



将来衛星ミッションCAMELOTを
見据えた、光検出器MPPPCにおける
放射線耐性の影響の評価

平出 尚義^{*1}

高橋弘充^{*1},内田和海^{*1},廣瀬健吾^{*1},鳥越健斗^{*1},深沢泰司^{*1},水野恒史^{*2},大野雅功^{*3},
久富章平^{*4},中澤知洋^{*4},山岡和貴^{*5},羽鳥聡^{*6},久米恭^{*6},水嶋慧^{*6}

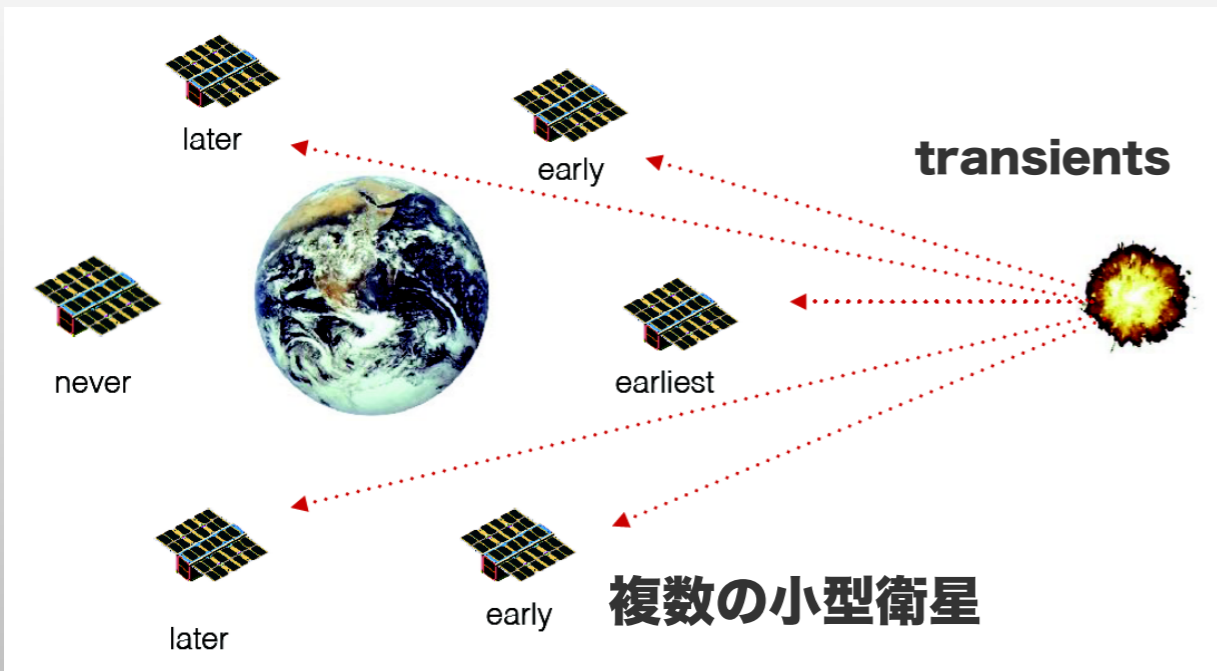
^{*1}:広島大学理学研究科, ^{*2}:広島大学宇宙科学センター, ^{*3}:Eotvos Univ. ^{*4}:名古屋大学理学研究科

^{*5}:名古屋大学宇宙地球環境研究所, ^{*6}:若狭湾エネルギー研究センター

CAMELOTに搭載される検出器の要求

1/8

CAMELOT : **C**ubeSats **A**ppplied for **ME**asuring and **LO**calizing **T**ransients



複数の小型衛星(キューブサット)を打ち上げ、

- 広い観測視野 ($>2\pi$)
- 高い決定精度 ($\sim \text{arcmin}$)

を持つガンマ線突発天体全天観測ミッション
→ 低電圧かつ高いゲインの検出器が必要

Si-PM(MPPC)

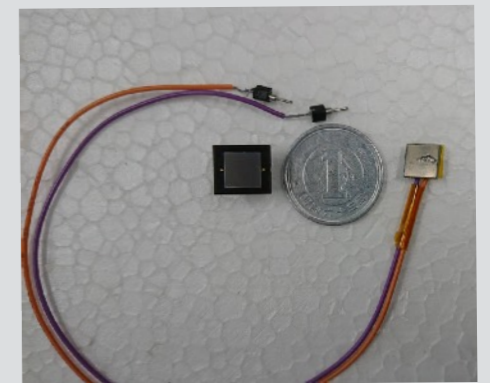
- 低電圧で作動($\sim 50\text{V}$)
- 高いゲイン($\sim 10^6$)
- サイズが小さい($\sim \text{mm}$)

+

CsI(Tl) シンチレータ

- 光量 大
(56000光子/MeV)

を使用



左:S13360-6050CS
右:S14160-6050HS

MPPCは宇宙空間で使用された実績がほとんどなく、今回新しい型番が発売されたので放射線耐性が向上しているか調べた。

MPPCが衛星軌道上の環境に耐えうるかを調べる。

①昨年度、浜松ホトニクス製MPPC S13360-6050CS(旧型)に対して宇宙線を模擬した 200 MeVの陽子を300 rad, 1000 rad, 5000 rad相当照射した。照射後7ヶ月でアニーリングによる性能回復があったかを調べる。

②浜松ホトニクス製MPPC S14160-6050HS(新型)に対して昨年と同様の実験を行い、S13360-6050CS(旧型)と比較し、どちらの方が放射線耐性が高いのかを調べる。

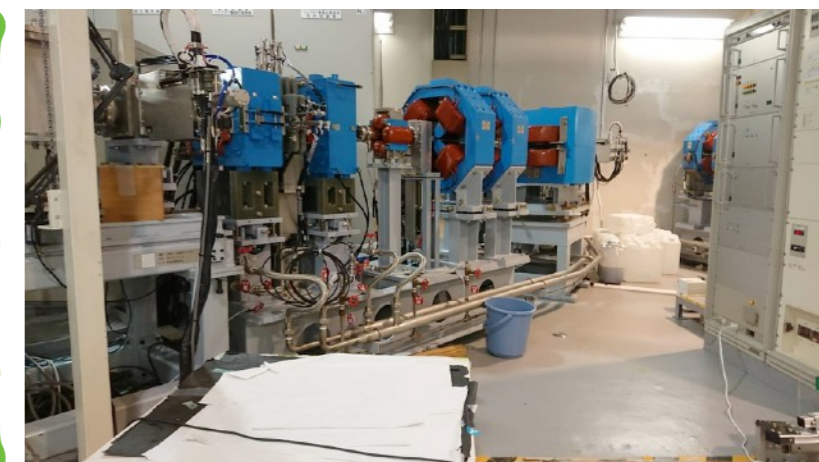
MPPCに200 MeVの陽子を300 rad, 1000 rad(1年分), 5000 rad相当照射し、1cm角のCsIを用いて読み出した。



若狭湾エネルギー研究センター

評価項目

- ① : 暗電流・スペクトルの変化
- ② : エネルギースレッシュホールドの変化



ビームライン

2度、若狭湾エネルギー研究センターにて実験

1度目 : 2018年 11月

• S13360-6050CS(旧型)

($V_{op} = 55.0$ V)

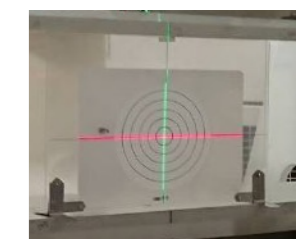
300 , 1000, 5000 rad 照射

2度目 : 2019年 5月

• S14160-6050HS(新型)

($V_{op} \sim 41.0$ V)

300 , 1000, 5000 rad 照射



放射線照射後にMPPCを大学へ持ち帰り、以下の**3種類**のスペクトル測定を行なった。

照射線源

- ^{241}Am (59.5 keV)
- ^{109}Cd (22.2, 88.0 keV)

測定

- S13360-6050CS (旧型, 放射線照射直後)
 - S13360-6050CS (旧型, 照射後7ヶ月経過)
 - S14160-6050HS (新型, 放射線照射直後)
- 温度 -30 , -20, 0, +20 °C

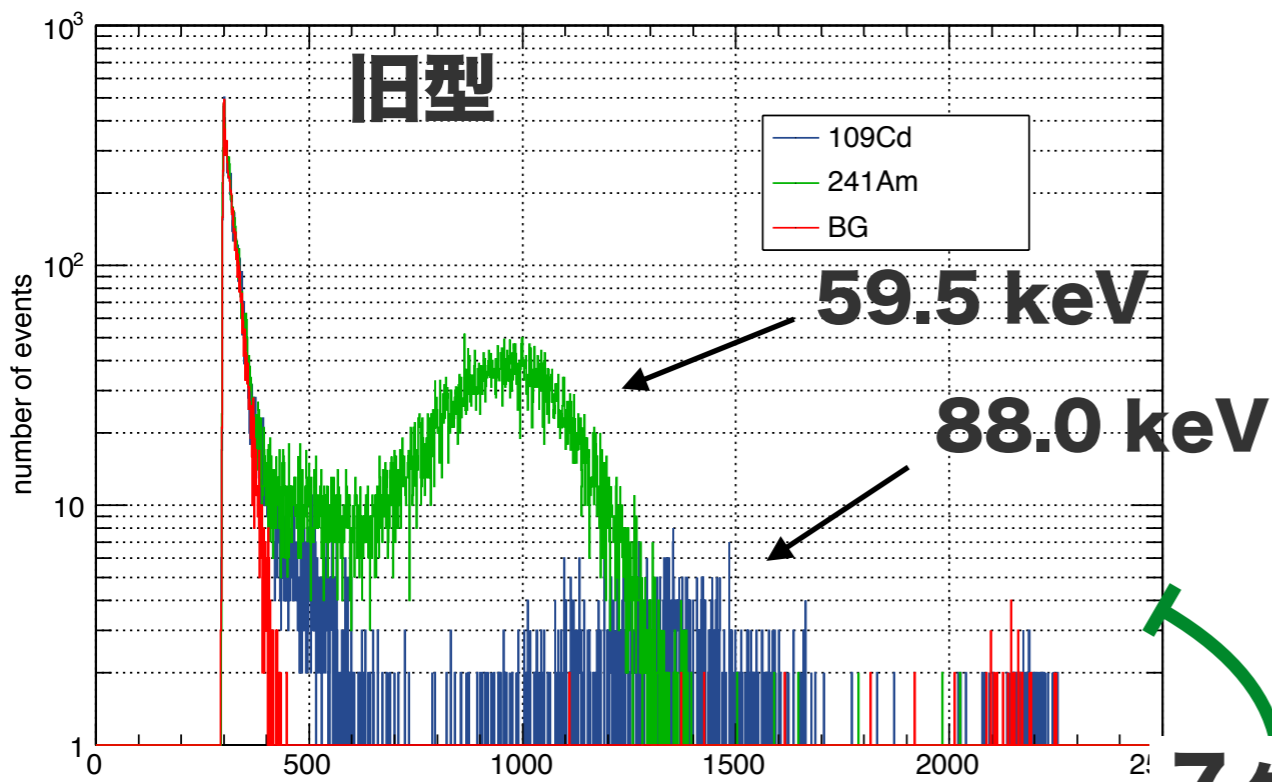


実際の回路

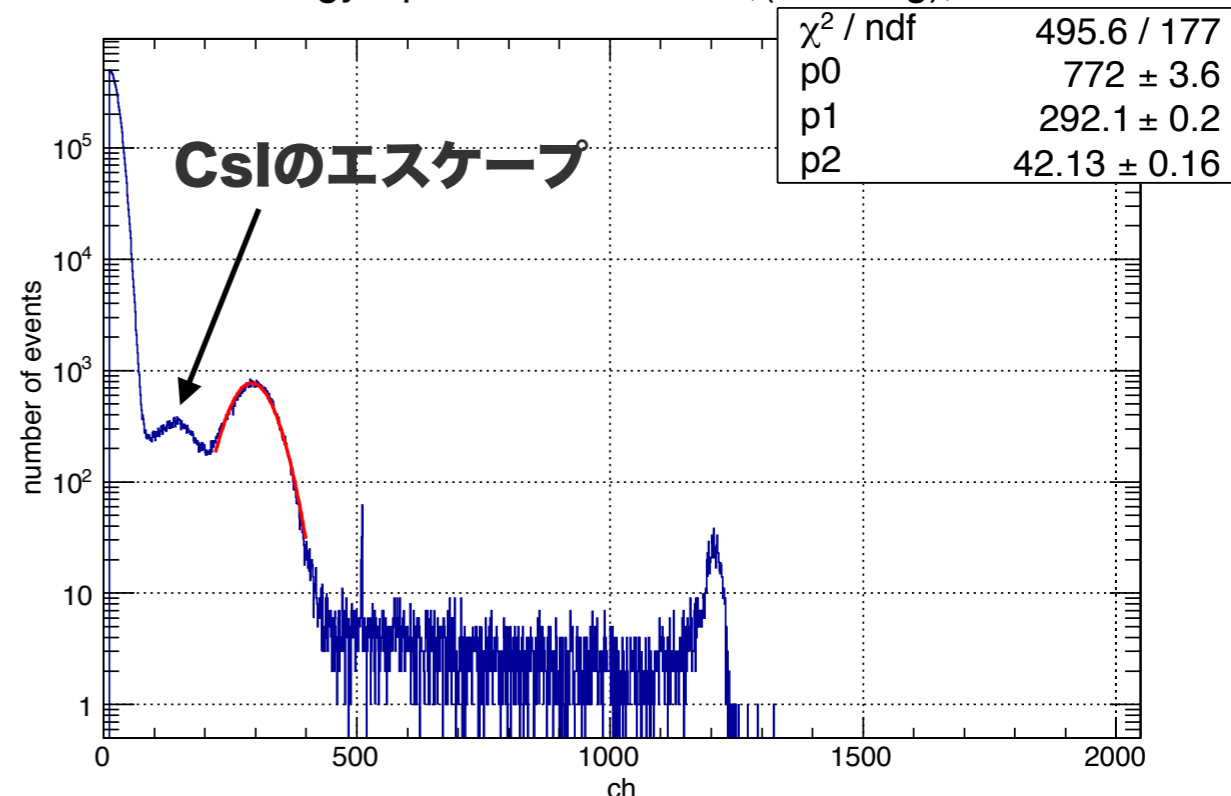
7ヶ月経過によるS13360(旧型)のスペクトル変化

4/8

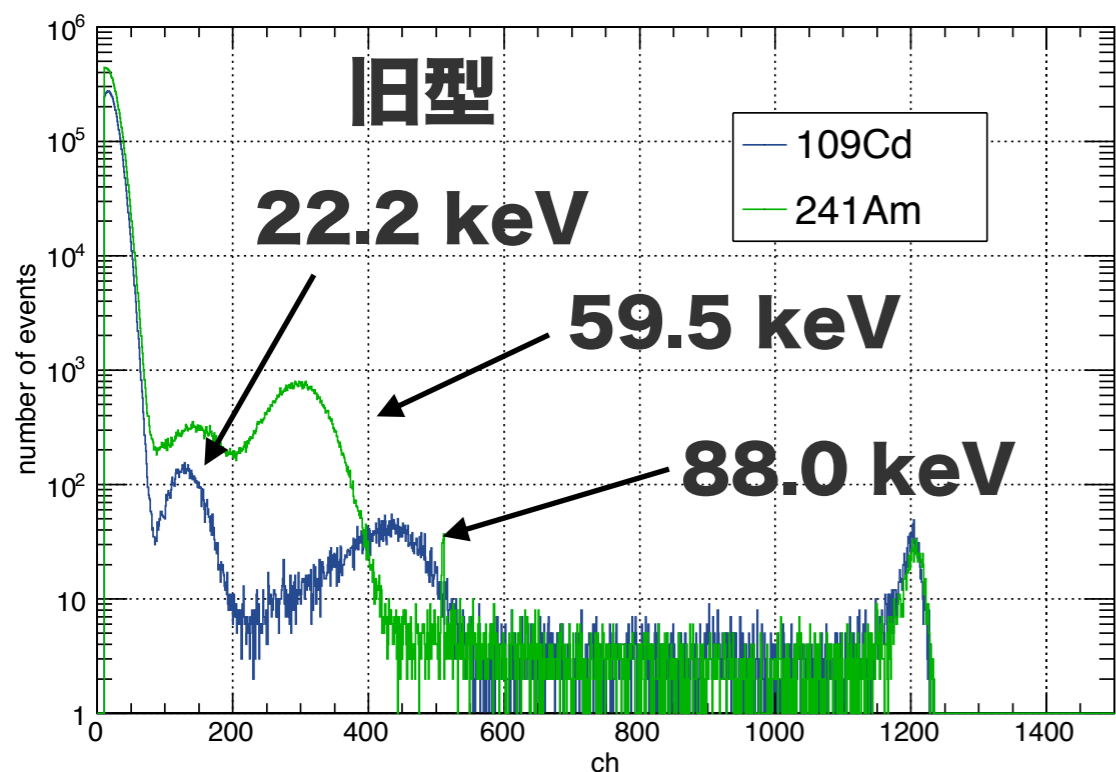
S13360, 照射直後, 300 rad@-30°C, 55V
Energy Spectrum of 300rad mppc at m30deg



Energy Spectrum of 300rad,(m30deg),Am



S13360, 7ヶ月後, 300rad@-30°C, 55V
Energy Spectrum of 300rad mppc at m30deg



7ヶ月

241Amピークのfitの一例

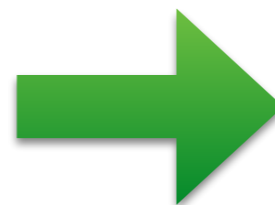
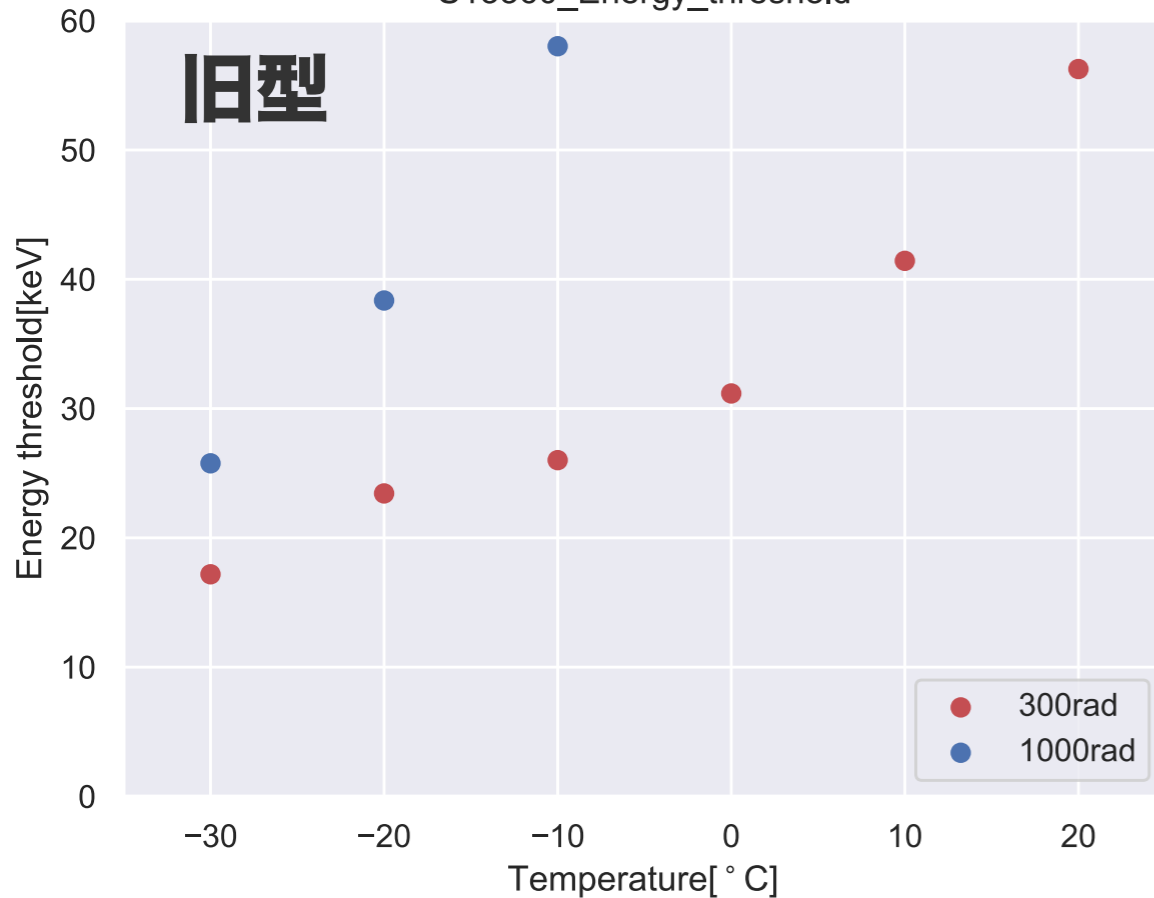
^{109}Cd の22.2 keVピークが見えている。
→ 実験のセットアップ(線源の位置やシンチレータの個体差)は多少違うが、7ヶ月間のアニーリングによる性能回復が見られる。

- ① ^{241}Am (59.5keV) と ^{109}Cd (88.0keV) のピークchから校正直線を作成.
 - ② 校正直線からエネルギーレスシヨルドを計算.
- エネルギーレスシヨルド: BGスペクトルをガウス関数でfit, 4σ の値.

