

# 高抵抗陰極を用いた $\mu$ -PICの開発

2018/2/18

神戸大学

山根史弥

- イントロ
- 新型 $\mu$ -PICの開発
- 動作試験 & 性能評価
- まとめ

- **イントロ**
- 新型 $\mu$ -PICの開発
- 動作試験 & 性能評価
- まとめ

## ➤ Multi Wire Proportional Chamber (MWPC)

- 従来用いられてきたガス検出器
- 粒子のトラッキングを大面積で
- 性能に制限
  - ✓ ワイヤー間隔 > 1mm
  - ✓ レート許容量:  $\sim 10^4$  cps/mm<sup>2</sup>

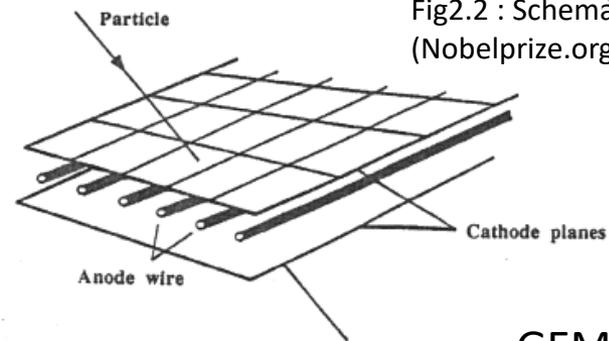


Fig2.2 : Schematic view of the MWPC  
(Nobelprize.org)

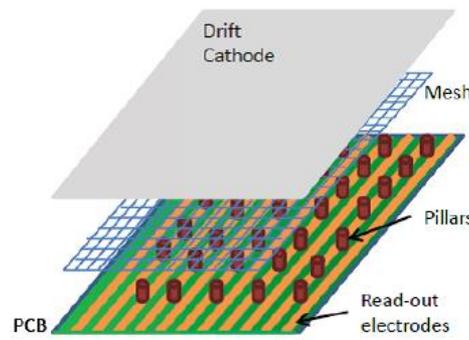
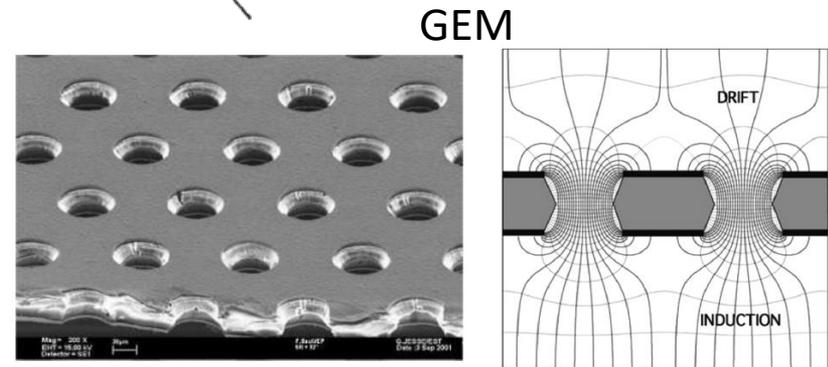
## ➤ Micro Pattern Gaseous Detector (MPGD)

- MWPCに代わる次世代のガス検出器
- 微細加工技術(フォトリソグラフィ, PCB技術, …)によって作られる
- 高位置分解能:  $\sim 100$   $\mu$ m
- 高レート耐性:  $> 10^6$  cps/mm<sup>2</sup>
- 安価・大面積

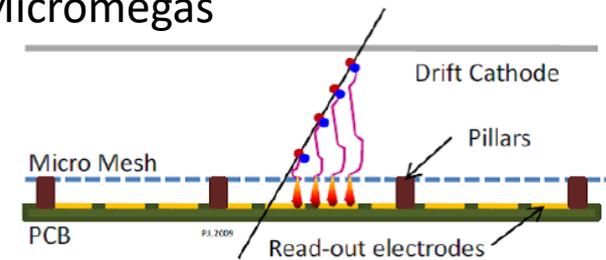
## ➤ GEM、Micromegasが広く使われている

## ➤ アプリケーション

- 素粒子・宇宙・原子核
- 医療
- 非破壊検査など



## Micromegas



# マイクロピクセル検出器( $\mu$ -PIC)

## ➤ $\mu$ -PICの特徴

- PCB技術で製作
- 陽極・陰極ストリップによる二次元読出(400 $\mu$ m間隔)
- 高ゲインと高頻度耐性(下図)
- ガス増幅のためのフローティング構造(メッシュやフォイル)が不要→組み込みが簡単
- タイル状に並べて少ないdead areaで大面積対応(右下図)

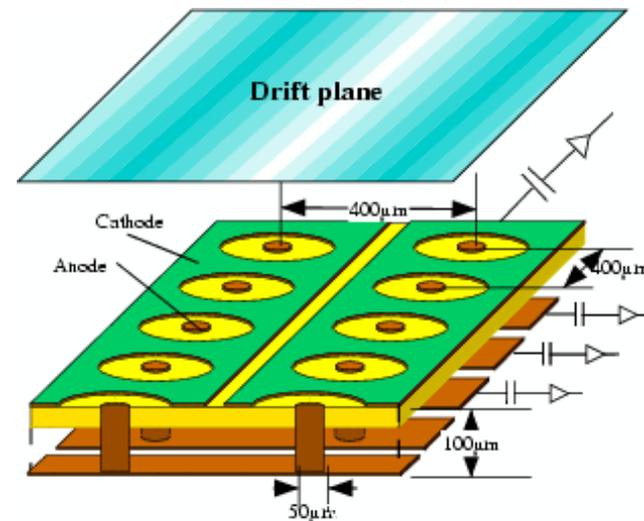


Fig3.1 : Schematic view of the  $\mu$ -PIC (A. Ochi, NIM A471(2001)264)

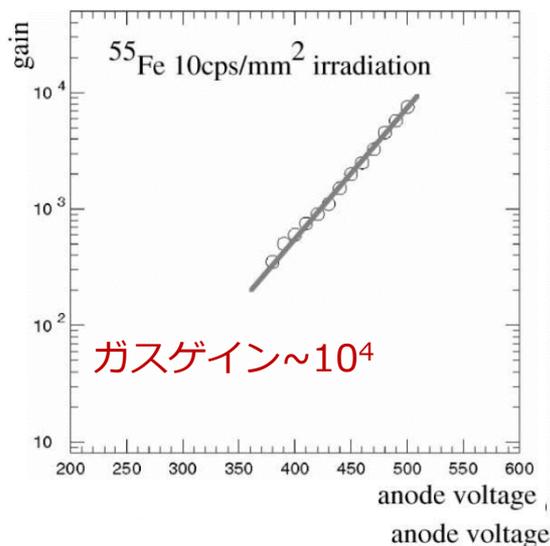


Fig3.2 :  $\mu$ -PICのガスゲイン (A. Ochi, NIM A471(2001)264)

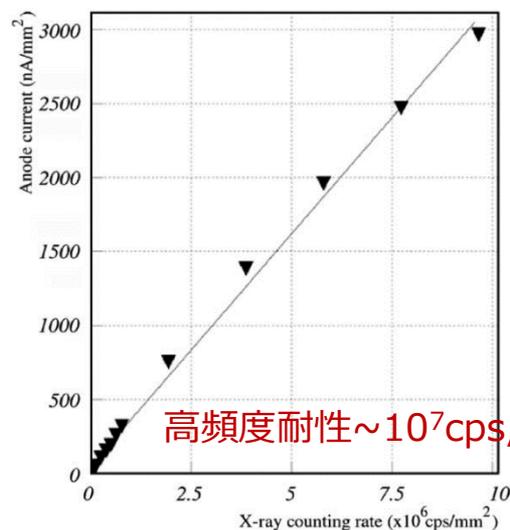
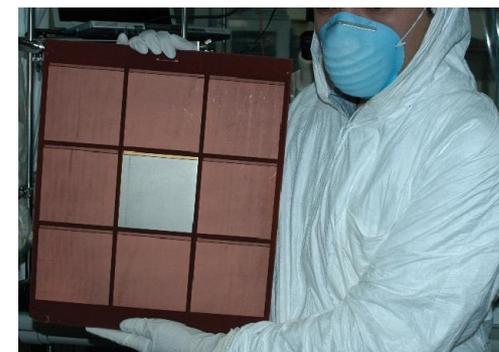


Fig3.2 : X線レートに対する $\mu$ -PIC陽極の電流値 (A. Ochi, NIM A478(2002)196)



9枚の $\mu$ -PICを並べて30cm角に (T. Nagayoshi, Doctoral thesis)

## ➤ Raether limit

- ガス検出器では、増幅電子数が $10^8$ を超えると放電  
→Raether limit
- MPGDは電極間隔が狭く、空間電荷密度が上昇するため  
Raether limitが下がる→ $10^{6-7}$
- 6keVのX線による1次電子数 $\sim 220$ →最大ガス増幅率 $\sim 10^4$
- $\alpha$ 粒子による1次電子数 $\sim 10^{4-5}$  →最大ガス増幅率 $\sim 10^2$   
→Heavily Ionizing Particles (HIPs)

## ➤ MPGDにおける放電

- 電極が細かいので放電で損傷しやすい
- 右図：MSGCの陽極・陰極間の放電により電極の損傷・絶縁破壊
- Raether limitを超えるようなオペレーションはダメ

## ➤ バックグラウンドにHIPsがある場合放電が避けられない

- 例えばLHCの場合、高速中性子よって反跳される原子核  
(検出器やガス)はHIPs
- 放電対策が必要

## ➤ 高抵抗電極

- 放電抑制の手段として近年活発に開発が行われている
- 実用例：ATLAS Micromegas

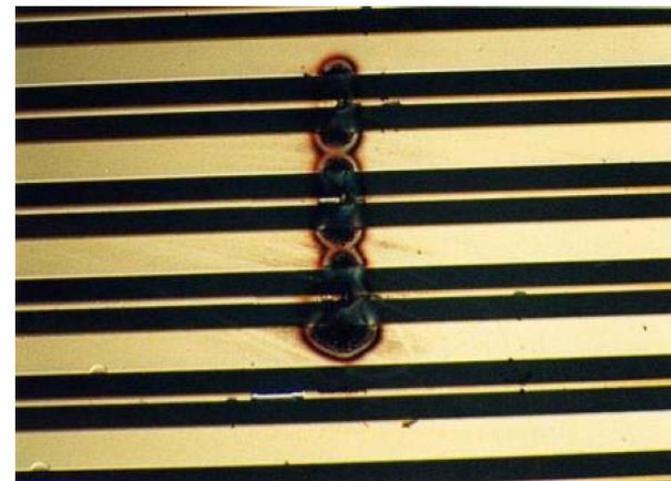


Fig2.7 : 放電で損傷したMSGCの電極  
(R. Oliveira, arXiv:1101.3727)

- 高抵抗電極を有した $\mu$ -PIC
  - 放電抑制のために陰極に高抵抗素材( $10^5 \sim 7 \Omega/\text{sq.}$ )
  - 高抵抗電極素材 : carbon-loaded paste
  - 放電抑制能力 : 通常型 $\mu$ -PICに比べて高速中性子による放電頻度が3~5桁減少( $\sim 200 \text{k}\Omega/\text{sq.}$ )

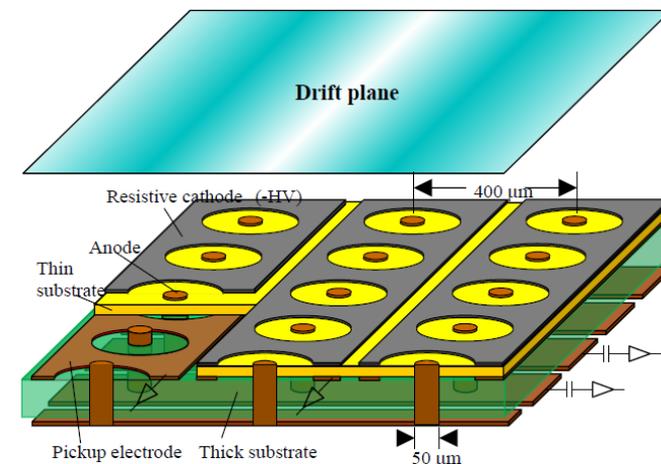


Fig3.3 : Schematic view of the  $\mu$ -PIC with resistive electrodes (A. Ochi, JINST 9 C01039, 1 (2014))

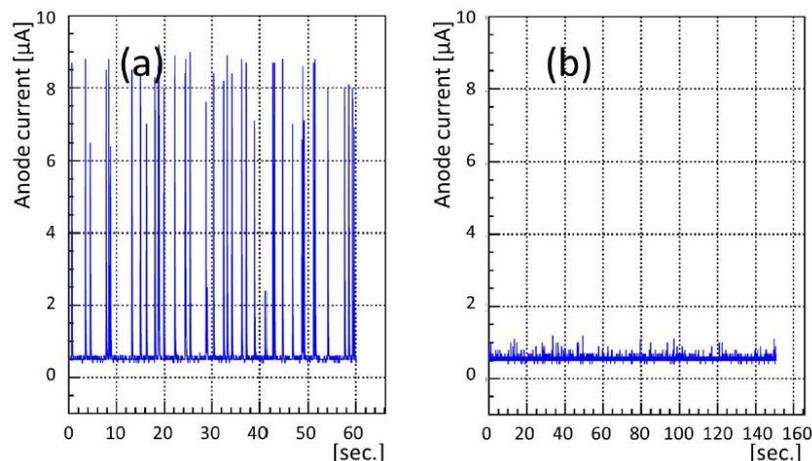


Fig3.5 : 高速中性子照射中の電流モニター  
左 : 従来の $\mu$ -PIC。右 : Resistive  $\mu$ -PIC  
(A. Ochi, JINST 9 C01039, 1 (2014))

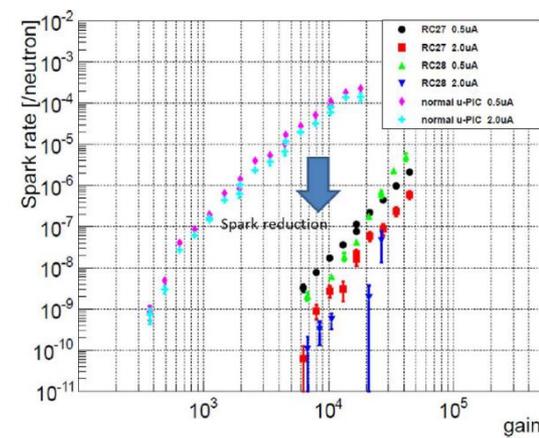
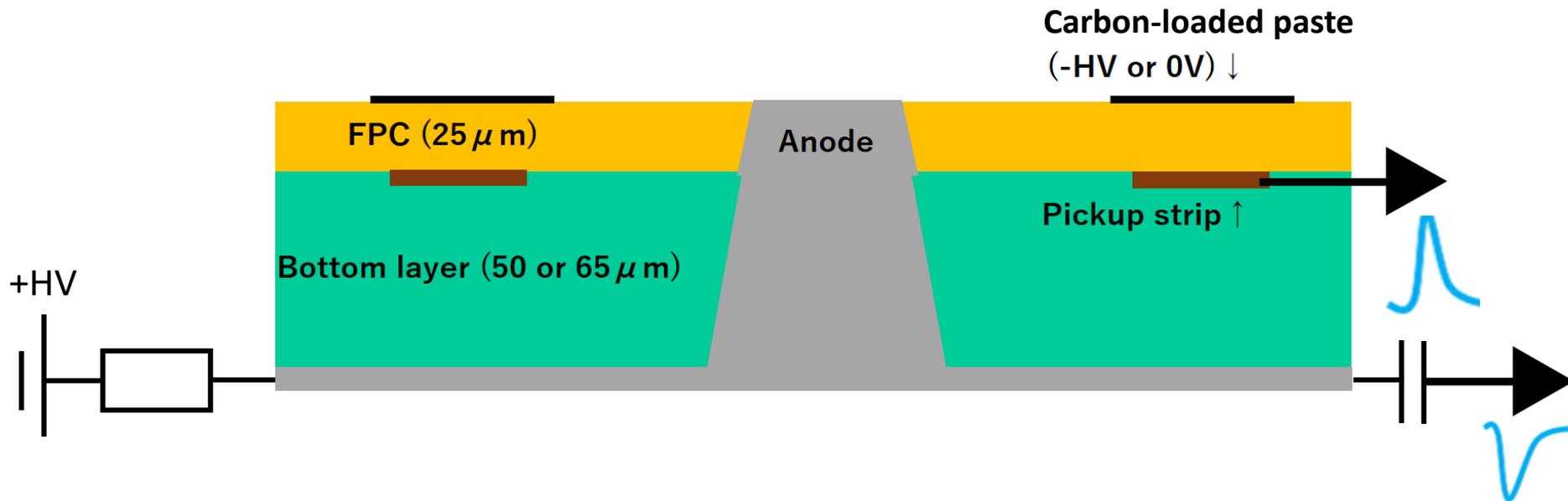


Fig3.6 : 照射した高速中性子数に対する放電頻度  
(A. Ochi, JINST 9 C01039, 1 (2014))

- イントロ
- 新型 $\mu$ -PICの開発
- 動作試験 & 性能評価
- まとめ

# Resistive $\mu$ -PIC 断面図

Produced by Raytech Inc.



