

2023年度 修士論文

小型衛星に搭載される  
MPPC光検出器の放射線耐性向上のための研究

広島大学 先進理工系科学研究科 先進理工系科学専攻 物理学プログラム

高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

M226023 丹羽 怜太

主査：高橋 弘充

副査：三好 隆博

2024年3月23日

## 概要

宇宙空間ではガンマ線や粒子を検出するために、シンチレータと光検出器を組み合わせた検出器がしばしば利用される。MPPCはcmサイズの小型で、数10Vの低電圧で高いゲインが得られるため、シンチレータ検出器での利用が検討されている。MPPCは宇宙線に被曝することで放射線劣化し、暗電流が桁で増加してしまうことが知られている。暗電流の増加は、検出器のエネルギー分解能の劣化、エネルギー閾値の上昇につながる。本研究では、このMPPCの放射線耐性を向上させるための手法を2パターン考え、実際に放射線で損傷させたMPPCについてそれぞれ振る舞いを評価した。

1つ目はMPPCを冷却する方法である。一般的な半導体検出器と同じく、MPPCは低温下で暗電流が減少することも知られているが、放射線劣化したMPPCでどれほど暗電流が低減されるかは詳しく調べられていない。そこで放射線劣化したMPPCについて、室温から液体窒素・アルゴンと同程度の低温(100K)までの環境で、性能を評価した。使用したMPPCは、受光面が6mm角のS13360型で、200MeV陽子を1krad照射したものである。シンチレータは1cm角のCsI(Tl)で、オプティカルラバーを用いてMPPCとシンチレータを接着した。室温では暗電流が高く、エネルギー閾値が60keV以上に悪化していたが、低温100Kでは暗電流が約1/1000の0.1 $\mu$ A台に低減し、エネルギー閾値も約10keVまで改善が見られた。また、中間温度での測定も行い、高温側は<sup>137</sup>Csの662keVで、低温側は<sup>241</sup>Amの60keVで測定した。途中で整形増幅器のshaping timeも調整しつつ、温度による閾値の傾向を調べた。結果として170K以下では、10keV付近で閾値が一定になることがわかった。

2つ目にMPPC受光面の各ピクセルの復帰時間を長くすることで、暗電流由来の信号の増幅率を減少させ、相対的に暗電流の寄与を小さくする実験を行った。このテーマは暗電流の発生頻度がターゲット信号であるガンマ線信号よりも多いという部分に注目して行われた。実際にはMPPCの回路に組み込まれているクエンチング抵抗の抵抗値を大きくする事によって各ピクセルの復帰時間を長くしている。MPPCなどの一般的な検出器の復帰時間は100ns程度である。また、ターゲット信号となるガンマ線などの到来頻度は検出器にもより異なるが、10cm角程度のサイズであれば、予想されるレートはおおよそ1msの間隔だとされている。一方で、ピクセルが放射線で損傷した場合、ピクセルからは連続的に暗電流ノイズの信号が出続けることとなり、その発生頻度はターゲット信号の頻度よりも高く、このような状況下ではターゲット信号がノイズ信号に埋もれてしまい、信号の読み出しが難しくなる。そこで、2つ目の手法ではMPPCのクエンチング抵抗を大きくして各ピクセルの復帰時間を長くし、欠陥ピクセルからの信号のみ増幅を抑制することで、相対的に暗電流の寄与を小さくすることを考えた。この手法は温度によらない暗電流対策の一つとして考えられている。測定で使用したMPPCはS13360-3050,3075で、それぞれ通常版と改良版で対照実験を行った。性能評価の結果、放射線を照射した改良版MPPCでは放射線を照射した通常版のMPPCよりもエネルギー閾値が平均して約12%ほど低下し、エネルギー分解能も改善していることが確認された。

このことからMPPCは放射線劣化しても、劣化の影響を抑えられる、また極低温では劣化前と変わらない性能を維持できることが分かった。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	光検出器	1
1.1.1	光電子増倍管 (PMT)	1
1.1.2	フォトダイオード (PD)	1
1.1.3	アバランシェフォトダイオード (APD)	2
1.1.4	MPPC(Multi-Pixel-Photon-Counter)	2
1.1.5	各検出器の比較	2
1.2	放射線損傷と暗電流	3
1.2.1	放射線損傷	3
1.2.2	暗電流	3
1.3	研究の背景・目的	4
1.3.1	検出器を冷却して暗電流の発生を抑える	4
1.3.2	各ピクセルの復帰時間を延長して暗電流信号の取得頻度を減らす	4
<b>第 2 章</b>	<b>低温実験</b>	<b>6</b>
2.1	目的	6
2.2	測定の流れ	6
2.3	実験セットアップ	6
2.3.1	MPPC・シンチレータ	6
2.3.2	配線・回路	6
2.3.3	真空冷却器・真空層	7
2.4	結果	8
2.4.1	I-V curve with MPPC only	8
2.4.2	BGO の生波形の温度依存性	10
2.4.3	放射線で損傷した MPPC の増幅率の温度依存性	11
2.4.4	Temperature dependence of enegy spectra	12
2.4.5	エネルギー閾値の決定方法	14
2.4.6	エネルギー閾値の変化	15
2.4.7	BGO の光量変化、時定数増加と shaping time の関係	17
2.4.8	温度によるエネルギー分解能の変化	18
2.4.9	Energy spectra of various sources at low temperature 100 K	19
2.5	まとめ	20

<b>第 3 章</b>	<b>改良した MPPC の性能評価</b>	<b>21</b>
3.1	実験の目的	21
3.2	改良 MPPC	21
3.2.1	クエンチング抵抗と変更による効果	22
3.3	実験セットアップ	24
3.3.1	使用した MPPC	24
3.3.2	シンチレータ・装着	24
3.3.3	配線・回路	24
3.4	陽子ビームの照射	25
3.4.1	陽子ビーム照射過程	25
3.4.2	1000 rad 照射予定の rev74-s1 のゲインが不安定になる	27
3.5	測定結果	28
3.5.1	照射前の MPPC 単体での I-V 測定	28
3.5.2	通常の MPPC との比較	29
3.5.3	照射後の暗電流の減衰	31
3.5.4	エネルギースペクトルの比較	31
3.5.5	照射前後の生波形の変化	38
3.5.6	エネルギー閾値の比較	40
3.5.7	改良版 MPPC の冷却	41
3.6	まとめ	45
<b>第 4 章</b>	<b>まとめと考察</b>	<b>47</b>
<b>付録 A</b>	<b>付録</b>	<b>48</b>
A.1	MPPC 単体のエネルギー閾値の推定	48

# 目次

1.1	光電子増倍管	1
1.2	欠陥ピクセルでの改良前後での変化	4
2.1	光電吸収、特性 X 線	7
2.2	Positioning of measuring instruments	7
2.3	IVCurve	9
2.4	IVCurve	10
2.5	光電吸収、特性 X 線	11
2.6	Spectra of $^{241}\text{Am}$ (Blue), $^{109}\text{Cd}$ (Green) @100 K	12
2.7	Cschange	13
2.8	Amchange	13
2.9	Spectra of $^{137}\text{Cs}$ (Green), $^{133}\text{Ba}$ (Blue) @292 K	15
2.10	Spectra of $^{241}\text{Am}$ (Blue), $^{109}\text{Cd}$ (Green) @100 K	15
2.11	閾値と温度	16
2.12	エネルギー分解能と温度	18
2.13	465V100K	19
2.14	Linearity	20
3.1	MPPC 概略図	22
3.2	1 ピクセル等価回路	22
3.3	MPPC からの出力波形	22
3.4	改良により欠陥ピクセルで起こる変化	23
3.5	$^{241}\text{Am}$ のスペクトル変化	24
3.6	セットアップ	25
3.7	300 rad、1000 rad 貼り付け	26
3.8	ビーム照射台にセット	27
3.9	nor50,rev50 の I-V 事前測定	28
3.10	nor75,rev75 の I-V 事前測定	29
3.11	3050 系統 I-V 比較 (0 rad, 300 rad, 1000 rad)	30
3.12	3075 系統 I-V 比較 (0 rad, 1000 rad)	30
3.13	照射後の暗電流の減衰	31
3.14	照射後 Background のスペクトル変化	32
3.15	通常版 MPPC の放射線照射による $^{241}\text{Am}$ のスペクトル変化	33

3.16	MPPC 3050CS(左) と 6050CS(右) . . . . .	34
3.17	1000 rad 照射した 3050 の通常版と改良版の比較 . . . . .	35
3.18	300 rad 照射した 3050 の通常版と改良版の比較 . . . . .	35
3.19	1000 rad 照射した 3075 の通常版と改良版の比較 . . . . .	36
3.20	300 rad 照射した 3075 の通常版と改良版の比較 . . . . .	36
3.21	3075 通常版と改良版の 0 rad と 300 rad 照射比較 . . . . .	37
3.22	300 rad 照射後の通常版と改良版の $^{241}\text{Am}$ スペクトル . . . . .	37
3.23	nor75_1000 rad 照射前後 . . . . .	38
3.24	rev75_1000 rad 照射前後 . . . . .	38
3.25	nor75_1000 rad 照射前後 (log scale) . . . . .	38
3.26	rev75_1000 rad 照射前後 (log scale) . . . . .	38
3.27	nor75_1000 rad 照射前後 (規格後) . . . . .	39
3.28	rev75_1000 rad 照射前後 (規格後) . . . . .	39
3.29	改良版の個々のピクセルの状況 . . . . .	40
3.30	20°C, 0°C, -20°C での nor50_1000 rad I-V 測定 . . . . .	41
3.31	20°C, 0°C, -20°C での rev50_1000 rad I-V 測定 . . . . .	42
3.32	-20°C:nor75_1000 rad 照射前後 (規格後) . . . . .	43
3.33	-20°C:rev75_1000 rad 照射前後 (規格後) . . . . .	43
3.34	1000 rad 照射後に電流を変更して測定したもの . . . . .	44
3.35	nor50_300 rad 20°C,0°C,-20°C . . . . .	44
3.36	rev50_300 rad 20°C,0°C,-20°C . . . . .	44
3.37	nor50_1000 rad 20°C,0°C,-20°C . . . . .	45
3.38	rev50_1000 rad 20°C,0°C,-20°C . . . . .	45
A.1	閾値と温度 . . . . .	49

# 表目次

1.1	様々な光検出器の特性 . . . . .	3
2.1	各温度での測定条件とエネルギー閾値、暗電流 . . . . .	17
2.2	各温度間でのエネルギー閾値と暗電流の変化率 . . . . .	17
2.3	各温度での測定条件とエネルギー閾値、暗電流 . . . . .	18
3.1	照射前後でのエネルギー閾値の変化 [keV] . . . . .	24
3.2	照射前後でのエネルギー閾値の変化 [keV] . . . . .	40
3.3	照射前後 1 ヶ月と 3 ヶ月でのエネルギー閾値の変化 [keV] . . . . .	41
3.4	各温度でのエネルギー閾値 [keV] . . . . .	45

# 第1章 序論

## 1.1 光検出器

宇宙空間で使用する光検出器には用途に合わせて様々な種類が存在する。この章では様々な検出器を簡単に説明した上で、今回実験に使用した MPPC について説明を行う。

### 1.1.1 光電子増倍管 (PMT)

光電子増倍管は高感度な光検出器であり、増幅率は  $10^5$  から  $10^8$  程度であるとされている。図 1.1 は光電子増倍管のイメージ図である。[1] 入射光はまず光電面 (カソード) に衝突し、そこで光電子を発生させる。続いて光電子は高電圧をかけられた電子増倍部 (ダイノード) と陽極 (アノード) に引き寄せられ、ダイノードに衝突するたびに増幅しながら最終的にアノードまで到達する。光電子増倍管は高い増倍率と低ノイズを持ち合わせているが、必要電圧が 1000V 程度と高く、また半導体検出器と比べてロバスト性が低く、人工衛星に搭載するには不向きな点もある。[2]

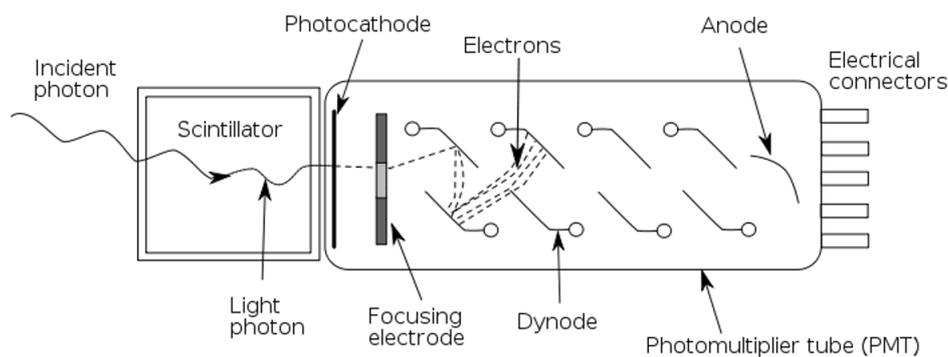


図 1.1: 光電子増倍管 [3]

### 1.1.2 フォトダイオード (PD)

フォトダイオードとは半導体光検出器の一つである。受光面に光子が入射すると、それを電気信号に変換する素子を持っている。この検出器は n 型半導体と p 型半導体からなり、素子に逆電圧を印加する。逆電圧によって広げられた空乏層にエネルギーギャップを超える光子が侵入すると、それに伴い発生した電子と正孔が内部の電界に沿って移動する。これが光電流となって検出が可能となる。[4]

### 1.1.3 アバランシェフォトダイオード (APD)

先程のフォトダイオードに増幅機能を付け加えたものがアバランシェフォトダイオード (APD) である。アバランシェとは雪崩を意味しており、文字通りきっかけとなる少量の電子・正孔対が他の電子・正孔対を繰り返し発生させることによって高い増幅率を得ることができるようになる。この APD には 2 つのモードがあり、一つはノーマルモード、もう一つがガイガーモードである。ノーマルモードは降伏電圧以下の電圧で作動し、印加された電圧に比例して増幅率も大きくなる。よって入射光子数と信号の大きさは線形関係にある。一方で、ガイガーモードは降伏電圧以上で作動する。このモードでは入射光子の数に関わらず、同じ出力の信号を出力する。ガイガーモードでは出力される信号の大きさは同じだが、数個の光子から検知でき、高い増幅率を持っている特徴がある。[4]

### 1.1.4 MPPC(Multi-Pixel-Photon-Counter)

本研究では MPPC (Multi-Pixel-Photon-Counter) を扱っている。浜松ホトニクス社の取り扱う光子計測デバイスの一つである。この光検出器を一言で表すと、ガイガーモードの APD をピクセル上に多数並べた検出器であると言える。一つのピクセルはガイガーモードの APD の後ろにクエンチング抵抗を直列に接続したもので構成されており、これを他のピクセルと並列に接続することで光量を測定する。MPPC は低電圧で作動し、小型で高いゲインを得られるという特徴を持っている。各ピクセルが格子状となっており、デッドスペースの増加により量子効率が PD や APD と比較して若干落ちるが、微量の光量でも検知し増幅できるという利点も持っている。

#### 実際のシンチレータ検出器使用事例

以上、シンチレータ検出器に使用される主な光検出器について説明した。実際に GRBA $\alpha$  は 10cm 角のキューブサットで、ガンマ線バーストや太陽フレアなどの突発現象を監視している。検出器は CsI(tl) シンチレータを MPPC 光検出器で読み出すというもので、2022 年から 1 年以上の運用が続けられている。[5]APD で読み出して、アクティブシールドやガンマ線バースト検出器として利用する「ひとみ」などもあり、次の衛星では MPPC の利用が検討されている。また、大型の人工衛星では、BGO シンチレータを光電子増倍管で検出する「すざく X 線衛星」や「フェルミガンマ線衛星」等がある。

### 1.1.5 各検出器の比較

ここまで紹介した光検出器について比較した以下表 1.1 に載せる。この表から MPPC は PMT に比べ、小型で低電圧での運用が可能であることがわかる。また、PD や APD と比較した際には高い増幅率を持っていることがわかる。その他にも回路が比較的シンプルであること、ピクセル検出器なので、受光面積が可変で有ること等が挙げられる。これらの特徴から、MPPC は小型の人工衛星に搭載することに適していると考えられている。

表 1.1: 様々な光検出器の特性

	検出効率 [%]	増幅率	暗電流	動作電圧 [V]	サイズ [cm]
光電子増倍管	40	$10^7$	低	1000	10
PD	80	1	低	数 10	1
APD	70	100	中	数 100	1
MPPC	40	$10^6$	高	数 10	1

## 1.2 放射線損傷と暗電流

ここでは MPPC の受ける放射線ダメージとそれに伴う影響について話す。宇宙空間でのガンマ線や粒子の検出には、シンチレータと光検出器を組み合わせたシンチレータ検出器がよく使用される。MPPC は数 cm の大きさで、数十 V の低電圧で動作するため、電力に制限のある CubeSat では光検出器として利用されている。[5]

### 1.2.1 放射線損傷

人工衛星に搭載される光検出器は宇宙空間で運用する際、宇宙線などの放射線に曝される。光検出器は宇宙からの放射線（陽子・中性子）により受光面上の複数のピクセルが損傷することが知られている。損傷したピクセルはノイズの原因である暗電流を増加させ、光半導体検出器はわずか一年の衛星軌道運用で検出器のエネルギー分解能の低下や低エネルギー閾値の上昇を引き起こす。一方、[Annealing of proton radiation damages in Si-PM at room temperature][6] で MPPC も他の半導体検出器と同様に、低温で暗電流が減少することが知られている。

### 1.2.2 暗電流

光刺激がない、すなわち光子が受光面に入射していないのに関わらず電流が発生してしまう現象のことを言う。この暗電流は素子の特性に起因しており、放射線で損傷していない状態でも微量の電流は検出される。MPPC の場合、暗電流の発生する原因として挙げられるのは、バルク電流の漏れと素子表面で起きる表面リーク電流である。

バルク電流とは検出器の素子の表面を流れる電流のことである。検出器の素子は放射線に曝されることによって Si 結晶中に格子欠陥が発生してしまうと、禁制帯にエネルギー準位ができてしまう。そうすると、熱励起された電子が新たなエネルギー準位を介して伝導帯に放出され、結果的に光子が入射していないのに電流が流れる現象が起きる。このバルク電流はガイガーモード APD ではターゲット信号と同じ様に増幅されてしまい、主なノイズとなってしまふ。一方、表面リークによる暗電流は表面の汚れなどにより、想定していない部分が導通してしまい、電流が流れてしまう現象である。こちらはバルク電流の様に増幅されないので、出力信号への影響は小さいと考えられる。[4]

下のイメージ図は MPPC の受光面を模している。図は放射線で損傷する前のもので、通常状態のものである。MPPC の受光面は多数のピクセルを並列に接続したもので、各ピクセルは独立している。通常は左の図のように光子を検出したピクセルのみ信号を出す。一方、放射線に曝されて暗電流を検知しやすい欠

陥ピクセルが発生すると、光子だけでなく暗電流にも反応し、信号を出力するようになる。各ピクセルから出力される信号は 1.1.3 に記載した通り、光子・暗電流関係なく同じ信号を出力するので、取得したい信号がノイズに埋もれてしまう現象が発生するようになる。こうなると宇宙空間での運用が難しくなる。これが放射線による光検出器の性能劣化である。

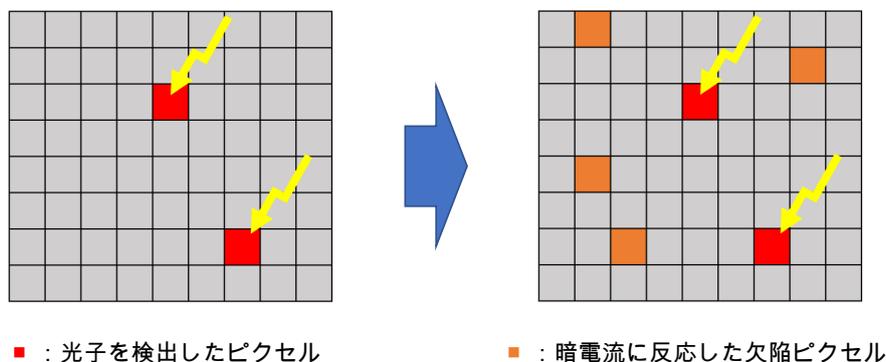


図 1.2: MPPC 受光面の損傷前と損傷後イメージ

### 1.3 研究の背景・目的

このような MPPC の放射線による性能の劣化は人工衛星の地球低軌道上での運用において、約 1 年ほどの運用で観測に支障をきたすようになる。このような問題を解決するために今回 2 つの手法を考えた。どちらの手法も前提条件として、放射線によって損傷してしまった素子を損傷する前の状態に戻すことを目的としていない。あくまで性能が素子の劣化・変化が生じた際に、外的環境の変化や信号処理をすることによって、出力信号を正常なものへと近づけるためのものである。

