

新型原子核乾板の大型現像処理環境の構築とその現像結果

三角尚治*, 花岡佑哉**, 森元祐介***,
松尾友和***, 大島 仁****, 福田 努*****

Construction of a Large-scale Facility to Process a New Type of Nuclear Emulsion Films and Its Results.

*Shoji MIKADO**, *Yuya HANAOKA***, *Yusuke MORIMOTO****,
*Tomokazu MATSUO****, *Hitoshi OSHIMA*****, and *Tsutomu FUKUDA******

Study of neutrino properties is one of the most important subjects in particle physics. Since the discovery of neutrino oscillation, much progress has been made in our understanding of neutrino properties in these two decades. More precise experiments by reducing the main source of systematic errors will be required to solve remaining mysteries. The J-PARC T60/NINJA experiment was designed to precisely measure the neutrino-nucleus cross sections in the 1 GeV energy region. The experiment utilizes a large amount of nuclear emulsion films of a new type where the size and content of AgBr crystals can be chosen according to the aim of experiments. Hence we have newly constructed a large-scale facility to process the new type emulsion films. By monitoring and controlling the temperature and humidity in the facility, we have succeeded in developing 318 large emulsion films and later in swelling them. The thickness of the emulsion layers after the processing was controlled to be $70 \pm 3 \mu\text{m}$. The detection efficiency of penetrating particle tracks was found to be higher than 95%, for most of the films. An important advantage of emulsion films to detect and identify low-energy protons was confirmed. Furthermore some neutrino-nucleus interactions have already been found. Thus the facility have been verified to have sufficient capability to process such a large amount of new type emulsion films properly.

Keywords: Nuclear Emulsion, Development, Neutrino, Darkroom, Elementary Particle Physics

1. 序 論

ニュートリノ研究の進歩はめざましい。2015 年ノーベル物理学賞で祝福されたスーパーカミオカンデによるニュートリノ振動の発見¹⁾以来、多くのことがわかって

きた。我々も参加した OPERA 実験では、ミューニュートリノからタウニュートリノへの振動を、出現したタウニュートリノの検出により、確認することができた²⁾。今後は、物質優勢の宇宙創生の鍵を握ると言われるレプトンセクターにおける CP 対称性の破れなど、残されたニュートリノの謎に迫るため、精密実験の時代に入る。

*日本大学生産工学部教養・基礎科学系准教授

**日本大学生産工学部数理情報工学科 4 年

***東邦大学理学部科研費臨時職員

****東邦大学大学院理学研究科博士後期課程 3 年

*****名古屋大学高等研究院（理学研究科）YLC 特任助教

当然大量のデータを蓄積し、統計誤差を小さくしていくことになるが、一方で、系統誤差も小さくしていく必要がある。現在、系統誤差のうち、最も大きいものは、ニュートリノ・原子核反応の断面積である。通常の検出器では低エネルギー陽子の検出が難しいため反応過程が分離できず、ニュートリノエネルギーの再構成に誤差が生じる。その結果、ニュートリノ振動の確率や振動パラメーターの決定に誤差が生じてしまう。そこで、空間分解能に優れ、低エネルギー陽子の検出も可能な原子核乾板検出器を用いた実験が計画された。これは、当初テスト実験としてJ-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) から T60 実験^{3), 4)} という名称で承認され、その後本格的に採択され、現在ではNINJA (Neutrino Interaction research with Nuclear emulsion and J-PARC Accelerator) 実験と呼んでいる。この実験には日本大学 (生産工学部)、東邦大学、名古屋大学、神戸大学、京都大学、東京大学が参加している^{5), 6)}。

NINJA 実験は、ニュートリノ振動の研究が進む最先端の J-PARC ニュートリノビームにおいて重要な 1 GeV 領域のニュートリノ・原子核反応の精密測定を目的とする。OPERA 実験で成功し、成果を挙げた原子核乾板と金属板を交互に積層した標的兼検出器を用いる。金属板を厚さ 0.5mm の鉄板とし、感度の高い新型原子核乾板を用いると、ニュートリノ反応から放出された陽子飛跡の観測閾値を、運動エネルギーにして約 20MeV 程度にまで下げることができる。一方、今までの T2K 前置検出器の陽子飛跡観測閾値は 175MeV 程度で、その違いは大きく、複雑な反応過程の分離やそれらの反応断面積の精密測定が期待される⁷⁾。

尚、本論文は、2018 年に研究報告 A (理工系) に掲載された研究ノート⁸⁾の内容を発展させたものであり、日大生産工学部に現像室を立ち上げ、その現像室で NINJA 実験に適応した乾板を大量に処理し、その結果を解析したものである。この成功により当学部が NINJA 実験他の原子核乾板を用いた素粒子実験に大きく貢献できるようになった。

2. 原子核乾板検出器

2.1 原子核乾板

原子核乾板とは、荷電粒子 (電荷をもった粒子) に感度がある銀塩写真感光材料であり (Fig. 1)、素粒子の飛跡を検出するための装置として素粒子物理学では古くから活用されてきて、後述する特徴によりこれまで多くの新粒子の発見に寄与してきた⁹⁾。原子核乾板にはその用途により、さまざまな種類があるが、プラスチックフィルムをベースとしてその両面に原子核乳剤を塗布したものが一般的である。フィルムの大きさも、その用途

