

平成 30 年 8 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H06727

研究課題名(和文)放射線損傷の生じない新しいX線イメージングデバイスの開発

研究課題名(英文)Development of novel X-ray imaging device without radiation damage

研究代表者

三津谷 有貴(Mitsuya, Yuki)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教

研究者番号：70784825

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：新しいフラットパネル型検出器の実現を目指し、気体放射線検出器に基づくイメージング技術の開発をおこなった。硬X線を固体コンバーターで間接的に捕捉する方法を採用し、タングステンメッシュのコンバーターをモンテカルロ計算によって設計した。その結果、コンバーターの無い場合に比べて高い検出効率を得られることがわかった。また、実験でコンバーターが実際に動作していることが確認できた。本研究課題では、イメージング用回路・DAQシステムの開発も行った。dToTに基づく信号処理と電荷分割方式によるイメージングシステムを開発し、少ない回路コンポーネントでも10cm角の領域で歪みなくイメージングを行うことに成功した。

研究成果の概要(英文)：In this research, to achieve a new flat-panel type radiation detector, a new radiation imaging detector based on gaseous radiation detector (glass gas electron multiplier, G-GEM) was proposed and demonstrated. To increase the detection efficiency to hard X-rays, the idea of introducing a solid state converter (tungsten mesh type) was proposed. The converter was designed with monte-carlo simulation. The result showed the converter will increase the detection efficiency of detector compared with the detector without converter. The converter was demonstrated by experiment. In this research, a new imaging signal processing and data acquisition system dedicated for G-GEM was also developed. The system was based on a new analog-to-digital conversion technique called dynamic ToT (dToT). In spite of its reduced number of circuit components, the large-area of 10 cm square was successfully imaged with X-ray.

研究分野：放射線計測

キーワード：X線 検出器 GEM 中性子

1. 研究開始当初の背景

申請者はこれまでに、新しいアイデアに基づく放射線イメージング用検出器の開発を行ってきた。このデバイスは、感光性ガラス基板にフォトリソグラフィ技術によって微細な孔を多数形成した検出器であり、ガラス製ガス電子増幅器 (glass gas electron multiplier, G-GEM) と名付けられている。以降 G-GEM と記述する。G-GEM は、希ガス雰囲気中で表・裏面間に高電圧を印加して使用される。高電圧印加によって G-GEM の孔内部には強電場が形成される。放射線による希ガスの電離電子は、G-GEM の孔内へドリフトし、強電場によって加速され、他の希ガス分子に衝突し電離を生じ、電離された電子もまた同様に加速されるため、連続的に雪崩のように電離が続いていく。この電子雪崩によって最初の電離電子の数は最終的には $10^4 \sim 10^5$ 倍ほどに増幅される。これによって、微小な放射線信号を高感度に検出することができる。

感光性ガラスによって製作されたものでない、通常の GEM は、微細孔型検出器の代表として以前から存在していた。しかしそれは、有機物で形成されているためにアウトガス放出の問題があったことや、放電耐性が低く損傷しやすかったこと、また、大面積化した場合の安定性などに問題があった。これらの理由が、微細孔型検出器の放射線イメージングデバイスとしての産業面での実用化を阻む原因となってきた。しかし G-GEM は、ガラス製で原理的にアウトガス放出がなく、またフォトリソグラフィ微細加工により低コストでの大型化に成功しており、大型化しても機械的な安定性が高く、従来の検出器の実用化を阻んでいた問題をクリアしている。性能面においても、単体で 10^4 を越える増幅率は従来の検出器を 1 桁ほど上回る値であり、信号雑音比が良い。

現在では、大型の放射線イメージング検出器が求められる局面が多いが、X 線だけでなく、中性子線や、治療用荷電粒子線などのイメージングも需要が高まっている。現在代表的なイメージング検出器にはフラットパネル検出器がある。これは固体ベースの検出器であり、X 線に対して高い検出効率を持っているが、中性子線や治療用荷電粒子線などの測定には感度が低く、検出素子の放射線損傷の問題もあることから、適用することができない。一方で、気体検出器に基づくイメージングデバイスであれば、中性子線や治療用荷電粒子線に対しても十分な感度を有しながらも、気体ベースであるために放射線損傷が原理的に存在しないという利点がある。特に G-GEM であれば、大型化が容易であるために、今後、大型で、かつ多様な放射線イメージングに用いることのできるデバイスとして、普及していく可能性を秘めている。

