

平成22年 5月14日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19560840
 研究課題名（和文）数個のシンチレータからなるリアルタイム型全方向 γ 線源探査機の開発
 研究課題名（英文）Real time 4π gamma source detector with several scintillators
 研究代表者
 玉川 洋一（TAMAGAWA Yoichi）
 福井大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：40236732

研究成果の概要（和文）：

原子力発電所およびその周辺施設等における主に建屋内の漏洩放射能のモニターを行うため、ガンマ線のコンプトン散乱を利用した数個のシンチレータからなるリアルタイム型全方向有感型の検出器の開発を行った。2インチのNaI（TI）シンチレータとプラスチックシンチレータ等を組み合わせて、角度分解能 5° でガンマ線のエネルギー同定可能な検出器のプロトタイプを2つ製作し、ガンマ線源の飛来方向を視覚的に捉えるための描画ソフトも開発した。

研究成果の概要（英文）：

R&D of real-time 4π gamma source detector for nuclear power plant was studied. The gamma ray was monitored by the prototype Compton scope made with several scintillator crystals. The angle resolution of this detector was achieved within 5 degree and the direction of incident gamma ray was drawn by the imaging software using open-GL.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：原子力，放射線，モニター，コンプトン散乱，ガンマ線

1. 研究開始当初の背景

原子力発電所およびその周辺施設において、放射性物質や放射能の漏洩は最も注意を要する事柄であり、これらに従事する人たちにとって最も関心の高いことである。また、近年になって、高経年化原子炉の廃炉の問題が浮上し、廃炉の際の施設への立ち入り時に残留放射能をいかにして正しくモニターするか、

それらの残留場所の同定を精度良く行う必要がある。特に、「ふげん」原子炉はすでに廃炉が決定し、廃炉に関わる様々な検討を始めており、発電所建家内に残留する放射線源の特定とそれらの分布・広がりを定量的に知るための試みが始められている。

これらの原子力関連施設に残留する放射性物質から漏洩する可能性のある放射線には、

中性子線、ベータ線、ガンマ線等があるが、漏洩を監視することが最も容易な放射線がガンマ線である。ガンマ線は代表的で一般的な放射線の一つであり、代表的なガンマ線検出器としては、NaI(Tl)に代表されるシンチレーターと光電子増倍管(PMT)を組み合わせたシンチレーション検出器やシリコンやゲルマニウム等を利用した半導体検出器(SSD)がある。これらの一般的な検出器は通常単体で使用され、飛来して検出器内で相互作用したガンマ線のエネルギーと数を計測することで、検出器のおかれた環境のガンマ線源としての放射性物質の種類と存在量を同定することは可能であるが、ガンマ線の飛来方向・距離を精度良く同定することはできない。

最近の高エネルギー物理実験における高エネルギー粒子検出器システムの飛躍的な進歩に伴い、放射線(高エネルギー荷電粒子やガンマ線)計測機器の性能が向上し、複数の放射線検出器からの信号を組み合わせる論理的処理を施すことで、これまで得られなかった種々の放射線に関する詳細な情報を明らかにすることが可能となってきた。ガンマ線検出器についても同様で、コンプトン散乱の現象を利用し、一つめの検出器でコンプトン反跳電子のエネルギーを測定し、二つめの測定器で二次ガンマ線の光電効果による電子を的確に捉えるという時間的にほぼ同時に起こる連続事象を異なる検出器で捕らえ、信号の大きさや到達時間等を演算処理することにより、入射1次ガンマ線の飛来方向をもとめることが可能となった。現在では、このような原理を用いたコンプトンスコープ(コンプトン望遠鏡)が人工衛星に搭載され、ガンマ線天文学の分野で精密な測定が可能となった。

