

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18316

研究課題名(和文) マイクロ蛍光比例計数管を用いた放射線イメージングデバイスの開発研究

研究課題名(英文) Gas scintillation Glass GEM detector for various radiation imaging

研究代表者

藤原 健 (Fujiwara, Takeshi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・分析計測標準研究部門・研究員

研究者番号：90552175

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：Glass GEM (Gas Electron Multiplier)と呼んでいるガラス製のマイクロ比例計数管アレイと、蛍光ガスを組み合わせた放射線イメージング検出器を開発した。蛍光ガスの組成の探索、デバイスの設計を中心に組み、混合したガスの発光を定量的に調べる他、ガスの発光イメージングデバイスとして活用するためには放射線量とガスの発光が比例関係であることが必要になるため、その実証に、電離と励起発光の相関を調べる装置を組み上げ評価した。その上で、イメージング装置を組み上げ、X線、粒子線、中性子の本研究の目的である本装置による放射線イメージングを実証した。

研究成果の概要(英文)：A high resolution X-ray imaging gaseous detector has been successfully developed with Glass GEM. The imaging system consists of a chamber filled with scintillating gas (Ar/CF₄, Kr/CF₄, Xe/CF₄), inside of which Glass GEM (G-GEM) is mounted for high gain gas multiplication. Since the gas gain of the G-GEM is much higher compared to conventional GEMs, ultra high yield scintillation photons are produced during the avalanche process. These photons can be easily detected by a mirror-lens-CCD-camera system and a high resolution X-ray radiograph is formed. We demonstrate X-ray imaging performance of Glass GEM based X-ray imager with 20 - 60 kV X-ray tube, and combination of various gas (Ar/CF₄, Kr/CF₄, Xe/CF₄). High spatial resolution, high speed image forming and 3D CT is also demonstrated.

研究分野：放射線計測

キーワード：ガス検出器 マイクロパターンガス検出器 Glass GEM 放射線イメージング ラジオグラフィ 中性子
ラジオグラフィ

1. 研究開始当初の背景

放射線検出器は大きく分けて、検出媒体に気体(ガス)を用いたもの、液体を用いたもの、そして固体を用いたものに大別される。今日では、放射線のイメージングには固体を用いたものが最も流通しており、医療用、学術用、産業用など広く用いられている。他方で、ガスを用いた検出器は、種々の理由から高エネルギー物理実験など限られた用途にしか用いられていなかった。ガス検出器がイメージングに用いられていない(いなかった)理由は様々だが、主に以下のような理由が挙げられる。

- ① 空間分解能が劣る
- ② ハンドリング・オペレーションが難しい
- ③ X線・ガンマ線の検出効率が悪い

一方、われわれは2012年にウェットエッチングによるガラス微細加工技術を用いてガラス製マイクロ比例計数管: Glass GEM (Glass Gas Electron Multiplier)の開発に成功した(Takahashi, et al., NIM A 2012)。これは感光性ガラスに露光によるパターンニング後、ウェットエッチングで微細加工を施し、無数の穴をあける技術である。この微細加工を施したガラスの両面に電極を付けた電極間に高電圧を印加することで、ガラスに開けられた多数の穴一つ一つがマイクロ比例計数管として動作させることが可能になる。その後のGlass GEMの改良やオペレーションノウハウの蓄積により、Glass GEMは従来のポリイミド製のGEM (Sauli, NIM A 1999)と比較し、二桁以上高いガス増幅率(3×10^4)が得られることや、優れた高計数特性を示すなど、優れた性能を有していることを示している(Fujiwara et al., JINST 2014)。

