

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：32607

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03891

研究課題名(和文) 背景事象の飛躍的削減による地表でのMeVニュートリノ測定

研究課題名(英文) Measurement of MeV energy anti-electron neutrino at earth's surface with a drastical background reduction

研究代表者

川崎 健夫 (Kawasaki, Takeo)

北里大学・理学部・教授

研究者番号：00323999

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：原子炉内部の核分裂反応により発生する反電子ニュートリノ(原子炉 )を地表・屋外に設置した小型の検出器で観測することが本研究の目的である。プラスチックシンチレータ検出器を用いた約2.5カ月間の測定により、原子炉から45mの距離で原子炉 を5.1シグマの有意度でエネルギースペクトルとして観測することに成功した。

続けて測定時間の短縮のため背景事象の削減に関する基礎研究に取り組んだ。中性子検出方法やシンチレータの種類、光検出器などについて、テスト測定器を製作して評価した。多数の小型光検出器MPPCを用いる、もしくは波長変換ファイバーによって、反応位置の分解能を向上させることが必要であると結論する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、原子炉内部の核分裂反応により発生する反電子ニュートリノ(原子炉ニュートリノ)を屋外に設置した小型・可搬型の検出器によって観測した。地表において、炉心から45メートルという建屋から遠く離れた位置でエネルギースペクトルとして観測することに成功した。この測定技術の開発によりニュートリノ振動実験など、素粒子物理学における新しい知見に関わる研究が進展することが期待される。また、原子力工学や核査察安全保障など、応用研究における発展も期待される。

研究成果の概要(英文)：The goal of the study is to detect anti-electron neutrino from reactor (Reactor neutrino) at the surface level with tenth meter distance. We have installed the detector developed of plastic scintillator to the point 45 m from reactor and succeeded to observe the energy spectrum with 5 sigma significance.

We have also studied on the items for new detector. Many items including that neutron detection, scintillators and opt-detectors were evaluated with prototypes. We have concluded that the most important item is the excellent spatial resolution realized by making a large coverage with many MPPCs or by readout segmented with WLS fibers.

研究分野：素粒子物理学(実験)

キーワード：原子炉 ニュートリノ シンチレータ 環境放射線・背景事象 ニュートリノ地表測定

## 1. 研究開始当初の背景

ニュートリノ振動は素粒子標準理論の枠内で説明されないため、標準理論を超えた物理の探索に繋がる有効な研究手段と考えられている。さまざまなエネルギーのニュートリノを用いた研究が活発に行われてきたが、ニュートリノと物質の反応確率(断面積)は極めて小さい。さらに**数 MeV 程度のエネルギーのニュートリノ**の反応は背景事象(BG: 環境放射線や宇宙線)との判別が難しいため“地表”での観測は非常に困難である。多くの実験では大深度地下に極低放射能環境を構築して行われている。

