

「超広角コンプトンカメラ」による 福島での実証試験

武田 伸一郎, 渡辺 伸, 高橋 忠幸

Takeda Shin'ichiro Watanabe Shin Takahashi Tadayuki

1. はじめに

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 (ISAS/JAXA) 高橋研究室 (<http://www.astro.isas.jaxa.jp/takahasi>) では、次期 X 線天文衛星「ASTRO-H」(2014 年打ち上げ予定) に向けて、宇宙からの微弱な γ 線を検出するための計測技術を蓄積してきた。研究開発は過去 10 年以上にわたり、現段階では、高エネルギー分解能テルル化カドミウム (CdTe) 半導体を用いた大面積撮像素子や、シリコン (Si) 半導体を用いた低ノイズ撮像素子など、「ASTRO-H」に向けた要素技術の開発に成功している。これらの要素技術を地上用途に応用して、東京電力(株)福島第一原子力発電所事故により放出された放射性物質の可視化を目的として開発したのが、本稿における「超広角コンプトンカメラ」である¹⁻³⁾。

2. 超広角コンプトンカメラ

2.1 背景

一般に、コンプトンカメラでは、 γ 線が検出器の物質中の電子と散乱する際のコンプトン散乱によって、電子に与えたエネルギーと散乱後の γ 線のエネルギー、さらに散乱位置と γ 線の散乱方向とを測定することで、入射光子の到来方向を求める。従来のガンマカメラで用いられてきたコリメーターを必要としない、次世代型ガンマカメラと位置付けられる。¹³⁷Cs (662 keV) などの核分裂生成物のモニタリング装置として、特に海外研究機関において、セキュリ

ティ分野への応用を視野に入れた研究開発が活発である^{*1}。しかしながら、必要な効率や画像分解能で可視化を行い、また比較的簡便な手法で現地での撮像ができるような装置は存在せず、実証は実験室レベルにとどまっていた。

十分な画像分解能を実現すること、及び装置のコンパクト化が実用化には不可欠である。ここに、研究グループが独自に提案し、開発を進めてきたのが、高性能 Si と CdTe の半導体撮像素子を用いた Si/CdTe コンプトンカメラである⁷⁾。Si 検出器でコンプトン散乱した γ 線を CdTe 検出器で吸収する。今回、福島第一原発事故対応用に製作した装置の最大の特徴が、180×180 度 (半球) にわたる広角撮像能力であるため、特に「超広角コンプトンカメラ」と命名することにした。

2.2 超広角コンプトンカメラの構成

超広角コンプトンカメラは、両面 Si ストリップ検出器 (Si-DSD) を 2 層、両面 CdTe ストリップ検出器 (CdTe-DSD) を 3 層、4 mm ピッチで計 5 積層した構造を 1 つの検出器モジュールとしている。Si-DSD と CdTe-DSD の素子サイズと電極ピッチを同じにすることで、同じ検出器トレイとアナログ ASIC を用いることができ、読み出し回路の共通化と開発コストの低減を図った。図 1 が、製作した超広角コンプトンカメラの写真である。2 つのモジュールが左

*1 国内では、医療イメージングへの応用を目指した研究開発が行われている。参考文献 4-6) など。



図1 製作した超広角コンプトンカメラ
2つのモジュールを左右に並べて感度を向上させている (提供: JAXA)

右に並べられている。これは、実地撮像試験に先立って行ったサーベイメータを用いた調査から、1モジュールでは感度が不足すると推測されたためである。実地試験では、この装置を市販の冷却ボックスに入れ、装置を -5°C に冷却し、車載した状態で測定を行った。

以降、2.3節と2.4節にわたり、コンプトンカメラを構成する検出器の詳細と、データ取得の方法に関して、特に、CdTe-DSDを例として解説を加える。

2.3 高エネルギー分解能 CdTe 半導体検出器の開発

コンプトンカメラにおいて、優れた角度分解能(画像分解能)を実現するためのカギは、コンプトン散乱のプロセスを精度良く記録することにある。すなわち、検出器には優れた位置分解能とエネルギー分解能が要求される。さらに、 ^{137}Cs から放出される γ 線のエネルギーは高く(662 keV)、Siで散乱した後でも数100 keVのエネルギーを持つため、吸収体となる検出器には、高い光子阻止能力も同時に要求される。

