

次期 X 線衛星 ASTRO-H 搭載
アクティブシールドセンサー部
受け入れ試験及び機能検証

広島大学大学院 理学研究科 物理科学専攻
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

M123493

徳田伸矢

主査：深沢泰司 副査：志垣賢太

2014 年 2 月 10 日

概要

2015年度打ち上げ予定の次期 X 線衛星 ASTRO-H には 4 つの検出器が搭載され、その中の硬 X 線撮像検出器 (HXI) 及び軟ガンマ線検出器 (SGD) には、バックグラウンドを極限まで低くするための手段の一つとしてアクティブシールドが採用されている。アクティブシールドとは、主検出器をシンチレータで隙間なく取り囲むことにより、主検出器の視野外からの信号を遮断するとともに、もし視野外からの信号がシンチレータを突き抜けて主検出器に到達してしまっても、シンチレータの信号との反同時計数処理を行うことにより、その信号をバックグラウンドとして除去するというものである。この徹底したバックグラウンドの除去により、HXI と SGD は従来の検出器より一桁良い感度を実現している。

アクティブシールドは BGO シンチレータで構成されており、その光はアバランシェフォトダイオード (APD) で読み出される。そして、APD で読み出された信号は低雑音プリアンプを通った後に、APD Processing and Management Unit (APMU) と呼ばれる回路で処理される。APMU では AD 変換しデジタル化した信号波形データに対して FPGA を用いることでデジタルフィルター処理や、反同時計数処理のためのトリガー信号生成などを行う。HXI/SGD が高い感度を実現するためにはシールド部の出力する反同時計数処理信号に、より低いスレッシュホールドまで感度を持たせ、また主検出器側に確実に反同時計数処理信号をラッチしてもらはなければならない。そのためには、BGO シンチレータの光量が正しく出力されていることと、APMU の出力する反同時計数処理信号のタイミングがこちらの想定通りであることが重要である。

本研究では、実際の衛星搭載品である BGO ユニットの光量を事前に測定し、製造に問題がないことと、想定される光量が読み出せていることを確認するための受け入れ試験を行い、実際に HXI/SGD 各一台分の計 34 個の BGO ユニット受け入れ試験を行った。また、BGO ユニットの信号処理に用いられる APMU の FPGA ロジックの機能検証を行い、反同時計数処理信号が想定されるタイミングで出力されているかなど、APMU の全ての機能を網羅する形で試験を行った。そして実際に衛星に搭載される検出器と同型の試作機を用いて APMU の性能確認を行うとともに、HXI 主検出器と BGO を組み合わせて初めての反同時計数処理の実証を行った。

目次

第1章	序論	7
1.1	ASTRO-H 衛星	7
1.1.1	硬 X 線望遠鏡 (HXT)+硬 X 線撮像検出器 (HXI)	9
1.1.2	軟ガンマ線検出器 (SGD)	11
1.2	BGO アクティブシールド	12
1.2.1	BGO シンチレータ	13
1.2.2	アバランシェフォトダイオード (APD)	14
1.2.3	電荷有感型前置増幅器 (CSA)	15
1.2.4	アクティブシールド部の信号処理	15
1.3	APD Processing and Management Unit(APMU)	17
1.3.1	APMU アナログ部	19
1.3.2	APMU デジタル部	20
1.3.3	反同時計数処理	21
1.4	本研究の目的	21
第2章	搭載型 BGO ユニットの評価試験	23
2.1	搭載型 BGO ユニット	23
2.1.1	搭載型 BGO ユニットの形状と数量	24
2.1.2	搭載型 BGO ユニットに求められる性能	29
2.2	搭載型 BGO ユニットの測定	30
2.2.1	評価項目	30
2.2.2	測定セットアップとスケジュール	31
2.2.3	搭載型 BGO ユニットの測定結果	33
第3章	APMU デジタル部の機能検証	44
3.1	APMU デジタル部の詳細	44
3.2	APMU デジタル部の要求事項と機能検証	46
3.2.1	トリガー信号生成機能	46
3.2.1.1	FastBGO	46
3.2.1.2	Hitpat	52
3.2.1.3	UD/SUD	56
3.2.2	ヒストグラムデータ生成機能	61

3.2.3	GRB データ生成機能	63
3.2.4	Radiation Belt Monitor(RBM) 機能	64
第 4 章	試作型 HXI を用いたアクティブシールド部機能検証	66
4.1	試験概要	66
4.2	試験セットアップ	67
4.2.1	BGO ユニットの性能検証	69
4.2.2	反同時計数処理信号ラッチタイミングの検証	77
4.2.3	トリガー出力タイミングの考察	80
4.2.4	反同時計数処理の実証	81
第 5 章	まとめと今後の課題	83

目 次

1.1	ASTRO-H 衛星 [1]	8
1.2	ASTRO-H 衛星搭載検出器の観測エネルギー帯域 [1]	8
1.3	全反射鏡、多層膜ミラー、多層膜スーパーミラーの模式図 [2]	9
1.4	HXI の概念図 [3]	10
1.5	Si と CdTe の検出効率 [4]	10
1.6	従来の検出器とHXIの要求感度 [2]	10
1.7	SGD の概念図	11
1.8	SGD の断面図 [4]	11
1.9	アクティブシールドの模式図 [4]	12
1.10	活性化された結晶シンチレータのエネルギー帯構造 [6]	13
1.11	アクティブシールド部の信号処理の全体像	16
1.12	HXI の BGO アクティブシールド部の読み出しシステム	16
1.13	SGD の BGO アクティブシールド部の読み出しシステム [3]	17
1.14	APMU 試作基板	18
1.15	アクティブシールド部回路模式図 [3]	18
1.16	APMU デジタル部の機能ブロックダイアグラム	21
2.1	搭載型 BGO ユニットの模式図 [12]	24
2.2	APD 周りの構造図 [12]	24
2.3	実際の搭載型 BGO ユニットの外観	24
2.4	搭載型 BGO の形状 (HXI)	25
2.5	搭載型 BGO の形状 (SGD:Type-A, B, C1, C2)[11]	26
2.6	搭載型 BGO の形状 (SGD:Type-D1, D2)[11]	27
2.7	HXI の BGO 配置図	28
2.8	SGD の BGO 配置図	28
2.9	標準光量 BGO の外観。右図のように BGO に APD を接着したものを固定された基板に取り付けている。[12]	29
2.10	搭載型 BGO ユニット測定配線図 [12]	31
2.11	搭載型 BGO ユニット測定セットアップと電源配線図 [12]	32
2.12	搭載型 BGO ユニットの測定スケジュールと恒温槽内温度プロファイル (1 週間) [12]	33
2.13	APD 単体と BGO ユニット加工後での IV カーブ比較 (-20)	34
2.14	熱サイクル前後での BGO ユニットの IV カーブ比較 (+25)	34

2.15	^{137}Cs 照射時の HA 結晶 (HA-101) の熱サイクル前後のスペクトル (+25)	35
2.16	BGO ユニット形状ごとの熱サイクル前後の光量比	36
2.17	^{137}Cs 照射時の HA 結晶 (HA-101) の低温 (-20) でのスペクトル	37
2.18	BGO ユニット形状ごとの低温時と常温時の相対光量の比	38
2.19	BGO ユニット形状ごとの相対光量の推定値と測定値の比	39
2.20	-20 での搭載型 HXI-BGO ユニットの測定光量値 (線が推定値)	40
2.21	-20 での搭載型 SGD-BGO ユニットの測定光量値 (上部数値が推定値)	41
2.22	BGO ユニット形状ごとのテストパルスの FWHM から求めた LD 値 (緑が推定値)	42
2.23	BGO ユニット形状ごとのノイズの駆け上がりから求めた LD 値	43
3.1	SGD での FastBGO によるコンプトンカメラ ADC キャンセルまでの流れ (タイミングチャート)	47
3.2	シミュレータの概要	48
3.3	シミュレータを用いた FastBGO 出力タイミング	49
3.4	トリガー出力の揺らぎ検証試験のセットアップ	50
3.5	FastBGO 出力タイミングの測定結果 (左図: FastBGO スレッシュホールド低、右図: スレッシュホールド高)	51
3.6	トリガー出力タイミングの Jitter と Walk の影響	51
3.7	Hitpat のピーク検出ロジック	52
3.8	Hitpat 出力タイミング (黄色が APMU アナログ基板の ADC 入力直前の波形で、青が Hitpat)	53
3.9	Hitpat 出力タイミングの測定結果 (左図: Hitpat スレッシュホールド低、右図: スレッシュホールド高)	54
3.10	左図:ピーク検出までの時間とヒストグラムの 2 次元マップ、右図: Hitpat 効率を考慮したヒストグラムとエネルギー vs Hitpat 効率	56
3.11	UD/SUD のトリガー判定方法概念図	58
3.12	大信号入力時の UD 出力	59
3.13	UD 延長幅の場合分け	60
3.14	オシロスコープでの UD 出力延長幅確認 (左図: 延長幅なし、右図: 延長幅最大)	60
3.15	Fe イオン相当の信号入力時の SUD 出力。	61
3.16	左図がシミュレータで 1023 を、右図が 1024 を入力時のヒストグラム	62
4.1	ASTRO-H 衛星における HXI-BGO シールド周りのスケジュール	67
4.2	HXI-Full-EM を用いた試験のセットアップ	68
4.3	HXI-Full-EM のセットアップ写真 (左図: コマンド送受信を行う PC、右図: HXI 読み出し回路)	68
4.4	HV APD1(サイド、ボトム部) のゲイン値	69
4.5	HV APD2(トップ部) のゲイン値	69
4.6	^{137}Cs 照射時、 ^{22}Na 照射時、バックグラウンドを重ねたスペクトル	70

4.7	HB1 の低エネルギー側を拡大した ^{137}Cs 照射時、 ^{22}Na 照射時、バックグラウンドを重ねたスペクトル	71
4.8	^{57}Co 照射時とバックグラウンドを重ねたスペクトル	72
4.9	^{57}Co 照射時の線源位置	73
4.10	HB1 のエネルギー較正結果	74
4.11	FastBGO、Hitpat スレッシュホールドスキャンに使用したコマンドの一部。13 ch それぞれのスレッシュホールド値を設定した後に、全チャンネル共通設定である Delay や Width の設定を行っている。	75
4.12	FastBGO のスレッシュホールドスキャン結果（縦軸：カウントレート、横軸：sec）	76
4.13	Hitpat のスレッシュホールドスキャン結果（縦軸：カウントレート、横軸：sec）	76
4.14	主検出器側のラッチタイミングを変えていった時の FastBGO フラグがついたイベントの割合	78
4.15	主検出器側のラッチタイミングを変えていった時の Hitpat フラグがついたイベントの割合	79
4.16	主検出器側のラッチタイミングを変えていった時の UD/SUD フラグがついたイベントの割合	80
4.17	カメラ（主検出器部）のバックグラウンドスペクトル	81
4.18	カメラ（主検出器部）の Si 1 層目のバックグラウンドスペクトル	82

表 目 次

1.1	HXI の要求性能 [5]	11
1.2	SGD の要求性能 [4]	12
1.3	放射線検出のためのシンチレータ特性比較 [7]	14
1.4	光検出器の特性比較 [7]	15
1.5	HXI/SGD に採用されている APD の特性	15
2.1	搭載型 BGO に推定される相対光量と LD[12]	30
2.2	搭載型 BGO ユニット測定の 1 サイクルの流れ	33
3.1	APMU デジタル部搭載 FPGA の機能一覧	45
3.2	FastBGO の機能一覧	49
3.3	Hitpat の機能一覧	54
3.4	ヒストグラムカウンタの圧縮方法	62
3.5	カウントレートの上昇に伴う GRB 判定機能検証結果	64
3.6	RBM 判定機能検証結果	65
4.1	FastBGO、Hitpat のスレッシュホールド設定値	76
4.2	反同時計数処理信号 (Hitpat) の閾値	77

第1章 序論

1.1 ASTRO-H 衛星

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 線やガンマ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 線やガンマ線を観測することが高エネルギー天体现象の研究をする上でとても重要なことであると言える。

天体现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现象を解明することができる。

しかし、天体からの X 線やガンマ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、低電力、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 線ガンマ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。そこで、2015 年打ち上げ予定の日本で 6 番目となる X 線天文衛星 ASTRO-H(図 1.1) 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、検出器の視野外からのバックグラウンドを徹底的に除去することにより、従来検出器より一桁良い感度を実現可能とする。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ること成功している。

ASTRO-H 衛星には全部で 4 種類の検出器が搭載される。それぞれ軟 X 線分光検出器 (Soft X-ray Spectrometer:SXS)、軟 X 線撮像検出器 (Soft X-ray Imager:SXI)、硬 X 線撮像検出器 (Hard X-ray Imager:HXI)、軟ガンマ線検出器 (Soft Gamma-ray Detector:SGD) であり、その中の HXI と SGD にはアクティブシールドが採用されている。図 1.2 に ASTRO-H に搭載される検出器の観測可能エネルギー帯域を示す。ASTRO-H 衛星ではこれらの 4 種類の検出器を用いて、軟 X 線から軟ガンマ線までの幅広い帯域での高感度観測を実現する。

本論文では、HXI、SGD のアクティブシールドに採用されている BGO シンチレータの受け入れ試験及び、そのアクティブシールド部のマネージメントと信号処理を担っているデジタル回路の仕様決定、そして実際に衛星に搭載される検出器と同型の試作機を用いたアクティブシールドによるバックグラウンド除去の実証の3項目を主に記述している。

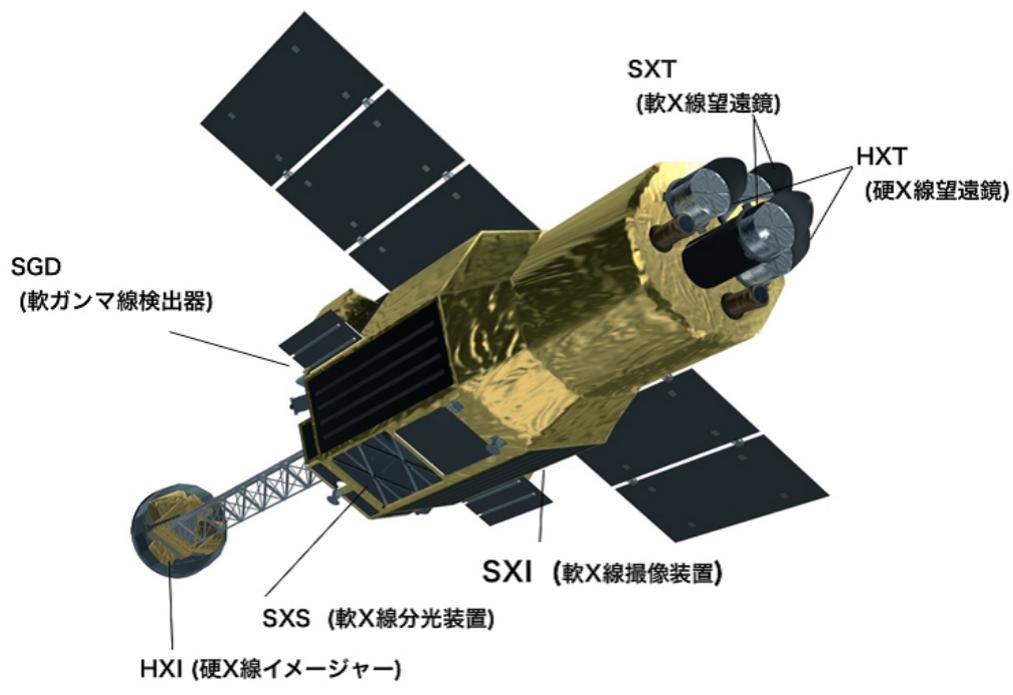


図 1.1: ASTRO-H 衛星 [1]

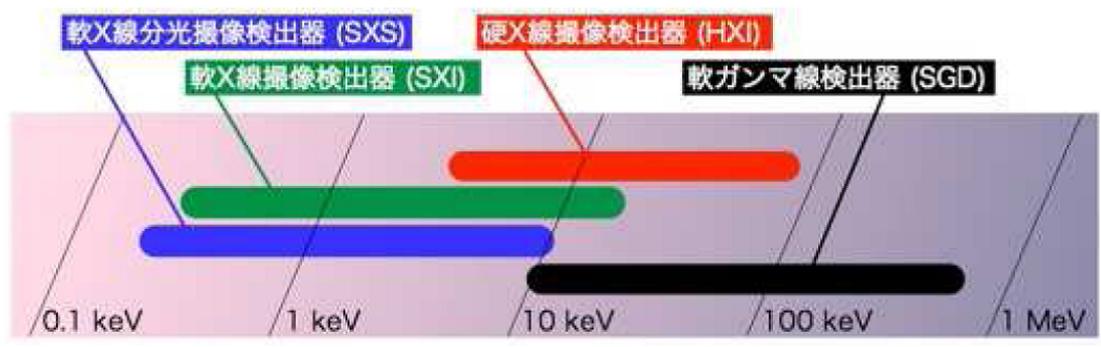


図 1.2: ASTRO-H 衛星搭載検出器の観測エネルギー帯域 [1]

1.1.1 硬 X 線望遠鏡 (HXT)+硬 X 線撮像検出器 (HXI)

HXI は 5-80 keV の帯域を精度良く撮像を行う検出器であり、12 m の焦点距離を持つ硬 X 線望遠鏡 (Hard X-ray Telescope:HXT) の焦点面に置かれる。これにより、その有効面積に対して検出器の面積を小さくでき、signal/noise(SN 比) を上げることにより、検出器の感度を大きく向上させている。

HXT には従来の多層膜型とは異なり、表面からの深さによって層の間隔を変えることにより、広いエネルギー帯での高いブラッグ反射率を実現している多層膜スーパーミラーが採用されている (図 1.3)。これにより HXT は 5-80 keV までの硬 X 線領域での望遠鏡による集光撮像観測を可能としている。

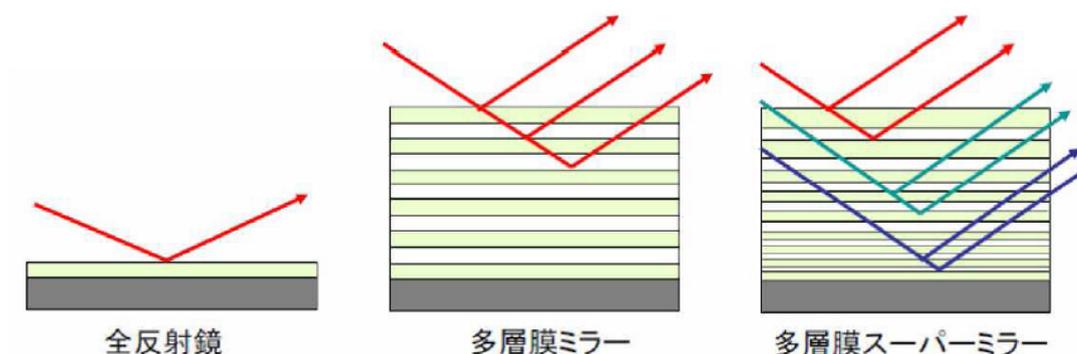


図 1.3: 全反射鏡、多層膜ミラー、多層膜スーパーミラーの模式図 [2]

HXI は HXT によって集光された硬 X 線を、厚さ 0.5 mm の両面 Si ストリップ検出器 (DSSD)4 枚と、CdTe ストリップ検出器 1 枚で検出し、個々の光子のエネルギー分解能と到来方向を決定する。DSSD は 5-40 keV の光子の到来方向とエネルギーを決定し、20-80 keV の光子は CdTe により光電吸収を起こしエネルギーが測定される。HXI の概念図を図 1.4 に、Si と CdTe の検出効率を図 1.5 に示す。

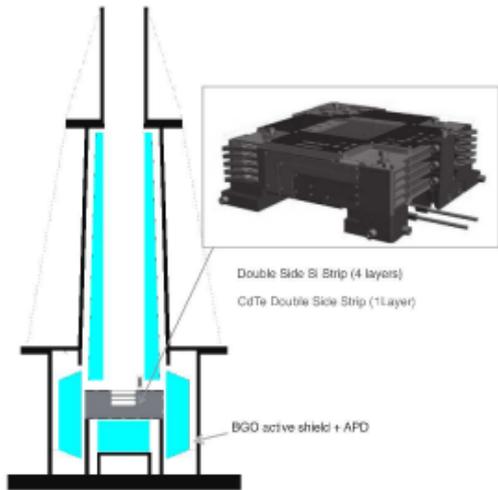


図 1.4: HXI の概念図 [3]

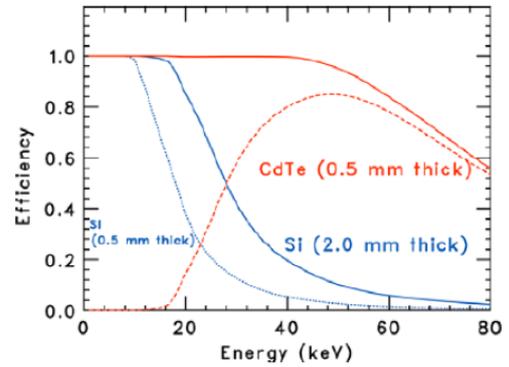


図 1.5: Si と CdTe の検出効率 [4]

HXIは更に、BGO シンチレータによるアクティブシールドが採用されており、観測天体外からのバックグラウンドを徹底的に除去し、従来よりも約二桁良い感度を実現している。図 1.6 に従来の検出器とHXIの要求感度を一緒に示したものの、表 1.1 にHXIに求められる要求性能を示す。

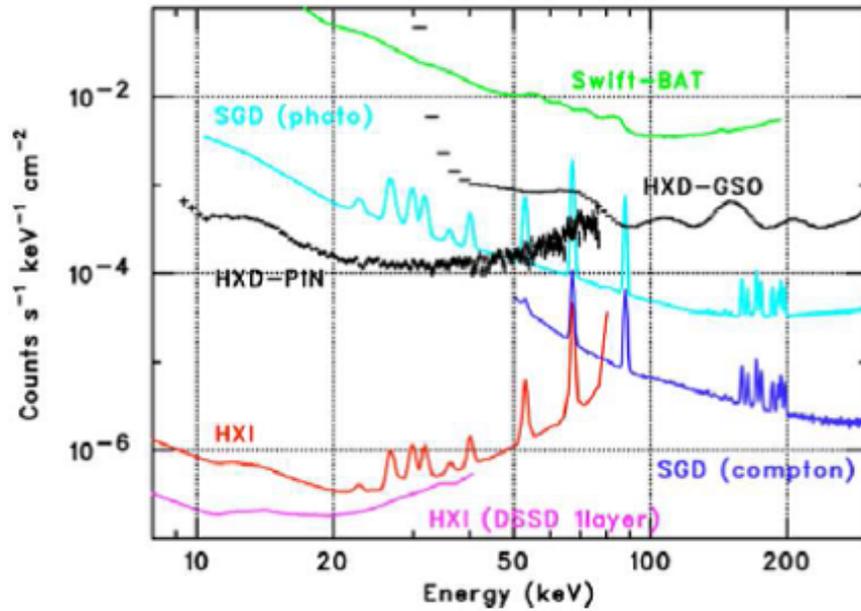


図 1.6: 従来の検出器と HXI の要求感度 [2]

エネルギー領域	5 - 80 keV
エネルギー分解能	< 2 keV@60 keV
有効面積	300 cm ² @30 keV
視野	9 × 9 arcmin ²

表 1.1: HXI の要求性能 [5]

1.1.2 軟ガンマ線検出器 (SGD)

SGD は 80-600keV 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ガンマ線に高い感度を持つ 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と、リン青銅と金を用いたファインコリメータにより、110 keV 以下において視野を 0.5×0.5 度以内に絞ることと、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ることで、ガンマ線の到来方向を制限しバックグラウンドを大幅に低減する。これにより SGD は従来の検出器の感度より一桁以上高い性能を実現する (図 1.6)。図 1.7 に SGD の概念図を、図 1.8 に SGD の断面図を、表 1.2 に SGD の要求性能を示す。

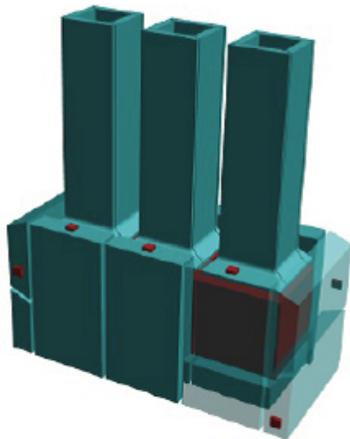


図 1.7: SGD の概念図

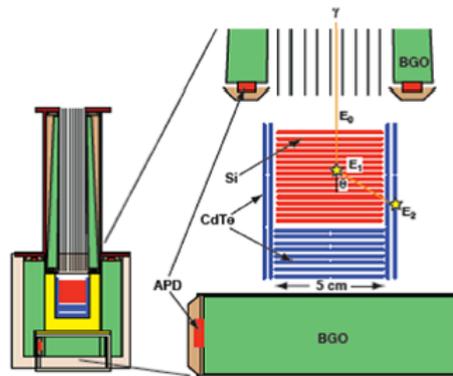


図 1.8: SGD の断面図 [4]

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) 20 × 20 度 (@600keV)
角分解能	< 4 度 (E ~ 600keV)

表 1.2: SGD の要求性能 [4]

1.2 BGO アクティブシールド

衛星軌道上では、検出器の視野外からやってくる荷電粒子や X 線、ガンマ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。そこでそれらの問題を解決するために、ASTRO-H 衛星には、主検出器を Anti 検出器である BGO ユニットで取り囲む、BGO アクティブシールドが採用されている。これにより、視野外からの宇宙線を遮断するとともに、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としても、BGO シンチレータ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 1.9 にアクティブシールドの模式図を示す。

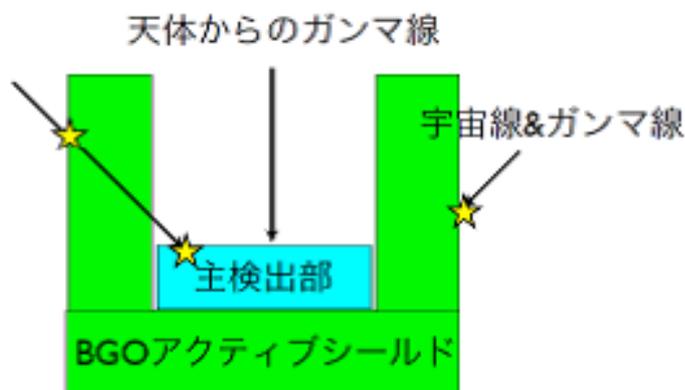


図 1.9: アクティブシールドの模式図 [4]

HXI ではHXI 一台につき BGO ユニットの合計 9 個使用し、主検出器部を取り囲む。SGD は主検出器部のコンプトンカメラが 3 台一列に並んだ構造となっているため、HXI とは数量が異なり SGD 一台につき BGO ユニットの 25 個使用する。SGD では、このHXI よりも大きな BGO ユニットの有効面積と広い視野を利用し、アクティブシールドによる全天モニターを行い、突発天体などの観測を行う役割も担っている。

1.2.1 BGO シンチレータ

シンチレータと言われる物質に放射線が入射することによって、物質内部で相互作用が起こりシンチレーション光が発生する。このシンチレーション光を光検出器で検出することにより、電気信号に変換し、電離放射線を検出する手法は放射線測定法の一つとして古くから知られており、現在でも放射線のスペクトル測定を行う上で有効な方法として広く利用されている。

シンチレータは有機と無機シンチレータの2つに分けられるが、X線、ガンマ線測定には無機シンチレータが用いられる。無機シンチレータはアルカリ金属の結晶であり、密度、原子番号が大きいのでガンマ線スペクトル測定に非常に有用であることが知られている。また、入射光子のエネルギーと蛍光の光量に良い比例関係を持つという優れた特徴がある。無機シンチレータのシンチレーション放射機構は、シンチレータの材料となっている結晶格子で決定されているエネルギー状態に依存する。図 1.10 に活性化された結晶シンチレータのエネルギー帯構造を示す。電子は絶縁体あるいは半導体材料中では離散的なエネルギー状態しか取りえない。図 1.10 では、下方が価電子帯と呼ばれる電子が格子上の位置に束縛されている状態であり、上方が伝導帯と呼ばれる電子が結晶内部を自由に動き回れるエネルギーを持っている状態を表している。この二つの状態の間には禁制帯と呼ばれるエネルギーギャップが存在し、純粋な結晶では電子は存在できない。ガンマ線が入射するとそのエネルギーを吸収して価電子帯の電子が励起され伝導帯へ移動する。そして、それが基底状態に戻る時に放出される光(シンチレーション光)を検出することにより、入射されたガンマ線のスペクトルを求める。