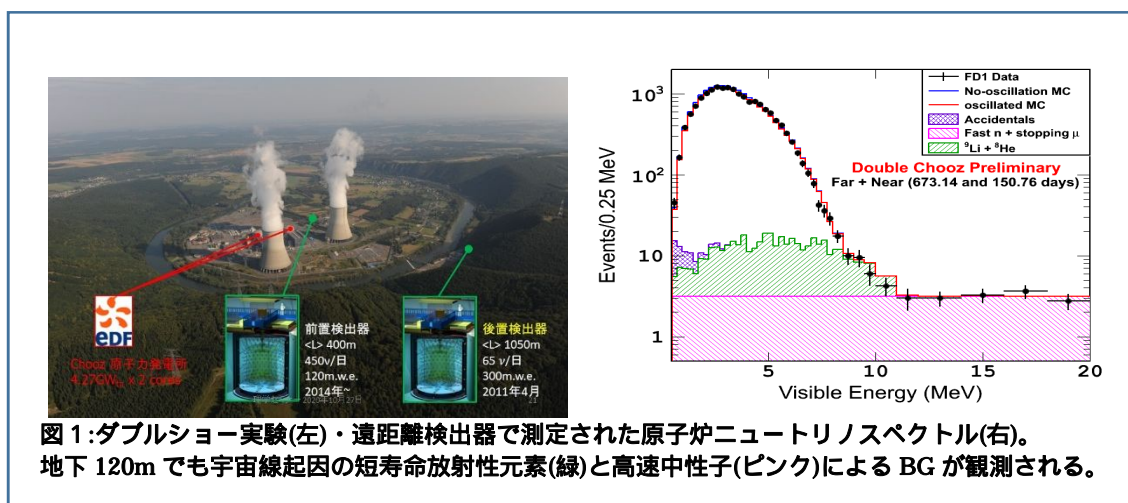


図1:ダブルショー実験(左)・遠距離検出器で測定された原子炉ニュートリノスペクトル(右)。  
地下120mでも宇宙線起因の短寿命放射性元素(緑)と高速中性子(ピンク)によるBGが観測される。

代表者の川崎が参加する、原子炉を用いたニュートリノ振動実験(ダブルショー)では、原子炉で発生する大量の反電子ニュートリノ( $\bar{\nu}_e$ 以降、原子炉)を観測しているが、このような地下施設を用いても、データ解析において、宇宙線による背景事象の除去が必要であった(図1)。もし、炉心から数十m程度の地表において原子炉を観測出来れば、ニュートリノに関する実験の自由度が飛躍的に上がり、素粒子物理学の研究が大きく前進することが期待される。そのため、我々は地表・屋外で測定可能な、小型可搬型測定器(原子炉モニター)を開発してきた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、原子炉モニターの開発を通じて、“背景事象の多い地表で、MeVエネルギーのニュートリノ測定を可能にすることにより、発生源測定器間の距離に制約のない、新しいニュートリノ実験の可能性を拓くこと”である。

## 3. 研究の方法

上記の「研究の目的」を実現するため、以下の2項目について研究を行った。

### (1)研究項目[A]小型検出器による原子炉の地表での有意な測定の実証

まず、現時点で実現できている技術により、地表・屋外において原子炉スペクトルを観測可能なことを実証した。開発した1トンクラスの原子炉モニターPANDA(Plastic Anti-Neutrino Detector Array)を用いて、商用原子炉から数十mの地表・屋外において、有意な精度で原子炉を観測した。背景事象を減らす解析手法を開発し、測定可能なエネルギーの下限を下げて原子炉の測定効率を高め、可能な限り短期間かつ高いS/N比(信号/背景事象数)でのエネルギースペクトル測定を実現する。

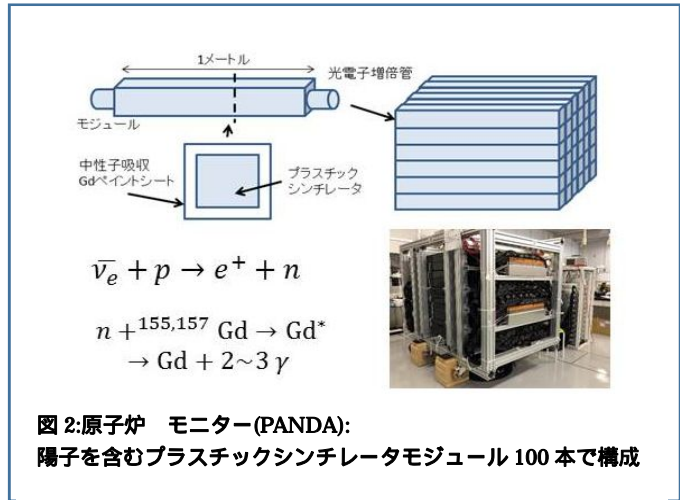
### (2)研究項目[B]さらなる背景事象削減のための測定器の改良:

将来の地表におけるニュートリノ実験を実現させるため、原子炉の「リアルタイム」測定を可能にするための基礎技術を開発する。統計的にしか観測できない原子炉を1事象で判別するためには、単なる背景事象の削減だけでなく、原子炉の方向や反応位置の精密な測定、粒子種(中性子/ガンマ線)の判別が必要である。現有の原子炉モニターの設計や検出原理を根本から見直し、試作モジュールの製作と評価により、改良についての基礎研究を進める。

