

## 利用課題名

### 高効率コンプトンカメラを用いた即発ガンマ線イメージング

Imaging of Prompt Gamma-rays with Highly Efficient Compton Camera

高橋忠幸<sup>1)</sup>、武田伸一郎<sup>1)</sup>、都築 豊<sup>1)</sup>、長澤俊作<sup>1)</sup>、渡辺 伸<sup>2)</sup>、米田裕基<sup>2)</sup>、大澤崇人<sup>3)</sup>

Tadayuki Takahashi Shinichiro Takeda, Yutaka Tsuzuki, Shunsaku Nagasawa, Shin Watanabe,  
Hiroki Yoneda, Takahito Osawa

<sup>1)</sup>東京大学 <sup>1)</sup>宇宙航空研究開発機構 <sup>1)</sup>理化学研究所 <sup>2)</sup>原子力機構

#### (概要)

高いエネルギー分解能を持つ CdTe 半導体イメージャを 20 段重ねた半導体多層コンプトンカメラを用いた即発ガンマ線イメージングの実証実験を行った。ホウ素 (477 keV)、鉄 (352 keV)、塩素 (517keV) の試料を用いデータを取得した。コンプトン再構成を行い、それぞれのエネルギーのガンマ線にたいしてイメージを得ることができた。ホウ素試料における角度分解能は FWHM で 12.2 度程度 (FWHM) であった。またホウ素と塩素の試料を 10cm 離して置いた実験で二つの試料を再構成したガンマ線イメージ上で明瞭に分離できることを示した。

#### キーワード:

コンプトンカメラ、即発ガンマ線、CdTe、テルル化カドミウム半導体

#### 1. 目的

ガンマ線の可視化を目的に開発された、超広角コンプトンカメラの技術[1,2]を発展させ、中性子照射によって発生する即発ガンマ線のイメージングに適用する。2016 年に製作した CdTe DSD を 20 段重ね、合計で 1.5cm の CdTe の厚さを有するコンプトンカメラ[3]を用いて原子力機構の JRR3 のビームラインで実際に照射実験を行う。最終的には物質内部にとじこめられた水を探るための水素からの 2.2 MeV のガンマ線によるイメージングを行うコンプトンカメラの開発につなげる。そのため、CdTe20 段コンプトンカメラにより、ホウ素 (477 keV)、鉄 (352 keV)、塩素 (517keV) などの低エネルギーガンマ線のイメージングから実験を行い、実際のバックグラウンド環境の中でイメージングが可能であるか検証する。

#### 2. 方法

新型の高効率コンプトンカメラモジュールを PGA に設置して、中性子を確保照射しながら即発ガンマ線の検出を試みる。用いたのは CdTe ピクセル検出器を 20 段重ね、合計で 1.5cm の CdTe の厚さを有するコンプトンカメラである。本実験で用いたコンプトンカメラの詳細は文献[3]にまとめら



図 1 20 段コンプトンカメラ[3]

れている。コンプトンカメラの諸元を表2にまとめる。1層あたり4枚のピクセル検出器を2×2上に配置している。検出器の積層間隔は、1層目から16層目まで3.6mm、16層目と17層目の間が5.2mm、それ以降は4.4mmである。CdTe20段コンプトンカメラは、SGDと同じ構造を用いて、Si検出器層2層分をCdTe検出器1層分で置き換えて開発されており、読み出しシステムは、基本的にはSGDと同一のものを使用した

検出器の読み出しは、これまで低ノイズ同時多チャンネル読み出しASICを用いる。ASICは、トリガ発生部(TA)と、AD変換を行い、波高値を出力する(VA)の2パートに別れる。TA部では、時定数の短い(~0.5μs)整形増幅器で整形増幅を行い、スレッシュホールドを超えた場合に、トリガを出す。VA部では、時定数の長い(~3μs)整形増幅器で整形増幅を行う。TA部でトリガが出力されると、一定時間待ってからVA部にサンプルホールド信号を送る。保持された後は、ウィルキンソン型ADCによってAD変換が行われる。

実効面積	2.56×2.56 cm <sup>2</sup>
ピクセルサイズ	3.2 × 3.2 mm <sup>2</sup>
ピクセル数	8 × 8
実効厚さ	0.75 mm
印加電圧	1000 V

