

機関番号：14301  
 研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2009～2010  
 課題番号：21740180  
 研究課題名（和文） 高エネルギー分解能 CdTe 検出器の開発ーダブルベータ崩壊探索に向けてー  
 研究課題名（英文） Development of CdTe detector having high energy resolution-toward the search for the double-beta decay-  
 研究代表者  
 市川 温子 (ICHIKAWA ATSUKO)  
 京都大学・大学院理学研究科・准教授  
 研究者番号：50353371

## 研究成果の概要（和文）：

ニュートリノを伴わないダブルベータ崩壊探索を目指して、厚さ 5mm 以上で、数 MeV 程度の放射線に対して高いエネルギー分解能を持つテルル化カドミウム(CdTe)検出器の開発を行った。

CdTe 半導体においては信号の大きさが放射線の反応した深さによって変わってしまいエネルギー分解能が悪化する。本研究では、単純な電極構造の素子からの信号を波形により補正して 662keV ガンマ線に対して 2%(FWHM) という高いエネルギー分解能を得た。

## 研究成果の概要（英文）：

Towards the future neutrino-less double beta decay search, we have developed a CdTe detector of more than 5mm thickness and having high energy resolution for a few MeV radiations.

The CdTe semiconductor has characteristics that the signal size depends on the interaction point, which worsen the energy resolution as the radiation detector. We have obtained the high energy resolution of 2%(FWHM) for the 662 keV gamma ray by correcting the signal pulse height using the pulse shape information.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子（実験）

## 1. 研究開始当初の背景

ニュートリノ振動現象の発見により、ニュートリノが質量を持つことが明らかとなったが、その質量がせいぜい数十 meV～数 eV と、同じレプトンである電子にくらべて 5～9 桁も小さいということは驚きであり、ニュートリノの質量の獲得が、クォークや荷電レプ

トンとは異なる機構で起きていることを示唆している。このような大きな差を説明する理論的モデルとして、シーソー機構が提唱されている。これは、ニュートリノが、粒子と反粒子が同一粒子であるマヨラナ粒子であることを仮定し、非常に大きな右巻きニュートリノ質量と、荷電レプトンと同程度のディ

ラック質量の混合の結果、現在観測されているような小さな質量状態が実現するというものである。ニュートリノが本当にマヨラナ粒子であるのかどうかは、シーソー機構の前提条件を確かめるという意味で重要なのもちろんであるが、「マヨラナ粒子」の存在を確認するだけでも素粒子物理学上、大きな意味をもち、実験的に解決されるべき問題である。これを確かめるために、ニュートリノを伴わない(0ν)ダブルベータ崩壊を検出する試みが、世界中で進んでいる。ベータ崩壊の過程で生成した仮想的なニュートリノが反ニュートリノとしてもう一度ベータ崩壊過程を引き起こす事象である。この崩壊事象は、ニュートリノの質量が小さいほど寿命としては長くなるため、現在観測されているような非常に小さな質量では、ごく稀にしか起きない。探索は、放出される数 MeV の2個の電子のエネルギーの和が作るピークを探すことで行われるが、稀崩壊のため環境背景事象の混入が深刻な問題となっている。現在の実験感度は、崩壊寿命として  $10^{25}$  年、対応するニュートリノの質量としては 1eV 程度までにしか達していない。ニュートリノを伴わないダブルベータ崩壊の寿命を測定することができた暁には、ニュートリノ質量の絶対値を知ることできる。

テルル化カドミウム(CdTe)結晶を素子とする半導体検出器は、常温で使用可能で、また高い元素番号(Z=48,52)のため高効率のガンマ線検出器として医療や宇宙観測の分野で利用されている。しかし、厚みを増すと検出位置によって収集される電荷量が変わってしまい、エネルギー分解能が非常に悪くなるという欠点をもっており、そのため素粒子原子核実験分野での利用はそれほど盛んではない。高エネルギー分解能 CdTe 検出器が開発されれば、素粒子原子核実験や宇宙観測の分野で大きく応用が広がると期待される。本研究では、高分解能 CdTe 半導体検出器を開発し、ダブルベータ崩壊探索実験に用いる可能性を追求する。

## 2. 研究の目的

CdTe 検出器を用いたダブルベータ崩壊探索実験を可能とするため、厚さ 5mm 以上で、数 MeV 程度の放射線に対して高いエネルギー分解能を持つ CdTe 検出器の開発を目指す。

## 3. 研究の方法

CdTe 半導体においては正孔の移動度が遅くまた寿命が短いため、放射線によって生成

された正孔が電極に到達する前にある割合で捕獲されてしまう。したがって、信号の大きさが放射線の反応した深さによって変わってしまいエネルギー分解能が悪化する。この傾向は、素子が大きくなればより顕著になる。本研究では、信号波形から、放射線によって対生成が起こった場所と正孔の吸収の度合いを推定し、信号を補正することによってエネルギー分解能を改善する。具体的には、

- 波形の読み出しシステムの構築
- 市販の 2mm 厚 CdTe 素子を用いた波形の解析
- 5mm 厚素子の試作と、それを用いた波形補正法の確立
- 10mm 厚素子の試作とその評価
- バイアス電圧や環境温度等を変えて測定を行い、基礎特性の理解を進める

