

# 国際リニアコライダー用ハドロンカロリメータ の最適な精細度に関する研究

Study on Optimal Granularity for Hadron Calorimeter of  
International Linear Collider

東京大学理学系研究科物理学専攻  
大谷研究室 修士2年

辻直希

# 目次

- 研究背景
  - 国際リニアコライダー(ILC)計画
  - Analogue Hadron CALorimeter (AHCAL)
  - 精細度の最適化
- 大サイズのシンチレータタイルを用いた検出層HBUの開発
  - タイルサイズの検出光量への影響の調査
  - 大サイズシンチレータタイルを用いた検出層HBUの開発
  - 大サイズシンチレータタイルを用いた検出層HBUの動作試験
- AHCAL大型試作機におけるテストビーム実験
  - CERN SPSにおけるテストビーム実験
  - 大サイズシンチレータタイルを用いた検出層HBUの性能評価
  - AHCAL大型試作機を用いた精細度の評価
- 結論と今後の展望

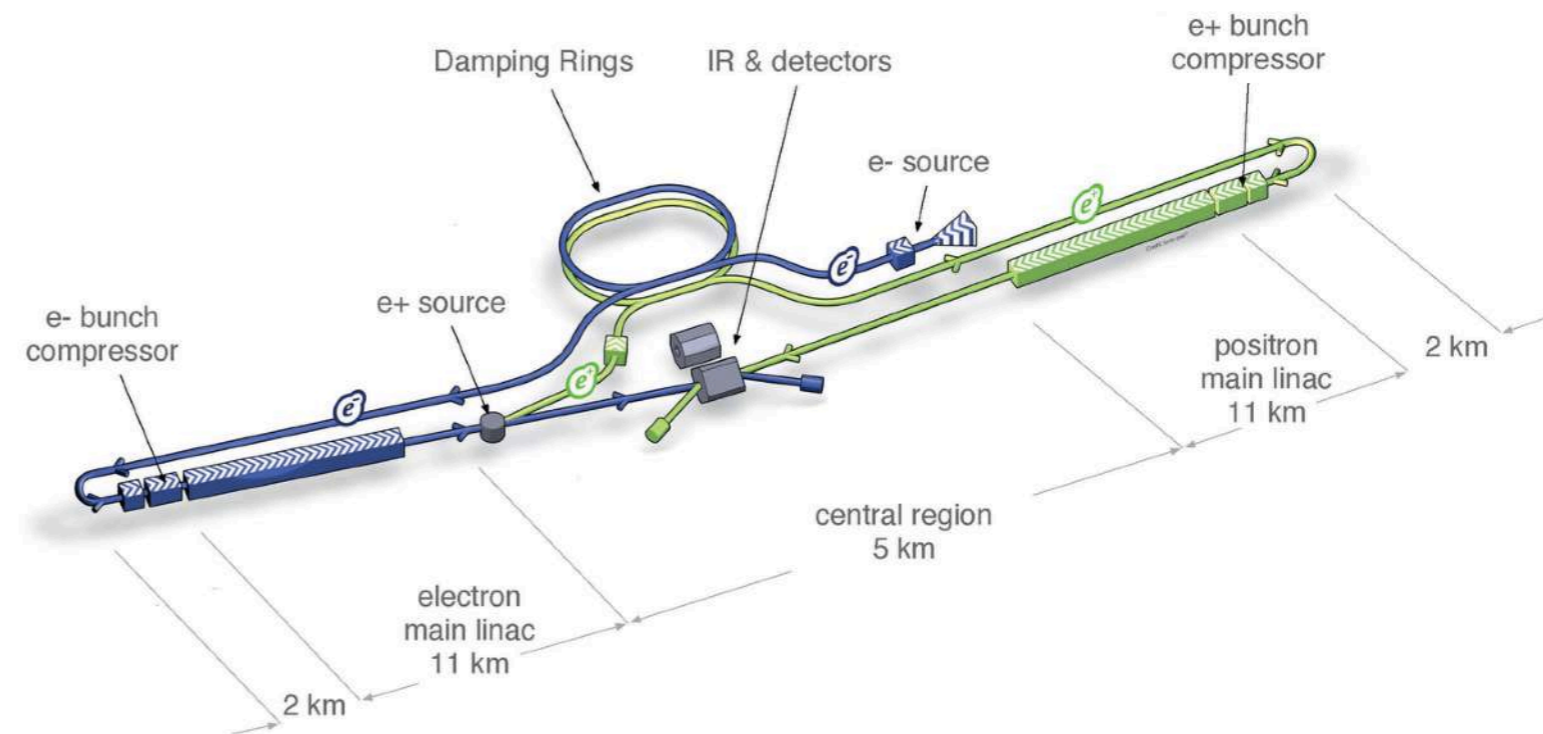
# 目次

- 研究背景
  - 国際リニアコライダー(ILC)計画
  - Analogue Hadron CALorimeter (AHCAL)
  - 精細度の最適化
- 大サイズのシンチレータタイルを用いた検出層HBUの開発
  - タイルサイズの検出光量への影響の調査
  - 大サイズシンチレータタイルを用いた検出層HBUの開発
  - 大サイズシンチレータタイルを用いた検出層HBUの動作試験
- AHCAL大型試作機におけるテストビーム実験
  - CERN SPSにおけるテストビーム実験
  - 大サイズシンチレータタイルを用いた検出層HBUの性能評価
  - AHCAL大型試作機を用いた精細度の評価
- 結論と今後の展望

# 国際リニアコライダー計画

- International Linear Collider (ILC)
  - 電子陽電子衝突型加速器
    - 内部構造を持たないレプトン
    - バックグラウンドが少ない → 精密測定が可能
  - 重心エネルギー : 250 ~ 500 GeV
    - 初期計画 : 250 GeV
    - 加速部分を伸ばしてTeVスケールまで拡張可

- 新物理の探索
  - Higgs粒子の精密測定
  - トップクォークの精密測定
  - 暗黒物質の探索



ILC Scheme | © www.forn-one.de

ILC加速器・測定器の外観(500 GeV)

# Particle Flow Algorithm (PFA)

● ILCのジェットエネルギー分解能の目標値： $\sigma_E/E = 30\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$

● 従来の手法

- ECALとHCALのエネルギー和
- 72%のエネルギーをHCALで測定
  - 荷電ハドロン62%中性ハドロン10%
- HCALの典型的な分解能

$$\sigma_E/E = 55\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$$

● PFA

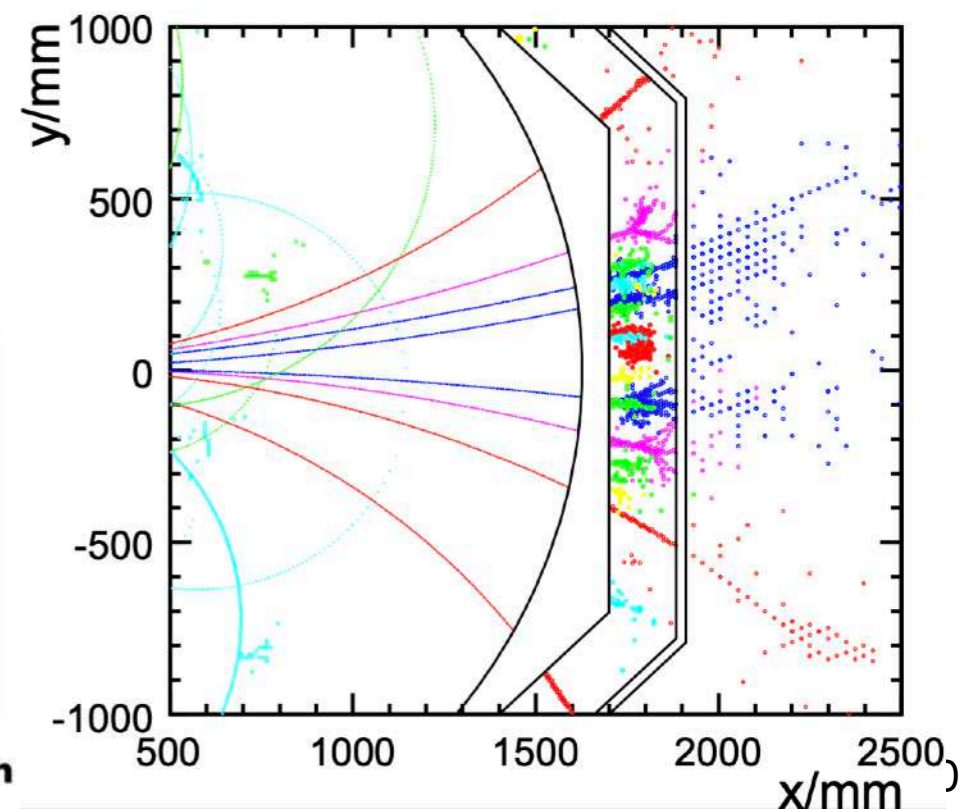
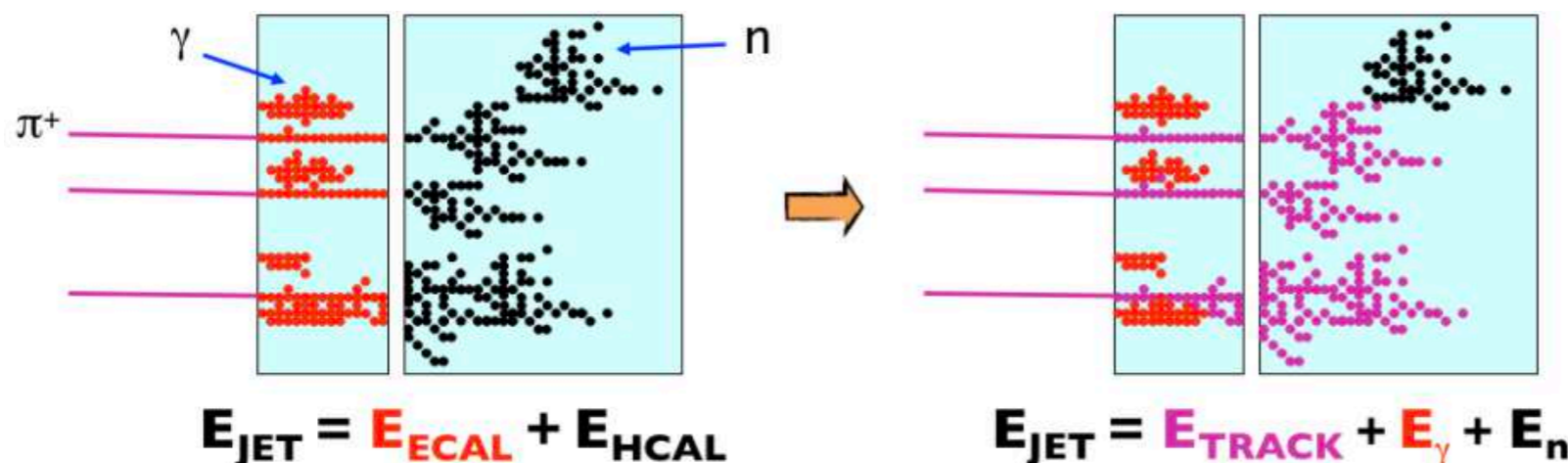
● **ジェット中の1つ1つの粒子を識別し、それぞれ最も適した検出器で測定する。**

- 荷電粒子 → 内部トラッカー
- 光子 → ECAL
- 中性ハドロン → HCAL

● ジェットエネルギー分解能を大幅に向上

● 荷電粒子と中性ハドロンを精度よく分離することが重要

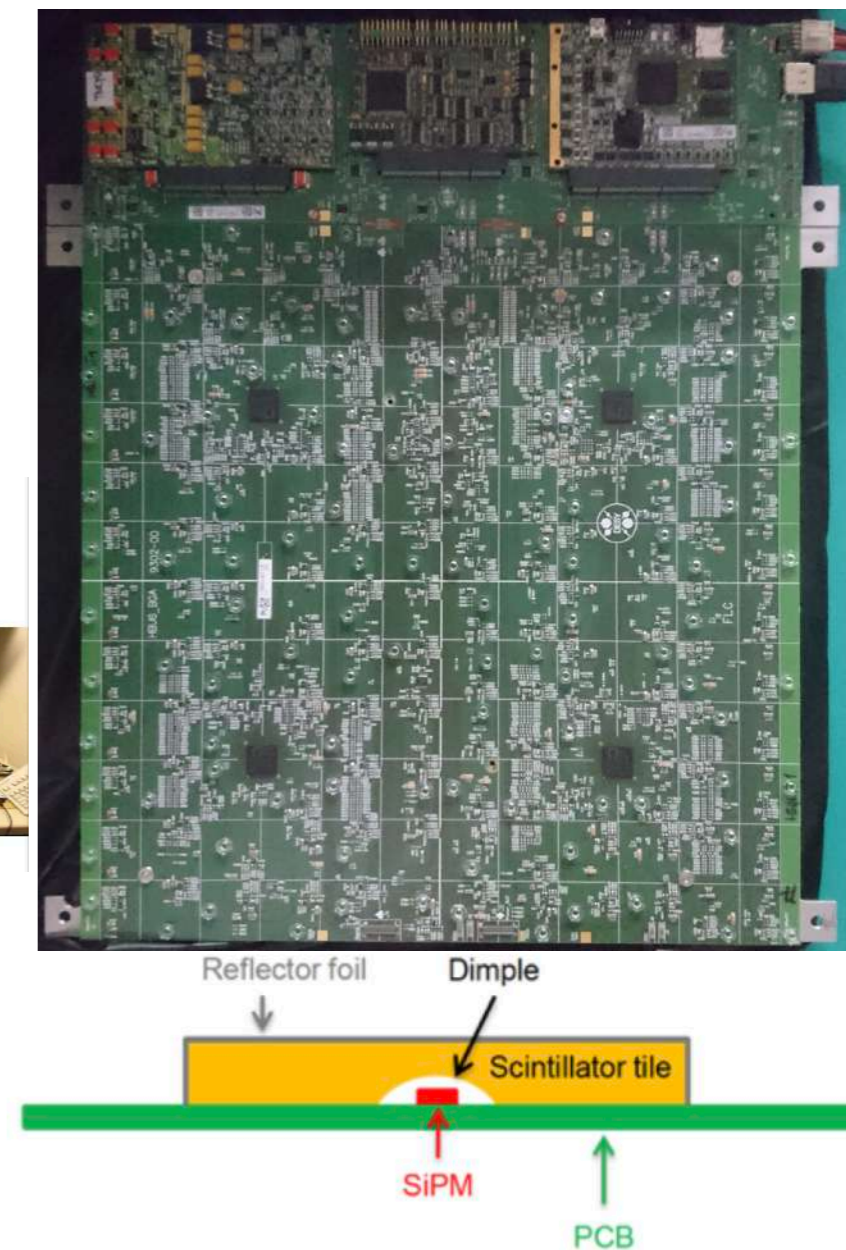
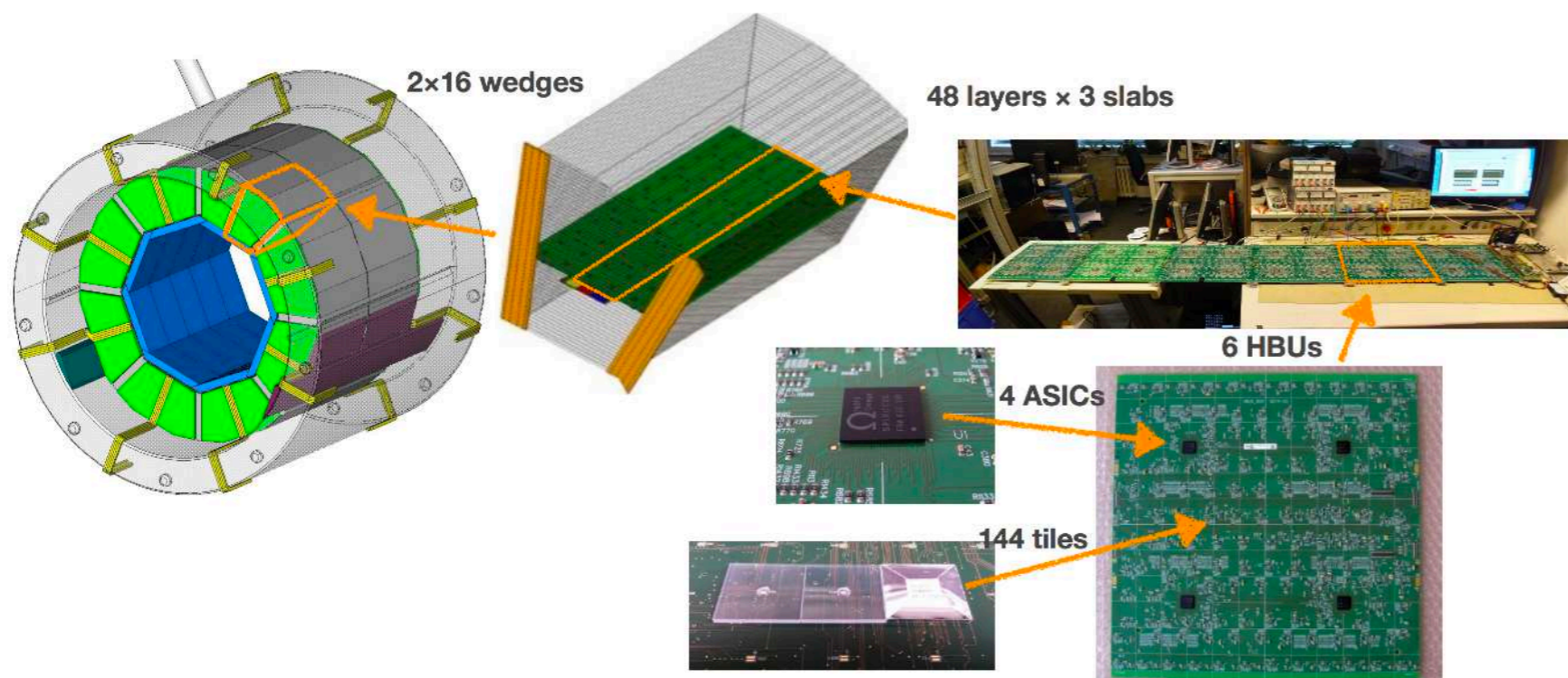
● **高精細なカロリメータが必要**





