

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：13301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22924

研究課題名(和文) 超高線量下における放射性物質の可視化実現

研究課題名(英文) Visualization of radioactive substances in an extremely high-dose environment

研究代表者

有元 誠 (Arimoto, Makoto)

金沢大学・先端宇宙理工学研究センター・助教

研究者番号：40467014

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では除染や廃炉作業を進めるために、放射性デブリから放出されるガンマ線の空間分布を可視化できるガンマイメジャーの開発を行った。特に研究代表者が進めているX線CTイメージャーで使われている多系統ピクセルセンサーを、このガンマイメジャー用途に2次元アレイセンサーとして拡張応用することで、極めて高計数率での計測を実現できる。そして、開発したガンマイメジャーを用いることで、 $\sim 100$  Sv/h の極めて高い線量率でもエネルギー情報をもつ2次元イメージングを実現できることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2011年に生じた福島第一原発のメルトダウンにより、崩壊した原発炉内部の放射性デブリの除染作業は極めて重要である。そこで放射性デブリの可視化が極めて重要となっているものの、空間的に狭い炉内では、放射性デブリから放出されるガンマ線だけでなく散乱ガンマ線の存在により、デブリの空間分布を把握することが難しい。本研究では、エネルギー情報を利用することで、この散乱ガンマ線の影響を除去できるガンマイメジャーの開発に成功した。これにより、除染作業を効率化し、将来の安心・安全な日本に貢献することができる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have developed a gamma-ray imager that can visualize the spatial distribution of gamma rays emitted from radioactive debris in order to proceed with decontamination and decommissioning operations at the Fukushima Daiichi Plant. In particular, we have expanded application of the multi-channel X-ray pixel sensor developed in the X-ray CT field being promoted by the principal investigator. By using this technology as a two-dimensional array sensor for this gamma-ray imaging application, measurement with an extremely high counting rate can be realized. Then, we have verified that 2D gamma-ray imaging with energy information can be performed even at an extremely high dose rate of  $\sim 100$  Sv/h by using the developed gamma-ray imager.

研究分野：X線・ガンマ線イメージング

キーワード：高線量 ガンマ線 MPPC シンチレータ 2次元アレイセンサー

### 1. 研究開始当初の背景

2011年東日本大震災により福島原子力発電所の炉心が融解し、原子力発電所の機能が失われると同時に、多量の放射性物質が飛散した。この福島原発の廃炉作業は日本国家レベルでの課題でありながら、事故から10年近く経つ現在でも依然として難しい状況下にある。この要因として、核燃料デブリ漏れだしに伴う多量の高線量放射性物質の存在があげられる。この物質の除去こそが廃炉を達成するためにもっとも重要でありながら、その可視化が困難を極めており、廃炉作業を妨げる最大の要因となっている。そこで、放射性物質の位置を同定するためには、放射性物質から放出されるガンマ線の到来方向を知ることが鍵となる。

原子炉周辺における建屋内の線量は凄まじく0.1~1 Sv/h [1]であり、さらに原子炉内部はさらにそれを上回ると考えられている。ここで炉内における極めて超高線量の環境では、~500 Sv/h を超えるレベルとの報告もなされている[2]。このような環境下では、極めて高いガンマ線の到来レートになるため、従来のガンマ線検出器を用いた場合、光子単位で検出することはできず、エネルギー情報が失われ、ガンマ線の強度情報のみを有する線量分布の情報となる。しかしながら、ガンマ線の空間強度分布を得ることができたとしても、それがそのまま放射性物質の位置を示すことにはならない点が挙げられる。この主要因が、散乱ガンマ線の存在である(図1)。散乱ガンマ線そのものは、放射性物質から生じたものであるものの、原子炉内の狭い空間内では、壁や瓦礫などの物質とエネルギーを失いながら多重散乱を繰り返す。そのため、放射性物質の本来の位置情報は著しく失われてしまうことになる。よって、この放射性物質そのものの空間分布を直接知ることができるガンマ線イメージャーが求められている。

