

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2015

課題番号：25707021

研究課題名(和文) ミュー粒子電子転換過程探索実験のための真空中で動作可能な飛跡検出器の開発研究

研究課題名(英文) Development of a vacuum-compatible tracking detector for the muon-to-electron conversion search experiment

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・助教

研究者番号：10534810

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,800,000円

研究成果の概要(和文)：素粒子標準理論を超える新物理に優れた感度を有するミュー粒子電子転換過程探索では、10 MeV電子が信号事象となるため、低エネルギーの荷電粒子を高精度で検出する必要がある。そこで、20ミクロンという極めて薄いポリマー膜の導電性ストローを開発、これに高電圧を印加するワイヤを実装して、薄膜ストローチェンバーを開発した。更に、ストロー成形の際に超音波溶着技術を応用して、ストローからのガス漏洩を極限まで低減することに成功、このストローチェンバーを真空中で運用することで、究極の軽量化飛跡検出器を実現した。ミュー粒子電子転換過程探索実験で必要とされる飛跡検出器技術は、本研究でその全てを実現することが出来た。

研究成果の概要(英文)：An extremely light material tracking detector is essential in order to perform the muon-to-electron conversion search experiment which is supposed to have an excellent sensitivity to the new physics beyond the Standard Model. As such an extremely light material tracker, 20-micron-thick straw tube made by polymer film was developed. By using this straw tube, straw chamber tracker was assembled. This straw is formed by ultra-sonic welding technique which enables straw to be vacuum compatible. The vacuum compatibility was confirmed by the prototype tracker which uses this newly developed straw tubes. The electron-beam irradiation test was also conducted in order to estimate the detector performances such as spatial resolution and detection efficiency. Good enough performances for the muon-to-electron conversion experiment is achieved.

研究分野：素粒子実験

キーワード：粒子検出器技術 ガス検出器 真空技術 ミュー粒子 大統一理論

1. 研究開始当初の背景

LHC 実験にて遂にヒッグス粒子と目される新粒子が発見され、素粒子物理学は一大転換期を迎える一方で、ヒッグス粒子以外に新しい物理の手がかりは得られておらず、このような状況下で標準理論を超える物理のヒントを得る観点から、精密実験の重要性が再認識されてきていた。数多ある新しい物理モデルを実験で得られるデータに基づいて検討するには、LHC の結果と、それとは別の切り口から得られる TeV スケール物理の知見とを組み合わせ、複合的見地から議論することが必須であり、そこで注目されているのが、TeV スケール物理に優れた感度を持つ「荷電レプトンフレーバ非保存事象探索実験」である。特にミュー粒子を用いた探索は、膨大な数のミュー粒子を容易に生成可能であることから極めて優れた感度での実験が可能で、物理的に互いに相補的な関係にある 2 つの探索モード” $\mu \rightarrow e \gamma$ ” と” $\mu N \rightarrow e N$ ”(原子内でのミュー粒子電子転換過程)がある。長らく実現が待たれていた $\mu \rightarrow e \gamma$ 探索(MEG 実験)が 2008 年にスイス PSI 研究所にて始まり、LHC・MEG 両実験が結果を出し始めていたため、この最高の時期を逸することなく、残された $\mu \rightarrow e$ 転換探索を優れた感度で実現するために、比較的低運動量(100MeV/c 程度)の荷電粒子を優れた運動量分解能で測定するような「軽量化飛跡検出器」の開発が希求されていた。

2. 研究の目的

MEG 実験では、この軽量化飛跡検出器として「ドリフトチェンバーを薄膜でモジュール化することで低物質量化を図り、そのモジュール以外の領域をヘリウムで満たす事で更なる低物質量化」を実現したが、本研究では、そのアイデアを更に発展させ「薄膜で形成したストローチューブの内部にワイヤを張る事で軽量化比例計数管(ストローチェンバー)を作り、ストロー外部を真空排気することで究極の軽量化を実現する」事を目指した。従って、極限まで薄くしつつも、外部を真空排気することで生じる 1 気圧の圧力差に耐え得る力学的堅牢性を兼ね備えたストローチューブの開発、そのストローを真空中で動作可能な比例計数管として実装する技術開発、及び圧力差によって生じるストローの歪み・撓みを較正する較正手法の開発等を統合的に押し進め、次世代 $\mu N \rightarrow e N$ 探索実験の感度を 10,000 倍向上させるために求められる究極の軽量化飛跡検出器の開発研究を完了させることを目的とした。

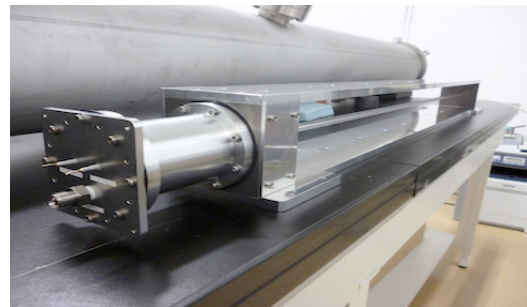
3. 研究の方法

従来のストローチェンバーでは、十分な気密性を確保するため、2 枚の導電性ポリマーフィルムを螺旋状に巻き付け、2 層を接着剤で成形することでストローチューブとしていたが、この方法では、ガス漏洩の原因とな

