平成 25 年度

環境研究総合推進費補助金 研究事業

総合研究報告書

半導体コンプトンカメラ技術を用いた放射性汚染物の

イメージング分析技術の開発

(3K122105)

平成 26 年 3 月

独立行政法人理化学研究所 本村 信治

補助事業名 環境研究総合推進費補助金研究事業(平成24年度~平成25年度)

- 所管 環境省
- 国庫補助金 144,225,000 円(複数年度の総計)
- 研究課題名 半導体コンプトンカメラ技術を用いた放射性汚染物のイメージング分析技術の開発
- 研究期間 平成 24 年 7 月 2 日 ~ 平成 26 年 3 月 31 日
- 研究代表者名 本村信治(独立行政法人理化学研究所)
- 研究分担者 榎本秀一(岡山大学)

目 次

| 総合 | ·研究報告書概要 ······ | · 1 |
|---------------|--|-----|
| $\star \star$ | - | |
| 1. | 、 研究背景と目的 ···································· | 10 |
| 2. | 研究方法 | 13 |
| 2.1 | 屋外撮像用 GREI システムの構築と撮像実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 13 |
| 2.2 | 遠方撮像法画像再構成法の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 17 |
| 2.3 | GREI 撮像ヘッドの遠方撮像最適化設計 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 18 |
| 2.4 | 既有の GREI によるガンマ線源の短時間撮像・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 18 |
| 2.5 | 低エネルギーガンマ線に対する撮像性能の向上・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 19 |
| 2.6 | GREI 信号処理システムの小型化 ······ | 19 |
| 2.7 | GREI 撮像ヘッドを用いた放射性物質モニタリング技術の開発 ····· | 19 |
| 2.8 | 遠方撮像に最適化した GREI 撮像ヘッドの作製・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 19 |
| 2.9 | 遠方撮像に最適化した GREI 撮像システムの構築と実証実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 20 |
| 2.10 |) 遠方撮像用画像再構成法の高度化開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 28 |
| 2.11 | レデジタル信号処理技術による GREI システムの小型化技術開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 31 |
| 2.12 | 2 機械式冷凍機を装備した両面直交ストリップ電極式 Ge 半導体検出器の作製 | 35 |
| 3. | 結果と考察 | 37 |
| 3.1 | 屋外撮像用 GREI システムの構築と撮像実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 37 |
| 3.2 | 遠方撮像法画像再構成法の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 41 |
| 3.3 | GREI 撮像ヘッドの遠方撮像最適化設計・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 41 |
| 3.4 | 既有の GREI によるガンマ線源の短時間撮像・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 45 |
| 3.5 | 低エネルギーガンマ線に対する撮像性能の向上・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 46 |
| 3.6 | GREI 信号処理システムの小型化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 47 |
| 3.7 | GREI 撮像ヘッドを用いた放射性物質モニタリング技術の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 48 |
| 3.8 | 遠方撮像に最適化した GREI 撮像ヘッドの作製・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 49 |
| 3.9 | 遠方撮像に最適化した GREI 撮像システムの構築と実証実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 55 |
| 3.10 |) 遠方撮像用画像再構成法の高度化開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 82 |
| 3 11 | - デジタル信号処理技術による GREI システムの小型化技術開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 84 |
| 3.12 | 2 機械式冷凍機を装備した両面直交ストリップ電極式 Ge 半導体検出器の作製・・・・・ | 88 |
| 4. | 結論 | 91 |
| 5 | 会 孝 立 动 · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | Q1 |
| υ. | 参与 义厭 | 91 |
| 6. | 研究発表 | 92 |
| 7. | 知的財産権の取得状況 | 92 |
| 8. | 研究概要図 | 93 |
| 9. | 英文概要 | 94 |

環境研究総合推進費補助金 研究事業 総合研究報告書概要

研究課題名:半導体コンプトンカメラ技術を用いた放射性汚染物のイメージング分析技術の開発 研究番号 : 3K122105

国庫補助金清算所要額:144,225,000円(複数年度の総計)

- 研究期間: 平成24年7月2日~平成26年3月31日
- 研究代表者名: 本村信治(独立行政法人理化学研究所)

研究分担者: 榎本秀一(岡山大学)

研究目的

災害により発生する大量の廃棄物の処理に関しては、資源としての利用可能性を追求すると共に 早期の復旧を実現するため、廃棄物の特性に応じた迅速で適切な対応が求められるが、東日本大震 災においては、それに加えて廃棄物の放射性物質による汚染の可能性も考慮しなければならないこ とが喫緊の課題として浮上した。そこで本研究では、本研究代表者らが元来医学・生物学研究用の ガンマ線撮像装置として開発した半導体コンプトンカメラ「GREI」の技術を応用し、放射性汚染物 の位置と放射性核種を一度に検査することを可能にするイメージング分析技術を開発することで、 従来は困難であった汚染状況の迅速で正確な把握を可能にし、震災廃棄物の取扱に際して安全・安 心を実現することを目的とする。また、本研究代表者らの半導体コンプトンカメラを利用した、新 規サーベイ手法の実現も追求する。

本研究代表者らは、医学・生物学研究用に開発した GREI を用いて、植物試料や生きたマウス体内 の複数種の放射性物質の分布を同時に画像化することに成功してきた。ただし、これらの撮像結果 は、撮像ヘッドからの距離が 5 cm 以内の放射性物質の分布を示したものであり、装置としても単一 の撮像ヘッドで約 10 cm までの距離の撮像しか想定していなかった。そこで、本研究課題の目的の 達成に向けて、より遠方に存在する放射性物質についても効率的な撮像を可能にするように GREI の 撮像性能を拡張する。

研究方法

本研究期間内の最終目標として、(1)現在の半導体コンプトンカメラ「GREI」の撮像感度を5倍向上させる、(2)可搬性・保守性に優れたシステムを開発する、(3)従来のガンマカメラでは約300keV以下に限られていた撮像可能なガンマ線のエネルギーを、2MeV以上まで拡張し、同時に核種の同定も可能にする、という項目を申請当初に設定した。そこで、当時の計画においては、現在のGREIシステムにさらに半導体検出器を追加することで遠方撮像性能を向上させることを考案し、そのた

めの新たな半導体検出器の作製を計画していた。しかしながら、初年度の研究開始時期や補助金の 採択額、被災現地の状況のより早期の把握などを勘案した結果、平成24年度においては既有のGREI を用いた実証的研究に重点化し、撮像性能を向上させるための新たな半導体検出器の作製は中止し た。平成25年度においては、前年度の研究で得られた知見を加味して研究計画を再検討し、最終目 標達成のための研究開発を行った。実施した具体的な研究内容は、以下のとおりである:

(平成24年度)①屋外撮像用GREIシステムの構築と撮像実験、②遠方撮像用画像再構成法の開発、 ③GREI撮像ヘッドの遠方撮像最適化設計、④既有のGREIによるガンマ線源の短時間撮像、⑤低エネ ルギーガンマ線に対する撮像性能の向上、⑥GREI信号処理システムの小型化、⑦GREI撮像ヘッドを 用いた放射性物質モニタリング技術の開発。

(平成25年度) ⑧遠方撮像に最適化したGREI 撮像ヘッドの作製、⑨遠方撮像に最適化したGREI 撮像システムの構築と実証実験、⑩遠方撮像用画像再構成法の高度化開発、⑪デジタル信号処理技術によるGREI システムの小型化技術開発、⑫機械式冷凍機を装備した両面直交ストリップ電極式Ge 半導体検出器の作製。

①屋外撮像用 GREI システムの構築と撮像実験

屋外撮像実験で用いる GREI システムを、本研究代表者の所属機関で保有している回路モジュール 等を組み合わせて構築した。商用電源の供給がない場所でも撮像実験を可能にするため、インバー タ方式の発電機を用いて電源を供給可能にした。また、屋外撮像用 GREI システムの画像再構成法と しては、②で述べる手法を用いた。

構築した屋外撮像用 GREI システムを福島県に運搬し、以下の日程で屋外での撮像実験を行った。

平成 24 年 11 月 25 日 福島県相馬郡飯舘村 国道 399 号線の路肩 平成 24 年 11 月 26 日 福島県県中浄化センター 指定廃棄物の保管作業現場 平成 24 年 11 月 27、28 日 福島大学構内

②遠方撮像用画像再構成法の開発

遠方撮像の場合、ガンマ線源の深度方向の分布の情報は消失する。そこで、遠方撮像においては、 撮像ヘッドを中心とした球面上の位置座標(θ,φ)にガンマ線源の分布画像を投影する画像再構成 法を用いるのが適当である。また、このような球面上に投影した画像を見やすく表示するため、魚 眼カメラで撮影した画像と重ね合わせを行うソフトウェアも実装した。 ③GREI 撮像ヘッドの遠方撮像最適化設計

現在の GREI 撮像ヘッドに搭載されている 2 つの検出器間の距離を近づけることで遠方撮像の性能 を向上させることを検討した。目標は、当初計画の通り、感度を 5 倍向上させることとした。屋外 撮像実験で用いた GREI 撮像ヘッドに搭載されている 2 つの検出器間の距離は 6 cm であり、この距 離を近づけることで撮像性能がどの様に向上するかを調べるため、モンテカルロシミュレーション の手法を用いてその撮像性能を見積もった。 ④既有の GREI によるガンマ線源の短時間撮像

既有の GREI の撮像性能を示す参考とするため、比較的に撮像ヘッドの近傍にあるガンマ線源をどのくらいの時間で画像化可能であるかを示した。

⑤低エネルギーガンマ線に対する撮像性能の向上

シリコン半導体検出器を既有の GREI に装着した撮像システムを用いて撮像実験を行い、低エネル ギーガンマ線に対する撮像性能が向上するかどうかを確かめた。⁵⁷Co (122keV, 200 kBq)、¹³⁷Cs (662keV, 920kBq)、および 54Mn (835keV, 580 kBq)のガンマ線を、撮像ヘッドから 6 cm の位置に配置し、 撮像を行った。十分なデータ量の取得を勘案し、撮像時間は 10 時間とした。 ⑥GREI 信号処理システムの小型化

屋外撮像用 GREI システム用にカスタマイズした回路モジュールを準備し、回路モジュール数や配 線数を減らしてさらに小型化した GREI 信号処理システムを構築した。また、屋外撮像用 GREI シス テム用に、回路モジュールで使用される入出力信号の規格をカスタマイズして統一した波形整形処 理回路やアナログーデジタル変換回路モジュール等を準備し、これらを用いて GREI 信号処理システ ムを構築した。小型化の目標としては、従来の信号処理システムの4分の1にすることとした。 ⑦GREI 撮像ヘッドを用いた放射性物質モニタリング技術の開発

ガンマ線が GREI の検出器に当たった位置の異方性から、ガンマ線源が存在する大まかな方向と核 種を同定する新規サーベイ手法の実現可能性を調べるための予備実験を行った。

⑧遠方撮像に最適化した GREI 撮像ヘッドの作製

最適化設計の結果に基づいて実際に作製する GREI 撮像ヘッドの仕様を定め、遠方撮像に最適化した GREI 撮像ヘッドの作製を行った。

⑨遠距離撮像に最適化した GREI 撮像システムの構築と実証実験

作製した遠方撮像最適化 GREI 撮像ヘッドを組み込んだ GREI 撮像システムを構築し、種々の条件 で撮像実験を行ってその性能の実証を行った。

⑩遠方撮像用画像再構成法の高度化開発

GREIによる放射線検出に関わる物理現象を詳細に検討することで画質を向上させることを目指した画像再構成法を開発し、実際の撮像データに適用してその効果を調査した。

⑪デジタル信号処理技術による GREI システムの小型化技術開発

GREI 撮像システム用に特化したデジタル信号波形処理システムを開発することにより、さらに小型化した撮像システムを可能にする技術開発を行った。

12機械式冷凍機を装備した両面直交ストリップ電極式 Ge 半導体検出器の作製

液体窒素による冷却を廃し、機械式冷凍システムを導入した Ge 半導体検出器を作製し、保守性・ 使い勝手の向上を可能にする技術開発を行った。

結果と考察

①屋外撮像用 GREI システムの構築と撮像実験

県中浄化センターでの撮像実験においては、本研究で開発した遠方撮像用の画像再構成アルゴリ ズムをそのまま撮像データに適用して、魚眼カメラの画像に重ね合わせた結果、視野の中心付近の 感度が低く画像が抜け、また、周辺から入射したガンマ線の応答に起因する円弧状のアーチファク トが生じた(図-1)。なお、この時の撮像対象までの距離は1.4mであった。そこで、画像再構成に 用いるデータを、散乱角が37°以下のコンプトン散乱事象に限定し、中央部の感度を重点化した処 理を行った。その結果、魚眼カメラの画像のドラム缶の位置とGREI画像が一致し、既有のGREI撮 像ヘッドで遠方撮像における画質の改善に成功した(図-2)。



図-1 遠方撮像用の画像再構成アルゴリズム をそのまま撮像データに適用した結果



図-2 遠方撮像用の画像再構成アルゴリズムに 中央部の重点化を適用した結果

飯舘村での撮像実験の結果、魚眼カメラの画像中の斜面上部のラインおよび斜面と道路の境界に 一致する GREI 画像が得られた(図-3 および図-4)。



図-3 道路の縁と山の斜面の上部を視野中央 に入れて撮像した結果



図-4 斜面と道路の境界を視野中央に入れて撮像した結果

福島大学構内での撮像実験の結果、汚染した土を置いた場合は、その位置と GREI の画像の強度が高い位置が一致した画像が得られた(図-5)。また、土を取り除いた画像では、GREI の画像でも強度

が消失した(図-6)。背景の表面における空間線量率が1µSv/hで、汚染した土を置いた領域の空間線量率は1.7µSv/hであったが、その違いをGREIで画像として表示できることが示された。



図-5 福島大学構内での撮像結果(汚染土あり) 図-6 福島大学構内での撮像結果(汚染土なし)

これら一連の撮像実験は、これまで医学・生物学研究用のガンマ線撮像装置として屋内で使用していた GREI を、屋外に持ち出して撮像実験を行うという初めての試みであったが、撮像システムとしては商用電源を用いた場合と遜色の無いエネルギー分解能等の性能が得られ、今後の屋外撮像用GREI の実用化の可能性に対して大きな自信となった。

②遠方撮像用画像再構成法の開発

レーザーマーカーの十字点を魚眼カメラで視野中心から10°ずつ回転させながら撮影した結果、 一定の角度の回転に対してほぼ一定の距離だけ変位していることが分かり、使用した魚眼カメラは 等距離射影で近似できることが判明した。そこで、魚眼カメラ画像へ等距離射影で重ね合わせを行 うソフトウェアを実装した。この画像再構成法を撮像データに適用した結果は、屋外撮像実験の結 果で示した通り、遠方にあるガンマ線源の位置を正しく表示していることが示された。

③GREI 撮像ヘッドの遠方撮像最適化設計

検出器間の距離を 2.5 cm まで近づけることにより、当初の目標として設定していた 5 倍程度の感 度の向上が実現できることが示された。また、検出器間の距離を近づけることで感度が向上するだ けでなく、遠方撮像における画質も向上することが判明した。

④既有の GREI によるガンマ線源の短時間撮像

空間線量率が撮像ヘッド表面で5µSv/hとなるように配置した¹³⁷Csガンマ線源を、10秒間の撮像で7°の半値幅のスポットとして画像化することが出来た。近距離であれば、現在のGREIでも短時間でガンマ線源の画像化が可能であり、GREI本来の撮像性能を示した。

⑤低エネルギーガンマ線に対する撮像性能の向上

Ge 検出器のみのデータからは⁵⁷Co の 122keV の低エネルギーガンマ線の画像を得ることができな かったが、Si 検出器を装着した GREI では⁵⁷Co を含め全てのガンマ線源の画像化が出来た。この撮 像実験により、本研究代表者らが特許を保有している GREI の技術を実証することができた。

⑥GREI 信号処理システムの小型化

本研究で従来の4分の1以下の小型化が達成され、幅60cm×奥行80cm×高さ80cm以内のスペースで完全に動作するGREI信号処理システムの構築に成功した。



図-7 本研究で構築した屋外撮像用 GREI システム

⑦GREI 撮像ヘッドを用いた放射性物質モニタリング技術の開発

ガンマ線源が X 方向にある場合には検出器の X 方向にガンマ線が当たった位置が偏り(図-8)、また、ガンマ線源が Y 方向にある場合には検出器の Y 方向にガンマ線が当たった位置が偏る(図-9) ことが実証された。本研究では 10 秒間の測定を行ったが、十分な統計変動が得られているため、さらに短時間でもガンマ線源が当たった位置の異方性を観察すことが可能であると考えられる。



