

放射能分布を可視化するガンマカメラの開発

高橋 真^{1)*}、上野 雄一郎¹⁾、石津 崇章¹⁾、田所 孝広²⁾、岡田 耕一²⁾、名雲 靖²⁾、額賀 淳²⁾、
長島 賢一³⁾、藤島 康剛⁴⁾

¹⁾株式会社 日立製作所 中央研究所(〒319-1221 茨城県日立市大みか町 7-2-1)、

²⁾株式会社 日立製作所 日立研究所(〒319-1221 茨城県日立市大みか町 7-2-1)、

³⁾日立コンシューマエレクトロニクス株式会社(〒244-0817 神奈川県横浜市戸塚区吉田町 292)、

⁴⁾日立 GE ニューカリア・エナジー株式会社(〒317-0073 茨城県日立市幸町 3-1-1)

Development of Gamma Camera to Visualize Distribution of Radioactivity

Isao TAKAHASHI^{1)*}, Yuichiro UENO¹⁾, Takafumi ISHITSU¹⁾, Takahiro TADOKORO²⁾, Koichi OKADA²⁾,
Yasushi NAGUMO²⁾, Jun NUKAGA²⁾, Kenichi NAGASHIMA³⁾, Yasutake FUJISHIMA⁴⁾

¹⁾Hitachi, Ltd., Central Research Laboratory (7-2-1, Omika-cho, Hitachi, Ibaraki 319-1221 Japan)、

²⁾Hitachi, Ltd., Hitachi Research Laboratory (7-2-1, Omika-cho, Hitachi, Ibaraki 319-1221 Japan)、

³⁾Hitachi Consumer Electronics Co., Ltd.(292 Yoshida-cho, Totsuka-ku, Yokohama, Kanagawa 244-0817 Japan)、

⁴⁾Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd.(3-1-1, Saiwai-cho, Hitachi, Ibaraki 317-0073 Japan)

Summary

A gamma camera has been developed to support recovering from the contamination caused by the accident of Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. The gamma camera consists of a radiation detector, an optical camera, and a laser range finder, which enables recognition of the contamination situation by visualizing radioactivity. Laboratory tests confirmed the capability of discriminating nuclides (e.g. ¹³⁷Cs and ¹³⁴Cs) and the spatial resolution of 0.8 m (FWHM) at a distance of 10 m. Field tests under the actually assumed environment revealed that hot-spots can be visualized and the effect of decontamination works can be measured by using the gamma camera.

Key Words: Gamma Camera, Radiation Detector, Visualization, Decontamination

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って引き起こされた福島第一原子力発電所での事故により、¹³⁷Cs や ¹³⁴Cs といった放射能による汚染状況および除染効果を確認する必要性が発電所内外で高まっている。環境放射能の分布を測定する手法としては、サーベイメータ等を用いて空間線量率を密にサンプリングする方法が一般的である^{1,2)}。しかし、サンプリングの方法によっては局所的なホットスポットを見落とす可能性があり、対象領域全体を漏らさずに測定する方法が望まれる。

放射能の二次元的な分布を測定する装置として、ガンマカメラが知られている。ガンマカメラは医療分野で広く普及しており、様々な方向からの投影画像（二次元画像）を元に断層像（三次元画像）を計算する SPECT (Single Photon Emission Computed Tomograph) 装置もこの一種である。その原理は、放射性薬剤を投与した対象を、コリメータ（平行

多孔コリメータ・ピンホールコリメータなど）越しに位置有感型放射線検出器で測定することで、対象内の放射能分布を二次元画像とするものである。位置有感型放射線検出器としては、NaI(Tl) シンチレータの平板に光電子増倍管を複数とりつけ、その出力の重心演算によってガンマ線の入射位置を逆算する Anger カメラ^{3,4)}が最も一般的であるが、近年は半導体検出器を利用するものもある⁵⁾。これらの装置は病院内の専用の検査室で使用され、一般に大型であるため可搬性には乏しい。