無機物質の純結晶中でのシンチレーション光は能率が悪い。その上、このとき放出される光子はエネルギーが大きく、可視光にはならない。そこで、この過程での可視光放出率を高めるために、多くの無機シンチレータでは活性化物質と呼ばれる少量の不純物を添加される。これにより、純結晶では存在しなかった、禁制帯中に価電子帯への電子遷移が可能な中間準位を設けることができ、可視光の発生確率を高めることができる。

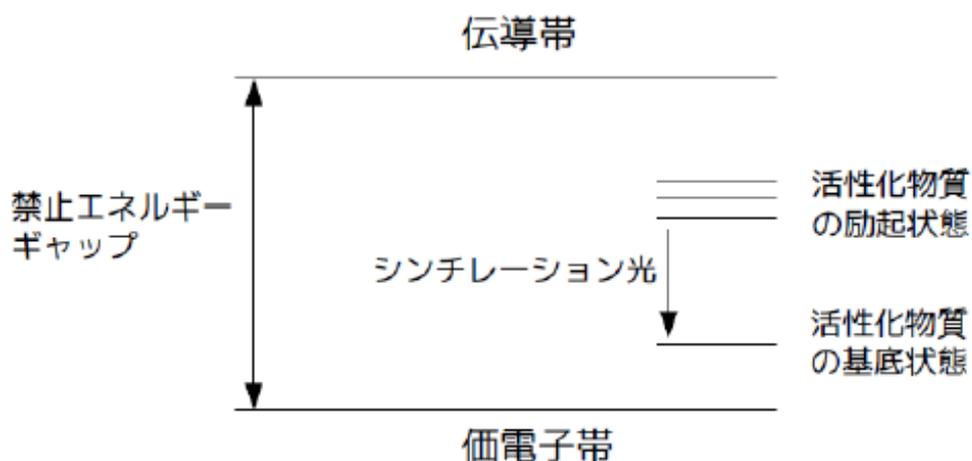


図 1.10: 活性化された結晶シンチレータのエネルギー帯構造 [6]

HXI/SGD には前述しているように、アクティブシールドとして BGO シンチレータが採用されている。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 1.2.1 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。

無機結晶シンチレータであるピスマスジャーマナイト ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$:BGO) の主な特徴は、ピスマスの大きな原子番号 (83) とその大きな比重 ($7.3\text{g}/\text{cm}^3$) 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ール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 ($511\text{ keV}:\text{cm}^{-1}$)	0.34	0.41	0.955	0.674

表 1.3: 放射線検出のためのシンチレータ特性比較 [7]

1.2.2 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、これが数 10-数 100 keV 帯域における 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、HXI/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 1.4: 光検出器の特性比較 [7]

表 1.5 に HXI/SGD のアクティブシールドに採用されている APD の主な特徴を示す。この APD は大面積であり、静電容量が非常に大きいため、APD と CSA で発生する雑音は容量性雑音が支配的である。従って雑音特性に優れる CSA の開発が必要不可欠である。

大きさ	10-10 mm ²
暗電流	0.4 nA (gain 50-15 deg)
容量	400 pF (同軸ケーブル 1 m 含む)

表 1.5: HXI/SGD に採用されている APD の特性

1.2.3 電荷有感型前置増幅器 (CSA)

電荷有感型前置増幅器 (Charge Sensitive Amplifier; CSA) は、APMU と呼ばれる BGO ユニットの信号処理とマネージメントを担っている回路 (後述) の高圧電源 HV から APD へ電圧を供給するとともに、1 枚で 4ch 分の APD からの出力信号を処理する。具体的には APD から出力された電荷は CSA で増幅されて電圧波形へと変換され、その後簡単な波形整形が行われた後 APMU へ出力される。

従来の CSA の回路様式をアクティブシールドに適用させてしまうと、APD の容量が 20 pF と大きいため、その容量に比例するノイズの勾配が大きくなってしまふことが考えられた。そのため、HXI/SGD チームにより、容量勾配を低減させるとともに、ノイズ性能に影響をあまり与えずに荷電粒子由来の大信号に対する耐性を高めるべく、宇宙科学研究所の森氏と早稲田大学を中心に CSA の開発が行われた。その結果、デッドタイムを少なくしつつ最良の性能が得られた帰還容量 10 pF、10 μ s の微分回路が開発され、採用された。

1.2.4 アクティブシールド部の信号処理

アクティブシールド部での信号処理は、まず BGO シンチレータの光信号を光検出器である APD で検出し、その信号を CSA で増幅、電圧波形変換し、その後 APMU でトリガー生成などの処理

が行われる。図 1.11 にアクティブシールド部の信号処理全体像を示す。

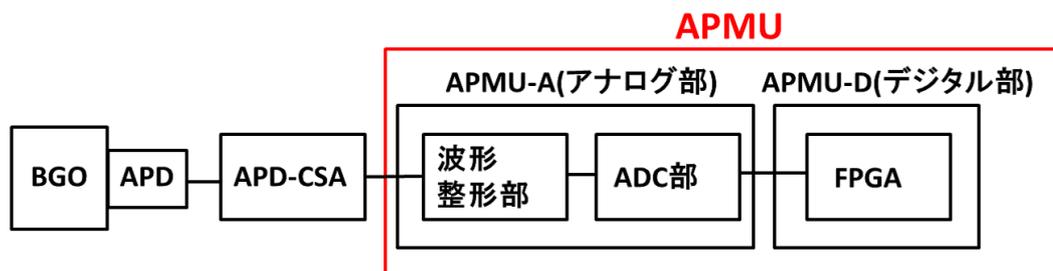


図 1.11: アクティブシールド部の信号処理の全体像

HXI/SGD の BGO アクティブシールドは図 1.7 のようにトップ、サイド、ボトム部の 3 部より構成されるが、信号の読み出しではサイドとボトム部を合わせて、全体としてトップ部とサイド + ボトム部の 2 つに分けて行われる。HXI ではトップ部とサイド + ボトム部でそれぞれ CSA ボックス 1 台ずつで計 2 台、SGD では更に左右に分けることにより計 4 台での読み出しを行う。HXI の BGO アクティブシールド部の読み出しシステムの全体像を図 1.12 に、SGD の全体像を図 1.13 に示す。ミッション標準 I/O ボード (Mission I/O; MIO) は、APMU にコマンド送信し、その動作を制御するとともに、APMU から出力されるデータを取得し、後段の衛星本体のデジタルデータ処理部 (Mission Digital Electro; MDE) にそのデータを送信する。一部のトリガー信号は主検出器を制御する MIO に別途送信される。

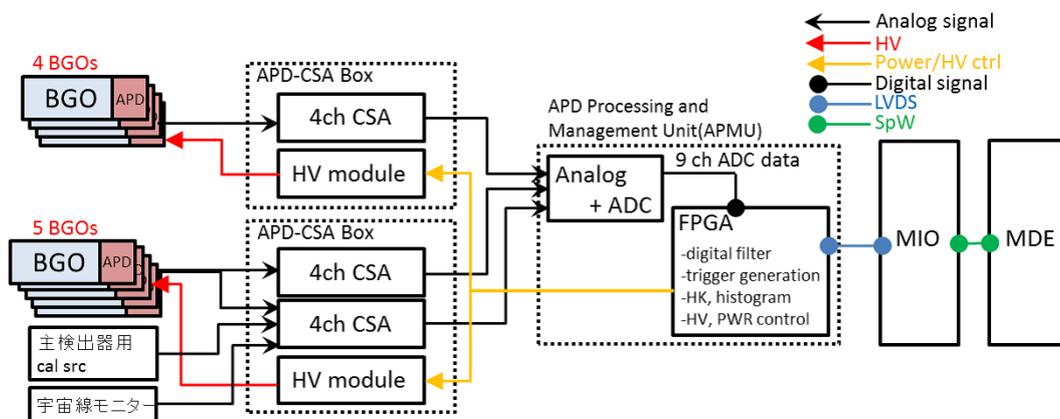


図 1.12: HXI の BGO アクティブシールド部の読み出しシステム

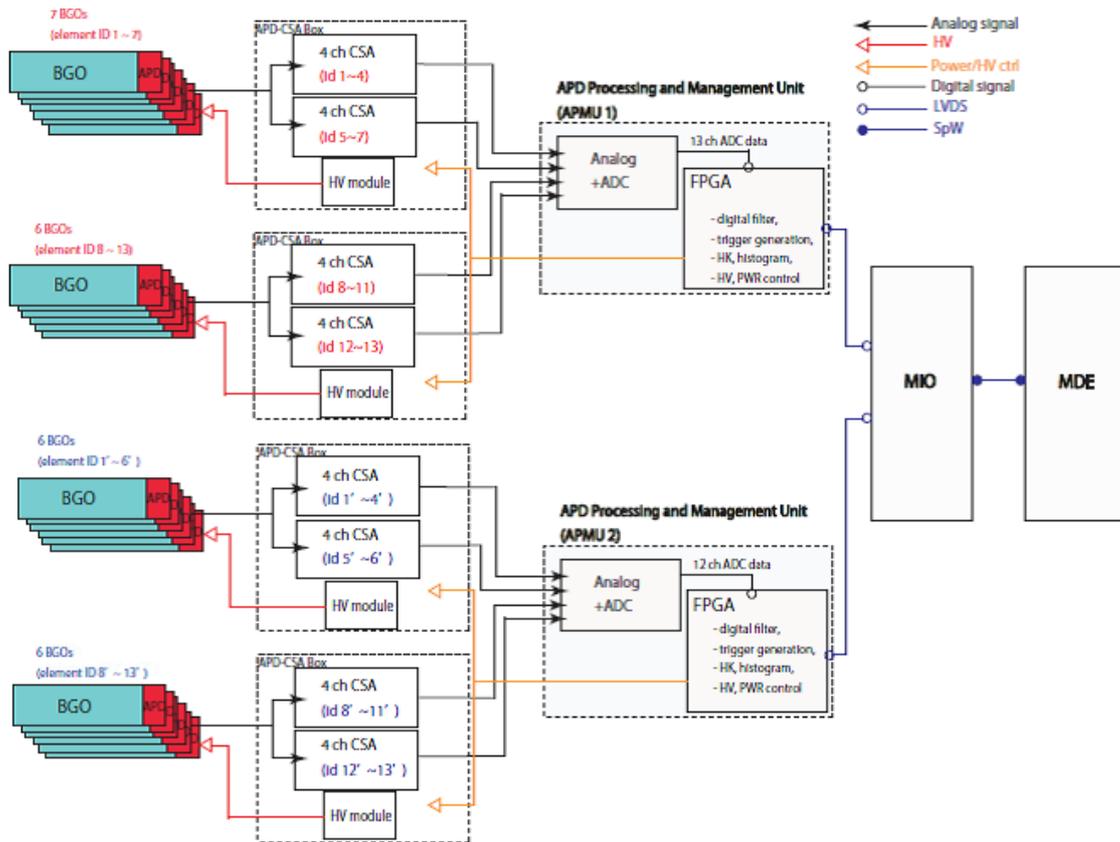


図 1.13: SGD の BGO アクティブシールド部の読み出しシステム [3]

1.3 APD Processing and Management Unit(APMU)

APD Processing and Management Unit(APMU) とは、CSA より出力された波形のゲイン調整、整形、波高値取得や各種トリガー信号などを生成する信号処理回路と、高圧電源や温度モニター (House Keeping:HK) を行う回路で構成されている。図 1.14 に実際の APMU 基板を、図 1.15 に CSA+APMU を含めた回路模式図を示す。

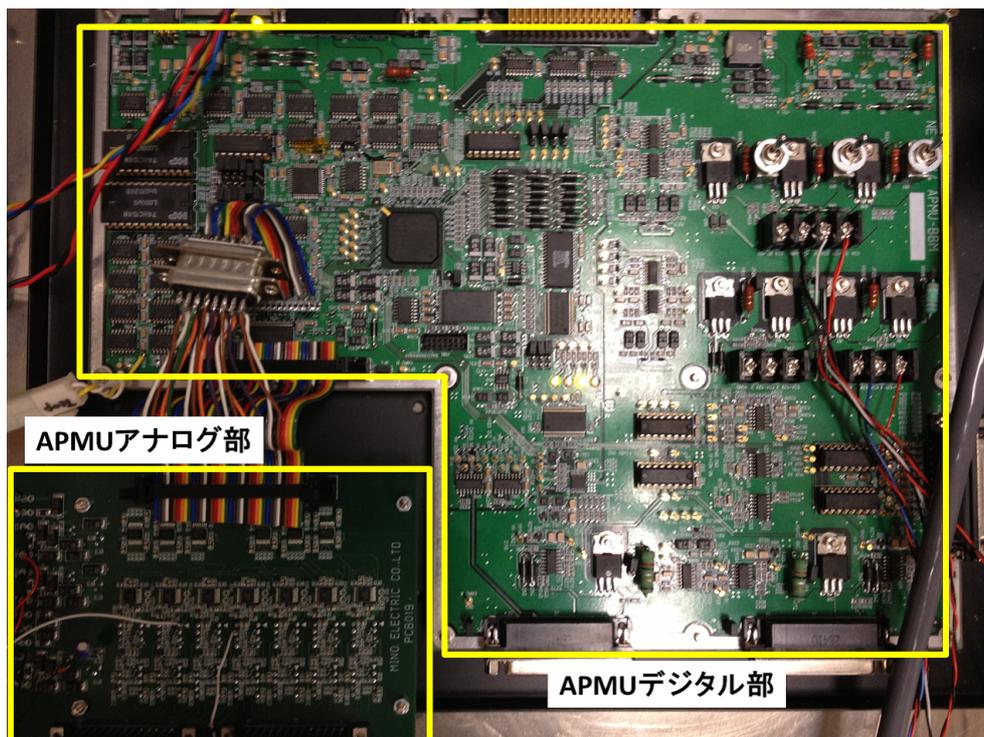


図 1.14: APMU 試作基板

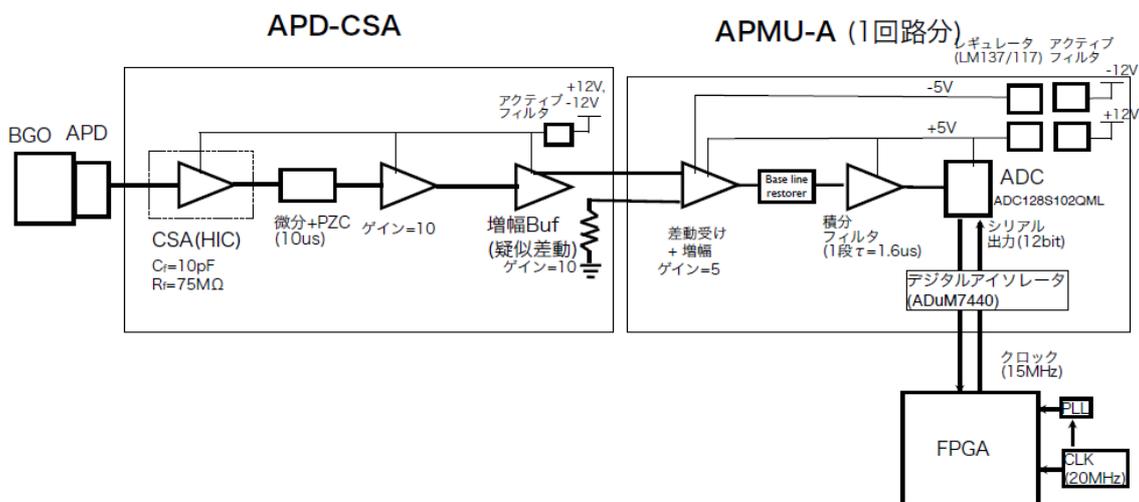


図 1.15: アクティブシールド部回路模式図 [3]

1.3.1 APMU アナログ部

波形整形部

APMU アナログ部では積分回路により増幅、整形を行っており、ADC のサンプリング周期や APMU デジタル部でのデジタルフィルタ処理を考慮した、信号処理が行われる。APMU アナログ部の回路パラメータは、上空で想定される信号に対応できるように最適化されており、大信号入力時 (陽子や Fe イオン入射時) にベースラインに早く復帰できるようにベースラインリストアラ (BLR) 回路が採用されている。また、後段の APMU デジタル部での信号処理を考慮し、積分時定数 $1.6 \mu s$ の積分アンプが用いられている。

アイソレータ部

APMU は、大きくアナログ部とデジタル部に分かれている。そしてそのアナログ部とデジタル部では、それぞれノイズの影響具合が異なっている。アナログ部には微弱なノイズの影響も受けしてしまうという特徴があり、一方で、デジタル部には過渡的な電圧変化によるノイズが出やすいが、“0”か“1”の信号しか存在しないため、その他のノイズの影響を受けにくいという特徴がある。このように、アナログ部とデジタル部はノイズの出やすさとノイズの影響の受けやすさが異なるため、APMU の開発においては、アナログ部とデジタル部を別基板として設計、試験が行われている。しかし、衛星に搭載するフライトモデルはアナログ部、デジタル部が一体となった基板を製作するため、アナログ部とデジタル部を分けて試験した結果を反映させるために、グラウンドが分離された状態で信号をやりとりでき、放射線耐性もあるデジタルアイソレータ (ADuM7440) が採用された。

ADC 部

CSA より出力された信号は増幅、整形後に、デジタルデータとして処理、保存を行うためにアナログ-デジタル変換が行われる。HXI/SGD で用いるアナログ-デジタル変換器 (ADC) は、衛星軌道上で動作させるために、(1)BGO+APD からの信号の立ち上がり時間 $3 \mu s$ に比べて速いサンプリングレートであること、(2) 小型であること、(3) 消費電力が小さいこと、(4) 放射線耐性があること等が要求される。BGO アクティブシールドの信号処理システムではこれらの要求を満たす ADC である National Semiconductor 社の ADC128S102QML を採用した。ADC128S102QML は逐次比較型 ADC であり、 100krad の放射線耐性をもつ。本論文で使用した APMU 試験基板ではこの ADC128S102QML とほぼ同じ性能 [8] であるが放射線耐性がない、同じく National Semiconductor 社の ADC128S102 を用いている。ADC128S102 の消費電力は単体試験により 5mW である [9] ことが分かっており、QML 版も同程度であると予想される。

1.3.2 APMU デジタル部

APMU デジタル部には Large Scale Integration(LSI) の一種である FPGA が搭載されている。FPGA とは VHDL というハードウェア記述言語で動作ロジックを書き込むことで、ユーザーが自由なデジタル回路処理を後天的に設定することができる。APMU デジタル部の FPGA は主に CSA への電源供給、ADC データ処理、デジタル信号処理、電流値や温度などのモニター (House Keeping; HK)、衛星本体につながる MIO との通信などを行っている。図 1.16 に APMU デジタル部のブロックダイアグラムを示す。

APMU デジタル部におけるアクティブシールド部の信号処理は、アナログ部で AD 変換されたデジタル信号を取得し、得られた波形データに 2 種類のデジタルフィルターをかけ、そのそれぞれのフィルター後の波形に対して異なるトリガーロジックを用いてトリガー出力される。この 2 種類のデジタルフィルターをそれぞれ Filter1 と Filter2 と APMU では定義している。

Filter1 が適用された波形は FastBGO 生成部でトリガー判定される。判定されて出力された信号は、そのイベントが視野外からの宇宙線や放射線、荷電粒子などによるものと判断し、HXI/SGD の主検出器に禁止信号 (FastBGO) として伝わる。この禁止信号は上空で直ちに主検出器の AD 変換を中止させ、主検出器の不感時間を減らす役割を担っている。よって、Filter1 では可能な限り早い応答が要求されるため、tap 数 4(作用させるデジタル値の数が 5)、設定できる係数の範囲は 1, 0, -1 と単純な構造のフィルターが使用されている。

Filter2 が適用された波形は Hitpat 生成部でトリガー判定される。判定されて出力された信号は、反同時信号処理信号 (Hitpat) として主検出器に送られ、速さを追求した簡単なフィルターであった Filter1 で生成された禁止信号では落とし切れなかった、より低エネルギー側のバックグラウンド信号等を除去するために地上でのオフライン解析に用いられる。よって、Filter2 では時間をかけて、できるだけトリガー出力判定スレッシュホールドを下げられるように tap 数 16(作用させるデジタル値の数が 17) で、設定できる係数の範囲は-31 から +31 の整数と、詳細なデジタルフィルター処理が行えるようになっている。

デジタルフィルター処理を行わず、APMU デジタル部に入力されたデータをそのまま用いて出力するトリガー信号もある。荷電粒子由来の約 5 MeV 以上の高いエネルギー信号がシールド部に入射し、アナログ回路がサチュレーション (飽和状態) した場合に出力される信号として UD 信号が UD 生成部から出力され、それよりもさらに高いエネルギーを BGO ユニットに落とす、重イオンが入射し、CSA すらもサチュレーションしてしまった場合に出力される信号として SUD 信号が SUD 生成部から出力される。これらの信号も必要に応じて主検出器側で FastBGO あるいは Hitpat 信号と同じように使われる。

Filter2 を通した波形がパルスハイト生成部で、トリガー判定された場合は、その波形の波高値を算出し、ヒストグラム生成部でイベントの時刻やヒストグラムなどのデータ生成が行われる。波高値はシールド検出器に入射した放射線が持っていたエネルギーに比例するため、ヒストグラムデータはエネルギースペクトルとなる。ヒストグラムデータの取得は、特にガンマ線バースト (GRB) などの突発現象の発生時にはアクティブシールド自身がメインの検出器となり、サイエンスに役立てられるため、非常に重要である。

前述した様々な信号は全てスケーラーで計数され、記録されている。そして、大まかなデット

タイムの見積もりや、アクティブシールド部に異常が起こっていないか（異常なレートになっていないか）等の検出器の状態を知るモニター情報として役立てられる。

GRB 事象の判定機能も FPGA ロジックには含まれている。時間分解能の良いヒストグラムデータが APMU 上のメモリに保存されており、バックグラウンドイベントの急激な上昇を感知すると、GRB だと判定され、そのヒストグラムデータを MIO へ送信する。

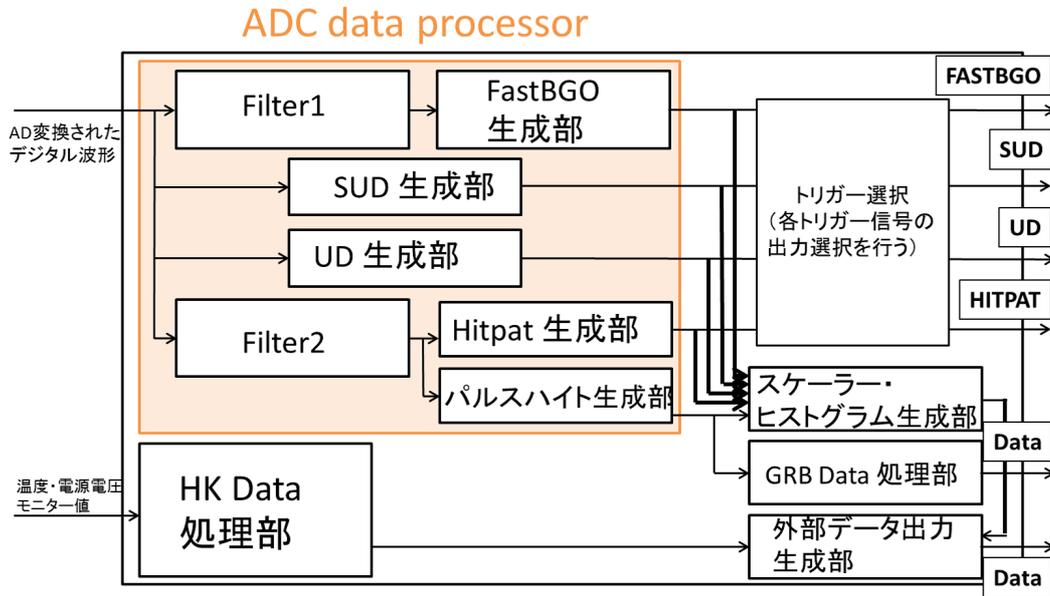


図 1.16: APMU デジタル部の機能ブロックダイアグラム

1.3.3 反同時計数処理

前述したとおり HXI/SGD は主検出器の周りを BGO アクティブシールドで取り囲むことによって、主検出器の視野外からのバックグラウンドの除去を行っている。この時、行われている処理が反同時計数処理と呼ばれ、BGO シンチレータがシンチレーション光を出力した時と同タイミングで検出された主検出器でのイベントを、バックグラウンドイベントとして取り除く。

シールド部で出力された反同時計数信号（禁止信号 FastBGO、ヒットパターン）は、主検出器側であるタイミングでラッチされる。HXI/SGD では反同時計数信号の出力とラッチするタイミングは各々で設定することが可能である。この反同時計数信号と主検出器側のラッチタイミングが上手く合致しなければ、反同時計数処理の効率は下がってしまう。

1.4 本研究の目的

ASTRO-H 衛星搭載検出器である HXI/SGD はこの章で述べてきたとおり、BGO アクティブシールドの信号を CSA で電圧波形に変換し、さらにその信号を APMU を用いてアナログ部で増

幅、整形を行う。そして AD 変換後にデジタルフィルタ処理を行い、主検出器への禁止信号を出力したり、ヒストグラム生成などを行う。

HXI/SGD が高い感度を実現するためには、このシールド部の出力する反同時計数信号により低いスレッシュOLDまで感度を持たせ、また主検出器側に確実に反同時計数信号をラッチしてもらはなければならない。そのためにはまず、BGO ユニットの想定される光量が正しく出力されていることと、APMU の出力する反同時計数信号のトリガー出力タイミングがこちらが想定しているタイミングで出力されていることが重要である。

そこで本研究では、実際の衛星搭載品である BGO ユニットの光量を事前に測定し、製造に問題がないことと、想定される光量が読み出せていることを確認するための受け入れ試験を行い、実際に HXI,SGD 各一台分の BGO ユニット受け入れ試験を行った。また、BGO ユニットの信号処理に用いられる APMU の FPGA ロジックの仕様・動作検証を行い、反同時計数信号が想定されるタイミングで出力されているかなど、APMU の全ての機能を網羅する形で試験を行った。そして実際に衛星に搭載される検出器と同型の試作機を用いて、APMU の仕様確認を行うとともに、HXI 主検出器と BGO を組み合わせて初めての反同時計数処理の実証を行った。

第2章 搭載型BGOユニットの評価試験

ASTRO-H 衛星搭載検出器のHXI/SGDにはBGO アクティブシールドが採用されている。そのアクティブシールドに用いられるBGOユニットは主検出器を隙間なく取り囲まなくてはならないため、複雑な加工を施した様々な形状があり、光量なども形状ごとに異なっている。そのため、本研究では衛星に実際に搭載するBGOユニットの性能評価試験を行い、アクティブシールドに用いても性能が期待できるかどうか事前に確認を行った。本章ではHXI/SGDの1台分ずつのBGOユニットの性能評価について記述する。

2.1 搭載型BGOユニット

搭載型のBGOユニットは主検出器を隙間なく取り囲むためと、打ち上げ時の負荷に耐えられるように特殊な加工が施されている。具体的にはBGO結晶の一面にCFRPと呼ばれる炭素繊維強化プラスチックが取り付けられており、その面を検出器のハウジングにネジ止めすることで、正確に位置を固定することができ、主検出器を隙間なく取り囲むことを容易にしている。CFRP加工が施されていない5面は、ESRとゴアテックスと呼ばれる反射材で巻かれており、その上からカプトンテープで固定されている。CFRPが取り付けられている一面も、BGO結晶とCFRPの間にBaSO₄という反射材+接着剤の役割を持つ塗料が塗られており、シンチレーション光をできるだけ逃さない作りとなっている。図2.1に搭載型BGOユニットの模式図を示す。