我々は、次世代の γ 線天文学を切り拓く観測装置の鍵となる技術として、CdTe半導体を用いた撮像素子の開発を進めてきた。CdTeは原子番号が大きく(Cd: 48, Te: 52)、密度が高い(5.83 g/cm^3)のために、光子阻止能力が高い。

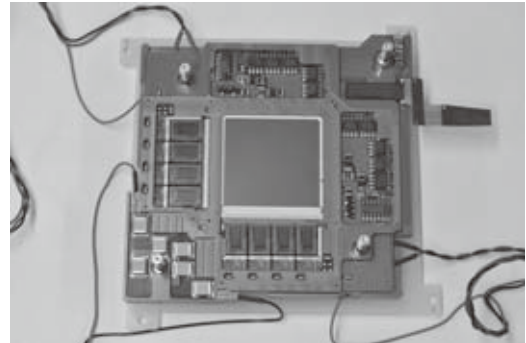


図2 両面 CdTe ストリップ検出器 (CdTe-DSD)
素子サイズ 3.2 cm 角, ストリップピッチ 250 μm ,
片面当たりのストリップ数は 128 本 (提供: JAXA)

γ 線検出器を形作る上で有力な半導体である。ただし、素子中での正孔の移動度が小さいため、優れたエネルギー分解能を実現するためには、高いバイアス電圧を必要とする。ところが、バイアス電圧を掛けすぎると素子のリーク電流(漏れ電流)が増加し、後段の信号処理回路のノイズ源となり、逆に、エネルギー分解能を悪化させてしまうというジレンマがあった。

この問題を克服したのがショットキー型のCdTeダイオード素子である⁸⁾。陰極側に白金(Pt)、陽極側にインジウム(In)電極を採用した、Pt/CdTe/Inタイプの構造により、CdTeとInの界面にショットキー障壁が形成され、外部電圧に対してダイオード特性を示す。これにより、リーク電流を劇的に低減することに成功し、優れたエネルギー分解能($\Delta E/E < 1\%$ (FWHM) @ 662 keV)を達成した。さらに今回は、陽極にアルミニウム(Al)電極を用いたPt/CdTe/Alタイプの素子を用いて、In電極を用いたプロセスでは困難であった微細な電極形成に成功した。これにより、優れたエネルギー分解能と、250 μm の位置分解能を同時に実現したのが、両面CdTeストリップ検出器(CdTe-DSD)である(図2)。

2.4 入射 γ 線の反応情報の記録

ここでは、コンプトンカメラがいかにして γ 線の反応情報を記録しているかを説明する。図

3にCdTe-DSD断面の模式図を示した。CdTe半導体の両面に、それぞれ直行する形で、200 μm 幅のストリップ電極が250 μm ピッチで取り付けられている。実際の素子では、片面当たり128本のストリップ電極が並び、素子サイズは32 mm角になる。外部から入射した γ 線がCdTeで光電吸収すると、エネルギーに比例した個数の電子・正孔対が生じる。外部からバイ

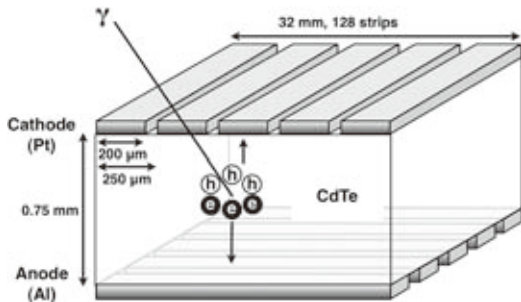


図3 CdTe-DSDの断面の模式図
(提供：JAXA)

アス電圧を与え、電子を陽極 (Anode)、正孔を陰極 (Cathode) へと誘導すると、陽極・陰極それぞれで、電荷を収集した特定のストリップ電極に信号を生じる。各面での1次元の位置情報から、最終的に2次元の反応位置を得る仕組みである。

次に、信号の処理方法である。図2の検出器トレイで、CdTe-DSDの横に計8チップ配置されているのが、信号処理用の多チャンネル処理アナログASICである*2。1チップ当たり64チャンネルの並列処理が可能であり、コンパクトなシステムを実現するための根幹たるものである。ASICの内部回路ブロックを図4に示す。検出器からの信号は前置増幅器 (PreAmp) によって増幅されたあと、FastとSlowの2系統の波形整形回路 (Shaper) に入力される。Fastはトリガー (Trigger) を生成する回路、Slowは波高値 (Pulse Height) を取得する回路である。図中の波形で示したようにFastの波形はSlow

