

# ILDのための シンチレータ－電磁カロリメータの シミュレーションを用いた性能評価

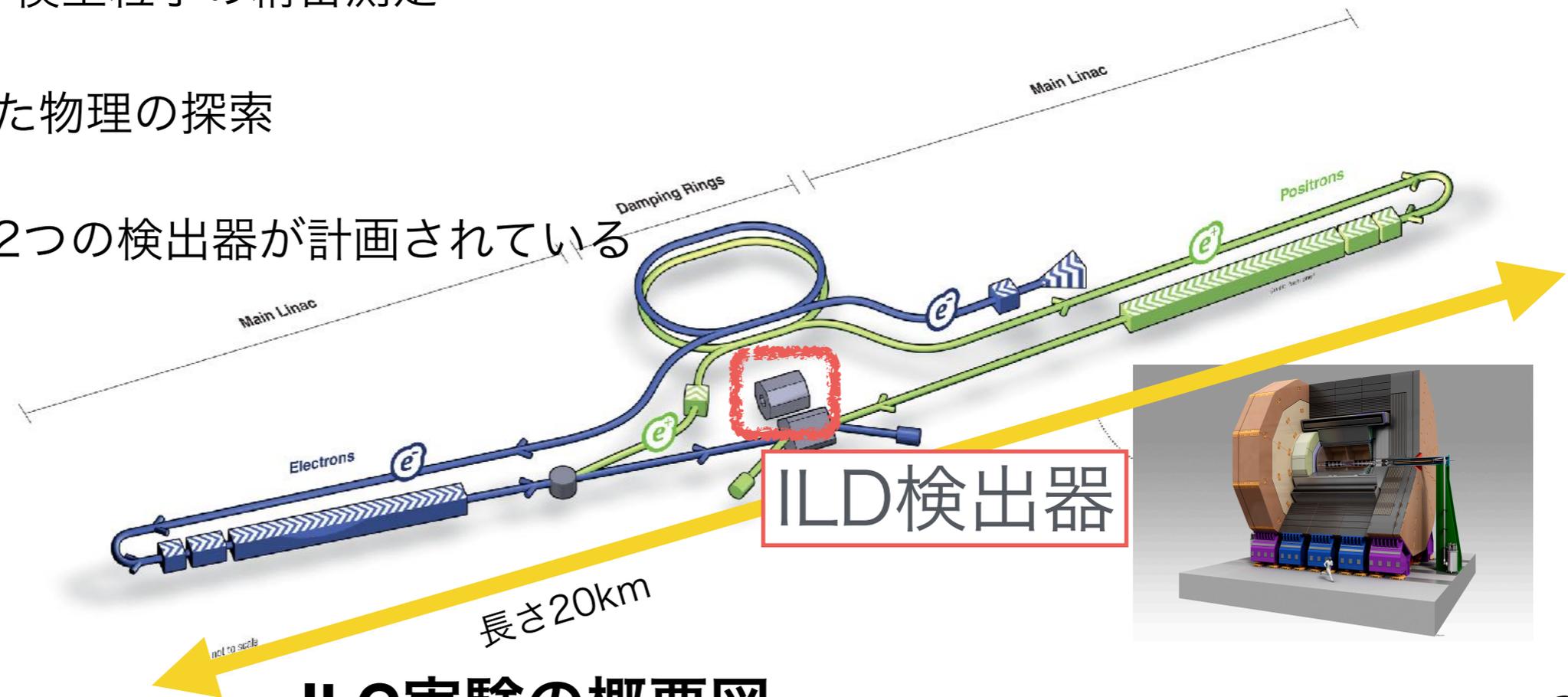
信州大学

寺田 怜真 (Reima Terada)



# ILC Experiment

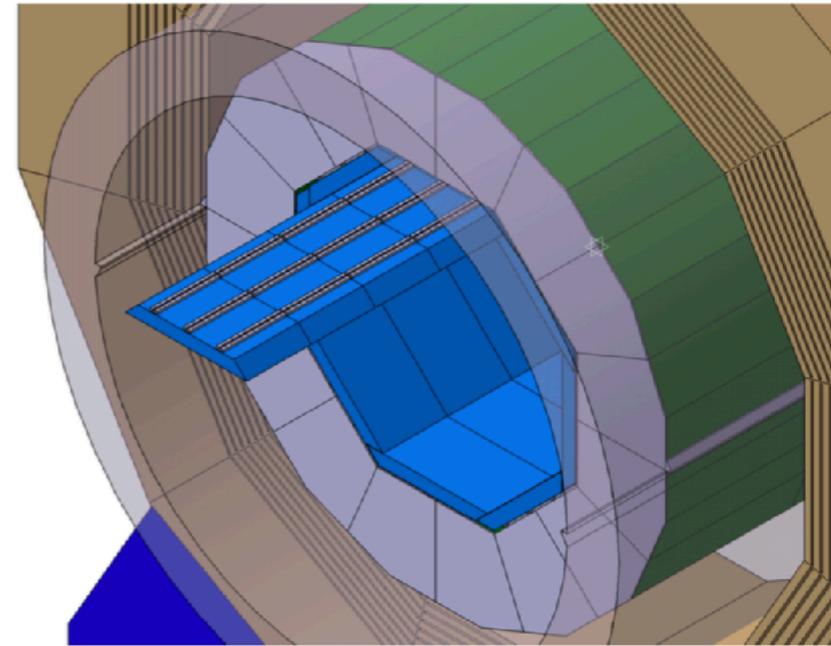
- 電子陽電子衝突型加速器実験
- 加速部分が20kmの直線であることが特徴
- 開始時は、ヒッグスファクトリーを目標に250GeVの衝突エネルギー
- 目指す物理は、
  - Higgsなどの標準模型粒子の精密測定
  - 標準模型を越えた物理の探索
- 検出器はILD, SiDの2つの検出器が計画されている



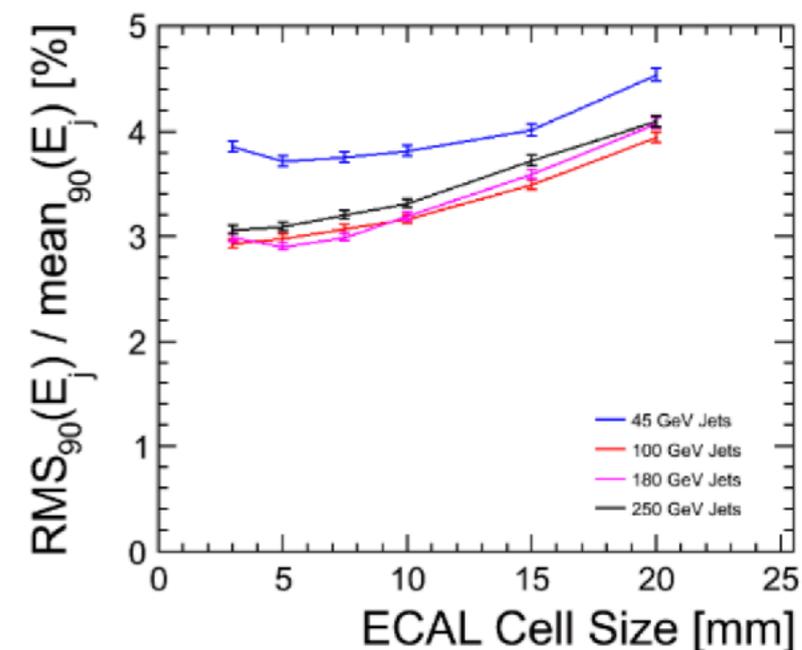
ILC実験の概要図

# ILD ECAL

- ILCの測定器は、ILCの物理から、典型的にはWとZの識別のためにJetのエネルギー分解能として、3~4%が要求されている
- 測定器は内側から、Vertex, Tracker, ECAL, HCAL, Muonの順
- 既存のカロリメータのみの分解能ではこの分解能の達成は難しい
- そのため、粒子を識別するParticle Flow Algorithm(PFA)を用いて、Trackerの運動量分解能も利用することにより、この要求を満たす
- 光子や他の粒子起因の、クラスターの重なりを分解するため、PFAに最適化したカロリメータとなっており、ILDのECALは  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  の細分度が必要
- 粒子識別を行いJetのエネルギー分解能をあげるParticle Flow Algorithmの要求から、粒子のクラスターの横方向の広がりであるモリエール半径を小さくしたいため、吸収層はタングステンとして計画されている
- 30層の検出器として計画されており、計84mmのタングステン吸収層から放射長は $24X_0$
- 検出層のセンサーとして、シンチレータストリップ(Sc)とシリコンパッド(Si)の2種類の検出器が考えられている



ILD ECAL(青の部分)



