

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

Astro-E2 衛星搭載硬X線検出器 (HXD-II) の 放射化バックグラウンド特性

村島未生・川原田円・国分紀秀・岡田 祐・牧島一夫
井上北斗・小林謙仁・三谷烈史・中澤知洋・高橋忠幸
洪 秀徴・寺田幸功・宮坂浩正・山岡和貴・川添哲志
他HXDチーム

2004年 10月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

Astro-E2 衛星搭載硬X線検出器 (HXD-II) の 放射化バックグラウンド特性

村島 未生¹・川原田 円¹・国分 紀秀¹・岡田 祐¹・牧島 一夫^{1,4}
井上 北斗^{1,2}・小林 謙仁^{1,2}・三谷 烈史^{1,2}・中澤 知洋²・高橋 忠幸^{1,2}
洪 秀徴^{3,4}・寺田 幸功⁴・宮坂 浩正⁵・山岡 和貴⁶・川添 哲志⁷
他HXDチーム

Activation Background of the Hard X-ray Detector II (HXD-II) Onboard *Astro-E2*

By

Mio MURASHIMA¹, Madoka KAWAHARADA¹, Motohide KOKUBUN¹, Yuu OKADA¹, Kazuo MAKISHIMA^{1,4},
Hokuto INOUE^{1,2}, Yoshihito KOBAYASHI^{1,2}, Takefumi MITANI^{1,2}, Kazuhiro NAKAZAWA², Tadayuki TAKAHASHI^{1,2},
Soojing HONG^{3,4}, Yukikatsu TERADA⁴, Hiromasa MIYASAKA⁵, Kazutaka YAMAOKA⁶, Satoshi KAWASOE⁷,
and HXD team

Abstract : *The Astro-E2* Hard X-ray Detector (HXD-II) is characterised by well-type phoswich counters in a compound-eye configuration which reduce the detector background to lower level than any other past hard X-ray mission. *Astro-E2* will be operated in Low Earth Orbit. In such environment, the major origin of background is activation induced by trapped protons with the energy of ~ 100 MeV in South Atlantic Anomaly. In order to study activation properties of HXD-II, we have carried out beam irradiation experiments for a flight-equivalent unit of HXD-II, and have measured the internal background with electronics which is identical with a flight model.

概 要

Astro-E2 衛星に搭載される硬X線検出器 (Hard X-ray Detector II, HXD-II) は、10 keVから600 keVの領域での宇宙硬X線の観測を行う。その最大の特徴は、アクティブシールドによる反同時計数など、さまざまな工夫を凝らした徹底した低バックグラウンド化であり、それによって従来の検出器よりも1桁良い感度を達成すると期待される。こうして低バックグラウンド化を図ったあと、最後に残るのは、地磁場に捕捉された100 MeV程度の陽子によって引き起こされる放射化バックグラウンドである。HXD-IIが期待通りの性能を発揮するためには、この放射化バックグラウンドを正確に見積もって差し引くことが必須である。軌道上での放射化バックグラウンドを物

¹ 東京大学 University of Tokyo

² 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部 JAXA/ISAS

³ 埼玉大学 Saitama University

⁴ 理化学研究所 RIKEN

⁵ California Institute of Technology

⁶ 青山学院大学 Aoyama Gakuin University

⁷ 広島大学 Hiroshima University

理的に正しく解釈するためには、予め、その特性を地上試験によって確かめておくことが有効である。そこで我々は、加速器を用いて、衛星軌道上の環境を模擬した 100 MeV, 210 MeV の陽子を、実際に衛星搭載品と同等の検出器ユニットに照射する放射化試験を行った。照射後 10 分後から 40 日近く後まで、放射化させた検出器のバックグラウンドを、衛星搭載品と同等の回路系を用いて測定した。その結果、反同時計数が正しく動作していること、シールド部自身の放射化成分の洩れ込みは、シールドが無いときと比べて最大でも 2 倍程度であり、数日以上の上長寿命成分については、無視できるほど低いことが確かめられた。また、1 日で減衰してしまうような短寿命成分についても、1 日あたりに生じると予想される放射化バックグラウンドは、最大でも照射前の内在バックグラウンドと同じ、もしくは、それより低いと分かった。

1. はじめに

Astro-E2 衛星は、2004 年度に打ち上げが予定されている日本の 5 番目の X 線天文衛星であり、2000 年 2 月に軌道投入に失敗した *Astro-E* 衛星の再挑戦プロジェクトである。*Astro-E2* には 5 台の X 線望遠鏡 (X-Ray Telescope, XRT) が搭載され、そのうちの 4 台の焦点面には CCD を用いた X 線撮像分光器 (X-ray Imaging Spectrometer, XIS)、残りの 1 台には、世界で初めて衛星に搭載される X 線カロリメータ (X-Ray Spectrometer, XRS) がおかれている。*Astro-E2* の大きな特徴は、XRS の今までにない高エネルギー分解能に加えて、観測レンジが 0.2 ~ 600 keV と広いところにある。XRS および XIS は十数 keV よりも低い低エネルギー側での観測を行うのに対し、10 keV を超える硬 X 線領域での観測を担うのは、本論文の主題である硬 X 線検出器 (Hard X-ray Detector, HXD-II) であり、集光系を持たない非撮像型の検出器である。HXD-II は宇宙科学研究本部、東京大学、理化学研究所、埼玉大学、金沢大学、広島大学、大阪大学などの機関と、クリアパルス、明星電気、三菱重工などの企業が協力して開発が進められてきた。HXD-II は基本的には *Astro-E* 衛星に搭載した HXD-I を踏襲しつつ、最低限の改良を加えている。

硬 X 線・ γ 線領域での天体観測においては、高温プラズマや高エネルギー粒子の加速など、ひじょうに興味深い物理が多くあるにもかかわらず、あまり観測が進んでいない。なぜならば、このような領域では天体からの信号が少ないだけでなく、検出器のバックグラウンドが高いため、感度の良い検出器を得ることが難しかったからであり、硬 X 線領域で高感度の観測を行うためには、バックグラウンドを低くすることが必須である。HXD-II の最大の特徴は徹底した低バックグラウンド化にあり、それによって従来の硬 X 線検出器よりも 1 桁良い感度を達成する。こうしてきわめて低いバックグラウンドを実現したあと最後に残るのが、二次宇宙線陽子によって引き起こされる放射化バックグラウンドであり、これを正しく見積もって差し引くことは、HXD-II が期待通りの高感度を達成するために必須である。軌道上での放射化バックグラウンドを物理的に正しく解釈するためには、加速器を用いて衛星軌道上の環境を模擬した 100 MeV 程度の陽子を照射する放射化試験を予め行っておくことが最も有効である。

本論文では、HXD-II の衛星搭載品と同等の検出器ユニットに加速された陽子を照射する実験を行い、その放射化バックグラウンドを測定した結果について報告する。まず HXD-II の概要 (§ 2) を述べたあとに、衛星軌道上でのバックグラウンドについて簡単にまとめ (§ 3)、放射化試験の詳細と放射化バックグラウンド特性を解析した結果を述べる (§ 4, 5)。

2. HXD-II の概要

2.1. 基本構成

HXD-II のセンサ部は、 4×4 のマトリクス状に配置した 16 ユニットの Well 検出器と、その周囲を囲う 20 ユニットの Anti 検出器のシールド部とで構成される [1] [2] [3]。全体の概観を図 1 に示す。

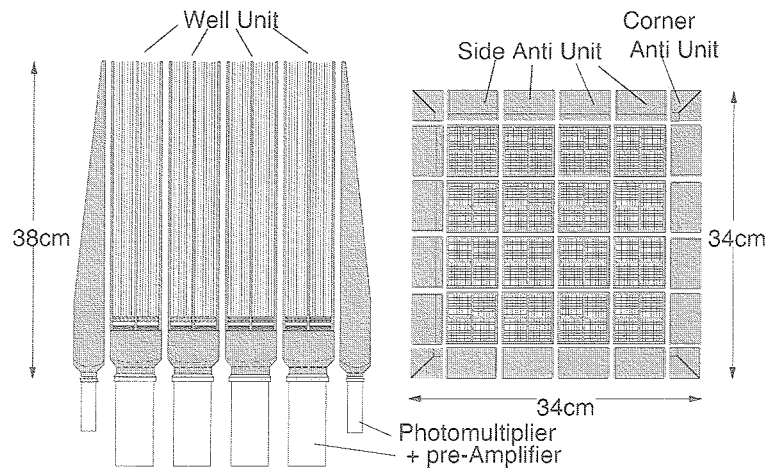


図1 HXD-IIの概観。断面図（左）と上から見た図（右）。

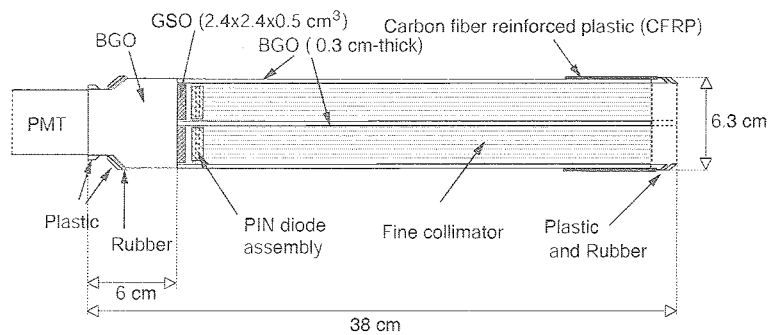


図2 Well検出器1ユニットの概観。天体からの硬X線は右側から入射する。

Well検出器は、主検出部に減衰時定数の短いGSO ($\text{Gd}_2\text{SiO}_5 : \text{Ce } 0.5 \text{ \% mol}$)、シールド部には減衰時定数の長いBGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) という二種類の結晶シンチレータを用いた井戸型フォスウィッチカウンタである [4]。Well検出器ユニットの詳細な構成を図2に示す。BGO結晶によるアクティブシールドは、ボトム部と4分割された細長い井戸型のトップ部から成る。検出部であるGSOの視野は、この井戸型のBGOによって絞られ、コリメータ自身が検出感度を持っている。ボトム部の底に光電子増倍管（浜松ホトニクス，R6231）が接着され、GSOもBGOも同じ光電子増倍管で読み出される。さらに低エネルギー側での観測を行うため、GSOの前面には2mm厚のPIN型Si半導体検出器（以下、PIN）を置き、そのエネルギー域では燐青銅のファインコリメータによってさらに視野を絞っている。天体からの信号は、井戸の開口部から入射し、低エネルギー側（10～60 keV）はPINで検出され、高エネルギー側（40～600 keV）はPINを透過してGSOで検出される。

このようなユニットを複数並べた複眼構成を用いることで、高いバックグラウンド計数を避けつつ有効面積を増やし、また、ユニット間の反同時計数をとることでさらなる低バックグラウンド化を図る。

外周をシールドするAnti検出器は、BGO結晶シンチレータからなる。これらはWell検出器に対するアクティブシールドになるとともに、高エネルギーまで大きい有効面積を保つことから、ガンマ線バースト検出器や天体の地没を利用したトランジェントX線源モニタといった役割を果たす。

2.2. 信号処理

Well検出器においては、GSOとBGOという蛍光時定数の異なる2つの結晶シンチレータからの信号を同時に1つの光電子増倍管で読み出す。この信号処理を行うフォスウィッチカウンタ処理回路の模式図を図3に示す。1本の光電子増倍管からはアノード信号と最終ダイノード信号の2つが取り出される。アノード信号は高速ディス

