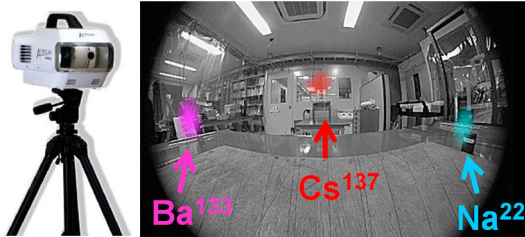


放射性物質見える化カメラ “ASTROCAM 7000HS”の開発

Radiation Visualization Camera“ASTROCAM 7000HS”



松浦 大介^{*1}
Daisuke Matsuura

玄 蕃 恵^{*2}
Kei Genba

黒田 能克^{*2}
Yoshikatsu Kuroda

池淵 博^{*3}
Hiroshi Ikebuchi

塘中 哲也^{*4}
Tetsuya Tomonaka

東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故を受け、2013 年3月に放射性物質見える化カメラ“ASTROCAM 7000HS”をリリースした。ASTROCAM 7000HS は、当社が(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)宇宙科学研究所の元で開発している ASTRO-H 衛星搭載用のガンマ線検出器の技術を転用し、地上で利用できる形に製品化したものである。2013 年6月には、福島県の居住制限区域内で実地試験を行い、ホットスポットの可視化に成功した。本稿では、ASTROCAM 7000HS の概要、測定原理及び試験結果について報告する。

1. はじめに

東日本大震災に伴う原子力発電所の事故により引き起こされた、放射性物質の広範囲に及ぶ汚染が今日大きな問題となっている。これに伴い放射性物質の除去、つまり、除染作業が必須となるのであるが、その作業を困難としている課題の一つに、除去すべき放射性物質が人の目では捕らえることができないという現象がある。現在、特に問題となっているセシウム 134、セシウム 137 (以降、¹³⁴Cs、¹³⁷Cs)からは、約 600 キロエレクトロンボルト(以降、keV)から 800keV までの大きなエネルギーを持つガンマ線が放出される。従来、放射性物質が集積した場所であるホットスポットの有無を検知するには、サーベイメータを用いて空間線量率を測定する方法が一般的であった。しかし、汚染の可能性のある広い地域をサーベイメータで限なく測定するという方法にはいくつかの課題がある。例えば、手の届かない高所等の測定が困難であること、潜在的に測定者が長時間被ばくする可能性があること、またホットスポットの見落としの可能性が排除できないこと等が挙げられよう。

一方当社は、JAXA 宇宙科学研究所の次期X線天文衛星“ASTRO-H”⁽¹⁾に搭載するエックス線及びガンマ線検出器の開発を進めてきた。当検出器は、シリコン(以降、Si)半導体、テルル化カドミウム(以降、CdTe)半導体及びアナログ ASIC (Application Specific Integrated Circuit)を極めて高密度に実装した Si/CdTe コンプトンカメラと呼ばれるものであり、天体から飛来するガンマ線の測定やイメージングを行う機能を持つものである⁽²⁾。これら宇宙開発分野の技術を地上装置に応用することにより⁽³⁾、従来不可能であった ¹³⁷Cs 等放射性物質の可視化を可能とするカメラ“ASTROCAM 7000HS”を 2013 年3月に製品化した⁽⁴⁾。本稿では、ガンマ線測定の課題と、これを解決するための鍵となる技術、及び福島で実施した実地試験結果等を紹介する。

*1 防衛・宇宙ドメイン誘導事業部電子システム技術部 理博

*2 防衛・宇宙ドメイン誘導事業部電子システム技術部 主席技師

*3 防衛・宇宙ドメイン誘導事業部電子システム技術部 主席チーム統括

*4 技術統括本部高砂研究所 主席研究員

2. ガンマ線と物質の相互作用

光には波長や生成原理により赤外線、可視光線、紫外線及びエックス線等の呼び名が存在する(図1)。ガンマ線も光(電磁波)の一種である。除染の対象となる放射性物質が放出するガンマ線は、以降2点の理由から可視化が難しかった。①レンズ等を使った集光が難しいこと、②数100keV から数1000keV と可視光の10万倍エネルギーが大きいため、デジタルカメラで使用されている CCD 素子では透過してしまうこと。

