

# Scintillating Fiber Tracker の開発に向けた プラスチックファイバーの溶着試験

東北大理, 京大理<sup>A</sup>

若林大貴, 市川温子, Lukas Berns, 木河達也<sup>A</sup>

日本物理学会 2023年第78回年次大会

2023年3月24日

# 長基線ニュートリノ振動実験

## T2K実験

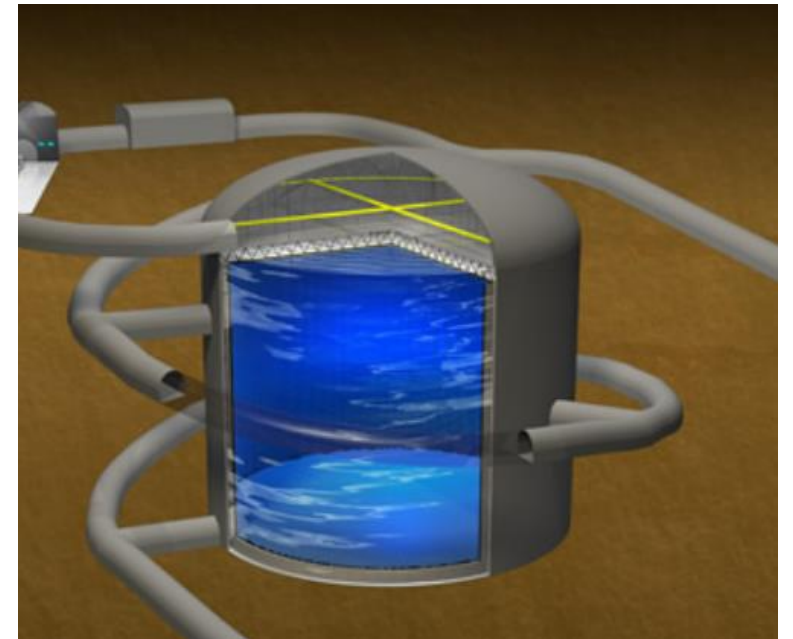


- J-PARCで作ったニュートリノビームを前置検出器と、295km離れたSK(スーパーカミオカンデ)で観測する長基線ニュートリノ振動実験
- ニュートリノと反ニュートリノにおける振動の違いを測定し、レプトンのCP対称性の破れを調査
- 前置検出器ND280では振動前のニュートリノビームを測定し、フラックスや反応断面積を制限

## HK(ハイパーカミオカンデ)実験

- T2K実験を継承し、2027年観測開始予定である長基線ニュートリノ実験
- 後置検出器としてSKの**約8倍**の有効体積を持つハイパーカミオカンデを使用
- **前置検出器ND280のアップグレード**も計画中である

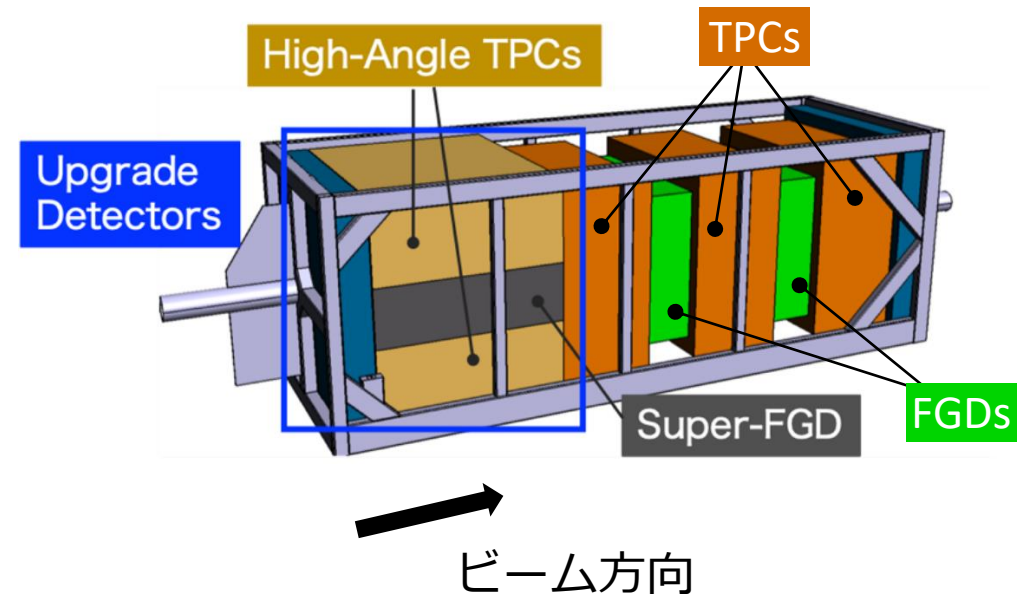
ハイパーカミオカンデの完成イメージ



# ND280++へのアップグレード

- 前置検出器ND280の課題

- 現在は主に炭素標的 (プラスチックシンチレータ)の検出器を使用している
- 水標的のSKと炭素標的のNDの違いが系統誤差となる
- アップグレードによる統計量の増加によって、この系統誤差の影響が大きくなる



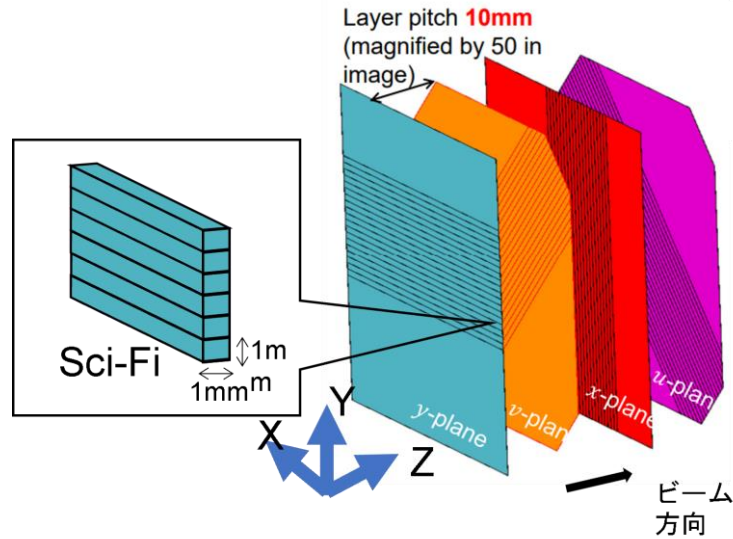
- 解決策

- ND280++ではHKと同じ水標的検出器の導入を計画中
- 候補：SciFiトラッカー+水
- 課題：水の比率を高く保ちつつ、飛跡の検出効率、粒子識別能がプラスチックシンチレータ検出器と同程度の性能を得たい

\*SciFi = **Sc**intillation **F**iber

# SciFiトラックターの概要

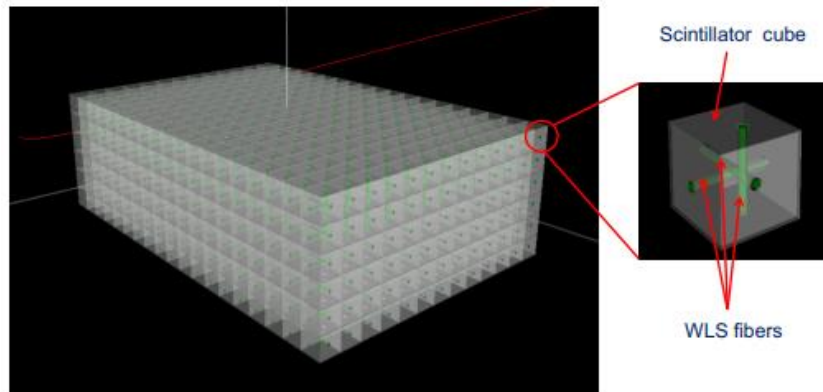
Sci-Fiトラックターのイメージ



## 構成

- SciFi :コアにシンチレーション物質を混ぜたファイバー
- 1mm\*1mm角状SciFiを並べたシート
- ファイバー方向：1mmの位置分解能
- SciFiシートを10mmピッチでビーム方向に並べて水タンクに沈める
- 高multiplicity事象でも飛跡を分離可能  
SFGDとSciFiの比較

現在制作中のSFGD.  
1cm角のシンチレータキューブからの光を3方向に挿入した波長変換ファイバーで読み出す



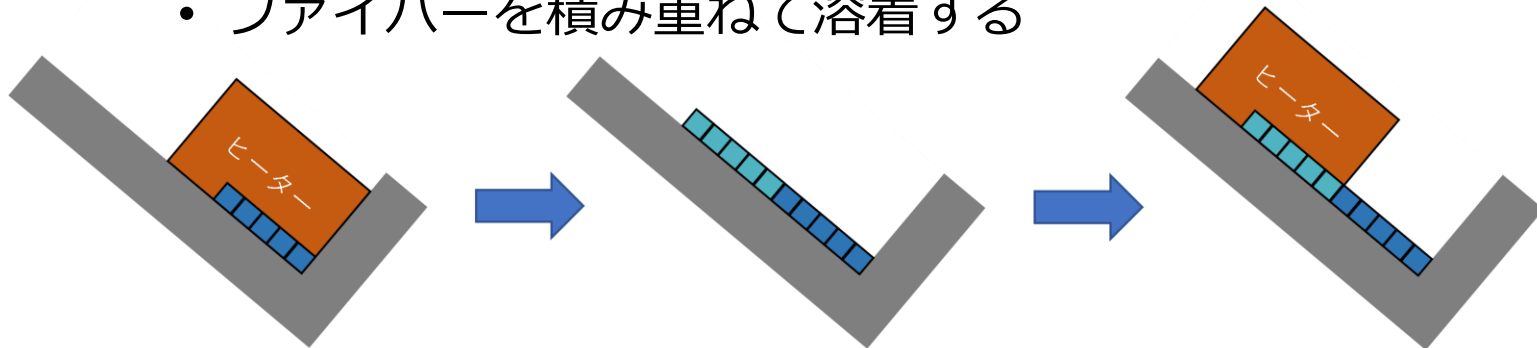
検出器	SFGD	SciFi
体積[m <sup>3</sup> ]	1.92*1.82*0.56	2*2*0.5
H2Oの比率[%]	0	90
光量 [p.e.]	35/cube <sup>[1]</sup>	29/fiber <sup>[2]</sup>
channel数 [ch]	60k	100k

[1]A. Blondel, "A fully-active fine-grained detector with three readout views" arXiv:1707.01785 (2018).

