

図 1. NU4-2008 構造図  
(Disselhorst JA, April 2010, The Journal of Nuclear Medicine)

### C. 研究結果

INVEON の撮像により、NU4-2008 ファントムの hot rod が描出可能であることを確認した (図 2)。しかし、hot rod の径が小さくなるにつれアクティビティは低下傾向にあり、rod 径が細くなるほどアクティビティが過小評価されることが示された。

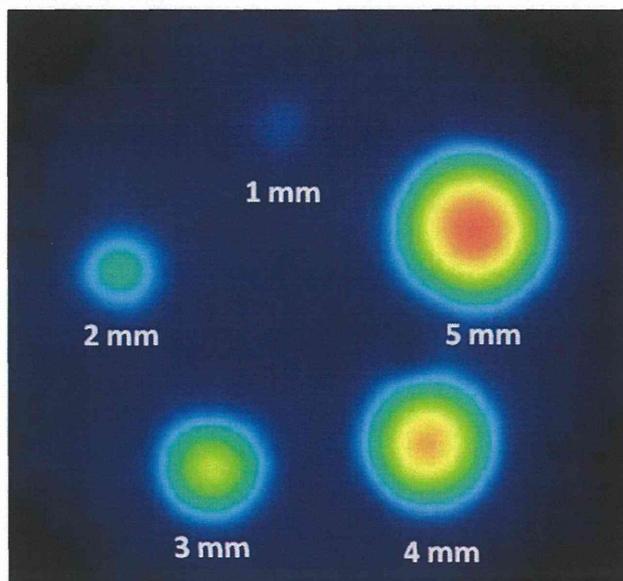


図 2. NU4-2008 ファントム画像 (hot rod 部)

Hot rod に関心領域 (ROI) を設定し、各 rod 内の  $^{18}\text{F}$ -FDG の放射能濃度を算出し、定量性を評価した。定量性の評価を行うにあたり、INVEON とキュリーメータ間のクロスキャリブレーションを実施した。各 hot rod に 0.8 ~ 3.0 mm 径の ROI を設定し、各 ROI の放射能濃度を算出したところ、5mm-rod では 1.18 MBq/ml だったのに対し、1mm-rod では 0.19 MBq/ml と、rod 径の低下に伴う定量性の低下が示された (図 3)。

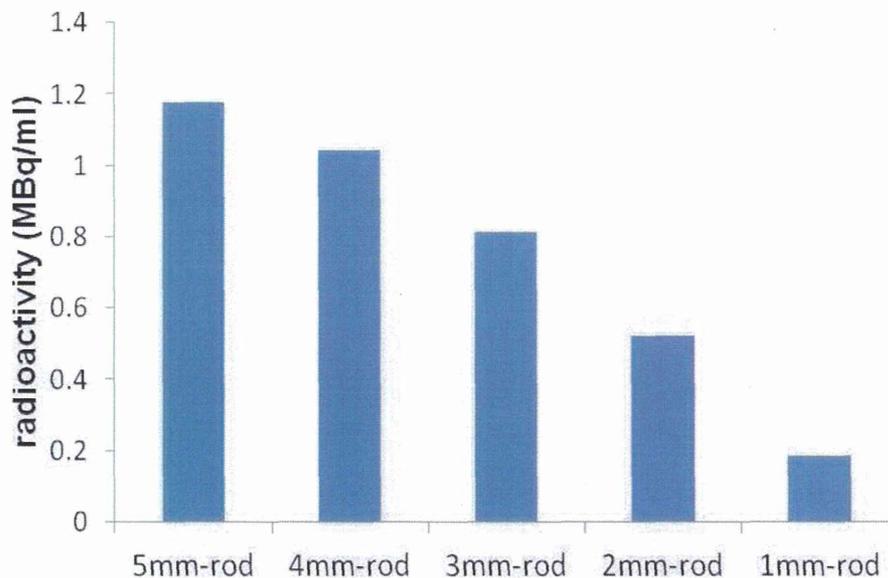


図 3. 各 rod における放射能濃度の定量結果

#### D. 考察

小動物用 PET を用いたファントム実験により、rod 径の減少に伴って定量性等が著しく低下することが示された。これは PET 装置の構造上避けられないことであり、これをクリアするための方法としては PET の空間分解能の向上が求められる。一般的に、定量性を担保するために必要な計測対象の直径は、空間分解能 (FWHM) の 3 倍以上が望ましいとされている。本プロジェクトで測定の対象としている腕血管の内径は 2~3mm 程度と推定されることから、ウェアラブル PET に求められる FWHM は 0.5~0.6 mm 程度であると考えられる。また、ウェアラブル PET の画像解析によって得られる放射能の数値と、実際の放射能値を補正するリカバリー計数を算出することで、血管の太さに合わせた安定的な定量が行える可能性がある。

本研究により、PET 画像解析によって腕血管から放射能を定量するウェアラブル PET の実現には、0.5 mm 程度の高い空間分解能が求められることを明らかにした。今回得られた結果は、今後実施されるウェアラブル PET の性能評価試験において比較データとして活用され、ウェアラブル PET の性能を示すための有力な情報になると考えられる。

#### E. 結論

小動物用 PET 装置 INVEON を用いて、ウェアラブル PET の性能比較用データを取得した。また、hot-rod の径の減少に伴って定量性も低下することが明らかとなり、ウェアラブル PET の高い空間分解能と感度の実現以外に、リカバリー計数の算出による補正計算の必要性も示唆された。

#### F. 健康危険情報

特になし

#### G. 研究発表

##### 1. 論文発表

(1) Takahashi M, Momose T, Koyama K, Ichikawa M, Kurokawa M, Ohtomo K. Dynamic Metabolic Changes during the First 3 Months after (90)Y-Ibritumomab Tiuxetan Radioimmunotherapy. Scientific World Journal. 2014;2014:368947. doi: 10.1155/2014/368947. Epub 2014 Jun 19. PubMed PMID: 25050390; PubMed Central PMCID: PMC4090517.

