

感度 10^{-15} の $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索を目指した アクティブコンバーター型 光子ペアスペクトロメーターの開発

榊原 滯

2026-09-16

第81回日本物理学会年次大会

測定器開発優秀修士論文賞 受賞記念講演

概要

背景

$\mu \rightarrow e\gamma$ 探索のための将来実験のガンマ線検出器として、コンバーターでガンマ線を対生成させ電子・陽電子をトラッキングするペアスペクトロメーター方式を検討中

本研究

アクティブコンバーターの研究開発

行ったこと

1 シミュレーション

コンバーターの最適化と性能評価

最適な仕様

LYSO・厚み 3 mm・5 × 50 mm

2 ビーム試験

試作コンバーターの実測評価

時間分解能

25 ps

光量

10000 p.e. 以上

目次

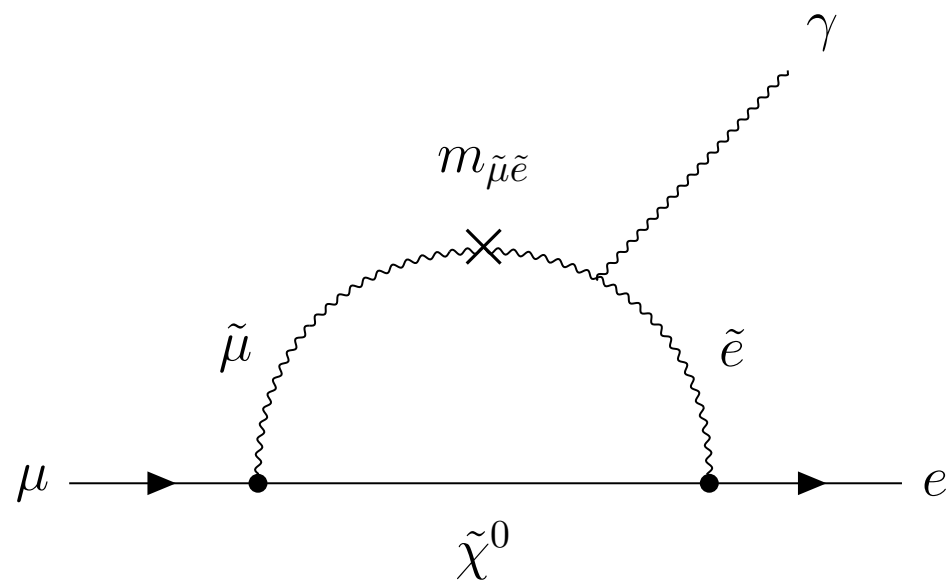
1. 序論	4
2. シミュレーションによる研究	12
3. 電子ビームによる研究	20
4. 展望	27

01

序論

$\mu \rightarrow e\gamma$ 探索

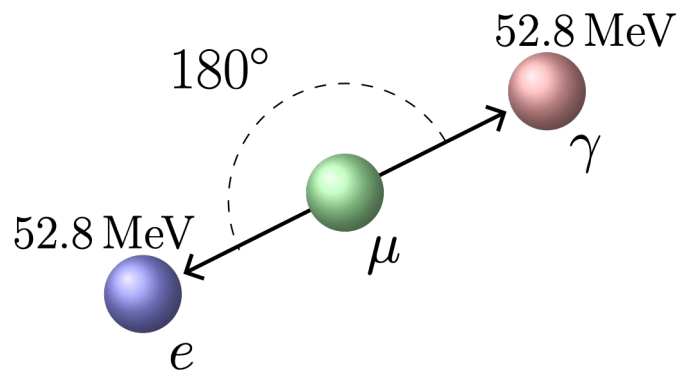
- 荷電レプトンフレーバー保存を破る現象
 - 標準模型では禁止されるが、新物理の効果により観測可能な頻度で起こる
- 現在の $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験: MEG II実験
 - 2022年までに取得したデータで崩壊分岐比感度 2.2×10^{-13} (90 % C.L.)の探索を行った
 - 2026年9月末までデータ取得予定(目標感度: 6×10^{-14})



SUSY粒子を媒介した $\mu \rightarrow e\gamma$

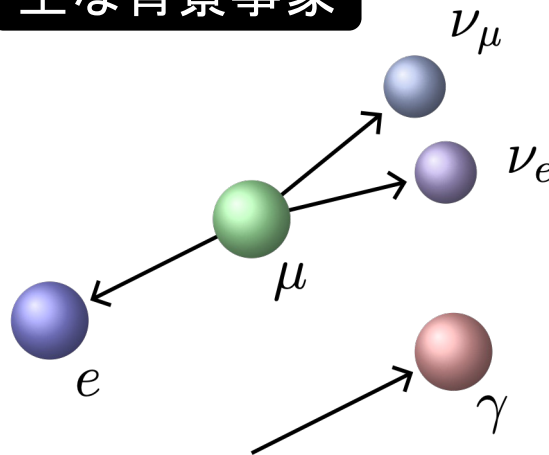
信号事象と背景事象

信号事象



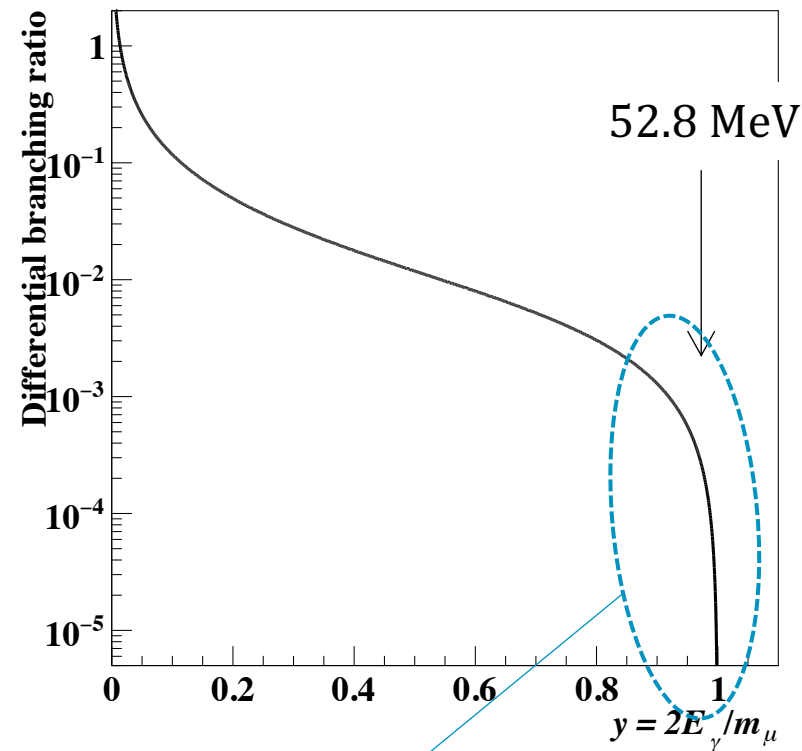
- $E_\gamma = 52.8 \text{ MeV}$
- $E_e = 52.8 \text{ MeV}$
- $t_{e\gamma} = 0 \text{ s}$
- $\Theta_{e\gamma} = 180^\circ$

主な背景事象



- $E_\gamma < 52.8 \text{ MeV}$
- $E_e < 52.8 \text{ MeV}$
- $t_{e\gamma} \dots$ 相関なし
- $\Theta_{e\gamma} \dots$ 相関なし

背景ガンマ線スペクトラム

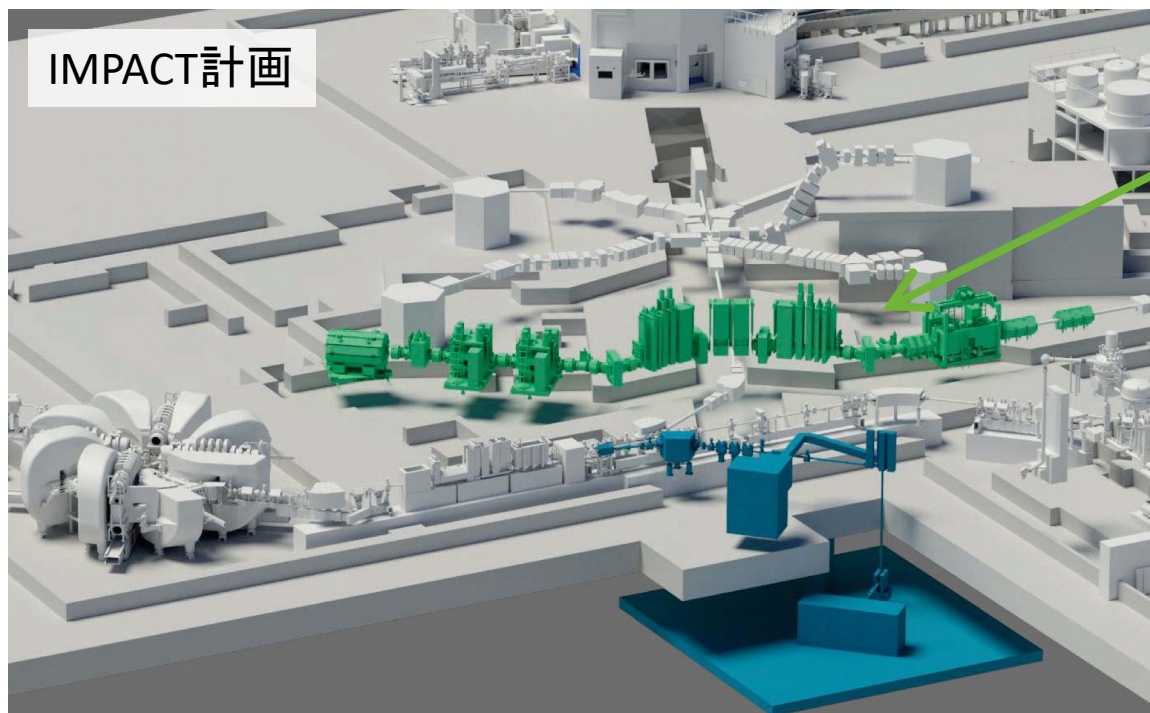


$$N_{BG} \propto R_\mu^2 \sigma_{t_{e\gamma}} \sigma_\Theta \sigma_{E_e} + \sigma_{E_\gamma}^2$$

→ 背景事象の削減には、
ガンマ線エネルギー分解能が特に重要

$\mu \rightarrow e\gamma$ 探索のための将来実験

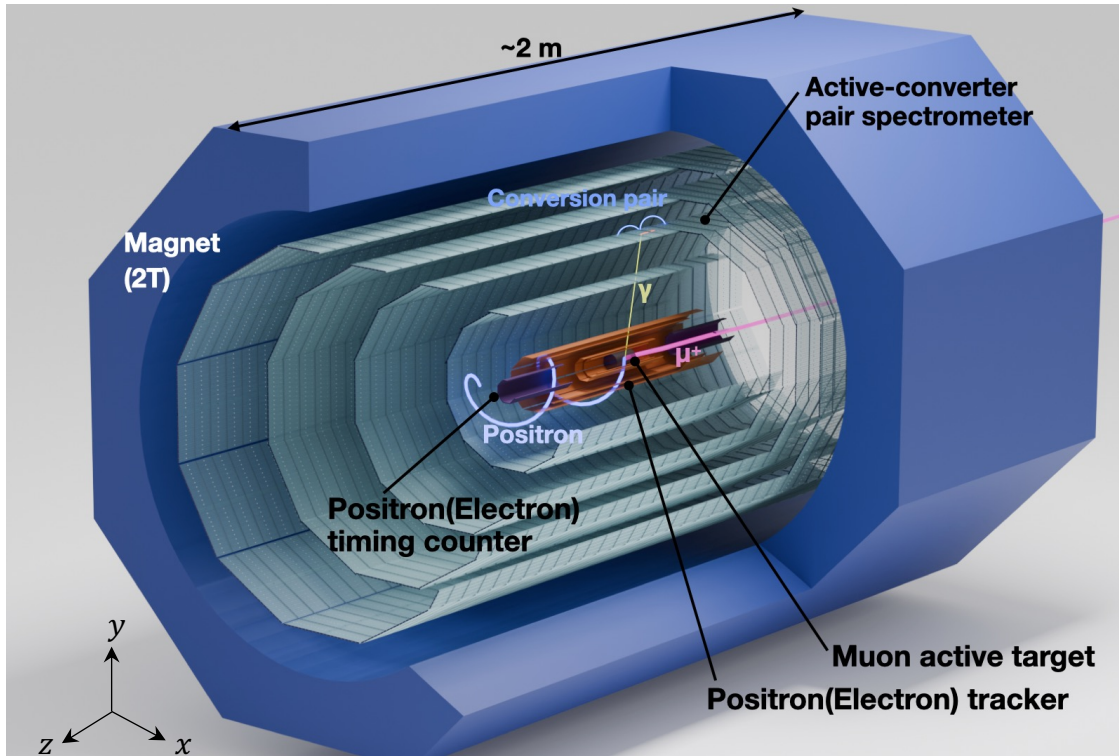
- 動機: MEG II実験の一桁上の感度 $O(10^{-15})$ での $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索・発見後の精密測定
- ミューオンビームラインアップグレード計画@PSI
 - およそ100倍のミューオンビームレート増加 ($O(10^8 \mu/\text{sec}) \rightarrow O(10^{10} \mu/\text{sec})$)
 - 2029年より運用開始予定
 - $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索新実験に最適



HIMB
(High Intensity Muon Beamline)

検出器コンセプト

- 80 % の大立対角 (MEG: 11 %) による大統計と角分布測定
- $O(10^{10} \mu/\text{sec})$ のレートで運用するためのレート耐性・放射線耐性
- 高い分解能 (特に光子測定において0.4 %のエネルギー分解能)



ミューオン静止標的

- アクティブ素材&分割標的

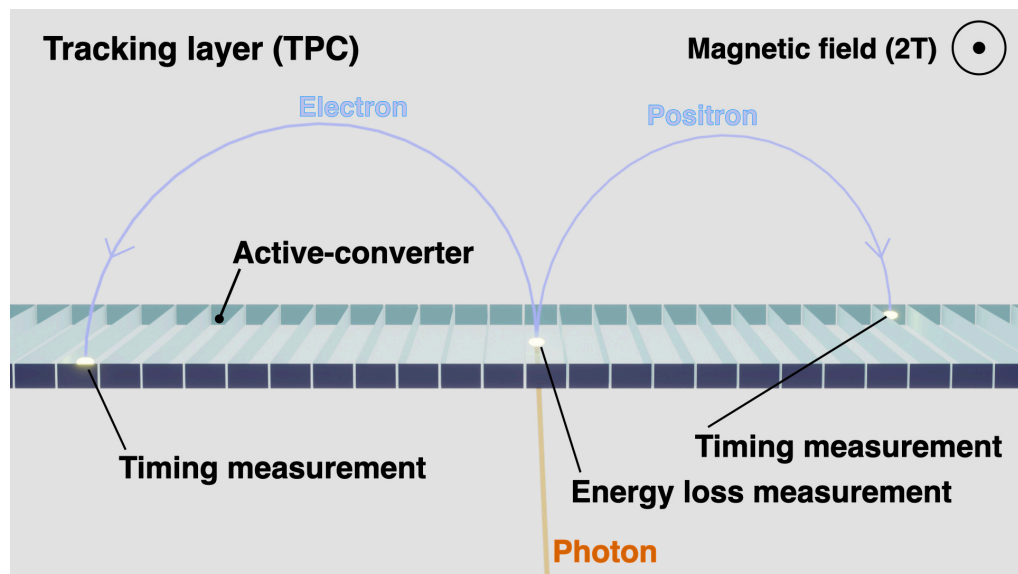
陽電子検出器

- シリコントラッカー
... Mu3e実験で用いられているMAPSをベースに開発予定
- タイミングカウンター (シンチレーター+ SiPM)

光子検出器

- アクティブコンバーター型ペアスペクトロメーター

アクティブコンバーター型ペアスペクトロメーター



$$E_{\gamma} = E_{\text{dep}} + E_{e^{+}} + E_{e^{-}}$$

$$t_{\gamma} = \frac{1}{2} \left(t_{\text{hit}}^{e^{+}} + t_{\text{hit}}^{e^{-}} - t_{\text{TOF}}^{e^{+}} - t_{\text{TOF}}^{e^{-}} \right)$$

■ = ペアトラッカーによる測定
■ = コンバーターによる測定

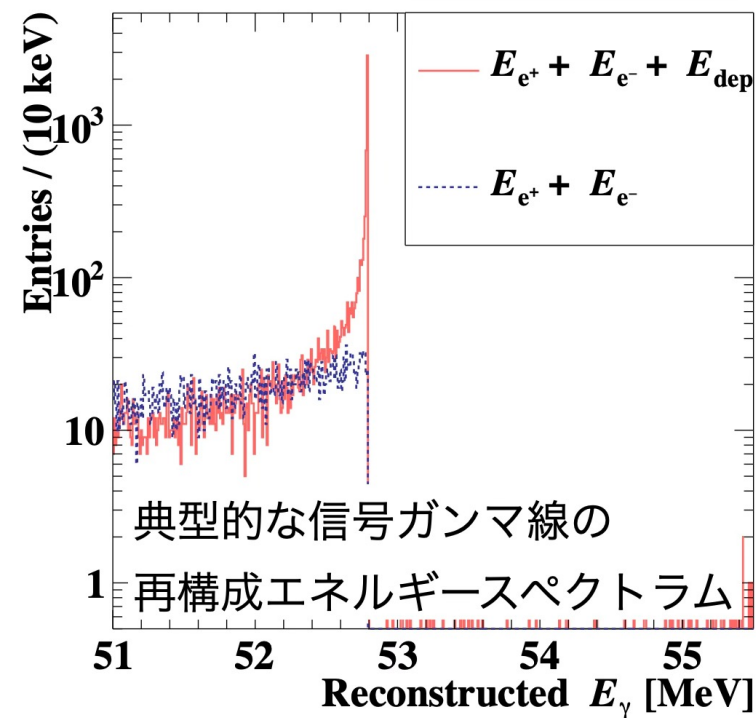
カロリメーター方式(MEG, MEG II) との比較

利点

- レート耐性
- トラッカーによる高分解能
- 角度測定可能性

欠点

- 低検出効率→高レートビーム + 複数層



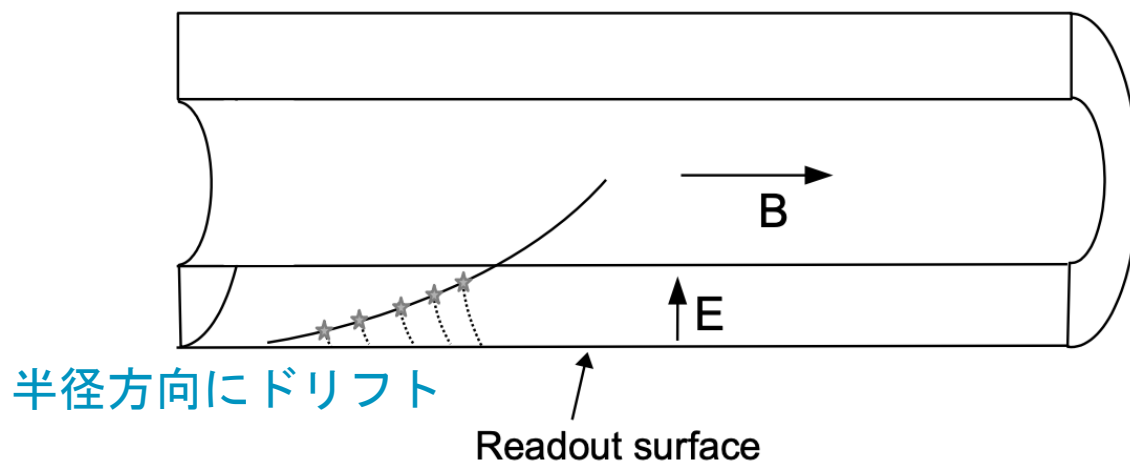
ペアスペクトロメーターの構成

ペアトラッカー

Radial TPC

TPC 連続サンプリングにより低エネルギートラックも検出可能に

Radial ドリフト距離を短く



開発状況

- **ビームテスト (2024年5月)**
μRWELLを増幅段に使用
ヒット分解能 800 μm 、トラック分解能 2 deg
- **ビームテスト (2026年10月予定)**
GEMを増幅段に使用

