

平成 30 年 6 月 9 日現在

機関番号：82118

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25105008

研究課題名(和文)液体アルゴン3次元飛跡イメージング検出器の開発研究

研究課題名(英文)R&amp;D for the LArTPC detector

研究代表者

丸山 和純(Maruyama, Takasumi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：80375401

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 53,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、期間中にできるだけ安価な大型検出器にも使用できる検出器技術を開発した。また、荷電粒子によるビームテストを行い、世界初の荷電粒子応答詳細を測定した。本研究成果から100トン級の検出器については検出器性能の理解、要素技術の確立ともに達成でき、現在や将来のニュートリノ実験で課題となるニュートリノ相互作用の詳細研究等での大きさの液体アルゴンTPC検出器を活用した国内の実験が検討できるようになった。また本研究で開発したASICが他の実験でも活用されたり、LArIAT実験で開発した再構成ツールやシミュレーション、物理結果等が他の液体アルゴン実験で活用されるなど本研究成果の展開も進んでいる。

研究成果の概要(英文)：We developed the cost effective and low noise ASIC in LAr temperature for the charge readout. The good purity (<0.3ppb) was kept during 3 months with our developed purification system, and the monitor using the ultra-violet scintillation light was also developed. The high voltage system with Cockcroft-Walton gave >30 kV. The FEM and cosmic ray data provided further understandings of this HV system. These R&D were also verified by the 70tons detector of the CERN WA105.

For the charged particle test-beam, we joined the LArIAT (LArTPC In A Test-beam). We accumulated the 1800000 events for pi/K/mu/p/e in the 1 ton LArTPC during 2015-2017. The data is used to understand the feasibility of the future experiments with large LArTPCs as well as the current LArTPC experiments' systematic uncertainties.

With these results, we can consider 100 tons LArTPC experiments in Japan. Our developed ASIC, the software and simulation tools in the LArIAT can be used for other experiments.

研究分野：素粒子実験分野

キーワード：ニュートリノ

### 1. 研究開始当初の背景

液体アルゴン 3次元飛跡イメージング検出器は、素粒子をビジュアルにリアルタイムで捉えることのできる現代版電子泡箱とも言える夢の検出器である。その検出器性能の高さから、将来のニュートリノ実験や核子崩壊実験、暗黒物質探索実験に非常に有望な検出器である。

現在までに世界最大の検出器は600トンのICARUS実験であるが、将来のニュートリノ物理や核子崩壊物理に使用するためには、更なる大型化が必須である。それを目指すには、大型化への技術開発、特に安価な検出器を作成する技術を培うことが必要である。

また、2013年までに期待されていた検出器性能は全てシミュレーションからの推測であり、実際の荷電粒子を使ったデータでその性能を確認した訳ではない。そのため、エネルギーや運動量、角度、粒子の種類等、良く理解された荷電粒子を使ったビームテストを行うことが重要であった。

### 2. 研究の目的

上記の背景を受けて、検出器の大型化のため、(A)大型化する技術と安価な検出器を作製する技術を培い、(B)運動量、角度、粒子の種類等良く理解された荷電粒子を使ったビームテストを行う、の2つを行う必要がある。本研究ではこの2つを目的とする。

