

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

研究代表者 河原林 順 国立大学法人名古屋大学大学院工学研究科
参画機関 国立大学法人名古屋大学、独立行政法人国立高等専門学校機構富山高等専門学校
研究開発期間 平成24年度～27年度

1. 研究開発の背景とねらい

1. 1 背景

既存原子力発電施設等の大型原子力施設による大規模災害では、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、放射性物質の存在位置分布を迅速に探知可能な体制を構築しておくことが望ましい。特に災害初期の段階における施設内での放射性物質の分布は、事態収束のための作業に際し作業員防護の観点から、また、周辺住民にとって、放射性ヨウ素等の大気・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、避難経路決定及び被曝量評価の観点から極めて重要となる。さらに初期以降は、沈着放射性物質の核種ごとの分布情報を迅速に得ることは、環境修復作業のために重要となる。

市販されているサーベイメータやスペクトロメータでは、検出器の存在する場所での放射線線量やエネルギースペクトルしか測定できず、ロボットや車両・航空機に搭載、あるいは徒歩にて移動しながら測定することにより、沈着物質の空間分布を推定している。そのため、サーベイ行為自体に長時間を必要とし、作業員の被曝が不可避である欠点がある。一方、放射線飛来方向とそのエネルギー情報が取得可能であれば、その地点に入射する放射線の線源方位情報が得られることになる。この情報を使用することにより、線源に対する遮蔽あるいは対処が可能となり、復旧作業や修復作業の効率化に資することができると考えられる。

このためには、核種弁別能力、放射線の飛来方向が探知可能、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。しかし、既存のピンホールガンマカメラは、サイズ・重量の増大(30kg前後)⁽¹⁾が不可避であり、低検出効率、視野が限られることから、既存のガンマカメラをそのまま上記目的に適用することは困難である。

一方、軽量コンパクトとなるコンプトン散乱型ガンマカメラの開発が、国内外の様々なグループ⁽²⁾⁽³⁾により進められている。しかしながら、各グループとも一方方向からのガンマ線入射を前提とした開発がなされており、動作原理上視野が180度(立体角で 2π 方向)に限られる欠点がある。特に、災害発生直後には線源の事前情報が存在せず、360度(4π 方向)からガンマ線が入射する可能性があり、最低でも2台の検出器を背中合わせにする配置する必要がある。このため、我々は非常時に有益な情報を迅速に取得するため、1台の検出器で全方向に感度を有することを目指したコンプトン散乱型ガンマイメージャの開発を実施する。

1. 2 目的

前述の状況に対応可能な、高検出効率、エネルギー弁別能力を有し、かつ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器開発として、シンチレータスタック型⁽⁴⁾ガンマイメージャの開発を本研究開発の目的とする。これは、高効率なガンマ線エネルギー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、放射線相互作用位置とその付与エネルギーを個別に取得し、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。特に本開発課題で提案する基本構造では、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可能であると考えている。概略図を図1に示す。両端に光センサーを配した棒状シンチレータロッドを束ね、それぞれのシンチレータ内の発光事象の位置（棒状シンチレータ長軸方向の位置・シンチ自体の位置）及び発光量をシンチレータごとに独立して読み出し、そのデータからコンプトン散乱の式により入射方向を推定するものである。

ここで重要となるのが、シンチレータの種類及びそのエネルギー分解能及び長軸方向の位置分解能、飛来方向推定アルゴリズム、可搬型に適した光センサーの特性評価であり、H24年度はこれらの評価を目的として研究開発を実施した。

2. 研究開発成果

2. 1 シンチレータの特性評価

数々のシンチレータ材料が一般に供給されており、本研究開発に最適なシンチレータ材料を選定する必要がある。そのため、棒状シンチレータとして、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 (CaF₂)、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（有しても若干な）棒状シンチレータを用意し、側面の凹面鏡加工を実施し、その加工性を評価した。この加工は、シンチレータの長軸方向の位置分解能を向上するために実施するものである。また、シンチレータの分解能等の特性評価を実施し、本目的に合致するシンチレータを選別した。

加工性評価の結果を表1に示す。これより、GAGG、LYSO、CaF₂が適している結果となった。また、図2にGAGGシンチレータ（3x3x48mm）中央部にコリメートされた¹³⁷Csからのガンマ線入射した場合のエネルギースペクトルを、図3にGAGGシンチレータ各位置に同上のガンマ線ビームを入射した場合の位置情報分布を示す。これらの結果より、GAGGシンチレータのエネルギー分解能は9.4%(@662keV)、位置分解能は6mmと評価された。なお、LYSOは自己放射能のため、CaF₂は実効原子番号が小さいことより、これらの評価は不能であり、本研究開発にはGAGGシンチレータが適していることが判明した。