# Analogue Hadron CALorimeter (AHCAL)

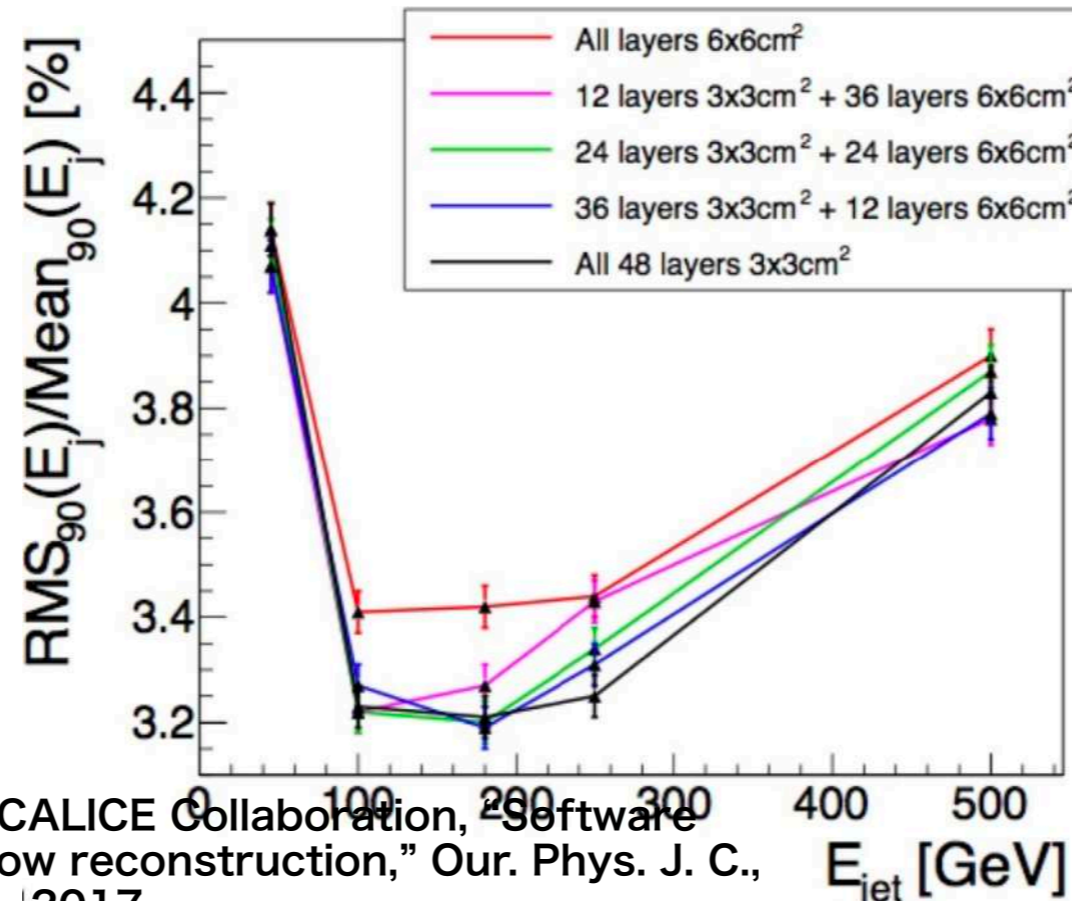
- サンプリング型ハドロンカロリメータ
  - 48層の鉄またはタングステンの吸収層、48層のシンチレータ検出層
  - 30 mm×30 mm×3 mmの有機プラスチックシンチレータタイルを有感領域 1.3 mm×1.3 mmの半導体光検出器Silicon PhotoMultiplier(SiPM)で読み出す
  - 全体で800万の読み出しチャンネル
- MPPC読み出し基板HCAL Base Unit (HBU)
  - 検出層に統合されたエレクトロニクス
  - 4枚のSilicon Photomultiplier Integrated Chip 2し、144個のSiPMを制御可能



## AHCAL精細度の最適化

- ILC検出器設計案を完成させるため、各測定要素の設計の最適化が行われている。
- AHCALの精細度の最適化が行われている。
- **検出層ごとにタイルサイズを変え異なる精細度を混合した設計**
  - 60mm角タイルを採用した場合、チャンネル数・ASICの個数を1/4に削減可
- 先行研究では、外側半分(24層)の検出層の30mm角タイルを60mm角タイルに置き換えても、AHCAL全体の性能を維持できることが分かった。
  - しかし、30mm角より大きなタイルに関しては十分に実験・検証されていない。

精細度をミックスした場合のシミュレーション結果



横軸がジェットのエネルギー  
縦軸がジェットのエネルギー分解能



# 目次

- 研究背景
  - 国際リニアコライダー(ILC)計画
  - Analogue Hadron CALorimeter (AHCAL)
  - 精細度の最適化
- 大サイズのシンチレータタイルを用いた検出層HBUの開発
  - タイルサイズの検出光量への影響の調査
  - 大サイズシンチレータタイルを用いた検出層HBUの開発
  - 大サイズシンチレータタイルを用いた検出層HBUの動作試験
- AHCAL大型試作機におけるテストビーム実験
  - CERN SPSにおけるテストビーム実験
  - 大サイズシンチレータタイルを用いた検出層HBUの性能評価
  - AHCAL大型試作機を用いた精細度の評価
- 結論と今後の展望



## タイルサイズの検出光量への影響の調査

● 30mm角と60mm角のシンチレータタイルを製作し、それぞれ光量・位置依存性を測定した。

● 検出光量の位置によるばらつき(RMS)は30mm角タイルと比べても十分小さい

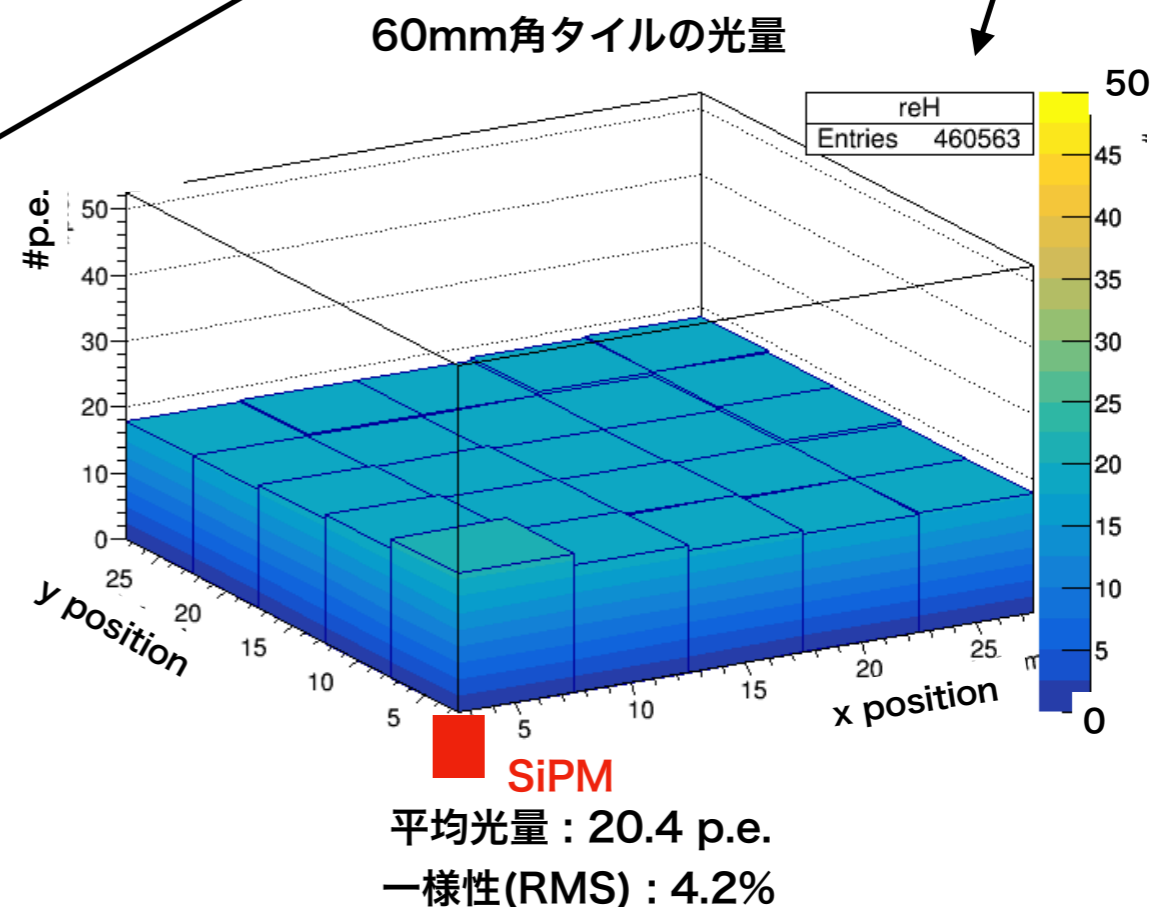
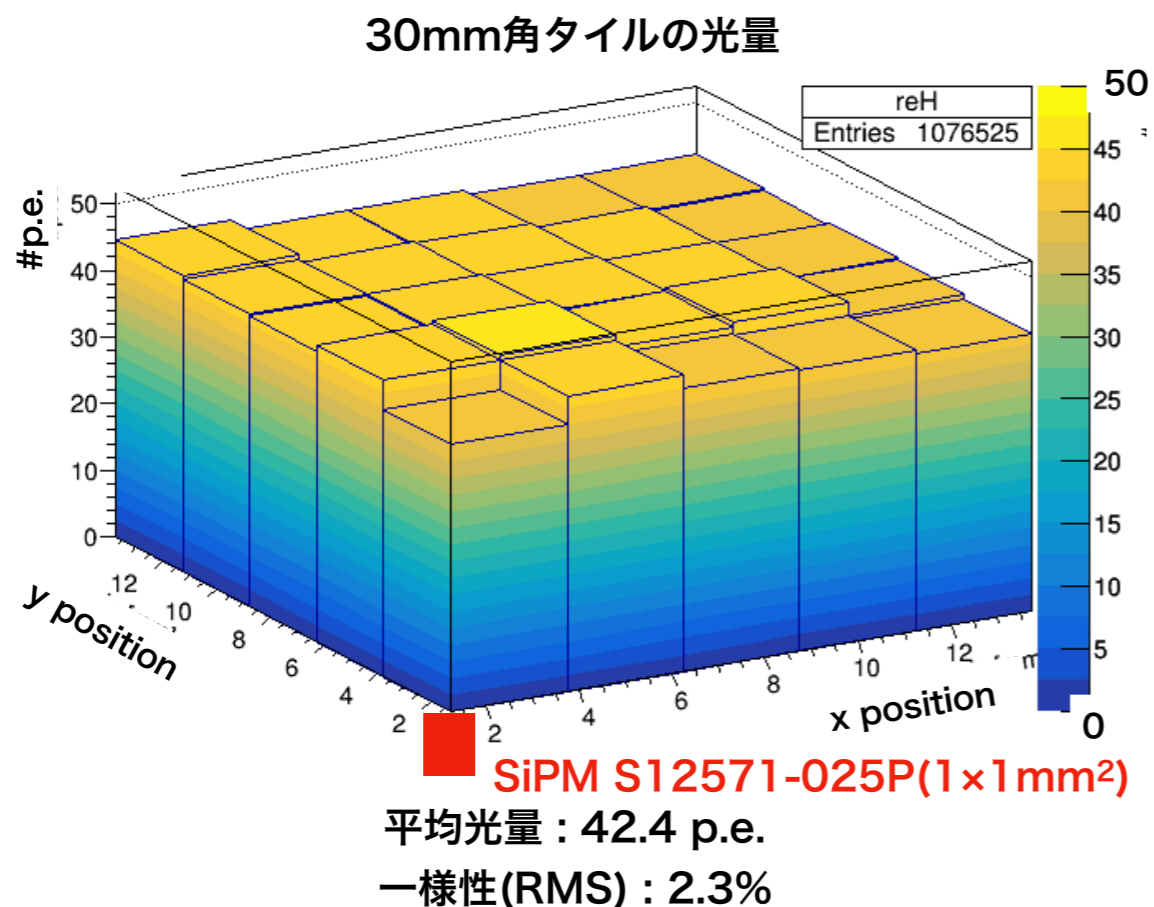
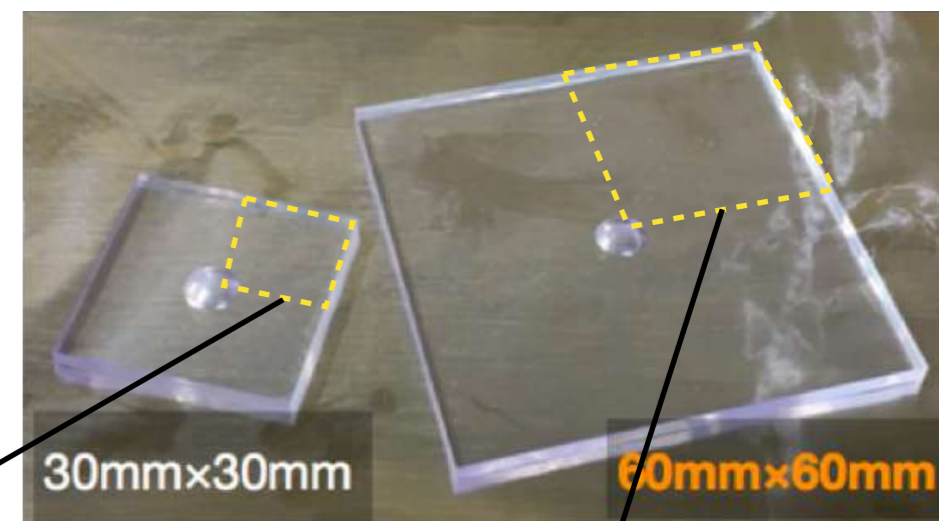
● 非常に良いタイル応答の一様性

