

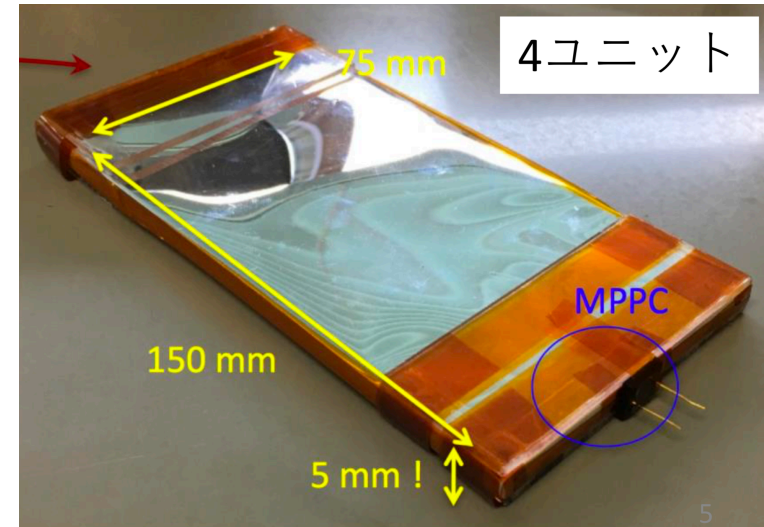
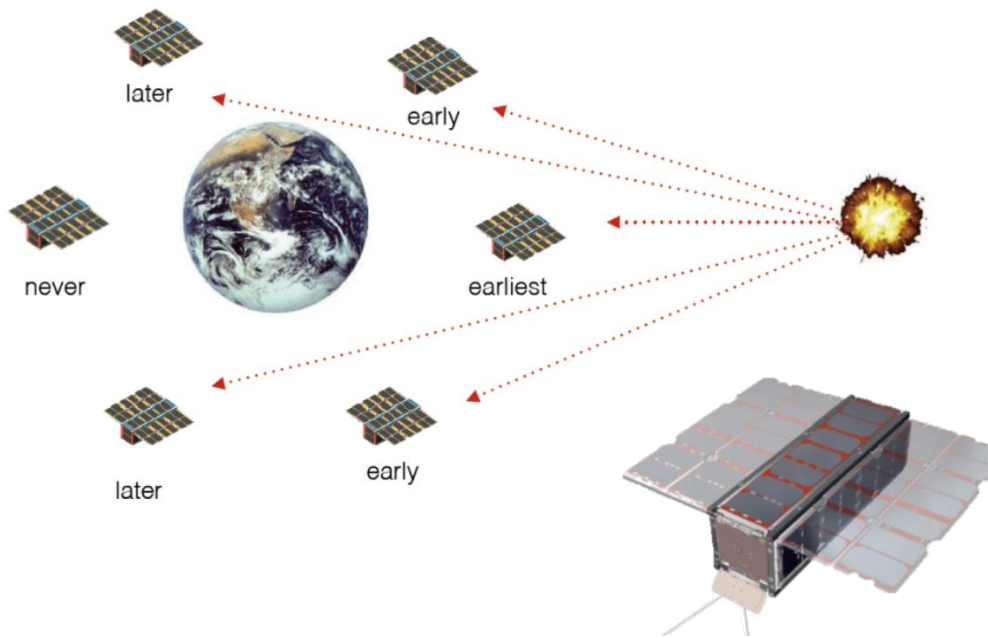
# 将来衛星ミッションを見据えた、 光検出器 MPPC の陽子線耐性実験

○内田和海, 高橋弘充, 平出尚義, 廣瀬健吾, 鳥越健斗, 深沢泰司, 水野恒史  
(広島大学), 大野雅功 (Eötvös Univ.), 久富章平, 中澤知洋, 山岡和貴  
(名古屋大学), 羽鳥聡, 久米恭, 水嶋慧 (若狭湾エネルギー研究センター)



# CAMELOT :

## CubeSats Applied for MEasuring and LOcalizing Transients



PI: Norbert Werner (Eötvös Univ.)

★ガンマ線突発天体の、**迅速 + 正確な位置同定**を目的とした衛星計画

⇒多数の安価な3U-CubeSatを用いて**全天をカバー**

⇒衛星間の時間差を用いて、**詳細に発生位置を決定** (～分角)

★限られたサイズで、**大きな有効面積 + 低スレッシュホールド**が必要

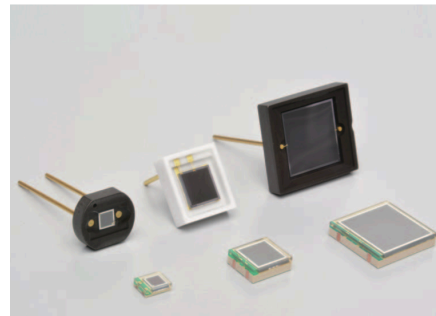
★**CsI(Tl)シンチレータ + MPPC**からなる、シンチレーション検出器

来月、性能検証のため気球実験 (@ポーランド) を予定

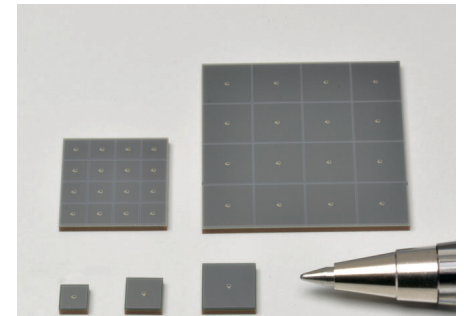
# 光検出器SiPM(MPPC)

低電圧(<60V)、小型(~1cm) → 小型衛星に適する  
これまで、S13360の使用を検討 → 今年新型が発売

どちらの方が、  
CAMELOTに適する？



S13360-6050CS



S14160-6050HS

	検出効率 (%)	増幅率 ( $10^6$ )	暗電流 ( $\mu\text{A}$ )	動作電圧 (V)
S13360-6050CS	40	1.7	0.388	54.4
S14160-6050HS	50	2.5	1.63	41.0

- ・従来型の方が、暗電流は低い。
- ・新型は、検出効率と増幅率が大きいいため、シグナルが大きい
- ・新型の方が動作電圧が低く、電源回路設計が楽そう。

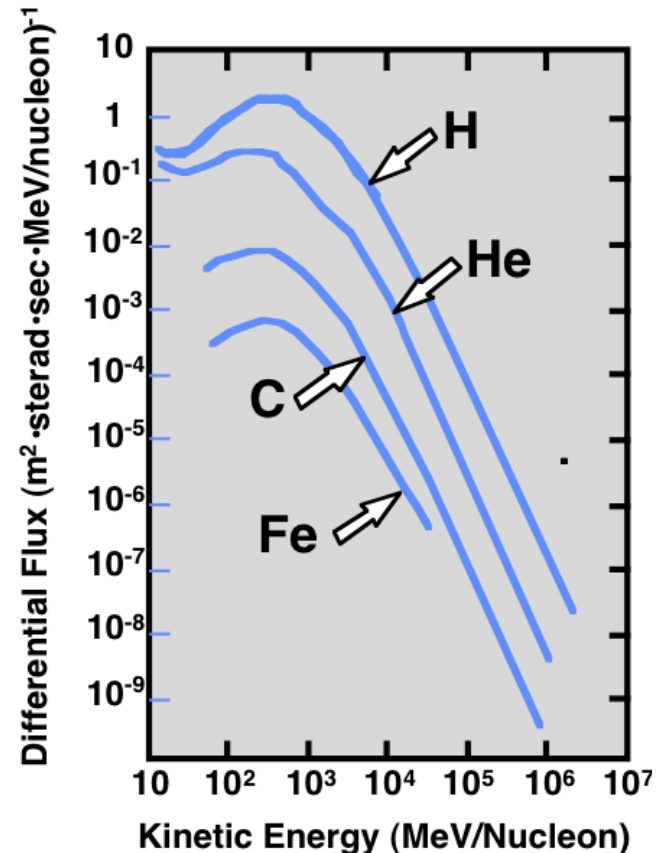
# MPPCの放射線損傷

衛星軌道上では、 $\sim 100\text{MeV}$ のエネルギーを持ったプロトンに曝される。

MPPCを構成するSi原子への弾性散乱等  
→ 暗電流増加や、ゲインの低下等の性能劣化が見込まれる

若狭湾エネルギー研究センターにて、 **$200\text{MeV}$ のプロトン**を、衛星軌道上で見込まれる数年分( $\sim \text{krad}$ )照射

