

シンチレータスタック型ガンマ線イメージャに関する研究開発

(受託者) 学校法人五島育英会東京都市大学

(研究代表者) 河原林順 工学部

(再委託先) 独立行政法人国立高等専門学校機構富山高等専門学校、国立大学法人名古屋大学

(研究期間) 平成24年度～27年度

1. 研究の背景とねらい

既存の軽水炉等、原子力発電施設等の大型施設による大規模原子力災害では、施設中あるいは環境中へ放射性物質の放出を伴うリスクがあり、作業員や住民の放射線防御のためには、放射性物質がどこにどの程度存在するかを迅速に探知する必要がある。特に初期の段階において、施設内での放射性物質の位置分布は、事態収束にむけた作業を実施するうえで作業員の防護のために重要となる情報である。また、周辺住民にとっては、放射性ヨウ素の情報及び大気・地表沈着放射性物質から放出されるガンマ線による外部被曝情報は、避難経路決定及びその際の被曝量評価に重要となる。

このためには、核種弁別能力を有し放射線の飛来方向が探知可能であり、かつ可搬な検出器、すなわちエネルギー分解能力を有するコンパクトなガンマカメラが有用であると考えられる。既存のガンマカメラには、ピンホール型及びコンプトン散乱型の二種類があり、様々な分野において目的に応じた最適な構造が採用されている。大規模原子力災害時には時間的・人的余裕は制限されると考えられるため、迅速・簡易に広範囲のデータが取得可能であることが望ましい。しかしながら、ピンホール型は鉛コリメータ等で γ 線の入射方向を絞ることが一般的であり、サイズ・重量の増大(30kg前後)を招くと共に、検出効率の劣化、すなわち迅速なリアルタイム情報収集には不向きである。また、比較的軽量のコンプトン散乱型は、原理的に視野が180度以下となるため、広範囲の領域を一度にモニタするためには複数台のガンマカメラを配置することが必要となる。大規模原子力災害時には、線源の事前情報は基本的に存在せず、360度(全方向)から γ 線が飛来する可能性があり、既存のコンプトンガンマカメラを採用しても最低でも2台の検出器を背中合わせにする必要がある(図1)。

このような状況下に対応可能な、高検出効率、エネルギー弁別能力を有し、全方向に感度を有するガンマカメラの心臓部である放射線検出部開発として、シンチレータスタック型ガンマイメージャの開発を本研究開発の最終的な目標となる。これは、高効率なガンマ線スペクトロメータとして使用されているシンチレーション検出器内の、複数点となる放射線相互作用位置とその付与エネルギーを同時・個別に取得し、入射ガンマ線のエネルギーと入射方向を逆計算し推定するものである。特に、棒状シンチレータをスタック状に束ねる構造を採用することで、コリメータを必要とせず、全方向に感度を有し、かつ高検出効率で上記の情報を得るものが実現できる。また、コリメータを必要としないことから軽量コンパクトとなり、可搬型の検出システムが構築可能であると思われる。さらに、コンプトン散乱式や検出器応答の統計的逆推定により、計数率にも依存するが、数秒～数分で飛来放射線のエネルギー及び方向が求められ、その場所の線量の主要因となっている放射性同位体の種類やその方向の推定が可能になると期待される。

本研究開発事業で目標としている検出器部は、具体的にはロッド状のシンチレータを複数本束ね、それぞれのシンチレータでの放射線との相互作用位置及びその付与エネルギーを取得し、コンプトン散乱の原理を利用して入射法方向を推定することとしている。ロッド毎に光センサー及