## 4. 研究成果

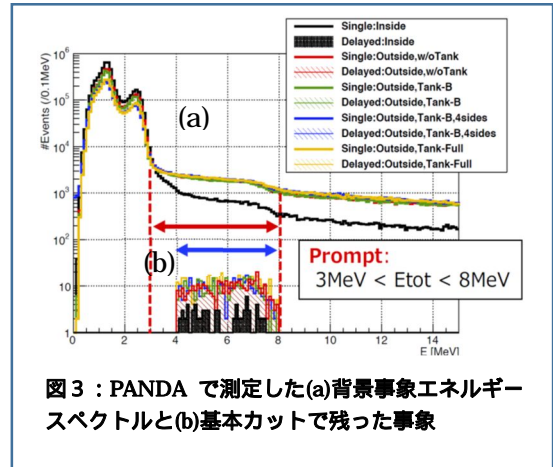
### 研究項目[A]

2011年の震災以来、国内の原子力発電所は多くが停止したため、商業用・研究用原子炉を用いた原子炉測定を行うことは困難であった。2017年ごろより電力会社との協議を進めた結果、未だ制約は多いものの、発電所内の再稼働した原子炉近傍での測定が可能であり、本研究に対して協力できる旨の回答を2018年度に関西電力・大飯発電所より得られたため、測定の準備を進めてきた。



#### (1) 測定準備(測定場所・期間について)

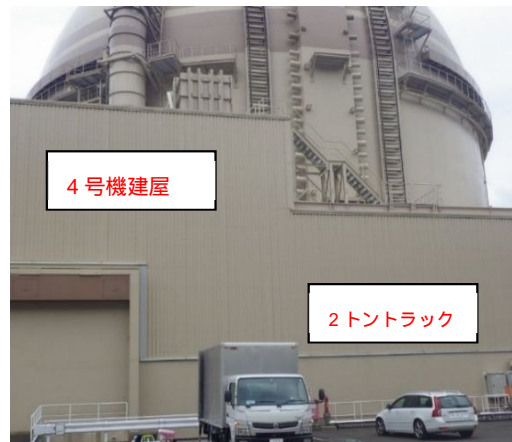
現有の技術により開発した原子炉モニター(PANDA)は測定器として完成している(図2)。2017年8月北里大学構内において屋外設置コンテナ内での背景事象の測定を行っていた。原子炉近傍で1トンのシンチレータにより原子炉の信号を検出するために必要な測定期間を見積もるため、あらためて解析した(図3)。基本的なカットにより背景事象数は3MeV以上で7,000(事象/日)程度と見積もられた。熱出力3GWの炉心からの距離を50m程度、測定有意度3を目標とした場合、原子炉の稼働/停止期間のそれぞれについて、少なくとも1カ月間程度の測定が必要であると見積もられた。関西電力との協議により、2019年度中に大飯発電所4号機付近にコンテナを設置して稼働/停止で各1~2カ月間の測定することが可能となった。



#### (2) 実際の測定

発電所の安全管理上の制約から、測定器の設置可能な場所は非常に限られていたが、最終的に炉心から約45mの位置に設置することが可能となった。台風などの非常時に移動可能なように、測定器は2トントラックの荷台内に積載して駐車した(図4)。

臨時の配電盤を設置してもらったが、使用可能な電力は2kW以内であった。人員が滞りせずに安定した長期測定を可能にするため、測定器の状態をリモートで監視・コントロールするための経路を、携帯電話回線を通じて構築した(発電所内のネットワークは保安上使用できないため)。



**図4: 関西電力大飯発電所(福井県)**  
測定器はトラックの荷台に積み、4号機建屋付近に設置した

測定は、原子炉稼働(2019/5/28-7/4), 停止(7/5-8/7)の期間に行った。屋外での長期測定では、外気温の変化が問題となる。電力の点からエアコンの使用はできない。2018 年度に行った予備測定では、外気温が氷点下の冬季でも荷台内部は摂氏 15 度を下回らず、6-7 月の測定では測定器や計算機の動作が困難な温度となる恐れがあった。そのため、赤外線反射シート(農業用)で荷台全体を覆い、荷台内部から熱気を排気するファンとダクトを設置することにより、測定器周辺の温度を摂氏 50 度以下に抑えることができた(図 5)。