表2 検出器諸元

データ処理の時間を短縮するため、AD変換後、あるスレッシュホールドを越えたものだけに限り、読み出しを行う。また、読み出し時、ASIC全チャンネルに同時にのるコモンモードノイズを得るため、64チャンネル中32番目に大きさのADC値を出力する。上から16層までは、4ASICごとに、下4層は、8ASICごとにまとめられ、デジタイゼーション接続されており、それぞれに対してレジスタ設定・データ読み出しが実行される。

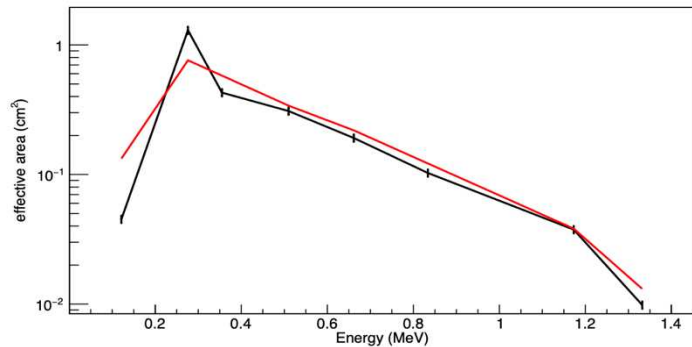


図2 20段コンプトンカメラの有効面積[3]

角度分解能(ARM)の半値幅は、511keVで約13度である。有効面積を図2に示す。

装置の配置図を図3に示す。以下の3つのターゲットを設置し、イメージング実験を行った。

- (1) B 5.74 × 10<sup>4</sup>秒測定
- (2) B+Cl 1.64 × 10<sup>4</sup>秒測定
- (3) Fe 1.95 × 10<sup>4</sup>秒測定

また、中性子ビームだけのみでのバックグラウンドデータを2.36 × 10<sup>4</sup>秒取得し、バックグラウンドの評価を行った。各試料から放射されるガンマ線のエネルギーは、

- B 477.595keV
- Cl 517.073 keV
- Fe 352.347 keV

である。実験のセットアップの写真を図4に示す。

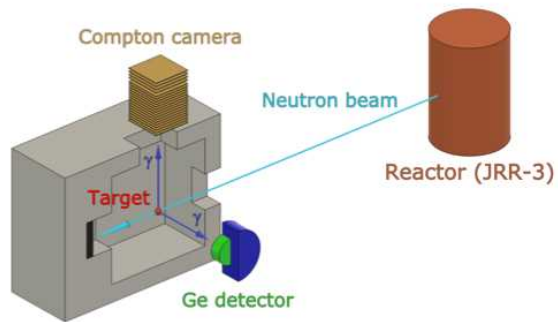


図3 装置配置図



図 4 実験セットアップ写真

B 試料測定のエネルギースペクトル (2-hit) を図 5 (a) に示す. B のライン (478 keV) のほかに、511 keV や Cd (558 keV) が見える。ピークのエネルギ分解能(FWHM)は約14keVである。Cdからのピークは検出器(CdTe)に起因するものと考えられる。BG を差し引いたところ、明瞭な B のピークが現れた。現在、

