

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：31302

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540308

研究課題名(和文) 極端条件下におけるGEMの動作研究

研究課題名(英文) Performances of two-phase cryogenic detector based on GEM

研究代表者

星 善元 (Hoshi, Yoshimoto)

東北学院大学・工学部・教授

研究者番号：80146117

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：厚さ50 μ mGEMの1, 2, 3層構造でのドリフト領域, 転送領域, 信号誘起領域の適正な電場を求め, 55FeからのX線による電荷増幅率が3層で約10000倍を得る事が出来た。これらの結果から, 厚さ50 μ mGEMを用いた場合の最適な電圧条件を見いだす事が出来た。さらにGEMへ供給する電圧の分割回路を製作した。また液体アルゴン三次元位置検出器(TPC)の基本的データを収集するため10リットルの高真空断熱容器とそれに内蔵するコッククロフト・ウォルトン型高電圧整流器を製作し, 適正な電場を有するプロトタイプTPCを製作した。

研究成果の概要(英文)：We study the performance of avalanche detector based on GEM (Gas Electron Multiplier) and operated in an avalanche mode with Ar-CO₂ mixture. We tested four gas mixtures by varying the ratios of Ar and CO₂, and investigated the properties of the charge gain changed. GEM has 70 μ m hole-diameter, 140 μ m apart in pitch, etched on 50 μ m and 100 μ m copper-clad kapton. The distance of drift region, the transfer region and the induction region are 2mm each. A detector system with GEM is systematically tested operating in single, tandem and triple GEM, and investigated the gain properties for X-ray from 55Fe. The results show that the maximum charge gains of triple-GEM in Ar-CO₂ mixtures was about 10000. Also, we constructed Cockroft-Walton cascade generator to obtained stable ascending electric field in TPC.

Now, we are going on testing the performance of two-phase cryogenic GEM detector.

研究分野：放射線計測学

キーワード：GEM TPC 液体アルゴン アバランシェ コッククロフト

1. 研究開始当初の背景

高エネルギー加速器を用いた素粒子物理実験において粒子検出器として多線式比例計数管やドリフト・チェンバーのような細い芯線を用いた検出器が用いられてきた。このような検出器内では正イオンの移動速度は電子の移動速度に比べて約 1000 倍遅いため高計数率の実験では空間電荷が起り、高い検出効率や高い精度での実験が不可能になっている。このような問題点を克服するため半導体微細加工技術を応用したマイクロパターンガス検出器の開発が欧州合同原子核研究機構(CERN)の F. Sauli によって行なわれ、GEM が開発された。この検出器は約 50 μm 厚のフレキシブル両面基板に多数の細孔($\sim 70\mu\text{m}$)をあけ、その両面に銅箔が蒸着されており、この両面に高電圧を印加して細孔内の高電場を利用してガス増幅を得るものである。この一つ、一つの細孔がガス増幅器として動作するので、芯線を利用した検出器と比べると正イオンによる空間電荷効果が少ないため高計数効率を有している。CERN での実験において位置分解能、時間分解能はそれぞれ 10-15 μm , 1.2nsec が得られている。これらの性能から日本では GEM が加速器を用いた長基線ニュートリノ実験の液体アルゴン TPC の 2 次元検出器に用いられる計画がある。同じような液体アルゴンを用いた TPC はイタリアの ICARUS 実験がある。日本での長基線実験では粒子の電離による電子を液体アルゴンから気相のアルゴンへ取り出して、GEM により電離電子の 2 次元位置座標を得るとしている。一方 ICARUS では 2 次元位置検出器としてワイヤーチェンバーを使用し、ワイヤーの自重によるサグを考慮して垂直に配置されている。2 次元ワイヤーチェンバーとして用いるには少なくとも 3 枚のワイヤーチェンバーが必要となり、信号の読み出しチャンネル数も膨大な数となる。一方 GEM はワイヤーを使用しないため簡単なジグにより水平に配置する事ができ、電子増幅も GEM のタンデム構造で簡単に所定の増幅度を得る事が出来る。位置分解能は GEM のホールの径で決まり、安定した位置情報を得ることが可能である。