ILD ECALのセルサイズの違いでの分解能の変化

# Particle Flow Algorithm(PFA)

- ILCではジェットのエネルギー分解能の要求は 3~4% だが、カロリメータだけではエネルギーの分解能が足りない

- LEPで調べられた、W, Zのジェットのエネルギー比は、荷電粒子が約60%、中性粒子が約40%程度となる

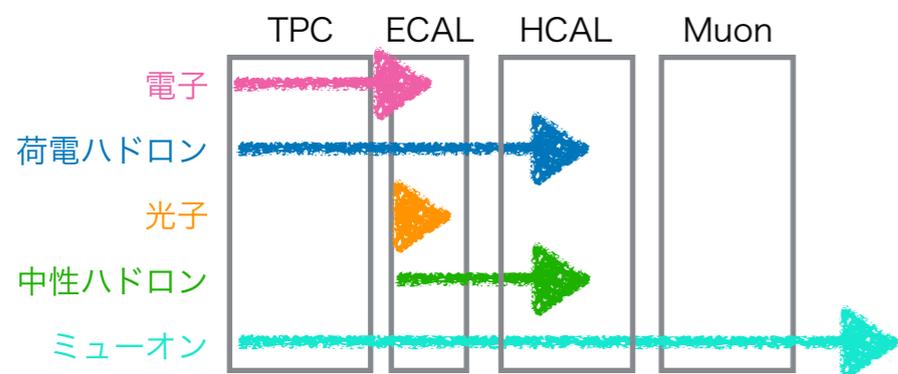
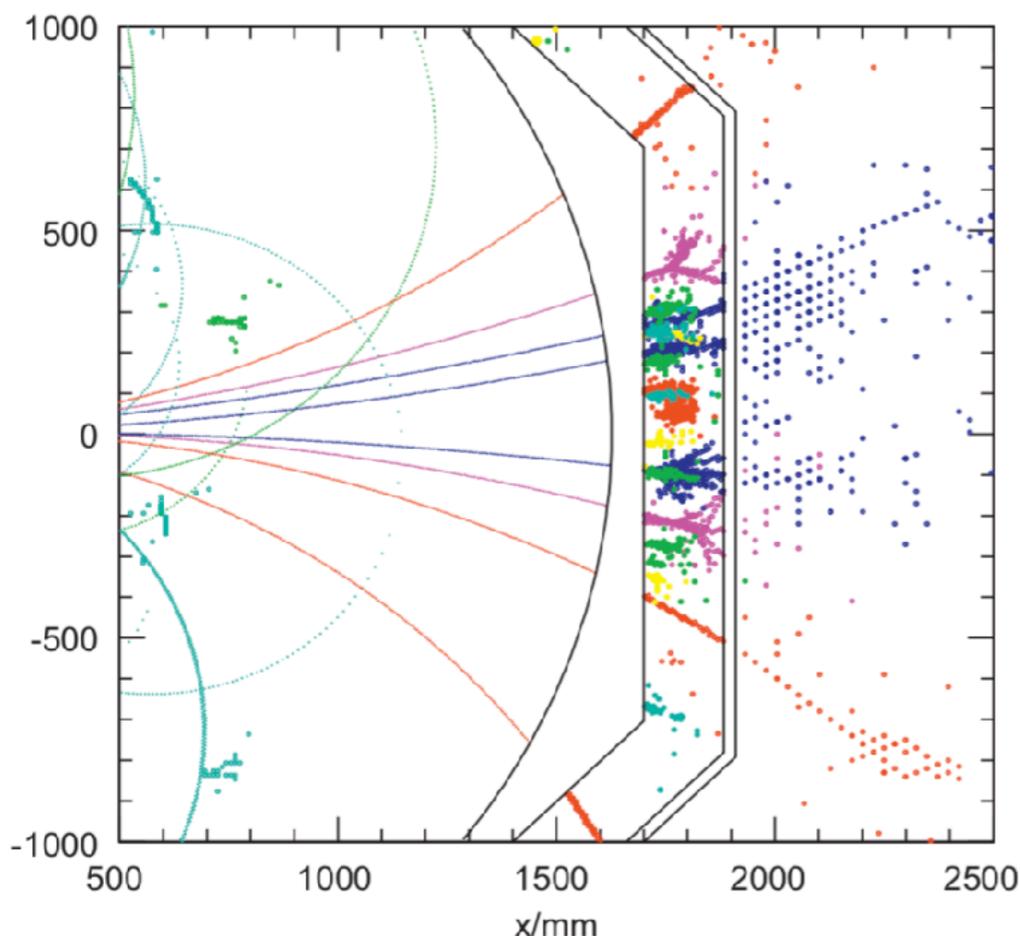
- 荷電粒子の運動量分解能は、Trackerは非常に高い

- そこで、カロリメータとTrackerを対応させて、測定器全体で解析を行う

-> Particle Flow Algorithm (PFA)

- PFAに最適化した検出器として、カロリメータはTrackerとの対応を取るために、エネルギー分解能だけでなく、位置分解能も重要となり3次元に細かい必要がある

- このTrackerとの対応のために、PFAに最適化したカロリメータが考えられており、ECALは  $5 \times 5 \text{ mm}^2$ の細分度が必要



	エネルギーの比	測定器	エネルギー (運動量)分解能
荷電粒子	62%	Tracker	$10^{-4}$
光子	27%	ECAL	0.15
中性ハドロン	10%	HCAL	0.55 4

# Particle Flow Algorithm(PFA)

- ILCではジェットのエネルギー分解能の要求は 3~4% だが、カロリメータだけではエネルギーの分解能が足りない

は、

器全体で解析を

ackerとの対応を  
解能も重要とな

カロリメータが考

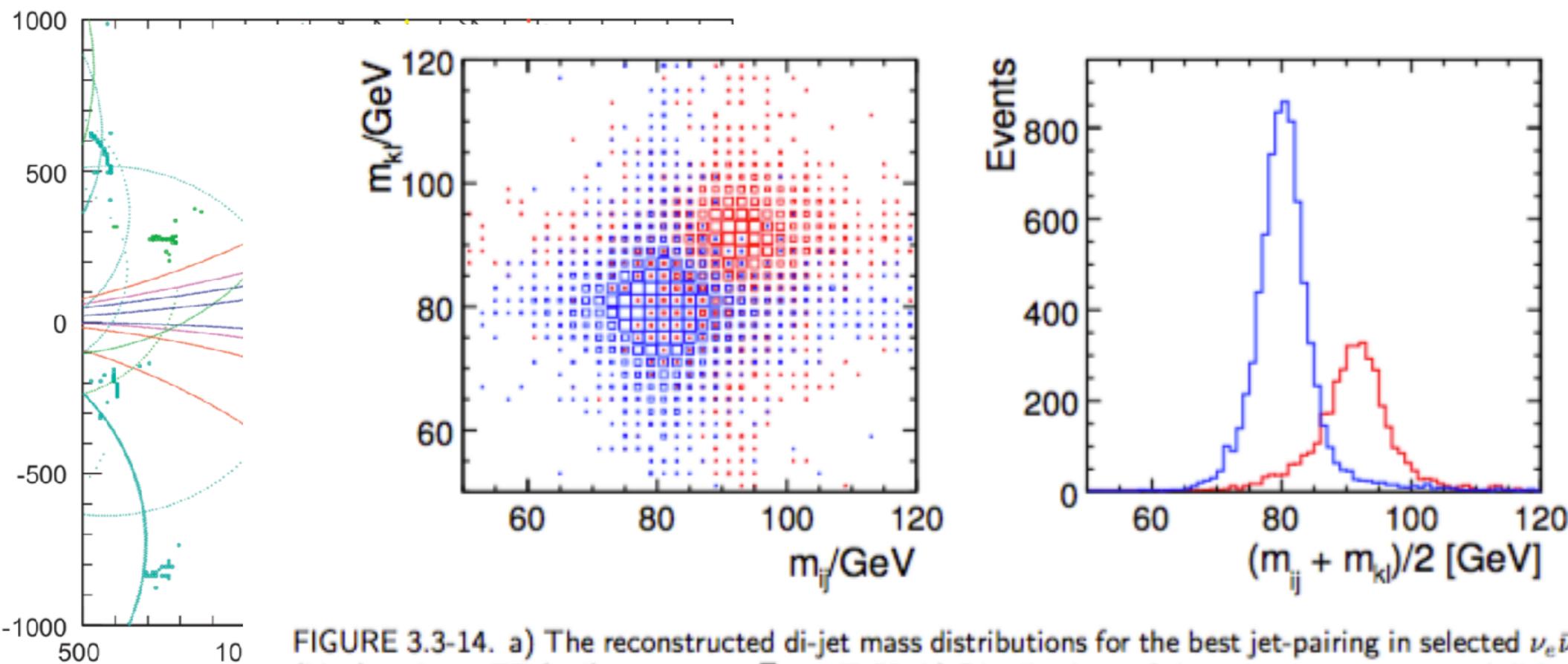
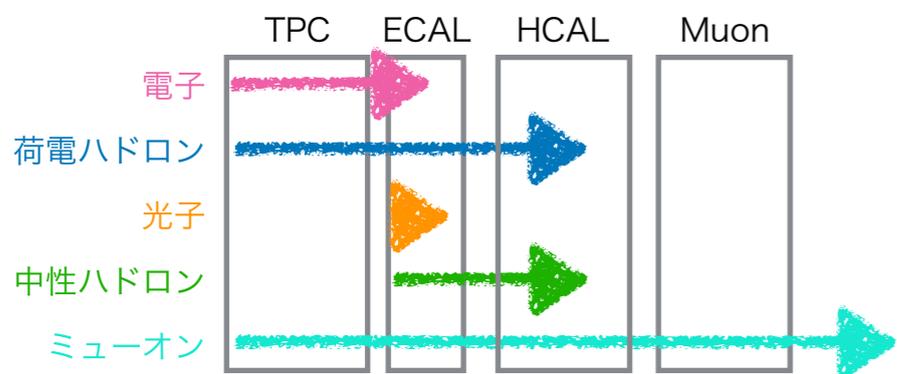


FIGURE 3.3-14. a) The reconstructed di-jet mass distributions for the best jet-pairing in selected  $\nu_e \bar{\nu}_e WW$  (blue) and  $\nu_e \bar{\nu}_e ZZ$  (red) events at  $\sqrt{s} = 1 \text{ TeV}$ . b) Distributions of the average reconstructed di-jet mass,  $(m_{ij} + m_{kl}^B)/2.0$ , for the best jet-pairing for  $\nu_e \bar{\nu}_e WW$  (blue) and  $\nu_e \bar{\nu}_e ZZ$  (red) events.

んつれくあり、ECALはうまうTPCの和が反が必女

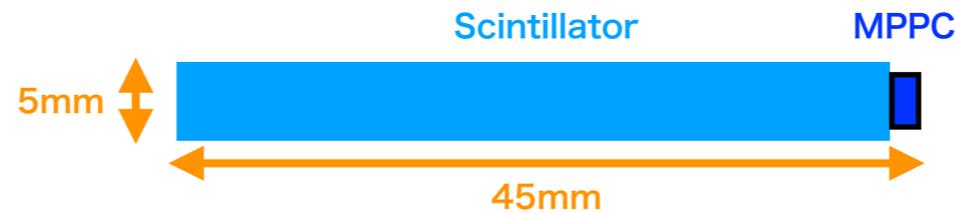


	エネルギーの比	測定器	エネルギー (運動量)分解能
荷電粒子	62%	Tracker	$10^{-4}$
光子	27%	ECAL	0.15
中性ハドロン	10%	HCAL	0.55 5

# ScECAL

- シンチレータを利用した ECAL(ScECAL)では、プラスチックシンチレータと光検出器 MPPC を検出層として利用する

- シンチレータは



- 45 x 5 mm<sup>2</sup> の短冊型プラスチックシンチレータ  
(チャンネル数削減のため)

- それぞれのストリップシンチレータをレイヤー毎に直行して並べる  
(Strip Splitting Algorithmを用いて、5 x 5 mm<sup>2</sup>の細分度の達成)

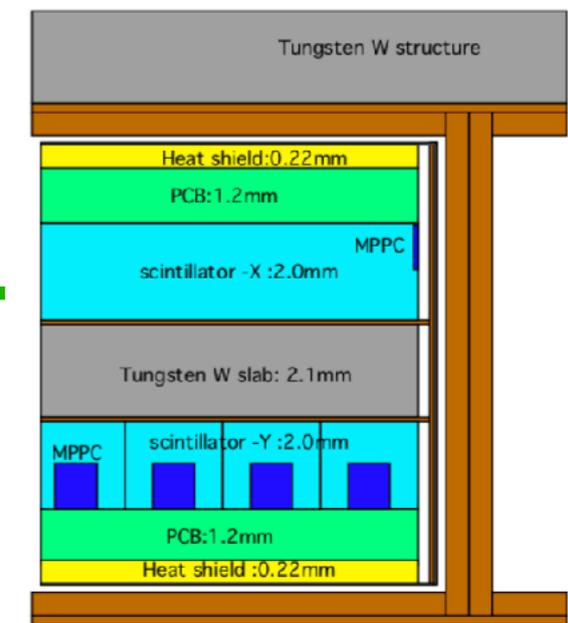
- 2mm の厚さが ILC の Detailed Baseline Design では採用