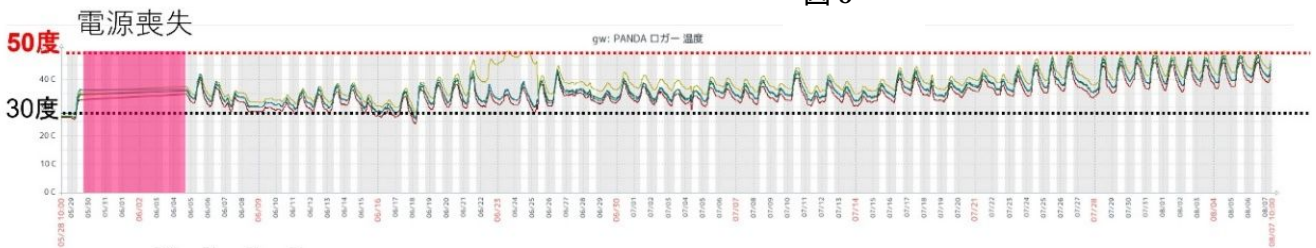


図 5

昼夜の温度変化は防げないため、測定器周辺に複数の温度モニターを配置した。原子炉の稼働/停止期間のデータを差し引くためには、測定器性能の長期間安定性が重要である。環境放射線(40K, 208Tl)によりエネルギー値を補正した(図 6)。

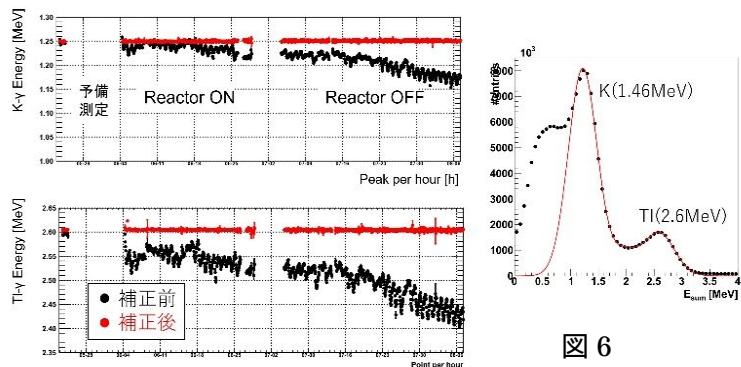


図 6

### (3) 測定データの解析

背景事象の削除には、通常のエネルギー値のカットの他に、先発(陽電子) 後発(中性子)信号の距離やイベント形状を含んだ Likelihood 法による選別を導入した。結果として、一日あたり  $175.8 \pm 34.4$  事象の原子炉 を観測した。これは 5.1 シグマの有意度にあたり、当初の予想よりも良い結果で、地表での原子炉 の測定が可能であることを実証できた。海外では近い距離(25m)での測定例があるが、国内では初の結果である。さらに、エネルギースペクトルを観測出来たことも大きな成果である。図 7 の左は原子炉稼働/停止時のデータと、その差を原子炉事象として、シミュレーションと比較して示している。右は BG である宇宙線起因の高速中性子事象である。

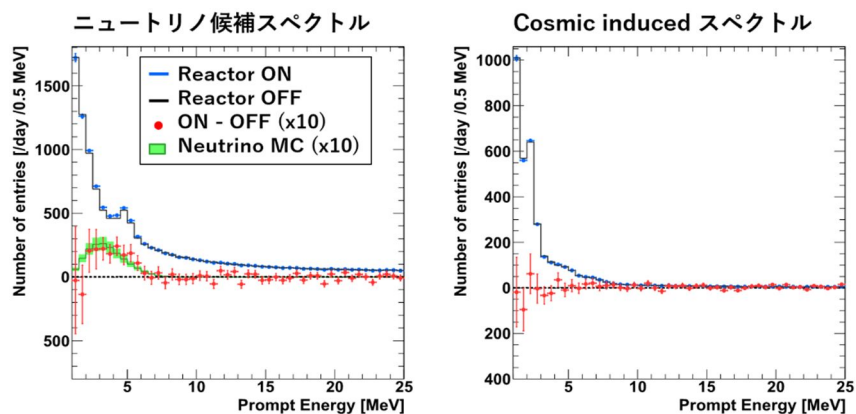


図 7

### 研究項目[B]

開発した原子炉 モニター(PANDA)は、100 本の固体シンチレータのモジュールにより構成されている(前頁 図 2)。この設計を根本から見直し検出効率、反応点位置分解能、背景事象除去能力を向上させることを目指した。

