

MEG II 実験背景事象削減に向けた 超低物質質量・高レート耐性RPCの開発

(Development of ultra-low mass and high-rate capable
resistive plate chamber for background reduction
in the MEG II experiment)

森研究室 山本 健介

2022年1月24日(月) 修士論文審査会

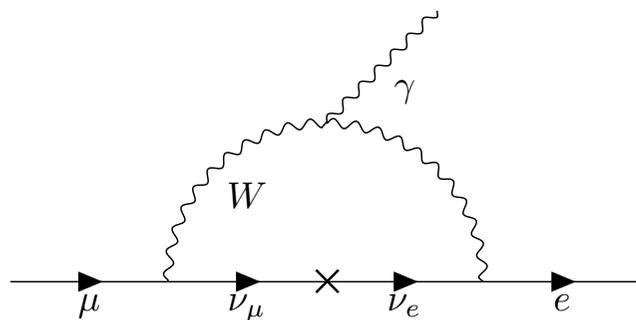
Outline

- Introduction
 - $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊
 - MEG II実験
 - 背景ガンマ線削減とRDC
 - 本研究で開発するRPC
- 本研究内容
- 結論

$\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊探索

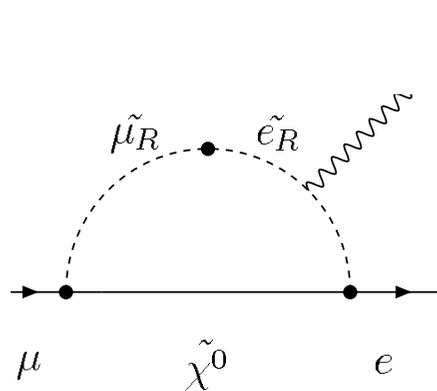
- $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊：レプトンフレーバー保存則を破る現象
 - 標準理論+ニュートリノ振動では観測不可能
 - 多くの新物理モデルでは観測可能な崩壊分岐比($\mathcal{O}(10^{-12}) - \mathcal{O}(10^{-14})$)を予言
 - SUSY-GUT, SUSY-seesaw
 - 現在の崩壊分岐比の上限値: 4.2×10^{-13} (90% C.L.) (MEG実験, 2016)

→ 発見すれば新物理の確実な証拠となる



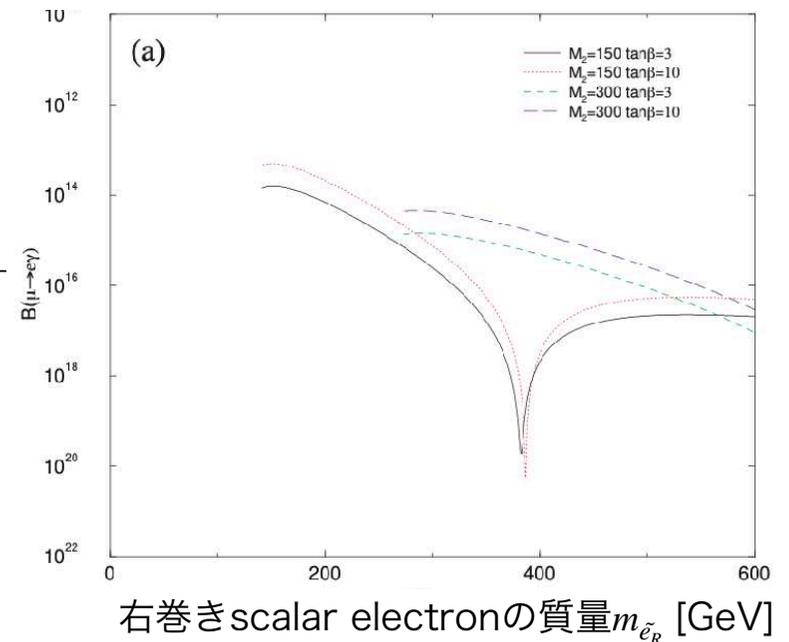
標準理論 + ニュートリノ振動

$$B(\mu \rightarrow e\gamma) = \frac{3\alpha}{32\pi} \left| \sum_i U_{\mu i}^* U_{ei} \frac{\Delta m_{i1}}{M_W^2} \right|^2 \sim 10^{-54}$$



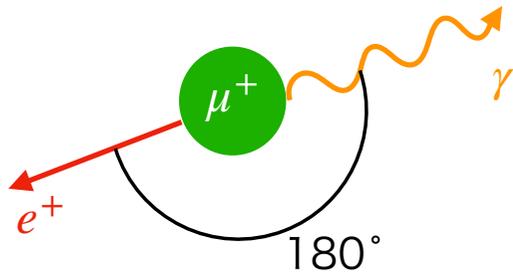
SU(5) SUSY-GUTでの
 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊の例

SU(5) SUSY-GUTでの $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊分岐比の例



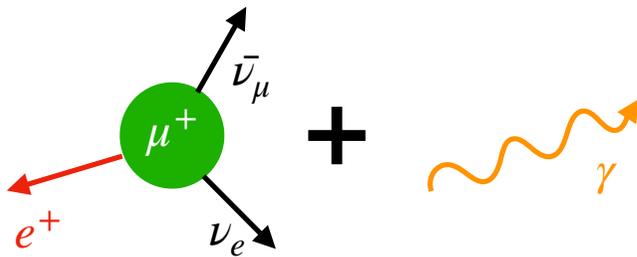
右巻き scalar electron の質量 $m_{\tilde{e}_R}$ [GeV]

MEG II 実験



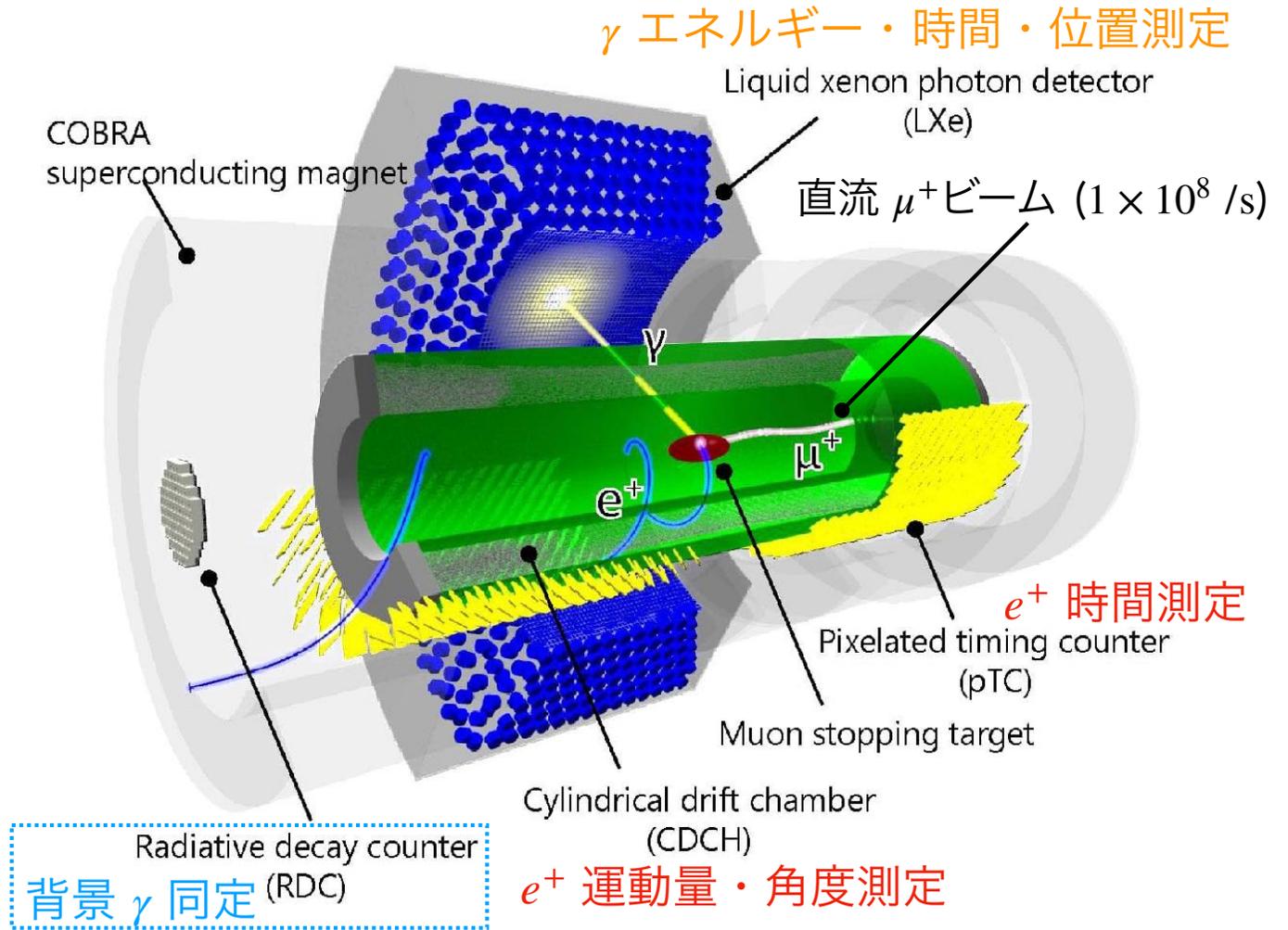
信号事象

- e^+ と γ がどちらも52.8 MeV ($m_\mu/2$)
- e^+ と γ が逆方向に放出
- e^+ と γ が同時に放出

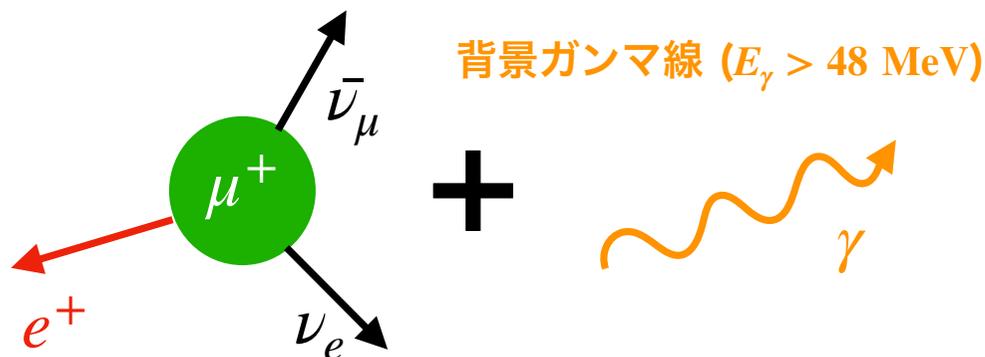


偶発的背景事象

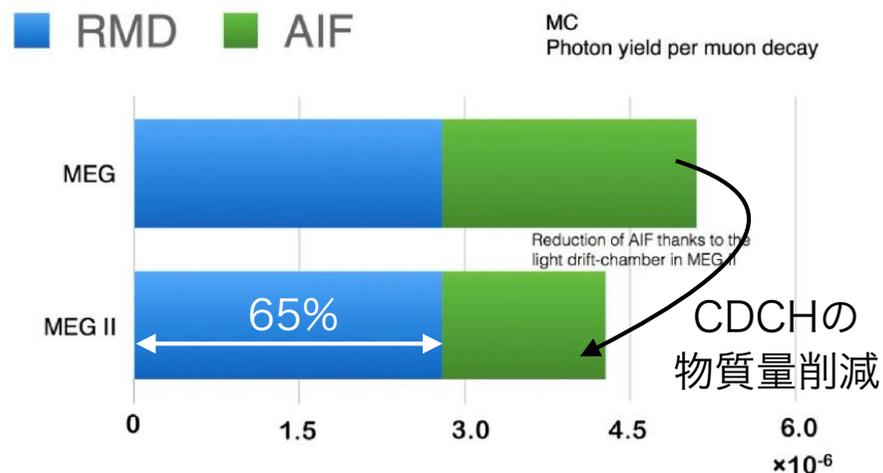
- MEG II実験で主要な背景事象
- Signal-likeな特徴を偶発的に持つ
- 高い分解能を持つ検出器が必要



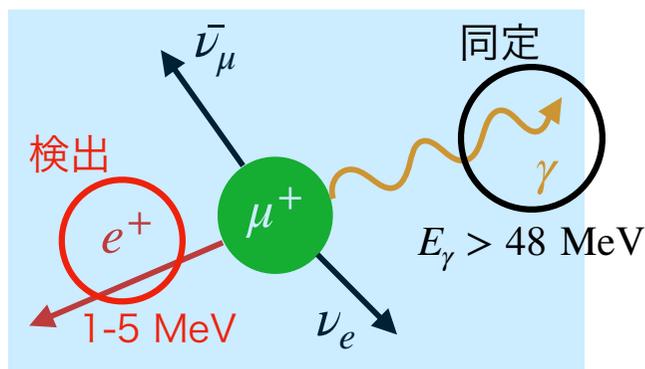
背景ガンマ線削減



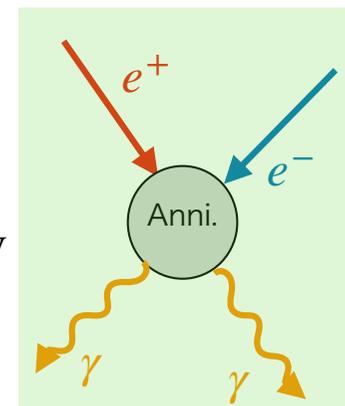
48 MeV以上の背景ガンマ線発生源



輻射崩壊を積極的に同定する
 検出器を導入する
 → 輻射崩壊同定用検出器 (RDC)

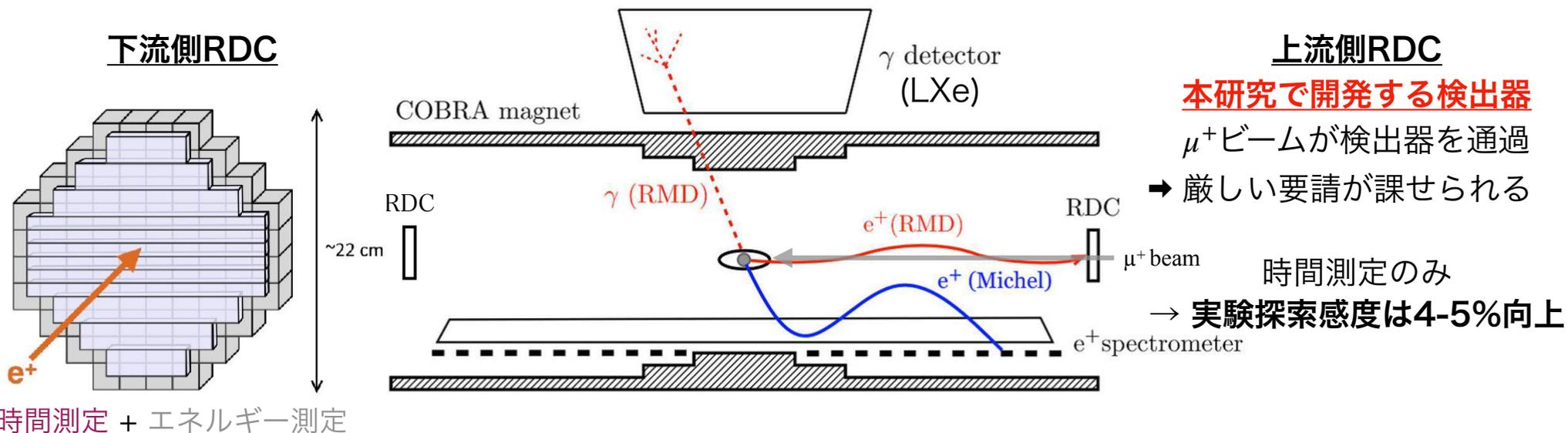


輻射崩壊 (RMD)

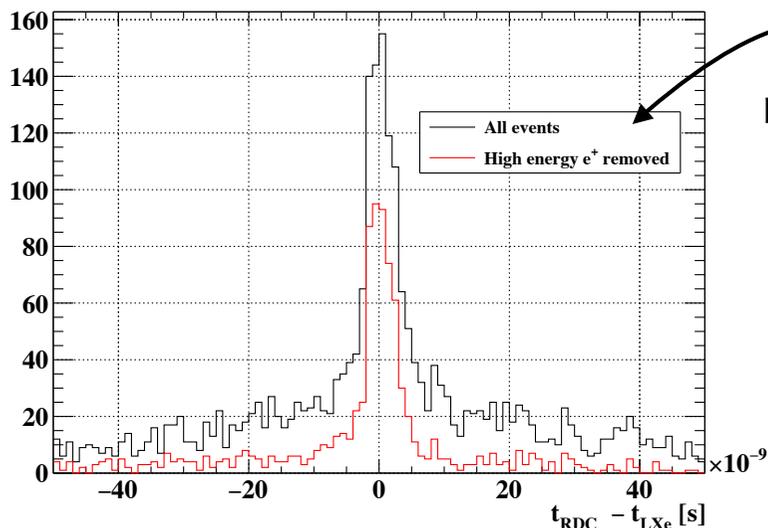


e^+ 飛行中の対消滅 (AIF)

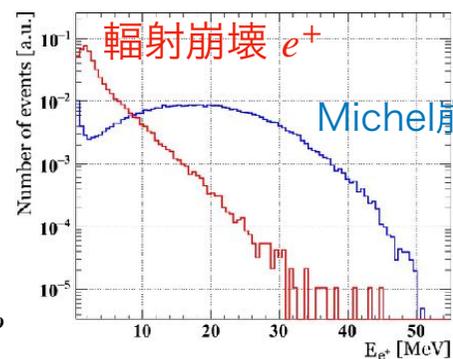
輻射崩壊同定用検出器 (RDC)



下流側RDCでの陽電子検出とLXeでのガンマ線検出の時間差



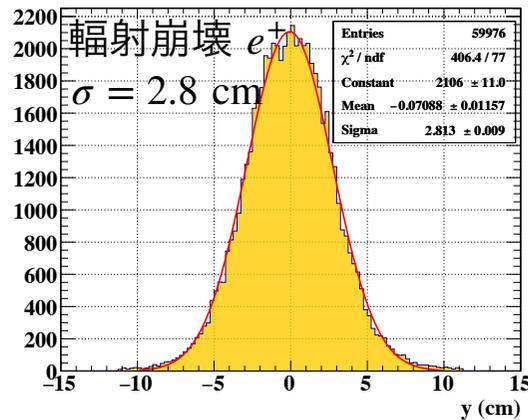
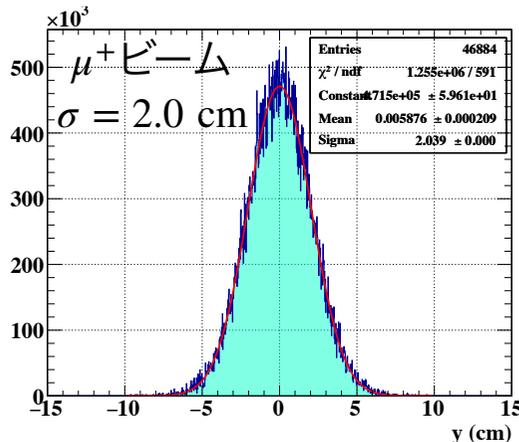
RDCの位置での陽電子のエネルギー



