

X線天文衛星 ASTRO-H 用
搭載型 BGO シンチレータの光量試験

広島大学 理学部 物理科学科
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

B082314

徳田伸矢

主査：深沢泰司 副査：佐々木茂美

2012年2月10日

概要

2014年度打ち上げ予定の次期 X 線天文衛星 ASTRO-H には 4 つの検出器が搭載される。その中で 10-600keV に優れた感度を持つ、望遠鏡による集光系を用いない検出器が軟 X 線検出器 (SGD) である。SGD は主検出部を BGO シンチレータのシールドで取り囲むことによって、衛星軌道上で外からやってくる荷電粒子や X 線、 γ 線などのバックグラウンドを低減させることができる。シールドの光読み出しには従来の光電子増倍管 (PMT) に代わり、アバランシェフォトダイオード (APD) が用いられる。

BGO は各々の結晶ごとの個性や、製造過程での差異など様々な要因でシンチレーション光の光量が異なる。よって、実際に衛星に搭載される BGO シンチレータの光量を事前に測定し、光量が著しく低いものがないかを確認し、より光量の高い結晶を選定する必要がある。そこで本研究では、SGD に実際に搭載される BGO の光量測定試験のセットアップの立ち上げを目的として、試作型の BGO を用いてセットアップを確立した。そして、現在までに 9 個の搭載型 BGO の光量を測定した。

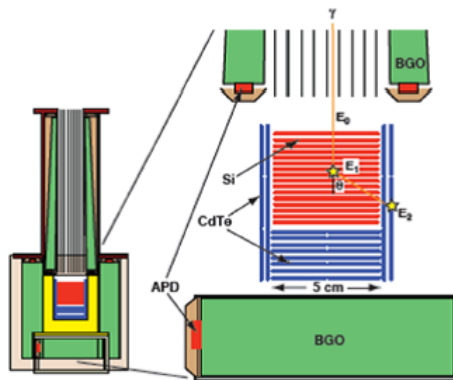


図 1: SGD の断面図 [1]

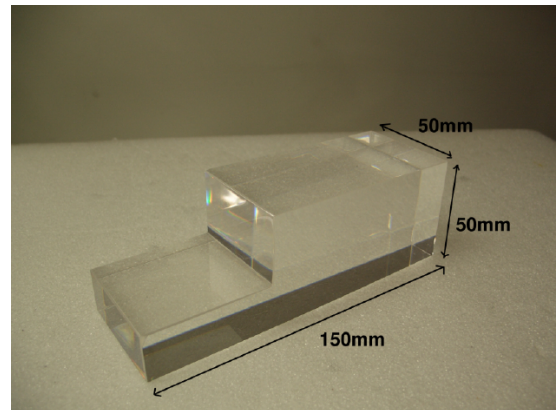


図 2: $50 \times 50 \times 150 \text{ mm}^3$ の BGO

目次

第1章	序論	4
第2章	ASTRO-H 衛星搭載 SGD とアクティブシールド	5
2.1	ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器 SGD	5
2.2	BGO アクティブシールド	6
2.3	アバランシェフォトダイオード (APD)	7
2.4	半導体検出器におけるノイズ	8
2.5	SGD-BGO の形状と個数	9
2.6	BGO + APD に求められる性能	12
2.7	本研究の目的	13
第3章	光量測定試験のセットアップの立ち上げ	14
3.1	測定セットアップの立案	14
3.1.1	アルミ箱を用いない案	14
3.1.1.1	測定のセットアップ	14
3.1.2	アルミ箱を用いた案	17
3.1.2.1	測定のセットアップ	17
3.2	セットアップ検証事項	20
3.2.1	APD のゲイン測定	20
3.2.2	APD の暗電流測定	21
3.2.3	反射材の巻き直しによる光量の再現性	22
3.2.4	APD の取り外しによる光量の再現性	24
3.2.5	SN 比の HV 値依存性	25
3.2.6	標準光量 BGO の絶対光量測定	26
3.3	プレ光量チェックシートの作成	28
第4章	搭載型 BGO の光量測定と評価	32
4.1	搭載型 BGO 結晶の取り扱い	32
4.2	測定のセットアップ	32
4.3	搭載型 BGO の光量測定結果	34

目 次

1	SGD の断面図 [1]	1
2	50 × 50 × 150 mm ³ の BGO	1
2.1	SGD の概念図	5
2.2	SGD の断面図 [1]	5
2.3	アクティブシールドの模式図 [1]	6
2.4	SGD-BGO の形状 (Type-A, B, C1, C2)[3]	10
2.5	SGD-BGO の形状 (Type-D1, D2)[3]	11
2.6	SGD の BGO 配置図	12
3.1	リモケーブルと APD の取り付け簡易図	15
3.2	反射材を巻き、更にアルミ箔で覆った BGO に APD を取り付けしている。	15
3.3	セットアップの簡易図 (アルミ箱を用いない案)	16
3.4	測定時の恒温槽内での BGO の状態	16
3.5	反射材を 2 重に巻いた BGO にオプティカルグリッドで APD を接着した。	17
3.6	APD を固定し、エアパッキンで包んだ BGO (Type-C1)	18
3.7	ソケットに APD を接続したアルミ箱内の BGO (Type-C1)	18
3.8	セットアップの簡易図 (アルミ箱を用いる案)	19
3.9	測定時の恒温槽内でのアルミ箱の配置	19
3.10	APD ごとのゲイン測定結果	20
3.11	APD ごとの暗電流 (20)	21
3.12	50 × 50 × 150 mm ³ の BGO	22
3.13	ゴアテックスの巻き直しによる光量再現性の測定結果 (徳田)	23
3.14	ゴアテックスの巻き直しによる光量再現性の測定結果 (上野)	23
3.15	Type-A の BGO 結晶	24
3.16	APD No.14 の取り外しによる光量の再現性	25
3.17	APD ごとの SN 比の HV 値依存性	26
3.18	²⁴¹ Am を当てた時の PD のスペクトル	27
3.19	¹³⁷ Cs を当てた時の PD のスペクトル	27
3.20	プレ光量チェックシート (1 ページ目)	29

3.21	プレ光量チェックシート (2 ページ目)	30
3.22	プレ光量チェックシート (3 ページ目)	31
4.1	Type-D1 における線源の照射位置 (D2 も同様)	33
4.2	各搭載型 BGO 結晶での APD 取り付け位置	34
4.3	SBG061(Type-A) のスペクトル	35
4.4	1B.SGD.B.11.3(Type-B) のスペクトル	35
4.5	1B.SGD.B.11.4(Type-B) のスペクトル	35
4.6	1B.SGD.C1.11.2(Type-C1) のスペクトル	35
4.7	SBG064(Type-C2) のスペクトル	35
4.8	SBG361(Type-D1) のスペクトル	36
4.9	OK.astro.Type.D1.11.7(Type-D1) のスペクトル	36
4.10	OK.astro.Type.D2.11.5(Type-D2) のスペクトル	36
4.11	OK.astro.Type.D2.11.6(Type-D2) のスペクトル	36

表 目 次

2.1	SGD の要求性能 [1]	6
2.2	放射線検出のためのシンチレータ特性比較 [2]	7
2.3	光検出器の特性比較 [2]	8
4.1	光量測定に用いた実験器具	33
4.2	光量測定時の測定条件	33
4.3	搭載型 BGO (9 個) の測定結果	37
4.4	広大と東大の光量比	38
4.5	+20 での ch 毎のパラメータ	39
4.6	搭載型 BGO 結晶ごとの絶対光量とノイズ	39

第1章 序論

宇宙から地球には絶えず、高エネルギーの放射線（宇宙線）が降り注いでいる。その起源は宇宙での高エネルギー現象と言われている。宇宙線を観測することによって我々はその高エネルギー現象を解明するための情報を得ることができる。しかし、宇宙線の中の粒子は電荷を持った陽子や原子核なので宇宙に存在する磁場によって曲げられてしまい、その起源の正しい位置情報を失ってしまう。それとは異なり、電磁波である X 線や γ 線は宇宙に存在する磁場によって進路を曲げられることがほとんどなく、その放射線の起源の位置情報をそのまま保つことができる。そのため、X 線や γ 線を観測することが高エネルギー天体現象の研究をする上でとても重要なことであると言える。

天体現象の放射から観測的に得られる指標は、放射のスペクトル（連続スペクトル、輝線、吸収スペクトル）、時間変動、イメージ、偏光等である。連続スペクトルからは温度、磁場、電離度などの物理量が得られ、輝線、吸収スペクトルからは温度、化学成分、活動性の高さを知ることができる。また、時間変動からは天体の大きさ、イメージからは天体の空間的な情報を得ることができる。これらの情報の総合的な解析によって様々な高エネルギー天体現象を解明することができる。

しかし、天体からの X 線や γ 線は大気による吸収が大きいので地上では十分な観測を行うことができない。そのため、検出器を人工衛星に搭載して観測を行う必要がある。検出器を人工衛星に搭載する上で、小型化、低重量、耐久性など地上での検出器と比べ求められる性能は厳しく、それでいて優れた感度を持ち合わせていなくてはならない。X 線

線の観測感度向上のためには、バックグラウンドを除去するためのシールドが必要不可欠である。次期 X 線天文衛星である ASTRO-H 衛星では、搭載する検出器を BGO シンチレータを用いた井戸型アクティブシールドで覆い、感度の向上を計っている。またシールドの光読み出しには従来使用されていた光電子増倍管（PMT）に代わり、アバランシェフォトダイオード（APD）を用い検出器デザインの可能性を広げている。

第2章 ASTRO-H衛星搭載SGDとアクティブシールド

2.1 ASTRO-H衛星搭載軟ガンマ線検出器SGD

2014年度打ち上げ予定の次期X線天文衛星ASTRO-Hには4つの検出器が搭載される。その中で10-600keVに優れた感度を持つ、望遠鏡による集光系を用いない検出器が軟線検出器(SGD)である。SGDはBGOシンチレータを用いた井戸型のアクティブシールドの底に高いエネルギー分解能を持つシリコンパッドセンサーと線に高い感度を持つテルル化カドミウム(CdTe)半導体ピクセルセンサーから構成されている半導体多層コンプトンカメラを置いた構造になっている。井戸型アクティブシールドの狭視野に、コンプトン運動学を用いたコンプトンカメラを組み合わせ、更に線の到来方向を制限することによってバックグラウンドを大幅に低減し、従来の検出器の感度より1桁以上高い性能を実現する。以下にSGDの概念図と断面図、要求性能を示す。

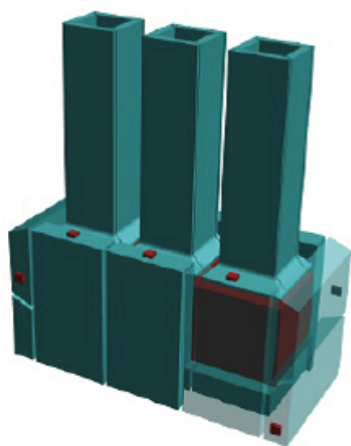


図 2.1: SGD の概念図

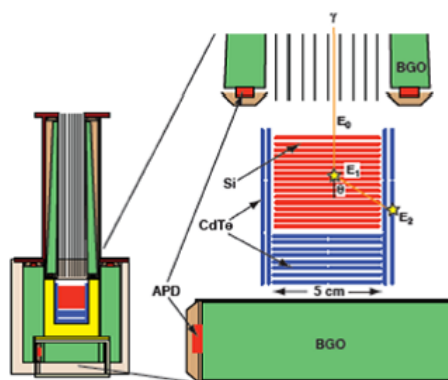


図 2.2: SGD の断面図 [1]

エネルギー領域	10 - 600keV
エネルギー分解能	< 2keV@40keV
有効面積	100cm ² @100keV
視野	0.5 × 0.5 度 (< 110keV)
角分解能	20 × 20 度 (@600keV) < 4 度 (E ~ 600keV)

表 2.1: SGD の要求性能 [1]

2.2 BGO アクティブシールド

衛星軌道上では、外からやってくる荷電粒子や X 線、 γ 線などが検出器のバックグラウンドとして検出されてしまう。また、陽子が主検出部に当たることで主検出器内に放射性同位体が生成され（放射化）、バックグラウンド源にもなってしまふ。そこで検出器を Anti 検出器である BGO アクティブシールドで取り囲むことによって外からの宇宙線を遮断し、内部検出器の放射化を防ぎ、もし放射線がシールドを抜けて主検出部に入ってしまったら、BGO の信号との反同時係数をとることによって、それをバックグラウンドとして除去することができる。図 2.3 にアクティブシールドの模式図を示す。

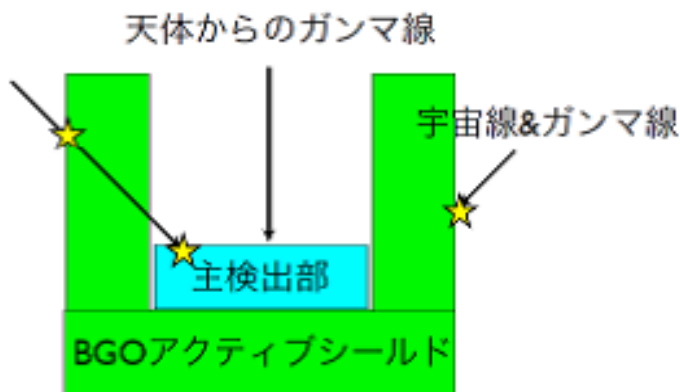


図 2.3: アクティブシールドの模式図 [1]

