

【本件リリース先】

9月5日(金) 13:30

(レク付資料配付)

福島県政記者クラブ

(資料配付)

原子力規制庁記者会(仮称)、
文部科学記者会、科学記者会



FURUKAWA



東京大学
The University of Tokyo



TOHOKU
UNIVERSITY



平成 26 年 9 月 5 日

独立行政法人日本原子力研究開発機構
古河機械金属株式会社
国立大学法人東京大学
国立大学法人東北大学
独立行政法人科学技術振興機構

上空から放射性セシウムを可視化する散乱エネルギー認識型ガンマカメラの開発に成功
— 無人ヘリに搭載して上空から放射性セシウムの分布を可視化 —

【発表のポイント】

- 無人ヘリコプターにより上空から詳細な放射性セシウム分布（位置分解能：約 10m）を測定
- 周囲からの放射線の影響を除き、汚染状況の高精度なマッピングが可能
- 広範囲の除染箇所の特定制除染効果の確認作業の効率化に向けて大きく前進

独立行政法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）は、古河機械金属株式会社、国立大学法人東京大学、国立大学法人東北大学と共同で、「無人ヘリ搭載用散乱エネルギー認識型高位置分解能ガンマカメラ¹⁾」の開発に成功しました。

原子力機構は、東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故により環境中に放出された放射性セシウムの分布状況の広範囲にわたる迅速な把握、及び、除染の効率化のため、放射線検出器を無人ヘリに搭載して上空から測定する技術の研究開発を行ってきました。事故後に行われている放射線モニタリングでは、人間や車が立ち入ることの困難な場所については計測が難しいため、無人ヘリや有人ヘリによる上空からの放射線量測定が行われていますが、位置分解能が数十～数百 m と大きく、より高位置分解能かつ高精度の線量マップ作成に関して強い要望がありました。

今回のガンマカメラの開発により、山林等を含む広範囲の放射性セシウムの分布の可視化、及び、周辺からの影響が排除された可視的かつ高精度の放射線量マップの作成が可能となり、広範囲中の除染箇所の特定制除染効果の確認作業の効率化に向けて大きく前進します。

今後、検出素子を増やすことによって感度と位置分解能の向上を実現し、現地での試験結果をフィードバックして改良していきます。さらに、計測回路の高集積化、検出素子の高精細化を図ることにより、指向性と検出効率を高め、位置分解能 1m 以内の高精度・高位置分解能の放射線量分布測定法の実用化を目指します。

なお、本研究開発は、平成 24 年度より、独立行政法人科学技術振興機構（以下、JST）先端計測分析技術・機器開発プログラム（放射線計測領域）「無人ヘリ搭載用散乱エネルギー認識型高位置分解能ガンマカメラの実用化開発」の開発課題として行われました。

また、本研究成果は、日本原子力学会 2014 年秋の大会で発表する予定です。

【本件に関する問い合わせ先】

(研究担当)

(独)日本原子力研究開発機構 福島環境安全センター 鳥居建男	TEL:03-3592-2117、FAX:03-3592-1950
古河機械金属(株) 薄 善行 (リーダー)	TEL:029-839-2804、FAX:029-839-2152
国立大学法人東京大学教授 高橋浩之 (サブリーダー)	TEL:03-5841-1262、FAX:03-5841-2932
国立大学法人東北大学教授 吉川彰、黒澤俊介	TEL:022-215-2217、FAX:022-215-2215

(報道担当) (独)日本原子力研究開発機構

広報部報道課	中野 裕範	TEL:03-3592-2346、FAX:03-5157-1950
福島事業管理部総務課	眞鍋、吉田	TEL:024-524-1060、FAX:024-524-1073

【研究開発の背景と目的】

2011年3月11日の東日本大震災に端を発した東京電力福島第一原発事故に伴う大気中への放射性物質の放出により、多量の放射性セシウムが環境中に飛散しました。放射性セシウムの分布状況は、地表面の雨水や河川の流動等の自然現象により、時間経過とともに変化するため、広範囲の測定を定期的に行っていく必要もあることから、航空機や自動車等の様々な手法を用いて放射線分布を測定し、マップ化されてきました。しかしながら、人間や車が立ち入ることの困難な場所は計測が難しいため、有人ヘリや無人ヘリによって行われていますが、位置分解能の向上が課題となっていました。