る接着面の総延長が長くなり、フィルム膜厚を薄くすると却ってガス漏洩発生率が上がってしまう事、ストロー表面全面にわたって接着剤を用い、更に全面に亘ってポリマーフィルムを 2 枚用いるため、物質厚という観点からは、低物質量化に大きく寄与しているとは言えなかった。そこで本研究では、超音波溶着技術を応用し、1 枚のポリマーフィルムの両端を接着することで丸く成形する、というアイデアでストローチューブを製作し、超音波溶着の優れた特性である気密性を十分に活かしたストローチェンバーを実現することを目指した。また、そのストローの両端に比較的大きなサイズのガスマニフォールド(ストロー内部へガスを等圧分配するための多岐管)を用意し、その内部へ信号読出回路及び高電圧分配回路を設置することで、真空中で動作させる際に生じる恐れのある放電や熱暴走等の不具合を抑制することを目指した。また、数十 μm クラスの薄膜ストローに 1 気圧の圧力差が加わる事で生じる歪み・撓みはストローチェンバーの固有位置分解能に悪影響を及ぼす事は必至であり、これを抑制するための較正手法を、静電容量計測型の近接センサを用いて開発することを目指した。

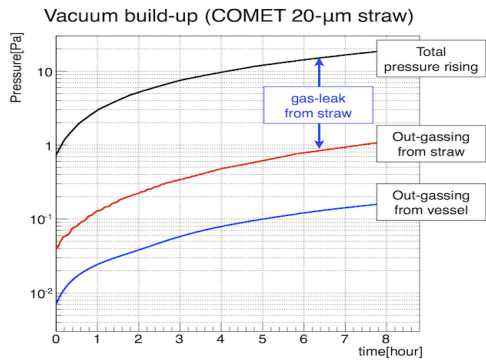
4. 研究成果

超音波溶着の条件の最適化を行うことで、最終的に 20 μm 厚のマイラーに 70nm 厚のアルミを蒸着したフィルムを 10mm 径のストローに成形することに成功した。このストローの内部に 25 μm の金メッキタンングステンワイヤを張り、比例計数管として実装した(図 1)。



【図 1・小型プロトタイプ】

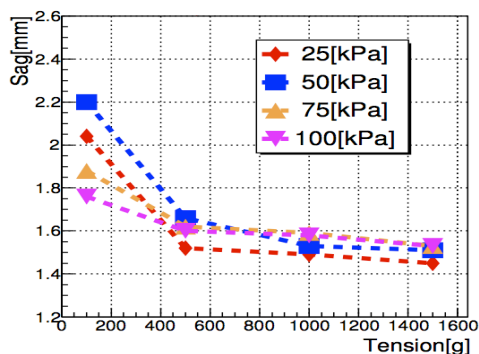
この薄膜ストロー比例計数管(小型プロトタイプと呼ぶ)内部を 2 気圧に加圧して、外部の大気圧に対する 1 気圧の圧力差によるガス漏洩量を実際に測り、更に小型プロトタイプを真空槽に導入し、真空度の上昇具合を測る事で、真空内での動作環境下におけるストローからのガス漏洩量を実際に計測した。図 2 は、真空槽内部の圧力の上昇具合を「(A) 小型プロトタイプ無し」「(B) 小型プロトタイプ有り且つガスフロー無し」「(C) 小型プロトタイプ有り且つガスフロー有り」の 3 つの条件で測り、内部の真空排気を停止した以降の時間の関数としてプロットしたものである。従って、(A) の計測結果は真空槽内面からの



【図2・ストローからのガス漏洩量】

アウトガスを表し、(B)と(C)の差が正味のガス漏洩量を表している。この結果、本研究で開発した薄膜ストローは、真空内に設置することで生じる1気圧の圧力差が掛った状態でも、ストロー1本(1m)当たり0.007cc/minのガス漏洩に抑える事に成功した。このストローを $\mu\text{N}\rightarrow\text{eN}$ 探索実験に供するには、約2,000-3,000本並べることになるが、通常のターボ分子ポンプの排気速度で十分対応出来る、極めて優れたガス気密性を実現した。

次に、薄膜ストローの圧力差による変形(歪み・撓み)の寄与を低減するための較正手法の研究を実施した。本研究の計画では、静電容量計測型の近接センサをストローに対して垂直に正対させ、ストローの膨張具合や撓み具合を測る事を計画していた。これは、真空内でストローの変形を実測するための手段である。図3にその結果を示す。