ガンマカメラは医療分野以外でも需要があり、原子力関連施設における汚染状況の調査等を目的とした環境放射能検査向けの装置が開発されている。一般的な構成として、シンチレータ平板を位置有感型に読み出すようにし、光学系としてピンホールコリメータを組み合わせたものが挙げられるが、利便性を高めるために各種の開発がなされてきている。例えば、放射能分布を可視化するには光学カメラを別に備え付け

*Corresponding author: E-mail: isao.takahashi.ht@hitachi.com

る必要があり、測定対象が近過ぎるとガンマ線と可視光とでイメージに視差が生じることになるが、両者の信号を同一のCCDカメラで処理することで原理的に視差が発生しない装置が開発されている⁶。また、測定時間を短縮するため、原理的にはピンホール光学系より高感度となる符号化開口マスクを利用した装置も開発されており^{7,8)}、シンチレータではなく半導体を採用することで1kg程度にまで軽量化した装置もある⁹⁾。

これらの装置は、特定の方向に放射能が分布している場合にはその分布を簡易に可視化することが可能である。一方で、放射線検出器の遮蔽が充分でないため、広く汚染されその状況の把握が求められるような環境では、視野外からのガンマ線の影響を受けやすい。よって、精度の良い測定が難しいと考えられ、これを克服するために半導体放射線検出器の技術を用いて新規にガンマカメラを開発した。

2. 装置

放射能分布を可視化するためには、位置検出が可能な放射線検出器が必要である。また、除染の現場等で容易に使用可能な装置であるためには、できるだけコンパクトであることが望ましい。そこで、放射線検出器の素材には半導体検出器を選んだ。半導体検出器は、放射線検出器として広く使われているシンチレータとは異なり、光電子増倍管等の光デバイス無しで電気信号が得られるため、コンパクトな装置設計が可能となる。また、ピクセル化のための微細加工が容易で、高い空間分解能が期待できるというメリットがある。半導体検出器としては、ショットキ型のCdTe(テルル化カドミウム)¹⁰⁾を採用した。CdTeは、密度が5.85 g cm⁻³、実効原子番号が50と高いためにCsから放出されるガンマ線に対する感度が高く、バンドギャップが1.4 eVと広いために常温でも使用可能である。これにより、シンチレータと比べて温度依

存性が小さい特性を持つ装置構成にすることが可能となり、屋外でも安定して使うことのできるシステムを設計することができる。また、エネルギー分解能が高いことから、核種の同定や核種ごとの分布の把握が可能である。ガンマカメラに用いた放射線検出器モジュール¹¹⁾の外観をFig. 1(左)に示す。16×16の計256のピクセルを持つ二次元アレイ状の検出器となっており、CdTe素子で検出された放射線は電気信号となって読み出され、独自に開発した低消費電力の集積回路で処理されて外部に信号を出力する。

ガンマ線の到来方向を求めるためには、ピクセル型放射線検出器に光学系を組み合わせる必要がある。ガンマ線は可視光のように集光することができないため、ピンホール光学系や符号化開口マスク¹²⁾、コンプトン運動学を利用した光学系^{13,14)}などを利用することが考えられる。これらの中で、原理がシンプルで画像作成に複雑な計算処理を必要としないことから、ピンホール光学系を採用した。撮像原理をFig. 2に示す。ピンホールコリメータの素材には、単位体積あたりのガンマ線遮蔽能力が高いタンゲステンを用いている。放射線検出器の視野の大きさは、10 m先の平面上で8 m四方(1ピクセルは50 cm四方)に相当する。

ピンホール光学系では、ピンホールの穴径を大きくするほど感度が上昇する一方で空間分解能は低下する。よって、測定のニーズに合わせて穴径を柔軟に変更できるように、ピンホールコリメータ部分のみを取り替えることができるようとした。

ガンマ線源がどこにあるのかを光学情報と対応付けるために、Fig. 1(中)に示したように装置内に光学カメラを取り付けている。これにより放射線検出器の視野をカバーする領域を可視光で撮像することができ、ガンマ線のイメージと組み合わせることにより、視覚的にリアルタイムで放射能分布を認識することができる。光学カメラと放射線検出器モ

