

ILC高精細カロリメータに 用いる高性能シンチレータ の開発

鳥丸 達郎

東京大学 素粒子物理国際研究センター(M1)

高エネルギー物理春の学校2017

International Linear Collider

電子陽電子線形加速器

全長約30km

候補地：北上山地

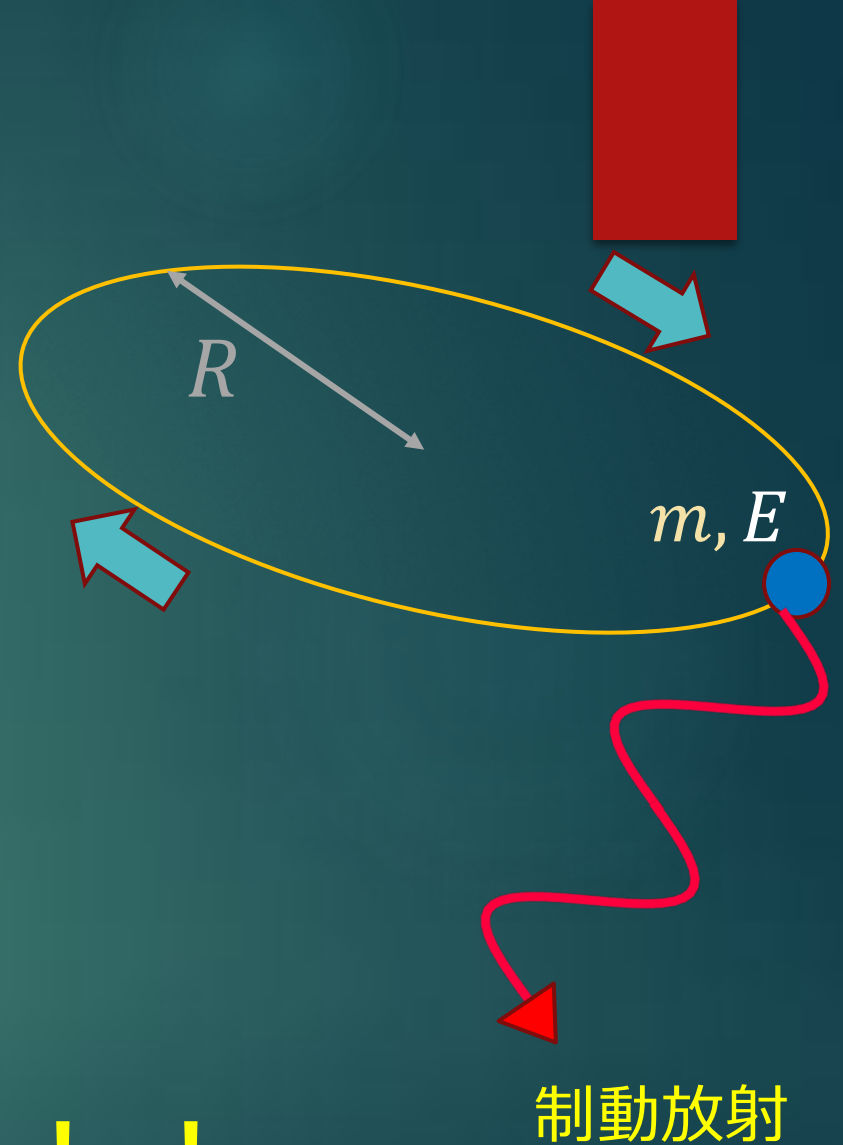
線形のこだわり

- 円形加速器に伴うエネルギー損失
 - 粒子が一周して失うエネルギー

$$\Delta E \propto \left(\frac{E}{m}\right)^4 / R$$

- 重い荷電粒子を回す->LHC
- エネルギー損失をなくしたい！

➡ $R \rightarrow \infty$ にする ➡ 線形！！



ILCの特徴

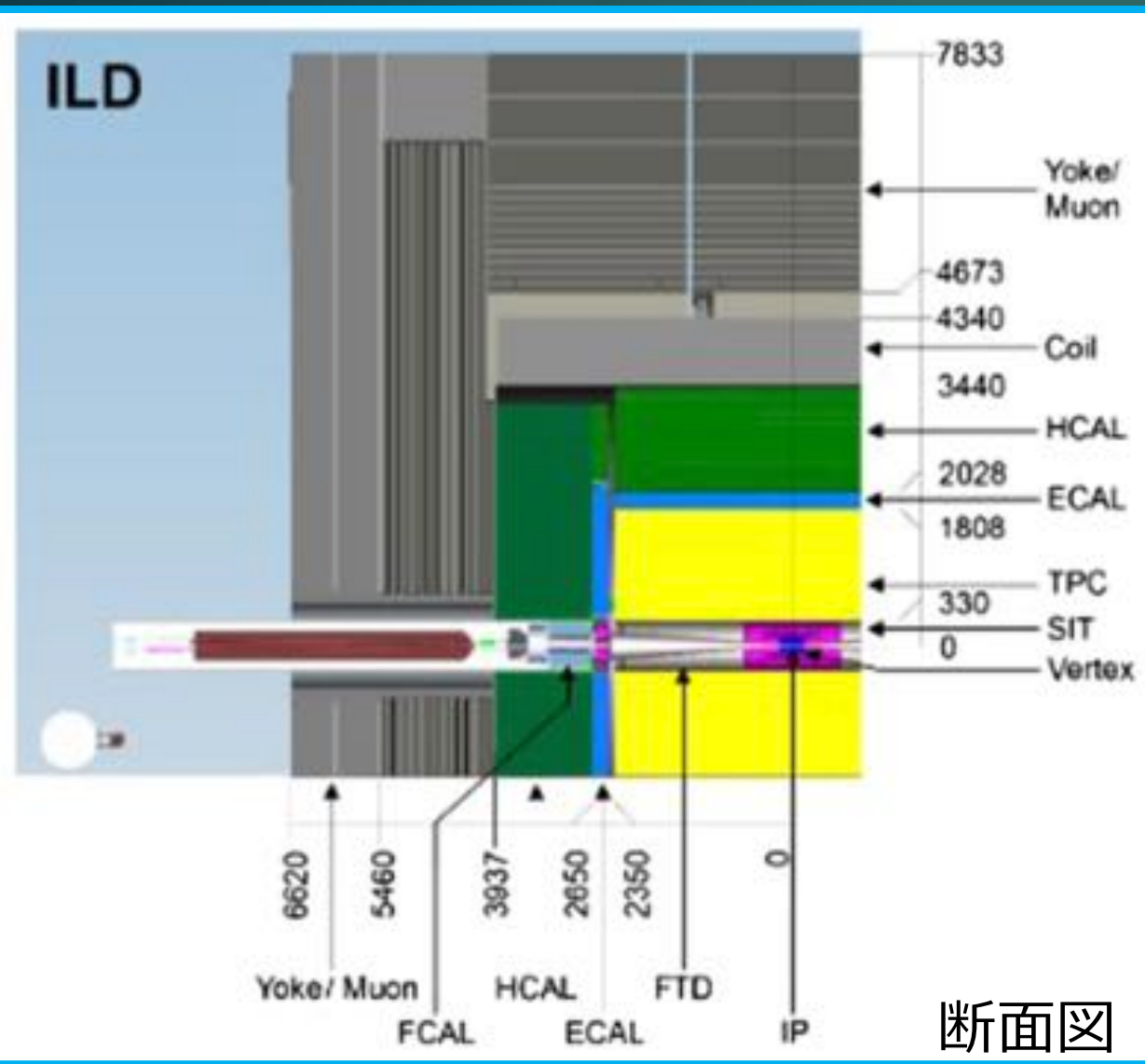


- 電子陽電子加速器
 - 重心系エネルギー：250 ~ 500 GeV (アップグレード可)
- 始状態がレプトン対
 - 重心系エネルギーの全てが反応に寄与
 - 背景事象が少ない
- 生じた全ての粒子を解析し，元の物理現象をたどる
 - 全ての粒子の物理量を精密に測定しなければならない
- etc...

