

CTA計画 半導体光検出器MPPCを用いた チェレンコフカメラの開発

日高直哉^A、田島宏康^A、奥村 暁^{A,B}、河島孝則^A、David Williams^C、
Aurelien Bouvier^C、K. Bechtol^D、S. Funk^D、A. Simons^D、
J. Vandenbroucke^D、G. Varner^E、N. Otte^F、他 The CTA Consortium

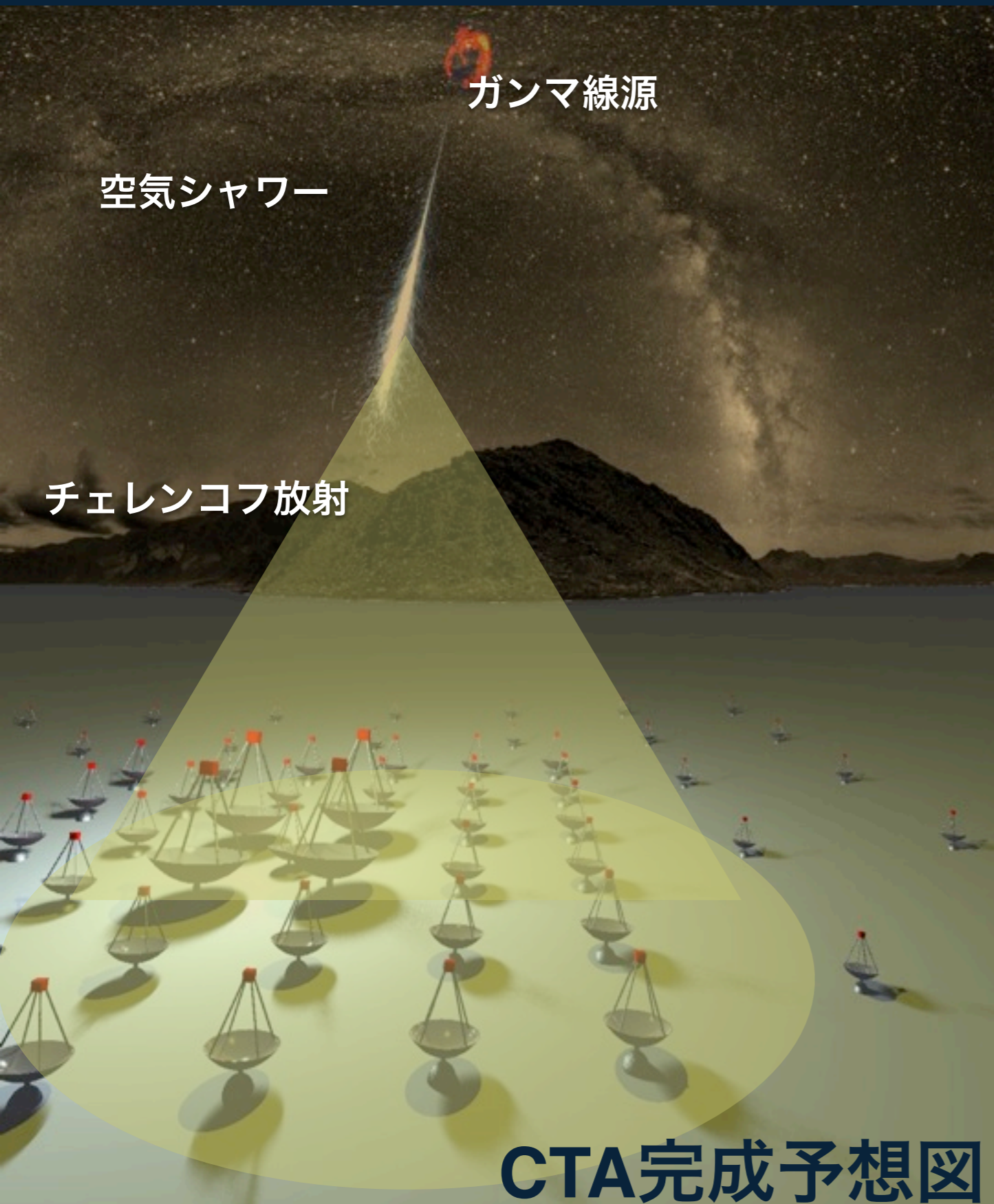
名大STE研^A、レスター大^B、UCSC^C、SLAC^D、ハワイ大^E、
ジョージア工科大^F

CTA計画 半導体光検出器MPPCを用いた チェレンコフカメラの開発

日高直哉^A、田島宏康^A、奥村暁^{A,B}、河島孝則^A、David Williams^C、
Aurelien Bouvier^C、K. Bechtol^D、S. Funk^D、A. Simons^D、
J. Vandenbroucke^D、G. Varner^E、N. Otte^F、他 The CTA Consortium

名大STE研^A、レスター大^B、UCSC^C、SLAC^D、ハワイ大^E、
ジョージア工科大^F

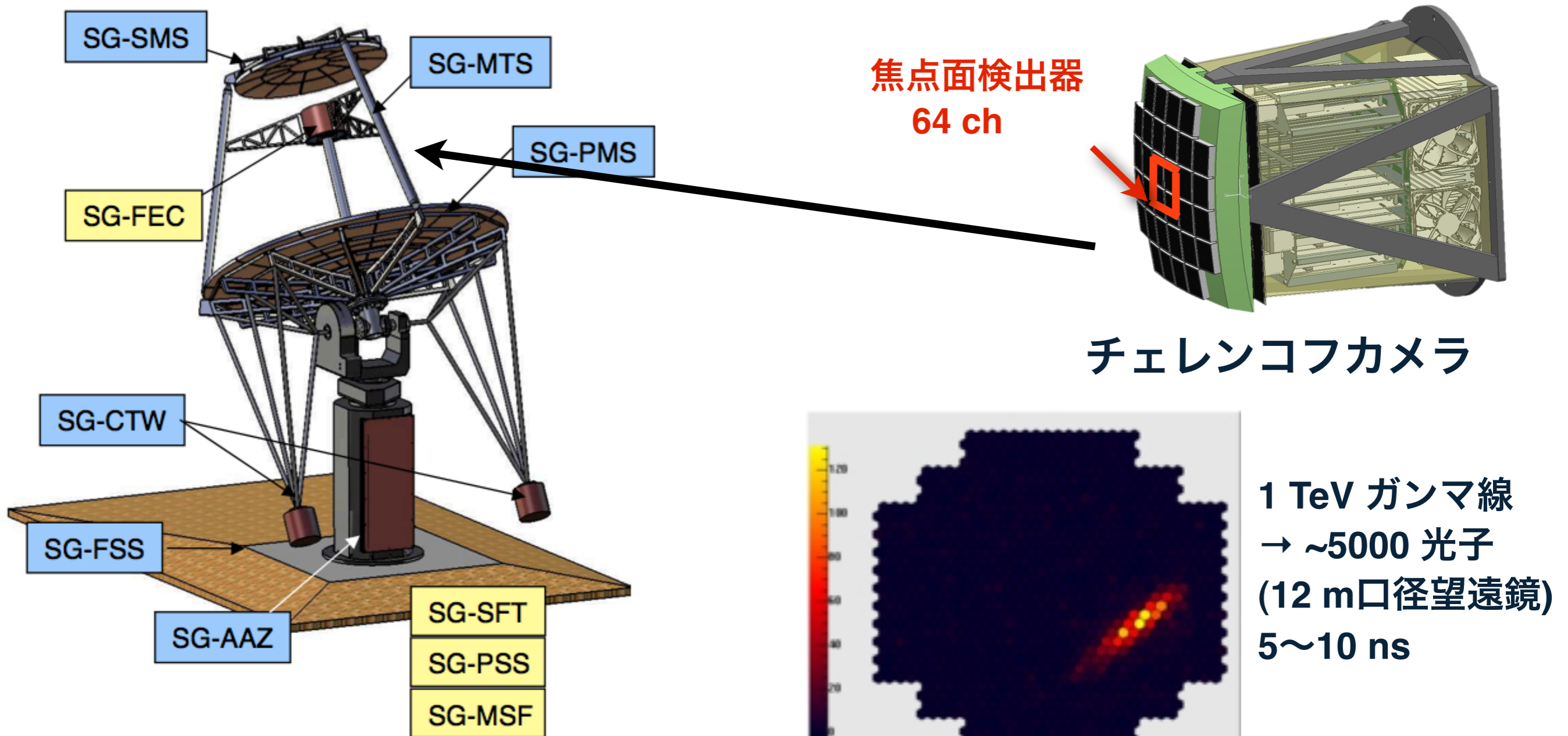
Cherenkov Telescope Array (CTA)



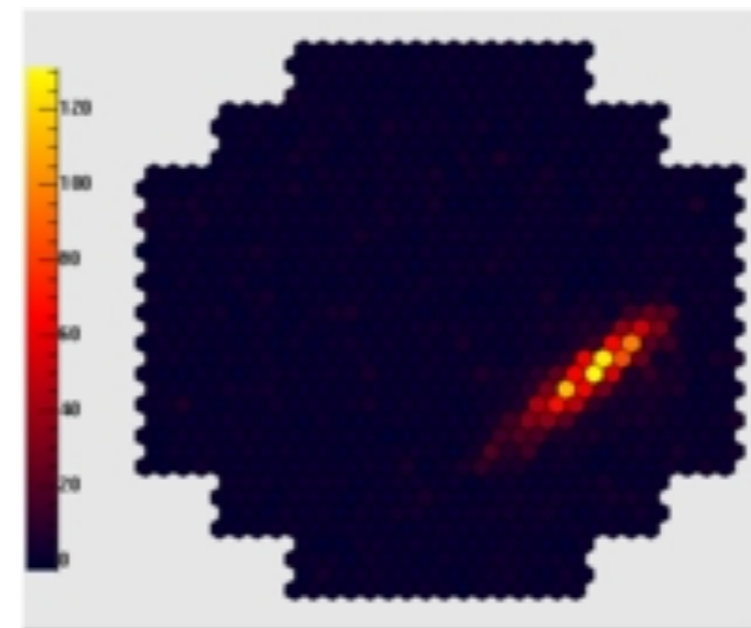
- 20 GeV~100 TeV 以上の宇宙ガンマ線の観測
- 日米欧を中心とした国際共同実験
- 現在稼働中のチェレンコフ望遠鏡から 10 倍の感度向上を目指す
- 複数の望遠鏡でガンマ線シャワーイメージを再構成
 - ▶ 検出光量からエネルギーを決定
 - ▶ シャワーイメージから到来方向を決定

