

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 19 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2010～2014

課題番号：22220010

研究課題名(和文)半導体光増幅素子を用いた革新的次世代PET技術の開発実証

研究課題名(英文)Development of an innovative PET technique using Geiger-mode APDs for future medical application

研究代表者

片岡 淳(Kataoka, Jun)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：90334507

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 68,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では癌の早期発見を目指し、半導体光センサーMPPCを基盤とした3つの次世代PET技術の開発を行なった。まず、ガンマ線の反応位置を3次元かつ1mm以下の精度で決める新規技術を開発し、小動物用PET装置を用いて視野端まで歪みのない高解像度(約1mm)を得ることに成功した。続いて小型のMRI併用PET装置を製作し、4.7テスラの強磁場中でPET/MRI双方の画像に影響が無いことを実証した。さらにMPPC専用的高速LSIを2種類独自に開発し、ガンマ線の飛行時間差を用いたTOF-PET技術を開拓した。単素子では213ピコ秒、16chアレイでも489ピコ秒(FWHM)の優れた性能が得られた。

研究成果の概要(英文)：We developed innovative technologies for the next-generation PET scanner utilizing the Multi-Pixel Photon Counters (MPPCs). The key technologies developed here are (i) Depth-Of-Interaction (ii) Magnetic Resonance, and (iii) Time-of-Flight PET imaging techniques. For (i), we invented a novel technique of measuring the 3-D positions of gamma-ray absorption in the scintillators by dual-readout of MPPCs. A virtual 18-ch PET gantry system achieved excellent image resolution of 0.9 mm (FWHM) at the center of FOV, which only slightly degraded to 1.5 mm at the off-center. We also fabricated a compact MRI/PET module designed for small animals that can be used in 4.7 T MRI system. Finally, we designed two front-end ASICs for future PET scanners with Time-Of-Flight (TOF) capability to be coupled with 4×4 MPPC-arrays. We confirmed excellent time resolution of 213 psec for a MPPC pixel, and 489 psec (FWHM) for MPPC-array, as measured using back-to-back 511-keV gamma rays.

研究分野：放射線計測、高エネルギー宇宙物理、医学物理

キーワード：次世代PET技術 MPPC DOI-PET MRI-PET TOF-PET

1. 研究開始当初の背景

癌の治癒率向上には、何よりもまず早期に癌を発見することが不可欠となる。PET (陽電子断層撮影)は癌の活性度に応じた機能画像を与え有効な手段になり得るが、従来のPET装置は大型で解像度も悪く(5-10mm程度)、初期病巣の発見が難しい。PET自体の解像度・画質を向上することが必要であるが、PMT (光電子増倍管)を用いた旧態依然の装置では大幅な改善は難しく、PET装置そのものにブレークスルーが切望されてきた。

2. 研究の目的

本研究では近年注目を集める半導体光増幅素子 MPPC を積極的に導入し、次世代 PET 装置の鍵となる三つの技術を実証する。すなわち 1) サブミリに迫る究極の解像度の達成と DOI(Depth-of-Interaction)技術の実験的検証 (2) 強磁場下での MRI 併用を目指した耐磁場センサーシステムの構築 (3) 超高速 LSI の導入による時間分解能の改善と TOF 技術への応用を試みる。

3. 研究の方法

大面積 MPPC アレイと微細シンチレータ、超高速 LSI を新規に開発し、独自の MPPC-PET ユニット (モジュール) を製作する。さらに、モジュールを用いた検証・マウスを用いた臨床実験により PET 装置としての性能を詳細に評価する。次世代 PET としての計測手法の確立と、さらなる改善の可能性を明らかにする。

4. 研究成果

要素技術として(1)大面積 MPPC アレイ(2)0.5mm 角までの高精細シンチレータアレイ(3)16ch/32ch 超高速アナログ LSI の開発等を行った。最初のテーマである DOI-PET 技術に先立ち、シンチレータ内部でガンマ線の反応位置 3 次元的かつ 1mm の高精度で求める新規手法 (図 1: Kishimoto et al. 2013) を確立し、二件の特許出願を行った (特願 2011-289480, 2012-157920)。本技術は 2012 年度の先端技術大賞 (特別賞: フジサンケイグ