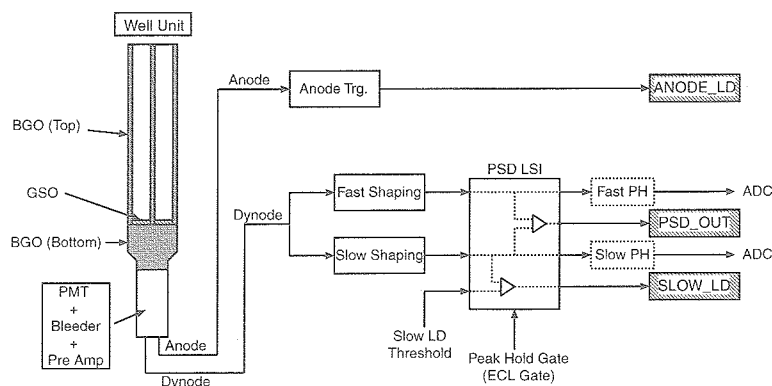


図3 フォスウィッチカウンタ信号処理回路

クリ回路に入力され、アノードLD信号 (Anode_LD) が生成されて、トリガーとして用いられる。ダイノード信号は、パルスハイト計測と波形弁別に用いられる。HXD-IIのセンサ部は、PINのリーク電流を抑えるために -20°C に保たれ、この温度での蛍光時定数は、GSOでは $\tau_{\text{GSO}} \sim 122 \text{ ns}$ 、BGOでは $\tau_{\text{BGO}} \sim 706 \text{ ns}$ である。この結晶の時定数の違いを利用し、Well検出器では、ダイノード信号を2つに分けて整形時定数の異なる2つの整形アンプに入力し、それらのピーク値を比較する方法を用いて波形弁別を行っている。一方の整形アンプはFastと呼ばれ、その時定数は τ_{GSO} 、もう一方はSlowと呼ばれ、その時定数は τ_{BGO} 程度にとつてある。GSOだけでエネルギーを吸収したイベントは、FastとSlowで波高値 (PH) にあまり差が出ない (Fast PH \sim Slow PH)。BGOイベントの場合は、Fastでは整形時定数が早過ぎて信号を積分しきれず、波高値に差が現れる (Fast PH $<$ Slow PH)。こうして純粋なGSO信号のみを取り出し、荷電粒子イベントやコンプトン散乱イベントを除去する。この波形弁別を行うために開発された専用の集積回路が、図3中のPSD-LSIである。このPSD-LSIの中では、コンパレータでFastとSlowのピークホールド出力波高を比較し、BGOイベントであれば信号 (PSD_OUT) を出力する。また、それとは別にSlowの波高値を外から与えた閾値と比べてディスクリ信号 (Slow_LD) を出力する。Slow_LDレベルはアノードLDレベルより低く設定されており、例えば、このWell検出器ユニットのPINでトリガーがかかったとき、同時に結晶シンチレータにも小さい信号があれば反同時計数で除去する、などの形で利用される。

HXD-IIでは、16本のWell検出器ユニットがトリガーも含めて独立に動作し、その信号は並列して処理される。Well検出器1ユニットからはAnode_LDに加えて4つのPINから独立した信号が発生する。これらの信号のORを取ってWell検出器のトリガー信号が生成される。トリガー信号がかかると、この1ユニットに対し、ただちに禁止信号が設定され、トリガー信号より $4 \mu\text{sec}$ 後のタイミングで、そのトリガー信号をアクセプトするかどうかの判定がなされる。その際、PSD_OUTがBGOを示していれば、そのイベントはバックグラウンドであるとしてトリガー信号はリジェクトされ、処理シーケンスは終了して禁止信号が解除される。PSD_OUTがBGOを示していなければ、フォスウィッチカウンタからのFastおよびSlow信号、PINの信号がAD変換され、イベントデータが生成される。このPSD_OUTによるイベントセレクションをハードウェアセレクションと呼び、あとで述べる、よりきめの細かなソフトウェアセレクション (§ 4.4) と併せて、Well検出器1ユニットからのイベントのうちGSOだけで全エネルギーを吸収したイベントを取り出すことができる。

3. 宇宙X線・ γ 線観測におけるバックグラウンド

検出器が受けるイベントのうち、目的とする天体からの信号ではないものを、バックグラウンドと総称する。衛星軌道上の環境において、その成分や成因は複雑であり、ここでは便宜的に以下の3つに分けて簡単に説明する。

3.1. 外来の光子

バックグラウンドのある部分は光子 (γ 線) であり, それはさらに, 視野内に混入する成分と視野外からシールドを透過してくる成分に分けられる. 前者は, 観測対象以外の天体からの光子を起源とし, 硬X線の領域で最も影響が大きいのは宇宙背景放射である. これらは, 撮像型の検出器であれば空間分解能を上げることで, HXD-II のような非撮像型の検出器であれば視野を絞ることで対処できる. 後者は, 視野外の天体に起源をもつもの, 宇宙線が地球大気や衛星と衝突して生じるものなど, さまざまな起源を持つ. これらはシールドを厚くすることで軽減できるが, γ 線は荷電粒子にくらべて透過力が大きいので, 十分にシールドするためには大きな質量を必要とする. とくにMeV領域ではコンプトン散乱が卓越するため, γ 線を完全に止めることは容易ではない. そこで, γ 線が入射したことを検知し, その時刻でのデータを捨てるという, アクティブシールドが有効となる. HXD-II では, Well検出器のBGO部およびAnti検出器の全体が, アクティブシールドとなっている. 例えば, 周囲に何も無いGSO結晶と, Well検出器に入れたGSOで環境バックグラウンドを測定して比べると, Well検出器の方が, 200 keV以下では1桁以上, 500 keV以上でも半分以下まで, バックグラウンドが低くなる [6].

3.2. 外来の荷電粒子

宇宙空間では銀河系からの一次宇宙線や太陽からの高エネルギー粒子といった荷電粒子が大量に存在するので, それらに起因するバックグラウンドを考慮する必要がある. これらの荷電粒子のうち85%以上は陽子, 10%程度がHeであり, その残りを重イオンが占める [7]. *Astro-E2* のような低周回軌道 (Low Earth Orbit, LEO) では, 一次宇宙線のうち検出器まで届くのは, 地磁気を突き抜けてくるような, 数GeVよりも高いエネルギーのものである. この荷電粒子自身は検出器でひじょうに大きな信号を作るので容易に除去できる場合が多いが, 回路系の応答がそうした大信号に対し誤動作しないようにする必要がある.

このような地球付近まで来た一次宇宙線は, 二次粒子の生成を繰り返しつつエネルギーを失っていく. こうして生じる数百MeV以下のエネルギーを持つ粒子が, 地磁場に補足され, それに沿った放射線帯を形成する. そこで硬X線・ γ 線の衛星は通常この放射線帯の下端に達しないよう, 高度500~600 kmのLEOに打ち上げられる. ところが, 地磁場の磁気双極子中心と地球の中心が少しずれており, 磁気回転軸と地球自転軸が一致していないため, 図4に示したように, ブラジル上空付近に放射線帯がLEOに食い込む部分があり, 南太平洋地磁気異常帯 (South Atlantic Anomaly, SAA) と呼ばれる. 日本から衛星を打ち上げる場合, 赤道に対して30°程度の傾斜角をもつので, 一日に6~9回は必ずSAAを通ることになる. SAA中の荷電粒子は, 一次宇宙線と同じく陽子がほとんどを占め, その密度はSAA以外の領域の1000倍以上と圧倒的に多い. 衛星が一日に浴びる荷電粒子の9割以上は, このSAA中のものである. 図5に, 我々が想定する高度500~550 kmでのSAA中の陽子スペクトルを示す. 低エネルギー側の陽子ほど多いが, HXD-IIの場合は平均して厚さ6 cmのBGOシールドに覆われていることを考えると, 低エネルギー側の陽子はシールドを透過できず, 結果として100 MeV付近でゆるやかなピークを持つ

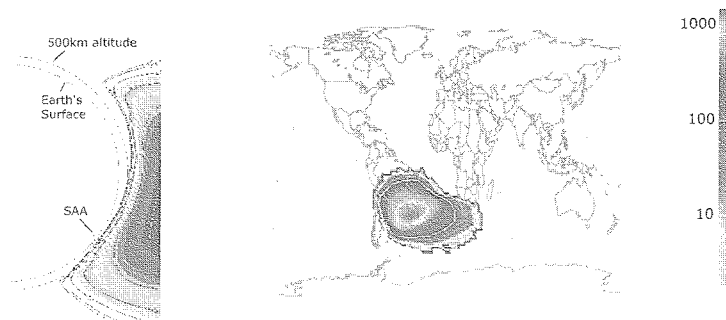


図4 (左) 地球と放射線帯の断面を模式的に表した図. (右) 高度500 kmでの陽子の分布 ($\text{proton cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) を世界地図に重ねた図 [8] [9]

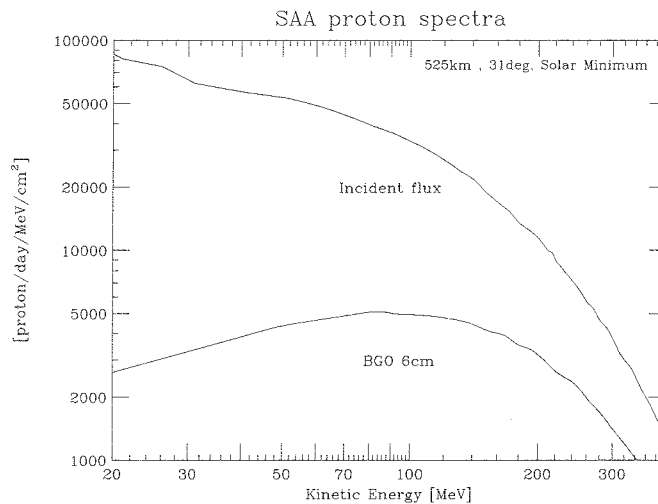


図5 SAAでの予想される陽子スペクトル。厚さ 6 cm のBGOを透過したあとのスペクトルも重ねて示す [10] [11] [12]

つような分布をする。本論文では、このBGO越しの陽子スペクトルを採用し、SAA中の陽子の典型的なエネルギーを 100 ～ 150 MeV と想定している。

3.3. 検出器の内在バックグラウンド

硬X線・ γ 線検出器は、高い阻止能を得るために原子番号 Z の大きい物質が用いられるため、天然に存在する放射性同位体が混入しやすく、微量放射能が内在する。これは、他のバックグラウンド要因を極限まで下げて初めて見えてくるものである。

さらに衛星軌道上では、混入とは別に内在バックグラウンドを引き起こす要因がある。上で述べたように、LEOでは、主にSAAを衛星が通過するあいだに陽子を浴びる。通常はSAA中では検出器の電源をオフにし、観測は行われないので、これは直接のバックグラウンドイベントとなるわけではない。しかし、SAA中の陽子が検出器の物質と原子核反応を起こし、内在の放射性同位体を生成してしまう。こうして放射化された検出器内の不安定同位体は安定状態にまで遷移していき、その過程において α 線、 β 線、 γ 線が放出され、大きなバックグラウンドとなる。放射性同位体はそれぞれの核種に固有の半減期に従って崩壊していくので、放射化バックグラウンドは時間変動する。原子番号 Z の大きい物質を使う硬X線・ γ 線検出器では、原子核反応によって放射性同位体が生成されやすく、また、遷移の過程で放出されるエネルギーは、ちょうど硬X線・ γ 線の領域である。LEOを飛ぶ低バックグラウンド検出器にとっては、このSAA中の陽子による放射化が最大のバックグラウンド源となると予想される。

