

MEG-II実験に向けた 背景ガンマ線同定用 シンチレーション検出器の研究開発

中浦正太、他MEGコラボレーション
東京大学

日本物理学会 2014年秋季大会@佐賀大学

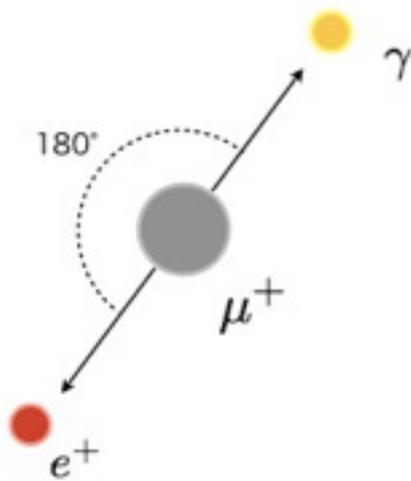


- MEG実験紹介と現状
- アップグレード紹介
- RDC紹介
- 自己放射線とキャリブレーション
- SiPM比較
- まとめ

- 対象とする物理現象:cLFV $\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma$
 - 標準理論+ニュートリノ振動での分岐比： $O(10^{-45})$ 以下
 - SUSY-GUTなどでの分岐比： $O(10^{-14}) \sim O(10^{-12})$
 - 発見されれば新物理のまぎれもない証拠
 - 現在の分岐比の上限： 5.7×10^{-13} (90% C.L.)

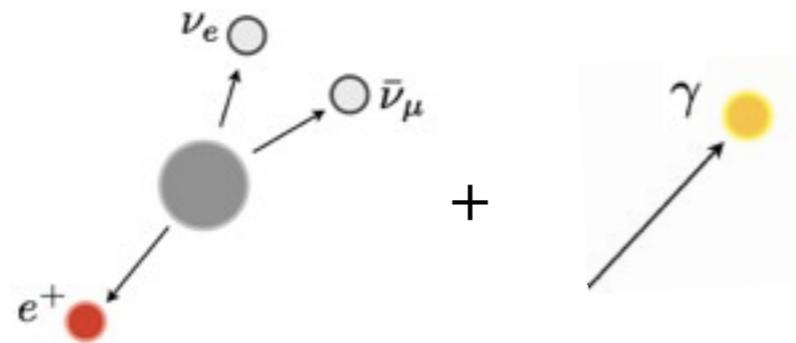
[Phys. Rev. Lett. 110, 201801 – Published 13 May 2013](#)

signal



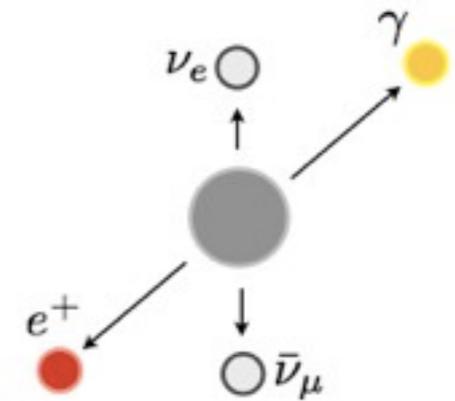
- μ 粒子の静止系での崩壊
- $E=52.8\text{MeV}$
- back-to-back
- 同時刻

accidental background



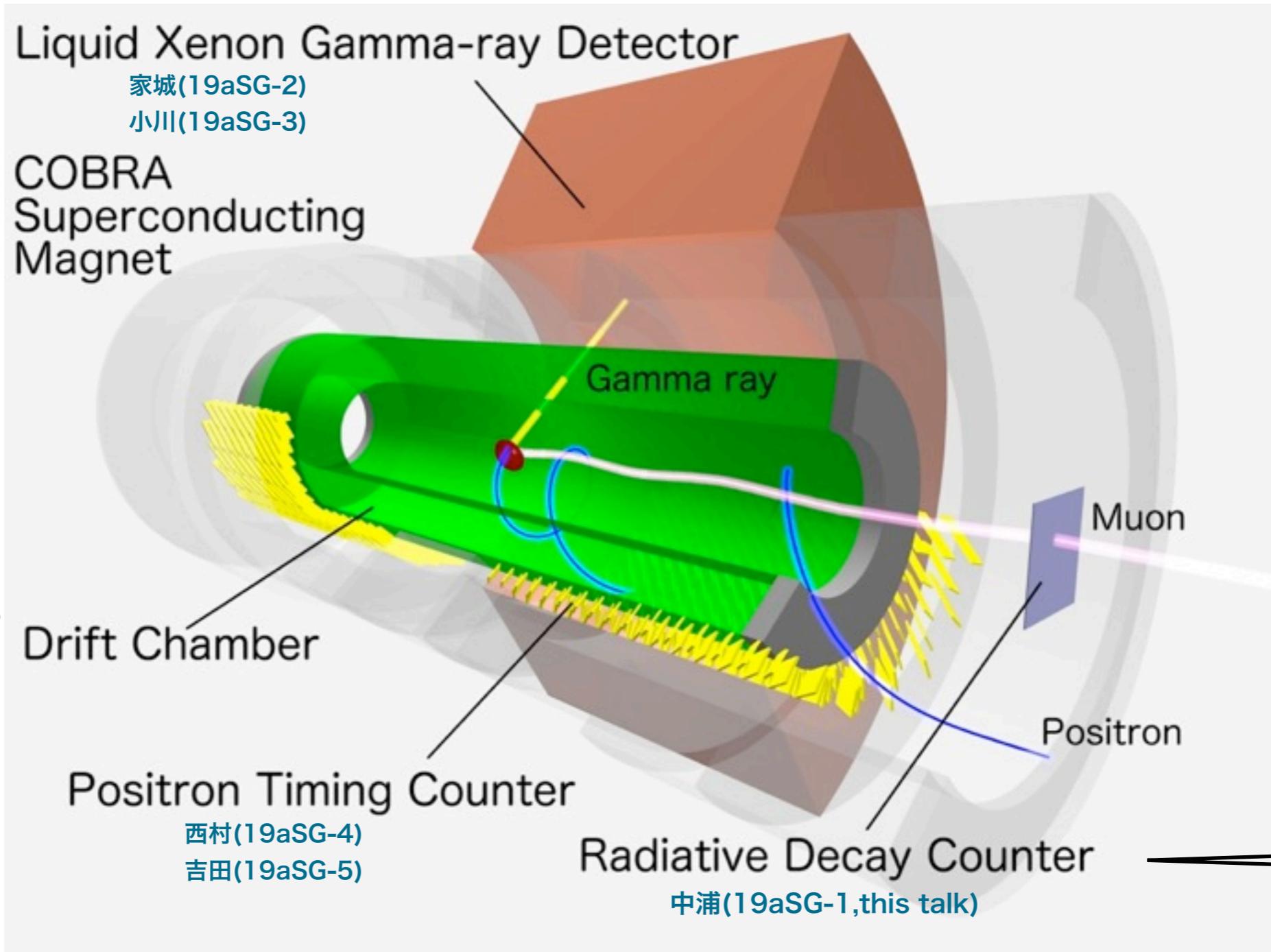
- ミッセル崩壊による陽電子と γ 線の偶発的ヒット
- ランダムな角度分布
- ランダムなタイミング

radiative muon decay



- $E < 52.8\text{MeV}$
- not back-to-back
- 同時刻

目標感度: 5×10^{-14}



γ 線のエネルギー、位置、時間測定
PMを一部SiPMに、PMの配置変更

勾配磁場
(同一運動量なら同一半径)

陽電子の飛跡測定
モジュール型から一体型へ

陽電子の時間測定
カウンターを細分化

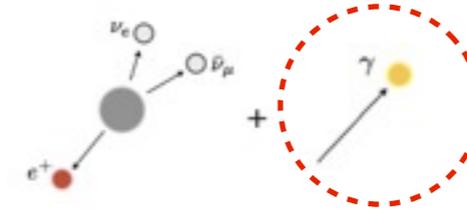
レート2倍

RMD起源の
 γ 線の同定
NEW

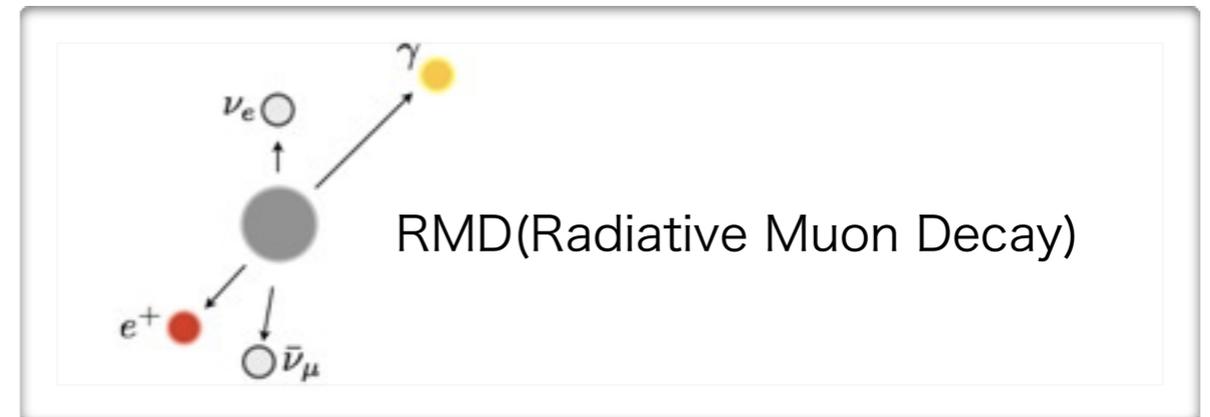
- ・ 2倍のビームレート下で運転($5 \sim 7 \times 10^7 \text{ Hz}$)
- ・ 検出効率の向上