以上の背景に対し、散乱エネルギー認識型ガンマカメラ¹⁾を開発することにより、感度が高く、地表面上での2次元位置分解能を持ち、かつ無人ヘリに搭載可能な10kg以下の装置を開発し、上空からの高位置分解能な放射線分布の測定を目指してきました。本研究では、新開発の国産のシンチレータであるCe:GAGG²⁾とSiPM³⁾(シリコン・フォトマルチプライヤー)アレイ[散乱体]及びAPD⁴⁾(アバランシェ・フォトダイオード)アレイ[吸収体]とを組み合わせた放射線検出器を構成します。エネルギー補正を導入したコンプトンカメラ⁵⁾の方式により、ガンマ線の飛来方向を高感度に分析する検出器システムを開発し、ヘリコプターによる詳細かつ広範囲なマップの迅速な作成の可能なシステムの開発を目指します。本システムにより地表から放出されるガンマ線の飛来方向情報が得られるため、GPS・地形情報を活用し計測データを地表面の情報に焼き直すことで、樹木・建造物・地形の影響を排除し、対象とする地表面における土壌の汚染に由来する放射線量を得ることができ、可視的かつ精度の高い放射線量マップを住民へ定期的に提供することが可能となります。

【研究の手法】

ガンマカメラの測定原理

開発した散乱エネルギー認識型ガンマカメラは、図1に示すように、既存の材料から選定した有効原子番号の小さいシンチレータからなる第1面検出器(散乱体)でコンプトン散乱を起こさせて散乱位置と反跳電子のエネルギーを測定し、高感度のGAGG(密度6.63g/cm³, 有効原子番号54)シンチレータとAPDアレイからなる第2面検出器(吸収体)で散乱ガンマ線の位置とエネルギーを測定します。

従来のコンプトンカメラ方式では、両方の検出器において高いエネルギー分解能が求められていましたが、共同研究者である高橋浩之(東京大学大学院工学系研究科教授)らは、**標的となる線源のエネルギーが既知の場合には幾何学的な配置から前方で散乱されるエネルギーと後方で検出される位置の関係を算出することで後方の検出器の詳細なエネルギー情報を必要としないエネルギー補正方式(図1)を導入したシステム**を新たに考案し、**格段の角度分解能と検出効率の向上にブレイクスルー**を果たしました。本ガンマカメラにおいては、**標的となる線源は放射性セシウムに限定されるため、新しいコンプトンカメラ方式の有効性を**

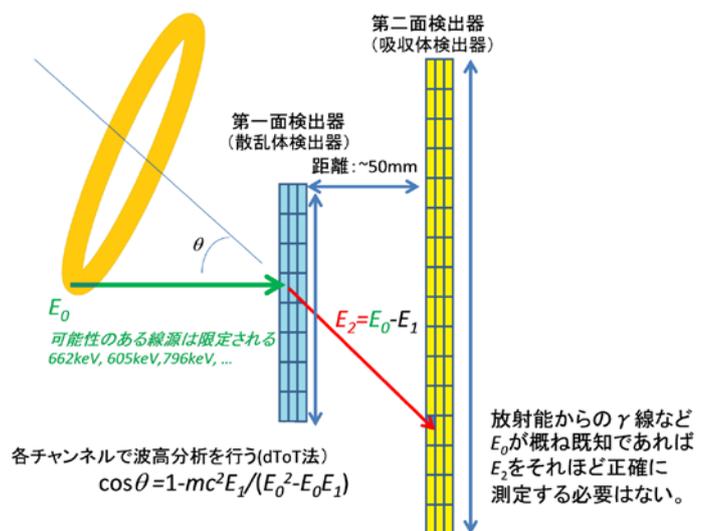


図1 エネルギー認識型ガンマカメラの概念図

標的となる線源のエネルギーが既知の場合には幾何学的な配置から前方で散乱されるエネルギーと後方で検出される位置の関係を算出することで後方の検出器の詳細なエネルギー情報を必要としないエネルギー補正方式(図1)を導入したシステムを新たに考案し、**格段の角度分解能と検出効率の向上にブレイクスルー**を果たしました。本ガンマカメラにおいては、**標的となる線源は放射性セシウムに限定されるため、新しいコンプトンカメラ方式の有効性を**

