

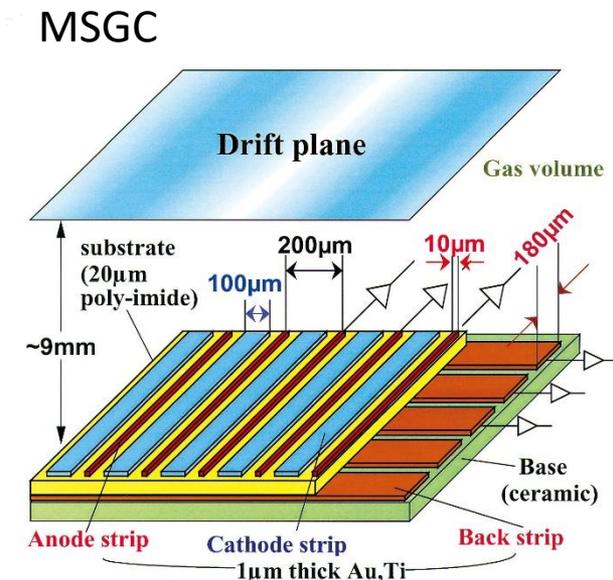
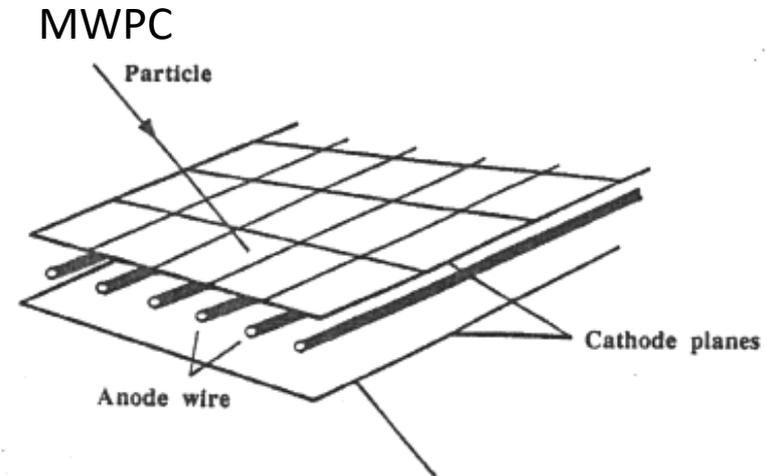
高抵抗電極を用いた μ -PICの開発

神戸大学
山根史弥

- マイクロパターンガス検出器
- 高抵抗電極を用いたMPGDの開発
- 高レート実験に向けた μ -PICの開発
- μ -PICの開発現状と検出器構造の改良
- まとめ

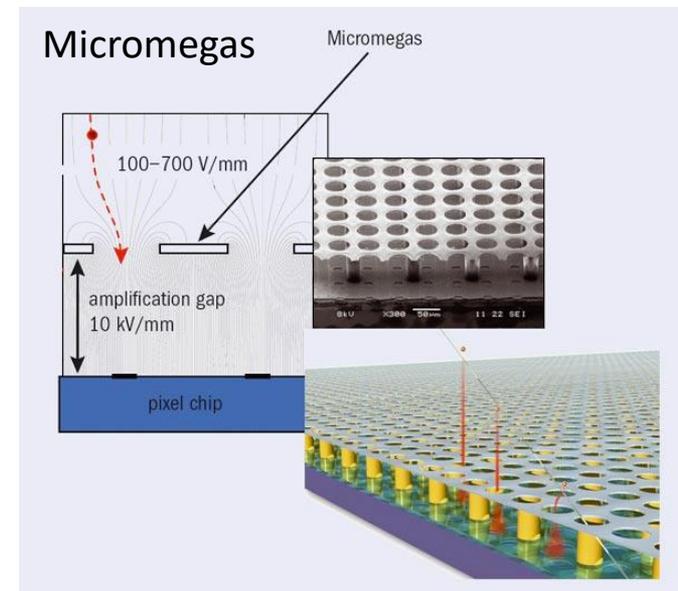
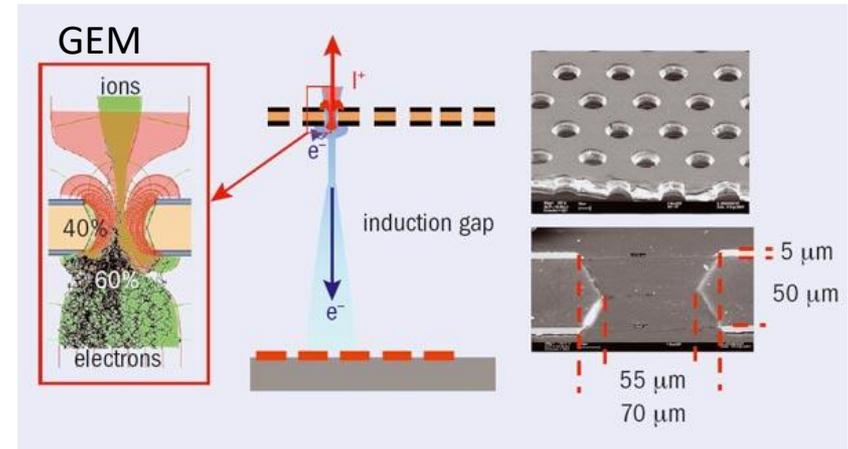
- **マイクロパターンガス検出器**
- 高抵抗電極を用いたMPGDの開発
- 高レート実験に向けた μ -PICの開発
- μ -PICの開発現状と検出器構造の改良
- まとめ

- 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/mm²
- 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
 - 従来のガス検出器では不可能だった高位置分解能、レート許容量が実現可能
- Micro Strip Gas Chamber (MSGC)
 - 1988年に開発された最初のMPGD
 - IC技術を用いて基板の上にストリップ形成
 - ストリップ間隔: 200um
 - レート許容量: $> 10^6$ cps/mm²