#### 1.3.1 検出器を冷却して暗電流の発生を抑える

1 つ目の手法では検出器を冷却する手法をとっている。先ほどの 1.2.2 で話したように、MPPC が放射線で損傷した場合、暗電流発生 の主な原因となるのは熱励起による電子の伝導帯への放出である。そこに注目し、この手法では検出器全体を冷却することによって、暗電流の発生頻度自体を減らすことが狙いとなっている。それによって暗電流由来のノイズを減らし、結果的に性能を損傷前のものに近づけるということが狙いである。MPPC の冷却に関する先行研究はいくつか存在しており、一般的な半導体検出器と同様、MPPC も冷却することによってある程度暗電流の発生を抑えることが可能であることがわかっている。しかし、放射線損傷した MPPC を冷却した場合にどれほど暗電流の発生が抑えられるかについてはまだ詳しく調べられていない。本研究では放射線で損傷した MPPC について、室温から低温 100 K までの温度範囲で性能や振る舞いを評価した。

#### 1.3.2 各ピクセルの復帰時間を延長して暗電流信号の取得頻度を減らす

続いて、2 つ目の手法の内容について説明する。この手法は温度によらない暗電流対策の一つとして考案され、暗電流とターゲット信号の発生頻度の違いに注目している。MPPC などの一般的な検出器の復帰

時間<sup>1</sup>は 100 ns ほどである。また、ターゲット信号となるガンマ線などの到来頻度は検出器にもより異なるが、10 cm 角程度のサイズで、明るい天体 (ガンマ線バースト) や宇宙線バックグラウンドで予想されるレートはおよそ 1 ms の間隔だとされている。一方で、ピクセルが放射線で損傷した場合、ピクセルからは連続的に暗電流ノイズの信号が出続けることとなり、その発生頻度はターゲット信号の頻度よりも高く、このような状況下ではターゲット信号がノイズ信号に埋もれてしまい、信号の読み出しが難しくなる。そこで、2つ目の手法では MPPC のクエンチング抵抗を大きくして各ピクセルの復帰時間を長くし、欠陥ピクセルからの信号のみ増幅を抑制することで、相対的に暗電流の寄与を小さくすることを考えた。

---

<sup>1</sup>注: 待機状態にあるピクセルが光を検出し、信号を出力してから次の待機状態になるまでの時間のことをここでは復帰時間とよんでいる

## 第2章 低温実験

### 2.1 目的

本研究では、BGO シンチレータと MPPC を組み合わせたシンチレータ検出器において、放射線により劣化してしまった MPPC の性能を低温で回復させる方法を調べた。実験方法としては放射線劣化した MPPC を室温から低温（100K）の環境下まで冷却を行い、劣化してしまった MPPC が 100 K の極低温で回復できるかを調べるといったものである。

### 2.2 測定の流れ

低温での検出器の振る舞いを調べるために、まずは MPPC 光検出器（浜松ホトニクス MPPC、S13360-6050）のみを真空槽に入れ、冷凍機を用いて徐々に温度を下げていった。温度は 293 K(室温) から 100 K までの範囲で変化させた。また複数の温度で電圧を変化させてその時の電流を記録する I-V 測定も行った。次に MPPC 光検出器と BGO シンチレータを組み合わせたシンチレータ検出器を真空槽に入れ、同様の実験を行った。

### 2.3 実験セットアップ

#### 2.3.1 MPPC・シンチレータ

MPPC には受光面が 6 mm 角の浜松ホトニクス製の S13360-6050 型の MPPC を用いた。この検出器は 200 MeV の陽子を 1000 rad 照射して放射線劣化させたものである。(これは  $1.71 \times 10^{10}$  protons/cm<sup>2</sup> に相当し、中性子換算では  $(1.69 \times 10^{10} \text{ 1 MeV neq})$  に相当する) 使用した MPPC の周辺回路については [Silicon photomultiplier (Si-PM) comparisons for low-energy gamma ray readouts with BGO and CsI (Tl) scintillators][7] で使用したものと同一である。

また、シンチレータには BGO を使用した。BGO は減衰時間が室温では 300 ns 程度である。大きさは 1 cm 角のものを使用した。今回の実験では検出器受光面とシンチレータの間にオプティカルラバー (EJ-560, 厚さ：1 mm) を挟んだ。

#### 2.3.2 配線・回路

配線・回路図を下の図のように示す。使用した機材は以下のものである。

- HV(Keithley2400)

- Preamplifier(CP-2916)
- Shaper(ORTEC-571)
- ADC(DC8000)

また今回電源ソースから真空槽、真空槽から前置増幅器までは 1m の導線で繋いでいる。

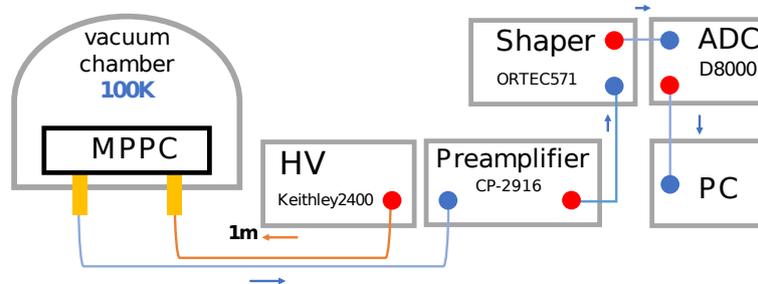


図 2.1: cable setup

### 2.3.3 真空冷却器・真空層

今回の実験では冷却に真空冷却器を使用した。典型的な真空槽の真空度は室温 293K で約  $1.0 \times 10^{-3}$  Torr であり、低温 100 K では約  $1.0 \times 10^{-7}$  Torr であった。今回使用した冷却器は真空層の底面のステージが低温に下がり、それに接している検出器の底面からの熱伝導により冷却するというものである。MPPC 単体での測定では、MPPC 表面をステージに接触させており、MPPC 全体がステージ温度に保たれている。一方、BGO と MPPC を組み合わせた測定では、BGO シンチレータのひとつの面（底面）をステージに接触させ、MPPC は BGO の側面に接着した状態にした。したがって、1 cm 角の BGO の側面に MPPC を接着した場合、MPPC の底面に近い側と上面に近い側で冷却中に温度勾配が生じる。そこで今回は BGO 上面とステージに温度計を設置し、2つの温度の平均温度を MPPC と BGO を組み合わせた検出器全体の温度とした。実際に平均 100 K となった際はステージ上の温度計は 70 K であり、BGO 上面の温度計は 130 K を示していた。

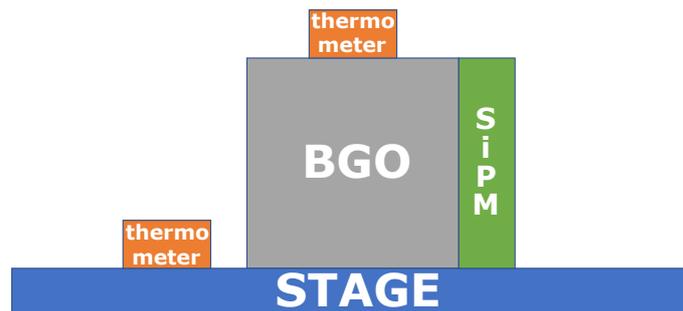


図 2.2: Positioning of measuring instruments

## 2.4 結果

### 2.4.1 I-V curve with MPPC only

まずは MPPC 検出器のみで温度による暗電流の変化を調べた。図 2.3 は放射線で劣化した MPPC を室温 (293 K) から 100 K での環境温度で I-V グラフを測定したものと室温での劣化していない通常の MPPC の I-V グラフをプロットしたものである。縦軸は電流、横軸は電圧である。使用した MPPC の周辺回路には 1 k $\Omega$  の抵抗が直列で入っているので暗電流が大きい MPPC では実行的に電圧が下がると考えられる。室温での劣化していない通常の MPPC に付いて、MPPC のデータシート [8] によると、ダークカウントが通常 2000 kc/s であり、増倍率が  $1.7 \times 10^6$  である。暗電流は

$$\text{暗電流 [A]} = \text{ダークカウントレート [count/s]} \times \text{増倍率} \times \text{電気素量 [c]} \quad (2.1)$$

で表されるので、暗電流は  $5.44 \times 10^{-7}$  A となり、実験で得た推奨動作電圧での電流値と 2 倍以内の差であった。次に、先行研究 [6] に記載されている、1000 rad で放射線劣化した MPPC の室温での暗電流を見ると約  $1.0 \times 10^{-4}$  A であり、今回の測定では推奨電圧で  $2.46 \times 10^{-4}$  A あった。以上の結果から使用した通常の MPPC、1000 rad 照射した MPPC の室温での特性は妥当だと判断した。

今回測定した通常の MPPC と劣化した MPPC の比較をする。室温では 1000 rad で劣化した MPPC の暗電流はそうでない MPPC に比べて 3 桁近く暗電流が大きくなっていることがわかった。また、放射線で劣化した MPPC の縦軸の変化を見ると、温度が下がるにつれて全体的に暗電流が減少していることがわかる。100 K では室温での約 1/1000 程度まで減少していることがわかった。同様に横軸の変化について注目すると、温度が低下するにつれてブレイク電圧が左にシフトしていることがわかる。100 K では常温からブレイク電圧値が約 6 V 下がることがわかった。これは光半導体検出器の仕組みに由来するものだと考えられている。(ブレイク電圧値とはある電圧で急に電流が増加を始める電圧のことである。一般的に計測に適している電圧はブレイク電圧から +3 V したものである。)

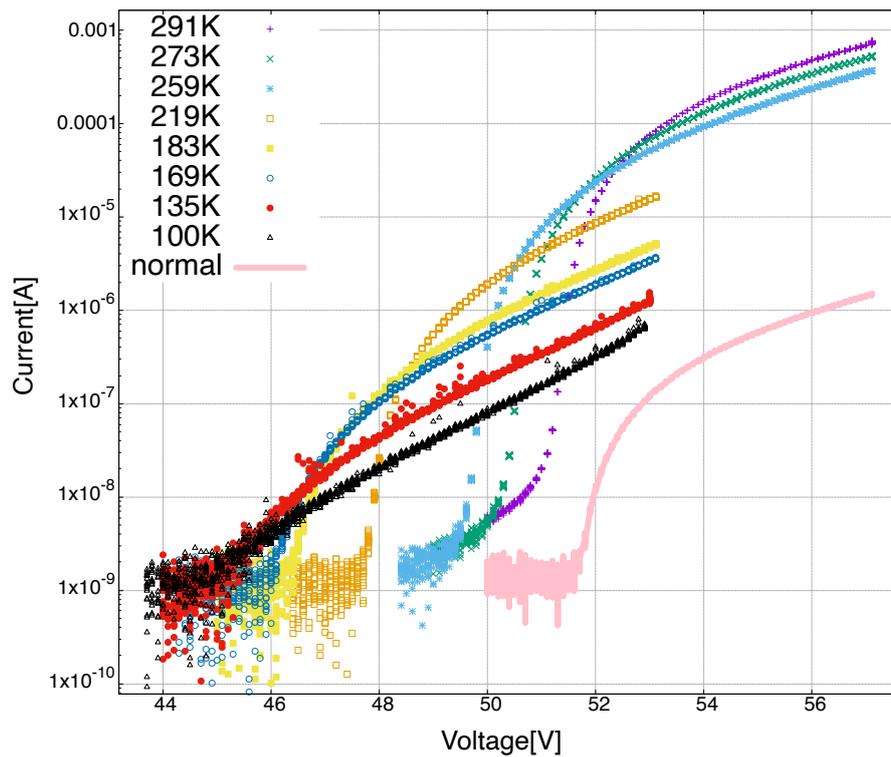


図 2.3: Dark current and temperature

さらに図 2.4 ではブレイク電圧位置を揃え、ブレイク後の電流を各温度で比較しやすくしたグラフを用意した。また、先程と同じくグラフに放射線によって劣化していない MPPC の室温 291 K でのデータを実線で追加している。

この結果から、1000 rad の放射線で劣化した MPPC でも、170 K ~ 180 K 程度まで冷却することによって通常の MPPC と同程度の暗電流の大きさまで低減することが可能であることがわかった。また、そのまま 100 K まで冷却を続けることで順調に暗電流も小さくなっていくことも確認した。劣化した MPPC について、大まかに見ると 50 K 温度が下がるごとに暗電流が約 1 桁減少していることがわかった。その後、100 K に到達した時点で MPPC に機械的な故障や変化は見られず、再び室温に戻した後も正常に動作することを確認したため、放射線劣化した MPPC も低温 100 K で問題なく動作することがわかった。

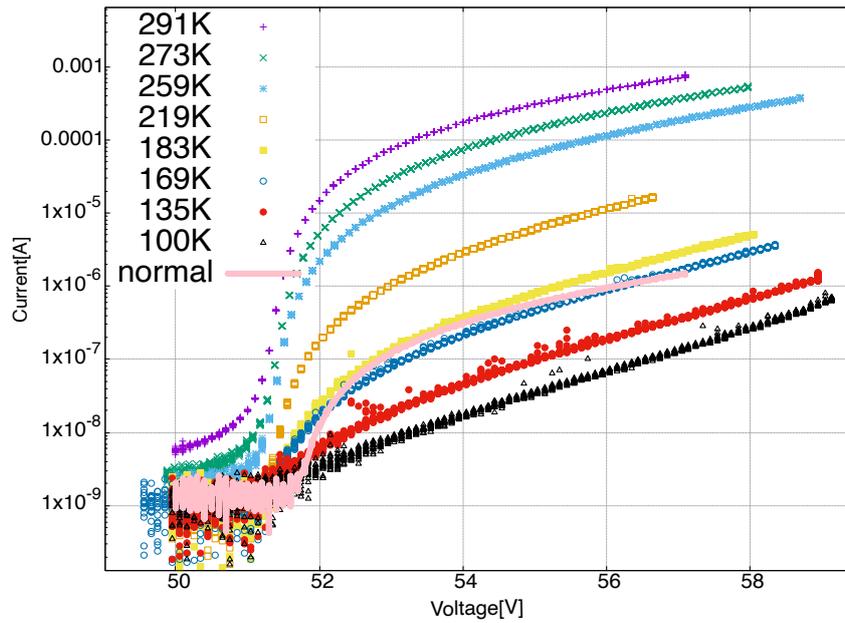


図 2.4: Dark Current and Temperature(voltage adjusted)

## 2.4.2 BGO の生波形の温度依存性

図 2.1 は室温 292 K から 100 K での BGO シンチレータから放出されるシンチレーション光を放射線劣化した MPPC で読みだした際の生波形であり、各温度での BGO シンチレータの減衰時間を表している。シンチレータは温度が下がると発光時間が伸びる性質がある。BGO は室温では減衰時間が 300 ns 程であるが、100 K まで下げると減衰時間は 1500 ns 以上まで伸びることを確認した。また 77 K では減衰時間が数十  $\mu\text{s}$  になることがわかっている [9]。横軸は立ち上がりからの減衰時間を示している ( $\mu\text{s}$ )。縦軸は電圧を示しているが、必ずしもガンマ線の energy deposit が均一ではないため、見やすいように規格化している。低温ほど波形が長くなるので、最適なエネルギー閾値が得られるように、shaper の shaping time を調整することにした。

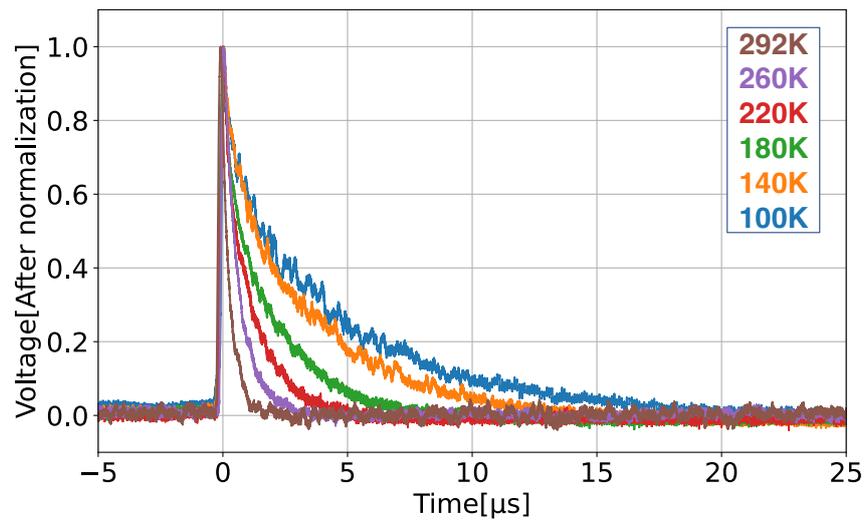


図 2.5: Temperature dependence of BGO waveforms

### 2.4.3 放射線で損傷した MPPC の増幅率の温度依存性

MPPC の信号の増幅率は降伏電圧からの追加電圧値で決まっている。同時に MPPC は温度を低下させると降伏電圧も低下することがわかっている。MPPC は浜松ホトニクス製の MPPC である。MPPC のデータシート [10] を確認したところ、温度変化による内部抵抗値の変化は少ないとあり、増幅率も温度依存は少ないと記されている。

今回は確認もふまえ、使用した劣化 MPPC の 100 K と 160 K での増幅率を調べた。放射線で劣化した MPPC ではノイズレートが高すぎ、1 光電子ピークの分離ができなかったため、室温での測定結果はない。測定に使用したのは CP FAST/SLOW AMPLIFIER で MPPC から出力される信号を one photo-electron peak を分離することができる。MPPC から出力される photo-electron 信号の間隔の平均がその時の増幅率と比例関係にあり、平均間隔が大きくなれば増幅率も大きくなっていることを示している。今回はこれを利用して増幅率の比較を行った。下の図は横軸に降伏電圧からの追加電圧、縦軸に出力された photo-electron peak の平均間隔をプロットしている。図のように 60 K 異なる温度でも降伏電圧からの増幅率の増加傾向はほぼ同じであることを確認した。

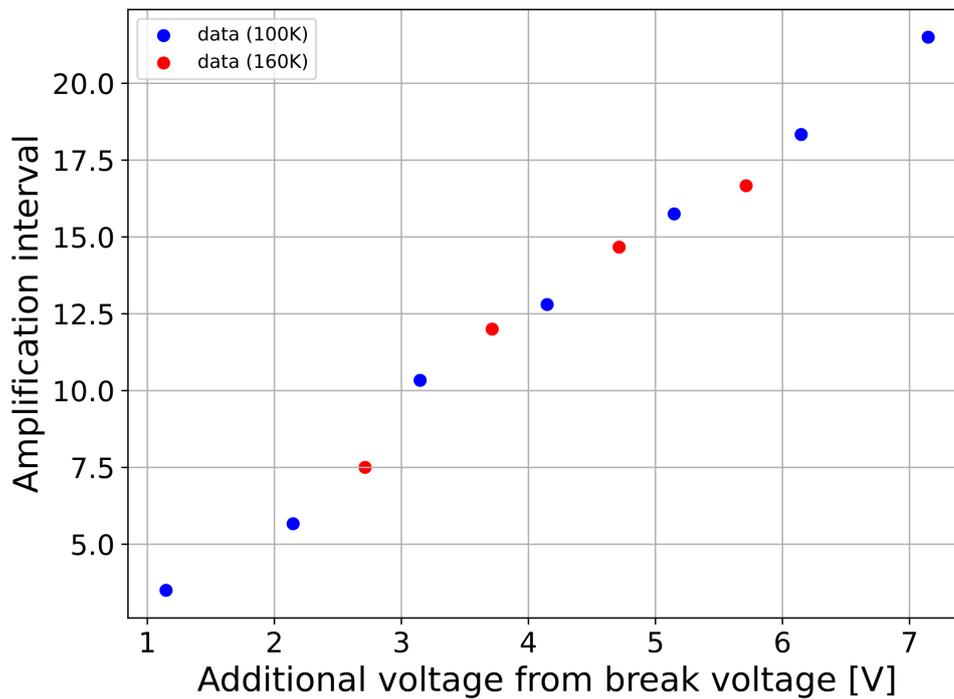


図 2.6: Spectra of  $^{241}\text{Am}$  (Blue),  $^{109}\text{Cd}$  (Green) @100 K

#### 2.4.4 Temperature dependence of energy spectra

下の図 2.7 は室温 (292 K) から 233 K まで温度を降下させたときと、100 K での  $^{137}\text{Cs}$  線源のスペクトルの変化である。この図は低エネルギー側での形を見やすくするために X 軸も log スケールにしている。茶色のものが室温での測定で、エネルギー閾値が最も高い。3つの緑色のスペクトルは温度が低いほどピーク位置が右側である。青色が 100 K のもので、各温度の中でもエネルギー閾値が最も低いことが確認できる。この時、室温 292 K と 100 K の測定時の温度変化はなく、それ以外での中間温度では、1 点を測定する際に変化する温度は約 0.5 K であった。この時 shaping time は 292 K, 265 K から 265 K までは  $1 \mu\text{s}$  で、233 K では  $2 \mu\text{s}$ 、100 K では  $3 \mu\text{s}$  で測定した。また、こうしたエネルギースペクトルから、エネルギー閾値を求めている。具体的な手法については、Appendix を参照。

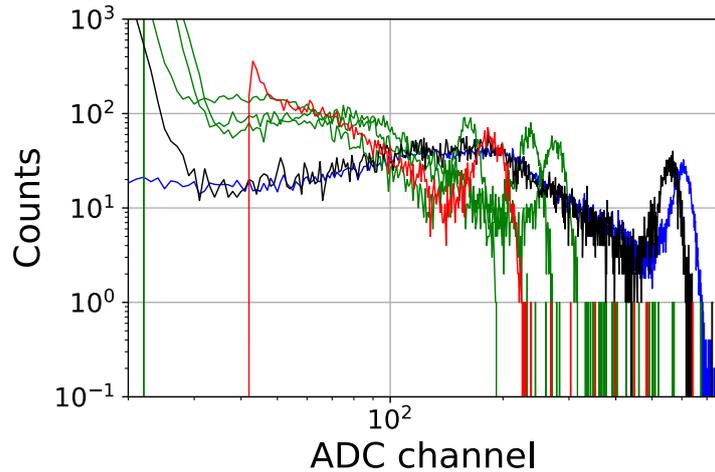


図 2.7: Spectra of  $^{137}\text{Cs}$  @46.5V\_100K (Blue), 50.5V\_233K (Black), 51.5V\_265K,268K,273K (Green), 52.5V\_292K (Red) For the three green spectra, the lower the temperature, the more the peak position moves to the right.