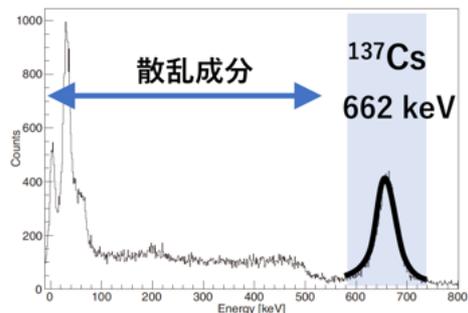


図1: 662 keV のガンマ線スペクトルの例。662keV の輝線に加え、散乱成分が生じる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、>100 Sv/h を超える環境下での放射性物質の位置を直接同定できるガンマ線イメージャーの開発である。特に原子炉内の放射線源は、およそ30年と半減期の長い<sup>137</sup>Csが支配的と考えられている。この<sup>137</sup>Csからは、662 keVのエネルギーを有するガンマ線が生じる。よって、この662 keVのガンマ線検出を重点においたイメージングが鍵となる。このイメージングを実現することで、日本の将来の廃炉作業を円滑に導くとともに、この超高線量ガンマ線イメージングで構築した技術を、異分野における超高計数率の環境下でのイメージング(例えばX線CTなど)に応用することを目指した技術構築を目指す。これにより単一分野における環境計測の革新だけにとどまらず、医療や産業へ学際的アプローチを目指した技術構築につながることを期待される。またシンチレータをベースとした安価なシステムの構築を目指しており、これも本研究が目指すシステムの特徴的な点である。先行研究における原発建屋内でのイメージングとして、CdTe半導体素子をベースとした検出器システムで行われた例[1]が挙げられる。CdTe半導体素子は優れたセンサーであるものの、極めて高価であり、検出器の大型も難しいため、広い視野かつ短時間での測定の実現は難しい。本研究で目指すシンチレータを用いた安価なシステムで超高線量ガンマイメージングを実現できれば、幅広い技術の普及が期待できる。

### 3. 研究の方法

超高線量の環境下での放射性物質を同定するために、散乱ガンマ線の影響を徹底的に排除したイメージングの実現を目指す。そこでガンマ線を光子単位で検出することで、エネルギー情報を取得できるセンサーを開発する。ここで炉内の線量率が~100 Sv/hとした場合、対応するガンマ線の到来レートは、数10 MHz/mm<sup>2</sup>に及ぶと予想される。従来型のガンマ線センサーの場合、多方向から到来するガンマ線イベントの信号がセンサー内部で重畳(パイルアップ)してしまい、エネルギー情報が失われてしまう。そこで本研究では、研究代表者がX線CT用途で開発している高計数率イベントに対応した測定システムを応用する。ガンマ線センサーは、シンチレータと次世代光センサー・マルチピクセルフォトンカウンター(MPPC)で構成されている。注目すべきは、MPPCが持つ10<sup>6</sup>倍という非常に高い内部増幅機能と数nsという速い時間応答を利用する点である。これにより、シンチレータ内部で生じたガンマ線イベントを高い信号対雑音比で電気信号に変換できる(図2)。一般的な直接変換型の半導体センサーでは、信号増幅機能を有しておらずガンマ線イベントの電荷信号が微弱であるため、信号を積分する増幅器が必要となる。よって、高速応答が要求される高計数率の環境下では、半導体センサーは不得手である。

本研究では、高い信号雑音比を誇るMPPCを用いることで高計数率での計測を実現する。また、原子炉内の最大線量率は、数100 Sv/hを上回る可能性があり、ガンマ線の到来レートは数100

MHz/mm<sup>2</sup>以上に及ぶと考えられる。そこでピンホールコリメータの構造を採用することで、視野外から到来するガンマ線を極限まで低減する構成とする。そして、新たに開発した2次元アレイの 픽セルイメージャーとピンホールコリメータを組み合わせることで、超高線量環境でのガンマ線イメージングを実現する。

