

ASTRO-H衛星に搭載するアクティブシールドに用いるBGOシンチレータのフライト品試験

東京大学 理学系研究科物理学専攻 牧島・中澤研究室 修士課程二年 西田 瑛量
牧島一夫^{A,B}、中澤知洋^A、内山秀樹^A、笹野理^A、深澤泰司^C、徳田伸矢^C、佐藤理江^D
A ; 東京大学、 B ; 理化学研究所、 C ; 広島大学、 D ; ISAS/JAXA

0. 概要

2014年打上げ予定のASTRO-H衛星には、10 keV以上を受け持つ装置として、硬X線撮像器(Hard X-ray Imager; HXI)と軟ガンマ線検出器(Soft Gamma-ray Detector; SGD)が搭載される。それぞれ5--80~keV、40--600~keVの帯域で「すざく」衛星を大きく上回る検出感度を目指す[1]。感度達成に重要な役割を果たすのが、ガンマ線バックグラウンドに対するシールド効果が高いBGO($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$)結晶と低電力で小型のアバランシェフォトダイオード(APD)を用いたアクティブシールドである。反同時計数により観測方向からの信号とそれ以外を区別し、低バックグラウンドを実現する。しかし、APDはコンパクトだが受光面が小さい上に、BGOの屈折率は2.15と大きいため、BGOからの蛍光光子の集光効率が悪い。よって、透明度の高い高品質の結晶を用い、反射材の材質やAPDの接着方法に十分な工夫を行わないと、アクティブシールドの閾値(LD)を十分に下げられず、バックグラウンドが高くなってしまう[2]。

BGO結晶は、両装置で計100個近くを使用する。それらの結晶は全数がすでにロシアの製造所から入手済みで、東京大学における試験では、これまでの研究開発に基づく予測値とほぼ一致する、良好な発光量を確認し、全て合格と判定された。これを受けて、搭載品として正しい手順で組上げて評価試験を行い、温度サイクル、振動試験などの環境試験を行っていく。

I. ASTRO-H

次期X線天文衛星ASTRO-H衛星は、2014年打ち上げ予定の日本で6番目の科学衛星である。全系は図1のような形状をしており、総重量が2.5トンにも及ぶ、日本最大の人工衛星となっている。

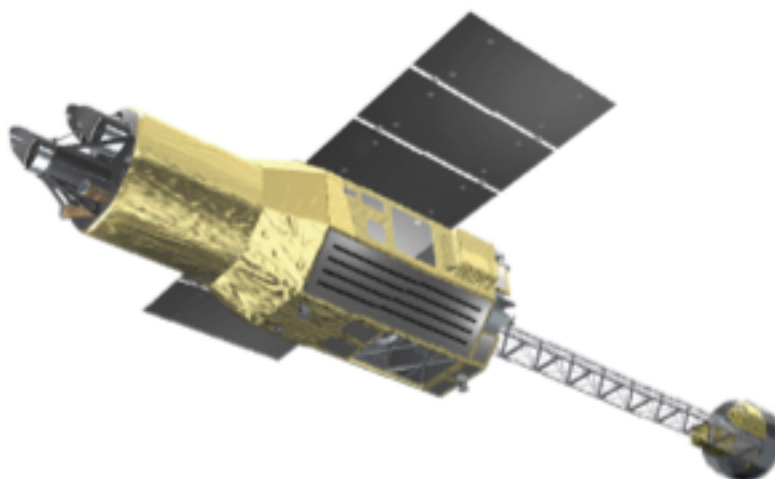


図1 ASTRO-Hの全体像

ASTRO-Hには、軟X線帯域と硬X線帯域で2つずつ、合計4つの検出器が搭載され、2種類の光学系(軟X線望遠鏡、硬X線望遠鏡)と組み合わせられる。軟X線帯域では、0.2–10 keVをカバーするX線カロリメータと、0.5–12