アクティブコンバーターの研究開発

シミュレーション

01

ガンマ線測定の実験

– ペアスペクトロメーター方式による測定の実験

02

コンバーターの最適化

– 最適な素材や厚みは？
– 最適なセグメンテーションは？

03

実際の性能の評価

– 時間分解能は？
– エネルギー分解能は？
– ガンマ線変換効率？

ビームテスト

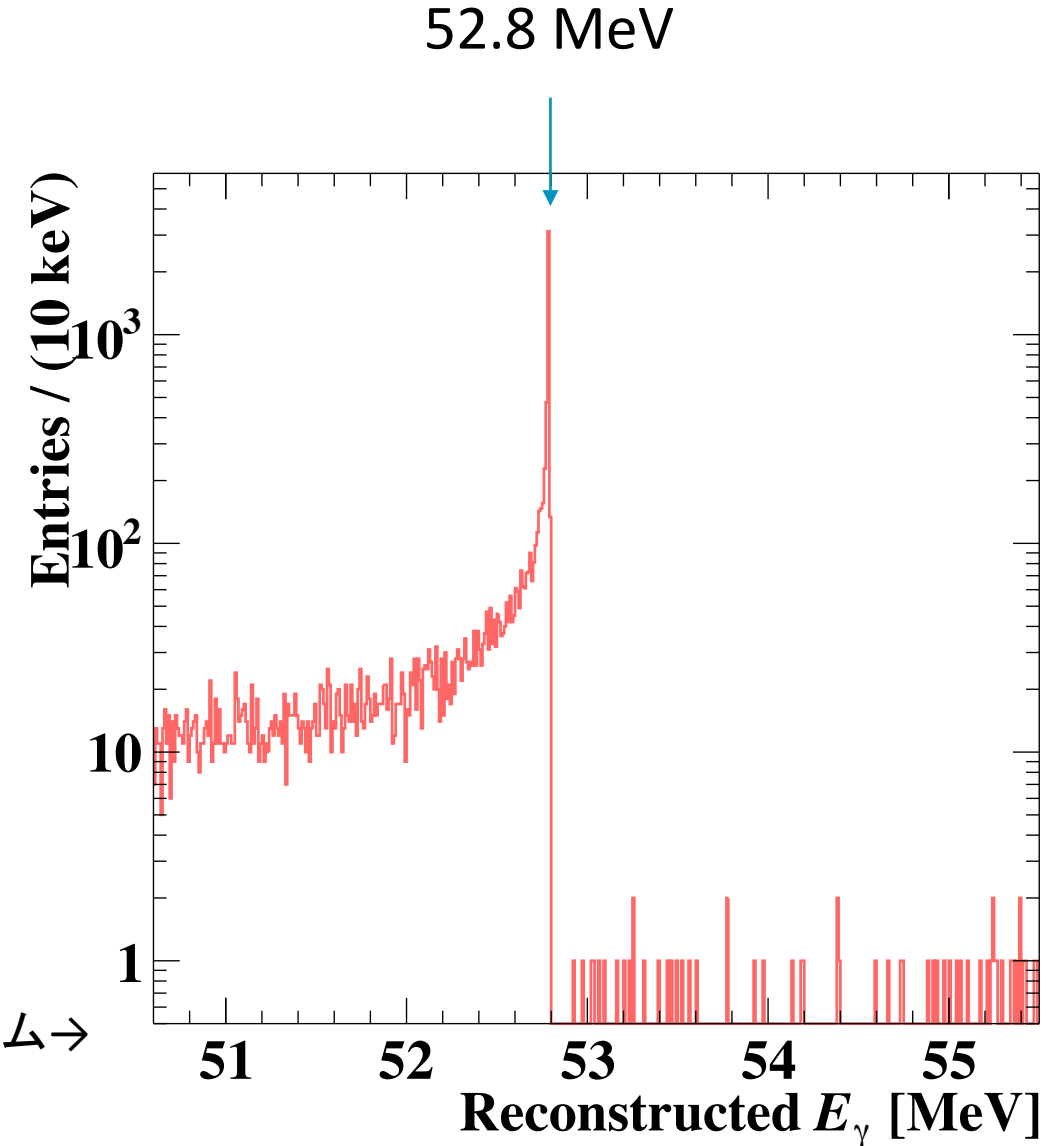
02

シミュレーションによる研究

信号光子の再構成エネルギースペクトラム

- 52.8 MeVの単色エネルギーの再構成スペクトラム
- 52.8 MeVより高エネルギー側・低エネルギー側に非対称なテール

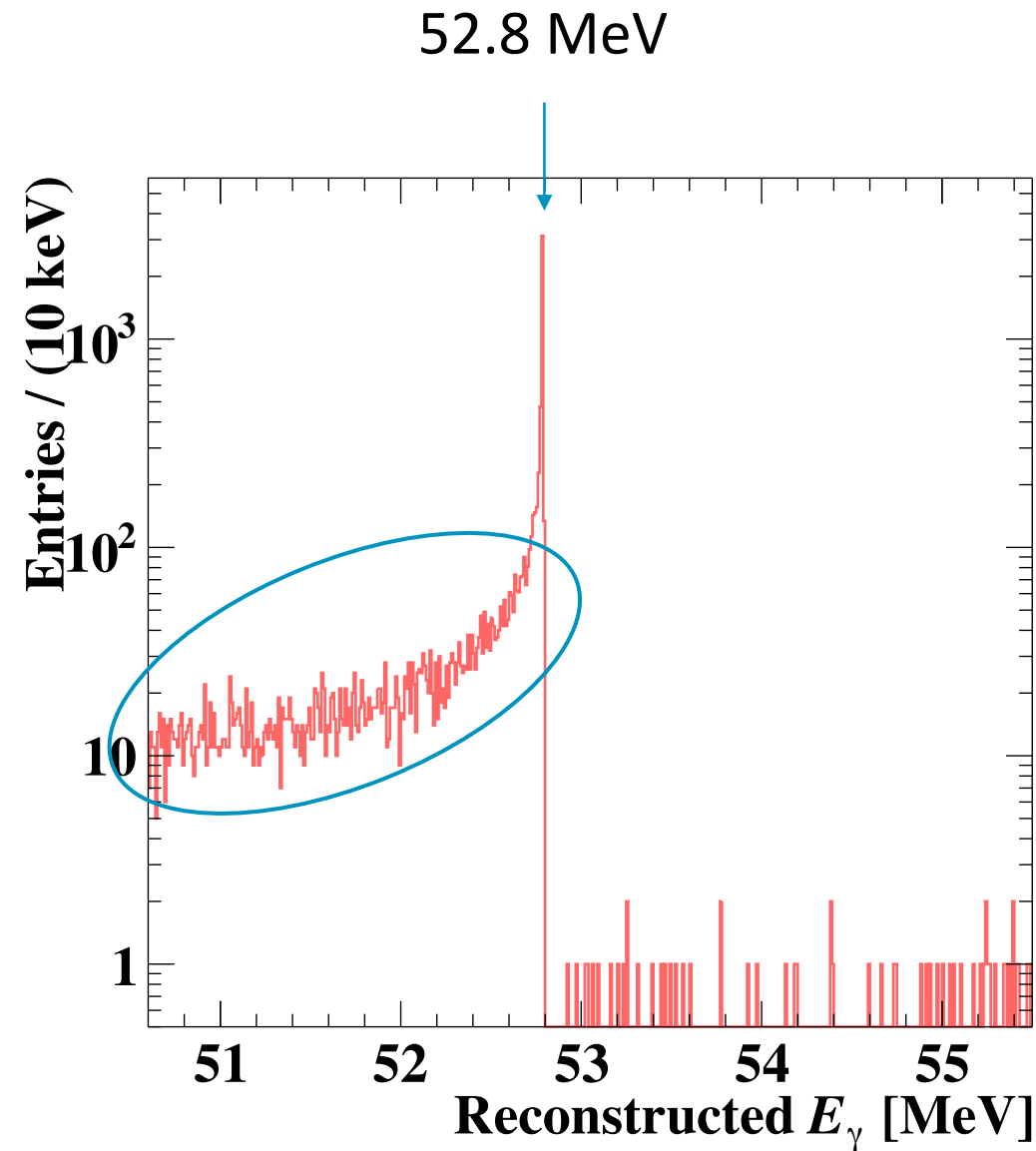
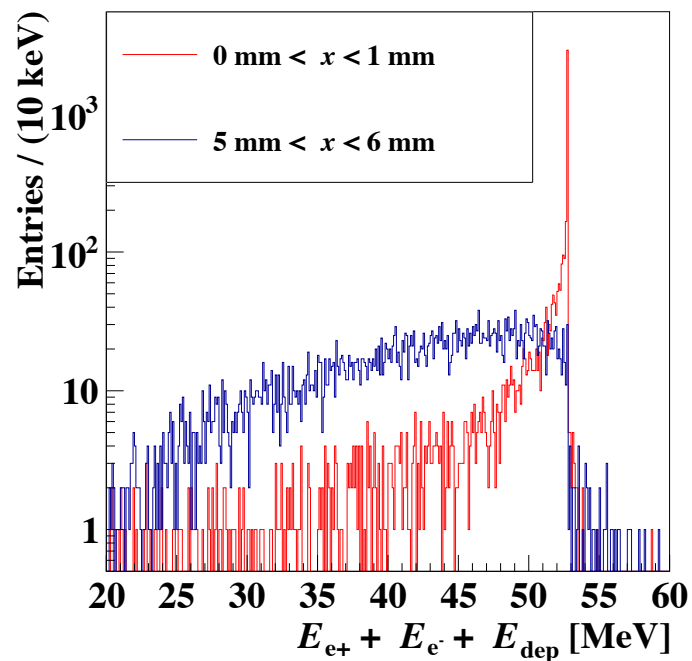
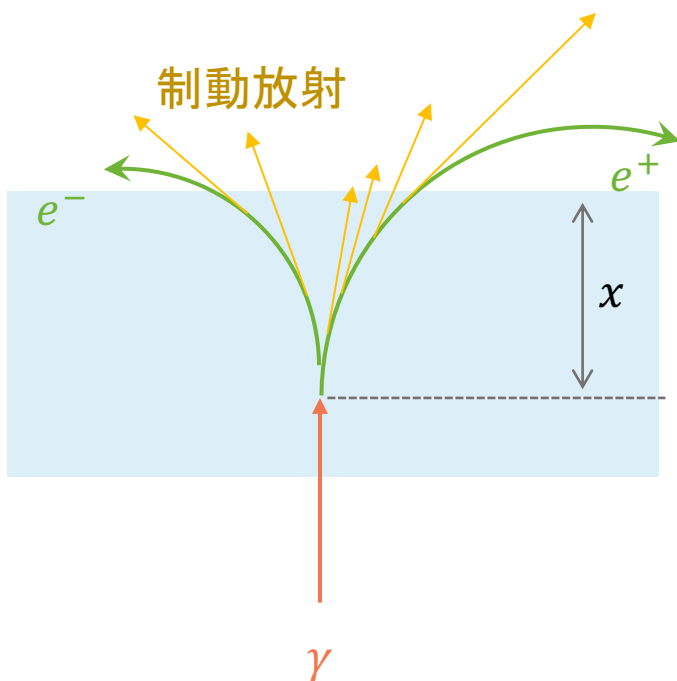
52.8 MeVの信号光子のエネルギー再構成スペクトラム→



信号光子の再構成エネルギースペクトラム

低エネルギーテール

対生成粒子がコンバーターから出るまでに、
制動放射により測定できずに逃げるエネルギー
による効果

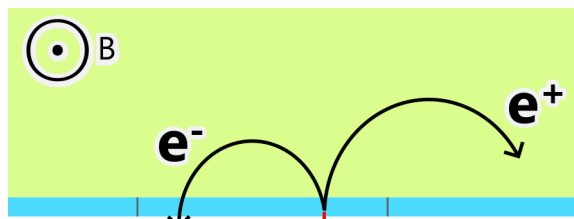


信号光子の再構成エネルギースペクトラム

高エネルギーテール

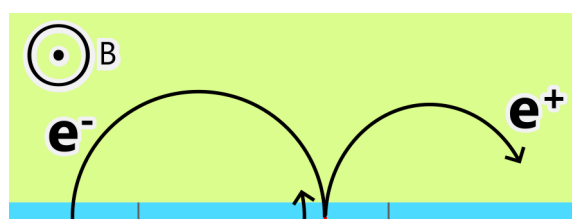
対生成粒子が対生成を起こしたコンバーターセルと同じセルに再度入射した場合のエネルギー二重カウント

半周後同じセルに再入射

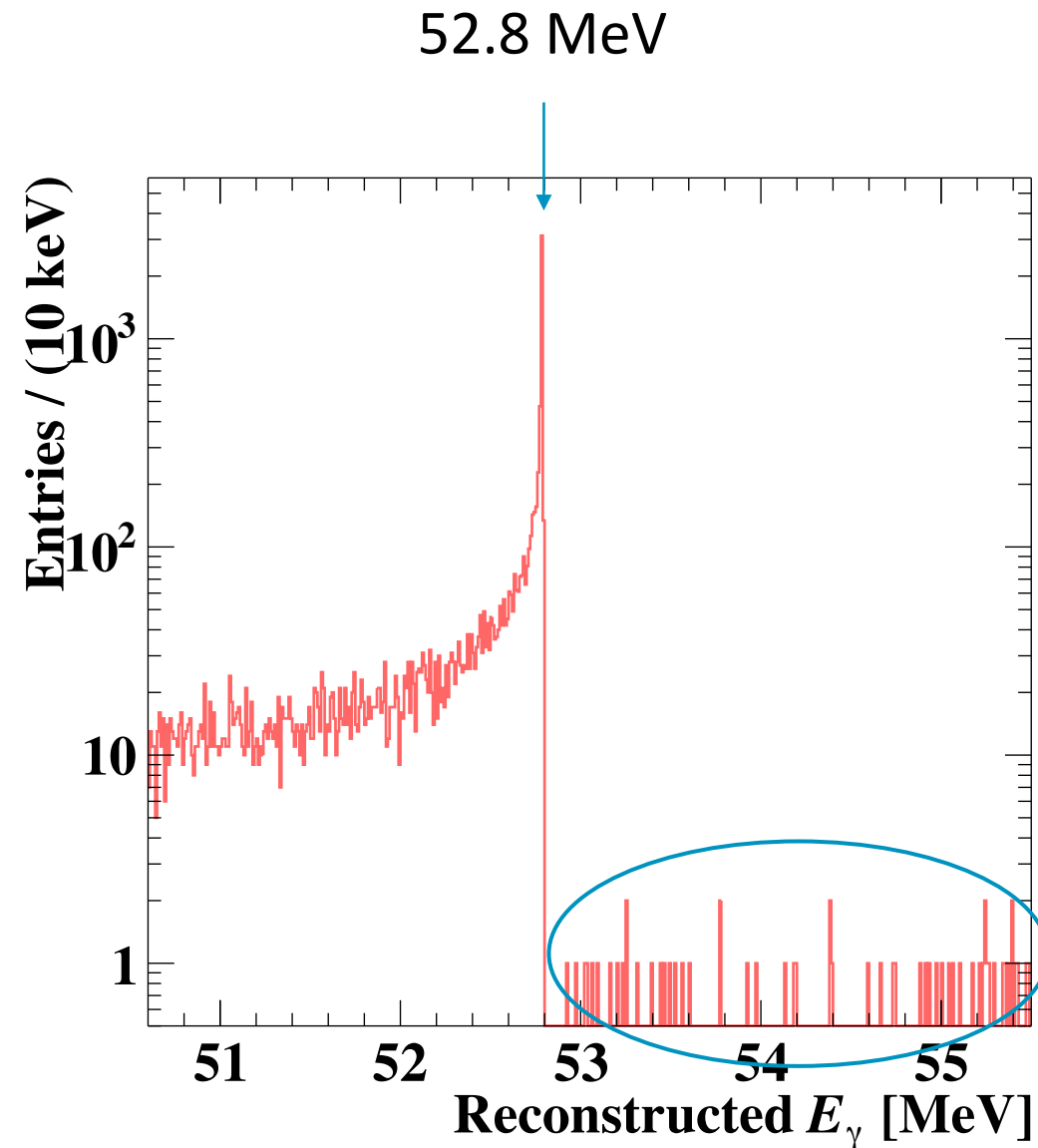


トラッキングにより
特定して解析から除去

複数周後同じセルに再入射



高エネルギーテール
に寄与

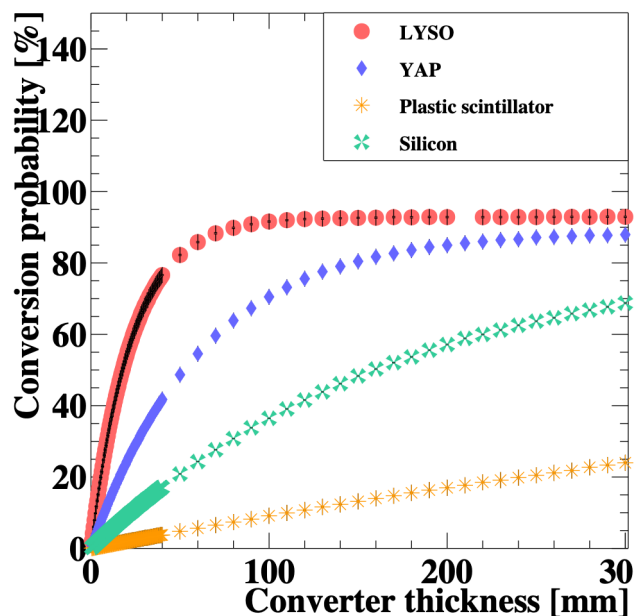


厚み・材質の最適化

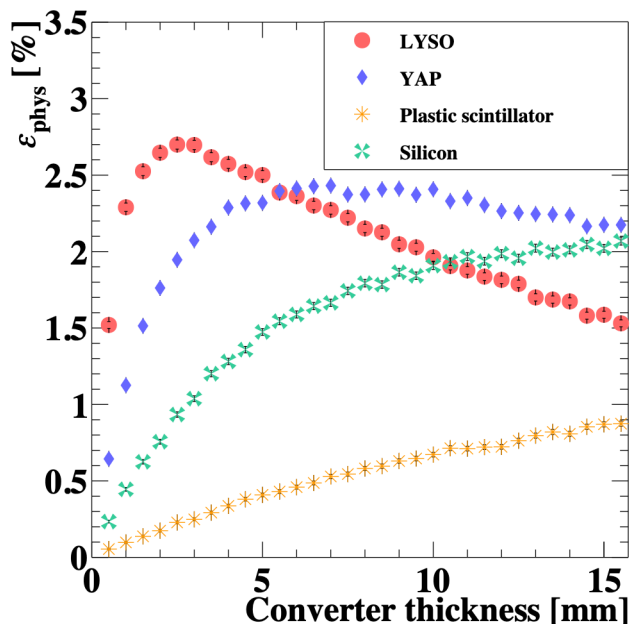
- 対生成確率は物質質量とともに増加
- しかし厚いコンバーターでは
 - 制動放射により持ち出されるエネルギーが増加 (低エネルギーテール)
 - コンバーター中で停止してしまう電子・陽電子が増加

両者のバランスで厚みを最適化
する必要がある

対生成確率の材質ごとの厚み依存性



信号効率の材質ごとの厚み依存性



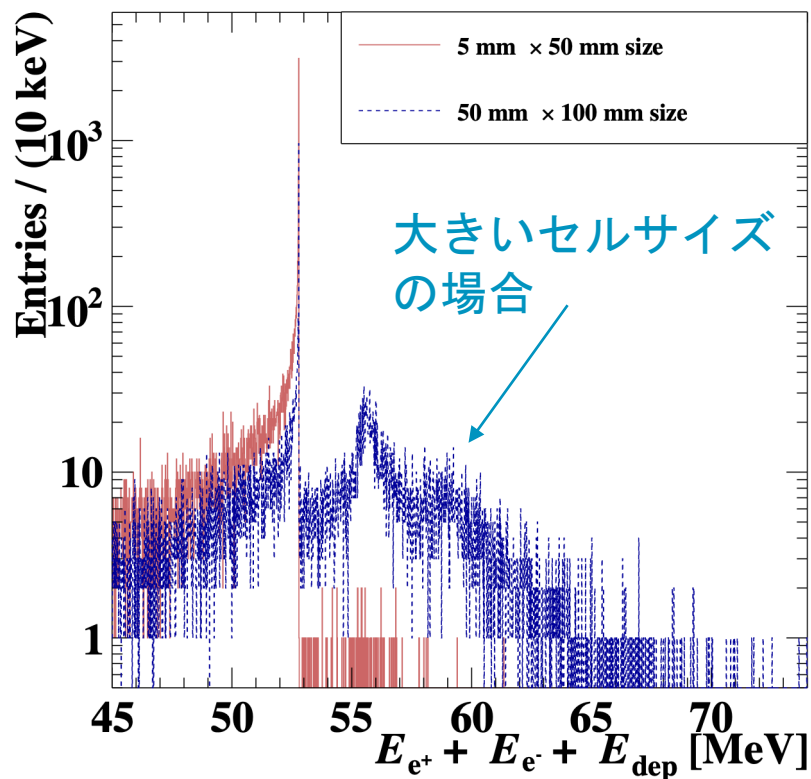
3 mm のLYSOが信号効率を最大化

厚みを抑えて制動放射を抑えつつ、
Z が大きいいため高い対生成効率が得られる

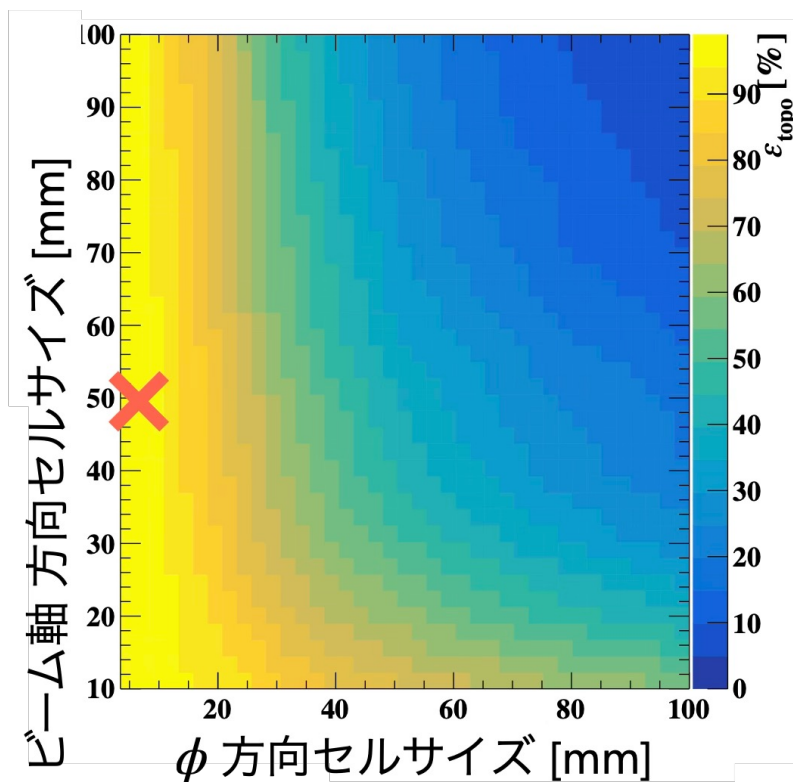
コンバーター分割粒度の最適化

- 事象トポロジー由来の高エネルギーテールの割合に影響
- セルサイズを小さくするほど高エネルギーテールは減らせるが、チャンネル数も増える

信号エネルギースペクトラム



1セルのサイズによる信号効率

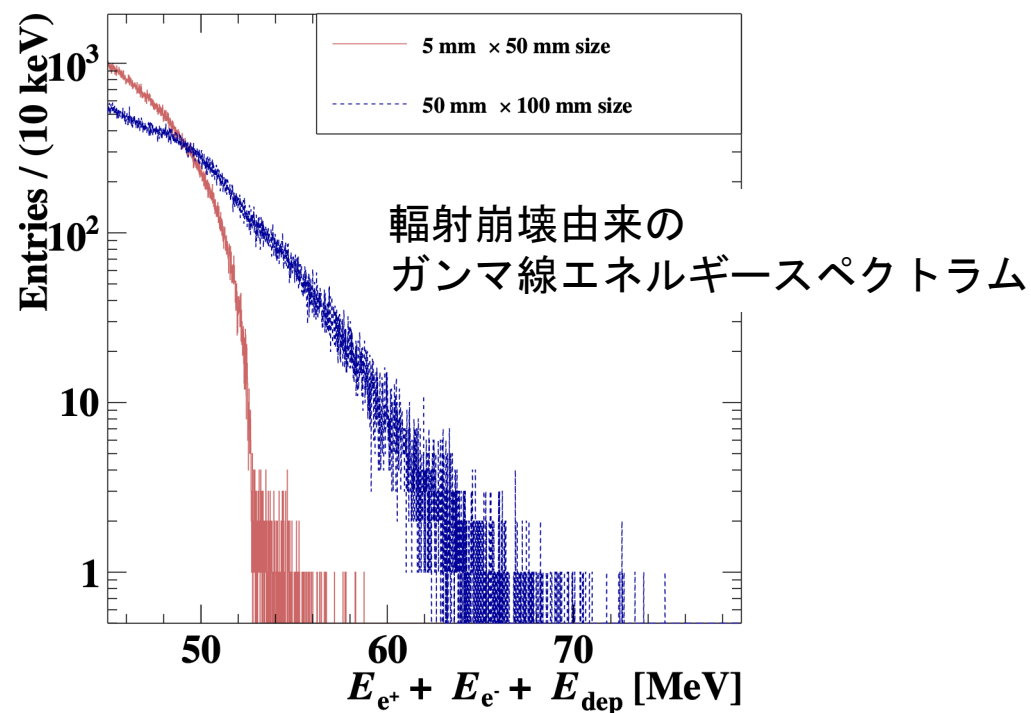


5 mm (φ方向)
× 50 mm (ビーム軸方向)
をベースラインに採用

セルサイズによるその他の影響

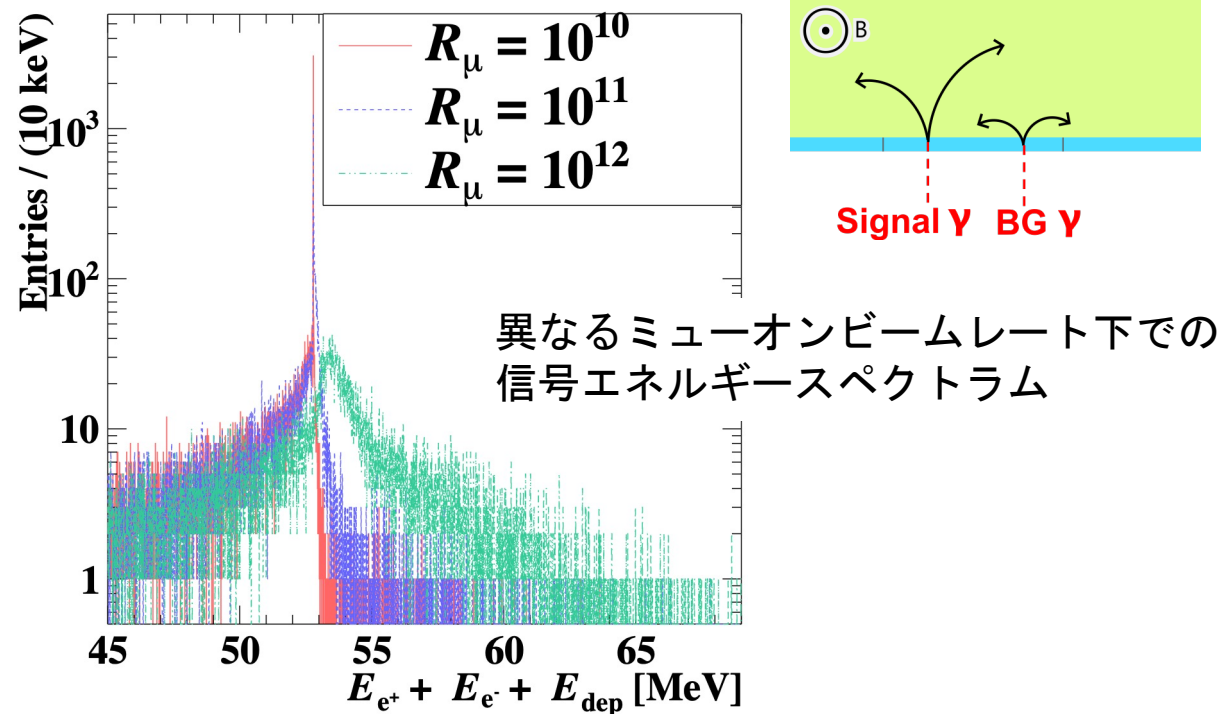
背景ガンマ線スペクトラム

- 分割が荒いと高エネルギー側のテールが顕著
→ 背景事象数に直結
- 5 mm × 50 mm では十分抑制される



パイルアップガンマ線の影響

- 有限セルサイズでは、背景ガンマ線が信号ガンマ線と同じセルに入射するパイルアップ事象が発生
- セルサイズ 5 mm × 50 mm の場合 $10^{10} \mu/\text{sec}$ ではその影響は顕著ではない