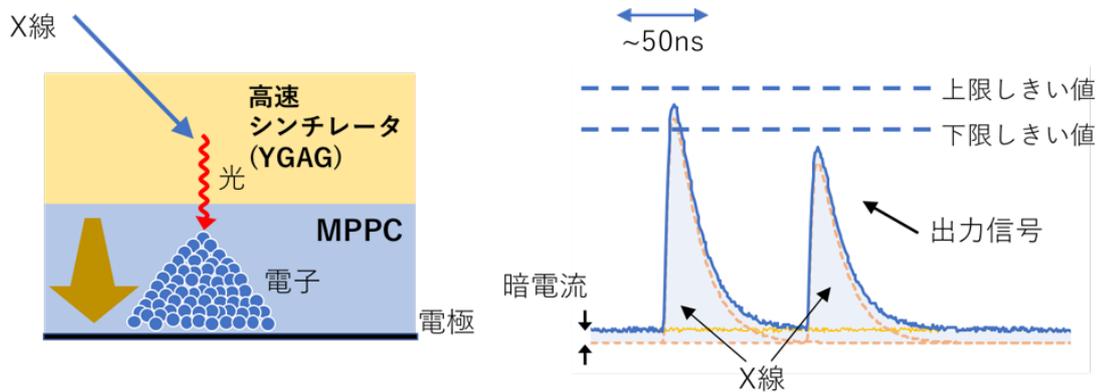


図 2:(左)ガンマ線検出原理の模式図、  
(右):波形信号の例、閾値を設けることで、662 keV イベントのみを選択的に取得可能

#### 4. 研究成果

##### 【I. 超高速信号処理エレクトロニクスの実現】

本研究を実現する上で、重要な開発要素のひとつがコンパクトな信号読み出しシステムの構築である。2次元の 픽セルアレイを構築した場合、多系統の信号処理を実現する必要があり、コンパクトな読み出しシステムが求められる。そこで、これまで研究代表者が培ってきた X 線 CT 技術[3]を応用して、MPPC からの 64 系統の電荷信号を高速信号処理できる大規模集積回路 (LSI) を開発した(図 3)。これにより、コンパクトかつ高速信号処理を行うエレクトロニクスを実現できる。

この LSI の単体試験および YGAG シンチレータ+MPPC アレイと組み合わせた性能試験を実施した。実験室に設置した X 線発生装置を模擬線源として評価した結果、~10 MHz の信号レートに対して、X 線信号を計測できることがわかった。またこの LSI は幅広いダイナミックレンジの調整が可能である。そこで、X 線 CT イメージングに対応した 100 keV 程度のダイナミックレンジに加え、本研究のガンマ線イメージングを目指した ~1 MeV のダイナミックレンジにも応用できる。それぞれのダイナミックレンジにおいて得られたスペクトルを図 4 (<sup>241</sup>Am, <sup>137</sup>Cs)に示す。100 keV 相当のダイナミックレンジでは、X 線 CT 用途において、マルチエネルギーでの CT 画像の取得に成功し、精度の高い物質同定を実現する結果につながっている。また、本研究で目指す 1 MeV 相当のダイナミックレンジでの測定では、光電吸収イベントとコンプトン散乱イベントを明瞭に分割できるスペクトルを得ることができた。これはエネルギー弁別できるガンマ線イメージングのコンセプトを性能実証したといえる。また得られたスペクトルで、コンプトン散乱イベントに比べ光電吸収イベントが少ないのは、今回用いた YGAG シンチレータの厚みが 1 mm であり、ガンマ線阻止能が低いことが主たる要因と考えられる。

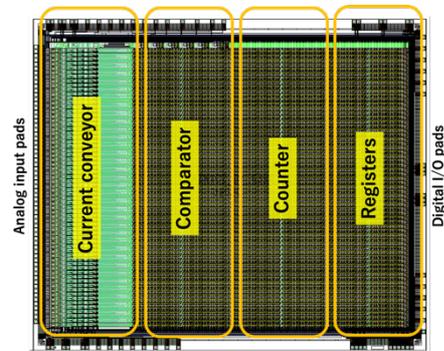


図3:開発した MPPC アレイ用高速信号処理 LSI。64 系統の電荷信号を高速アナログ・デジタル処理可能。

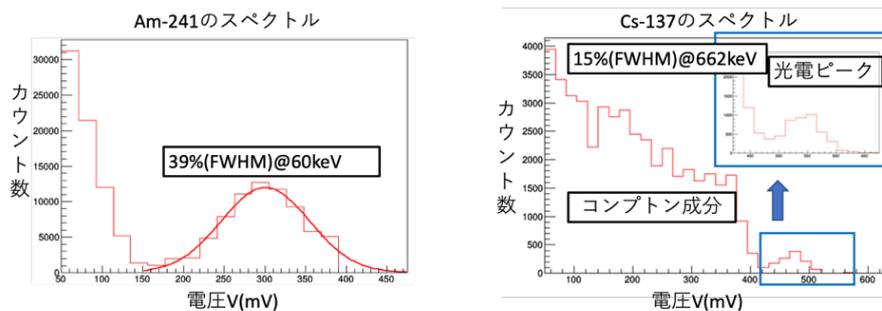


図 4: 本研究で開発したガンマ線イメージャーで得られたスペクトル  
(左) <sup>241</sup>Am のスペクトル、(右) <sup>137</sup>Cs のスペクトル

