

2 Ionizing Radiation Poster presentation : 2 Ionizing Radiation (Poster)
--

[9p-P08-1~26] 2 Ionizing Radiation (Poster)

[9p-P08-1]

Growth and fundamental property characterization of Ga-doped CdTe single crystals by THM for radiation detector applications

○Hayato Tsuru¹, Akira Nagaoka¹, Isshin Sumiyoshi², Yoshitaro Nose², Kenji Yoshino¹
(1.Miyazaki Univ., 2.kyoto Univ.)

[9p-P08-2]

Impact of Substrate Off-Angle on Device Performance for BGaN Neutron Detectors

○Ryota Saito¹, Ryohei Kudo¹, Tatsuhiro Sakurai¹, Eito Kokubo², Genichiro Wakabayashi³, Yoshio Honda⁴, Hiroshi Amano⁴, Yoku Inoue¹, Toru Aoki⁵, Takayuki Nakano^{1,5} (1.Shizuoka Univ., 2.Nagoya Univ., 3.Kindai Univ., 4.IMaSS Nagoya Univ., 5.R.I.E. Shizuoka Univ.)

[9p-P08-3]

Study on neutron response in transparent composite scintillators

○(D)Yuya Oshima¹, Yutaro Saito¹, Kenichi Watanabe¹ (1.Kyushu Univ.)

[9p-P08-4]

Synthesis and Characterization of Rare-Earth Co-Doped YF₃Nanophosphors Prepared by the Solvothermal Method

○Naruki Yoshimura¹, Yamaguchi Kotaro¹, Kominami Hiroko¹, Hara Kazuhiko^{1,2}, Takagi Ktsuyuki², Aoki Toru^{1,2,3} (1.Grad. School of Integrated S&T, Shizuoka Univ., 2.Res. Inst. Electron., Shizuoka Univ., 3.Faculty of Informatics, Shizuoka Univ.)

[9p-P08-5]

Study on Enhancing the Luminescence Intensity of Near-infrared Nd-doped Lu₂O₃ Scintillator

○Satoshi Ishizawa¹, Shunsuke Kurosawa^{1,2,3}, Akihiro Yamaji^{1,2}, Akira Yoshikawa^{1,2,3,4} (1.IMR, Tohoku Univ., 2.NICHE, Tohoku Univ., 3.Institute for Laser Eng., Osaka Univ., 4.C&A Corporation)

[9p-P08-6]

Evaluation of n-γ discrimination characteristics of an accelerator-driven D(d,n) neutron source using EJ-276 plastic scintillator

○Taiyo Asakawa¹, Shintaro Ishihara¹, Takafumi Tuzimoto¹, Yuki Yokoyama¹, Kyoka Maruta¹, Misako Miwa¹, Naoto Aizawa¹, Wataru Kada¹, Shigeo Matuyama¹ (1.Department of Quantum Science and Energy Engineering, Tohoku Univ.)

[9p-P08-7]

Surface Treatment of TlBr Crystal by Laser Etching

○Shoichiro Motoi¹, Naoto Izumi¹, Toshiyuki Onodera¹ (1.Tohoku Inst. Tech.)

[9p-P08-8]

Seed Growth of TlBr Crystals by the Bridgeman Method

○Takayuki Suzuki¹, Rento Hori¹, Toshiyuki Onodera¹ (1.Tohoku Inst. Tech.)

[9p-P08-9]

Charge Collection Characteristics of Heteroepitaxial Diamond Detectors

Oseiya miura¹, Kazushi Ishimaru¹, Toshiyuki Onodera¹, Koji Koyama², Seong woo Kim², Kiyomitsu Shinsho³, Osamu Maida⁴, Keitaro Hitomi⁵ (1.Tohoku Inst. Tech., 2.Orbray Co.Ltd., 3.Tokyo Metropolitan Univ., 4.Osaka Univ., 5.Tohoku Univ.)

[9p-P08-10]

Investigation of 3D imaging of Co-60 in graphite using pinhole gamma camera

○(M2)Yusuke Takabayashi¹, Jun Kawarabayashi¹ (1.TCU)

[9p-P08-11]

3D visualization representation based on segmentation of X-ray CT images

○Hiroki Kase^{1,2}, Katsuyuki Takagi², Toru Aoki^{1,2} (1.Shizuoka Univ. Info., 2.Shizuoka Univ. R.I.E.)

[9p-P08-12]

Neutron Production Rate of Discharge Plasma Neutron Source with Cubic Electrode

○Hodaka Osawa¹, Moriyama Kei¹ (1.Kansai Univ.)

[9p-P08-13]

Study of time and temperature dependences of carrier transport characteristics in CdTe semiconductor radiation detectors using laser pulses

○Daiki Tomiita¹, Syun Sugimoto¹, Shu Naganawa¹, Toru Aoki^{1,2}, Tetsu Ito^{1,2} (1.Shizuoka Univ., 2.RIE, Shizuoka Univ.)