下流側RDCは開発・設置が完了
 同定能力もすでに実証
 → 実験探索感度は8%向上

上流側RDCへの要請

- 高レートの μ^+ ビームが検出器を通過する



- 上流側RDCへの要請

✓ (1) 0.1% X_0 以下の物質質量

★ (2) $1 \times 10^8 \mu^+/\text{s}$ (中心で4 MHz/cm²)へのレート耐性

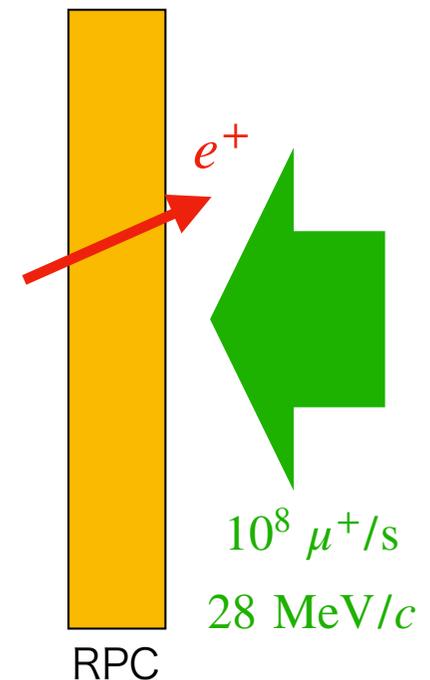
(3) 高レートミュオン環境下で60週間以上の放射線耐性

✓ (4) 90%以上の陽電子検出効率

✓ (5) 1 nsの時間分解能

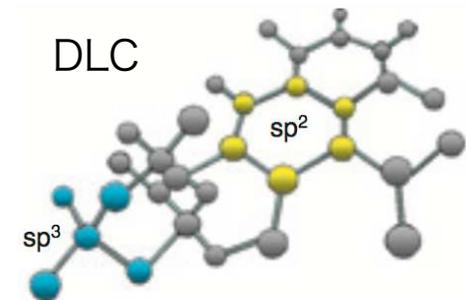
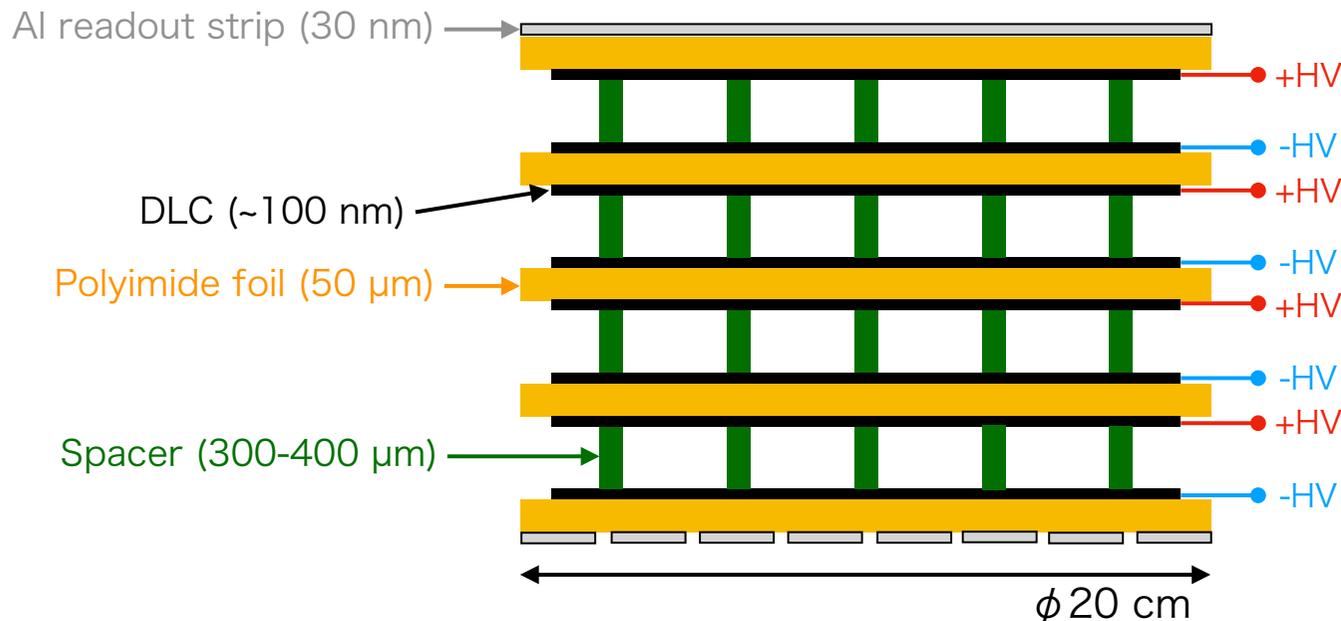
★ (6) 直径20 cmの検出器サイズ

→ Diamond-Like Carbonを高抵抗電極に用いたResistive Plate Chamber



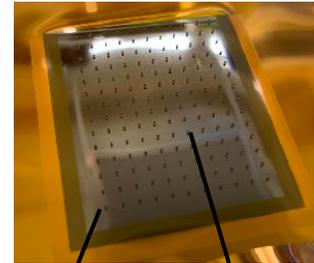
RPC with DLC

- RPCの高抵抗電極にDLCを用いる
 - 超低物質質量を実現
 - 高レート耐性に貢献
(低い表面抵抗率・抵抗率の調整可能)
- 4層に積層し、検出効率を改善
 - $\epsilon_n = 1 - (1 - \epsilon_1)^n$
 - 物質質量の制限 (0.1% X_0) も満たす

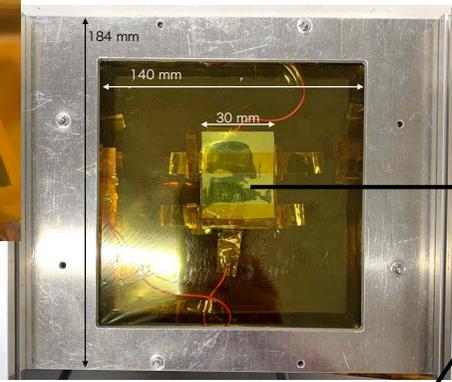


	物質質量
ポリイミド 50 μm	0.0175% X_0 [50]
アルミニウム 30 nm	0.0034% X_0 [50]
ガス 2 mm	~0.001% X_0

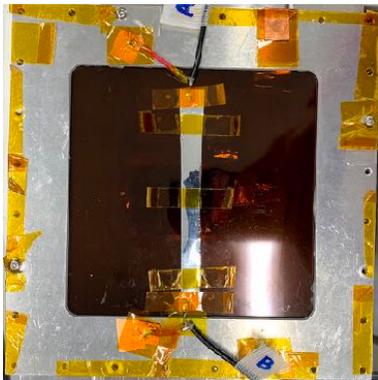
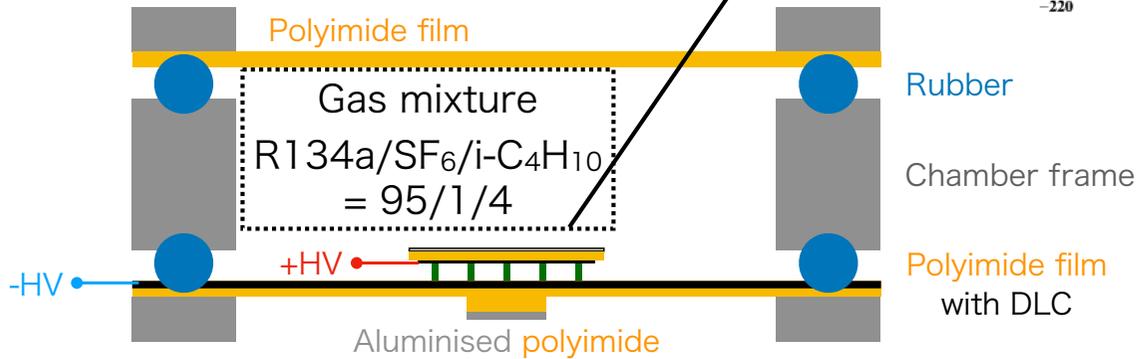
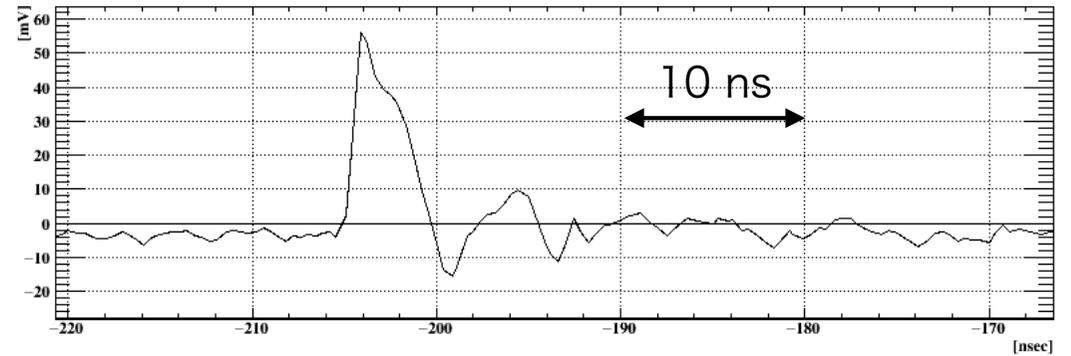
プロトタイプ検出器



スペーサー (384 μm)
DLC



3 cm角の
高抵抗電極



アンプ
(38 dB)

波形デジタイザー (DRS4)
(700 MHz, 1.6/2.5 GSPS)

RPCのレート耐性

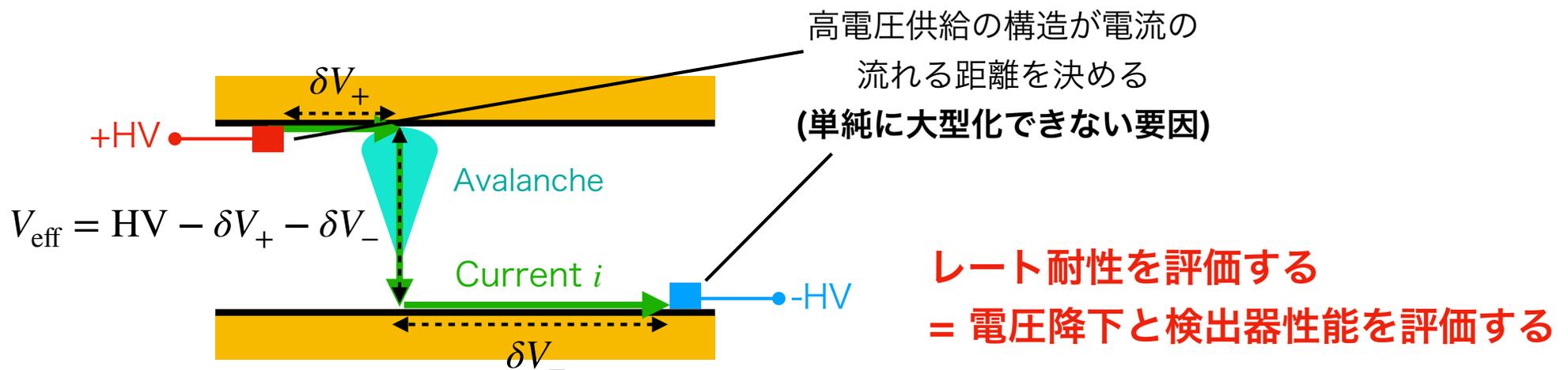
- 高レート環境下では信号電荷による大電流によって電圧降下 δV が生じる

- 表面型RPCの場合: $\nabla^2 \delta V(x, y) = Q_{\text{mean}}(V_{\text{eff}}) \cdot f(x, y) \cdot \rho_S$

- Q_{mean} : アバランシェの平均電荷量
- $f(x, y)$: 粒子のヒットレート
- ρ_S : 高抵抗電極の表面抵抗率

→ 実効的な動作電圧 V_{eff} が減少する

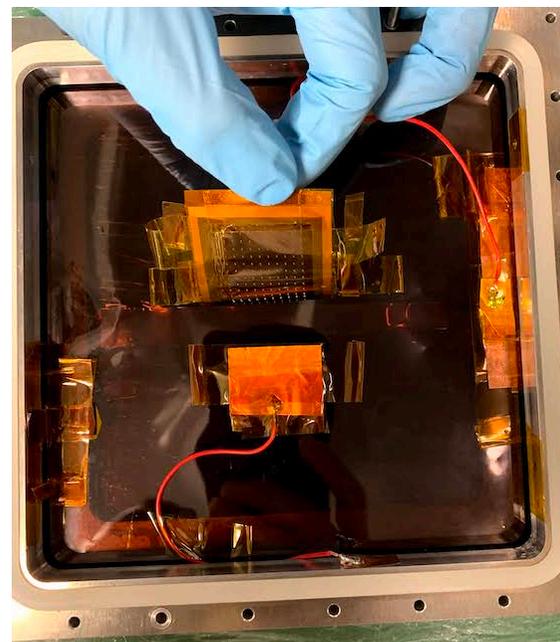
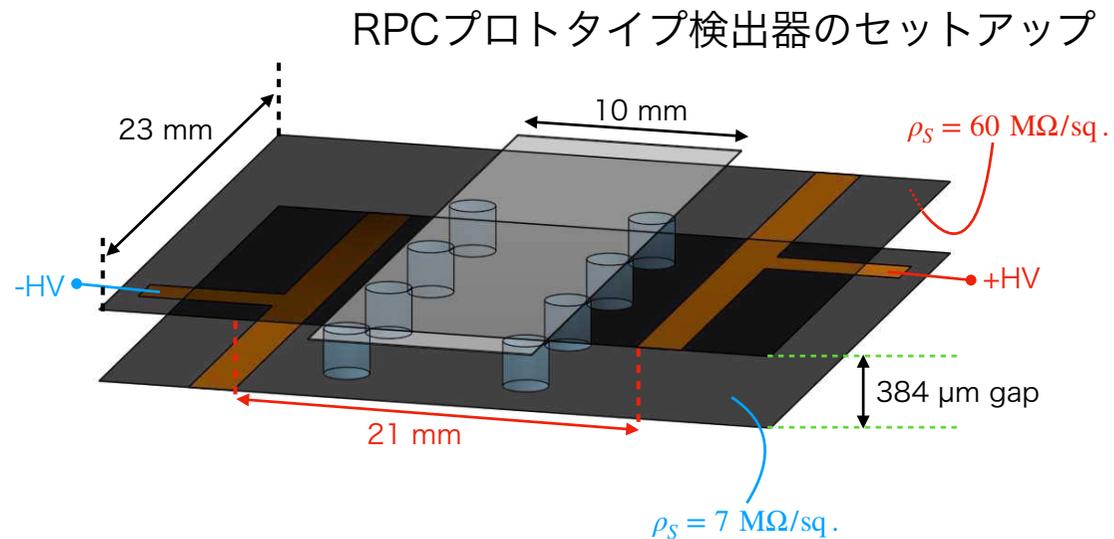
→ ガスゲインが小さくなり、検出器性能が悪化する



Outline

- Introduction
- 本研究内容
 - プロトタイプ検出器のレート耐性の評価
 - 高抵抗電極の改良
 - RPC実機的设计
- 結論

ミューオンビーム照射試験



レート耐性の評価方法

波高分布を比較することによる評価

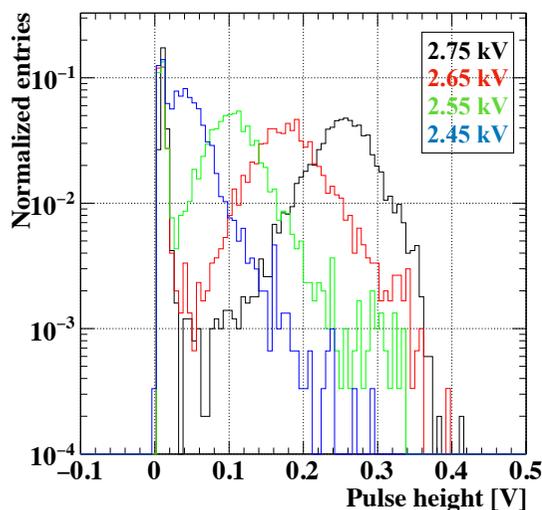
- 低レート環境下でRPCへの印加電圧を変えながら、 μ^+ とMIP e^+ に対する波高分布を取得
- 高レートミュオンビーム環境下でMIP e^+ に対する波高分布を測定
- 波高分布を比較することで、電圧降下の大きさを評価

$$\nabla^2 \delta V(x, y) = \frac{Q_{\text{mean}}(V_{\text{eff}}) \cdot f(x, y) \cdot \rho_S}{\epsilon_0}$$

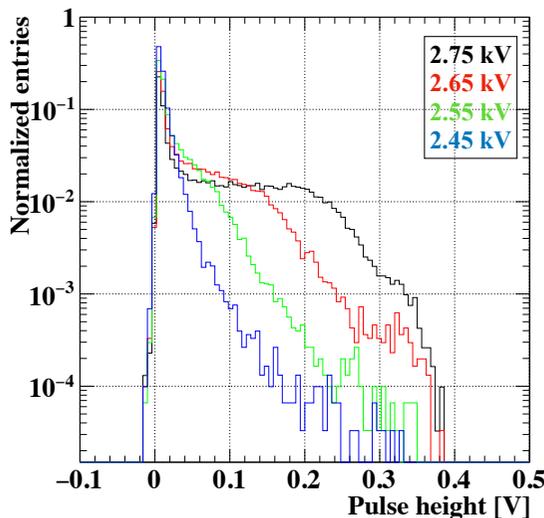
の式を用いた評価

- 低レート環境下でRPCへの印加電圧を変えながら、 μ^+ の平均電荷量を取得
- 高レート環境下での電圧降下から平均電荷量を推定
 - (測定される電流値とも比較)
- 測定されたビーム分布とそのレート、DLCの表面抵抗率から、電圧降下を見積もる

