

# 3Dプリントシンチレータの性能評価

栗田口 唯人、松原 綱之<sup>A</sup>、中平 武<sup>A</sup>、新城 優治<sup>B</sup>、金 政浩<sup>C</sup>

---

首都大学東京 理学研究科 物理学専攻

KEK 素粒子原子核研究所<sup>A</sup>

九州大学 工学部 エネルギー化学科<sup>B</sup>

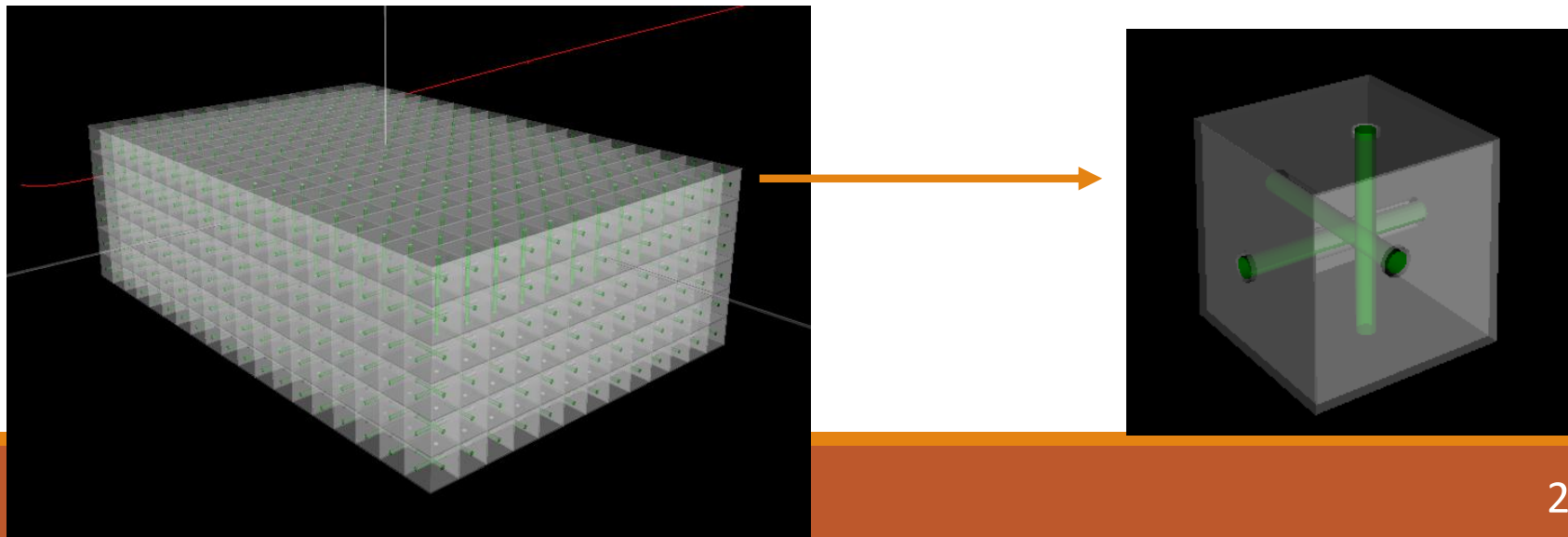
九州大学 総合理工学府 先端エネルギー理工学専攻<sup>C</sup>

# 3Dプリントシンチレータ研究開発の経緯

- SuperFGDの開発がきっかけ
  - $1\text{cm}^3$ のシンチレータを $192 \times 192 \times 56$  個  $\approx$  200万個使用
  - キューブ一つ一つが反射層に覆われ、光学的に分離されている
  - 3方向の波長変換ファイバーによって光を読み出す

→このような特徴からキューブ組み立てに課題

→九州大学で3Dプリントシンチレータ開発の先行研究があると判明  
SuperFGDへの応用可能性を検討するため共同研究を開始





# 3Dプリントシンチレータの開発状況

## 3Dプリントシンチレータの構成物質・割合\*

M-211B	Irgacure TPO	PPO	Bis-MSB
80 wt%	0.05 wt%	20 wt%	0.1 wt%

- 九州大学の金 政浩氏らのグループによる先行研究では、発光性能を最適化しながら造形できる材料の選定が行われた
    - M-211B: ベース樹脂
    - Irgacure TPO: 光重合開始剤
    - PPO: 発光剤
    - Bis-MSB: 波長変換剤
- 3Dプリンタでの造形のために使う物質
- シンチレータとして使うために添加する物質
- これらの材料を市販の3Dプリンタで造形
  - 市販のプラスチックシンチレータと同じ光量が出ることを確認  
→本研究では同じ材料・混合割合のものを使用

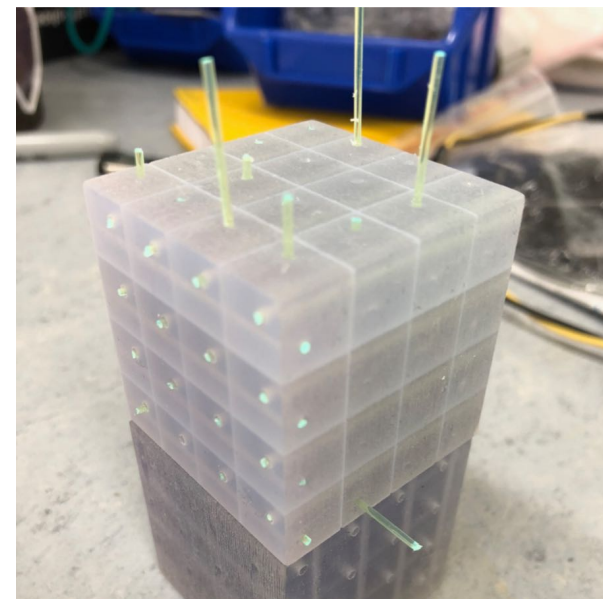
# 本研究の動機

---

- 3Dプリンタでシンチレータを作るメリット
  - 中空な構造が作れる
  - 複数の素材を一体的に成形できる（反射材など）
  - ファイバーやライトガイドのような光学素材も一緒に成形できる
  - 製造工程の自動化→低コスト
- SuperFGDのような構造の検出器を作るときに有用
  - 3方向のファイバー穴・反射層→一体成形できる
  - 大量のキューブを組み立てる必要がなくなる
  - 検出器サイズや構造を容易に変えられる

→これらの実現可能性を確認する

(ただし、2021年の検出器アップグレードには間に合わないため、将来的な実用化を目指して研究開発を行なっている)



SFGD-likeな検出器のモックアップ

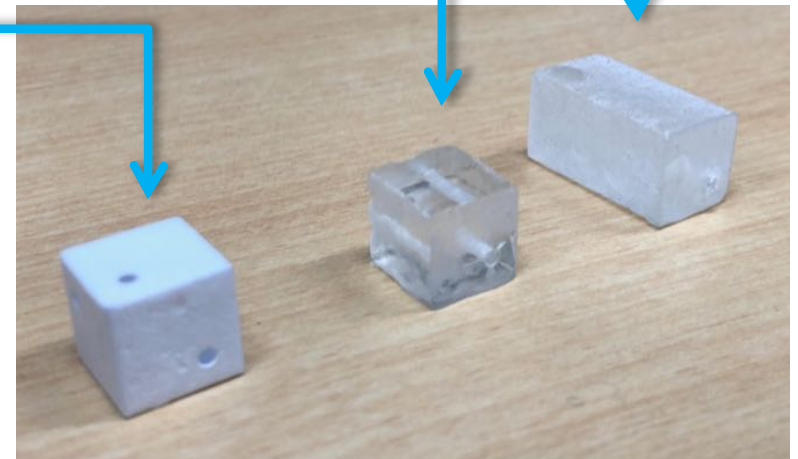
# 本研究の目的

---

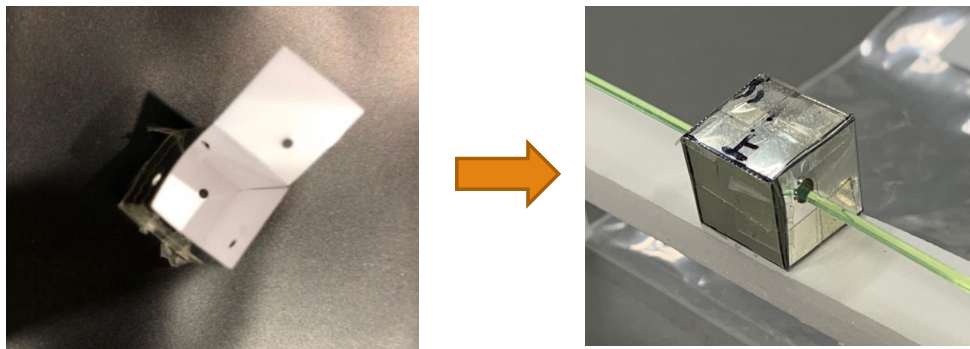
- 九州大学の金政浩氏らのグループにSuperFGD-likeなシンチレータキューブを製作していただき、ビーム試験を行い、性能を評価
  - 発光量
  - 検出効率
  - 上記項目の位置による一様性
  - 反射材の影響
- 射出成形+ドリルによる穴あけで製作したプラスチックシンチレータ（SuperFGDで用いるもの）と性能を比較

# 本実験で用いたシンチレータ

- 以下の3種類のシンチレータを用いた
  - 2 cm x 1 cm x 1 cm (今回の発表では割愛)
  - 1 cm x 1 cm x 1 cm
  - SuperFGD用 (比較用)
- 現在のところ技術的な理由により
  - ファイバー穴が1方向のみ
  - 複数素材を使った一体成形が不可能  
→反射材を手作業で巻き付けた

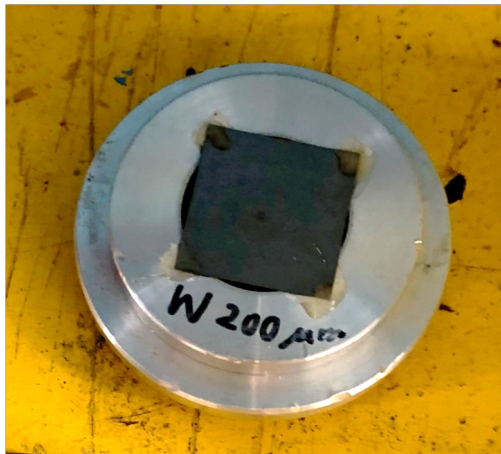


湿気に弱いためコーティングしてあるが、作ってから日がたっているので白濁している



# 実験日時・施設

- 実験日時：2018年11月13日～15日
- 場所：ELPH (Research center for electron photon science, 東北大学)
- 陽電子ビーム
  - 標的：タングステン (厚さ200 $\mu\text{m}$ )
  - 運動量： $\sim 500\text{MeV}/c$
  - ビーム幅： $\sigma_x = \sigma_y = 7\text{ mm}$

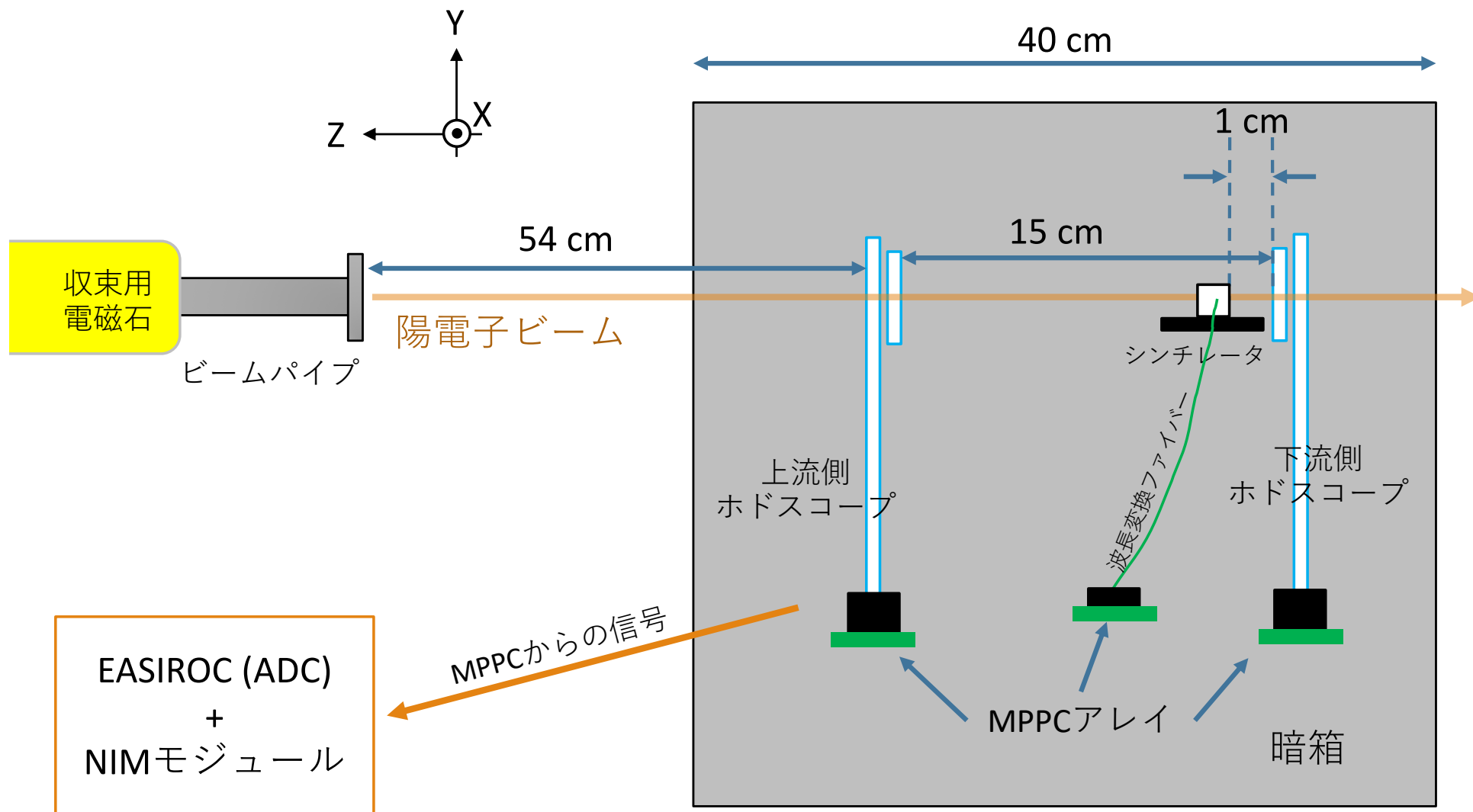


タングステン標的



陽電子ビームパイプ

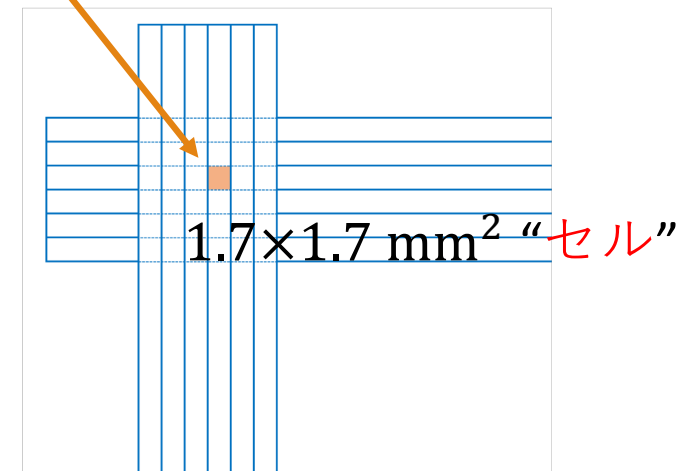
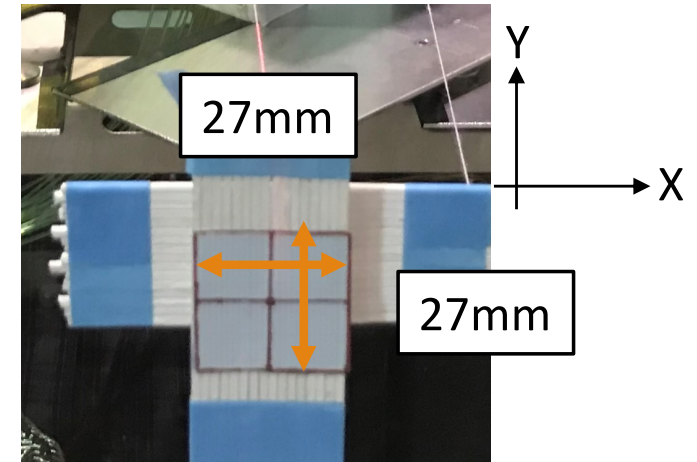
# 全体セットアップ



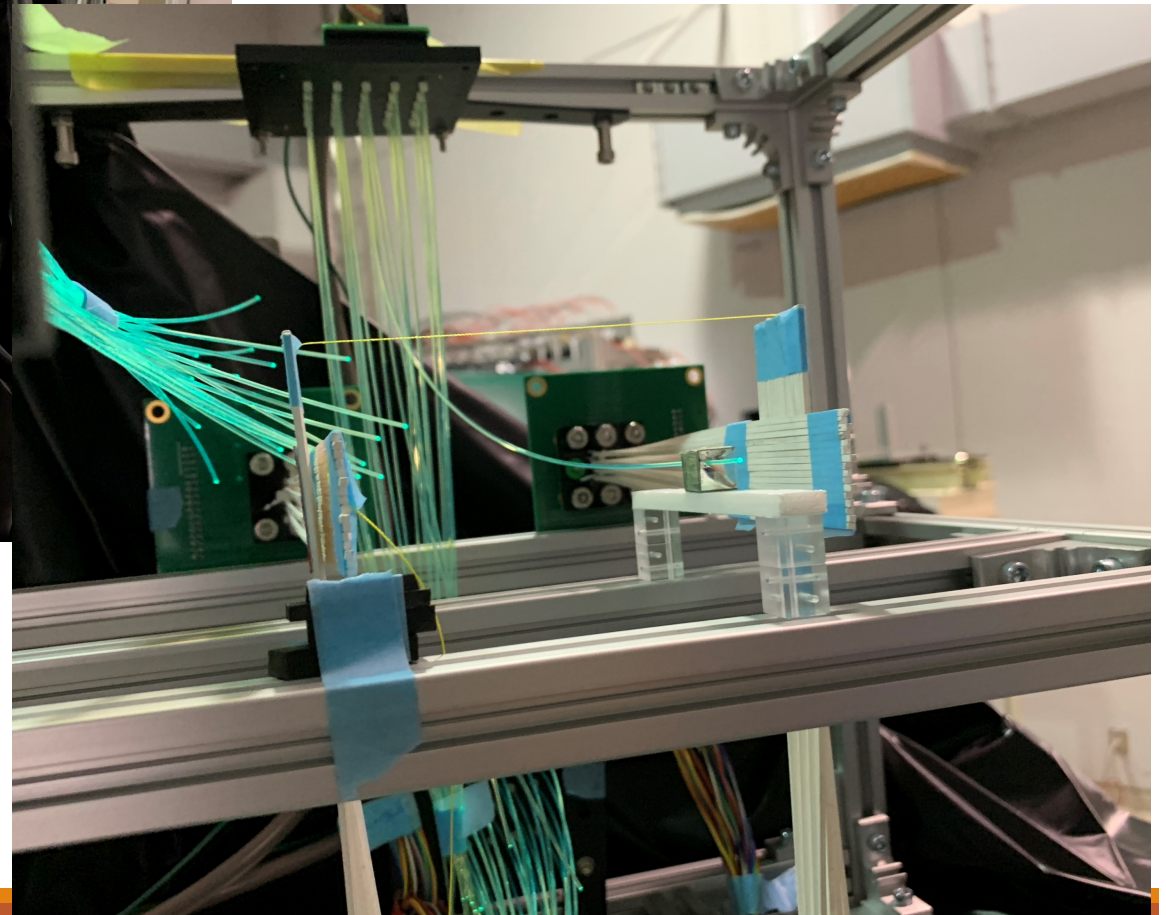
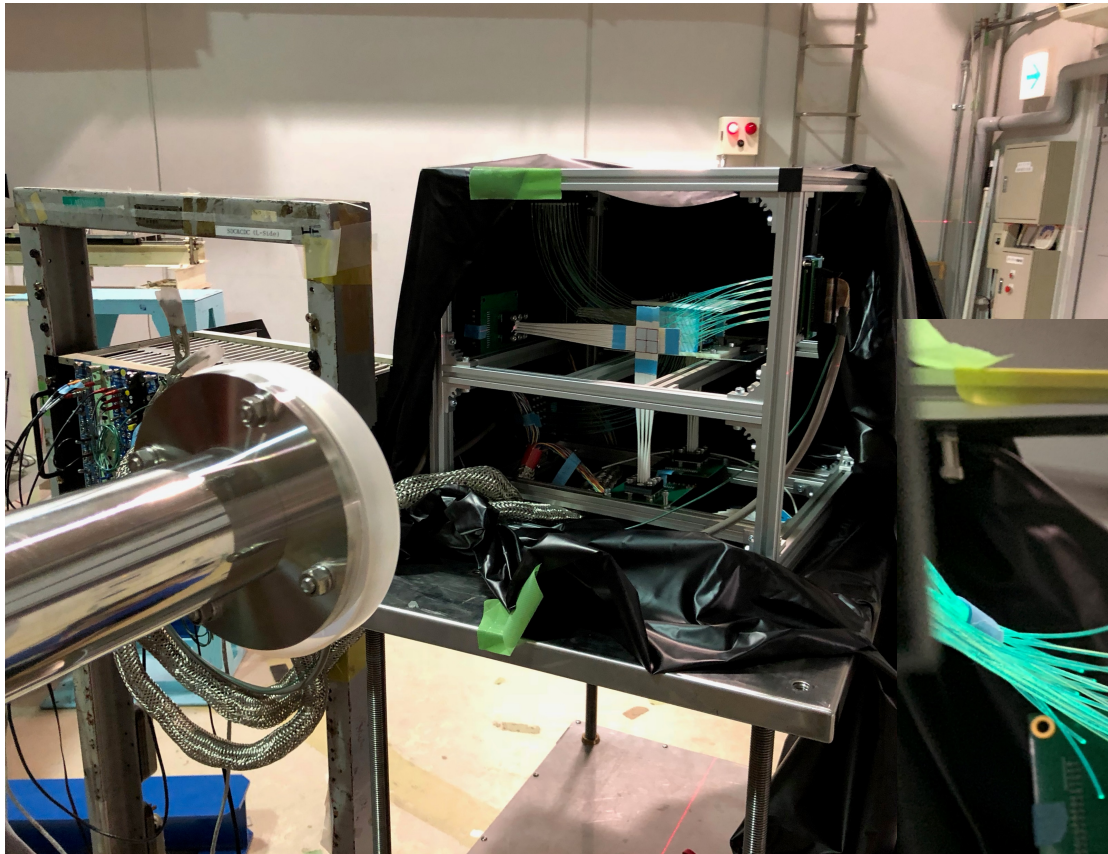