2. 2 全方向放射線飛来方向推定アルゴリズム

GAGGシンチレータを構成要素とし、図1に示されるようにスタック（3x3x48mmのGAGGシンチレータを16x16本スタック）した場合の、シンチレータ内ガンマ線挙動をEGS5計算コードによりシミュレーションした。さらに、2. 1にて評価されたエネルギー分解能・位置分解能値を用いて検出器応答を取得した。このデータに対し、以下に示すアルゴリズムを考案し、入射方向を推定しアルゴリズムの妥当性評価を実施した。

表1 各種シンチレータ加工性評価結果

シンチレータ候補	GAGG (Ce)	LYSO (Ce)	CsI (Tl)	CaF ₂ (Eu)	プラスチック
自己放射能	無	有 (¹⁷⁶ Lu)	無	無	無
ラッピング研磨加工	○	○	—	○	△
加工時間（1面あたり）	24分	20分	—	5分	4分

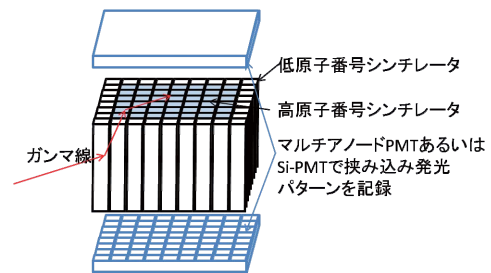


図1 提案するガンマ線イメージャの概念図。棒状のシンチレータをスタックし、ガンマ線入射時のコンプトン散乱事象を記録・解析して入射方向情報を取得。

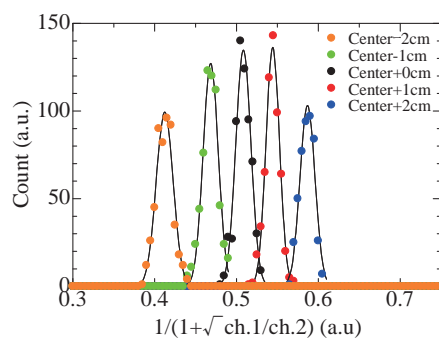
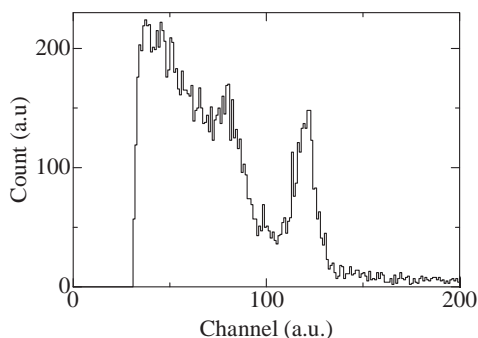


図2 GAGGシンチレータの662keVガンマ線入射 図3 GAGGシンチレータ各位置へ662keVガンマ線に対するエネルギースペクトル 線を照射した場合の位置応答

1本のガンマ線入射に対し、検出器の内2つの領域で相互作用が起こったイベントのみを抽出した後に、コンプトンコーンの逆投影を行う単純逆投影アルゴリズムを採用した。本システムでは散乱点・吸収点の区別をせず、2か所の相互作用点をそれぞれ1、2とし、1が散乱点で2が吸収点である場合と、両者が入れ替わった時の両方の場合について通常のコンプトン散乱式を用いてコンプトンコーンの算出を行い、検出器を中心とする仮想球殻に2つのコンプトンコーンを投影し、入射方向推定イメージを算出した。

^{137}Cs を対象に662keVのガンマ線入射に対する算出結果を図4に、 ^{131}I を対象に365keVのガンマ線に対する算出結果を図5に示す。線源は $(\theta, \phi) = (0, 0)$ に設定しており、両者とも同方向に推定ピークが得られ、本アルゴリズムにより入射方向推定可能であることが示された。しかしながら662keVの場合は方向分解能が100度(FWHM)であり、また365keVでは180度反対方向により小さいながらも偽ピークが表れ、アルゴリズムの改善が必要とされた。そこで、662keVのガンマ線入射場合、発光2点間の距離が大きいイベントのみ選択するに転換距離に閾値を導入したところ、図6に示される通り閾値を大きくするに従い方位分解能が改善することが示され、18mm以上の事象のみの場合で28度(FWHM)の方位分解能が得られた。さらに、365keVのガンマ線入射に対して、発光2点のうち低発光点を散乱点、高発光点を吸収点としてコンプトンコーンを描画したところ、図7に示される通り、若干の影響は残るものの、偽ピークを消去し、線源方向推定が可能であることが確認された。