- MPPC

- 小型で磁場中で利用可能な半導体光検出器

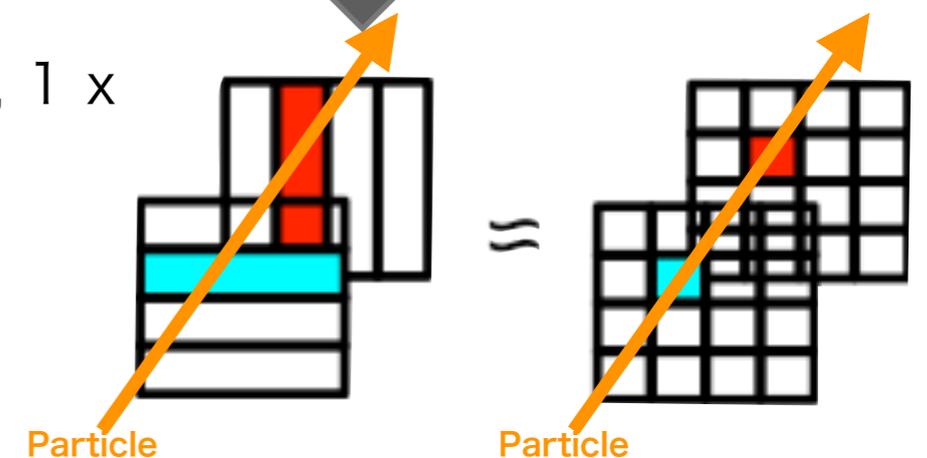
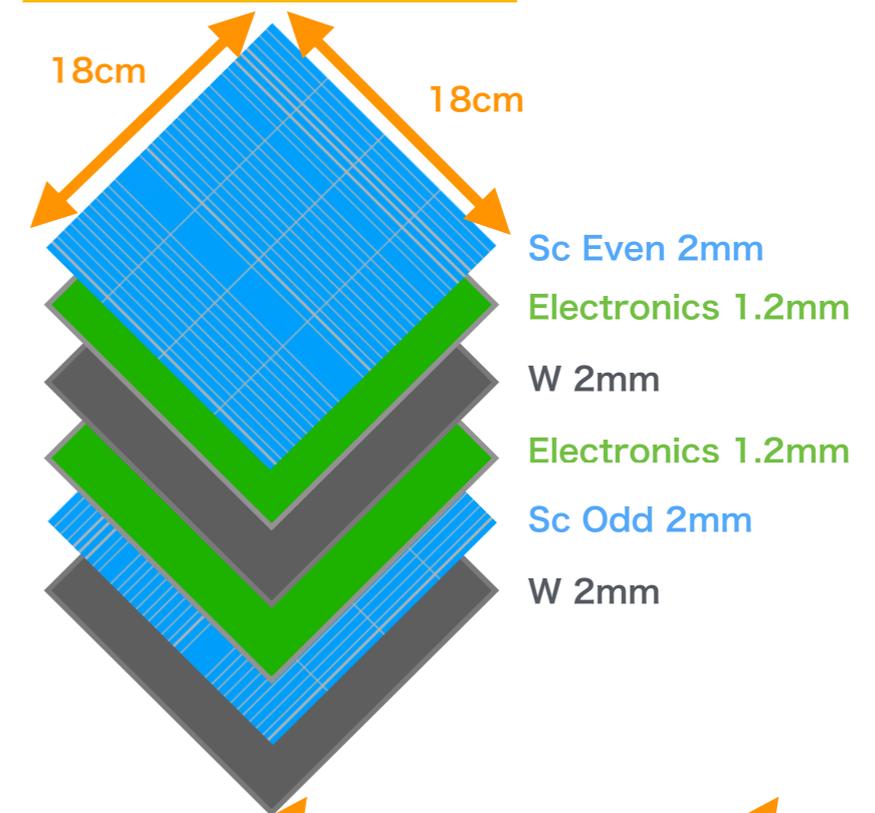
- 大きなダイナミックレンジのために、10k pixel (10 $\mu$ m pitch, 1 x 1 mm<sup>2</sup> sensor area) の利用を計画

- SSA(Strip Splitting Algorithm)というアルゴリズムを用いて、5 x 5 mm<sup>2</sup> segment を達成する



Cut model

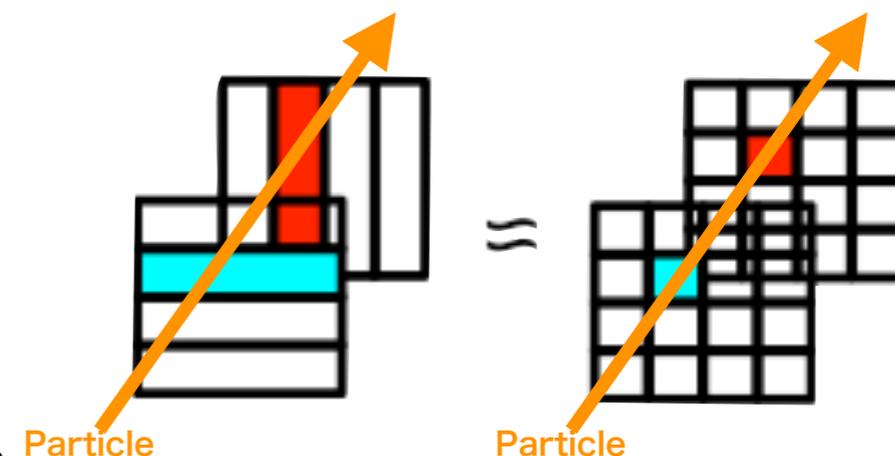
1 read out unit 144ch



# Strip Splitting Algorithm(SSA)

- そのままではストリップシンチレータは各層 45x5mm<sup>2</sup> の分解能しかないため、5x5 mm<sup>2</sup> の分解能にSSAを利用して回復する必要がある

- エネルギーと位置の情報を、前後の層を用いて回復する

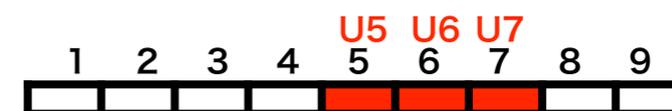


エネルギー情報を  
9つの仮想セルへ分配する



D4 D5 D6

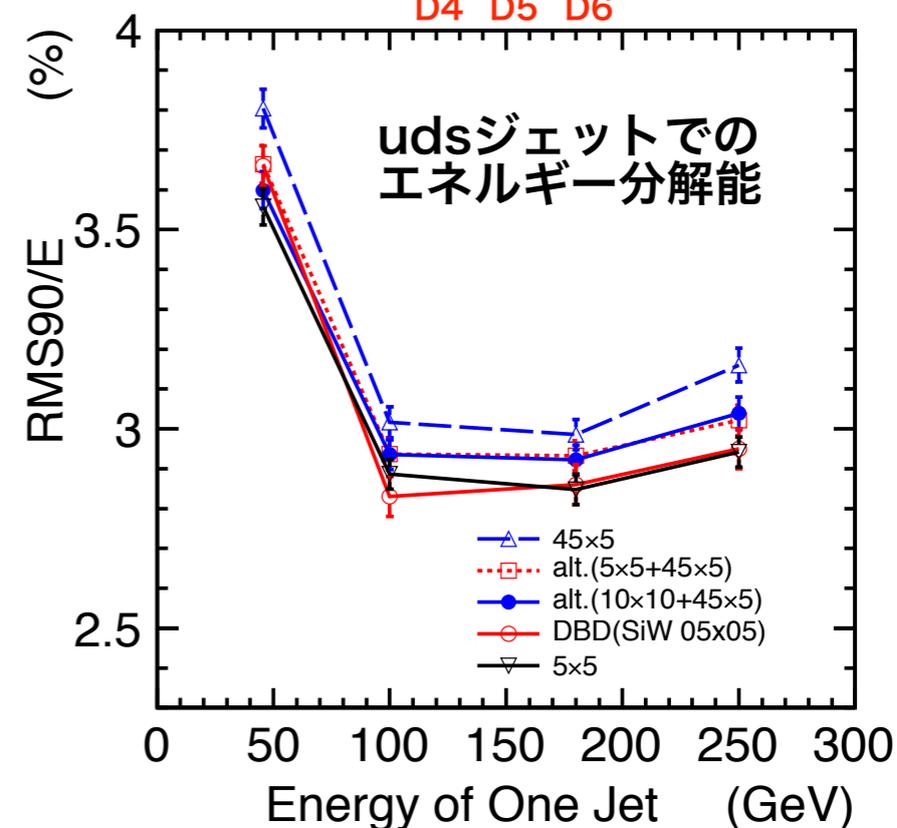
Particle



E5



D4 D5 D6



energy distributed in #cell5

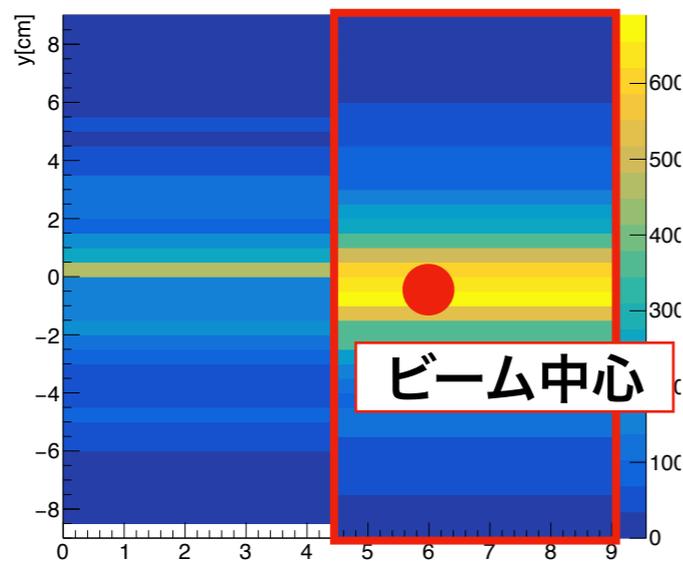
$$E5 = ET \times \frac{U5 + D5}{\sum U_j + \sum D_j}$$