- (2) Miyagawa T, Ueda K, Ohtomo R, Sasaki T, Takahashi M, Momose T, Kurokawa M, Tsuji S. Treatable chorea associated with polycythemia vera. *Neurology and Clinical Neuroscience* 2, 2014 : 90-91.
- (3) Takami H, Mukasa A, Ikemura M, Shibahara J, Takahashi M, Momose T, Saito N. Findings from positron emission tomography and genetic analyses for cerebellar liponeurocytoma. *Brain Tumor Pathol.* 2014 Dec 20. [Epub ahead of print] PubMed PMID: 25527206.
- (4) 百瀬 敏光, 高橋 美和子. シンチグラフィー 脳血流. 神経内科研修ノート. 永井 良三(総監修), 鈴木 則宏(責任編集) 診断と治療社 : 105-110, 2015.
- (5) 百瀬 敏光, 高橋 美和子. シンチグラフィー In-111 DTPA による脳槽シンチグラフィー. 神経内科研修ノート. 永井 良三(総監修), 鈴木 則宏(責任編集) 診断と治療社 : 111, 2015.
- (6) 百瀬 敏光, 高橋 美和子. シンチグラフィー タリウム : TL-201 シンチグラフィー. 神経内科研修ノート. 永井 良三(総監修), 鈴木 則宏(責任編集) 診断と治療社 : 112, 2015.
- (7) 百瀬 敏光, 高橋 美和子. パーキンソニズムの DAT スキャン. 神経内科 82 (2) : 160-166, 2015

## 2. 学会発表

- 1) 高橋 美和子, 相馬 努, 加藤 誠二, 関本 道治, 古山 桂太郎, 大友 邦, 百瀬 敏光. 内側型側頭葉てんかんにおける、PET、MEG による Multimodality imaging 解析. 第 54 回日本核医学会学術総会, 大阪, 2014 年 11 月 7 日.
- 2) Toshimitsu Momose. Current status of manufacturing and quality control system for PET tracers in early-stage exploratory clinical trials in Japan. 第 54 回日本核医学学術総会 特別企画プログラム International Symposium on PET Clinical Trials, 大阪, 2014 年 11 月 8 日.
- 3) 百瀬 敏光. 認知症とアミロイドイメージング. 第 45 回千葉ベイシティカンファランス, 千葉, 2014 年 7 月 4 日.
- 4) 百瀬 敏光. Interpretation of brain perfusion SPECT. 第 50 回日本医学放射線学会秋季臨床大会, 神戸, 2014 年 9 月 26 日.
- 5) 百瀬 敏光. From physics to cutting-edge biomedical imaging —overview and future perspective—. 「放射線によるイメージングの展望」ワークショップ, 東京大学伊藤国際学術センター, 2014 年 11 月 29 日.
- 6) 百瀬 敏光. がん、認知症、動脈硬化に対する RI 標識薬剤開発の現状と将来展望—認知症オーバービュー—. 第 2 回放射線イメージングの展望ワークショップ, 東京大学小柴ホール, 2015 年 1 月 24 日.

## H. 知的財産権の出願・登録状況

(予定を含む。)

### 1. 特許取得

特になし

### 2. 実用新案登録

特になし

### 3. その他

特になし

厚生労働科学研究費補助金（医療機器開発推進研究事業）

（分担）研究報告書

PET 装置開発、電子回路、放射線検出器開発に関する研究

研究分担者 島添 健次、大野 雅史

東京大学大学院 工学系研究科

## 要旨

本年度においては 500 $\mu\text{m}$  ピクセル検出器およびサブ mmPET 検出器からの信号読出のため TOT-ASIC の開発および評価を行い、エネルギー分解能および時間分解能においては PET 装置として十分な性能を有していることを確認した。また 500 $\mu\text{m}$  ピッチの SiPM の大型化の設計を行い 8 $\times$ 8 のデザインを完了した。一方で東北大から供給された 500 $\mu\text{m}$  ピッチの GAGG アレーに対してアレーの確認のため 8 $\times$ 8 の MPPC を用いた電荷分割読出によりピクセルの分離性を確認した。また新たな DOI の検出方法として両面読出が不要な方法を考案し、波長に基づく情報を用いることで片面読出が可能であることを実験により確かめた。また本方式に用いるための SiPM の設計および開発したピクセルアレー検出器を用いたガンマカメラシステムに利用可能なタングステン製のコリメーターの製作をおこなった。

## A.研究目的

本研究においてはサブ mm の空間分解能を有する PET システム製作のため、PET 装置開発、電子回路、放射線検出器開発に関する研究を行う。500 $\mu\text{m}$  の位置分解能を有する PET 検出器の開発のためには新たな光センサ (SiPM シリコンフォトマル) および個別読出を可能にするための専用の集積回路 (ASIC Application Specific Integrated Circuit) の開発が必要である。本研究においては PET 装置開発のため、サブ mm の結晶、光検出器およびアレーからの個別読出を行う ASIC および放射線検出器の開発を行う。また PET 装置のプロトタイプを試作を行う。

## B.研究方法

東北大学により作成された 500 $\mu\text{m}$  ピッチの GAGG アレーの評価のため、また新たな DOI (Depth Of Interaction) の検出方法として、波長弁別によるものを考案し、波長による深さ方向の情報の弁別性の検証を行った。本方法によれば片側読出においても DOI 情報の取得が可能であると考えられ、セグメント化していない GAGG および GAGG/LYSO の積層型検出器にたいして分離試験をおこなった。またカラー弁別において均一性の高い特性を達成するために新たに 2 列ごとに出力を有するあらたな SiPM の設計開発をおこなった。

加えてサブ mm の分解能を有するプロトタイプ PET システム作成のため、1.2mm 角の SiPM を用いた 12 $\times$ 12 の SiPM アレーを作成した。またこれにより PET プロトタイプの 1 号機の作成をおこなった。

## C.研究結果

東北大学において作成された 500 $\mu\text{m}$  ピッチの GAGG における分離性を評価するためいくつかのガラス基板を介して 8 $\times$ 8 ピクセル(1 ピクセル 3mm 角)MPPC に接合して、結晶の分離性を確認した。個別読出型との比較および信号削減のため抵抗分割の 4 チャンネルによる信号読出を行った。