#### (1) 中性子検出方法:

反電子ニュートリノは、逆ベータ反応を通じて検出されるため、中性子の検出が測定器の性能を左右する。PANDA では熱中性子の捕獲断面積が最大である Gd を用いていたが( $n + \text{Gd} \rightarrow e^+ + \gamma_s$ )、これを、 ${}^6\text{Li}$  を用いることを検討した( $n + {}^6\text{Li} \rightarrow t + \alpha$ )。

実際には、高強度の中性子線のプロファイル測定に使用される「 ${}^6\text{Li}:\text{ZnS}$  シンチレータシート (以下シート)」を採用した。単一中性子の観測に使用できるかは不明である。シートと 3cm 角のプラスチックシンチレータを組み合わせる測定し、中性子による信号波形(発光時間)が大きく異なり、線と区別が可能であることを確認した(図 8)。ただし、時定数が違いすぎるため、両方を記録できるエレクトロニクスを構築することは、コスト・技術的に困難である。

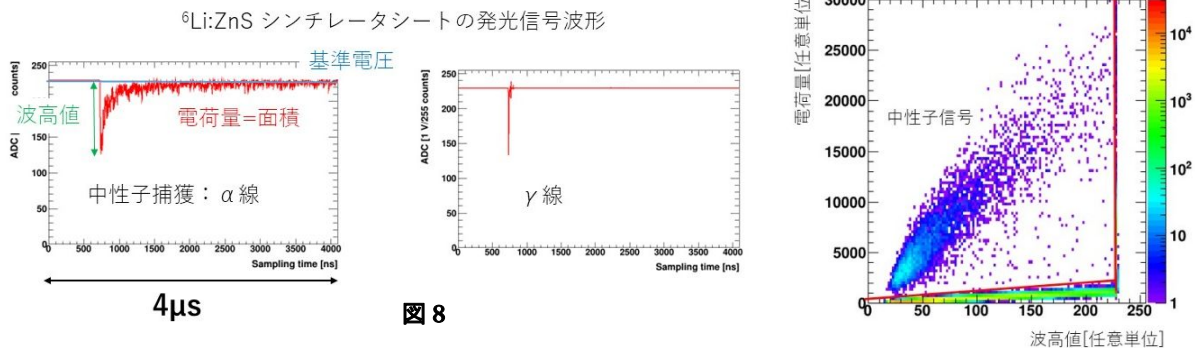


図 8

(2)そのため、陽電子( $\beta^+$ 線)と中性子の検出部を光学的に分離する設計を検討した。陽電子対消滅によるガンマ線に対して不感となるため、中性子検出部は薄くする必要がある。 ${}^6\text{Li}$  の使用により反応点の広がり小さくなり、結果として位置分解能が向上するはずである。図 9 のような薄いアクリルと PMT による中性子検出部を製作し、位置再構成能力について調べた。 ${}^6\text{Li}$  シートによる中性子捕獲信号の位置再構成ができた。しかし、PMT では密な配置が困難で不感領域が大きくなる。そのため観測光量が、数光子程度と小さくなる。

(3)光検出器の選択：小型の光検出器として MPPC(Multi-Pixel-Photon-Counter)の使用を試みた。MPPC の有感領域は数 mm 角と小さいため、多数を配置する必要がある。

もう一つの方法は波長変換ファイバーを用いて、光検出領域を細分化することであるが、観測光子数はそれほど多くはならないため反射材の使用等の工夫が必要である。これまでに得られた結果からは、最終的にどちらの方法が優れているかを決定できない。

(4)固体のシンチレータやアクリルを用いた方法以外に、 ${}^6\text{Li}$  含有液体シンチレータの開発も行った。 $\text{LiCl}$  の濃度を増やすと中性子検出効率も大きくなるが、透明度が下がるため、検出効率の最適化を行った。また、 ${}^6\text{Li}$  は 7.5%しか自然に存在しない。次のステップとして、95%まで濃縮した  ${}^6\text{LiCl}$  (価格は約 1,000 倍)を使用した大サイズの測定器(5-10 リットル程度)を開発する予定である。