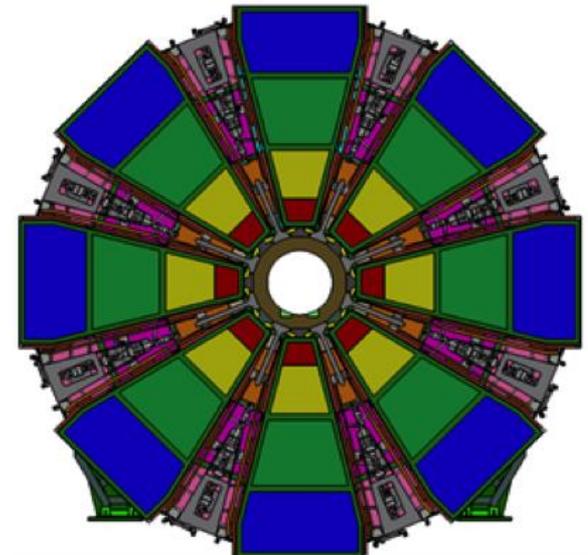
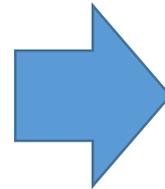
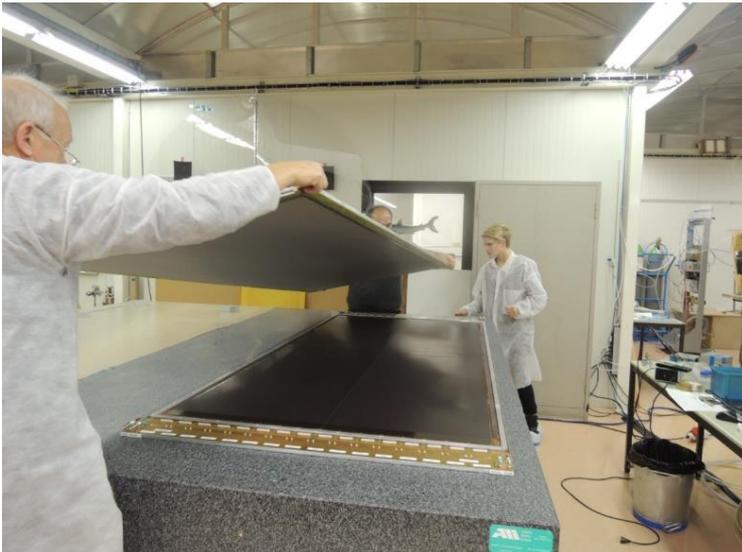


Micro Pattern Gaseous Detector

- MSGC以降、様々なMPGDが開発された
- Gas Electron Multiplier (GEM)
 - 両面基板に空いた数十 μm の穴の中で電子増幅
- Micromegas
 - 陽極基板に高さ100 μm のピラーを立ててメッシュを張る。メッシュと基板の間で電子増幅
- MPGDのメリット
 - 高位置分解能: $\sim 100\mu\text{m}$
 - 高レート耐性: $> 10^6\text{cps}/\text{mm}^2$
 - 大面積: $> 1\text{m}^2$
 - 安価
 - 動作の安定性
 - 放射線耐性
- アプリケーション
 - 素粒子・原子核実験
 - 医療
 - 非破壊検査
 - その他X線、中性子イメージング等を利用する分野



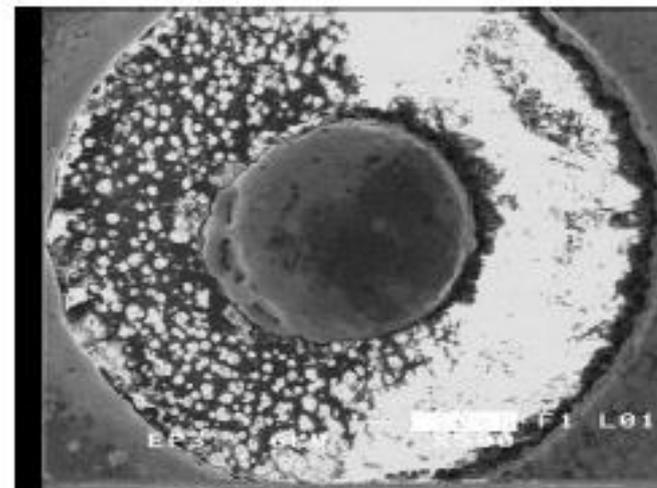
- LHC実験
 - LHC: 世界最高エネルギーのハドロン衝突型加速器
 - ビームルミノシティのアップグレード
 - $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \rightarrow 2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \rightarrow 7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 - 1バンチあたり200陽子陽子衝突(バンチ間隔25ns)
 - 現行の検出器ではレート増大に対応できない
- 検出器をMPGDにアップグレード
 - 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



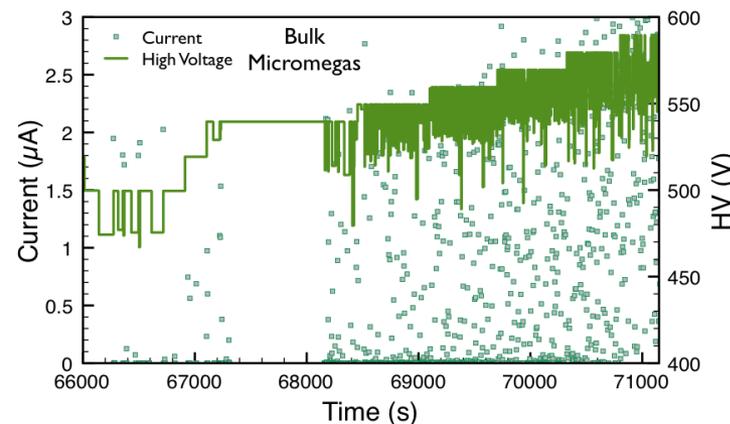
- マイクロパターンガス検出器
- **高抵抗電極を用いたMPGDの開発**
- 高レート実験に向けた μ -PICの開発
- μ -PICの開発現状と検出器構造の改良
- まとめ

- MPGDは狭い電極間に高電場をかけるため、電極間の放電が起こりやすい
 - 不感時間の発生
 - 検出器の損傷
- 上図: μ -PICにおける導通路の形成
 - 陽極陰極間に高電圧をかける \rightarrow 放電が続いて基板が炭化 \rightarrow 導通路が形成
- 下図: ATLASミュオン検出器アップグレードに向けたMicromegasの高速中性子照射実験
 - 検出器設置領域では高速中性子が高頻度で入射 \rightarrow 電荷をたくさん落とす
 - 増幅による電子密度がRaether limit($\sim 10^8$)を超えると放電
 - 結果: 放電が頻発して電圧供給が不安定に
- 高電場での安定動作を実現するための対策が必要