S13360, 照射直後, $V_{op}=55V$

S13360_Energy_threshold

旧型

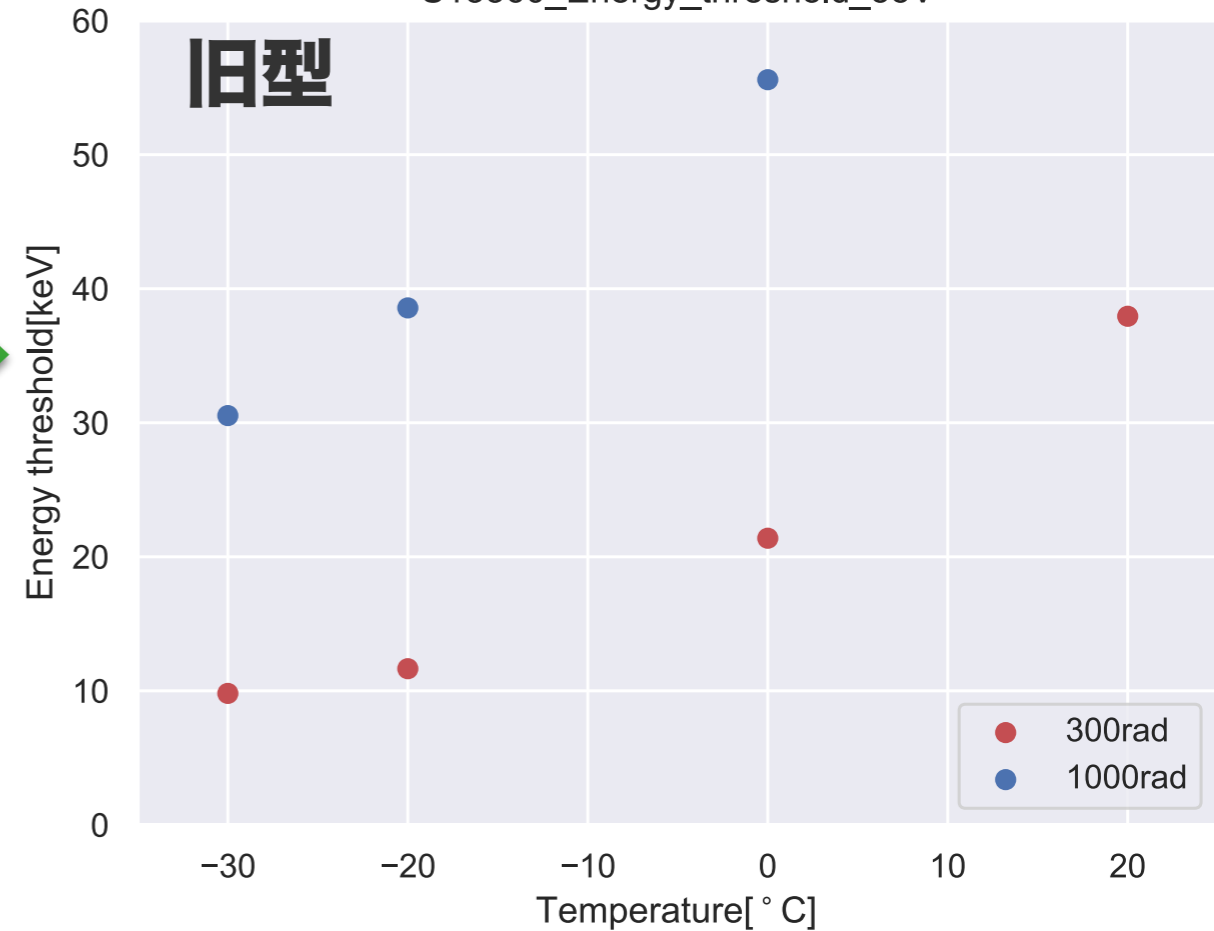


7ヶ月後

S13360, 7ヶ月後, $V_{op}=55V$

S13360_Energy_threshold_55V

旧型



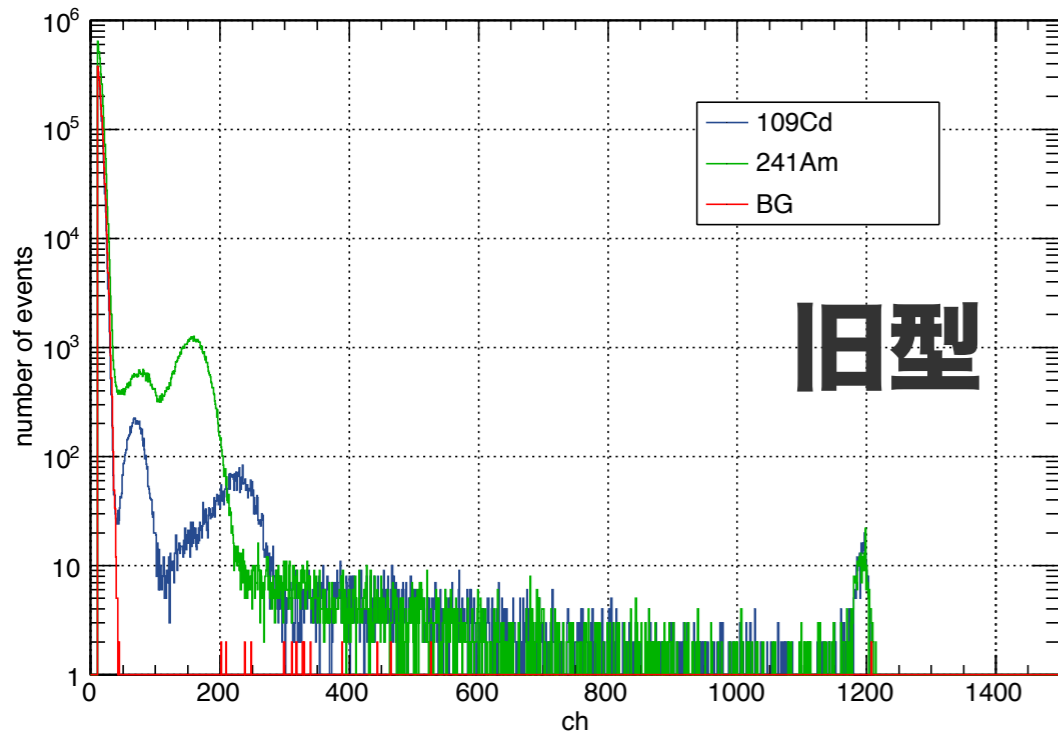
Result

- S13360のエネルギーレスシヨルドが去年より良くなった。→7ヶ月でリカバリーした。

S13360(7ヶ月後)とS14160のスペクトル比較

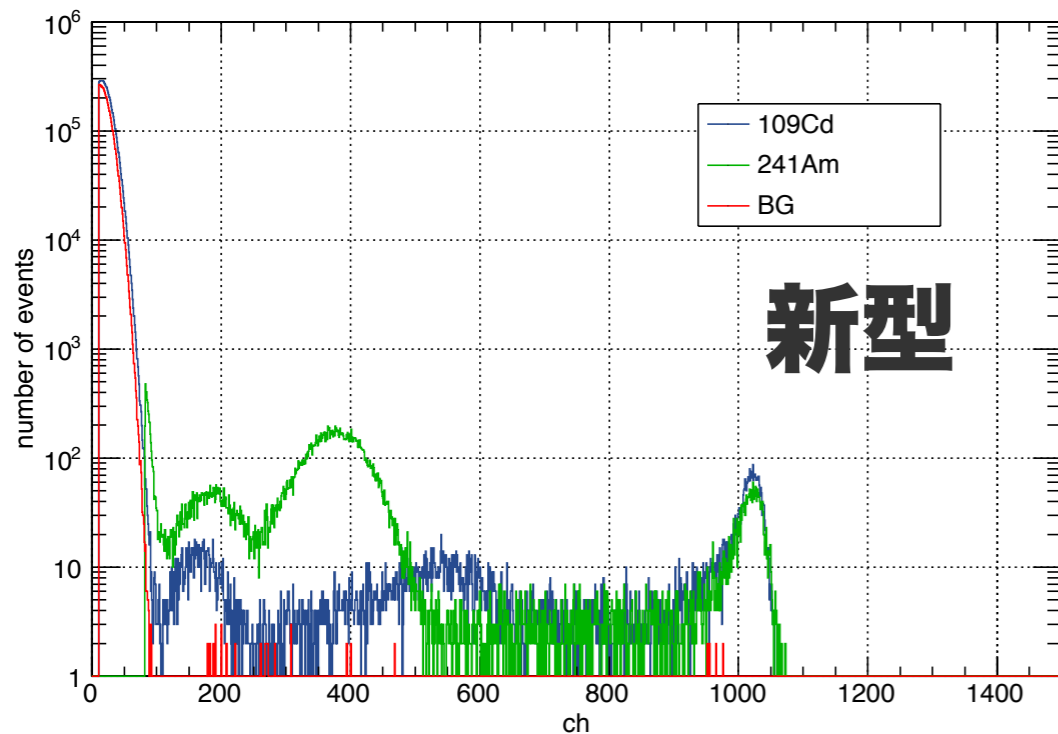
6/8

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

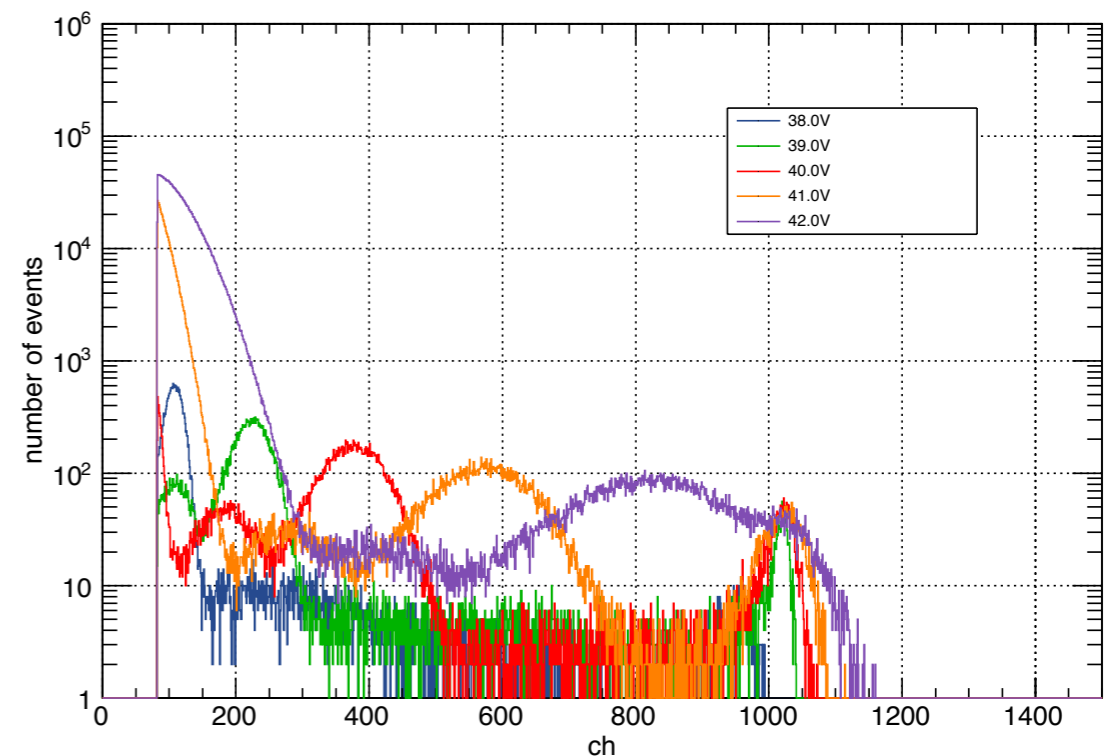


- 7ヶ月後のS13360
 - 照射直後のS14160
- のスペクトルを比較
印加電圧=S/N比が良い

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

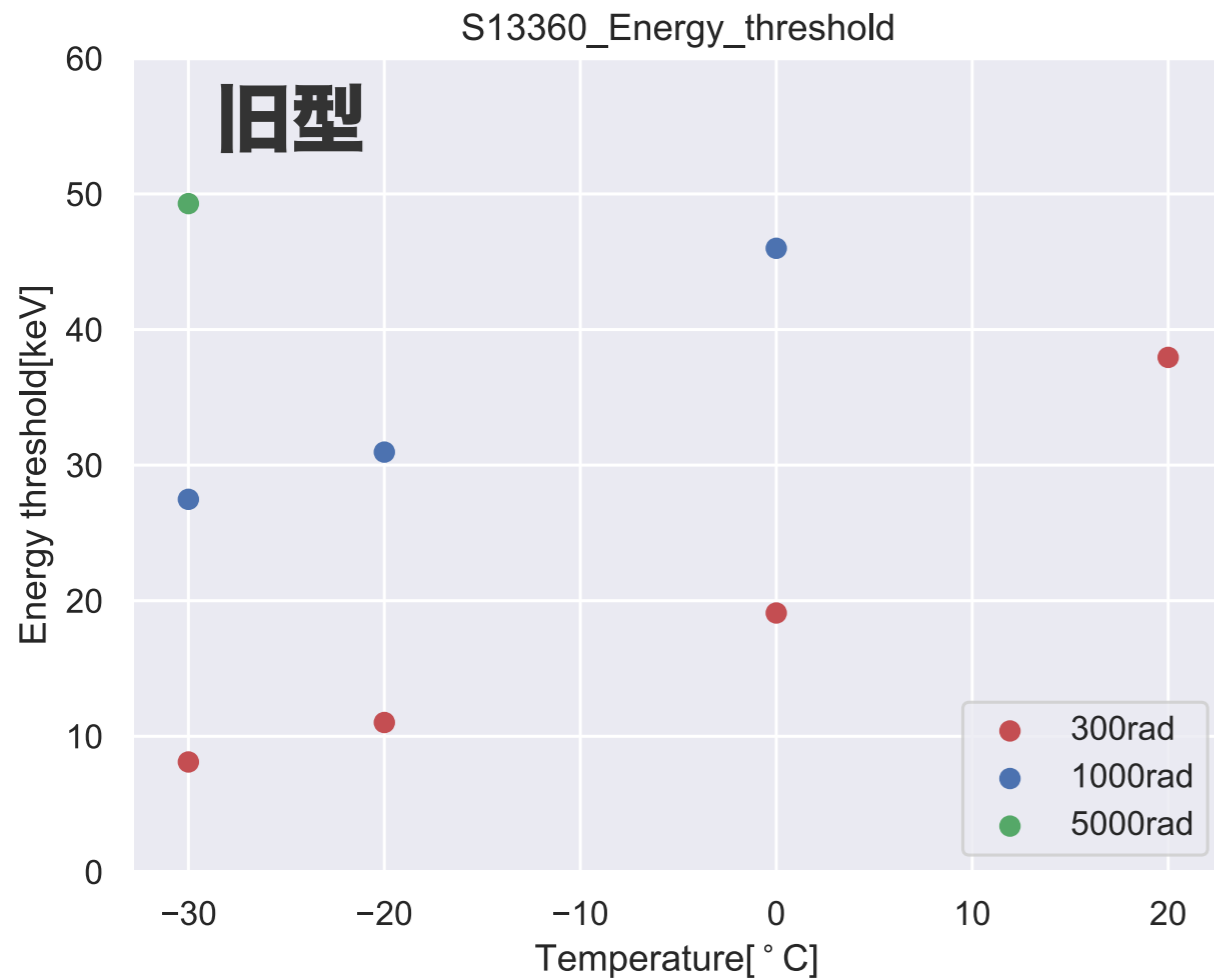


S14160, 照射直後, 300rad@-30°C,
電圧変化(38V ~ 42V)
Energy Spectrum of 300rad mppc at m30deg

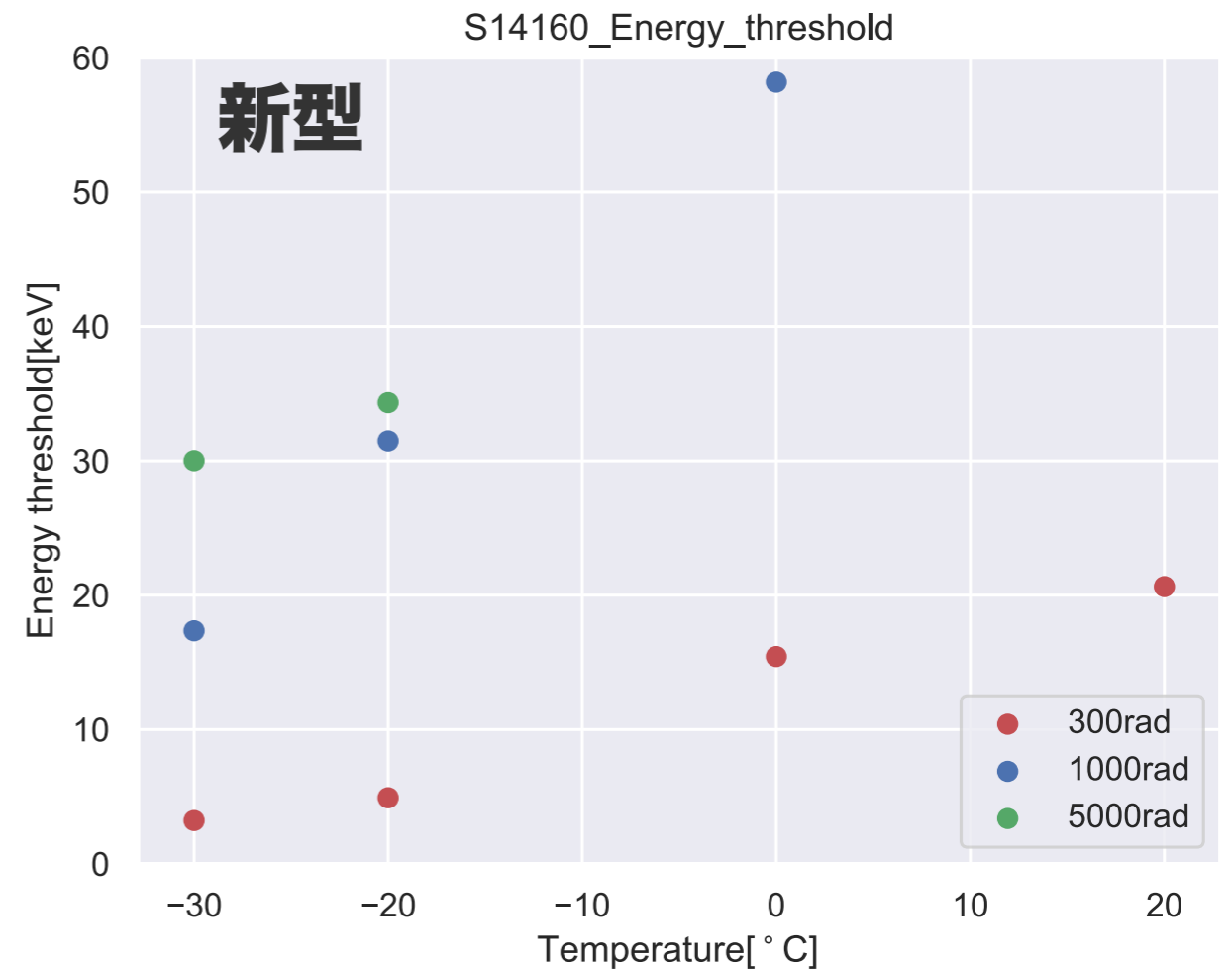


S13360とS14160のエネルギーレスショルドの比較 7/8

S13360, 7ヶ月後, $V_{op}=S/N$ がもっとも良い電圧



S14160, 照射直後, $V_{op}=S/N$ がもっとも良い電圧



Result

- 300 rad, 5000 radにおいては新型の方がエネルギーレスショルドが良い。
- 1000 rad は同程度のエネルギーレスショルドだった。
これは1000 radのみ小分けに照射したことが原因だと思われる。
(100 → 300 → 500 → 1000 rad)

目的

- 若狭湾エネルギー研究センターで 200MeVプロトンを照射し、
新型(S14160)が衛星軌道上の環境に耐えうるかを調べた。
- 照射後アニーリングによる性能回復があるかを調べた。

結果

- 旧型(S13360)は7ヶ月の室温アニーリングによって性能が回復した。
- 7ヶ月後の旧型と照射直後の新型の性能は同程度。
- 新型をCAMELOTへの採用を検討。