最大限に発揮できます。

また、**Ce:GAGG (表 1) は高発光量・高エネルギー分解能、高い検出効率および自己放射能が無い点** (それぞれ、表 1 の発光量、エネルギー分解能、有効原子番号、自己放射能の欄より) から Ce:GAGG 結晶を用いれば、それまでの材料を利用するのに比べて**高感度な検出器を実現**できます。GAGG のエネルギー分解能は半導体検出器にはやや劣るものの、662keV 付近の ^{134}Cs (605keV) と ^{137}Cs (662keV) のガンマ線が分離できます。エネルギー補正方式 (図 1) により吸収体でそれほど高いエネルギー分解能を必要しない本システムには、上記のガンマ線の分離が可能な分解能を有するシンチレータの中で、感度の点でも最適なシンチレータです。試作機においては、第 2 面検出器として、 $10 \times 10 \times 10\text{mm}^3$ のエネルギー分解能を改善した結晶を 4×4 ピクセルに配置したシンチレータアレイと 1 対 1 対応する 4×4 APD アレイを組み立て、 $40 \times 40\text{mm}^2$ の検出面積を持たせました (図 2)。高感度シンチレータを 10mm の厚さにすることで、高感度な検出器が実現できます。GAGG はまた発光波長が 520nm と長く APD の波長感度領域と一致するため、APD との組み合わせで性能を最大限発揮することが出来ます。**APD は光電子増倍管に比べ非常に小型軽量**であり、動作電圧が小さく消費電力が小さいことから、**電圧供給装置 (インバータ等) やバッテリーの軽量化が可能**です。結果として、**無人ヘリに搭載可能な小型で軽量 (10kg 以下) のガンマカメラを実現**できました。

	Si 半導体	CdTe 半導体	Tl:Nal	Ce:LaBr3	Eu:Srl2	Ce:La-GPS	Ce:GYAGG	Ce:GAGG (通常品)	Ce:GAGG (開発品)
有効 原子番号	14	50	51	46	49	52-54	48	54	54
密度(g/cm ³)	2.33	5.85	3.67	5.07	4.6	5.3	~6.5	6.63	6.63
エネルギー 分解能 @662keV	1-2%	3%	6% PMT 使用時	3% PMT 使用時	3-4%	5%	5% APD 使用時	6%	3.9% APD 使用時
発光波長 (nm)	-	-	415	380	430	390	520	520	520
発光量 (photon/MeV)	-	-	45000	75000	80000	40000	45000	57000	57000
蛍光寿命 (ns)	-	-	230	18		60	80	88	175
潮解性	無	無	有	有	有	無	無	無	無
自己放射能	無	無	無	有	無	僅か	無	無	無
備考	数mm厚 程度が 限界	数mm厚 程度が 限界			第1面 検出器候補	第1面 検出器候補	第1面 検出器候補	市販品	第2面 検出器用 第1面 検出器候補

表 1 シンチレータ結晶・半導体の性能比較



図 2 GAGG+APD (左) 及び設置状況 (右)

【実証試験と開発成果】

(1) 実験室での測定試験

図3に示す検出器（試作機）を製作し、角度分解能を評価するために実験室での測定試験を実施しました。試作検出器は2段の10mm角GAGG検出器（前段[散乱体]：厚さ5mm 後段[吸収体]10mm）からなり（図2）、開発した集積回路により個別にデジタル化されデータ取得分析装置に伝送され、GPSによる位置情報と統合されます。まず、検出器下部に1つの ^{137}Cs 点線源を配置（図4の左上図）し、散乱体と吸収体のシンチレータで同時測定を行いました。そこで得られた両シンチレータのエネルギー分布を基に、正面方向に指向性を持たせるようなエネルギー選択条件で画像再構成を行いました。その結果、横方向に 20° 、縦方向に 20° 移動させた線源位置が分離できることを確認しました（図4の3つの再構成画像[ガンマ線強度の2次元分布]）。これにより測定したエネルギーにある条件を課すことで下方から飛来するガンマ線のみを検出できることが確認できました。

