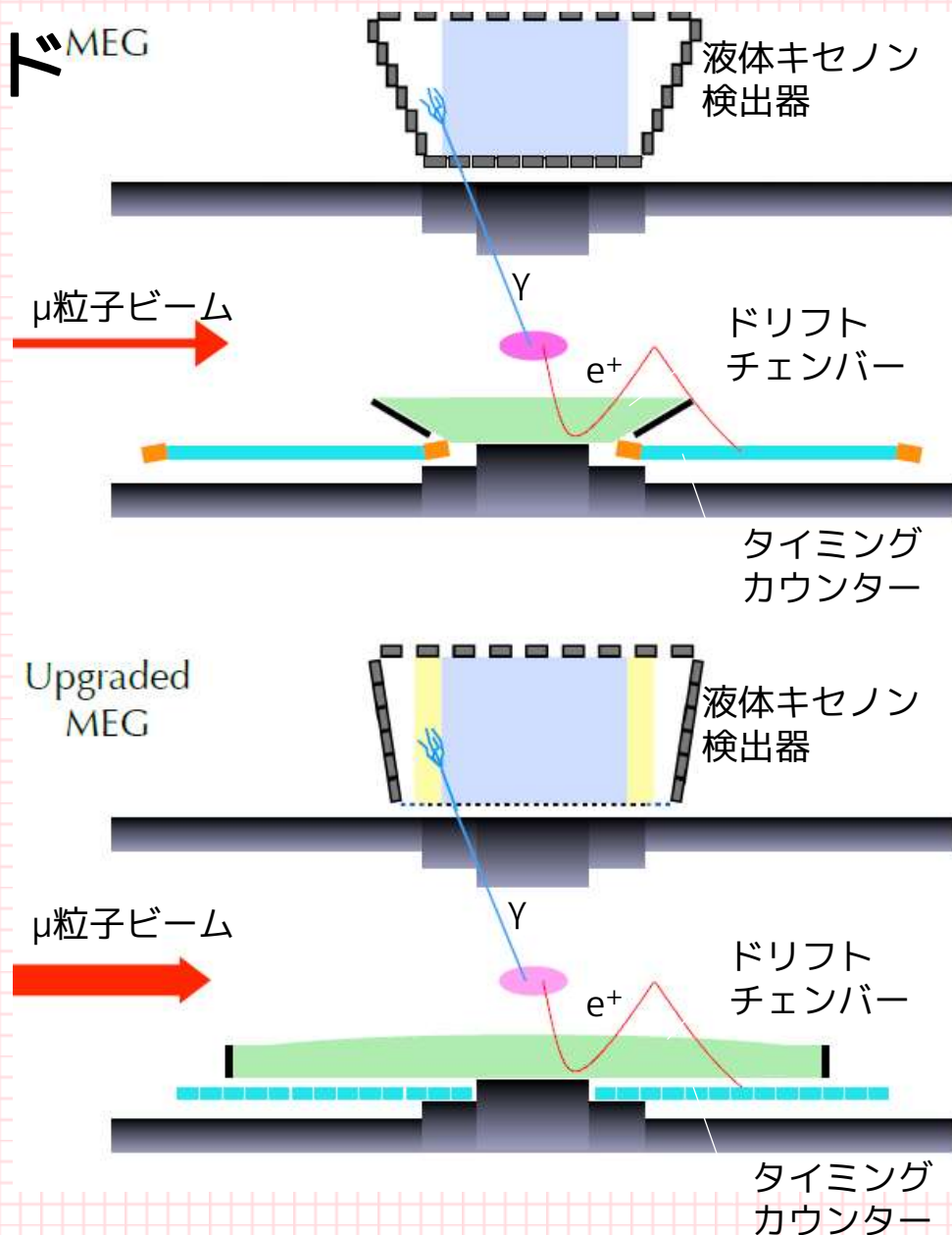


液体キセノンのシンチレーション光に 感度のある大型MPPCの研究開発

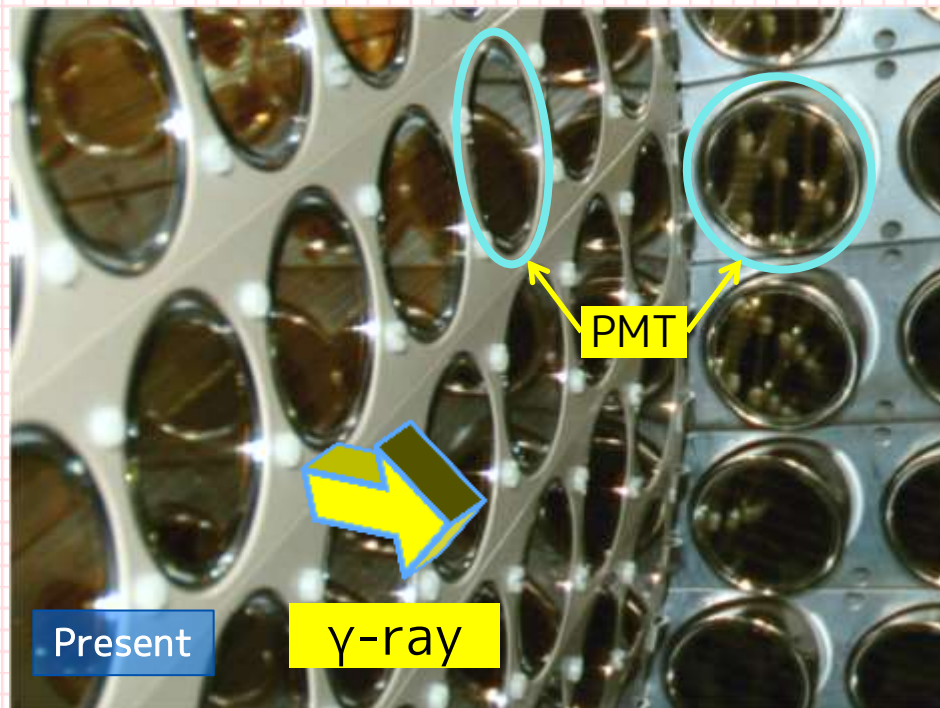
金子大輔、他MEGコラボレーション

MEG実験アップグレード^{MEG}

- 現MEG実験は2013年8月 DAQ 終了
- 現時点での最新結果は2013月3月に発表 $\mathcal{B}(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) < 5.7 \times 10^{-13}$ (90% CL)
Phys. Rev. Lett. 110, 201801 (2013)
- MEG実験アップグレードプロポーザルは2013年1月にPSIから承認を受けた arXiv:1301.7225
- アップグレード後の目標感度は 5×10^{-14} 。γ線検出器の分解能が非常に重要。



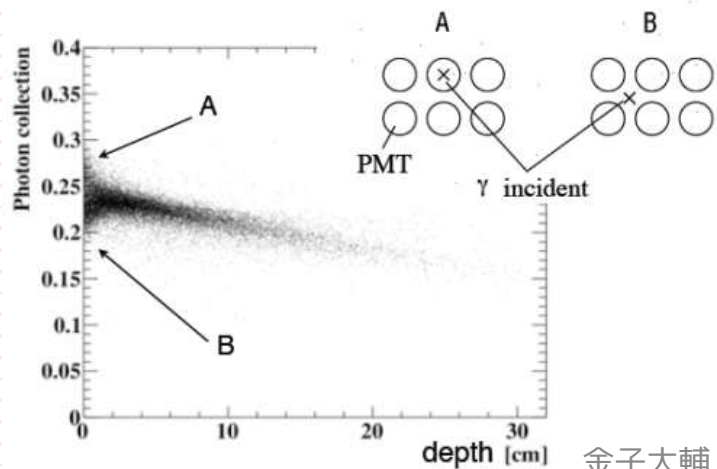
現MEGにおける液体キセノン検出器



$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊で発生する
52.8MeVの γ 線を検出する。

900 l の液体キセノン (LXe)

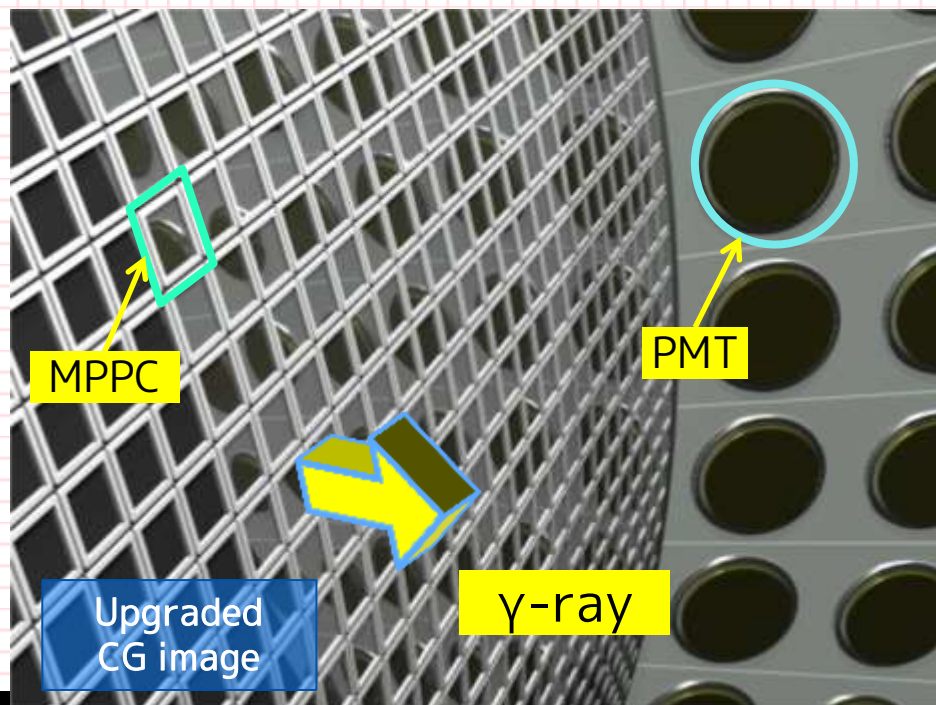
入射面に216個
他の面に630個の
有効面積の直径が46mmの
光電子増倍管(PMT)