- ・ 背景事象
 - （・ 分解能を上げて減らす
 - ・ 積極タグ

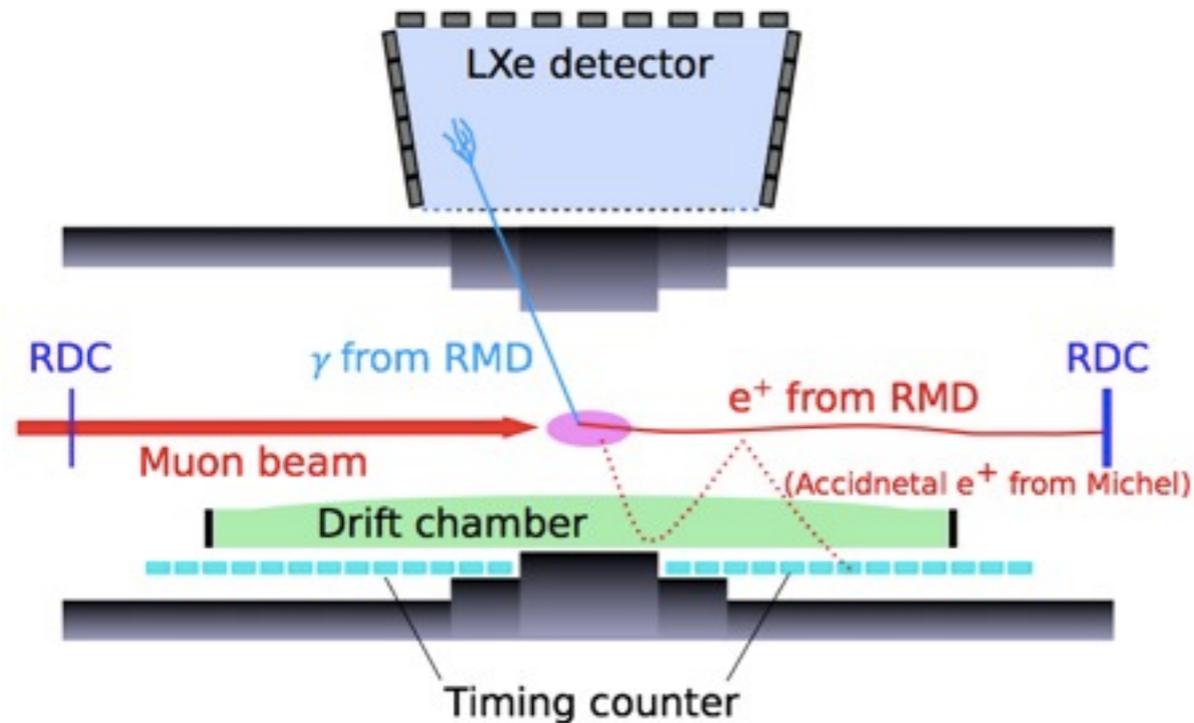
RDC : Radiative Decay Counter



- ・ アクシデンタルバックグラウンドにおける γ 線の源は2種類存在 : AIF、RMD

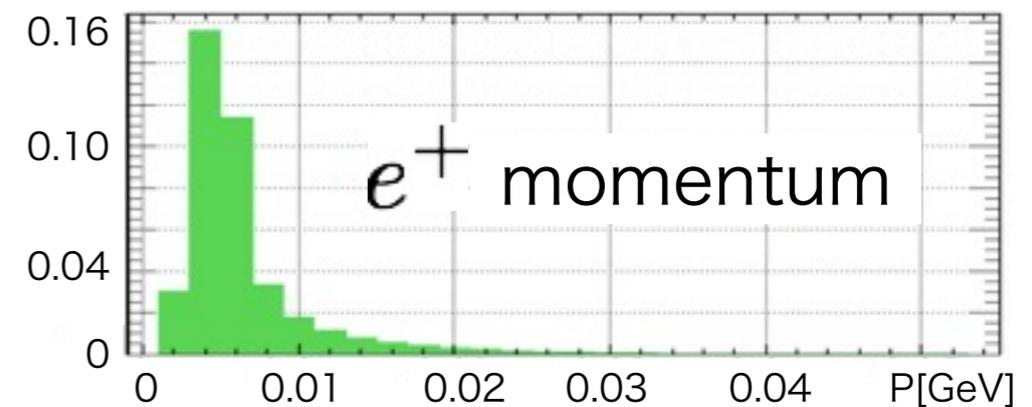


↑ この γ 線が関与するバックグラウンドを同定したい



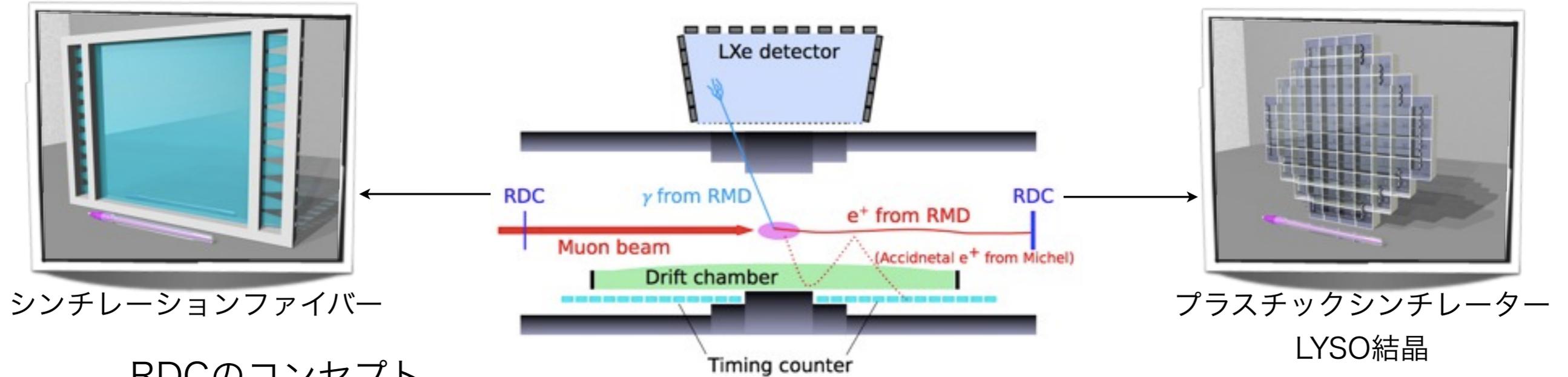
想定 : γ (48MeV以上) & e⁺ from RMD
+ e⁺ from MD

48MeV以上の γ 線に付随する e⁺ の運動量分布



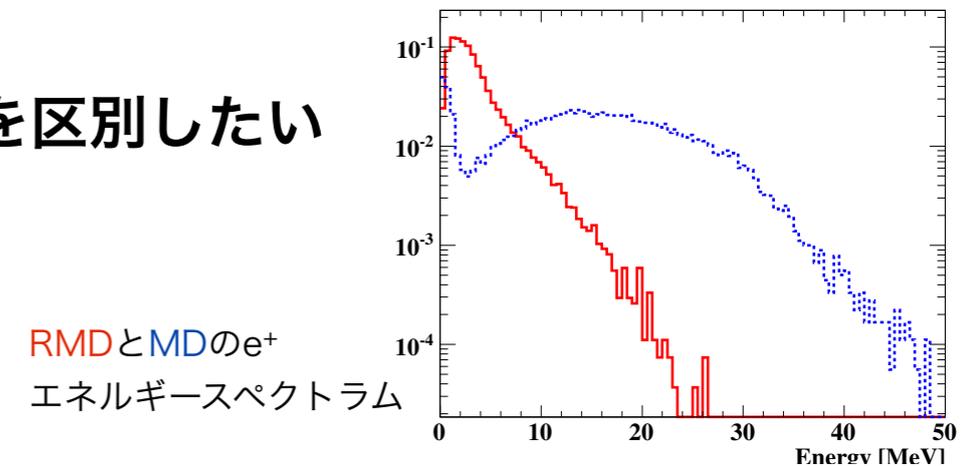
- ・ RMDで48MeV以上の γ 線が放出されたならば同時に2~5MeV (typical) の低運動量陽電子が放出されており、これは磁場に巻き付いている

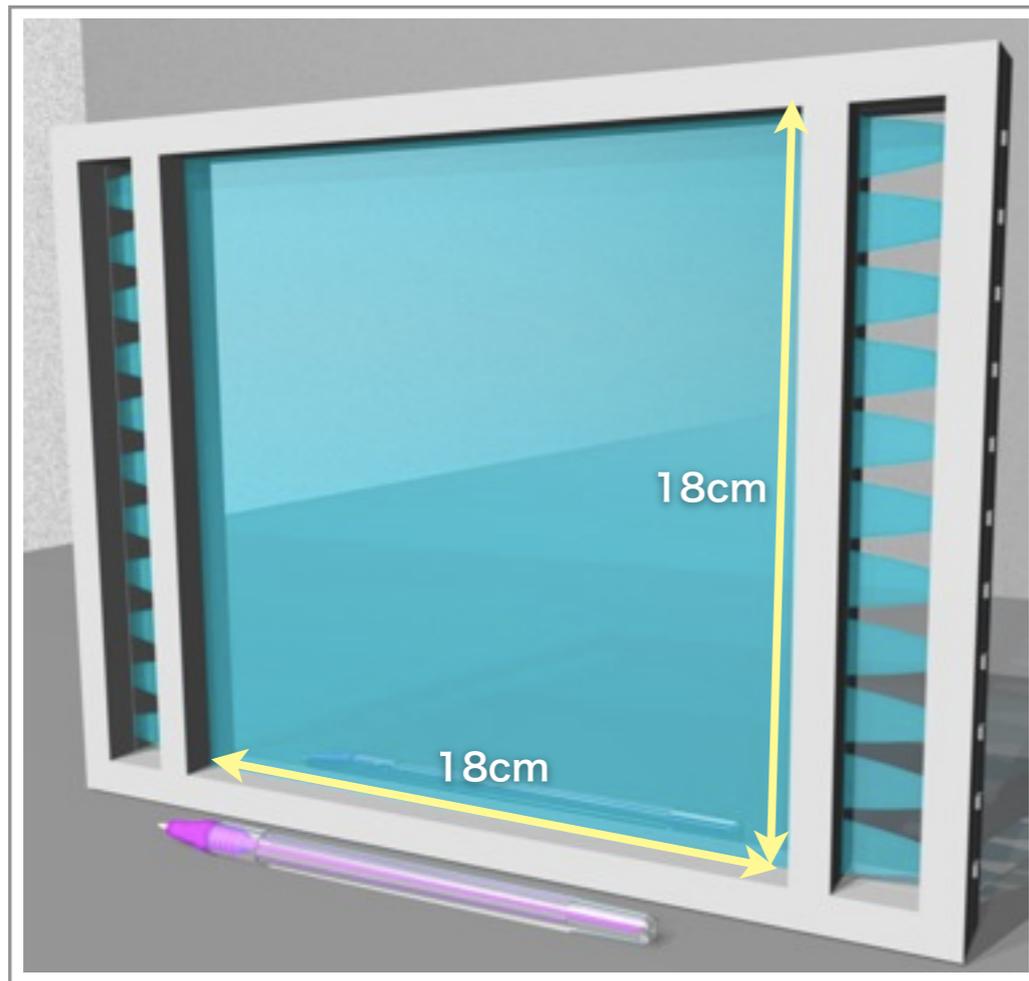
RDC : Radiative Decay Counter



RDCのコンセプト

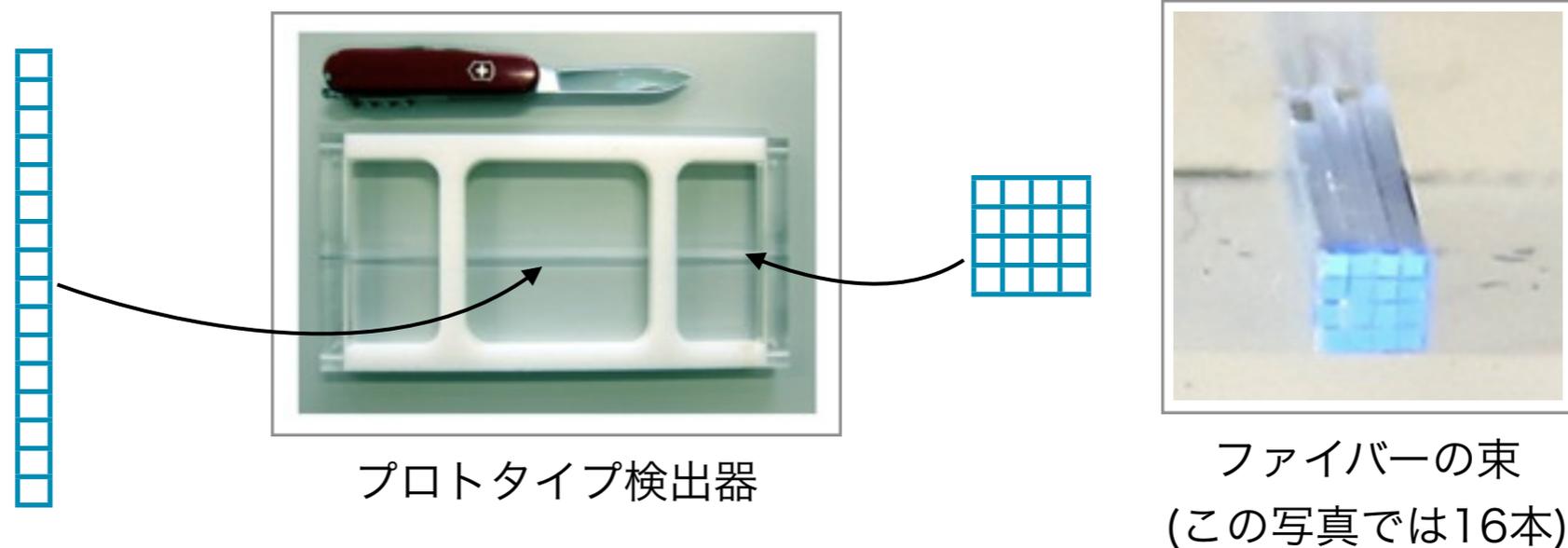
- γ 線(48MeV以上)と低運動量(典型的には数MeV)陽電子の同時測定により、RMD由来の γ 線が関与するアクシデンタルバックグラウンドの同定を狙う
- ビームの上流、下流にそれぞれ検出器を設置
- μ 粒子を通過させる必要性から上流側には薄い検出器を設置
- シンチレーションファイバーとプラスチックシンチレーターで時間情報取得
- シグナル γ 線&数十MeVの陽電子の偶発的ヒットとRMD由来の γ 線&数MeVの陽電子の偶発的ヒットを区別したい
- LYSO結晶でエネルギー測定
- 10MeV程度まで、特に5MeV付近の領域で良いエネルギー分解能が必要