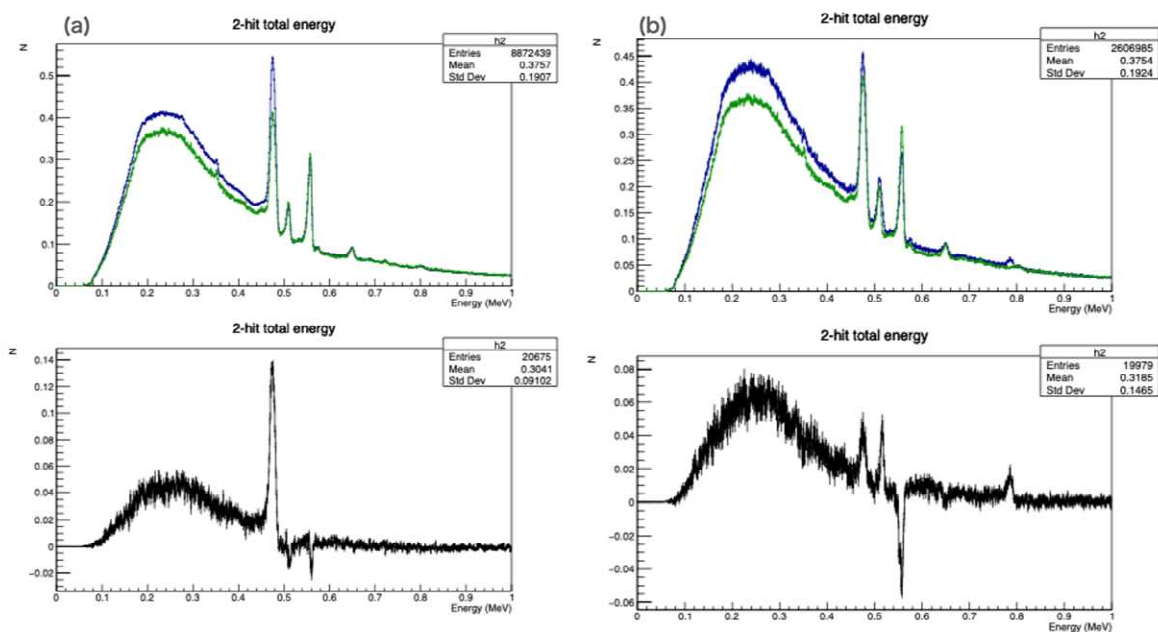


図 5 (a) B 試料および(b) B 試料と KCl 試料を並べておいた場合のスペクトル  
試料以外のラインが何に由来するかの検討をその定量化とともに進めている。

B 試料と KCl 試料を並べて置いたときのスペクトルを図 6 に示す。BG を差し引く前は、C1 のラインは 511keV と重なって見えづらいが、差し引いたあとは C1 のラインが明瞭に現れる。

B 試料、KCl 試料、さらにその二つを 10cm 離して並べて置いたときイメージを図 6 に示す。それぞれの試料において明確にイメージができてることがわかる。特に、並べておいたときに、即発ガンマ線のイメージングにより、それぞれの位置に試料が同定されていることがわかる。B 試料における角度分解能は FWHM で 12.2 度程度 (FWHM) であった。

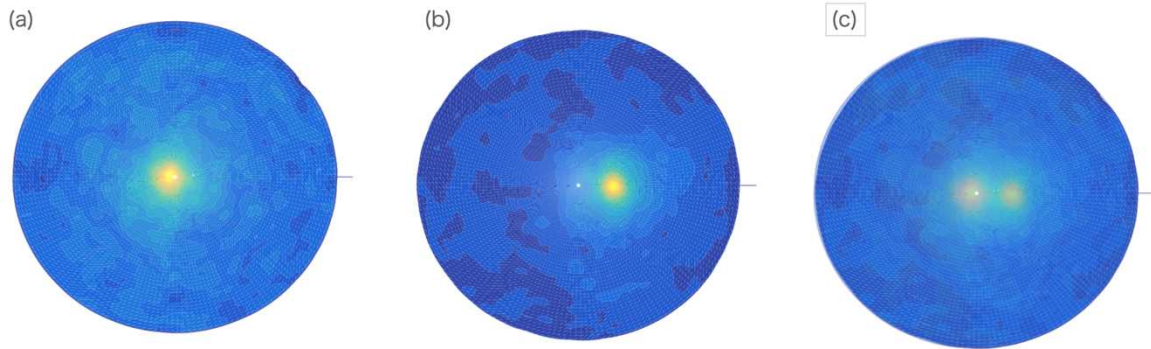


図 6 B 試料と KCl 試料を並べて測定したイメージ (a) Cl の即発ガンマ線で再構成 (b) B の即発ガンマ線で再構成 (c) (a) と (b) の重ね合わせ。

今後、スペクトルにみられるバックグラウンドのラインの同定およびそれが何に起因するかをデータ解析とシミュレーションから求め、得られたデータの定量化を進め、より適切な画像再構成のアルゴリズムを検討する予定である。

#### 4. 引用(参照)文献等

- [1] High resolution CdTe detectors for the next generation multi-Compton gamma-ray telescope, T. Takahashi et al. SPIE vol 4851, pp. 1228-1235, 2003
- [2] CdTe/CdZnTe 半導体を用いたガンマ線検出器と宇宙観測への応用, 高橋忠幸, 中澤和洋, 物理学会誌, 1月号, 2004)
- [3] 宇宙 MeV ガンマ線高感度観測に向けた半導体コンプトンカメラの試作とその評価, 米田 浩基, 東京大学 修士論文 (2017)