チェレンコフ望遠鏡

- 望遠鏡で集光された光を光検出器で検出



チェレンコフカメラ



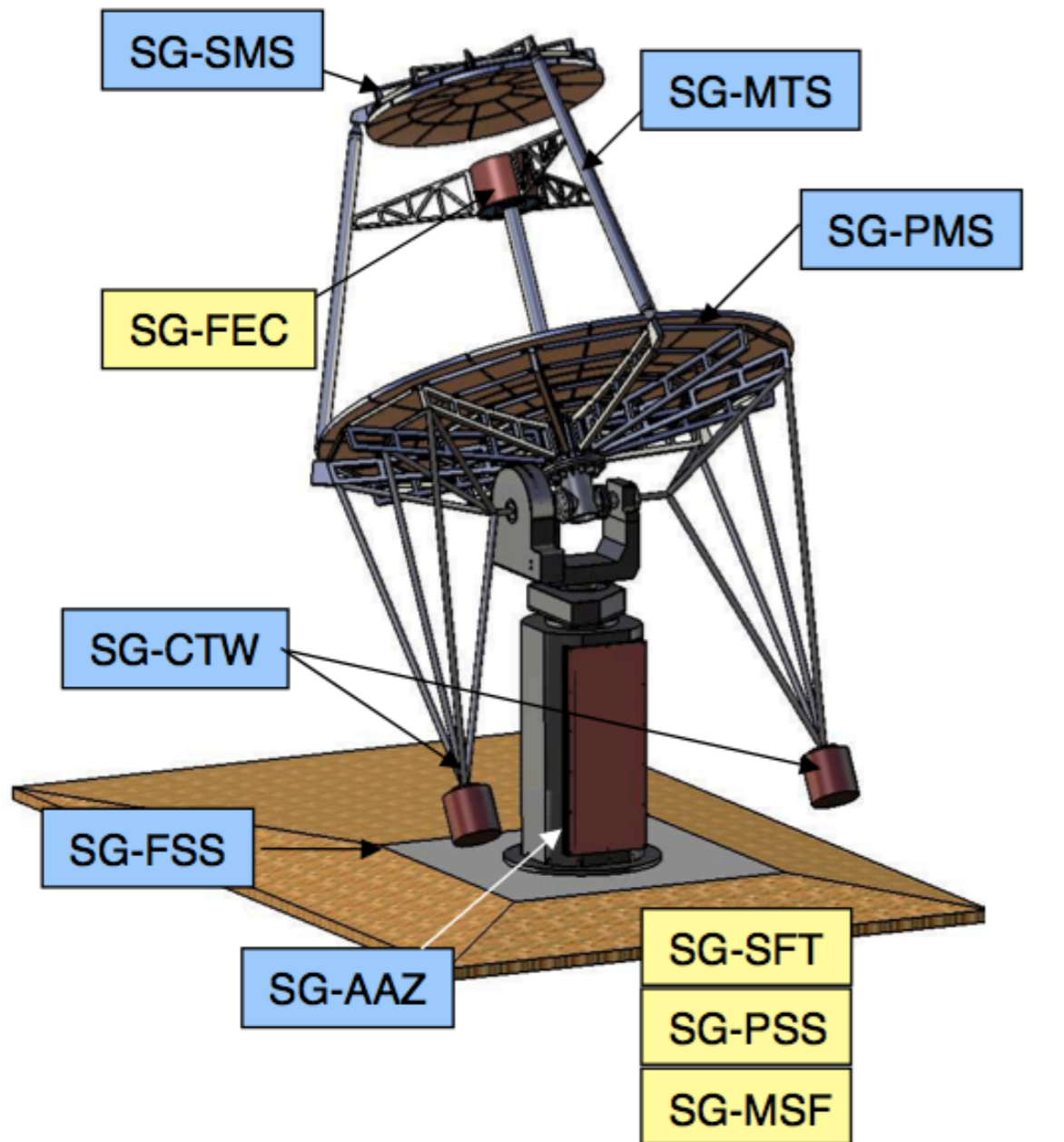
1 TeV ガンマ線
→ ~5000 光子
(12 m口径望遠鏡)
5~10 ns

H.E.S.S.望遠鏡での
チェレンコフイベント例

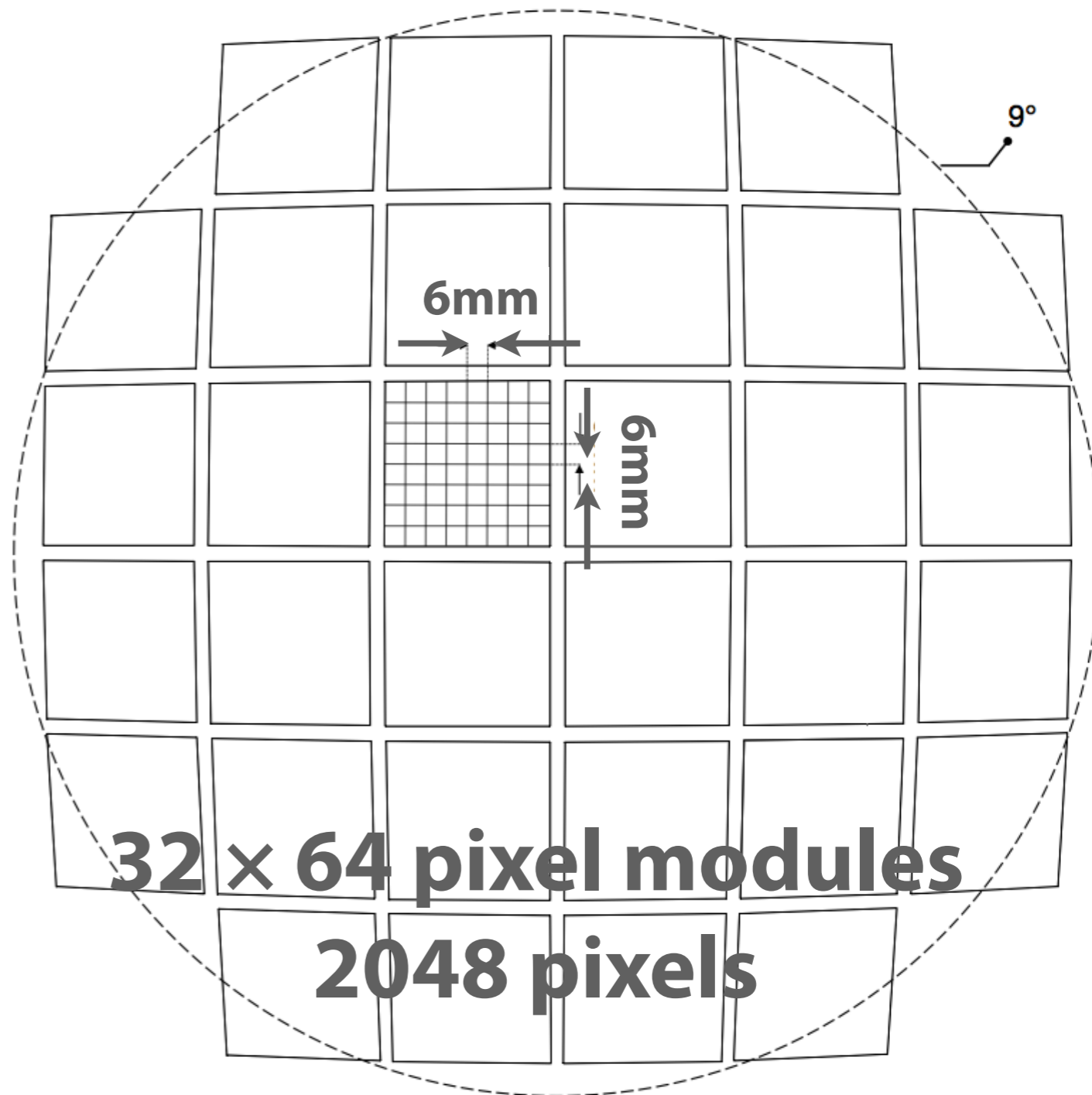
CTA Small Size Telescope (SST)
dual mirror type

チェレンコフ望遠鏡

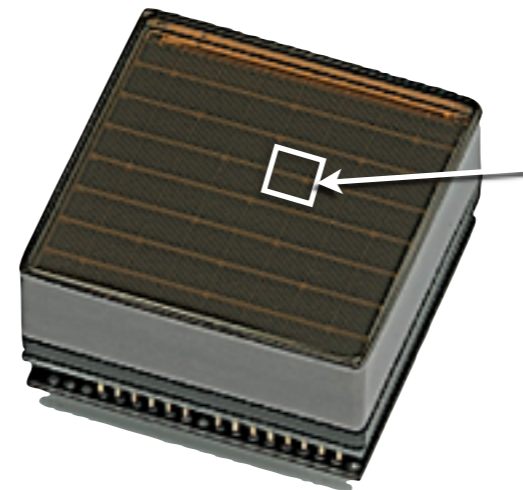
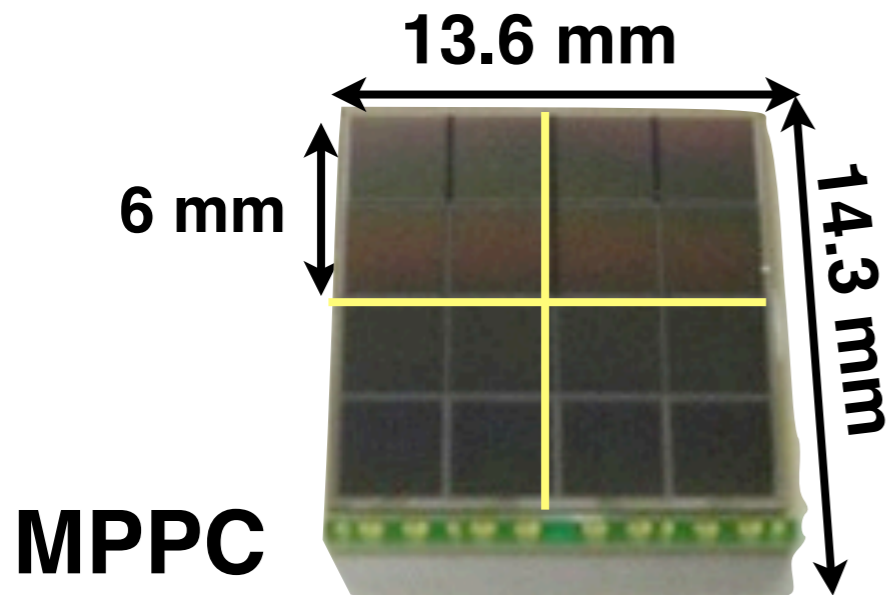
- 望遠鏡で集光された光を光検出器で検出



CTA Small Size Telescope (SST)
dual mirror type



MPPC (Multi Pixel Photon Counter)

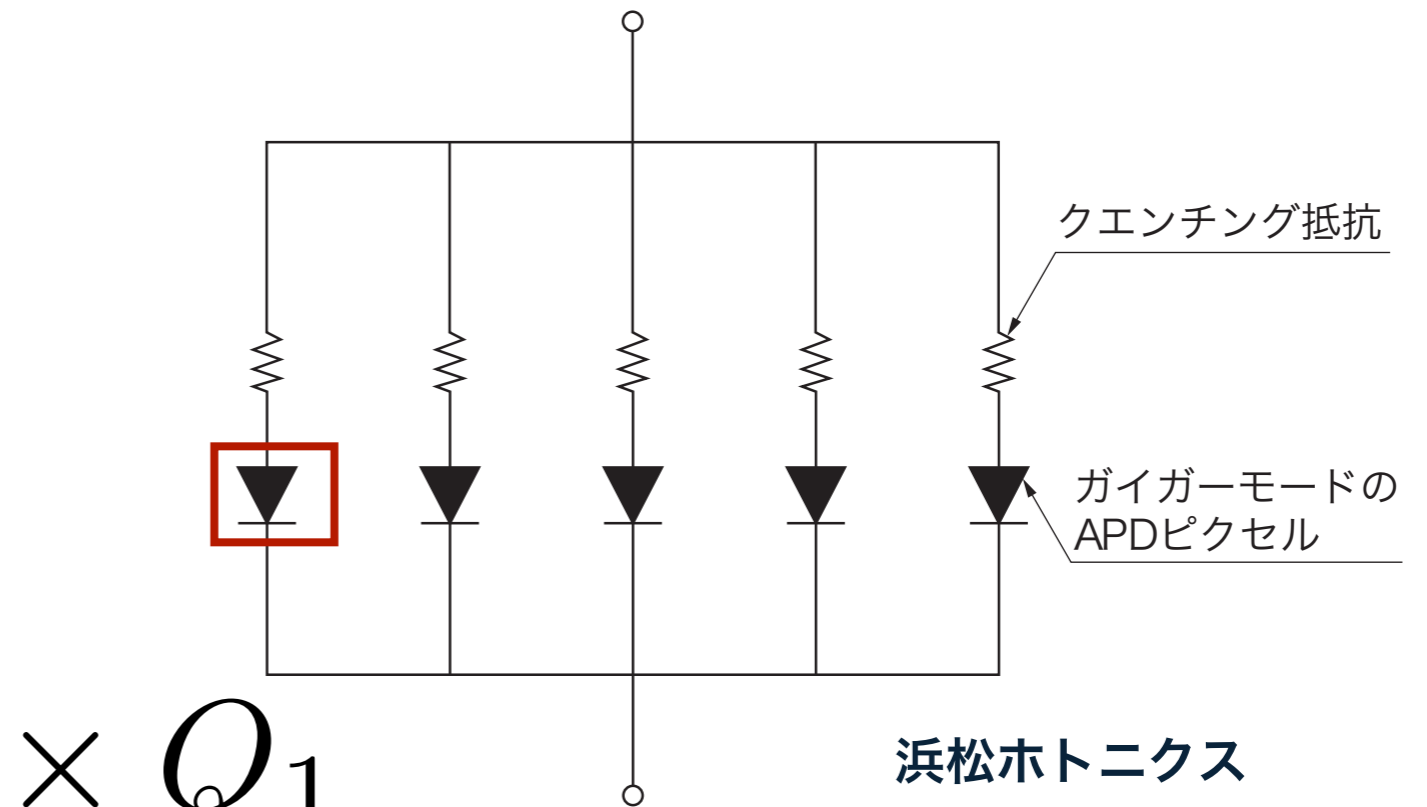
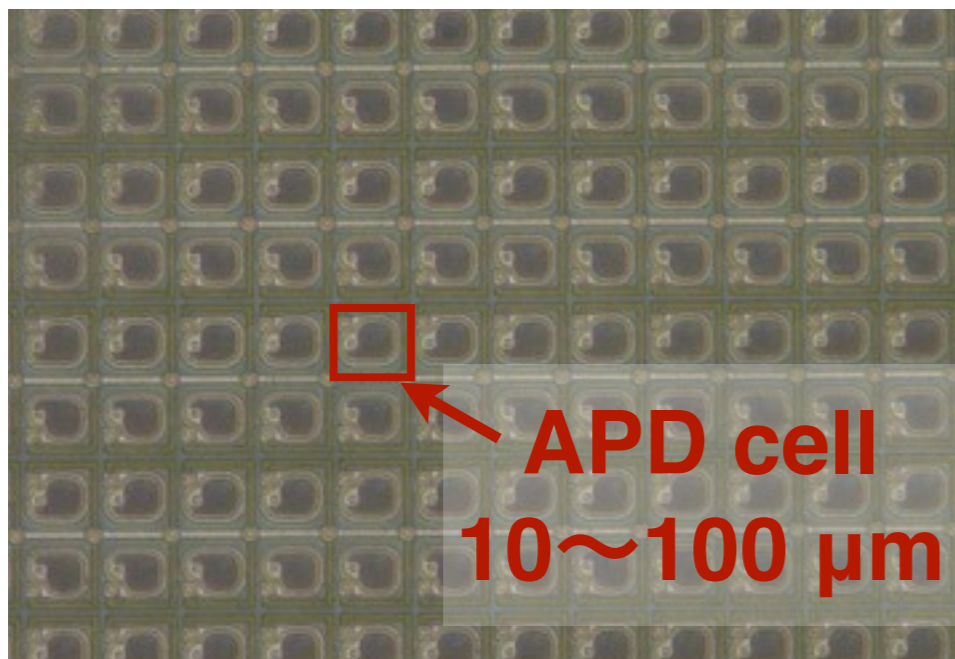


