様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ３０ 年　 ６ 月 １０ 日現在

機関番号：８２１１０
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2014～2017
課題番号：２６８００１５２

研究課題名（和文）ゲルマニウム検出器用高速デジタル波形処理システムの開発

研究課題名（英文）Development of a waveform readout system for germanium detectors

研究代表者
細見　健二（Kenji, Hosomi）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・バックエンド研究開発部門　核燃料サイクル工学研究所　放射線管理部・技術員

研究者番号：４０７１０３８０

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、ゲルマニウム(Ge)半導体検出器の新しい信号読み出し方式として、高速デジタル波形処理技術の開発を目的としている。高速デジタル波形処理システムを開発し、Ge検出器の波形データを取得し性能テストを行った。また、Ge検出器のエネルギー校正システムとしてLSO結晶を用いたLSOパルサー、その他データ収集装置に必要なFPGA回路の開発を行った。 これらの成果は、J-PARC用のガンマ線分光装置Hyperball-J、エックス線分光装置Hyperball-Xに応用されている。

研究成果の概要（英文）：Purpose of this work is to develop a new readout system of germanium detectors based on digital waveform sampling and analysis. I developed a waveform readout system and its performance was tested. I also developed a LSO pulsar system using LSO scintillators for in-beam energy calibration and FPGA circuits for data acquisition system.
These outcomes of this work are applied for germanium detector arrays (Hyperball-J and Hyperball-X) in J-PARC experiments.

研究分野：原子核物理(実験)

キーワード：ゲルマニウム半導体検出器　波形読み出し

１．研究開始当初の背景

ハイパー核の核構造は、核子（陽子、中性子）とラムダ（Λ）粒子の間の相互作用で記述できるため、実験でハイパー核の核構造を測定して、理論計算と比較することによって間接的にΛ粒子と核子間の相互作用（ΛN 間相互作用）を研究することができる。ΛN 間相互作用にはスピン依存性があることが知られており、コアとなる通常の原子核（^{A-1}Z）とΛ粒子のスピンの組み合わせによって、ハイパー核　（$^{A}_{\Lambda}Z$）の低励起状態にはスピン依存相互作用による特徴的な微細構造（スピン二重項）が現れる。これまでに、ゲルマニウム（Ge）半導体検出器を用いたガンマ線分光実験により、そのスピン二重項のエネルギー間隔が数 10〜数 100　keV と非常に狭いことが測定され、ΛN 間のスピン依存性は核力に比べて小さいことが分かっている。また、質量数が 7〜16 までのハイパー核の核構造が明らかになり、ΛN 間相互作用の理論計算モデルに対して大きなフィードバックを与えている。しかし、実験で観測されたすべてのハイパー核の構造を統一的に説明することはできていない。これは、多体効果や原子核依存性などといった不定性が残っているためであり、ΛN 間相互作用の研究をさらに進めるためには様々な種類のハイパー核の構造を系統的に測定することが望まれていた。

2008　年に茨城県東海村に大強度陽子加速器施設 J-PARC が建設され、大強度ビームを利用した実験が可能となるため、新型の　Ge 検出器群である Hyperball-J を開発し、$^{4}_{\Lambda}He$、$^{19}_{\Lambda}F$　を含む多くの種類のハイパー核を対象としたガンマ線分光実験が計画された。しかし、現状の Ge 検出器の信号処理回路では図１に示すようにビーム強度に対する不感時間の増加のため、J-PARC の大強度ビームを十分に利用することができないことが分かっており、実験計画を進める上でこのボトルネックを取り除く必要があった。

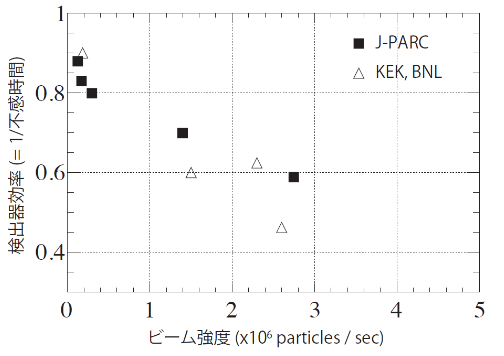

図１：ビーム強度と Ge 検出器の不感時間の関係。J-PARC、KEK、BNL での実験において得られた実測値をプロットしてあり、2〜3 MHz　のビーム強度でガンマ線収量が飽和する。