続いて下の図 2.8 は 250K から 100K までの  $^{241}\text{Am}$  線源のスペクトルの変化である。この図も低エネルギー側での形を見やすくするために X 軸を log スケールにしている。同電圧では温度が下がるに連れて光電吸収ピークが右にシフトし、エネルギー閾値は減少することを確認した。これは  $^{137}\text{Cs}$  線源でも見られた傾向である。250 K では 60 keV のピークは半分ノイズに埋もれていたが、温度が下がるにつれて次第に見えるようになり、最終的には 100 K で 20 keV 付近のピークも確認することができるようになった。Am 線源のスペクトル測定では 100 K の測定時の温度変化はなく、それ以外での中間温度では、1 つの点を測定する際に変化する温度は約 1 K であった。図 2.8 の赤色は電圧が 50.5 V、shaping time 2  $\mu\text{s}$  であり、青色は電圧 49.5 V、shaping time 3  $\mu\text{s}$  で測定している。また、赤、青のそれぞれの中で、低い温度ほどピークが右側にある。

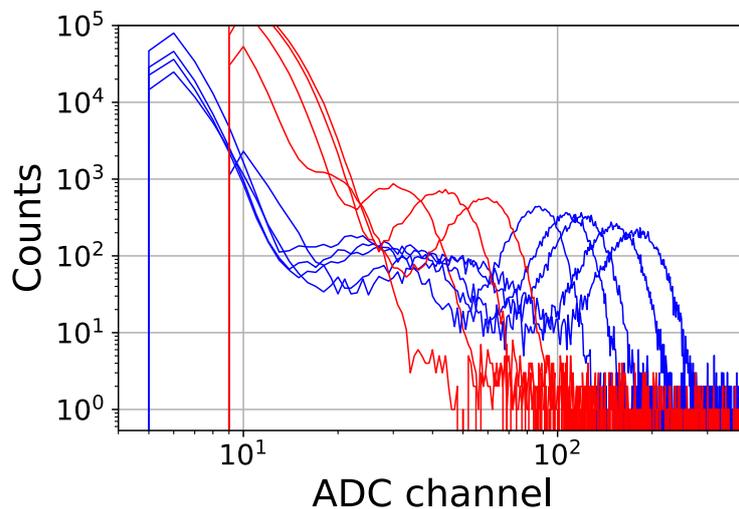


図 2.8: Spectra of  $^{241}\text{Am}$  @49.5 V\_100K to 187 K(Blue), 50.5 V\_225 K to 253 K(Red)

## 2.4.5 エネルギー閾値の決定方法

エネルギー閾値の決定方法についてはその時の測定温度によって条件が異なっている。降温過程では徐々にブレイク電圧が低下していく。閾値の測定にはその温度での測定に適した線源とノイズ信号が必要になるので、エネルギー閾値を確認できる最低限のノイズが見える範囲で徐々に電圧を下げていった。また、オシロスコープで信号にサチュレーションが起きていないかの確認を行った上で、shaping time を 1,2,3  $\mu$ s で変化させスペクトルを取得し、最も閾値の低かったものを採用している。室温付近では 0.5 または 1  $\mu$ s で測定し、降温過程で 2  $\mu$ s と比較しつつ、エネルギー閾値が良い方を採用するという方式を取った。エネルギー校正に使用する線源については温度によって変更しており、高温部ならば、主に  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Ba}$  を使用し (図 2.9)、低温部では  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{241}\text{Am}$  を主に使用した (図 2.6)。

下の図 2.9 では、それぞれ  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{133}\text{Ba}$  の光電吸収ピークから閾値を 105 keV と算出した。 $^{133}\text{Ba}$  の光電吸収ピークは放射線劣化した MPPC ではエネルギーを分解できず一つの光電吸収ピークとなってしまうため、303 keV と 356 keV、384 keV の 2 本の重心から 348 keV とみなした。また、その際の閾値の決定方法はノイズ信号が 0.5 counts/sec 以上となる境界を閾値 ch としている。また、比較的レートの高い線源と比べても、ノイズレートは十分に高く、Background の判別が可能であった。図 2.9 でのエネルギー閾値の計算例を挙げる。

$^{137}\text{Cs}$  の 662 keV の光電吸収ピークは 188 ch、 $^{133}\text{Ba}$  の光電吸収ピークを 104ch、 $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Ba}$  と同じ測定条件でバックグラウンドを測定した際にノイズ信号が 0.5 counts/sec 以上となる境界は 48 ch であった。この測定結果を用いてまず、 $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Ba}$  のエネルギーと ch の校正直線を作成する。次にその直線の式にバックグラウンドの ch を代入し、エネルギー閾値として算出する。

今回の場合、(662 keV, 188 ch), (348 keV, 104 ch) から直線式

$$ch = 0.627 \times keV + 11 \quad (2.2)$$

を得る。ここに background = 48 ch を代入してエネルギー閾値 138.6 keV を得た。図 2.10 についても同様の手法を用いて、 $^{241}\text{Am}$ (60 keV, 182 ch)、 $^{109}\text{Cd}$ (22 keV, 57 ch), (88 keV, 278 ch)、background = 17 ch からエネルギー閾値を 10.2 keV であるとした。

誤差は典型的に  $^{137}\text{Cs}$  の 662 keV で  $\pm 1$  ch で  $\pm 2$  keV、 $^{133}\text{Ba}$  では高温かつ分解能が足りないので判定が難しいため、348 keV で  $\pm 6.07$  ch で  $\pm 35$  keV。 $^{109}\text{Cd}$  の 88 keV で  $\pm 7.30$  ch で  $\pm 0.7$  keV、22 keV は  $\pm 0.25$  ch で  $\pm 0.1$  keV、 $^{241}\text{Am}$  60 keV で  $\pm 1$  ch で  $\pm 1$  keV であった。

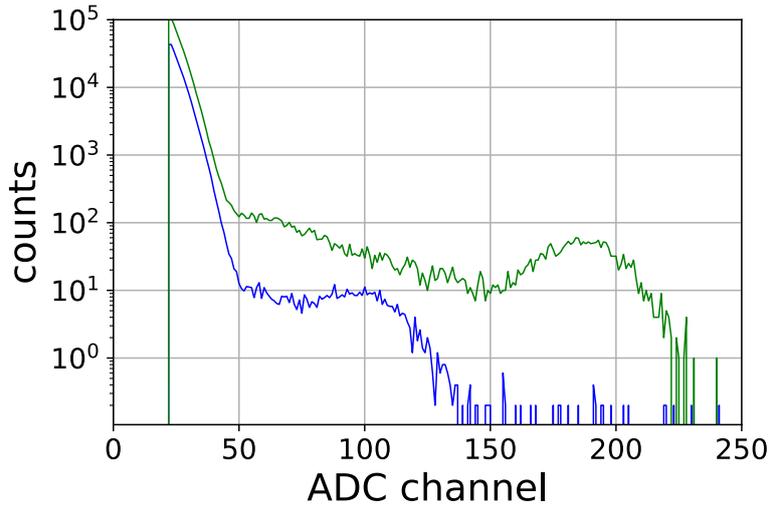


図 2.9: Spectra of  $^{137}\text{Cs}$  (Green),  $^{133}\text{Ba}$  (Blue) @292 K

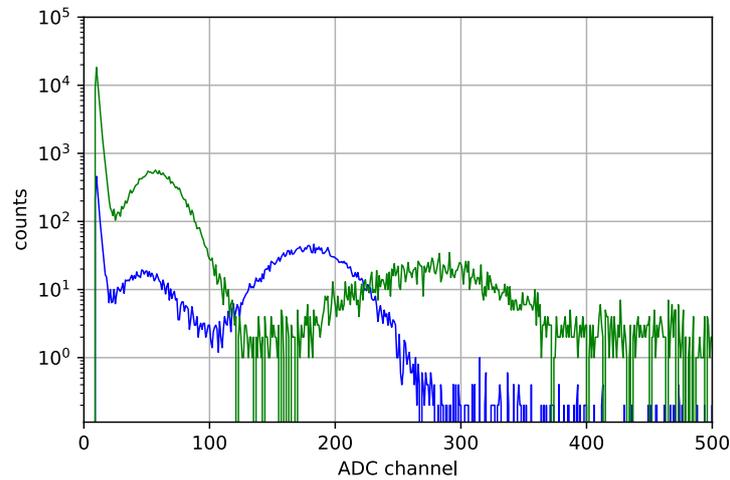


図 2.10: Spectra of  $^{241}\text{Am}$  (Blue),  $^{109}\text{Cd}$  (Green) @100 K

## 2.4.6 エネルギー閾値の変化

下のグラフは温度とエネルギー閾値の関係を表したグラフである。縦軸がエネルギー閾値、横軸が温度である。このグラフから、温度が低下すると共にエネルギー閾値も低下していることが確認できる。また、170 K より以下では、それ以上冷却しても閾値が低下しない傾向があることがわかった。この傾向は放射線で損傷していない通常の MPPC にも見られたものである。この測定では低温になるにつれて、MPPC の暗電流の低下と BGO 波形が長くなるという 2 点から各温度で *shaping time* や電圧を調整している。グラフにプロットしたエネルギー閾値は各温度で調整した測定結果の中で、最も低いエネルギー閾値の値である。

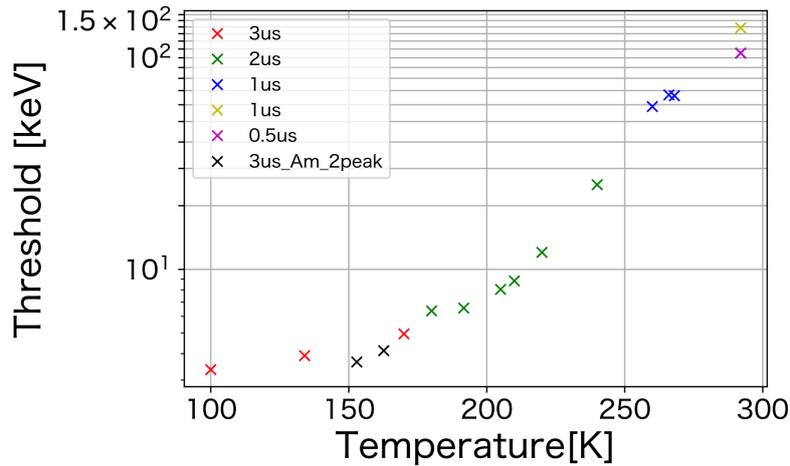


図 2.11: Threshold and Temperature

### 考察

エネルギー閾値は 170 K 付近まで冷却すると、それ以上冷却しても閾値が下がらない傾向が見られたが、図 2.4 では、室温から 100 K まで下げる過程において、MPPC から出力される暗電流の大きさは指数関数的に低下することを確認し、170 K 以下になっても暗電流は下がり続けることがわかっている。このことから 170 K 以下のエネルギー閾値では、MPPC の暗電流はもはや支配的ではなく、BGO の発光量が少ないことに起因するポワソン揺らぎが決定していると考えられる。

そのことを確かめるため、以下の表ではエネルギー閾値とそれを測定した電圧での暗電流の大きさの関係を調べた。一般的に有効ノイズは暗電流によるノイズを  $\sigma_D$ 、読み取りノイズを  $\sigma_R$ 、光電子のゆらぎを  $\sigma_S$  とすると

$$Threshold = \sqrt{(\sigma_D)^2 + (\sigma_R)^2 + (\sigma_S)^2} \quad (2.3)$$

のように表される。ここで、室温から 170 K 付近まで有効ノイズのうち暗電流ノイズが支配的であるとすると

$$Threshold \approx \sqrt{(\sigma_D)^2} \quad (2.4)$$

という関係になると考えた。そこで表 2.1 では各温度でのエネルギー閾値と、閾値を測定した電圧での暗電流の大きさをまとめている。ここから各温度間での変化率が式 (2.4) の関係のような関係があるかどうかを調べた。BGO の発光時間を考慮すると、0.5  $\mu$ s のシェーピングタイムは短すぎると考え、1  $\mu$ s での測定結果を採用している。

表 2.1: 各温度での測定条件とエネルギー閾値、暗電流

温度 [K]	291	260	220	170	135	100
測定電圧 [V]	52.5	51.5	50.5	49.5	49.5	49.5
暗電流 [A]	$3.99 \times 10^{-5}$	$1.42 \times 10^{-5}$	$3.00 \times 10^{-6}$	$3.81 \times 10^{-7}$	$1.30 \times 10^{-7}$	$5.72 \times 10^{-8}$
エネルギー閾値 [keV]	138	88.2	25.6	12.7	11.0	10.5

この表からそれぞれの温度間でのエネルギー閾値と  $\sqrt{(\text{暗電流の変化率})}$  をまとめると

表 2.2: 各温度間でのエネルギー閾値と暗電流の変化率

	291 K-260 K	260 K-220 K	220 K-170 K	170 K-135 K	135 K-100 K
暗電流変化率	0.357	0.211	0.127	0.340	0.441
$\sqrt{\text{暗電流の変化率}}$	0.598	0.459	0.356	0.583	0.664
閾値変化率	0.639	0.290	0.497	0.866	0.955

表 2.2 を見てみると 291 K-260 K の間で式 (2.4) の関係が成り立っていることを確認した。170 K-100 K では光子のゆらぎによって閾値の変化が小さくなると考えられる。

また、260 K-220 K の区間で  $\sqrt{\text{暗電流の変化率}}$  と閾値変化率の間で逆転現象が起きている。これは測定した shaping time と BGO の低温における時定数と発光量の変化によるものだと考えた。詳しくは付録 2.4.7 に記載する。

## 2.4.7 BGO の光量変化、時定数増加と shaping time の関係

BGO は低温にすることで、発光量や時定数が変化することがわかっている。ここで表 2.2 の 260 K-220 K の区間で  $\sqrt{\text{暗電流の変化率}}$  と閾値変化率の間で逆転現象が起こった原因について述べる。下の表 2.3 はその時の測定条件をより詳細に記したもので、over voltage, shaping time, BGO 減衰時間が追加されている。まず、291 K-260 K の区間では shaping time を  $1 \mu\text{s}$  に設定していた。その間、減衰時間は  $0.3 \sim 1 \mu\text{s}$  に変化している。よって室温では  $1 \mu\text{s}$  の shaping time で 100% の光量を得るが、260 K では BGO の減衰時間も  $1 \mu\text{s}$  まで伸びるので温度変化の途中で発生する光をそれなりに取りこぼすようになる。また BGO はその間光量が 1.5 倍になるが、その影響は相殺される。また、ノイズ (暗電流) についても shaping time  $1 \mu\text{s}$  から変更されていないので暗電流の温度変化以外は反映されない。

一方、260 K-220 K での変化では、減衰時間は  $1 \mu\text{s}$  から  $2 \mu\text{s}$  に伸びているが、それに合わせて shaping time も  $1 \mu\text{s}$  から  $2 \mu\text{s}$  に設定したので 260 K-220 K の区間では光量を取り入れる割合は変わらないと考えられる。そのうえで BGO の発光量は 260 K から約 1.4 倍増えるが、その影響が顕著に現れたため、260 K に比べて 220 K でのエネルギー閾値が極端に良くなってしまったと考えられる。shaping time を  $1 \mu\text{s}$  から  $2 \mu\text{s}$  に変更したことにより暗電流の積分時間が増えるが、エネルギー閾値に大きな影響は与えていないと考えた。

表 2.3: 各温度での測定条件とエネルギー閾値、暗電流

温度 [K]	291	260	220	170	135	100
測定電圧 [V]	52.5	51.5	50.5	49.5	49.5	49.5
over voltage[V]	1.0	1.7	2.7	3.5	4.7	5.2
shaping time[ $\mu$ s]	1	1	2	3	3	3
BGO 減衰時間 [ $\mu$ s]	0.3	1	2	4	6	8
暗電流 [A]	$3.99 \times 10^{-5}$	$1.42 \times 10^{-5}$	$3.00 \times 10^{-6}$	$3.81 \times 10^{-7}$	$1.30 \times 10^{-7}$	$5.72 \times 10^{-8}$
エネルギー閾値 [keV]	138	88.2	25.6	12.7	11.0	10.5

また、温度によってエネルギー閾値が変化するため 260 K-220 K 間では閾値決定に使用する線源を  $^{109}\text{Cd}$ (88 keV),  $^{241}\text{Am}$ (60 keV) から  $^{137}\text{Cs}$ (662 keV),  $^{133}\text{Ba}$ (348 keV) に変更している。これにより MPPC から出力される光電子の数が最大 10 倍異なり、光電子のゆらぎも低エネルギー側で大きくなることが予想される。170 K ~ 135 K、135 K ~ 100 K ではすでに光電子ゆらぎによって冷却過程でも閾値の変化が小さくなると考えられる。

#### 2.4.8 温度によるエネルギー分解能の変化

温度とエネルギー分解能の変化についても調べた。グラフはその時の変化を表していて、横軸が温度、縦軸がエネルギー分解能である。室温では  $^{137}\text{Cs}$  の 662 keV で  $(17.46 \pm 1.15)\%$  であったエネルギー分解能は温度が下がるにつれて分解能も良くなり、100 K ではエネルギー分解能は  $(10.03 \pm 0.36)\%$  となった。各測定点での FWHM 誤差から分解能の誤差を算出し、エラーバーにしている。

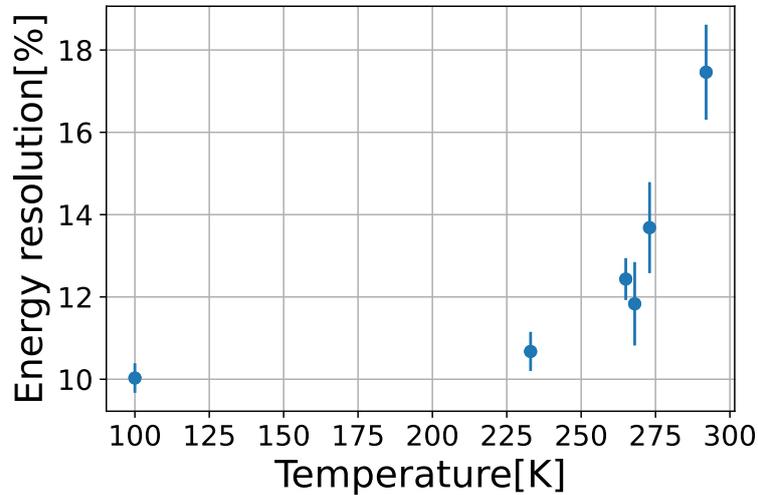


図 2.12: Energy resolution at 662 keV, the photoelectric absorption peak of  $^{137}\text{Cs}$  at each temperature

## 2.4.9 Energy spectra of various sources at low temperature 100 K

温度 100 K において、様々な線源で取得したエネルギースペクトルを図 2.13 に示す。この図は低エネルギー側での形を見やすくするために X 軸も log スケールにしている。またシェーピングタイムは  $3 \mu\text{s}$  である。光電吸収ピークは最高で  $^{137}\text{Cs}$  の 662 keV、最低で  $^{109}\text{Cd}$  の 22 keV であるが、その間のスペクトル形状を見る限り、100 K のもとでも異なるエネルギー間の増幅率に大きな違いは見られなかった。

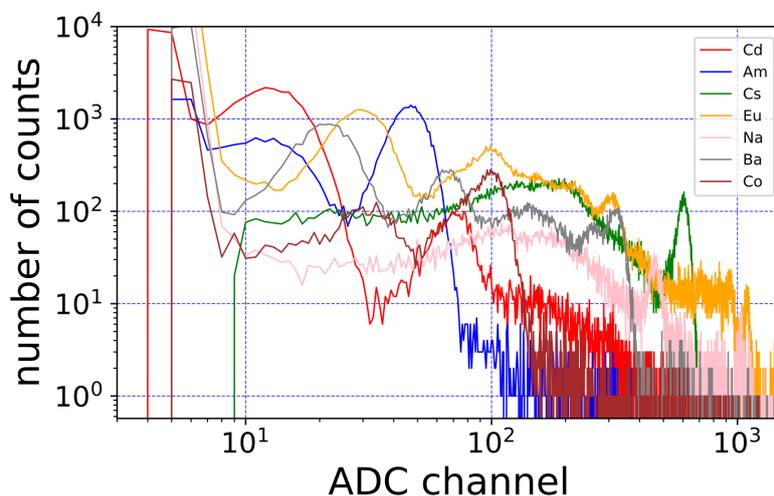


図 2.13: Spectra of  $^{109}\text{Cd}$  (Red),  $^{241}\text{Am}$  (Blue),  $^{137}\text{Cs}$  (Green),  $^{152}\text{Eu}$  (Orange),  $^{22}\text{Na}$  (Pink),  $^{133}\text{Ba}$  (Gray),  $^{57}\text{Co}$  (Brown) @100 K