Produced by Raytech Inc.

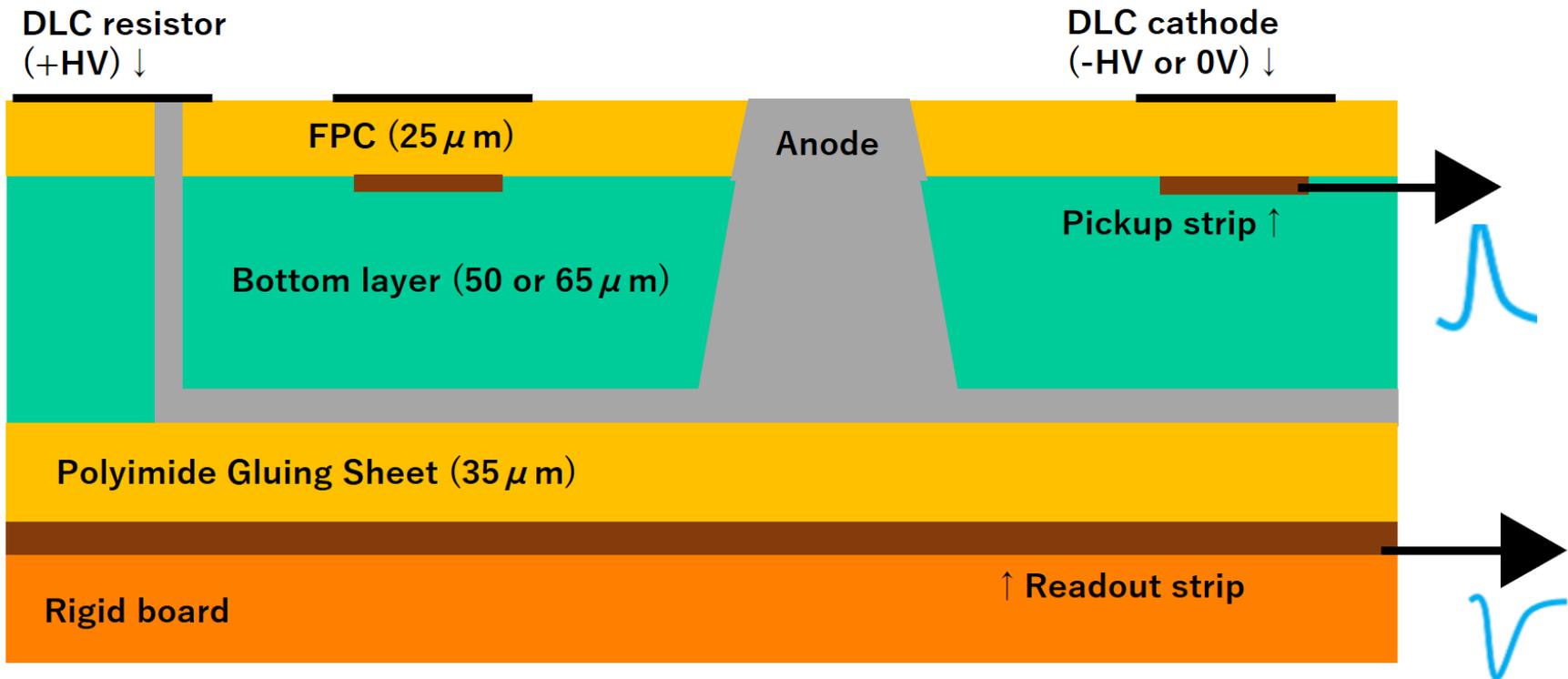
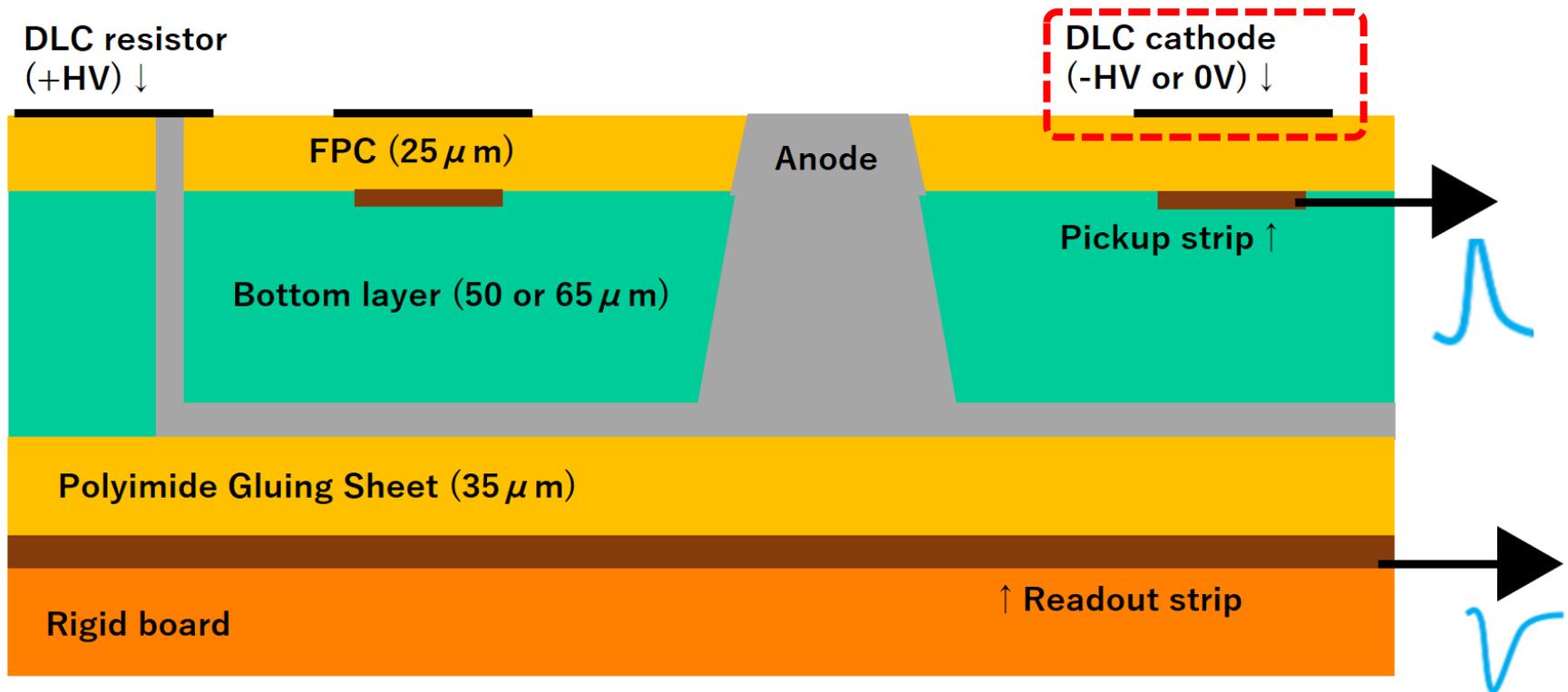
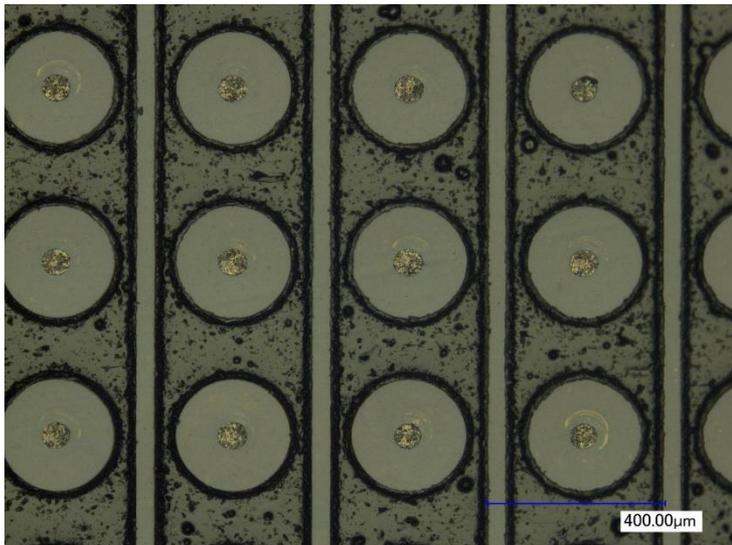


Fig 4.9 : 新型μ-PICの断面図

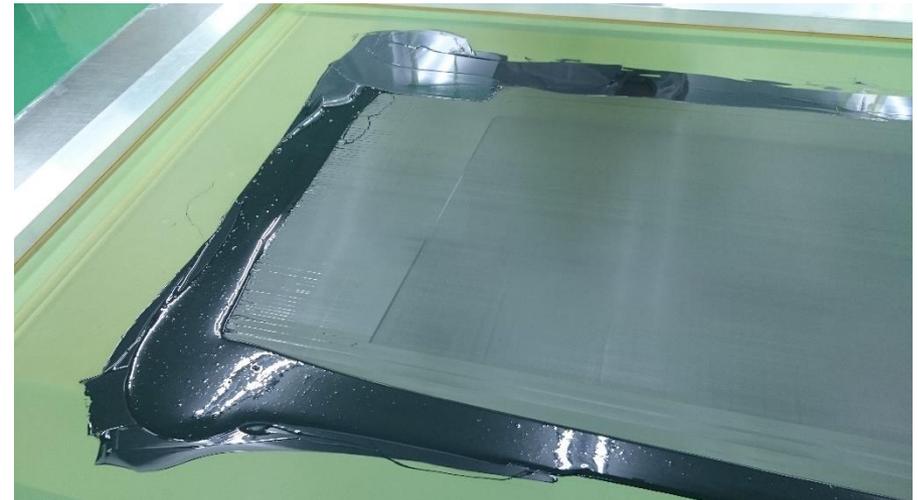
# 新しい検出器デザインの考案



- 抵抗電極素材としてはcarbon-loaded pastesがメジャー
- これは面抵抗で欲しい値である $1\text{M}\Omega/\text{sq.}$ を実現できるから
- 抵抗値発現はカーボン粒子の状態と製造のコンディションに左右される
- 正確で一様な値を出すのが難しい！
- 単体または安定な化合物でこのあたりの抵抗値を実現できるものがなかった



Resistive  $\mu$ -PICの顕微鏡写真



ATLAS Micromegasの抵抗電極形成工程

# 新しい高抵抗電極素材: DLC

- 高抵抗電極素材にはDiamond Like Carbon(DLC):  
sp<sup>2</sup>型とsp<sup>3</sup>型から成るアモルファスカーボン
- 炭素スパッタリングにより形成
- 神戸大学が2012年に考案
- 特徴
  - 高精細パターンニング(<10μm)
  - 一様な抵抗値(<30%)
  - 広範囲の抵抗値設定 (50k~3GΩ/sq.)
    - 膜厚調節 (300~3600 Å)
    - 窒素ドーピング
  - ポリイミドに対する高い付着力
  - 大型スパッタリングチェンバーで大面積対応 (~数m)
  - 様々なMPGDへ応用可能
    - 海外でもDLCを用いた新検出器開発

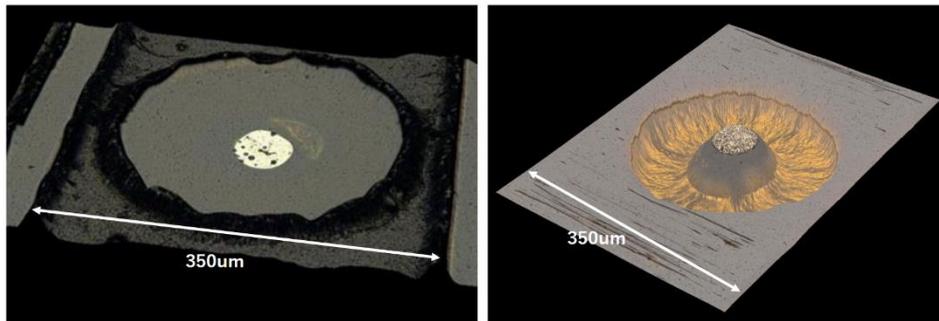


Fig4.1 : Resistive μ-PICのピクセルの顕微鏡写真  
左 : carbon-loaded polyimide。右 : DLC

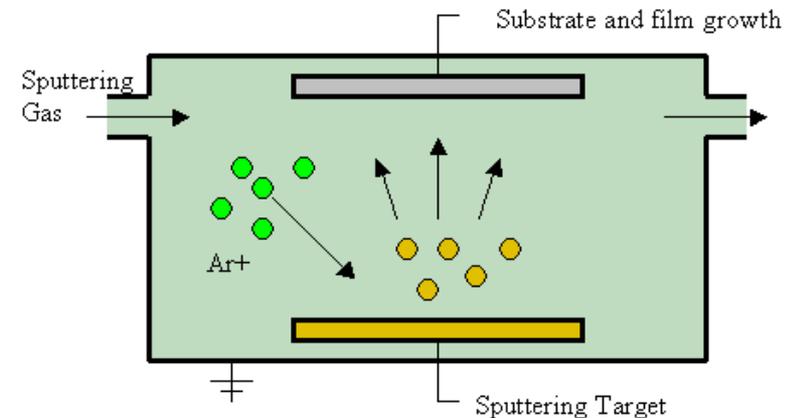


Fig2.10 : Schematic view of sputtering process  
(Pos(TIPP2014)351)