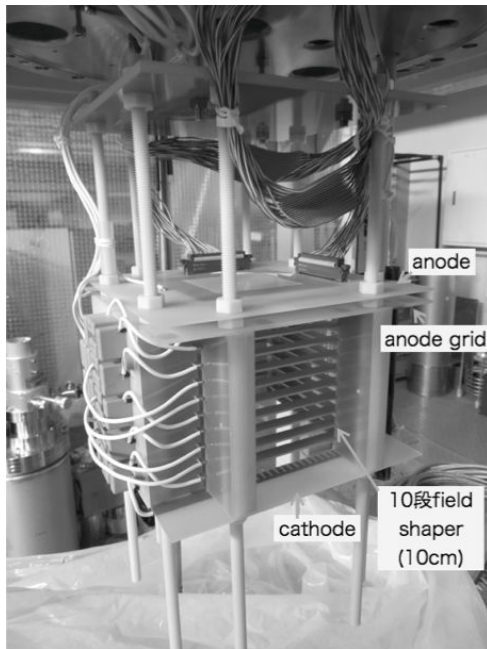


図1: KEK-30L 小型液体アルゴン検出器

### 3. 研究の方法

大型化にむけた技術開発では、電離電子を長い距離ドリフトさせるために必要な技術に重点を置いて開発した。まず次の3点の要素技術について KEK や CERN にあるテストベンチを用いて試験を進めた。(a) 電離電子がドリフト中に不純物によって減衰することを低減させるための液体アルゴンの純化と

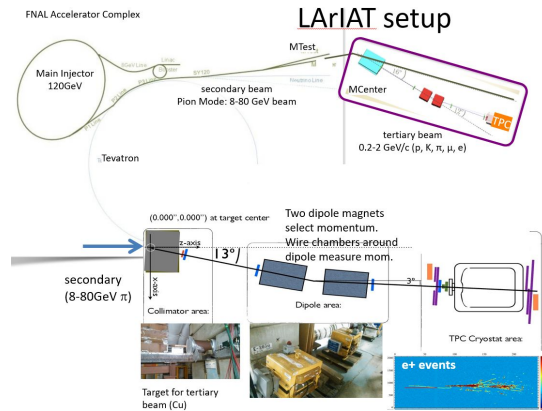


図2: LArIAT 実験セットアップ。120GeVまで加速された陽子ビームが2次標的に衝突した際生成される8-80GeVの中間子を更に3次銅標的に衝突して生成されるパイ中間子、K中間子、ミュー粒子・陽子・(陽)電子を用い液体アルゴン飛跡検出器応答を探る。

高純度の維持、(b)できるだけ速くドリフトさせるために500V/cm以上の電場を形成する高電圧生成装置、(c)微小信号を高い信号・雑音比で読み出すための液体アルゴン温度(約マイナス180度)で動作可能な電荷増幅器と読み出しエレクトロニクス。KEKでは、ドリフト距離10cm、読み出し面6.4cm x 6.4cmの小型液体アルゴンTPC(30L-TPC。図1)や、ドリフト距離40cm、読み出し面76cm x 40cmの液体アルゴンTPC(250L-TPC)を用いて、これら要素技術の開発や試験を行った。また、CERNでは、電離電子を検出器上部でガス領域に取り出して、ガス増幅器をもちいて信号を増幅する方法(2相読み出し方法。一方で、KEK 30L-TPCは、液中で信号を直接捉える1相読み出し方法である。)を用いた小型検出器で開発を進めた。大型化にむけて、どのような方法がより効率がよく、かつ安価にできるか、多角的に検討することが狙いである。これら開発した要素技術は、最終的に国際共同研究であるCERN WA105実験70トン検出器で実証試験を進めた。

また、荷電粒子ビーム試験は、最適なテストビームラインを持つ米国フェルミ研究所にて行われた国際共同研究LArIAT(LArTPC In A Test-Beam)実験に参加し、研究を進めた。LArIAT実験のセットアップを図2に示す。120GeVまで加速された陽子ビームが2次標的に衝突した際生成される8-80GeVの中間子を更に3次銅標的に衝突して生成されるパイ中間子、K中間子、ミュー粒子・陽子・(陽)電子を用い、液体アルゴン飛跡検出器応答を探る。2つのDipole磁石を用い、粒子の運動量や電荷を選べるだけでなく、磁石の前後に設置されたワイヤチェンバでの粒子位置情報を用いることで、運動量を $\Delta p/p=3\%$ 程度で知ることができる。最下流に約1トンの液体アルゴン3次元飛跡イメージング検出器を設置し、その荷電粒子応答を測定する。