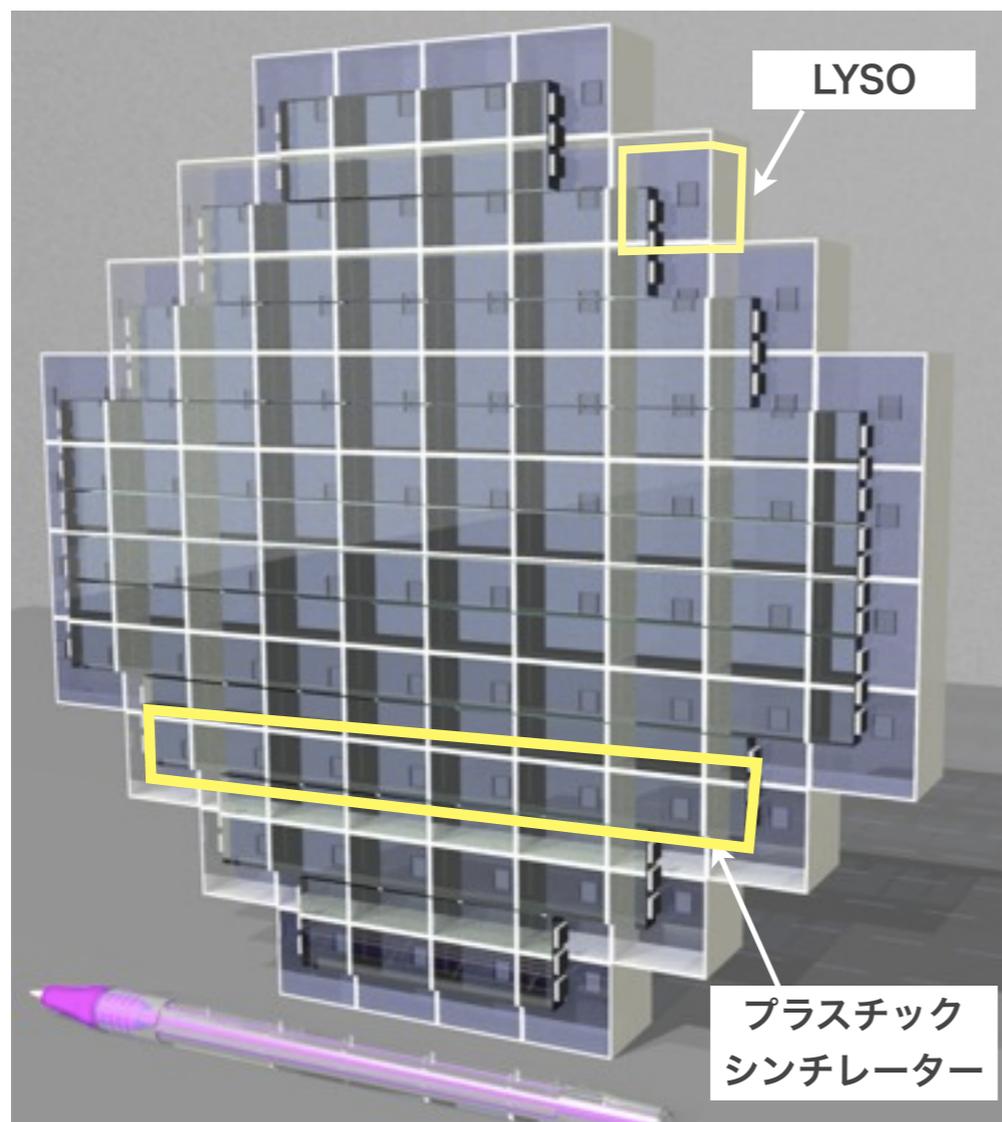




- ・ **シンチレーションファイバー** :
厚みが $250\mu\text{m}$ 、704本
- ・ 両端ではファイバー64本を
 $2\times 2\text{mm}^2$ 程度の正方形に束ねる
- ・ $3\times 3\text{mm}^2$ のSiPMで信号読み出し

- ・ 時間情報のみ取得
- ・ プロトタイプの時間分解能は
 2.1nsec (FWHM) → 改良中
(目標値 : 1.2nsec)





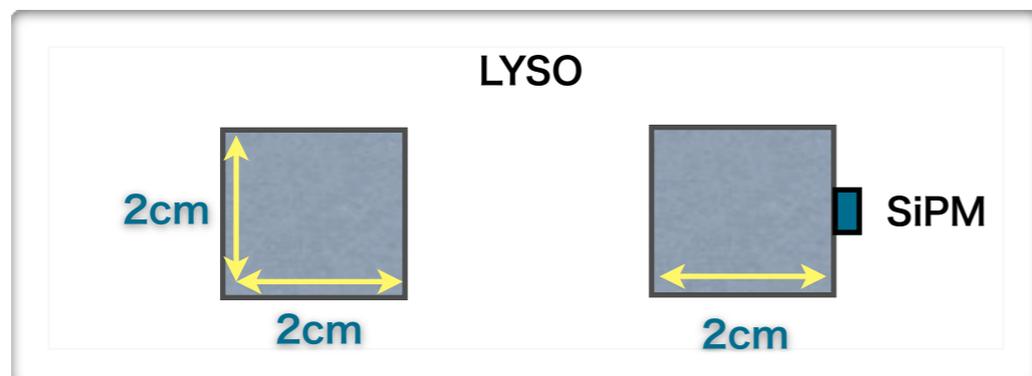
- ・プラスチックシンチレーター10本とLYSO結晶76個の組み合わせ

- ・プラスチックシンチレーターで時間情報を取得
プロトタイプでは分解能が~100psec (100keV以上のエネルギーデポジット)
- ・LYSO+プラスチックシンチレーターでエネルギー情報を取得

LYSO :
長さ、幅、厚みは全て2cmの立方体
背面の3×3mm²のSiPMで信号読み出し

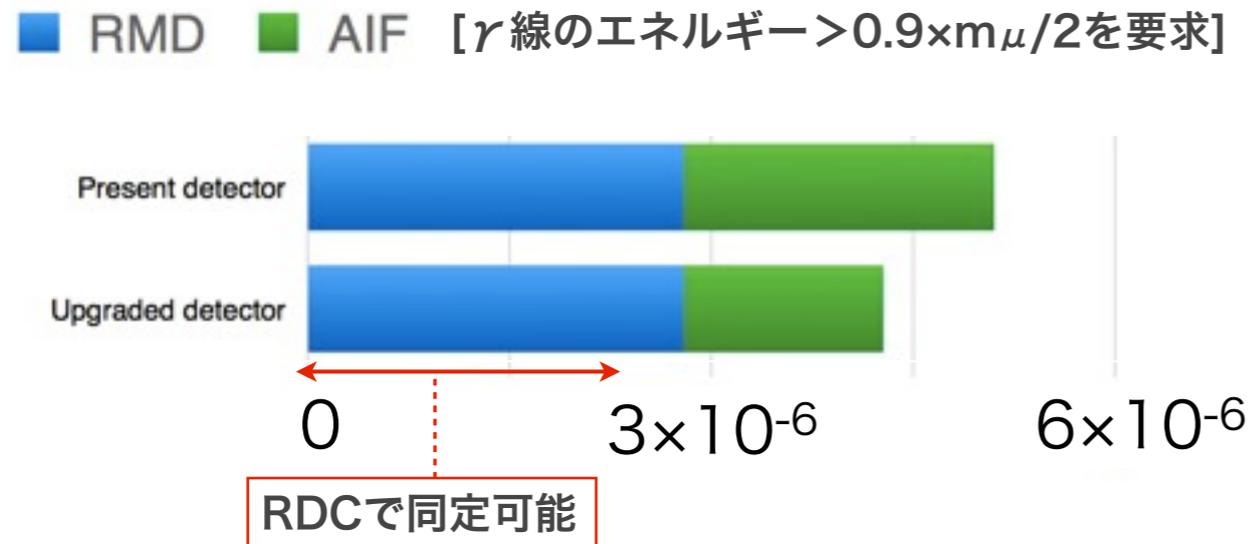
プラスチックシンチレーター :

- ・長さは最大18cm、幅は2cm(ただし中心の2枚は幅1cm) 厚みの最適化は調査中(5mmベース)
- ・中心から半径9cmの領域をカバー
- ・側面のSiPM(直列接続)で信号読み出し





μ 粒子崩壊1イベントあたりに放出される光子数



	予想感度 (DAQ時間:3年)
RDCなし	$5.0e-14$
RDCあり	$3.9e-14$

30% improvement

- **UPGRADE**でAIFは削減されるが、RMDは変化しない
- **積極的なタグが必要!**
→simulationではRMDの83%がRDCによってタグ可能

RDCの導入によりMEGIIでの感度は30%改善見込み!