暗電流、スペクトルの測定を行なった。



W. Schimmerling, J. W. Wilson, F. Cucinotta, and M-H Y. Kim.<sup>3</sup>

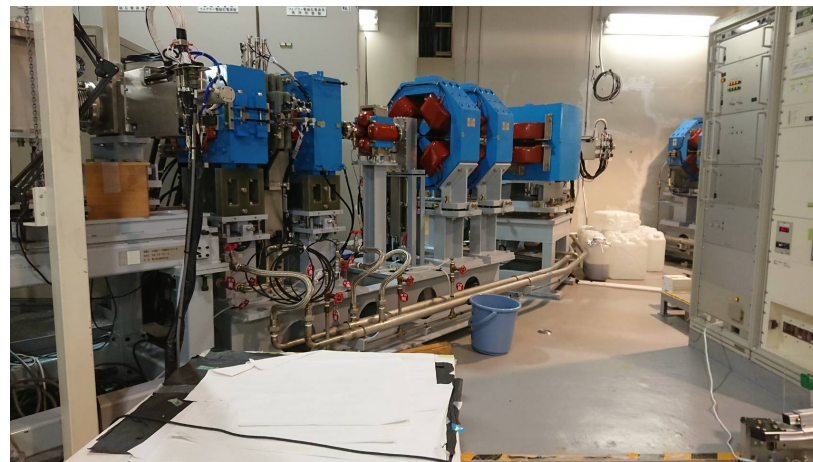
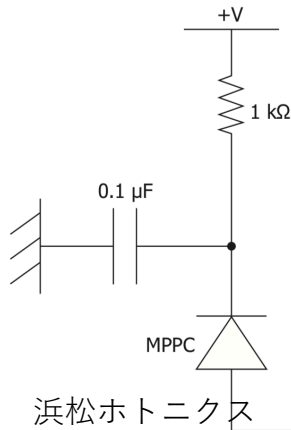
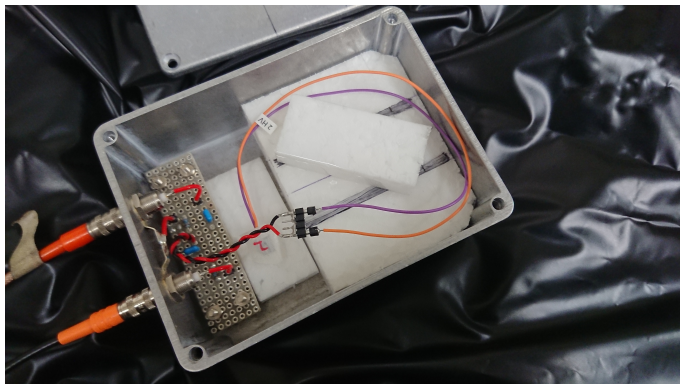
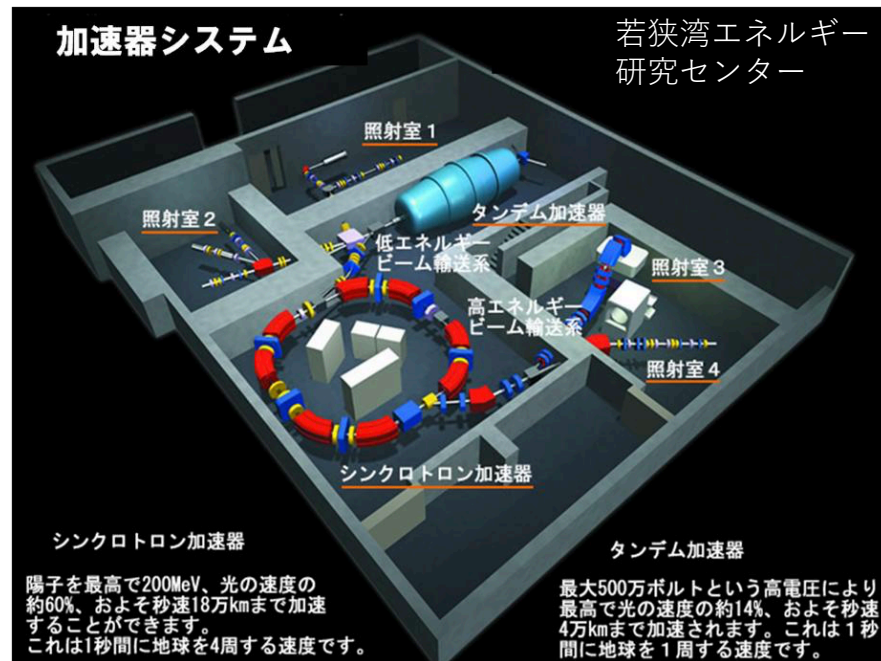


# 陽子線照射実験@若狭湾エネルギー研究センター



200MeVに加速した陽子を  
300rad, 1krad, 5krad 照射

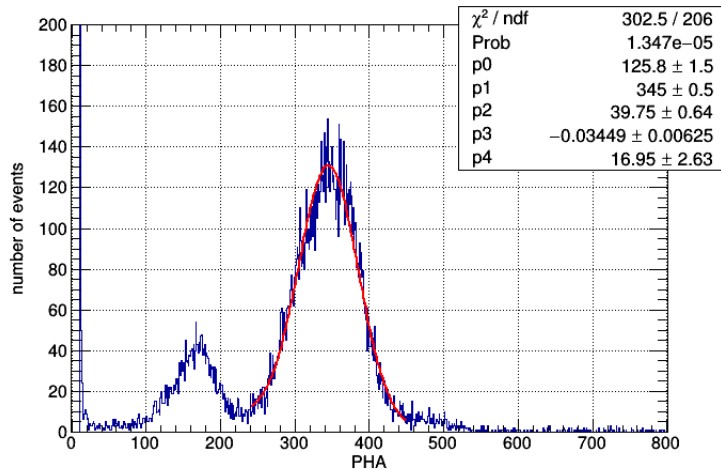
陽子線照射後に、CsIを取り付け  
241Amスペクトルを取得  
広大に帰ってから、継続測定