#### 4. 研究成果

大型化にむけた要素技術の開発では、以下の成果を得ることができた。(1)液体アルゴンの高純度化では、250L-TPCに純化フィルターやアルゴン循環装置を自作して取り付けて、純度 0.3ppb で液体アルゴンを長時間(3ヶ月)維持することに成功した。また、液体アルゴン中を通過した際に放出される真紫外波長の光を捉えた純度モニターの開発を行った。(2)高電圧生成では、コッククロフトウォルトン回路を用いて、30kV以上の高電圧生成の達成や、有限要素法での計算と宇宙線データの比較から生成電場の理解を進めた。(3)低コストで低ノイズ性能をもつ電荷増幅回路とそれを用いた電荷読み出しシステムを開発した。電荷増幅回路は、液体アルゴン温度(約マイナス 180 度)でも動作可能な、CMOS ASIC(特定用途集積回路)を開発し、その基礎性能評価を進めた。入力電荷に対する増幅後の出力電圧は、10mV/fC と概ね設計通りの値を確認した(図3)。

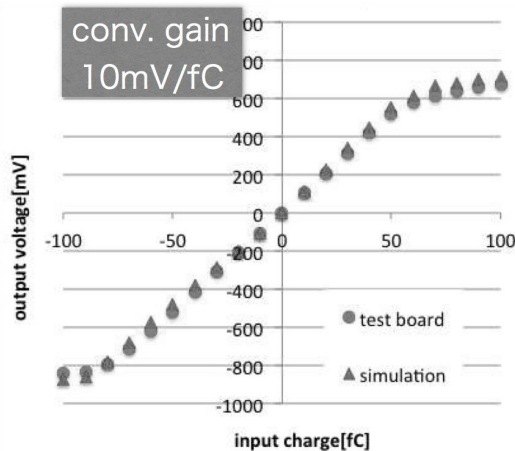


図3：開発したASICの入力-出力関係。増幅率 10mV/fC を確認した。

一方で ASIC 固有の雑音が予想よりも大きいことが分かり、ASIC 内部の回路レイアウトに改善の余地があることがわかった。このASICを搭載した読み出しボードや、増幅後の信号をデジタル処理してコンピュータで読み出すためのボード等も開発し、これらを組み合わせてCERN 小型検出器で宇宙線トラック信号の測定も行った。信号-雑音比 10 以上で宇宙線信号を捉えることができている(図4)。これら要素技術について、CERN WA105 実験 70 トン検出器で実証試験を進め、大型検出器へも応用可能なことを確認した。

また、日本の知識・技術を盛り込みつつ、良く素性を理解した荷電粒子ビームに対する検出器応答を米国フェルミ国立研究所のLArIAT 実験にて測定した。日本から、ビームのコミッションングへの参加、低運動量のミュオン粒子、パイ中間子を主に区別するエアロジェルカウンターの設置、波長変換材を使わない新型光検出器(MPPC)のアルゴン内への設置等のハードウェア的な直接的な貢献も