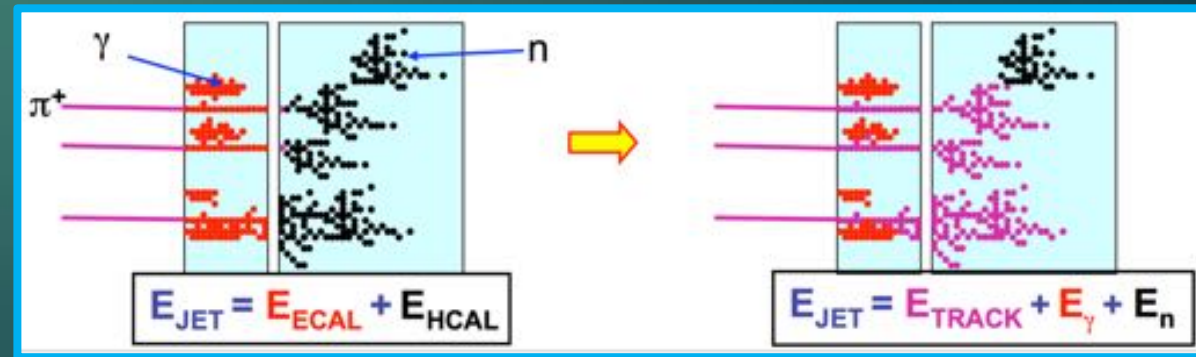
高性能測定器の開発が必要！



測定器



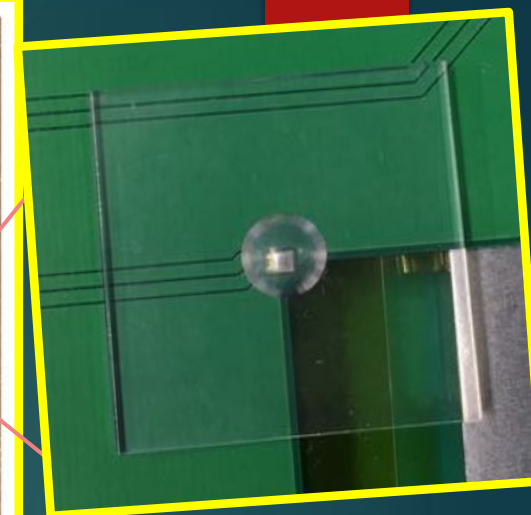
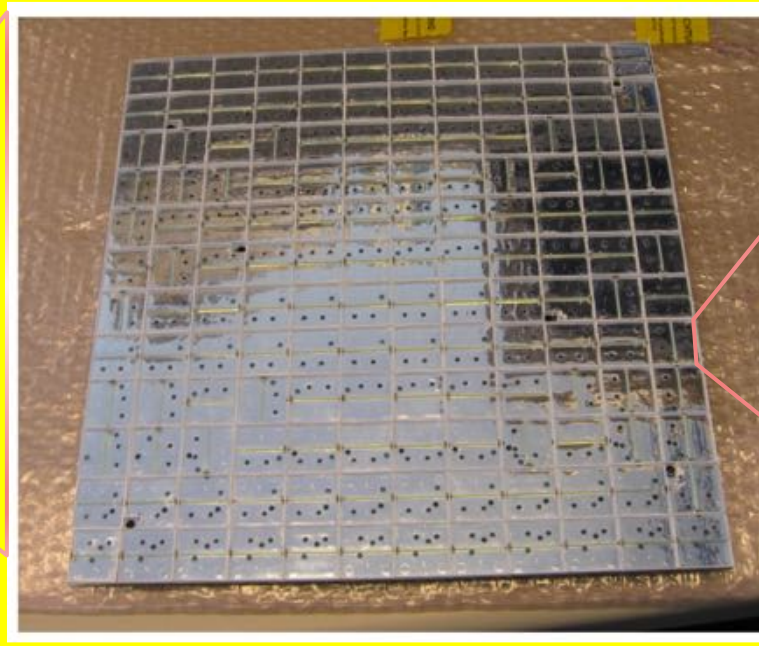
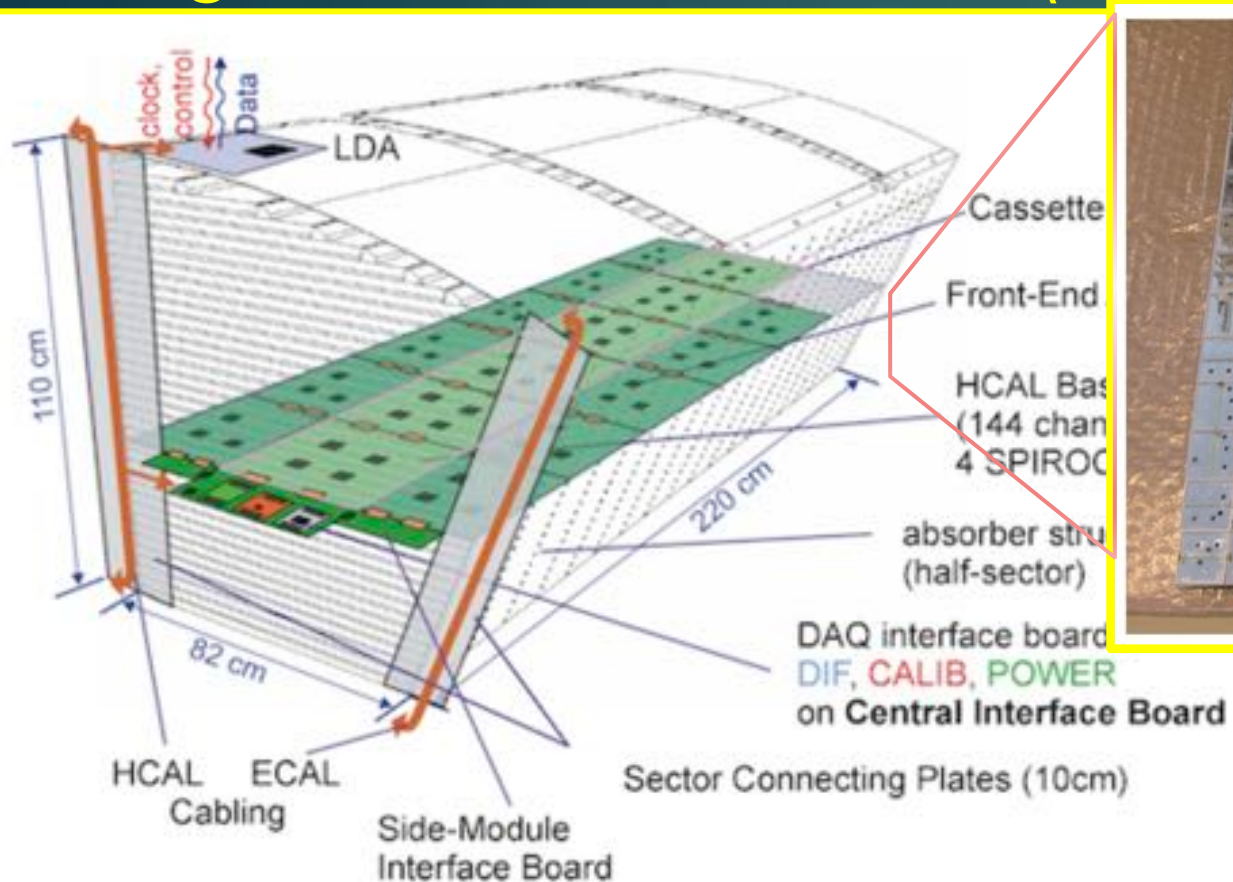
- 反応の終状態には複数のジェットを含む
->ジェットの精密な測定が必要
- Particle Flow Algorithm(PFA)
 - 検出器の性能には限界がある
->PFAという事象再構成方法
 - 個々の粒子の性質に最適な検出器で粒子のエネルギーを測定
 - 荷電粒子->飛跡検出器(TPC)
 - 光子->電磁カロリメータ(ECAL)
 - 中性ハドロン->ハドロンカロリメータ(HCAL)



従来の検出器

PFA

Analog Hadronic Calorimeter(AHCAL)



本研究のデザイン

シンチレータセルユニット

->プラスチックシンチレータタイル+SiPM+読み出し基板

サンプリング型カロリメータ

- 吸収層と検出層のサンドイッチ
- 吸収層->シャワーを起こす
 - クラスタ分離のため鉄や鉛など重い金属
- シャワーの形状, エネルギーから入射中性粒子のエネルギー再構成
 - >ピクセル状に細分化された高精細なデザイン