[2]平本 綾美, "ニュートリノ反応測定実験に用いる高位置分解能 Scintillating Fiber Trackerの開発" 京都大学修士論文 (2017).

# ファイバー固定方法の開発

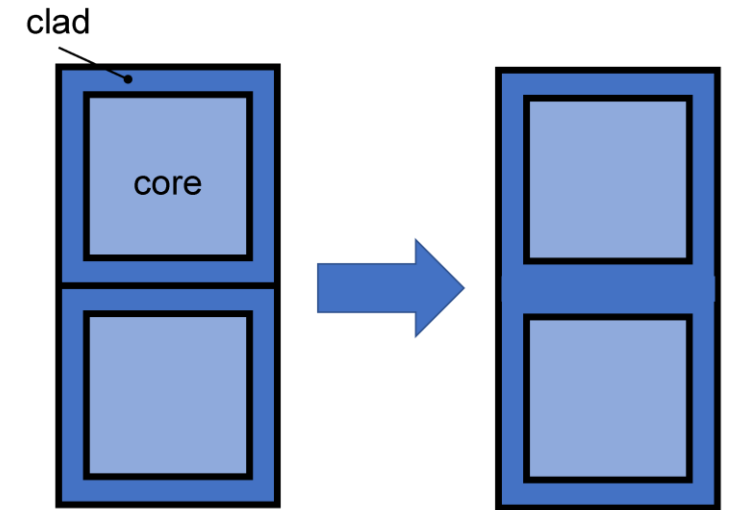
- ファイバー固定の一般的な方法
  - 接着剤や金属フレームでファイバーを固定
    - 水以外の物質質量が増加
    - 系統誤差の原因
- 本研究で開発中のファイバー固定法
  - ファイバーのクラッド同士を**熱溶着**し物質質量を削減
  - 熱膨張による変形を防ぐため、重力でファイバーの各側面に等しく荷重をかける
  - ファイバーを積み重ねて溶着する



ファイバーを  
並べて熱溶着する

溶着したファイバーの上に  
新たにファイバーを並べる

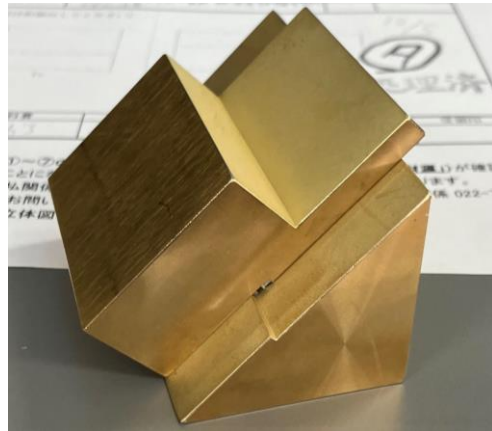
新たに並べた  
ファイバーを溶着する



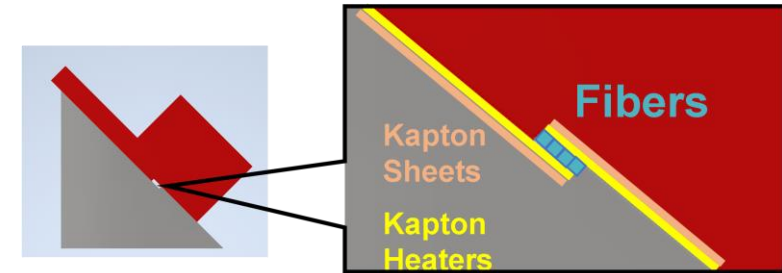
熱溶着のイメージ  
熱でファイバーのクラッドだけを溶かし、  
ファイバー同士を接着する

# 溶着用治具：試作1号機

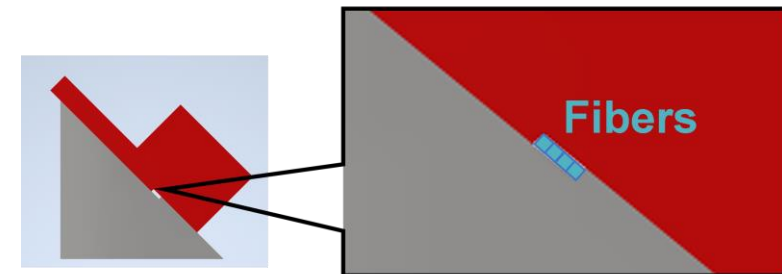
- 当初のアイデア
  - 上下の治具の間にあるファイバーを両側からヒーターで加熱
- 問題：ヒーターパワー不足
  - 恒温槽で治具とファイバー全体を加熱した。



真鍮製の治具



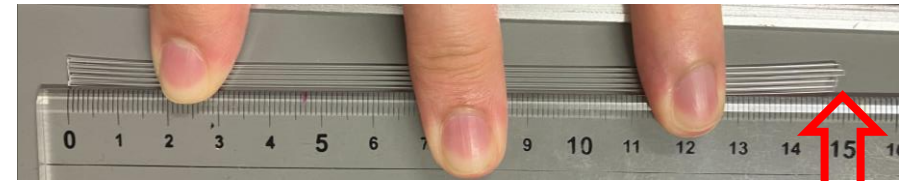
治具の間にカプトンヒーターとカプトンシートを挟み加熱する



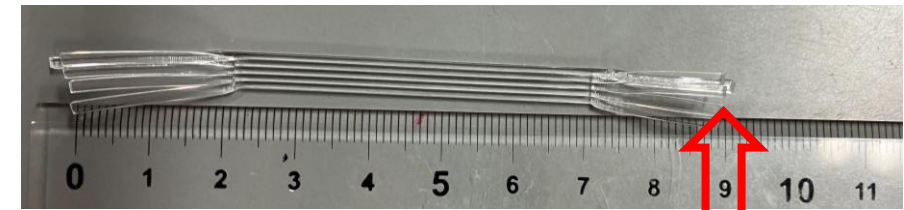
治具だけでファイバーを挟み、全体を恒温槽に入れて加熱

# 非荷重部におけるファイバーの変形

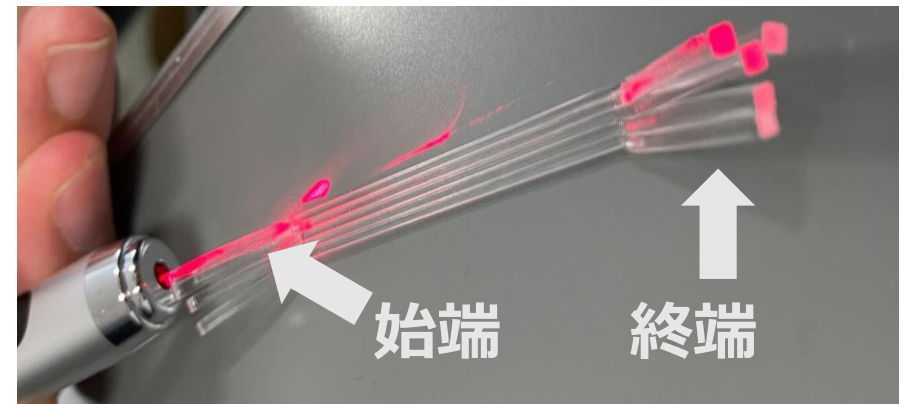
- ファイバー試験溶着結果
  - 長さ方向に縮み幅方向に膨張
  - 荷重をかけていない箇所が縦方向に熱収縮を起こしたと推測
- クロストークチェック
  - 端から2番目のファイバーに赤色光を入射した。
  - どのファイバーも赤く光って見えた。
  - 大きなクロストーク(TT)



溶着前

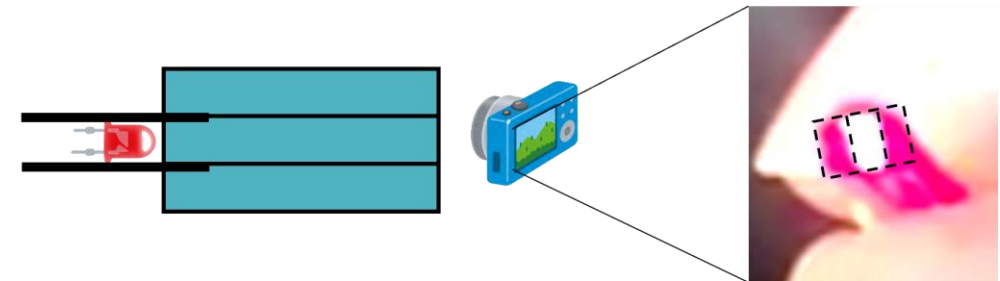
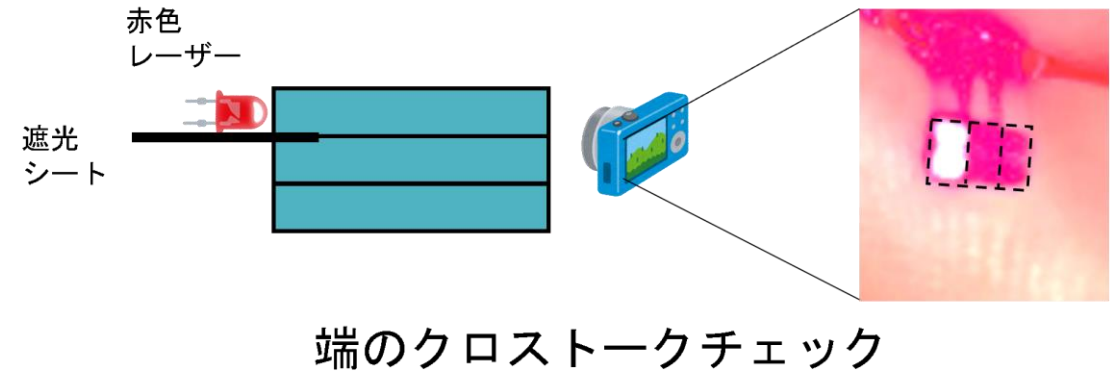
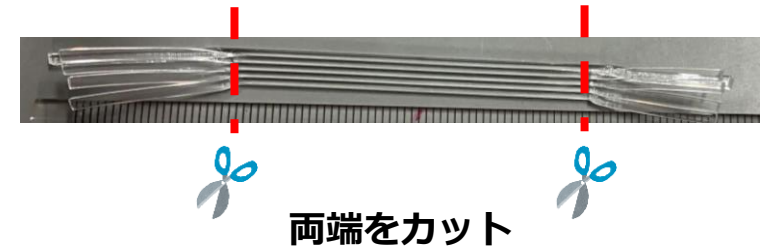


