

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：13401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K14279

研究課題名(和文)ニュートリノ観測による核廃棄物遠隔モニタリングシステムの構築

研究課題名(英文)Development of remote monitoring system of nuclear waste by neutrino observation

研究代表者

中島 恭平(Nakajima, Kyohei)

福井大学・学術研究院工学系部門・講師

研究者番号：30722540

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：国内の原子炉稼働によって発生する高レベル放射性廃棄物について、地下数百m以下に埋設する地層処分が検討されている。本研究では、この放射性廃棄物が地下に安定的に保管されていることを、ニュートリノ観測数の統計的変動を捉えることによって、遠隔から高レベル放射性廃棄物をモニターできるか試みるものである。ニュートリノの検出反応である逆ベータ崩壊が利用できる閾値1.8MeV以上の核種を同定し、核廃棄物から発生するニュートリノフラックスの計算を行った。また検出器開発として、環境放射線バックグラウンド低減に向けた、放射線種類による波形の違いを利用可能なプラスチックシンチレータを用いて、波形弁別能を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、これまで基礎科学分野として行われていたニュートリノ観測技術の応用を試みるものであり、世界で初めて核廃棄物モニターとしてのニュートリノ検出器の実現性を探るものである。核廃棄物ニュートリノフラックスについても見積もられたことがなく、本研究によって初めて、大型ニュートリノ実験における核廃棄物ニュートリノに対する影響を検討することが可能となる。

研究成果の概要(英文)：It is considered that high-level radioactive waste generated from a nuclear reactor will be buried several hundred meters underground. In this study, we try to monitor the stable storage of radioactive waste in the underground by observing the statistical fluctuations of the number of neutrinos from high-level radioactive waste. We identified nuclides with a threshold of 1.8 MeV or higher that can be used for inverse beta decay and calculated the neutrino flux generated from nuclear waste. In addition, as a detector development aiming to reduce the background of environmental radiations, we evaluated the pulse shape discrimination of a plastic scintillator that can discriminate gamma rays and neutrons.

研究分野：素粒子実験、放射線計測

キーワード：核廃棄物 高レベル放射性廃棄物 ニュートリノ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

日本国内では、過去半世紀におよぶ原子力発電の利用によって、大量の使用済燃料が発生してきた。これらは再処理されて、そこから発生した高レベル放射性廃棄物は安定性を増すためにガラス固化処理され、放射能が低減した数十年後に、300m以上の地下深くに埋める計画となっている。これらは容易にアクセスできない環境下で数万年保管される計画となっており、原則として長期安全性の確保を目的とした、処分場閉鎖後の管理(モニタリング等)は必要でないことになっている[1]。しかしながら、社会的要請によって閉鎖後もモニタリングを継続することがあり得ると指摘されている[2]。モニタリング手法としては、処分場にアクセスの必要がある放射能測定や、周囲の地下水サンプリングといった間接的な放射能の漏れ出しを確認する測定が考えられている。

このような状況に対して、核廃棄物の保管場所に全く影響を与えず、また保管場所から数百m離れた距離から安全に核廃棄物の保管状況をリアルタイムでモニターできる手段として、ニュートリノによる核廃棄物モニターを着想するに至った。

廃棄物内の核種から崩壊によって発生したニュートリノは、物質と非常に反応しにくいいため周辺の物質で遮蔽されることなく透過するが、ニュートリノ標的物質を10トン程度と大量に用意することによって、モニタリングに必要な統計量が得られる見込みがある。核廃棄物であるガラス固化体1本あたりの放射能は、燃料取り出し後で $10^{19}$ Bq、ガラス固化体後で $10^{16}$ Bqと非常に高く、また国内でこれまで発生した使用済燃料は約25,000本のガラス固化体に相当するという事実がある。よって、大量のガラス固化体を一か所に保管した場合に十分なニュートリノ反応が得られると試算し、物理的に断絶した位置から安全に核廃棄物保管状況のモニタリングが可能であると考えた。

### 2. 研究の目的

本研究は、核廃棄物からのニュートリノ反応数を見積もることで核廃棄物ニュートリノモニターの実現性を検証し、小型検出器を開発してバックグラウンド測定を行い、実機装置の基本設計を行うことを目的とする。以下、各項目について説明する。

#### (1) 核廃棄物からのニュートリノ反応数の見積もり

核廃棄物の放射能が地下水などで漏れださずに同じ位置に存在しているかを判断するために、1日あたり数十以上のニュートリノ事象を観測する必要がある。ここでは、ニュートリノ反応数の見積もりに必要な核廃棄物ニュートリノフラックスを求めることを目標とする。

