

# Belle II 実験 TOPカウンターにおける MCP-PMTの量子効率変動の評価

名大理<sup>A</sup>, 名大KMIB<sup>B</sup>, KEK素核研<sup>C</sup>

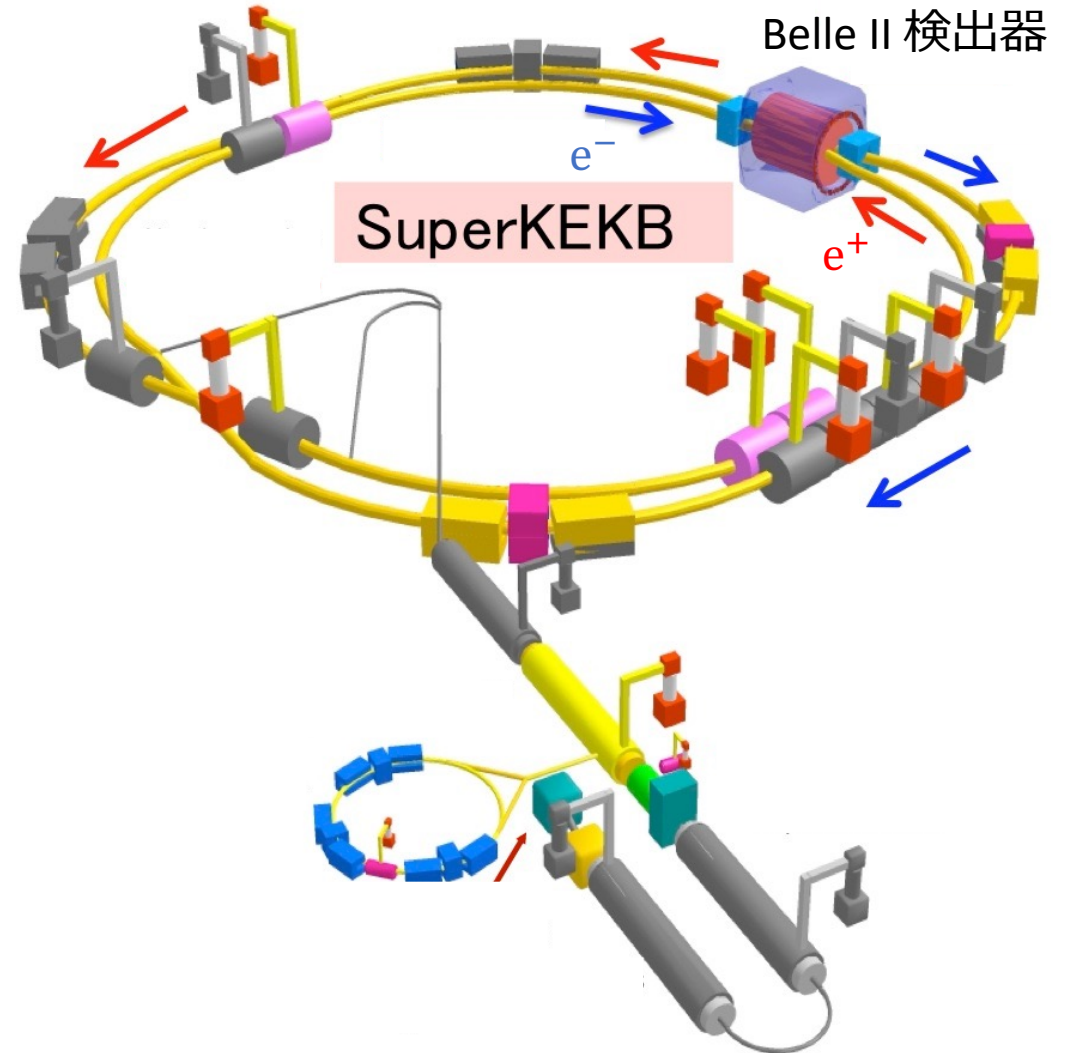
安達佑也<sup>A</sup>, 飯嶋徹<sup>A,B,C</sup>, 居波賢二<sup>A,C</sup>, 松岡広大<sup>A,C</sup>, 吉原圭亮<sup>B</sup>,  
都築識次<sup>A</sup>, 児島一輝<sup>A</sup>, 大久保亮吾<sup>A</sup>, 前田朱音<sup>A</sup>,  
他 Belle II TOPグループ

# 目次

- イントロダクション
- 衝突データを用いたMCP-PMTの量子効率変動測定
- 量子効率変動の温度依存性評価
- まとめ

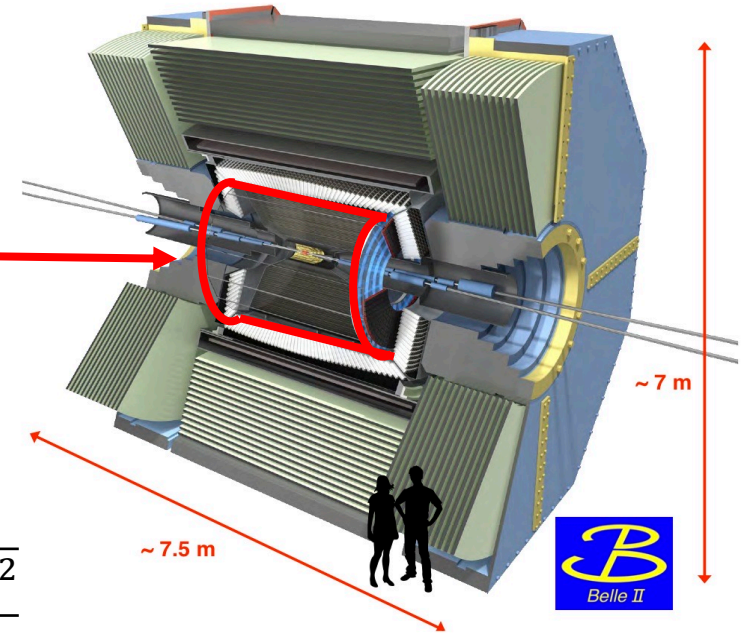
# Belle II 実験

- 重心系エネルギー10.58 GeVの電子陽電子衝突実験
- 世界最高ルミノシティを実現  
 $4.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$   
(目標： $6.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
- $B$ 中間子などを大量に生成  
⇒精密測定により新物理探索
- 高バックグラウンド環境下での運転になる



# TOPカウンター

- Time-Of-Propagation カウンター(全16台)
- 円筒部に設置されたリングイメージ型粒子識別装置
- チェレンコフ光が光検出器に到達した時間と位置から粒子識別を行う