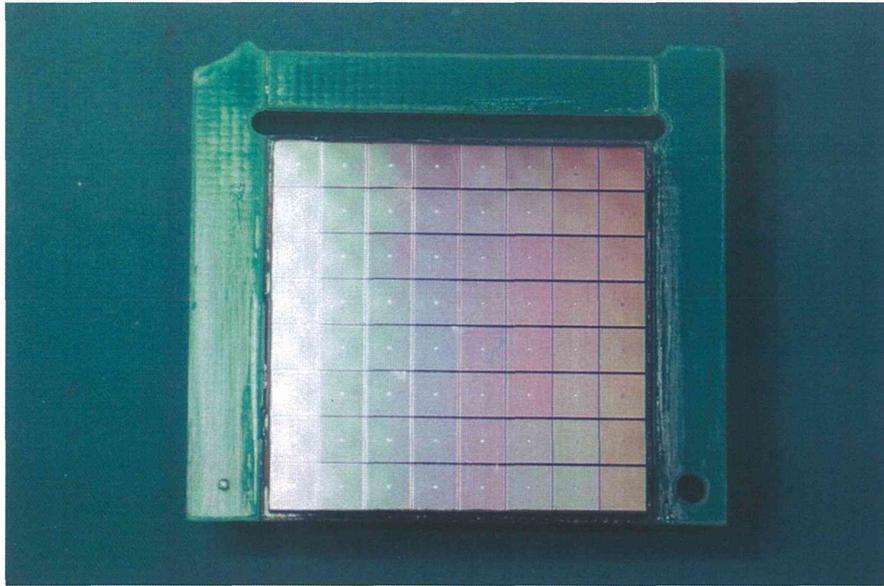


図 8×8 MPPC アレー検出器

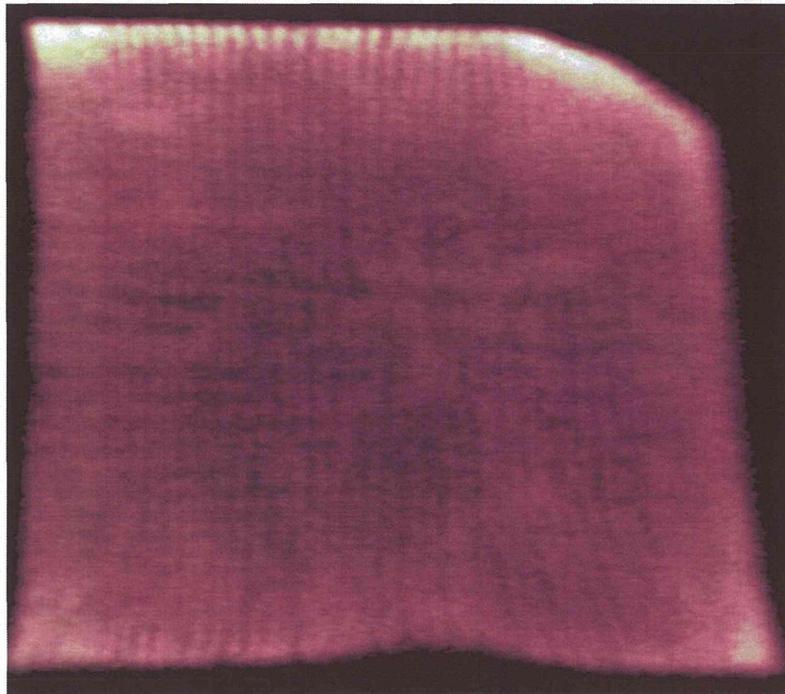


図 MPPC アレー検出器による電荷分割を用いたピクセルの分離性

500 $\mu\text{m}$  の分解能を実現するためには 500 $\mu\text{m}$  ピッチの SiPM の開発が必須である。昨年度 4 x 4 ピクセル検出器の作成を行い正常な動作を確認したが本年度はデッドスペース削減のため、サイズを 8 x 8 に拡張した SiPM の設計デザインを行った。各ピクセルのピッチは 500 $\mu\text{m}$  でありピクセルの有効面積は 400×400 $\mu\text{m}^2$  である。各ピクセルは 400 個の 20×20 $\mu\text{m}^2$  のマイクロセルから構成されている。全体のチップサイズは 4100×4100 $\mu\text{m}^2$  である。

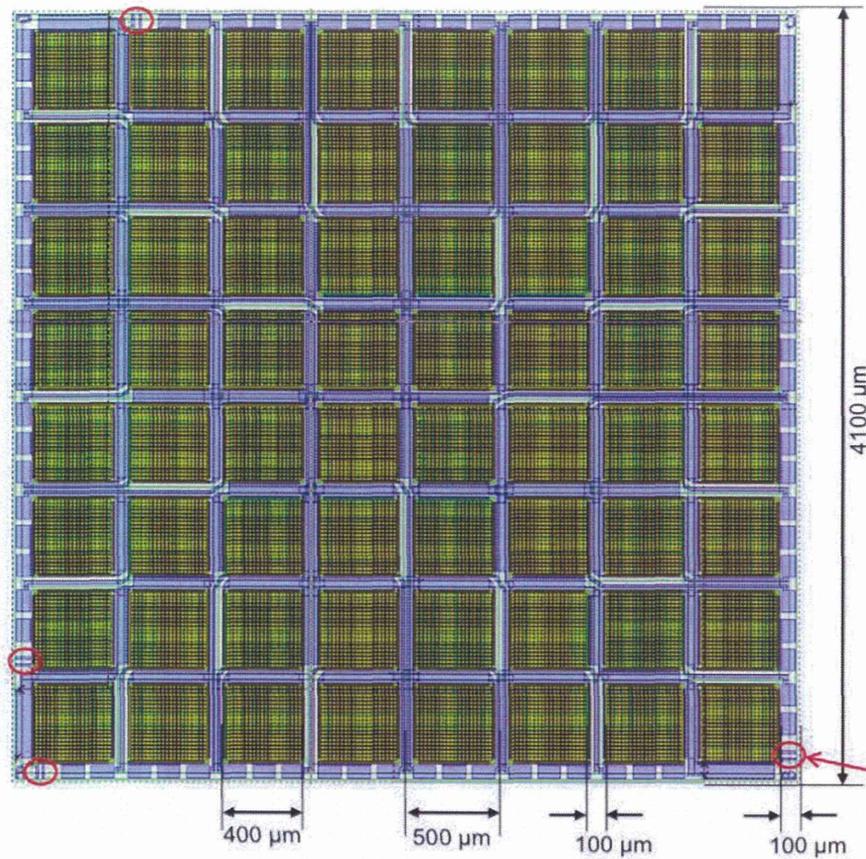


図 500 $\mu\text{m}$  微細ピッチを有する 8 × 8 SiPM アレー

個別読出型の PET 検出器の開発にむけて TOT (Time over Threshold)方式の ASIC の開発を行ってきた。TOT 方式の採用により多チャンネルの信号処理を低消費電力に実行可能である。