# ホドスコープ

- ビームトラッキング用ホドスコープ
  - 1本のホドスコープは16本のシンチレーションファイバーから成る
  - 水平・垂直方向に配置→2次元的にビーム位置を特定
  - 上流・下流に配置→シンチレータへのヒット位置を特定
  - ファイバー幅：1.7 mm →  $1.7 \times 1.7 \text{ mm}^2$ の解像度
  - ファイバー長さ：20 cm
  - 有効面積：27 x 27 mm<sup>2</sup>



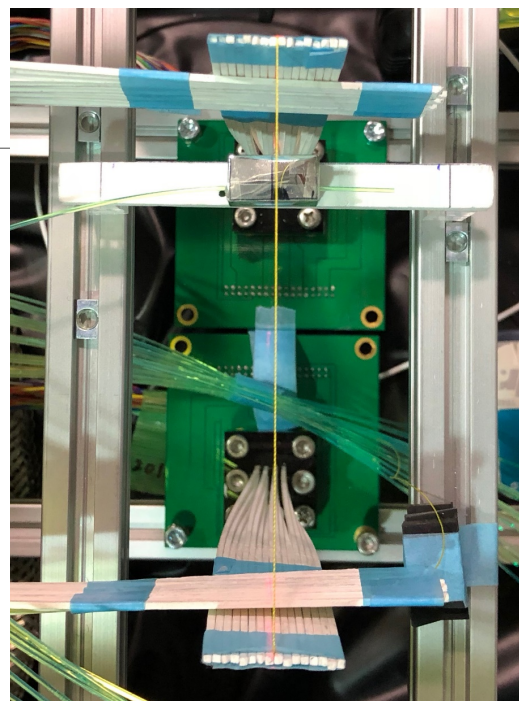
# セットアップの写真



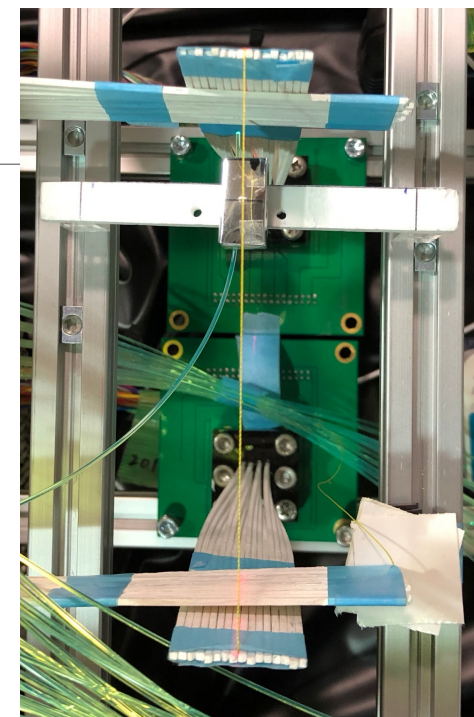


# 測定項目

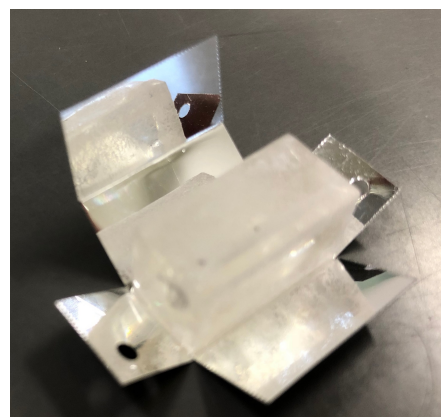
- キューブサイズ
  - 1 cm x 1 cm x 1 cm
- ファイバー穴のビームに対する向き
  - 垂直
  - 平行
- 反射材
  - 白色
  - 銀色
  - なし



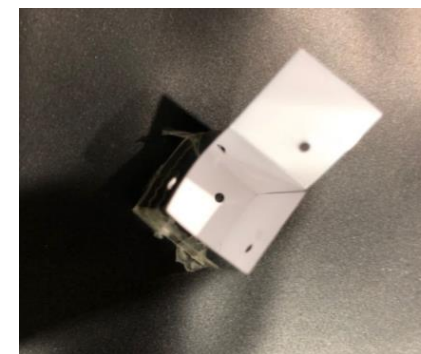
垂直



平行



銀色



白色

# 解析項目

---

- 1 cmキューブ・垂直および平行・白色反射材
  - シンチレータの光量
  - 検出効率のビームヒット位置依存性
  - 光量のビームヒット位置依存性
  
- 上記項目を
  - 銀色反射材と比較
  - 反射材なしと比較

# 解析項目

---

- 1 cmキューブ・垂直および平行・白色反射材
  - シンチレータの光量 ←
  - 検出効率のビームヒット位置依存性
  - 光量のビームヒット位置依存性
  
- 上記項目を
  - 銀色反射材と比較
  - 反射材なしと比較

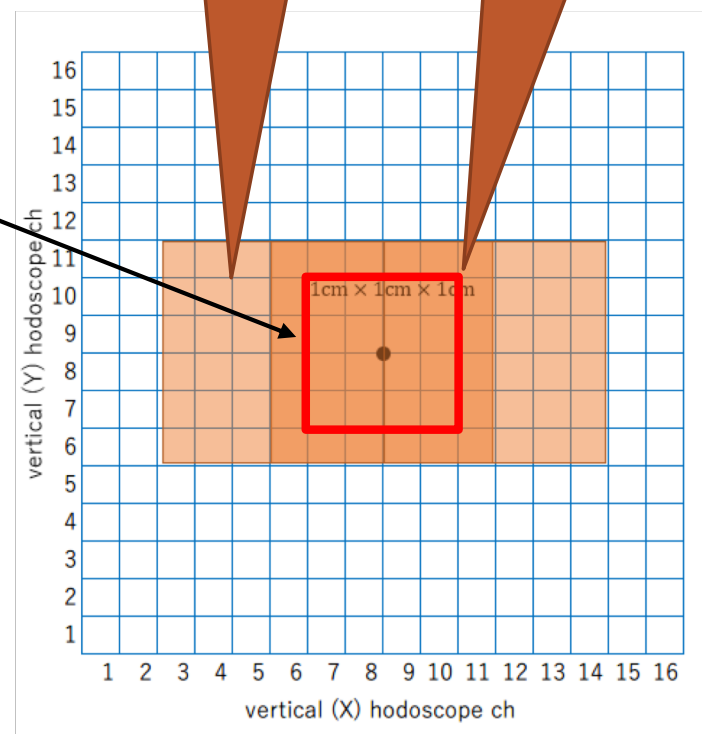
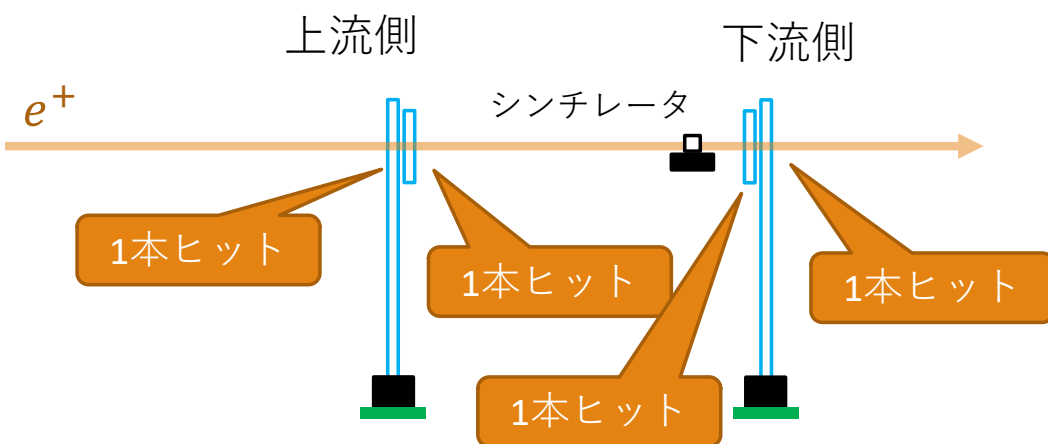
# イベント選別条件

- 4つのホドスコープそれぞれに1つだけ**ヒット**
  - 多重ヒットを除いてビーム経路を特定するため
- ホドスコープの特定の領域に**ヒット**
  - 中央 4 x 4 ch

**ヒットの定義：**  
2.5 p.e. 以上

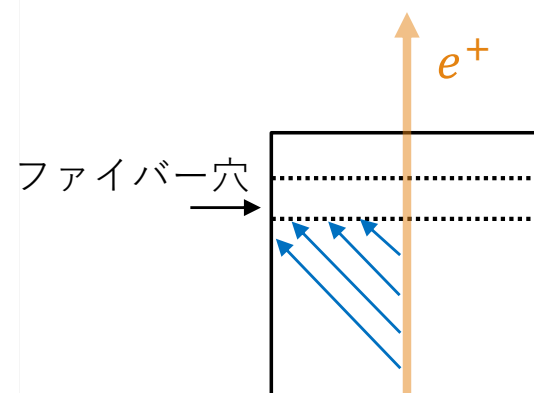
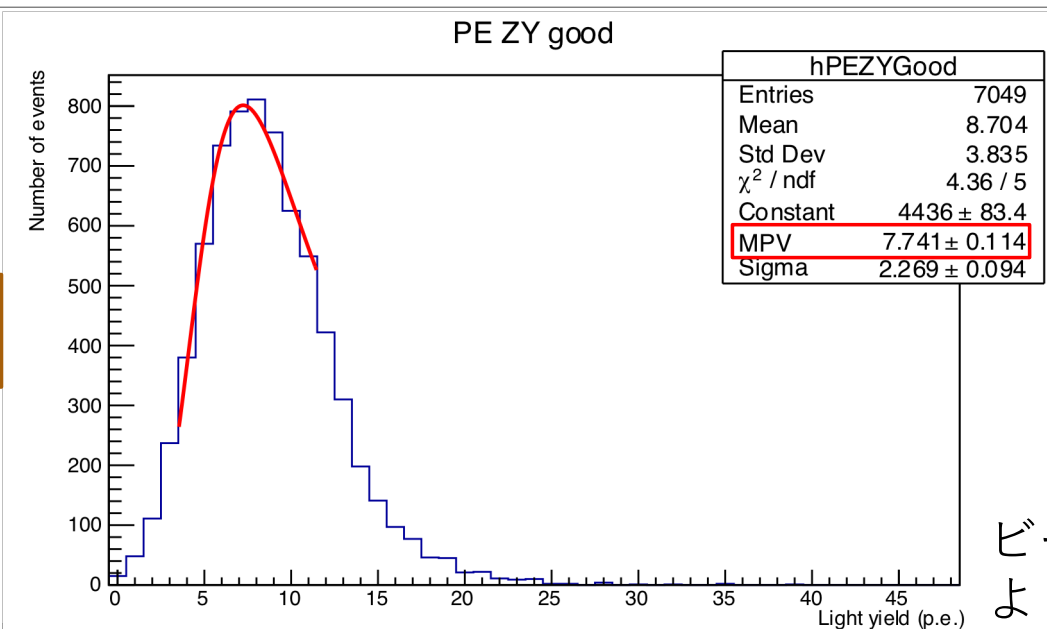
薄い色の領域：  
2 x 1 x 1 cm<sup>3</sup>

濃い色の領域：  
1 x 1 x 1 cm<sup>3</sup>



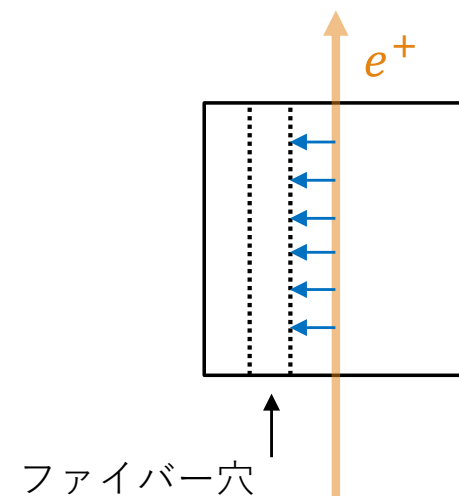
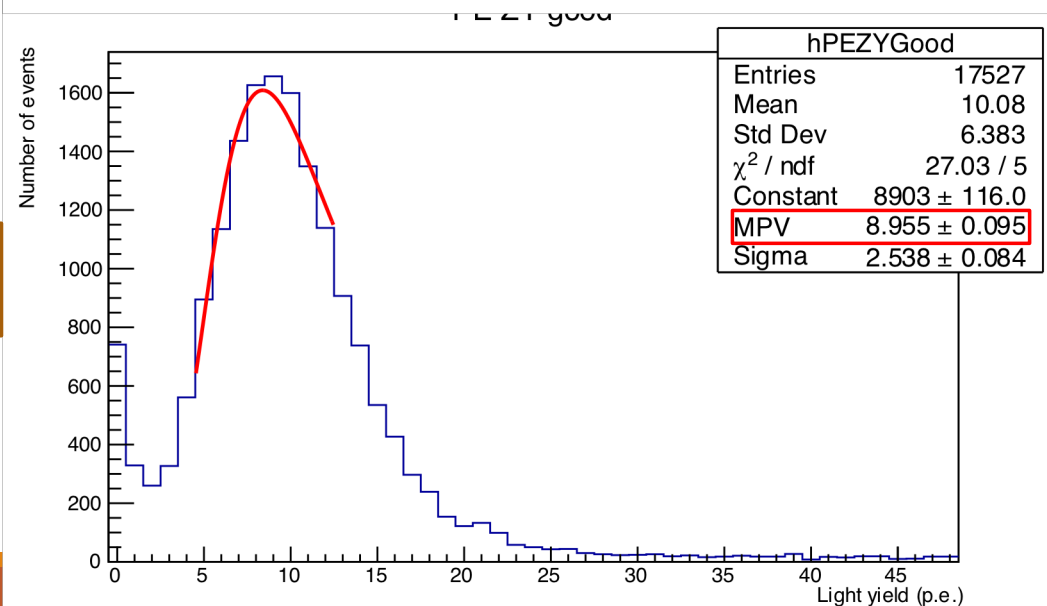
# シンチレータの光量

1 cm, 垂直

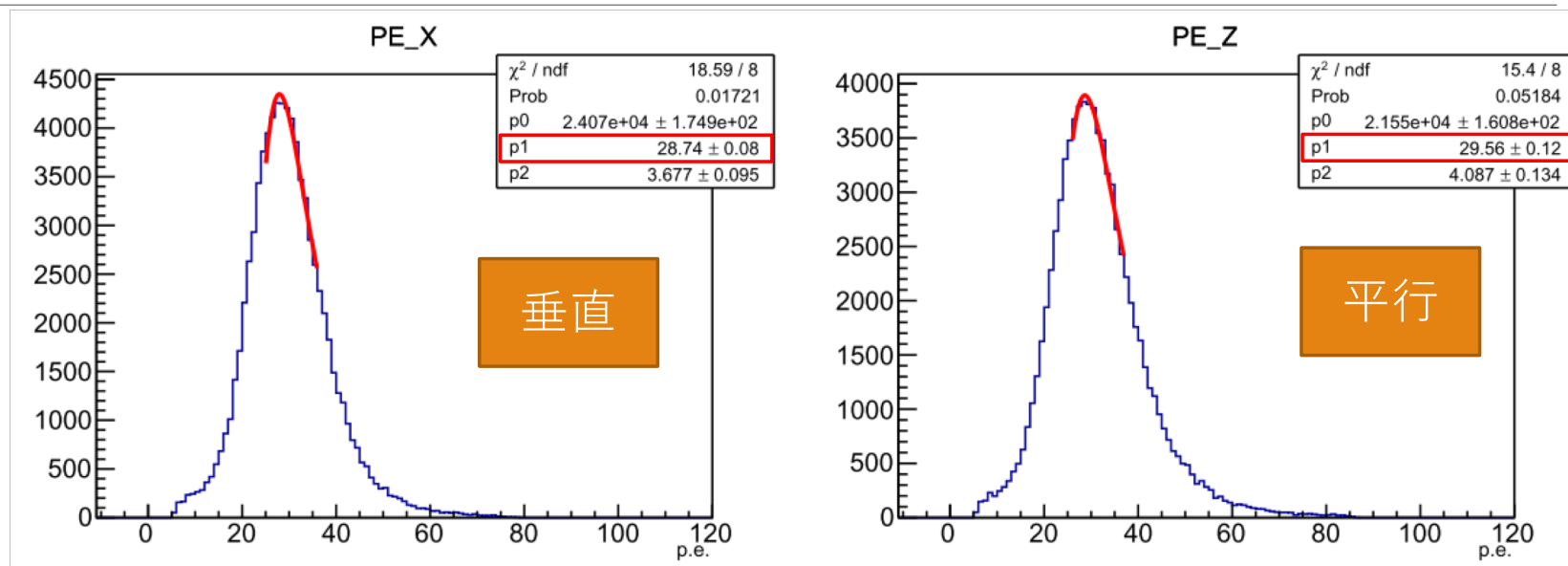


ビームとファイバーが平行だと  
より多くの光が直接入る

1 cm, 平行



# SuperFGDキューブの光量



	SuperFGD		3Dプリント
	補正前	補正後	
平行	29.56 +/- 0.12	42.57 +/- 0.17	8.955 +/- 0.095
垂直	28.74 +/- 0.08	41.36 +/- 0.12	7.741 +/- 0.114

光量が低い原因として考えられるもの

- 手作りの反射材
- 湿気によるファイバー穴のくもり
- 湿気によるキューブ全体の劣化

ファイバー挿入本数  
による補正 (1.44倍)

5倍程度の光量

R. Fujita, "Research and development of a new fine-grained scintillator tracker for the upgrade of T2K near detector", 34 (2019).

# 解析項目

---

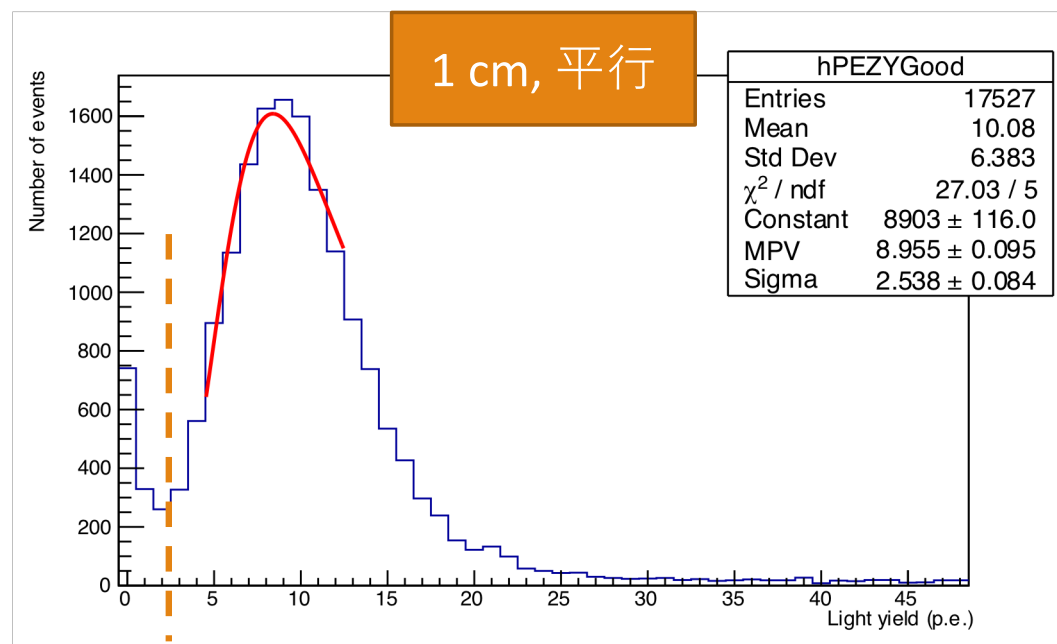
- 1 cmキューブ・垂直および平行・白色反射材
  - シンチレータの光量
  - **検出効率のビームヒット位置依存性** ←
  - 光量のビームヒット位置依存性
  
- 上記項目を
  - 銀色反射材と比較
  - 反射材なしと比較

# 計算方法

ヒットの定義：  
2.5 p.e. 以上

$$\text{検出効率} = \frac{\text{分母の条件 かつ シンチレータにヒットしたイベント数}}{\text{上下のホドスコープで同じ位置のセルにヒットしたイベント数}}$$

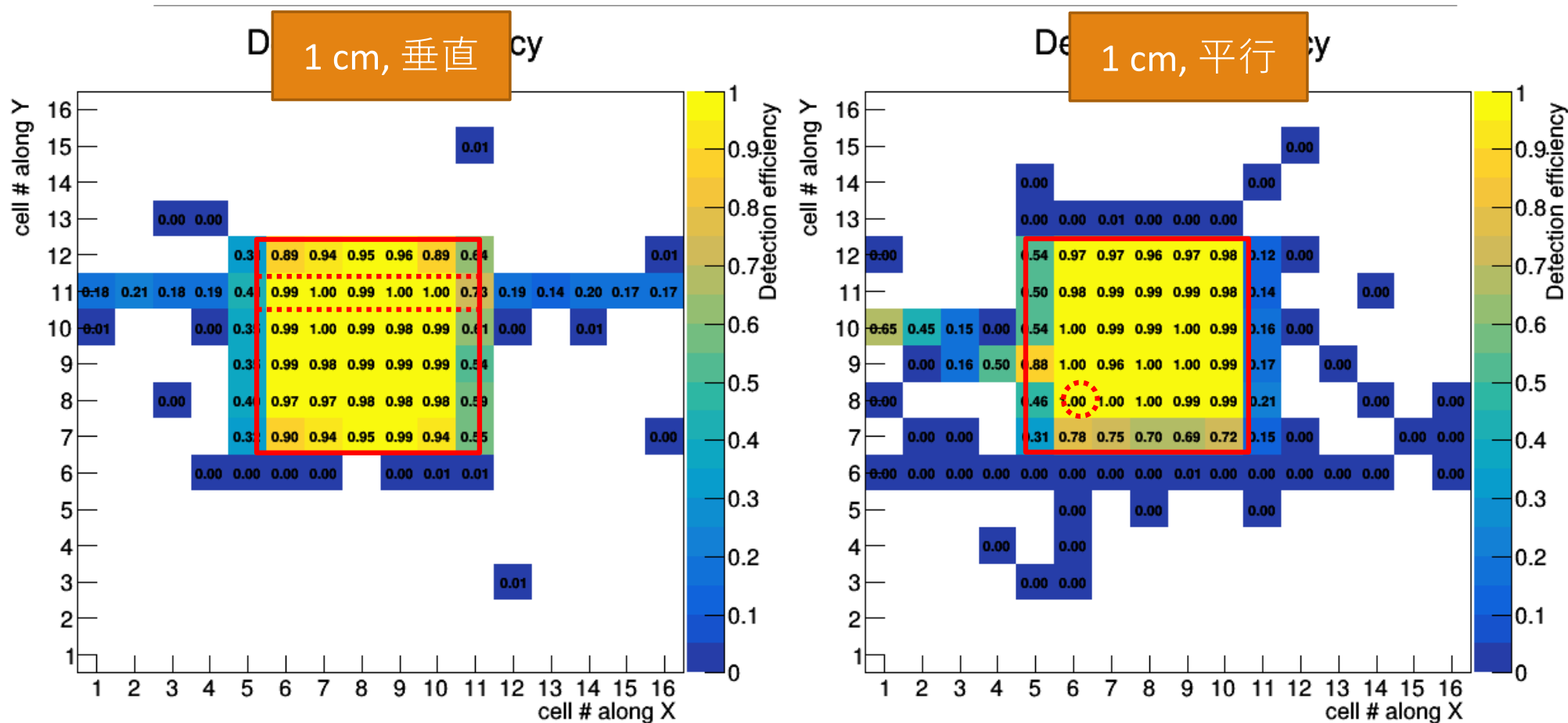
- これを各セルごとに計算する



2.5 p.e.



