

|                                                                  |
|------------------------------------------------------------------|
| Oral presentation   2 Ionizing Radiation : 2.1 Detection Devices |
|------------------------------------------------------------------|

📅 Tue. Sep 19, 2023 1:00 PM - 5:30 PM JST | Tue. Sep 19, 2023 4:00 AM - 8:30 AM UTC | 📍 A306 (KJ Hall)

**[19p-A306-1~16] 2.1 Detection Devices**

Shunji Kishimoto(KEK), Fuyuki Tokanai(山形大), Yasuyuki Okuno(理研)

1:00 PM - 1:15 PM JST | 4:00 AM - 4:15 AM UTC

[19p-A306-1] Investigation of large size fabrication technique of optical-guiding crystal scintillator

○Kei Kamada<sup>1,2</sup>, Naoko Kutsuzawa<sup>2</sup>, Yoshiyuki Usuki<sup>2</sup>, Rei Sasaki<sup>3</sup>, Masao Yoshino<sup>1,2</sup>, Yuji Shirakami<sup>2</sup>, Takahiko Horiai<sup>1,2</sup>, Rikito Murakami<sup>1,2</sup>, Akira Yoshikawa<sup>1,2,3</sup> (1.Tohoku Univ. NICHe, 2.C&A corp., 3.Tohoku Univ. IMR)

1:15 PM - 1:30 PM JST | 4:15 AM - 4:30 AM UTC

[19p-A306-2] Crystal Growth and Optical Properties of Ce doped (Gd, Y, Tb)<sub>3</sub>Ga<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>12</sub> Scintillators for X-ray Imaging

○(M1)Kazuya Omuro<sup>1,2</sup>, Masao Yoshino<sup>2,3</sup>, Kei Kamada<sup>2,3,4</sup>, Kyoung Jin Kim<sup>2</sup>, Takahiko Horiai<sup>2,3</sup>, Rikito Murakami<sup>2</sup>, Akihiro Yamaji<sup>2,3</sup>, Takashi Hanada<sup>2</sup>, Yuui Yokota<sup>2</sup>, Shunsuke Kurosawa<sup>2,3,5</sup>, Yuji Ohashi<sup>2,3</sup>, Hiroki Sato<sup>2,3</sup>, Akira Yoshikawa<sup>2,3,4</sup> (1.Grad. Sch. Eng., Tohoku Univ., 2.IMR, Tohoku Univ., 3.NICHe, Tohoku Univ., 4.C&A, 5.ILE, Osaka Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

1:30 PM - 1:45 PM JST | 4:30 AM - 4:45 AM UTC

[19p-A306-3] Investigation of Application of Near-infrared Emitting Scintillators to the Radiation Dose Rate Monitoring System for the Decommissioning

○Daisuke Matsukura<sup>1,2</sup>, Shunsuke Kurosawa<sup>2,3,4</sup>, Akihiro Yamaji<sup>2,3</sup>, Yuji Ohashi<sup>2,3</sup>, Yuui Yokota<sup>2</sup>, Kei Kamada<sup>2,3</sup>, Hiroki Sato<sup>2,3</sup>, Masao Yoshino<sup>2,3</sup>, Takashi Hanada<sup>2</sup>, Rikito Murakami<sup>2</sup>, Takahiko Horiai<sup>2,3</sup>, Akira Yoshikawa<sup>2,3,5</sup>, Hiroki Tanaka<sup>6</sup>, Takushi Takata<sup>6</sup> (1.Tohoku Univ. Graduate School of Eng., 2.Tohoku Univ. IMR, 3.Tohoku Univ. NICHe, 4.Osaka Univ. ILE, 5.C&A, 6.KURNS)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

1:45 PM - 2:00 PM JST | 4:45 AM - 5:00 AM UTC

[19p-A306-4] Crystal Growth and Luminescence Properties of Cs<sub>3</sub>(Li, Cu)<sub>2</sub>I<sub>5</sub> Scintillators for Cosmic Dark Matter Search

○(D)Yusuke Urano<sup>1,2</sup>, Shunsuke Kurosawa<sup>2,3,4</sup>, Akihiro Yamaji<sup>2,3</sup>, Akira Yoshikawa<sup>2,5</sup>, Kenichi Fushimi<sup>6</sup>, Reiko Orito<sup>6</sup> (1.Department of Mat. Sci., Graduate School of Eng., Tohoku Univ., 2.IMR, Tohoku Univ., 3.NICHe, Tohoku Univ., 4.Institute for Laser Eng., Osaka Univ., 5.C&A Corporation, 6.Faculty of Science and Technology, Tokushima Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[19p-A306-5] Development of Analytical Methods for Large-Grained Nuclear Emulsion

○(M2)Kai Shimizu<sup>1</sup>, Nobuko Kitagawa<sup>1</sup>, Kunihiro Morishima<sup>1</sup>, Taketo Nishigaki<sup>1</sup> (1.Nagoya Univ.)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[19p-A306-6] Precise measurement of ion microbeam profiles produced by glass capillary optics using super-fine-grained nuclear emulsion

○Harukichi Miyazaki<sup>1</sup>, Takuya Shiraishi<sup>2</sup>, Tokihiro Ikeda<sup>3</sup>, Tatsuhiko Naka<sup>1</sup>, Kana Saeki<sup>1</sup>, Yurika Dowdy<sup>1</sup>, Hirotaka Suzuki<sup>1</sup>, Tomohiro Kobayashi<sup>3</sup>, Kotoko Inayoshi<sup>1</sup>, Wei-Guo Jin<sup>1</sup> (1.Toho Univ., 2.Kanagawa Univ., 3.RIKEN)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[19p-A306-7] High-sensitivity fiber optic radiation monitor using GOS:Tb

○Shuichi Hatakeyama<sup>1</sup>, Yuichiro Ueno<sup>1</sup>, Yuki Koizumi<sup>2</sup>, Keisuke Sasaki<sup>2</sup>, Tooru Shibutani<sup>2</sup> (1.Hitachi, Ltd. R&D Group, 2.Hitachi, Ltd. Omika Works)

---

◆ Highlighted Presentation

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[19p-A306-8] Estimation of Radiation Tolerance of CIGS Solar Cell Dosimeters by Applying the Displacement Damage Dose Method of Radiation Degradation Prediction Model for Space Solar Cell

○Yasuki Okuno<sup>1</sup>, Yukiko Kamikawa<sup>2</sup>, Mitsuru Imaizumi<sup>3</sup>, Takahiro Makino<sup>4</sup>, Nobuhiro Sato<sup>5</sup>, Yuki Jimba<sup>6</sup>, Ryuta Kasada<sup>6</sup> (1.RIKEN, 2.AIST, 3.Sanjo City Univ., 4.QST, 5.Kyoto Univ., 6.Tohoku Univ.)

---

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[19p-A306-9] Radiation Transport Simulation of Neutron Dosimeter using Solar Cell with Converter Films

○Yuji Kurimoto<sup>1</sup>, Tamotsu Okamoto<sup>1</sup>, Akito Iwasaki<sup>1</sup>, Ayuto Kobayashi<sup>1</sup>, Yasuki Okuno<sup>2</sup>, Tomohiro Kobayashi<sup>2</sup> (1.NIT Kisarazu Col., 2.RIKEN)

---

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[19p-A306-10] Radiation detection characteristics for BGaN detectors under high-dose neutron

○(M1)Tatsuhiro Sakurai<sup>1</sup>, Ryohei Kudo<sup>1</sup>, Seiya Kawasaki<sup>2</sup>, Tetsuichi Kishishita<sup>3</sup>, Yoshinori Sakurai<sup>4</sup>, Hiroshi Yashima<sup>4</sup>, Takahiro Makino<sup>5</sup>, Takeshi Ohshima<sup>5</sup>, Yoshio Honda<sup>6</sup>, Hiroshi Amano<sup>6</sup>, Yoku Inoue<sup>1</sup>, Toru Aoki<sup>7</sup>, Takayuki Nakano<sup>1,7</sup> (1.Shizuoka Univ., 2.Nagoya Univ., 3.KEK, 4.KURNS, 5.QST, 6.IMaSS Nagoya Univ., 7.R.I.E. Shizuoka Univ.)

---

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[19p-A306-11] Evaluation of large area pixelated SSD for super heavy element experiments II

○Fuyuki Tokanai<sup>1</sup>, Kouji Morimoto<sup>2</sup>, Daiya Kaji<sup>2</sup>, Pierre Brionnet<sup>2</sup>, Mirei Takeyama<sup>1</sup>, Kazumasa Kosugi<sup>3</sup> (1.Yamagata Univ., 2.RIKEN Nishina Center, 3.HPK)

---

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC

[19p-A306-12] Development of scintillator-type real-time beam monitor for particle beam cancer treatment

○Kanta Takahashi<sup>1</sup>, Kouji Morimoto<sup>2</sup>, Takeo Iwai<sup>3</sup>, Shunsuke Kurosawa<sup>4,5</sup>, Fuyuki Tokanai<sup>6</sup> (1.Sci. and Eng. Yamagata Univ., 2.RIKEN, 3.Med. Yamagata Univ., 4.Tohoku Univ., 5.Osaka Univ., 6.Sci. Yamagata Univ.)

---

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

4:30 PM - 4:45 PM JST | 7:30 AM - 7:45 AM UTC

[19p-A306-13] Technique for 3D-dose distribution measurement of a proton beam by using a PVA-I gel dosimeter and Optical CT

○Keisuke Momokita<sup>1</sup>, Terakawa Atsuki<sup>1</sup>, Hoashi Riko<sup>1</sup>, Zhao Liang<sup>1</sup>, Satake Daiki<sup>1</sup>, Suzuki Sotaro<sup>1</sup>, Tujimoto Kota<sup>1</sup>, Miyada Kengo<sup>1</sup> (1.CYRIC Tohoku Univ.)

---

4:45 PM - 5:00 PM JST | 7:45 AM - 8:00 AM UTC

[19p-A306-14] Selective measurement of small-angle scattering Compton gamma rays and application of anti coincidence method for BNCT

○Hiroyuki Miyamaru<sup>1</sup>, Nguyen Quang Kien<sup>1</sup>, Takao Kojima<sup>1</sup> (1.OMU)

---

5:00 PM - 5:15 PM JST | 8:00 AM - 8:15 AM UTC

[19p-A306-15] Measurement of Scintillation Decay Time for  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -nanoparticle-loaded PLS II

○Shunji Kishimoto<sup>1</sup>, Akehiro Toda<sup>2</sup> (1.KEK IMSS, 2.Tokyo Printing Ink)

---

5:15 PM - 5:30 PM JST | 8:15 AM - 8:30 AM UTC

[19p-A306-16] Fundamental study of Multi-Isotope Imaging Using a Novel Gamma Ray Imaging Technique Based on Detector Response Patterns

○(D)Yoshiharu Kitayama<sup>1,2</sup>, Nogami Mitsuhiro<sup>2</sup>, Keitaro Hitomi<sup>2</sup> (1.JAEA, 2.Tohoku Univ.)