• 結晶の選択

- GSOとLYSOの比較(^{137}Cs と ^{60}Co を使用したstudy)
 - LYSOはGSOに比べ分解能、光量、波形の立ち上がり/下がり時間の点で優れている

→結晶はLYSOを選択

• 下流側の検出器において解決すべき課題

- **LYSO結晶は数百keVの放射線を出す(自己放射線)**

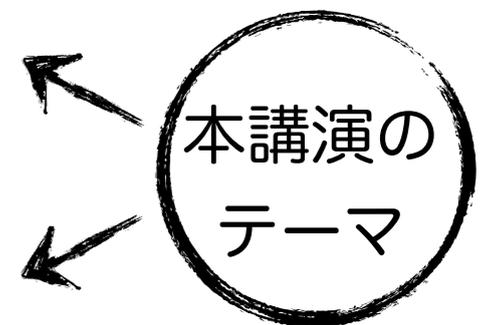
→キャリブレーションソースとして利用可能か

- **LYSO検出器の最適化**

- エネルギーが数MeVの領域でnon-linearityが観測された
これは波形解析によるpileup分離には好ましくない

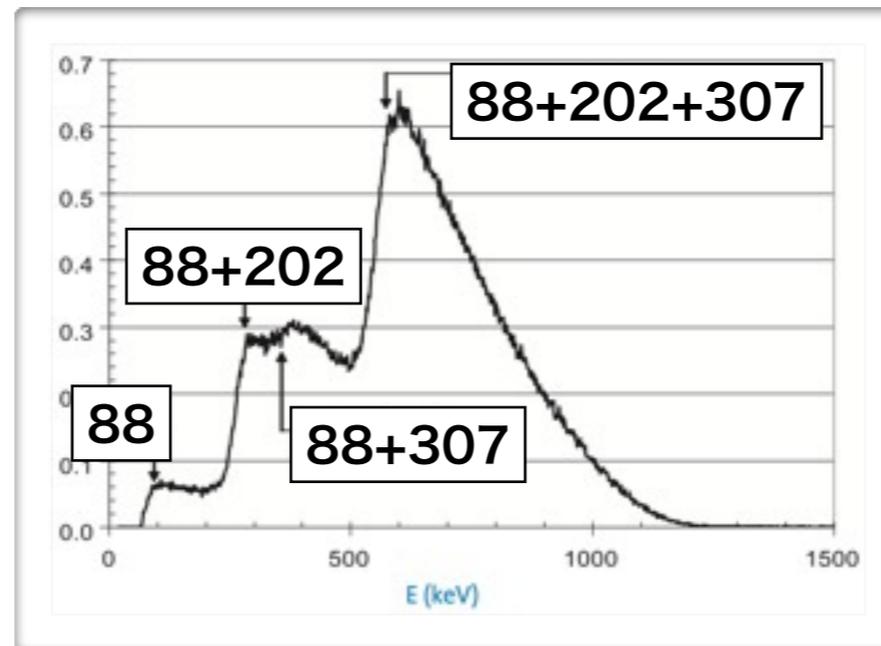
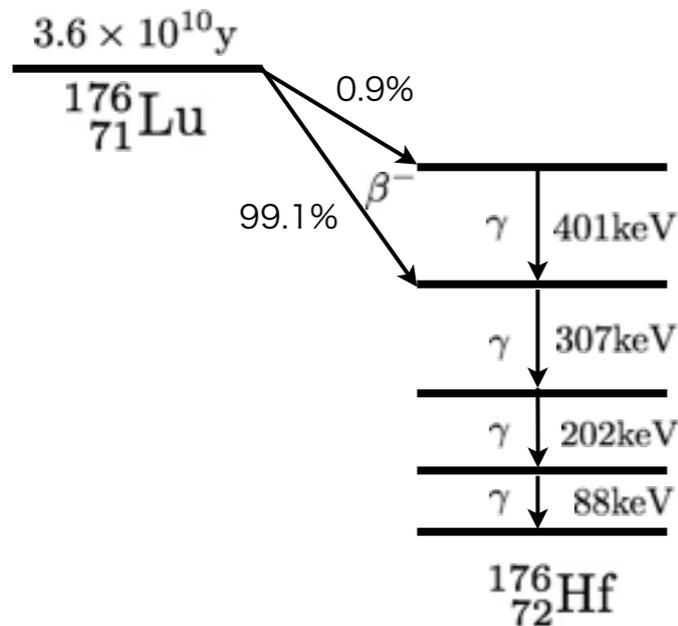
- SiPMでのsaturationか→ピクセルピッチサイズの変更

- 分解能の比較



• 背景と目的

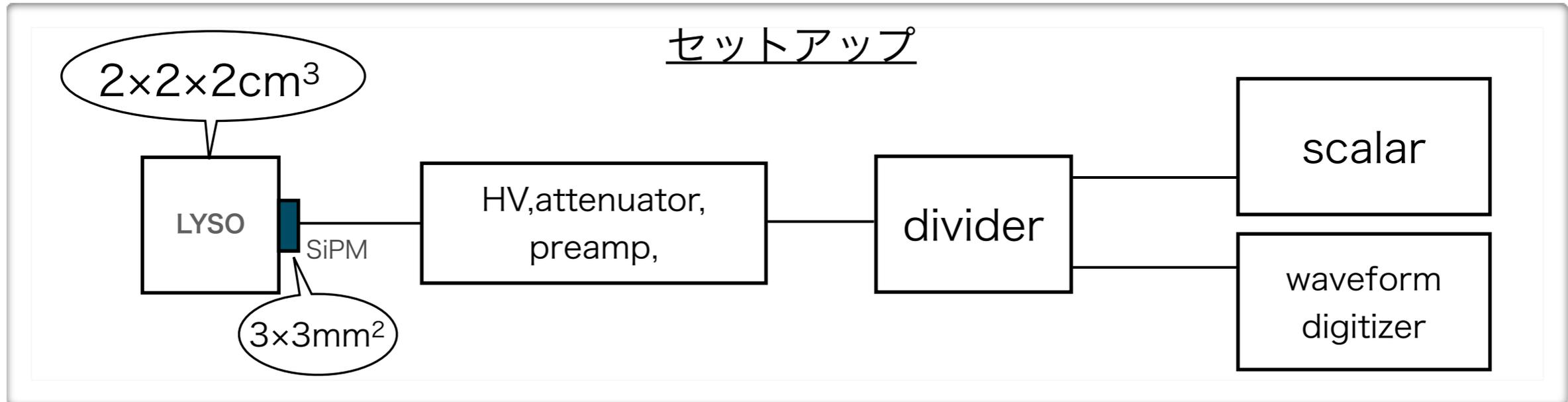
- LYSOの構成要素であるLuには**放射性同位体**の ^{176}Lu が天然比2.61%で存在。半減期 3.79×10^{10} 年で ^{176}Hf に β 崩壊
- バックグラウンドになる可能性
→プラスチックシンチレーターとのコインシデンスをとれば問題なし
- エネルギースケールの**キャリブレーションソース**として使用可能か



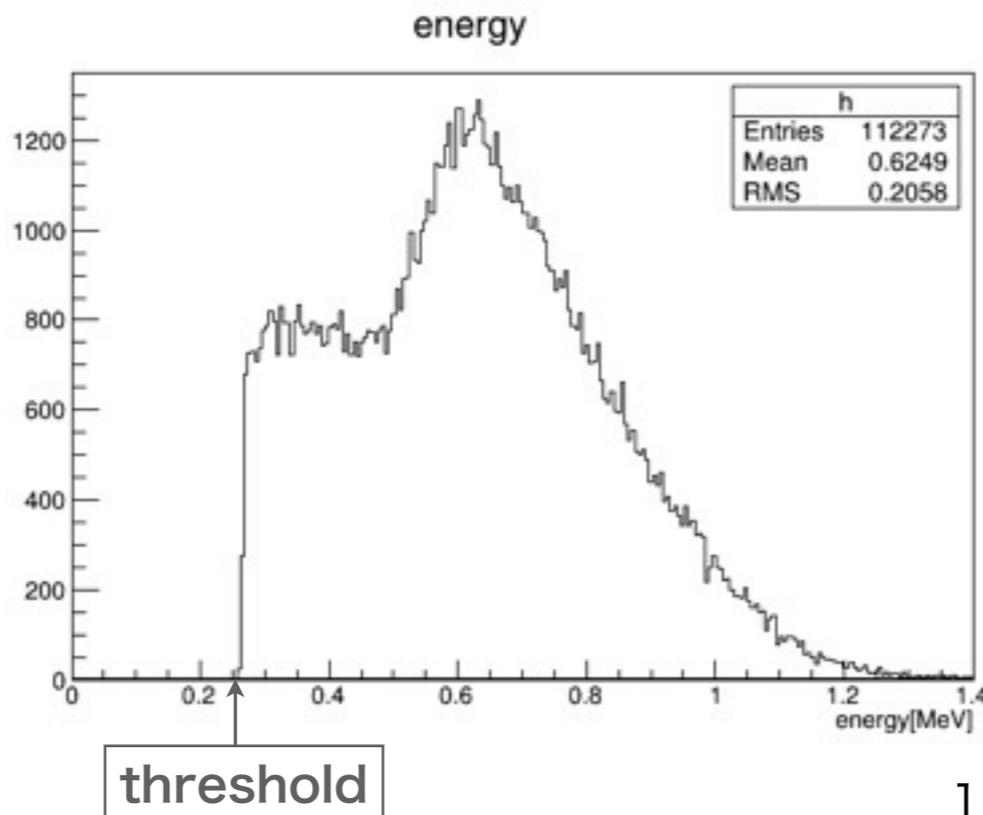
Saint-Gobain PreLude™ 420 data sheet

- γ 線がLYSO内で吸収され、その上に β 崩壊のスペクトルが乗った形状
- 特に600keV以上は γ 線が全て吸収された過程と考えることができる

- 理論値 : 結晶サイズが $2 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$ と定めると2kHz程度



- thresholdはscalarとwaveform digitizerで統一
- scalarとwaveform digitizerで同時間(5分間)DAQ
- scalarでレートを出し、waveform digitizerで波高分布をチェック



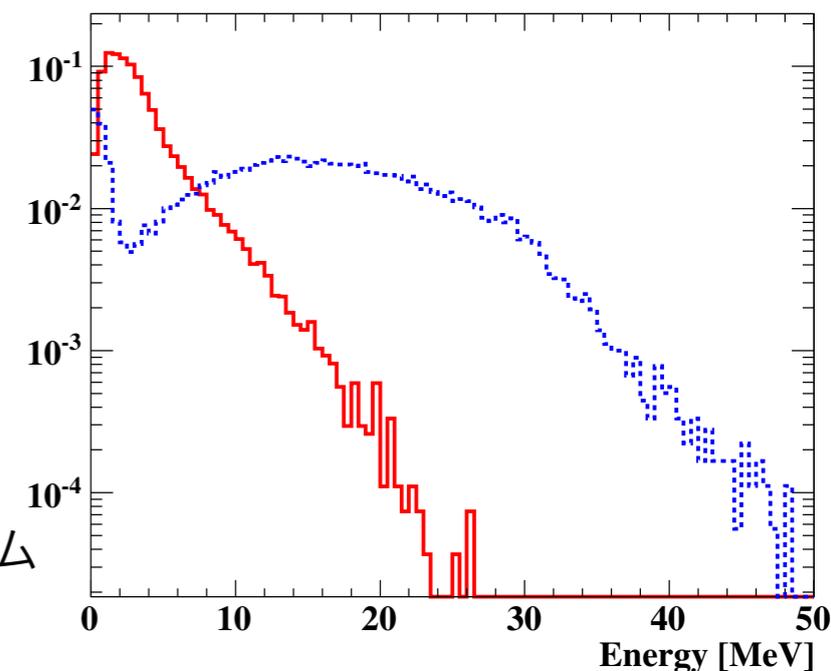
- 左の図は250keV以上のレートが測定されたことを表している

rate : 2.1 kHz

- **キャリブレーションソースとして十分高いレート**である
 - 実際にかかる時間はDAQのエレキの性能で制限される
 - 100HzでDAQが可能だとすると4.5時間程度で全ての結晶のキャリブレーションが可能
- 必要ならば、キセノンカロリメータのキャリブレーション (MEG Iでは2~3時間、週2回実施) と同時にRDCデータをとることも可能

- 背景と目的
 - 数MeV以上の領域において**non-linearity**が観測された
 - SiPMにおけるsaturationが原因か
 - ピクセルピッチサイズの縮小により改善を試みる
 - 実際の物理runでhit rateが高いので**current**は小さい方が良い
 - SiPMの性能上、電流は2mAが限界
 - HV supplyの最大出力以下
 - ピッチサイズの縮小はゲインの低下ひいては**分解能**の低下につながりうる
 - RMD由来の陽電子は典型的なエネルギーが2~5MeV
 - MDからの陽電子と区別したい
 - 5MeV付近においてそれなりのエネルギー分解能 [8%@1MeV, design value]が要求されるので線源を用いて分解能を比較