によりさまざまなものが製作可能である。乳剤の組成も、使用目的により調製が可能である。一般的に原子核乾板の乳剤は普通の写真フィルムの乳剤と比べると厚みがあり、ハロゲン化銀含有量が多い。多いものを高銀、そこから少なくなるに伴い中銀、低銀等と呼ばれている。この乳剤層に荷電粒子が通過すると、その飛跡に沿ってハロゲン化銀結晶中に潜像核という非常に小さな銀の塊ができ、現像液に浸す現像処理により潜像核が触媒となってハロゲン化銀粒子全体が還元されて、大きな銀の塊となり可視化される。このため、光学顕微鏡で素粒子の飛跡を観測できるようになる。実際の作業としては、現像液に浸した後、停止液に浸し現像過程を停止させ、定着液に浸し銀にならなかったハロゲン化銀を除去する定着処理を施し、最後に流水に浸して薬液を洗い流す、といった一連の化学処理を行い、その後乾燥し乾板として使用する。必要に応じて更に膨潤作業へと進む。尚、原子核乾板には、電荷のない中性粒子の飛跡は記録されない。

原子核乾板の際立った特徴は、1 μm 以下の解像度で三次元的に素粒子の飛跡を捉えられるという点であり、これは他の飛跡検出器を寄せ付けない^{10) - 12)}。原子核乾板はこれまでに、飛跡の観測により、直接には目で見ることのできない素粒子のさまざまな特性を顕わにしてきた。過去、飛跡の検出は、顕微鏡での測定に時間がかかり、解析全体の時間を多く費やす作業であったが、近年の飛跡認識技術の進歩により、全自動飛跡読み取り装置が開発され、その測定時間については大幅な改善がなされた^{13), 14)}。

この原子核乾板は、光にさらされると簡単に感光してしまう。現像前の原子核乾板を扱うには、暗室での作業が必須となるが、そこには通常の写真フィルムとは異なる注意も必要となる。原子核乾板は写真フィルムと比べて、乳剤層が厚く、粒子の飛跡を検出するためには歪みを極力抑えて均一に現像する必要がある。また、1 枚のサイズが大きいのでそのハンドリングにも注意が必要である。

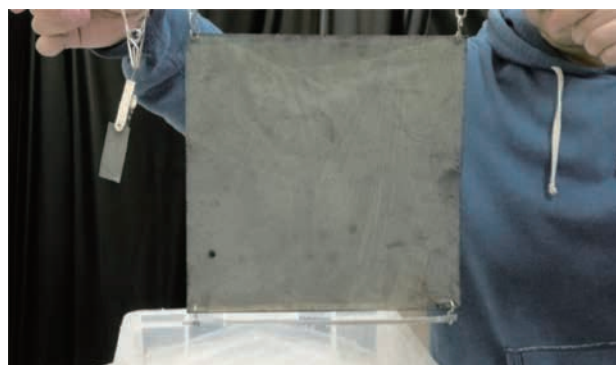


Fig. 1 A nuclear emulsion film after development⁸⁾.

2.2 新型原子核乳剤を用いた検出器

従来、原子核乾板は専門の会社で製造されたものを購入するか、写真乳剤を購入し、塗布するしかなかった。ところが近年、大学でも乳剤製造が可能になり、研究に最適な乳剤を開発し、製造することが可能になった。その臭化銀結晶サイズや含有量は様々で、研究目的に応じて最適なものを選ぶことができる。これにより、荷電粒子に対する感度を研究者が変更することができるようになった。これが新型原子核乾板である。反面、乳剤層中のノイズ銀粒子量や素粒子飛跡に対する潜像退行などの性能性質も様々で、保存や使用の環境、現像処理環境にも開発の要素が伴う。そこで、NINJA 実験に用いる新型原子核乾板も、感度特性や潜像退行特性の研究とともに、現像・膨潤処理環境を新たに立ち上げることになった。これが、本論文で紹介する日大生産工学部の現像室である。

今回取扱った原子核乾板は、2016 年 1 月 31 日から 5 月 27 日の期間にニュートリノビームを照射したもので、実験グループ内部の通称 RUN6 乾板を日本大学で現像した。NINJA 実験 (RUN6) では、鉄板 (SUS304) 250mm×250mm×0.5mm 22 枚、新型原子核乾板 250mm×250mm×0.3mm 23 枚を 1 つの標的兼検出器としており、これを ECC (Emulsion Cloud Chamber) と呼び、その模式図を Fig. 2 に示す。1 枚の新型原子核乾板は、厚さ 180 μm のポリスチレンシートの両面に厚さ 60 μm の乳剤を塗布したものである。また、NINJA 実験では、銀含有量に応じて、高銀、中銀、中低銀、低銀 (それぞれ銀含有量: 55%, 45%, 35%, 31%) といっ

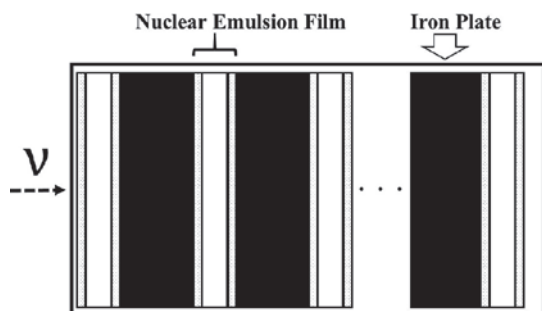


Fig.2 An ECC consists of 23 nuclear emulsion films interleaved with 0.5mm thick iron plates.