G-GEM のような気体放射線検出器の利点は、低いマテリアルコストと大面積イメージングの両立が可能である点である。一方でその問

題点としては、ハンドリングの難しさや、硬 X 線に対しての感度不足などが挙げられる。ハンドリングの難しさに関しては、G-GEM では、機械的安定性を高め、また放電による絶縁破壊耐性の高い素材を用いており、これまでの研究によって一定の解決を示すことができている。一方で、アプリケーションの幅が広い硬 X 線領域での感度不足に関しては、まだ解決されていない。また、これは気体ベースの検出器が普及しない原因となっているとも考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、新しい放射線イメージングデバイスの実現を目指して、まず硬 X 線領域での検出を行うための X 線⇄電子線のコンバーター開発を行うことを目的とした。

また、将来的な大型イメージングデバイスの実現も見据えて、G-GEM の有感領域全体のイメージングを少ない回路コンポーネントで行えるような回路・DAQ 系の開発を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

本研究課題では、硬 X 線を効率よく検出する方法として、固体コンバーターを開発する (図 3.1)。固体コンバーターは、その材質 (金、鉛など) や厚さ、微細加工形状について、その最適値をシミュレーションによって明らかにする。その結果に基づき、実際にコンバーターを試作・開発する。開発したコンバーターは硬 X 線を用いて実験によって動作を確認する。

また、イメージング回路・DAQ システムの開発に関しては、従来の ADC を用いた読み出し回路では検出器の大型化時に配線や回路の複雑化や消費電力の上昇といった問題があるため、それに変わる新しい信号処理方式を採用した回路を開発することとした。具体的には、アナログ信号波高値に比例する時間幅を持つデジタル信号に変換する、Dynamic Time-over-Threshold (dToT) の技術を採用する。

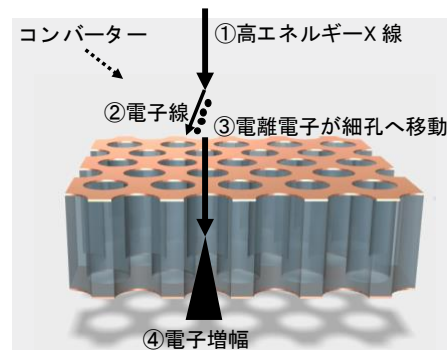


図 3.1 コンバーターを用いた硬 X 線検出システム

4. 研究成果

4. 1 コンバーターの設計と数値実験

硬 X 線を電子線に変換するコンバーターの設計を、モンテカルロ・シミュレーションによって行った。モンテカルロ・シミュレーションには、GEANT4を用いた。硬 X 線とコンバーターとのコンプトン散乱によって生じた電子がガスを電離し、ガス中に生成した電荷量（ガス中に付与したエネルギー量）を測定した。

コンバーターのモデルとしては、ガスとの接触面積が大きくガス中に電子線を放出する確率が高くなるように、メッシュ形状を想定したものを作成した。材質には、重元素金属であるタングステン、あるいは金を想定した。今回は入手性の高さから考え、タングステンのメッシュをモデルとして作成し計算に用いた。図 4.1 にコンバーターのモデルを示す。メッシュの開口部は $120\ \mu\text{m}$ 、線径は $50\ \mu\text{m}$ とした。簡単のためメッシュ線は Cylinder 形状ではなく Box 形状で近似した。

計算条件であるが、まずコンバーターは、3 mm あるいは 5 mm の厚さを持つアルゴンあるいはクリプトンガス層の上に設置されている。そしてコンバーターの上方から、X 線の照射を行った。X 線のエネルギーは 100 keV の単色とした。また、メッシュに対して均等な照射となるように、コーンビーム形状とした。

計算結果を図 4.2 から図 4.5 に示す。図 4.2 はアルゴン層 3 mm 厚、図 4.3 はアルゴン層 5 mm 厚の場合のスペクトルである。また、図 4.4 はクリプトン層 3 mm 厚、図 4.5 はクリプトン層 5 mm 厚の場合のスペクトルである。各図中で、緑の破線は X 線がコンバーターと反応して生成した電子がガス中に落としたエネルギーによるスペクトルである。一方、緑の一点鎖線は、X 線がガス層と直接反応してガス中に電荷として落としたエネルギーのスペクトルである。また、これら 2 つの合計量を赤の実線として示している。アルゴンは軽元素のガスであるため、100 keV 程度の硬 X 線に対しての直接の検出効率が低く、そのため直接反応するイベントは少ない。しかしながら、X 線とコンバーターとが反応した電子に対しては検出感度が高いため、効率よくこの電子を検出することができており、すなわち効率よく間接的に硬 X 線を検出することに成功している。クリプトンはアルゴンより原子番号が大きく、また密度が高いため、直接の X 線検出効率はアルゴンよりは高い。とはいえ、固体検出器と比較すると、やはり検出効率は非常に低く、硬 X 線の検出にはコンバーターを必要とする。