3.4. HXD-IIの低バックグラウンド化

HXD-IIの最大の特徴は、その徹底した低バックグラウンド化にある。衛星軌道上の環境において低バックグラウンドを実現するために、さまざまな工夫がなされている。

§ 3.1 で述べたような外来の光子のうち、視野内に混入するイベントを落とすためには視野を絞る必要があり、Well検出器では、井戸型のトップ部によって視野を $4.6^\circ \times 4.6^\circ$ に絞っている。低エネルギー側では井戸型によるコリメーションではまだ広過ぎ、宇宙X線背景放射や近接する他の天体の混入が問題となる。そこで、パッシブなシールド（ファインコリメータ）を入れて、視野を $0.56^\circ \times 0.56^\circ$ (< 100 keV) にまで絞っている。HXD-IIのWell検出器の最も独創的な点は、井戸型のコリメータにBGO結晶を用いて、それをそのままアクティブシールドとしてフォスウィッチの構成要素としている点である。さらにHXD-IIでは、Well検出器ユニットを 4×4 の複眼状に配置しており、外周部分を囲む 20 本のAnti検出器を合わせると、すべてのWell検出器ユニットは隣接する 8 本のユニットと反同時計数を取ることができる。これにより、視野外からシールドを透過してくる γ 線や、検

出器自身からの散乱成分も落とすことができる。また、絞った視野や反同時計数といった工夫は、§ 3.2 で述べた荷電粒子に対しても有効である。

さらに、§ 3.3 で述べたような内在バックグラウンドについても工夫がなされている。硬X線を検出する際には、検出器を構成する物質として原子番号 Z のなるべく大きいもの ($Z_{\text{Bi}}=83, Z_{\text{Gd}}=64$) を選ぶことで、小さい体積で大きい阻止能を得ることができる。一方で、 Z が大きいということは、ウラン・トリウム系列を始め、天然に存在する放射性同位体を含みやすいことも意味する。実際にBGO結晶には放射性同位体の ^{207}Bi が含まれてしまうが、HXD-IIではビスマス鉱石の産地を選んで ^{207}Bi の混入量の少ないBGOを使用している。GSOでは、やはり天然放射性同位体の ^{152}Gd やウラン・トリウム系列の混入がバックグラウンド源となる。前者は同位体分離の技術を用いない限り取り除けないが、後者については、高純度の材料を選び、納入されたGSOのバックグラウンドを測定して放射性同位体の混入の少ないものを選定することで、内在バックグラウンドの低い結晶を揃えている[5]。また、光電子増倍管のガラス面や、PINがマウントされているセラミックケースも、特別に ^{40}K を含まないものになっている。

以上のような工夫により、HXD-IIはかつてない低バックグラウンドを実現すると期待され、実際にHXD-Iでは地上での低バックグラウンドを実現している。こうして極めて低いバックグラウンドを達成したときに最後に残るのは、やはり、衛星軌道上での宇宙線陽子による放射化バックグラウンド (§ 3.3) である。これは*Astro-E2*の軌道条件では無視できず、さらに衛星の地球周回に伴って複雑に時間変動する。

3.5. 結晶シンチレータの放射化バックグラウンド特性の理解

従来の宇宙硬X線・ γ 線検出器では、ターゲット天体の領域と、強い光源天体のいないバックグラウンド領域を、交互に観測してバックグラウンドを差し引く手法が取られている。しかし、HXD-IIは十分に低バックグラウンドであり、観測時間を有効に利用するために、上のようなオンオフ観測を行わず、バックグラウンドをモデル化して差し引いて観測を行う予定である。この方法は「ぎんが」衛星のLAC装置で最初に導入され[13]、「あすか」衛星のGIS装置でさらに詳細に研究された[14][15][16]。*Astro-E2*では、「ぎんが」や「あすか」と同様、高度約500 km、傾斜角 31° の略円軌道を用いるので、先行する2つの衛星の実績は大きな参考になるものの、LACやGISはガス検出器であり、放射化バックグラウンドに対する感受性はそれほど高くはなかった。これに対し、HXD-IIはより感受性の高い結晶シンチレータであり、自分自身の放射化について、その時間変動まで含めて正しく理解しておく必要がある。そのため、HXD-Iの時代から、SAA中での典型的なエネルギーである100–150 MeVの単色の陽子を照射する放射化試験を行い、結晶シンチレータの放射化特性を調べてきた[11][12]。

1996年に理研のリングサイクロトロンにおいて行われた放射化試験では、BGO ($2.4 \times 2.4 \times 1 \text{ cm}^3$) と、衛星搭載品に使われるものと同じサイズのGSO ($2.4 \times 2.4 \times 0.5 \text{ cm}^3$) に、135 MeVの陽子を照射した。その放射化バックグラウンドを、Ge検出器により外部から、また光電子増倍管を用いて内部から測定し、まずは、検出器を構成する物質であるGSOおよびBGO単体での放射化特性について調べた。100–200 MeVの陽子は、主に検出器の物質との(p, xn)反応によって放射性物質を生成する。外部測定によって、生成する核種とその量を、内部測定によって、実際に観測されるであろう放射化バックグラウンドスペクトルを得た。また、放射化したGSOの片面に放射化させていないBGOを隣接させて測定し、反同時計数によりどれだけ放射化バックグラウンドを落とすことができるかを調べ、短い寿命の放射化成分ほど効率良く除去できることが分かった。こうした実験結果を踏まえた上で、EGS 4 [18]を用いたシミュレーションにより、寿命の長い放射化成分が平衡に達したときの軌道上の放射化バックグラウンドのモデル化を行っている[11][12]。

このようにして、GSOおよびBGOの単体としての基本的な放射化特性を理解し、それをもとにした軌道上での放射化バックグラウンドスペクトルの見積りも行っている。しかし、Well検出器ユニットとして組み上げた時の放射化特性は、単体の結晶についての結果をただ組み合わせるというわけにはいかず、反同時計数の効果や、アクティブシールドの放射化成分の洩れ込みなど、実際にユニットごと放射化させて測定しなければ分からない

点が多く残されている。

4. HXD-II の放射化試験

4.1. 研究の目的

ここまでの章で述べてきたように、HXD-IIが軌道上に上がると、主にSAA中の陽子によって結晶シンチレータ内に放射性同位体が生成され、大きなバックグラウンド源となると予想される。Well検出器を構成するBGOおよびGSOそれぞれについては、放射化によって生成される核種やその量などといった基本的な特性をすでに調べている。しかし、それらをWell検出器ユニットとして組み上げた場合、放射化の影響は検出器の複雑なジオメトリや回路系の応答に依存すると予想される。よって、HXD-IIとしての放射化バックグラウンドを知るには、実際に検出器ユニット全体が放射化した場合の実測データが必要である。

GSO内に生成した放射性同位体の遷移で、GSOを透過するような γ 線を伴う場合は、 4π 方向を覆うBGOアクティブシールドによって落とすことができ、反同時計数は放射化バックグラウンドに対して有効であると期待される。しかし、このアクティブシールド自身も放射化し、バックグラウンド源となる。BGO内で生成された核種からの放射が、BGOのLD以上のエネルギー損失を伴わないでBGOを透過し、GSO内でエネルギーを失って信号が検出されたら、反同時計数で落とすことはできない。こうしたBGO放射化成分のGSOへの洩れ込みが、かえってGSOのバックグラウンドを増加させる可能性がある。これによって、もしGSOの放射化バックグラウンドが桁違いに悪化してしまえば、単体GSOをもとにした結果は使えないことになる。それとも、影響は数倍程度で済むのか、まったく無視しても良いのか、実際に調べる必要がある。

そこで、実際の衛星搭載品と同等の検出器ユニットに、SAA中と同じようなエネルギーにまで加速された陽子を照射し、その後、衛星搭載品と同等の性能を持った回路系を用いて測定を行い、放射化特性を調べた。ここでは、フォスウィッチ機能およびユニット間の反同時計数による放射化バックグラウンドの軽減と、BGOアクティブシールドの放射化が主検出部であるGSOとPINに与える影響という、2つの項目を定量的に評価することを目的とした。

放射化試験は2回にわたって行われた。1回目は、Well検出器とAnti検出器を1ユニットずつ並べて置いた状態で同時に放射化させ、Well検出器の放射化バックグラウンド特性を調べた。また、BGOアクティブシールドの放射化成分のPINへの洩れ込みを調べるために、PINの位置に室温で動作の可能なCdTeダイオードを置いてバックグラウンドを測定した [19]。2回目の放射化試験では、Well検出器1ユニットのみをビームライン上に置いて放射化させ、1回目の試験で取得できなかった、ビーム照射直後の短寿命成分の測定を行った。

4.2. 放射化試験（1回目、理研）

4.2.1. 概要

1回目の放射化試験は、2002年9月30日から10月1日にかけて、理化学研究所のリングサイクロトロンを用いて、E3照射室で行われた。被照射体はWell検出器とAnti検出器が1ユニットずつであり、Well検出器はPINが入っていない他は、ユニットとしてほぼ完全に衛星搭載品と同じである。

用いたビームのパラメータは、210 MeVの陽子で、強度は $\sim 10^6$ proton s^{-1} である。実際の衛星軌道上では結晶全体が陽子を浴びるので、この地上試験でもWellおよびAnti検出器のできるだけ広い範囲にわたって陽子を照射するため、ビームサイズは最終取り出し口の大きさ（半径6 cm）ぎりぎりまで広げた。ビームの広がりにはビーム取り出し口に据え付けたZnSが蛍光で光る様子をビデオカメラで撮影し、照射室外のモニタ画面で確認した。

図6に被照射体の配置を、ビームの広がりと一緒に示す。被照射体となるWell検出器とAnti検出器を並べ、GSOに陽子が照射されるように、ビームラインに対して 45° の向きに置いた。上流側にAnti検出器を置き、実際の軌道上と同じように陽子がAnti検出器越しにWell検出器に照射されるようにした。被照射体より下流側には、

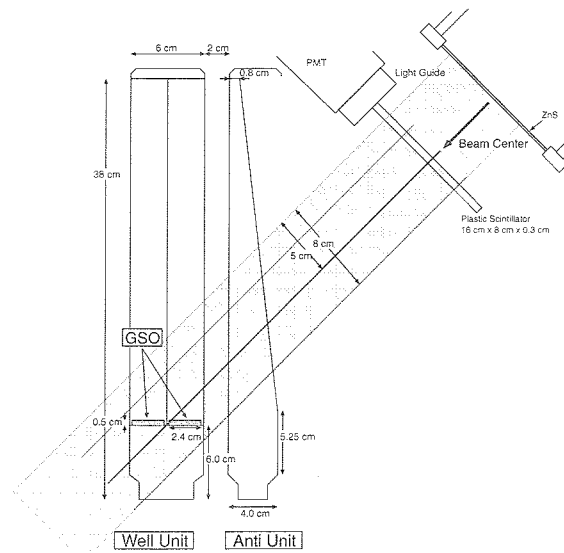


図6 放射化試験（1回目，理研）の照射セットアップ。ビーム取り出し口のフランジにZnSが取り付けられてある。ビーム取り出し口の中心から伸ばした位置に，Well検出器GSOの中央部分が来るように被照射体を置いた。実際のビームの広がりを，影を付けた部分で示してある。