keVを撮像観測するX線CCDカメラがある。硬X線帯域では、5–80 keVで撮像を行う硬X線撮像器(Hard X-ray Imager; HXI)および、20–600 keVを観測する軟ガンマ線コンプトンカメラ(Soft Gamma-ray Detector; SGD)が搭載されている。これら4つの検出器を組み合わせることで、~0.1–数100 keVという4桁に及ぶ広帯域の観測が可能になる。これらの装置はそれぞれ特徴的な性能を持っており、例えばX線カロリメータは、図2のシミュレーションに示すように、従来の半導体検出器を1桁以上もしのぐエネルギー分解能(6 keVでFWHM 5 eV)を達成する。このシミュレーションは、ケンタウルス銀河団を見ると想定したときに得られるスペクトルであり、点線で示しているのが、典型的なX線CCDカメラで得られるスペクトルである。このように、非常に優れた性能を持つ**ASTRO-H**は、2010年代の後半を席卷する世界の天文台であり、単独ではもちろんのこと、「すばる」、ALMA、CTAとのコラボレーションを通じても大きな成果が期待されているプロジェクトである。

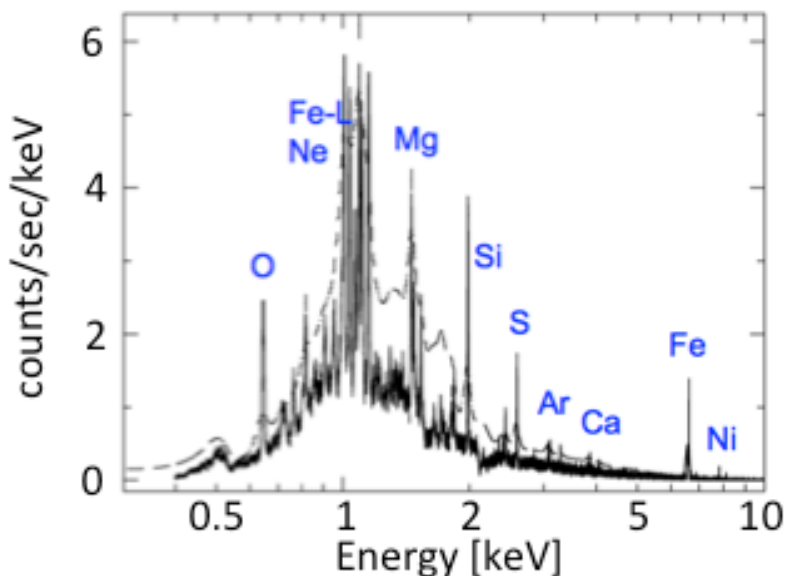


図2 X線カロリメータを用いて得られるケンタウルス銀河団のスペクトル[3]

以下では、**ASTRO-H**に搭載される4種の検出器のうち、HXIとSGDに焦点を当て、特にそこに用いられているアクティブシールドを説明する。

II. HXIとSGDの構成

HXIとSGDに共通な特徴は、半導体による主検出部と結晶シンチレータを用いたアクティブシールド部が挙げられる。図3のようにHXIは高さ65 cmほどの装置で、SGDはそれを横に3つ並べたような設計となっている。