シンチレータの素材は何か適切だろうか？

シンチレータマテリアル

カロリメータの**高精細化**



読み出し数が**約800万チャンネル！！**

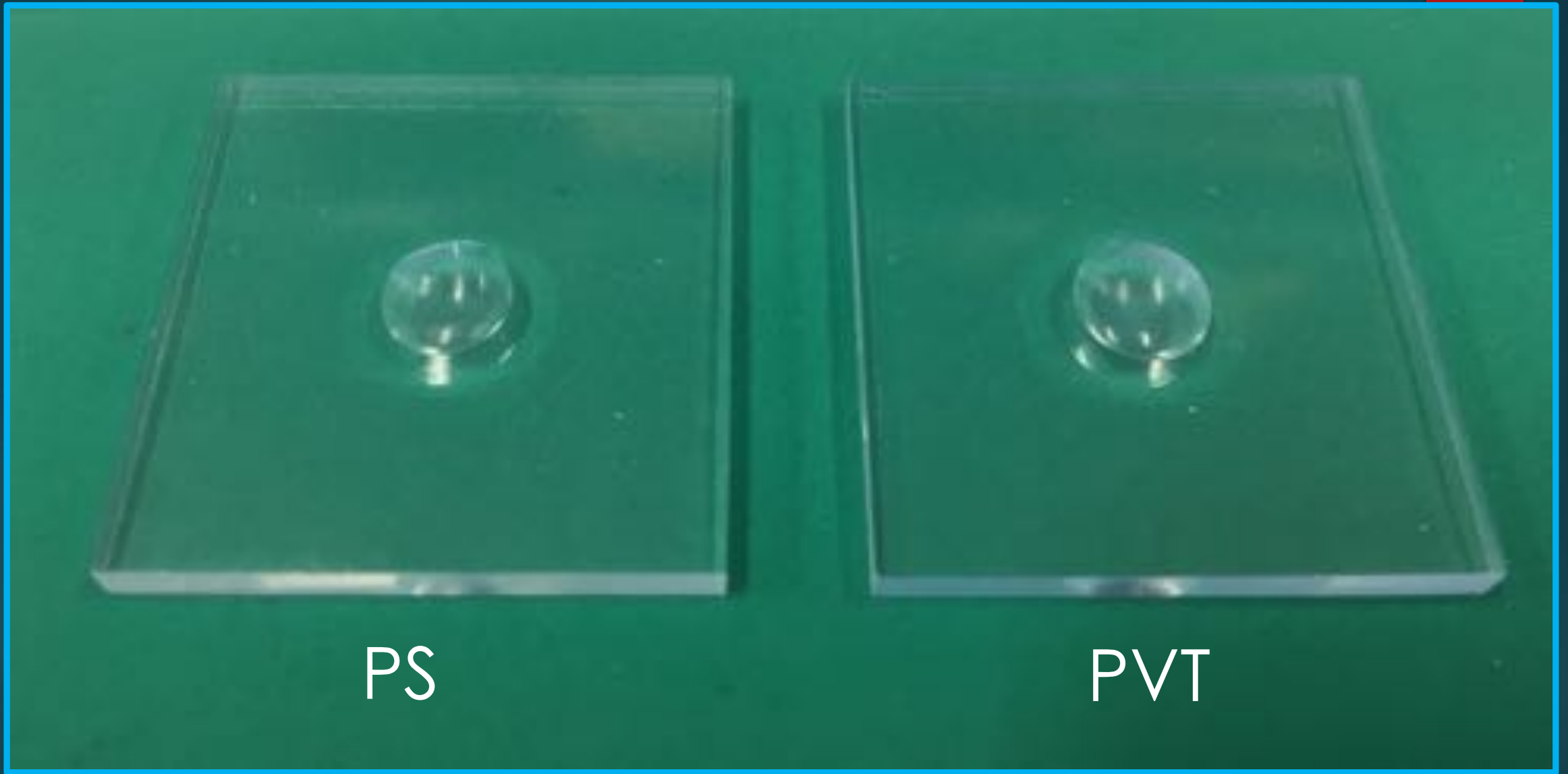
⇒ **大量生産**を考慮した検出器デザインでなければならない

ポリスチレンシンチレータに注目！

シンチレータマテリアル

ポリスチレンシンチレータ(PS) ->射出成形	ポリビニルトルエンシンチレータ(PVT)-> キャスト成形
<p>利点</p> <ul style="list-style-type: none">• 安価• 短期間で製作可• 機械加工が不必要• 金型を作れば複雑な形状も製作可 <p>欠点</p> <ul style="list-style-type: none">▶ キャスト成形に比べ、光量が少ない▶ キャスト成形に比べ、透明度が低く、減衰長が短い	<ul style="list-style-type: none">• ELJEN Technology社のPVTシンチレータを使用 <-EJ-212 <p>利点</p> <ul style="list-style-type: none">• 透明度が高い• 光量が多い <p>欠点</p> <ul style="list-style-type: none">▶ 重合反応を経る必要があるため、時間がかかる▶ 重合後、機械加工が必要

この問題をどうにかしたい！



PS

PVT

目視では区別がつかない. . .

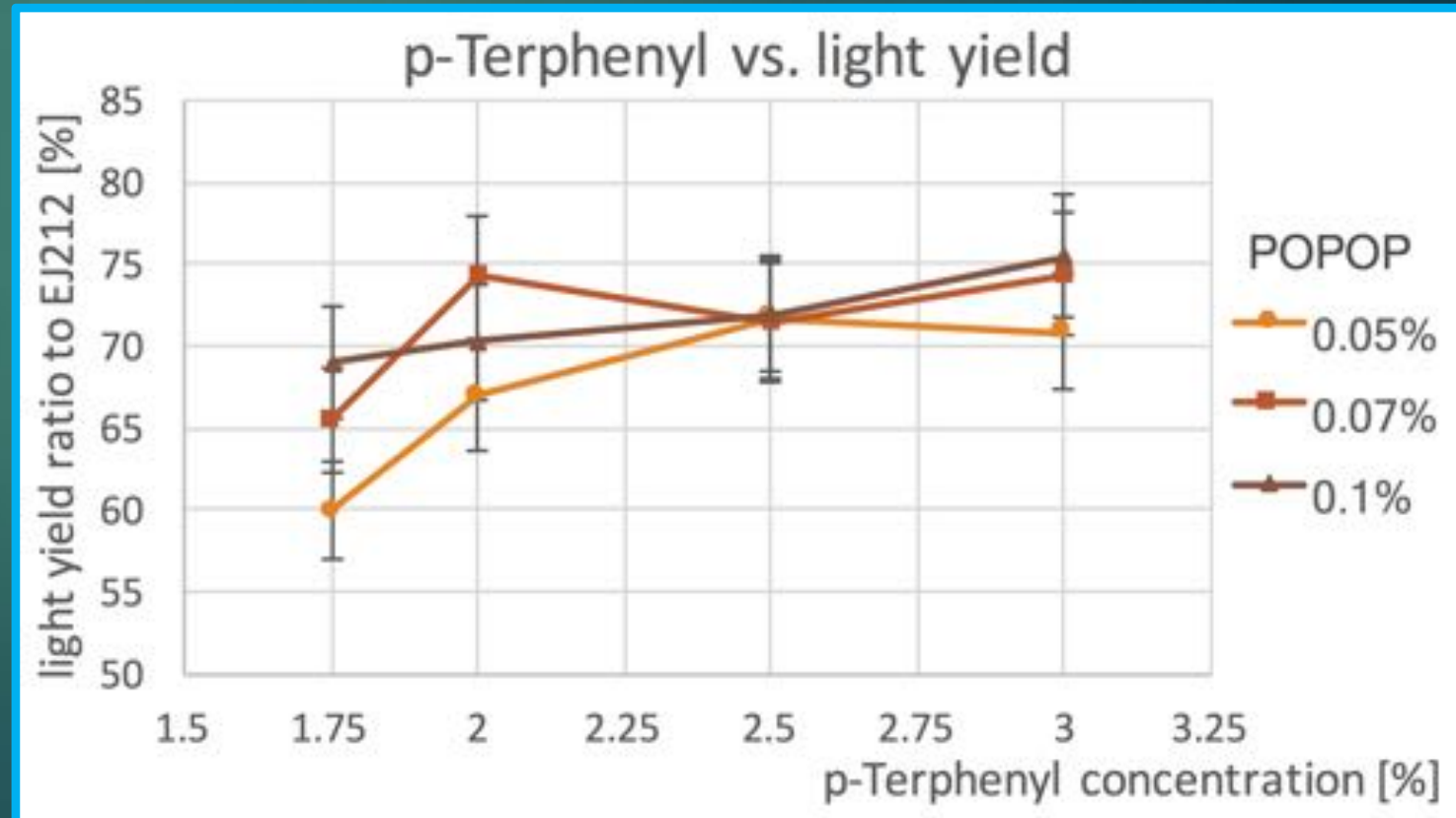
研究のモチベーション

◎ 発光量のパラメータをうまく取って発光量を改善したい

➡ パラメータ {
・ 発光剤の種類
・ 発光剤の濃度

研究の背景

- 我々が行ってきた研究とその結果
 - PS with p-Terphenyl+POPOP シンチレータ
 - 二種類の発光剤の濃度を変化
 - PVTの発光量に対して~75%を達成



研究の背景

Jun Zhu, et al. NIMA 835(2016)136 によると

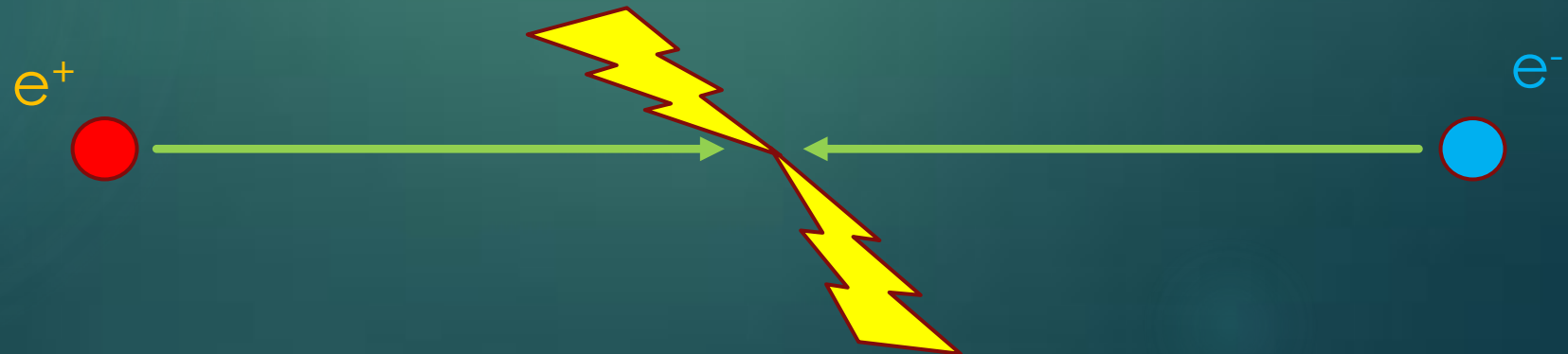
- PS with PPO (2.0%)+POPOP (0.02%)がベスト
- アントラセンの光量に対して74.3%を達成
 - PS with p-Terphenyl+POPOPより高い光量
 - PVTはアントラセンの光量に対して~65%
- サンプルは熱重合反応により成形

