

## 藤森科学技術振興財団 研究実施概要報告書

(西暦) 2026 年 5 月 31 日

公益財団法人藤森科学技術振興財団  
理事長 藤森 行彦 殿

藤森科学技術振興財団の助成金による研究が終了しましたので、下記のとおり報告をいたします。

所属機関 群馬工業高等専門学校

職 名 助教

氏 名 深澤 永里香



### 【提出書類】

(1)研究実施概要報告書(本紙)

添付書類(A4 版 3 枚以内):研究状況を示す写真等の資料

(2)収支報告書

添付書類:助成金を充当した経費の領収書

領収書を添付しない場合:支払一覧表と支払部門担当者記名捺印

④

(1)テーマ

※スペースが足りない場合は、枠を追加いただいて構いません。

導電性高分子を用いた新規個体放射線検出器の内部クエンチングの検討

(2)本研究の期間

(西暦) 2025年4月～2026年3月

(3)本研究の目的

#### 研究背景

現代社会では発電や物質解析、医療など、非常に幅広い分野で原子力、放射線の利用がなされている。放射線が利用される現代社会において放射線検出は非常に重要な研究課題となる。中でも無機半導体検出器は、そのエネルギー分解能、時間分解能から医療用検出器、環境放射線モニタリング、加速器実験や原子力関連技術に幅広く活用されている。しかし作製コストが高く、大面積化が困難であるため利用範囲が制限されてしまう。

我々の研究室では、材料としてポリアニリン(PANI)を用いて、有機放射線検出器の開発を行っている。検出効率の高いポリアニリン有機検出器を実現することで、低価格な放射線センサが製造可能となる。検出器の安価な入手や放射線防護機器として家庭への配布が可能となれば、放射線検出は身近なものとなり、放射線利用に対する忌避感を低下することが期待される。また、研究の場でもポリアニリン検出器は需要がある。粒子の識別を行う際、高精度位置検出実現のため立体角の大きいセンサが求められるが、シリコン検出器でこれを実現することは、その価格から困難が伴う。これをポリアニリン検出器で代替することにより価格、形状などの点で大きな恩恵を得られる。

#### 課題と研究目的

実用化のために解決すべき課題の一つは連続放電の制御である。放電が起こる主な原因は材料内部での光電効果により飛び出す電子であると考えられ、その光電効果の原因である内部から発生する電磁波(主に紫外線)を抑えることが重要である。本研究の目的は紫外線吸収剤の混合により、放電が抑えられPANIセンサの動作が改善できるのかを明らかにする。

比較する性能の具体的な内容は①連続放電開始電圧の変化、と②センサの動作領域(動作特性)である。動作領域はセンサへの印加電圧の大きさと出力信号の関係から求まる。各紫外線吸収剤の混合割合を変化させたセンササンプルを作製し、①、②を測定することで、紫外線吸収剤が放電消失剤(クエンチャー)として機能しているのかを明らかにする。

## (4) 本研究の概要

我々が開発している PANI センサは製作工程が単純で(図1)、材料費と製作コスト共に無機半導体に比べて大幅に削減できる。放射線感度についてはこれまでの研究で  $\alpha$  粒子、 $\beta$  粒子、 $\gamma$  粒子について成果を上げており、有機半導体を用いた放射線粒子1つ1つをカウントできる検出器開発は国内外で本研究が初めてである。PANI センサの特徴は形状自由度があること、機能性添加物の混合が可能なことであり汎用性が高い。本研究が進み安価 PANI 検出器が製品化されれば、様々な用途の放射線検出器のコストダウンが可能となり、加速器実験以外にも放射線に関する分野、医療や環境放射線、原子炉モニタなどへの応用が期待できる。

本研究ではクエンチャーの候補として、酸化チタンを(無機クエンチャー)と2-ヒドロキシ-4-n-オクチルオキシベンゾフェン(有機クエンチャー)の二種類について、以下の通り検証を行った。

## 1. 酸化チタンを混合したセンサの連続放電開始電圧の測定

まずは、PANI/TiO<sub>2</sub> センサの放電開始電圧の測定を行い、クエンチャーとしての有効性を評価する。添加量を変化させたセンササンプルの放電開始電圧の測定に加えて、SEM・EDS 測定、IR 測定、UV-Vis 分光の化学測定から材料を総合的に評価する。

## 2. 有機クエンチャーを混合したセンサの作製と性能評価

酸化チタンのような無機紫外線吸収剤以外にも他の有機ポリマーに使用しやすいと言われる2-ヒドロキシ-4-n-オクチルオキシベンゾフェンを使用したセンサの作製を行う。このセンサに対して図2のような印加電圧に対する応答性および連続放電開始電圧の評価を行う。