しかしながら、人工衛星に搭載されるコンプトン望遠鏡は遠くの天体からのガンマ線を精度良く測定するため散乱用検出器にストリップタイプの半導体検出器等を用いており(例えばT. Takahashi et al., "High resolution CdTe detectors for the next generation multi-Compton gamma-ray telescope", SPIE, 4851, 1228, 2003.),この初段の検出器部分の読み出しチャンネル数も膨大なものとなっている。これは信号処理のためのエレクトロニクスモジュール数にも反映し、最終的に非常に大がかりで高価な検出器システムとなるため、より安価で使いやすいシステムが求められている。

2. 研究の目的

本研究では、上記のような天体観測用ガンマ線スコープの設計思想から離れ、原子力関

連施設の限られたスペース内に設置可能で、近距離(10-20m程度)からのガンマ線のエネルギー・強度・飛来方向を同時に検出できる検出器システムを数個のシンチレーターで構築することを目的とする。

さらに、検出器の感度は空間的に全立体角を持つものとし、角度分解能として 5° 以内を目指す。また、検出中のモニタリングを可能とするために、動作時に測定データがモニターでき、空間的に把握しやすい表示システムについても検討を行う。

3. 研究の方法

(1)福井大学に於いてNaI(Tl)およびプラスチックシンチレーターを用いた基礎的実験を行い、コンプトンガンマスコープの基本的構成に関する検討を行う。特に、エネルギー分解能・角度分解能・検出効率等についてシミュレーションと放射線源を用いた実験を行い詳細な解析を行うことで、ガンマ線源探査能力の評価を行う。

(2)KEK等に於いて、NaI(Tl)やプラスチックシンチレーターばかりでなく当該検出器を構成するにふさわしいシンチレーターに関する基礎的検討を行うと同時にシンチレーターの配置に関する検討を行う。

(3)KEKまたは福井大学において実施した研究についての検討会を開催し研究成果及び研究の芳香性について議論する。

(4)基礎的検討項目についての詳しい検討を行った後に、福井大学において複数のシンチレーターからなる γ 線探査検出器(コンプトンガンマスコープ)を作製し、標準線源を用いた実測定を行い性能評価を行う。

3. 研究成果

(1) γ 線探査機としてのコンプトンスコープに関する構成に関する基礎的検討

① コンプトンガンマスコープの基本原則

γ 線源を探査するために、本研究では γ 線と物質の相互作用の一つであるコンプトン散乱に着目し入射 γ 線が散乱体と吸収体の二つの物質(シンチレーター)で落としたエネルギーを測定することにより散乱角を同定し、幾何学的に入射方向を決定するシステムを採用した。基本的原理を図1に示す。

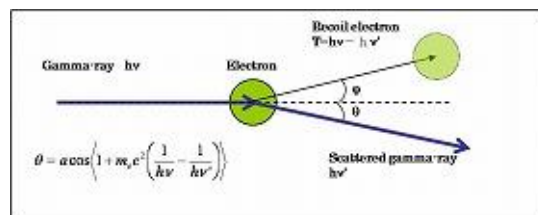


図1 コンプトンガンマスコープの原理

② GEANT4 シミュレーションによる検討
 検出器システムを構成するにあたり、シンチレーターの種類および配置を決定するためモンテカルロシミュレーター (GEANT4) を用いた解析を行った。検討した項目は、シンチレーター結晶の大きさ・結晶間距離の変化による角度分解能・検出効率の変化等である。その結果、コンプトン散乱体として直径2インチ×厚さ5cmのプラスチックシンチレーターと吸収体として直径2インチ×厚さ5cmの

Scattered Angle :設置(deg)	Scattered Angle : 解析値 (deg)	Scattered Angle σ (deg)	counts
30 deg	30.34 deg	4.79 deg	4471
60 deg	60.55 deg	4.96 deg	2806
90 deg	89.71 deg	5.05 deg	2803
120 deg	120.0 deg	7.07 deg	2977
150 deg	148.2 deg	14.17 deg	2807

NaI (Tl) を40cm離して設置した場合、擬似散乱イベント (間違った角度導出イベント) を減らすことができ、目標とする5度以下の角度分解能を実現できることが明らかとなった。