# 照射前測定

陽子線照射**無し**の旧型、新型MPPC + CsIで $^{241}\text{Am}$ を測定

## S13360-6050CS

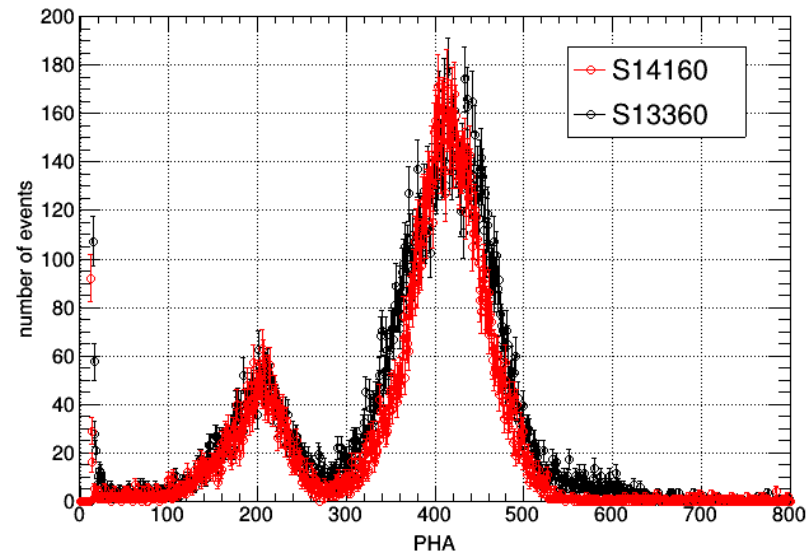
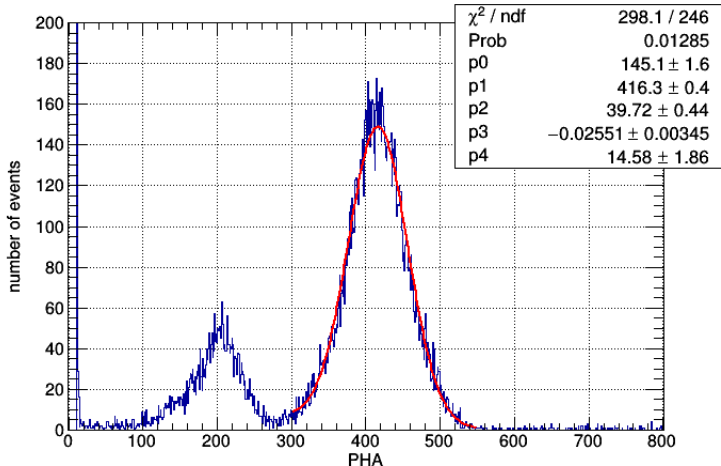


温度 : +20°C

Bias : 旧型 :  $V_{\text{op}} = 55.4 \text{ V} (0.229 \mu\text{A})$

新型 :  $V_{\text{op}} = 41.0 \text{ V} (0.909 \mu\text{A})$

## S14160-6050HS



新型の方が分解能良いのは、個体差？  
そこまで**大きな性能差はない**。  
スペックシートと大差ない結果

# 照射後測定（昨年実験と今年実験）

**S13360-6050CS**は、**2018年11月**に照射・測定を行なった。

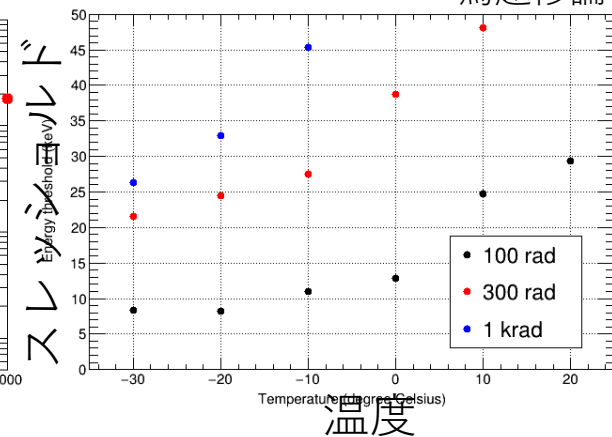
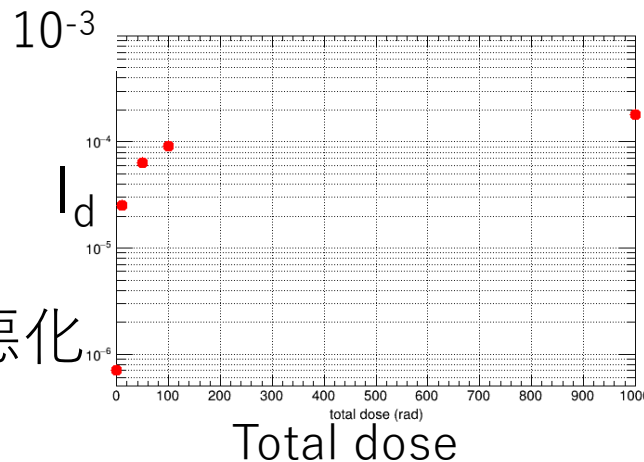
鳥越修論

一定電圧(55V)で測定

Total doseが上昇

→暗電流増加

→スレッシュホールド悪化



旧型MPPCのプロトン照射直後の暗電流とスレッシュホールド

室温で保管し、最近再び測定を行なった。（**7ヶ月後の測定**）

→性能回復している？

**S14160-6050HS**は、**2019年5月**に照射・測定を行なった。

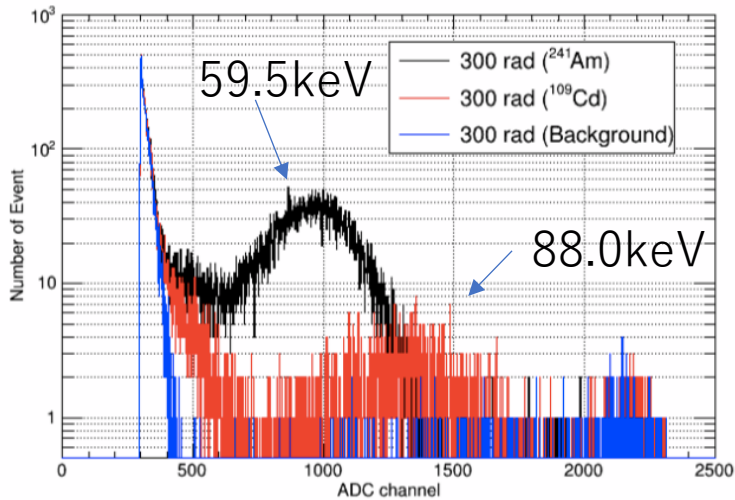
→照射量が増えるごとに、性能悪化。暗電流~mA。

7ヶ月後測定のS13360 vs 照射直後のS14160

どちらがCAMELOTミッションに適するか検討していく<sup>6</sup>

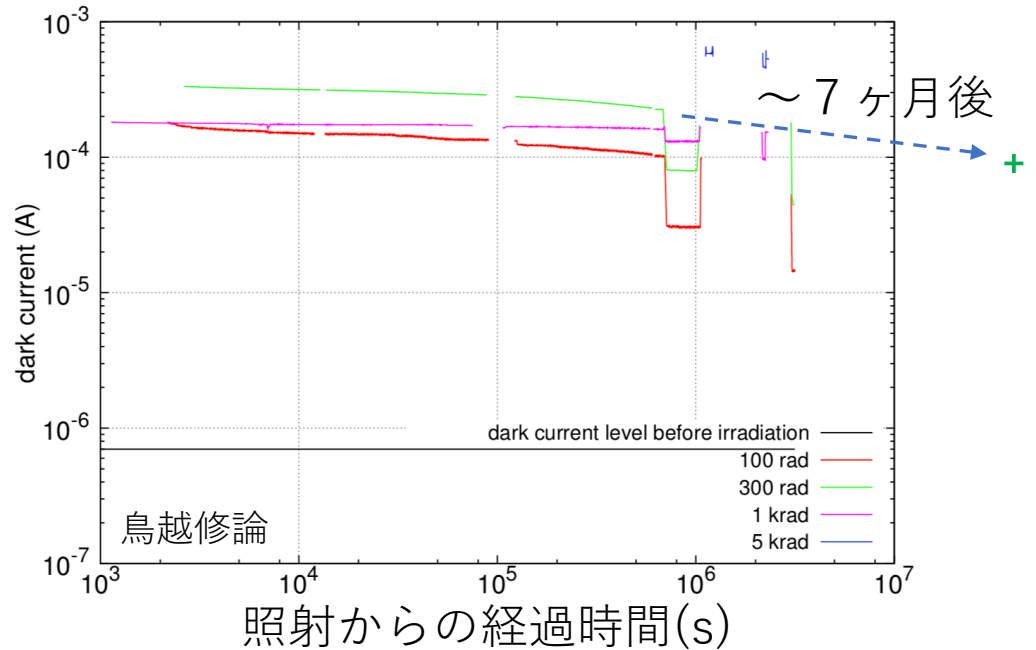
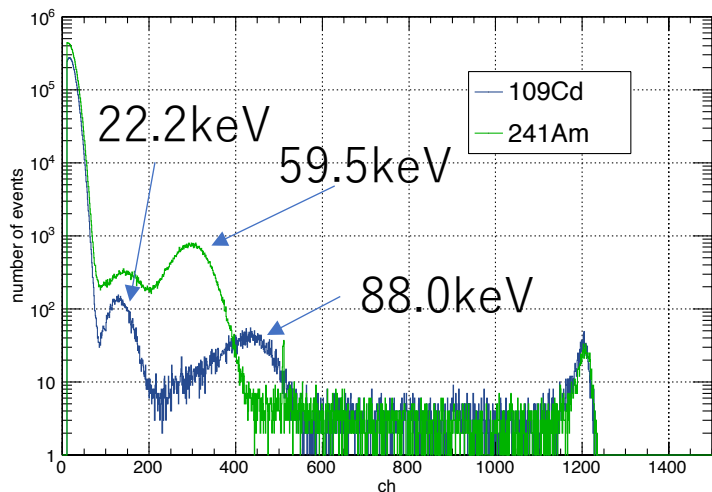
# S13360-6050CSの、照射直後と7ヶ月後の比較

