

国際リニアコライダーのための 高位置分解能シリコンセンサーの 開発

粒子物理学分野 素粒子実験研究室

上杉悠人

指導教員：末原大幹、川越清以

2020年2月13日

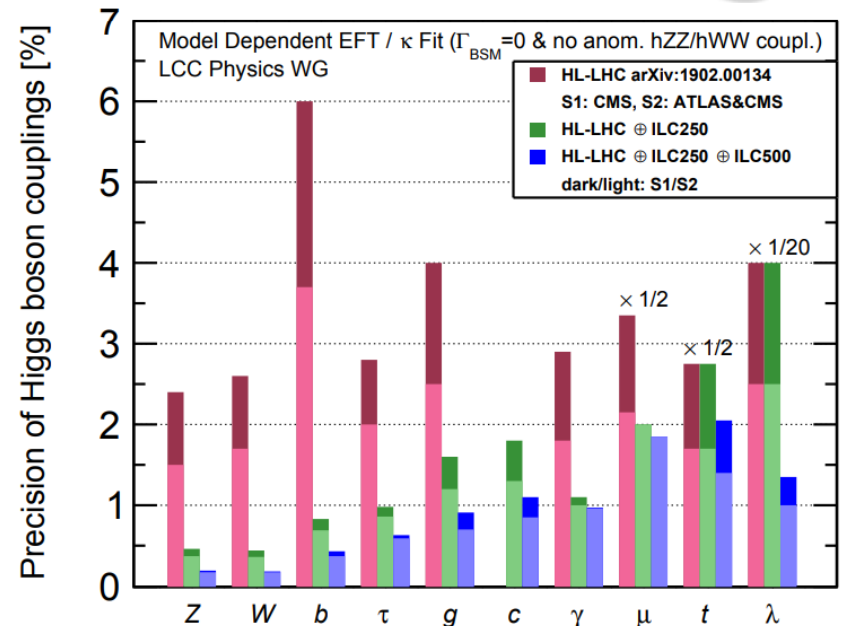
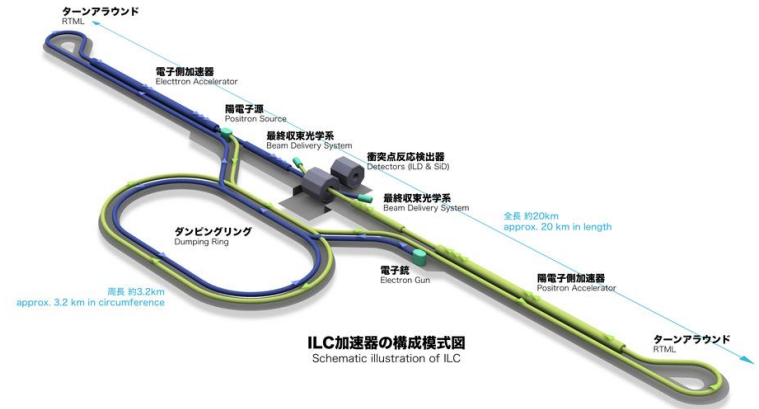
修士論文本審査



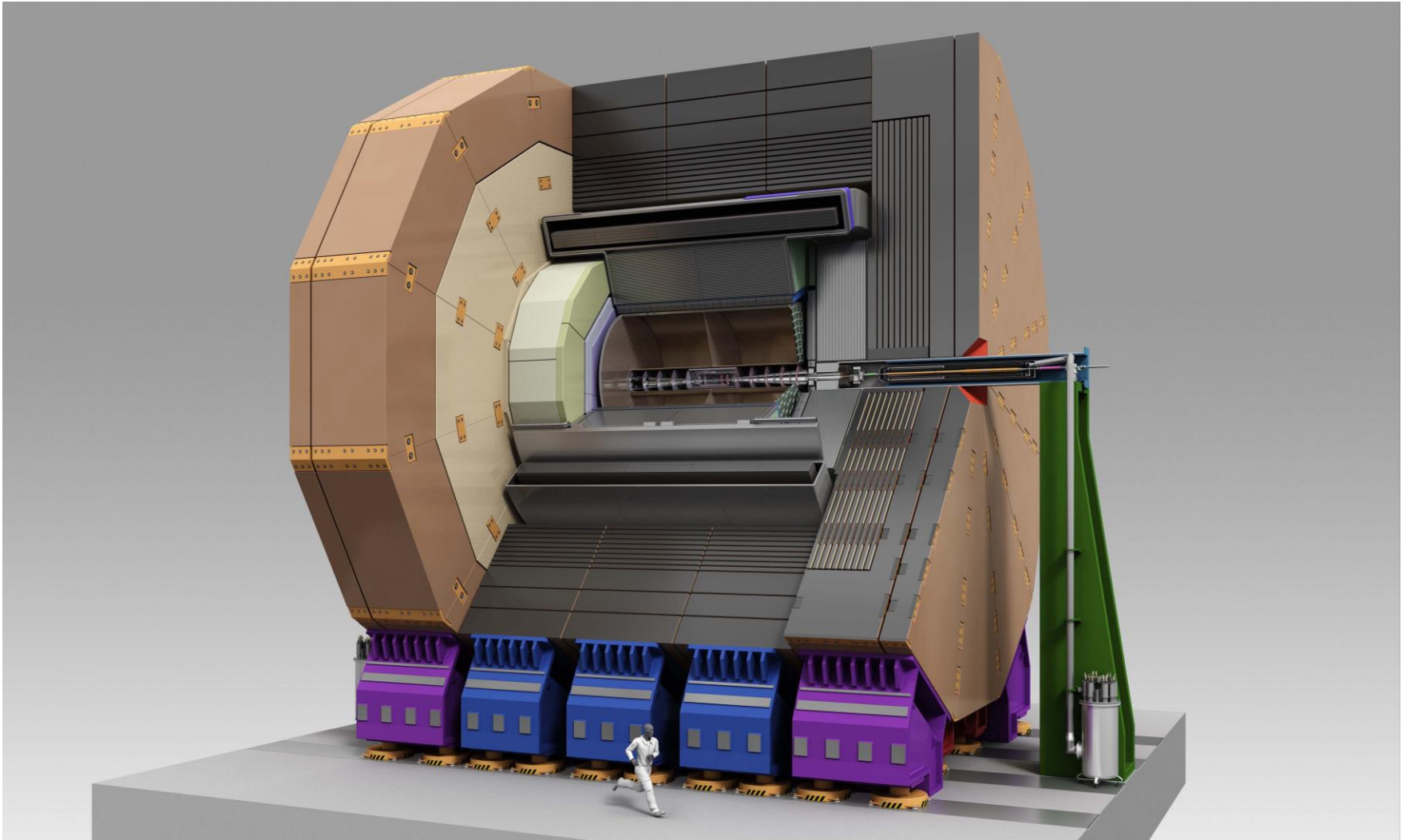
KYUSHU
UNIVERSITY

国際リニアコライダー実験

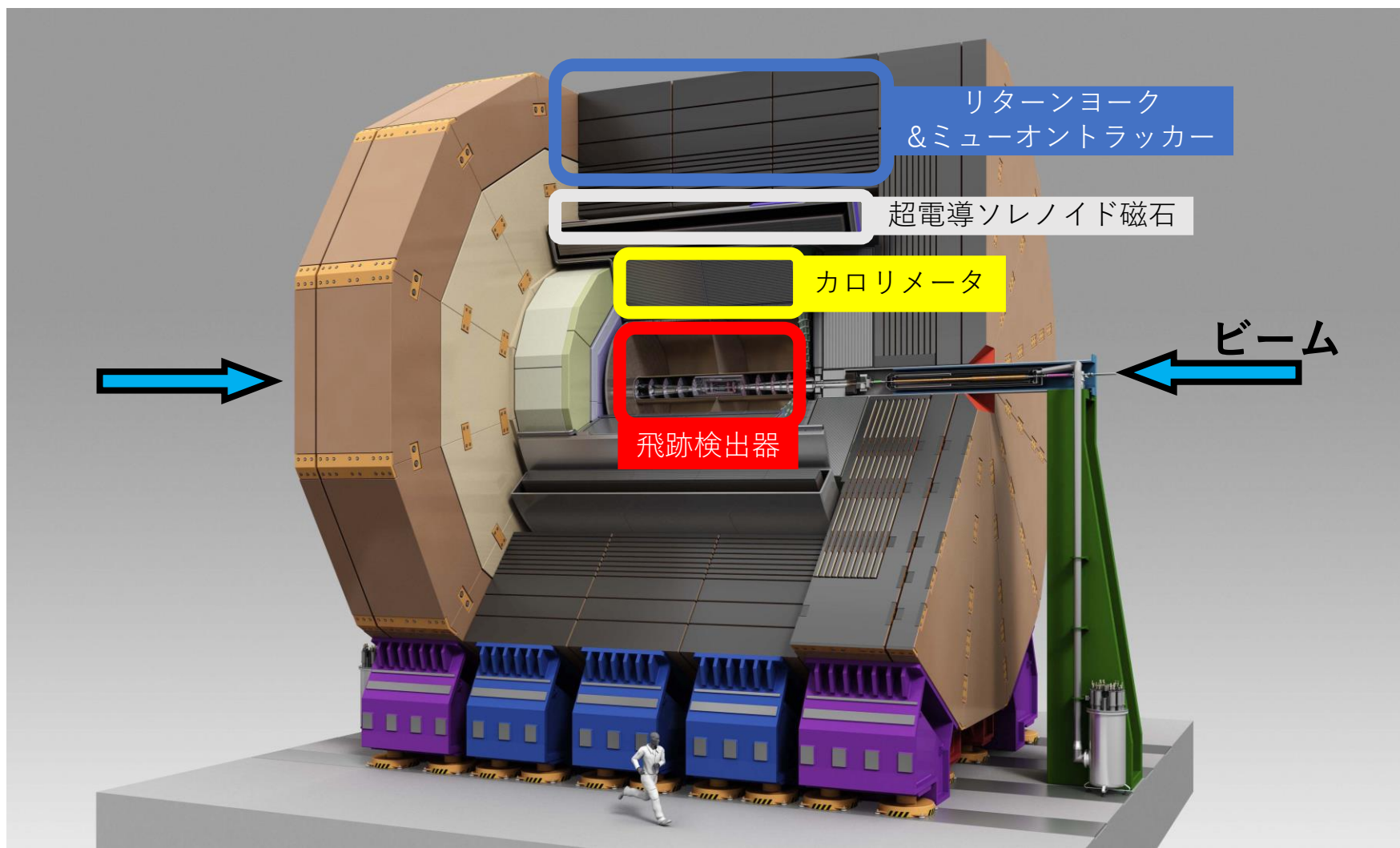
- International Linear Collider
- 次世代の線形加速器
 - 電子・陽電子衝突
 - 全長：20 km
 - 重心系エネルギー：250 GeV
 - Higgs factory
- ILCの特徴
 - 背景事象が少なく精密測定が可能 (LHCは陽子・陽子衝突)
- 各国との国際交渉を開始
- 国際的なILC準備研究所の設立



ILD (International Large Detector)