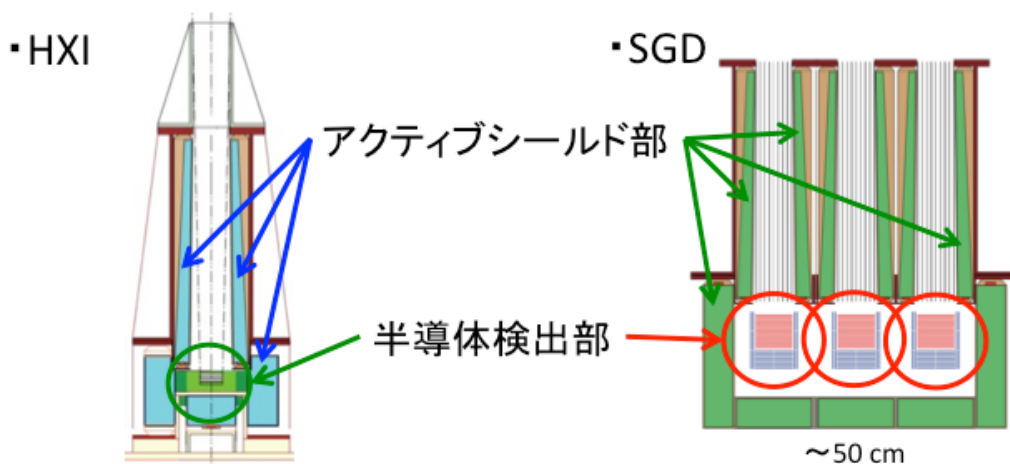


図3 HXI(左)とSGD(右)の模式図

HXIの性能を保証するには、その前方12 mに搭載される硬X線望遠鏡(スーパーミラー; HXT)による集光が欠かせない。エネルギーが高いX線では、屈折が起こらず、反射でしか光子の進行方向を変えることができない。さらに金属表面での全反射を用いる従来の技術では、 ≥ 10 keVの反射は難しい。そこでHXTでは、多層反射膜の技術を開発し、ブラッグ反射を利用して集光を実現している。HXTを組み合わせることでHXIは、硬X線帯域における撮像を可能にし、硬X線帯域で撮像を行うという画期的なことができるようになった。

一方でSGDは、コンプトン運動学を再構成することで、光子一つ一つのエネルギーと方向を決定することができるコンプトンカメラである。この技術とⅢ. で述べるアクティブシールドを併用し、バックグラウンドを極限まで下げることで、硬X線帯域から軟ガンマ線帯域における高感度の観測が可能となる。

Ⅲ. アクティブシールドとは

これまでの衛星の中でも最高感度を誇る「すざく」HXDの感度に比べて、HXIは二桁、SGDは一桁という飛躍的な感度向上を実現しているが、それを支えるために、アクティブシールドが大きく貢献している。

そもそもシールドの役割は、硬X線帯域で卓越する放射線バックグラウンドを落とすことにあり、CXB(宇宙背景X線放射)の混入を阻止する役目も含む。シールドには、パッシブシールドとアクティブシールドの二種類がある。前者は鉛などを用いて、完全に放射線を止めることを目指すため、必然的に物質の質量が必要となる。後者では、バックグラウンドイベントを検出し、主検出器に対して反同時計数を行うため、パッシブシールドより軽くできるが、それ自体が高機能の放射線検出器となるため、圧倒的に複雑である。

アクティブシールドに必要な性能は、荷電粒子に代表される宇宙線や、ガンマ線に対して大きな反応断面積を有していること、また、センサー部分を覆うことができる十分な大きさが実現できることである。前者よりその素材には、大きな原子番号と高い物質密度が求められ、後者と合わせて考えると、結晶シンチレータで放射線のエネルギーを可視光に変換し、それを光検出器で読み出すことが最適であると考えられる。これらの条件を満たすために、ASTRO-HではアクティブシールドにBGO($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$)という結晶シンチレータを用い、APD(Avalanche Photo Diode)という光半導体でBGOからの光を読み出すという設計を採用している[4]。