ストッパとなるAl板が置かれている。

Well検出器にはPINの位置での放射化バックグラウンドを測定するための，小面積（ $5 \times 5 \times 0.5 \text{ mm}^3$ ）と大面積（ $21.5 \times 21.5 \times 0.5 \text{ mm}^3$ ）のCdTeダイオードが1つずつ，それぞれファインコリメータに装着されて井戸に差し込まれている。照射中は陽子ビームに当たらないよう，ファインコリメータは半分だけ差し込んだ状態にして，CdTeダイオードをビームライン上からずらしておいた。小面積の方は動作が安定しなかったため，後の解析では大面積のCdTeダイオードの結果のみを用いた。以後，CdTeダイオードと言った場合は，すべて大面積の方のみを示すものとする。CdTeダイオードの信号はWell検出器の井戸型の口の方から外へケーブルを引き出してCharge Sensitive Amplifier（CSA）につないでいる。

Well検出器，CdTeダイオード，そしてAnti検出器それぞれの高圧電源は照射室の外に置き，ビーム停止後なるべく早く高圧を投入して放射化スペクトルを測定できるようにした。検出器からの信号は4本あり，Well検出器のアノード出力，ダイノード出力，Anti検出器の出力，CdTeダイオードのプリアンプ出力である。測定系は照射室前の廊下に置いてあり，照射室内の検出器とは50 mのBNCケーブルで接続し，照射後に高圧を入れたらすぐにデータ取得ができる状態にしておいた。

放射化バックグラウンドの強度を正確に算出し，過去の実験結果などと定量的に比較するためには，照射した陽子の総数を正確に知る必要がある。そこで，広がったビーム全体よりも大きい3 mm厚のプラスチックシンチレータを図6のように被照射体の上流側に置き，それを光電子増倍管で読み出し，アノード信号を照射室の外まで引き出して，ディスクリミネータとスケーラで直に数えた。この計数系の精度は，ビームのパンチ構造に起因する統計的なゆらぎを考慮して，2倍以内である。

照射は表1に示したように，2回にわたって行った。1回目は，放射化の短寿命成分のスペクトルを取得することを目的とし，照射直後のカウントレートが高くなりすぎないように少ない照射数で行った。しかし実際には，この1回目の照射直後のカウントレートは，Anti検出器で70 kHz，Well検出器で50 kHzとなり，過去の試験（1996年 [11]）からスケールして予想される値よりも1桁高くなり，データ取得系の限界を超えてしまった。これは検出器自身の放射化によるものではなく，ビームストッパとして被照射体の下流に置いていたAl板の放射化バックグラウンドを検出してしまった成分が大きく効いていたことと，直前のビームの位置調整のために強度の

表1 照射の概要 (2002年10月1日, 理研)

ビーム	照射開始	照射終了	照射時間 [s]	照射レート	照射数 [†]
210 MeV	～ 0:58	～ 1:09	～ 660	～ 0.9 MHz	5.9×10^8
陽子	～ 8:27	～ 8:46	～ 1185	～ 2.5 MHz	3.0×10^9

† 計数系のスケアラの値

高い陽子ビームが照射室内に長時間あてられていたため、照射室全体が放射化していたことが原因と考えられる。そのため、放射化の長寿命成分を測定することを目的とした2回目の照射では、照射する陽子の数を当初予定していた10年分から減らし、150日分とした。軌道上での1日分のGSOへの照射数を 10^7 としてこれを150倍し、さらにビームの広がりに対するGSOの占める面積の割合 ~ 0.5 で割ると、照射する陽子の数は $\sim 3 \times 10^9$ となる。計数系の値を見ながらビームを照射し、予定した照射数になるあたりで照射を止めることにした。また、1回目の照射による放射化成分が減衰するのを待つために、2回目の照射までに7時間の間隔をあけた。

4.2.2. 放射化バックグラウンドの測定

HXD-IIとしての放射化バックグラウンド特性を調べるためには、異なるユニット間での同時計数が重要である。そこで、Well検出器、Anti検出器、およびPINの代わりのCdTeダイオードまで含めて、すべてのセンサからの信号を1つの測定系で同時に読み出してデータを取得した。

表2 放射化バックグラウンド測定記録 (1回目, 理研)

場所	測定開始日時	終了日時	ケーブル
ビームライン上 (E3 照射室内)	10/01 8:45	10/01 9:21	無
E3 照射室前廊下 (管理区域内)	10/01 10:24	10/03 14:20	有
宇宙放射線研実験室 (理研本館)	10/03 19:00	11/08 16:33	有

放射化後の測定は、表2にまとめてあるように、照射直後の半時間ほどはそのままビームライン上で、その後、E3照射室前の廊下に組んだケーブルに移し、さらに照射の3日後には放射線管理区域外に持ち出して、理研・宇宙放射線研究室の一角にて、39日後まで測定を続けた。測定にあたっては、環境バックグラウンドを低く抑えるために、5cm厚の鉛ブロックの内側を2mm厚のSnシートで覆ったケーブルに、ビームライン上と同じようにWell検出器とAnti検出器を隣合わせに入れた。ケーブルの中に入れることにより、環境バックグラウンドの連続成分が1桁半以上低くなり、内在放射性同位体に起因する ^{152}Gd のピークがはっきりと見えてくる (§ 3.4 および図10)。

バイアス電圧は、Well検出器に850V、Anti検出器に900V、大面積のCdTeダイオードには300Vをかけて測定した。CdTeダイオードはポラリゼーションの影響 [20] を防ぐため、連続しての測定は3時間以内とし、そのつど高圧を入れ直した。

測定に用いたデータ取得系の模式図を図7に示す。衛星搭載品を模擬するために、衛星搭載品と同等のアナログ回路系を用いて放射化バックグラウンドを測定した。Well検出器の光電子増倍管からの信号のうち、アノード信号はAnode Triggerモジュールにおいて高速ディスクリミネータ回路で処理され、Anode_LD信号が出力される。

最終ダイノード信号はCSAで増幅されたあと、WPU-AモジュールでFastとSlowに分けられてゲイン調整を行ない、整形される。その後、PSDモジュールに入れられ、ピークホールドされたFastおよびSlowの波高値と、それらをコンパレータで比較したPSD_OUT信号、また、Slowのディスクリ信号であるSlow_LDが出力される。これら3つのモジュールには、衛星搭載品と同等の回路が組み込まれている。Anti検出器からの信号は、同じく衛星搭載品と同等の回路を組み込んだTPUモジュールで処理され、LD信号と整形信号が出力される。CdTeダイオードからの信号は、プリアンプ出力を波形整形アンプに通し、そこで信号を2つに分けて、1つはADCへ、もう1つはディスクリに入れてLD信号をつくる。

各センサからのLD信号はVMEスケーラーで独立に数えると同時に、これらのOR信号がトリガーシーケンスに送られる。このORを取ったあとのトリガー信号をイベント処理のすべての起点として、ゲート信号、取り込み開始信号、リセット信号などの、イベントデータ取得に必要な信号を作っている。各信号は、基本的にHXD-IIと同じタイミングを、NIMモジュールのゲートジェネレータなどを組み合わせて作っている。

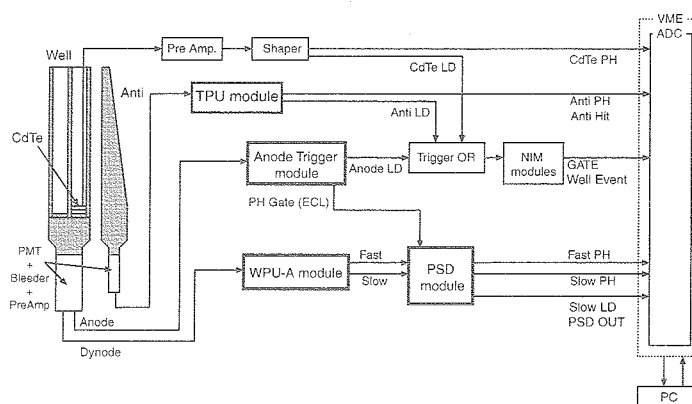


図7 放射化試験（1回目、理研）の測定系。

実際のHXD-IIの信号処理では、データ容量の節約とデッドタイムの軽減のためにPSD_OUTによってBGOイベントを落とすハードウェアセレクションを行なうが、今回の測定系では、BGOイベントを含めて、すべてのイベントデータを取得している。PSD判定はオフラインでの解析時にソフトウェアで処理する。スケーラーには、クロックとゲート信号、イベント取得終了の信号も入力しており、これらを用いて解析時にデッドタイム補正を行う。こうして取得するイベントデータに含まれるのは、以下の通りである。

- ・ FastおよびSlow, CdTeダイオード, Anti検出器の合計4つの波高値。
- ・ PSD_OUT, Slow_LD, Well検出器のイベントが正しくトリガーをかけたことを示すWell_Event, Anti検出器が信号を検出したかどうかを示すAnti_Hitの合計4つのフラグ情報。
- ・ クロック, ゲート信号, イベント取得終了信号と, Well検出器, Anti検出器, CdTeダイオードそれぞれのLD信号の合計6つのスケーラ値。

4.3. 放射化試験（2回目、放医研）

4.3.1. 概要

2回目の放射化試験は、2003年12月17日早朝から、放射線医学総合研究所・重粒子治療センターのシンクロトロン（Heavy-Ion Medical Accelerator in Chiba, HIMAC）を用いて、物理・汎用照射室で行なわれた。ビームラインはPH1コースを用いた。照射粒子は100 MeVの陽子である。被照射体はWell検出器1ユニットのみであり、これは、1回目の放射化試験と同一のものである。ただし、2回目の放射化試験時には、PIN型シリコン半導体を装着したファインコリメータが2つ挿入されている。

被照射体のセットアップを図8に示す。ビームライン上に鉛ブロックと銅ブロックであらかじめケーブルを組ん

だ中に、ビームラインと平行にWell検出器を設置して、井戸型の口の方からビームを照射した。照射中はビームの通り道にあたる部分の鉛・銅ブロックは取り除いておき、ビーム停止後入室できるようになると同時に組み直した。ビームスポットは1 cmに絞り、1つの井戸穴に完全に入るように、即ちGSO 1つに陽子が照射されるように位置を調整した。照射した陽子を数えるため、Well検出器の上流側にプラスチックシンチレータを置き、1回目の放射化試験と同様にして、光電子増倍管で読み出したアノード信号を照射室の外まで引き出して、ディスクリミネータとスクエーラで数えた。それとは別に、Well検出器のビームが当たる位置に衛星搭載品と同じサイズのGSOを貼りつけて同時に放射化させ、その放射化レベルを以前の実験（1996年 [11]）とくらべることで照射数のリファレンスとした。

2回目の放射化試験の目的は、1回目では取得できなかった、照射後数時間以内のひじょうに短寿命の放射化成分を取得することであり、照射直後のレートが測定系で取得できる上限の10 kHzより低くなるように照射数を少なめに設定した。プラスチックシンチレータで測った照射数は、 2.2×10^8 であった。リファレンスGSOの放射化バックグラウンドスペクトルを1996年に理研で行なわれたビーム実験の結果と比較したところ、照射数は $\sim 1.4 \times 10^8$ と見積もられ、シンチレータの結果と測定精度内で一致した。この照射数は、1回目の放射化試験と同様に軌道上での1日分のGSOへの照射数を 10^7 として、約20日分に相当する。