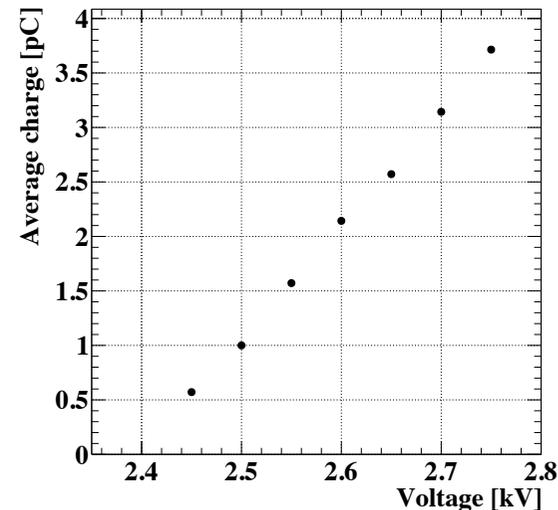
低レート環境下での μ^+ の波高分布



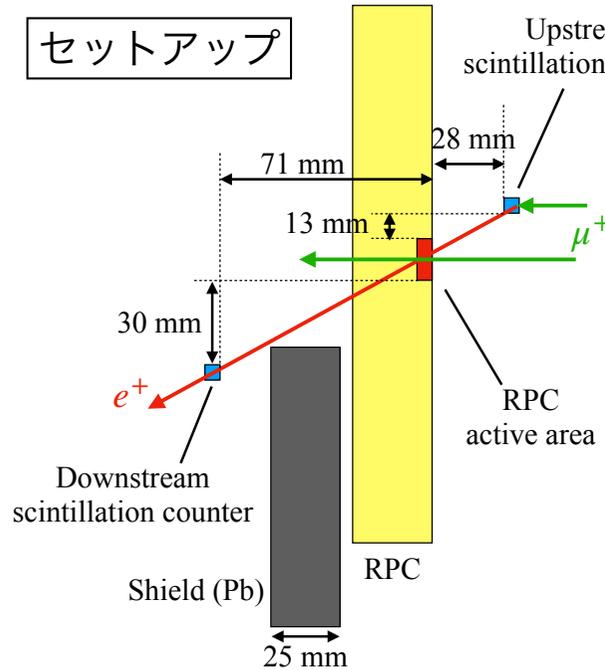
低レート環境下でのMIP e^+ の波高分布



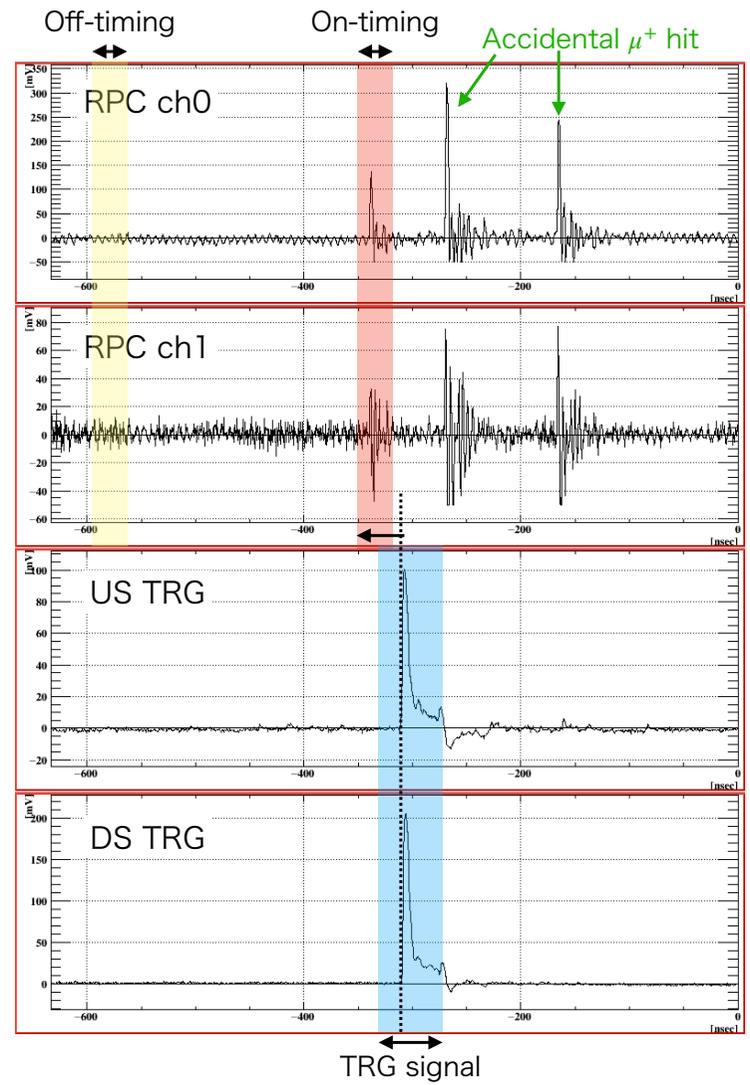
μ^+ の平均電荷量の動作電圧依存性



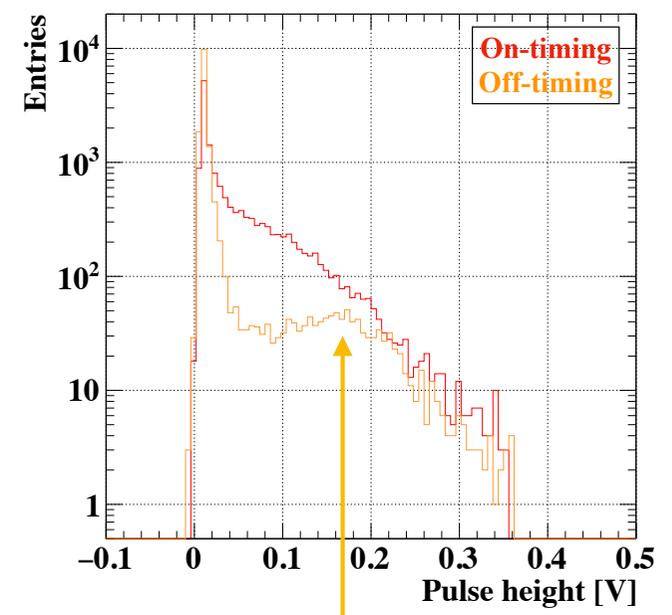
高レート環境下 e^+ 測定



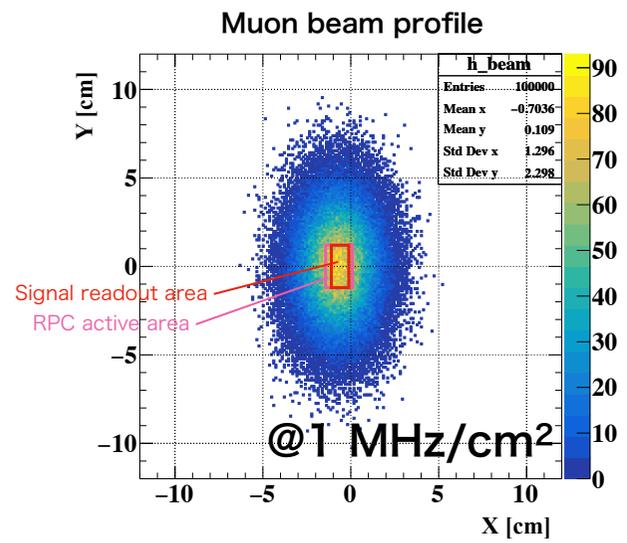
取得された波形の例



波高分布 @2.75 kV

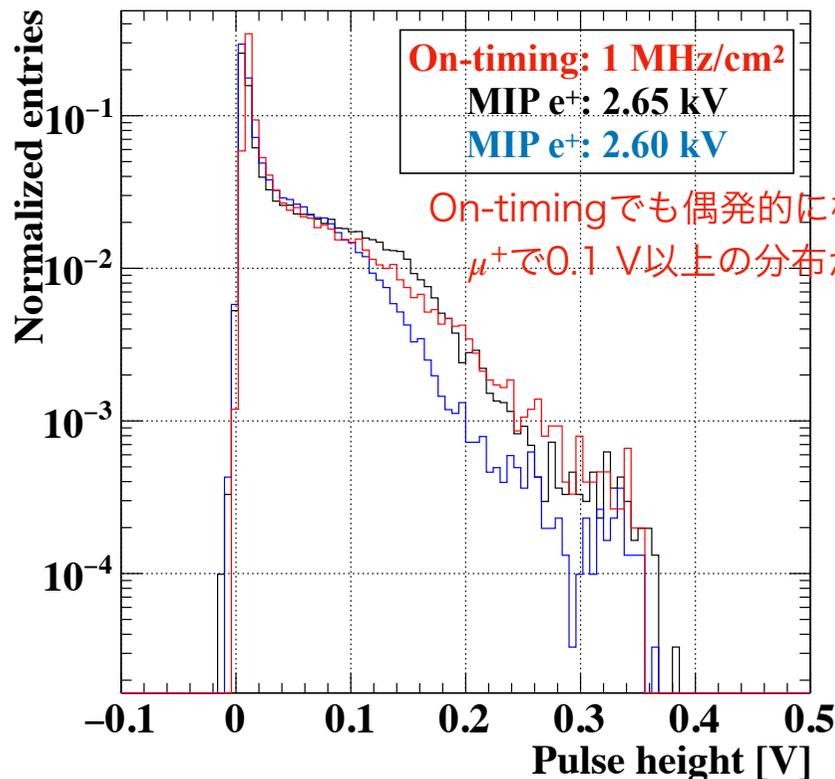


偶発的なミュオン
ヒットによるピーク

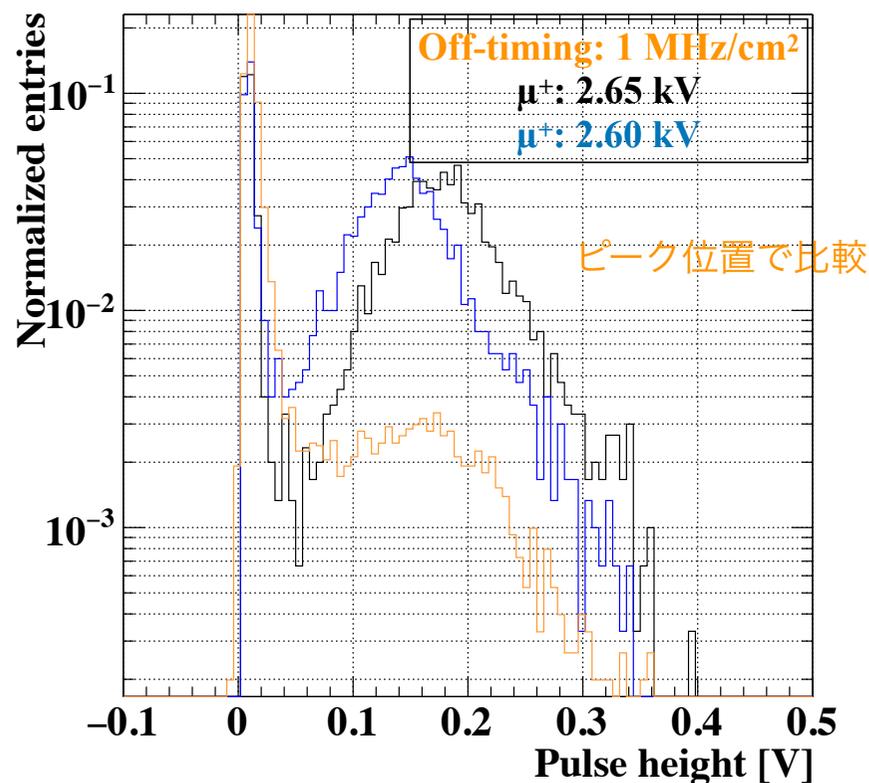


波高分布の比較によるレート耐性の評価

On-timingでの波高分布 @2.75 kV



Off-timingでの波高分布 @2.75 kV



- 100-150 Vの電圧降下
- 単層で50%の陽電子検出効率
 - (4層に積層して90%以上を達成見込み)

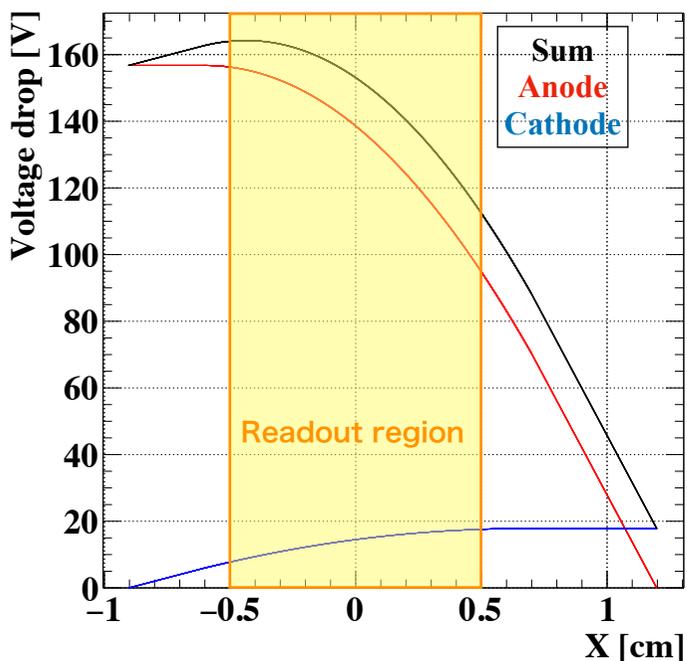


**プロトタイプ検出器は
1 MHz/cm²のレート耐性を有する**

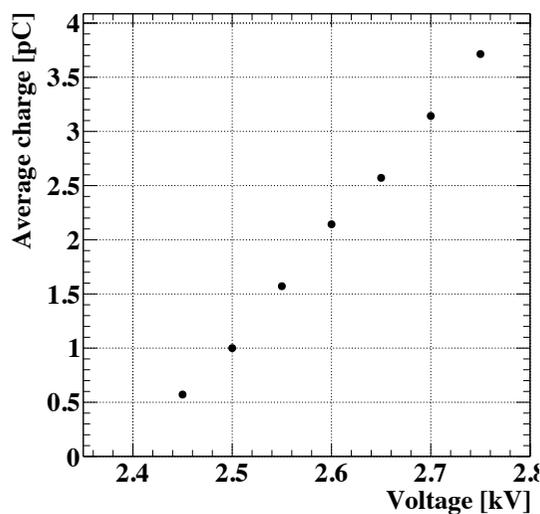
電圧降下の式によるレート耐性の評価

$$\nabla^2 \delta V(x, y) = Q_{\text{mean}}(V_{\text{eff}}) \cdot f(x, y) \cdot \rho_S$$

見積もられる電圧降下



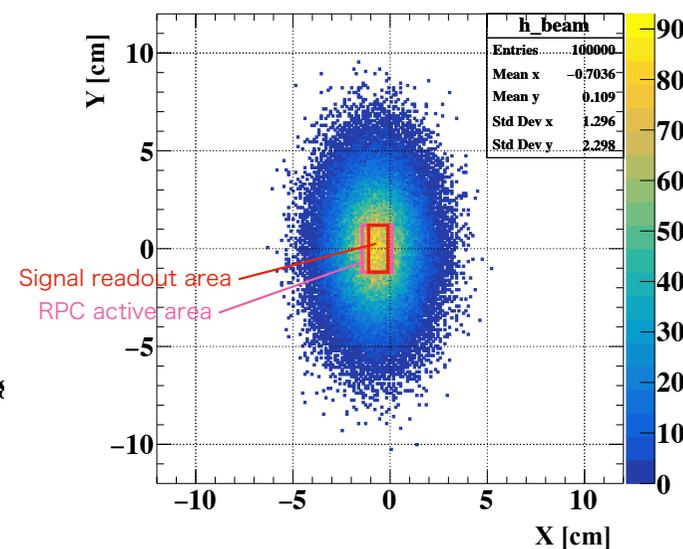
μ^+ の平均電荷量の動作電圧依存性



DLCの表面抵抗率

- Anode: 60 MΩ/sq
- Cathode: 7 MΩ/sq

ビーム試験における μ^+ ビーム分布



110-170 Vの電圧降下が見積もられる

→ 波高分布から評価される電圧降下と~10%で一致

高抵抗電極の改良

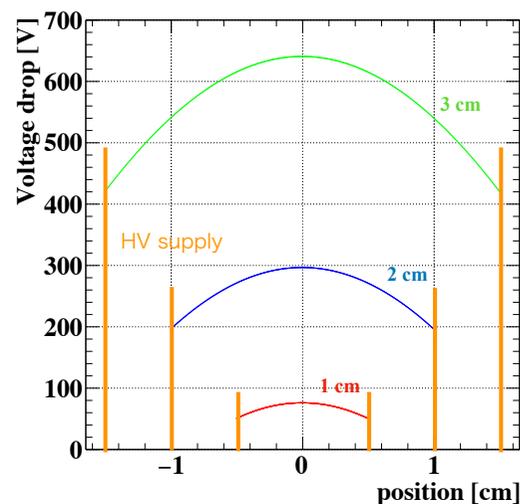
	プロトタイプ 検出器	実機
レート耐性	1 MHz/cm ²	4 MHz/cm ²
検出器サイズ	2 cm角	直径20 cm

上流側RDCの要請を満たすために
高抵抗電極の改良が必要

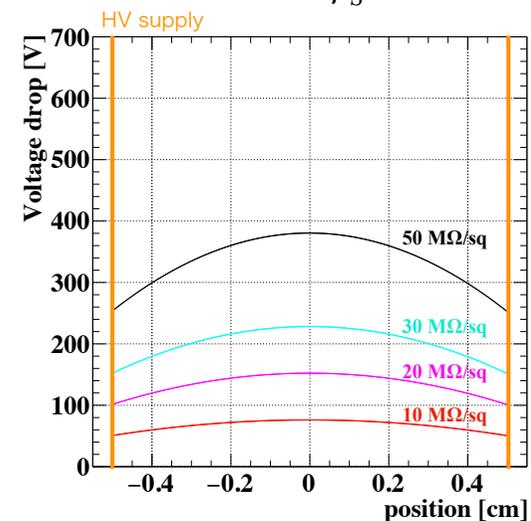
高抵抗電極の改良点

- ・ 導電ストリップを実装する
 - ・ 電流が流れる距離を短くする (1 cm)
 - ・ DLCの表面抵抗率を精度良く
コントロールする (10 MΩ/sq)
 - ・ 放電を抑えて安定運転
 - ・ 抵抗値を抑える
- 電圧降下を100 V以下に抑える
→ 実機性能を達成する見込み

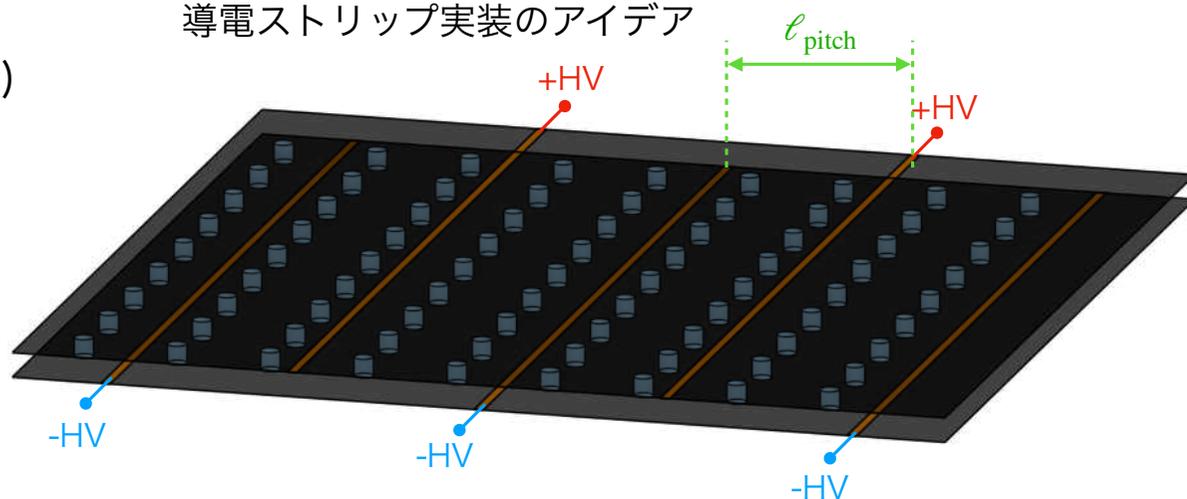
電圧降下の ℓ_{pitch} 依存性



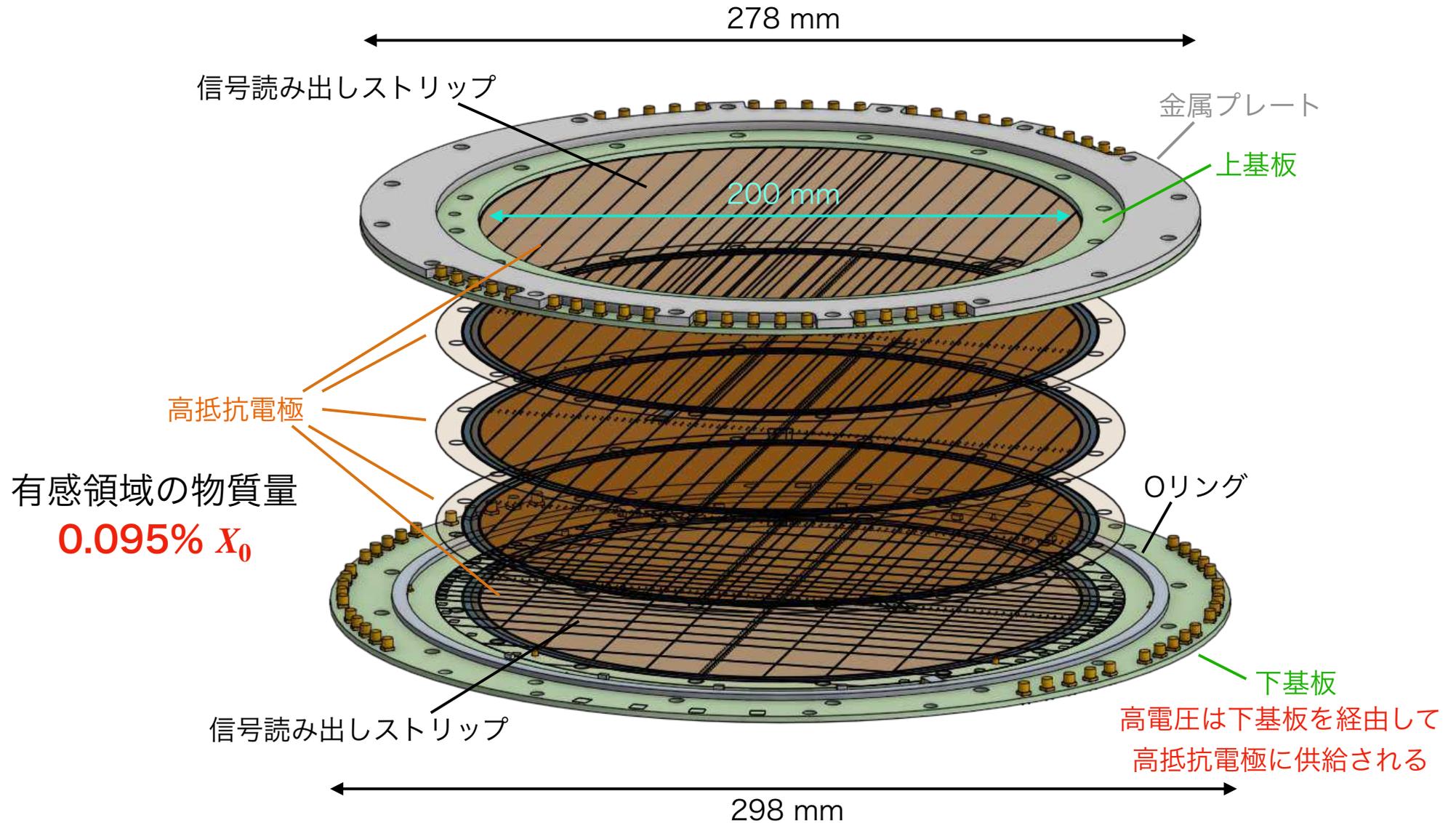
電圧降下の ρ_s 依存性



導電ストリップ実装のアイデア



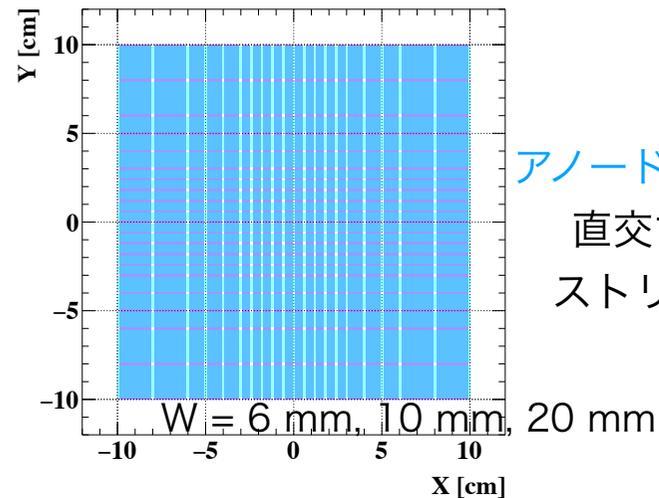
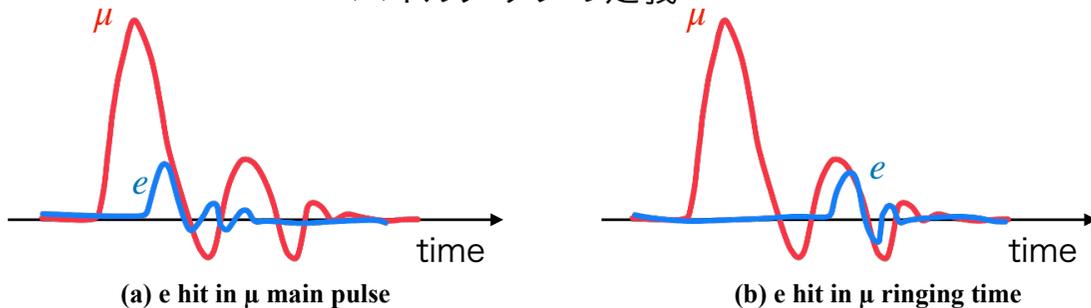
RPC実機的设计



