

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月 8日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23654076

研究課題名（和文） カリウム地球ニュートリノ測定のための CdWO<sub>4</sub> 結晶シンチレータ検出器の開発研究課題名（英文） Development of CdWO<sub>4</sub> Crystal Scintillator for Potassium Geoneutrino Measurement

研究代表者

清水 格 (SHIMIZU ITARU)

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・助教

研究者番号：10400227

研究成果の概要（和文）：

地球内部の熱源である放射化熱の量を決定するため、カリウム原子核崩壊に起因する低エネルギーの反ニュートリノに対しても感度を持つ CdWO<sub>4</sub> 結晶シンチレータの開発を実施し、基本性能の評価を行った。実測したパラメータを基にしたプロトタイプ検出器の設計が完了し、新型反ニュートリノ測定装置を実現する具体的な方法を確立した。この結果、約 20% の不定性でカリウム地球ニュートリノ量を決定するのに必要な検出器の大型化を検討できる段階となった。

研究成果の概要（英文）：

The development of CdWO<sub>4</sub> crystal scintillator sensitive to low-energy anti-neutrinos emitted by Potassium nucleus decays was performed to measure the radiogenic heat contribution in Earth's heat production, and its performance was evaluated. The prototype detector based on measured parameters was already designed, and built a realistic technic for a new anti-neutrino detection device. As a consequence, the study has reached the stage to start to discuss a plan for a future large detector to measure the Potassium anti-neutrino flux at about 20% uncertainty.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,200,000	960,000	4160,000

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

地球の歴史は 46 億年と言われるが、同程度の寿命をもつウラン・トリウム・カリウムなどの放射性核種は、現在でも地球活動の原因となる熱の発生に重要な寄与をしていると考えられている。これらの核種がベータ崩壊する際、熱と同時に電子型反ニュートリノ（地球ニュートリノ）を発生する。ニュートリノは弱い相互作用しかしない透過力の強

い素粒子であるため、地上の検出器でも地球内部からのニュートリノを捕らえることができる。実際 2005 年には、1,000 トンの液体シンチレータを用いた KamLAND 実験において、ウラン・トリウム崩壊起源の地球ニュートリノの初観測に成功している。これに続いて最近、イタリアの Borexino 実験においても観測が確認されたことによって、地球ニュートリノの多地点観測が実現された。このような

地球ニュートリノの測定は、地球の熱収支を決定するための唯一の手段であるため、現在ではニュートリノ物理と地球科学の両方のコミュニティから注目を集めている。

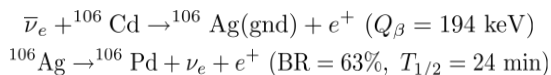
現在の地球の熱収支を知ることは、地球の歴史・進化を予測するための土台となる。放射化熱の寄与は、地球化学による推定によるとウラン 8 TW、トリウム 8 TW、カリウム 3 TW、合計 19 TW であるのに対し、地球表面からの熱流量の測定値 (44 ± 1 TW) の約半分程度である。この発熱量と熱流量の比 (約 0.5) を「ユーリー比」と呼び、地球冷却の度合いを測る地球物理では重要なパラメータである。ウラン・トリウムの放射化熱は、今後の地球ニュートリノ測定によって精度よく確認されると期待されるが、カリウムについては未だに観測の目処は立っていない。

## 2. 研究の目的

本研究課題は、カリウム崩壊起源の地球ニュートリノを観測するための手法を確立することを目的としている。カリウム地球ニュートリノのエネルギーはウラン・トリウムよりも低く、1.8 MeV のエネルギーしきい値を持つ陽子標的による実験での観測は不可能である。そこで、よりエネルギーしきい値の低い  $^{106}\text{Cd}$  の逆ベータ崩壊反応を利用した検出器を開発し、将来計画する大型装置においてウラン・トリウム・カリウムからの全放射化熱の測定が可能となることを立証する。この方法によって地球内部の放射化熱が正確に測定された場合、地球の歴史・進化に対する決定的な知見が得られる。