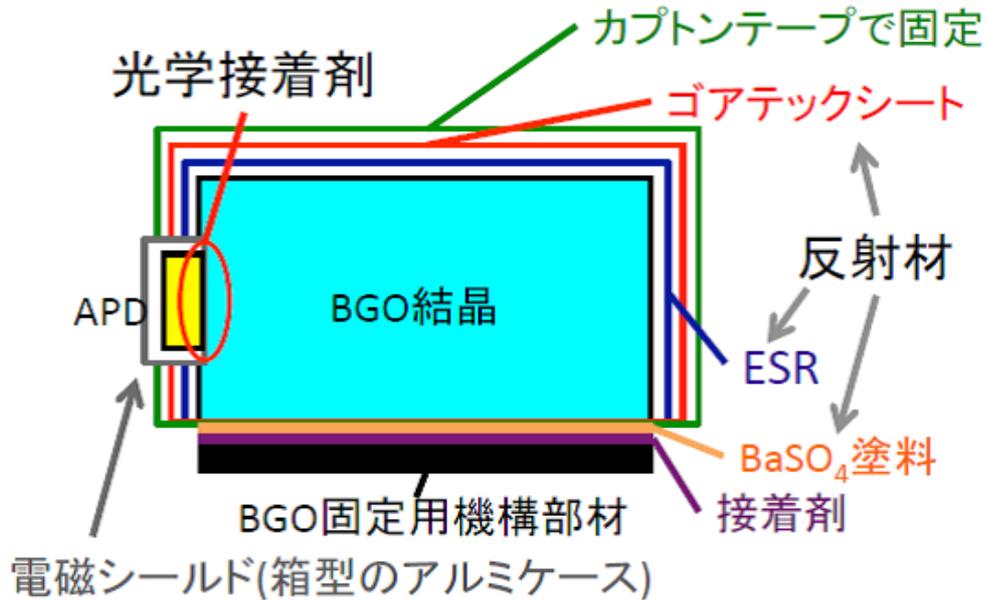


図 2.1: 搭載型 BGO ユニットの模式図 [12]

BGO 結晶の光読み出しに用いられている光検出器である APD は BGO と光学接着されており、APD 自体は電磁シールドを兼ねたアルミシールドで囲まれている (APD アセンブリ)。そのアルミシールド内部で APD は基板に装着されており、そこから細い同軸ケーブルで信号の読み出しが行われる。図 2.2 に APD 周りの構造図を、図 2.3 に実際の搭載型 BGO の写真を示す。

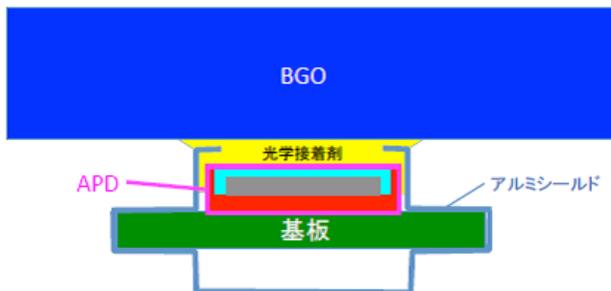


図 2.2: APD 周りの構造図 [12]

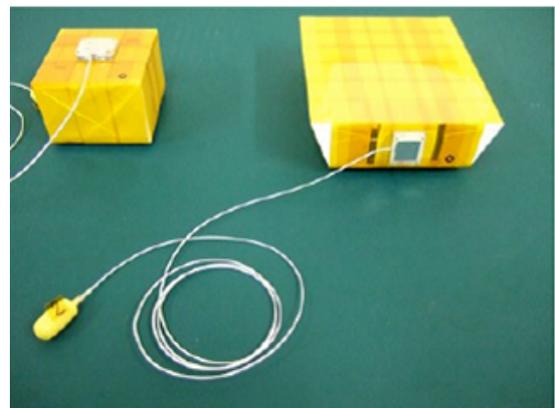


図 2.3: 実際の搭載型 BGO ユニットの外観

2.1.1 搭載型 BGO ユニットの形状と数量

搭載型 BGO ユニットの形状は前述したとおり、主検出器を隙間なく取り囲まなければならないため、様々な形状が存在する。HXI のアクティブシールドに使用される BGO ユニットの形状は全部で

3種類、SGDは6種類存在する。図2.4にHXIの、図2.5と2.6にSGDのシールドに使用される搭載型BGOユニットの形状をそれぞれ示す。

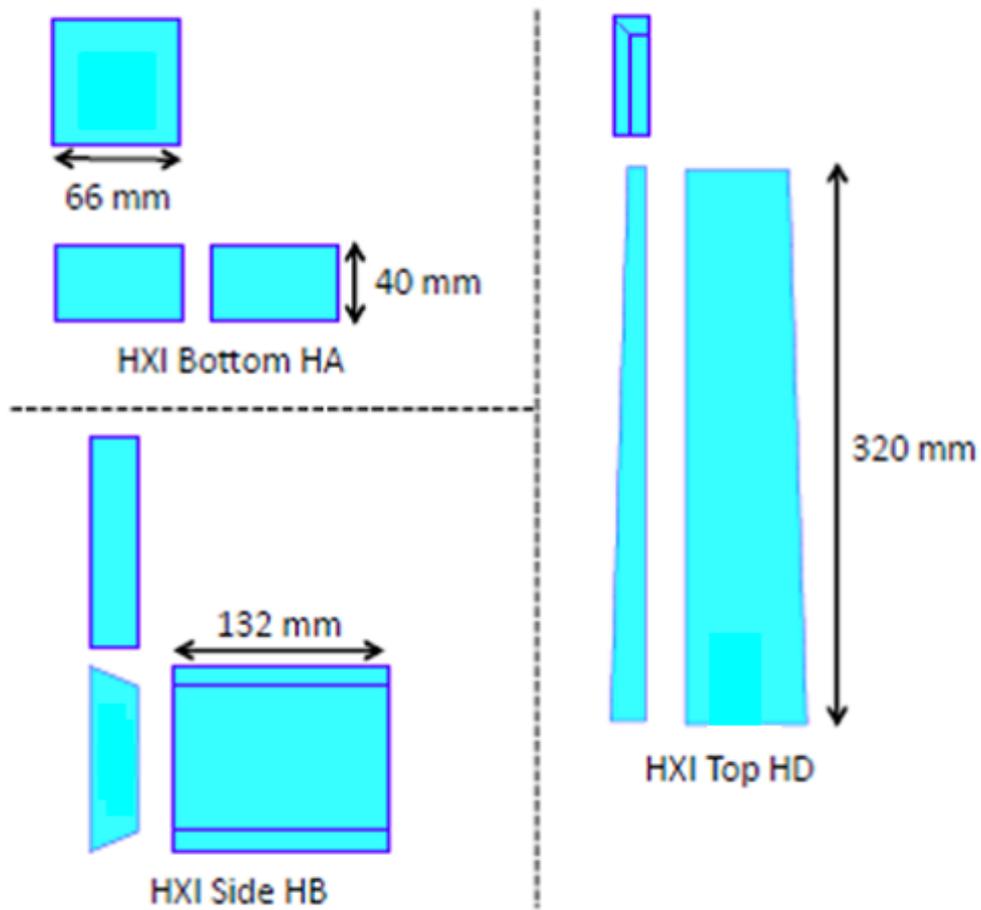
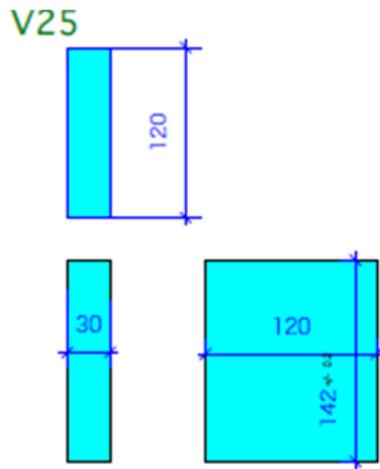
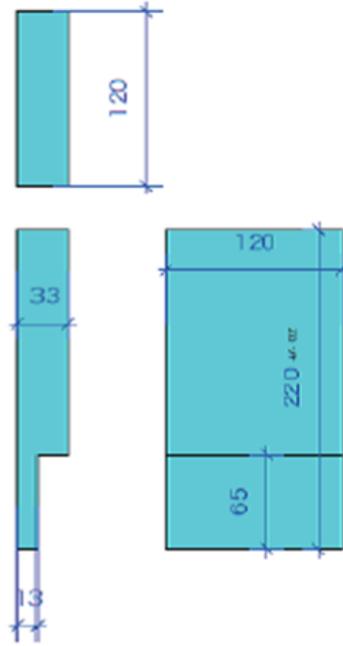


図 2.4: 搭載型 BGO の形状 (HXI)

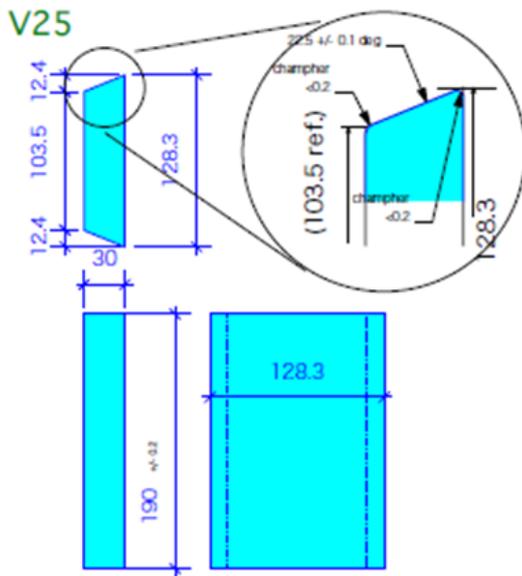
Type-A (bottom)



Type-B (Side-B)



Type-C1 (Side-C1)



Type-C2 (Side-C2)

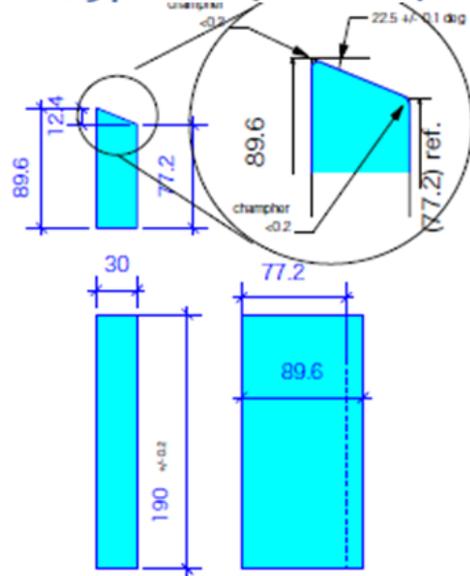


図 2.5: 搭載型 BGO の形状 (SGD:Type-A, B, C1, C2)[11]

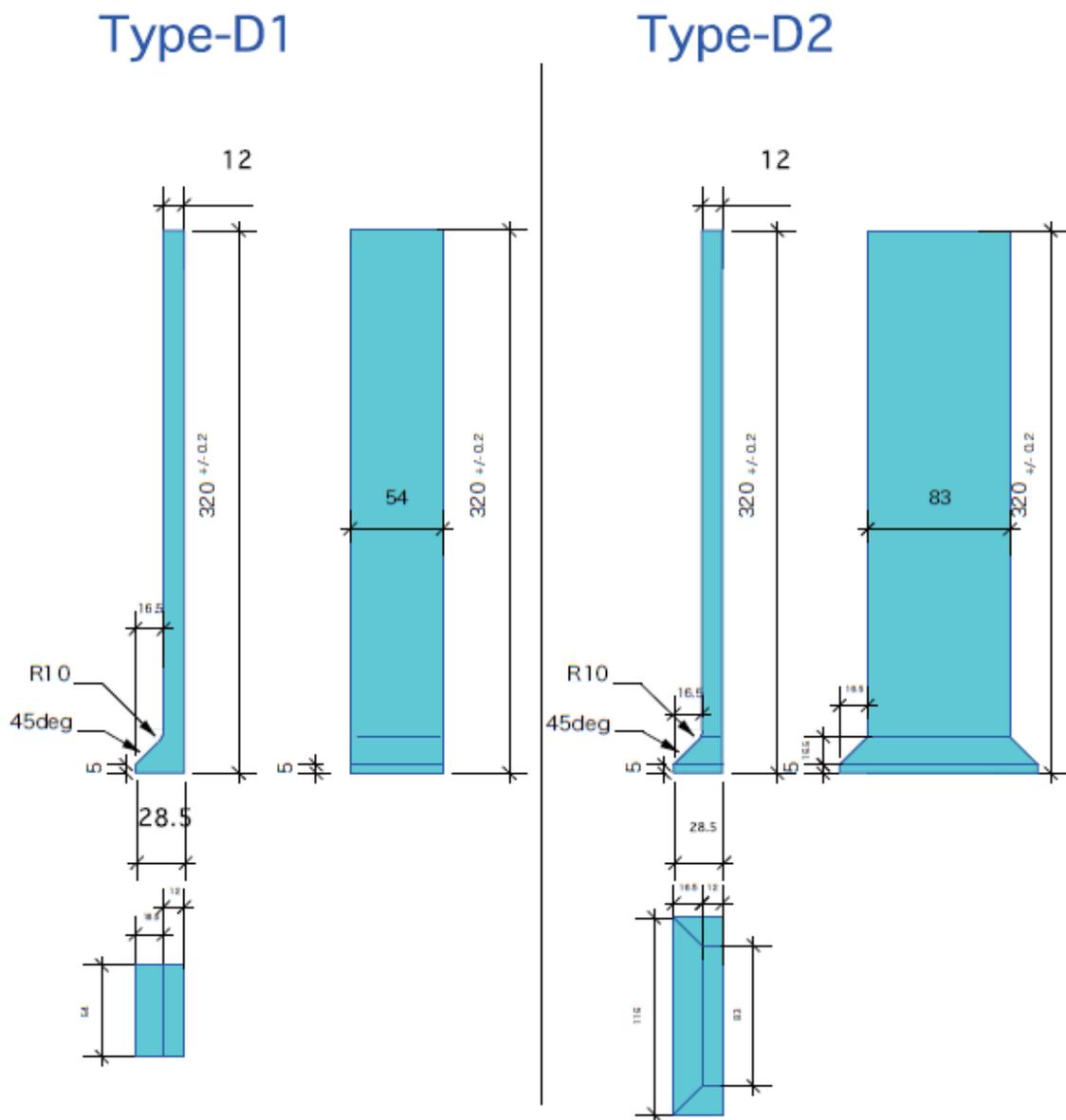


図 2.6: 搭載型 BGO の形状 (SGD:Type-D1, D2)[11]

それぞれ、HXI では HA がボトム部、HB がサイド部、HD がトップ部、SGD では Type-A がボトム部、Type-B, C1, C2 がサイド部、Type-D1, D2 がトップ部となる。HXI 一台につき HA × 1, HB × 4, HD × 4 の計 9 個、SGD 一台につき Type-A × 3, B × 6, C1 × 2, C2 × 2, D1 × 6, D2 × 6 の計 25 個の BGO 結晶を使用する。よって、ASTRO-H には 2 台ずつ HXI/SGD が搭載されるので HXI で 18 個、SGD で 50 個の計 68 個の BGO 結晶が搭載される。図 2.7 に HXI での、図 2.8 に SGD での BGO 配置図を示す。

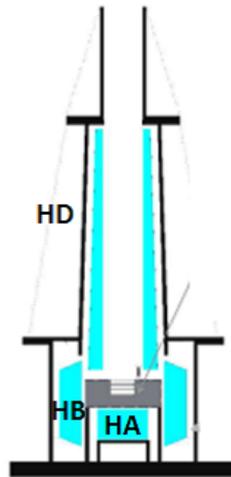


図 2.7: HXI の BGO 配置図

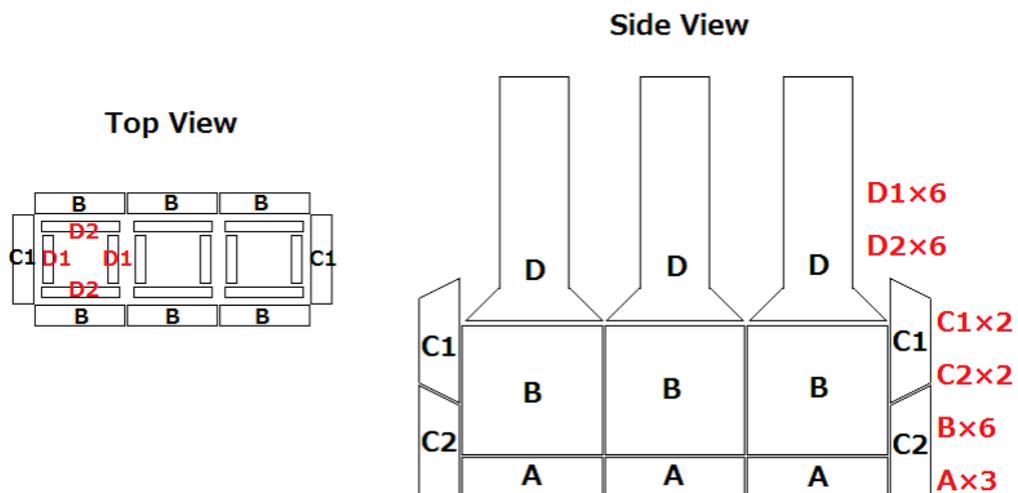


図 2.8: SGD の BGO 配置図

この HXI/SGD の BGO の形状と配置は、どの方向からも主検出部を厚さ 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、SGD の 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。

2.1.2 搭載型 BGO ユニットに求められる性能

搭載型 BGO に推定される光量は、搭載型と同型の BGO 結晶で様々な反射材の場合での光量値の変化を測定したり、搭載型加工される前の BGO 結晶の光量を事前に測定することにより推定が行われている。詳しくは東京大学の笹野修論 (2011)[13] と西田修論 (2012)[12] に記載されている。BGO の測定光量値は、測定環境 (温度や CSA 等) に依存する。そのため、光量の推定値には標準光量 BGO と呼ばれる BGO との相対値を算出し、その標準 BGO で規格化を行った値で評価する。ここで、標準光量 BGO とは、ゴアテックス 2 重で 5 面を巻いた 1 cm^3 角の BGO に $1 \times 1\text{ cm}^2$ の受光面をもった APD をシリコン樹脂接着剤で固定し、APD との接着不良等で光量に変化がおきない様に加工されたものである。本試験では電磁シールドのためにその 1 cm^3 BGO を図 2.9 のように、アルミボックスの中に入れて使用している。

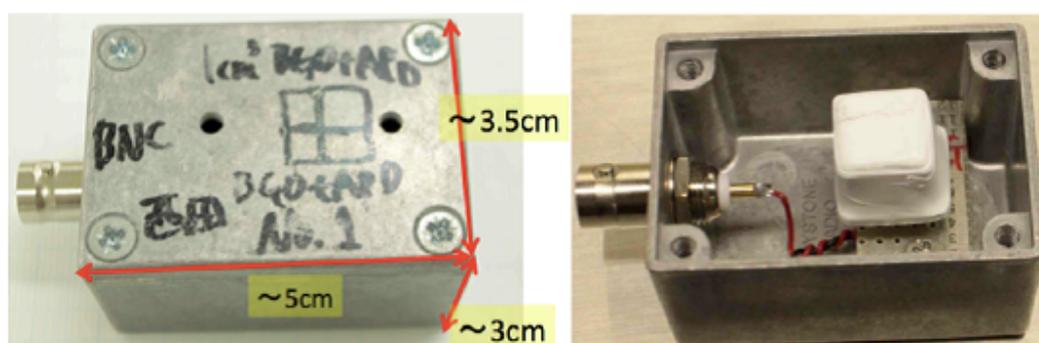


図 2.9: 標準光量 BGO の外観。右図のように BGO に APD を接着したものを固定された基板に取り付けている。[12]

また、本試験では放射線検出器としての閾値 (Lower Discrimination; LD) も性能評価に用いる。搭載型 BGO ユニットが目標とする LD は -20 において 150 keV 前後となっている [14]。LD は一般的には、スペクトルの低エネルギー側に見られる雑音成分が十分に減り、検出器の信号が検出可能となる値に設定される。本試験ではその値を定量的に決めるために、APD の信号と一緒に、Test Pulse 信号を CSA に入力し、その半値幅 (Full Width at Half Maximum; FWHM) を測定し、以下のように定義した。

$$LD = 3 \times \text{FWHM} = 3 \times 2.35\sigma = 7.05\sigma$$

ここで、 σ は入力したテストパルスピークをガウシアンでフィットしたときのパラメータ σ である。LD の値は実際にはエネルギー換算し、上記の目標値を達成できているか確認を行う。表 2.1 に推定された搭載型 BGO の推定光量値 (標準光量 BGO で規格された値) と LD の値を示す。

BGO ユニット			相対光量	-20 での LD[keV]
HXI	bottom	HA	0.235	81
	side	HB	0.141	116
	top	HD	0.13	85
SGD	bottom	A	0.11	147
		B	0.1	162
	top	C1	0.09	180
		C2	0.11	147
		D1	0.15	108
		D2	0.13	125

表 2.1: 搭載型 BGO に推定される相対光量と LD[12]

2.2 搭載型 BGO ユニットの測定

搭載型 BGO ユニットの測定は運送の危険性などを考慮して、ユニットの作成が行われる三菱重工業株式会社 (MHI 社) の一室をお借りして行った。このセクションでは搭載型 BGO ユニット測定における評価項目と測定セットアップ、そして測定結果について記述する。

2.2.1 評価項目

搭載型 BGO ユニットの性能評価試験を行う上で、具体的に 5 つの評価項目を定めている。以下に記述する。

- (1) APD の信号読み出しに用いられているレイノルズコネクタの導通確認
- (2) APD の IV ブレイク異常発生の有無の確認
- (3) APD 光学接着面の剥離の有無の確認
- (4) 運用温度に近い-30 にしても、熱ひずみで BGO+APD アセンブリが壊れないこと
- (5) 予想される光量が出ていること

それぞれ、(1) は+25 /-20 での APD IV 測定、(2) は-20 /低温経験後の+25 での IV 測定、(3) と (4) は+25 /-20 /低温経験後の+25 の光量測定結果の比較、(5) は+25 /-20 の光量測定結果と予想光量の比較で確認を行う。また、IV 測定は BGO ユニット製作前の APD 単体での IV 測定結果と比較して、暗電流の増加などが見られないかなどの確認も同時に行う。光量値の比較は、前述した通り標準 BGO で規格化した相対光量を使って行う。

2.2.2 測定セットアップとスケジュール

測定セットアップの構築は、東京大学の牧島・中澤研が中心に行った。詳しくは西田修論(2012)に記載してある。測定セットアップは、図 2.10 のように恒温槽内に棚を設置し、そこにスポンジを敷き、配置する BGO ユニット間にもスポンジをはさむことで、ハンドリングのミスによる BGO ユニットの損傷を防ぐセットアップとなっている。恒温槽内には最大同時に 7 個の BGO ユニットが配置可能である。これは評価試験を行わなければならない搭載型 BGO ユニットの総数が 77 個もあるため、測定の並列化を重視した結果このようなセットアップとなっている。APD の信号読み出しケーブルは、恒温槽内でレイノルズケーブルから BNC ケーブルに変換され、恒温槽の外まで引き出されている。そして、実際の測定時には、IV 測定を行う場合はその BNC ケーブルを恒温槽外に設置してある Keithley237 に接続、光量測定の場合は同じく恒温槽外に設置してある 4ch 入力が可能な CSA である CP 5005H に接続する。それぞれ Keithley237 は 3 台、CP 5005H は 2 台設置してあり、試験の効率化が図られている。

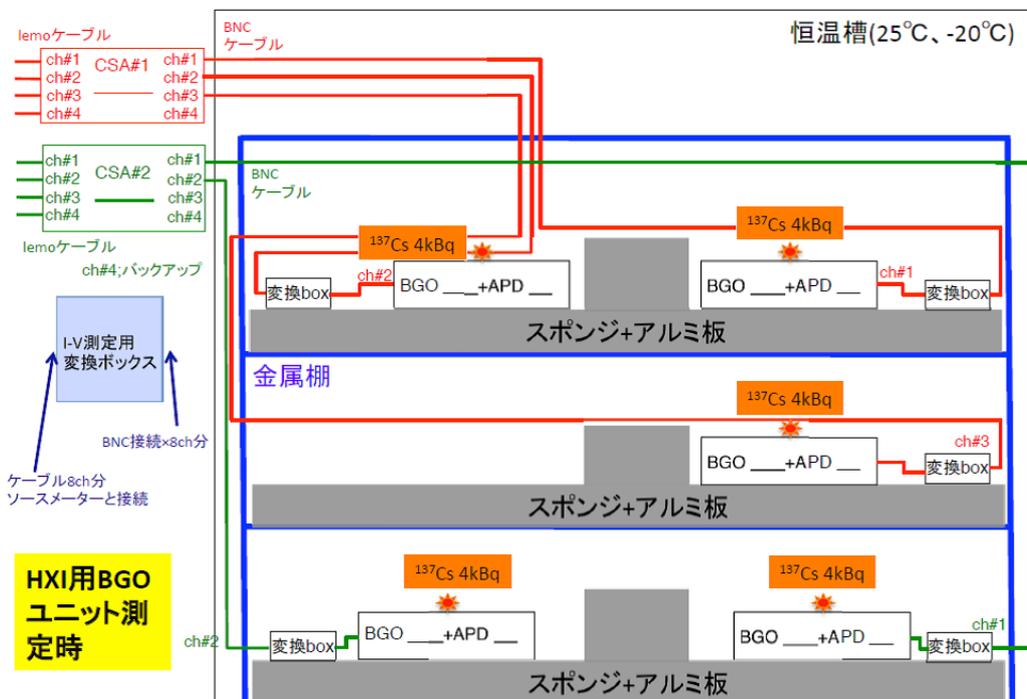


図 2.10: 搭載型 BGO ユニット測定配線図 [12]

光量測定の場合は更に、CSA out を Shaper の CP 4066 に入力し、整形を行った後に Pocket MCA8000A で読み出し、PC でスペクトルの記録を行う。これらの測定機器は全て、全体の電圧基準を定めて配線が行われている。図 2.11 に測定セットアップの全体図と電源配線図を示す。

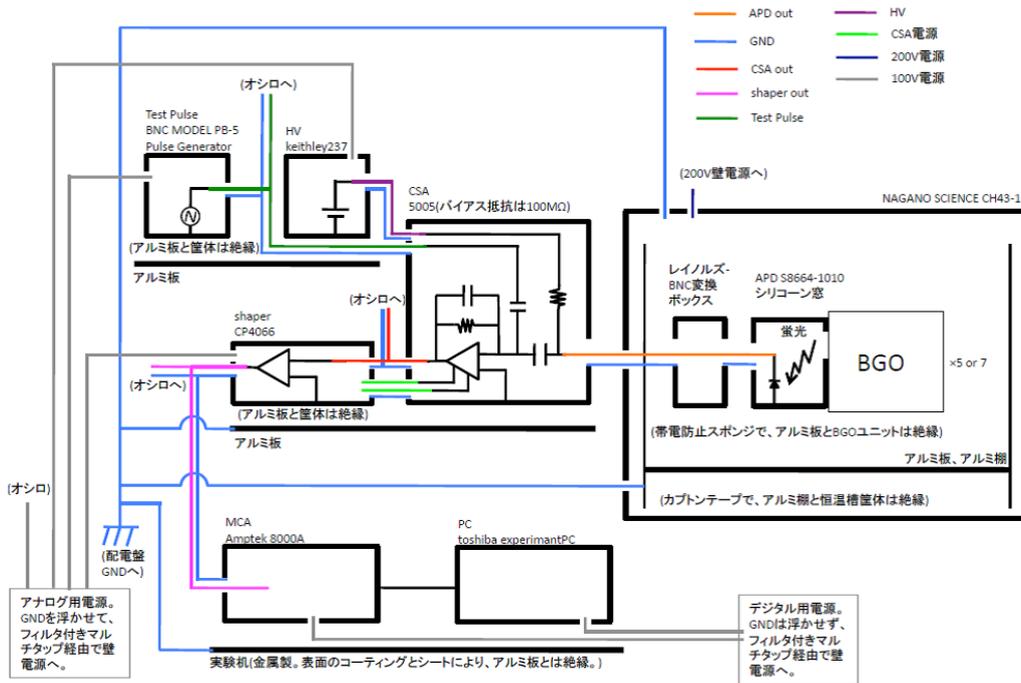


図 2.11: 搭載型 BGO ユニット測定セットアップと電源配線図 [12]

搭載型 BGO ユニットの測定は評価項目にもあったように、温度サイクルをかけて行う。温度サイクルは、一週間で最大 2 サイクル行われ、搭載型 BGO ユニットに無理な負荷がかからないように 6 /h で温度変化を行い、IV、光量測定は温度安定のために最低でも 1 時間半は定値にしてから測定を行う。図 2.12 に一週間の測定スケジュールと温度プロファイルを、表 2.2 に 1 サイクルの測定の流れを示す。