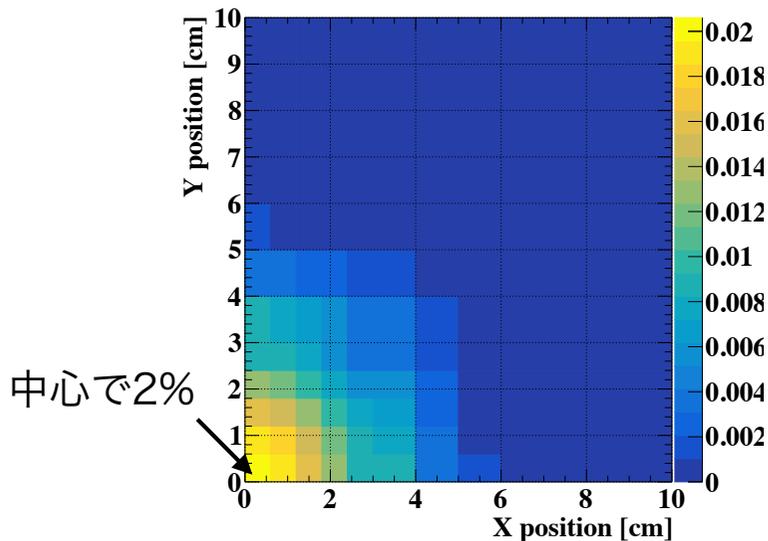
信号読み出し構造

ビーム μ^+ と検出したい e^+ のパイルアップを抑えた信号読み出し構造

パイルアップの定義

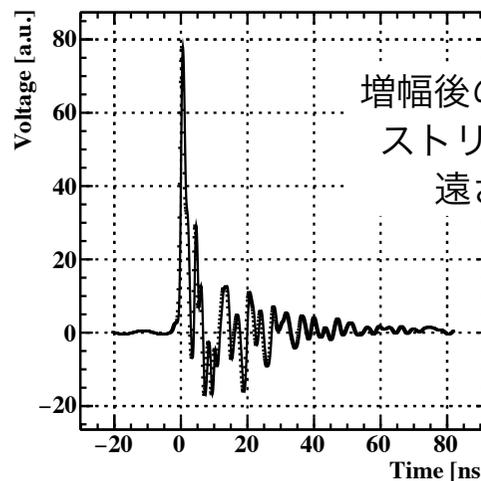


リングングを十分に抑制できた場合のセルごとのパイルアップ確率

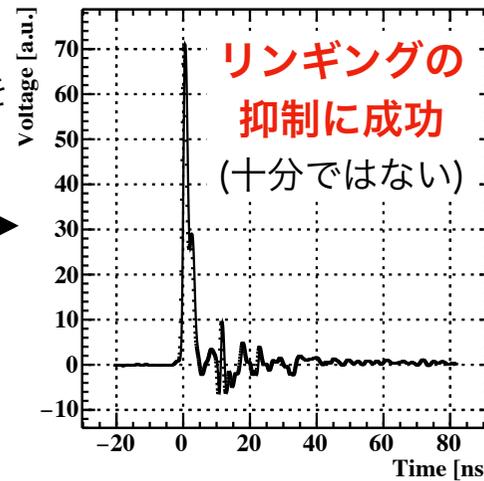


全体で0.83%を達成見込み (<1%)

リングング対策前の平均波形



リングング対策後の平均波形



Outline

- Introduction
- 本研究内容
- 結論
 - 結論
 - 今後の展望

結論

- MEG II実験の背景事象削減のために超低物質質量・高レート耐性のRPCを開発
 - μ^+ ビームが通過するため厳しい要請が課せられている
 - レート耐性(4 MHz/cm²)と検出器の大型化(ϕ 20 cm)に着目
- 2 cm角のプロトタイプ検出器が1 MHz/cm²のレート耐性を有していることを示した
 - 100-150 Vの電圧降下
 - 単層で50%の検出効率
- 高抵抗電極の改良を行い要求性能を達成する見込みである
 - 1 cm間隔で導電ストリップを実装
 - DLCの表面抵抗率を10 M Ω /sqに精度良くコントロール
- 実機の詳細な設計を行い、建設に向けて前進した

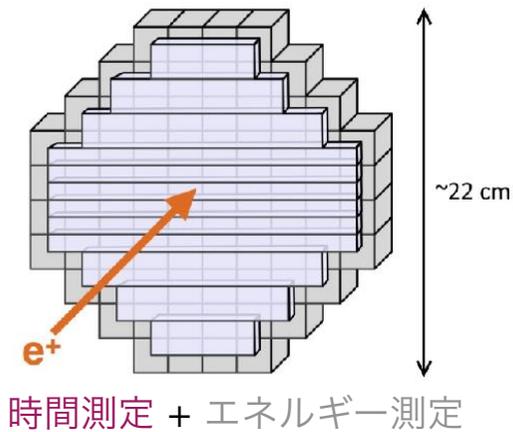
今後の展望

- 改良した高抵抗電極の製作
 - この電極を用いたRPCの動作試験・性能評価
 - 上流側RDCの要求性能を満たすことを実証する
- 放射線耐性のスタディ
- MEG II実験へのインストール
 - 実機の建設
 - RPCが μ^+ ビームに与える影響を評価
 - ソフトウェア開発 (ヒット再構成、輻射崩壊同定)
 - 実機の性能評価と探索感度向上の寄与の見積もり
- 2023年物理ランからの導入を目指す

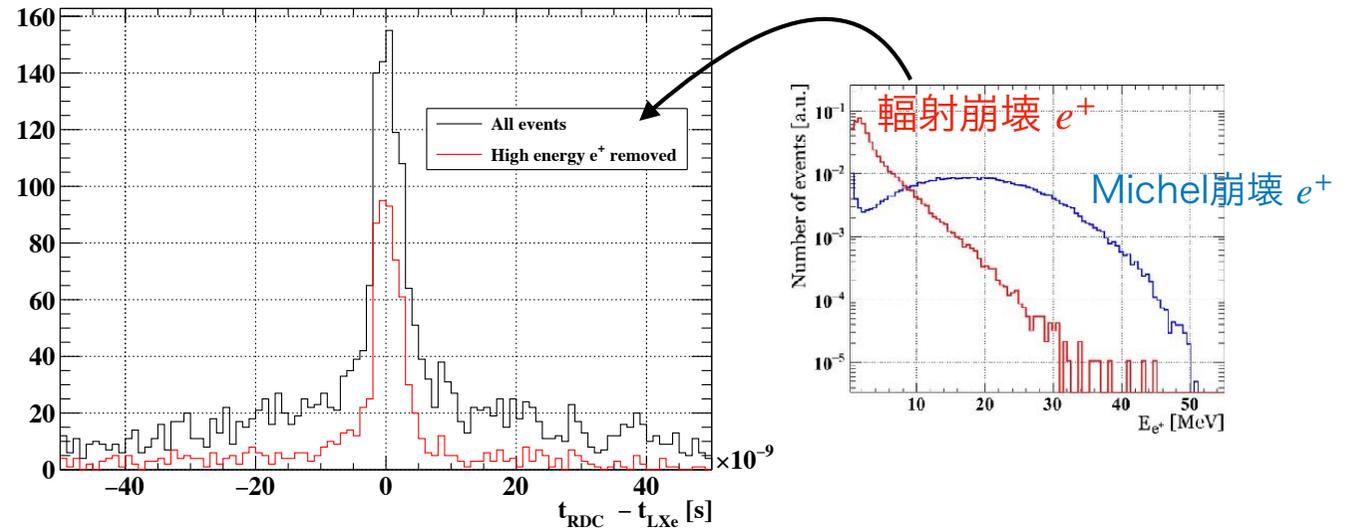
Backup

下流側RDC

下流側RDC



下流側RDCでの陽電子検出とLXeでのガンマ線検出の時間差



LXeで検出された48 MeV以上の
ガンマ線のうち26.6(4)%を同定

$$f_{\text{RMD}} = \frac{N_{\text{RMD}}}{N_{\gamma}}$$

$$N_{\text{RMD}} = N_{\text{on-timing}} - N_{\text{off-timing}} \times \frac{N_{\text{BG}}(t_{\text{min, on-timing}}, t_{\text{max, on-timing}})}{N_{\text{BG}}(t_{\text{min, off-timing}}, t_{\text{max, off-timing}})}$$

$$N_{\text{BG}}(t_{\text{min}}, t_{\text{max}}) = A \times \int_{t_{\text{min}}}^{t_{\text{max}}} e^{-2R_{\text{acc}}|t|} dt,$$

Contribution to MEG II

- Sensitivity improvement

Preliminary results by Rina

Table 7.1 Parameters for sensitivity calculation as the nominal setting.

Variables	Values	
	$7 \times 10^7 \mu^+ \text{ stops/s}$	$3.5 \times 10^7 \mu^+ \text{ stops/s}$
$\sigma_{p_{e^+}}$	100 keV/c	90 keV/c
$\sigma_{\theta_{e^+}}$	6.7 mrad	6.2 mrad
$\sigma_{\phi_{e^+}}$	4.9 mrad	4.7 mrad
σ_{E_γ}	1.7%	
σ_{w_γ}	2.5–8.1 mm (for different w_γ)	
σ_{v_γ}	2.5–7.4 mm (for different w_γ)	
σ_{w_γ}	2.4–13.9 mm (for different w_γ)	
$\sigma_{t_{e^+\gamma}}$	70 ps	68 ps
ϵ_{e^+}	65%	74%
ϵ_γ	69%	
k	9.38×10^{13} (for three years)	5.34×10^{13} (for three years)

$7 \times 10^7 \mu^+ \text{ stops/s}$	No RDC	US RDC	DS RDC (T only)	DS RDC	Full RDC	Full RDC (disentangled)
Ratio	1	0.95	0.95	0.92	0.83	0.88
Improvement	0	5%	5%	8%	17%	12%

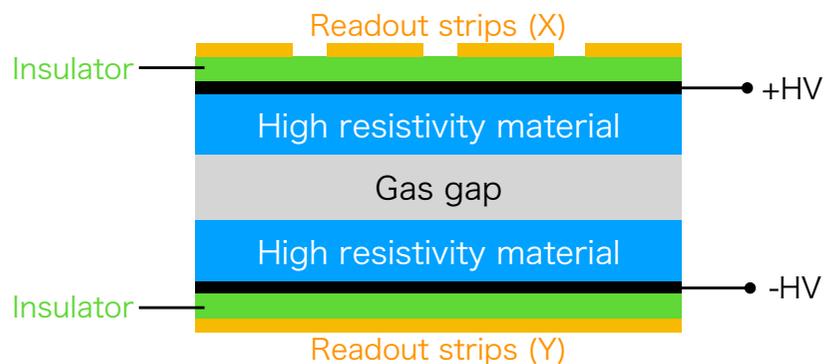
- Muon beam realtime monitoring

- ~100% detection efficiency for μ and high capability for μ ID
- Beam rate can be measured
- Profile can be measured every 6 mm cell

