

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：82118

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2017～2022

課題番号：16KK0108

研究課題名（和文）真空中で動作可能な軽量化比例計数管の素粒子飛跡検出器への実装研究（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Research and development to assemble a vacuum-compatible thin-wall straw chamber in order for the elementary particle tracking(Fostering Joint International Research)

研究代表者

西口 創 (Nishiguchi, Hajime)

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：10534810

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,000,000円

渡航期間： 12ヶ月

研究成果の概要（和文）：低いエネルギーの素粒子反応を大量に精査することで、非常に高いエネルギーでの素粒子物理学を調べるアプローチがある。しかし、低いエネルギーの粒子は、検出器の物質との相互作用（クーロン多重散乱）の影響によりその飛跡が障害され、検出精度が制限されてしまう。本研究では、超音波溶着を応用した独自技術で開発した導電性薄膜ストロー検出器を真空中で動作させることで、世界で最も軽い素粒子検出器を実現した。これにより、低いエネルギーの荷電粒子を従来よりも遥かに優れた精度で位置検出することが可能になる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素粒子の基本的な相互作用を理解するためには、より高いエネルギーでの反応を調べる（エネルギーフロンティア）手法が有効であるが、本研究により低いエネルギーでの大量の素粒子反応を従来よりも優れた精度で調べることが可能になり、その結果、大型加速器での高エネルギー衝突反応に依らない、大強度フロンティア実験の有効性が高まる。大型加速器の開発には、非常に大規模な予算・人員・時間が必要であるが、大強度フロンティア実験が高精度で実施可能になると、既存の加速器を用いて実現可能となり、素粒子標準理論を超える新しい物理の探索へ、画期的なアプローチを切り拓くことになる。

研究成果の概要（英文）：Particle physics at very high energies can be studied by probing a large number of low-energy particle reactions. However, low-energy particles easily interact with detector material (Coulomb's multiple scattering), hinder their trajectories, and limit detection accuracy. In this research, we realized the world's lightest elementary particle detector by operating a conductive thin film straw detector developed with our own technology that applies ultrasonic welding in a vacuum. This will make it possible to detect the positions of low-energy charged particles with much higher accuracy than in the past.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：素粒子検出器 素粒子実験 大強度加速器 ガス検出器 ストローチェンバー 放射線検出器

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

素粒子標準理論を超える新しい物理を模索している素粒子物理学では、大型加速器を用いて、より高いエネルギーでの素粒子反応を探るアプローチ（エネルギーフロンティア）と相補的に、比較的低いエネルギーながら大量の素粒子反応を精査することで、標準理論からのわずかなズレを検知し、ここから新しい物理に迫るアプローチ（大強度フロンティア）が期待を集めるようになった。特に、近年実現した大強度陽子加速器により大量に生成可能なミュオン粒子を用いた「ミュオン粒子 = 電子転換過程探索実験」は、そのようなアプローチにより可能になる、新物理に優れた感度のある実験として注目を集めている。このような低いエネルギーでの素粒子反応を精度良く検知するためには、「検出器の軽量化」が欠かせない。低いエネルギーの荷電粒子は、検出器の物質との間でのクーロン相互作用によりその飛跡が多重散乱され、精度良い飛跡の検出が制限される（= 磁場中での飛跡の曲率を測ることにより運動量を測定するため、結果として運動量測定精度が制限される）。特に、より高いエネルギースケールに相当する現象の探索を可能にするには、より高感度で小さな「ズレ」を見出す必要があり、そのためにはガス検出器に代表される従来の軽量化飛跡検出器でもまだ足りない程の、更なる軽量化が必要であった。

そこで本研究申請者は、超音波溶着手法を応用して独自に開発した 20 ミクロン厚の導電性薄膜ストローを用いた比例計数管を真空中で動作させることに成功した。これは、大強度陽子加速器実験施設（J-PARC）で準備を進めていたミュオン粒子 = 電子転換過程探索実験（COMET）における飛跡検出器として、実験の目標感度を達成するために大きな役割を果たす検出器となった。一方で、この「薄膜ストロー検出器を真空中で動作させる」というアイデアは、世界中で同様なエネルギー領域での実験で一般的なアプローチとなり、熾烈な国際研究競争となっていた。更なる軽量化に向け、「より薄く、より細い」ストロー飛跡検出器の開発が希求されていた。