もしかしたら

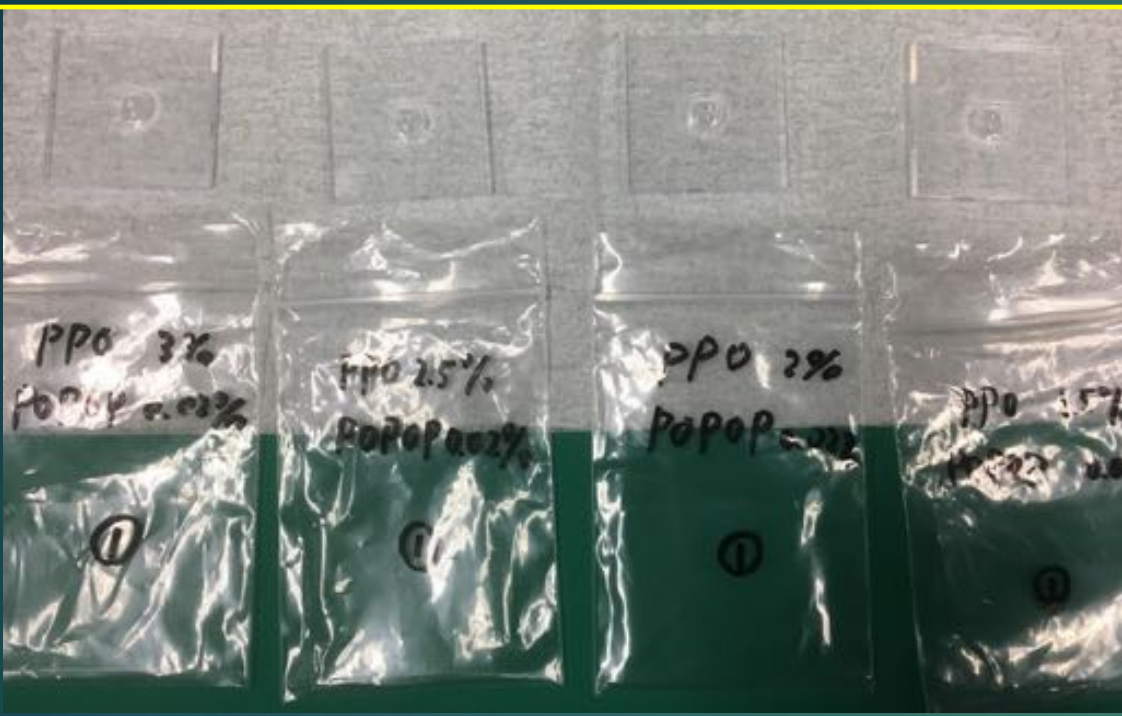
PVTより良い光量が得られる可能性あり！！！！

本研究の目的, 及び発表内容

NIMA論文と同じ濃度条件でPSシンチレータを射出形成で作ってみて光量の改善が見られるかみてみた

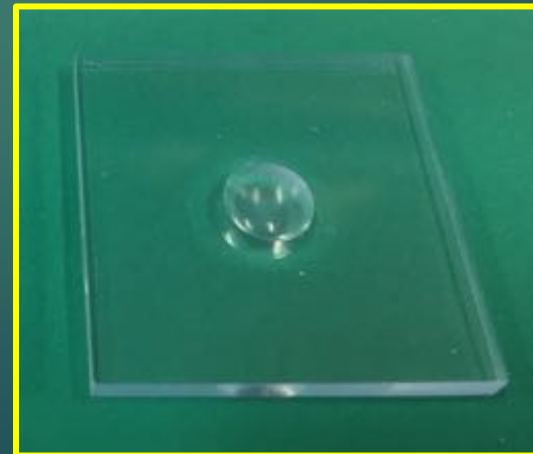


使用したシンチレータ

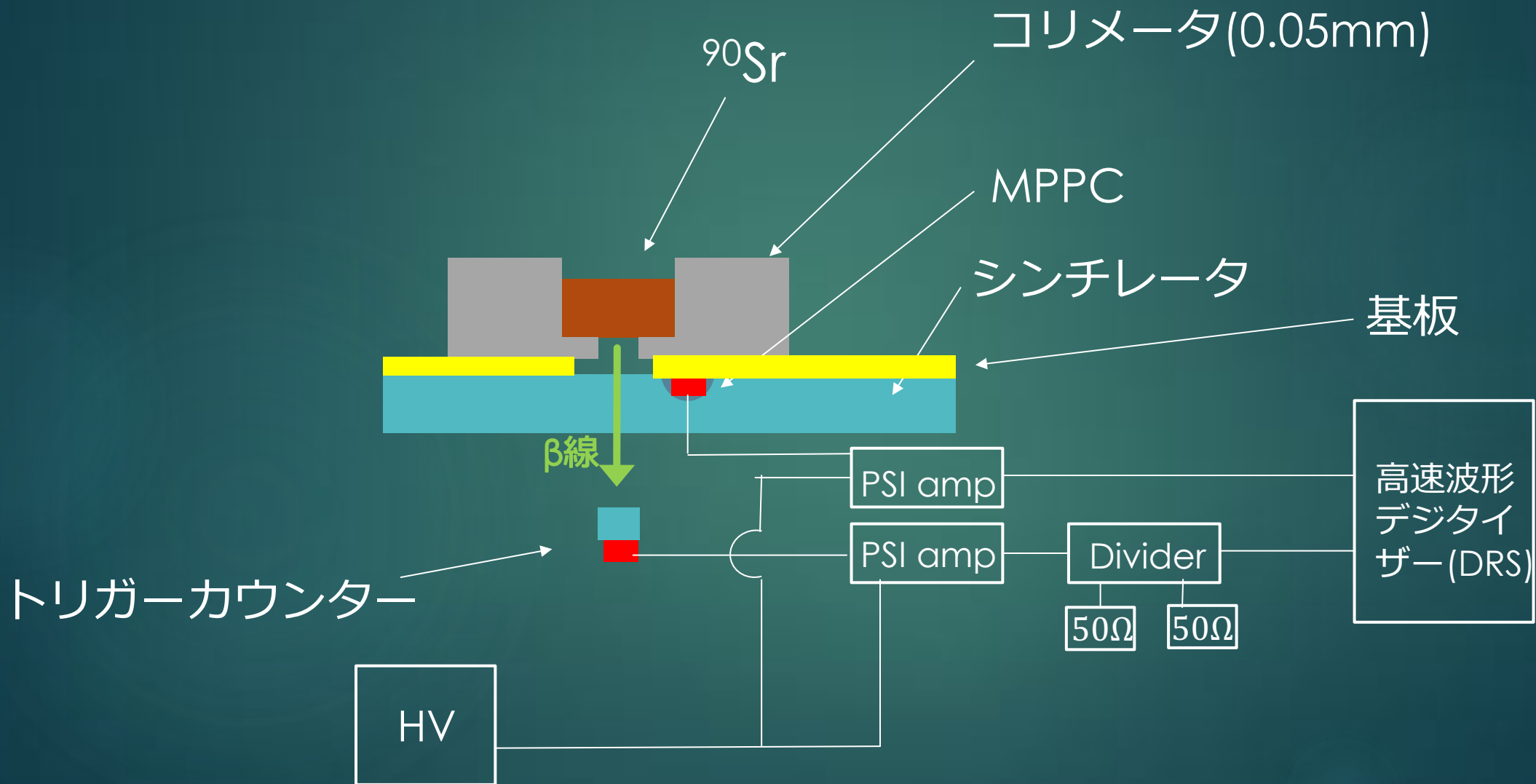


- PS with PPO + POPOP
 - PPOの濃度-> 4種類
 - 1.5, 2.0, 2.5, 3.0%
 - 各濃度に9個のサンプル
 - POPOP->0.02%(固定)
 - 射出形成
 - 3mm厚の大きな板を30×30mm²に切り出した
 - 側面とDimpleは機械加工

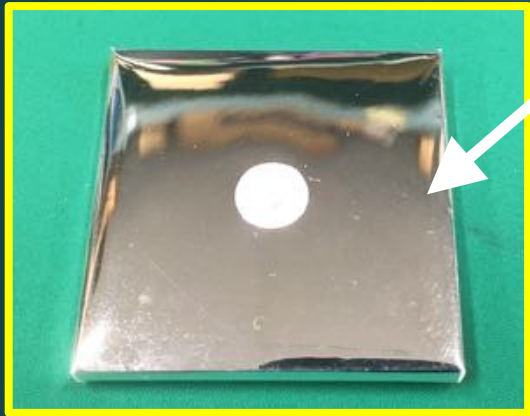
- PVTシンチレータ(EJ-212)
 - 比較の基準
 - 5個のサンプル



セットアップ略図



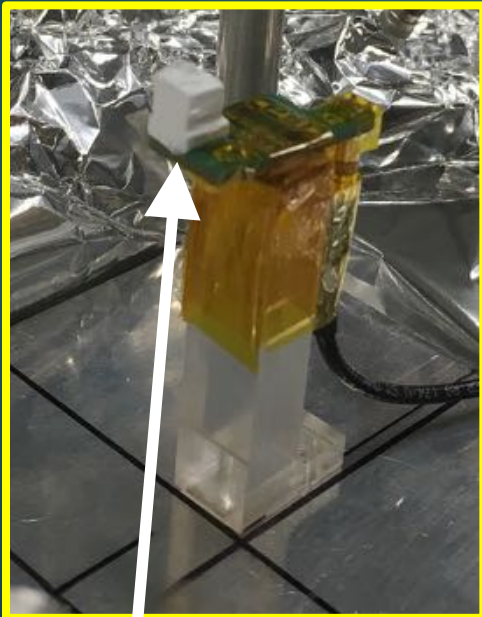
各種装置



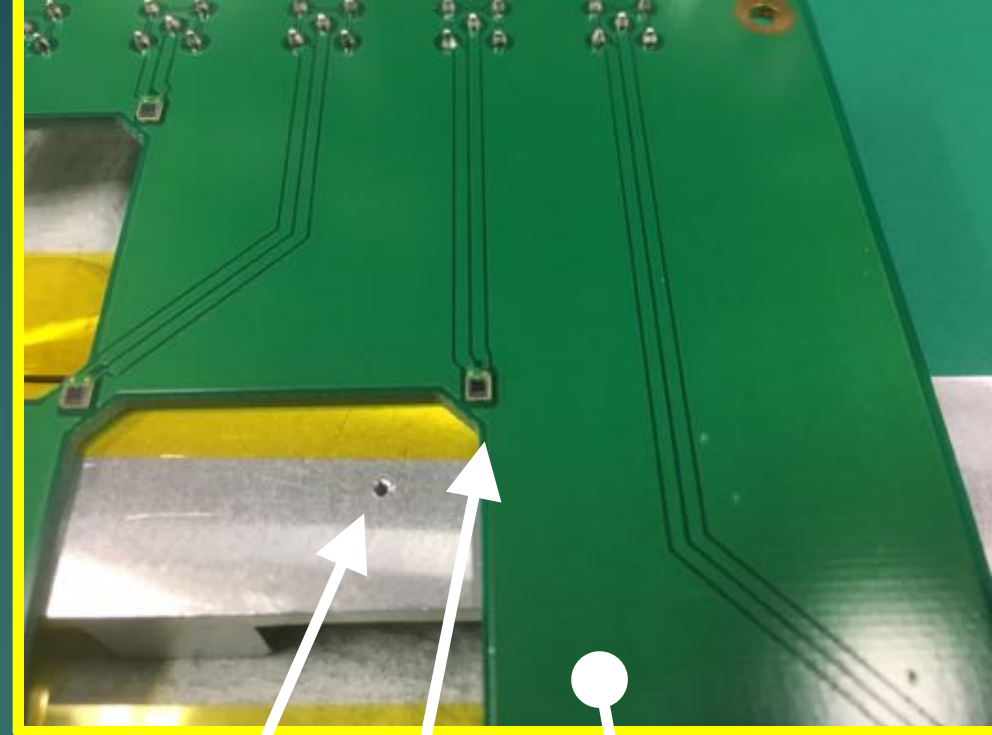
リフレクターを巻いたプラスチックシンチレータ



PSIアンプ



トリガーカウンター (白い部分)