シミュレーションによるコンバーター最適化まとめ

信号光子の再構成効率を主な指標として最適化した結果、以下の仕様が最適と結論づけられた

材質

LYSO

厚み

3 mm

大きさ

5 mm × 50 mm

ただし、この評価は分解能を考慮していない

→ 実際の時間・エネルギー分解能を試験する必要がある

03

電子ビームによるコンバーターの試験

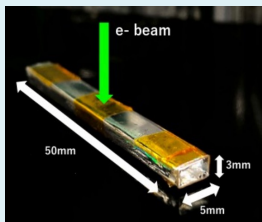
電子ビームテスト概要

目的

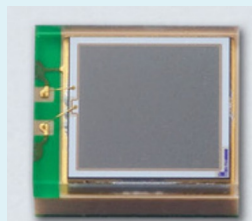
シミュレーションにより最適化したLYSOによるアクティブコンバーターの実際の性能を調べる

コンバーター試作機

- $3 \times 5 \times 50 \text{ mm}^3$ のLYSO
+両側にSiPM



+



VETOカウンター

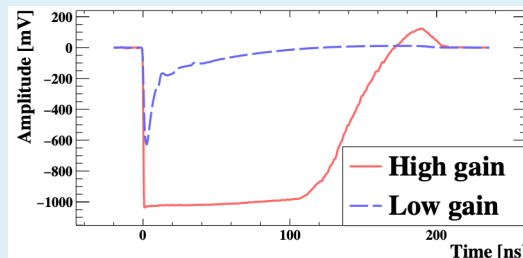
- $3 \times 20 \times 60 \text{ mm}^3$ の
プラスチックシンチレーター2枚
- イベントセクションに使用

時間参照用カウンター

- 5 mm角のプラスチックシンチレーター
- トリガーとしても使用

DAQ

- 4 GSPSで波形をサンプリング
- 2回目ビームテストでは、
信号を二つに分け異なる増幅率で同時取得



- 約 3 GeVの電子ビームを供給するKEK PF-ARテストビームラインにて2度にわたり実施

アクティブコンバーターの目標性能

エネルギー分解能

200 keV (0.4 %)

ペアスペクトロメーター全体 (52.8 MeV)

ビーム試験での目標 (コンバーター単体)

3 %

エネルギー分解能

5 – 6 MeV の損失に対し 200 keV

1100 p.e. 以上

光量

3 GeV 電子ビーム・MPV 約 2.7 MeV

参考 : JTC 社製 LYSO (Ce:FTRL) の光量 $36,000 \pm 10 \% \text{ photon / MeV}$

時間分解能

30 ps

信号光子 52.8 MeV に対する目標

ビーム試験での目標 (1 MIP あたり)

40 ps

電子・陽電子を独立に測定するため $30 \times \sqrt{2}$ が必要

光量の校正・評価

電荷から光電子数への変換

$$\text{光電子数} = \frac{\text{Low-gainで測定した積分電荷}}{\text{High-gainで測定したSiPM増幅率}}$$

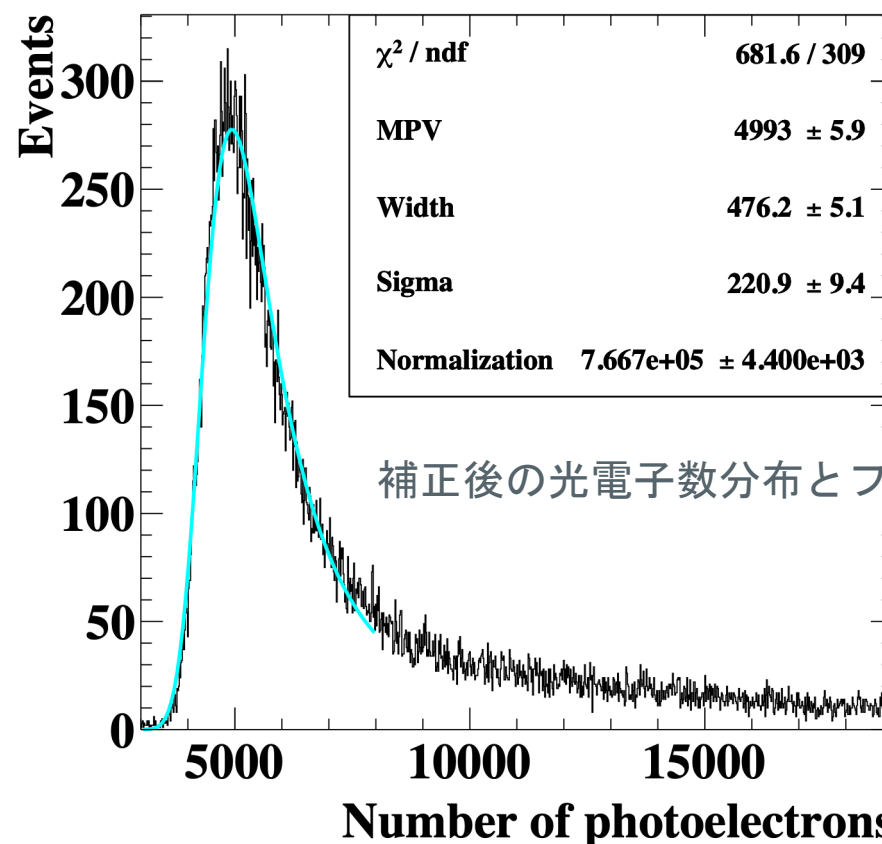
弱いLED光をSiPMに照射し測定

↓
SiPMの飽和をモデルにより補正

$$\times \frac{\text{High-gain 増幅率}}{\text{Low-gain 増幅率}}$$

光量の評価

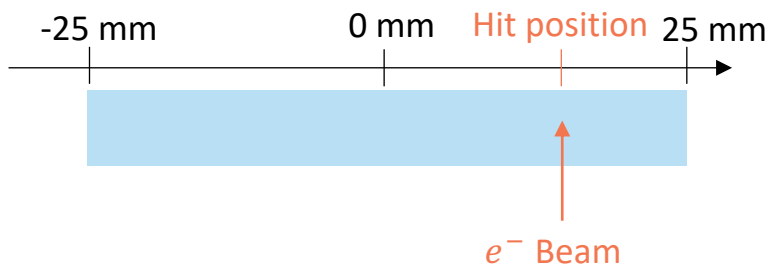
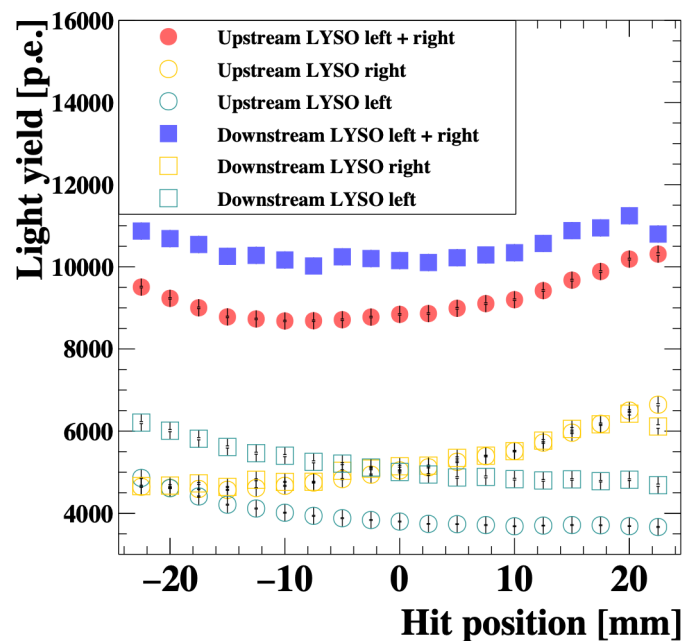
- Landau fitによるMPVの値を“光量”と定義



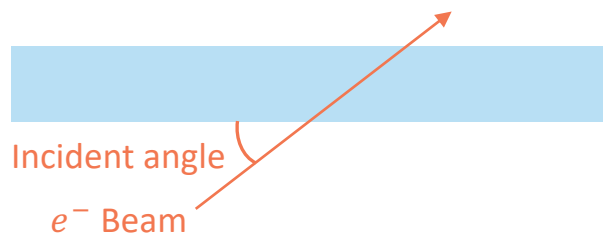
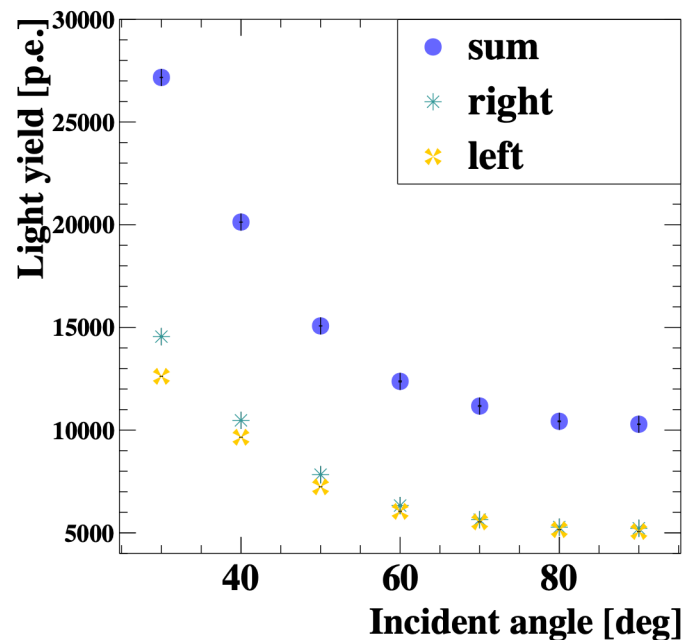
補正後の光電子数分布とフィットの例

光量の測定結果

入射位置依存性



入射角度依存性



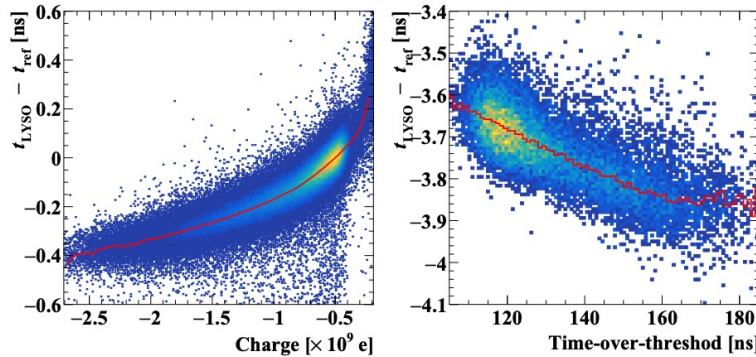
- 異なる入射位置・角度において、左右の読み出しチャンネル合計
~ 10^4 光電子数 ($\gg$ 目標値1100 p.e.)
- 15 %程度の位置依存性
 - トラックーにより再構成した対生成位置により補正可能
- 1.3倍程度の個体差
 - 特にビーム上流側のLYSOの左側チャンネルの光量が著しく低い
 - 製造品質の影響と考えられる
→ 大量製造時の品質管理が課題

時間分解能の較正・評価

読み出しチャンネルごとの時間較正

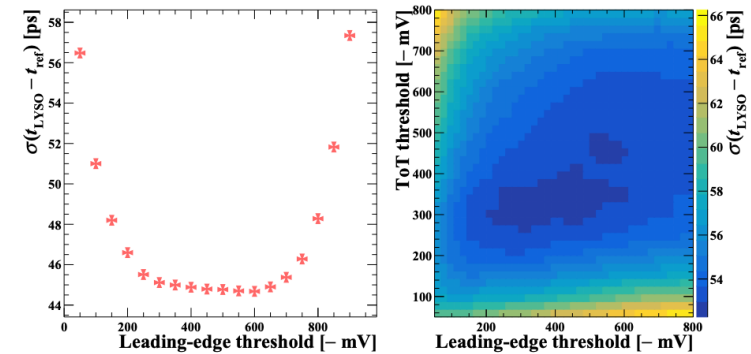
Time-walk 補正

- 左右のチャンネルそれぞれの到達時刻を Leading-edge で取得
- 電荷 / ToT との相関により Time-walk を補正



閾値最適化

- Leading-edge (および Time-walk 補正に用いる場合は ToT) の閾値をスキャン
- 分解能を最小化する値を採用

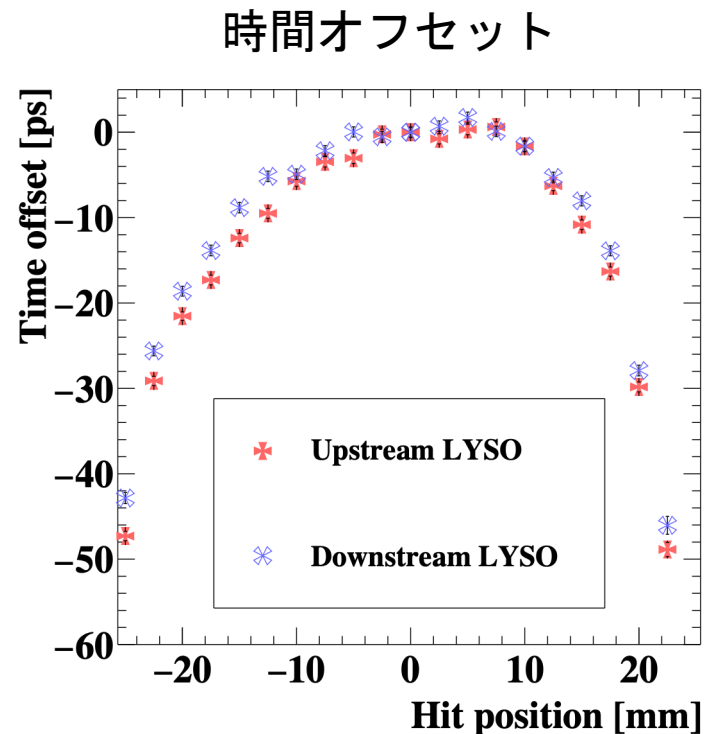
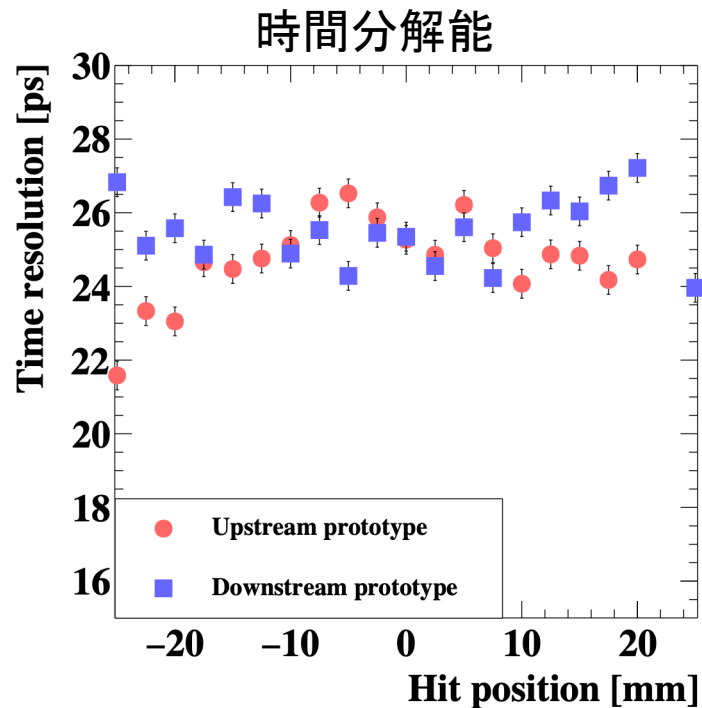


カウンター時間分解能の評価

- $t_{\text{LYSO } 1}, t_{\text{LYSO } 2}$ を左右の読み出しチャンネルの平均、 t_{ref} を上下参照カウンター時刻 (time-walk 補正済み) の平均として定義
- $\sigma(t_{\text{LYSO } 1} - t_{\text{LYSO } 2}), \sigma(t_{\text{LYSO } 1} - t_{\text{ref}}), \sigma(t_{\text{LYSO } 2} - t_{\text{ref}}) \rightarrow \sigma(t_{\text{LYSO } 1}), \sigma(t_{\text{LYSO } 2}), \sigma(t_{\text{ref}})$

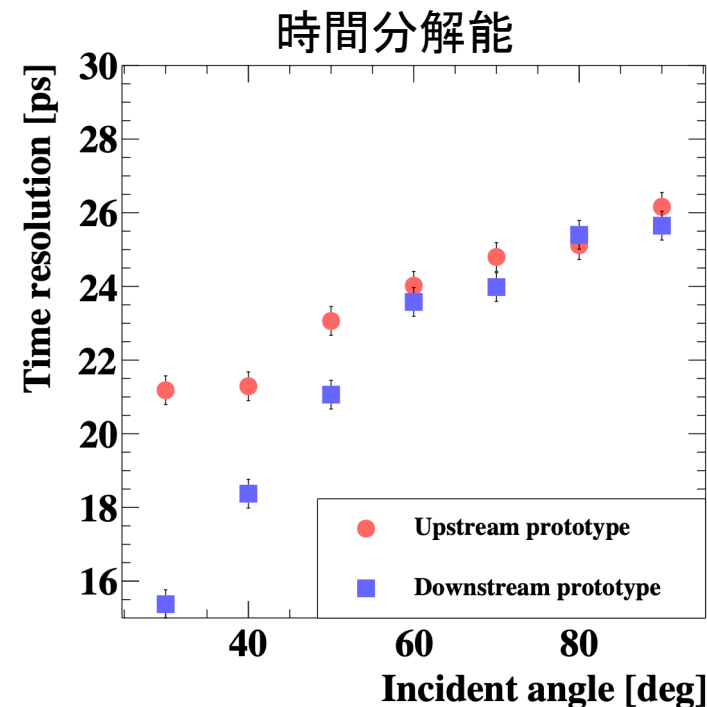
時間分解能のヒット位置・角度依存性

位置依存性



- 入射位置によらず 25 ps の分解能を達成
- 時間オフセットには50 ps 程度の位置依存性
... 将来的に補正する必要あり

角度依存性



- 浅い角度ほど光量増加による時間分解能改善が見られる
- 試作機間の個体差が顕著

04

展望

予想到達性能

	MEG II	将来実験
ガンマ線		
エネルギー分解能	1.8-2.4 %	0.4 %
時間分解能	63 ps	30 ps
検出効率	67 %	10 %
陽電子		
角度分解能	89 keV	100 keV
エネルギー分解能	3.8 mrad (ϕ), 6.2 mrad (θ)	6 mrad
時間分解能	40 ps	30 ps
検出効率	67 %	70 %
その他		
ガンマ線角度・分割標的 による背景事象削減	—	25 %
幾何アクセプタンス	11 %	85 %
ビームレート	$3 - 5 \times 10^7 \mu/s$	$1 \times 10^{10} \mu/s$

今回のビームテストにより
実現可能性の目処が立った

→ 本研究のシミュレーションによる見積もり
(ビーム試験も計画中、後述)

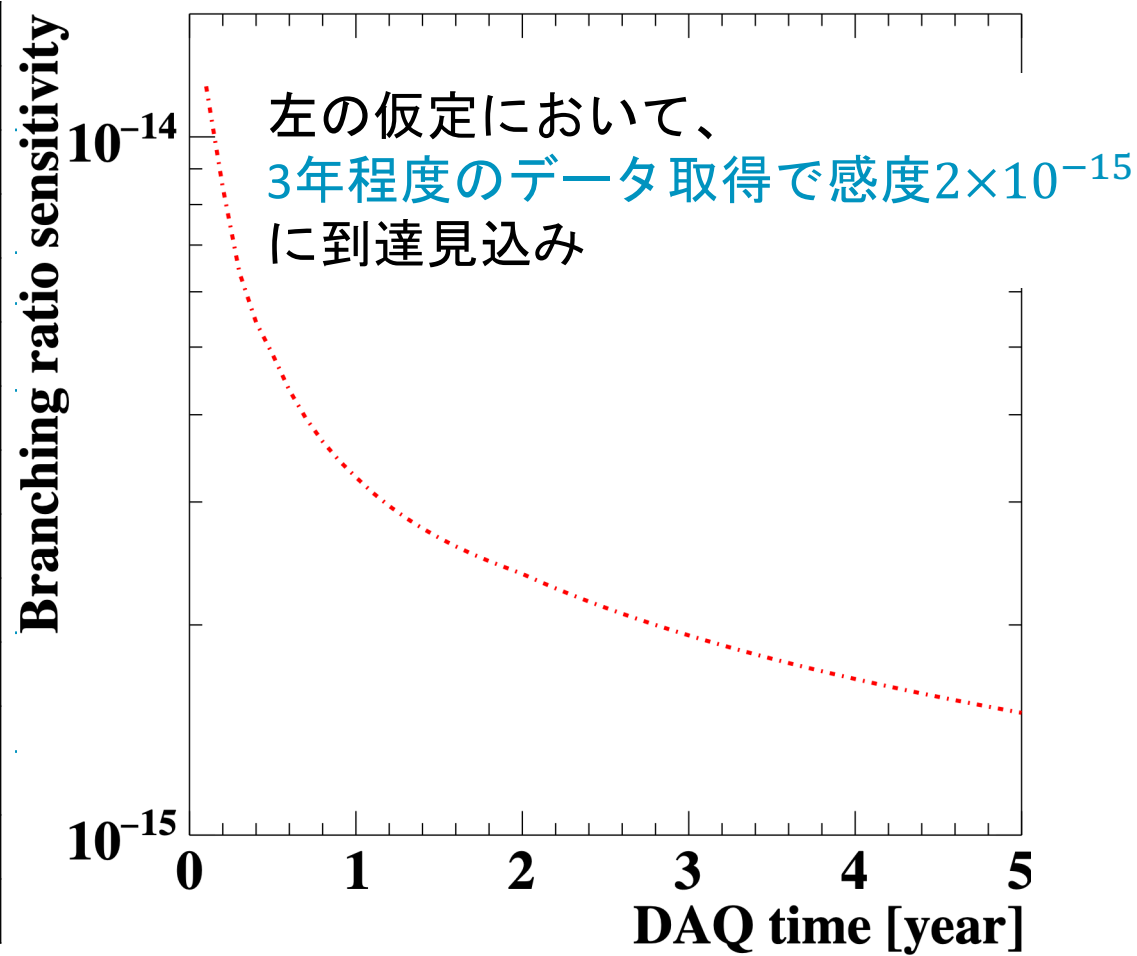
MEG IIの経験による仮定
シリコン検出器での実現可能性は要検証

→ 大まかな見積もり

設計値

予想到達感度

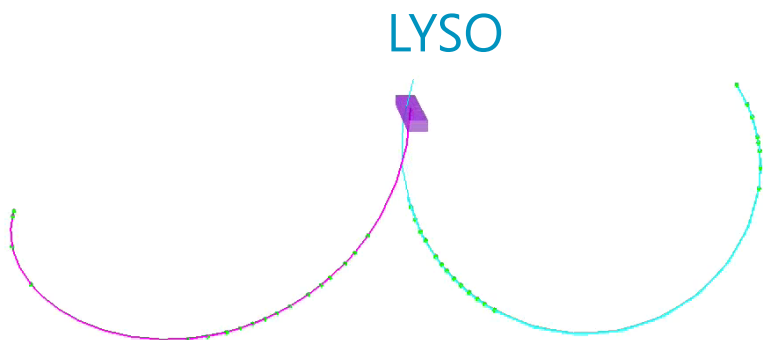
	MEG II	将来実験
ガンマ線		
エネルギー分解能	1.8-2.4 %	0.4 %
時間分解能	63 ps	30 ps
検出効率	67 %	10 %
陽電子		
角度分解能	89 keV	100 keV
エネルギー分解能	3.8 mrad (ϕ), 6.2 mrad (θ)	6 mrad
時間分解能	40 ps	30 ps
検出効率	67 %	70 %
その他		
ガンマ線角度・分割標的 による背景事象削減	—	25 %
幾何アクセプタンス	0 %	85 %
ビームレート	$3 - 5 \times 10^7 \mu/s$	$1 \times 10^{10} \mu/s$