100 keV の X 線がこのコンバーターと反応したイベント数は、100 万回の照射のうち 3000 イベント程度であったため、システム検出効率としては約 0.3% と算出された。メッシュの開口率が 50.1% であることを考慮すると、コンバーターに入射した X 線に対しての絶対

検出効率は 0.6% 程度であることがわかった。このシステムとしての検出効率、例えばコンバーターのスタックなどによっても向上させることができるため、まずは単体として検出効率は目標値に対して十分のものとなったと考えられる。コンバーターのスタックに関しては、今後の検証と研究開発が望まれる。

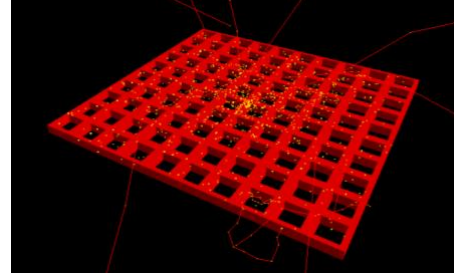


図 4.1 メッシュ形状のコンバーターの GEANT4 モデル

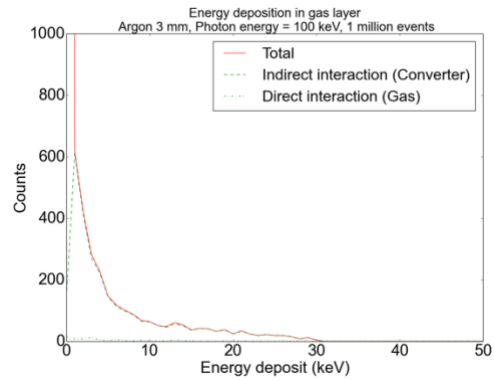


図 4.2 エネルギー付与のスペクトル（コンバーター+アルゴン 3 mm）

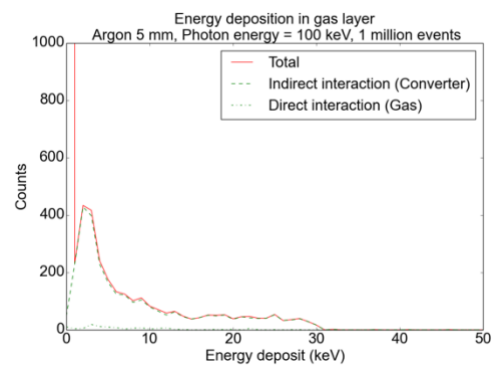


図 4.3 エネルギー付与のスペクトル（コンバーター+アルゴン 5 mm）

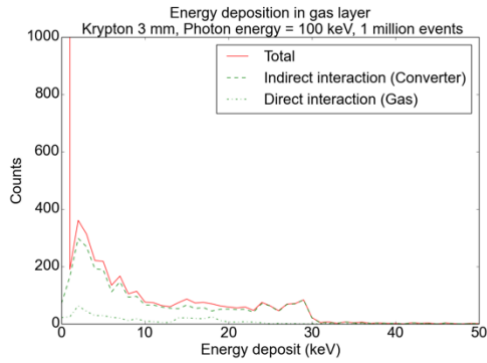


図 4.4 エネルギー付与のスペクトル (コンバーター+クリプトン 3 mm)

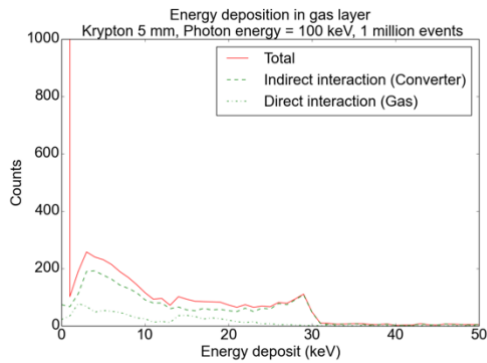


図 4.5 エネルギー付与のスペクトル (コンバーター+クリプトン 5 mm)

