

福島第一原子力発電所での事故を受け,短時間で広範囲のガンマ 線強度分布を可視化可能な装置(ガンマカメラ)が必要とされてい る。日立製作所は,医療用の半導体放射線計測技術を応用した装 置を開発し,原子力発電所内外での適用を進めている。原子力発 電所外の低線量率環境においては,コリメータの大口径化,および エネルギー測定範囲のワイドレンジ化などの適用により,測定時間 の短縮を図っている。また,計測回路の高速化,遮蔽体の増強と 最適化,およびシャッター機能の適用により,原子炉建屋内の高線 量率環境における計測を実現している。さらに,放射性核種の特定 が可能という特徴を生かし,核種ごとに異なる最適な除染方法の提 案や線源位置同定による除染の効率化を図る予定である。

#### 1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災による津波により,福 島第一原子力発電所での事故が引き起こされ,環境中に放 出された放射性物質による汚染が発電所内外に広がってい る。除染作業の効率化や作業によって発生する汚染物低減 のためにも,汚染場所の特定,除染状況・効果の確認を効 率的に行う必要がある。環境放射線を測定する一般的方法 として,サーベイメーターを用いて空間線量率を測定する 方法がある。しかし,汚染場所の特定に時間を要するとと もに,局所的にガンマ線強度が強い場所(ホットスポット) を見落とす可能性がある。そこで,短時間で広範囲のガン マ線強度分布を可視化可能な装置(ガンマカメラ)が必要 とされており,海外メーカーを含めて数社が製品化してい る<sup>1)~4)</sup>。日立製作所は,医療用の半導体放射線計測技術 を応用した放射性核種の特定が可能なガンマカメラを開発 し,発電所内外での適用を進めている<sup>5).6)</sup>。

ここでは, ガンマ線強度分布を可視化するガンマカメラ の開発について述べる。

# 2. ガンマ線強度分布の可視化

ガンマ線強度分布の測定には、ガンマ線検出素子を二次 元に配列したピクセル型ガンマ線検出器とピンホールコリ メータを用いている。ピンホールコリメータは、ガンマ線 の遮蔽材にピンホールを設けた構造としており、ピンホー ル部分を通り抜けるガンマ線以外を遮蔽する役割を持つ。 ガンマ線検出器の各ピクセルとピンホール部分を結ぶ直線 と、測定対象面との交点がガンマ線の生成位置と同定でき る。ピクセルごとに測定されるガンマ線計数率がガンマ線 強度に比例することから、測定対象面でのガンマ線強度分 布の測定が可能となる(図1参照)。

ガンマ線強度分布の測定と同時に,光学カメラを用いて 測定対象面の光学画像を撮影する。ガンマ線強度分布をカ ラー表示し,光学カメラの画像を重ね合わせることで,ガ ンマ線強度分布の可視化が可能となる。



図1 ガンマ線強度分布の測定原理

測定対象面で生成するガンマ線は、ピンホールコリメータを通り抜け、検出 器の各ピクセルで測定される。測定されたピクセルを特定することで、ガン マ線の飛来方向,すなわち測定対象面でのガンマ線の生成位置を同定できる。 各ピクセルでのガンマ線計数率からガンマ線強度を導出でき、ピクセル全体 の測定データから、ガンマ線強度分布の測定が可能となる。

#### 3. ガンマカメラ

#### 3.1 ガンマ線検出器モジュール

ガンマ線検出素子には、CdTe (テルル化カドミウム)半 導体を用いている。CdTe半導体素子は、バンドギャップ が1.4 eVと高いことから室温での測定が可能であり、素 子の微細化が容易であることから高位置分解能の測定が可 能である。また、密度が5.85 g/cm<sup>3</sup>、実効原子番号が50 と高いことから、高感度での測定が可能である。CdTe半 導体素子をピクセル化して、またピクセル化した各素子か らの信号処理用のASIC (Application Specific Integrated Circuit)を開発し、それらを基板上に実装することで二次 元ピクセル型ガンマ線検出器を実現している(図2参照)。