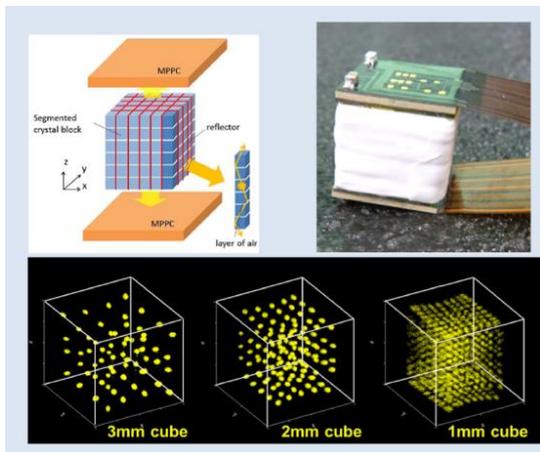


図 1: 本研究で開発した新規 DOI 計測手法 (上段) と実測データ (下段)

ループ)を受賞した。図 2 は 2 ユニットからなる DOI-PET モジュール(GAGG3mm 厚 7層)を用いて仮想的な 18 ユニットのガント리를構成した結果で、DOI 情報を用いることで視野端での解像度が 7.8mm から 1.5mm(FWHM)まで、劇的に改善することが確かめられた (Fujita et al. 2014)。同技術は汎用であるが故にあらゆる応用が可能で、たとえば JST 先端計測分析技術における、高感度コンプトンカメラの開発 (浜松ホトニクス・早稲田大学) においても感度・解像度を向上する鍵となった。

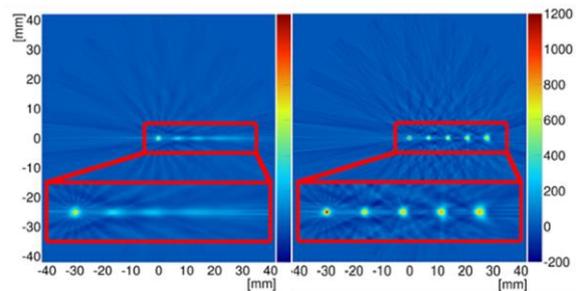


図 2: (左) 非 DOI 型 (右) DOI 対応型 PET における点線源の解像度改善の様子

2 つ目のテーマである MRI-PET に関し、MPPC の磁場耐性を生かした ABS 樹脂製の小動物用 PET ガントリを新たに構築し、4.7 テスラの強磁場中に配置して試験を行なった。FSE (Fast Spin Echo), GE (Gradient Echo) どちらの撮影中においても PET/MRI 画像双方の画像にほとんど影響が無く (S/N の劣化は 5%程度)、両装置が共存できることを実証した (Kurei et al. 2014: 図 3)

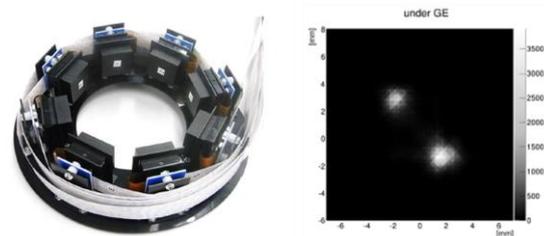


図 3: (左)開発した 樹脂製・小動物用 MRI-PET ガントリと、MRI 動作中の PET による 2 線源画像。S/N の劣化は僅かに 5%程度

最後に TOF 計測について、開発した 2 種類の専用アナログ LSI (32ch, Matsuda et al. 2013; 16ch Ambe et al. 2015)については単体で 200psec 程度の優れた時間応答を示し、16ch の MPPC アレイ及びLYSO シンチレータと組み合わせた評価でも 489 psec (FWHM)を達成した (図 4)。対向ユニットを用いたガンマ線の実測結果では、70mm 離れた二つの線源が時間(TOF)情報だけで明確に分離した。さらに、今後の MPPC 素子自体の性能改善を見込んで、オシロスコープを用いたデジタル波形処理による TOF 分解能の限界性能評価を行なった (Tsujiikawa et al. 2014)。単素子同士の試験ではあるが室温環境で 213 psec (FWHM)も性能が得られ、これは現状の TOF-PET 装置としてワールドレ