2. 研究目的

これらの卓越した GEM の性能から日本では加速器を用いた長基線ニュートリノ実験の液体アルゴン TPC の 2 次元検出器として用いられる計画がある。このような液体アルゴンを用いた TPC はイタリアの ICARUS 実験がある。日本での長基線実験では粒子の電離による電子を液体アルゴンから気相のアルゴンへ取り出して、GEM により電離電子の 2 次元位置座標を得るとしている。一方 ICARUS では 2 次元位置検出器としてワイヤーチェンバーを使用し、ワイヤーの自重によるサグを考慮して垂直に配置されている。2 次元ワイヤーチェンバーとして用いるには少なくとも 3 枚のワイヤーチェンバーが必要となり、信号の読み出しチャンネル数も膨大な数となる。一方 GEM はワイヤーを使用しないため簡単なジグにより水平に配置する事が出来、電子増幅も GEM のタンデム構造で簡単に所定の増幅度を得る事が出来る。位置分解能は GEM のホールの径で決まり、安定した位置情報を得ることが可能である。また GEM のアノードの 2 次元読み出し系は、KEK が開発した読み出し回路を用いることは可能でありワイヤーに比べて読み出しのチャンネル数を大幅に削減する事が可能となる。このような測定器としての利点を持つ GEM の極端条件下でのテストは、新しい分野を切り開くには欠く事の出来ない事であり、現在まで我々が蓄積して来た GEM の研究開発の知見は非常に重要なものとする。これにより日本で液体アルゴンを TPC の媒質として用いたニュートリノ実験が行われ、レプトンセクターの CP 対称性の破れの測定が可能となり、更なる新しい物理が開けると考えている。

3. 研究の方法

(1) タンデム構造の最適化を ^{55}Fe , X 線による電荷分布、時間分布を中心に実験を行い、これらの結果から各領域の間隔、印加電圧を決定してタンデム構造の GEM の動作条件の探査を行なった。GEM の大きさは 10cm \times 10cm, 厚さは 50 μm のカプトンを電極として用い、細孔の径は 70 μm , 間隔は 140 μm である。

(2) 混合ガスのガス混合比により GEM の性能が異なる

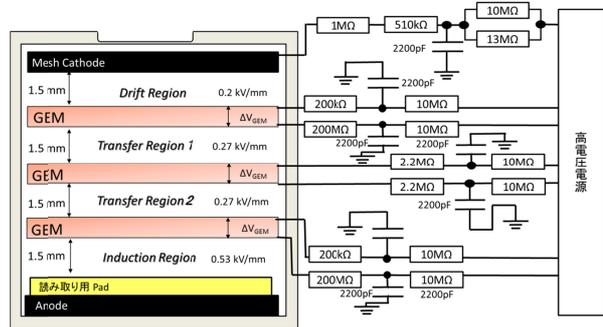
るため、タンデム構造 GEM で混合ガスの混合比の最適化の実験を行なった。GEM は混合ガスのガス混合比と細孔の高電場により電子がアバランシェへ移行することが分かっている。早い読み出しや高い計数効率を考えた場合は、アバランシェを使用することが望ましいことの知見を得ている。タンデム構造 GEM の測定系の整備を行なった。各 GEM 電源の整備と生成される信号は波高値が数 mV、立ち上がり時間が数 nsec であるため擬似パルスを用いて波高弁別器や前置増幅器を含めた信号読み出し系のトリガー整備を行なった。さらに高真空断熱容器を設計した。

(3) 以上の結果をもとに高真空断熱容器に液体アルゴン注入する事により液体アルゴン TPC と同じ状態にし、2 相での GEM の動作確認を行う。この事は非常に重要な事で液体アルゴン中では電子の増幅は出来ず、また液体アルゴン中の不純物により電子の付着が起こる。そのため信号の増幅や雑音との分離が重要となり、低雑音で高速応答を持つ市販の前置増幅器を選択し、時間応答性・分解能の評価を行なった。アバランシェ信号は放電現象なので信号の立ち上がり時間は、他の検出器に比べると格段に速い。このような信号パルスの処理には市販されている機器は使えないので、そのためタンデム構造 GEM に適した波高弁別器や前置増幅器の開発が必要となった。さらに TPC の電場整形用リングの製作を行い、さらに電場整形用直流電源としてコッククロフト-ウォルトン高電圧整流回路を製作し、極低温環境下での特性を実験した。