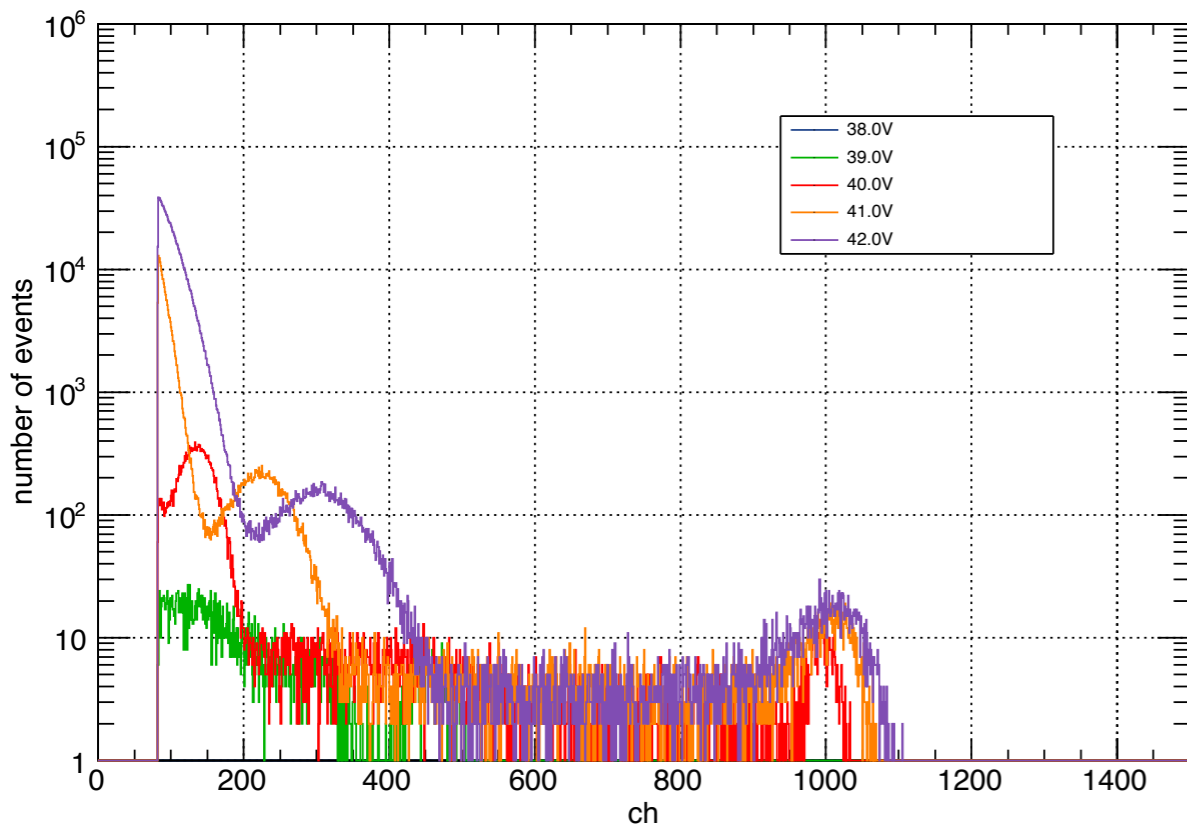
今後

新型にもアニーリングによる性能回復がある可能性が高いので、
今後は十分時間たった新型のエネルギースレッシュホールドを測定する予定。

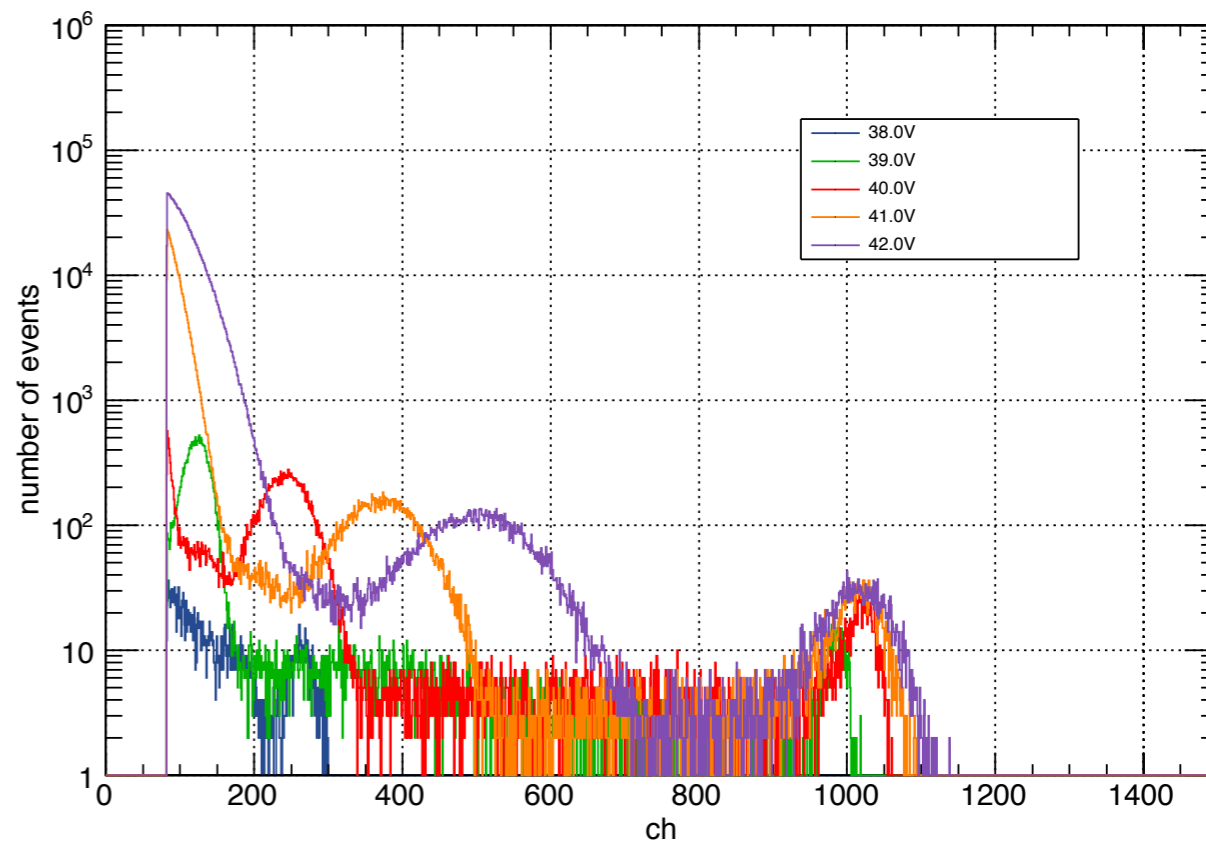
補足 スライド

ゲイン依存性(S14160,300rad)

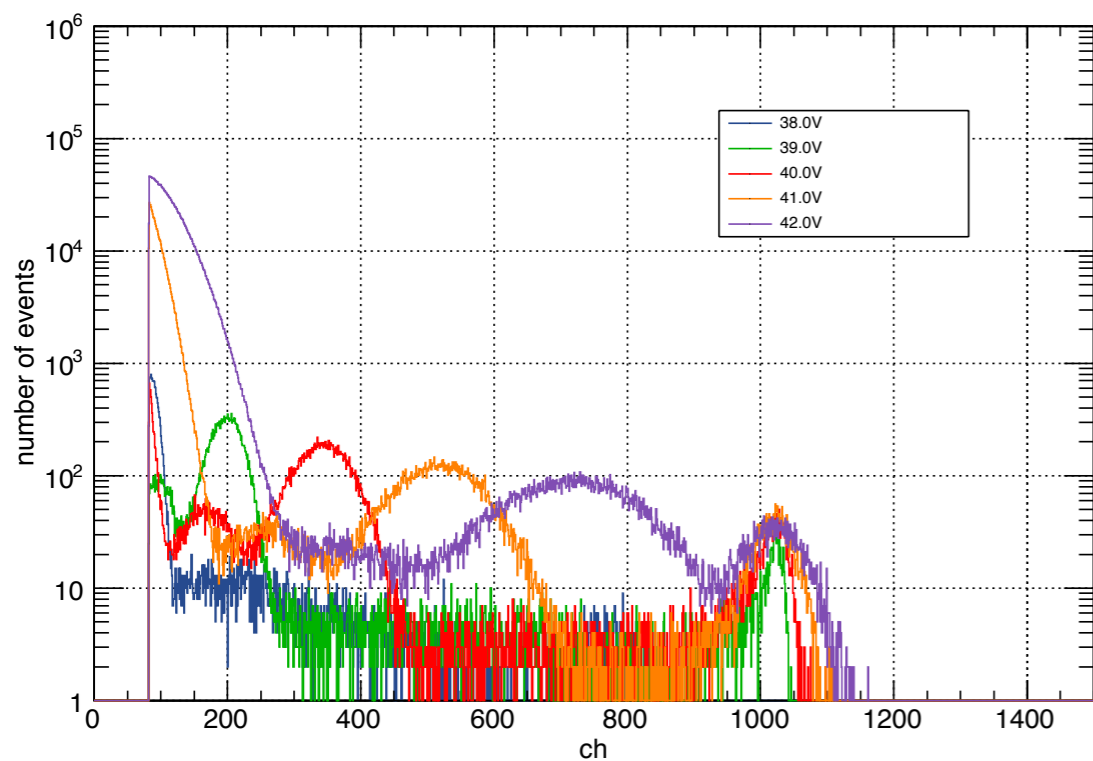
Energy Spectrum of 300rad mppc at p20deg



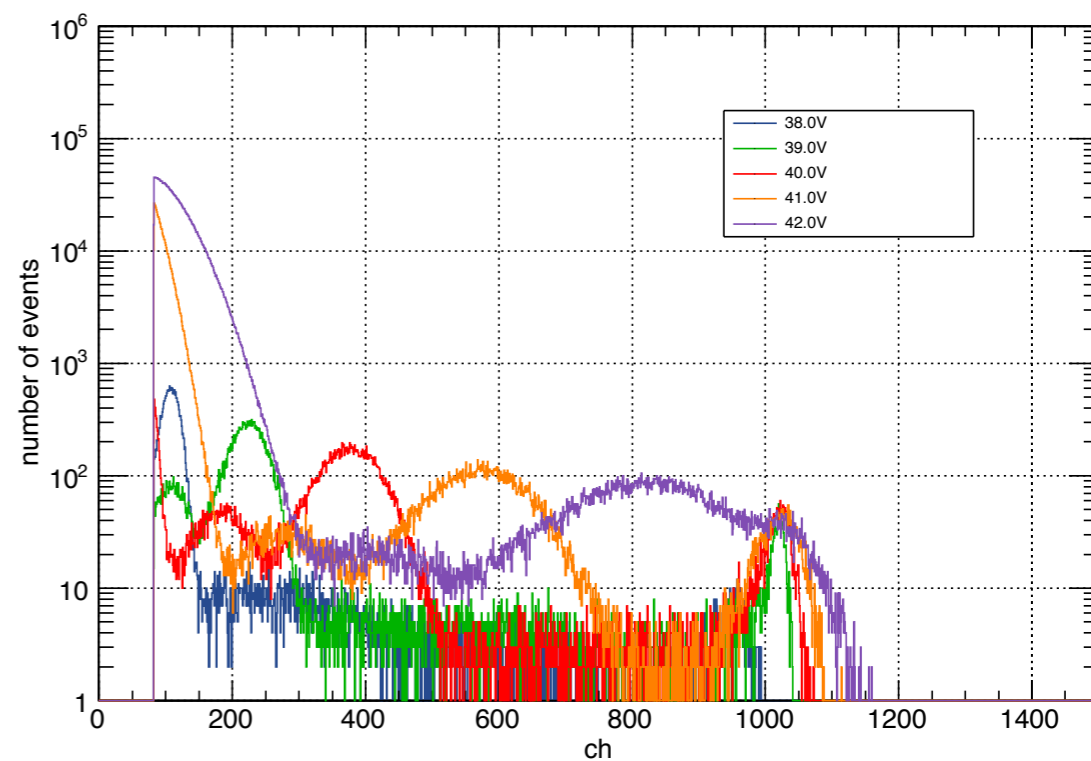
Energy Spectrum of 300rad mppc at 0deg



Energy Spectrum of 300rad mppc at m20deg

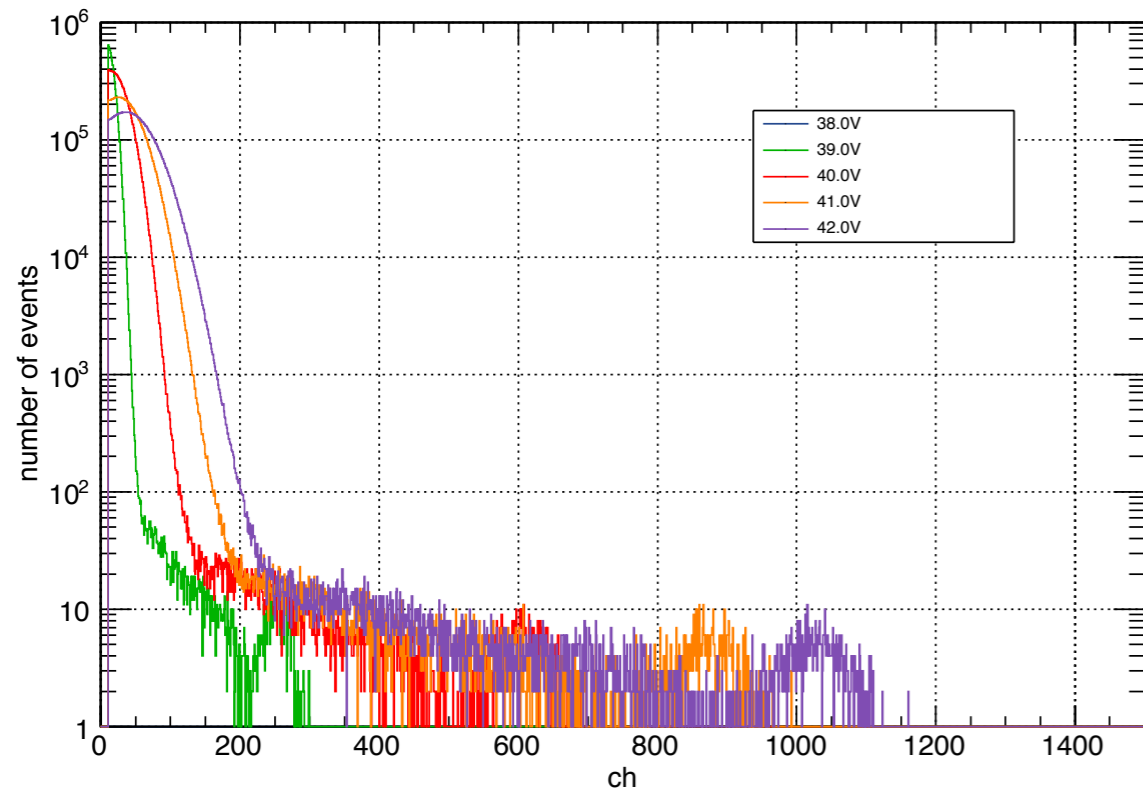


Energy Spectrum of 300rad mppc at m30deg

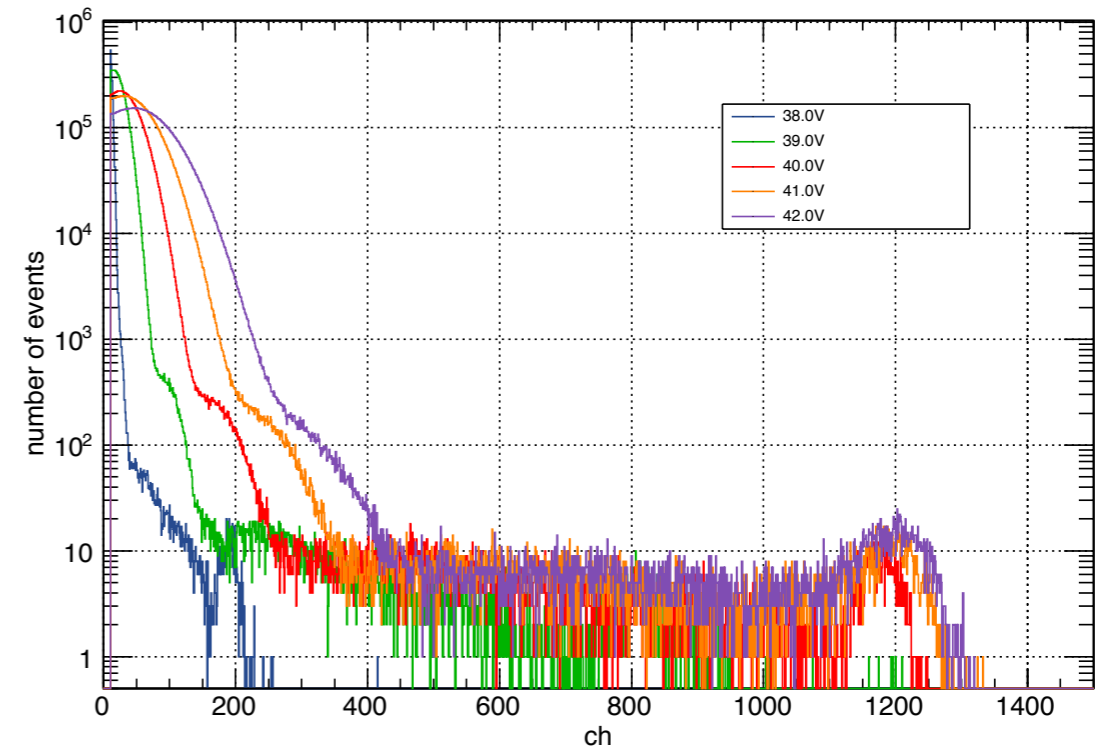


ゲイン依存性(S14160, 1000rad)