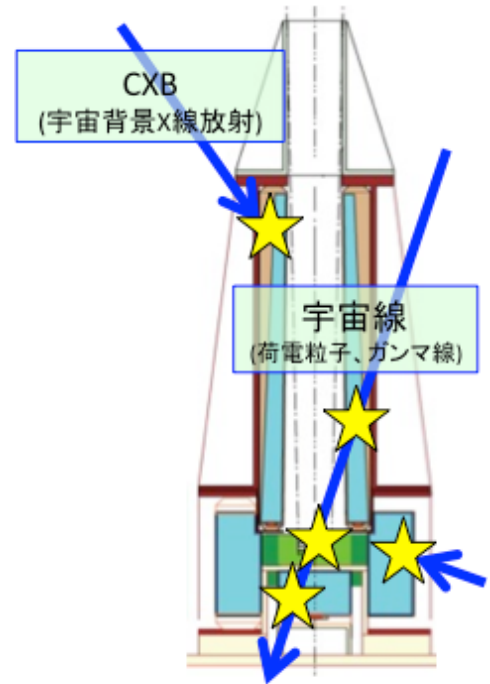


図4 アクティブシールドの概念

Ⅳ. BGOとAPDの特徴

BGOとAPDの特徴について触れる。まず、BGOに含まれる原子番号はBiが83、Geが32と非常に大きく、同時に密度が 7.13 g/cm^3 と大きいいため、ガンマ線との反応断面積が大きい。BGOは透明度の高い大型結晶が入手でき、かつ潮解性を持たないため、衛星に搭載するアクティブシールドの要求を満たしていると言える。一方で、放射線計測によく用いられるNaIと比べて発生光子数が20%と少ないため、十分な感度を達成するには、デメリットと言える。これは、装置を -15°C まで冷却するとBGOの発光量が上がり、かつ、APDの電流性ノイズが下がるので、ある程度まで補うことができる。

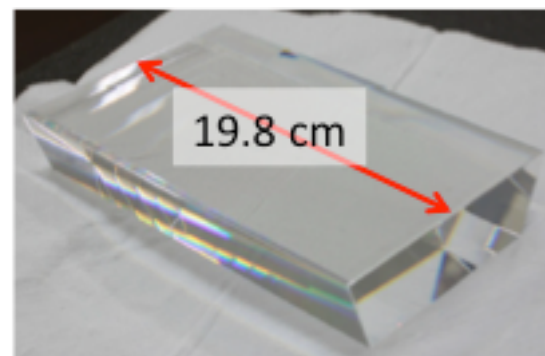


図5 衛星搭載品のBGO結晶の一例

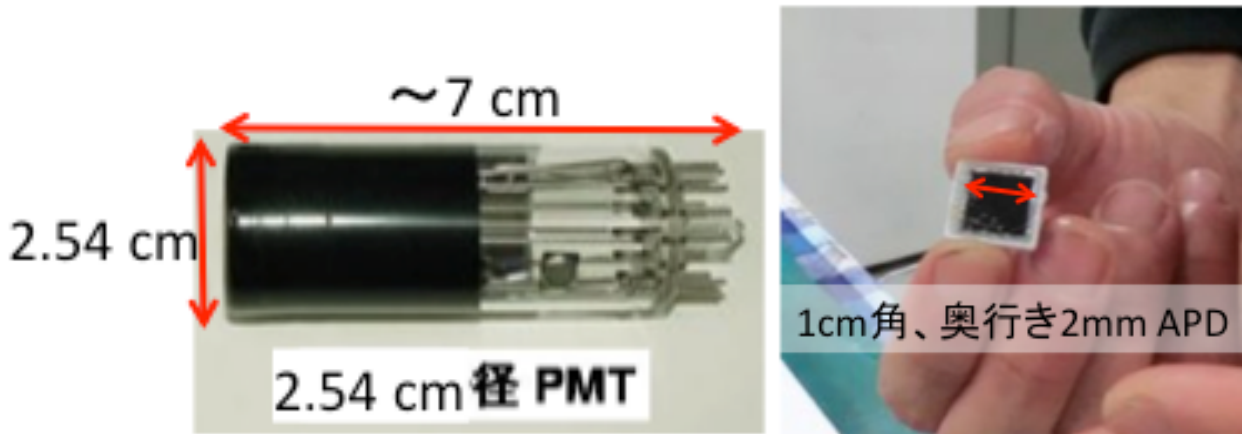


図6 ASTRO-Hで用いるAPD(右)と典型的な1インチ(2.54 cm)径PMT(左)の比較

次にAPDであるが、図6に示すように、PMT(Photo Multiplier Tube)に比べて圧倒的に小さく、軽く、薄く、また耐振性も高いので、大きな結晶を1個のPMTで読み出す代わりに、結晶を分割してそれぞれ別のAPDで読み出すなど、設計の自由度も高まる。