PMT に近い位置で γ が反応した場合、光子の収集効率に場所依存性が大きくなる。

↓
検出器の浅い位置では分解能が悪い。

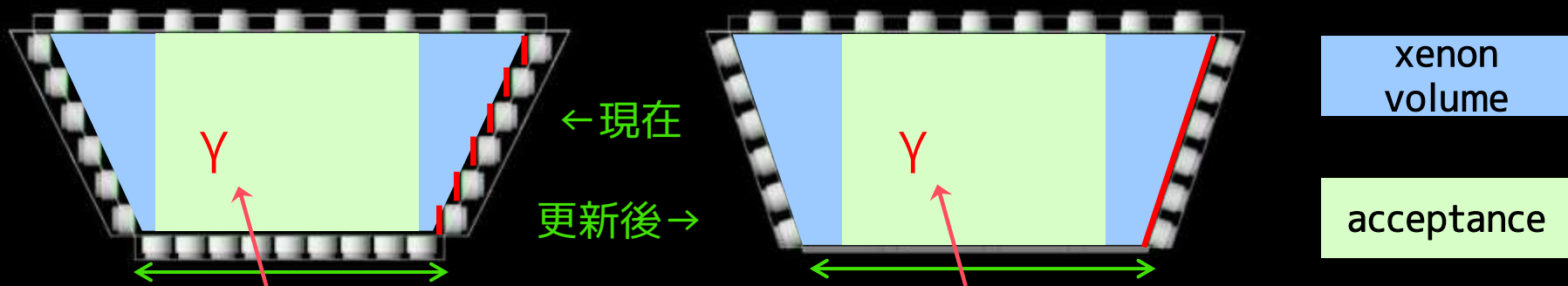
液体キセノン検出器の更新



より小型のセンサーを入射面に配置してuniformityを良くして、分解能を向上させる

浜松ホトニクス製のピクセル光検出器(MPPC)を採用する予定

入射面に約4000個の紫外線に感度があり有感面積 $12\times 12\text{mm}^2$ を持つMPPC

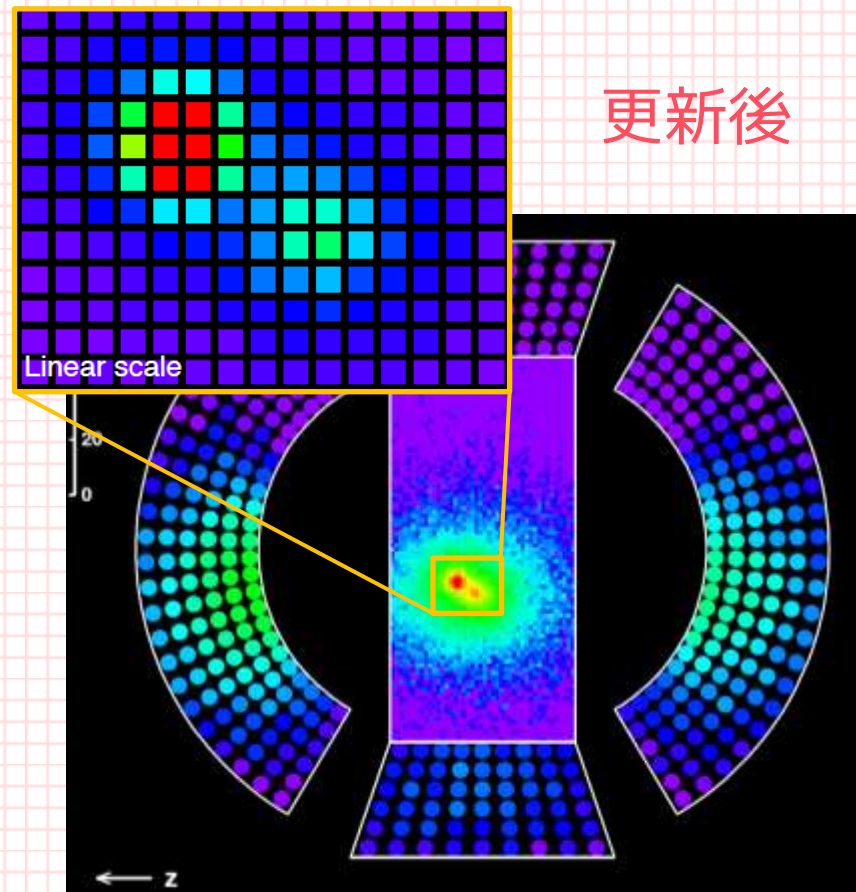
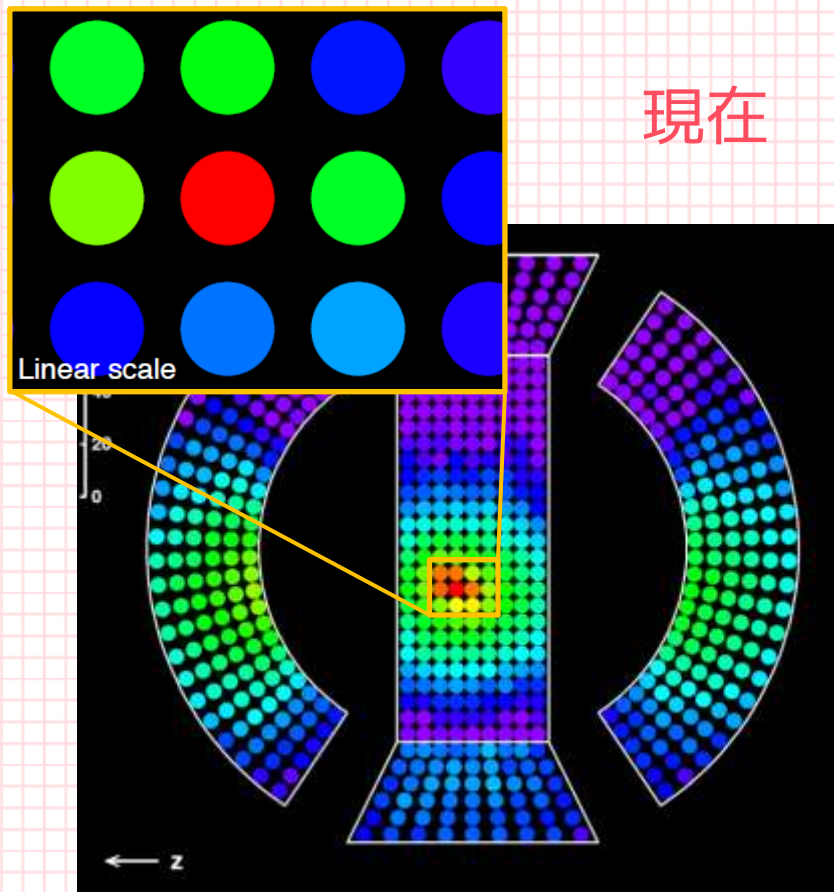


入射面の幅を広げる
光電面を同平面上に
入射前の物質量が減少

→
→
→

エネルギー漏れが減少
レスポンスがより均一に
検出効率が向上(約10%)