RMDとMDのe⁺
エネルギースペクトラム



MPPC

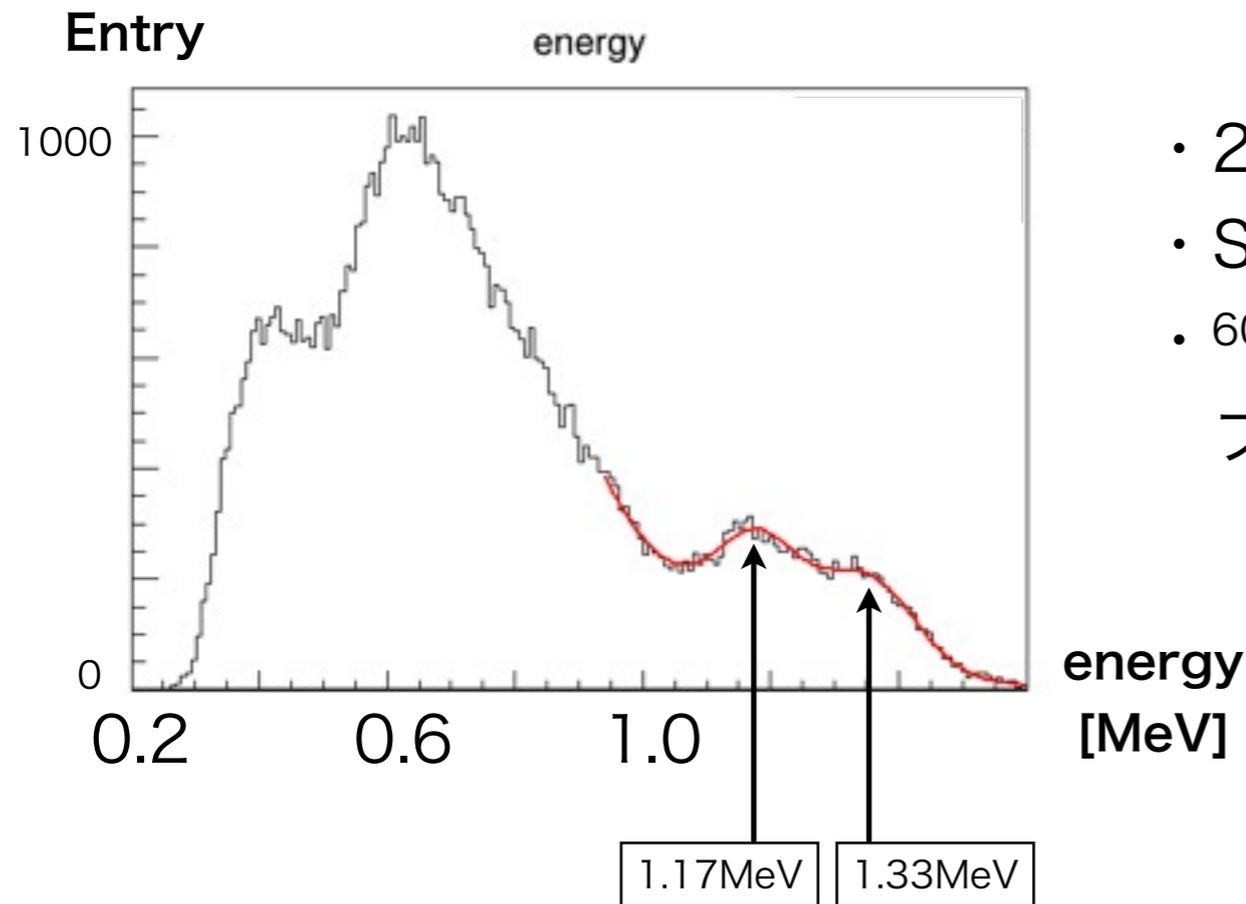
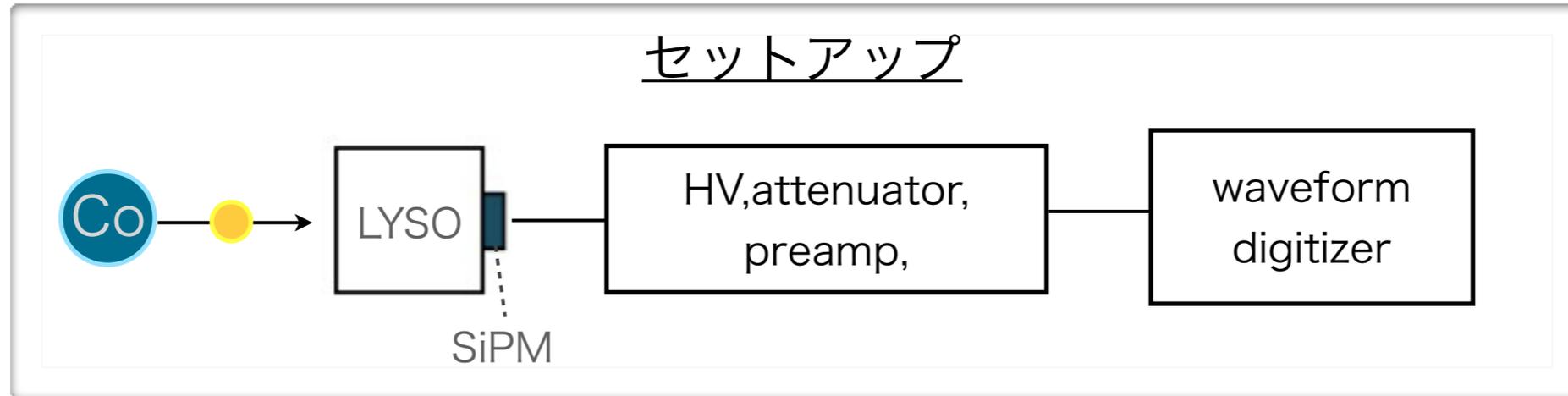
S12572-025P, -050P

overvoltageが同じ場合の比較

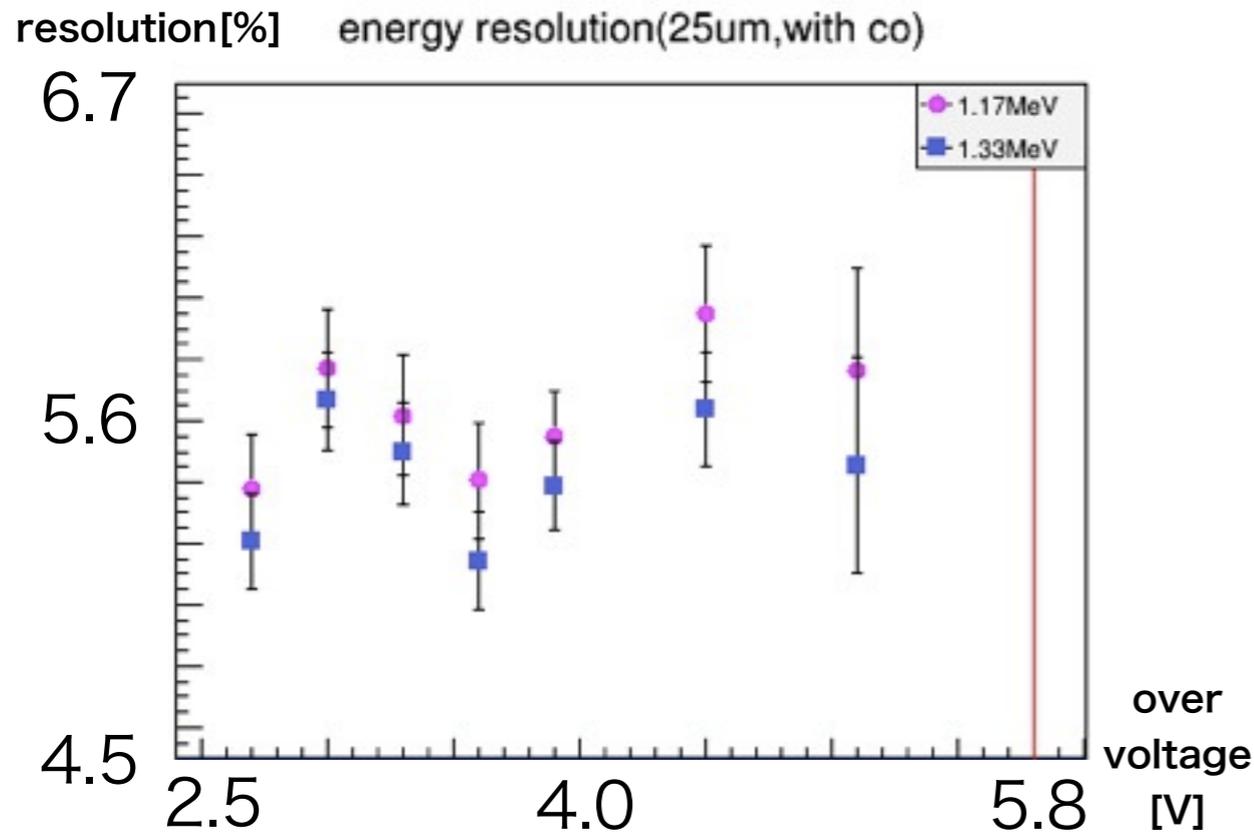
ピクセルピッチ	25 μm	50 μm
ピクセル数の比	4	1
ゲイン	1	4
クロストーク	小	大
PDE	1	1
saturation	小	大
current	小	大

- ・ ピッチ25 μm の利点
 - ・ クロストークの割合が小さい (ゲインが小さいから)
 - ・ saturationが起こりにくい
 - ・ 電流が小さい