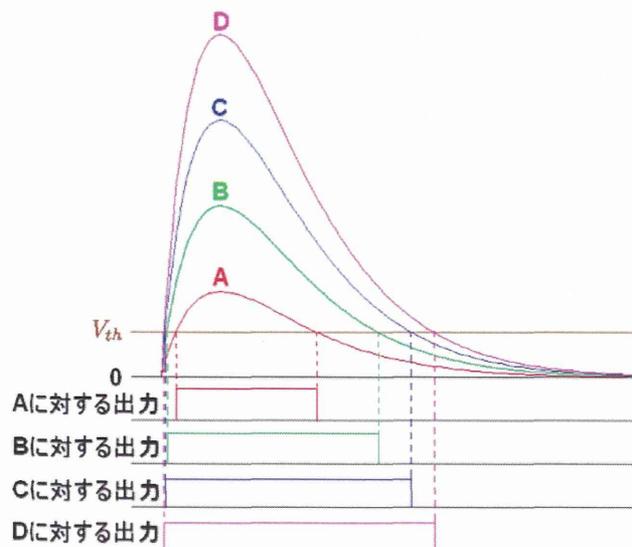


図 2-8. ToT法の原理

図 TOT 方式の原理

本方式を用いて 0.25 $\mu$ m TSMC-CMOS プロセスにより開発を行った 48 チャンネルの TOT-ASIC について評価を行った。下図に GAGG/SiPM 検出器と接続した場合の信号波形およびエネルギースペクトル( $^{18}\text{F}$ -FDG)を示す。 $^{18}\text{F}$ -FDG からの 511keV のピークが明瞭に観察され、PET として利用可能であることが確認できる。また時間分解能としてはコインシデンスにより 550 ps (FWHM)が得られた。加えて MRI 中でのテストも行っており、エネルギー分解能は劣化することなく読出可能であることが確認されている。これにより開発した ASIC は十分な性能を有していることを確認し、読出基板の作成を行った。

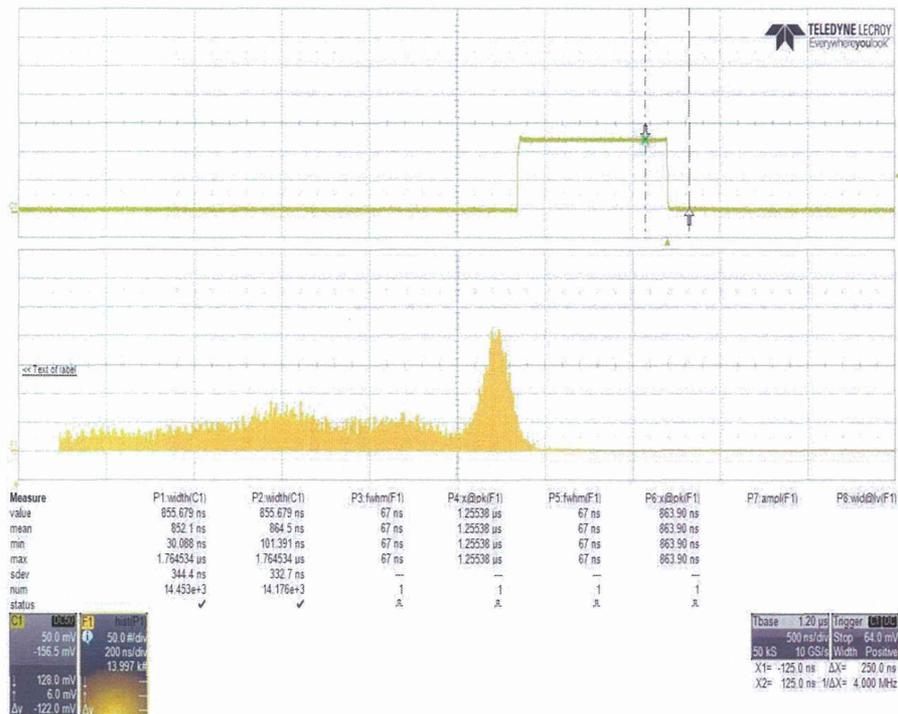


図 8 GAGG/SiPM + ASIC の出力およびエネルギースペクトル

通常シンチレータからの深さ情報の読み出しにおいては、異なる不純物濃度による減衰時間の違いを利用した Phoswich 型の検出器もしくはシンチレータの両面に光検出器を接着する両面読出、反射材の利用により光を異なる位置へガイドする方式が用いられてきている。しかしそれぞれ信号波形の解析が必要、シンチレータ両面に光検出器による構造の制限、位置分解能の劣化などの問題が存在している。本研究においては、光のシンチレータ内での減衰度合が波長に依存することを利用して、シンチレータの片側読出により DOI 情報を取得可能であると考え実験により確認した（特許出願）。

下図に GAGG 結晶を光検出位置からそれぞれ 0, 20, 40 mm で紫外光により励起した時の波長分布を示す。結晶内の減衰が波長依存であることにより 500 nm 付近において観測される波長分布に違いがあることがわかる。光センサの近くで反応した場合は短波長側の光が観測されるが、上部で反応した場合は減衰のため短波長の光は観測されない。