たときの各印加電圧における各混合ガスにおける増幅率の変化を求めた。

(2) GEM の各領域での電場の決定

実験に用いた GEM の大きさは 10cm×10cm、厚さは 50μm,100μm である。3 層構造での生成された電離電子を移動するドリフト領域、その電子を次の GEM に転送する転送領域、増幅された電子の信号を取り出す信号誘起領域の最適な電圧を求めた。これらの実験による知見から各混合ガスにおける GEM の最適電圧条件を見いだす事が出来た。下図に 3 層の測定模式図を示す。



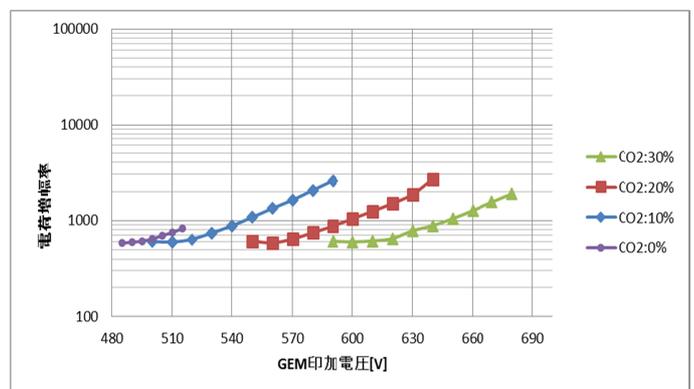
(3) GEM の増幅率の測定

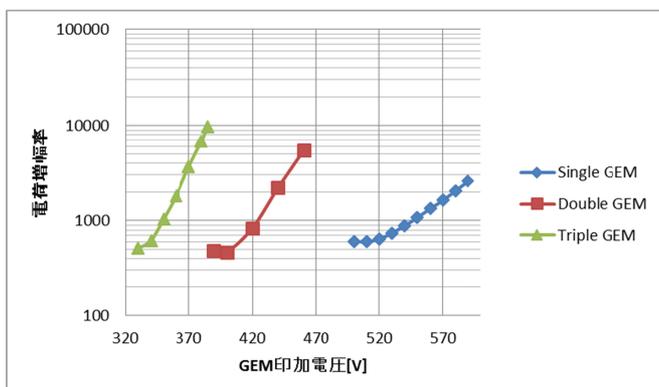
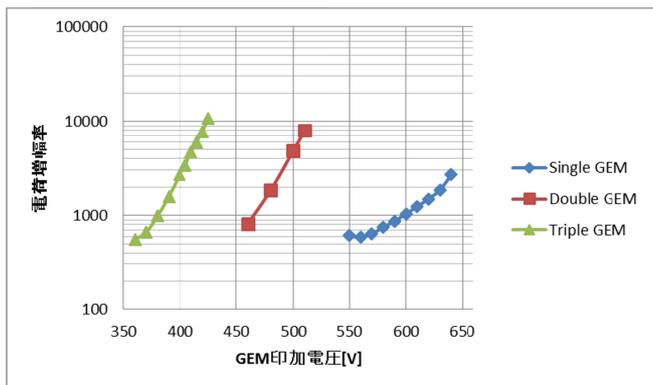
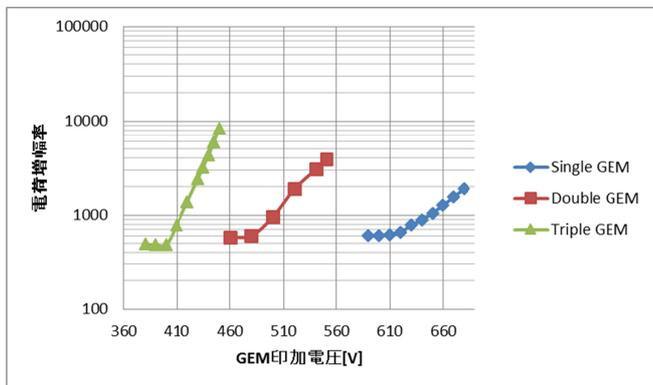
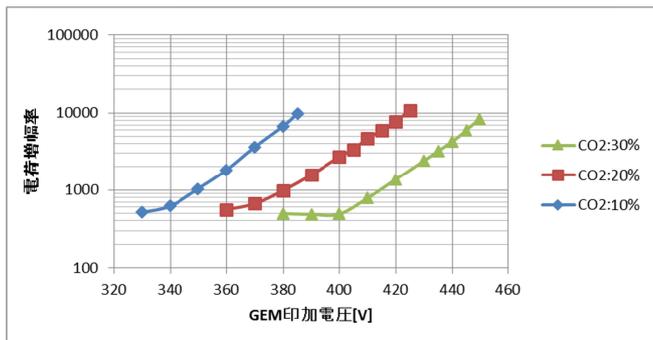
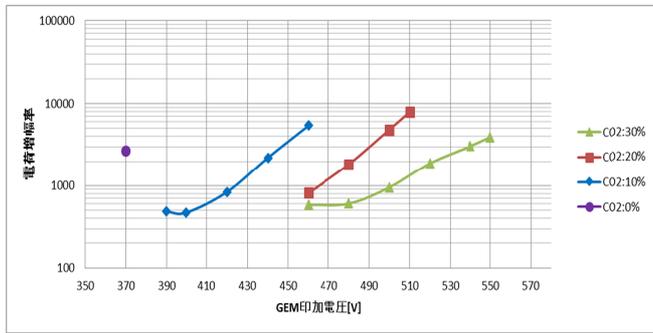
実験は Ar(70)+CO₂(30), CO₂(20), CO₂(10)の混合ガスと Ar(100)を用いて 2 種類の GEM をシングル、タンデム、トリプルにしたときの各印加電圧における増幅率の変化を ⁵⁵Fe X 線で求めた。下図に右から各混合ガスでのシングル、タンデム、トリプルの GEM 動作電圧に対する電荷増幅率と CO₂ の 30, 20, 10%でのシングル、タンデム、トリプル GEM 動作電圧に対する電荷増幅率を示す。