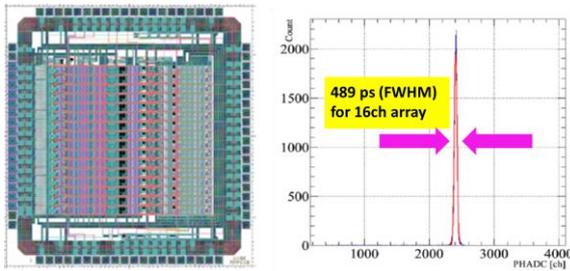


図4: (左) 16ch MPPC 専用高速 LSI レイアウト (右) MPPC アレイと LYSO の対向センサーで取得した TOF 時間分布

コードに近い良好な値となっている。

これら新規の要素技術とあわせ、システムレベルの PET データ処理装置の開発を行なった。具体的には、モノリシック MPPC アレイと微細シンチレータを組み合わせた汎用 MPPC-PET モジュールを多数製作し、8 ユニットを用いて内径 70mm の小動物用 MPPC-PET 装置 (ガントリ) を製作した。8 ユニットからの信号は独自に製作したデータ処理システムで重心演算してガンマ線吸収位置を計算し、また到来時間の同時性を調べる。図 5 に取得したイメージの一例を示す。解像度は視野中心で 0.9mm(FWHM) と頗る良好な値が得られ、大阪大学医学部において脳ファントムや生体マウスを用いた臨床実験を行った。結果の一例を図 5 に示す。マウスの下顎の骨格が明瞭に見て取れ、同時取得した X 線 CT の画像とも良く一致している (Kataoka et al. 2015)。

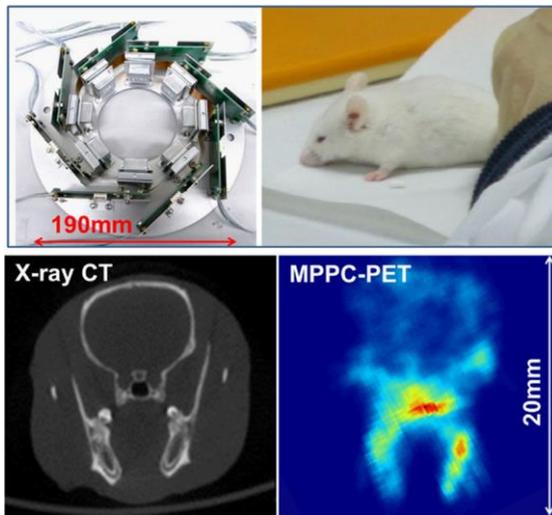


図 5: (上)MPPC-PET 装置とマウス (下) X 線 CT 画像と MPPC-PET 画像の比較

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 24 件: 査読付のみ)

(1) J. Kataoka, A. Kishimoto, H. Ikeda, et al., “Recent progress of MPPC-based

scintillation detectors in high precision X-ray and gamma-ray imaging”, NIM-A, vol. 541, pp. 398-404, (2015)

doi:10.1016/j.nima.2014.11.004

(2) T. Ambe, H. Ikeda, J. Kataoka, et al., “Development and evaluation of an ultra-fast ASIC for future PET scanners using TOF-capable MPPC array detectors”, NIM-A, vol. 771, pp. 66-73, (2015)

doi:10.1016/j.nima.2014.04.012

(3) T. Nishiyama, J. Kataoka, A. Kishimoto, et al., “A novel Compton camera design featuring a rear-panel shield for substantial noise reduction in gamma-ray images”, Jinst, vol. 9., C12031 (2014)

doi:10.1088/1748-0221/9/12/C12031

(4) Y. Kurei, J. Kataoka, T. Kato, et al., “Development of a MPPC-based prototype gantry for future MRI-PET scanners”, Jinst, vol. 9., C12032 (2014)

doi:10.1088/1748-0221/9/12/C12052

(5) T. Fujita, J. Kataoka, A. Kishimoto, et al., “Development of prototype PET scanner using dual-sided readout DOI-PET modules”, Jinst, vol. 9., C12015 (2014)