## 3. 研究の方法

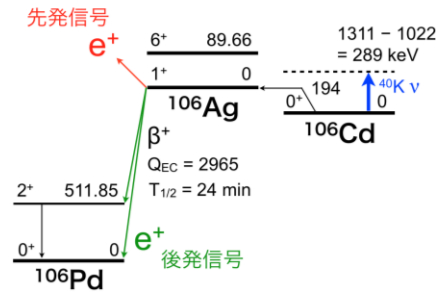
これまでの地球ニュートリノ観測は、エネルギーしきい値 1.8 MeV の陽子の逆ベータ崩壊反応を利用するため、エネルギーの高いウラン・トリウム崩壊起源のニュートリノのみの測定に限定されていた。本研究では、エネルギーしきい値の低い  $^{106}\text{Cd}$  の逆ベータ崩壊反応を利用してカリウム地球ニュートリノの測定を実現する。この場合、以下のような反応が連続して起こる。



上式の陽電子が先発信号を作り、1.216 MeV のニュートリノエネルギーしきい値を持つ (下図)。一方、下式の陽電子が後発信号を作り、陽電子は対消滅によるガンマ線を放出するので [1.02 MeV, 2.965 MeV] の範囲の観測エネルギーを持つ。この測定の利点は、2 つの連続した陽電子に起因する 4 つの対消滅ガンマ線 (511 keV) からの特徴的な信号を利用し、環境ガンマ線からのバックグラウン

ドを抑えることができる点である。

## $^{106}\text{Cd}$ のニュートリノ捕獲反応



カリウム地球ニュートリノの測定に使用することができる原子核には 40 以上の候補があるが、この中でも比較的反応断面積の大きい  $^3\text{He}$  や  $^{107}\text{Ag}$  が有力であるとされてきたが、バックグラウンド量の削減が重大な課題であった。一方、 $^{106}\text{Cd}$  を用いた場合には、以下のような利点がある。

- (1) 逆反応のベータ崩壊における log ft 値が 4.7 と小さいため、比較的新ニュートリノ捕獲反応断面積が大きい。
- (2) ニュートリノ捕獲反応で陽電子と  $^{106}\text{Ag}$  が作られ、さらに  $^{106}\text{Ag}$  が 24 分の半減期でベータ崩壊し陽電子を作るため、遅延同時計測によるバックグラウンドの削減が可能である。
- (3) 装置の細分化により 2 つの対消滅ガンマ線を分離観測し、陽電子の識別を行った場合、さらにバックグラウンドが低減できる。
- (4)  $\text{CdWO}_4$  結晶は、一般的なシンチレータとして使用されており、発光量や透過率などの性能も優れている。
- (5) 二重ベータ崩壊の測定に応用された実績があり、放射性不純物の低減や同位体濃縮の方法が確立されている。

このようなカリウム地球ニュートリノの測定手法を実現するため、以下の開発と研究を行う。

- (1) 装置設計に必要な  $\text{CdWO}_4$  結晶シンチレータの発光量・透過率・時定数などのパラメータを測定する。 $\text{CdWO}_4$  結晶は、原料となる高純度な  $\text{CdO}$ ,  $\text{WO}_3$  酸化物を溶解混合し、種結晶をゆっくりと引き上げて単結晶に成長させて製作される。ウクライナ国立研究所における二重ベータ崩壊の実験では、330g の単結晶の製作に成功しており、発光量は  $\text{NaI}$  の 40%、減衰長は 20cm、時定数は 10  $\mu$  秒程度であると報告されているが、同程度の性能が得られることを確認する。

- (2) 対消滅ガンマ線の同時計測を実現するためには、2つのガンマ線を空間的に区別するために装置を細分化する必要がある。511 keVのガンマ線の飛程と現実的なセル数などを考慮に入れて装置をデザインする。1つのセルを、直径2cm、長さ1mの棒状のCdWO<sub>4</sub>結晶シンチレータとした場合、16×16セルで1トンの検出器となる。CdWO<sub>4</sub>結晶の屈折率が2.3と大きいために効率よく全反射光を両端まで導くことができる。光学シミュレーションツールを用いて、シンチレーション光を高効率で集光できる光学系を設計する。
- (3) 同時計数法によるバックグラウンド除去の効率を見積り、CdWO<sub>4</sub>結晶シンチレータに含まれる放射性不純物の濃度に対する要求を評価する。各セルで1 Hz程度まで低減させることで、4重同時計測で目標のバックグラウンド削減を達成する。