# 検出効率



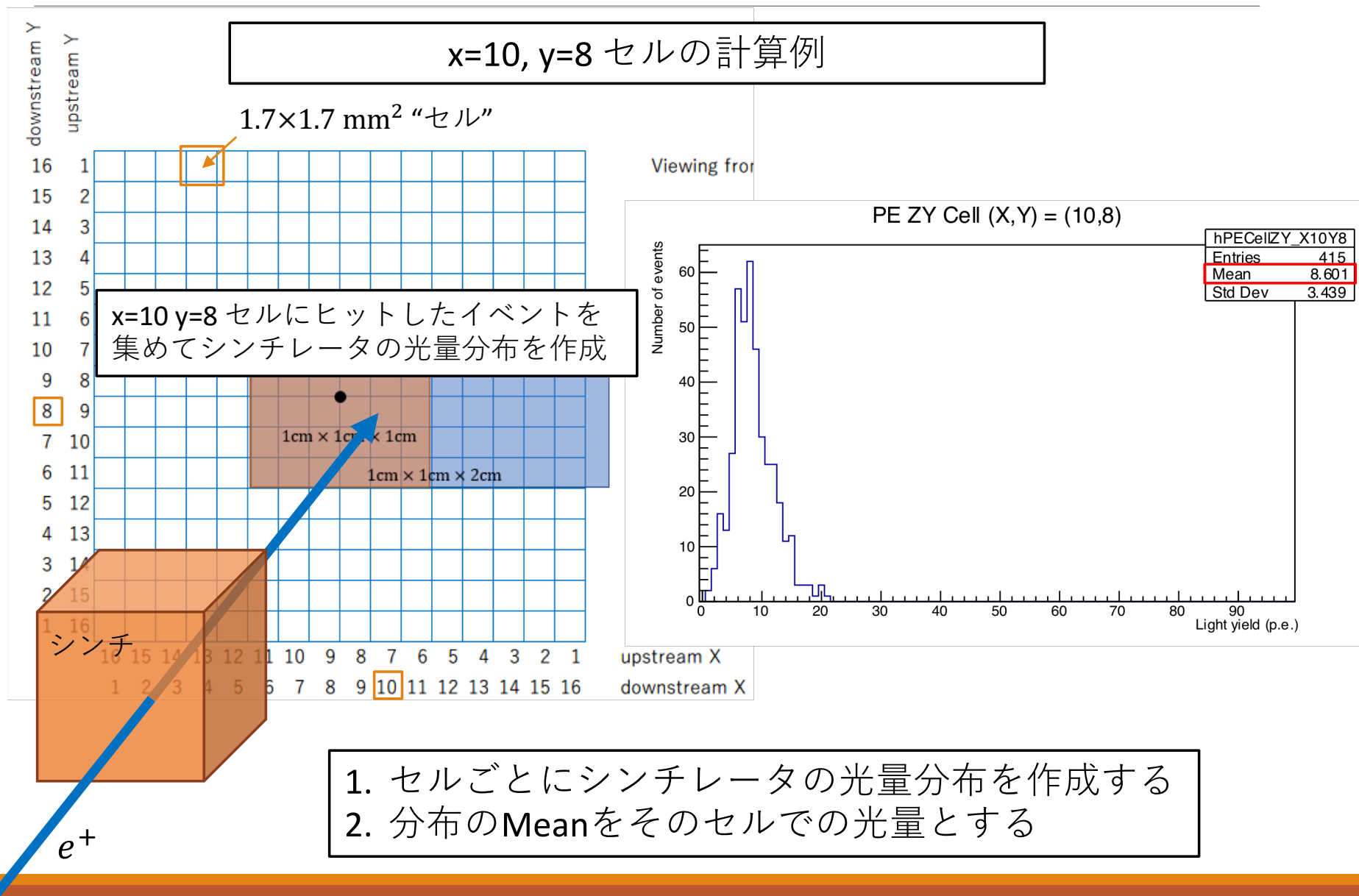
- 2.5 p.e. のしきい値ではほぼ100%の検出効率
- 観測光量は低いものの、放射線検出器としては十分な性能

# 解析項目

---

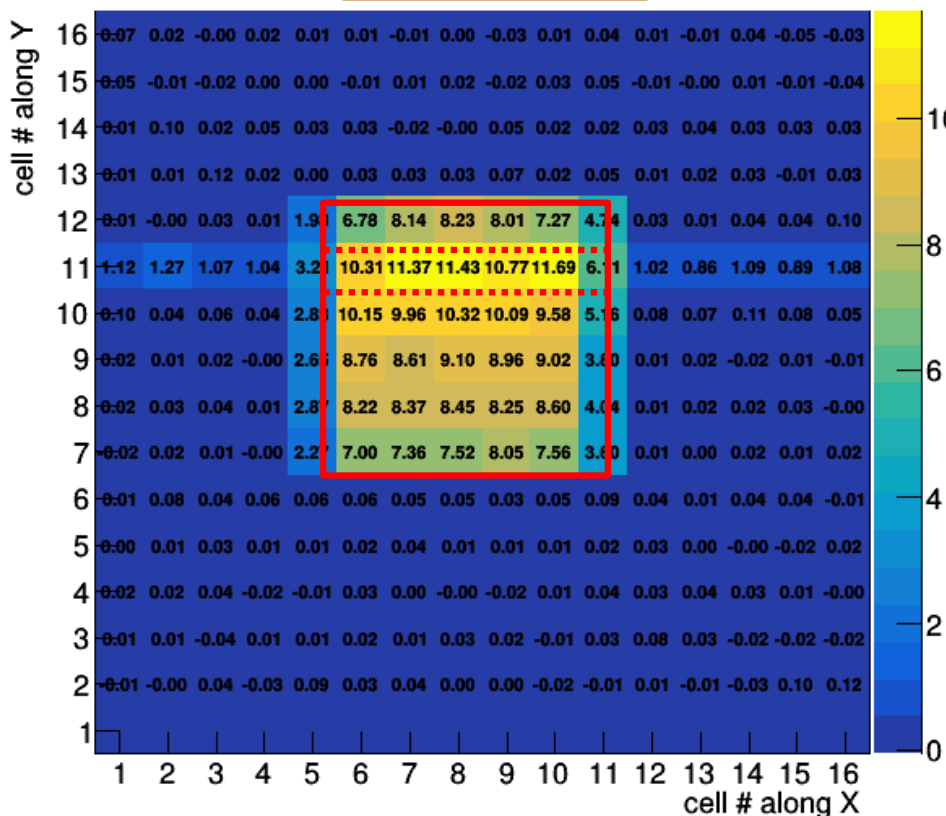
- 1 cm キューブ・垂直および平行・白色反射材
  - シンチレータの光量
  - 検出効率のビームヒット位置依存性
  - **光量のビームヒット位置依存性** ←
  
- 上記項目を
  - 銀色反射材と比較
  - 反射材なしと比較

# 計算方法

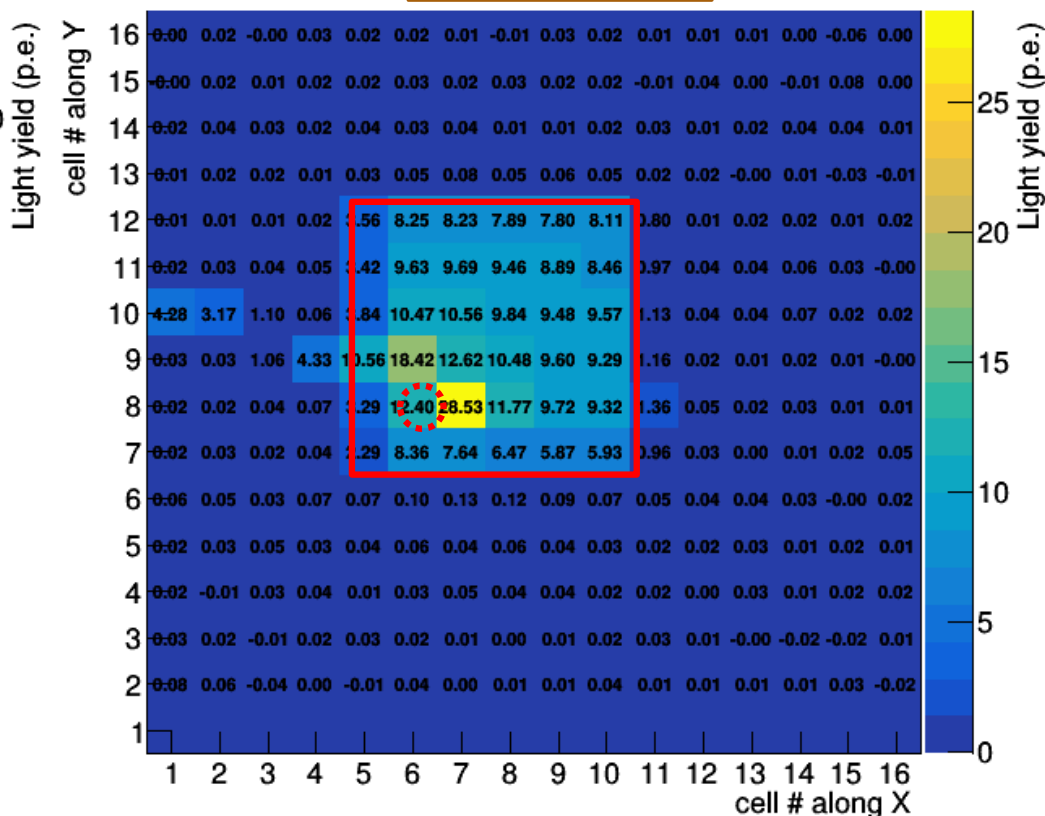


# 光量のビームヒット位置依存性

Scintillator (1 cm, 垂直) (log mean)



Scintillator (1 cm, 平行) (log mean)

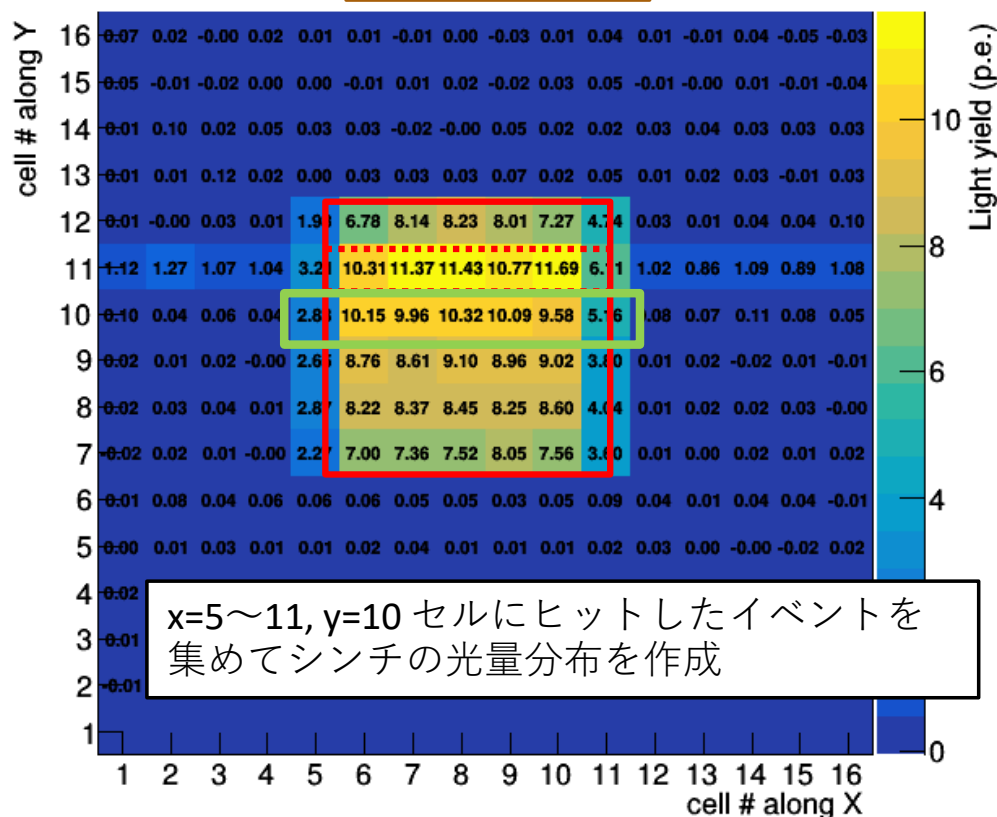


- ファイバー付近で光量が高い  
→ファイバーからの距離と光量の関係は？

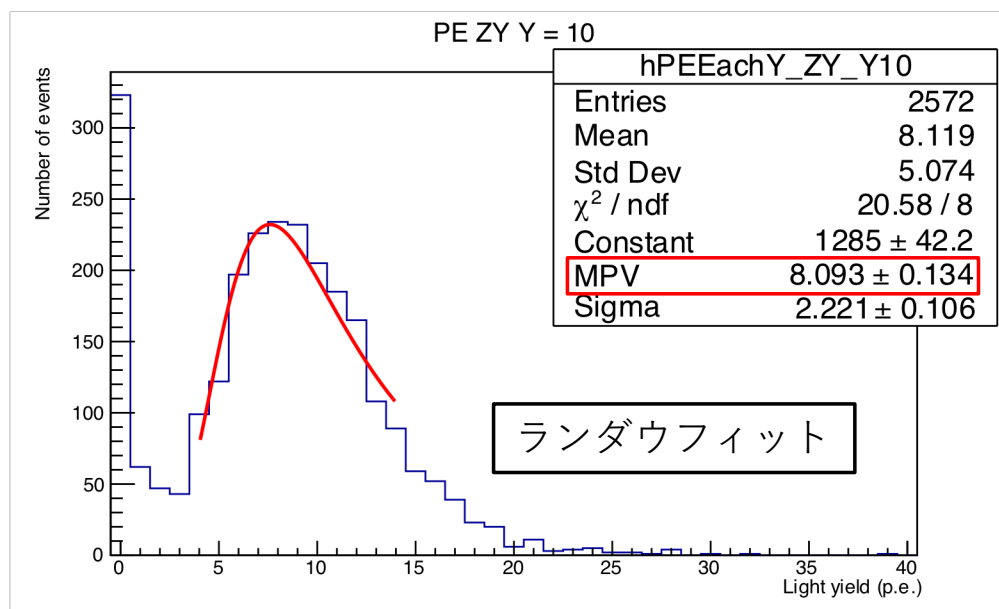
# 計算方法

y=10 セル列の計算例

Scintillator (1 cm, 垂直方向の平均)



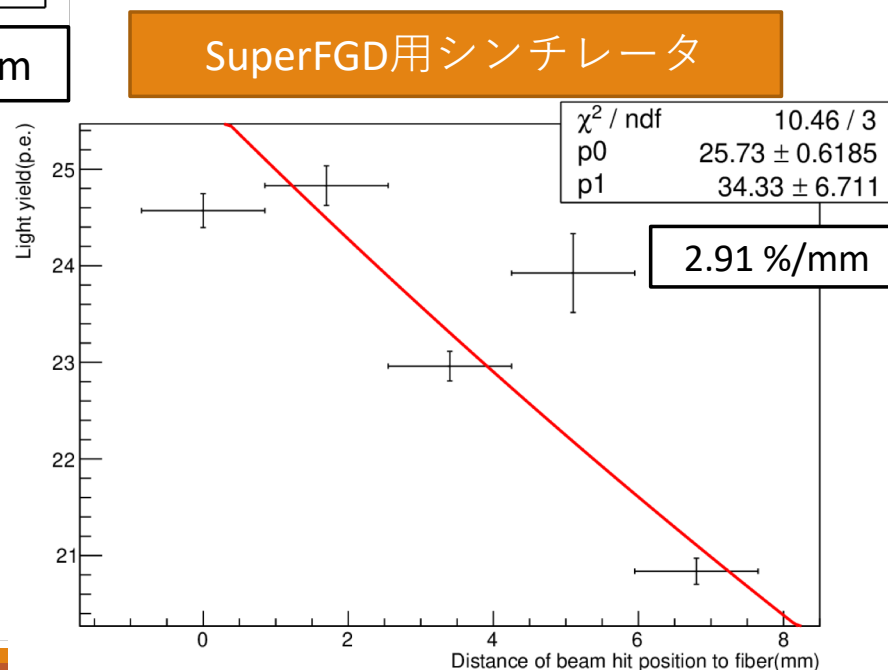
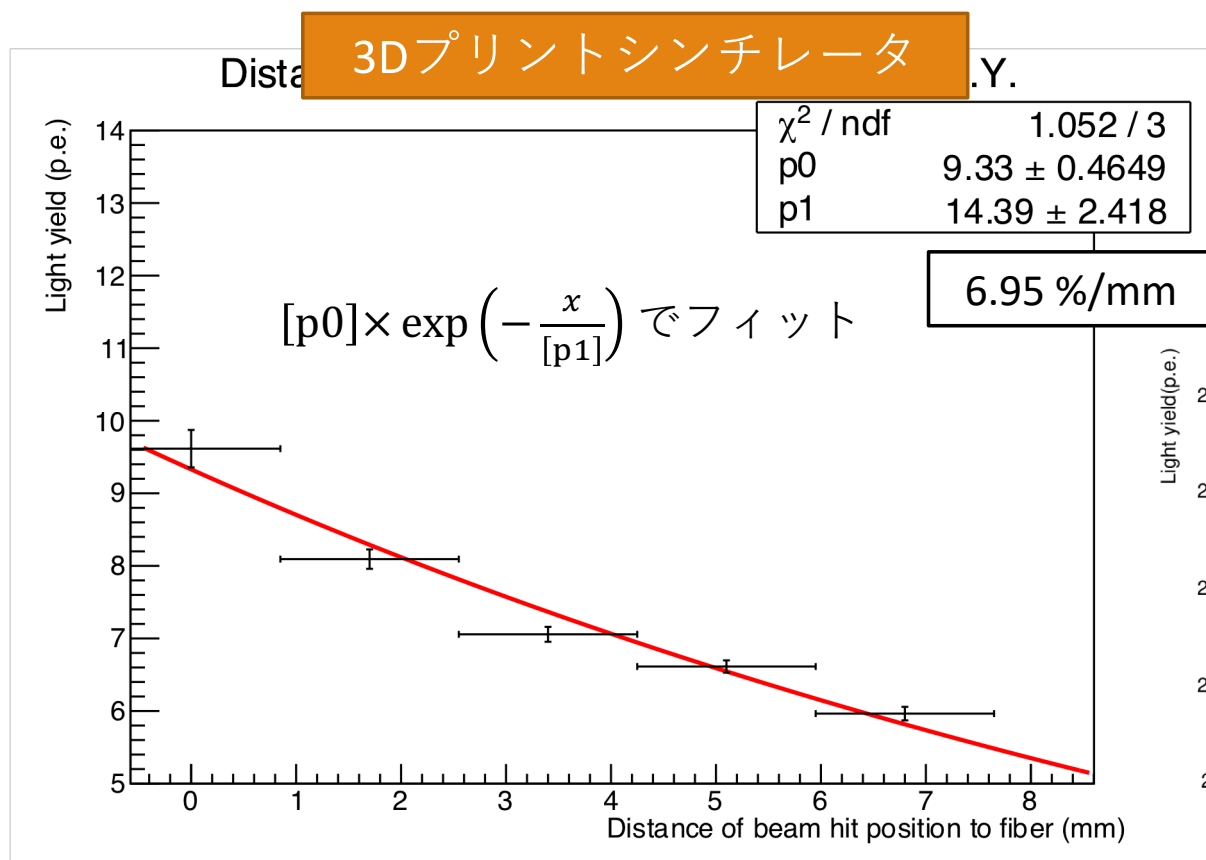
x=5~11, y=10 セルにヒットしたイベントを集めてシンチの光量分布を作成



1. セル一列ごとにシンチレータの光量分布を作成する
2. 光量分布をランダウフィットする
3. MPVをそのセル列での光量とする



# ファイバーからの距離と光量の関係

- ビームヒット位置がファイバーから離れると、**1 mmあたり6.95%光**が小さく見える
- 減衰長、キューブ端での反射角度と回数、発光点からファイバーへのアクセプタンス、etc.