といったことを行う。

また、試作した素子を用いて、ダブルベータ崩壊の背景事象の評価も行う。

## 4. 研究成果

### (1) 波形読み出しシステムの構築

CdTe 素子からの生信号を前置増幅器を通した後に、VME100MHz フラッシュ ADC モジュールで読み出すシステムを構築した。前置増幅器については、微分時定数の最適化を行い、高い精度で波形情報を保存できるようにした。

(2) 市販品である 2mm 角の素子にガンマ線源を照射した際の信号について、(1)の方法で波形情報を取り込み、波形が素子内の放射線反応位置の情報を反映していることを確認した。

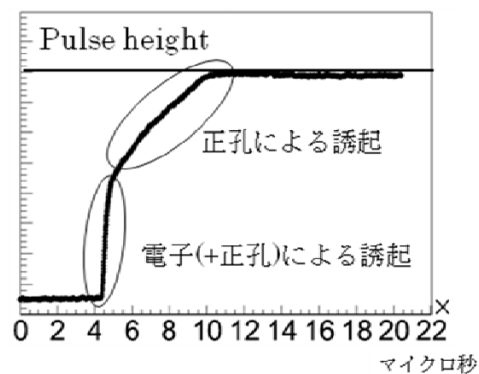


図1 5mm角CdTe検出器の信号の例  
プリアンプからの出力を見ている。

(3) 5mmx5mmx5mm の結晶素子を試作した。図1に、この素子からの信号波形の例を載せる。図にあるように、電子と正孔では、移動度が大きく異なるため、それぞれの誘起信号がはっきりと判別でき、放射線が反応した場所に依りて、信号が立ち上がりきるまでの時間が変わる。この信号の立ち上がり時間から、素子内で信号が減衰した分を補正する方法の開発に成功し、図2のように662keVのガンマ線に対し、2%(FWHM)という高いエネルギー分解能を得た。1.3MeVのガンマ線に対しては、1.4%(FWHM)となっている(図3)。

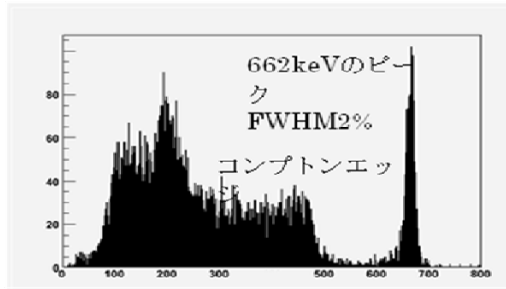


図2: 5mm角CdTe検出器による662keVガンマ線の波形補正後の波高分布。

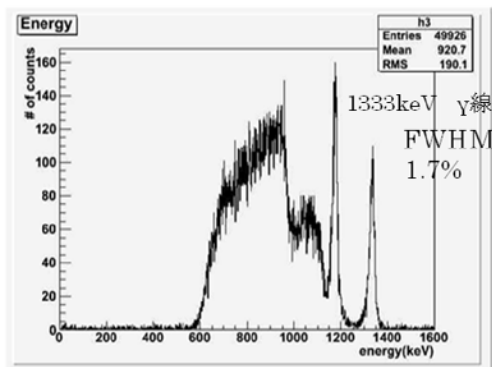


図3 15mm x 15mm x 10mm(厚)素子

(4) 15mmx15mmx10mm(厚さ)素子の試作とその評価

5mm角素子に比べて、正孔の捕獲の効果が大きく、エネルギー分解能が悪いという結果となった。すなわち、1.3MeVのガンマ線に対して、5mm角素子では1.4%(FWHM)であったのに対し、15mmx15mmx10mm素子では3.9%であった。

(5) バイアス電圧や環境温度等の条件を変えての基礎特性の測定

液体窒素を用いて、雰囲気温度を-90℃から30℃の範囲で変化させ、性質の温度依存性を測定した。低温では、正孔の移動度が低下することを発見した。

分解能を悪化させる要因の一つである漏れ電流の温度やバイアス電圧依存性を測定した。測定結果を考慮したシミュレーションにより信号波形の再現を行い、分解能を悪化させている要因として、漏れ電流および正孔の捕獲が主要因であることをつきとめた。



図4 15mm x 15mm x 10mm(厚)素子

この様に、低温では正孔の移動度が低下し、高温では漏れ電流によるノイズが増加するため、最も良い分解能が得られるのは、0℃付近であるとつきとめた。

(6) 5mm角の素子を用いてダブルベータ崩壊探索の妨げとなる背景事象の評価を行った。環境放射線の40K等が観測されたが、特に素子起源の背景事象は検出されなかった。

(7) まとめ

CdTe 半導体検出器について、単純な電極構造の素子からの信号を波形により補正して662keV ガンマ線に対して2%(FWHM)というエネルギー分解能を得た。得られた結果について考察を行い、さらなる分解能の向上、素子の大型化のためには、正孔の移動、バイアス電圧、塩素ドーピング量、環境温度について改善の余地があることがわかった。

## 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)

[学会発表] (計 2件)

- ① 平木貴宏、市川温子、木河達也、中家剛、南野彰宏、山内隆寛、大型で高エネルギー分解能のCdTe半導体検出器の開発、日本物理学会、2011年3月28日、(新潟大学)
- ② 木河達也、市川温子、中家剛、横山将志、高エネルギー分解能CdTe検出器の開発、日本物理学会、2010年3月23日、岡山大学

[その他]

ホームページ等

<http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/member/ichikawa/CdTeWiki/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

市川 温子 (ICHIKAWA ATSUKO)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：50353371

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：