さらに、下の図 2.14 は図 2.13 の各放射線源の光電吸収ピーク ch をもとに作成した校正直線である。なお、 $^{22}\text{Na}$  の 1275 keV は、MPPC のピクセル数が十分ではなく、線形から外れているため除去している。この結果から MPPC が放射線で劣化しても低温にして暗電流を低減することができれば、linearity を保った検出器として動作することがわかった。

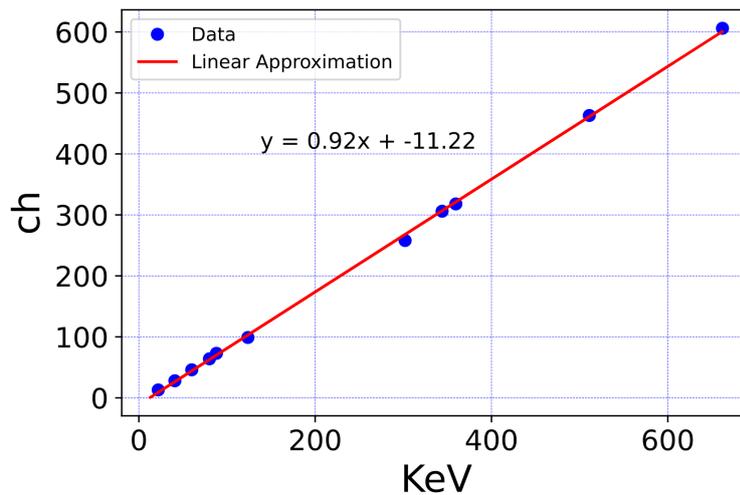


図 2.14: Linearity

## 2.5 まとめ

暗電流は室温で約  $100 \mu\text{A}$  (放射線劣化のない通常の MPPC では  $1 \mu\text{A}$  以下) であったが、 $100 \text{ K}$  では  $0.1 \mu\text{A}$  にまで減少した。 $^{241}\text{Am}$  や  $^{137}\text{Cs}$  線源を用いて温度依存性を調べた結果、 $60 \text{ keV}$  のピークは室温 ( $294 \text{ K}$ ) では暗電流によるノイズに埋もれていたが、 $100 \text{ K}$  では  $30 \text{ keV}$  以下まで閾値が回復し、放射線劣化を受けていない状況と同レベルまで改善することがわかった。

MPPC は放射線劣化しても、ノイズピクセルが増えただけのようであった。また低温に冷やせれば冷やせるほど、放射線劣化しても、暗電流は減少した。

また、 $150 \text{ K}$  より低温ではシンチレーション光の統計揺らぎが支配的となっていることを確認した。放射線劣化している MPPC を  $100 \text{ K}$  の極低温においても、リニアリティは崩れておらず、またエネルギー分解能は劣化していない MPPC と同程度であった。よって、人工衛星において MPPC を低温に下げることができれば、MPPC の放射線劣化の影響は緩和できることが分かった。

## 第3章 改良したMPPCの性能評価

### 3.1 実験の目的

この実験の目的はMPPCの放射線耐性を向上させるために復帰時間を延長させたMPPCを用意して通常のMPPCとの比較を行いながら性能評価を行うことである。対照実験とするために通常のMPPCにも陽子ビームを照射してその後の変化を調査した。

### 3.2 改良MPPC

元々このMPPCは高エネルギーガンマ線を観測する大気チェレンコフ望遠鏡CTAプロジェクトを行っているグループが作成したもので、通常のMPPCの一つのピクセル信号は通常100 nsで減衰をしている。CTAグループはそれよりも早く減衰させるために、クエンチング抵抗を大きくしている。[11]これにより副産物的に復帰時間が長くなることを利用して、放射線ダメージを受けたピクセルからの暗電流の寄与を少なくすることを我々は目的としている。

#### MPPCの信号出力原理

図3.1にMPPCの概略図を示す。この概略図のようにMPPCはガイガーモードのAPDピクセルとクエンチング抵抗を一つのセルとして並列に接続されている。一つのピクセルに注目した場合、等価回路は図3.2のように表される。図3.2の $V_{\text{bias}}$ はMPPCにかかる電圧、 $V_{\text{bv}}$ はAPDの降伏電圧を表す。 $R_q$ はクエンチング抵抗の大きさ、 $R_s$ はAPD全体としての抵抗値を表し、 $C_j$ はAPDのコンデンサを表している。

信号の出力から再充電までの仕組みを図3.2を用いて説明する。まず光子が受光面に入射し増幅が起きると、スイッチSが閉じることで、コンデンサ $C_j$ から $R_s$ を通じて電荷が流れる。このとき出力信号は $1 - \exp(-R_s C_j)$ に比例して立ち上がり理を示す。増幅された信号はクエンチング抵抗 $R_q$ によって抑えられ、 $R_q$ に流れる電流が $i = \frac{V_{\text{bias}} - V_{\text{bv}}}{R_q + R_s} \approx \frac{V_{\text{bias}} - V_{\text{bv}}}{R_q}$ になると増幅が止まる。その後、再度スイッチSが開きコンデンサ $C_j$ に $R_q C_j$ で決まる時定数で再び充電される(図3.3)。一連の流れにより、MPPCから出力される信号は鋭い立ち上がりとなだらかな立ち下がりによって構成される。

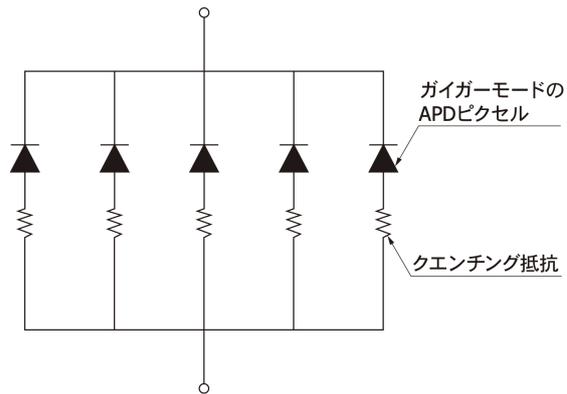


図 3.1: MPPC 概略図 [10]

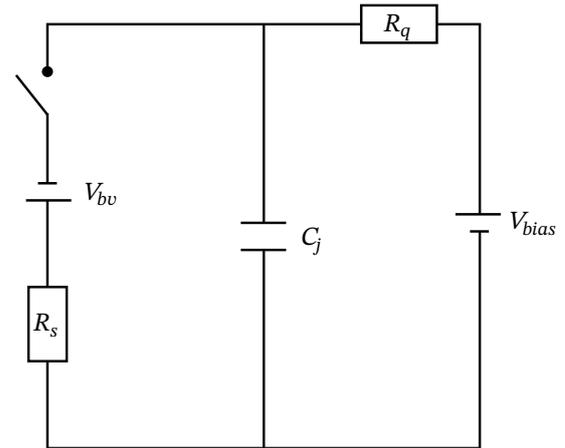


図 3.2: 1 ピクセル等価回路 [12]

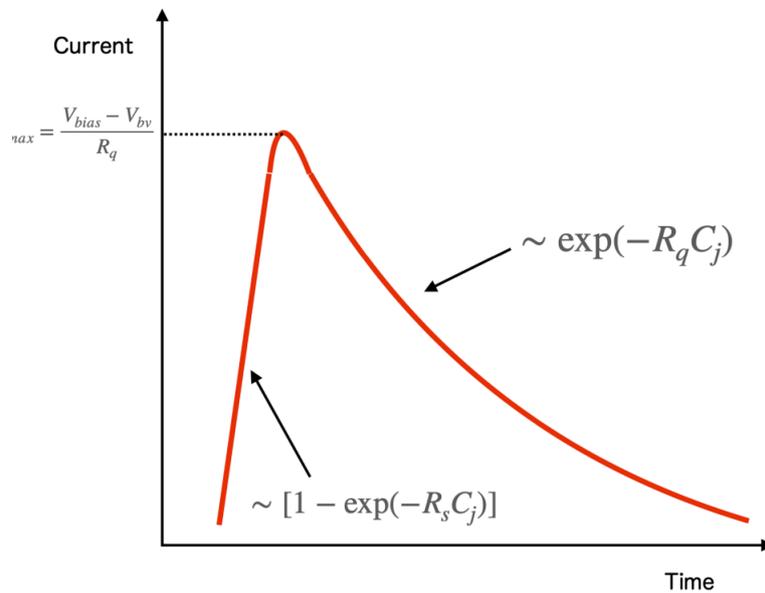


図 3.3: MPPC からの出力波形 [12]

### 3.2.1 クエンチング抵抗と変更による効果

MPPC の回路におけるクエンチング抵抗は、光子を検出して信号を生成した後、検出器の信号を終了または抑制するための抵抗のことを指す。ピクセルが光子を検出し、信号を出力した後は検出器をリセットすることが必要になる。これにより、次の光子が検出されるまでの間に待機状態に戻ることができれば、正確な時間分解能を得ることができる。

1.3.2 で説明した通りターゲット信号（この場合ガンマ線信号）の頻度は検出器の大きさにも依存するが、1 ms 程度である。一方で、放射線で損傷したピクセルでは暗電流が圧倒的な頻度で発生するようになる。

また、放射線で損傷したピクセルからは連続的に暗電流ノイズの信号が出続けるため、このような状況下では必要なターゲット信号がノイズ信号に埋もれてしまう。そこで、今回の研究では MPPC 受光面にある各ピクセルの復帰時間を延長することで、欠陥ピクセルから発生する暗電流由来の信号の出力を抑制することで、相対的に暗電流の寄与を小さくすることを考えた。この手法は温度によらない暗電流対策の一つとして考案され、上記の暗電流とターゲット信号の発生頻度の違いに注目している。

クエンチング抵抗を変更した際に起こる効果について、放射線劣化していない正常なピクセル、劣化した欠陥ピクセルの2つの状況に分けて説明していく。改良を施した際、正常なピクセルでは、ターゲット信号は 1ms の間隔で到来するため復帰時間が改良前の 100ns でも、改良後の 1 $\mu$ s でも十分な復帰時間があると考えられるため、改良前のピクセルと同じく十分な電圧での信号増幅が行われることが考えられる。

一方、放射線でダメージを受けて欠陥ピクセルになった場合に、両者に違いが出ると考えられている。以下、欠陥ピクセルに起こる効果について述べる。図 3.4 は通常版と改良版の欠陥ピクセルのピクセル内電圧と実際のオシロスコープの出力波形をイメージして、左側が通常版、右側が改良版を表している。また、青軸のイメージ上段がピクセル内電圧、下の緑の軸がオシロスコープでの出力波形を表しており、どちらも横軸が時間、縦軸が電圧を表している。一般的な欠陥ピクセルでは発生する時間間隔が短いノイズ信号でも、出力してから次のノイズ信号が来る前に充電が完了することができる。これによりターゲット信号もノイズ信号も同じ波高値で信号を出力している。しかし、改良を施して、復帰時間を大きくしたピクセルでは再充電時間が長いため、充電が間に合わない状態で次の信号が到来する。このとき、出力されるノイズ信号は電圧が正規信号よりも波高値が低い状態で出力されることになる。結果、ノイズ信号の出力が低い状態が続く。この効果によりノイズ信号の寄与が小さくなることを期待している。

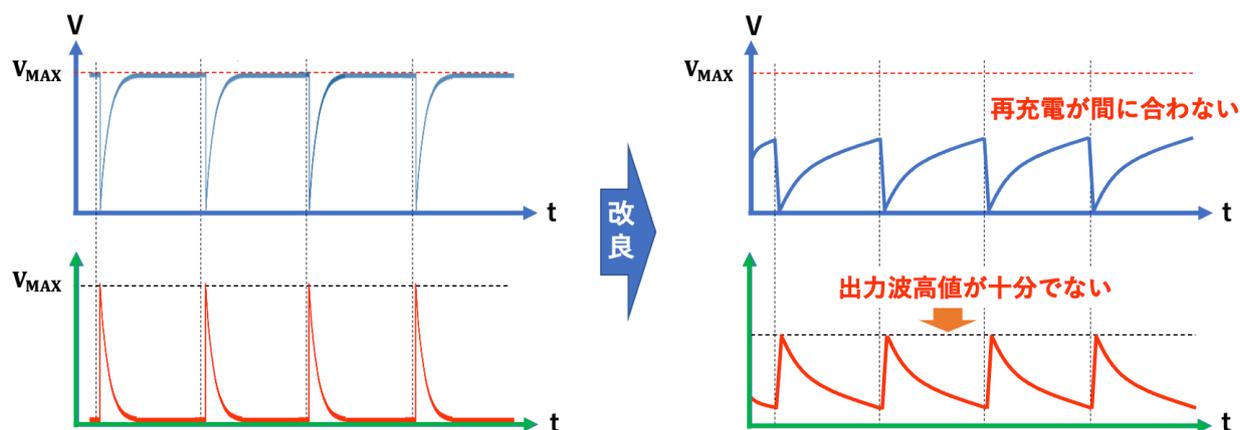


図 3.4: 改良により欠陥ピクセルで起こる変化  
(上はピクセル内電圧、下がオシロスコープの出力波形)

#### 復帰時間を長くする方法

今回の研究で用いた改良版 MPPC は APD の後ろに接続されているクエンチング抵抗を大きくすることで、復帰時間を長くしている。通常は数 100 k $\Omega$  のところを数 M $\Omega$  に変更されている。それにより、復帰時間は数  $\mu$ s 程度になる。

### 3.3 実験セットアップ

#### 3.3.1 使用したMPPC

今回使用したMPPCは浜松ホトニクス製のS13360系統3050CSと3075CSである。更にこれに改良を施した改良版3050CSと改良版3075の4種類である。以下の表3.1に使用したMPPCの簡単な特性をまとめている。また、比較用にS13360\_6050CSも載せている。

表 3.1: 照射前後でのエネルギー閾値の変化 [keV]

	検出効率 (%)	受光面 (mm)	Pixel size ( $\mu\text{m}$ )	Pixel	開口率 (%)	復帰時間 (ns)	Serial No.
3050CS_通常	40	3×3	50	3600	74	100	s16590, s16592, s16593
3075CS_通常	50	3×3	75	1600	82	100	s1468, s1469, s1470
3050CS_改良	40	3×3	50	3600	74	1000	s1, s2, s3
3075CS_改良	50	3×3	75	1600	82	1000	s1, s2, s3
6050CS_参考	40	6×6	50	14400	74	100	

#### 3.3.2 シンチレータ・装着

今回使用したシンチレータはCsIである。大きさは1 cm角である。装着に関して、今回シンチレータに巻く反射材はESRを用いている。また、測定に用いたMPPCの受光面及びフレームはCsIに対して面積が小さかったため、MPPC周りにESRを敷き、光漏れがないように装着している。

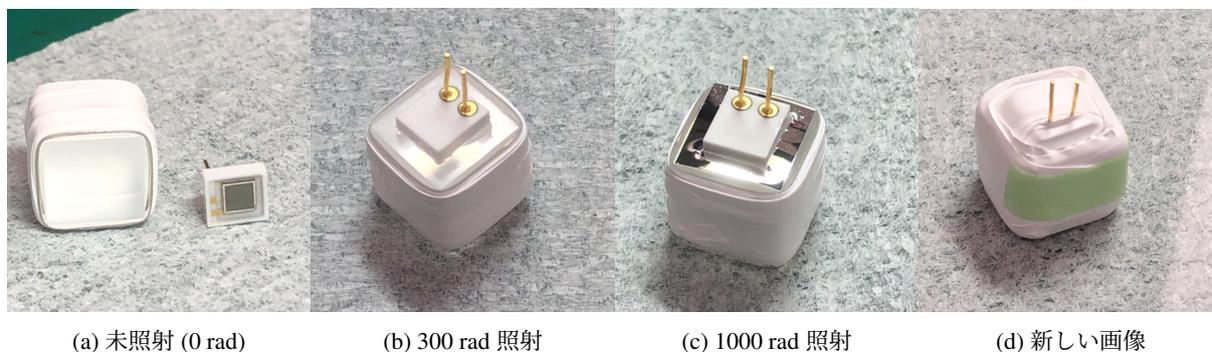


図 3.5:  $^{241}\text{Am}$  のスペクトル変化

#### 3.3.3 配線・回路

配線・回路図を下の図のように示す。使用した機材は以下のものである。

- HV(Keithley2400,2410,2450,2470)

- Attenuator
- Preamplifier(CP-5028)
- Shaper(ORTEC-571)
- ADC(DC8000)

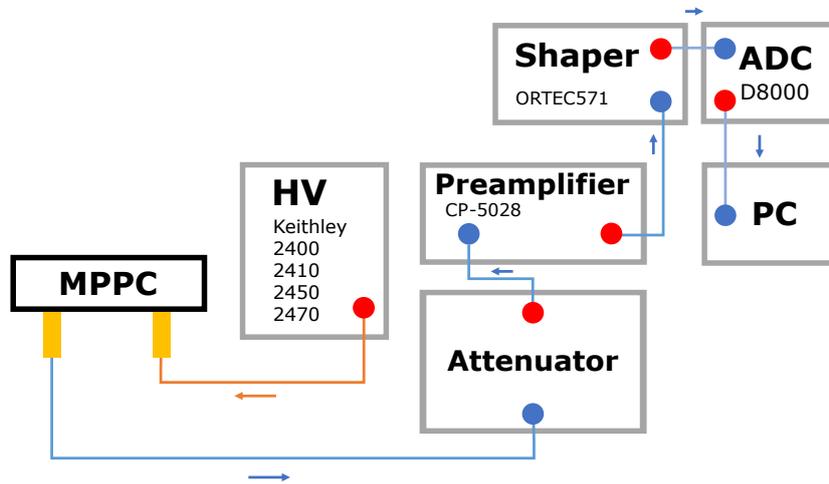


図 3.6: セットアップ

## 3.4 陽子ビームの照射

### 3.4.1 陽子ビーム照射過程

今回の陽子ビーム照射は若狭湾エネルギー研究センターで行った。照射を行った核種は陽子で、エネルギーは 200 MeV である。照射強度は最大 10 krad である。これは地球低軌道 (LEO) で 1 年間運用した場合の環境と等価である。

以下の写真は照射時の様子である。図 3.7 は照射台にセットするために MPPC を発泡スチロールに固定したものである。写真は左が 300 rad, 右が 1000 rad 用である。照射料に合わせてそれぞれ、nor50, rev50, rnor75, ev70 の 4 枚が正方形の形に固定されている。固定は発泡スチロールに MPPC のピンを差し、上からカプトンテープで固定している。画像から見て真上方向からビームが照射される。図 3.8 は実際に照射台先程の発泡スチロールに固定した MPPC を設置した写真となっている。赤線と緑線の交差する部分が照射ビームのセンターのマークであり、4 つ並べた MPPC の中心に来るようにセットした。照射するビーム幅は予め設定できるようになっており、今回は 2 cm × 2 cm で照射した。これは MPPC を 4 枚を並べても十分な面積である。