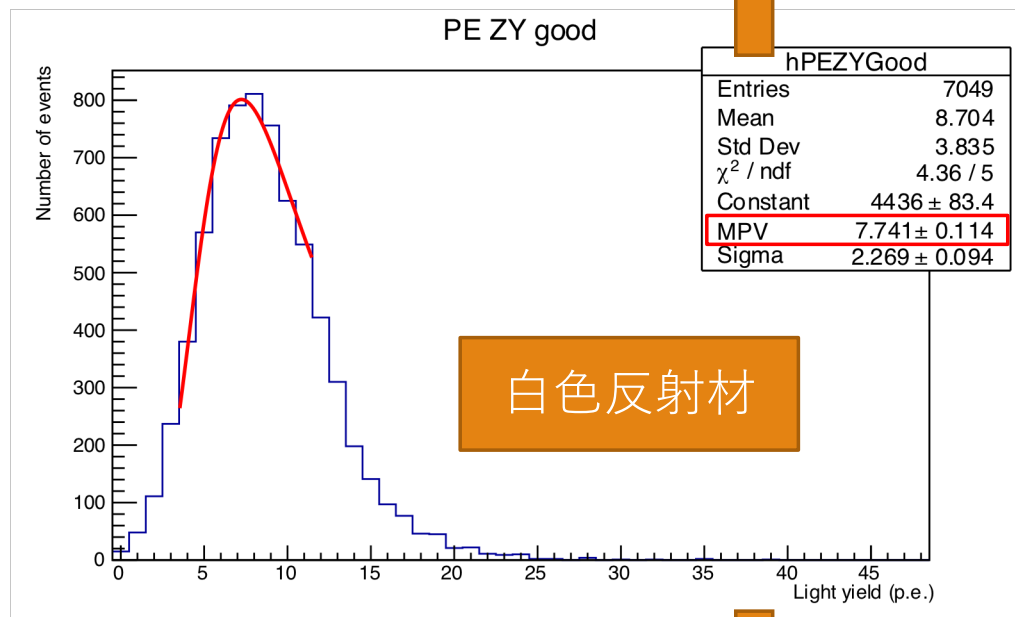


# 解析項目

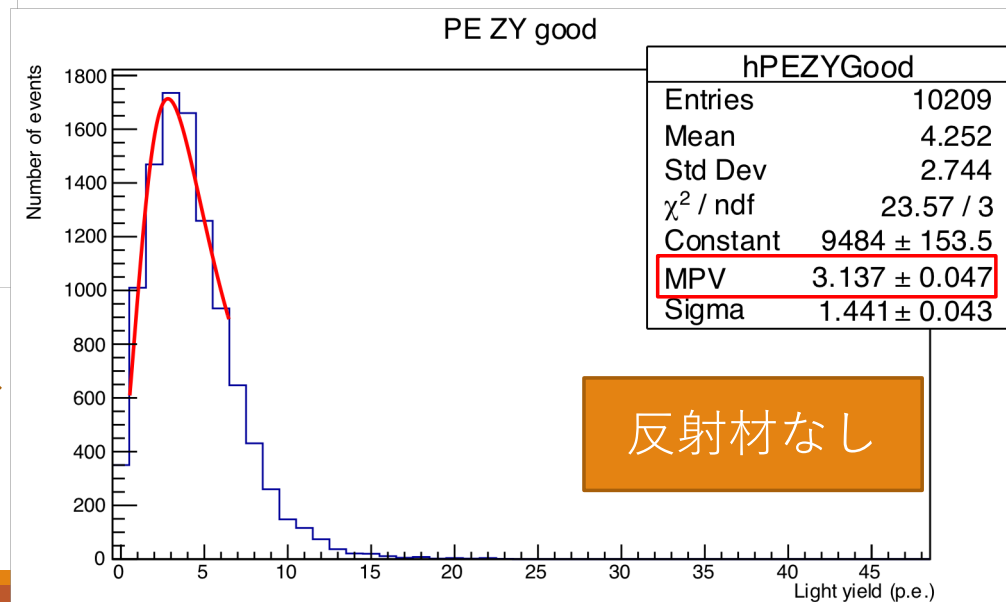
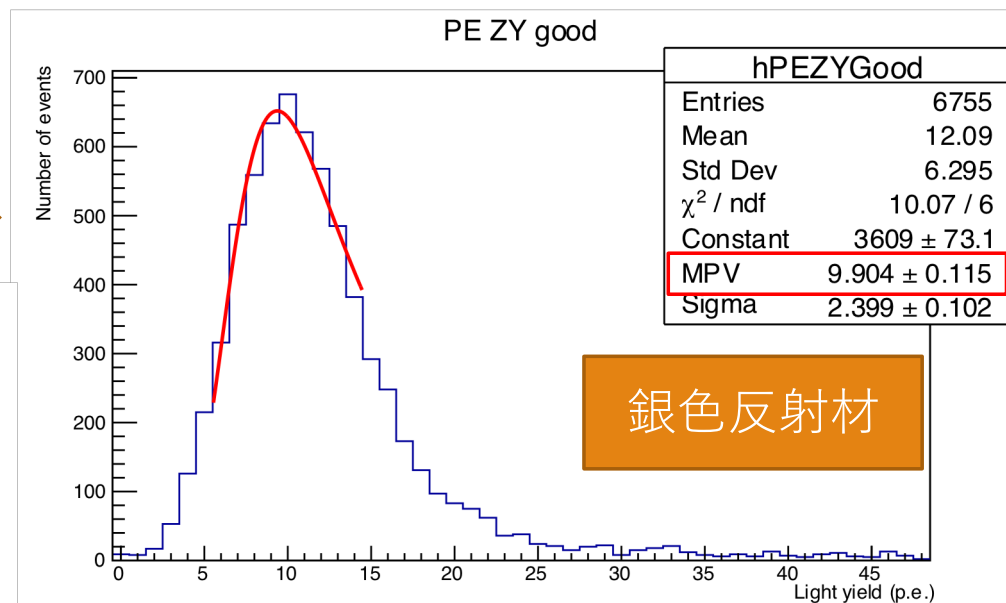
---

- 1 cm キューブ・垂直および平行・白色反射材
  - シンチレータの光量
  - 検出効率のビームヒット位置依存性
  - 光量のビームヒット位置依存性
- 上記項目を
  - 銀色反射材と比較 
  - 反射材なしと比較 

# 白色 vs. 銀色 vs. なし - 光量



光量増加

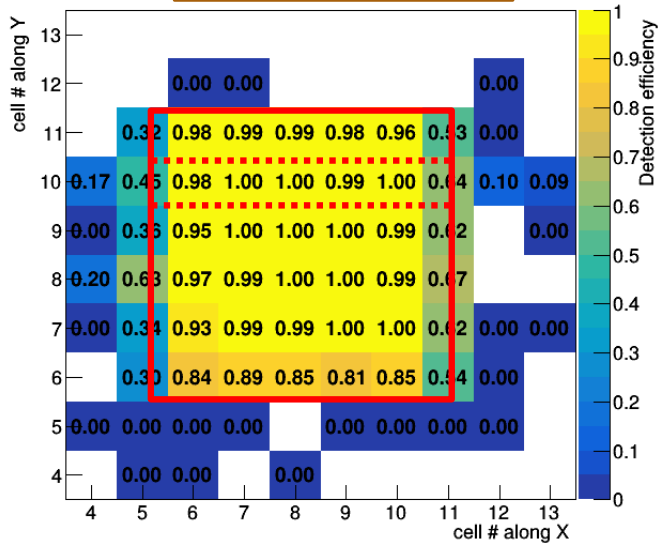


光量減少

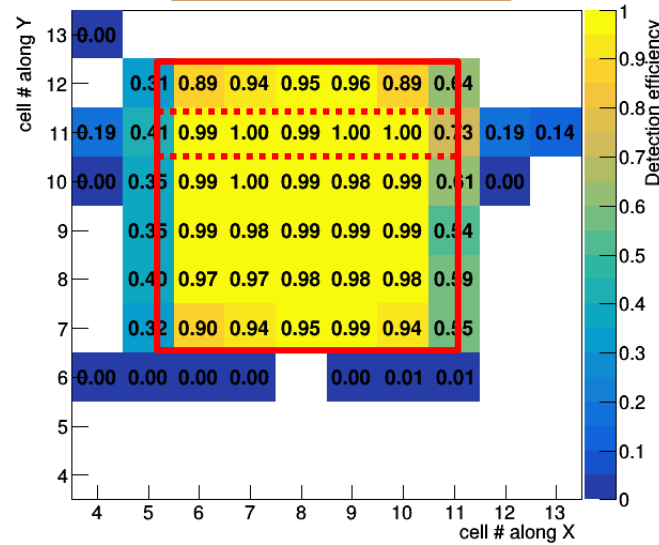


# 白色 vs. 銀色 vs. なし - 検出効率

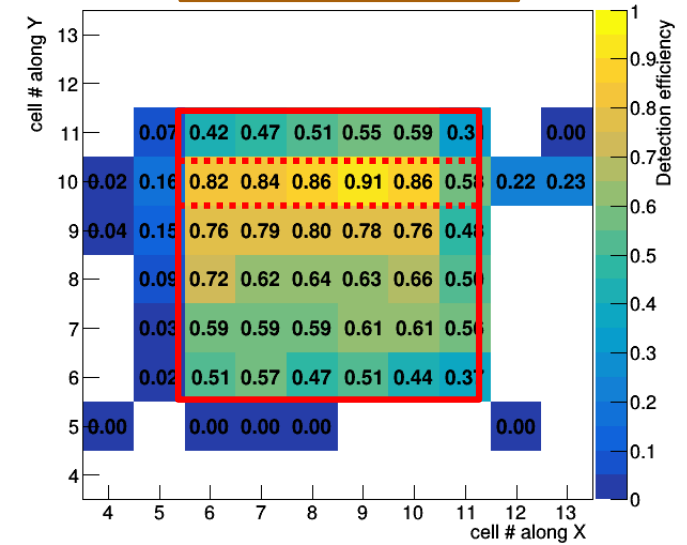
銀色反射材



白色反射材



反射材なし

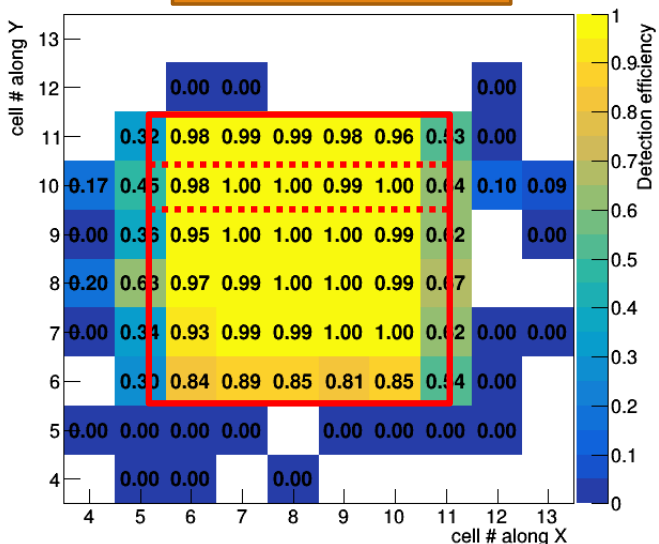


効率変わらず

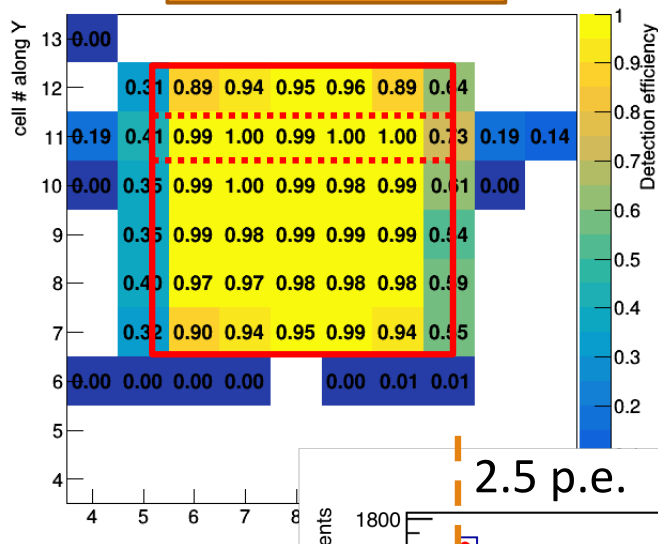
効率低下

# 白色 vs. 銀色 vs. なし - 検出効率

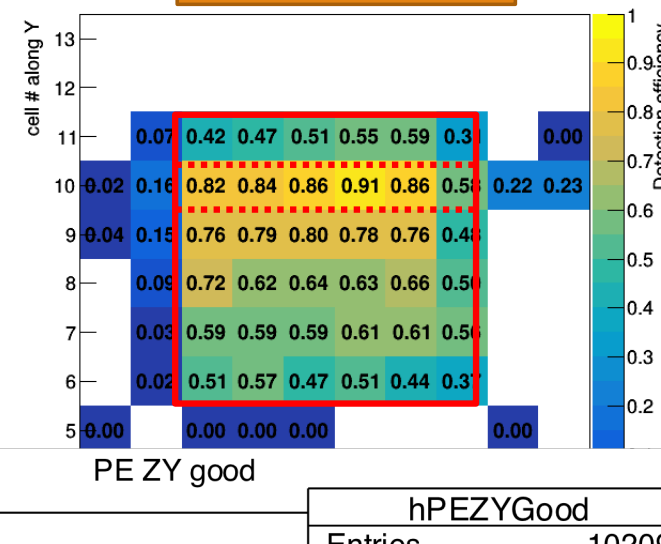
銀色反射材



白色反射材



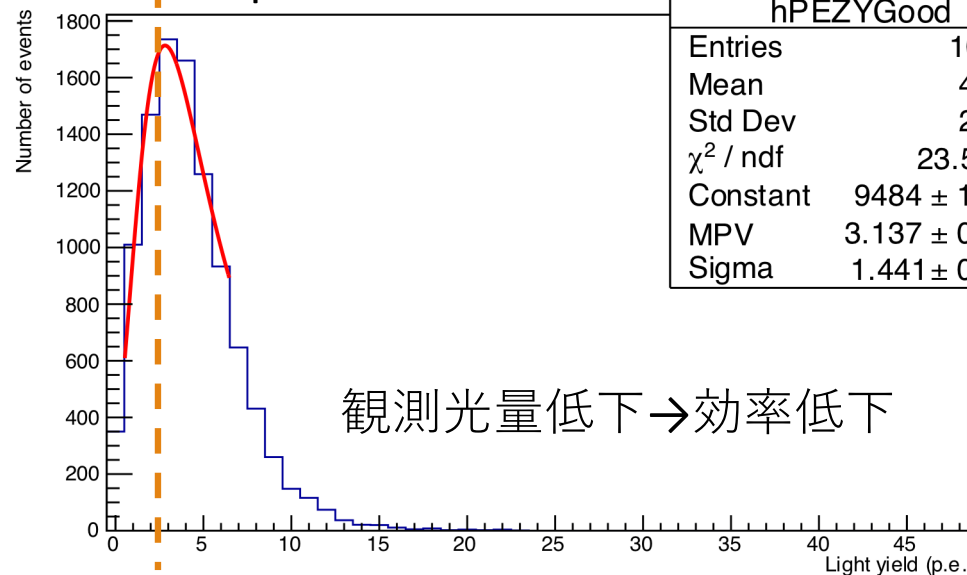
反射材なし



効率変わらず

2.5 p.e.

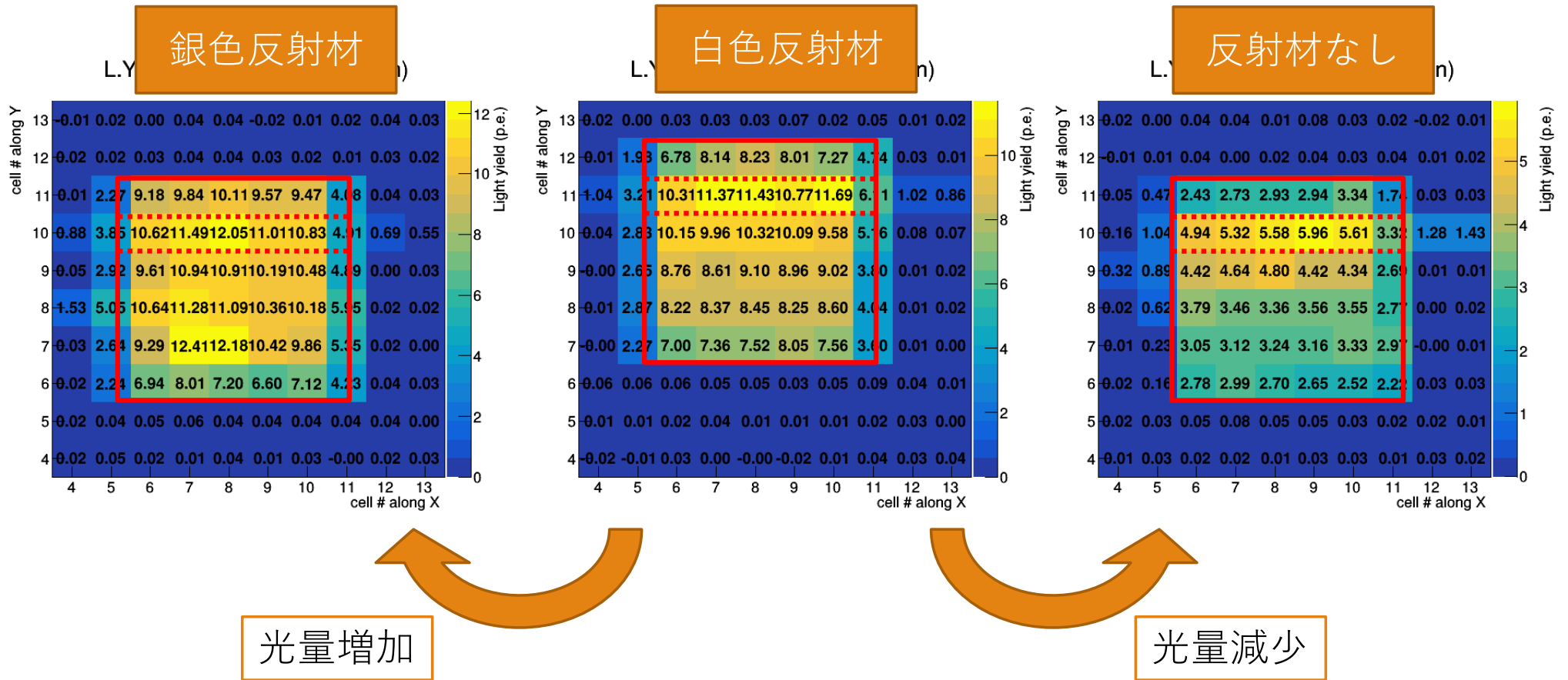
PE ZY good



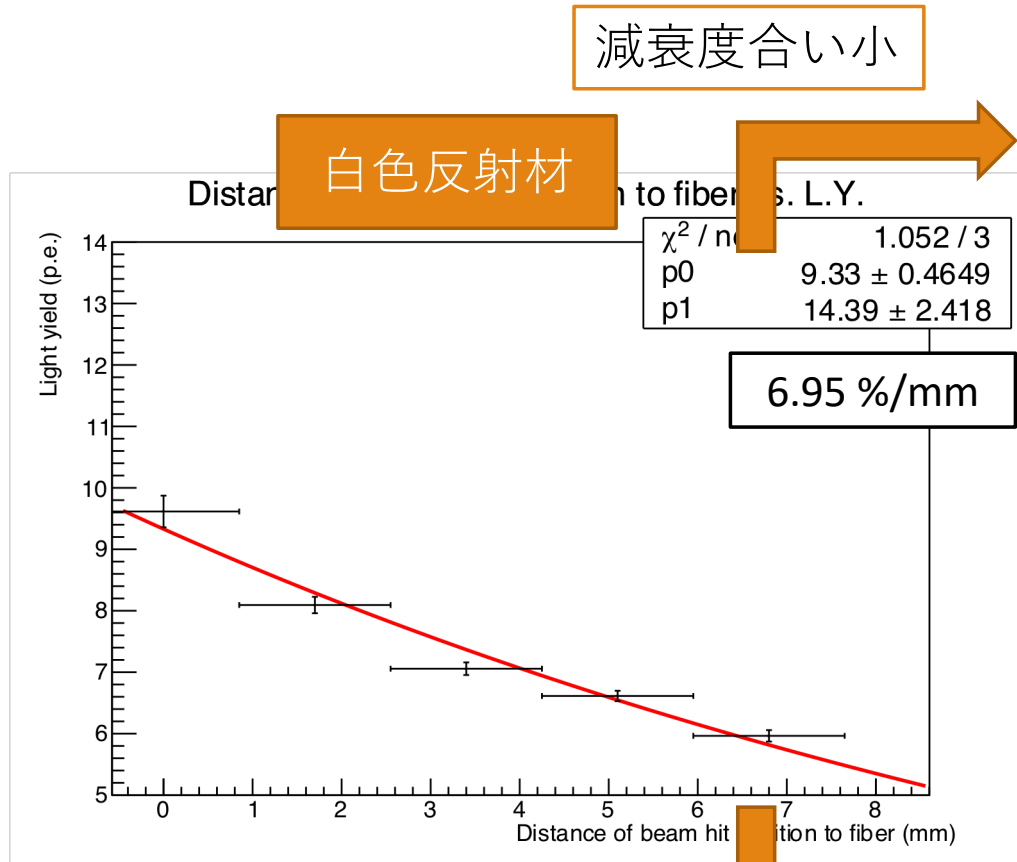
hPEZYGood	
Entries	10209
Mean	4.252
Std Dev	2.744
$\chi^2 / \text{ndf}$	23.57 / 3
Constant	$9484 \pm 153.5$
MPV	$3.137 \pm 0.047$
Sigma	$1.441 \pm 0.043$

