

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2014～2016  
課題番号：26400286  
研究課題名(和文) J-PARCステライルニュートリノ探索用検出器開発研究

研究課題名(英文) R&D of a detector for sterile neutrino search at J-PARC

## 研究代表者

古田 久敬 (FURUTA, HISATAKA)

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・研究支援者

研究者番号：50467023

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：重力しか感じない3世代を超えるステライルニュートリノは、LSND実験でその可能性が示唆された標準模型では説明できない粒子である。そのため、このステライルニュートリノは、発見されれば、宇宙、素粒子物理に大きなインパクトを与える。現在世界で唯一LSND実験の直接的な追試実験としてJSNS2実験が計画されている。JSNS2実験は、J-PARC MLF施設を利用したステライルニュートリノ探索実験である。本研究では、MLF施設内の検出器設置候補地点において背景事象測定を行い、測定結果とMCシミュレーションを比較することで、検出器デザインの構築及び背景事象量の見積りを行った。

研究成果の概要(英文)：Sterile neutrino is a particle, which can interact with only gravity, and the existence was indicated by LSND experiment. It impacts on particle physics and cosmology to observe the sterile neutrino. JSNS2 experiment is planed at MLF facility in J-PARC as re-measurement of LSND experiment, it is unique experiment in the world. In this research, we carried out background measurement with 500kg of plastic scintillator detector at real detector location for JSNS2. Comparing the result and the MC simulation, the detector design was fixed and amount of background for the real detector was estimated.

研究分野：素粒子実験

キーワード：ステライルニュートリノ ニュートリノ振動 ガドリニウム液体シンチレータ J-PARC 波形弁別法

### 1. 研究開始当初の背景

約 20 年前、LSND 実験[1]により、重力以外相互作用をしないステライルニュートリノの存在が示唆され、その後世界中で多くの検証実験が成され、また現在も計画されているが、未だその存在の確証を得ていない。ステライルニュートリノは、標準模型で記述されている 3 世代の粒子では説明できない、また暗黒物質の一躍を担う可能性もあり、発見されれば素粒子、宇宙物理学に与えるインパクトは計り知れない。

そこで、2013 年に、研究代表者を含む日米総勢 30 名の研究者らで、J-PARC MLF 施設の水銀ターゲットから大量に発生する反ミューオンニュートリノを利用した LSND 実験の追試を計画し(JSNS<sup>2</sup>実験[2])、現在まで本実験実現に向けた R&D を行っている。

ステライルニュートリノは現在の所、ニュートリノ振動現象を介してのみ観測できる可能性がある。特に MLF 内では、3 GeV 陽子を水銀ターゲット内に打ち込んだ際に発生したミューオンが、さらにターゲット内で静止崩壊することにより反ミューオンニュートリノ (end point 53MeV の連続エネルギー分布) が発生するが、ステライルニュートリノが存在する場合、振動現象により、通常の 3 世代スキームでは起こり得ない振動パラメータ領域内で反電子ニュートリノに変化し得るため、この反電子ニュートリノを観測することで、ステライルニュートリノの存在を確認する。

JSNS<sup>2</sup>実験では、逆ベータ崩壊反応を利用して反電子ニュートリノを検出するガドリニウム入り液体シンチレータ (Gd-LS) 検出器 (17ton) を用いる (図 1 は反電子ニュートリノ検出原理)。シンチレータ内の水素 (自由) 陽子と反応することで陽電子と中性子が発生、中性子は熱化後 (約 30us 後) Gd に捕獲されて計 8 MeV のガンマを発生、これら時間差のある陽電子とガンマの 2 つの信号のコインシデンスを取ることでニュートリノと同定)。

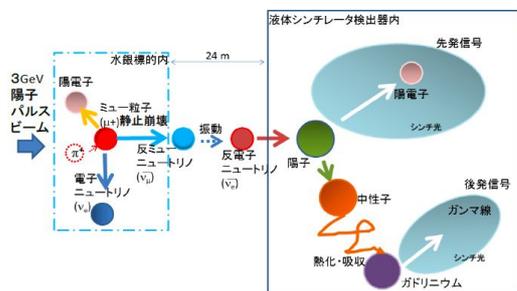


図1 反電子ニュートリノ検出原理

JSNS<sup>2</sup>実験の基本的な実験手法は LSND 実験と同じであるが、MLF の 1MW 大強度パルスビームを使うことでニュートリノフラックスを増やし、且つ、このパルスビーム及び Gd