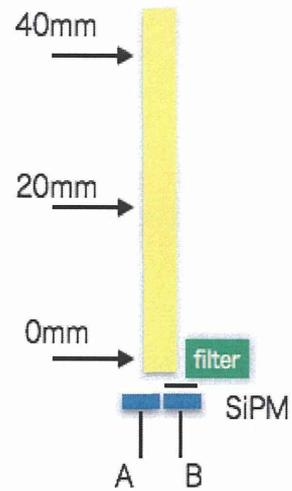
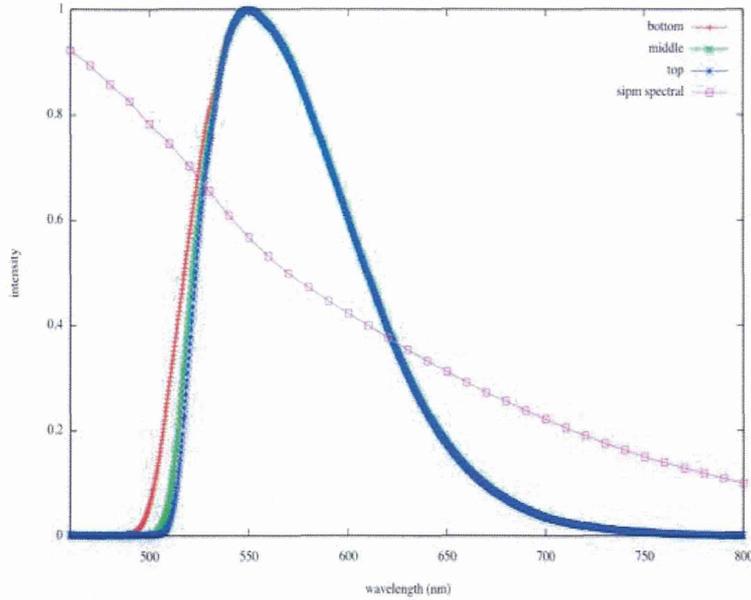


図 励起位置による波長分布 (赤 : 0mm 緑: 20mm 青: 40mm)      図 照射位置および SiPM 読出

上記の短波長側の違いを観測することで片側読出により深さ位置を特定可能であることを確認した。下図に上記の3点の位置で  $^{137}\text{Cs}$  により励起し波長感度をもたせた2つの SiPM により観測された信号比の分布を示す。今回の試験においては2つの SiPM を用いているため分離性は良くないが弁別可能であることが確かめられた。フィルターは減衰度合いがことなる 520nm 付近にシャープカット(50nm FWHM)特性を有するものを用いた。

また GAGG(ピーク波長 520nm)と LYSO(ピーク波長 420nm)の積層型の検出器にかんしては(右図)明瞭に弁別が可能である(赤: GAGG 緑: LYSO)。

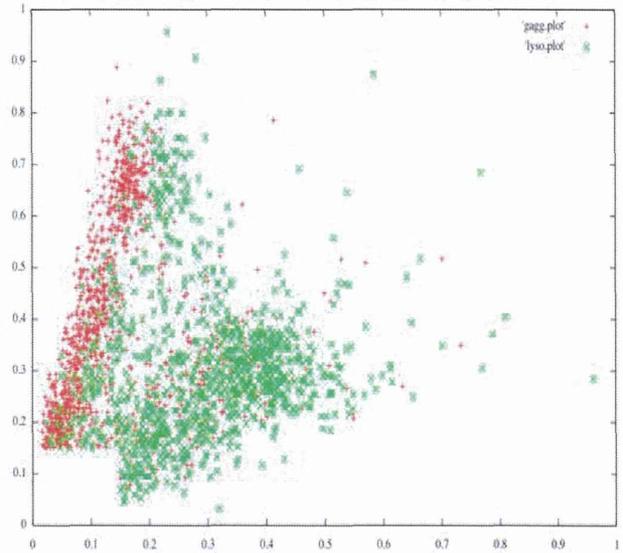
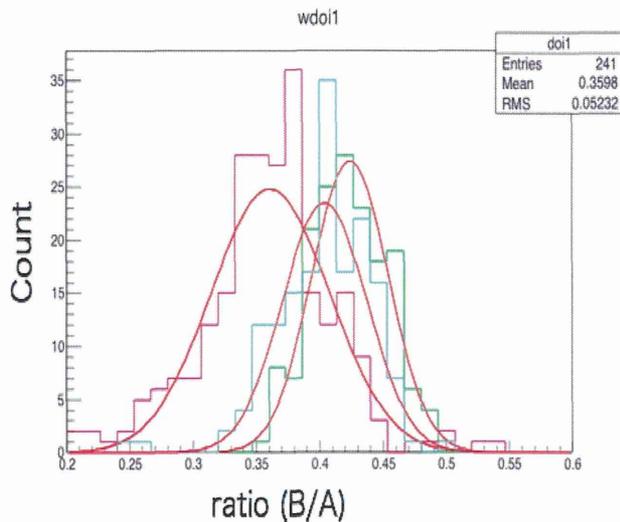


図 異なる3点の照射位置に対する SiPM 信号比      図 GAGG/LYSO 積層型における弁別

またカラーフィルターによる均一性を高めるため新たな、カラー(波長)に感度を有する SiPM の新たな設計開発をおこなった。下図に設計した SiPM を示す。SiPM の2列のガイガーモード APD セルごとに別の信号出力線につなぐ構造を有している。このような SiPM とカラーフィルターを用いることにより片側読出において DOI 情報の取得が可能となる。