- Si とほぼ同程度の分解能が達成できる

# ECAL Base Unit(EBU)

- 10Mチャンネルの読み出しを想定して、検出装置内で、読み出しからデジタル化まで行う、テクニカルプロトタイプであるEBUの試作を行っている
- EBUはDesyで開発された、ScECAL読み出しボードで、OmegaのSPIROC2bチップを4つ搭載し、ボード内で、144chの信号を読み出し、デジタル信号へと変換する
- 現在、不感領域の最小化と、EBU作成時の簡素化のために、シンチレータ底面からの光読み出しを読み出しをテスト中
- また、SPIROCチップのゲインが足りないため、現状の10k pixel MPPCではMIPの分離が難しく、ゲインが大きい4489pixelのMPPCのテストを行っている
- 昨年実施した、ELPHでの単体のテストビームで動作を確認した

20181124\_0712\_ebu

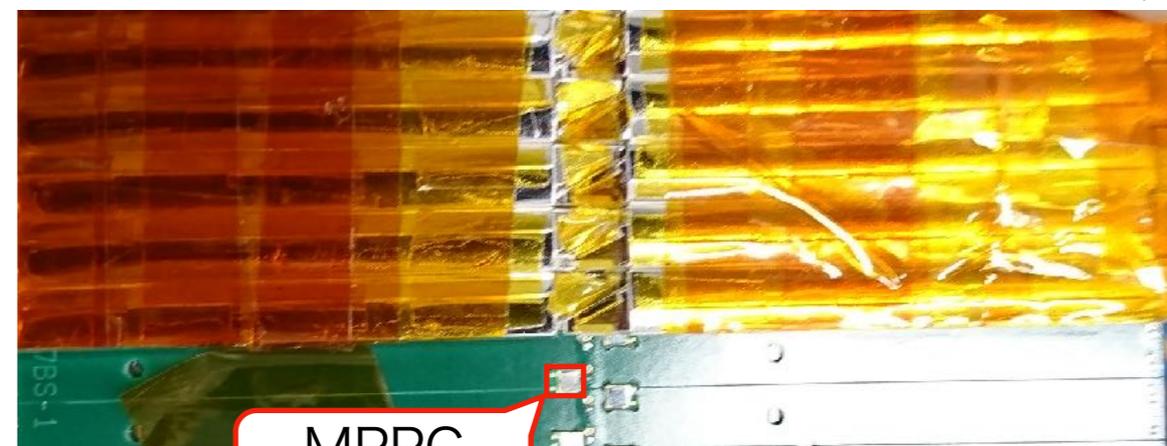
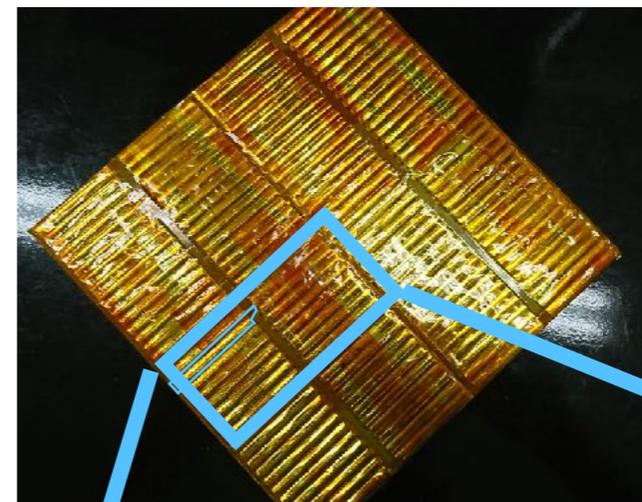


SPIROC2b EBU



Top view

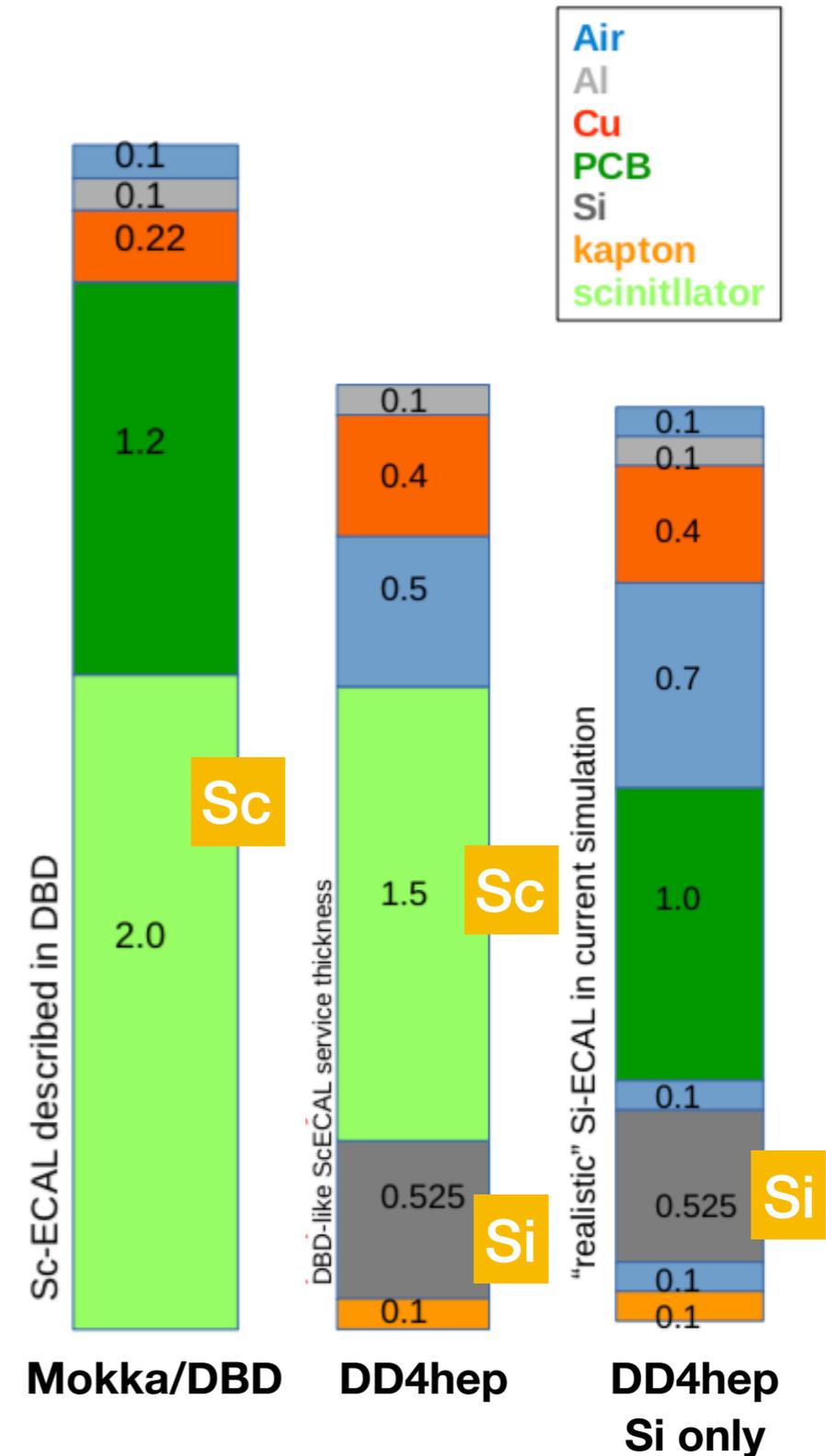
18cm  
bottom view



MPPC

# ILC ECAL simulation model

- DD4hepで検出器と粒子の相互作用のシミュレーションを行い、Marlinでデジタイズと解析を行う
- 最近、シミュレーションソフトウェアが、以前まで利用されていたMokkaから、DD4hepという新しいシミュレーションのモデルとなり、検出器の構成も変更になった
- Mokka(以前のシミュレーションソフトウェア)のジオメトリは
  - Detailed Baseline Design で採用された ScECAL 向け Geometry (Sc thickness が 2mm)
- DD4hep(現在のシミュレーションソフトウェア)のジオメトリは
  - 比較のシミュレーション向けにシリコンとシンチレータが入った Geometry
  - Sc の厚さは 1.5mm になっている。これは、Siだけのモデルの電子トロンクスなどの部分を足し合わせた放射長とほぼ同じ放射長となる
- DD4hepでのScECALについてテストが必要



# Characteristic Parameter of ScECAL

- ScECAL固有のパラメータとして、  
利用する実験装置で決まるパラメータと、  
Siから材質が変わることによるパラメータがある

- 特に特徴的なパラメータが、以下の表となる

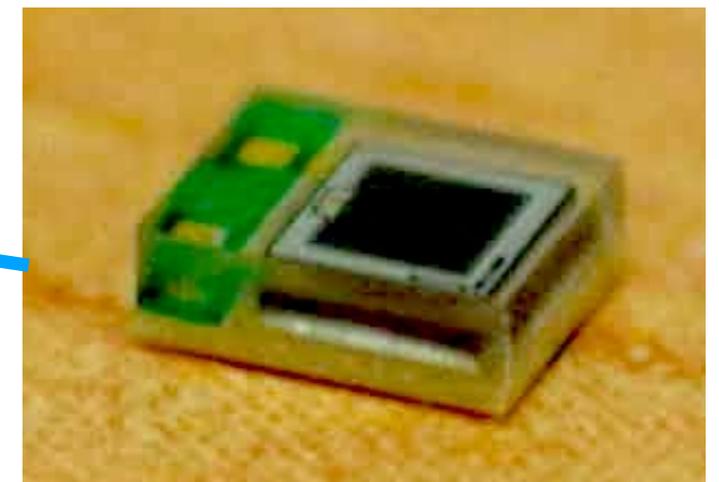
Sensor type	ScECAL	SiECAL
p.e./MIP	7	-
MPPC pixel	10,000	-
MIP Calibration(GeV)	0.0002407 (at Barrel)	0.0001575
Energy Calibration	0.006729 (at Barrel)	0.006412