μ -PIC基板の導通路の形成

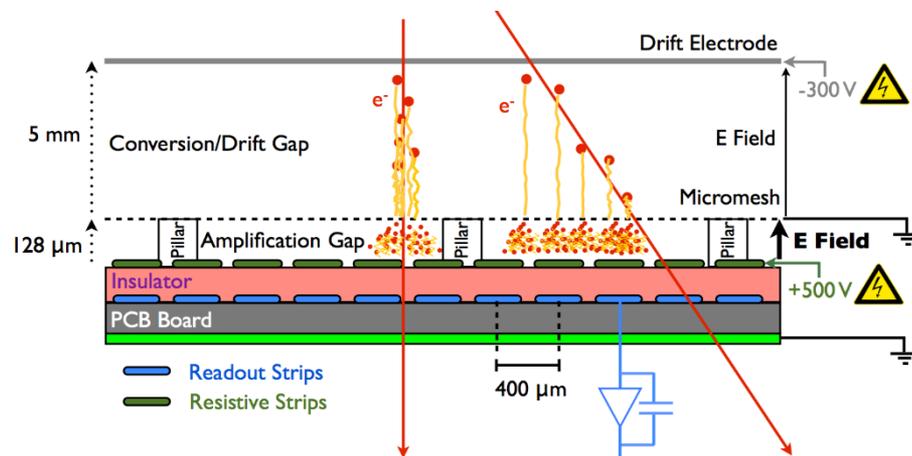
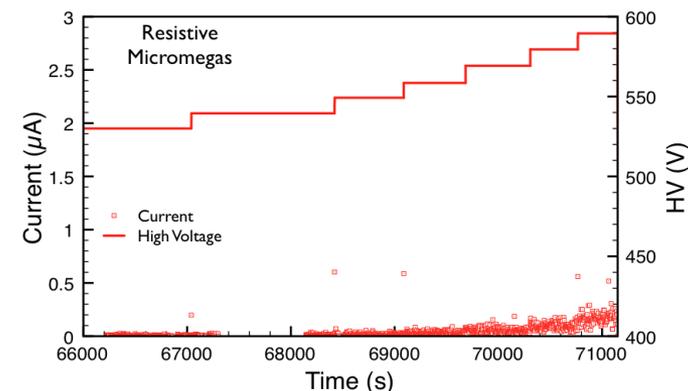
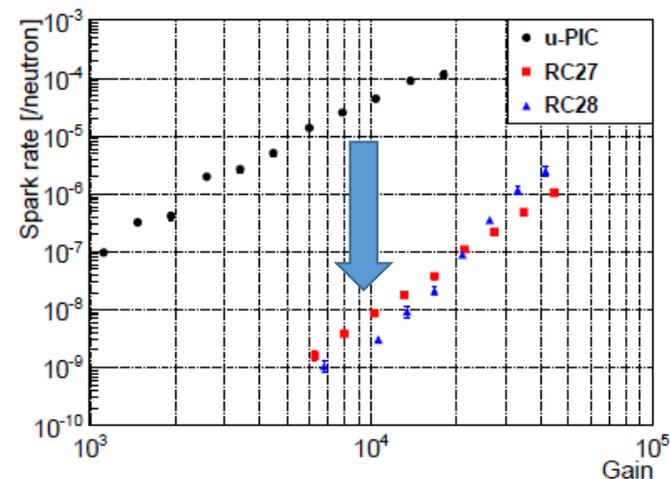


Micromegasの高速中性子照射試験



高抵抗電極による放電抑制

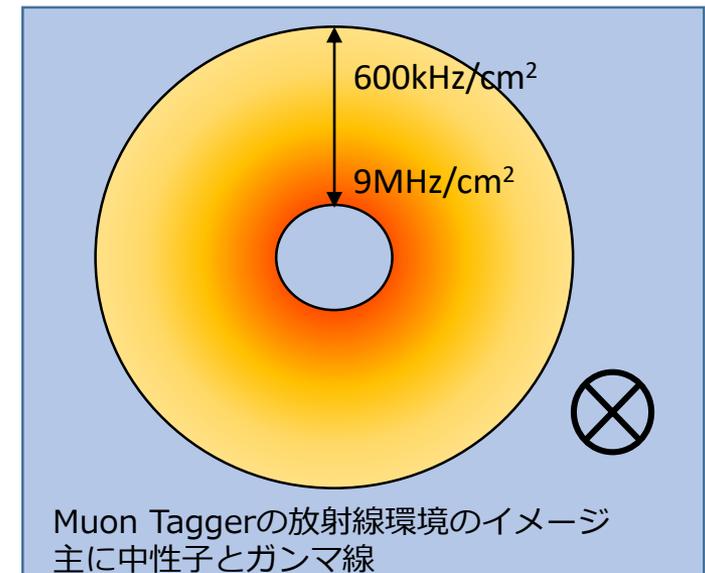
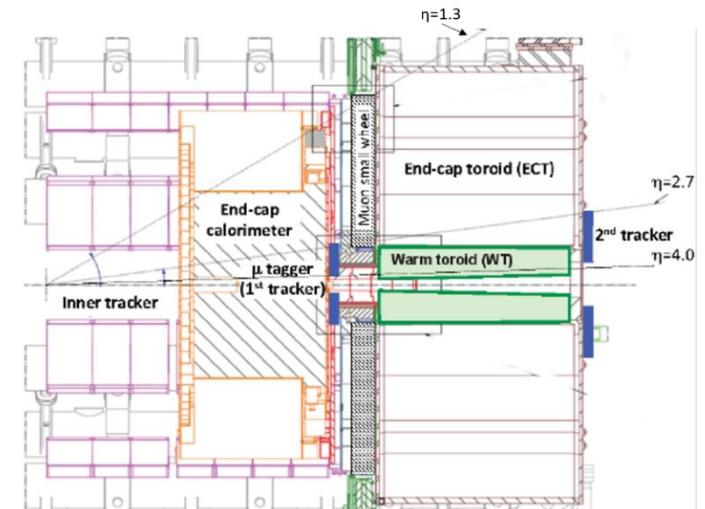
- 電極に高抵抗素材を用いることで放電の抑制
 - Micromegasの場合: 読み出し電極の上に絶縁層を挟んで高抵抗電極を配置
- 高速中性子照射実験の結果
 - μ -PIC: 放電頻度が3~4桁減少
 - Micromegas: 高電圧においても安定動作
→ ATLAS Micromegasは高抵抗電極を採用
- Micromegas, μ -PIC以外にも高抵抗電極を利用したMPGDの開発が進められている



- マイクロパターンガス検出器
- 高抵抗電極を用いたMPGDの開発
- **高レート実験に向けた μ -PICの開発**
- μ -PICの開発現状と検出器構造の改良
- まとめ

さらなる高レート環境への進出

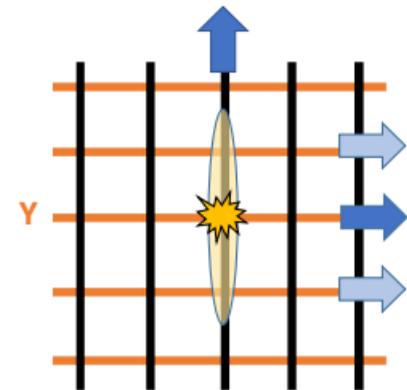
- ATLAS Muon Tagger配置案
 - 2023年のLHCルミノシティアップグレードでミュオン検出器の増設を検討中
 - $2.7 < |\eta| < 4.0$ (ビームパイプから25~92cm)
 - Inner trackerとMuon taggerでミュオンのトラッキング
- 検出器への要求
 - 500um間隔の二次元読出検出器5層
 - 高い放射線耐性(右図)
 - コンパクトな検出器; 厚さ5cm以内
- 検出器にとって非常にチャレンジング



- シリコンは予算的に厳しい
- MPGDの出番 (ワイヤーは論外)
- GEM: 高増幅率を得るために3段重ねる必要→スペース的に厳しい

- Micromegas: 生産性が高く高性能
 - 高抵抗電極が必須
 - 電圧降下と電荷伝搬を考慮した精密な抵抗値設定が必須
 - 1次元(X方向)の分解能は良い
 - Y方向は? →電荷伝搬を考慮する必要
 - 最適な抵抗値解が存在しない
 - Micromegasでは不可能