4. 2 コンバーターの評価試験

上記のモンテカルロ計算による設計に基づいて、硬 X 線コンバーターの導入と評価試験を行った。コンバーターは、タングステン製の微細メッシュを導入した。線幅は 50 μm 、開口ピッチは 119 μm である。このタングステンメッシュコンバーターに対して、Am-241 の 60 keV の γ 線 (X 線) を照射し、実際に X 線を検出することができるかどうかを評価した。コンバーターの下には比例計数管ワイヤを設置し、コンバーターで生成された電荷をガス増幅して読み出した。この信号は MCA によってスペクトルとして取得された。図 4.6 にその波高スペクトルを示す。モンテカルロ計算の結果と同様のスペクトルが実験でも得られており、コンバーターが実際に動作していることが確認できた。

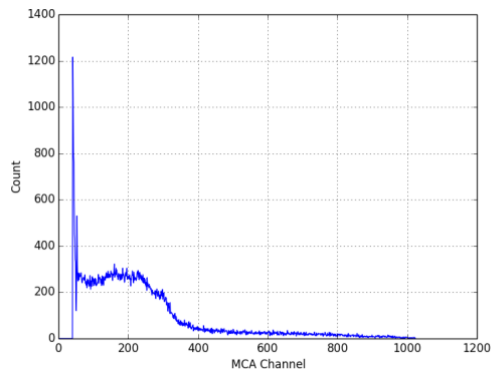


図 4.6 コンバーター設置時のスペクトル

また、タングステン製のメッシュコンバーターとは別に、金薄膜 (厚さ 50 μm) のコンバーターを導入し、これを用いた X 線画像の取得を行った。金薄膜は G-GEM 検出器上方に設置されたカソードに貼り付けられており、ここで生成した電荷が G-GEM のガス増幅によって増幅される。これも同様に Am-241 の 60 keV を用いて、そのソースのイメージの取得を行った。コンバーターを図 4.7 に、イメージングの結果を図 4.8 に示す。左上の位置に設置した Am-241 のソースが見えていることがわかる。

コンバーターに関しては、比較的低エネルギーの Am-241 を用いた動作確認を行った。今後、よりエネルギーの高い X 線管などを用いてのイメージング試験を行うことが望まれる。

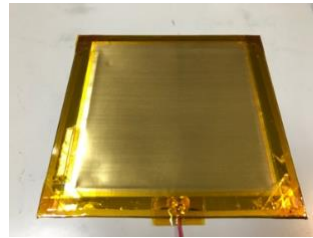


図 4.7 金コンバーター製カソード

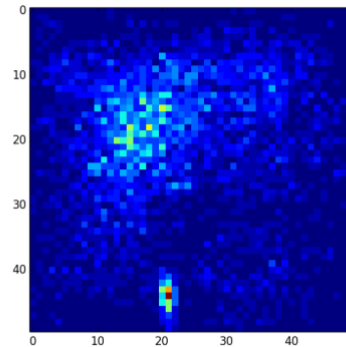


図 4.8 Am-241 のソース位置 (左上) のイメージング (有感領域 10 cm 角)

4. 3 イメージング用回路・DAQ システム開発

本研究では、コンバーター開発に加えて、G-GEM 専用のイメージング用回路・DAQ システムの開発を行った。

従来の読み出し回路は、検出器の電気信号 (アナログ) を ADC によってデジタル信号へと変換し取得していた。しかしながら、ADC は分解能が n ビットとすると、デジタル側の配線は出力のみで 1ch あたり n 本必要となり、配線が複雑化する問題点がある。また、消費電力も大きいため、多チャンネルの読み出しにおいては不利な点が多い。

近年ではアナログ信号を、ある閾値を超えている時間を計測することによって、元のパ

ルス波高に比例した時間幅を持つデジタル信号に変換する Time-over-threshold (ToT) 方式の信号処理の研究がなされ、一部ではすでに実用に供されている。ToT は、コンパレータによるシンプルな回路構成で実現でき、また、デジタル側の出力信号も信号線一つで済む。そのため、ADC に比べて、今後の高解像度化・大型化に向けて重要性を増すと考えられる。しかしながら ToT の問題点は、アナログ信号の波形と、デジタル信号の時間幅の間の変換の線形性が悪い点である。これを解決するために近年提唱されたアイデアが、ToT のしきい値を、信号の整形時定数に合わせた形で動的に変化させることによって、アナログ波高値とデジタル時間幅の間の変換の線形性を大幅に改善するという、Dynamic Time-over-Threshold (dToT) である。