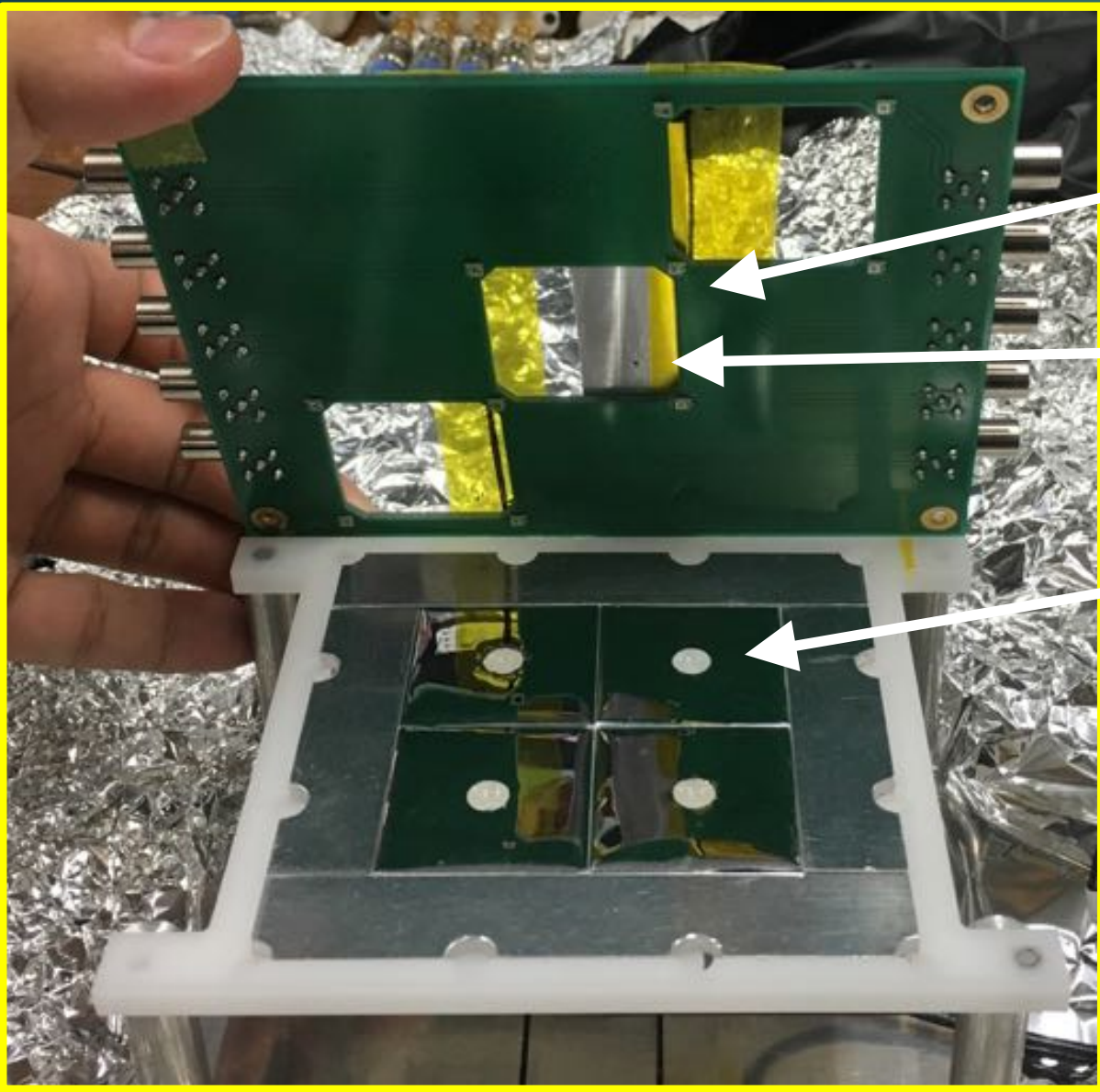
コリメータ

読み出し基板

SiPM(浜松ホトニクス社製 MPPC)

- 型番 : S13360-1325PE
- 有感面積 : $1.3 \times 1.3 \text{mm}^2$
- ピクセルピッチ : $25 \mu\text{m}$

シンチレータとMPPPCの位置関係

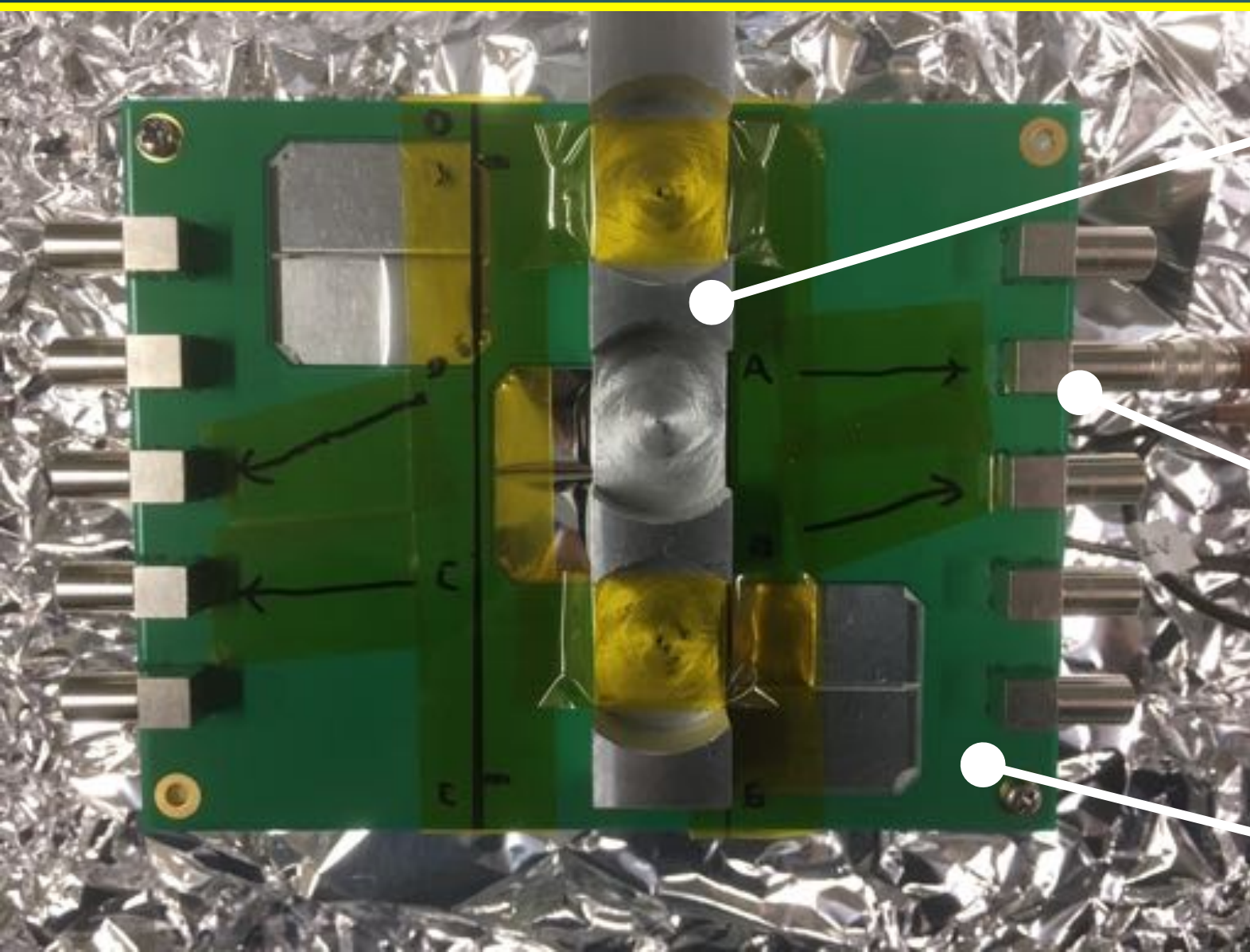


MPPPC

コリメータ

Dimple(MPPPCがくる)