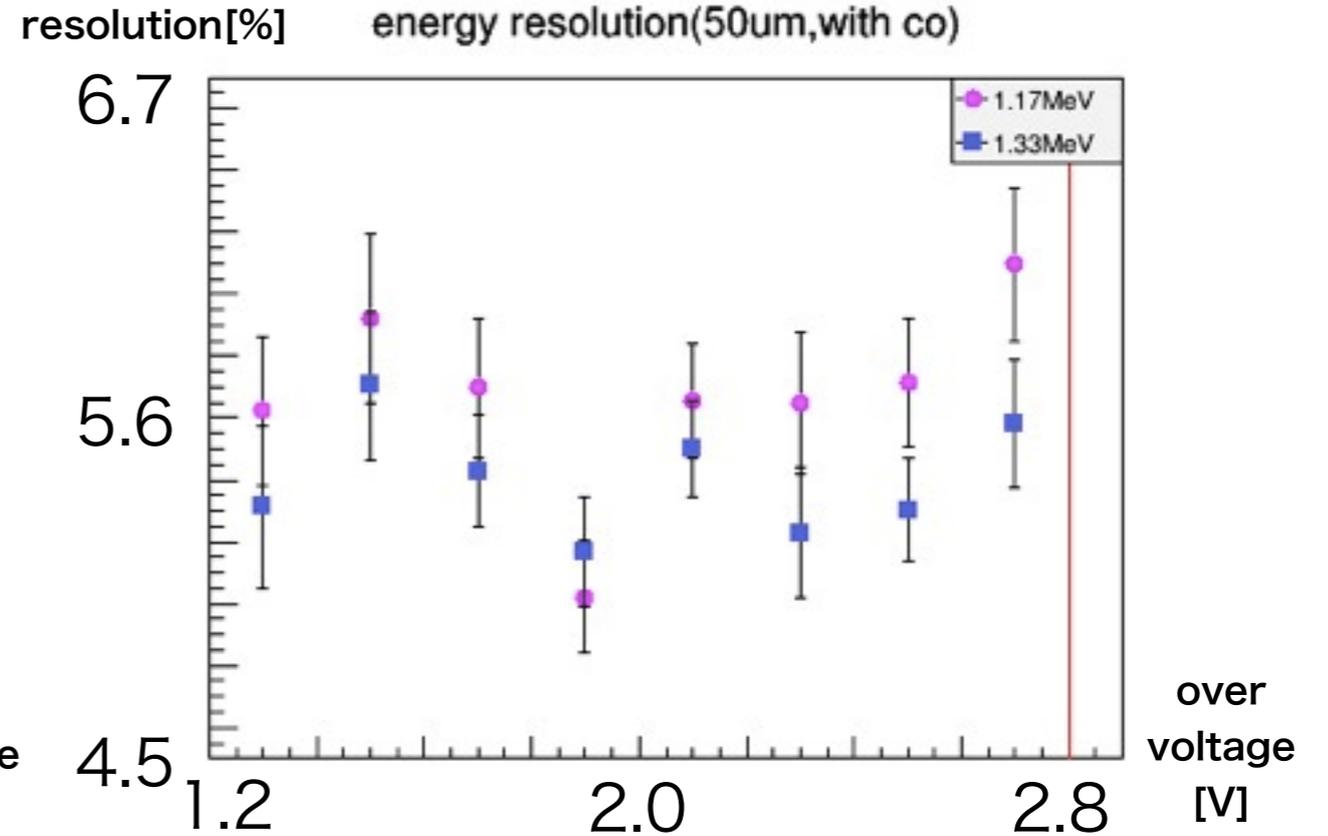
- ・ ピッチ50 μm の利点
 - ・ ゲインが大きくS/Nが良い



- 25 μm と50 μm のエネルギー分解能比較
- SiPMのバイアス電圧を変えて数点DAQ
- ^{60}Co からの γ 線の光電ピークをガウス関数でフィットし、分解能を算出



稼働電流(MEGII) 1mA

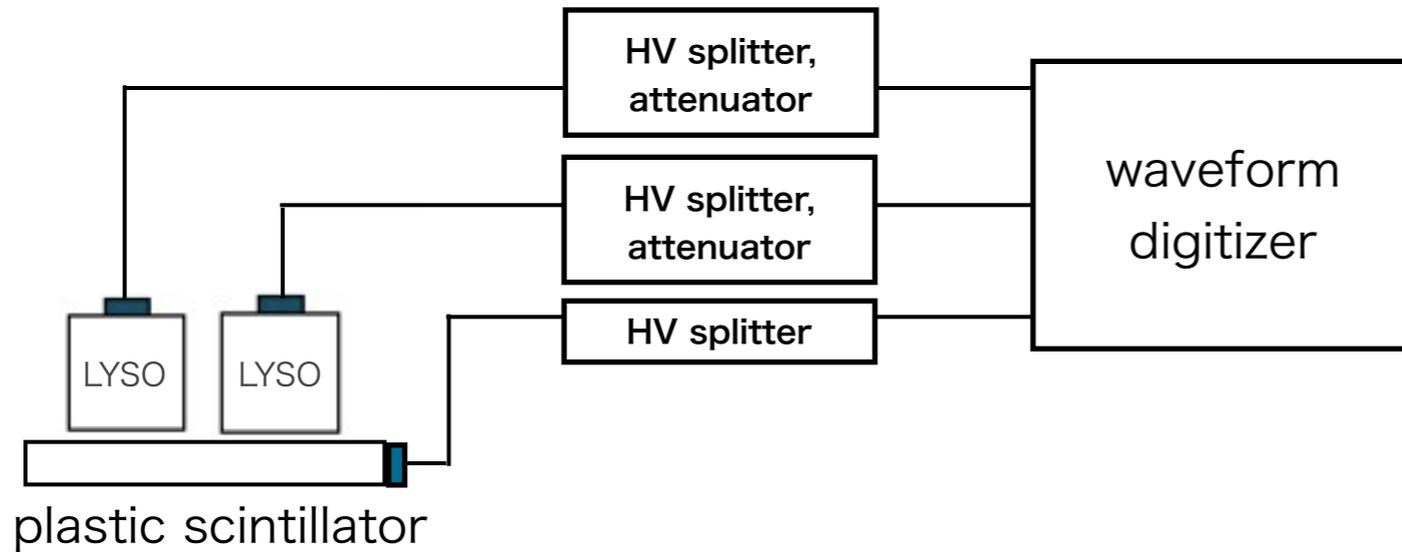


稼働電流(MEGII) 1mA

- 赤のライン：Hit Rateが0.69 MHz、平均のエネルギーデポジットが5.9 MeV、SiPMに流れる電流の上限を1mAと仮定したときに要求される overvoltageの上限値

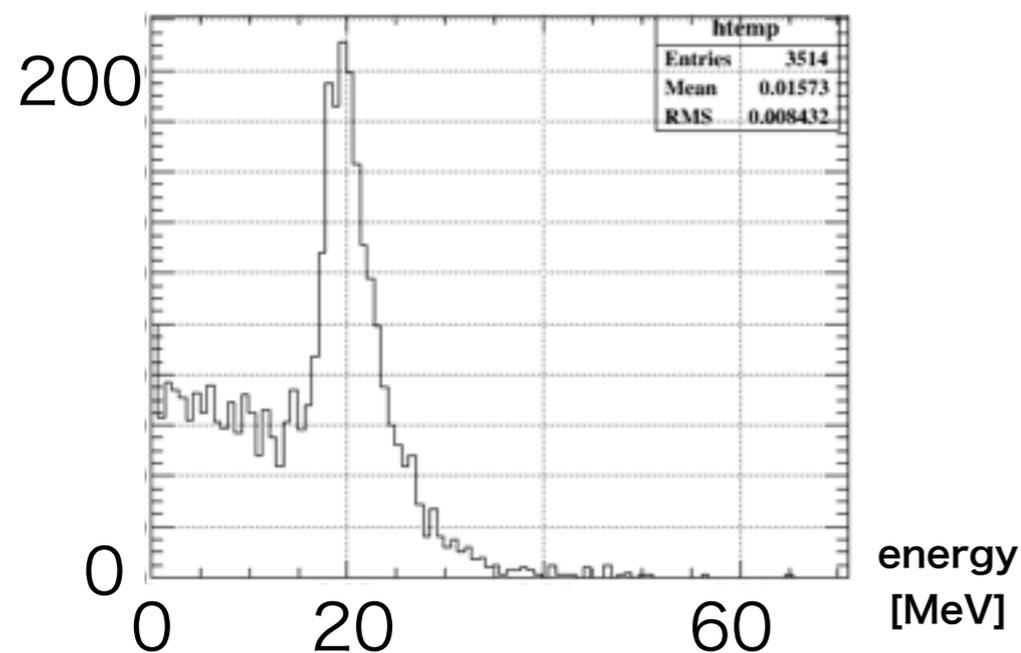
- 分解能はovervoltageを上げるに従いはじめはP.D.Eの効果により良くなるが、徐々にcrosstalkの効果により悪くなる
- 25 μ m、50 μ mともに7%以下の分解能→**双方RDC運用に問題なし**

setup

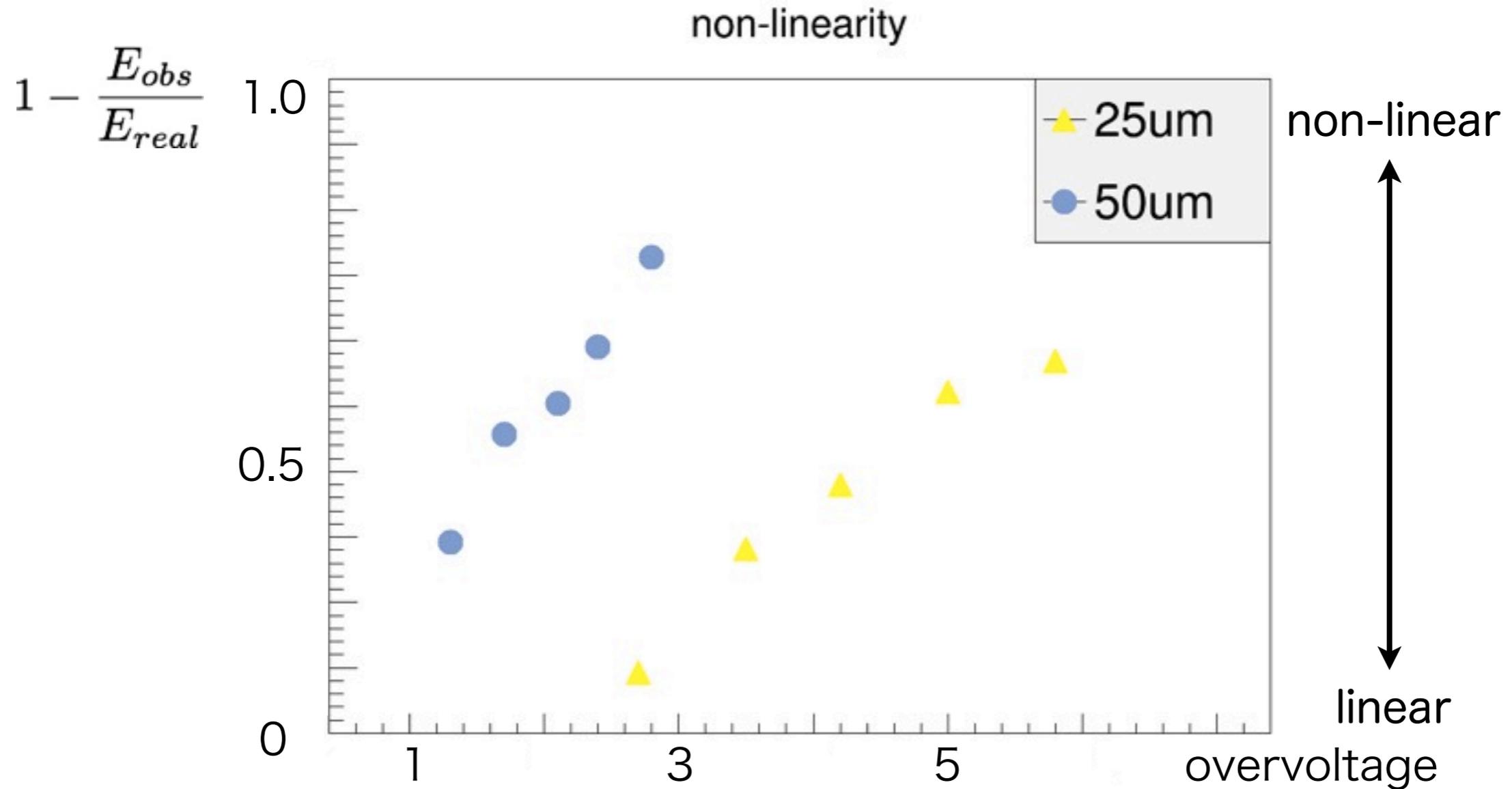


- 数十MeVの領域を観測したい
→宇宙線の利用
- $6 \times 2 \times 0.5 \text{cm}^3$ のプラスチックシンチレーターでトリガー
- SiPMのバイアス電圧を変えて5点データ取得