3000 20 7000 15 10 6000 5000 ر [mm] م 4000 -5 3000 -10 2000 -15 1000 -20 _0 -15 -10 10 15 -5 20 0 x [mm] 5 -20

図-8 線源が X 方向(右)にある場合の検出位置 のパターン

図-9 線源が Y 方向(上)にある場合の検出位置の パターン

⑧遠方撮像に最適化した GREI 撮像ヘッドの作製

実際に作製する GREI 撮像ヘッドの仕様を検討した結果、2 つの検出器間距離を最適化することで 検出感度が4 倍になり、さらに、利用可能なデータ量が3 倍に増えるため、総合的には12 倍の撮像 感度の向上が実現されることが判明した。この設計に基づき、遠方撮像最適化 GREI 撮像ヘッドを作 製した。

⑨遠方撮像に最適化した GREI 撮像システムの構築と実証実験

遠方撮像最適化 GREI 撮像ヘッドを組み込んだ GREI 撮像システムを用いて種々の条件で撮像実験 を行った結果、GREI の優れた実用性能を示すことに成功した。例えば、撮像ヘッドから1m離れた 位置に2つの2 MBqの¹³⁷Csのガンマ線源を置いて10分間撮像した結果、10°の角度分解能で分布 画像を取得することに成功した(図-10)。



図-10 GREIの前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0° および 10° の位置に配置した 2.0MBq の ¹³⁷Cs 溶液を封入した線源(左図)を 10分間撮像し、2 つの線源位置を分解して正しく画像化する ことに成功した(右図)。この時の GREI 撮像ヘッド位置での空間線量率は 0.57 µ Sv/h であった。

⑩遠方撮像用画像再構成法の高度化開発

コンプトン散乱角度の推定誤差に関与する物理過程を正確に考慮することが可能な画像再構成法 の開発に成功し、福島県で撮像したデータに適用することで画質を向上させることが可能であるこ とを示した。

⑪デジタル信号処理技術による GREI システムの小型化技術開発

GREI 撮像システム用に特化したデジタル信号波形処理回路モジュールの開発に成功し、4 枚の回路モジュールで GREI 撮像システムを構築することが可能な技術開発に成功した。

12機械式冷凍機を装備した両面直交ストリップ電極式 Ge 半導体検出器の作製

液体窒素による冷却を廃し、機械式冷凍システムを導入した Ge 半導体検出器を作製し、保守性・ 使い勝手の向上を可能にする技術開発を行った。

環境政策への貢献

本研究では、視野角 120°以上の広い範囲に渡って、いちどに種々の放射性物質の分布及び種類 を画像として表示することが可能なイメージング分析技術の実現可能性が示された。GREI は放射性 核種を識別する能力が極めて高いことが特徴であり、核種に応じた適切な処置へと容易に導くこと が出来る。元来医学・生物学研究用に設計された GREI を遠方撮像用に最適化することに成功し、撮 像ヘッドから1 m 離れた位置に 2 つの 2 MBq の¹³⁷Cs のガンマ線源を置いて 10 分間撮像した結果、 10°の角度分解能で画像化することに成功し、優れた実用性能を示した。感覚的には把握が困難な 放射性物質を画像として視覚化することにより、放射性汚染物の取扱いに際して安全・安心をもた らすことが期待される。

研究成果の実現可能性

本研究で構築した屋外撮像用の GREI システムを実際に福島県に運搬し、同装置を用いた屋外での撮像実験に成功した。この成果は、遠方撮像用 GREI の実現に対して大きな自信となった。GREI の撮像ヘッドを遠方撮像用に最適化することに成功し、実用レベルの撮像性能が得られることを示した。費用面に関しては、現在の市場価格では GREI の撮像ヘッドに使用している Ge 半導体検出器は高価であり、事業化の妨げになる可能性は否定できない。しかしながら、現在市場に投入されているガンマ線イメージング装置の価格に比べて桁違いに高いという訳ではないため、解決の方策を追求していきたいと考えている。

結論

本研究により、医学・生物学用のガンマ線イメージング装置として本研究代表者らが開発してき た半導体コンプトンカメラ GREI の技術を応用し、放射性物質によって汚染された廃棄物の汚染部位 と放射性核種を一度に検査することを可能にするイメージング分析を実現するための技術開発が行 われた。屋外での GREI 撮像実験を可能にするため、従来の GREI 処理システムを小型化して自動車 に搭載可能な GREI 撮像システムを構築し、屋外でも遜色の無い撮像性能が得られることが確認され た。この撮像システムを実際に自動車に搭載して福島県内に運搬し、指定廃棄物等のイメージング 分析実験を行うことに成功した。この実験の結果、当初より課題となっていた GREI の遠方撮像性能 の最適化の必要性が明確に示され、既有の GREI の撮像装置に搭載されている 2 台の Ge 検出器間の 距離を変更することで、遠方撮像性能を当初の目標値まで向上させることが提案された。計算機シ ミュレーションの手法を活用した装置の設計に基づいて遠方撮像に最適化した GREI 撮像ヘッドを作 製し、設計通りの撮像性能の向上が得られた。例えば、撮像ヘッドから1m離れた位置に2つの2MBq の¹³⁷Csのガンマ線源を置いて10分間撮像した結果、10°の角度分解能が得られることが示された。 さらに装置を小型化して可搬性を向上させるため、デジタル信号処理技術を用いて集積度が向上し た処理システムの開発や、液体窒素が不要なパルス管冷凍機を装備した両面直交ストリップ電極式 Ge 半導体検出器の導入を検討中である。今後これらの小型化技術開発を継続することにより、手で 持ち運びが可能なサイズの可搬型システムの実現に発展することを期待している。

本文

1. 研究背景と目的

東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故により、さまざまな種類の放射性物質が一般環 境に漏出し、一般の生活圏が放射性汚染の被害を受けた。災害により発生する大量の廃棄物の処理 に関しては、資源としての利用可能性を追求すると共に早期の復旧を実現するため、廃棄物の特性 に応じた迅速で適切な対応が求められるが、東日本大震災においては、それに加えて廃棄物の放射 性物質による汚染の可能性も考慮しなければならないことが喫緊の課題として浮上した。放射性物 質は、含有する核種によって半減期や放射線の種類が異なり、また、元素が異なれば化学的性質も 異なるため、廃棄物中に存在する核種に応じて適切な処置をすることが必要であると考えられる。

しかしながら、過去の原子力発電所の事故等で取り沙汰された放射性物質と健康被害との関係や、 低線量被曝の生体への影響など、科学的に明らかになっていない事項が存在することも事実であり、 必ずしも正しい理解に基づいた適切な処置が確立されている訳ではない。このような状況は、放射 性物質の取扱に際する不必要な恐れや、あるいは逆に不注意な取り扱いをしてしまうなど、不適切 な行動を招く原因になることも考えられる。また、放射性物質に関して不適切な取り扱いを引き起 こす原因の一つとして、例えば通常は問題とされるような数十 μ Sv/h 程度の空間線量率であっても、 放射線を目で見たり、感覚的に捉えたりできないということが考えられる。さらに、放射性物質は、 1 個の原子核から放出されるエネルギーが、日常的に起こる化学的な発熱反応に比べて格段に大きく、 例えば 100 万 Bq の ¹³⁷Cs が 10cm 程度の距離に存在すると 5 μ Sv/h を超える空間線量率を与えるが、 その質量はおよそ 3.1×10⁻⁷g しかなく、日常的な物質としての取扱いも困難である。

一方、本研究代表者らは、医学・生物学研究用のガンマ線イメージング装置として、半導体コン プトンカメラ「GREI」と呼ぶ装置の開発を行ってきた[1]。ガンマ線は物質の透過能が高く、また、 上述のように放射性物質は人体にとって化学物質としての毒性が現れない程の微量でも十分な感度 が得られるため、医療の分野では、放射性物質を結合させた薬剤を用いた画像診断が行われており、

PET や SPECT と呼ばれるガンマ線イメージン グ装置が実用化されている。ただし、PET は 原子核の崩壊に伴って陽電子を放出する核 種しか画像化できず、また、SPECT で効率良 く画像化できるのは、約 300 keV 以下のガン マ線を放出する核種に限定される。それに比 べて、GREI は格段に広いエネルギー範囲のガ ンマ線を画像化することが可能で、さらに、 そのガンマ線のエネルギーの違いから核種 を識別・同定することが可能である。

本研究代表者は、GREIのプロトタイプを構築し、世界で初めてコンプトンカメラを用いて動物および植物に投与した複数の放射性核種を同時に識別して画像化することに成功している。GREI は図1.1に示したように2



図 1.1. 医学・生物学研究用 GREI のプロトタイプ[1]

枚の板状のゲルマニウム(Ge)半導体検出器を有しており、検出器に入射したガンマ線がコンプトン散乱を起こすことを利用したコンプトンカメラの撮像原理に基づいている。さらに、Ge 半導体検 出器はエネルギー分解能が極めて優れているため、異なる核種から放出されるガンマ線のエネルギ ー(波長)の違いを容易に識別することができ、それを基にして、空間的に分布している放射性核 種を識別して画像化することが出来る。

図 1.2 は、生きたままのマウスに投与した3種類の放射性核種を GREI で同時に撮像した結果である。ヒト用の画像診断にも用いられる放射性医薬品であるヨウ化メチルノルコレステノール(¹³¹I) 注射液(¹³¹I-Adosterol)、⁸⁵Sr-塩化ストロンチウム溶液、および⁶⁵Zn-塩化亜鉛溶液をマウスに同時 投与し、⁸⁵Sr が骨に、⁶⁵Zn が肝臓に、また、¹³¹I が甲状腺および腹部にと、それぞれの核種が体内で 異なる挙動を示したことを明確に画像化することに成功した。



図 1.2. 生きたマウス体内における複数核種の同時イメージング[1] [S. Motomura *et al., J. Anal. Atom. Spectrom.* 23, 1089-1092, 2008.]

また、図 1.3 は、ダイズを水耕栽培し、¹³⁷Cs、⁵⁹Fe、および ⁶⁵Zn の 3 種類の放射性核種を同時に投 与して GREI で撮像した結果である。¹³⁷Cs がダイズ試料の全体に分布しているのに対し、⁵⁹Fe および ⁶⁵Zn は根の付近に集積しており、また、⁶⁵Zn は上部の成長点付近にも集積が見られた。



図 1.3. ダイズに投与した複数核種の同時イメージング[2] [S. Motomura *et al., IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 54, 710-717, 2007.]

このように、GREIを用いた撮像実験により、東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故で も取り沙汰された¹³¹Iおよび¹³⁷Csや、Srの挙動を同時に視覚化することに成功している。そこで本 研究では、本研究代表者らが開発した GREIの技術を応用し、放射性汚染物の位置と放射性核種を一 度に検査することを可能にするイメージング分析技術を開発し、従来は困難であった放射性汚染状況の迅速で正確な把握を可能にし、東日本大震災後の現在や将来における震災廃棄物の取扱に際して安全・安心を実現することを目的とする。また、本研究代表者らの半導体コンプトンカメラは、そのまま高感度のガンマ線スペクトロメトリー装置として作動するため、イメージング分析と組み合わせた新規モニタリング技術の実現も追求する。

しかしながら、前述の生きたマウスやダイズの撮像結果は、撮像ヘッドからの距離が5 cm 以内の 放射性物質の分布を示したものであり、装置としても単一の撮像ヘッドでは約 10 cm までの距離の 撮像しか想定していなかった。つまり、現在の GREI は近接撮像に最適化した設計を行っており、そ のままでは屋外等での遠方に存在する放射性物質の効率的な画像化は期待できない。これは、現在 の GREI では、画像の空間解像度を向上させるために 2 つの Ge 検出器間の距離をある程度離して配 置していることに起因する。近接撮像の場合は、GREI の検出器によって撮像対象の周囲に覆われる 立体角が大きいため、検出器に対して様々な角度でガンマ線が入射することになり、散乱角が大き い場合でも幾何学的に後段の検出器に入射することが可能であり、撮像感度が確保される。一方、 ガンマ線源が遠方に存在する場合、検出器付近ではガンマ線が平行光線に近くなり、入射角度がほ ぼ一定になるため、特に視野の中心付近のガンマ線は散乱角が大きくなると後段の検出器に入射し なくなり、感度が低下してしまう。また、視野の周辺部からガンマ線が入射した場合も、後段の検 出器に入射するための散乱角度がある一定の領域に限られ、計測事象毎の応答の違いを利用したガ ンマ線源の位置の局在化が困難になる。そこで、本研究課題の目的の達成に向けて、より遠方に存 在する放射性物質についても効率的な撮像を可能にするように GREI の撮像性能を向上させることを 検討した。



図 1.4. ガンマ線源の距離による撮像性能の違い

2. 研究方法

本研究課題の目的の達成にむけて、本研究期間内の最終目標として、①現在の半導体コンプトン カメラ「GREI」の撮像感度を5倍向上させる、②可搬性・保守性に優れたシステムを開発する、③ 従来のガンマカメラでは約300 keV以下に限られていた撮像可能なガンマ線のエネルギーを、2 MeV 以上まで拡張し、同時に核種の同定も可能にする、という項目を申請当初に設定した。そこで、当 時の計画においては、現在のGREIシステムにさらに半導体検出器を追加することで遠方撮像性能を 向上させることを考案し、そのための新たな半導体検出器の作製を計画していた。しかしながら、 初年度の研究開始時期や補助金の採択額、被災現地の状況のより早期の把握などを勘案した結果、 平成24年度においては既有のGREIを用いた実証的研究に重点化し、撮像性能を向上させるための 新たな半導体検出器の作製は中止した。平成25年度においては、前年度の研究で得られた知見を加 味して研究計画を再検討し、最終目標達成のための研究開発を行った。実施した具体的な研究内容 は、以下のとおりである:

(平成24年度)①屋外撮像用GREIシステムの構築と撮像実験、②遠方撮像用画像再構成法の開発、 ③GREI撮像ヘッドの遠方撮像最適化設計、④既有のGREIによるガンマ線源の短時間撮像、⑤低エネ ルギーガンマ線に対する撮像性能の向上、⑥GREI信号処理システムの小型化、⑦GREI撮像ヘッドを 用いた放射性物質モニタリング技術の開発。

(平成25年度) ⑧遠方撮像に最適化したGREI 撮像ヘッドの作製、⑨遠距離撮像に最適化したGREI 撮像システムの構築と実証実験、⑩遠方撮像用画像再構成法の高度化開発、⑪デジタル信号処理技 術によるGREI システムの小型化技術開発、⑫機械式冷凍機を装備した両面直交ストリップ電極式Ge 半導体検出器の作製。

2.1 屋外撮像用 GREI システムの構築と撮像実験

本研究代表者らが開発してきた半導体コンプトンカメラ「GREI」は、元来医学・生物学研究に用いることを目的としてきたため、屋外を含め様々な場所に装置を移動して撮像実験を行うことは考慮されていなかった。そこで本研究項目では、自動車等に搭載して運搬することが可能で、屋外などの商用電源の供給がない場所でも撮像実験が可能なGREIシステムの構築を行った。ただし、遠方撮像性能を向上させるための最適化は行っていない。また、実際に構築した装置を自動車に搭載して福島県内にGREIを運搬し、GREI撮像実験を行った。

屋外撮像用 GREI システムの構築

本研究代表者らは既に2台のGREI撮像ヘッドを保有していた。そのうちの1台は構造上撮像ヘッドを下向きにしか配置できないが、もう一台は撮像ヘッドをどのような向きに配置しても撮像できるように設計されている。後者の撮像ヘッドは全長約85 cm で重量は10 kg 程度であるため、屋外に運搬して使用することも十分可能であると考え、これを屋外撮像用GREIシステムに用いることとした。

より大きな問題は、GREIの信号処理システムであった。図 2.1 に初期のプロトタイプで用いていた信号処理システムの回路構成を示す。従来より放射線検出器に用いられている信号処理システム

は、図 2.1 のシステムに含まれるそれぞれの処理記号毎に別々の単純な機能を持った回路モジュー ルに分かれているのが普通であり、そのためシステム全体の大きさがかさばり、また、配線のため の信号ケーブルも多数必要で、取扱いが煩雑なシステムになりがちである。ただし、このようにモ ジュール化されたシステムは、必要な処理に応じてシステムの構成を自由に変更したり、高度な処 理を後で追加したりすることが確実にかつ容易に可能であるという利点がある。従来の GREI の開発 においても、撮像性能と機能の拡張性を重視してきたため、単純な機能ごとにモジュール化された システムを採用しており、高さ約2mの回路ラック2つ分のスペースを必要としていた。



図 2.1. 初期のプロトタイプの信号処理システムの回路構成[2] [S. Motomura *et al., IEEE Trans. Nucl. Sci.,* 54, 710-717, 2007.]