２．研究の目的

本研究では、J-PARC の大強度ビームを利用したガンマ線分光実験を可能にするため、Ge　検出器の信号処理方式としてより高計数率に耐性のある新しい方式（高速デジタル波形処理システム）を開発する。図２に示すように、新しい方式では、Ge　検出器のプリアンプ出力波形は高性能サンプリング ADC によってデジタル化して記録され、その後の波形解析によりエネルギー情報と時間情報が読み出される。また、不感時間の主要因であったアナログ整形アンプは不要になるため、信号処理回路全体の処理時間が短縮でき、高計数率への耐性が高くできる。

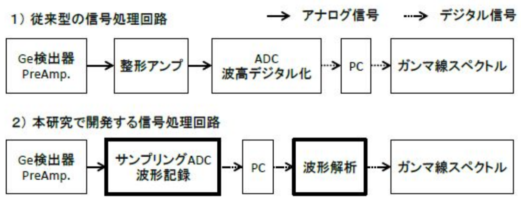

図２：従来型と本研究で開発する信号処理方式の違い。

３．研究の方法

高速デジタル波形処理システムのプロトタイプ（ハードウェア＋ソフトウェア）を製作し、その性能評価を行う。プロトタイプのハードウェア構成は、汎用モジュールとして市販されている高性能サンプリング　ADC（5V/16bit、100 MHz サンプリング）を主体として、その他に必要となる部品も市販の汎用モジュールを利用する。データ収集プログラム、波形解析プログラム及びモジュール制御用　FPGA　プログラムなどはすべて開発する。Ge　検出器はビーム実験に最適化された低増幅率のトランジスターリセット型プリアンプ搭載のものを使用する。

その他に、Ge 検出器のエネルギー校正や性能モニター用のデータを取得するため、Lu_2SiO_5(LSO)シンチレーターと光検出器を組み合わせた LSO パルサー（標識化ガンマ線トリガー生成器）を製作し、その性能を試験する。

波形解析プログラムは、図３に示すように、利用目的に分けて次の２つを開発する。

①PC によるオフライン解析用

メインのデータとして使用するため、エネルギー分解能を最重視する。オフライン解析のため、解析時間は長くてもよい。

②FPGA 回路によるオンライン解析

ハードウェアレベル（FPGA 回路）でラフな解析を行い、エネルギー弁別したトリガー生成などに利用する。オンライン解析となるため、解析時間を最重視し、エネルギー分解能は犠牲とする。

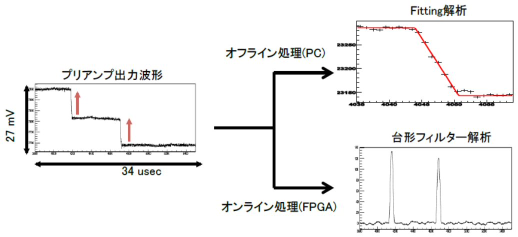

図３：ソフトウェアによる波形解析手法。

４．研究成果

(１)高速デジタル波形処理システムの開発
　高速デジタル波形処理システムのプロトタイプの開発・製作に成功した。プロトタイプは、カスタマイズ性を高くするため、VME規格の汎用モジュールを組み合わせて製作し、データ収集プログラムとモジュール制御用の FPGA プログラムを作成した。波形解析ソフトウェアは、波形を関数でフィッティングする方式と、台形フィルターと呼ばれるデジタルフィルターを用いる方式の２つを開発した。^{60}Co 線源からのガンマ線を Ge 検出器に入射させて開発した高速デジタル波形処理システムで Ge 検出器のプリアンプ信号を読み出し、その性能評価を行った。
　オフライン解析用の波形フィッティング方式では、エネルギー分解能（FWHM）は、当初、1.33 MeV のガンマ線に対して約 15 keV と Ge 検出器本来の分解能(約 2 keV)に比べ、性能が出ていなかったが、Ge 検出器のプリアンプの増幅率を高く調整したところ、約 6 keV まで改善させることができた。Ge 検出器のプリアンプの出力回路側を高速デジタル波形処理システムに合わせて最適化すればさらに改善させることができると考えている。
　オンライン解析用の台形フィルター方式では、エネルギー分解能（FWHM）は 1.33 MeV のガンマ線に対して約 10 keV が得られ、エネルギー弁別したトリガー生成用としては十分な性能があることが確認できた。