セットアップ（上から）



コリメータ

Lemoケーブルを接続
したチャンネル

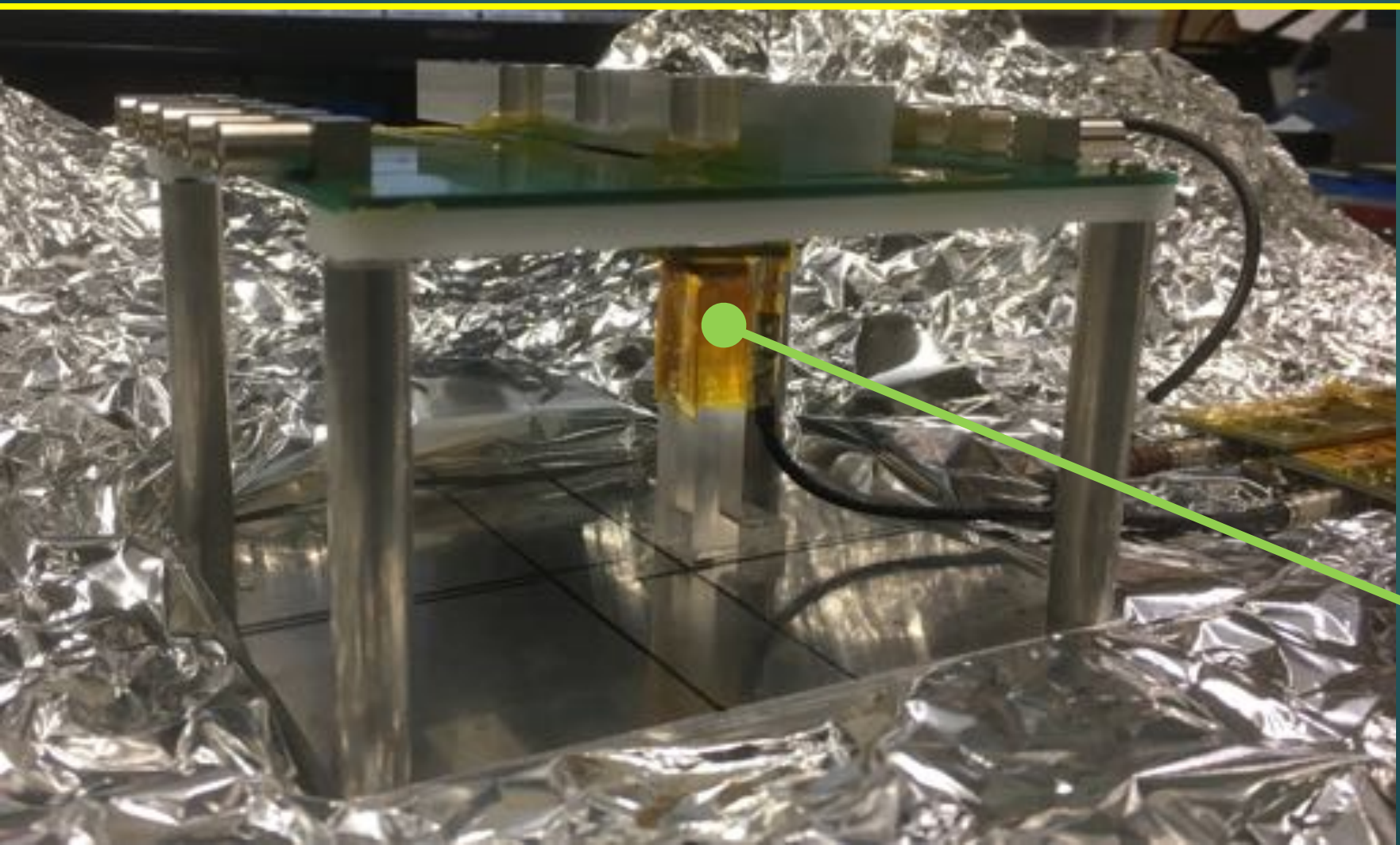
読み出し基板

セットアップ（上から）



^{90}Sr をセットした
状態

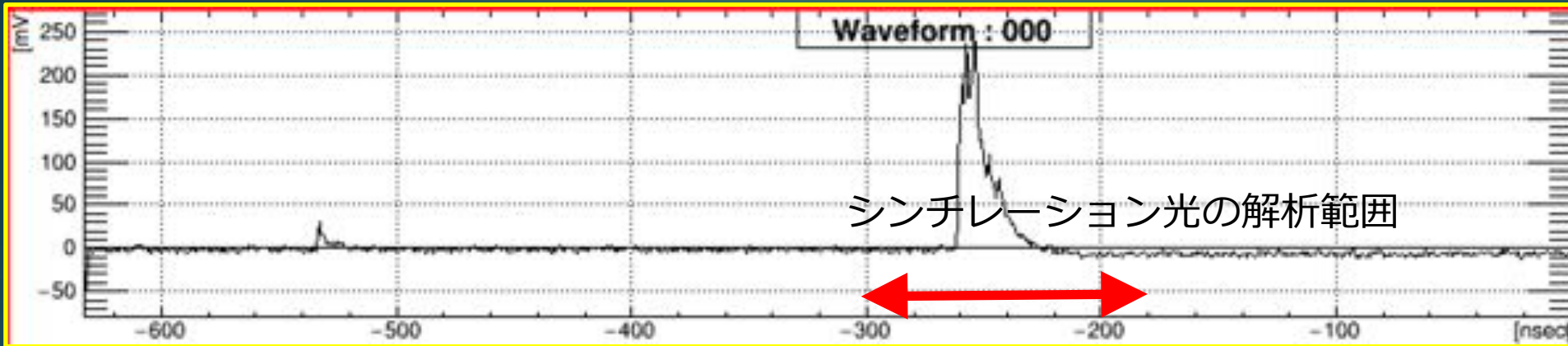
セットアップ (横から)



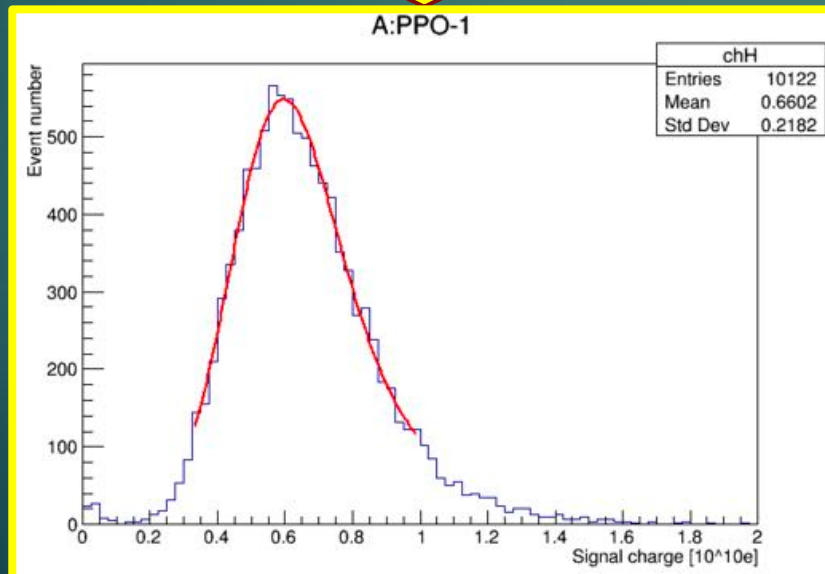
トリガーカウンターの
支柱

解析手法

DRSで得られたシンチレーション光の波形



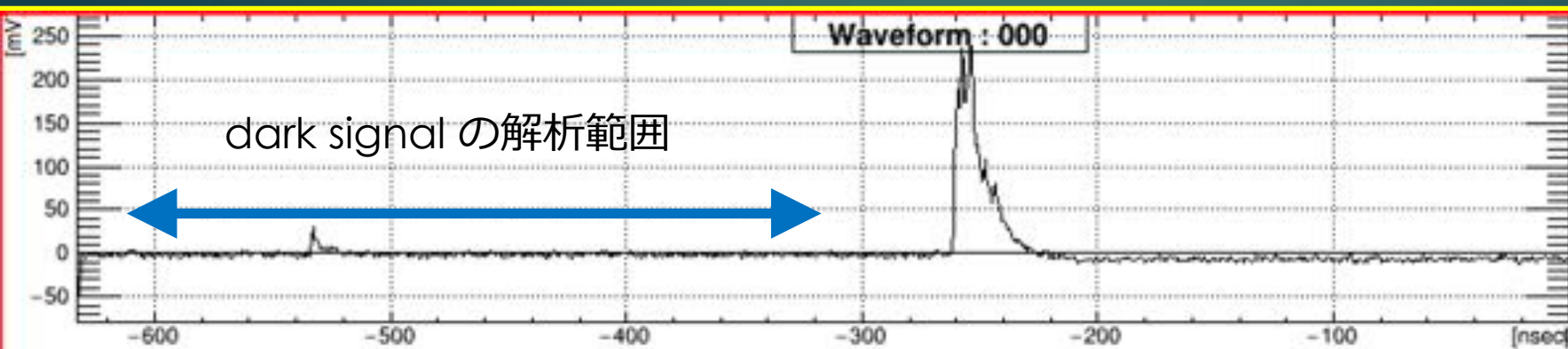
シンチレーション光の charge 分布



- 得られたシンチレーション光の charge 分布にガウス関数を畳み込んだランダウ分布でフィッティングし、ピーク値を求める
- ピーク値を1p.e.分のchargeで割り、光電子数を求める