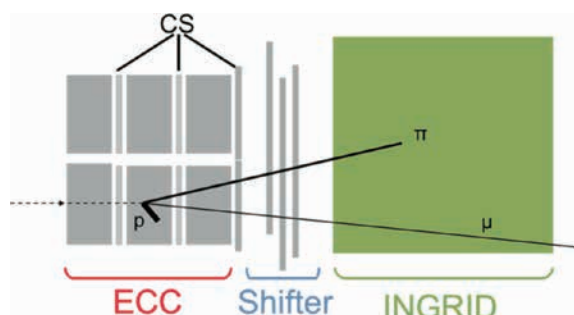


Fig.3 Detector overview of NINJA RUN6 experiment.

た新型原子核乾板を開発しているが、ここで報告する原子核乾板は、中銀乳剤を用いて製作されたものと、高銀乳剤を用いて製作されたものがある。ECC 群の下流には Fig. 3 のように、乾板のみで構成されるシフター (時間分解多段シフター、時間ごとに位置をずらしタイムスタンプ機能を実現した原子核乾板 28 枚) および電気的な信号で飛跡を捉える INGRID (Interactive Neutrino Grid)¹⁵⁾ と呼ばれる装置がある。中銀は粒子の識別が必要な ECC (276 枚) に用い、高銀は飛跡の検出効率が重要なシフターおよび changeable sheet (CS) に用いた。CS は、ECC 間を相互につなぐものと、ECC とシフターをつなぐものがあり、原子核乾板計 14 枚である。高銀は中銀よりも定着時間が長くなる。これら新型原子核乾板の大量現像を国内で行ったことはなく、現像処理環境の構築が望まれていた。

3. 現像処理環境の構築

NINJA 実験に用いる新型原子核乾板は大きさが 250mm 四方もあり、そのために、以下のような条件を兼ね備えた大型現像処理環境の構築が必要となる。

- ・遮光が適切になされている現像室、
- ・大型原子核乾板を暗室で取扱える空間の確保、
- ・純水器が設置されている、
- ・温度と湿度の監視と管理ができる、
- ・乾燥室が隣接または近くにあること。

今回の現像の対象となる原子核乾板のサイズと枚数、そして現像処理後の厚みを Table 1 にまとめる。これらの原子核乾板の現像処理等のため、日本大学生産工学部 実研校舎 物理実験棟 3 階の 306 室を暗室作業室とした。今回の原子核乾板の大量現像処理は、ビーム照射直後の 2016 年 5 月に計画されていたために、2016 年 2 月 2 日から同年 3 月 10 日にて本格的な整備改善作業を行った⁸⁾。

Table 1 The size of nuclear emulsion films for development.

サイズ [mm]	枚数	現像後の乳剤層の 目標厚 [μm]
250×250	284	70
250×300	34	70

3.1 環境

暗室作業室のサイズ等を Fig. 4 に示す。2 部屋に分かれており、両部屋とも 4.60m×3.05 m の広さがあり、各部屋の室温管理は、備え付けのエアコンで行った。Fig. 4 の点線枠部分は遮光強化作業を実施した箇所である。

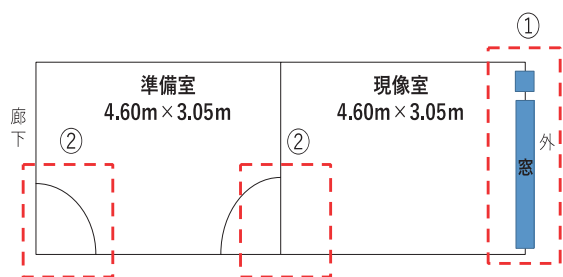


Fig.4 Floor outline of the development and preparation rooms with shade enhancement points⁸⁾.

3.2 実験装置

現像に用いる水として、水道水からカートリッジ式の純水器（G-10DSTSET [オルガノ社製]）により不純物を除去したものをを用いた。現像液の液温管理には冷却・加熱可能なマルチサーマルユニット（SMU-60C [三商社製]）を使用した。溶液の温度管理を容易にするために、エアコンの設定温度を液温の目標温度と同じ20℃とした。室温の温度モニターは、当初はデジタル温湿度測定器（HN-CH [チノー社製]、EL-USB-2 [Lascar Electronics 社製]）を用いローカルで管理していたが、その後 web 上から温湿度の監視が行える遠隔式温湿度測定装置（おんどとり、TR-72ef [T&D 社製]）を導入したため、暗室の温湿度は10分間隔での監視が可能となり、暗室のエアコンが正常に稼働していることや、現像室、乾燥室（準備室）の環境に異常がないかを暗室外部から確認できる環境を構築した⁸⁾。これは複数大学が参加している実験では非常に重要で、日本大学から物理的に離れている研究室からも現像室環境のモニタリングが可能となった。

4. 原子核乾板の現像と膨潤処理

以下に原子核乾板の現像処理と膨潤処理の作業手順等を順に記述する。

原子核乾板の現像処理には、薬品の液温管理が極めて重要となる。各液に対し要求される温度条件等を Table 2 にまとめた。また、各液の調液処方が Table 3 である。

Table 2 Required temperature and processing time for each chemical solution.