4. 研究の成果

(1) GEM の混合ガス

GEM の細孔とその形状、細孔の間隔による電場のシミュレーションを行ない、最適な細孔形状と細孔間隔を求めた。GEM の大きさは 10cm×10cm、厚さは 50μm,100μm カプトンの 2 種類である。このカプトンの上下に銅を蒸着して電極として用い、細孔の径は 70μm、間隔は 140μm である。実験は Ar(70)+CO₂(30), CO₂(20), CO₂(10)の混合ガスと Ar(100)を用いて、厚さの異なる 2 種類の GEM をシングルとタンデムにし

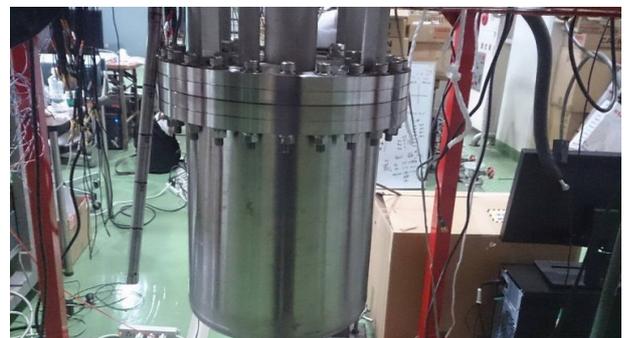




		GEM		
		Single	Double	Triple
Ar:CO ₂	70:30	1896倍	3912倍	8294倍
	80:20	2686倍	7939倍	10816倍
	90:10	2591倍	5454倍	9778倍
	100:0	826倍	2704倍	測定不能

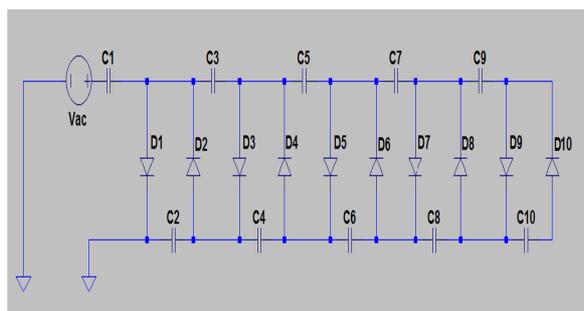
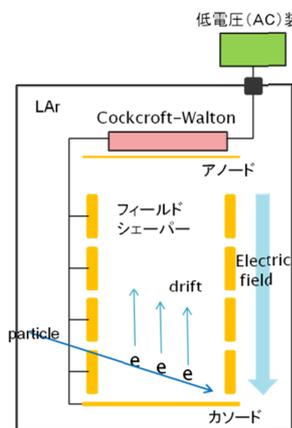
(4) 液体アルゴン TPC 高真空断熱容器