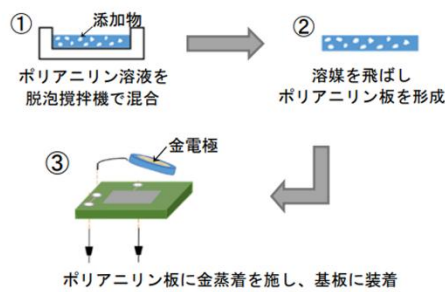
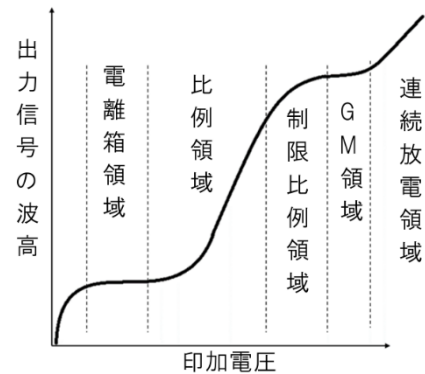


図1 PANI 検出器の作製手順

図2 ガス検出器の場合の動作領域の例。  
縦軸は放射線のカウント数に比例する量。

## (5) 本研究の内容及び成果

**無機クエンチャー添加検出器の放射線テストの結果**

酸化チタン添加量とセンサ性能との関係性の検証について、作製したセンサの動作領域の測定結果を図3(左)に示した。放射線カウント数は式(1)より求めた。

$$N = N_{\text{Sig}} - N_{\text{BG}} \quad (1)$$

ここで、 $N$ は放射線カウントの数、 $N_{\text{Sig}}$ は $\beta$ 線源セット時の信号数、 $N_{\text{BG}}$ は $\beta$ 線源非セット時の信号数である。各種センサの $\beta$ 線由来の信号数はいずれのセンサも近い値を記録し、大きな差異を確認することはできなかった。しかし、PANI(0wt%)のセンサと比較してTiO<sub>2</sub>を添加したセンサでは明らかにノイズ放電由来の信号数が低減されており、放射線感度の向上を確認することができた。またノイズ放電の測定結果(図3(右))では、添加比率が50wt%のセンサに関して、高電界域においても $N_{\text{BG}}$ が非常に小さく(10 cps以下)、連続放電も測定した印加電界領域では観測されず、最も優れた検出性能を有していることを確認した。ちなみに連続放電が発生した場合、プロットの傾きが急激に増加するが、ポリアニリン単体のセンサについては一番傾きの変化が顕著であり、比較的小さい印加電界から連続放電が発生してしまった。

さらに、同条件で独立に作製したセンサの性能比較を図4に示す。 $\beta$ 線由来・ノイズ放電由来の信号数および検出

効率のいずれも同程度の性能を示したことから、今回取り組んだ合成手法により作製したセンサは応答が安定しており、将来の実用化の方向性を示すことができたと考えられる。

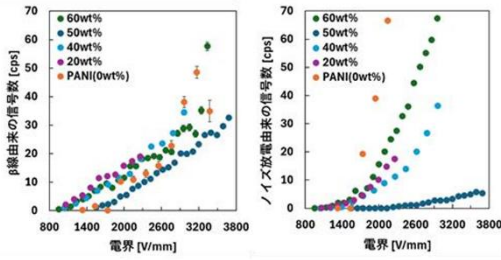


図3 TiO<sub>2</sub>添加割合(wt%)を変更させた各センサの  
(左)入射β線由来の信号数  
(右)ノイズ放電由来の信号数

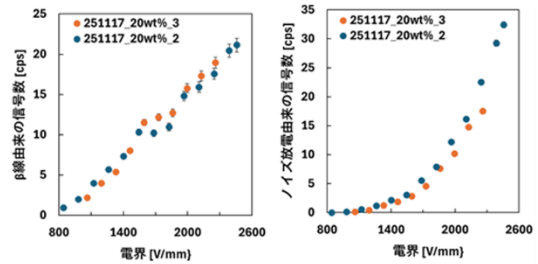


図4 同条件で独立に作製したセンサの  
(左)入射β線由来の信号数の比較  
(右)ノイズ放電由来の信号数の比較

β線検出効率の比較について放射線検出効率の測定を図5に示す回路で行った。プラスチックシンチレータから得られる信号をトリガー(シンチトリガー)として試作センサの信号を読み出し、ADCにて電荷量分布(シンチトリガー分布)を測定した(図6)。またクロックジェネレータを用いてシンチトリガー以外のタイミングでペDESTAL分布を取得し、式(2)により検出効率(*eff.*)を算出した。

$$eff. = \frac{n_s}{N_s} - \frac{n_p}{N_p} \quad (2)$$

ここで $n_s$ ,  $n_p$ はそれぞれシンチトリガー分布、ペDESTAL分布の $C_{ADC}$ 以上のチャンネル値にあるイベント数、 $N_s$ ,  $N_p$ はそれぞれシンチトリガー分布、ペDESTAL分布の全イベント数である。