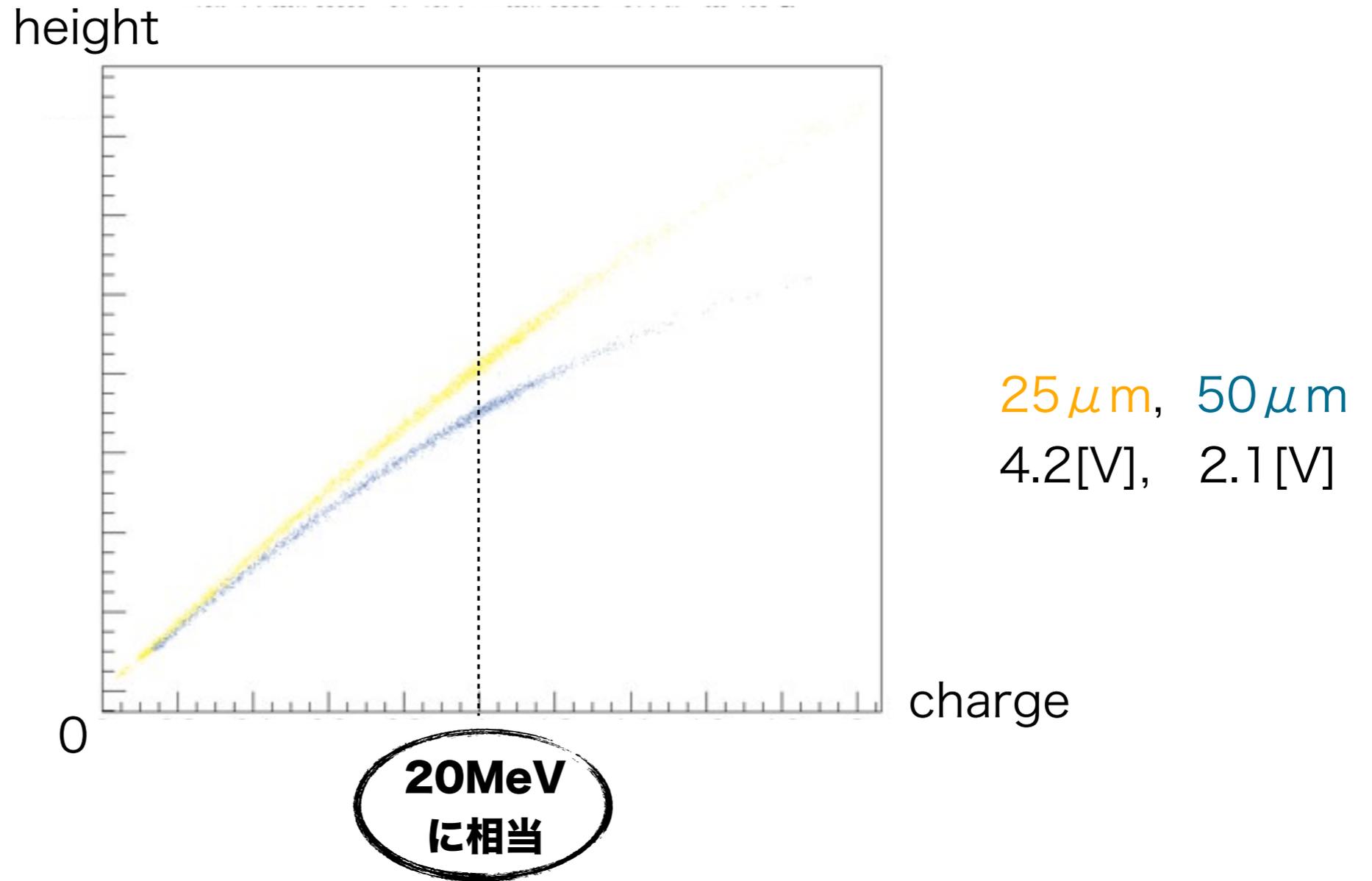
simulation



- エネルギー値を知りたい
→simulation
- LYSO密度 7.3g/cm^3
- 天頂角分布を実装
- ランダウピークが **20MeV**程度と算出



- SiPMでのsaturationがnon-linearityの原因と理解できる (ここではエレキのnon-linearityは効いていない)
- 25 μ mの方がsaturationの影響が小さい



- 25 μm の方が波形変化が小さく波形解析でのpileup分離に有利
- ピクセルのリカバリーの効果が現れている



- non-linearityはピクセルピッチサイズを
50 μm から25 μm に変更することにより改善された
- 25 μm においても50 μm と同等の分解能が得られた
- ピクセルのリカバリーの効果から25 μm の方が
波形変化は緩やかである
- LYSO検出器には25 μm の方がより適当である



・ まとめ

- ・ RDC検出器での背景事象同定により感度の30%改善が見込まれている
- ・ LYSOはキャリブレーションソースを備えた結晶と考えることができる
- ・ non-linearityの原因はSiPMのピクセルでのsaturationであった
- ・ 今回の調査では波形解析の観点から $25\mu\text{m}$ がRDCの目的によりかなったSiPMのピクセルサイズである

・ 今後の展望

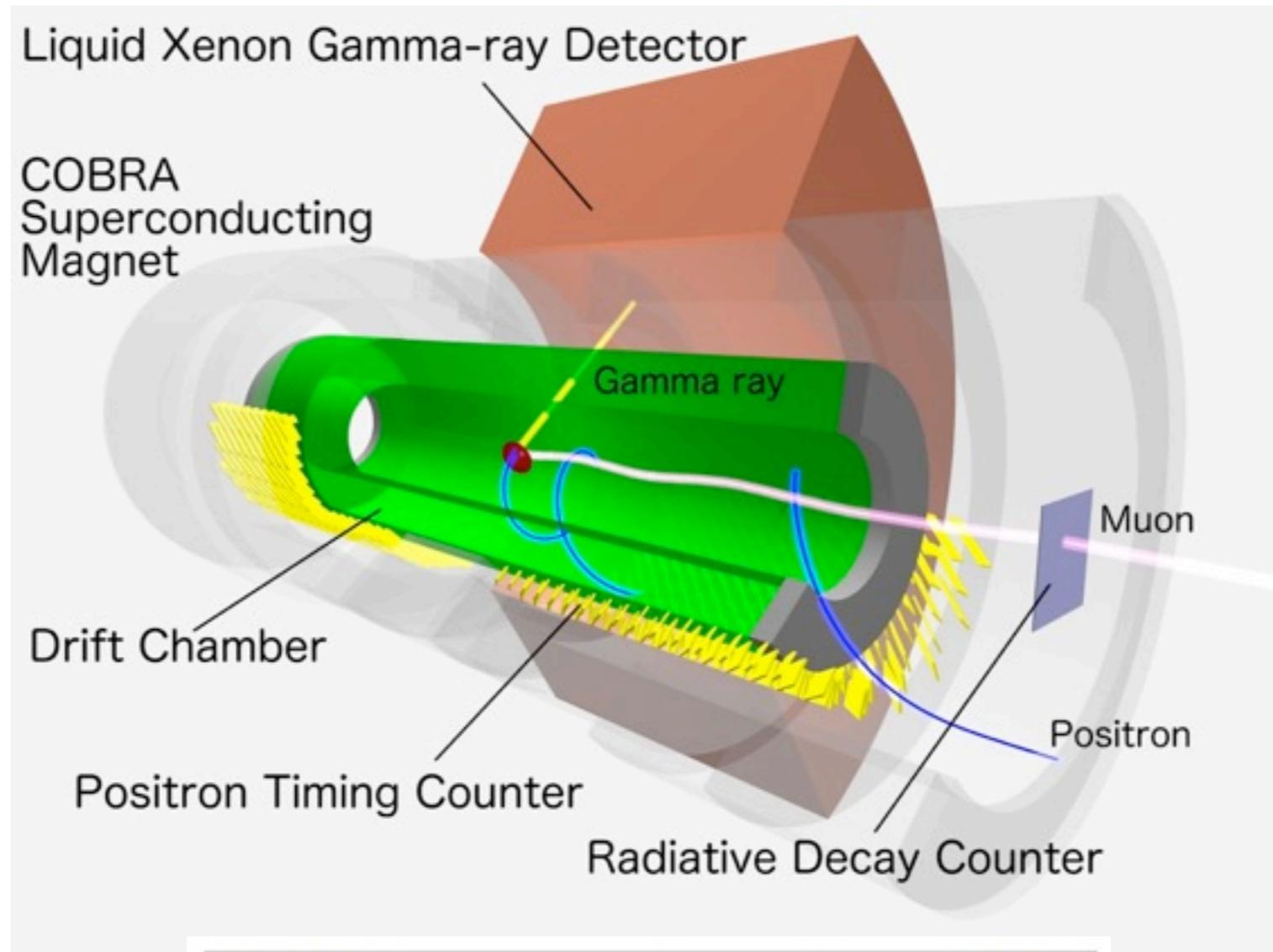
- ・ 今年中に最終的な検出器のconfigurationの決定(SiPM選定 etc.)
 - ・ さらに小さいSiPM($15\mu\text{m}$)も試す
 - ・ 上流側検出器のプロトタイプ作成と性能評価
- ・ 来年夏までに実機作成(upstream detector etc.)
 - ・ 上流側のファイバーディテクターはPSIが担当
 - ・ 下流側のディテクターは東京グループが担当
- ・ 来年末にインストール準備完了



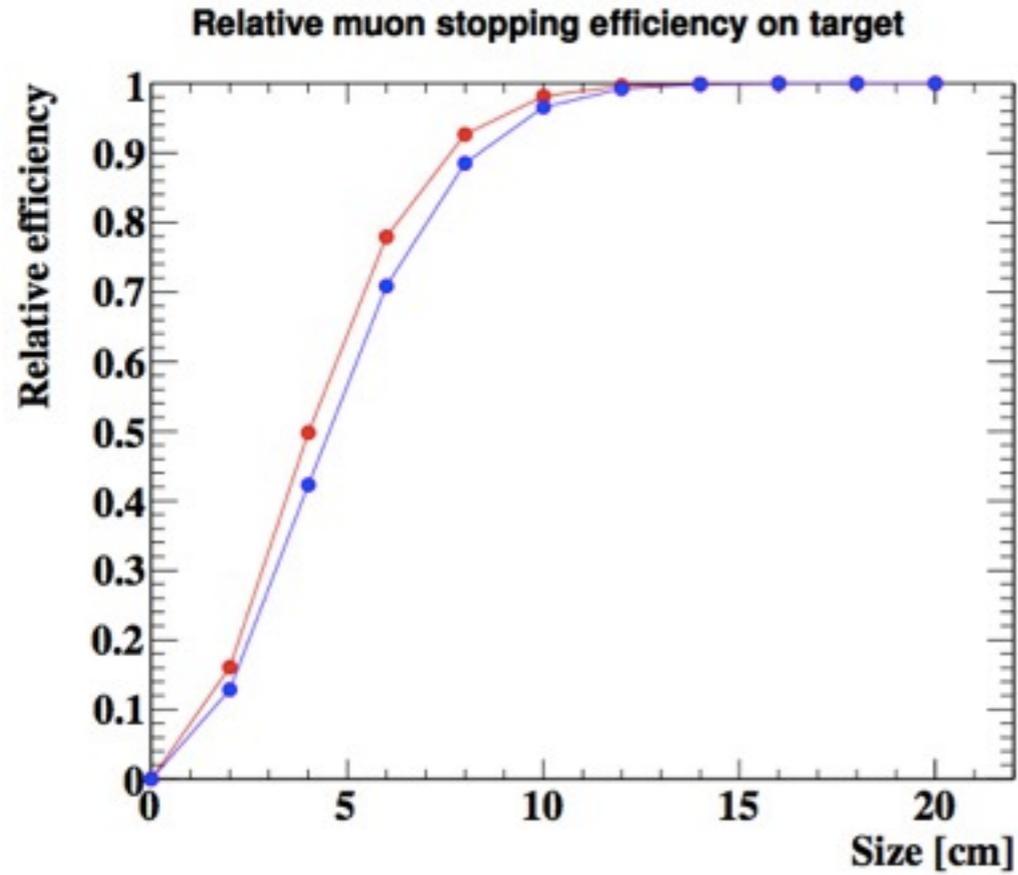
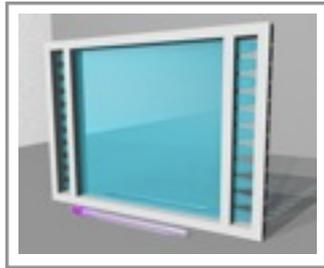
END