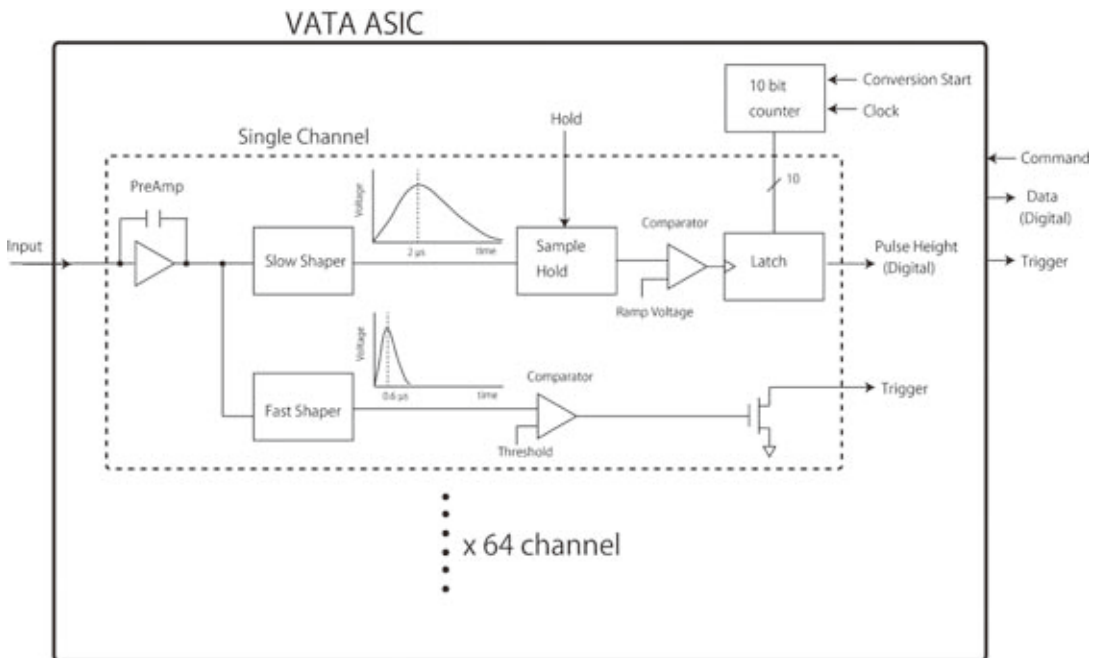


図4 多チャンネルアナログASICの内部回路ブロック
1つのチップで64チャンネルが並列処理できる。出力データは、波高値のデジタル値である (提供：JAXA)

に比べてピークに到達するまでの時間が短い。これは、信号がASICに入力された時、まずFastの経路からトリガーを外部へと出力するためである。コンプトンカメラの場合には、効率的なデータ取得を行うために、Si部とCdTe部からのトリガーのコインシデンス判定を外部回路で行い、コインシデンスがあったイベントに対して、AD変換のシーケンスをスタートさせる。

まず、Slowの波形がピークに到達する時間を待って、サンプルホールド (Sample Hold) 回路にホールド信号を入力して、波高値を保持する。次にASICに内蔵された10ビットのカウンターをインクリメントさせながら、サンプルホールド回路後段のコンパレーターのランプ電圧 (Ramp Voltage) を一定のスピードで上げる。コンパレーター出力は後段のラッチ (Latch) 回路にラッチ信号として入力され、10ビットカウンターの値を保持する。コンパレーター出力のタイミングが波高値に比例して遅くなるので、結果として、波高値に比例したデジタル値が出力されることになる^{*3}。

2.5 放射性物質の分布画像に至るまでの解析方法

コンプトンカメラから出力されるデータは、デジタル化された波高値となる。ここでは、この波高値データから放射性物質の分布画像に至る、一連の解析シーケンスを、図5を用いて解説する。

まず、波高値データを、検出器におけるヒット情報、すなわち、検出器のどの位置でどれだけのエネルギーを計測したか変換する。位置への変換は、ASICチャンネルと検出器ストリップの対応表から、ストリップ検出器での2次元の位置を求め、更に検出器の配置情報から3次元の位置へと変換する。エネルギーへの変換