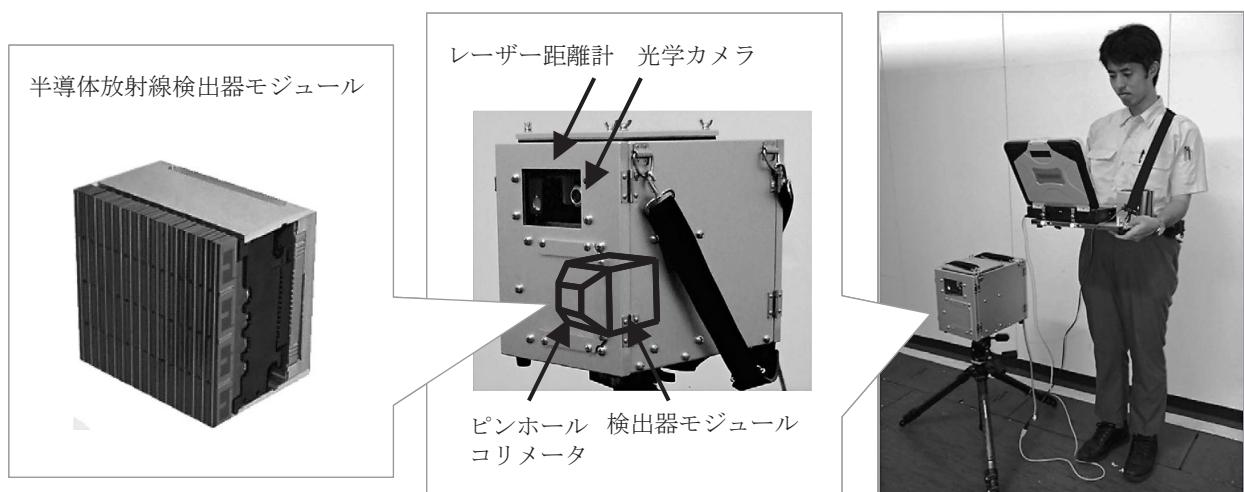


Fig. 1 装置外観。 (左) 放射線検出器モジュール、 (中) ガンマカメラ本体、 (右) 全体像。

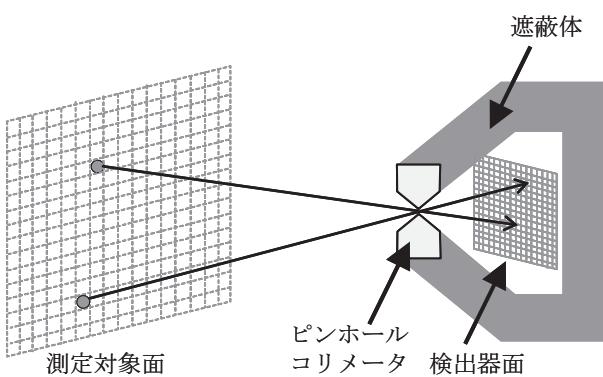


Fig. 2 撮像原理

ジューの位置が異なることから、対象までの距離が 2 m 程度以下になると両者の間に発生する視差が問題となるが、本装置はもっと離れた位置から広い領域を測定することを想定しており、実用上の問題は小さい。また、レーザー距離計も備え付けられており、対象を点線源と仮定した場合の線量率を算出することができる。

対象以外からの環境放射線はバックグラウンドとなり、できるだけ減らす必要があるため、検出器の周りには遮蔽材を配置している。この遮蔽材を増やすほどバックグラウンドの遮蔽能力は向上する。通常状態では、可搬性を考慮して装置重量 16 kg となっているが、容易に遮蔽体を追加することができます。対象となる線源分布の状況や、測定場所の空間線量率、測定時間等の条件に応じ、これら 2 つの構成から選択可能とした。なお、コリメータ部も含め、通常状態および遮蔽体を追加した状態での遮蔽厚さは鉛相当でそれぞれ 2 cm、4 cm となっている。これは、遮蔽に垂直に入射した 662 keV のガンマ線の透過率にして 1/10、1/100 に相当する。