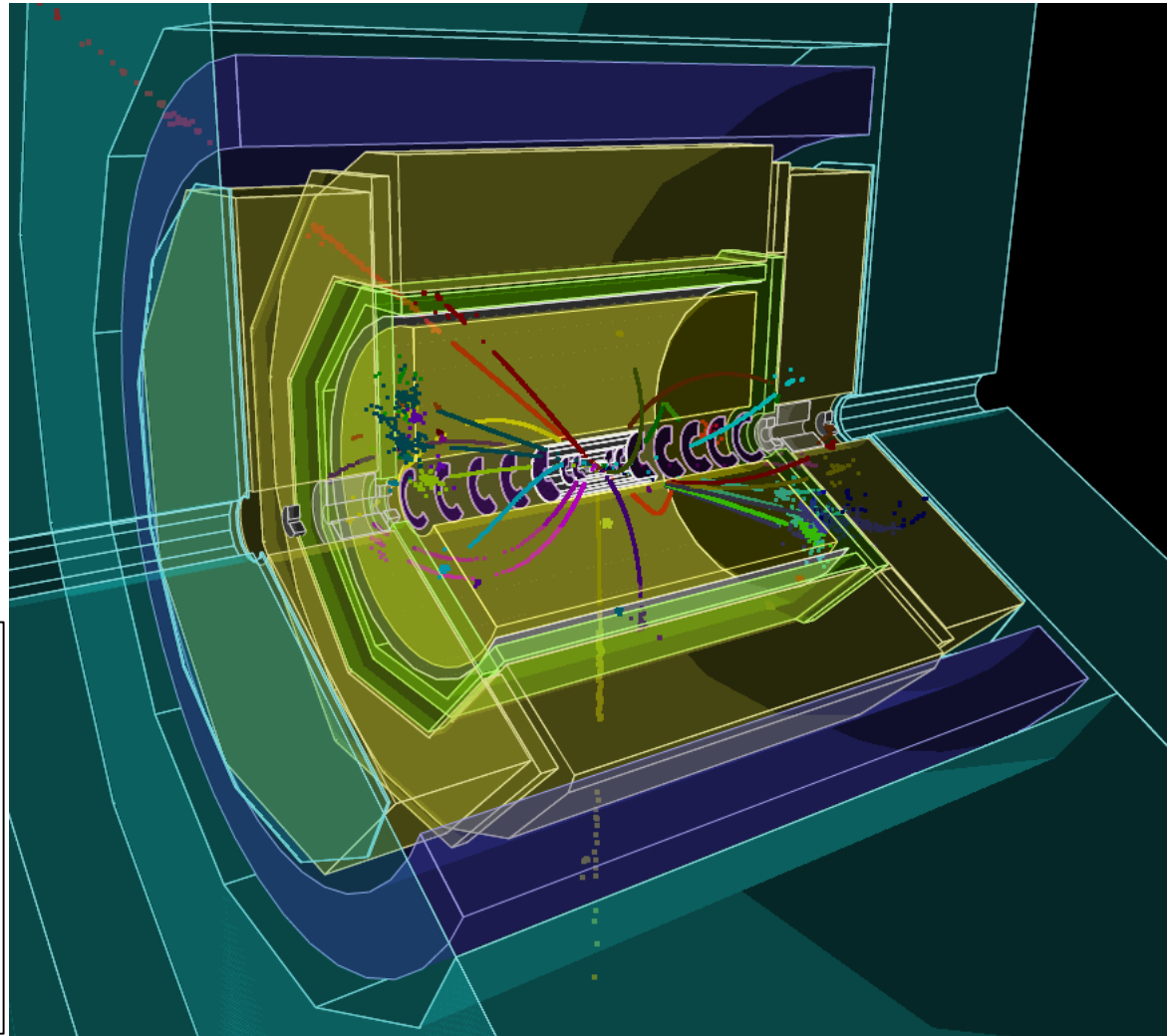
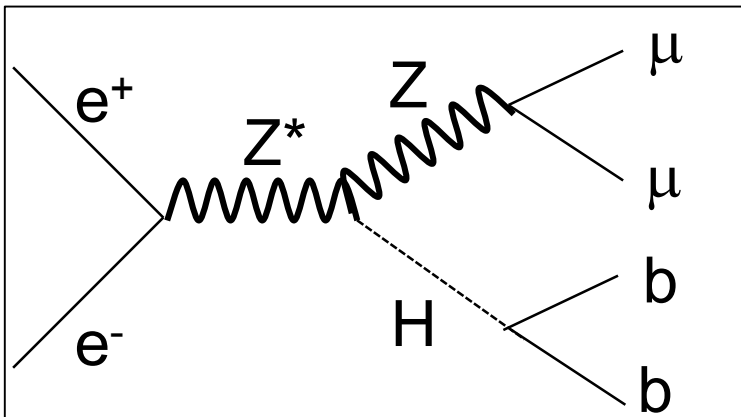


ILD (International Large Detector)



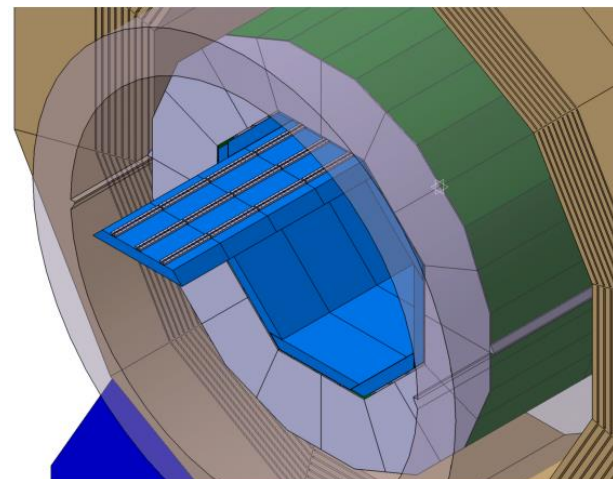
重心系エネルギー250 GeV におけるヒッグス粒子生成過程の一例

- ILC でターゲットとする物理事象の多くは終状態に複数のジェット(多数の粒子群)を含む
→ ジェットエネルギー分解能の向上が必要



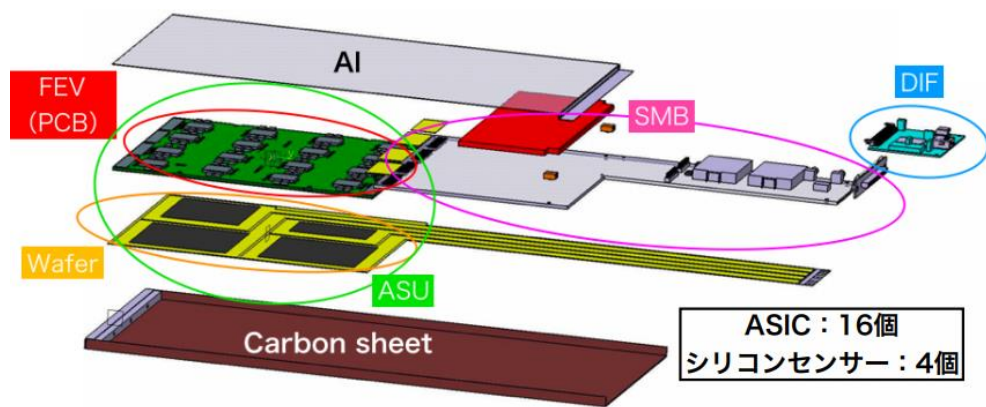
シリコンタングステン電磁カロリメータ

- Si 検出層 + W 吸収層 → 多層構造 (20~30 層)
- センサーと読み出し回路が一体化し、検出層と吸収層の間に挟まれる
- W → 電磁シャワーを起こす
- 主に電磁シャワー (電子、光子) のエネルギーを測定



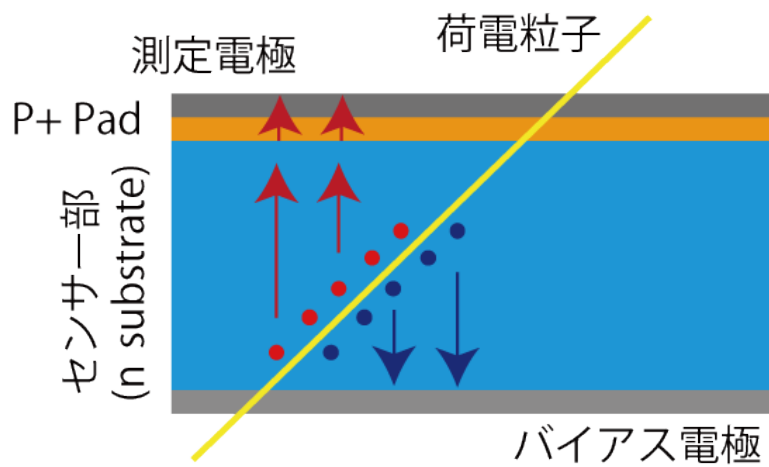
- ジェット中の電磁シャワーはほとんどが π^0 由来 ($\pi^0 \rightarrow 2\gamma$)
- π^0 の再構成精度向上のためには、光子の方向(角度分解能)が重要な情報

→ 高位置分解能センサーを電磁カロリメータの最内層で使用

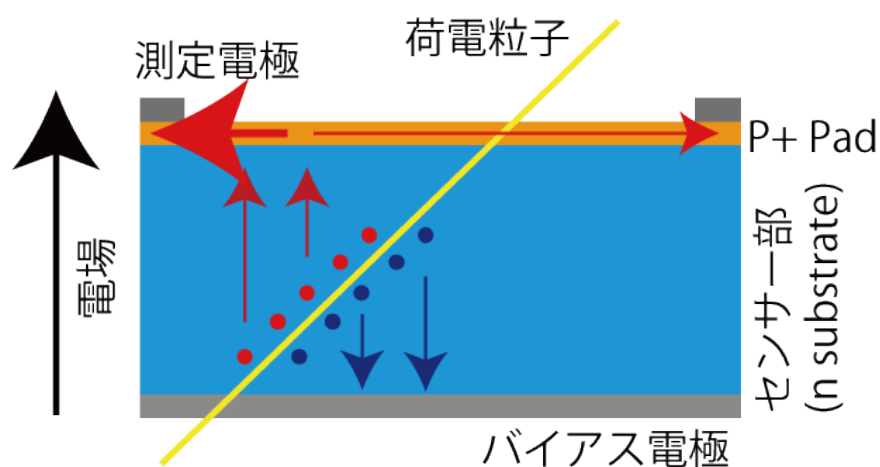


PSD (Position Sensitive Silicon Detector)

- センサー表面の抵抗層で信号を抵抗分割
- 入射位置は読み出した信号電荷の光量の重心位置から再構成



通常のシリコンパッド: P+ padを電極が覆っており電極に直接到達

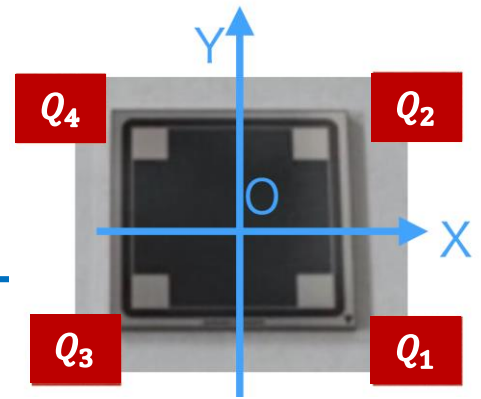


PSD方式: P+ pad内での抵抗分割により粒子の入射位置を取得

- PSDを用いることで、読み出しチャンネルの増加を最小限に抑えつつ、位置分解能の向上が期待できる

九大で以前に行った研究

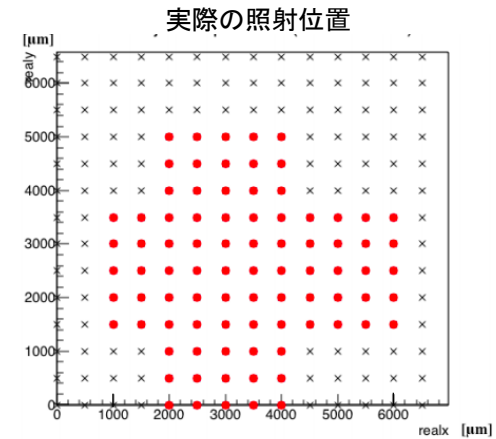
- PSD ($7 \times 7 \text{mm}^2$) にレーザーを $500 \mu\text{m}$ 間隔で照射
- 四隅の電極で信号電荷の読み出し



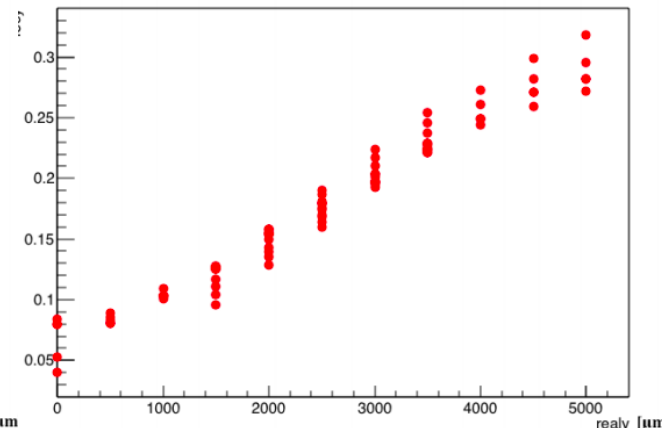
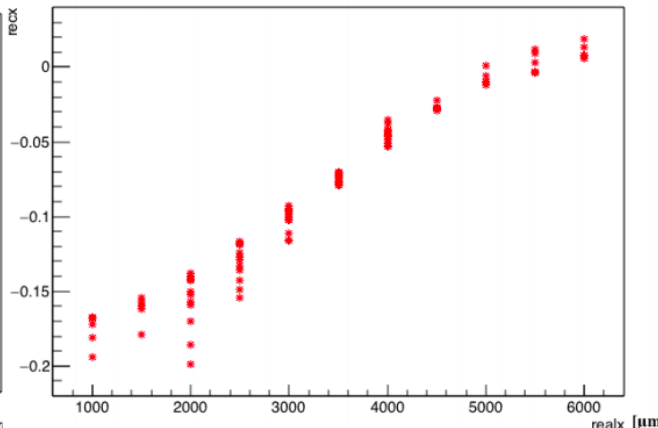
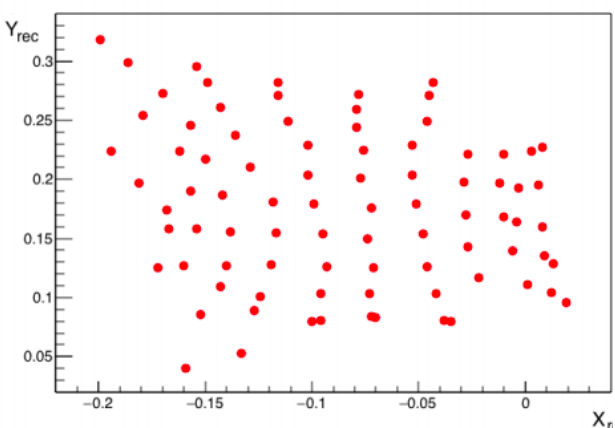
- 端部での歪み
- ダイナミックレンジが小さい $\rightarrow x : 0.33/7000\mu\text{m}$ $y : 0.34/7000\mu\text{m}$
- 放射線読み出しに適した読み出し回路にしていなかったため、レーザーのみ測定し、テストビームでは未測定

$$X_{\text{rec}} = \frac{(Q_1 + Q_2) - (Q_3 + Q_4)}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4} \quad (-1 < X_{\text{rec}} < 1)$$

$$Y_{\text{rec}} = \frac{(Q_2 + Q_4) - (Q_1 + Q_3)}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4} \quad (-1 < Y_{\text{rec}} < 1)$$