ガンマ線と物質間の反応には、以下の3種類の物理現象がある。これらの原理を応用して、ガンマ線の可視化カメラは作られている。カメラへの応用例は3項で紹介する。

(1) 光電吸収

光電吸収は、ガンマ線が1回の相互作用で検出部に完全に吸収され消失する反応である。

ガンマ線はエネルギーが高く検出器を透過しやすいため、反応確率が低い相互作用である。

(2) コンプトン散乱

コンプトン散乱は、図2に示す通り、入射したガンマ線は検出部で完全に吸収されずに散乱し、ちょうどビリヤードの玉のように散乱ガンマ線と反跳電子を作り出す反応である。ガンマ線に対して最も反応確率が高い相互作用である。

(3) 電子対生成

電子対生成は、ガンマ線が電子と陽電子の対を作り出す反応である。電子対生成が起きるには電子の静止質量の 511keV の2倍をこえる必要があり、除染の対象となる ^{134}Cs と ^{137}Cs が放射する 600keV から 800keV 程度よりも更に大きなエネルギーを持つガンマ線が起こす反応である。医療用 PET (Positron Emission Tomography) は、電子対生成で発生した2本の 511keV のガンマ線を使って、画像を作成している。

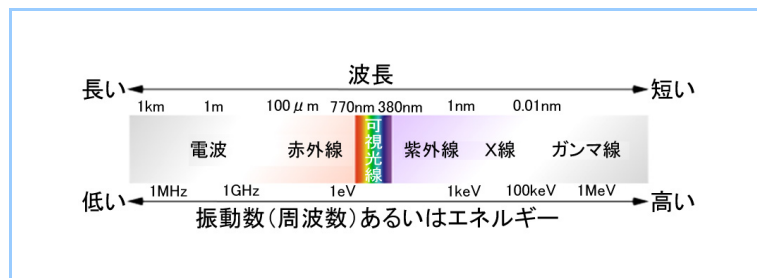


図1 光の分類

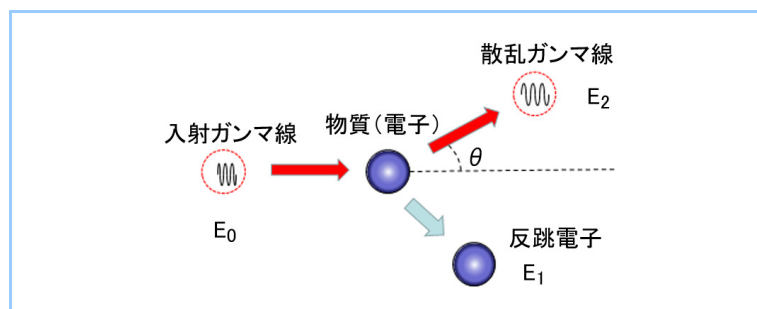


図2 コンプトン散乱

3. ガンマ線カメラの撮像原理

ガンマ線カメラで主に採用されているピンホールカメラ方式とコンプトンカメラ方式の2種類的方式についてまとめる。各方式の比較を表1、撮像原理概略を図3に示す。

(1) ピンホールカメラ方式

ピンホールカメラ方式は、光電効果を応用してガンマ線を撮像する方式である。カメラは図3

(a)で示すように、検出器をピンホールコリメータと遮蔽材で覆った構成となる。ピンホールコリメ

ータを通り抜け、カメラに入射したガンマ線は、 픽셀型検出器で検出される。測定された検出器の位置情報とピンホールとの幾何学的な関係からガンマ線の飛来方向を特定する。