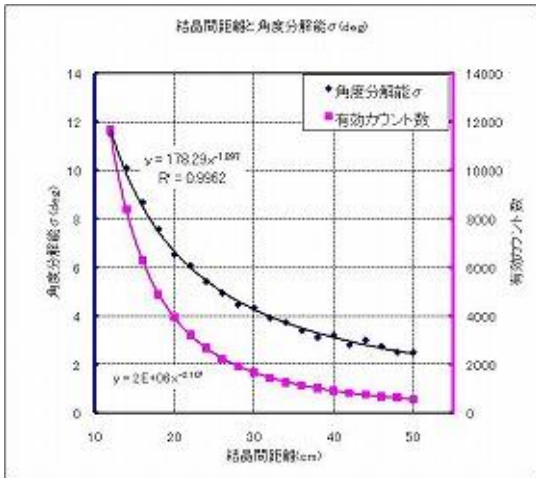


図2 結晶間距離と効率および角度分解能

③ 基本構成での基礎実験

シミュレーションによる結果から、最小構成の検出器をくみ上げ実験的な検証を行ったところ、エネルギー分解能6.4% (Cs-137 ; 1σ) , 角度分解能4.3度を達成できた。このときの検出効率は 6.9×10^{-5} (90度散乱時)であった。図3に実験設定を、表1にはCo-60 線源を用いたときの実測散乱角と角度分解能を示す。散乱角が小さいときには角度分解能も良好な値を示すが、散乱角が大きくなるにつれてコンプトン散乱電子のエネルギーが小さくなる

ことにより算出される角度分解能が劣化してくることがわかる。

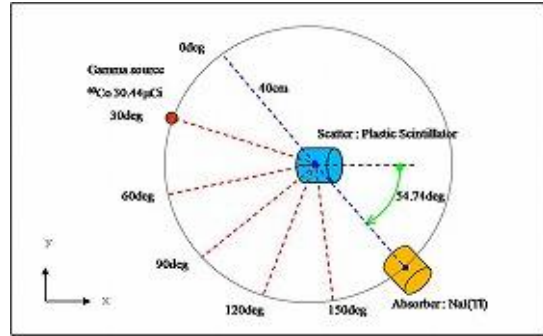


図3 Co-60線源を用いた基本構成実験

表1 Co-60線源による散乱角と角度分解能

(2) ガンマ線源位置描画システムの開発

導出された散乱角からガンマ線飛来位置を同定するための描画システムを構築した。ソフトウェアとしてはOpenGLを用いて、散乱体での観測エネルギー値その際、3つの円錐の重ね合わせによる方法 (3点一致法: 図4) と一つの円錐による円を全て投影する方法 (プロジェクション法) の2つを考案した。3点一致法は線源が点状に存在している場合すなわち標準線源等の場合に有効に描画を行うことが可能であるが、広く分布する線源の場合には線源位置が正しく描出できない。従って、今回は分布線源への対応を考え後者を主に用いることとした。図5に描出されたガンマ線源位置を示す。

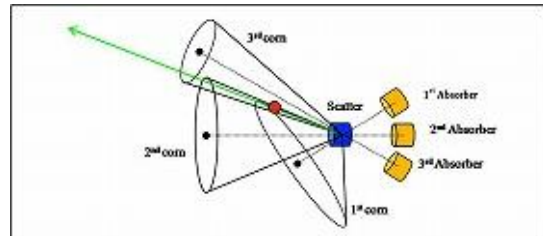


図4 ガンマ線源位置描画の概念図

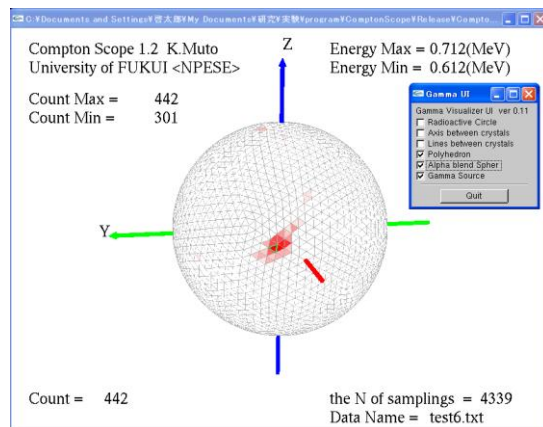


図5 描出されたガンマ線源位置 (赤い部分)