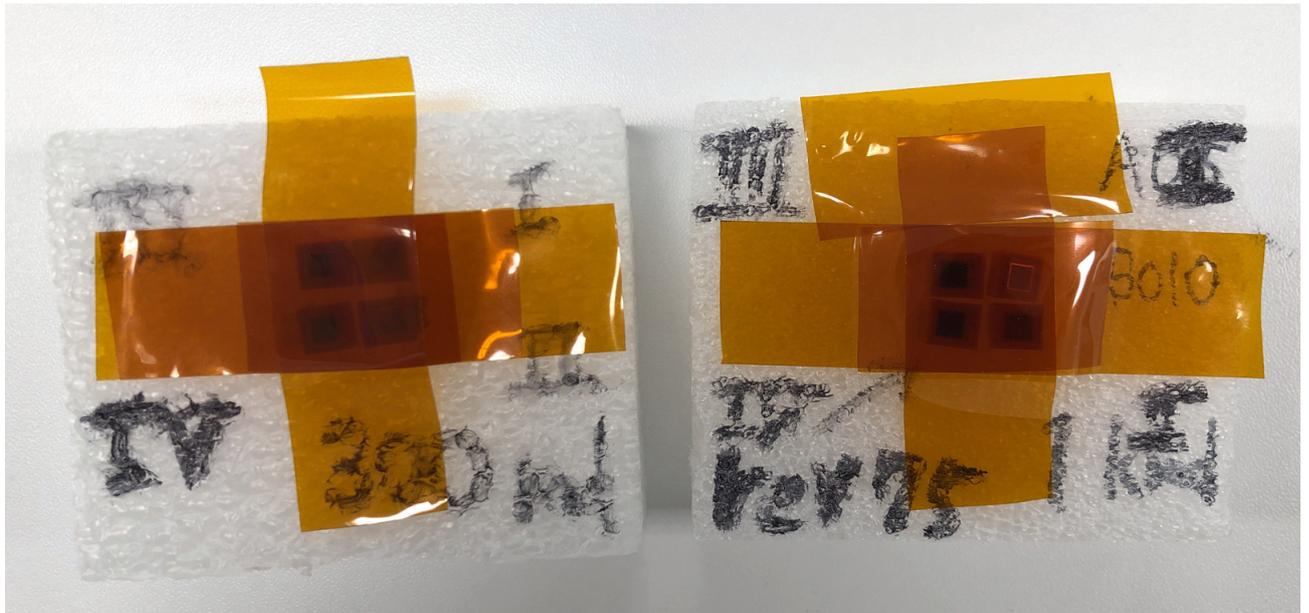


図 3.7: 300 rad、1000 rad 照射のために発泡スチロールに貼り付けたもの

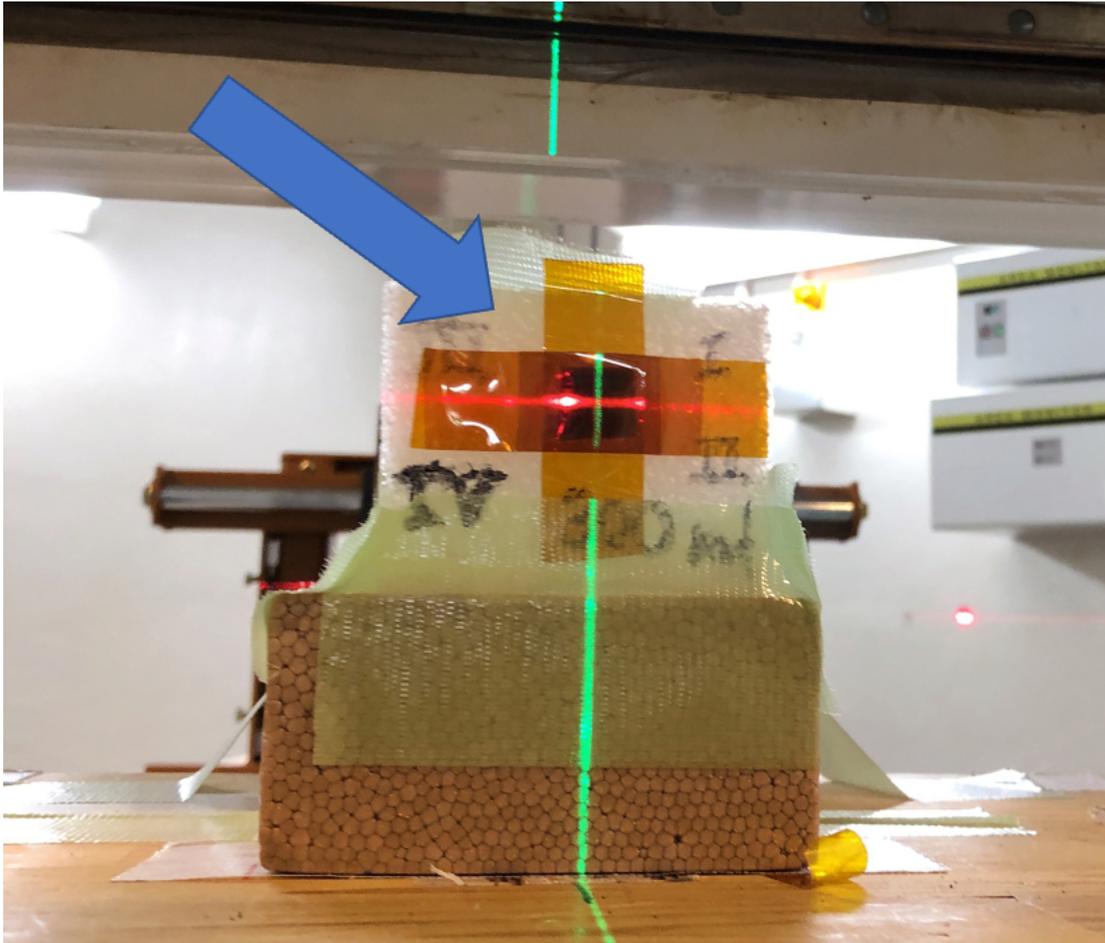


図 3.8: ビーム照射台にセット

### 3.4.2 1000 rad 照射予定の rev74-s1 のゲインが不安定になる

ビームを照射する直前に rev74-s1 のゲインが著しく低下する問題が発生した。若狭湾エネルギー研究センターに持ち出す前は特に大きな異変はなく、暗電流もデータシート通りであった。しかし、若狭湾に到着し、広島大学での測定と同じセットアップを立ち上げた後、照射前に事前測定を行う際にゲインが著しく低下していることに気付いた。その後も増幅率は安定せず、不規則に変化していた。セットアップを調べたが、ケーブルやソースメータ、アルミ箱を変更しても、状況は回復しなかった。よって MPPC 自体に問題があるとした。その後、オシロスコープで MPPC から出力される信号を観察すると、やはり増幅率が下がっていた。

広島大学に持ち帰った後、rev74-s1 の生信号の波形をオシロスコープで確認してみると、他の MPPC と比べて暗電流ノイズ、ガンマ線信号の増幅率は同程度であり、健全なピクセル、欠陥ピクセルの違いによる増幅率の差は発生していないと判断した。また、ノイズとガンマ線信号の増幅率に違いはなかったため、エネルギースペクトルや閾値の計算は他の MPPC と同様の手法で計算している。

## 3.5 測定結果

### 3.5.1 照射前の MPPC 単体での I-V 測定

まず照射前のすべての MPPC で I-V 測定をした。

以下図 3.10 は通常の MPPC S13360-3075CS-HRQ Serial No.1468, 1469, 1470 と改良した MPPC S13360-3050CS-HRQ Serial No.1,2,3 の事前に測定した I-V グラフである。縦軸は電流、横軸は電圧である。

尚、簡略化のため以後通常の MPPC S13360-3075CS-HRQ Serial No.1468 の場合 nor75-s1468 のように省略する。改良版の場合は rev75-sXXXX のように省略する。また、放射線を照射した際、照射量も合わせて表記するため、改良版 3075 に 1000 rad 照射した場合は rev75\_1000 rad というように表記していく。

今回測定したすべての MPPC で、製品に記載されている適正電圧での電流値と同じであった。この結果からこの MPPC の事前測定は妥当であると判断した。同じ型番の通常版同士、改良版同士での電流値は同程度であった。また、50 型と 75 型、通常版と改良版では元のベース電流の大きさが異なる場合があるが、暗電流はダークカウントレート × 増幅率で決まり、増幅率は内部抵抗値やピクセルサイズに応じた容量によって違いがあるためである。

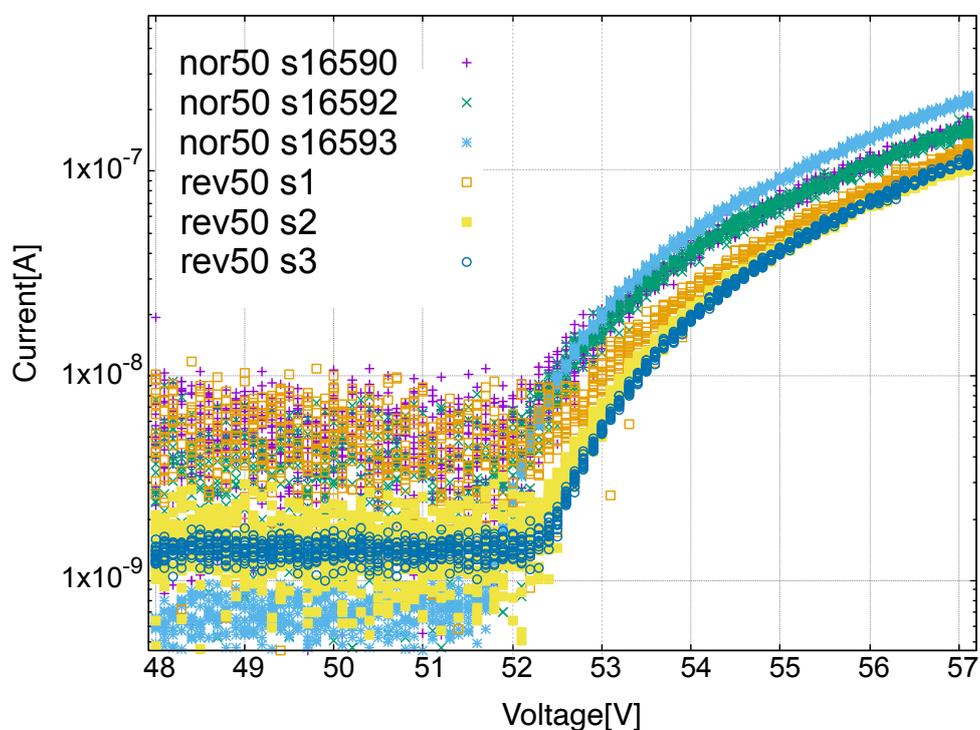


図 3.9: nor50,rev50 の I-V 事前測定]

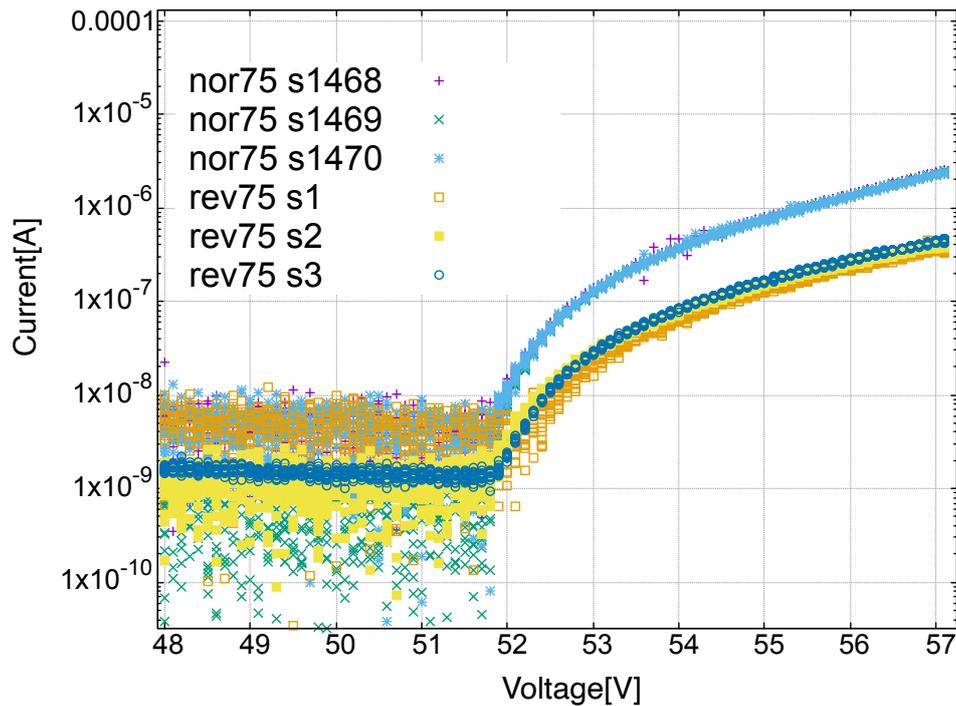


図 3.10: nor75,rev75 の I-V 事前測定]

### 3.5.2 通常の MPPC との比較

実際に放射線で劣化させたものと前後比較を行った。以下のグラフは室温で MPPC3050 系統 (図 3.11) と 3075 系統 (図 3.12) に 300 rad、1000 rad 照射した際の I-V 比較である。3050 系統では 0 rad、300 rad、1000 rad 照射したもの、3075 系統では 0 rad と 1000 rad 照射したものをプロットしている。どちらも放射線を照射した後、暗電流の増加が見られ、3桁程度暗電流が増加していることが確認できる。図 3.11 について、先行研究 [6] では MPPC は nor\_6050 型で今回の 3050 型とは異なるが、300 rad 照射した時点での適正電圧での電流値を nor50 と比べると nor50\_300 rad のほうが一桁程低い値を取っていた。しかし、放射線を照射する前の元々の暗電流を比較すると nor50\_300 rad の方が同様に一桁小さい値をとっていたため、両者は正常に行われたと判断した。図 3.12 についても同様に暗電流の上昇が見られたが、全体的に 50 系統よりも上昇幅が小さかった。

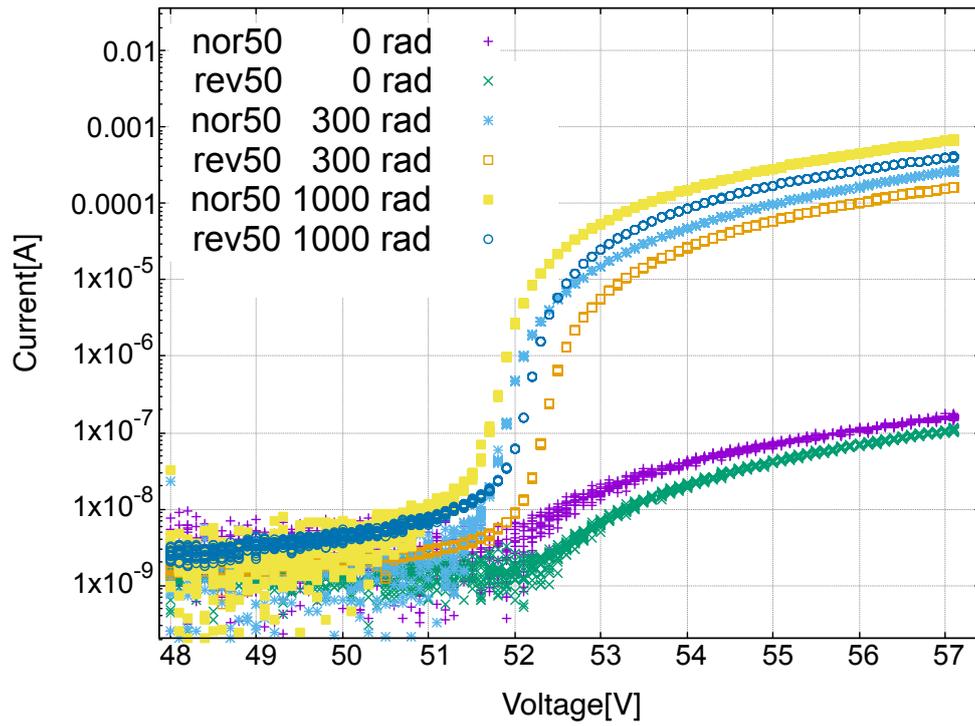


図 3.11: 3050 系統 I-V 比較 (0 rad, 300 rad, 1000 rad)]

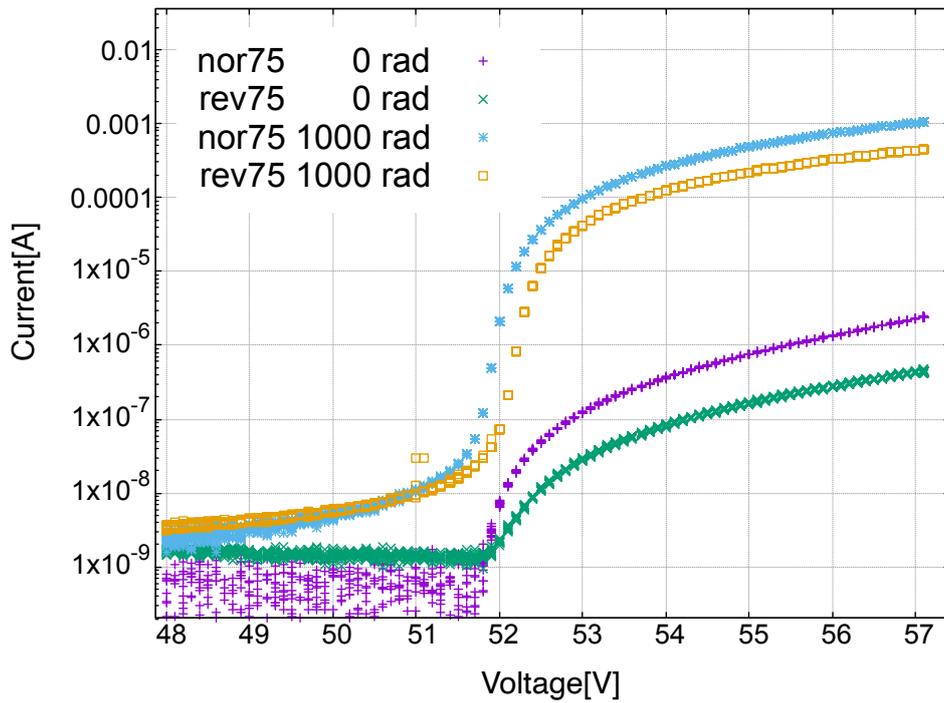


図 3.12: 3075 系統 I-V 比較 (0 rad, 1000 rad)]

### 3.5.3 照射後の暗電流の減衰

ビーム照射直後は暗電流非常に多いが、時間の経過とともに暗電流は少なくなっていく。これは放射線によって半導体素子の核が変化し、放射線同位元素が発生するも、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 崩壊によって放射線を放出し、時間とともに放射線は減衰する場合や、損傷した半導体素子の構造が時間経過により欠陥部分の修復が起こり暗電流の減衰につながる場合があるからである。このプロセスはアニーリングと呼ばれる。下の図 3.13 は陽子ビームを照射した後、暗電流の減衰を観察したものである。横軸はエポック時間 [s] で縦軸は電流 [A] である。この減衰減少は初期の変化が激しいので両対数グラフとしてプロットしている。極端に電流値が上がっている部分では線源を置いた測定を行っていた部分である。また、途中で途切れている部分は場所移動等によって測定を行えていなかった時間である。グラフを見ると、どの検出器も陽子を照射した直後は迅速に暗電流の減衰が起き、その後は比較的なだらかに減衰している。300 rad, 1000 rad を比べると 1000 rad 照射したもののほうが同系統では電流値は高くなっているが、減衰の仕方に両者の違いはなかった。また通常版と改良版を見比べても減衰の仕方に違いは大きな差はなかった。

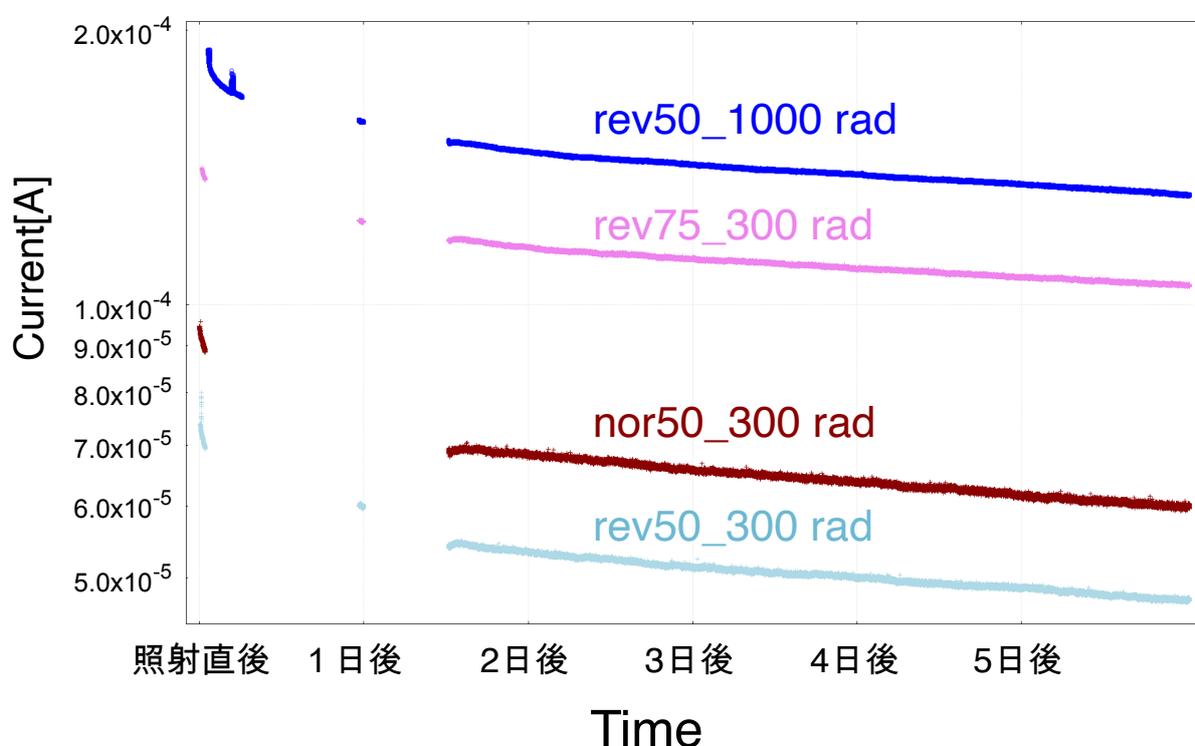


図 3.13: 照射後の暗電流の減衰]

### 3.5.4 エネルギースペクトルの比較

#### 照射直後からの Background 測定

MPPC に陽子ビームを照射した直後の Background 測定のプロットし、30 分後、1 時間後、5 時間後と並べたものを図 3.14 に示す。この図から低エネルギー側にノイズが乗っていることが確認できる。また、