また、PMTと比べて低電圧(~400 V)かつ低消費電力で動作が可能であり、フォトダイオードと比べても信号の増幅機能を持っていることから、電氣的雑音にも大きく影響されにくい。しかし、受光面が小さいことや増幅率が温度に強く依存するというデメリットも持ち合わせているため、衛星に使用するには十分な管理が必要である。

V. 衛星搭載品の製作

ASTRO-H衛星製作の大筋としては、基礎開発が2000年から開始されており、衛星の概念設計や各要素技術の開発が進められてきた。その後、様々な検討や試験を経て、2008年から衛星の詳細設計が行われると共に、搭載装置が試作され、それを用いて性能試験や設計の確認を行った。2012年から、衛星実機と実際の搭載品の製作が進められている。HXIとSGDの製造は三菱重工が行い、検証は大学側が担当している。今後、搭載品の組み上げを行い、衛星全体の組み上げを経て、2014年、種子島宇宙センターより打ち上げが行われる予定となっている。



アクティブシールドの製作では、結晶自体はESA(European Space Agency)経由でロシアから購入し、受光素子は国内の浜松ホトニクスより調達を行った。これらの素子を単体試験で検証し、外観チェックや光量測定、電氣的性能試験を進めてきた。

V-1. 衛星搭載のBGO結晶の形状

図7に示すように、スペアを含め、HXIに用いる結晶は3種37個ある。一方で、SGDに用いる結晶は6種88個があり、現在、各種測定を行っている。様々な形の結晶を用いており、長い結晶では32 cm、重い結晶で~5 kgのものがある。BGO結晶は機械的にもろくて欠けやすく、また紫外線で劣化するので、取り扱いには細心の注意が必要である。

