

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 17 日現在

機関番号：13401  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22560827  
 研究課題名（和文） 全方位有感型高性能 $\gamma$ 線探査機の開発  
 研究課題名（英文） R&D of  $4\pi$  gamma ray monitor  
 研究代表者  
 玉川 洋一（TAMAGAWA YOICHI）  
 福井大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号： 40236732

## 研究成果の概要（和文）：

原子力施設内の放射能汚染等に対応するための「全方位有感型高性能 $\gamma$ 線探査機」の開発を行った。探査機のガンマ線検出部としては、4つの1インチ LaBr<sub>3</sub>結晶を採用し、それを正4面体の頂点に配した構造とした。信号処理部は、まず従来の NIM-CAMAC を用いた方法によりガンマ線源の位置を角度 3° 程度の誤差で導出可能であることが確認された。次に、信号処理部に FADC 回路を用いた場合、サイズの小型化のみならず有効イベント数の向上に大きく寄与することが確認された。

## 研究成果の概要（英文）：

4 $\pi$  gamma-ray monitor system for nuclear power plant was developed. Detector part of this system was 4 LaBr<sub>3</sub> crystals mounted on the regular tetrahedron structure. Using NIM-CAMAC circuit for the signal processing, we decided the gamma ray direction with the direction resolution of 3 degree. When FADC was used for the signal processing, it contributed to smaller size and good efficiency.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：原子力計測・放射線計測

## 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、また一般社会においても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と残

留場所の同定を精度良く行うことの必要性が指摘されている。

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、比較的能量の

低い $\gamma$ 線の検出方法はこれまでに様々な方法で確立されてきているが、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には至っていなかった。また、ガンマ線の飛来方向を明らかにする検出器としては、開口部を小さく絞ったコリメーターを利用した検出器は実在するが、検出視野はコリメーター方向に限定されており、全立体角をモニターし可視化するものは存在しない。

一方で、人工衛星に搭載される大型なコンプトン望遠鏡はガンマ線天文学のために開発され、現在宇宙において観測を開始しているが、これは機構が大変複雑で開発・製作に大変な労力と資金を必要とするため、原子力関連施設に簡単に設置して放射線漏洩をモニターするための検出器としては適していない。

そこで、研究代表者らは、前回の科研費補助金（H19—H21）の支援を受けて「数個の結晶からなる全方向リアルタイム型ガンマ線源探査機」の実験機を開発・製作し、ガンマ線と物質の相互作用の一つであるコンプトン効果を利用した比較的簡単なシステムでガンマ線の飛来方向を同定できることを立証した。この実験機では合計9個のシンチレーション検出器を用いて、空間角度分解能 $5^\circ$ でガンマ線の飛来方向とガンマ線エネルギーおよびその頻度を同定することが可能であることを実験的に明らかにした。また、得られたデータをPCで処理し、全立体角視野のどの方向から飛来したのかをわかりやすく表示するためのソフトウェアを開発し、ガンマ線の飛来方向と強度・エネルギーを視覚的に捉えることをも可能にした。

## 2. 研究の目的

これまでの「リアルタイム型全方向ガンマ線探査機（コンプトンスコープ）」（実験器）の開発研究により、ガンマ線のエネルギーと飛来方向を $5^\circ$ の角度分解能で視覚的に同定可能であることを実証できた。本研究では、検出効率を向上させながら角度分解能 $3^\circ$ 以内のものを実現させる。さらに、検出器からの多数の信号を効率的にリアルタイム処理し、検出器システム全体をコンパクトに保つために、現在、高エネルギー物理実験分野で導入されている波形処理モジュールであるFADC（フラッシュADC）やデータ収集システムを駆使し、コンパクトで開発・製作費を抑えたプロトタイプ機の製作を実現することを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究は下記の項目について検討を重ねながら遂行した。