溶着後



# クロストークチェック

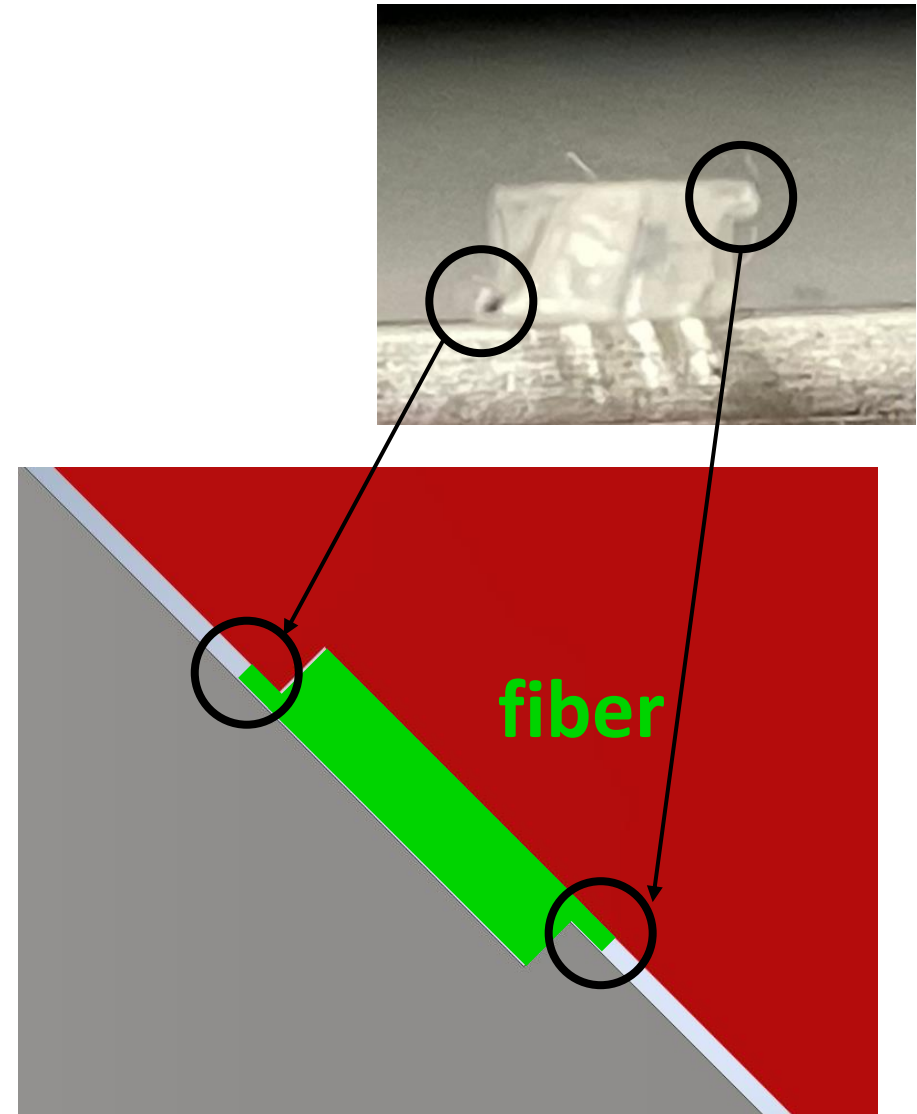
- クロストークの発生箇所を調べるために、両端をカットし溶着部分だけを残して、目視による確認を行った。
- 片方先端のみ溶着を剥がし、ファイバー一本のみ遮光シートで覆いレーザー光を入射してクロストークを目視でチェックした。
- クロストークはほとんど無かった。
- 溶着部分両端の変形を抑えればクロストークも低減できると考えた。





# 荷重部におけるファイバーの変形

- 上下のjigの境界に接していたファイバーの部分に突起ができています。
- 軟化したファイバーが治具の隙間にはみ出すことで変形したと推測
- 荷重を増やして隙間を減らすことで変形を防げると予想



# 試作1号機の問題点

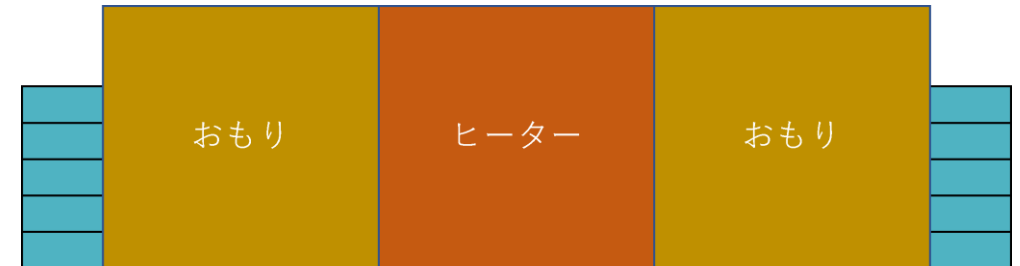
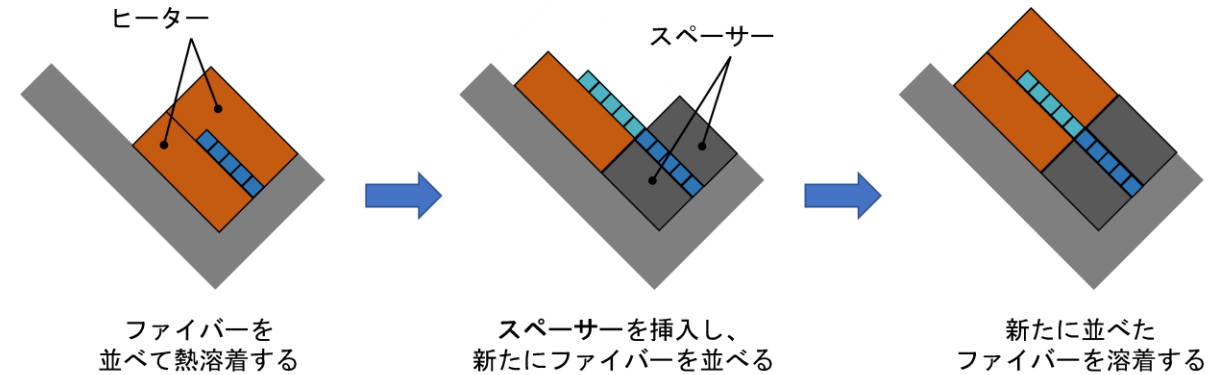
---

- 恒温槽での溶着による問題
  - 非荷重部の膨張
  - 2m長のファイバーが恒温槽に入りきらない
- 横方向に大型化できない
  - 最大で約30本のファイバーしか斜面に載らない
- (荷重不足?)
  - 現在の質量は336g
- 以上の点を考慮し、新たに治具試作2号機を制作した。

# 熱溶着のための治具試作2号機

## • 特徴

- 荷重の調整
  - 336g→388g
- ファイバーアレイの大型化に対応
  - 1号機では最大で約30本のファイバーしか溶着できなかったが、2号機ではスペーサーを積み重ねていくことで大型化に対応
- ファイバーの変形防止
  - 局所的な加熱：上下の治具にヒーターを内蔵
  - 必要に応じて加熱部両脇に荷重をかけて変形を防ぐ
- 温度制御
  - オーバーシュート低減のために上治具ヒーター表面温度を測ってON/OFF制御を行う。