Device parameters

Calibrationで決定



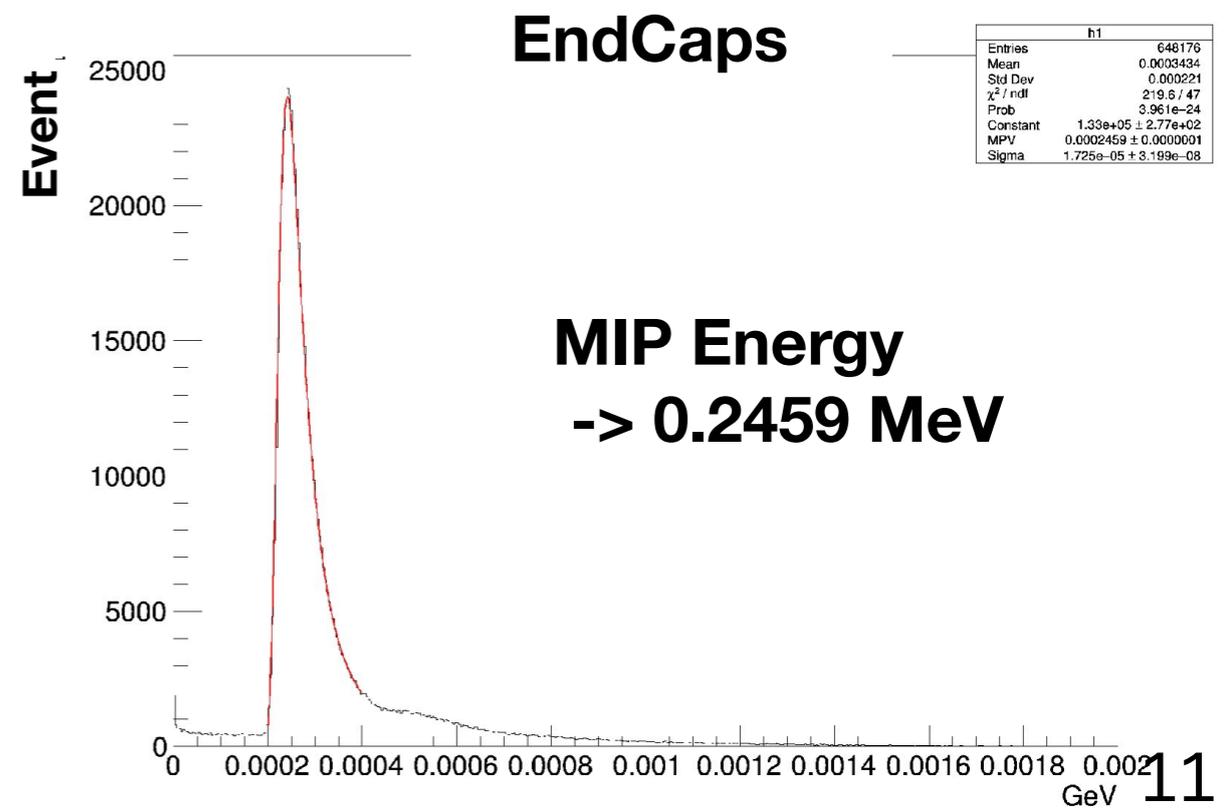
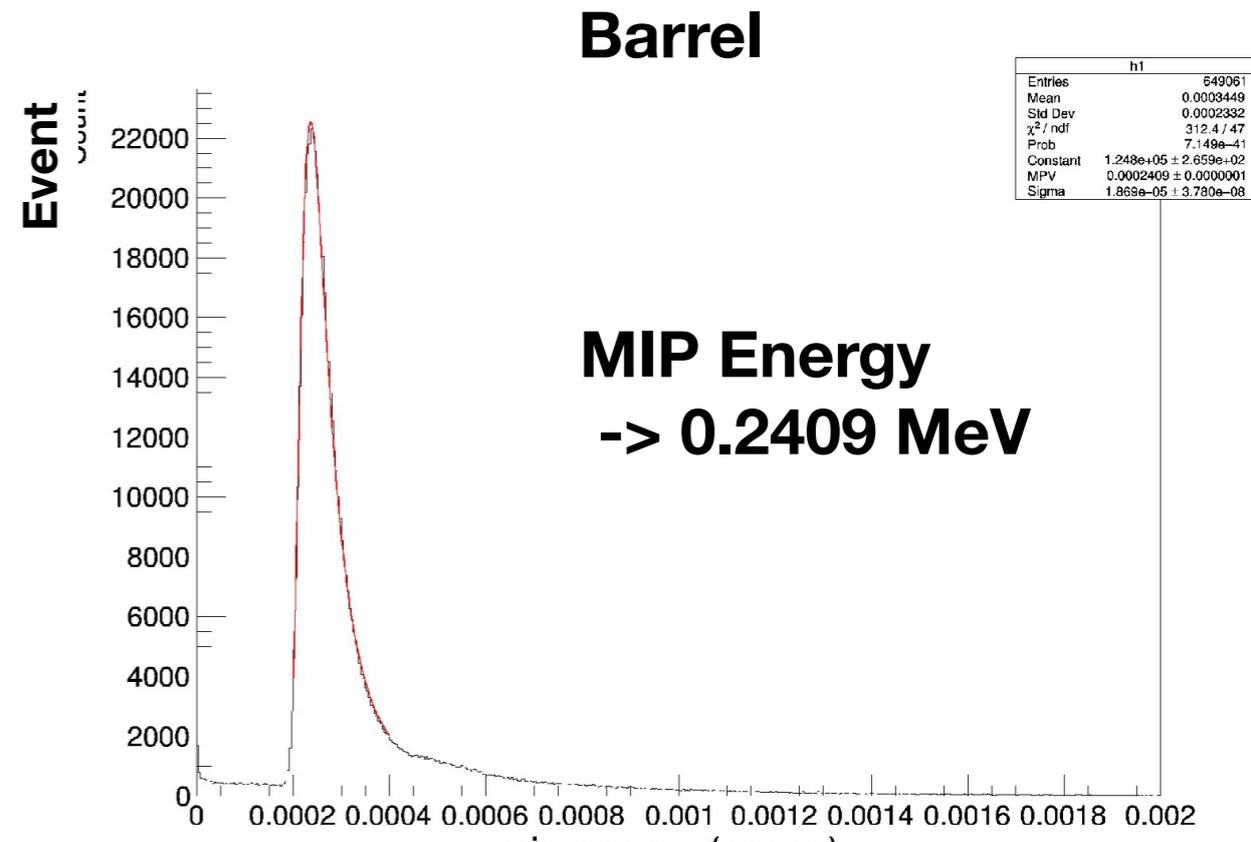
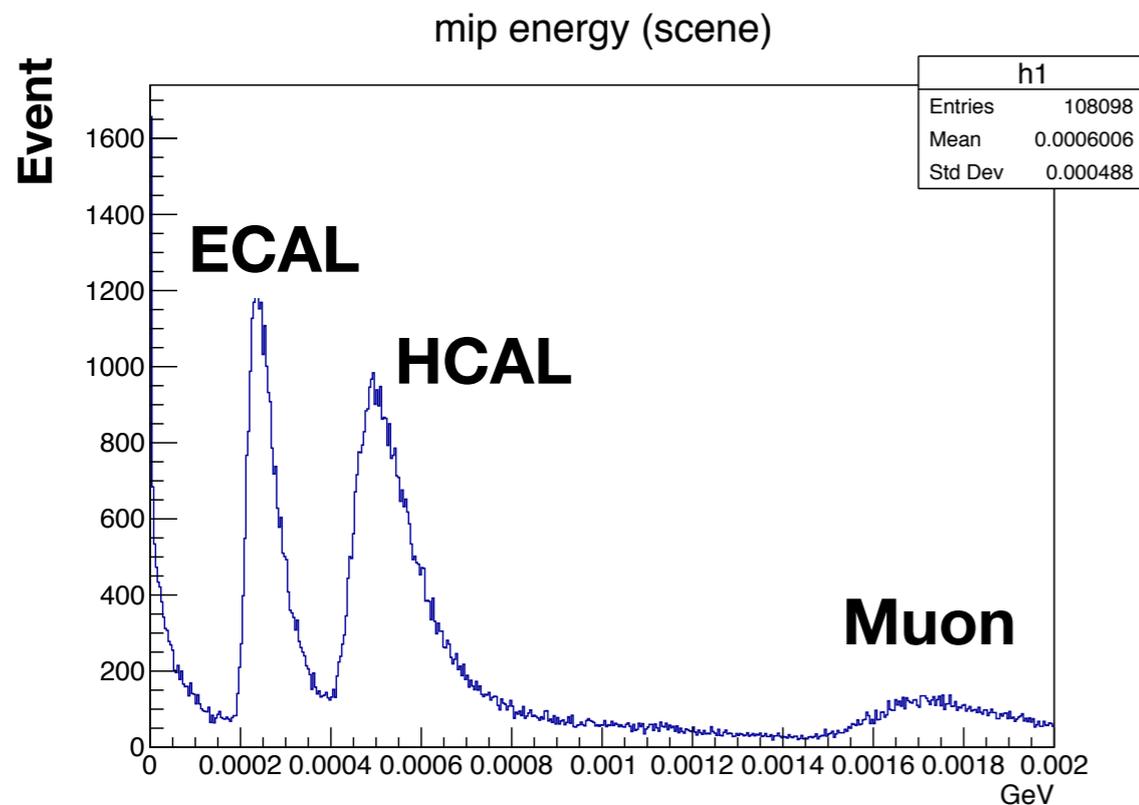
Scintillator (45 x 5 x 2 mm<sup>2</sup>)



MPPC (10k pixel)