(2) コンプトンカメラ方式

コンプトンカメラ方式は、コンプトン散乱を応用してガンマ線を撮像する方式である。当社のASTROCAM 7000HSは、この方式を採用している。カメラは、図3(b)に示すように散乱層と吸収層の 픽셀型検出器で構成される。カメラに入射したガンマ線は散乱層でコンプトン散乱を起こし、散乱したガンマ線は吸収層で光電吸収される。散乱層で測定したエネルギーを(E_1)、コンプトン散乱を起こした検出器面上の3次元座標位置を位置ベクトル($\vec{X}_1$)、同様に吸収層で測定したエネルギーを(E_2)、光電吸収を起こした位置を($\vec{X}_2$)と定義する。入射したガンマ線のエネルギーは、 E_1+E_2 で求められる。また、ガンマ線の飛来方向は、図3(b)に示す円錐の円環上のいずれか一点を通ると推定できる。この円環は、エネルギー情報から算出した散乱角(θ)と、位置情報から算出した円錐の中心軸から求められる。

表1 ピンホールカメラとコンプトンカメラの比較

撮像方式 主な相互作用	ピンホールカメラ 光電効果	コンプトンカメラ コンプトン散乱
短所	- 検出部を重い遮蔽材で囲い込む必要があり、装置が大型で重くなる。 - 視野角が40度から60度に制限される。 - 遮蔽材をすり抜けたガンマ線によりノイズが増加する。特に遮蔽材が薄くなるピンホールコリメータ付近では顕著になる。	取得データからガンマ画像の作成が複雑である。
長所	- 検出部の構造が比較的簡単である。 - 取得データからガンマ画像の作成が比較的容易である。	- ガンマ線の到来方向を特定できる為、遮蔽材は不要で小型軽量化が可能である。 - 視野が180度(半球)と超広角である。 - コンプトン散乱はガンマ線に対して反応確率が高い相互作用であり、検出効率を向上できる。

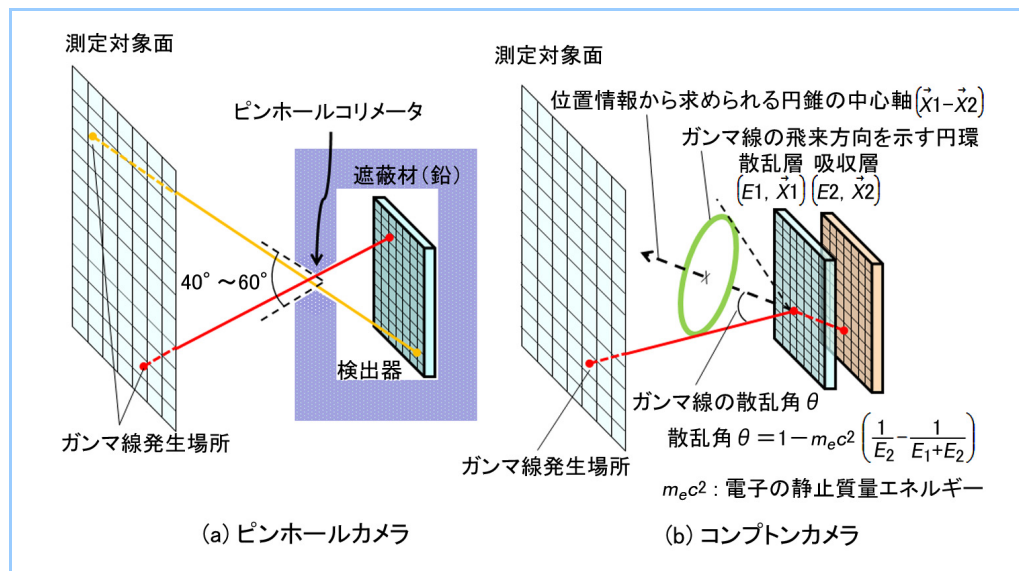


図3 ピンホールカメラとコンプトンカメラの撮像原理

同一のガンマ線源から複数のガンマ線が検出できれば、円環が重なり合う交点からガンマ線の飛来方向を特定できる。図4に示した通り、検出したガンマ線のイベント数が3個、16個と増加するに従い、円環の交点が赤く強調され、ガンマ線の画像が鮮明になる様子が分かる。