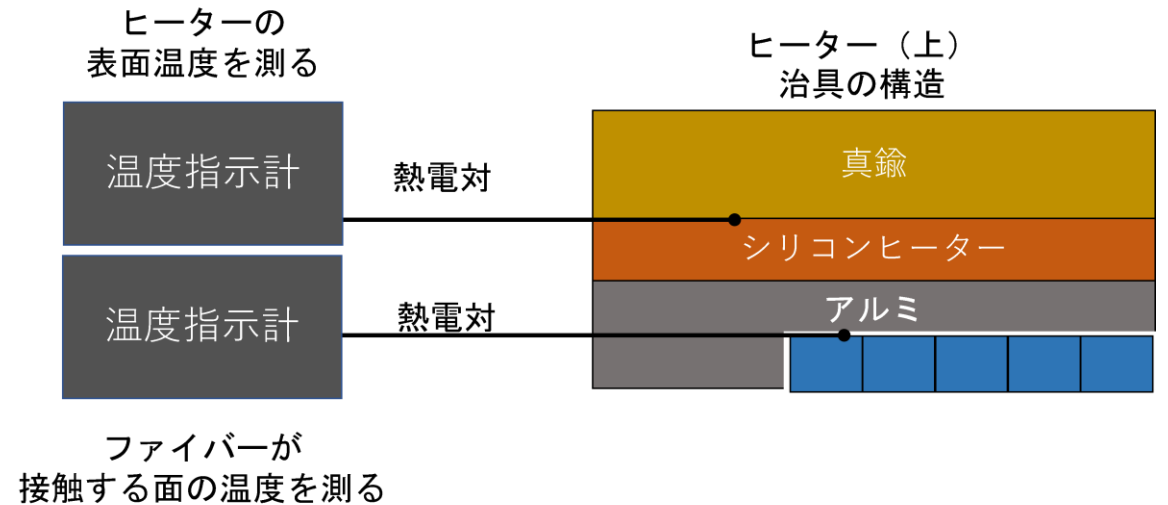
ヒーターの両脇におもりを置いて荷重をかけ  
ファイバーの変形を抑制する

試作2号機

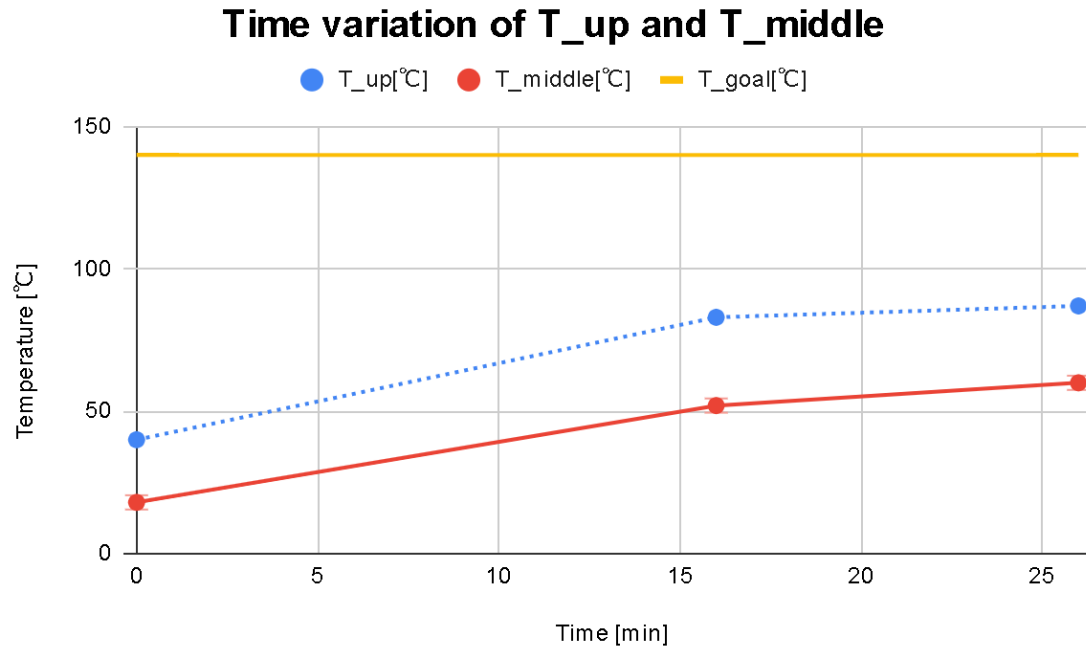
# 加熱試験の目的とセットアップ

- 目的
  - ファイバー接面の温度が十分に上昇するか確認する。
- 目標：ファイバー表面で140°Cを30分間保つ
- 温度測定点
  - 上シリコンヒーター表面温度
  - ファイバー接触面温度

- 温度制御のための熱電対とヒーターの配線



# 加熱試験



- 60°C付近で熱平衡に達し、目標の140°Cには届かなかった。
- この結果を踏まえ、次に挙げるいくつかの改善策を施した。

- T\_up: 上シリコンヒーターの表面温度
- T\_middle: ファイバー接触面温度
- T\_goal: 目標温度

# 断熱性を改善

- 変更点

- 真鍮へ逃げる熱を減らす
  - 真鍮とアルミの間にワッシャーを挟んで接触面積を減少
  - シリコンヒーターと真鍮の間にPTFEシートを挿入し接触防止
- 空気へ逃げる熱を減らす
  - 溶着系全体を断熱材で覆い、空気の対流を抑制

- アルミ板の両側で一様な温度

ヒーター（上）  
治具の構造



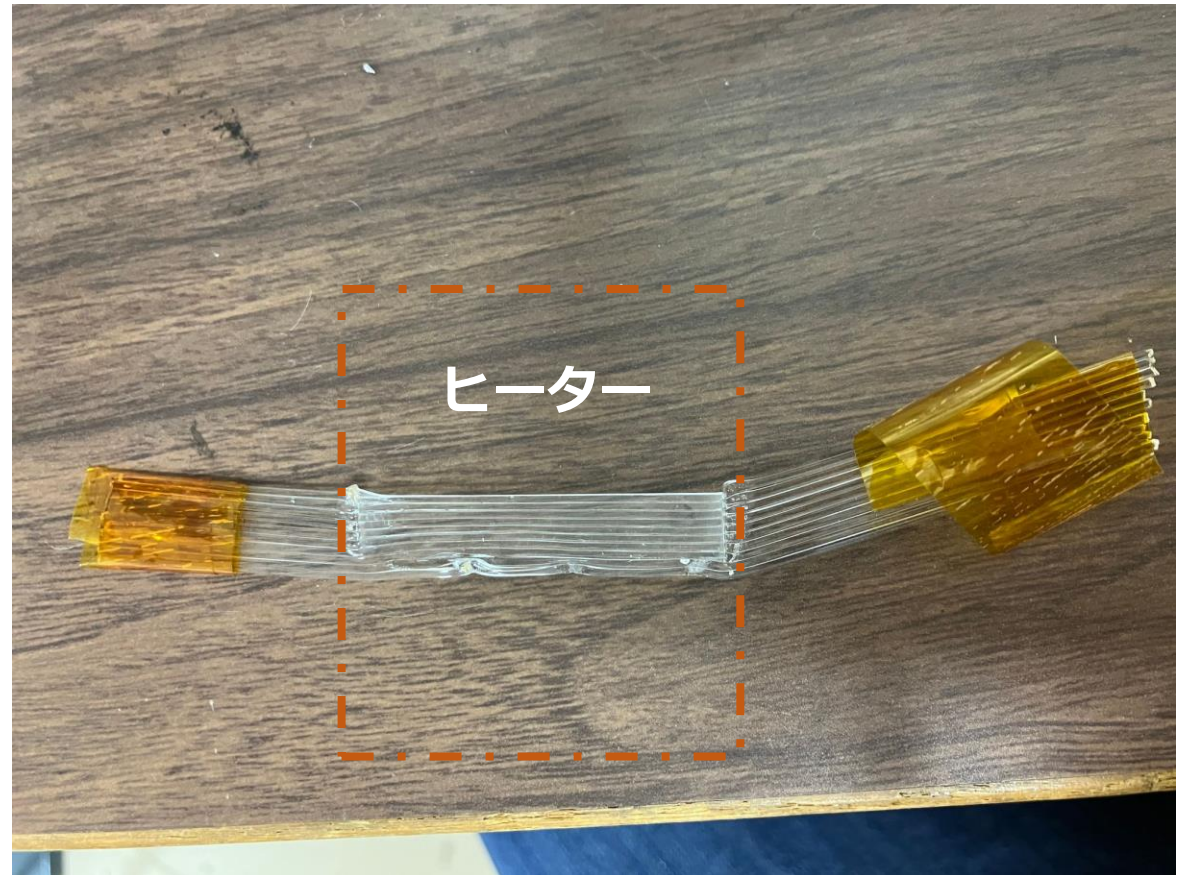
シリコンヒーター  
表面温度

ファイバー  
接触面温度



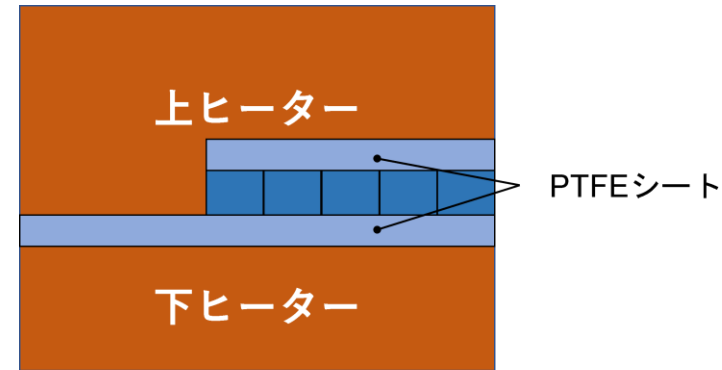
# ファイバー溶着 (140°C, 30分間)

- 断熱性を高めたところ、目標温度に達したのでファイバーを挿入して加熱
- ファイバーの膨張を抑制して溶着できた。
- 課題
  - 治具の食い込みやファイバーの湾曲を確認
  - ファイバーの溶け方に非一様性を確認 (下方ファイバーの溶着が弱い)