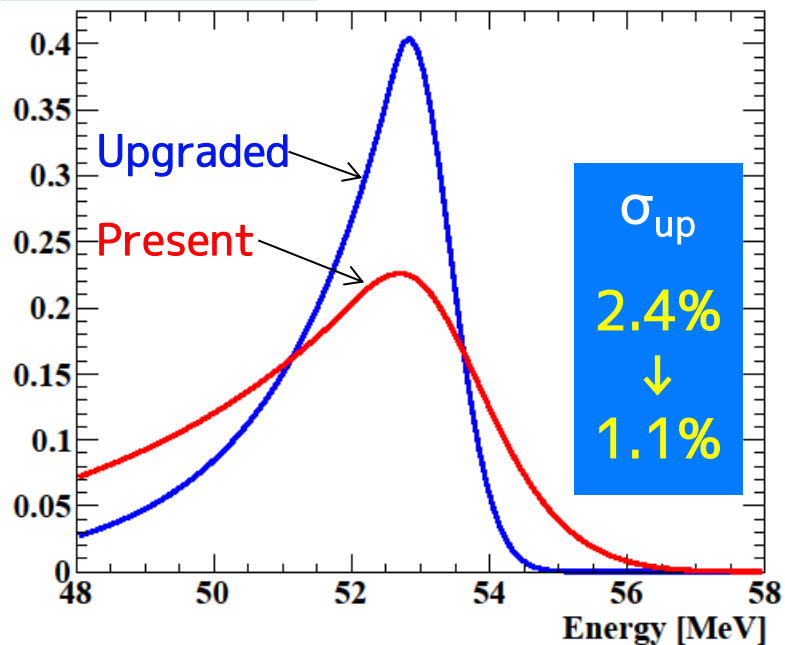
シャワーの見え方の違い



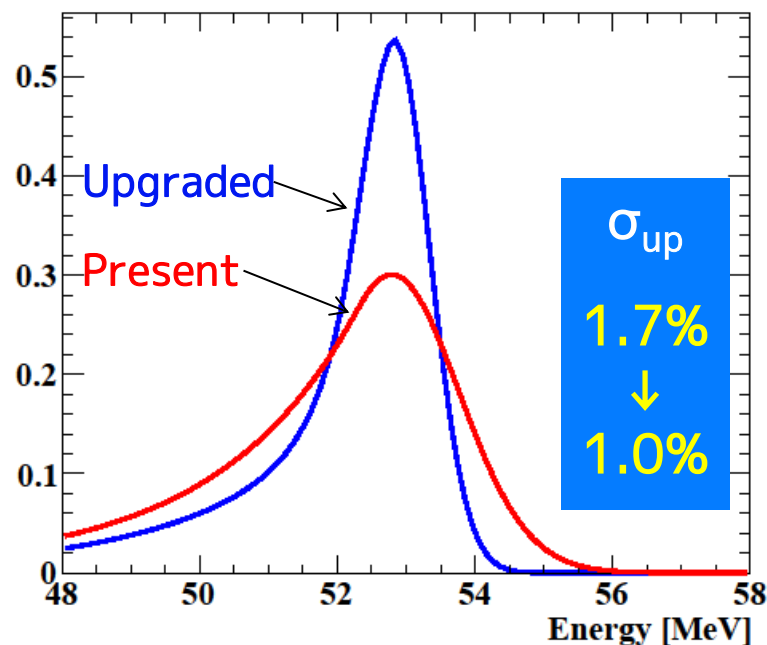
MCによる、同一の γ 線パイルアップイベント
イメージング能力が格段に向上

更新後の性能 エネルギー分解能

depth < 2cm
40 % of events

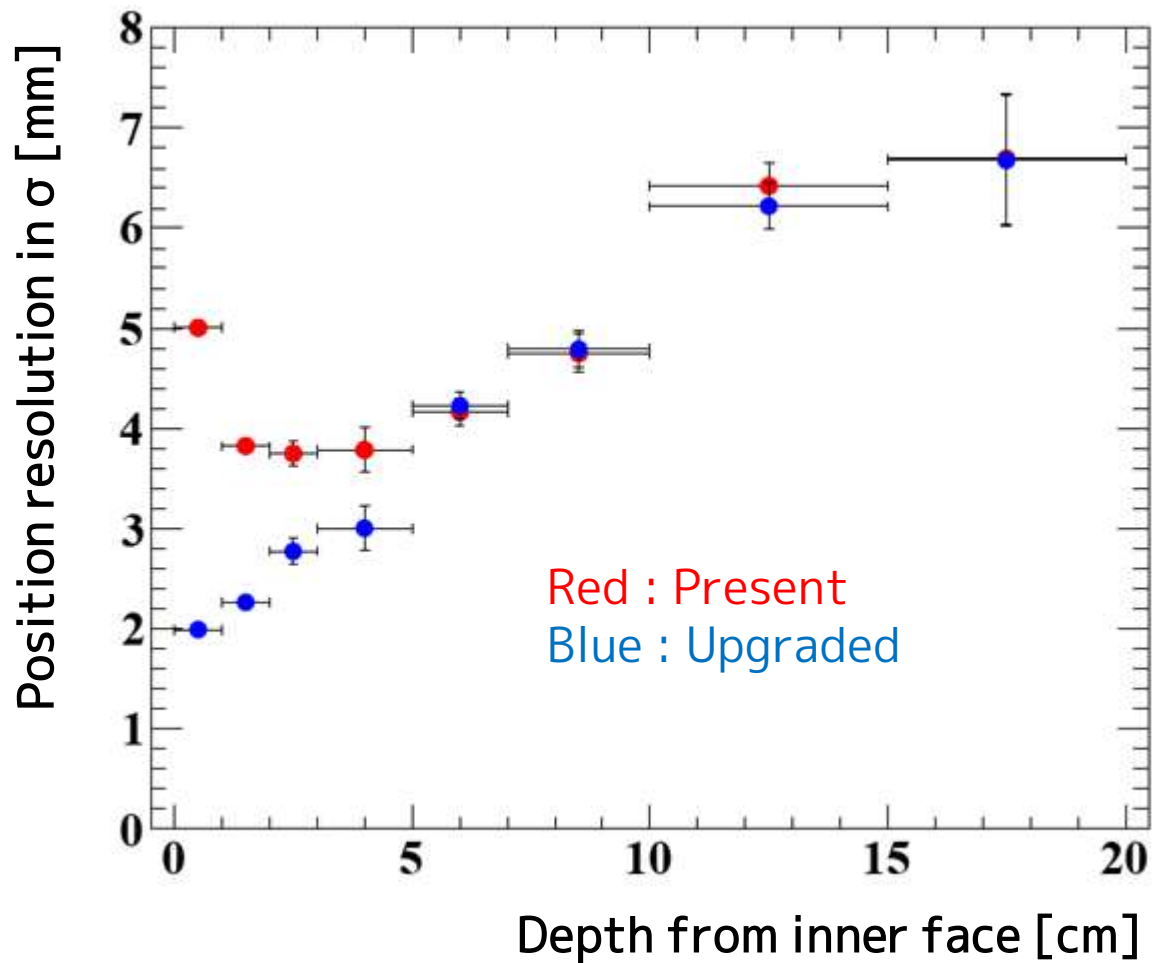


depth \geq 2cm
60 % of events

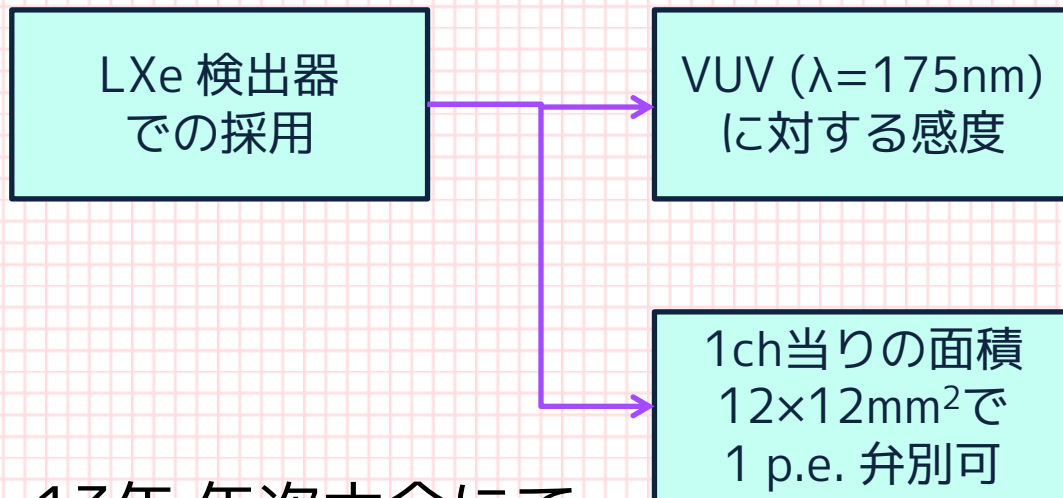


52.8MeV(MEGで探索する信号)に対する応答

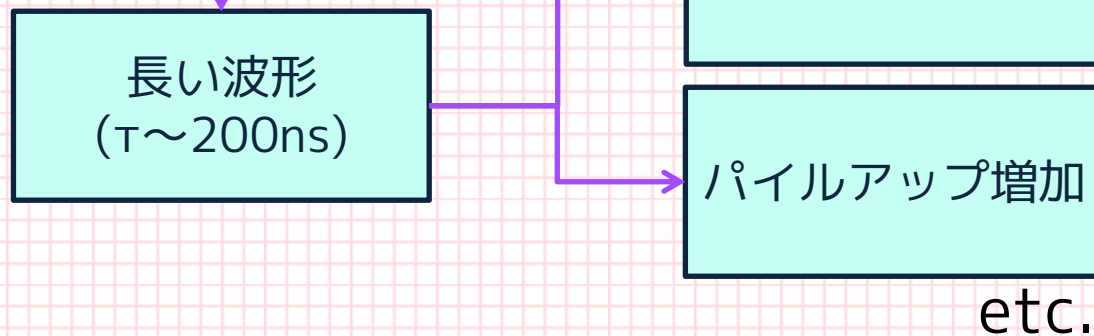
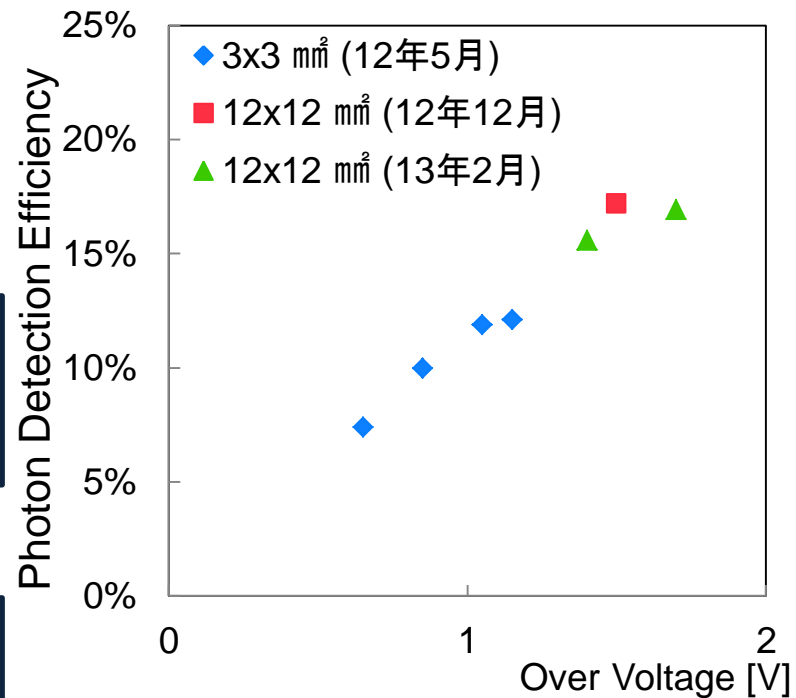
更新後の性能 位置分解能



開発の経緯



13年 年次大会にて報告した。
波形のテールをどのように抑制するかが課題となった。
目標は50ns。



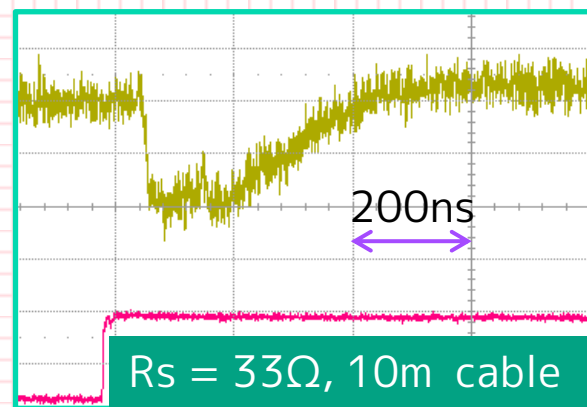
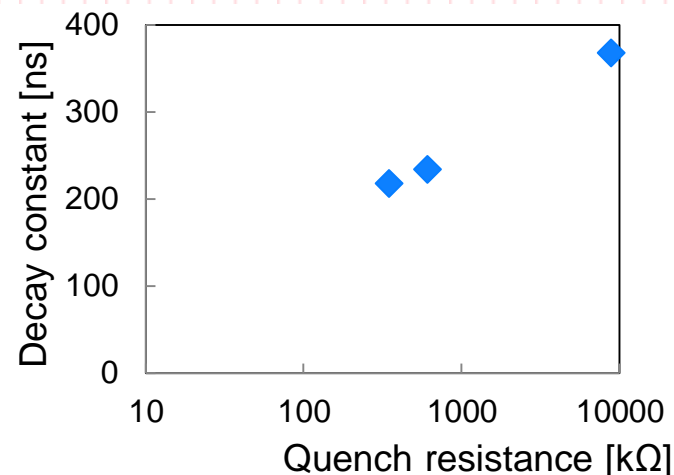
本講演での報告

長いテールの抑制

- クエンチ抵抗を可能な限り小さく
- プリアンプ入力インピーダンスを下げる
- センサーを分割して直列に接続する

クエンチ抵抗を下げて、ある長さより短い波形にはできなかった。

長い同軸ケーブルを通すと、波形が崩れてしまう。



浜松ホトニクス製 新型MPPC

紫外光対応型の試作品の作成を依頼
LXe中で試験を行った。

MPPCの直列接続について

12mm×12mm のセンサー領域をいくつかに分割し直列に接続することでキャパシタンスを減少させる。

4つの素子を接続する場合

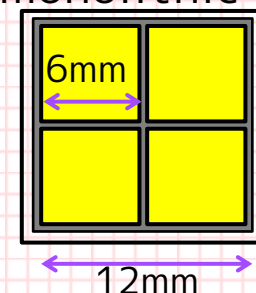
$$\text{並列} : C = c + c + c + c = 4c$$

$$\text{直列} : C = \left(\frac{1}{c} + \frac{1}{c} + \frac{1}{c} + \frac{1}{c} \right)^{-1} = \frac{c}{4}$$

キャパシタンスの減少により波形が鋭くなることが期待される
一方ゲインが減少してS/N比が悪化する懸念がある。

今回12mm×12mm の素子を内部的に分割する代わりに
6mm×6mm のMPPCを4個HPKから提供を受け試験した。
(合計の面積は12mm×12mmと等価)

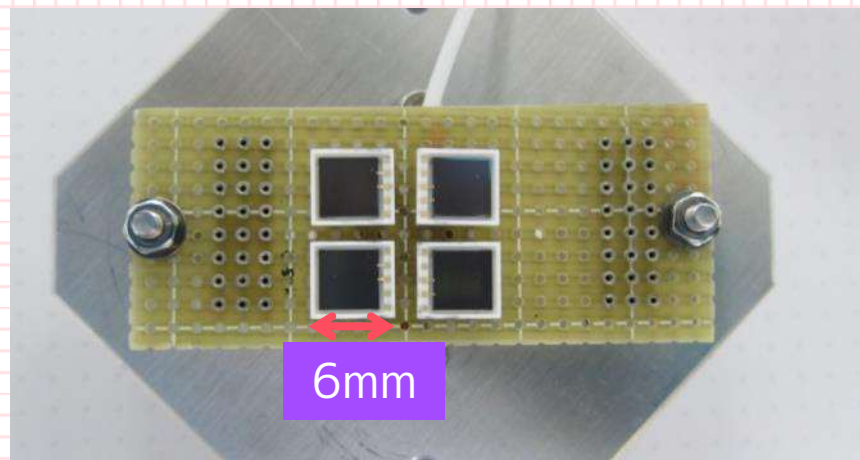
うまくいけば
monolithicで



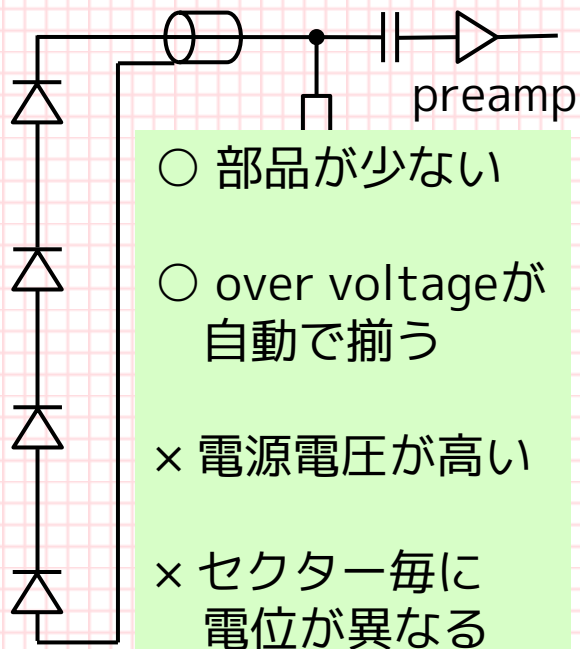
直列接続自体は、スイス・PSIの μ SR 実験で実証されている。
MEG実験の新型タイミングカウンターでも採用されている。