#### 4. 研究成果

CdWO<sub>4</sub>結晶シンチレータの性能評価のため、<sup>60</sup>Co線源のガンマ線を利用してシンチレーション光の計測を行った。発光時定数は、14μ秒であることが判明した。この結果を用いて、1トンサイズの検出器での4重同時計測による検出効率をシミュレーションによって評価する。2つの対消滅ガンマ線を効率的に識別するためには装置を細分化する必要があるが、直径2cm、長さ1mの棒状の結晶を縦横に16セルずつ並べることで、71%の陽電子検出効率が見積られることを確認した。一方、同じエネルギーのガンマ線はコンプトン散乱などの影響によって13%程度混入することから、バックグラウンド除去率は5分の1程度となる。この結果から、プロトタイプ検出器で近距離からの原子炉ニュートリノを検出する場合、結晶中に含まれる放射性不純物のウラン・トリウム濃度に対してそれぞれ4×10<sup>-14</sup> g/g以下、4×10<sup>-13</sup> g/g以下(現在の不純物濃度の30分の1以下)に抑える必要があることが分かった。カリウム地球ニュートリノの検出の場合、1万分の1以下の削減とより厳しい要求となるが、それでも液体シンチレータで達成されている10<sup>-18</sup> g/gに比べると2桁程度緩い要求である。

1トンサイズの検出器では、縦横に16セルの計256セルごとに光検出器を用意する必要があるが、コスト面で有利なMPPCを検討した。光学シミュレーションによって、シンチレータの内部全反射の寄与によって一定の集光率が確保できることが示されたが、MPPC前面に集光するためのレンズが複雑な

設計になることが予想される。そこでレンズの代わりに、高電圧が印加された光電面とシンチレータを組み合わせたデザインも検討したが、電場を考慮した電子の収集効率の評価が今後の課題である。

カリウム地球ニュートリノを観測するためには、1トンCdWO<sub>4</sub>結晶シンチレータ検出器をさらにスケールアップしてKamLAND実験のようなキロトンスケールの検出器を用意する必要がある。検出器のスケールアップを段階的に行うため、今後は小型のサイズでも実現可能な原子炉ニュートリノ観測を行うためのデザインを検討する。<sup>106</sup>Cd原子核のニュートリノ捕獲断面積は陽子とくらべると大きく、1kgの検出器でも原子炉すぐそばの検出器では1日あたり約1,000事象のレートが期待される。また、観測できるニュートリノのエネルギーも低いと、比較的近距离でのニュートリノ振動実験への応用が可能となるというメリットもある。将来さらにスケールアップしてキロトン検出器が実現した場合、地球モデルの予測では5年の測定でカリウム地球ニュートリノが約50事象観測されると期待される。このとき、ウラン・トリウムの不定性20%と同程度の精度で地球内部カリウム量が見積もられ、ウラン・トリウム・カリウムからの全放射化熱の寄与が決定される。

#### 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1件)

1. A. Gando, ..., I. Shimizu, 他カムランド共同研究者 (66名中16番目)、Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurement、Nature Geoscience、査読有、4巻、2011年、647-651、doi:10.1038/ngeo1205

[学会発表] (計2件)

1. 清水格、Geo Neutrino: Experiment、LowNu2011、2011年11月10日、韓国
2. 清水格、Results of Geo Neutrino and Xenon Experiment with KamLAND、Symposium on the Life and Science of Dr. Raju Raghavan、2012年10月20日、米国

[その他]

ホームページ等

<http://www.awa.tohoku.ac.jp/kamland/>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

清水 格 (SHIMIZU ITARU)  
東北大学・ニュートリノ科学研究センター・助教

研究者番号：10400227

(2) 研究分担者  
( )

研究者番号：

(3) 連携研究者  
( )

研究者番号：