- ・コンプトンスコープの実験機からプロトタイプ機への高性能化のための設計変更（基礎実験とシミュレーションによる）  
角度分解能 $3^\circ$ を目指す。検出効率向上の対策。
- ・効率的な信号パルス処理のためのFADCモジュールの導入とシステム開発。
- ・リアルタイム処理可能なデータ収集系の導入とシステム開発。500MHzFADCを用いたデータ収集系の整備とリアルタイム・オンライントリガーによるデータ収集能の向上。
- ・実際の原子炉関連施設への設置を考慮したプロトタイプ機の製作と動作確認・評価

## 4. 研究成果

### 4-1 コンプトンスコープ製作のための計算機シミュレーションの実施

GEANT4 シミュレーターによるシミュレーションを行った。種類はNaI(Tl)で2インチ、1インチ、およびLaBr31インチの3種類とした。その結果結晶間距離30cm角度30度—45度の配置で1インチ結晶を用いる場合が検出効率・角度分解能を高く維持できることが明らかとなった。また、正四面体の頂点に検出器を配置することによりすべての立体角( $4\pi$ )に対応したコンプトンカメラとして散乱イベントに対応できることを確認し、それぞれの検出器を散乱体・吸収体の両方の働きを持たせることで検出効率は3倍となることが確認できた(図1)。

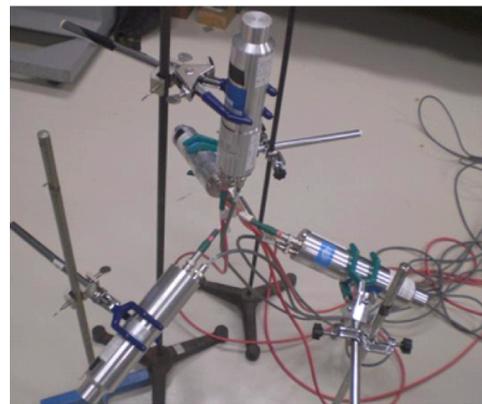


図1 4 $\pi$ 有感型装置の検出器配置

### 4-2 LaBr3 シンチレーターによる基礎実験

NaI(Tl)に替わってエネルギー分解能の高いLaBr3(1インチ)結晶による実験を行ったところ、Cs-137(0.662MeV)でのエネルギー分解能は約2.8%( $1\sigma$ )となり、NaI(Tl)1インチの6.4%( $1\sigma$ )に比べて2倍以上のエネルギー分解能を有していることを確認した(図2)。LaBr<sub>3</sub>シンチレーター2本を組み合わせてコンプトンスコープを形成し実験を行い、散乱角が大きくなると散乱 $\gamma$ 線

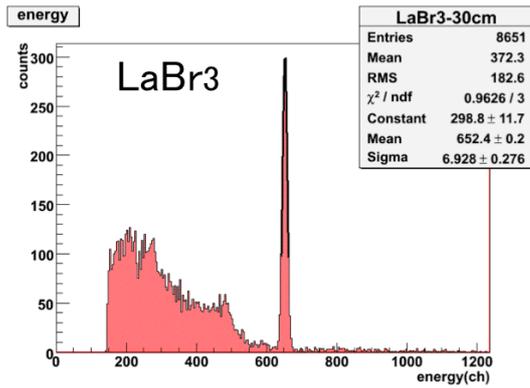


図2  $^{137}\text{Cs}$  エネルギースペクトル (LaBr3)

のエネルギーが小さくなるためエネルギー計測の揺らぎが大きくなり角度分解能が大きくなることが確認できた。これにより、散乱角 30 度において目標とする角度分解能 3 度以下を達成した (図 3)。また、 $^{137}\text{Cs}$  と  $^{60}\text{Co}$  の 2 種類の線源を別の位置に設置し  $\gamma$  線のエネルギー同定と位置同定が同時に可能であることも実験により確認した。