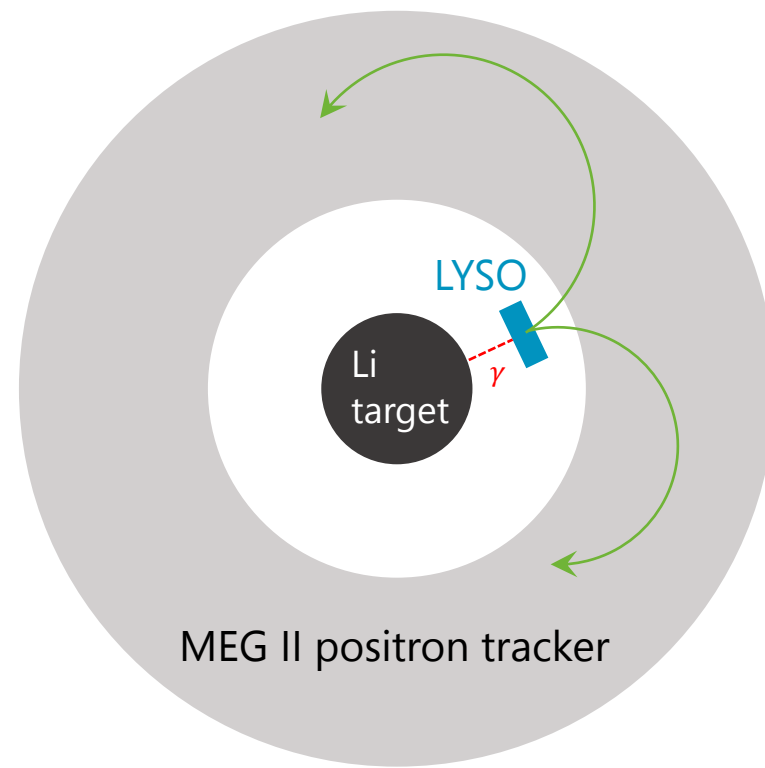
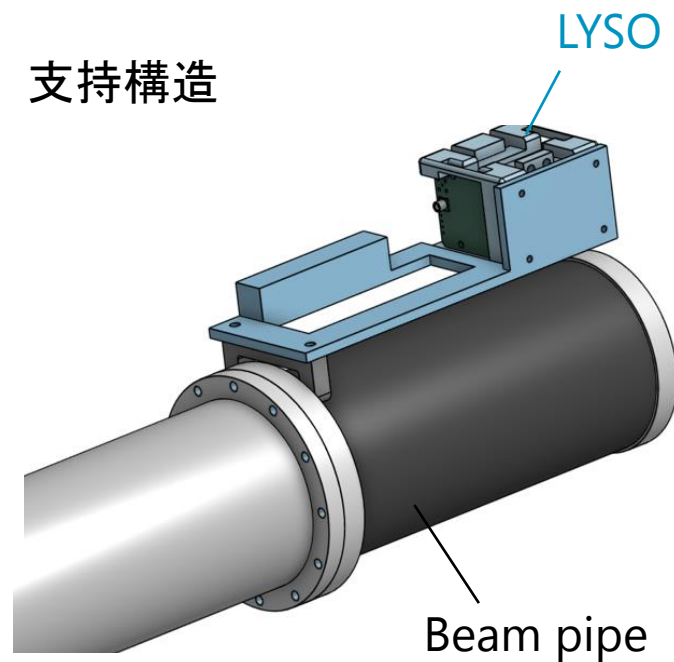
測定原理実証実験

- ペアスペクトロメーターのガンマ線に対する測定原理実証実験をこの冬実施予定
- ペアトラッカー：MEG II 陽電子飛跡検出器を利用
- γ 線源： ${}^7\text{Li}(p, \gamma){}^8\text{Be}$ 反応による17.6 MeV単色ガンマ線 (MEG II校正用)

トラッキング



支持構造



アクティブコンバーター本格実装に向けて

量産後の較正

- 4層構成のペアスペクトロメーターに必要な $O(10^5)$ 個の結晶に対して、個別に
 - 製造品質(個体差)の管理
 - 位置依存性(光量および時間オフセットで顕著)の較正
 - 時間変動しうる性能の較正を行う手法の確立が必要

読み出しチャンネル数削減

- 1セルあたりの読み出しチャンネル数は深刻な問題(ビームテスト時4チャンネル)
- チャンネル数を削減するためのアイデア
 - 信号を分けずに単一増幅率でエネルギーと時間を測定する
 - 片側のみにSiPMを取り付ける
 - 両端の信号を電氣的に結合、一つのセンサーとして読み出す

その他

- LYSO支持構造 (一層あたり最大数100 kg)

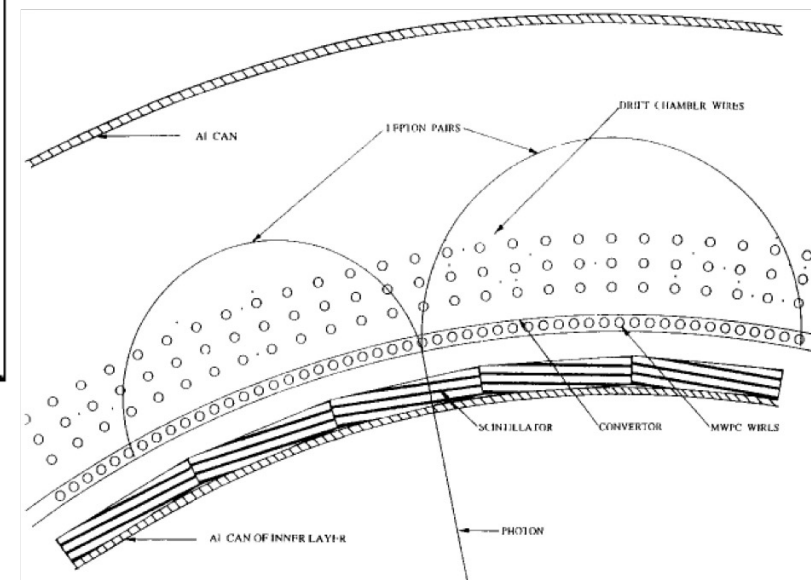
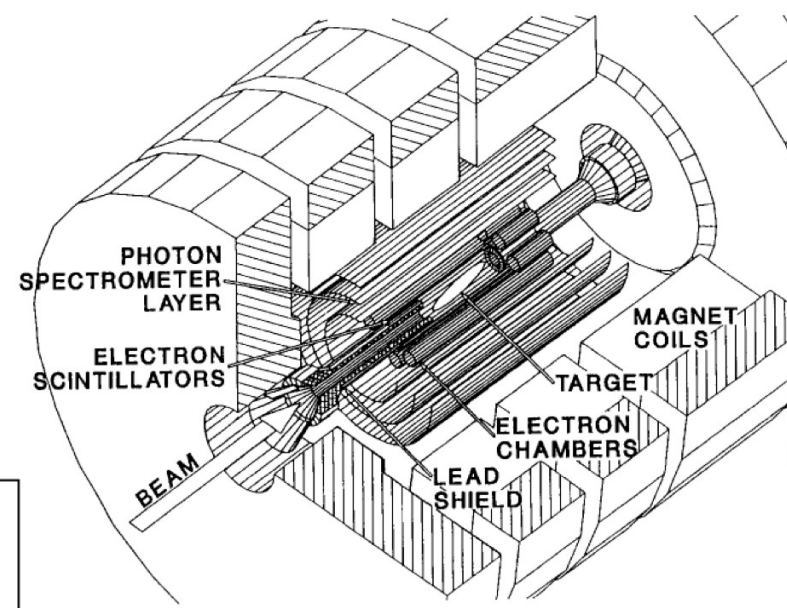
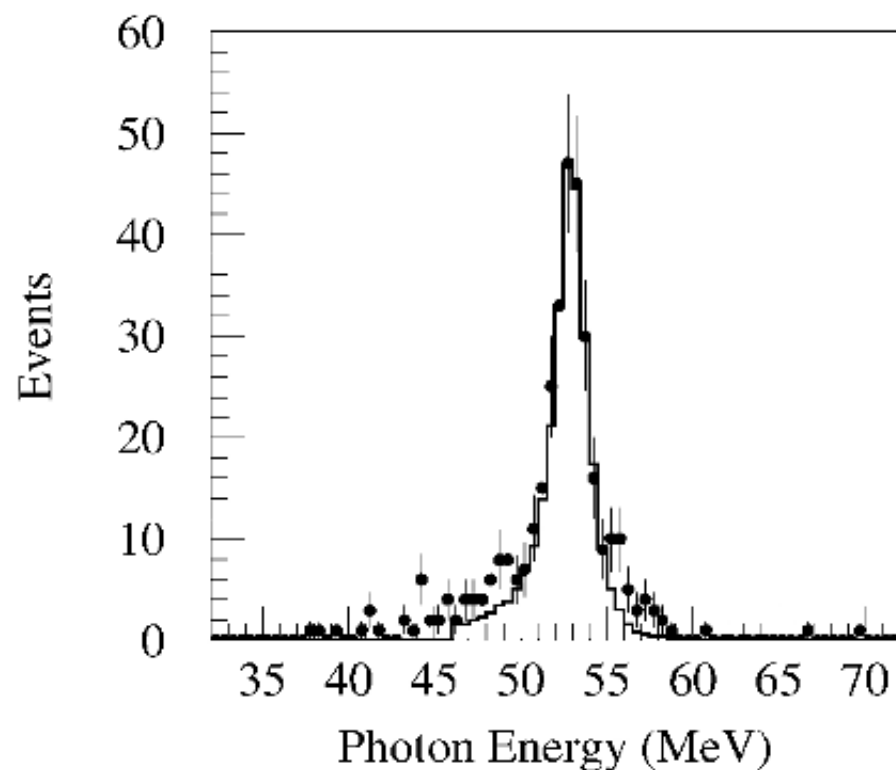
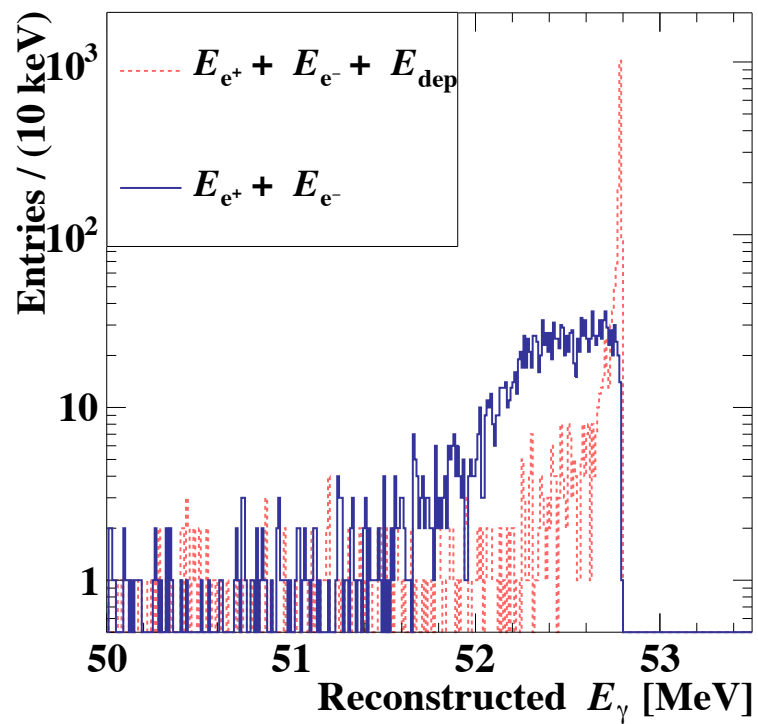
まとめ

- MEG II実験の一桁上の感度 $O(10^{-15})$ での $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索のための将来実験を計画中
- 感度向上の鍵を握るガンマ線検出器は、アクティブコンバーター型ペアスペクトロメーター型を予定
- シミュレーションにより最適化したコンバーター設計では、電子ビームに対して時間分解能25 psおよび光量10000 p.e.程度が得られることを確認
→ 将来実験における目標性能を大幅に上回る結果
- この冬にガンマ線に対する測定原理実証実験を計画中

Back up

MEGA 実験

- 0.25 mmの鉛によるpassive converter
- エネルギー分解能力が非常に悪い



信号効率によるコンバーターの最適化

- 信号効率 ϵ_{sig} :
 - ここでは、信号光子を $\pm 0.1 \text{ MeV}$ 以内の誤差で再構成できる割合とする
 - 1層で約2.3 %, 4層で8 %

$$\epsilon_{\text{sig}} = \epsilon_{\text{phys}} \cdot \epsilon_{\text{topo}} \cdot \epsilon_{\text{analysis}}$$

 ϵ_{phys}

~ 2.7 %

コンバーター内部の物理過程
(対生成、制動放射など)に
由来する効率

主な依存先
コンバーター材質・厚み

 ϵ_{topo}

~ 97 %

事象トポロジーに由来する
効率

主な依存先
コンバーター分割粒度

 $\epsilon_{\text{analysis}}$

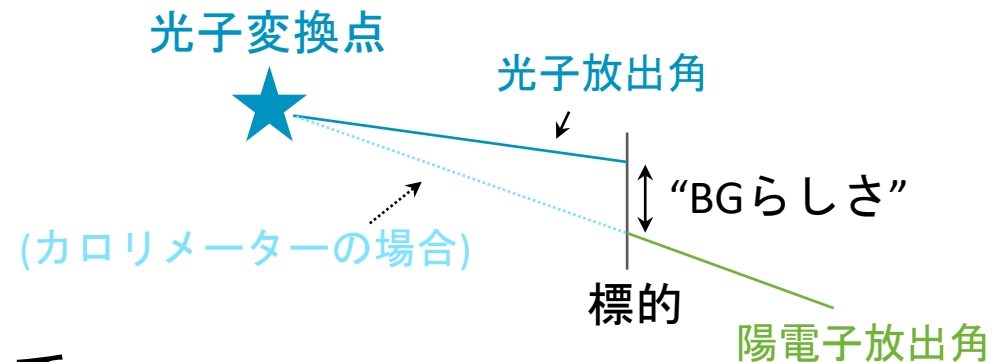
75 - 90%

事象選択やトラッキング、
その他解析に関連する効率

主な依存先
トラッカー検出効率・カット条件

角度測定

- 対生成粒子のトラッキングにより光子単体での角度再構成が可能に
 - MEG/MEG IIのようなカロリメーターでは不可能
- 頂点を陽電子側・光子側から独立に再構成することで、背景事象らしさの指標が得られる
- 測定精度を制限するのは多重散乱
 - その影響はコンバーター中での損失エネルギーからある程度推測可能
→Event-by-eventの分解能を条件変数にして角度PDFを構築?

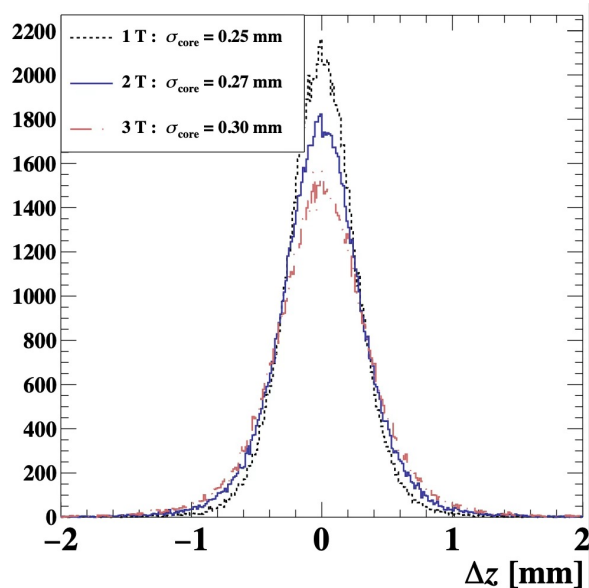


	θ 分解能	ϕ 分解能	標的上での広がり(1層目)
$E_{dep} < 0.5 \text{ MeV}$	30 mrad	30-50 mrad	1 cm
$E_{dep} > 6 \text{ MeV}$	100-130 mrad	110-250 mrad	5-6 cm
全イベント	60 mrad	60-80 mrad	2 cm

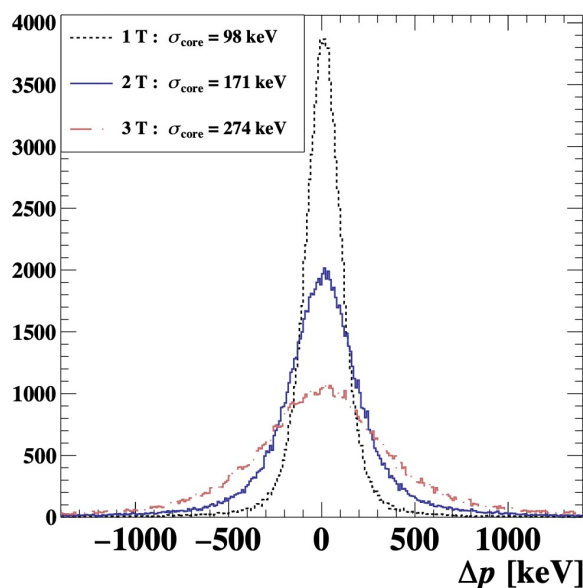
ペアトラッカーの分解能

- シミュレーションにより、単一ヒット分解能 $800\text{ }\mu\text{m}$ (ビーム試験によりえられている値)を仮定して評価
- 磁場の強さと共に分解能は悪化(特に運動量分解能で顕著)

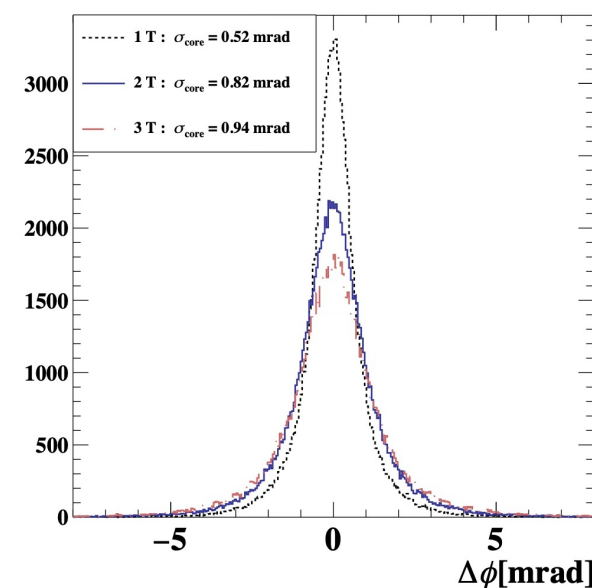
z位置分解能



運動量分解能



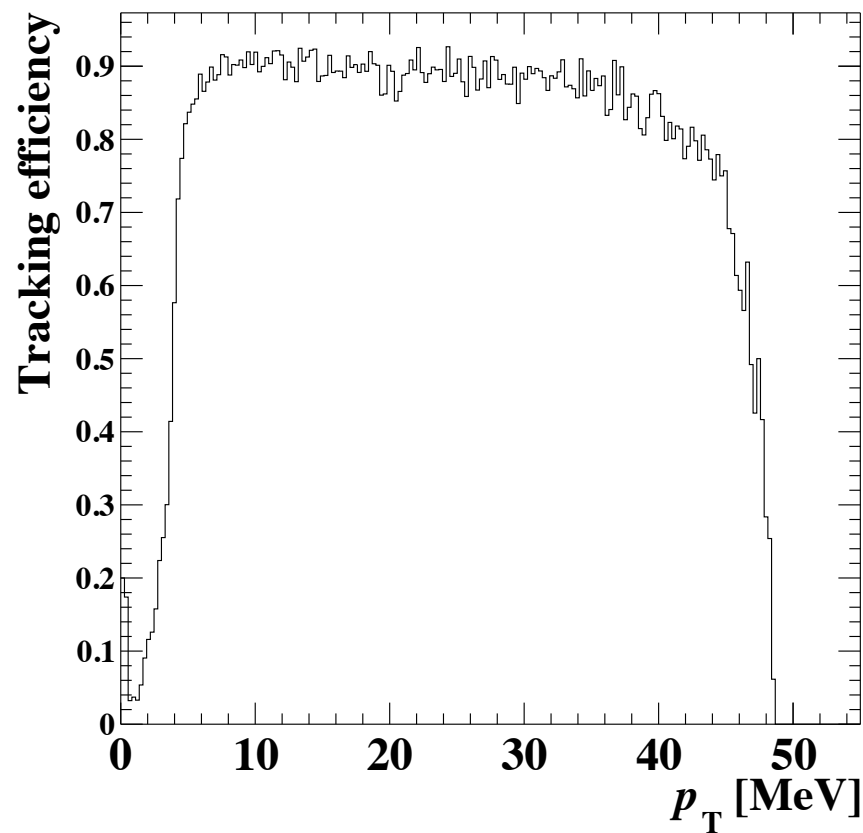
ϕ 位置分解能



ペアトラッカーの飛跡検出効率

$$\text{検出効率} = \frac{\text{かつ、どちらも飛跡フィットに成功した事象}}{\text{信号ガンマ線から対生成により生じた粒子がどちらもコンバーターを出た事象}}$$

- ペアのどちらかの横運動量が小さい(~ 5 MeV以下)の場合、検出効率が低下

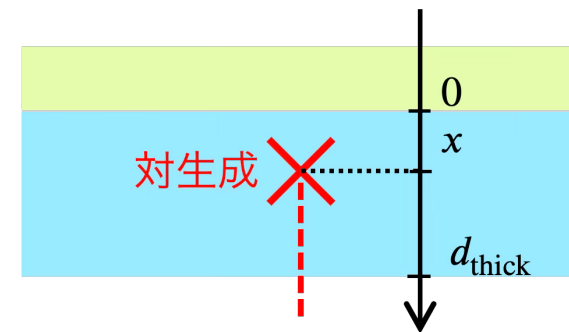


コンバーターの厚み・材質

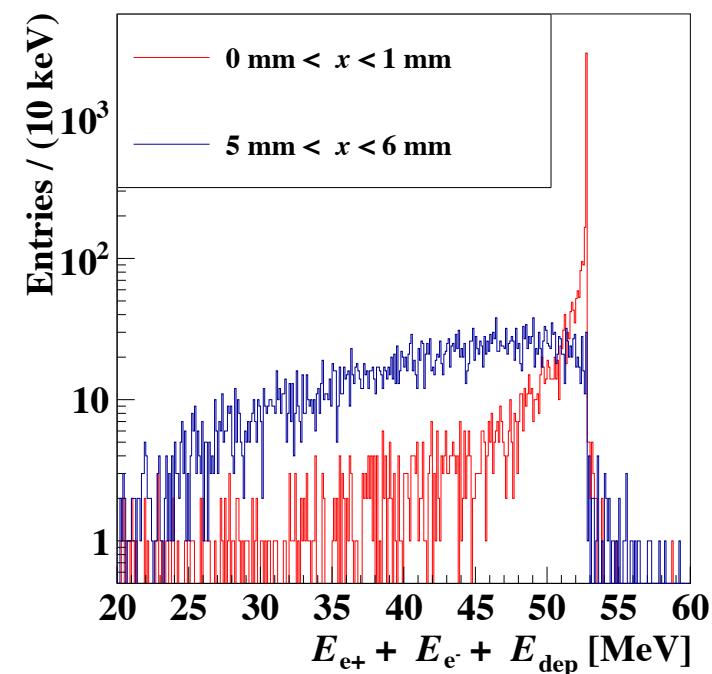
$$\varepsilon_{\text{phys}} = \int_0^{d_{\text{thick}}} p_{\text{conv}}(x; d_{\text{thick}}) p_{\text{peak}}(x) dx$$

深さ x で対生成する確率

深さ x で対生成したガンマ線が
正しく再構成できる確率



- $p_{\text{conv}}(x; d_{\text{thick}}) = \exp\left(\frac{x - d_{\text{thick}}}{l_{\text{mean}}}\right)$ は増加関数 (l_{mean} は平均自由行程)
- $p_{\text{peak}}(x)$ は減少関数
 - 制動放射光子により検出されないエネルギー損失は x とともに増加
 - 低エネルギーな対生成流油脂は、深い位置からは出られない
- $p_{\text{peak}}(x)$ の寄与があるために、積分全体を最大化する d_{thick} が存在
($p_{\text{conv}}(x; d_{\text{thick}})$ のみであれば積分全体は d_{thick} の増加関数)