## スペクトル変化



7ヶ月後

Energy Spectrum of 300rad mppc at m30deg



★ スペクトル

$^{109}\text{Cd}$ の22.2keVピークが見えている

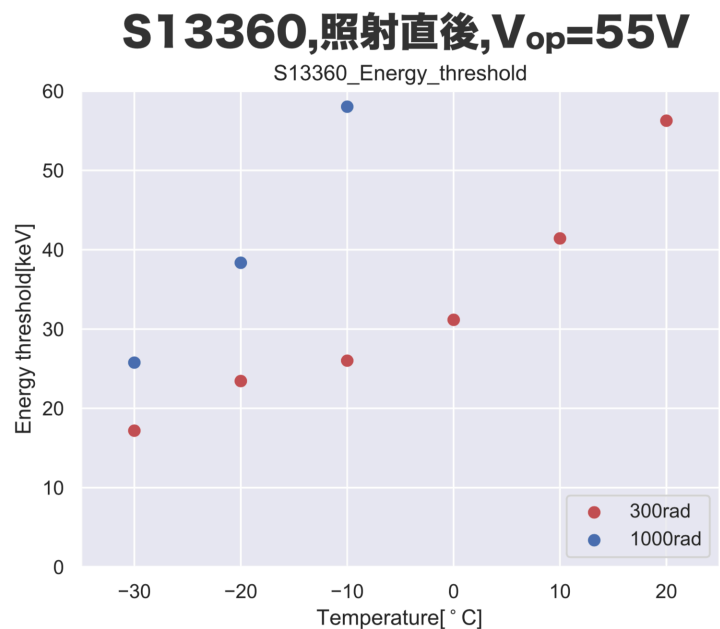
★ 暗電流値： $2 \times 10^{-4}\text{A} \rightarrow 9 \times 10^{-5}\text{A}$   
 だいたい、上記曲線に沿っている  
 → 性能回復している？



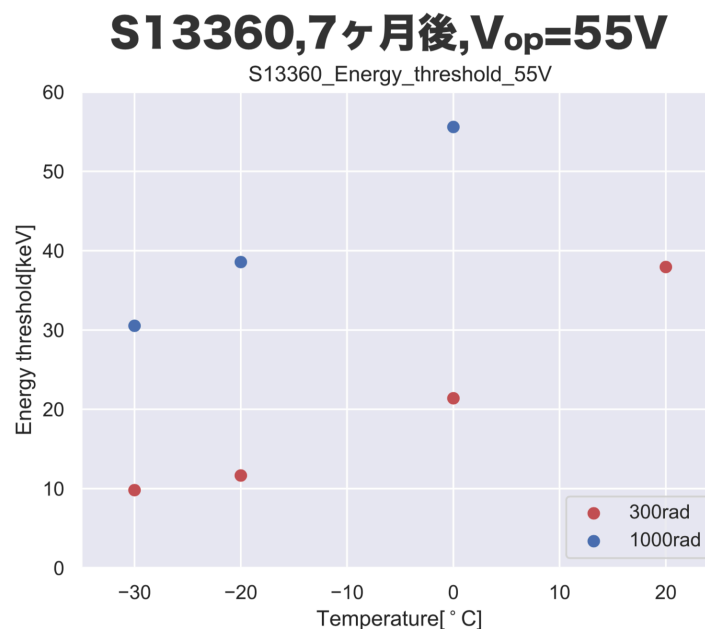
# S13360-6050CSの、照射直後と7ヶ月後の比較

★  $^{241}\text{Am}$ (59.5keV)と $^{109}\text{Cd}$ (88.0keV)の光電吸収ピークから  
較正直線を作成し、温度を変えて**エネルギーレスシヨルド**を調べた

★ エネルギーレスシヨルドは、暗電流ノイズ成分をガウシアンフィットし、  
その $4\sigma$ の値を採用



～7ヶ月後



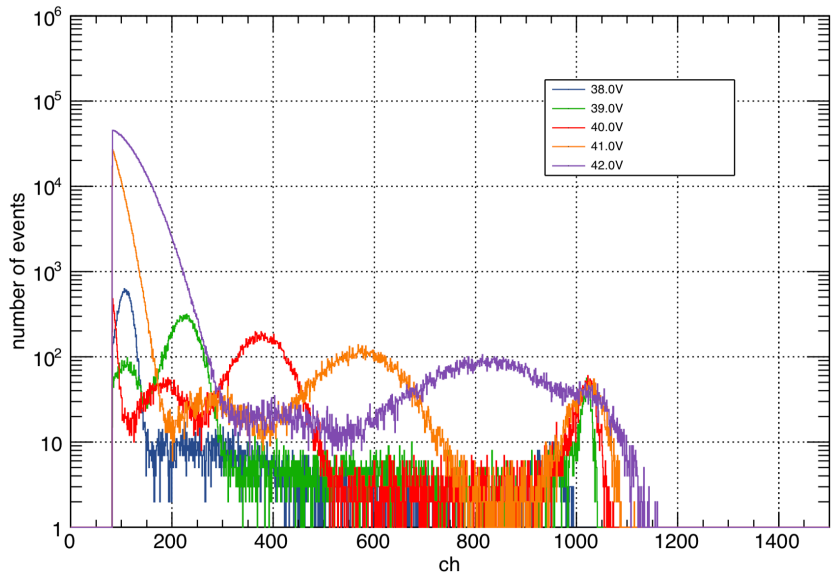
300rad照射と1000rad照射の両方、全温度範囲（ $-30^{\circ}\text{C}\sim+20^{\circ}\text{C}$ ）で、**エネルギーレスシヨルドが改善**

→7ヶ月の室温保管の間に、**アニーリング**したと考えられる。

# S14160-6050HS(照射直後) vs S13360-6050CS(7月後)

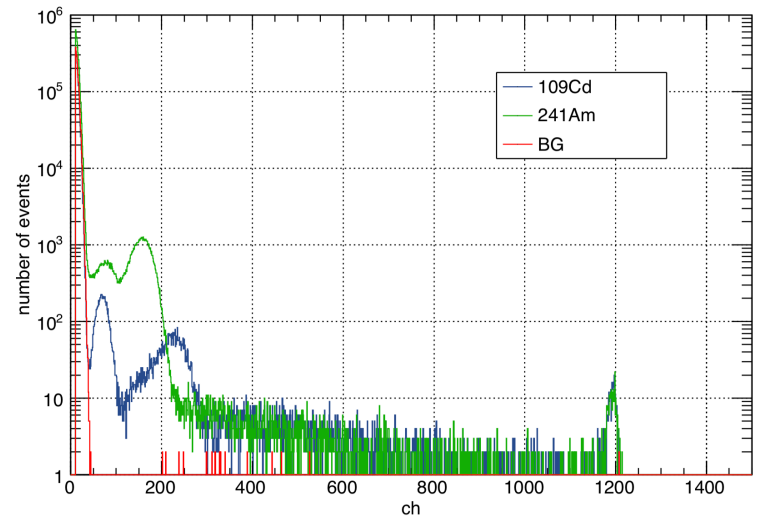
様々な電圧で、スペクトルを測定  
各MPPCで、最もS/Nの良い印加電圧  
で比較を行なった