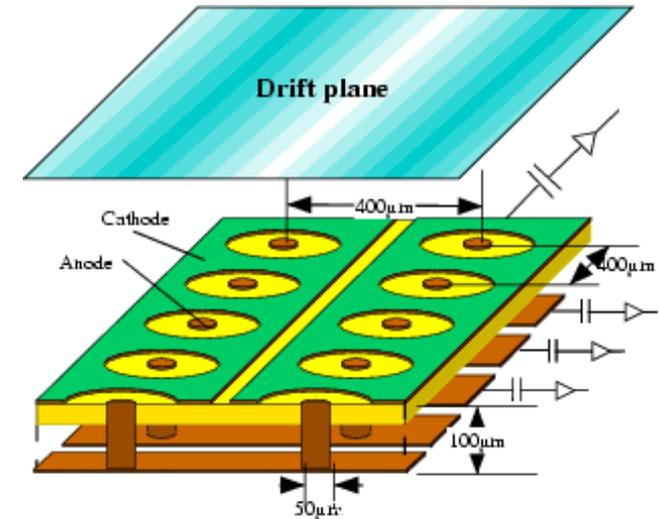
- 新たな検出器が必要



Micro Pixel Chamber (μ -PIC)

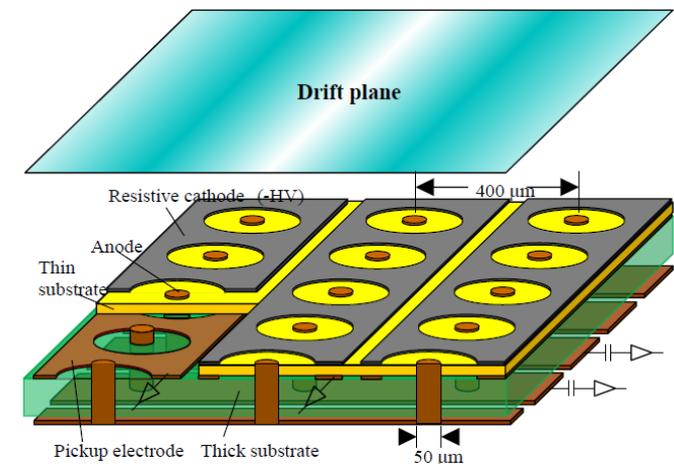
➤ μ -PICの特徴

- PCB技術で製作
- 陽極・陰極ストリップによる二次元読出(400 μ m間隔)
- 増幅はピクセル単位で起こる→高いトラック分離能力が期待できる
- 陽極付近の電場は強く、陰極付近は弱い
 - 単独でガス増幅率 >10000
- **ガス増幅のためのフローティング構造が不要**
 - **マイクロメガス、GEMに比べてコンパクトで扱いやすい**
- タイル状に並べて大面積対応



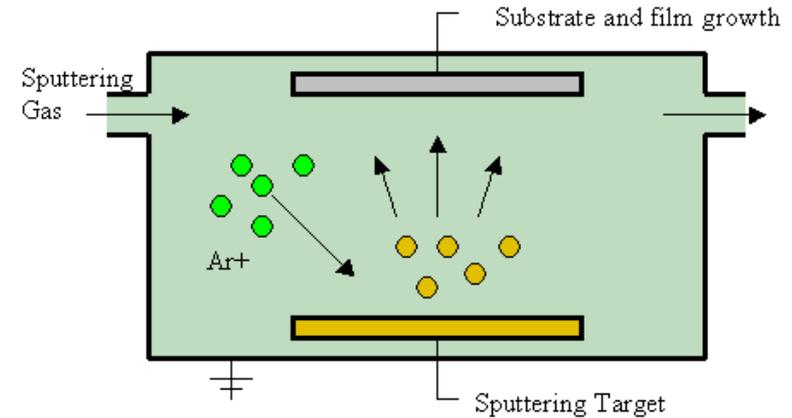
➤ 高抵抗電極を有した μ -PIC

- 陰極に高抵抗電極(10⁵~7 Ω /sq.)
- 放電抑制能力：通常型 μ -PICに比べて3~4桁減少
- 陰極：ピックアップ電極による誘起電荷読み出し
 - コンデンサ要らず→パーツを大幅削減
- 電荷伝搬による位置分解能の悪化を考慮しなくてよい

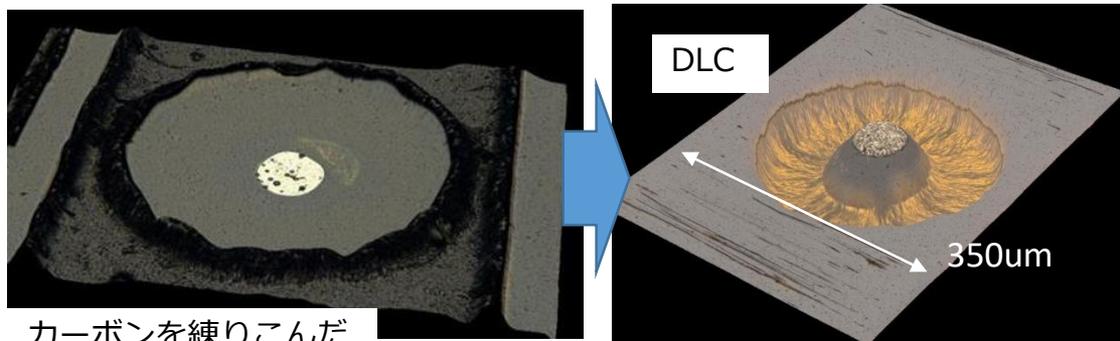
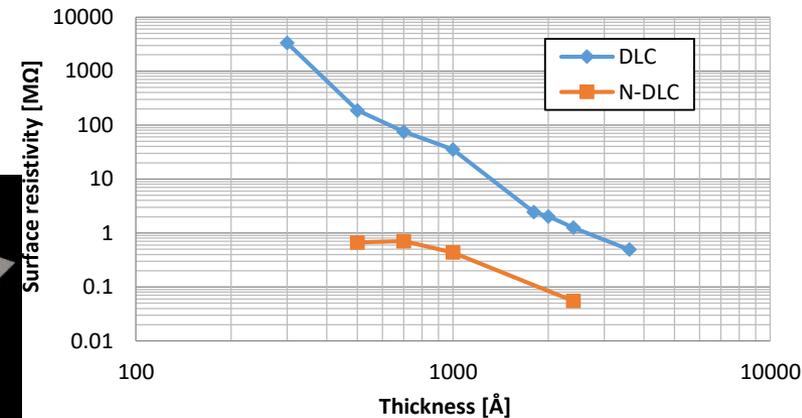


新しい高抵抗電極素材: DLC

- 高抵抗電極素材にはDiamond Like Carbon(DLC):
sp₂型とsp₃型から成るアモルファスカーボン
- 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)
 - 広範囲の抵抗値設定 (50k~3GΩ/sq.)
 - 膜厚調節 (300~3600 Å)
 - 窒素ドーブ
 - ポリイミドに対する高い付着力
 - 酸・アルカリに対する高い耐性
 - 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**
 - Micromegas, μ-PIC, GEM, MSGCを製作→全てについて動作を確認