doi:10.1088/1748-0221/9/12/P12015

(6) A. Kishimoto, J. Kataoka, T. Nishiyama, et al., “Performance and field tests of a handheld Compton camera using 3-D position-sensitive scintillators coupled to multi-pixel photon counter arrays”, Jinst. vol. 9, P11025 (2014)

doi:10.1088/1748-0221/9/11/P11025

(7) Y. Kurei, J. Kataoka, T. Kato, et al., “Qualification test of a MPPC-based PET module for future MRI-PET scanners”, NIM-A, vol. 765, pp. 275-279, (2014)

doi:10.1016/j.nima.2014.04.040

(8) T. Fujita, J. Kataoka, T. Nishiyama, et al., “Two-dimensional diced scintillator array for innovative, fine-resolution gamma camera”, NIM-A, vol. 765, pp. 262-268, (2014)

doi:10.1016/j.nima.2014.04.060

(9) T. Tsujikawa, H. Funamoto, J. Kataoka, et al., “Performance of the latest MPPCs with reduced dark counts and improved photon detection efficiency”, NIM-A, vol. 765, pp. 247-251, (2014)

doi:10.1016/j.nima.2014.06.033

(10) K. Takeuchi, J. Kataoka, T. Nishiyama, et al., “stereo Compton cameras for the 3-D localization of radioisotopes”, NIM-A, vol. 765, pp. 187-191, (2014)

doi:10.1016/j.nima.2014.04.039

(11) 片岡 淳, 「大面積 MPPC-array を用いた放射線検出器の最前線」, 放射線, vol. 39, No. 3, pp. 117-125, (2014)

(12) J. Kataoka, A. Kishimoto, T. Nakamori, et al., “Handy Compton camera using 3D

position-sensitive scintillators coupled with large-area monolithic MPPC arrays”, NIM-A, vol. 715, pp. 105-111, (2013)
doi:10.1016/j.nima.2013.07.018
(13) T. Kato, J. Kataoka, T. Nakamori et al., “High resolution phoswich gamma-ray imager utilizing monolithic MPPC arrays with submillimeter pixelized crystals”, Jinst, vol. 8, P05022, (2013)
doi:10.1088/1748-0221/8/05/P05022
(14) A. Kishimoto, J. Kataoka, T. Nakamori et al., “Development of a dual-sided readout DOI-PET module using large area monolithic mppc-arrays”, IEEE-TNS, vol. 60, pp. 38-43, (2013)
DOI:10.1109/TNS.2012.2233215
(15) T. Kato, J. Kataoka, H. Ikeda, T. Nakamori et al., “A novel gamma-ray detector with submillimeter resolutions using a monolithic MPPC array with pixelized Ce:LYSO and Ce:GGAG crystals”, NIM-A, vol. 699, pp. 235-241, (2013)
doi:10.1016/j.nima.2012.04.008
(16) H. Matsuda, J. Kataoka, H. Ikeda, et al., “Development of ultra-fast ASIC for future PET scanners using TOF-capable MPPC detectors”, NIM-A, vol. 699, pp. 211-215, (2013)
doi:10.1016/j.nima.2012.05.040
(17) J. Kataoka, T. Saito, T. Nakamori, et al., “Expected radiation damage of reverse-type APDs for the Astro-H mission”, Jinst, 7, P06001 (2012)
doi:10.1088/1748-0221/7/06/P06001
(18) T. Nakamori, T. Enomoto, J. Kataoka, et al., “Development of X-ray/gamma-ray imaging spectrometers using reach-through APD arrays”, Jinst, 7, C03038, (2012)
doi:10.1088/1748-0221/7/03/C03038
(19) T. Miura, T. Nakamori, J. Kataoka, et al., “Development of a scintillation detector using a MPPC as an alternative to an APD”, Jinst, 7, C02036 (2012)
doi:10.1088/1748-0221/7/02/C02036
(20) T. Nakamori, J. Kataoka, H. Ikeda, et al., “Development of a gamma-ray imager using a large area monolithic 4×4 MPPC array for a future PET scanner”, Jinst, 7, C01083 (2012)
doi:10.1088/1748-0221/7/01/C01083
(21) T. Miura, T. Nakamori, J. Kataoka, et al., “Improvement of energy thresholds for scintillation detectors using a monolithic 2 × 2 multi-pixel photon counter array with a coincidence technique”, JPSJ, vol. 80, 094203, (2011)
DOI: 10.1143/JPSJ.80.094203
(22) M. Yoshino, J. Kataoka, T. Nakamori, et al., “The development and performance of UV-enhanced APD arrays for high resolution