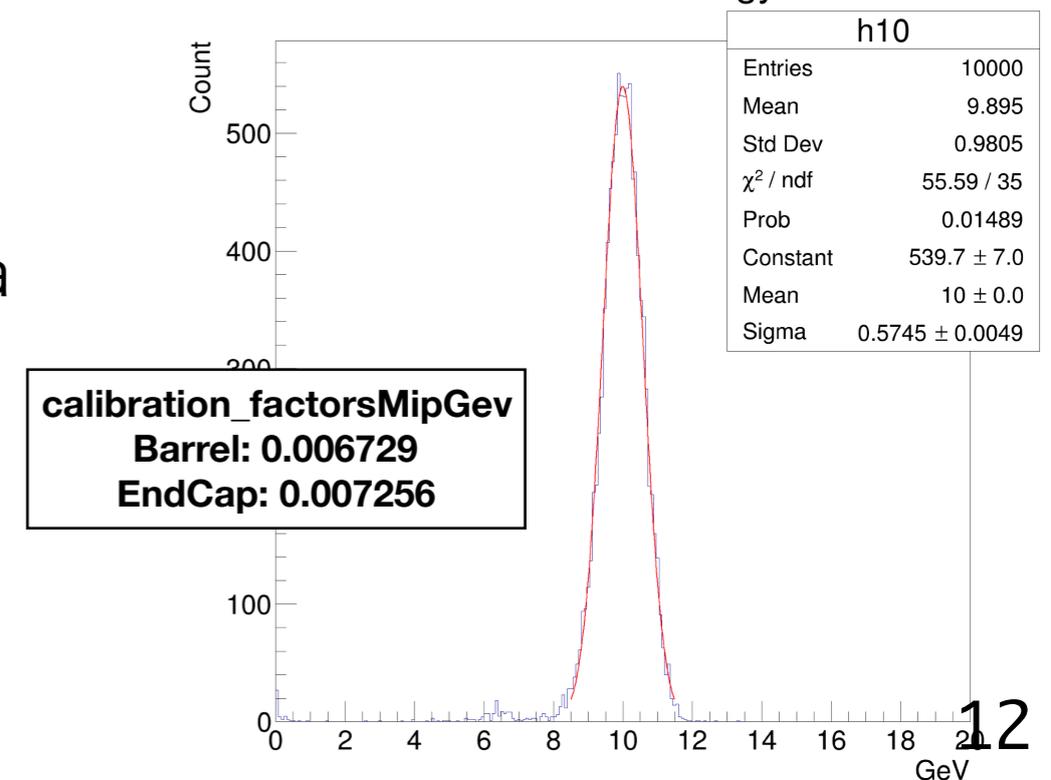
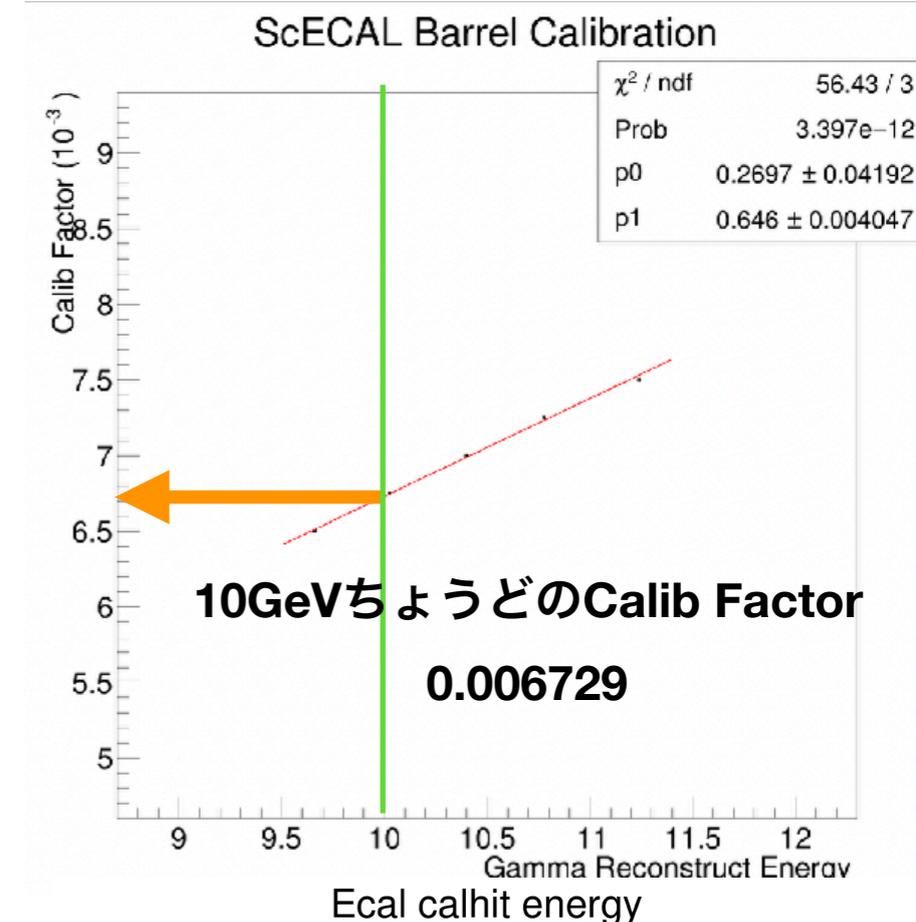
# Mip Calibration

- ILDのディテクターには3つのシンチレータ検出器が存在する
  - ScECAL (1.5mm), HCAL (3mm), Muon (10mm)
- それぞれのdE/dxは物質が同じなので一定となる
- Muon 10GeV 1000個を入射し、シンチレータ毎のエネルギーデポジットをチェックした。
- 3つの検出器の厚さによるエネルギーデポジットの分離が確認でき、ScECALのシミュレーションが動いていることが確認できた
- ECALのデータをLandau fitして、MIP Calibrationの値を決めた



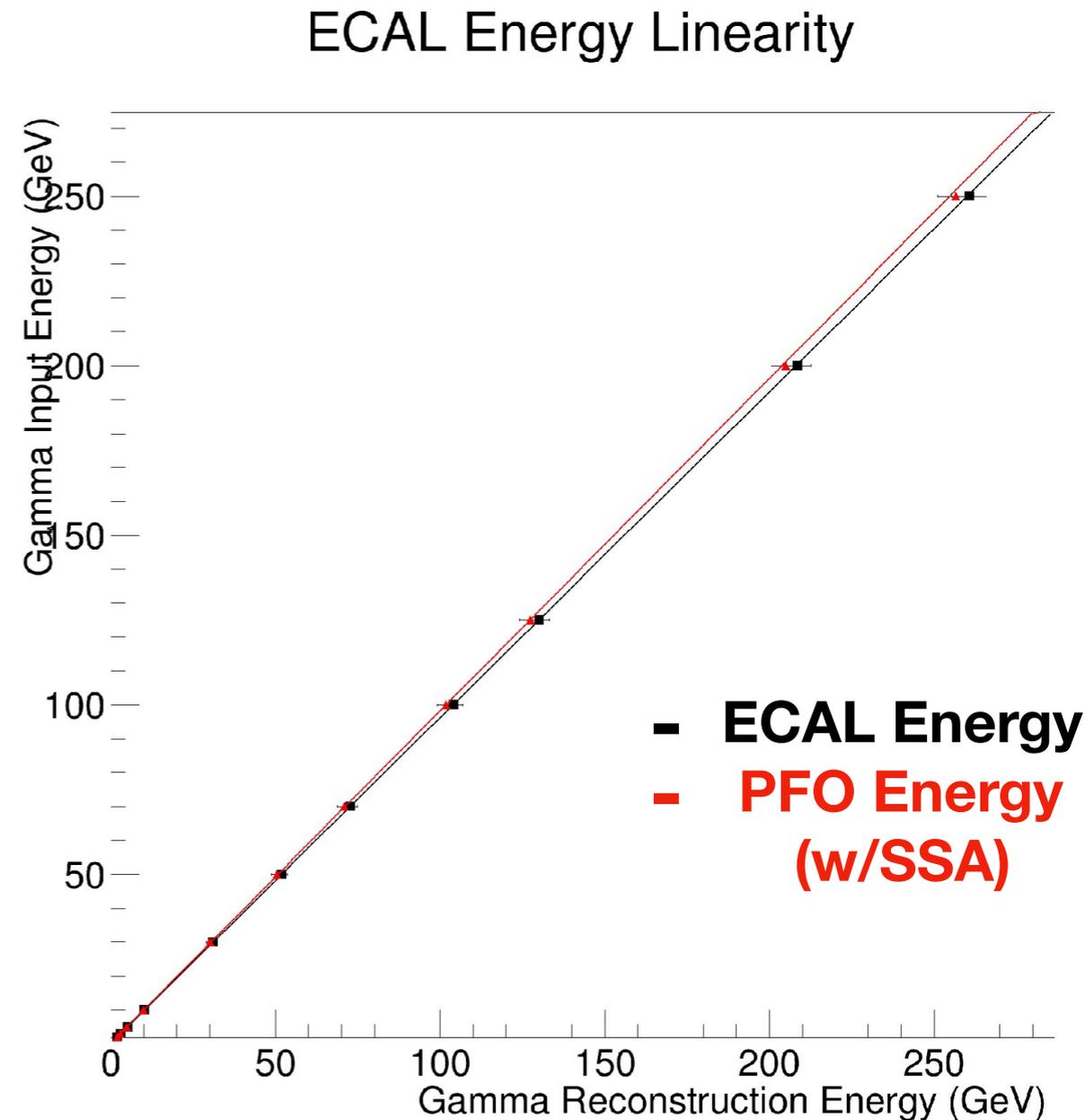
# Energy Calibration

- カロリメータを利用するにはエネルギーキャリブレーションが必要となる
- ECALでは、gammaの10GeVを入射し、10GeVのレスポンスが得れるように、キャリブレーションを行う
- ECALのみのデータでキャリブレーションを実施
- キャリブレーション係数を変更して、10GeVになる値をBarrelとEndcapsで独立に確認
- 独立にキャリブレーションした上で、全方向に gamma を打ち込み、キャリブレーションの妥当性を確認
- ディストリビューションはガウシアンでフィットでき、分解能は想定されていたものとなった



# Energy linearity of gamma

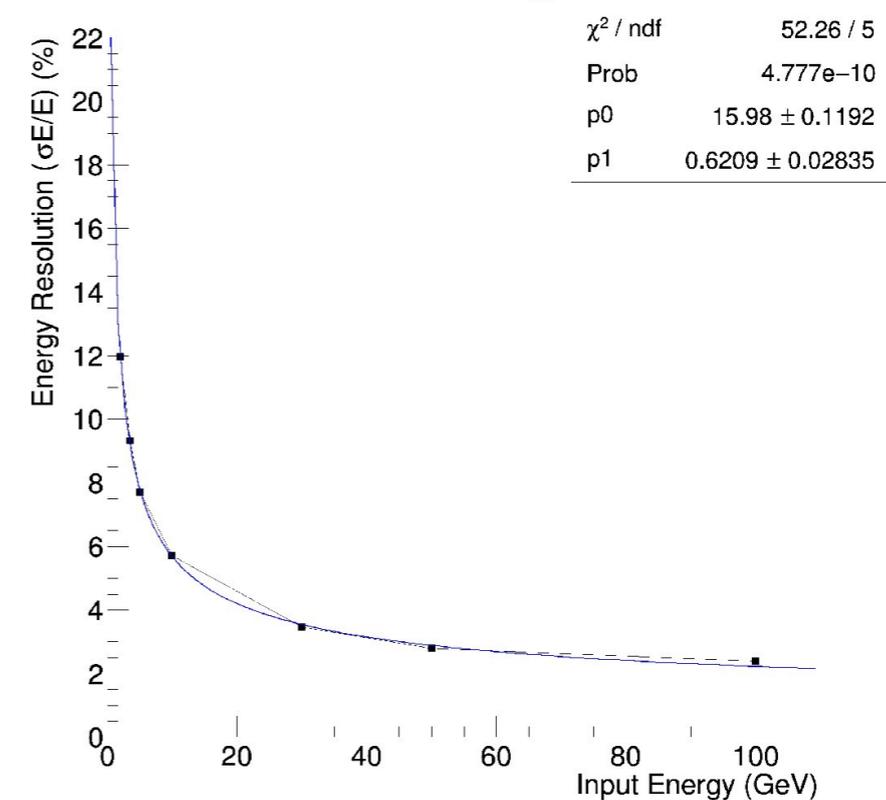
- ECALのエネルギーの線形性を gamma で確認
- gamma はすべての方向に以下のエネルギーで入射
  - 2, 3, 5, 10, 30, 50, 70, 100, 125, 200, 250 GeV
- 再構成した全体のエネルギー(PFO)とECALで落としたエネルギーを確認
- リニアリティは十分にあり、また切片はほぼゼロとなった
- 若干ながら、SSAとECALのみでのレスポンスに差はあるが、問題ない程度