2. 研究の目的

申請者が開発した導電性薄膜ストロー（20 ミクロン厚・10mm 径）よりも大幅な軽量化を目指し、12 ミクロン厚・5mm 径ストローの開発と、その飛跡検出器としての実装、検出器試作機を製作し、その基礎特性試験を実施し、最終的にビーム照射による性能評価までを目指す。薄膜ストローとしての成形までは、KEK と JINR（ロシア）との共同研究により既に着手したが、その実装手法の開発が急務である。特に、極めて薄く軽い薄膜を、1.5m の長さに亘り、多数のストローを精度良く据え付ける機構の開発は容易ではない。そこで本研究では、同様のストロー検出器において優れた実装技術を持つ CERN の検出器グループとの国際共同研究により、新型ストローに適切な実装手法を開発し、検出器の製作、試験まで実現することを目指す。

3. 研究の方法

本研究は、まず新型ストローの実装のために専用のエンドプラグを設計し、これを試作することで、多くのストローを精度良く検出器として実装可能にする。このエンドプラグには、「ストローの変形を防ぐために張力を印加する機構」「ストローを検出器陰極として接地するための電極」「ストロー内に検出器陽極として導入する金属ワイヤを保持し、かつこのワイヤに高電圧を印加するための電流導入端子」等の機能を持たせる必要があり、これを実現するために、まず新型ストローの力学的・電気的基礎特性の理解から始める。力学的基礎特性を把握することで張力印加機構を最適化し、電気的基礎特性を把握することで電極の実装が決まる。

その後、プラグを試作し、実際に検出器試作機として製作、試験へと進む。

検出器の動作試験は、放射線源からの線照射ならびに宇宙線照射により検出器の高電圧応答・固有位置分解能・検出効率等を調べる。

最終的な性能評価として、荷電粒子ビーム、特にパイ中間子・ミュオン粒子・電子混在ビームを照射することで、ビーム粒子種の同定まで含めた検出器性能評価を実施する。

4. 研究成果

まず、新型ストローの力学的特性、特に印加張力と撓み量、気密性、断面形状の変性、等の調査を行うため、CERN の電子顕微鏡施設(Engineering Department)にて詳細な SEM 撮像による調査を行なった(図 1)。その結果、ポリマー膜の超音波溶着の継ぎ目(seam)部分は良好な溶着が確認され、これにより優れた耐圧が期待されることが分かった。そこで、エンドプラグの径は、特に厳しい加工公差は不要となり、CERN 物理研究部・検出器テクノロジーグループ(Elementary Particle Physics Department・Detector Technology Group)が所有する樹脂マシニングマシンを用いてプラグ本体を製作し、これにアルミ電極をスパッタリングで成膜することとした(図 2)。

作成したプラグを新型ストローに
に嵌合させ、図 3 に示すテストベンチを開発し、新型ストロー内部を
加圧したり、端部に荷重を印加したりすることで、力学的な特性
を詳細に調べた。その結果、図 4
に示す通りの結果が得られ、これを元に最終的な検出器の製作条件
(ストロー間の最短ギャップ、撓みを抑制するための印加張力、またそれを保持するためのプラグの
特性、等)を策定することに成功した。

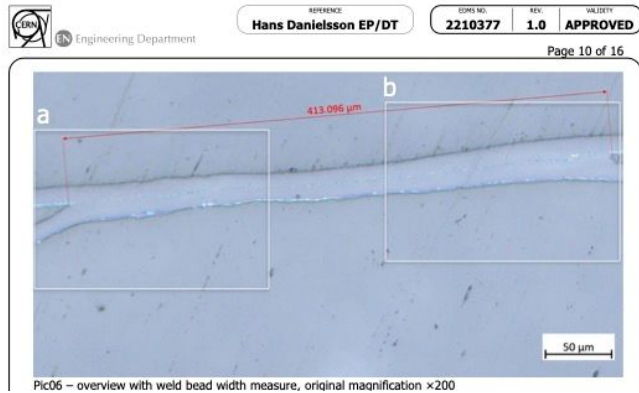


図 1 CERN 電顕施設で撮像した SEM 像

検出器の製作条件が定まったので、その条件を満たすようなアルミ電極をスパッタした樹脂製エンドプラグの最適化に取り組んだが、試作した新型ストローの個体差によるため、ストローサンプルのロットを重ねる度にプラグの嵌合試験を実施し、徐々に実機用プラグへと仕上げていった。しかし、その過程で新型コロナウイルス感染症の世界的な流行が始まり、残念ながら CERN への渡航が制限される事態となった。



図 2 試作したエンドプラグ

その後の本研究は、TV 会議を通じて CERN の共同研究者、

JINR の共同研究者らと協議を重ねつつ、プラグの最適化作業は CERN にて継続することとした。ただし、2020 年度は現地での実作業も制限を受けたことで進捗に乏しく、2021 年度にようやくプラグを最終形とすることが出来た。この後、2022 年度より量産した新