行った。H25 から 2 年間をかけて準備を行い、

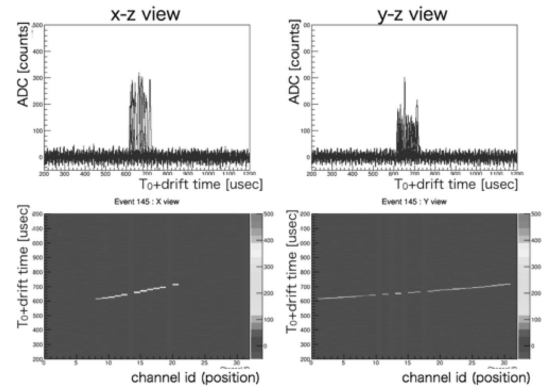


図4：開発した読み出しエレクトロニクスを用いて液体アルゴン TPC を通過した宇宙線を捉えた様子。

H27 ~ 29 年度に約 180 万事例のパイ中間子、K 中間子、ミュオン粒子・陽子・(陽)電子データを取得した。図5に典型的な事例ディスプレイを掲載する。

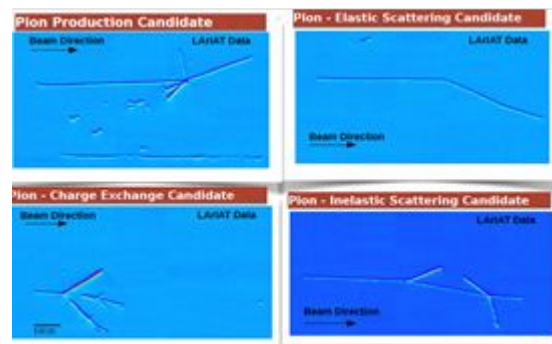


図5：観測された液体アルゴン 3次元飛跡イメージ(典型例)

これは世界初の快挙であり、液体アルゴン 3次元飛跡イメージング検出器界の大きな財産となった。また、H29 年度には、読み出し面のワイヤ幅を 3 mm、4 mm、5 mm と変更し、データ取得を行った。これは、見える物理が読み出し面のワイヤ幅にどれほど依存するかを始めて荷電粒子を用いて見たものである。ワイヤ幅は同じ読み出し面積を維持した場合、読み出し(エレクトロニクス ch)数を決定するため、将来の大型検出器の予算に関する大きな知見を与える。

データ解析も負電荷 と液体アルゴンの総散乱断面積を得て、講演を通じて公表した(図6)。



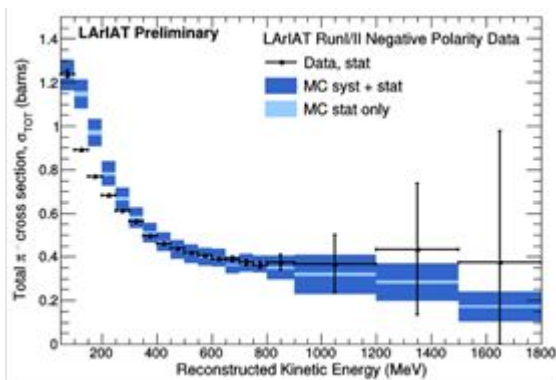


図6；負電荷 中間子とアルゴン原子の全散乱断面積（点に十字誤差棒がデータ、箱がシミュレーション）

また、他の解析についても進展を進め、将来の大型検出器に対する feasibility や起こり得る系統誤差に関する知見を得た。

本研究結果から 100 トン級の検出器については検出器性能の理解、要素技術の確立ともに達成でき、現在や将来のニュートリノ実験で課題となるニュートリノ相互作用の詳細研究等でこの大きさの液体アルゴン TPC 検出器を活用した国内の実験が検討できるようになった。また本研究で開発した ASIC が他の実験でも活用されたり、LArIAT 実験で開発した再構成ツールやシミュレーション、物理結果等が他の液体アルゴン実験で活用されるなど本研究結果の展開も進んでいる。

## 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 6 件)

[1] "Liquid Argon TPC Neutrino Detector", K.Sakashita, JPS Conf. Proc. 8, 023011 (2015)

[2] "2014 年度 Open-It 活動報告 (プロジェクト紹介 LArTPC)", 内田智久, 坂下健, 榎本良治, 高エネルギーニュース Vol.33, No.4, (2015)

[3] Optimized sensitivity to leptonic CP violation from spectral information: the LBNO case at 2300km baseline, S.K.Agarwalla, K.Sakashita et. al, arXiv:1412.0593 (2014).

[4] The mass-hierarchy and CP-violation discovery reach of the LBNO long-baseline neutrino experiment, S.K.Agarwalla, K.Sakashita et. al, arXiv:1312.6520 (2013).