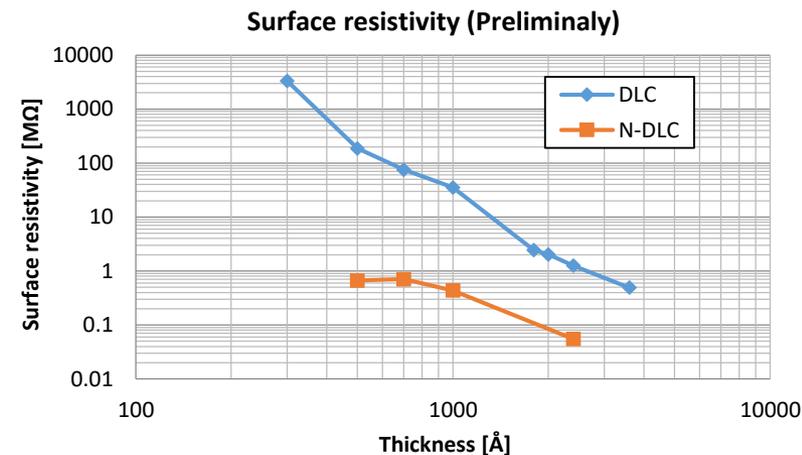
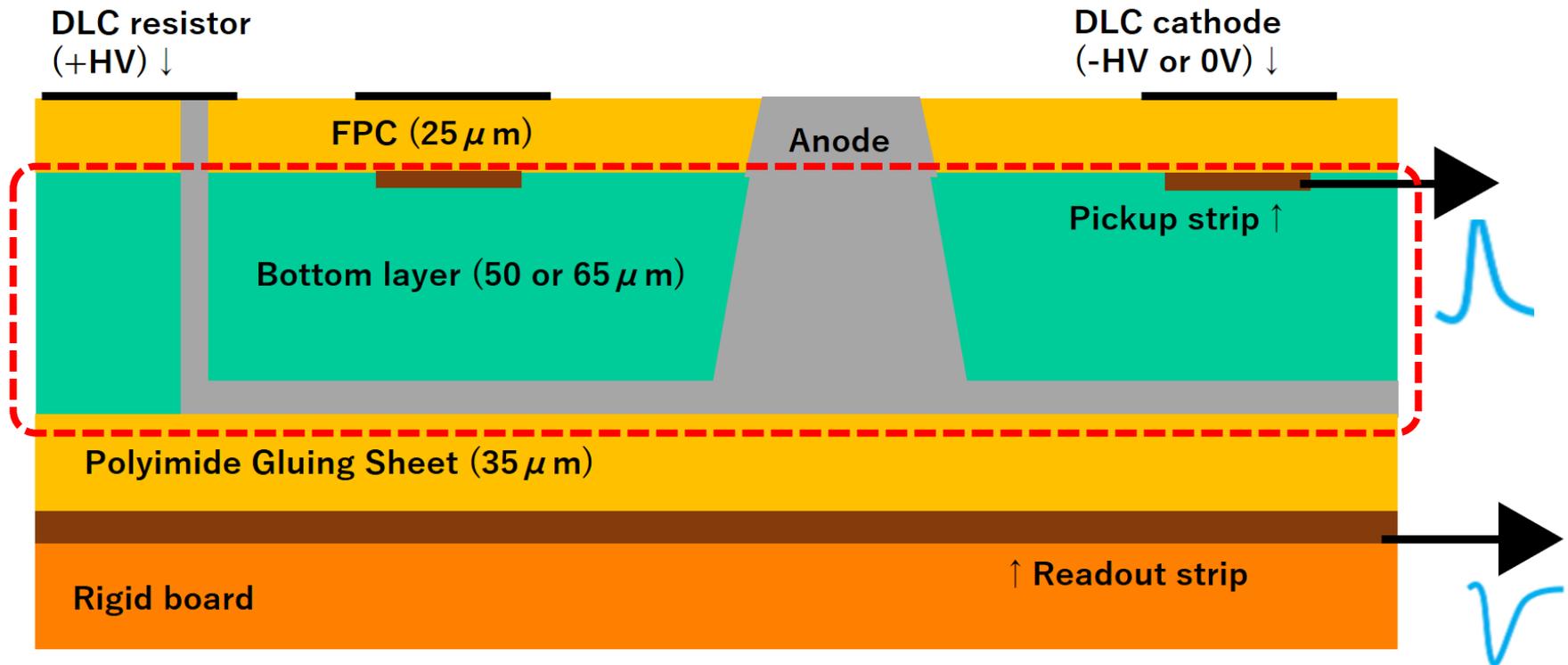


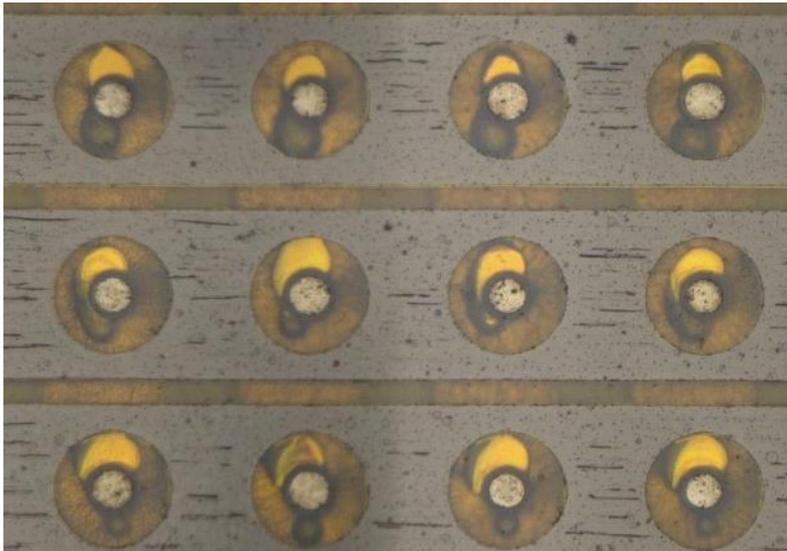
Fig2.12 : 膜厚に対する表面抵抗値  
(Pos(TIPP2014)351)

# 新しい検出器デザインの考案

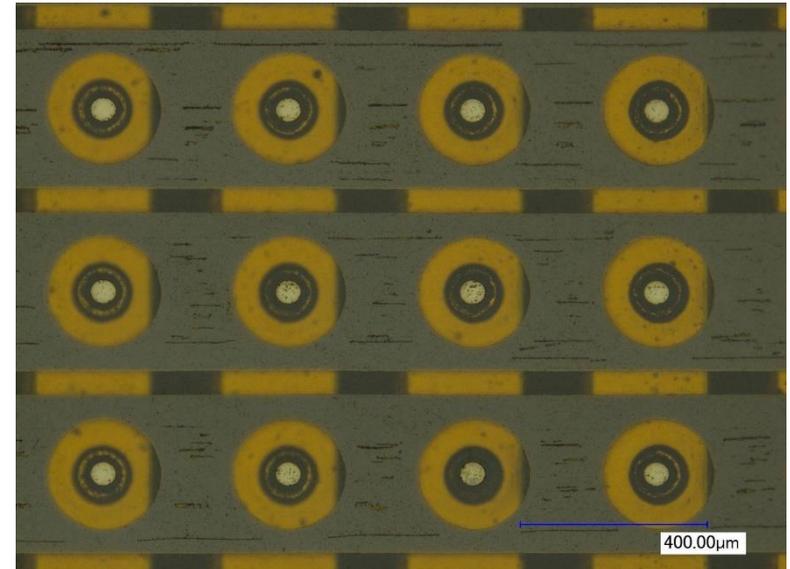


# 電極の位置合わせ

- 抵抗電極層を加えたことで基板が二層化
- アノードは上層と下層で2段階に分けて作る
- 下層の穴あけはレーザードリリングだったが位置合わせが困難
- 位置ズレによってアノードとピックアップ電極の間でショートしてしまう
- 10cm角のうち一部の領域のみでしか動作ができなかった



- 下層を半透明の感光性素材に変更
- フォトリソで穴あけ。素材が透明なのでマスクの位置を正確に合わせられる
- 10cm x 10cmの検出領域で65536pixel全てが動作できるようになった



# 読み出しのためのRC回路

- 信号読み出しには各チャンネルにRC回路が必要
- これまでのテストチェンバーは簡単のため16stripsをまとめて1ch読み出し
  - 16chだけでも大きなスペースを食う
- 1strip1chにする場合左下のような基板を作る必要
  - 組み込みの手間・スペースの確保・ノイズ対策
  - コンパクトにしたい

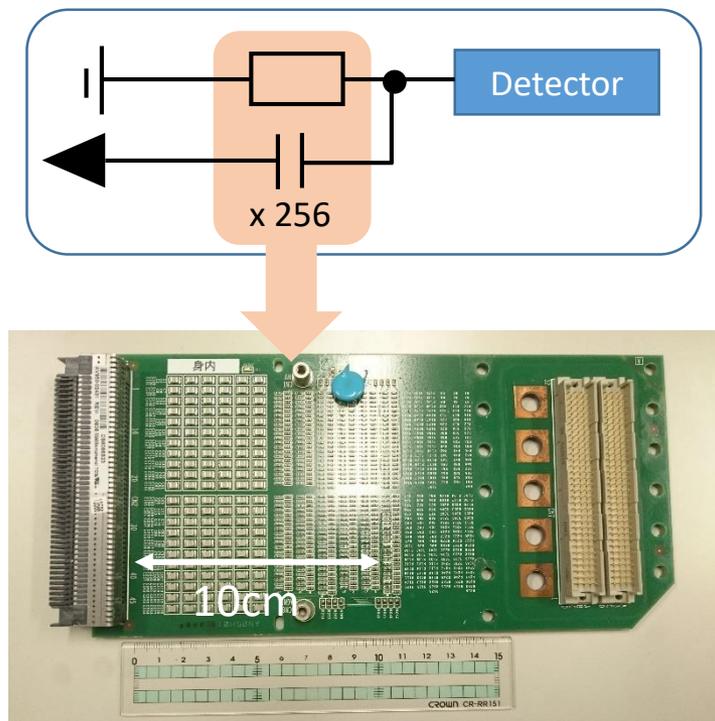
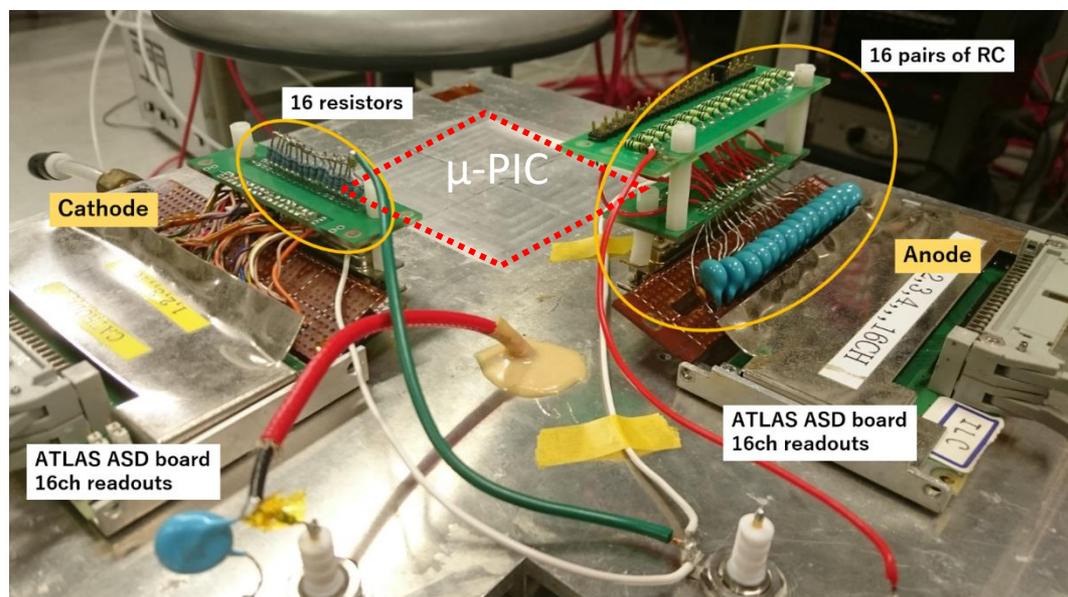
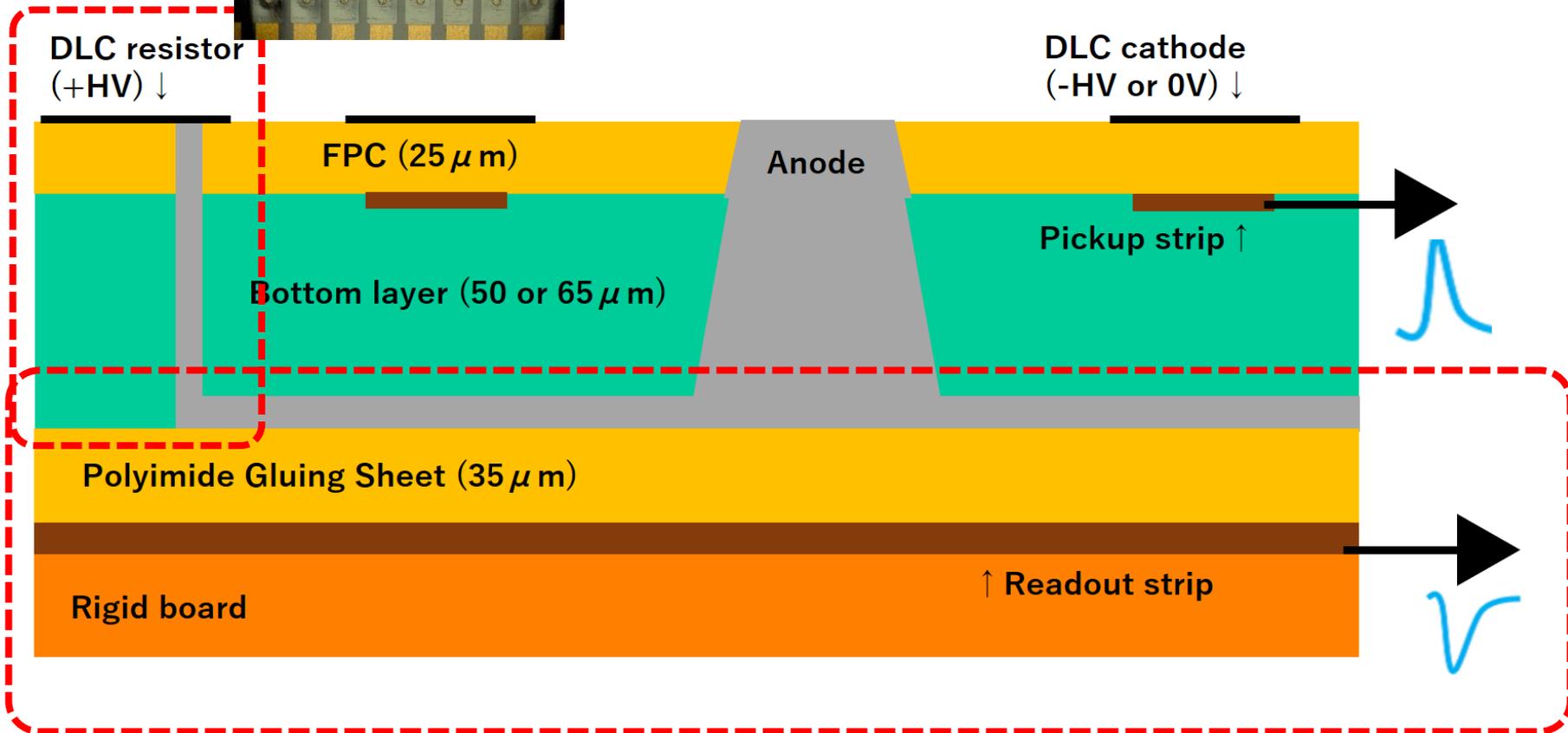