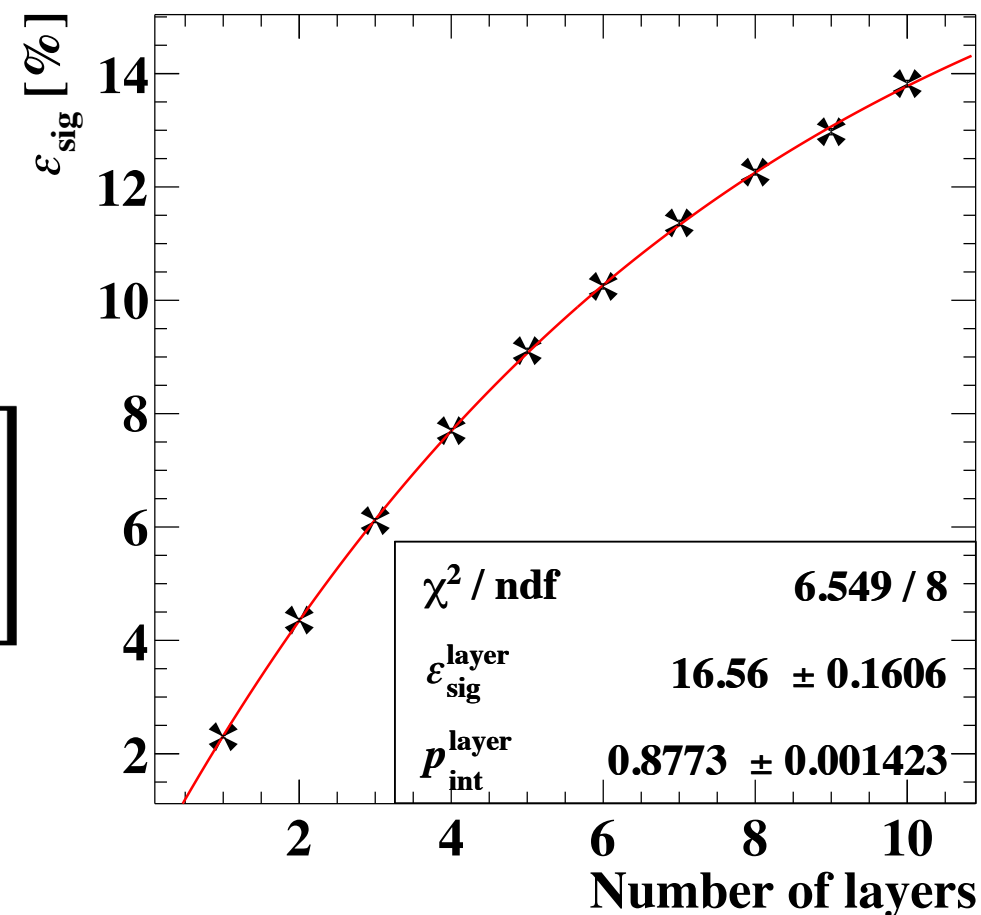


多層構造

$$\varepsilon_{\text{sig}}^{(n)} = \left(1 - p_{\text{int}}^{\text{layer}}\right)^{n-1} \varepsilon_{\text{sig}}^{\text{layer}}$$

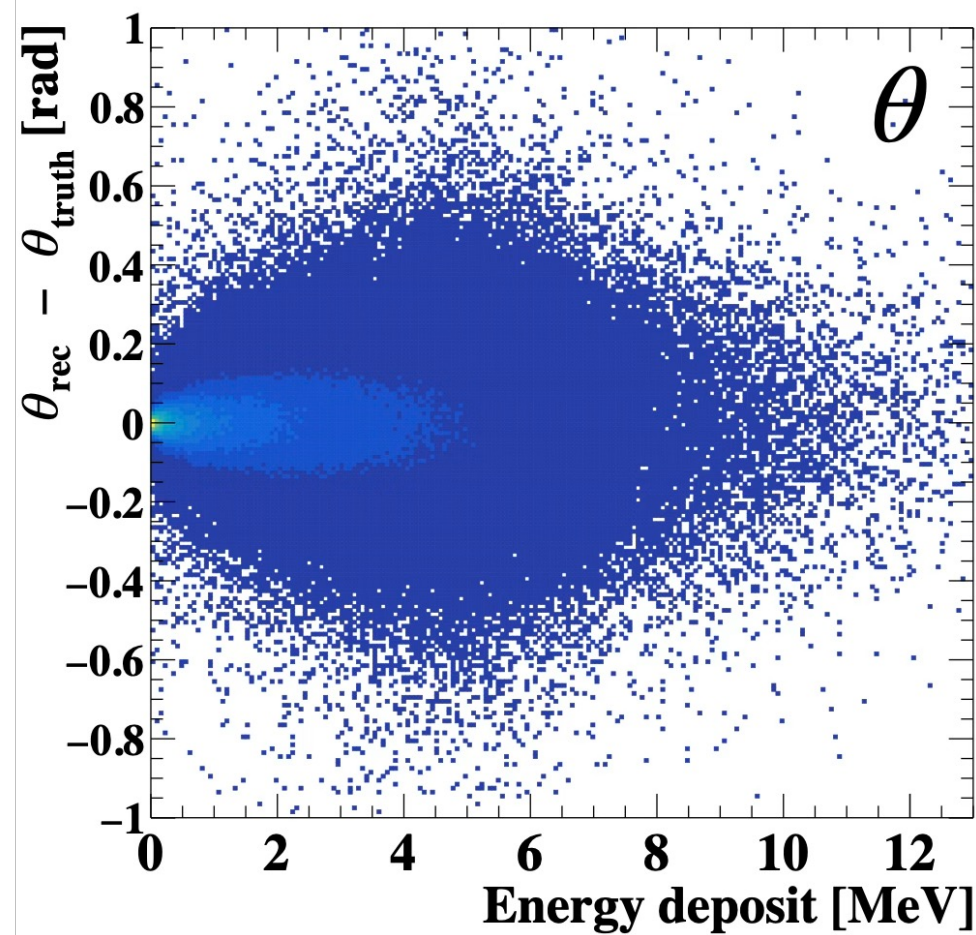
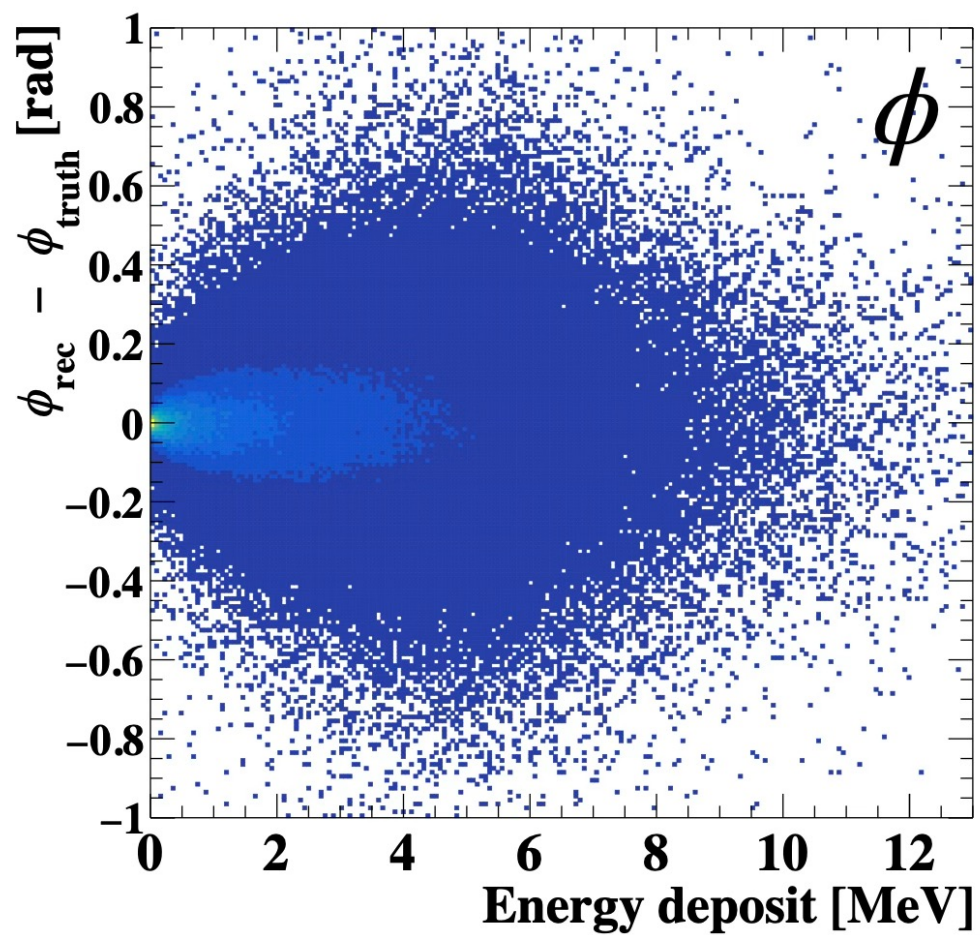
$$\sum \varepsilon_{\text{sig}}^{(n)} = \frac{\varepsilon_{\text{sig}}^{\text{layer}}}{p_{\text{int}}^{\text{layer}}} \left[1 - \left(1 - p_{\text{int}}^{\text{layer}}\right)^n\right]$$

$\varepsilon_{\text{sig}}^{(n)}$: n 層目でガンマ線が対生成し、信号効率に寄与する確率
 $p_{\text{int}}^{\text{layer}}$: ガンマ線が一層で相互作用を起こす確率
 $\varepsilon_{\text{sig}}^{\text{layer}}$: 単層での信号信号効率

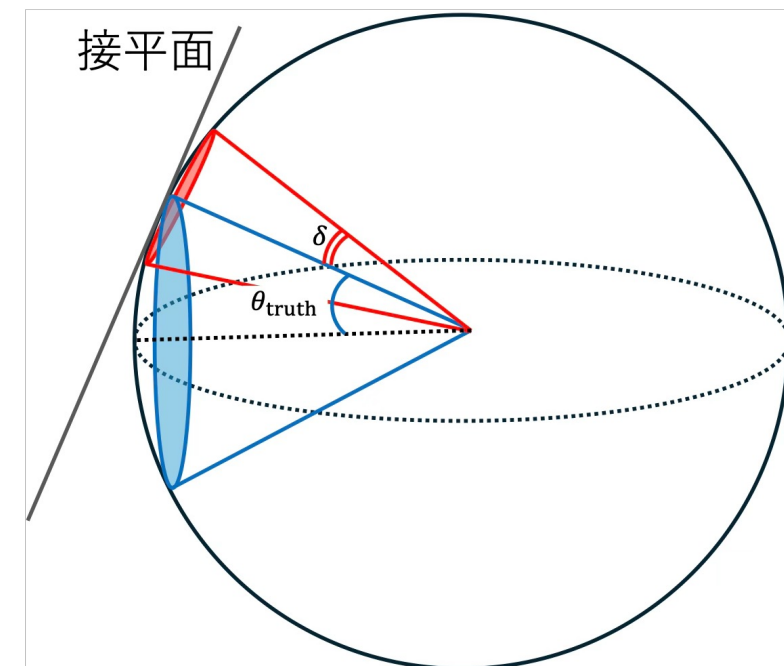
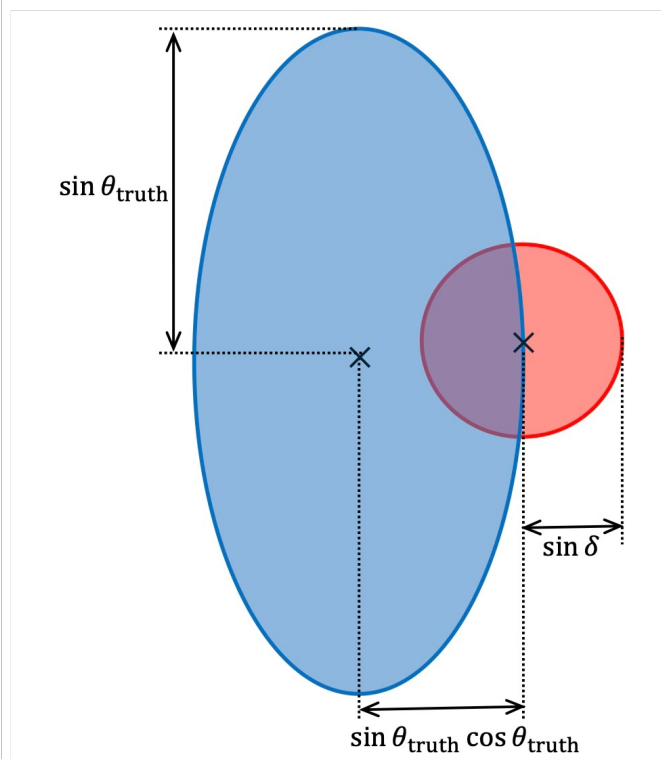
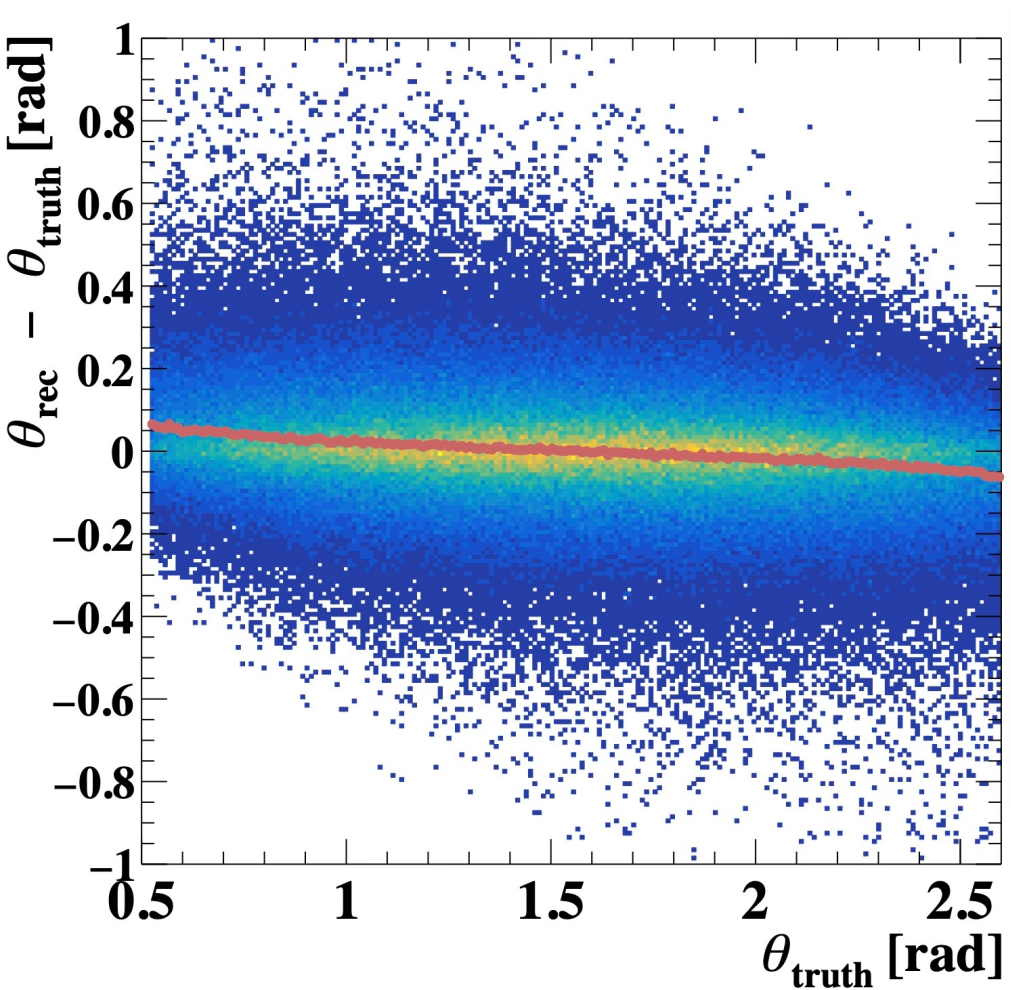


- 信号効率はどんなに多層化しても19 %以下
- 現在は4層程度を検討

角度再構成



角度測定におけるバイアス



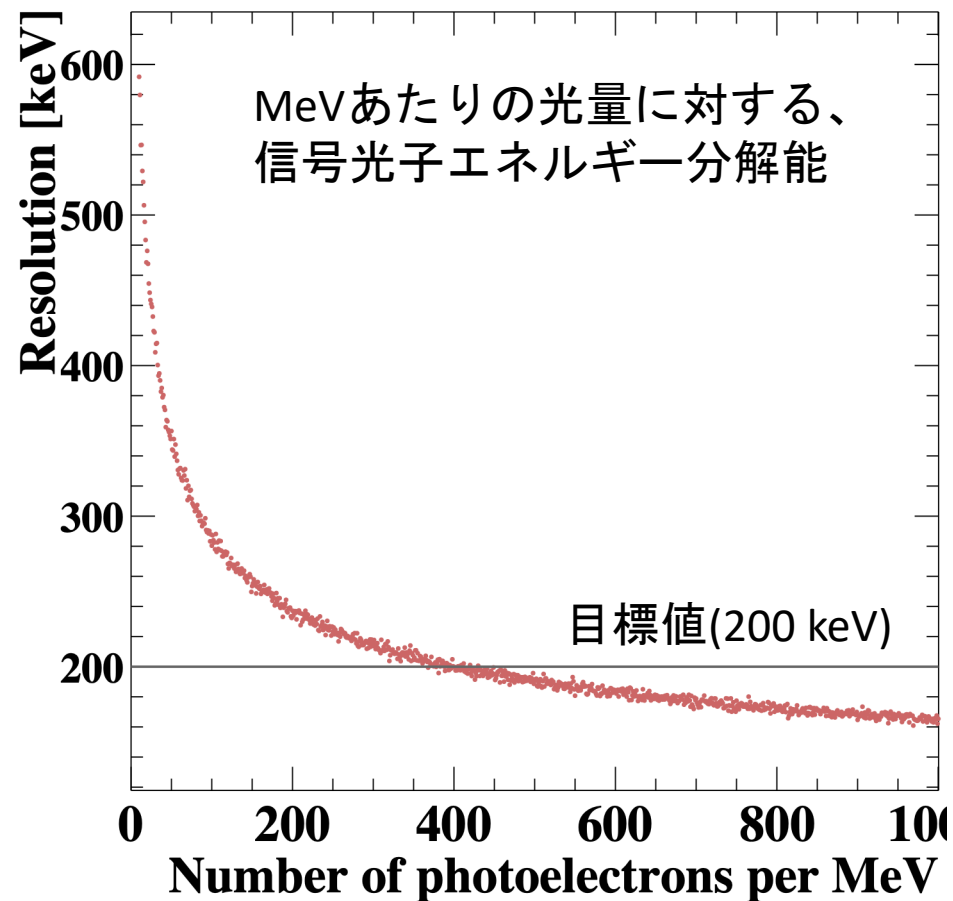
アクティブコンバーターの目標性能

エネルギー損失の測定分解能

- 信号光子(52.8 MeV)に対する目標分解能: 200 keV
- 光量のポアソン揺らぎのみを考慮すると、400 p.e. / MeVが必要
- 3 GeV電子ビームの場合、エネルギー損失のMPV(約2.7 MeV)で1100 p.e.以上が必要

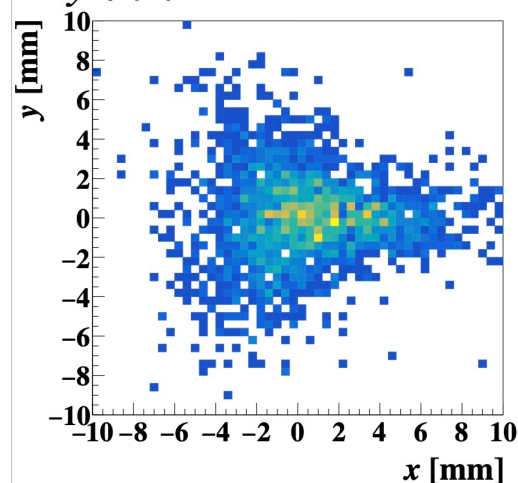
時間分解能

- 信号光子(52.8 MeV)に対する目標分解能: 30 ps
- 電子・陽電子に対して独立に測定可能
→ 1MIPあたり $30 \times \sqrt{2} \sim 40$ ps が必要

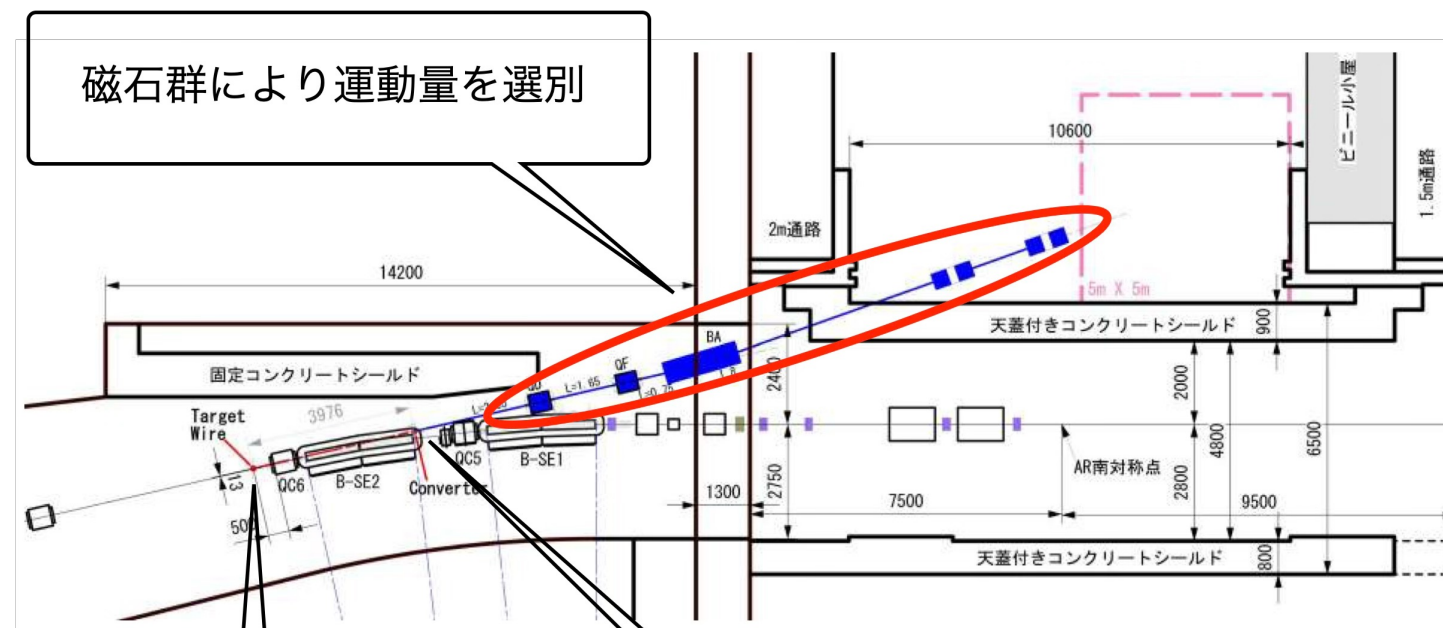
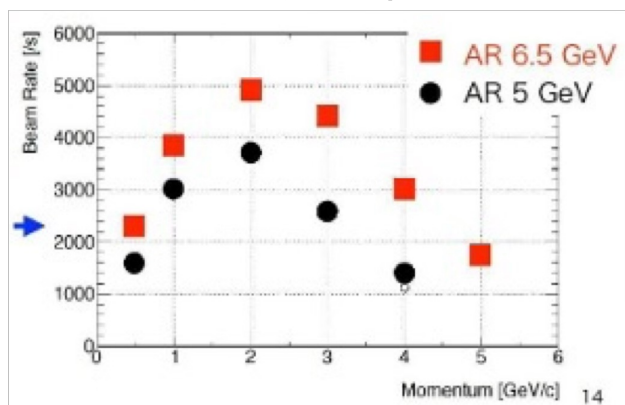