PET imaging coupled with pixelized Pr:LuAG crystal”, NIM-A, vol. 643, pp. 57-63, (2011)
doi:10.1016/j.nima.2011.03.045
(23) T. Kato, J. Kataoka, T. Nakamori, et al., “Development of a large-area monolithic 4×4 MPPC array for a future PET scanner employing pixelized Ce:LYSO and Pr:LuAG crystals”, NIM-A, vol. 638, pp. 83-91, (2011)
doi:10.1016/j.nima.2011.02.049
(24) 片岡 淳, 「大面積 APD アレーの開発と次世代 PET 技術への展望」, 放射線, vol. 35, No. 4, pp. 277-287. (2010)

[学会発表] (計 61 件: **招待講演 11 件**)

以下は招待講演、国際学会のみを記載)

- (1) T. Tsujikawa, J. Kataoka, H. Ambe et al., “Evaluation of Performance Limit of MPPC for TOF-PET”, IEE NSS/MIC, Seattle, USA (2014 年 11 月)
- (2) J. Kataoka, A. Kishimoto, H. Ikeda et al., “Recent progress of MPPC-based scintillation detectors in high precision X-ray and gamma-ray imaging”, SORMA XV, Michigan, USA (2014 年 6 月)
- (3) A. Kishimoto, J. Kataoka, et al., “Performance and field Tests of a Handheld Compton Camera using 3-D position sensitive scintillators coupled to MPPC arrays”, SORMA XV, Michigan, USA (2014 年 6 月)
- (4) 片岡 淳 「高感度かつ携帯可能なガンマ線カメラの開発」, 電気学会・専門委員会(**招待講演**), 自然科学研究機構 (2014 年 3 月)
- (5) T. Nishiyama, J. Kataoka, A. Kishimoto et al., “Current status and optimization of handy Compton camera using 3-D position sensitive scintillators”, IEEE NSS/MIC, Seoul, Korea (2013 年 11 月)
- (6) K. Takeuchi, J. Kataoka, T. Nishiyama et al., “stereo Compton cameras for the 3-D localization of radio-active isotopes optimized by Geant4”, IEEE NSS/MIC, Seoul, Korea (2013 年 11 月)
- (7) Y. Kurei, J. Kataoka, T. Nakamori et al., “Qualification test of a MPPC-based PET module for future MRI-PET scanners”, HSTD9, Hiroshima, JPN (2013 年 9 月)
- (8) T. Fujita, J. Kataoka, T. Nishiyama et al., “Two-dimensional diced scintillator array for innovative, fine-resolution gamma camera”, HSTD9, Hiroshima, NPN (2013 年 9 月)
- (9) T. Ambe, H. Ikeda, J. Kataoka et al., “Development and evaluation of an ultra-fast ASIC for future PET scanners using TOF capable MPPC array detectors”, HSTD9, Hiroshima, JPN (2013 年 9 月)
- (10) T. Tsujikawa, H. Funamoto, J. Kataoka

et al., “Performance of the latest MPPC with reduced dark currents and improved photon detection efficiency”, HSTD9, Hiroshima, JPN (2013年9月)

(11) 片岡淳, 「高感度かつ携帯可能なガンマ線カメラの開発」, 電気学会秋季年会 (招待講演), 東京電機大学, (2013年9月)

(12) J. Kataoka, T. Nishiyama, T. Nakamori et al., “Handy Compton camera using 3D-position sensitive scintillators coupled with large area monolithic MPPC arrays”, VCI2013, Wien, Austria (2013年2月)

(13) 片岡淳, 「大面積 MPPC アレイを用いた放射線検出器の新展開」, 第4回光センサーWS (招待講演), 大阪大学, (2012年12月)