MAPMT

6.08 mm × 6.08 mm /ch

8 ch × 8 ch

焦点面検出器の候補の一つ



浜松ホトニクス
MPPC技術資料より

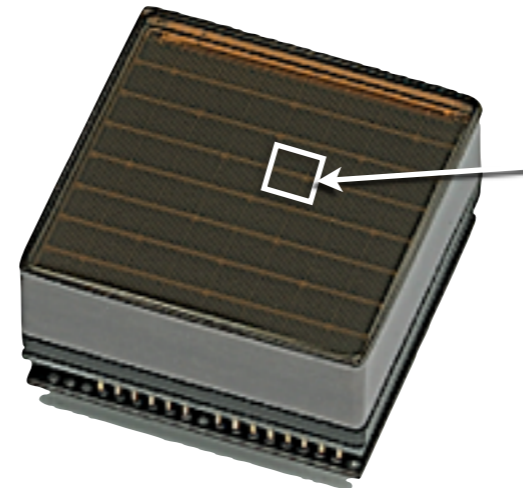
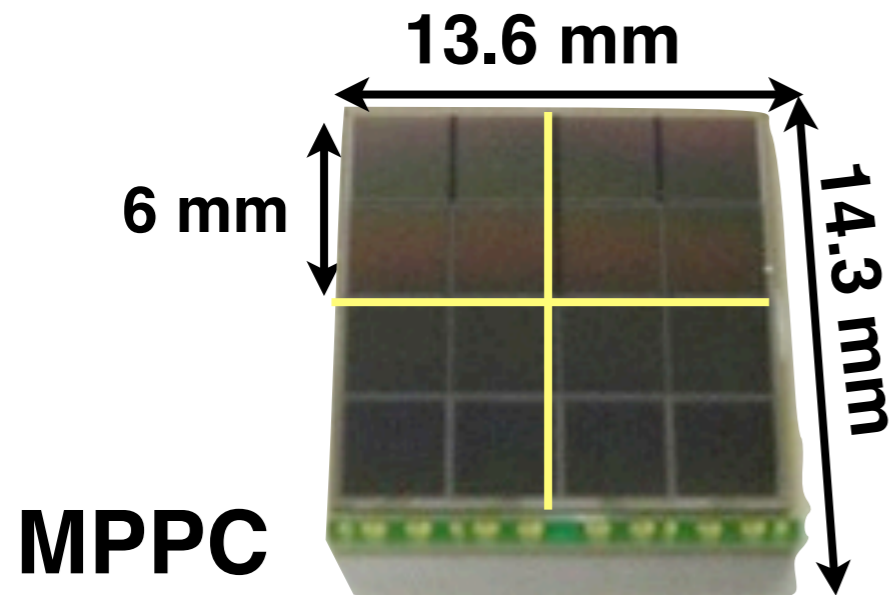
$$Q_{\text{out}} = N_{\text{fired}} \times Q_1$$

MPPCの出力

増幅した
APDの個数

1つのAPDの出力

MPPPC (Multi Pixel Photon Counter)



MAPMT

6.08 mm × 6.08 mm /ch

8 ch × 8 ch

焦点面検出器の候補の一つ

- 半導体光検出器
- MAPMTに対して高い光検出効率
- 望遠鏡の小型化が可能
- ▶ 費用低減分を望遠鏡台数の増加に充てることでCTAでのガンマ線天体の検出感度向上

チェレンコフ望遠鏡へのMPPPCの採用を目指す

MPPCの採用にむけて

- 光検出能力向上の実証

- ▶ MPPCとPMTの光検出効率を比較し、CTAでの性能向上を実測に基づき定量的に評価する (2012春発表内容)
 - チェレンコフ光の検出光量は60%向上

- 基礎性能の詳細評価 (温度依存性、動作電圧依存性)

- ▶ CTAでは野外での運用
 - 運用環境での最適な動作条件の決定が重要
- ▶ ダークカウント、光検出効率、増幅率 (2012秋発表内容)
 - 増幅率、光検出効率は動作電圧のコントロールで安定した性能を得られる
- ▶ 望遠鏡トリガー性能の見積もり (2013春発表内容)
 - クロストーク、アフターパルス測定