	液量 [L]	温度 [℃]	時間 [min]
現像液	54	20.0±0.2	25
停止液	41	20.0±0.5	10
定着液	41	20.0±0.5	60 ~ 120
水洗	-	室温	60 以上

Table 3 Required contents and quantities for each chemical solution.

種類	内訳	液量 [L]
現像液	OPERA 実験用現像液	0.250
	Demineralized water	0.750
	RD-S	0.020
停止液	Acetic acid	0.005
	Demineralized water	1.000
定着液	NF-1	0.333
	Demineralized water	0.666
水洗	tap water	1.000

4.1 現像処理

原子核乾板の現像処理においては、明室状態で調液等準備をし、暗室状態で現像を実施した。現像作業期間は、2016年5月28日～2016年6月6日で、現像作業手順は以下の通りである⁸⁾。

現像室を明室状態にし、現像液（54 L）、停止液（41 L）、定着液（41 L）を、Table 3の組成をもとに調液した。その際、使用した現像缶は市販品にはないために、ステンレス槽（内寸：350mm（W）×550mm（D）×300mm（H）、SUS304）を特別注文した。各溶液の液温管理のため、プラスチック製外浴槽を水で満たしマルチサーマルユニットとヒータ（F-002 [Fine 社製]）で温度調整し、現像液 20.0±0.2℃、停止液 20.0±0.5℃、定着液 20.0±0.5℃を実現した。

次に、現像室を暗室状態にし、現像、停止、定着、水洗の処理を施した。処理時間は、現像液に25分、停止液に10分、定着液に60～120分（原子核乾板の乳剤層が半透明になるまでの時間の2倍）順次浸し、その後、60分以上の水洗を行った。その際、原子核乾板の表面に水滴が残る乾燥ムラによる乳剤膜の歪みができるのを防ぐため、水滴防止剤ドライウェル（富士フイルム）水溶液に数秒間浸した。その後、原子核乾板を現像室から準備室へ移し、スチールラック（乾燥棚）に吊るし一晩以上乾燥させた。また、現像前後の原子核乾板の厚みを、厚み測定器（ダイヤルシクネスゲージ 目量 0.01mm タイプ ピーコック形式：G）を用い、1 μm 単位で原子核乾板の四隅を時計回りにそれぞれ測定した。尚、現像液の処理能力から一日の最大処理枚数を54枚と設定した。現像缶内で原子核乾板同士が接触しないように一度に8枚ずつの現像を基本とし、一日に48枚から最大54枚の現像と乾燥を行った。

4.2 膨潤処理

原子核乾板は、現像を行うと乳剤層の臭化銀が溶解す

るため薄くなり、厚み方向の測定に影響を及ぼす。このため、全自動飛跡読み取り装置での解析作業の際に、データ取得効率の低下やノイズの増加を招く。膨潤処理とは、薄くなった乳剤層にグリセリン水溶液を含ませ膨潤させ、水分が蒸発した後も一定の厚みを保つための処理である。今回は、全自動飛跡読み取り装置での解析作業に支障が無いよう乳剤層の一番薄い部分であっても $60\mu\text{m}$ 以上とするため、膨潤後の乳剤層の平均厚目標を $70\mu\text{m}$ と設定した⁸⁾。膨潤作業に先立ち、紙ワイパー（ケイドライ、日本製紙クレシア）と無水エタノール（99.5%）で、原子核乾板表面に析出した銀の微粒子（表面銀）を一枚ずつ丁寧にふき取った。

膨潤作業期間は2016年6月26日～2016年7月19日で、膨潤作業手順は以下の通りである。

水浸用の水（41L）をあらかじめ用意し、置換用のグリセリン水溶液（41L）の調液を行った。攪拌には、スターラー（Fine社FS-01N）を使用した。膨潤後の乳剤層の平均厚目標を達成するために、複数回にわたり原子核乾板の厚みを測定（測定箇所は原子核乾板の四隅）した。まずは水浸前、そして水浸中であっても、水から原子核乾板を取り出し測定を何度も行った（測定回数は原子核乾板の状態に依存するため一定ではない）。水浸後の目標厚は以下の式で計算した。

$$Tw = (Tf - Ta) / Rg + Ta \quad (1)$$

記号はそれぞれ、 Tw ：水浸後の目標厚、 Tf ：膨潤後の目標厚、 Ta ：現像乾燥後の厚み、 Rg ：グリセリン水溶液の濃度である。水浸で目標の厚みに達したものをグリセリン水溶液に20分以上浸し、水とグリセリン水溶液の置換を行った。膨潤速度は、水浸用の水温と、グリセリン水溶液の濃度によって制御した。水温は、 20°C 、 25°C 、 30°C 、そして、グリセリン水溶液の濃度は、30%、33%、35%を用意した。水温が高いほど、また、溶液の濃度が高いほど膨潤が早く進む。このため、目標値に近づけるよう時間調整しながら各原子核乾板の膨潤の度合いに応じて適宜水温と溶液濃度の組み合わせを変えた。