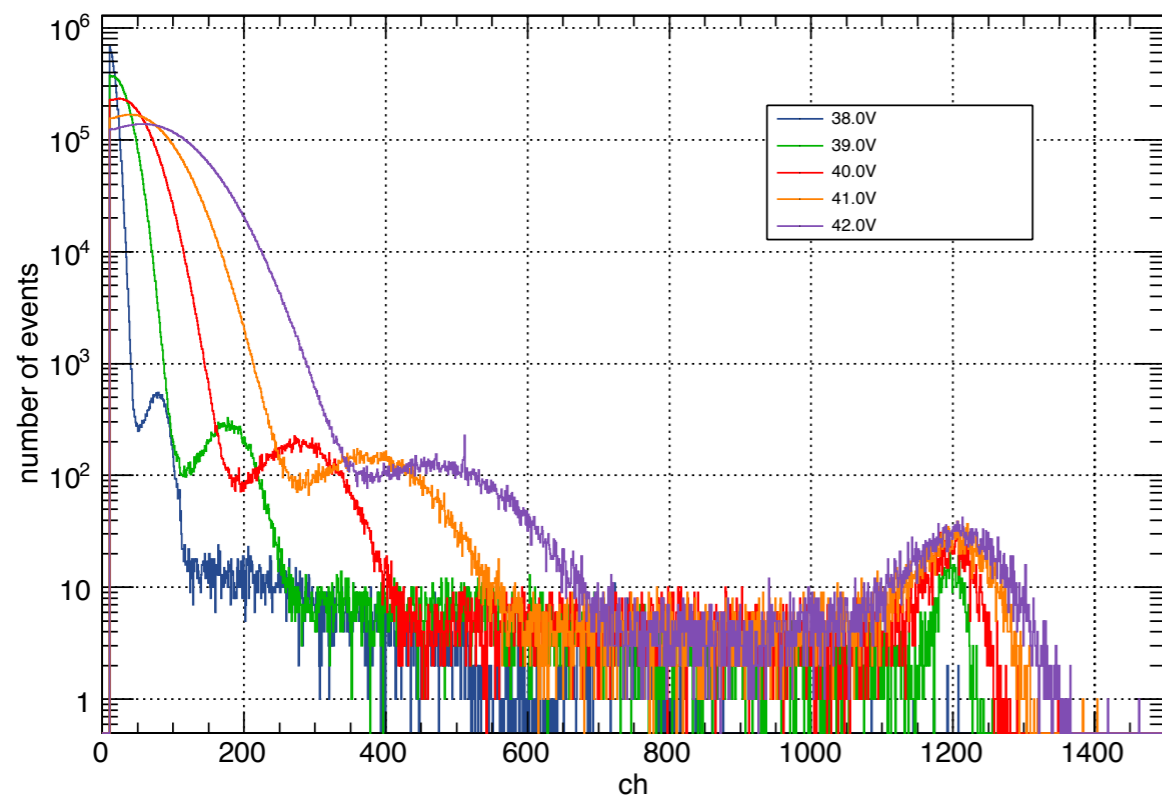
Energy Spectrum of 1krad mppc at p20deg



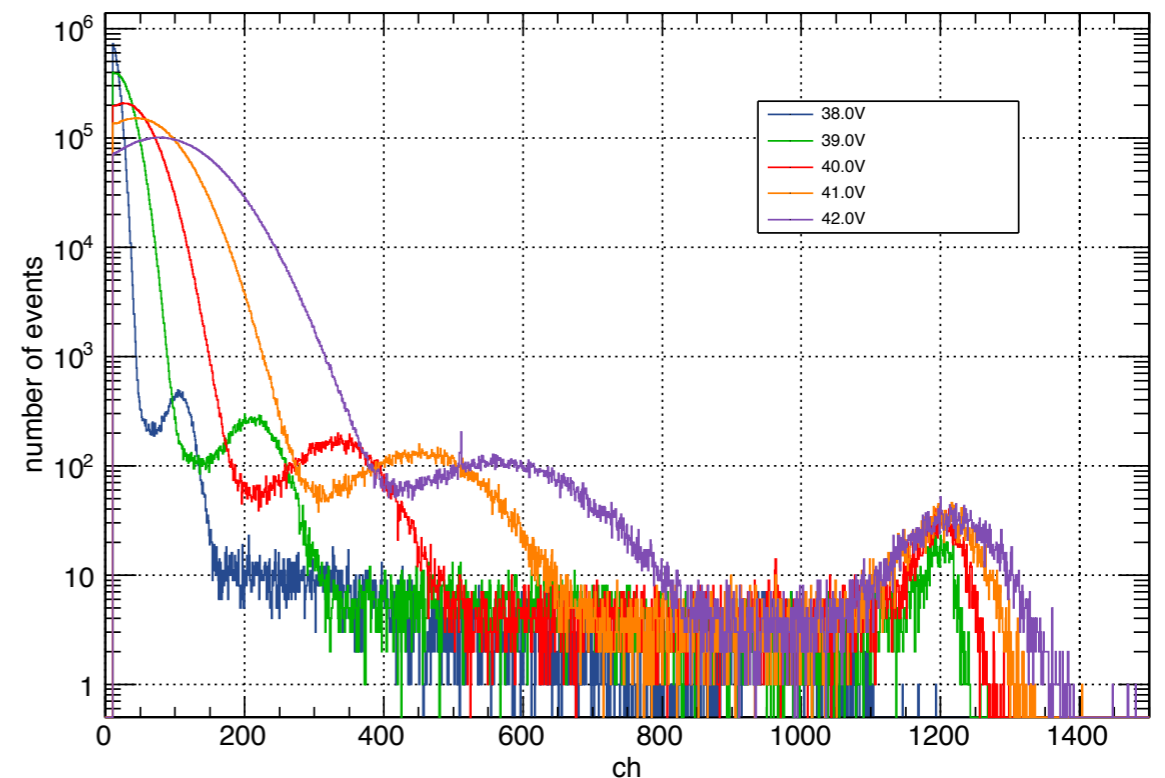
Energy Spectrum of 1krad mppc at 0deg



Energy Spectrum of 1krad mppc at -20deg

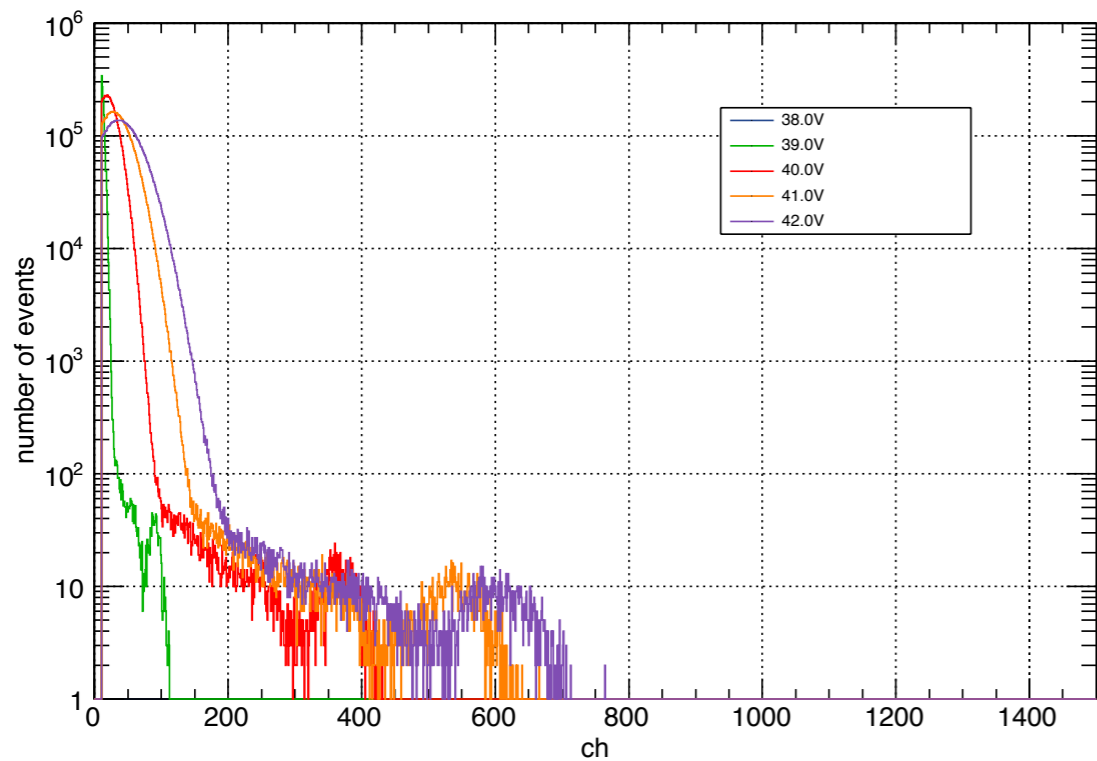


Energy Spectrum of 1krad mppc at -30deg

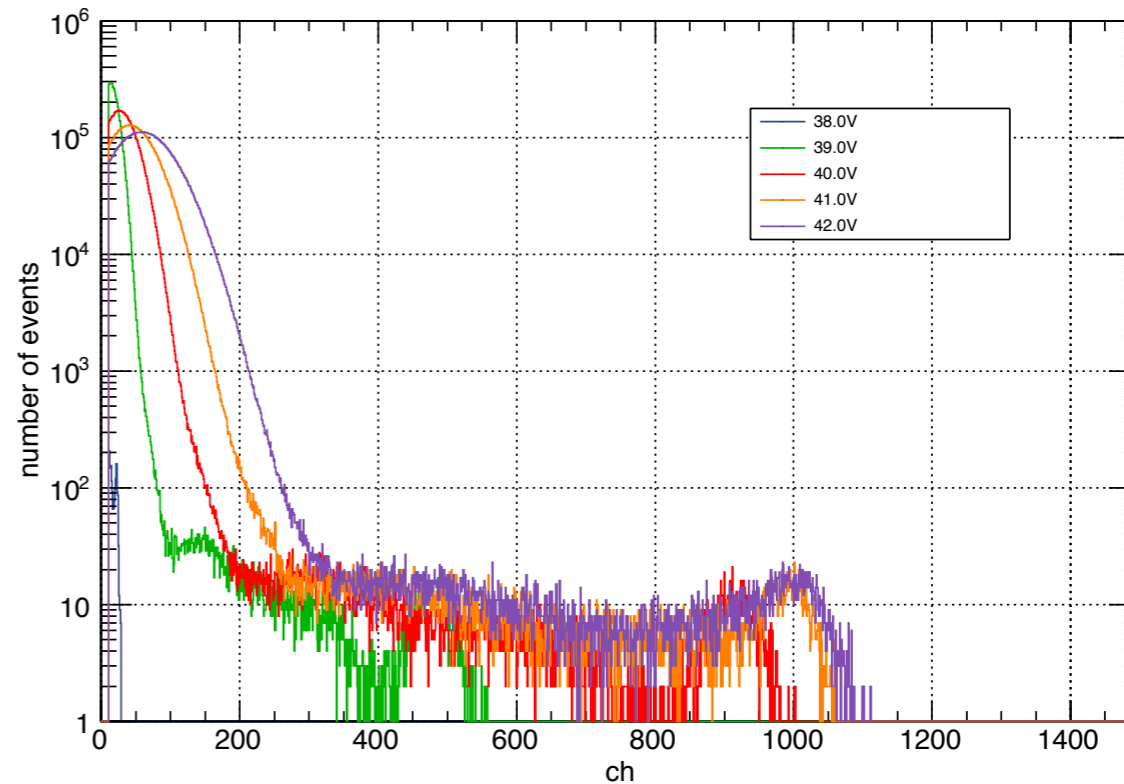


ゲイン依存性(S14160,5000rad)

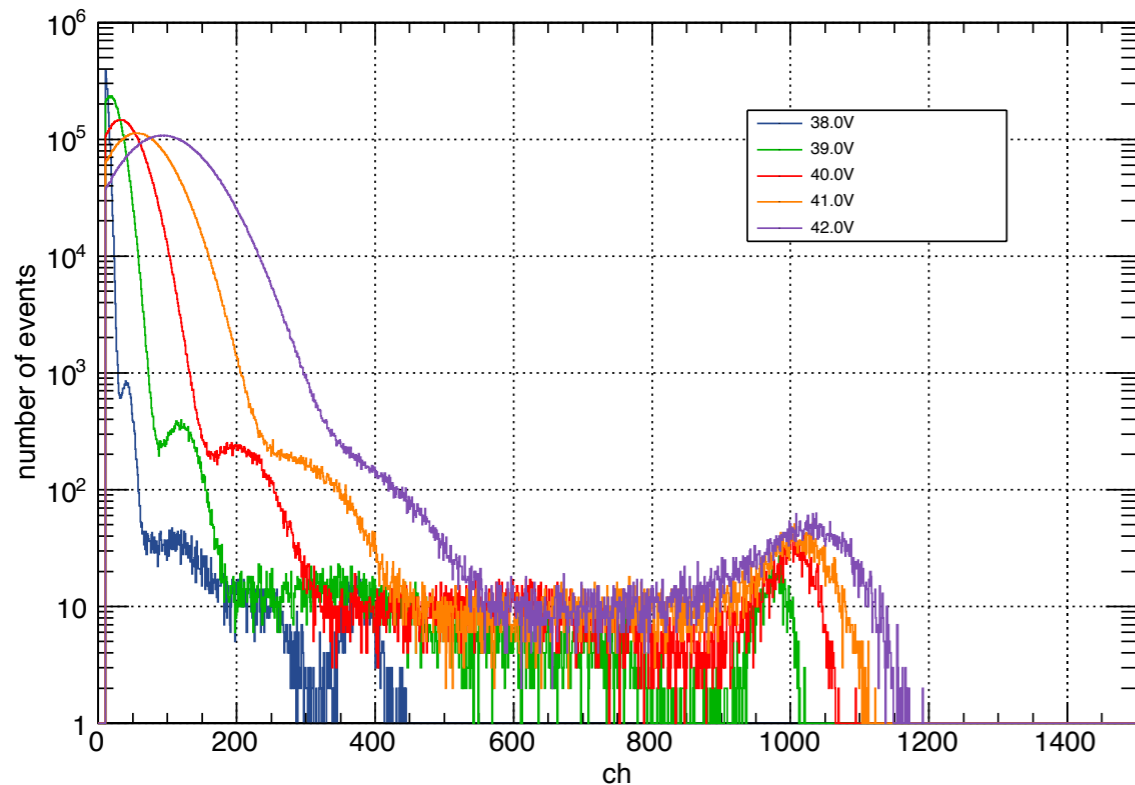
Energy Spectrum of 5krad mppc at p20deg



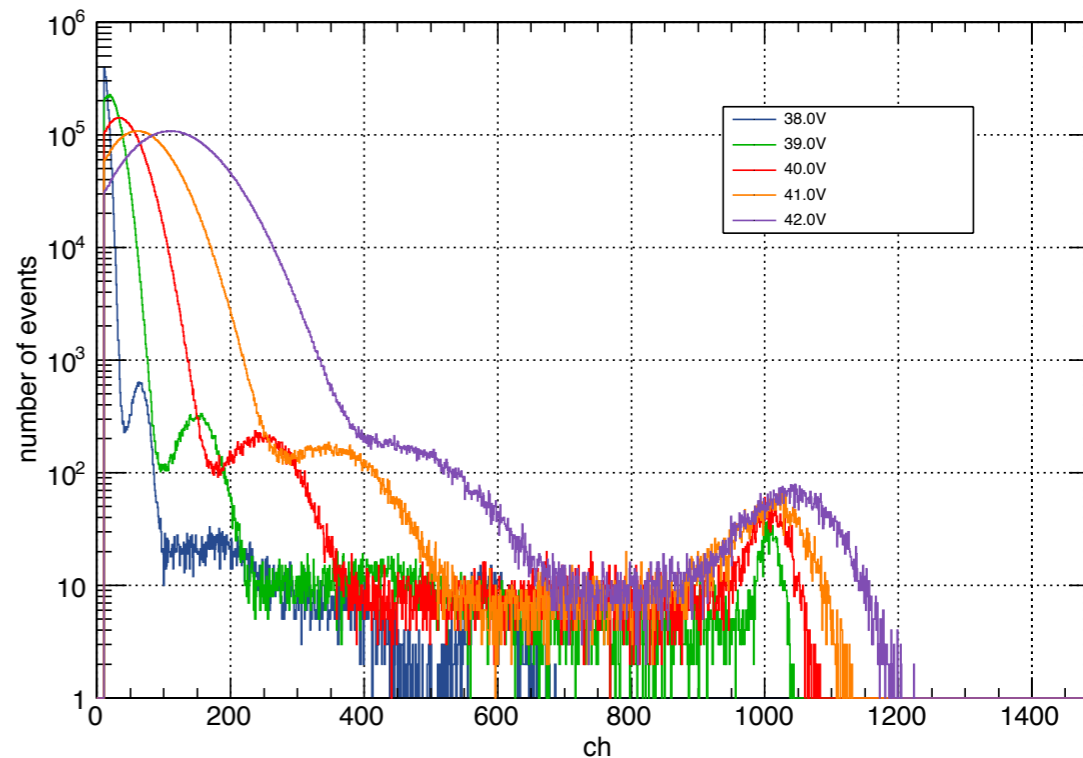
Energy Spectrum of 5krad mppc at 0deg



Energy Spectrum of 5krad mppc at m20deg



Energy Spectrum of 5krad mppc at m30deg

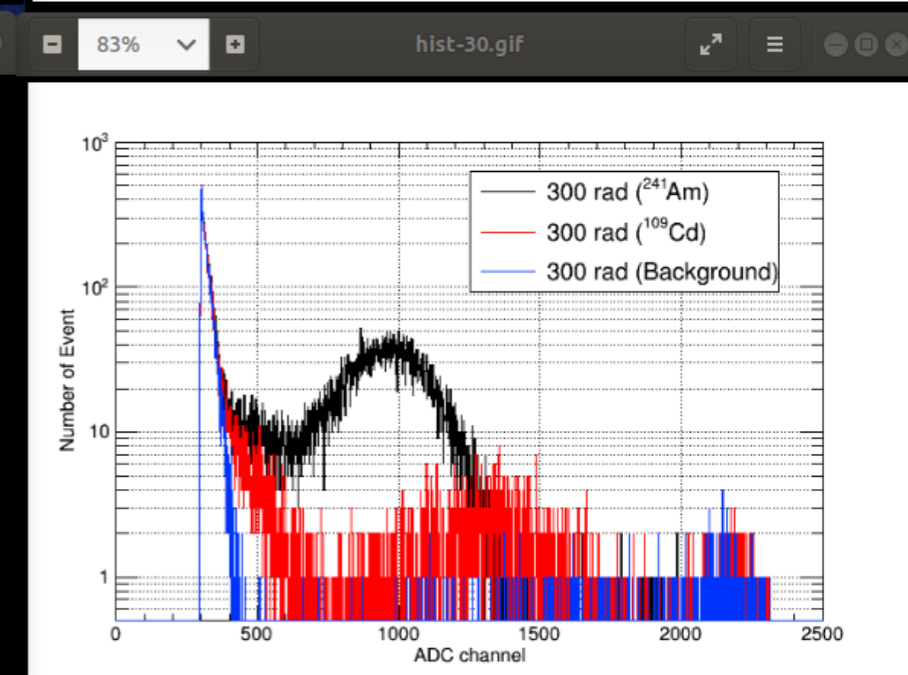
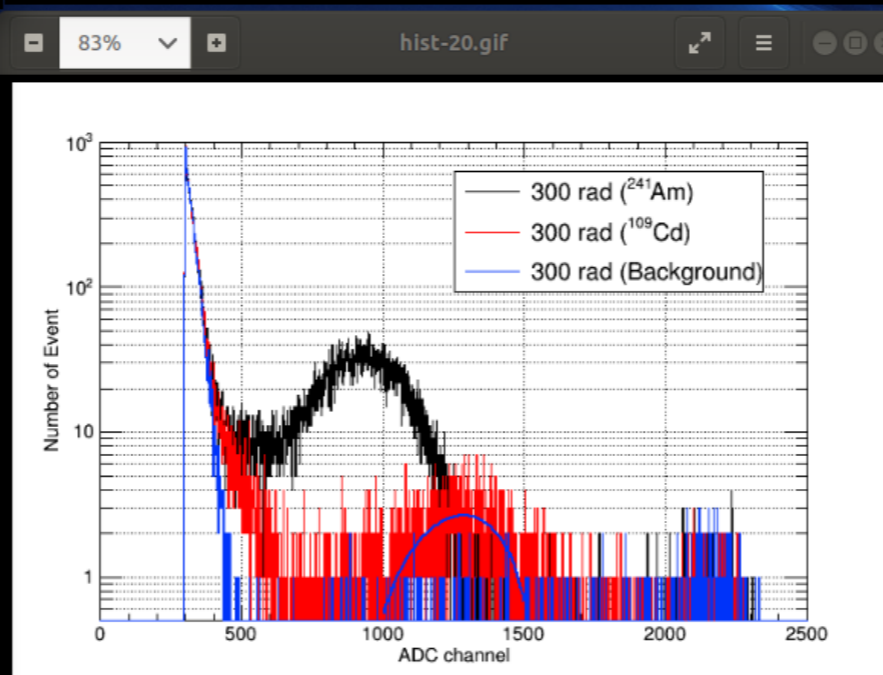
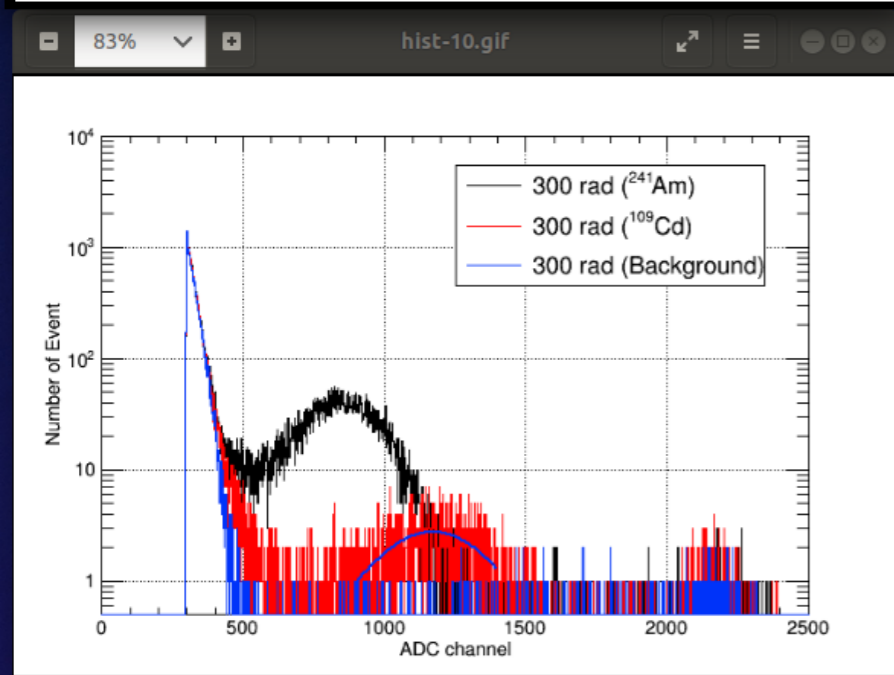
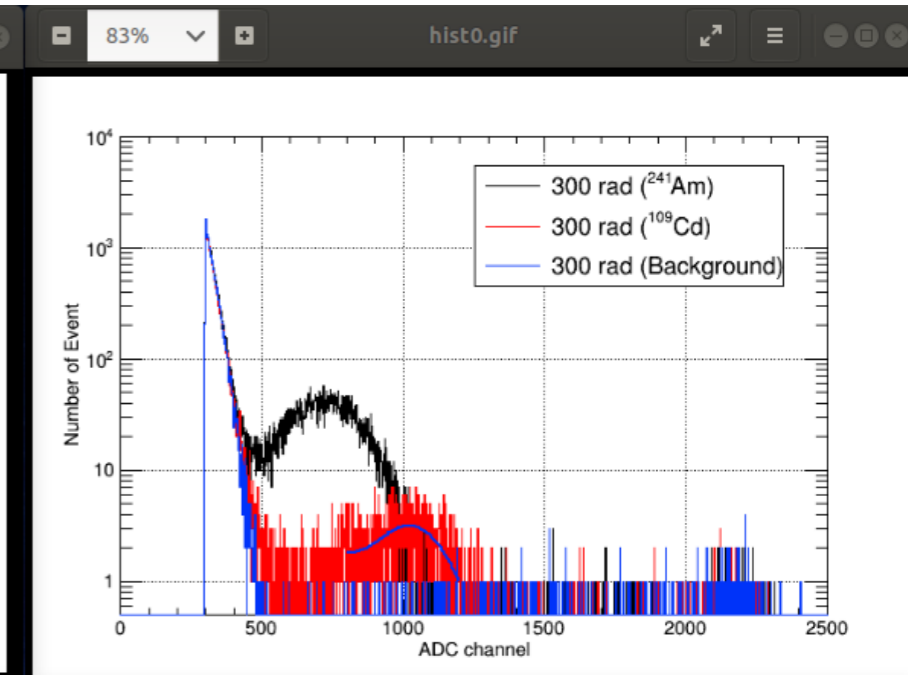
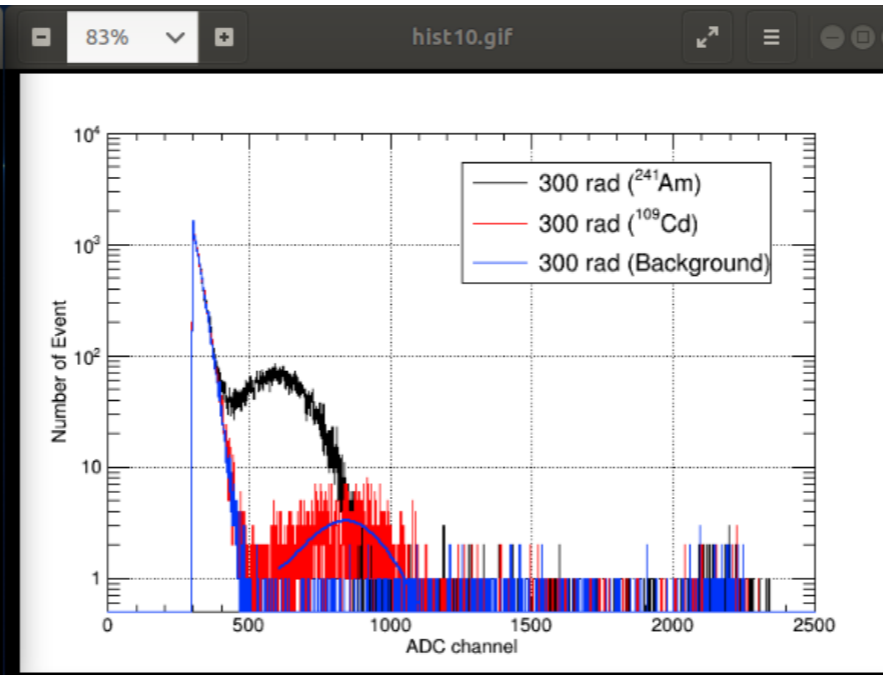
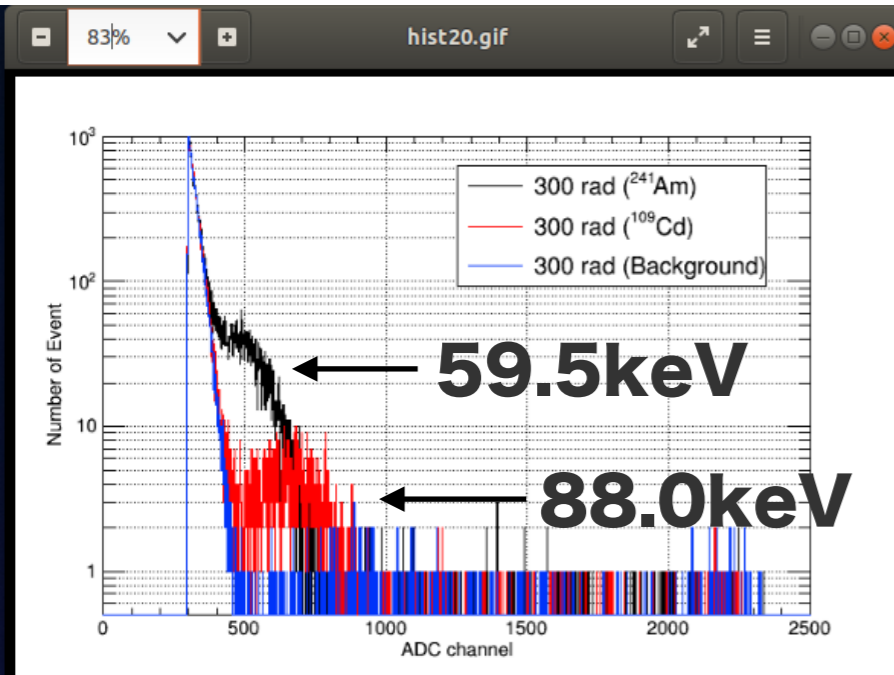


① スペクトルの変化 (S13360, 300 rad, 去年の結果)