一方で、近年になって Ge 検出器の性能を損なうことなく小型化を実現し、多数の出力信号を一度 に処理することが可能な信号処理回路モジュールが入手可能になってきた。このような回路モジュ ールを用いれば、拡張性は損なわれるが、機能を限定することでシステム全体のサイズを小型化し、 配線の数も減らすことが可能になる。本研究代表者の所属機関でも、そのような回路モジュールの 導入の実績があったため、それらを用いて信号処理システムの構築を試みたところ、従来の2分の1 以下のサイズに小型化することが出来た。そこで、この構築した信号処理システムを屋外撮像用 GREI に用いることとした。

構築した屋外撮像用 GREI システムを作動させるには、1 kW 程度の電力が必要であるため、ガソリ ンエンジンを用いたインバータ方式の発電機を用いて電源を供給した。Ge 半導体検出器は、微弱な 検出信号を高精度に処理するため、電源にノイズ成分が含まれると、性能が著しく低下する。これ を防ぐため、発電機からの出力をノイズカットトランスを通して GREI システムに供給した。この構 成で動作テストを行ったところ、商用電源と遜色の無い性能が得られることが確認された。



図 2.2. 屋外撮像用に構築した GREI システム

また、GREIの撮像データは、撮像ヘッドのGe検出器の中で起こったガンマ線のコンプトン散乱の 情報を記録したデータであり、この撮像データからガンマ線源の画像を得るためには、特別な画像 再構成アルゴリズムを撮像データに適用する必要がある。後に詳述する通り、屋外撮像用GREIシス テムの画像再構成法として、魚眼カメラで撮影した画像にGREI画像を重ね合わせることが可能な画 像再構成法を開発し、本開発手法に適用した。

福島県における屋外撮像実験

構築した屋外撮像用 GREI システムを福島県に運搬し、以下の日程で屋外での撮像実験を行った。

平成 24 年 11 月 25 日 福島県相馬郡飯舘村 国道 399 号線の路肩 平成 24 年 11 月 26 日 福島県県中浄化センター 指定廃棄物の保管作業現場 平成 24 年 11 月 27、28 日 福島大学構内

飯舘村での撮像実験

国道 399 号線(飯樋)の路肩に GREI を設置して撮像実験を行った(図 2.3)。当時の帰宅困難区域 との境界に近い場所であり、設置場所周辺の空間線量率は、低い所でも 5 µ Sv/h 程度、道路脇の斜 面に近付くと 10 µ Sv/h 程度であった。まず、魚眼カメラの視野の中央部に道路の縁と斜面が入るよ うに GREI 撮像ヘッドを配置し、90 分間の撮像を行った。次に、視野の中央部に道路と斜面の境界が 映るように GREI 撮像ヘッドを配置し、80 分間の撮像を行った。



図 2.3. 飯舘村飯樋の国道 399 号線の路肩に設置した GREI システム





図 2.4. 飯舘村での撮像実験における 2 通りの GREI の撮像視野

県中浄化センターでの撮像実験

福島県県中浄化センターにおいては、下水汚泥の溶融処理の結果生じる指定廃棄物の保管作業が行われていた。この指定廃棄物の保管作業現場において、ドラム缶に詰められた煤塵の撮像実験を行った。図 2.5 のようにドラム缶から 1.4 m 離れた位置に GREI の撮像ヘッドを設置し、2.5 時間の 撮像実験を行った。空間線量率は、ドラム缶の近傍では 14 µ Sv/h、GREI 撮像ヘッドの位置では 4 µ Sv/h であった。

福島大学構内での撮像実験

福島大学構内では、まだ除染作業が行われていない領域を背景として、そこに背景よりも高濃度 の汚染部位がある場合に、それを GREI で画像化可能であるかどうかを検証するための模擬実験を行 った。まだ除染が行われておらず、斜面の表面付近で 1.0 μ Sv/h の空間線量率となる土手の縁から 30cm 離れた位置に GREI の撮像ヘッドを設置した。その撮像ヘッドの前方の土手の斜面の上に、福島大学構内の側溝から採取した土をビーカーに入れて配置し、2 時間の撮像を行った。この時、土を入れたビーカーの付近の空間線量率は 1.7 μ Sv/h、GREI 撮像ヘッドの位置での空間線量率は 0.9 μ Sv/h であった。その後、土を入れたビーカーを取り除くと、斜面の表面付近では 1.0 μ Sv/h、GREI 撮像ヘッドの付近では 0.8 μ Sv/h となった。この条件で GREI 撮像を行ったが、前日の撮像実験で装置が濡れてしまった影響で不具合が生じ、1 時間の撮像しかできなかった。そこで、このデータから再構成した画像の強度を 2 倍にして比較対象とすることとした。



図 2.5. 県中浄化センターでの撮像実験の様子



図 2.6. 福島大学構内での撮像実験

2.2 遠方撮像用画像再構成法の開発

本研究代表者らが医学・生物学研究用のガンマ線撮像装置として開発してきた GREI を遠方撮像用 の装置に拡張するためには、GREI の撮像データからガンマ線源の分布画像を生成するための画像再 構成法についても、遠方撮像用に開発する必要がある。近接撮像の場合は、GREI の検出器によって 撮像対象の周囲に覆われる立体角が大きいため、ガンマ線源の分布を多数の方向に投影した情報が 得られ、そこに深度方向の分布の情報も含まれる。つまり、近接撮像では、放射性物質の3次元の 分布画像を取得することが可能である。しかし、遠方撮像の場合は検出器付近では入射ガンマ線が 平行光線に近くなり、入射角度がほぼ一定になるため、深度方向の分布の情報は得られない。そこ で、遠方撮像用には、撮像ヘッドを中心とした球面上の位置座標(θ, φ)にガンマ線源の分布画像 を投影する画像再構成法を用いるのが適当である。また、このような球面上に投影した画像を見や すく表示するため、魚眼カメラで撮影した画像と重ね合わせを行うソフトウェアの実装も行った。

球面上の画像再構成法の開発

画像を投影する球面として、GREIの前段の検出器の中心から半径1mの球面を想定した。球面上 に投影を行う際には、検出器内のどの位置にガンマ線が当たったかは考慮せず、検出器中心から見 た方位のみを用いた。球面上の逆投影画像からのボケの除去は、魚眼カメラの画像に重ね合わせる ための射影の後に、モンテカルロシミュレーションで求めた応答画像を用いて行った。

球面上の逆投影画像を魚眼カメラの画像に重ね合わせるための射影を行うため、実際に用いる魚 眼カメラで、球面上の(θ, φ)がどの様に射影されるかを実測して調べた。レーザーマーカーで 壁に映した十字点を、魚眼カメラを 10° ずつ回転させながら撮影し、射影方法を求めた。次に、球 面上の画素の(θ, φ)を求め、魚眼カメラの画像上の座標に線型補間を施して射影するソフトウ ェアの実装を行った。

2.3 GREI 撮像ヘッドの遠方撮像最適化設計

屋外撮像実験の結果でも如実に示されるが、現在の GREI 撮像ヘッドは近接撮像に最適化された設計になっており、遠方撮像性能を向上させるためには、遠方撮像に最適化した撮像ヘッドの設計を行う必要がある。当初計画では、新たに Ge 検出器を撮像ヘッドに追加することでこの撮像性能を向上させることを想定していたが、本研究で使用する検出器は高価であり、また検出器を追加すると処理システムも変更しなければならずその開発工程も必要となるため、早期の貢献が難しくなると判断した。そこで本研究では、現在の GREI 撮像ヘッドに搭載されている 2 つの検出器間の距離を近づけることで遠方撮像の性能を向上させることを検討した。

本研究の屋外撮像実験で用いた GREI 撮像ヘッドに搭載されている 2 つの検出器の中心間の距離は 6 cm である。この距離を近づけることで撮像性能がどの様に向上するかを調べるため、Geant4 [3] を 用いて検出器中心間の距離を 6 cm、4 cm、および 2.5 cm に設定した GREI 撮像ヘッドをソフトウェ ア上にモデル化し、モンテカルロシミュレーションの手法を用いてその撮像性能を見積もった。ガンマ線源の距離は、5 cm、30 cm、1 m、および 5 m と変化させ、検出器の中心から見たガンマ線源 の存在する方向も 0°、15°、30°、45°、及び 60°と変化させた。

2.4 既有の GREI によるガンマ線源の短時間撮像

本研究項目では、既有の GREI の撮像性能を示す参考とするため、比較的に撮像ヘッドの近傍にあるガンマ線源をどのくらいの時間で画像化可能であるかを示した。図 20 に示した通り、1.0 MBq の ¹³⁷Cs の溶液を試験管に準備した。NaI (T1) シンチレーションサーベイメータを用いて空間線量率を 測定したところ、線源から 12 cm 離れた位置で 5 μ Sv/h であった。そこで、GREI の撮像ヘッドの中 心軸上で 12 cm 離れた位置に、準備した ¹³⁷Cs ガンマ線源を配置し、10 秒間の撮像を行ってどのよう な画像が得られるかを調べた。

2.5 低エネルギーガンマ線に対する撮像性能の向上

既有の Ge 半導体検出器のみを用いた GREI では、エネルギーが約 200 keV 以下のガンマ線に対す るコンプトン散乱の生起確率が著しく低下するため、コンプトンカメラとしての感度も著しく低下 する。本研究代表者らは、図 22 に示したシリコン(Si)検出器装着型 GREI で低いエネルギーのガン マ線に対する感度を向上させることを既に考案しており、日本および米国の特許を取得している。 さらに、既有の GREI の前方に設置することが可能な両面直交ストリップ電極式の Si(Li)検出器も 保有している。そこで本研究では、Si(Li)検出器を既有の GREI に装着した撮像システムを用いて 撮像実験を行い、低エネルギーガンマ線に対する撮像性能が向上するかどうかを確かめた。

図 23 に示した通り、⁵⁷Co(122keV, 200 kBq)、¹³⁷Cs(662keV, 920kBq)、および ⁵⁴Mn(835keV, 580 kBq)のガンマ線源を準備した。撮像ヘッドから 6 cm の位置にガンマ線源を配置して撮像を行った。 +分なデータ量の取得を勘案し、撮像時間は 10 時間とした。

2.6 GREI 信号処理システムの小型化

本研究の屋外撮像実験で使用した処理システムは、本研究代表者の所属機関で既に保有していた 回路モジュールを組み合わせて構築した装置であり、回路モジュールの出力信号の規格等を整合さ せるため、信号変換回路モジュール等が追加され、それに必要な配線なども追加されていた。そこ で本研究項目では、屋外撮像用 GREI システム用にカスタマイズした回路モジュールを準備し、回路 モジュール数や配線数を減らしてさらに小型化した GREI 信号処理システムの構築を行った。屋外撮 像用 GREI システム用に、回路モジュールで使用される入出力信号の規格をカスタマイズして統一し た波形整形処理回路やアナログーデジタル変換回路モジュール等を準備し、これらを用いて GREI 信 号処理システムを構築した。

2.7 GREI 撮像ヘッドを用いた放射性物質モニタリング技術の開発

既有の GREI は、半導体検出器としては大体積の Ge 検出器を 2 台搭載しており、そのままそれら の検出器を高感度ガンマ線スペクトロメトリー装置として用いることが可能である。またそれと同 時に、ガンマ線が GREI の検出器のどこに当たったかを三次元的に検出することが出来る。これを利 用して、ガンマ線が GREI の検出器に当たった位置の異方性から、ガンマ線源が存在する大まかな方 向と核種を同定することが可能であると考えられる。そこで本研究では、この新規サーベイ手法の 実現可能性を調べるための予備実験を行った。

2.8 遠方撮像に最適化した GREI 撮像ヘッドの作製

本研究項目では、平成24年度に行ったGREI撮像ヘッドの遠方撮像最適化設計の結果得られた知 見をさらに検討し、まず実際に作製するGREI撮像ヘッドの仕様を決定した。その仕様に基づいて既 有のGREI撮像ヘッドを改造し、遠方撮像に最適化したGREI撮像ヘッドを作製した。

平成 24 年度に行ったモンテカルロシミュレーションによる最適化設計の結果、2 台の Ge 検出器の 中心間距離を、改造前の 6 cm から 2.5 cm にまで近づければ、検出効率が 5 倍以上に向上すること が判明していた。しかしながら、このときの 2 台の検出器の間の空間は 1 cm であり、配線のための 空間の不足や、検出器表面の電極同士が接近することによる検出信号の相互干渉が問題になる可能 性があるため、実際の装置として実現可能な検出器の配置を選択し、撮像ヘッドの仕様を決定した。 作製した GREI 撮像ヘッドを用いてガンマ線の計測を行った時のエネルギー分解能を調べ、Ge 半導体 検出器としての性能が保たれているかどうかを確認した。

2.9 遠方撮像に最適化した GREI 撮像システムの構築と実証実験

作製した GREI 撮像ヘッドを、平成 24 年度に小型化した GREI 信号処理システムに接続し、遠方撮像に最適化した GREI 撮像システムの構築を行った。GREI 撮像ヘッドの最適化は、搭載されている 2 台の Ge 検出器間の距離を変更することで行っており、出力信号線の数および規格は従来と同一であるので、小型化した GREI 信号処理システムをそのまま利用することができた。

構築した GREI 撮像システムを用いて放射性核種の撮像実験を行い、遠方撮像性能向上の実証を行った。まず、平成 24 年度に行った既有の GREI によるガンマ線源の短時間撮像と同様に、GREI の撮像ヘッドの中心軸上で 12cm 離れた位置に、1.0 MBq の¹³⁷Cs 溶液を封入した試験管を配置し、10 秒間の撮像を行ってその撮像結果を調べた(図 2.7)。2 台の Ge 検出器間の距離を近づけたことによる検出効率の向上を調べるため、画像生成に有効な検出事象の計数を比較した。



図 2.7. 本研究で屋外撮像用に最適化した GREI 撮像ヘッドを用いた、ガンマ線源の撮像の様子

次に、従来の GREI で遠方に存在するガンマ線源を撮像した時に生じていた円弧状のアーチファクトの問題が、最適化した撮像システムで解決されたかどうかを、撮像実験を行って調べた。GREI の前段の検出器の中心を起点とし、距離 1.7 m で視野の中心から 28°の位置に、合計で 5.0MBqの¹³⁷Cs溶液を封入した試験管(1.5mL 容量マイクロチューブ)を配置した(図 2.8、図 2.9)。この時の GREI 撮像ヘッドの位置での空間線量率は、0.28 µ Sv/h であった。この空間線量率は、福島県で指定廃棄物のイメージング実験を行った際の 10 分の 1 以下であり、十分な計数を取得するため 90 分間の撮像を行った。

なお、GREIの撮像実験における記録データは、タイムスタンプ情報を含んだリストモードデータ として保存しており、長時間の撮像データからでもより短時間の撮像のデータを抽出して評価する ことが可能である。そこで、最初の10分間のデータのみを用いた画像も作成した。



図 2.8. 本研究項目の撮像実験で用いた¹³⁷Csのガンマ線源。放射能濃度が 24.7 kBq/µL の ¹³⁷Cs 溶 液を 1.5 mL 容量の 5 本のマイクロチューブ先端に 1.0 MBq ずつ注入した。



図 2.9. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.7 m、角度 28°の位置に置いた、合計で 5.0MBq の¹³⁷Cs 溶液を封入した線源位置を示す魚眼カメラ画像。90分間の撮像を行い、全データを用いた画像と10分間のみのデータを用いた画像を作成した。