● 60mm角タイルの光量は30mm角タイルに比べて52%減少

● 集光率の悪化が原因

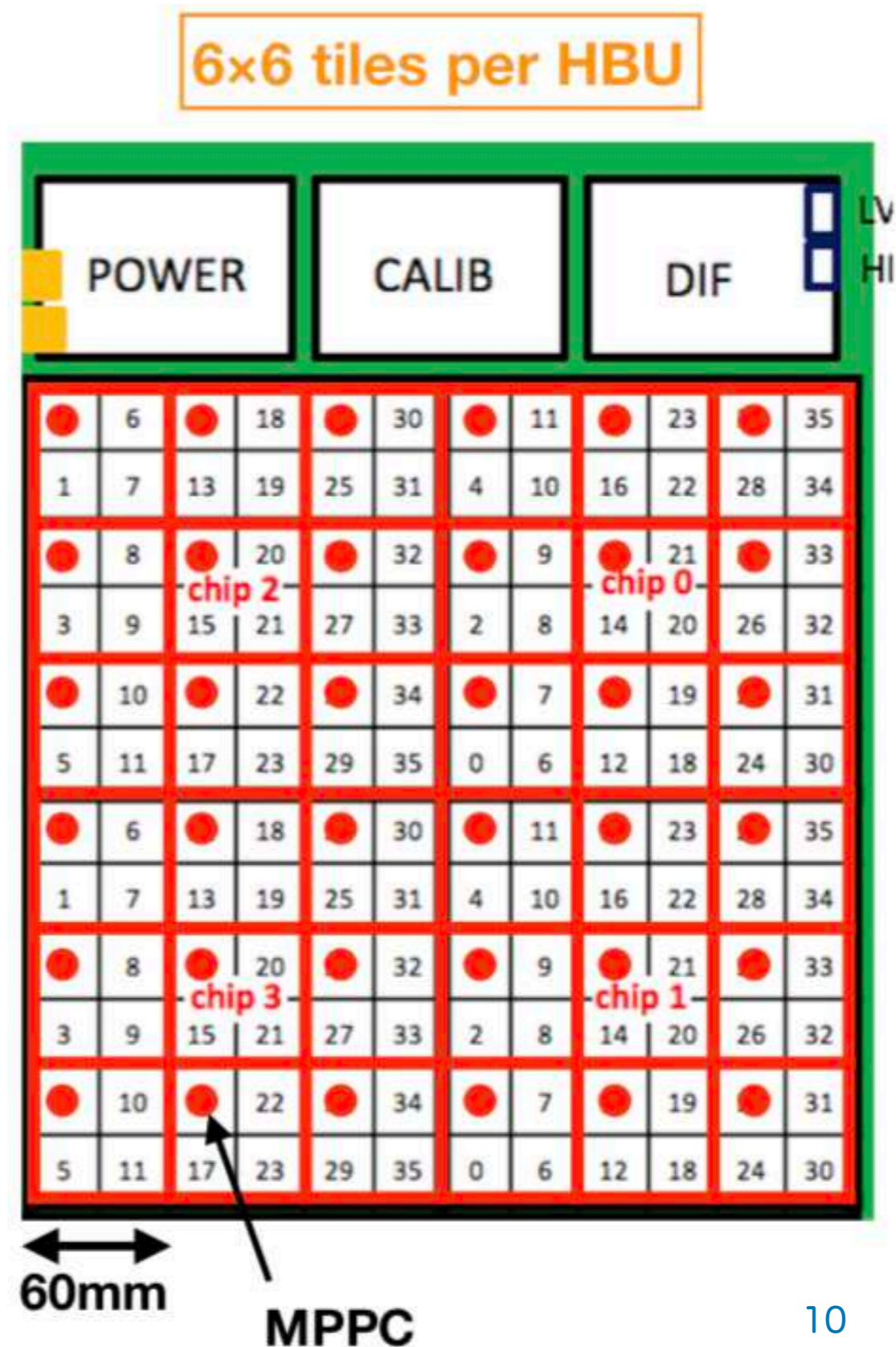
● MPPCの有感領域を大きくすることで改善可能

EJ-212(キャスト成形)を使用



## 大サイズシンチレータタイルを用いた検出層HBUの開発

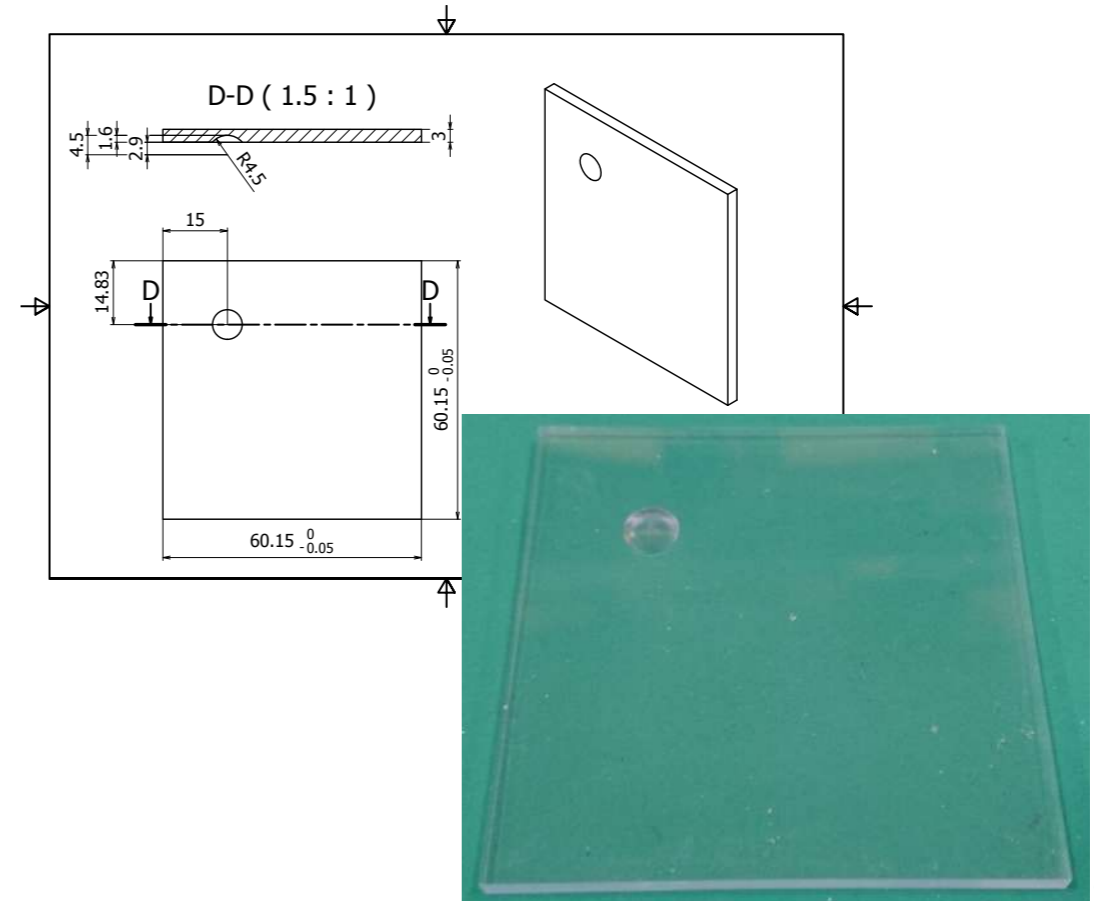
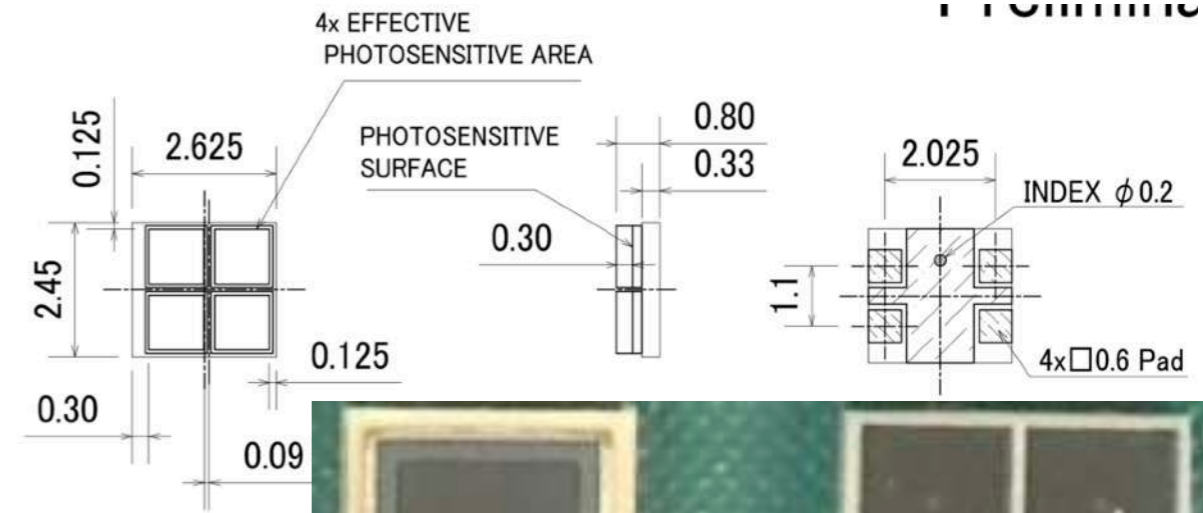
- 30mm角タイルの代わりに60mm角タイルを用いた検出層HBUを製作した。
- デザイン
  - 標準の30mm角タイル用HBU(HBU6)を使用
  - 30mm角タイル4枚分のスペースに60mm角タイル1枚を置く
    - タイル中心からずれた位置でMPPC読み出し
    - 光量の一様性に問題がないことは検証済み
  - 光量補正のためにMPPCの有感領域を、通常の1.3mm角から2mm角に変更
  - リフレクターは標準のHBUと同じデザイン
  - 手作業でアセンブリ
- 144枚の60mm角タイルを使って4枚のHBUを製作
- 将来的には60mm角タイルに最適化したHBUを製作予定



# MPPC、タイル

Hamamatsu Photonics K.K.

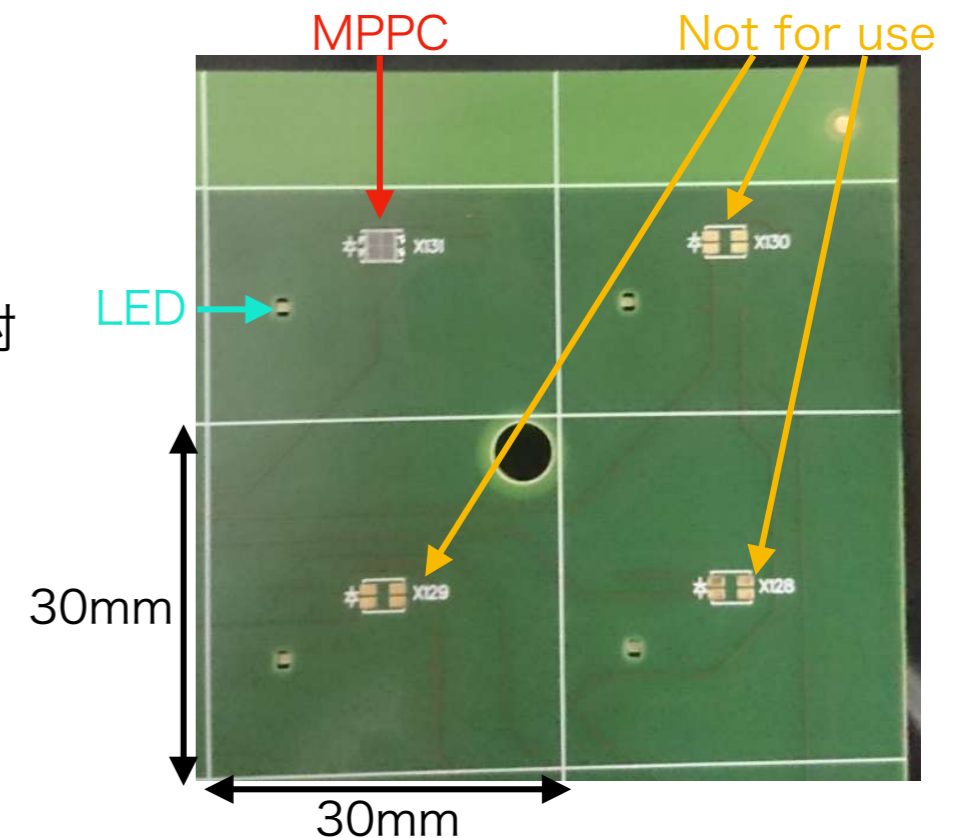
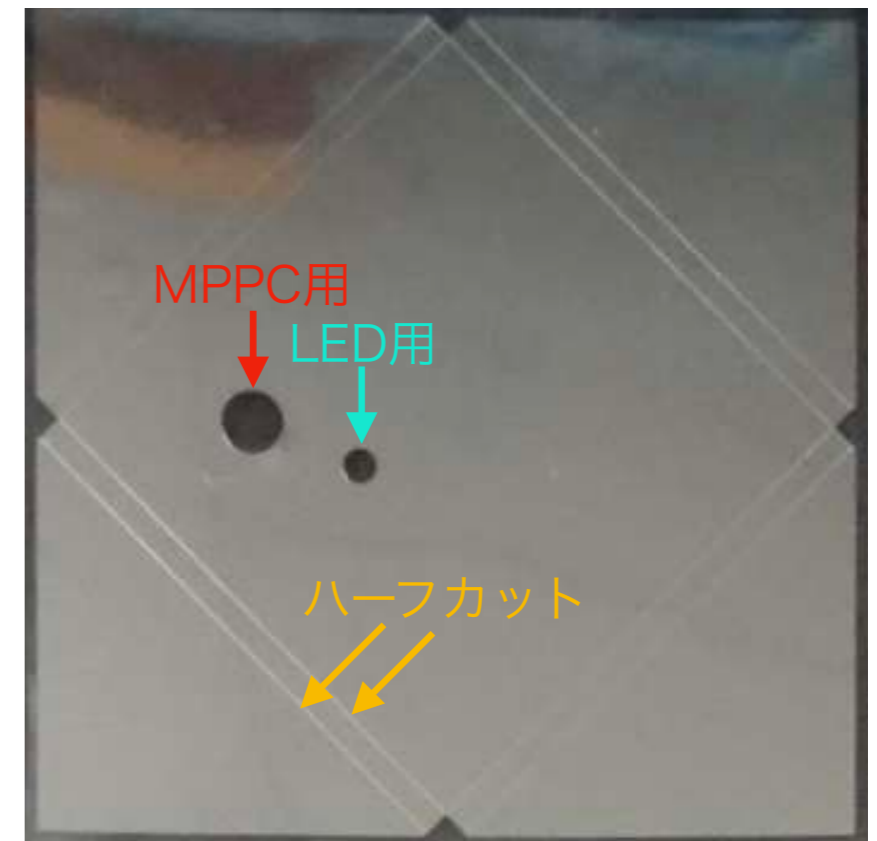
- 浜松ホトニクスに依頼して、有感領域2mm角、ピクセルピッチ25 $\mu$ mのMPPCを製作
  - 標準の1.3mm角MPPC(S13615-1325PE)と同じ特性を持つ、有感領域1mm角、ピクセルピッチ25 $\mu$ mのMPPC(S13615-1025)を4つ並列接続
  - Through Silicon Via (TSV)技術により、標準のS13615-1325PEとほぼ同じパッケージサイズ
- 2mm角MPPCは1.3mm角MPPCに比べて、2.4倍の光量増加が期待できる。
- 大量生産に適した射出成形により、シンチレータタイルを製作
  - (p-Terphenyl, POPOP) = (3%, 0.1%)
  - PSベースのシンチレータの光量は、PVTベースのシンチレータの約70%





## 反射材、配置

- 標準の30mm角タイルと同じ3M社のESRフィルムを使用
- 30mm角タイルと同様の構造
- レーザー加工
  - 折り曲げる部分はハーフカット
- 手作業でタイルにラッピング
- 4箇所のうち1箇所のパッドにMPPPCを半田付け
  - MPPPCのパッケージサイズがほぼ同じため、そのまま半田付け可能
- キャリブレーション用のLEDはMPPPCに最も近いものを使用
- LEDの位置がチャンネル毎に異なるので、それに合わせて反射材の穴の位置、タイルのアセンブリを調整





# アセンブリ

HBUの大きさに合わせてアクリルのフレームを製作



60mm角タイルを6×6枚整列



接着剤をドット状に塗布



HBUを置き、その上にプレートを置く  
(HBU上にスペーサーが置いてある)

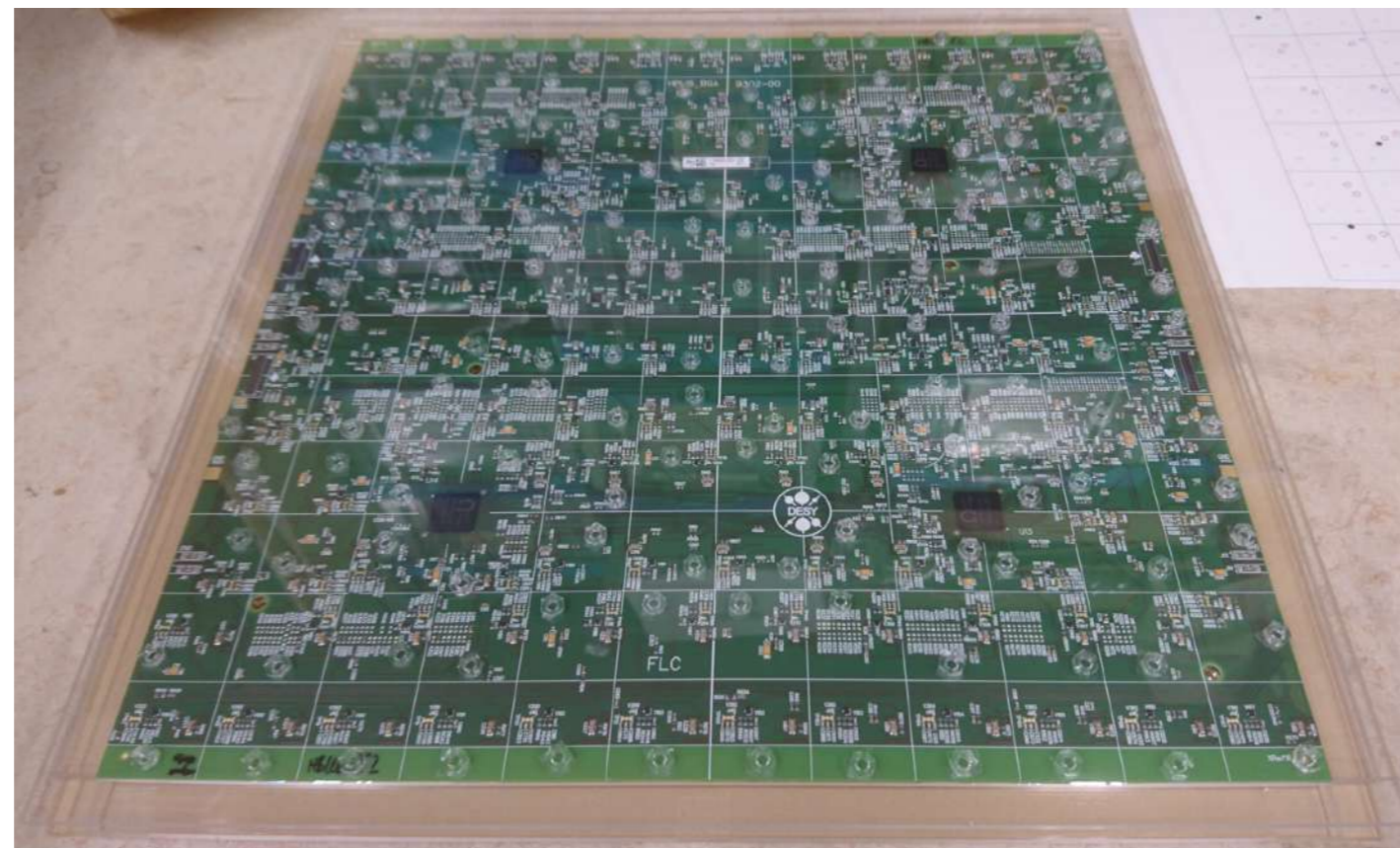


重しを置き、固まるまで安置





## 完成した60mm角タイルを用いたHBU



表面



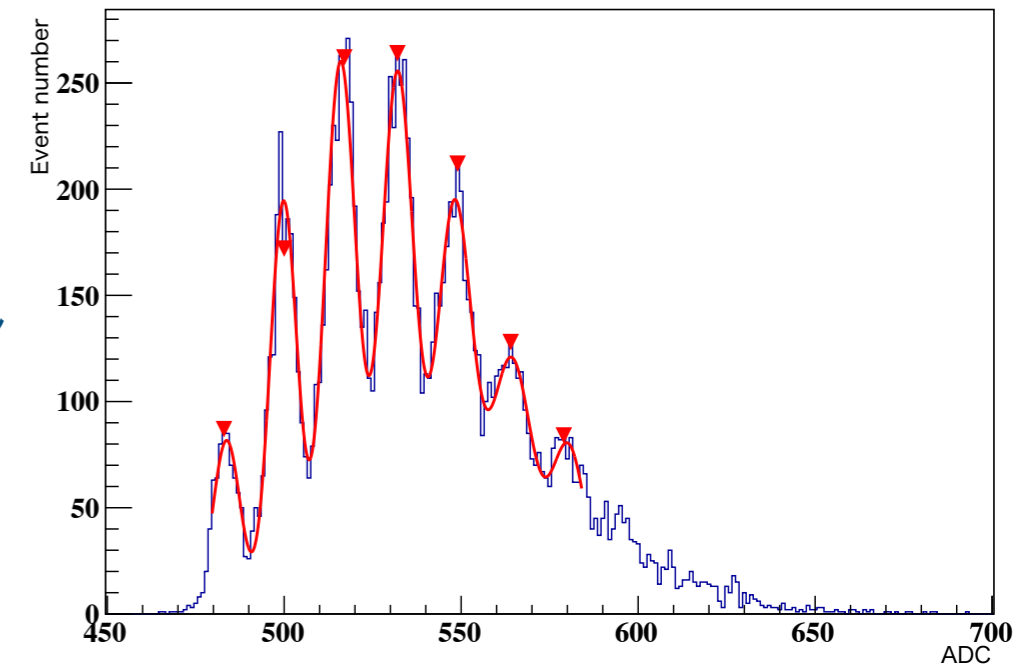
裏面



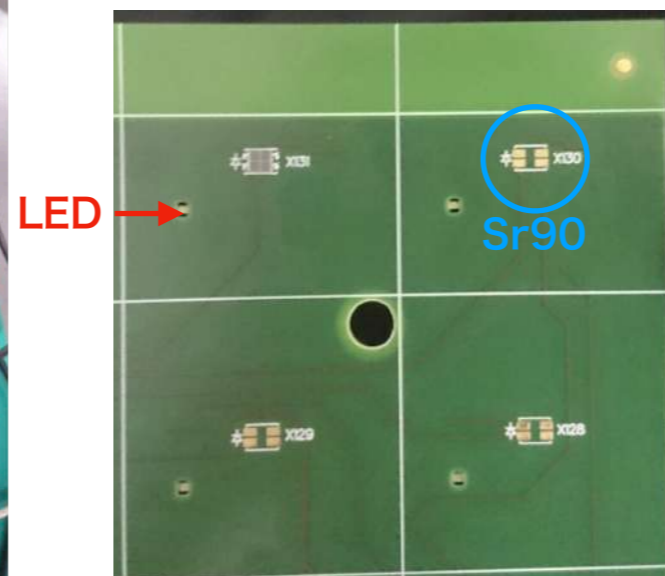
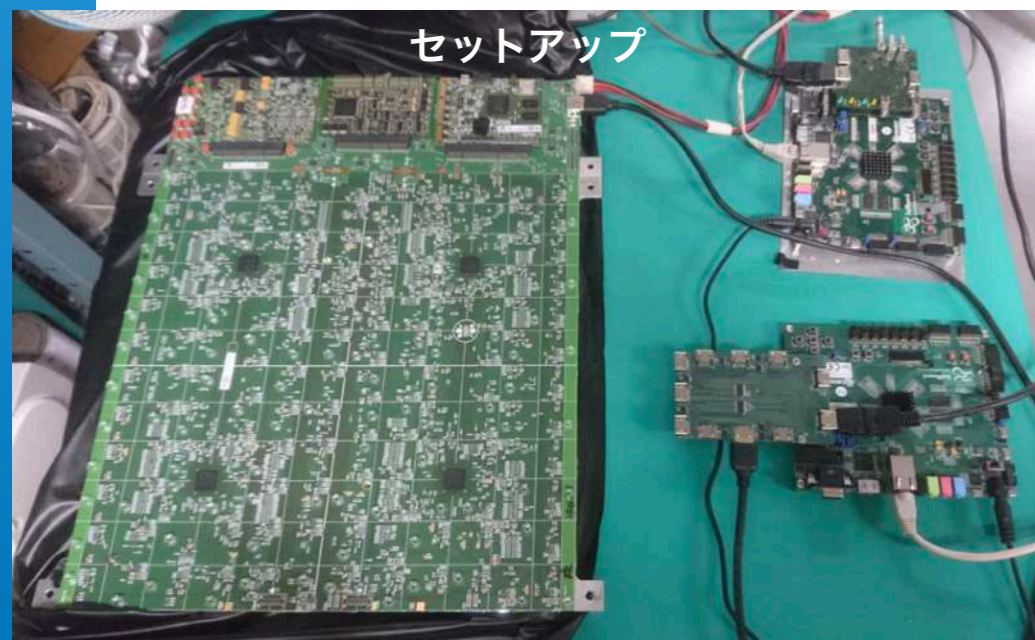
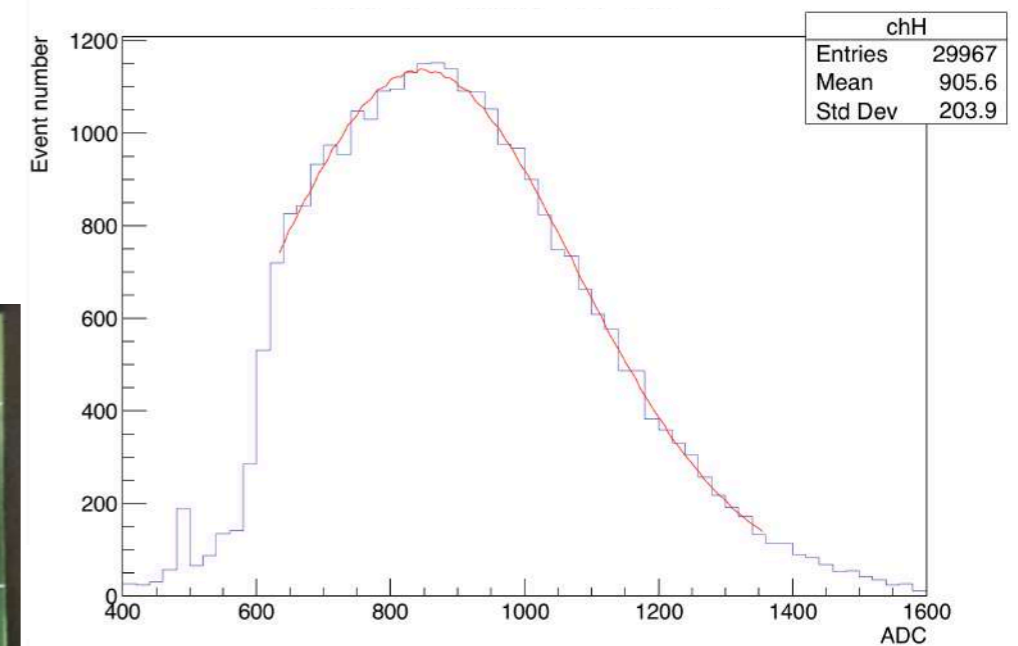
## HBUの動作試験