Reconstructed positions (meshed PSD)



再構成した照射位置

2020/02/13

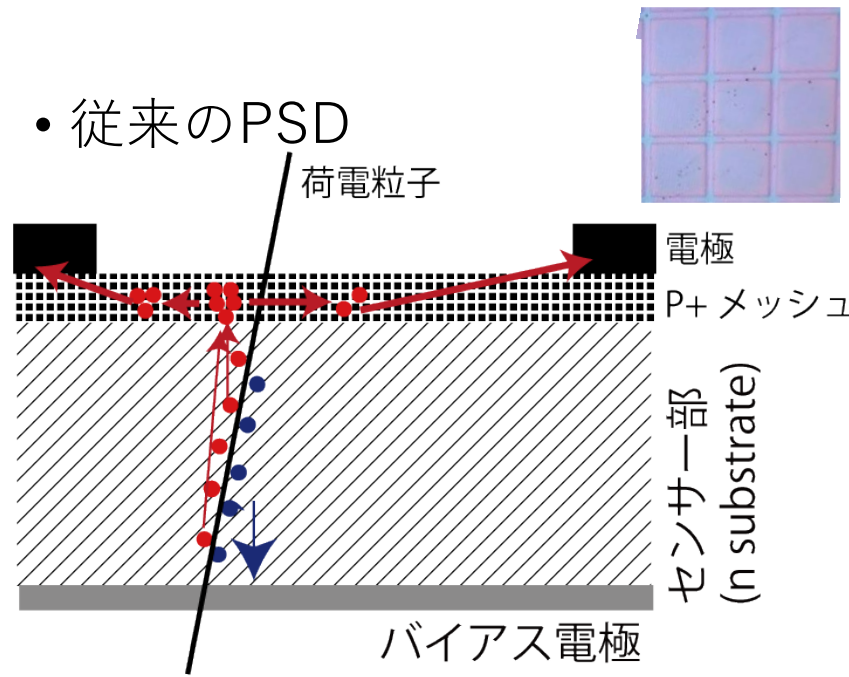
再構成した照射位置
とX座標の対応

再構成した照射位置
とY座標の対応

新 PSD の仕様

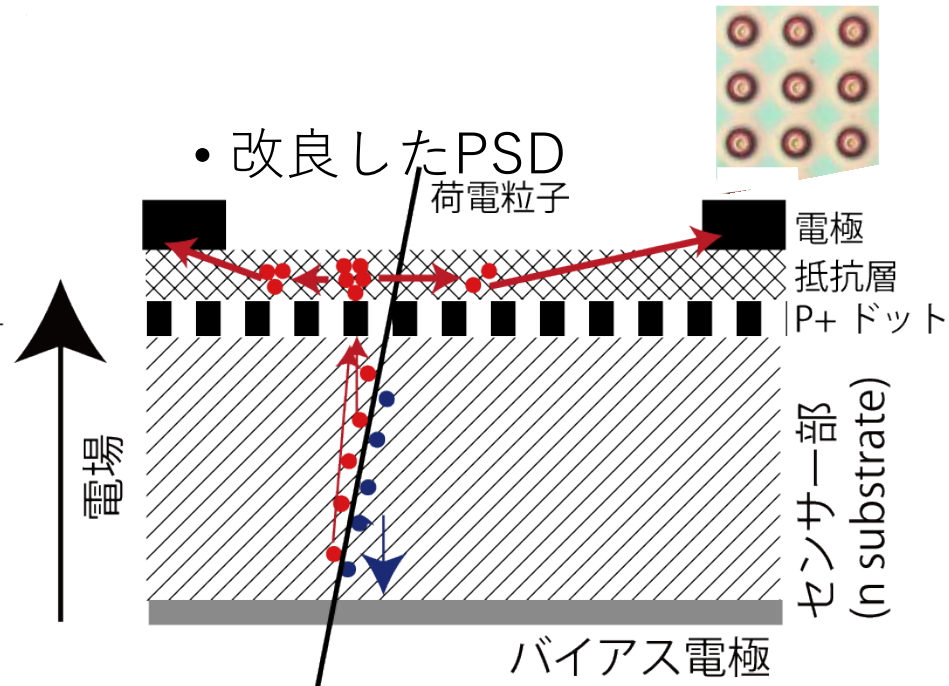
- ダイナミックレンジが小さい → 読み出しインピーダンスの影響
→ 抵抗層の抵抗値を大きくした

• 従来のPSD



P+メッシュ: P+層を電荷が通過するメッシュ形状により抵抗値をコントロールするが変更するにはマスクを作り直す必要がある

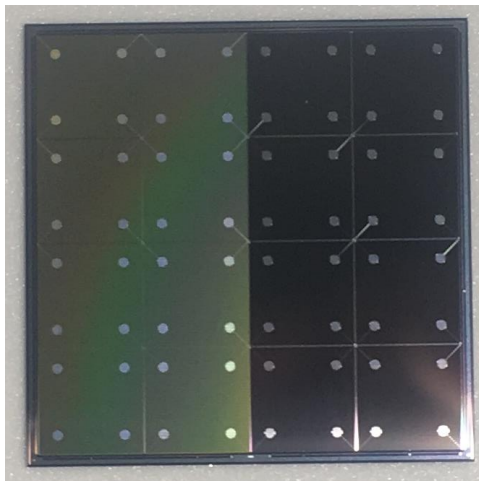
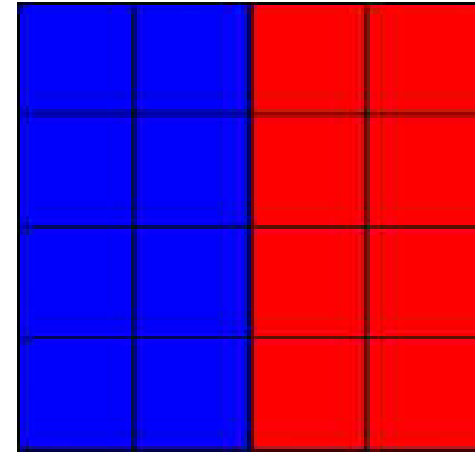
• 改良したPSD



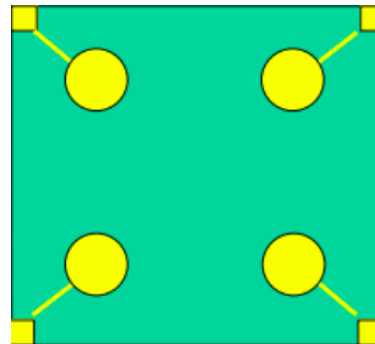
抵抗層: P+はドット状に配置し上部の抵抗層を介して電荷を輸送する抵抗層の抵抗値を高めに設定できマスクを変えずに変更もできる

新 PSD の仕様～PSD1-1

- セルの大きさ : $5.5 \times 5.5 \text{ mm}^2$
- センサー厚さ : $650 \text{ }\mu\text{m}$
- 抵抗値が以前のPSDの10倍、20倍、30倍の3種類を用意→抵抗層の抵抗値を最適化するため



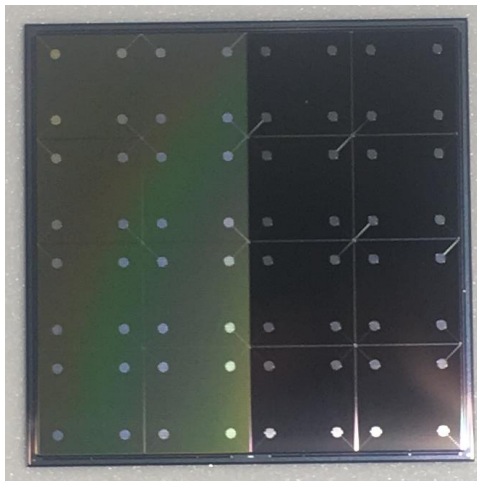
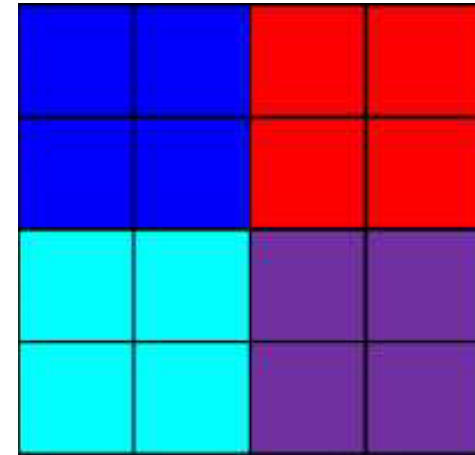
PSD 1-1



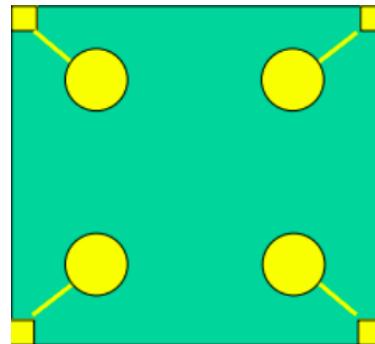
PSD 1-1
 $\times 16 = 64\text{ch}$

新 PSD の仕様～PSD1-2

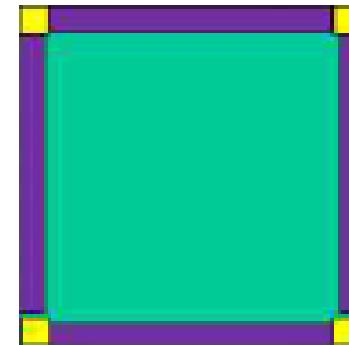
- セルの大きさ : $5.5 \times 5.5 \text{ mm}^2$
- センサー厚さ : $650 \mu\text{m}$
- 抵抗値が以前のPSDの10倍、20倍、30倍の3種類を用意→抵抗層の抵抗値を最適化するため
- セルの端部に低抵抗ラインを設置→歪みを減らすため



PSD 1-2



PSD 1-2
× 16 = 64ch



PSD1-2低抵抗ライン
→中央面に対して1/4
倍と1/8倍

^{90}Sr 線源での測定セットアップ

測定条件

- 線源無し
- 線源をセンサー基板の上に置く
- 線源をセンサー基板の左側に置く
- 線源を12mm 離して測定

用いたPSD

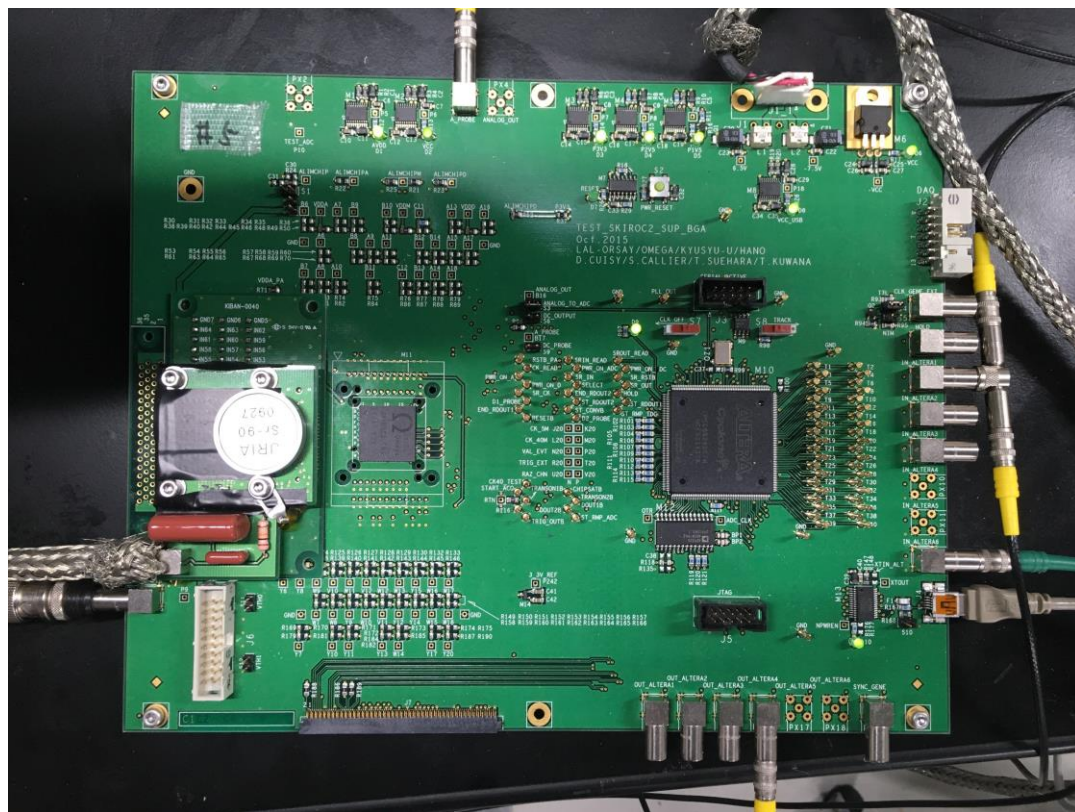
- PSD1-2 → シリアル番号1,2,3番
- PSD1-1 → シリアル番号3,4番