## 光導波型シンチレータの組織制御および大口径化の検討

### Investigation of large size fabrication technique of optical-guiding crystal scintillator

東北大 NICHe<sup>1</sup>, 憐C&A<sup>2</sup>, 東北大金研<sup>3</sup>, °鎌田 圭<sup>1,2</sup>, 沓澤 直子<sup>2</sup>, 佐々木 玲<sup>3</sup>, 白紙 悠之<sup>2</sup>, 薄  
善行<sup>2</sup>, 吉野 将生<sup>1,2</sup>, 堀合 毅彦<sup>1,2</sup>, 村上 力輝斗<sup>2,3</sup>, 吉川 彰<sup>1,2,3</sup>

NICHe Tohoku Univ.<sup>1</sup>, C&A<sup>2</sup>, IMR Tohoku Univ.<sup>3</sup>, °Kei Kamada<sup>1,2</sup>, Naoko Kutsuzawa<sup>2</sup>, Yuji  
Shiirakami<sup>2</sup>, Yoshiyuki Usuki<sup>2</sup>, Masao Yoshino<sup>1,2</sup>, Takahiko Horiai<sup>1,2</sup>, Rikito Murakami<sup>2,3</sup>,  
Akira Yoshikawa<sup>1,2,3</sup>

E-mail: kei.kamada.c6@tohoku.ac.jp

【緒言】X 線イメージング装置では、100  $\mu\text{m}$  厚程度の Tb:Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S 焼結体、Tl:CsI ウィスカーや Gd<sub>3</sub>Ga<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>12</sub> (GAGG) 単結晶薄板をシンチレータとし、数  $\mu\text{m}$  の解像度を有する CCD や CMOS などの光検出器と組み合わせることで放射線の位置分解を可能としている。近年では、フォトリソグラフィ技術を応用し、基板上に 200  $\mu\text{m}$  ピッチ x 400  $\mu\text{m}$  深さの格子を設け、格子中に CsI 粒子を充填したシンチレータプレートも報告されている。我々の研究グループでは、これまでに、光導波型の共晶体構造を利用することで X 線イメージングの分解能を改善する技術を提案し、さらに最新の報告として、optical-guiding crystal scintillator (OCS) を報告してきた[1-3]。OCS ではコアが高屈折率かつシンチレータ特性に優れた無機シンチレータ結晶、クラッドが低屈折率のガラスや石英で構成されるため、光ファイバーと同様の光導波性を有するバンドル型位置分解シンチレータやシンチレータファイバーとしても利用できる。コアを融液成長させることで単結晶化が可能であり、シンチレータ特性や光透過性を向上でき、厚みに制限がないことが特徴である。これまでに、Tl:CsI、Eu:SrI<sub>2</sub> 単結晶をコア、とした OCS を報告した。本研究では、組織の均一化と大口径化の検討を行った。

【結果】OCS の基本的な設計指針としては、クラッドのガラスの軟化点近傍でガラスと反応せず、軟化点以下の融点である、塩化物、臭化物、ヨウ化物シンチレータがコアとして利用できる。今回、ほう珪酸ガラスおよび石英をクラッドとし、それぞれ、六方最密構造となる組織の均一化と 5mm 径までの大口径化を検討するとともに、コアの融液成長による結晶化を行った。作製方法やシンチレータ特性等については当日報告する。

[1] R. Yajima, K. Kamada *et al* 2023 Applied Physics Express, 16(2), 025505.

[2] R. Yajima, K. Kamada *et al* 2023 Ceramics International, DOI:0.1016/j.ceramint.2022.12.264

[3] R. Yajima, K. Kamada *et al* 2023 Jpn. J. Appl. Phys. 62 SC1064

# X線イメージング用 Ce 添加(Gd, Y, Tb)<sub>3</sub>Ga<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>12</sub> シンチレータの 結晶成長および光学特性

## Crystal Growth and Optical Properties of Ce doped (Gd, Y, Tb)<sub>3</sub>Ga<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>12</sub> Scintillators for X-ray Imaging

東北大工<sup>1</sup>, 東北大金研<sup>2</sup>, 東北大 NICHe<sup>3</sup>, 株式会社 C&A<sup>4</sup>, 阪大レーザー研<sup>5</sup> ○(M1)大室和也<sup>1,2</sup>,  
吉野将生<sup>2,3</sup>, 鎌田圭<sup>2,3,4</sup>, 金敬鎮<sup>2</sup>, 堀合毅彦<sup>2,3</sup>, 村上力輝斗<sup>2</sup>, 山路晃広<sup>2,3</sup>, 花田貴<sup>2</sup>,  
横田有為<sup>2</sup>, 黒澤俊介<sup>2,3,5</sup>, 大橋雄二<sup>2,3</sup>, 佐藤浩樹<sup>2,3</sup>, 吉川彰<sup>2,3,4</sup>

Grad. Sch. Eng., Tohoku Univ.<sup>1</sup>, IMR, Tohoku Univ.<sup>2</sup>, NICHe, Tohoku Univ.<sup>3</sup>, C&A Corp.<sup>4</sup>,  
ILE, Osaka Univ.<sup>5</sup>

○Kazuya Omuro<sup>1,2</sup>, Masao Yoshino<sup>2,3</sup>, Kei Kamada<sup>2,3,4</sup>, Kyoung Jin Kim<sup>2</sup>, Takahiko Horiai<sup>2,3</sup>,  
Rikito Murakami<sup>2</sup>, Akihiro Yamaji<sup>2,3</sup>, Takashi Hanada<sup>2</sup>, Yuui Yokota<sup>2</sup>, Shunsuke Kurosawa<sup>2,3,5</sup>,  
Yuji Ohashi<sup>2,3</sup>, Hiroki Sato<sup>2,3</sup>, Akira Yoshikawa<sup>2,3,4</sup>

E-mail: kazuya.omuro.r5@dc.tohoku.ac.jp

【背景】シンチレータは、医療診断や空港のセキュリティ管理などの分野で活躍する X 線イメージング技術に利用されており、短い露光時間でコントラストに優れた画像を得るために高い密度と発光量が要求される。近年、ガーネット型三元系酸化物を四元系に拡張したガーネット型四元系酸化物を母材とすることで、Ce, Tb 添加シンチレータの発光量が劇的に向上することが報告されている。また、単結晶シンチレータは、その高い透明性により光の散乱や拡散を抑制することができるため、X 線イメージング用シンチレータとして期待されている。Korzhik らは、Tb 添加(Gd, Y)<sub>3</sub>Ga<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>12</sub> (GYAGG : Tb) 多結晶について、200,000 ph/MeV という非常に高い発光量を報告した[1]。しかし、GYAGG:Tb 単結晶は未だ報告されていない。本研究では、マイクロ引き下げ法 (μ-PD 法) を用いた GYAGG:Ce, Tb 単結晶の育成と、その発光特性について報告する。

【実験方法】出発材料として純度 99.99%の CeO<sub>2</sub>, Tb<sub>4</sub>O<sub>7</sub>, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末を用い、仕込み組成(Gd<sub>1-x-y</sub> Ce<sub>x</sub> Tb<sub>y</sub>)<sub>1</sub>(Y<sub>1-x-y</sub> Ce<sub>x</sub> Tb<sub>y</sub>)<sub>2</sub>Ga<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>12</sub> (x = 0.000, 0.005, y = 0.000, 0.005, 0.050, 0.100, 0.150) の混合粉末を作製し、0.06-0.08 mm/min の速度で μ-PD 法による結晶育成を行った[2]。

【結果・考察】μ-PD 法によって透明な GYAGG:Ce, Tb 結晶の育成に成功した (Fig. 1)。Ce<sup>3+</sup>の励起波長 430 nm で励起した際の発光スペクトルを Fig. 2 に示す。GYAGG:Ce, Tb 結晶において、Ce<sup>3+</sup>の 5d<sub>1</sub>-4f 遷移に由来する緩やかなピークと、Tb<sup>3+</sup>の 4f-4f 遷移に由来する鋭いピークが同時に観察された。発光量や蛍光寿命等の発光特性については当日紹介する。

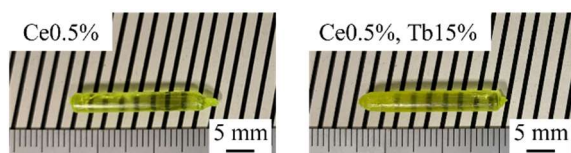


Fig. 1 Photograph of the grown GYAGG:Ce, Tb crystals

### 【参考文献】

- [1] Korzhik, M. et al., J. Lumin., Vol. 234, **2021**, 117933.
- [2] Yoshikawa, A. et al., Opt. Mater., Vol. 30, **2007**, 6-10.

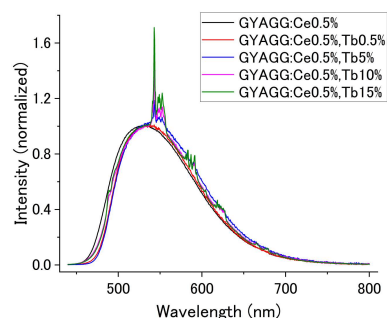


Fig. 2 Emission spectra of GYAGG:Ce, Tb crystals

## 近赤外発光シンチレータの廃炉用放射線量率 モニタリングシステムへの適用の検討

### Investigation of Application of Near-infrared Emitting Scintillators to the Radiation Dose Rate Monitoring System for the Decommissioning

東北大工学研究科<sup>1</sup>, 東北大金研<sup>2</sup>, 東北大 NICHe<sup>3</sup>, 大阪大レーザー研<sup>4</sup>, C&A<sup>5</sup>, 京都大複合研<sup>6</sup>

○(M2)松倉 大佑<sup>1,2</sup>, 黒澤 俊介<sup>2,3,4</sup>, 山路 晃広<sup>2,3</sup>, 大橋 雄二<sup>2,3</sup>,

横田 有為<sup>2</sup>, 鎌田 圭<sup>2,3,5</sup>, 佐藤 浩樹<sup>2,3</sup>, 吉野 将生<sup>2,3</sup>, 花田 貴<sup>2</sup>, 村上 力輝斗<sup>2</sup>,

堀合 毅彦<sup>2,3</sup>, 吉川 彰<sup>2,3,5</sup>, 田中 浩基<sup>6</sup>, 高田 卓志<sup>6</sup>

Tohoku Univ. Graduate School of Eng.<sup>1</sup>, Tohoku Univ. IMR<sup>2</sup>,

Tohoku Univ. NICHe<sup>3</sup>, Osaka Univ. ILE<sup>4</sup>, C&A<sup>5</sup>, KURNS<sup>6</sup>