(14) 片岡淳, 「大面積 MPPC アレイを用いた放射線検出器」, 応用物理学会・分科定期公演会 (招待講演), 東京大学, (2012年12月)

(15) J. Kataoka, T. Nakamori et al., “Expected radiation damage of reverse type APDs for the Astro-H mission”, IEEE NSS/MIC, Anaheim, USA (2012年11月)

(16) T. Kato, J. Kataoka, T. Nakamori et al., “High position resolution gamma-ray imagers consisting of a monolithic MPPC array with submillimeter pixelized scintillator crystals”, IEEE NSS/MIC, Anaheim, USA (2012年11月)

(17) A. Kishimoto, J. Kataoka, T. Nakamori et al., “Development of a MPPC-based DOI-PET module with submillimeter 3-D resolution”, IEEE NSS/MIC, Anaheim, USA (2012年11月)

(18) 岸本彩, 片岡淳, 中森健之ほか「大面積・薄型モノリシック MPPC アレイを用いた3次元高解像度ガンマ線位置検出手法の開発」, 応用物理学会秋季年会 (招待講演), 愛媛大学, (2012年9月)

(19) 片岡淳, 「3次元高解像度・高時間分解能次世代PETモジュールの開発現状」, 放射線プロセスシンポジウム (招待講演), (2012年6月)

(20) 片岡淳, 「3次元高解像度・高時間分解能次世代PETモジュールの開発」, 次世代PET研究会 (招待講演), 放医研, (2012年1月)

(21) T. Kato, J. Kataoka, T. Nakamori et al., “A novel gamma-ray detector with submillimeter resolutions using a monolithic MPPC array with pixelized Ce:LYSO and Ce:GAGG crystals”, HSTD8, Taipei, Taiwan (2011年9月)

(22) H. Matsuda, H. Ikeda, J. Kataoka et al., “Development of ultra-fast ASIC for future PET scanners using TOF-capable MPPC detectors”, HSTD8, Taipei, Taiwan (2011年9月)

(23) T. Miura, T. Nakamori, J. Kataoka et al., “Development of scintillation detector using a MPPC as an alternative to APD”,

PSD9, Aberystwyth, UK, (2011年6月)

(24) T. Nakamori, T. Kato J. Kataoka et al., “Development of a gamma-ray imager using a large area monolithic 4x4 MPPC array for a future PET scanner”, PSD9, Aberystwyth, UK (2011年9月)

(25) T. Nakamori, T. Enomoto J. Kataoka et al., “Development of X-ray/gamma-ray imaging spectrometers using reach-through APD arrays”, PSD8, Aberystwyth, UK (2011年9月)

(26) 片岡淳, 「APD/MPPCを用いた高解像度ガンマ線イメージセンサー」, 日本物理学会春季年会 (招待講演), 新潟大学, (2011年3月)

(27) 片岡淳, 「二次元放射線検出器の最前線: イントロダクトリトーク」, 応用物理学会春季年会 (招待講演), 神奈川工科大学, (2011年3月)

(28) 松田英憲, 片岡淳ほか「APDを用いた拡張型・高解像度PETモジュールの開発とその実証」, 応用物理学会秋季年会 (招待講演), 長崎大学, (2010年9月)

〔図書〕 (計1件)

「震災後に考える

—東日本大震災と向き合う92の分析と提言— 第2部: 原子力発電所事故をめぐって」

15章 大震災と放射能汚染 —福島県の里山に大気沈着した放射性物質の動態と除染— 大河内 博、黒島碩人、緒方 裕子、岸本 彩、片岡 淳

鎌田 薫 監修/ 早稲田大学・震災復興研究論集編集委員会 編 2015年3月

〔産業財産権〕

○出願状況 (計6件)