を加えた検出器を用いることで、LSND 実験のメイン背景事象である低エネルギー環境ガンマ線 (2.6MeV 以下) 由来の背景事象を大幅に排除し、測定感度を向上させている。世界で様々な実験が計画されているが、LSND 実験の完全な追試は本実験のみであり、LSND 実験で示唆されたステライルニュートリノ問題を完全決着させるためには、本実験のような追試以外にないため、世界でもユニークな実験である。

JSNS<sup>2</sup>実験では、本実験用検出器設置候補地で小型の検出器を用いた背景事象測定を行い、MC シミュレーションも併用して本検出器デザインでの背景事象量及び測定感度の見積りを行うことが喫緊の課題となっていた。

本科研費申請時は、東北大学で所有している 200kg の液体シンチレータ検出器が背景事象測定用検出器の候補であったが、液体シンチレータが危険物であることを考慮し、MLF 3F で測定を円滑に進めるため、500kg のプラスチックシンチレータを使用することになった。

### 2. 研究の目的

本研究では、本実験用検出器設置候補地点である MLF 3F 大型機器取扱室において、数百 kg 級のシンチレータを設置し、背景事象測定を行う (図 2)。

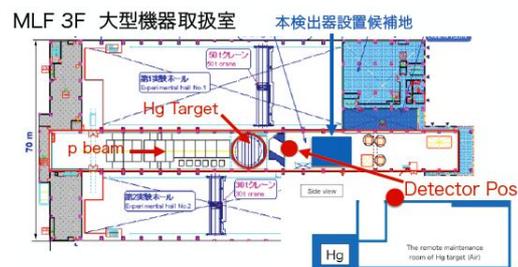


図2 MLF 大型機器取扱室検出器設置候補地

またモンテカルロ (MC)・シミュレーションを併用することで、実機デザインを構築し、測定結果と合わせて実機での背景事象量を見積もる。特に、ビーム由来の中性粒子、宇宙線由来の中性粒子が背景事象に成りうるため、それらのエネルギースペクトルとフラックスを抑える。ガンマ線は、トリガーのタイミングで偶発的に信号として捉えられ、陽電子の疑似信号に成りうる。また中性子は、液体シンチ中の陽子を反跳させて先発疑似信号を作り、さらに Gd に捕獲されて後発疑似信号を作る。また 200MeV 以上の中性子は、検出器内で  $\mu^+$  を生成し、 $\mu^+ \rightarrow \mu^+ + e^+$  の崩壊後、さらに  $\mu^+$  の崩壊により、トリガータイミングでミッセル電子を生成し得る。そのミッセル電子が疑似先発信号に成りうる。

### 3. 研究の方法

500kg のプラスチックシンチを MLF3F 大型機器取扱室内、大ハッチ上の検出器設置候補地点に設置する。その際、別途外から入ってくる荷電粒子を除去するため、veto 用プラスチックシンチで全体を囲み、ターゲットシンチ内の中性粒子を捕らえる (図 3)。

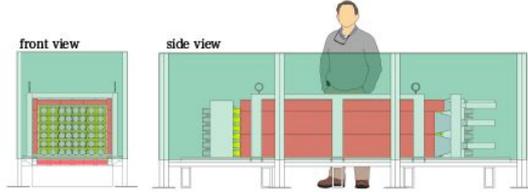


図 3 500kg プラスチックシンチ検出器

MLF では、100ns 幅の陽子ビームを、540ns 内に 2 バンチずつ 25Hz の頻度で発生させる。測定にはこのビームに同期したクロック信号及び、シングルの 2 種類のトリガーを用いる。図 4 は、発生するニュートリノの期待される時間特性分布である。特に測定対象であるミュオン静止崩壊から発生する反ミュオンニュートリノ (赤) 由来の事象のみが観測されるようにビームタイミングから 1us 後の事象を本実験では測定するため、この領域での背景事象を測定する。