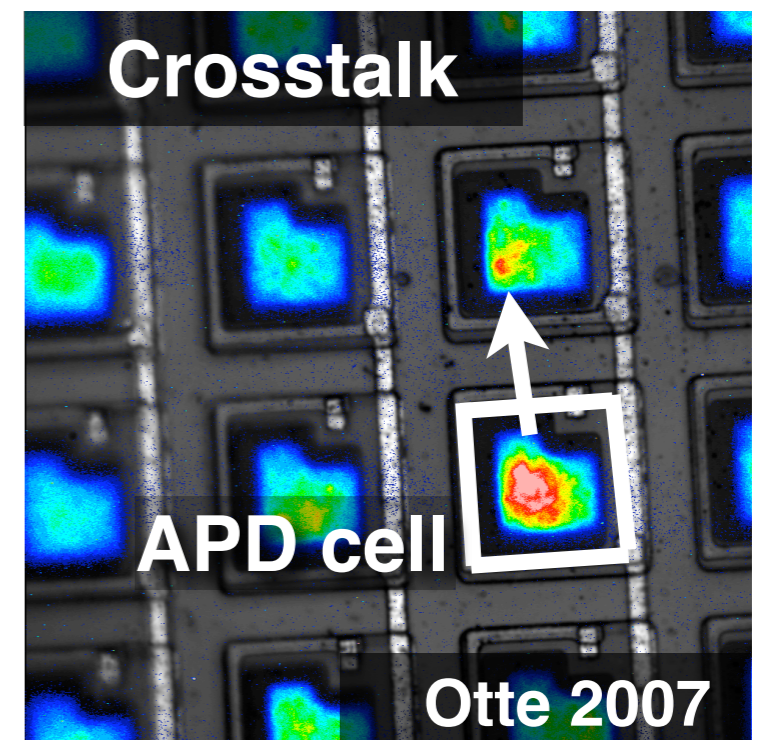
クロストーク、アフターパルス

- クロストーク

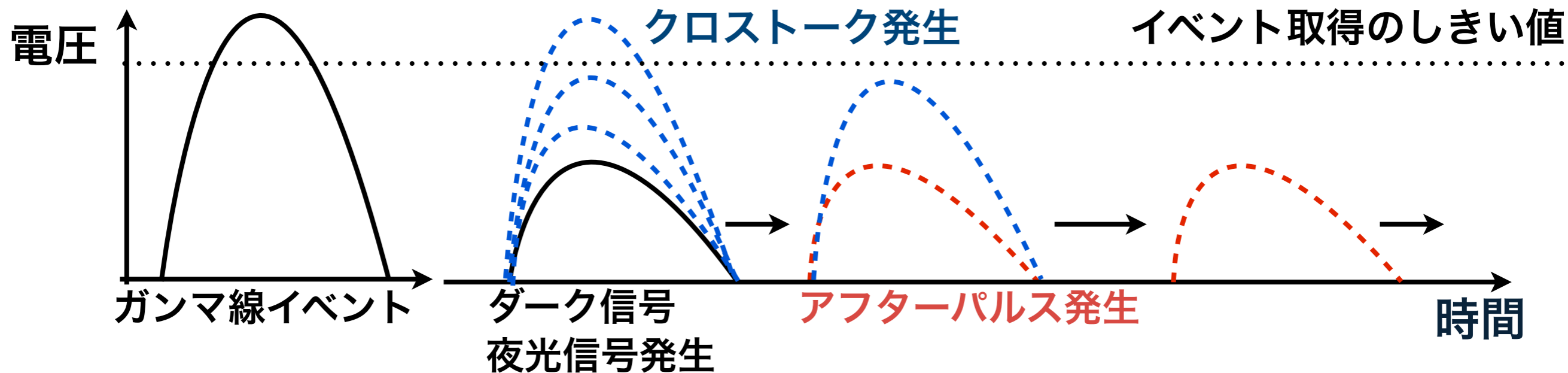
- ▶ 増倍過程に放射される二次光子によって別の APD cell が励起

- アフターパルス

- ▶ 増幅キャリアが格子欠陥でトラップされ、ある時間定数を持って再放出されて、再び増倍が起こる



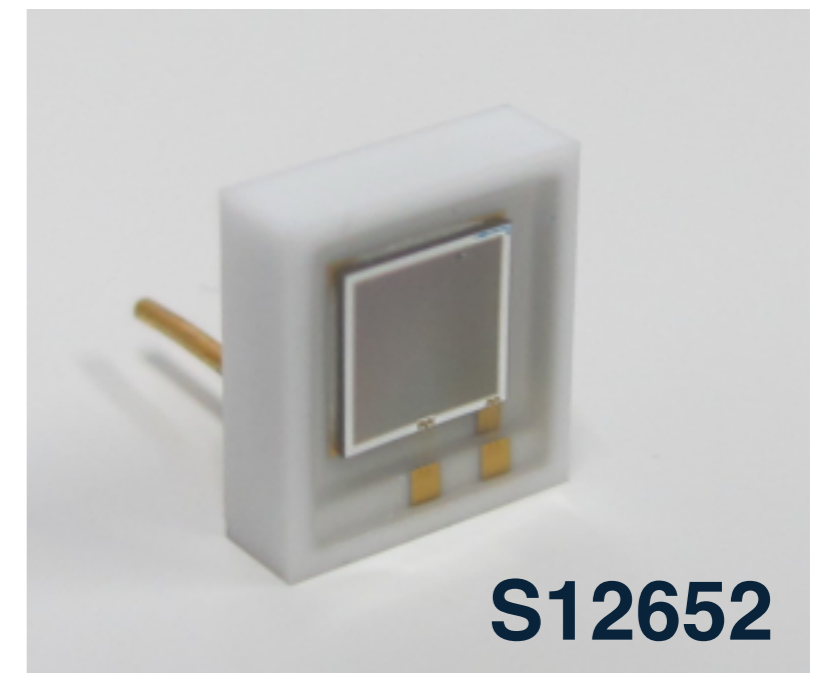
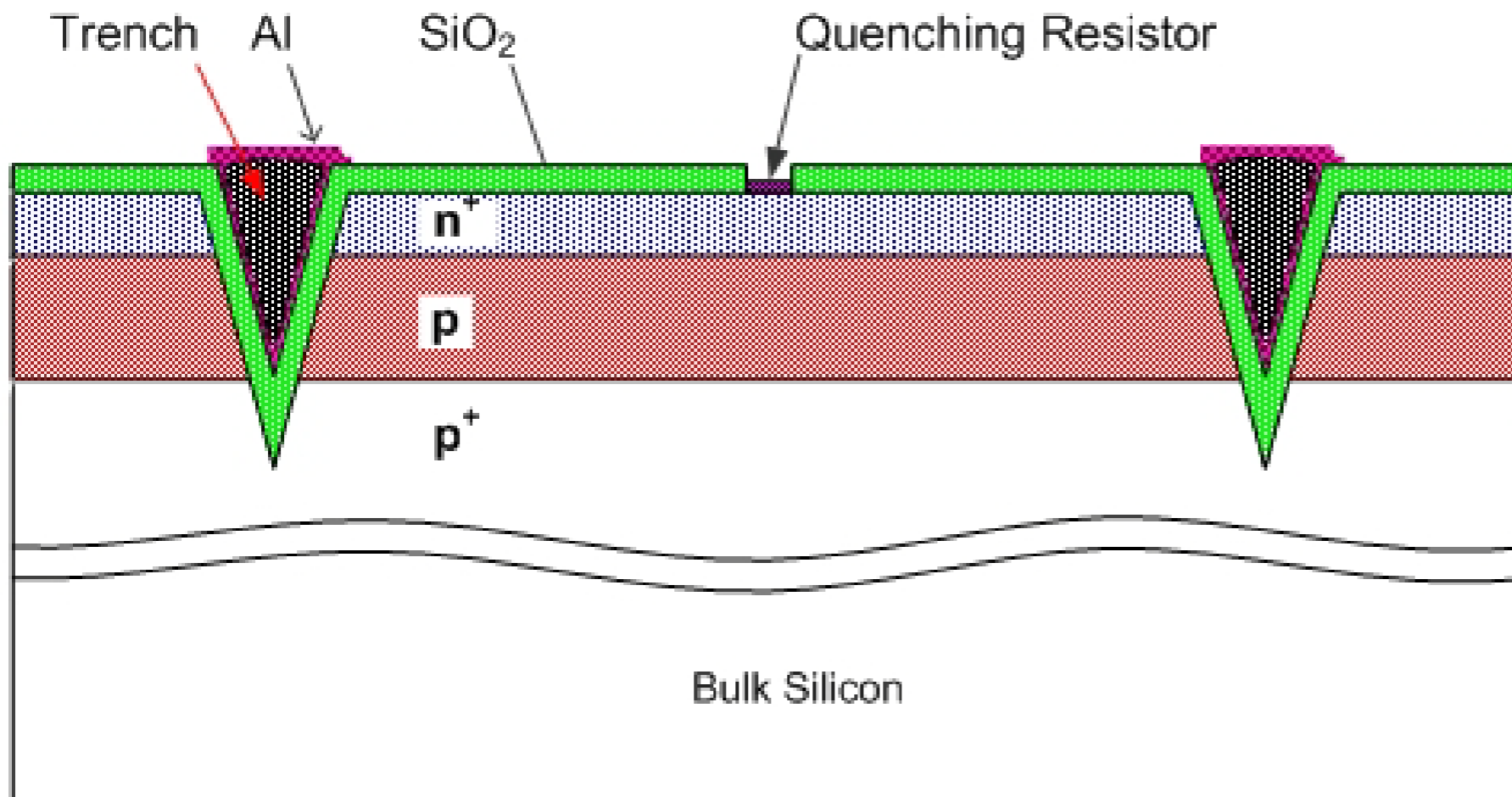
ピクセルトリガーレートの増加



- クロストーク、アフターパルスの影響
- ダーク信号や夜光信号がガンマ線イベントとしてトリガーされる
- 各p.e.閾値でのトリガーレートを求める
 - ▶ 4 p.e. で 数 MHz 以上 (6 × 6 mm pixel)
 - PMTに比べて高い

今回の測定

- クロストーク、アフターパルスの改善されたMPPPCのサンプル
 - ▶ トレンチの設置によってクロストーク改善
 - ▶ 製造プロセスの見直しによりアフターパルスの低下
- 温度25°Cで、これまでのMPPPCと同様の測定をし、結果を比較



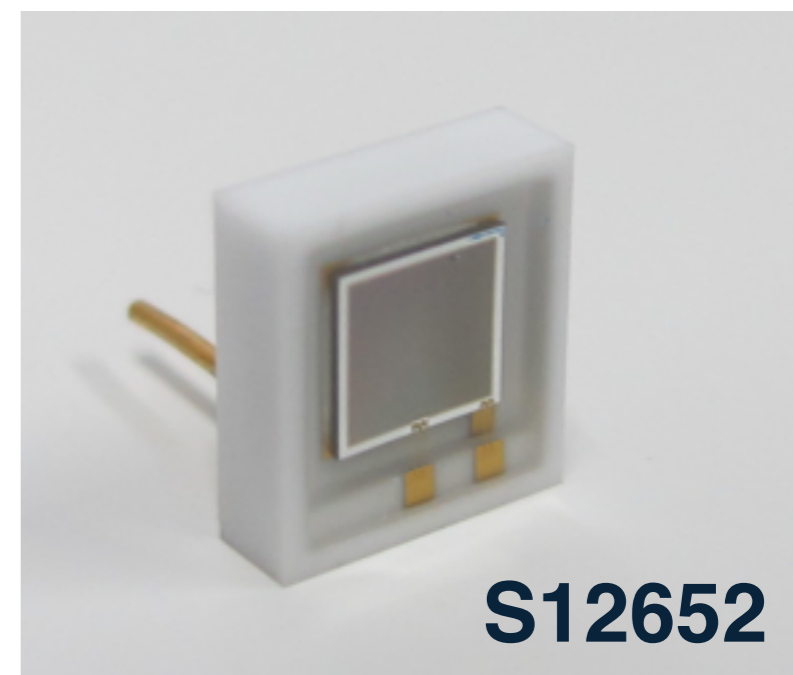
(D. McNally, G-APD workshop, GSI, Feb. 2009)

今回の測定

- クロストーク、アフターパルスの改善されたMPPPCのサンプル
 - ▶ トレンチの設置によってクロストーク改善
 - ▶ 製造プロセスの見直しによりアフターパルスの低下
- 温度25°Cで、これまでのMPPPCと同様の測定をし、結果を比較

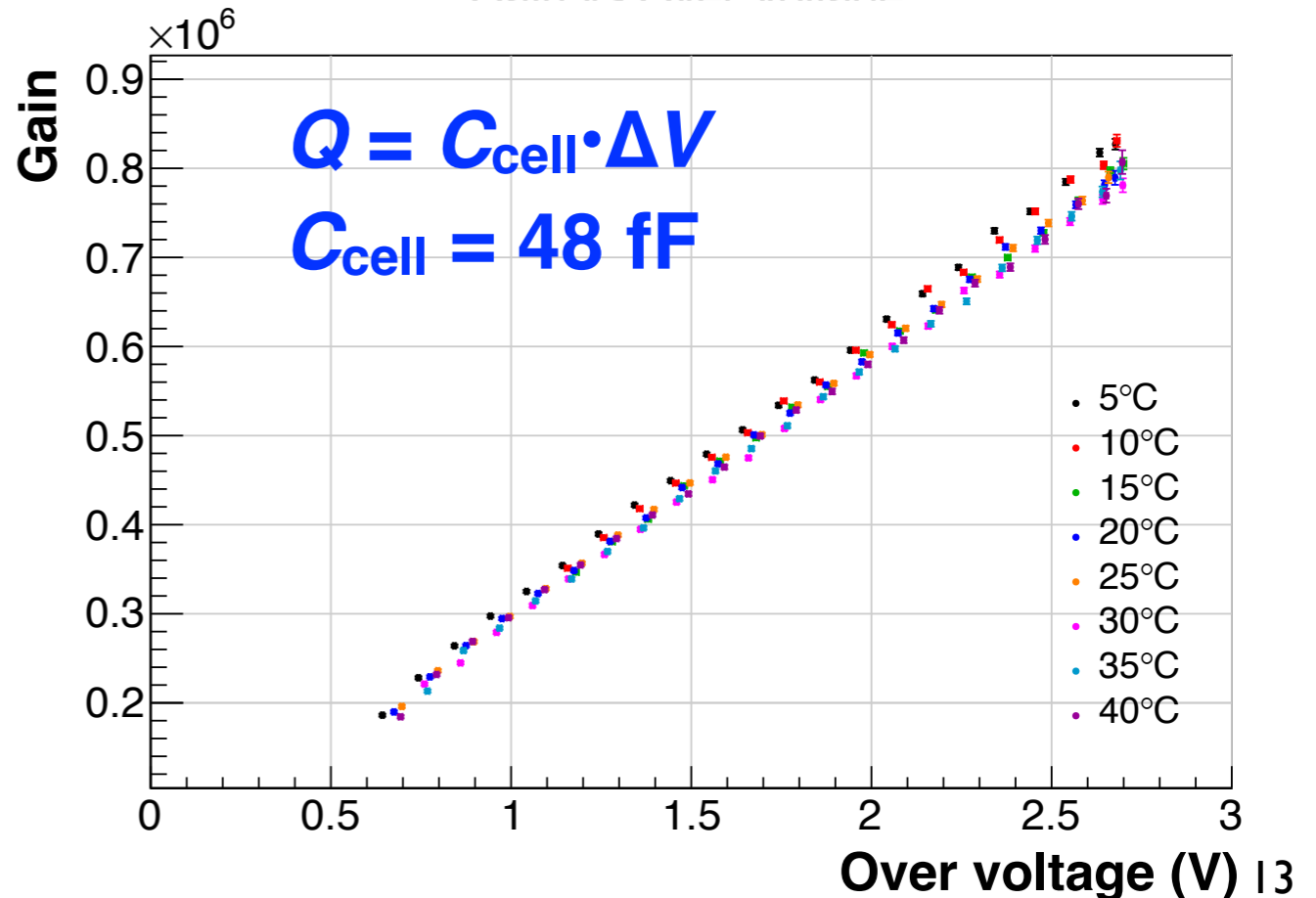
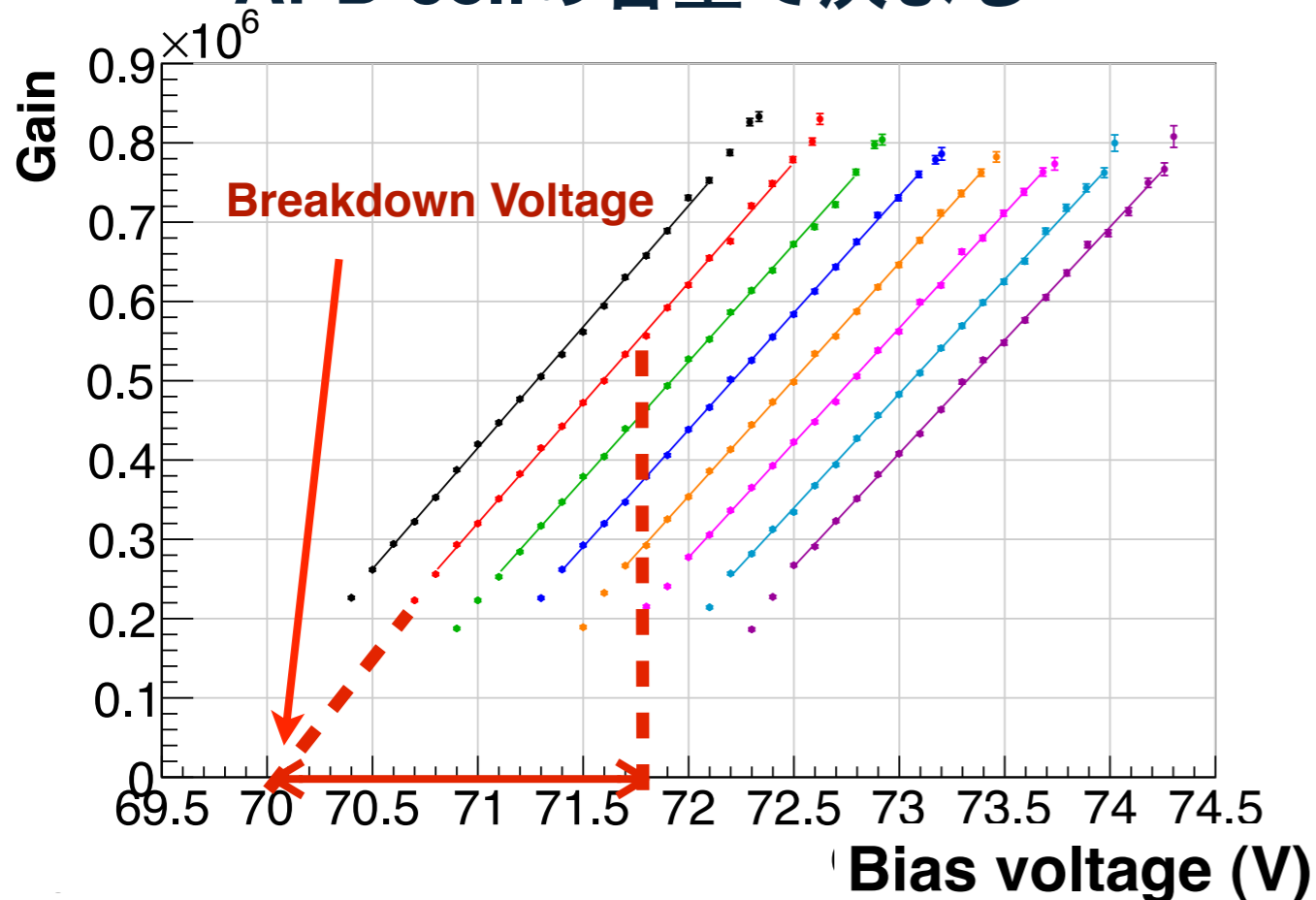
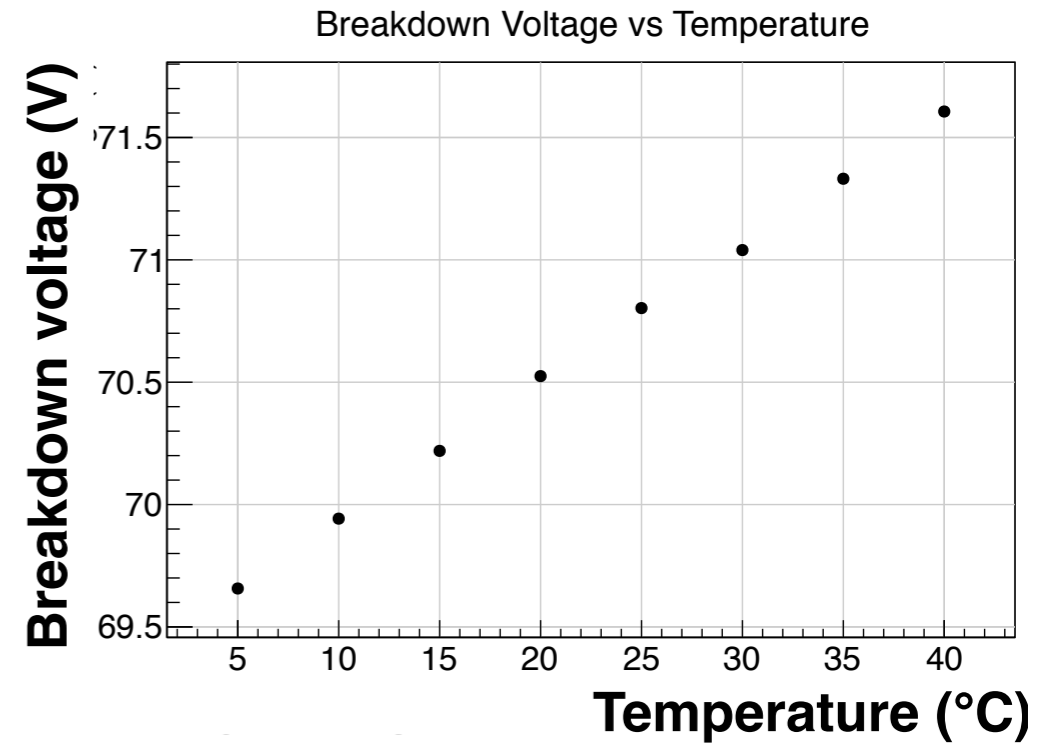
トレンチ有