Fig4.4 : 過去の $\mu$ -PICのガスパッケージ



# DLC/PCB技術を応用



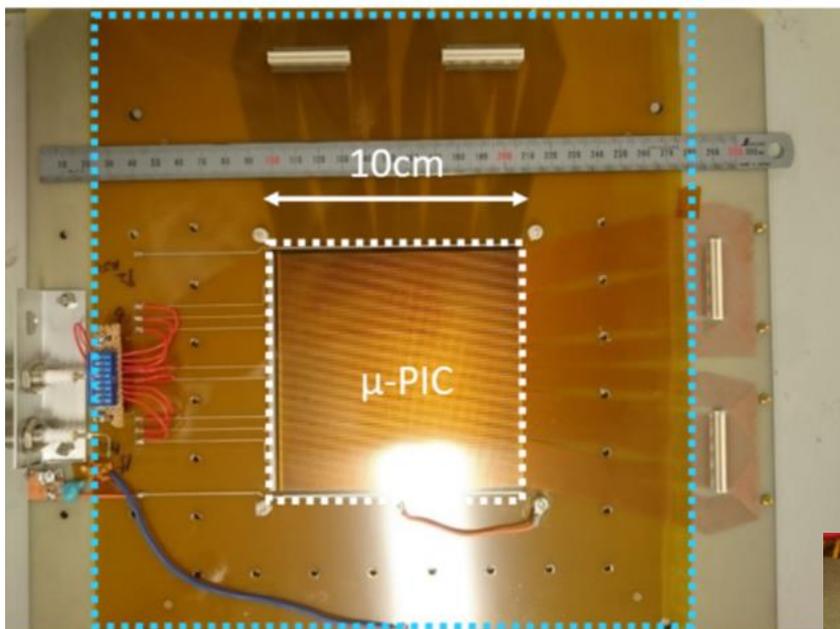
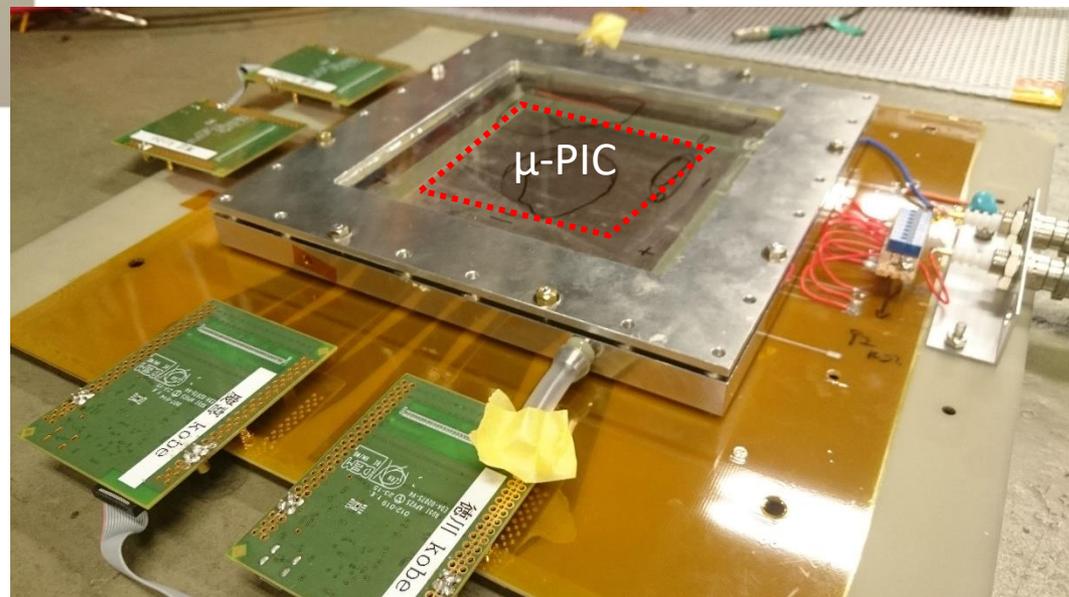


Fig4.7 : 新型 $\mu$ -PICの写真

- 10 x 10 cm<sup>2</sup>の有感領域
- 正確な抵抗値設定
- コンパクトな検出器

Fig4.10 : 新型 $\mu$ -PICの入ったガスパッケージ



まともに動かせるまで2年かかった

- イントロ
- 新型 $\mu$ -PICの開発
- 動作試験 & 性能評価
- まとめ

- $^{55}\text{Fe}$ を用いてガスゲインを測定
- Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>=90:10, 80:20, 70:30
  - プリアンプ : ATLAS ASD (0.8V/pC,  $\tau=16\text{ns}$ )
    - 90:10で最大gain10000以上達成
- Ar:CO<sub>2</sub>=93:7
  - プリアンプ : ORTEC 142PC (4V/pC,  $\tau=75\mu\text{s}$ )
- アノードよりカソードのgainが高い
  - カップリングの容量( $\sim 22\text{pF}$ )が小さい
- エネルギー分解能: 20~25%(FWHM)
- 一様性: 64か所で測定。中央値に対して30%

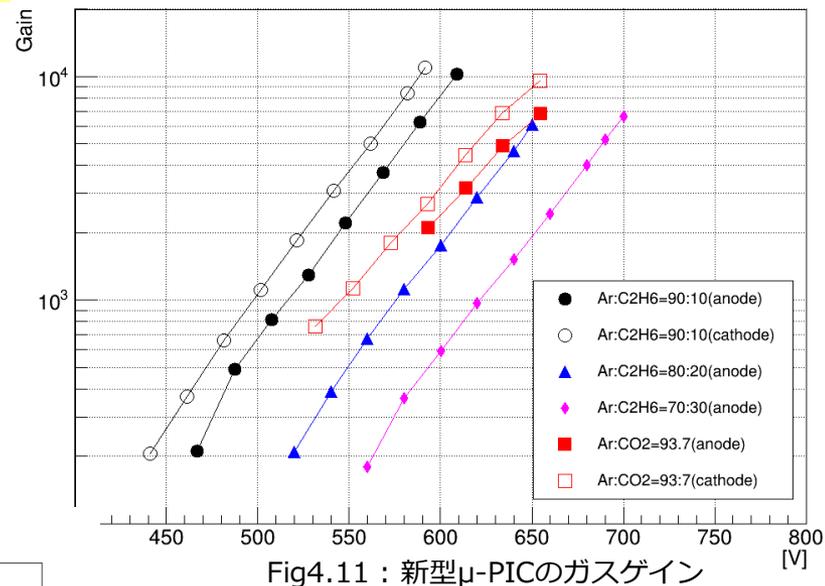


Fig4.11 : 新型 $\mu$ -PICのガスゲイン

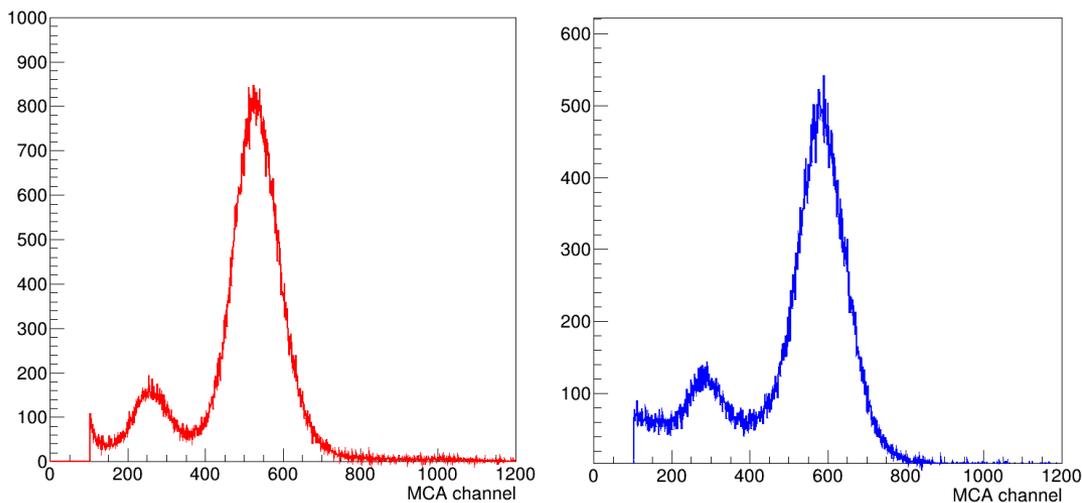


Fig4.12 : 得られた信号のスペクトル。左 : アノード。右 : カソード

# X線イメージング



Fig4.17 : X-ray image of a key

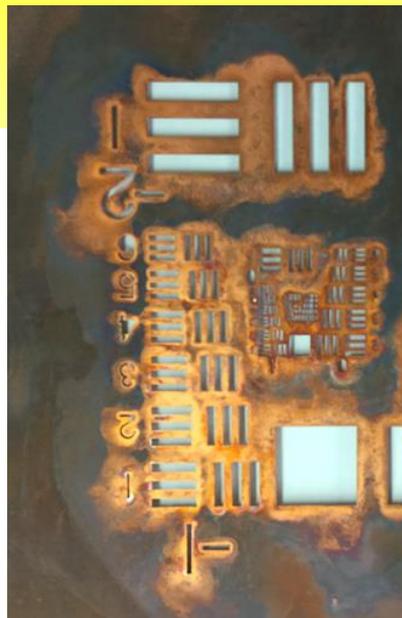
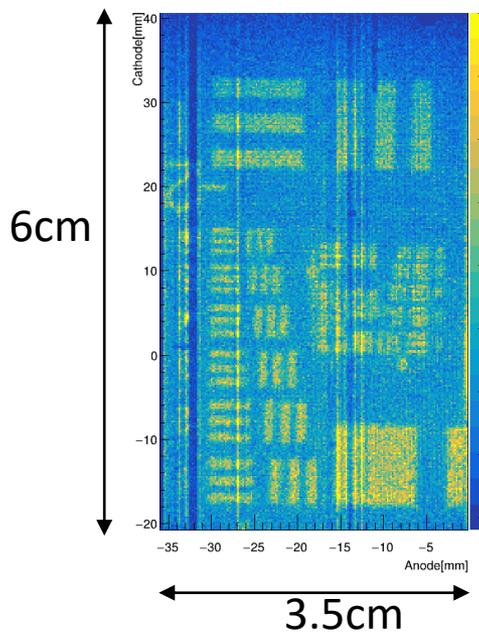
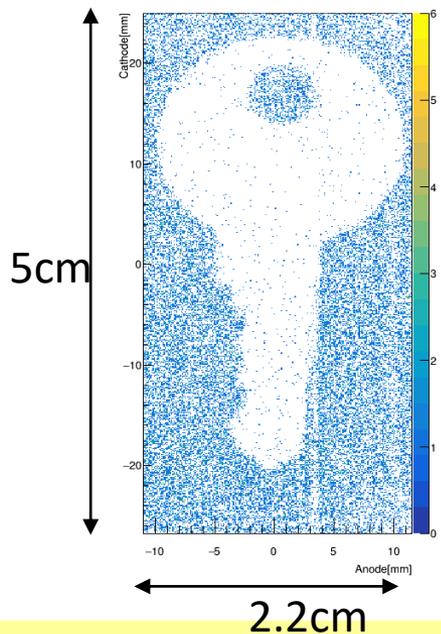


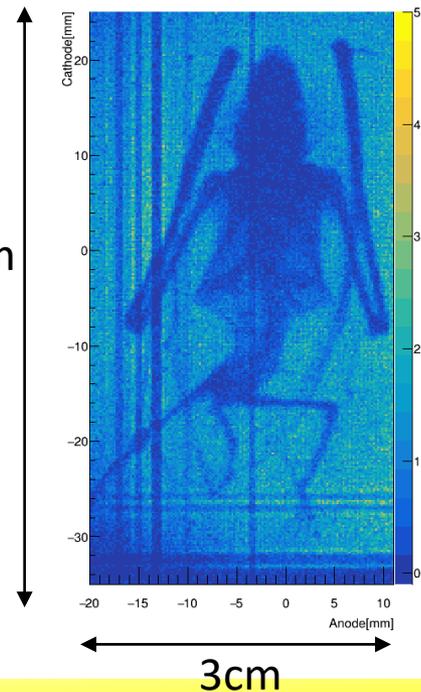
Fig4.16 : X-ray image of a test chart



Fig4.18 : X-ray image of a bat



5.5cm



# 荷電粒子を用いた試験

- 実験期間: 2017/10/9~16
- ビーム
  - CERNのSPS/H4ビームライン
  - ミューオン: 150GeV/c
  - 検出器に対して垂直に入射
  - $\sim 10^5$  muons/4s/8 x 8 cm<sup>2</sup>
  - 390Hz/cm<sup>2</sup>
- 検出器
  - Trigger: プラスチックシンチレーター x2
  - Reference telescope: 2次元読出Micromegas x2 (Tmm: 250um pitch, 360ch)
  - $\mu$ -PIC x4: RC37,RC38,RC41,RC42, 裏表配置
  - フレームは他グループと共同で利用 (Paddy x2は他グループの検出器)
- ガス
  - Ar/CO<sub>2</sub>(93:7)
  - Ar/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(70:30)
- 読み出し
  - SRS/APV

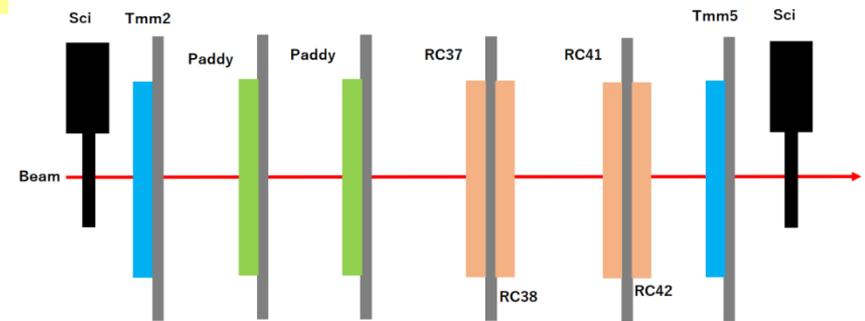


Fig5.2 : 実験セットアップ図

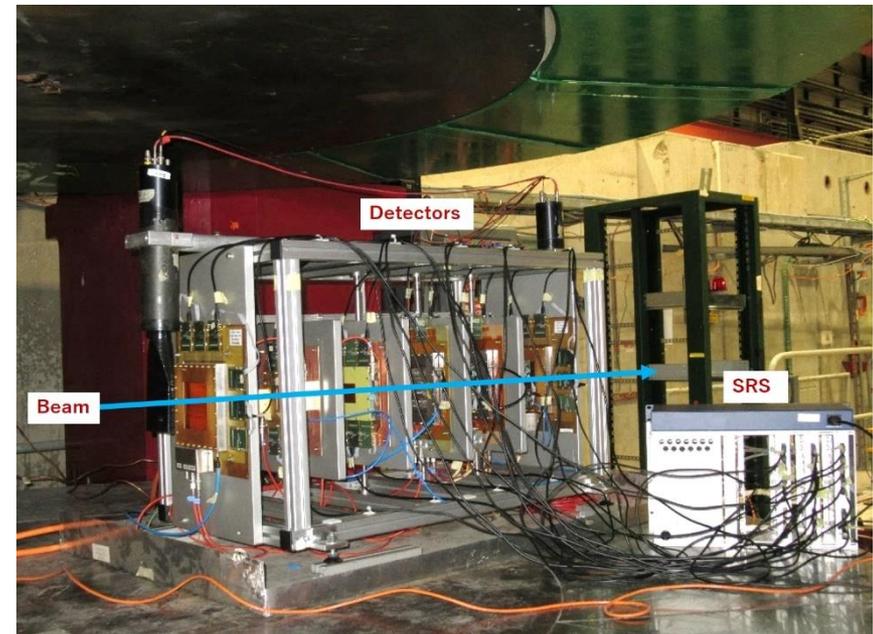


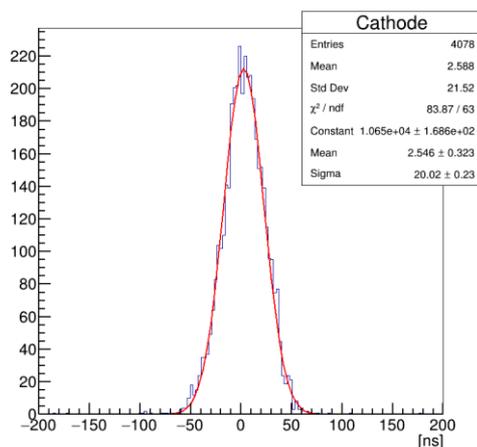
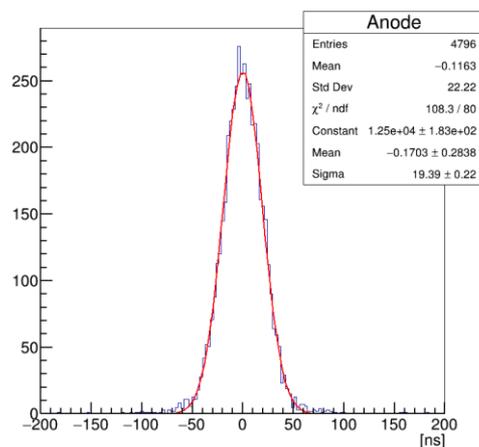
Fig5.3 : 実験セットアップ写真