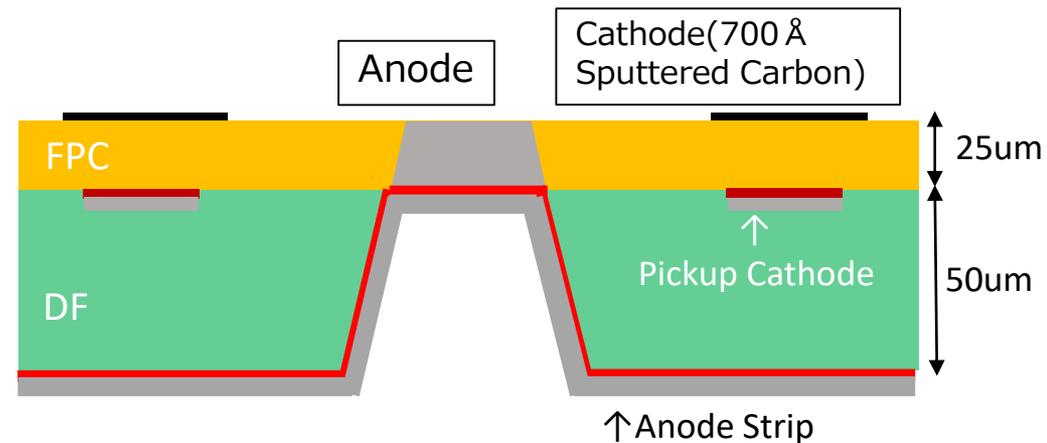
Surface resistivity (Preliminary)



カーボンを練りこんだ
ポリイミドシート

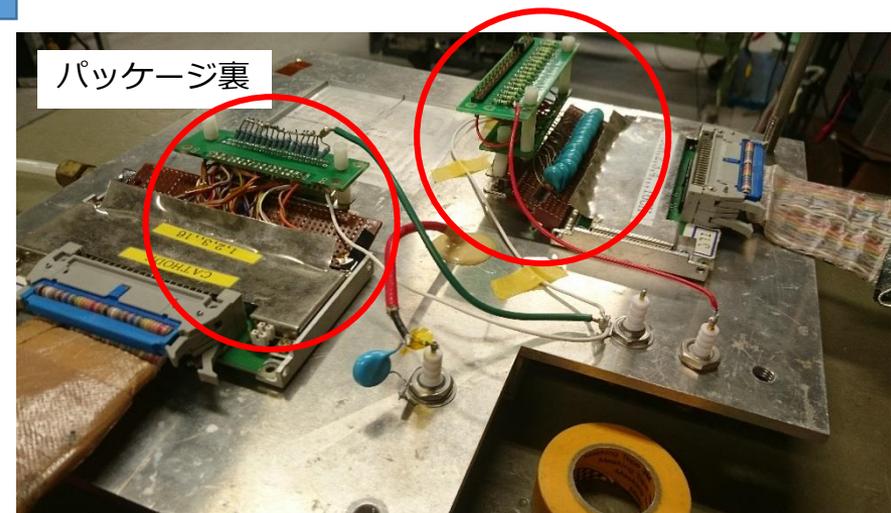
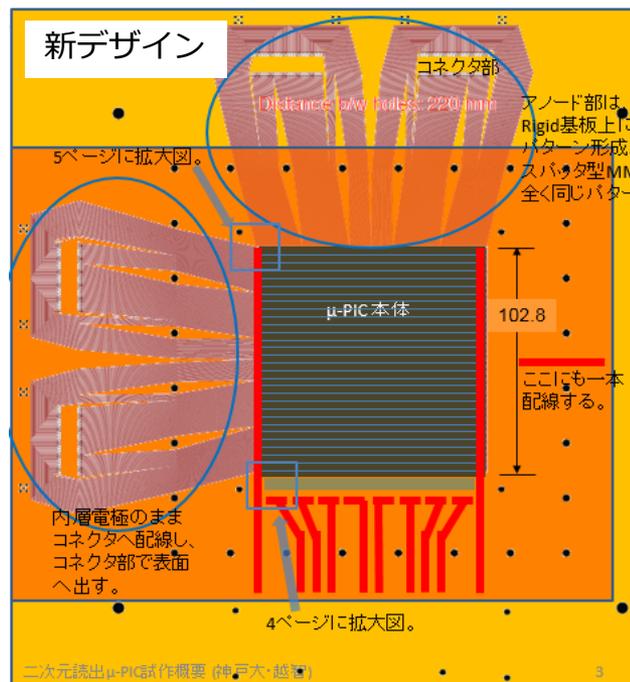
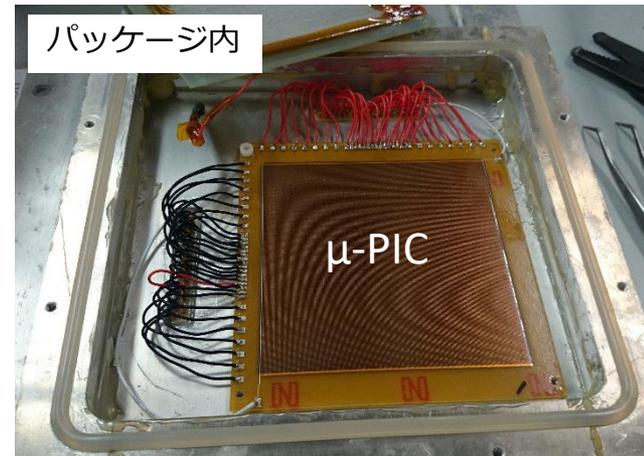
- マイクロパターンガス検出器
- 高抵抗電極を用いたMPGDの開発
- 高レート実験に向けた μ -PICの開発
- μ -PICの開発現状と検出器構造の改良
- まとめ

- 検出器製作: RAYTECH Inc.
- スパッタ: Be-Sputter Co., Ltd
- 上層のFlexible Print Circuit (FPC)と下層のドライレジストフィルム(DF)による2層構造
- 抵抗陰極・読出陰極パターン形成
 - 両面袋とじマスク
- アノード導通・ピクセル位置あわせ
 - 半透明素材のDFとフォトリソグラフィを用いることで256×256pixels全ての位置合わせが可能
 - 真空ラミネート→気泡の混入を防ぐ
- この製作が確立するのに1年
- **ガス増幅率>10000**
- **高速中性子照射試験**
 - 放電による不感時間の発生や損傷はなく、安定動作