KEK PF-AR テストビームライン

$x-y$ 平面上でのビームプロファイル



ビームレート



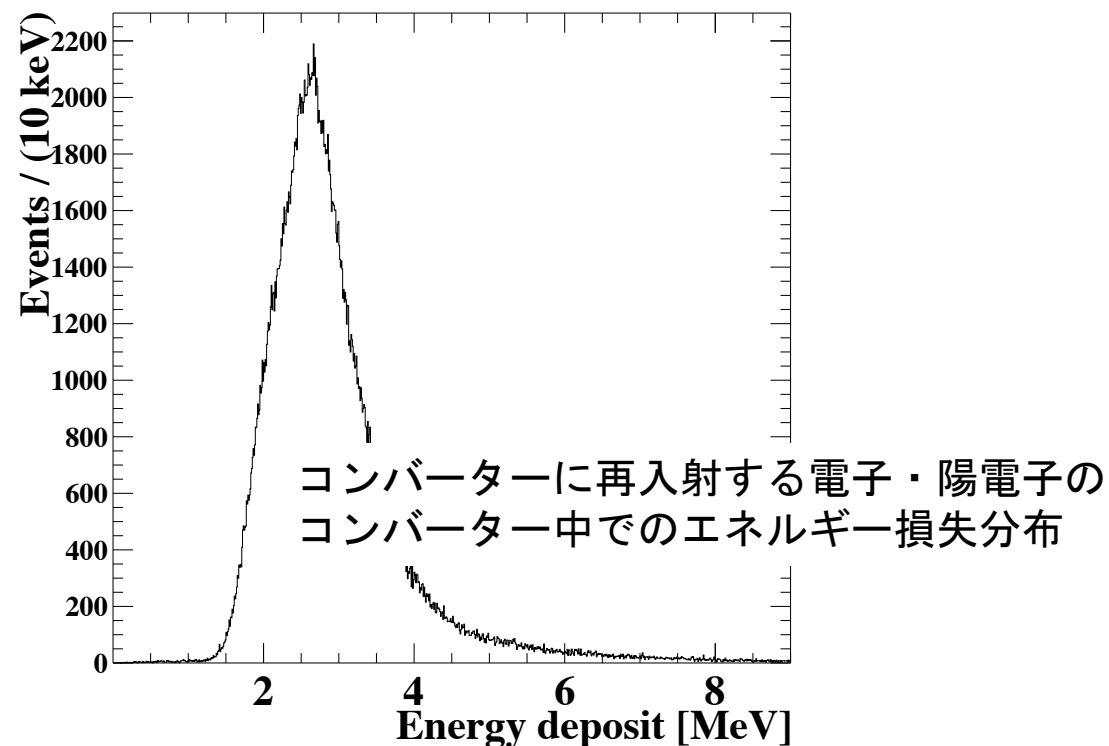
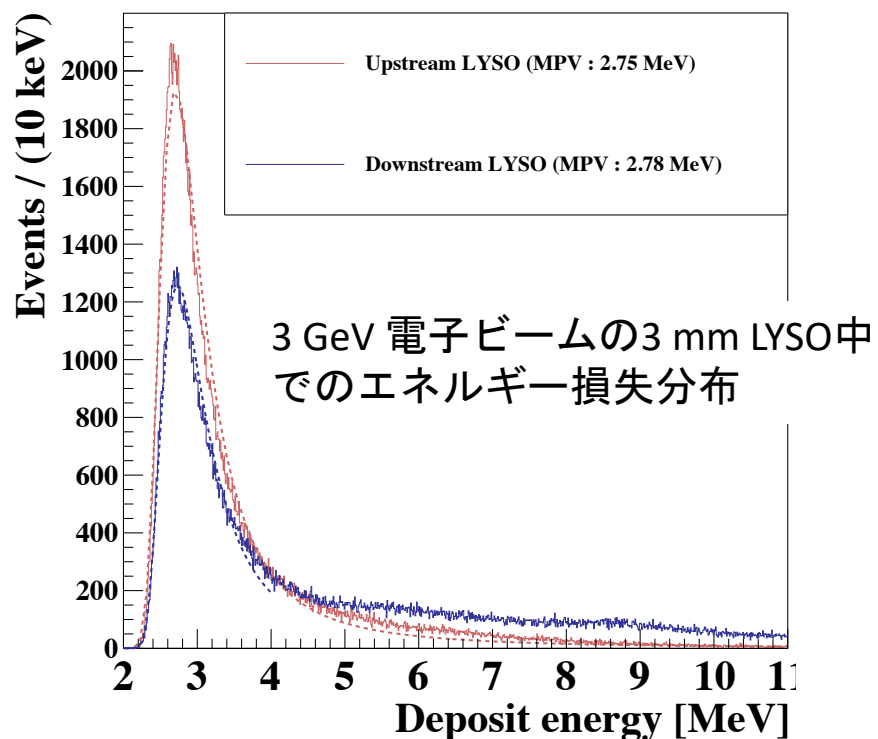
磁石群により運動量を選別

蓄積リング内部にワイヤ標的を挿入し、放射光を発生させる

銅製コンバーターで対生成させる

時間分解能の目標値

- ペアスペクトロメーターでコンバーターに電子・陽電子が再入射する際に落とすエネルギー分布は、3 GeV電子が落とすエネルギー分布とほぼ同じになる
- 従って、電子ビームによる時間性能をそのまま将来実験に適用できる



JTC's Scintillation Product Information

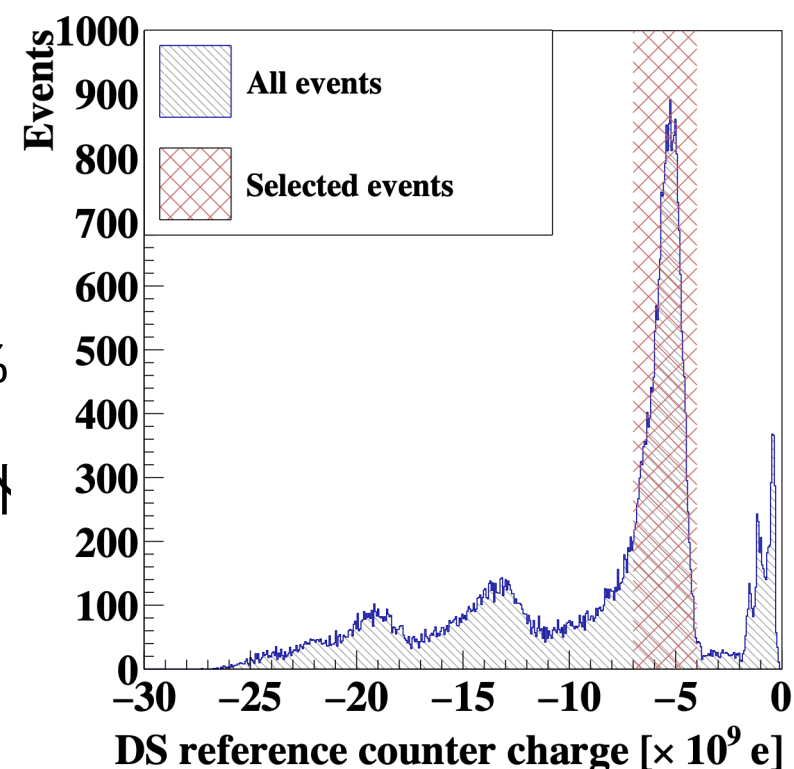
Properties	Ce:FTRL	Ce:LYSO	YSO
Coincident Time Resolution(ps) 2mm cube	96	125	
LO (Ph/MeV)	30000±10%	36000±10%	27000
Decay Time (ns)	31	40	70
Energy Resolution	8-10%	8-10%	11%
Hygroscopic	No	No	No
Wavelength of Max Emission (nm)	420	420	420
Refractive Index	1.81	1.81	1.8
Density (g/cm3)	7.2	7.2	4.5

事象選択

目的	カットに用いるヒット	削減率* (2024年テスト)
ビーム位置・角度の限定	上下参照用カウンタ	31 %
複数粒子混入事象の除外	VETOカウンタ	0.5 %
	下流側参照用カウンタ	18 %
誤トリガー事象の除外	コンバータ	19 %

- VETOカウンタで除外できた複数粒子混入イベントは0.5 %
に止まる
→ 下流側参照用カウンタの2つ目以降のピークによる除外
を併用
- 誤トリガー事象19 %
... ミスアライメントがあった可能性あり

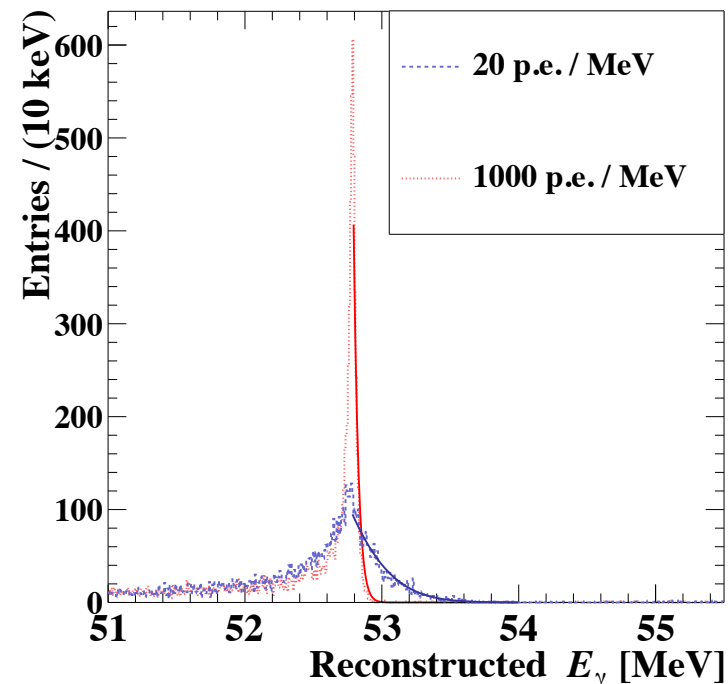
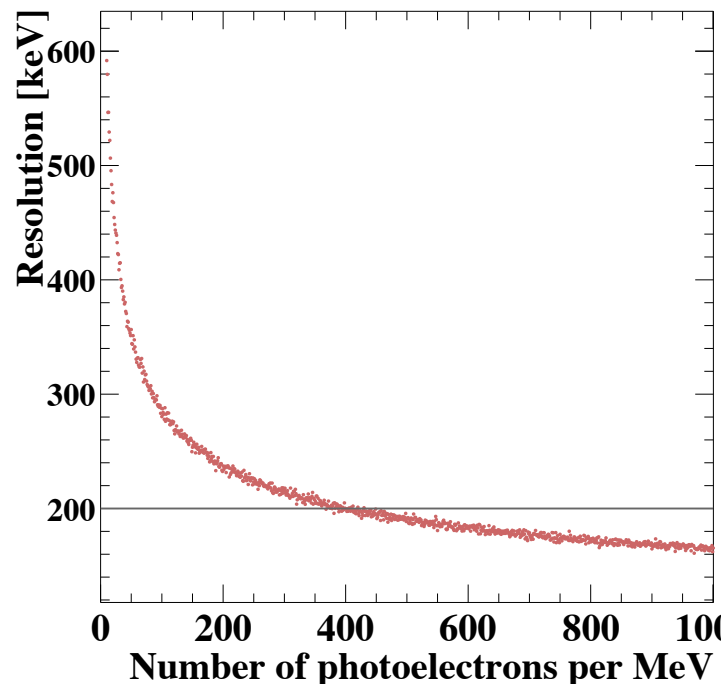
下流側参照用カウンタの電荷分布



*表の上から順にカットをかけ、直前のカットから新たに削減された事象の割合

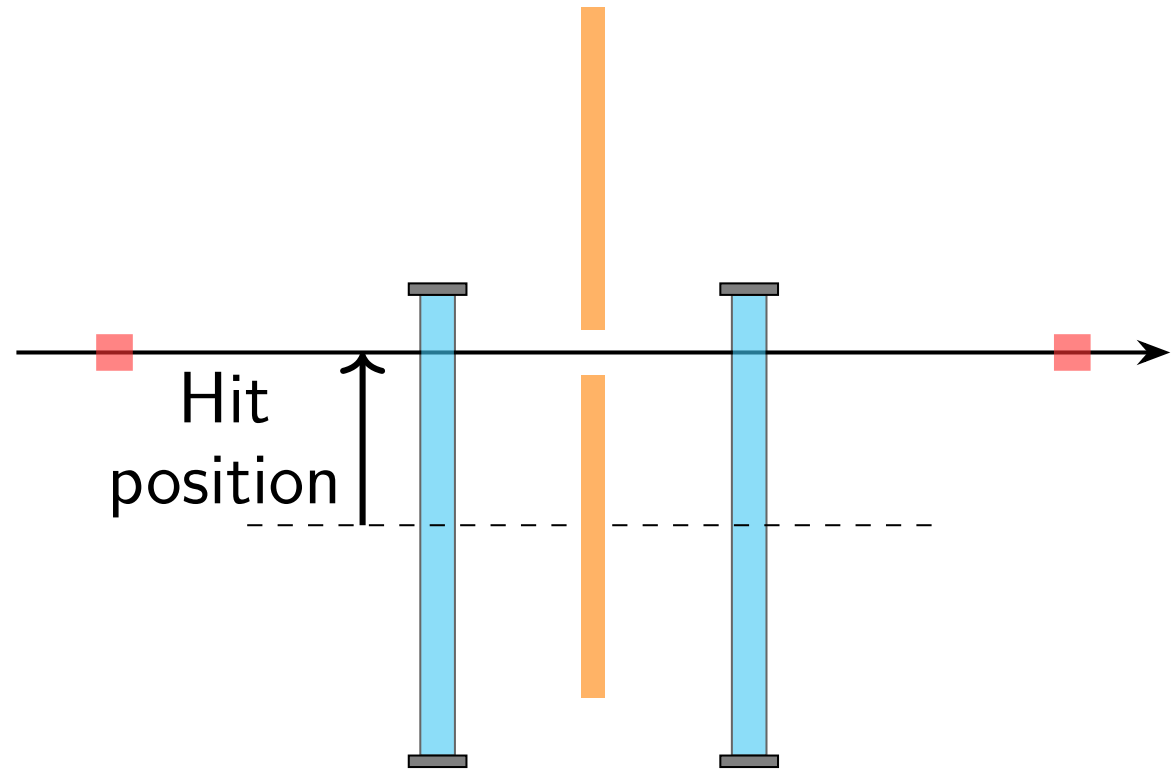
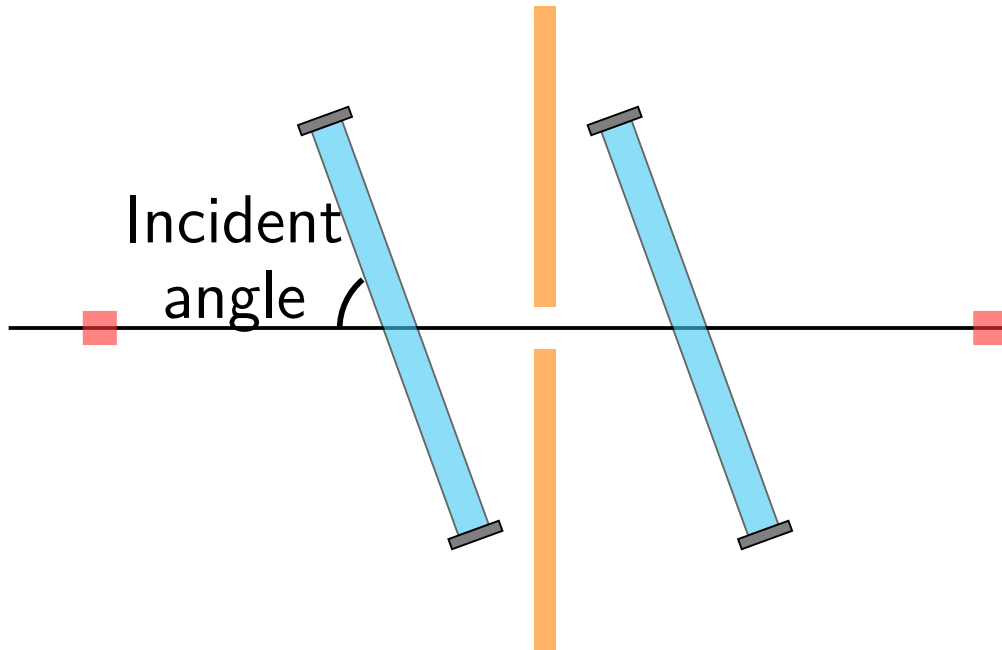
光量に対するエネルギー分解能

- 事象ごとに以下を行う
 - コンバーター中でのエネルギー損失を光量に変換
 - その光量を平均値とするポアソン分布に従う乱数により、実際に得られる光量を算出
 - 実際の光量をエネルギー損失に変換
- このように再構成したガンマ線エネルギー分布の高エネルギー側をガウスフィット



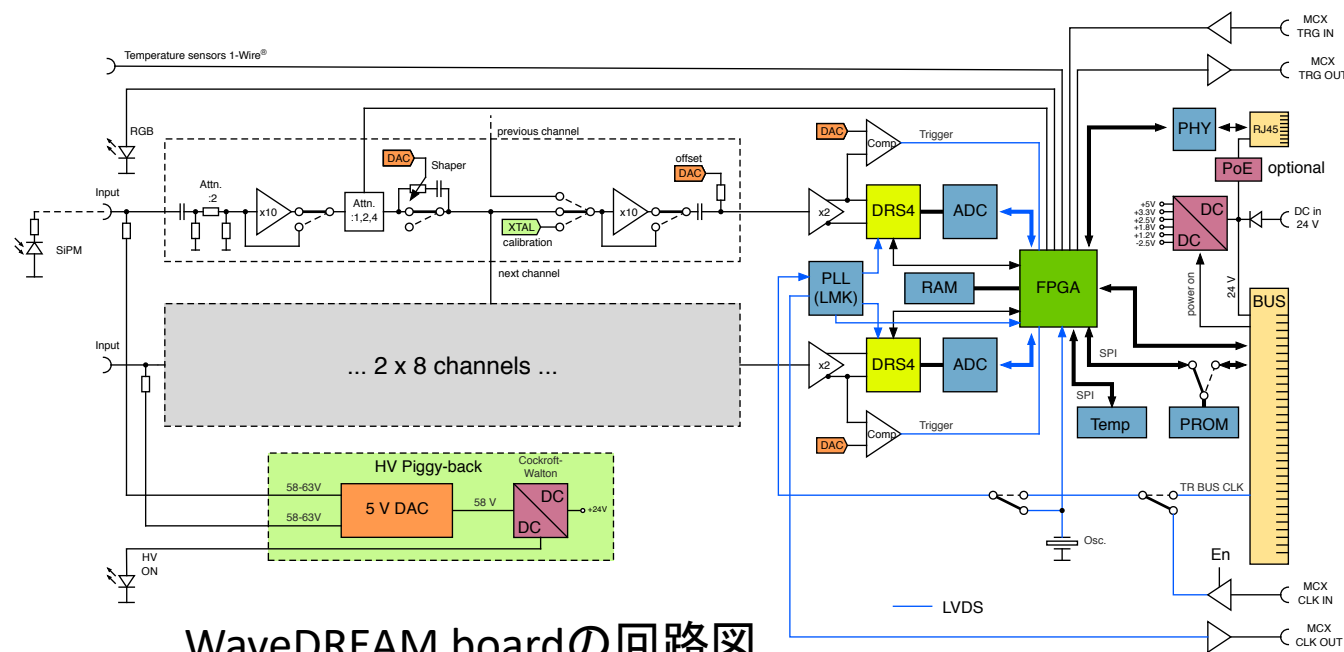
位置・角度スキャン

- ステージによりコンバーターの位置・角度を調整

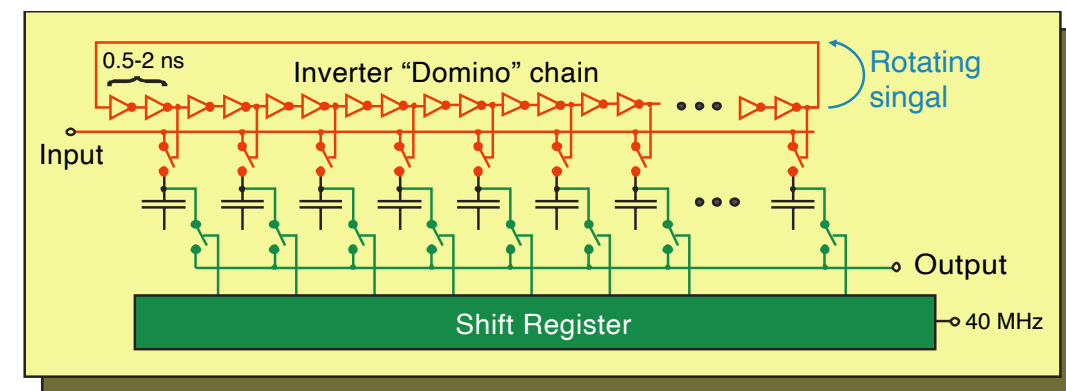


読み出しエレクトロニクス

- WaveDREAM board
 - DRS4波形デジタイザチップを二つ搭載、0.8-5 GSPSで16チャンネルの波形取得が可能
 - 二段の可変増幅回路を搭載
 - 調整可能なpole-zero cancellation 回路による可変整形機能を搭載
 - SiPMに必要な高電圧(最大240 V)を生成・供給



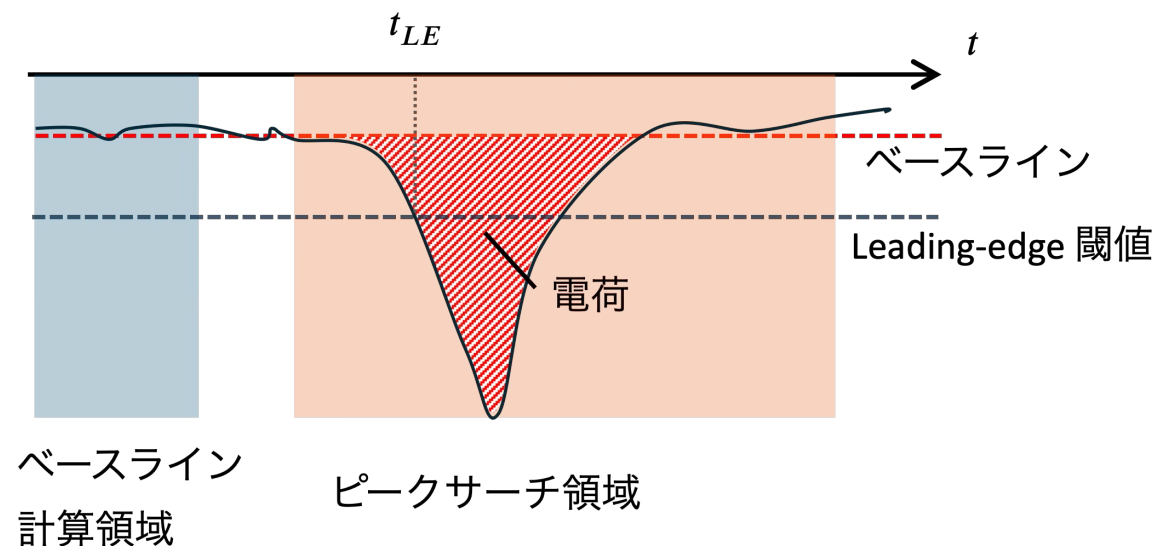
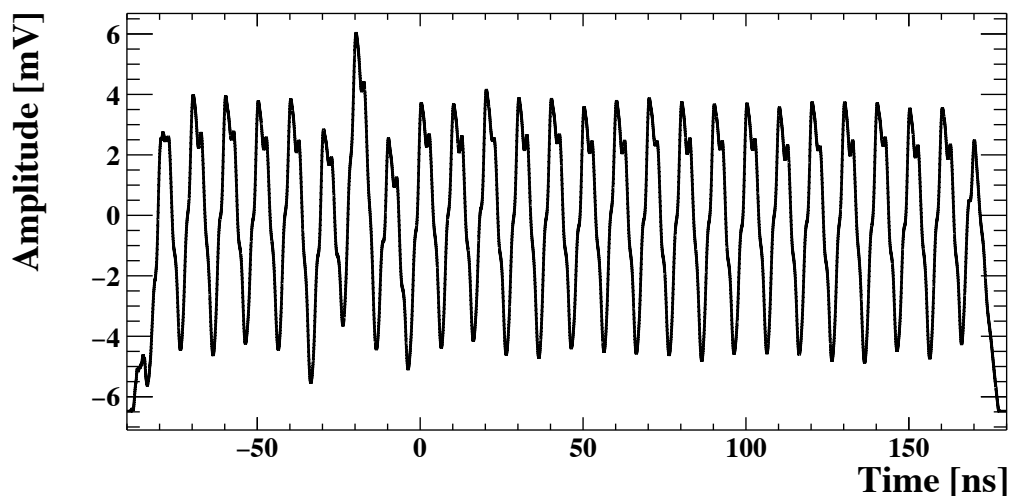
WaveDREAM boardの回路図