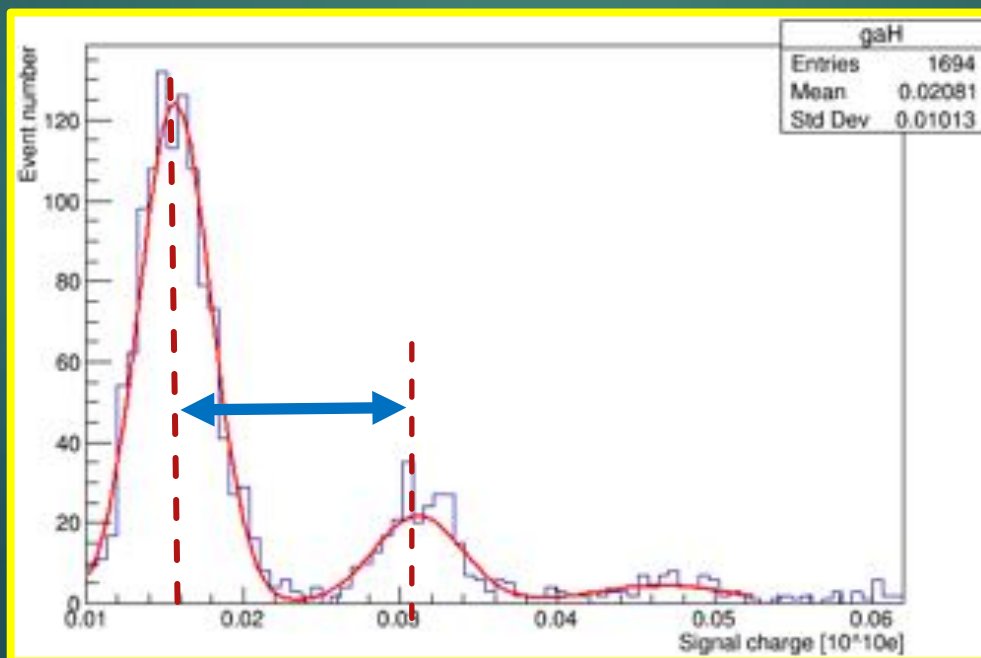
解析手法

DRSで得られたシンチレーション光の波形



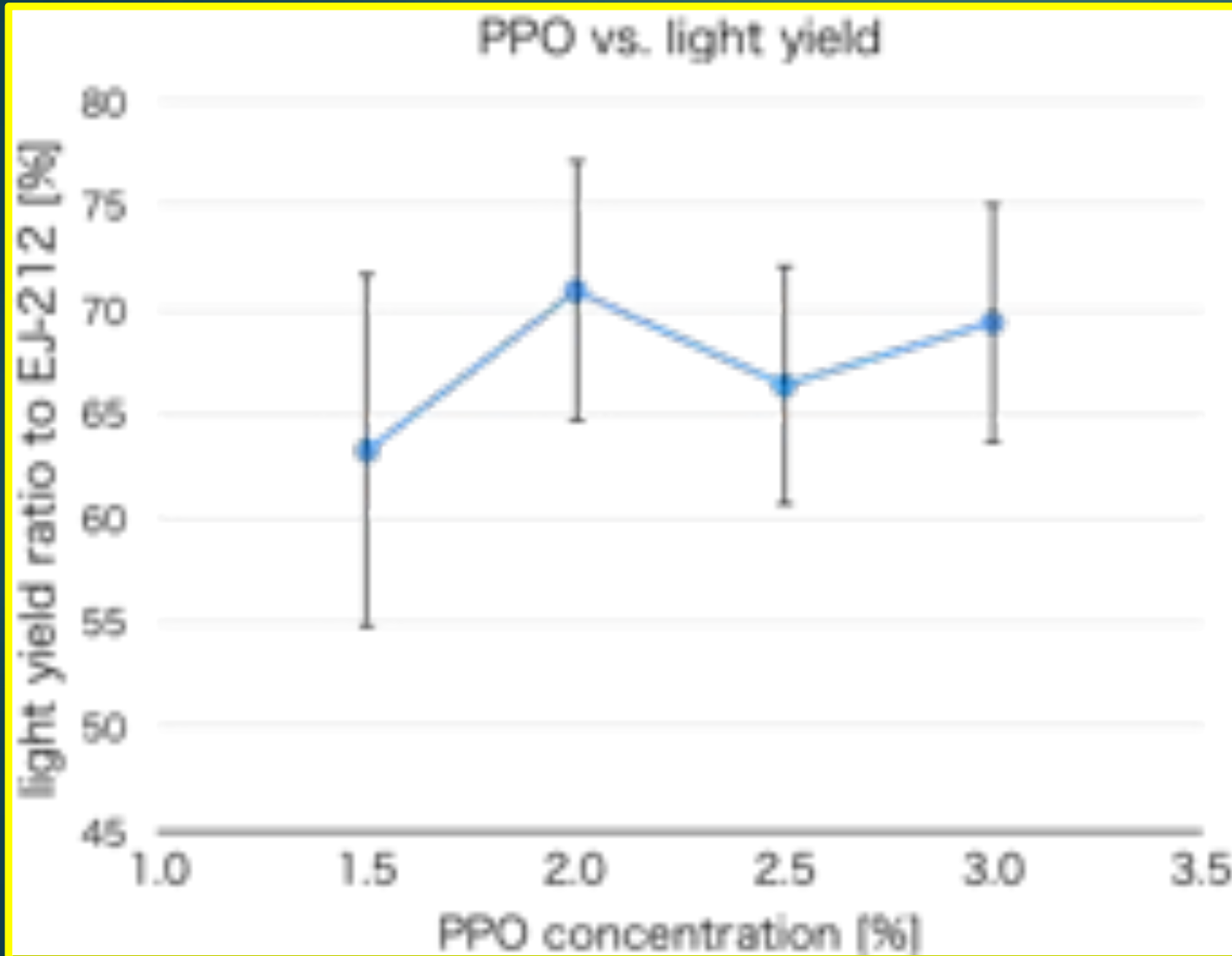
シンチレーション光の光量を評価するのに1 p.e. 分のchargeが必要
->ダークシグナルから求める
アフターパルスの影響を避けるため、シンチレーション光より前の時間範囲で解析

ダークシグナルのcharge分布



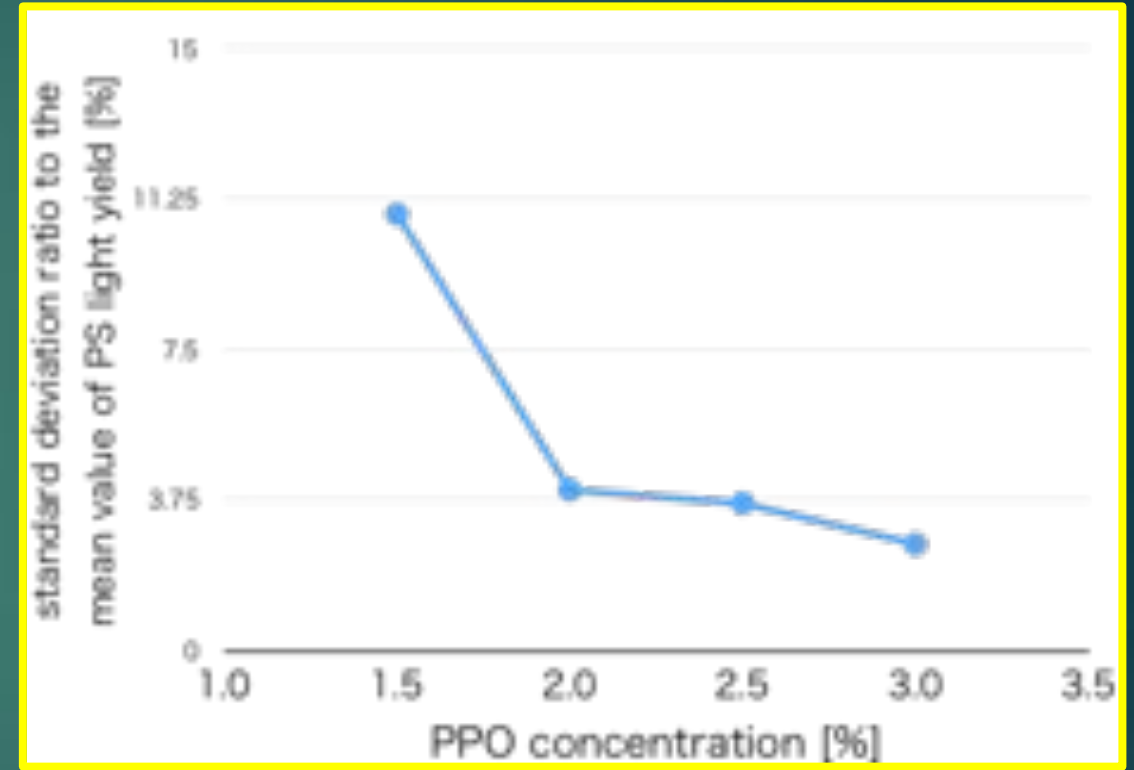
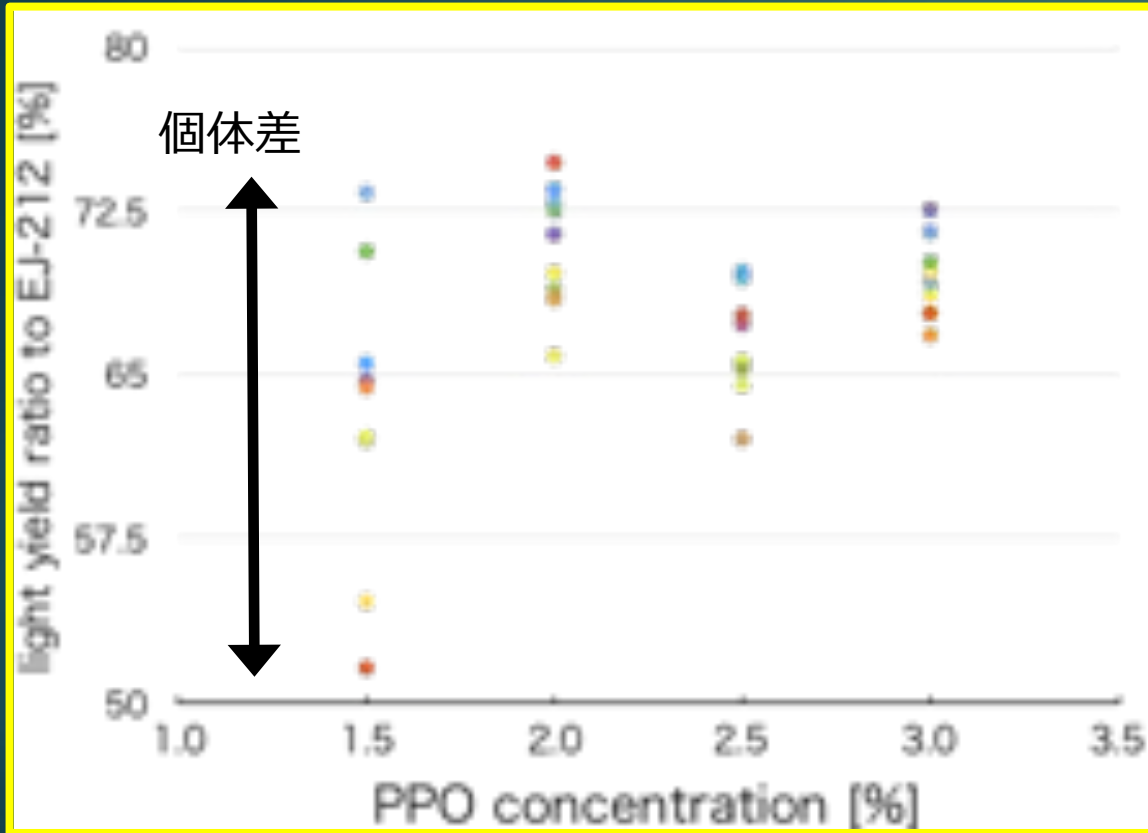
- ピーク間隔=1 p.e. 分のcharge

