

GEMの電荷増幅特性に関する研究

著者	庄司 愛子, 星 善元, 成田 晋也
雑誌名	東北学院大学工学部研究報告
巻	50
号	1
ページ	27-32
発行年	2016-02
URL	http://id.nii.ac.jp/1204/00000536/

GEM の電荷増幅特性に関する研究

Characteristic of charge multiplication with GEM

庄司 愛子*,**

星 善元*

成田 晋也**

Aiko SHOJI

Yoshimoto HOSHI

Shinya NARITA

Abstract: Gas electron multiplier (GEM), as a micro pattern gas detector, offers a potential for applications of a precise tracking device in high-energy physics experiment. It is necessary to understand the performance of the detector in various operating conditions. The signal property is mainly defined using a multiplying process of the ionized electrons induced, and it depends on the detector configuration as well as the composition of the operating gas. In this study, we tested a detector system with single, double, and triple GEMs operating in tandem with an Ar-CO₂ mixed gas, and investigated the signal properties for X-ray from ⁵⁵Fe systematically. We also tested some sets of gas mixtures by varying the ratios of Ar and CO₂. As the result, we obtained a higher gain by stacking GEMs by applying a relatively lower voltage. In addition, the mean signal charge and the gain of the detector were found to depend on the gas mixing ratio. Since CO₂ has an ability to absorb UV photons generated in an avalanche development process, the multiplication of photoelectron was suppressed for a higher CO₂ density.

Keywords: GEM, charge multiplication, electric field, electron avalanche

1. はじめに

国際リニアコライダー (ILC) 計画などの素粒子物理学実験において粒子飛跡測定に用いられるものとして、三次元飛跡測定器 (TPC: Time Projection Chamber) がある。TPC では、測定器内を粒子が通過した際に発生する電離電子が、内部電場によって信号読み出し電極にドリフトし、電気信号を発生させる。この信号発生位置情報と時間情報から粒子の飛跡が決定される。通常、この電気信号は微弱であるため増幅が必要となる。その増幅装置として考えられているのがガス電子増幅器 (GEM: Gas Electron Multiplier) である。GEM は、多数の細孔が開けられた基板両面に電位差を与え、細孔中に高電界を形成させることで、電子が細孔を通過する際に雪崩増殖し、それによって電荷を増幅させる装置である^{[1][2]}。GEM の増幅作用には、媒質として用いるガス種、GEM の配

置、GEM への印加電圧や測定器内部電場分布など様々な要因が関わっており、TPC の飛跡決定精度の向上のためには、これらの条件の最適化が必要である。

本研究では、GEM の積層および媒質混合気体の組成比に対する増幅率の変化を検証し、GEM 使用条件の最適化のための指針を得ることを目的とした。

2. GEM(ガス電子増幅器)

図1に本実験で使用した GEM (サイエナジー社製) を示す。大きさは 10 cm × 10 cm, 細孔サイズ 70 μm, 細孔間隔 140 μm となっており、厚さは 50 μm である。絶縁体カプトンの両面に銅が蒸着された構造となっている。

基板両面に数百ボルトの電位差を与えることで、孔の内部に高電場が形成される (図3)。GEM の孔に導かれた電子は電子雪崩を引き起こし、ガス増幅する。GEM を多層に積層して使用することにより、高い増幅率を得ることができる。

* 東北学院大学

** 岩手大学

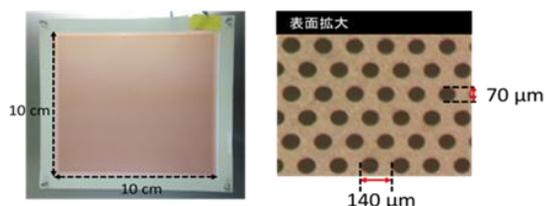


図1 実験で使用した GEM

3. 測定装置

図2に測定装置の概略図を示す。まず、GEM 収納アルミ容器 (GEM chamber) に GEM を配置し、ガスを流量計でモニタし、GEM chamber 内に充填させる。このとき、安全上の配慮から排気側に液体シリコンを入れた容器 (バブラー) を設置し、ガスの気泡によってガスの排気をモニタできるようにした。実験ではガス流量を 80cc/min に設定した。本研究での GEM 増幅率評価試験では、 ^{55}Fe から放出される X 線 ($E=5.9\text{keV}$) を使用した。X 線がガス原子を電離させることで電離電子が発生する。各々の GEM 電極間に高電圧を印加することにより GEM の孔中に最適な高電場を発生させる。電離電子が GEM の孔中を通過する際に高電場によって雪崩増殖をし、それによって増幅した電荷を、アノードパッドの信号として読み出し、増幅器および A/D 変換器 (ADC: Analog to Digital Converter) を介し、PC でその電荷量を記録する。