放射性物質の空間分布画像を正しく取得できることを示すための最も単純な試験として、¹³⁷Cs 溶 液を封入した複数の試験管を同時に異なる位置に配置して撮像実験を行い、得られた画像を評価し た。行った撮像実験の条件は次のとおりである: ①2.0 MBq の ¹³⁷Cs 溶液を封入した 2 本の試験管を 距離 1 m、視野中心から 0° および 30° の位置に配置(図 2.10)、撮像時間: 10 分、②2.0 MBq の ¹³⁷Cs 溶液を封入した試験管を距離 1 m、視野中心から 0° および 15° の位置に配置(2.11)、撮像時間: 10 分、③2.0 MBq の ¹³⁷Cs 溶液を封入した試験管を距離 1 m、視野中心から 0° および 10° の位置に 配置(図 2.12)、撮像時間: 10 分、④1.0 MBq の ¹³⁷Cs 溶液を封入した試験管を距離 1 m、視野中心 から 0°、30° および 60° の位置に配置(図 2.13)、撮像時間: 90 分。それぞれの撮像条件におけ る GREI 撮像ヘッド位置の空間線量率は、①~③のとき 0.57 μ Sv/h、④のとき 0.43 μ Sv/h であった。



図 2.10. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0° および 30° の位置に配置した 2.0MBq の¹³⁷Cs 溶液を封入した線源位置を示す魚眼カメラ画像。10 分間の撮像を行い、画像を作成した。



図 2.11. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0°および 15°の位置に配置した 2.0MBq の¹³⁷Cs 溶液を封入した線源位置を示す魚眼カメラ画像。10分間の撮像を行い、画像を作成した。



図 2.12. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0° および 10° の位置に配置した 2.0MBq の ¹³⁷Cs 溶液を封入した線源位置を示す魚眼カメラ画像。10 分間の撮像を行い、画像を作成した。



図 2.13. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0°、30°および 60°の位置に配置した 1.0MBq の¹³⁷Cs 溶液を封入した線源位置を示す魚眼カメラ画像。90分間の撮像を行い、全データを用 いた画像と 10 分間のみのデータを用いた画像を作成した。

また、異なる放射性核種の分布画像を同時に取得できることを示すために、次の条件で撮像実験 を行った:⑤1.0 MBqの¹³⁷Cs 溶液を封入した3本の試験管を距離1m、視野中心から0°、30°およ び60°の位置に配置、同時に2.8MBqの¹³¹I 溶液を距離1m、視野中心から30°の位置に配置(図2.14)、 撮像時間:60分、⑥2.0 MBqの¹³⁷Cs 溶液を封入した2本の試験管を距離1m、視野中心から0°お よび30°の位置に配置、同時に2.8MBqの¹³¹I 溶液を距離1m、視野中心から30°の位置に配置、さ らに同時に2.2MBq および1.0MBqの⁸⁵Sr 溶液をそれぞれ0°および30°の位置に配置(図2.15)、 撮像時間:150分。



図 2.14. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0°、30° および 60°の位置に配置した 1.0MBqの¹³⁷Cs 溶液を封入した線源位置と、距離 1.0 m 角度 30°の位置に配置した 2.8MBqの¹³¹I 溶 液を封入した線源位置を示す魚眼カメラ画像。60分間の撮像を行い、それぞれの核種毎の画像を作 成した。



図 2.15. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0° および 30° の位置に配置した 2.0MBq の¹³⁷Cs 溶液を封入した線源位置と、距離 1.0 m 角度 30° の位置に配置した 2.8MBq の¹³¹I 溶液を封入した線源位置、さらに、距離 1.0 m 角度 0° および 30° の位置に配置した、それぞれ 2.2MBq および 1.0MBq の⁸⁵Sr 溶液を注入した線源の位置示す魚眼カメラ画像。150 分間の撮像を行い、全データを用いた画像と 10 分間のみのデータを用いた画像をそれぞれの核種毎に作成した。

2.10 遠方撮像用画像再構成法の高度化開発

平成 24 年度に福島県で行った屋外 GREI 撮像実験の結果、撮像システムが遠方に存在する放射性 物質の撮像用に最適化されていないことに起因する問題点が如実に示された。すなわち、撮像視野 中央部の感度の損失と周辺部の円弧状のアーチファクトが顕著に現れた。平成 24 年度の研究では、 画像化に利用する撮像データに制限を設け、視野中央部の画像を重点化することで画質を改善する ことに成功した。それに加え、さらに検討を重ねた結果、画像化に利用する撮像データに制限を設 けなくても、GREI による放射線検出に関わる物理現象を詳細に検討することで当該問題を改善でき る可能性が浮上した。そこで本研究項目では、検出した一つ一つのガンマ線に対する物理現象を効 果的に反映させることが可能な、List-Mode Maximum-Likelihood Expectation-

Maximization (LM-ML-EM) 法 [4] に基づいて高度化した画像再構成法を開発し、実際の撮像データに適用してその効果を調査した。

LM-ML-EM 法は、コンプトンカメラの画像再構成法として広く用いられている画像再構成法であり、 次の数式で表される:

$$\lambda_j^{(l+1)} = \frac{\lambda_j^{(l)}}{s_j} \sum_i \frac{t_{ij}}{\sum_k t_{ik} \lambda_k^{(l)}}$$

この数式は、(*l*+1) 番目の推定画像 $\lambda_j^{(l+1)}$ が、(*l*) 番目の推定画像 $\lambda_j^{(l)}$ に、その画像を基にして算 出した補正項 $\frac{1}{s_j} \sum_i \frac{t_{ij}}{\sum_k t_{ik} \lambda_j^{(l)}}$ を画素毎に乗算することによって生成されることを表しており、 $\lambda_j^{(l)}$ は 画像を生成する球面上の画素 *j*の画像強度、 t_{ij} はシステム応答関数、 s_j は画素 *j* におけるガンマ 線の検出感度である。システム応答関数 t_{ij} は、画素 *j* から放出されたガンマ線が *i* 番目のデータ として検出される過程の確率的なモデルに基づいており、本研究では次の式のように定義した:

$$t_{ij} = \exp\left\{-\sigma_t(E_\gamma)d_{j1,i}\right\} \frac{\mathrm{d}\sigma_{c,ij}}{\mathrm{d}\Omega} p_{ij}$$
$$\times \exp\left\{-\sigma_t(E_\gamma')d_{12,i}\right\} \sigma_p(E_\gamma')$$

ここで、 $\exp \{-\sigma_t (E_{\gamma}) d_{j1,i}\}$ は画素 jから放出されたエネルギー E_{γ} のガンマ線が、コンプトン散乱するまでに起こる検出器内での減弱、 $\exp \{-\sigma_t (E'_{\gamma}) d_{12,i}\}$ はコンプトン散乱位置から光電吸収位

置までに起こるガンマ線の検出器内での減弱、 $\frac{d\sigma_{c,ij}}{d\Omega}$ はガンマ線画素 *j*から放出されたと仮定した 場合のコンプトン散乱微分断面積、 $\sigma_p(E'_{\gamma})$ はコンプトン散乱されたガンマ線の光電吸収断面積、 p_{ij} はコンプトン散乱角の推定誤差に起因する広がりを表す成分である。また、本開発手法では、 画像を生成する球面上の位置を極座標で表現するため、画素毎にその面積 A_jが異なり、検出感度 s_j は画素の面積の逆数 1/A_jを考慮した。

本開発手法でポイントとなるのは、コンプトン散乱角度の推定精度、すなわち p_{ij} がコンプトン 散乱角度によって変化することを詳細に画像再構成に反映することである。コンプトン散乱角度の 推定に誤差をもたらす要因として、①検出器のエネルギー分解能と②検出器材料物質中の電子がも つ運動量分布による散乱角度の広がり(ドップラーブロードニング)の2つを考慮した。エネルギ ー分解能に起因する散乱角度推定値の分布関数 $f_{\rm E}(\theta)$ と、ドップラーブロードニングよる散乱角推 定値の分布関数 $f_{\rm D}(\theta)$ は、それぞれ次の式の式で表されると仮定した:

$$f_E(\theta) = \frac{1}{\sigma_E \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\theta - \theta_c)^2}{2\sigma_E^2}\right\},$$
$$f_D(\theta) = \frac{1}{Z\sqrt{2\pi}} \sum_l \frac{n_l}{\sigma_{D,l}} \exp\left\{-\frac{(\theta - \theta_c)^2}{2\sigma_{D,l}^2}\right\}$$

ここで、 $\sigma_{\rm E}$ はエネルギー分解能に起因する散乱角度推定値分布の標準偏差、 $\sigma_{\rm E}$ はドップラーブロードニングに起因する散乱角度推定値分布の標準偏差、 $\theta_{\rm c}$ は真のコンプトン散乱角、Z は検出器材料物質の原子番号、 n_l は電子軌道 l に属する電子の数である。これらを総合した散乱角推定値の分布関数 $f_{\rm o}(\theta)$ は、 $f_{\rm E}(\theta)$ と $f_{\rm D}(\theta)$ の畳み込みとなり、

$$f_o(\theta) = \frac{1}{Z\sqrt{2\pi}} \sum_l \frac{n_l}{\sqrt{\sigma_{D,l}^2 + \sigma_E^2}} \exp\left\{-\frac{(\theta - \theta_c)^2}{2\left(\sigma_{D,l}^2 + \sigma_E^2\right)}\right\}$$

である。

ある1つの検出されたガンマ線のコンプトン散乱に対するシステム応答関数 t_{ij} は、 $f_0(\theta)$ で表される厚みを持った円錐が画像を生成する球面と交差した円状の領域の分布となる。LM-ML-EM 法においては、(*l*) 番目の計算を行う毎に、検出した全てのコンプトン散乱に対するシステム応答関数が計算されるため、多数の演算を要する。この計算負荷を軽減するため、 $f_0(\theta)$ は図 2.16 のように離散化して用い、また、GPGPUを用いて実装することにより高速化を図っている。



図 2.16. 本研究項目で開発した画像再構成で考慮した、コンプトン散乱角度の推定誤差を表す分布 関数。離散化して計算の高速化を図っている。

本研究項目で開発した画像再構成法を、モンテカルロシミュレーションにより生成したデータお よび GREI を用いた撮像実験で取得したデータに適用し、詳細な物理現象を考慮することの画質への 影響を調べた。モンテカルロシミュレーションでは、ソフトウェア上で GREI 撮像ヘッドとその 5 m 前 方に配置した¹³⁷Cs の点状の線源をモデル化し、線源を GREI 撮像視野の中央から 0°、15°、30°、 45° および 60° の位置に配置した。GREI を用いた撮像実験で取得したデータとしては、福島県県中 浄化センターで行った指定廃棄物の撮像データから、¹³⁷Cs の 662 keV のガンマ線のデータのみを選 別して用いた。



図 2.17. 本研究項目で開発した詳細な物理現象を考慮した画像再構成法を適用するデータ を生成するための、モンテカルロシミュレーションで用いた¹³⁷Cs線源配置の条件。

2.11 デジタル信号処理技術による GREI システムの小型化技術開発

本研究代表者らは、従前からの研究でコンプトンカメラ GREI 用のデジタル信号処理装置の開発 に成功していた[6]。デジタル信号処理装置が、従来のアナログベースの信号処理装置と異なるのは、 検出器からの信号を、早い段階(前置増幅器からの出力等)でデジタル数値に変換し、エネルギー 値や検出時刻等を導出する処理をすべてデジタル演算により行う点である(図 2.18)。デジタル演算 は、FPGA (Field Programmable Gate Array)や ASIC (Application Specific Integrated Circuit) など集積回路で行わるのが一般的である。この様なデジタル信号処理装置は、高周波数帯域である 放射線計測信号に対応できる高速なサンプリング ADC が普及し始めた 1990 年代から用いられる様に なってきた[5]。特徴としては、信号処理の大部分に集積回路を用いているため、汎用的なモジュー ルを組み合わせたアナログベースの信号処理装置と比較してコンパクトかつ省電力である。また、 デジタル数値に変換したデータはノイズの影響を受けにくいため、複雑な演算を実行してもデータ の劣化が無い。加えて、デジタルデータは温度変化の影響を受けないため、アナログ増幅器等に見 られる温度変化による増幅率の変化が起こらないため、長時間の使用でも安定して高い精度を保つ ことが可能である。さらには、検出器からの出力信号の形状(信号波形)をデジタルデータとして 記録しているために、このデータを用いて、粒子識別や検出位置の導出等の複雑な波形解析が可能 である。



図 2.18. 開発済のデジタル信号処理装置の構成([5]より)。

既に開発済の GREI 用デジタル信号処理システムは、ゲルマニウム半導体検出器のエネルギーと時 間情報を導出する汎用的なデジタルモジュールと GREI 用の信号波形解析に特化したデジタル演算モ ジュールを組み合わせたシステムとなっている。8 チャンネル仕様の汎用モジュール 2 台と、専用の デジタル演算モジュール 1 台を組み合わせて 1 セットとし、これを 4 セット用いて、GREI の前段・ 後段検出器それぞれの陽極側・陰極側分割電極(各 13 チャンネル)の信号を処理している。これに、 すべてのモジュールの同期を取るためのクロックを分配するモジュール 1 台と、4 つのセットの同時 計測を行うモジュール 1 台を加えて、合計 14 台のモジュールでシステムが構成されている。すべて のモジュールは VME 規格 6U サイズ(縦横 23×16 cm、厚さ 2 cm)のカードであり、これを合計 14 台用いており、電源クレートに収めると、縦×横×奥行が、おおよそ 31×30×40 cm の大きさとな る。



図 2.19. 従来の GREI 用デジタル信号処理装置

<従来装置の問題点>

前述の通り、既に GREI 用デジタル信号処理システムを構築し、コンプトンカメラ・イメージング に成功している。しかしながら、さらに GREI の実用性能を向上させ、小型化したシステムを構築す るには、いくつかの改善すべき課題が残されている。これらの課題を以下に述べる:

(1) サイズと消費電力

集積度の高い回路を用いたデジタル信号処理装置の開発により、従来の汎用アナログモジュール による信号処理装置と比較して、装置のサイズと消費電力は非常に小さくなった。しかしながら、 演算回路等の集積度は年々高くなって来ており、最新の演算回路を用いることにより、さらにコン パクトかつ省電力なシステムの構築が可能であると考えられる。コンパクトで消費電力の少ないシ ステムを構築することは、装置の可搬性を考えると非常に重要である。

(2) 誘起信号の誤認識

電極分割型の半導体検出器では、放射線が入射した電極から電荷収集による信号(電荷信号)が 出力されるのに加えて、その周辺の電極にも電荷の移動により誘起された信号(誘起信号)が現れ る(図3)。GREI用デジタル信号処理システムでは、この誘起信号を解析することにより、電極の分 割サイズよりさらに細かいガンマ線相互作用位置の導出を実現している。しかしながら、この誘起 信号をシステムが電荷信号と誤認識し、有効イベントが減少してしまう問題が発生していた。これ は、誘起信号を電荷信号と誤認識した場合には、エネルギーおよび時間情報を導出できないために 無効なイベントとなってしまうためであり、GREI検出器の前段・後段検出器それぞれの陽極側・陰 極側分割電極の4セットすべてのデータが揃わないと、コンプトンカメラとしての有効イベントに ならず、その影響は非常に大きい。



図 2.20 電荷信号と誘起信号の例

(3) マルチヒットイベントの取得

一般的に、検出器内でガンマ線は、1回の相互作用のみでエネルギーが吸収される場合もあれば、 コンプトン散乱により複数回の相互作用を行う場合もある。単一電極の半導体検出器では、相互作 用回数を特定するのは困難であるが、電極分割型の半導体検出器では、複数回の相互作用が異なる 電極内で起きた場合には、相互作用回数を特定することが可能である。しかしながら、半導体検出 器の時間分解能では、相互作用の起きた順番を時間情報により推定することはできない。そこで、 GREI では、この様なマルチヒットイベントをガンマ線トラッキング技術(相互作用の起きた順番を
運動学的に推定する)により有効にし、感度の向上を目指す開発も行っている[5]。したがって、マ ルチヒットイベントが取得できる方が望ましい。

<本研究での解決策と改良点>

これらの課題を解決するために、今回新規のデジタル信号処理装置を開発した。新規のデジタル信 号処理装置の開発は株式会社テクノエーピー社との協力により行った。前述の3つの課題について、 以下に順番に改良点と解決策を示す。

(1)「サイズと消費電力」に対する改良点

従来は複数のFPGA に分担しないと GREI 検出器片面 13 チャンネルのための演算が実行できなかっ たが、ここ数年の FPGA の高集積化により、最新のものを使用すると単一の FPGA で 13 チャンネル分 の演算を、波形解析も含めて実行できるようになってきた。そこで、本研究では、最新の FPGA 演算 チップを使用した GREI での使用に特化したデジタル信号処理モジュールを新たに設計した。新しい GREI 用デジタル信号処理システムでは、1 モジュールで 13 チャンネル分の信号を処理する設計とな っており、4 モジュールで GREI 1 台分すべての信号を処理することができる(旧システムでは 12 モジュール)。これにより、大幅なシステムのコンパクト化とモジュール数が減ったことに伴う省電 力化を実現する。