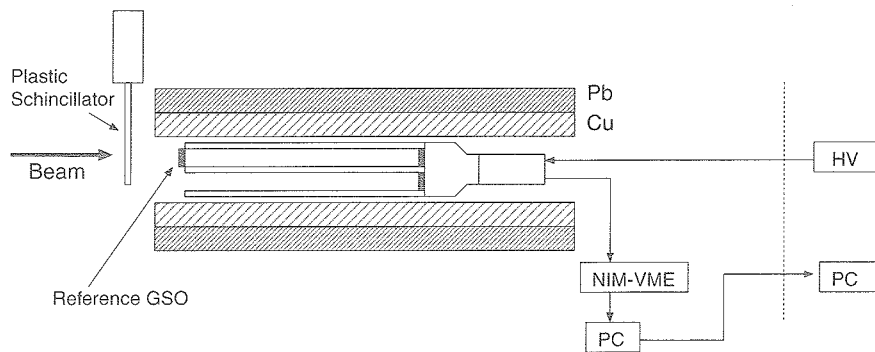


図8 放射化試験（2回目、放医研）の照射セットアップ。

Well検出器からの信号を処理する測定系のうち、プリアンプ用電源、NIMおよびVMEモジュール、データ取得用PCは照射室内に置き、照射室外からネットワーク越しに測定系を制御した。高圧電源だけは照射室外に引き出して、ビーム停止後速やかに高圧を投入して測定を行なえるようにした。

4.3.2. 放射化バックグラウンドの測定

ビーム停止と同時に放射化バックグラウンドの測定を開始し、ビーム停止から10分後には、ケーブルも完全に組み上げられた状態になった。そのまま4時間後までビームライン上で測定を続けた。その後、東京大学の実験室へ持ち帰り、まったく同じようにケーブルの中に設置して測定を続けた。バイアス電圧は900 Vを印加した。

測定系は、基本的には1回目の放射化試験時と同じである。ただし、今回はセンサがWell検出器のみであり、複数あるセンサのLD信号のORではなく、Well検出器のLD信号であるAnode_LDがそのままトリガー信号となる。このAnode_LDをスクエーラで数え、イベント取得終了信号との比を取ることでデッドタイムを補正した。イベントセレクションなど、基本的な解析手法も、1回目の放射化試験時と同じである。

4.4. 2次元スペクトル

Well検出器で信号が検出されると、FastおよびSlowの波高値がイベントデータとして記録される。一例として、 ^{137}Cs の線源を照射した測定の、横軸にFastの波高値（Fast PH）、縦軸にSlowの波高値（Slow PH）をとった頻度分布を図9の左側に示す。このような図を、これ以降2次元スペクトルと呼ぶ。BGOイベントではFast PH < Slow

PHとなり、この2次元スペクトル上では、傾きが1よりも急な直線上に乗る。一方でGSOイベントはFast PH～Slow PHであり、2次元スペクトル上では傾きがほぼ1の直線上に乗る。この図のFast PH～Slow PH～3000 chあたりにあるピークが、GSOで光電吸収された662 keVのイベントである。BGOのブランチ上には、Slow PHが～1200 chと～500 chの2ヶ所にイベントのピークがあり、それぞれBGOのボトム部とトップ部での662 keVの全吸収イベントに相当する。このBGOとGSOの全吸収ピークの間には、コンプトン散乱成分によるイベントが見られる。このようにFastとSlowを2次元上にプロットすることで、GSOとBGOのイベントを切り分けることができる。

2次元スペクトルからGSOブランチのみを切り出して、Slow PHもしくはFast PHに投影すると、GSOのみの1

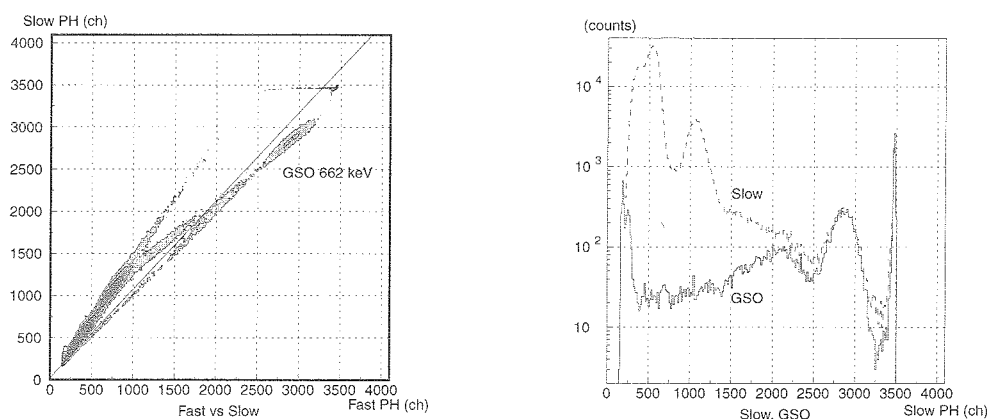


図9 (左) ^{137}Cs を照射したときの2次元スペクトル。(右) 左の2次元スペクトルの全イベントを射影して得たSlowスペクトルと、直線より下側のGSOイベントだけを切り出して射影したスペクトル。GSOスペクトルで250 ch以下に見えるイベントの増加は、BGOイベントを除ききれなかったためのもので、エネルギーでは60 keV以下に相当する。

次元スペクトルが得られる。イベントを切り出すにあたり、まず、 ^{137}Cs , ^{22}Na , ^{152}Eu , ^{133}Ba といった線源を用いてエネルギー較正を行い、2次元スペクトルをGSOのエネルギー相当のFast Energy—Slow Energy空間に変換した。このとき、662 keVでのエネルギー分解能は、1回目の放射化試験では～11%，2回目では～10%であり、放射化バックグラウンドを測定した全期間に渡って安定していた。こうしてGSO相当のエネルギー空間に変換した2次元スペクトルにおいて、GSOブランチの広がりも考慮して切り出し方を決め、GSOの1次元スペクトルを得た。このイベントセレクションを行う前後での1次元スペクトルを図9の右側に重ねて示す。BGOイベントやGSOとBGOの両方にまたがるコンプトン散乱イベントが効率良く落とされ、GSOイベントのみのスペクトルを切り出すことができています。

照射前にこの測定系によって得たWell検出器GSOのバックグラウンドを図10に示す。360 keV付近にピークが見られ、これはGSOにもともとから内在する放射性同位体（存在比0.2%）の ^{152}Gd が α 崩壊をする際に放出される、 $E_\alpha = 2.14$ MeVの α 線によるものである。結晶シンチレータでは α 線と $\beta \cdot \gamma$ 線では発光量が違い、GSOではその比 L_α/L_γ は0.20程度という報告があり[21]、2.14 MeVの α 線が360 keVにピークをつくることは理解できる。1000 keV付近にも幅の広いピークらしい構造が見えており、これも、GSOに内在するウラン・トリウム系列の放射性同位体からの、 $E_\alpha = 3.95 \sim 8.78$ MeVに分布する α 線を起源としていると考えられる[6]。

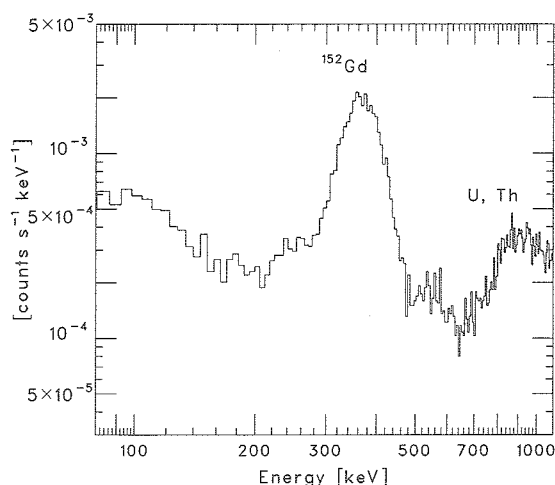


図10 照射前のGSOバックグラウンドスペクトル。

5. HXD-IIの放射化バックグラウンド特性

5.1. GSOの放射化バックグラウンド

1回目の放射化試験時の、照射後9000秒後から～40日後までの放射化バックグラウンドスペクトルを図11左側に示す。これは、Well検出器で検出された全イベントをSlow PHを横軸に取って示したものである。照射前と比べて、照射直後ではイベントが2桁以上も増加している。放射化バックグラウンドは時間とともに減衰していき、38日後には照射前の2倍以下にまで下がっている。ラインのような構造がいくつか見られるが、SlowスペクトルにはGSO、BGOのボトム部とトップ部のそれぞれの光電吸収ピークがすべて含まれており、それらを分離して取り出すことは難しい。

§4.4で述べたように、2次元スペクトル上でGSOイベントを切り出すソフトウェアセレクションを行ない、GSOで全エネルギーを吸収したイベントを取り出すことができる。すなわち、BGOアクティブシールドとの反同時計数を取ったあとのGSOの放射化バックグラウンドスペクトルが得られる。1例として、照射後4から5日後のイベントセレクションをかける前のSlowスペクトルとセレクション後のGSOスペクトルを図11右側に示す。これを見ると、SlowスペクトルはGSOよりも1桁以上も高いレベルであり、Well検出器の放射化バックグラウン

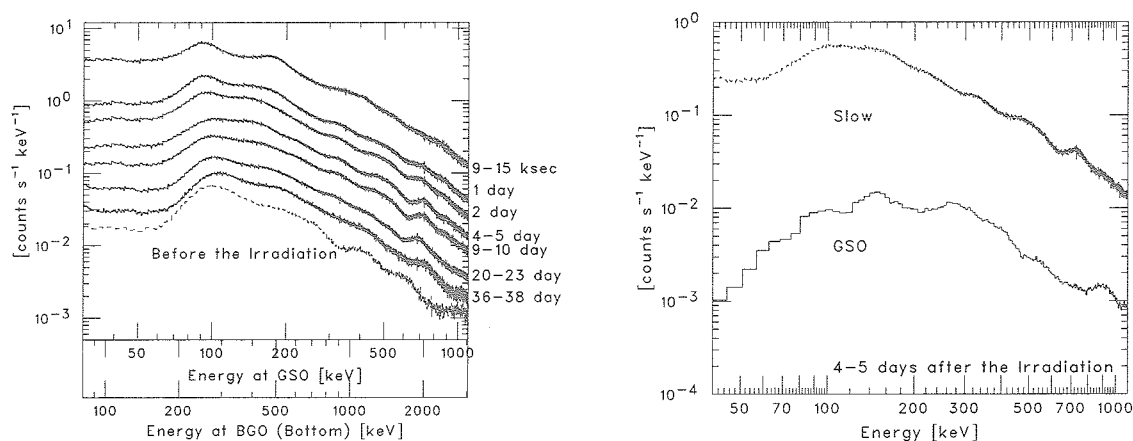


図11 (左) Slow 放射化バックグラウンドスペクトル。(右) イベントセレクション前後のスペクトル。照射後4～5日後のデータを使用。

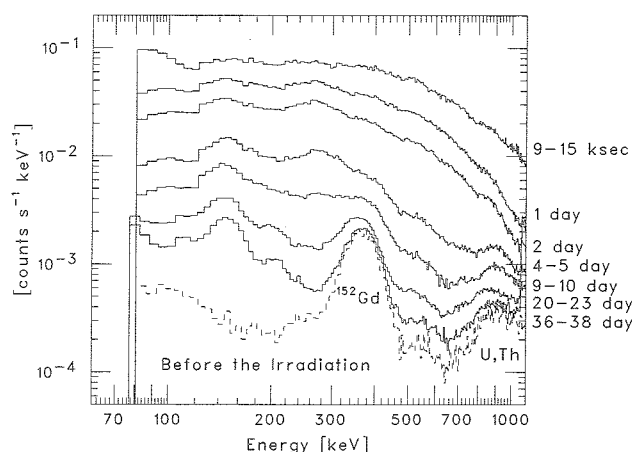


図12 GSO放射化バックグラウンドスペクトル (1回目, 理研, 80 – 1100 keV). 4 – 5 day のものは, 図11 (右) のGSOスペクトルと同一であり, 破線は照射前のスペクトルで, 図10と同じ.