°Daisuke Matsukura<sup>1,2</sup>, Shunsuke Kurosawa<sup>2,3,4</sup>, Akihiro Yamaji<sup>2,3</sup>, Yuji Ohashi<sup>2,3</sup>, Yuui Yokota<sup>2</sup>,

Kei Kamada<sup>2,3,5</sup>, Hiroki Sato<sup>2,3</sup>, Masao Yoshino<sup>2,3</sup>, Takashi Hanada<sup>2</sup>, Rikito Murakami<sup>2</sup>,

Takahiko Horiai<sup>2,3</sup>, Akira Yoshikawa<sup>2,3,5</sup>, Takushi Takata<sup>6</sup>, Hiroki Tanaka<sup>6</sup>

E-mail: daisuke.matsukura.p5@dc.tohoku.ac.jp

福島第一原子力発電所の廃炉作業において、炉内の状況調査を行うために高線量率環境下におけるリアルタイムな放射線量率モニタリングシステムが求められている。当該システムとして、シンチレータ、光ファイバー、および CCD 分光器から構成される線量率モニタが提案されている[1]。シンチレータの発光を光ファイバーにて炉外の CCD 分光器へと輸送するが、全長 100 m の光ファイバー中での光子の損失を抑制する必要がある。また、ファイバー由来のノイズ(ファイバー自身の発光やチェレンコフ光など 550 nm 以下の発光)を目的の信号から分離する必要がある[2, 3]。したがって、シンチレータには長波長発光(目標: 650-1,000 nm)と高発光量が求められる。

本研究ではレーザー結晶として知られ、近赤外発光を示す Nd 添加 Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (Nd:YAG) 単結晶に注目した。複数の Nd 濃度の Nd:YAG 単結晶をマイクロ引き下げ法にて育成し、発光特性を評価した。この Nd:YAG 単結晶と 20 m の光ファイバーを用いたモニタリングシステムの模擬実験を行い、<sup>60</sup>Co 線源による高線量率環境下(約 1-700 Gy/h)での線量率ダイナミックレンジを評価した。

ラジオルミネッセンスの評価では Nd<sup>3+</sup> の 4f-4f 遷移に由来する約 880 nm の発光ピークが見られた。ダイナミックレンジの評価では下限値が約 0.3-0.5 Gy/h となった(Fig. 1)。ダイナミックレンジの放射線の照射後、残光を評価したところ、線源の移動時間を含めて照射停止の約 18 秒後に、シンチレータの信号強度は照射時の最大強度の 1%以下にまで減少した。この結果より残光は無視でき、Nd:YAG はシステムに適用できる性質を持つことが分かった。さらなる発光量の向上を期待し、Nd/Tb 共添加 YAG を同様に育成・評価したので、本講演では Nd:YAG および Nd/Tb:YAG の発光特性の詳細な結果を示し、このシステムの実現可能性を議論する。

[1] Fukushima Nuclear Accident Archive, Topics  
Fukushima No.70, (2015)

[2] H. Liu *et al.*, Rev. Sci. Instr., vol. 89 (2018).

[3] Fosco Connect, optical fiber loss and attenuation,  
<https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95048006-optical-fiber-loss-and-attenuation>

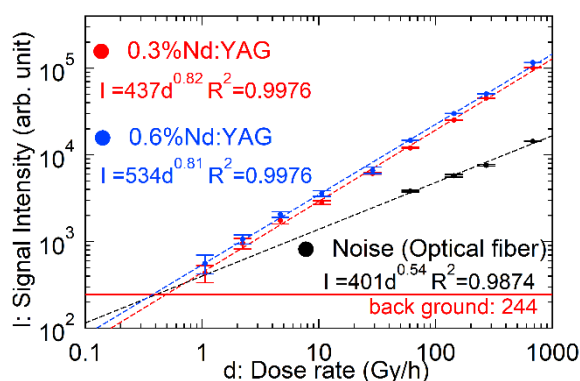


Fig. 1 Calibration curve for signal intensity of emission spectra (integration range: 800-980 nm) as a function of dose

## 宇宙暗黒物質探索用の $\text{Cs}_3(\text{Li}, \text{Cu})_2\text{I}_5$ シンチレータの 結晶育成と発光特性評価

### Crystal Growth and Luminescence Properties of $\text{Cs}_3(\text{Li}, \text{Cu})_2\text{I}_5$ Scintillators for Cosmic Dark Matter Search

東北大工<sup>1</sup>, 東北大金研<sup>2</sup>, 東北大 NICHe<sup>3</sup>, 大阪大レーザー研<sup>4</sup>, (株) C&A<sup>5</sup>, 徳島大理工<sup>6</sup>

○(D) 浦野 雄介<sup>1,2</sup>, 黒澤 俊介<sup>2,3,4</sup>, 山路 晃広<sup>2,3</sup>, 吉川 彰<sup>2,5</sup>, 伏見 賢一<sup>6</sup>, 折戸 玲子<sup>6</sup>

Department of Mat. Sci., Graduate School of Eng., Tohoku Univ.<sup>1</sup>, IMR, Tohoku Univ.<sup>2</sup>,

NICHe, Tohoku Univ.<sup>3</sup>, Institute for Laser Eng., Osaka Univ.<sup>4</sup>, C&A Corporation<sup>5</sup>,

Department of Sci. and Tec., Tokushima Univ.<sup>6</sup>

○Yusuke Urano<sup>1,2</sup>, Shunsuke Kurosawa<sup>2,3,4</sup>, Akihiro Yamaji<sup>2,3</sup>, Akira Yoshikawa<sup>2,5</sup>,

Kenichi Fushimi<sup>6</sup>, Reiko Orito<sup>6</sup>

E-mail: urano.yusuke.s1@dc.tohoku.ac.jp

宇宙暗黒物質 (DM) の最有力候補として、質量 GeV~TeV で重力相互作用と弱い相互作用をする粒子 WIMP(s) (Weakly Interacting Massive Particles) が考えられている[1]。WIMP は、標的核との弾性散乱による核反跳エネルギーを測定することで検出するが、その衝突頻度は非常に稀であり、長期間の測定が必要である。そのため DM 探索では、高い発光量に加え、化学的に安定なシンチレータ材料が求められる。 $\text{Cs}_3\text{Cu}_2\text{I}_5$  (CCI) 結晶が、40,000 光子/MeV 以上の高い発光量をもち、潮解性をほとんど示さないことが報告されている[2]。そこで我々は CCI に着目し、様々な質量の DM に対する感度向上を目指し、CCI に Li を添加した  $\text{Cs}_3(\text{Li}, \text{Cu})_2\text{I}_5$  (CCIL) の結晶育成を試みた。

垂直ブリッジマン・ストックバーガー法により CCIL の単結晶を育成した。得られた結晶の相を D8 DISCOVER (Bruker 社) を用いて、粉末 X 線回折 (XRD) で結晶構造解析を行った。また、発光および励起スペクトルなどのフォトルミネッセンス測定を、分光蛍光光度計 (FP-8300, JASCO 社) を用いて実施した。さらに  $^{137}\text{Cs}$  線源と Si-APD (S8664-1010, 浜松ホトニクス社)、光電子増倍管 (H11934-300, 浜松ホトニクス社) とマルチチャンネルアナライザ (MCA MCA8000D, AMPTEK 社) を用いて、ガンマ線に対する発光量とシンチレーション蛍光寿命をそれぞれ見積った。

得られた CCIL 結晶を Fig.1 に示す。CCIL 結晶は透明でオレンジ色をしており、X 線回折パターンデータにより単相であることを確認した。Li を含まない CCI [2] と比較して、Li の添加によって発光波長は変化しなかったが、励起波長は 360 nm から 334 nm にブルーシフトしており、ストークスシフトが広がっていることを確認した。本講演では、CCIL の結晶育成の様子、およびその発光特性、シンチレーション特性について報告する。

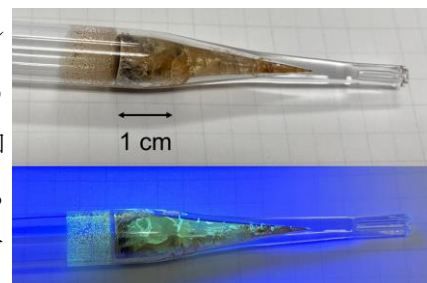


Fig.1 得られた CCIL 結晶(上)  
UV ランプでの発光の様子(下)

References [1] K. Fushimi *et al.*, J Phys. Conf. Ser., 2156, 012045, 2021.

[2] L. Stand *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 991, 164963, 2021.



## 大粒子原子核乾板の解析手法の開発

### Development of Analytical Methods for Large-Grained Nuclear Emulsion

名代理<sup>1</sup>, <sup>○</sup>(M2)志水 凱<sup>1</sup>, 北川 暢子<sup>1</sup>, 森島 邦博<sup>1</sup>, (M1)西垣 豪人<sup>1</sup>

Nagoya Univ.<sup>1</sup>, <sup>○</sup>Kai Shimizu<sup>1</sup>, Nobuko Kitagawa<sup>1</sup>, Kunihiro Morishima<sup>1</sup>, Taketo Nishigaki<sup>1</sup>

E-mail: shimizu.kai.r0@s.mail.nagoya-u.ac.jp

#### 1. 序論

原子核乾板は、素粒子をサブミクロンの精度で観測することが可能な検出器である。現在実験に使用している原子核乾板は通常、臭化銀粒子径 200nm の粒子を使用している。本研究では、より感度の高い原子核乾板実現のため、臭化銀粒子径 300nm 以上の大粒子を用いた原子核乾板の実験への適用のため、その解析手法を開発する。大粒子を用いた原子核乾板では 200nm の粒子を用いた乾板と比較して現像後の粒子サイズが大きいために読み取りが困難になるという課題がある。これを解決する目的で、粒子サイズの制御および超高速自動飛跡読取装置 HTS による性能の評価を行った。

#### 2. 実験方法

本研究では、まず 200nm と 300nm 粒子を用いた乾板の比較を行った。

その結果を踏まえて、300nm 粒子を用いた乾板が持つ感度が高いという特性を保持すること。また、HTS への最適化を目指して現像後の粒子サイズを 200nm 粒子の乾板と同程度にすることを目的として、300nm 粒子乾板の現像手法の変更を行った。

現像手法の変更として現像液に浸す時間のみの変更と現像液の温度と浸す時間の変更を行った。

#### 3. 結果と考察

300nm 乾板の現像時間を変更したところ、目視による感度評価(GD)と読み取り装置による感度評価(PH)は Fig.1 のようになった。GD, PH はともに数値が大きいくほど感度が高いことを示す。

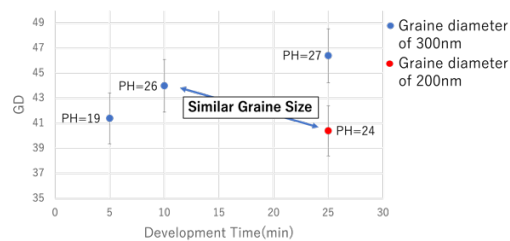


Fig1. The sensitivity change of a 300nm particle nuclear emulsion due to variations in development time and its comparison with a 200nm particle nuclear emulsion.