- ゲインキャリブレーション
  - MPPCのオーバー電圧は全チャンネル共通で5 Vに設定
  - HBU搭載のLEDを使用
  - 最適な電圧値で見られる数光電子分のピークをマルチガウシアンでフィット
- MIPキャリブレーション
  - $^{90}\text{Sr}$ をMPPCの直上から30mm離れた位置に置く
    - $^{90}\text{Sr}$ 由来の $\beta$ 線はMIPとは異なる。
    - $^{90}\text{Sr}$ のピーク値を83%したものがMIPに相当
  - ランダウ関数にガウス関数を畳み込んだ関数でフィットし、ピーク値をゲインで割ったものをタイルの光量とした。

ゲイン測定用のLEDデータの電荷分布の例

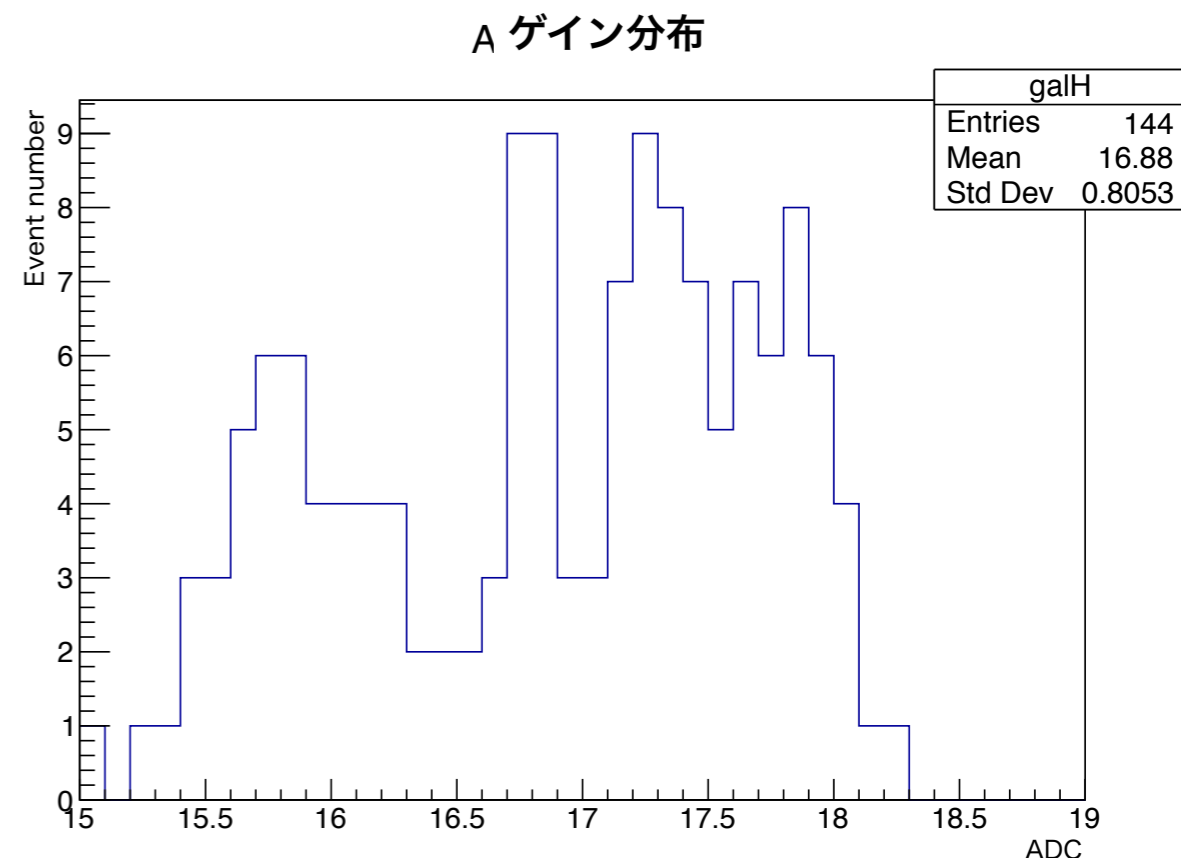
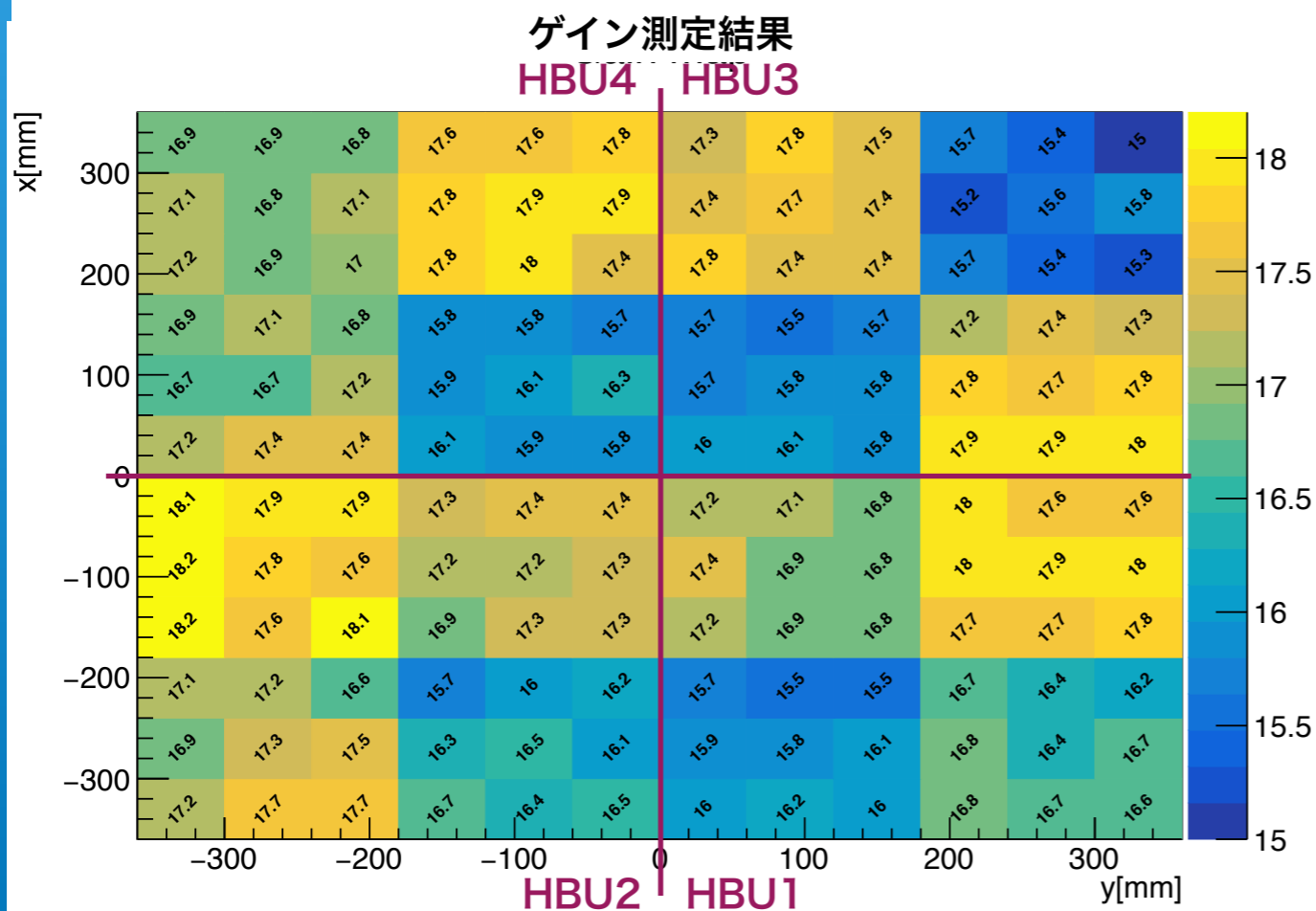


Sr照射時の電荷分布の例



# ゲインキャリブレーション

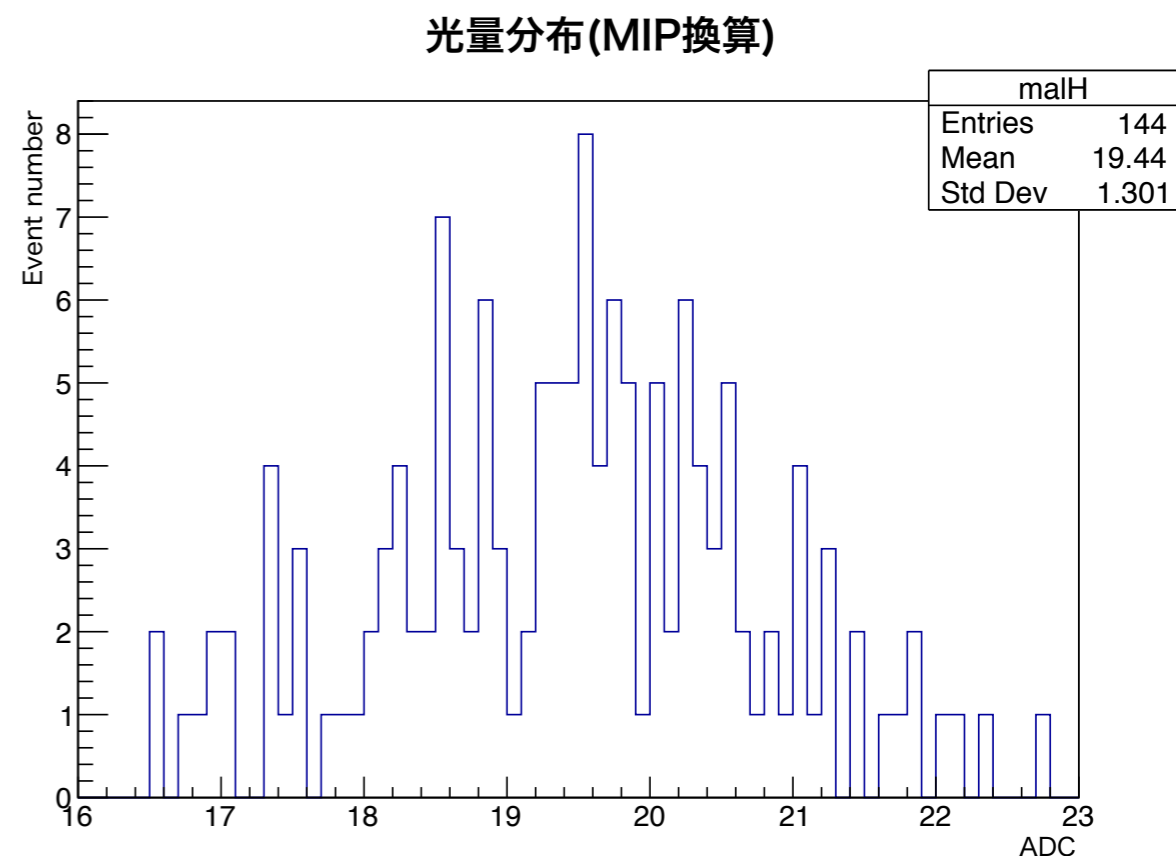
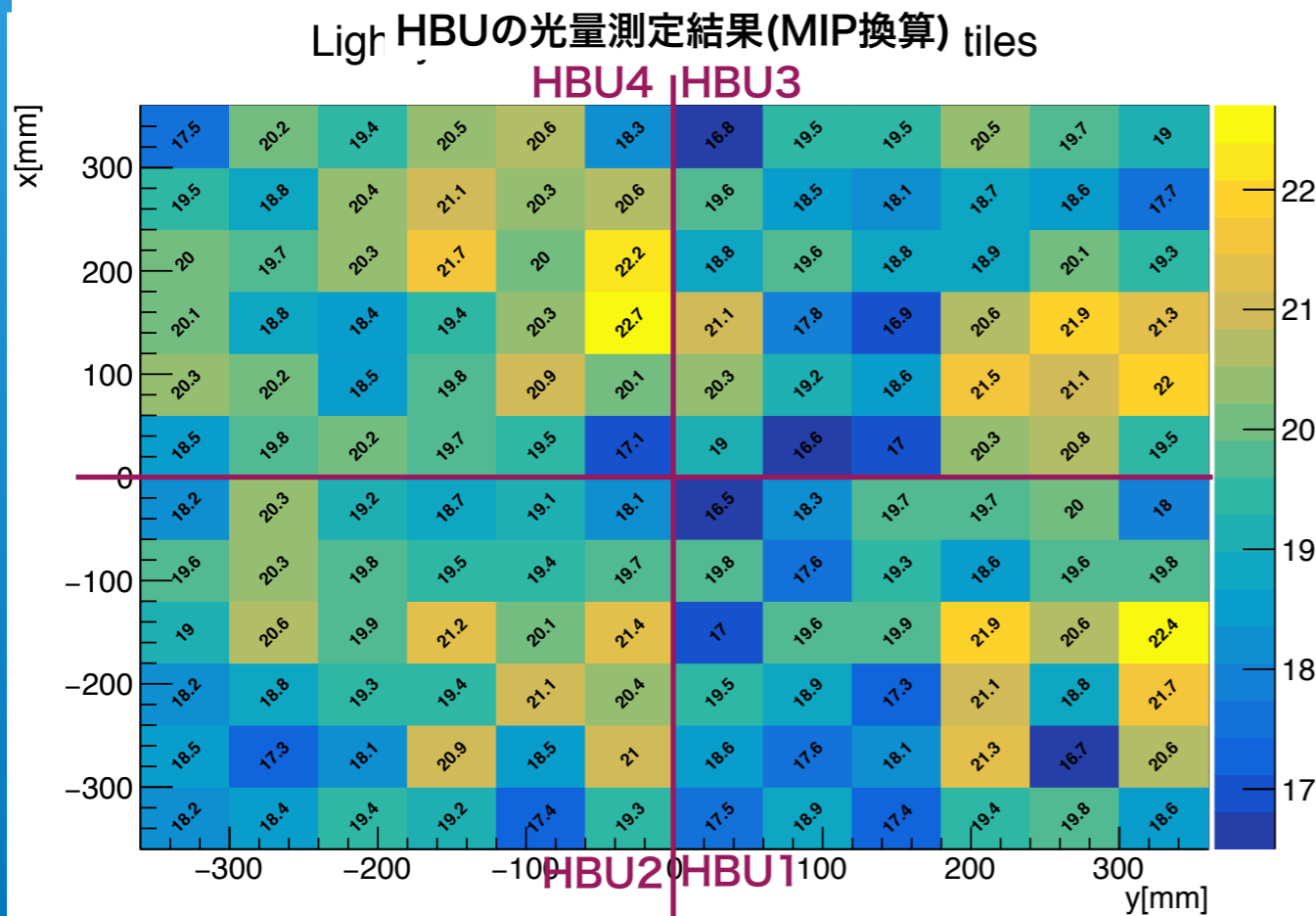
- **平均16.9 ADC counts**
  - 15~20 ADC countsの範囲で分布
  - 通常の30mm角HBUでのゲインが15 ADC countsほどなので、十分良い値が得られている。
  - ASIC毎の個性が見られる。
    - 再構成の際に較正されるので問題ない。





# MIPキャリブレーション

- 平均19.4 p.e.
- 16~23 p.e.の範囲で分布
- 通常の30mm角タイルの光量が15 p.e.ほどなので、十分良い光量が得られている。
- 光量のばらつきも7%ほどで十分小さく、再構成の際に較正されるので問題ない。



# 目次

- 研究背景
  - 国際リニアコライダー(ILC)計画
  - Analogue Hadron CALorimeter (AHCAL)
  - 精細度の最適化
- 大サイズのシンチレータタイルを用いた検出層HBUの開発
  - タイルサイズの検出光量への影響の調査
  - 大サイズシンチレータタイルを用いた検出層HBUの開発
  - 大サイズシンチレータタイルを用いた検出層HBUの動作試験
- AHCAL大型試作機におけるテストビーム実験
  - CERN SPSにおけるテストビーム実験
  - 大サイズシンチレータタイルを用いた検出層HBUの性能評価
  - AHCAL大型試作機を用いた精細度の評価
- 結論と今後の展望

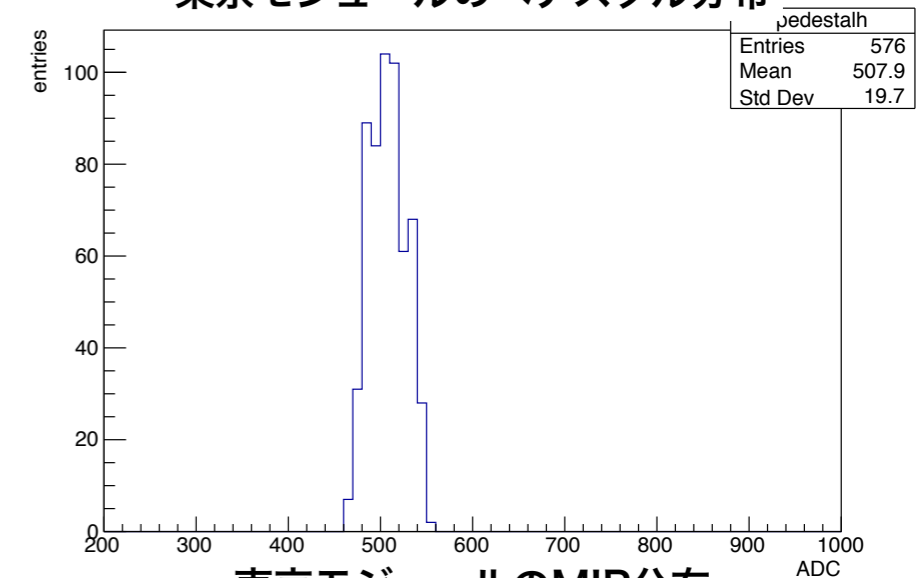
## 60mm角タイルを用いたHBUの挿入

- **60mm角タイルを用いた2×2枚のHBUが大型試作機に挿入された**
  - 6-7月のテストビーム実験のみ
  - 38層目に挿入
  - 東京モジュールと呼ばれ、以下この名称を使用する。
- 標準のHBUの1.3mm角MPPCのオーバー電圧は5 Vだが、サチュレーションを抑制するため、東京モジュールの2mm角MPPCのオーバー電圧は4 Vに設定
- その他の設定は標準の30mm角タイル用HBUと同じ

