

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03743

研究課題名(和文) 重元素ナノ粒子添加ピコ秒シンチレータによる放射光X線時間分解イメージング

研究課題名(英文) Synchrotron X-ray time-resolved imaging using high-Z nanoparticle-loaded picosecond scintillators

研究代表者

岸本 俊二 (Kishimoto, Shunji)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・名誉教授

研究者番号：00195231

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高エネルギーX線用高感度プラスチックシンチレータとして実用的に最も高速な1 nsレベルで発光するビスマス、ハフニウム、ジルコニウム酸化物ナノ粒子を40重量%まで充填したPLSの製作を確実にし、放射光X線ビームによって高い検出効率と高い時間分解能、 10^7 乗(毎秒)を超える計数率を確認した。厚さ5mmのハフニウム酸化物ナノ粒子充填PLSで60keVのX線に対して検出効率50%を達成している。またPLSピクセル間遮光スクリーンのレーザーによる試作・X線ビームによる遮光性能評価に成功した。今後のSi-APDピクセルアレイ検出器の基礎として超高速ASICアンプの試作も進めることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で実用化した重元素充填PLSは、高エネルギーX線だけでなく荷電粒子線検出にも、またリチウム-6等を添加すれば中性子検出も可能で放射線計測全般に応用が広がる可能性がある。近年、ガイガーモードSi-APD(シリコン・アバランシェ・フォトダイオード)を受光素子とする2次元検出器の開発は盛んだが、100 μ m以下の高精細でピクセル当たり 10^8 乗(毎秒)までの高計数率で使える比例モードSi-APDアレイを受光素子として使う研究例は他にない。我々が取り組んだ超高速・高S/N比のCMOS集積回路(ASD-ASIC)技術は、ピクセルアレイ検出器によるイメージングシステムを実現する鍵となる。

研究成果の概要(英文)：We have successfully developed bismuth-, hafnium-, and zirconium-oxide nanoparticle-loaded (up to 40 wt%) plastic scintillators (High-Z PLSs) for high-energy X-rays. Their superior properties of detection efficiency, high time resolution, and count rates of $>10^7$ per sec were observed using synchrotron X-ray beam. Their scintillation light has the practically fastest decay time of 1-ns range. The detection efficiency reaches 50% at 60 keV X-ray with a 5-mm-thick Hf-PLS. We attempted to form an optical screen to provide a pixelated High-Z PLS using a focused laser beam and succeeded to evaluate a good performance of preventing light leakage from neighboring pixels. Prototype of ASIC amplifier was also advanced as the basis of Si-APD pixel array detector system.

研究分野：放射光X線計測学

キーワード：量子ビーム 放射光X線 重元素含有プラスチックシンチレータ シリコン・アバランシェフォトダイオード ピクセルアレイ検出器 時間分解測定

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

比例モード Si-APD は本申請者によって世界で初めて放射光利用研究に導入(Nucl. Instr. Meth. A309 (1991) 603)、核放射線時間分光実験(核共鳴散乱や電子軌道遷移による核励起実験)(Rev. Sci. Instrum. 63 (1992) 824, Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 1831)、 10^8 s^{-1} に及ぶ高計数率 X 線回折測定(Rev. Sci. Instrum. 69(2) (1998) 384)に使われてきた。その Si-APD によりピクセルアレイ画像検出器を構成すれば検出器応答を ns まで高速化できる。タイミング精度はサブ ns になり放射光通常モードの 2 ns 間隔 X 線パルスを区別できるため、サブナノ秒変化を連続的に記録できるという着想を得た。