Fig1 より、300nm 粒子乾板は現像時間を変更した場合でも、粒子サイズを低減しながら高い感度を維持している。また、低温での現像でも粒子サイズの低減を確認している。

#### 4. 結論

本実験では、現像時間を変更した場合でも 200nm 粒子を用いた原子核乾板を比較して、300nm 粒子乾板では、高い感度を保持していることを確認した。

今後は、低温現像での読み取り評価と、読み取り装置への最適化を進めていく。



## ガラスキャピラリーを用いたイオンマイクロビームの 超微粒子原子核乾板によるビームプロファイルの精密測定

Precise measurement of ion microbeam profiles produced by glass capillary optics  
using super-fine-grained nuclear emulsion

東邦大理<sup>1</sup>, 神奈川大理<sup>2</sup>, 理研<sup>3</sup>, 宮崎 晴吉<sup>1</sup>, 白石 卓也<sup>2</sup>, 池田 時浩<sup>3</sup>, 中 竜大<sup>1</sup>,  
佐伯 加奈<sup>1</sup>, ダウディ 由莉香<sup>1</sup>, 鈴木 大貴<sup>1</sup>, 小林 知洋<sup>3</sup>, 稲吉 琴子<sup>1</sup>, 金 衛国<sup>1</sup>

Toho Univ.<sup>1</sup>, Kanagawa Univ.<sup>2</sup>, RIKEN<sup>3</sup>, H. Miyazaki<sup>1</sup>, T. Shiraishi<sup>1</sup>, T. Ikeda<sup>3</sup>, T. Naka<sup>1</sup>,

K. Saeki<sup>1</sup>, Y.C. Dowdy<sup>1</sup>, H. Suzuki<sup>1</sup>, T. Kobayashi<sup>3</sup>, K. Inayoshi<sup>1</sup> and W.-G. Jin<sup>1</sup>

E-mail: 6422015m@st.toho-u.jp

イオンマイクロビームの生成方法の一つとして、テーパー型ガラスキャピラリー（ガラス細管）光学系が知られている[1]。数 MeV のイオンビームをキャピラリーに通過させれば、マイクロビームとして出射され、ミクロンオーダーの標的への選択的照射が可能になる。さらにキャピラリーのビーム出口のプラスチック製の薄いフタによって、大気中・液体中へのビーム取り出しも可能で、医療、工学分野などで応用が期待されている[2]。用途に応じ、そのビーム拡がりやエネルギー損失を事前に評価する必要があるが、それらはキャピラリーの出口径や、出口と標的の間の距離（照射距離  $L$ ）に依存する。さらにはキャピラリー内壁表面での小角散乱（ラザフォード散乱）によるビーム拡がりの悪化や、出口付近のガラス壁を貫通してしまいエネルギー損失が大きいイオンの存在など、ビームプロファイルの正確な予測は難しかった。そこで、我々はサブミクロン精度の高い空間分解能をもつ3次元飛跡検出器である超微粒子原子核乾板（以下 NIT : Nano Imaging Tracker）を用いた実測による評価方法を提案している。

原子核乾板は、結晶 1 粒 1 粒が荷電粒子センサーとして振る舞うことで飛跡を可視化するが、NIT はゼラチン媒質中に直径 70 nm のサイズの AgBr:I 結晶を高密度（1000 個/ $\mu\text{m}^3$ ）に分散させることで、より高い空間分解能を実現している[3]。この個別のイオンの位置、方向、角度、そしてエネルギーの高精度測定と、high rate 型の従来の検出器による測定を相補的に組み合わせることは、マイクロビームの正確な照射の要となる。

実際のプロファイル測定は理化学研究所のペレトロン加速器施設にて行われた。最高 3.4 MeV の proton ビームをキャピラリー（出口径 50  $\mu\text{m}$ 、フタ厚 30  $\mu\text{m}$ ）にてマイクロビーム化し、大気中の NIT サンプルに照射した。測定では、大気中の多重散乱によるビーム拡

がり及びイオンのエネルギースペクトルの照射距離（ $L = 3 \text{ mm}$ , 10 mm）に対する依存性も調べた。解析は東邦大学で行われており、光学顕微鏡自動撮像装置と3次元トラッキングアルゴリズムを用いて[4]、飛跡の始点終点の座標を取得することによって、NIT への入射角度や方向、飛跡長を得ることができる。

Fig.1 は NIT に記録された飛跡の光学像である。この飛跡一つ一つが角度や方向情報を持っている。 $L$  が大きくなるほど、大きなビーム拡がりかつ入射イオン数の減少が予想される。講演では詳細について報告する。

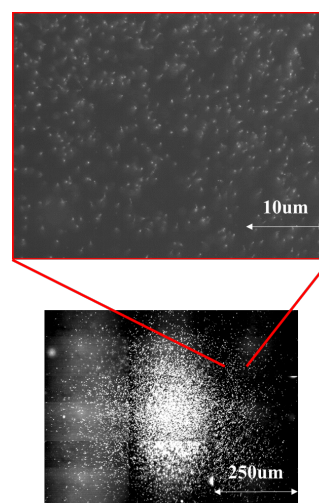


Fig.1 Visualization of a microbeam spot from a proton beam accelerated by 1.6 MeV recorded in an NIT sample at  $L = 3 \text{ mm}$  (top), a typical ion track in the spot (bottom).

### [参考文献]

- [1] T. Ikeda, Quantum Beam Sci.4, 22 (2020).
- [2] T. Ikeda *et al.*, Nucl. Inst. Meth. B 470, (2020) 42.
- [3] T. Asada *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2017, (2017) 063H01.
- [4] T. Shiraishi *et al.*, Phys. Rev. C 107, (2023) 014608.

# GOS:Tb を用いた高感度光ファイバ型放射線モニタ

## High-sensitivity fiber optic radiation monitor using GOS:Tb

日立研開<sup>1</sup>, 日立大産<sup>2</sup> ◯畠山 修一<sup>1</sup>, 上野 雄一郎<sup>1</sup>,

小泉 湧希<sup>2</sup>, 佐々木 敬介<sup>2</sup>, 渋谷 徹<sup>2</sup>

Hitachi, Ltd. R&D Group<sup>1</sup>, Hitachi, Ltd. Omika Works<sup>2</sup>

◯Shuichi Hatakeyama<sup>1</sup>, Yuichiro Ueno<sup>1</sup>, Yuki Koizumi<sup>2</sup>, Keisuke Sasaki<sup>2</sup>, Tooru Shibutani<sup>2</sup>

E-mail: shuichi.hatakeyama.tb@hitachi.com

### 1. 背景と目的

原子力発電プラントの通常運転時及び事故時の原子炉建屋(R/B)内線量率監視に向け、高感度光ファイバ型放射線モニタを開発中である<sup>1)</sup>。光ファイバ型は耐環境性(温度、放射線、湿度)及び耐電気ノイズ性に優れ、遠隔動作確認可能な利点を有する。これまでに GTO:Tb を検知部に適用することで、実機に適用可能な感度を有することを確認している。本研究では製品化時のコスト低減に向け、医療用 CT 装置に広く適用されている高密度(7.3 g/cm<sup>3</sup>)かつ長減衰時定数(>700 us)である GOS:Tb を検知部に適用した高感度光ファイバ型放射線モニタを試作し検出特性を評価した。目標値は実機に適用可能とするため、計測範囲 1.0×10<sup>-4</sup> ~ 1.0 mGy/h における線量率線形性の相対レスポンス±30%以内である<sup>2)</sup>。

### 2. 光ファイバ型放射線モニタの動作原理

シンチレータを用いた従来測定法と単一光子測定法の比較概略図を図 1 に示す。単一光子測定法では、放射線入射により生成された無数の光子を確率的に減衰させ、減衰時定数のテールに沿って生成される単一光子を計数するため、従来は適用困難であった減衰時定数の長いシンチレータを適用することで単一光子信号の生成確率を増加でき、感度を向上可能である。

### 3. 評価結果

試作モニタの <sup>137</sup>Cs 線源に対する線量率線形性測定結果を図 2 に示す。R/B 内への適用を想定し、各計数値は測定結果にファイバ長 300 m における光減衰率(0.5)を乗じた値である。計測範囲 1.0×10<sup>-4</sup> ~ 1.0 mGy/h における線量率線形性の相対レスポンスは、目標値(±30%以内)を満たす±12.8%以内となり、実機に適用可能な見通しを得た。

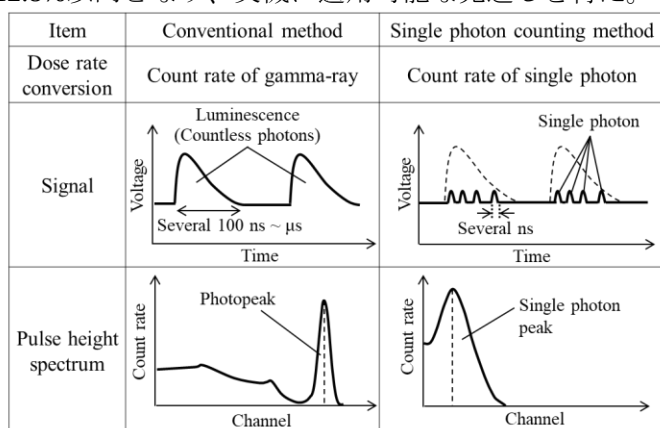


Fig. 1 Schematic diagram of a conventional and single photon counting method.

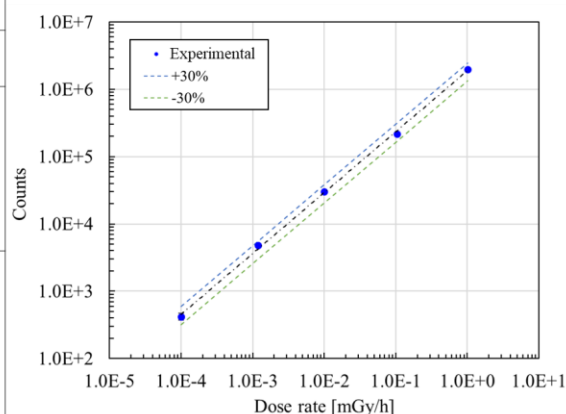


Fig. 2 Dose rate linearity of a prototype monitor.