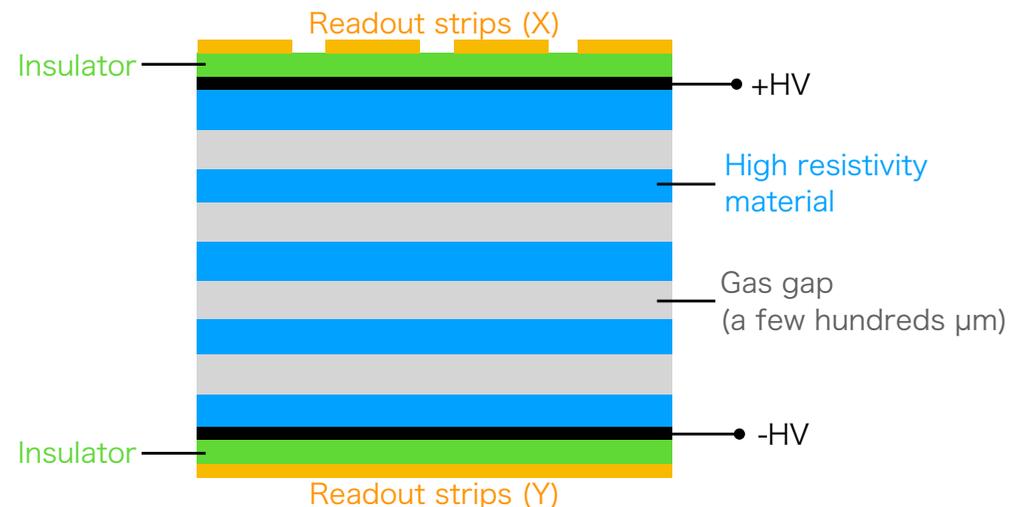
Synergy of both RDCs

Resistive Plate Chamber

- 高抵抗電極を向かい合うように配置したガス検出器
 - 高抵抗電極にはガラスが用いられることが多い

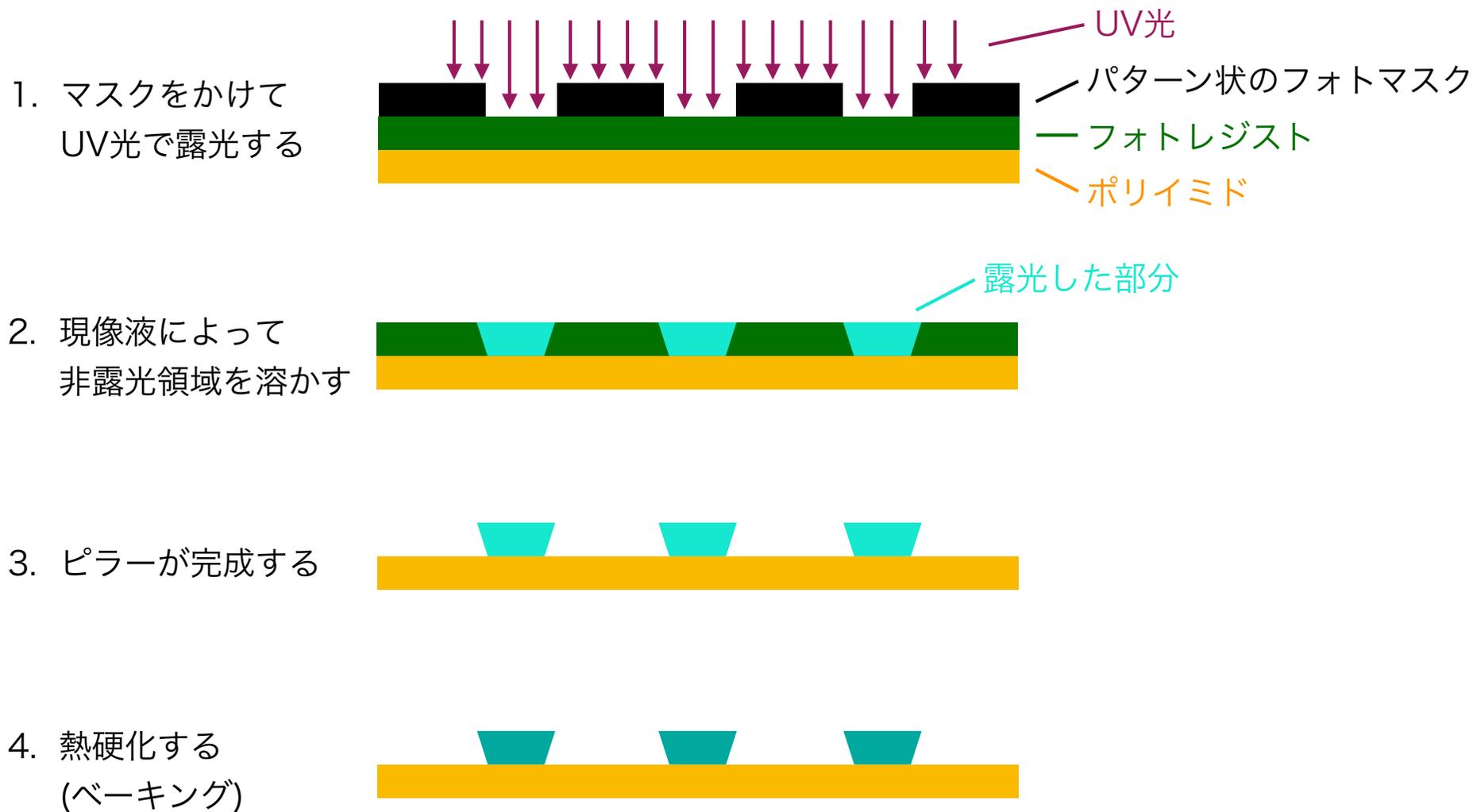


シングルギャップ型

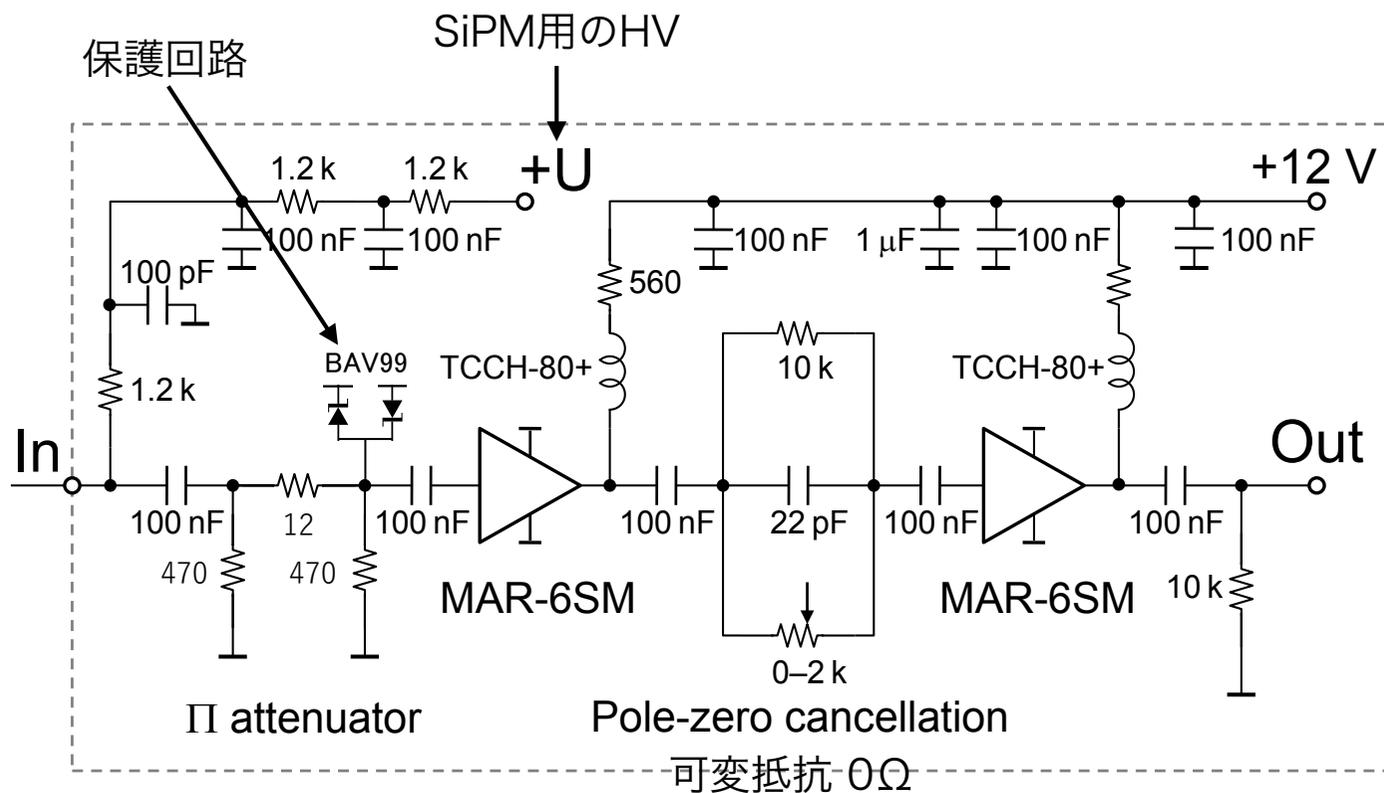


マルチギャップ型

フォトレジストの取り付け



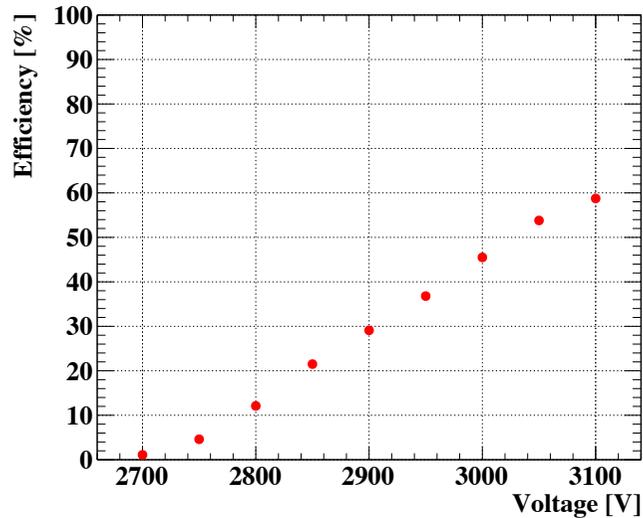
アンプ



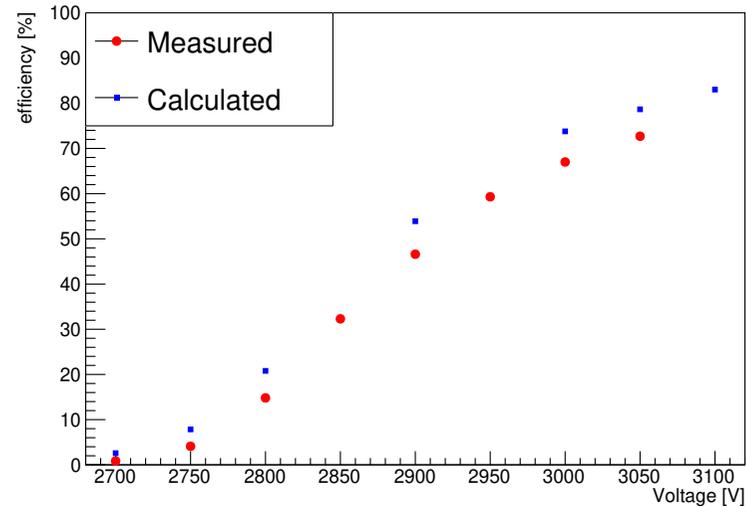
38 dB (80倍) の増幅器

先行研究における検出効率

384 micron - 1 layer

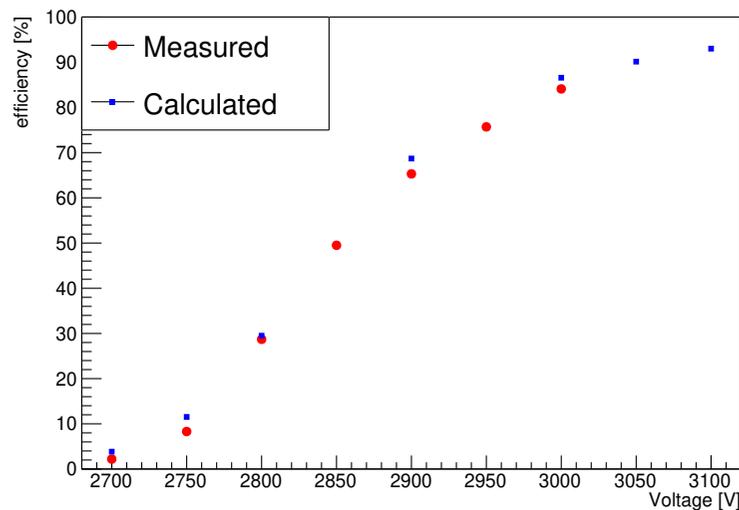


384 micron - 2 layer

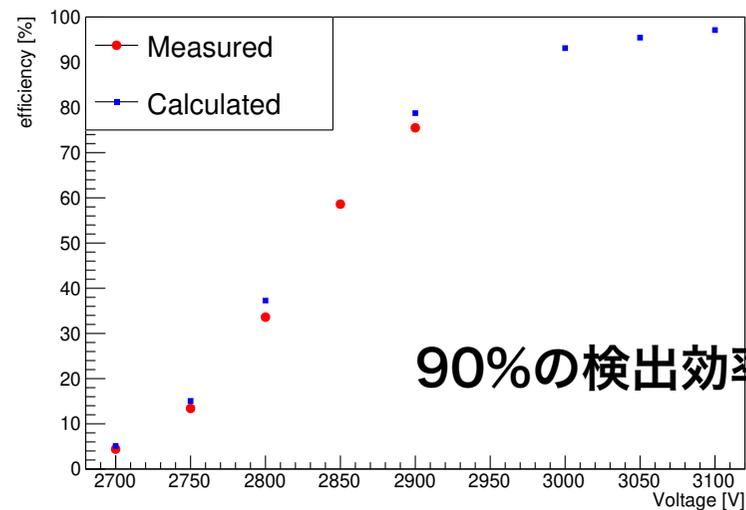


Calculated by
 $\epsilon_n = 1 - (1 - \epsilon_1)^n$

384 micron - 3 layer

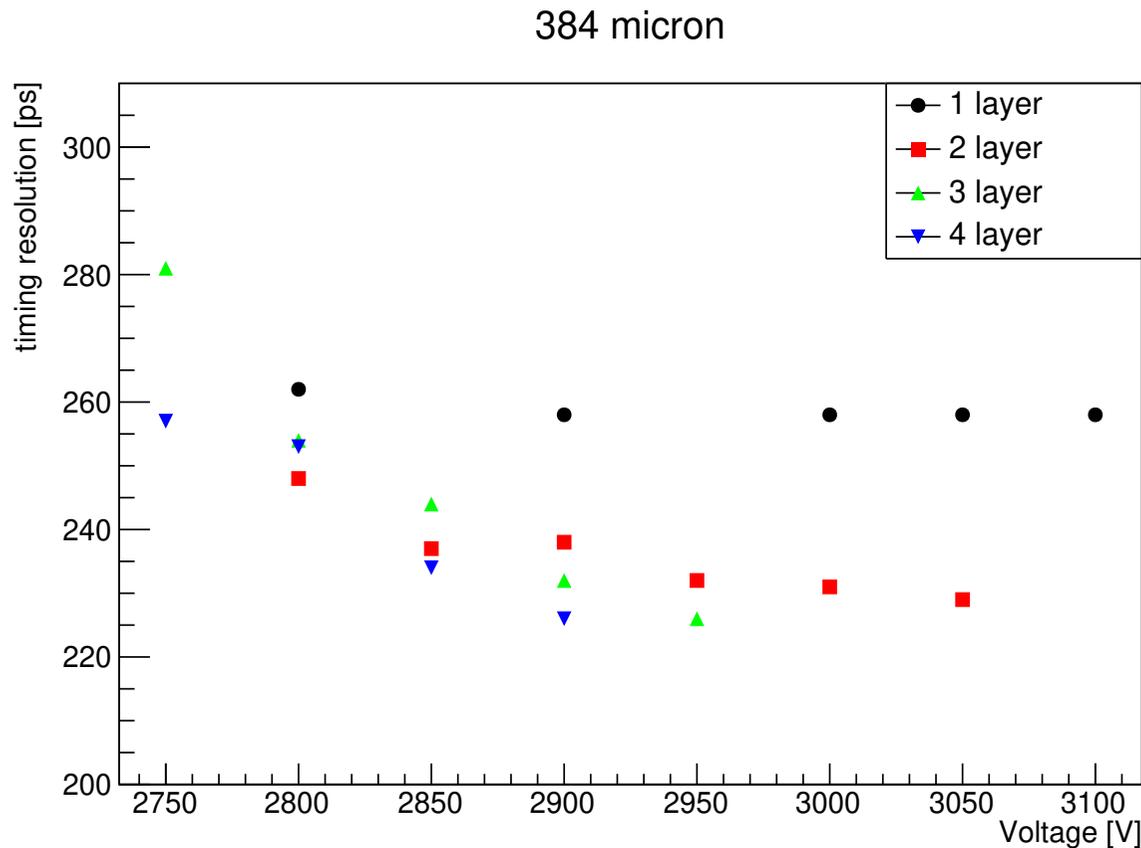


384 micron - 4 layer



90%の検出効率が達成見込み

先行研究における時間分解能

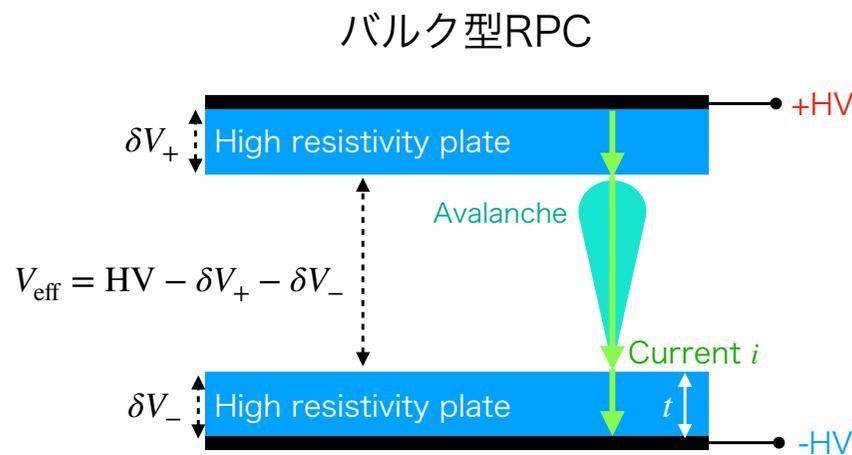


1 ns以下の時間分解能を達成
積層による分解能改善も確認

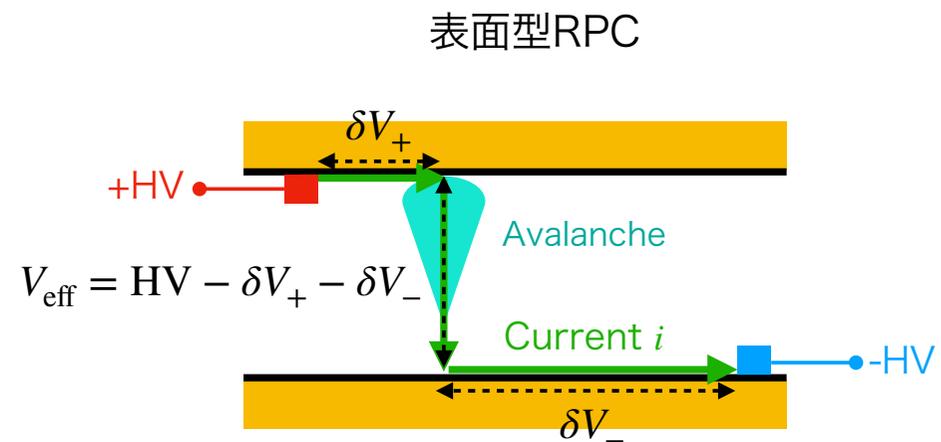
ただしリファレンスカウンタなどの測定系の寄与も含まれている

RPCのレート耐性

- 高レート環境下では信号電荷による大電流によって**電圧降下 δV** が生じる
- 実効的な動作電圧 V_{eff} が減少する
- ガスゲインが小さくなり、**検出器性能が悪化する**

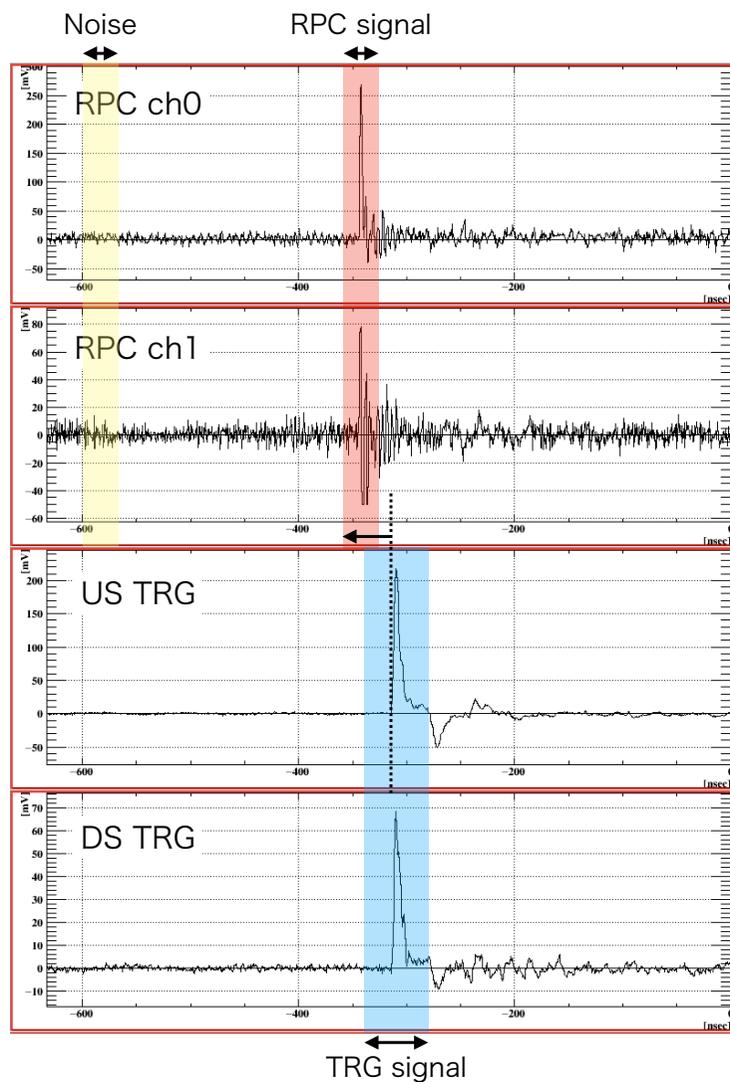
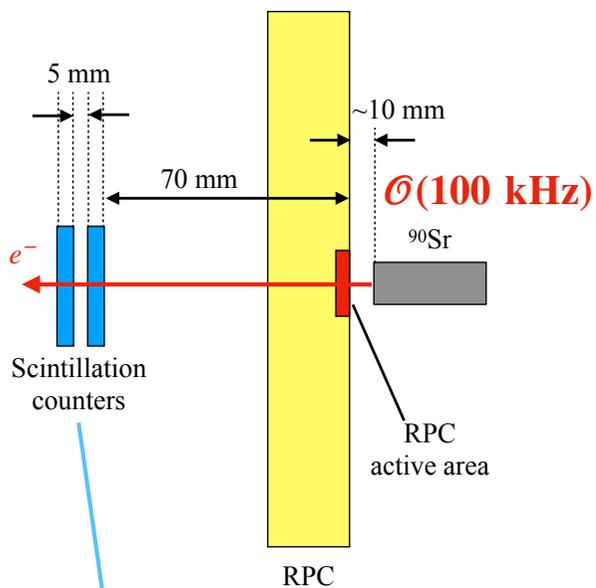


$$\delta V = Q_{\text{mean}}(V_{\text{eff}}) \cdot f(x, y) \cdot \rho_V \cdot t$$

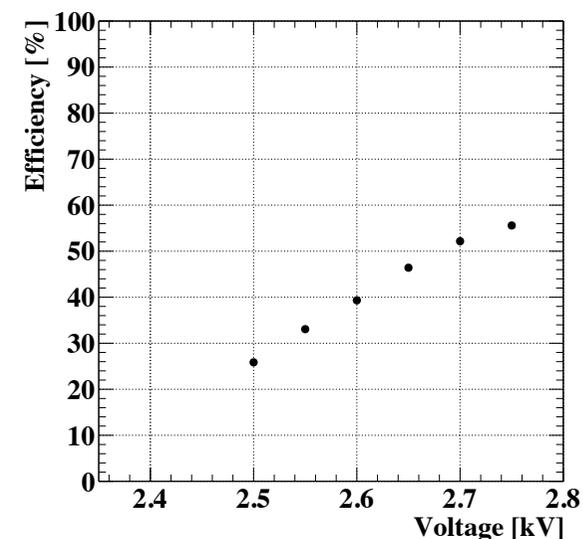


$$\nabla^2 \delta V(x, y) = Q_{\text{mean}}(V_{\text{eff}}) \cdot f(x, y) \cdot \rho_S$$

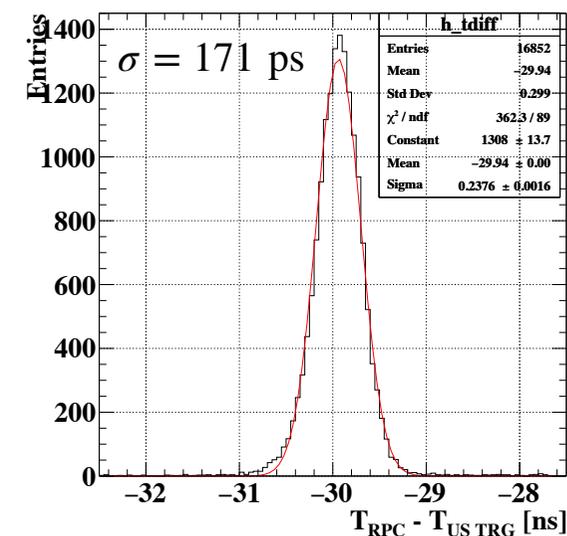
^{90}Sr 由来の β 線測定



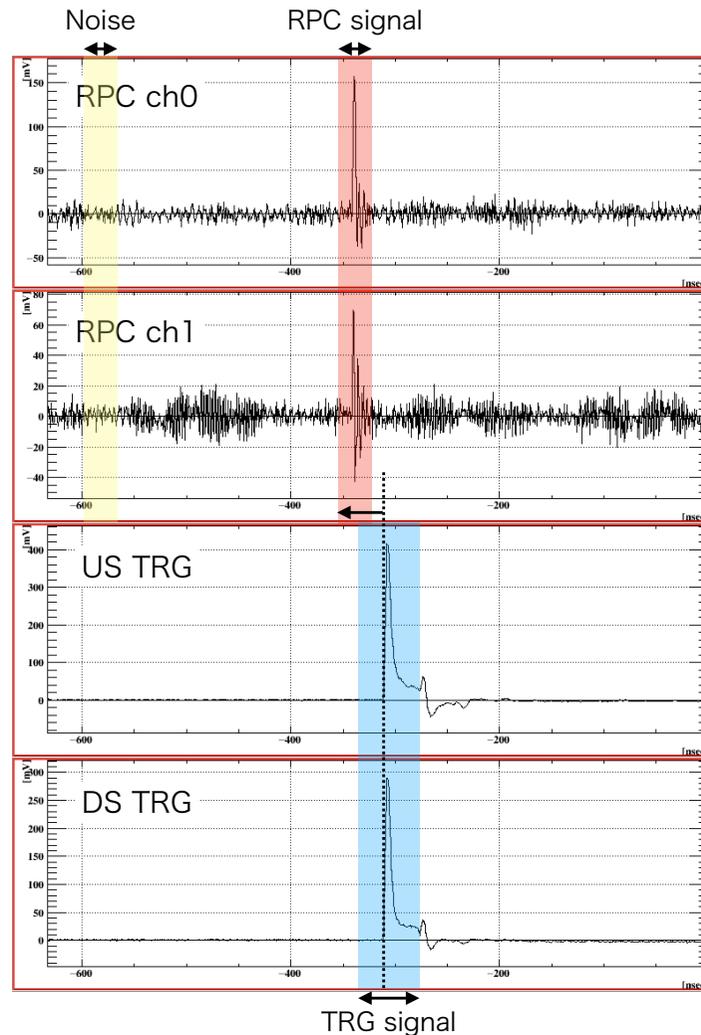
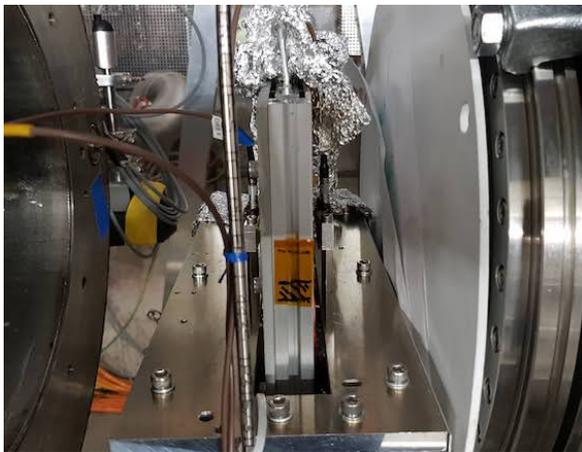
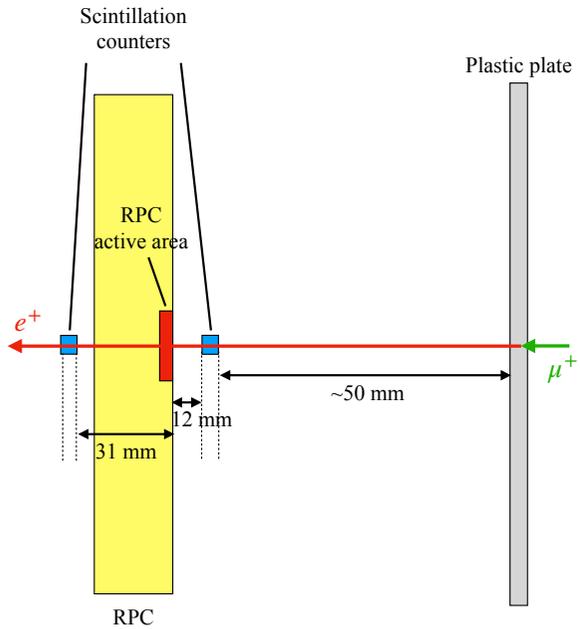
Efficiency vs voltage