核廃棄物ニュートリノは、過去に経験のある原子炉ニュートリノ観測と同じ、逆ベータ崩壊反応(反電子ニュートリノ + 陽子 → 陽電子 + 中性子)を用いて検出する。反応閾値が1.8MeVであるため、これ以上のエネルギーを持ったニュートリノしか反応しない。よって、核廃棄物内に存在する崩壊する核種の内訳を調べ、どの核種が1.8MeV以上のニュートリノを放出するかを調査する。核廃棄物ニュートリノフラックスは放射能の時間変化に従って変化するため、燃料取り出し後の任意の経過時間におけるニュートリノフラックスを求める。以上によってニュートリノ反応数を計算し、検出器サイズ(ニュートリノターゲット量)を検討する。

#### (2) 検出器の設置場所条件とデザイン設計の決定

実機装置のデザインを決定する上で重要なのが、バックグラウンド事象の見積もりである。逆ベータ崩壊反応では、宇宙線ミュオンや宇宙線起因の高速中性子がバックグラウンドとなる。これらの宇宙線に起因するバックグラウンドは地中深くに潜るほど低減するため、一般的にニュートリノ実験は地下で行われている。本研究では検出器の設置が容易な地上か、もしくは浅い地下での測定を検討している。

この際、バックグラウンドである高速中性子を波形で弁別できるようなシンチレータの性能評価を行い、信号である陽電子と中性子の波形弁別能の評価を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) 核廃棄物からのニュートリノ反応数の見積もり

ニュートリノフラックスの計算手法の確立とニュートリノ反応数の見積もり

核廃棄物から発生するニュートリノのフラックス計算は過去に文献がなく、本研究による初の試みとなる。ニュートリノは核廃棄物中の核種が崩壊されて発生するため、どのような核種が存在するかを知る必要がある。その中でも、1.8MeV以上のニュートリノを発生する核種を調査する。

本研究ではさらに調査する核種範囲を広げ、詳細な見積もりを進めていく。放射性核種の生成・崩壊を計算可能な代表的な計算プログラム ORIGEN(米国オークリッジ国立研究所が開発)を活用し、燃料取り出し後の任意の時間における核種内訳を計算する。それぞれの崩壊核種からニュートリノスペクトルを計算して合算し、核廃棄物ニュートリノフラックスを求める。

ニュートリノ検出器の素材として、長期間安定した測定が可能であり、かつ安全性の高いプラスチックシンチレータを採用する。1/100 スケールである 10 リットルサイズのプラスチックシンチレータを用い、宇宙線ミュオン、高速中性子、環境ガンマ線事象について、地上および地下で測定を行う。近年開発された波形弁別能を有するプラスチックシンチレータを用い、どの程度 線と中性子を弁別可能かを評価する。

#### 4. 研究成果

核廃棄物から発生するニュートリノフラックスの計算を行い、核廃棄物中の構成原子核を時系列順に調べ、ニュートリノを発生する核種を特定した。さらにそれぞれの核種から発生するニュートリノをエネルギー事に足し合わせることでニュートリノフラックスを求め、特にニュートリノの検出反応である逆ベータ崩壊の閾値 1.8MeV 以上の核種からのニュートリノを求め、100m 離れた位置にある検出器でどの程度の統計量が得られるかを試算した。

次に環境放射線バックグラウンド低減に向け、放射線種類による波形の違いを利用可能なプラスチックシンチレータ 5cm 角を用いて、線と中性子事象の波形弁別能評価のための測定を行った。プラスチックシンチレータ周りに、ニュートリノ反応の際発生する中性子を吸収し線を放出する 6Li 入りシートで覆い、線・線・中性子事象の波形弁別能評価を行った。これらの結果、それぞれの放射線を波形弁別可能であることを確認した。さらに、大型化に限界があるプラスチックシンチレータ開発から 6Li を含有した液体シンチレータ開発に着手した。Li の化合物は水溶性であるため、界面活性剤を通じて溶かす必要がある。Li を溶かすところまで成功しており、今後は波形弁別能を有する Li 入り液体シンチレータの開発を行っていく必要がある。

#### <参考文献>

- [1] IAEA(1995), The Principles of Radioactive Waste Management, IAEA Safety Series No. 111-F
- [2] IAEA(2001), Monitoring of Geological Repositories for High Level Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-1208.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 K. Nakajima et al.	4. 巻 916
2. 論文標題 Temperature dependence of scintillation properties and pulse shape discrimination between gamma- and alpha-rays in Gd3Al2Ga3O12:Ce scintillator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A	6. 最初と最後の頁 51-55
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2018.11.012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 中島恭平
2. 発表標題 Reactor Neutrino Monitor Experiments in Japan
3. 学会等名 Applied Antineutrino Physics 2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中島恭平
2. 発表標題 ニュートリノ観測による核廃棄物遠隔モニタリングの検討
3. 学会等名 原子力学会2017年秋の大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kyohei Nakajima
2. 発表標題 Status of reactor neutrino monitor developments in Japan
3. 学会等名 International Workshop on Applied Antineutrino Physics（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------