アクティブシールドに適したシンチレータの特徴として、(1) 阻止能が高いこと、(2) 蛍光効率が高いこと、(3) 蛍光に対する透明度が高いこと、(4) 蛍光の減衰時間が長いこと、(5) 蛍光の波長分布の適正、といった特徴を満たしていることが挙げられる。ここで一般

的なシンチレータ物質の特性を表 2.2 に示す。これに加えて、人工衛星搭載用検出器として、コンパクト性や頑丈なシンチレータが要求される。

BGO の主な特徴は、ビスマスの大きな原子番号 (83) とその大きな比重 ($7.3g/cm^3$) である。これにより市販のどの材質よりもガンマ線の光電吸収率が大きい。BGO は蛍光時に結晶の主成分である Bi^{3+} イオンの光学的遷移を伴うため、不純物添加の必要がない。そのため高い阻止能であるにも関わらず、シンチレーション光にたいして高い透明度を保つ。短所として、蛍光出力が NaI の 10 ~ 20 % 程度しかないが、これは低温にすることによって光量が増加し、光センサー (光電子増倍管や APD) のゲイン増加と合わさって都合が良い。以上の特徴から BGO は宇宙ガンマ線検出用のアクティブシルードに適していると言える。

特性	NaI:Tl	CsI:Tl	BGO	GSO
実行原子番号	50	54	74	59
密度 (g/cm^3)	3.67	4.51	7.13	6.71
最大発光波長 (nm)	410	565	480	430
蛍光出力 (相対値)	100	45	12	20
蛍光減衰時間 (ns)	230	1000	300	60
吸収係数 ($511 keV:cm^{-1}$)	0.34	0.41	0.955	0.674

表 2.2: 放射線検出のためのシンチレータ特性比較 [2]

2.3 アバランシェフォトダイオード (APD)

これまで、数 100keV ~ 数 MeV 領域での結晶シンチレータと組み合わせる光検出器は光電子増倍管 (PMT)、GeV 領域ではフォトダイオード (PD) が一般的に使われてきた。

PMT は得られた信号を内部増幅することができるため、微弱な信号も読み取ることが可能である。しかし、PMT 自体の体積が大きい、磁場の影響を受けやすい、動作させるのに 1000V を超える高い電圧が必要であるという欠点を抱えていた。また、量子効率も ~ 20 % と悪いのも欠点の一つである。もう一方の PD は、PD 自体の体積は小さく、作動電圧も通常は 100V 以下ですみ、磁場にも強い、量子効率も ~ 80 % と良いと PMT の欠点をクリアしているのだが、信号を増幅する機能を持っていなかった。増幅する機能がないと、微弱な信号はノイズに埋もれてしまい検出ができないので、これが PD の欠点となっていた。

アバランシェフォトダイオード (APD) は PD と同じ半導体光センサーであるが、検出器内で生成された光電子を、半導体に高い電圧を印加することにより加速し、衝突により新たな電子、正孔を作り出すという方法 (なだれ増幅) で内部増幅を可能にしている。ま

た作動電圧も数 100V となっている。APD は PMT と PD の長所を併せ持ち、搭載する衛星の設計に与える制限が小さい。そのため、SGD ではアクティブシールドの光検出器として APD を採用している。

特性	PMT	PD	APD
負荷電圧 [V]	~ 1000	40	300
量子効率 [%]	20 ~ 30	~ 80	~ 80
増幅率 [倍]	~ 10^{5-6}	1	~ 10^2
磁場の影響	受ける	受けない	受けない
大きさ [mm]	10 ~ 760	0.1 ~ 30	0.04 ~ 10

表 2.3: 光検出器の特性比較 [2]

2.4 半導体検出器におけるノイズ

半導体検出器によるノイズは、APD から CSA に至るまでの初段電気回路系の雑音が大きく影響する。これらは、電子の熱雑音 johnson noise、電子の熱揺らぎが原因である暗電流の変動によって発生する shot noise、半導体に固有に存在し、不純物のランダム運動や構造に由来する $1/f$ noise の和になる。

APD を含んだ等価雑音電荷の式は、

$$\overline{\Delta_{\text{RMS}}^2} \sim \frac{k_b T \tau}{\pi^2 R_p} + \frac{(qI_{\text{ns}} + I_{\text{nb}}FM^2)\tau}{2\pi^2} + 4k_B TR_s C_{\text{in}}^2 \cdot \frac{1}{\tau} + C_{1/f} C_{\text{in}}^2 \quad [C^2]$$

となる。 I_{ns} は表面暗電流、 C_{in} は等価入力容量 (PIN 検出器の接合容量、ケーブル、初段 FET (電界効果トランジスタ) の入力容量)、 R_p は等価並列抵抗 (帰還抵抗、高圧負荷抵抗)、 R_s は等価直列抵抗 ($\equiv A/g$ 、 $A: 0.5 \sim 0.7$ の定数、 g_m : 初段 FET の相互コンダクタンス)、 M は内部増幅率、 F は過剰雑音係数である。ここで第一項と第三項がそれぞれ R_p , R_s による Johnson noise、第二項が I_{ns} による shot noise、第四項が $1/f$ noise の和であることを表している。

更に雑音の単位を等価雑音電荷ではなく Si 半導体検出器のエネルギー分解能 [Si-keV] に換算した場合には、 $T=270[\text{K}]$ において、

$$\overline{\Delta_{\text{FWHM}}^2} \sim 2.355^2 \left[\frac{1.965 \times 10^{-4}}{R_p} + 4.218 \times 10^{-3} (I_{\text{nb}} + I_{\text{nb}}FM^2) \right] \tau + \{f(C_{\text{in}})\}^2 \quad [\text{keV}^2(\text{Si})]$$

となる。本研究では原因が分かり難い $1/f$ noise を考慮せずにノイズ計算を行う。それぞれのパラメータの単位は $R_p(\text{G}\Omega)$ 、 $I_{\text{ns}}(\text{nA})$ 、 $C_{\text{in}}(\text{pF})$ 、 $\tau(\mu\text{s})$ である。本研究で用いた

CSA(クリアパルス社製 5005H 4chPreAmp) の R_p は $\sim 5000M\Omega$ であり、 I_{ns} は内部増幅の影響を受けないため、 \square 内において I_{nb} の項が支配的であると考えられている。これを考慮した場合、APD のノイズは

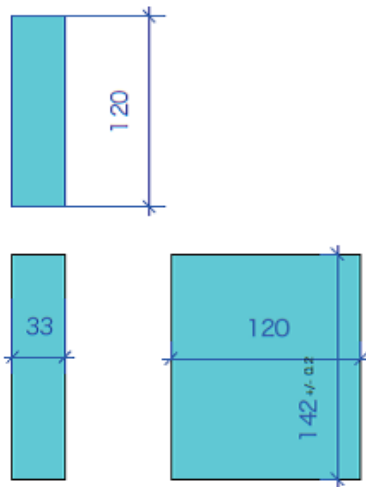
$$\overline{\Delta E_{FWHM}^2} \sim (\delta_{noise})^2 \sim (\delta_{noise,I}^2) + (\delta_{noise,C}^2) \sim [0.01474 \times 4\pi^2 I_{nb} FM^2 \tau + \{f(C_{in})\}^2] \quad [keV^2(Si)]$$

と表すことができる。この式の第一項は電流性ノイズ、第二項を容量性ノイズと呼ぶ。

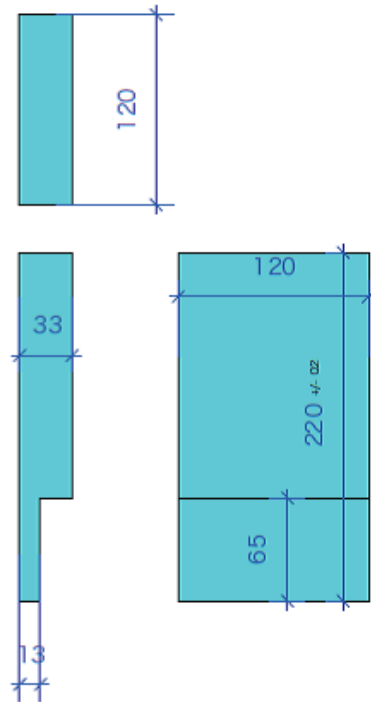
2.5 SGD-BGO の形状と個数

SGD-BGO の形状は全部で 6 種類ある。図 2.4 と 2.5 に SGD-BGO の形状を示す。

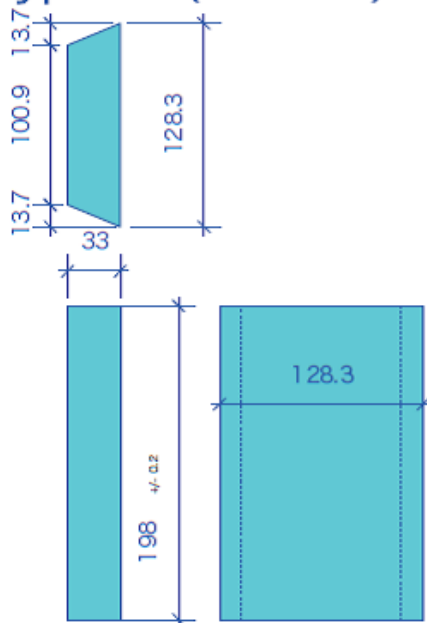
Type-A (bottom)



Type-B (Side-B)



Type-C1 (Side-C1)



Type-C2 (Side-C2)

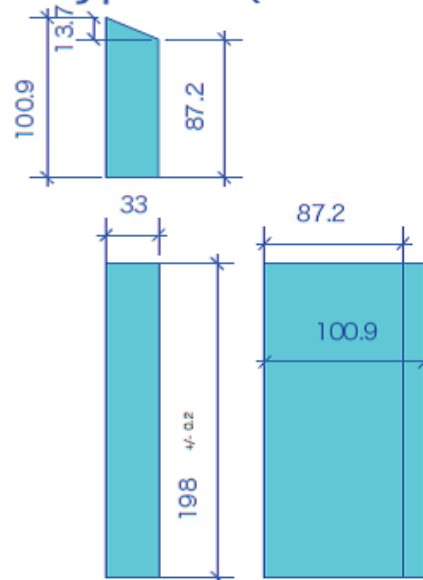


図 2.4: SGD-BGO の形状 (Type-A, B, C1, C2)[3]

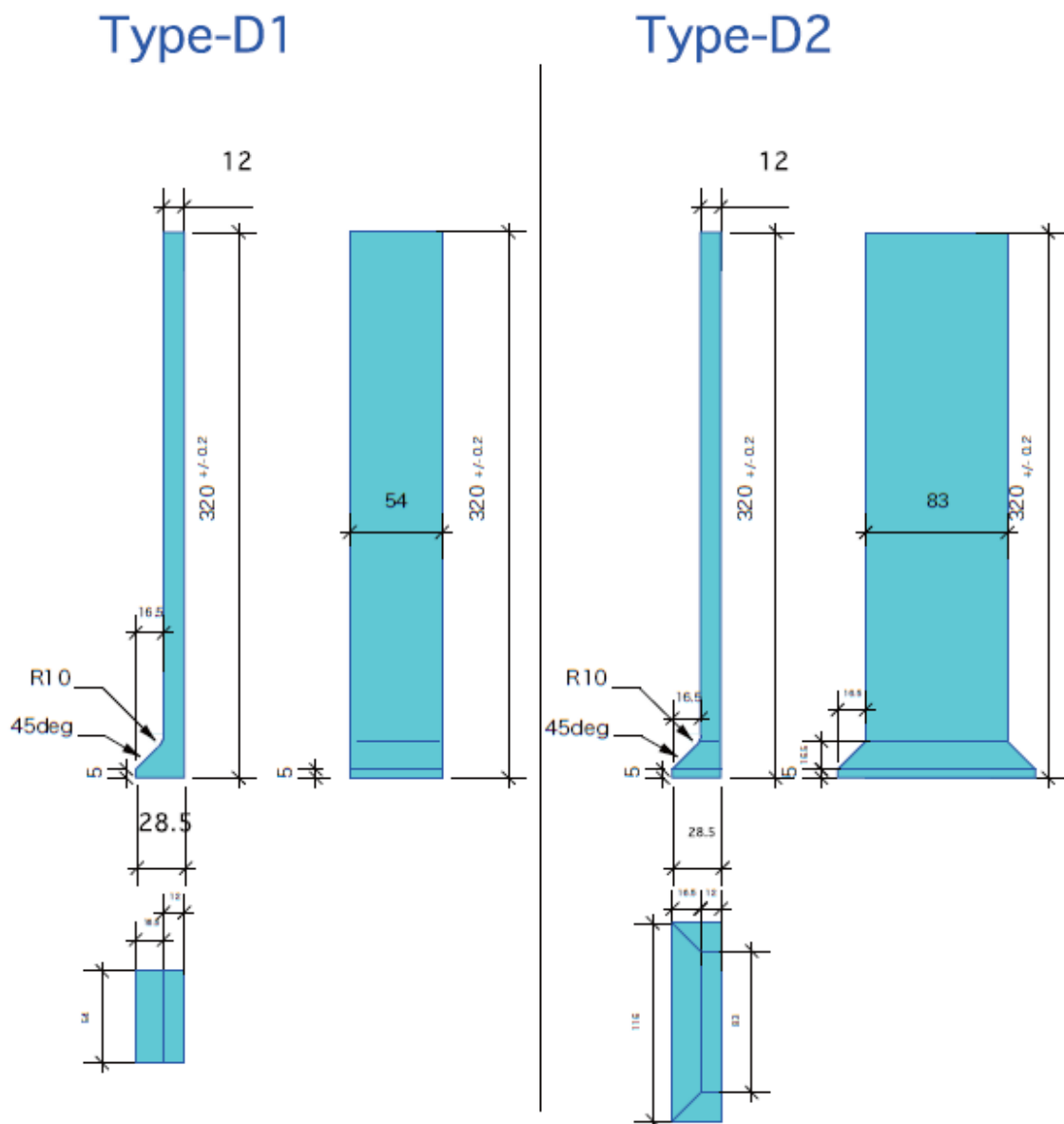


図 2.5: SGD-BGO の形状 (Type-D1, D2)[3]