直列試験セットアップ

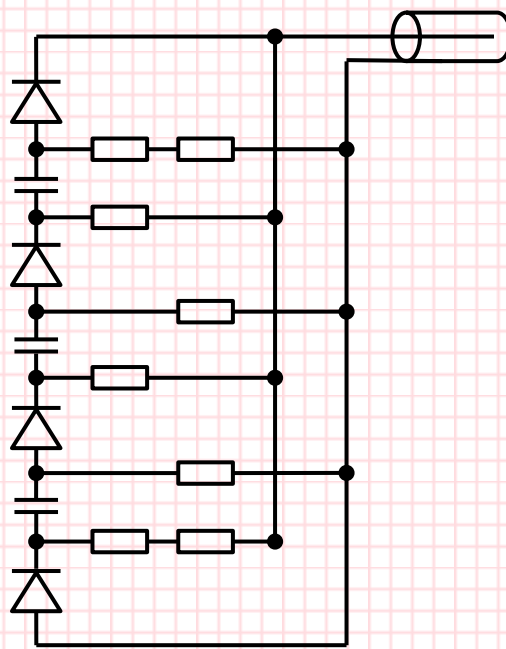
液体キセノン中で2種類(3通りの)の接続方法をテストした。



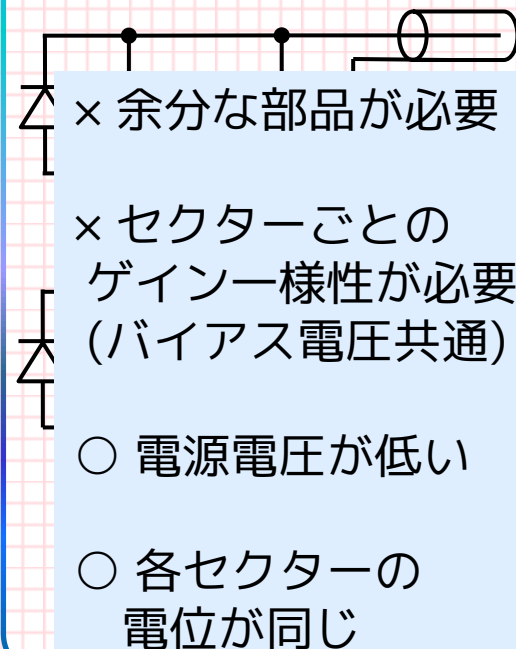
単純直列 : Simple



Hybrid I (4分割)



Hybrid II (2分割)

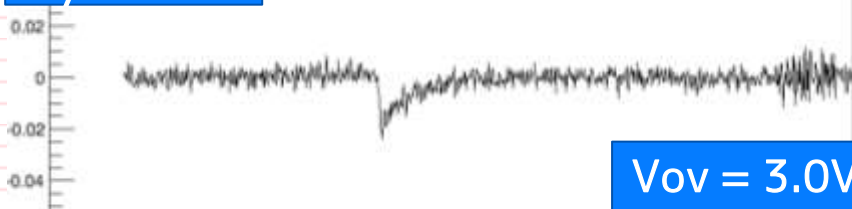


※MPPC故障のため、テスト時は3個の直列

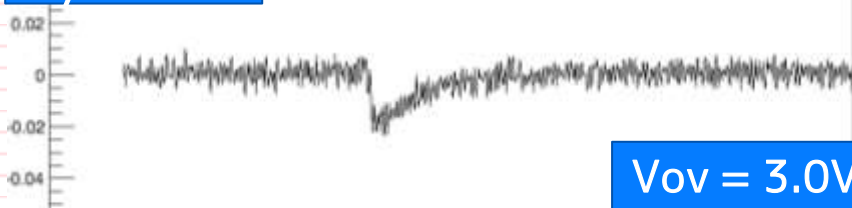
1 photo electron 波形

電圧 [V] →

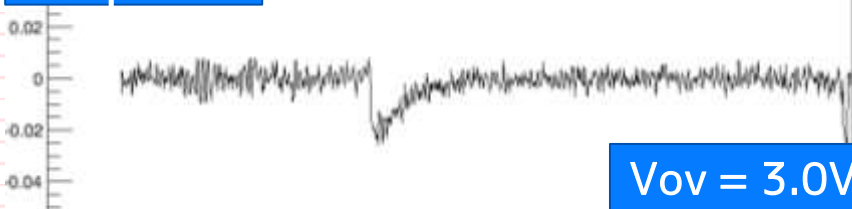
Hybrid I



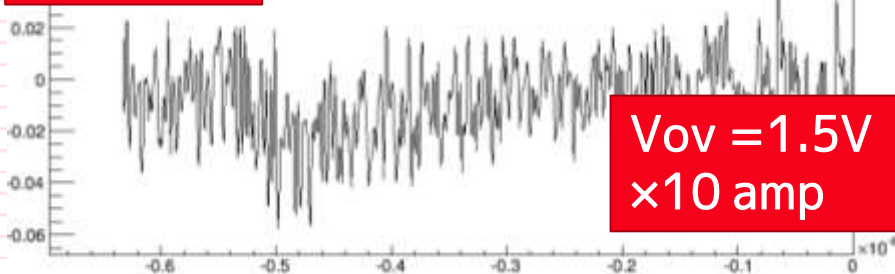
Hybrid II



Simple

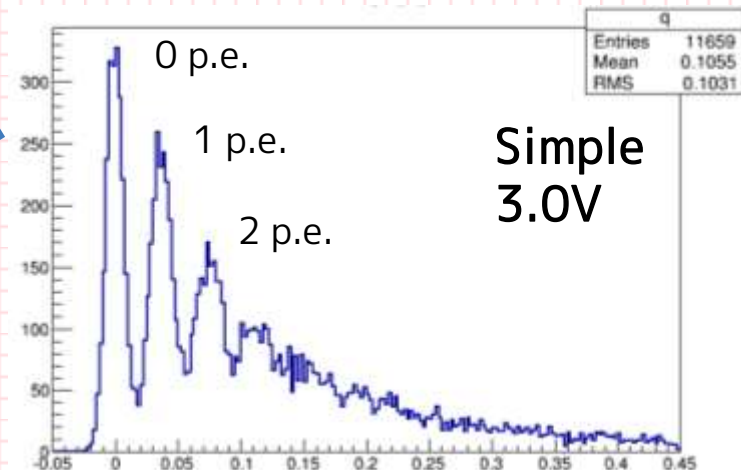


Parallel



LEDを微弱に発光させ、それと同期したトリガーでデータを取得。

- 波形が $3 \times 3 \text{mm}^2$ のMPPCと同程度に鋭い
- 1 p.e. の信号が弁別可能

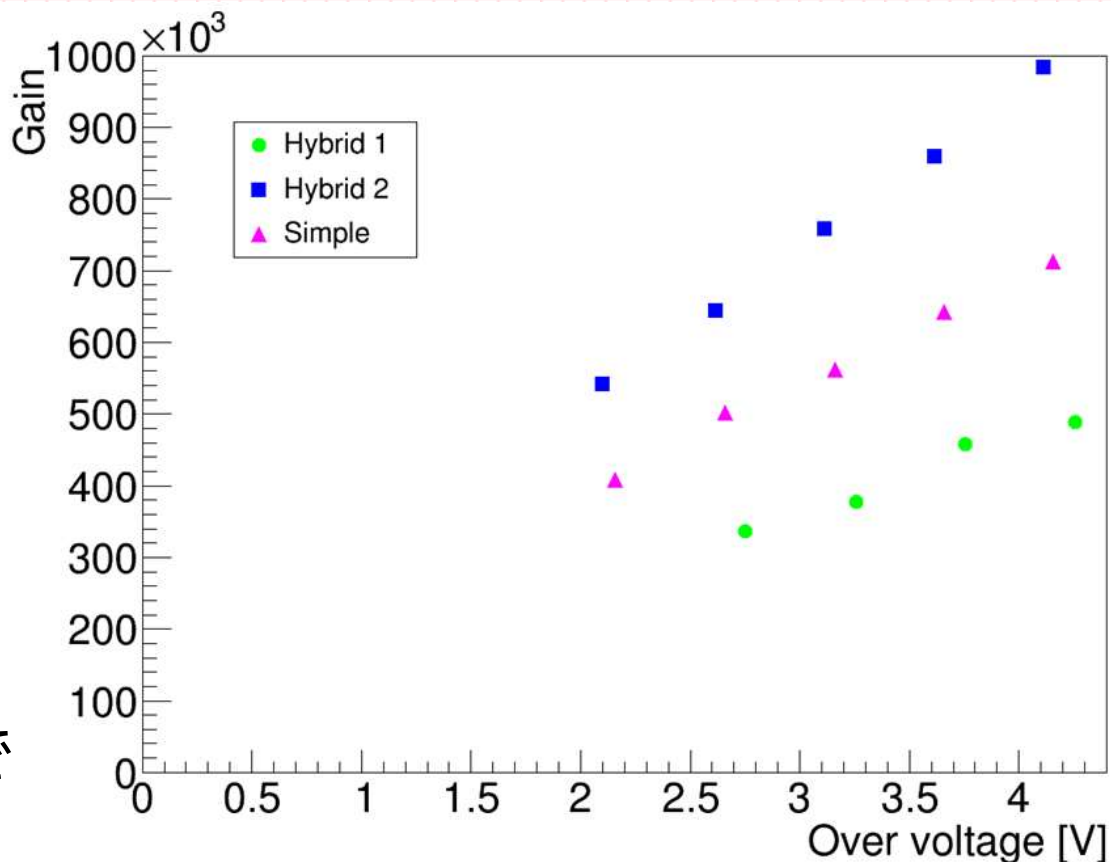


電荷 →

ゲイン

波形が短くなる(キャパシタンスが小さい)
接続ほどゲインも小さく、測定を行った領域では $4 \sim 10 \times 10^5$ 。

並列接続に比べて低い
が、1 p.e.は十分分解できるので問題ない。



キャパシタンス $C = e \times \text{Gain} / V$

Hybrid1 : 18.7 ± 1.9 [fF]

Hybrid2 : 32.9 ± 0.4 [fF]

Simple : 27.9 ± 0.6 [fF]