本研究では、GEM 基板を 1~3 枚積層した場合の増幅率の変化を Ar/CO₂ 混合気体を用いて調べた。ここで、Ar は入射 X 線に対する電離気体、CO₂ は電子雪崩の成長を制御するクエンチング作用を持つ気体である。本実験では、Ar/CO₂ の比率が 70:30, 80:20, 90:10, 100:0 [%] それぞれの混合気体に対する増幅率の違いについても検証した。

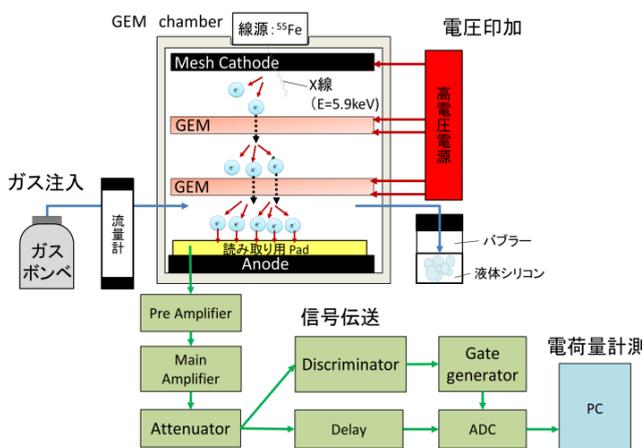


図2 測定装置の概略図

3.1. GEM chamber

図3に本研究で使用した GEM chamber の写真を示す。GEM chamber の外寸は縦 20cm × 横 20cm × 高さ 8.3cm である。容器の材質はアルミニウムで、厚さを 5.5mm である。なお、X 線の透過性を考慮して、ふた上面にアルミ箔の窓 (10 cm × 10 cm × 0.1 mm) を設け、そこに線源を設置した。

容器内部に 1 枚のメッシュカソードと 3 枚の GEM を設置できるような電圧供給用端子が 7 個取り付けられている。また、ガスの注入・排気用に導入口が 2 つ取り付けられている。容器内の下部に 4 つのボルトを設置し、あらかじめ四隅に穴が開いている GEM やメッシュカソード、読み取り用アノードパッドをボルトに通し、固定した。GEM の積層にはプラスチック製のスペーサーを使用し、その間隔を 1.5 mm に設定した。

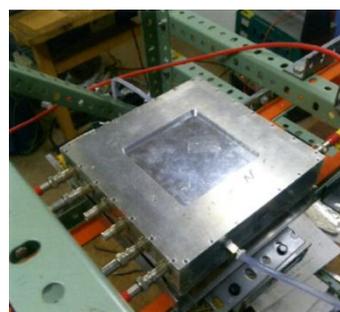


図3 GEM chamber

3.2 使用ガス

本研究では、媒質として Ar/CO₂ 混合ガスを使用した。Ar は電離性の高い気体であり、ガス型粒子測定器で広く用いられている。一方で、Ar が電離すると、電子が放出されるとともに真空紫外光も放出される。真空紫外光が GEM の基板表面の電極金属に入射すると、光電効果によって電子が放出される。この放出された電子によって過剰な電子雪崩増殖を引き起こされる。また、電子が Ar ガス中に放出されるだけではなく、GEM 中の絶縁体部分に放出されれば、絶縁破壊を引き起こし、電極が短絡して GEM が破損する恐れがある。これを防ぐために、クエンチングガスとして CO₂ を使用する。CO₂ は真空紫外光を吸収する性質があり、電子雪崩の成長を抑制することができる。

本研究では、Ar/CO₂ の比率が 70:30, 80:20, 90:10, 100:0 の 4 種類の混合気体を使用した。

3.3. GEM の配置と各領域の電場

図4にGEMを2枚使用する場合の各領域の電場を示す。図のように、GEM 測定器では、Drift 領域、Transfer 領域、Induction 領域の3つの領域が存在する。Drift 領域では、X 線が入射して Ar 原子との相互作用により電子を生成する。生成された電子は電場の作用によって GEM の孔へとドリフトしていく。Transfer 領域では、GEM の孔中で増幅された電子を次の GEM まで転送する。Induction 領域では、GEM によって増幅された電子を読み取り用アノードパッドへ導く。