基盤研究(A)「ナノ秒時間分解・超高速ピクセルアレイ X 線検出器の開発」(FY2013-2016、課題番号:25246040)で、ピクセルサイズ $100 \times 200 \mu\text{m}$ 、長さ 19mm、 $10 \mu\text{m}$ 厚、128 チャンネルの Si-APD リニアアレイを製作して空間分解能 $150 \mu\text{m}$ (12 度まで傾けて $30 \mu\text{m}$)・時間幅 0.5 ns ごとに連続 2048 回計数できるシステムを実現した。それに続く「Si-APD ピクセル X 線検出器の高性能化による放射光ナノ秒連続測定」(基盤研究(A)FY2017-2020、課題番号:17H01078)では、空乏層が $30 \mu\text{m}$ の厚い Si-APD アレイの製作によって検出効率を 3 倍以上に引き上げ X 線直接検出での高感度化を達成、CMOS-ASIC 試作にも着手した。一方、厚さ $100 \mu\text{m}$ 程度の Si-APD では積層しても高エネルギー X 線に対して検出効率に限界がある。厚みが増せば X 線がエネルギーを失う位置の違いによって厚み方向に生じる信号電荷収集の時間差が時間分解能を劣化させる($100 \mu\text{m}$ で時間差 1 ns に相当)。これに対し検出効率が十分なら高速発光するシンチレータに X 線検出を担わせ、受光素子として Si-APD のピコ秒タイミング性能を発揮させれば、検出効率と時間分解能が両立できる。この考えから単一素子比例モード Si-APD シンチレーション検出器開発を始め、 HfO_2 ナノ粒子添加 PLS と組み合わせ 67 keV で 0.3 ns 時間分解能を実現した(IEEE Trans. on Nucl. Sci. 65 (2018) 1012)。2018 年秋から開始した東京インキ株との共同研究により製作した ZrO_2 および HfO_2 ナノ粒子添加 PLS は、重量比が 40~60%でも発光量減少が比較的小さく、これまでにない高い検出効率を達成した。本研究では、さらにピコ秒発光蛍光体を採用して超高速 PLS を開発し、Si-APD ピクセル・リニアアレイで受光するシステム実現を目指した。サブナノ秒変化を明瞭にとらえるため、FPGA のタイミング精度限界や放射光 X 線パルス幅 (PF: 90 ps, FWHM) に迫る 100 ps をシステム時間分解能の目標とした。

2. 研究の目的

(1) 超高速・高感度 X 線シンチレータの実現:

ピコ秒発光する重元素ナノ粒子添加プラスチックシンチレータを新規に開発する。東京インキ株との共同研究(2018 年~)により、酸化ジルコニウムや酸化ハフニウムのナノ粒子が 60-70 重量(wt)%まで含まれる透明なプラスチックシンチレータ(蛍光体は butyl-PBD 1 mol%)が製作できた。鉛を 5wt%含む市販 PLS(EJ-256)では、厚さ 1 mm で 67 keV の X 線に対し検出効率: 2%、タイミング半値全幅(FWHM): 500 ps だが、厚さ 1 mm あたり 15%を超える検出効率と 300 ps のサブナノ秒タイミングが両立する高性能を実現できた(IEEE Trans. on Nucl. Sci. 67(6) (2020) 983, 特願 2019-156234 (特許 6810941))。凝集しやすいナノ粒子の分散を保って重元素成分増加時の発光量の大幅な低下を抑えたことによる。本研究では、ピコ秒台の発光寿命を持つ高速蛍光体を合成のうえ PLS に添加して同等以上の発光量と検出効率、サブナノ秒変化検出のため 100 ps 以下の時間分解能をめざした。重元素 K 吸収端を超えるエネルギーの場合に放出される KX 線によって性能を劣化させず最適なエネルギー領域を広げるため、90 keV に K 吸収端を持つ原子番号 83 のピスマスを添加した酸化ピスマス・ナノ粒子添加 PLS 製作を進めようとした。

(2) ピクセルアレイ検出器用高速システム技術を進展:

以下のようなシステムの開発を提案した。超高速 ASD-ASIC(増幅・整形・波高弁別用専用集積回路)と FPGA(Field Programmable Gate Array)によって 128 チャンネルのマルチチャンネル・スケーラ(MCS)を構成し、T ごとに Si-APD 各ピクセルからのパルスを連続計数(2048 回分)できる。最短 T をそれまでの 500 ps から 100 ps とする。現有 ASD-ASIC の集積度を 4 倍(配線長短縮、増幅帯域 3GHz 以上・高 S/N 比(50keV で 5 以上)に性能を向上させた 65 nm CMOS 技術による ASIC フロントエンド回路の試作チップ(FGATI: 16 チャンネル/4mm 角)の評価・改良(S/N 比・出力レートなど)を進める。10Gbps Ethernet ベース高速・大容量データ収集システム(10G-SiTCP)を新しく採用する。これまでの 1Gbps システムを 10 倍高速化、試料加熱ミリ秒連続測定などを可能にする。増幅率増大・熱雑音低減のための Si-APD ピクセル・リニアアレイ冷却技術の確立、加工自由度が高い PLS の特性を生かして薄く均一化、溝加工により Si-APD ピクセルごとにシンチレーション光を分離吸収させる。