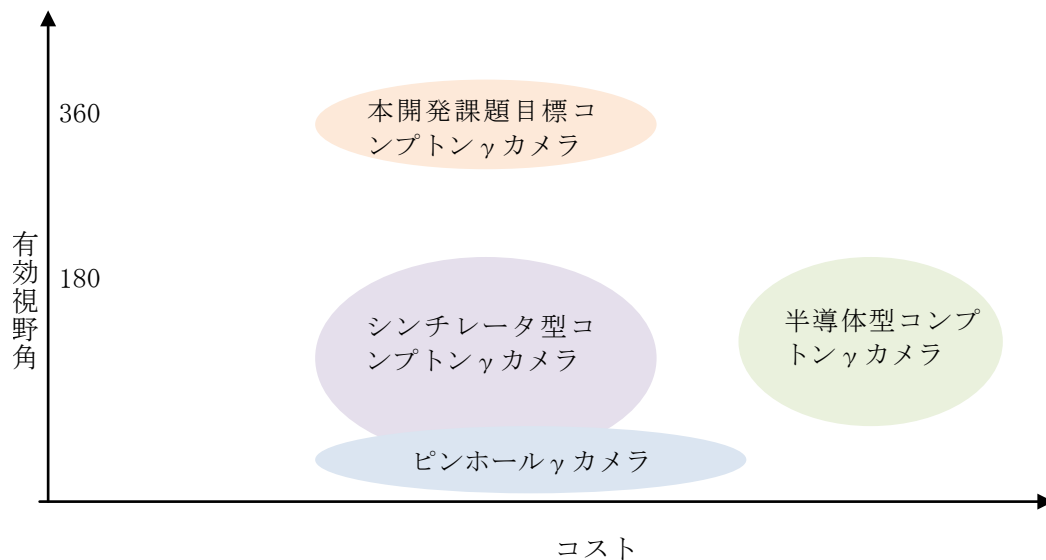


図1 他方式のガンマカメラと比較した場合の本開発課題の目標

びセンサー用回路を付することにより、それぞれのシンチレータロッドを独立に動作させることが可能になり、コンプトン散乱事象での複数地点となる放射線とシンチレータとの相互作用位置を記録可能とすると共に、ロッドを束ねることにより、全方向からの γ 線入射に対応することが可能となる。

2. これまでの研究成果

上記検出器の実現を目指し、以下の項目を実施し成果を得た。

①材料評価検討

開発するガンマ線イメージャは、シンチレータをその検出要素とする。数々のシンチレータ材料が一般に供給されているため、本研究開発に適したシンチレータを選定した。候補として、ルテチウムイットリウムオルソシリケート (LYSO)、フッ化カルシウム (CaF_2)、ガドリニウムアルミニウムガリウムガーネット (GAGG)、プラスチックシンチレータ、ヨウ化セシウム (CsI) の、潮解性を有しない（有しても少ない）シンチレータを用意して評価を実施した。その結果、自己放射能、側面加工性、を考慮し、GAGG を候補として以下の開発を進めることとした。

②側面処理

ガンマ線イメージャは 360 度方向に感度を有し、かつコンプトン散乱を利用してガンマ線入射方向を推定するため、ガンマ線の散乱点とその点での付与エネルギーを記録する必要がある。そのため、本研究開発では、棒状のシンチレータを束ね、どのシン

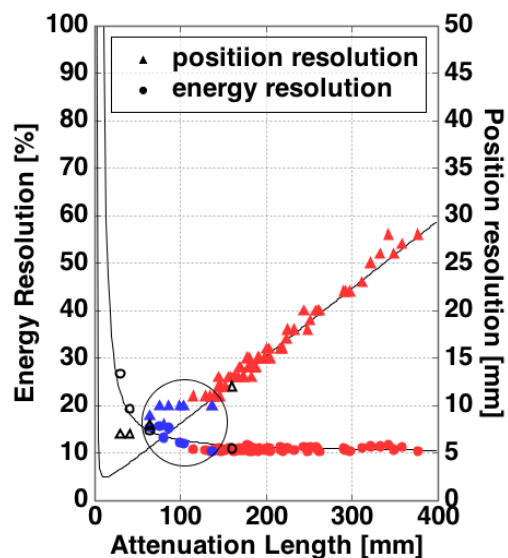


図2 スパッタリング前後の位置・エネルギー分解能の測定結果

チレータが光ったかで XY 情報を、シンチレータの長軸方向の位置情報で Z 情報を得てガンマ線との相互作用位置の 3 次元情報を得る構造をしている。そのため、棒状シンチレータの両端面の光出力より、長軸方向の位置情報を得ると共にエネルギー情報も得ることのできる構造とする必要がある。そのために、棒状 GAGG シンチレータの側面を加工し、位置情報とエネルギー情報が取得可能となる条件を探索した。