**S14160, 照射直後, 300rad@-30°C,  
電圧変化(38V ~ 42V)**  
Energy Spectrum of 300rad mppc at m30deg

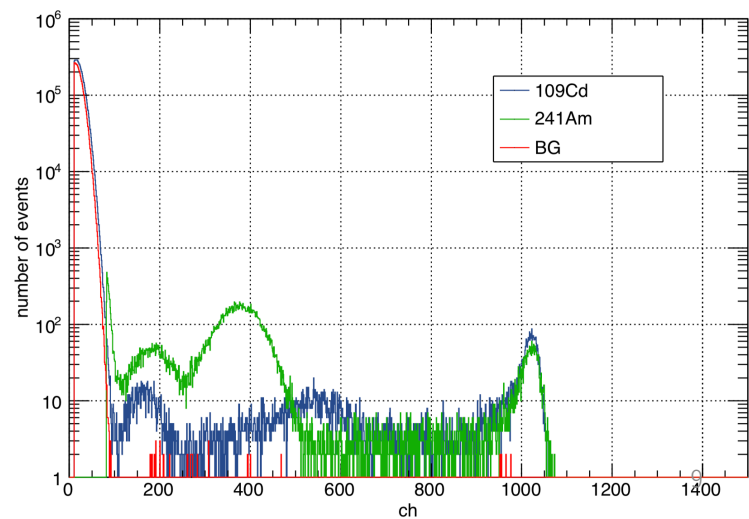


同様に、暗電流ノイズ成分から、  
エネルギーレシヨルドを求めて比較

**S13360, 7ヶ月後, 300rad@-30°C, 52V**  
Energy Spectrum of 300rad mppc at m30deg



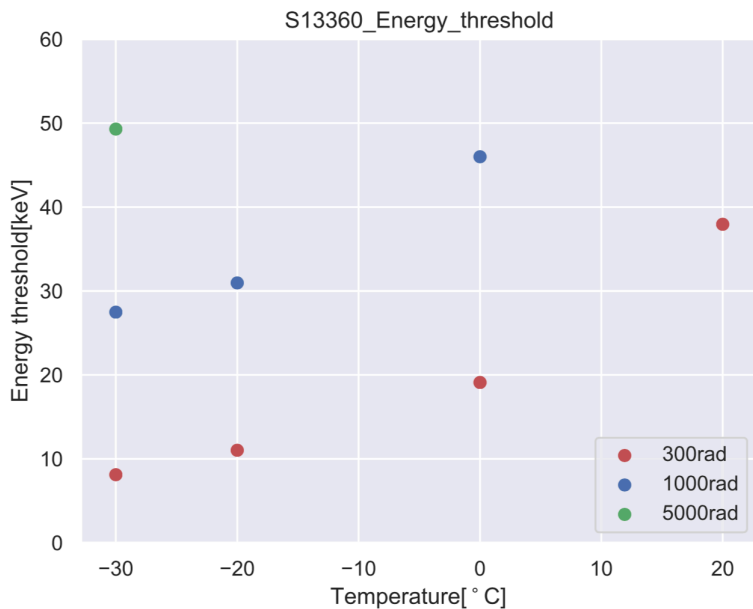
**S14160, 照射直後, 300rad@-30°C, 39V**  
Energy Spectrum of 300rad mppc at m30deg



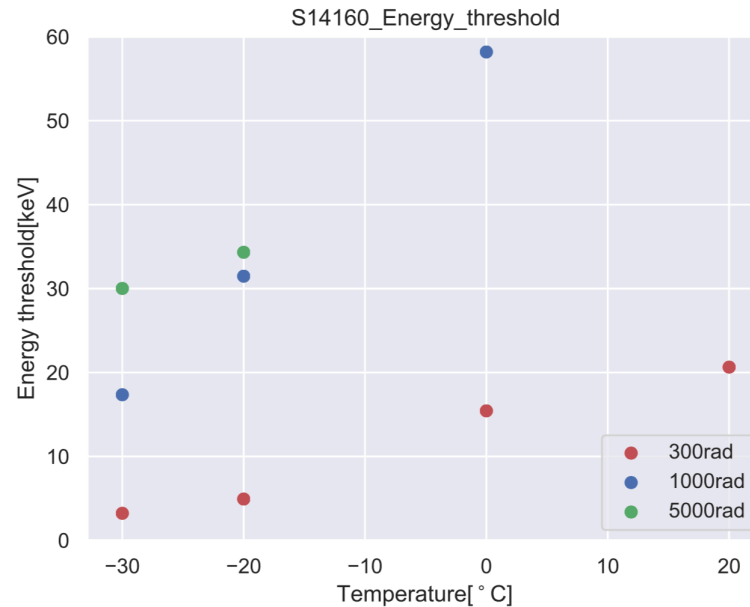
# S14160-6050HS(照射直後) vs S13360-6050CS(7ヶ月後)