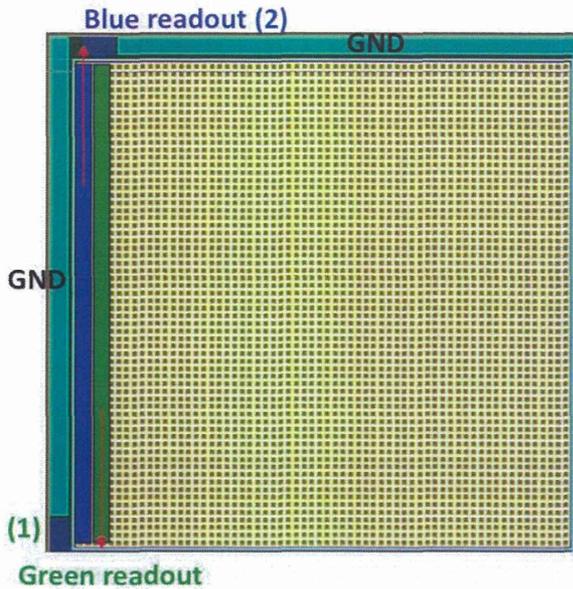


図 2 出力を有する波長有感型センサ用 SiPM

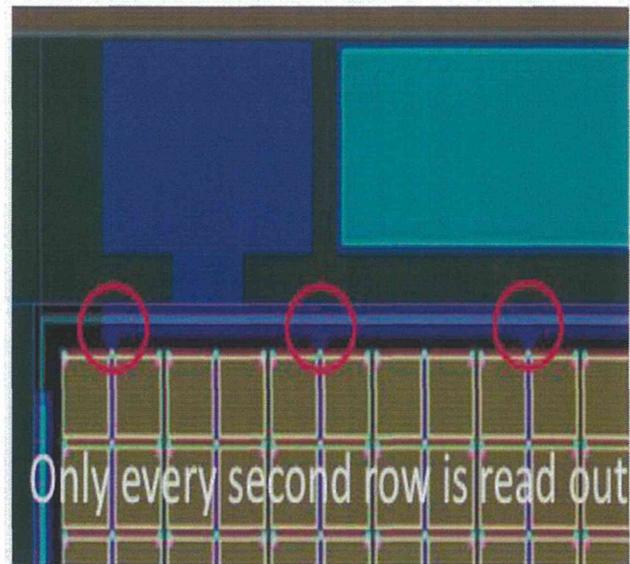


図 ガイガーモード APD セルの接続 (2 出力)

PET プロトタイプ用の光センサアレーとして KETEK PM1150 を  $12 \times 12 = 144$  チャンネル配列した SiPM アレーの作成をおこなった。下図に 144 チャンネル 1.9mm ピッチの SiPM アレーの全体図 (左) とボンディング図 (右) をしめす。これによりシステムとしてサブ mm の分解能を実現可能な検出器を構築した。

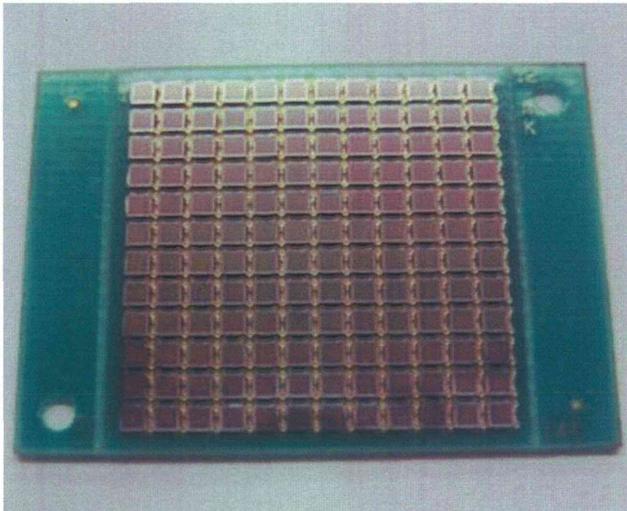


図 KETEK PM1150 144 チャンネル SiPM アレー

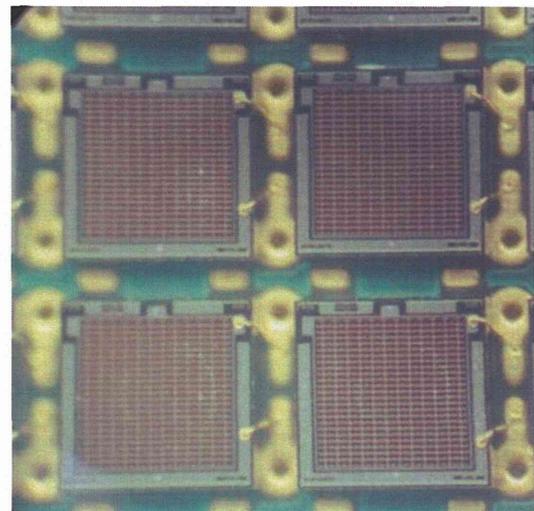


図 SiPM ボンディング図

開発したピクセル型検出器は PET 検出器としてのみならず、SPECT などの、ガンマカメラ用途しても有用であると考えられる。今後のガンマカメラ評価用として、タングステン製の微細ピッチ ( $500\mu\text{m}$ ) コリメーターの製作をおこなった。下図にコリメーターの外形を示す。今後本コリメーターを用いた評価も同時にすすめる予定である。

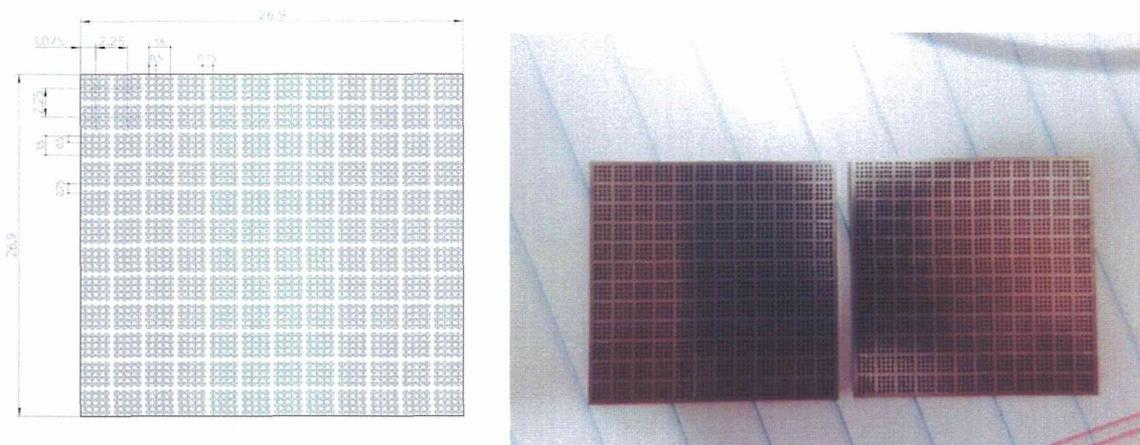


図 作成したタングステンコリメーターのサイズおよび写真

#### D. 考察

電流読出型の TOT-ASIC の開発を行い、結晶と合わせた評価により十分な時間分解能およびエネルギー分解能を有していることが確認された。本 ASIC の採用により後段の処理システムが構築されれば 2 桁以上の高計数率化を達成可能であることが示唆された。また  $500\mu\text{m}$  ピッチの GAGG を  $3\text{mm}$  サイズの MPPC アレーと接合しピクセルの分離性の試験をおこなった。ピクセルの分離が可能であることが確認できたが一方で SN の向上においては個別読出が望ましいことが示唆された。また波長弁別型の DOI (深さ情報) 検出方法に関して新たに考案し、片面読出においても深さが特定可能であることが示された。