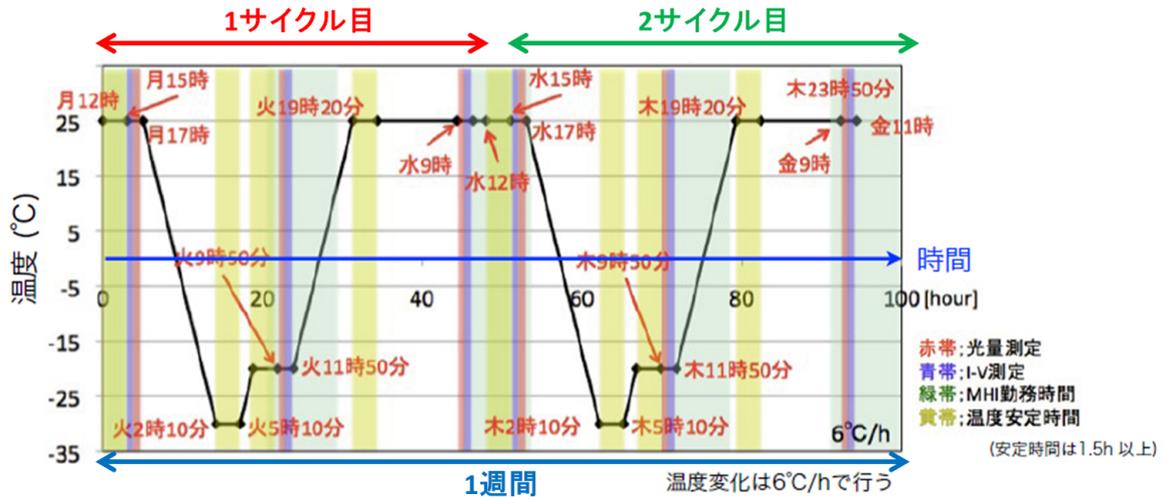


図 2.12: 搭載型 BGO ユニットの測定スケジュールと恒温槽内温度プロファイル (1 週間) [12]

曜日	月曜日 水曜日		火曜日 木曜日		水曜日 金曜日
温度 []	+25	-30 経 験 後 -20 へ	-20	+25 へ	+25
測定項目	IV, 光量測定		IV, 光量測定		光量, IV 測定

表 2.2: 搭載型 BGO ユニット測定 の 1 サイクルの 流 れ

2.2.3 搭載型 BGO ユニットの測定結果

現在まで、HXI9 ユニットと、SGD25 ユニットの各検出器 1 台分ずつの BGO ユニットの測定が終了したので、その評価試験の結果を示す。

IV 測定結果

APD の IV の測定値を +25 と -20 でそれぞれで測定し、検証事項の (1)APD の信号読み出しに用いられているレイノルズコネクタの導通確認、(2)APD の IV ブレイク異常発生の有無の確認を全 34 ユニットで行った。図 2.13、2.14 に例として、HXI のボトム結晶である HA 結晶 (HA-101) の IV カーブを示す。

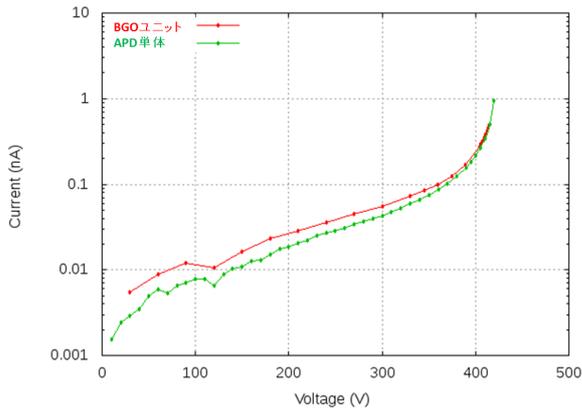


図 2.13: APD 単体と BGO ユニット加工後での IV カーブ比較 (-20)

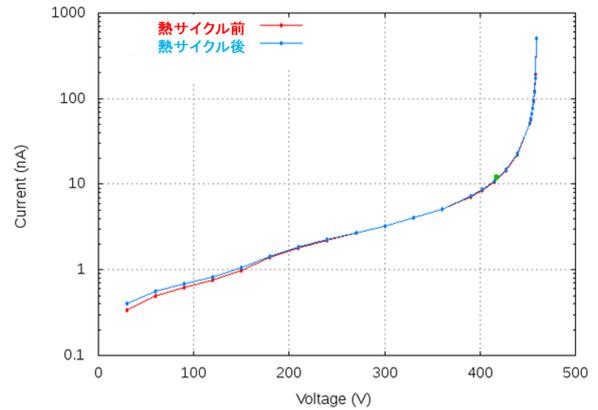


図 2.14: 熱サイクル前後での BGO ユニットの IV カーブ比較 (+25)

図 2.13 は、-20 での APD 単体時と BGO ユニット時での IV カーブの比較である。この結果を見ると、BGO ユニットの加工後でも、IV に異常は見られていないことが分かった。BGO ユニットの暗電流値が若干高い値になっているが、これは BGO ユニットに APD を取り付けたことによって、BGO のシンチレーション光が入射してしまっているためであり、APD の IV 異常ではないと考えられる。

図 2.14 は、熱サイクル前後での +25 の IV カーブの比較である。この結果を見ると、熱サイクル前後での IV カーブはよく一致しており、一度 -30 を経験したことによる APD の IV 異常は起きていないことが確認できた。

残りの 33 ユニットでも上記の IV カーブの測定、比較を行っており、全ユニットで問題がないことを確認した。全 BGO ユニットで問題なく IV カーブが取得できていることと、APD 単体と熱サイクル後の IV カーブを比較し問題がなかったことから、検証事項の (1) と (2) は問題がないと考えられる。

光量測定結果

全 34 ユニットの光量を測定し、予想値 (図 2.1) と合致するか、また熱サイクルによる光量の異常は起こっていないか検証した。まず、熱サイクルによる BGO ユニットの異常が発生していないか検証するために、熱サイクル前後での +25 のスペクトル比較を行った。図 2.15 に一例として、HA 結晶の熱サイクル前後での +25 のスペクトルを示す。

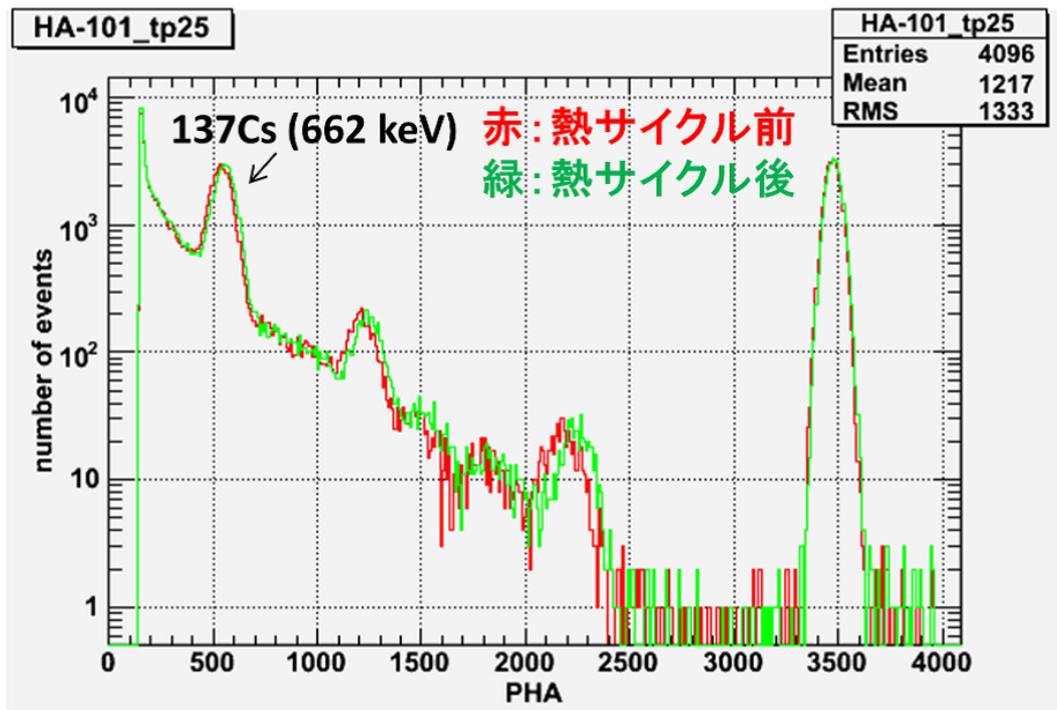


図 2.15: ^{137}Cs 照射時の HA 結晶 (HA-101) の熱サイクル前後のスペクトル (+25)

図 2.15 の結果を見ると、熱サイクル経験前と経験後でのスペクトルは、熱サイクル後のスペクトルが 3 % 程高く光量が出ていることが分かった。図 2.16 に測定を行った全 34 ユニットの熱サイクル前後での光量の比率を BGO ユニットの形状ごとに示す。

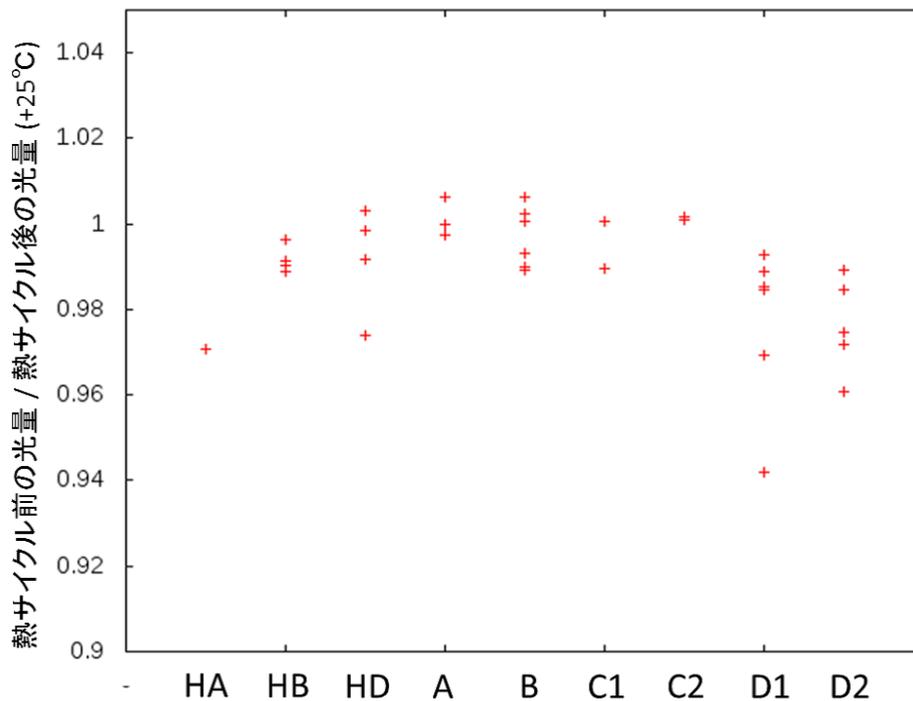


図 2.16: BGO ユニット形状ごとの熱サイクル前後の光量比

図 2.16 の結果より、ほとんどの BGO ユニットで HA 結晶と同様に、熱サイクル後に光量が上昇していることが分かった。これは熱サイクル前は温度安定時間が短く、BGO ユニットの温度が高くて光量が低くなっていたが、熱サイクル後は+25 に温度安定させてからの時間が十分に長い
ため光量が高くなっていると考えられる。しかし、図 2.16 に示すように、ほとんどの BGO ユニ
ットが 5 % 以内に変化が落ち着いているため、BGO ユニットの製造には問題がないと考えられる。

次に、低温で APD の剥離等が生じ、光量低下が見られていないか、-20 での BGO ユニットの
相対光量 (-20 での標準 BGO の光量で割った値) と +25 での相対光量 (+25 での標準 BGO
の光量で割った値) を比較することによって検証を行った。図 2.17 に例として HA-101 の -20 での
スペクトルを示す。

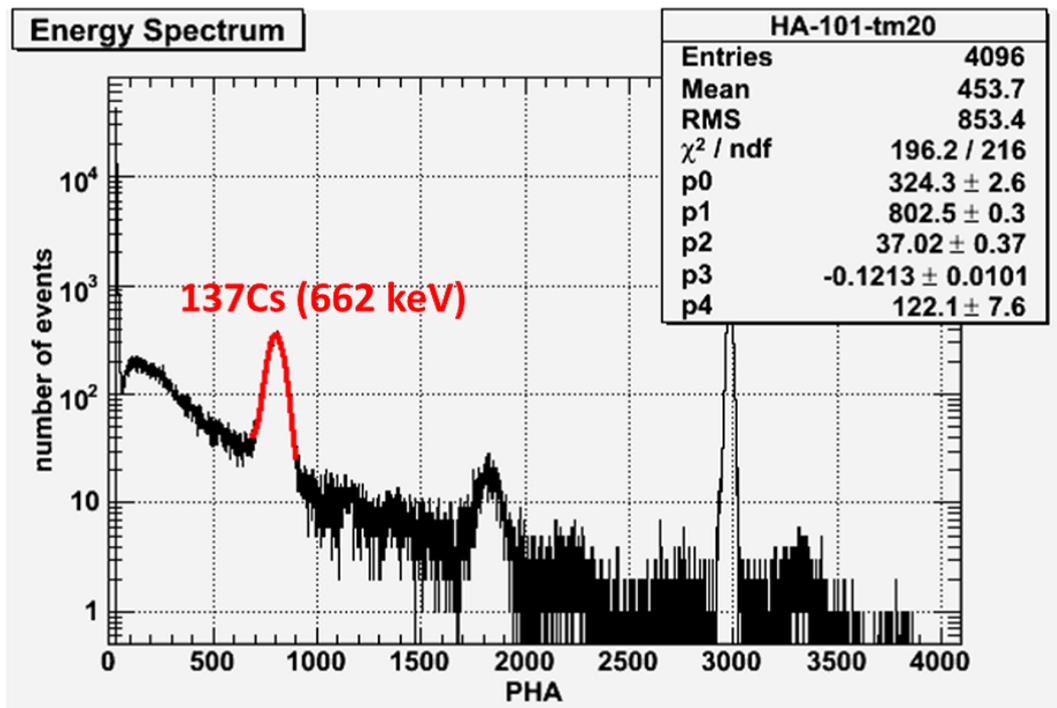


図 2.17: ^{137}Cs 照射時の HA 結晶 (HA-101) の低温 (-20) でのスペクトル

図 2.17 のように -20 でも問題なくスペクトルを取得することができた。図 2.18 に全ユニットの -20 と +25 での相対光量の比較を示す。

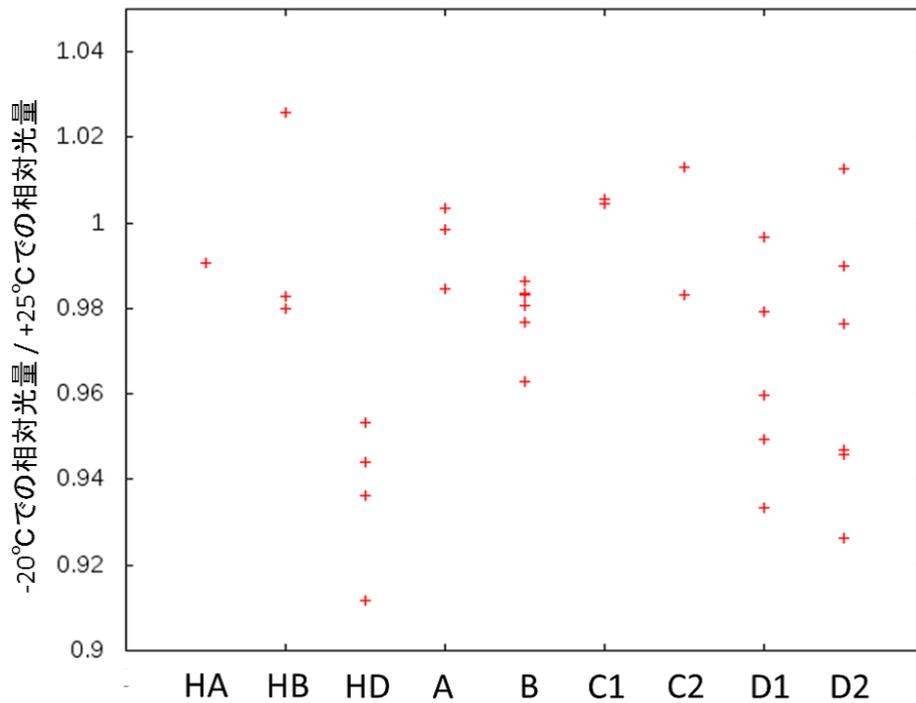


図 2.18: BGO ユニット形状ごとの低温時と常温時の相対光量の比

図 2.18 の結果より、低温時と常温時での相対光量比は約一割で一致していることが分かった。低温で剥離等が生じた場合は、3~4割の規格化光量の差が生じると考えられるため、今回の BGO ユニットは問題がないと考えられる。

次に、低温時での相対光量が表 2.1 に示した相対光量の推定値とどの程度一致しているか検証した。図 2.19 に全ユニットの推定値と測定値の比を示す。

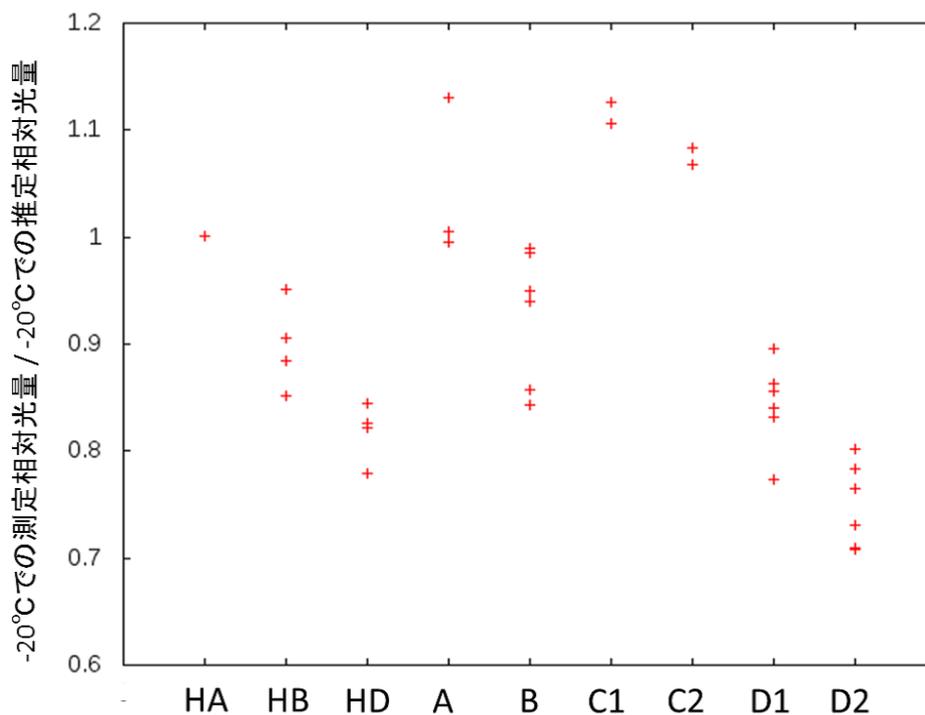


図 2.19: BGO ユニット形状ごとの相対光量の推定値と測定値の比

図 2.19 の結果より、全体的に予測値より 1～3 割程度光量が低いことが分かった。光量が予測値より低い BGO ユニットのいくつかは、再製作を行い光量の再測定を行ったが、光量比の変化は見られなかった。これは、予想値の見積もりに用いた試作型の搭載型 BGO の光量が高めに出ていたためではないかと考えられる。また、ユニットの形状ごとに光量が 1～2 割で一致していることと、次に記述する LD の検証結果より BGO ユニットの性能的に問題がないと考えられる。図 2.20 と 2.21 に HXI/SGD それぞれの -20℃ での測定光量値のヒストグラムを示す。

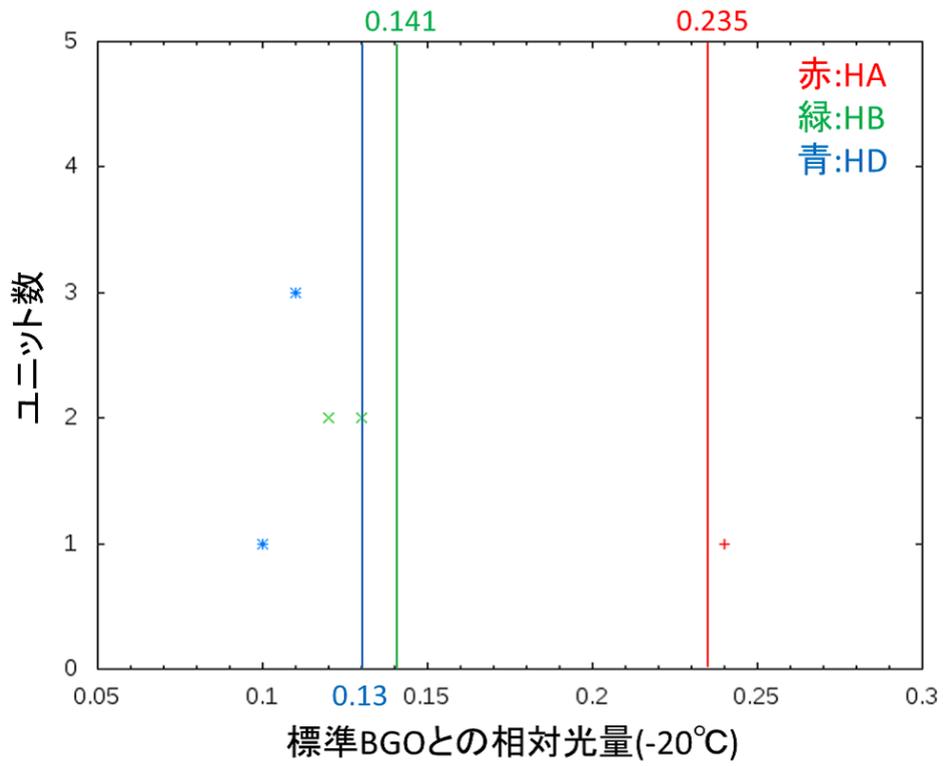


図 2.20: -20 °Cでの搭載型 HXI-BGO ユニットの測定光量値 (線が推定値)

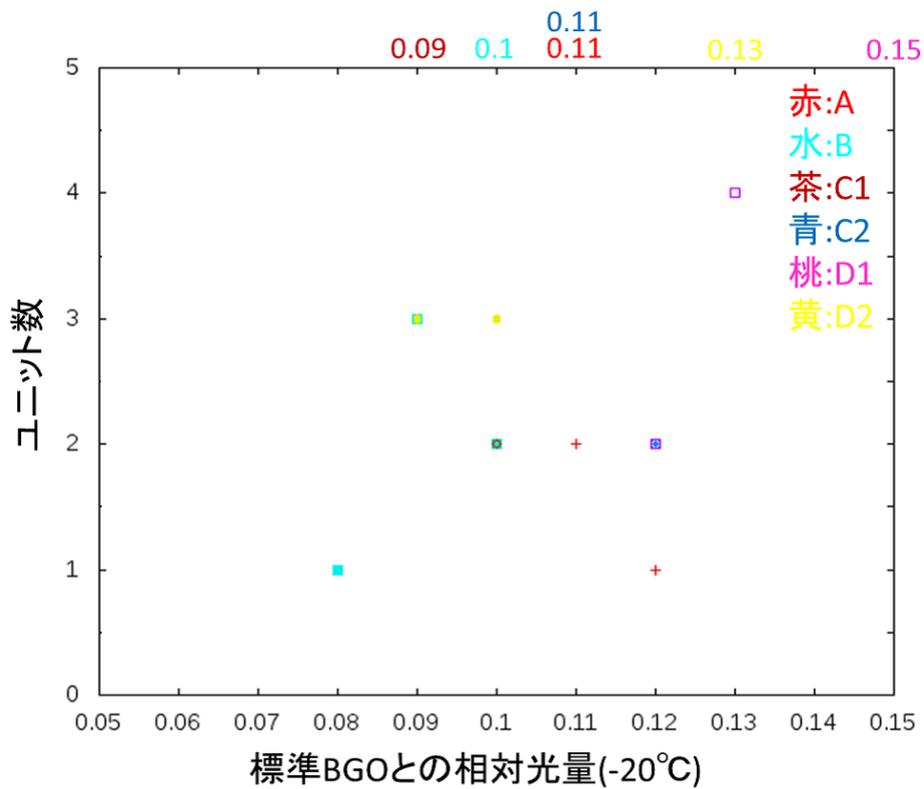


図 2.21: -20 での搭載型 SGD-BGO ユニットの測定光量値 (上部数値が推定値)

最後に、-20 での LD の検証を行った。LD の値はエネルギー換算して検証を行うが、HXI と SGD の BGO ユニットはスペクトル取得時に用いた線源が異なるため、それぞれ以下のように LD 値をエネルギー単位で求めた。

- HA, HB, HD ユニット (HXI)

$$LD[\text{keV}] = 3 \times \text{FWHM}[\text{ch}] \times \frac{662[\text{keV}]}{662\text{keVのピーク中心値}[\text{ch}]}$$

- A, B, C1, C2, D1, D2 ユニット (SGD)

$$LD[\text{keV}] = 3 \times \text{FWHM}[\text{ch}] \times \frac{1275[\text{keV}]}{1275\text{keVのピーク中心値}[\text{ch}]}$$

図 2.22 に全ユニット形状ごとの求められた LD 値を示す。

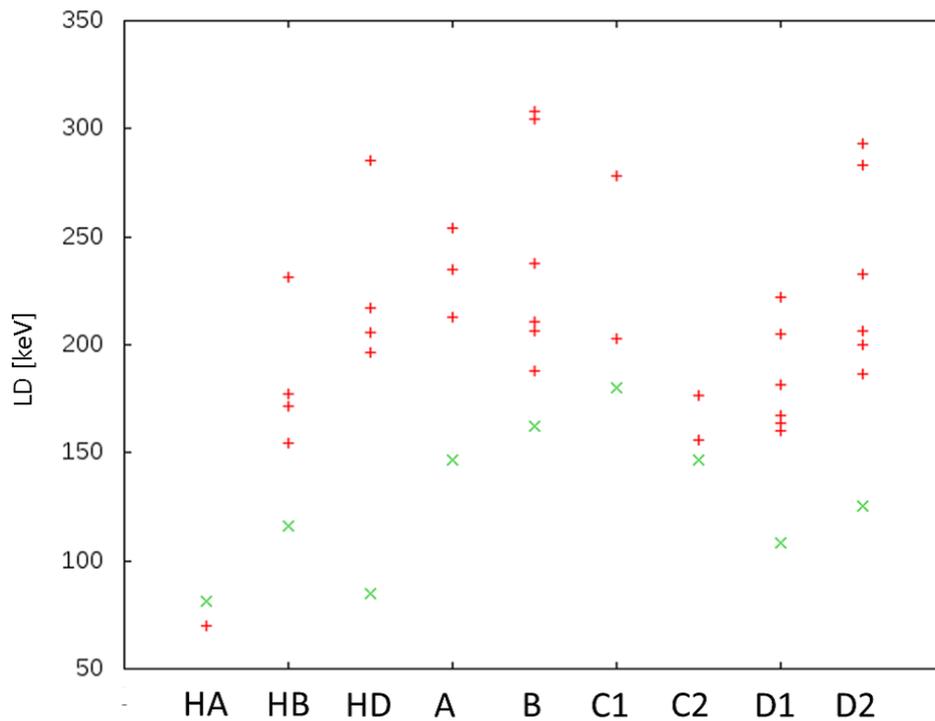


図 2.22: BGO ユニット形状ごとのテストパルスの FWHM から求めた LD 値 (緑が推定値)

図 2.22 の結果より、ほとんどの結晶で表 2.1 に示した推定値よりも LD 値が 1.5~2 倍悪いことが分かった。しかし、ここで求めた LD という値は ASTRO-H チームの中で LD という値を共通の規準として定量的に示すために、テストパルスの FWHM の 3 倍と定められたものであり、ノイズとの物理的な関連は乏しい。LD は一般的には、スペクトルの低エネルギー側に見られる雑音成分が十分に減り、検出器の信号が検出可能となる波高値に設定されるものであるが、実際のスペクトルでのノイズの駆け上がりを見てみると、上記の値よりも明らかに小さい LD 値となる。そこで、全ユニットでのスペクトルのノイズの駆け上がりのチャンネルを、LD の値とした場合の結果を求めた。図 2.23 にその結果を示す。