測定項目

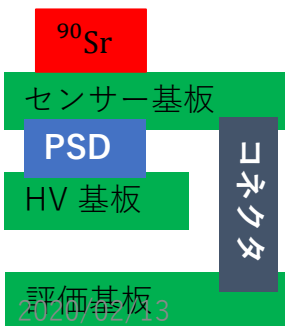
- ペDESTAL分布
- MIP スペクトル
- 再構成位置

- センサー基板 → 4層基板
- コネクタ → ノイズ低減

コネクタ



修論本審査



2020/02/13

^{90}Sr 線源での測定セットアップ

測定条件

✓ 線源無し

- 線源をセンサー基板の上に置く
- 線源をセンサー基板の左側に置く

✓ 線源を12mm 離して測定

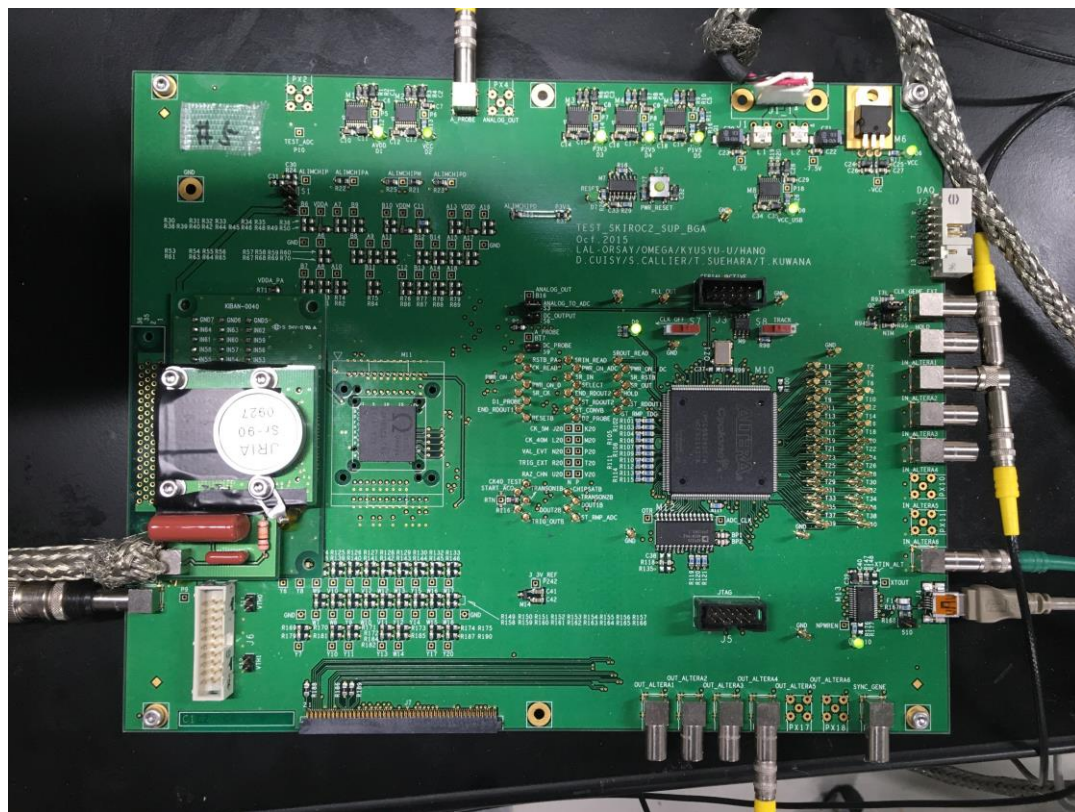
用いたPSD

- PSD1-2 → シリアル番号1,2,3番
- PSD1-1 → シリアル番号3,4番

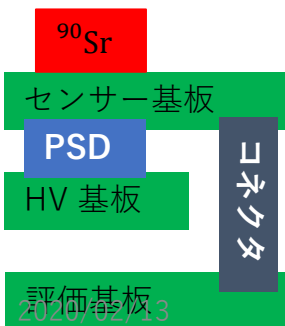
測定項目

- ✓ ペDESTAL分布
- ✓ MIP スペクトル
- ✓ 再構成位置

- PSD1-2-1 → MIP スペクトル
- PSD1-2-2 → 再構成位置分布
- PSD1-2-3 → 再構成位置分布

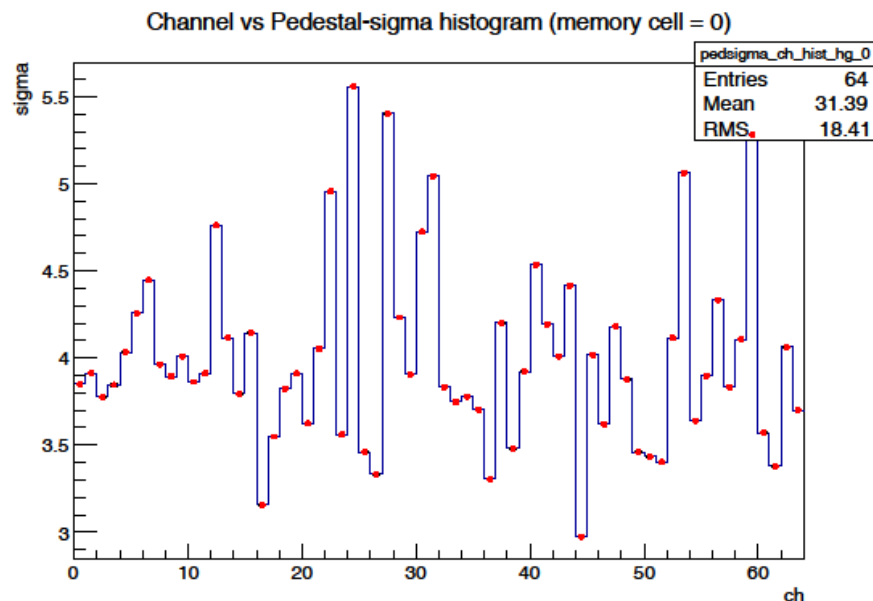
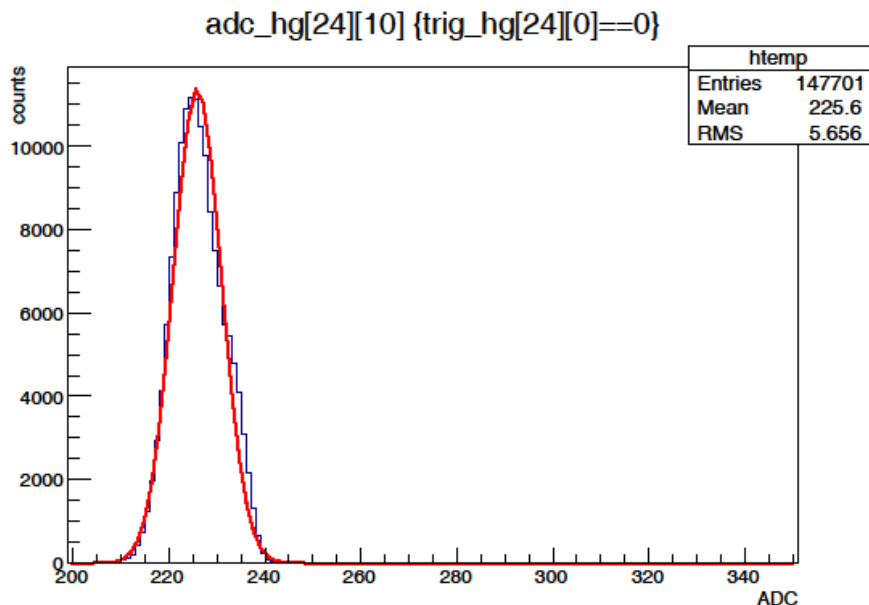


修論本審査



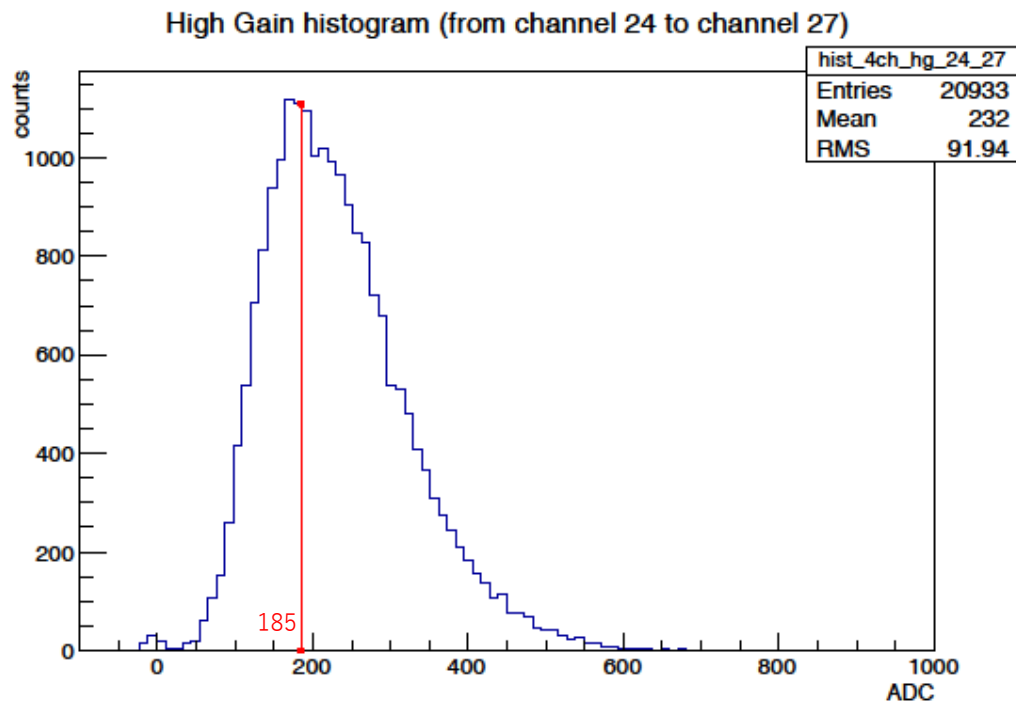
ペDESTAL分布

- PSD 1-2-2 における線源を 12 mm 離して測定した際のチャンネル24、メモリセル10番のペDESTALのADC分布及びそれをガウス関数でフィッティングを行った例（左）
- PSD 1-2-1 における各チャンネルのペDESTALの幅（右）



MIP スペクトル

- PSD1-2-1を ^{90}Sr を用いて β 線測定
- β 線はシリコンを容易に通り抜けるためほとんどがMIPとして振舞う
→信号の大きさは有感領域の厚みに比例
 - ✓650 μm で7.8 fCの信号量（読み出しASICのADC値185に相当）



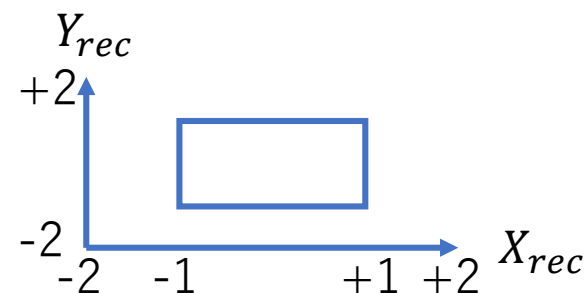
- ペDESTAL値を引き、1セル(4ch合計)のADC値を算出
- 4チャンネルのうち1チャンネル以上に信号が入ったときをカウント