膨潤処理が終了した原子核乾板は、準備室に設置した乾燥棚に吊り下げて乾燥した。乾燥時には除湿機を稼働させ原子核乾板がカールしないように湿度管理を行った。また、吊り下げ時には、原子核乾板の下辺に溜まるグリセリン水溶液が原因でその箇所だけが厚くならないよう、紙ワイパーで余分なグリセリン水溶液を丁寧に吸い取った。乾燥後は、膨潤作業による厚み変化を確認するため、再び上記同様に原子核乾板四隅の厚み測定を行った。

4.3 粒子飛跡情報の取得と評価方法

名古屋大学理学部物理学教室F研の自動飛跡読取装置

HTS^{14),16)}を使用してすべての原子核乾板の飛跡データを1枚ずつ取得した。原子核乾板の乳剤層（平均の厚み $70\mu\text{m}$ ）を16段に分割し、それぞれの断層画像を取得し重ね合わせることで、記録された銀粒子の連なりを認識して荷電粒子の飛跡（トラック）情報とした。このトラックデータは、乳剤層片側1層の表面側とベース側それぞれにおける位置 x , y , z , 角度情報 $\tan\theta_x$, $\tan\theta_y$, ならびに飛跡の濃さの情報を持つ。ここで、ニュートリノビームに対して垂直に置かれたECC原子核乾板をビーム下流から見て、右向きに x 軸、上向きに y 軸をとる右手系デカルト座標を考えてビーム方向を z 軸とした。また、ECC最下流原子核乾板の下流側乳剤層表面を z 軸原点とした。乳剤層1層だけのトラックデータをマイクロトラックと呼ぶ。原子核乾板は、現像・膨潤により臭化銀結晶をグリセリンで置換するため、現像・膨潤後の乳剤層中のマイクロトラックは、ビーム照射時に対して歪んでいる。また、現像・膨潤後の乳剤層そのものも、周辺の温湿度変化でも形状が3次的に変化してしまう。そこで、原子核乾板のベース部分は乳剤層の厚みを不変として、それを基準として位置決めをした。つまり、周辺環境の変化に対する依存性が小さい部ベース面との境界側の位置を結ぶ直線を用いて、トラックの角度精度と位置精度を保証した。これをベーストラックと呼び、原子核乾板1枚のトラックデータとして用いた。更に、複数の原子核乾板のベーストラックを連結したトラックをチェーンと呼ぶ。

原子核乾板の性能を示す指標として、飛跡の検出効率があり、飛跡の貫通した原子核乾板の枚数と、ベーストラックを測定することができた原子核乾板の枚数の比で定義される。今回は、原子核乾板3枚を貫通したチェーン数を分母とし中間の原子核乾板のベーストラックの本数を分子として、原子核乾板ごとの飛跡検出効率を評価した。本実験では、原子核乾板には中性の粒子の飛跡が記録されないで、原子核乾板検出器中で突然始まるチェーンを探索して中性粒子であるニュートリノの反応点を検出した。飛跡の検出効率はニュートリノ反応点の検出効率やニュートリノ反応点の誤検出率に直結するため、飛跡検出効率は90%以上であることが望ましい。

原子核乾板では、記録された飛跡情報から制限はあるものの粒子識別が可能である^{17),18)}。粒子識別に用いた測定量VPH（Volume Pulse Height）は、乳剤1層あたり16枚の2次元断層画像を取得し各画像において飛跡に付随する撮像素子のピクセル数の和を16枚にわたって合計したものである¹⁷⁾。これは、飛跡の太さを反映し、飛跡に沿った3次元の銀粒子密度の測定に対応する。一方、荷電粒子が物質中を通過する際、物質との相互作用によってエネルギー E を失うことをエネルギー損失という。単位長さ（ dx ）あたりのエネルギー損失（ $dE/$

$d\alpha$) を阻止能とよび、VPH はこれと相関する。これらを用いて粒子の識別を行った。

現像作業が終了しても、実際に原子核乾板に飛跡が記録され、物理解析に使用できなければ意味がない。そこで、物理解析に使用できるかどうかの性能評価項目として、乳剤層の厚み、飛跡検出効率、粒子識別能力、ニュートリノ反応の検出結果を用いた。

5. 結果および考察

ニュートリノビーム照射後の原子核乾板すべてについて、予定した実施期間で現像処理および膨潤処理を完了した。結果と考察を以下に示す。

5.1 原子核乾板乳剤層の厚み

乾燥作業後の全原子核乾板乳剤層の厚みを測定し分布図としたものを Fig. 5 に示す。横軸が厚み [μm] で、縦軸は測定データ数を示す。乳剤層全体の厚みは $70 \pm 3 \mu\text{m}$ となり、原子核乾板を目標通りの厚みまで膨らませることができた。

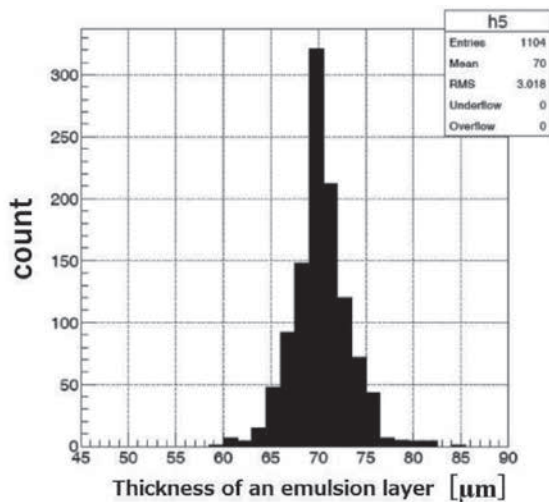


Fig.5 Distribution of emulsion layer thickness at the films after swelling⁸⁾.