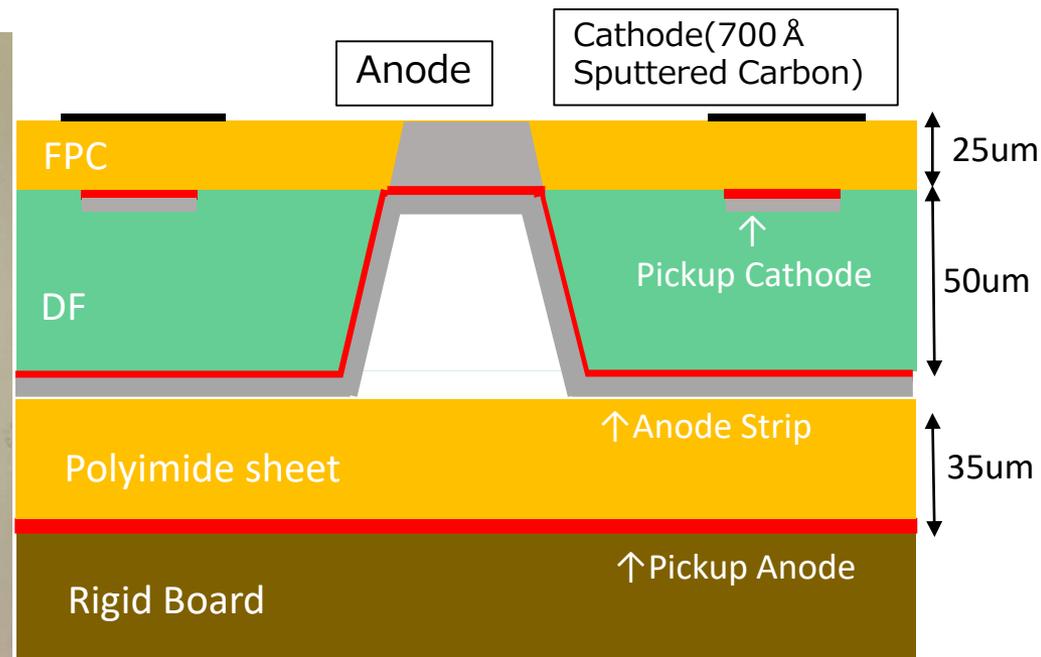
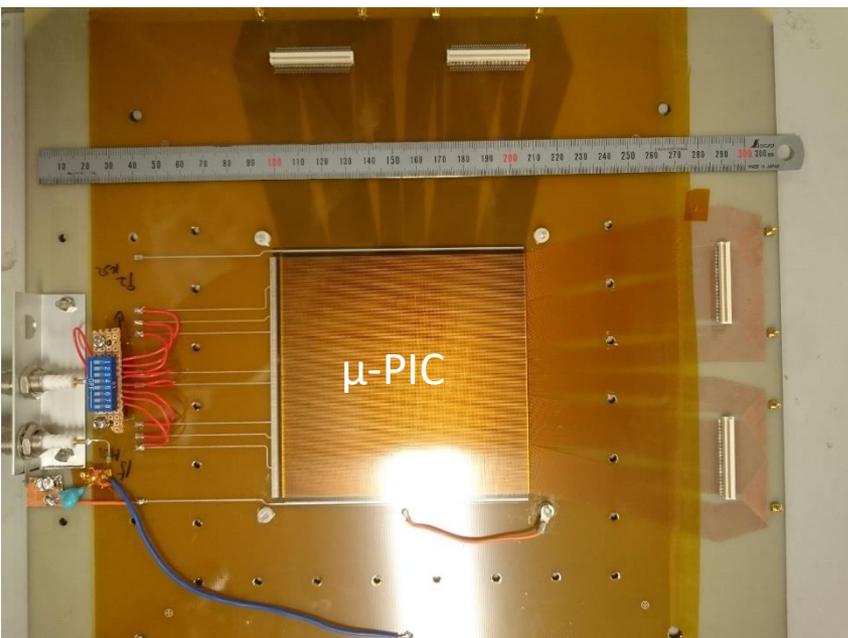
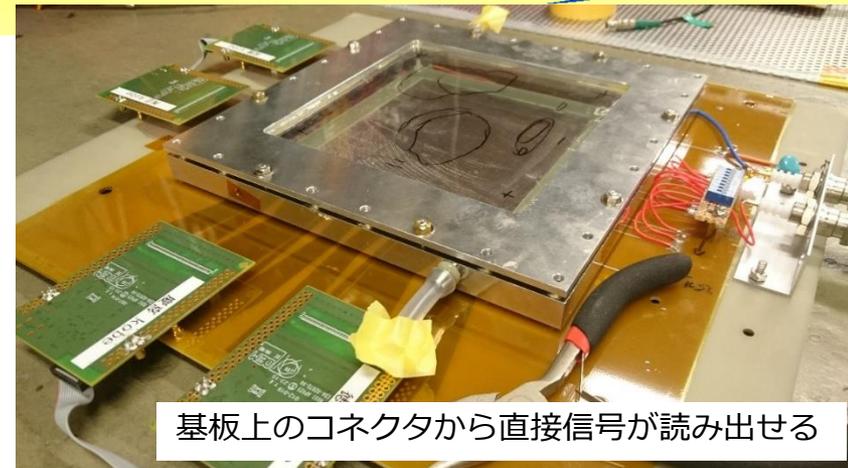
検出器構造の簡略化

- μ -PIC自体は基板1枚だが、信号読み出しには1chごとにRC回路が必要
- パッケージの外に読み出しのための回路を組む必要
- 便宜上16stripsを1chにまとめて読み出していた
- PCB技術とDLC薄膜を利用した等価回路を試みる



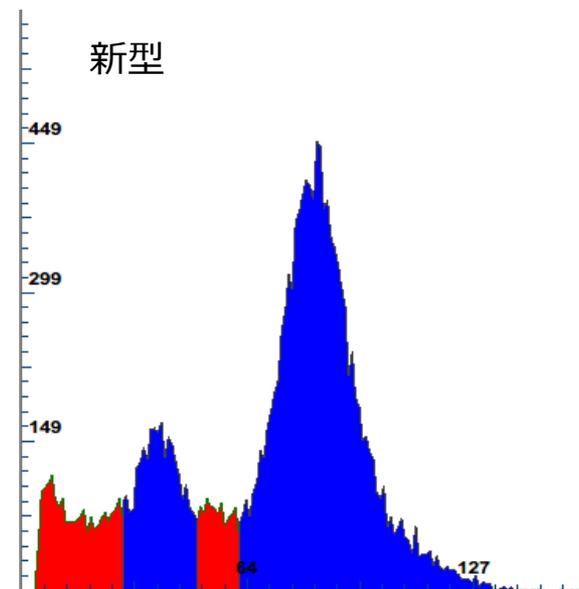
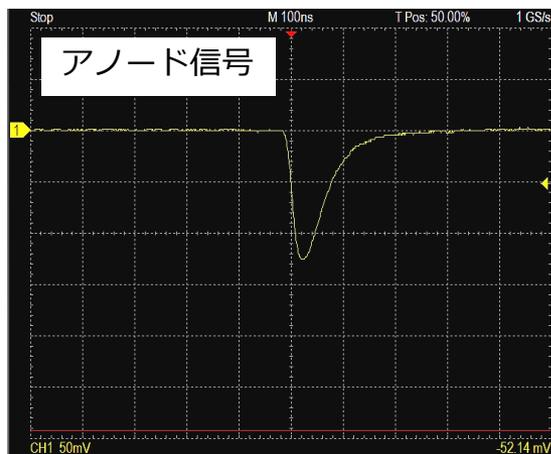
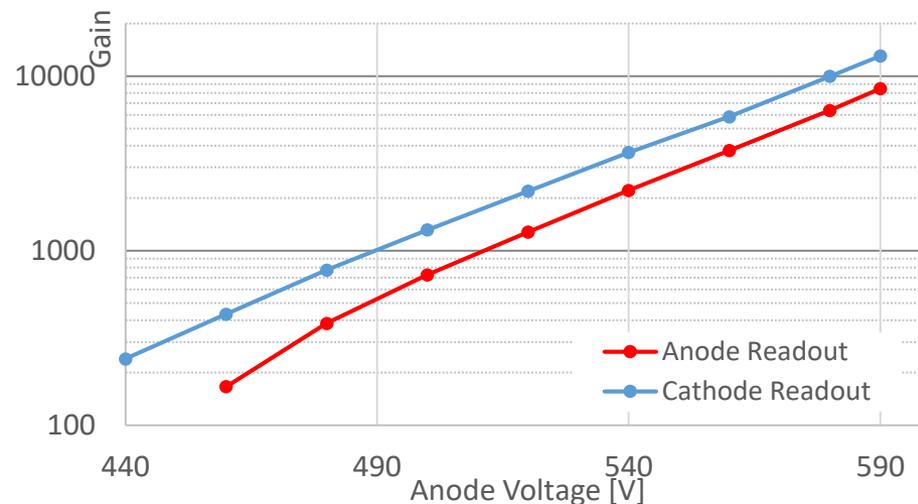
検出器構造の簡略化