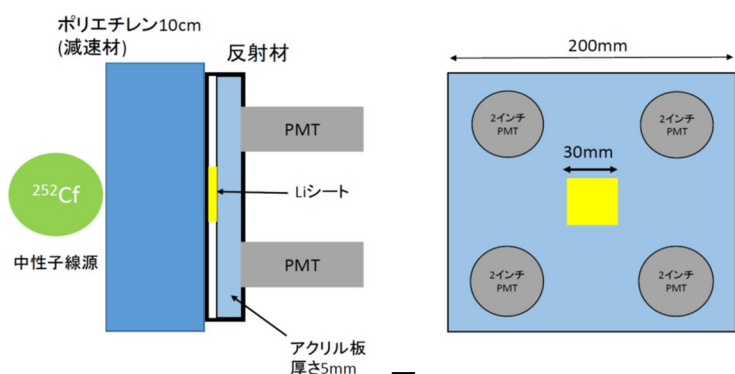
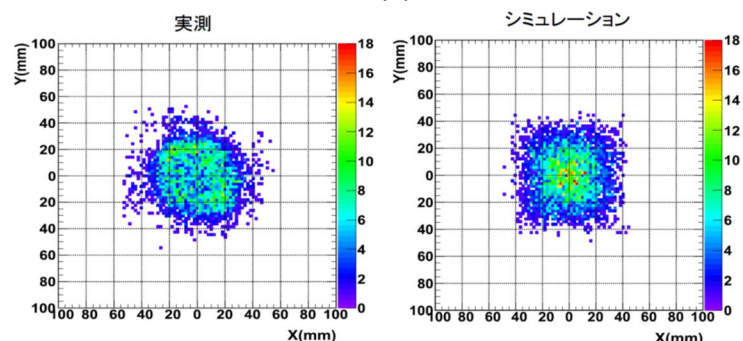


図 9



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 今野智之, 川崎健夫, 今井皓太, 朱健, 中島恭平, 玉川洋一, 末包文彦, 岩田修一
2. 発表標題 原子炉ニュートリノモニター開発の現状
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会(オンライン) 2020年9月14 - 17日
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川崎健夫, 今野智之
2. 発表標題 可搬型小型原子炉ニュートリノ測定器の開発
3. 学会等名 2020年度第3回東工大先導研コロキウム / 第36回つばめラウンジセミナー(オンライン) 2021年1月21日
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 増井友哉, 中島恭平, 玉川洋一
2. 発表標題 地上でのニュートリノモニター開発に向けた環境放射線測定
3. 学会等名 日本物理学会北陸支部 定例学術講演会(オンライン) 2020年12月5日
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomoyuki Konno
2. 発表標題 Measurement of reactor neutrinos using plastic scintillator array on the ground
3. 学会等名 5th Applied Antineutrino Physics, Sun Yat-sen Univ, China, Dec 5-8, 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今野智之, 川崎健夫, 今井皓太, 朱健, 中島恭平, 玉川洋一, 池山佑太, 廣田歩夢, 岩田修一, 末包文彦
2. 発表標題 プラスチックシンチレータを用いた原子炉ニュートリノ地上測定
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会(名古屋大学) 2020年3月16-19日
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今井皓太, 川崎健夫, 今野智之
2. 発表標題 原子炉モニターのためのリチウム6シンチレータシートによる中性子捕獲位置検出
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会(名古屋大学) 2020年3月16-19日
4. 発表年 2020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原子炉の遠隔モニタリングに向けた研究
3. 学会等名 第1回原子力関係科学技術の基礎的研究の動向調査委員会における報告、2019/10/14、大阪
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>プレスリリース・原子炉で発生した反電子ニュートリノを地表において観測することに成功  <a href="https://www.kitasato.ac.jp/jp/news/20191210-03.html">https://www.kitasato.ac.jp/jp/news/20191210-03.html</a></p>
---

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
研究分担者	中島 恭平  (Nakajima Kyohei)  (30722540)	福井大学・学術研究院工学系部門・講師    (13401)	
研究分担者	岩田 修一  (Iwata Shuichi)  (80791904)	東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・助教    (52605)	

	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
連携研究者	今野 智之  (Konno Tomoyuki)  (60751518)	北里大学・理学部・助教    (32607)	

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