## ➤ 時間分解能

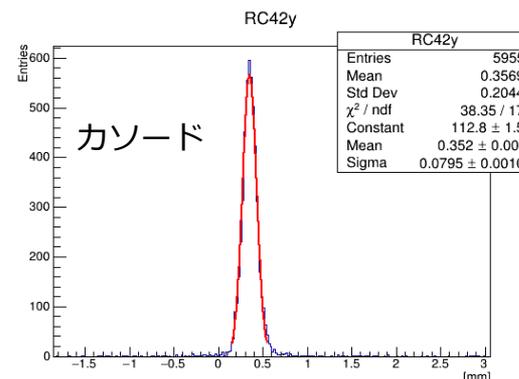
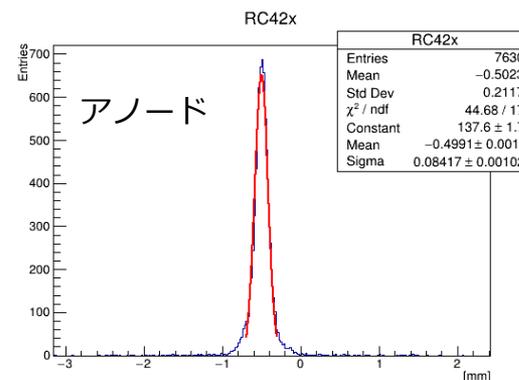
- 裏表に置いた検出器2台のヒット時間の差から求める
- 13-15ns (SRSのshaping time・sampling rateやヒット時間の決め方に依存)

## ➤ 位置分解能

- 2台のMicromegasから推定されるヒット位置と実際のヒット位置の差から求める
- 60-90um



ヒット時間差の分布



Micromegasから推定されるヒット位置と実際のヒット位置の差の分布

# 高速中性子を用いた試験

## ➤ 実験環境

- 2017/7/10~16
- タンデム静電加速器@神戸大海事科学部
- ${}^9\text{Be}(d,n)$ 反応で2MeV付近にピークを持つ中性子
- 中性子発生量： $2 \times 10^8$  n/uC ( $E_d=3\text{MeV}$ の場合)  
(Y. Zuo Physics Procedia 60(2014) 220-227)
- ターゲットからの距離4-60cm
- 中性子フラックス： $10\text{kHz}/\text{cm}^2$  -  $10\text{MHz}/\text{cm}^2$
- $\mu$ -PICのアノード電流をモニター



Fig 6.1 : 神戸大海事科学部タンデム静電加速器施設

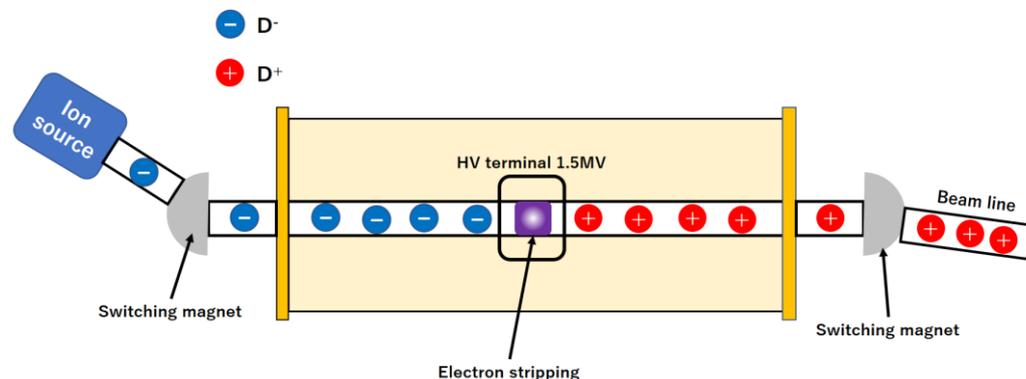


Fig 6.2 : 加速器の概略図

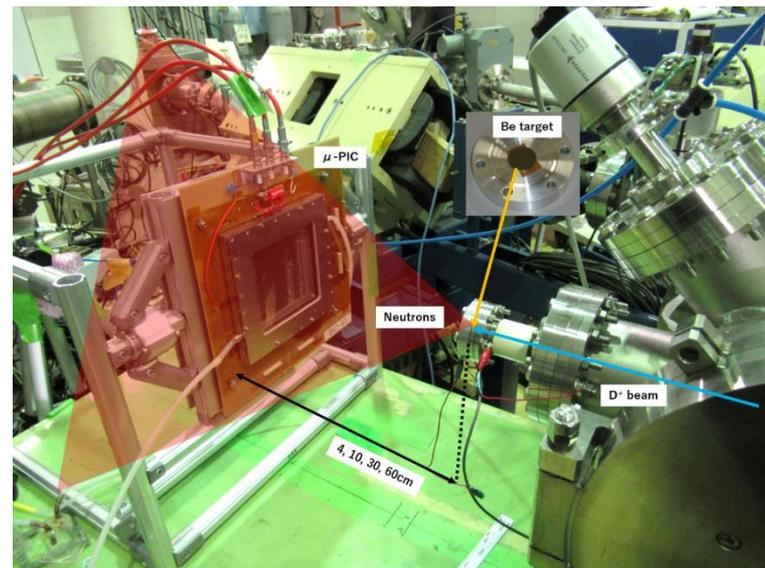


Fig 6.5 : 実験セットアップ

- 中性子照射中に $\mu$ -PICに流れる電流
  - 左図：中性子照射中の電流モニター
  - 中性子照射中は定常電流が流れる(水色線)
  - 放電が起こった場合 $\mu$ Aを超える電流が瞬間的に流れる
- 放電率測定
  - 放電の定義：定常電流に対して閾値（赤線）を超えた場合を放電とみなす
  - 中性子数：Beターゲットに流れる電流値から推定
  - 放電率 = 放電回数 / 検出器に照射した中性子数
- 結果
  - 右図：新型 $\mu$ -PIC(RC37,38)及び先行研究(RC27,28と抵抗電極無し $\mu$ -PIC)の放電率
  - 通常 $\mu$ -PICに比べて放電率は2~5桁減少

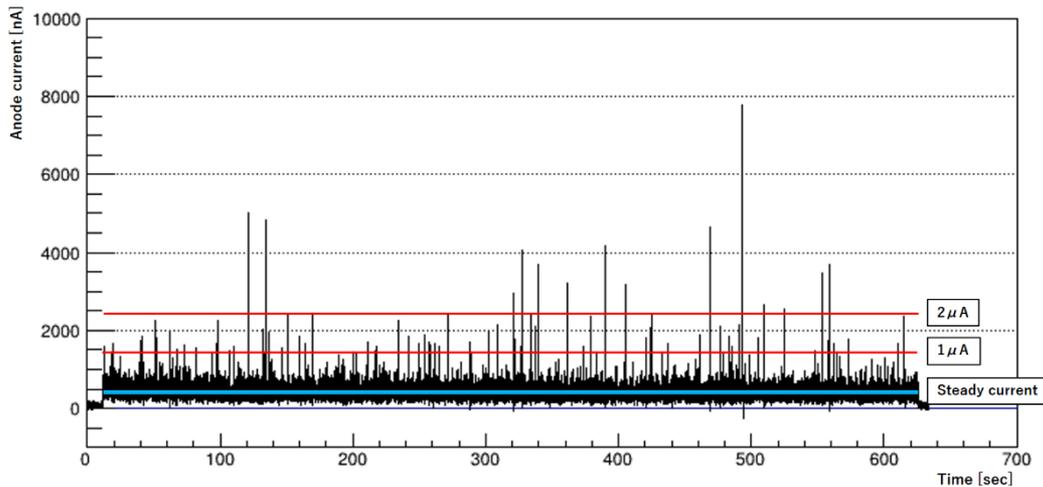


Fig 6.6：高速中性子照射中のアノード電流モニター

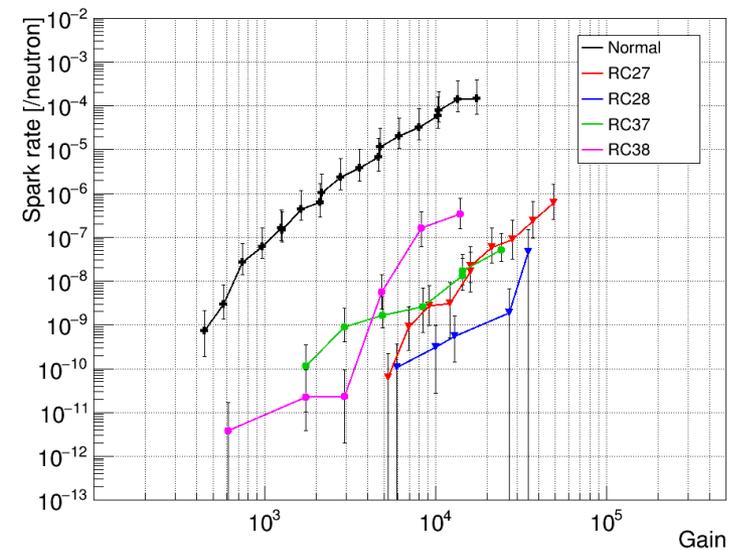
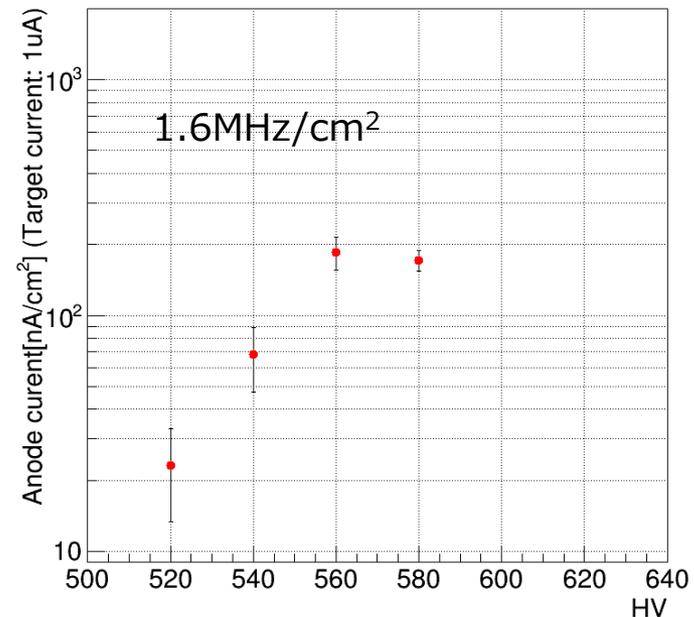
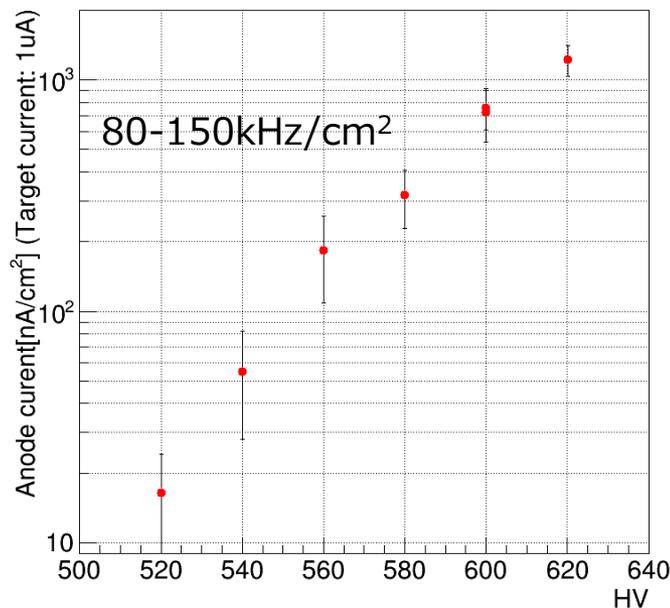


Fig 6.7：ゲインに対する放電率  
 黒：抵抗電極なし $\mu$ -PIC  
 青・赤：過去の結果  
 緑・桃：今回の結果

- 高速中性子照射によって、電極には定常電流が流れる
- 抵抗電極の場合：抵抗値に応じて電圧降下→ゲイン減少→検出効率が下がるおそれ
- 高速中性子に対するレート耐性(抵抗値：180kΩ/sq.、動作領域~25cm<sup>2</sup>)
  - 左図：80-150kHz/cm<sup>2</sup>：ゲインが10000を超えても電流値が上昇→ゲイン低下なし
  - 右図：1.6MHz/cm<sup>2</sup>：560V(ゲイン5000)までは安定して上昇。580Vで電流値が下がった→ゲインが低下
  - ゲイン5000あればMIPを高効率で検出できる→1MHz/cm<sup>2</sup>程度の環境なら安定動作が期待できる