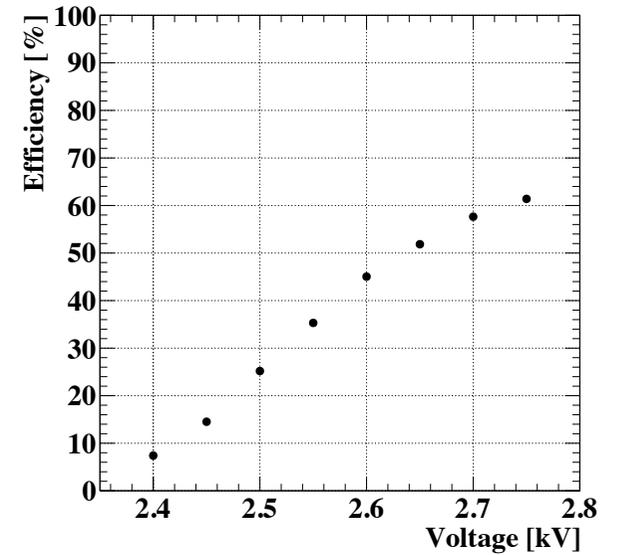
Time difference



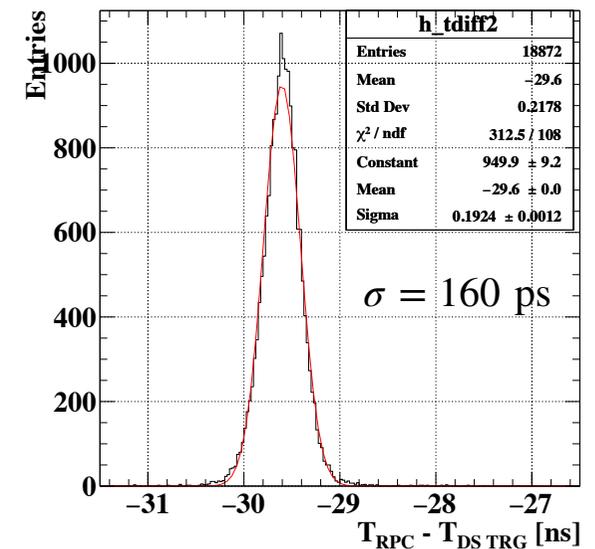
低レートMIP e^+ 測定



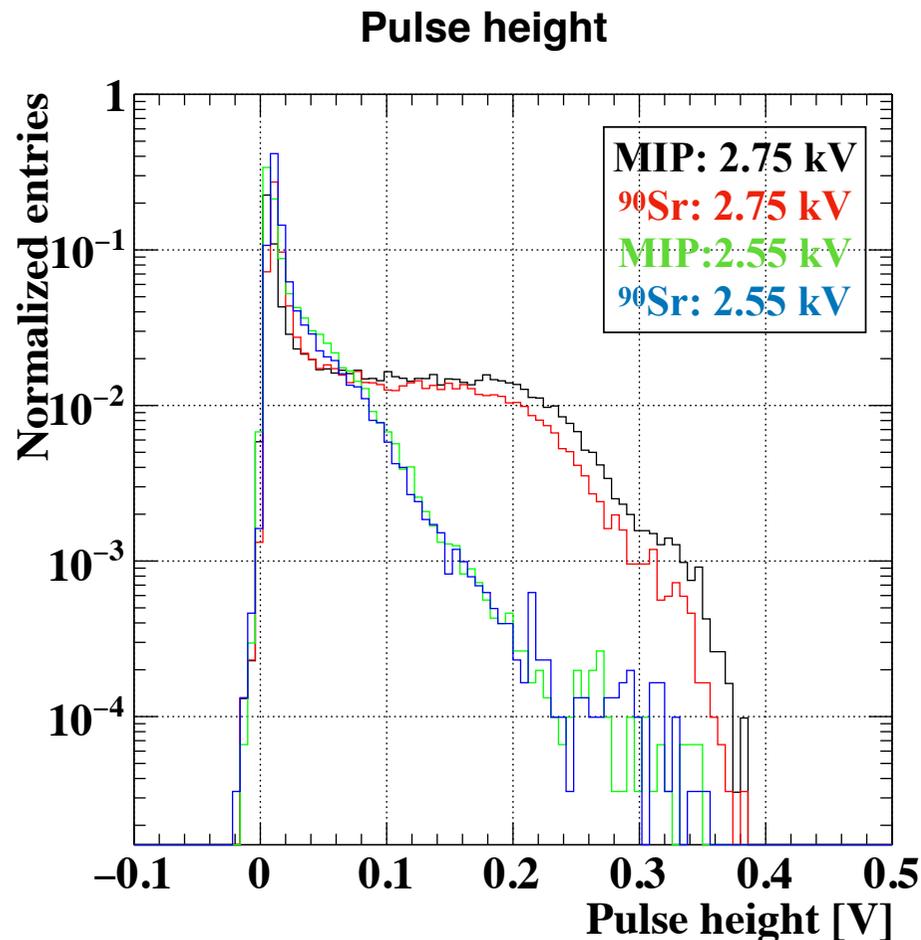
Efficiency vs voltage



Time difference

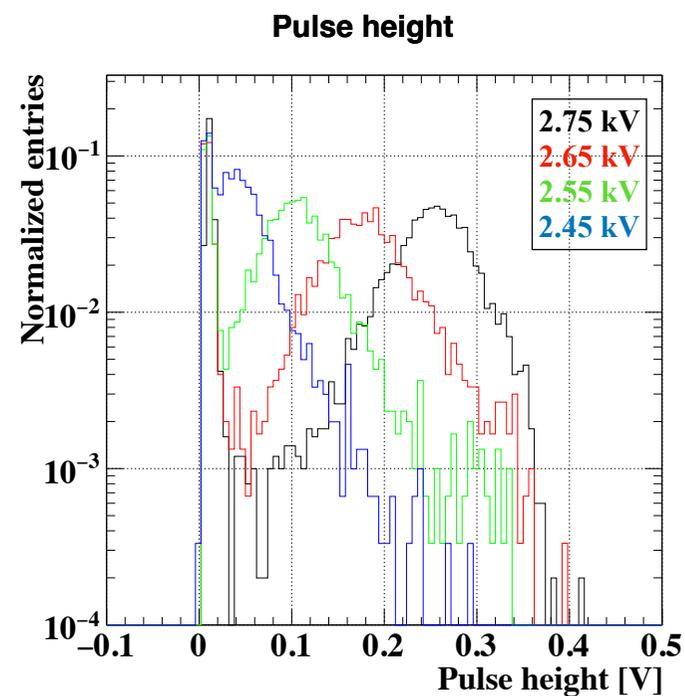
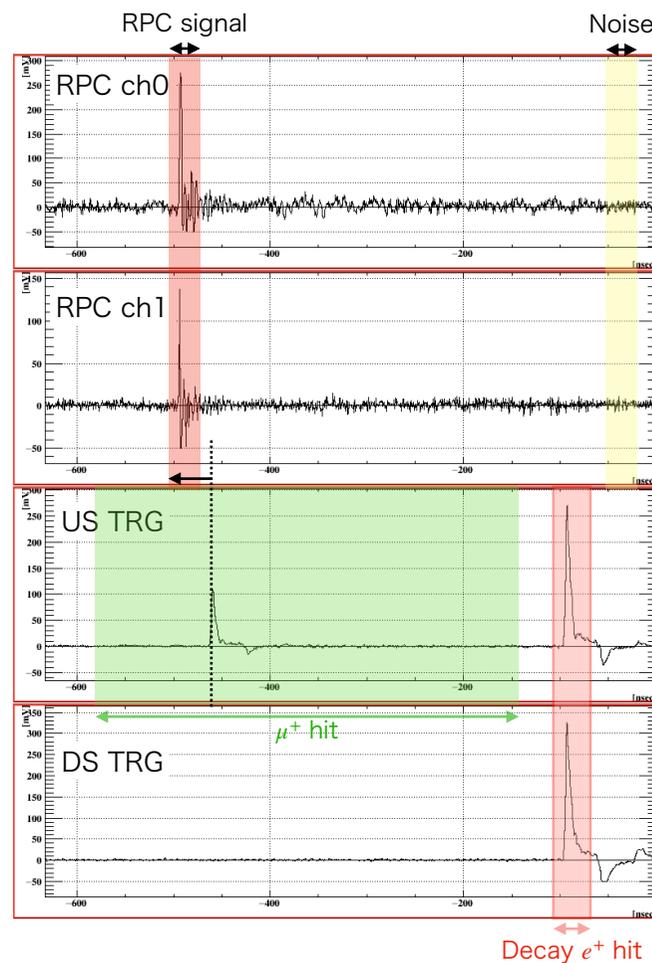
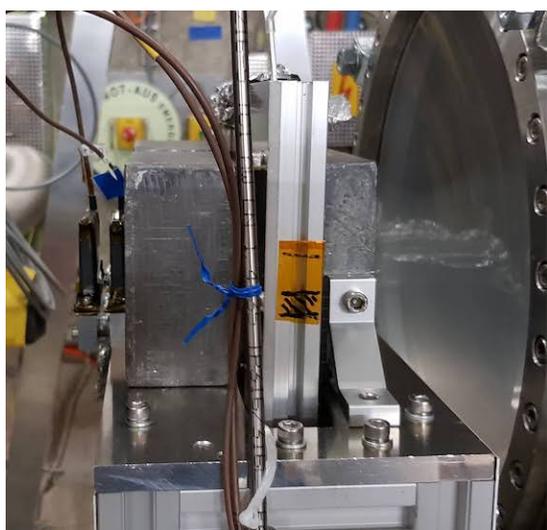
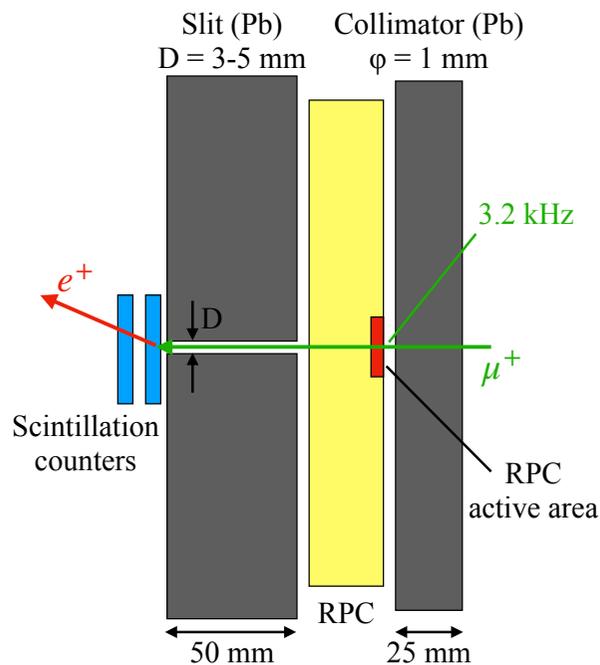


^{90}Sr 由来の β 線とMIP e^+ の比較



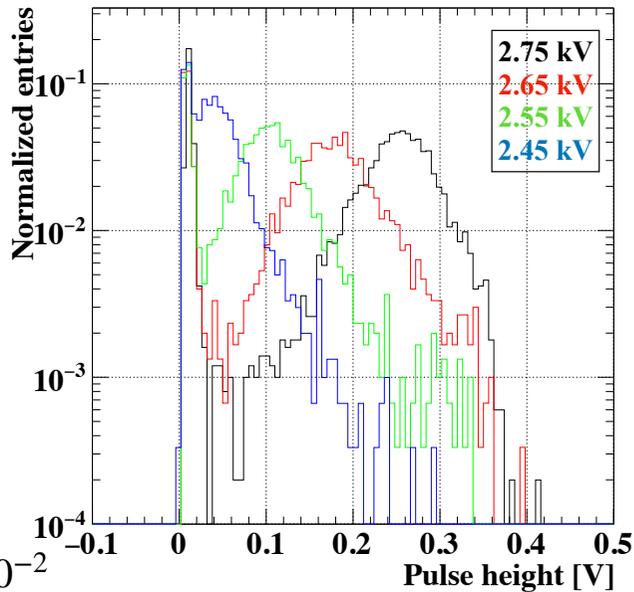
- ^{90}Sr 由来の β 線とMIP e^+ で波高分布の違いは見られない
 - 若干の相違はギャップ間隔の不定性
- ➔ 今後の研究で、MIP e^+ の応答を調べるときに β 線を試験に用いることは妥当である

低レート μ^+ 測定

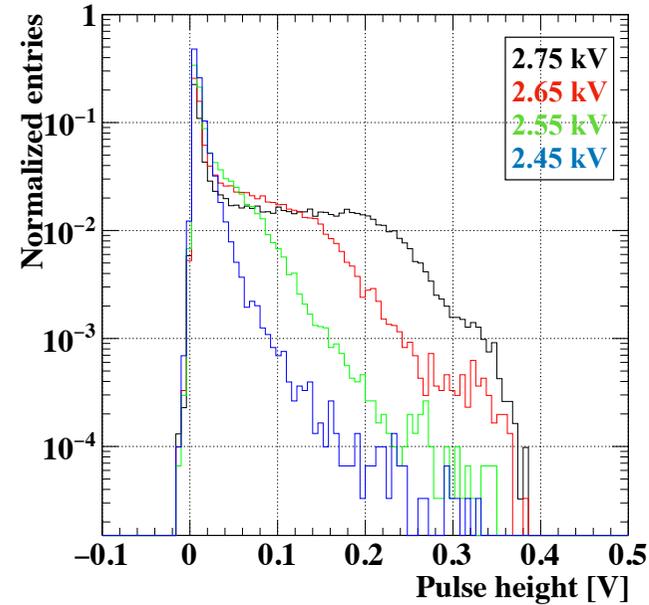


低運動量 μ^+ の応答の理解

低運動量 μ^+ の波高分布



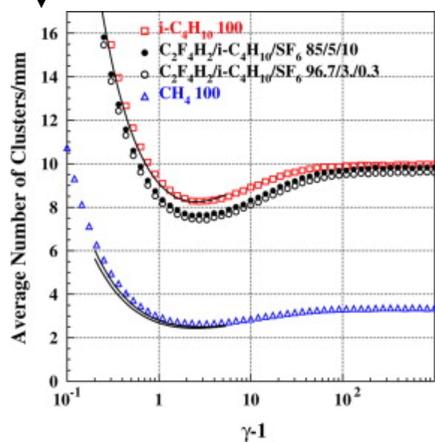
MIP e^+ の波高分布



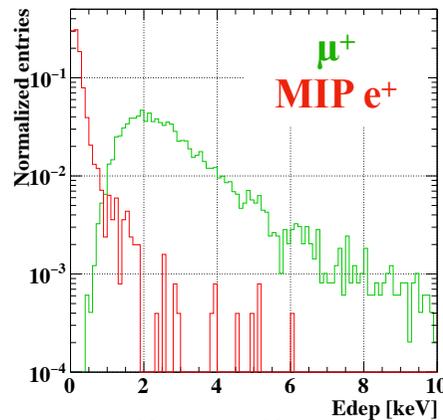
平均波高で
3倍の差

低運動量 μ^+ は
 $\gamma - 1 = 3.4 \times 10^{-2}$

電離クラスター生成数
(シミュレーション)

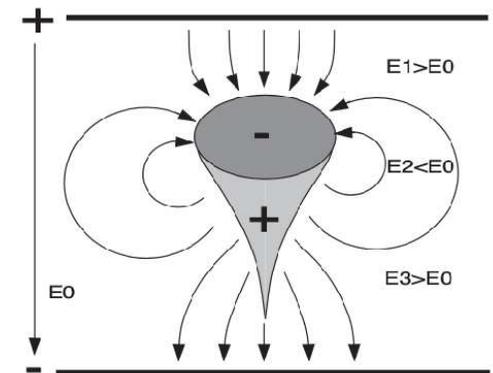


MCでのエネルギー損失



平均で10倍異なる ($p/E = \beta = 0.26$)

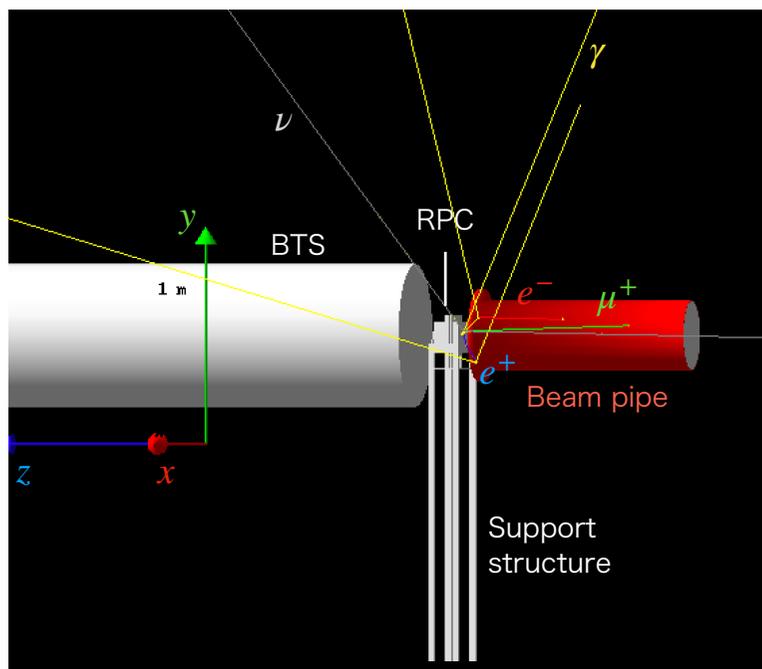
十分に増幅する
クラスターが
多く生成される



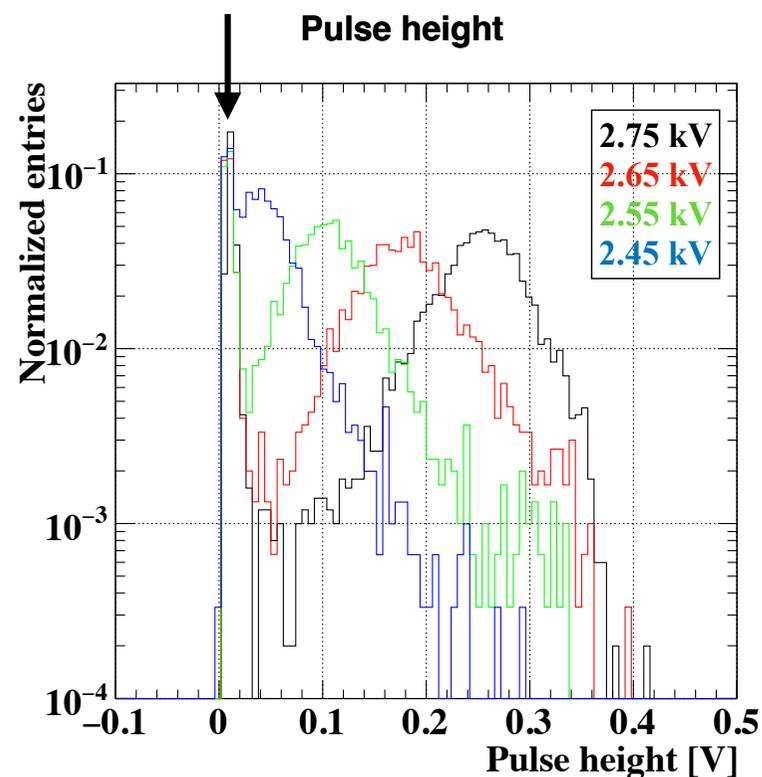
空間電荷効果によって
電子の増幅が飽和する

Riegler, W. and Lippmann, C., "The physics of Resistive Plate Chambers", NIM A, 518 (2004)