観測光量低下→効率低下

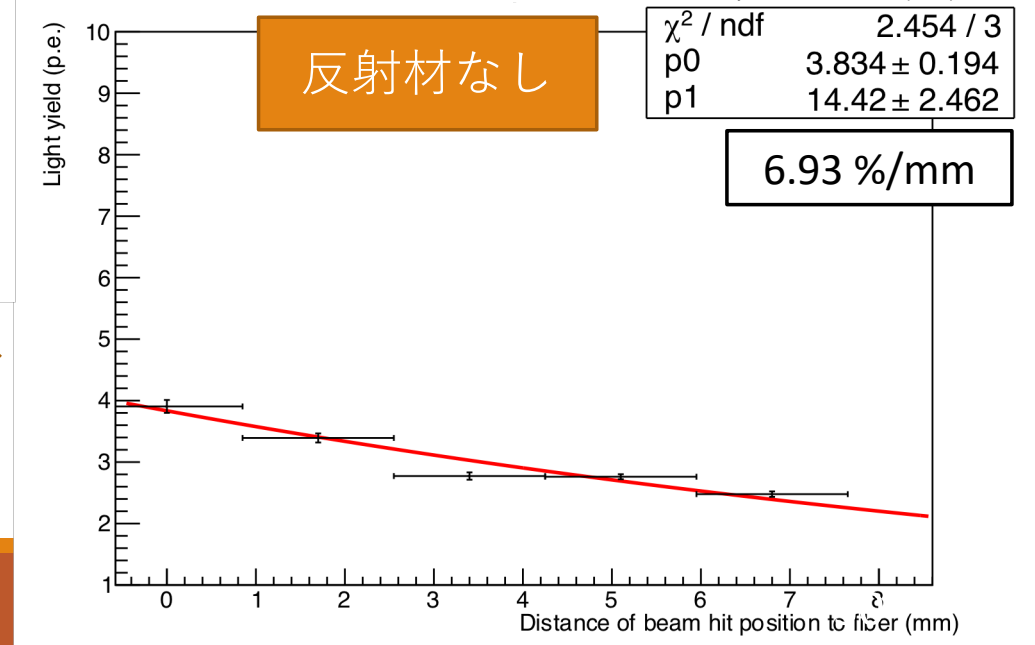
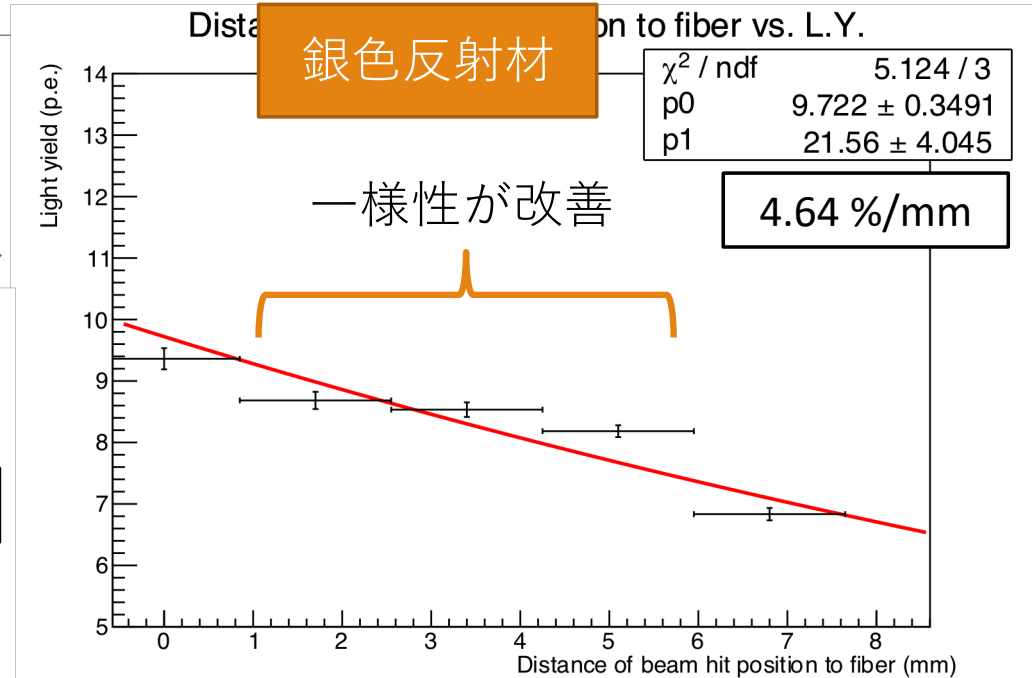
# 白色 vs. 銀色 vs. なし - 光量の位置依存性



# 白色 vs. 銀色 vs. なし - 光量の位置依存性



減衰度合い変わらず



# まとめ

---

- SuperFGDのような複雑な構造の検出器には3Dプリントシンチレータが有用であると期待される
- 将来の実用化に向けて研究開発を行なった
  
- 3Dプリントシンチレータが放射線検出器として有用であることを確認
  - 射出成形のプラスチックシンチレータよりは光量が低い
  - 検出効率はほぼ100%で検出自体には問題なし
  - 光量の一様性は射出成形のプラスチックシンチレータと比べて悪くなった
  - 反射材の材質を工夫することによって一様性を改善できる
- 実用化に向けての課題
  - 湿気による劣化の防止、3方向のファイバー穴、反射材との一体成形、etc.

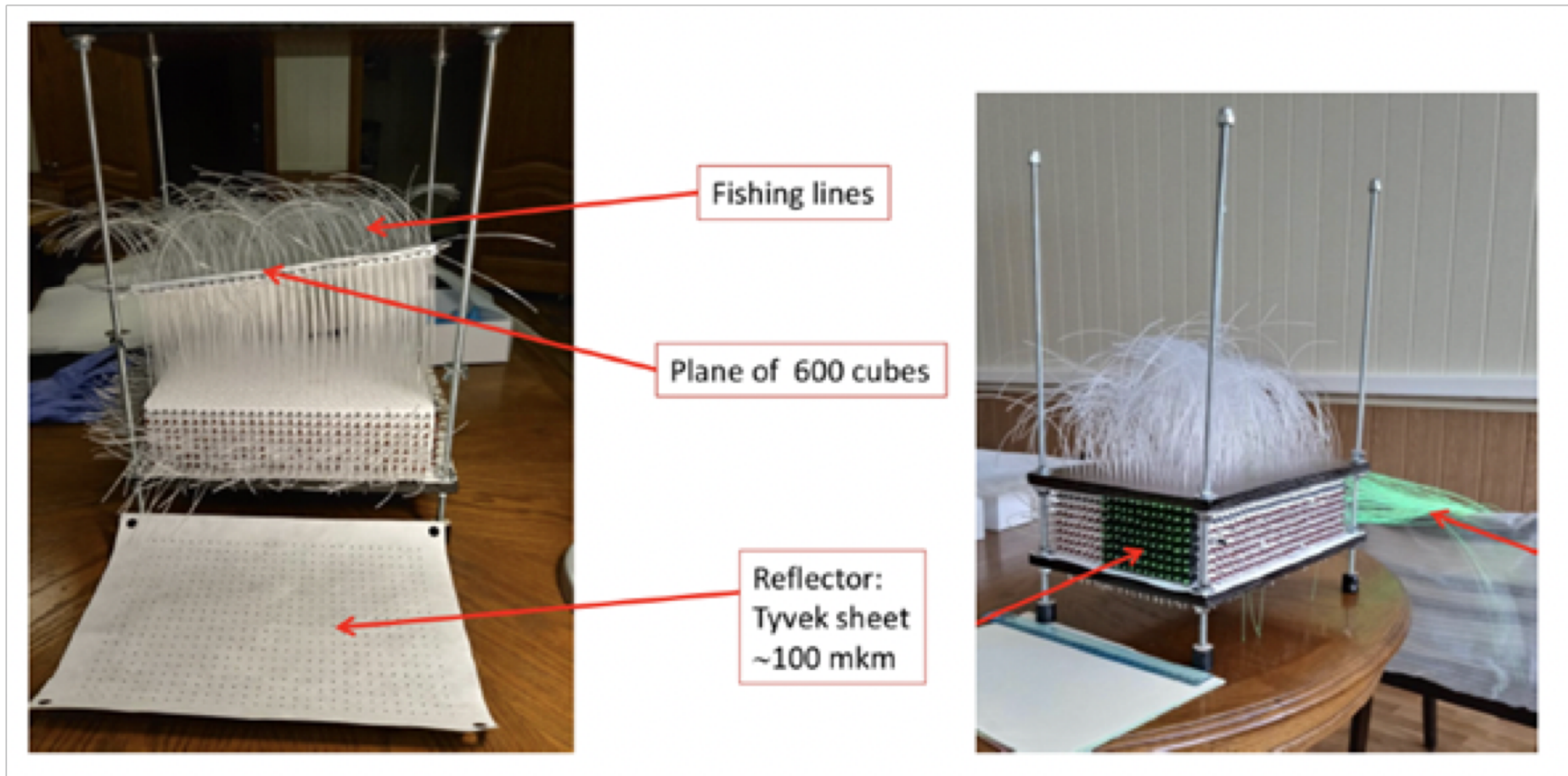


# Backup

---

# SuperFGDの組立方法（その1）

- 釣り糸を使う方法
  - 釣り糸で完全に形を作ったあと、WLSファイバーに置き換える

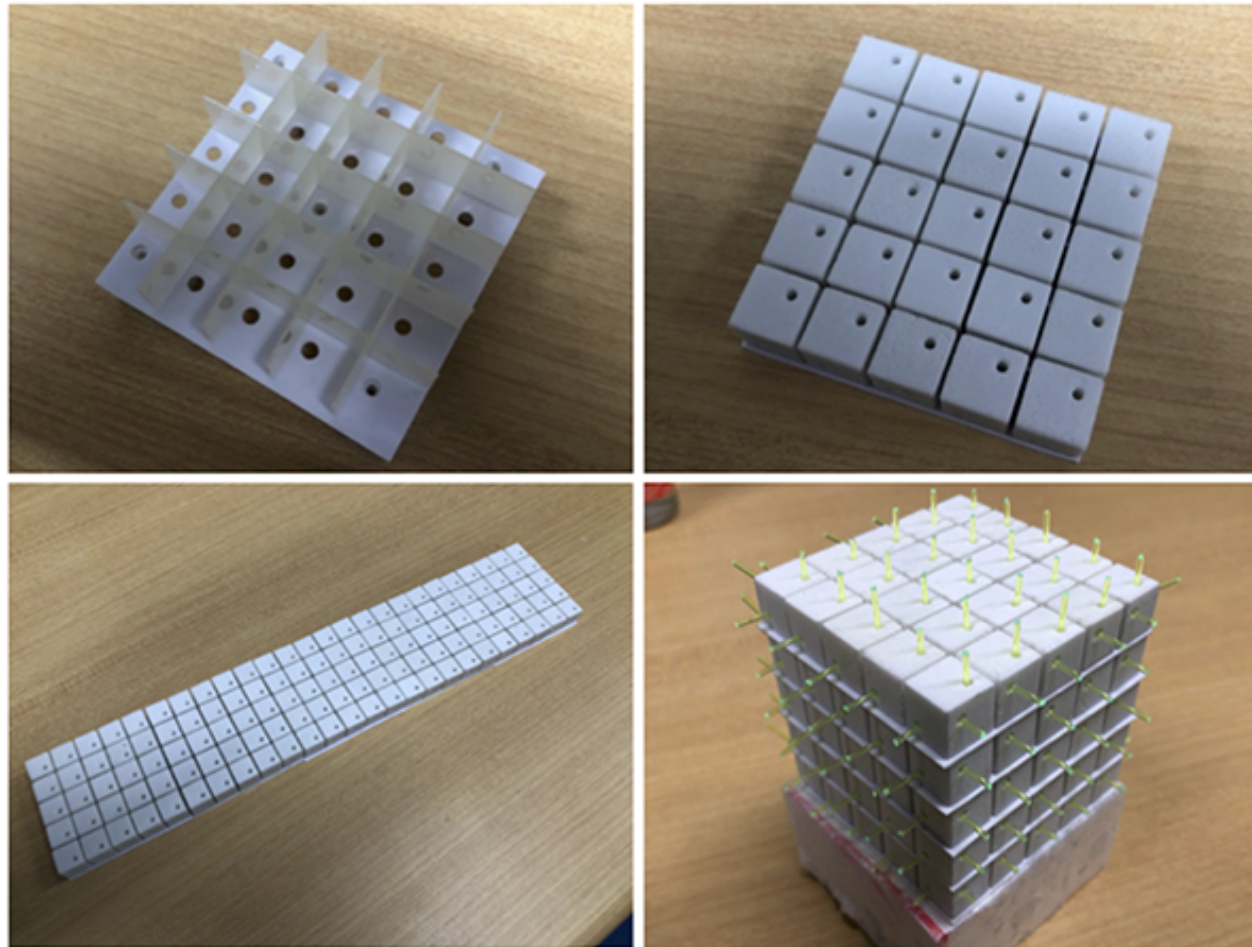




# SuperFGDの組立方法（その2）

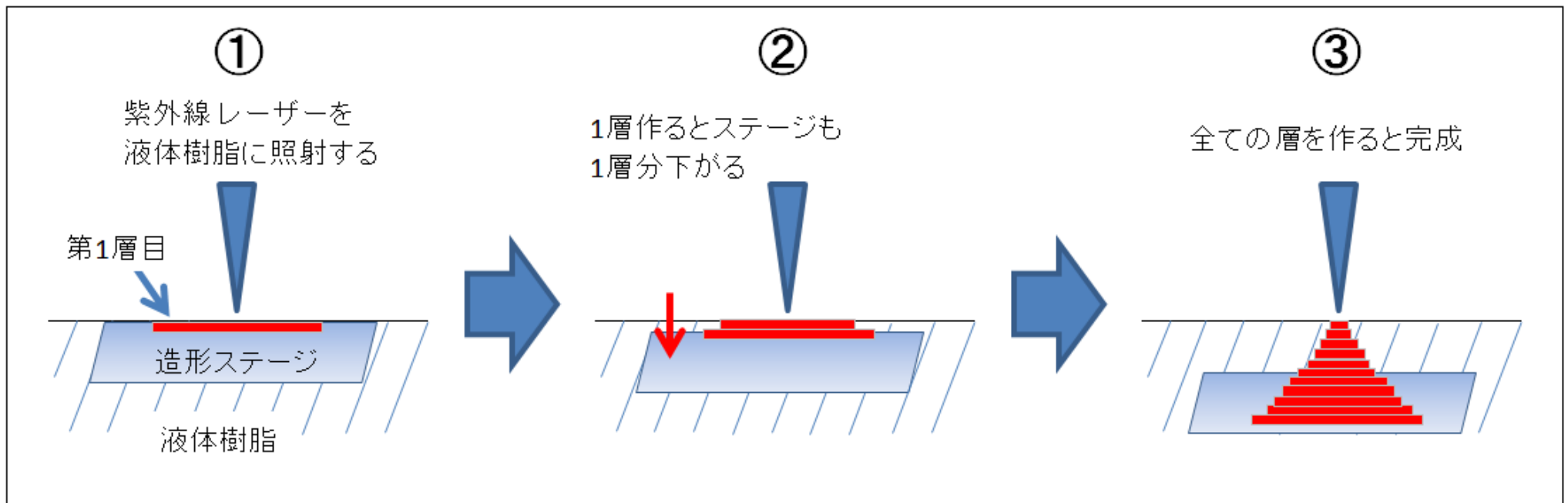
---

- ポリスチレンシートで一層ごとに支持する



# 光造形方式

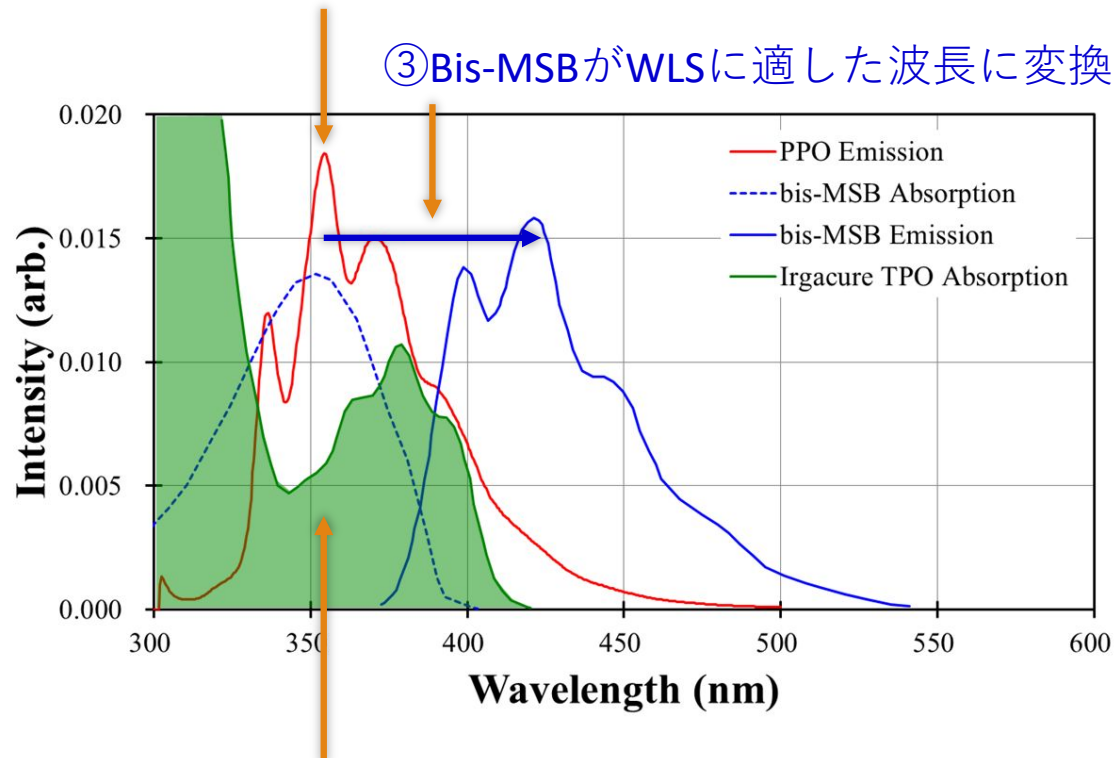
- 熱溶解方式に比べて縦方向の解像度が高い



画像は<http://www.japanese-makers.com/archives/4105>より引用

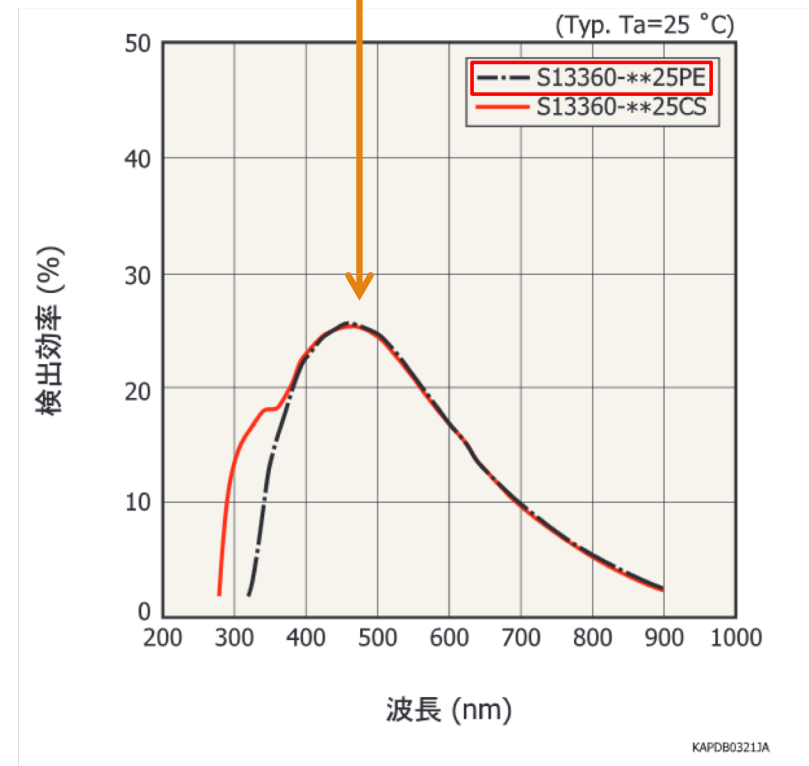
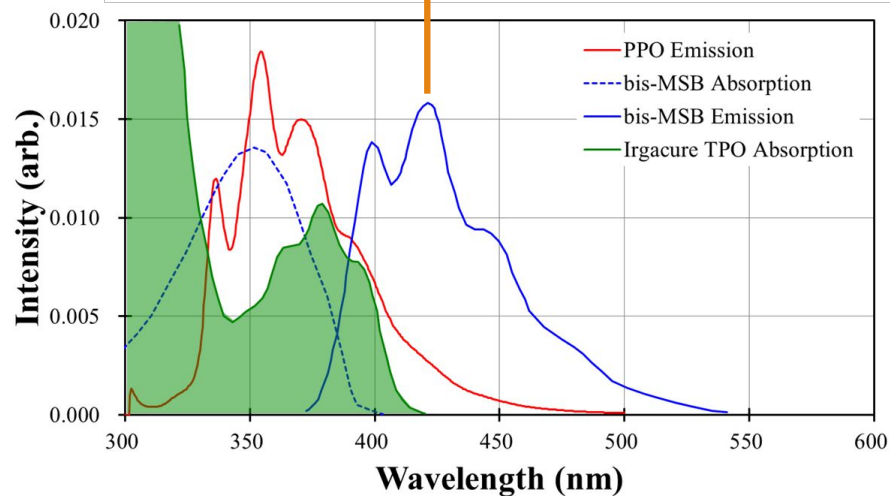
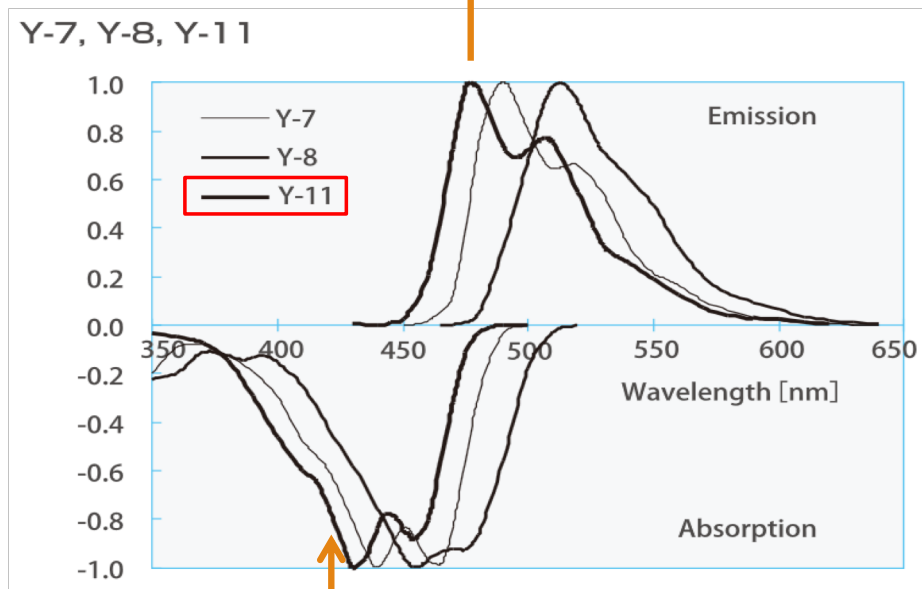
# シンチレーション・波長変換メカニズム