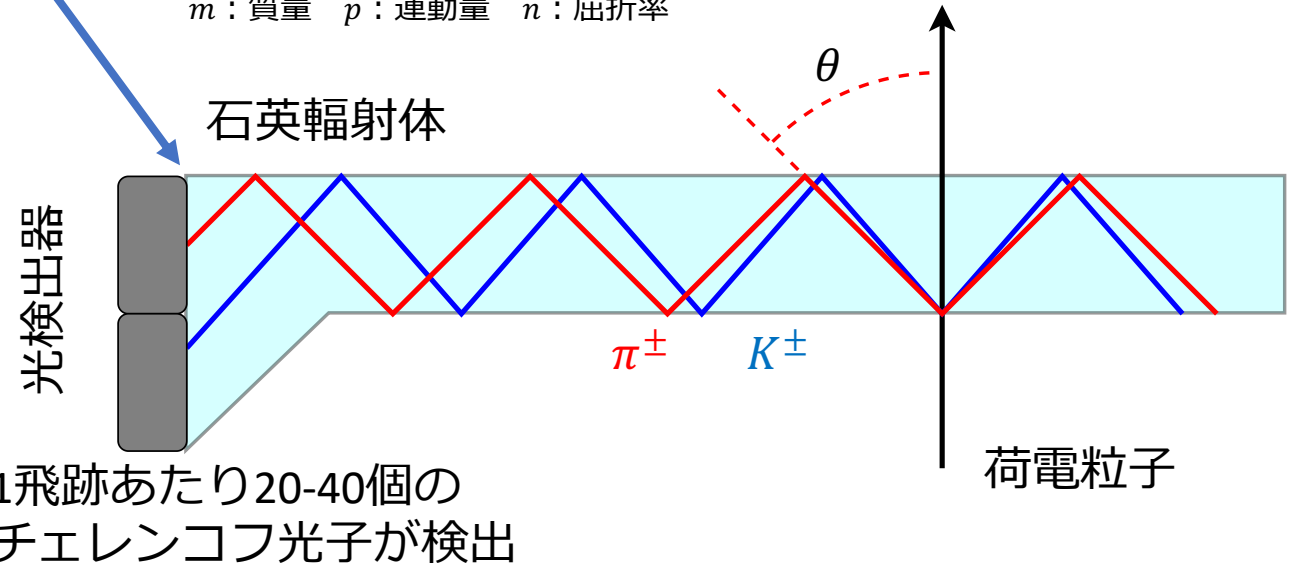


$$\text{識別性能} \propto \frac{\sqrt{\text{検出光子数}}}{\text{時間分解能}}$$

$$\cos \theta = \frac{\sqrt{m^2 + p^2}}{np}$$

$m$ : 質量  $p$ : 運動量  $n$ : 屈折率

TOPカウンターの運用において、**時間分解能**と**検出効率**が重要



# 光検出器 MCP-PMT

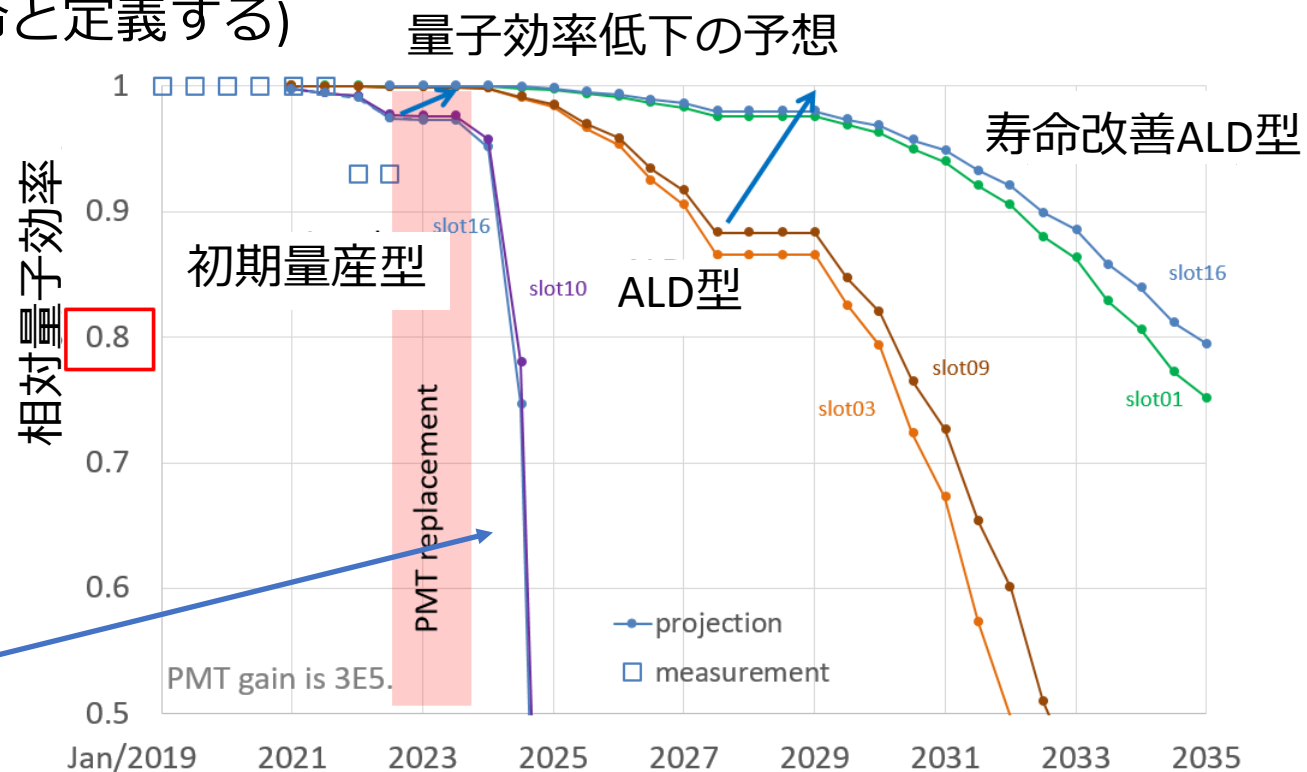
マイクロチャンネルプレート (Micro-channel-plate, MCP)を使用した光電子増倍管

- $\sigma \sim 34.3$  psの高い時間分解能を実現
- 積算出力電荷の増加に伴い、量子効率が低下する  
(相対量子効率が0.8になる積算出力電荷を寿命と定義する)