+20°C

+10°C

+0°C



-10°C

-20°C

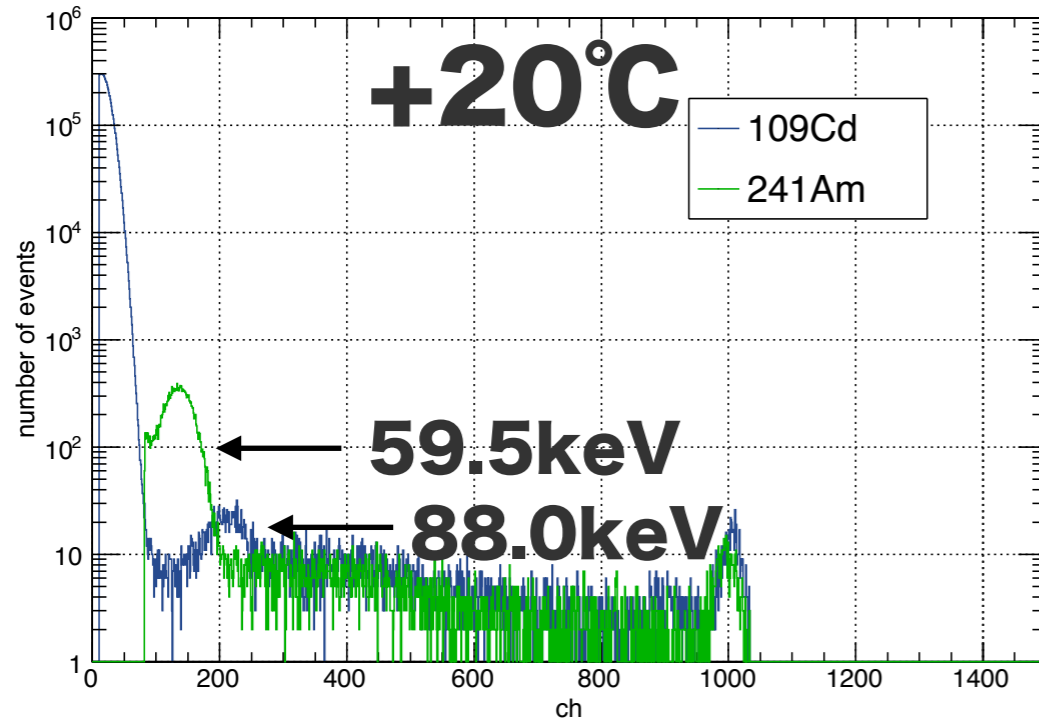
-30°C

$V_{br} \dots 51.7\text{V}$, $V_{op} \dots 55.0\text{V}$

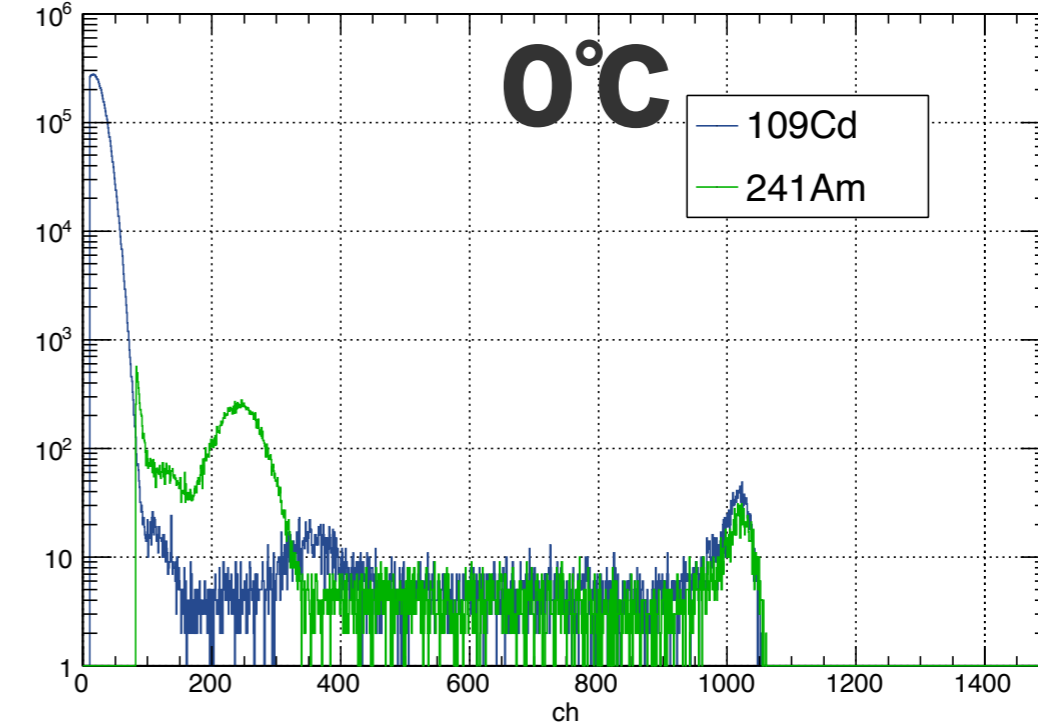
@鳥越修論、広島大学

① スペクトルの変化(S14160, 300 rad, 今年の結果)

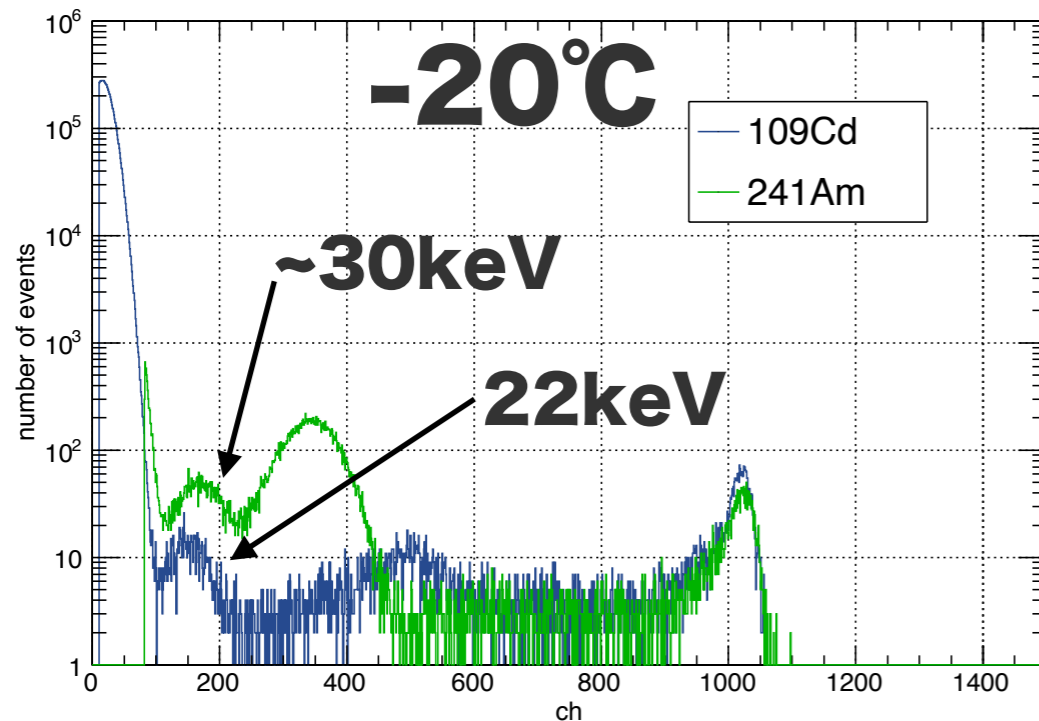
Energy Spectrum of 300rad mppc at p20deg



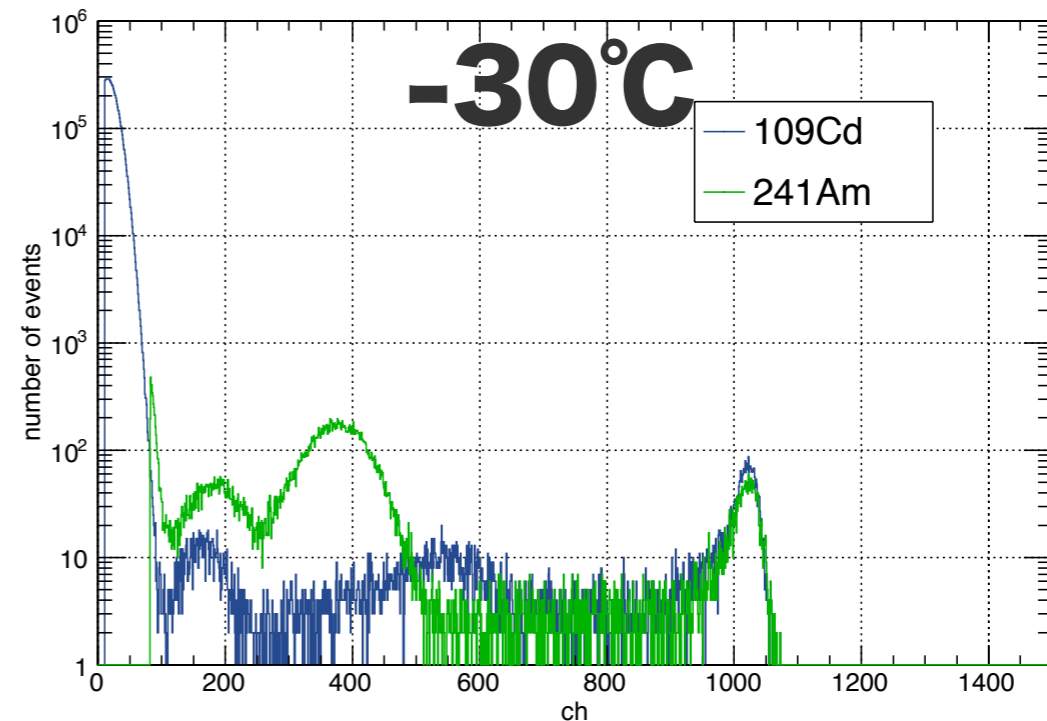
Energy Spectrum of 300rad mppc at 0deg



Energy Spectrum of 300rad mppc at m20deg



Energy Spectrum of 300rad mppc at m30deg

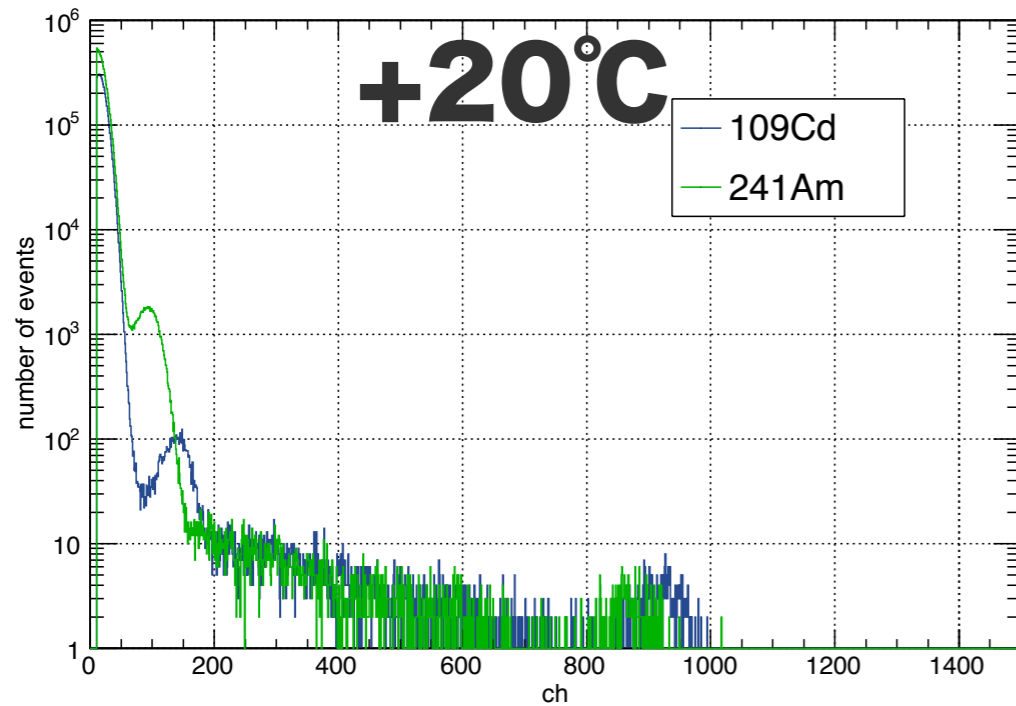


-20, -30°Cでは22 keV ピークが見えることがわかる。

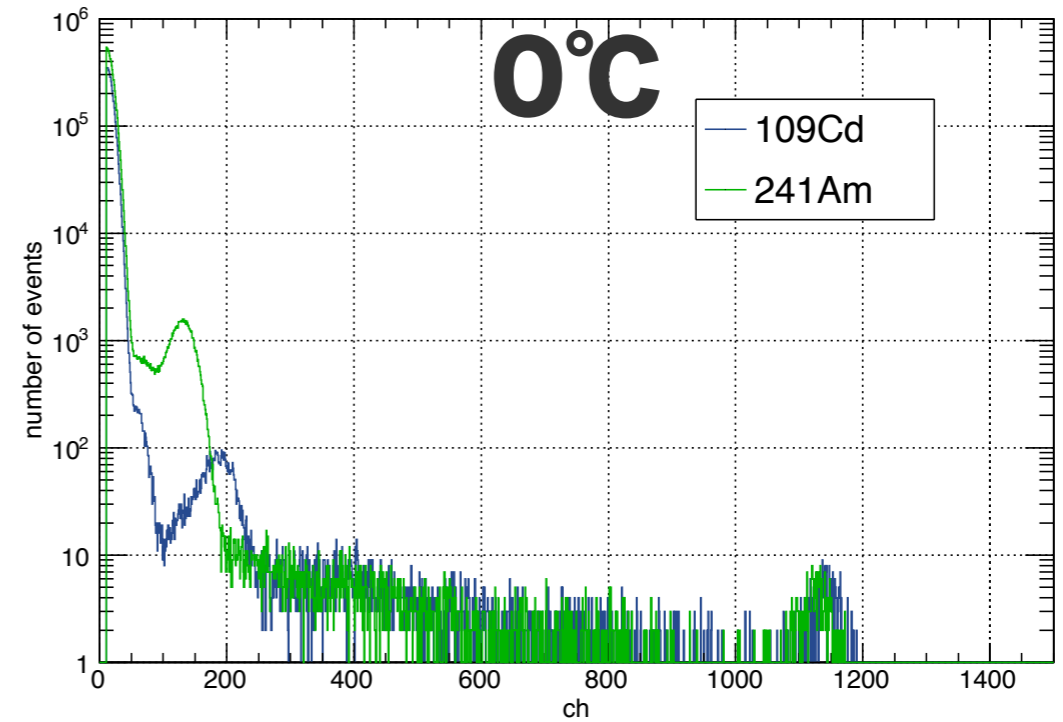
@40.0V

① スペクトルの変化 (S13360, 300 rad, 今年の結果)

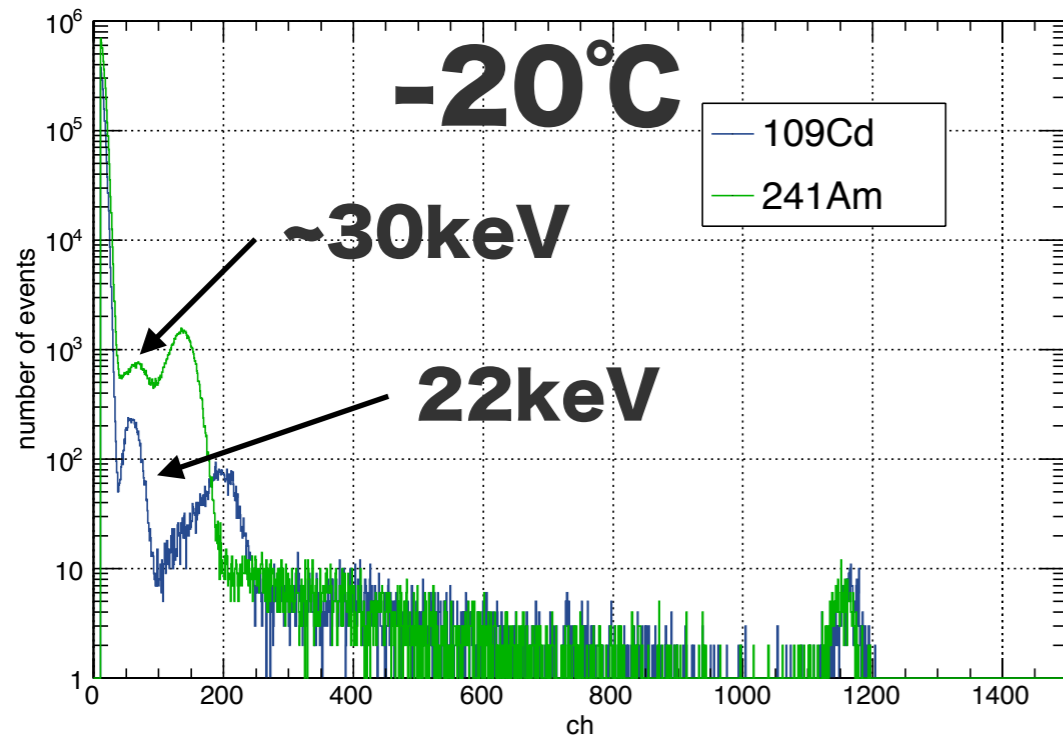
Energy Spectrum of 300rad mppc at p20deg