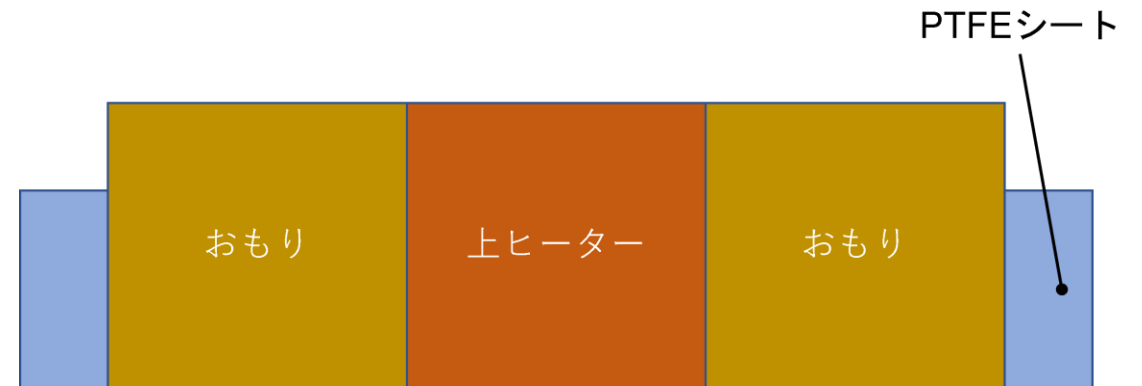
# 改善策

- 治具の食い込み防止
  - ファイバーの上下全体をPTFEシートで覆った
  - 140°C→130°Cに変更



横から見た図：ファイバー全体をPTFEシートで覆う

- ファイバーの湾曲防止
  - ヒーターの両脇のおもり（ヒーターと同じ形・大きさ）でファイバーを抑える



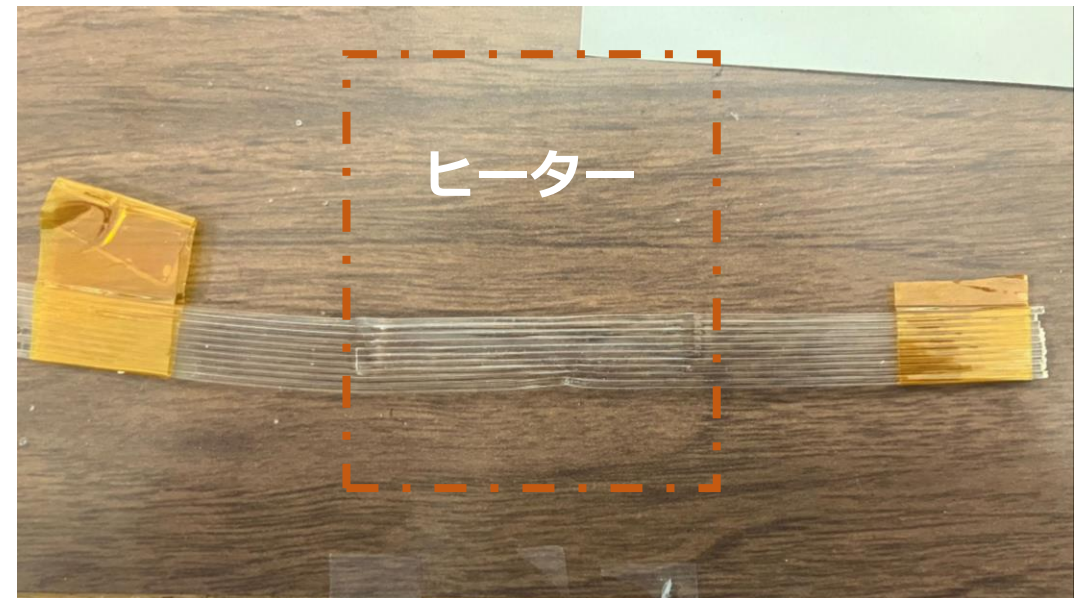
上から見た図：  
ヒーターの両脇のおもりでファイバーの湾曲を抑制する



# ファイバー溶着 (140°C, 30分間)

---

- 前回 (140°Cおもり無し) よりも湾曲や食い込みは低減
- 温度の非一様性は改善されず (下方ファイバーの溶着が弱い)



# まとめ

---

- 概要

- ハイパーカミオカンデ実験に向けて、新たな水標的の前置検出器の設置を検討中であり、水標的のSci-Fiトラッカーがその候補である。
- 試作1号機による溶着ではファイバーが大きく膨張し変形してしまった。
- 試作2号機による溶着ではファイバーの変形を抑制できたが、まだ変形箇所が残り、さらに温度分布の非一様性が懸念される。

- 今後の展望と課題

- 変形を抑制するような機構の実装
- 治具の温度分布を一様にする工夫

# 参考文献

---

- [1]A. Blondel, “A fully-active fine-grained detector with three readout views ” arXiv:1707.01785 (2018).
- [2]平本 綾美, ”ニュートリノ反応測定実験に用いる高位置分解能 Scintillating Fiber Trackerの開発” 京都大学修士論文 (2017).

Back up

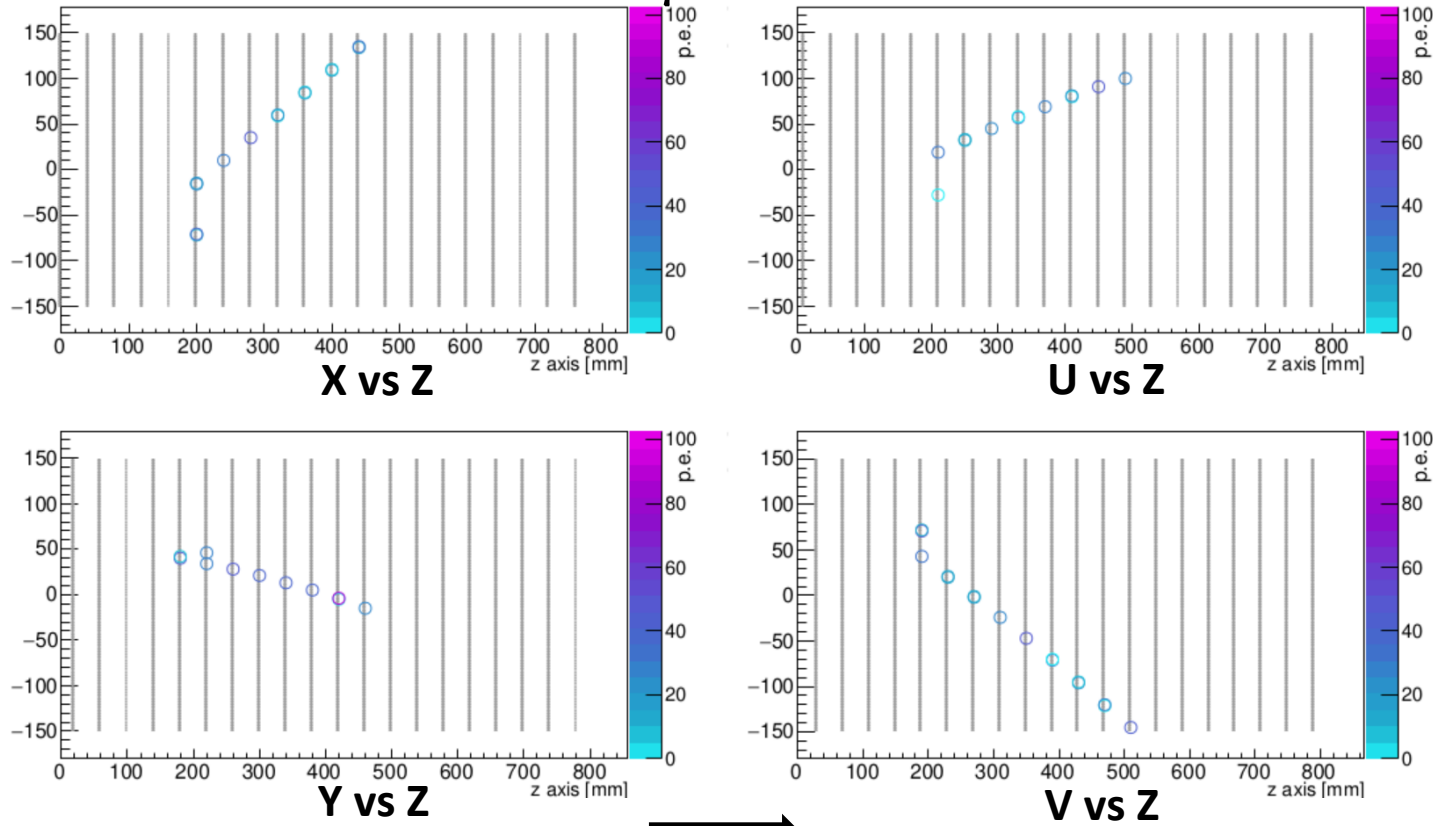
# なぜUV？：以前の構成

---

- Q:XYXYではない理由は？
- :必ず見やすい2平面を選べる
  - XYXYだと2方向からしか見えないが、XUYVだと4方向から見える
  - 少なくとも直感的にはわかりやすい
  - 4方向ではなく3方向で十分な可能性もある