長寿命化に向けて製造工程を改良した3種類のMCP-PMTが実装されている

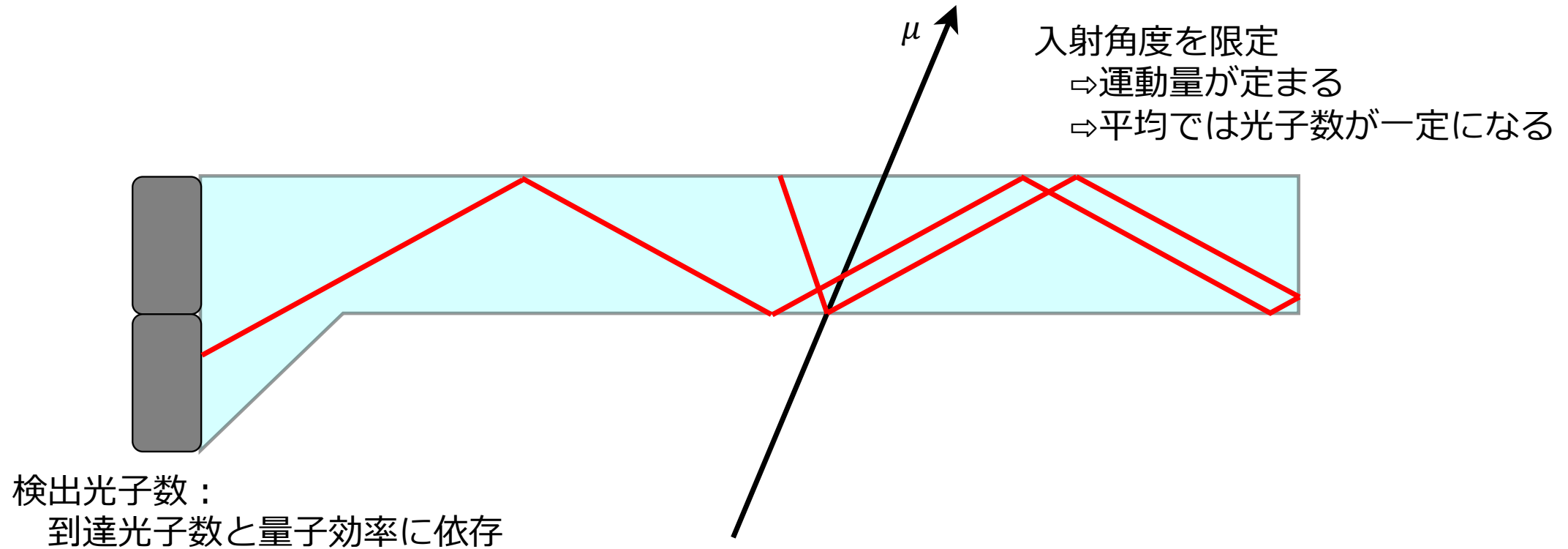
型番	個数	寿命 ( $C/cm^2$ ) 平均, [最小, 最大]
初期量産型	224	1.1 [0.3, 1.7]
ALD型	220	10.4 [2.5, 26.1]
寿命改善ALD型	68	> 13.6

初期量産型は寿命改善ALD型への交換を想定している



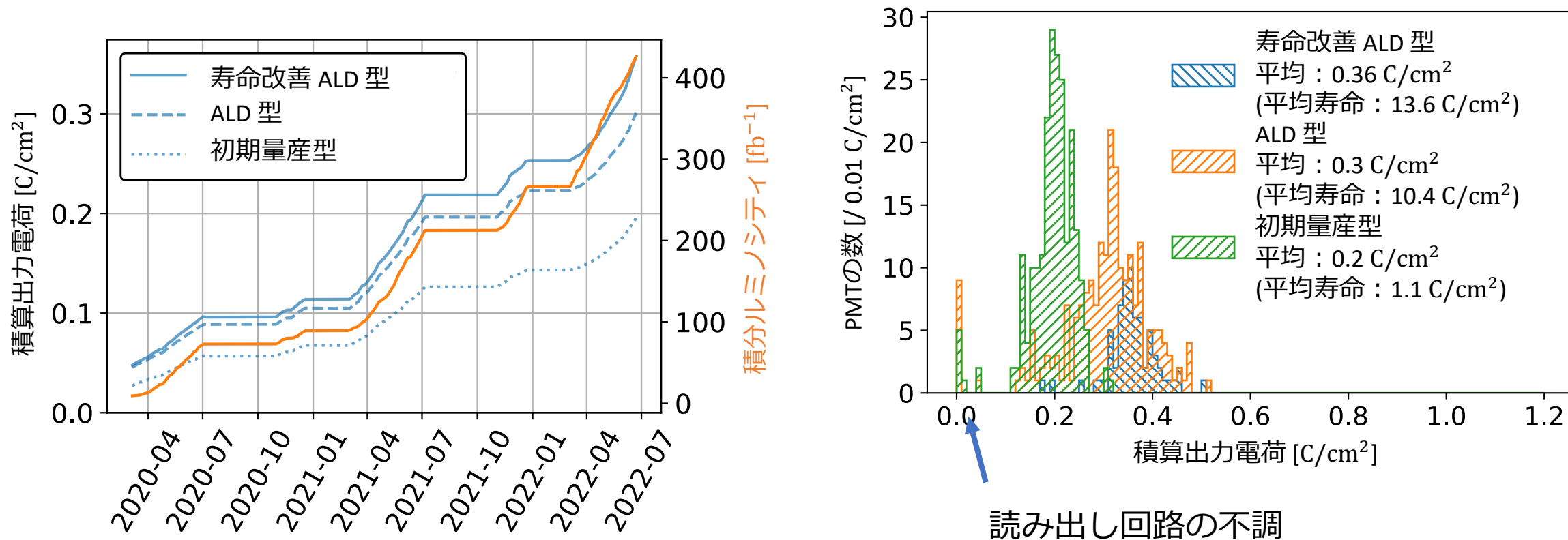
# 衝突データを用いた量子効率変動のモニター

使用するデータ：ダイミュオン( $ee \rightarrow \mu\mu$ )事象 (2021年以降)