(2)「誘起信号の誤認識」に対する解決策



図 2.21. 新規フィルターの仕組みの概念図

誘起信号の誤認識を無くすために、電荷信号と誘起信号を識別する、新規の信号フィルターを発案 し作成した。このフィルターは、時間情報を導出するために、デジタル信号処理装置に元から導入 されているファースト・トラペゾイダル信号[7]を利用している。従来は、ファースト・トラペゾイ ダル信号もしくは、それにコンスタント・フラクション処理をした信号に閾値を設けることにより、 信号発生のトリガーとしていた。この方法だと、エネルギー値が大きく誘起信号が大きい場合に、 偽のトリガーを発生させてしまう。特に、誘起信号は電荷信号よりも信号立ち上がりが早い場合が 多く、誤認識の発生確率が高い。トリガーの閾値を高く設定すると誤認識を減らすことができるが、 低いエネルギーのガンマ線を測定することができなくなってしまう。従って、コンプトンカメラの 様に、二つの検出器でのエネルギー吸収比を元にしてイメージングを行う装置では、様々なエネル ギーを取得する必要があり、従来の方法では、有効イベントを選別するのには限界があった。そこ こ、電荷信号と誘起信号を弁別する方法として、ファースト・トラペゾイダル信号を用い、この信 号の遅延した位置に二つめの閾値を設けた、新規のフィルターを考案した。誘起信号はその特徴と して、電荷信号と比較して信号立ち上がり後すぐに減衰する。そのため、遅れた位置での閾値によ り明確に、電荷信号と分離することが可能となる仕組みである。また、この新規フィルターは、既 存のファースト・トラペゾイダル信号を用いているために、フィルターの追加により演算量が大き くは増えない特徴も持っている。新規に開発したデジタル信号処理モジュールには、この新規のフ ィルターを実装した。

(3)「マルチヒットイベントの取得」のための解決策

従来の装置は、開発のベースに汎用的なデジタル信号処理装置を使用したこともあり、マルチヒ ットイベントを取り込むことができない仕様になっていた。この仕様では、検出器内でマルチヒッ トが起きた場合には、最初に閾値を超えたチャンネルが採用され、それ以後のチャンネルはブロッ クされる。前述の誘起信号の誤認識問題も、マルチヒットイベントが取得できないことが、解決が 困難である理由の1つとなっている。すなわち、閾値を超えたチャンネルのデータをすべて取得可 能であれば、データ取得後にオフラインで、電荷信号と誘起信号を選別することができる。マルチ ヒットイベントが取得できない仕様になっていた主な理由は、ヒットしたチャンネルの数によりデ ータ長が変化するため、その後の波形解析等のアルゴリズムがこれに対応したものでなくてはなら ず、複雑なものになるためである。今回、前述の電荷信号と誘起信号をオンラインで弁別するフィ ルターを新規に導入したことにより、ガンマ線がヒットしたチャンネルを早い段階で同定すること が可能となったこと、および、ここ数年のFPGA 回路の高集積化により、より複雑なアルゴリズムを 実装できる様になったことにより、マルチヒットイベントが取得可能な設計ができた。

2.12 機械式冷凍機を装備した両面直交ストリップ電極式 Ge 半導体検出器の作製

現有の GREI に搭載されている放射線検出器は Ge 半導体検出器であり、動作させるためには約 80K まで冷却する必要があるため、液体窒素による冷却方式を採用している。この方式では、液体窒素 を補給するだけで必要な低温が安定して得られるため、Ge 検出器の冷却方式として大変優れた実績 のある有効な方式である。しかしながら、液体窒素が常に蒸発していくため、使用中に液体窒素が 枯渇しないように補給を続けなければならないという欠点がある。長時間にわたって液体窒素を補 給せずに使用できるようにするには、液体窒素を充填する容器の容量を大きくすれば良いが、寸法・ 重量共に大きくなり、可搬性が損なわれる。逆に、可搬性を確保するために液体窒素の充填容器の 容量を小さくすると、今度は頻繁に液体窒素を補給しなければならず、利便性・保守性に問題が生 じる。そもそも、屋外で撮像を行う際には、液体窒素の供給が困難な条件で使用しなければならな いことも考えられる。

そこで本研究項目では、液体窒素による冷却方式を廃し、電源を供給するだけで使用可能な機械 式冷凍機を装備した Ge 半導体検出器で GREI を構築することを検討する。近年、低振動・長寿命の パルス管冷凍機が入手可能になり、Ge 半導体検出器の冷凍機として採用した製品も登場しているた め、GREI 用の両面直交ストリップ電極式 Ge 半導体検出器にも適用可能であることが期待される。そ こで、GREIの構成要素として利用することが可能で、パルス管冷凍機を装備した両面直交ストリップ電極式 Ge 半導体検出器を作製し、その性能を調べた。

3. 結果と考察

3.1 屋外撮像用 GREI システムの構築と撮像実験

県中浄化センターでの撮像実験の結果

前述の通り(2.1節)、本研究項目で構築した撮像装置は、医学・生物学用に作製された GREI 撮像 ヘッドをそのまま採用しており、環境中などの比較的遠方に存在する放射性物質に対して効率的な イメージング分析を行うことは期待していない。しかしながら、県中浄化センターでの撮像実験に おいては、高濃度の放射性物質が存在する領域が既知で限られており、今回の屋外実験では最も良 い条件で撮像が出来たため、まずこの実験の結果を示し、画像処理の効果などを考察した。

図 3.1 は、本研究で開発した遠方撮像用の画像再構成アルゴリズムをそのまま撮像データに適用 して、魚眼カメラの画像に重ね合わせた結果である。この画像には、現在の GREI による遠方撮像の 課題が如実に表れている。すなわち、視野の中心付近の感度が低く画像が抜けており、また、周辺 から入射したガンマ線の応答に起因する円弧状のアーチファクトが生じている。



図 3.1. 遠方撮像用の画像再構成アルゴリズムをそのまま撮像データに適用した結果

そこで、画像再構成に用いるデータを、散乱角が 37°以下のコンプトン散乱事象に限定し、視野 の周辺部から大きな散乱角で入射するガンマ線を棄却し、中央部の感度を重点化した処理を行った。 その結果、図 3.2 に示す通り、魚眼カメラの画像のドラム缶の位置と GREI 画像が一致し、既有の GREI 撮像ヘッドで遠方撮像における画質の改善に成功した。ただし、中央の白いドラム缶の位置には依 然として画像が抜けているように見える部分がある。この原因としては、左隣りのドラム缶に比べ て 6 割程度しか内容物が充填されていないことが確認されており、その影響も含まれていると考え られる。



図 3.2. 遠方撮像用の画像再構成アルゴリズムに中央部の感度の重点化を適用した結果

図 3.3 は、この撮像実験で得られたガンマ線のエネルギースペクトルである。同図を見て分かる 通り、GREI は極めてエネルギー分解能が優れていることが大きな特徴であり、¹³⁷Cs および¹³⁴Cs に固 有のガンマ線が非常にシャープなピークとして得られている。このそれぞれの核種に固有のガンマ 線のエネルギーの違いを利用して撮像データを選別することで、それぞれの核種毎の画像化を行う ことは容易である。図 3.4 及び図 3.5 はそれぞれ¹³⁴Cs および¹³⁷Cs の分布を画像化した結果である。 両核種はほぼ同等の分布をしており、それぞれの分布画像を足し合わせることで図 3.2 のように画 質を向上させることが可能であることが示された。



図 3.3. 県中浄化センターでの撮像実験で測定したガンマ線のエネルギースペクトル



図 3.4.¹³⁴Csの GREI 画像

図 3.5.¹³⁷Cs の GREI 画像

飯舘村での撮像実験の結果

図 3.6 及び図 3.7 は、飯舘村で撮像したデータに本研究の画像再構成アルゴリズムを適用し、魚 眼カメラの画像に重ね合わせた結果である。これらの画像は、県中浄化センターでの撮像結果で示 した中央部重点化の処理を適用済みの画像である。そのため、GREIの撮像視野は、魚眼カメラの画 像の中央部に限られている。図 3.6 を見ると、斜面のラインと道路の縁に沿って GREI の画像が分布 していることが分かる。また図 3.7 では、道路の縁に沿った分布が見られた。



図 3.6. 飯舘村での撮像結果1

図 3.7. 飯舘村での撮像結果2

福島大学構内での撮像結果

図 3.8 及び図 3.9 は、福島大学構内で撮像したデータに本研究で開発した画像再構成アルゴリズ ムを適用し、魚眼カメラの画像に重ね合わせた結果である。これらの画像も、県中浄化センターで の撮像結果で示した中央部重点化の処理を適用済みの画像である。図 3.8 を見ると、汚染した土を 置いた位置と GREI の画像の強度が高い位置が一致していることが分かる。また、土を取り除いた画 像では、GREI の画像でも強度が消失していることが分かる。背景の表面における空間線量率が 1 μ Sv/h であるとき、1.7 μ Sv/h の空間線量率の領域が存在すれば、その違いを GREI で画像として表示 できることが分かった。



図 3.8. 福島大学での撮像結果(汚染土あり) 図 3.9. 福島大学での撮像結果(汚染土なし)

本研究項目では、これまで医学・生物学研究用のガンマ線撮像装置として屋内で使用していた GREI を、屋外に持ち出して撮像実験を行うという初めての試みであったが、撮像システムとしては商用 電源を用いた場合と遜色の無い性能が得られ、今後の屋外撮像用 GREI の実用化の可能性に対して大 きな自信となった。ただし、雨天の中で撮像実験を行った際に装置が濡れてしまい、それが原因と 考えられる不具合が後々まで続いたため、今後は雨天時の対策をより万全に行うこととした。 屋外での撮像実験に関しては、やはり当初より現在のGREIの撮像ヘッドの課題として想定していたことが如実に撮像結果に表れた。ただし、本研究で開発した中央部重点化の処理を施すことで現在のGREIによる遠方撮像での画質を改善することに成功し、遠方に存在するガンマ線源も正しく画像化できることが示された。

3.2 遠方撮像用画像再構成法の開発

この研究項目で開発した画像再構成法を撮像データに適用した結果は、屋外撮像実験の結果で示 した通りである。魚眼カメラ画像への重ね合わせについては、レーザーマーカーの十字点を魚眼カ メラの視野中心から 10° ずつ回転させながら撮影した結果、一定の角度の回転に対してほぼ一定の 距離だけ変位していることが分かり、使用した魚眼カメラは等距離射影で近似できることが判明し た。そこで、魚眼カメラ画像へ等距離射影で重ね合わせを行うソフトウェアを実装した。

3.3 GREI 撮像ヘッドの遠方撮像最適化設計

放射線検出器のモンテカルロシミュレーションを行うことが可能なツールキットであるGeant4を 用い、検出器中心間の距離を6 cm、4 cm、および2.5 cmに設定した GREI 撮像ヘッドの、¹³⁷Cs に対 する検出感度を求めた結果を図 3.10 に示す。このモンテカルロシミュレーションの結果、検出器間 の距離を6 cm から4 cm に近づけると感度が2倍向上し、2.5 cm まで近づけると感度が5倍向上す ることが示された。また、それぞれの検出器間の距離のとき、ガンマ線源の距離を、5 cm、30 cm、 1 m、および5 m と変化させ、さらに、検出器の中心から見たガンマ線源の存在する方向を0°、15°、 30°、45°、及び60°と変化させたとき、¹³⁷Cs の点線源を撮像した結果の画像を図 3.11 から図 3.13 に示す。検出器間の距離を近づけるほど、視野周辺の画像がつくるリング状のアーチファクトが軽 減し、より広い視野角のイメージングが可能になることが示された。つまり、検出器間の距離を 2.5 cm まで近づけることにより、当初の目標として設定していた5倍程度の感度の向上が実現できるだ けでなく、遠方撮像における画質も向上し、遠方の放射性物質に対する撮像感度をさらに向上させ ることが可能であることが判明した。



図 3.10. 放射線検出器のモンテカルロシミュレーション用ツールキット Geant4 を用いて求めた、検 出器中心間の距離を 6 cm、4 cm、および 2.5 cm に設定した GREI 撮像ヘッドの、¹³⁷Cs に対する検出 感度の相対値。2.5 cm まで近づけると、感度が 5 倍向上することが示された。

検出器中心から見た線源位置の角度 0° 15° 30° 45° 60° 5 cm 30 cm θ Ð, 検出器中心からの距離 θ_{x} θ_x θ× θ_x θ_{x} 1 m θ *ө*, θ, *ө*, θ, *ө*, 5 m θ ð Ð θ, θ θ θ θ×

図 3.11. 放射線検出器のモンテカルロシミュレーション用ツールキット Geant4 を用いて求めた、検 出器中心間の距離を 6 cm に設定した GREI 撮像ヘッドで、ガンマ線源の距離を、5 cm、30 cm、1 m、 および 5 m と変化させ、さらに、検出器の中心から見たガンマ線源の存在する方向を 0°、15°、30°、 45°、及び 60°と変化させたときの、¹³⁷Cs の点線源を撮像したデータから作成した単純逆投影画像 (画像再構成適用前の中間画像)。

検出器中心から見た線源位置の角度



図 3.12. 放射線検出器のモンテカルロシミュレーション用ツールキット Geant4 を用いて求めた、検 出器中心間の距離を 4 cm に設定した GREI 撮像ヘッドで、ガンマ線源の距離を、5 cm、30 cm、1 m、 および 5 m と変化させ、さらに、検出器の中心から見たガンマ線源の存在する方向を 0°、15°、30°、 45°、及び 60°と変化させたときの、¹³⁷Cs の点線源を撮像したデータから作成した単純逆投影画像 (画像再構成適用前の中間画像)。

検出器中心から見た線源位置の角度



図 3.13. 放射線検出器のモンテカルロシミュレーション用ツールキット Geant4 を用いて求めた、検 出器中心間の距離を 4 cm に設定した GREI 撮像ヘッドで、ガンマ線源の距離を、5 cm、30 cm、1 m、 および 5 m と変化させ、さらに、検出器の中心から見たガンマ線源の存在する方向を 0°、15°、30°、 45°、及び 60°と変化させたときの、¹³⁷Cs の点線源を撮像したデータから作成した単純逆投影画像 (画像再構成適用前の中間画像)。

3.4 既有の GREI によるガンマ線源の短時間撮像

図 3.14 に、この実験で得られた撮像データを用いて画像再構成を行った結果を示す。同図に見られ る通り、5 µ Sv/h の空間線量率を与える¹³⁷Cs ガンマ線源を、10 秒間の撮像で、7°の半値幅で画像 化することが出来た。



図 3.14. 5 µ Sv/h の空間線量率を与える¹³⁷Cs ガンマ線源を、最適化前の GREI の前方 12 cm の位置に 置き、10 秒間撮像して作成した画像。画像の広がりは半値幅で 7° であった。

3.5 低エネルギーガンマ線に対する撮像性能の向上

図 3.15 及び図 3.16 は、それぞれ Ge 検出器のみ、及び Si 検出器+Ge 検出器のデータから画像再構成を行った結果である。Ge 検出器のみのデータからは ⁵⁷Co の 122keV という低エネルギーガンマ線の画像を得ることができなかったが、Si 検出器を装着した GREI では ⁵⁷Co を含め全てのガンマ線源の画像化が出来た。



図 3.15. Ge のみのデータを用いた結果



図 3.16. Si+Ge のデータを用いた結果

この撮像実験により、本研究代表者らが特許を保有している GREI の技術を実証することができた。

3.6 GREI 信号処理システムの小型化

図 3.17 に、本研究で構築した屋外撮像用 GREI システムを示す。幅 60cm×奥行 80cm×高さ 80cm 以内のスペースで完全に動作する GREI システムの構築に成功した。従来は、幅 60cm×奥行 80cm× 高さ 180cm の回路ラック 2 台分のスペースを占有していたため、本研究で従来の 4 分の 1 以下の小 型化が達成された。