ドは, BGOの体積がGSOの40倍であることから予想できるように, BGOアクティブシールドからの成分がほとんどを占めていることが分かる. ここで重要なのは, これほどBGOの計数ばかりが高い状態でも, イベントセレクションによって効率良くGSOイベントを取り出すことができていることである.

こうして得られた照射後9000秒後から38日後のそれぞれの時間帯でのGSO放射化バックグラウンドスペクトルを図12に示す. このようにGSOイベントだけを取り出してみても, 照射後の放射化バックグラウンドは照射前と比べて2桁以上も高い. これらは時間とともに減衰し, 150 keV付近や270 keV付近にライン構造が見えてくる. 照射後20日ほど経ったあたりで内在バックグラウンドである ^{152}Gd のピークが見え始め, 40日近く経ったところで, 300 keVより高いエネルギーでは, ほとんど照射前と同じレベルまで減衰している. 一方で, 低エネルギー側, とくに100 keV付近では, 40日近くが経過してもなお照射前の数倍以上の放射化バックグラウンドが残っている.

ここまでは1回目の放射化試験の結果であるが, 次に, 2回目の放射化試験で得られた, 数時間よりも短い時間帯でのGSOの放射化バックグラウンドスペクトルを図13に示す. 照射後1, 2時間以内のひじょうに短い時間帯では, 511 keVのラインが強く見えている. この511 keVの減衰は早く, 3時間後には, もうほとんど見えなくなっている. また, 1回目では測定系に問題があったために100 keV以下のスペクトルが完全には取得できなかったが, 2回目の放射化試験での測定では60 keVまでスペクトルを取得することができた. 図13が図12に比べ, 同じ時刻でも低いカウント数になっているのは, 照射した陽子の数が違うためである.

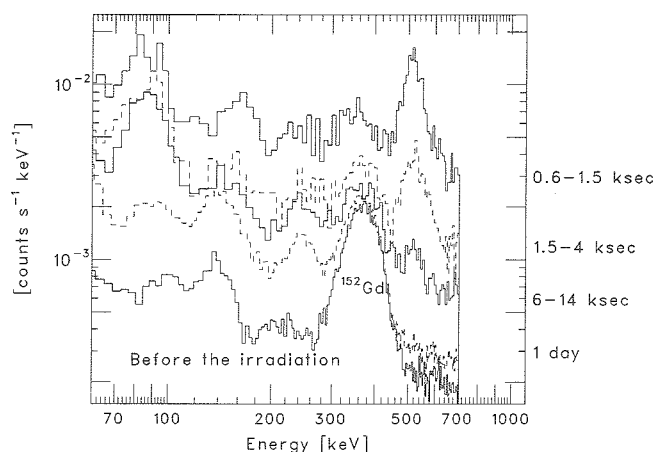


図13 GSO放射化バックグラウンドスペクトル (2回目, 放医研, 60 – 700 keV).

5.2. Antiユニットとの反同時計数

1回目の理研での放射化試験ではWell検出器とAnti検出器を隣接させて同時に放射化させ、そのままの配置で同一の測定系で放射化バックグラウンドの測定を行なった。これにより、ユニット同士の反同時計数を取ることができ、Well検出器の放射化バックグラウンドがどれだけ除去されるかを調べることができる。

Anti検出器との反同時計数を取るということは、つまり、GSOイベントに対してAnti検出器で禁止信号をかけ、Anti検出器が同時に信号を検出しているようなGSOイベントは、バックグラウンドとして除去するというのである。バックグラウンド除去前後のGSOのライトカーブを作り、実際に除去効率を、その時間変化も含めて見られるようにしたのが図14である。ここでの除去効率は、反同時計数を取る前後のカウント数の差を、除去前のカウント数で割ったものである。これを見ると、照射後の早い時間では、GSOイベントのうちの15%近くを、隣接するAnti検出器の反同時計数で除去できている。除去効率は数日後には～5%にまで減少している。途中、照射後 10^6 秒後あたりで効率が一時的に上がるが、全体的には時間とともに減少していく。これは、照射直後で支配的な寿命の短い核種は、一般的に遷移するときのエネルギー差(Q値)が大きいのでエネルギーの高い γ 線が出やすく、それがGSOやその周囲のBGOを透過してAnti検出器で検出されるのに対し、寿命の長い核種では、一般的にQ値が小さく、GSOを透過できるほどの高いエネルギーの γ 線($E_\gamma > 300$ keV)を伴う遷移が少ないためと理解できる。

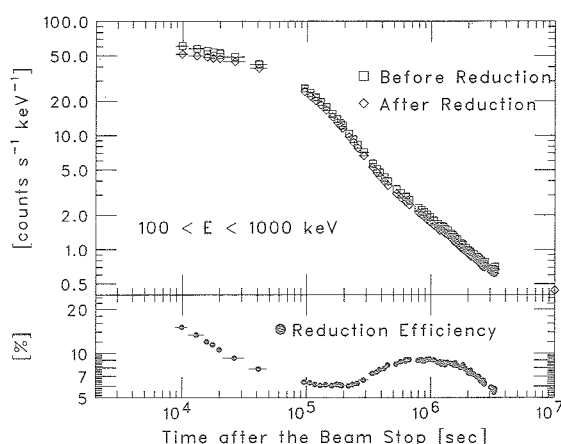


図14 Anti検出器との反同時計数を取る前後のライトカーブ（上段）と、それによるバックグラウンド除去効率（下段）。

5.3. 単体 GSOとの比較

前項まででは、Well検出器のフォスウィッチ構成を利用した反同時計数（2次元スペクトルでのイベントセレクション）およびAnti検出器との反同時計数という、2段階にわたってバックグラウンドを軽減したGSOの放射化スペクトルを得た。次に、この反同時計数で落とせるだけ落としたあとのGSO放射化スペクトルに、井戸型のアクティブシールドを使う上で最も心配されるBGOアクティブシールド自身の放射化成分がどれだけ洩れ込んで寄与しているかを調べた。そのためには、BGOシールドごと放射化させた今回の結果と、GSOだけを放射化させた実測データを比較すれば良い。そこで、2度にわたって行った今回の実験結果と、以前に我々のグループで行われたGSO単体の放射化の実測データ [11] とを比較した。

まず図15で、Well検出器ごと放射化させたGSOのライトカーブを、GSO単体の放射化データと比べた。放射化の強度は、照射粒子の数とビーム入射方向の原子数との積に比例するので、ライトカーブは照射した陽子の総数とビーム方向のGSO素子の厚みで規格化した。1回目の理研での放射化試験のライトカーブは、Anti検出器との反同時計数まで取ったあとのもので、2回目の放医研での放射化試験で得たのは、Well検出器自身のフォスウィッチ構成による反同時計数までを行なったあとのGSOイベントのライトカーブ（黒丸）である。この図を見る

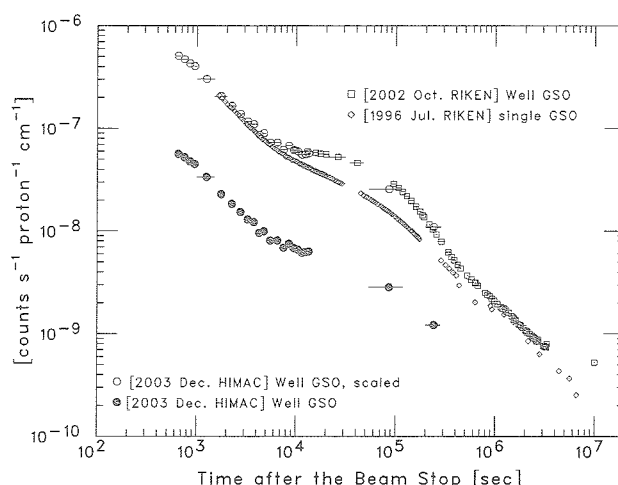


図15 GSO放射化バックグラウンドのライトカーブ。菱形が1996年の単体GSO，四角がWell検出器GSOの1回目である。黒丸は2回目の結果，白丸はそれを9倍したものである。

と、今回の1回目の結果と単体GSOのライトカーブはよく重なるが、2回目の放医研の結果だけは明らかに低い。原因として、照射した陽子数の不定性が考えられる。プラスチックシンチレータによる計数系では照射数は 2.2×10^8 であり、Well検出器の井戸の入口に貼り付けたリファレンスGSOからは $\sim 1.4 \times 10^8$ と見積もられ、二種類の異なる手法で得た計数が一致している以上、計数系に大きな間違いがあったとは考えにくい。Well検出器の入口の部分では確かに計数通りの陽子が照射されていたが、Wellの上流側の入口とGSOの位置がビームライン上からずれていたためにWell検出器のGSOに実際に照射された陽子数が1/9にまで少なくなってしまった可能性が考えられる。また、単体GSOに照射された陽子が135 MeVであったのに対して、放医研では100 MeVであり、リファレンスGSOや井戸に挿入されたフィンコリメータによってさらにエネルギーが低くなって、核種の生成量が全体的に減った可能性も考えられる。

照射数の不定性等に関しては決定的なことは分らないが、ライトカーブの傾きに注目して放射化成分の減衰していく時定数を見るために、図15では、2回目の放医研での実測データを、1回目の理研での結果とつながるように9倍して重ねてある（白丸）。これを見ると、数時間より短い時間帯、数日より長い時間帯では、単体GSOの結果とほとんど重なり、BGOアクティブシールド自身の放射化成分の洩れ込みは無視できると分かる。 10^4 か

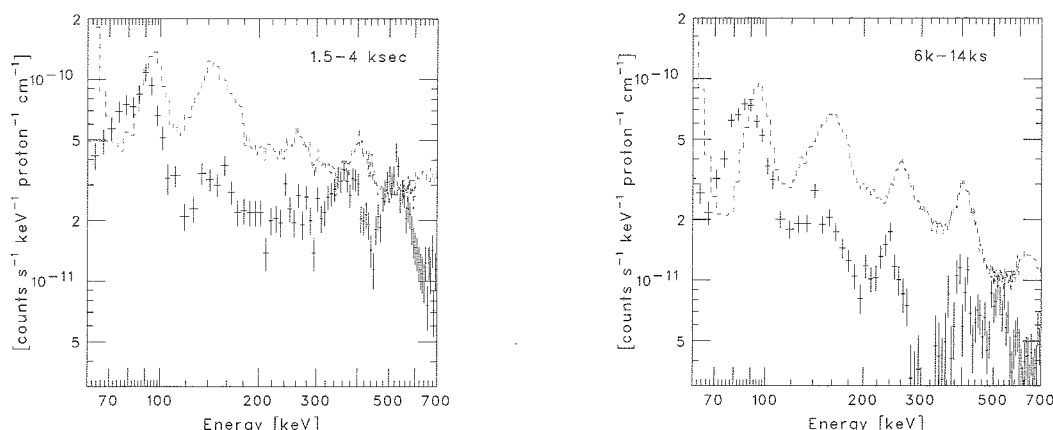


図16 (左) GSO放射化バックグラウンドスペクトル (1, 4 時間後)。十字で示したのがWell検出器GSOの放射化スペクトル (2回目, 放医研)。ただし、照射前のバックグラウンドを予め差し引いてある。破線で示したのが、単体GSOの放射化スペクトル [11]。放射化させていないBGOを隣接させて反同時計数を取ったあとのスペクトルである。

ら 10^5 秒後あたりでは、単体GSOと比べてWell検出器ごと放射化させた場合には超過が見られるが、これがすべてBGOアクティブシールドからの洩れ込みであったとしても、その影響は2倍程度である。