名称: 「放射性物質の三次元分布を計測する方法及びその装置」

発明者: 片岡淳, 岸本彩, 岩本康弘

権利者: 早稲田大学

種類: 特願

番号: 2015-12203

出願年月日: 2015年1月26日

国内外の別: 国内

名称: 「放射線検出用素子および放射線検出装置」

発明者: 中森健之、片岡淳 ほか

権利者: 山形大学・早稲田大学・古河機械

種類: 特願

番号: 2014-38739

出願年月日: 2014年2月26日

国内外の別: 国内

名称: 「コンプトンカメラ」

発明者: 片岡淳, 西山徹ほか

権利者：早稲田大学・浜松ホトニクス
種類：特願
番号：2013-212844
出願年月日：2013年10月10日
国内外の別：国内/PCT国際移行

名称：「コンプトンカメラ」
発明者：片岡淳，岸本彩ほか
権利者：早稲田大学・浜松ホトニクス
種類：特願
番号：2012-157920
出願年月日：2012年7月13日
国内外の別：国内

名称：「放射線検出器」
発明者：片岡淳，岸本彩ほか
権利者：早稲田大学・古河機械金属
種類：特願
番号：2011-289480
出願年月日：2011年12月28日
国内外の別：国内/PCT国際移行

名称：「携帯型放射線検出器」
発明者：片岡淳，鎌田圭ほか
権利者：早稲田大学・古河機械金属
種類：特願
番号：2011-231544
出願年月日：2011年10月21日
国内外の別：国内

○取得状況（計0件）
全件審査中もしくは審査請求中

〔その他〕

【受賞】

- (1) 平成26年度・第1回早稲田大学リサーチアワード（国際研究発信力）：片岡淳
- (2) 平成26年度・早稲田大学物理応物修士論文賞 「3次元シンチレータとMPPCを用いた高解像度DOI-PET装置の開発」（藤田卓也：指導教官 片岡淳）
- (3) 平成24年度科学技術分野・文部科学大臣表彰（若手科学者賞）：片岡淳
- (4) 第26回（2012年度）独創性を拓く先端技術大賞（特別賞） 「PET装置の高解像度化に向けた新規三次元位置検出器の開発」
岸本彩（早大理工M1）指導教官：片岡淳
- (5) 平成24年度・小野梓賞 「MPPCを用いた高解像度小動物用PET装置の開発」（加藤卓也：指導教官 片岡淳）
- (6) 第32回応用物理学会講演奨励賞 「大面積モノリシックMPPCアレイを用いた新規DOI測定手法の開発」 岸本彩，片岡淳ほか
2012年4月
- (7) 平成23年度・早稲田大学物理応物修士論文賞 「MPPCを用いたフォスウィッチ型ガンマカメラの開発」（三浦大陽：指導教官 片岡淳）
- (8) Best Poster Award “Improvement of

energy thresholds for scintillation detector using a monolithic 2x2 MPPC array with coincidence technique”, T. Miura, J. Kataoka, T. Nakamori et al., PSD8, UK, (2011)

(9) 第29回応用物理学会講演奨励賞 「APDを用いた拡張型・高解像度PETモジュールの開発とその実証」 松田英憲，片岡淳，池田博一ほか 2010年10月

【報道・プレス発表】

(1) 2014年7月23日（静岡第一テレビ、日経産業新聞、日刊工業新聞、ハフィントンポストほかで紹介）

「ガンマ線撮像用コンプトンカメラの高性能化に成功～除染のさらなる効率化、環境調査、医療、理学応用へ期待～」

<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20140723-2/index.html>

(2) 2013年9月10日（日本経済新聞（全国版・朝刊）朝日新聞（全国版・朝刊）日経産業新聞（全国版）日刊工業新聞（全国版）中日新聞 静岡新聞ほかで紹介）

「放射性物質の除染作業を効率化するガンマ線撮像用コンプトンカメラを製品化～高感度コンプトンカメラとして、従来よりも大幅な小型・軽量化と低価格化を実現～」

<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20130910/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

片岡 淳 (Kataoka Jun)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号：90334507

(2) 連携研究者

池田 博一 (Ikeda Hirokazu)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究
所・教授
研究者番号：10132680

中森 健之 (Nakamori Takeshi)
山形大学・理学部・准教授
研究者番号：30531876

(2010-2011年度のみ)

錦戸 文彦 (Fumihiko Nishikido)
放射線医学総合研究所・分子イメージン
グ研究センター・研究員
研究者番号：60367117