は、各チャンネルで定義された、波高値とエネルギーの較正曲線を用いる。較正曲線は、²⁴¹Am (60 keV)、⁵⁷Co (122 keV)、¹³³Ba (276, 302, 356, 383 keV)、²²Na (511 keV)、¹³⁷Cs (662 keV)の較正用線源を用いて、事前にデータベース化してある。

次に、ヒット情報が詰まったイベントリストから、Siでコンプトン散乱しCdTeで光電吸収したと見なすことができるイベントだけを抽出する。SiとCdTeで計測したエネルギーの和、すなわち、コンプトンカメラで計測した全エネルギーに対して、エネルギーウィンドウを設定して、ウィンドウ外のイベントを棄却する。例えば、¹³⁷Cs (662 keV) に対しては、640~675 keVのウィンドウを設定している。これにより、(a) 入射γ線が反応後にカメラから逃げたイベント、(b) 放射性物質から放出されたγ線がどこかで散乱してからカメラに入射したイベント、が除外できる。特に、建物やアスファルトによる散乱が無視できない、福島のような場合、(b)が重要である。なぜならば、γ線が放射性物質から直接入射したことが保証でき、放射性物質の正しい位置をイメージングできるからである。加えて、ウィンドウ内のイベントであっても、コンプトン散乱の運動方程式を満たさないものは棄却する。

最後に、これまでの解析シーケンスにより得られた(棄却されなかった)イベントに対して、コンプトン散乱の運動方程式から散乱角 θ を計算し、天球にγ線の到来方向を逆投影(バックプロジェクション)する。図5中に示したように、1つのイベントから、γ線の到来方向を示す1つの円環が描かれる。複数のイベントの円環を重ね合わせていくことで、放射線源の位置を特定することができる。

3. 超広角コンプトンカメラの特徴

この装置の最大の特徴は、その名の由来の通り、超広角の撮像能力である。従来のガンマカメラでは、撮像素子の前段にコリメーターを配

^{*2} 名古屋大学 田島教授と共同で開発したものである。

^{*3} これはウィルキンソン型のAD変換と呼ばれる手法である。

置し、 γ 線の入射方向と撮像素子上の結像位置とを対応付けることで、放射性物質の可視化を実現している。しかし、コリメーターの開口角により視野が限定され、典型的には 40×40 度程度である。コンプトンカメラの場合には、コリメーターを必要とせず、カメラ前方のあらゆる方向からの γ 線を検出できる。さらに、福島県での実証試験用に開発した超広角コンプトンカメラは、半導体を高密度に積層することで、斜入射してきた γ 線が散乱後に装置から逃げにくい構造を実現している。図6に実験室で行った視野測定実験のセットアップを示す。この実験では、 ^{137}Cs の点線源を、カメラに対して図6のように移動

させ、カメラから見た線源方向を変えながら、カウントレート測定とイメージ取得を行った。図7(上)が得られたカウントレートである。鉛直方向($\Phi=0$)の値で規格化してある。カメラから見て80度方向に位置する線源に対しても、検出効率の減少を、視野中心比で20%にとどめている。おなじく図7(下)に示したイメージからも80度方向の線源が捉えられていることが分かる。このような広い視野は、ホットスポットの探索に有利であると考えられる。