### 参考文献

- 1) 畠山他 10 名, 「単一光子測定法を用いた高感度光ファイバ型放射線モニタ」, 応用物理学会放射線分科会誌『放射線』, 応用物理学会放射線分科会, Vol. 46, No. 4, 2021.
- 2) IEC 60532:2010, Radiation protection instrumentation - Installed dose rate meters, warning assemblies and monitors - X and gamma radiation of energy between 50 keV and 7 MeV.

# 宇宙太陽電池放射線劣化予測モデル変位損傷量法を応用した CIGS 太陽電池型線量計の放射線耐性の解明

Estimation of Radiation Tolerance of CIGS Solar Cell Dosimeters by Applying the Displacement  
Damage Dose Method of Radiation Degradation Prediction Model for Space Solar Cell

理研<sup>1</sup>, 産総研<sup>2</sup>, 三条市大<sup>3</sup>, 量研<sup>4</sup>, 京大<sup>5</sup>, 東北大<sup>6</sup>

○奥野泰希<sup>1</sup>, 上川由紀子<sup>2</sup>, 今泉充<sup>3</sup>, 牧野高紘<sup>4</sup>, 佐藤信浩<sup>5</sup>, 陣場優貴<sup>6</sup>, 笠田竜太<sup>6</sup>

RIKEN<sup>1</sup>, AIST<sup>2</sup>, Sanjo City Univ.<sup>3</sup>, QST<sup>4</sup>, Kyoto Univ.<sup>5</sup>, Tohoku Univ.<sup>6</sup>

○Yasuki Okuno<sup>1</sup>, Yukiko Kamikawa<sup>2</sup>, Mitsuru Imaizumi<sup>3</sup>, Takahiro Makino<sup>4</sup>,

Nobuhiro Sato<sup>5</sup>, Yuki Jimba<sup>6</sup>, Ryuta Kasada<sup>6</sup>

\*E-mail : yasuki.okuno@riken.jp

東京電力福島第一原子力発電所の廃炉では、燃料格納容器内部の線量分布を測定するための検出器を開発する必要があり、検出器の放射線耐性として Co-60  $\gamma$  線 1 MGy の指標が設定されている。太陽電池素子を利用した放射線検出は、内蔵電位駆動により外部電圧を印加することなく信号となる放射線誘起電流を出力する自立駆動形線量計として開発されている[1]。CIGS 太陽電池は、非常に高い放射線耐性を有していることから、高線量環境下で長時間安定した放射線検出ができることが期待される。しかし、CIGS 太陽電池を応用した  $\gamma$  線線量計において 1 F 廃炉用検出器の放射線耐性指標に対する適合性については明らかではない。また、Co-60  $\gamma$  線 1 MGy という指標は、1 ヶ月程度の照射が求められることから開発サイクルを妨げる要因の一つである。そのため、本研究では、宇宙用太陽電池で構築されてきた放射線劣化予測モデルである変位損傷線量(DDD)法を応用した新しい太陽電池型線量計の劣化予測方法を構築することで、短時間の電子線照射による劣化挙動データから CIGS 太陽電池型線量計の Co-60  $\gamma$  線環境中での放射線耐性に関して明らかにする。

CIGS 太陽電池は、5mm×10mm の面積に調整し、厚み 1.25 mm のアルミニウム製のケースに封入した。ケースには導入端子を設置しており、同軸ケーブルを用いて CIGS 太陽電池とソース・メジャー・ユニット(SMU, Keysight 社製 B2901A)に接続した。高崎量子応用研究所の 1 号電子線加速器を用いて、1 MeV 電子線を CIGS 太陽電池に照射した。照射中、SMU を用いて電子線誘起電流を計測した。ケースは、水冷台に設置し、照射中の表面温度は 25℃であった。

図 1 に、電子線照射中の CIGS 太陽電池の電子線誘起電流のフルエンス依存性を示す。測定中の放電などによるノイズが見られるが、 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  まではほとんど電流の劣化は観測されなかった。DDD 法では、原子のはじき出しに消費されるエネルギー量である DDD と素子劣化量の関係から様々な放射線環境中での劣化挙動を見積もることができる。およそ  $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  の 1MeV 電子線は、CIGS に対して Co-60  $\gamma$  線 1 MGy で蓄積される DDD と等価であることが計算により得られた。これより、CIGS 太陽電池型線量計は、1 F に適応するための指標を満たしていることが示唆された。

謝辞：本研究は、英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業「高放射線耐性の低照度用太陽電池を利用した放射線場マッピング観測システム開発」として行われた。

参考文献[1] : [1] Y. Okuno, N. Okubo, and M. Imaizumi, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **56**, 851–858 (2019).

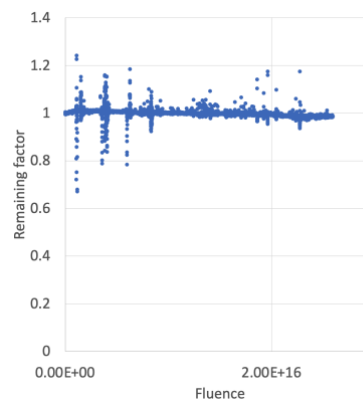


Fig.1 Electron fluence dependence of electron beam induced current in CIGS solar cell type dosimeter.

# コンバータ膜を用いた太陽電池型中性子線量計の 放射線挙動シミュレーション

## Radiation Transport Simulation of Neutron Dosimeter using Solar Cell with Converter Films

木更津高専<sup>1</sup>, 理研<sup>2</sup>

○栗本祐司<sup>1</sup>, 岡本 保<sup>1</sup>, 岩崎 晶斗<sup>1</sup>, 小林 歩人<sup>1</sup>, 奥野 泰希<sup>2</sup>, 小林 知洋<sup>2</sup>

NIT, Kisarazu Coll.<sup>1</sup>, RIKEN<sup>2</sup>

○Yuji Kurimoto<sup>1</sup>, Tamotsu Okamoto<sup>1</sup>, Akito Iwasaki<sup>1</sup>, Ayuto Kobayashi<sup>1</sup>,

Yasuki Okuno<sup>2</sup>, Tomohiro Kobayashi<sup>2</sup>

\*E-mail : kurimoto@e.kisarazu.ac.jp

我々はアクリルバインダーを用いたスクリーン印刷により中性子コンバータ膜を作製し、太陽電池と組み合わせ中性子線量計として使用できることを明らかにしてきた[1]。

線量計構造を Fig.1 に示す。コンバータ膜と中性子の核反応により放出された荷電粒子が太陽電池部の光電変換層内で正孔電子対を発生させ、太陽電池短絡電流を生じさせる。太陽電池に InGaP セル (厚さ 1  $\mu\text{m}$ )、コンバータ膜に  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  膜 (20  $\mu\text{m}$  厚) を用いた線量計 (以後 Gd 線量計)、および同太陽電池と  $\text{B}_4\text{C}$  膜 (20  $\mu\text{m}$ ) コンバータ膜を使用した線量計 (以後 B 線量計) の 2 種類を試作した。100meV 以下の中性子と Gd の核反応断面積は、同中性子と B の核反応断面積に比べて 10 倍程度大きいので、Gd 線量計の感度は B 線量計のそれに比べて大きくなることが予測された。

理化学研究所 RANS 装置 (RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source) を用いて上記 2 種類の線量計に 25meV の中性子照射を行った。予測に反して Gd 線量計の感度は B 線量計のそれに比べて数係数 6.5 程度小さかった。

モンテカルロ計算コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) による解析を行った。実験を再現したモデルを作製し太陽電池でのエネルギー吸収量を計算した。計算結果は定性的には実験結果を再現した。数係数は 9.5 であり実験と同オーダーであった。

キャリアの収集を調べるために、太陽電池厚みを 20  $\mu\text{m}$  にして計算を行った。Fig.2 は線量計の断面において、どこでエネルギー吸収が行われたかを示す。Gd 線量計では、荷電粒子は太陽電池部全域で吸収がなされ、多くは線量計を貫通し線量計の出力に寄与していないのに対し、B 線量計ではコンバータ膜接合面 4  $\mu\text{m}$  以内ですべて吸収がなされていた。上記違いは、 $\text{Gd}_2\text{O}_3$  で発生した荷電粒子が主に内部転換電子であり、 $\text{B}_4\text{C}$  で発生したそれは主に  $\alpha$  粒子および  ${}^7\text{Li}$  であること、前者の太陽電池部での飛程は後者のそれに比べて圧倒的に長いことによる。上記計算結果は、Gd 線量計で観測された予期しない低感度を説明すると思料する。

**謝辞:** 本研究は、文科省「原子力システム研究開発事業」の一部として実施した。

参考文献[1] : 岡本他, 第 70 回春季応物, 16p-D311-8

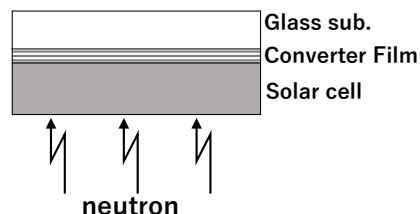


Fig.1 Structure of solar cell neutron dosimeter with converter film.

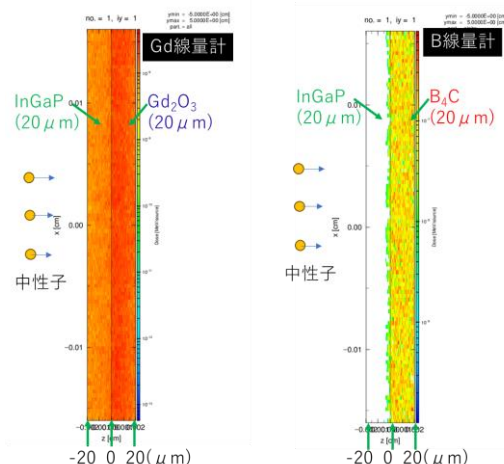


Fig.2 Deposit energy distributions of the charged particles generated by neutron irradiation.