5.2 原子核乾板の飛跡検出効率

今回の評価方法に基づく原子核乾板ごとの飛跡検出効率を Fig. 6 に示す。Fig. 6 の横軸は原子核乾板の通し番号、縦軸が飛跡の検出効率 [%]、各プロットの色は飛跡の角度に対応している。ほとんどの原子核乾板で、飛跡の検出効率は 95% 以上を示した。飛跡の角度範囲 $\tan \theta$ が $0.0 \sim 0.3$ の場合では、全枚数の 96% で検出効率 95% 以上を達成した。大角度と呼ばれる領域も含めた測定可能な全角度範囲 ($\tan \theta = 0.0 \sim 1.6$) では、全枚数の 94 ~ 99% (角度依存性あり) で検出効率 90% を達成した。

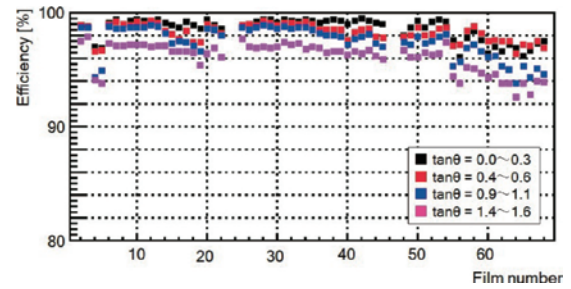


Fig.6 Track-detecting efficiency for each film.

5.3 荷電粒子の識別

荷電粒子の識別方法のひとつを Fig. 7 に示す。これは横軸に実験で得られた粒子の運動量 $p\beta$ [GeV/c] を、縦軸には VPH をとったものである。運動量は、原子核乾板内の多重電磁散乱から測定した^{19), 20)}。

一方、横軸に粒子の運動量 $p\beta$ [GeV/c] をとり、縦軸に dE/dx をとった理論カーブが、Fig. 8 である。原子

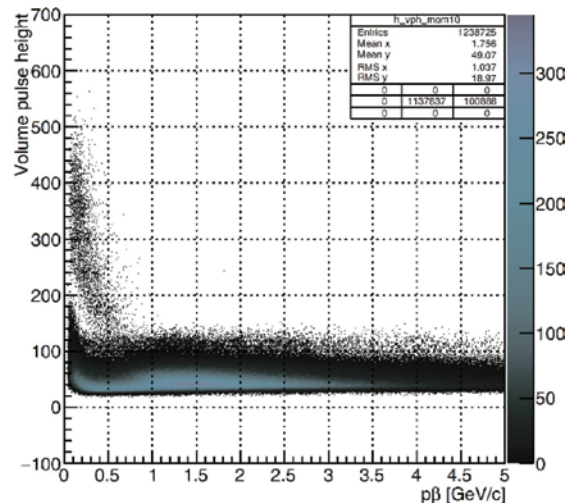


Fig.7 A plot of VPH vs. track momentum $p\beta$.

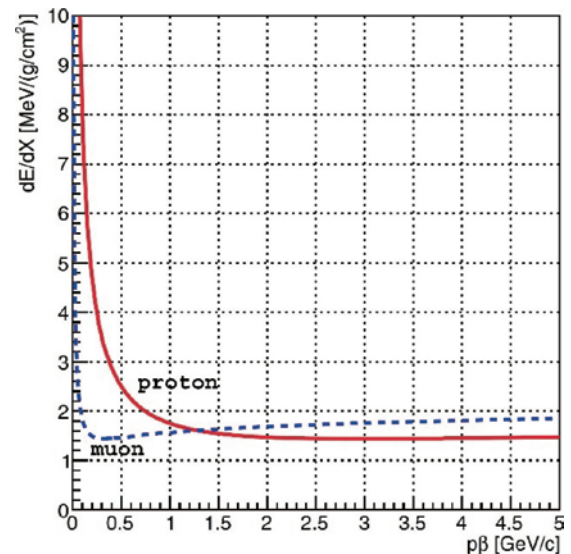


Fig.8 Theoretical plot of dE/dx vs. track momentum $p\beta$. The upper right curve is a theoretical line of proton and the lower left dotted curve is a theoretical line of muon.

核乳剤を構成する元素中の荷電粒子の運動量と dE/dx の関係を調べるため、陽子については、SRIM2013²¹⁾を、ミュー粒子については Particle Data Group から提供されている表²²⁾を用い、原子核乳剤中におけるそれぞれの dE/dx を算出した²³⁾。Fig. 8 中の低運動量領域では、陽子とミュー粒子の理論カーブが重ならなくなり両者が分離されていることがわかる。Fig. 7 では、VPH の角度依存性を考慮しなければならないが、VPH の値は阻止能の大きさを反映しており、低運動量側でプロット点群が2つに分かれているため、Fig. 8 と比較し陽子とミュー粒子（またはパイ粒子）を分離できることがわかる。