装置の性能パラメーターを表1にまとめる。エネルギー分解能は、662 keVの γ 線に対して

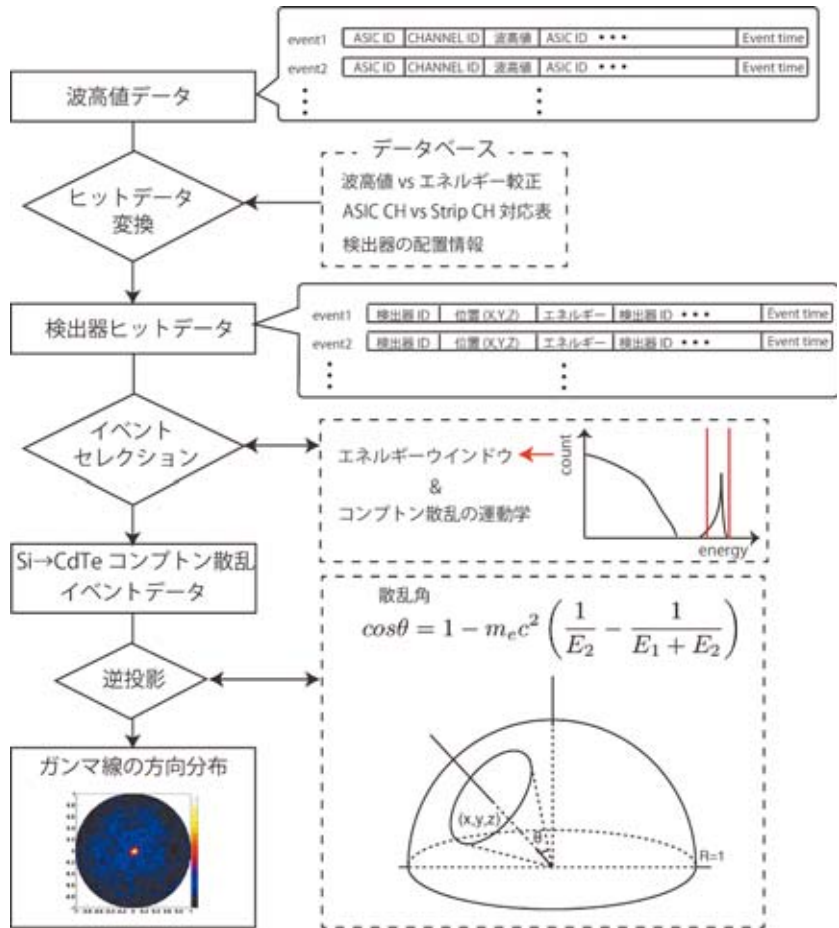


図5 データ解析のシーケンス図 (提供: JAXA)

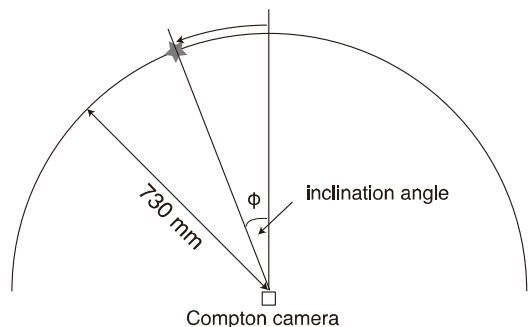


図6 視野測定実験のセットアップ
星印が ^{137}Cs (662 keV)の点線源。カメラから見た方向 (inclination angle) を20度刻みで0度から80度まで変えながらデータを取得した (提供: JAXA)

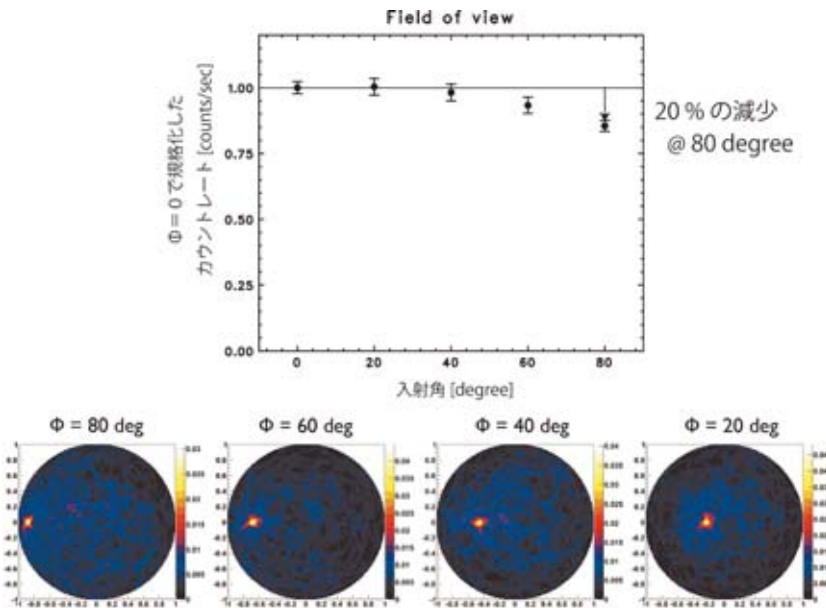


図7 視野測定実験で得られた、カウントレートの線源方向依存性（上）、及び、各方向での γ 線イメージ（下）
（提供：JAXA）

表1 超広角コンプトンカメラの性能パラメーター

エネルギー分解能	2.2% (FWHM) @662 keV
角度分解能	3.8 度@662 keV
検出器感度	0.035 cps/MBq@1 m, ^{137}Cs (662 keV)
視野	180×180 度（視野中心から 80 度方向で、中心比 20%の感度減少）