図 3.17. 本研究で構築した屋外撮像用 GREI システム

3.7 GREI 撮像ヘッドを用いた放射性物質モニタリング技術の開発

図 3.18 及び図 3.19 は、それぞれ 1.0 MBq の¹³⁷Cs ガンマ線源を GREI の撮像ヘッドの側面から X 方向に 12cm 離れた位置にガンマ線源を配置した場合、及び GREI の撮像ヘッドの側面から Y 方向に 12cm 離れた位置にガンマ線源を配置した場合の、GREI の検出器にガンマ線が当たった位置を示している。 ガンマ線源が X 方向にある場合には検出器の X 方向にガンマ線が当たった位置が偏り、また、ガン マ線源が Y 方向にある場合には検出器の Y 方向にガンマ線が当たった位置が偏っていることが分か る。



図 3.18. 線源が X 方向(右)にある場合の異方性

図 3.19. 線源が Y 方向(上)にある場合の異方性

本研究では10秒間の測定を行ったが、図3.18及び図3.19を見ると十分な統計変動が得られている ため、より短時間でもガンマ線源が当たった位置の異方性を観察すことが可能であると考えられる。 今後の研究でさらに詳しい検討を継続し、本提案手法の有用性を明らかにしたいと考えている。

3.8 遠方撮像に最適化した GREI 撮像ヘッドの作製

まず、既有の GREI 撮像ヘッドに搭載されている 2 台の Ge 半導体検出器間の距離をどこまで近づけることが可能かを確認したところ、2 つの検出器間の空間が 12 mm 以上必要であることが判明した。そこで、実際に作製する GREI 撮像ヘッドの検出器間の距離として 30 mm を候補とした。このとき、前段検出器の厚さが 10 mm、後段検出器の厚さが 20 mm であるので、2 検出器間の間隙の距離は 15 mm である。

モンテカルロシミュレーションの手法を用いて、検出器間距離を 35 mm および 30 mm としたとき の GREI 撮像ヘッドの性能を評価した。ソフトウェア上に GREI 撮像ヘッドとその前方に配置した¹³⁷Cs の点状のガンマ線源をモデル化し、ガンマ線源の距離を 5 cm、30 cm、1 m、および 5 m と変化させ、 それぞれの距離において検出器の中心から見たガンマ線源の存在する方向を 0°、15°、30°、45°、 および 60°と変化させた時に得られる GREI 撮像の結果を見積もった。図 3.20 と図 3.21 にこのモン テカルロシミュレーションで得られた撮像データを用いて生成した単純逆投影画像を示している。 検出器間距離を 30 mm とした場合、近距離から遠距離まで、円弧状のアーチファクトが十分に抑制 された画像が得られていることが分かる。また、図 3.22 には、平成 24 年度に行ったモンテカルロ シミュレーションの結果を組み込み、既有の GREI の検出効率を基準とした相対的な検出効率を示し いている。検出器間距離を 30 mm としたとき、検出効率が4倍になることが分かる。つまり、遠方 に存在するガンマ線源に対しても撮像データに制限を加えることなく画像化が可能であるので、画 像化に利用可能なデータの量が3倍になり、さらに、検出効率が4倍になるので、遠方撮像に対す る撮像感度は12倍に向上することが見込まれた。これは申請当初に設定した目標値を大幅に上回る 数値であり、遠方撮像に最適化した GREI 撮像ヘッドの仕様として採用した。



図 3.20. 放射線検出器のモンテカルロシミュレーション用ツールキット Geant4 を用いて求めた、検 出器中心間の距離を 35 mm に設定した GREI 撮像ヘッドで、ガンマ線源の距離を、5 cm、30 cm、1 m、 および 5 m と変化させ、さらに、検出器の中心から見たガンマ線源の存在する方向を 0°、15°、30°、 45°、及び 60°と変化させたときの、¹³⁷Cs の点線源を撮像したデータから作成した単純逆投影画像 (画像再構成適用前の中間画像)。



図 3.21. 放射線検出器のモンテカルロシミュレーション用ツールキット Geant4 を用いて求めた、検 出器中心間の距離を 30 mm に設定した GREI 撮像ヘッドで、ガンマ線源の距離を、5 cm、30 cm、1 m、 および 5 m と変化させ、さらに、検出器の中心から見たガンマ線源の存在する方向を 0°、15°、30°、 45°、及び 60°と変化させたときの、¹³⁷Cs の点線源を撮像したデータから作成した単純逆投影画像 (画像再構成適用前の中間画像)。



図 3.22. 放射線検出器のモンテカルロシミュレーション用ツールキット Geant4を用いて求めた、検 出器中心間の距離を 6 cm、4 cm、3.5 cm、3 cm および 2.5 cm に設定した GREI 撮像ヘッドの、¹³⁷Cs に対する検出感度の相対値。3 cm まで近づけると、検出感度が 4 倍向上することが示された。

そこで、搭載されている検出器間の距離を 30 mm として遠方撮像に最適化した GREI 撮像ヘッドを 作製した(図 3.23)。この GREI 撮像ヘッドに搭載されている前段の検出器が後段検出器に近付けら れたため、外容器の長さも 140 mm から 110 mm に短縮された。表 3.1 及び表 3.2 は、この撮像ヘッ ドに搭載された検出器のすべての出力のエネルギー分解能を測定した結果である。エネルギー分解 能の劣化等の異常は特に観測されず、Ge 半導体検出器としての優れた性能が保たれていることが分 かる。

| 表 3.1. 屋 | 外撮像用に最適化した | GREI 撮像ヘッ | ドに搭載された前段のG | e 半導体検出器のすべ | ての出 |
|----------|------------|-----------|-------------|-------------|-----|
| 力のエネル | ギー分解能を測定した | こ結果。 | | | |

| | ストリップ | エネルギー分解能(FWHM) | エネルギー分解(FWHM) | |
|--------|-------|----------------|----------------|--|
| | 電極番号 | @60keV [keV] | @1332keV [keV] | |
| | 1 | 1.28 (2.1%) | 2.34 (0.18%) | |
| | 2 | 1.26 (2.1%) | 2.32 (0.17%) | |
| | 3 | 1.25 (2.1%) | 2.16 (0.16%) | |
| | 4 | 1.28 (2.1%) | 2.18 (0.16%) | |
| | 5 | 1.32 (2.2%) | 2.42 (0.18%) | |
| | 6 | 1.25 (2.1%) | 2.20 (0.17%) | |
| Xストリップ | 7 | 1.26 (2.1%) | 2.10 (0.16%) | |
| | 8 | 1.25 (2.1%) | 2.16 (0.16%) | |
| | 9 | 1.27 (2.1%) | 2.20 (0.17%) | |
| | 10 | 1.31 (2.2%) | 2.28 (0.17%) | |
| | 11 | 1.29 (2.2%) | 2.29 (0.17%) | |
| | 12 | 1.32 (2.2%) | 2.17 (0.16%) | |
| | 13 | 1.33 (2.2%) | 2.52 (0.19%) | |
| | 14 | 1.50 (2.5%) | 2.72 (0.20%) | |
| | 15 | 1.52 (2.5%) | 3.03 (0.23%) | |
| | 16 | 1.53 (2.6%) | 3.06 (0.23%) | |
| | 17 | 1.46 (2.4%) | 3.46 (0.26%) | |
| | 18 | 1.49 (2.5%) | 3.32 (0.25%) | |
| | 19 | 1.49 (2.5%) | 3.73 (0.28%) | |
| Yストリップ | 20 | 1.52 (2.5%) | 3.85 (0.29%) | |
| | 21 | 1.48 (2.5%) | 3.05 (0.23%) | |
| | 22 | 1.51 (2.5%) | 3.37 (0.25%) | |
| | 23 | 1.49 (2.5%) | 3.09 (0.23%) | |
| | 24 | 1.49 (2.5%) | 2.69 (0.20%) | |
| | 25 | 1.50 (2.5%) | 2.62 (0.20%) | |
| | 26 | 1.48 (2.5%) | 2.78 (0.21%) | |

表 3.2. 屋外撮像用に最適化した GREI 撮像ヘッドに搭載された後段の Ge 半導体検出器のすべての出 力のエネルギー分解能を測定した結果。

| | ストリップ | エネルギー分解能(FWHM) | エネルギー分解(FWHM) | |
|--------|-------|----------------|----------------|--|
| | 電極番号 | @60keV [keV] | @1332keV [keV] | |
| | 1 | 1.28 (2.1%) | 1.92 (0.14%) | |
| | 2 | 1.27 (2.1%) | 2.03 (0.15%) | |
| | 3 | 1.25 (2.1%) | 2.06 (0.15%) | |
| | 4 | 1.37 (2.3%) | 2.10 (0.16%) | |
| | 5 | 1.78 (3.0%) | 2.54 (0.19%) | |
| | 6 | 1.30 (2.2%) | 2.10 (0.16%) | |
| Xストリップ | 7 | 1.24 (2.1%) | 1.97 (0.15%) | |
| | 8 | 1.25 (2.1%) | 2.13 (0.16%) | |
| | 9 | 1.29 (2.2%) | 1.90 (0.14%) | |
| | 10 | 1.29 (2.2%) | 2.05 (0.15%) | |
| | 11 | 1.30 (2.2%) | 2.12 (0.16%) | |
| | 12 | 1.27 (2.1%) | 1.75 (0.13%) | |
| | 13 | 1.23 (2.1%) | 2.08 (0.16%) | |
| | 14 | 1.44 (2.4%) | 3.09 (0.23%) | |
| | 15 | 1.56 (2.6%) | 2.98 (0.22%) | |
| | 16 | 1.49 (2.5%) | 3.17 (0.24%) | |
| | 17 | 1.54 (2.6%) | 2.91 (0.22%) | |
| | 18 | 1.55 (2.6%) | 3.76 (0.28%) | |
| | 19 | 1.52 (2.5%) | 3.67 (0.28%) | |
| Yストリップ | 20 | 1.54 (2.6%) | 3.29 (0.25%) | |
| | 21 | 1.57 (2.6%) | 3.79 (0.28%) | |
| | 22 | 1.59 (2.7%) | 3.70 (0.28%) | |
| | 23 | 1.56 (2.6%) | 3.47 (0.26%) | |
| | 24 | 1.59 (2.7%) | 3.23 (0.24%) | |
| | 25 | 1.49 (2.5%) | 3.39 (0.25%) | |
| | 26 | 1.48 (2.5%) | 2.98 (0.22%) | |



図 3.23. 搭載されている検出器間の距離を 30 mm として遠方撮像に最適化した GREI 撮像ヘッド を用いて新たに構築した撮像システム。

3.9 遠方撮像に最適化した GREI 撮像システムの構築と実証実験

前節で示した遠方撮像用に最適化した GREI 撮像ヘッドと、平成 24 年度に従来の 1/4 以下に小型 化した GREI 信号処理システムを接続して構築した GREI 撮像システムを用いて行った、種々の撮像 実験の結果を示す。まず、GREI の撮像ヘッドの中心軸上で 12cm 離れた位置に、1.0 MBq の ¹³⁷Cs 溶 液を封入した試験管を配置し、10 秒間の撮像を行った結果を図 3.24 および図 3.25 に示す。まず、 撮像で得られた画像生成に利用可能な検出事象の計数は 105 で、これは最適化前の 25 と比べて 4 倍になった。このことは、近距離の撮像において検出感度が 4 倍になったことを示しており、モン テカルロシミュレーションの手法を用いた見積り通りの数値が得られた。また、得られた画像の角 度分解能も改善しており、5µSv/h の空間線量率を与える ¹³⁷Cs の線源を 10 秒間撮像して約 6°の半 値幅で画像化することに成功した。



図 3.24. GREI の撮像ヘッドの中心軸上で 12cm 離れた位置に、1.0 MBq の¹³⁷Cs 溶液を封入した試験 管を配置し、10 秒間の撮像を行って得られたガンマ線のエネルギースペクトル。エネルギー662 keV のガンマ線が鋭いピークとして測定されている。



図 3.25. GREI の撮像ヘッドの中心軸上で 12cm 離れた位置に、1.0 MBq の¹³⁷Cs 溶液を封入した試験 管を配置し、10 秒間の撮像を行って得られたデータから作成した画像。画像の広がりの半値幅が 6° であることが分かる。

次に、GREIの前段の検出器の中心を起点とし、距離 1.7 m で視野の中心から 28°の位置に、5.0MBqの¹³⁷Cs 溶液を封入した試験管を配置して 90 分間撮像した結果を図 3.26 及び図 3.27 に示す。最適 化前の GREI 撮像システムで取得した画像中に見られた円弧状のアーチファクトは見られず、GREI 撮像ヘッドの最適化によって撮像データに制限を加えることなく画像化が可能なったことが示された。また、GREIの撮像データにはタイムスタンプの情報を含んでいるため、撮像後に任意の時区間 で撮像した画像を生成して評価することが可能である。図 3.28 及び図 3.29 に示す通り、0.28 µ Sv/h の空間線量を与える¹³⁷Cs を 10 分間測定するだけでその位置を画像化することが可能であることが 分かった。



図 3.26. GREI の前段の検出器の中心を起点とし、距離 1.7 m で視野の中心から 28°の位置に、5.0MBqの¹³⁷Cs 溶液を封入した試験管を配置し、90分間撮像して得られたガンマ線のエネルギースペクトル。 ネルギー662 keV のガンマ線が鋭いピークとして測定されている。



図 3.27. GREI の前段の検出器の中心を起点とし、距離 1.7mで視野の中心から 28°の位置に、5.0MBqの¹³⁷Cs 溶液を封入した試験管を配置し、90分間撮像して得られたデータから作成した画像。線源の 位置を正しく画像化できていることが分かる。(線源位置・強度は図 2.9参照)



図 3.28. GREI の前段の検出器の中心を起点とし、距離 1.7 m で視野の中心から 28°の位置に、5.0MBq の¹³⁷Cs 溶液を封入した試験管を配置し、90分間撮像して得られたデータのうち、10分間のデータを 用いて作成したガンマ線のエネルギースペクトル。エネルギー662 keV のガンマ線が鋭いピークとし て測定されている。



図 3.29. GREI の前段の検出器の中心を起点とし、距離 1.7 m で視野の中心から 28°の位置に、5.0MBq の¹³⁷Cs 溶液を封入した試験管を配置し、90分間撮像して得られたデータのうち、10分間のデータを 用いて作成した画像。線源の位置を正しく画像化できていることが分かる。(線源位置・強度は図 2.9 参照)

異なる位置に配置した複数の¹³⁷Csの線源を同時に撮像した結果を次に示す。まず、2.0 MBqの¹³⁷Cs 溶液を封入した試験管を距離1m、視野中心から0°および30°の位置に配置し、10分間の撮像を 行った結果を図3.30および図3.31に示した。2つの¹³⁷Csの線源を正しい位置に画像化することに 成功し、線源の分布画像を取得するための基本的な性能を有していることが示された。



図 3.30. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0° および 30° の位置に配置した 2.0MBq の ¹³⁷Cs 溶液を封入した線源を 10 分間撮像して得られたガンマ線のエネルギースペクトル。エネルギ -662 keV のガンマ線が鋭いピークとして測定されている。



図 3.31. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0° および 30° の位置に配置した 2.0MBq の¹³⁷Cs 溶液を封入した線源を 10 分間撮像して得られたデータから作成した画像。線源の分布を正し く画像化できていることが分かる。(線源位置・強度は図 2.10 参照)

図 3.32 及び図 3.33 は、2.0 MBq の¹³⁷Cs 溶液を封入した試験管を距離1m、視野中心から0°および15°の位置に配置し、10 分間の撮像を行った結果であり、また、図 3.34 および図 3.35 は 2.0 MBq の¹³⁷Cs 溶液を封入した試験管を距離1m、視野中心から0°および10°の位置に配置し、10 分間の撮像を行った結果である。どちらの撮像結果も、2 つの¹³⁷Cs の線源の位置を明確に分解して画像化することに成功しており、10 分間の撮像で10°の角度分解能が得られることを実証した。



図 3.32. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0° および 15° の位置に配置した 2.0MBq の ¹³⁷Cs 溶液を封入した線源を 10 分間撮像して得られたガンマ線のエネルギースペクトル。エネルギ -662 keV のガンマ線が鋭いピークとして測定されている。



図 3.33. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0° および 15° の位置に配置した 2.0MBq の ¹³⁷Cs 溶液を封入した線源を 10 分間撮像して得られたデータから作成した画像。線源の分布を正し く画像化できていることが分かる。(線源位置・強度は図 2.11 参照)



図 3.34. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0° および 10° の位置に配置した 2.0MBq の ¹³⁷Cs 溶液を封入した線源を 10 分間撮像して得られたガンマ線のエネルギースペクトル。エネルギ -662 keV のガンマ線が鋭いピークとして測定されている。