コンプトンカメラでは以上のような方法によりガンマ線の飛来方向を絞り込めるため、ピンホールコリメータ等によりガンマ線の飛来方向を制限する必要がない。よって、半球方向という超広角の測定視野を可能としている。

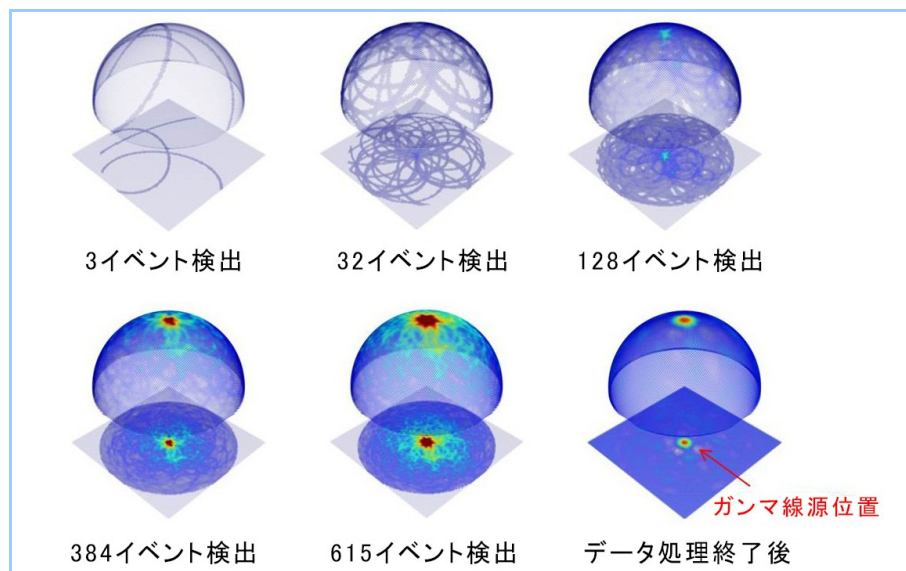


図4 検出したガンマ線のイベント数とガンマ画像の変化

4. ASTROCAM 7000HS 概要

4.1 製品構成

ASTROCAM 7000HS 全体の構成を図5、基本仕様を表2に示す。本製品は、カメラ本体、制御部及び操作・画像処理部で構成される。以降では、各構成部品について説明する。