また、Coimbra大学のFragaらの先行研究により、比例計数管の計数ガスにCF₄を混合したものをを用いることでガス増幅の際に励起発光が起こることが分かっている(Fraga et al. NIM A 2003)。そこでわれわれはCF₄(蛍光ガス)の励起発光とGlass GEMの高いガス増幅率に着目し、マイクロ蛍光比例計数管とする着想を得た(Fujiwara et al. JINST 2013)。Glass GEMのような高い増幅率を有する二次元ガス検出器を用いて、イメージング装置を組み上げることで、現在X線のイメージングとして広く用いられている、X線CCDやX線I.I.(Image Intensifier)、フラットパネルディテクタと比較し、有感面積あたりのコストや軟X線に対する感度、放射線耐性という点で優位性が出せると考えられる。このようなイメージング装置を用いることで、軽元素物質のイメージングやCTなどへの活用が見込める。

しかし、現状の蛍光ガスの発光量ではX線透過イメージの撮像時間に1~10秒程度要しており、発光量を増大させようとGlass GEMの印加電圧をあげるとデバイス内で放電が起こるなど、実用化のためには①撮像の

高速化(<100ms)や②放電問題の解決が不可欠である。本研究では上記の2つの課題を解決するために、蛍光ガスの組成について重点的に研究し、イメージングに特化した最適なガス組成を探索する基礎研究と、産業応用・医学領域への展開を視野に入れた実証試験を遂行する。

2. 研究の目的

本研究ではガラス製のマイクロ比例計数管と蛍光ガスを組み合わせ、放射線の反応媒体に“ガス”を用いた放射線イメージングデバイスの開発を行うことを主目的としている。そのための本研究の具体的な目的は、①ガラス製のマイクロ比例計数管と組み合わせる“蛍光に特化したガス”の組成の探索(発光輝度・)と、②“固体”に対し“ガス”が持つ優れた物理的特性を活かしたアプリケーション(軟X線、中性子、高LET放射線)で有用性を実証することである。本研究では、ガスの組成の探索とデバイスの設計を進め、それぞれの用途(放射線の種類)にあわせた高分解能イメージングデバイスを開発する。

3. 研究の方法

蛍光ガスを用いた新しい放射線イメージングデバイスを開発するために、本研究計では主に以下の研究項目に取り組んだ。

- ① ガス増幅と励起発光の相関を調べ、効率的に励起発光が得られる蛍光ガスの探索
- ② 放電を抑制するための添加ガスの探索と、その混合比のスクリーニング調査
- ③ 用途に合わせた最適なガス圧の研究
- ④ ガスを用いたイメージングデバイスの応用研究への展開
- ⑤ 軟X線CT、陽子線イメージング・中性子イメージングの実証実験。

まず、ガスの組成と励起発光の相関を調べるために三種ガス混合装置(図1)を導入し、種々の混合比のガスを用いて測定を行い、その特性を調べた。ベースとなるガスにはArの他、He、Kr、Xeを用い、それに添加ガスとしてCF₄、CO₂、CH₄、N₂を用い、それぞれのガスの混合比を変えて試験した。

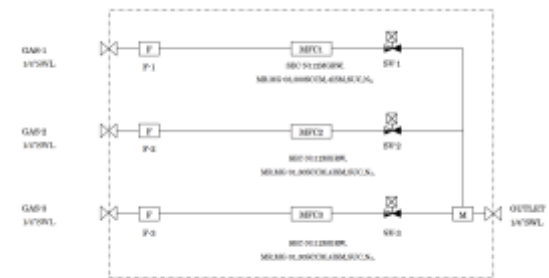


図1. 3種ガス混合装置

混合したガスの発光を定量的に調べる他、ガ

スの発光イメージングデバイスとして活用するためには放射線量とガスの発光が比例関係であることが必要になるため、その実証に、電離と励起発光の相関を調べる装置を組み上げ評価した。その上で、イメージング装置を組み上げ、X線、粒子線、中性子の本研究の目的である本装置による放射線イメージングを実証した。