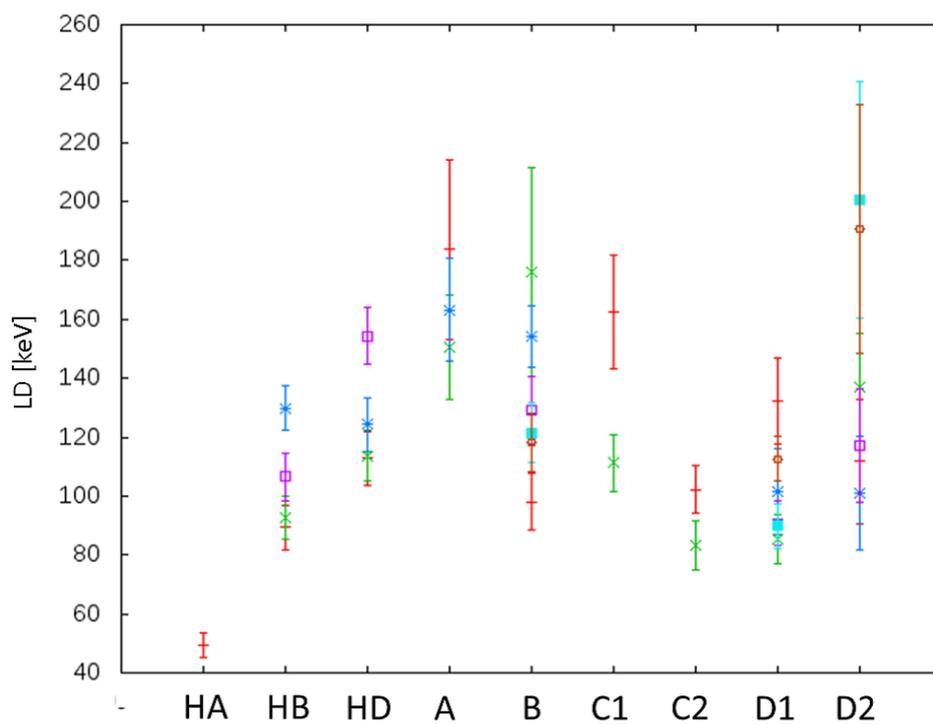


図 2.23: BGO ユニット形状ごとのノイズの駆け上がりから求めた LD 値

図 2.23 の結果より、概ねどの形状の BGO ユニットも LD が 150 keV 程度であることが分かった。よって、今回測定した 34 ユニットは搭載型 BGO ユニットとしての性能 (目標値 150 keV 程度) を満たしていると考えられる。

第3章 APMU デジタル部の機能検証

これまで記述してきたように、アクティブシールド部の信号が正しく出力され、正確な信号処理が行われることが、HXI/SGD の要求性能を達成するためには必要不可欠である。前章では BGO ユニットからの信号が正しく出力されているかの検証を行った。本章ではその BGO ユニットからの信号処理を行う、APMU の FPGA ロジックの機能検証について記述する。

3.1 APMU デジタル部の詳細

BGO アクティブシールドの信号は APMU のデジタル部に搭載されている FPGA で処理される。FPGA は Large Scale Integration (LSI) の一種であるが、工場で製造される段階から回路が決定する Application Specific Integrated Circuit (ASIC) とは異なり、回路の設計者が手元で作成した回路を書き込むことができる。FPGA では書き込むことをダウンロードと呼ぶが、ダウンロードに必要な機材は FPGA を搭載した基板の他に PC とダウンロードケーブルだけであり、簡単に実装することができる。

FPGA に書き込む回路情報の作成にはハードウェア記述言語 (Hardware Description Language; HDL) の改良版である VHDL が用いられている。VHDL の特徴はゲートレベルでの記述以上に高い記述を行うことができることであり、C 言語等のコンピュータ言語を扱うように、ハードウェアの回路を記述することができる。これにより要求に合わせた回路を設計しやすくなり、製作者以外にも動作内容が分かりやすくなるため、誤動作の対処や、回路変更が容易になっている。

実際に衛星搭載品となる APMU デジタル部に用いられている FPGA は、Actel 社の RTAX2000 という製品であるが、本研究で仕様検証を行った APMU 試作基板に搭載されている FPGA は、Xilinx 社の XC3S2000 という製品である。表 3.1 に APMU デジタル部の FPGA の機能を示す。表 3.1 にあるように、APMU デジタル部の FPGA は、反同時計数処理を行うための信号形成の他に、衛星本体との通信を行う MIO との通信や、アクティブシールド部の電源管理、状態管理等の機能が実装されている。

機能		詳細
ADC データ処理機能	Filter1 Filter2	AD 変換された波形データに対してデジタルフィルター処理を行う
	FastBGO 生成	Filter1 処理を行った後の波形を用いて FastBGO 信号を生成する
	Hitpat 生成	Filter2 処理を行った後の波形を用いて Hitpat 信号を生成する
	UD 生成	波形データを用いて UD 信号を生成する
	SUD 判定	波形データを用いて SUD 信号を生成する
	パルスハイト (PH) 値生成	Filter2 処理を行った後の波形から波高値をピークホールドし、ラッチシグナルを生成
トリガー選択機能		MIO に送る FastBGO, Hitpat 等のトリガー信号の選択、組み合わせを行う
モニターデータ処理機能	スケーラーデータ生成	各トリガー信号の計数を行う
	ヒストグラムデータ生成	PH Manager で生成された信号をラッチし、ヒストグラムを作成する
	RBM フラグ生成	UD 信号をカウントし、RBM フラグを生成する
外部データ出力機能		HK データやヒストグラムデータを編集し、DE からのコマンドに応じて出力
コマンド伝達機能		MIO からのコマンドをデコードし、各モジュールに渡す
HK データ生成機能	HV モニター	APD の高圧電源における過電流ステータスの監視、カレントリミッタ機能
	電源モニター	APD-CSA 部やアナログ処理部のカレントリミッタ機能
	温度モニター	温度をモニターデータとして記録する
GRB データ処理機能	GRB データ生成	GRB データのためのヒストグラムを編集し、リングバッファに書き込む
	GRB 判定	突発的なカウントレートの上昇を判定し、メモリをフリーズするフラグを生成する

表 3.1: APMU デジタル部搭載 FPGA の機能一覧

3.2 APMU デジタル部の要求事項と機能検証

APMU デジタル部に搭載される FPGA に書き込まれるロジックは、表 3.1 に示したように様々な機能がある。このセクションでは、それぞれの機能の要求事項と、APMU の試作基板を用いて行った各機能検証結果について述べる。

3.2.1 トリガー信号生成機能

APMU では FastBGO, Hitpat, UD, SUD という役割の異なった 4 種類のトリガー信号が生成されるため、各信号ごとの検証結果を記す。

3.2.1.1 FastBGO

仕様

FastBGO 信号はアクティブシールド部で信号を検出した場合に、主検出器の AD 変換処理を止めさせる信号である。HXI/SGD の主検出器部は slow, fast の 2 種類のアナログフィルター処理を行う。このうち fast フィルターが適用された信号は、主検出器の AD 変換を開始するトリガー信号として用いられる。主検出器は AD 変換開始までの間に FastBGO 信号をラッチすると AD 変換処理を行わない。よって、FastBGO は必然的に速いトリガー出力が要求されるため、BGO で放射線を検知してから主検出器側の FastBGO ラッチタイミング範囲である 3 ~ 11 μ s の間に出力されなければならない。FastBGO のトリガー判定方法は、速いトリガー出力を実現するために、前サンプルとの差分と FastBGO スレッシュホールドとの比較となっており、その差分がスレッシュホールドを越えた時に出力されるように設計されている。図 3.1 に一例として、SGD の主検出器であるコンプトンカメラでの ADC キャンセルまでの流れを示す。

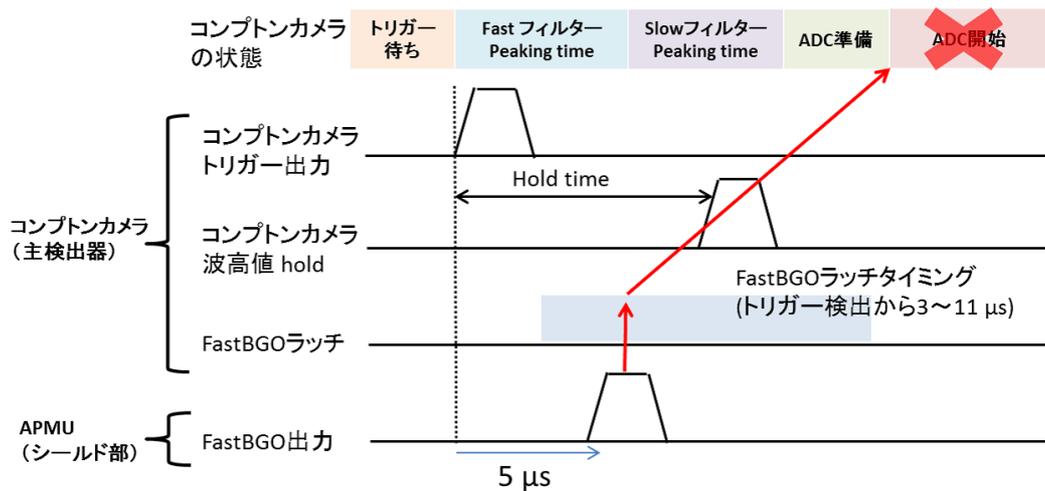


図 3.1: SGD での FastBGO によるコンプトンカメラ ADC キャンセルまでの流れ (タイミングチャート)

シミュレータを用いた検証

トリガー出力までの時間や、スレッシュホールド等の設定値が設計通りになっているか検証するために、シミュレータを用いた試験を行った。シミュレータとは、ADC の出力に相当するデジタルデータを模擬するたもので、任意のデータ列を生成する。それを APMU デジタル部に入力することで、APMU デジタル部への任意の波形入力を可能とする。更に、シミュレータは入力回数やレート制御も可能なため、APMU の FPGA 機能検証には非常に効果的である。図 3.2 にシミュレータの概要を示す。

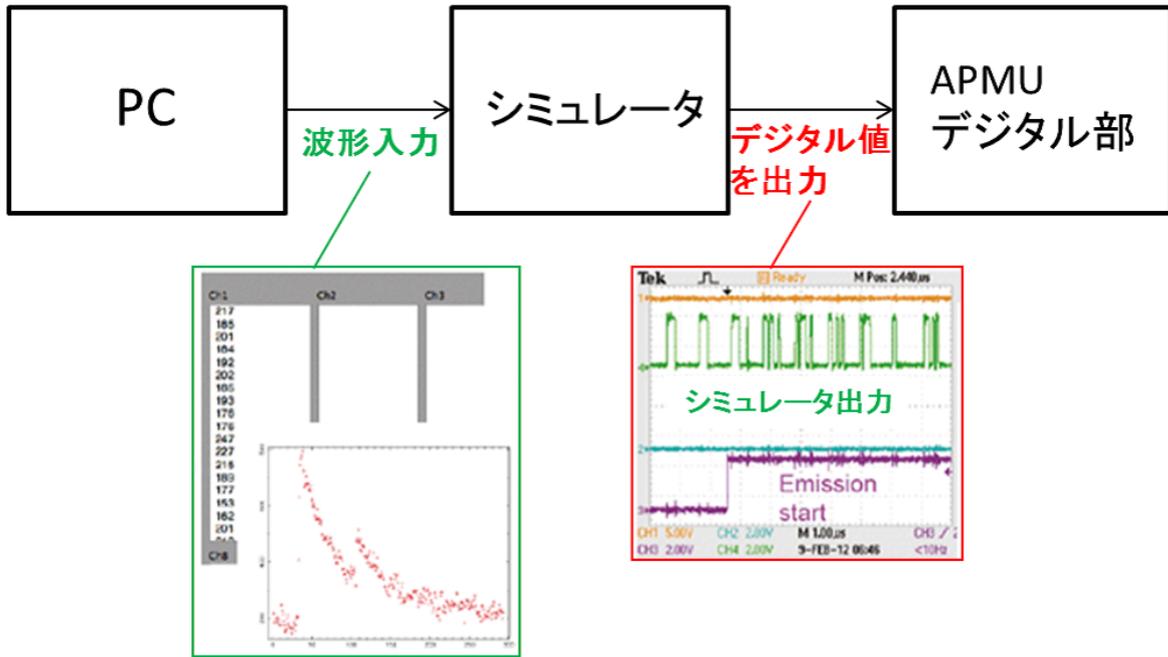


図 3.2: シミュレータの概要

シミュレータを用いたトリガー出力の検証では、オシロスコープでシミュレータ出力と FastBGO の出力をモニターした。シミュレータには (... , 240, 240, 240, 240, 1001, 240, 240, 240,...) という波形データを 100 Hz で入力した。ここで、1001 以外の 240 という値はオフセット値である。フィルターによる影響がないように Filter1 の係数は (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) とした。

シミュレータを用いた検証結果

図 3.3 がモニターしたオシロスコープの画像である。結果として 1001 というデジタル値の入力から約 $2.7 \mu s$ 後に FastBGO が出力されていることが分かった。ここで、主検出器側の FastBGO ラッチタイミングは主検出器部のトリガー検出から $3 \sim 11 \mu s$ まで $1 \mu s$ 刻みで設定でき、APMU 側の FastBGO 出力は $0.5 \mu s$ 刻みで $0.5 \sim 8 \mu s$ まで遅らせられるため、主検出器側で FastBGO を問題なくラッチできると言える。

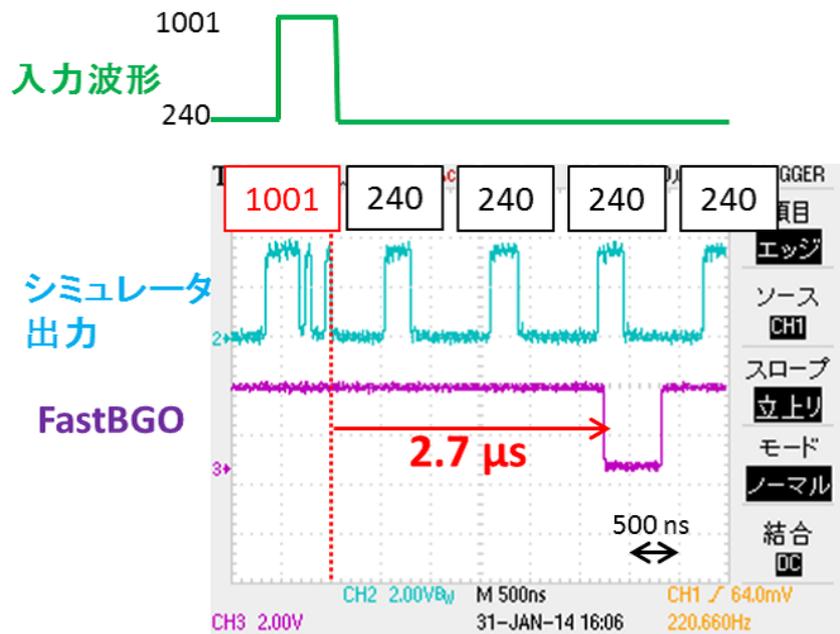


図 3.3: シミュレータを用いた FastBGO 出力タイミング

また、FastBGO スレッシュホールド値や、FastBGO Judge Depth(何サンプル前との差分を取るか)等の設定もシミュレータを用いて検証を行い、1 digit の精度で正しいことを確認した。表 3.2 に検証を行った FastBGO の機能一覧を示す。

機能名	詳細
FastBGO 遅延機能	FastBGO 信号を遅らせて出力させる
FastBGO Width 調整	FastBGO 信号の出力幅を設定する
FastBGO スレッシュホールド	FastBGO スレッシュホールド値を設定する
FastBGO Judge Depth	何サンプル前との差分をとるか設定する

表 3.2: FastBGO の機能一覧

トリガー出力の揺らぎ検証

実際にノイズが存在する場合に、FastBGO の出力タイミングが要求を満たしているかどうかを、APMU への信号入力から FastBGO の出力までの時間を計測することで検証を行った。検証方法は、N-TM 203 100MHz Clock generator でレート制御を行ったクロックを、BNC Model DB-2 (テストパルサー) の External trigger に入力し、Clock generator のクロックに合わせてテストパルスを生成できるようにし、そのテストパルス信号を CSA に入力し、FastBGO を出力させた。そして、External trigger に入力している信号を、ORTEC 566 TAC(Time to Analog Converter) の start に、FastBGO 信号を stop に入力した。TAC により start と stop に入力された信号の時

間差を電圧変換し、それを Pocket MCA(MCA8000A) で測定することにより、テストパルス信号入力から FastBGO 出力までの時間差を見積もった。APMU のコマンド送信には MIO を模擬した DIO ボードで行った。図 3.4 にこの試験の測定セットアップを示す。また、検証を簡単にするために、Filter1 の係数は (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)、つまり元波形をそのまま出力するフィルターを適用させた。

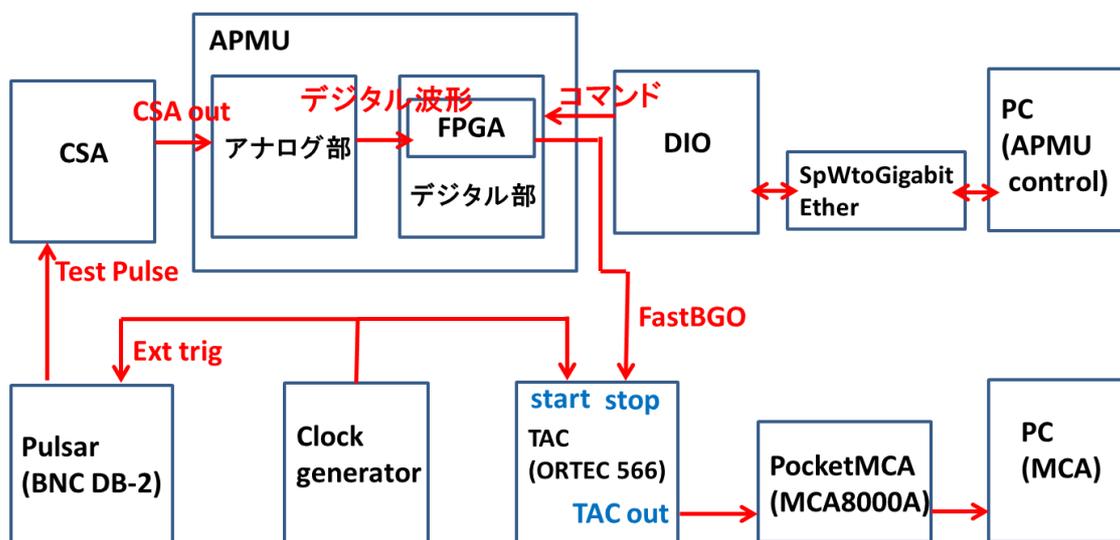


図 3.4: トリガー出力の揺らぎ検証試験のセットアップ

トリガー出力の揺らぎ検証結果

図 3.5 に、FastBGO スレッシュホールドが低い場合（左図）と高い場合（右図）の結果を示す。まず、スレッシュホールドをノイズぎりぎりの 1 fC(HXI/SGD の BGO ユニットで換算すると 100 keV 相当)、入力電荷も 1 fC 程度とした場合には、FastBGO 出力までの時間が FWHM で 0.5-1.0 μ s 程度揺らぐことが分かった。また、スレッシュホールドをノイズの影響がない 5 fC 程度に設定し、入力電荷を変化させていったところ、入力電荷（波高値）に依存して FastBGO の出力が 0.5 μ s 程度前後することが分かった。

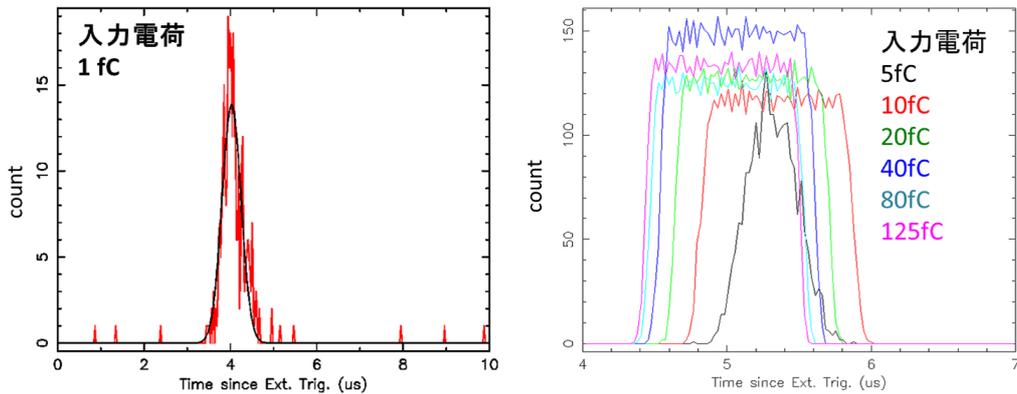


図 3.5: FastBGO 出力タイミングの測定結果（左図：FastBGO スレッシュホールド低、右図：スレッシュホールド高）

これは、トリガー出力のタイミングが Jitter や Walk といった要因で揺らいでいるためだと考えられる。図 3.6 に Jitter と Walk のそれぞれの概念図を示す。Jitter とはトリガー出力判定を行うスレッシュホールドがノイズぎりぎりに低い場合に、本来の信号にノイズがのってしまいトリガー出力タイミングがずれてしまう現象である。一方、Walk とは波高値の違いにより、スレッシュホールドを越えるタイミングが異なってしまう、出力タイミングが波高値によって揺らぐ現象である。図 3.5 の左図は、スレッシュホールドがノイズぎりぎりであるため、Jitter の影響で出力タイミングが揺らいでしまっていると考えられる。右図はスレッシュホールドが十分に高い値に設定されており、入力電荷（波高値）が大きくなるにつれトリガー出力が速くなっていることから、Walk の影響が見えていると考えられる。

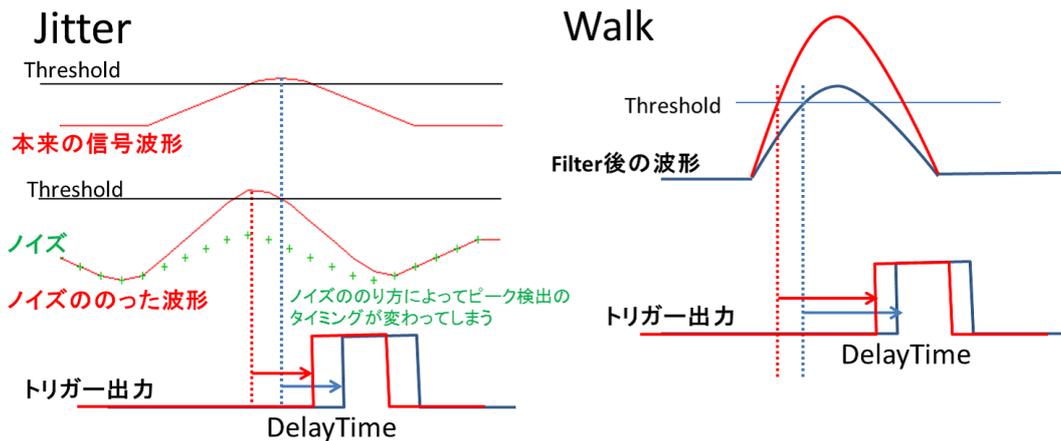


図 3.6: トリガー出力タイミングの Jitter と Walk の影響

結果として、FastBGO はスレッシュホールドを低く設定すると出力の揺らぎが FWHM で 0.5-1.0 μ s、スレッシュホールドを高く設定すると入力電荷に依存して 0.5 μ s 程度出力が前後することが分かった。ただし、FastBGO の Width は 0.5-8.0 μ s まで設定できるので、Width を 2.0 μ s に設定すれば、この Jitter と Walk の影響がカバーできるため、現在の設計で問題ないと考えられる。

3.2.1.2 Hitpat

仕様

Hitpat は入力される信号に Filter2(遅延器数 16、係数範囲-31 ~ +31 の複雑なデジタルフィルター) を適用させた信号が、Hitpat スレッシュホールドを超えた場合に出力し、主検出器のデータとともに、アクティブシールドで信号の検出があったことを記録する。そして、地上でのオフライン解析で、Hitpat 信号が出力されている時に主検出器で検出された信号を除去する(反同時計数処理)。Hitpat 出力は Filter2 後の波形が Hitpat スレッシュホールドを越えることで出力されると書いたが、正確にはスレッシュホールドを越えた後にピーク検出が行われ、そこで検出されたピーク + 任意の遅延時間で Hitpat が出力される。ピーク検出機能は、Filter2 後の波形が Hitpat スレッシュホールドを越えている間、あるサンプル $X[n]$ から 2 つ前までのサンプル $X[n-1]$, $X[n-2]$ の大きさを比較し、 $X[n-1] \geq X[n-2]$ かつ $X[n] < X[n-1]$ の条件を満たした時にピークとして検出するという機能である。図 3.7 にピーク検出ロジックの概要図を示す。

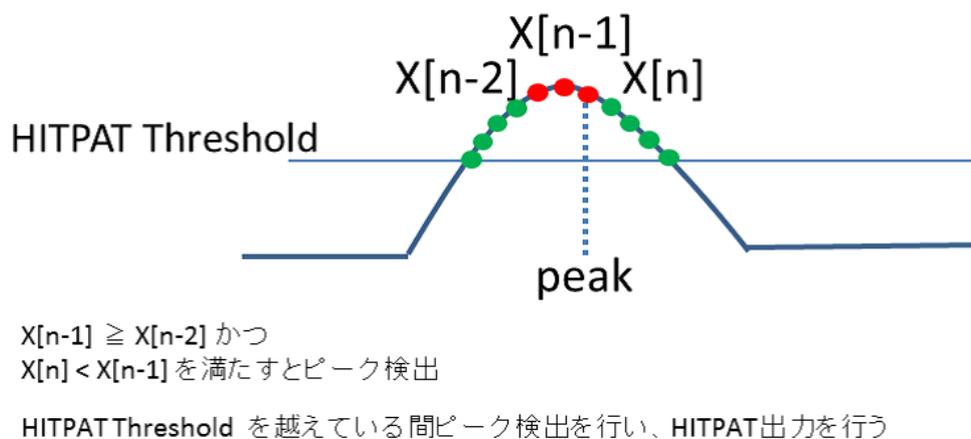


図 3.7: Hitpat のピーク検出ロジック

Hitpat の機能検証は広島大学の後藤修論 (2012) でも既に行われているが、その当時の Hitpat の機能では追加パルス出力機能と呼ばれるものが設計されていた。これはバックグラウンドイベントがほぼ同時に入射してきた時のための機能で、スレッシュホールドを越えている間に、ピークの個数をカウントし、追加パルスを出力するという機能だった。しかし、上空での Hitpat の出力レー

トはBGO1ユニットにつき約100 Hz程度であるのに対して、追加パルス判定されるには4 μ s以内に信号が重ならなければならないため、0.4 %程の確率しかないことが分かった。そのため、判定が煩雑にならないように、現在では追加パルス出力機能は削除されている。

アナログ波形とシミュレータを用いた検証

衛星搭載品とほぼ同型の試作品であるCSAにHitpatスレッシュホールドを越えるようなテストパルスを入力し、それをAPMUで読み出し、波形の立ち上がりから何 μ s程度でHitpatが出力されているか、オシロスコープでモニターした。この時、Filter2の係数は実際に衛星搭載時に用いられる予定である最新のフィルター係数を用いた(詳しくは広島大学、後藤修論参照)。また、シミュレータを用いてHitpatのスレッシュホールド等の各機能についても検証を行った。

アナログ波形とシミュレータを用いた検証結果

図3.3にHitpat出力をオシロスコープでモニターした画像を示す。結果としてテストパルスの立ち上がりから37 μ sでHitpatが出力されていることが分かった。これは、ピーク検出までの時間10~12 μ s程度とHitpatに元から設定してある遅延時間24 μ sを足し合わせた値とほぼ合致する。ここで、Hitpat幅は4 μ sであり、主検出器側のHitpatラッチタイミングは15~55 μ sまで5 μ s刻みで設定できるため、現在の設計で問題がないことを確認できた。

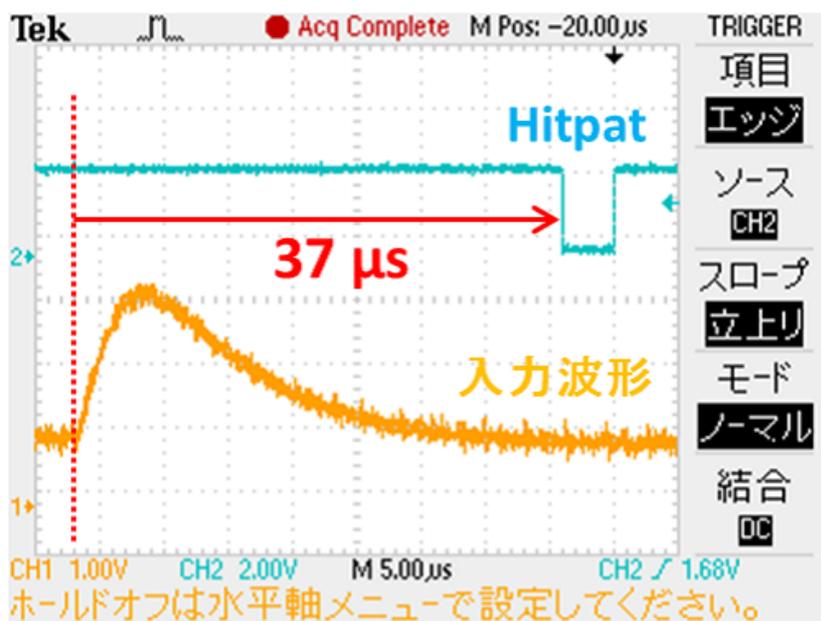


図 3.8: Hitpat 出力タイミング (黄色が APMU アナログ基板の ADC 入力直前の波形で、青が Hitpat)