検出光子数の変動  $\equiv$  量子効率の変動

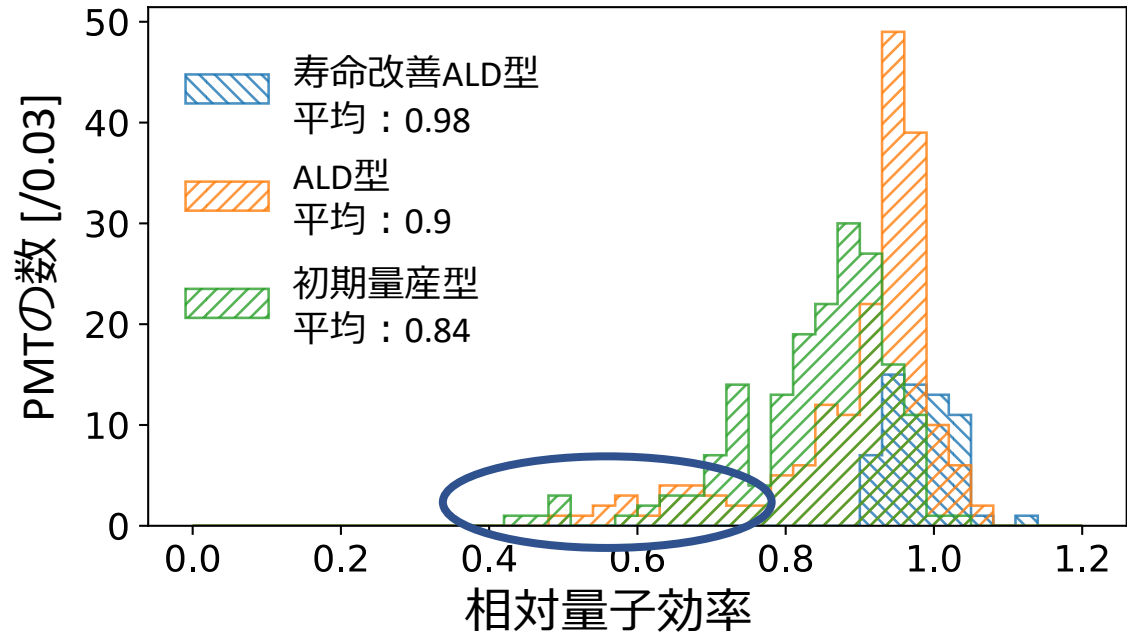
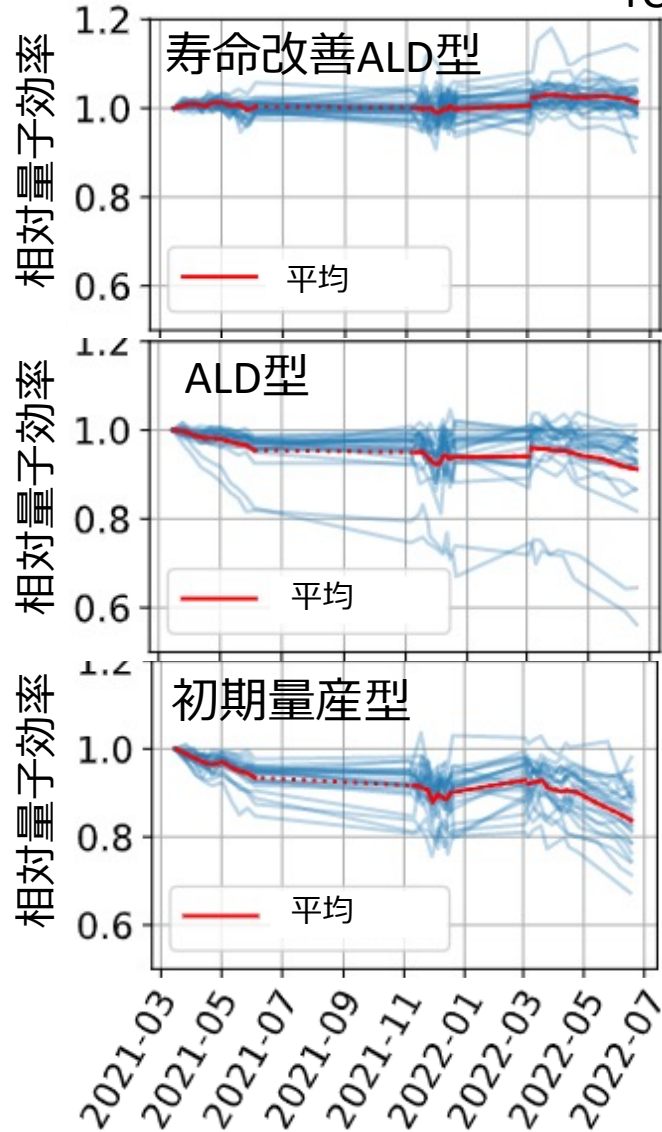
# 積算出力電荷の測定結果



積算出力電荷は寿命に対して十分小さいため、量子効率低下は起きないと予想される  
(初期量産型の一部では低下が始まる可能性がある)

# 量子効率変動

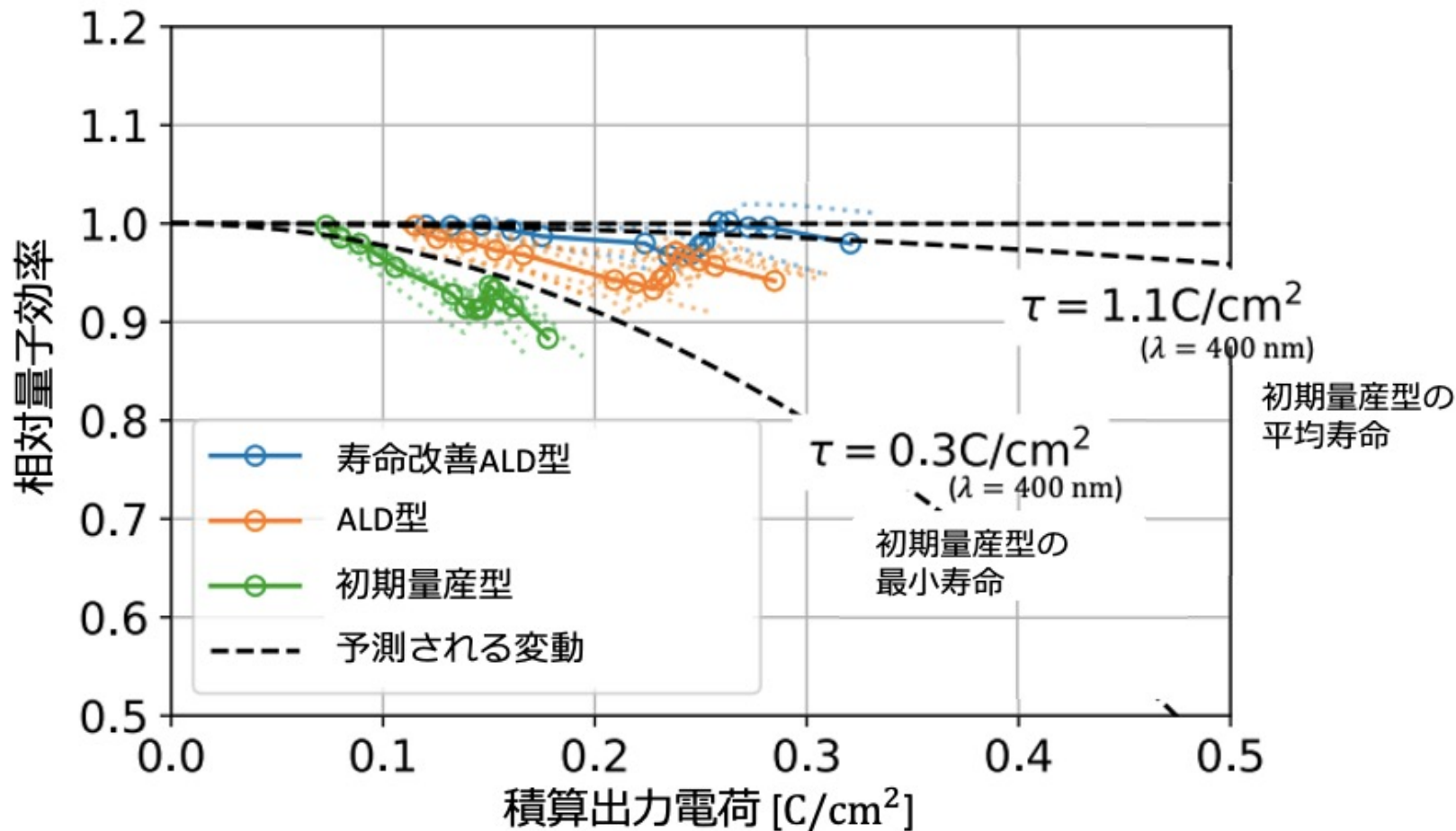
PMTの型毎に  
TOPカウンター1台分の32個



- 2021年前半と2022年に量子効率低下して、2021年後半ではほとんど変化していない。
- 一部で大きな量子効率低下が見られる  
⇒製造バッチ依存性が疑われる