本実験での各領域の電場設定は、Drift 領域では 2.0kV/cm、Transfer 領域では 2.7kV/cm、Induction 領域では 5.3kV/cm とした。GEM の配置間隔は 1.5 mm としたため、各領域への電位差は、Drift 領域で 300V、Transfer 領域で 400V、Induction 領域で 800V となるように電圧を印加した。GEM を2枚使用する場合はこれら各領域が1つずつ存在する。GEM が1枚の場合、Transfer 領域が無く、Drift 領域と Induction 領域のみとなる。GEM が3枚の場合、Transfer 領域が2つ存在するため、それぞれを Transfer 領域1、Transfer 領域2とする。

また、電圧印加時の GEM への過大な電圧供給を避けるため、GEM とメッシュカソードには保護回路を設けた。実験では各 GEM への印加電位を GEM の放電限界まで段階的に上昇させて増幅特性を評価した。

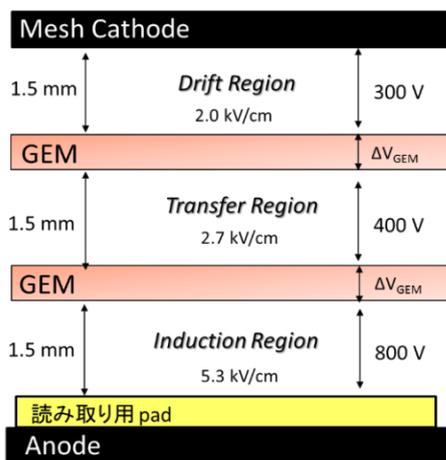


図4 GEM2枚での電場構成

3.4. 信号の読み出しと及び処理回路

読み取り用アノードパッドでは、Induction 領域を通じて導かれた電子を読み取り、信号として伝送する。アノードパッドの表面は銅であり電子が当

たると、電子は負の電荷であるため、静電誘導によってパッドに正の電荷が誘起される。これと同時にパッド中の負の電荷、すなわち電子が信号として増幅器および ADC へと伝送される。

まず、前置増幅器と主増幅器で信号を増幅させる。そして信号が大き過ぎた場合、減衰器で信号を減衰させる。信号を2つに分け、一方では波高弁別器で閾値以上の信号を通しノイズを除去する。ゲートジェネレータでゲートをつくり ADC へ送る。もう一方では、遅延モジュールで信号を遅らせゲートに信号を入れるタイミングを合わせる。ADC で信号がアナログ量からデジタル量へ変換される。ADC から PC へデータを転送し、PC でデータ解析を行った。

3.5. 電荷増幅率の算出

電荷増幅率 A_E の算出については(1)式を使用した。

$$A_E = \frac{e_{ADC}(m-p)}{en_e a} \quad (1)$$

m は信号の電荷分布に対するガウス関数によるフィッティングから得られる平均値であり、測定値を指す。ペDESTAL p は、暗電流に相当する電荷であり、測定値から差し引かなければならない。ADC の1チャンネルあたりの電荷量 e_{ADC} は 0.25 pC である。 e は電気素量 1.6×10^{-19} C である。アンプの増幅率 a は 1170 倍である。初期電子数 n_e は増幅される前の電子数であり、(2)式を用いて算出した。

$$n_e = \frac{E}{W_{Ar}} \times N_{Ar} + \frac{E}{W_{CO_2}} \times N_{CO_2} \quad (2)$$

E は ^{55}Fe からの X 線のエネルギー 5.9 keV である。 W 値とは、イオン化する際に必要なエネルギーのことであり、Ar の W 値は 25 eV、 CO_2 の W 値は 34 eV としている。

• Ar/ CO_2 =70%/30%の場合の初期電子数

$$n_{e(70:30)} = \frac{5900}{25} \times 0.7 + \frac{5900}{34} \times 0.3 \cong 217 \text{ 個}$$

• Ar/ CO_2 =80%/20%の場合の初期電子数

$$n_{e(80:20)} = \frac{5900}{25} \times 0.8 + \frac{5900}{34} \times 0.2 \cong 223 \text{ 個}$$