また、シミュレータを用いて Hitpat のスレッシュヨルド値等の機能検証を行い問題がないことを確認した。表 3.3 に検証を行った Hitpat の機能を示す。

機能名	詳細
Hitpat 遅延機能	Hitpat 信号を遅らせて出力させる
Hitpat Width 調整	Hitpat 信号の出力幅を設定する
Hitpat スレッシュヨルド	Hitpat スレッシュヨルド値を設定する

表 3.3: Hitpat の機能一覧

トリガー出力の揺らぎ検証

FastBGO の検証と同様に TAC を用いてトリガー出力タイミングの揺らぎ検証を行った。セットアップは図 3.4 での TAC の stop への入力を Hitpat 信号に変更したものである。Filter2 の係数は実際に衛星搭載時に用いられる予定である最新のフィルター係数 (12, 20, 26, 30, 31, 30, 26, 20, 12, 4, -4, -11, -16, -16, -11, -4, 0) を用いた。

トリガー出力の揺らぎ検証結果

図 3.9 に Hitpat スレッシュヨルドが低い場合 (左図) と高い場合 (右図) の結果を示す。まず、スレッシュヨルドを 0.8 fC というノイズぎりぎりの値に設定し、入力波形は 1 fC 程度とした場合には、Hitpat 出力までの時間分布の FWHM が 3.3 μ s 程度であることが分かった。また、スレッシュヨルドをノイズの影響がない 5 fC 程度に設定し、入力電荷を変化させていったところ、入力電荷 (波高値) に依存しての Hitpat 出力の揺らぎは 1 μ s 以下であることが分かった。

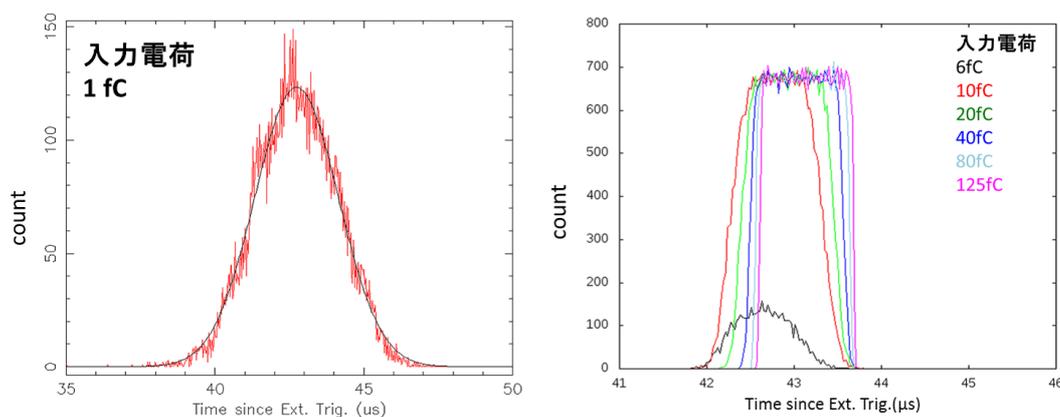


図 3.9: Hitpat 出力タイミングの測定結果 (左図: Hitpat スレッシュヨルド低、右図: スレッシュヨルド高)

Hitpat の場合にも、FastBGO の時と同様に低スレッシュホールドの場合は Jitter が、高スレッシュホールドの場合は Walk の影響が見えていると考えられる (図 3.6)。しかし、Walk の影響が見られるであろう高スレッシュホールドでの検証結果では、Filetr2 後の波形の長さが $20 \mu\text{s}$ 程度もあるのに対して、Hitpat 出力の揺らぎが $1 \mu\text{s}$ 以下に抑えられている。これは、FastBGO と異なり、信号のピークを検出しそこを起点に Hitpat 信号を出力しているためである。よって、Hitpat は主に Jitter の影響により出力が揺らいでいることが分かった。

結果として、Hitpat 出力はスレッシュホールドが高い場合にはピーク検出ロジックが上手く機能しており、出力の揺らぎが $1 \mu\text{s}$ 以下に抑えられているが、スレッシュホールドが低い場合には出力の揺らぎが FWHM で $3.3 \mu\text{s}$ 程度あることが分かった。よって、Jitter の影響をカバーするために Hitpat の Width の最適化を検討する必要性が出てきたので、次にその検討を行った。

Hitpat の Delay/Width の最適化検討

トリガー出力の揺らぎ検証において Hitpat は Jitter の影響により $3 \sim 4 \mu\text{s}$ 程度出力が揺らぐことが分かったため、Hitpat の遅延設定 (Delay) も含め、Width の最適化を行った。検証内容は、衛星搭載品と同型の試作品の CSA を用いて、衛星搭載品と同型の BGO 結晶に ^{137}Cs を照射して APMU で読み出した。ここでは、Hitpat 信号で用いる波形の波高値を APMU 内でヒストグラムにつめたスペクトルも用いて、実際の Hitpat 出力の効率が信号波形値とどう関係するのかを調べた。手順として、まず APMU に入力された BGO の波形データを取得し、その波形データに衛星でも使用される最新のフィルターを適用させ、ピークまでの時間を見積もった。ここで、テストパルスとは違って、線源の場合は本当のイベント時刻、つまり、ピーク検出までの時間の始点分からないので、それは以下のように決定した。フィルター前の波形をテンプレート波形のノームと時刻オフセットをパラメータとして、フィッティングを行って、時刻オフセットから、波形の立ち上がり時刻を求め、その時刻を始点としてピーク検出時間を見積もった。テンプレート波形は、ノイズを除去するために ^{137}Cs 662 keV の単発波形を 100 サンプルほど加算平均した。そして Hitpat 効率の定義を次のように定義した。時刻の始点からピーク検出時刻までの時間差をピーク検出時間 t_p とし、Hitpat 信号の Delay と幅を t_d 、 t_w とする時、 $t_p + t_d - t_w/2 < 35 < t_p + t_d + t_w/2$ となるイベントの割合を Hitpat 効率とした。

Hitpat の Delay/Width の最適化検討結果

図 3.10 に検証結果を示す。まず、左図はイベント発生からピーク検出までの時間と、パルスハイトを 2 次元マップで示したものであり、ピーク検出までの時間がほぼ $10 \mu\text{s}$ 程度となっていることが分かる。一方、右図は Hitpat width を変更したときのヒストグラムと Hitpat 効率であり、幅を変えることにより特に低エネルギー側で効率が変わってきていることが見て取れる。ここでヒットパット出力の Delay は最少設定値である $24 \mu\text{s}$ とした。

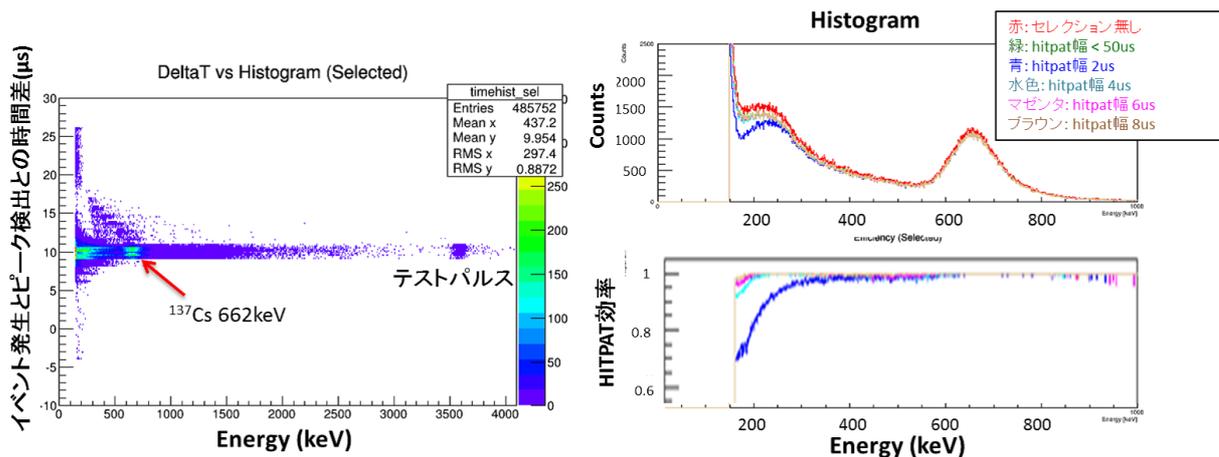


図 3.10: 左図:ピーク検出までの時間とヒストグラムの2次元マップ、右図: Hitpat 効率を考慮したヒストグラムとエネルギー vs Hitpat 効率

左図の結果より、ピーク検出までの時間が約 $10 \mu s$ のため、APMU での Hitpat の Delay 設定値 $24 \mu s$ を足し、典型的な Hitpat 出力が $34 \mu s$ になることが分かった。これは主検出器側で十分ラッチ可能な設定範囲内である。また、低エネルギー側でピーク検出時間がまばらになっているのは、Jitter の影響が見えているからであると考えられる。

右図の結果は、高エネルギー側はどの Hitpat 幅でもほぼ 100% と効率が出せているが、 300 keV あたりから顕著に効率の低下が見取れる。これも、やはり Jitter の影響であると考えられる。 150 keV (スレッシュホールド) 付近では Hitpat 幅 $2 \mu s$ で効率が約 60% まで落ちるが、 $4 \mu s$ にすると約 90% となり、それ以上幅を大きくしても効率はほとんど変わらなかった。

二つの結果より、Delay の最適値は主検出器でも十分ラッチ可能な値である Delay $24 \mu s$ 、幅の最適値は Hitpat 効率も十分確保できる Width $4 \mu s$ であると求めることができた。そして、 $2 \mu s$ 以下では性能が出ないことが分かったので、Hitpat 幅の設定値がこれまで $0.4 \sim 7 \mu s$ だったのを $1.4 \sim 14 \mu s$ ($0.4 \mu s$ 刻み) に変更することを提案し、反映させた。

3.2.1.3 UD/SUD

仕様

アクティブシールドでは荷電粒子等が BGO ユニットに入射することにより、約 5 MeV 以上の高いエネルギーの信号が入力されることがある。この時、アナログ回路はサチュレーション (飽和状態) となり、数十 μs の間アクティブシールドはシールド検出器としての動作が保証できない状態となる。そのため、大信号が入射してきたことを記録するために UD 信号というトリガー出力を作った。UD のトリガー出力判定にはデジタルフィルター処理は用いず、APMU デジタル部に入力されたデータをそのまま使用する。そして、ADC 値が UD のスレッシュホールド値を越えている

の間、APMU は UD 信号を出力し続け、ADC 値が UD スレッシュホールドを下回り、そこからある時間後に UD 出力がストップされる。この UD 信号の延長機能はスレッシュホールドを下回った直後ではまだ回路の動作が保証されていないために設計されたもので、コマンド設定できる。図 3.11 に UD 信号の出力タイミングの仕様を示す。

5 MeV に比べて非常に高いエネルギー 1 GeV (Fe イオン等) が入射されたときに、CSA すらもサチュレーションしてしまった場合に出力される信号として SUD 信号が設計されている。SUD 信号は、UD 信号の幅がある値 (SUD スレッシュホールド) を越えた時に出力される。SUD が出力されるほどの信号が入力された場合、UD の出力幅はかなり大きくなるためである。また、SUD は CSA もサチュレーションしてしまっているため、その間 CSA 信号はノイズもなく電圧値の揺らぎがほとんどない状態となる。そのため、SUD の出力は CSA のサチュレーションが収まり、次に CSA が復帰したときに見られるノイズなどの電圧値の揺らぎを感知してストップするような仕様になっている。具体的には、フィルターをかけない波形に対して一つ前の ADC 値との差分をとり、それがある値を越えた時に SUD をストップする。図 3.11 に SUD 信号の出力タイミングの仕様を示す。

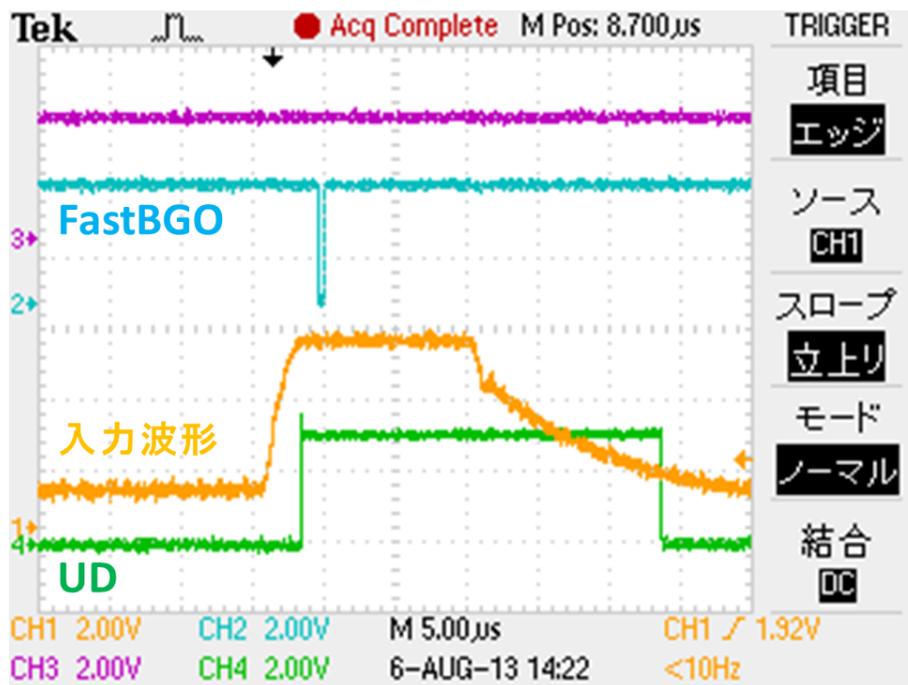


図 3.12: 大信号入力時の UD 出力

また、UD の延長機能の検証も行った。UD の延長機能は UD Wait min, UD Wait max, UD Wait Offset, UD Wait Coeff の 4 つの設定値により決められる。延長機能は UD の信号幅に相当する UD Width Count に対して、以下の様な場合分けで延長幅が変わる。

- (a) $UD\ Width\ Count \leq (UD\ Wait\ min - UD\ Wait\ Offset) / (UD\ Wait\ Coeff)$ の場合、UD 延長幅 = UD Wait min
- (b) $UD\ Width\ Count > (UD\ Wait\ max - UD\ Wait\ Offset) / (UD\ Wait\ Coeff)$ の場合、UD 延長幅 = UD Wait max
- (c) 上記の (a), (b) 以外の場合、UD 延長幅 = $(UD\ Wait\ Coeff) \times (UD\ Width\ Count) + (UD\ Wait\ Offset)$

UD Width Count は 60 MHz のクロックで UD スレッシュホールドを越えている間の時間を数えた内部カウント数である。図 3.13 に上記の場合分けを図示したものを記載する。

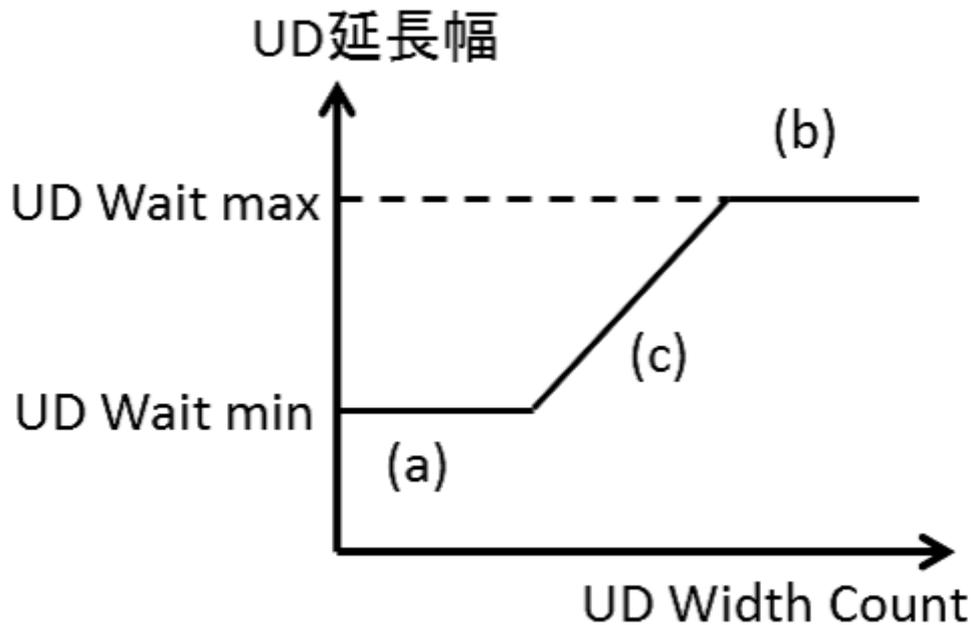


図 3.13: UD 延長幅の場合分け

ただし、実際に衛星搭載時には UD Wait min/max の設定値は同じにし、UD 延長幅は固定幅で運用することが考えられている。また、min/max の設定値を 0 に設定することにより、UD 延長幅をなしにすることも可能である。図 3.14 に延長幅なしの場合と、最大にした場合でのオシロスコープの画像を示す。図 3.14 より、延長幅最大で $50 \mu\text{s}$ 延長されているのが見て取れる。延長幅最大での設定値は $50.13 \mu\text{s}$ 延長されるので、設計が正しいことが確認できた。

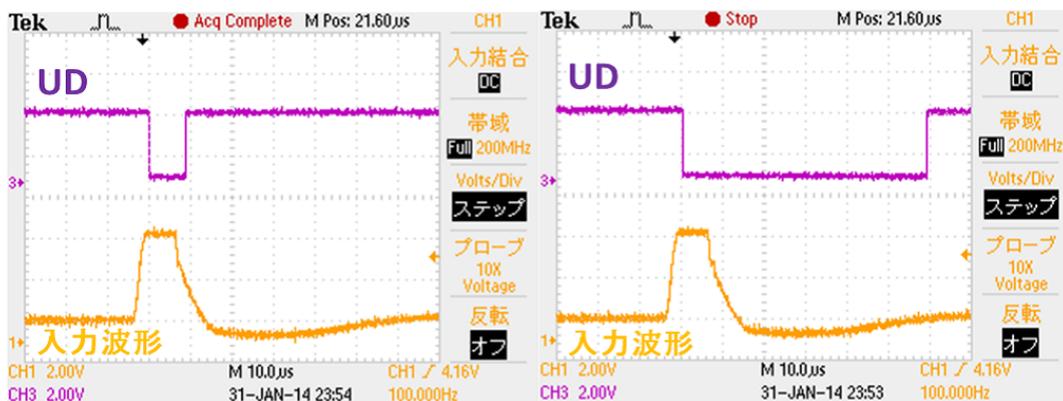


図 3.14: オシロスコープでの UD 出力延長幅確認 (左図: 延長幅なし、右図: 延長幅最大)

SUD 出力検証試験

UD と同様に SUD の出力をオシロスコープで確認を行った。ただし、SUD 信号が出力されるような大信号の入力をテストパルスでは再現できなかったため、LED と APD を用いて、大信号を模擬した信号の入力を行った。LED の光を APD で直接読み出すと、LED が明るすぎたため、APD の受光面の 9 割程を暗幕で遮光することで APD で発生する電荷量を調整した。そして LED に印加する電圧値を変えながらキャルブレーションを行い、Fe イオンが入射時と同等の電荷量が CSA に入力されるようにセットアップを行った。図 3.15 に Fe イオン相当の大信号を模擬し入力した場合の SUD のオシロスコープでの出力結果を示す。この結果で SUD が正しく出力され、またサチュレーション後の最初の信号で SUD 出力がストップしてしることが確認できた。

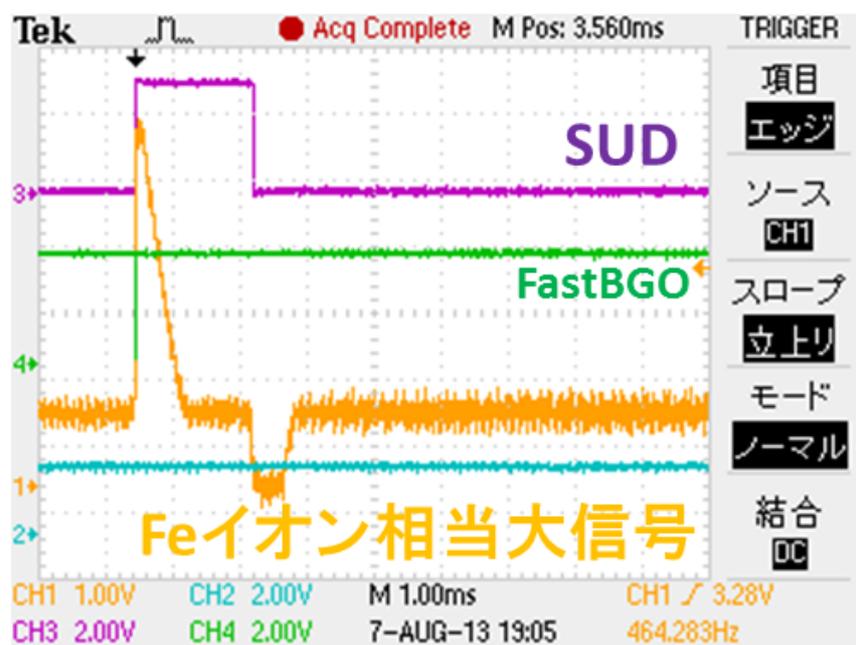


図 3.15: Fe イオン相当の信号入力時の SUD 出力。

3.2.2 ヒストグラムデータ生成機能

仕様

APMU のヒストグラム作成には内部信号の PH 値が使用されている。PH 値は、Filter2 を通した後の波形が PH スレッシュホールドを越えると、その波形で前サンプルよりも大きなデジタル値を PH 信号に上書き保存する。そして、波形が PH スレッシュホールドを越えてから設定した PH LATCH Delay Timing の後に PH LATCH が出力され、そのタイミングで PH 値がヒストグラム生成部に送られ保存される。PH 値の受け渡しが完了すると PH 値はリセットされる。ヒストグラムデータは、この時得られた PH 値を表 3.4 の圧縮方法に従ってヒストグラムカウンタに詰めていくことで

作成される。ただし、ノイズ周辺の 1-16 ch はカウントが多いので、飽和をさけるために 10 bit カウンタで数え、上位 8 bit をヒストグラムデータとして保存する。

PH 値	保存 ch	圧縮率
0 ~ 23		記録しない
24 ~ 159	1 ~ 68	2
160 ~ 255	69 ~ 80	8
256 ~ 767	81 ~ 112	16
768 ~ 1023	113 ~ 116	64
1024 ~ 2047	117 ~ 124	128
2048 ~ 4095	125 ~ 128	512

表 3.4: ヒストグラムカウンタの圧縮方法

ヒストグラム生成機能検証

ヒストグラムが正しく生成されているかシミュレータを用いて検証を行った。Filter2 の計数は (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) とし、入力波形がそのままヒストグラムの値となるように設定した。そして、シミュレータで 1000 というデジタル値と 2000 というデジタル値をそれぞれ入力した。図 3.16 の左に 1000 入力時、右に 2000 入力時のヒストグラムを示す。

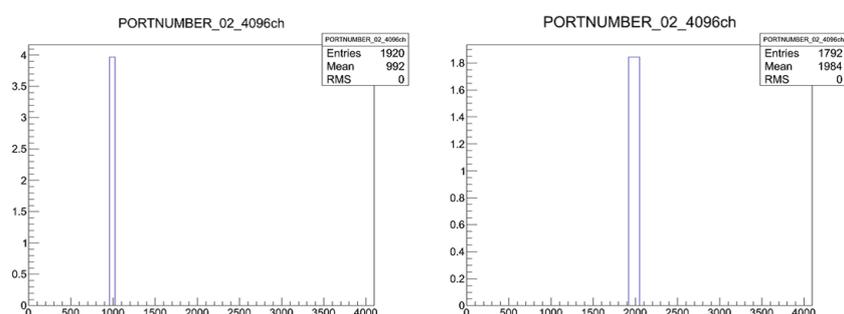


図 3.16: 左図がシミュレータで 1023 を、右図が 1024 を入力時のヒストグラム

図 3.16 のように、1000、2000 入力時にそれぞれ該当の ch に設計通りヒストグラムが保存されていることを確認できた。実際は、全 128 ch でヒストグラムは生成されるが、図 3.16 は検証を容易にするために、全 4096 ch でヒストグラム表示させている。1000ch と 2000 ch でヒストグラムの幅が違うのはその全 128 ch 時の圧縮率の違いによるものである。

3.2.3 GRB データ生成機能

仕様

BGO アクティブシールドではガンマ線バースト (GRB) などの突発現象が起きた場合に、通常時に記録しているヒストグラムとは別に、詳細な時間幅でヒストグラムを取得するための、GRB モードという機能を持つ。突発現象が行った場合、急激なカウントレート上昇が考えられるため、GRB 判定にはカウントレートをを用いた判定が行われている。GRB モードを開始するトリガー判定には、6 つの BGO 信号が用いられる。そして、設定した範囲内のエネルギーを持つ信号の 8 s 積算したものを B_{8s} 、1 s 積算したものを S_{1s} 、0.25 s 積算したものを $S_{0.25s}$ としたとき以下の判定式により GRB モードを開始する。GRB モードはこの 1 s 積算カウンタ判定か 0.25 s 積算カウンタ判定のどちらかを選択する。

- 1 s 積算カウンタ判定

$$S_{1s} - \frac{B_{8s}}{8} > k \sqrt{\frac{B_{8s}}{8}}$$

- 0.25 s 積算カウンタ判定

$$S_{0.25s} - \frac{B_{8s}}{8} \times 0.25 > k \sqrt{\frac{B_{8s}}{8} \times 0.25}$$

上記の式において、 k は 5, 8, 10, 16 のいずれかに設定できる。8 s 積算カウンタ及びその平方根は 8 s ごとに値がラッチされ、その値を判定に用いる。判定は 1 s 及び 0.25 s 積算カウンタの値が更新される毎に行う。なお、GRB が起きた場合のガンマ線カウントレートは 1 photon/s/cm² 程度 (多いときは 100 photon/s/cm²) まで上昇し、これは SGD の BGO アクティブシールドの有効面積 200 cm² に換算すると 200 Hz (多いときは 20 kHz) に相当する。

GRB データ自体は、普段は Static Random Access Memory (SRAM) に 16 ms おきに書き込まれており、記録領域が 336 ブロックのため $16 \text{ ms} \times 336 = 5.376 \text{ s}$ 毎に上書きされている。しかし、GRB 判定されるとそこから 250 ブロック ($16 \text{ ms} \times 250 = 4 \text{ s}$) データが書き込まれた後に、それ以上の SRAM への書き込みを止める (Freeze する)。この Freeze することにより、GRB 発生前の情報も記録でき、バックグラウンドに用いることができる。そして、DE がある周期で GRB 判定フラグを監視しており、その時 GRB 判定されていると SRAM の読み出しが行われ、その後 Freeze が解除されて再び SRAM へのデータ書き込みが開始される。

GRB 判定機能仕様検証試験

GRB 判定機能に用いられている判定式の k の値を変更しながら、レート制御されたテストパルスアナログ部に入力し、どのカウントレートで GRB 判定されたか検証を行った。具体的には初めに、1000 Hz でテストパルスを入力し、あるタイミングでそのレートを上昇させ、GRB 判定さ

れたレートと判定式から求められるレートが一致するか検証を行った。表 3.5 に予想される判定レート値と、実測値を示す。表 3.5 の結果より、概ね予想値と実測値が一致していることを確認した。予想値と判定値の若干の差異は初めに入力している 1000 Hz の揺らぎや、レート制御の精度から十分な誤差範囲以内だと考えられるため、GRB 判定機能は問題がないと考えられる。

スレッシュヨルド設定値	判定予想値 [Hz]	判定実測値 [Hz]
5σ	1158	1170
8σ	1253	1260
10σ	1316	1330
16σ	1506	1520