# 量子効率変動予測との比較



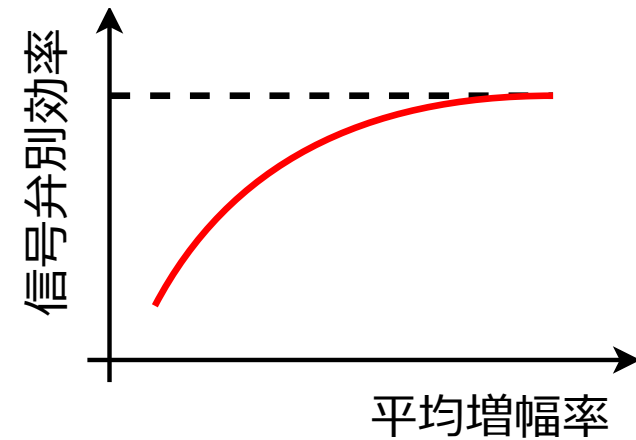
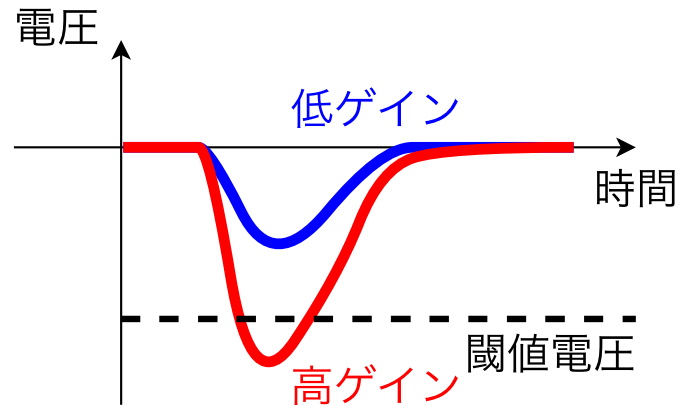
予測とは異なる量子効率変動をしている。  
⇒予測との差異の原因を考察する。

# 変動の要因①

- 増幅率

- 物理ラン中に増幅率が減少 → 信号弁別効率が低下  
信号弁別効率の補正が不十分であると疑われた。

- 主要な原因でないことを確認済み



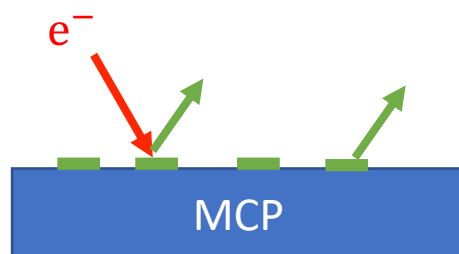
# 変動の要因②

## 量子効率低下の原因

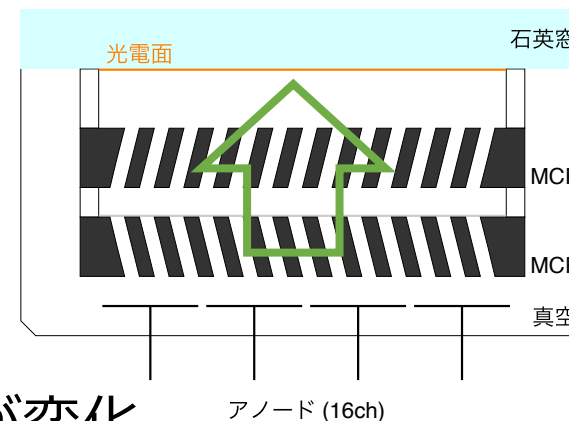
物質の表面には  
ガスが付着している  
(残留ガス:  $H^+$ ,  $H_2O^+$ , 中性ガス)



増幅時や自然に  
ガスが放出される  
(アウトガス)



アウトガスにより  
光電面が劣化する



- 温度による影響

可能性：アウトガスの増加、光電面とアウトガスの反応が変化

寿命測定試験時：室温(20 ~ 30 °C)