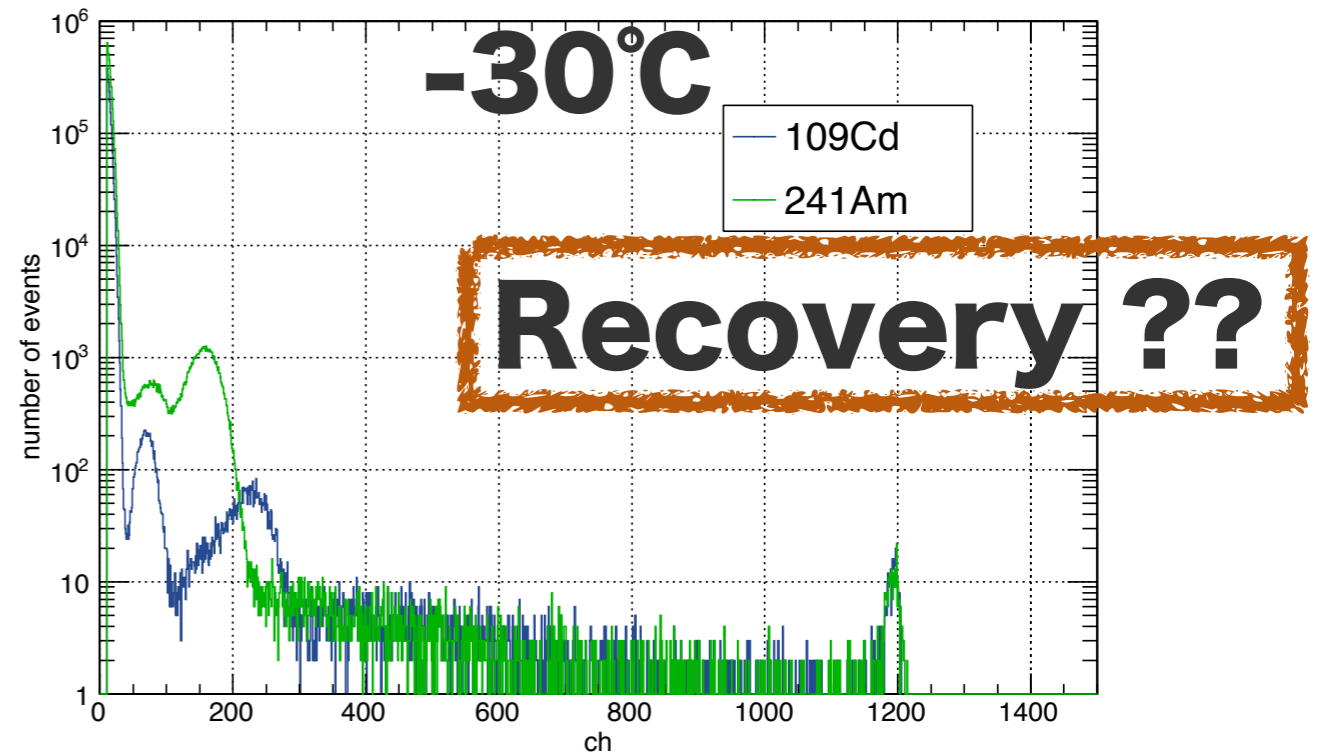
Energy Spectrum of 300rad mppc at 0deg



Energy Spectrum of 300rad mppc at m20deg



Energy Spectrum of 300rad mppc at m30deg



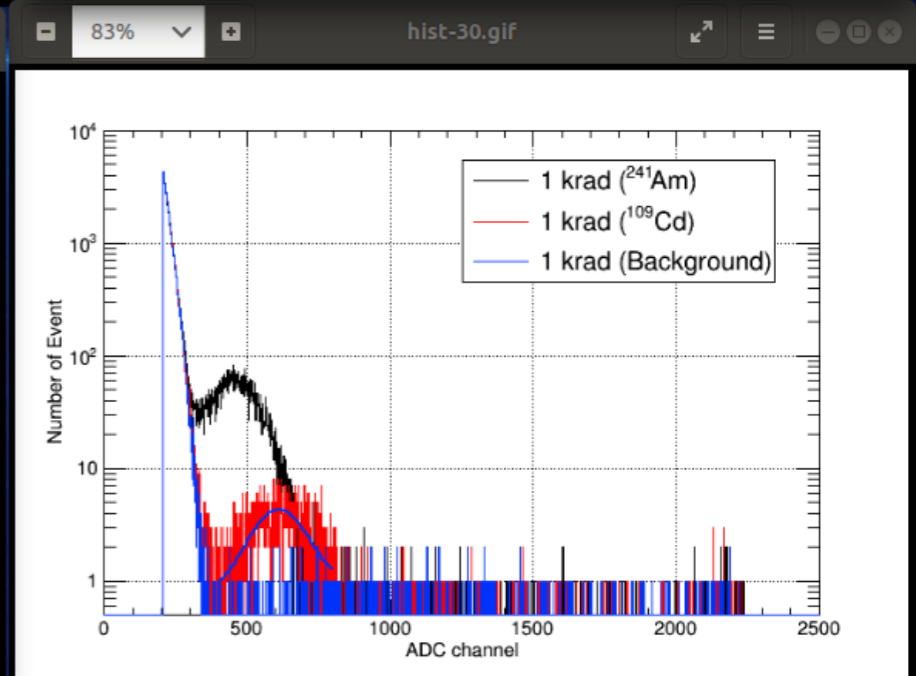
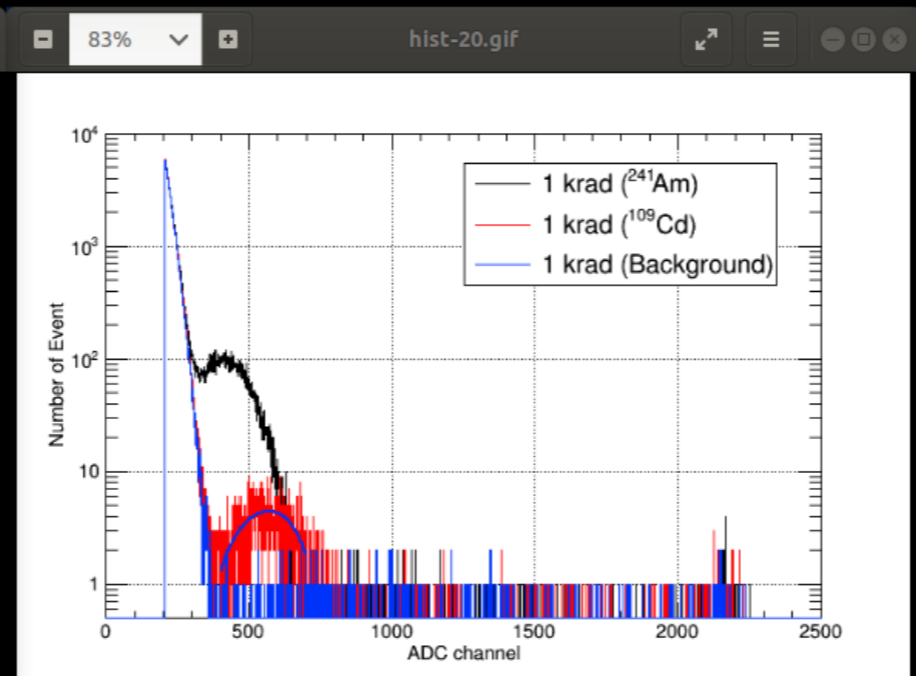
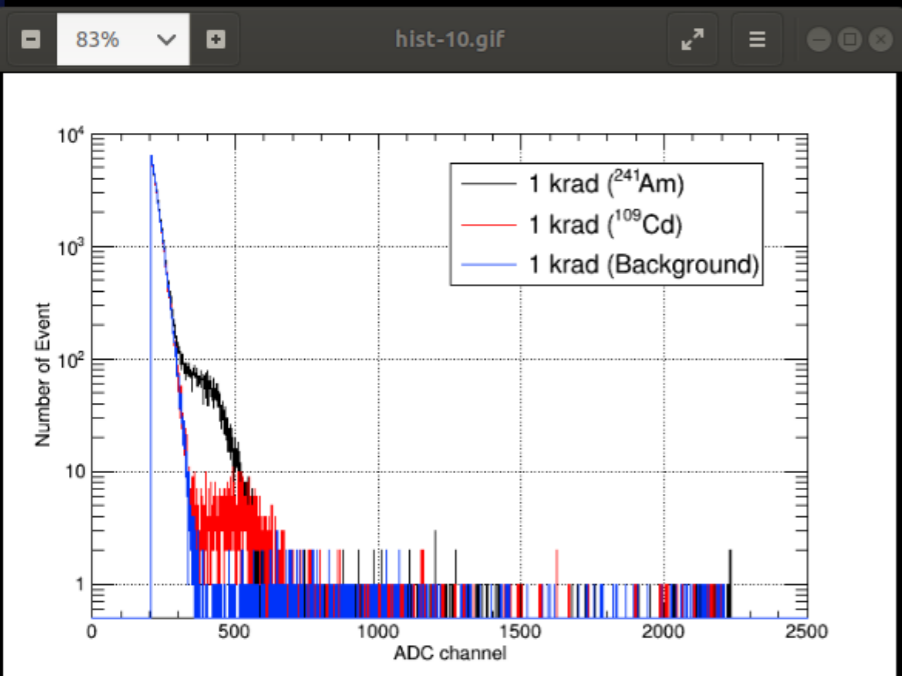
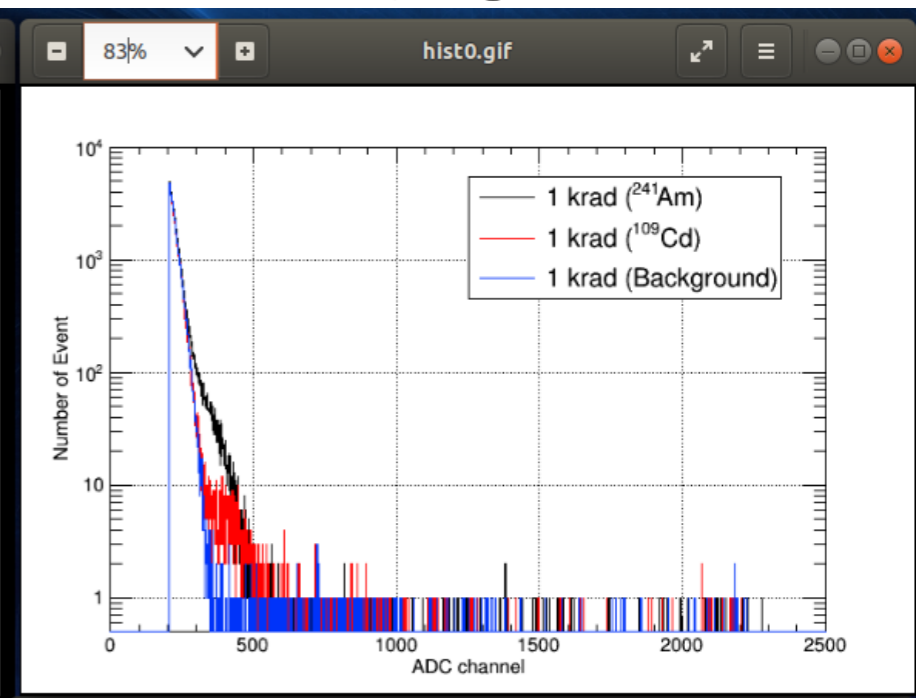
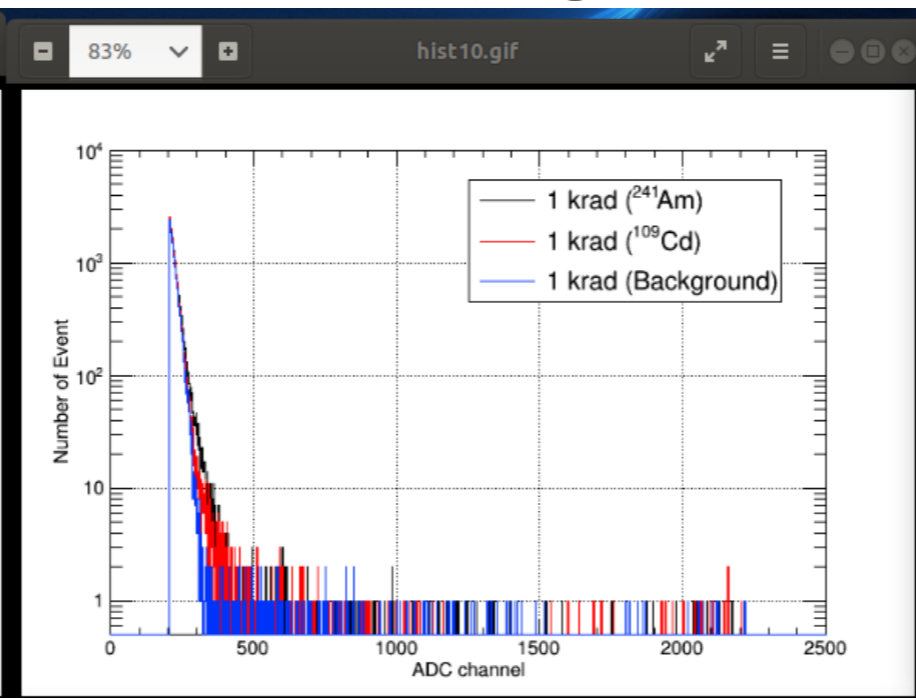
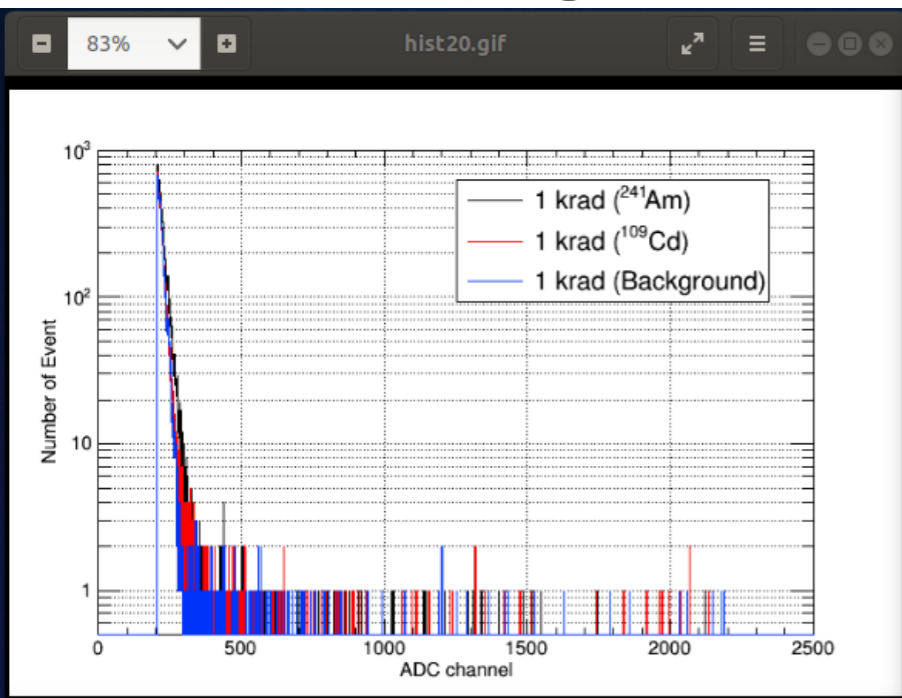
去年に比べてエネルギーレシヨルドが良くなっている。→ $V_{br} \pm 3V$ で確認。

① スペクトルの変化 (S13360, 1000 rad, 去年の結果)

+20°C

+10°C

+0°C



-10°C

-20°C

-30°C

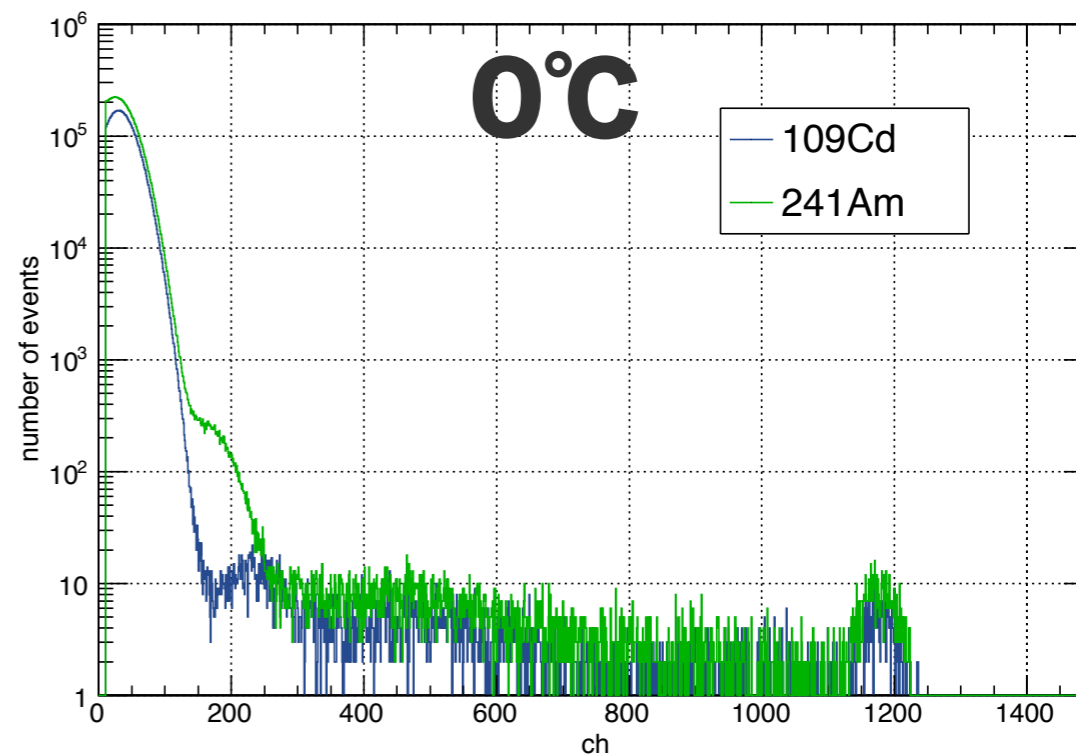
Vop...55.0V , Vbr...51.7V

@鳥越修論、広島大学

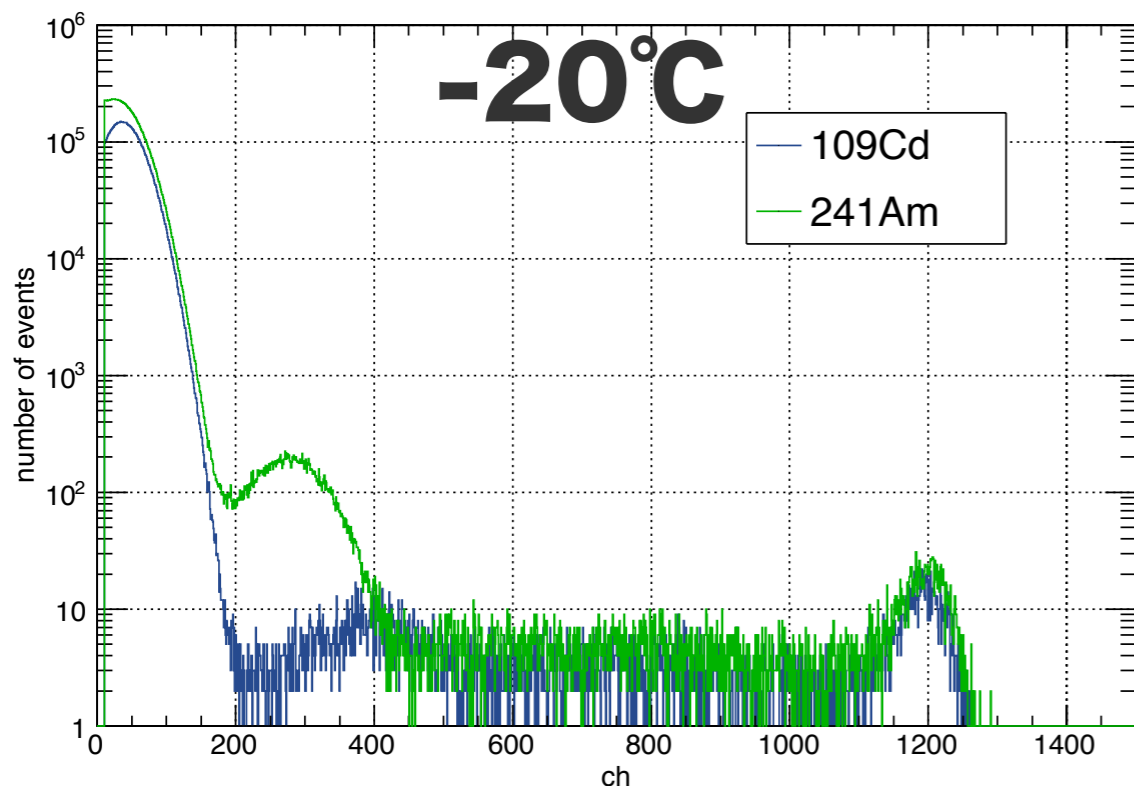
① スペクトルの変化(S14160, 1000 rad, 今年の結果)

ピークが見えなかったため、省略@+20°C

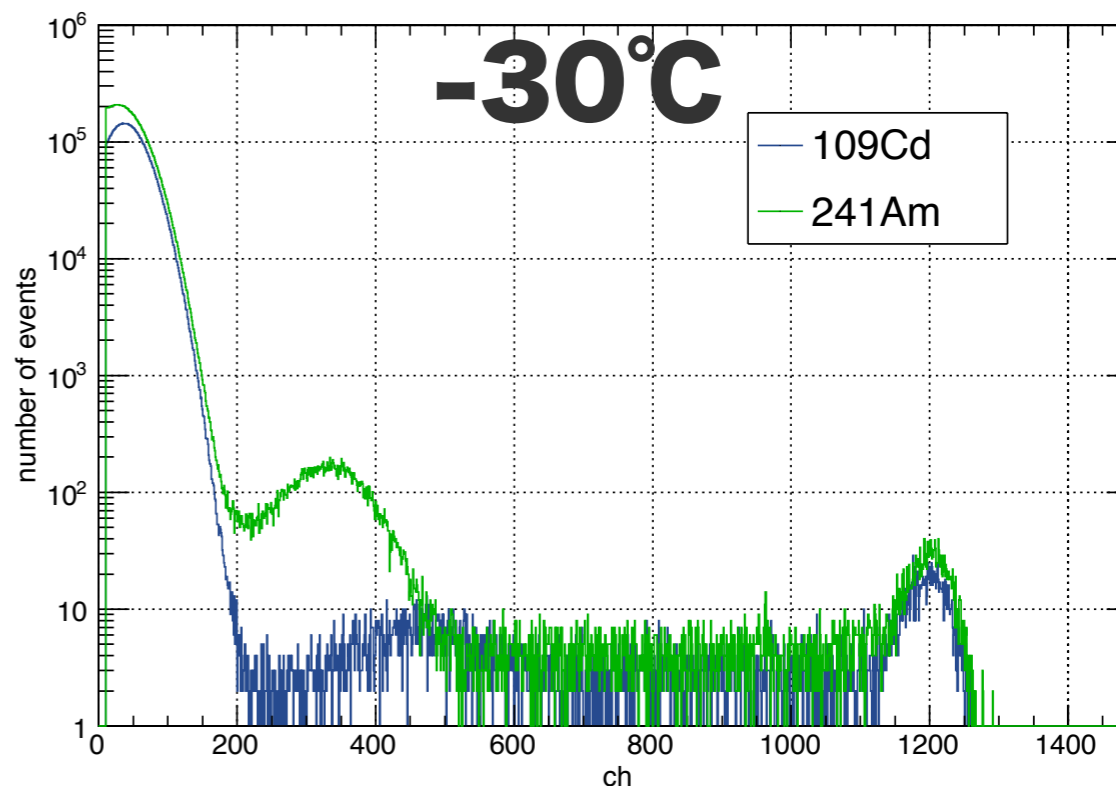
Energy Spectrum of 1000rad mppc at 0deg



Energy Spectrum of 1000rad mppc at m20deg



Energy Spectrum of 1000rad mppc at m30deg

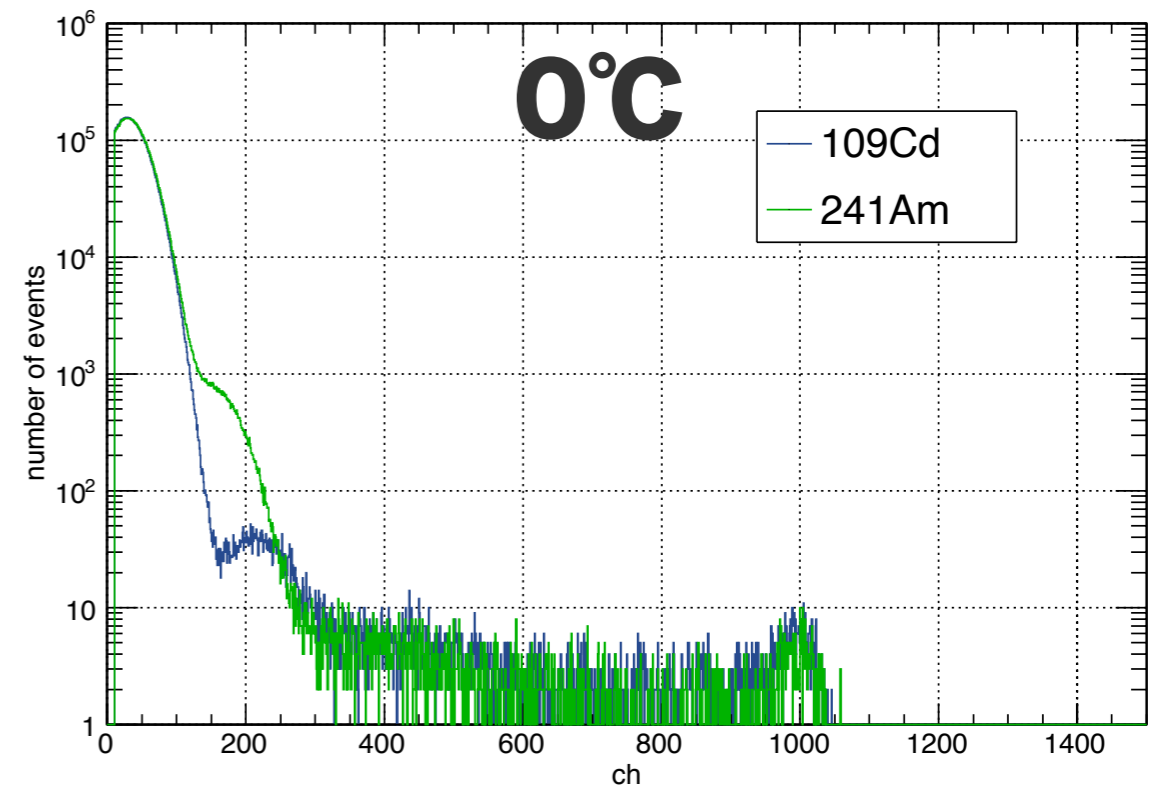


@40.0V

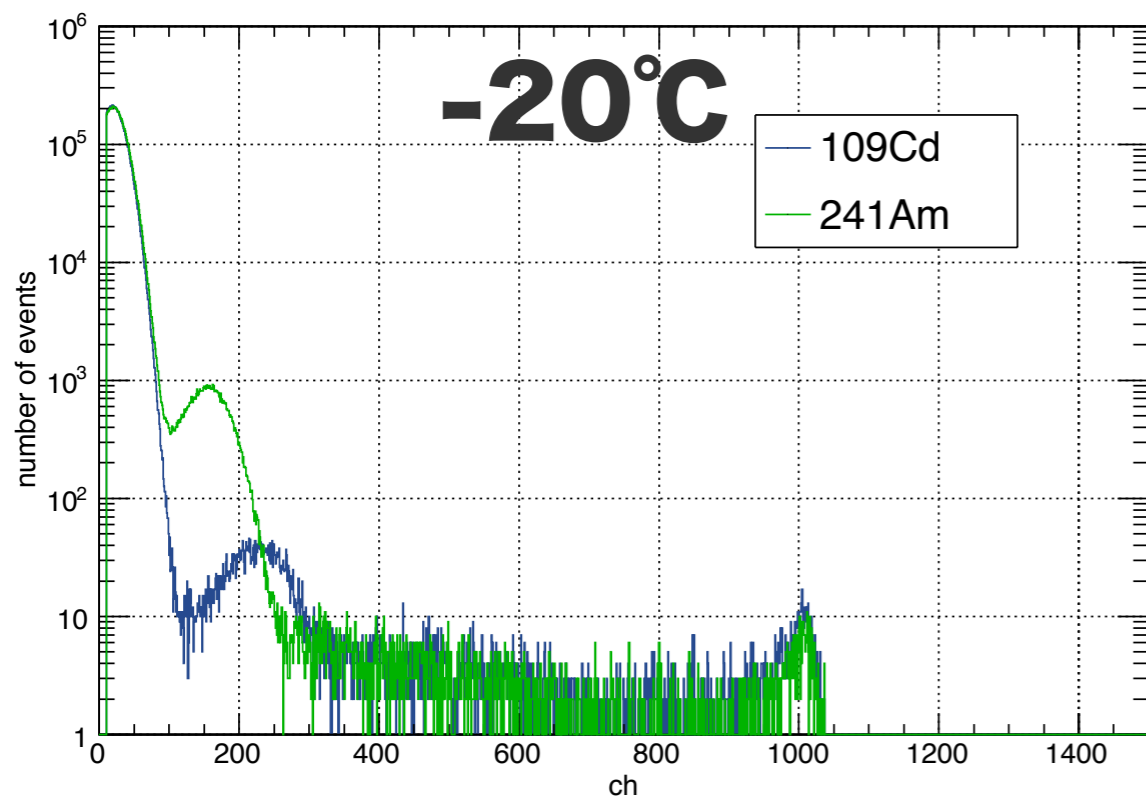
① スペクトルの変化(S13360, 1000 rad, 今年の結果)