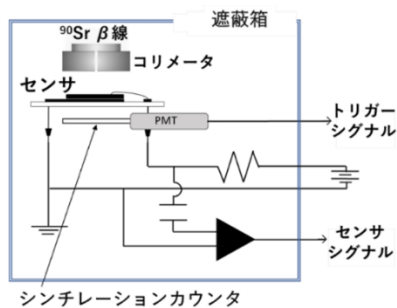


図5 検出効率測定セットアップ

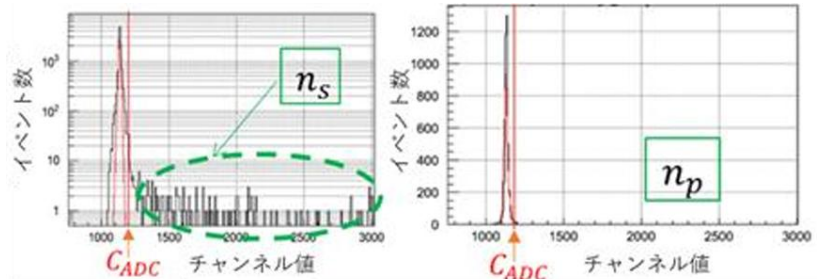


図6 検出効率測定の例 右: シンチトリガー分布 左: ペDESTAL分布。  
 $C_{ADC}$ はペDESTALのガウスフィットより得られたカット値である。

今回は最も放電が小さかった添加率 50wt%の PANI-TiO<sub>2</sub>の検出器と PANI のみの検出器についてβ線検出効率の評価及び比較を行った(表1)。

表1 各検出器の最大β線検出効率

材料 (印加電圧)	検出効率 [%]	抵抗値 [GΩ]
PANI/TiO <sub>2</sub> (3800V/mm)	5.26 ± 0.28	116.7
PANI (1700V/mm)	0.35 ± 0.13	24.8

添加率 50wt%の PANI-TiO<sub>2</sub>の検出器は PANI 単体の検出器の 10 倍以上の検出効率を示した。図 7,8 は各検出器のシンチトリガー分布である。酸化チタン含有センサの方はβ線由来の信号が広範囲のチャンネルにわたって分布していることが分かる。今回の使用している線源由来のβ線のエネルギー分布は連続値であるため、出力信号分布も広がりを持つと考えられる。

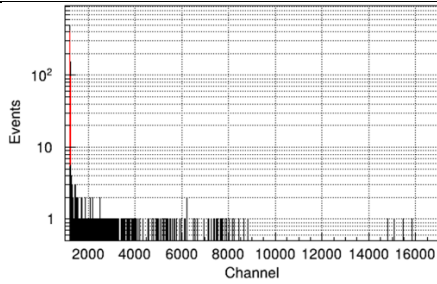


図 7 PANI-TiO<sub>2</sub>の検出器(50wt%)のシンチトリガー分布

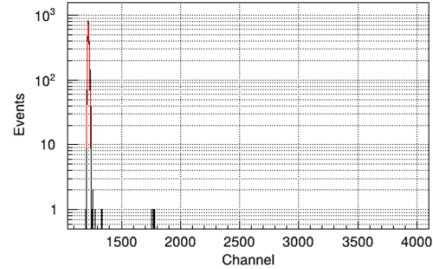


図 8 PANI-TiO<sub>2</sub>の検出器(50wt%)のシンチトリガー分布

**有機クエンチャー添加検出器と無機クエンチャー添加検出器の比較および放射線テストの結果**

紫外線吸収能の比較が可能か検証するため、UV-Vis の拡散反射測定を行った。まずドーブしていないポリアニリンに 220 nm の紫外線を入射し、波長ごとの蛍光強度を測定した(図9左)。220 nm 付近で大きなピークが確認できるが、これは入射した光に由来するものであると考えられる。ポリアニリンの蛍光に由来するピークを 275 nm 付近に確認することができた。図 9 右に、各クエンチャーを添加したポリアニリンの蛍光強度を無添加ポリアニリンと同時に示した。無添加と酸化チタン添加で蛍光強度は変化せず、オクタベンゾンを添加したポリアニリンは予想と反し、蛍光強度が上昇した。