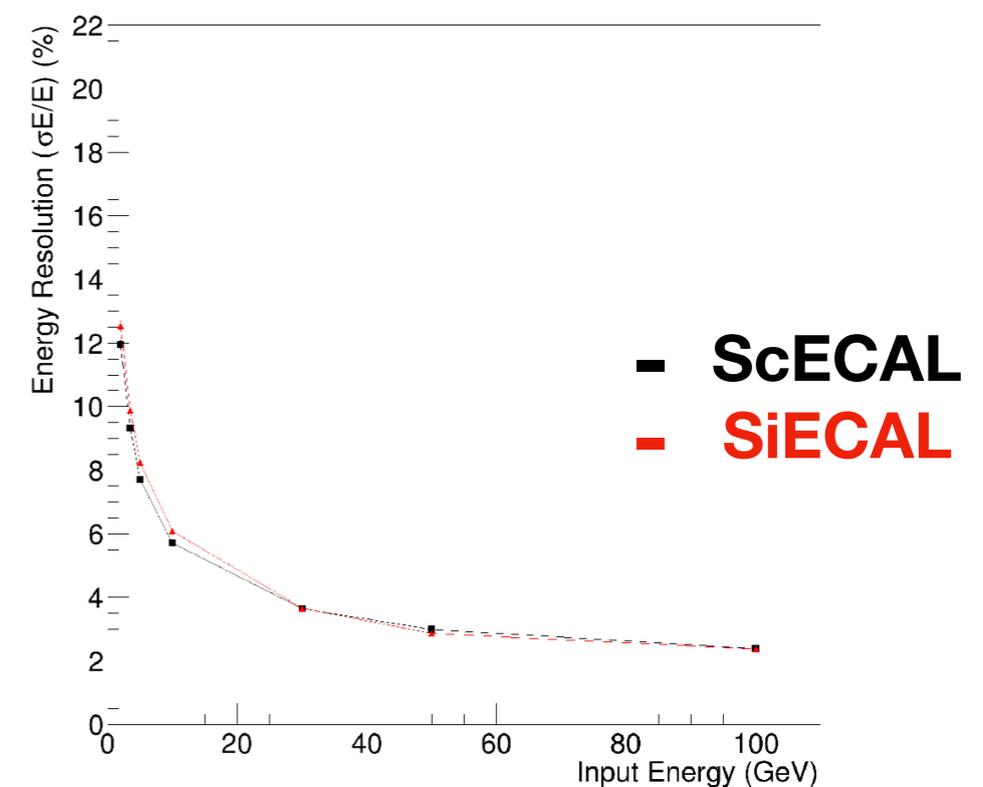
# Energy Resolution of gamma

- ガンマでのエネルギー分解能を確認した
- gammaのエネルギーを変えて、入射した
- $\sigma E/E$ でのフィット結果は、16%程度となり、想定されていた分解能となった
- 単一光子での、SiECALとのエネルギー分解能の比較は、20GeV以下でScECALのほうが良い  
(単純にサンプリングレシオの影響)
- 30GeV以上で分解能は大きな差はない

ScECAL Gamma Energy Resolution

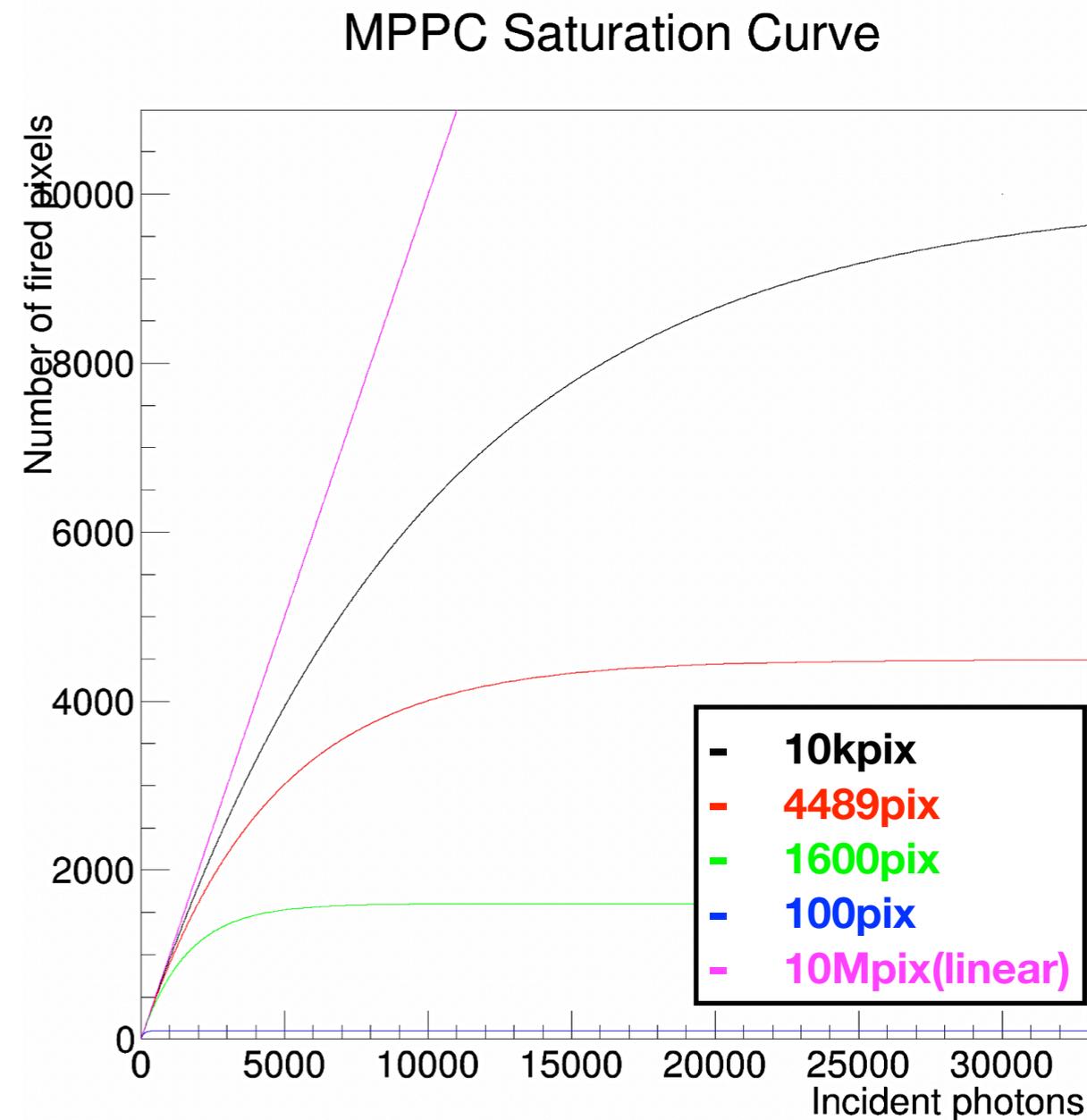


ScECAL vs SiECAL Gamma Energy Resolution



# MPPC Saturation Effect

- ScECALは、MPPCの飽和の影響を考える必要がある
- MPPCはnaiveな飽和モデルでは、ピクセル数以上のフォトンが同じタイミングに入射した場合、完全飽和(出力一定)が起こる
- このオーバーフローは、Bhabhaイベントのような非常に狭い領域に大きなエネルギーが入射する場合に、同じシンチレータで多数の光子が発生することで起きうる
- 500GeVのILCでのBhabhaイベントを想定して、現在は大きなダイナミックレンジを持つ、10k pixelのMPPCの利用が考えられている
- (実際のMPPCはクロストーク、アフターパルス、ピクセルリカバリーなどの影響でもう飽和が遅くなる
- これをシミュレーション上で、エネルギーの再構成をした場合に、どの程度の影響があるかを確認した