図 3.35. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0° および 10° の位置に配置した 2.0MBq の¹³⁷Cs 溶液を封入した線源を 10 分間撮像して得られたデータから作成した画像。2 つの線源の位置 が分解され、分布を正しく画像化できていることが分かる。(線源位置・強度は図 2.12 参照)

図 3.36 および図 3.37 は、¹³⁷Cs の線源をさらに分散させ、1.0 MBq の ¹³⁷Cs 溶液を封入した試験管 を距離 1 m、視野中心から 0°、30° および 60°の位置に配置し、90 分間の撮像を行った結果であ る。3 つの ¹³⁷Cs の線源がある条件でも正しい位置にそれらの線源を画像化することに成功し、線源 の分布画像を取得するための基本的な性能を有していることを再確認した。ただし、60°の位置で は約 50%の感度の低下が見られた。また、上述の通り、90 分間の撮像データから任意の時区分の 10 分間の撮像結果を生成することが可能であり、その結果を図 3.38 および図 3.39 に示した。撮像時 間が 10 分でも正しく画像化できていることが示されたが、やはり 60°の位置では感度の低下が見ら れ、背景のノイズ成分との識別が困難な様子が見られた。この問題の解決策としては、本研究課題 でも並行して開発を行った LM-ML-EM 法等のノイズに強い画像再構成法を適用し、適切な感度補正を 適用することが考えられる。



図 3.36. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0°、30°および 60°の位置に配置した 1.0MBq の¹³⁷Cs 溶液を封入した線源を 90 分間撮像して得られたガンマ線のエネルギースペクトル。 エネルギー662 keV のガンマ線が鋭いピークとして測定されている。



図 3.37. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0°、30° および 60°の位置に配置した 1.0MBq の ¹³⁷Cs 溶液を封入した線源を 90 分間撮像して得られたデータから作成した画像。3 つの ¹³⁷Cs 線源の分布を正しく画像化できていることが示され、120°以上の撮像視野を有することが分かった。 (線源位置・強度は図 2.13 参照)


図 3.38. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0°、30°および 60°の位置に配置した 1.0MBq の ¹³⁷Cs 溶液を封入した線源を 90 分間撮像して得られたデータのうち、10 分間のデータを用 いて作成したガンマ線のエネルギースペクトル。エネルギー662 keV のガンマ線が鋭いピークとして 測定されている。



図 3.39. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0°、30°および 60°の位置に配置した 1.0MBq の ¹³⁷Cs 溶液を封入した線源を 90 分間撮像して得られたデータのうち、10 分間のデータを用 いて作成した画像。3 つの ¹³⁷Cs 線源の分布を正しく画像化できていることが示されたが、60°の位 置については背景ノイズ成分との識別が困難であった。(線源位置・強度は図 2.13 参照)

GREIの顕著な特徴の1つは、複数の核種が同時に存在する場合でも、それらの核種を識別して同時に画像化分析できるということである。図3.40、図3.41および図3.42は、1.0 MBqの¹³⁷Cs 溶液を封入した試験管を距離1m、視野中心から0°、30°および60°の位置に配置、同時に2.8MBqの¹³¹I 溶液を距離1m、視野中心から30°の位置に配置し、60分間の撮像を行った結果であり、図3.43、図3.44、図3.45、および図3.46は、2.0 MBqの¹³⁷Cs 溶液を封入した試験管を距離1m、視野中心から 0°および30°の位置に配置、同時に2.8MBqの¹³¹I 溶液を距離1m、視野中心から 30°の位置に配置、同時に2.8MBqの¹³¹I 溶液を距離1m、視野中心から 30°の位置に配置、こ45 に配置、さらに同時に2.2MBqおよび1.0MBqの⁸⁵Sr 溶液をそれぞれ 0°および30°の位置に配置し、150分間の撮像を行った結果である。 どちらの撮像実験の結果も、同時に存在する複数の核種を識別して正しい位置に画像化できたことを示している。また、図3.47、図3.48、図3.49および図3.50 は 10 分間の撮像結果を示しており、どちらも正しく画像化することに成功しており、GREI の優れた複数核種同時イメージング性能を遠方に存在する線源にも適用することに成功した。



図 3.40. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0°、30° および 60°の位置に 1.0MBq の ¹³⁷Cs 溶液を封入した線源を配置し、同時に距離 1.0 m 角度 30°の位置に 2.8MBq の ¹³¹I 溶液を封入し た線源を配置し、60 分間の撮像を行って得られたガンマ線のエネルギースペクトル。662 keV の ¹³⁷Cs のガンマ線と 364keV のガンマ線が鋭いピークとして測定されている。



図 3.41. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0°、30° および 60°の位置に 1.0MBqの ¹³⁷Cs 溶液を封入した線源を配置し、同時に距離 1.0 m 角度 30°の位置に 2.8MBqの¹³¹I 溶液を封入し た線源を配置し、60分間の撮像を行って得られたデータを用いて作成した¹³⁷Csの分布画像。3 つの ¹³⁷Cs 線源の分布を正しく画像化できていることが分かる。(線源位置・強度は図 2.14 参照)



図 3.42. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0°、30° および 60° の位置に 1.0MBq の ¹³⁷Cs 溶液を封入した線源を配置し、同時に距離 1.0 m 角度 30° の位置に 2.8MBq の ¹³¹I 溶液を封入し た線源を配置し、60分間の撮像を行って得られたデータを用いて作成した ¹³¹I の分布画像。3 つの ¹³⁷Cs 線源と同時に撮像した ¹³¹I の位置を正しく画像化できていることが分かる。(線源位置・強度は図 2.14 参照)



図 3.43. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0° および 30° の位置に 2.0MBq の¹³⁷Cs 溶液を封入した線源を配置し、同時に距離 1.0 m 角度 30° の位置に 2.8MBq の¹³¹I 溶液を封入した線 源を配置し、さらに同時に、距離 1.0 m 角度 0° および 30° の位置に、それぞれ 2.2MBq および 1.0MBq の⁸⁵Sr 溶液を注入した線源を配置して、150 分間の撮像を行ってえられたガンマ線のエネルギースペ クトル。662 keV の¹³⁷Cs のガンマ線と 364keV の¹³¹I のガンマ線、および 514keV の⁸⁵Sr のガンマ線 が鋭いピークとして測定されている。



図 3.44. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0° および 30° の位置に 2.0MBq の¹³⁷Cs 溶液を封入した線源を配置し、同時に距離 1.0 m 角度 30° の位置に 2.8MBq の¹³¹I 溶液を封入した線 源を配置し、さらに同時に、距離 1.0 m 角度 0° および 30° の位置に、それぞれ 2.2MBq および 1.0MBq の⁸⁵Sr 溶液を注入した線源を配置して、150 分間の撮像を行って得られたデータから作成した、¹³⁷Cs の分布画像。¹³⁷Cs 線源の分布を正しく画像化できていることが分かる。(線源位置・強度は図 2.15 参照)



図 3.45. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0° および 30° の位置に 2.0MBq の¹³⁷Cs 溶液を封入した線源を配置し、同時に距離 1.0 m 角度 30° の位置に 2.8MBq の¹³¹I 溶液を封入した線 源を配置し、さらに同時に、距離 1.0 m 角度 0° および 30° の位置に、それぞれ 2.2MBq および 1.0MBq の⁸⁵Sr 溶液を注入した線源を配置して、150 分間の撮像を行って得られたデータから作成した、¹³¹I の画像。他の線源と同時に撮像した¹³¹I の位置を正しく画像化できていることが分かる。(線源位置・ 強度は図 2.15 参照)



図 3.46. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0°および 30°の位置に 2.0MBq の¹³⁷Cs 溶液を封入した線源を配置し、同時に距離 1.0 m 角度 30°の位置に 2.8MBq の¹³¹I 溶液を封入した線 源を配置し、さらに同時に、距離 1.0 m 角度 0°および 30°の位置に、それぞれ 2.2MBq および 1.0MBq の⁸⁵Sr 溶液を注入した線源を配置して、150分間の撮像を行って得られたデータから作成した、⁸⁵Sr の 分布画像。⁸⁵Sr 線源の分布を正しく画像化できていることが分かる。(線源位置・強度は図 2.15 参照)



図 3.47. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0° および 30° の位置に 2.0MBq の¹³⁷Cs 溶液を封入した線源を配置し、同時に距離 1.0 m 角度 30° の位置に 2.8MBq の¹³¹I 溶液を封入した線 源を配置し、さらに同時に、距離 1.0 m 角度 0° および 30° の位置に、それぞれ 2.2MBq および 1.0MBq の⁸⁵Sr 溶液を注入した線源を配置して、150 分間の撮像を行って得られたデータのうち、10 分間のデ ータを用いて作成したガンマ線のエネルギースペクトル。662 keV の¹³⁷Cs のガンマ線と 364keV の¹³¹I のガンマ線、および 514keV の⁸⁵Sr のガンマ線が鋭いピークとして測定されている。



図 3.48. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0° および 30° の位置に 2.0MBq の ¹³⁷Cs 溶液を封入した線源を配置し、同時に距離 1.0 m 角度 30° の位置に 2.8MBq の ¹³¹I 溶液を封入した線 源を配置し、さらに同時に、距離 1.0 m 角度 0° および 30° の位置に、それぞれ 2.2MBq および 1.0MBq の ⁸⁵Sr 溶液を注入した線源を配置して、150 分間の撮像を行って得られたデータのうち、10 分間のデ ータを用いて作成した、¹³⁷Cs の分布画像。¹³⁷Cs 線源の分布を正しく画像化できていることが分かる。 (線源位置・強度は図 2.15 参照)



図 3.49. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0° および 30° の位置に 2.0MBq の¹³⁷Cs 溶液を封入した線源を配置し、同時に距離 1.0 m 角度 30° の位置に 2.8MBq の¹³¹I 溶液を封入した線 源を配置し、さらに同時に、距離 1.0 m 角度 0° および 30° の位置に、それぞれ 2.2MBq および 1.0MBq の⁸⁵Sr 溶液を注入した線源を配置して、150 分間の撮像を行って得られたデータのうち、10 分間のデ ータを用いて作成した、¹³¹I の画像。他の線源と同時に撮像した¹³¹I の位置を正しく画像化できてい ることが分かる。(線源位置・強度は図 2.15 参照)



図 3.50. GREI の前段の検出器の中心から距離 1.0 m、角度 0° および 30° の位置に 2.0MBq の ¹³⁷Cs 溶液を封入した線源を配置し、同時に距離 1.0 m 角度 30° の位置に 2.8MBq の ¹³¹I 溶液を封入した線 源を配置し、さらに同時に、距離 1.0 m 角度 0° および 30° の位置に、それぞれ 2.2MBq および 1.0MBq の ⁸⁵Sr 溶液を注入した線源を配置して、150 分間の撮像を行って得られたデータのうち、10 分間のデ ータを用いて作成した、⁸⁵Sr の分布画像。⁸⁵Sr 線源の分布を正しく画像化できていることが分かる。 (線源位置・強度は図 2.15 参照)

3.10 遠方撮像用画像再構成法の高度化開発

GREIによる放射線検出に関わる物理現象を詳細に検討し、遠方撮像用に高度化した画像再構成法 を、モンテカルロシミュレーションにより生成したデータおよび GREI を用いた撮像実験で取得した データに適用した結果を示す。図 3.51 は、モンテカルロシミュレーションのソフトウェア上で GREI 撮像ヘッドとその5 m 前方に配置した¹³⁷Cs の点状の線源をモデル化し、線源を GREI 撮像視野の中 央から0°、15°、30°、45°および60°の位置に配置して生成したデータに LM-ML-EM 法に基づい た画像再構成法を適用した結果である。図 3.51 の左図は、ガンマ線のコンプトン散乱角に応じて変 化するシステム応答関数の詳細な情報を反映せずに再構成した画像である。図 3.51 の右図のシステ ム応答関数の変化を組み込んで再構成した画像に比べて、線源位置の周辺にアーチファクトが目立 つ結果となっており、詳細な物理現象を考慮した画像再構成法により画質が向上することが示され た。



図 3.51. GREI による放射線検出に関わる物理現象を詳細に検討し、遠方撮像用に高度化した画像再構成法を、モンテカルロシミュレーションにより生成したデータに適用した結果。

図 3.52 は、福島県県中浄化センターで行った指定廃棄物の撮像データから選別した¹³⁷Cs の 662 keV のガンマ線のデータに画像再構成法を適用した結果である。モンテカルロシミュレーションで生 成したデータに適用した結果と同様に、図 3.52 の左図のガンマ線のコンプトン散乱角に応じて変化 するシステム応答関数の詳細な情報を反映せずに再構成した画像では、画像中に円弧状のアーチフ ァクトが顕著に出現する結果となった。それに対し、図 3.52 の右図のシステム応答関数の変化を組 み込んで再構成した画像では、円弧状のアーチファクトが消え、画質を著しく向上させることに成 功した。



図 3.52. GREI による放射線検出に関わる物理現象を詳細に検討し、遠方撮像用に高度化した画像再構成法を、GREI 装置を用いた撮像実験で取得したデータに適用した結果。

3.11 デジタル信号処理技術による GREI システムの小型化技術開発

(1) サイズと消費電力



図 3.53.(左)新規モジュールの構成、(右)新規信号処理システムの構成、左から2枚目、3枚目が新規 モジュール、4枚目以降は従来のモジュール、およびクロックモジュール(左端)、コインシデンスモジ ュール(右端)

図 3.53 に本研究で新規に開発した GREI 専用デジタル信号処理モジュールを示した。モジュール は、ゲルマニウム半導体検出器の前置増幅器からの信号を直接入力して使用する。入力コネクター の直後には、ADC のダイナミックレンジとのマッチングを取るためのアナログ微分増幅器(アナログ 処理部)がある。入力された信号は、アナログ処理部を通過した後、100MHz サンプリングレートの ADC によりデジタルデータに変換され、演算用 FPGA に送られる。FPGA により、ガンマ線のエネルギ ーと検出時刻、ヒットチャンネルの判定、誘起信号も含めた波形解析の演算が行われ、演算結果は データ転送用 CPU ボードのデータ・バッファーに送られる。データ・バッファーに集められたイベ ントデータは、CPU のコントロールにより、イーサネットを介して、PC に転送され記録される。本 研究で開発した、新しい GREI 用デジタル信号処理システムでは、1 モジュールで 13 チャンネル分の 信号を処理することが可能であり、4 モジュールで GREI 1 台分すべての信号を処理することができ る (旧システムでは 12 モジュール)。これにより、信号処理システムを縦×横×奥行が、31×15× 40 cm 程のサイズに収めることができ、旧システムの 31×30×40 cm と比較しておおよそ半分の大き さにコンパクト化することに成功した。また、モジュール数が減ったことに伴い、消費電力も従来 の 60% 程度に省電力化することに成功した。

(2) 電荷信号と誘起信号の識別フィルターの効果



図 3.54. 新規フィルターの有無による有効イベントの数(入力レートと有効出力レートの相関)

誘起信号を電荷信号と誤認識して有効イベントが減るのを防ぐために、電荷信号と誘起信号を判 別する新規のフィルターを、各チャンネルに実装した。新規フィルターの導入により、実測の結果、 電荷信号と誘起信号をほぼ完全に弁別することに成功した。図 3.54 (左) に、1 モジュールの場合 (1つのチャンネルについてと同じ)、新規フィルターが有る場合と無い場合の有効イベントの割合 を、信号入力レートと有効出力レートの相関として示した。入力レート 5~20 kcps の時、新規フィ ルターが無い場合約半分であった有効イベント数が、新規フィルターを導入することにより、ほぼ 100%になっている事がわかった。全体の傾向として入力レートが増えると出力レートが減るのは、 信号処理による不感時間が発生するためである。GREI 検出器の前段・後段検出器それぞれの陽極側・ 陰極側分割電極の4 セットすべてのデータが揃わないと、コンプトンカメラとして有効なイベント とならないため、画像化に有効なイベントの割合は単純計算で、1つの検出器片面の有効イベントの 割合の4 乗となる。実測においても、従来のシステムでは、画像化に有効なイベントの割合が 10% 程度になっていたが(4 乗の 6%にならないのは、検出器両面のエネルギー相関等があるためと考えられる)。新規のシステムでは、これがほぼ 100% の有効イベント率(図 3.54(右))となり、大幅に改善した。