実機：約40 °C

⇒ 温度による影響を試験する

加熱試験、高温環境動作による試験

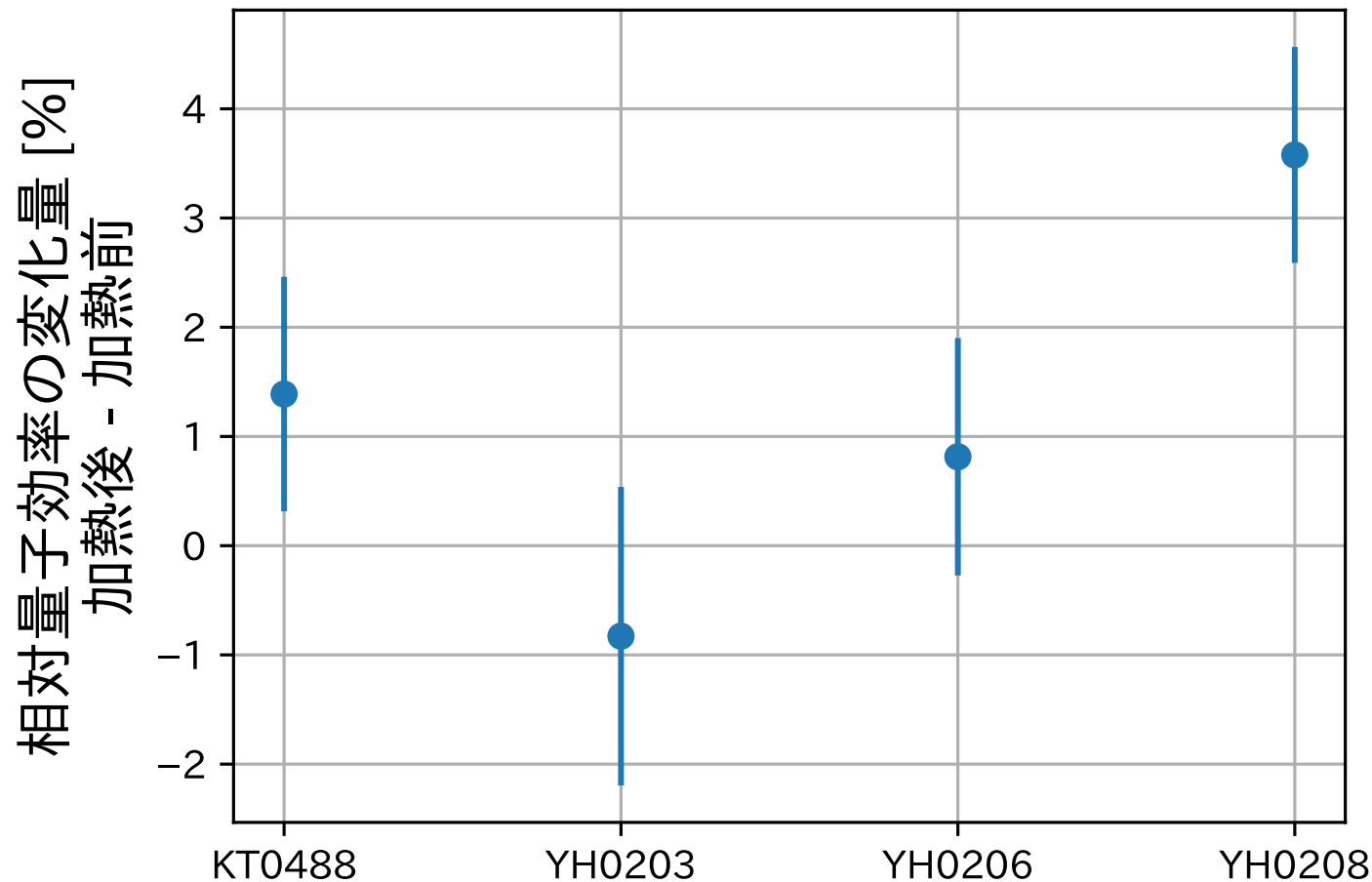
# 加熱試験の結果

3週間40 °Cで加熱し、  
加熱前後の量子効率を比較  
(寿命改善ALD型を使用)