#### E. 結論

本年度においては  $500\mu\text{m}$  ピクセル検出器およびサブ mmPET 検出器からの信号読出のため TOT-ASIC の開発および評価を行い、エネルギー分解能および時間分解能においては PET 装置として十分な性能を有していることを確認した。また  $500\mu\text{m}$  ピッチの SiPM の大型化の設計を行い  $8\times 8$  のデザインを完了した。一方で東北大から供給された  $500\mu\text{m}$  ピッチの GAGG アレーに対してアレーの確認のため  $8\times 8$  の MPPC を用いた電荷分割読出によりピクセルの分離性を確認した。また新たな DOI の検出方法として両面読出が不要な方法を考案し、波長に基づく情報を用いることで片面読出が可能であることを実験により確かめた。また本方式に用いるための SiPM の設計および開発したピクセルアレー検出器を用いたガンマカメラシステムに利用可能なタングステン製のコリメーターの製作をおこなった。次年度はこれらの微細アレー検出器を用いた PET および SPECT 検出器の製作および改良を引き続き行っていく予定である。

#### F. 健康危険情報

特になし

#### G. 研究発表

##### 1. 論文発表

- (1) Shimazoe, K., et al. "Development and characterization of 16-channel silicon photomultiplier prototype with sub-mm pixels for high-resolution PET system." *Journal of Instrumentation* 9.11 (2014): C11018
- (2) Florian R Schneider<sup>1,3</sup>, Kenji Shimazoe<sup>2</sup>, Ian Somlai-Schweiger<sup>1</sup> and Sibylle I Ziegler<sup>1</sup>. "A PET detector prototype based on digital SiPMs and GAGG scintillators." *Physics in medicine and biology* 60.4 (2015): 1667.
- (3) T. Orita, K. Shimazoe, H. Takahashi, The dynamic time-over-threshold method for multi-channel APD based gamma-ray detectors, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*:

Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 775, 1 March 2015, Pages 154-161

(4) K. Shimazoe, H. Takahashi, K. Kamada, A. Yoshikawa, K. Kumagai, J. Kataoka, S. Itoh, H. Sato, Y. Usuki, Development of a prototype of time-over-threshold based small animal PET scanner, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 753, 21 July 2014, Pages 84-90

## 2. 学会発表

(1) Kenji Shimazoe, Alina Lipovec, Hiroyuki Takahashi, Florian Wiest, Peter Iskra, Thomas Ganka, Kei Kamada "Development and characterization of 16-channel silicon photomultiplier prototype with sub-mm pixels for high-resolution PET system" 10<sup>th</sup> International Conference on Position Sensitive Detectors, University of Surrey, England, 7-12 September 2014

(2) Alina Lipovec, Kenji Shimazoe, Hiroyuki Takahashi "Development of SiPM DOI detector for high resolution PET system", JSAP conference, 17-20 September 2014, Hokkaido University

(3) Alina Lipovec, Kenji Shimazoe, Hiroyuki Takahashi "Development of SiPM DOI detector for high resolution PET system", AESJ conference, 10 September 2014, Kyoto University

(4) Nakamura, Y., K. Shimazoe, and H. Takahashi. "A new digital-analog multiplex method using an adder circuit." 10th International Conference on Position Sensitive Detectors, University of Surrey, England, 7-12 September 2014

(5) 「医療診断のための $\gamma$ 線イメージング基盤技術の開発」島添健次 第2回放射線イメージングの展望ワークショップ, 東京大学小柴ホール, 2015年1月24日.

## H. 知的財産権の出願・登録状況

(予定を含む。)

### 1. 特許取得

出願番号 62118611 「波長弁別による DOI 検出法」(平成 27 年 1 月 22 日受理) 島添健次 他

### 2. 実用新案登録

特になし

### 3. その他

特になし

## III. 研究成果の刊行に関する一覧表

## 研究成果の刊行に関する一覧表

## 書籍

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の編集者名	書籍名	出版社名	出版地	出版年	ページ
百瀬 敏光, 高橋 美 和子.	脳血流	永井 良三 (総監修), 鈴木 則宏 (責任編集)	シンチグラフ イー	診断と治 療社		2015	105-110
百瀬 敏光, 高橋 美 和子.	In-111 DTPAによ る脳槽シンチグラ フィー	永井 良三 (総監修), 鈴木 則宏 (責任編集)	シンチグラフ イー	診断と治 療社		2015	111
百瀬 敏光, 高橋 美 和子.	タリウム : TL-201 シンチグラフィ	永井 良三 (総監修), 鈴木 則宏 (責任編集)	シンチグラフ イー	診断と治 療社		2015	112

## 雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻	ページ	出版年
Shimazoe, K., et al.	Development and characterization of 16-channel silicon photomultiplier prototype with sub-mm pixels for high-resolution PET system	Journal of Instrumentation	9.11	C11018	2014
Florian R Schneider, Kenji Shimazoe et. al.	A PET detector prototype based on digital SiPMs and GAGG scintillators	Physics in medicine and biology	60.4	1667	2015

T. Orita, K. Shimazoe et. al.	The dynamic time-over-threshold method for multi-channel APD based gamma-ray detectors	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	775	154-161	2014
K. Shimazoe et. al.	Development of a prototype of time-over-threshold based small animal PET scanner	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	753	84-90	2014
Takahashi M, Momose T, et. al.	Dynamic Metabolic Changes during the First 3 Months after (90Y-Ibritumomab Tiuxetan Radioimmunotherapy	ScientificWorldJournal	2014	168947	2014
Miyagawa T, Ueda K, Ohtomori R, Sasaki T, Takahashi M, Momose T, Kurokawa M, Tsuji S.	Treatable chorea associated with polycythemia vera	Neurology and Clinical Neuroscience	2	90-91	2014
Takami H, Mukasa A, Ikemura M, Shibahara J, Takahashi M, Momose T, Saito N	Findings from positron emission tomography and genetic analyses for cerebellar liponeurocytoma	Brain Tumor Pathol.		PubMed PMID: 25527206.	2014
百瀬 敏光, 高橋美和子.	パーキンソニズムのDATスキャン.	神経内科	82(2)	2015	160-166