5.4 ニュートリノ反応の検出結果

最後にこれらをまとめた成果として Fig. 9 に、粒子飛跡データ解析後の結果を用いて、実際の NINJA 実験でのニュートリノ・原子核反応現象を再現（再構成）した一例を示す。図は3次元で描いており、図の下側からニュートリノが入射しているが中性粒子のためにその飛跡は見えない。そのニュートリノと鉄標的の原子核が相互作用し、2つの荷電粒子が放出されているのがわかる（Fig. 9 では2本の飛跡として描かれている）。Fig. 7 の VPH- $p\beta$ 解析の情報も加えると、図の右側の飛跡は陽子によるもので、左側の飛跡はミュー粒子またはパイ粒子であることがわかった。左側の飛跡は、ECC 群下流の INGRID で得られた解析情報から最終的にミュー粒子であることが判明した。今回再現した原子核乾板の飛跡を解析することで、ニュートリノ反応現象を再構成することができた一例である。これにより、日本大学生産工学部で再現した原子核乾板が、物理解析に耐えうる性

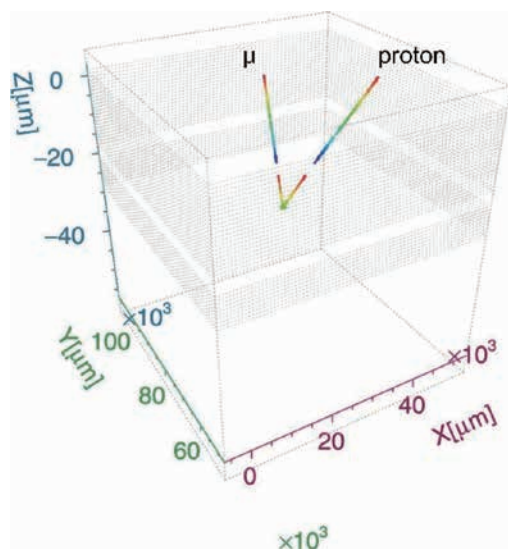


Fig.9 An example of 3-dimensional view of neutrino-Fe interaction. The right side track is a proton and the left track is a muon track, both are generated by the interaction.

能をもつことがわかった。今回の照射実験（RUN6）では、照射されたニュートリノビームの総数から、数千個のニュートリノ・原子核反応が標的兼検出器の中に蓄積されたと予想される。今後、これらの解析が進み 1 GeV 領域のニュートリノ・原子核反応断面積に関する新たな知見が得られるものと期待されている。

6. まとめ

新型原子核乾板の大量現象処理が可能な環境を、日本大学生産工学部に新たに構築した。そして、実際の素粒子実験でニュートリノビームを照射し荷電粒子の飛跡データが記録された大量の原子核乾板の現象、乾燥、膨潤を目標通り行うことができた。その原子核乾板の乳剤層の厚みは設定通りの $70 \pm 3 \mu\text{m}$ となり、それらは飛跡検出効率が 95% 以上と十分高く、更に粒子識別能力をもつこともわかった。解析の進行により実際のニュートリノ・原子核反応も検出できており、この新しい現象処理施設が十分な処理能力、性能を備えていることが実証された。

このように、物理解析に耐えうる新型原子核乾板の大量現象処理を生産工学部で実施することが可能となった。次期計画では今回の 4 倍の枚数となる大量現象処理を再び生産工学部で行うことが他大学からも期待されている。本論文で得られた成果をもとに、現象缶等のサイズ見直しと配置の再検討、新たに廃液処理の効率化を図り、次期計画に対応する予定である。現在その準備を着々と進めているところである。

今後、さまざまな原子核乾板を用いた素粒子実験は国内外を問わず継続的に行われていくため、今回のこの現象室を含む統合的環境構築により、日本大学生産工学部が今後も継続的に最先端の素粒子実験に対して貢献することが可能となった意義は大きい。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、東邦大学理学部物理学科素粒子物理学研究室、名古屋大学理学部物理学教室 F 研の方々からの協力を得ました。この場を借りて深く感謝申し上げます。

日本大学生産工学部 教養・基礎科学系の山川一三男准教授（当時）、三木久美子准教授、森健太郎助手には現象液の廃液処理にご協力頂きました。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Y. Fukuda, et al. : Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos, *Phys. Rev. Lett.* 81 (1998),