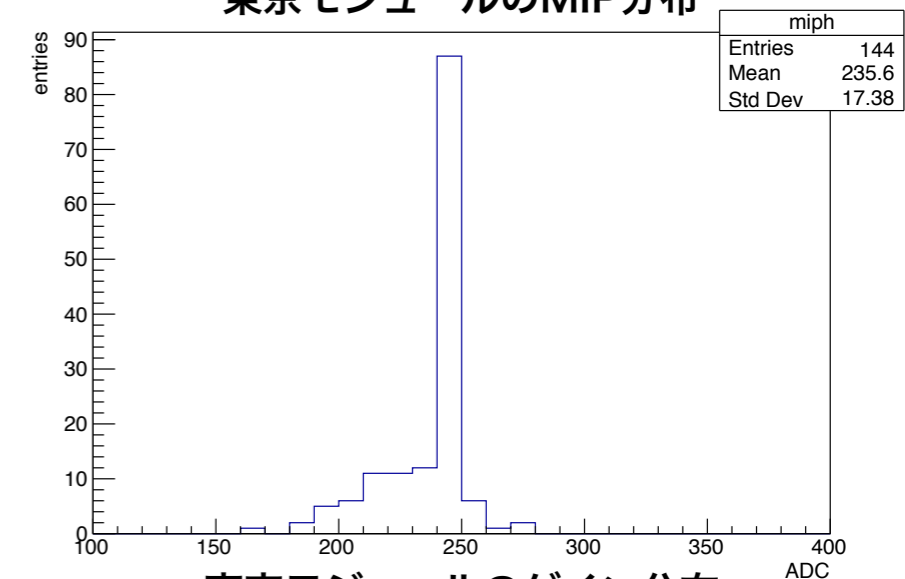


## 60mm角タイルを用いた検出層HBUの性能評価

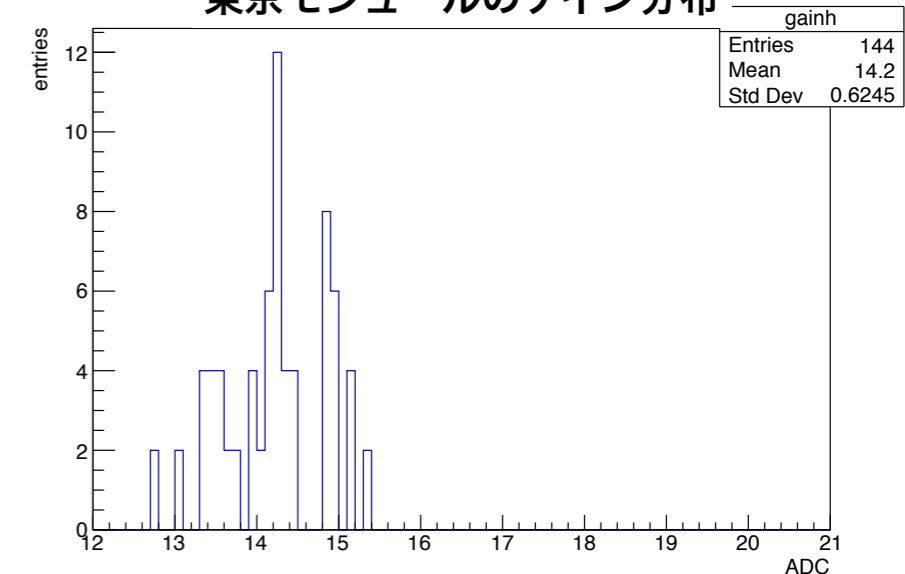
東京モジュールのペDESTAL分布



東京モジュールのMIP分布



東京モジュールのゲイン分布



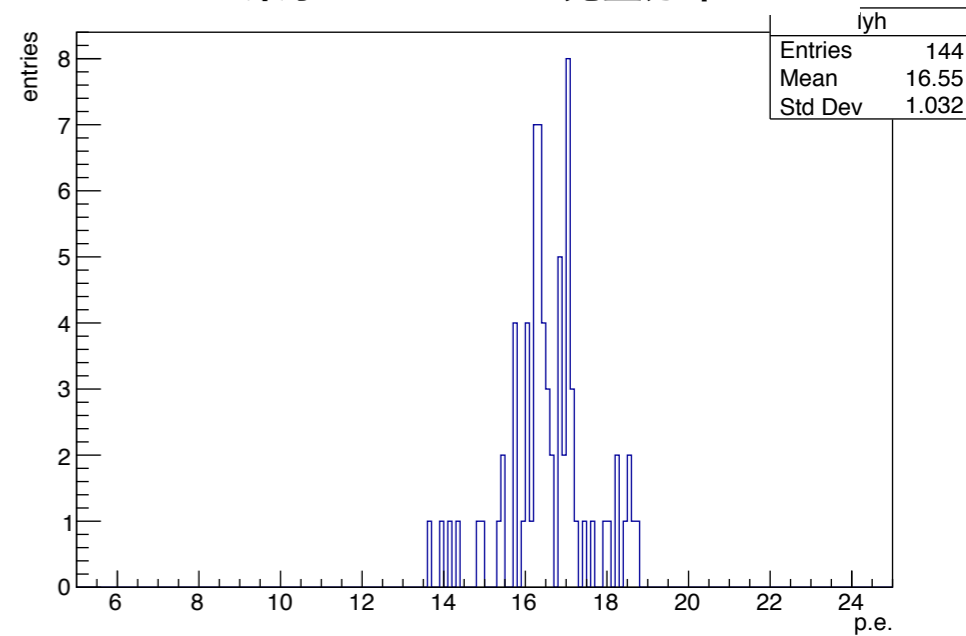
- ペDESTALキャリブレーション
  - 東京モジュール : 531.1 ADC
  - 試作機全体 : 507.9 ADC
- MIPキャリブレーション
  - ポジションスキャンしたミュオンイベントを使用
  - 東京モジュール : 235.6 ADC
  - 試作機全体 : 217.8 ADC
- ゲインキャリブレーション
  - 東京モジュール : 14.2 ADC
  - 試作機全体 : 16.6 ADC
- タイル・MPPCのサイズ等のデザインの違いやMPPCのオーバー電圧を下げたことから、東京モジュールと標準の30mm角タイルHBUに差異が見られる。
- 何にしても再構成の際に較正されるので問題にはならない。



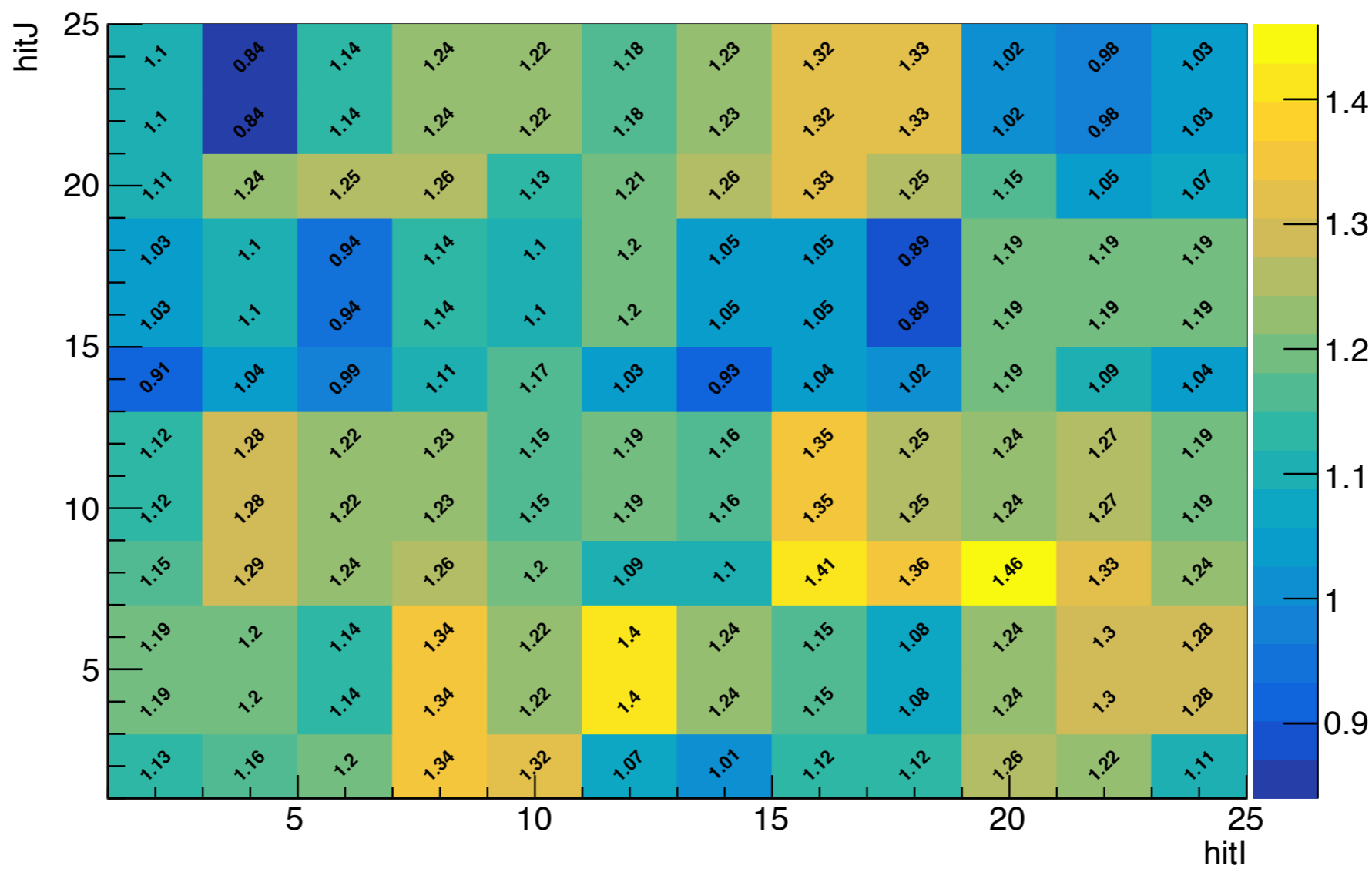
# 光量の比較

- 東京モジュール：平均16.6 p.e.
  - 試作機全体で平均13.5 p.e.なので、ほぼ同じ光量が得られた。
- **全チャンネル正常に動作しており、検出器として十分な光量が得られている。**

東京モジュールの光量分布

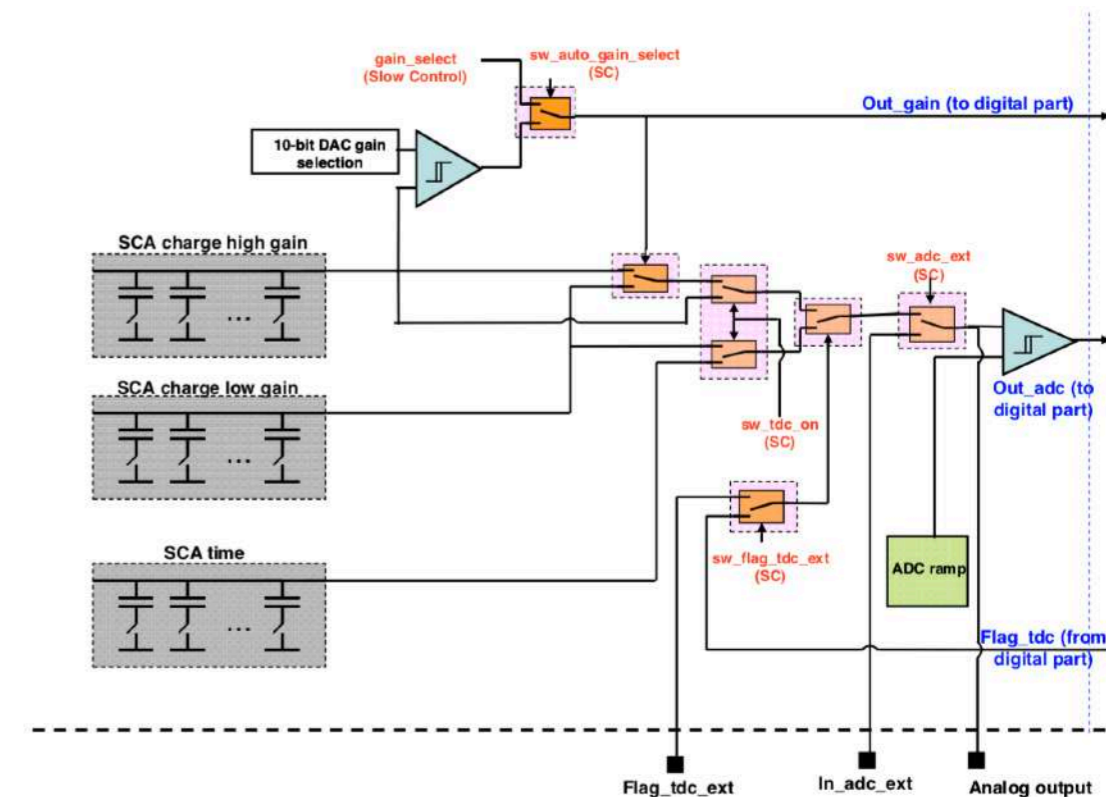
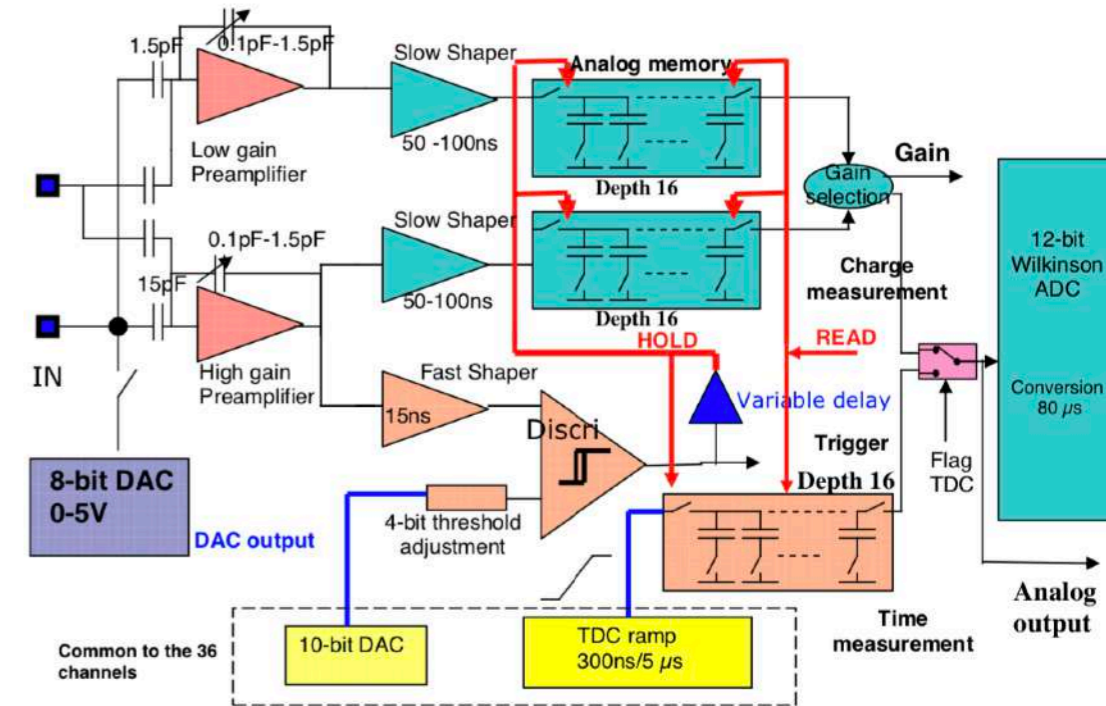


東京モジュールの光量比較



## サチュレーションの影響の調査

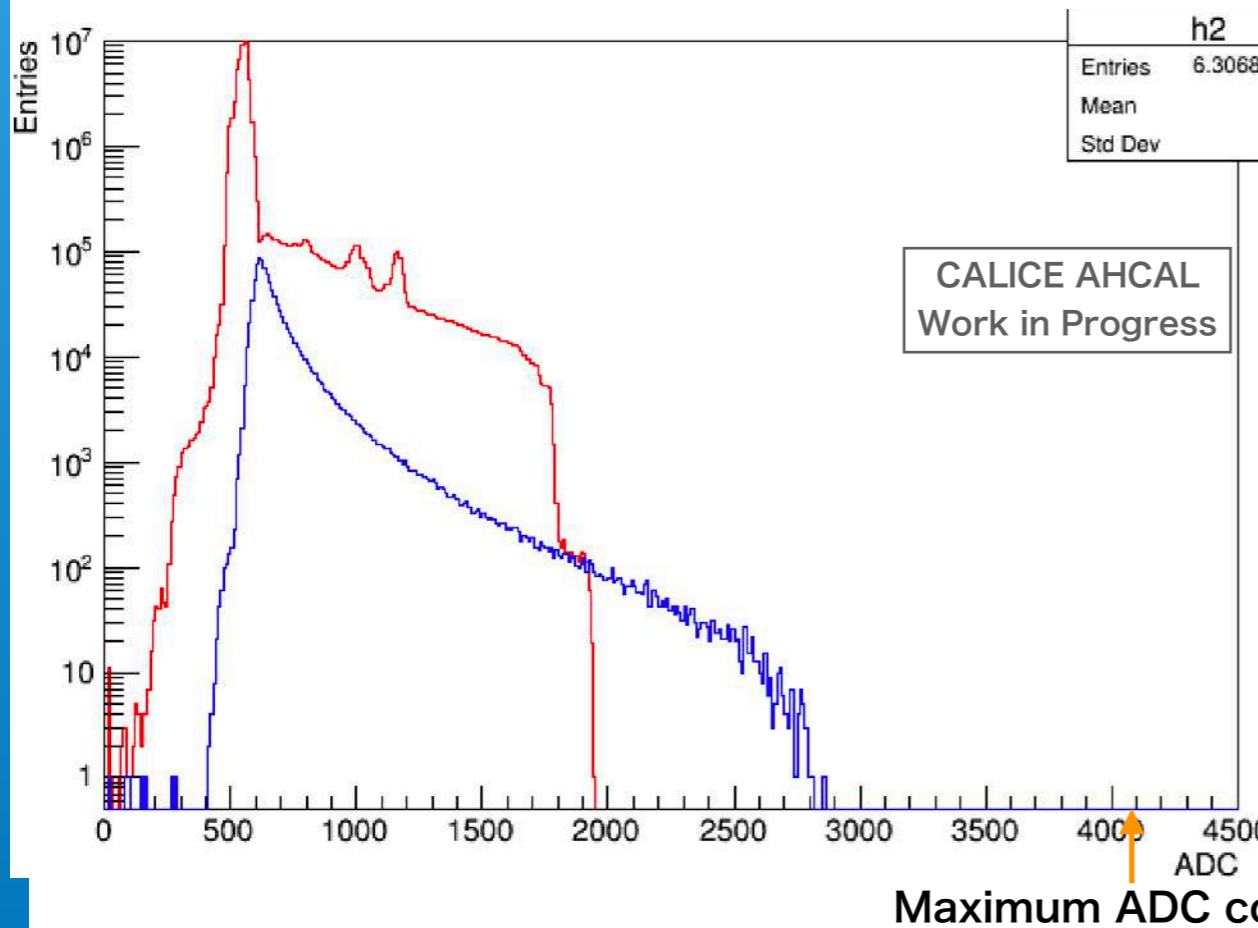
- 現在のエレキは30mm角タイルに最適化されている。
- 60mm角タイルはサチュレーションを起こす可能性がある。
- MPPCサチュレーション
  - 1.3mm角MPPC : 2700 pixels ↔  
2mm角MPPC : 6400 pixels
  - 1 MIP当たりの光電子数は同じだが、タイルサイズの違いによりヒット数は最大で4倍になる。
  - よってサチュレーションが起きやすい
- ADCサチュレーション
  - SPIROC2Eは低ゲインと高ゲインの2つの増幅器を持つ
  - 小さい信号は高ゲインで大きく増幅、大きい信号は低ゲインで小さく増幅
  - 12 bit ADC : 0 ~ 4095 ADC counts
  - サチュレーションが起こると0を出力