①放射線が当たると、PPOによってUV光が出る



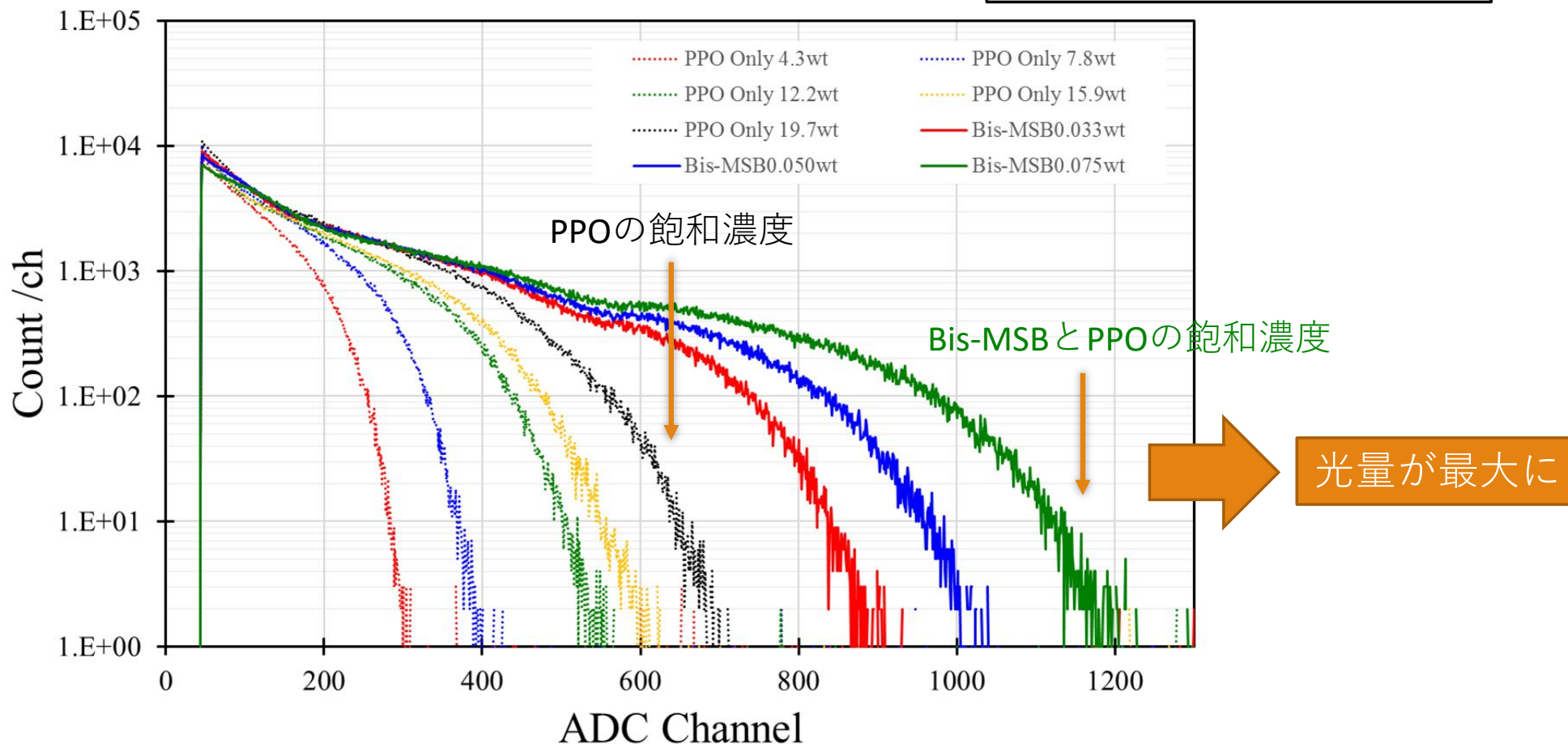
②PPOによって出たUV光はBis-MSBとIrgacure TPOに吸収されるが、Irgacure TPOが吸収する割合は小さい

# シンチ・WLS・MPPPCの波長特性



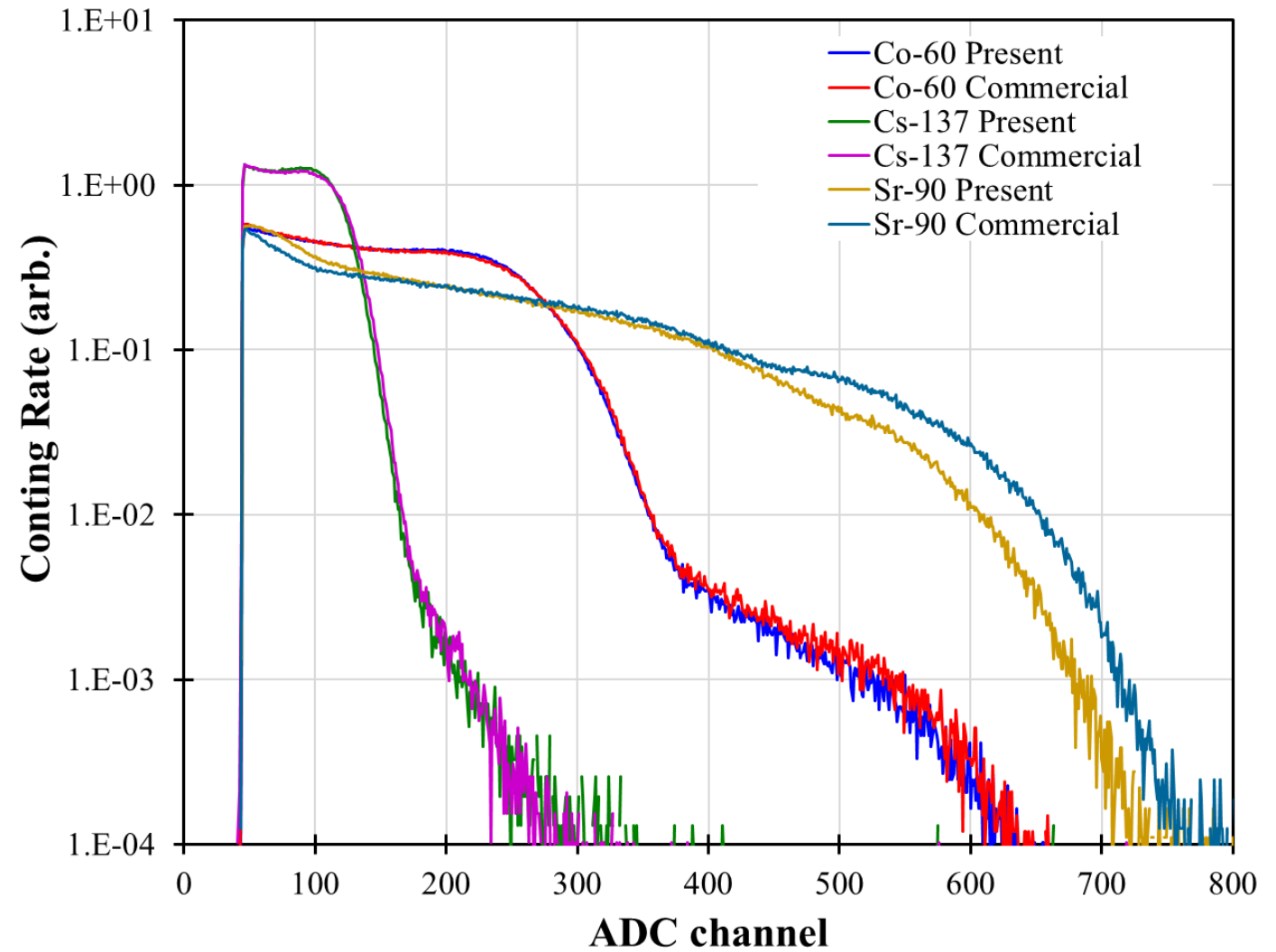
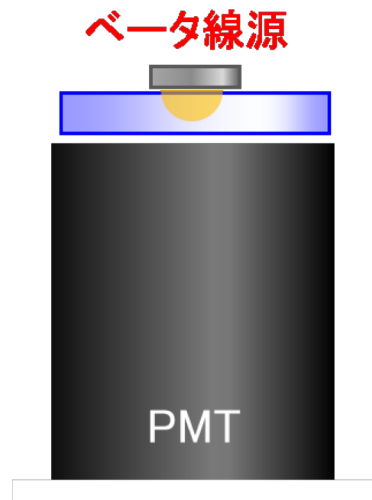
# 材料の割合の比較

- 放射線源： $^{90}\text{Sr}$  ( $\beta^-$ )
- 光検出器：PMT



ベータ線を照射したときの光量分布 (PPO & Bis-MSBの濃度ごと)

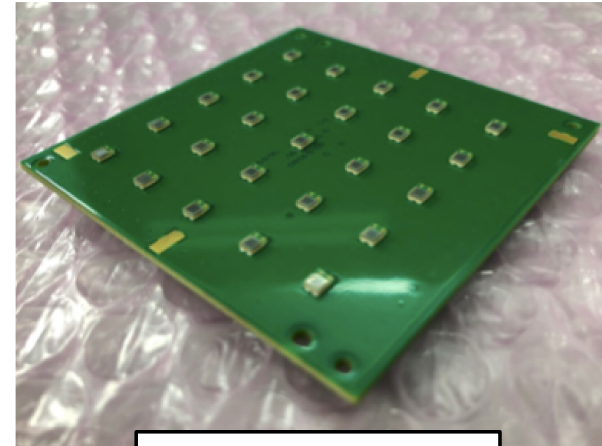
# 市販のプラシン vs. 3Dプリントシンチ



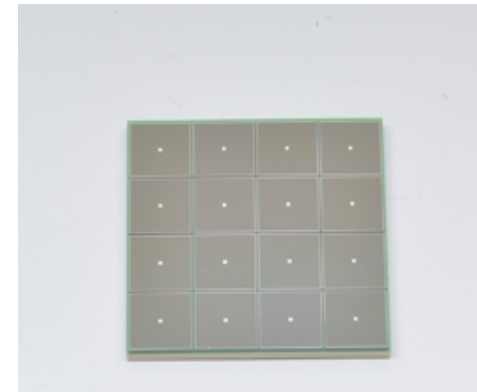


# 使用機材

- シンチ用MPPC
  - 浜ホト S13360-1325PE
  - 25ch MPPC array
  - 有効受光面直径：1.5 mm
- ホドスコープ用MPPC
  - 浜ホト S13361-3050AE-04
  - 16ch MPPC array
- 波長変換ファイバー
  - Kuraray Y11
  - 直径：1.0 mm
  - 減衰長：3.5 m
- EASIROC
  - 64chアンプ + ADC



シンチ用MPPC\*



ホドスコープ用MPPC\*\*

\* M Zito et al., "T2K ND280 Upgrade - Technical Design Report", 37, (2019)

\*\* <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/type/S13361-3050AE-04/index.html>

# イベント数

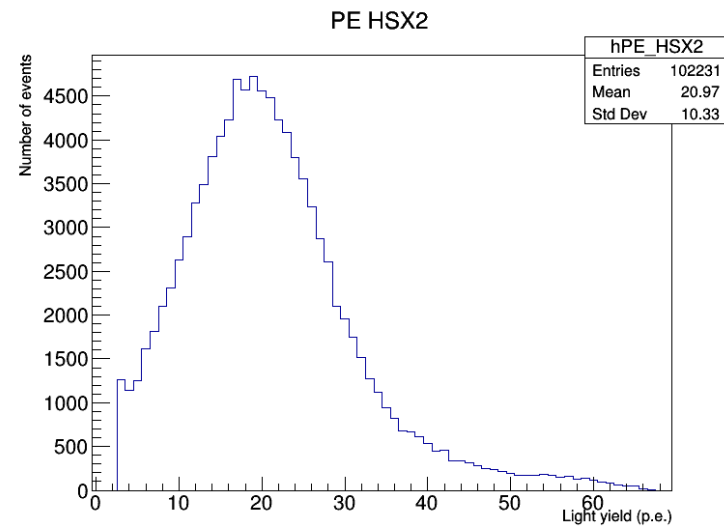
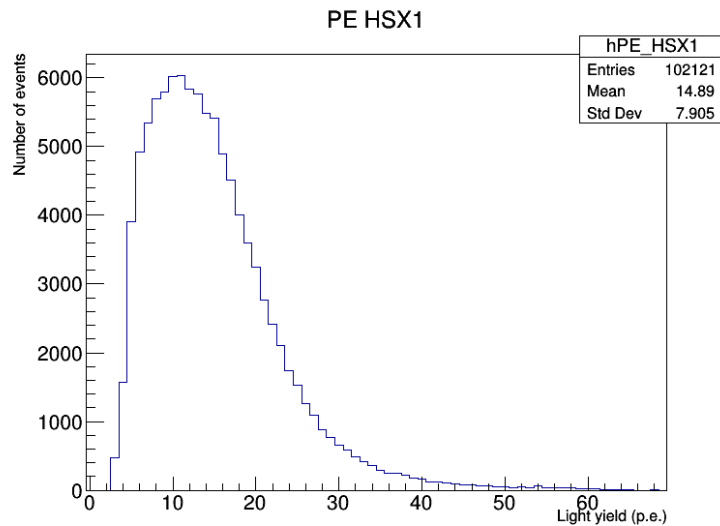
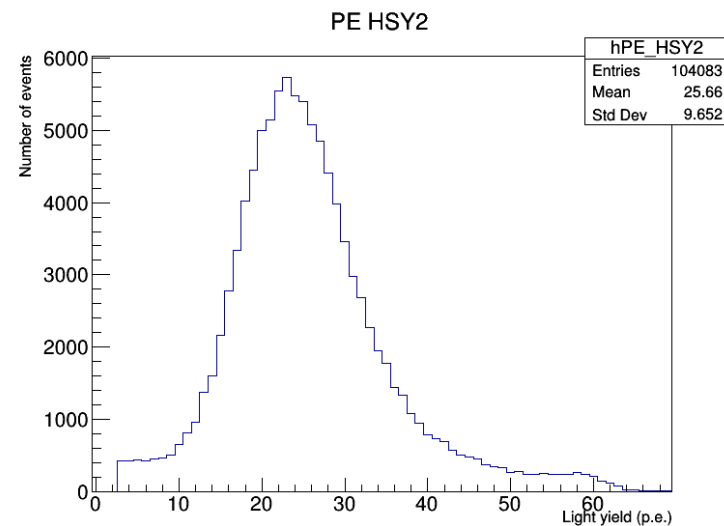
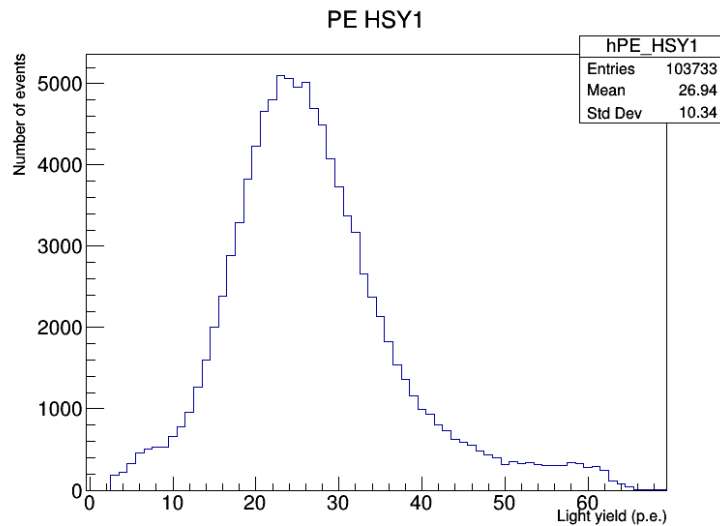
---

- 1 set = 50001 events

サイズ	向き	反射材	有効イベント数 (set)	使用イベント数 (set)
1 cm	vertical	white	3	2
2 cm	vertical	white	5	2
1 cm	parallel	white	8	5
2 cm	parallel	white	8	5
1 cm	vertical	silver	5	3
1 cm	parallel	silver	4	2
1 cm	vertical	none	4	3
1 cm	parallel	none	4	1

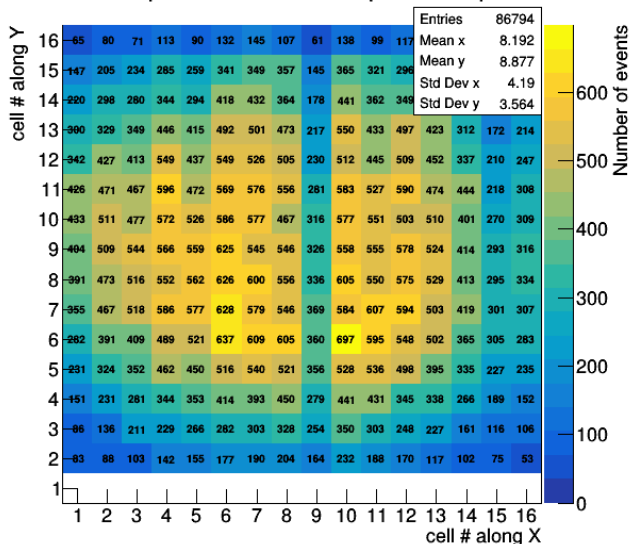


# ホドスコープの観測光量分布

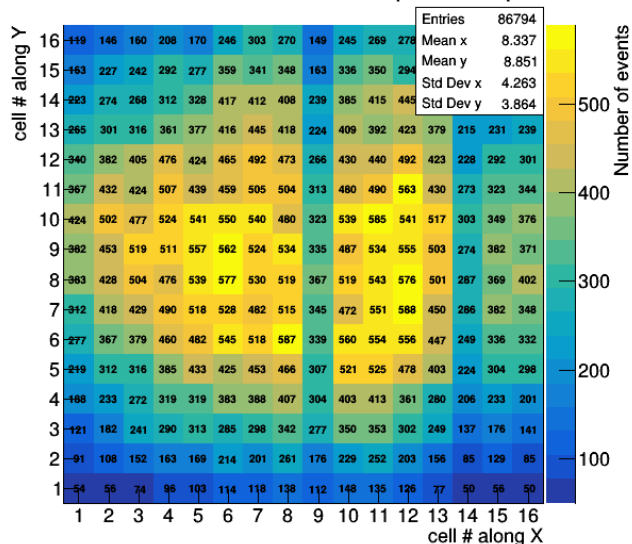


# ビームプロファイル

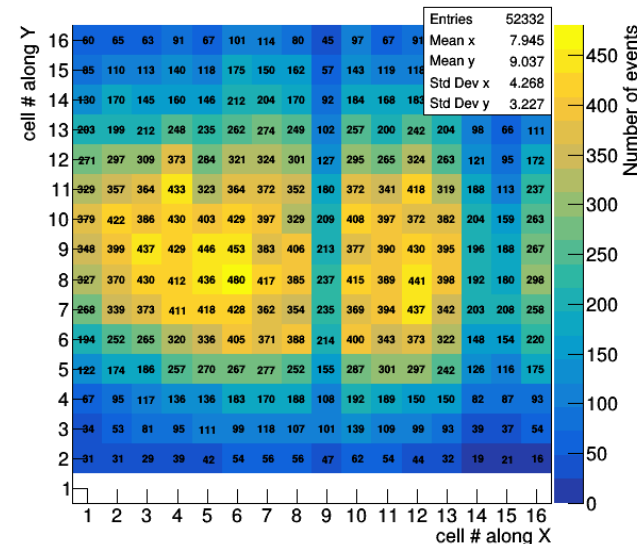
Upstream hodoscope hitmap



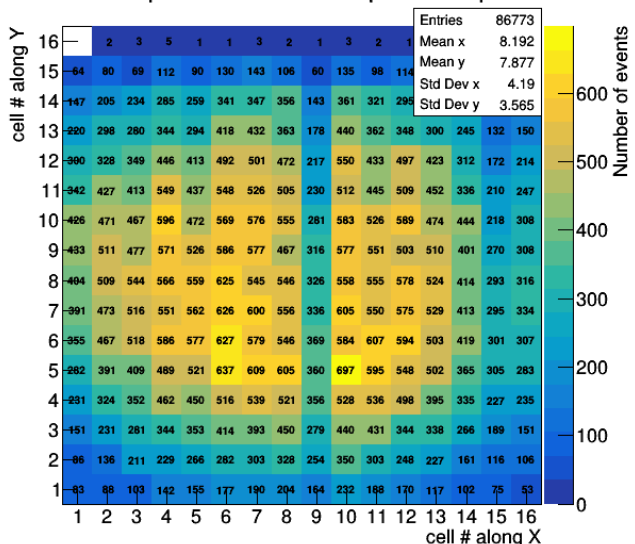
Downstream hodoscope hitmap



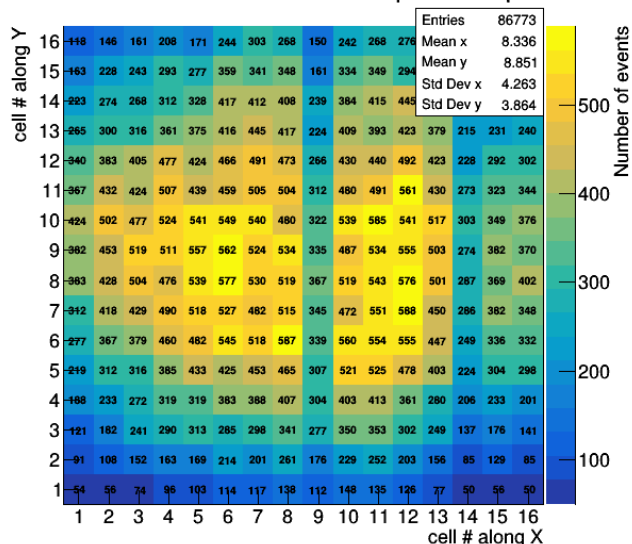
Hodoscope hitmap with straight beam event