#### 3.2 ピンホールコリメータおよび遮蔽体

ピンホールコリメータは、ピンホール部分を通り抜ける ガンマ線以外を効果的に遮蔽する必要がある。したがっ て,密度19.3 g/cm<sup>3</sup>,原子番号73とともに大きく、単位 体積当たりの遮蔽能力が高いタングステンを構造材として いる。測定可能な対象面の大きさは、検出器面の大きさ、 測定対象面と検出器面間の距離、および、検出器面とピン ホール間の距離によって決定される。今回開発したガンマ カメラは、10 m先にある8 m四方の対象面を測定可能と している。空間分解能と検出感度はピンホール径によって 決定され、トレードオフの関係にあるので、測定対象やそ の環境に対応するためにピンホール径が異なるコリメータ を交換可能な構造としている。

測定対象面以外から検出器に入射してくるガンマ線は測 定のバックグラウンドとなることから,できるだけ低減さ せる必要がある。そこで,検出器モジュールの周囲を遮蔽 体で覆うことで,測定対象面以外からのガンマ線が検出器



ピクセル化したCdTe半導体素子を二次元平面上に配列し,信号処理用のASIC (Application Specific Integrated Circuit)を開発している。各素子からの信号 を個別に収集可能である。 モジュールに入射することを防いでいる。遮蔽体の増強に よってバックグラウンドを低減する効果は高まるが、装置 の重量が増加してしまうので、コンパクトな検出器モ ジュールを使うこと、および遮蔽体構造の最適化を図るこ とにより、ガンマカメラの可搬性(軽量化)と十分な遮蔽 能力とを両立させている。

#### 3.3 重ね合わせ画像と線量率導出

ガンマ線強度分布の可視化には、強度分布の測定結果と 光学画像の重ね合わせが必要である。そこで、ガンマカメ ラに光学カメラを備え付け、ソフトウェア上で重ね合わせ て表示している。ガンマ線検出器モジュールの各ピクセル において、ガンマ線エネルギースペクトルを測定している ことから、放射線核種ごとの強度分布の測定が可能である (図3参照)。

また、レーザ距離計を備えることで、検出器と測定対象 面との距離を計測しており、測定対象を点線源と仮定した 場合の線量率を算出可能としている。

#### 3.4 ガンマカメラ本体

ガンマカメラ本体の大きさは、幅24 cm、高さ34.5 cm, 奥行き34 cmであり、重さは約15 kgである。可搬性を考 慮し、小型軽量化を図っているが、周囲のガンマ線バック グラウンド環境に応じて、簡易に遮蔽体が追加可能な構造 としている。ガンマカメラ筺(きょう)体は、前方、後方 および上部が開く構造としており、ピンホールコリメータ 交換や遮蔽体の追加が容易である。(図4参照)。



注:略語説明 Cs-137 (セシウム137), Co-60 (コバルト60)

図3 / ガンマ線強度分布と光学画像の重ね合わせ画像

各ピクセルにおけるガンマ線エネルギースペクトル情報を利用することで, 放射性核種ごとの強度分布の可視化が可能である。



図4 ガンマカメラ本体

可搬型を考慮し,小型軽量化を図っている。周囲のガンマ線バックグラウン ド環境に応じて,ガンマ線検出器モジュールを囲む遮蔽の厚さを簡易に変え られる構造となっている。

ガンマカメラの制御,データ収集・処理は1台のPC (Personal Computer)で行っており,ガンマカメラ本体と USB (Universal Serial Bus)ケーブルで接続している。PC でのデータ処理後の結果は,1秒ごとに画面表示可能であ る。また,さまざまな環境下での使用を想定し,PCはタッ チパネルでの操作も可能となっている。

使用場所に電源がないことを想定して、ガンマカメラは バッテリを搭載している。バッテリは、軽量化を優先して 電池ボックスとしているが、充電池タイプの二次電池や AC (Alternating Current) 100 V電源の使用も可能である。

#### 4. 性能評価

#### 4.1 エネルギー分解能

汚染の原因となる放射性核種に応じた適切な除染を実施 するために,放射性核種の情報は重要である。開発したガ ンマカメラは,放射性核種の特定が可能であることが大き な特徴である。放射性核種の特定は,ガンマ線エネルギー スペクトルを測定し,核種ごとに異なる全吸収ピークのエ ネルギーの評価により実施している。核種の特定精度は, エネルギー分解能に依存する。Cs-137 (セシウム137) お よびCo-60 (コバルト60)の点線源を用いて,そのエネル ギースペクトルを測定することで,エネルギー分解能を評 価している (図5参照)。