	S11828 -3344M	S12652
APD cell size	50 μ m	50 μ m
# of cells/channel	60 x 60	60 x 60
# of channels	4 x 4	1
trenches	no	yes



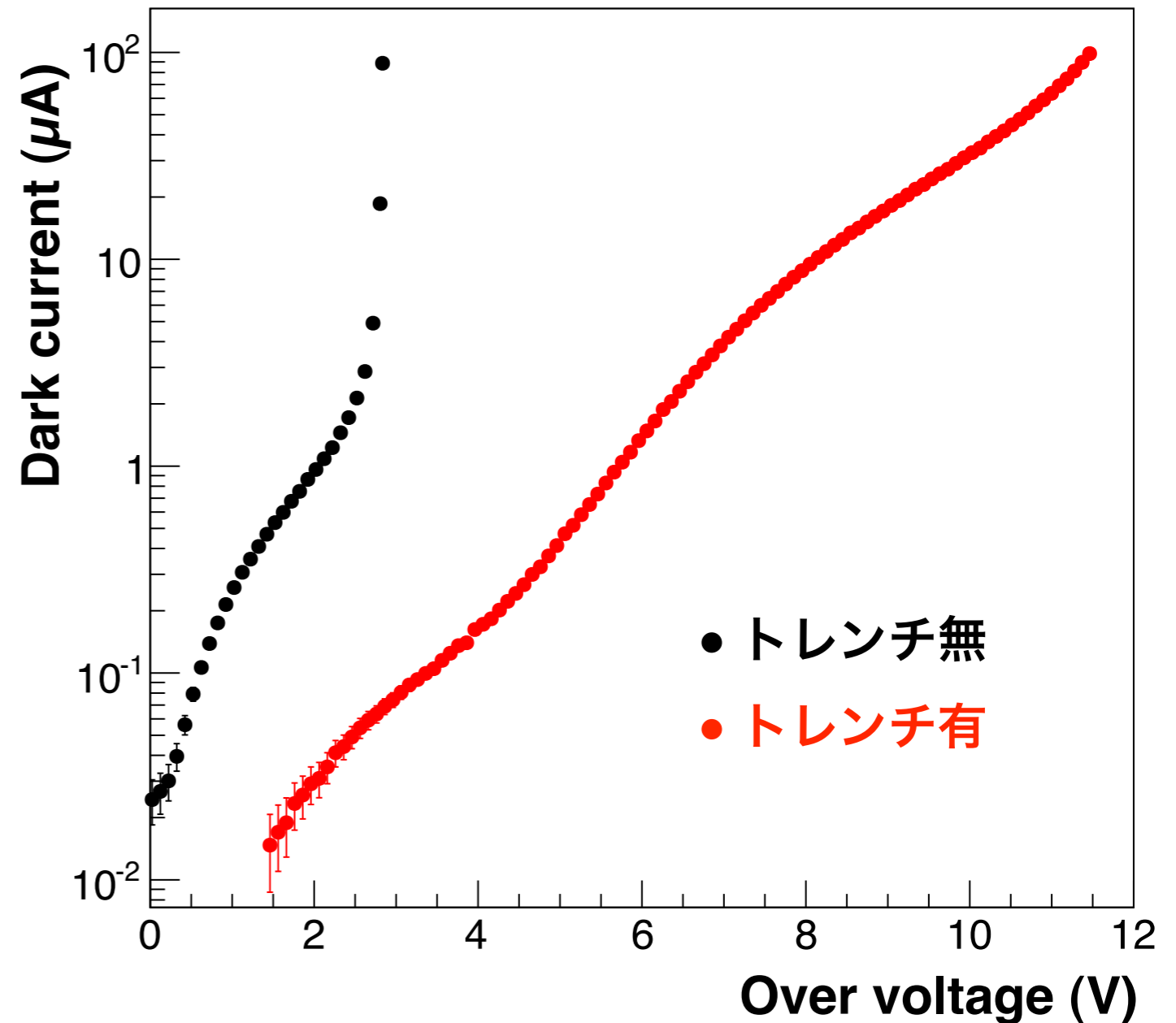
Over Voltage

- ブレークダウン電圧 : Gain = 0
 - ▶ 温度依存性あり
- Over Voltage : ブレークダウン電圧からの電圧差
 - ▶ 増幅率Over Voltageの依存性は温度に対しては一定
 - ▶ APD cellの容量で決まる



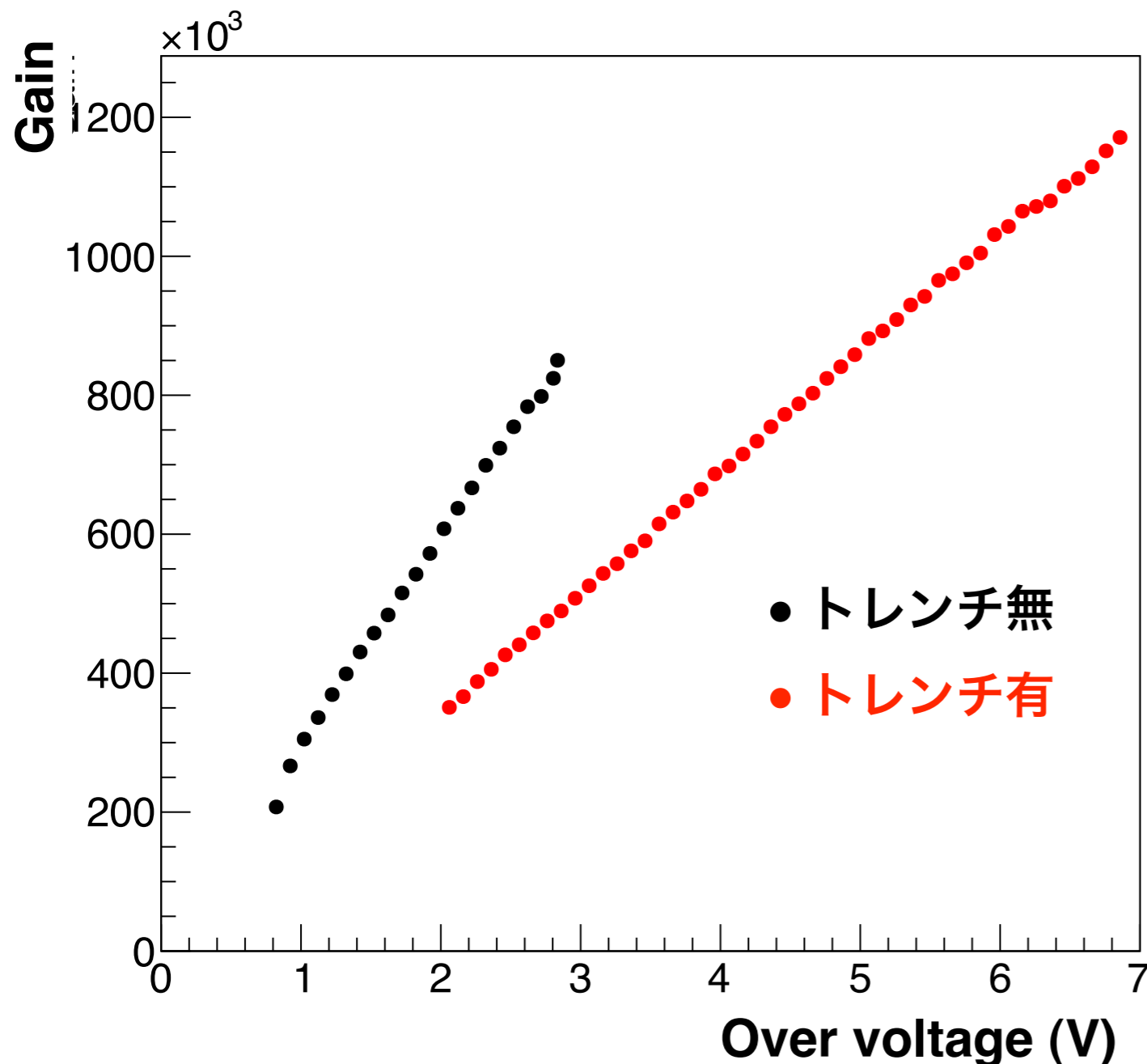
ダークカレント

- 100 μA まで測定
- ダークカレントの低下により、より高い電圧(Over Voltage)での使用が可能となった
- ▶ クロストークとアフターパルスの低下によるもの考えられる