(3) サブナノ秒時間変化を連続記録する高感度・放射光 X 線時間分解イメージングの展開:

放射光パルスを使う従来の「ポンプ-プローブ法」時間分解イメージングでは、ポンプ(パルス電場など)とプローブ(放射光 X 線)の遅延時間を 1 点ごとに変化させる。通常の X 線画像検出

器は 10 μm ピクセルを持つ CCD のように空間分解能が優れているが、信号電荷収集にマイクロ秒を要する。データ取得には放射光パルス間の時間間隔の確保のため特別な加速器運転や特殊なビームライン設備が必要となる。一方、本研究で開発するシステムは高速応答するので放射光通常モードの 2ns 間隔 X 線パルスすべてをプローブとして使える。そのため 2ns 間隔で連続的に X 線強度の時間変化を記録できる。さらに「ポンプ」と測定開始の時間差を変えれば「隙間」なくサブナノ秒連続記録が可能となる。具体例として、透過能に優れた高エネルギー X 線 (>35 keV) で放射光 X 線回折・散乱イメージングを行いパルス電場印加時の誘電体の構造変化など、狙った場所で物体内部構造に由来するサブナノ秒変化を効率よく同時観察することを挙げた。

3. 研究の方法

(1) ピコ秒発光寿命蛍光体を採用した重元素酸化物ナノ粒子添加 PLS を製作する。

サブナノ秒オーダー発光の蛍光体として知られてきた 4-dimethylamino-stilbene 誘導体などのうち、メトキシ基やシアノ基を置換した誘導体は発光寿命が各々 700-800 ps, 100 ps 以下と測定されていた。これらを合成し、ハフニウムおよびジルコニウム酸化物ナノ粒子添加 PLS (溶媒: スチレンまたはビニルトルエン) 製作に適したものを評価する。時間分解能 100 ps 以下を得ること、発光量を低下させないことが目標だった。さらにピコ秒発光蛍光体を使って高濃度ビスマス酸化物添加 (20wt% 以上) PLS 試作を行う。KEK PF ビームライン BL-14A にて X 線入射時の発光量・出力波高分布、時間特性の測定を行い、発光量が最大となる蛍光体選定や mol 濃度などの最適な PLS 組成の探索を行うことを考えた。

(2) シンチレーション光ピクセル分離のためレーザー光ビームによる光障壁加工を試みる。PLS を数 mm 以下の均一な厚さとし、PLS へのレーザービーム照射によっていくつかの遮光スクリーンを形成。Si-APD ピクセルアレイに搭載して遮光性能を X 線入射によって評価し、加工条件を確立する。

(3) 128 チャンネル Si-APD ピクセル・リニアアレイシステムを製作する。

帯域 3GHz 以上、高集積度 (16ch/4mm 角)・高 S/N 比の CMOS-ASIC フロントエンド回路チップ (FGATI) の評価・改良を行う。並行して 10G-SiTCP によるデータ収集系の開発を進める。4 チャンネル程度の比例モード Si-APD を受光素子とする超高速・高感度 X 線シンチレータ搭載 X 線シンチレーション検出器を製作して回路性能を確認する。

そのうえで、PLS を Si-APD リニアアレイ (ピクセルサイズ: 100 \times 200 μm) に搭載しマイナス 20 まで冷却して X 線ナノ秒パルスに対する十分な S/N 比が得られるようにする。100 ps 分解能のためリニアアレイは開発済みの薄い素子 (空乏層厚さ: 10 μm) を使いシンチレータの搭載を容易にするため Si-APD アレイ基板の改良を行う。改良した FGATI チップを搭載、データ収集には 10G-SiTCP を採用して 128 チャンネル MCS ボードを新規に製作する。