・Ar/CO₂=90%/10%の場合の初期電子数

$$n_{e(90:10)} = \frac{5900}{25} \times 0.9 + \frac{5900}{34} \times 0.1 \cong 229 \text{ 個}$$

・Ar/CO₂=100%/0%の場合の初期電子数

$$n_{e(100:0)} = \frac{5900}{25} \times 1 + \frac{5900}{34} \times 0 \cong 236 \text{ 個}$$

4. 測定結果

ここで、GEMを1枚使用した場合をSingle GEM, 2枚使用した場合をDouble GEM, 3枚使用した場合をTriple GEMと表記する。また、GEMへの印加電圧を ΔV_{GEM} と表記する。

4.1 ADC 分布

図5にAr/CO₂=80%/20%で ΔV_{GEM} =640 V印加した時のSingle GEMのADC分布, 図6にAr/CO₂=80%/20%で ΔV_{GEM} =500 V印加した時のDouble GEMのADC分布, 図7にAr/CO₂=90%/10%で ΔV_{GEM} =360 V印加した時のTriple GEMのADC分布を示す。ADC分布は積分電荷量分布であり、電荷増幅率を決定する³⁾。ADC分布では2つのピークが見られた。今回の測定ではガウス関数でフィッティングし、その最大値を増幅率の算出に使用した。ただし、Ar/CO₂=100%/0%では、放電が生じやすく測定が不可能になった場合が多かったため除いている。