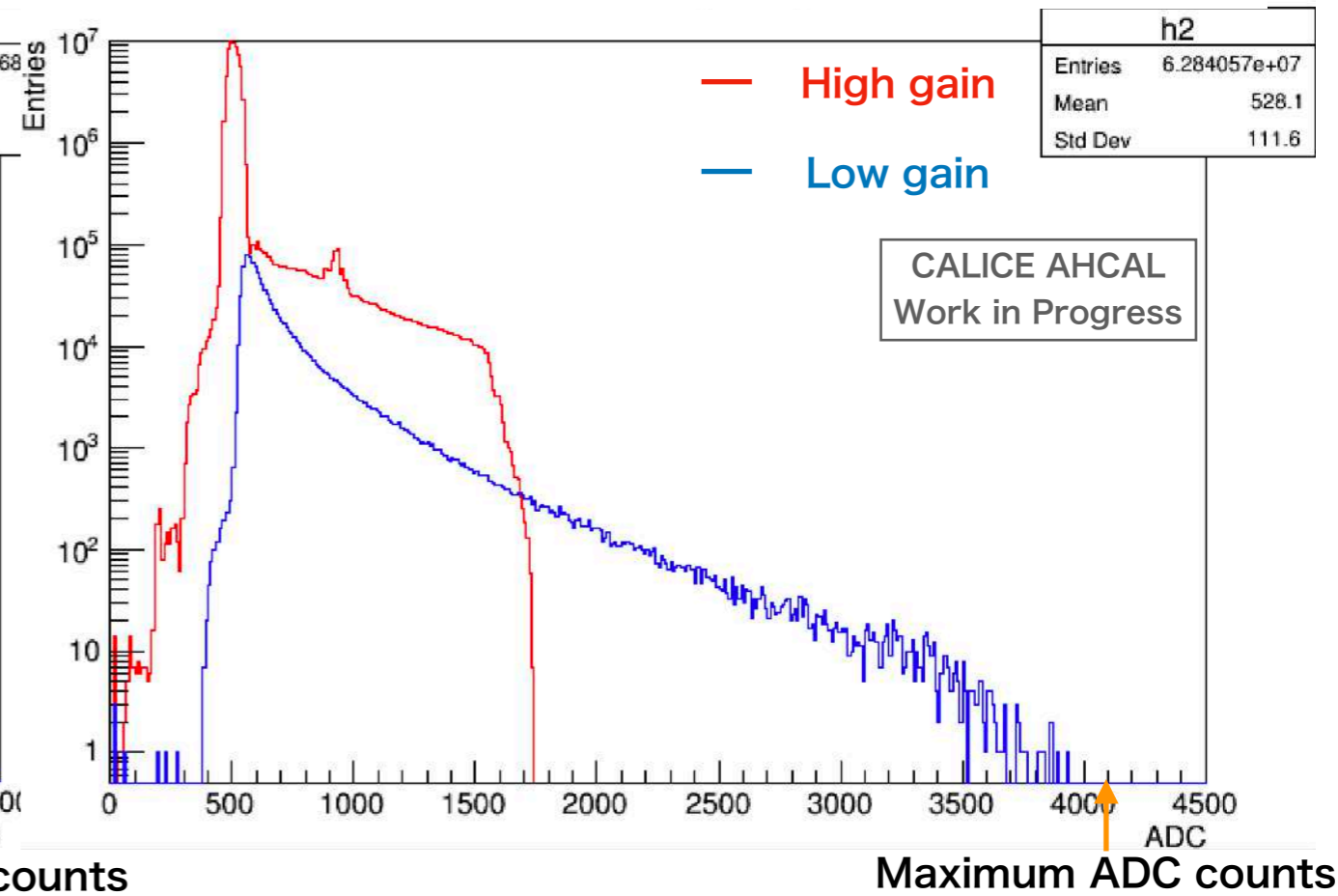
## 層ごとのADC分布(パイオン200 GeV)

- 東京モジュールは高いADC値を持ったイベントが多い。
  - 1タイル当たりのヒット数が多いため
- サチュレーションは起こっていない。

37層目の標準HBUのADC分布



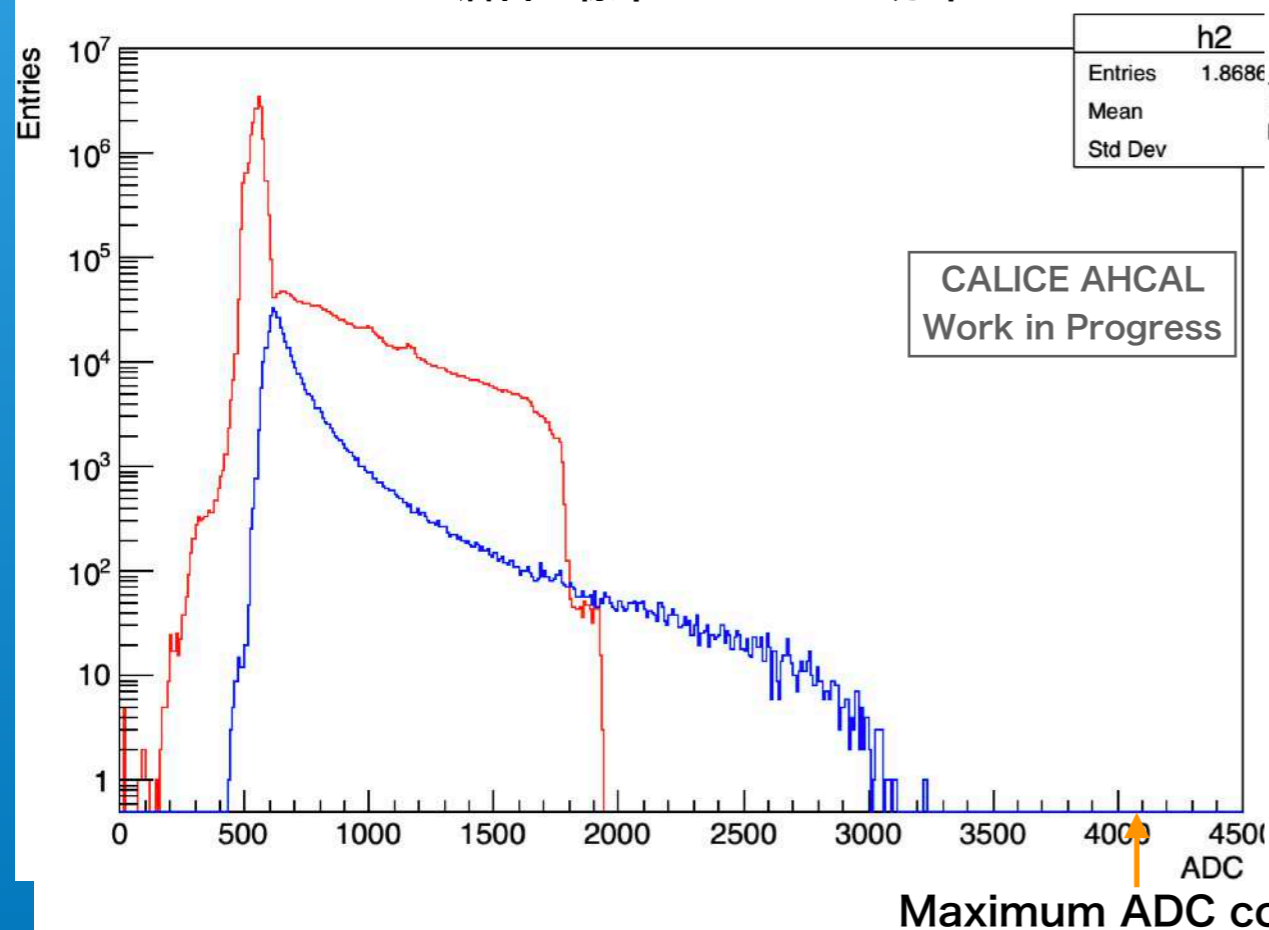
東京モジュールのADC分布



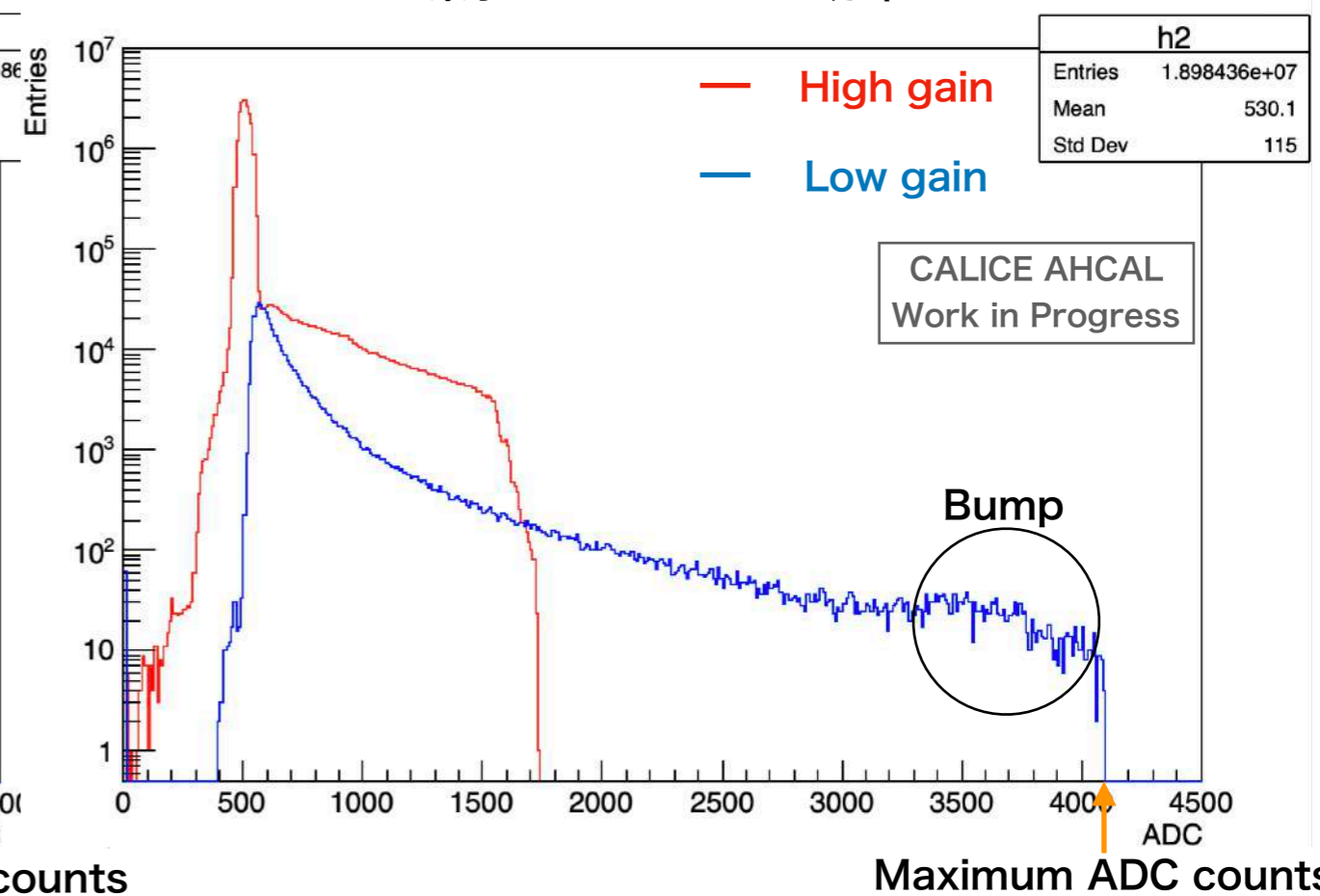
## 層ごとのADC分布(パイオン350 GeV)

- 東京モジュールに関して、ごく一部のヒットがサチュレーションを起こしている
  - ADCサチュレーション：0.08%のヒットがADCの最大値を超えている
  - MPPCサチュレーション：3500-4000 MIPsあたりにバンプがある
- ※MPPCのサチュレーションの補正はされていない。
- **ILC実験では重心系エネルギー500 GeVまでなら350 GeVのパイオンが生成することはないため、今回のサチュレーションは問題にならない。**

37層目の標準HBUのADC分布



東京モジュールのADC分布





# AHCAL大型試作機を用いた 精細度の評価

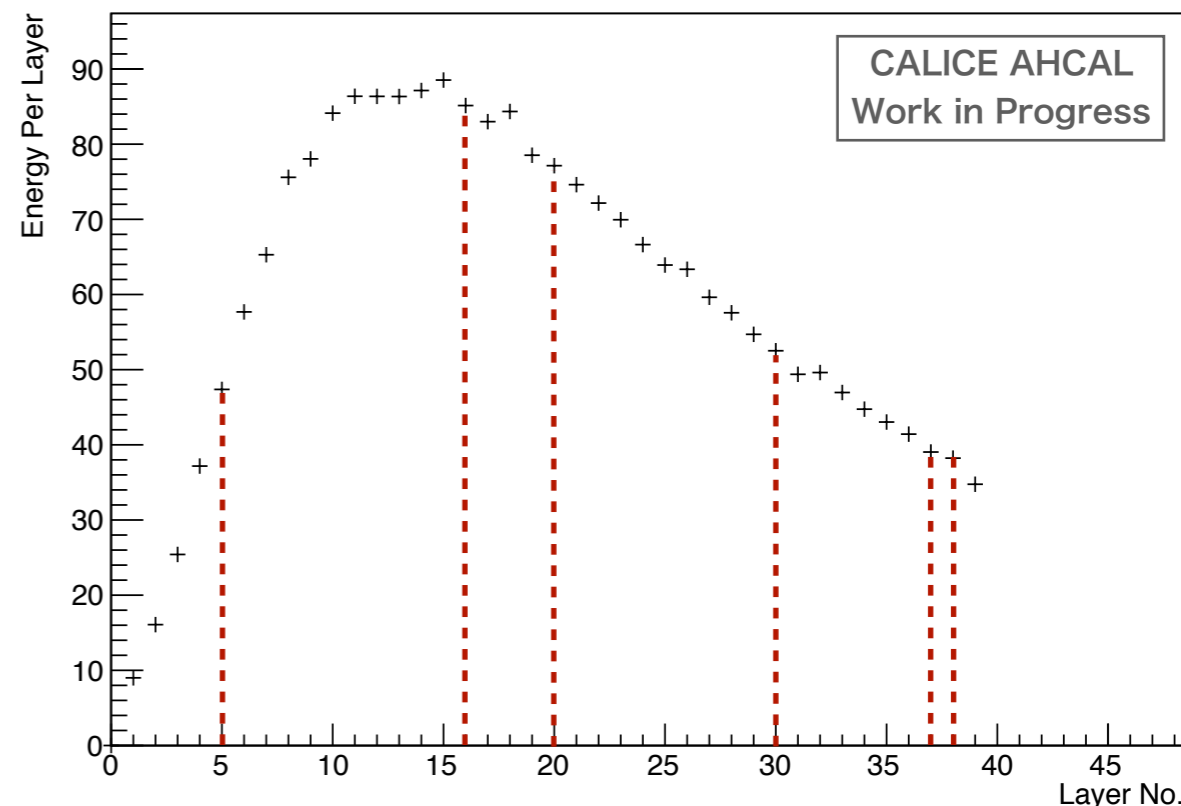
- 大型試作機には後方に1枚しか東京モジュールが導入されていない。
- 異なるエネルギーデポジットの層での60mm角タイルの応答が見られない
- Ganging tile : 2×2枚の30mm角タイルのヒットをまとめて、60mm角タイルの応答をシミュレートする
- 実験データを使って混合精細度の性能を評価できる。

## パイオン80 GeV

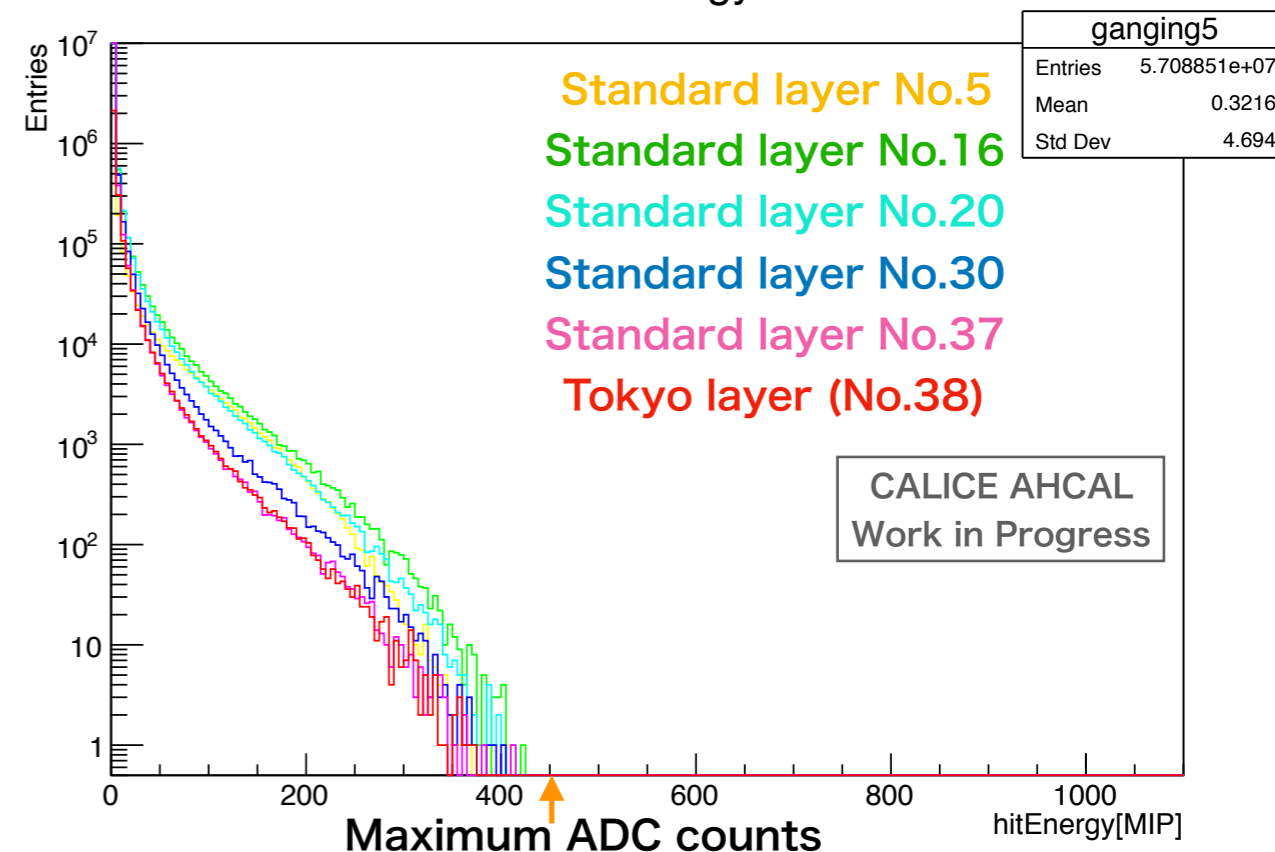
- 東京モジュールと、その直前の37層目の標準HBUのganging tileの応答がほぼ同じ分布
- **60mm角タイルの応答をganging tileで再現できている**
- サチュレーションは起きていない。