# Event simulation $\nu_\mu$

$\nu_\mu$ :Reco

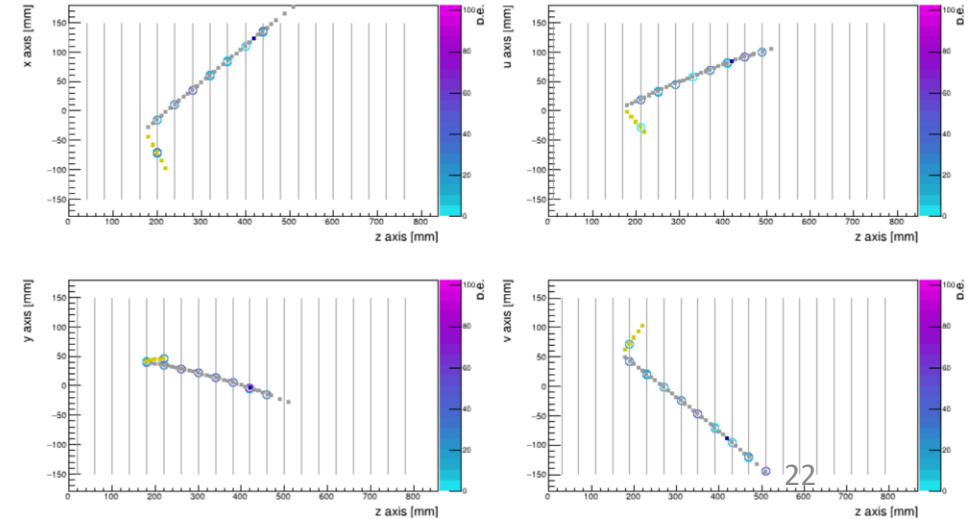


→  
ビーム方向

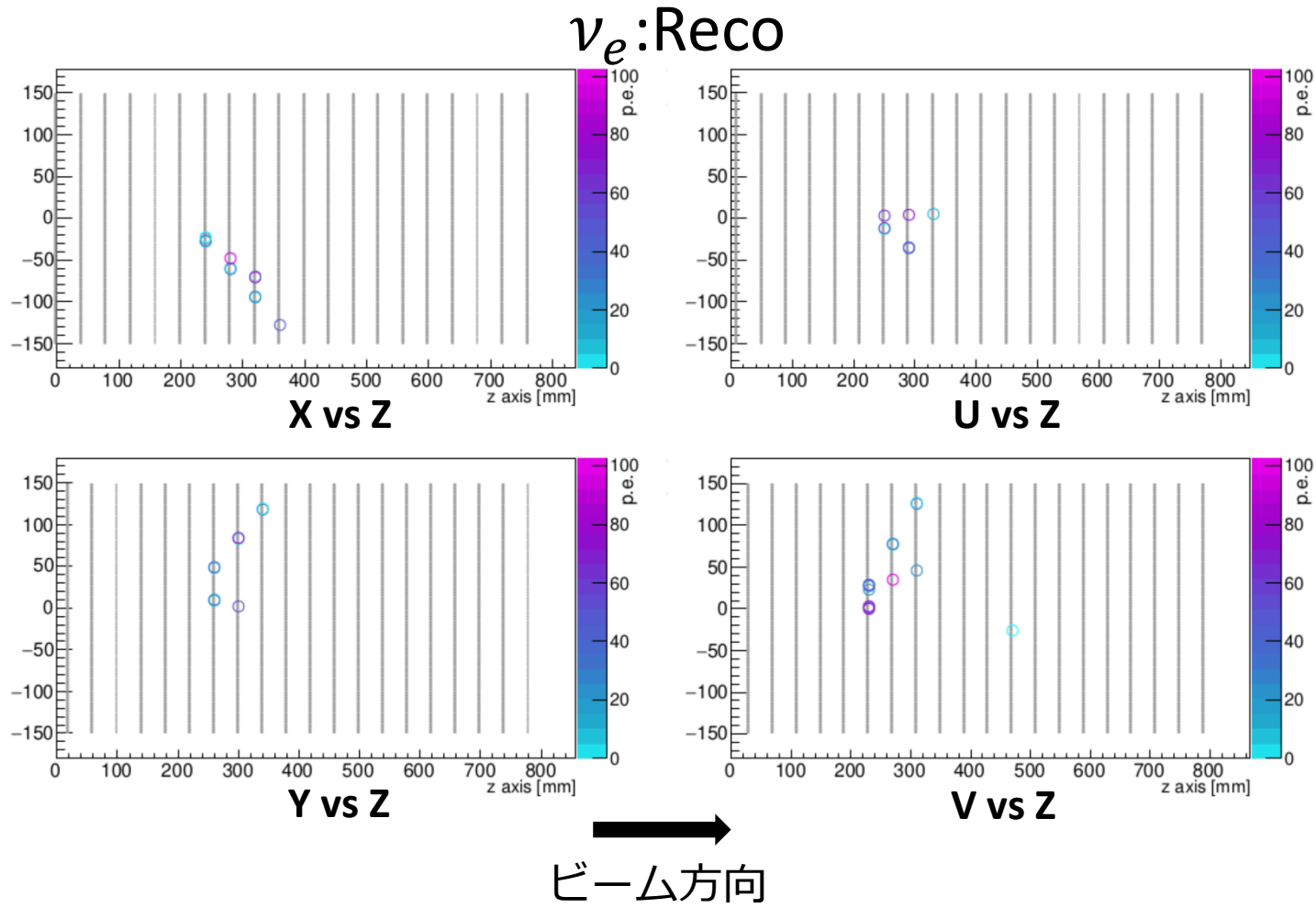
- 675MeVの $\nu_\mu$ のCCQEをシミュレーション  
 $\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$
- 短いトラックにも感度をもつ
- 陽子が4layer以上通過しているので再構成できそう

■  $\mu$   
■ p

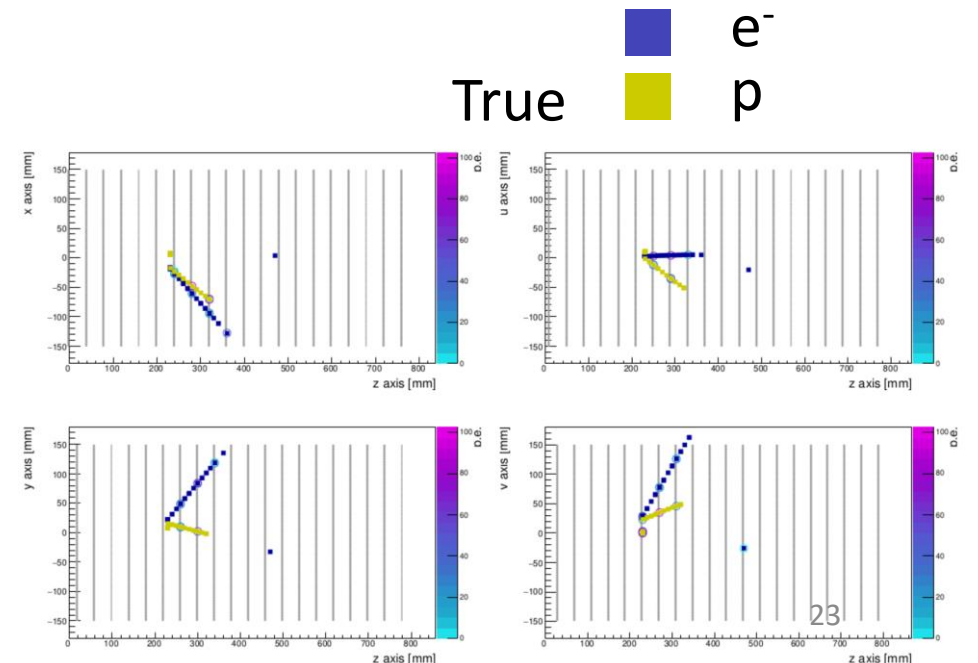
True



# Event simulation $\nu_e$

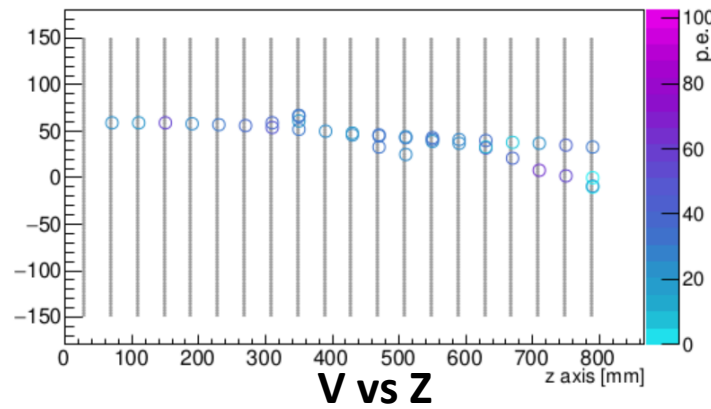
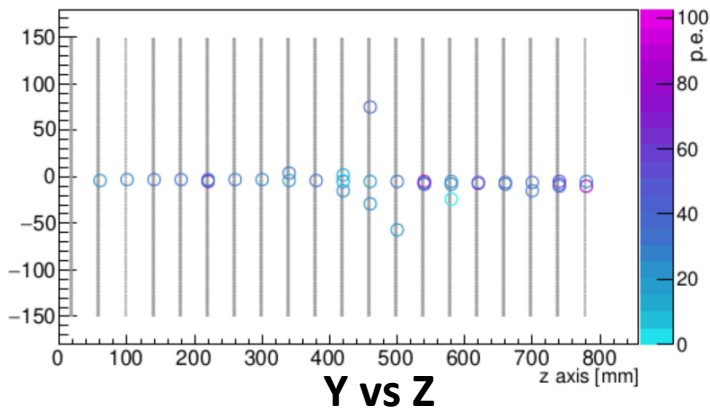
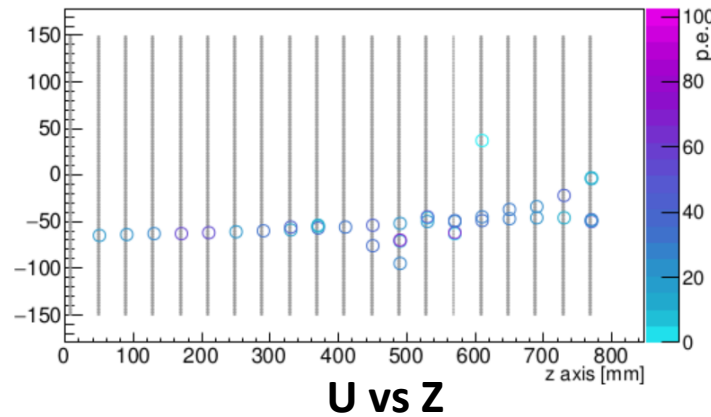
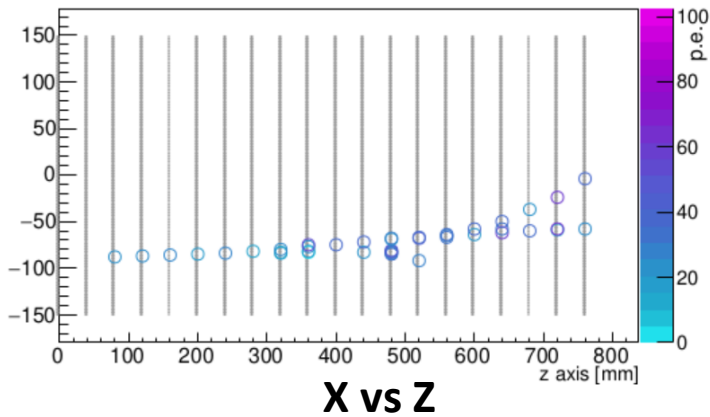