- アノードストリップを形成したRigid基板に μ -PICを接着
- 接着シートをカップリングコンデンサとして用いる ($\sim 22\text{pC}/\text{strip}$)
- アノードのバイアス抵抗はDLC薄膜
- 容量がもっと大きい接着シートを試験中
- 512strips分の回路を1枚のPCBに収めることに成功



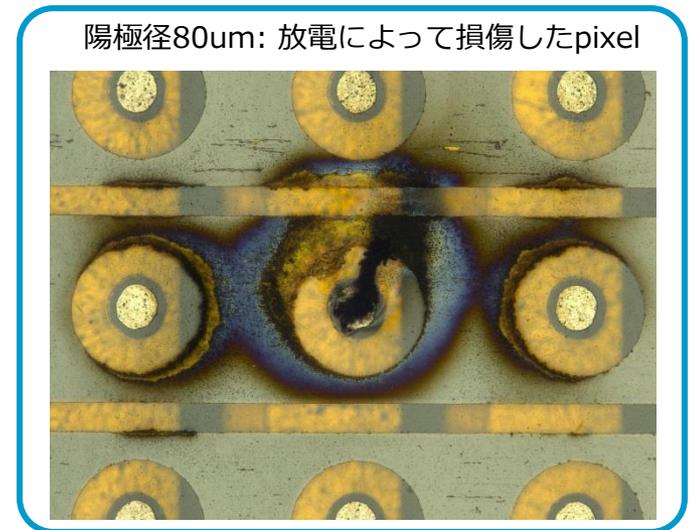
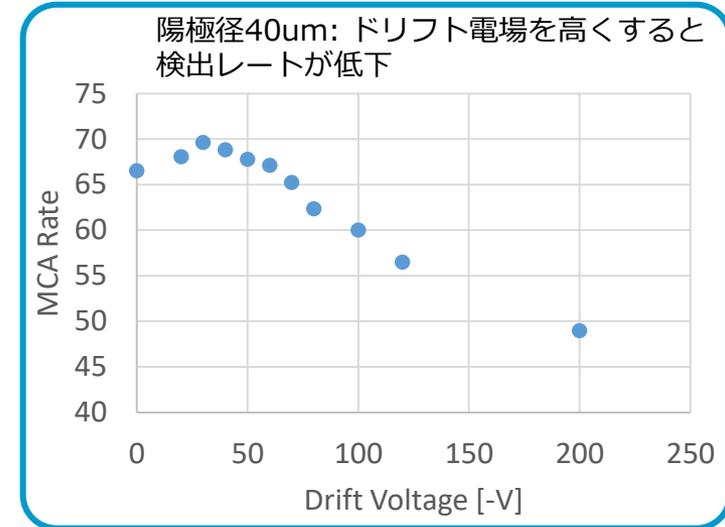
基本的な動作試験

- ^{55}Fe 線源の信号測定
 - 動作ガス: $\text{Ar}:\text{C}_2\text{H}_6 = 90:10$
 - プリアンプ: ATLAS ADC
 - 陽極陰極共に信号の確認
 - ガス増幅率 > 10000
 - 検出器としての動作が可能になった
- エネルギー分解能
 - 測定範囲: $12.8\text{mm} \times 3.2\text{mm}$
 - アノード: 23~26%
 - カソード: 18~20%



- 陽極径のサイズによって動作特性に変化が見られた
 - 小さい場合: $\sim 40\mu\text{m}$
 - ドリフト電場を大きくすると検出効率が悪化
 - 増幅率10000以上で安定動作
 - 考えられる原因: 陽極に電子が到達しにくい
 - 大きい場合: $\sim 80\mu\text{m}$
 - 検出効率・エネルギー分解能が良い
 - 最大到達ゲインが低い(最大で10000程度)
 - 増幅率5000を超える動作は不安定
 - 考えられる原因: 陽極陰極間の電場が強すぎる
- 電極構造の最適化が必要

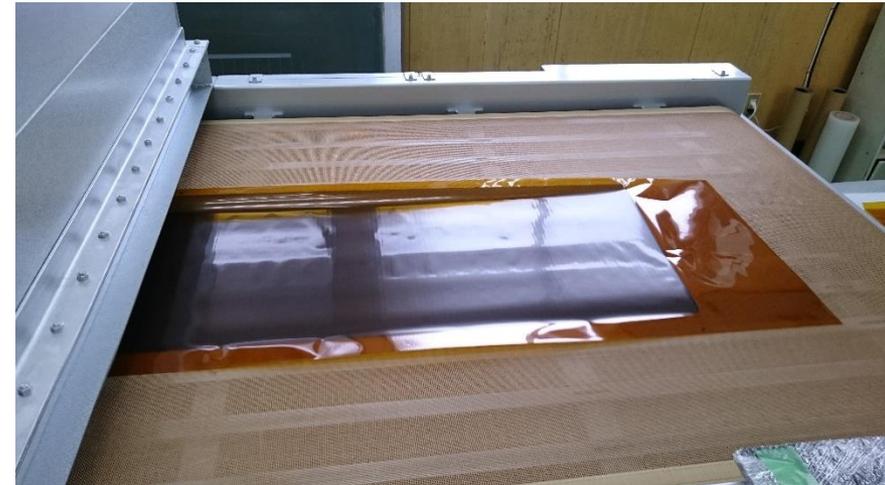
- 電場及び電子増幅過程のシミュレーション(Elmer + Garfield++)によって最適化
 - 例: 陽極に到達する電子の割合(ドリフト電場1kV/cm)
 - 陽極径40 μm →50%
 - 陽極径80 μm →90%