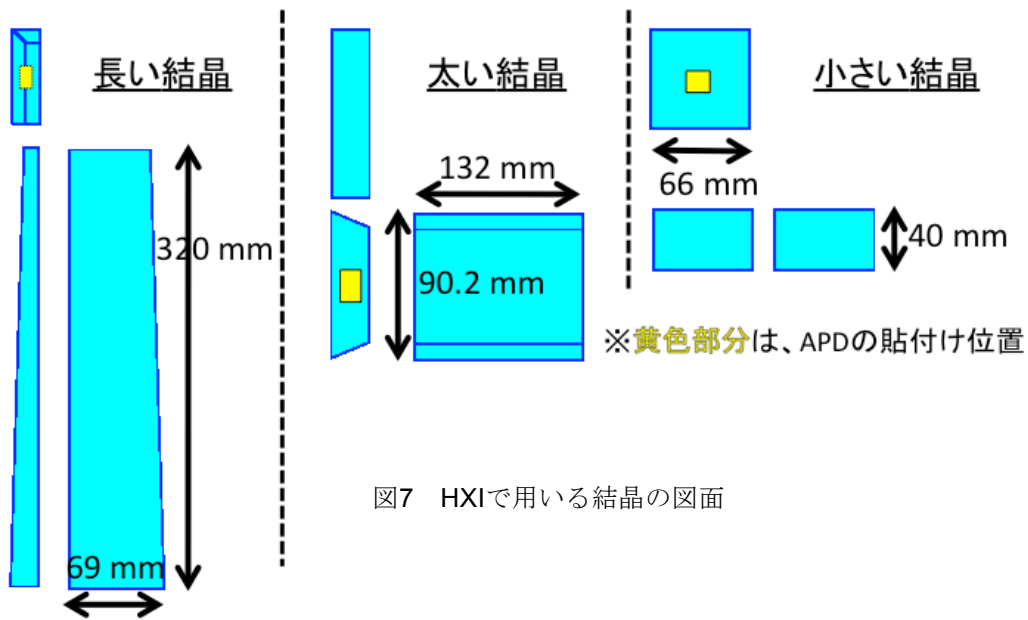


図7 HXIで用いる結晶の図面

V-2. 外観チェック

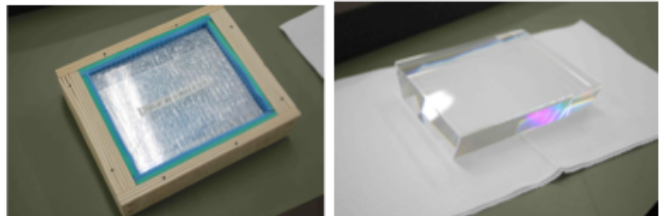


図8 外見チェックの様子。木箱に入って届いた結晶を一つ一つ開封し、チェック。

ロシアから納品された結晶は、図8に示すように、クリーンルームで全数、チェックシートを用いて丁寧に目視チェックを行った。主なチェック項目は、1)サイズ、2)重量、3)傷の有無、4)結晶中の泡の有無、である。仕様として、サイズの精度は± 0.1 mmを要求している。その結果、スペアを含めて全ての結晶がパスした。

V-3. 光量測定

V-3-1. セットアップ

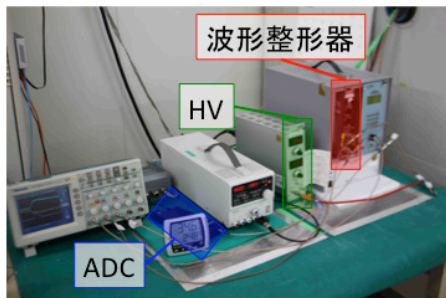
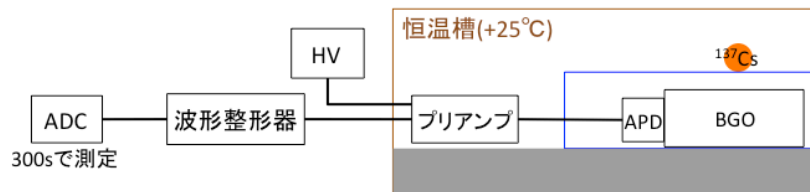


図9 光量測定の標準的なセットアップ

結晶の光量は、反射材の巻き方やAPDの取り付け方を別にすれば、1)結晶の発光率、2)結晶の表面処理、3)結晶の透明度、の3つが主に効く。2)と3)が問題になるのは、BGOの大きな屈折率により、蛍光光子が結晶内で何回も全反射を繰り返し、その途中で失われる可能性があるからである。

光量測定には、図9に示す標準的なセットアップを用いた。恒温槽内に設置したBGOにガンマ線源 ^{137}Cs を照射し、APDから出た信号を増幅してAD変換を行い、データを取得するようになっている。