(4) 比例モード Si-APD リニアアレイと超高速・高感度 X 線シンチレータによる X 線イメージングへの応用を行う。

電圧パルス印加による誘電体薄膜の構造変化 (密度変化を含む) とスイッチング特性の変化を、KEK PF のビームライン BL-14C に設置されたイメージング光学系 (干渉計含む) を使って高感度に同時に捉える。

4. 研究成果

(1) 発光寿命 1 ns レベルの実用的発光量を有する蛍光体を使った高速 High-Z PLS の製作技術の確立

候補としたピコ秒発光寿命蛍光体を合成してハフニウム酸化物ナノ粒子を充填した PLS (Bi-PLS) の蛍光体とした。これをこれまでに開発した butyl-PTB を蛍光体とする PLS と比較したところ、発光量がその $\sim 1/2$ 以下に低下するなど残念ながら実用にならないことが判明した。しかし、蛍光体は実用レベルの発光量を示す最も短い発光寿命の butyl-PBD (2-(4-tert-butylphenyl)-5-(4-biphenyl)-1,3,4-oxadiazole-5-yl) 1mol% を使用してビスマス酸化物ナノ粒子を充填した PLS の製作に成功した (IEEE trans. NS, Vol.70(2)(2023) 164)。ポリビニルトルエン・ベースで厚さ 3 mm、直径 8 mm の 40wt% Bi-PLS を製作、高速光センサーモジュール (浜松ホトニクス H14990-100-02) に搭載して X 線検出器を構成した。この検出器により 73.04 keV の X 線に対して時間分解能 0.24 \pm 0.06 ns (図 1)、固有検出効率は 25.4 \pm 0.1% だった。また 57.61 keV の X 線を使って最大計数率 3.28 $\times 10^7$ s⁻¹ が得られた (図 2) (IEEE trans. NS, Vol.69(10)(2022) 2179)。またピーク発光波長が butyl-PBD の 386 nm より長い 420 nm で市販のシンチレーション検出器に多く使われている光電子増倍管の感度領域に適した蛍光体 (PTP+POPOP) を使った重元素酸化物ナノ粒子充填 PLS を製作し、Zr, Hf, Bi のそれぞれのシンチレータについて 67.41 keV X 線で性能を評価した。発光寿命は 2 ns を超えるため butyl-PBD と比べ高速性能は劣るものの、時間分解能は 0.3-0.4 ns と十分な性能であることを確認した。高感度・高速シンチレータとして今後の製品展開の基礎となるデータが得られた (国際会議 2023 IEEE NSS-MIC, NSS Poster, N-01-001 で研究協力者・戸田氏と共著で発表)。

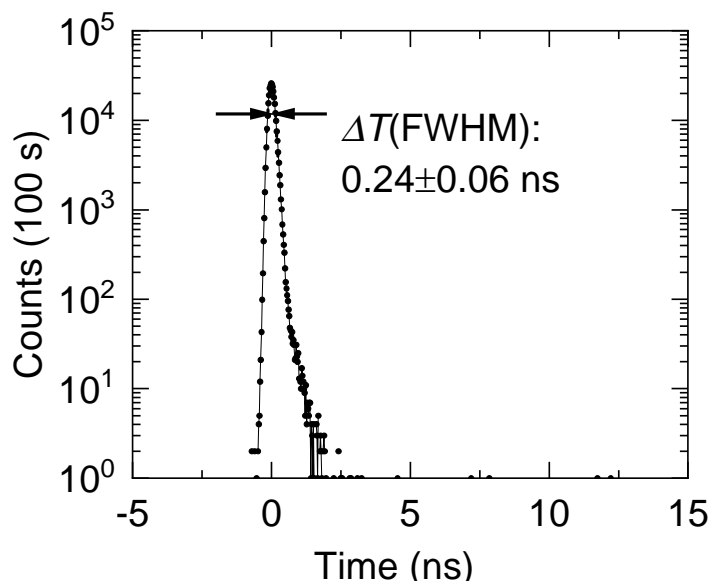


図1 . ポリビニルトルエン・ベース、butyl-PBD 1mol%、厚さ 3 mm・直径 8 mm の40wt% Bi-PLS で得た時間スペクトル。73.04 keV の X 線に対して時間分解能 0.24(FWHM)を得た。検出器の光電子増倍管として高速光センサーモジュール（浜松ホトニクス H14990-100-02）を使った。