様々な加工法を試み、最終的には棒状シンチレータを伝わるシンチレーション光に対する減衰特性を調整することが最も実用的であるとの結論に達した。具体的にはシンチレータの形状により異なり、2.8mm 角×50mm 長さの棒状 GAGG シンチレータに対しては、初期の減衰特性に応じた量の金属（今回は Ag を採用）を側面にスパッタリングすることがよいとの結果が得られた。その実験データを図 2 に示す。また、1mm 角×50mm の棒状シンチレータの場合は、金属側面スパッタリング処理ではなく、テフロンによる側面被膜処理が望ましいとの結論となった。

③アルゴリズムの開発

前期の特性を有する棒状シンチレータを束ねた場合の検出器応答を、モンテカルロシミュレーションコード（electron gamma shower 5: EGS5）を用いて取得した。また、得られた応答データを用いて、ガンマ線飛来方向推定のための逆投影アルゴリズムを開発した。本検出器は全方向からのガンマ線入射に対応するため、一般的なコンプトン

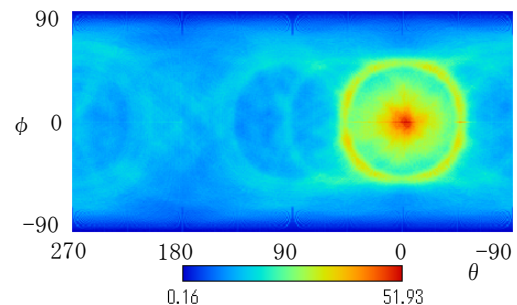


図 3 逆投影結果（発光点間距離閾値なし）（計算値）

ガンマカメラと異なり、ガンマ線との散乱点と吸収点の区別がつかない。そこで、ガンマ線が入射し検出器内 2 か所で相互作用したイベントを抽出し、その 2 か所の相互作用位置 A 及び B に対し、以下の要領で逆投影を行った。すなわち、位置 A をコンプトン散乱点、位置 B を吸収点としてコンプトンコーンを描画し、更に位置 A と位置 B を入れ替えて再度コンプトンコーンを描画した。¹³⁷Cs の点線源が $(\theta, \phi) = (0^\circ, 0^\circ)$ に位置した場合の結果を図 3 に示す。若干アーチファクトがあるものの、正確に方向推定が可能であることを確認した。また、アルゴリズムの改善として、相互作用 2 点間の距離を大きくすることにより、アーチファクトの低減、方位分解能の改善がはかれることを確認すると共に、¹³¹I から放出される 365keV の比較的低エネルギーのガンマ線の場合は、散乱点と吸収点を検出器中心からの距離で仮定することにより、擬似ピークの除去が可能になることを確認した。

④光読み出しシステムの構築

ガンマ線の入射方向を算出するためには、ガンマ線とシンチレータとの相互作用位置及び付与エネルギー情報を取得する必要がある、かつ 2 か所以上の複数点で相互作用したイベントを抽出する必要がある。そのため、棒状シンチレータ両端からの光出力の発光量とそのタイミング情報を記録する装置を開発する必要があった。本研究開発では、光読み出し素子として小型の固体光センサーである Multi Pixel Photon Counter (MPPC) を採用した。MPPC をシンチレータ両端に配置し、その出力の日から長軸方向位置が、その和から発光量の情報が得られる。MPPC からの出力は、波形整形回路を通し ADC にて波高値情報をデジタルデータに変換した後、PC に記録される。記録されたデータは PC 上で位置情報やエネルギー情報に変換され、逆投影される。2.8mm 角×50mm