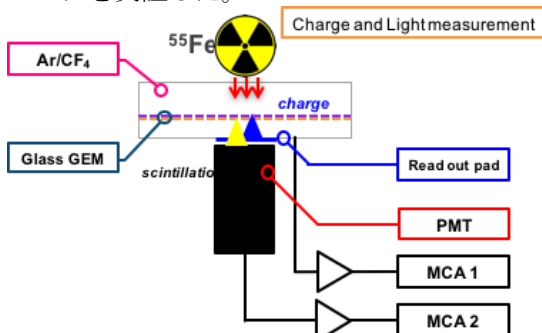


図2. ガスの発光測定セットアップ。発光と電離を同時に測定するために、チャンバの下部に光学窓をつけ、光電子増倍で発光を測定している。

4. 研究成果

(1) ガスの発光の比例性と発光量

Glass GEM を用いた高いガス増幅時の、ガスの発光特性を調べた結果、図3に示すように、電離と発光の信号をそれぞれとって測った場合でも同等のエネルギースペクトルが得られ、このことから電離量と発光量にはガス増幅率8,000の領域でも比例関係にあることが分かった。

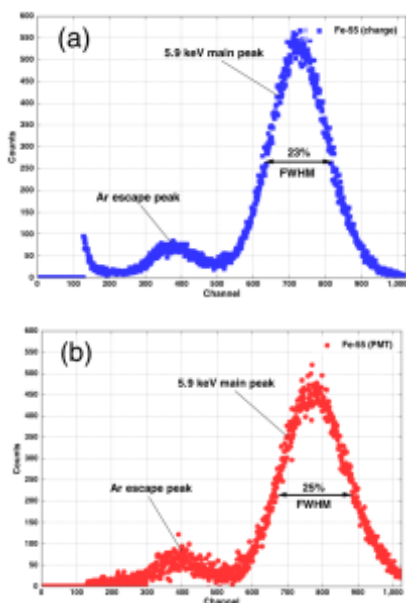


図3. ガスの電離(a)と発光(b)でそれぞれ測定した Fe-55(5.9 keV X線)のエネルギースペクトル。

また、ガス増幅時の発光量を世界で初めて定量的に調べることに成功し、その結果を図4に示す。発光スペクトルを加味し、受光素子にはブロードな波長領域で量子効率が一定

なアバランシェフォトダイオードを用い、校正済みの CsI:Tl の発光量と比較することでガスの発光量を評価した。その結果、CsI の結晶に Co-60 のガンマ線を照射した発光量と比較して、Glass GEM に Fe-55 からの X 線を照射した場合、5 倍以上の発光量が得られることが分かった。これは入射した放射線のエネルギーから換算すると、単位エネルギーあたりの発光量は 85,000 ph/keV となることが分かり、これは一般的な無機結晶のシンチレータと比較して3桁以上高い発光量が得られていることになる。これは電離量の少ない 10 keV 以下の低いエネルギーの X 線イメージングなどで

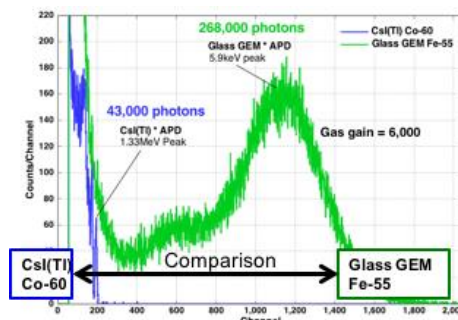


図4. ガスの電離(a)と発光(b)でそれぞれ測定した Fe-55(5.9 keV X線)のエネルギースペクトル。

(2) X線のイメージング

高い増幅率と発光量が得られた Glass GEM と、暗箱・ミラー・冷却 CMOS カメラと組み合わせた新しいイメージングデバイス (Scintillating Glass GEM) を開発した (図5)。本検出器は 100mm² の有感面積を持った Glass GEM とガスチェンバで構成されており、CMOS 素子に直接放射線が当たらないように暗箱内のミラーでシンチレーション光を 90 度反射させている。