実験結果



- $100 \times \frac{x}{y} \times \left(1 \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2} \right)$
を算出
 - x : PSサンプルの濃度ごとの平均値
 - y : EJ-212の5個の光量の平均値
 - σ_x : PSサンプルの各濃度ごとのばらつき(標準偏差)
 - σ_y : EJ-212のサンプルの光量のばらつき(標準偏差)
 - $\sigma_y = 2.74$
- 濃度による大きな依存性はない

実験結果



濃度増加でサンプルごとの光量のばらつきが減少しているように見える

考察

- 論文の結果(PPO+POPOPでアントラセン比74.3%の光量)を再現しなかった
 - 熱重合成形法と射出成形法との違いで光量が変化したのか
 - 期待していた光量より~30%少ない
- 濃度の増加に伴い個体差が減少
 - ペレット中の発光剤の場所による偏りが少なくなる？

まとめ

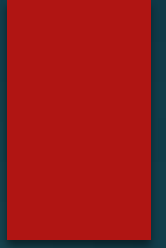
- PS with PPO + POPOP シンチレータはEJ-212の光量に対して~71%を達成
- 射出形成のPS with PPO + POPOP シンチレータは今まで研究してきたp-Terphenylを含むシンチレータに対する光量の大きな改善は見られなかった
- 濃度増加に伴い、個体差が小さくなっていくように見える

展望

- 射出成形の温度を低くすることで光量が回復しないか調べる
- サンプルの個体差と温度の関係をさらに調査

End

backup



悪い再現性

- EJ212に関して光量の良い再現性を得られなかった
 - シンチレータの不均一性->independence
 - リフレクターの歪み->independence
 - MPPCの温度依存性->可能性あり（影響は小さい）
- まだ原因を突き止められていない

シンチレータの製法

- 射出成形

高温高圧で流動性のあるプラスチックを型に押し込み冷却硬化させる

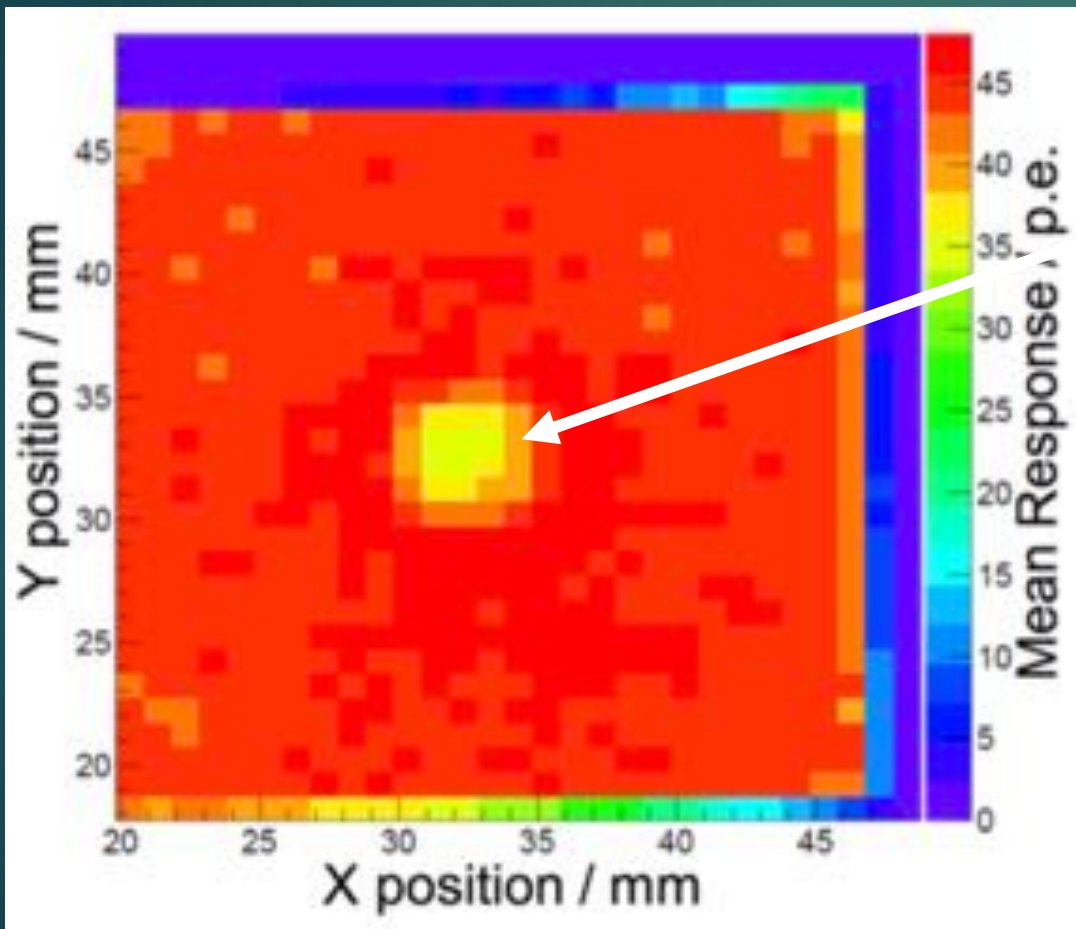
- キャスト成形

射出成形に比べて低温低圧で硬化剤を添加して重合反応により硬化させる

- thermal polymerisation(熱重合)

- 36時間55°Cのオーブンの中に入れる
 - 1時間ごとに3°Cずつ85°Cまで上げる
 - 5日放置
 - ポリマー化完了
 - 1時間ごとに3°Cずつ下げていく

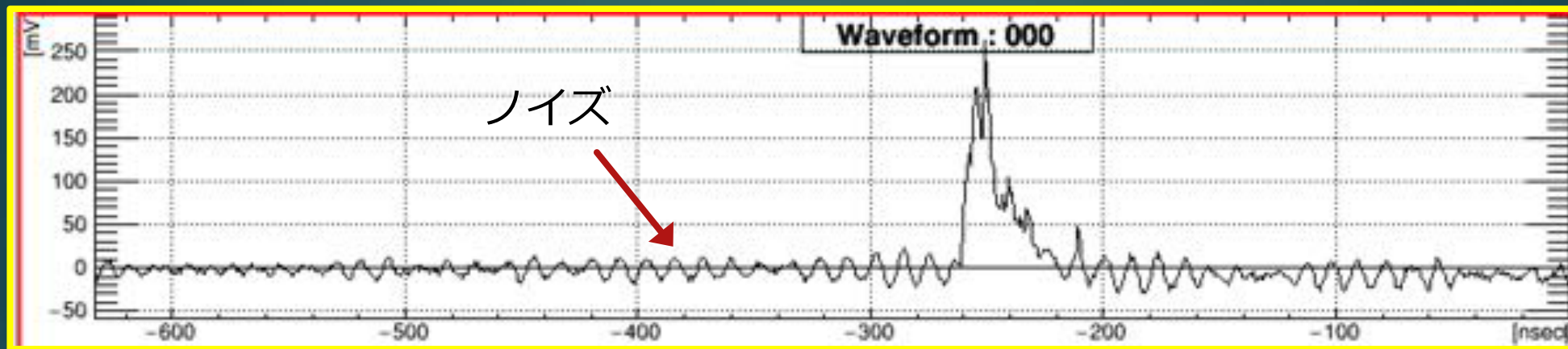
タイルに発生するシンチレーション光の位置依存性



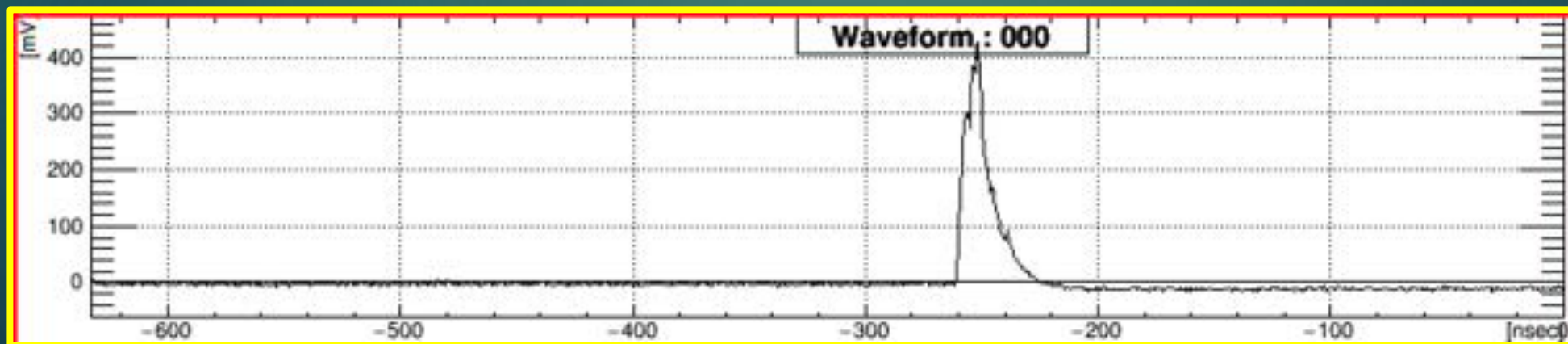
Dimpleの位置

ほとんど均一に分布

ノイズに対する工夫



アルミなし



アルミあり