(2)LSO パルサーの開発
　標識化したガンマ線トリガーを生成する LSO パルサーを開発した。LSO パルサーの原理は、LSO 結晶に天然に含まれる ^{176}Lu のベータ崩壊とそれに続くガンマ崩壊の同時計数法である。LSO 結晶は無機シンチレーターであるため、^{176}Lu のベータ崩壊によって発光し、その光信号を LSO 結晶に接着した光検出器で検出する。光検出器には古くからある光電子増倍管と近年開発された MPPC の２つを使用した。実験室での試験では、両者ともパルサーとしての性能に差はなかったが、実際のビーム実験にて試験した結果では、MPPC 型の LSO パルサーの方は、小型化できるため設置場所の制約を受けないこと、また、MPPC は電磁石による磁場の影響を受けないなどのメリットが大きいことが分かった。

(3)ガンマ線分光実験の遂行
　2015 年に、J-PARC K1.8 ビームラインにて、$^{4}_{\Lambda}$He と $^{19}_{\Lambda}$F のガンマ線分光実験（J-PARC E13）を行った。E13 実験では、$^{4}_{\Lambda}$He の核構造の測定を過去実験よりも精密に行い、その鏡像核である $^{4}_{\Lambda}$H の核構造と比較して、ΛN 間相互作用の荷電対称性が大きく破れていることを発見した。また、$^{19}_{\Lambda}$F の核構造を初めて明らかにした。E13 実験には、新型の Ge 検出器群 Hyperball-J を使用したが、この Hyperball-J を開発・製作するにあたり、本研究開発にて得られたデータ収集プログラムやモジュール制御用 FPGA プログラムなどを応用した。高速デジタル波形処理システムの応用は間に合わなかったが、今後改良を進め、J-PARC のビーム強度増強に対応したいと考えている。
　2016 年に、X 線分光に特化して開発した Ge 検出器群 Hyperball-X を使用して、グザイハイパー核の X 線分光実験(J-PARC E07)を行った。この Hyperball-X の開発・製作においても、本研究開発にて得られたデータ収集プログラム、モジュール制御用 FPGA プログラム、MPPC 型 LSO パルサーなどを応用した。

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　4　件）
①S.B. Yang, K. Hosomi(48 名中 14 番目),
First Determination of the Level Structure of an sd-Shell Hypernucleus, $^{19}_{\Lambda}$F,
Phys. Rev. Lett. 120, 132505, 2018, 査読有,
DOI:10.1103/PhysRevLett.120.132505

②Kenji Hosomi(33 名中 1 番目),
Precise determination of $^{12}_{\Lambda}$C level structure by γ-ray spectroscopy,
Prog. Theor. and Exp. Phys., 081D01, 2015, 査読有,
DOI:10.1093/ptep/ptv113

③T.O. Yamamoto, K. Hosomi(54 名中 17 番目),
Observation of Spin-Dependent Charge Symmetry Breaking in ΛN Interaction: Gamma-ray Spectroscopy of $^{4}_{\Lambda}$He,
Phys. Rev. Lett. 115, 222501, 2015, 査読有,
DOI:10.1103/PhysRevLett.115.222501

④T. Koike, N. Chiga, T. Haruyama, K. Hosomi, H. Ichinohe, K. Kasami, T. Matsushita, Y. Mizoguchi, H. Ono, K. Shirotori, T. Takeuchi, H. Tamura and T.O. Yamamoto,
Development of a low-temperature

germanium detector via mechanical cooling with a compact pulse-tube refrigerator, Nucl. Instr. Meth. A 770, 1-7, 2015, 査読有,
DOI:10.1016/j.nima.2014.09.084

〔学会発表〕（計　3　件）
①Kenji Hosomi,
Hypernuclear gamma spectroscopy,
The 31st Reimei Workshop on Hadron Physics in Extreme Conditions at J-PARC, 2016

②細見健二、
Ξ原子のX線分光用Ge検出器アレイの開発、
日本物理学会2015年秋季大会、2015年

③細見健二、
Ge検出器の波形読み出し、
Open-It 若手の会「若手研究会 2014」、2014年

〔図書〕（計　0　件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計　0　件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計　0　件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

６．研究組織
(1)研究代表者
細見　健二（HOSOMI　Kenji）
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・バックエンド研究開発部門　核燃料サイクル工学研究所　放射線管理部・技術員
研究者番号：40710380

(2)研究分担者
（　　　）

研究者番号：

(3)連携研究者
（　　　）

研究者番号：

(4)研究協力者
（　　　）