装置の大きさは高さ 35 cm、幅 24 cm、奥行き 34 cm であり、操作用の PC に USB で接続して使用する。電源は、軽量性および柔軟性の観点から外付けの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 100 V 電源で駆動することもできる。また、様々な環境下での使用を想定し、タッチパネルでも操作できるようにした。雨天等でも問題なく使用できるよう、生活防水仕様としている。

3. 結果と考察

(1) エネルギー分解能

半導体放射線検出器の特徴の一つに、エネルギー分解能が高いことがある。検出したガンマ線のエネルギーから核種が同定できれば、福島第一原子力発電所の事故に由来したものかが確認できるとともに、核種に応じた除染を検討すること

ができる、有効と考えられる。

核種の同定能力について検証するために、ピンホールコリメータがない状態で統計の良いスペクトルを取得した。放射線検出器モジュールから 10 cm の距離に強度 2 MBq の ^{137}Cs 点線源を置き、1 時間の測定によって得られたスペクトルを Fig. 3 に示す。662 keV の全エネルギー吸収ピークに対する半値幅は 2.3 % であった。また、茨城県北部で採取した土壌サンプルを 1 cm の距離に置き、2 時間の測定によって得られたスペクトルも合わせて Fig. 3 に示した。なお、 ^{137}Cs のピークが重なるように正規化している。互いにエネルギーが近い ^{137}Cs の 662 keV および ^{134}Cs の 605 keV のガンマ線のピークが明確に分離できており、核種識別が可能であることがわかる。

このような核種識別が有効に機能する別のケースとして、原子力発電所内の測定が考えられる。核燃料物質の放出するガンマ線を識別し、その分布を可視化することができれば、その後の作業内容に大きなフィードバックをかけられる可能性がある。

(2) 空間分解能

放射能の分布を精度良く測定するためには、画素数の多さと空間分解能が重要である。本装置では微細加工した半導体素子を利用して、 $16 \times 16 = 256$ ピクセルのガンマ線の画像を作成している。ガムマカメラから 5 m の距離に 300 MBq の ^{137}Cs 点線源を置いて 1 時間の測定を行った際の、ガムマ線の画像と光学カメラの画像とを重ね合わせたものを Fig. 4 に示す。ピンホールコリメータの穴径は 2 mm のものを使用している。線源位置は両者でよく一致しており、線源が実際には見えない状況でも放射能分布を可視化することが可能である。

点線源のイメージに対し、一次元の断面プロファイルから空間分解能の半値幅を求めるとき、穴径が 2 mm、4 mm のピンホールコリメータに対してそれぞれ 1.6 ピクセル、2.6 ピクセルと