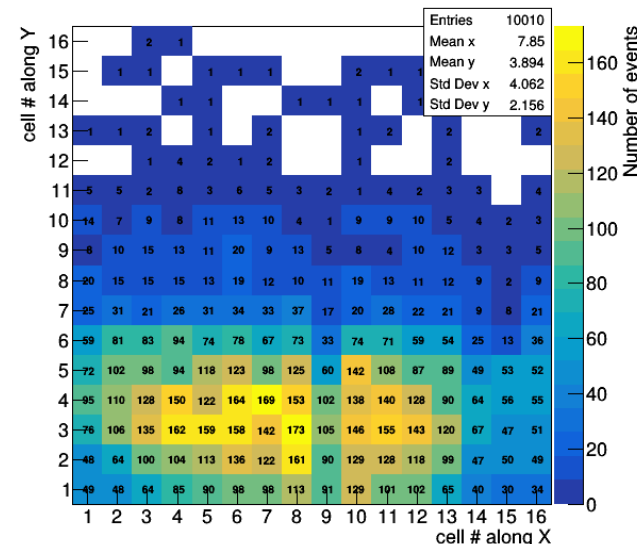
Upstream hodoscope hitmap



Downstream hodoscope hitmap



Hodoscope hitmap with straight beam event



# ファイバー本数による光量補正

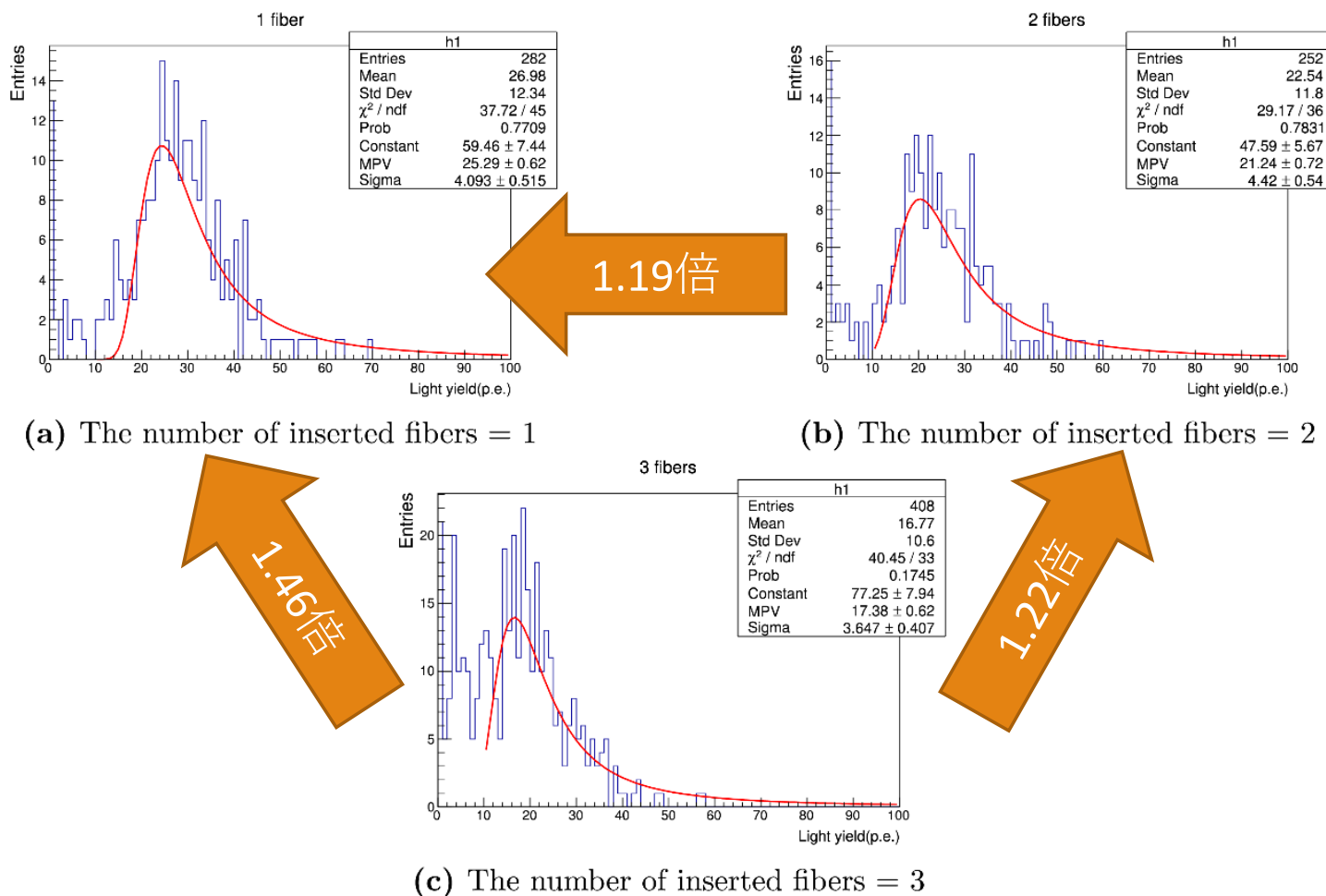
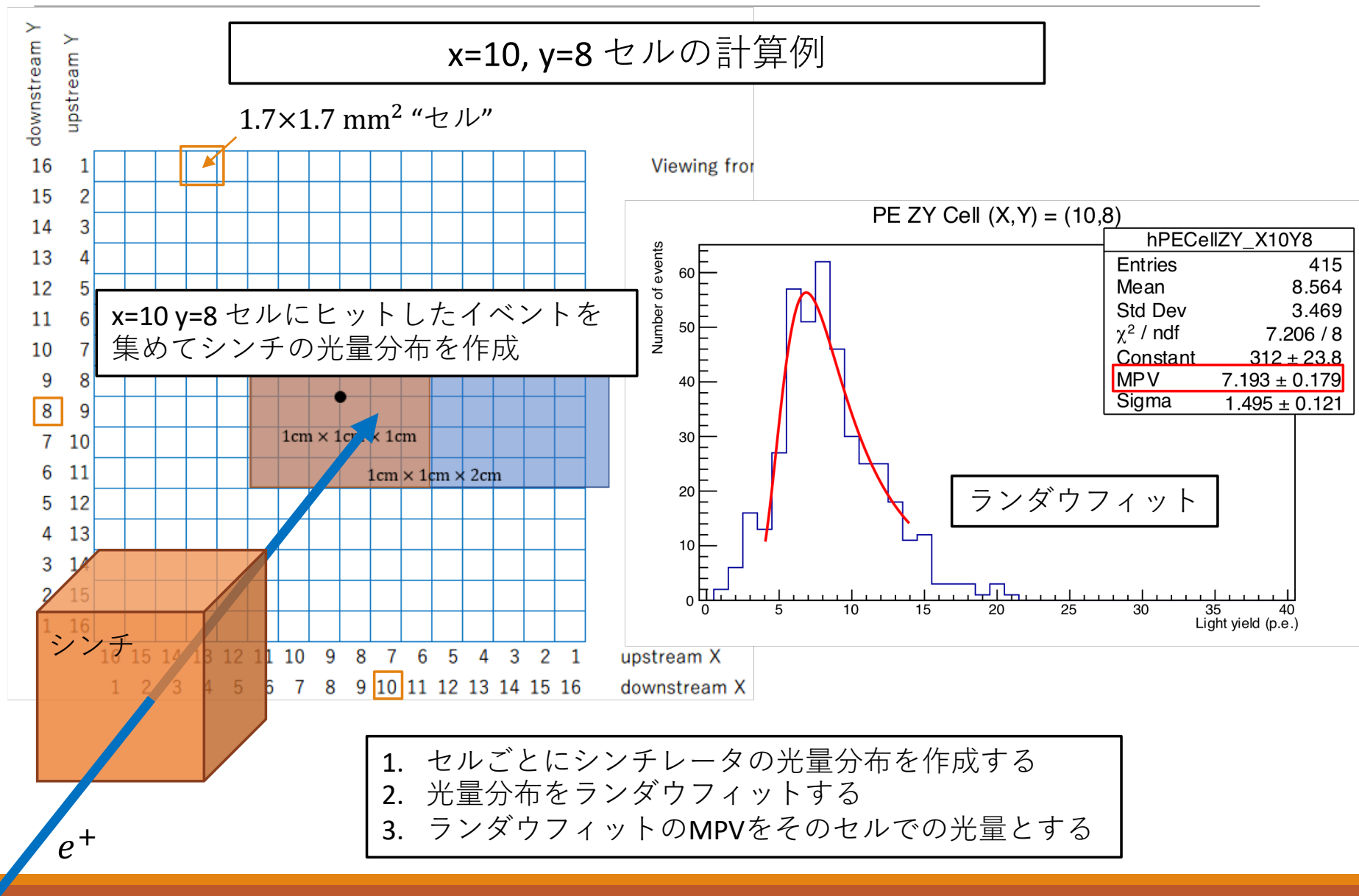


Figure A.6: Light yield distributions in each n each number of inserted fibers

R. Fujita, "Research and development of a new fine-grained scintillator tracker for the upgrade of T2K near detector", 56 (2019).

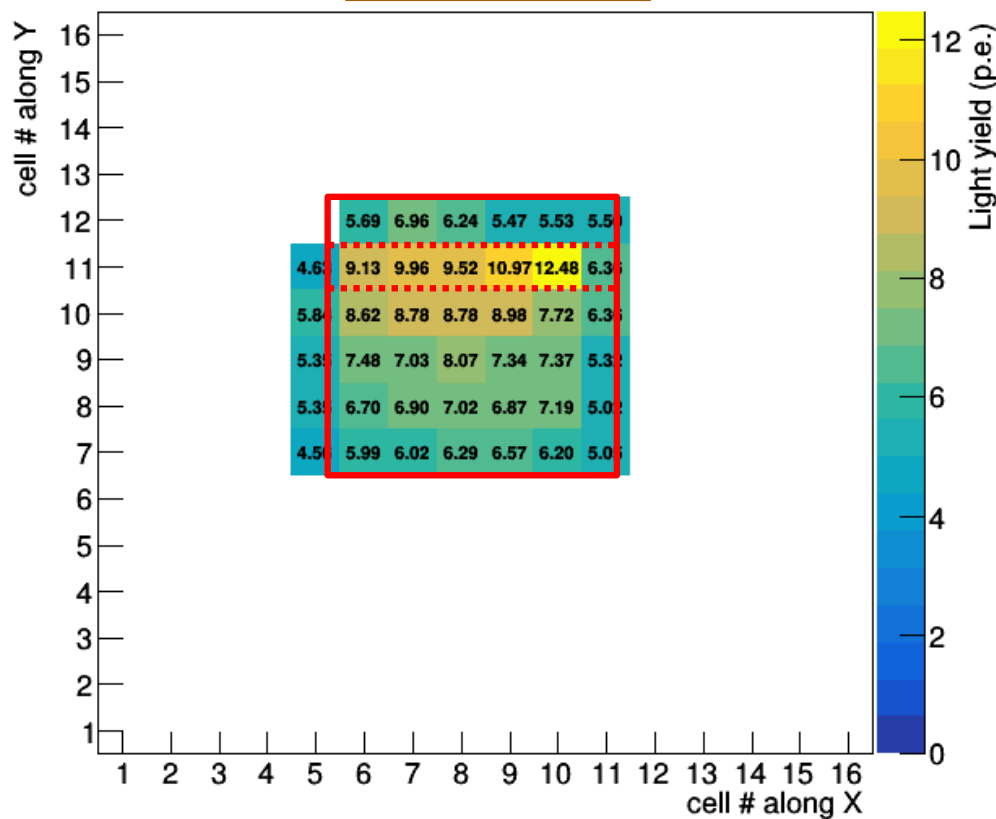
# 計算方法（ランダウフィット）



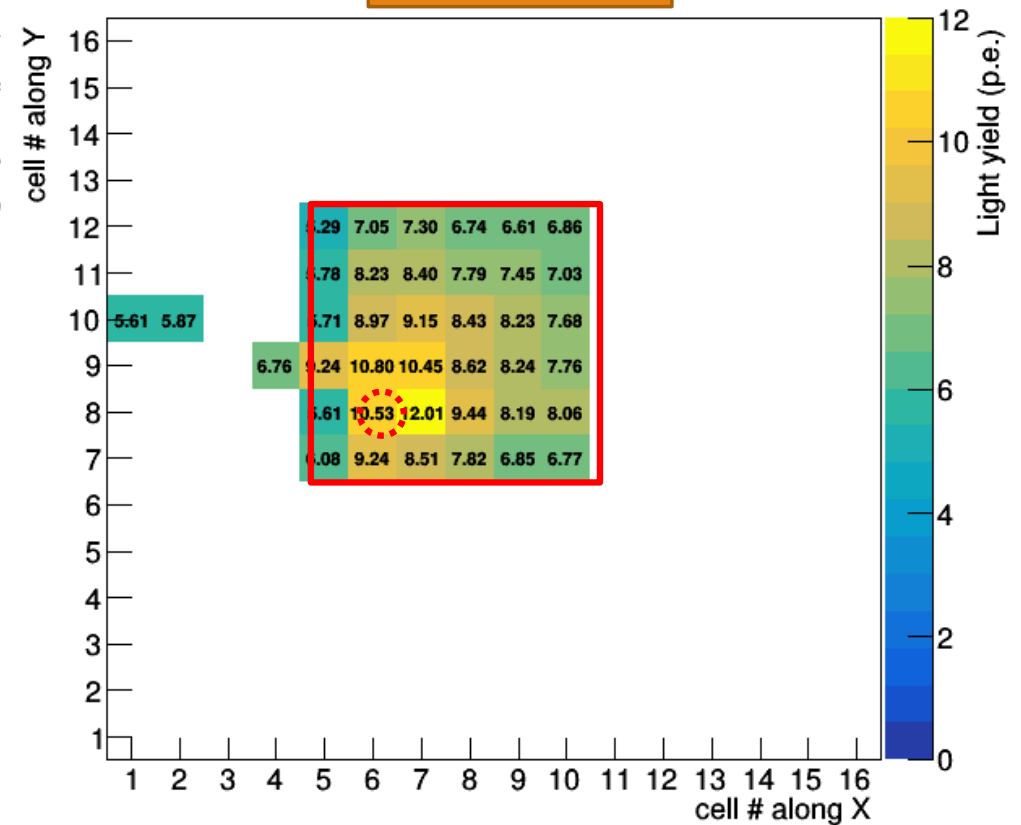
# 光量の位置依存性（ランダウフィット）

- ファイバー付近で光量が高い→フィットがうまくいかない

S 1 cm, 垂直 ap



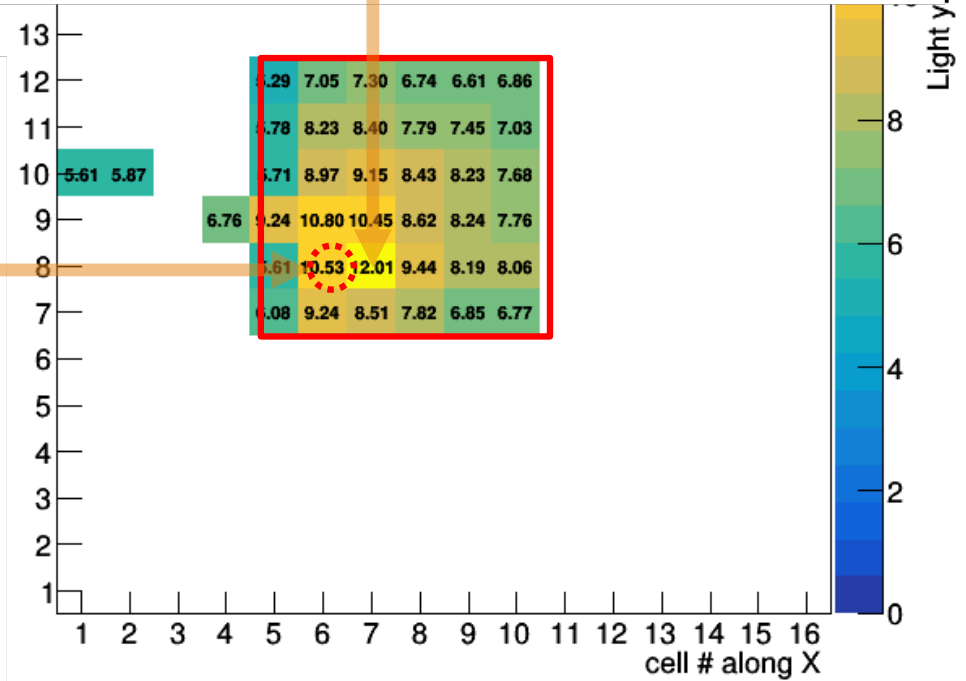
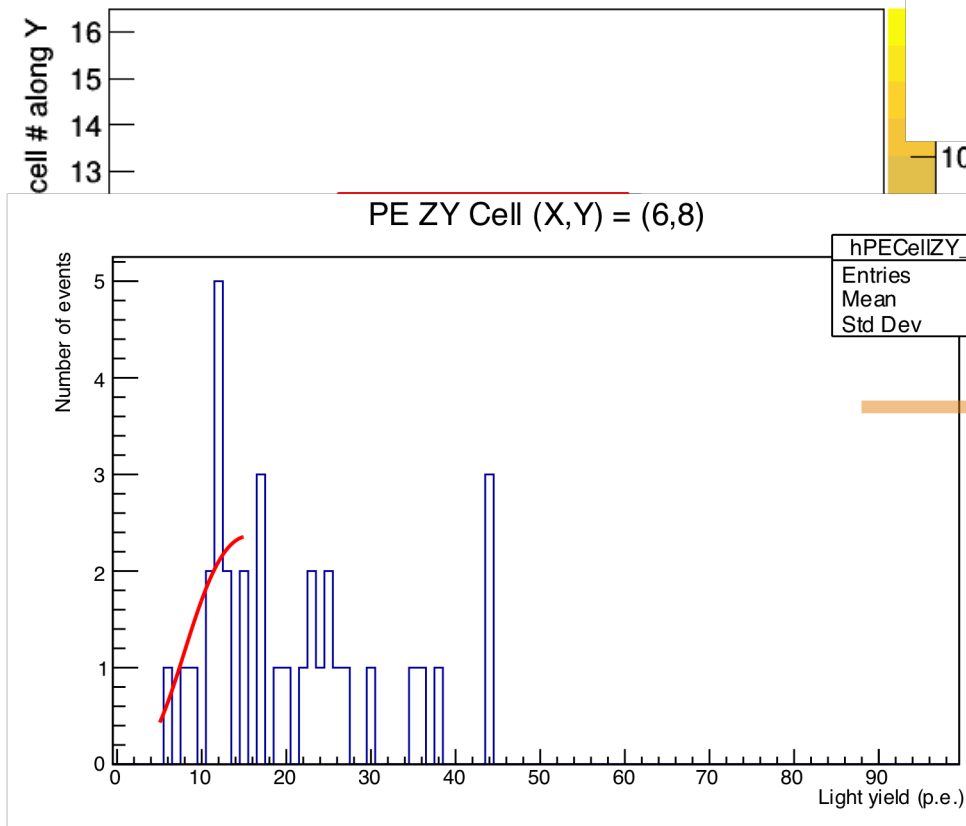
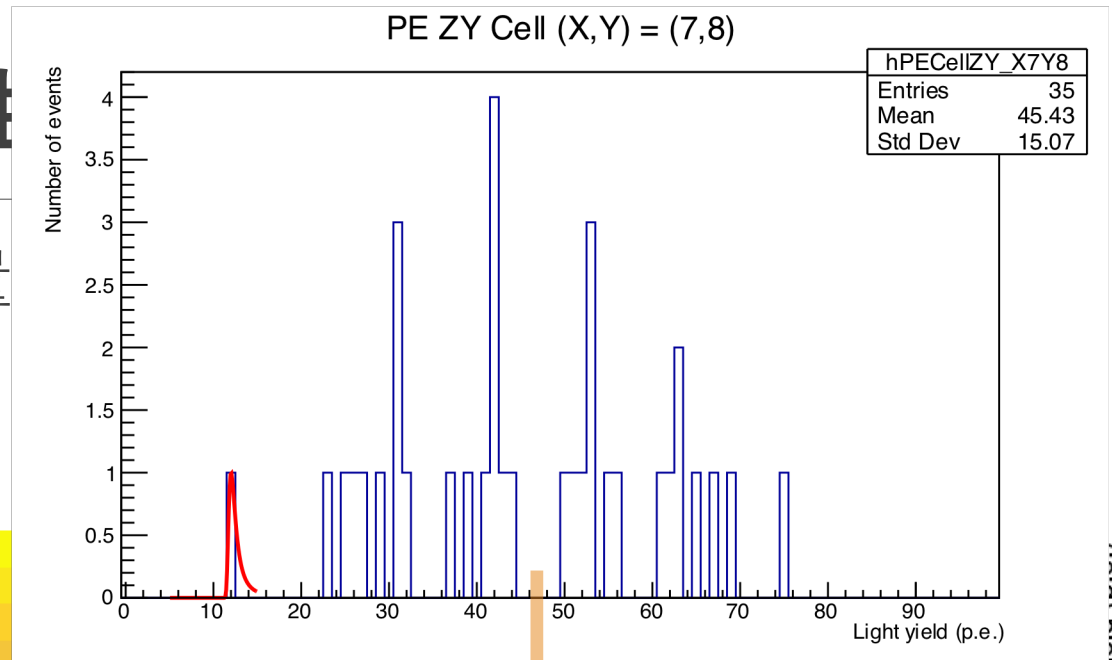
S 1 cm, 平行 ap