平均値：1.2 ± 0.6 %

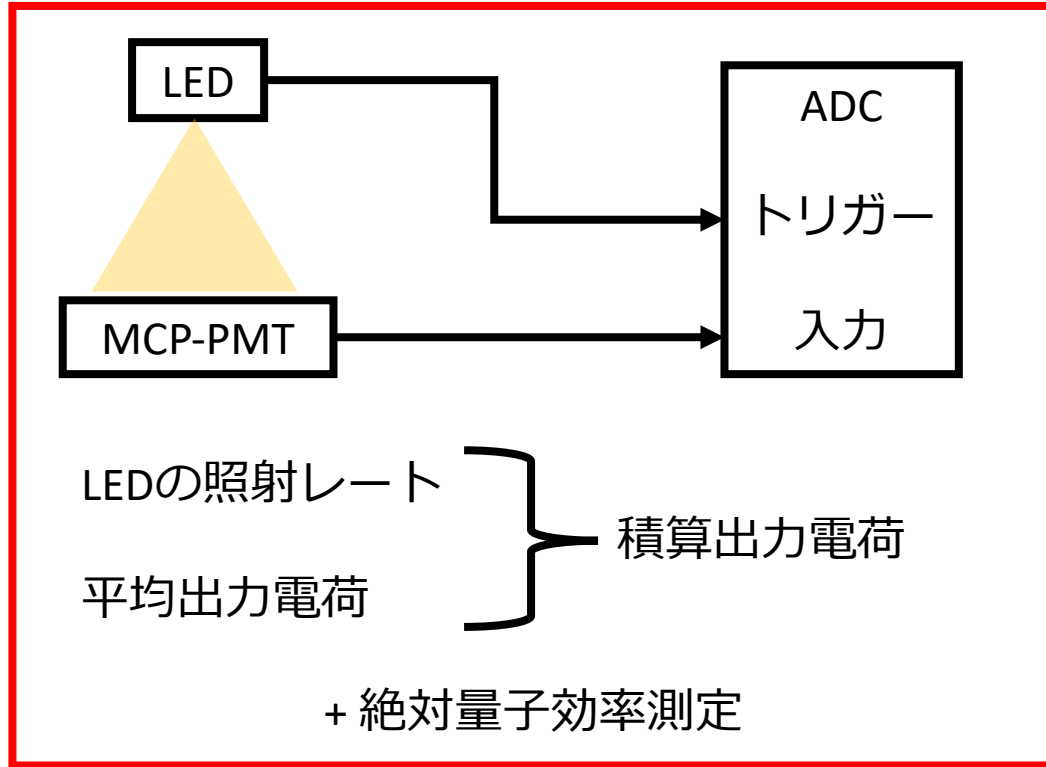
寿命改善ALD型では、  
加熱による影響は  
ほとんど見られない。

測定結果



# 高温環境動作による試験方法

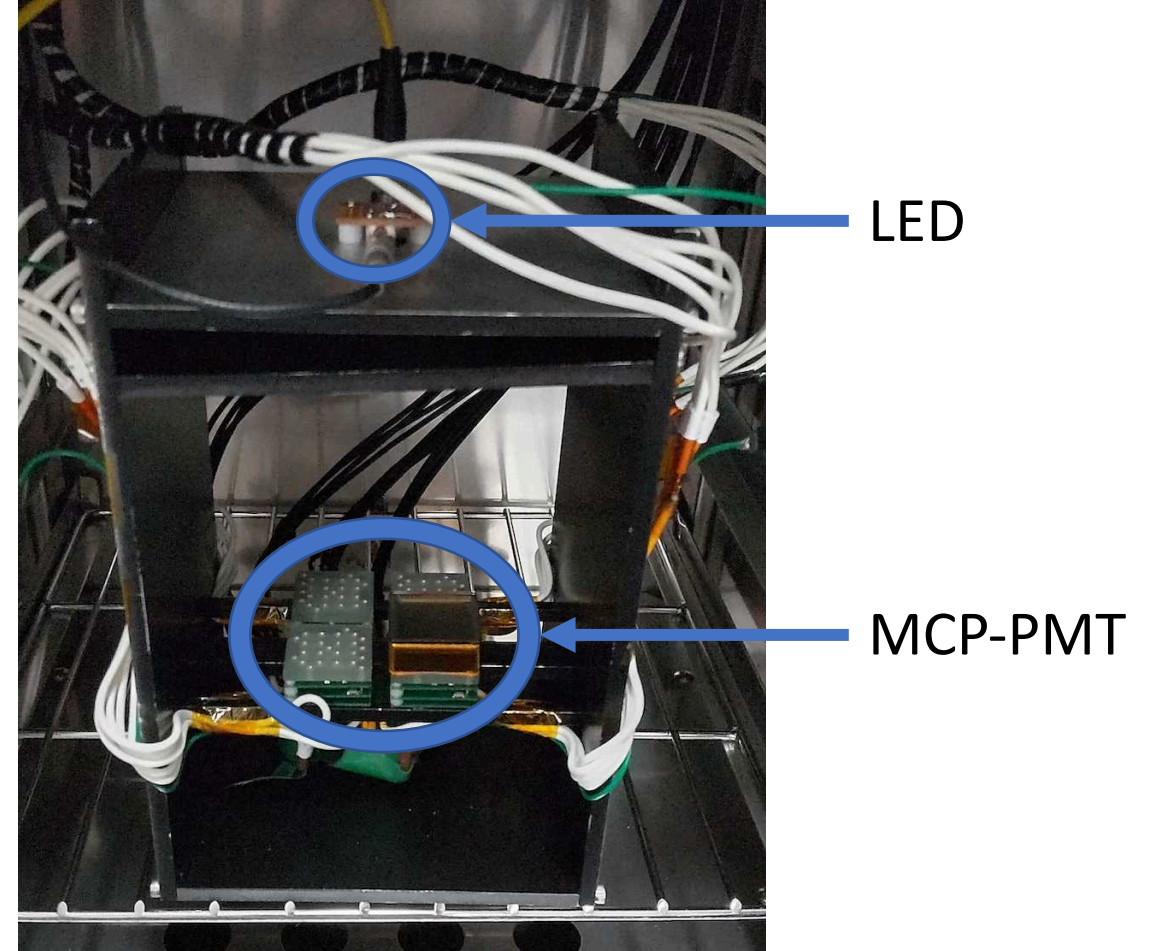
## 試験方法の概要



使用したPMTの型：寿命改善ALD型

## セットアップ

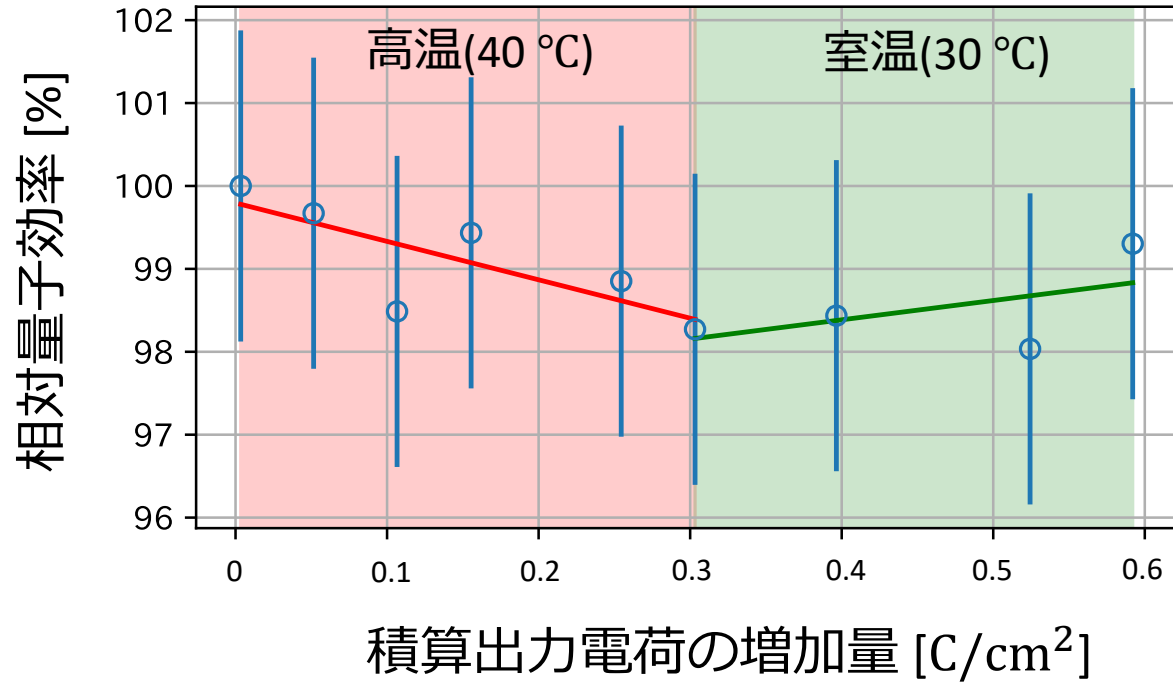
(温度を一定に保つため恒温槽を使用)



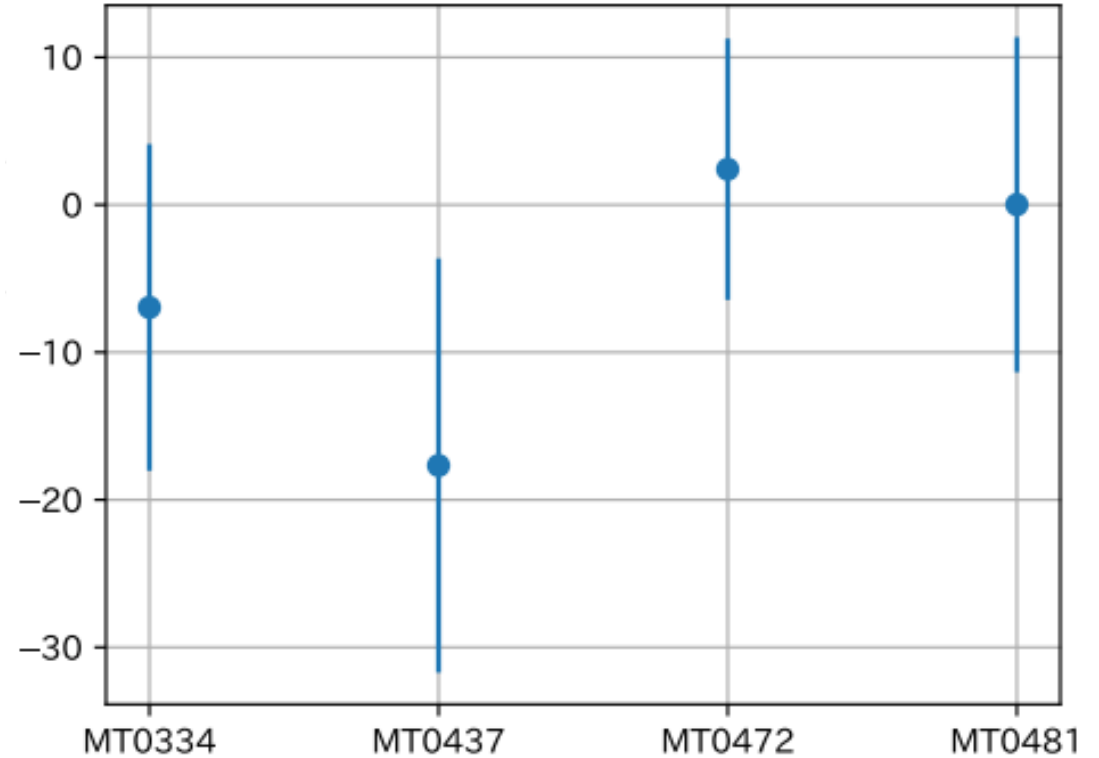
# 高温環境動作による試験結果

測定結果の比較

測定結果の例 (MT0334)



傾きの変化量 [%/(C/cm<sup>2</sup>)]