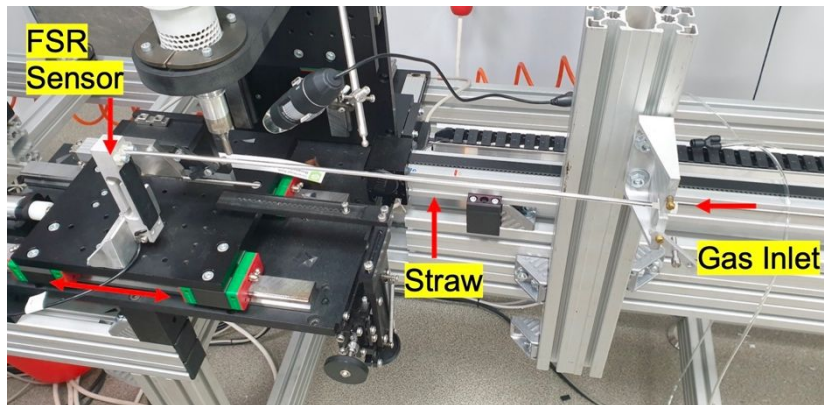


図 3 開発したプラグを新型ストローに嵌合させ、各種力学的試験

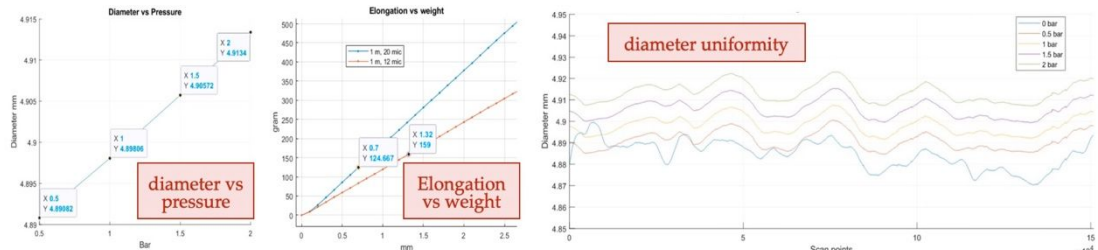


図 4 各種力学的特性の測定結果(加圧による膨張、荷重による撓み、変形の一様性)

型ストローとプラグを組み合わせる検出器試作機を組み立てる計画であったが、ロシアによるウクライナ侵攻の影響により JINR で試作していた新型ストローを CERN へ持ち込めなくなった。最終的に、この時点での成果(12 ミクロン厚新ストローを比例計数管として動作可能な力学的特性を保持するプラグを開発し、放射線検出器として組み立てる準備を完了させた)を取りまとめて、本研究の成果として国際会議(Vienna Conference on Instrumentation 2022)で公表、また学術論文として Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 誌に投稿、受理され出版された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nishiguchi H., Evtoukhovitch P., Fujii Y., Hamada E., Kamei N., Mihara S., Moiseenko A., Noguchi K., Oishi K., Suzuki J., Tojo J., Tsamalaidze Z., Tsverava N., Ueno K., Volkov A.	4. 巻 958
2. 論文標題 Construction on vacuum-compatible straw tracker for COMET Phase-I	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 162800 ~ 162800
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2019.162800	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 該当する

1. 著者名 Nishiguchi H., Danielsson H., Hamada E., Hashimoto Y., Kamei N., Mihara S., Osawa O., Suzuki J., Tsamalaidze Z., Tsverava N., Ueno K., Volkov A., Watanabe K.	4. 巻 1042
2. 論文標題 Vacuum-Compatible, Ultra-Thin-Wall Straw Tracker; Detector construction, Thinner straw R&D, and the brand-new graphite-straw development	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 167373 ~ 167373
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2022.167373	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 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 H. Nishiguchi
2. 発表標題 StrECAL system for COMET Phase-I and Phase-II
3. 学会等名 NuFact2021: The 22nd International Workshop on Neutrinos from Accelerators（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Nishiguchi
2. 発表標題 Vacuum-Compatible Ultra-Thin-Wall Straw Tracker; Detector construction, Thinner straw R&D, and the brand-new graphite-straw development
3. 学会等名 VC12022 - The 16th Vienna Conference on Instrumentation（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 N. Tzverava, H. Nishiguchi, et al.
2. 発表標題 Development of ultra-thin 12 um-thick straw tubes for the tracking detector of COMET experiment
3. 学会等名 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (国際学会)
4. 発表年 2020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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ダニエルソン ハンス (Danielsson Hans)	セルン・EP department・Detector Technology Group Leader	

	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
その他の研究協力者	ツヴェラヴァ ニコロジ (Tsverava Nikolosi)	ジョージア工科大・Physics Department・Junior Researcher	

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
---------	---------

スイス	CERN			
-----	------	--	--	--