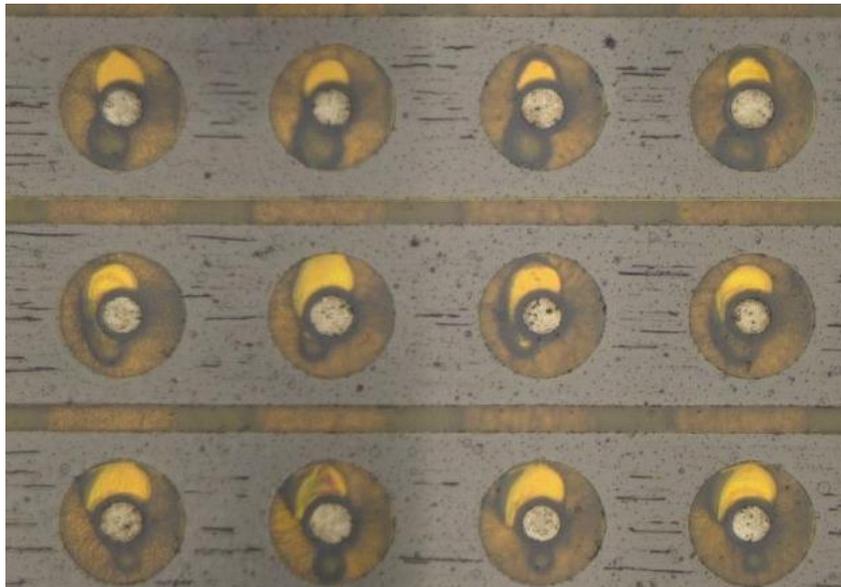
- 高抵抗電極を用いた μ -PICの実用化に向けた研究開発
- 高強度ビームを用いた実験にフォーカス
- DLC電極とPCB技術を駆使→高抵抗電極を用いた μ -PICのデザインが確立
 - 増幅率 >10000 , エネルギー分解能 $<20\%$
 - 荷電粒子のトラッキング試験やX線イメージングが可能に
 - 高レート環境での実用化に向けた本格的な試験
- シミュレーションによる検出器構造の最適化中
- 世界最高峰の新ガス検出器を目指す
- 素粒子実験以外の分野でもいっぱい使ってもらいたい

ATLAS Micromegasの例

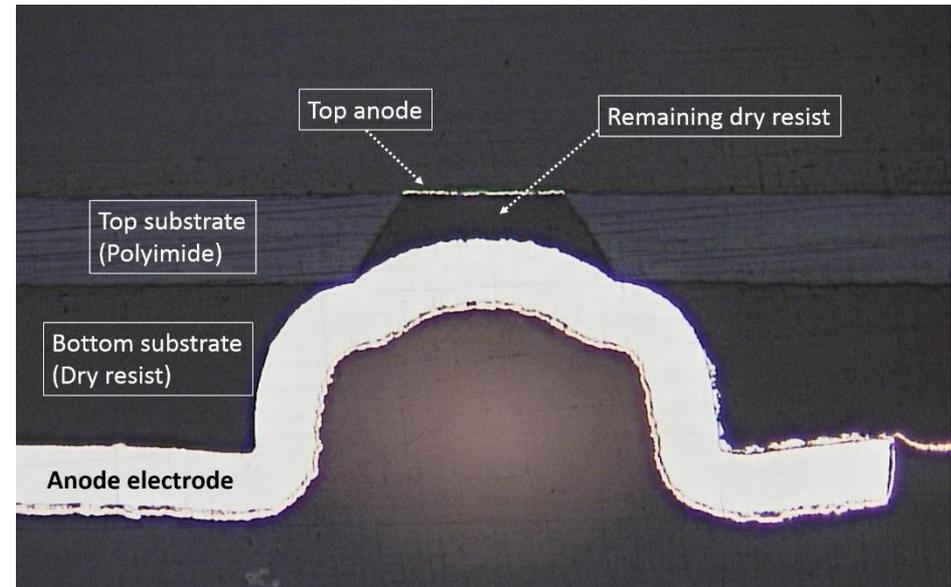
- LHCのルミノシティ増大→ATLASミュオン検出器の最内層をアップグレード
 - レート許容量: $15\text{kHz}/\text{cm}^2$
 - η 方向の角度分解能 1mrad
 - 大面積・大量生産が可能なもの
- 上の条件を満たす検出器としてMicromegasを採用
 - ミュオンを検出するためには高い増幅率(~ 5000)が必要
 - $10\sim 100\text{kHz}/\text{cm}^2$ の頻度で入射する高速中性子由来の放電は免れない
 - 高抵抗電極($20\text{Mohm}/\text{cm}$)を採用
- 神戸大学は高抵抗電極フォイルの生産を担当しており、生産・QA/QCが進行中



基礎デザインが完成するまで、多層基板ならではの困難が多かった



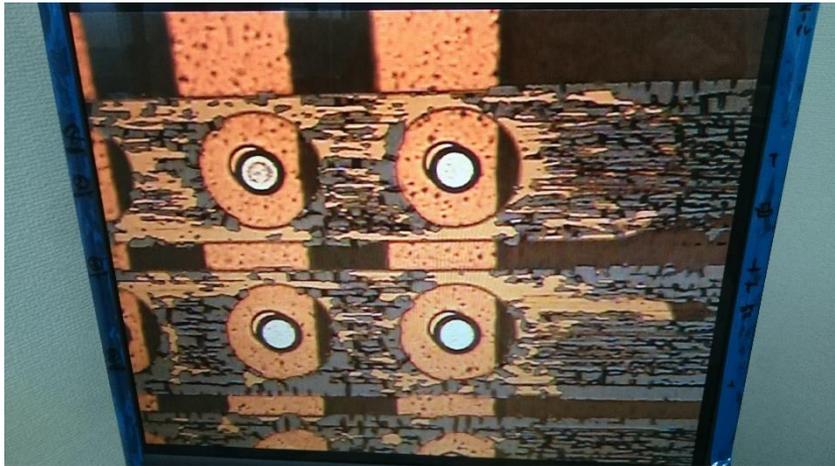
多層基板のため、1つ1つのピクセルのアライメントが非常に困難だった



ピクセルの位置合わせには成功
陽極ストリップとピクセルが繋がらなかった

- 検出器製作業者での視察・議論を通して製作工程を改善
- 将来の生産のために歩留まり100%を目指す

- 製造過程で発生する高抵抗陰極のダメージが問題だった
 - ニクロムエッチング時にダメージが入ることが分かった
 - 反応温度を下げることで解決
 - DLC層を厚くすることも検討



- 陽極径の狙った値のみ製作したい
 - FPC層形成後、陽極のボトム径を測定
 - 基準値を超えるものを廃棄