波形と接続方式の関係

イベント毎に波形をフィットし
立下りの時定数を求めた。

Hybrid I 約26ns

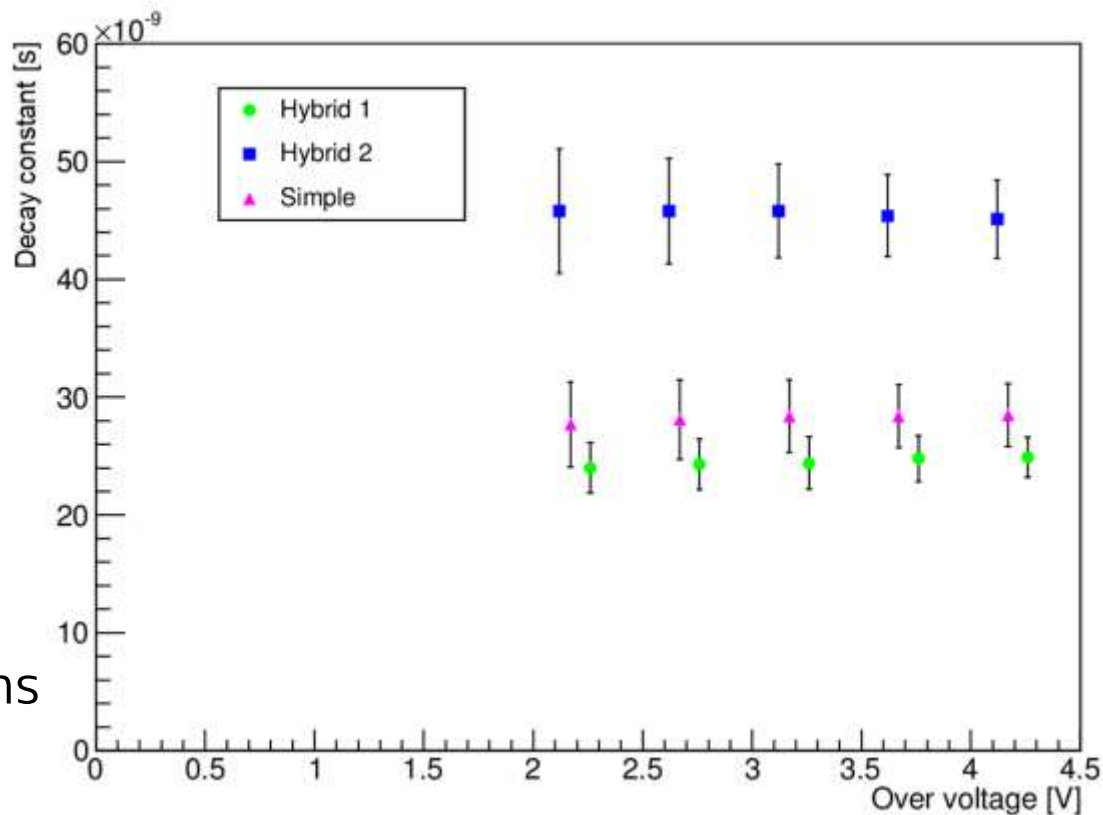
Hybrid II 約46ns

Simple 約28ns



Parallel 約200ns

どのケースでも目標とする50ns
以下の時定数が得られている。



クエンチ抵抗 $1.20\text{M}\Omega$ と、先に求めたCから、時定数 $\tau = RC$

Hybrid I : 22.4ns

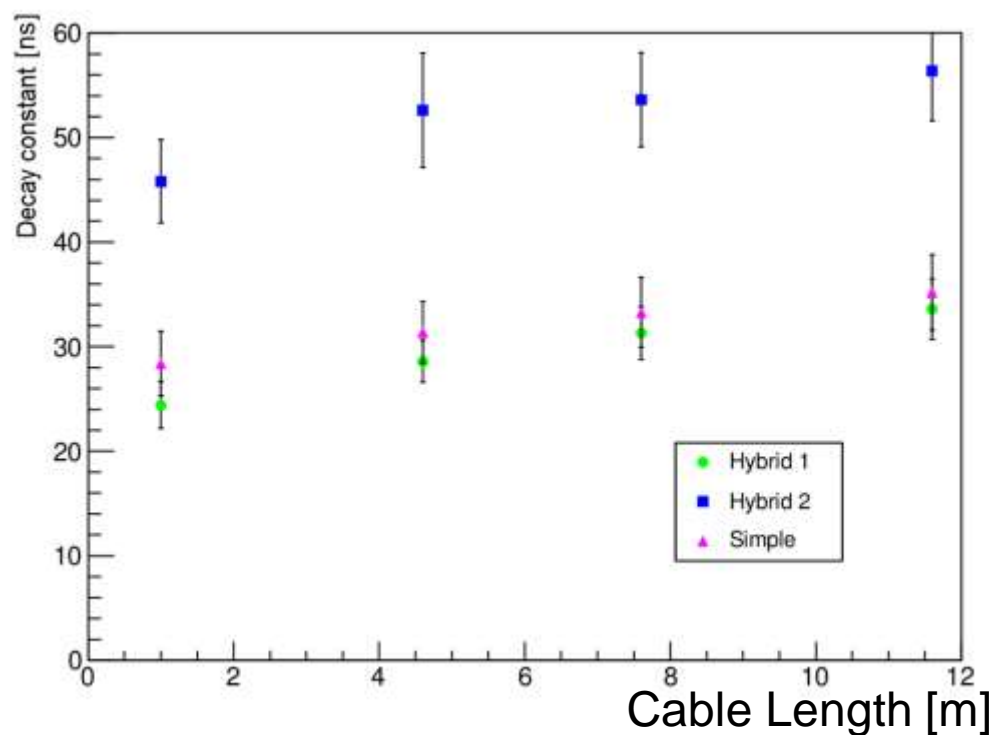
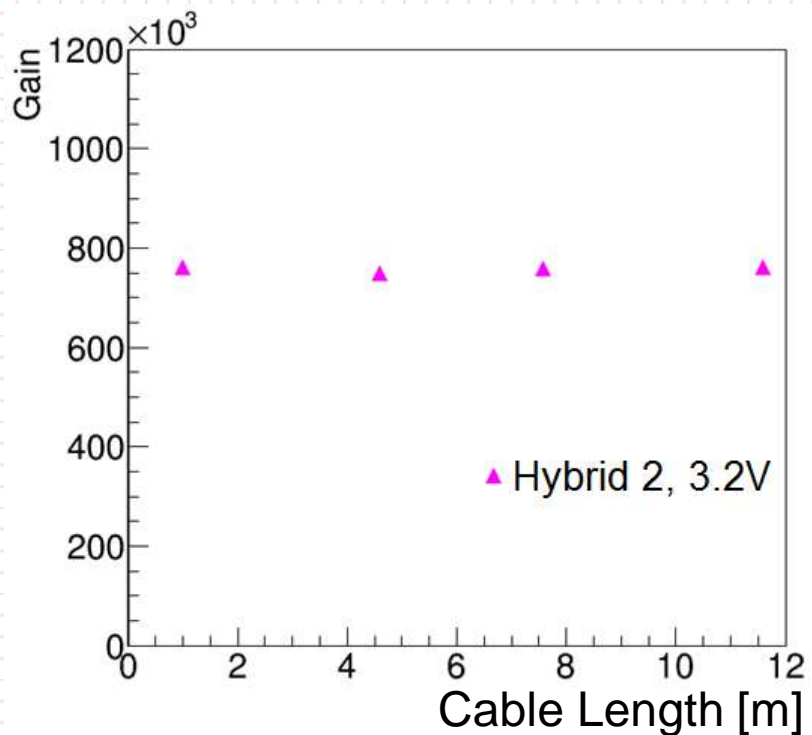
Hybrid II : 39.4ns

Simple : 33.5ns

2割程度の誤差で、コンシステントな結果

ケーブルの長さの影響

実機ではMPPCから読み出しエレキまで、約10mのケーブルがある。
MPPCとプリアンプの間にケーブルを追加して波形の変化を観測した。



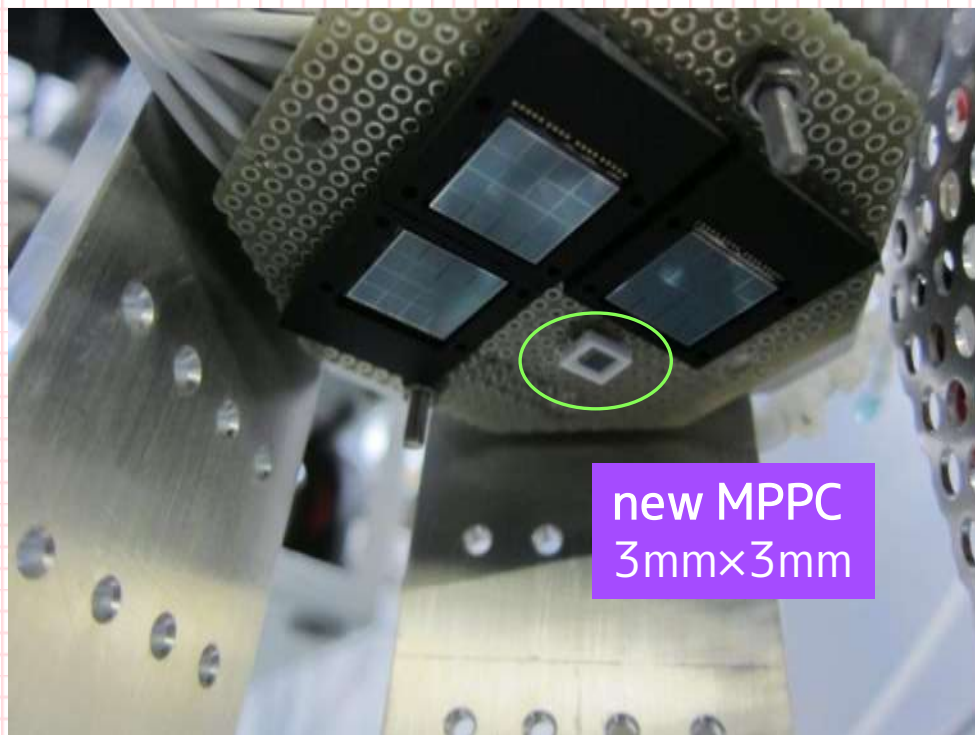
ゲインは殆ど変化していないが、テールの時定数は1mあたり約1ナノ秒長く見えている。Hybrid 2は 56nsまで増えているが、acceptable。

新型MPPCの性能評価

2012年浜松ホトニクス社から新しい設計のMPPCが発表された。

T.Nagano *et. al.*, IEEE NSS 2012

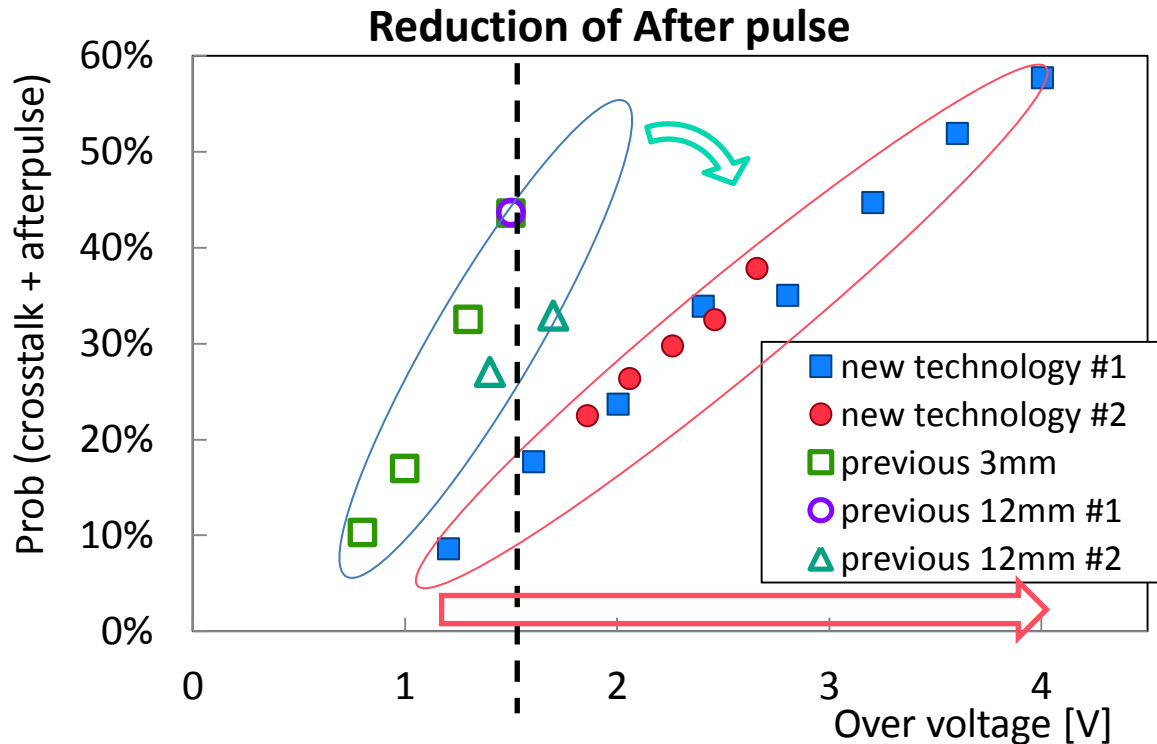
今回、この技術が導入されていて、かつ真空紫外光に対する感度を持つプロトタイプの試験を行った。



- アフターパルスの抑制
 - 安定に運転可能な電圧領域の拡大
 - より高いゲインとPDE
 - ハイレート耐性の向上
- 金属クエンチ抵抗
 - 常温と低温での波形の変化が減少