# MPPC Saturation Effect at Energy reconstruction

- ILCの各段階で、最大エネルギーとなる125GeVと、250GeVの単一光子を10k イベント作成し、入射した

- ECALのデータのみでエネルギーを再構成

- 比較条件として

- MPPC Pixel: 1600, 4489, 10k pixel

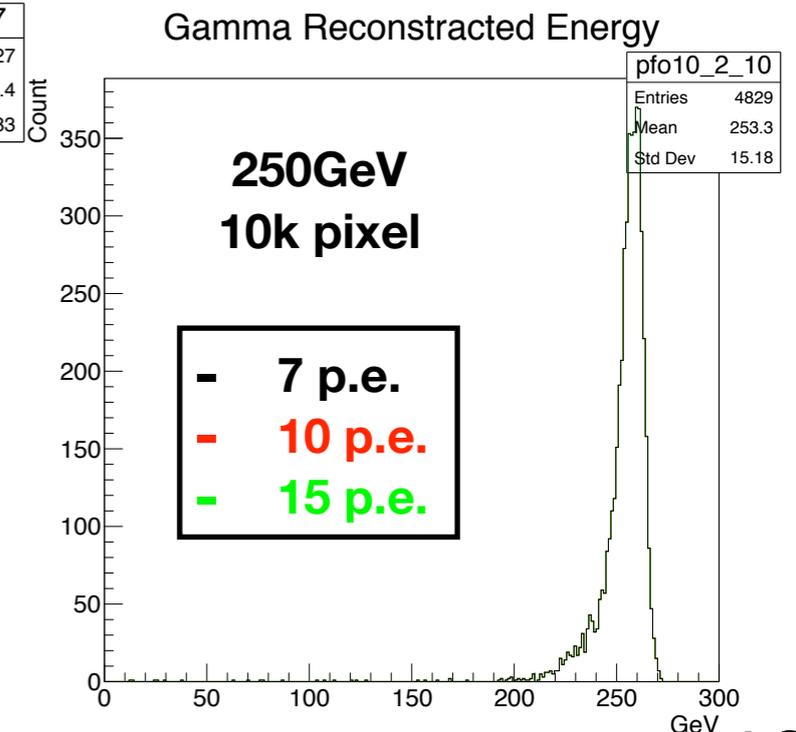
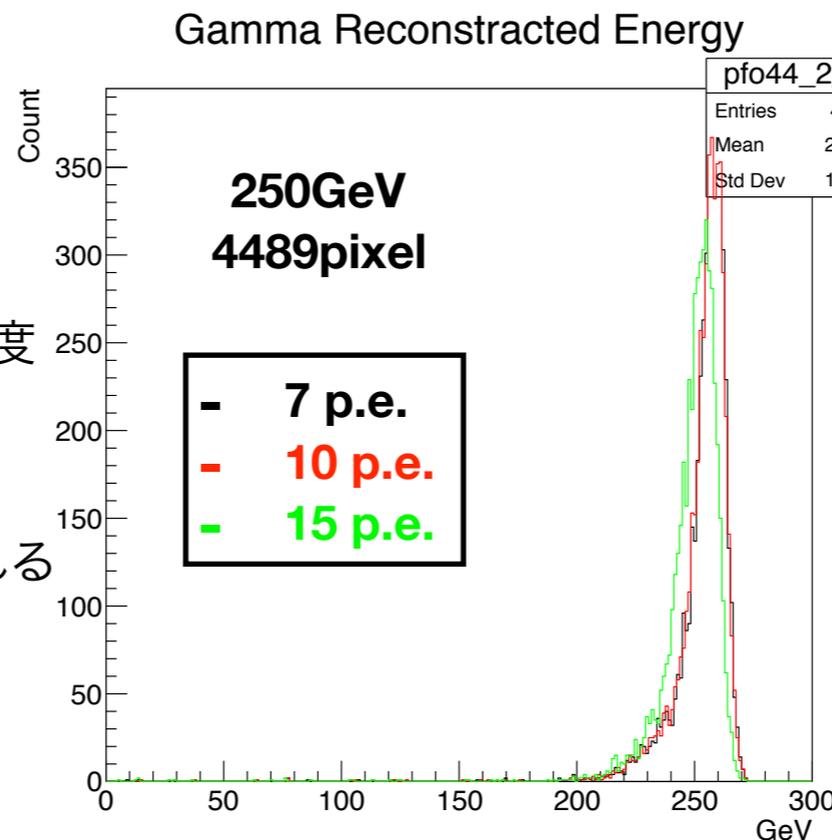
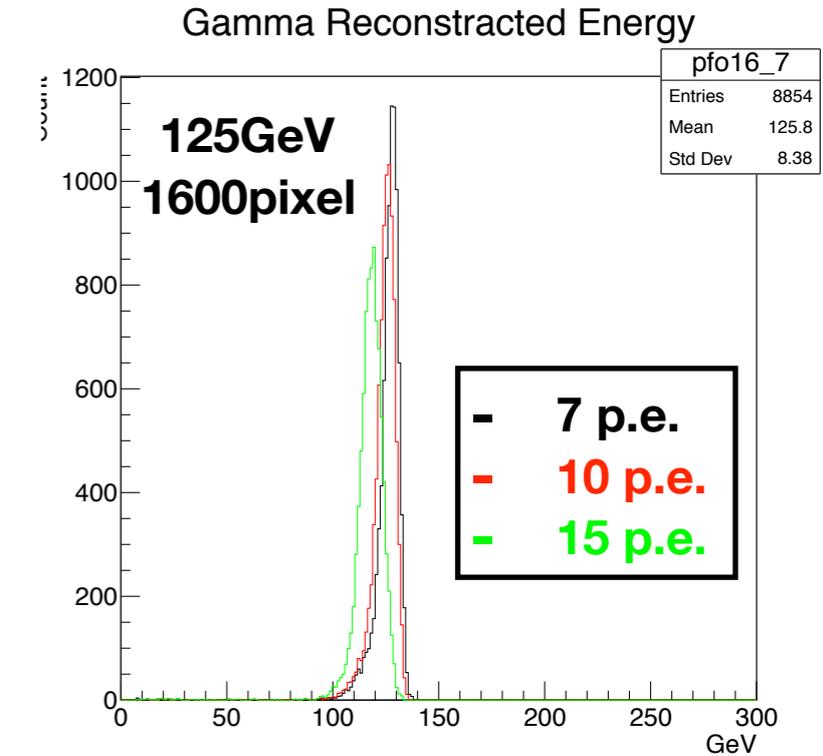
- p.e./MIP: 7, 10, 15

- 1600 pixでは、125GeVでも、15MIP/p.e.では、再構成したエネルギーが低い値となっているのが確認できる

- 10k pixel では、250GeVを入射し、p.e./MIP を変えてもほとんど変化はない

- 4489 pixelも、250GeVでもほぼ影響はない程度

- シミュレーションからはMPPCは4489 pixel以上であれば利用可能だと考えられる



# Summery

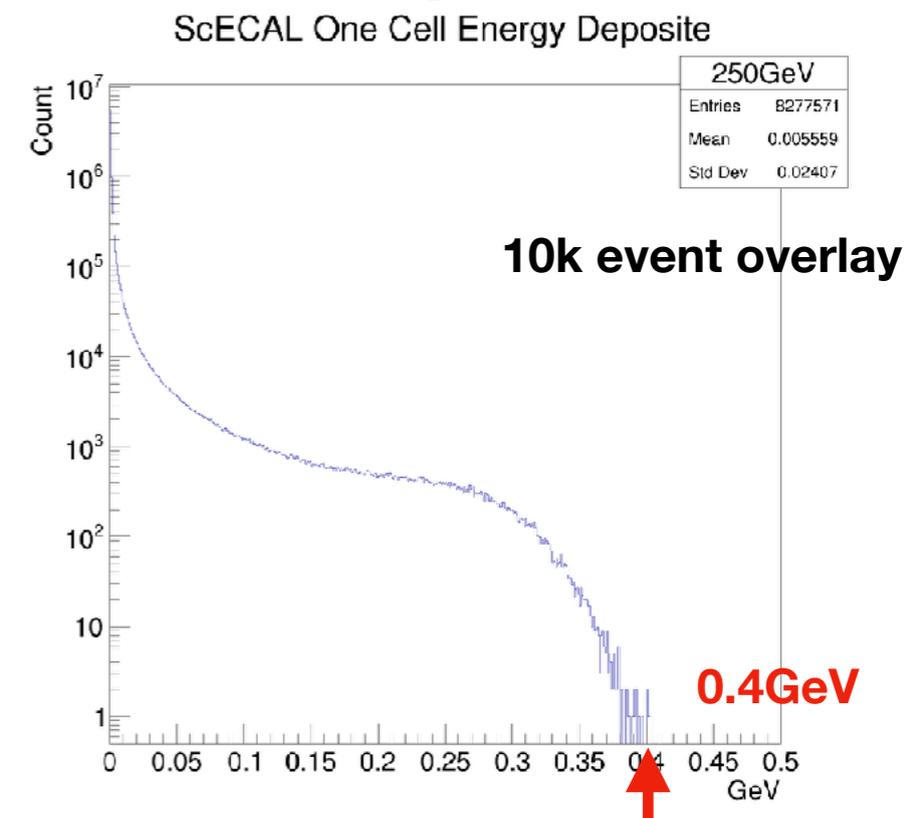
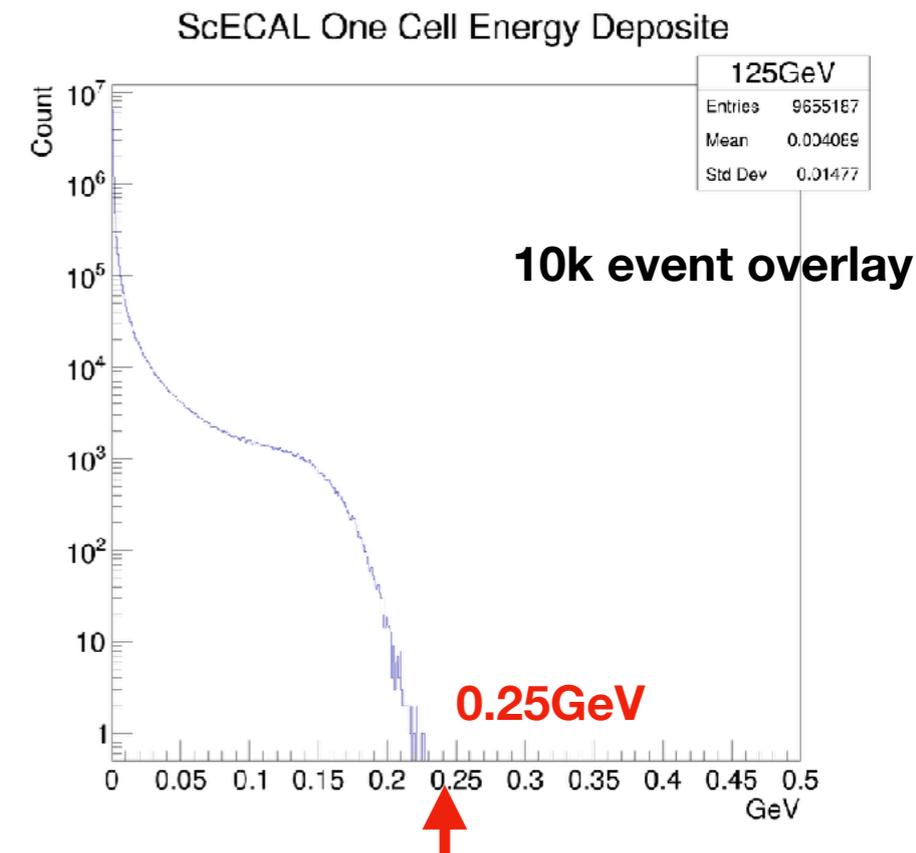
- 信州大学では、ILDのシンチレータ電磁カロリメータの開発を行っている
- 新しく導入されたDD4hepでのScECALのシミュレーションを評価した
  - 新しいSiとScを同時に評価可能な、シミュレーションモデル
  - ScECAL固有のパラメータの決定
  - ScECALのみで必要となるSSAの導入
- 再構成でのSSA、PFAを含めた、ScECALのgammaでのエネルギー線形性は非常に良い
- また、純粋な単一光子でのエネルギー分解能も想定していた結果となった
- MPPCのピクセルを10k pix->4489 pixへと減らす、また1MIPあたりの光子数を7->15へ増やし、naiveモデルを仮定したとしても、500GeV ILCでも問題ないことが確認できた
- 今後として
  - SSAとPFAパラメータの調整を行い、Jetを含むエネルギー分解能の評価を行う
  - より現実に即したMPPCのモデルを入れた上での評価を行う

# Backup

---

# 単一シンチレータの最大エネルギーデポジット

- 125GeVと、250GeVの単一光子を 10k イベント作成し、入射した
- 125GeVでは、最大0.25GeV程度  
250GeVでは、最大0.4GeV程度
- 1MIPあたりのエネルギーデポジットは、Sc1.5mmだと、だいたい0.25MeVとなる
- 1MIP7p.e.とすると、ここから、最大の光電子数は容易に計算でき
- 0.25GeVだと、1000MIPで、7000p.e. 程度
- 0.4GeVだと、1600MIPで、11200p.e.程度
- 10k pixのだと、飽和するかどうかぐらいの影響となる
- しかし、このエネルギーが発生するイベント数は非常に少ない



# SSAでのJet ERの向上