MPPC に陽子を照射した直後は Background 測定をしていても鋭いピークが立つ。これは MPPC 自身が放射線を浴びたことで電子陽電子対消滅が起こっているためである。このピークは 511 keV に対応する ch 付近に現れる。この現象は時間の経過とともに徐々に収まる。また 511 keV のピークを追っていくと、ピークが右にシフトしていることが確認できる。これは照射直後から暗電流が徐々に減少し、実効電圧が上昇していることを示している。

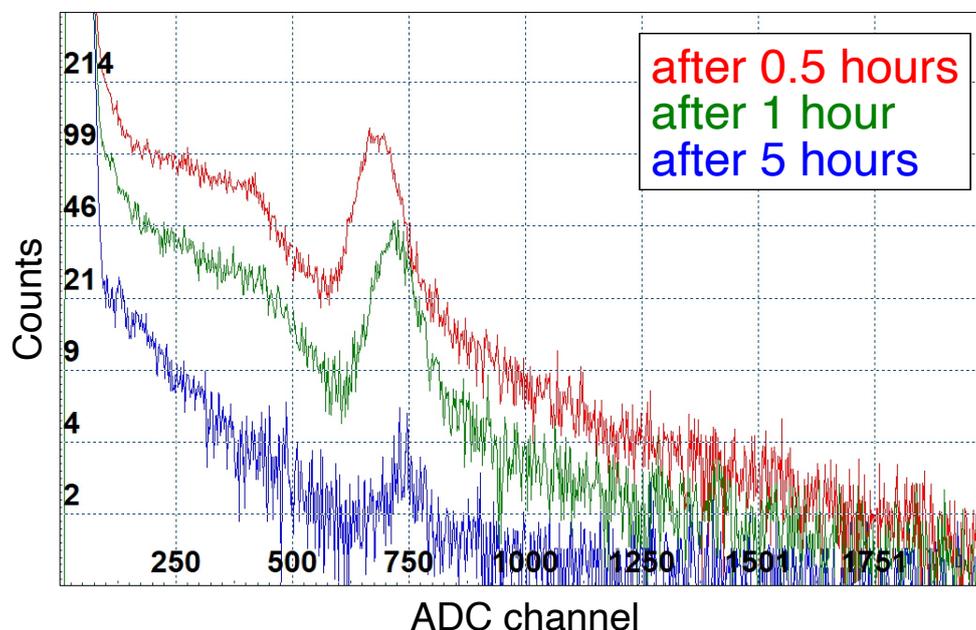


図 3.14: 照射後 Background のスペクトル変化

#### 照射によるスペクトルの変化

下の図 3.15 はそれぞれ異なる量の陽子ビームを通常版 MPPC の 3050 に当てた際に、 $^{241}\text{Am}$  線源の測定したときのスペクトル変化である。(a) は未照射で通常の MPPC である。通常は  $^{241}\text{Am}$  線源を当てると、60 keV のピークとその左にエスケープ (30 keV) を確認することができる。しかし 300 rad、1000 rad と放射線を照射していくと、低エネルギー側からノイズが増えてくる。図はビーム照射直後 300 rad 照射時点でエスケープピークが見えなくなり、1000 rad 照射で 60 keV ピークも埋もれ始めた。同時に 60 keV のピークに注目すると、照射量が増加するに連れてピークチャンネルが低くなっていることがわかる。これは放射線劣化によって増加した暗電流が検出器にかかる実効電圧を下げているからだと考えられる。また、平出論文 [6] では 300 rad 照射した時点でエネルギー閾値は 58 keV ほどだったのに対し、今回の照射では 1000 rad 照射しても 60 keV ピークが確認できていた。今回は S13360 の 6050 ではなく 3050 を使用していることが関係していると考えた。

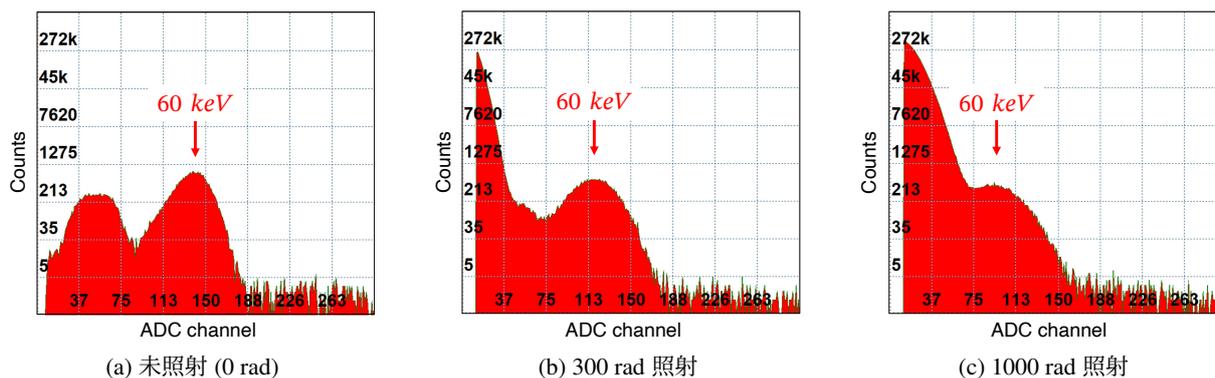


図 3.15: 通常版 MPPC の放射線照射による  $^{241}\text{Am}$  のスペクトル変化

### 3050CS と 6050CS の閾値の上昇率の違い

300 rad では閾値が 60 keV 弱であったのに対して、今回は図 3.15 を見ると 40 keV あたりまで見えそうである。どちらも 1cm 角の CsI を装着しており、異なる点は型番の 3050 と 6050 である。型番の 3050 の意味は有効受光面サイズ (30 mm) とピクセルピッチ (50  $\mu\text{m}$ ) の大きさを表している。今回の 3050 や 3075 は有効受光面サイズが 6050 よりも小さく、ピクセル数が 1/4 以下の数となる (表 3.1 参照)。CsI の発光量が同じであるとする一般的な  $^{137}\text{Cs}$  の 662 keV などではエネルギーにより発生する光子数が多く、3050, 3075 系がサチュレーションを起こしやすくなる。今回は  $^{241}\text{Am}$  の 60 keV とエネルギーが小さく、発生する光子数が少ないのでピクセル数が少ない 30XX 系列でも問題なく読み出しができていられると考えられる。そうなると 3050, 3075 系統は受光面の全体のピクセルにおける Signal ピクセルの占める割合が 6050 に比べて増える。結果として、同じ量の放射線を照射しても閾値が 6050 よりも低くなったと考えている。また、図 3.16 にあるように、60XX 系列はパッケージが黒色となっており、光を反射せずに光量をロス (吸収) させている影響が大きいと思われ、1/1.4 程度の光量ロスが考えられる。[7]

よって 60XX 系列は、1cm 角を読み出すには必要以上に大きすぎる (光量は増えずに暗電流が増える) またはパッケージが黒枠なので、その分光量をロスするという点から閾値の上昇率の違いに繋がったものだと考える。

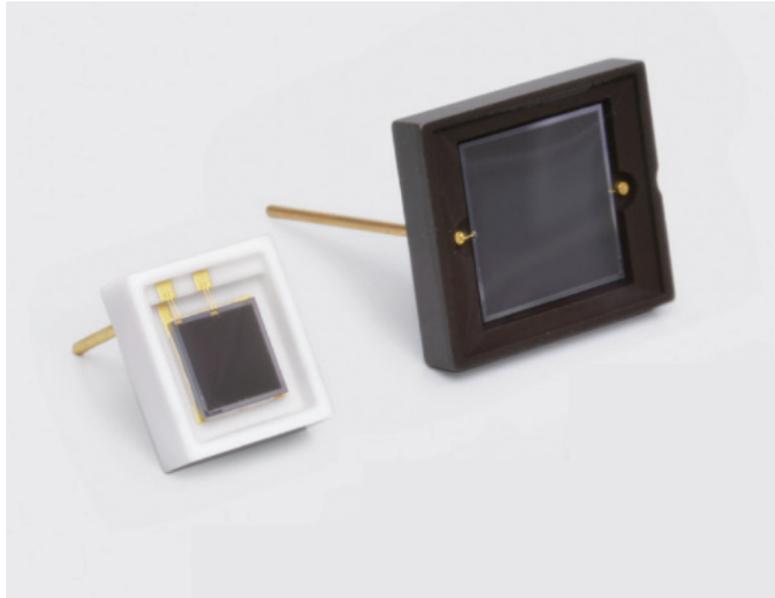
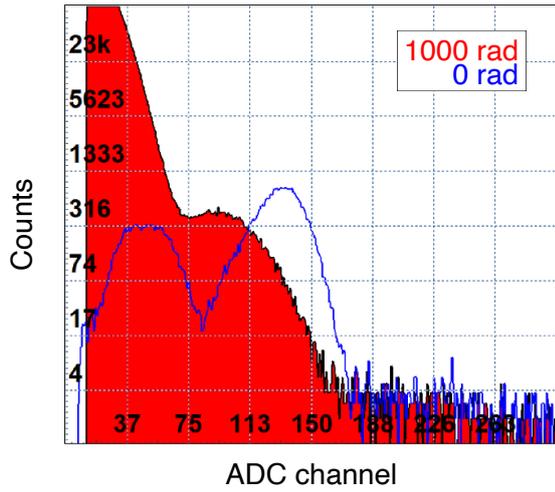


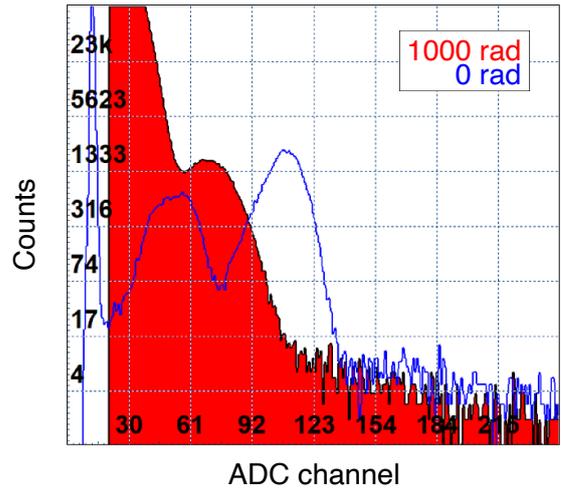
図 3.16: MPPC 3050CS(左) と 6050CS(右)

#### 通常版と改良版の比較

次に通常版と改良版の MPPC の比較を行った。下の図 3.37、3.38 は 3050 の通常版、改良版それぞれに 300 rad、1000 rad 照射した場合のスペクトルの変化を表している。青い輪郭が照射前のスペクトル、赤色に塗られたものが 300 rad、1000 rad 照射後のスペクトルを表している。両者の照射後のスペクトルを比べると多少ではあるが、改良版 MPPC の方が 60 keV のピークの左側の裾とノイズで作られる谷が通常版よりも深いように感じられる。また、改良版 3050 では照射後の 60keV ピークが、照射前の  $^{241}\text{Am}$  のピーク同士の谷間付近にいたので、ピーク位置が通常版よりも下がっている様に見える。3075 の通常版、改良版の比較においてもスペクトル形状に特筆するような差は確認されなかった。測定系の違いにより attenuator の値が異なり、ピーク ch を照射前と比較することが難しいものもあるのでその場合は、スペクトルの比較のみを行った。

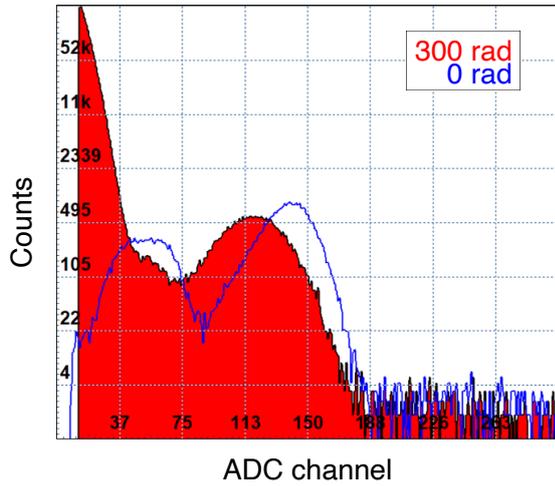


(a) 通常版 50(1000 rad 照射)

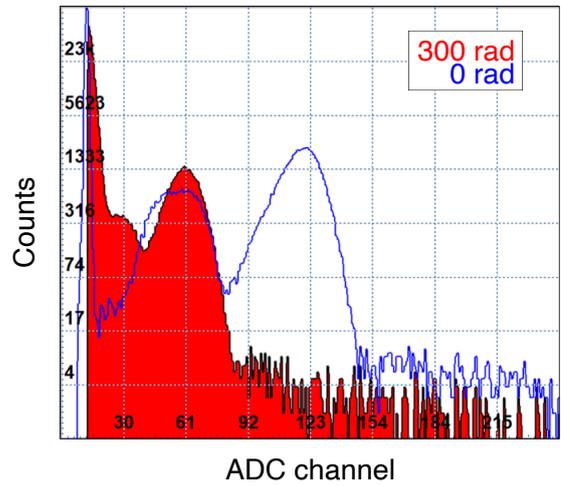


(b) 改良版 50(1000 rad 照射)

図 3.17: 1000 rad 照射した 3050 の通常版と改良版の比較

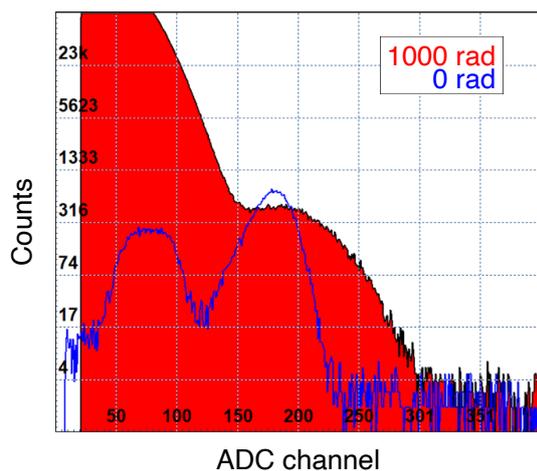


(a) 通常版 50(300 rad 照射)

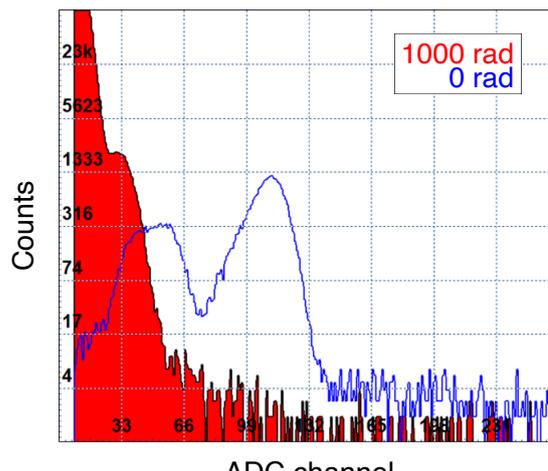


(b) 改良版 50(300 rad 照射)  
照射前 24dB, 照射後 28dB

図 3.18: 300 rad 照射した 3050 の通常版と改良版の比較

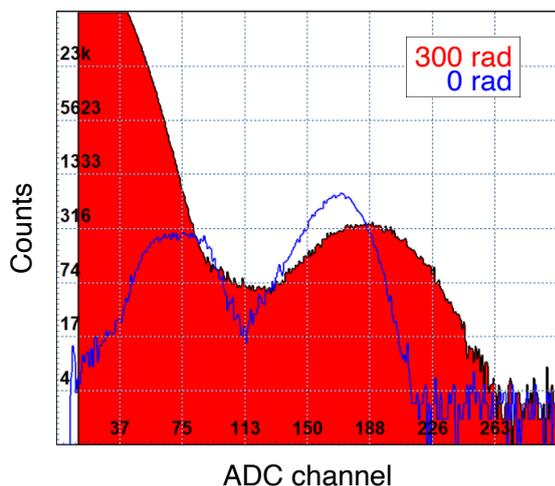


(a) 通常版 75(1000 rad 照射)  
照射前 28dB, 照射後 24dB

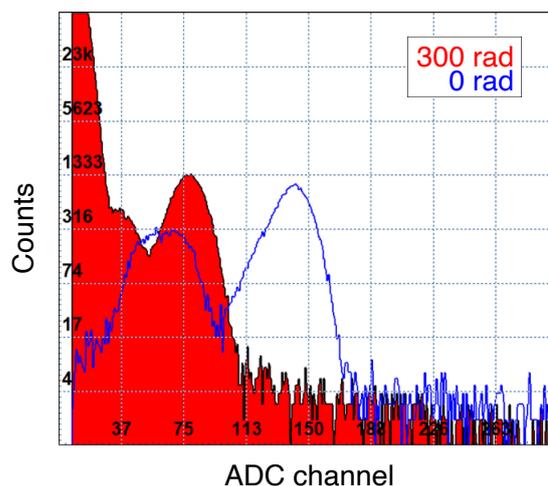


(b) 改良版 75(1000 rad 照射)  
ゲイン不安定

図 3.19: 1000 rad 照射した 3075 の通常版と改良版の比較



(a) 通常版 75(300 rad 照射)

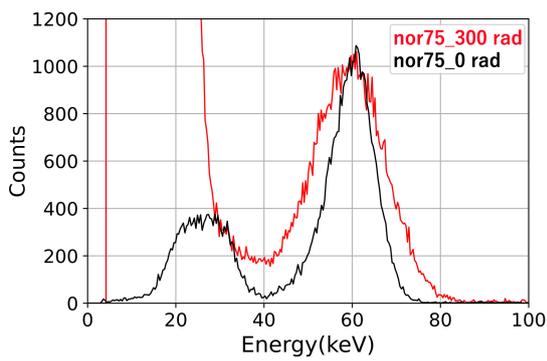


(b) 改良版 75(300 rad 照射)

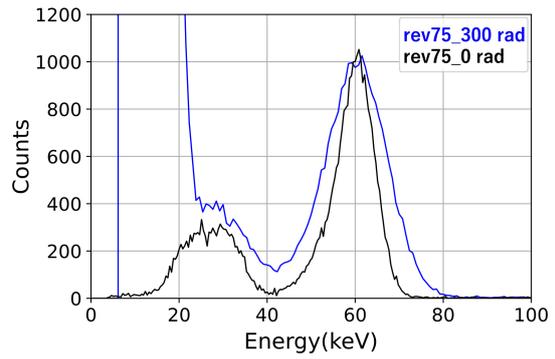
図 3.20: 300 rad 照射した 3075 の通常版と改良版の比較

### 通常版と改良版の分解能の比較

次に通常版と改良版のエネルギースペクトルと分解能の違いについて調べた。下の図 3.21 は 3075 の通常版と改良版について、未照射と 300 rad 照射後のエネルギースペクトルの比較を行ったものである。線源には  $^{241}\text{Am}$  を使用している。横軸はエネルギーで縦軸は 1000 に規格化したカウント数である。通常版では 300 rad 照射後に 2 本のピークの家左側に見えていた 30 keV のエスケープピークが見えなくなっている。一方で改良版では 300 rad 照射した後もわずかに 30 keV ピークを確認することができた。この傾向は 1000 rad 照射の通常・改良ペアや 3050 の通常・改良ペアでも確認することができた。



(a) 通常版 75, 0 rad と 300 rad 照射比較



(b) 改良版 75, 0 rad と 300 rad 照射比較

図 3.21: 3075 通常版と改良版の 0 rad と 300 rad 照射比較

また、下の図 3.22 は 300 rad 照射後の通常版改良版を重ねたものである。この図からエネルギー閾値が通常版に比べて低下していることと、分解能が改善されていることが確認できる。実際に分解能は通常版の 300 rad 照射後で 31.30%( $\pm 0.67\%$ )、改良版の 300 rad 照射後で 25.62%( $\pm 0.30\%$ )であった。このことから改良版 MPPC は通常版に比べて若干の放射線耐性がついているということがわかった。