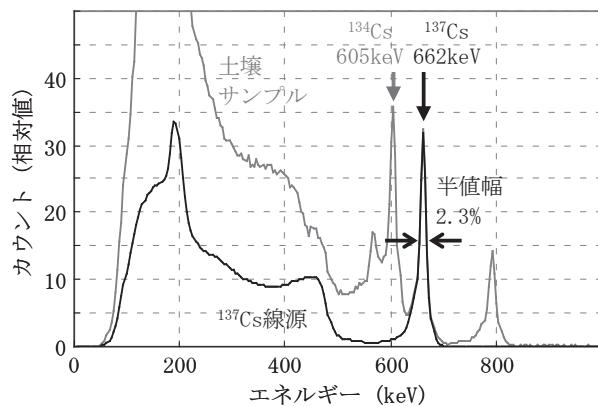


Fig. 3 エネルギースペクトル

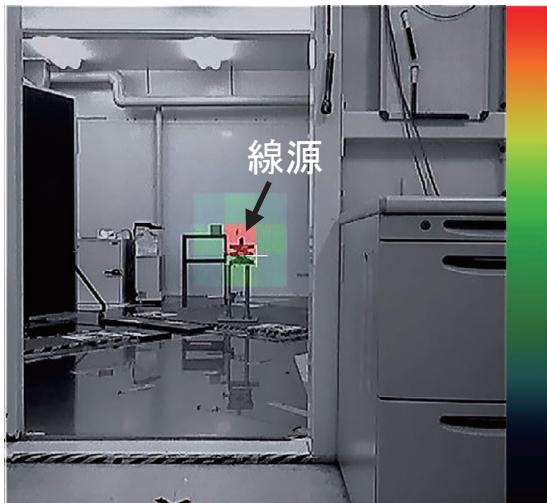


Fig. 4 点線源のイメージ
カラーバーはガンマ線の画像のスケールに対応

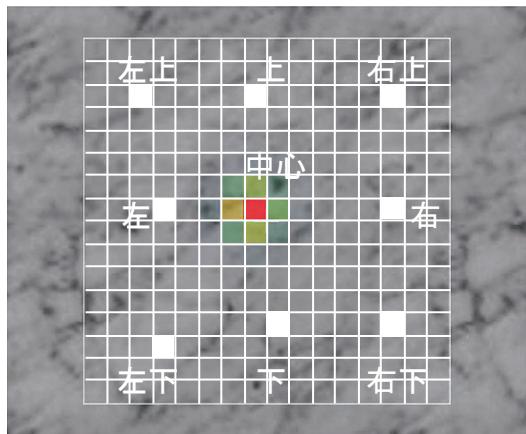


Fig. 5 均一性を測定した 9箇所

なった。これはガンマカメラから 10 m の位置に換算して 0.8 m、1.3 m に相当する。穴径が 4 mm のピンホールコリメータでは、2 mm のものよりも空間分解能が悪いものの、イメージ中心 3×3 ピクセルにおいて 5 割多いカウントが得られており、穴径によって空間分解能と感度を柔軟に選択できる設計が期待通りに機能していることが確認できた。

(3) 均一性

ピンホール光学系は、視野の端にいくほど感度が低くなるという特性を持つ。一方で、定量性を確保する観点から、視線方向に垂直な同一平面に同じ強度の線源がある場合は、ガンマカメラでも同じ強度に見えるように校正されていることが望ましい。

均一性を確認するために、距離 1.5 m の平面内で点線源を移動させながら Fig. 5 に示した 9 箇所で測定を行ったところ、

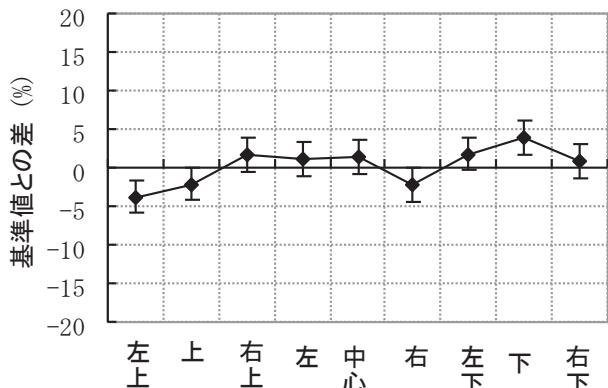


Fig. 6 均一性（誤差棒は統計誤差を表す）

Fig. 6 に示した結果が得られた。基準値との差は 5%程度以内であり、誤差を考慮すると有意な非均一性は見えておらず、ピンホール光学系が正しく校正されていると言える。

(4) 温度依存性

一般に、半導体は温度の上昇と共に顕著に特性が変化する。半導体放射線検出器の場合には、暗電流が指数関数的に増えることにより、エネルギー分解能も劣化することが予想される。一方で、環境放射能を測定するガンマカメラとして屋外で使用することを考えると、高温でも特性変化が小さいことが望ましい。

装置の温度特性を調べるために、ガンマカメラ本体を恒温槽に入れ、 ^{137}Cs 線源を視野内に配置して測定を行い、出力の変化を調べた。その結果、検出器温度が 40°C を超えても ^{137}Cs 線源のガンマ線のイメージに有意な変化は見られなかつた。また、エネルギー分解能の温度依存性は Fig. 7 に示した通りであり、検出器温度が 40°C 以上となっても劣化は小さく、安定して動作することが確かめられた。