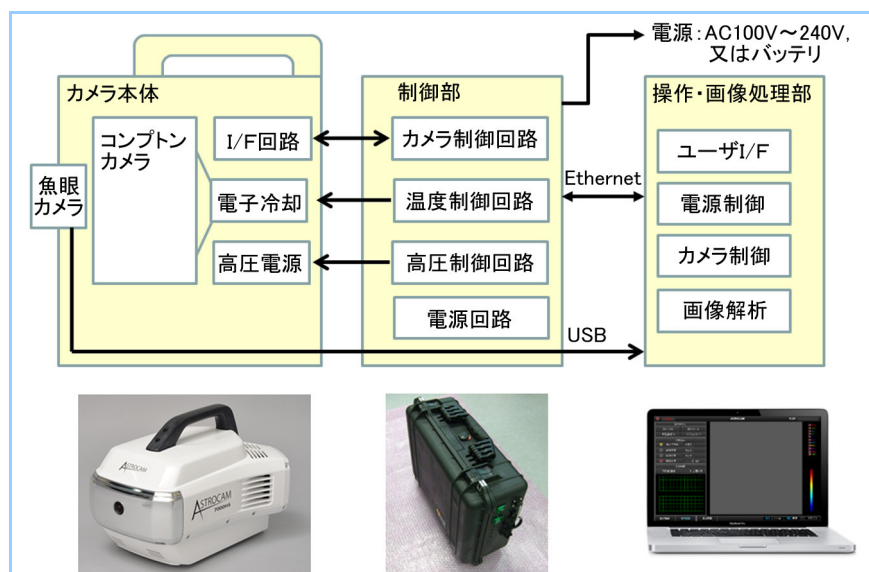


図5 ASTROCAM 7000HS のシステム構成

表2 ASTROCAM 7000HS の基本仕様

製品型番	ASTROCAM 7000HS
外形	L445×W340×H235 (mm) (カメラ本体。ただし、突起部含まず)
視野角	180度(超広角) <角度により検出効率は変化します>
核種	12種 ユーザ選択可能
エネルギー分解能	2.2% (FWHM) at 662keV
角度分解能	5.4度 (FWHM) at 662keV <ARM (Angular Resolution Measure) 評価値>
重量	約8~13kg (カメラ本体) <カメラを構成するセンサの層数による>
電源	AC100V~240V/バッテリー
温度	動作温度: 0~+40℃, 保存温度: 0~+50℃
動作湿度	35~80%, 結露無きこと
付属品	カメラ制御ボックス, ノートパソコン, 測定用ソフト

仕様は予告なく変更することがあります。

(1) カメラ本体

カメラ本体には、コンプトンカメラ、カメラへの高圧電源、電子冷却、インタフェース(I/F)回路及び可視光の魚眼カメラ等が収納されている。カメラ本体の大きさは、奥行き 445mm×幅 340mm×高さ 235mm、重さは 8kg～13kg である。除染作業等での使用を想定し、一人で持ち運びができるよう小型軽量化を行った。

コンプトンカメラの構造は、ASTRO-H 衛星搭載品を踏襲した。ただし、カメラに使用するセンサの層数は、衛星搭載品より間引いた構成とし、散乱層に Si 半導体を8層、吸収層に CdTe 半導体を4層の合計 12 層とした。この構成は、シミュレーションにより除染用途として適切な層構成を解析して決定した。カメラの感度は、用途に応じて調節でき、センサの層数を最大まで実装すれば、現行仕様の約 16 倍まで上げることのできる構造としている。

カメラ前方には魚眼カメラを設置しており、放射線の飛来方向の特定は、魚眼カメラの光学画像と、ガンマ線画像を重ね合わせることで可能としている。

(2) 制御部

制御部には、カメラ制御回路、温度制御回路、高圧制御回路及び電源回路等が格納されている。制御部は、操作・画像処理部からコマンドを受け取り、カメラ本体へ電圧供給制御指令や測定制御信号を送る。また、制御部は、安全設計として温度異常、湿度異常及び操作・画像処理部間の通信を常時監視しており、異常を検出した場合は、カメラをセーフモードに移行する、故障防止の機能を持っている。

(3) 操作・画像処理部

測定に関するすべての制御は、パソコン上のユーザインタフェース画面から行える。そのため、パソコンのリモート操作機能を使えば遠隔操作が可能のため、測定員の被爆量を低減できる。図6にユーザインタフェース画面を示す。画面操作は非常に簡単であり、測定者は画面上の“操作ボタン”で、カメラへの電圧供給のオン・オフと、測定の開始を操作するのみである。測定を開始すると、魚眼カメラが撮像した画面中央の光学画像に、コンプトンカメラが検出したガンマ線の円環がほぼリアルタイムで重ね書きされ、ホットスポットが徐々に強調される。その他、画面上では、カメラの状態表示、エネルギースペクトルや検出数の時間変化を確認できる。