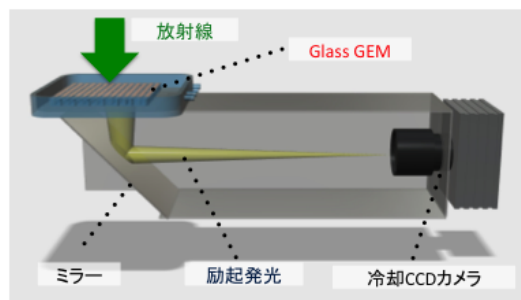


図5. Scintillating Glass GEM 検出器の概要。

本研究では Scintillating Glass GEM を用いて、高解像 X 線イメージングや CT 撮像を実証した。Scintillating Glass GEM はガス中で高い増幅率(10³~)で電子を増幅するため、~20keV の低エネルギー X 線でも高感度に検出することが可能となり、従来の固体検出器では撮像が困難であった軽元素のイメージングを、低エネルギー X 線と組み合わせるこ

とで高いコントラストのX線ラジオグラフィを高速に行うことが可能になった(図6)。Scintillating Glass GEMの増幅率と安定性の改善に取り組み、100mm²の有感面積を持つデジタルX線イメージングを実現した。

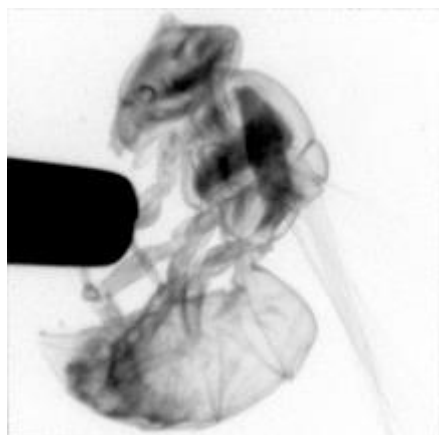


図6. 有感面積10cm²ガスを用いた検出器で得られたスズメバチのラジオグラフィ(マイクロフォーカスX線源による3倍拡大撮像)。

(3) 中性子のイメージング

Glass GEM 検出器で中性子を検出するために微細構造を持つマイクロストラクチャ型の¹⁰Bコンバータを用いた検出器を開発した。中性子と¹⁰Bとの核反応により発生した二次粒子(α線, Li粒子)がガスを電離し, その際に発生した微小な電荷をGlass GEMの孔内で電子雪崩を発生させることで増幅し, チャージアンプ・ADCで読み出すことで中性子の検出が可能になる。中性子検出器に要求される共通の課題として, γ線に対する感度をいかに低減するかということが挙げられる。中性子がある場には必ずγ線が存在するため, 中性子検出器にバックグラウンドとしてγ線が入射してくる。このγ線は中性子減速材や遮蔽材など, 中性子ビームラインを構成するほぼ全ての物質から発生する即発γ線に起因しており, γ線そのものを中性子の場から無くすることは不可能である。したがって, 検出器側でγ線バックグラウンドの影響を可能な限り除去する必要があり, ガンマ線と中性子の弁別能は中性子検出器の性能の重要な指標の一つである。

¹⁰Bコンバータを用いた検出器の場合でも, ガス増幅の際のシンチレーション光を利用した積分型のイメージング検出器の開発にも取り組んだ。元々ガスを用いた検出器はγ線が検出器に落とすエネルギーが小さいため, 積分型にしても比較的S/N比が高い画像が得られる。中性子ラジオグラフィは産業利用としてのニーズも高く, 積分型中性子フラットパネルディテクタへの要望は産業界からも強く聞こえてくる。Glass GEM, ¹⁰Bコンバータ, シンチレーションガスを組み合わせることで, γ線感度の低い中性子シンチレ