それぞれ、Type-A は SGD のボトム部、Type-B, C1, C2 はサイド部、Type-D1, D2 はトップ部にあたる結晶となる。SGD 一台につき、Type-A \times 3, B \times 6, C1 \times 2, C2 \times 2, D1 \times 6, D2 \times 6 の計 25 個の BGO 結晶を使用する。よって、ASTRO-H には 2 台の SGD が搭載されるので SGD のみで計 50 個の BGO 結晶が搭載される。図 2.6 に SGD の BGO 配置図を示す。

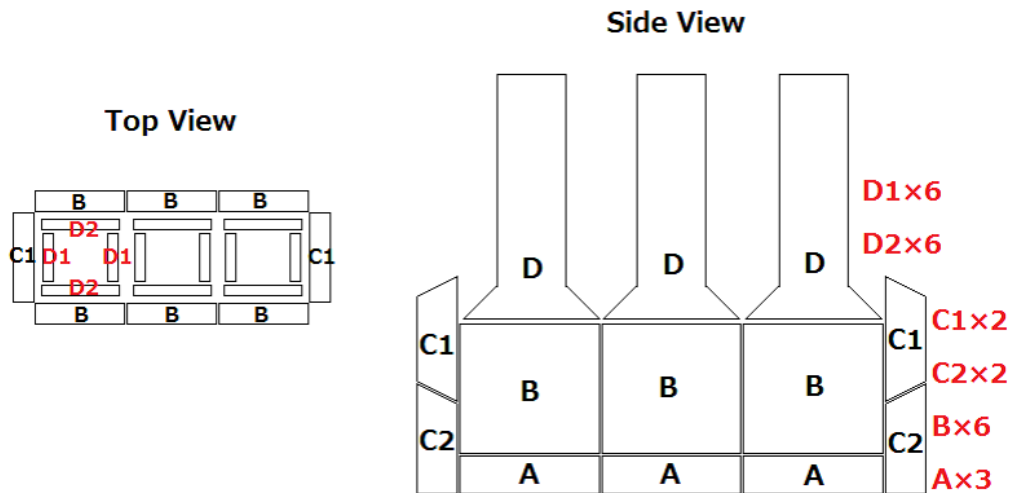


図 2.6: SGD の BGO 配置図

この SGD の BGO の形状と配置は、どの方向からも主検出部コンプトンカメラを厚さ 3 cm 以上の BGO でほぼ隙間なくシールドできるように設計されている。これは BGO の厚さが 3cm あれば、外から検出器まで入ってくる陽子の数を 4 分の 1 以下に抑えることができ、検出器の放射化をかなり抑えることができるためである。また、Type-C1, C2 が分割されているのは、1 つの BGO だと大きく重すぎて、構造的にも光量的にも厳しいためである。

2.6 BGO + APD に求められる性能

実際に衛星に搭載する BGO の体積は大きく、1cm 角立方 BGO の 30 % 以下の光量しか出すことができない。これは搭載する BGO 自体の体積が大きく、透過率が高い BGO でもシンチレーション光が BGO の中を何回も走り回る間に減光してしまうためである。また BGO の体積に比べて、光読み出しを行う APD の受光面が小さいため、光収集率が悪くなっているということも理由の一つである。また、今回の研究でもだが BGO の光量測定を行う場合、BGO をゴアテックス (0.25 mm) という反射材で 2 重に巻いて測定を行っているが、衛星に搭載するときは BGO の一つの面に BaSO₄ という反射材兼接着剤を塗って CFRP 板を貼り、CFRP を介して SGD の容器に取り付ける (5 つの面は ESR とゴアテックス)。このときの光量は、全面ゴアテックスのときと比べて 70 % 落ちてしまう。更にその他の接着材や APD に取り付けるアルミケースの影響などでも光量は 80 % 減少する。(ただし、衛星搭載時には ESR という鏡面有機物シートとゴアテックスで巻くこ

とによってゴアテックスの2重に比べて20%の増光がある。)このように実際に衛星に搭載する際の光量の減少を考慮すると、もともとのBGO自体の光量はできるだけ高いほうが良い。SGDでは低温(-20)でノイズに対する閾値約100keVを目標としている。

2.7 本研究の目的

BGOは各々の結晶ごとの個性や、製造過程での差異など様々な要因でシンチレーション光の光量が異なる。よって、実際に衛星に搭載されるBGOシンチレータの光量を事前に測定し、光量が著しく低いものがないかを確認し、より光量の高い結晶を選定する必要がある。

そこで本研究では、SGDに実際に搭載されるBGOの光量測定試験のセットアップの立ち上げを目的とする。衛星搭載型BGOを測定する上でBGOの特性を考慮するとともに、測定しなければならないBGOの個数は前述したSGD2台分の50個と予備のBGOとなり、合計100個近くにもなるため、迅速かつ精確な測定が行えるセットアップを目指す。

第3章 光量測定試験のセットアップの立ち上げ

3.1 測定セットアップの立案

前述したようにSGDに用いられる搭載型BGOの個数は100個近くにもなるため、迅速かつ正確な測定が行えるセットアップを立ち上げる必要性がある。ここでは2つの案について検討した。

3.1.1 アルミ箱を用いない案

BGOの光量をAPDで測定する上で、従来静電遮蔽のためにアルミボックスの中にBGOとAPDを入れて測定していた。しかし、そのアルミボックスの代わりにBGOをアルミ箔で覆うことで静電遮蔽を実現する方法を考案した。理由は以下に記載する。

1. 測定を行わなければならないBGOの数量が約100個にもなり、それぞれ大きさ、形状に差があるため、それに合わせてアルミボックスを用意するのは非効率である。
2. BGOの光量測定を行う恒温槽内のスペースが限られており、アルミボックスによる体積の増加で同時測定できる数量が減少してしまう。
3. BGOをアルミボックスから出し入れしていると、アルミボックスの角などにぶつけてしまいBGOが欠けてしまう危険性がある。

以上の点よりアルミボックスを用いない測定法を考案した。

3.1.1.1 測定のセットアップ

BGOにはゴアテックス社製の反射材を2重に巻き、その上からアルミ箔と緩衝剤としてエアパッキンを巻き測定を行う。そしてBGOの光量測定に用いるAPDは、リモケーブルの先に主線とグラウンドを分けてはんだ付けしたソケットに取り付け、アルミテープ

で静電遮蔽を行った。図 3.1 にその簡易図を示す。BGO と APD の接着には応用光社製のオプティカルグリスを用いた。図 3.2 では反射材を巻き、更にアルミ箔、緩衝剤で覆った BGO にオプティカルグリスで APD を接着している。

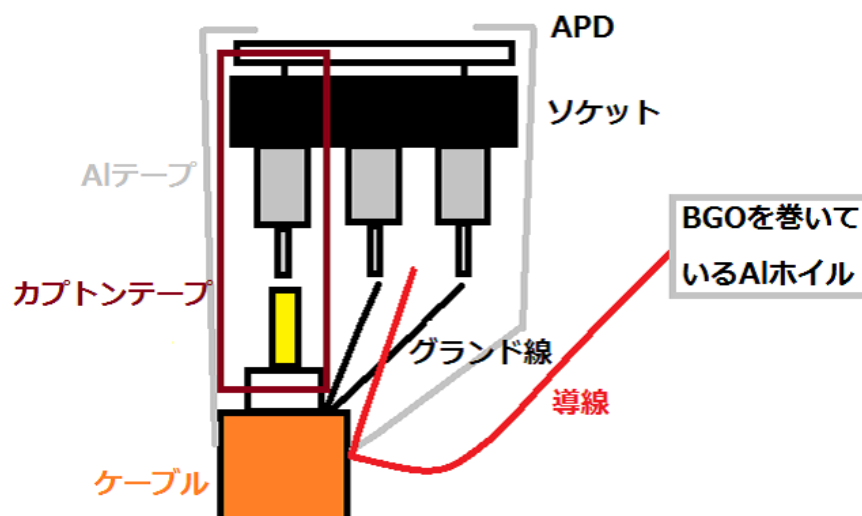


図 3.1: レモケーブルと APD の取り付け簡易図



図 3.2: 反射材を巻き、更にアルミ箔で覆った BGO に APD を取り付けしている。

実際は BGO を恒温槽内に設置し、恒温槽内で APD を接着して測定を行う。この案では 4 つの BGO を同時に測定することが可能であった。図 3.3 にセットアップの簡易図と、

図 3.4 に実際に恒温槽内で BGO を測定する時の状態を示す。

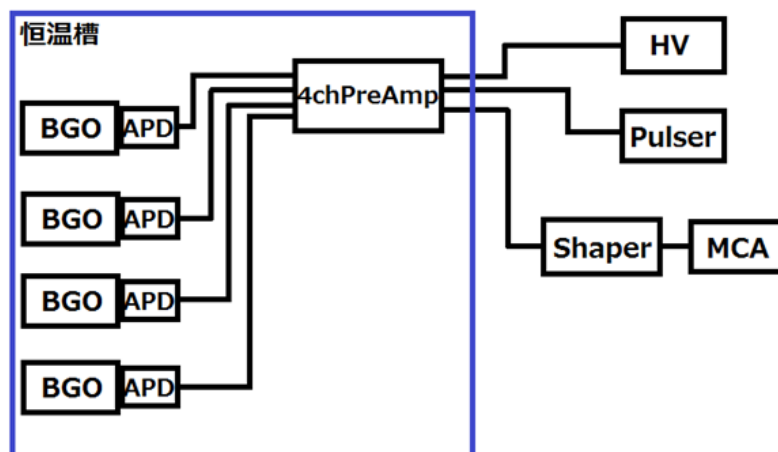


図 3.3: セットアップの簡易図 (アルミ箱を用いない案)



図 3.4: 測定時の恒温槽内での BGO の状態

しかし、このセットアップで測定を重ねていくと、APD とソケットを静電遮蔽しているアルミテープの内部にオプティカルグリスが侵入し、漏電してしまう恐れが発生してしまい、セットアップを壊してしまう可能性があったため不採用となった。

3.1.2 アルミ箱を用いた案

アルミ箱を用いないセットアップには危険性があったため、BGO 光量測定の実績もあるアルミ箱を用いる案を試みた。また、ASTRO-H に搭載する検出器の一つである HXI にも BGO アクティブシールドが用いられているのだが、それに使用される BGO の光量測定を行っていた東大牧島研がこの方法で行っていたため、この方法で測定を行う方がお互いの状況を把握できることも、この方法を採用した理由の一つである。

3.1.2.1 測定のセットアップ

反射材であるゴアテックスを 2 重に巻いた BGO にオプティカルグリスを用いて APD を装着する。ゴアテックスを巻く際は、ゴアテックスに皺が寄らないように、また隙間がないようにしっかりと巻く必要がある。図 3.5 にその様子を示す。



図 3.5: 反射材を 2 重に巻いた BGO にオプティカルグリスで APD を接着した。

更に、ゴアテックスで APD がずれないように固定し、その上からスポンジで APD を押さえつけた。そしてアルミ箱に入れる際にぶつけてしまっても BGO が傷つかないように、BGO をエアパッキンで覆った。この状態で静電遮蔽を行うためにアルミ箱に入れ、移動時の振動の影響を受けないようにするためにスポンジで BGO を固定した。図 3.6 に APD を固定し、エアパッキンで包んだ BGO と、図 3.7 にソケットに APD を接続しているアルミ箱内の BGO を示す。



図 3.6: APD を固定し、エアパッキンで包んだ BGO(Type-C1)