# 光量の位置依存性

- ファイバー付近で光量

S 1 cm, 垂直 ap



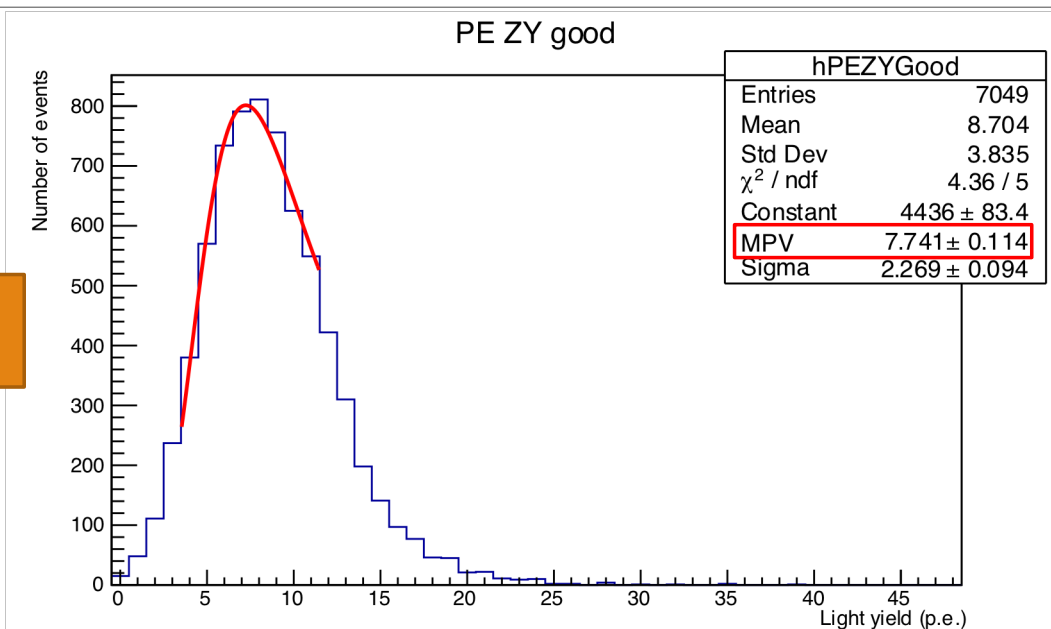
# 解析項目

---

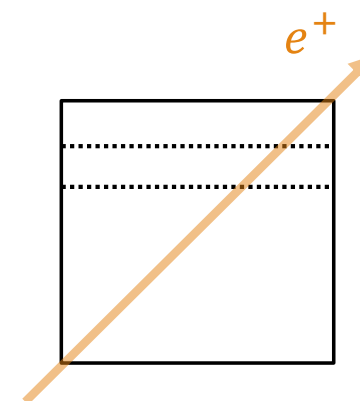
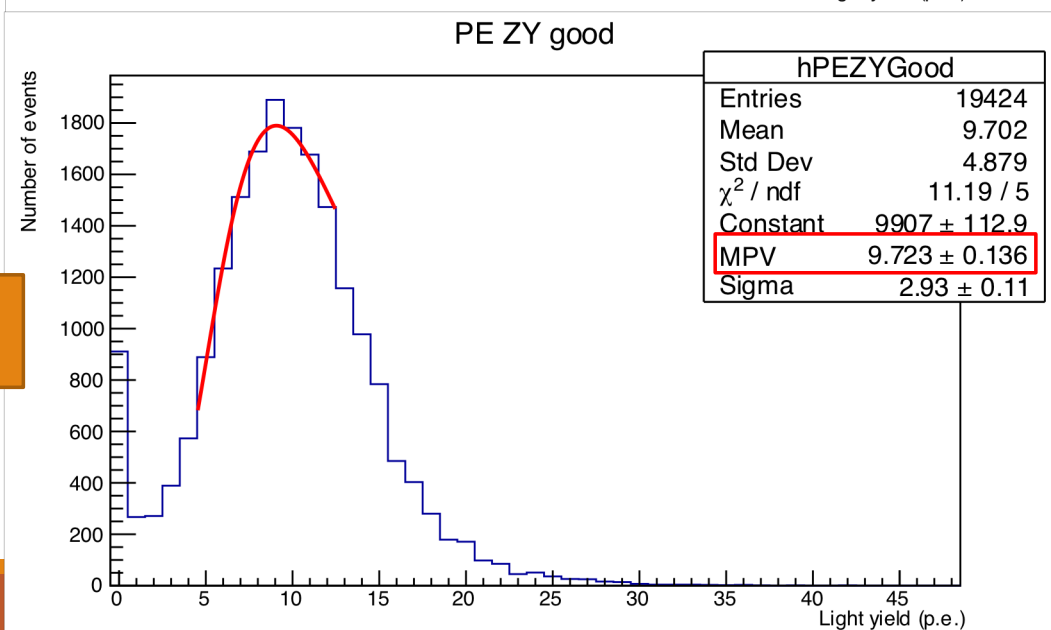
- 1 cmキューブ・垂直および平行・白色反射材
  - シンチレータの光量
  - 検出効率のビームヒット位置依存性
  - 光量のビームヒット位置依存性
  
- 上記項目を
  - **2 cmキューブと比較** ←
  - 銀色反射材と比較
  - 反射材なしと比較

# 1 cm vs. 2 cm – 光量

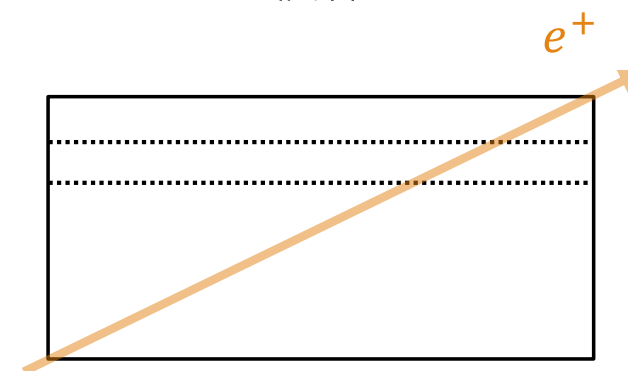
1 cm, 垂直



2 cm, 垂直



2 cmのほうが光量が大きい  
→Path lengthの影響？  
キューブの個体差？



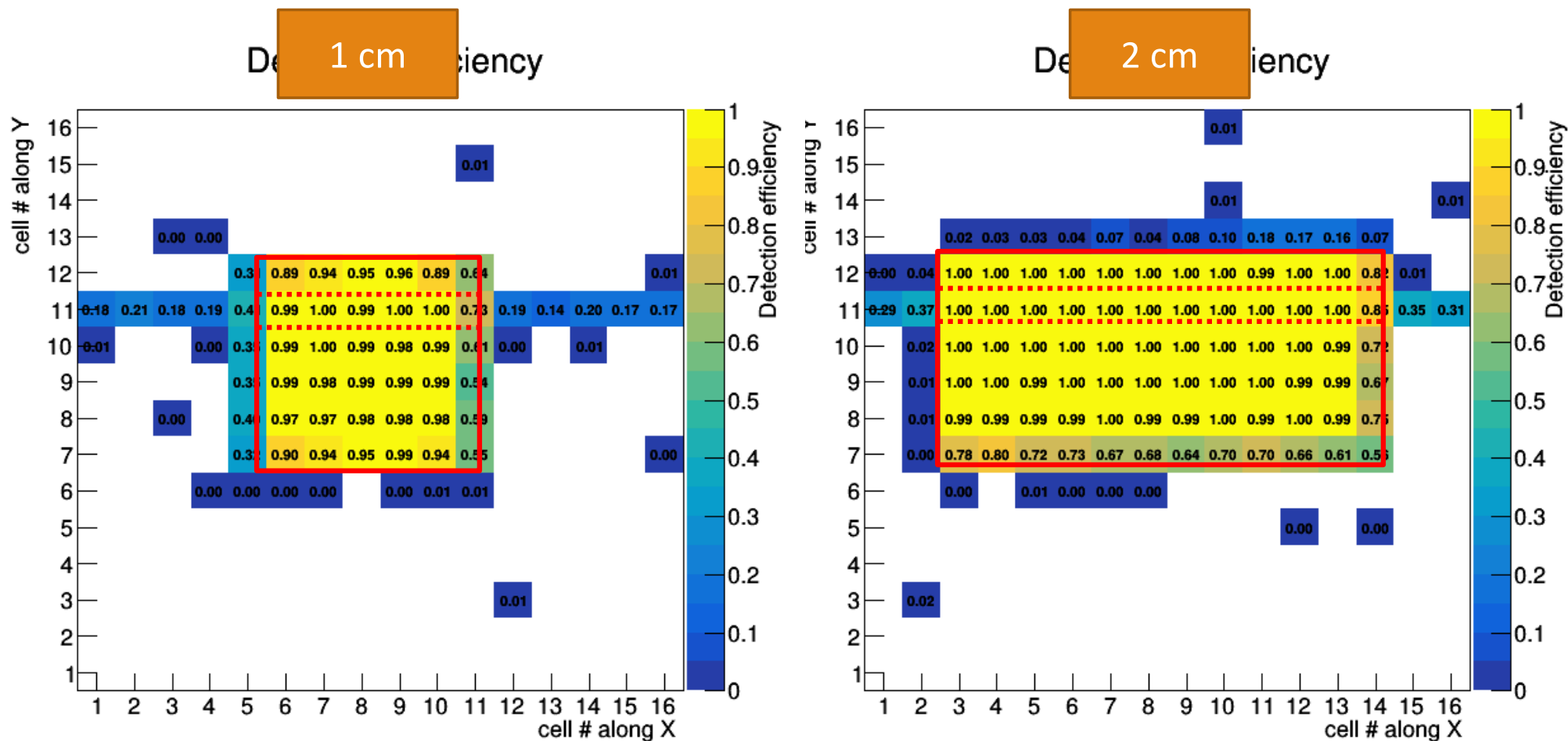
取りうるpath lengthが  
1 cmキューブよりも長い



# Path length分布

---

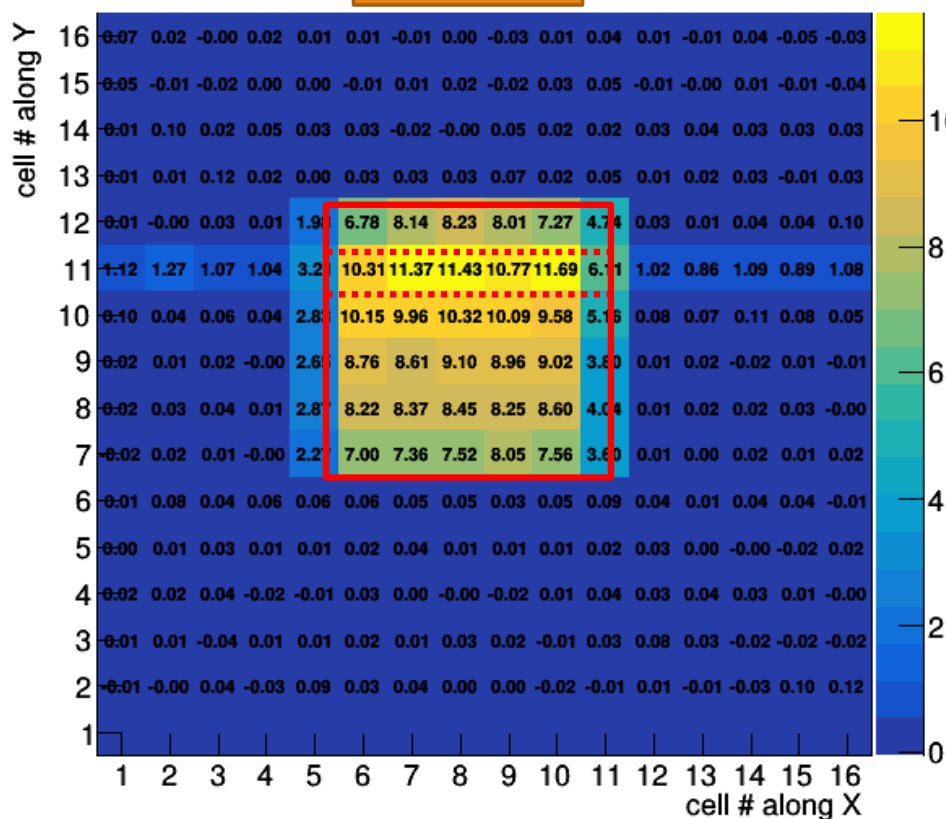
# 1 cm vs. 2 cm - 検出効率



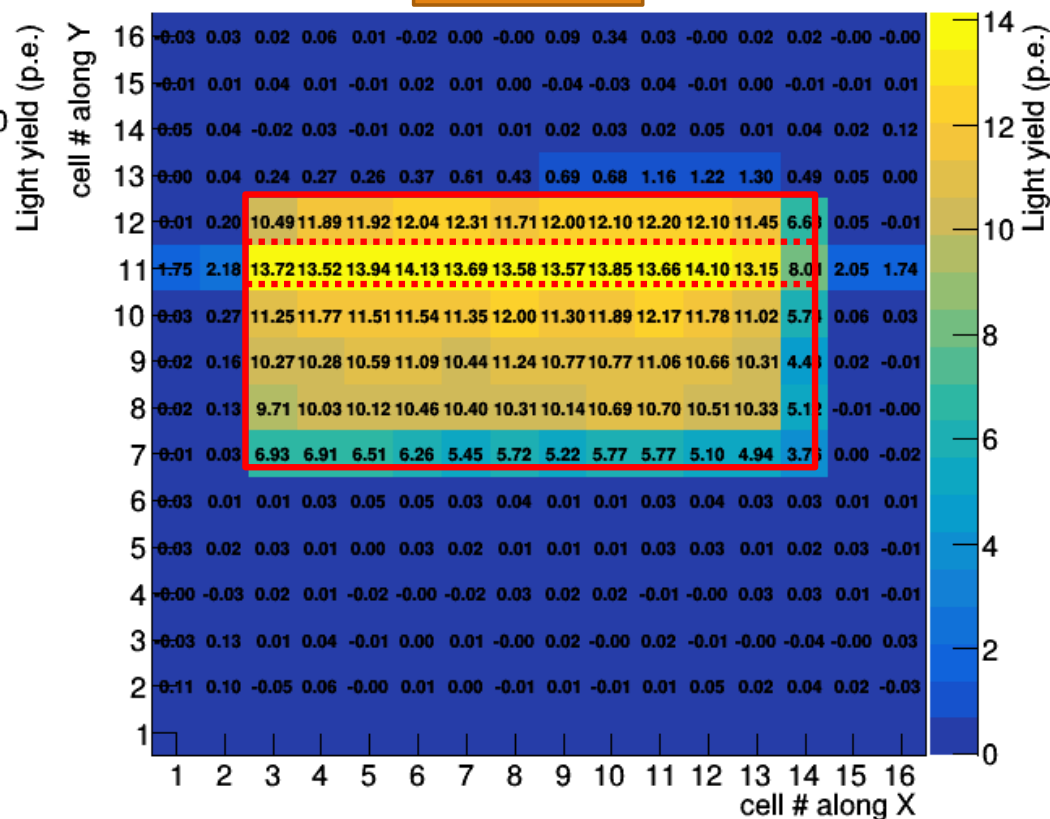
- 2 cmでも十分な検出効率

# 1 cm vs. 2 cm – 光量の位置依存性

Scintillator (1 cm using mean)



Scintillator (2 cm using mean)

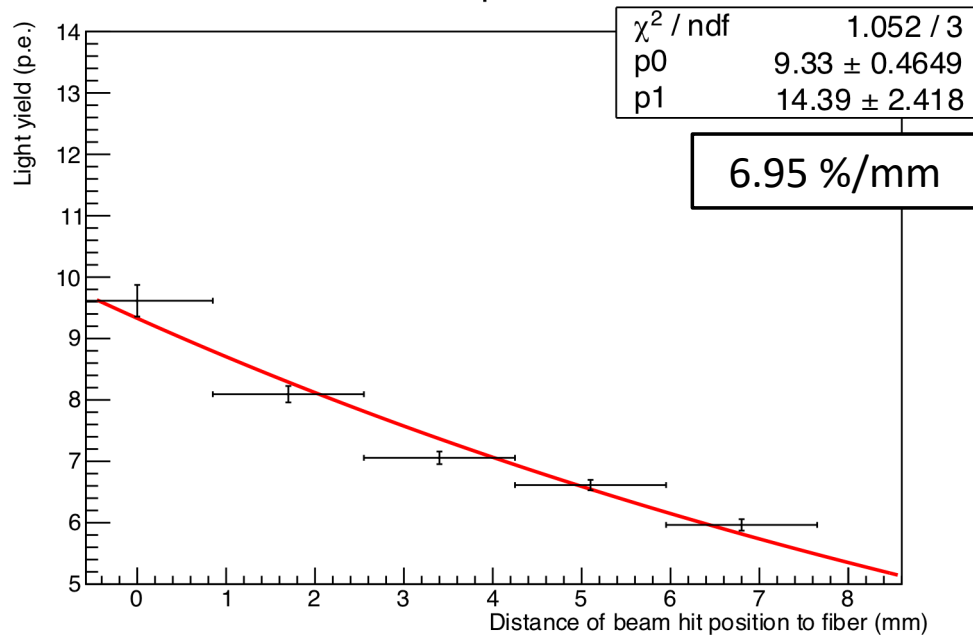


- 2 cmのほうが全体的に光量が大きい
- 個体差、光の経路の違い（壁面での反射の回数など）？

# 1 cm vs. 2 cm – 光量の位置依存性

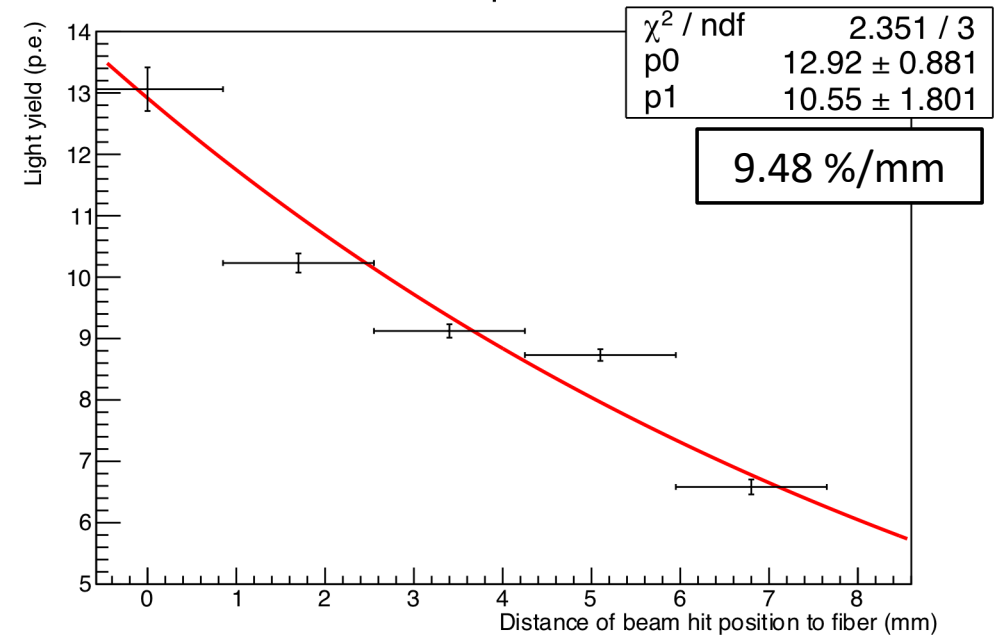
1 cm

Distance of beam hit position to fiber vs. L.Y.



2 cm

Distance of beam hit position to fiber vs. L.Y.



- 2 cmのほうが減衰の度合いが大きい
- 個体差、キューブ内のくもり？

# シンチレータ光量まとめ

サイズ	向き	反射材	光量 (p.e.)
1 cm	垂直	白色	7.741 +/- 0.114
1 cm	平行	白色	8.955 +/- 0.095
2 cm	垂直	白色	9.723 +/- 0.136
1 cm	垂直	銀色	9.904 +/- 0.115
1 cm	垂直	なし	3.137 +/- 0.047
1 cm	X (垂直)	白色	28.74 +/- 0.08
	Z (平行)		29.56 +/- 0.12

} SuperFGD  
シンチレータ

- 平行だと光量が大きい → ファイバーに直接入る光が多くなる
- 2 cmだと光量大きい → Path length? 個体差?
- 銀色だと光量大きい → 反射材の反射率が大きい
- 反射材なしだと光量小さい
- SuperFGD用シンチレータより光量小さい  
→ 反射材の作り、ファイバー穴のくもり、経年劣化?

# 光量の位置依存性まとめ

サイズ	向き	反射材	減衰割合 (%/mm)
1 cm	垂直	白色	6.95 +/- 1.17
2 cm	垂直	白色	9.48 +/- 1.62
1 cm	垂直	銀色	4.64 +/- 0.87
1 cm	垂直	なし	6.93 +/- 1.18
1 cm	X (垂直)	白色	2.91 +/- 0.57

} SuperFGD  
シンチレータ

- 2 cmでは減衰大 → キューブ自体のくもり？
- 銀色反射材では一様性が改善
- 反射材なしでは変わらず
- SuperFGDシンチより一様性が悪い → キューブ自体のくもり、そもそも減衰長が違う？