※従来のポリシリコン抵抗では抵抗がLXe温度で常温の約2倍

新型MPPCの結果



従来のMPPCと比較し
アフターパルスが抑制
されている。

従来のUV有感MPPCで
は1.5V程度のオーバ
ボルテージ以上では波
形が不安定になったが、
新型では4.0V以上まで
運転領域を拡大できる。

立下りの時定数は
常温：21.3ns、LXe温度：25.1 ns

約2割の違い。浜松のデータによるRqの変化、20%と一致

まとめと、今後

MEG実験アップグレードにおける液体キセノン検出器更新のために液体キセノン中で使用できる大型MPPCが必要であり研究開発を進めている

結果

大型MPPCでの波形の鈍りを抑えるために、直列(ハイブリッド)接続の試験を行い、30 – 60 nsの短いパルスを得ることができた。

浜松ホトニクスによる新しい技術の導入により、アフターパルス確率の減少を確認した。

動作電圧範囲の拡大->PDE、ゲインの向上
ハイレート耐性の向上

予定

基本的な要求事項は満足する事が出来たため、今後は量産に向けた詳細な設計の段階に移る。

2014年に600個のMPPCを使用するプロトタイプ試験を予定している。続いて実機のためのMPPCの量産、試験を開始する。

終



実験に協力いただいた九州大学、中居勇樹氏に感謝します

MPPC for Liquid Xenon

浜松ホトニクスと協力し、新型MPPCを開発中
要求

対策:

保護膜を除去
不感層を薄く
反射防止膜
LXeの屈折率に合わせる

- ・ VUV ($\lambda = 175 \pm 5 \text{ nm}$) に対する感度

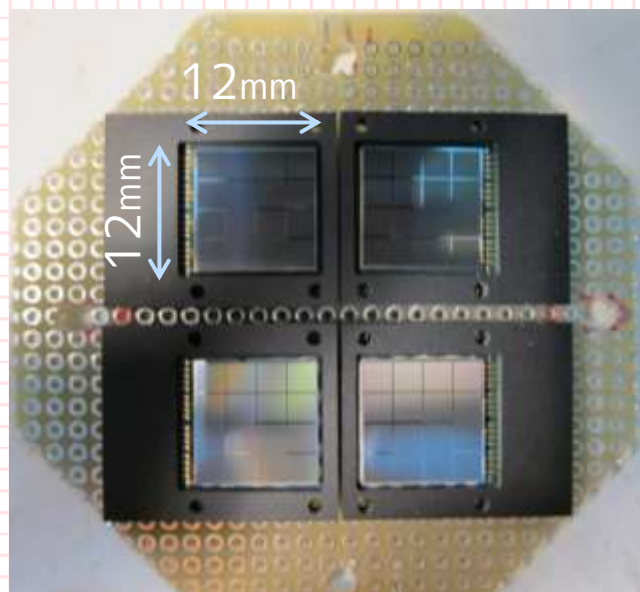
現在市販されている製品は液体キセノンのシンチレーション光に対してほとんど感度が無い。

前回の物理学会で $3 \times 3 \text{ mm}^2$ サイズの新型MPPCについてPDE11%と報告

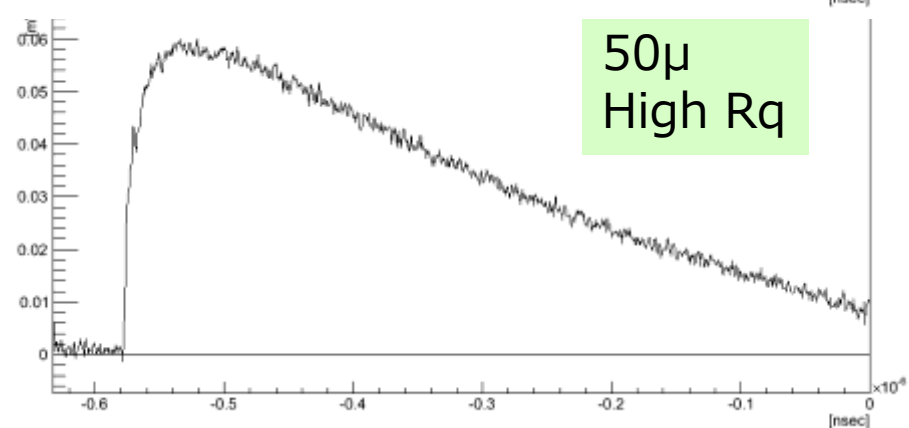
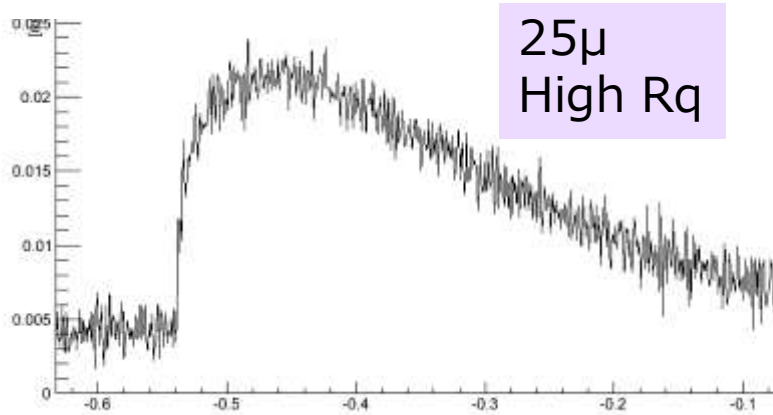
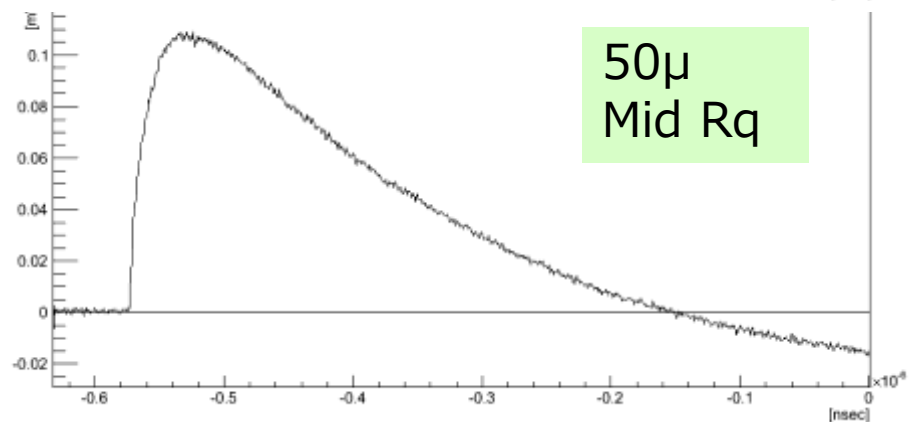
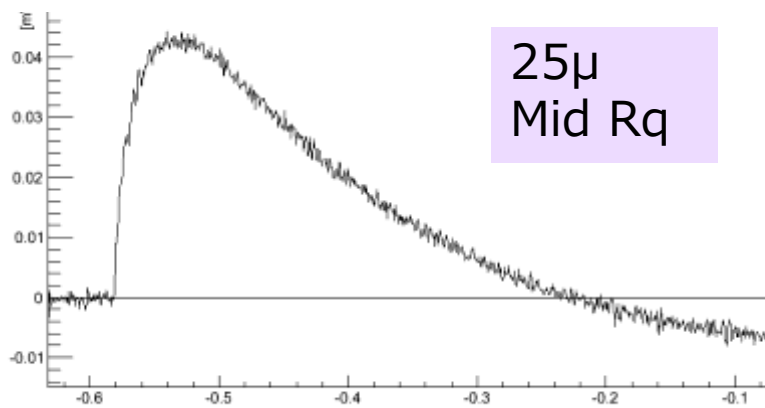
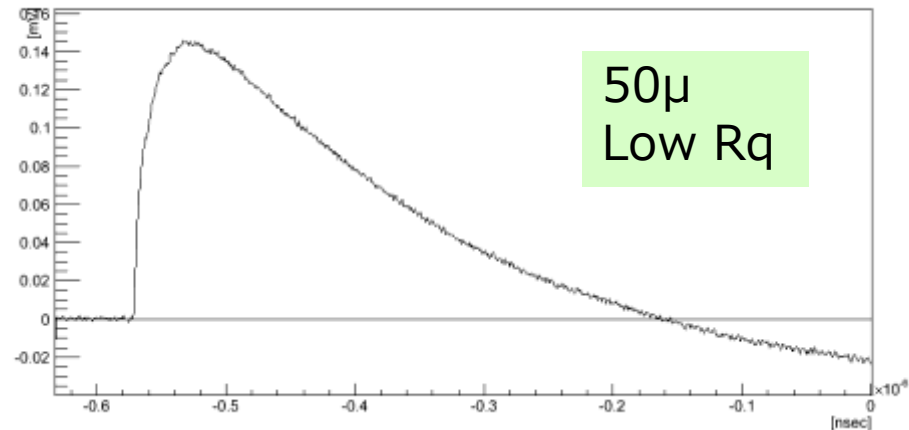
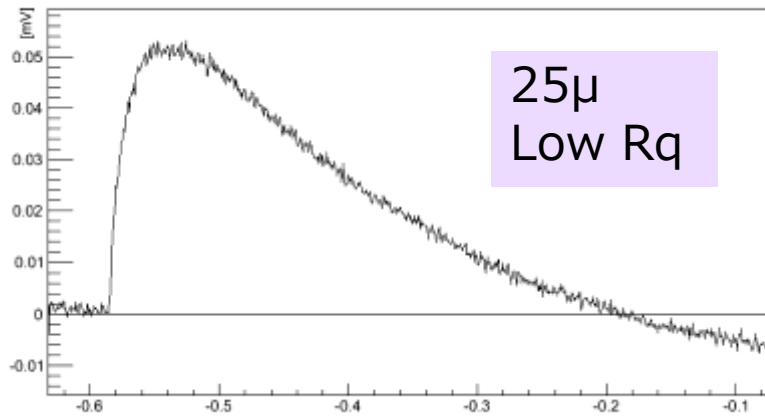
- ・ 単一の素子として、 $12 \times 12 \text{ mm}^2$ の大きさ

市販品は $3 \times 3 \text{ mm}^2$ が最大。
チャンネル数の抑制。
 $12 \times 12 \text{ mm}^2$ で約4000ch。