増幅率

- 同じ電圧の場合で比較すると、増幅率は低いですが、高い電圧をかけることでこれまで以上の増幅率が得られる



$$Q = C_{\text{cell}} \cdot \Delta V$$

トレンチ無 $C_{\text{cell}} = 48 \text{ fF}$

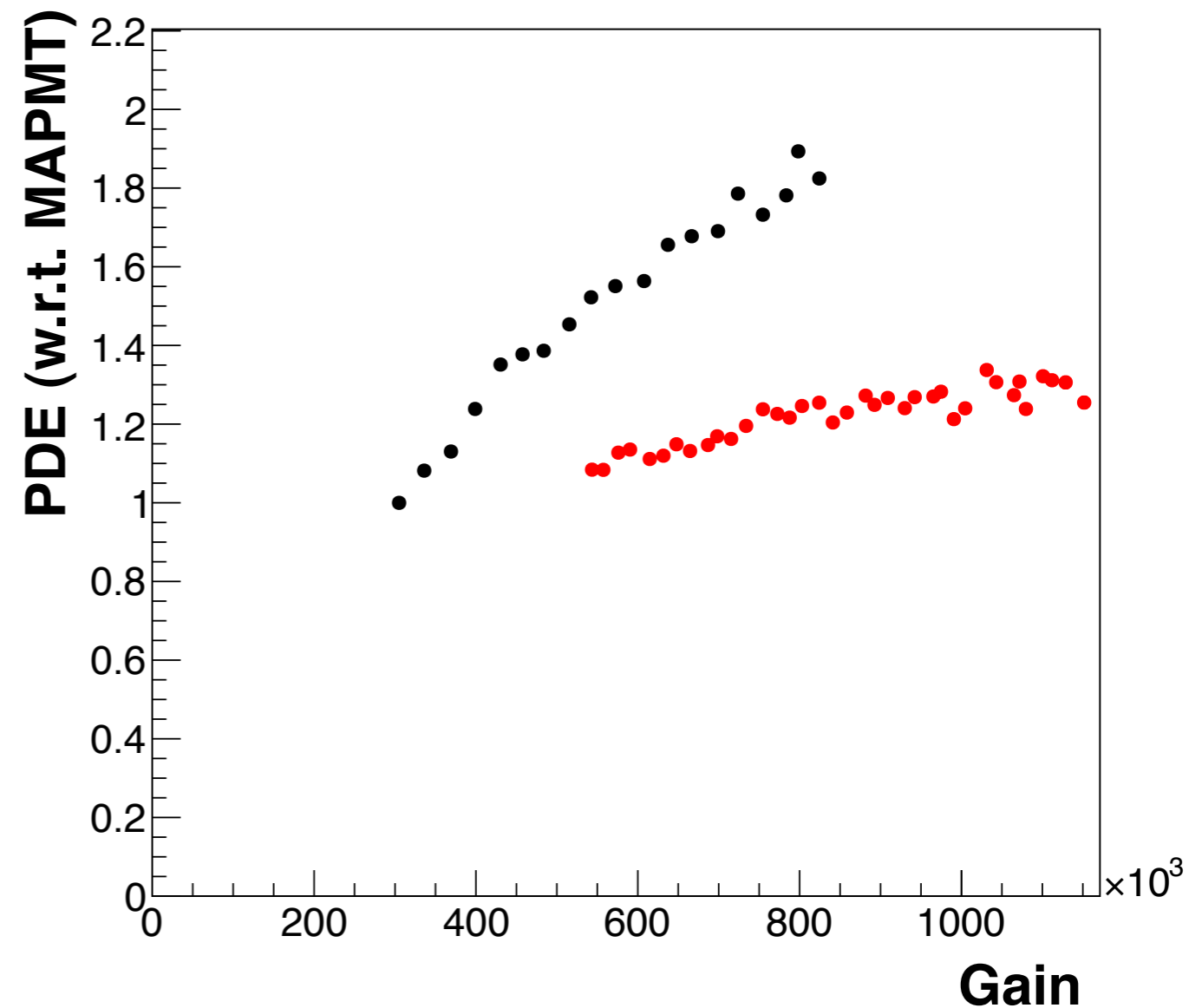
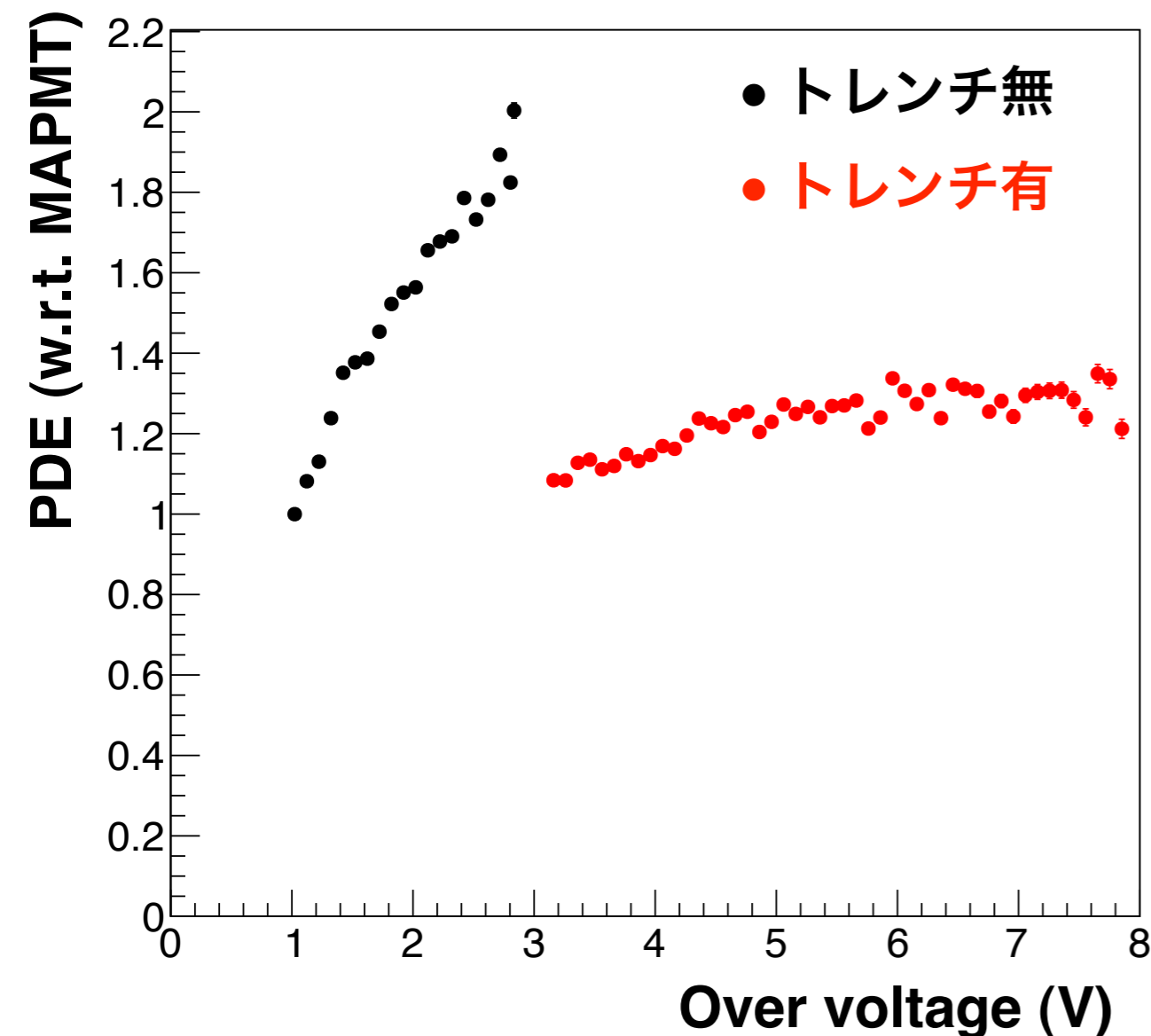
トレンチ有 $C_{\text{cell}} = 29 \text{ fF}$

cellの容量の低下

→ トレンチの設置による有効面積の減少 ($29 \text{ fF} / 48 \text{ fF} \approx 60\%$)