新型(照射直後)と旧型(7ヶ月後)で、エネルギーレスシヨルドを比較

S13360,7ヶ月後,V<sub>op</sub>=S/Nがもっとも良い電圧



S14160,照射直後,V<sub>op</sub>=S/Nがもっとも良い電圧



★300rad, 5000radは**新型の方がエネルギーレスシヨルドが良い**

★1000radに関しては、**新型も旧型も同程度**

→性能回復した旧型と照射直後の新型で、あまり性能が変わらない  
→CAMELOTでは、新型を用いる方が良さそう。

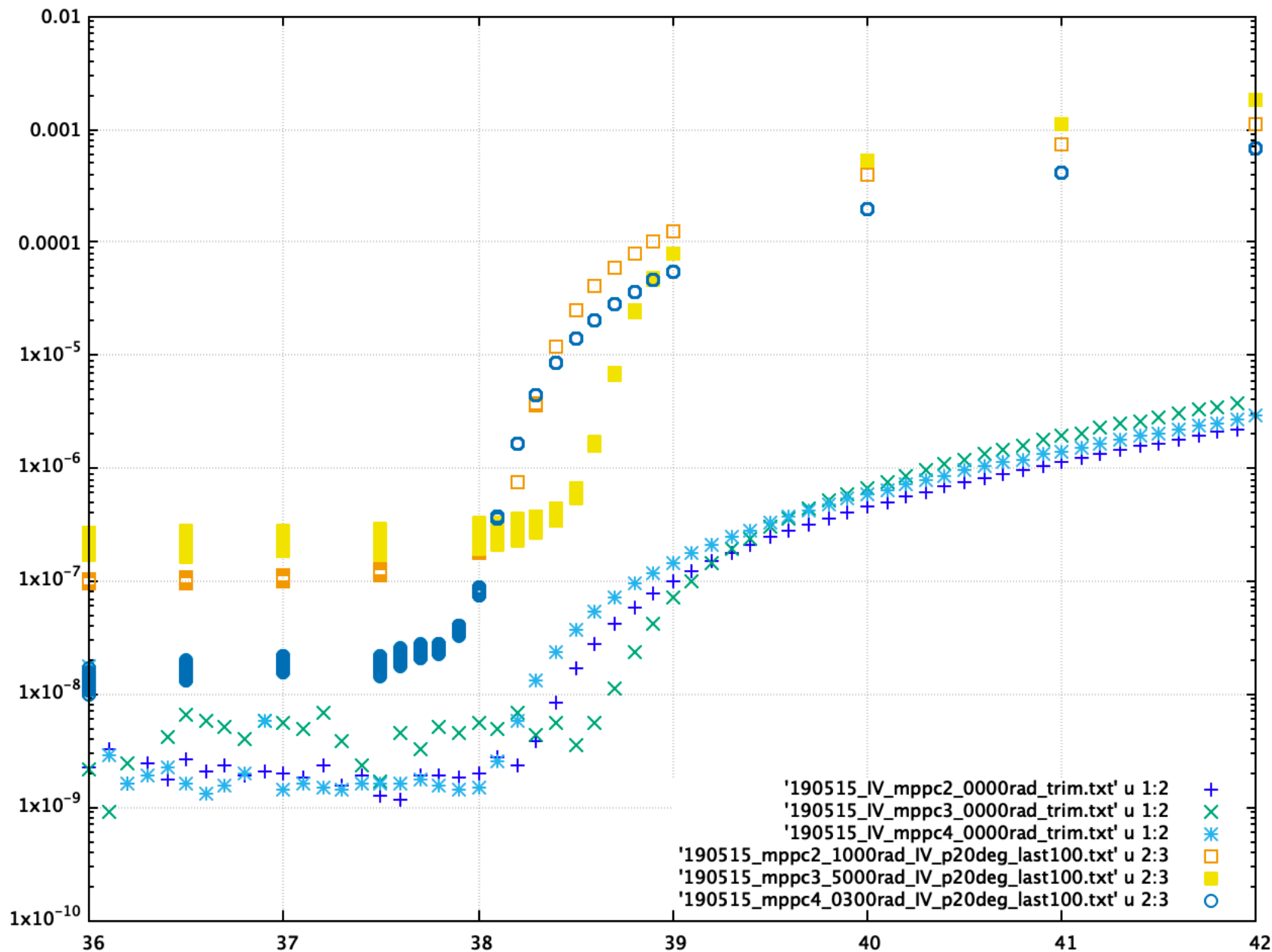
# まとめと今後

- ・我々は多数のCubeSatによって、**全天を観測**しながら、**突発天体の位置決定（～分角）**を行う、**CAMELOT**ミッションを推進している。
- ・小スペース・省エネのため、衛星壁面に薄型のCsIシンチレータを取り付け、MPPCで読み出す構造。
- ・今年発売されたMPPCと、一世代前のもので、どちらが良いか検討を行った。
- ・プロトン損傷前では、2つのMPPCでほとんど違いが見られなかった。
- ・旧型は、照射後7ヶ月で性能が少し回復していた。
- ・プロトン照射直後の最新型MPPCと、照射後7ヶ月後の旧型を比較し、どちらも性能に大差はなかった。  
→**CAMELOTでは、最新型MPPCの使用を検討。**
- ・最新型MPPCも、時間を置くことで性能が回復するのかを実験予定 11