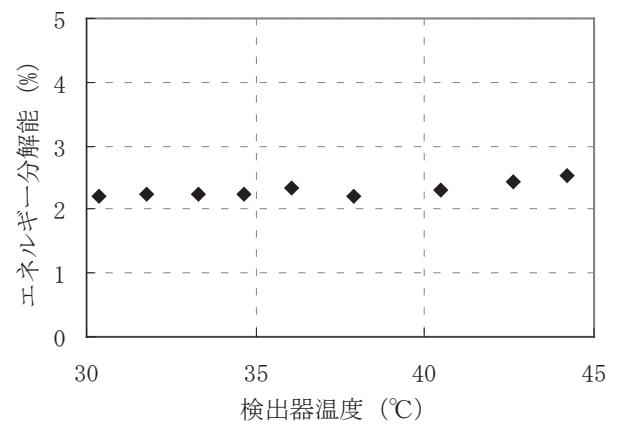


Fig. 7 エネルギー分解能の温度依存性



Fig. 8 フィールド試験の周辺環境

(5) フィールド試験

開発したガンマカメラにより、実際の環境でどのようなイメージが得られるかを確認するため、ホットスポットの撮像試験を実施した。測定対象として、茨城県北部の樹木（ケヤ

キ）を選んだ。周辺の様子を Fig. 8 に示す。また、サーベイメータ（日立アロカメディカル製 TCS-172）を用いて測定した周囲の空間線量率を Table 1 に示す。アスファルトの汚染は雨によって洗い流されたためか、ガンマカメラ設置位置（芝生上）に比べて空間線量率はやや低めとなっているが、この界隈での空間線量率は、通常の生活を送った際に年間 1 mSv の被ばくになるとされる $0.23 \mu\text{Sv}/\text{h}$ に近い値であるとわかる。また、サーベイメータの測定では、Fig. 8 にて示された樹木の根元に $2 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 程度のホットスポットがあることがわかるが、放射能の分布を可視化することはできない。

ガンマカメラによる 30 分間の測定によって得られたイメージを Fig. 9 (a) に示す。樹木の根元からのガンマ線が有意に検出されており、放射能が土の領域全面に分布していることが視覚的に認識できる。これは枝葉に付着した ^{137}Cs および ^{134}Cs が雨によって根元に流され、たまたまものが原因であると考えることができる。なお、サーベイメータの測定からは他の樹木等にはホットスポットは見られず、Fig. 9 (a) は妥当なイメージであると考えられる。

また、除染においてガンマカメラが有効に活用できるかを検証するために、樹木の根元の土を深さ 5 cm だけ除去し、放射能の軽減を試みた。土壤除去後に再度ガンマカメラで測

Table 1 サーベイメータで測定した線量率（単位： $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ）