Kei Kamada, Martin Nikl, Shunsuke Kurosawa, Alena Beitlerova, Aya Nagura, Yasuhiro Shoji, Jan Pejchal, Yuji Ohashi, Yuui Yokota, and Akira Yoshikawa	Alkali Earth Co-doping Effects on Luminescence and Scintillation Properties of Ce doped $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$ scintillator	Opt. Mater.	41	63-66	2015
Kei Kamada, Shunsuke Kurosawa, Yasuhiro Shoji, Jan Pejchal, Yuji Ohashi, Yuui Yokota, and Akira Yoshikawa	Growth of Nd doped $(Lu, Gd)_3(Ga, Al)_5O_{12}$ single crystal by the micro pulling down method and their scintillation properties	Opt. Mater.	41	32-35	2015
Kei Kamada, Akira Yoshikawa, Takanori Endo, Kousuke Tsutsumi, Yasuhiro Shoji, Shunsuke Kurosawa, Yuui Yokota, Petr Prusa, and Martin Nikl	Growth of 2 inch size Ce:doped $Lu_2Gd_1Al_2Ga_3O_{12}$ single crystal grown by the Czochralski method and their scintillation properties	Journal of Crystal Growth	410	14-17	2015
Kei Kamada, Shunsuke Kurosawa, Petr Prusa, Martin Nikl, Vladimir V. Kochurikhin, Takanori Endo, Kousuke Tsutsumi, Hiroki Sato, Yuui Yokota, Kazumasa Sugiyama, Akira Yoshikawa	Cz grown 2-inch size $Ce:Gd_3(Al, Ga)_5O_{12}$ single crystal; relationship between Al, Ga site occupancy and scintillation properties	Opt. Mater.	36	1942-1945	2014

Kei Kamada, Jan Pejchal, Martin Nikl, Syunsuke Kurosawa, Yuui Yokota, Akira Yoshikaw	Growth of Sc doped RE <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> (RE = Y, Lu) single crystals by micro-pulling-down method and their scintillation properties	Opt. Mater.	36	1934-1937	2014
Kei Kamada, Kenji Shimazoe, Shigeki Ito, Masao Yoshino, Takanori Endo, Kousuke Tsutsumi, Jun Kataoka, Shunsuke Kurosawa, Yuui Yokota, Hiroyuki Takahashi, and Akira Yoshikawa	Development of a Prototype Detector Using APD-Arrays Coupled With Pixelized Ce:GAGG Scintillator for High Resolution Radiation Imaging	IEEE Trans. Nucl. Sci.,	61	348-352	2014
Kei Kamada, Takayuki Yanagida, Shunsuke Kurosawa, Yuui Yokota, Takanori Endo, Kousuke Tsutsumi and Akira Yoshikawa	Czochralski growth and scintillation properties of Ce:(Gd, Y, Lu) <sub>3</sub> (Al, Ga) <sub>5</sub> O <sub>12</sub> single crystals	IEEE Trans. Nucl. Sci.	61	293-296	204
Shunsuke Kurosawa, Yasuhiro Shoji, Yuui Yokota, Kei Kamada, Valery I. Chani, Akira Yoshikawa	Czochralski growth of Gd <sub>3</sub> (Al <sub>5-x</sub> Ga <sub>x</sub> )O <sub>12</sub> (GA GG) single crystals and their scintillation properties	J. Cryst. Growth	393	134-137	2014

Seiichi Yamamoto, Takahiro Kobayashi, Jung Yeol Yeom, Yuki Morishita, Hiroki Sato, Takanori Endo, Yoshiyuki Usuki, Kei Kamada, Akira Yoshikawa	Development of GAGG depth-of-interaction (DOI) block detectors based on pulse shape analysis	Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A	767	289-295	2014
Ongsa Sakthong, Weerapong Chewpraditkul, Chalerm Wanarak, Kei Kamada, Akira Yoshikawa, Petr Prusa, Martin Nikl,	Scintillation properties of $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}:Ce^{3+}$ single crystal scintillators	Nucl. Instrum. Meth. A 751	751	1-5	2014
Warut Chewpraditkul, Dalibor Pánek, Petr Brža, Weerapong Chewpraditkul, Chalerm Wanarak, Nakin, Pattanaboonmee, Vladimir Babin, Karol Bartosiewicz, Kei Kamada, Akira Yoshikawa, and Martin Nikl,	Luminescence properties and scintillation response in $Ce^{3+}$ -doped $Y_2Gd_{1-x}Al_5-xGa_xO_{12}$ ( $x = 2, 3, 4$ ) single crystals	Journal of Applied Physics	116	083505	2014

Martin Nikl, Kei Kamada, Vladimir Babin, Jan Pejchal, Katerina Pilarova, Eva Mihokova, Alena Beitlerova, Karol Bartosiewicz, Shunsuke Kurosawa, and Akira Yoshikawa	Defect Engineering in Ce-Doped Aluminum Garnet Single Crystal Scintillators	Cryst. Growth Des.,	14	4827-4833	2014
Shunsuke Kurosawa, Kei Kamada, Yuui Yokota, Akira Yoshikawa	Luminescent Properties of Ce:Gd <sub>3</sub> (Al, Ga, Mg, M) <sub>5</sub> O <sub>12</sub> Crystal (M=Zr, Hf)	Japanese Journal of Applied Physics	53	04EG14	2014
A. Satoh, M. Kitaura, K. Kamada, A. Ohnishi, M. Sasaki, and K. Hara	Time-Resolved Photoluminescence Spectroscopy of Ce:Gd <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> Ga <sub>3</sub> O <sub>12</sub> Crystals	Japanese Journal of Applied Physics	53	05FK01	2014
W.Drozdowski, K. Brylew, M.E. Witkowski, A.J. Wojtowicz, P. Solarz, K. Kamada, A. Yoshikawa	Studies of light yield as a function of temperature and low temperature thermoluminescence of Gd <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> Ga <sub>3</sub> O <sub>12</sub> :Ce scintillator crystals	Optical Materials,	36	1665-1669	2014