- 675MeVの $\nu_e$ のCCQEをシミュレーション  
 $\nu_e + n \rightarrow e^- + p$
- 短いトラックにも感度をもつ。
- 陽子が4layer以上通過しているので再構成できそう



# Event simulation e-

## e-:Reco

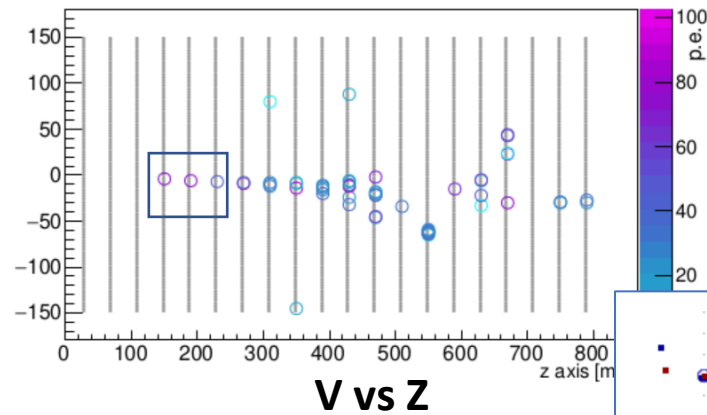
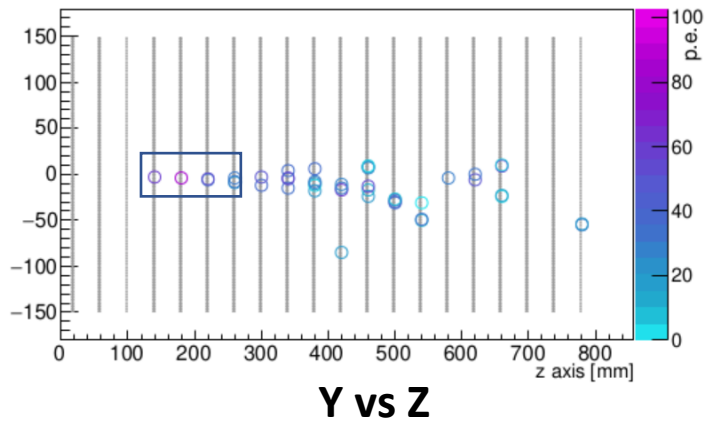
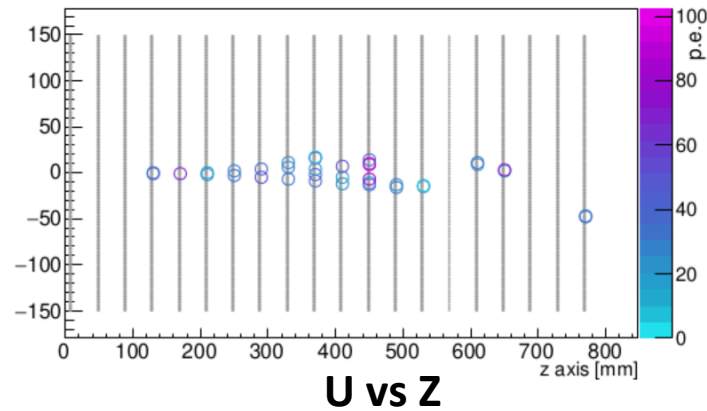
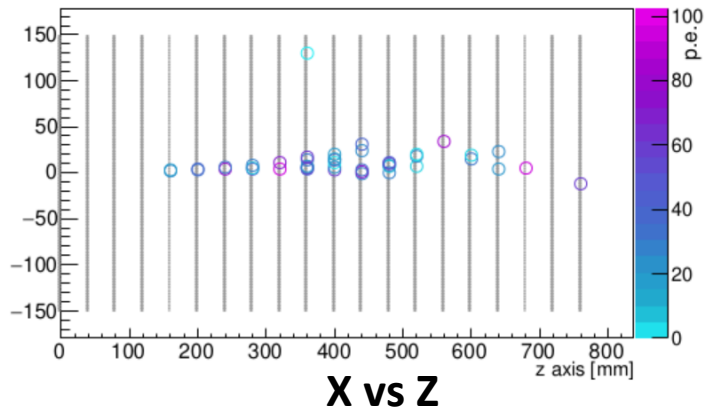


- 675MeVのe-をz方向に入射した
- e-の識別
  - $\gamma$ 線を出すNC $\pi^0$ 反応が $\nu_e$ のCCQEにおける主なBGとなる
  - $\gamma$ とe-を識別できることが重要



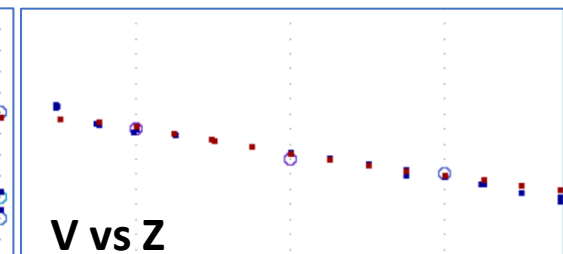
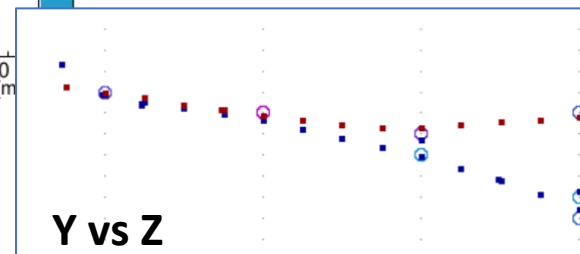
# Event simulation $\gamma$

$\gamma$ :Reco

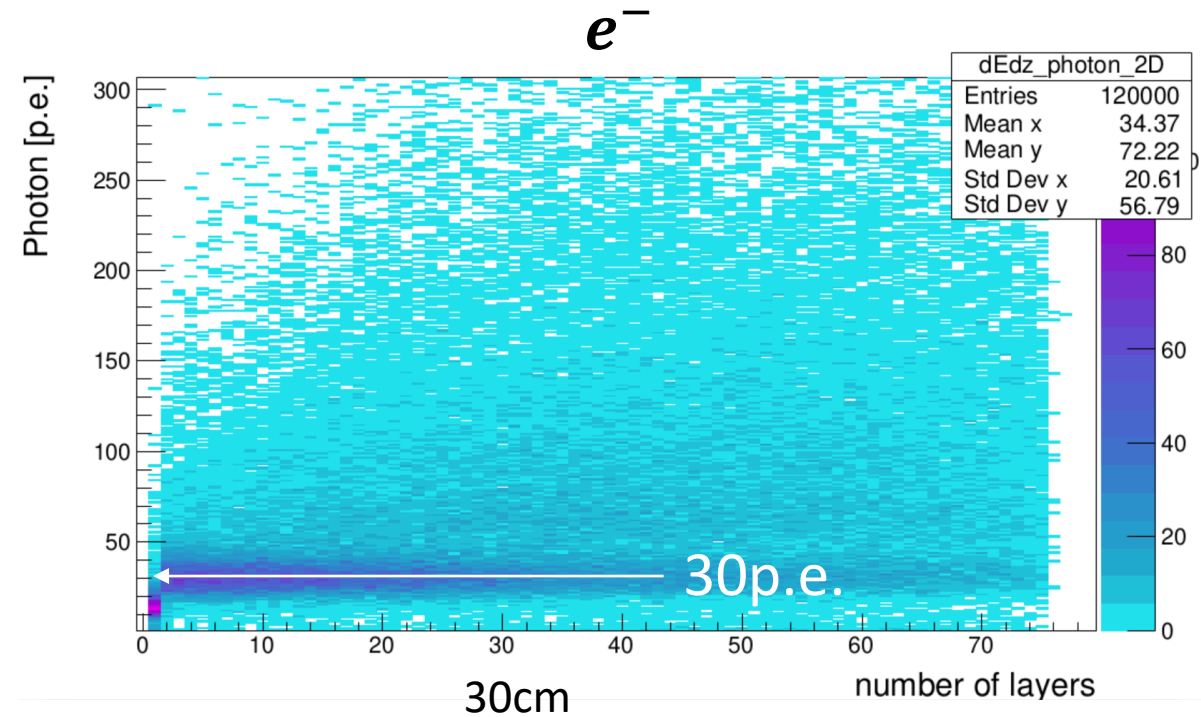
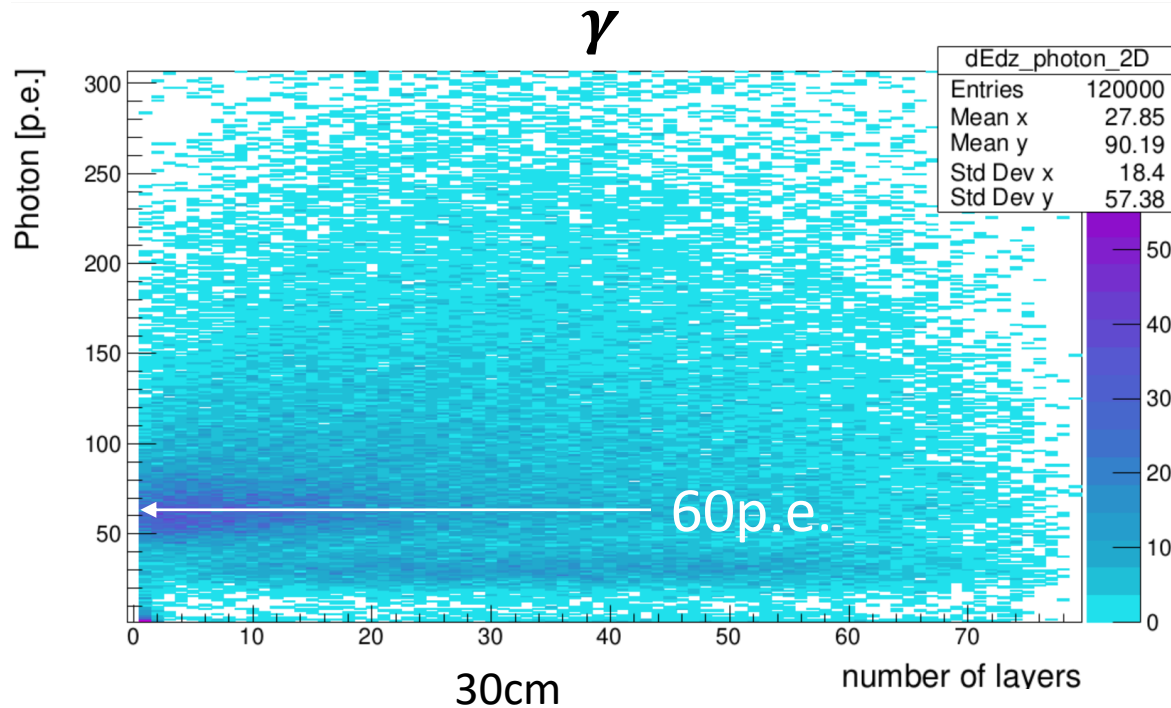