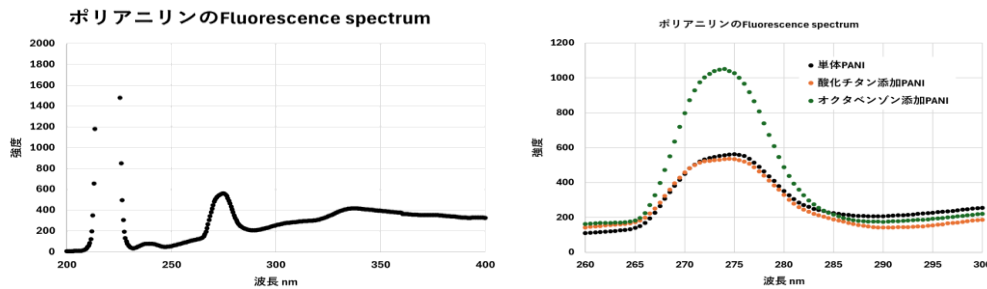


図 9 ポリアニリンの蛍光波長測定(入射光 220 nm)  
(左)全体の傾向、(右)各クエンチャーを添加した場合の蛍光強度(275 nm)

次にオクタベンゾンを加えたセンサで放射線応答の結果を示す。印加電圧に対するバックグラウンド信号回数とβ線照射時の応答回数を図に示す。今回、ポリアニリン単体では応答が確認できなかった材料について、酸化チタン、オクタベンゾンを添加したセンサでは応答を確認できた。

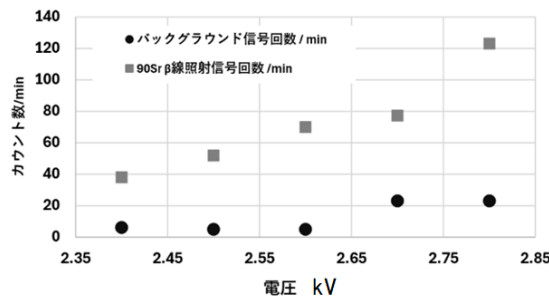


図 10 オクタベンゾン添加センサの電圧対信号数プロット

(6)本研究の考察

無機クエンチャーの検証について、放射線応答を有する材料の合成に成功し、作製したセンサのすべてにおいて、PANI(0wt%) と比べて感度領域が広がり(1300-3800 V/mm 以上)、検出効率の向上を確認することが出来た。また、TiO<sub>2</sub> を添加したセンサでは 50wt% のセンサがノイズ放電の数も極端に小さく、最も優れた性能を有しており、平板金電極で検出効率 5% を越えることに成功した。図3については二つのシンチトリガー分布を比較すると検出できている信号数(n<sub>s</sub>)に圧倒的な差がある上に、酸化チタン含有検出器の方はノイズ放電が少ない。式(2)の第二項よりノイズが小さいことは検出効率の減数をおさえることにつながるため、今回の検出効率の差につながったと考える。

有機クエンチャーの検証について、蛍光測定での紫外線吸収能の比較は、粉末ではなく、センサ化後の板状に

④

なっている状態で計測したので、それぞれの表面状態の粗さが異なっていたことから、予想と異なるスペクトルが得られている可能性がある(図 9)。測定上の不確定要素の排除が今後の課題となった。図 10 に示す放射線テストの結果から酸化チタン同様、オクタベンゾンも放射線検出能に影響を与える材料であると考えられる。ただし、PL 測定の結果から、紫外線防護能が影響しているかは不明であるため、これを確かめことが今後の課題である。

(7) 共同研究者(所属機関名、役職、氏名)

新潟大学理学部、フェロー、宮田 等  
足利大学工学部、講師、宮田 恵理

(8) 本研究の成果の公表先

坂下 航太郎、深澤 永里香、宮田 恵理、早坂 圭司、勝亦 正明、小野 裕明、渡辺 みのり、斎藤 栄輔、清野 義敬、梅山 晃典、佐藤 誠、鈴木 崇民、田村 正明、「導電性高分子-酸化チタン複合材料の酸化チタン濃度依存性と放射線検出特性評価」, 第 73 回応用物理学会春季学術講演会, 第 73 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集(02-006)

[注]この報告書を当財団のホームページ等に掲載します。予めご了承ください。