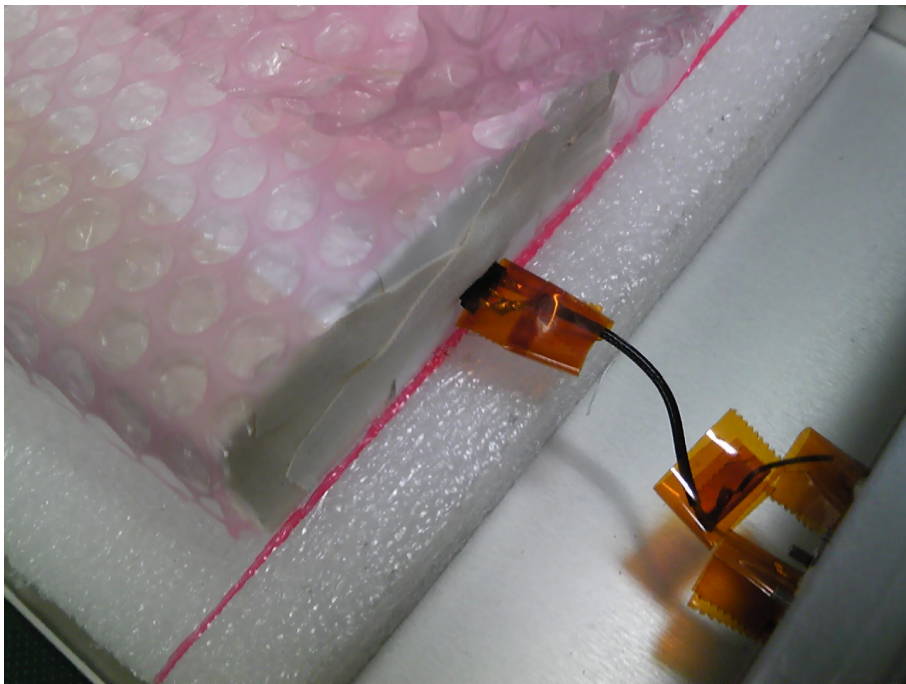


図 3.7: ソケットに APD を接続したアルミ箱内の BGO(Type-C1)

そして、アルミ箱を恒温槽内に設置し、プリアンプにリモケーブルを使って接続して

信号の読み出しを行う。この案では2個のBGOを同時に測定することが可能であった。図3.8にセットアップの簡易図と図3.9に実際に恒温槽内でBGOを測定する時の状態を示す。

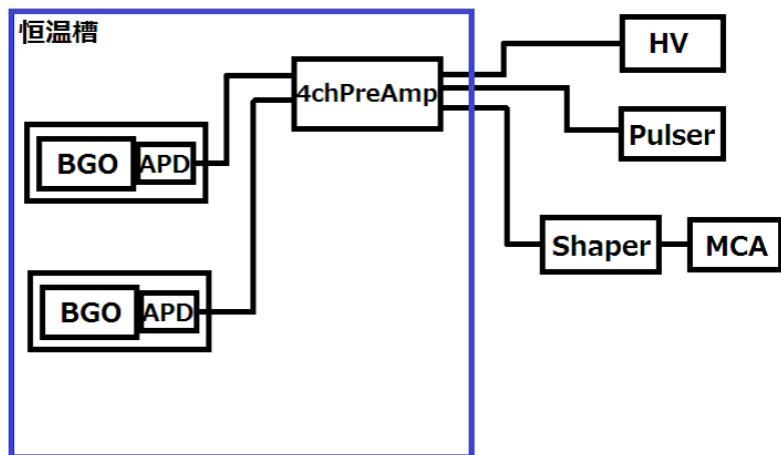


図 3.8: セットアップの簡易図 (アルミ箱を用いる案)

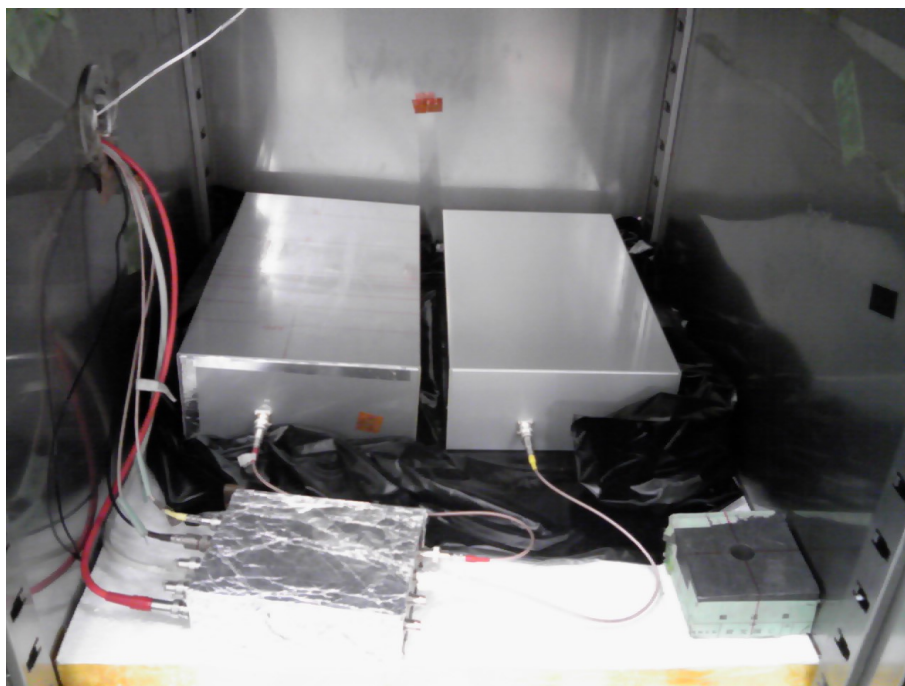


図 3.9: 測定時の恒温槽内でのアルミ箱の配置

以降、このアルミ箱を用いた測定法でのセットアップに問題がないかを検証していく。

3.2 セットアップ検証事項

3.2.1 APD のゲイン測定

今回の測定に用いる APD のゲイン測定を行った。APD は $10 \times 10\text{mm}^2$ サイズの浜松ホトニクス社製 SIAPD SPL 4650 の中から 4 つを選んだ。以降これらの APD をそれぞれ No.14, 26, 60, 62 と呼ぶ。ゲイン測定では、APD にそれぞれ 1 cm 角立方の BGO をオプティカルグリスを使用して接着し、更にバルカーテープを縦横に 2 重ずつ巻いて固定し、アルミ箱の中に入れた。そして、20 に設定した恒温槽内部にアルミ箱ごと入れ、HV を 400V から 430V まで 5 V ずつ刻みながら上げ、PocketMCA を用いてスペクトルを取得した。線源は ^{137}Cs を使用した。この測定をそれぞれの APD で 3 回ずつ行った。図 3.10 にそれぞれの APD ごとに ^{137}Cs のピーク位置をプロットしたグラフを示す。

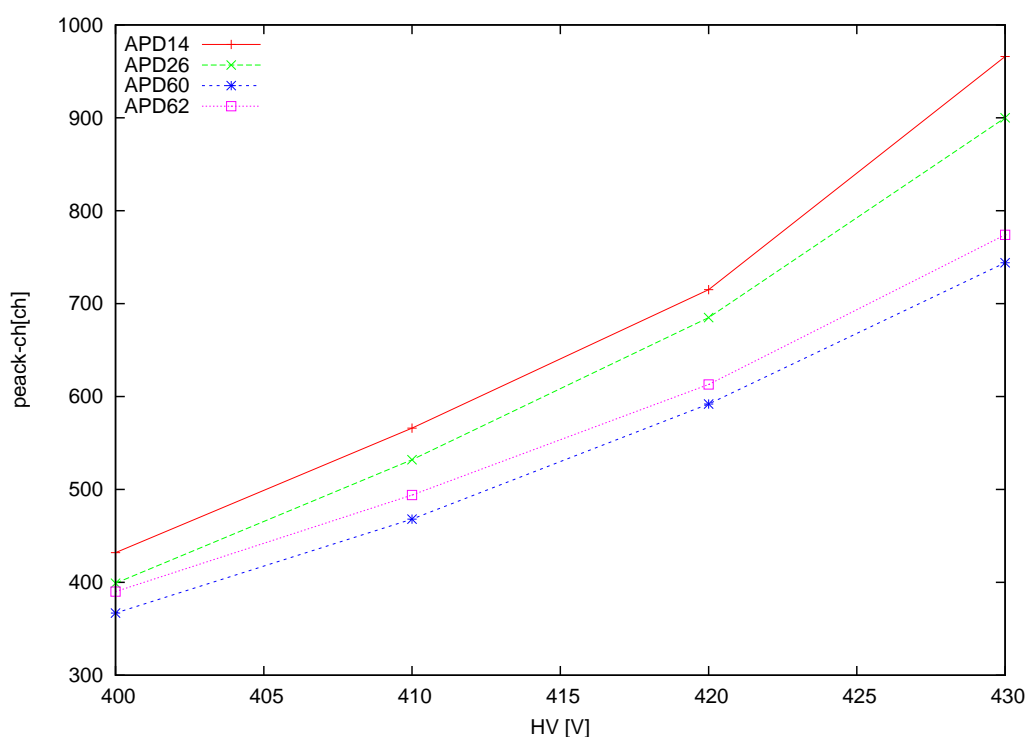


図 3.10: APD ごとのゲイン測定結果

結果として、それぞれの APD 同士のゲイン差は 10% 以内となり、同時測定を行う上で問題がないことがわかった。

3.2.2 APDの暗電流測定

暗電流は電流性ノイズの原因となるが、個々のAPDによって値が異なるため、使用する印加電圧での測定値が重要となる。そこで電圧に対する暗電流の測定をAPDNo.14, 60, 62でそれぞれ行った。APDNo.26はこの測定の前にピンが折れてしまい、測定不可能になってしまった。電流電圧計にはKeithley237を用いた。図3.11に20℃でのAPDNo.14, 60, 62のそれぞれの暗電流測定結果を示す。

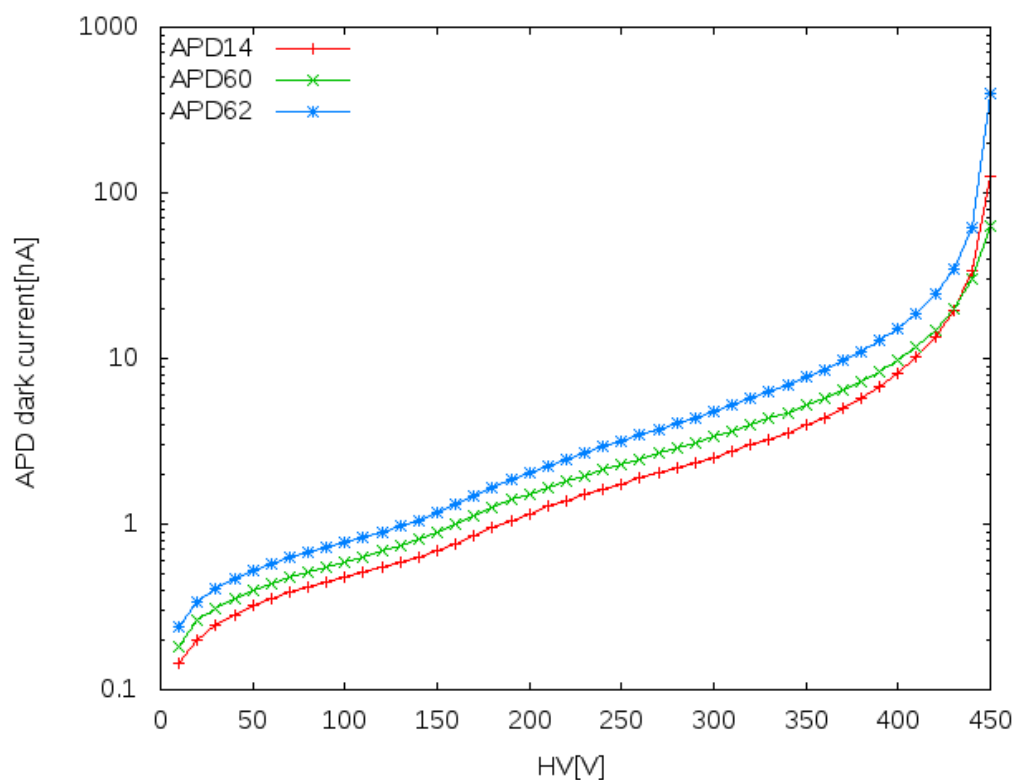


図 3.11: APD ごとの暗電流 (20℃)

3.2.3 反射材の巻き直しによる光量の再現性

BGO に 2 重に巻いているゴアテックスを巻きなおすことによって、どの程度の光量の再現性が取れているのかを確認した。ゴアテックスの巻き直しによる再現性を確認するために $50 \times 50 \times 150\text{mm}^3$ の BGO を使用した。図 3.12 に $50 \times 50 \times 150\text{mm}^3$ の BGO を示す。