[5] "LBNO-DEMO: Large-scale neutrino detector demonstrators for phased performance assessment in view of a long-baseline oscillation experiment", L.Agostino, K.Sakashita, et. al., arXiv:1409.4405 [physics.ins-det] (2014)

[6] "LArIAT: Liquid Argon In A Testbeam", J.Paley, E.Iwai, T.Maruyama, et al, arXiv:1406.5560 [physics.ins-det] (2014)

〔学会発表〕(計 38 件)

[7] "Liquid argon TPC for neutrino experiment", K.Sakashita(KEK), AFAD2018, Jan. 2018.

[8]"R&D toward realization of a large size(>10kton) liquid argon TPC detector", K.Sakashita (KEK), 8th AFAD, Jan, 2017

[9]"R&D toward realization of the huge (>10kton) Liquid Argon TPC", S.Narita (Iwate University), 7th AFAD, Feb, 2016

[10]"Liquid Argon Time Projection Chamber R&D at KEK (poster)", L.Zambelli (KEK), The international workshop on future potential of high intensity proton accelerator for particle and nuclear physics (HINT2015)

[11]"LAr TPC R&D status", K.Sakashita, Workshop for Neutrino Programs with facilities in Japan, Ibaraki, Japan August-4-6 (2015)

[12]Liquid Argon Time Projection Chamber R&D at KEK, L.Zambelli(KEK), HINT2015, Aug. 2015

[13]"Liquid-Argon TPC neutrino detector", K.Sakashita, 2nd J-PARC symposium, Ibaraki, Japan July-12-15 (2014)

[14]"Update on LAr TPC Studies in Testbeams in Japan", T.Maruyama, Liquid Argon TPC R&D Workshop (LArTPC13), Chicago, USA March 20-21 (2013)

[15] "大型液体アルゴン開発" 坂下健 (KEK), 日本物理学会、東京理科大学、千葉、2018年3月

[16] "Liquid Ar 3D track imaging -detector development", K.Sakashita(KEK), Neutrino frontier workshop 2017, Shiga, Japan December-11-13 (2017)

[17] "液体アルゴン飛跡検出器荷電粒子ビーム応答テスト実験(LArIAT 実験) Run-3 までの現状" 丸山和純 (KEK), 日本物理学会秋季大会、宇都宮大学 宇都宮、2017年9月

[18] "液体アルゴン TPC の大型化にむけた開発" 坂下健 (KEK), アクティブ媒質 TPC 開発座談会、KEK、茨城、2017年4月

[19]"液体アルゴン TPC の大面積読み出しに向けた読み出しエレクトロニクスの開発" 坂下健 (KEK), 日本物理学会、大阪大学、大阪、2017年3月

[20] "Status of LArIAT" 丸山和純 (KEK), ニュートリノフロンティア研究会、加賀、2016年11月

[21] "Status of Liquid Argon TPC R&D" 根岸健太郎 (岩手大学), ニュートリノフロンティア研究会、加賀、2016年11月

[22]"液体アルゴン飛跡検出器荷電粒子ビーム応答テスト実験 (LArIAT 実験)の現状" 丸

山和純 (KEK), 日本物理学会秋季大会、宮崎大学、宮崎、2016年9月

[23]"大型液体アルゴン TPC 測定器 (>10kt) の開発に用いる試験 TPC 測定器ドリフト電場の理解" 黒川真行 (岩手大), 日本物理学会 秋季大会、宮崎大学、宮崎、2016年9月

[24]"大型液体アルゴン TPC 測定器 (>10kt) の開発に用いる 30L 小型測定器の運転試験および性能評価" 黒川真行 (岩手大), 日本物理学会、東北学院大学 仙台、2016年3月

[25]"大型液体アルゴン TPC 測定器 (>10kt) で用いる信号読み出しエレクトロニクス の開発" 黒森雄介 (岩手大), 日本物理学会、東北学院大学 仙台、2016年3月