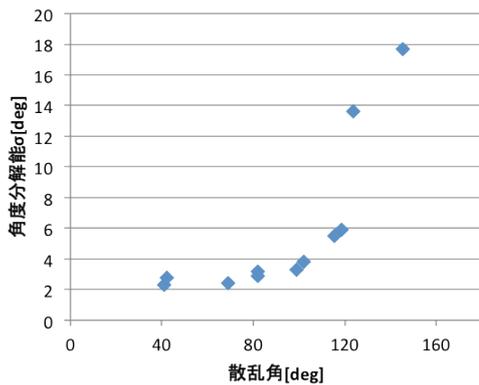


図3 散乱角と角度分解能の関係

#### 4-3 FADC 導入のためのプログラム開発

できるだけ少ない波形形成回路モジュールで、シンプルな計測システムを実現するため、500MHz 動作でプログラム可能な FPGA 搭載型 FADC を用いるための整備を行った。データ取得のためのプログラム開発を行い、動作試験を行った (図 4、図 5)。

さらに、主に検出器信号のリアルタイム処理に重点を置いた整備を行った。FADC を用いた偶然同時計数や散乱ガンマ線のイベントの効率的な排除方法については、FADC データ処理部分にデジタルコンスタントディスクリミネーター (dCFD) を作成して搭載し、各検出器の応答時間差を精度よく導出しマークし、同時に各検出器でのエネルギー損出をリアルタイムに計算する機能を搭載することで行うこととした。デジタルコンスタント

ディスクリミネーターは、検出器のパルス発生時刻 (パルス時間と呼ぶ) を正確に同定するための方法であり、外部設置型 NIM モジュールが不要でありしかもパルス時間を 100ps 程度の精度で決定できる。さらに、データ収集時点でリアルタイムに各イベントの検出器のパルス時間とエネルギー損失量を調べるオンラインソフトウェアトリガーを導入することにより、バックグラウンドイベントや偶然同時イベントを同定して選択的に排除することが可能となり、効率の良いデータ収集が可能となった (図 6)。

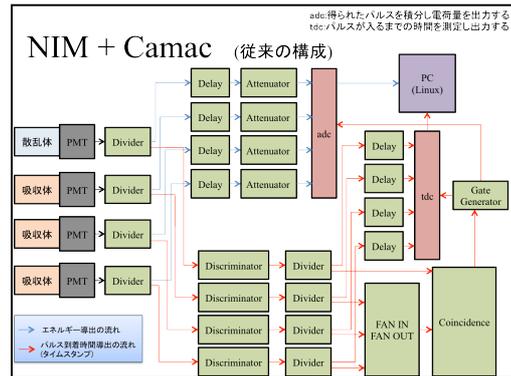


図4 従来のデータ収集回路の模式図

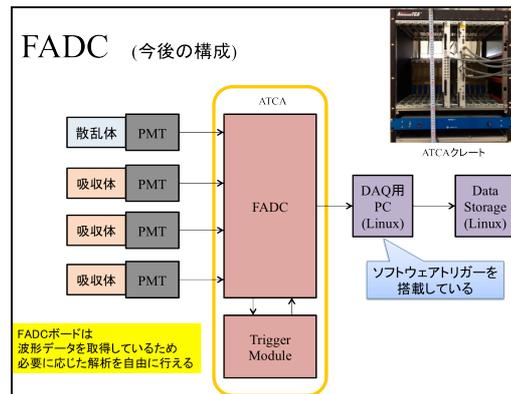


図5 FADC 採用時のデータ収集回路の模式図

#### dCFDのメリット

波形の大きさに依存せず時間的ゆらぎのないタイムスタンプを決定できる  
 →より正確に不要なイベントをカット可能

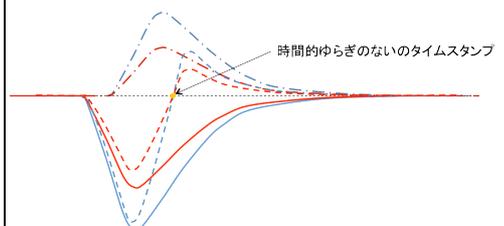


図6 dCFDによるパルス時間の決定方法

また、FADC の転送データとしては、波形構

成点すべてを転送し保存するのではなく、時間計算・エネルギー計算した後、コンプトン散乱角と検出器対の番号のみを転送するため転送データ量を節約して効率を上げることが可能となった。