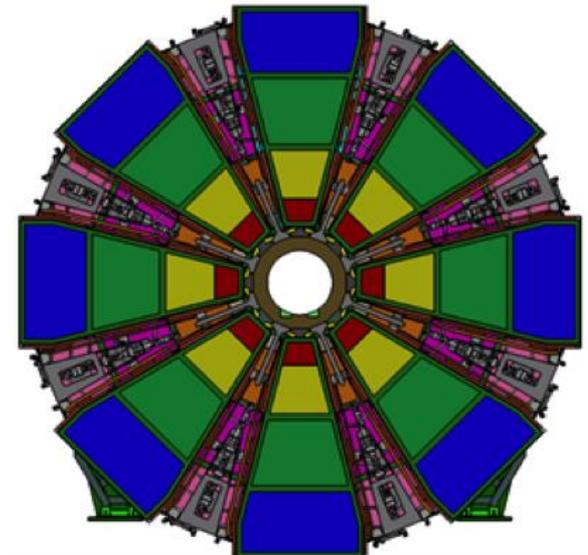
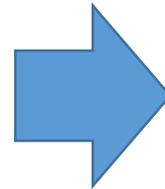
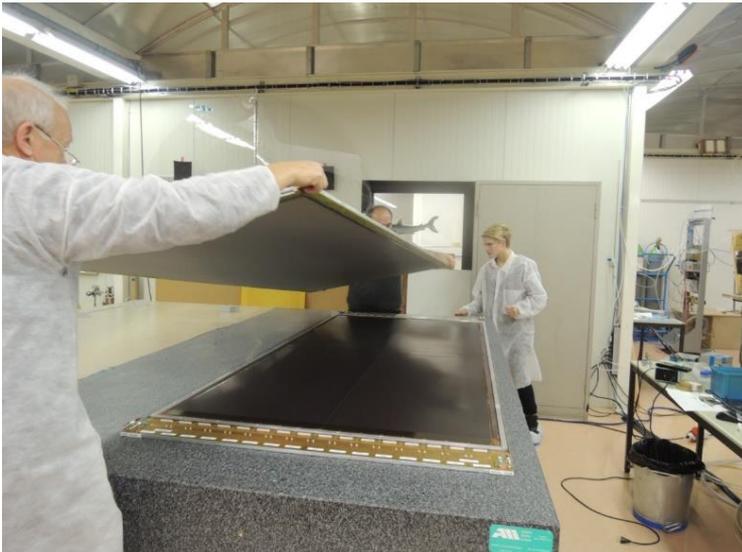
増幅電圧に対する単位面積当たりのアノード電流値(Beターゲット電流は1µAで規格化)  
左：中性子レート80-150kHz/cm<sup>2</sup> (Fig 6.9)。右：中性子レート1.6MHz/cm<sup>2</sup> (Fig 6.10)

- 2次元での高い分解能に加え、放電抑制能力を備えたコンパクトな新検出器の開発に成功

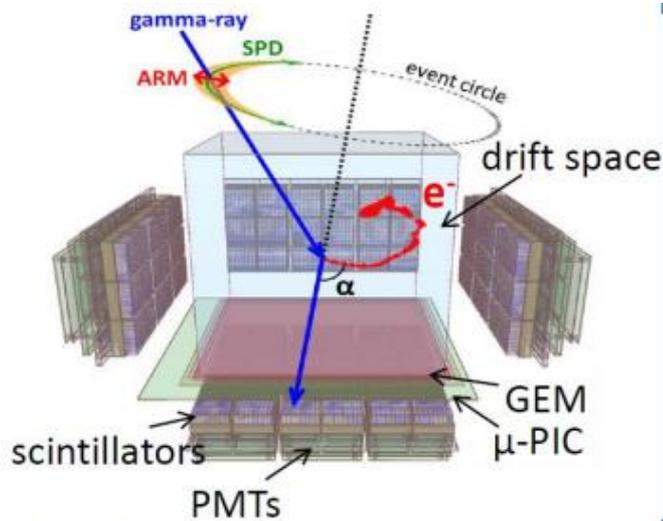
# バックアップ



- LHC実験
  - LHC: 世界最高エネルギーのハドロン衝突型加速器
  - ビームルミノシティのアップグレード→統計量を増やす
  - $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \rightarrow 2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \rightarrow 7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
  - 現行のワイヤー検出器ではレート増大に対応できないため、新たな検出器が必要
- 高頻度入射に強いMPGDにアップグレード
  - Micromegas: ATLAS→ミュオン前方検出器(下図)
  - GEM: CMS, ALICE, LHCb→ミュオン前方検出器、TPC
- 将来の高レート実験におけるMPGDの需要の高まり



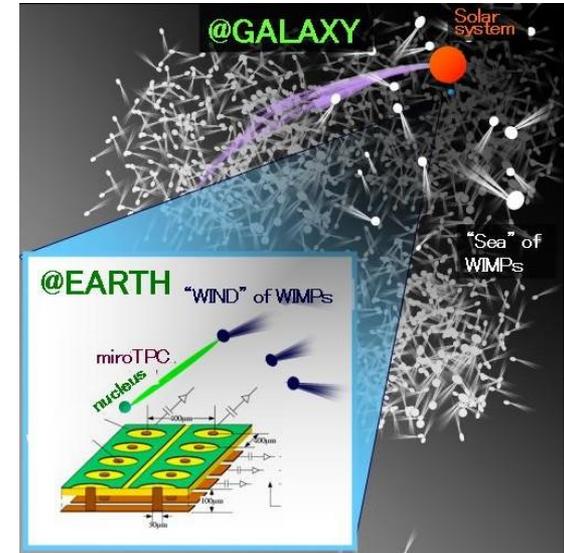
# μ-PICの応用例



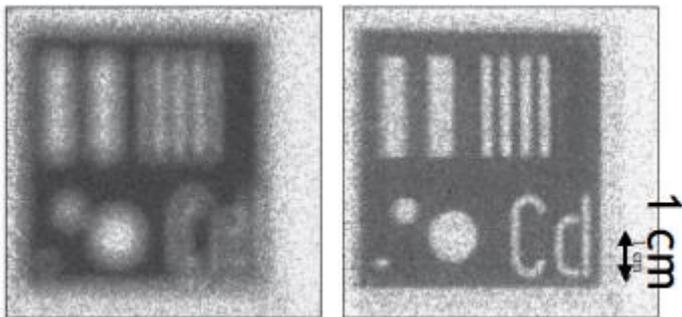
ETCC(Electron-Tracking Compton Camera)  
T.Tanimori+  
The Astrophysical Journal 810 (2015)



Space Dosimeter(PS-TEPC)  
Y.Kishimoto  
NIM A732 (2013) 591



Dark Matter Search(NEWAGE)  
K.Nakamura  
PTEP (2015) 043F01



Neutron Imaging  
J.D.Parker+  
NIM A697 (2013) 23

- 電極に高抵抗素材を用いることで放電の抑制
  - Micromegasの場合: 読み出し電極の上に絶縁層を挟んで高抵抗電極を配置
  - 高速中性子照射実験の結果、高ゲインでも安定動作→ATLAS Micromegasで採用

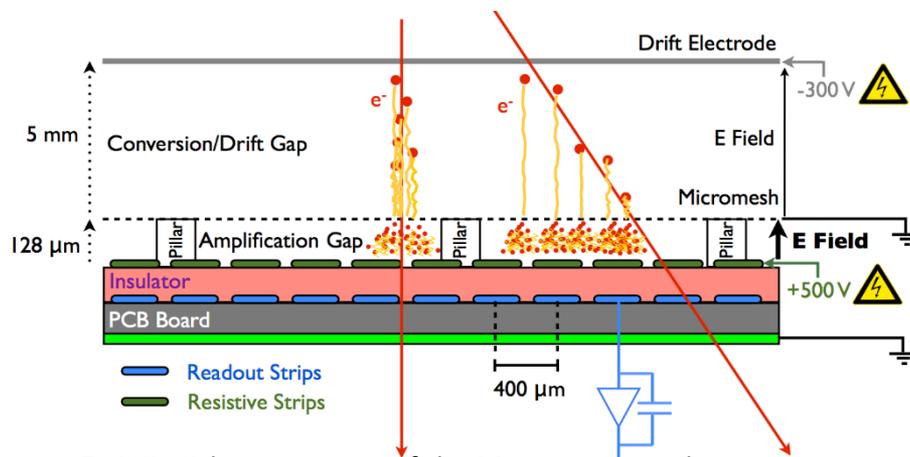


Fig2.8 : Schematic view of the Micromegas with resistive electrodes  
(T. Alexopoulos, NIM A640(2011)110)

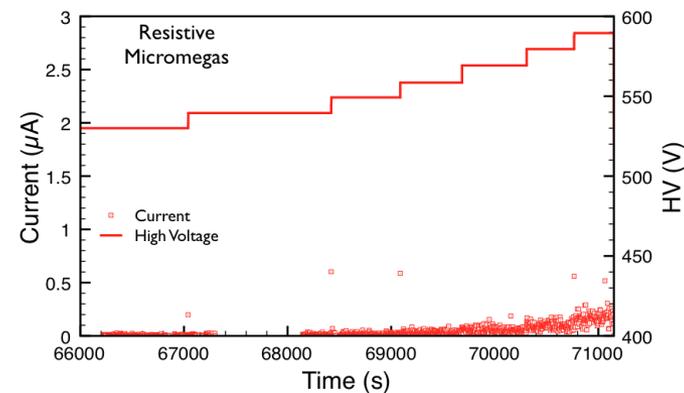
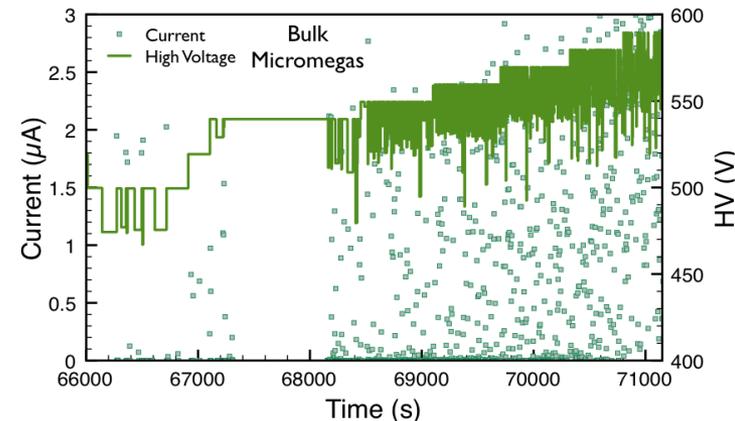


Fig2.9 : 高速中性子照射下のMMとresistive MMの電圧・電流モニター  
(T. Alexopoulos, NIM A640(2011)110)

# 電極の位置合わせ

- 抵抗電極層を加えたことで基板が二層化
- アノードは上層と下層で2段階に分けて作る
- 下層の穴あけはレーザードリリングだったが位置合わせが困難
- 位置ズレによってアノードとピックアップ電極の間でショートしてしまう
- 10cm角のうち一部の領域のみでしか動作が  
できなかった

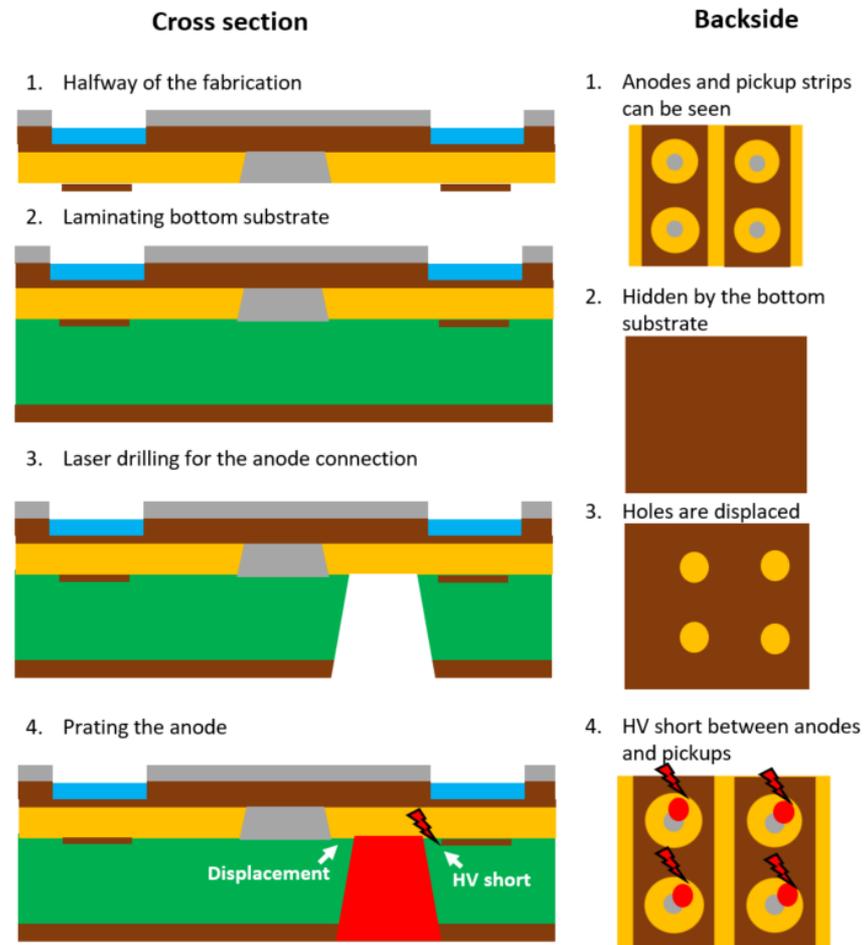
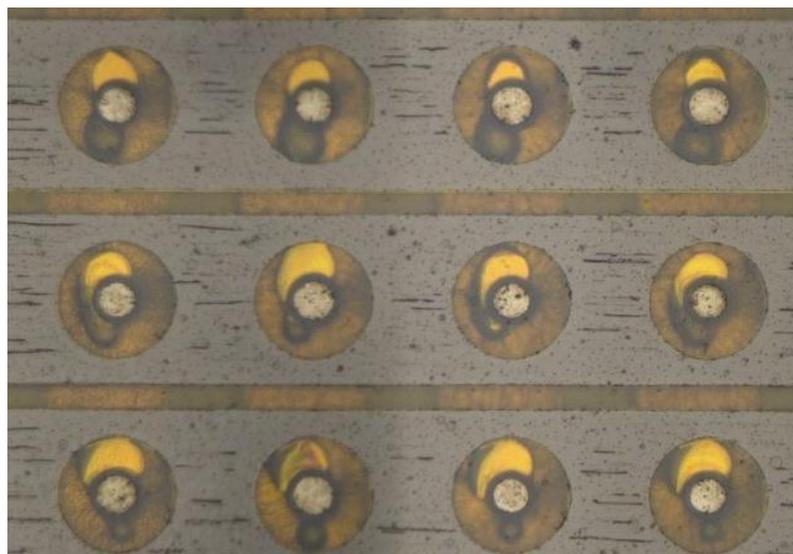
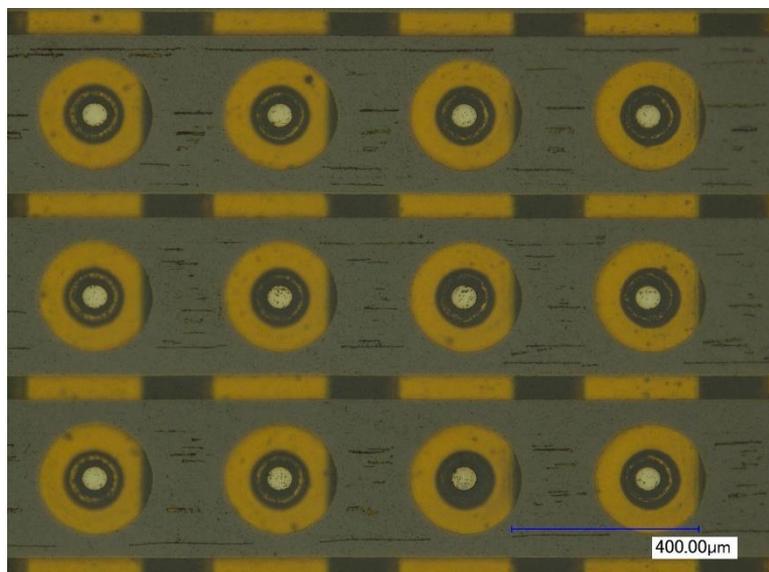