## 高ドーズ中性子照射場における BGaN 検出器の放射線検出特性評価 Radiation detection characteristics for BGaN detectors under high-dose neutron irradiation

<sup>1</sup> 静大院工, <sup>2</sup> 名大院工, <sup>3</sup> 高エネ研, <sup>4</sup> 京大複合研, <sup>5</sup> 量研, <sup>6</sup> 名大 IMaSS, <sup>7</sup> 静大電研

櫻井辰大<sup>1</sup>, 工藤涼兵<sup>1</sup>, 川崎晟也<sup>2</sup>, 岸下徹一<sup>3</sup>, 櫻井良憲<sup>4</sup>, 八島浩<sup>4</sup>,

牧野高紘<sup>5</sup>, 大島武<sup>5</sup>, 本田善央<sup>6</sup>, 天野浩<sup>6</sup>, 井上翼<sup>1</sup>, 青木徹<sup>7</sup>, 中野貴之<sup>1,7</sup>

Shizuoka Univ.<sup>1</sup>, Nagoya Univ.<sup>2</sup>, KEK<sup>3</sup>, KURNS.<sup>4</sup>,

QST<sup>5</sup>, IMaSS Nagoya Univ.<sup>6</sup>, R.I.E. Shizuoka Univ.<sup>7</sup>

○T. Sakurai<sup>1</sup>, R. Kudo<sup>1</sup>, S. Kawasaki<sup>2</sup>, T. Kishishita<sup>3</sup>, Y. Sakurai<sup>4</sup>, H. Yashima<sup>4</sup>, T. Makino<sup>5</sup>,

T. Ohshima<sup>5</sup>, Y. Honda<sup>6</sup>, H. Amano<sup>6</sup>, Y. Inoue<sup>1</sup>, T. Aoki<sup>7</sup>, T. Nakano<sup>1,7</sup>

E-mail: sakurai.tatsuhito.19@shizuoka.ac.jp

【緒言】原子炉核計装において、高温かつ高放射線雰囲気下で動作する中性子検出器が重要な技術となっている。大きな中性子捕獲断面積を有する B 原子を構成元素に含む BGaN が新規中性子検出材料として提案されており[1]、ワイドギャップ半導体であることから耐熱性および耐放射線性についても優れた特性が期待されている。これまでに、GaN および BGaN 検出器の高温耐性を評価し、GaN では 450 °C、BGaN は 300 °C での動作を確認している[2]。一方、BGaN 検出器の高放射線雰囲気下における放射線検出特性について十分な評価がなされていない。そこで本研究では、BGaN 検出器を用いて高ドーズ中性子照射下における放射線検出特性評価を行った。

【実験方法】有機金属気相エピタキシー(MOVPE)法により、サファイア基板上に GaN バッファ層を堆積後、Si ドープ GaN(2.0 μm), BGaN(3.5 μm), Mg ドープ GaN(350 nm)の順で堆積し、BGaN pin ダイオードを作製した。放射線検出測定では、<sup>241</sup>Am を用いた α 線照射実験と、京都大学研究用原子炉(KUR)の重水中性子照射設備にて、熱中性子束  $5 \times 10^9 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$  の高ドーズ中性子照射実験を行った。

【結果】BGaN 検出器を用いて 2.3 MeV の α 線照射実験を行った。0 ~ -50 V の電圧印加時の α 線検出特性は、印加(逆バイアス)電圧増加に伴い、α 線検出信号の高チャネル化が確認された。印加電圧が -40 V 以下において検出ピーク位置が一定となったことから、-40V の印加電圧により、生成されたキャリアの電荷収集が一定になったことを示唆している。0 ~ -40 V の領域では十分な S/N 比が得られておらず検出カウント数も印加電圧により変化することが確認された。次に、中性子照射実験においても同様に印加電圧依存性を評価した。中性子照射時の BGaN 検出器における 2 次元エネルギースペクトルを図 1 に示す。印加(逆バイアス)電圧を増加させていくと、中性子検出信号が高チャネルにシフトしており、α 線照射実験同様の結果が得られた。-40 V 以下の領域(-40 V, -50 V)において検出カウント数が一定であり、ノイズ領域との弁別についても α 線照射実験と中性子照射実験が同様であることが確認された。この結果は、中性子照射時における即発 γ 線などによるノイズは小さく、高ドーズ中性子照射雰囲気下においても、室温環境下と同様に評価が可能であることが明らかとなった。従って、高放射線環境下における中性子検出器としての可能性を示唆する結果となった。更なる詳細な評価結果については当日の発表にて報告を行う。

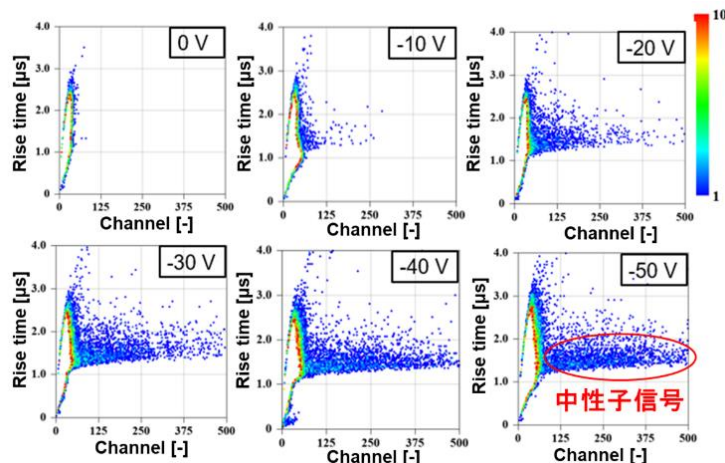


Fig.1 Number of counts during 10 minutes of neutron irradiation

参考文献 [1] T. Nakano, *et al.* JAP **130** (2021) 124501, [2] 林 他, 第 69 回応用物理学会春季学術講演会 (2022) 22a-F308-5

謝辞 本研究の一部は中部電力(株)原子力安全技術研究所共同研究、科研費補助金(16H03899、19H04394)、原子力システム研究開発事業、名古屋大学未来材料・システム研究所における共同利用・共同研究、京都大学複合原子力科学研究所共同利用研究の援助により実施された。

## 超重核実験用大面積ピクセル型半導体検出器の性能評価 II

### Evaluation of large area pixelated SSD for super heavy element experiments II

○門叶冬樹<sup>1</sup>、森本幸司<sup>2</sup>、加治大哉<sup>2</sup>、Pierre Brionnet<sup>2</sup>、武山美麗<sup>1</sup>、小杉和正<sup>3</sup>

山形大理<sup>1</sup>、理研仁科加速器研究センター<sup>2</sup>、浜松ホトニクス<sup>3</sup>

○Fuyuki Tokanai<sup>1</sup>, Kouji Morimoto<sup>2</sup>, Daiya Kaji<sup>2</sup>, Pierre Brionnet<sup>2</sup>,

Mirei Takeyama<sup>1</sup>, Kazumasa Kosugi<sup>3</sup>

Yamagata Univ.<sup>1</sup>, RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science<sup>2</sup>,

Hamamatsu Photonics K. K.<sup>3</sup>

E-mail: tokanai@sci.kj.yamagata-u.ac.jp

現在、理化学研究所では原子番号 119 番の新元素の合成を目指して、ビーム原子核  $^{51}\text{V}$  とターゲット原子核  $^{248}\text{Cm}$  との核融合反応実験が行われている[1]。生成された新元素は、気体充填型反跳分離器 (GARIS- II, III) により入射ビームや副生成粒子から分離され、焦点面に設置された Si-box と呼ばれる検出器によって収集される[1,2]。Si-box は両面シリコンストリップ検出器 (DSSD) とその側面を箱状に覆うように設置された複数の Si 半導体検出器 (SSD) で構成されている。DSSD では、打ち込まれた新元素や、その連鎖  $\alpha$  崩壊および自発核分裂事象の位置、時間、エネルギー情報が観測される。SSD では、崩壊の際に DSSD から飛び出した  $\alpha$  粒子や核分裂片といったエスケープ事象を検出し、超重核の核種同定の精度を高める役目を担っている。

我々は、新元素の核種同定の精度向上を目的に、Si-box の DSSD およびそれを取り囲む全ての SSD に、浜松ホトニクスと共同開発した新しい Si 半導体検出器を導入する。側面用の SSD (S15543-9552) は 60 mm×60 mm の有効面積を持ち、16 チャンネル (4×4) にピクセル化された電極を持つ。上下面の SSD (S15543-9553) は 120 mm×60 mm の有効面積を持ち、その電極は 32 チャンネル (8×4) にピクセル化されている。側面用と上下面の SSD は、従来ピクセル化されていなかった SSD と比較して、ピクセルサイズの位置検出能力を有し、また 1 チャンネルの静電容量が小さくなることでエネルギー分解能の向上につながり、より正確な粒子のエネルギー同定が期待できる。そこで、ピクセル型 SSD の基礎特性評価として、各ピクセルの不感層の厚さとエネルギー分解能の測定を行った (図 1)。不感層厚とエネルギー分解能の評価には、 $^{241}\text{Am}$  線源からの  $\alpha$  線を異なる 2 方向から照射し、入射角の違いによるエネルギーピークの変化を測定する方法を用いた[3,5]。本発表では、ピクセル型 SSD の各チャンネルの不感層とエネルギー分解能の測定結果、および開発の現状について報告する。

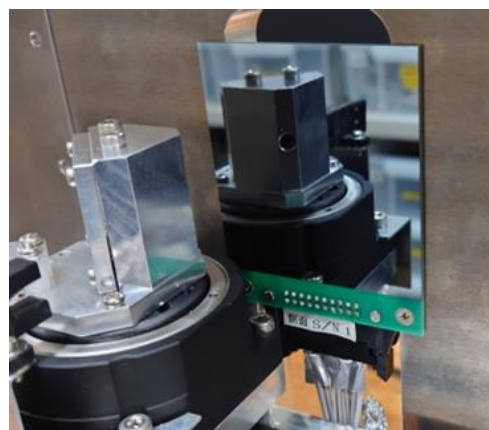


Fig.1 Photograph of the calibration system for investigating the characteristics of segmented SSD.

#### 参考文献

- [1] H. Sakai, H. Haba, K. Morimoto and N. Sakamoto, Eur. Phys. J. A 58, 238 (2022).
- [2] D. Kaji, K. Morimoto, N. Sato, A. Yoneda and K. Morita, Nucl. Instrum. Meth. B 317, 311 (2013).
- [3] H. Numakura, K. Morimoto, D. Kaji, K. Kosugi, C. Horikawa, S. Ishizawa, M. Takeyama and F. Tokanai, Jpn. J. Appl. Phys. 59, 066004 (2020).
- [4] K. Kuramoto, K. Morimoto, D. Kaji, P. Brionnet, M. Takeyama, K. Kosugi and F. Tokanai, Jpn. J. Appl. Phys. 62, 046001 (2023).