次に、図16および17に示したように、照射後のある時間帯ごとに、今回のWell検出器のGSO放射化スペクトルと、以前の単体GSOの放射化スペクトル [11] を重ねて比較した。これもライトカーブと同様、照射した陽子の総数と素子の厚みで規格化してある。ただし、図16では、ライトカーブで行なったような便宜的なスケールリングはしていない。また、単体GSOのスペクトルは、隣接させたBGOによって反同時計数を取ったあとのものを示してあり、BGOシールドの効果によって除去できるイベントは予め取り除かれている。これにより、スペクトルのカウントレートは図15のライトカーブの2分の1になっている。つまり、重ねて示したこれらのスペクトルの違いは、GSOのそばにあるBGOシールドが放射化しているかどうかという点にある。

図16に示したのは、短寿命成分が支配的な照射後1時間もしくは4時間以内の放射化スペクトルである。100から700 keVのカウントレートは単体GSOの方が4倍強高く、スペクトルはライトカーブの1/2のレベルであることを考えると、単体GSOと放医研の結果をライトカーブで比べたときの違いと矛盾しない。511 keVのラインは単体GSOでは検出されず、Well検出器GSOのスペクトルのみに強く見えていることから、GSOに起因するものではなく、BGOからの洩れ込みであることが分かる。また、ライトカーブからは今回のWell検出器GSOの方がカウント数が全体的に低いと予想されるのに90 keV付近のラインが強く、Biの放射化に由来する特性X線 (K_{α} 77 keV, K_{β} 87 keV) が洩れ込んで重なっていると考えられる。それ以外のライン構造に関しては、エネルギー較正の誤差の範囲内 ($\sim 10\%$) で、単体GSOの放射化スペクトルで見えていたものと一致している。

長寿命成分が支配的になってくる5日後および20日後のスペクトルを、図17に示してある。このスペクトルで確認したかったのは、単体GSOで予想したスペクトルをそのままスケールして使っても良いのか、それとも、BGOの洩れ込みが圧倒的で全然使えないのかということであり、結果として、BGOの洩れ込みを含めても、単体GSOの放射化レベルとは大きく違わないということが分かった。もう少し詳細にスペクトルを見ると、Well検出器GSOの放射化スペクトルには、単体GSOとほぼ同じようなエネルギー位置にライン構造が見られるが、連続成分に対する強度が、単体GSOほど強くないようである。また、150 keV以下の超過や400 keV付近などの未同定ラインなど、スペクトルの形は同じであるとは言い切れない。これを追求することは今後の課題である。いずれにせよ、エネルギー全体で積分したカウント数は、図15のライトカーブに示される通り、Well検出器GSOと単体GSOで同程度である。

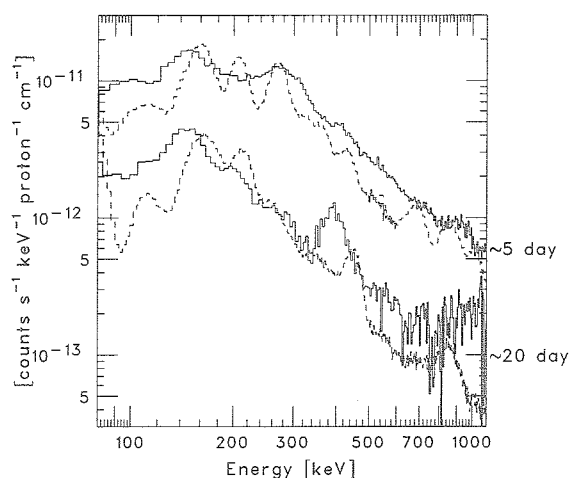


図17 GSO放射化バックグラウンドスペクトル (5, 20日後)。実線で示したのがWell検出器GSOの放射化スペクトル (1回目, 理研)。ただし、照射前のバックグラウンドを予め差し引いてある。破線で示したのが単体GSOの放射化スペクトル [11]。

5. 4. PINの位置での放射化バックグラウンド

低エネルギー側の主検出部であるPINは、原子番号の小さいSiであり、それ自身の放射化の影響は小さい。しかし、周囲の結晶シンチレータからの洩れ込みには注意が必要であり、GSOで見たように、BGOシールドからの影響を調べておく必要がある。そこで、1回目の理研での放射化試験では、室温で動作可能な半導体検出器であるCdTeダイオードを、ビーム照射後にPINの位置に置いて放射化バックグラウンドを測定した (§ 4.2.2)。

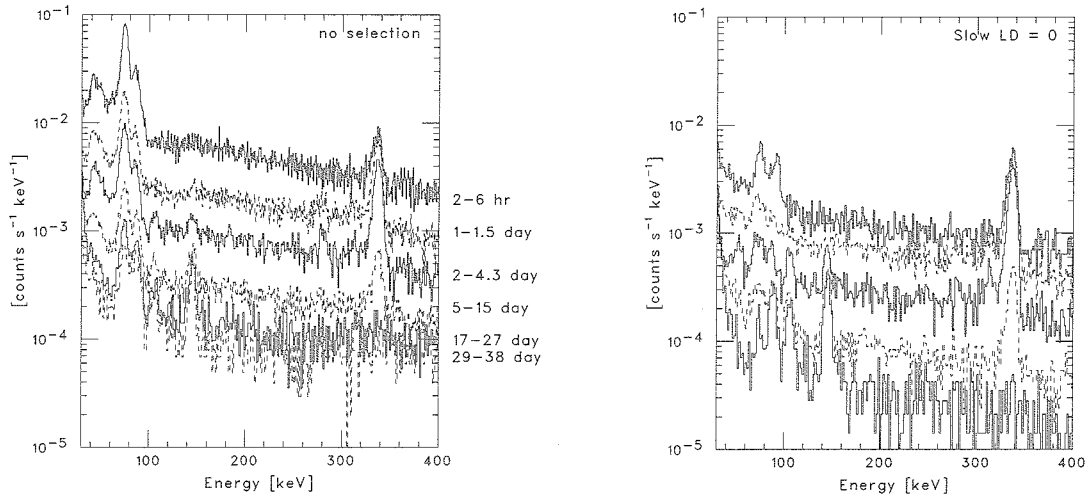


図18 CdTeで測定した、PINの位置での放射化バックグラウンド。(左) Well検出器の結晶シンチレータと反同時計数を取らなかった場合。(右) 反同時計数を取った場合。

こうして測定したPINの位置での放射化バックグラウンドスペクトルを図18の左側に示す。特定のライン γ 線に起因するピークが検出されており、100 keV以下は、GSOのGdおよびBGOのBiの放射化に由来する特性X線である。スペクトルに見られるラインと、放射源となる核種の候補、また特性X線のエネルギーを表3および4にまとめてある。これらは、Gd (p, xn) もしくは Bi (p, xn) の反応でGdおよびBiよりも原子番号Zが1つ大きい核種が生成され、それが軌道電子捕獲によってまた元のZに戻るときに、GdおよびBiの特性X線が放出されるものである。その他のラインは、同じくGdとBiから放射化によって生成された核種の崩壊に伴う γ 線である。ライン強度は、生成される核種の崩壊時定数に従って減衰していき、実際に図18からも、ラインによって減衰する様子が異なることが分かる。

PINの位置に洩れ込む放射化バックグラウンドは、Well検出器のシンチレータ部分との反同時計数をとることで軽減できると期待される。そこで、Well検出器が信号を検出したことを示すSlow_LD信号を用いてセレクションをかけた。CdTeダイオードのイベントのうち、Slow_LD信号が出ていないもの、すなわち、Well検出器のシンチレータ部の出力で禁止をかけたあとの放射化スペクトルを図18の右側に示す。反同時計数を取る前のスペクトル(図18左側)と比べると、全体的に連続成分が半分以下まで削減されていることが分かる。また、GdおよびBiからの特性X線ととりわけ効率良く落とすことができている。反同時計数により強度が1桁近く小さくなっている。Gdからの特性X線にいたっては、時間帯によっては除去後のスペクトルにはライン構造が見られなくなっている。GdもBiも、それぞれの結晶内部での軌道電子捕獲により崩壊し、その遷移に伴って特性X線と γ 線が放出されるのは同じだが、光量の大きいGSOの場合は、同じ γ 線のエネルギーでも大きな信号を出力できるため、より効率良くバックグラウンド除去を行うことができるのである。このシンチレータ信号を用いたバックグラウンド除去の効率を、除去前後のライトカーブとあわせて図19に示した。これを見ると、測定の全期間にわたって60%以上の高い効率でPINのバックグラウンドを除去することができている。

連続成分や特性X線が結晶との反同時計数により効率良く除去できた一方で、CdTeダイオードで見えている100

表3 CdTe ダイオードで測定したスペクトルに見えるラインと核種の候補.

エネルギー [keV]	核種の候補
~ 45	Gd-K α
~ 50	Gd-K β
~ 75	Bi-K α
~ 85	Bi-K β
~ 105	^{155}Tb
~ 145	^{200}Pb
~ 340	^{152}Tb , ^{201}Pb

表4 BGOおよびGSOからの特性X線の文献値.

元素	K 吸収端 [keV]	K α_1 [keV]	K β_1 [keV]
^{64}Gd	50.2	43.0	48.7
^{83}Bi	90.5	77.1	87.3
^{82}Pb	88.0	75.0	84.9

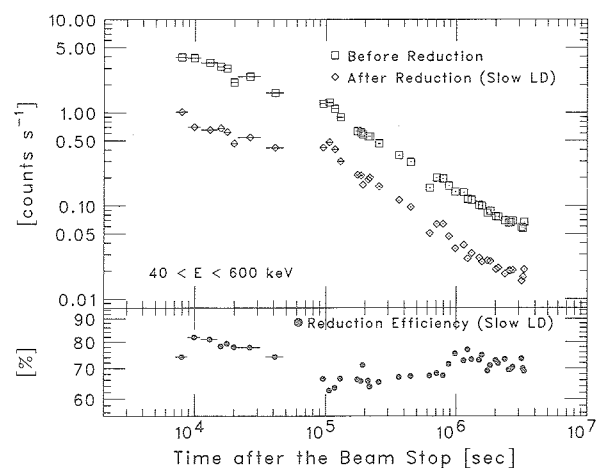


図19 CdTeで測定した、PINの位置での放射化バックグラウンドのライトカーブ. (上段) 結晶シンチレータとで禁止をかける前後のライトカーブ. (下段) それによるバックグラウンド除去の効率.

keV以上の強いラインは、この反同時計数では落とすことができない。これらのラインの起源としては、BGOもしくはGSO内に生成された放射性同位体のうち、 γ 線を1つしか出さないような遷移をする核種、もしくは、同時に出る γ がSlow_LDにもかからないほどエネルギーの小さいような遷移をする核種であると予想される。実際には γ 崩壊の場合、ほとんど複数の γ 線が放射され、GSO起源であればそれらはSlow_LDで落とせるはずなので、これらはBGO起源ではないかと疑われる。エネルギーと半減期を基準にいくつかの候補はあるが、単体GSOおよびBGOの放射化試験では検出されていなかったり、反同時計数により落とせるはずだったり、すべての条件を満たす核種は今のところ同定されていない。