表 3.5: カウントレートの上昇に伴う GRB 判定機能検証結果

3.2.4 Radiation Belt Monitor(RBM) 機能

仕様

ASTRO-H 衛星が飛ぶ衛星軌道上では、南大西洋上にある地磁気異常帯 (South Atlantic Anomaly; SAA) と呼ばれる地域が含まれる。この地域を通過する時は、高エネルギー陽子などのバックグラウンドレートが通常空間と比べて非常に多くなる。そのため、大信号が高カウントレートで入射してきたことを検知し記録するための機能が APMU には設けられている。SAA では、高エネルギー陽子などの入射レートが上昇するため、RBM 機能では UD 信号の内部カウント数である UD cnt の 8 s 以内での積算カウント数が判定に用いられる。ここで、UD cnt とは 60 MHz のクロックで UD スレッシュヨルドを越えている間の時間を数えた内部カウント数である。

RBM 判定機能検証試験

RBM 判定機能に用いられるスレッシュヨルドを変更しながら、UD 信号が出力されるような大きな信号をテストパルスでアナログ部に入力し、どのカウントレートで GRB 判定されたか検証を行った。具体的には、UD cnt が 1s 間に 8 counts するような信号を入力し、その信号の入力レートを変えて、予想値と実測値が合うか検証を行った。例えば RBM スレッシュヨルドが 3000 だとすると、RBM 機能は UD cnt の 8 s 積算カウント数で判定されるため、 $3000/8 = 375\text{counts/s}$ UD cnt がされるように UD 信号が出力されなければならない。そのため、入力信号は 1 s 間に 8 counts

UD cnt であるため、入力信号のレートが $375/8 \approx 47$ Hz 程度で RBM 機能は判定されるはずである。表 3.6 に予想される判定レート値と、実測値を示す。表 3.6 の結果より、概ね予想値と実測値が一致していることを確認した。予想値と判定値の若干の差異は入力している信号の UD 出力数の揺らぎや、レート制御の精度から十分な誤差範囲以内だと考えられるため、RBM 判定機能は問題がないと考えられる。

スレッシュヨルド設定値	判定予想値 [Hz]	判定実測値 [Hz]
3k	47	45
5k	78	75
7k	109	105
10k	156	150
30k	469	450
50k	781	750
70k	938	990
100k	1563	1500

表 3.6: RBM 判定機能検証結果

第4章 試作型HXIを用いたアクティブシールド部機能検証

2章ではBGOアクティブシールドに用いられるBGOユニット単体での性能評価を、3章ではそのアクティブシールドの信号処理やマネージメントを行うAPMUのFPGAロジックの機能検証を行ってきた。本章では、今までそれぞれ単体で行ってきた検証事項を実際に、衛星搭載検出器の試作機として一つに組み上げた状態で、要求性能を満たしているか検証を行った。

4.1 試験概要

図4.1にASTRO-H衛星の製作スケジュールの中で本論文が関わっている部分をピックアップしたものを示す。図4.1に示した、青字と赤字の部分は本論文で述べる機能検証項目である。特に青文字の搭載型(Flight Model;FM)BGO試験は2章、FPGAのロジック検証は3章にそれぞれ詳細を記述した。本章では赤字で示したHXIのFullEM試験について記述する。

ASTRO-H衛星搭載検出器であるHXIの試作機(Engineering Model;EM)が初めて、主検出器とシールド検出器が搭載に近い状態で全て統合された形で製造された。HXIのFullEM試験とは、その製造されたEM-HXIを搭載型と同じまたはそれに近い回路で読み出し、測定を行うことによりフライト設計の最終検証を行うことが目的である。APMUはこのFullEM試験で回路パラメータやFPGAロジックの問題の洗い出しを完全に終わらせ、設計を確定させなければならない。また、今回が主検出器とシールド部が初めて合わさった試験であるため、今まで行ったことがない9つのBGO信号を含む全11チャンネルもの信号の同時読み出しを行い、問題がないことを検証する必要もある。そして、実際に主検出器とシールド部を同時に動作させ、3章で行った反同時計数処理信号(Hitpat)の最適化パラメータで実際に反同時計数処理が正しく行えるかも初めて検証を行う。HXI-FullEMはこのFullEM試験が終了すると衛星全てを合わせた衛星動作試験に合流し、そこで衛星として問題がないかの検証も行われる予定である。このように、このHXIのFullEM試験は設計の確定と、検出器単体での動作検証、そして終了後にはこの試験で確定したロジックを用いて衛星試験に用いられるという重要な位置づけを持った試験となっている。

YEAR	2013										2014		
Month	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2		
衛星全体					衛星全体試験								
HXI						EM組立	FullEM試験					↑	
BGO				EMBGO組立、試験			FMBGO組立、試験						
APMU	FPGAロジック検証						FPGAロジック確定 FM基板製造			基板試験			

図 4.1: ASTRO-H 衛星における HXI-BGO シールド周りのスケジュール

4.2 試験セットアップ

HXI-Full-EM を用いた試験のセットアップを図 4.2 に示す。セットアップは可能な限り搭載系と近づけるために、搭載型と同じまたは近い回路の構成とした。カメラ側のマネージメントを行う回路は Camera Power Management Unit(CPMU) と呼ばれ、今回の試験でも用いられている。MIO1 により APMU、CPMU の制御と、HK データ処理が行われ、MIO2 によりカメラ側のデータ読み出しとイベントデータ作成が行われている。Digital Electro(DE) では PC からのコマンドを MIO へ渡したり、MIO から送られてきたデータを圧縮し、PC に送る役割を持つ。各電源供給には Power Supply Unit(PSU) によって行われる。今回の試験では全て Generic Spacecraft Test and Operations Software(GSTOS) と呼ばれる汎用衛星試験運用ソフトウェアによるコマンド送受信が PC で行われており、検出器への HV 印加からデータ読み出しまで、実際に衛星軌道上での運用、管理を模擬した試験セットアップとなっている。図 4.3 に実際のセットアップの写真を示す。

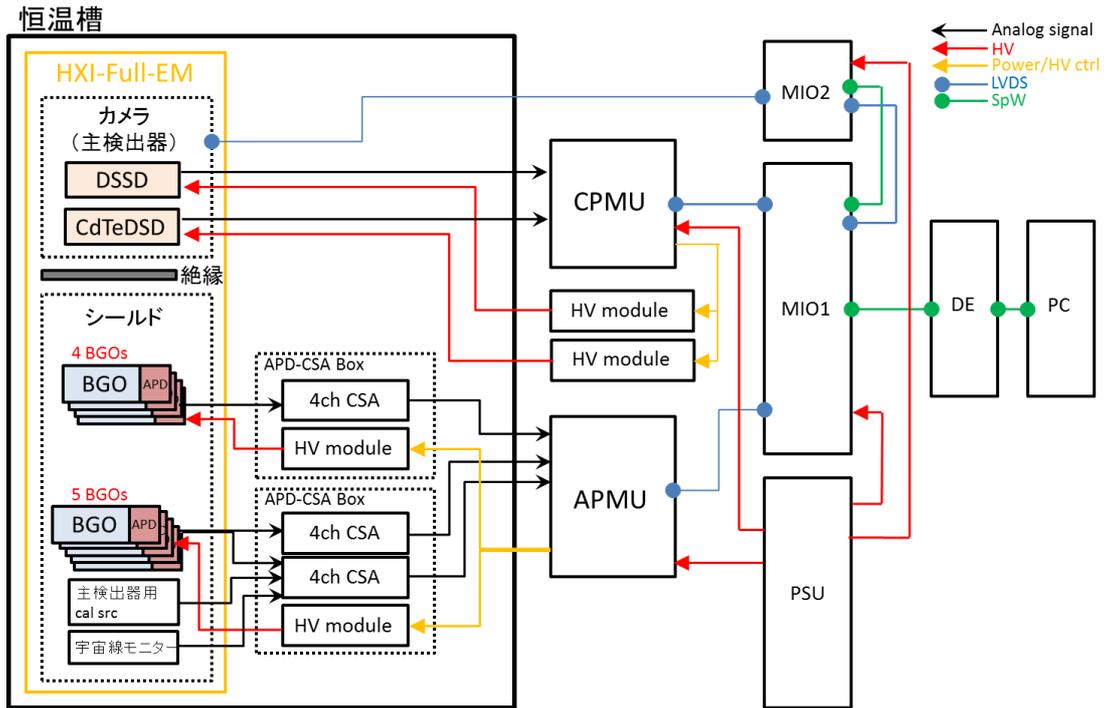


図 4.2: HXI-Full-EM を用いた試験のセットアップ

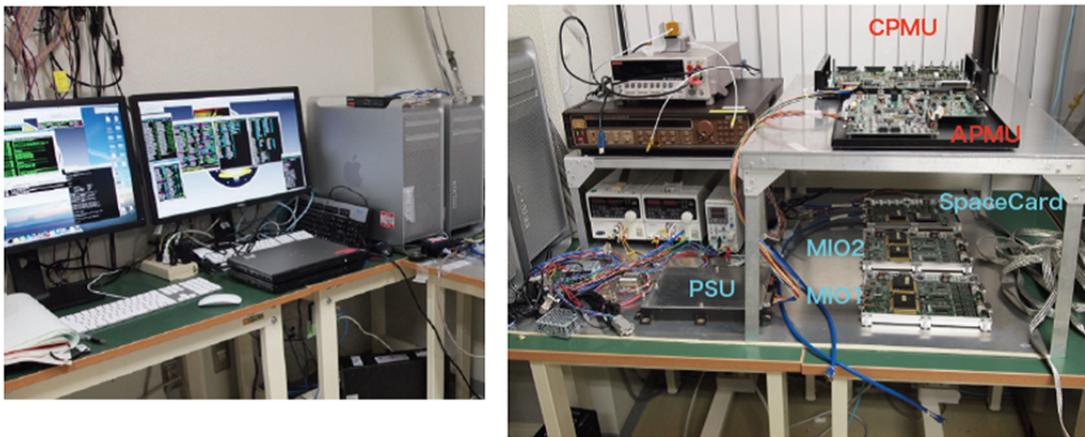


図 4.3: HXI-Full-EM のセットアップ写真 (左図: コマンド送受信を行う PC、右図: HXI 読み出し回路)

4.2.1 BGO ユニットの性能検証

実際に HXI の FullEM 中の BGO ユニットに HV 値を印加し、APMU で信号処理して要求性能 LD 150 keV 程度を-20 で達成しているか検証を行った。ここで BGO ユニットに印加する HV 値だが、HXI/SGD では一つの APD-CSA Box で処理される 5~8 個の BGO-APD への HV 値が同じになる。そのため、軌道上で検出器の温度が変わることも考慮し、低温になってもブレイクダウンする APD がないように APD-CSA Box ごとに APD はゲインがそろったものが選定されている。今回の検証では実際の衛星軌道上で用いられる予定の APD ゲイン値 70 となる HV 値が一番小さい BGO ユニットの HV 値を印加することとした。よって、HV APD1(ボトム、サイド部)には 344.6 V、HV APD2(トップ部)には 349.6 V 印加した。表 4.4 にサイド、ボトム部に、表 4.5 にトップ部にその HV 値を印加したときの各 BGO ユニットのゲイン値を示す。

HV APD1(印加 HV 値 344.6 V)		
BGO		Gain(-20)
bottom	HA	70
side	HB1	62.4
	HB2	66.6
	HB3	61.7
	HB4	60.5
-	Cal src	35.6
	宇宙線モニター	60.8

HV APD2(印加 HV 値 349.6 V)		
BGO		Gain(-20)
top	HD1	68.9
	HD2	70
	HD3	32.8
	HD4	69.7

図 4.5: HV APD2(トップ部)のゲイン値

図 4.4: HV APD1(サイド、ボトム部)のゲイン値

ここで、今回は HD3 だけ本来使用されるはずだった APD ではなく、代理品が用いられているためゲイン値が大きすぎています。実際のフライト品ではこのようなことはなく、ゲインがそろったものが取り付けられる。

ヒストグラム検証

実際に表 4.4、4.5 の HV 値をそれぞれ印加してスペクトルを取得した。図 4.6 に ^{137}Cs (662 keV) 照射時、 ^{22}Na (511 keV, 1275 keV) 照射時、バックグラウンドを重ねたスペクトルを、図 4.7 にそのスペクトルの低エネルギー側を拡大したものを示す。結果、図 4.7 のように ^{137}Cs の 662 keV のピークと、 ^{22}Na の 511 keV, 1275 keV のピークがどの BGO ユニットでもはっきりと確認することができた。

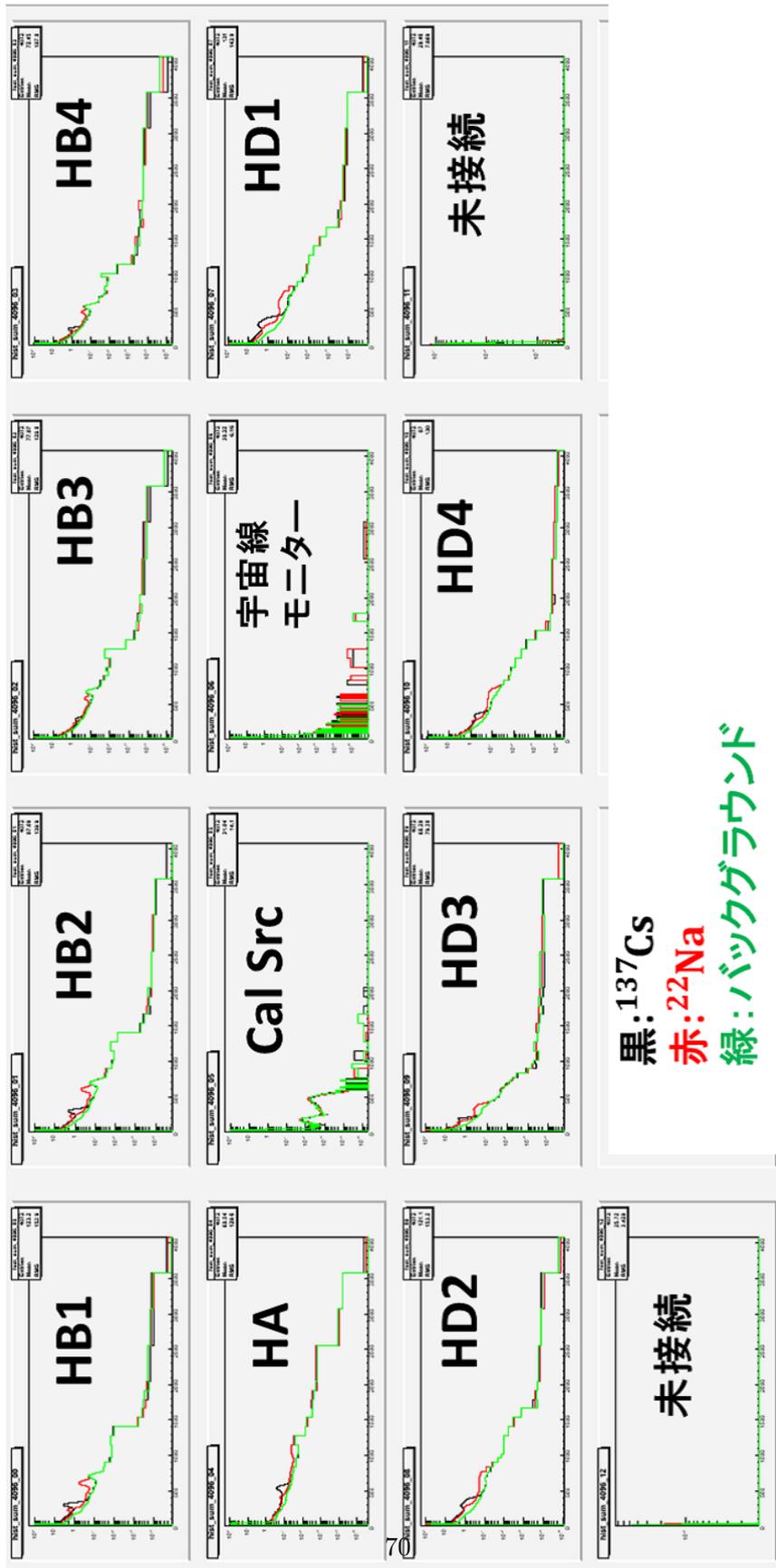


図 4.6: ^{137}Cs 照射時、 ^{22}Na 照射時、バックグラウンドを重ねたスペクトル

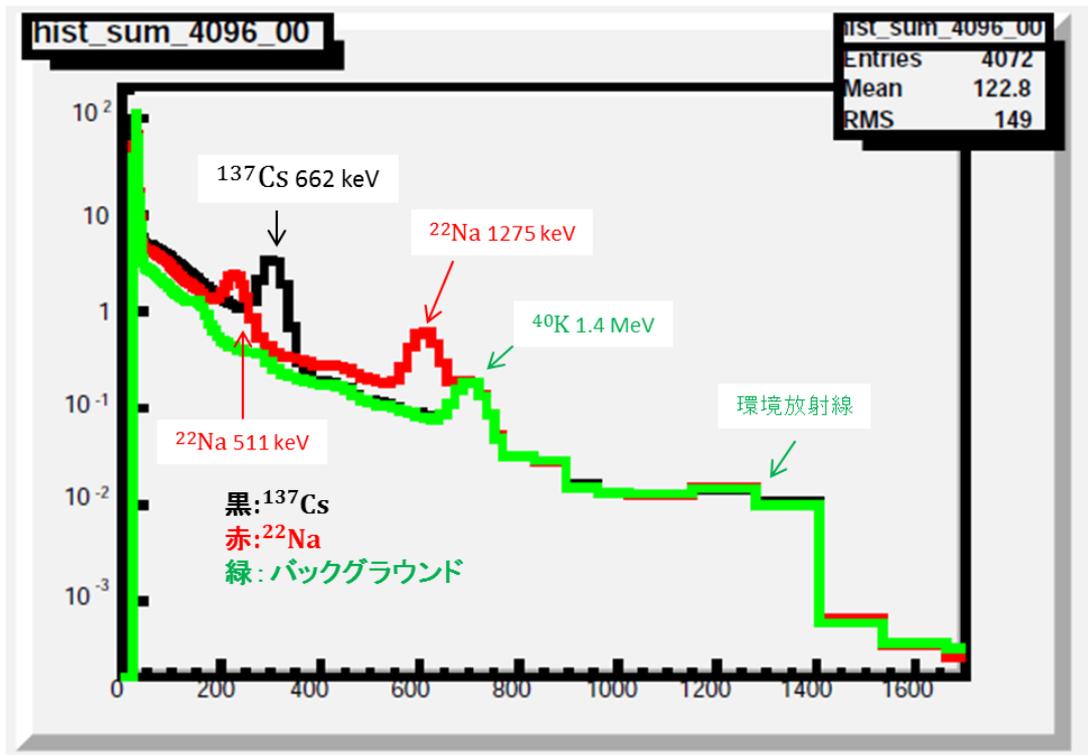


図 4.7: HB1 の低エネルギー側を拡大した ^{137}Cs 照射時、 ^{22}Na 照射時、バックグラウンドを重ねたスペクトル

次に、BGO ユニットの LD の値を知るために、様々な線源を用いてエネルギー較正を行った。線源は ^{137}Cs (662 keV)、 ^{22}Na (511 keV, 1275 keV)、 ^{57}Co (122 keV) を用いて、4 点で較正を行った。図 4.8 に、 ^{57}Co (122 keV) とバックグラウンドを重ねたヒストグラムの低エネルギー側を拡大したスペクトルを示す。 ^{57}Co はエネルギーが低く、BGO を通過することができないため、一か所から全ユニットを照射することが難しかった。そのため、照射位置を変えて計 3 回スペクトル取得を行った。図 4.9 に照射時に置いた ^{57}Co の位置を示す。pos1 は bottom に位置する HA ユニットに照射するために、恒温槽内の HXI の開口部に設置したバッフルプレートから、pos2, 3 は恒温槽の外から照射した。

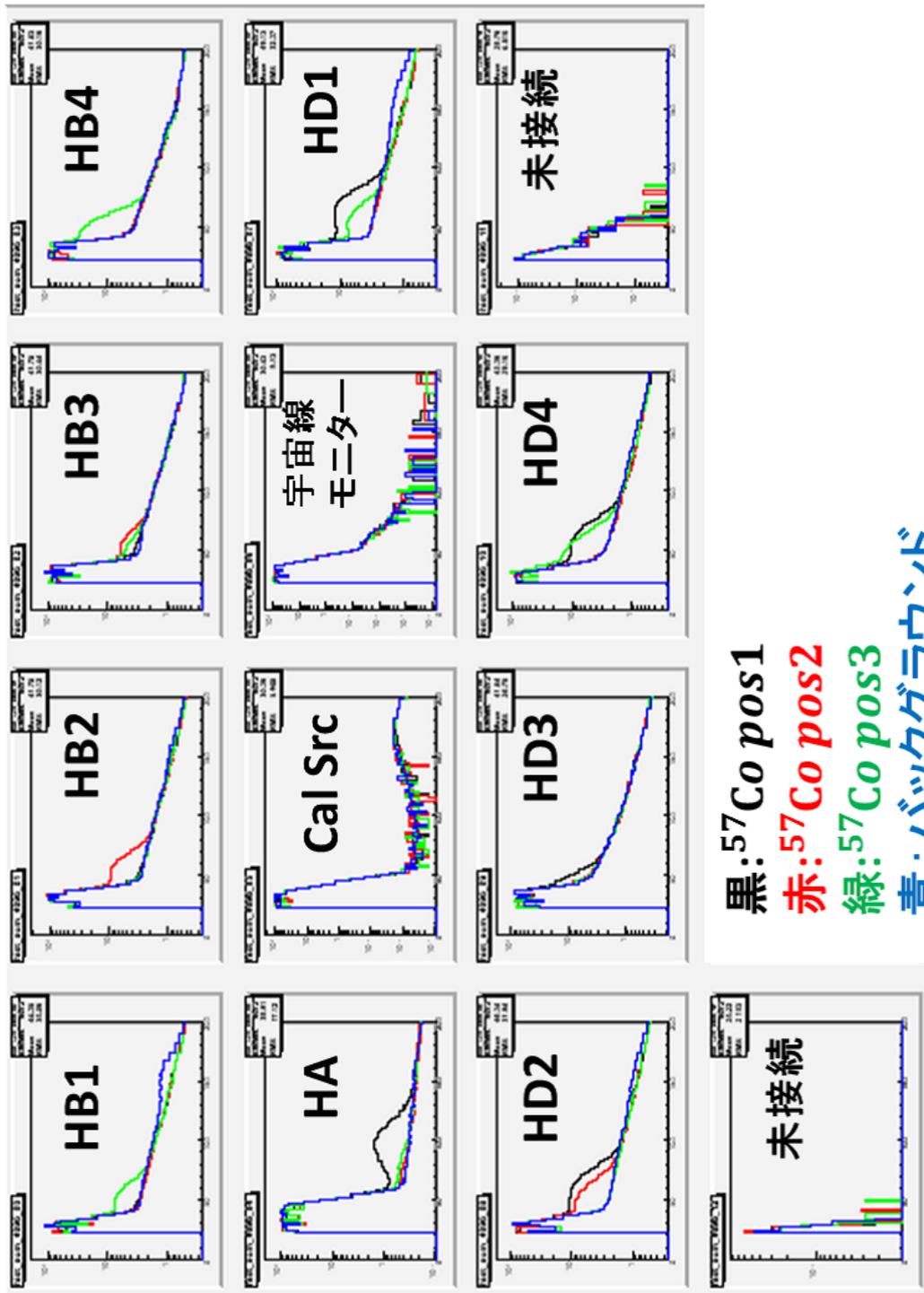


図 4.8: ^{57}Co 照射時とバックグラウンドを重ねたスペクトル

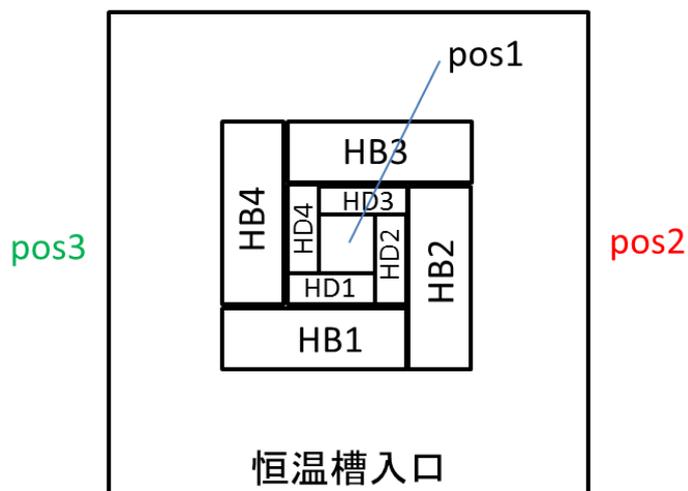


図 4.9: ^{57}Co 照射時の線源位置

図 4.8 の未接続部のチャンネルに信号が出ているが、おそらくこのチャンネルも含めて 13 ch 分が同じ APMU アナログ基板で処理されているため、何らかのノイズを拾っている可能性がある。しかし、BGO が接続されているチャンネルのレートに比べると十分に小さい値であるため、問題はないと考えられる。

図 4.10 に一例として、 ^{137}Cs (662 keV)、 ^{22}Na (511 keV, 1275 keV)、 ^{57}Co (122 keV) を用いて求めた HB1 ユニットのエネルギー較正結果を示す。

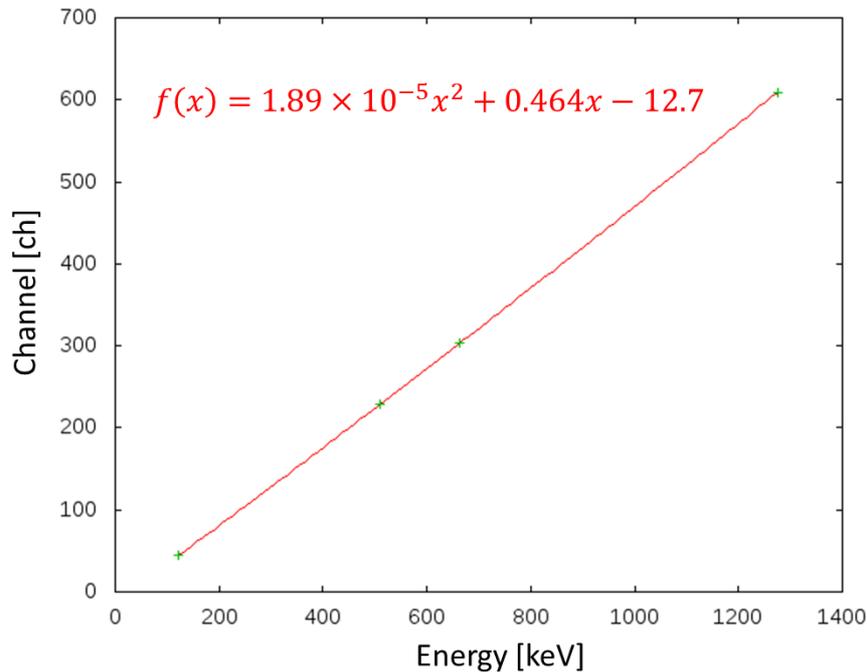


図 4.10: HB1 のエネルギー較正結果

図 4.10 に示すように、縦軸ヒストグラムのチャンネル値、横軸エネルギーの 2 次関数で求めることができた。HB2~4, HA の BGO ユニットも同じように 2 次関数で求めることができたが、HD1~4 のユニットに関しては、光量に位置依存性があり、線源のピークがガンマ線の到来方向によって変わってくるため、正確なエネルギー較正をすることができなかった。

FastBGO, Hitpat スレッシュホールドの最適化

FastBGO スレッシュホールドと Hitpat スレッシュホールドの設定値を実際にどの値に設定するのが適切か検証を行った。主検出器のバックグラウンドを低エネルギーまで除去するために、FastBGO、Hitpat とともにスレッシュホールドは可能な限り低エネルギー側に設定したい。しかし、あまりに低エネルギー側にスレッシュホールドを設定すると、ノイズを拾い始めるため、FastBGO、Hitpat の出力レートが非常に高くなってしまい、主検出器のデッドタイム増加につながってしまう。そのため、FastBGO と Hitpat のスレッシュホールドを変化させて、FastBGO、Hitpat のカウントレートの変化を見ることによって、どのスレッシュホールドが最適か検証を行った。このスレッシュホールドの最適化には、衛星上空でのオペレーションを想定して、自動でスレッシュホールド値を変更する計画コマンドを作成し、そのコマンドを作動させることでデータの取得を行った。図 4.11 に実際に使用したコマンドの一部を示す。今回のコマンドでは、13 ch 全ての FastBGO、Hitpat のスレッシュホールド値を 30 s おきに変更してカウントレートを測定した。

```

FastBGOスレッシュヨルド, Delay, Widthの設定
#!HEAD: dcm-APMULDScan 2013-11-05 13:10:11 63 47 ASTRO-H DCSM //
8001 . #FastBGO and Hitpat LD scan (10-110 5step (FBGO) 5-105d 5step (HPAT) 30 sec each)
8002 HXI1.APMU.SET ADC FBGO 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 0 3 1
8003 HXI1.APMU.SET ADC HIT PAT 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 0 0x11
      現在の設定値取得 HXI1.APMU.GET_PRM
8005 WAIT_SEC 30
      Hitpaスレッシュヨルド, Delay, Widthの設定
30s待った後に次のコマンドへ
8007 HXI1.APMU.SET_ADC_FBGO 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 0 3 1
      コマンド送信
      の流れ
      ↓
8008 HXI1.APMU.GET_PRM
8009 WAIT_SEC 30
8010 HXI1.APMU.SET_ADC_FBGO 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 0 3 1
8011 HXI1.APMU.SET_ADC_HIT_PAT 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 0 0x11
8012 HXI1.APMU.GET_PRM
8013 WAIT_SEC 30