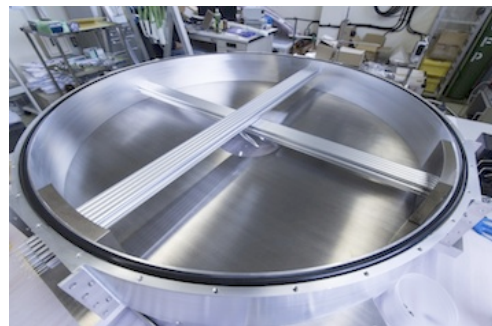


【図3・圧力差によるストロー変形】

ここでは、ストロー内外の圧力差を様々に変えながらストロー表面の変形具合を計測した。当然の事ながら、ストローの両端に張力を印加することで変形を抑制することが出来るが、図3にはその実測結果が示されている。図3に示されている通り、内外圧力差に依らず両端に1kg以上の荷重を印加することでストローの変形は0.1mm以下に抑制されることがわかった。例えば、1.5kg重印加することで、ストローの歪みは $30\mu\text{m}$ 以下に抑える事が出来る。ストローチェンバーによって

$\mu\text{N}\rightarrow\text{eN}$ 探索実験用の飛跡検出器を実現する場合、求められる固有位置分解能は $200\mu\text{m}$ であり、実現されたストローの歪み量は、更なる較正の必要がない程度の小さな歪みにまで抑制出来ることが示された事になる。従って、本研究で開発したストローを用いてストローチェンバーを製作する際には1.5kg重の荷重を印加しながら実装する事にする。

以上の小型プロトタイプによる研究で得られた知見を基に、 $\mu\text{N}\rightarrow\text{eN}$ 探索実験において想定されている飛跡検出器と同寸法の試作機(実寸プロトタイプと呼ぶ)を、本研究で開発した薄膜ストローを用いて製作した。この実寸プロトタイプでは、ストローの両端に1.5kg重の張力を印加し、またストローの両端に信号読出回路を内包出来る大きさのガスマニフォールドを設けた。図4に完成した実寸プロトタイプを示す。



【図4・実寸プロトタイプ】

図4に示されている通り、実寸プロトタイプでは円形の飛跡検出器モジュールのうち、中心部分のみに $16\text{本}\times 16\text{本}=32\text{本}$ のストローが実装されており、ストローの本数のみを実機よりも少ないだけで、それ以外は実機と同等のプロトタイプである。モジュール内の空いているスペースにストローを敷き詰めると丁度実機が出来上がる寸法である。図4では、検出器内部のストローが見えるように上蓋が外された状態であるが、上蓋であるフランジを閉めると、検出器内部が真空排気出来る構造になっており、ストローチェンバーの真空中での振る舞いを詳細に研究することが出来る。

研究の仕上げとして、実寸プロトタイプに105MeVの電子ビームを照射する試験を実施し、荷電粒子飛跡検出器としての性能評価を行った。105MeV電子は、 $\mu\text{N}\rightarrow\text{eN}$ 転換過程での信号事象であり、すなわち本実験での想定される性能を評価することに他ならない。その結果、 $120\text{-}170\mu\text{m}$ の固有位置分解能、並びに99%以上の検出効率が実現された。これらは、 $\mu\text{N}\rightarrow\text{eN}$ 探索実験を遂行する上で、十分な性能である。また、ビーム照射試験の際には、検出器内部を真空排気し、大気中での性能と比して、同等の検出性能を有することも確認した。これにより、ストロー両端への張力印加によって、真空内での圧力差によるス

トローの変形が、固有位置分解能よりも小さい寄与しかない程度にまで抑制されていることが証明された。従って、当初研究目的の全てを実現することに成功し、次世代 $\mu N \rightarrow eN$ 探索実験において求められる荷電粒子飛跡検出器のための開発研究を成功裏に完了することが出来た。今後は、この開発されたストロー飛跡検出器を実機として建設し、飛跡検出器としての運用の研究へと進む事になる。

なし

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)

[学会発表] (計 5 件)

- ① 日本物理学会・第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 19 日～3 月 22 日, 東北学院大学 (宮城県・仙台市) 「COMET 実験用ストローチューブ飛跡検出器の研究開発」発表者・田中聡一
- ② 国際会議・第 14 回 Vienna Conference on Instrumentation, 2016 年 2 月 15 日～2 月 19 日, ウィーン (オーストリア) 「Development of an extremely thin-wall straw tracker operational in vacuum - The COMET Straw Tracker System」発表者・西口創
- ③ 日本物理学会・2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 25 日～9 月 28 日, 大阪市立大学 (大阪府・大阪市) 「J-PARC COMET 実験用ストローチューブ飛跡検出器のプロトタイプ性能評価」発表者・田中聡一
- ④ 日本物理学会・第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21 日～3 月 24 日, 早稲田大学 (東京都・新宿区) 「J-PARC COMET 実験用ストローチューブ飛跡検出器の基礎特性研究」発表者・田中聡一
- ⑤ 国際会議・第 3 回 Technology and Instrumentation in Particle Physics Conference, 2014 年 6 月 2 日～6 月 6 日, アムステルダム (オランダ) 「The COMET Straw Tracker System」発表者・西口創

[その他]

ホームページ等

<https://www2.kek.jp/ipns/articles/comet-straw-chamber>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西口 創 (NISHIGUCHI HAJIME)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教

研究者番号：10534810

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者