低レート μ^+ 試験での背景放射線



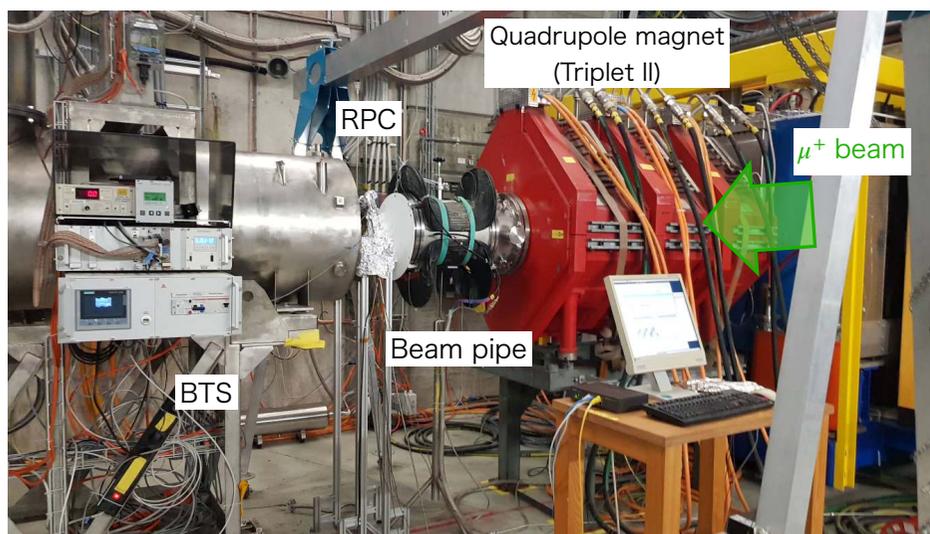
背景放射線による偶発的なトリガー



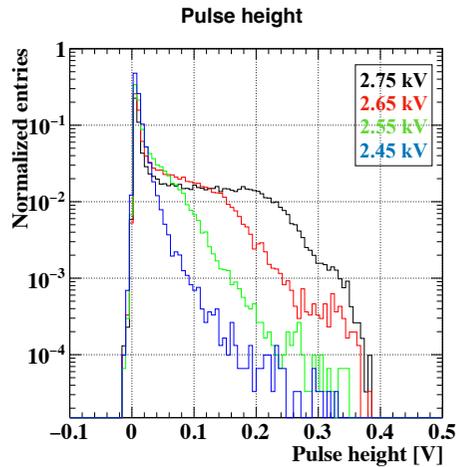
全イベントの25%がペDESTALに存在



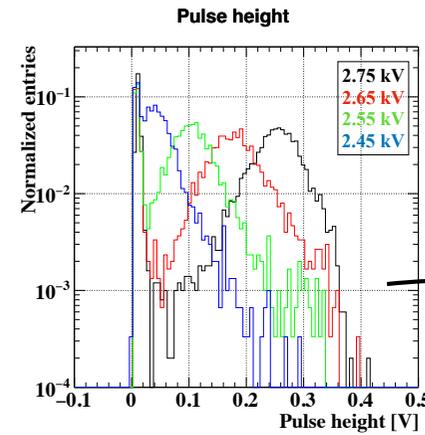
- MCシミュレーションでビーム軸と鉛コリメータの穴が
- 完全に平行なとき、15%が偶発的なトリガーイベント
 - 2°傾いているとき、23%が偶発的なトリガーイベント



μ^+ の平均電荷量の推定

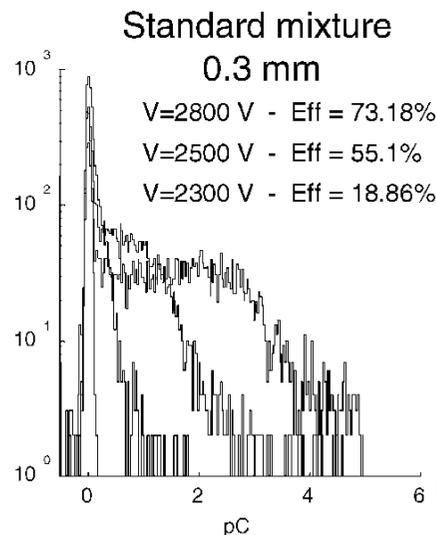


平均波高
84 mV
@2.75 kV



ペDESTALイベントを
除いた分布の平均波高を
平均電荷量に換算

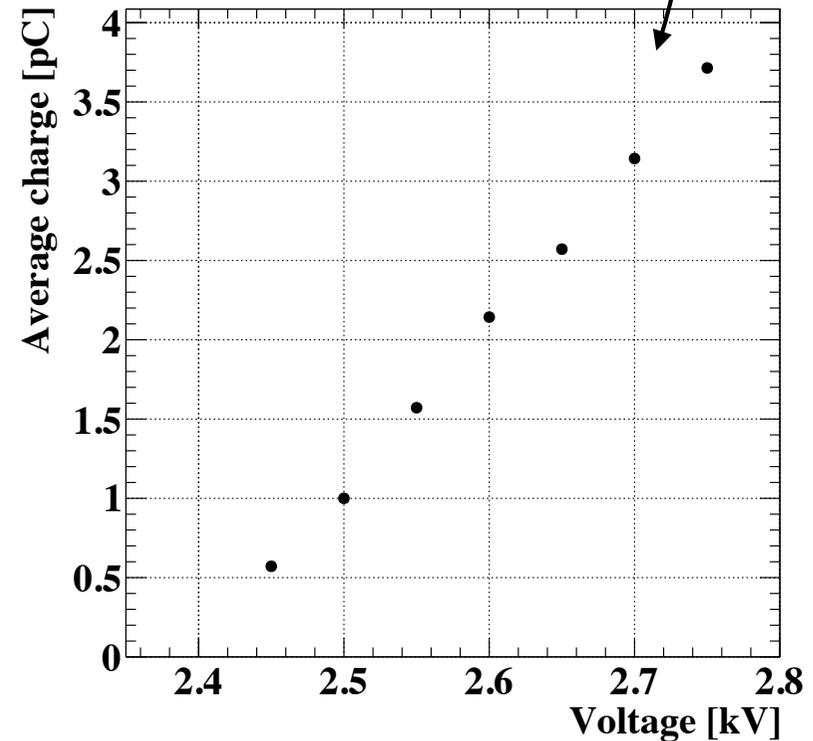
電荷量 \propto 波高
得られた波高分布と
先行研究の電荷分布を比較



波高と電荷の
換算係数

平均電荷
1.2 pC
@2.8 kV

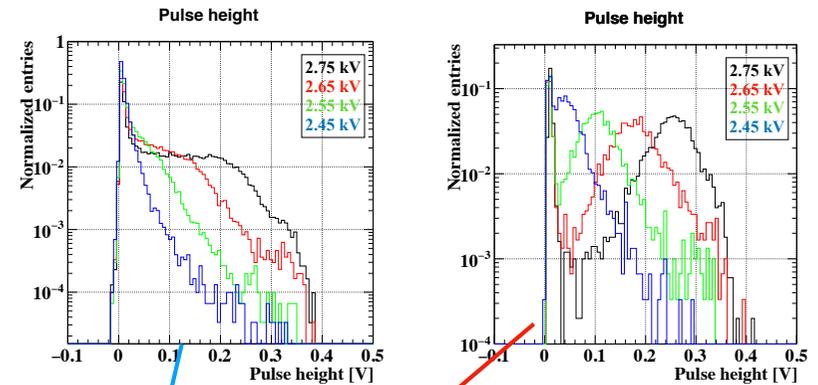
Average charge vs voltage



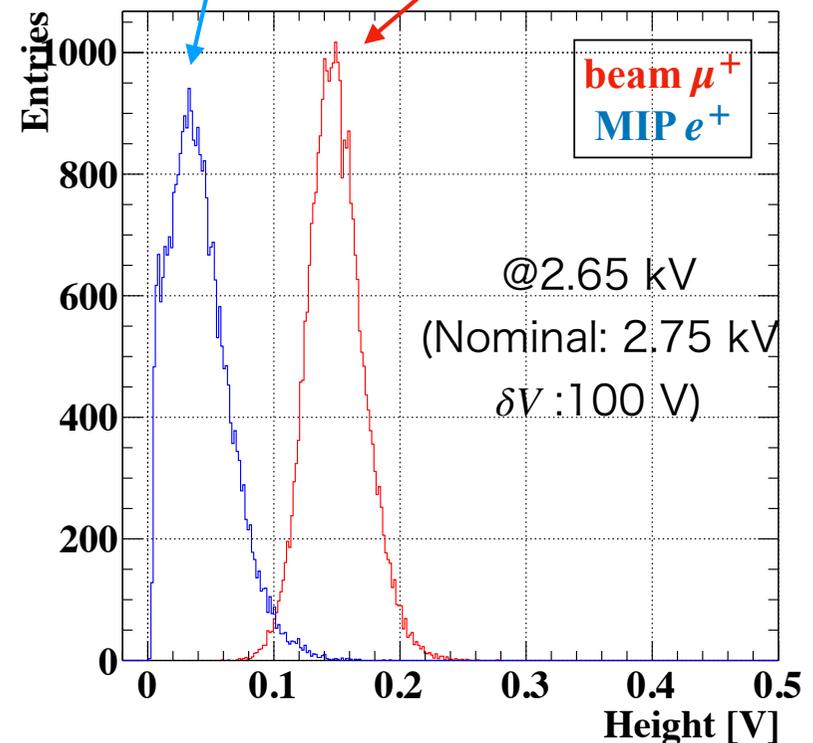
6 Fonte, P. and Peskov, V., "High-resolution TOF with RPCs", NIM A, 477 (2002)

μ^+ と e^+ の識別

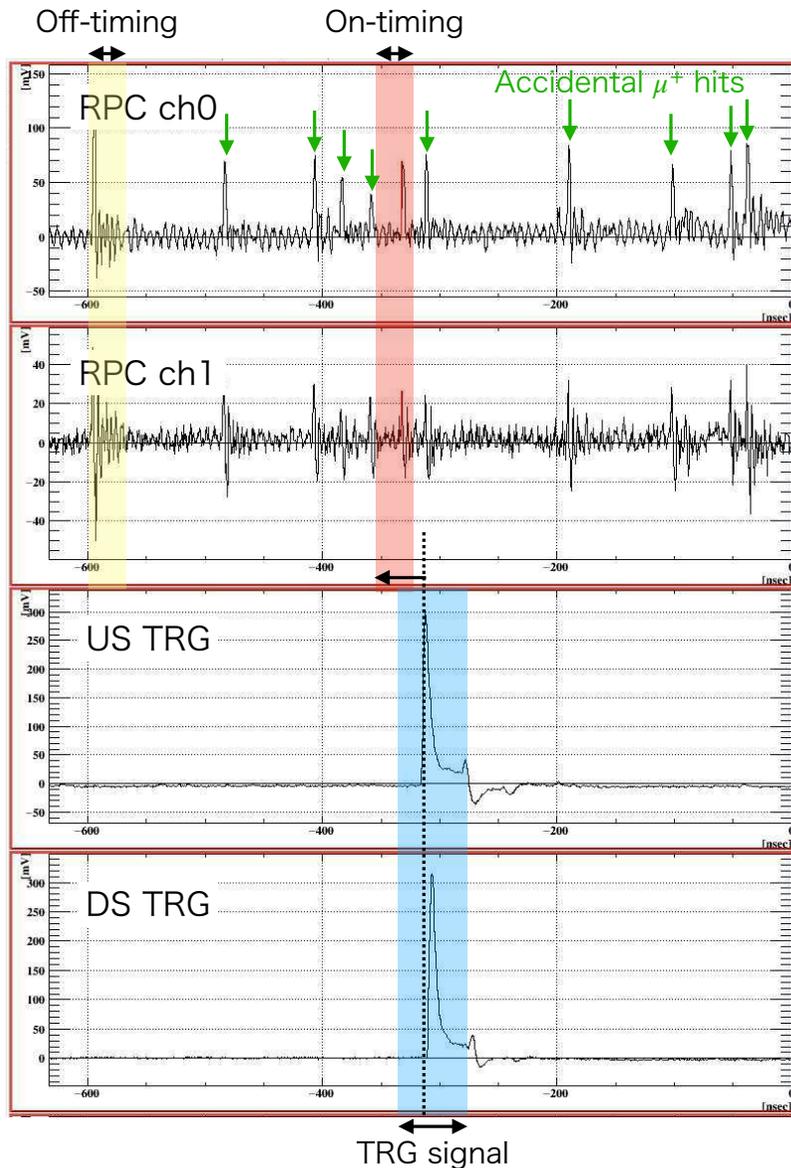
- 積層して各層の増幅プロセスが平均化されることで、 μ^+ と e^+ の識別が可能
- 積層した場合のシミュレーション
 - 1層での波高分布に従う乱数を n 個独立に生成する (各層での増幅プロセス)
 - n 個の和をとり weighting field を補正する (およそ n で割る)
- μ^+ の混入率: 0.1% (閾値: 0.1 V)
 - (e^+ の inefficiency: 2.2%)



Expected pulse height spectra

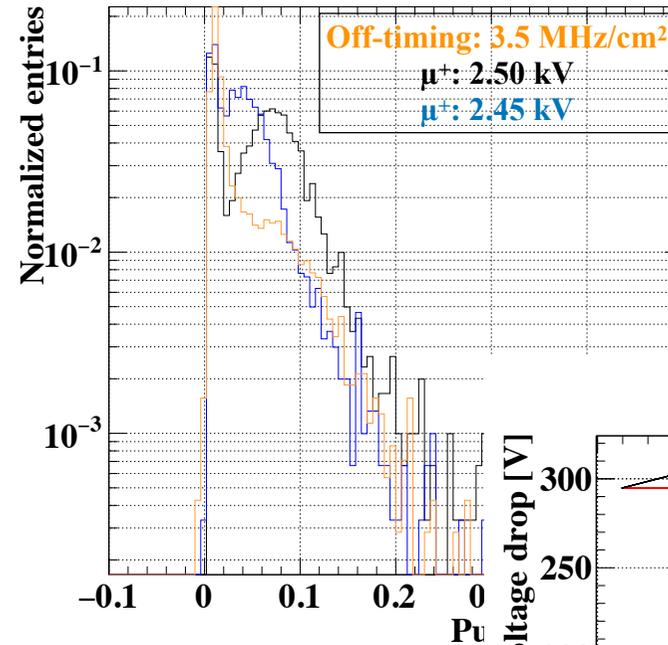


高レート測定 (slit 110)



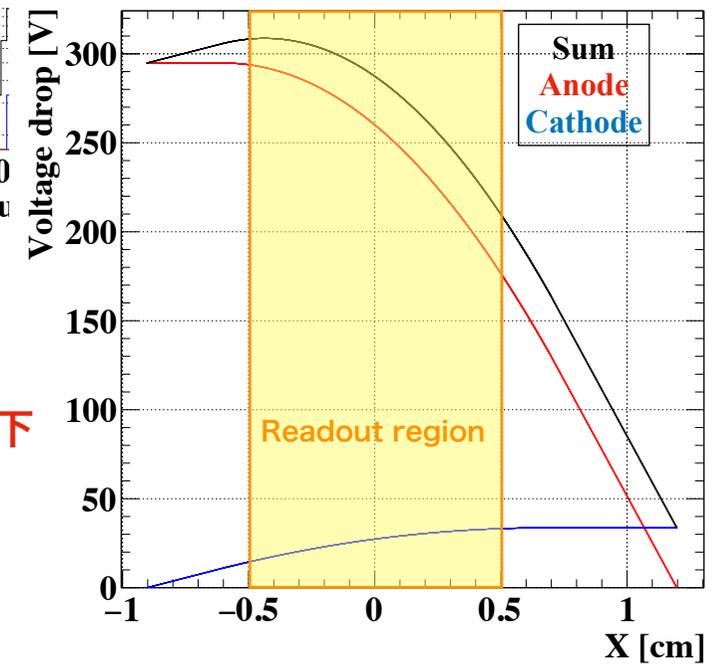
Off-timingの波高分布の比較 @2.75 kV

3.5 MHz/cm²



250-300 Vの電圧降下

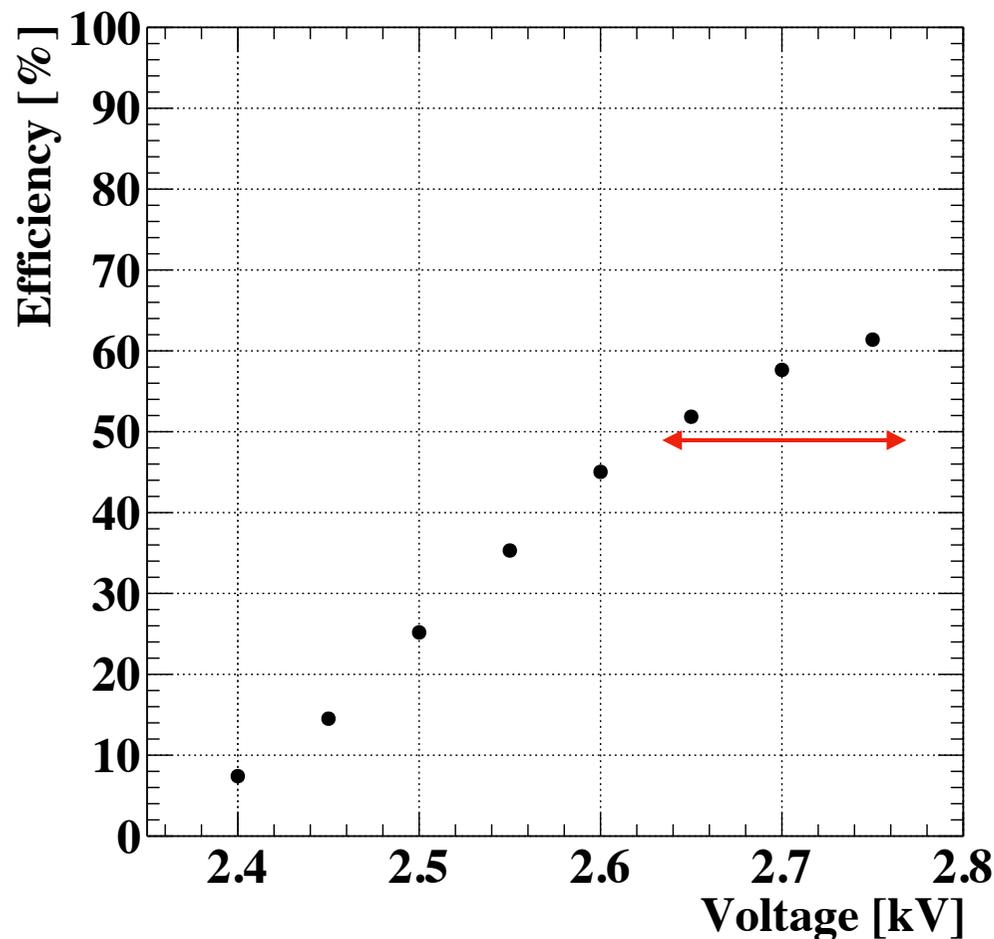
Voltage drop



210-310 Vの電圧降下

許容できる電圧降下の大きさ

Efficiency vs voltage MIP e^+ 測定

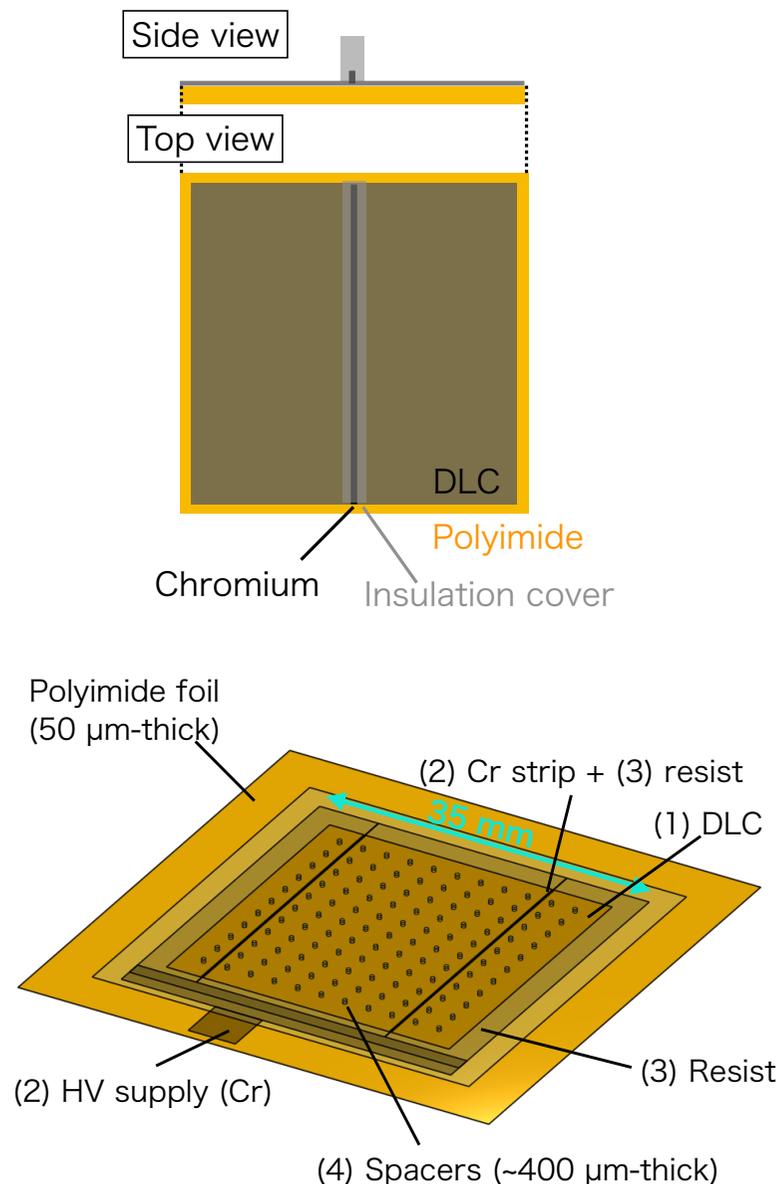


$$\epsilon_n = 1 - (1 - \epsilon_1)^n$$

単層で50%あれば、4層に積層して94%
(conservativeに見積もる)