- 1562-1567.
- 2) N. Agafonova, et al. : Discovery of tau neutrino appearance in the CNGS neutrino beam with the OPERA experiment, *Phys. Rev. Lett.* 115 (2015), 121802, 1-7.
 - 3) S. Aoki, et al. : Proposal of an emulsion-based test experiment at J-PARC, *KEK/J-PARC-PAC 2014-17*, (2014), 1-5.
 - 4) S. Aoki, et al. : A Test Experiment to Develop a Neutrino Detector with Emulsions for Neutrino-Nucleus Cross Section Measurements at J-PARC, *JPS Conf. Proc.* 8 (2015), 023004, 1-6.
 - 5) T. Fukuda, et al. : First neutrino event detection with nuclear emulsion at J-PARC neutrino beamline, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, (2017), 063C02, 1-23.
 - 6) K. Yamada, et al. : First demonstration of an emulsion multi-stage shifter for accelerator neutrino experiments in J-PARC T60, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, (2017), 063H02, 1-17.
 - 7) The NINJA collaboration : Proposal for precise measurement of neutrino-water cross-section in NINJA physics run, *J-PARC-PAC-2018-P71*, (2017), 1-20.
 - 8) 三角尚治, 花岡佑哉 : 原子核乾板の現像環境の構築, *日本大学生産工学部研究報告 A (理工系)*, 51 (2018), 1, 11-17.
 - 9) C. F. Powell, P. H. Fowler, and D. H. Perkins : The Study of Elementary Particles by the Photographic Method., Pergamon Press, New York, (1959) .
 - 10) 丹羽公雄 : 放射線計測における写真乾板, *日本写真学会誌*, 67 (2004), 6, 561-568.
 - 11) 桑原謙一, 西山伸吾 : 新規原子核感材の開発—オペラ実験に使用するニュートリノ検出用原子核感材—, *日本写真学会誌*, 67 (2004), 6, 521-526.
 - 12) 久下謙一 : 光と放射線による銀塩写真の感光の原理, *日本写真学会誌*, 79 (2016), 1, 65-69.
 - 13) 中野敏行, 森島邦博 : 原子核乾板の飛跡読み取りの現状, *日本写真学会誌*, 71 (2008), 4, 229-233.
 - 14) 中野敏行, 吉本雅弘, 駒谷良輔 : 最新の原子核乾板飛跡読み取り技術, *日本写真学会誌*, 79 (2016), 1, 54-59.
 - 15) K. Abe, et al. : Measurements of the T2K neutrino beam properties using the INGRID on-axis near detector, *Nucl. Instr. and Meth. A*, 694 (2012), 211-223.
 - 16) M. Yoshimoto, et al. : Hyper-track selector nuclear emulsion readout system aimed at scanning an area of one thousand square meters, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, (2017), 103H01, 1-20.
 - 17) T. Toshito, et al. : Charge identification of highly ionizing particles in desensitized nuclear emulsion using high speed read-out system, *Nucl. Instr. and Meth. A*, 556 (2006), 2, 482-489.
 - 18) T. Toshito, et al. : π / p separation at 1.2-GeV/c by an emulsion cloud chamber, *Nucl. Instr. and Meth. A*, 516 (2004), 2-3, 436-439.
 - 19) K. Kodama, et al. : Momentum measurement of secondary particle by multiple coulomb scattering with emulsion cloud chamber in DONuT experiment, *Nucl. Instr. and Meth. A*, 574 (2007), 1, 192-198
 - 20) N. Agafonova, et al. : Momentum measurement by the multiple Coulomb scattering method in the OPERA lead-emulsion target, *New J. Phys.*, 14 (2012), 013026, 1-19
 - 21) SRIM : INTERACTIONS OF IONS WITH MATTER, 2019/03/10, <http://www.srim.org/>.
 - 22) PDG : Atomic and Nuclear Properties of Materials for more than 300 materials, 2019/03/10, <http://pdg.lbl.gov/2018/AtomicNuclearProperties/index.html>.
 - 23) C. Patrignani et al. : REVIEW OF PARTICLE PHYSICS, *Chin. Phys. C*, 40 (2016), 100001, 446

(H 30.12.10 受理)

Biographical Sketches of the Authors



Shoji Mikado was born in Chiba prefecture Japan in 1964.

He received his Bachelor degree, Master, and Doctor of Science from Toho University, Japan. His career is as follows, post doctoral fellowship at University of Wisconsin - Madison in the U.S.A., Assistant Manager at personal computer business in NEC Corporation, Japan. Since 2007 Associate Professor at the Physics division Liberal Arts and Basic Science, College of Industrial Technology, Nihon University, Japan. His high energy experimental experiences were provided in the group of CERN-WA75, Fermilab-E653, Fermilab-E791, KEK-E176, OPERA, and J-PARC NINJA experiments.



Yuya Hanaoka was born in Gunma prefecture Japan in 1996.

He is an undergraduate student of Department of Mathematical Information Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University, Japan. He has been a member of “Mikado Juku” since 2015. He participated in the J-PARC NINJA experiment in 2016.



Yusuke MORIMOTO was born in Hokkaido Japan in 1979.

He is a research assistant of Department of Physics, Faculty of Science, Toho University. He received his Bachelor degree and Master of Science from Toho University. His career is as follows, technical assistant at the Institute for Cosmic Ray Research, the University of Tokyo, Since 2014 Research assistant at Toho University. His experimental experiences were provided in the group of Ashra, 3D-RTIL and the NINJA experiment.



Tomokazu Matsuo is raised in Tokyo, entered Toho University Physics Department in 2004, was awarded as a special student, and graduated after three years, receiving his Bachelor degree and there after, the Master degree and Doctor of Science from Toho University, Japan. He is a researcher specializing in experimental physics of elementary particles at Toho University. He is participating in the OPERA experiment and the J-PARC NINJA experiment.



Hitoshi Oshima was born in Chiba prefecture Japan in 1989.

He received his Bachelor degree and Master of Science from Toho University, Japan. At present, he is a Ph.D. student of the particle physics laboratory in Toho University. He has been a member of the NINJA experiment collaboration since 2014.



Tsutomu Fukuda was born in Kobe, Japan in 1980.

He received his Bachelor degree, Master, and Doctor of Science from Nagoya University, Japan. His career is as follows, research fellowship for young scientists of JSPS, post doctoral fellowship at Toho University, designated assistant professor at Nagoya University. His high energy experimental experiences were provided in the group of OPERA and NINJA Experiments. He is a spokesperson of the NINJA Collaboration.