Cs-137の662 keVの全エネルギー吸収ピークの半値幅 は2.3%, Co-60の1332 keVの半値幅は1.5%であり, 今回 の原子力発電所の事故により環境中に放出されたI-131(ヨ ウ素131), Cs-134 (セシウム134), Cs-137に加えて, Mn-54 (マンガン54), Co-60などの金属の放射化により 生成する核種, Eu-154 (ユーロピウム154) に代表される 核燃料中に存在する核種,およびK-40 (カリウム40) など の自然界に天然に存在する核種の特定が可能である。



#### 図5 ガンマ線エネルギースペクトル

Cs-137とCo-60のピークが、それぞれ2.3%および1.5%の半値幅で測定可能 であり、今回の事故に関連する核種、および天然に存在する核種の特定が可 能である。

#### 4.2 可視化確認

ガンマカメラから5 mの距離に Cs-137 の点線源を設置 し、ガンマ線強度分布と光学画像の重ね合わせを確認して いる。光学画像でのガンマ線強度の強い位置が、点線源の 位置と一致しており、線源の空間上の位置が一目で分かる ようになっている(図6参照)。

ガンマ線強度分布を測定するうえで,空間分解能は重要 である。点線源を用いて,ガンマカメラの各ピクセルのカ ウント数を測定し,画素番号に対するカウントを示すグラ フのピークの半値幅を空間分解能としている。同図の青枠 ピクセルにおける半値幅は1.6ピクセルとなっており,ガ ンマカメラから5mの位置においては,1ピクセルが0.25m に相当するので,空間分解能は0.4mとなる(図7参照)。



# 図6│可視化確認

ガンマ線強度の強い位置を赤で示している。点線源位置と一致しており,線 源の空間内での位置を一目で確認できている。



図7 位置分解能の評価結果

5 mの距離の測定対象物に対して、0.4 mの分解能でのガンマ線強度分布の測 定が可能である。

# 5. 福島第一原子力発電所内外での適用例

# 5.1 原子力発電所外

原子力発電所外の空間線量率が比較的低い環境において は、一般的に必要な測定時間が長くなる。測定時間を短縮 するためにコリメータの大口径化、エネルギー測定範囲の ワイドレンジ化などを図っている。茨城県北部での測定状 況を図8に示す。測定対象の樹木から約5.2 m離れた高さ 約1mの位置にガンマカメラを設置し測定した。

また、サーベイメーター(日立アロカメディカル株式会 社製TCS-172B)を用いて測定した空間線量率の結果を 表1に示す。ガンマカメラ設置位置での空間線量率は



図8 | 茨城県北部の測定場所 測定対象の樹木から約5.2 m離れた高さ約1 mの位置にガンマカメラを設置し て測定した。

表1 サーベイメーターを用いた空間線量率の測定結果(除染前) ガンマカメラの設置位置における空間線量率は、通常の生活をした際に年間 1 mSvの被ばくを受けるとされる0.23 µSv/hとほぼ等しい値である。

場所	地表からの高さ		
	10 cm	50 cm	100 cm
樹木の根元	1.92	0.85	0.58
アスファルト	0.21	0.19	0.19
ガンマカメラの設置位置	0.36	0.29	0.27

注:単位 µSv/h (毎時マイクロシーベルト)

0.27 µSv/hであり,通常の生活をした際に年間1 mSvの被 ばくを受けるとされる 0.23 µSv/hとほぼ等しい値である。 樹木の根元に2 µSv/h程度の空間線量率の高いホットス ポットが存在することは分かったが,その分布をサーベイ メーターの測定結果から確認することはできていない。