```

図 4.11: FastBGO、Hitpat スレッシュヨルドスキャンに使用したコマンドの一部。13 ch それぞれのスレッシュヨルド値を設定した後、全チャンネル共通設定である Delay や Width の設定を行っている。

図 4.12 に FastBGO の、図 4.13 に Hitpat のカウントレートの変化を示す。横軸は時間 (sec) であり、30 sec ごとにスレッシュヨルド値が上がっていき、カウントレートが減少しているのが見て取れる。そして、ある一定のスレッシュヨルド値以上になると、カウントレートがほぼ一定となり変化が見られなくなった。始めの時間の部分がカウントレートが異常になっている様に見える。これは、各トリガー信号をカウントしているスケーラーデータが 16 bit の non reset カウンタであり、そのデータを 2 s 毎に取得し差分を求めて、各トリガーのカウントとしているためである。つまり、スケーラーデータは 16 bit なので最大 65535 カウントまでカウントできるが、このカウントを 2 秒間で超えるような、 $3 \times 10^4/s$ レート以上となると、カウンタが回りきってしまい、差分を正しくとることができない。そのため、スレッシュヨルドが低く、カウントレートが高い領域ではカウントレートが異常に見えてしまう。

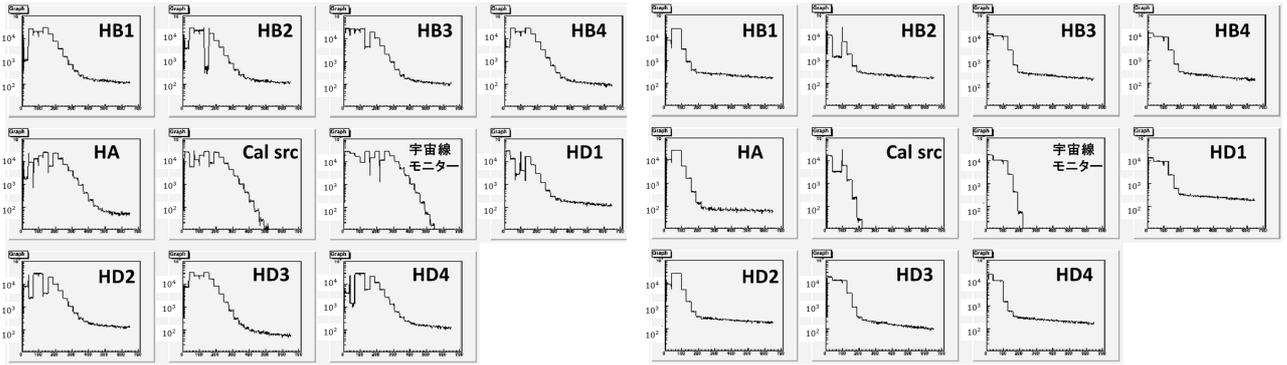


図 4.12: FastBGO のスレッシュリッドスキャン結果 (縦軸: カウントレート、横軸: sec)

図 4.13: Hitpat のスレッシュリッドスキャン結果 (縦軸: カウントレート、横軸: sec)

FastBGO、Hitpat のカウントレートがあるスレッシュリッド値よりほぼ一定になっているのは、スレッシュリッドがノイズレベルより十分高い値に設定されたためだと考えられる。そのため、スレッシュリッドの設定値は、ノイズが多くを占める領域と十分に減少した領域の境目だと考えられる、カウントレートがほぼ一定となる値の一つ前の設定値を採用した。表 4.1 に FastBGO と Hitpat の採用したスレッシュリッド設定値を示す。

BGO ユニット	HB1	HB2	HB3	HB4	HA	HD1	HD2	HD3	HD4
FastBGO	30	25	25	25	40	30	25	35	25
Hitpat	35	37	38	38	49	37	33	39	35

表 4.1: FastBGO、Hitpat のスレッシュリッド設定値

しかし、ここで求めたスレッシュリッド値はあくまで現時点で大まかに決めた値であり、軌道上では定量的に決める必要がある

BGO ユニット性能検証結果

採用した Hitpat スレッシュリッド (反同時計数信号の閾値) が、実際に BGO ユニットの要求性能 150 keV を達成しているか検証した。表 4.2 に採用された Hitpat スレッシュリッドの設定値とそれをエネルギー (keV) 換算したものを示す。

BGO ユニット		設定値	閾値 (keV)
bottom	HA	49	61
side	HB1	35	102
	HB2	37	90
	HB3	38	77
	HB4	38	109

表 4.2: 反同時計数処理信号 (Hitpat) の閾値

表 4.2 の結果より、今回定めた Hitpat スレッシュホールド設定値が、BGO ユニットの要求性能である 150 keV を概ね満たしていることが分かった。また、ここに示していない HD ユニットは、図 4.8 の結果より、 ^{57}Co の 122 keV ピークが APD ゲインの大きく異なる HD3 以外では確認できることから LD の値は 122 keV より下であると考えられる。よって、エネルギー較正をすることは出来なかったが、BGO ユニットの目標 LD である 150 keV を満たせていると考えられる。

4.2.2 反同時計数処理信号ラッチタイミングの検証

3章で最適化した反同時計数処理信号出力タイミングが、実際に主検出器側（カメラ）のラッチタイミングに上手く合致できているか検証を行った。検証方法は、カメラのバックグラウンド測定中に、カメラ側における反同時計数処理信号のラッチタイミングを変更していき、その測定したカメラのバックグラウンドイベントについての反同時計数処理フラグの割合をラッチタイミングごとに求めた。ここで、カメラはバックグラウンドイベントを取得しているが、そのイベントの中にはカメラ側のノイズも含まれているため、反同時計数処理フラグが実際に何割のカメライベントにつくかは定かではない。そのため、今回の検証では反同時計数処理フラグがついた割合が高いラッチタイミングを最適値であると考えられる。また、FastBGO は本来ならば、主検出器側にラッチされると AD 変換が止まってしまうため、主検出器側のイベントに FastBGO フラグがついたイベントは存在しえない。しかし、主検出器側の設定で、FastBGO 信号をラッチしても AD 変換を止めず、代わりにその時のイベントに FastBGO のフラグをつけることができる。今回の検証ではその設定を使用して割合を求めた。図 4.14 に FastBGO でのカメラ側で設定可能なラッチタイミング 3 ~ 11 μs の間でスキャンを行った結果を示す。

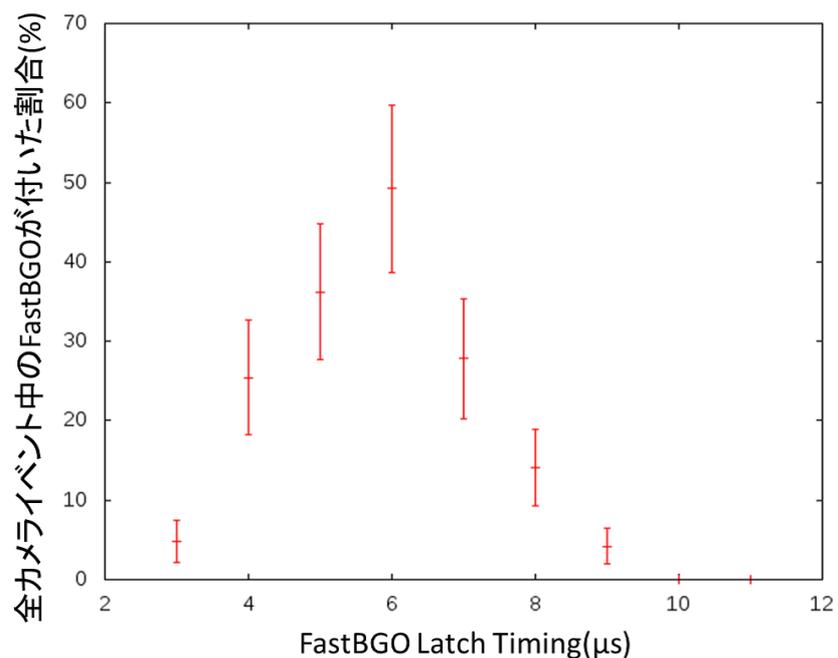


図 4.14: 主検出器側のラッチタイミングを変えていった時の FastBGO フラグがついたイベントの割合

図 4.14 の FastBGO は、BGO ユニット 9 個での FastBGO 出力の OR であり、出力幅は $2 \mu s$ となっている。図 4.14 の結果より、FastBGO は主検出器側のラッチタイミングが $6 \mu s$ の時に、カメライベントについての FastBGO フラグの割合が最大となっていることが分かった。

次に、図 4.15 に Hitpat でのカメラ側で設定可能なラッチタイミング $30 \sim 45 \mu s$ の間でスキャンを行った結果を示す。

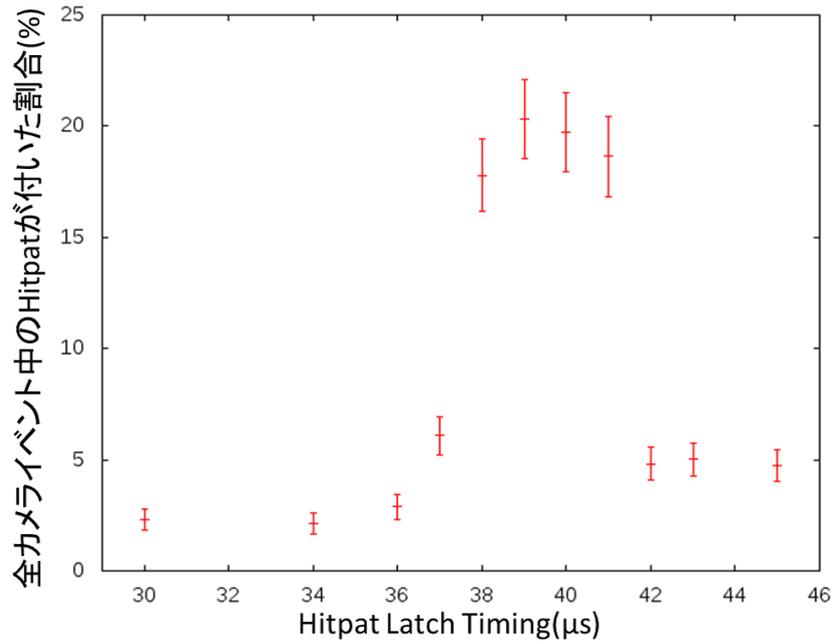


図 4.15: 主検出器側のラッチタイミングを変えていった時の Hitpat フラグがついたイベントの割合

図 4.15 の Hitpat は、BGO ユニット 9 個での Hitpat 出力の OR となっている。図 4.15 の結果より、Hitpat は主検出器側のラッチタイミングが $37 \mu\text{s}$ から立ち上がり始め、 $38 \sim 41 \mu\text{s}$ の時に、Hitpat フラグの割合が最大となっていることが分かった。ここで、ラッチタイミングが Hitpat 出力タイミングと全くあっていない場合は、カメラ側とシールド部では違うイベントを検出していることになるので、カメライベントの Hitpat フラグの割合は偶然同時確率と一致するはずである。この時の Hitpat のレートは、1ch あたり約 500 Hz であり、BGO ユニット 9 個の OR で出力しているため、計 4500 Hz となる。そして、Hitpat の出力幅 $4 \mu\text{s}$ だったので、偶然同時確率を計算すると、 $4500 \times 4 = 0.018$ となり約 2% と求めることができる。これは、図 4.15 の Hitpat Latch Timing $30 \mu\text{s}$ の時の Hitpat フラグの割合と一致している。

最後に、図 4.16 に UD/SUD でのラッチタイミングスキャンを行った結果を示す。

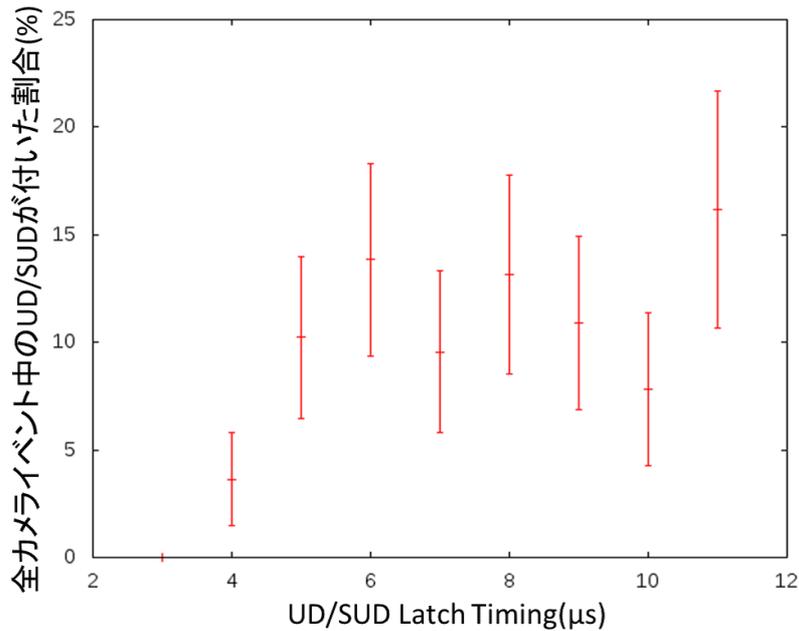


図 4.16: 主検出器側のラッチタイミングを変えていった時の UD/SUD フラグがついたイベントの割合

図 4.16 の UD/SUD は、BGO ユニット 9 個での UD/SUD 出力の OR となっている。図 4.16 の結果より、UD/SUD は主検出器側のラッチタイミングが 5 ~ 11 μ s の時に、UD/SUD フラグの割合が最大となっていることが分かった。これは UD/SUD の出力幅が長いことから、5 μ s 以降の割合がほぼ同じになっていると考えられる。

4.2.3 トリガー出力タイミングの考察

前項のラッチタイミングの結果と、3章で検証した FastBGO, Hitpat 出力タイミングの結果を比較して考察を行った。まず、FastBGO は3章でシミュレータを用いた検証により、信号入力から 2.7 μ s で出力されていることが分かっている。それに、前項のラッチタイミング検証では、カメラでのイベント判定と FastBGO 判定までの時間差、FastBGO の出力幅 2 μ s を加味すると、ラッチタイミングは 5 μ s 付近でカメライベントにつくトリガーフラグは最大になると考えられる。図 4.14 の結果を見ると、ラッチタイミング 5 ~ 6 μ s で最大となっており、3章の結果と一致している。

次に、Hitpat は3章で、シールド側のイベント検出時刻からピーク検出までの時間が約 10 μ s であり、それに最小値の Delay 24 μ s を足して、結果約 34 μ s が Hitpat 出力タイミングであると求めた。前項の検証では、更にカメラでのイベント立ち上がりと BGO 信号の立ち上がりの時間差、Hitpat の出力幅 4 μ s を加味すると、ラッチタイミングは 38 ~ 39 μ s 付近でトリガーフラグ

が最大となると考えられる。図 4.15 の結果を見ると、ラッチタイミング 38 ~ 41 μs で最大となっており、3 章の結果と一致している。

トリガー出力タイミングの結果と、ラッチタイミング検証結果がよく合致していることから、シールド部と主検出器部を組み合わせた場合でも問題がなく動作していることが確認できた。また、この結果より主検出器のラッチタイミングをそれぞれ FastBGO は 6 μs 、Hitpat は 39 μs と決定することができた。

4.2.4 反同時計数処理の実証

FastBGO、Hitpat のラッチタイミングを最適化することができたので、その最適化パラメータを用いて初めての反同時計数処理の実証を行った。図 4.17 に、カメラ（主検出器）でバックグラウンドを測定した時に FastBGO イベントフラグがついたイベントを除去したものと、さらに Hitpat フラグがついたイベントを除去したものを重ねたスペクトルを示す。

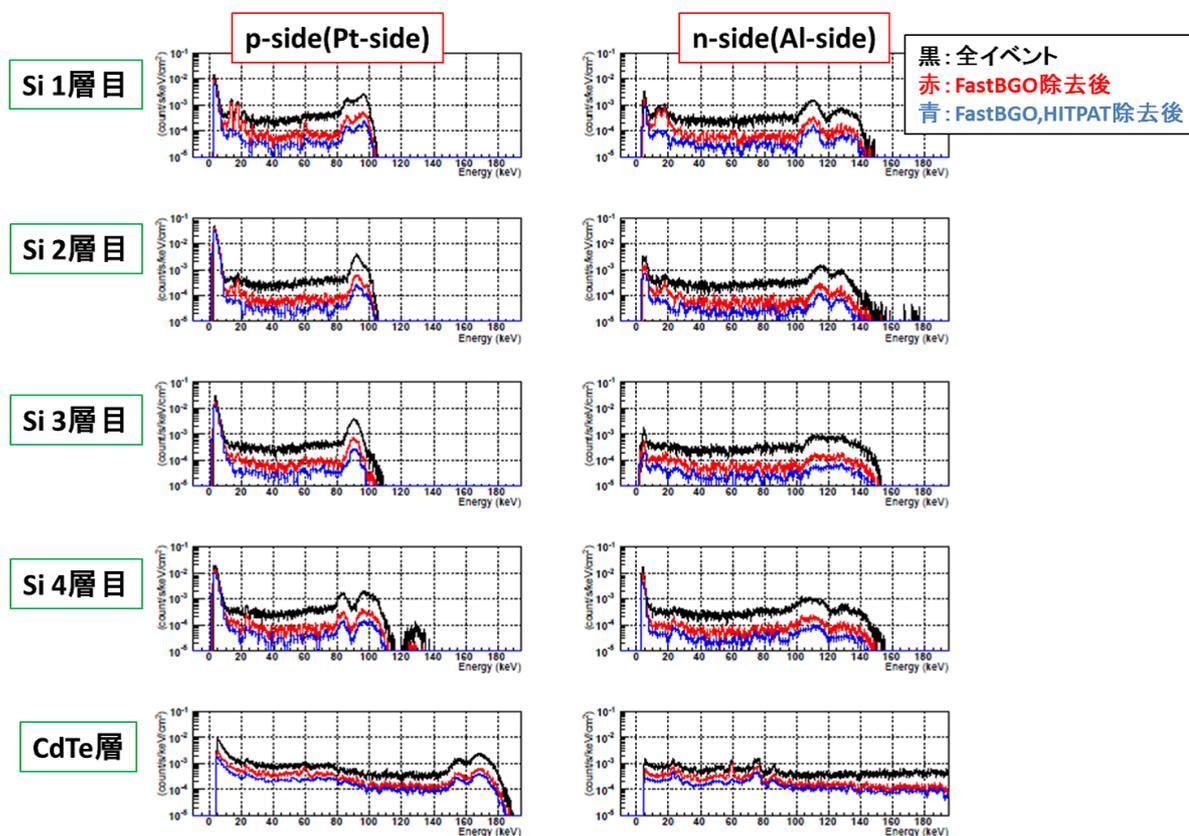


図 4.17: カメラ（主検出器部）のバックグラウンドスペクトル

主検出器部のカメラは Si4 層と CdTe1 層で構成されているため、それぞれの層でスペクトルが

取得される。また、それぞれの層は p-side と n-side という二つの読み出し口から、信号を読み出すことが可能である。図 4.17 の結果を見ると、Si 層では FastBGO と Hitpat により 8 割のイベント除去が、CdTe 層では 7 割のイベント除去ができていることが確認できた。

次に、図 4.6 に示したように、シールド部全 11 ch のうち、ある 1 ch はカメラ部のエネルギー較正のために取り付けられたキャリブレーションソース (^{241}Am をプラスチックシンチレータで取り囲んだもの) を読み出しており、カメラ側で ^{241}Am のガンマ線ピークを捕え、シールド側で ^{241}Am からの信号をプラスチックシンチレータで読み出すことで、同時計数を取り、カメラ側の較正に用いる。そのキャリブレーションソースにより出力された反同時計数処理信号のみでイベント除去した場合のスペクトルを求め、反同時計数処理の効率を検証した。図 4.18 にカメラの Si 1 層目の全イベントでのバックグラウンドスペクトルと、それからキャリブレーションソースで生成された反同時計数処理信号を差し引いたスペクトルを示す。

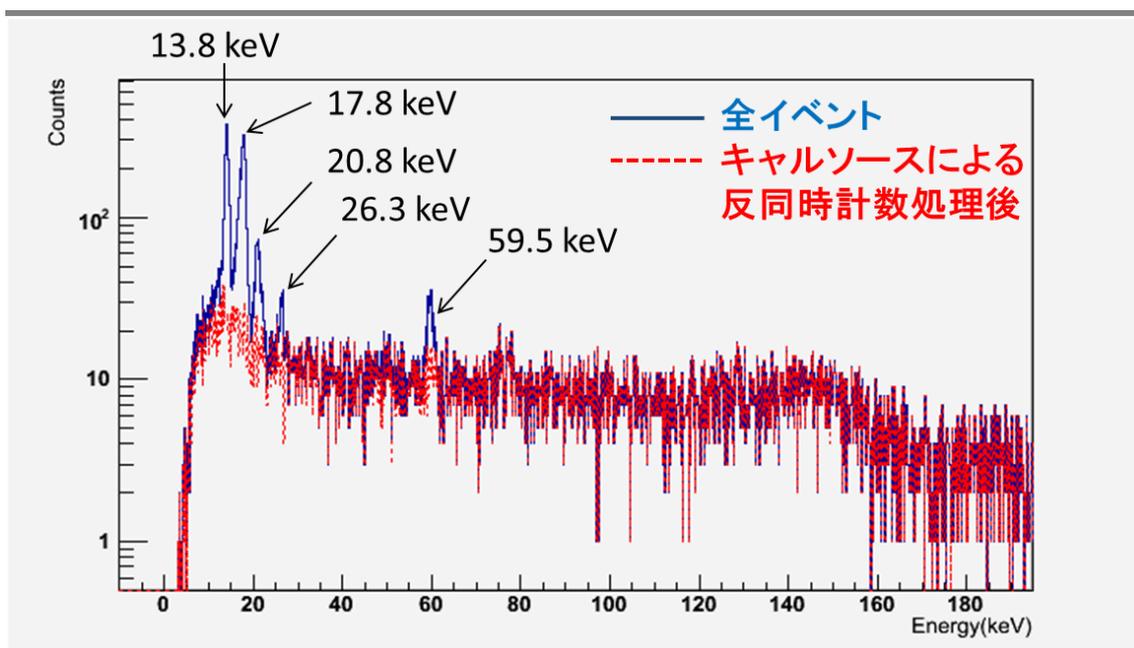


図 4.18: カメラ (主検出器部) の Si 1 層目のバックグラウンドスペクトル

図 4.18 の全イベントのスペクトルに見られている ^{241}Am の輝線のみが、反同時計数処理後のスペクトルでは除去されていることが見て取れる。詳細に ^{241}Am の輝線である 13.81 keV 付近を見ても、全イベントでは 13-15 keV の範囲は 3803 イベントだが、反同時計数処理後は 475 イベントとなり、バックグラウンドレベルと変わらないカウント数まで落ちていることが確認できた。

以上の結果より、現在の APMU の設計で問題なく反同時計数処理が行えることを、初めて実証することができた。

第5章 まとめと今後の課題

本研究では、2015年打ち上げ予定の次期 X 線天文衛星 ASTRO-H に搭載される検出器、HXI/SGD のアクティブシールドセンサー部の受け入れ試験及び機能検証を行った。以下にその結果を記す。

アクティブシールドに用いられている BGO シンチレータの性能が、衛星搭載品として加工された後も想定通りに発揮されるか、受け入れ試験を行うことにより確認を行った。本研究では、HXI1 台分の HXI-BGO 9 ユニットと、SGD1 台分の SGD-BGO25 ユニットの計 34 ユニットの IV、光量を、衛星軌道上で想定される温度サイクルを BGO ユニットにかけながら測定した。結果、全 34 ユニットで IV は問題がなかったが、光量が予想されていた値よりも 1~3 割低いという測定結果となった。しかし、実際のスペクトルから LD を算出すると要求性能 150 keV を概ね満たしていることが分かったため、今回測定を行った 34 ユニットについては、搭載型 BGO ユニットとして性能は問題がないと考えられる。

また、アクティブシールドの信号処理を主に行う APMU の FPGA の機能が正しく設計されているか検証を行った。APMU の試作基板を用いて、反同時計数処理信号の出力タイミングやその揺らぎについて詳しく検証し、反同時計数処理信号の出力タイミングや出力幅の最適値を模索した。そして、Hitpat 信号の Delay24 μ s、幅 4 μ s という値を提示した。その他の APMU の機能についても検証を行い、APMU の全ての機能を網羅する形で試験を行い、設計に問題がないことを確認した。

そして、実際に衛星に搭載される検出器と同型の HXI FullEM を用いて、BGO、APMU の性能確認を行うとともに、主検出器側の反同時計数処理信号ラッチタイミングの最適値を検証し、FastBGO は 6 μ s、Hitpat は 39 μ s と決めた。この 39 μ s は、前述した Hitpat 信号の Delay24 μ s + ピーク検出時間約 10 μ s とカメラでのイベント立ち上がりと BGO 信号の立ち上がりの時間差、Hitpat の出力幅 4 μ s を加味すると合致する。そして、その求めたラッチタイミングの最適値で HXI 主検出器と BGO を組み合わせて初めての反同時計数処理を行い、主検出器部の Si で 8 割、CdTe で 7 割のバックグラウンドイベント除去ができていることを実証した。

今後は、BGO 測定ではまだ各検出器 1 台分の搭載型 BGO ユニットしか測定されていないので、引き続き 2 台目の BGO ユニットの測定を行い、性能に問題がないか確認を行う必要がある。また、APMU は EM で問題がないことが確認できたので、次はフライトモデルでも同じように問題がないか検証を行っていく必要がある。

謝辞

本研究において、多くの方々に大変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。大野先生にも論文添削から、お忙しい中実験にいっしょに付き合っていたり、アドバイスを頂いたり、なにからなにまで、様々なことで大変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、牧島研の中澤先生、名大の山岡先生、静岡大の内山さんには搭載型 BGO の測定で、宇宙研の高橋先生、渡辺先生、佐藤先生には HXI-FulLEM 試験で大変お世話になりました。ありがとうございました。他にも多くの方々にたくさんお世話になりました。同じ研究室の中村君には BGO 測定に協力していただき、ありがとうございました。中川君も実験室で私の話し相手になっていただきありがとうございました。ここに書ききれ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。この研究に携わって、様々な貴重な体験を得ることができました。これからの人生で、この研究で得た物を活用して頑張っていきたいと思えます。

関連図書

- [1] ASTRO-H プロジェクトサイト, <http://astro-h.isas.jaxa.jp/>
- [2] 林克洋「次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載硬 X 線撮像用シリコン検出器の性能評価」 広島大学 (2009)
- [3] 後藤国広「ASTRO-H 衛星搭載アクティブシールドの信号処理におけるデジタルフィルタの最適化および性能評価」 広島大学 (2012)
- [4] 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)
- [5] N.Ota, M.Tsujimoto, H.Takahashi 「ASTRO-H Quick Reference」 (November 9,2010)
- [6] 科学衛星 Astro-E2 実験計画書 (第 2 分冊) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究本部 データセンター
- [7] 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)
- [8] National Semiconductor 社「ADC128S102QML Datasheet」 (May 17,2010)
- [9] National Semiconductor 社「ADC128S102 Datasheet」 (July 23,2009)
- [10] 後藤国広「X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載検出器 HXI, SGD の信号処理で用いられる ADC 単体の動作検証」 広島大学 (2010)
- [11] JAXA 「BGO requirements to ESA (for Astro-H/HXI and SGD)」
- [12] 西田瑛量「宇宙 X 線衛星 ASTRO-H に搭載する BGO アクティブシールドの製作手順とその検証」 東京大学 (2012)
- [13] 笹野理「ASTRO-H 衛星に向けた BGO シンチレータの APD 読み出しとその集光効率」 東京大学 (2011)
- [14] SGD CDR インパチ (March, 2012)