(3) ガンマ線コンプトンスコープの試作I

以上の基礎的検討を踏まえて、1つの散乱体 (プラスチックシンチレーター) を8個の吸収体 (NaIシンチレーター) が囲む形の直径80cm球のプロトタイプ検出器 (図6) を作製し、標準線源での実験を行った後に大強度照射施設にて実験的に評価した。その結果、標準線源を用いた実験では設計時の性能を確認できたが、大強度時のデータでは角度分解能は若干悪くなり、8.1度となった。これは強度が増えたための偶然同時計数増加による疑似散乱イベントによるものと考えられる。

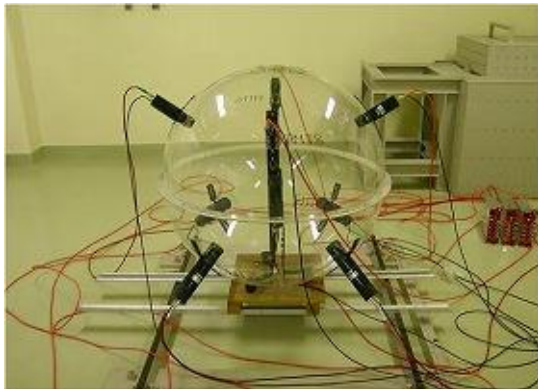
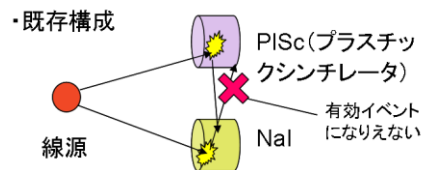


図6 コンプトンスコープの試作機

(4) コンプトンスコープの高効率化・小型化・リアルタイム処理に関する検討

① NaI-NaIの組み合わせによる構成

これまでの結晶組み合わせである散乱体にプラスチックシンチレーター・吸収体NaI(Tl)をNaI(Tl)-NaI(Tl)の組み合わせに変更した場合について検討した。NaI(Tl)-NaI(Tl)の結晶組み合わせ時のバックグラウンドイベントを低減させるために、双方の信号発生時間を精密に測定することで、ガンマ線のコンプトンイベントの方向性を同定可能であり、バックグラウンドとして捨てることなく有効に検出対象イベントとして採用可能であることを実験的に確かめた。この時の検出効率は1.7倍 (シミュレーションでは1.9倍) となった。



経路を限定することで経路を弁別する必要がない

図7 これまでのPlastic-NaIの組み合わせ

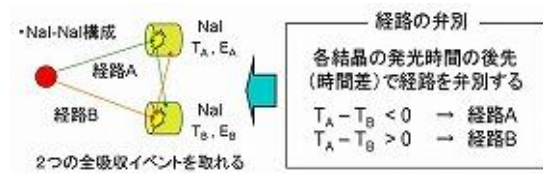


図8 新たなNaI-NaIの組み合わせ

② NaI-NaI組み合わせの基礎実験

コンプトンスコープを構成するシンチレーターとして、散乱体と吸収体双方にNaI(Tl)シンチレーターを用いた場合の検出器の応答について、シミュレーションと実験で検証し、シンチレーター間隔を30cm以上確保することによりそれぞれのシンチレーターでの応答時間の違いを捉えることが可能であり、散乱-吸収の過程を同定できることが確認された。図9に応答時間差分布を示す。左と右に二つのピークが見られるが、この2つのピークが2つの経路に対応している。