再構成位置の2次元分布

- 用いた再構成の式
 - ✓各チャンネルのADC値を代入

$$X_{rec} = \frac{-ch0 - ch1 + ch2 + ch3}{ch0 + ch1 + ch2 + ch3}$$

$$Y_{rec} = \frac{-ch0 + ch1 - ch2 + ch3}{ch0 + ch1 + ch2 + ch3}$$



- セルの範囲

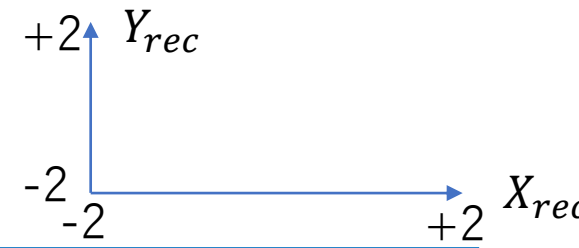
$$(-1 < X_{rec} < 1)$$

$$(-1 < Y_{rec} < 1)$$

抵抗値1倍				抵抗値10倍or20倍			
61	63	53	55	45	47	37	39
60	62	52	54	44	46	36	38
57	59	49	51	41	43	33	35
56	58	48	50	40	42	32	34
29	31	21	23	13	15	5	7
28	30	20	22	12	14	4	6
25	27	17	19	9	11	1	3
24	26	16	18	8	10	0	2

ピクセル位置とチャンネルの対応表

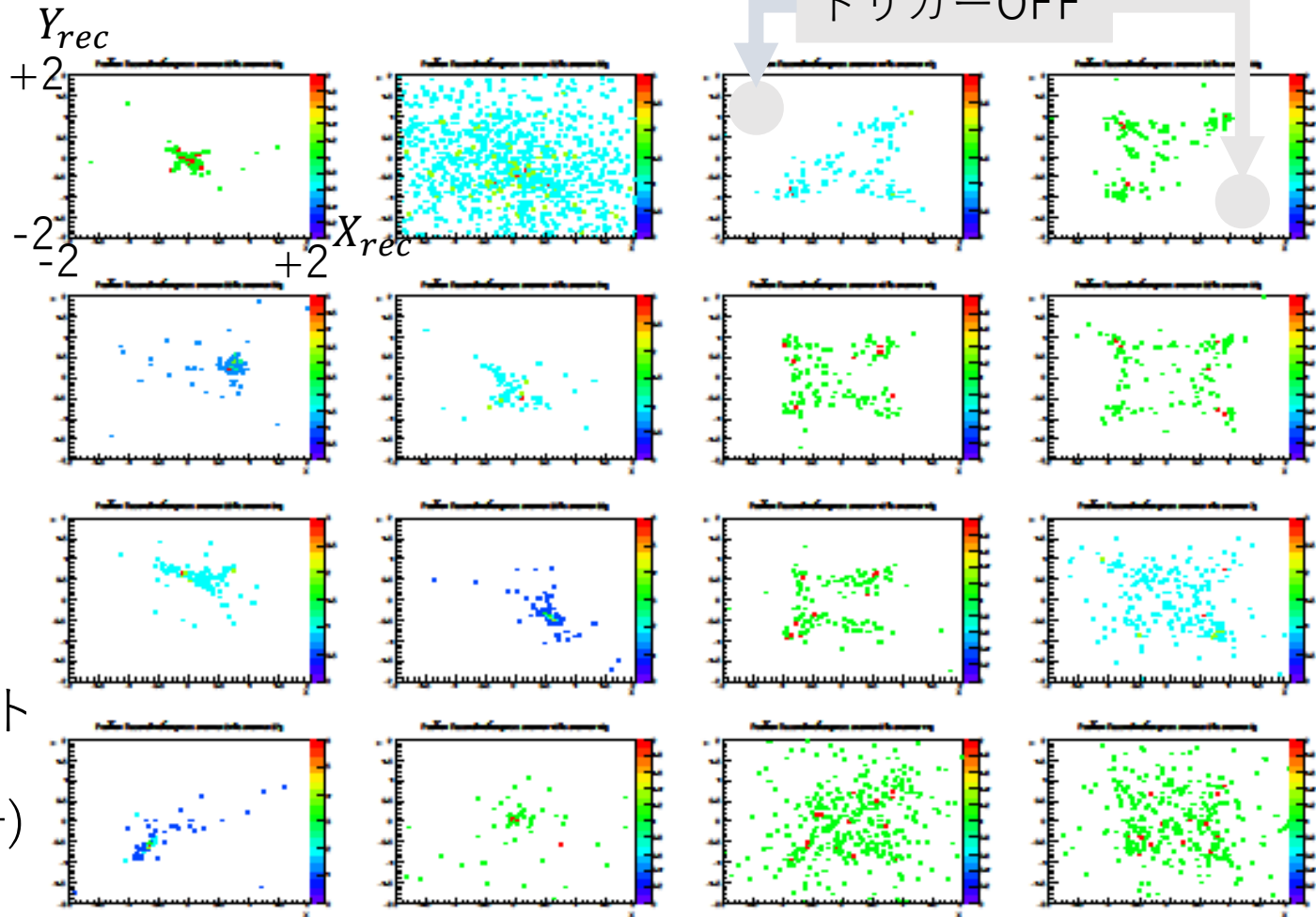
線源が無い場合の位置再構成



- PSD1-2-2
- 左半面
抵抗値1倍

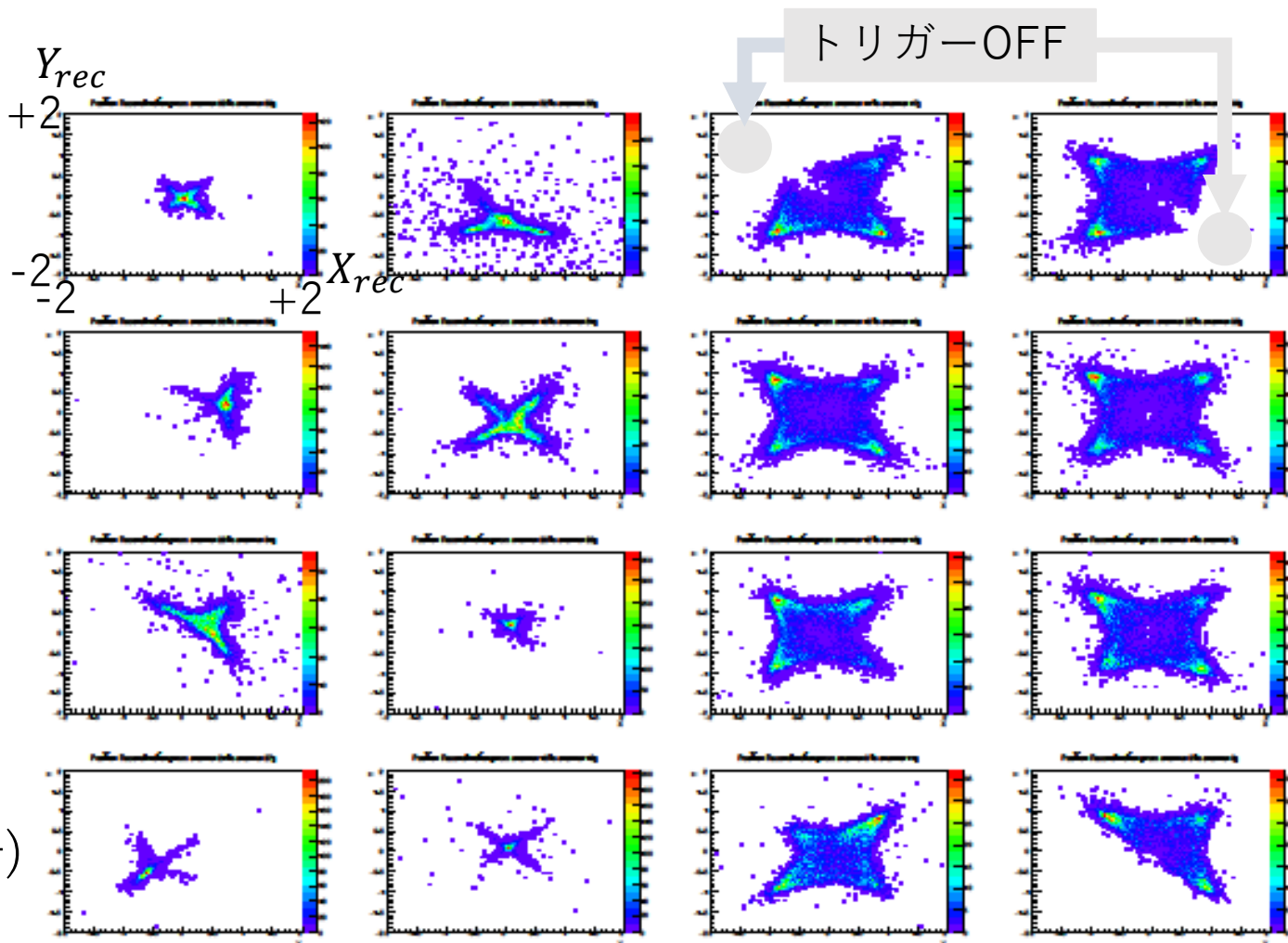
- 右半面
抵抗値10倍

- 測定時間
8時間
- ノイズレート
0.2 Hz
(全セル合計)



^{90}Sr を12mm離れた場合の位置再構成

- PSD1-2-2
- 左半面
抵抗値1倍
- 右半面
抵抗値10倍
- 測定時間
10時間
- 信号レート
1058Hz
(全セル合計)