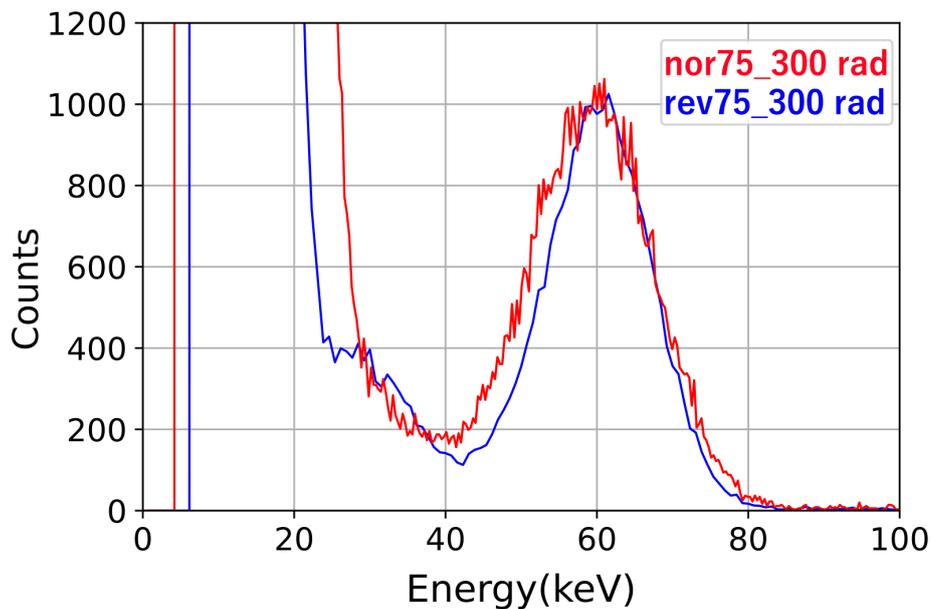


図 3.22: 300 rad 照射後の通常版と改良版の  $^{241}\text{Am}$  スペクトル

### 3.5.5 照射前後の生波形の変化

照射前後での MPPC の生信号をオシロスコープで波形の変化を観察した。使用した線源は  $^{137}\text{Cs}$  の 662 keV である。比較した検出器は nor75\_0 rad,1000 rad と rev75\_0 rad,1000 rad である。図 3.23、図 3.24 はそれぞれその出力波形である。横軸は時間、縦軸は電圧を表している。照射前後で比較している MPPC は同じ型番であるが、異なるシリアルナンバーのものである。測定した電圧はすべて適正電圧である。1000 rad 照射すると通常版、改良版どちらも増幅率が未照射の場合の約 1/2 程度に低下していた (図 3.25、3.26)。これは照射によって増加した暗電流が検出器にかかる実効電圧を低下させているためである。図 3.12 を参考にすると、rev75 での適正電圧では電流が  $2.01 \times 10^{-4}\text{A}$  程度流れており、それによる検出器にかかる電圧降下は 0.2 V 程度だと考えられる。また、rev75 に見られる一部急激な信号立ち上がりが見られる。これはもともと MPPC の出力波形には早い成分と遅い成分があり、低速成分を大きくすることで高速成分が際立っているためである。<sup>1</sup>

不調であるとした rev75\_1000 rad も照射後は増幅率が nor75 と同じ程度の減少であったため、この段階での増幅率は 1000 rad の照射の影響のみによるものとした。

いずれにせよ照射前後の比較によって通常版と改良版の MPPC に変化の仕方に大きな差はなかった。

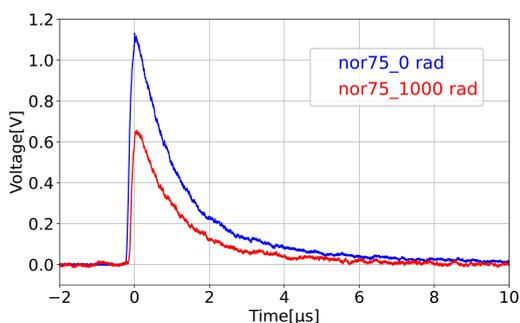


図 3.23: nor75\_1000 rad 照射前後

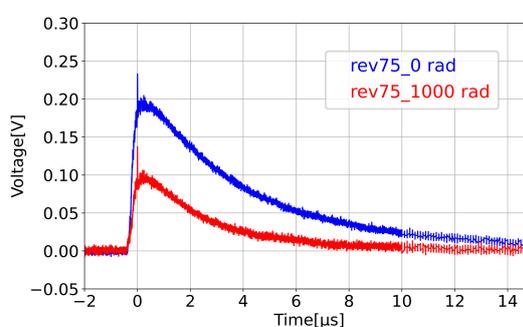


図 3.24: rev75\_1000 rad 照射前後

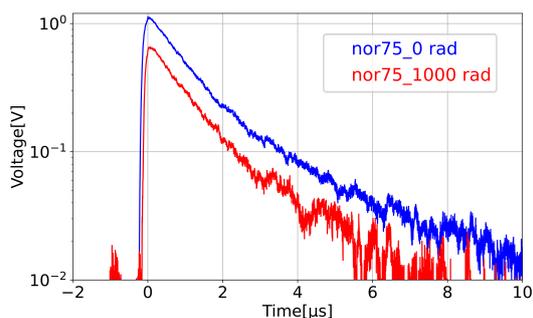


図 3.25: nor75\_1000 rad 照射前後 (log scale)

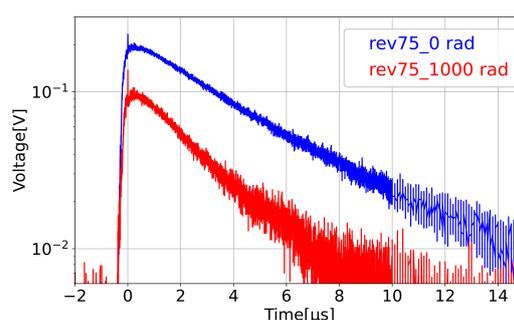


図 3.26: rev75\_1000 rad 照射前後 (log scale)

続いて、減衰時間の変化を比較した。下の図 3.27、3.28 は先程のグラフの縦軸を規格化している。これ

<sup>1</sup>CTA の計画ではこの高速成分をメインに取り扱っている。

により、照射前後での減衰時間の比較を行う事ができる。図 3.27 では照射前後で減衰時間は変わらず、波形は一定のままだった。一方で図 3.28 では照射後に減衰時間が早くなっていることが確認できた。

減衰時間が早まる原因の一つとして、ピクセルの復帰時間中に新たな光子を検出してしまうことに起因する増幅率不足である。この現象は各ピクセルの復帰時間中に光子信号が到来し、再充電が完了しておらず、降伏電圧からの過剰電圧が十分でない状態で信号を出力することにより発生する。改良版 MPPC は通常の MPPC に比べて復帰時間が 10 倍長いため、暗電流が増加し頻繁に信号を出すようになった欠陥ピクセルでは一つ一つの信号で増幅不足が起きやすくなる。その様に考えると、通常版の MPPC では良ピクセルも欠陥ピクセルからの信号も増幅されるが、改良版では欠陥ピクセルのみ増幅率が小さくなっている可能性も考えられる。よって改良版 MPPC では照射後のノイズが通常版よりも低エネルギー側に集められやすくなる可能性があるのではないかと考えた。

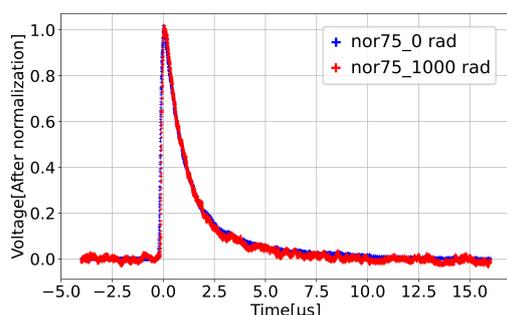


図 3.27: nor75\_1000 rad 照射前後 (規格後)

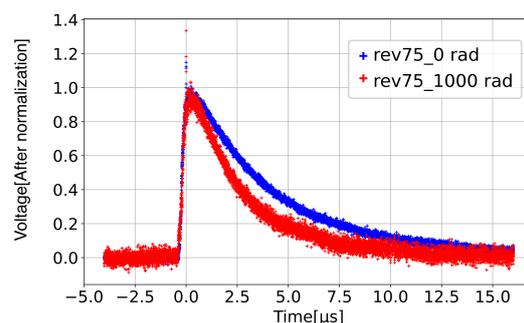


図 3.28: rev75\_1000 rad 照射前後 (規格後)

また、もう一つの要因として、ターゲット信号由来の波形が減衰の途中で新たなノイズ信号に打ち切られる可能性があると考えた。これは改良版は通常版よりも減衰時間が長いため、ガンマ線信号が減衰している途中で次のノイズ信号入って来てしまうために減衰が早くなってしまうのではないかと推測である。

下の図 3.29 は改良版の個々のピクセルから出力される信号のイメージを表している。左側の3つのイメージは未照射でダメージを受ける前の個々のピクセルで、右側はダメージを受け、暗電流が高い頻度で発生するようになってしまったピクセルの状況をイメージしている。横軸が時間で縦軸が電圧である。また赤色の波形がターゲット信号、緑色の波形はノイズ信号を表している。また、ノイズ信号の周期はポアソンゆらぎもあるが、ここでは一定の周期で発生することを想定している。

劣化していない未照射の状態では受光面のピクセルのほとんどが左側の列のような状態であり、暗電流の発生頻度が少ないため、減衰時間が長くてもターゲット信号の波形は最後まで形が残りやすい。一方で放射線で劣化すると、受光面の一部は欠陥ピクセルとなり、右のようなピクセル状況となる。この場合、ノイズ信号の発生頻度が高く、ターゲットを得て信号を出力したとしても、波形が最後まで減衰する前に次のノイズ信号に打ち切られてしまう可能性が高くなると考えた。

以上をまとめると、未照射ではほとんどのピクセルでターゲット波形は最後まで減衰し切る事ができ、受光面内の信号を検出したピクセルが合計され、平均化されたとしても減衰時間はそのままである。一方で、放射線劣化し、図の右のような状況のピクセルの割合が受光面内で増加すると、波形が打ち切られる成分が反映される様になり、結果的に平均化したときに減衰時間が短くなりやすいのではないかと考えた。

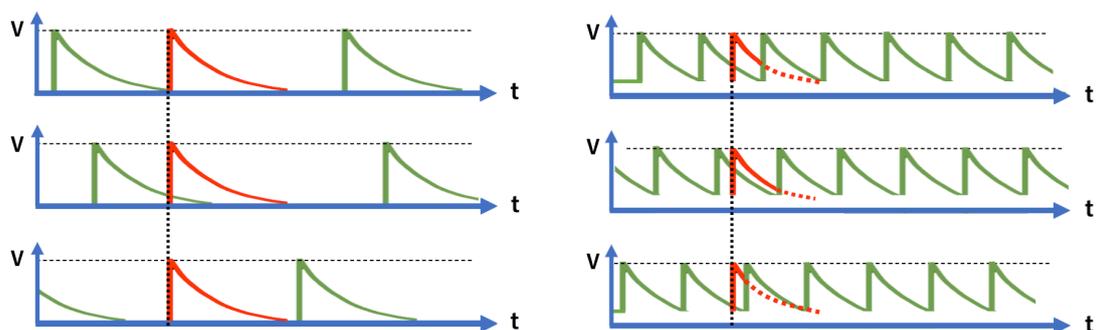


図 3.29: 改良版の個々のピクセルの状況  
左が正常、右が劣化したピクセル]

### 3.5.6 エネルギー閾値の比較

表 3.2 は放射線照射前後でのエネルギー閾値の変化をまとめたものである。照射前の閾値は校正すると負の値になる物もあったが、閾値測定の誤差範囲内だと考えられる。nor50-300 と rev50-300、nor50-1000 と rev50-1000 を比較すると、照射後のエネルギー閾値は同定度であることがわかった。この結果から今回のクエンチング抵抗の改良はあまり効果が出ていないように思える。また、75 系統の比較では nor75-300 と rev75-300 で照射後の閾値に違いがあり、改良した MPPC のほうが閾値が約 6 keV 程低いことがわかった。しかし、これは図 3.10 のように通常版 MPPC が改良版 MPPC よりも照射前の暗電流が推奨電圧で一桁近く高くなっていることに起因するからとも考えられた。いずれにせよエネルギー閾値が目に見えて改善しているということは確認できなかった。

表 3.2: 照射前後でのエネルギー閾値の変化 [keV]

	nor50-300	rev50-300	nor50-1000	rev50-1000
照射前	2.6	-0.5	4.43	-1.3
照射後	16.8	15.7	35.3	35.4
	nor75-300	rev75-300	nor75-1000	rev75-1000
照射前	-1.2	-2.7	-2.5	-2.7
照射後	17.7	11.8	35.5	32

#### 照射後 1 ヶ月から 2 ヶ月間の閾値変化

ビーム照射を行った 10 月下旬から 1 ヶ月経ち、暗電流減衰が落ち着いたところで閾値を測定したが、更にその 2 ヶ月後の 2024 年 1 月下旬にもう一度閾値を測定した。その時の結果を下の表 3.3 に表す。300 rad を照射した nor50、rev50 で閾値が上昇していることを確認した。理由は現在わかっておらず、測定系の異常か、数ヶ月放置したことにより、MPPC と CsI を接続する光学グリスの劣化、または CsI の潮解による劣化が起きた可能性があると考えている。

表 3.3: 照射前後 1 ヶ月と 3 ヶ月でのエネルギー閾値の変化 [keV]

	nor50-300	rev50-300	nor50-1000	rev50-1000
2023/11/21 閾値	16.8	15.7	35.3	35.4
2024/1/17 閾値	19.9	16.8	33.5	28.2

### 3.5.7 改良版 MPPC の冷却

今回通常版、改良版の MPPC を比較してきたが、室温では大きな差は見られなかった。最後に室温から冷却し、0°C、-20°C に冷却した際の振る舞いについても確認した。

#### 低温での I-V 測定

以下の図 3.30 は室温 (20°C)、0°C、-20°C での nor50\_1000 rad の IV 測定をプロットしたものである。章 2 で行った実験のように MPPC を冷却させると次第に暗電流が低減していくのを確認した。また、各温度でのブレイク電圧から +3 V した適正電圧での暗電流変化は、室温を基準に 0°C では 37%程度に抑えられており、-20°C では 11%程度に抑えられていた。また、図 3.31 は同じ条件で rev50\_1000 rad での場合の測定結果である。こちらでの測定結果も室温を基準に 0°C では 40%に抑えられており、-20°C では 14%程度に抑えられていた。通常版も改良版も振る舞いは同じで両者に差はないように思えた。

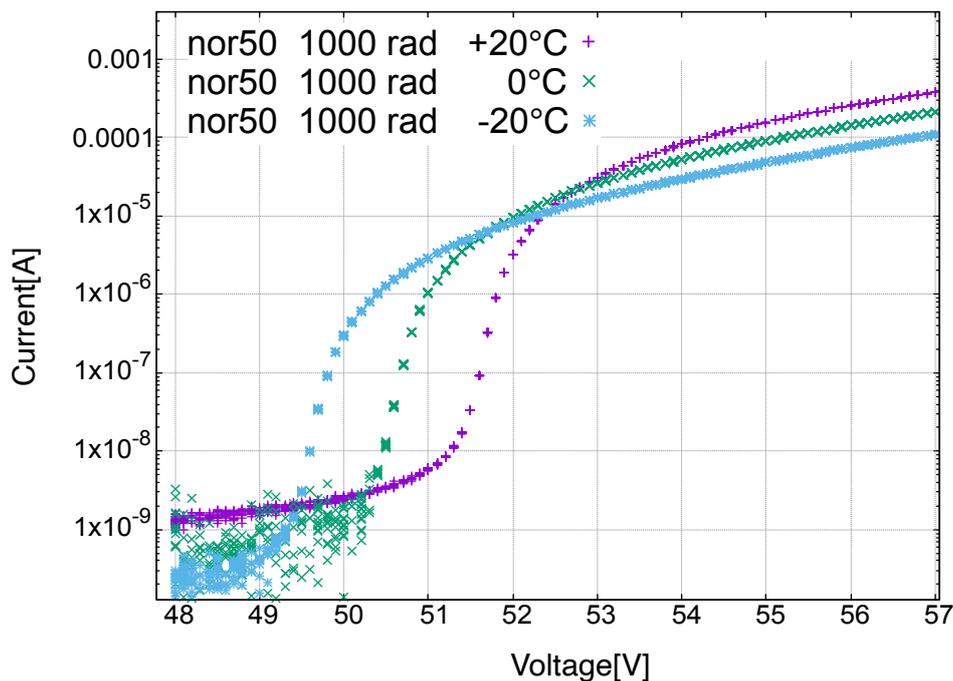


図 3.30: 20°C, 0°C, -20°C での nor50\_1000 rad I-V 測定]

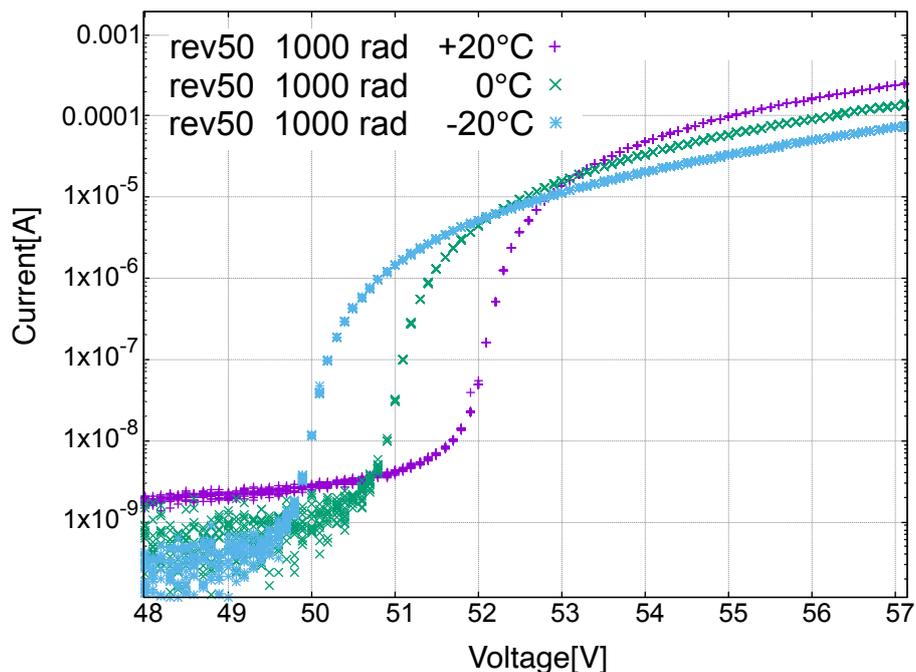


図 3.31: 20°C,0°C,-20°C での rev50\_1000 rad I-V 測定]

#### 低温での生波形

各温度で適正電圧での MPPC の生波形をオシロスコープで観察した。室温での適正電圧と-20°C,0°Cでの適正電圧での増幅率は同程度であった。また、-20°Cでも改良版の立ち上がり直後の鋭い信号成分を観察できたことから、低温下においても改良版に大きな異常が発生することは無いとした。

#### 規格化後の比較

先程の節 3.5.5 の図 3.28 では室温で改良版 MPPC の未照射と 1000 rad 照射したもので減衰時間に差が表れた。これは暗電流を拾うピクセルが増えたため、復帰時間中に次の信号を出すようになってしまったピクセルが増えたと考え、もう一つはターゲット信号由来の波形が減衰の途中で新たなノイズ信号に打ち切られる可能性があると考えた

これに付いて詳しく調べるために、今度は検出器を-20°Cに冷却した場合での減衰時間を観察した。これは冷却により、照射の影響でノイズを出すようになったピクセルが減少し、復帰時間が十分取れるピクセルの割合が増加し、減衰時間が未照射の場合に近づくのではないかと考えたからである。下の図 3.32、3.33 は-20°Cのときの生信号を先程と同じ様に比較したものである。念のため通常版の MPPC でも確認したが、こちらの生信号波形はほぼ同じ減衰時間だった。そして改良版を比較すると減衰時間が未照射 MPPC に近づいていることを確認できた。このことから、改良版ではオシロスコープの出力波形の温度依存性があることが確認できた。後の章では実際に取得されるエネルギースペクトルから、推測した2つの仮説のうちどちらがより正しいのかを議論する。

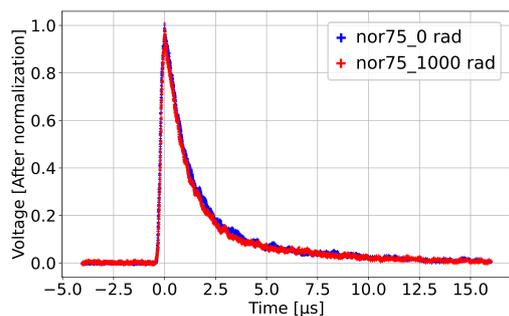


図 3.32: -20°C:nor75\_1000 rad 照射前後 (規格後)

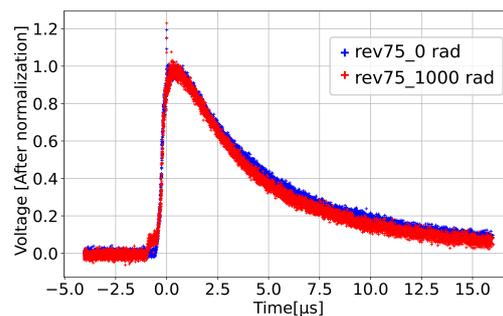


図 3.33: -20°C:rev75\_1000 rad 照射前後 (規格後)

### 電流値を変えた場合

改良版は通常版よりもクエンチング抵抗が 10 倍程大きく設定されている。これにより、MPPC が放射線劣化によって暗電流が増加した場合、クエンチング抵抗で発生するジュール熱も 10 倍になる。この実験では室温 20°C で流す電流を通常、通常の半分、通常の 2 倍に変更して、クエンチング抵抗の変更によりどれほど検出器に熱的影響があるのかを調べた。下の図 3.34 は改良版 3075 に 1000 rad 照射し、流れる電流を適正電圧の場合での電流 A、半分の 1/2A、2 倍の 2A となるように調節し、出力波形の減衰時間を比べたものである。横軸は時間、縦軸は規格化した電圧である。図のマーカは違いを見やすくするために小さくしている。グラフから、電流が 2 倍のときが一番減衰時間が小さく、1/2 のときが一番長い減衰時間を示していることがわかった。ジュール熱は電流の自乗に比例することから、2 倍電流と 1/2 電流の間では 16 倍の発熱量の違いがある。しかし、変化は小さかったので、クエンチング抵抗からの発熱は少なからず検出器に影響しているが、外部の温度環境による影響の方が大きいとした。