ご清聴ありがとうございました

BACKUP

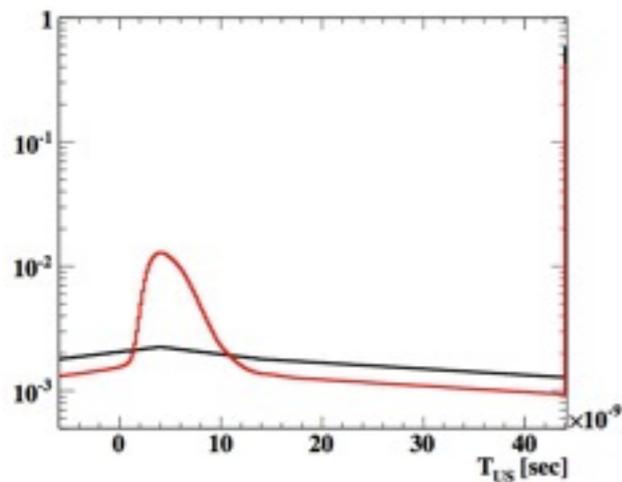


Resolution σ	Present MEG	MEG II
$\sigma_{E_{e^+}}$ (keV)	306 (core)	130
e^+ $\sigma_\theta/\sigma_\phi$ (mrad)	9.4/8.7	5.3/3.7
e^+ vertex (core) (mm)	1.2-2.4	0.7-1.6
$\sigma_{E_\gamma}/E_\gamma$ (%)	1.7-2.4	1.0-1.1
γ position at LXe (mm)	5-6	2.2-5
γ - e^+ timing (ps)	122	84
Efficiency (%)		
γ	63	69
e^+	40	88

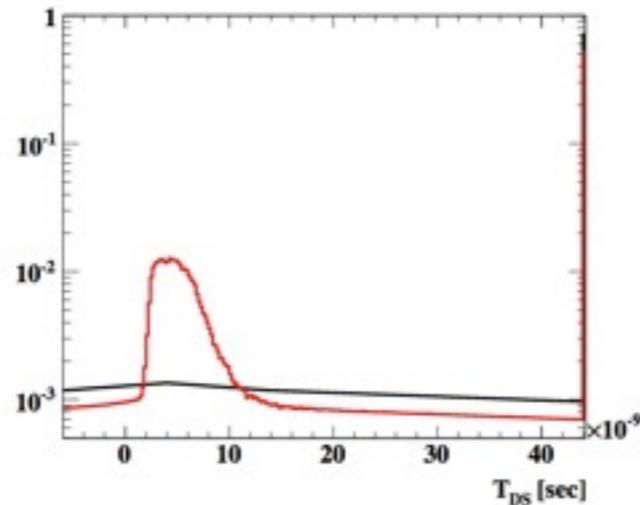


• RDC(上流側)のミュオンビームへの影響

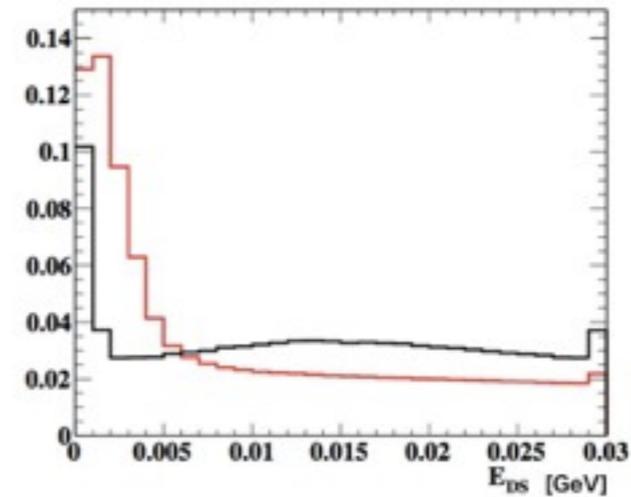
- ターゲットにおけるミュオンの stopping efficiencyのMC simulation
- ビームとターゲットの性質はMEG II proposalに基づいている
- efficiencyは検出器のサイズが20cmのときの値で規格化
- 現在のデザインは18cmであり、efficiencyの観点からは十分



RMDのe⁺と γ の時間差(上流)

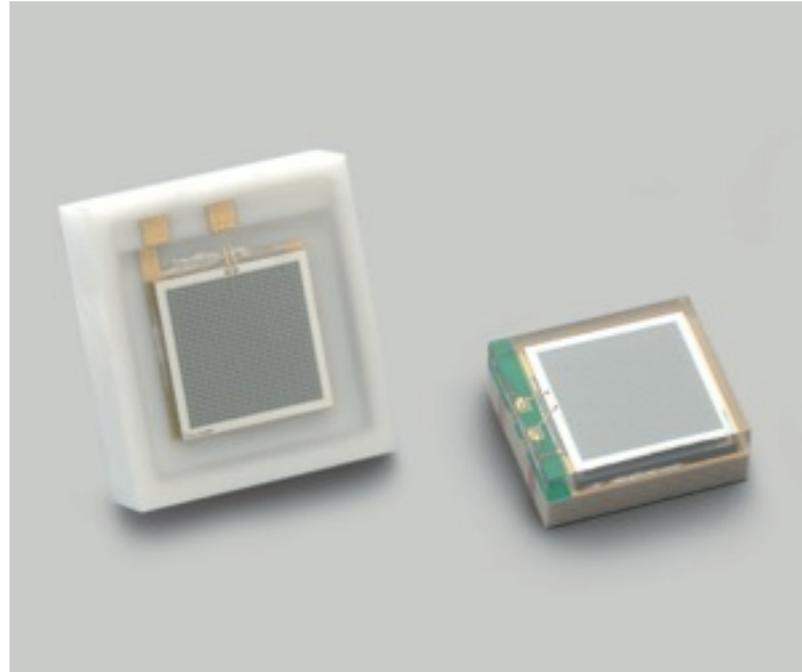


RMDのe⁺と γ の時間差(下流)



e⁺のエネルギー分布

- 赤 : RMD
- 黒 : signal+MD

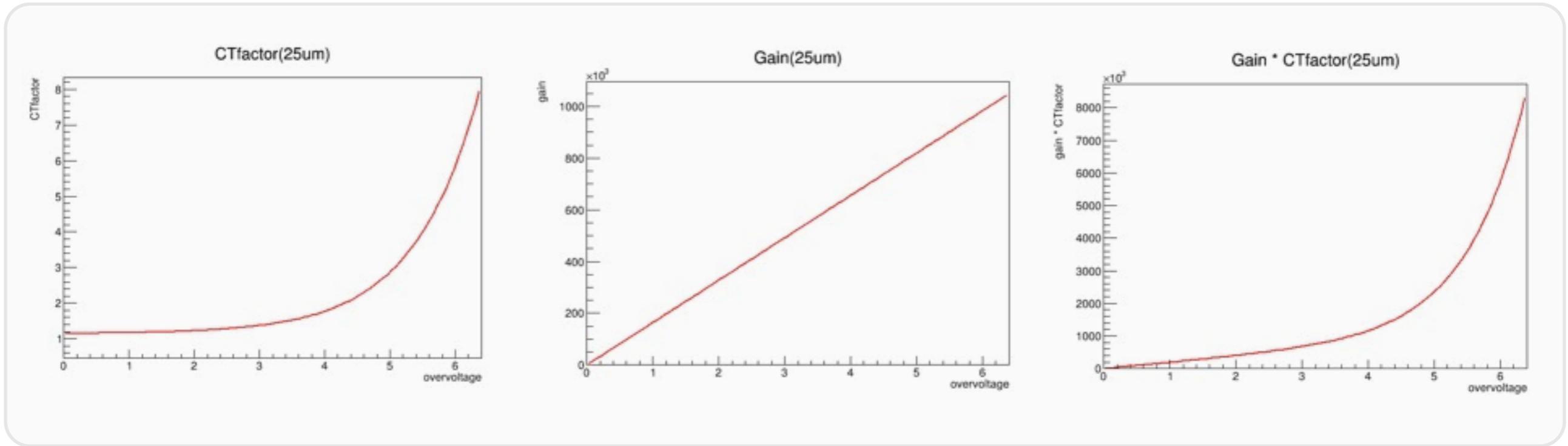


- ・ 複数のAPDピクセルからなる光検出器
- ・ 逆バイアスをかけガイガーモードで駆動
- ・ MPPC S12572-025,-50
- ・ 低アフターパルス

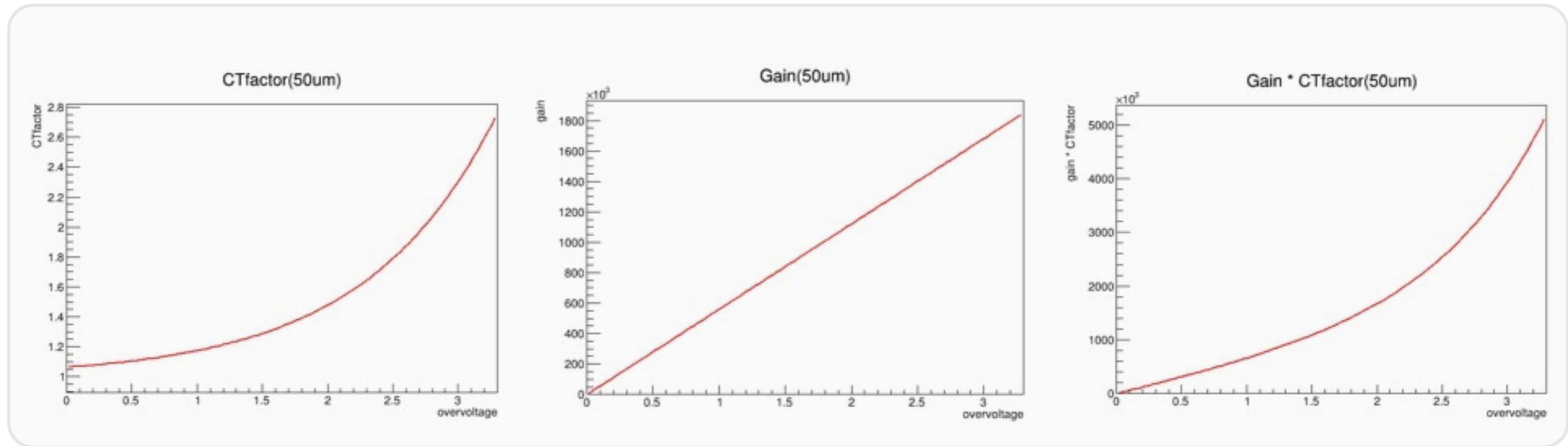
	-025P	-050P
有効受光面サイズ	3×3mm ²	3×3mm ²
ピクセルピッチ	25μm	50μm
ピクセル数	14400	3600



25um



50um





25 μm

50 μm