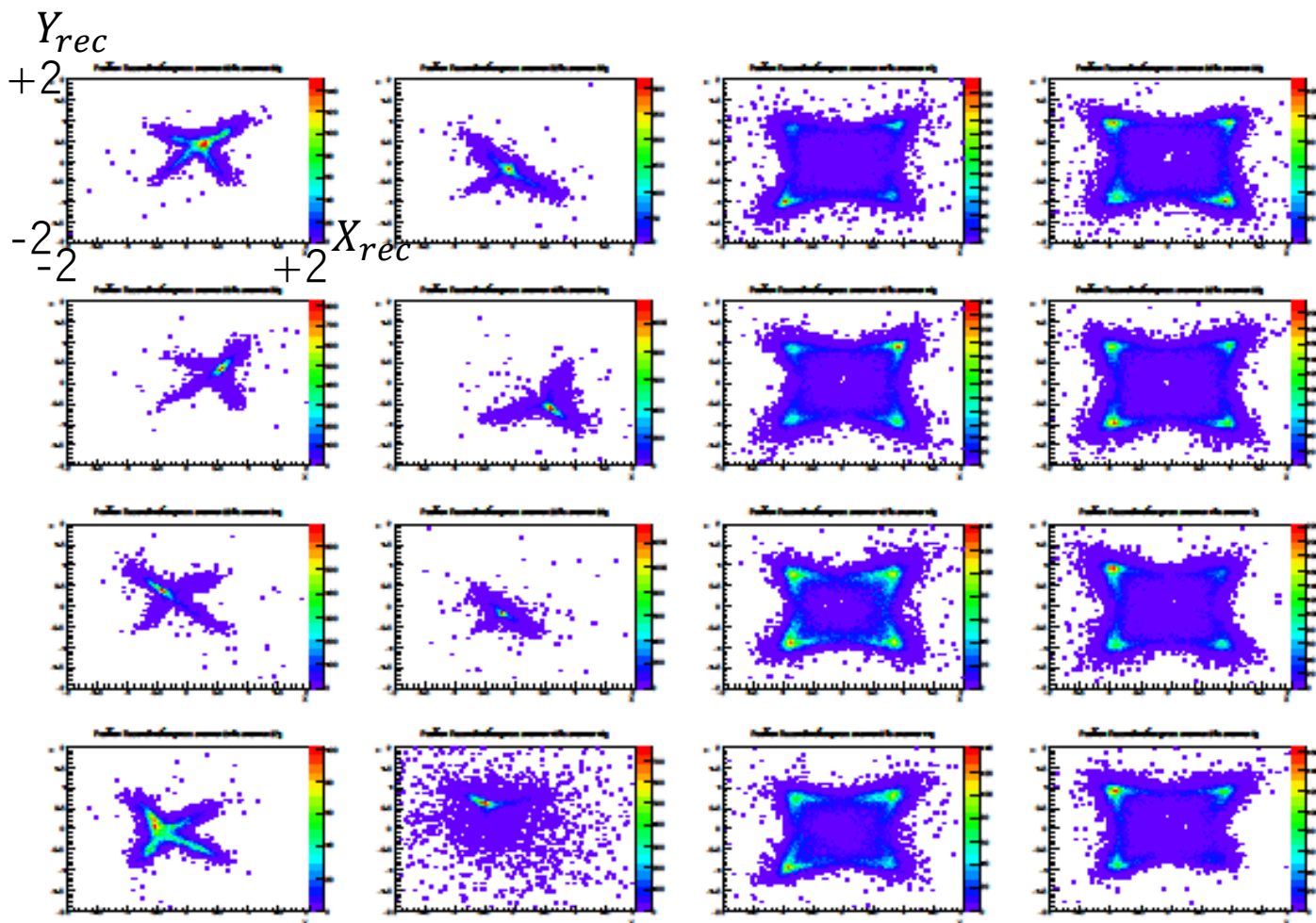


^{90}Sr を12mm離れた場合の位置再構成

- PSD1-2-3

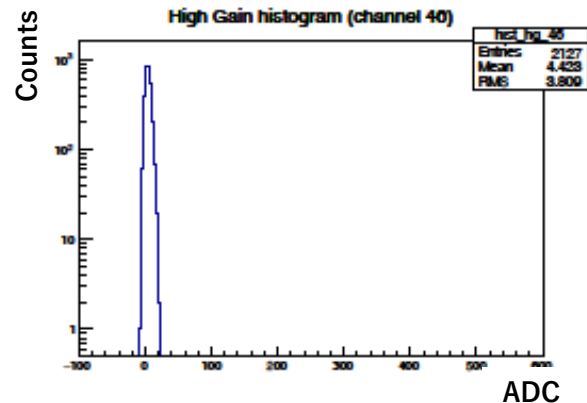
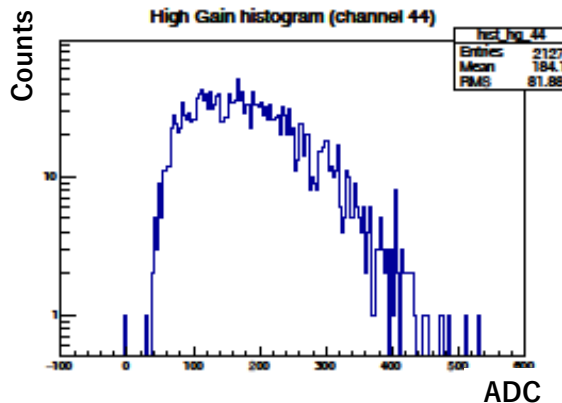
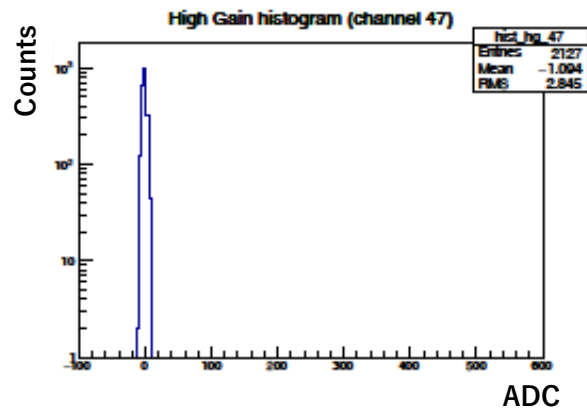
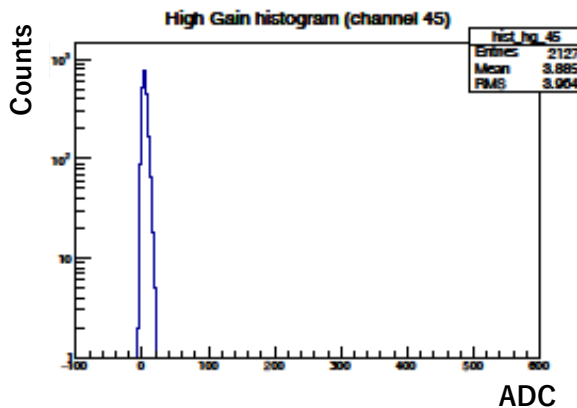
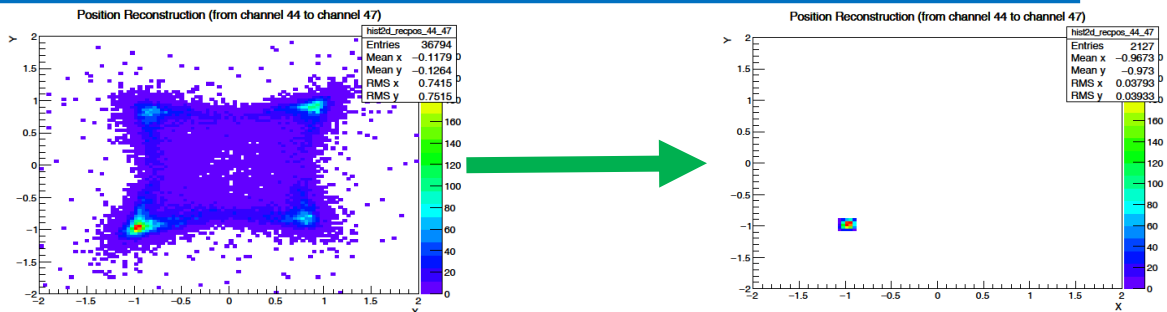
- 左半面
抵抗値1倍

- 右半面
抵抗値20倍

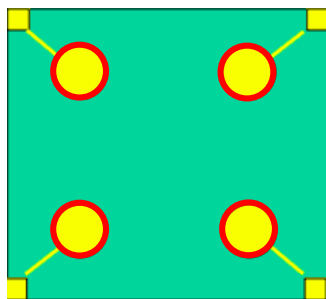


セルの四隅にヒットが集中していた

- PSD1-2-3
- $-1.05 < x < -0.9$
 $-1.05 < y < -0.9$
- トリガーがかかっているチャンネル以外のADC値はほとんど0
- PSDの電極の導電性接着剤が塗布範囲を超え、抵抗層と導通していた可能性
→ 今後レーザー試験



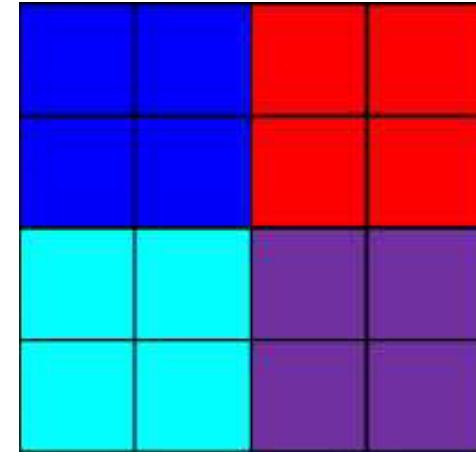
塗布範囲：○



2020/02/13

位置分解能

- PSD1-2-2 を ^{90}Sr から 12 mm 離して測定
- ペDESTALの幅を誤差として、位置の再構成に歪みが無く、ダイナミックレンジが 1 と仮定した場合の位置分解能
- $5.5[\text{mm}] \times \frac{\sigma_{reso}}{2}$ で $[\text{mm}]$ に換算
- 青色と水色部分はダイナミックレンジが小さいため除外
- 赤色： $(x_{reso}, y_{reso}) = (0.21, 0.21)[\text{mm}]$
- 紫色： $(x_{reso}, y_{reso}) = (0.19, 0.20)[\text{mm}]$
- 歪みがあるため、実際の分解能はこの数値より高くなる
- 従来のシリコンパッドだと位置分解能： $\frac{5.5}{\sqrt{12}} = 1.58 [\text{mm}]$
- SKIROC2A を用いた場合ノイズレベルが下がるため、SKIROC2CMS を用いた場合の位置分解能より改善されると考えられる



まとめと今後の課題

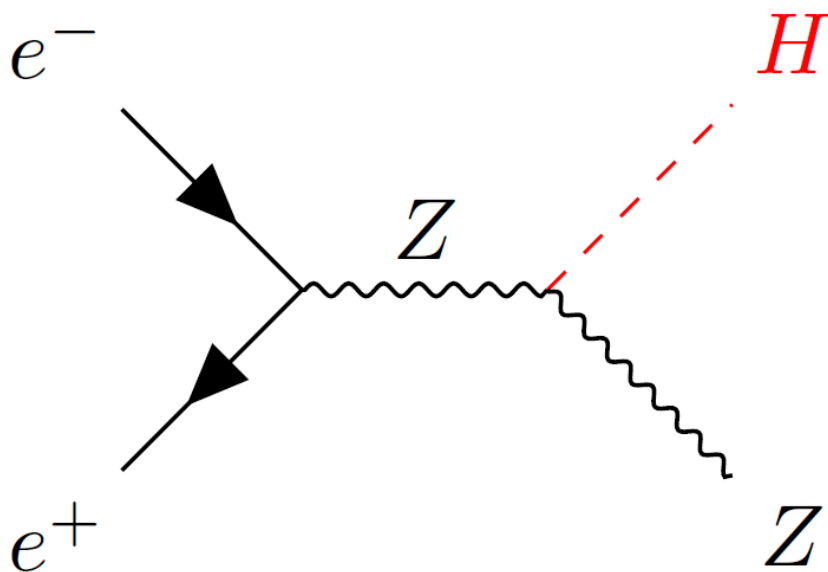
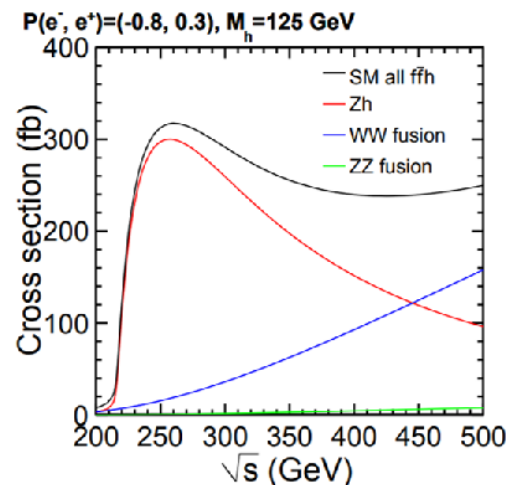
- γ の再構成において、高位置分解能センサーが重要
- PSD方式ではチャンネル数の増大が避けられる
- 従来のを改良したPSD
- PSD用センサー基板を新たに設計した
- PSDのセンサー基板への接着を行った
- β 線源によるMIPを確認した
- 従来のセンサーと比較して、表面抵抗値が大きくなると歪みが改善することを確認した

- 今後の課題
 - ✓レーザーでの測定
 - ✓セルの四隅にヒットが集中していた原因の調査
 - ✓ILCのプロトタイプに搭載できる設計のPSDの製作

Back up

重心系エネルギー250 GeV におけるヒッグス粒子生成過程

- bb や WW 、 cc などは2つのジェットと呼ばれる粒子群に崩壊
 →ジェットエネルギー分解能の向上が必要

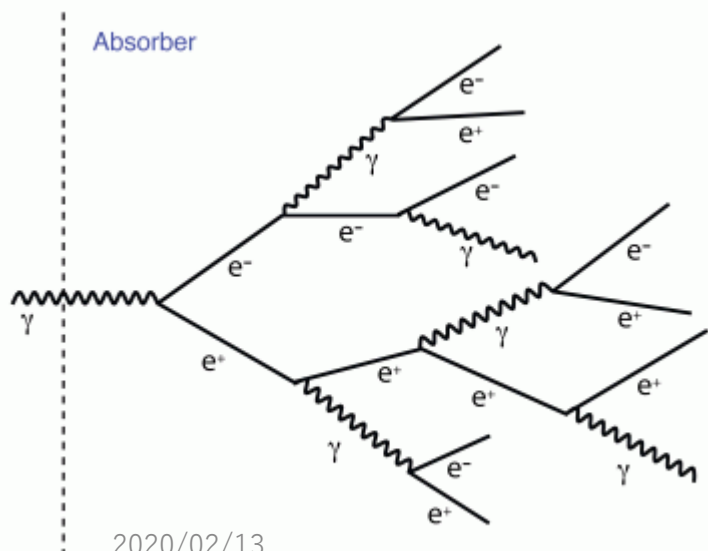


Hからの崩壊粒子 崩壊分岐比

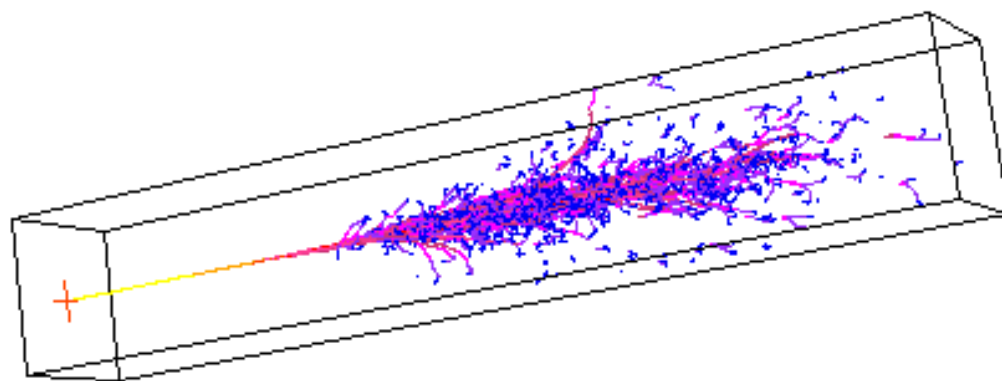
崩壊粒子	崩壊分岐比
bb	65.7%
WW	15.0%
$\tau\tau$	8.0%
gg	5.5%
cc	3.6%

電磁カロリメータと高位置分解能センサー

- PSD は、ヒット密度がシャワーの最大領域よりも非常に小さい ECAL最内層で使用可能
- 最内層においては、各粒子の広がり各粒子の測定精度より大きい
- 2つの光子からの π^0 の再構成を改善できる
- 改善された位置分解能は、 π^0 再構成のkinematic fitに使用でき、ECAL全体のジェットエネルギー分解能の改善につながる