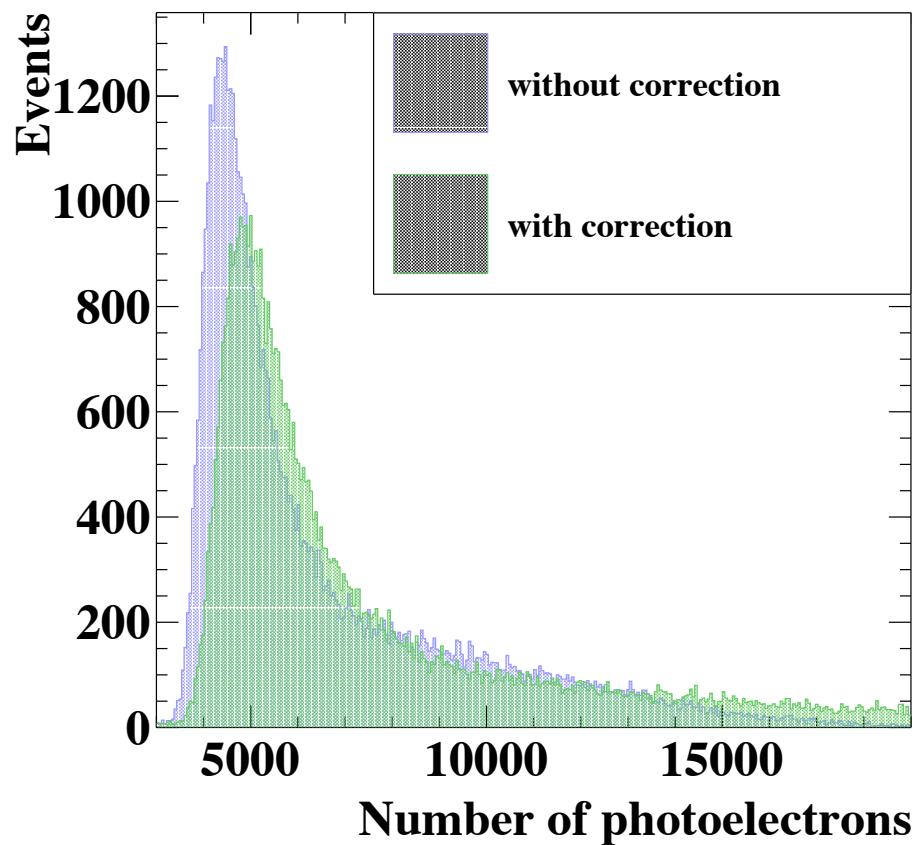
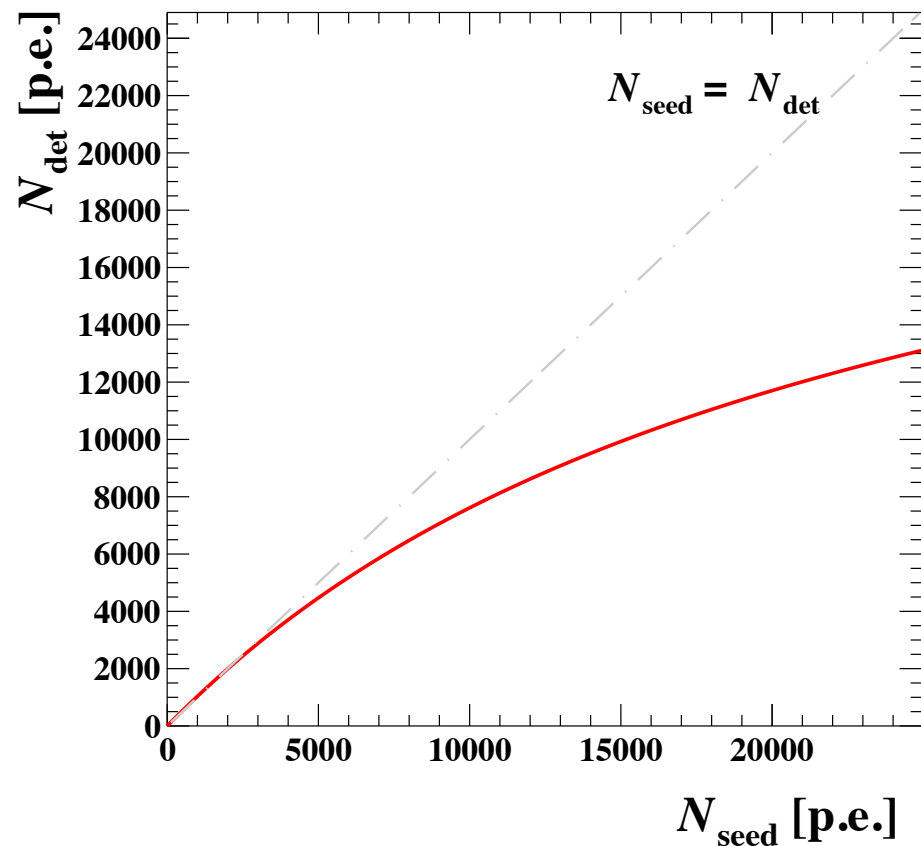
DRSで採用されているinverter domino chainの模式図

波形解析

- ペDESTALデータからノイズテンプレート波形を作成し、各波形からこれを差し引く
 - これは、WaveDREAM boardの二つのチップの同期に使用されるサイン波に由来
- まず、ベースライン波高を計算し、そこから以下の量を抽出
 - 電荷
 - Leading-edge時刻
 - Time-over-threshold

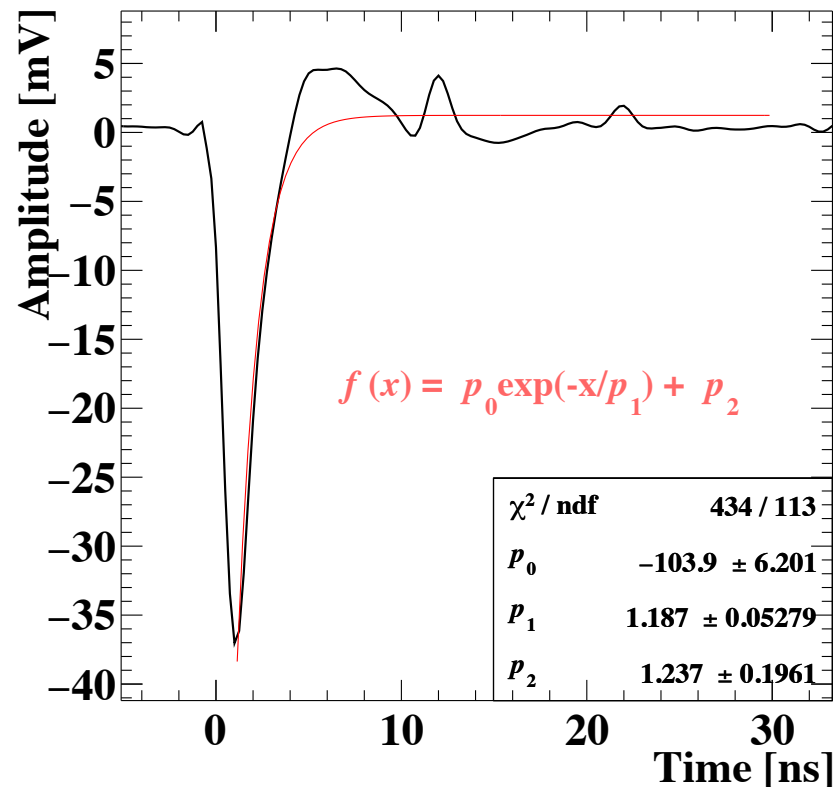
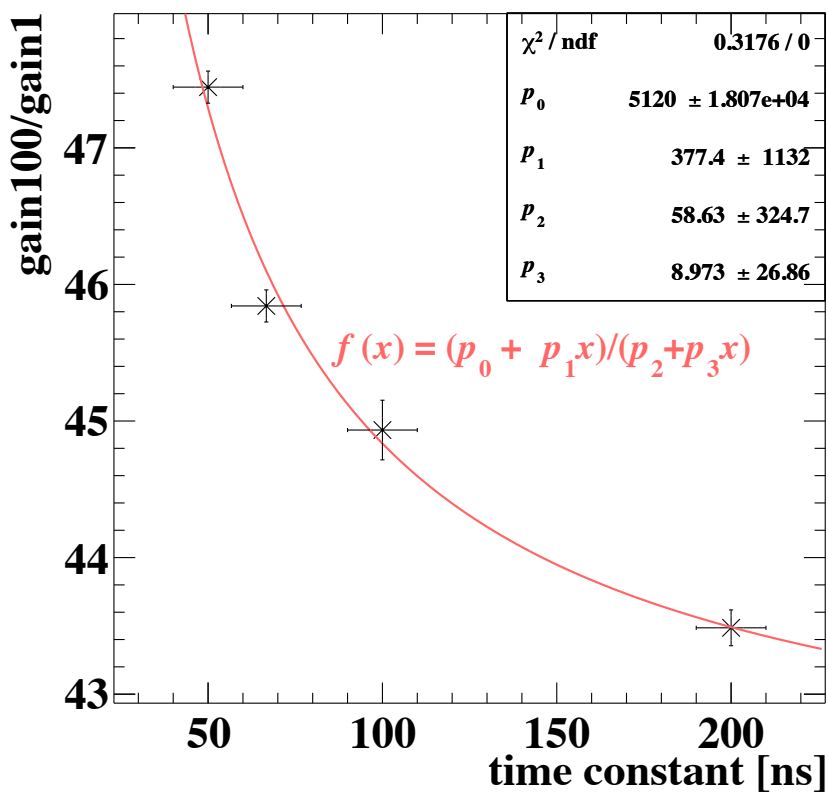


SiPMの飽和効果の補正



- 飽和モデルにより、
 - 飽和がないと仮定したときの検出光子数 N_{seed}
 - 実際の検出光子数 N_{det}の関係を予測

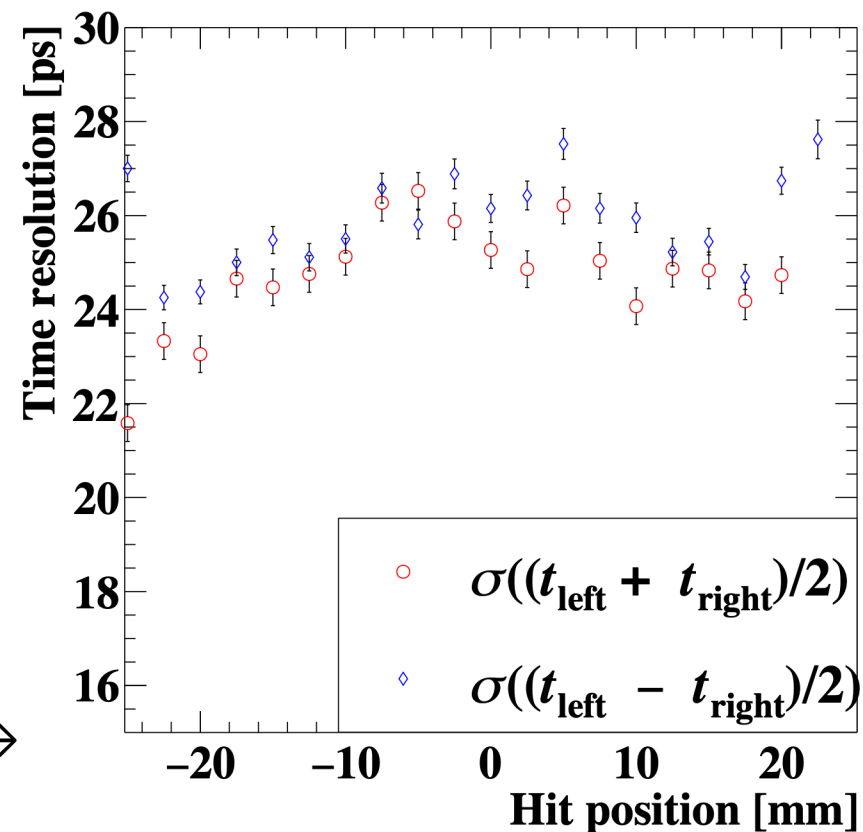
エレクトロニクスゲインの補正



- SiPMの1 p.e.波形の時定数... 0-5 ns
- よってhigh gain / low gain = $47.7 \pm 2.4 \%$ と見積もった

カウンタ分解能のクロスチェック

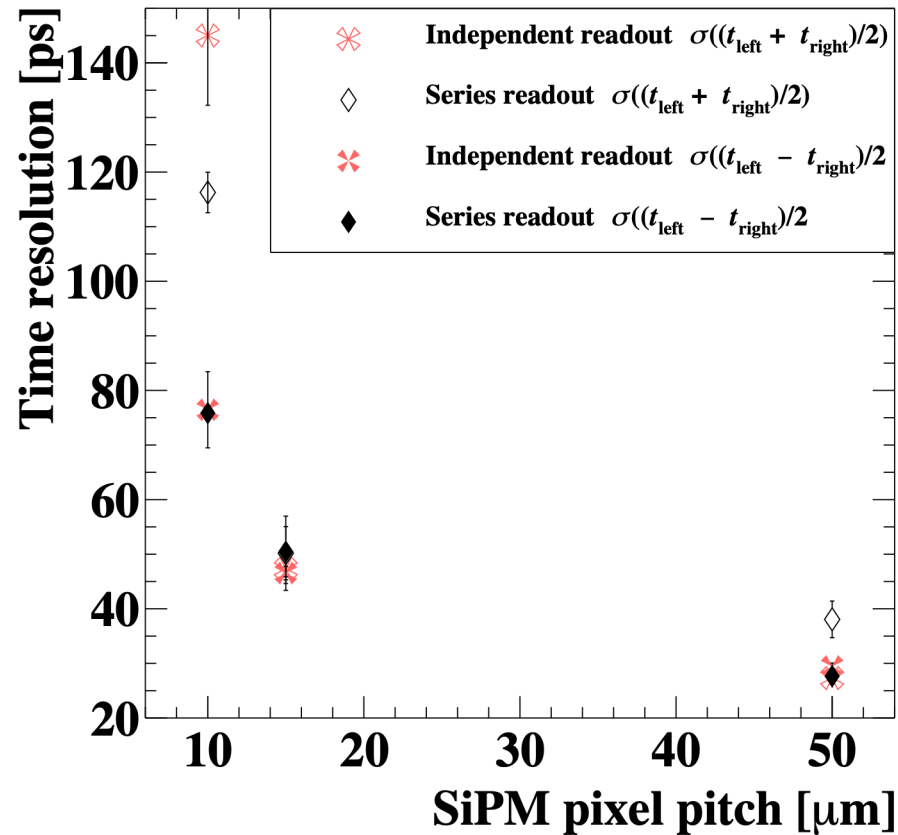
- 左右の検出時刻が統計的に独立であれば $\sigma\left(\frac{t_{\text{left}} - t_{\text{right}}}{2}\right) = \sigma\left(\frac{t_{\text{left}} + t_{\text{right}}}{2}\right)$
- $\sigma\left(\frac{t_{\text{left}} + t_{\text{right}}}{2}\right)$
 - 実際の実験での(構成を含めた)指標として適切
 - 本解析で主に使用
- $\sigma\left(\frac{t_{\text{left}} - t_{\text{right}}}{2}\right)$
 - ビームの広がり起因する統計誤差を含み得る
 - 左右検出時刻にtime-walkなど相関する誤差が含まれていても、打ち消される
 - 本解析ではクロスチェックとして使用



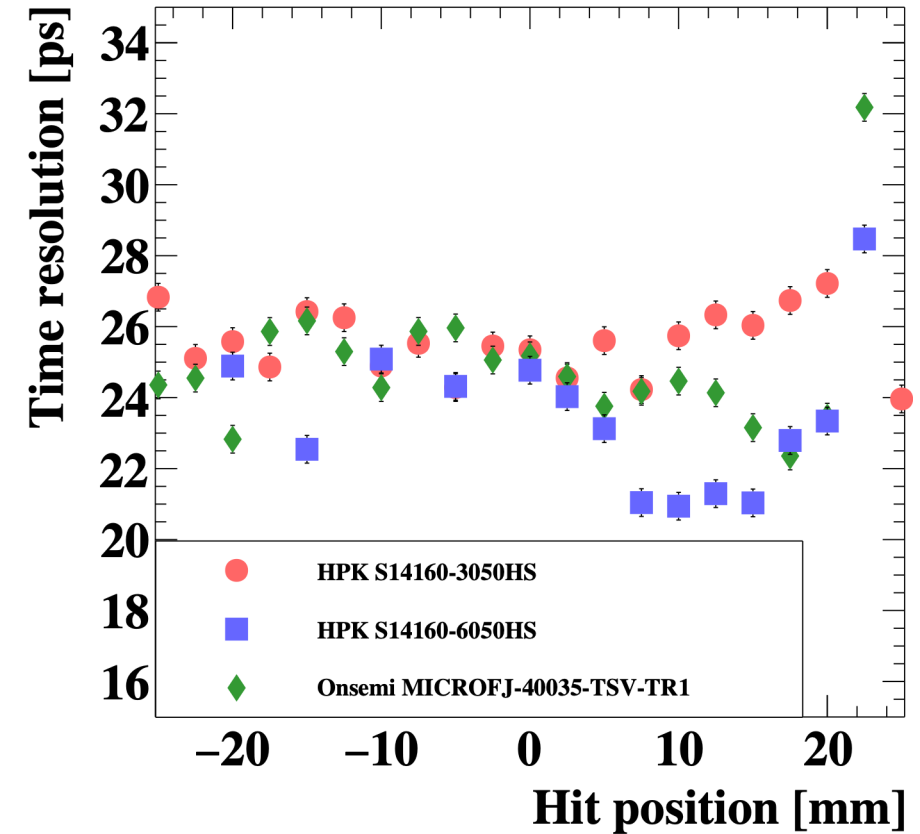
ビームの広がりにより、2024データでは左右差の方が数ps分解能が悪化→

読み出しSiPMによる性能比較

ピクセルピッチ



SiPM種別

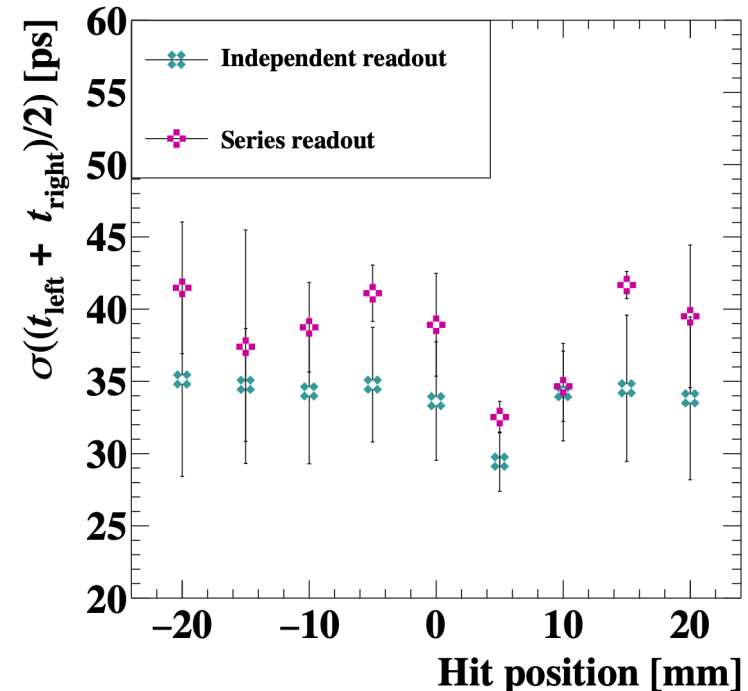
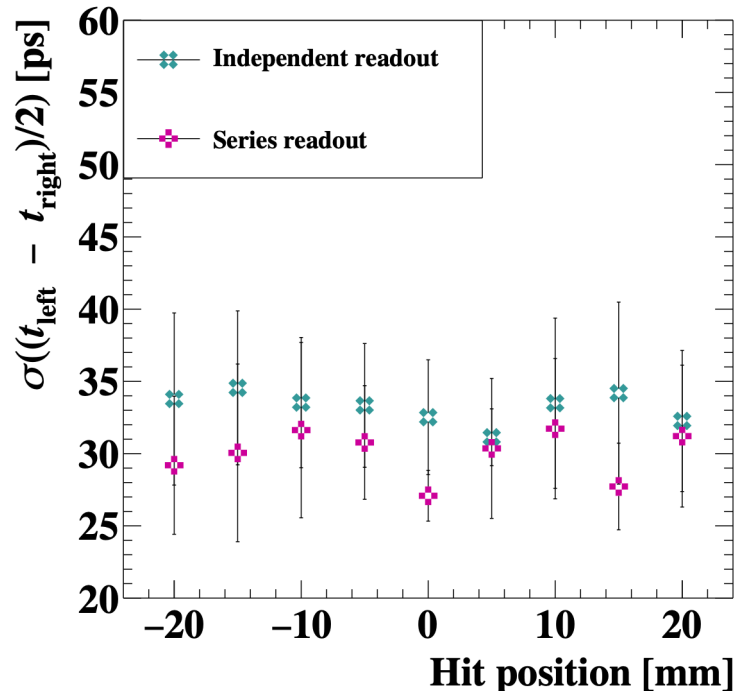


- 大きなピクセルピッチを持つほど良い分解能

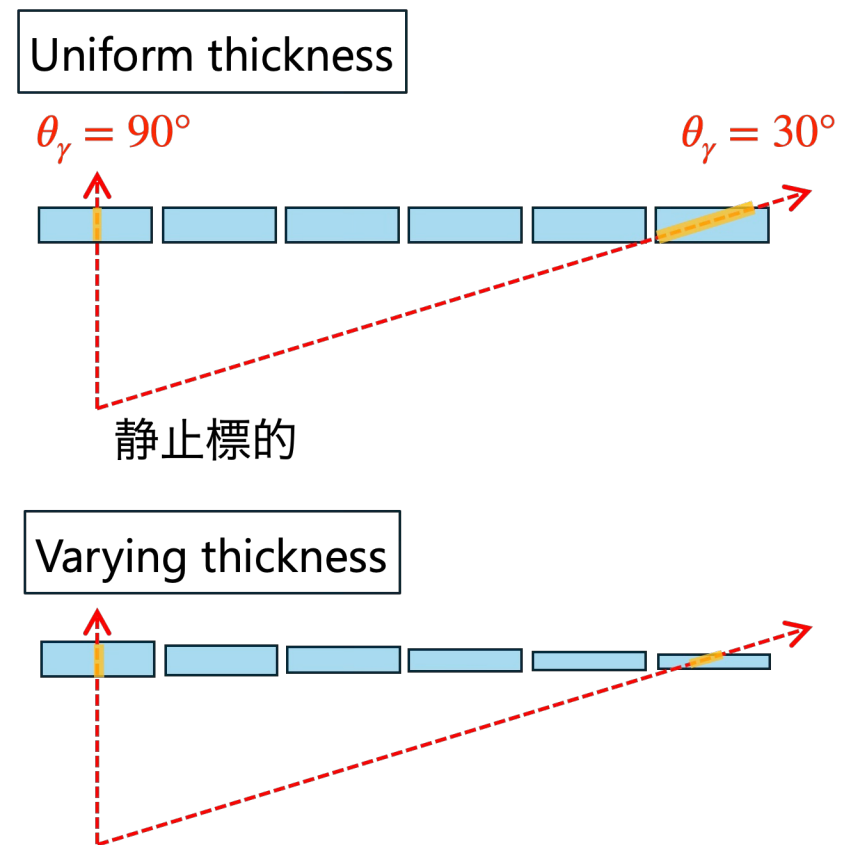
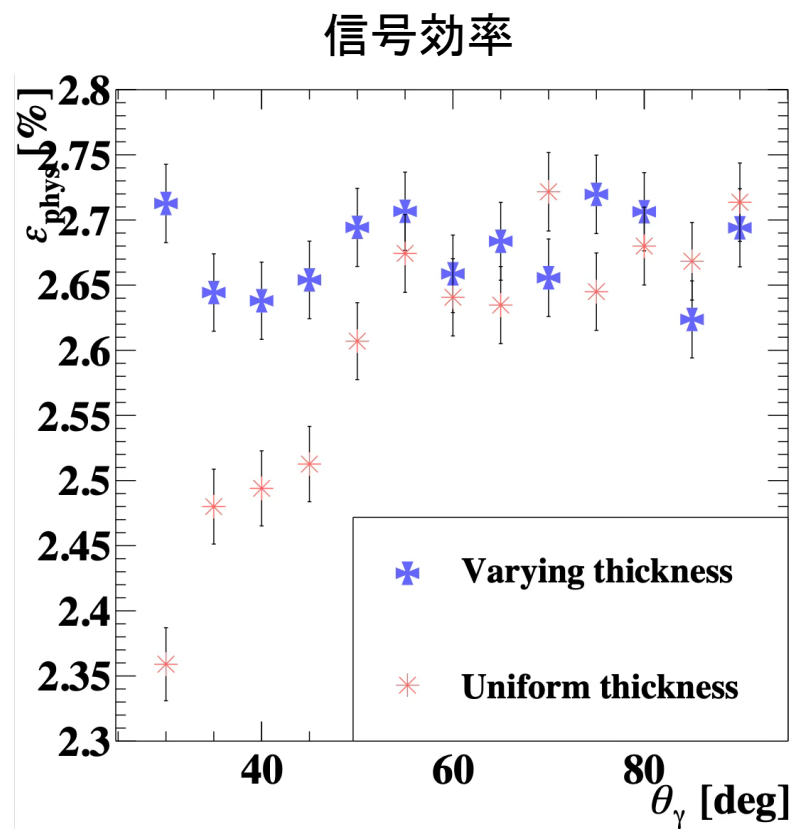
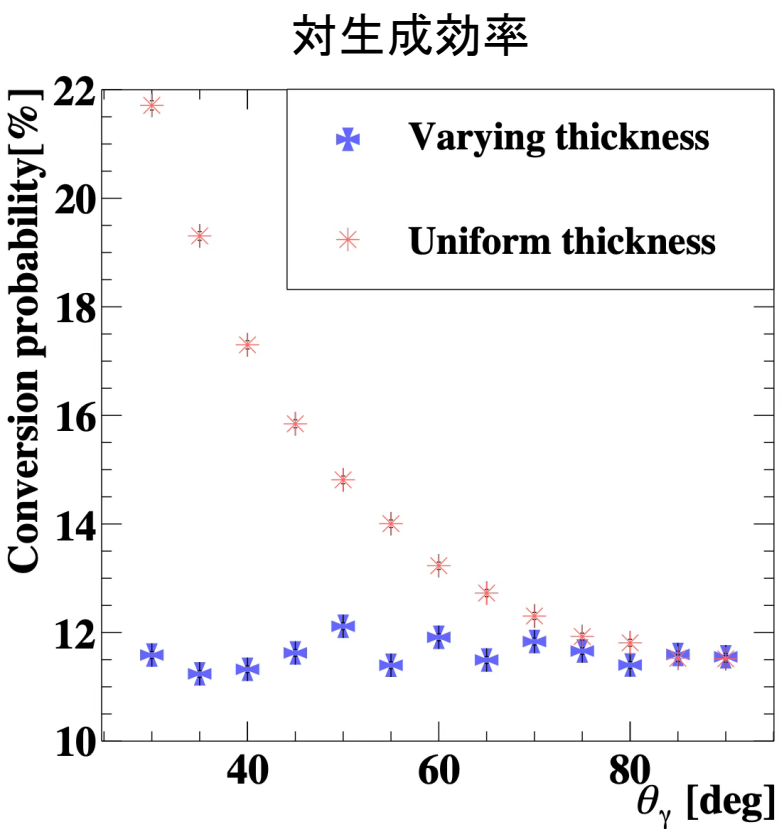
- 分解能に有意な差は見られなかった