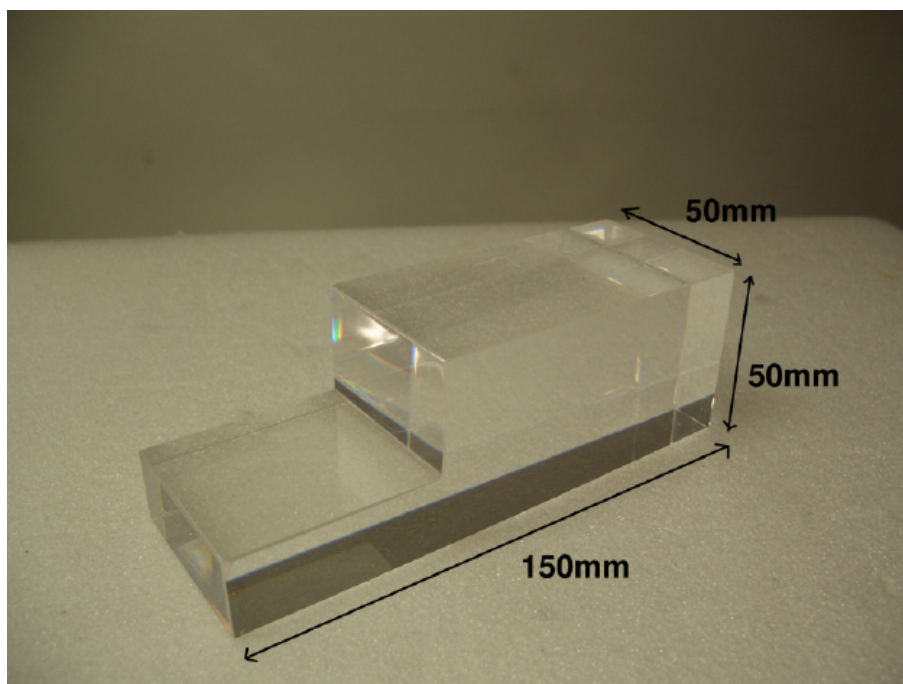


図 3.12: $50 \times 50 \times 150 \text{ mm}^3$ の BGO

$50 \times 50 \times 150\text{mm}^3$ の BGO にゴアテックスを 2 重に巻き、アルミ箱の中に入れて、恒温槽の中にアルミ箱ごと設置した。そして、恒温槽の温度を 20 に設定し、BGO の温度が一定になるまで (3 時間程) 待った。その後、HV を 420V かけて PocketMCA でスペクトルを取得した。線源は ^{137}Cs 、APD は No.26 を使用し、測定ごとにゴアテックスを巻きなおして 4 回測定を行った。また、異なる実験者による再現性を確認するために、同研究室の上野にも実験協力をしてもらった。図 3.13 に徳田、図 3.14 に上野の測定結果を示す。

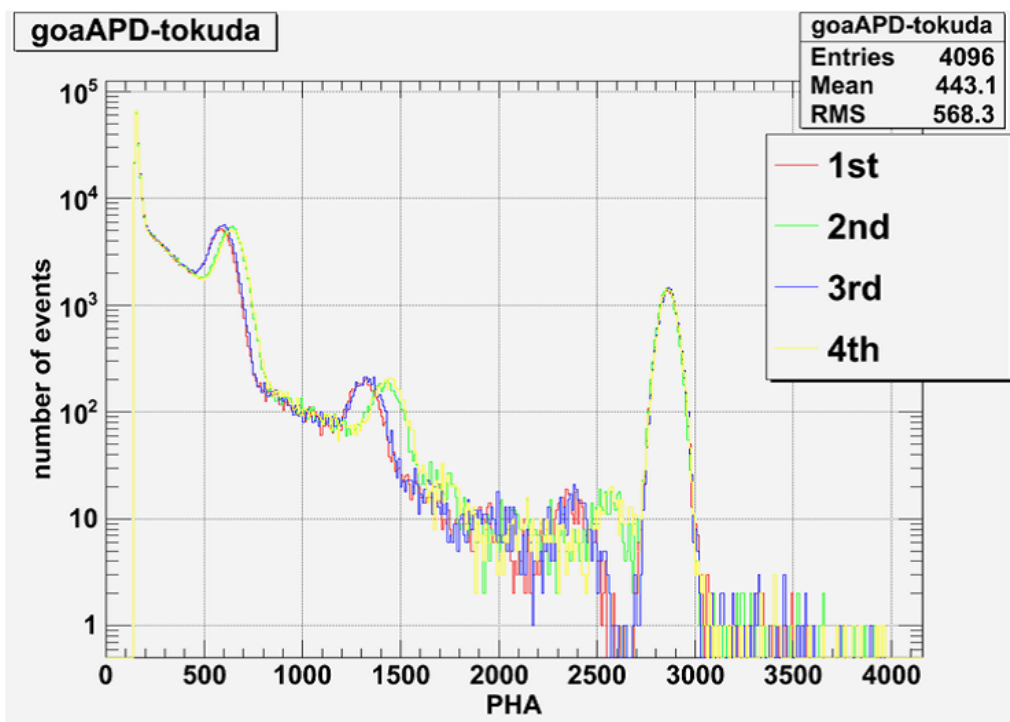


図 3.13: ゴアテックスの巻き直しによる光量再現性の測定結果 (徳田)

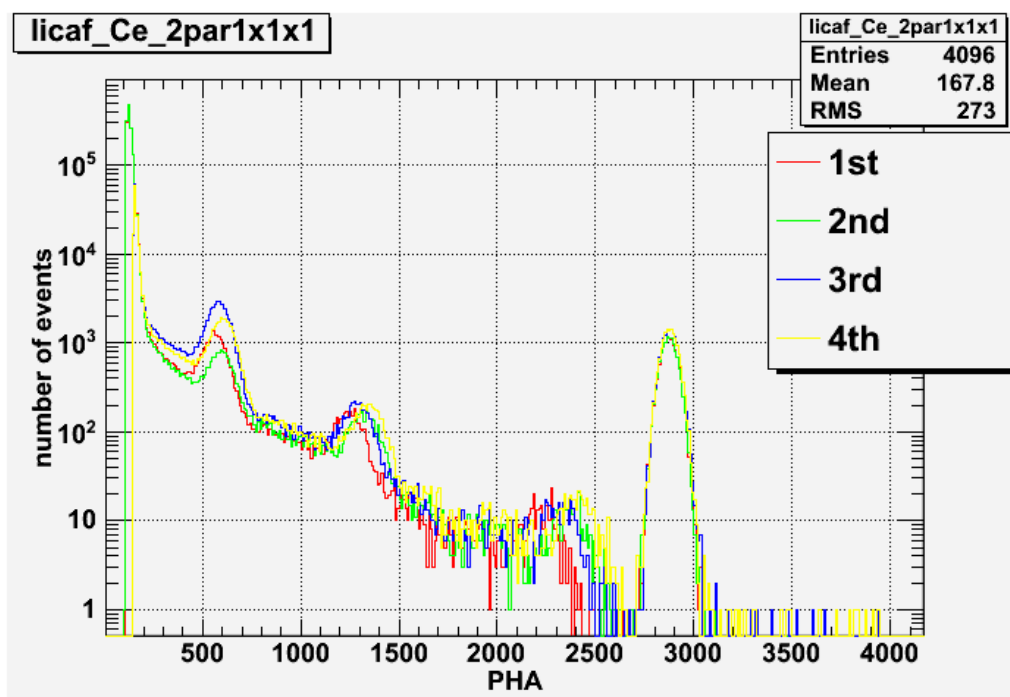


図 3.14: ゴアテックスの巻き直しによる光量再現性の測定結果 (上野)

結果、両者それぞれで約 10 % の再現性であることがわかった。また、お互いの光量差も約 10 % 以内に収まっていることがわかった。

しかし、試作型の BGO の光量測定時にゴアテックスに寄っていたしわと、ゴア同士の貼りあわせ部分をテープでねばりすることによって光量が 3 割近く向上したものがあつた。よって、約 10 % の再現性はゴアテックスがしっかりと巻かれていることが前提と言える。

3.2.4 APD の取り外しによる光量の再現性

搭載型 BGO の Type-A のゴアテックスを巻きなおさずに、APD の取り外しのみでの BGO の光量の再現性を確認した。図 3.15 に Type-A の BGO 結晶を示す。



図 3.15: Type-A の BGO 結晶

APD は NO.14 を使用し、アルミ箱の中に入れて恒温槽内に設置した。恒温槽の温度を 20 に設定し、BGO の温度が一定になるまで (3 時間程) 待った。その後、HV を 420V かけて PocketMCA でスペクトルを取得した。線源は ^{137}Cs を使用し、測定ごとに APD を BGO から取り外し 4 回測定を行った。図 3.16 に APD No.14 の取り外しによる光量の再現性の測定結果を示す。結果、APD の取り外しによる光量の再現性は約 5 % 以内であることがわかった。

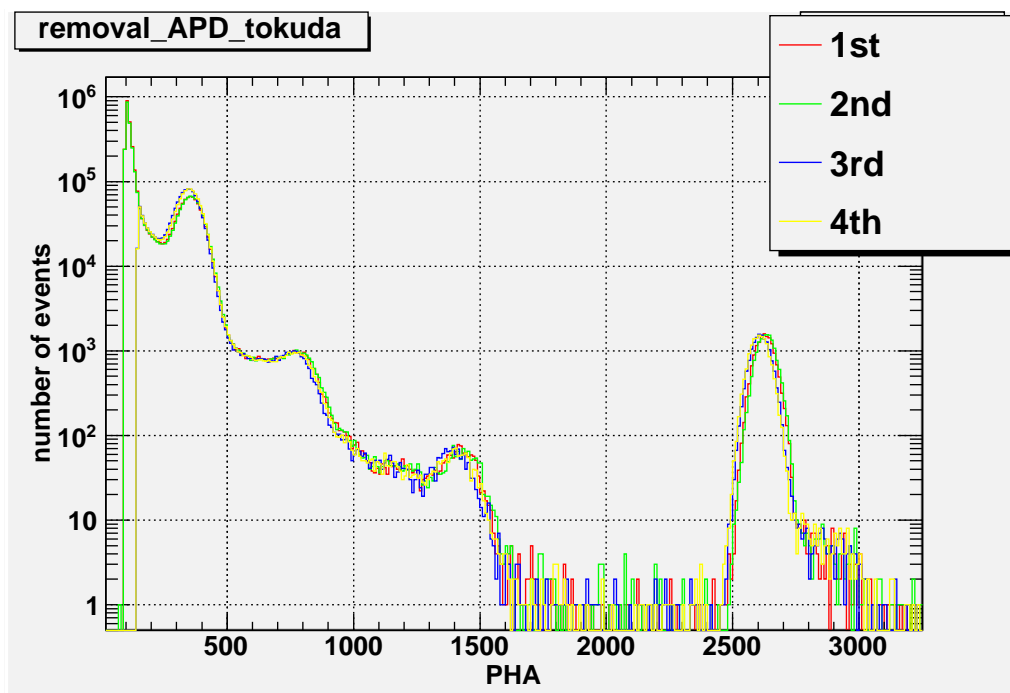


図 3.16: APD No.14 の取り外しによる光量の再現性

3.2.5 SN 比の HV 値依存性

APD で光を読み出す上で HV を上げていくと、シグナル値が増幅されるが、同じくノイズも増幅されてしまう。ここではその、シグナルとノイズとの比 (SN 比) を APD ごとに求めた。ここで、シグナルとは線源 ^{137}Cs を当てた時のピーク値 (662 keV) を、ノイズとはテストパルスの半値幅 (FWHM) を用いた。

$50 \times 50 \times 150\text{mm}^3$ の BGO にゴアテックスを 2 重に巻き、APD を取り付けアルミ箱の中に入れた。そして、恒温槽の中にアルミ箱ごと設置し、恒温槽の温度を 20 に設定した。その後、BGO の温度が一定になるまで (3 時間程) 待ち、HV360V から 440V にかけて PocketMCA でスペクトルを取得した。APD は No.14, 60, 62 を使用し、それぞれ SN 比を算出した。図 3.17 に APD ごとの SN 比の HV 値依存性を示す。