図 3.55. 新規システムによる GREI 前段検出器におけるマルチヒット数

(3) マルチヒットイベントの取得

新規に開発したモジュールは、コンプトン散乱等により、一つの検出器内で複数の相互作用が起きた場合の出力信号も、すべて取得できる設計となっている。図 3.55 に、新規モジュールで²²Na (511, 1274 keV のガンマ線を放出)を用いて測定した、前段検出器のマルチヒット数を示した。これらの数は、モンテカルロシミュレーターGeant4 を用いた数値シミュレーションによる多重相互作用数の計算結果と一致しており、新規に開発したモジュールで、正しくマルチヒットイベントが取得できていることが確かめられた。

(4) エネルギー分解能と制御プログラム



図 3.56. 専用モジュール・コントロール・ソフトウェアとエネルギー分解能の測定例

新規に開発したモジュールの基本性能を確かめるために、エネルギー分解能の測定を行った。測定 には、Princeton Gamma Tech 社製のゲルマニウム半導体検出器 IGC10200 (P 型同軸、相対効率 10%) を使用した。⁶⁰Co を用いた測定の結果、1333 keV のガンマ線に対してのエネルギー分解能(半値幅) は、26 チャンネル(13 チャネルモジュール2 台分)の平均値で、1.695 keV となり非常に高いエネ ルギー分解能を有していることがわかった。また、最も分解能の悪いチャネルで、半値幅 1.729 keV であり、いずれのチャンネルも、設計目標値 1.75 keV をクリアしていた。図 3.56 にエネルギー分 解能の測定例を示す。

また、ナショナルインスツルメンツ社が提供するグラフィック型言語による LabVIEW [8] による モジュール制御プログラムを新たに開発した。図 3.56 は、制御用プログラムの表示画面である。こ れにより、測定のスタート、ストップ、およびパラメータ設定、エネルギースペクトルの確認など が、GUI 操作で行えるようになった。さらに、従来のモジュールでは、アナログ入力部の設定(アン プのゲイン、ポールゼロキャンセラレーション値)は、モジュールフロントパネルのポテンショメ ーターにより調整を行っていたが、新規モジュールでは、これらもすべて PC 上から設定できる仕様 となった。これにより、すべての測定パラメータを PC 上から設定することが可能となり、調整のた めの設定値の変更が容易に行える様になった。

3.12 機械式冷凍機を装備した両面直交ストリップ電極式 Ge 半導体検出器の作製

図 3.57 に、本研究項目で作製した、パルス管冷凍機を装備した両面直交ストリップ電極式 Ge 半 導体検出器を示す。本装置は、米国 PHDs 社が販売している GeGI という名称のガンマ線探知装置を 基にしており、GREI の構成要素として利用可能にするための出力回路系を装備した。

この装置の性能を確認するため、¹⁵²Eu の較正用ガンマ線源を用いてガンマ線の計測を行い、エネ ルギー分解能を調べた。表 3.3 および表 3.4 に、¹⁵²Eu の主要なガンマ線ピークに対するエネルギー 分解能を測定した結果を示した。Ge 半導体検出器としての優れたエネルギー分解能が得られており、 このパルス管冷凍機を装備した両面直交ストリップ電極式 Ge 半導体検出器を構成要素として GREI を構築することが可能であると考えられる。



図 3.57. 機械冷凍式両面直交ストリップ Ge 半導体検出器

表 3.3. 作製した機械冷凍式両面直交ストリップ Ge 半導体検出器のすべての出力のエネルギー分 解能を測定した結果(122keV および 344keV)。

| | ストリップ | エネルギー分解能(FWHM) | エネルギー分解(FWHM) |
|--------|-------|----------------|---------------|
| | 電極番号 | @122keV [keV] | @344keV [keV] |
| | 1 | 1.77 (1.5%) | 1.96 (0.57%) |
| Xストリップ | 2 | 1.64 (1.3%) | 1.85 (0.54%) |
| | 3 | 1.68 (1.4%) | 1.82 (0.53%) |
| | 4 | 1.77 (1.5%) | 1.92 (0.56%) |
| | 5 | 1.85 (1.5%) | 2.01 (0.58%) |
| | 6 | 1.95 (1.6%) | 2.10 (0.61%) |
| | 7 | 1.97 (1.6%) | 2.14 (0.62%) |
| | 8 | 2.10 (1.7%) | 2.22 (0.65%) |
| | 9 | 2.24 (1.8%) | 2.38 (0.69%) |
| | 10 | 2.07 (1.7%) | 2.22 (0.65%) |
| | 11 | 2.17 (1.8%) | 2.33 (0.68%) |
| | 12 | 2.08 (1.7%) | 2.20 (0.64%) |
| | 13 | 2.07 (1.7%) | 2.18 (0.63%) |
| | 14 | 1.86 (1.5%) | 2.05 (0.60%) |
| | 15 | 1.65 (1.4%) | 1.79 (0.52%) |
| | 16 | 1.54 (1.3%) | 1.69 (0.49%) |
| | 17 | 2.07 (1.7%) | 2.70 (0.78%) |
| | 18 | 2.10 (1.7%) | 2.60 (0.76%) |
| Yストリップ | 19 | 2.20 (1.8%) | 2.66 (0.77%) |
| | 20 | 2.37 (1.9%) | 2.79 (0.81%) |
| | 21 | 2.65 (2.2%) | 3.03 (0.88%) |
| | 22 | 2.98 (2.4%) | 3.27 (0.95%) |
| | 23 | 3.22 (2.6%) | 3.50 (1.02%) |
| | 24 | 2.82 (2.3%) | 3.10 (0.90%) |
| | 25 | 2.30 (1.9%) | 2.60 (0.76%) |
| | 26 | 2.26 (1.9%) | 2.59 (0.75%) |
| | 27 | 2.21 (1.8%) | 2.58 (0.75%) |
| | 28 | 2.15 (1.8%) | 2.56 (0.74%) |
| | 29 | 2.11 (1.7%) | 2.51 (0.73%) |
| | 30 | 1.93 (1.6%) | 2.33 (0.68%) |
| | 31 | 2.09 (1.7%) | 2.57 (0.75%) |
| | 32 | 1.75 (1.4%) | 2.29 (0.67%) |

表 3.4. 作製した機械冷凍式両面直交ストリップ Ge 半導体検出器のすべての出力のエネルギー分解能を測定した結果(779keV および 1408keV)。

| | ストリップ | エネルギー分解能(FWHM) | エネルギー分解(FWHM) |
|--------|-------|----------------|----------------|
| | 電極番号 | @779keV [keV] | @1408keV [keV] |
| Xストリップ | 1 | 1.94 (0.25%) | 2.67 (0.19%) |
| | 2 | 2.30 (0.30%) | 2.61 (0.19%) |
| | 3 | 2.13 (0.27%) | 2.47 (0.18%) |
| | 4 | 2.05 (0.26%) | 2.70 (0.19%) |
| | 5 | 2.26 (0.29%) | 2.80 (0.20%) |
| | 6 | 2.31 (0.30%) | 2.71 (0.19%) |
| | 7 | 2.26 (0.29%) | 2.66 (0.19%) |
| | 8 | 2.30 (0.30%) | 2.70 (0.19%) |
| | 9 | 2.44 (0.31%) | 3.14 (0.22%) |
| | 10 | 2.45 (0.31%) | 2.84 (0.20%) |
| | 11 | 2.53 (0.32%) | 3.01 (0.21%) |
| | 12 | 2.49 (0.32%) | 2.83 (0.20%) |
| | 13 | 2.46 (0.32%) | 2.67 (0.19%) |
| | 14 | 2.30 (0.30%) | 2.91 (0.21%) |
| | 15 | 2.05 (0.26%) | 2.52 (0.18%) |
| | 16 | 1.79 (0.23%) | 2.33 (0.17%) |
| | 17 | 3.95 (0.51%) | 6.83 (0.49%) |
| | 18 | 3.35 (0.43%) | 5.81 (0.41%) |
| | 19 | 3.58 (0.46%) | 4.98 (0.35%) |
| Yストリップ | 20 | 3.83 (0.49%) | 5.57 (0.40%) |
| | 21 | 3.74 (0.48%) | 5.34 (0.38%) |
| | 22 | 3.53 (0.45%) | 4.96 (0.35%) |
| | 23 | 3.99 (0.51%) | 5.33 (0.38%) |
| | 24 | 4.13 (0.53%) | 5.12 (0.36%) |
| | 25 | 3.29 (0.42%) | 4.82 (0.34%) |
| | 26 | 3.09 (0.40%) | 4.82 (0.34%) |
| | 27 | 3.47 (0.45%) | 5.20 (0.37%) |
| | 28 | 3.34 (0.43%) | 4.90 (0.35%) |
| | 29 | 3.26 (0.42%) | 4.78 (0.34%) |
| | 30 | 3.12 (0.40%) | 4.58 (0.33%) |
| | 31 | 3.39 (0.44%) | 5.29 (0.38%) |
| | 32 | 3.65 (0.47%) | 5.10 (0.36%) |

4. 結論

本研究により、医学・生物学用のガンマ線イメージング装置として本研究代表者らが開発してき た半導体コンプトンカメラ GREI の技術を応用し、放射性物質によって汚染された廃棄物の汚染部位 と放射性核種を一度に検査することを可能にするイメージング分析を実現するための技術開発が行 われた。

屋外での GREI 撮像実験を可能にするため、従来の GREI 処理システムを小型化して自動車に搭載 可能な GREI 撮像システムを構築し、屋外でも遜色の無い撮像性能が得られることが確認された。こ の撮像システムを実際に自動車に搭載して福島県内に運搬し、指定廃棄物等のイメージング分析実 験を行うことに成功した。この実験の結果、当初より課題となっていた GREI の遠方撮像性能の最適 化の必要性が明確に示され、既有の GREI の撮像装置に搭載されている 2 台の Ge 検出器間の距離を 変更することで、遠方撮像性能を当初の目標値まで向上させることが提案された。

計算機シミュレーションの手法を活用した装置の設計に基づいて遠方撮像に最適化した GREI 撮像 ヘッドを作製し、設計通りの撮像性能の向上が得られた。例えば、撮像ヘッドから1 m 離れた位置 に2 つの2 MBq の¹³⁷Cs のガンマ線源を置いて10分間撮像した結果、10°以下の角度分解能が得ら れることが示された。

さらに装置を小型化して可搬性を向上させるため、デジタル信号処理技術を用いて集積度が向上 した処理システムの開発や、液体窒素が不要なパルス管冷凍機を装備した両面直交ストリップ電極 式 Ge 半導体検出器の導入を検討中である。今後これらの小型化技術を継続することにより、手で持 ち運びが可能なサイズの可搬型システムの実現に発展することを期待している。

5.参考文献(章末に入れても可)

- S. Motomura, Y. Kanayama, H. Haba, Y. Watanabe, and S. Enomoto: "Multiple molecular simultaneous imaging in a live mouse using semiconductor Compton camera," *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23, pp. 1089-1092 (2008).
- [2] S. Motomura, S. Enomoto, H. Haba, K. Igarashi, Y. Gono, and Y. Yano: "Gamma-ray Compton imaging of multitracer in biological samples using strip germanium telescope," *IEEE Transactions on Nuclear science*, 54 pp.710-717(2007).
- [3] Geant4: A toolkit for the simulation of the particles through matter, CERN, Geneva, Switzerland, Web site: http://geant4.web.cern.ch/geant4/
- [4] S. Wilderman, N. H. Clinthorne, J. A. Fessler, and W. L. Rogers, "List-mode maximum likelihood reconstruction of Compton scatter camera images in nuclear medicine," in Proc. IEEE Nucl. Sci. Symp., vol. 3, pp. 1716–1720 (1998).
- [5] T. Fukuchi, Y. Arai, F. Watanabe, S. Motomura, S. Takeda, Y. Kanayama, H. Haba, Y. Watanabe and S. Enomoto, A digital signal processing module for Ge semiconductor detectors, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 58, 461-467(2011).
- [6] M. A. Deleplanque, I. Y. Lee, K. Vetter et al., "GRETA: utilizing new concepts in γ-ray detection," Nucl. Inst. Meth. A vol. 430, pp. 292-310 (1999)
- [7] V. T. Jordanov, G. F. Knoll, A. C. Huber, J. A. Pantazis, "Digital techniques for real-time pulse shaping

in radiation measurements," Nucl. Inst. Meth. Avol. 353, pp. 261-264 (1994)

 [8] LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench), National Instruments, http://www.ni.com/labview/ja/

6. 研究発表

論文発表: なし

学会発表:

- [1] S. Motomura, T. Fukuchi, T. Ida, M. Hiromura, H. Haba, Y. Watanabe, and S. Enomoto, "Improvement of Low-Energy Gamma-Ray Imaging Performance of Semiconductor Compton Camera GREI," 2012 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Anaheim, CA, USA, Oct. 27-Nov. 3, 2012.
- [2] T. Ida, S. Motomura, M. Hiromura, S. Enomoto, "Development of Iterative Image Reconstruction Method for Environmental Radioactive Distribution with Germanium Semiconductor Compton Camera," 2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Seoul, Korea, Oct. 27-Nov. 2, 2013.
- [3] T. Fukuchi, S. Motomura, T. Ida, H. Haba, Y. Watanabe, S. Enomoto, "On-Line Digital Pulse-Shape Analysis for Segmented Semiconductor Detectors," 2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Seoul, Korea, Oct. 27-Nov. 2, 2013.

その他:

- [1] 「CMIS ラボツアー(GREI)」, 独立行政法人理化学研究所一般公開 2012, 平成 24 年 10 月 20 日
- [2] 「CLST ラボツアー(GREI)」, 独立行政法人理化学研究所一般公開 2013, 平成 25 年 10 月 19 日

7. 知的財産権の取得状況

[1] 「放射線検出器のための信号データ処理方法、信号データ処理装置、および放射線検出システム」, 特願 2013-150809, 平成 25 年 7 月 19 日

8. 研究概要図



9. 英文概要

·研究課題名:

"Development of imaging analysis method for radioactively contaminated objects by semiconductor Compton camera technology"

- ・研究代表者名及び所属: Shinji Motomura, RIKEN (The Institute of Physical and Chemical Research)
- ・研究分担者名及び所属: Shuichi Enomoto, Okayama University
- 要旨:

Various radioactive substances were released in the environment from the Fukushima Daiichi nuclear power plant in the aftermath of the Great East Japan Earthquake, and there are still significant amount of radioactivities left even in the ordinary environment near residential areas in Fukushima. The widely spread radioactive substances were washed out by the rainfall, and condensed at the water purification plants, waste incineration plants, sewage treatment plants, and so forth. The condensed radioactively contaminated wastes have been temporally stored at each site. In order to support appropriate and safe treatment of the radioactively contaminated wastes, we have proposed to use the technology of the semiconductor Compton camera GREI that is able to visualize the distribution of the radioactive substances and distinguish the radionuclide at the same time.

In FY2012, we succeeded in carrying out a field experiment for the first time using the GREI originally designed for bio-medical imaging application. We performed an imaging experiment of ash dust collected in drum cans at an incineration plant in Fukushima, and succeeded in demonstrating the imaging analysis of ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs contained in the radioactively contaminated waste. However, it took too long time as more than 2 hours to obtain the images of sufficiently good quality, as we expected from the beginning though.

In FY2013, we succeeded in constructing a GREI imaging system optimized for distant radioactive substances. The GREI imaging head was designed mainly by optimizing the distance between the two germanium semiconductor detectors composing the Compton camera, and achieved more than ten times increased overall imaging sensitivity for distant radioactive substances.

We have performed imaging experiment of various radioactive sources with the GREI system optimized for distant radioactive substances. To demonstrate the imaging system can construct accurate distribution images of the radioactive sources, we measured two ¹³⁷Cs sources of 2.0 MBq positioned 1.0 meter away from the GREI imaging head changing the angular distance between the two sources at 30-, 15-, and 10-degrees for 10 minutes respectively. The spatial dose rate at the GREI imaging head was 0.57 μ Sv/h. We have succeeded in obtaining the accurate images for each source arrangement, and demonstrating the angular resolving power of better than 10 degrees for 10 minutes' imaging time. Our proposed GREI imaging system will be able to contribute not only to the recovery from the present situation in Fukushima, but also to the management of radioactive substances at other radioactive material handling facilities including nuclear power plants, and to the provision for future accidents where the radionuclides are unknown.

・キーワード: Compton camera, gamma-ray imaging, radioactively contaminated wastes, gamma-ray spectrometry