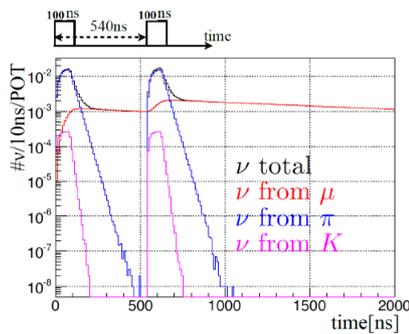


図 4 MLF で発生するニュートリノの時間分布

また別途中性子とガンマ線を識別可能な波形弁別能力 (PSD) を実装した小型 (2L) 液体シンチ (NE213) を設置することで、中性粒子内の n/γ 比も測定する。液体シンチは 4 cm 厚の宇宙線ミュオン veto 用プラスチックシンチで囲まれている (図 5)。

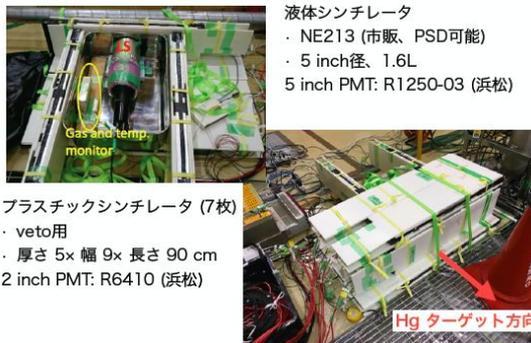


図 5 n/γ 比測定用 PSD 液体シンチレータ (2L)

本実験用検出器では、高速中性子背景事象

を除去可能な PSD 能力を実装した Gd-LS を使用する。本実験での高速中性子事象量として、PSD 解析で中性子を減らした後の量を見積もる必要があるため、東北大学にある CYRIC の 70MeV 中性子ビームを用いて、候補になっている Daya Bay/RENO 実験が用いているリニアアルキルベンゼンタイプの Gd-LS の PSD 能力を測定する [3]。100mL のバイアルに液体シンチを入れ、2 インチ PMT でシンチレーション光を読み出す (図 6)。この液体シンチに中性子ビームを照射して PSD 能力を測定する。

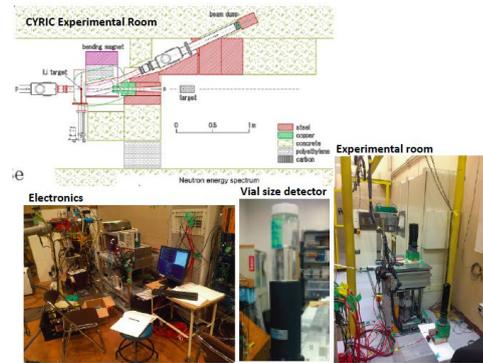


図 6 CYRIC での 70MeV 中性子ビームテスト

とで測定した結果と Geant4 を用いた MC シミュレーションを用いることで、本実験用検出器における中性粒子背景事象量を見積もる。その際、で測定した波形弁別能力を MC シミュレータに実装させて PSD 解析による中性子削減後の背景事象量を計算する。

### 4. 研究成果

図 7、8 は、500kg シンチを使った背景事象測定の結果である。図 7 は、ビーム起源の中性粒子事象の時間特性とエネルギーの相関を示している。特に信号観測エネルギー領域と関係がある数十 MeV で、2 バンチのビームに同期した中性粒子事象が確認された。またオンバンチのタイミングを外した信号観測時間領域 (1us 以上) では、トリガー窓内に偶発的に入った宇宙線起源中性粒子が観測された。

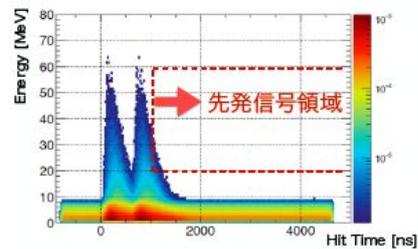


図 7 ビームに同期した中性粒子事象の観測時間分布

また図 8 は、ビームトリガーのタイミングで偶発的にトリガー窓に入って来た宇宙線起源中性粒子のエネルギー分布を表している。図の黒い点が測定データ、赤い領域及び青い領域はそれぞれ MC シミュレーションによるガンマ線及び中性子の内訳を表している。