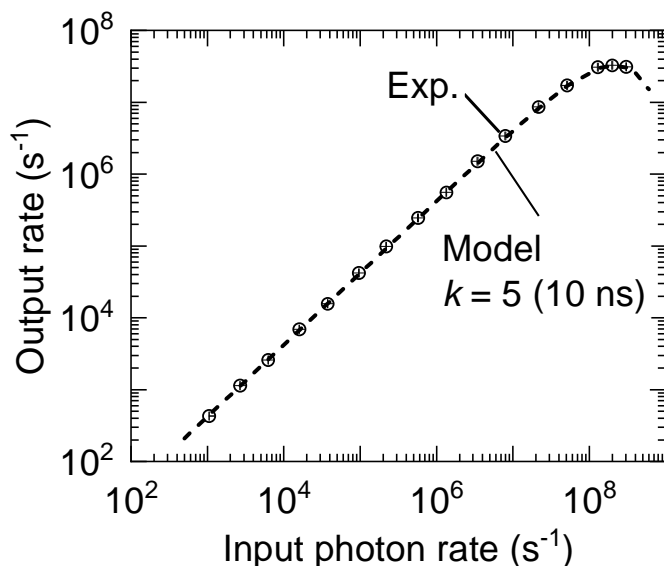


図2 . 図1と同じ検出器で得た入力 X 線レートに対する出力計数率の様子(“Exp.”)。X 線エネルギーは 57.61 keV。図中の “Model” の不感時間は 8 ~ 10 ns。最大観測計数率は $3.28 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ に達した。

(2) 放射光 X 線ビームによる発光寿命測定法の確立

発光寿命を 67.41 keV の放射光 X 線ビームを使って 0wt% (Bi を充填しない) と 20wt% Bi-PLS について調べたところ、それぞれ発光寿命は 1.42, 1.33 ns (誤差 ± 0.01 ns) だった。発光寿命の正確な測定のためには、シンチレーション光の発光点から受光素子 (光電子増倍管) までの距離を大きくして立体角を絞るだけでなく、PLS の発光点面積をできるかぎり狭くすることで時間的に重なった発光を抑えることの重要性を実験的に確認した (Nucl. Instr. and Meth. A1062 (2024) 169175)。

(3) PLS ピクセル化のためのレーザービームによる遮光スクリーンの試作に成功

Yb:YAG の ps パルスレーザー (2 倍高調波: 515 nm) 照射によって 20wt% Hf-PLS を使ってピクセル間の遮光スクリーンの試作とその PLS を SiPM (ガイガーモード APD) アレイに載せて 60 keV の X 線ビームを照射、ピクセル方向に走査したときの計数分布によるシンチレーション光の分離具合の評価を行った。図3の写真のように横 12.3 × 縦 2.4 mm、厚さ 1 mm の 20wt% Hf-PLS 表面に横方向 3.2 mm ピッチで 3 本のレーザー照射を行い黄色のレーザー照射痕を得た。この PLS を SiPM アレイ (浜松ホトニクス S14161-3050HS-04) の 3x3mm ピクセル (3.2 mm ピッチ) 4 個 1 列の部分に載せて APD 各チャンネルの信号から計数分布を得た。図4にその結果を示す。パル

ス波高領域を選択することで隣のピクセルからのシンチレーション光信号と区別して計数分布が 3.3 mm 幅で得られた。光学的な透過率測定の結果からレーザービーム痕周辺の蛍光体波長域 (380-420 nm) での光吸収 (半値幅 0.12-0.25 mm) によると考えられた。結果は IEEE trans. NS, Vol.71(6) (2024) に掲載される (DOI: 10.1109/TNS.2024.3406557)。