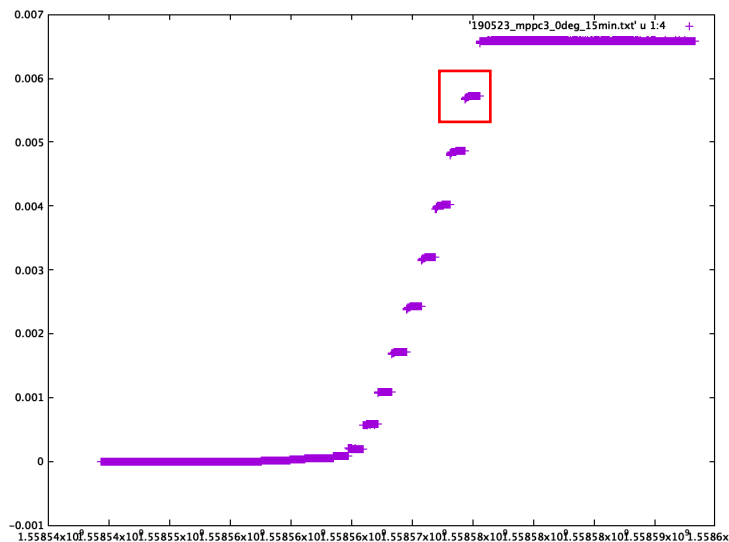


おまけスライド

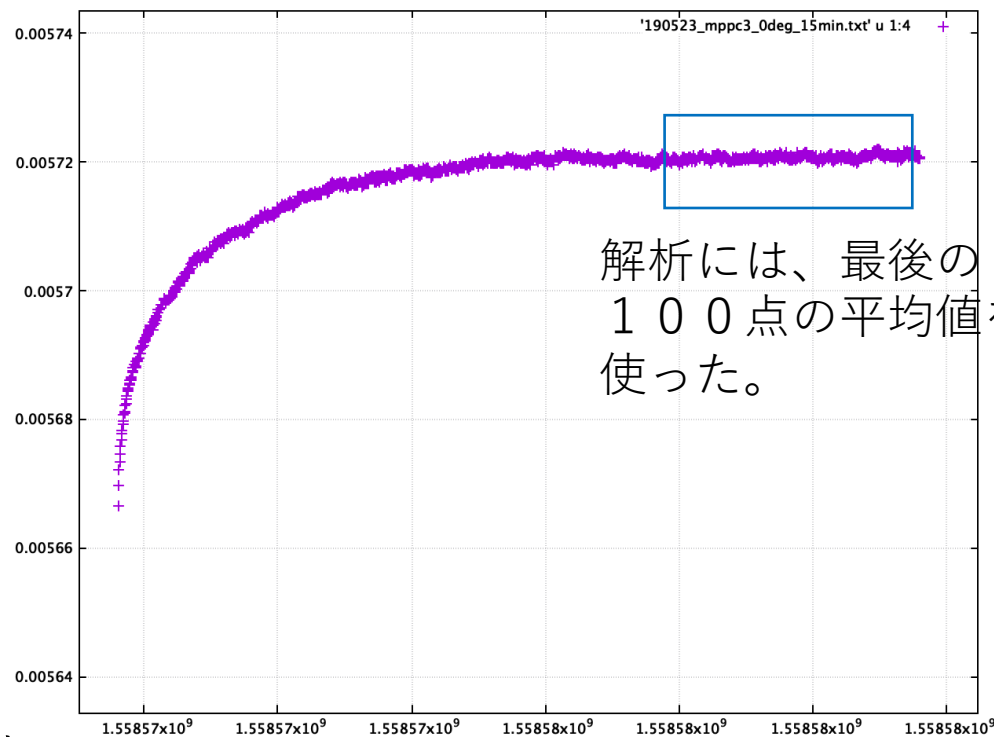
# S14160の照射前後のIV測定結果



5krad照射後の、IVカーブ。 (@ 0°C) 横軸は時間。



15分くらい、電流値が変動する。  
暗電流増加により発熱？  
チャージアップ？

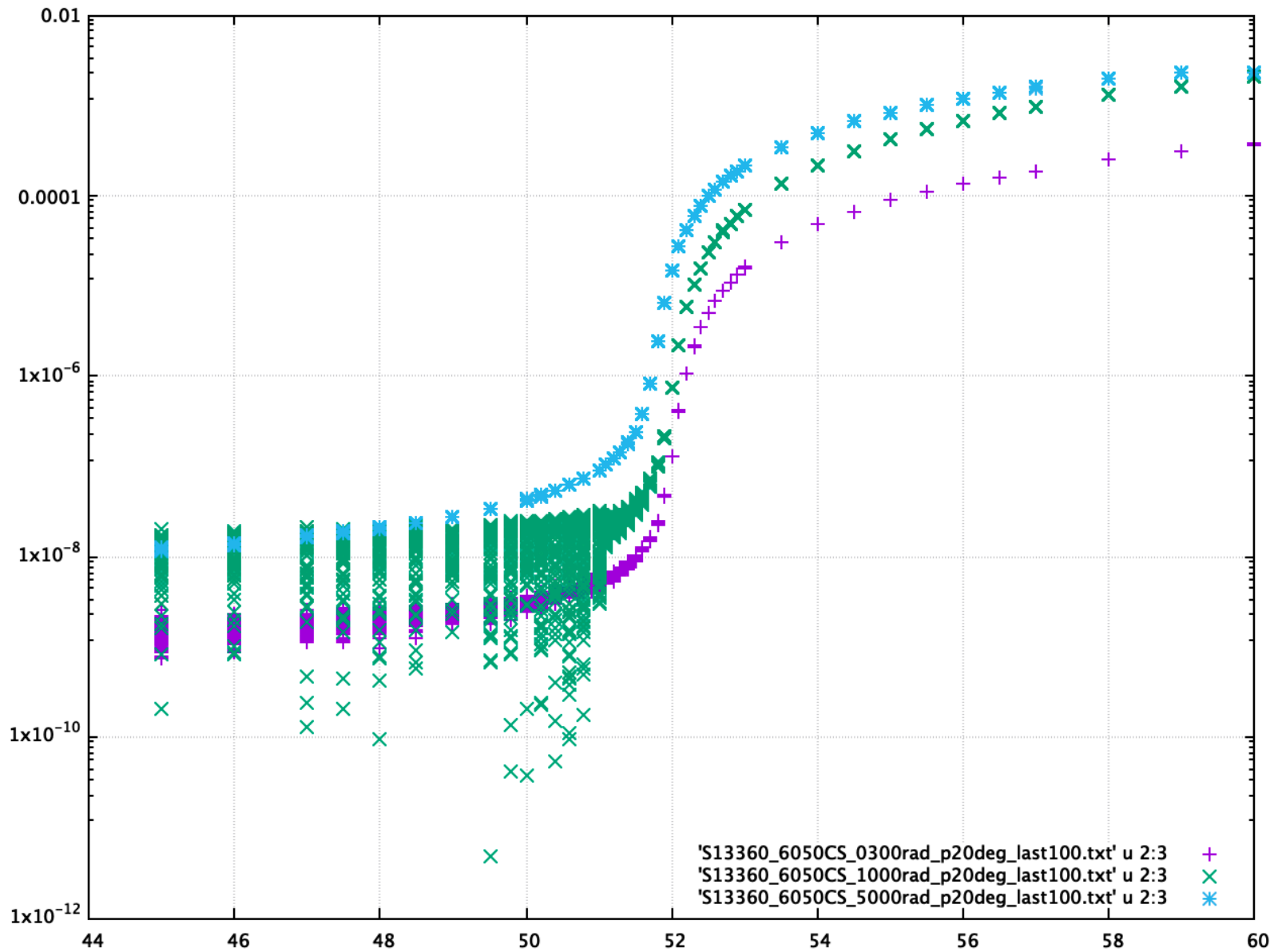


解析には、最後の  
100点の平均値を  
使った。

ただし、昨年のS13360については、  
IVの時間変動を考慮していない。

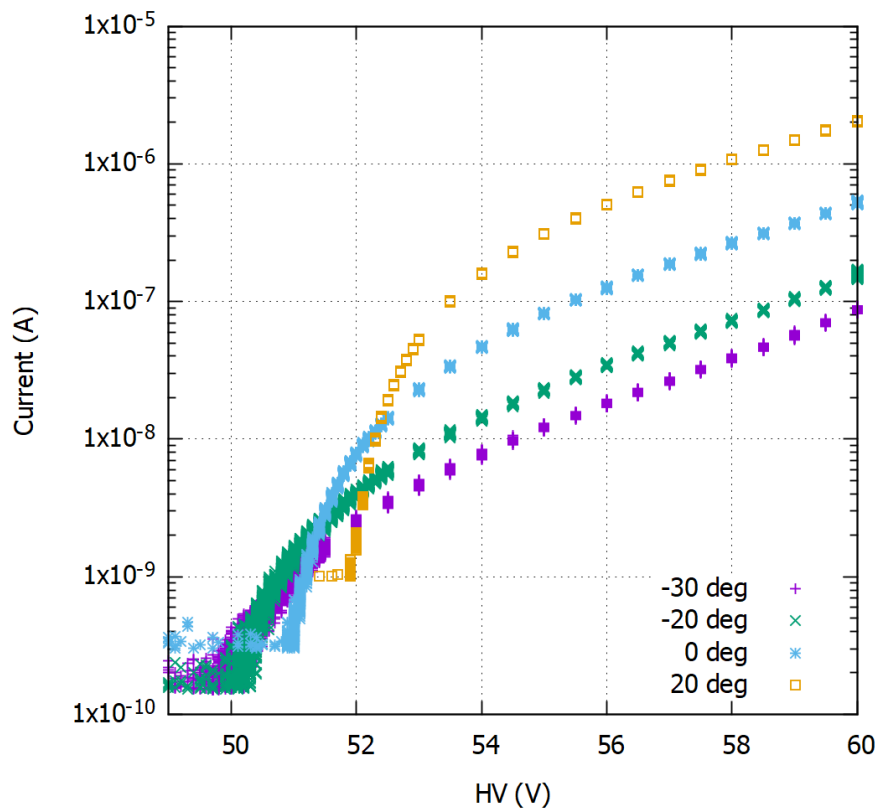
20分

# アニーリング?後のIV曲線

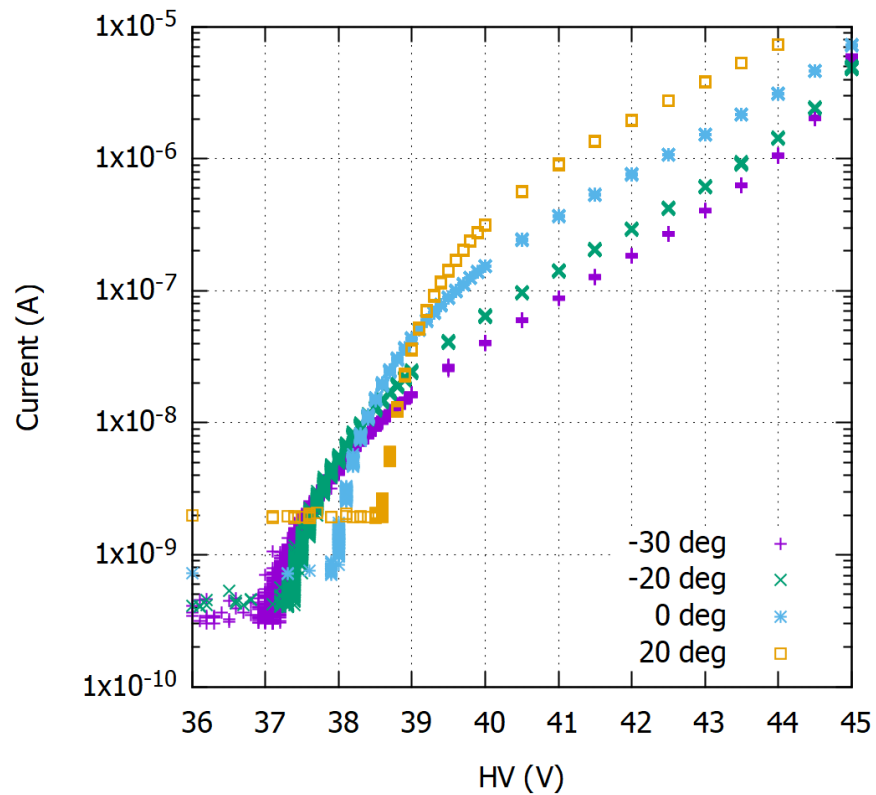




S13360-6050CS



S14160-6050HS



電氣的および光学的特性 (指定のない場合はTyp. Ta=25 °C)