V-3-2. 測定結果

上記のセットアップを用いて絶対光量を50個の結晶について測定をした。図10に代表的な結晶によって+25°Cで取得されたスペクトルを示す(図10左)。

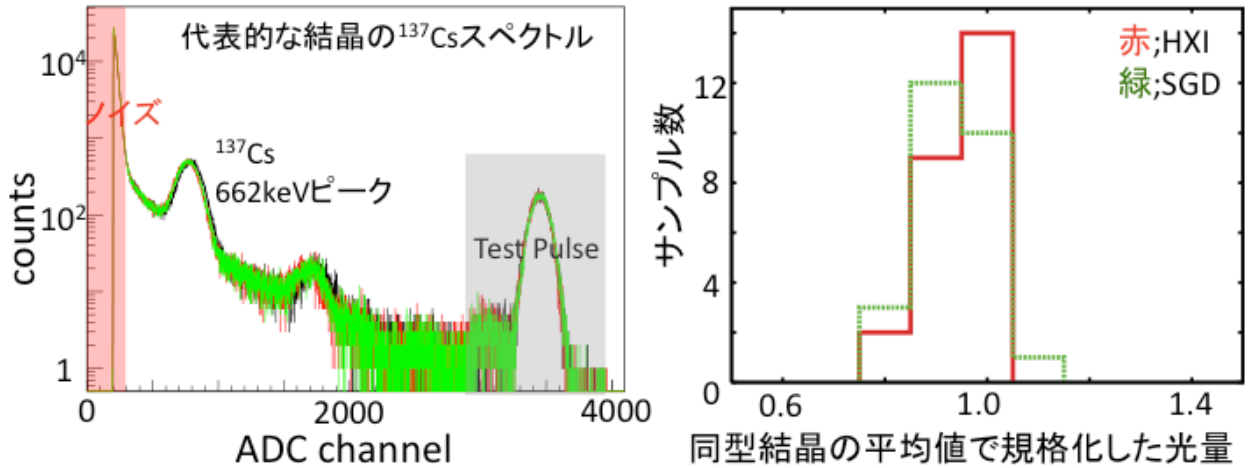


図10 図8で示した結晶から取得したスペクトル(左)。放射線源からの信号とは別に、テストパルスを入れて測定を行っている。右図は、光量ばらつきをヒストグラムに示したもの。

図10左では、 ^{137}Cs の662 keVのピークがはっきりと見え、また、ノイズに対してピーク中心値が十分離れており、十分な光量を示していると判断される。図11にこれまでの測定で十分な光量と判断されたLDとの相関を示す。この図を見ても分かるように、 $\sim 10\%$ 以内で一致していることが分かる。

また、図10左では、同一形状の3つの結晶から取得されたスペクトルを重ねており、性能がそろった良質な結晶であることも分かる。同一形状を持つ光量ばらつきを示したのが図10右である。以上の結果より、様々な形や大きさの結晶があるが、衛星搭載品として良質な性能を持っていることが伺える。

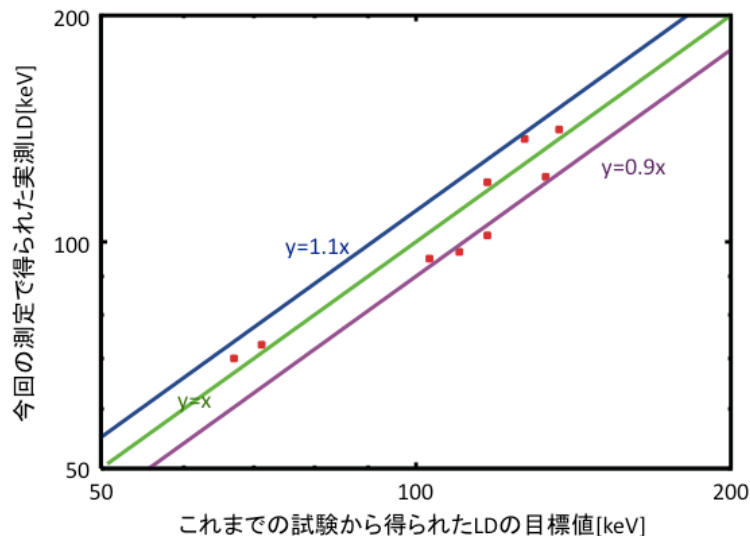


図11 これまでの測定から十分な光量と判断されたLDと実測値との相関

IX. まとめ

ASTRO-H衛星に搭載のHXI/SGDの開発を行っており、それらの感度の鍵を握るのが、アクティブシールドである。このアクティブシールドには、BGO結晶シンチレータとAPD半導体受光素子を用いる。これらの性能を調べ、我々の衛星で使用することが適切であると確認し、搭載品の開発を進めている。BGO結晶では、スペアを含めて125個全ての目視チェックを行い、問題ないことを確認した。一方で、50個の結晶で光量測定を行い、衛星搭載品としては良質な性能を有していることを確認した。

[参考文献]

- [1] T. Takahashi et al., The ASTRO-H mission, Proceedings of the SPIE, Volume 7732, pp. 77320Z-77320Z-18 (2010).
- [2] 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。修士論文、東京大学、2012年。
- [3] Mitsuda et al, The High-Resolution X-ray Microcalorimeter Spectrometer System for the SXS on ASTRO-H, Proceedings of the SPIE, Volume 7732, pp. 773211-773211-10 (2010).
- [4] K. Nakazawa, BGO modules requirements (for Astro-H/HXI and SGD), HXISGD-MEMO-2010-003, February 8, 2011