ピークが見えなかったため、省略@+20°C

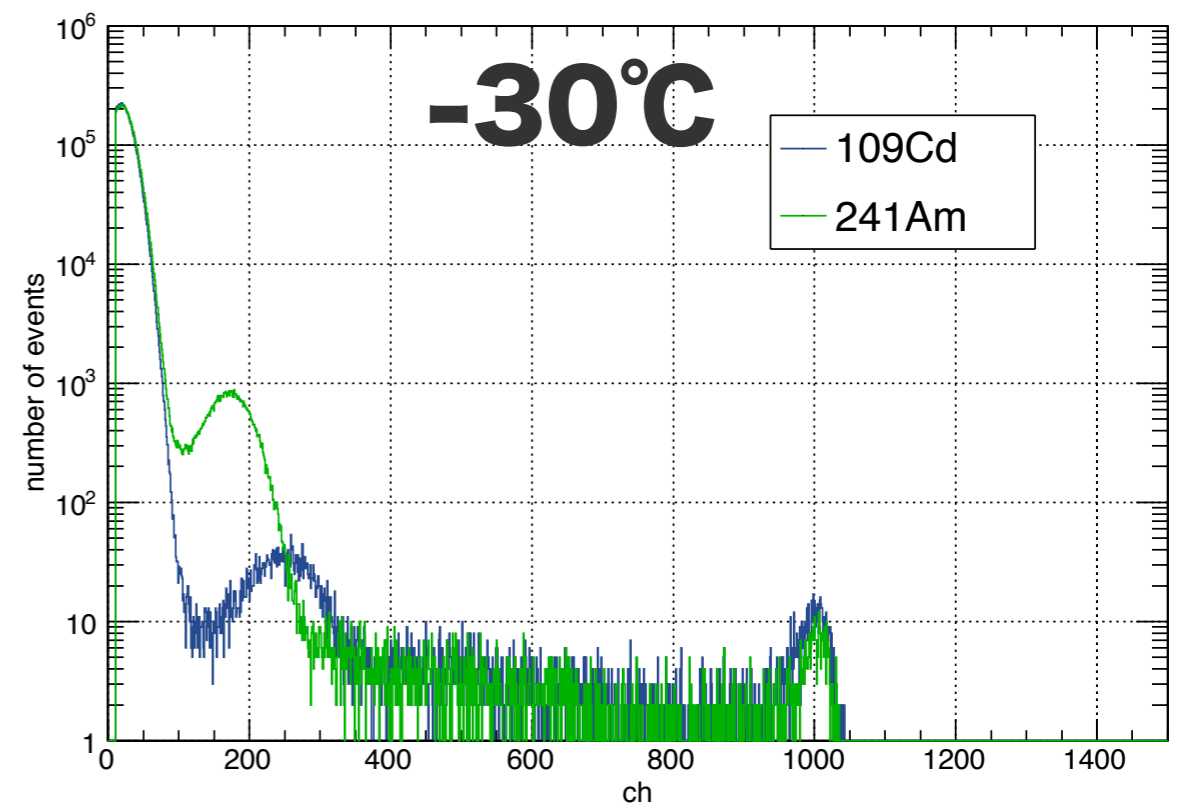
Energy Spectrum of 1000rad mppc at 0deg



Energy Spectrum of 1000rad mppc at m20deg



Energy Spectrum of 1000rad mppc at m30deg

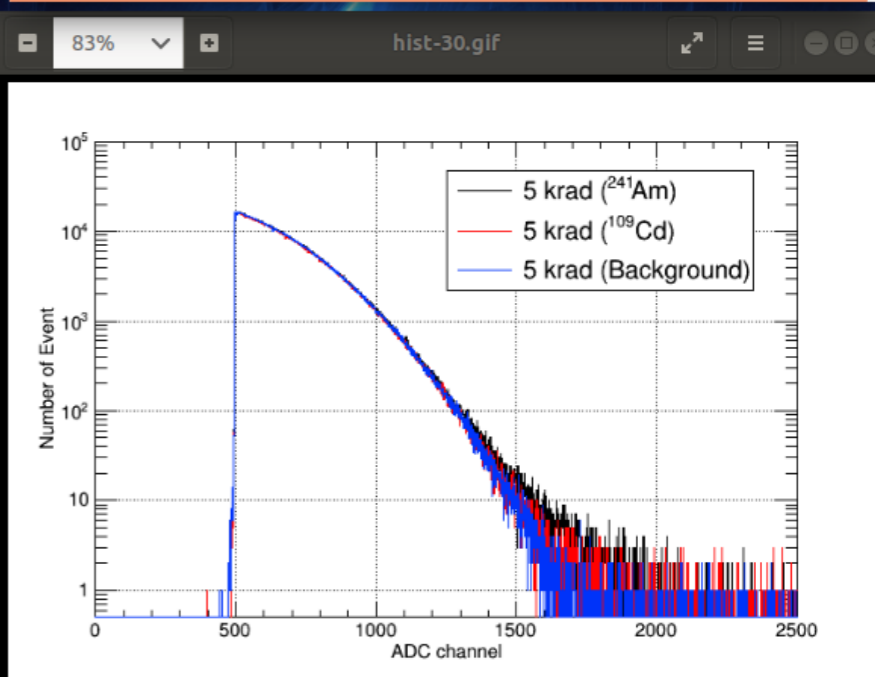
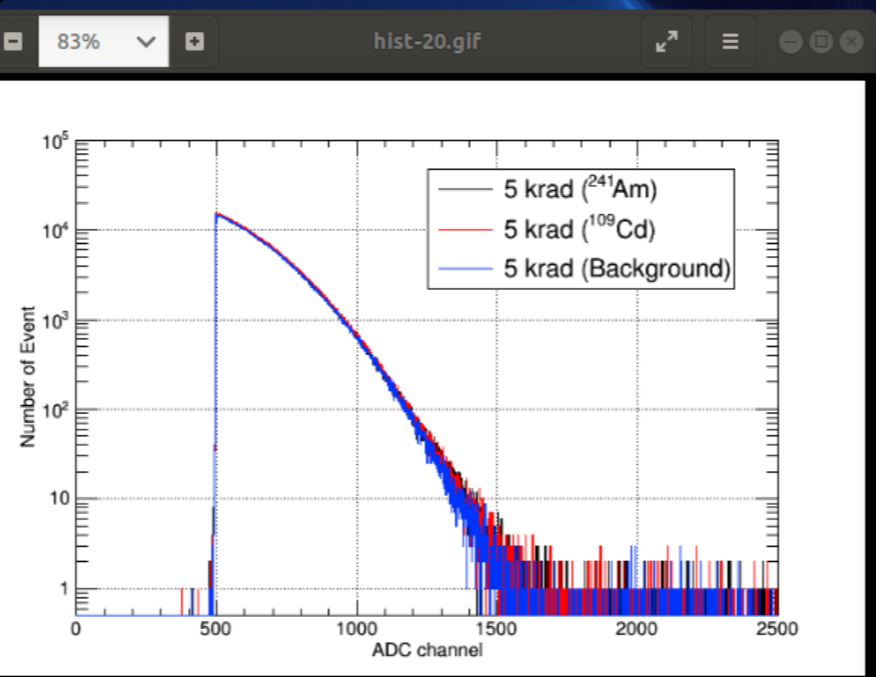
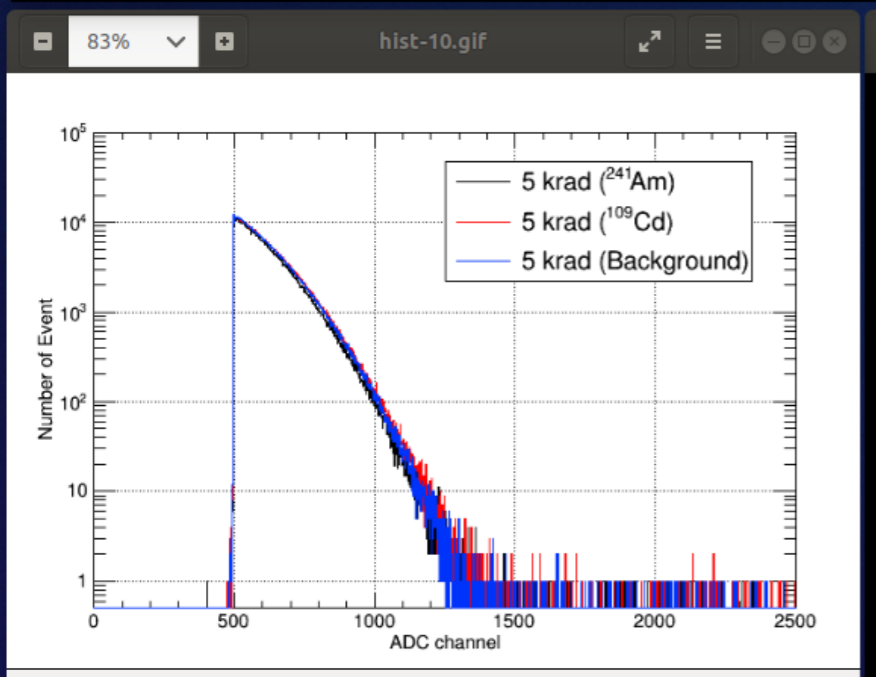
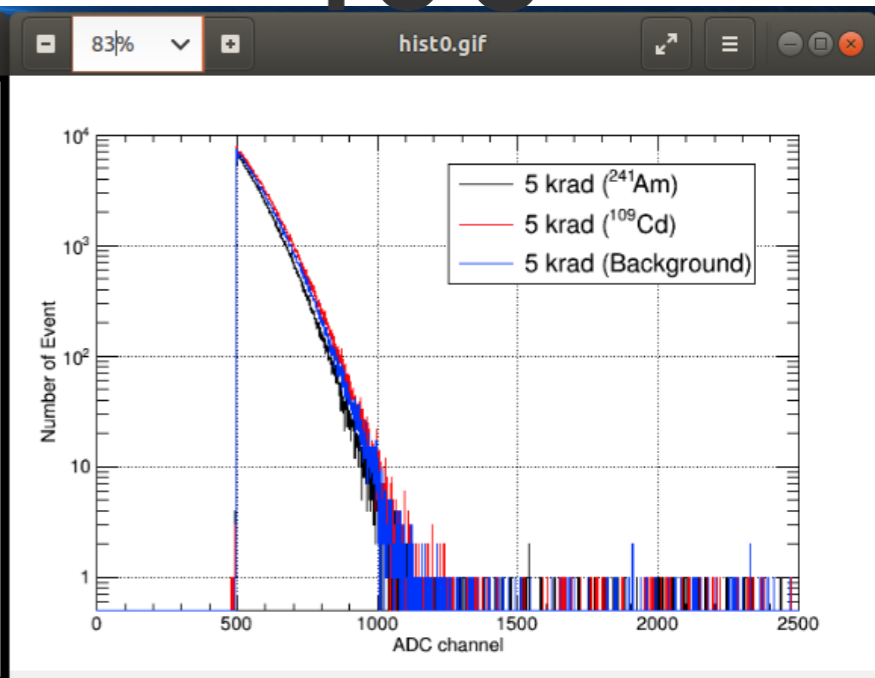
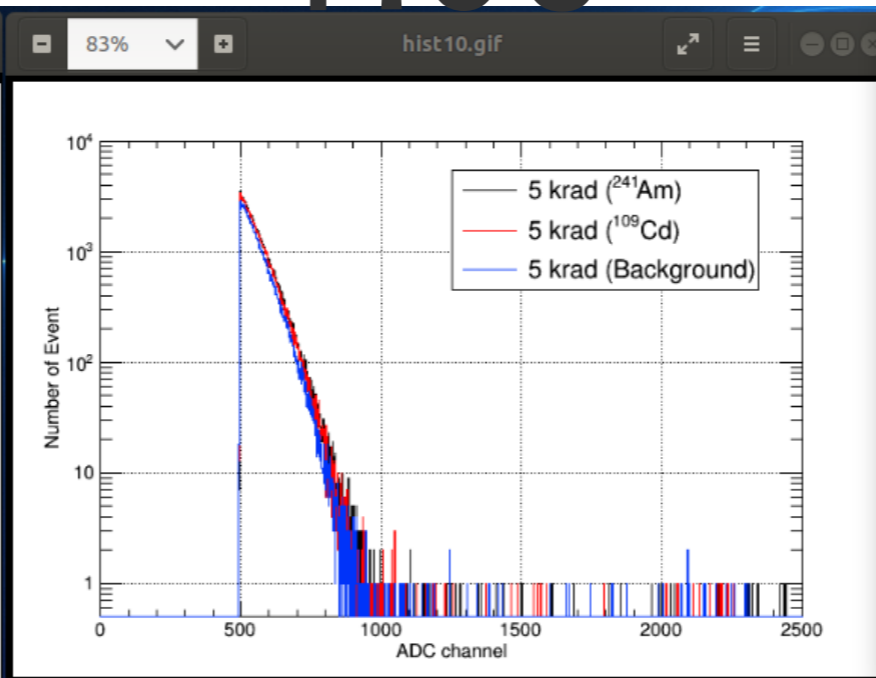
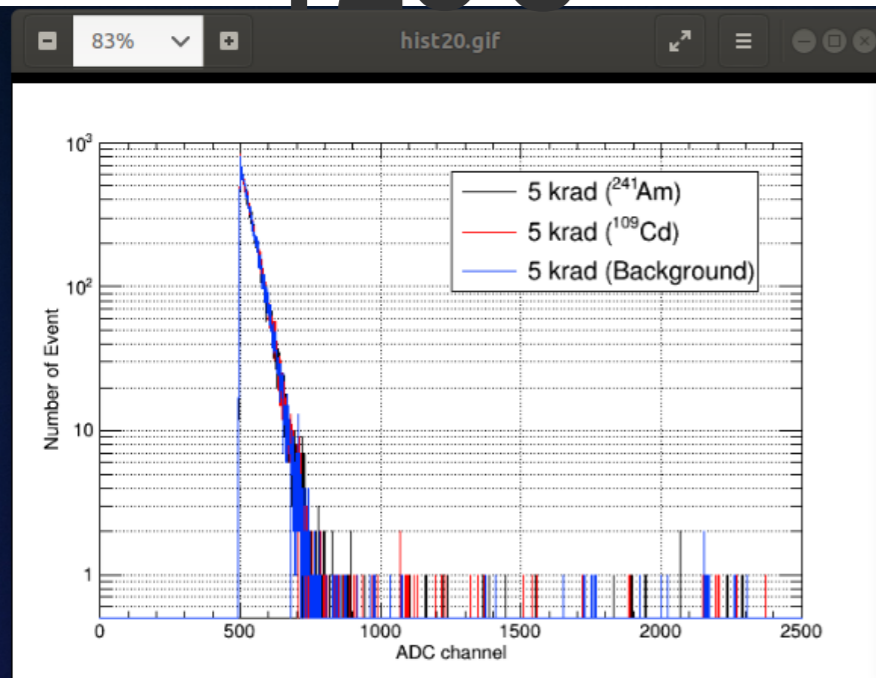


① スペクトルの変化 (S13360, 5000 rad, 去年の結果)

+20°C

+10°C

+0°C



-10°C

-20°C

-30°C

-30°Cでさえピークが見えない。

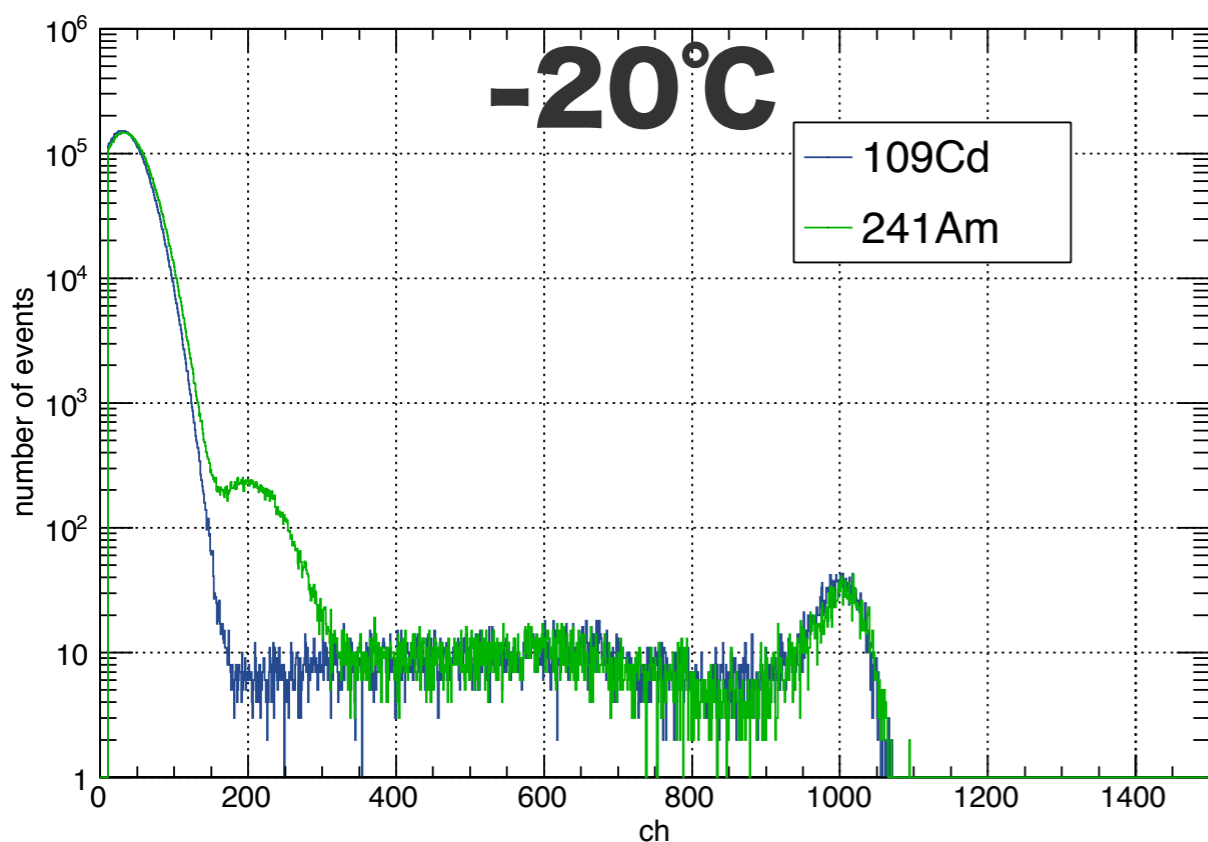
Vop...55.0V , Vbr...51.7V

@鳥越修論、広島大学

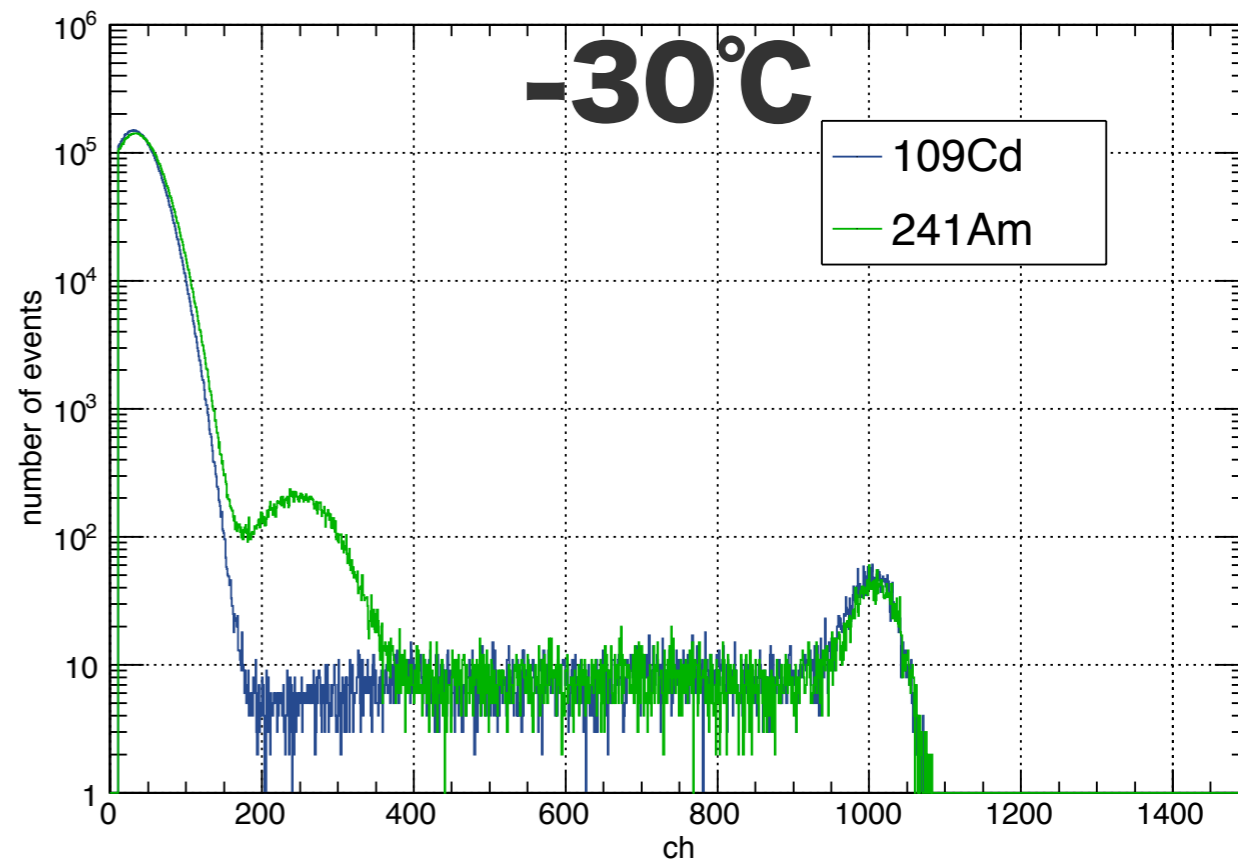
① スペクトルの変化(S14160, 5000 rad, 今年の結果)