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

^{*}測定場所は Fig. 8 内に示された位置

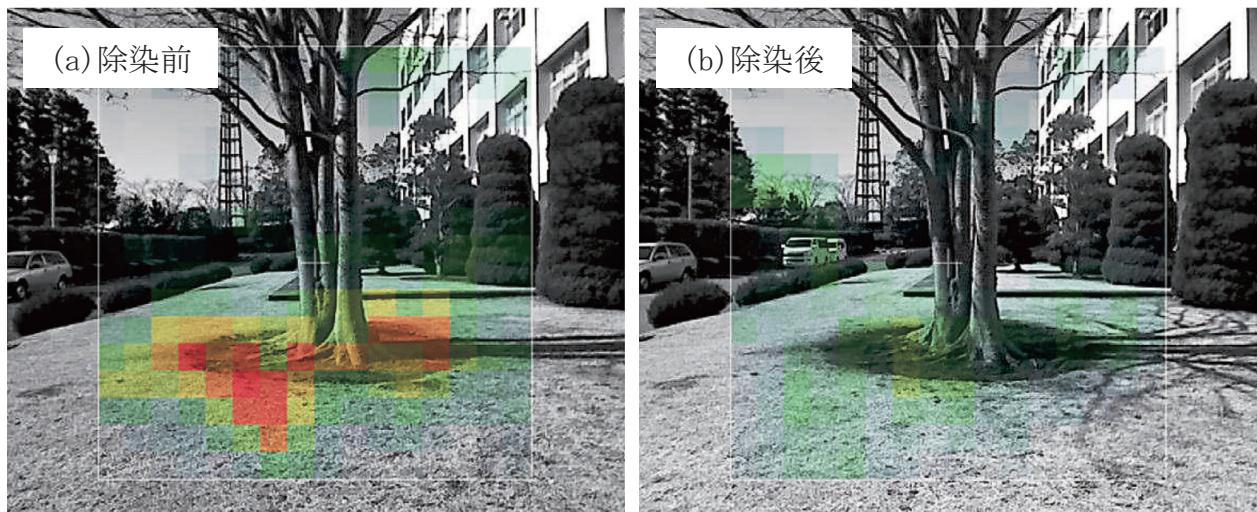


Fig. 9 ガンマカメラの測定により得られた樹木の根元のイメージ

(a) 除染前、(b) 除染後

定すると Fig.9 (b) のようなイメージが得られ、放射能が確かに減っていることを確認することができた。ガンマカメラの測定から除染係数（集積範囲における除染前後の計数率の比）を求めるとき、2.0 となった。なお、サーベイメータによる測定では、樹木の根元（地表 1 cm）での線量率は土壤除去によって 2.0 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ から 0.9 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ に減少しており、除染係数は 2.2 となった。ガンマカメラが特定の方向からの放射線だけを測定するのに対し、サーベイメータは四方からの放射線の総和を測定するため、両者の測定結果は原理的には一致しないはずであるが、除染係数としては近い値が得られている。これは、測定対象の近くでサーベイメータによる線量率測定をしたことによって、対象からの放射線の寄与が支配的となっていたためと解釈できる。

以上のフィールド試験の結果より、開発したガンマカメラを汚染状況や除染効果の確認等に活用可能であると考えられる。

(6) 高線量率環境での使用

原子力発電所内のような高い空間線量率の環境での使用について検討する。線量率が高いことによる装置への悪影響として、過剰な信号入力による回路系の飽和と、放射線損傷による故障が考えられる。

本装置では、視野以外から飛来する放射線が入射しないよう検出器を遮蔽しているが、ガンマ線は透過率が強いため、ある確率でこの遮蔽を透過する。その確率は、662 keV のガンマ線に対し、遮蔽体を追加した構成で最大 1/100 である。そのため、線量率が高くなり過ぎると検出器への入力が増え、回路が飽和する。遮蔽の効き方は飛来する放射線のエネルギーや到来方向にも強く依存するが、空間線量率が 10 mSv/h 程度の環境で飽和が発生する可能性がある。なお、より高線量率の環境で機能する専用機の開発も進めている。

放射線検出器モジュールと異なり、光学カメラ等は遮蔽されていないため、周囲から飛来する放射線の影響を受けやすい。光学カメラ等の放射線耐性は通常のシリコン半導体と同程度と予想され、故障の閾値を累計 30 Gy と仮定すると、例えば 10 mSv/h の環境では累積 3,000 時間（1 日 8 時間使用する場合は 375 日）までは故障せず稼動すると考えられる。また、故障に備え、光学カメラ等は簡易に交換が可能な構造となっている。

4. 結論

効率的な除染作業を支援するための環境放射能測定用のガンマカメラを開発した。充分に遮蔽された半導体放射線検出器モジュールと光学カメラ・レーザー距離計を組み合わせることにより、広い領域にわたって汚染されている環境でも放射能の分布を視覚的に認識することが可能となる。実験室内での基本特性測定によって空間分解能や温度特性等を評価し、また実際にフィールド試験を行うことで実用性を確認した。

今後、さらなる高感度化や原子力発電所内調査に向けた高線量率対応、またユーザインターフェースの改良等を検討し、さらに実用性を向上させることで福島の復旧・復興の加速に貢献していく。