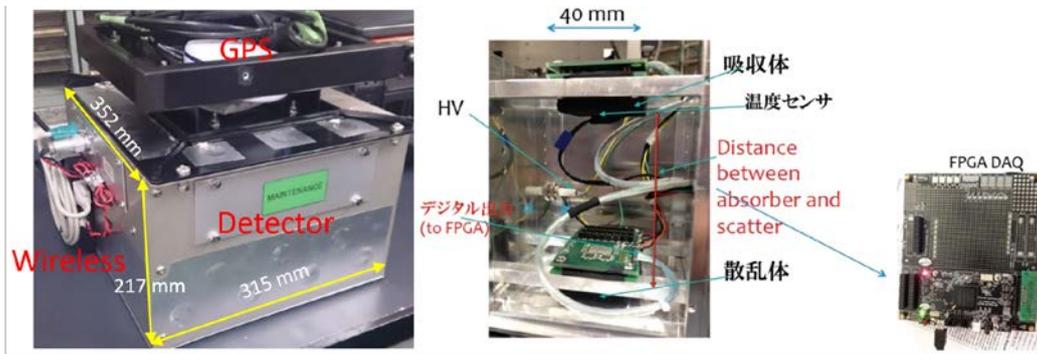


図3 検出器の外観図（左）とその内部（右）

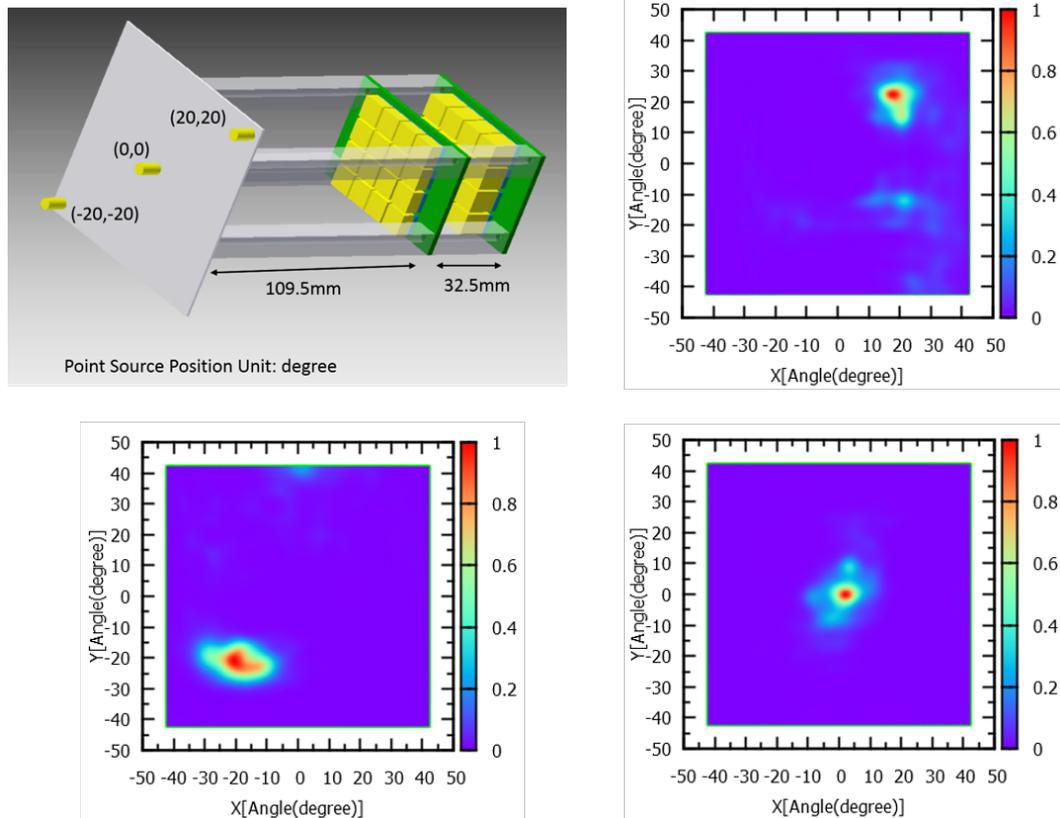


図4 約0.1m離れた位置からの ^{137}Cs の点線源の配置図（左上）、及び点線源を捉えた画像（左下・右上・右下）。オレンジ色の部分が直径5mmの線源位置

(2) 福島県内での実証試験

福島県浪江町請戸川河川敷（図 5）において、ガンマカメラの試作機を無人ヘリに搭載して測定を実施しました（図 6）。



図 5 試験場所（福島県浪江町高瀬川河川敷）
右は従来型検出器で測定された放射線分布マップ



図 6 試験の様子

測定では、予めプログラムされたラインに沿って測定を行うプログラミング飛行及びホバリング飛行を実施しました。プログラミング飛行では、およそ 60m 四方の範囲を矩形的に 5m 間隔のライン上を 20 分程度飛行測定することにより、河川の北岸の高線量部分と水面上や南西部の低線量部分を捉えることができました（図 7）。ここでは、散乱体と吸収体の 2 層のシンチレータを用いて同時測定（コインシデンス）することにより（コンプトン散乱による）ガンマ線のデータを取得しました。コンプトン散乱のエネルギーと散乱角との関係式から測定範囲を絞ることができ、ヘリコプター直