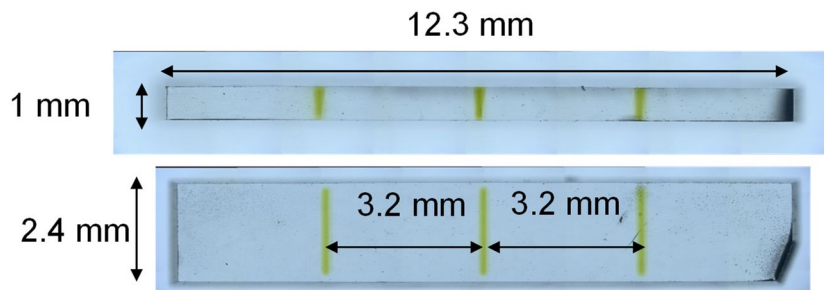


図 3. 横 12.3 × 縦 2.4 mm, 厚さ 1 mm の 20wt% Hf-PLS 表面から Yb:YAG レーザービーム (直径 <math>< 50 \mu\text{m}</math>) を照射して得られた黄色のレーザー照射痕の写真。上の写真が厚さ 1 mm の側面を写したものの。下側が表面の写真で 3.2 mm ピッチで 3 本のレーザー照射 (長さ ~2 mm) を行った。

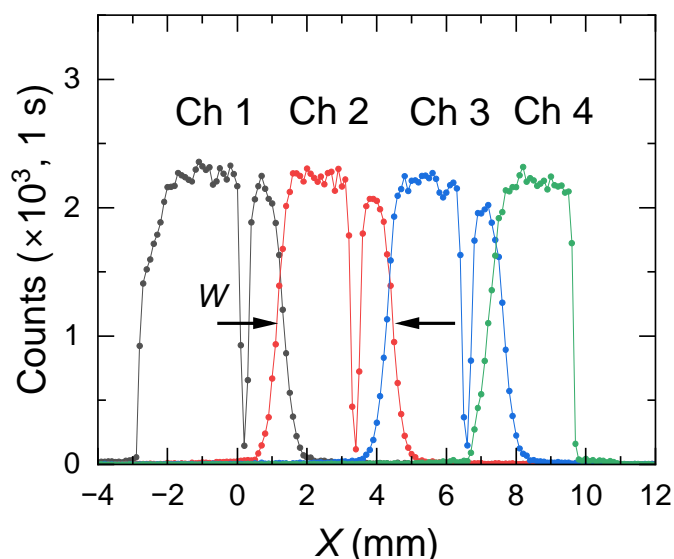


図 4 4 チャンネル X 線検出器によって得た各チャンネルからの計数分布。図 3 のシンチレータに対しレーザー照射痕を超えて 60.0 keV の X 線ビーム (0.1mm 径) を走査して得た結果である。計数 0 付近まで低下する各位置がレーザー照射痕の中心に対応している。