参考文献

- 1) 文部科学省、日本原子力研究開発機構: 放射線測定に関するガイドライン (2011)
- 2) 環境省: 除染関係ガイドライン 第 1 版 (2011)
- 3) H. O. Anger: A new instrument for mapping gamma-ray emitters. *Biology and Medicine Quarterly Report*. UCRL-3653, 38 (1957)
- 4) H. O. Anger: Scintillation Camera. *Rev. Sci. Instrum.* **29**, 27-33 (1958)
- 5) S. S. Gambhir, D. S. Berman, J. Ziffer, M. Nagler, M. Sandler, J. Patton, B. Hutton, T. Sharir, S. B. Haim, S. B. Haim: A novel high-sensitivity rapid-acquisition single-photon cardiac imaging camera. *J. Nucl. Med.* **50**, 635-643 (2009)
- 6) O. Gal, F. Jean, F. Laine, C. Leveque: The CARTOGAM Portable Gamma Imaging System. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47**, 952-956 (2000)
- 7) GammaCam Web-site <http://gammacamnow.com/>
- 8) M. Woodring, D. Souza, S. Tipnis, P. Waer, M. Squillante, G. Entine, K. P. Ziock: Advanced radiation imaging of low-intensity gamma-ray sources. *Nucl. Instrum. Meth. A* **422**, 709-712 (1999)
- 9) M. Gmar, M. Agelou, F. Carrel, V. Schoepff: A new generation of gamma camera. *Nucl. Instrum. Meth. A* **652**, 638-640 (2011)
- 10) T. Takahashi, B. Paul, K. Hirose, C. Matsumoto, R. Ohno, T. Ozaki, K. Mori, Y. Tomita: High-resolution Schottky CdTe Detectors for Hard X-ray and Gamma-ray Observations. *Nucl. Instrum. Meth. A* **436**, 111-119 (2000)
- 11) I. Takahashi, T. Ishitsu, H. Kawauchi, J. Yu, T. Seino, I. Fukasaku, Y. Sunaga, S. Inoue, N. Yamada: Development of Edge-on Type CdTe Detector Module for Gamma Camera. *Conference Record of 2010 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference*. 2000-2003 (2011)
- 12) E. Caroli, J. B. Stephen, G. Di Cocco, L. Natalucci, A. Spizzichino: Coded aperture imaging in X- and gamma-ray astronomy. *Space Sci. Rev.* **45**, 349-403 (1987)
- 13) V. Schoenfeld, H. Aarts, K. Bennett, H. de Boer, J. Clear, W. Collmar, A. Connors, A. Deerenberg, R. Diehl, A. von Dordrecht, J. W. den Herder, W. Hermsen, M. Kippen, L.

- Kuiper, G. Lichten, J. Lockwood, J. Macri, M. McConnell, D. Morris, R. Much, J. Ryan, G. Simpson, M. Snelling, G. Stacy, H. Steinle, A. Strong, B. N. Swanenburg, B. Taylor, C. de Vries, C. Winkler: Instrument Description and Performance of the Imaging Gamma-Ray Telescope COMPTEL aboard NASA's Compton Gamma Ray Observatory. *Astrophys. J. Suppl.* 86, 657-692 (1993)
- 14) T. Takahashi, K. Makishima, T. Kamae: Future Hard X-ray and Gamma-ray Observations. 210-213, "New Century of X-ray Astronomy, ASP Conference Proceedings Vol. 251", Ed. by H. Inoue and H. Kunieda, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco (2001)

2013年2月14日受付

2013年9月4日受理

和文要約

福島第一原子力発電所の事故を受け、汚染状況や除染効果の確認を可能とするガンマカメラの開発を行った。放射線検出器と光学カメラ・レーザー距離計を組み合わせることで放射能分布を可視化することができる。実験室で基本性能の評価を行い、¹³⁷Cs と ¹³⁴Cs 等の核種識別が可能であること、対象までの距離が 10 m であるときに半値幅 0.8 m の空間分解能を達成できることを示した。さらにフィールド試験を実施し、実際に想定される環境でホットスポットを可視化することができ、また除染の効果を見るのに活用できることを確認した。