一方,ガンマカメラでの測定により,樹木の根元に存在 するガンマ線強度の強い範囲が可視化できている(図9 参照)。

枝に付着した放射性物質が雨によって根元に流され、集 積したものと考えられる。また、ガンマカメラでの測定に よって得られたガンマ線強度の強い範囲の土壌を深さ



図9 | 除染前後のガンマカメラでの測定結果 除染によってガンマ線強度の強い範囲が,効果的に取り除かれているのが確 認できている。



図10 | 原子力発電所原子炉建屋内での測定場所 福島第一原子力発電所1号機の原子炉建屋内1階において,格納容器の外壁を 対象に測定を実施している。

5 cm除去する除染を実施している。除染後,再びガンマ カメラで測定しており,ガンマ線強度の強い範囲が除去さ れたことを視覚的に確認できている。

この時の除染係数(ガンマ線強度の強い範囲における除 染前後での計数率の比)は1.96であり,ガンマカメラでの 測定により,定量的な除染効果の確認が可能である。

#### 5.2 原子力発電所原子炉建屋

高線量環境下でのガンマカメラの適用も進めており、福 島第一原子力発電所の原子炉建屋内1階において、圧力容 器を囲む格納容器の外壁を測定している(図10参照)。

ガンマカメラ設置位置での雰囲気線量率は7 mSv/h程度 であり、原子力発電所外と比較して4桁以上高い値となっ ている。格納容器の貫通口が、放射性核種が集積している



図11 | 原子力発電所原子炉建屋内の測定結果 格納容器の貫通口がホットスポットになっていることが明確に確認できて



図12 | 原子力発電所内の測定結果 格納容器の貫通口がホットスポットになっていることが明確に確認できて いる。

ホットスポットとなっていることが明確に確認できており、高線量環境下においてもガンマ線強度分布の可視化が可能となっている(図11参照)。

ピクセルごとのガンマ線エネルギースペクトルの測定が 可能であることを用いて,複数のホットスポット部分のス ペクトルの比較を行っている。格納容器側(内部側)が閉 止されている貫通口のピーク部分の計数率をコンプトン領 域の計数率で除した値は,原子炉建屋側(外部側)が閉止 されている貫通口の値と比較して小さい値になっている (図12参照)。

内部が閉止されている場合は,ガンマ線の生成源が貫通 口よりも格納容器内部に多くあると考えられるので,ガン マ線が検出器に入射するまでに構造材などで散乱される頻 度が高いと考えられる。一方,外部が閉止されている場合 は,線源が貫通口外側表面近傍まで達しており,線源で生 成されるガンマ線が検出器に入射するまでに散乱される頻 度が比較的低いと考えられる。したがって,ガンマ線エネ ルギースペクトルが測定可能という特徴を用いることで, ピーク計数率とコンプトン部分の計数率の比の値により, 線源位置を推定できると考える。

#### 6. ガンマカメラの高度化

# 6.1 高線量率環境下への対応

原子炉建屋内の広範な領域において調査を行うために は、ガンマカメラを数100 mSv/hの高線量率環境下へ対応

いる。



注:略語説明 LAN (Local Area Network), PC (Personal Computer)

図13 ロボットに搭載しての遠隔操作化

遠隔移動ロボットを2台(ガンマカメラ搭載用および中継用)使用し,ロボットの通信機能にガンマカメラの映像・制御信号を搭載するシステムとしている。

させる必要がある。高線量率環境に対応するために、信号 処理性能の向上と遮蔽体の増強および遠隔操作化を図った。

信号処理性能向上に関しては、これまでガンマカメラの ソフトウェアに実装していた信号処理機能の一部を、 FPGA (Field-programmable Gate Array)に組み込み、ハー ドウェア化している。従来装置と比較すると信号処理性能 が2倍に向上し、ガンマ線のデータ収集速度を約2倍に高 速化している。このことで、従来比2倍の高線量率環境へ 対応可能としている。

次に遮蔽体増強に関しては、二次元ピクセル型ガンマ線 検出モジュールの遮蔽体の厚さを増強することで、従来比 約10倍の高線量率環境での測定を可能としている。高線 量率環境下での測定は、人が近づけないためガンマカメラ をロボットに搭載して遠隔操作を行い、実施する必要があ る。遮蔽構造の最適化を図ることで、ロボットへの搭載可 能重量(80 kg以下)を達成している。さらに、遠隔移動ロ ボットの通信機能にガンマカメラの映像・制御信号を搭載 するシステムとすることで、原子炉建屋内での一部無線に よる測定を実現している(図13参照)。

これらにより、従来比約20倍の高線量率環境(300 mSv/h)下にカメラ本体を設置し、遠隔操作による測定を可能にしている。これは、測定対象物から10 mの距離に 設置して測定する場合、測定対象物から0.5 mでの線量率 が約100 Sv/h(線量率は、距離二乗に反比例し距離が立な ので、約400倍)といった高線量率でも測定可能であるこ とを示している。