読み出し方式の比較

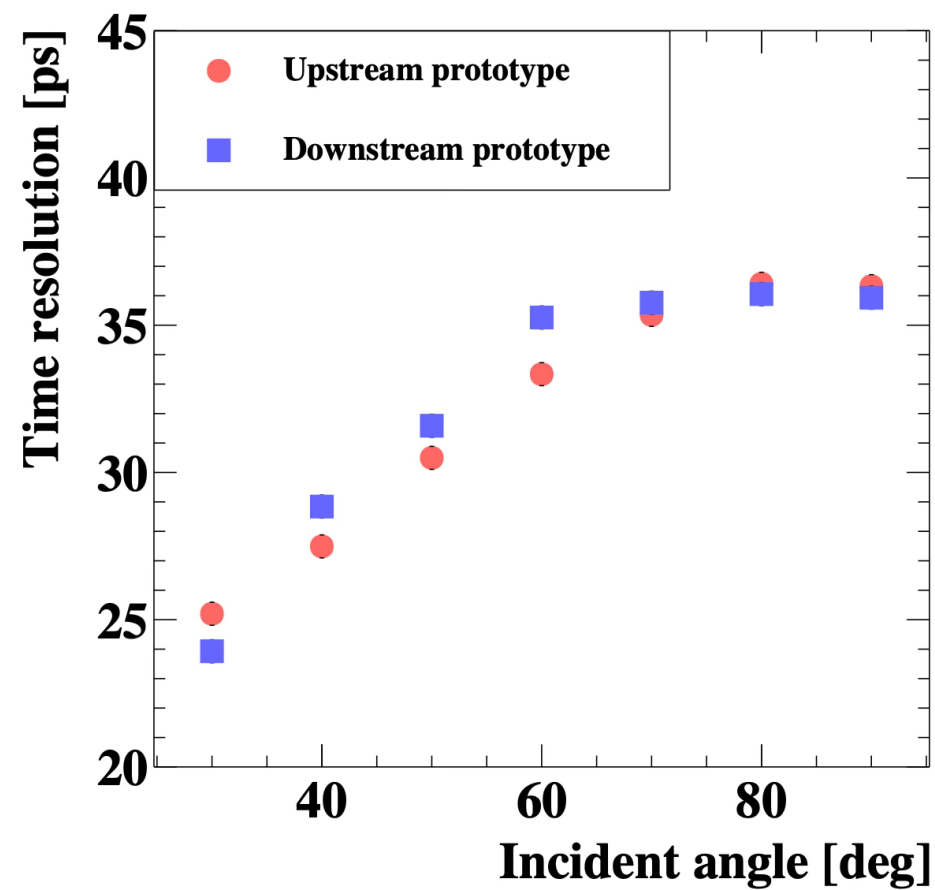
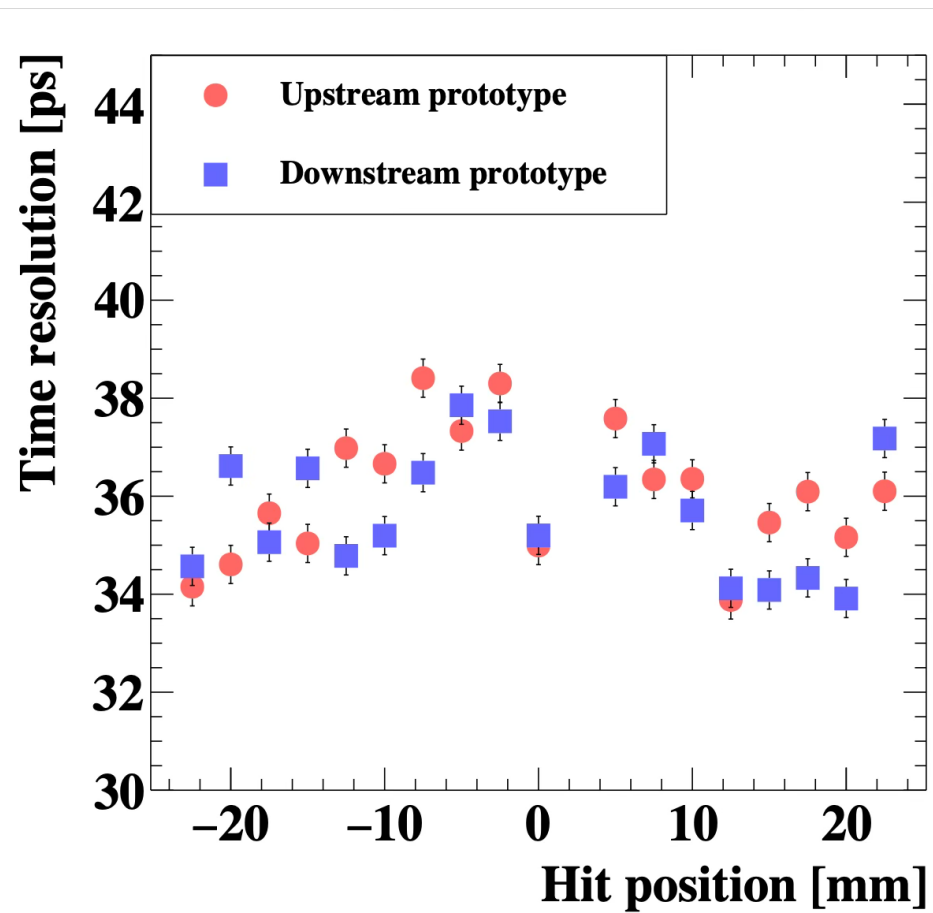
- コンバーターの片側に3つのSiPMを取り付ける際、2つの読み出し方式を比較
 - 独立接続...3つのSiPMの信号それぞれ独立に読み出す
 - 直列接続...3つのセンサーを電氣的に直列に繋ぎ、一つのセンサーとして読み出す
- 分解能の評価方法により異なる傾向が見えたが、誤差の範囲内
→ 読み出しチャンネル数を減らせる直列接続を採用



設置位置依存のLYSOの厚み



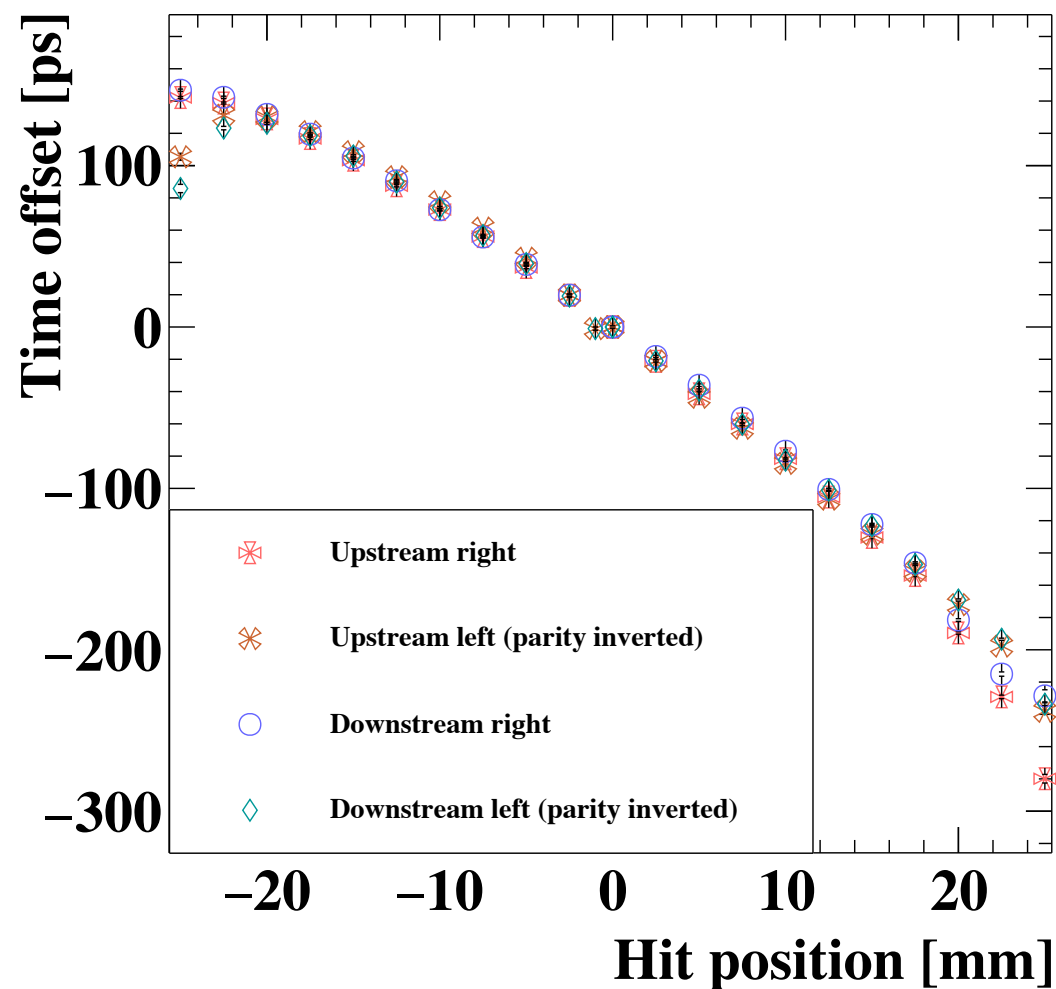
薄いLYSOによる時間性能



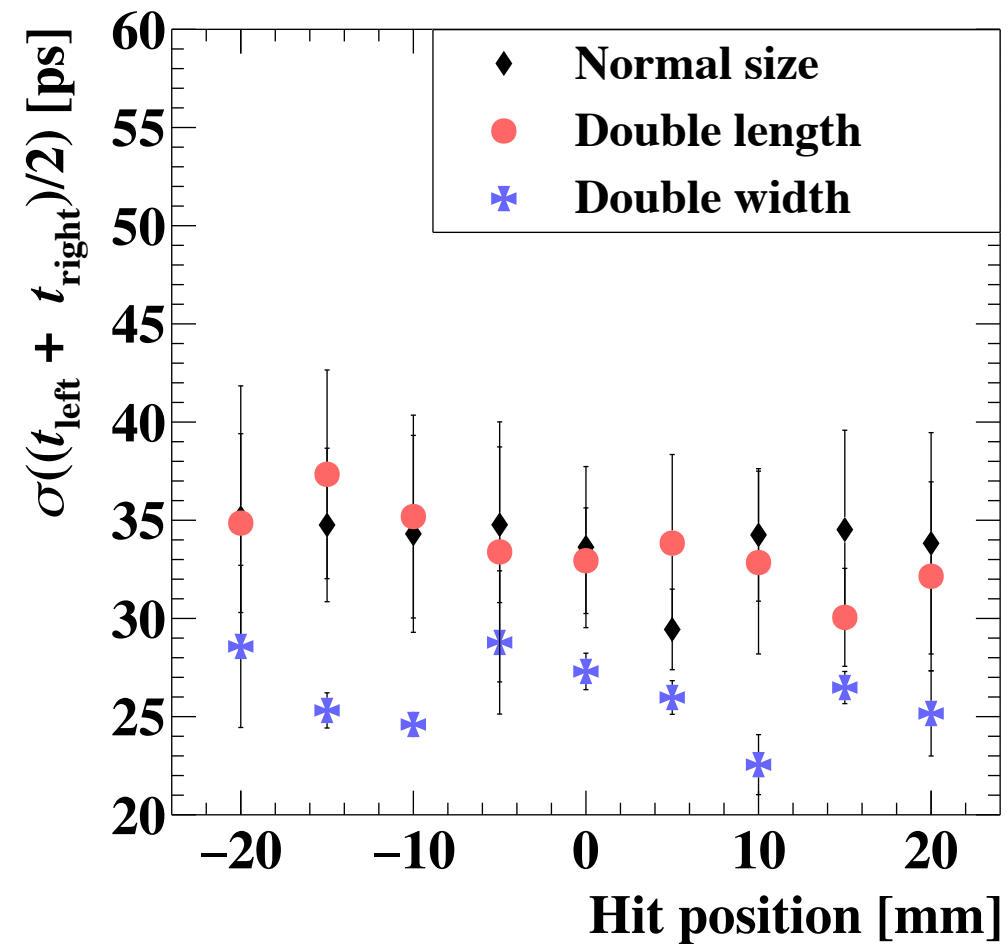
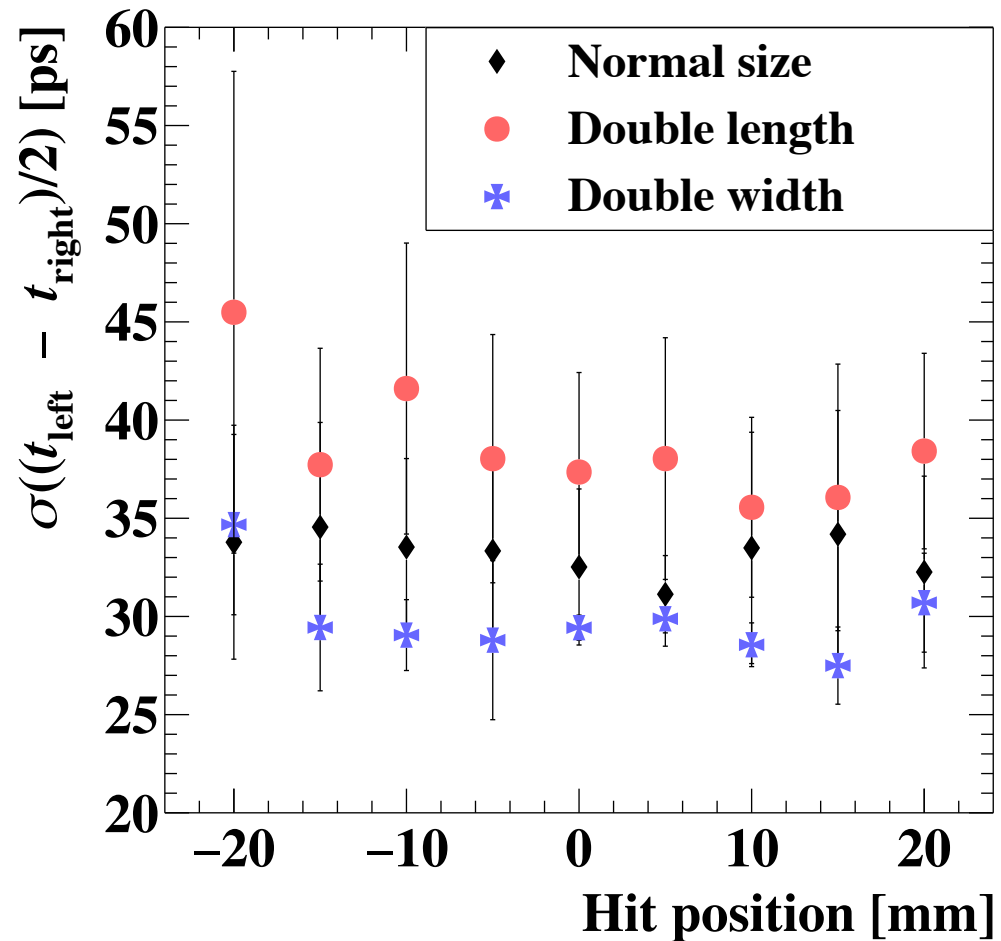
- 垂直入射の場合でも目標値40 psを達成

片側チャンネルにおける時間オフセット

- 線形領域の傾き(15 cm / ns)は、LYSOの光伝播速度 $c/n_{\text{LYSO}} \sim 16.6 \text{ cm/ns}$ とよく一致
- チャンネル間で最大10 ps程度の際
 - 主にSiPMの結合状態によると考えられる

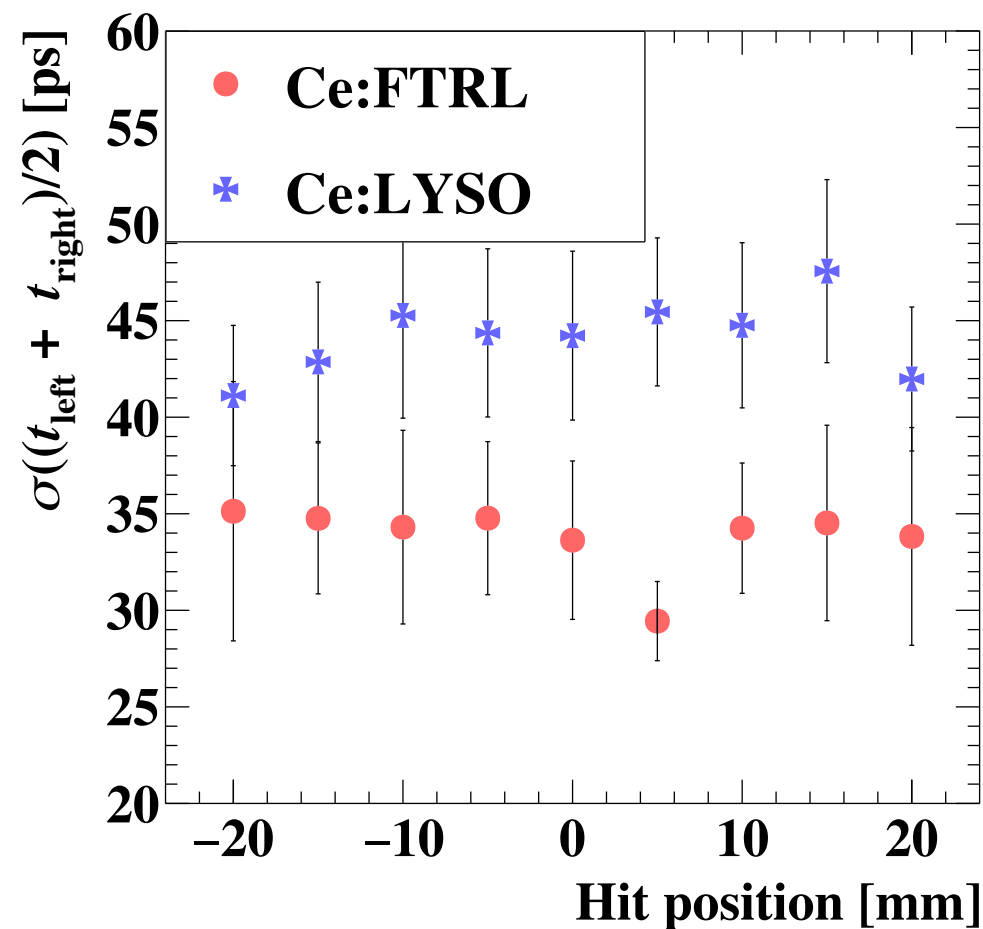


異なるサイズでの時間性能の比較

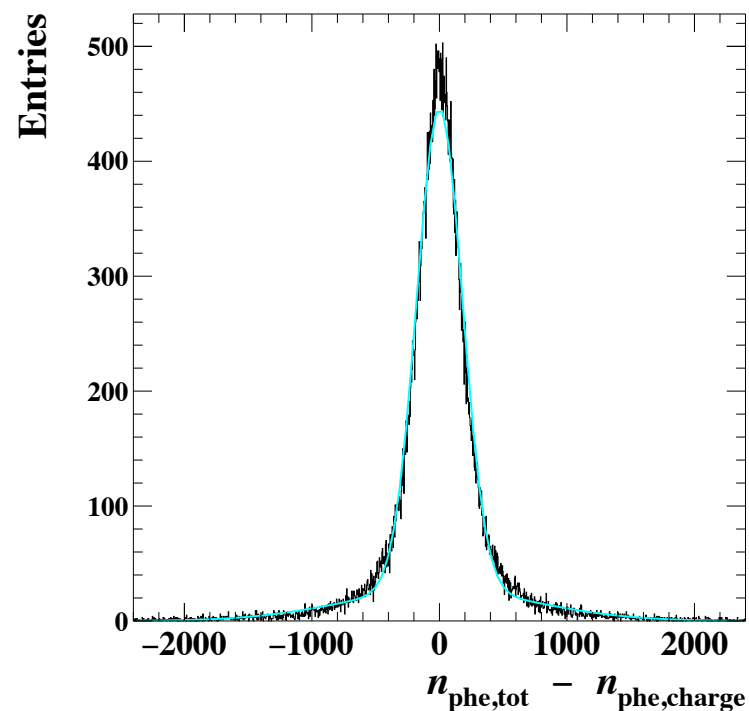
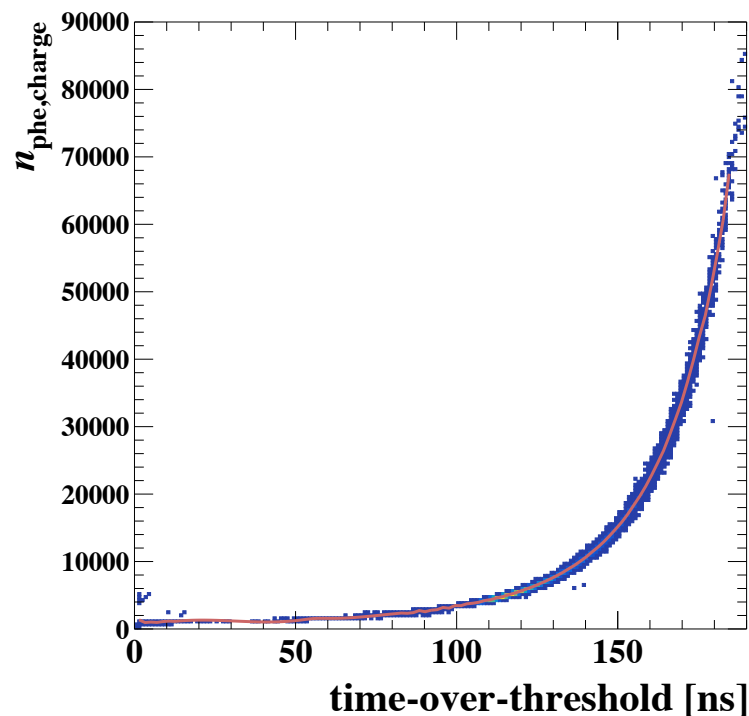


異なるLYSO typeでの時間性能の比較

特性	Ce:FTRL	Ce:LYSO
2 mm 角のものの時間分解能 (ps)	96	125
光量 (光子数 / MeV)	$30000 \pm 10 \%$	$36000 \pm 10 \%$
減衰時間 (ns)	31	40
最大波長 (nm)	420	420
屈折率	1.81	1.81
密度 (g/cm ³)	7.2	7.2



Time-over-thresholdによる光量の評価



- Time-over-thresholdによりエネルギーを再構成できれば、high-gainの増幅率のみでデータ取得をすればよくなる(チャンネル数半減)
- 200 p.e.程度の分解能で再構成可能 ... およそ110 keV (0.2 %)に相当