※ hitEnergy : MIP換算の1ヒットのエネルギー  
ADCの最大値4095は約450 MIPに相当

Longitudinal Shower Profile



Pion 80GeV hitEnergy distribution

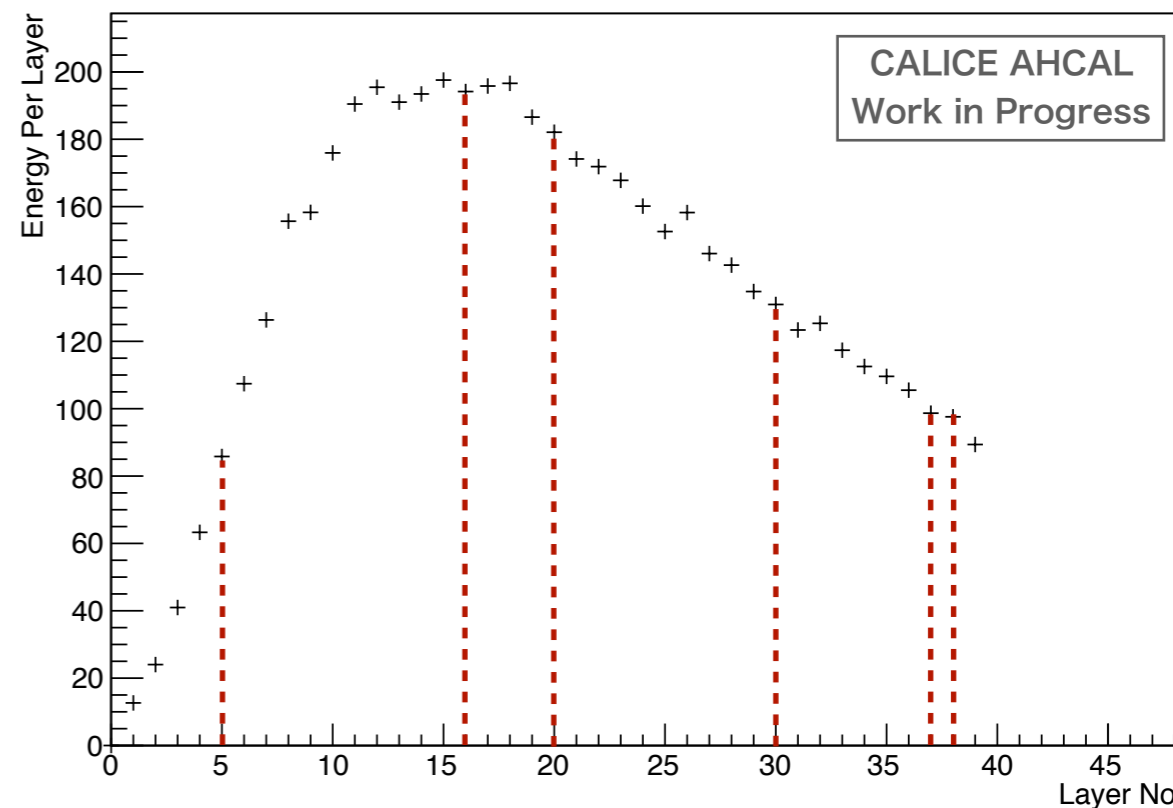


# パイオン200 GeV

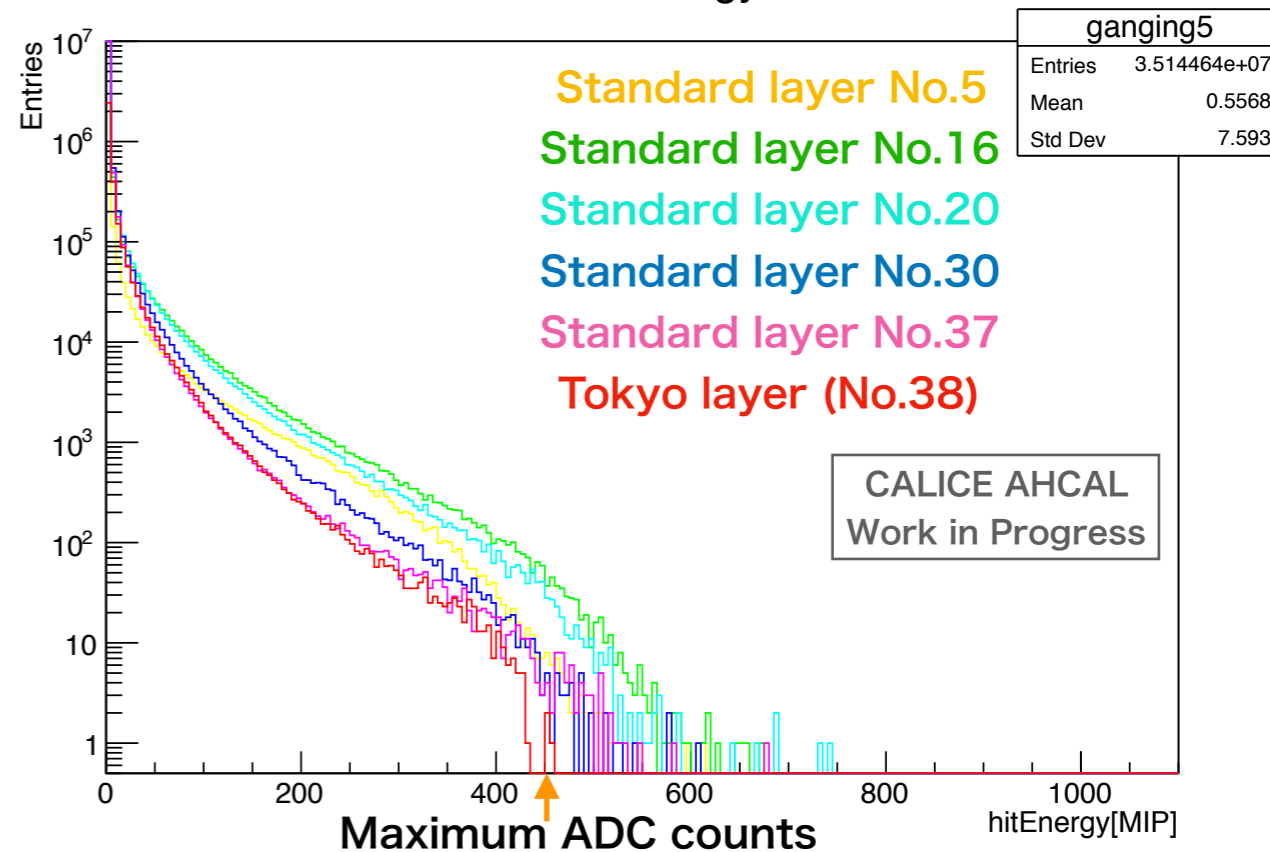
- シャワーマキシマムにおける層でサチュレーションが始まっている。
- 0.16%のヒットがADCの最大値を超えている。

※ 実際に60mm角タイルが置かれるのは、25層目以降

Longitudinal Shower Profile



Pion 200GeV hitEnergy distribution

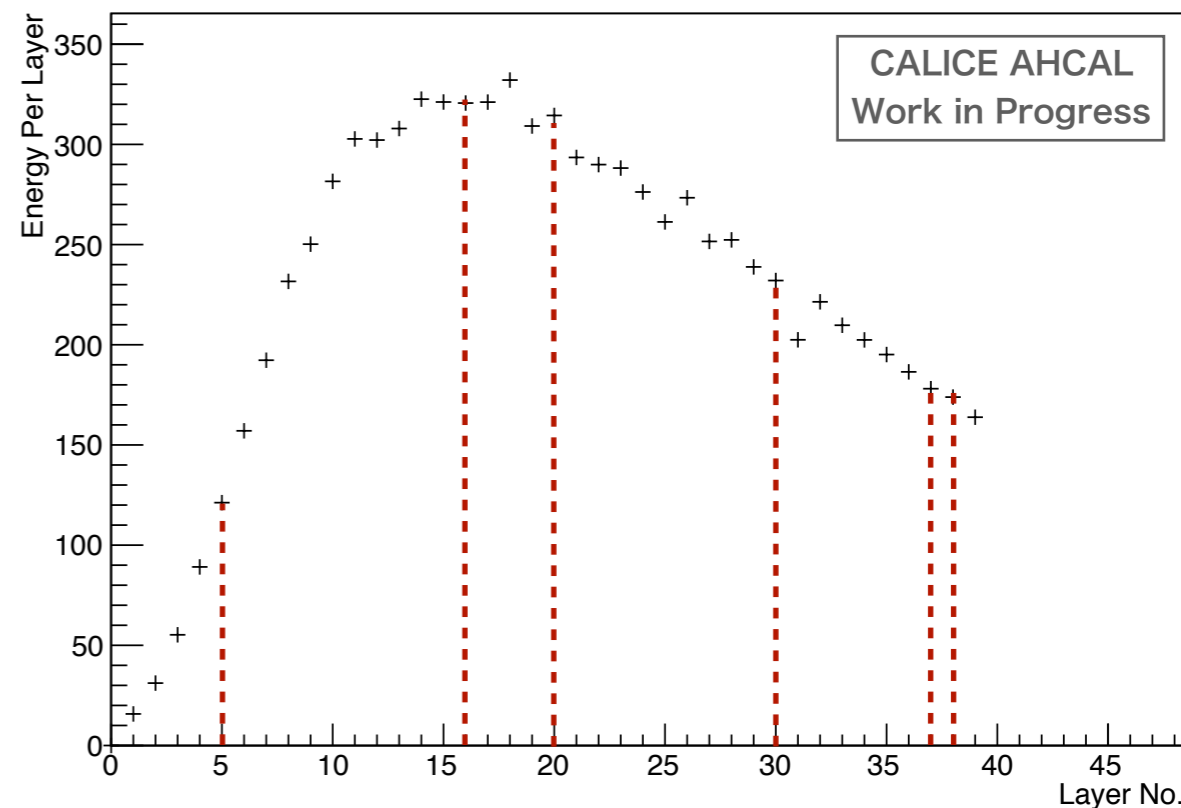


# パイオン350 GeV

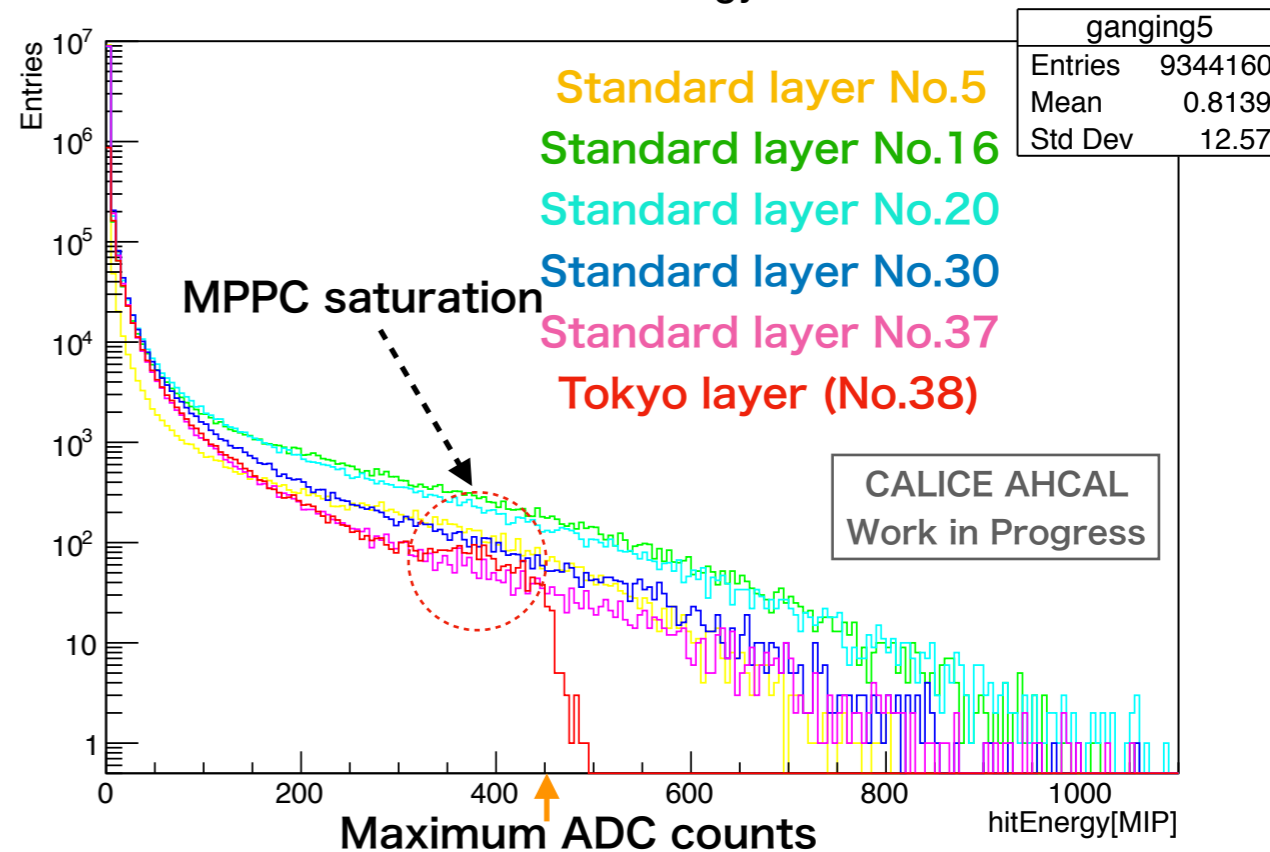
- 全ての層でADCの最大値を超えてサチュレーションを起こしている。
  - シャワーマキシマム : 7.3%
  - 37層目 : 1.3%
- 東京モジュールのバンプ(MPPCサチュレーション)が見て取れる。

※サチュレーションの補正がされているが、補正しきれていない。

Longitudinal Shower Profile



Pion 350GeV hitEnergy distribution





# 目次

- 研究背景
  - 国際リニアコライダー(ILC)計画
  - Analogue Hadron CALorimeter (AHCAL)
  - 精細度の最適化
- 大サイズのシンチレータタイルを用いた検出層HBUの開発
  - タイルサイズの検出光量への影響の調査
  - 大サイズシンチレータタイルを用いた検出層HBUの開発
  - 大サイズシンチレータタイルを用いた検出層HBUの動作試験
- AHCAL大型試作機におけるテストビーム実験
  - CERN SPSにおけるテストビーム実験
  - 大サイズシンチレータタイルを用いた検出層HBUの性能評価
  - AHCAL大型試作機を用いた精細度の評価
- 結論と今後の展望

## 結論

- ILC建設開始に向けて、AHCALの精細度の最適化が行われている。
  - AHCALの外側の層を基準設計の30mm角より大きなシンチレータタイルを用いた、精細度を混合した設計
- **60mm角タイル単体の性能を初めて測定した。**
  - 非常に高い一様性を持つ。光量は30mm角タイルに比べて52%少ない
- **60mm角タイルを用いた検出層HBUの製作**
  - 動作試験によりゲイン・光量を確認
- テストビーム実験
  - 6-7月のCERN SPSにおけるテストビーム実験において、60mm角タイルを用いたHBU(東京モジュール)を大型試作機の38層目に挿入
  - **東京モジュールは全チャンネルが問題なく動作し、標準のHBUと同様にペDESTAL、MIP、ゲインなどのキャリブレーションを行なった**
  - パイオン350 GeVにおいてADCとMPPCのサチュレーションが見られる。
    - 混合精細度の実用上は大きな問題にはならないと考えられる
  - 2×2枚の30mm角タイルの応答を結合したganging tileにより60mm角タイルの応答を再現することができた。
- 60mm角タイルを用いた検出層のデザインを実証することができた。