- 675MeVの $\gamma$ をz方向に入射した
- 上流の信号が大きい
  - 対生成した $e^+/e^-$ が同じファイバーにヒットしている

True ■  $e^-$   
■  $e^+$



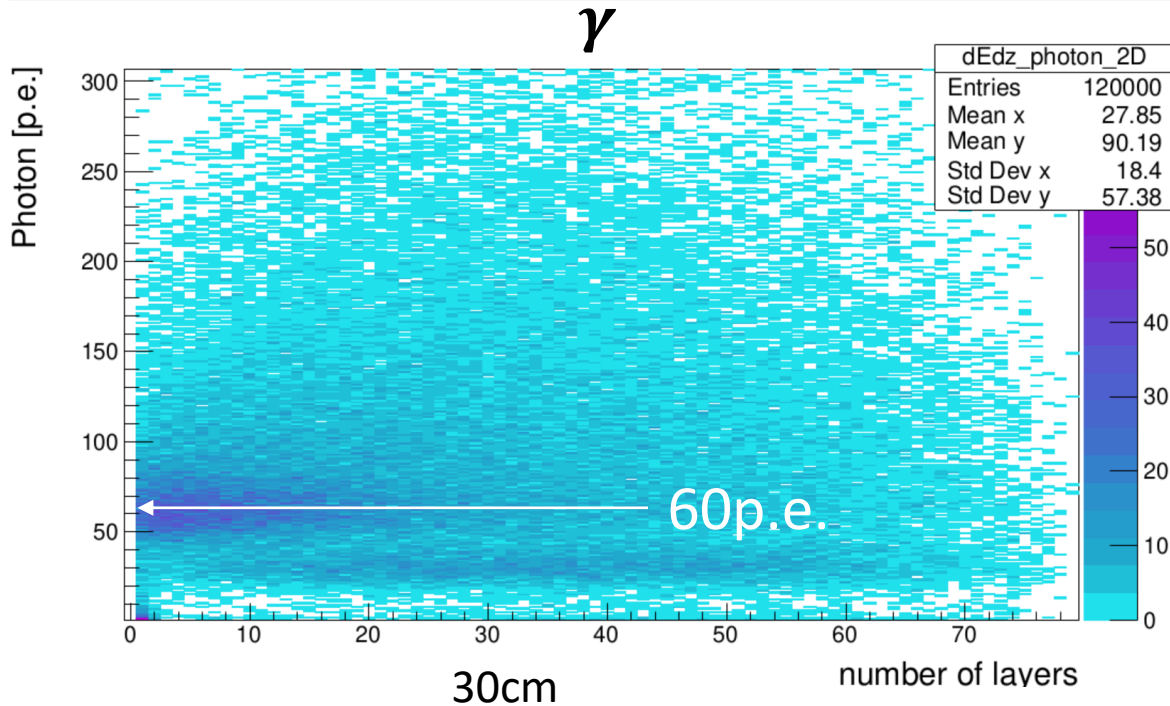
# 光子数分布: $\gamma$ vs $e^-$



- 675MeVの $\gamma$ 線と電子をビーム方向にそれぞれ入射して1500イベントを得た
- 横軸：最初にヒットしたlayerを基準にしたlayer数
- 縦軸：各layerの光子数の和

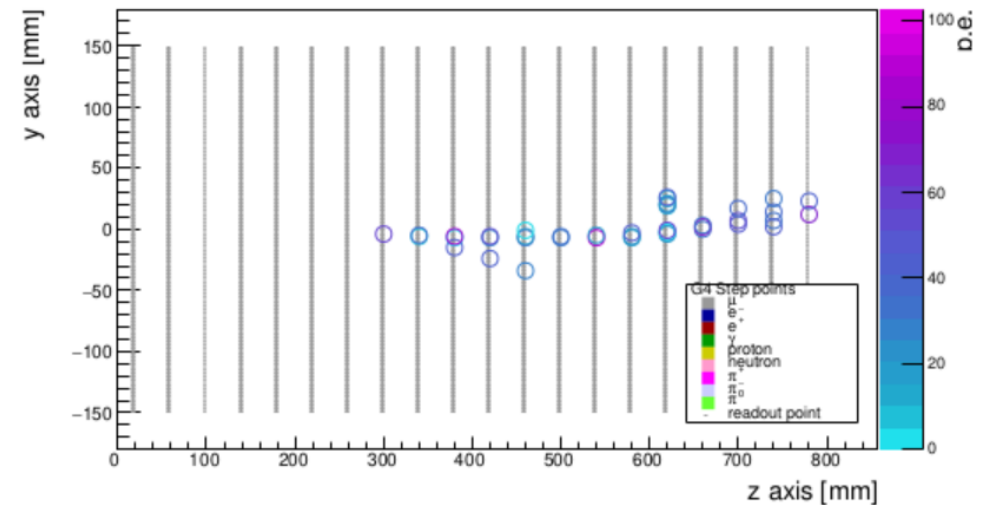
- 電子と $\gamma$ を判別する手がかりとして期待

# 光子数分布: $\gamma$

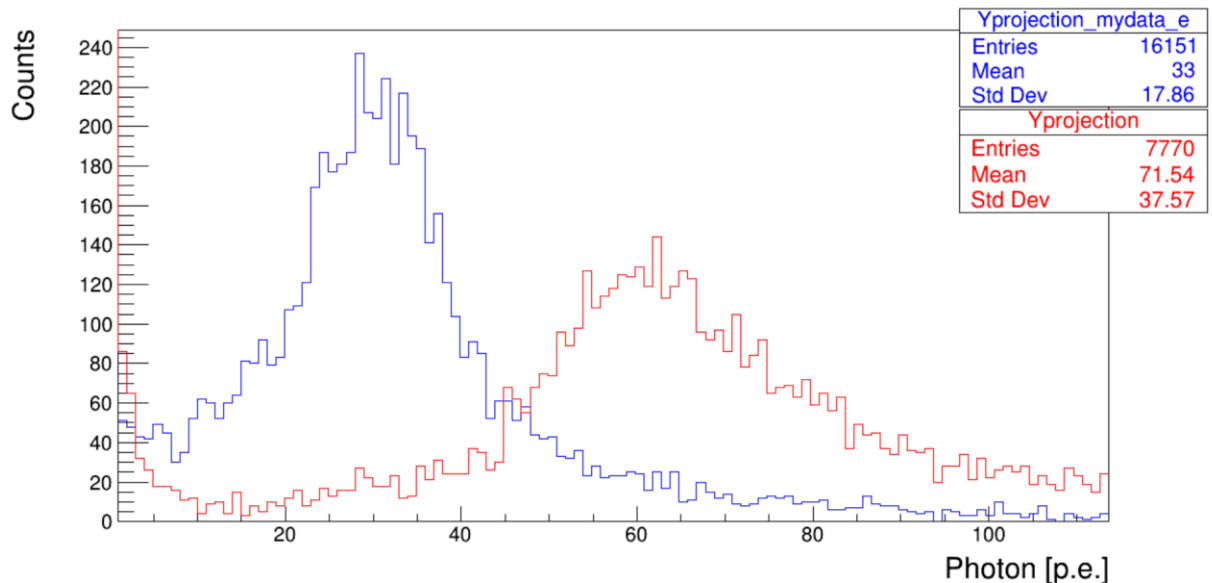


- $\gamma$ にも30p.e.に小さなピーク
  - 電子との判別を妨げるかも
  - 対生成した $e^+/e^-$ のエネルギーが小さい方が止まっている

ある $\gamma$ イベント



# 光子数分布：Y軸投影



- 前項の2DヒストグラムをY軸に投影
  - ヒットした最初の4layerのみ
- 約45p.e.を閾値に分けられそう
- 更に信号事象と背景事象のトポロジーの情報を使うことでさらなる分解能が期待できる