# 粒子線がん治療時のシンチレーター型リアルタイム線モニタの開発 V

## Development of scintillator-type real-time beam monitor for particle beam cancer treatment v

山形大学大学院理工<sup>1</sup>, 理研<sup>2</sup>, 山形大医<sup>3</sup>, 東北大 NiChE/金研<sup>4</sup>, 阪大レーザー研<sup>5</sup>, 山形大理<sup>6</sup>

○(M2) 高橋 貴太<sup>1</sup>, 森本 幸司<sup>2</sup>, 岩井 岳夫<sup>3</sup>, 黒澤 俊介<sup>4,5</sup>, 門叶 冬樹<sup>6</sup>

Yamagata Univ.<sup>1</sup>, RIKEN<sup>2</sup>, Yamagata Univ.<sup>3</sup>, Tohoku Univ.<sup>4</sup>, Osaka Univ.<sup>5</sup>, Yamagata Univ.<sup>6</sup>

○Kanta Takahashi<sup>1</sup>, Kouji Morimoto<sup>2</sup>, Takeo Iwai<sup>3</sup>, Shunsuke Kurosawa<sup>4,5</sup>, Fuyuki Tokanai<sup>6</sup>

E-mail: s222559m@st.yamagata-u.ac.jp

### 【緒言】

山形大学医学部東日本重粒子センターでは、2021 年から炭素線がん治療が開始され、現在、眼球を除く全ての対象疾患に対する重粒子線治療が実施されている。物質中で粒子線は、飛程終端（ブラッグピーク）でほとんどのエネルギーを付与するため、高い線量を集中的に腫瘍に照射し、正常組織には影響を及ぼさない治療が可能となる。しかし、実際には体内での線量分布、特にブラッグピーク深度は解剖学的な変化により影響を受け、狙った腫瘍以外の正常細胞に損傷を与えている可能性が指摘されている[1]。そこで、我々は生体内組織と炭素線との相互作用によって生じる $\gamma$ 線や高エネルギー陽子などの二次粒子線の飛跡追跡から、ブラッグピーク位置をリアルタイムに特定できるシステムの開発を行っている[2-4]。

### 【原理】

図 1 に開発中のシンチレーションファイバー検出器 (SFI)を示す。64 本の SF(角型 0.5mm<sup>2</sup>, BICRON BCF-N12 type)を X 層と Y 層に隙間無く組み上げ、各層のファイバーの両端を 8 本毎のグループと 8 本おきのストリップに分けてそれぞれまとめた。それらをアノード 2 本を 1ch にまとめた計 8ch のマルチアノード型光電子増倍管 (MAPMT HAMAMATSU R5900-L16) にそれぞれ接続し、その信号を波形弁別回路を通して読み出した。以上の方法により、各層の 64 本のファイバー信号を、2 台の PMT で読み出すことが可能となった。

### 【結果】

図 2 に <sup>90</sup>Sr からの  $\beta$  線を用いて行った特性試験の結果を示す。 $\beta$  線を用いて行った試験結果から SFI が放射線検出器として十分に動作していることが示された。実際の治療場では、生体内組織と粒子線との相互作用によって生じる二次粒子線(陽子・ヘリウム原子核)を、体外に設置した 2 台の SFI で検出し、その飛跡の再構成から体内に入射した粒子線の飛程をモニタリングすることを予定している。本講演では、SFI 開発の現状と新しい信号処理システムについて報告する。

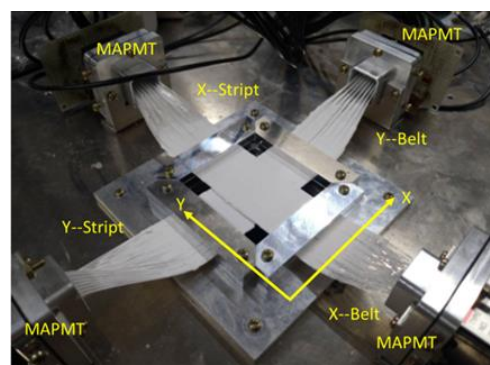


図 1: 自作した SFI の写真

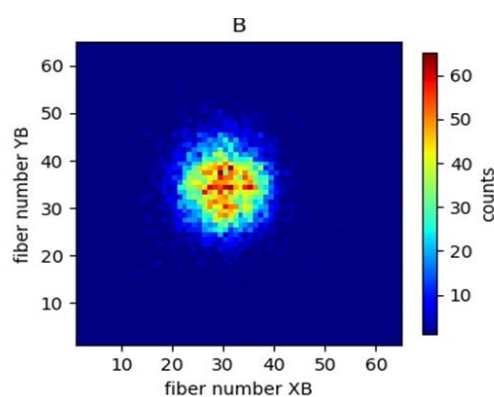


図 2: SFI で撮像した  $\beta$  線イメージ

### 参考文献

- [1] M. Durante and H. Paganetti: Rep. Prog. Phys. 79, 096702 (2016)
- [2] Iwai T. et al., JPS Conf. Proc. , 011030 (2019) 10.7566/JPSCP.24.01103.
- [3] 黒澤俊介 他 Isotope News. 2019; 763: 8-11.
- [4] 高橋貴太 他 第 83 回応物講演予稿集 2022,21p-P14-14



## PVA-I ゲルと光 CT を用いた三次元陽子線線量分布評価技術

### Technique for 3D-dose distribution measurement of a proton beam by using a PVA-I gel dosimeter and Optical CT

東北大学, CYRIC<sup>1</sup> ○ (M2) 桃北 啓佑<sup>1</sup>, 寺川 貴樹<sup>1</sup>, (M2) 佐竹 大樹<sup>1</sup>, 帆足 莉子<sup>1</sup>

Zhao Liang<sup>1</sup>, (M1) 鈴木 壮太郎<sup>1</sup>, (M1) 辻元 宏太<sup>1</sup>, (M1) 宮田 健吾<sup>1</sup>,

CYRIC, Tohoku Univ.<sup>1</sup>, °Keisuke Momokita<sup>1</sup>, Atsuki Terakawa<sup>1</sup>, Daiki Satake<sup>1</sup>, Riko Hoashi<sup>1</sup>, Zhao Liang<sup>1</sup>, Sotaro Suzuki<sup>1</sup>, Kota Tsujimoto<sup>1</sup>, Kengo Miyada<sup>1</sup>

E-mail: keisuke.momokita.q4@dc.tohoku.ac.jp

#### 緒言

現在、粒子線治療はビームスキニング照射や強度変調照射等の高精度照射技術により、腫瘍体積に一致した高線量域の形成が可能となっている。それに伴い、形成される線量分布は複雑なものとなるため、治療前の QA/QC の方法として線量分布を三次元 (3D) で連続的に評価できるゲル線量計が近年注目されている。ゲル線量計には様々な種類があるが、我々のグループではポリマーゲル線量計の 3D 線量情報の光 CT による読み出しを行っている。Figure 1 に示すようにポリマーゲルの照射領域は線量依存的に白濁し、可視光の透過により線量情報が読み出される。その結果、測定可能な線量範囲は 1 Gy 程度が限界であった。また、白濁度が増すにつれて散乱光の影響も問題となったため、我々は光 CT に適する色素系ゲル線量計の利用を検討した。よって、本研究では色素ゲルの一種である polyvinyl alcohol-iodide (PVA-I) ゲルによる陽子線線量分布を、独自開発した光 CT システムを用いて評価することを目的とする。しかしながら、色素ゲルの呈色反応には様々な依存性が複合的に影響するため、具体的には線量率依存性、線エネルギー付与 (LET) 依存性など線量評価に及ぼす影響を明らかにすることを目指す。

#### 実験と結果

本研究の PVA-I ゲル線量計は PVA-I ゲルを内径 6cm の円筒型 PET 製容器に封入したものとした。東北大学ラジオアイソトープセンター (CYRIC) の AVF サイクロトロンを使用して、ゲル線量計に 80 MeV 陽子線を照射した。また、比較のためピンポイント電離箱線量計を用いてリファレンス線量分布を取得した。照射条件としては、陽子線の拡大ブラックピーク領域において線量付与を 2–10 Gy (2Gy ステップ)、線量率を 1, 2, および 3 Gy/min として、これらを組み合わせた条件とした。照射済みのゲル線量計内に形成された線量分布は、光 CT 装置により読み出され、画像再構成された 3D 吸光度分布から評価した。現在、CYRIC の実験においてデータ取得・解析中であり、結果の詳細については学会において報告する。

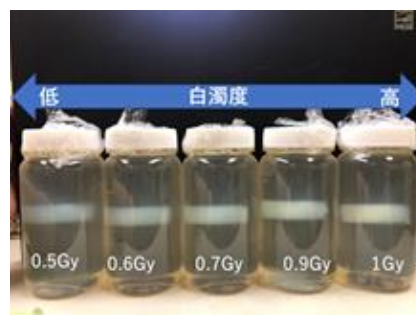


Figure 1. Polymer gel samples irradiated with an 80-MeV proton beam.

## BNCT 治療評価のための小角散乱コンプトンガンマ線の 選択的検出と非同時計数法

### Selective measurement of small-angle scattering Compton gamma rays and application of anticoincidence method for BNCT

阪公大院 ○宮丸 広幸, (M2) Nguyen Quang Kien, 小嶋 崇夫

Osaka Metropolitan Univ., °Hiroyuki Miyamaru, Nguyen Quang Kien, Takao Kojima

E-mail: miyamaru@omu.ac.jp

中性子を用いたがん治療法であるホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) の治療評価のために、治療中の患部から放出される 478 keV ガンマ線 (ターゲットガンマ線) をリアルタイムに高感度に測定するための散乱線検出器と非同時計数法を組み合わせた計測システムを開発している。シミュレーション計算による散乱線検出器の配置の最適化の検討、臭化セリウム (CeBr<sub>3</sub>) シンチレーション検出器を主検出器とし、タリウム活性ヨウ化セシウム (CsI(Tl)) 結晶を用いて製作した散乱線検出器とを組み合わせた非同時計数回路の実験等を報告する。

#### ○システム概要とシミュレーション計算による配置検討

BNCT では人体に熱外中性子を照射するため、2.2 MeV の水素の中性子捕獲ガンマ線が患部周辺から多く発生しこれが主たるバックグラウンドとなる。このため測定下限はターゲットガンマ線の光電ピークと捕獲ガンマ線のコンプトン連続部との計数比で決まる。本システムでは検出効率の高い主検出器の斜め後方にのみ散乱線検出器を配置し、2つの検出器による非同時計数法を適用することで、ターゲットガンマ線の光電ピーク付近のコンプトン連続部の計数を抑制することが本システムの特徴である。シミュレーション計算では特定散乱角のみを高効率で検出する配置が望ましいが、主検出器が円筒型の形状を有することや、散乱線検出器の製作上の困難から板状のものを主検出器の結晶位置の側面後方に4面配置することとして、シミュレーション計算によりその効果を確認した。