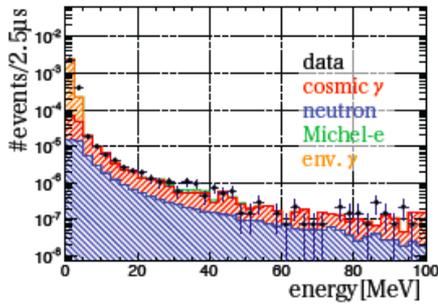


図 8 宇宙線起源中性粒子のエネルギー分布

図 9 は、NE213 液体シンチ測定（シングルバンチ測定）におけるビーム起源中性粒子の時間特性とエネルギーの相関を示しており、PSD 解析により粒子識別をした結果である。図 7 中の MC シミュレーションによる n/ の内訳がコンシステントであることを別検出器による測定で抑えた。

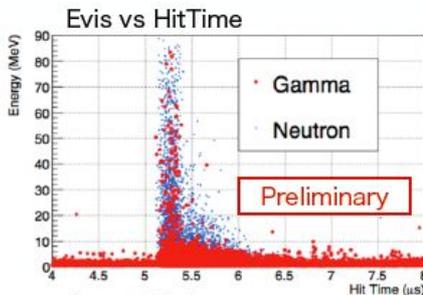


図 9 2L の NE213 液体シンチでの測定（シングルバンチ測定）における PSD 解析により識別したガンマ及び中性子事象の時間とエネルギーの相関

また図 10 は、CYRIC での中性子ビームテストの測定結果で、PSD 変数と検出された光量の相関を表している。上段が測定データ、下段が MC シミュレーションによるものである。

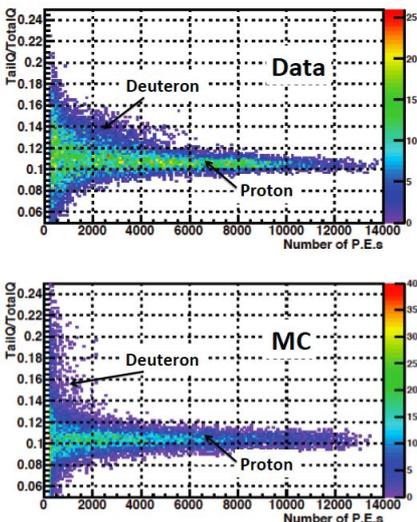


図 10 CYRIC 70MeV 中性子ビームを使って測定した DayaBay/RENO タイプ Gd-LS の光量と PSD 変数の関係

図 11 は、各光量の PSD 変数の平均値及び標準偏差のデータと MC の比較を表している。

MC が良くデータを再現していることが分かる。

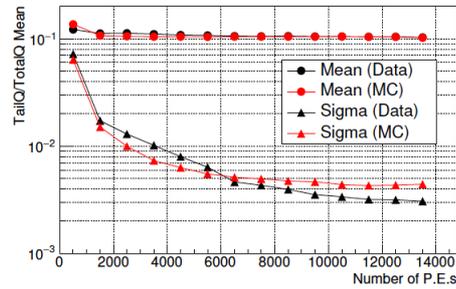


図 11 DayaBay/RENO タイプ Gd-LS の各光量の PSD 変数の平均値及び標準偏差のデータと MC の比較

このシミュレータを用いて、実機での波形弁別能力を評価した。図 12 は、実機における PSD 変数の分布を表しており、ニュートリノ信号の陽電子事象（赤）と宇宙線起源高速中性子の反跳陽子事象（青）を示している。粒子識別により、ほぼ 100% 実機で中性子事象の除去ができることが期待される。

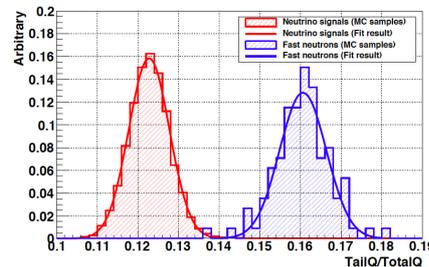


図 12 実機における PSD 変数の分布

表 1 は、現在の検出器デザインで、ビーム出力 1 MW、3 年測定での期待される信号数及び背景事象数を、背景事象測定結果及び MC シミュレーションを用いて算出し、まとめたものである。