## 今後の展望

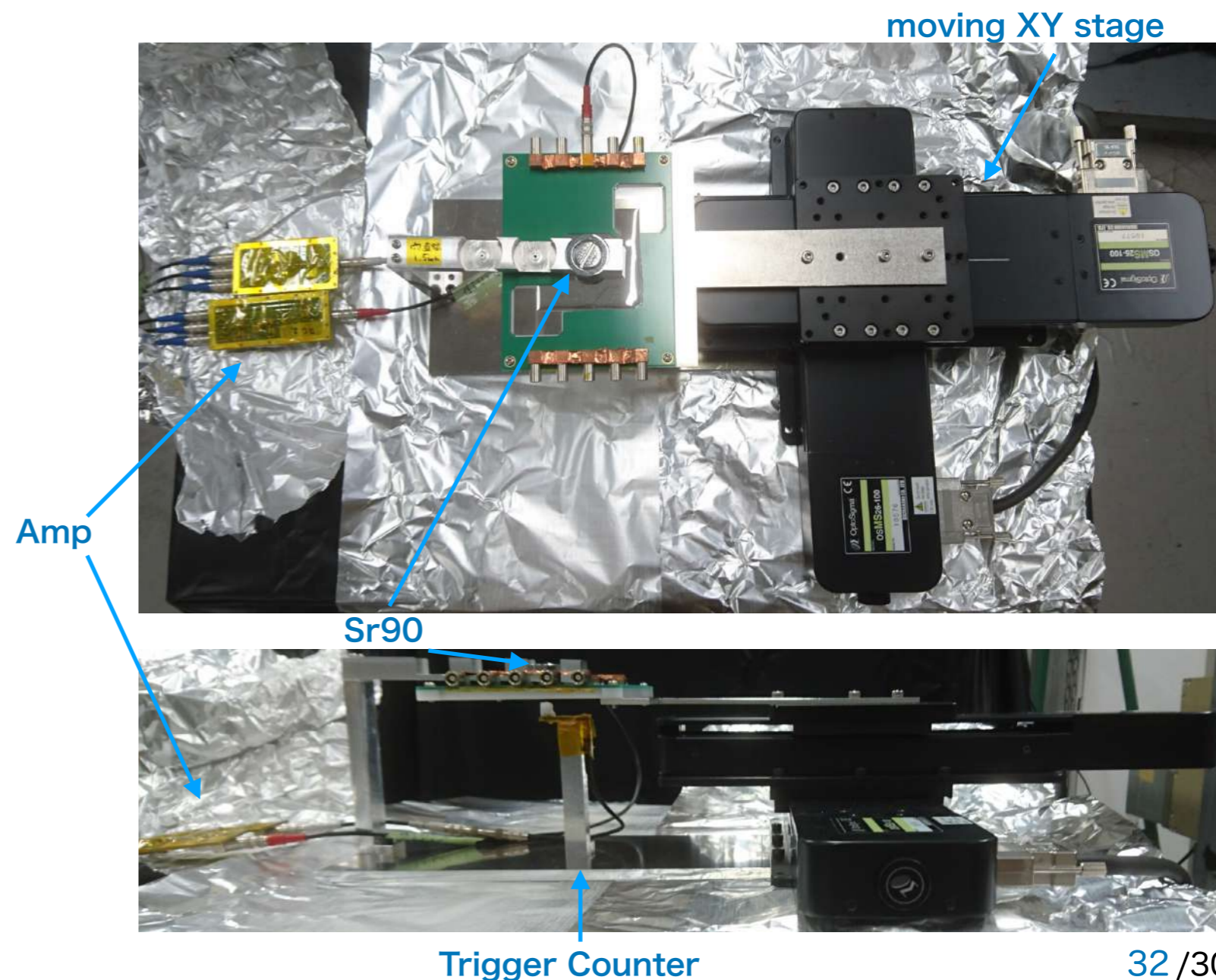
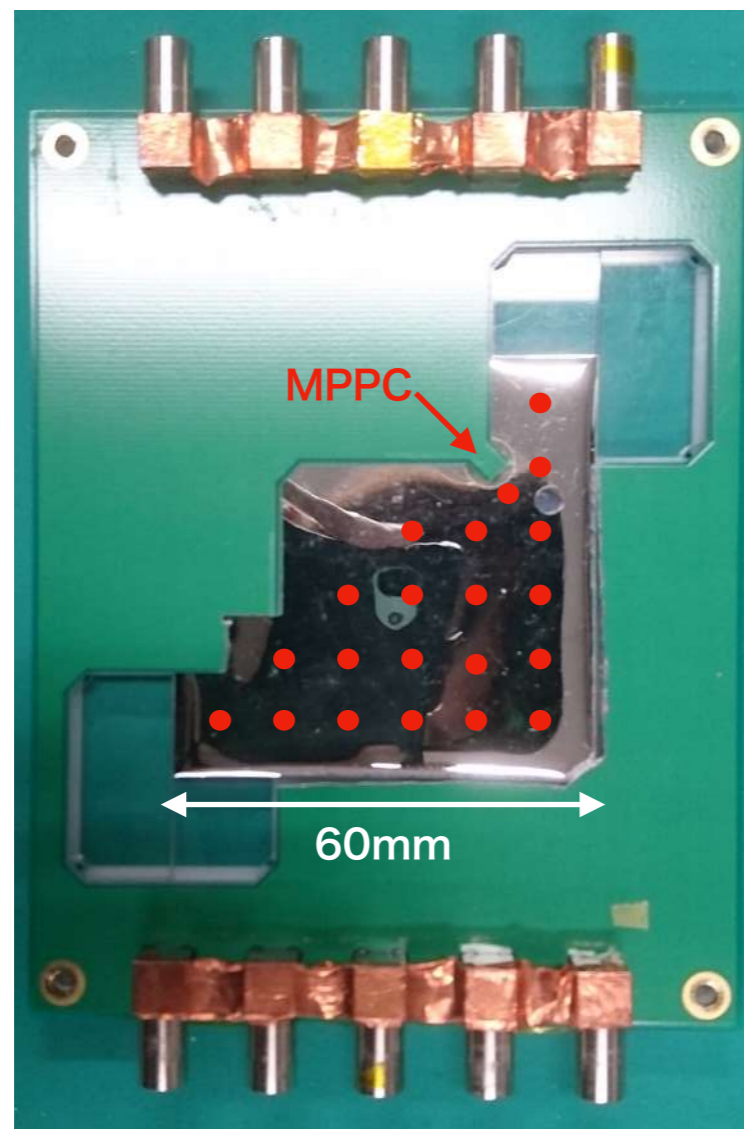
- テストビーム実験データにganging tileを適用し精細度を混合した設計を再現し、その性能を評価する。
  - Ganging tileの層の割合を変えて、様々なパターンの混合精細度を再現
  - 粒子識別、複数粒子のシャワーの分離、エネルギー分解能などの解析
  - 元の実験データの結果と比較し、精細度を混合した設計の性能について評価
- Ganging tileで得られたサチュレーションの情報を元に、カロリメータの性能への影響を調査する。
  - 影響があるようなら、エレキのダイナミックレンジを大きくしたり、MPPCのピクセルピッチを小さくしたりといった対策を講じる



# Backup

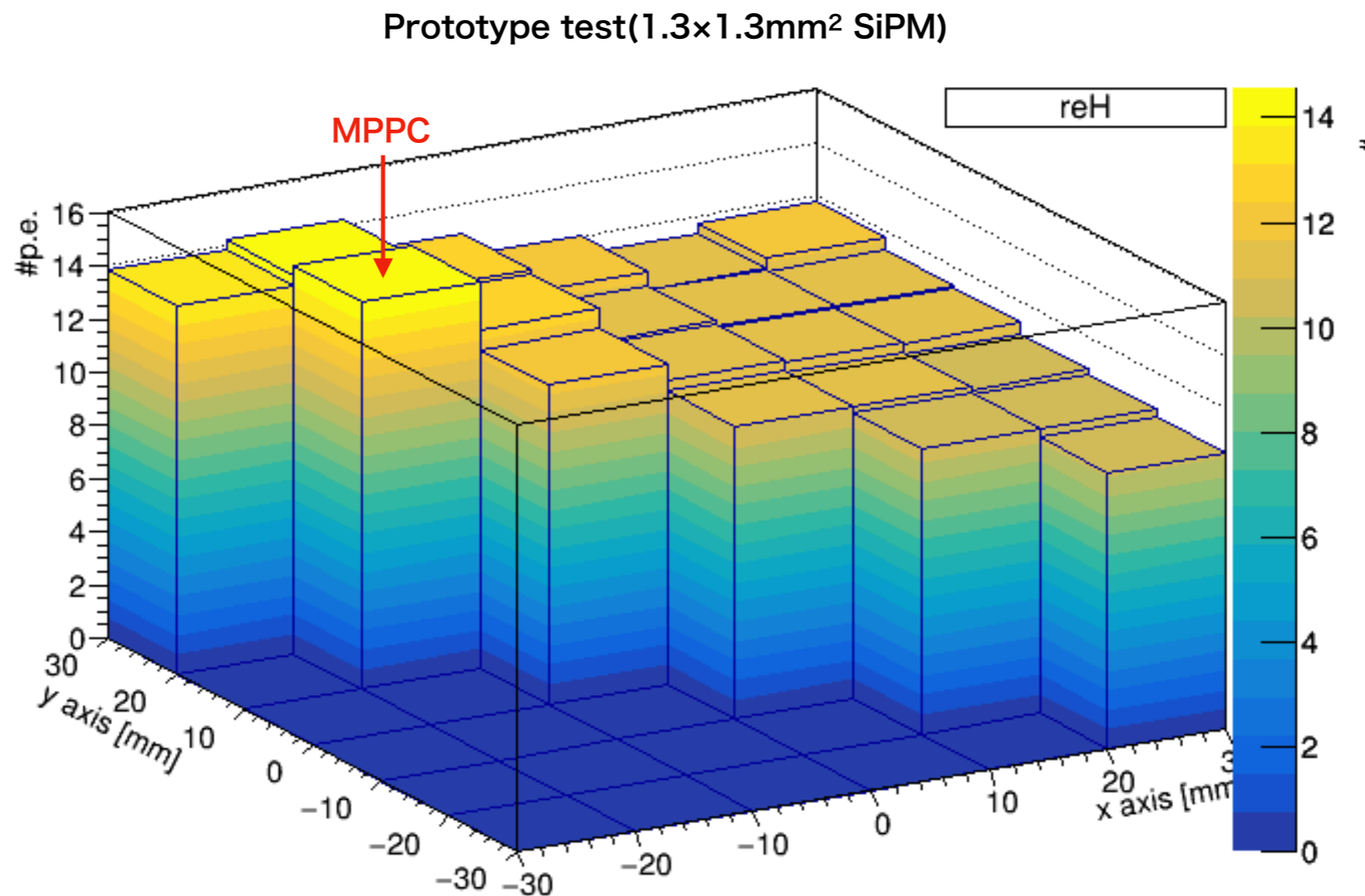
## Tile performance test

- Measure the performance of 60mm tile with shifted SiPM readout
  - **Position dependence of light yield**
  - MPPC S13360-1325PE (1.3×1.3mm<sup>2</sup>)



## Position dependence of light yield

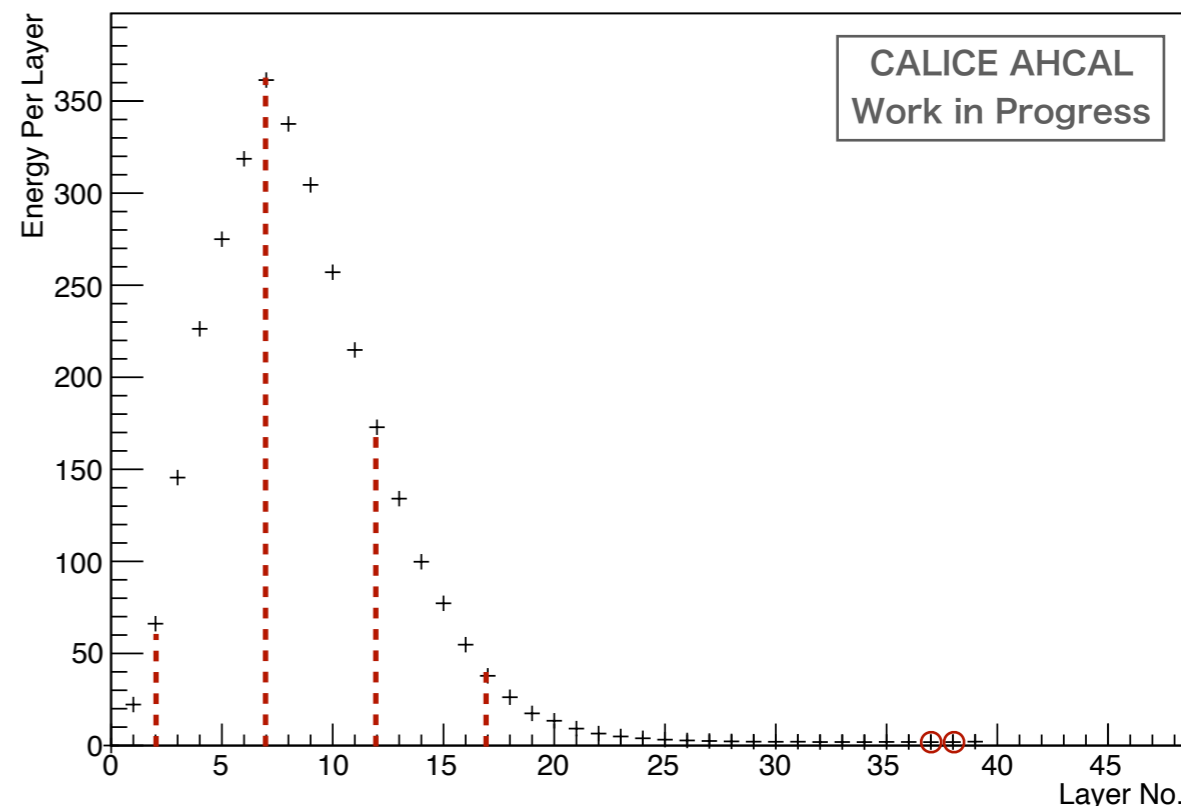
- Measured light yield (mean) : 11.8
  - 27.9 expected with 2×2mm<sup>2</sup> MPPC)
- Non-uniformity ~ 9.8% (RMS)
- Light yields and uniformity don't change significantly compared to center readout.



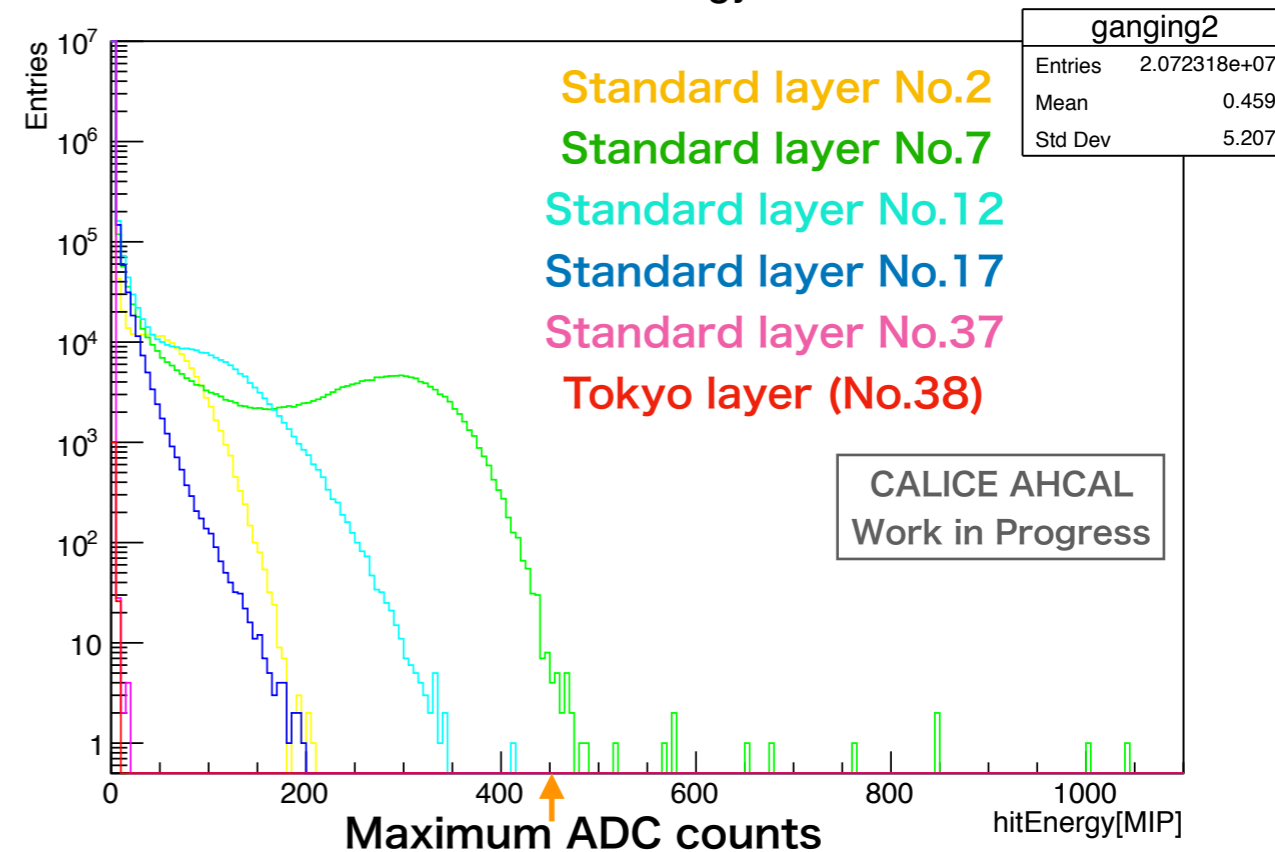
# 電子80 GeV

- 電子の作るシャワーは短く15~20層目で終わってしまう。
  - 東京モジュールには届かない
- 60mm角タイルの応答とサチュレーションの調査にはganging tileが必要
- シャワーマキシマムにおける層ではサチュレーションが始まっている。
  - 0.03%のヒットがADCの最大値を超えている

Longitudinal Shower Profile



Pion 80GeV hitEnergy distribution

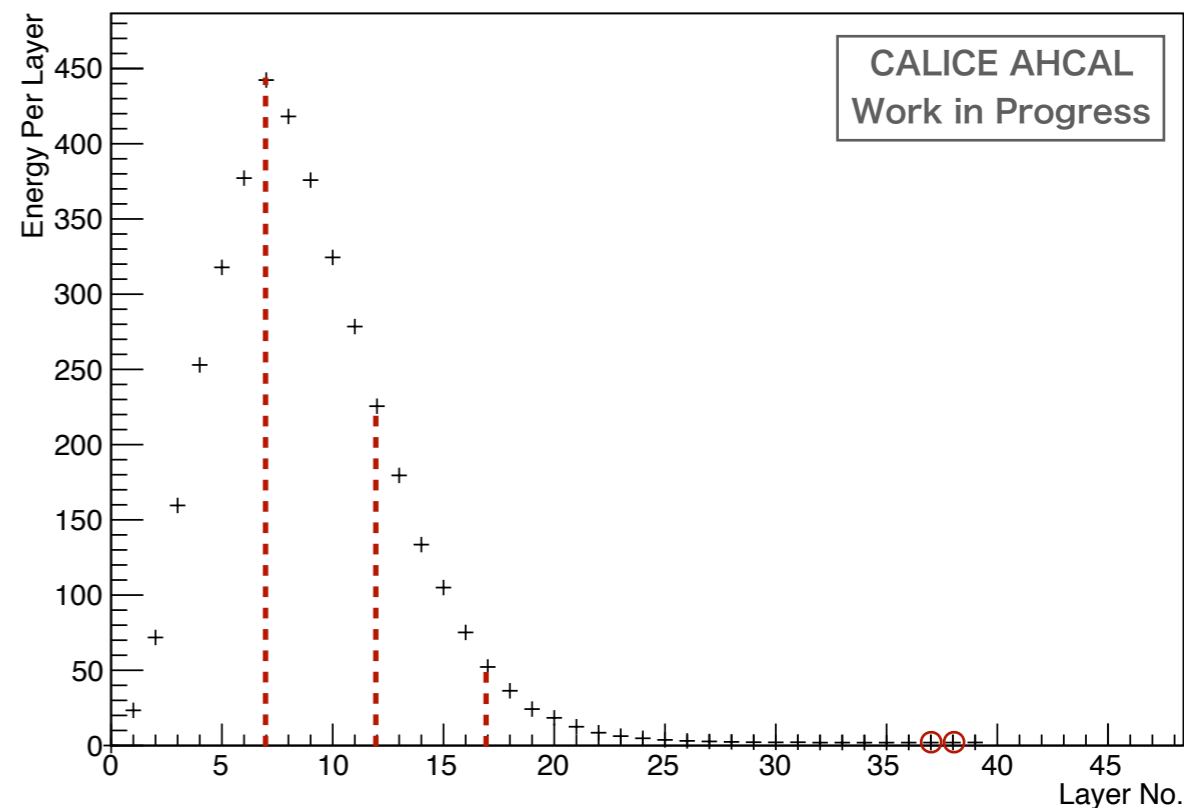




# 電子100 GeV

- シャワーマキシマムにおける層でサチュレーションが起こっている。
- シャワーマキシマム : 5.5%
- Ganging tileで得られたサチュレーションの情報を元に、エレキのダイナミックレンジやMPPCのピクセルピッチを調整・改善する。

Longitudinal Shower Profile



Pion 100GeV hitEnergy distribution