2020/02/13



修論本審査

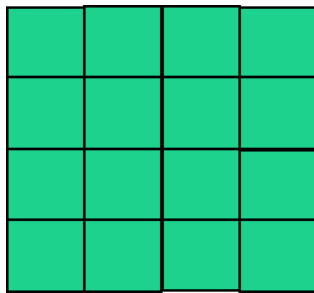
新 PSD の仕様～Ver.2

- 隣り合うセルのパッドを共有
- 読み出しチャンネルの増加を抑制
- 複数の抵抗値を用意
- 読み出しch数が同じ場合、ピクセルサイズを小さくできる。

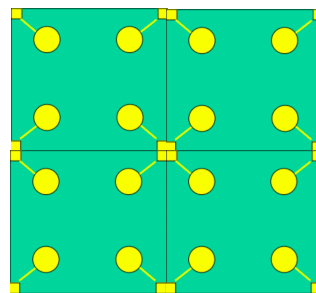
例：16×16セルの場合

PSD 1 →セルサイズは11mm(2倍)

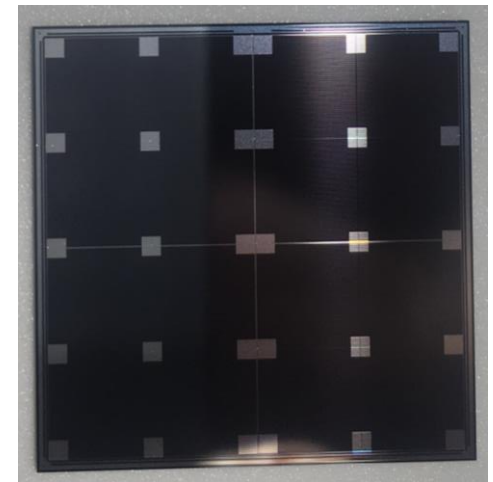
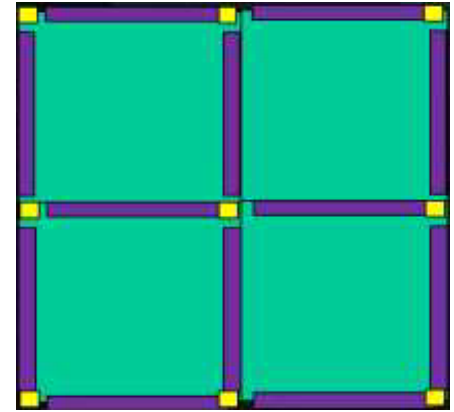
PSD 2 →セルサイズは5.86mm(16/15倍)



従来のSiセンサー
4×4セル



PSD 1 2×2セル
→ピクセルサイズ2倍



PSD 2

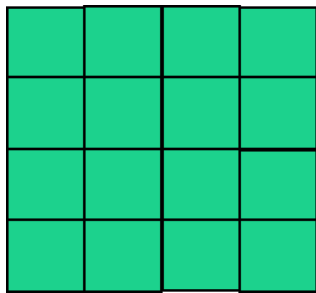
新 PSD の仕様～Ver.2

- 隣り合うセルのパッドを共有
- 読み出しチャンネルの増加を抑制
- 複数の抵抗値を用意
- 読み出しch数が同じ場合、ピクセルサイズを小さくできる。

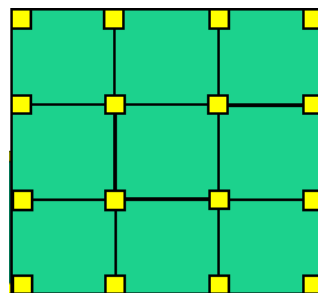
例：16×16セルの場合

PSD 1 →セルサイズは11mm(2倍)

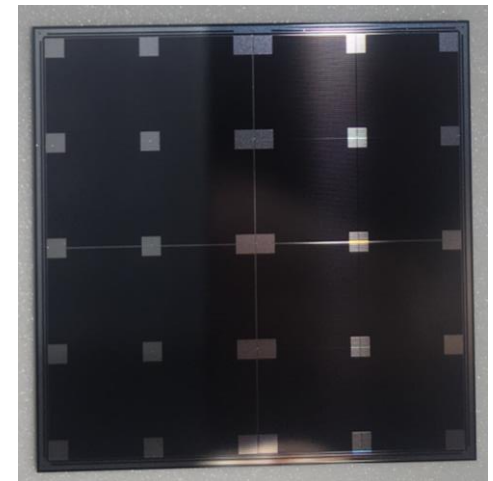
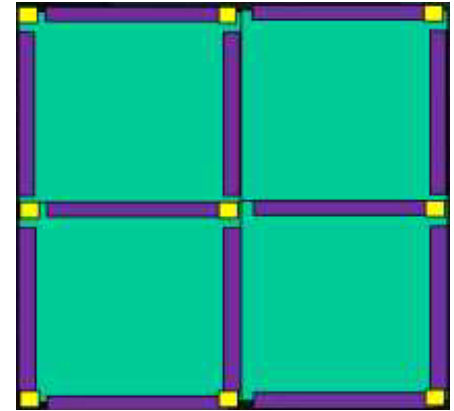
PSD 2 →セルサイズは5.86mm(16/15倍)



従来のSiセンサー
4×4セル



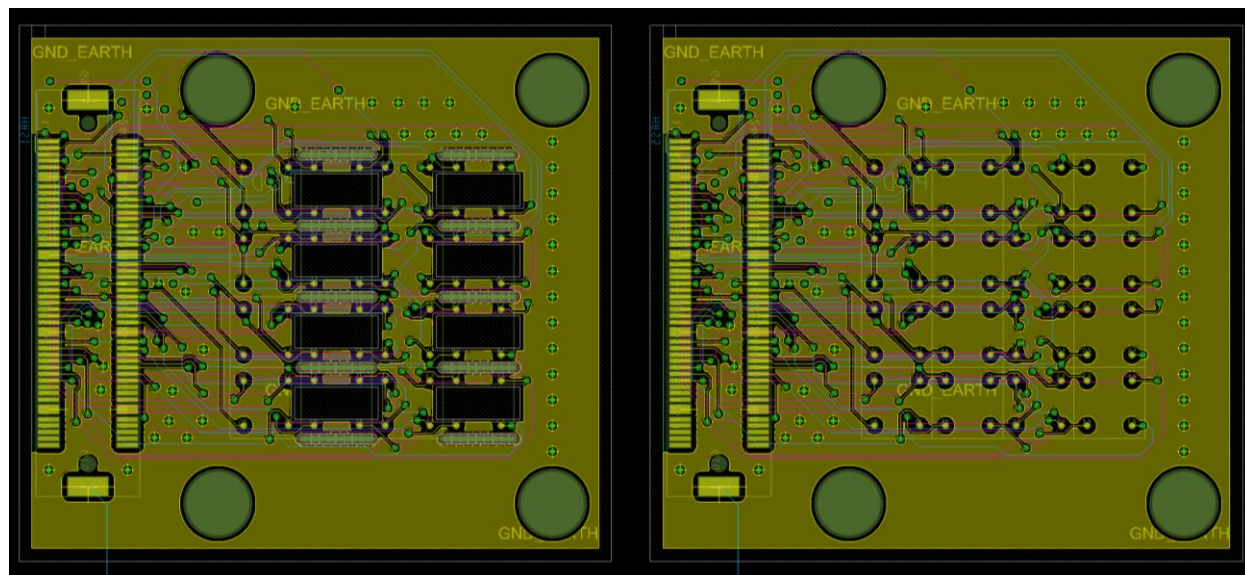
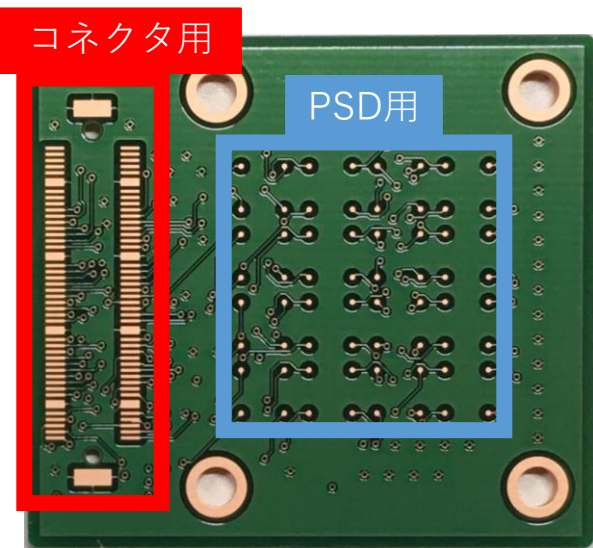
PSD 2 3×3セル
→ピクセルサイズ4/3倍



PSD 2

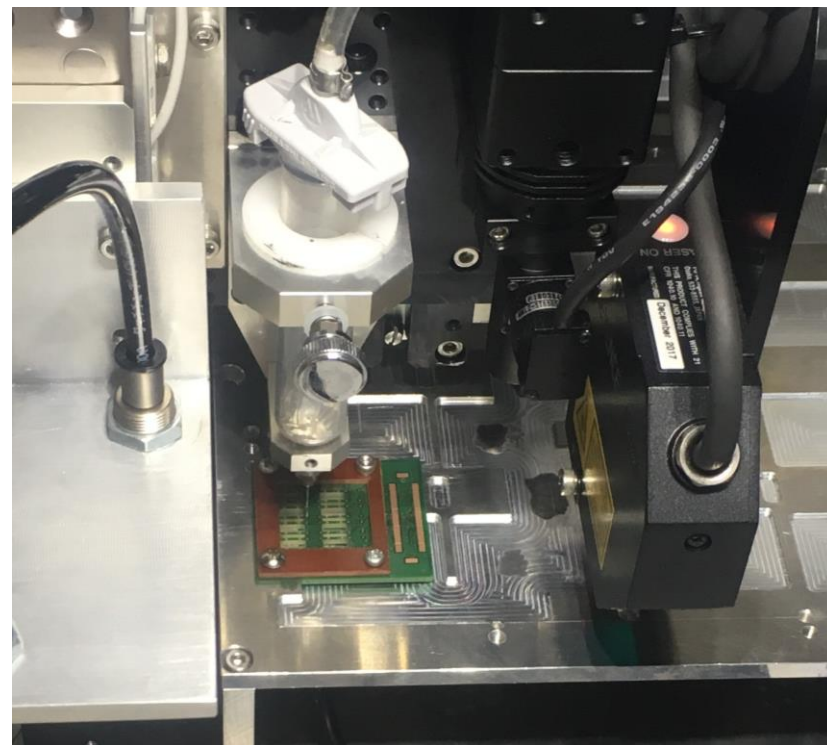
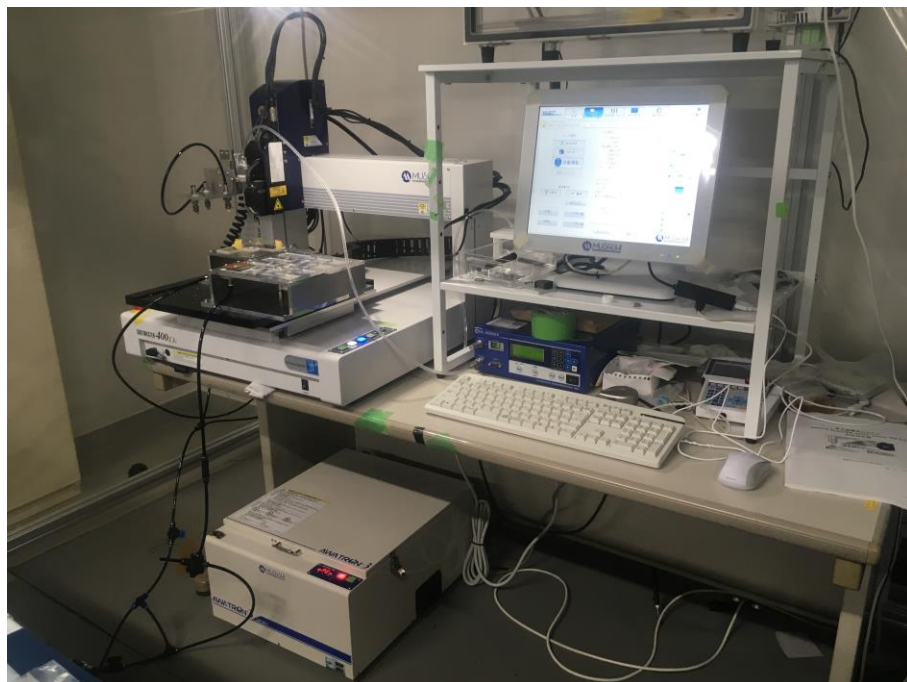
PSD 1 用のセンサー基板設計

- CADENCE allegroを用いてボードの設計を行った
 - ✓PSD 1用穴付き基板 → センサーにレーザーを照射するため
 - ✓PSD 1用穴無し基板 → 放射線源等での測定用