ータとして使用することが可能になる。図7はその原理実証のためにボロンコンバータ+Glass GEM+冷却 CCDカメラを組み合わせた検出器の概要である。本検出器を用いて, 理化学研究所の小型中性子源 RANSにて取得した中性子ラジオグラフィの一例を図8に示す。Glass GEMはその増幅率の高さ故に, 高輝度のシンチレーション光が得られる。CCDカメラを組み合わせることで手軽な中性子イメージングを実現できた。

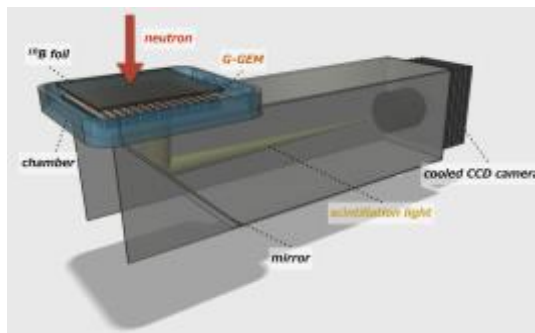


図7. ボロンコンバータを用いた中性子イメージング装置の概要。

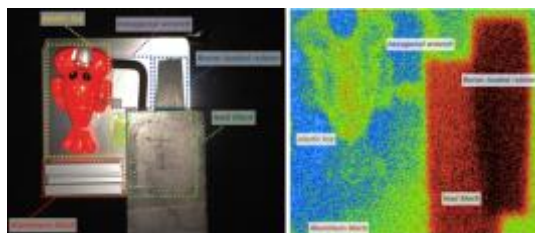


図8. 本検出器で得られた中性子ラジオグラフィの一例。ラジオグラフィの条件としては比較的厳しい(低フラックス, 高バックグラウンド)小型加速器中性子源でもラジオグラフィが可能であることが示せた。

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)

[雑誌論文] (計4件)

- ① T. Fujiwara, Y. Mitsuya, T. Fushie, K. Murata, A. Kawamura, A. Koishikawa, H. Toyokawa, and H. Takahashi, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 850, 7 (2017).
10.1016/j.nima.2017.01.013
- ② T. Fujiwara, Y. Mitsuya, and H. Toyokawa, J. Inst. 11, C12050 (2016).
10.1088/1748-0221/11/12/C12050
- ③ T. Fujiwara, U. Bautista, Y. Mitsuya, H. Takahashi, N. L. Yamada, Y. Otake, A. Taketani, M. Uesaka, and H. Toyokawa, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 838, 124 (2016).
10.1016/j.nima.2016.09.005
- ④ T. Fujiwara, Y. Mitsuya, T. Yanagida, T. Saito, H. Toyokawa, and H. Takahashi, Jpn. J. Appl. Phys. 55, 106401 (2016).

10.7567/JJAP.55.106401

〔学会発表〕（計 5 件）

- ① 藤原 健, Scintillating Glass GEM の開発とその応用, 応用物理学会, 2015 年 9 月 16 日, 名古屋国際会議場
- ② T. Fujiwara, Development and application of Scintillating Glass-GEM detector, 2015 年 10 月 13 日, 4 th International Conference of Micro Pattern Gaseous Detector
- ③ T. Fujiwara, Scintillating Glass GEM Detector for High Resolution X-ray Imaging and CT, IEEE Nuclear Science Symposium 2015
- ④ 藤原 健, Scintillating Glass GEM による高解像 X 線イメージングと CT, 応用物理学会, 2016 年 3 月 20 日, 東京工業大学
- ⑤ 藤原 健, Well 型 Glass GEM を用いた陽子線イメージング, 応用物理学会, 2017 年 3 月 16 日, パシフィコ横浜

〔図書〕（計 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等
<https://staff.aist.go.jp/fujiwara-t/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤原 健 (FUJIWARA, Takeshi)
産業技術総合研究所・分析計測標準研究部門・研究員
研究者番号：90552175

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者 ()

研究者番号：

(4) 研究協力者 ()