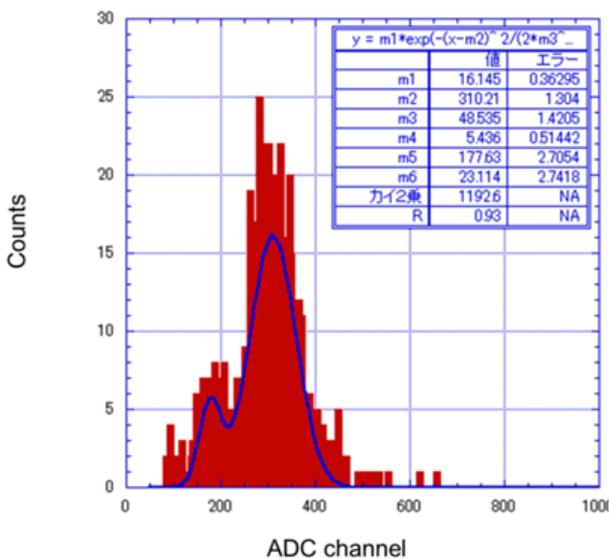


図5 Ar/CO₂=70%/30%で ΔV_{GEM} =680 V印加した時のSingle GEMのADC分布

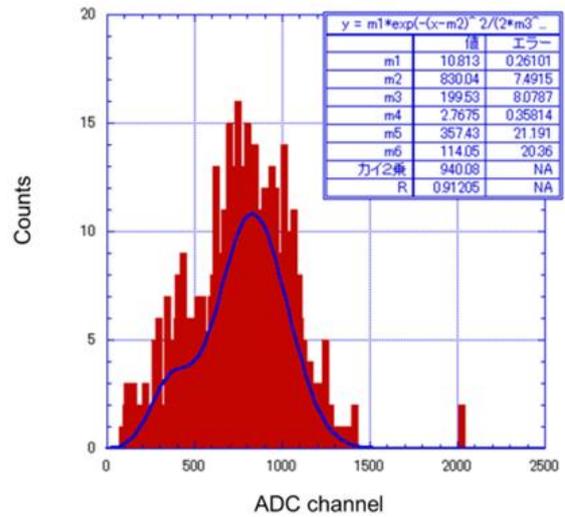


図6 Ar/CO₂=80%/20%で ΔV_{GEM} =500 V印加した時のDouble GEMのADC分布

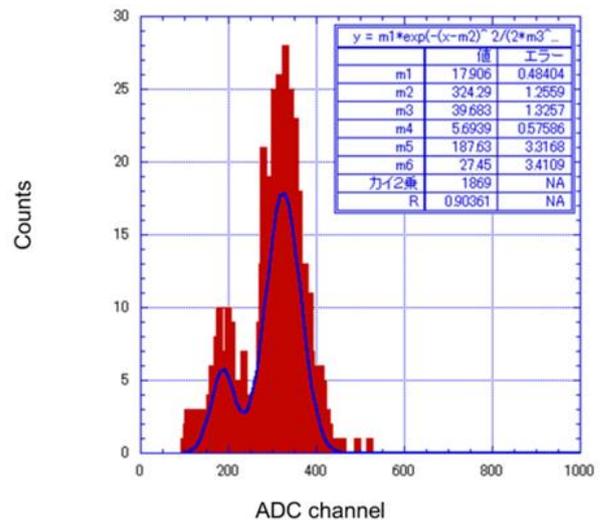


図7 Ar/CO₂=90%/10%で ΔV_{GEM} =360 V印加した時のTriple GEMのADC分布

4.2 GEMの積層による電荷増幅特性

図8にSingle GEM, 図9にDouble GEM, 図10にTriple GEMの電荷増幅特性のグラフを示す。Triple GEMではAr/CO₂=100%/0%の際、印加電圧が300Vの時点で放電が発生し、測定が不可能となった。

GEMに印加する電圧を大きくしていくと、電荷増幅率は増加した。Arの割合が大きいほど低い印加電圧で電子の増幅が可能である。一方で、電子雪崩の増加に伴い真空紫外光の放出が多くなることでGEM間およびGEM-陰極/陽極間の放電確率も大きくなるため、使用の際には慎重な条件設定が必要である。