表 1 現在の検出器デザインでのビーム出力 1 MW、3 年測定での期待される信号数及び背景事象数

	Contents	this TDR 1 detector 5000h×3y	Reference 50tons 5000h×5y
Signal	$\sin^2 2\theta = 3.0 \times 10^{-3}$ $\Delta m^2 = 2.5eV^2$ (Best fit values of MLF)	87	480
	$\sin^2 2\theta = 3.0 \times 10^{-3}$ $\Delta m^2 = 1.2eV^2$ (Best fit values of LSND)	62	342
background	$\bar{\nu}_e$ from $\mu^-$	43	237
	$^{12}C(\nu_e, e^-)^{12}N_{g.s.}$	3	16
	beam-associated fast n	$\leq 2$	$\leq 13$
	Cosmic-induced fast n	negligible	37
	Total accidental events	20	32

また図 13 は、現在の本実験の測定感度を表している。1 MW、3 年測定で 90% C.L で、LSND 実験でのステライルニュートリノが示唆された領域で且つ OPERA 実験で制限が掛けられた領域の大部分 ( $m^2 > 1eV^2$ ) の探索を行えることを示している。

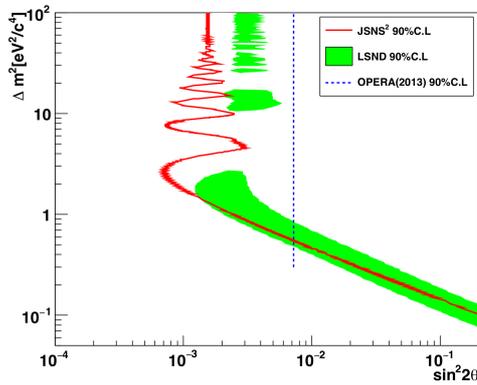


図 13 本実験の測定感度 (1MW、3年測定、90% C.L.)

本研究期間中に本実験検出器設置候補地で背景事象測定が行え、実機での背景事象量の見積り、実験感度の見積りを行うことができた。この背景事象測定の結果をまとめたものは、PTEP の論文に投稿され、さらに日本物理学会で報告された。

<引用文献>

- [1] A. Aguilar et al., Phys. Rev. D64, 112007 (2001).
- [2] M. Harada, et al, arXiv:1310.1437 [physics.ins-det]
- [3] M.Yeh et al., Nucl. Instrum.Meth. A578 (2007) 329-339  
J.S.Park et al., Nucl. Instrum.Meth. A707 (2013) 45-53

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 5件)

M. Harada, H. Furuta et al. (34人中19番目), Status Report(22th J-PARC PC):Searching for a Sterile Neutrino at J-PARC MLF (E56, JSNS<sup>2</sup>), arXiv:1610.08186 [physics.ins-det] 査読無 (2016)

M. Harada, H. Furuta et al. (32人中21番目), Status Report:Searching for a Sterile Neutrino at J-PARC MLF (E56, JSNS<sup>2</sup>), arXiv:1601.01046 [physics.ins-det] 査読無 (2016)

S.Ajimura, H.Furuta, et al (25人中5番目), On-site background measurements for the J-PARC E56 experiment: A search for the sterile neutrino at J-PARC MLF, PTEP

2015 6, 063C01 (2015), 査読有,

DOI:10.1093/ptep/ptv078

岩井瑛人、丸山和純、古田久敬、未包文彦、J-PARC MLF でのステライルニュートリノ探索実験 JSNS<sup>2</sup>(J-PARC E56)、高エネルギーニュース (vol34, No.1)、査読有 (2015)

M. Harada, H. Furuta et al. (34人中23番目), Status Report (BKG measurement): A Search for Sterile Neutrino at J-PARC MLF, arXiv:1502.02255 [physics.ins-det] 査読無 (2015)

[学会発表](計 16件)

岩井瑛人、古田久敬 (33人中、23番目)、“J-PARC MLF におけるステライルニュートリノ探索実験(JSNS2; J-PARC E56) 3” 日本物理学会 大阪大学(大阪府豊中市) 2017年3月19日