5.5. 軌道上での放射化バックグラウンドの考察

実際にHXD-IIに搭載するのは2 mm厚のSiであり、50 keV以上の γ 線に対する検出効率は、今回の試験で用いた0.5 mm厚のCdTeより1桁も小さい。PINが感度をもつのはせいぜい100 keVまでであり、今回測定できた図18のスペクトルから分かるように、この領域で最も強い放射化バックグラウンド成分はBiからの特性X線である。そこで、CdTeダイオードで受けたBi K α のピークのレベル $\sim 2 \times 10^{-3} \text{ counts s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$ をもとに、検出効率が1桁下がり、照射した陽子数を150日分から1日分にスケールすると、PINで検出されるレベルの見積もりは、 $\sim 1.6 \times 10^{-6} \text{ counts s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$ となる。このレベルを素子の面積($2.15 \times 2.15 \text{ cm}^2$)あたりにして、HXD-Iの地上での最終バックグラウンドと比べると、PINで検出される放射化したBGOからのBi K α のレベルは1桁近く低いと分かった。ここで考慮しなければならないのは、PINとCdTeのエネルギー領域の違いである。PINで検出できるのは10–100 keVあたりであり、今回CdTeダイオードで測定できたのは30 keV以上である。11 keV付近にはBiからのL-X線が見えるはずだがこれはK α よりも放出率が低く、一方で、PINのもともとのバックグラウンドは低エネルギー側の方がずっと高いので、30 keV以下でも結晶シンチレータの放射化成分は問題にならないといえる。

今回の2回にわたる放射化試験より以前に、[11] [12]において、単体GSOの結果に基づき、長寿命の放射化成分が平衡状態に達したときの放射化スペクトルモデルを得ている。これに加えて改めて放射化試験を行ったのは、GSOおよびBGO結晶をWell検出器として組み上げたときに、反同時計数がどれほど有効にはたらくか、また、BGOアクティブシールド自身の放射化成分がかえってバックグラウンドを高めたりはしないかという2点の、とくに後者について、実際に衛星搭載品と同等のユニットを放射化させて調べる必要があったためである。

単体GSOとWell検出器のバックグラウンドの違いを見るには、図15に示したライトカーブが良い指標となる。照射後、数日以上で長寿命成分は、両者のライトカーブの減衰していく傾きが同じであり、20–30%以内で重なり、照射数の精度内でよく一致している。このことから、ここではBGOアクティブシールドからの洩れ込みの影響は無視できると考えられる。また、図17のスペクトルからも、単体GSOとくらべて全体の強度が変わらないことが分かった。これらの結果より、長寿命成分のみを考えたモデルは、単体GSOの実測データをもとにした今あるもの [11] [12] を、近似として用いても良いと言える。一方で、照射後 10^{-4} – 10^{-5} 秒後に見られる単体GSOからの超過分は、BGOアクティブシールドの放射化成分の洩れ込みの可能性が高い。ただし、この超過分がすべてBGOからの洩れ込みだったとしても、その寄与はバックグラウンドを単体GSOの2倍に高める程度である。

また、今回の試験では、照射後10分後からのひじょうに短い寿命の放射化成分が測定できた。これにより、照射直後の時間帯で急激にカウントレートが高くなっているようなことはなく、BGOからの洩れ込みもあまり効かないだろうということが、まず分かった。ビーム停止から10分後の放射化バックグラウンドのカウントレートは、100–700 keVで $6.2 \text{ counts}^{-1} \text{ s}^{-1}$ となっており、照射した陽子の数が軌道上の20日分、また、1日に6回SAAを通過するとして120で割ってスケールすると、 $0.05 \text{ counts}^{-1} \text{ s}^{-1}$ となる。照射前のバックグラウンドは、 $0.28 \text{ counts}^{-1} \text{ s}^{-1}$ であり、SAAを1回通過するたびに生じる放射化成分の方が低い。また、1日分を考えても、照射前のバックグラウンドとせいぜい同程度のカウントレートとなる。こうした短寿命成分は、減衰時間も短いので、長寿命成分のように飽和状態に達するまで積み重なるのではなく、SAAを通過するたびに増加して1日以内で減衰するというサイクルを繰り返す。放射化スペクトルからは、照射後2時間以内の時間帯では、

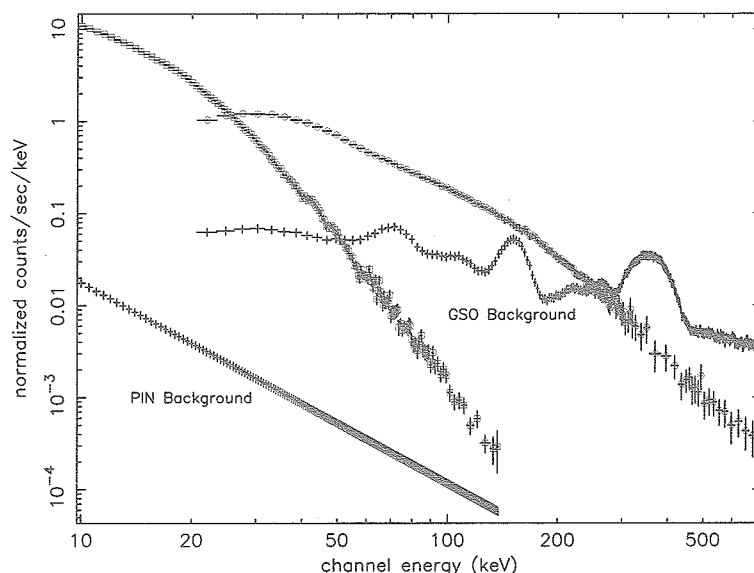


図20 HXDで10 ks観測したときの、かに星雲の予想スペクトル。PINのスペクトルを四角で、GSOを丸で示している。PINとGSOの予想バックグラウンドを十字で重ねてある。

BGOから洩れ込んだ511 keVが強く見えており、約30分の半減期で減衰している。また、Biに由来する特性X線の洩れ込みも見られた。ただしこれらは、実際のHXD-IIでは隣接する8本のユニットとの反同時計数を取ることができるので、除去できる確率が高まると考えられる。

図20に、かに星雲のHXDで観測されるスペクトルをシミュレーションした結果を示す。PINとGSOの予想バックグラウンドも重ねて示してある。GSOのバックグラウンドは、単体GSOの放射化データをもとにシミュレーションした長寿命成分の放射化スペクトルを、今回の結果を受けて大事をとって2倍に上方修正し、放射化前の内在バックグラウンドと足し合わせたものである。

以上のことから、井戸型アクティブシールドによる反同時計数で徹底した低バックグラウンド化を図るという、HXD-IIの最も独創的な特徴が、アクティブシールド自身の放射化によって損なわれるものではなく、十分にその機能を果たすことが分かった。

6. おわりに

Astro-E2衛星搭載HXD-IIは、2005年の打ち上げを目指し、2004年3月現在、まさに地上試験が行われている最中である。我々は、衛星軌道上での放射化バックグラウンドを予め理解するため、加速器を用いて陽子を照射する放射化試験を2002年10月と2003年12月の2回にわたって行った。その際、検出器としての放射化バックグラウンド特性を調べるため、衛星搭載品と同等の検出器ユニットに210 MeVと100 MeVの陽子を照射し、同じく衛星搭載品と同等の回路系を用いて測定した。2回の実験により、陽子照射後10分後から1カ月にわたっての放射化バックグラウンドを実測できた。

HXD-IIは、主検出部となるGSO結晶の周囲のほぼ全立体角を、アクティブシールドとなる深い井戸型のBGO結晶が覆っているという特徴的な構造を持っている。今回の実験結果により、BGOアクティブシールド自身の放射化成分の洩れ込みは、大きく見積もっても、Well検出器GSOの放射化バックグラウンドを、単体GSOの放射化の2倍に高める程度に抑えられると分かった。また、低エネルギー側での観測を行うPINへの洩れ込みも、PIN自身の放射化前のバックグラウンドに比べれば1桁近く低いことが分かった。これにより、放射化バックグラウンド

をその時間変動まで含めてモデル化することで、HXD-IIの最大の特徴である低バックグラウンド化は、衛星軌道上においても達成され得ると期待される。

7. 謝 辞

2003年12月の放射化試験では、放射線医学総合研究所の内堀幸夫様には、事前の下見から現場での受け入れまで、たいへんお世話になりました。また、宇宙科学研究本部の高島 健助手には、準備段階から実験当日は徹夜でお付き合い頂きました。この場を借りて、心より感謝を申し上げます。2002年10月の理研での放射化試験は課題番号R359n(2B)、2003年12月の放医研での放射化試験は課題番号P133として行われました。両施設の関係者の皆様に感謝を申し上げます。

参 考 文 献

- [1] T. Kamae, et al., "Astro-E hard X-ray detector", Proc. SPIE, 2806, 314, 1996
- [2] T. Takahashi, et al., "The Electronic System for the Astro-E Hard X-ray Detector", Proc. SPIE, 3445, 155, 1998
- [3] M. Tashiro, et al., "Performance of the ASTRO-E Hard X-ray Detector", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 49, 1893, 2002
- [4] T. Kamae, et al., "Well-type Phoswich Counters for Low-Flux X-Ray/Gamma-Ray Detection", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 40, 204, 1993
- [5] T. Kamae et al., "Improvement on the light yield of a high-Z inorganic scintillator GSO(Ce)", Nucl. Instr. Meth., vol. A490, 2002, 456-464
- [6] 高橋 勲「アクティブシールドを利用した低バックグラウンド γ 線検出器の研究」修士学位論文、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻(2001)
- [7] M. V. Zombeck "Handbook of Space Astronomy & Astrophysics" 2nd ed.
- [8] SPENVIS (SPace ENVironment Information System)
<http://www.spenvvis.oma.be/spenvvis/>
- [9] Sawyer, D. and J. Vette, "AP-8 trapped proton environment for solar maximum and solar minimum", National Space Science Data Center, Report 76-06, 1976
- [10] Stassinopoulos, E. G., and Barth, J. M., NASA X-900-91-7, 1991
- [11] 国分紀秀「Activation of the ASTRO-E Hard X-ray Detector in Low Earth Orbit」修士学位論文、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻(1998)
- [12] M. Kokubun et al., "Activation of the ASTRO-E hard X-ray detector in low Earth orbit", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 46, June 1999, 371
- [13] K. Hayashida et. al, "The Origin and Behavior of the Background in the Large Area Counters on Ginga and Its Effect on the Sensitivity", PASJ, 41, 373 (1989)
- [14] K. Makishima et. al, "In-Orbit Performance of the Gas Imaging Spectrometer onboard ASCA," PASJ, 48, 171,(1996)
- [15] Y. Ishisaki, Ph.D. thesis, University of Tokyo(1996)
- [16] A. Kushino et. al, "Study of the X-Ray Background Spectrum and Its Large-Scale Fluctuation with ASCA", PASJ, 54, 327,(2002)
- [17] 松崎恵一「ASTRO-E用硬X線検出器のバックグラウンド特性の研究」修士学位論文、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻(1995)
- [18] W. R. Nelson, et. al, SLACK-Report-265(1985)

- [19] 村上未生「宇宙硬X線・ γ 線検出器の放射化バックグラウンド特性」修士学位論文，東京大学大学院理学系研究科天文学専攻（2003）
- [20] 佐藤悟朗「宇宙硬X線・ γ 線検出用CdTe/CdZnTe半導体検出器の特性評価」修士学位論文，東京大学大学院理学系研究科物理学専攻（2002）
- [21] E. V. Sysoeva et. al, "The study of α/γ ratio for inorganic scintillation detectors", Nucl. Instr. Meth., A414, 274, (1998)

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-04-004

発行日 2004年12月1日
編集・発行 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構
〒182-8522
東京都調布市深大寺東町七丁目44番地1
TEL 0422-40-3000(代表)
印刷所 株式会社 ワークワン
神奈川県相模原市田名塩田1-14-2

©2004 JAXA

※本書（誌）の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で複写、複製、転載、テープ化およびファイル化することを禁じます。

※本書（誌）からの複写、転載等を希望される場合は、下記にご連絡ください。

※本書（誌）中、本文については再生紙を使用しております。

<本資料に関するお問い合わせ先>

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 情報化推進部 宇宙航空文献資料センター