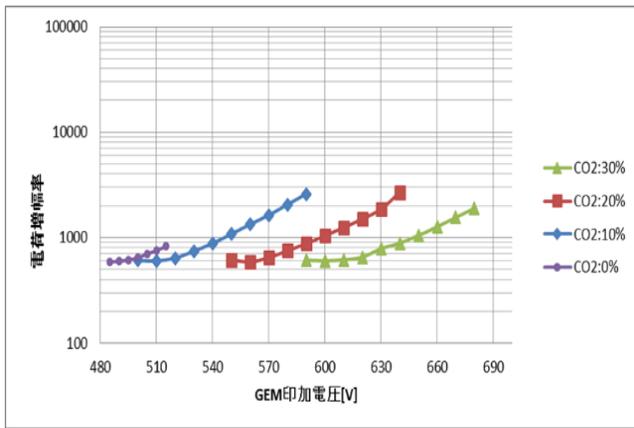


図8 Single GEM の電荷増幅特性

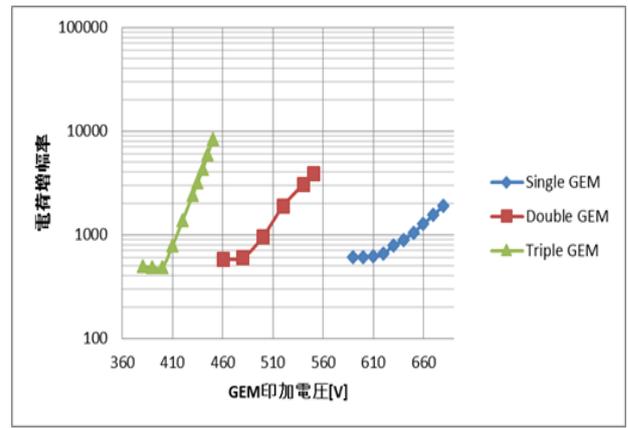


図11 Ar/CO₂=70%/30%時の電荷増幅特性

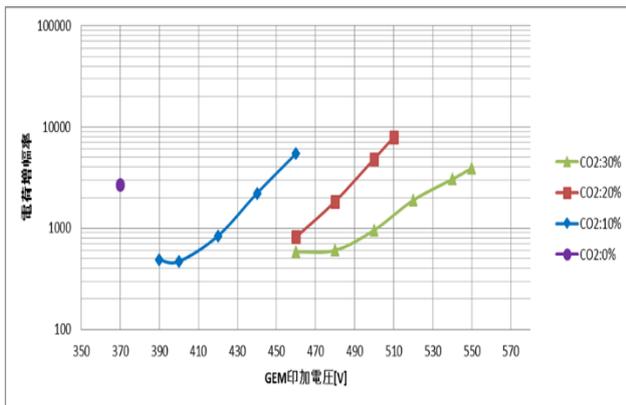


図9 Double GEM の電荷増幅特性

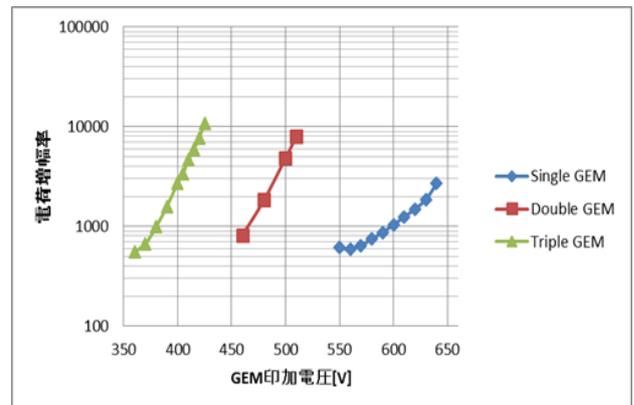


図12 Ar/CO₂=80%/20%時の電荷増幅特性

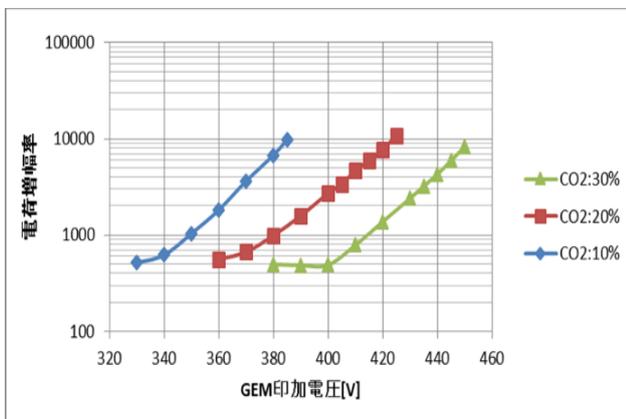


図10 Triple GEM の電荷増幅特性

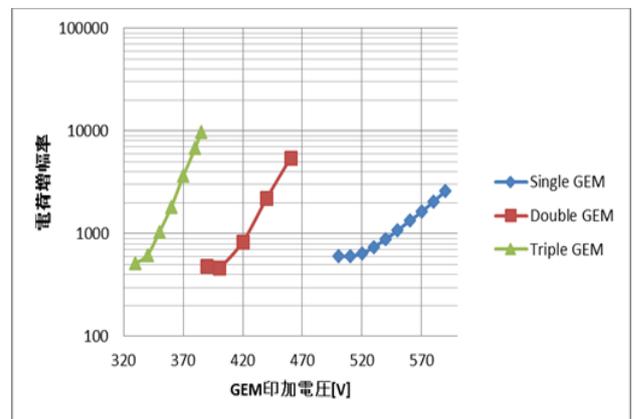


図13 Ar/CO₂=90%/10%時の電荷増幅特性

4.3 混合ガス比率による電荷増幅特性

図11に混合ガスの比率が Ar/CO₂=70%/30%、図12に Ar/CO₂=80%/20%、図13に Ar/CO₂=90%/10%時の電荷増幅特性のグラフを示す。4.1と同様に、放電が生じて測定が不可能なる場合が多かった Ar/CO₂=100%/0%の場合を除いた。Triple GEMの電荷増幅率が最も大きく、GEMの積層数を増やすことで高い増幅率を得られることがわかる。

5. 結論

本研究では、粒子飛跡決定装置で用いるGEMの増幅特性を、測定器構成および使用混合気体比の観点から評価した。その結果、GEMを積層させることで高い増幅率を得られた。また、媒質混合気体において、電離性気体であるArの比率を増加させることで、効果的な増幅作用が得られることがわかった。今後はTPCなど、素粒子実験用測定器への実装を想定したGEMの最適使用条件をさらに探索していく必要がある。TPCでの飛跡

決定精度は、電離信号検知の時間応答性や電離電子のドリフトによる電荷の拡がり関わっていることから、それら多様な条件を考慮した検討を行っていく。

謝辞

本研究は科学研究助成事業，基盤研究(C)(24540308)の一環として行われた。

参考文献

[1] Glenn F.Knoll: “放射線ハンドブック(第4版)”, 神野郁夫, 木村逸郎, 阪井英次共訳, オーム社(2013), p.73/p.81, p.202/p.204

[2] Fabio Sauli: “Gaseous Radiation Detectors –Fundamentals and Applications”, Cambridge University (2014), p.383/p.392

[3] 野中淳平: “Thick-GEM の基礎特性の測定とシミュレーションによる性能評価”, 信州大学理学部物理科学科, 卒業論文(2010), p.19/p.23