#### ○散乱線検出器の製作と非同時計数法

散乱線として検出対象とするガンマ線は 20 度の小角である故、これを有効に計測するため長さ 10 cm, 1 cm 角の CsI(Tl)結晶を用いて散乱線検出器を製作した。実験によりエネルギー分解能は 11 % (at 511 keV)であることが分かった。このような矩形のシンチレーション検出器を3本束ね、1枚の平板の散乱線検出器として非同時計数法に用いた。アナログモジュールを主体として2つの検出器の非同時計数回路を構築し、ガンマ線標準線源等を用いて特性評価を行った。主検出器と散乱線検出器との同時検出事象を示す時間スペクトルではおおよそ 0.9 μs の時間幅のピーク信号が得られた。非同時計数法を適用したエネルギースペクトルの総計数値の比較では、散乱線検出器の検出効率が不十分なことから、明確な改善は得られなかった。散乱線検出器の有感体積の増加などの改善が必要であることが分かった。

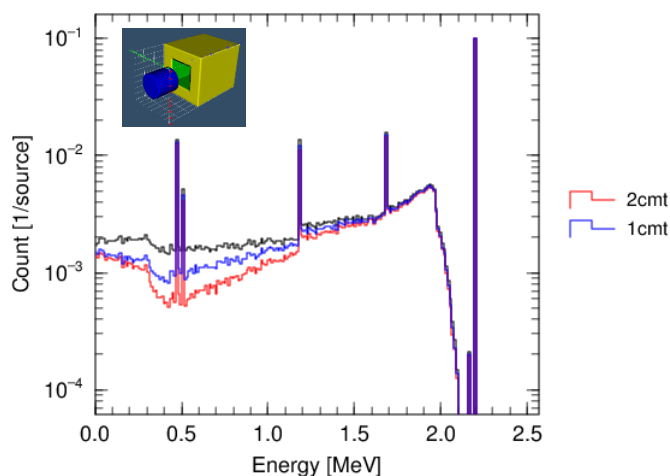


図 散乱線検出器厚みの違いによるコンプトン連続部低減効果の計算例

## 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 II

### Measurement of Scintillation Decay Time for Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-nanoparticle-loaded PLS II

KEK 物構研<sup>1</sup>, 東京インキ㈱<sup>2</sup> ○岸本 俊二<sup>1</sup>, 戸田 明宏<sup>2</sup>

KEK IMSS<sup>1</sup>, Tokyo Printing Ink<sup>2</sup> ○Shunji Kishimoto<sup>1</sup>, Akehiro Toda<sup>2</sup>

E-mail: syunji.kishimoto@kek.jp

有機物で表面修飾した酸化ビスマス (Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ナノ粒子を高濃度充填したプラスチックシンチレータ (PLS) を開発し、放射光の高エネルギーX線パルスを使ってシンチレーション光の減衰時間を測定してきた。2022 年秋の発表では、Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ナノ粒子を 20 wt% 充填したプラスチックシンチレータ (20wt% Bi-PLS) (蛍光体: b-PBD 1 mol%。ポリビニルトルエン・ベース) の時間スペクトルを示した。そのピーク立上り部分が非対称となる場合が見られ、それについてシンチレーション光受光に用いた光電子増倍管 (PMT, 浜松ホトニクス製 R9880U-110) の PLS からの距離 D、PLS 発光部の開口制限 (1mm 径穴あきアルミ箔カバー有・無し) との関係について議論した。正確な減衰時定数を求めるのに必要な条件は、発光測定の時間間隔のランダム性を保証するために X 線 1 パルスに対してシンチレーション光を複数でなく 1 個 (以下) を検出することである点に注目した。今回は、ペルチェ冷却 MPPC (浜松ホトニクス製 C13852-3050GA) を光検出器に採用して X 線 1 パルスあたりのシンチレーション光の数 (N) を区別した波高分布測定の結果を示す。この測定によって減衰時間測定に必要な条件を絞ることができた。実験は KEK 放射光実験施設 (PF) BL-14A で行った。入射 X 線エネルギー 67.41keV、0.8 mm 径 Ta 製ピンホールを通した X 線ビームを前回と同じ SUS 製真空容器内の 2 個の Bi-PLS (20, 0wt%。φ8, t3mm) に入射、電荷感应型前置増幅器 (Canberra 2005) を使うシステムによりシンチレーション光の波高分布を測定した。D=88 mm, アルミ箔カバー無しでは、20wt% Bi-PLS の 0wt% Bi-PLS に対する N=2, 3 のピーク強度比 (N=1 のピーク強度で規格化) は 1.34, 1.62 となった (Fig. 1)。アルミ箔でカバーした場合は 1.14, 1.18 となり同程度に近づいた (Fig. 2)。我々の測定系では発光部面積の制限が正確な発光減衰時間測定に重要であることを示す結果だった。その他、D=50 mm と 88 mm を比較した結果や、時間スペクトルのピーク形状からシンチレーション光 1 個の信号を検出するため十分な PMT 増幅率を確保する必要性、散乱 X 線の影響の確認、条件を整えた減衰時間測定の結果を発表する予定である。

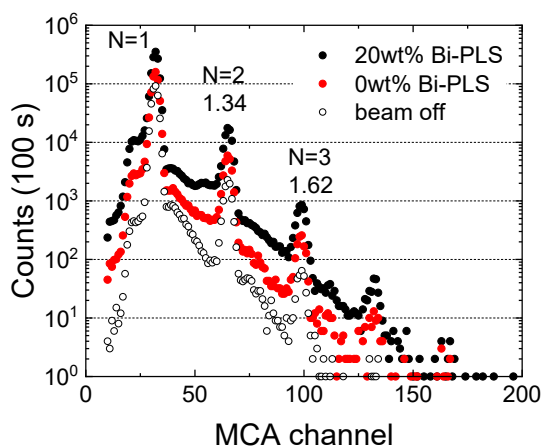


Fig. 1 Pulse-height spectrum of light emission from 20wt% and 0wt% Bi-PLSs without Al cover.

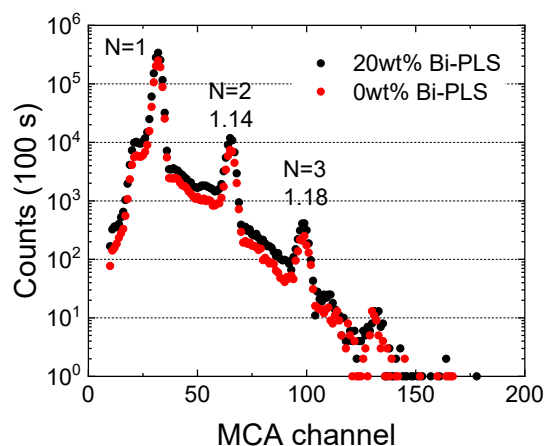


Fig. 2 Pulse-height spectrum of light emission from 20wt% and 0wt% Bi-PLSs with Al cover.

# 検出器応答パターンを利用した新しいガンマ線イメージング技術による 多核種イメージングの基礎検討

## Fundamental study of Multi-Isotope Imaging Using a Novel Gamma Ray Imaging Technique Based on Detector Response Patterns

原子力機構<sup>1</sup>, 東北大工<sup>2</sup> ○(D)北山 佳治<sup>1,2</sup>, 野上 光博<sup>2</sup>, 人見 啓太郎<sup>2</sup>

JAEA<sup>1</sup>, Tohoku Univ.<sup>2</sup>, Yoshiharu Kitayama<sup>1</sup>, Mitsuhiro Nogami<sup>2</sup>, Keitaro Hitomi<sup>2</sup>

E-mail: kitayama.yoshiharu.q1@dc.tohoku.ac.jp

我々は、空間に無作為に配置された複数の検出器応答パターンを利用した新しいガンマ線イメージング技術である三次元影法を開発している。既に 662 keV のガンマ線に対して約 10 度の角度分解能で全方向ガンマイメージングが可能だと実験で示された。本研究では同一ジオメトリのイメージャーを用いて異なるエネルギーに対する本手法の特性をシミュレーションにより調査した。

図 1 にシミュレーションに使用したイメージャー (Coded Cube Camera for Gamma-ray: C3G) の概要を示す。8 個の GAGG (Ce) シンチレータキューブ、18 個の鉛キューブ及び 1 個の空乏キューブで構成されており、各キューブの一辺の長さは 10 mm である。C3G から 3 m 離れた位置に置かれた 10 MBq の <sup>99m</sup>Tc と <sup>18</sup>F 点線源を 10 分間測定する状況を仮定し 141 keV 及び 511 keV の全方向ガンマ線イメージングシミュレーションを行った。

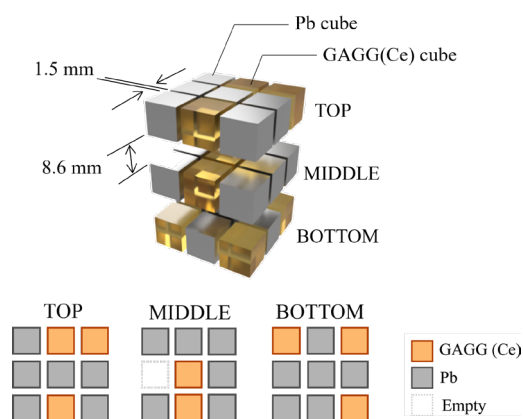


Fig 1. Over view of C3G

結果を図 2 に示す。矢印の先が真の線源位置である。141 keV と 511 keV で異なるカラースケールで描写した。それぞれ適切な位置に結像が見られるが、141 keV のイメージング精度は 511 keV と比較して悪い。これは 511 keV の散乱成分が 141 keV の光電ピークに被さる影響だと考えられる。今後は、精度向上のため、検出器ジオメトリや再構成アルゴリズムの最適化を図る。

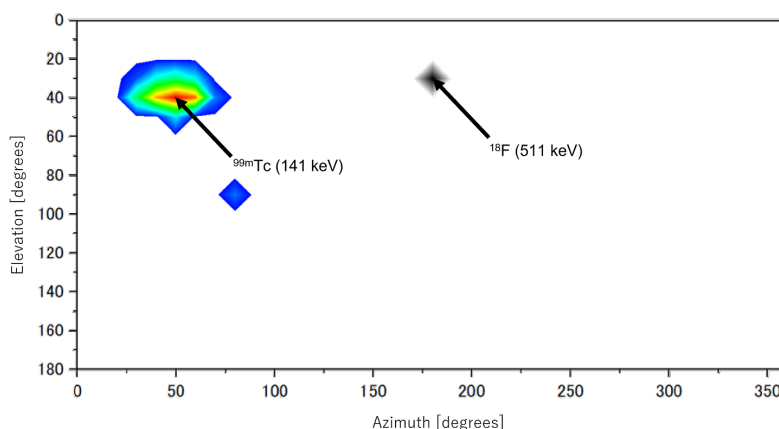


Fig 2. Result of image reconstruction.