ピークが見えなかったため、省略@+20°C, +0°C

Energy Spectrum of 5000rad mppc at m20deg



Energy Spectrum of 5000rad mppc at m30deg

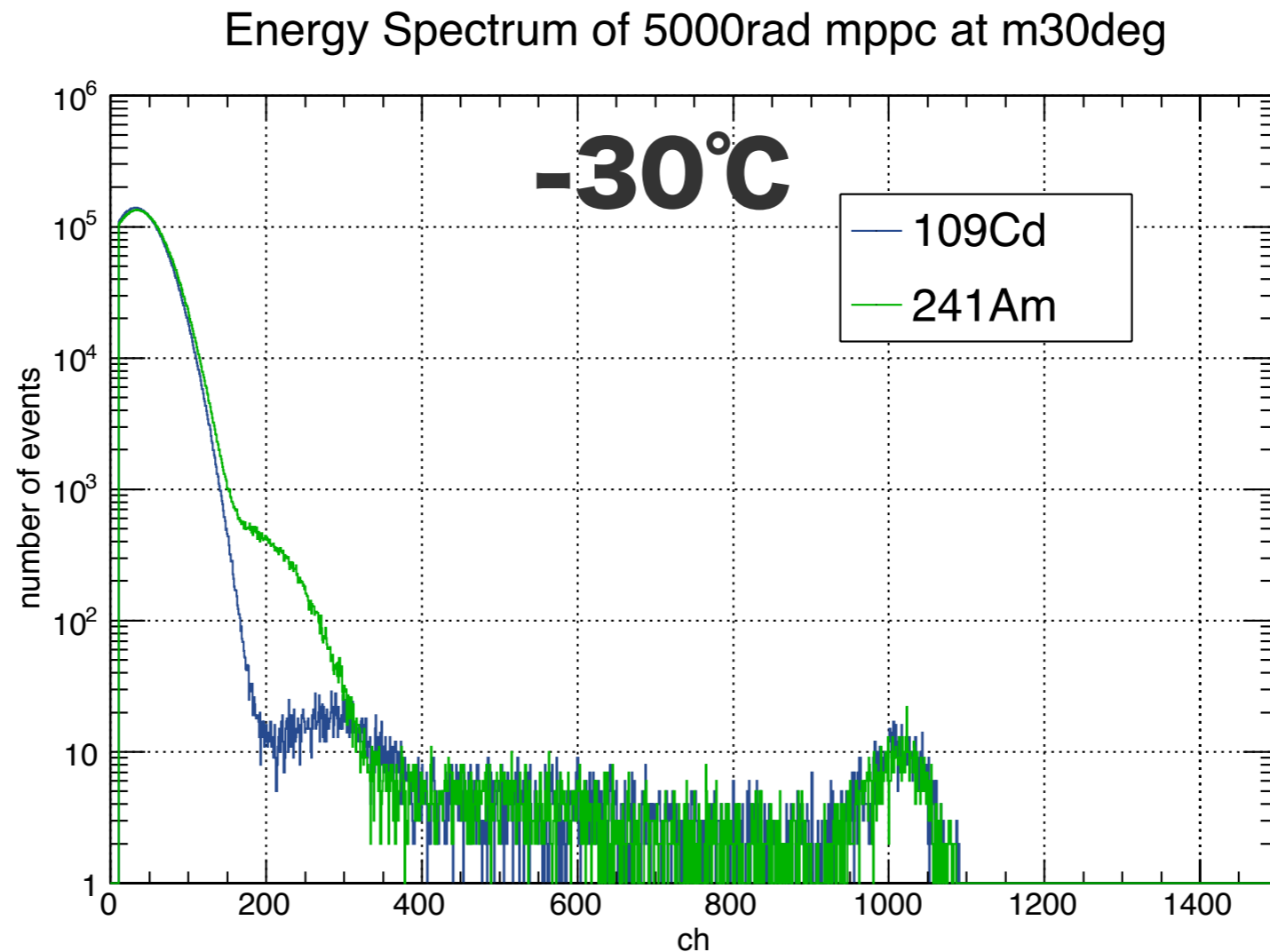


@40.0V

- 241Amの59.5 keVピークが見えている。
 - 109Cdの88.0 keVピークが見えていない
- 測定ミスかもしれないので、もう一度測定し直す。

① スペクトルの変化(S13360, 5000 rad, 今年の結果)

ピークが見えなかったため、省略@+20°C, +0°C, -20°C



- 241Amの59.5 keVピークが見えている。
- 109Cdの88.0 keVピークも見えている。

質疑応答

放射線損傷でなぜ暗電流、エネルギーレスショルドが変化したのか。

• 表面損傷

シリコンの表面は空気中では必ずシリコン酸化膜 (SiO₂) で覆われる。γ線が入射するとシリコン酸化膜中の電子が伝導帯まで励起され、シリコン酸化膜とシリコンの間、つまりシリコン表面で結合することにより新たなエネルギーレベルが作られ暗電流の増加につながる。

• バルク損傷

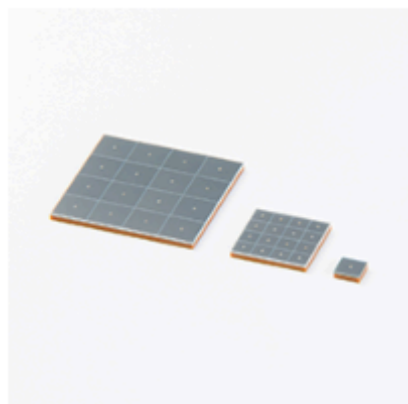
バルクの損傷は結晶格子の原子が放射線との相互作用により力を受けて本来の位置から移動して原子の欠けた欠陥や格子間原子の状態を形成することによる結晶の乱れである。これを displacement damage という。その結果トラップレベルや再結合中心をつくりその結果として暗電流の増加、信号荷電トラップによるパルス波高の低下等が主な損傷による影響として現れる。

(電離のものと中性子のものがある)

詳細な比較

	PD	APD	MPPC	PMT
増倍率	1	10^2	$\sim 10^6$	$\sim 10^7$
感度	低	中	高	高
動作電圧	5 V	100 ~ 500 V	30 ~ 60 V	800 ~ 1000 V
受光面積	×	×	拡張可能	○
狭いギャップを有する マルチチャンネル	○	○	○	×
読み出し回路	複雑	複雑	シンプル	シンプル
雑音	低	中	中	低
ユニフォミニティ	◎	○	◎	○
応答速度	○	○	◎	○
エネルギー分解能	高	中	高	高
温度特性	低	高	中	低
外乱光耐性	○	○	○	×
磁気耐性	○	○	○	×
コンパクト・軽量化	○	○	○	×

S14160



VIS PET スキャナ用

MPPC S14160/S14161シリーズ

PET

S14160/S14161シリーズは、高検出効率、低動作電圧を実現した放射線モニタ、PETスキャナ用のMPPCです。チャンネル間のデッドスペースを小さくし、受光面の周囲のスペースも端から0.2 mm に抑えています。この形状により、4面バタブル配列での使用に適しています。

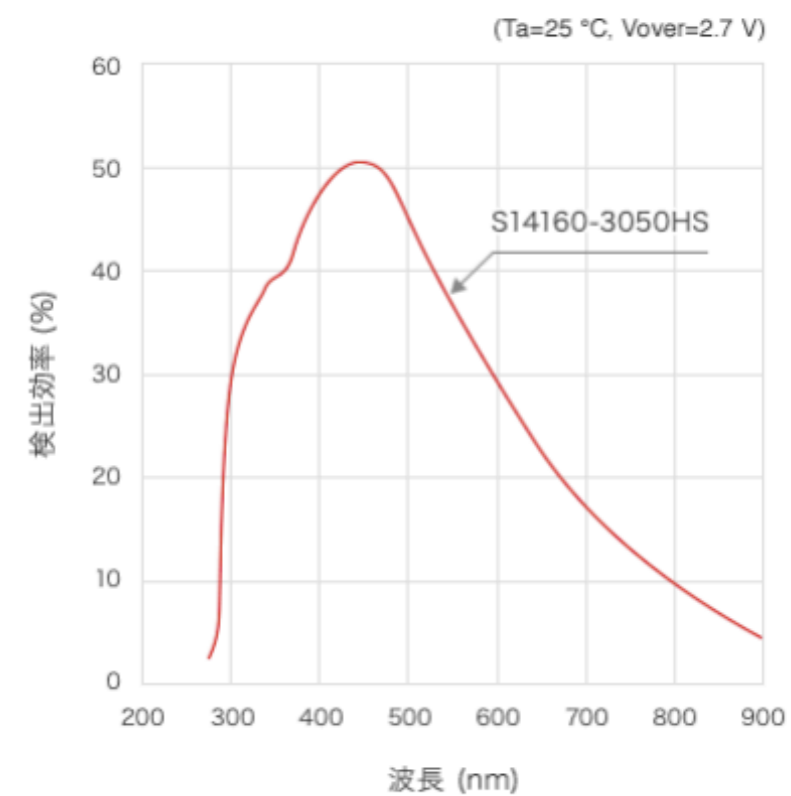
パッケージバリエーション

セラミック	メタル	表面実装型	タイリング	多チャンネル
		✓	✓	✓

ピクセルピッチ

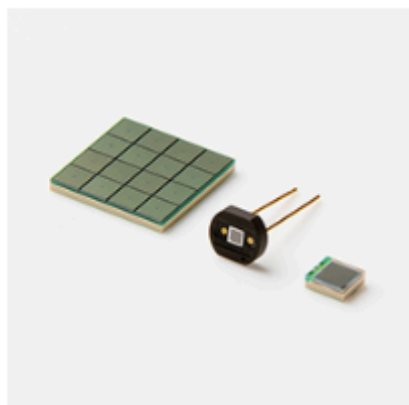
10 μm	15 μm	25 μm	50 μm	75 μm
			✓	

[ラインアップへ](#)



ピクセル数 7200

S13360



VIS 精密計測用

MPPC S13360/S13361シリーズ

学術研究 PET 計測機器

S13360/S13361シリーズは、高検出効率とともに低クロストーク・低アフターパルス・低ダークカウントを実現した精密計測用のMPPCです。

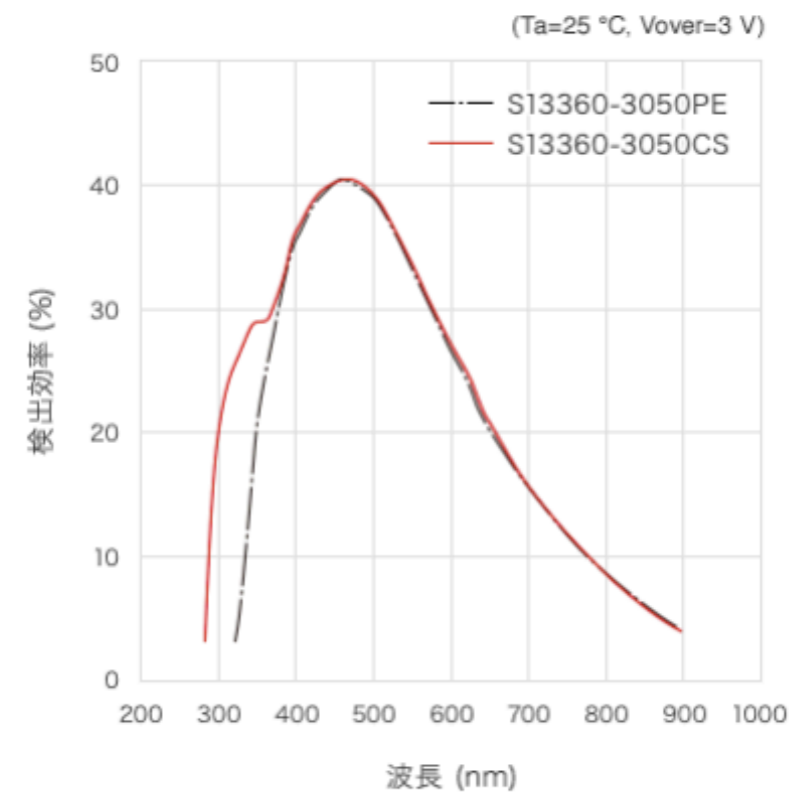
パッケージバリエーション

セラミック	メタル	表面実装型	タイリング	多チャンネル
✓	※	✓	✓	✓

※ 冷却タイプのみ

ピクセルピッチ

10 μm	15 μm	25 μm	50 μm	75 μm
		✓	✓	✓



エネルギー分解能 (照射前)

線源 241Am	+20°C
S14160 (BGO)	39.2 [%]
S14160 (CsI)	23.7 [%]
S13360 (BGO)	47.2 [%]
S13360 (CsI)	27.1 [%]

エネルギー分解能(300 rad)

線源 241Am	-30°C	-20°C	0°C	+20°C
S14160 (照射直後)	33.5 [%]	30.1 [%]	30.8 [%]	41.7 [%]
S13360 (照射直後)	36.0 [%]	34.6 [%]	42.5 [%]	60.7 [%]
S13360 (7ヶ月後)	28.6 [%]	23.7 [%]	29.5 [%]	36.7 [%]

エネルギー分解能(1000 rad)

線源 241Am	-30°C	-20°C	0°C	+20°C
S14160 (照射直後)	39.8 [%]	45.5 [%]	見えるがfit できない	見えない
S13360 (照射直後)	36.4 [%]	45.5 [%]	見えない	見えない
S13360 (7ヶ月後)	38.1 [%]	40.2 [%]	見えるが.. 219.4 [%]	見えない

エネルギー分解能(5000 rad)

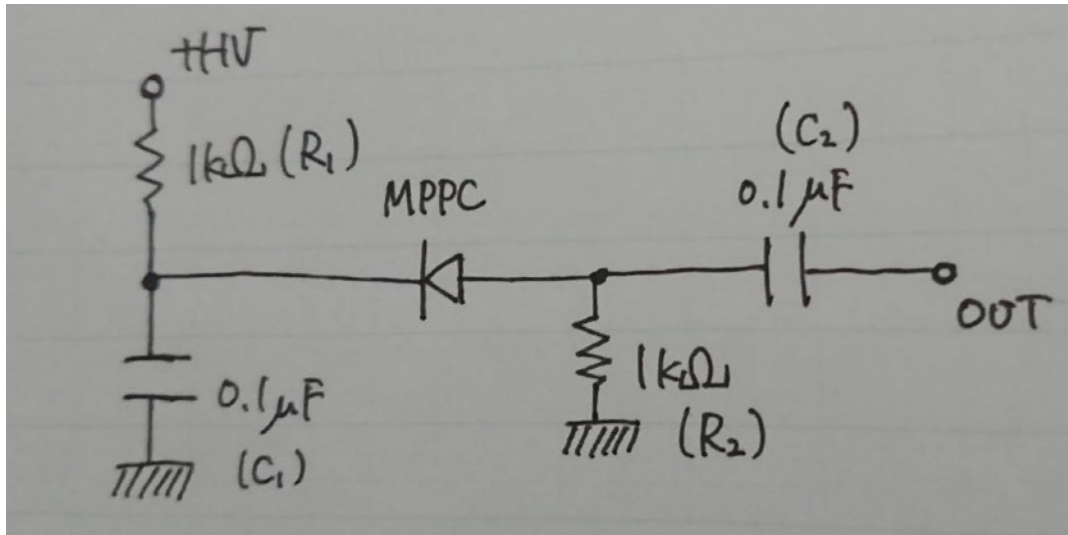
線源 241Am	-30°C	-20°C	0°C	+20°C
S14160 (照射直後)	37.8 [%]	36.9 [%]	見えない	見えない
S13360 (照射直後)	見えない	見えない	見えない	見えない
S13360 (7ヶ月後)	見えるが.. 253 [%]	見えない	見えない	見えない

アニーリング

放射線損傷による格子欠陥や格子間原子は、原子の熱振動により時間とともに移動する。その際、格子欠陥は消滅する場合もあるが、格子欠陥同士が結合し更に大きな欠陥へ成長する場合もある。この熱振動により、ある時点まで有効不純物密度が減少する現象をアニーリングと呼ぶ。その後、有効不純物密度が増加する逆アニーリングが起こる。アニーリングから、逆アニーリングに移る時間は温度に依存し、温度が高い程時間が短い。アニーリングの温度依存性は次のアレニウスの式から求めることができる。 $k = A \exp(-E_a/kBT)$

解析

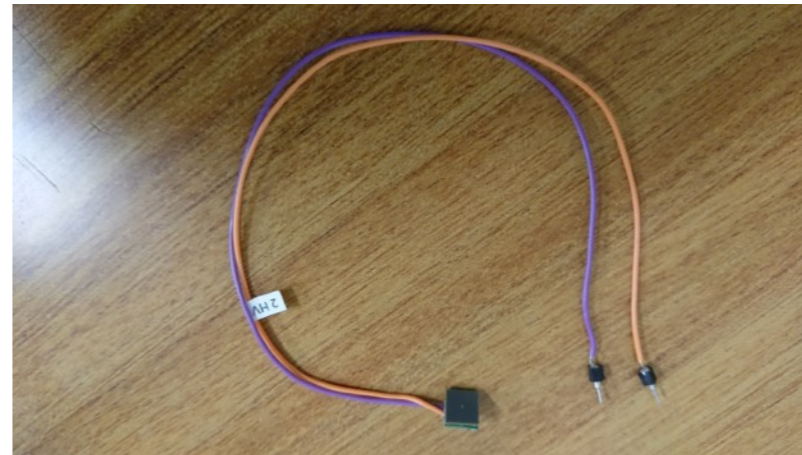
- 去年若狭湾で同様の実験をした旧型モデル(S13360)と、今年の若狭湾実験で用い新型モデル(S14160)の放射線耐性をスペクトル解析から比較。



回路図(手書きですみません)

照射核子

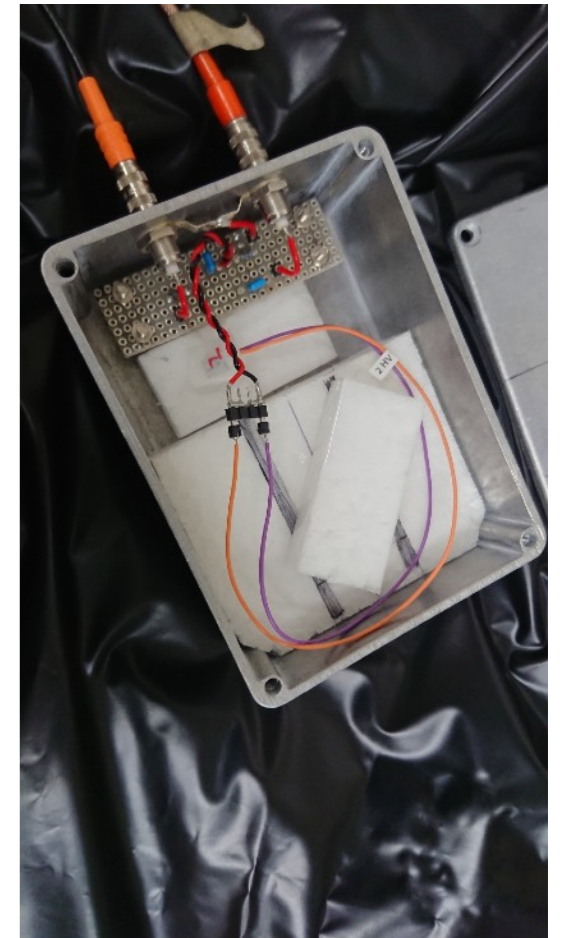
- ^{241}Am (59.5 keV)
- ^{109}Cd (22.0, 88.0 keV)
- ^{137}Cs (662 keV)



新型MPPC(S14160)



HV, オシロスコープ



実際の回路

- S14160の300 rad, 1000 rad, 5000 radを照射したMPPCを-30, -20, 0, +20 [°C]で測定し、去年のスペクトルと比較。また、1年経過したS13360のスペクトルも測定した。