Fig4.2 : アノード形成の過去の製作プロセス  
左：断面図。右：下から見た図

# 電極の位置合わせ

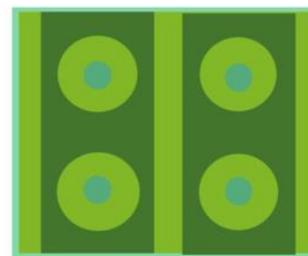
- 下層を半透明の感光性素材に変更
- フトリソで穴あけ。素材が透明なのでマスクの位置を正確に合わせられる
- 10cm x 10cmの検出領域で65536pixel全てが動作できるようになった



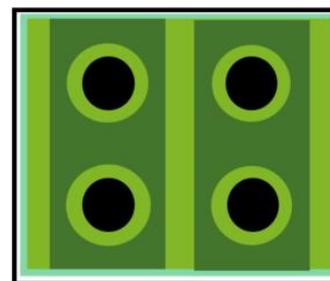
1. Anodes and pickups are formed



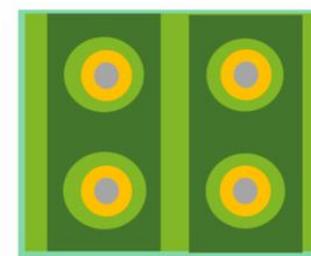
2. Laminating the transparent photo-sensitive layer



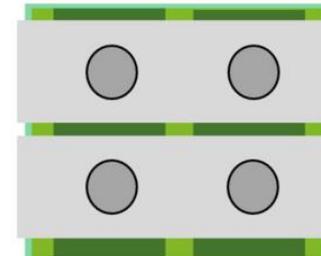
3. Photo-mask



4. Exposure and developing



5. Making anode strips and connecting to top anodes



A microscopic view of the  $\mu$ -PIC from backside

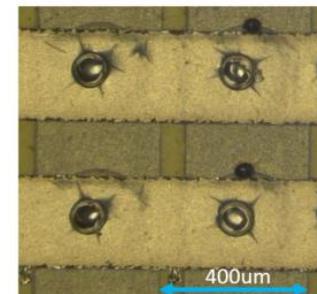


Fig4.3 : 新製造プロセス(下から見た図)

DLC・PCB技術を用いることでRC回路を不要に  
コンパクトな検出器で2次元の多チャンネル読み出しが可能になった

カーボンスパッタリングによる  
DLC薄膜を各陽極のレジスタに

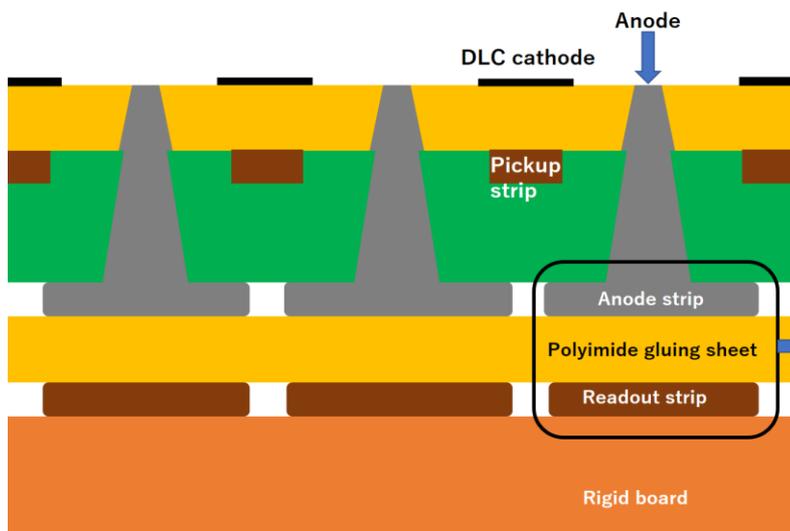


Fig4.6 : 新型μ-PICの断面図。各アノードチャンネルで  
平行平板コンデンサを形成

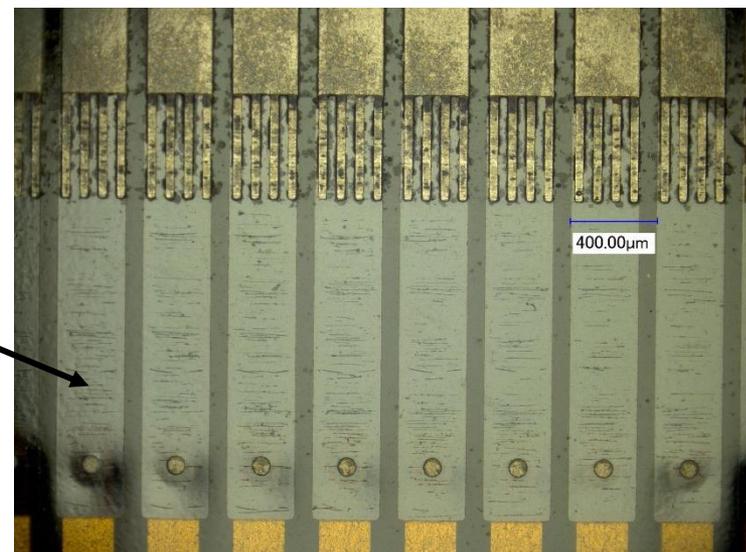
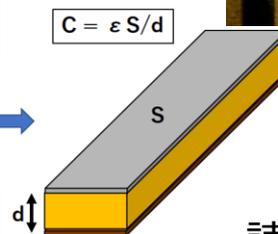


Fig4.5 : DLCで形成されたアノードレジスタ



読み出しストリップをプリントした  
基板にμ-PICを接着することで  
容量を持たせる

Polyimide    Photo-sensitive substrate    Rigid board

Copper    Nichel    Photo-mask    DLC

1. Preparing a double-sided polyimide



2. Photo mask and exposure (double side)



3. Developing



4. Cu plating on surface



5. Ni plating on double side



6. Photo mask and exposure on bottom surface



7. Developing



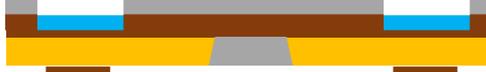
8. Etching for the anode (Cu + PI)



9. Etching for pickup strips (Cu + Ni)



10. Ni plating for the anode



11. Laminating the bottom layer



12. Exposure and developing



13. Connection to top anode & making anode strip



14. Etching for the resistive cathode pattern



15. Carbon sputtering



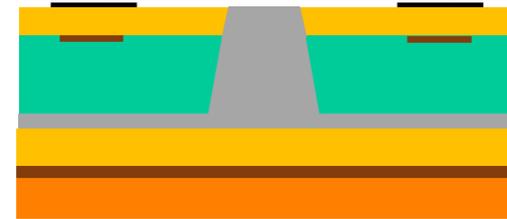
16. Removing DLC on the Cu plating



17. Cu etching



18. Gluing to the rigid board with readout strips



| Chamber name | Diameter size   |                   | Bottom layer        |           | Resistivity<br>[k $\Omega$ /sq.] |
|--------------|-----------------|-------------------|---------------------|-----------|----------------------------------|
|              | Anode[ $\mu$ m] | Cathode[ $\mu$ m] | Thickness[ $\mu$ m] | Material  |                                  |
| RC37, RC38   | 70-75           | 240-250           | 50                  | Dry film  | 180                              |
| RC41, RC42   | 55-60           | 240-250           | 65                  | Polyimide | 600                              |

Table 4.1: The parameters of produced detectors which have been well operated in the entire detection area.

# ゲインの一様性

- 検出領域を8x8分割
- ゲインの一様性の測定
- 中央値(アノード1080・カソード1090)を1とする
- 1,2か所を除いてゲインのばらつきは30%以内に収まっている
- 全領域で増幅・信号読み出しができています

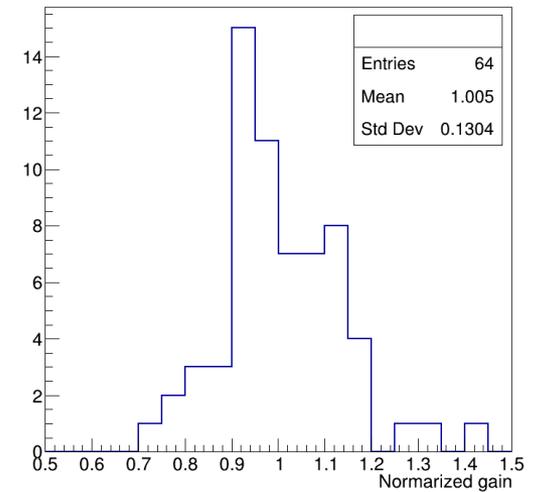
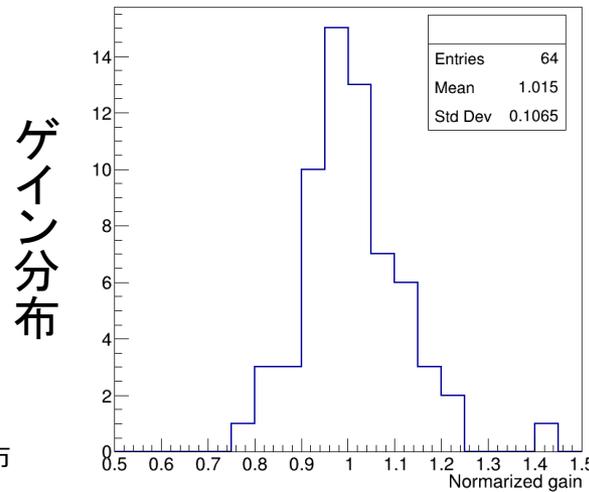
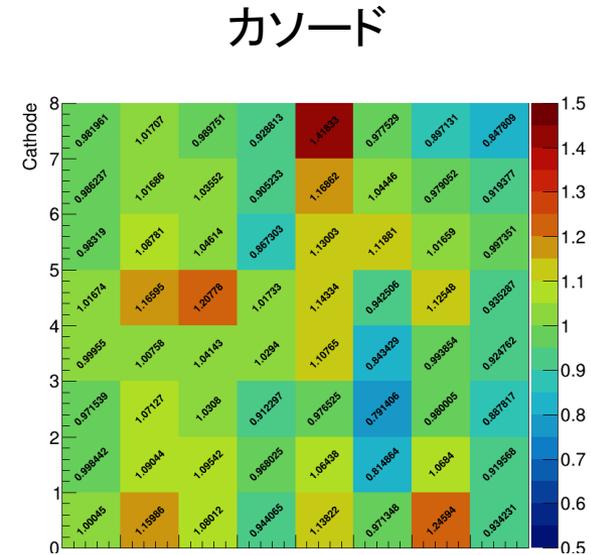
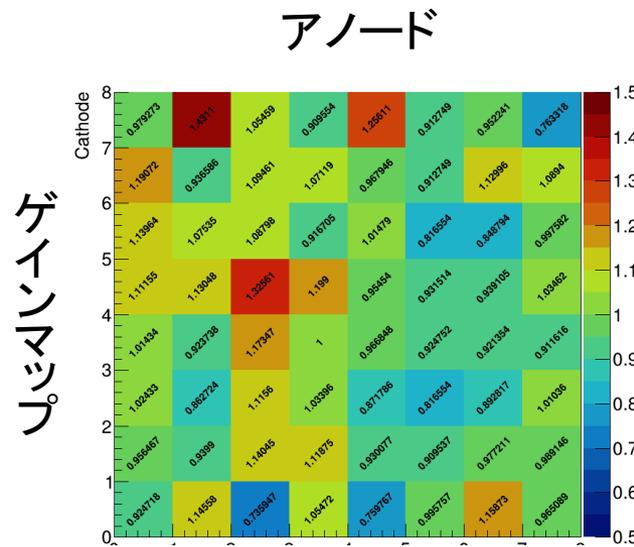


Fig 4.13, 4.14 : ゲインマップとゲイン分布

- MPGDは膨大なチャンネル数を読み出す→多チャンネルに対応できるシステムが必要
- Scalable Readout System(SRS)
  - CERNのRD51(MPGDのR&Dグループ)が開発
  - APV25 : 50ns CR-RC、sampling rate 40MHz、アナログデータをHDMIでADCに送信
  - ADC/FEC : 1セットで最大2048chの信号処理。GbEでPCに送信。本実験では3セット。
  - CTGF : ADC/FECを複数セット用いる場合にそれぞれに共通のトリガーを発行
  - mmdaq : ATLASマイクロメガス向けに開発されたデータ収集システム