# 6.2 高性能化

原子炉建屋内は周囲の床・壁が広く汚染されているため, 計測対象物以外の汚染体から放射されるガンマ線が誤差要 因となり,測定精度が低下する。この誤差を取り除くため に,ガンマカメラのコリメータ前方にシャッター機構を設



#### 図14 シャッター機構

シャッター開閉時のガンマ線強度分布の差分を取ることで,視野部分からの ガンマ線のみの測定を可能としている。



図15 | 高線量環境下での測定用ガンマカメラ 計測回路の高速化,および,遮蔽の増強と最適化による高線量率環境対応と, シャッター機構,および,スキャン型レーザ距離計の適用による高精度化を 図っている。

けている。シャッターを開いた場合は、カメラの視野部分 からのガンマ線とともに誤差要因となる周囲からのガンマ 線を測定する。シャッターを閉じた場合は、誤差要因とな る周囲からのガンマ線のみを測定する。開閉時のガンマ線 強度分布測定結果の差分を取ることで、視野部分からのガ ンマ線のみの測定を可能とし、ホットスポットなどの線量 集積箇所の特定性能を向上させている(図14参照)。また、 スキャン型レーザ距離計を適用し、カメラから測定対象ま での距離をピクセルごとに測定し、測定距離によって生じ る計測強度の減衰を補正処理することで、より高精度な測 定を可能としている(図15参照)。 feature

articles

#### 7. おわりに

ここでは、ガンマ線強度分布を可視化するガンマカメラ の開発について述べた。

除染作業中の被ばく低減、および、作業によって発生す る汚染物低減のために、短時間で広範囲のガンマ線強度分 布の可視化が可能なガンマカメラを開発した。開発したガ ンマカメラは、1 μSv/h以下の低線量率から数100 mSv/h の高線量率までの広い線量率環境下において可視化が可能 である。開発したガンマカメラの特徴の1つは、ガンマ線 エネルギースペクトルが測定可能なことである。この特徴 を生かすことで、放射性核種ごとの強度分布の可視化が可 能であり、核種ごとに異なる最適な除染方法の提案ができ ると考えている。また、スペクトルのピーク計数率とコン プトン領域の計数率の比を使うことで、線源位置の推定が 可能と考えている。今後も、福島復旧・復興のために、装 置の改良および福島第一原子力発電所内外への適用を進め ていく予定である。

なお,高線量率対応のガンマカメラは,独立行政法人新 エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)の「災害対 応無人化システム研究開発プロジェクト | において開発し たものである。

#### 参考文献など

- カートガム (Cartgam) リアルタイム γ線イメージングシステム, http://www.canberra.com/jp/products/wm\_cart.asp
- 2) GammaCam, http://www.gammacamnow.com/index.html
- 3) Radcam, http://dynasilproducts.com/category/radiation-detection/radcam/
- 4) 東芝プレスリリース,放射線を可視化するポータブルガンマカメラ装置の販売およ び撮影サービスの開始について (2012.4), http://www.toshiba.co.jp/about/press/2012\_04/pr\_j1601.htm
- 5) 日立コンシューマエレクトロニクス,製品情報;ガンマカメラ(放射線測定装置), http://www.hitachi-ce.co.jp/product/gamma\_detector/index.html
- 6) 田所:環境放射線分布測定用ガンマカメラの開発,放射化学ニュース,第26号, 36~42 (2012.10)

# 執筆者紹介



1993年日立製作所入社,中央研究所メディカルシステム研究部 所屋

現在、半導体検出器を用いた医療機器の開発に従事 日本核医学会会員, 応用物理学会会員

#### 岡田 耕一

上野 雄一郎



2009年日立製作所入社,日立研究所 原子力システム研究部 所属 現在,放射線計測機器・システムの研究開発に従事 博士 (工学) 日本原子力学会会員

#### 藤島 康剛



1984年日立製作所入社,日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所 原子力制御計画部 所属 現在、原子力発電所の計装制御システムの計画設計に従事



1990年日立製作所入社,日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所 原子力設計部 所属 現在、原子力発電所の非破壊検査装置の設計に従事

# 長島 賢一

米谷 豊



1991年日立製作所入社,日立コンシューマエレクトロニクス株式会 社 生活インフラ事業推進本部 放射線検知応用システム部 所属 現在、ガンマカメラの設計に従事