核種の選択ボタンは画面の右上に配置されており、測定中リアルタイムで画像表示させたい核種を切り替えられる。ユーザは、最大 12 種類まで任意の核種をデータベースに登録できる。ASTROCAM 7000HS の画像処理で特記すべき点の一つが、この選択機能である。放射性物質から発生したガンマ線は、例えば 137Cs の 662keV のように、核種固有のエネルギーを持つ。画像処理部は、測定したエネルギーとデータベースにある核種固有のエネルギー情報が一致した場合に限り、データを処理して可視化する。この処理方法により、地面や建物等で散乱、吸収された2次ガンマ線を排除し、放射性物質から直接飛来したガンマ線だけを処理する。そのため、放射性物質の位置が正確に解析できる。



図6 ユーザインタフェース画面

4.2 基本性能

鮮明なガンマ画像の生成には、カメラのエネルギー分解能及び角度分解能が重要である。ASTROCAM 7000HS のエネルギー分解能は、662keV のガンマ線に対して半値幅(FWHM(Full Width at Half Maximum))で 2.2%である(図7)。角度分解能は ARM(Angular Resolution Measure)の評価値で 5.4 度(FWHM)であり、カメラから 10m の位置で 1m に相当する。

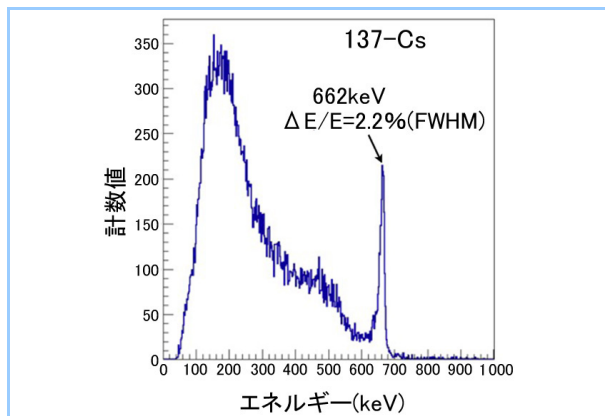


図7 137Cs のエネルギースペクトル

5. ASTROCAM7000HS の実証試験結果

5.1 複数線源の同時測定

複数の放射性物質を同時に測定した場合に、核種の識別ができることを実証するために、3種類の放射性物質を使用して測定を行った。使用した放射線物質は、バリウム 133(以降、133Ba)、ナトリウム 22(以降、22Na)及び 137Cs である。10 分間の測定で得られた画像を図8に示す。3種類の放射性物質の位置が、同一画面上ではっきりと識別できている。この他、ユーロピウム 154 や原子力発電所の廃炉用途等の対象核種であるコバルト 60 を使用した試験においても可視化を確認している。