2. 3シンチレータ両端光読み出しシステムの開発

上記シンチレータからの発光を測定する光読み出しシステムの小型化及び可搬化を目指し、マ

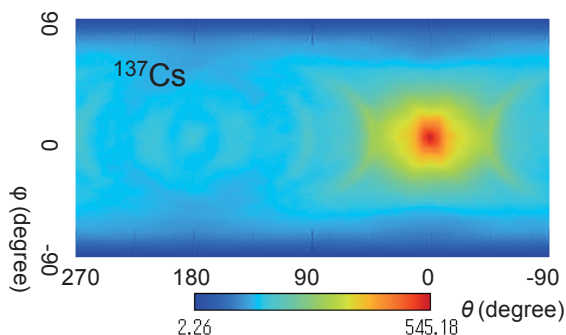


図4 662keVガンマ線入射に対する推定図

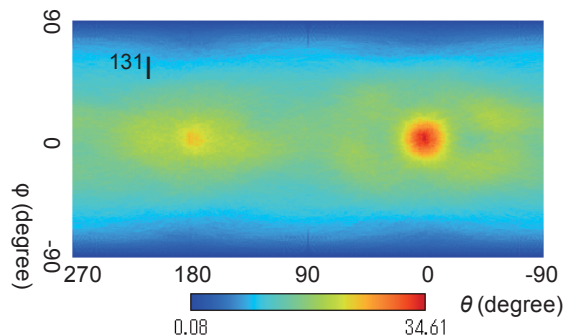


図5 365keVガンマ線入射に対する推定図

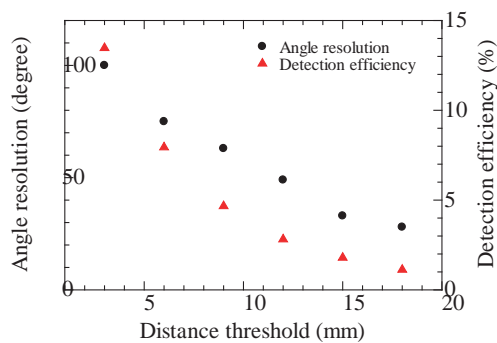


図6 発光2点間距離に制限を設けた場合の方向分解能と検出効率

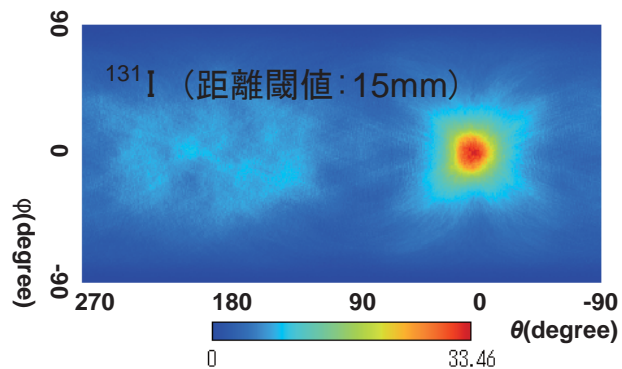


図7 エネルギーによる散乱点と吸収点の推定を導入した場合の推定図

ルチピクセルフォトンカウンタ (MPPC) を光センサーとして用いるシステムを開発した。シンチレータをそれぞれ独立に MPPC に接続し、シンチレータでの発光を電気信号に変換して処理を行うこととし、単一の MPPC からの信号波高値をアナログ-デジタルコンバータ (ADC) により取得可能な回路を設計・試作するとともに、冷却によるノイズ低減の可能性検討のため、低温恒温槽を用いて温度特性を評価した。また、多チャンネル (以下 8ch) の MPPC からデータを収集するシステムを構築した。

構築した回路システムと、市販の 8ch システムを比較したところ、シンチレータからの波高分布及び光出力分布がほぼ一致することを確認し、構築した回路システムが正常動作していることを確認した。また構 MPPC の温度特性を評価したところ、冷却機能を付すと観測精度が向上することが判明した。

3. 今後の展望

GAGG シンチレータを第一候補とし、両端に MPPC を配しスタックするプロトタイプ検出器を製作すると共に、最尤推定-期待値最大化法の導入等により入射方向推定アルゴリズムの改善を進め、全方向に感度を有するガンマ線イメージャの開発をさらに進めていく予定である。

4. 参考文献

- (1) 文部科学省研究成果展開事業 (先端計測分析技術・機器開発プログラム) 「放射線計測領域」実用化タイプ (短期開発型) 平成 24 年度「半導体検出器を用いた環境測定用ガンマカメラの実用化開発」
- (2) 文部科学省研究成果展開事業 (先端計測分析技術・機器開発プログラム) 「放射線計測領域」実用化タイプ (中期開発型) および革新技術タイプ (要素技術型・機器開発型) 平成 24 年度「革新的超広角高感度ガンマ線可視化装置の開発」
- (3) 文部科学省研究成果展開事業 (先端計測分析技術・機器開発プログラム) 平成 24 年度放射線計測領域<2次公募>「革新技術タイプ (機器開発型)」「高感度かつ携帯可能な革新的ガンマ線可視化装置の開発」
- (4) K. Watanabe, et al., "Development of Compact Wide-Angle Imaging Detector for MeV Gamma-Rays using Stacked BGO Scintillator Rods," IEEE NSS Conf. Record, pp. 253-256 (2006).