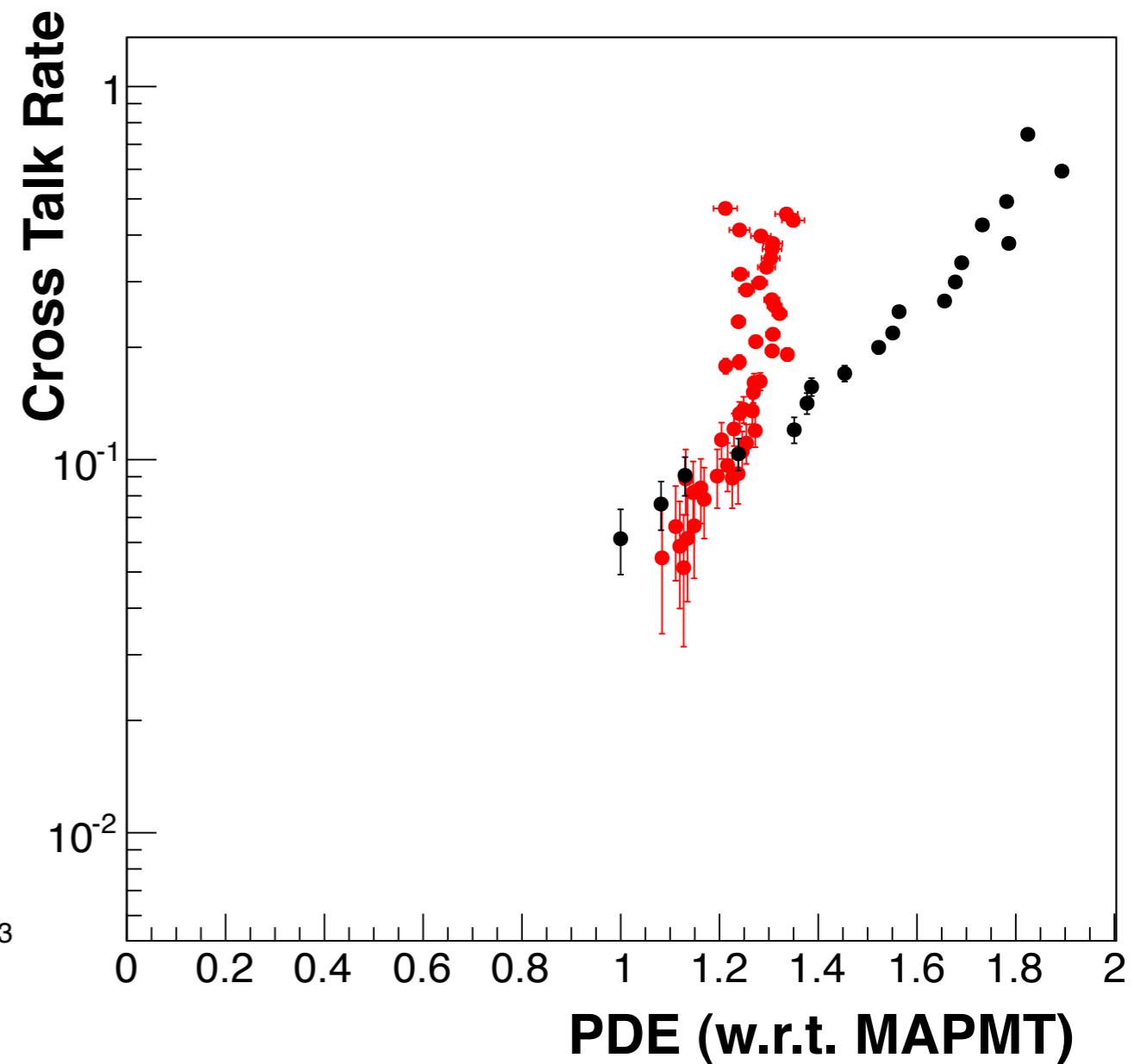
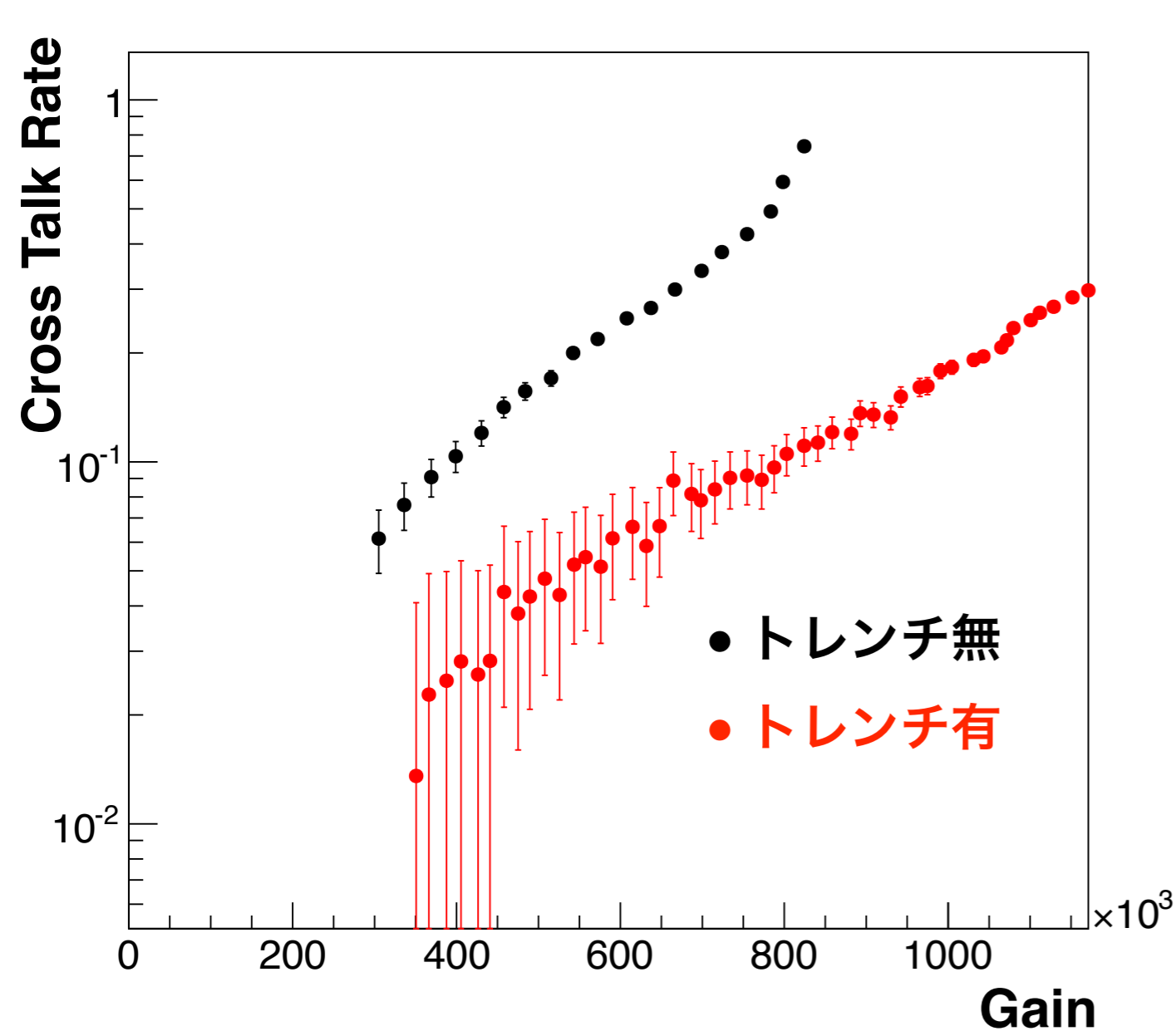
PDE

- MAPMTに対する相対的な検出効率を測定
- PDEは $V_{ov} \doteq 5$ Vから飽和し、最も高い所でこれまでの60%
 - ▶ トレンチの設置による有感面積の減少が原因 (cellの容量比と一致)



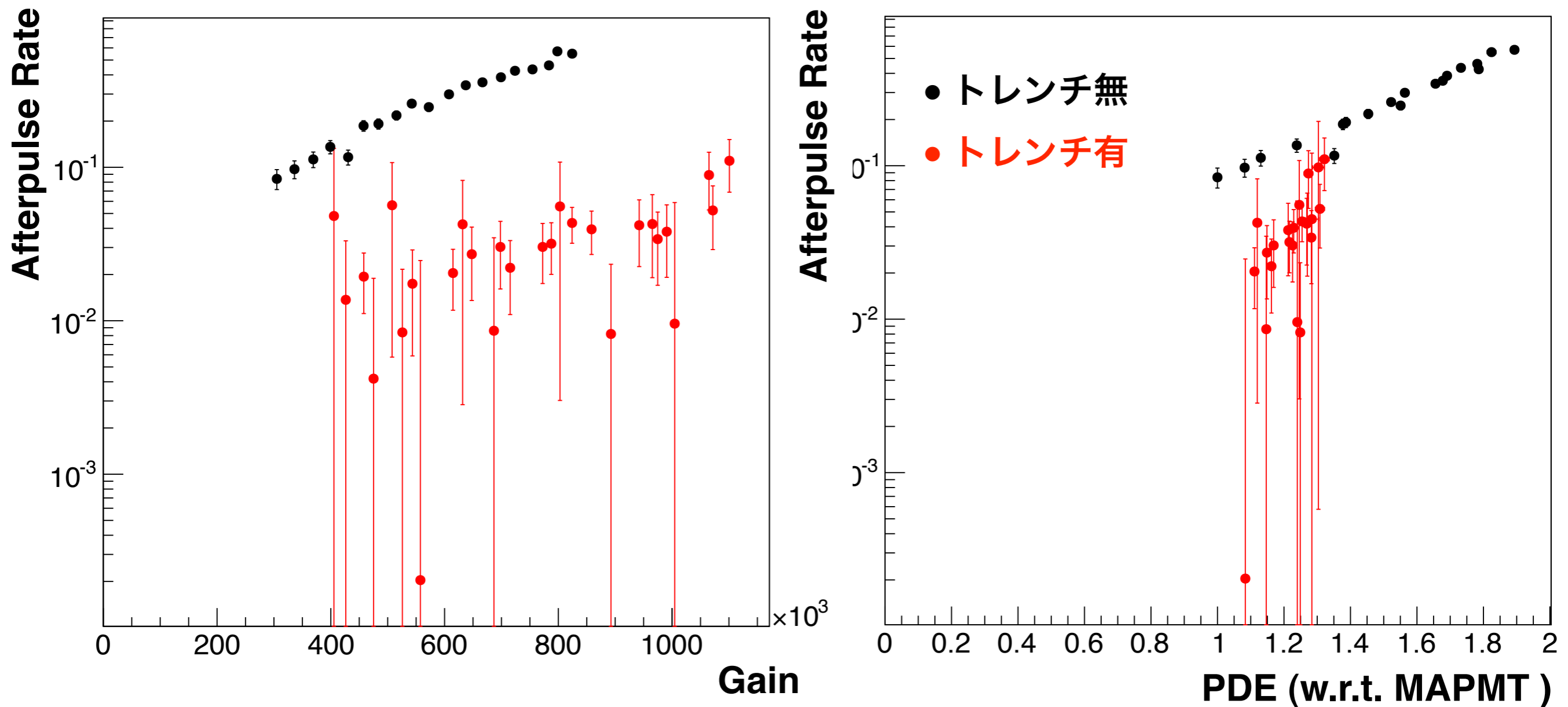
クロストークレート

- 同じ増幅率で、これまでの1/10以下に低減した
- PDEに対しては若干の改善 (PDE飽和前)