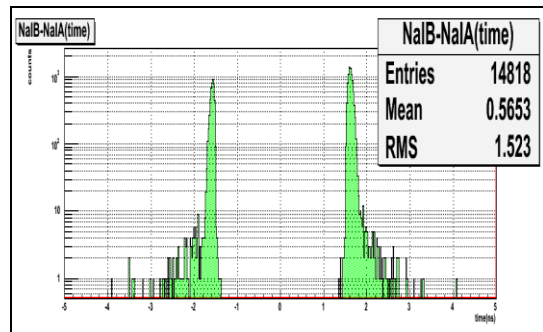


図9 シンチレーターでの応答時間差分布

(5) ガンマ線コンプトンスコープに試作II

① 4NaI型コンプトンスコープ

4つの2インチNaI(Tl)シンチレーターを頂点に配置する正4面体 (1辺50cm) のコンプトンスコープ (図10) を構築し、シミュレーションと標準線源を用いた実験を行った。その結果、検出器は正常に動作し、散乱角 (γ 線入射方向) を導出できることが確認された。検出効率は散乱体としてプラスチックシンチレーター1個を用いた9結晶モデルに比べて2.3倍に向上した。角度分解能 (平均値) はシミュレーションでは2.5° 実験では5.4° となり、散乱角が大きくなる結晶配置の場合に角度分解が悪くなる傾向を示した。これは実機におけるエネルギー分解能の影響によるものと考えられた。図11に回路構成を示す。

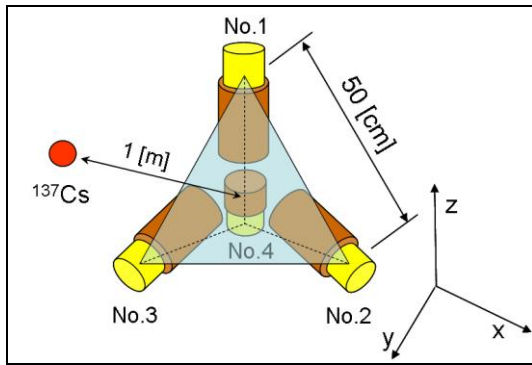


図10 4 NaI型実験機概念図

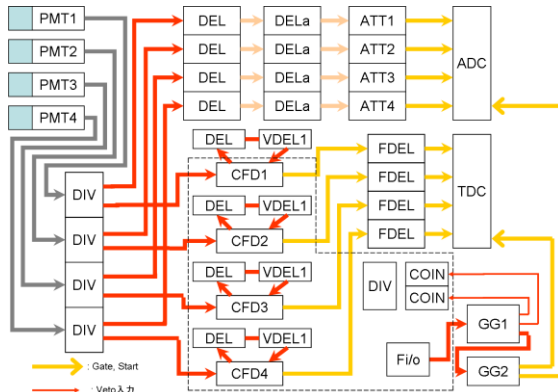


図11 4 NaI型コンプトンスコープの回路構成

③リアルタイム読み出しのためのFADCを用いた実験において、エネルギー損失ばかりでなく、パルスの立ち上がり時間をも同定することが可能となり、シンチレーター内イベントの時間差を利用した効率的なデータ収集にも対応可能であることを確認した。

まとめ

全方向有感型 γ 線探査のためのコンプトンスコープをNaI(Tl)シンチレーション検出器を用いて構築し、シミュレーションおよび実験によりその動作を検証した。4結晶モデルで散乱体・吸収体の区別を無くすることで装置の小型化を実現し同時に検出効率が向上した。データのリアルタイム読み出しについては、FADCを用いたデータ収集システムが有効でありことを実験的に確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① S. Aogaki, S. Isogai, M. Kobayashi, S. Sugimoto, F. Takeuchi, Y. Tamagawa, Measurement of 0.511 MeV gamma-rays with

a thin long strip of $Gd_2SiO_5:Ce^{3+}$ scintillator, Nucl. Instr. Meth. (査読有) A614 (2009) 250-259