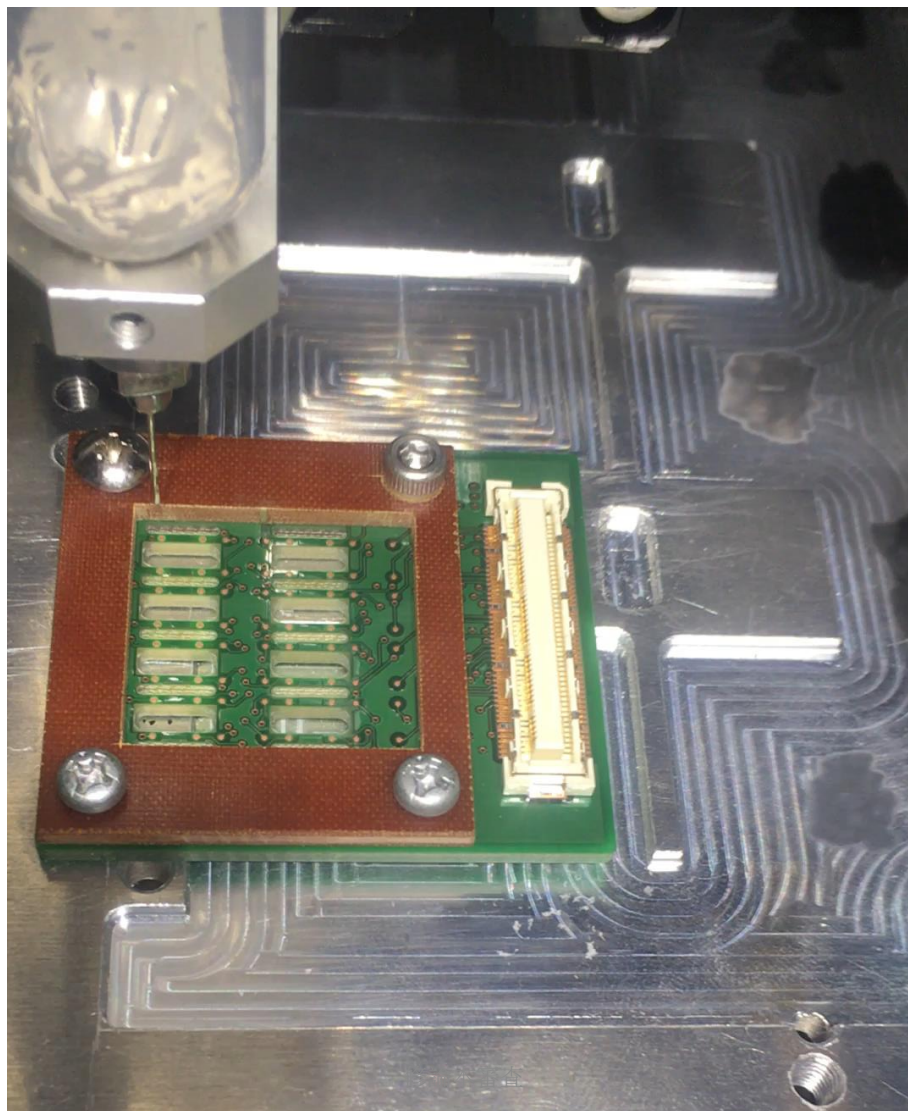


センサー基板への導電性接着剤塗布

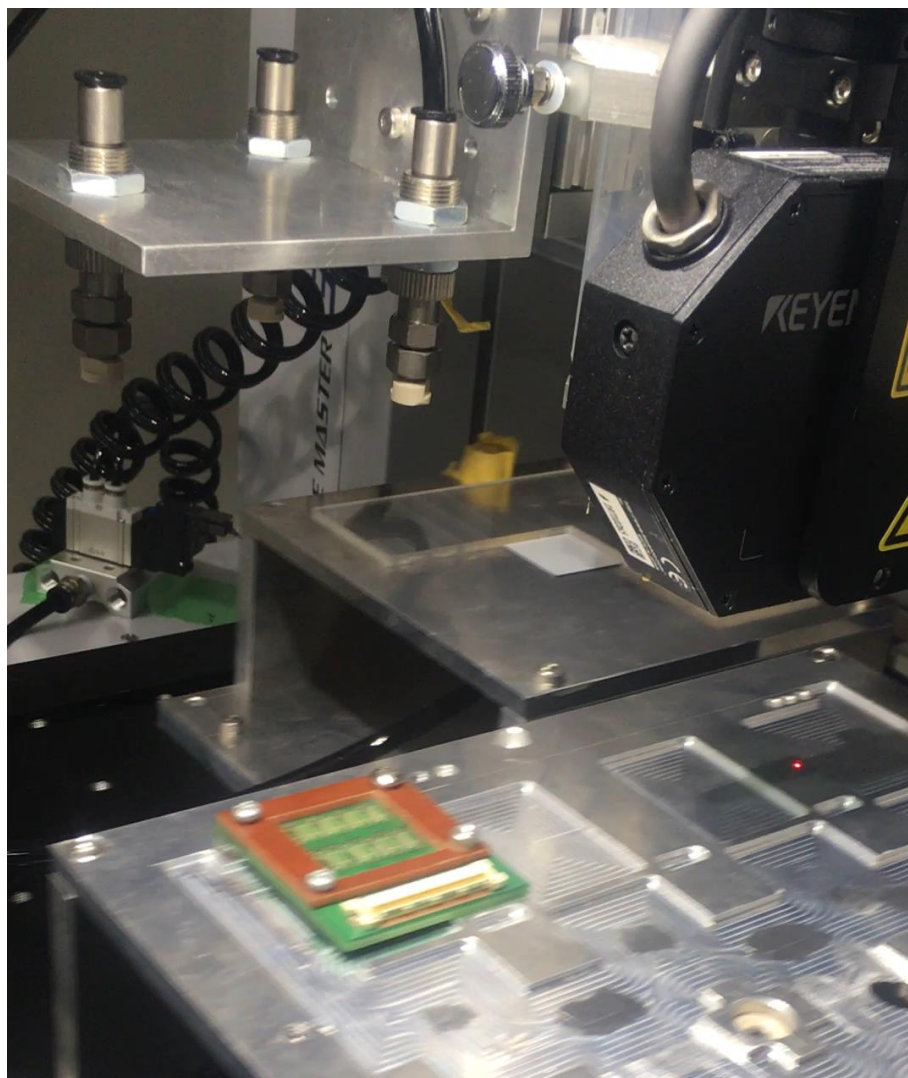
- 武蔵エンジニアリング社製ディスプレイペンサー (ML-808GX)
- 高精度汎用卓上門型ロボット (SHOTMASTER400ΩX)



センサー基板への導電性接着剤塗布



PSD のセンサー基板への接着

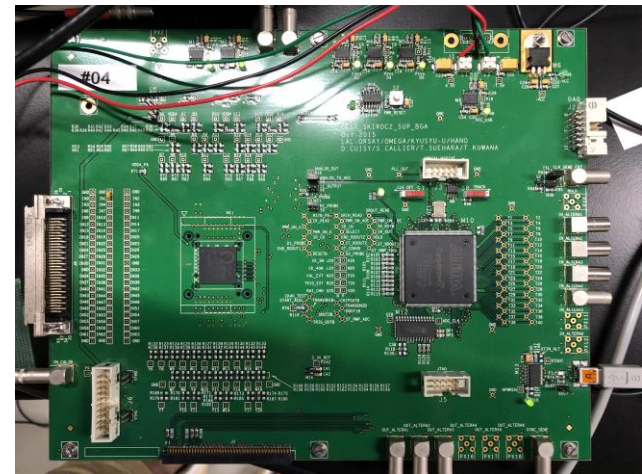
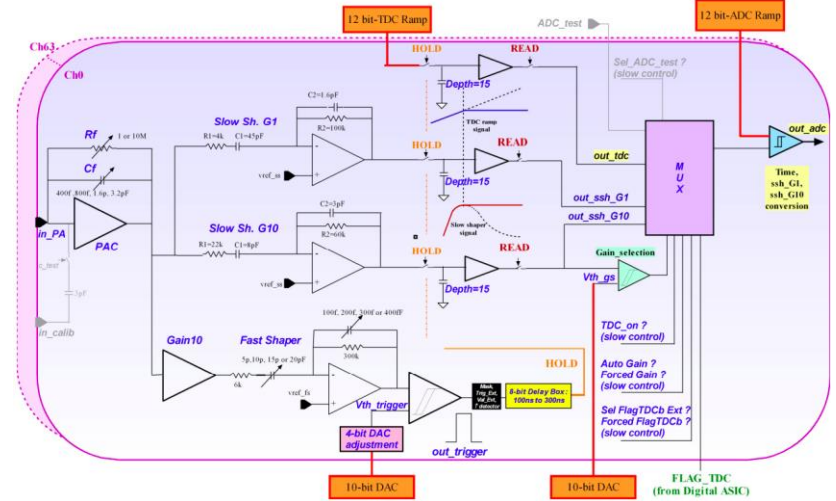


信号の読み出し

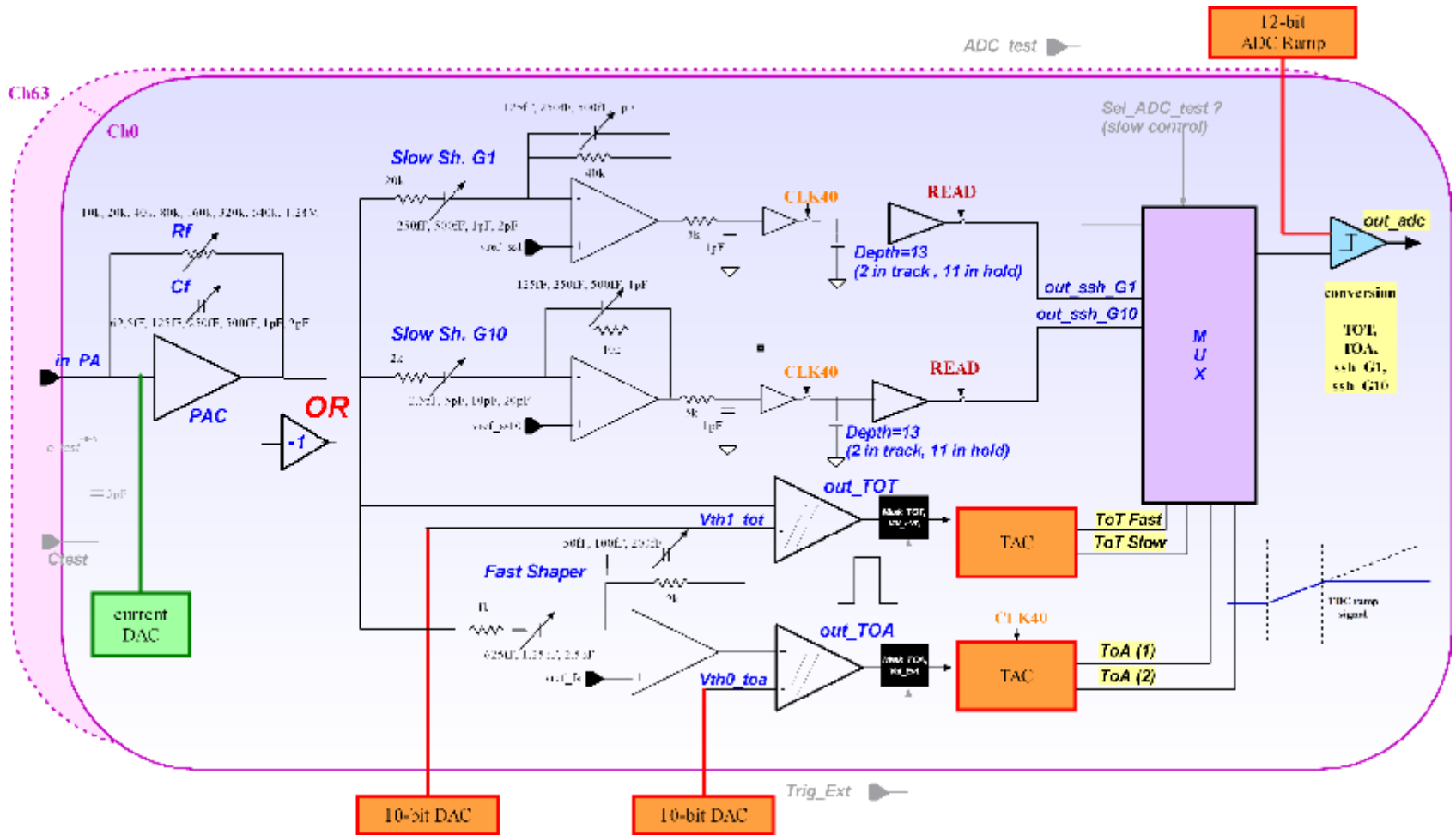
- SKIROC2A : ILD ECAL用ASIC
電磁カロリメータの細分化とコンパクト化



- 評価基板
 - 64ch外部端子
 - ASIC半田づけ
 - 擬似信号入力ソケット



SKIROC2CMS analog



^{90}Sr を12mm離れた場合の位置再構成

- PSD1-2-1
- 左半面
抵抗値1倍
- 右半面
抵抗値10倍