今回、この dToT に基づく信号処理を G-GEM 検出器専用実装し、イメージングの実証試験を行った。G-GEM 検出器の特徴は 30cm 角程度の面積化が容易であることであり、この面積の領域を読み出すにあたって dToT による信号配線のリダクション技術は非常に有効であると考えられる。今回は、読み出し方式には電荷分割方式を採用した。G-GEM の下段には、G-GEM の増幅電荷を抵抗値に基づいて分割する電荷分割基板を設置している。この基板は XY 方向にそれぞれ 1mm ピッチの分解能を持っており、イメージングの分解能もおよそこれに規定される。この電荷分割電極から 4ch で信号を読み出し、前置増幅および波形整形を行い、dToT 信号処理回路によってデジタル信号へと変換し、最終段で FPGA で構成した DAQ システムでデータを記録した。システムの全体像を図 4.9 に示す。また、このシステムで観測された信号を図 4.10 に示す。

まず、4ch のうち 1ch の dToT 信号を用いて、その時間幅を横軸にとり、縦軸にカウント数をとった、時間幅スペクトルを取得した。線源には Fe-55 の 5.9-keV X 線を用いた。図 4.11 にその結果を示す。dToT によっても、ADC に基づくスペクトルと遜色の無い形状のスペクトルが得られることがわかった。これによって、今回作成した回路が検出器に適合しており、期待通りに動作していることが確認できた。

この構築したシステムを用いて、X 線による透過像撮像を行った。検出器には G-GEM を用いた (有感領域 10 cm 角)。線源には X 線管 (管電圧 20 kV) を用いた。図 4.12 にその結果を示す。金属ナットの X 線画像を得ることができている。また、10 cm 角の有感領域に渡って歪みなく撮像することができていることがわかった。また、図 4.13 には放射光の 6-keV X 線を 100 μm 径にコリメートして照射した結果である。画像中心にカウントが現れているのがわかる。細かくコリメートした X 線が画像中の一点に、広がることなく現れているため、今回作成した前置増幅器や整形増幅器、

dToT 回路にはばらつきが少なく、イメージングシステムとして精度良く機能しているということがわかる。画像分解能に関しては、今回はプロトタイプの電荷読み出し基板を用いており、電極のピッチが 1 mm と広い。そのため画像分解能もその程度に制限されてしまう。しかしながら、今後の読み出し電極のピッチの微細化によって分解能向上が望むことができる。また、30 cm 角程度の面積のイメージングも検討している。今回開発したシステムでは、面積であっても少ないチャンネル数でイメージングが行える。これらに関しては、今後の開発に期待される。