## 【II. ガンマ線イメージャーシステムの開発】

本研究では、ガンマ線イメージングを実現するために、2次元のセンサーアレイを構築する必要がある。そこで開発した64系統アレイシステムをさらに拡張して、256系統アレイを開発した。ここでは、特にセンサーアレイの拡張に伴い、読み出しエレクトロニクスの拡張も必須となる。そこで、64系統信号処理LSIを4つ組み合わせることで、256系統の信号読み出しを実現するシステム構築を目指した。ピンホールコリメータであることに加え、システム全体をシールドで囲む必要があるため、できるだけコンパクトなシステムが必要となる。そこで、さまざまな設計検討を行った結果、 $16 \times 16 (= 256 \text{ ピクセル})$  MPPCアレイ基板(図5)を4枚のコンパクトな64系統LSI基板(図6左)で読み出し、バックプレーン基板で統合するエレクトロニクスの構成とした。これにより、デバッグ時のLSI基板の交換や信号配線の組み替えを容易にし、効率的に開発を進めることができた。

また、このセンサーアレイおよびエレクトロニクスシステムに合わせたタングステンシールド筐体・コリメータを設計製作した。ここでは、角度分解能を概ね $3^\circ$ を目指し、シンチレータアレイのピクセルサイズやピクセル数を考慮したピンホールコリメータ(図6右)を設計した。この設計においては、研究代表者が過去実施したピンホールカメラの設計情報[4]を生かしつつ行った。これらのシステムを全て組み合わせることで、最終的に図7に示すガンマ線イメージングシステムを構築することに成功した。

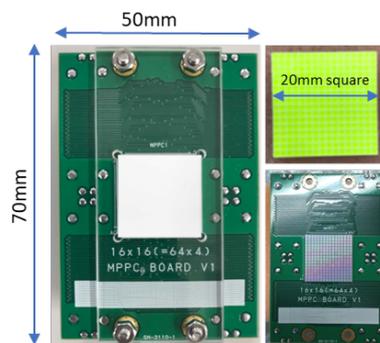


図5:(右上) YGAG シンチレータアレイ、(右下)MPPC アレイ、(右下) MPPC とシンチレータを組み合わせたアレイ

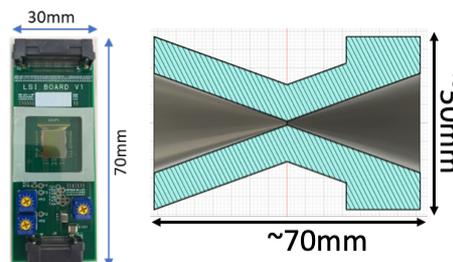


図6:(左)独自開発したLSIを実装した回路基板、(右)設計したピンホールコリメータ

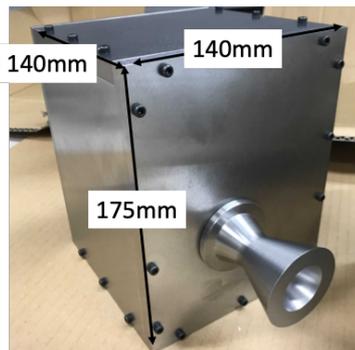


図7:(左)スケルトン筐体の実装したガンマ線イメージャー、(右) シールド・コリメータを実装した外観

## 【III. 超高線量率のガンマ線源を利用したイメージング性能の実証】

[II]では、実験室で利用可能な強度の弱い線源を利用しているが、実際には数桁大きな強度のガンマ線ソースが測定対象となる。そこで、東京工業大学コバルト照射施設にて、高強度の $^{60}\text{Co}$ 線源(1.17 MeV, 1.33 MeV,  $\sim 45 \text{ TBq}$ )のイメージングを行った。そこで得られた結果を図8に示す。最大 $\sim 100 \text{ Sv/h}$ のターゲット線源に対し、位置同定を実現するガンマ線イメージングに成功した。現在、得られたデータを詳細解析しており、エネルギーに応じた空間分解能や散乱ガンマ線の除去率などに対して定量的評価を進めている。また高強度 $^{137}\text{Cs}$ を用いたイメージングは、今後外部の照射施設で行う予定である。これらの得られた成果については、2022年夏および秋に行われる国際学会[5,6]にて報告予定であり、学術論文誌としても投稿準備を進めている。