12mm角・紫外線
高感度型MPPC

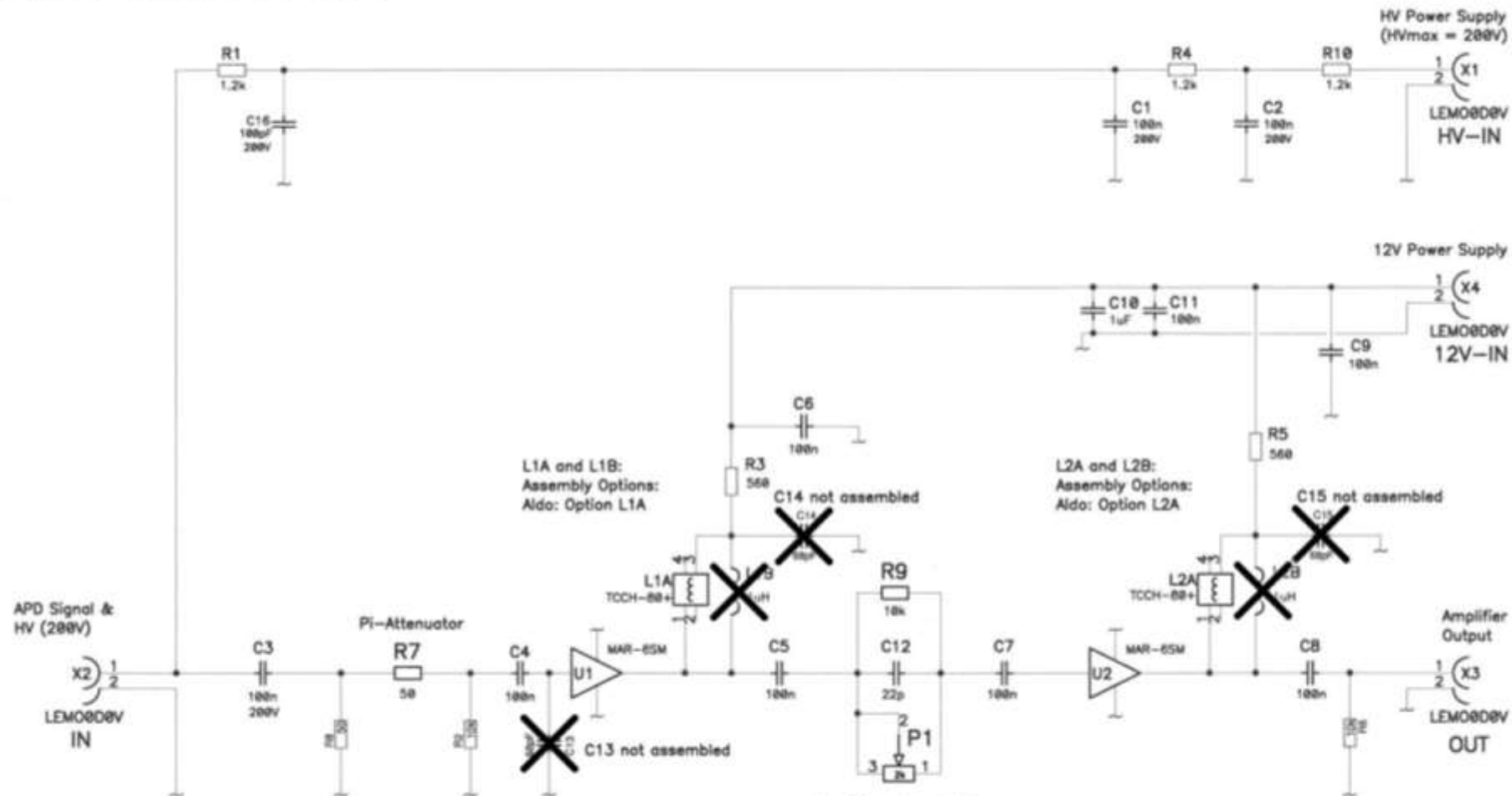


Raw-Waveform



pre amplifier

MAR-Amplifier for Aldo



Connectors X1, X2, X3, X4
 Assembly Options:
 LEMO 00 coax (LEM),
 or alternatively:
 SMA, SMB, SMC

Pi-Attenuator:

RB	R7	R2
1dB: 910	5.6	910
2dB: 470	12	470
3dB: 300	18	300
6dB: 150	39	150
12dB: 82	100	82 (for LEM 50 150 10k)
19dB: 62	220	62 (for HFuSR 50 390 10k)

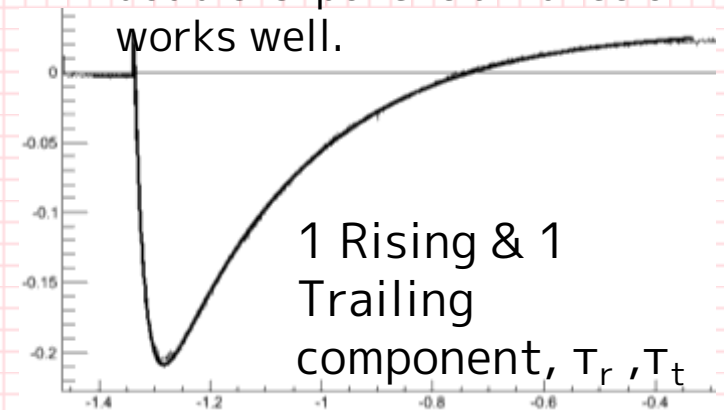
Pole-Zero-Cancellation:

R9	C12	P1
for LEM : 10k	220pF	2k
for HFuSR: 1k	22pF	-

Title MAR amplifier (Aldo V1.0)		
Size	Number	Rev 1.0
Date Wed Jan 18, 2012	Drawn by J. Greiner	Sheet 1 of 1

Result : Waveform and Quench-R

Fitting waveforms with a double-exponential function works well.



- The tail time constant do not depend on Rq so much
- 25 μ m pitch MPPC is not so different from 50 μ m.

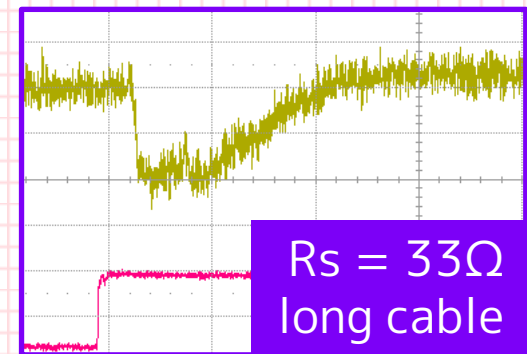
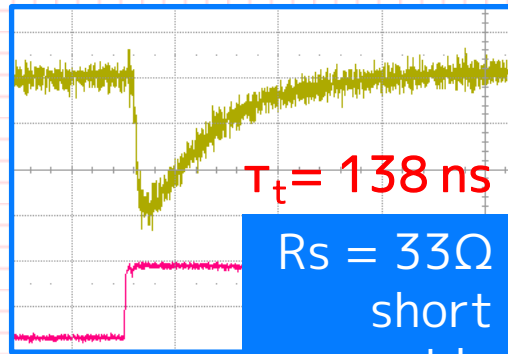
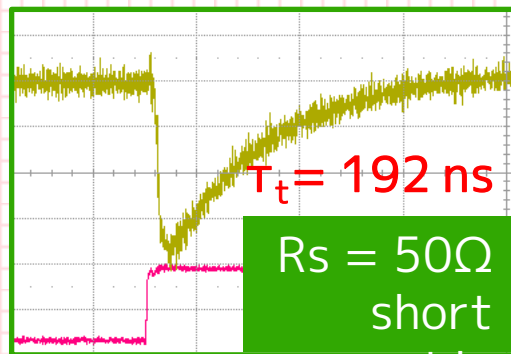
MPPC Type		Quench R [k Ω]	Trail time constant τ_t [ns]			Rise time constant τ_r [ns]		
			1.0	1.2	1.5	1.0	1.2	1.5
50	Over voltage [V]		1.0	1.2	1.5	1.0	1.2	1.5
	R1 Low	349	246	255	276	19.6	21	24.3
	R2 Mid	606	277	288	314	19	19.4	20.7
	R3 High	8867	-	783	-	-	16.5	-
25	Over voltage [V]		2.0	2.5	3.0	2.0	2.5	3.0
	R1 Low	719	-	214	-	-	20.7	-
	R2 Mid	1170	-	218	-	-	20.1	-
	R3 High	21433	-	538	-	-	23.5	-

How to shorten waveform

Smaller R_s

→ Effective, but only in limited situation.

↓ Data taken with large-area MPPC at room temperature ↓



Tail is reduced with small R_s , but the waveform is distorted with a long read-out cable because of the impedance mismatch.

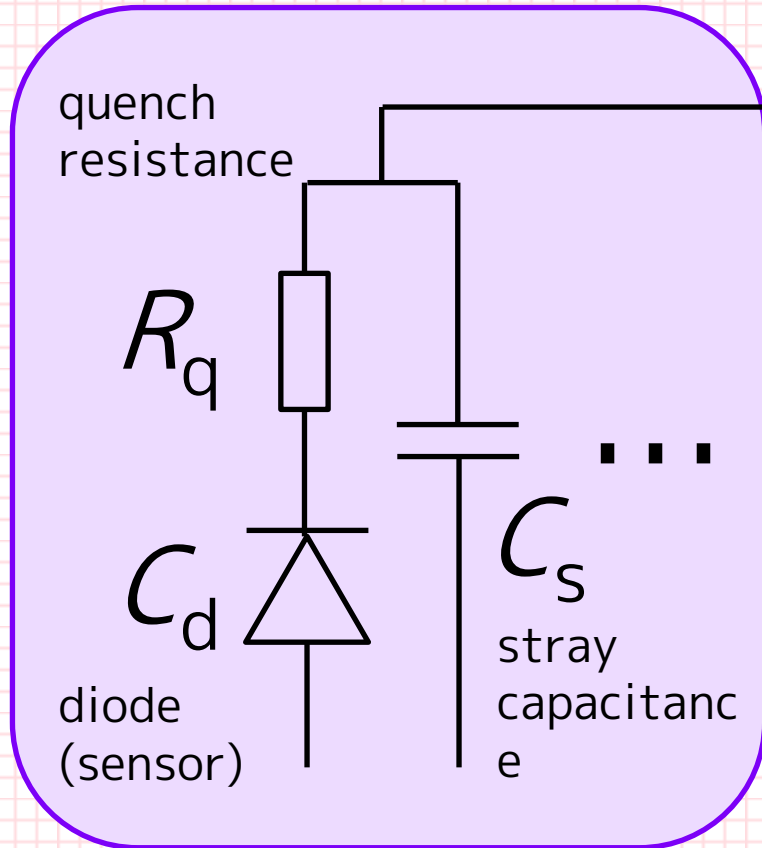
Smaller R_p

→ Not effective

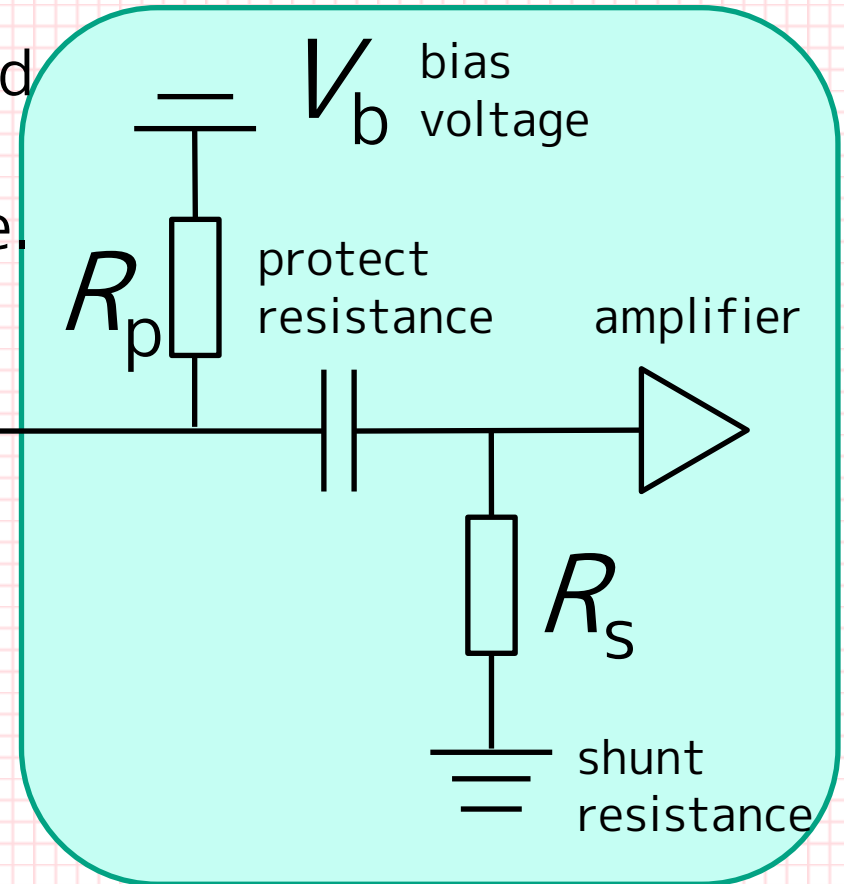
Cause of long waveform

Waveform can not be shortened only by reducing the quench resistance and cell capacitance.