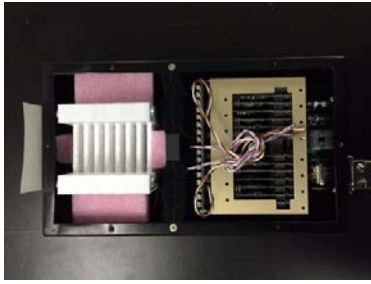


図4 光読み出しシステムの写真。左の白い棒は側面処理したシンチレータ

長さのGAGGシンチレータを64本束ねた場合の装置を図4に、チェックソースに対し得られた逆投影結果を図5に示す。さらに線源位置を45度刻みで0度～315度方向から入射した場合の θ 方向断面図を示す。360度すべての方向で入射方向が正しく得られ、方位分解能が約90度であることを確認した。

⑤高線量率対応

原子力災害時には、特に施設内部において線量率が高くなることが予想される。そのため、ガンマ線イメージャーにも、高線量率場での適用性が求められる。そこで、原子力プラント作業員が作業環境として困難と看做す高空間線量率の場での応答を計算にて評価したところ、数mSv/h以上の空間では偶然同時計数等により再構成画像が得られず適用が困難となることが明らかとなった。そこで、シンチレータの太さを1mm角とした、高線量率対応版の作成を実施した。図7にその写真を示す。シンチレータの太さを変更して検出効率を押さえるとともに、パイルアップ除去として、波高値を $\pm 1\mu$ 秒でも取得する機構とした。これにより 1μ 秒程度の偶然同時計数イベントを除去することが可能となる。この高線量率版の、チェックソースに対する再構成結果を図8に示す。正しく位置推定が可能であり、方位分解能が84度となったことを確認した。

3. 今後の展望（24年度採択課題の場合）

全方向ガンマイメージャーの開発を実施し、約90度の方位分解能を有する装置の開発に成功した。今後は、より分解能を向上するための各種数学的アルゴリズム導入や、高線量率場での性能の実証、360度カメラとの統合による実際の場所への適用が求められる。

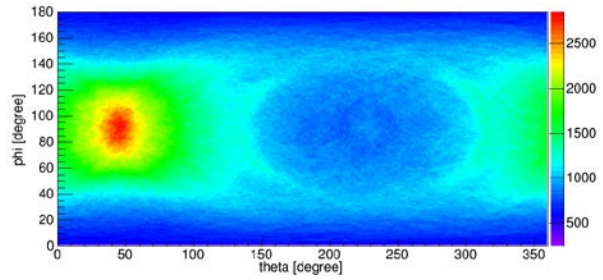


図5 ^{137}Cs チェックソースの位置再構成結果

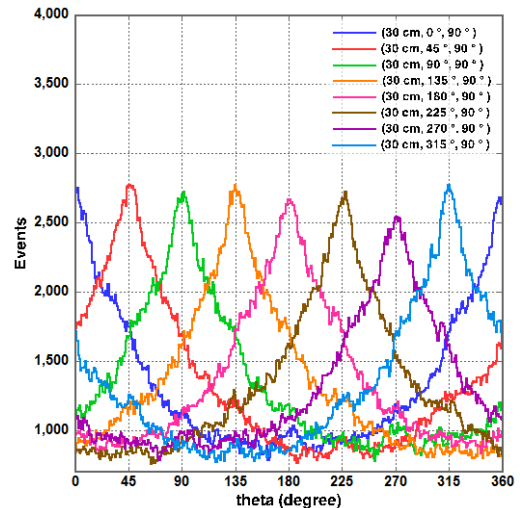


図6 入射方向0度～315度まで45度刻みで ^{137}Cs を配置した場合の再構成結果の θ 方向断面図



図7 高線量率版ガンマイメージャ写真。左部白い棒が1mm角の棒状シンチレータ。

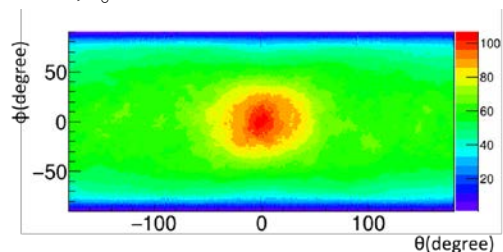


図8 高線量率版ガンマイメージャにて取得したデータを再構成結果。正確に方向情報が取得されている。