2.2% (FWHM) であり、これは、 ^{134}Cs (605,796 keV) と ^{137}Cs (662 keV) を分離するのに十分な性能である。角度分解能は 3.8 度である。検出器感度は、カメラ表面から鉛直方向 1 m の距離に位置する ^{137}Cs の点線源に対して、エネルギーウインドウ (640~675 keV) 内に検出されるイベントを cps/MBq で定義した。

4. 福島県における実証実験

東日本大震災に伴う福島第一原発事故によって、大量の放射性物質が飛散した。除染が緊急の課題となっているが、それを実施するに当た

り、放射性物質の可視化装置が強く望まれている。優れた可視化装置が実現すれば、作業前に除染箇所を特定し、効率的・重点的な除染ができるようになる。また、除染後の撮像による取り残しチェックへの適応も有効で、除染作業の評価だけでなく、作業の信頼性も向上できる。

超広角コンプトンカメラの広角撮像能力は、広い敷地におけるホットスポットを探索する上で有利であると述べた。しかし、現在

の福島のような、広く拡散した放射性物質がバックグラウンドを作っている環境下において、コンプトンカメラが稼働した例は過去になく、どのようなコントラストの画像が得られるかが不明であった。よって、実地での実証実験が不可欠である。

現在、製作したカメラを福島県に持ち込んで、カメラの性能評価を目的とする実証試験を行っている。一例として、飯館村草野地区で取得したイメージを図8に示す。空間線量 2~3 $\mu\text{Sv/h}$ 程度の環境下において、放射性物質の局所的な集積（最大 30 $\mu\text{Sv/h}$ ）の検出に成功した。今後除染が必要となる同エリアにおいて、実際にホットスポットの画像化に成功し、除染作業における本装置の適用が極めて有望であることが分かった。ただし、除染作業者が現地ですべて実際に使うことを想定すると、課題もある。現状のカメラでは、2~3 $\mu\text{Sv/h}$ の環境下において、ホットスポット検出に 40~60 分程度の撮像時間を要する。装置をより効果的に活用していくためには、撮像時間の短縮が必要である。



図8 飯館村で取得したイメージ
 (左) 魚眼レンズを装着したデジタルカメラの可視光画像。(右) 可視光画像に
 γ 線画像を重ねたもの。最大 $30 \mu\text{Sv/h}$ のホットスポットが明るく見えている。
 γ 線画像は 60 分積分したもの (提供: JAXA)

現地での実証試験を受けて、飛躍的な感度向上を目指した後継機の開発を、急ピッチで進めている。後継機は、「ASTRO-H」衛星の軟 γ 線検出器 (Soft Gamma-ray Detector, SGD) をベースとしたもので、Si と CdTe 検出器の積層枚数を増やすことで、10 倍以上の感度向上を狙っている。後継機を用いると、数分程度の撮像で放射性物質の集積が検出できるようになり、除染作業者が、作業中にリアルタイムで除染の効果を確認するような用途への適応も期待できる。

参考文献

- 1) 「超広角コンプトンカメラ」による放射性物質の可視化に向けた実証試験について”, Online : http://www.jaxa.jp/press/2012/03/20120329_compton_j.html (日本語), http://www.jaxa.jp/press/2012/03/20120329_compton_e.html

- (英語), JAXA プレスリリース, 2012 年 3 月
- 2) 渡辺伸, 武田伸一郎, 高橋忠幸, 超広角コンプトンカメラによる放射性物質の可視化, 岩波書店「科学」, 2012 年 7 月号 (2012)
- 3) 高橋忠幸, 渡辺伸, 武田伸一郎, 超広角コンプトンカメラによる放射性物質の可視化に向けた実証実験, 宇宙科学研究所 ISAS ニュース, 2012 年 7 月号 Online : <http://www.isas.jaxa.jp/ISASnews/No.376/ISASnews376.html>
- 4) Motomura, S., *et al.*, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **54**(3), 710-717 (2007)
- 5) Kabuki, S., *et al.*, *NIM A*, **580**, 1031-1035 (2007)
- 6) Takeda, S., *et al.*, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **59**(1), 70-76 (2012)
- 7) Takahashi, T., *et al.*, *New Astronomy Review*, **48**, 309-313 (2004)
- 8) Takahashi, T., *et al.*, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **49**(3), 1297-1303 (2002)

((独)宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所)