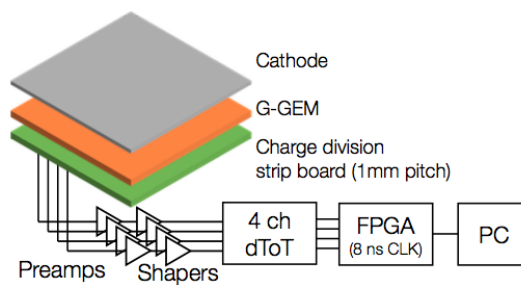


図 4.9 電化分割方式の読み出し電極 (分解能 1 mm ピッチ) および 4ch の dToT 信号処理に基づくイメージングシステム

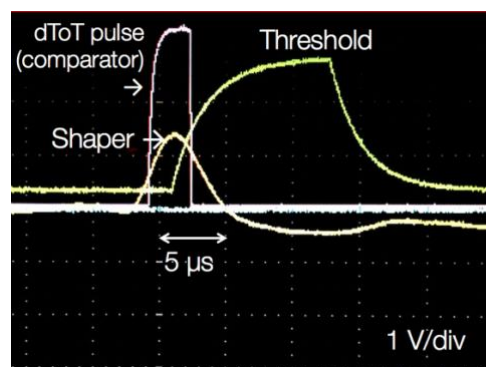


図 4.10 観測された dToT 信号

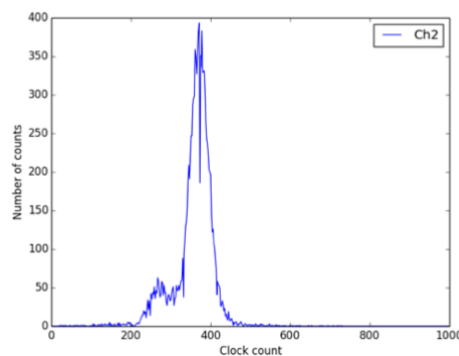


図 4.11 Fe-55 の 5.9-keV X 線による dToT 時間幅スペクトル

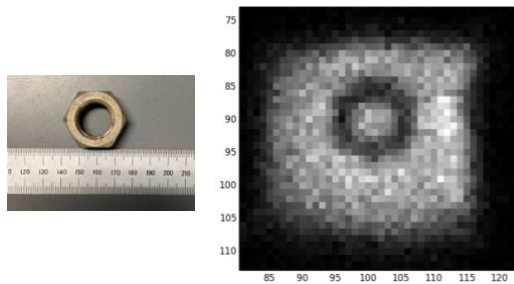


図 4.12 金属ナットの X 線イメージ

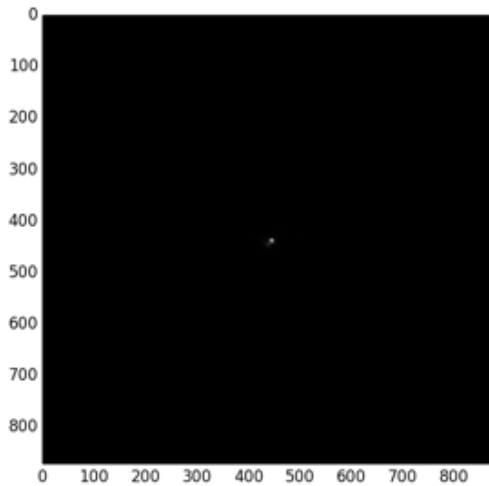


図 4.13 放射光の 6 keV, 100 μm 径ビーム画像

4. 4 まとめ

本研究課題では、新しいフラットパネル型の検出器の実現を目指して、ガラス基板微細加工型検出器である G-GEM を用いた検出器の開発をおこなった。G-GEM は気体検出器であるため、硬 X 線に対しての検出効率が低いのが問題であった。そこで本研究では固体コンバーターによって硬 X 線を電子線に変換し、間接的に捕捉する方法を採用し、そのためのコンバーターの設計開発を行った。タングステンメッシュ形状のコンバーターを設計し、モンテカルロ計算の結果から、コンバーターの無い場合に比べて高い検出効率が得られることがわかった。この設計に基づいて実験を行ったところ、モンテカルロ計算と同様のスペクトルが計測できており、コンバーターが実際に動作していることが確認できた。また、金薄膜に基づくコンバーターを用いて、10cm 角領域のイメージングを実験によって確認することができた。今後、より高エネルギーの線源を用いた評価を行うことが望まれる。

また、本研究課題では、G-GEM のイメージング用回路・DAQ システムの開発も行った。dToT に基づくアナログ・デジタル変換によって信号を取得する回路を開発した。また、電荷分割方式によってイメージングを行った。X 線イメージングでは、10 cm 角の領域で歪みなくイメージングを行うことに成功した。今後は、読み出し電極のピッチ微細化によって、高分解能のイメージングを行うことや、

30 cm 角程度の領域の大幅イメージングを行うことが期待される。

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 2 件)

(1) Y. Mitsuya, et al., "Gaseous flat-panel detector with glass gas electron multiplier coupled with micro-photodiode array", Nucl. Inst. and Meth. A, 873 (2017) 56-58

(2) 三津谷 有貴, "感光性ガラス基板を用いた気体放射線イメージング検出器", Isotope News No. 754 (2017) 15-17

[学会発表] (計 2 件)

(1) Y. Mitsuya, et al., "Imaging with glass GEM and dynamic time-over-threshold pulse processing method", MPGD 2017 & RD-51 Collaboration meeting, Philadelphia, U.S.

(2) Y. Mitsuya, et al., "X-ray imaging with a gaseous flat-panel detector combining a glass gas electron multiplier with a micro-photodiode array", IEEE NSS/MIC 2017, Atlanta, U.S.

[図書] (計 0 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 0 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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三津谷 有貴 (MITSUYA, Yuki)

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号： 70784825