また低温での GEM の低圧での液体アルゴン中の気相における GEM の性能評価をする目的で高真空断熱容器の設計を行った。現在、液体アルゴン気相雰囲気において実験中である。写真は高真空断熱容器である。また高真空断熱容器の内に設置する GEM の電圧の分割回路を製作し、低温テストを行った。



(5) TPC 電場整形用コッククロフト-ウォルトン高電圧整流回路の設計

液体アルゴン TPC の性能を決定する重要な要因として、最適なドリフト電場形成が挙げられる。電場形成のためには、電極間への高電圧の印加が必要であるが、液体アルゴン TPC は高真空断熱容器を構造体としているため、外部電源からの電圧供給の場合には、構造体内外をつなぐ導入端子の耐圧制限によって最大印加電圧が抑えられてしまう。そのため液体アルゴン TPC における電場形成用の直流高電圧電源として、コッククロフト-ウォルトン高電圧整流回路(C-W 回路)を製作した。C-W 回路を液体アルゴン中で動作確認を行ない TPC として最適な電場整形が可能となった。下図に高真空断熱容器内の各電極の配置の模式図とコッククロフト-ウォルトン回路(C-W 回路)を示す。



5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

1 S.Narita, Y.Hoshi, K.Neichi, and A.Yamaguchi: Induced Charge Profile in a Glass RPC Operated in Avalanche Mode, IEEE Trans. on Nucl. Sci., 60, pp.4656-4659, 2013

2 S.K.Agarwalla, S.Narita 他 The LBNO collaboration: The mass-hierarchy and CP-violation discovery reach of the LBNO long-baseline neutrino experiment, J. High Energy Phys., 94, DOI:10.1007/JHEP05, 2015.

[学会発表](計 7 件)

- 1 伊藤裕繁, 内藤裕貴, 成田晋也, 他 J-PARC T32 Collaboration: 液体アルゴン三次元飛跡検出器における高電界形成法の開発, 平成 24 年度電気関係学会東北支部連合大会, 秋田市 秋田県立大学, 2012.8.31
- 2 荒岡修, 笠見勝裕, 木村誠宏, 小林隆, 杉田慎一郎, 田中雅士, 寄田浩平, 伊藤裕繁, 成田晋也: J-PARC K1.1BR ビームラインを用いた 250L 液体アルゴン TPC の次期ビームテストについて(1), 日本物理学会 2012 年秋季大会, 京都市 京都産業大学, 2012.9.14
- 3 渡邊孝太, 磯木崇史, 佐々木亮輔, 千葉寿, 志田寛, 成田晋也: コッククロフト・ウォルトン型回路の低温

特性, 平成 25 年度電気関係学会東北支部連合大会, 会津若松市 会津大学, 2013.8.23

4 磯木崇史, 渡邊孝太, 佐々木亮輔, 千葉寿, 志田寛, 成田晋也: アルゴンからの真空紫外シンチレーション光検出に関する研究, 平成 25 年度電気関係学会東北支部連合大会, 会津若松市 会津大学, 2013.8.23

5 成田晋也, 東海林諒, 佐々木亮輔, 田頭拓也, 千葉寿, 志田寛: アルゴンからの微弱シンチレーション光検出に関する研究, 平成 26 年度電気関係学会東北支部連合大会, 米沢市 山形大学, 2014.8.21

6 佐々木亮輔, 田頭拓也, 千葉寿, 志田寛, 成田晋也, 坂下健, 長谷川琢哉: 液体アルゴン三次元飛跡測定器における強電界生成法に関する研究, 平成 26 年度電気関係学会東北支部連合大会, 米沢市 山形大学, 2014.8.21

7 坂下健, 池野正弘, 岩崎裕也, 内田智久, 笠井聖二, 笠見勝祐, 小林隆, 佐々木亮輔, 庄子正剛, 成田晋也: 液体アルゴン TPC 測定装置開発の現状, 日本物理学会第 70 回年次大会, 東京都 早稲田大学, 2015.3.22

6. 研究組織

(1) 研究代表者

星 善元(HOSHI Yoshimoto)
東北学院大学・工学部・教授
研究者番号: 80146117

(2) 研究分担者

根市 一志(NEICHI Kazushi)
東北学院大学・経営学部・教授
研究者番号: 90296012

(3) 研究分担者

山口 晃(YAMAGUCHI Akira)
東北大学・理学研究科・名誉教授
研究者番号: 60004470

(4) 研究分担者

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