寿命改善ALD型では温度による大きな違いは見られなかった。

# まとめ

Belle II実験の粒子識別装置TOPカウンターにおけるMCP-PMTの量子効率変動の評価を行った

## 量子効率変動測定

- 積算出力電荷はMCP-PMTの寿命に比べて十分小さい。
- 予測と異なる変動をしており、原因を探す必要がある。

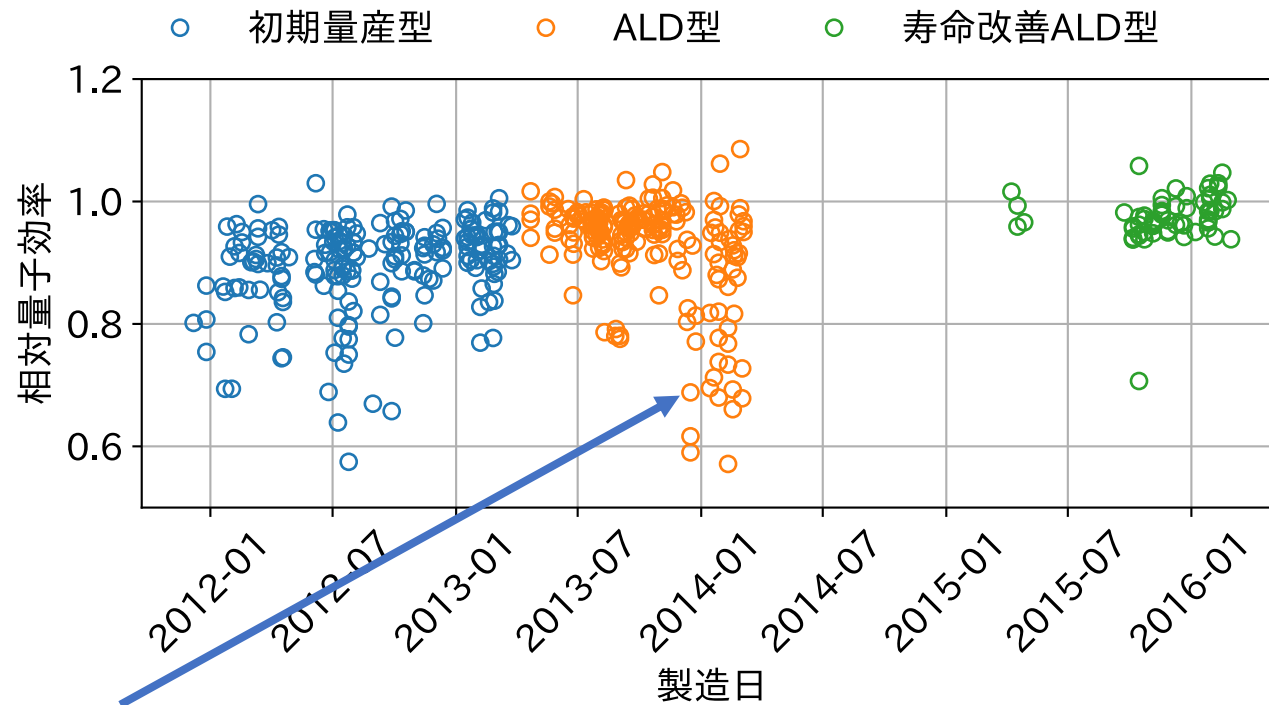
## 温度依存性評価

- 加熱試験と高温環境動作による試験を行なった。
- 寿命改善ALD型では温度変化による大きな違いは見られなかった。
- 測定の精度を上げ、他の型で同様の試験を行う。

# バックアップ

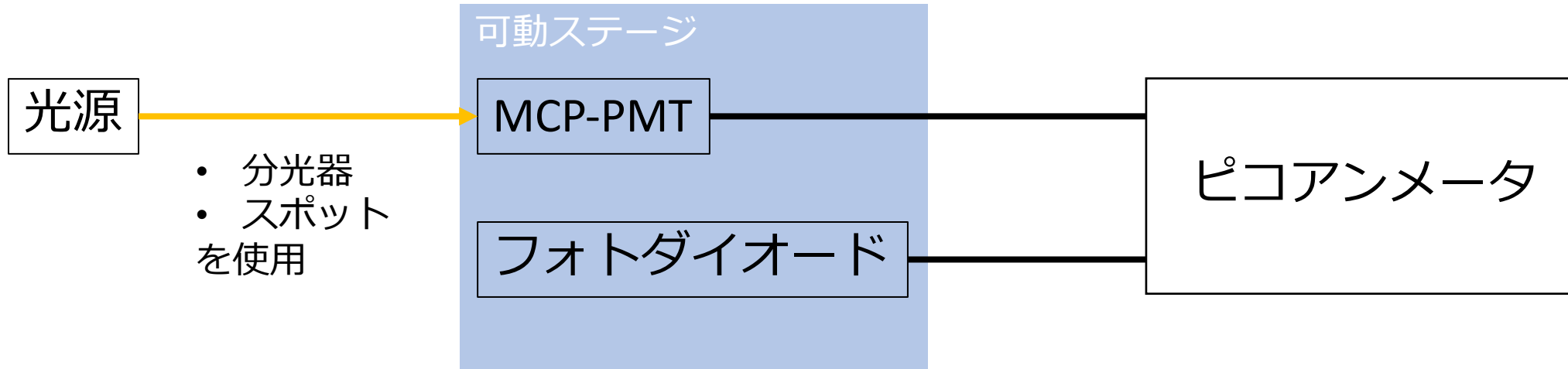


# 量子効率の低下が疑われるPMT



量子効率の低下が疑われるPMTの製造日は近い傾向にある  
製造時期によって製造工程に何か問題があった可能性がある  
(現在、製造元で調査中)

# 絶対量子効率測定



(非)照射時の

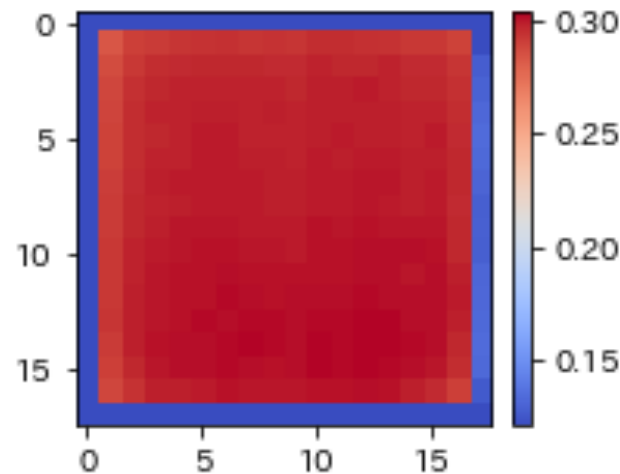
- MCP-PMTの光電面
- フォトダイオード

に流れ込む電子の量を測定

⇒ フォトダイオードの量子効率から  
MCP-PMTの量子効率を算出

$$QE^{MCP} = \frac{I_{light}^{MCP} - I_{dark}^{MCP}}{I_{light}^{PD} - I_{dark}^{PD}} \times QE^{PD}$$

面分布 量子効率



波長依存性