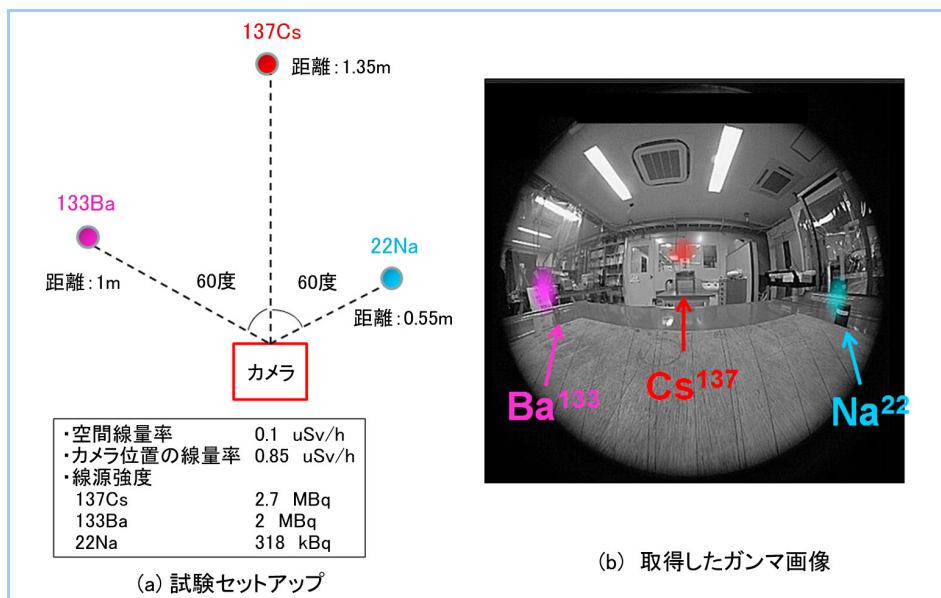


図8 3種類の放射性物質を同時に測定した結果

5.2 感度評価

線源強度が低い側の感度を評価するため、カメラ位置の空間線量率が空間線量と変わらない位置に放射性物質を設置し測定を行った。測定条件は空間線量 0.09 マイクロシーベルト/時(以降、 $\mu\text{Sv/h}$)、強度 1MBq の 137Cs をカメラから 3.2m の位置に設置した。8時間の測定で、空間線量と変わらない条件下でも、放射線源の位置を特定できることを確認した。つまり、サーベイメ

ータでは放射性物質の有無を認識できないほど線量率の差がわずかな場合でも、可視化できることを意味している。

5.3 遮蔽材の影響

放射性物質とカメラの間に配管や金属タンク等の遮蔽物があった場合でも、放射性物質の位置を特定できるか実証するために、24mm 厚のステンレスを遮蔽材に使用して測定を行った。測定結果より、遮蔽材の有無でガンマ画像の像の大きさが変化していないことから、遮蔽材で散乱したガンマ線の影響が抑えられ、遮蔽材で隠された放射性物質の位置を鮮明に特定できることを確認した。また、遮蔽材の有無で検出したガンマ線のイベント数の比は、遮蔽なし:遮蔽材有りが100:15と求まり、簡易的な遮蔽材による減衰の計算結果100:12とほぼ一致する結果が得られた。

5.4 3D ガンマ画像

ガンマ画像の3D化に向けて、複数の位置から同一の放射性物質を測定した場合、カメラから放射性物質までの距離情報を測定できるかを実証するために、2方向から測定した。ASTROCAM 7000HS の優れた角度分解能を生かして得られた視差(カメラAとカメラBの見え方の違い)より、図9に示す通り、距離測定が精度よくできることを確認した。