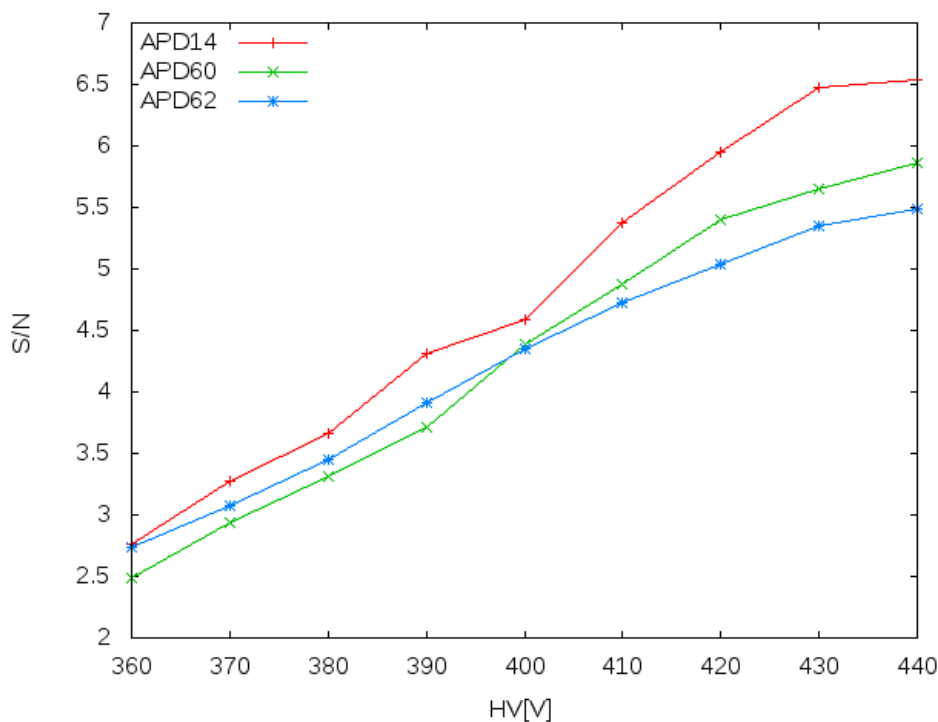


図 3.17: APD ごとの SN 比の HV 値依存性

結果、どの APD も 430V までは SN 比が向上し、440V からは向上しにくくなることがわかった。この結果より、どの APD も搭載型 BGO を測定する上で問題がない SN 比であることが確認できた。

3.2.6 標準光量 BGO の絶対光量測定

搭載型 BGO を測定する上で、絶対的な基準となる光量があると、BGO 同士の光量を比較する上で、非常に有用である。よって、基準となる BGO を一つ決め、その値との光量比較によって絶対的な光量を定義した。基準となる BGO (標準光量 BGO) には 1cm 角立方 BGO を選定した。その理由は、その 1cm 角 BGO は前述した既に HXI の搭載型 BGO の光量測定を行っている、東大牧島研でも測定した記録があり、そちらとのデータの比較を行う上でも非常に有用だったためである。

絶対光量測定では、型番 3590-08 の PD に標準光量 BGO をオプティカルグリスを使用して接着し、更にバルカーテープを縦横に 2 重ずつ巻いて固定し、アルミ箱の中に入れた。そして、20 に設定した恒温槽内部にアルミ箱ごと入れ、HV を 30V かけて PocketMCA を用いてスペクトルを取得した。線源は ^{241}Am と ^{137}Cs を用いた。図 3.18 に ^{241}Am を当てた時の、図 3.19 に ^{137}Cs を当てた時の PD のスペクトルを示す。

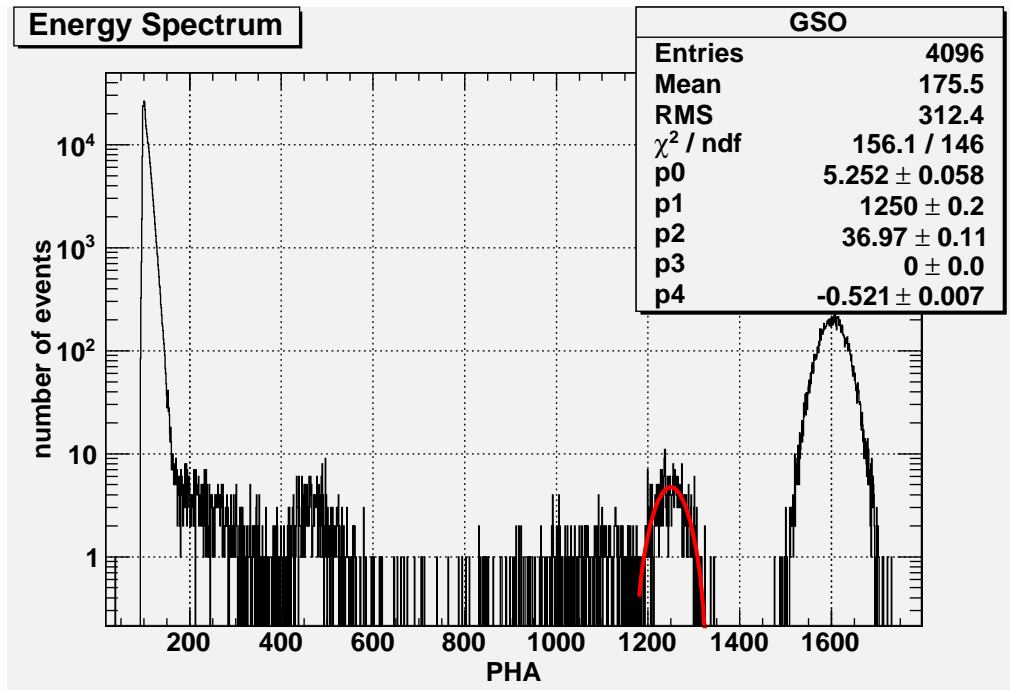


図 3.18: ^{241}Am を当てた時の PD のスペクトル

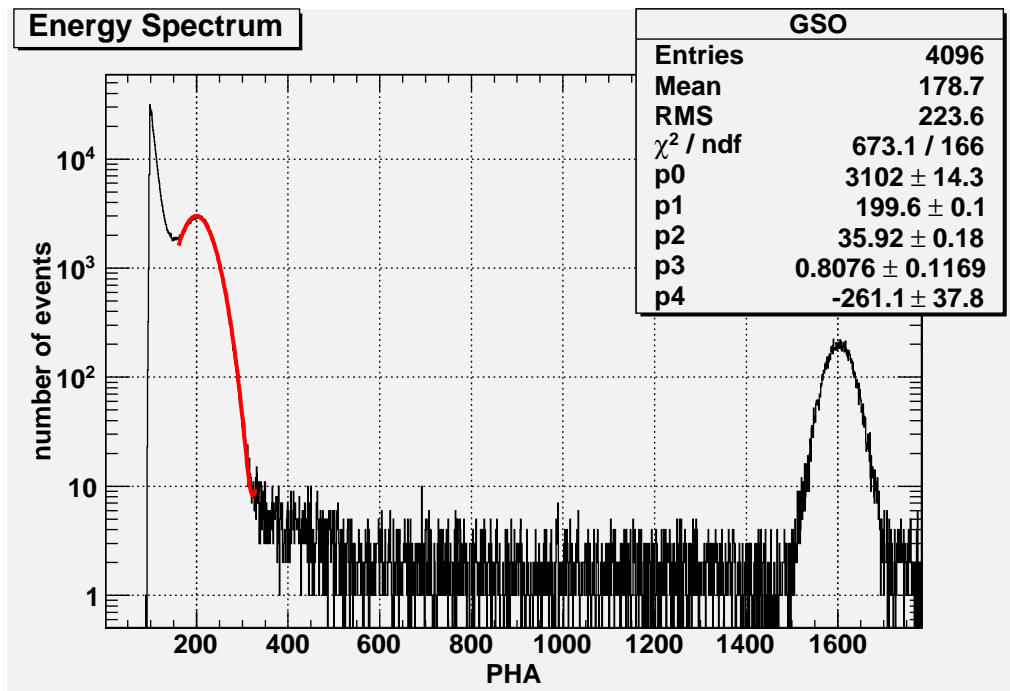


図 3.19: ^{137}Cs を当てた時の PD のスペクトル

図 3.18 の 1200ch 付近のピークは 59.5 keV が PD で反応したイベントである。一方、図 3.19 の 200ch 付近のピークは、662 keV が BGO で反応し、その光が APD で検出されたイベントである。よって ^{241}Am のピークチャンネルを見ることによって ch と電子数の対応を導出することが出来る ($\frac{C_{speak}}{Am_{peak}} \times \frac{59500}{3.65}$)。そして PD の量子変換率は 80 % と知られているので、BGO の 1keV あたりの光量は、次式のように求めることができる。

$$N_{ph} = \frac{C_{speak}}{Am_{peak}} \times \frac{59500/3.65}{662 \times 0.8}$$

よって、標準光量 BGO の絶対光量は 20 で 4.92 個/keV となった。

3.3 プレ光量チェックシートの作成

衛星搭載型 BGO の光量測定を行うにあたって、その測定結果を記録するとともに、測定の手順を示したシートを作成した。作成した理由は以下に示す。図 3.20, 3.21, 3.22 に実際に作成したプレ光量チェックシートを示す。

1. 測定を行わなければならない BGO の数量が約 100 個にもなり、データ数が膨大な量になるため、データ管理が難しくなるため。
2. BGO の数量が膨大で、自分一人での全 BGO の測定が難しいため、どの実験者でも同じ測定ができる環境を確立する必要性があったため。
3. 手順書に沿って確認しながら実験を行うことで、安全で正確な実験を行えるようにするため。

SGD BGO プレ光量チェックシート@広島 FM

Ver1.6 2012.02.06 Tokuda Shinya

BGO 情報

Serial No. (BGO.ASTRO は省略)	Ingot-ID	備考

アナログパラメータ

<Shaper パラメータ> ORTEC 571

Fine gain: _____ Coarse gain: _____ Shaping time: _____

<Test-pulse パラメータ> CP 9028

Pulse Height: _____ FINE ADJ: _____ Rise time: _____

Attenuator: _____

HV 値: _____ 線源 ID: _____ MCA threshold: _____

結果まとめ

CSA ID/ch	APD ID	APD gain 50 HV (V)	662 keV peak (ch)	662 keV FWHM (ch)

1:測定準備

YYYY/MM/DD _____ / _____ / _____ 氏名 _____

天気 _____ 室温 _____ 時刻 _____ ; _____

- C112 から BGO を持ってくる場合、台車を使用する(※振動に注意)。 作業台を整理する(※特に金属類)。
- BGO の箱のネジを外し、ふたを開ける(※ネジを箱内部に落とさない、カメラのフラッシュ厳禁)。
- ネジをタッパーの中に保管する。 トラベリングタグより必要事項を本チェックシートに書き写す。
- CSA ID、APD ID 情報を記録。 BGO の型にあったゴアを 2 枚切り出し、広げておく。
- アルミボックスに緩衝剤をつめる。 腕時計を外す。胸ポケットから物を出す。眼鏡を外す or 固定する。
- 手袋をして、手のひらをエタノールで拭く。 BGO 結晶を緩衝材上に置き、6面をエタノールで拭く。
- BGO をゴアの上に置き2枚同時に巻く。 結晶本体に触れないところまできたら素手で作業する。
- APD をオプティカルグリスを使用して BGO に固定する(※APD はピンが下にくるようにつける)。
- ゴアの切れ端で APD を覆う。 緩衝剤で APD を押さえる。
- BGO+APD をエアパッキンで覆い、アルミボックス内に納める。
- アルミボックスに緩衝剤をつめ、BGO が動かないようにする(※ケーブルのテンションに注意)。
- アースバンドをして静電気対策をとる。 CSA と接続する。

図 3.20: プレ光量チェックシート (1 ページ目)

- 線源を規定の位置に設置する(※トップ結晶ならコリメータを使用する)。
- Shaper や Pulser などのアナログパラメータを記録する。 NIM 電源 ON → オシロスコープ ON。
- オシロスコープで信号を確認する。 → 波高値(PreAmp out): _____ V@HV 0V
→ ノイズ(PreAmp out): _____ mV@HV 0V
- 恒温槽を+ 20℃にセット。 HV 電源 ON。
- 30V 毎に CSA の feedback コンデンサが追いつくのをオシロで確認しながら gain50 の規定 HV まで上げる。
- gain50 の値でオシロの波形、または取得したスペクトルに異常がないか確認する(※光量が異常に低い時は要注意)。 → 波高値(PreAmp out): _____ V@HV _____ V
→ ノイズ(PreAmp out): _____ mV@HV _____ V
→ 662 keV peak(Pocket MCA): _____ ch@HV _____ V
→ test pulse peak(Pocket MCA): _____ ch@HV _____ V
- gain50 の値でのオシロ波形を記録する。
- ディレクトリ: _____
- ファイル名: _____
- mca ファイル名は 測定日_時刻_結晶 SerialNumber_APDID_CSAID_線源 ID_(コリメイト位置)_温度_測定者.mca
(例: 20120119_1942_OK_astro_Type_D2_11_6_APD_14_4ch3_137Cs_4_pos1_p20_tokuda.mca)
- ファイル名: _____
- 30V 毎に CSA の feedback コンデンサが追いつくのをオシロで確認しながら 0V まで下げる。
- HV OFF して、オシロノ波形が初期と同じ波形か確認する。 NIM 電源 OFF。オシロスコープ OFF。
- 3 時間以上待つ。 → 時刻 _____ : _____
- 2: 20℃ 基準光量測定**
- YYYY/MM/DD _____ / _____ / _____ 氏名 _____
- 天気 _____ 時刻 _____ : _____
- 室温 / 恒温槽内温度: _____ / _____
- NIM 電源 ON → オシロスコープ ON。 アナログパラメータを確認。
- オシロスコープで信号を確認する。 → 波高値(PreAmp out): _____ V@HV 0V
HV 電源 ON。 → ノイズ(PreAmp out): _____ mV@HV 0V
- 30V 毎に CSA の feedback コンデンサが追いつくのをオシロで確認しながら gain 50 の規定 HV まで上げる。
- オシロスコープで信号を確認する。 → 波高値(PreAmp out) : _____ V@HV _____ V
→ ノイズ (PreAmp out): _____ mV@HV _____ V
- gain50 の値でのオシロ波形を記録し、PocketMCA でスペクトルを取得する。