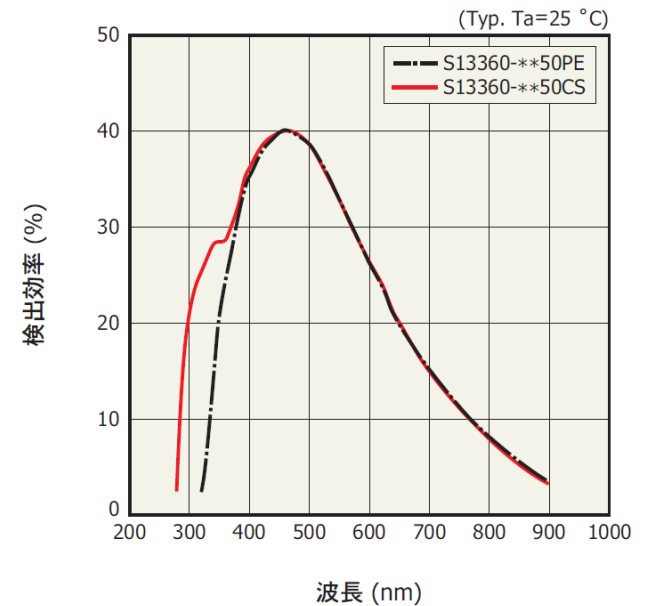
型名	測定条件	感度波長範囲 λ (nm)	最大感度波長 λ <sub>p</sub> (nm)	検出効率 PDE*4 λ=λ <sub>p</sub> (%)	ダークカウント*5		端子間容量 C <sub>t</sub> (pF)	増倍率 M	降伏電圧 V <sub>BR</sub> (V)	クロストーク確率 (%)	推奨動作電圧 V <sub>op</sub> (V)	推奨動作電圧の温度係数 ΔTV <sub>op</sub> (mV/°C)
					Typ.	Max.						
S13360-1325CS	Vover =5 V	270 ~ 900	450	25	70	210	60	7.0 × 10 <sup>5</sup>	53 ± 5	1	V <sub>BR</sub> + 5	54
S13360-1325PE		320 ~ 900										
S13360-3025CS		270 ~ 900										
S13360-3025PE		320 ~ 900										
S13360-6025CS		270 ~ 900										
S13360-6025PE		320 ~ 900										
S13360-1350CS	Vover =3 V	270 ~ 900		40	90	270	60	1.7 × 10 <sup>6</sup>	53 ± 5	3	V <sub>BR</sub> + 3	
S13360-1350PE		320 ~ 900										
S13360-3050CS		270 ~ 900										
S13360-3050PE		320 ~ 900										
S13360-6050CS		270 ~ 900										
S13360-6050PE		320 ~ 900										
S13360-1375CS	Vover =3 V	270 ~ 900		50	90	270	60	4.0 × 10 <sup>6</sup>	53 ± 5	7	V <sub>BR</sub> + 3	
S13360-1375PE		320 ~ 900										
S13360-3075CS		270 ~ 900										
S13360-3075PE		320 ~ 900										
S13360-6075CS		270 ~ 900										
S13360-6075PE		320 ~ 900										

\*4: 検出効率は、クロストークとアフターパルスを含んでいません。

\*5: 閾値=0.5 p.e.

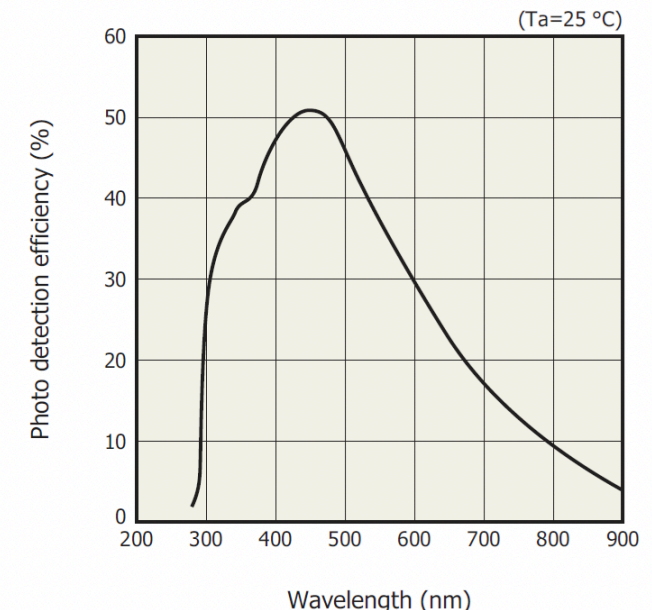
注) 上記の特性値は、表中の増倍率が得られる動作電圧における値です (製品に添付されるデータを参照してください)。

ピクセルピッチ: 50 μm



KAPDB0322JA

Photon detection efficiency vs. wavelength (typical)



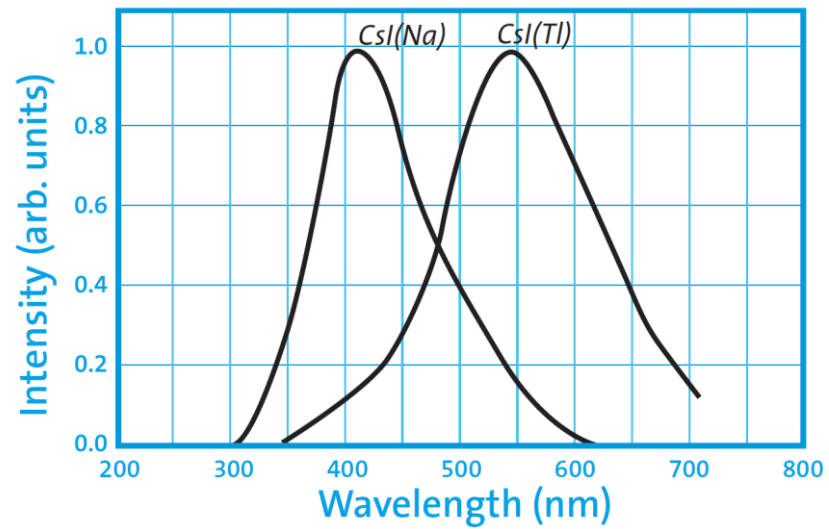
Electrical and optical characteristics (Typ. Ta=25 °C, overvoltage=2.7 V, unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	S14160/S14161 -3050HS-04, -08	S14160/S14161 -4050HS-06	S14160/S14161 -6050HS-04	unit
Spectral response range	λ	270 to 900			nm
Peak sensitivity wavelength	λ <sub>p</sub>	450			nm
Photon detection efficiency at λ <sub>p</sub> *3	PDE	50			%
Breakdown voltage	V <sub>BR</sub>	38			V
Recommended operating voltage*4	V <sub>op</sub>	V <sub>BR</sub> + 2.7			V
V <sub>op</sub> variation among channels in one array*5	Typ.	±0.05			V
	Max.	±0.1			
Dark current	Typ.	0.6	1.1	2.5	μA
	Max.	1.8	3.3	7.5	
Crosstalk probability	-	7			%
Terminal capacitance	C <sub>t</sub>	500	900	2000	pF
Gain	M	2.5 × 10 <sup>6</sup>			-
Temperature coefficient of recommended reverse voltage	ΔTV <sub>op</sub>	34			mV/°C

\*3: Photon detection efficiency does not include crosstalk and afterpulses.

\*4: Refer to the data attached for each product.

\*5: The parameter is for the S14161 series (multichannel type)



**Figure 1.** Scintillation emission spectrum of CsI