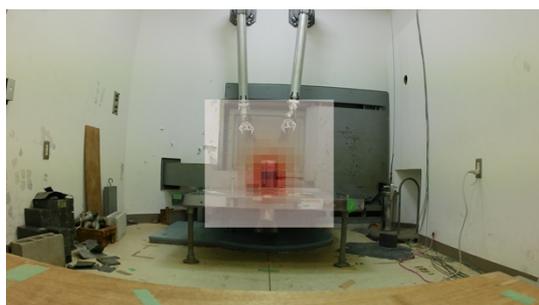


図8: 本システムで測定した高強度 $^{60}\text{Co}$ 線源のガンマ線イメージマップ(可視画像と重ねている)

【参考文献】

- [1] “Spectroscopic gamma camera for use in high dose environments” Y. Ueno et al, Nucl. Instr. Meth. In Phys. Res. A, 822, 48-56 (2016)
- [2] “IRID における燃料デブリ取り出し技術の開発 (2019年)”  
[https://irid.or.jp/\\_pdf/20190411.pdf](https://irid.or.jp/_pdf/20190411.pdf)
- [3] “Development of LSI for a new kind of photon-counting computed tomography using multipixel photon counters” M. Arimoto et al, Nucl. Instr. Meth. In Phys. Res. A, 912, 186-190 (2018)
- [4] “Development of a new pinhole camera for imaging in high dose-rate environments” K. Sueoka et al., Nucl. Instr. Meth. In Phys. Res. A, 912, 115-118 (2018)
- [5] “Development of a gamma-ray detector onboard a radiation source imager under high-dose environments” T. Mizuno, M. Arimoto et al., 9<sup>th</sup> Conference on New Developments in Photodetection, July 2022, accepted
- [6] “MPPC-based gamma-ray photon-counting imager for identifying radiation sources under high-dose environments” T. Mizuno, M. Arimoto et al., 2022 IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference, November 2022, submitted

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kiji H., Maruhashi T., Toyoda T., Kataoka J., Arimoto M., Sato D., Yoshiura K., Kobayashi S., Kawashima H., Terazawa S., Shiota S., Ikeda H.	4. 巻 984
2. 論文標題 64-channel photon-counting computed tomography using a new MPPC-CT system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 164610 ~ 164610
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2020.164610	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 水野 睦也、有元 誠、佐藤 大地、吉浦 宏大龍、相賀 耕、寺澤 慎祐、塩田 諭
2. 発表標題 高線量下での放射線源イメージャー搭載用検出器の開発
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤 大地、有元 誠、吉浦 宏大龍、水野 睦也、川嶋 広貴、小林 聡、片岡 淳、木地 浩章、豊田 貴也、Dima Sonia、池田 博一、寺澤 慎祐、塩田 諭
2. 発表標題 次世代フォトンカウンティングCTによる多系統イメージングの性能評価
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤 大地、有元 誠、吉浦 宏大龍、川嶋 広貴、小林 聡、片岡 淳、丸橋 拓也、木地 浩章、豊田 貴也、池田 博一、寺澤 慎祐、塩田 諭
2. 発表標題 次世代カラーX線CTに向けたMPPC用64チャンネル高速LSIの開発と性能評価
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 D. Sato, M. Arimoto, K. Yoshiura, T. Mizuno, H. Kawashima, S. Kobayashi, J. Kataoka, H. Kiji, T. Toyoda, S. Dima, H. Ikeda, S. Terazawa, S. Shiota
2. 発表標題 Performance estimate of MPPC-based PC-CT system and initial results of CT image contrast
3. 学会等名 IEEE Nuclear science symposium and medical imaging conference (2021 IEEE NSS/MIC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関