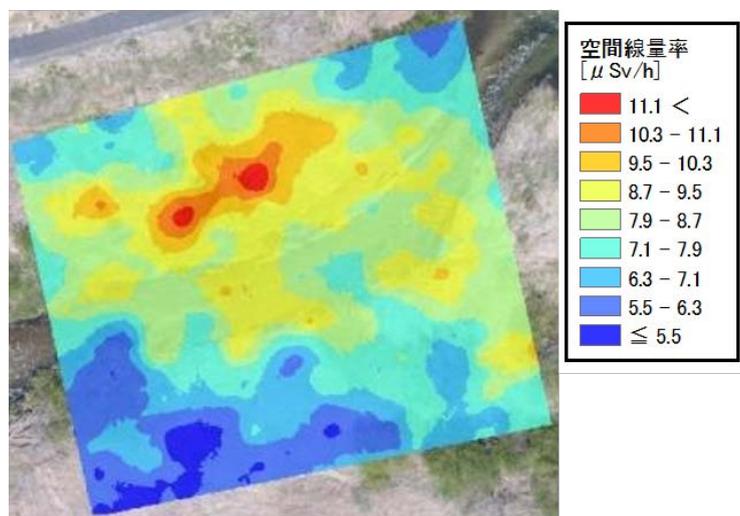


図 7 プログラミング飛行結果
（空間線量率分布マップ）

下のガンマ線を測ることができます。これにより、通常の測定器のように周辺の森林や山の斜面からの影響を大きく受けてしまうことなく、知りたい真下方向の情報を得ることが可能となりました。その結果、コインシデンスを取らない通常の測定では平均化されて見えない細かな分布を可視化することが可能となり、通常の測定器に比べて位置分解能が大幅に向上しました。

また、ホバリング飛行によるデータ収集も実施し、ガンマ線分布を再構成した画像を得ることに取り組んでおります。これにより、河川敷のホットスポットなど事故後の時間の経過とともに移流して局所的に線量の高い場所を、広範囲から迅速に特定して可視化することが可能となりました。

【今後の展望】

今回の測定手法は、上空から放射線分布をより詳細に把握するために開発しました。これまでのヘリコプターを用いた航空機モニタリングや無人ヘリによるモニタリングでは、下向き 45° の測定を行うため、図 8 に示すように位置分解能は百数十 m 以上（無人ヘリの場合）と、詳細な分布が測定できませんでした。

今回の手法では、位置分解能は約 10m で測定できました。また、3次元地図情報と組み合わせることにより、局所的な放射線分布の変化が測定できます。今回のガンマカメラの開発により、山林等を含む広範囲の放射性セシウムの分布の可視化、及び周辺からの影響を排除することによって高位置分解能の放射線量マップの作成が可能となり、広いエリアの中から除染箇所特定や除染効果の確認作業の効率化に向けて大きく前進します。