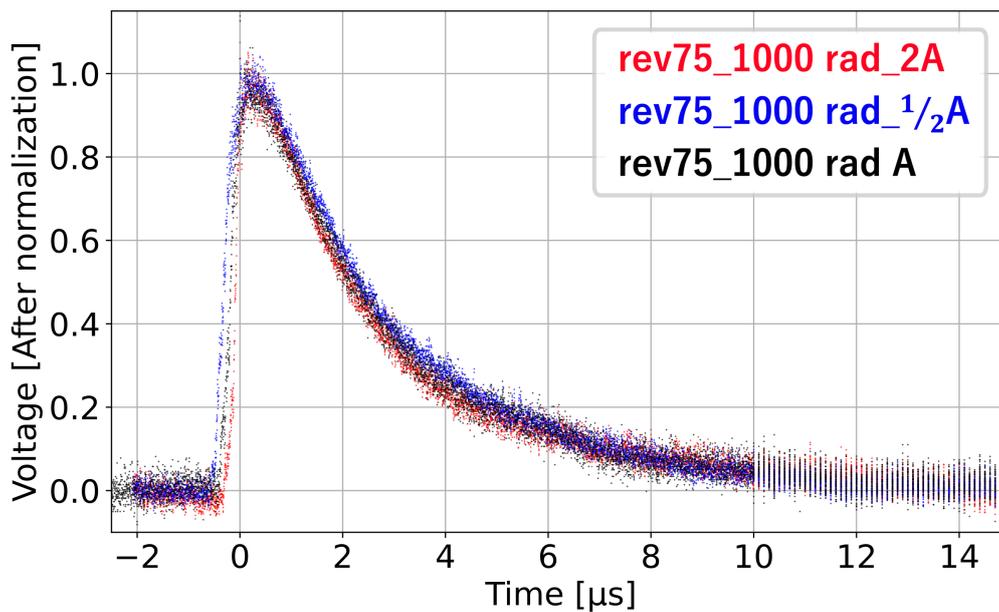


図 3.34: 1000 rad 照射後に電流を変更して測定したもの  
適正電圧電流 A, 2 倍電流 2A, 半分の電流 1/2A

#### 低温でのエネルギースペクトル

低温での  $^{241}\text{Am}$  のエネルギースペクトルを観察した。冷却した 4 種類の MPPC のスペクトルを図 3.35、3.36、3.37、3.38 に示す。赤色のグラフが室温 ( $20^{\circ}\text{C}$ )、緑が  $0^{\circ}\text{C}$ 、青が  $-20^{\circ}\text{C}$  である。温度が下がるとノイズ ch が減少していくことが確認できる。図 3.36 では室温のほうがノイズ ch が低いのが、増幅率の関係で ch が下回っていると考えられる。エネルギー閾値を計算すると、より温度が低いほうが閾値が小さく出ることがわかった。

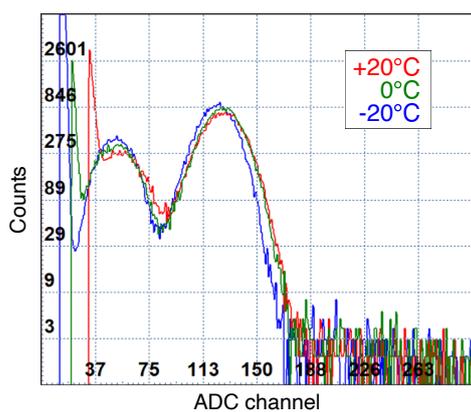


図 3.35: nor50\_300 rad  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$

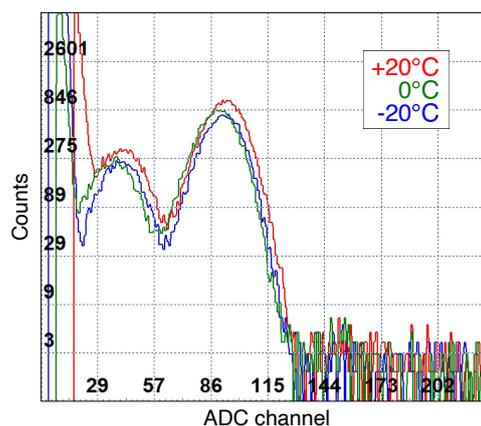


図 3.36: rev50\_300 rad  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$

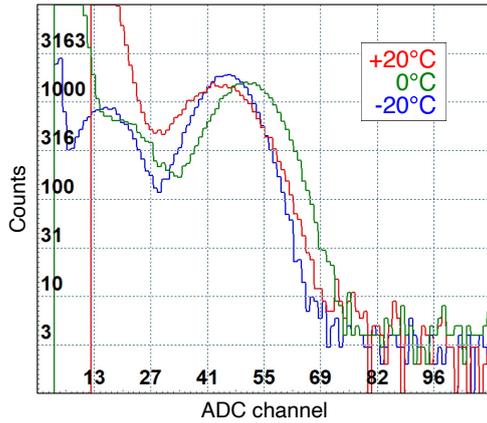


図 3.37: nor50\_1000 rad 20°C,0°C,-20°C

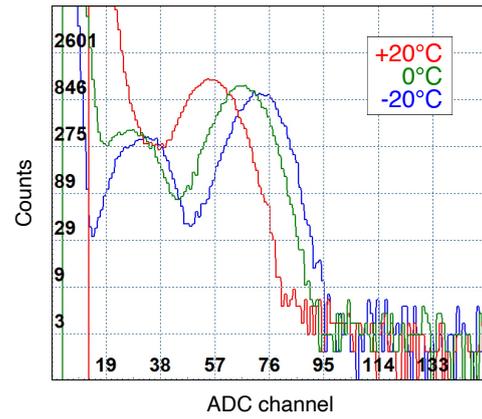


図 3.38: rev50\_1000 rad 20°C,0°C,-20°C

### 低温でのエネルギー閾値

最後に今回の改良版 MPPC での低温実験で測定したエネルギー閾値を下を表 3.4 に記載する。全ての検出器で温度が低下するとエネルギー閾値も低下することが確認できた。1000 rad 照射した検出器は-20°C でどちらもエネルギー閾値が室温の約 30% まで低減していた。rev50\_300 では室温の約 65% 程度にしか低減していなかった。

通常版と改良版での性能の回復具合を比べると、一概に通常版の方が良いとは言えなかった。もし 3.5.5 で考察した改良版で欠陥ピクセルのみ増幅率が小さくなる効果が発揮されているとすると、低温に下げると欠陥ピクセルが少なくなり、その効果が薄れる。よって低温下げても通常版ほど大幅な改善は見られない筈である。この結果から室温で欠陥ピクセルのみ増幅率が小さくなる効果が発揮されていると結論づけるには難しいと判断し、ターゲット信号由来の波形が減衰の途中で新たなノイズ信号に打ち切られている要因がより可能性があるかと判断した。

表 3.4: 各温度でのエネルギー閾値 [keV]

	nor50-300	rev50-300	nor50-1000	rev50-1000
20°C 閾値	19.9	16.8	33.5	28.2
0°C 閾値	14.3	15.5	23.27	20.7
-20°C 閾値	8.4	11.0	11.8	8.1

## 3.6 まとめ

ここまでクエンチング抵抗の変更により放射線耐性を向上させる実験を行ってきた。エネルギースペクトルやエネルギー閾値については若干ではあるが、通常版よりも改良版の方が放射線耐性が向上しているようだった。一方で MPPC 生波形のチェックでは室温で改良と通常版に差が表れた。現段階ではこれは優位な差としては認識しておらず、クエンチング抵抗が大きくなったことに起因するものであると推測している。よって、改良版でのエネルギー閾値の低下や分解能の向上と生信号の変化は関連していない現象で

あると推測している。いずれにしても改良版で生信号の減衰時間が短くなる原因をまだ特定できていないので今後更に精査していく必要がある。

## 第4章 まとめと考察

今回大きく2つのテーマに渡って研究を進めてきた。低温実験では放射線劣化により暗電流が増加したMPPCでも、低温にすることで暗電流の減少を確認できた。宇宙空間で1年間運用したことを想定してもエネルギー閾値を10 keV程度にまで回復させることができたことから、人工衛星運用中に冷却できれば検出器の寿命を伸ばせる可能性があることがわかった。しかし、実際に搭載を想定しているのは小型の人工衛星のため、冷却器の重量や冷却に消費される電力など、課題はまだ残っている。

エネルギースペクトルやエネルギー閾値については若干ではあるが、通常版よりも改良版の方が放射線耐性が向上しているようだった。一方でMPPC生波形のチェックでは室温で改良と通常版に差が表れた。現段階ではこれは優位な差としては認識しておらず、クエンチング抵抗が大きくなったことに起因するものであると推測している。よって、改良版でのエネルギー閾値の低下や分解能の向上と生信号の変化は関連していない現象であると推測している。いずれにしても改良版で生信号の減衰時間が短くなる原因をまだ特定できていないので今後更に精査していく必要がある。

# 付録A 付録

## A.1 MPPC 単体のエネルギー閾値の推定

今回は BGO シンチレータと MPPC を組み合わせて各温度での閾値を測定したが、[Scintillation studies of Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub> (BGO) down to a temperature of 6 K][13] では BGO シンチレータの室温から低温までの発光量の変化が詳細に調べられており、室温から 100 K までは発光量が増え続け、それ以上冷却しても光量はあまり増加しないことがわかっている。

この論文に使われていた温度による光量の変化を今回得られたエネルギー閾値のグラフに適応し、BGO の温度による光量変化分を差し引くことで、今回の実験で温度変化する BGO 光量を 100%積分できていたと仮定した場合に付いて考えた。プロットは論文中のグラフに近い 2 点に内挿する形で行った。図 A.1 では BGO の光量変化を温度によらず、全て結果に反映している。しかし、今回の測定では、シェーピングタイムをそれぞれ室温 ~ 260 K で 1  $\mu$ s、260 K ~ 180 K で 2  $\mu$ s、~ 100 K で 3  $\mu$ s に設定しており、シェーピングタイムを最大でも 3  $\mu$ s までしか伸ばしていない。一方、BGO の発光時間は図 2.5 で示したように低温になると、発光波形の時定数が数  $\mu$ s ~ 10  $\mu$ s 以上となり、shaping time よりも大幅に長くなる。さらに、[Scintillation studies of Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub> (BGO) down to a temperature of 6K][13] では、BGO の発光波形の時定数は 200K 以下の低温下に置くと、減衰時間が短い成分と長い成分の 2 種類に分けることができるとされている。その論文では 77 K で減衰時間が 1.4  $\mu$ s と 8.7  $\mu$ s のものが存在しているとし、BGO の総光量のうち、短い成分と長い成分の比率は 1:3 である。

論文によると 100 K での 2 成分の光量の比は分からないが、時定数の短い成分は 1  $\mu$ s、長い成分は 7  $\mu$ s であった。今回の実験では 100 K で 3  $\mu$ s のシェーピングタイムで測定していたため、その上記の影響を考えると、BGO 総発光量のうち、長い減衰時間を持つ成分については半分も取り込めていない可能性があることがわかった。また、135 K 付近での時定数の短い成分は 1  $\mu$ s、長い成分は 6  $\mu$ s である。それ以上の温度では時定数の長い成分も数  $\mu$ s と短くなるが、シェーピングタイムも 2  $\mu$ s, 1  $\mu$ s と短くしているため、やはり shaping time 内に BGO の光量を十分に積分できていなかった可能性が考えられ、BGO の光量を 100%取得することはできていなかったと考えた。よって図 A.1 で室温を基準として BGO の発光増加率をそのまま適応したグラフを作成すると光量増加を過剰に見積もることとなり、低温域でのエネルギー閾値の逆転を引き起こすと考えた。

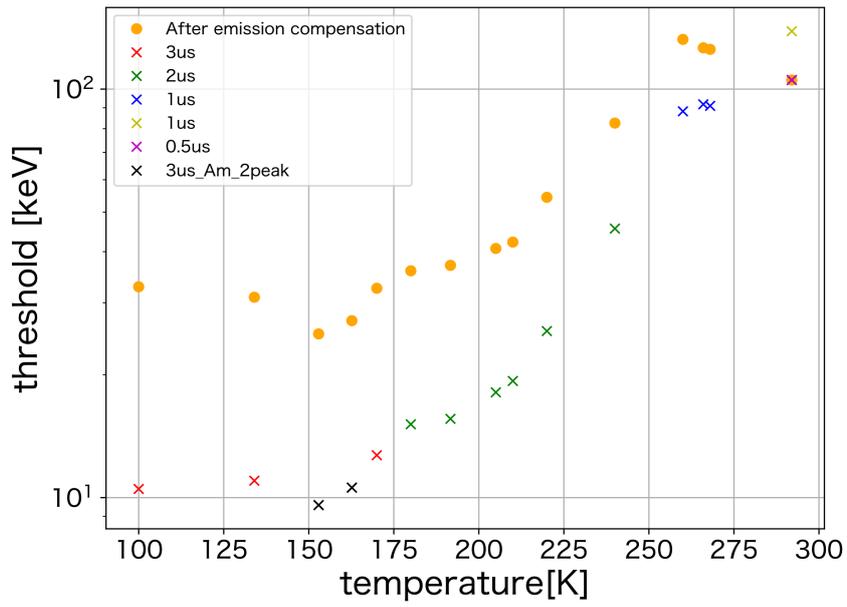


Figure A.1: Temperature dependence of the threshold value at which BGO emission is considered constant (Threshold approximation curve after correction for BGO light emission :red curve)

# 謝辞

この修士論文の完成に際し、多くの方々からのご支援と協力を得ることができました。この場を借りて、心から感謝申し上げます。特に、指導教員である高橋先生には大変お世話になりました。この3年間の研究生活を通じて、研究者としてのあり方や論理的思考能力を養うことができました。いろいろな面でご迷惑をおかけしましたが、いつも寛大な心で受け止めてくださいました。時に厳しく時に優しく、ご指導してくださいました。私はひろたかさんに出会えて本当に良かったと感じています。ありがとうございました。

次に、冷凍実験でお世話になった川端先生にも深く感謝申し上げます。真空冷凍機の使い方やトラブルに迅速に対処していただき、実験をスムーズに進めることができました。本当にありがとうございました。

また、同期の森下くんには改良実験での測定のお手伝いをしていただきました。時間に追われながらの作業だったので大変な思いをさせてしまいましたが、おかげで良い実験結果を得ることができました。本当に感謝しています。

高エネ宇宙の研究室の皆様にも感謝の意を表したいと思います。研究室の先輩方とは研究以外にも楽しい時間を過ごさせていただきました。真武さんは研究室の行事や遊びにも熱心に取り組んでいましたね、学年が3つも離れているのに気さくに話しかけてくれて嬉しかったです。またカラオケ行きたいです。濱田さん、面白トークを交えながらも丁寧にゴルフを教えてくださいましたね。またいつか一緒にプレーしたいです。今澤さんには研究を始め研究室のことなどたくさん教えていただきました。本当にありがとうございました。榎木さんは出張が一緒になることが多く、とても楽しい思い出が多いです。また色々なところに連れ出してくれ、楽しいときはだいたい榎木さんがそばにいました。ありがとうございました。楊さんは毎度不思議な食べ物を研究室に持ち込んできて、その都度試食会が開かれるのが楽しかったです。

M2の皆さんとは研究の合間に雑談をすることが心の癒しでした。誰一人欠けることなく、卒業できることが嬉しいです。森下は研究室も住んでいるマンションも同じでよく一緒に遊び、6年間共に過ごしてきました。少し寂しいですが、しばしのお別れですね。でもまたすぐに会うと思うので、これからもよろしく願いいたします。阪本さんは高エネのおしゃれ番長でしたね。いつも笑顔で研究室も明るかったです。新天地でも元気百倍で頑張ってください。佐崎さんはお酒の席でのおもしろトーク術もさることながら、普段自分が聞かないような曲も教えてもらい、世界が広がっていただきありがとうございました。橋爪君は互いに音楽系サークルで学部からの付き合いでしたね。これからも研究に没頭して夜更かし過ぎないようにしてくださいね。堀君はフットサル。どんなに忙しくても来てくれたことがとても嬉しかったし楽しかったです。またしよう。佐崎さん、橋爪君、堀君の三人はこれからドクターですね。これからはさらに高度で難しい研究が待っているかもしれませんが、3人なら素晴らしい成果を出してくれると確信しています。陰ながら応援しています。また、定期的に西条に赴くのでその時はよろしく願いいたします。

後輩のM1、B4の皆さんへ。頼り甲斐のない先輩でしたが、こんな私でも無事に卒業できそうです。お世話になりました。浦田君、いつも鋭く的確なツッコミをありがとう。浦田君のいる空間では安心してボケることができました。深田君は当初落ち着いている子だと思っていましたが、全然違いましたね。そのままの調子で頑張ってください。横田君、ノリが良くて一緒に過ごしていて楽しかったです。また飲みに行きましょう。丸田君、いつも構ってくれてありがとうございました。次に会うときはどんなモノマネが増えているのが楽しみです。宮島君、知識の多さに驚きました。新しい場所でも研究頑張ってください。仲野君、まだ研究室入って一年目なのに先輩顔負けの研究量でびっくりしました。これからも頑張ってください。呉

屋君は勉強もスポーツもできて素直に尊敬します。これからの高エネ宇宙フットサル部を頼みます。竹岡君、「割り勘」の話がすごく面白かったです。笠井さんこれからも観測で昼夜逆転気味になるかもしれませんが、体調にはお気をつけください。石川さん、大部屋に何度かお邪魔して騒がしくしてしまい申し訳ございませんでした。たまにくれたお菓子が美味しかったです。

3年間をこの高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室で過ごせて本当に良かったと思います。これからはこの研究室に恥じないような人となって精進していきたいと思います。皆様本当にありがとうございました。

## 参考文献

- [1] E. magazine.
- [2] 松定プレジジョン [https://www.matsusada.co.jp/case/ps/photomultiplier\\_tubepmt.html](https://www.matsusada.co.jp/case/ps/photomultiplier_tubepmt.html).
- [3] E. Al-Sarray, Investigation of radiation shielding properties of some composite materials, Ph.D. thesis (02 2016). doi:10.13140/RG.2.2.32533.06888.
- [4] 広島大学 理学部 物理科学科 久富 章平, MPPC の小型衛星応用を見据えたノイズ低減対策の研究.
- [5] [https://www.aanda.org/articles/aa/full\\_html/2023/09/aa46182-23/aa46182-23.html](https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2023/09/aa46182-23/aa46182-23.html), The smallest astrophysical space observatory 677 (2023) 9.  
URL [https://www.aanda.org/articles/aa/full\\_html/2023/09/aa46182-23/aa46182-23.html](https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2023/09/aa46182-23/aa46182-23.html)
- [6] N. Hirade, H. Takahashi, N. Uchida, M. Ohno, K. Torigoe, Y. Fukazawa, T. Mizuno, H. Matake, K. Hirose, S. Hisadomi, K. Nakazawa, K. Yamaoka, N. Werner, J. Řípa, S. Hatori, K. Kume, S. Mizushima, Annealing of proton radiation damages in si-pm at room temperature, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 986 (2021) 164673.
- [7] H. Takahashi, N. Hirade, N. Uchida, K. Hirose, T. Mizuno, Y. Fukazawa, K. Yamaoka, H. Tajima, M. Ohno, Silicon photomultiplier (si-pm) comparisons for low-energy gamma ray readouts with bgo and csi (tl), Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 989 (2021) 0168.
- [8] [https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\\_SALES\\_LIBRARY/ssd/s13360\\_series\\_kapd1052j.pdf](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s13360_series_kapd1052j.pdf).
- [9] J. Gironnet, V. Mikhailik, H. Kraus, P. de Marillac, N. Coron, Scintillation studies of bi4ge3o12 (bgo) down to a temperature of 6k, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 594 (3) (2008) 358–361. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.07.008>.  
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900208009194>
- [10] [https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\\_SALES\\_LIBRARY/ssd/mppc\\_kapd9008j.pdf](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/mppc_kapd9008j.pdf), Hamamatsu photonics technical-notes.
- [11] Takayuki Saito (東大宇宙線研), Kei Iwasaki (京大理), cta-japan consortium, CTA 報告 210: CTA 大口径望遠鏡のための SiPM モジュールの開発 (2)<http://www.cta-observatory.jp/Publications/Presentations/CTAJ-20230322-09.pdf> (...).

- [12] 京都大学大学院理学研究科 物理学宇宙物理学専攻 宇宙線研究室 Kei Iwasaki, 大気チェレンコフ望遠鏡の性能向上に向けた半導体光検出器 SiPM カメラの基礎開発.
- [13] J. Gironnet, V. Mikhailik, H. Kraus, P. de Marcillac, N. Coron, Scintillation studies of  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (bgo) down to a temperature of 6 k, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 594 (2008) 358–361.