[26]"Status of LAr TPC test beam experiment, LArIAT" 岩井瑛人 (KEK) ニュートリノフロンティア研究会、熱海、2015年12月

[27]"液体アルゴン TPC 測定器の電場形成理解", 田頭拓也 (KEK), ニュートリノフロンティア研究会、熱海、2015年12月

[28]"液体アルゴン TPC 測定器の読み出しエレクトロニクス開発研究", 黒森雄介 (岩手大), ニュートリノフロンティア研究会、熱海、2015年12月

[29]"液体アルゴン TPC 飛跡検出器の荷電粒子応答テスト実験 (LArIAT 実験) の解析の現状" 岩井瑛人 (KEK) 日本物理学会、大阪市立大学、2015年9月

[30]"液体アルゴン TPC のための信号読み出し装置の開発", 黒森雄介 (岩手大), 日本物理学会、大阪市立大学、2015年9月

[31]"Toward realization of >10kton Liquid Argon TPC", K.Sakashita and T.Hasegawa (KEK), 液体 TPC 座談会、2015年8月

[32]"小型液体アルゴン TPC のための強電界生成法の開発と特性評価", 田頭拓也 (岩手大)、電気関係学会東北支部連合大会、2015年8月

[33]"液体アルゴン TPC 用読み出しエレクトロニクス開発の現状", 坂下健 (KEK), 計測システム研究会、2015年7月

[34]"液体アルゴン飛跡検出器荷電粒子応答テスト実験 (LArIAT 実験) の現状" 丸山和純 (KEK) 日本物理学会、早稲田大学、2015年3月

[35]"液体アルゴン TPC 測定装置開発の現状", 坂下健 (KEK), 日本物理学会、早稲田大学、2015年3月

[36]"status of LArIAT" 岩井瑛人 (KEK) ニュートリノフロンティア研究会、山梨、2014年12月

[37]"status of LAr R&D (1)", 坂下健 (KEK), ニュートリノフロンティア研究会、山梨、2014年12月

[38]"status of LAr R&D (2)", 佐々木 (岩手大), ニュートリノフロンティア研究会、山梨、2014年12月

[39]"液体 ArTPC 3次元イメージ測定器", 丸山和純 (KEK), 「ニュートリノフロンティア

の融合と進化」研究会 2013 東京大学、2013年4月

[40]"液体アルゴン TPC に向けた読み出し回路開発", 岩崎裕也 (横浜国立大学工学府), 計測システム研究会 2013, 2013年7月

[41]"LArIAT: 米国ビームテスト / -原子核反応測定の可能性" 丸山和純 (KEK) 「ニュートリノフロンティア」研究会、東京、2013年12月

[42]"液体アルゴン検出器 R&D の現状とプラン", 坂下健 (KEK), 「ニュートリノフロンティア」研究会、東京、2013年12月

[43]"液体アルゴン検出器の開発状況と検出器の理解", 佐藤文孝 (KEK), 岩崎裕也 (横浜国大), 渡邊孝太 (岩手大), 「ニュートリノフロンティア」研究会、東京、2013年12月

[44]"液体 Ar 検出器を用いたニュートリノ実験の可能性 / 陽子ビームエネルギーに関する考察", 坂下健 (KEK), 次世代の加速器ニュートリノ実験ワークショップ、茨城、2014年3月

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況 (計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

丸山 和純 (MARUYAMA Takasumi)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授  
研究者番号: 80375401

### (2) 研究分担者

坂下 健 (SAKASHITA Ken)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子

核研究所・准教授  
研究者番号： 50435616

(3)連携研究者

成田 晋也 (NARITA Shinya)  
岩手大学・工学部・教授  
研究者番号： 80322965

池野 正弘 (IKENO Masahiro)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子  
核研究所・技師  
研究者番号： 40391718

山野井 豊 (YAMANOI Yutaka)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子  
核研究所・前任技師  
研究者番号： 90391739

(4)研究協力者

( )