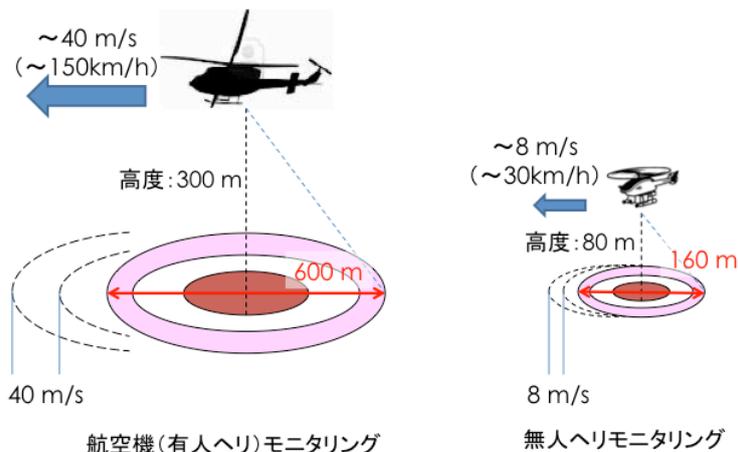


図 8 航空機と無人ヘリの測定範囲

今後、現地での試験結果をフィードバックし、より高性能なシンチレータの開発や検出素子の増強、補正情報の取得機能の追加など、今回用いた試作機の改良（図 9）を行うことによって感度と位置分解能の向上を実現し、必要な技術を確認して行きます。さらに、計測回路の高集積化、検出素子の高精細化を図ることにより、指向性と検出効率を高め、位置分解能 1 m 以内の高精度・高位置分解能の放射線量分布測定法の実用化を目指します。



図 9 検出素子 (APD) の 8×8 アレイ

また、データ解析方法やマッピングソフトウェアの開発も含めて、図10のように、ホバリングによる放射線の分布測定と高位置分解能を目指した測定法の実用化を目指して行く予定です。また、3次元地図情報と組み合わせることで、3次元のセシウム沈着量分布マップの作成を目指して行く予定です。



A. ホバリングによる分布測定

B. 移動測定による高位置分解能測定

図10 今回開発した測定システムの利活用方法（概念図）

本開発成果は、JST 先端計測分析技術・機器開発プログラム（放射線計測領域）の開発課題「無人ヘリ搭載用散乱エネルギー認識型高位置分解能ガンマカメラの実用化開発」によって得られました。

【用語説明】

1) ガンマカメラ

放射性物質から放出されるガンマ線を捉えて可視化するカメラ。ガンマカメラは、ガンマ線に感度がある半導体やシンチレータを撮像素子として用い、撮像素子の周りを遮へい材で囲むことでピンホールカメラとしたものです。通常のピンホールカメラがピンホールを通過してきたそれぞれの方向からの光を捉えて対称的な画像として記録されると同様に、ガンマカメラもピンホールを通ったガンマ線だけに反応するように撮像素子を遮へいしており、ガンマ線の到来方向の情報を得ております。ピンホールと検出素子との位置関係から一対一に位置が特定可能であり、構造は比較的シンプルなものとなります。ところが、ガンマ線はエネルギーが高く、物質を透過する力が強いいため、遮へい材は鉛などの物質で作られ、厚さは数 cm になります。このためガンマカメラの重量は一般的に重くなります。

2) GAGG

Ce 添加 $Gd_3(Al, Ga)_5O_{12}$ 単結晶 (Ce : GAGG) / ガドリニウムアルミニウムガリウムガーネット。東北大学吉川彰教授と古河機械金属(株)が共同開発した結晶。GAGG は従来のシンチレータ結晶 (Tl : NaI, Tl : CsI) に比べ密度が高いため、小さな結晶でも高感度の放射線測定が可能です。また高エネルギー分解能、高速応答といった特徴を持ち、さらに潮解性もなく空気中の水分による劣化の心配もないため、長期間安定して使用することができます。

3) SiPM

SiPM (シリコン・フォトマルチプライヤー) は、ガイガーモードで動作する APD ピクセルを 2 次元に並列接続したフォトンカウンティング・デバイスです。光電子増倍管と同程度の高い増幅率を有する。医療イメージング (PET) ・高エネルギー物理・シンチレータ光検出などで用いられます。

4) APD

APD (アバランシェ・フォトダイオード) は、逆バイアスを印加することにより光電流が増倍される高速・高感度のフォトダイオードです。PIN フォトダイオードに比べ高い S/N が得られるため、光波距離計・空間伝送・シンチレータ光検出などで用いられます。

5) コンプトンカメラ

コンプトンカメラはガンマカメラ¹⁾と同じようにガンマ線を捉えて可視化するカメラですが、仕組みが異なります。コンプトンカメラの撮像素子は散乱体の第 1 層と吸収体の第 2 層からなり、各層の位置とエネルギー情報を基に、ガンマ線のエネルギーと到来方向も測定できるようになっています。到来方向としては、散乱角は推定できても方位角まではすぐには特定できません。点線源からの到来方向を特定するためには複数イベント必要であり、イベントにフィルターをかけて逆投影法などにより、ガンマ線分布の画像を再構成します。重量のある遮へい材が不要になるため、コンプトンカメラはガンマカメラよりも軽量になります。一方でコンプトンカメラの撮像素子はガンマカメラと比べて複雑で高価なものとなってしまいます。