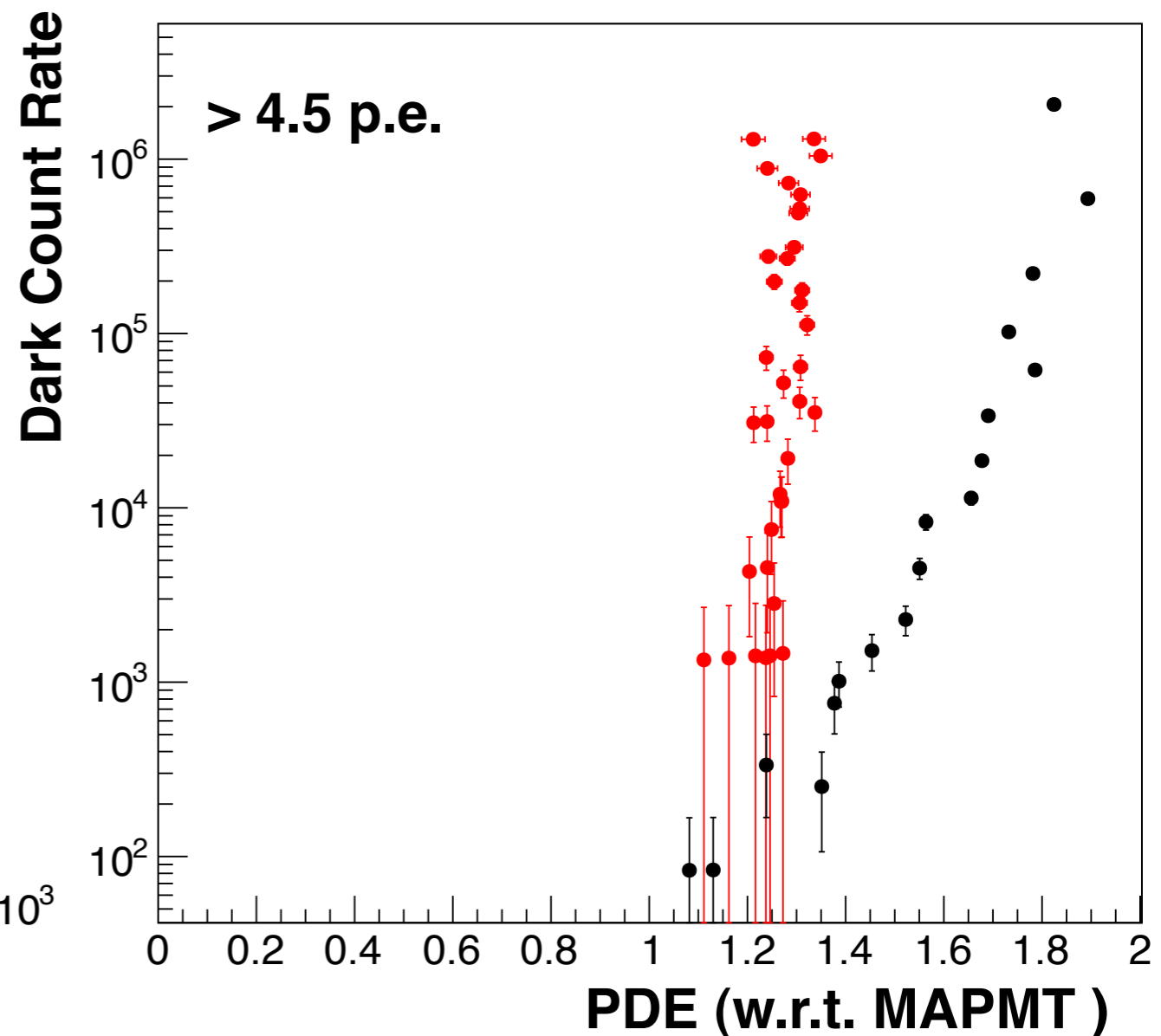
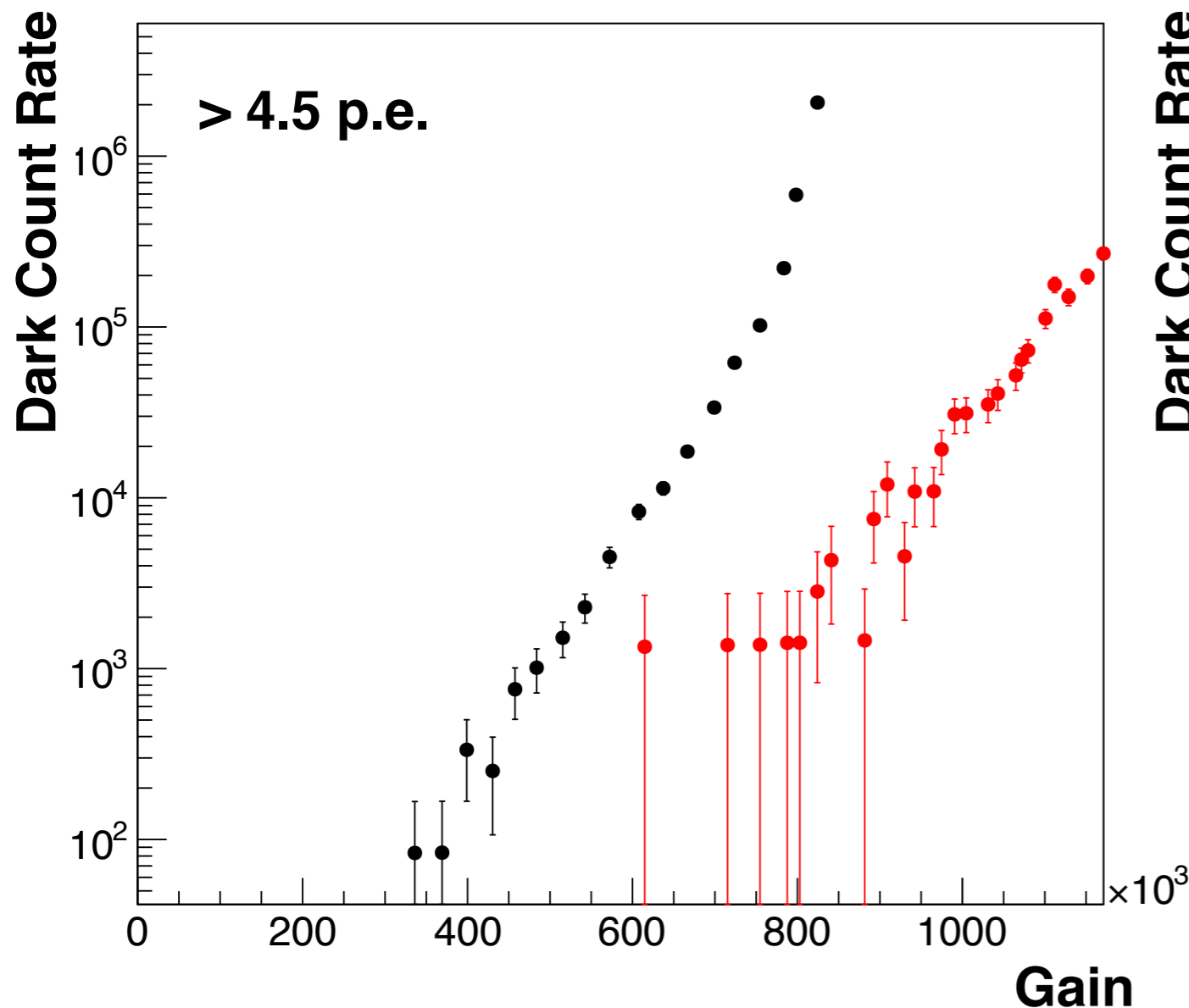
アフターパルス

- これまでの1/10程度まで低下



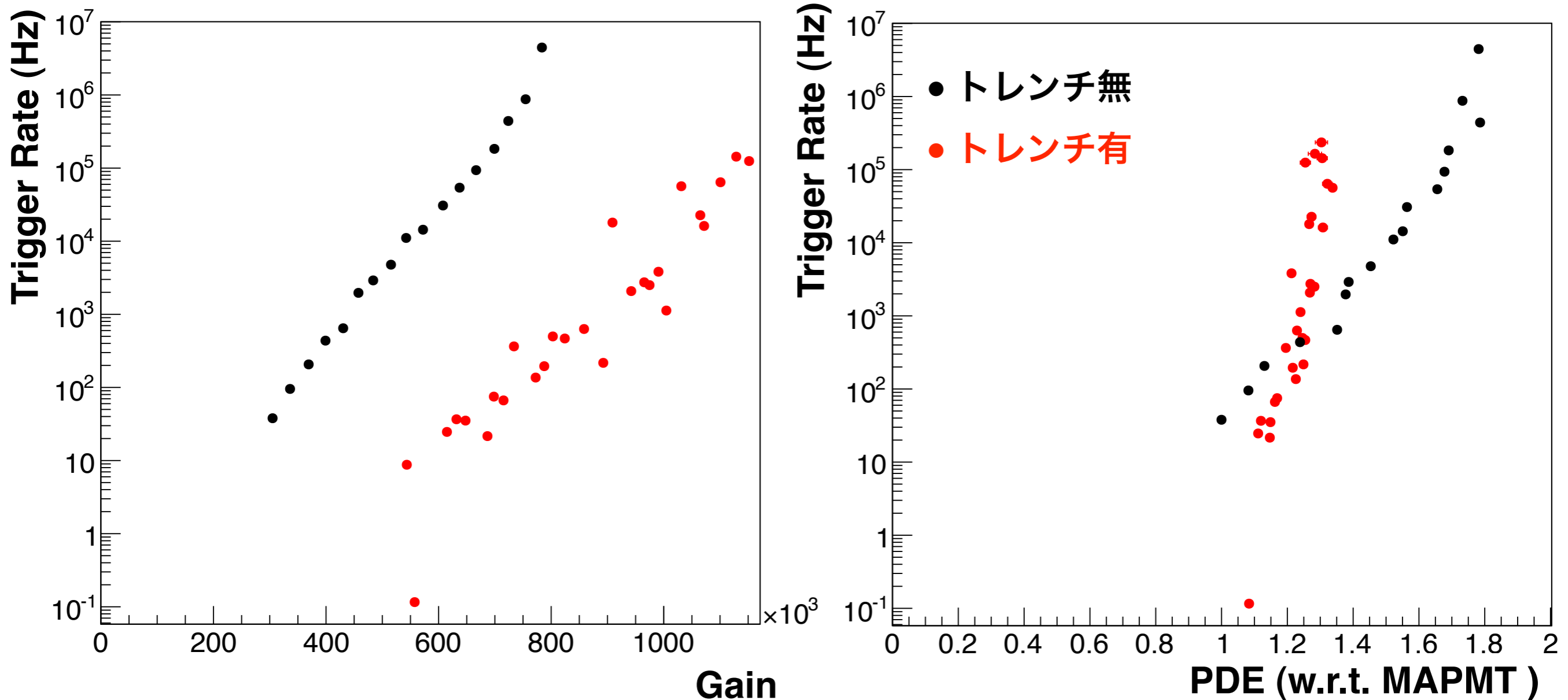
ダークカウント (> 4.5 p.e.)

- クロストーク、アフターパルスの改善によって、同じ増幅率に対してでのカウント数は1桁以上低下
- PDEに対しては改善せず



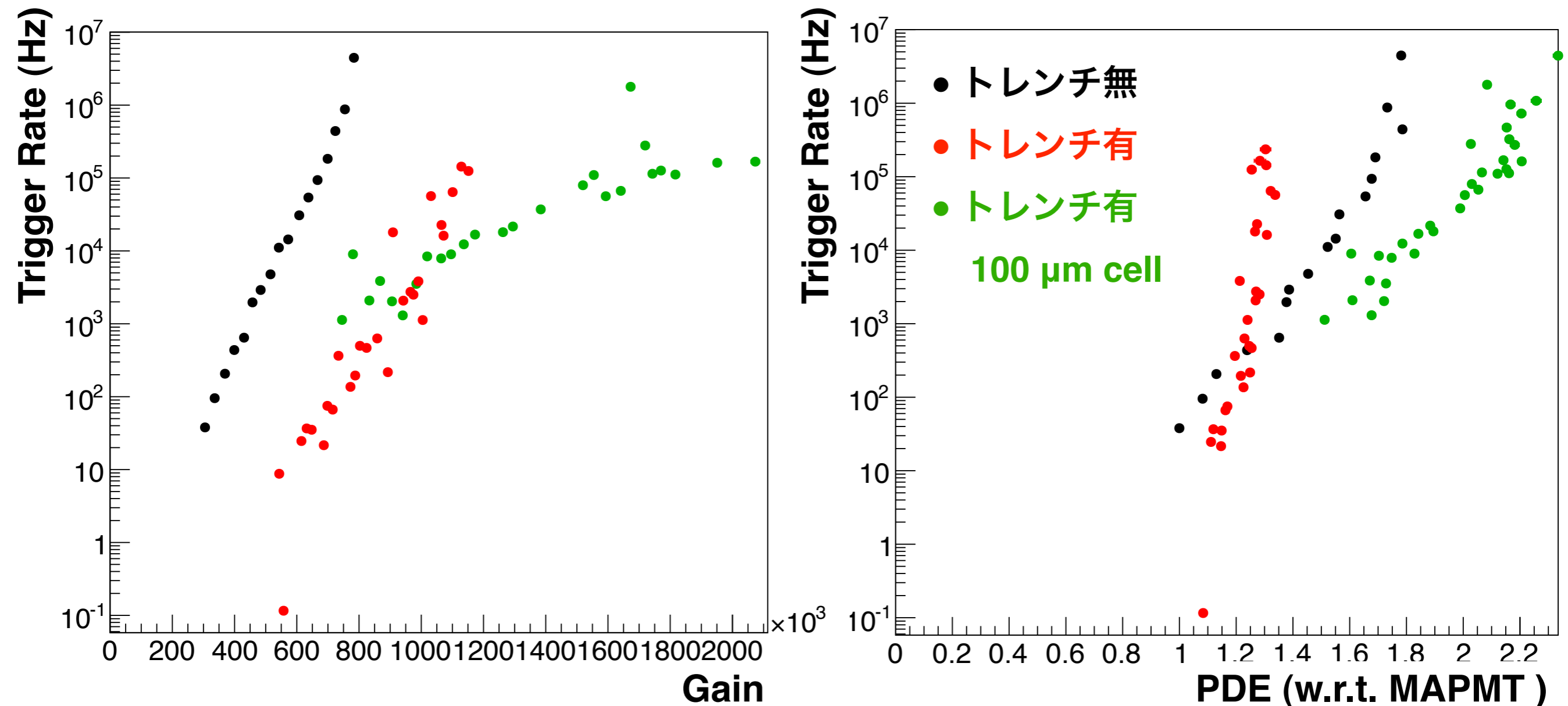
トリガーレート

- 夜光バックグラウンド 5 MHz、4 p.e. 閾値で計算
- PDEに対しては、飽和する前で 1/10 近くに低下



トリガーレート

- 夜光バックグラウンド 5 MHz、4 p.e.閾値で計算
- PDEに対しては、飽和する前で 1/10近くに低下
- APD cell size 100 μm のタイプでは、同PDEで3桁近く改善



まとめと今後

- トレンチ付きMPPCのサンプルを測定
- これまでのMPPCに比べ、クロストークレート、アフターパルスレート共に同じ増幅率で約1/10低減
- 同じPDEとなる動作条件で比較した場合、トリガーレートは約 1/10 に低減
 - ▶ 今後、APD cellサイズの大きいタイプ(100 μm)のMPPCを用いることでPDEは改善する予定 (約60%増加)
 - ▶ Si貫通電極 (TSV)を用いたMPPCによってパッケージングの損失を改善(約30%増加)
 - ▶ トレンチを薄くする施策