日野陽太、古田久敬 (33人中、3番目)、“J-PARC MLF におけるステライルニュートリノ探索実験(JSNS2; J-PARC E56) 2” 日本物理学会 大阪大学(大阪府豊中市) 2017年3月19日

丸山和純、古田久敬 (33人中、23番目)、“J-PARC MLF におけるステライルニュートリノ探索実験(JSNS2; J-PARC E56) 1” 日本物理学会 大阪大学(大阪府豊中市) 2017年3月19日

日野陽太、古田久敬 (32人中、3番目)、“ステライルニュートリノ探索実験 JSNS<sup>2</sup> 本検出器設置候補地におけるビーム由来背景事象粒子識別測定” 日本物理学会秋季大会 宮崎大学(宮崎県宮崎市) 2016年9月23日

丸山和純、古田久敬 (32人中、21番目)、“J-PARC MLF におけるステライルニュートリノ探索実験(JSNS2; J-PARC E56)の展望” 日本物理学会秋季大会 宮崎大学(宮崎県宮崎市) 2016年9月23日

古田久敬、未包文彦、T. J. C. Bezerra, 檜崎哲也, 桐生翔平, R. Sharankova, “波形弁別能力を実装した Gd 入り液体シンチレータの CYRIC70MeV 中性子ビームを用いた性能評価測定” 日本物理学会秋季大会 宮崎大学(宮崎県宮崎市) 2016年9月22日

岩井瑛人、古田久敬 (31人中、20番目)、“J-PARC MLF におけるステライルニュートリノ探索実験(JSNS2; J-PARC E56)の実現に向けて” 東北学院大学(宮城県仙台市) 2016年3月19日

丸山和純、古田久敬 (31人中、20番目)、“J-PARC MLF におけるステライルニュートリノ探索実験(JSNS2; J-PARC E56)の展望” 東北学院大学(宮城県仙台市) 2016年3月19日

丸山和純,古田久敬(31人中、20番目)、  
"J-PARC MLFにおけるステライルニュートリノ探索実験(JSNS2; J-PARC E56)の展望" 大阪市立大学(大阪府大阪市) 2015年9月25日

岩井瑛人,古田久敬(31人中、20番目)、  
"J-PARC MLFにおけるステライルニュートリノ検出器設置候補地での背景事象測定結果2" 日本物理学会 2015年年次大会, 早稲田大学(東京都新宿区) 2015年3月21日

坂井勇登, 古田久敬(31人中、3番目)、  
"J-PARC MLFにおけるステライルニュートリノ検出器設置候補地での背景事象測定結果1", 日本物理学会 2015年年次大会, 早稲田大学(東京都新宿区) 2015年3月21日

岩井瑛人,古田久敬(31人中、19番目)、  
J-PARC MLFにおけるステライルニュートリノ検出器設置候補地での背景事象測定結果3", 日本物理学会 2014年秋季大会, 佐賀大学(佐賀県佐賀市) 2014年9月18日

太田良介,古田久敬(31人中、19番目)、  
"J-PARC MLFにおけるステライルニュートリノ検出器設置候補地での背景事象測定結果2", 日本物理学会 2014年秋季大会, 佐賀大学(佐賀県佐賀市) 2014年9月18日

坂井勇登,古田久敬(31人中、3番目)、  
"J-PARC MLFにおけるステライルニュートリノ検出器設置候補地での背景事象測定結果1", 日本物理学会 2014年秋季大会, 佐賀大学(佐賀県佐賀市) 2014年9月18日

丸山和純,古田久敬(31人中、19番目)、  
"J-PARC MLF 施設を用いたステライルニュートリノ探索実験の展望", 日本物理学会 2014年秋季大会, 佐賀大学(佐賀県佐賀市) 2014年9月18日

H.Furuta, "A Search for Sterile Neutrino at J-PARC Materials and Life Science Experimental Facility (MLF)", 国際会議 第2回J-PARCシンポジウム, 茨城県つくば市 2014年7月15日

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

古田 久敬(FURUTA, Hisataka)

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・研究支援者

研究者番号: 50467023