→ 電圧降下は100 Vまで許容できる

導電ストリップの実装



DLCに金属を接着させるのは自明ではない
 → 先行研究で実績のあるクロム

放電を防ぐために絶縁カバーでクロムを覆う
 → フォトリジスト

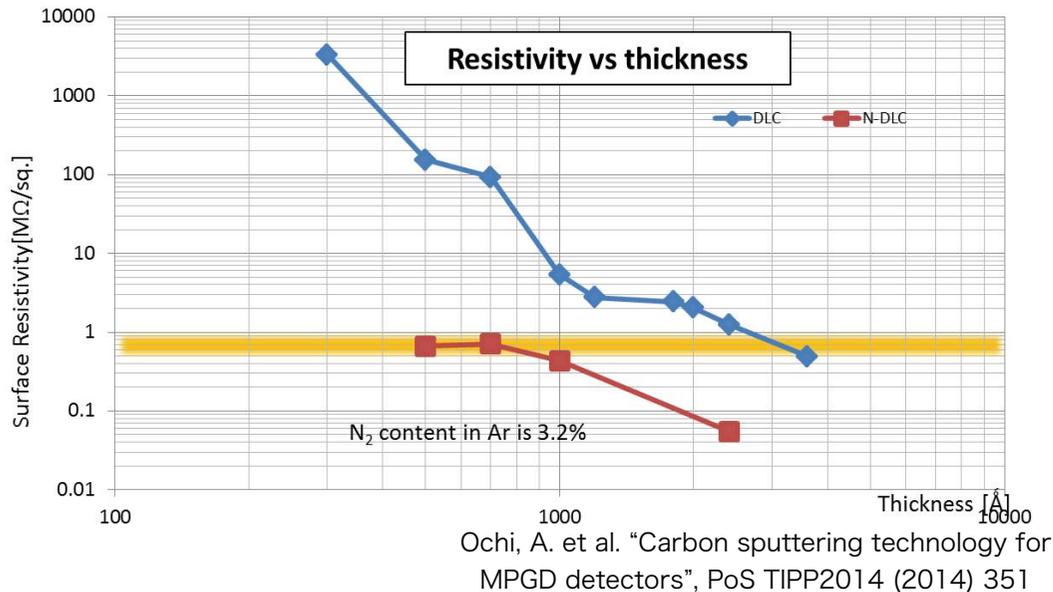
	導電ストリップ	絶縁カバー
素材	クロム	ドライレジスト
厚み	100 nm	25 μm
幅	50 μm	200 μm

不感領域となるためなるべく小さくしたい
 → 取り付けの位置精度から決定

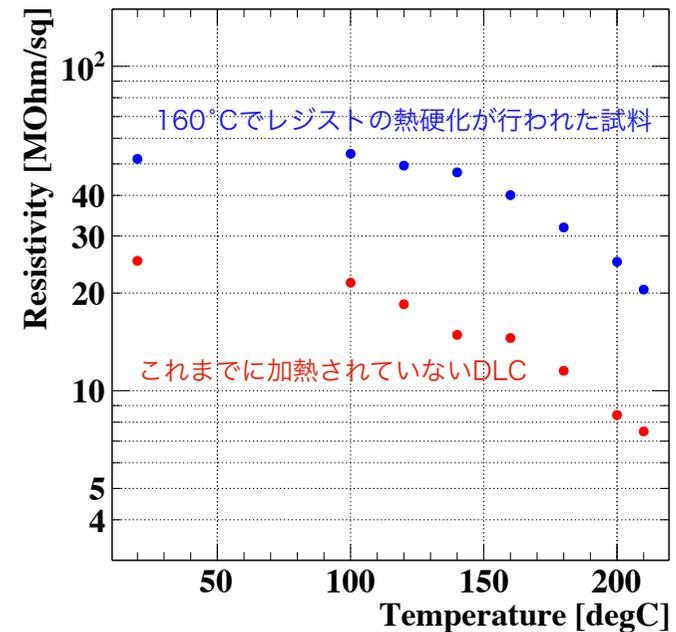
試作電極の設計まで完了
現在製作を進めている

DLCの表面抵抗率のコントロール

膜厚によるコントロール



加熱によるコントロール

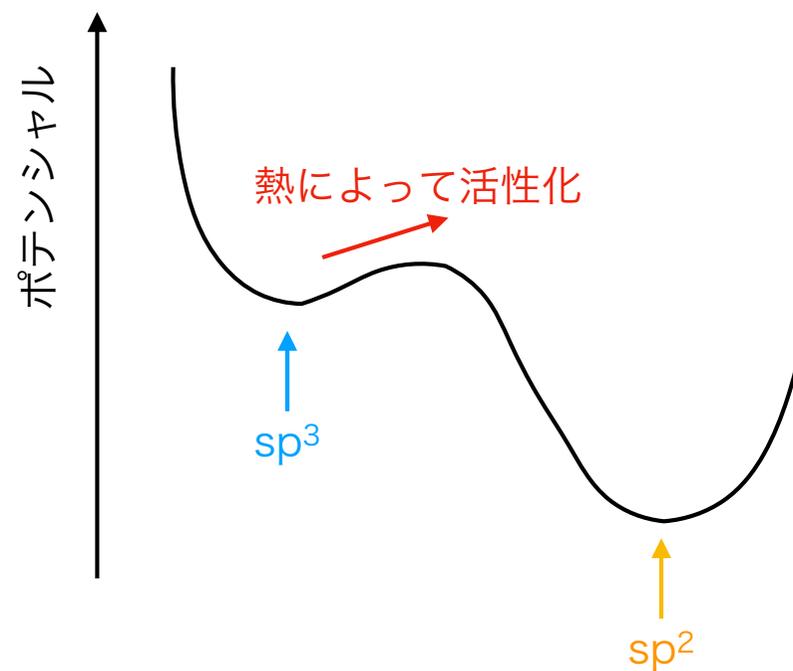
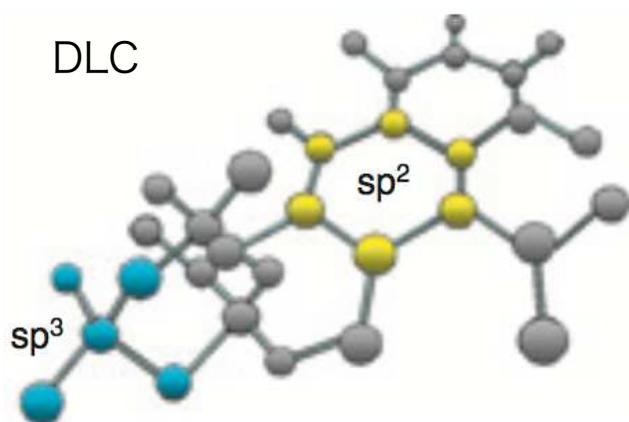


- スパッタリングにより膜厚を調整することで、表面抵抗率を調整できる
 - その精度は良くない
 - 2019年に製作した電極では1桁程度のばらつき
- 現在は**2倍程度のばらつき**で製作
 - 適宜抵抗率を測定しながら、スパッタリングによって炭素薄膜を継ぎ足す

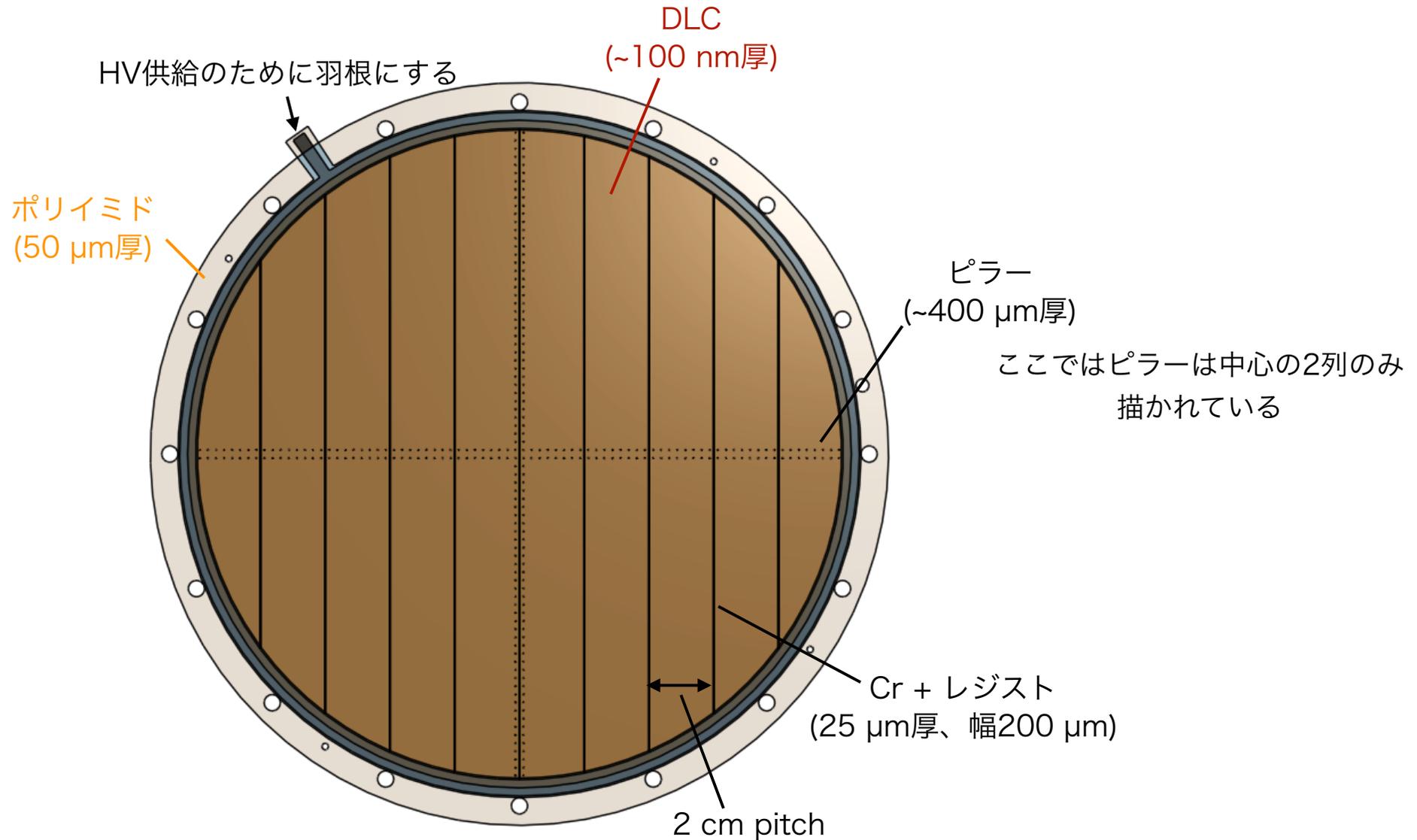
- 加熱によって減少する
 - 最大で75%減少 (210°Cで加熱)
 - 不可逆的
- **加熱温度を調整することで、精度良く抵抗率をコントロールすることが可能**

10 MΩ/sqの電極を製作可能

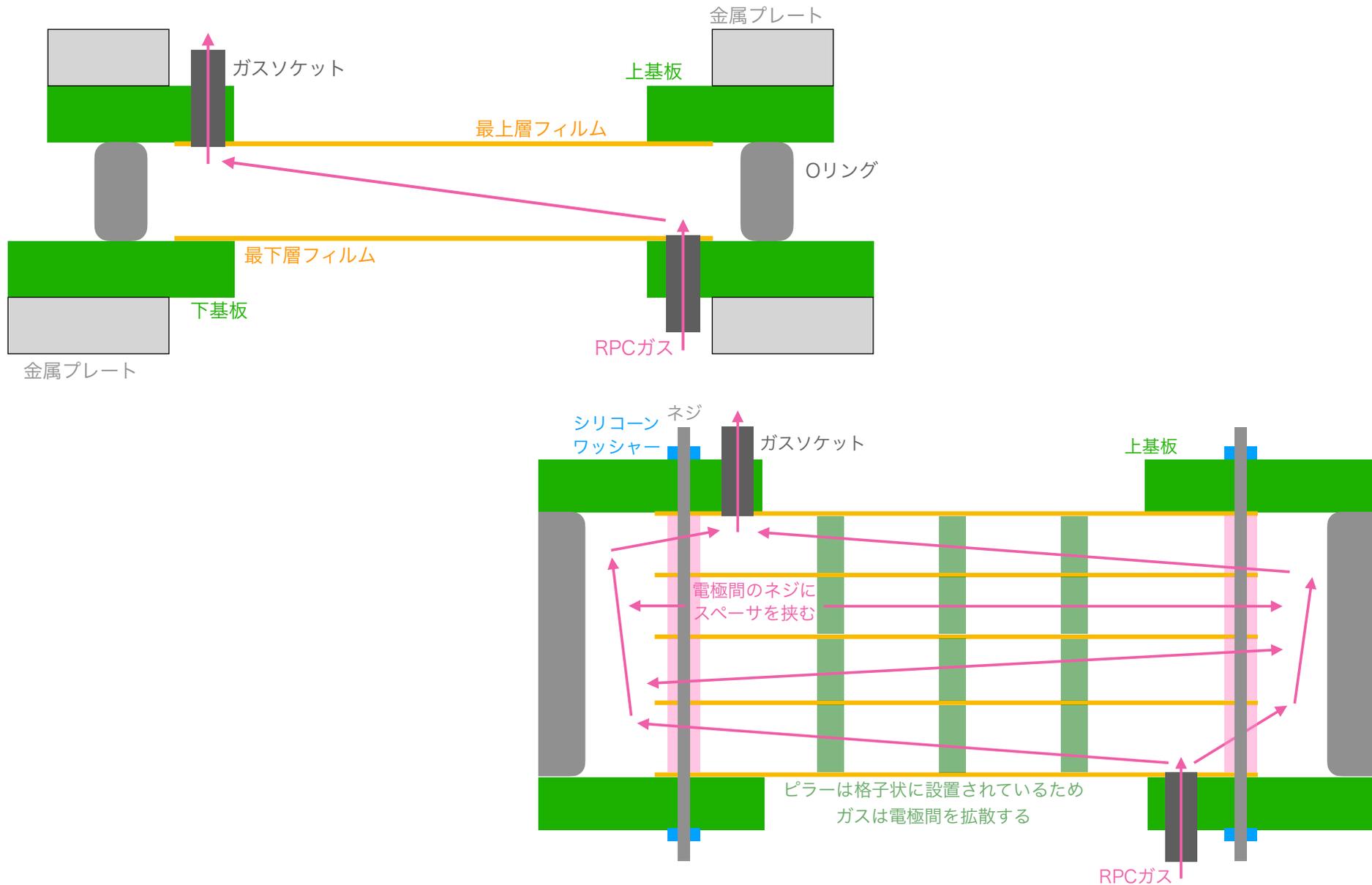
予想されるDLCの抵抗率変化メカニズム



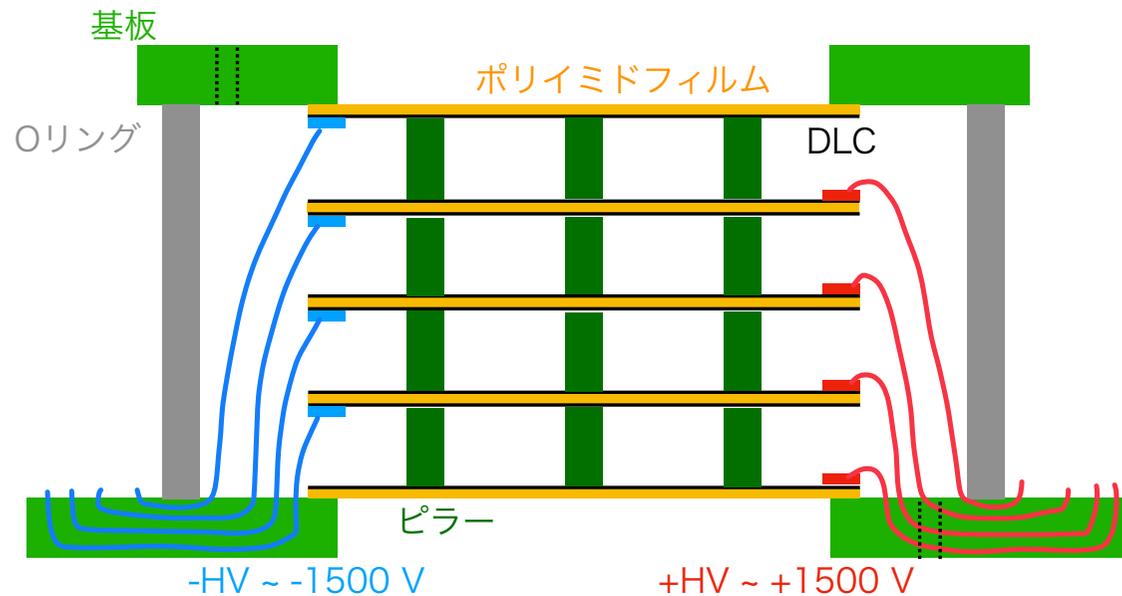
高抵抗電極の設計



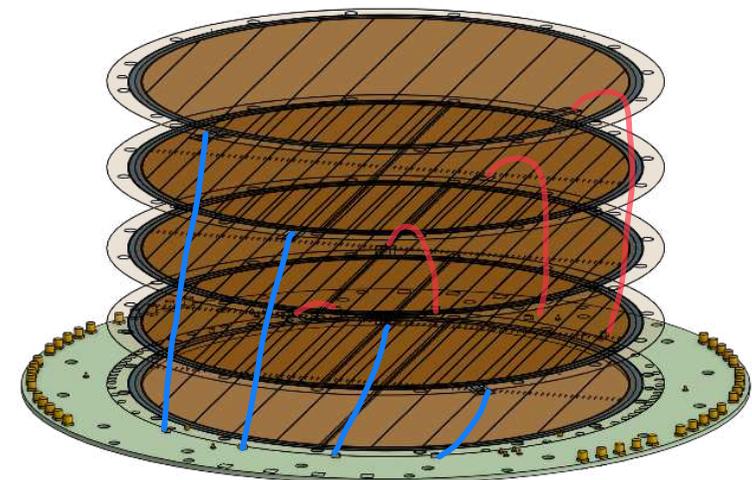
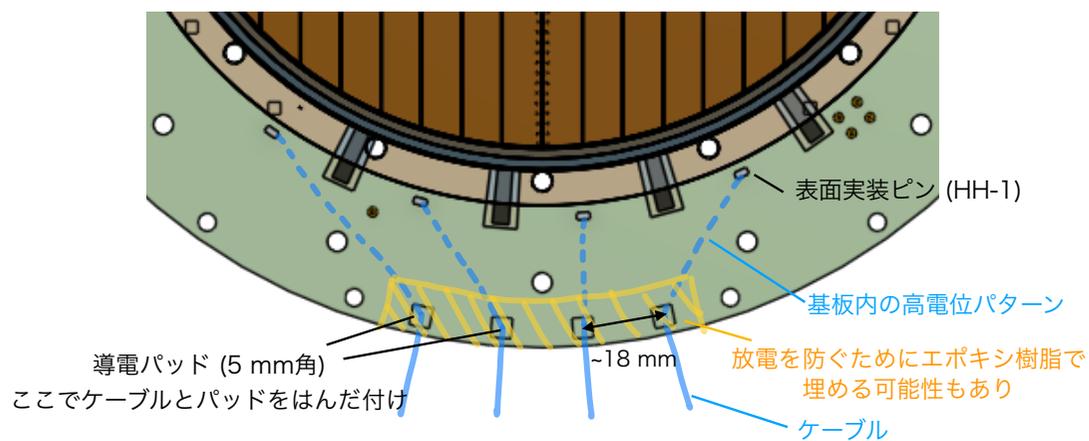
ガスパッケージの設計



高電圧供給の設計



表面実装ピンとHV供給の羽根をケーブルで繋ぐ



他実験への応用可能性

- 本研究で開発するRPCの特徴
 - 高レート耐性 (4 MHz/cm²)
 - 超低物質質量 (<0.1% X_0)
- 高レート環境下でのミュオントリガー検出器
 - FCC-hh: 500 kHz/cm²
 - CBM at FAIR: 500 kHz/cm²
- 高レート環境下でのTOF検出器
 - 80 ps in 30 kHz/cm²
 - 超低物質質量を生かしてハドロン実験や原子核実験でもTOF測定