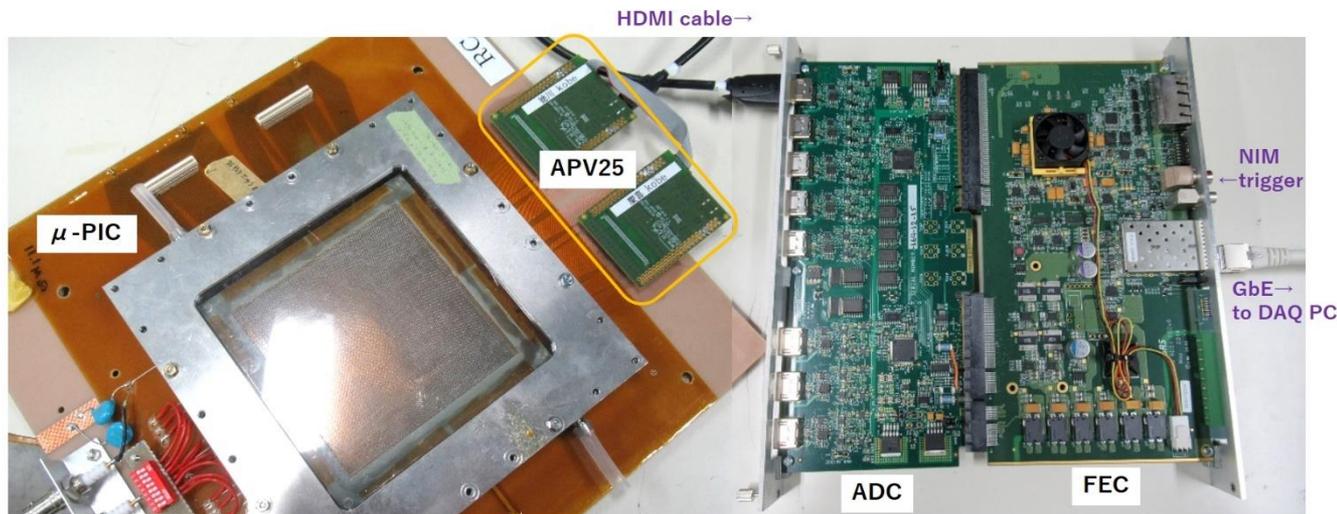


Fig5.4 : μ-PICとSRS

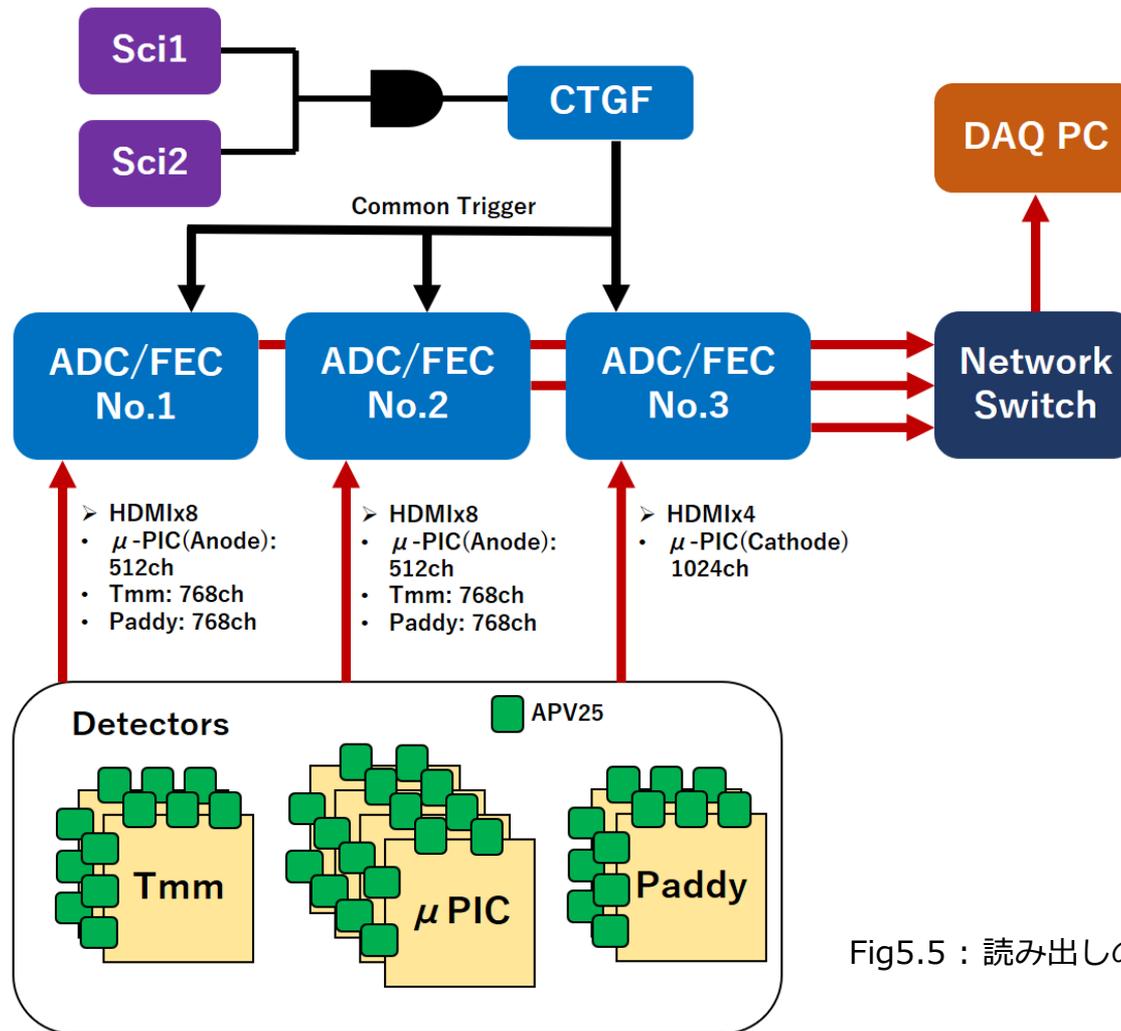


Fig5.5 : 読み出しのブロック図

- 左下図：ミュオンイベントの例
  - Strip number (1-256), Time (25ns/bin, 15frame), ADC count
- 入射粒子が落とす電子は複数のストリップにまたがる
- 隣り合うストリップをまとめたクラスタをヒットと定義
- 15フレームの中で一番大きいADC countをストリップの信号の大きさとする( $Q_{\max}$ )
- ヒット位置：クラスタ内のヒットストリップを $Q_{\max}$ で重みづけした位置

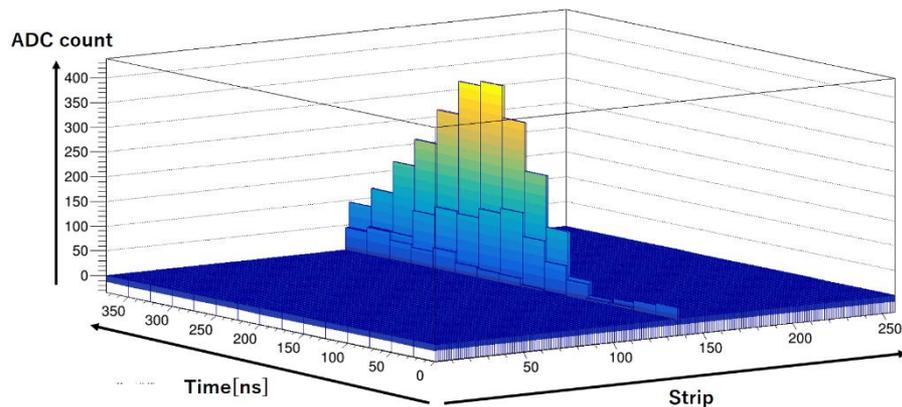


Fig5.6：ミュオンイベントの例

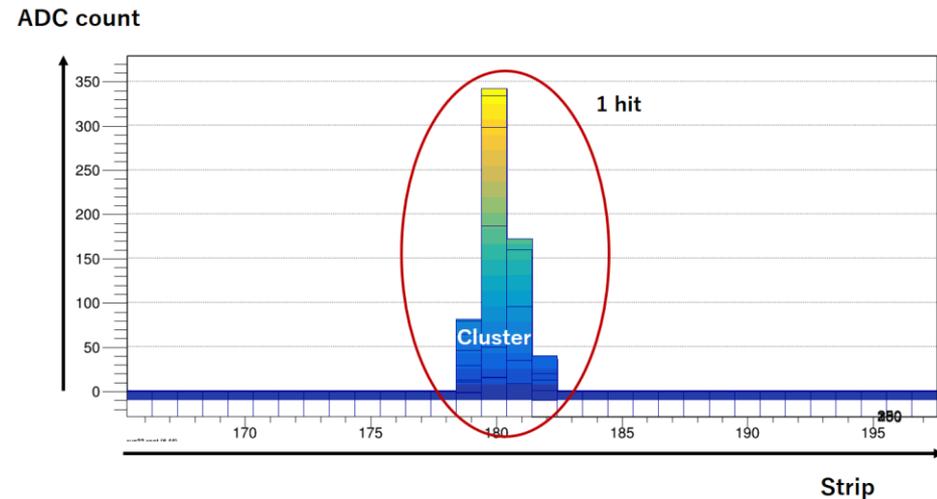


Fig5.7：横軸strip, 縦軸ADC count

- まずクラスター内の各ストリップのヒット時間を求める
- ストリップのヒット時間： $Q_{\max}$ の10%を超える部分を信号の大きさと重みづけ
- $Q_{\max}$ が閾値(低ゲインで100・高ゲインで200)より低いストリップは除去
- クラスターのヒット時間：ストリップのヒット時間で一番早いもの

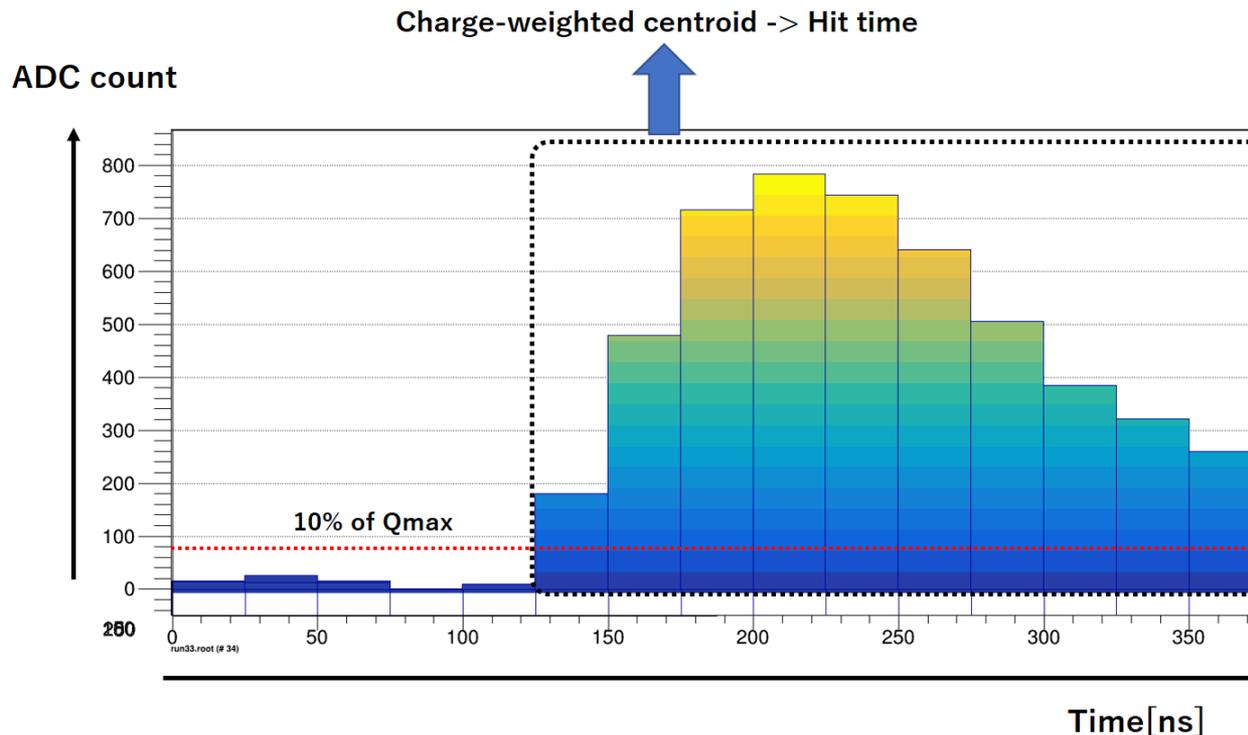


Fig 5.12 : ミューオンのイベント例。横軸：時間。縦軸：ADC count

# 放電電流の閾値で比較

- 左図：閾値を1 $\mu$ Aにすると、2 $\mu$ Aの場合と比べて放電率が約1桁上昇
- 右図：先行研究においても、閾値を下げると放電率が1桁上昇している。一方、抵抗電極のない $\mu$ -PICの放電率に違いは見られない
- 抵抗電極によって放電の多くは大電流に発展する前に抑制されていることが分かる

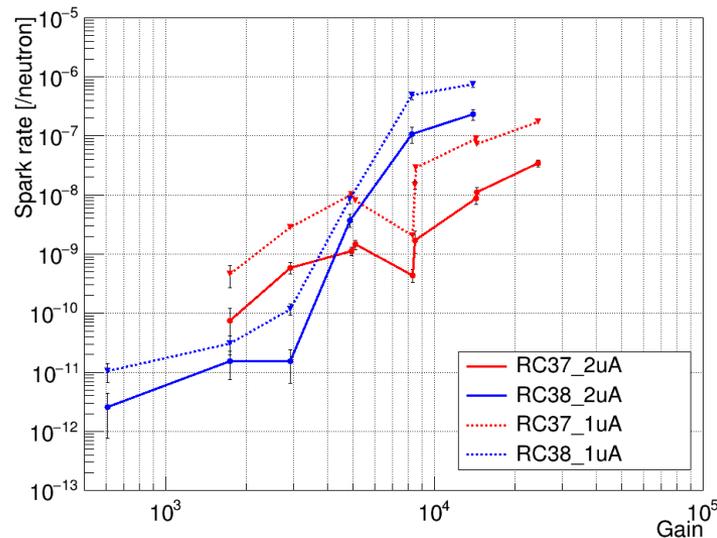


Fig 6.8 : 2種類の放電閾値を用いた放電率

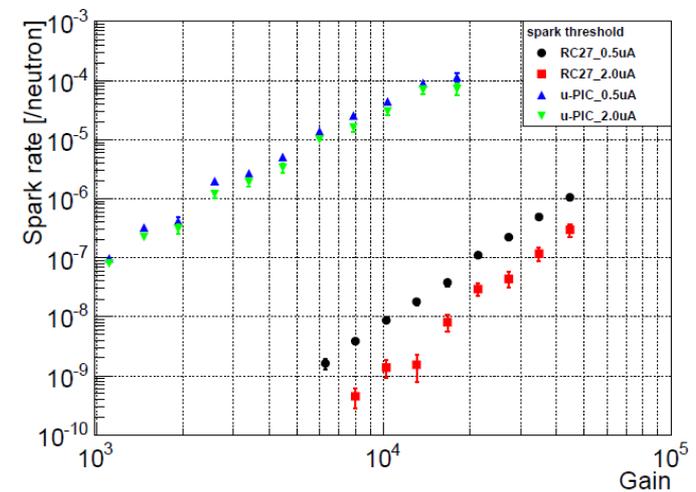


Fig 3.7 : 2種類の放電閾値を用いた放電率の過去の結果(T. Komai, Master thesis)

- 放電による不感領域
  - 右上図：放電イベントと放電に至らないイベントの例
  - 放電が起こるとAPV128ch全体に影響が出る
- 放電による不感時間
  - 1回の放電による電流が閾値を超える継続時間を不感時間とする
  - 閾値：1 $\mu$ A, 2 $\mu$ A
  - ほとんどの放電は50ms以内であることが分かる
- 放電率の結果と合わせて、高レート実験における $\mu$ -PICの不感時間・検出効率を推定することができる

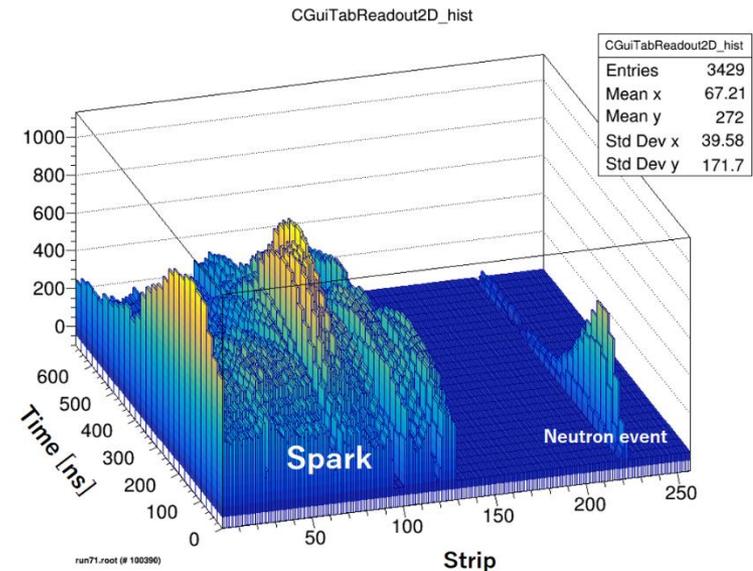


Fig 6.12 : 放電が起こった場合のイベント例

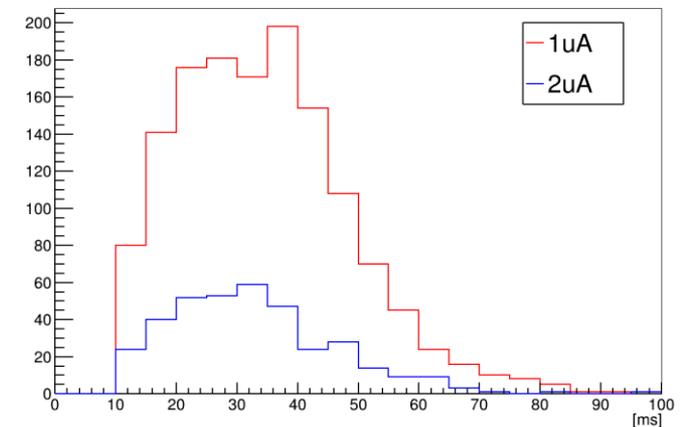


Fig 6.11 : 放電継続時間