(4) Si-APD ピクセル・リニアアレイシステム製作と CMOS-ASIC フロントエンド回路チップ (FGATI) の改良・評価

新型コロナウイルスの影響で電子回路部品入手のめどが立たず 128ch の Si-APD リニアアレイ用信号処理ボードの製作は断念せざるを得なかった。しかし、単一チャンネルながら High-Z PLS を搭載し Si-APD を受光素子とする高速シンチレーション検出器の開発、とくに低温冷却による信号増幅・雑音低減については論文 "X-ray timing detectors with HfO₂ nanoparticle-loaded plastic scintillator and silicon avalanche photodiode" (Nucl. Instr. and Meth. A1058 (2024) 168884) にまとめたような成果を得た。また、広帯域・高 S/N 比の CMOS による ASD-ASIC フロントエンド回路チップ (FGATI) の改良のための試作は、信号処理ボードと同様な理由で遅れはあったものの FY2022 から FY2023 春にかけて実施した。高エネルギー X 線入射によるシンチレーション光の信号レベルを想定して低エネルギー X 線 (6 keV) を比例モード Si-APD (直径 1 mm, 厚さ 30 μm) 素子に入射して評価した。X 線パルス出力は確認できたもののチャンネル間のクロストーク・信号/雑音比の不足などで課題を残した。今後の開発の基礎は得たと考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kishimoto Shunji、Toda Akehiro	4. 巻 71 (6)
2. 論文標題 Optical screen processed using laser beam for pixel array of high-Z plastic scintillator	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Nuclear Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TNS.2024.3406557	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kishimoto Shunji	4. 巻 1062
2. 論文標題 Decay time measurement for Bi203 nanoparticle-loaded plastic scintillator using scintillation pulse-height distribution	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 169175 ~ 169175
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2024.169175	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kishimoto Shunji、Toda Akehiro	4. 巻 1058
2. 論文標題 X-ray timing detectors with HfO2 nanoparticle-loaded plastic scintillator and silicon avalanche photodiode	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 168884 ~ 168884
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2023.168884	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Akehiro Toda and Shunji Kishimoto	4. 巻 70 (2)
2. 論文標題 Bi203 Nanoparticle-Loaded Plastic Scintillator for High-Energy X-Ray Detection	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE	6. 最初と最後の頁 164-172
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TNS.2020.3048943	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shunji Kishimoto and Akehiro Toda	4. 巻 69 (10)
2. 論文標題 Properties of High-Energy X-Ray Detector With Heavy-Metal-Oxide Nanoparticle-Loaded Plastic Scintillator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, OCTOBER 2022	6. 最初と最後の頁 2179-2187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TNS.2020.3048943	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Akehiro Toda and Shunji Kishimoto
2. 発表標題 Metal oxide nanoparticle-loaded plastic scintillator using fluorophore PTP+POPOP for high energy X-ray detection
3. 学会等名 2023 IEEE NUCLEAR SCIENCE SYMPOSIUM AND MEDICAL IMAGING CONFERENCE (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岸本俊二, 戸田明宏
2. 発表標題 酸化ビスマス・ナノ粒子充填プラスチック シンチレータの発光減衰時間測定
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岸本俊二
2. 発表標題 重元素ナノ粒子充填プラスチックシンチレータ ピクセル化のためのレーザー照射テスト
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 戸田 明宏
2. 発表標題 高エネルギーX線応答重元素充填プラスチックシンチレータの開発
3. 学会等名 計測システム研究会2022@J-PARC
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岸本俊二 , 戸田明宏
2. 発表標題 酸化ビスマス・ナノ粒子充填プラスチック シンチレータの発光減衰時間測定
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岸本俊二, 戸田明宏
2. 発表標題 Bi203-PLSおよびHfO2-PLS搭載シンチレーション検出器の高エネルギー X線検出特性
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 戸田明宏, 岸本俊二
2. 発表標題 酸化ビスマスナノ粒子充填プラスチックシンチレータの高エネルギーX線検出特性
3. 学会等名 第35回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 戸田明宏、岸本俊二
2. 発表標題 酸化ビスマスナノ粒子充填プラスチックシンチレータのX線検出特性
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岸本俊二, 戸田明宏
2. 発表標題 Bi203-PLS搭載MPPC検出器の73.0 keV X線測定
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 AkehiroToda, Shunji Kishimoto
2. 発表標題 Bi203 nanoparticle-loaded plastic scintillator for high energy X-ray detection
3. 学会等名 2021 IEEE NUCLEAR SCIENCE SYMPOSIUM AND MEDICAL IMAGING CONFERENCE (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shunji Kishimoto and Akehiro Toda
2. 発表標題 X-ray detector using HfO ₂ or Bi ₂ O ₃ nanoparticle-loaded plastic scintillator up to 40 wt% loading with Si-PM for high energy X-rays
3. 学会等名 2021 IEEE NUCLEAR SCIENCE SYMPOSIUM AND MEDICAL IMAGING CONFERENCE (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 プラスチックシンチレータおよびその製造方法	発明者 戸田 明宏、 岸本 俊二	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、P202106	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

Si-APDによるX()線用ピクセルアレイ検出器の開発 https://rd.kek.jp/project/fpix/index_j.html PF SiDD (Si Detector Development) Wiki Home https://wiki.kek.jp/display/sidd/PF+SiDD+%28Si+Detector+Development%29+Wiki+Home

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	田中 真伸 (Tanaka Manobu) (00222117)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子 原子核研究所・教授 (82118)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	戸田 明宏 (Toda Akehiro)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------