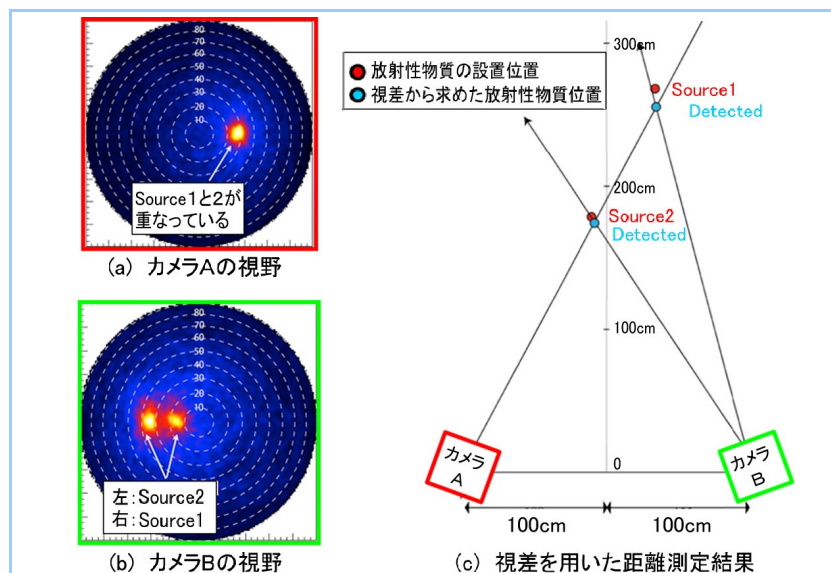


図9 視差を利用した放射性物質までの距離測定結果

5.5 実地試験

実際のホットスポットが可視化できるかを実証するため、2013 年6月に福島県の居住制限区域内で実地試験を行った(図10(a))。空間線量が $1.5 \mu\text{Sv/h}$ の環境下、30 分間の測定で得られた ^{137}Cs のガンマ画像を図10(b)に示す。画像で赤く分布している部分は、ガンマ線の強度が強いと測定された場所である。測定場所の線量率はサーベイメータで調査し、ガンマ画像の赤い分布はカメラから1m先の $20 \mu\text{Sv/h}$ のホットスポット、10m先の $30 \mu\text{Sv/h}$ のホットスポットと一致することを確認した。別の試験場所では、同じく空間線量率 $1.5 \mu\text{Sv/h}$ の環境下で30 分間測定し、除染作業前後の場所を識別できた(図10(c))。

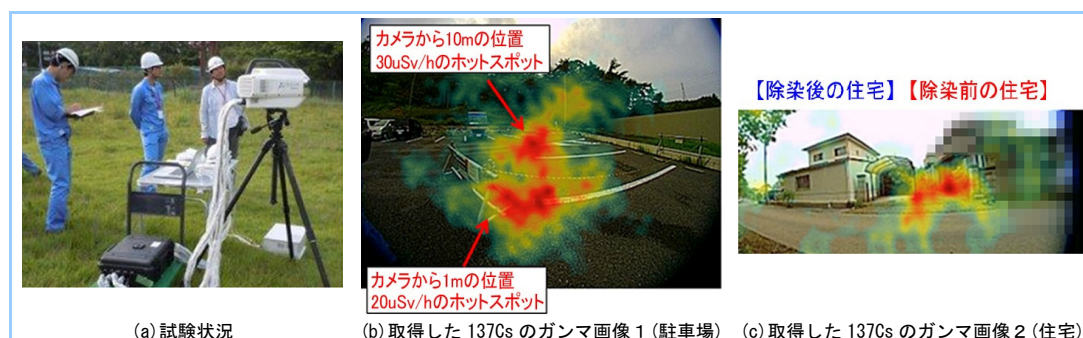


図10 福島県居住制限区域内での測定結果

6. まとめ

福島第一原子力発電所の事故を受けて、近年各社からガンマ線可視化カメラがリリースされている。当社も放射線見える化カメラ“ASTROCAM 7000HS”をリリースし、実証検証を進めている。福島県の居住制限区域内で行った実地試験では、ホットスポットを可視化でき、除染作業前後の場所を識別することにも成功しており、製品が実用レベルに近づいていることを確認した。

本製品が除染作業を支援し、福島の復興に貢献できることを願う。

今後の展開は下記を検討している。

- ・ 技術面:3D ガンマ画像の作成, 複数カメラのネットワーク化, 測定可能なガンマ線のエネルギー上限値を拡大し, 原子力発電所の廃炉作業や管理用途への展開
- ・ ビジネス面:ASTROCAM 7000HS を用いた測定サービス事業

謝辞:本製品の開発は, (独)科学技術振興機構 (JST)からご支援頂いた。

JST 先端計測分析技術・機器開発プログラム

「革新的超広角高感度ガンマ線可視化装置の開発」

チームリーダー名:高橋忠幸(独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所・教授)

サブチームリーダー名:黒田 能克(三菱重工業株式会社 防衛・宇宙ドメイン誘導・推進事業部 電子システム技術部 主席技師)

参考文献

- (1) Takahashi, T. et al., “The ASTRO-H Mission”, SPIE, 7732, pp. 77320Z-77320Z-18, (2010)
- (2) H. Tajima. et al., “Soft Gamma-ray Detector for the ASTRO-H Mission”, SPIE, 7732, (2010)
- (3) 高橋忠幸, 武田伸一郎, 渡辺伸, “コンプトンカメラで放射性物質の飛散状況を可視化する”, 物理学会誌, (2013 年6月号)
- (4) 三菱重工業(株), ニュースリリース, (2012)
<http://www.mhi.co.jp/news/story/121115-1.html>