図 3.21: プレ光量チェックシート (2 ページ目)

-ディレクトリ: _____

-ファイル名: _____

線源の有無	測定開始時刻/position	恒温槽内温度(°C)	Real-time	662 keV(ch)	Test Pulse(ch)

ファイル名: _____

ファイル名: _____

ファイル名: _____

ファイル名: _____

ファイル名: _____

ファイル名: _____

Top 結晶であれば、線源のコリメータを移動。 最後の測定後にアナログパラメータを確認。

3: 立ち下げ

- 30V 毎に CSA の feedback コンデンサが追いつくのをオシロで確認しながら 0V まで下げる。
- HV OFF して、オシロノ波形が初期と同じ波形か確認する。 NIM 電源 OFF。オシロスコープ OFF。
- 胸時計を外す。胸ポケットから物を出す。眼鏡を外す or 固定する。
- 恒温槽のふたを開ける。CSA と BGO+APD ジグはずし、取り出す(※静電気注意)。
- アースバンドをして静電気対策をとる。 APD が BGO から外れていないか確認する。
- BGO をジグより取り出し、緩衝材の上に置く。
- APD を BGO から取り外す(※APD のピンは使わない)。 APD を規定の場所に保管する。
- 手袋をして、手のひらをエタノールで拭く。 BGO に巻いてあるゴアを外す。
- BGO をエタノールでよく拭き、木箱に入れる(※木箱にぶつけない)。
- トラベリングタグに必要事項を記入し、木箱に入れる。 木箱をネジ締めする。
- 測定結果をプレ光量チェックシートに添付し、ドッジファイルに保管。

図 3.22: プレ光量チェックシート (3 ページ目)

第4章 搭載型BGOの光量測定と評価

4.1 搭載型BGO結晶の取り扱い

BGO結晶は、非常に傷がつきやすく、扱う時は最善の注意が必要である。以下に搭載型BGO結晶を扱うときの注意事項を記す。

1. BGO結晶に直接触れる場合は手袋をし、手のひらをエタノールで拭いてから取り扱う。
2. BGO結晶を取り扱う付近には硬い物（金属類など）を置かない。
3. BGO結晶は扱うときは必ず緩衝材（発泡スチロールなど）の上で扱う。
4. BGO結晶は紫外線に当たると劣化してしまうため、取り扱う場合は必ず紫外線の当たらない場所で取り扱う（測定を行う実験室の蛍光灯や窓はUVカット対応のものが用いられている）。

搭載型BGO結晶がまず到着したら、それぞれの結晶に対して傷やひび、欠けが生じていないか（元からあるもの、輸送中についたものを含め）、また形状が正しいか（設計通りになっているか）を確認する。これは前述した、既にHXIの搭載型BGO結晶の光量チェックを行っている東大牧島研の内山さんが作成した外観チェックシートに記述していく。この外観チェックシートへの記入は、もし、BGO結晶のシリアル番号が紛失してしまった時などに、このときの傷や欠けなどの情報からそのBGO結晶を特定できるなど、非常に重要である。

4.2 測定のセットアップ

搭載型BGO結晶の測定を行う上で、2章でも触れたがアルミ箱を用いるセットアップで測定を行っていく。表4.1に実験に用いた器具の型番を、表4.2に実験条件を示す。

実験器具	型番
CSA	4ch CP 5005H
HV	CP 6671PP
Pulser	CP 9028
Shaper	ORTEC 571
MCA	MCA-8000A

表 4.1: 光量測定に用いた実験器具

Shaper	Fine gain	5.185
	Coarse gain	50
	Shaping time	0.5
Pulser	Pulse Height	800
	FINE ADJ	0.04
	Rise time	FAST
	Attenuator	×1, ×0.1

表 4.2: 光量測定時の測定条件

APD は No.14 と 60 を使用し、APD と BGO の接着にはオプティカルグリスを使用した。そしてゴアテックスを 2 重に巻き、APD を取り付けた物を更にエアパッキン（緩衝剤）で巻き、アルミ箱に納め恒温槽中に設置した。恒温槽の温度は 20 に設定し、3 時間以上置いた後に線源を当て、PcketMCA で 300s 測定を行った。スペクトルを取得する HV 値はどちらの APD も 420V とし、4chPreAmp の 3ch 目と 4ch 目を使用した。また、線源は ^{137}Cs を使用し、Type-D1, D2 以外の結晶は結晶のちょうど真ん中となる位置のアルミ箱の上に線源を置いて測定し、Type-D1, D2 はそれぞれ APD から 4cm, 12cm, 20cm, 28cm の位置でコリメータ（厚さ 48mm, 穴の直径 20mm の鉛ブロック）を用いて線源を当てた。ここで Type-D1, D2 の照射位置は APD に近い方から pos1, pos2, pos3, pos4 と呼ぶことにする。図 4.1 に Type-D1 でのコリメート位置を、図 4.2 に各結晶での APD 取り付け位置を示す。

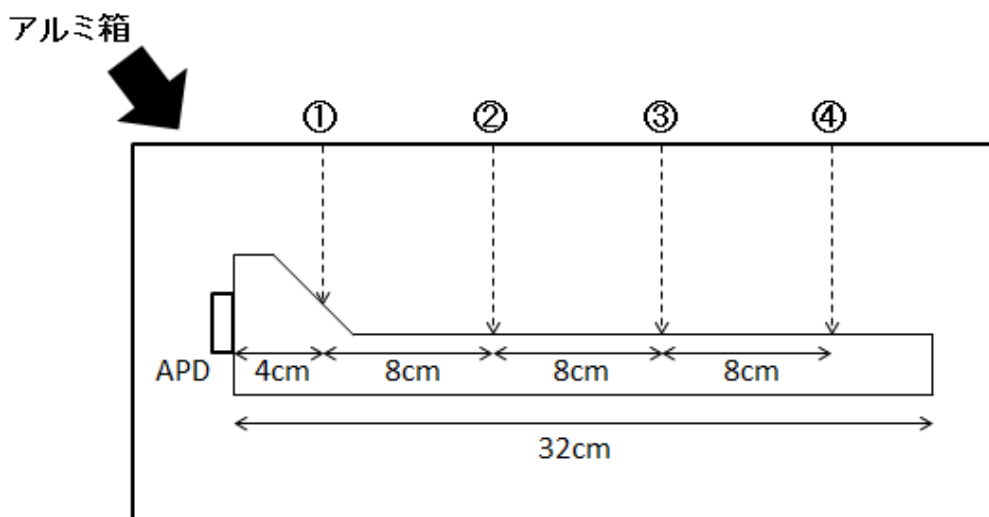


図 4.1: Type-D1 における線源の照射位置（D2 も同様）

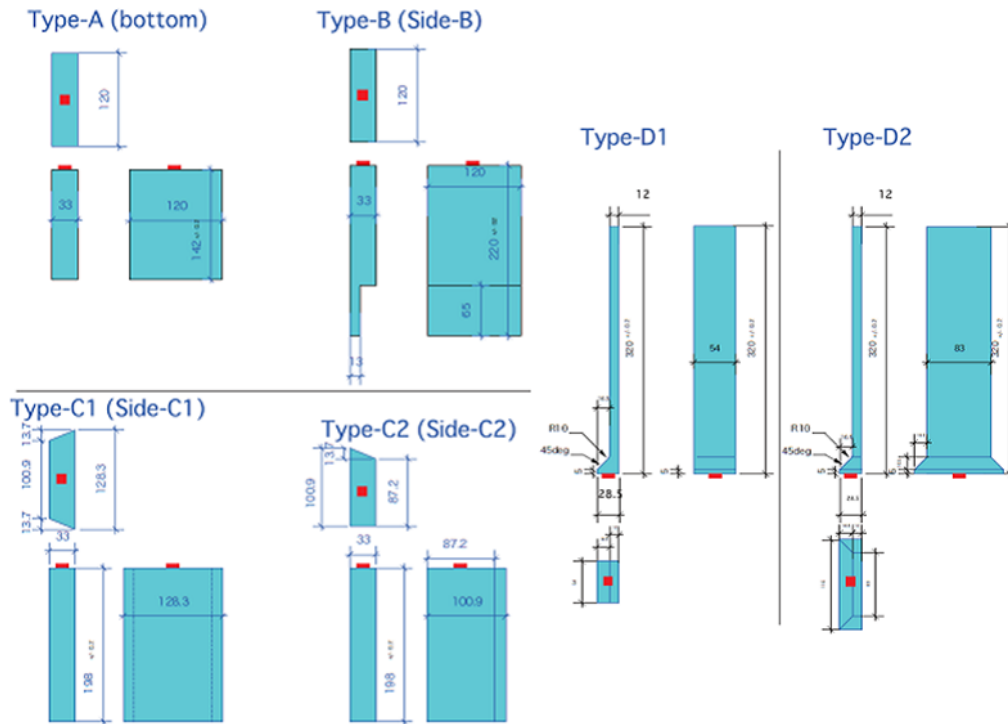
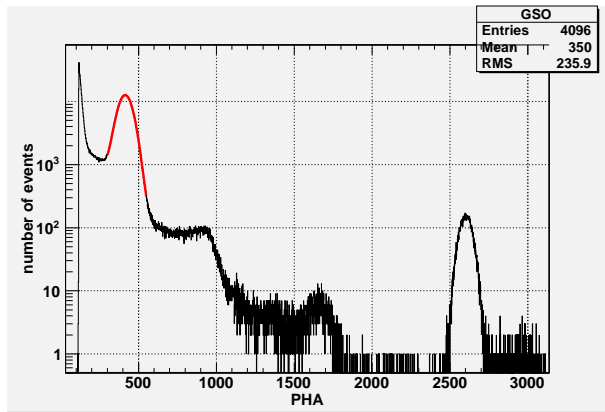


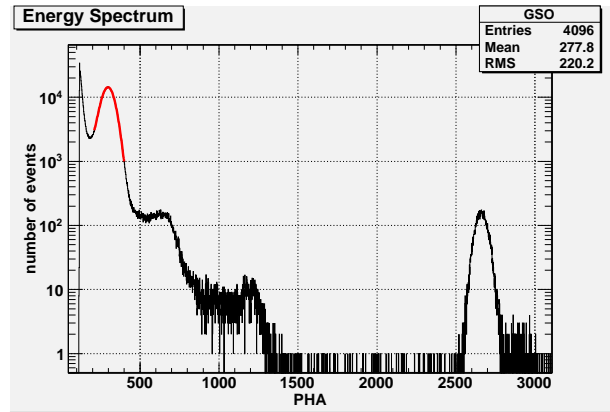
図 4.2: 各搭載型 BGO 結晶での APD 取り付け位置

4.3 搭載型 BGO の光量測定結果

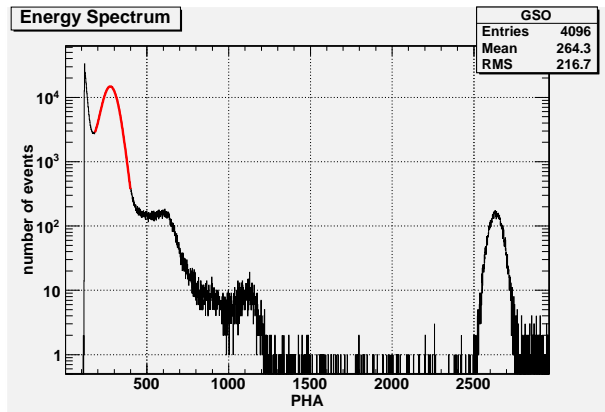
搭載型 BGO 結晶の Type-A × 1, B × 2, C1 × 1, C2 × 1, D1 × 2, D2 × 2 の計 9 個の光量測定を行った。以下に各結晶ごとの APD のスペクトルと、表 4.3 に各測定結果を示す。表 4.3 での Type-D1, D2 の光量は pos1 では位置依存性が大きいため、pos4 での測定結果を記している。