- ② J. Fu, M. Kobayashi and S. Sugimoto, Scintillation from Eu^{2+} in nanocrystallized glass, J. Am. Ceram. Soc. (査読有) 92 (2009) 2119
- ③ B. Adeva, M. Kobayashi, Evidence for πK -atoms with DIRAC, Phys. Lett. (査読有) B674 (2009) 11-16
- ④ M. Kobayashi, S. Sugimoto, Y. Tamagawa, 他5名, Scintillation characteristics of $CsPbCl_3$ single crystals, Nucl. Instr. Meth. (査読有) A592 (2008) 369-373
- ⑤ Kei Kamada, Masaaki Kobayashi, Shojiro Sugimoto 他8名, Scintillation properties of 2-inch-diameter $Pr:Lu_3Al_5O_{12}$ single crystal, IEEE NSS MIC 2007, Conference Record (査読有) N57-8 (2008) 2480-2484
- ⑥ J. Fu, M. Kobayashi, S. Sugimoto and J.M. Parker Eu^{3+} -activated heavy scintillating glasses Materials Research Bulletin (査読有) 43 (2008) 1502-1508

[学会発表] (計9件)

- ① 前川 祐希, 林 長宏, 藤原 直生, 小林 正明, 杉本章二郎, 玉川 洋一, FADCを用いた全方位有感型 γ 線飛来方向検出器の開発, 日本原子力学会 2010年春の年会, 2010年3月27日, 茨城大学(水戸)
- ② 前川祐希, 磯貝翔太, 佐藤健, 林長宏, 小林正明, 杉本章二郎, 玉川洋一, γ 線飛来方向検出器の検出効率向上に関する研究 2009年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会 2009年12月5日 金沢大学
- ③ 藤原直生, 水谷大希, 玉川洋一, 能町正治, 味村周平 シンチレーション検出器信号処理用FADCの時間分解能と処理速度の向上 2009年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会 2009年12月5日 金沢大学
- ④ 石川裕也, 林長宏, 玉川洋一, 菊池彦光, 新規シンチレーター $Ba_2InB_9O_{18}$ の作成と評価, 日本物理学会北陸支部定例学術講演会 2008年11月29日 福井大学
- ⑤ 下川智史, 中村勇千, 玉川洋一, 能町正治, 放射線計測のための波形データ測定-FADCリアルタイム処理の試み-, 日本物理学会北陸支部定例学

術講演会 2008年11月29日 福井大学

- ⑥ 柳田広務, 玉川洋一, 小林正明, 杉本章二郎, 多結晶型コンプトンスコープの性能改善—角度分解能向上を目指して—, 日本物理学会北陸支部定例学術講演会 2008年11月29日 福井大学
- ⑦ 武藤啓太郎, 前川祐希, 玉川洋一, 小林正明, 杉本章二郎, 放射線源核種と位置が特定可能なコンプトンカメラの開発, 平成19年度日本原子力学会秋の大会 2007年9月27日 北九州国際会議場
- ⑧ 前川祐希, 武藤啓太郎, 玉川洋一, 小林正明, 杉本章二郎, γ 線源探索のためのコンプトンカメラの開発 2007年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会 平成19年12月1日 富山大学
- ⑨ 武藤啓太郎, 前川祐希, 玉川洋一, 小林正明, 杉本章二郎, 多結晶型コンプトンスコープの開発, 平成19年度日本原子力学会春の年会 平成20年3月26日 大阪大学

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

玉川 洋一 (TAMAGAWA YOICHI)
福井大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：40236732

(2) 研究分担者

杉本 章二郎 (SUGIMOTO SHOJIRO)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・名誉教授
研究者番号：20044753

小林 正明 (KOBAYASHI MASA AKI)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・名誉教授
研究者番号：40013388