#### 4-4 装置の組上げと動作試験

検出器ヘッド部固定装置を作成して検出器の位置を固定し、装置を組み上げ、標準線源を用いた実験を実施し、検出器動作試験を行った。その結果、角度分解能等については、 $^{137}\text{Cs}$  線源からの 662keV ガンマ線に対して、ほぼ目標の  $3^\circ$  を達成し、データ読み出し効率は従来の方法の 2.6 倍程度に改善されていることを確認した。

#### 4-5 まとめ

4つの1インチ  $\text{LaBr}_3$  シンチレーターによる全方向有感型ガンマ線探査装置を開発し、次のことを確認した。

- ・角度分解能は散乱角により変わるが、最小  $2.3^\circ$ 、最大  $4.6^\circ$ 、平均  $3.4^\circ$  であり、2インチ  $\text{NaI}$  に比べ、平均 63%の値となり良くなった。

- ・2結晶では散乱角  $120[\text{deg}]$ 以上は信頼性がないが、4結晶の組み合わせで全方向をカバーすることで実用になる。

- ・2方向・2線源でシミュレーション実験及び、実際に実験を行った結果、2つの角度ピークを確認し、Cs、Co線源ごとに角度を導出できた。また、合計エネルギーより核種同定も可能となることを確認した。

- ・小型化を考慮してパルス回路部分を簡略化するため、FADCを搭載した実験を行った。その結果、dCFDにより正確なパルス時間を決定することが可能となり2結晶の経路弁別が容易となった。また、FADCを利用したオンラインソフトウェアトリガーを開発し、有効イベント数が35%から90%に著しく向上し、効率的なデータ取得が可能となった。

#### 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3件)

1)

B. Adeva, M. Kobayashi

Determination of  $\pi\pi$  scattering lengths from measurement of  $\pi^+\pi^-$  atom lifetime  
Phys. Lett. B704 (2012) 24-29 査読有り

2)

M. Kobayashi, Y. Tamagawa, S. Tomita, A. Yamamoto, I. Ogawa, Y. Usuki

Significantly different pulse shapes for  $\gamma$ - and  $\alpha$ -rays in  $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$  scintillating Crystals

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 694 (2012) 91-94 査読有り  
3)

Performance of thin long scintillator strip of  $\text{GSO}:\text{Ce}$ ,  $\text{LGSO}:\text{Ce}$  and  $\text{LuAG}:\text{Pr}$  for low energy  $\gamma$ -rays

M. Kobayashi, S. Aoyagi, F. Takeuchi, Y. Tamagawa, Y. Usuki

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 693 (2012) 226-235 査読有り

[学会発表] (計5件)

1)

藤田剛志、上野智史、水谷大希、小川 泉、玉川洋一

全方向有感型コンプトンカメラの開発

日本原子力学会 2013年春の年会 2013年03月28日 近畿大学

2)

犬飼裕司、川村篤史、小川泉、玉川洋一、鈴木耕拓、味村周平、能町正治、小林正明  
コンプトンカメラのFADCを用いたデータ取得

2012年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会 2012年12月01日 金沢大学

3)

山本彰紘、富田翔吾、小川泉、玉川洋一、小林正明

冷却状態でのGSOシンチレータの発光特性

日本物理学会第67回年次大会 2012年3月24日 関西学院大学

4)

玉川洋一、小川泉、水谷大希、上野智史、藤田剛志

全方向有感型コンプトンカメラの開発

平成23年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会 2011年11月26日 福井大学

5)

上野智史、水谷大希、玉川洋一、小川泉、小林正明

$2\pi$ 型ガンマ線飛来方向検出器の開発

2010年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会 2010年11月27日 富山大学

#### 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・教授

研究者番号：40236732

(2) 研究分担者

小林 正明 (KOBAYASHI MASAOKI)

高エネルギー加速器研究機構・素核研・

名誉教授

研究者番号：40013388