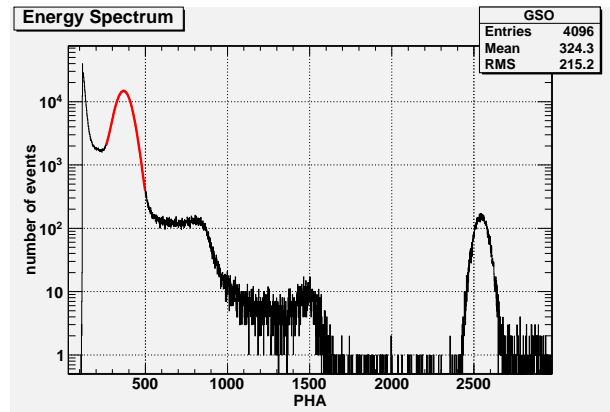
☒ 4.3: SBG061(Type-A) のスペクトル



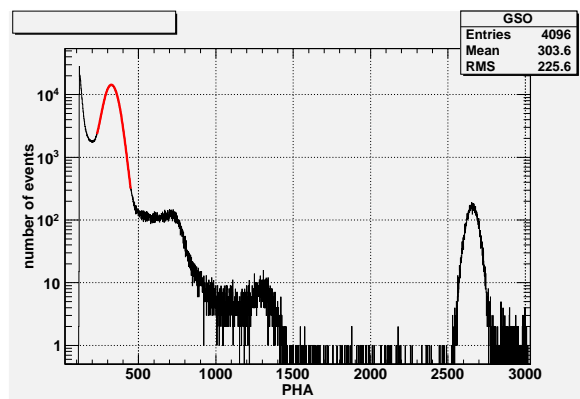
☒ 4.4: 1B.SGD.B.11.3(Type-B) のスペクトル



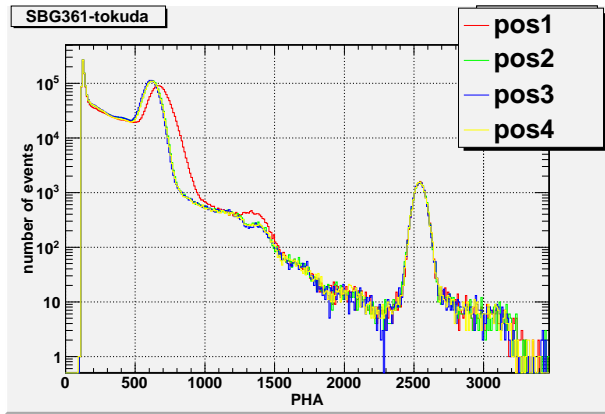
☒ 4.5: 1B.SGD.B.11.4(Type-B) のスペクトル



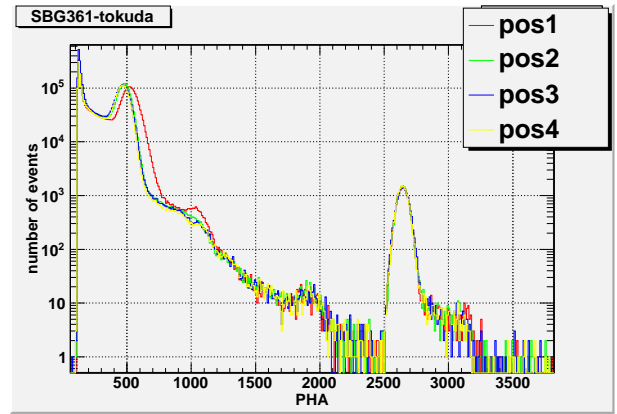
☒ 4.6: 1B.SGD.C1.11.2(Type-C1) のスペクトル



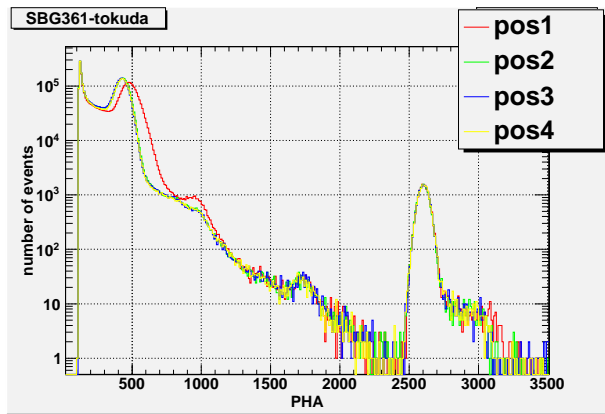
☒ 4.7: SBG064(Type-C2) のスペクトル



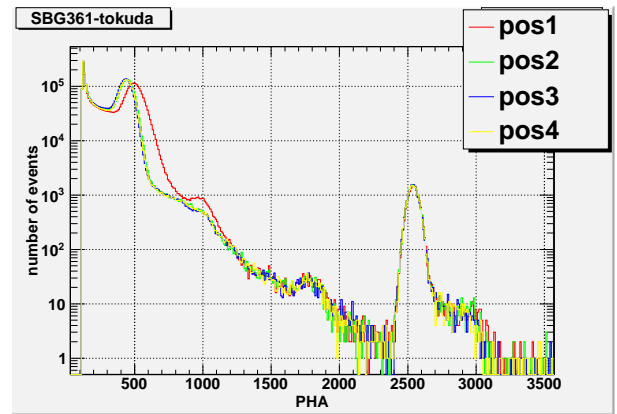
☒ 4.8: SBG361(Type-D1) のスペクトル



☒ 4.9: OK.astro.Type.D1.11.7(Type-D1) のスペクトル



☒ 4.10: OK.astro.Type.D2.11.5(Type-D2) のスペクトル



☒ 4.11: OK.astro.Type.D2.11.6(Type-D2) のスペクトル

BGO	APD	Cs peak(ch)	test pulse FWHM(ch)	広大 閾値 (keV)	東大 閾値 (keV)
SBG061 (Type-A)	14	416	90	432	377
1B.SGD.B.11.3 (Type-B)	60	294	87	590	-
1B.SGD.B.11.4 (Type-B)	60	273	90	652	-
1B.SGD.C1.11.2 (Type-C1)	14	366	91	494	442
SBG064 (Type-C2)	60	323	86	527	379
SBG361 (Type-D1)	14	617	91	294	333
OK.astro.Type.D1.11.7	60	465	93	395	-
OK.astro.Type.D2.11.5	14	427	89	413	429
OK.astro.Type.D2.11.6	14	440	91	410	-

表 4.3: 搭載型 BGO (9 個) の測定結果

ここでテストパルスの幅はノイズがなければ0に等しくなるはずだが、ノイズの影響で有限の幅を持ってしまっている。ここでASTRO-Hではテストパルスの幅をBGOkeVに直し、その3倍となる値を閾値として評価に用いている。本研究の目的は搭載型BGOの測定セットアップの立ち上げなので、先に述べているように東大牧島研では既に搭載型BGOの測定を行っており実績もあるので、そちらとの比較を行って再現性が取れているかを確認する。表4.3を見ると、閾値を東大牧島研の測定結果と見比べると、悪いもので1.4倍広大の閾値が高くなっている。これは広大のセットアップが東大のセットアップと比べて、ノイズが多いということである。

また、標準光量BGOの光量で比をとることによって東大牧島研での測定と光量の再現性がとれているか確認を行った。表4.4に東大牧島研で測定を行っている結晶との光量比を示す。ここで標準光量BGOの光量はそれぞれのセットアップでの測定結果(東大牧島研 = 3240 ch, 広大 = 1967 ch)を用いている。

BGO	東大 Cs peak(ch)	広大 Cs peak(ch)	東大 BGO /標準光量 (ch)	広大 BGO /標準光量 (ch)	広大/東大
SBG061 (Type-A)	625	416	0.193	0.211	1.10
1B.SGD.C1.11.2 (Type-C1)	510	366	0.157	0.186	1.18
SBG064 (Type-C2)	612	404	0.189	0.205	1.09
SBG361 (Type-D1)	862/703	666/617	0.266/0.217	0.339/0.314	1.27/1.45
OK.astro.Type.D2.11.6	555/499	495/440	0.171/0.154	0.252/0.224	1.47/1.45
1B.SGD.B.11.3 (Type-B)	-	368	-	0.187	-
1B.SGD.B.11.4 (Type-B)	-	341	-	0.173	-
OK.astro.Type.D1.11.7	-	649/581	-	0.330/0.295	-
OK.astro.Type.D2.11.5	-	476/427	-	0.242/0.217	-
50 × 50 × 150cm ³	-	535	-	0.272	-

表 4.4: 広大と東大の光量比

表 4.4 の Type-D1, D2 の光量は (pos1/pos4) のデータを記している。光量比は東大での測定結果と Type-D1, D2 の結晶を除いては約一割で一致した。Type-D1, D2 の光量は、広大で使用したコリメータの穴のサイズが東大のものより大きいため（東大は厚さ 47.3mm, 穴の直径 12.5mm の鉛ブロック）、光量が若干高い結果になっていると考えられる。この結果より表 4.3 で、広大のセットアップの方が閾値が高いのは、光量が出ていないせいではなく、外的なノイズを落とし切れていないのが原因ではないかと考えられる。

次に閾値を理論値と測定値で比較して議論する。この時の半導体検出器でのノイズは 2.4 節の式より、3ch(APD No.14) は 20.4[keV(Si)], 4ch(APD No.60) は 21.3[keV(Si)] となる。それぞれ用いた値は表 4.5 に示す。

	3ch APD No.14	4ch APD No.60
I_{nb} (nA)	13.5	14.7
F	2	2
M	50	50
τ (μ s)	0.5	0.5
fC_{in} (keV)	4.78	4.85

表 4.5: +20 での ch 毎のパラメータ

これに次式を用いて Si keV から BGO keV になおす必要性がある。

$$E_{th} = \frac{3\sqrt{[0.01474 \times 4\pi^2 I_{nb} F M^2 \tau + \{f(C_{in})\}^2]}}{E_g N_{ph} QMY} \quad [\text{keV}]$$

表 4.6 に各結晶ごとの絶対光量と BGO keV での閾値の理論値と測定値の比較を示す。

BGO	APD	N_{ph} [個/keV]	E_{th} 理論値 [keV]	E_{th} 測定値 [keV]
SBG061 (Type-A)	14	1.04	403	432
1B.SGD.B.11.3 (Type-B)	60	0.92	476	590
1B.SGD.B.11.4 (Type-B)	60	0.85	515	652
1B.SGD.C1.11.2 (Type-C1)	14	0.92	456	494
SBG064 (Type-C2)	60	1.01	433	527
SBG361 (Type-D1)	14	1.54	272	294
OK.astro.Type.D1.11.7	60	1.45	302	395
OK.astro.Type.D2.11.5	14	1.07	392	413
OK.astro.Type.D2.11.6	14	1.10	381	410
$50 \times 50 \times 150\text{cm}^3$	14	1.34	313	334

表 4.6: 搭載型 BGO 結晶ごとの絶対光量とノイズ

全体的に理論値の閾値の方が高めだが、APD No.14 のときは測定値と理論値が約 10 %以内で一致している。よって APD No.60 のときは外来ノイズを落とし切れていないと考えられる。

第5章 まとめと今後の課題

本研究では、次期 X 線天文衛星 ASTRO-H に搭載される、軟 X 線検出器 SGD のアクティブシールドに用いられる BGO シンチレータの光量測定試験のセットアップの立ち上げに取り組んできた。以下にその結果を記す。

結果として、搭載型 BGO シンチレータの光量測定試験のセットアップを様々な要件を検証しつつ、立ち上げることができた。そして、搭載型 BGO シンチレータの光量を測定し、その値は既に搭載型 BGO シンチレータの測定を行っていて、実績のある東大牧島研のデータと約 1 割で一致した。しかし、閾値（ノイズ）の観点から言うと、広島大学のセットアップは、閾値の理論値と測定値の比較より、APD.No.60 を使用したときは外来ノイズを落とし切れていないと言えらる。

今後の課題としては、ノイズがまだ多いのを低減する必要がある。また、作業効率を改善するために、プレ光量チェックシートの更なる改訂も必要だと考えられる。外観チェックシートも今後広大のセットアップにあった物を新しく作成する。

謝辞

本研究において、多くの方々にたくさんお世話になりました。担当教官である深澤先生には論文添削を始め、様々なことでお世話になりました。本当にありがとうございました。また、いっしょに搭載型 BGO の測定を行っていただいた高橋先生、東京出張に付き合っただいたり、本当にありがとうございました。東京で連れて行ってもらったラーメン屋の味は一生忘れません。そして、搭載型 BGO の扱い方や測定セットアップの参考となるものを頂いた東大牧島研の中澤先生、内山さん、笹野さん、本当にありがとうございました。あの出張がなかったらこの論文を書き上げることはできなかったと思います。他にも多くの方々にたくさんお世話になりました。大野先生にはセットアップの立ち上げ当初にいろいろとアドバイスを頂きました。花畑さんには毎回自分の馬鹿な質問に嫌な顔一つせず答えてくれました。林さん、朴さん、米谷さん、後藤さんには実験室で分からなかったことなどをたくさん教えていただきました。数馬さんには BGO の測定の仕方から、なにからなにまで、まだ何も分からず右往左往してした私に一から教えていただきました。上野くん、田邊くんにはセットアップの検証事項で測定を手伝っていただきました。みなさん本当にありがとうございました。ここに書ききれしていない方々もたくさんいます。みなさんには本当に心から感謝しております。

関連図書

- [1] 花畑義隆 「X線天文衛星 ASTRO-H 搭載アクティブシールドの基礎特性評価とデジタル信号処理の検討」 広島大学 (2009)
- [2] 深水浩司 「Astro-H 衛星搭載ガンマ線検出器アクティブシールドの光読み出しと信号処理の研究」 広島大学 (2008)
- [3] JAXA 「BGO requirements to ESA (for Astro-H/HXI and SGD)」