MPPC side

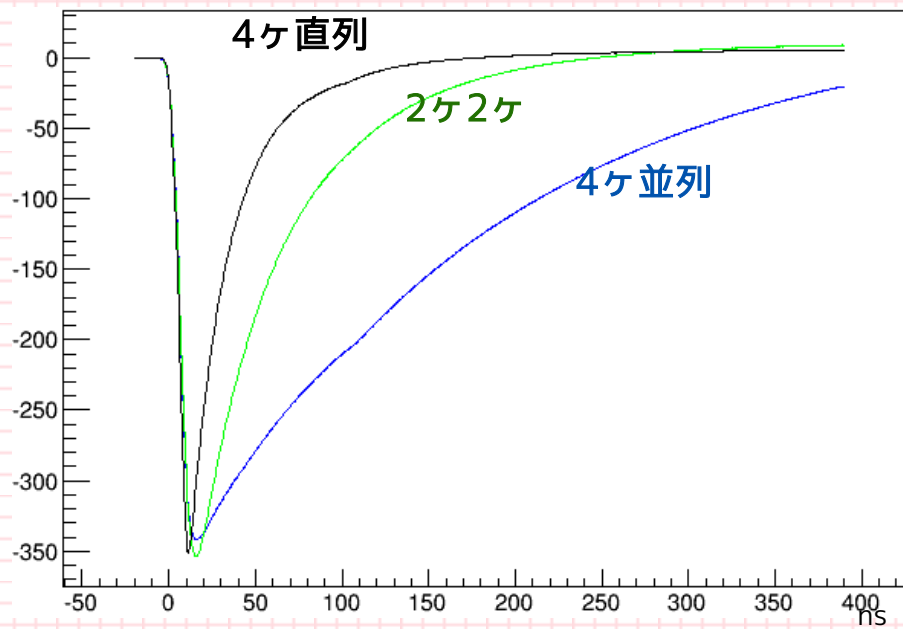


AMP side



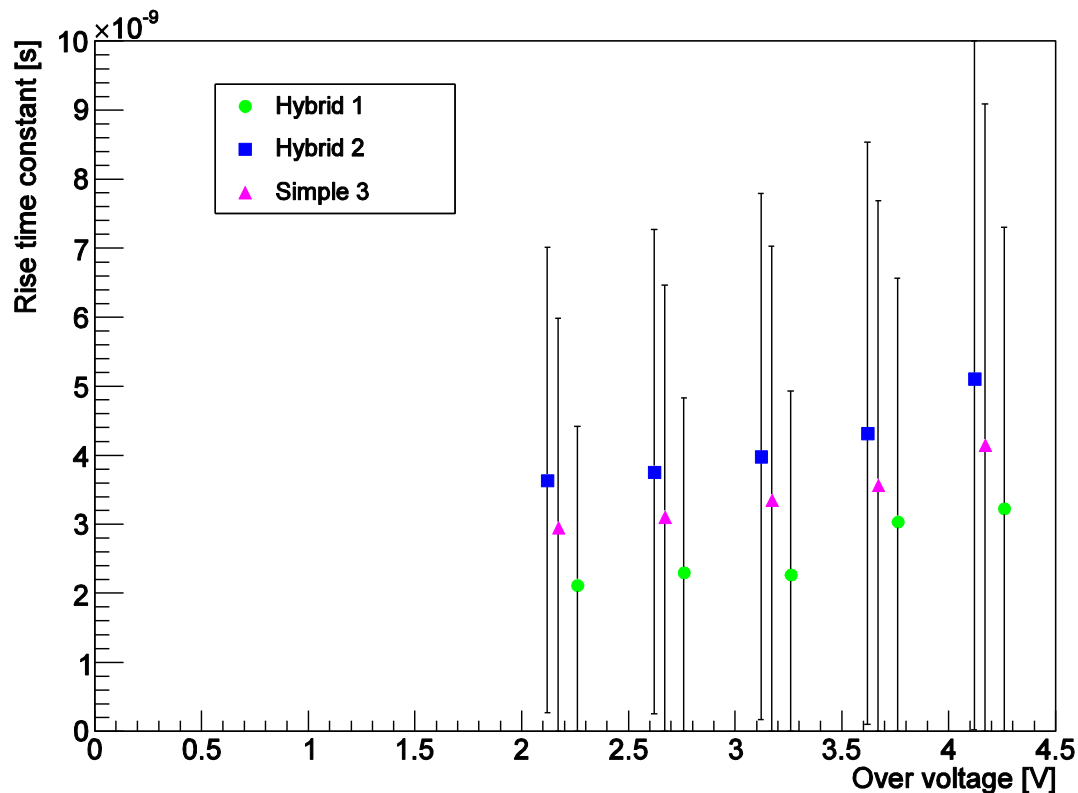
$R_s, R_p \times C_s$ term is dominant against $R_q \times C_d$ term under small R_q condition?

常温予備試験で
測定された波形
(LEDイベントの平均)



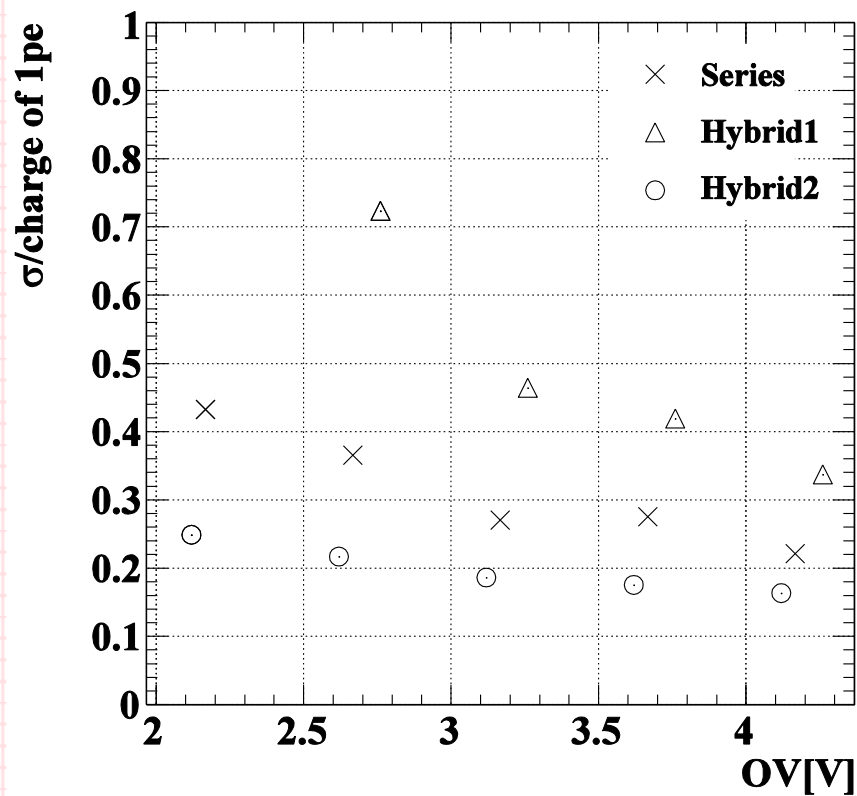
シングル波形の立ち上がり

印加電圧で上がっている？
フィッティングの違いが見えてしまっているよう。

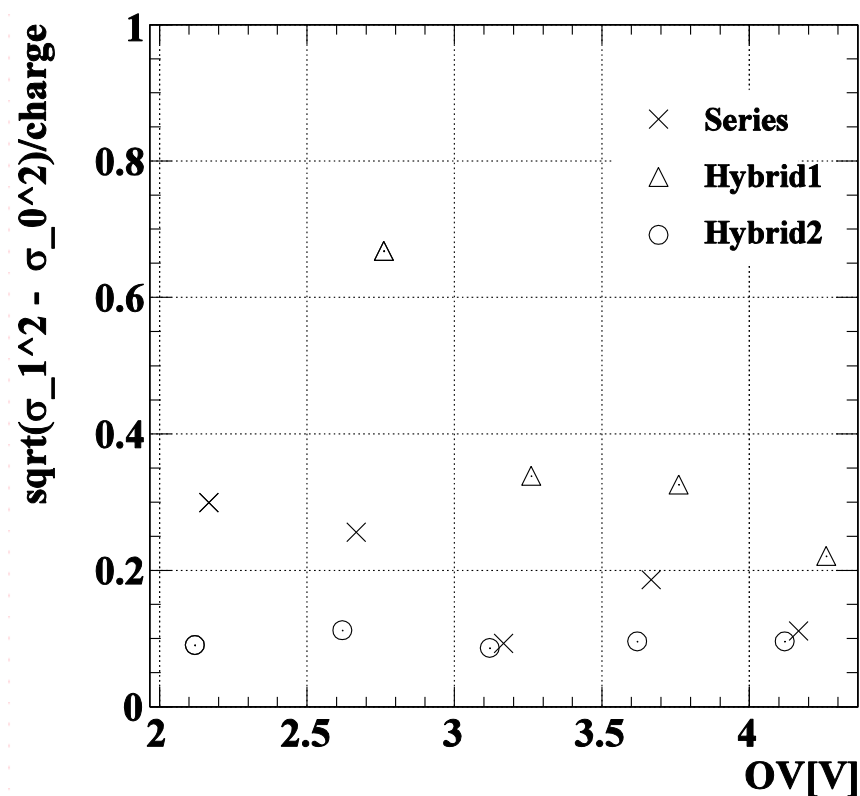


1 p.e. ピークの広がり

Connection Difference



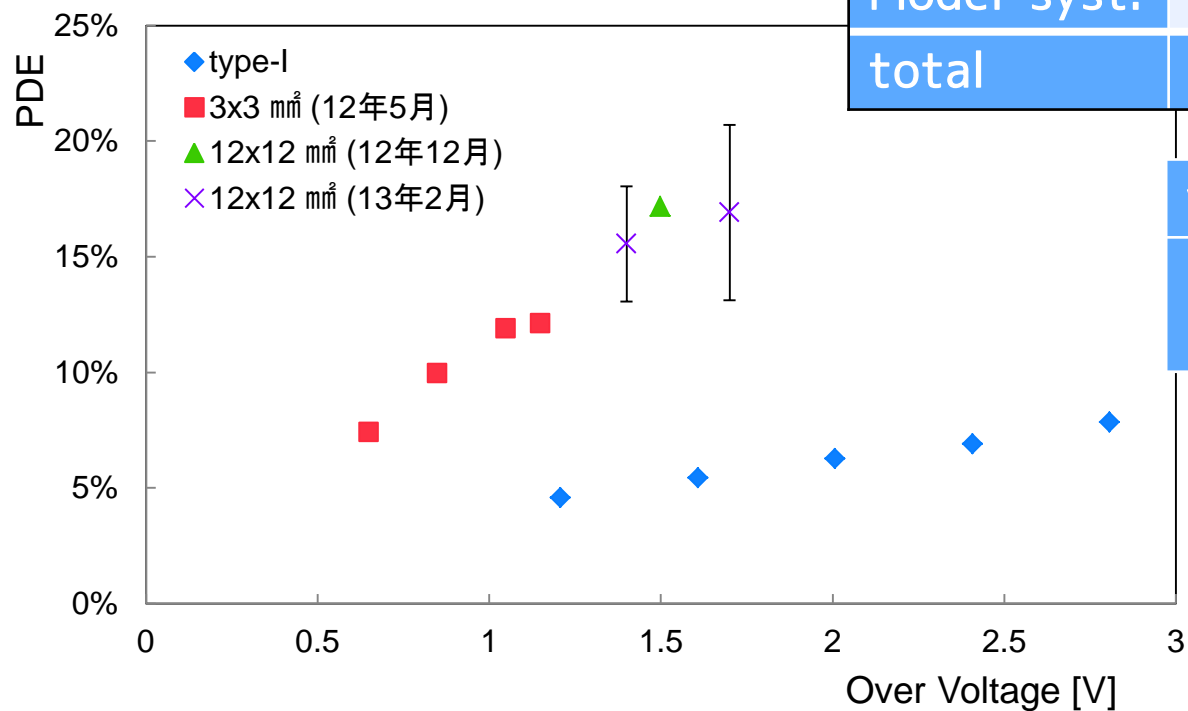
Connection Difference



Detailed PDE calculation of G-type MPPC

In 2013Feb-1 test
1301-50UM-R2

Voltage	1.4	1.7
	Errors	
Gain	3.1%	1.6%
Alpha peak	0.26%	0.21%
Correction	3.2%	1.7%
Model syst.	14%	22%
total	15.3%	22.2%



voltage	1.4	1.7
PDE	15.5	16.9
+/-	2.5	3.7