[9p-P08-14]

Study on isotope analysis method β -ray spectrum unfolding

○Sora Yonemura¹, Hiroshi Nishizawa¹ (1.Fukui University of Technology)

[9p-P08-15]

Structural Effects of Gamma Radiation on Silicon Semiconductor Detector

○(B)Nana Kobayashi¹, Katsuki Watabe¹, Naoki Saito², Shinnosuke Idogawa¹ (1.NIT, Kushiro College, 2.Hokkaido University)

[9p-P08-16]

Study on a simplified moderator for neutron source spectrum measurement

○Taketo Itani¹, Daiki Azuma², Ren Ohwada¹, Genichiro Wakabayashi³ (1.Kindai Univ., 2.Kindai Univ., 3.KUAERI.)

[9p-P08-17]

Development of a two-dimensional hydrogen elemental composition imaging by micro-ERDA system using ion microbeams

○Takeaki Goto¹, Kyoka Maruta¹, Misako Miwa¹, Sho Toyama¹, Wataru Kada¹, Shigeo Matsuyama¹ (1.Tohoku Univ.)

[9p-P08-18]

Investigation of ion optics in resonance ionization mass spectrometry for locally generated atoms

○(M2)JINGYI NI¹, Daisuke Ishikura¹, Keito Kimura¹, Takumi Mochizuki¹, Ryohei Terabayashi¹, Tetsuo Sakamoto², Hideki Tomita¹ (1.Nagoya Univ., 2.Kogakuin Univ.)

[9p-P08-19]

Development of a quasi-monochromatic X-ray irradiation field using an ion beam from 1MV tandem accelerator

OWataru Kada¹, Takumi Matsumoto¹, Miyu Matsuo¹, Yuki Ohtsuka¹, Sho Toyama¹, Misako Miwa¹, Shigeo Matsuyama¹ (1.QSE, Tohoku Univ.)

[9p-P08-20]

Construction of a low linear energy transfer particle irradiation field using a small accelerator adapted to the low-earth-orbit environment

OShintaro Ishihara¹, Naoki Shibamura¹, Yuki Otsuka¹, Sho Toyama¹, Wataru Kada¹, Shigeo Matsuyama¹ (1.Department of Quantum Science and Energy Engineering, Tohoku University)

[9p-P08-21]

Thermoluminescence Properties of Cr, Si, and Mg Co-doped Al₂O₃ Ceramics Plates under Electron FLASH Irradiation Field

O(M1)Hana Kuribayashi¹, Ayano Okubo¹, Hiroki Tanaka², Nishiki Matsubayashi², Kiyomitsu Shinsyo¹ (1.Tokyo Metropolitan Univ., 2.Kyoto Univ.)

[9p-P08-22]

Optimization and Performance Evaluation of YGAG Scintillator in Scintillator-Based Photon-Counting CT Systems

OShuma Midorikawa¹, Makoto Arimoto¹, Fitri Lucyana¹, Minoru Oshima¹, Yu Furuta¹, Jun Kataoka², Ryotaro Minagawa², Takahiro Ro², hiroki kawashima¹, satoshi kobayashi¹, Kenichiro Okumura¹, Shinsuke Terazawa³, Yuta Maeno³ (1.Kanazwa Univ., 2.Waseda Univ., 3.Proterial Ltd.)

[9p-P08-23]

The quantification of the radiation-induced current by means of a single crystal diamond detector within the diagnostic X-ray energy range.

O(D)Takumi Matsumoto¹, Masaki Fujisawa², Ryota Shindo², Sora Ito¹, Yohei Inaba², Shinnosuke Matsumoto³, Shigeo Matsuyama¹, Wataru Kada¹ (1.QSE, Tohoku Univ., 2.Med, Tohoku Univ, 3.Tokyo Metro Univ.)

[9p-P08-24]

Enhanced OSL Sensitivity of BeO Ceramic Plates via Thermal Treatment: A Study of Measurement Protocols

OHaduki Samura¹, Go Okada², Kiyomitsu Shinsho¹ (1.Tokyo Metropolitan Univ., 2.Kanazawa Institute of Technology)

[9p-P08-25]

Establishing SEEM Studies: An ethnographic system for knowledge transfer and human resource development in the decommissioning of 1F

O(M2)Nanami Nakao¹, Kanoko Yoshida¹, Nakahiro Yasuda¹, Makoto Takahashi², Yutaka Watanabe², Tomoka Koyama³, Teruhiko Yoneyama³, Shintaro Ono³ (1.Fukui Univ., 2.Tohoku Univ., 3.KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc.)

[9p-P08-26]

Survey of teacher attitudes regarding radiation and nuclear disaster prevention education at elementary and junior high schools

O(M1)Yushiro Taniyama¹, Takumi Wakimura¹, Nanami Nakao¹, Yusuke Yuge¹, Kanoko Yoshida¹, Nakahiro Yasuda¹ (1.Fukui Univ.)

放射線検出器応用に向けた THM 法による Ga-doped CdTe 単結晶の成長と基礎物性評価

Growth and fundamental property characterization of Ga-doped CdTe single crystals

by THM for radiation detector applications

°都留 颯人¹, 永岡 章¹, 住吉 孝心², 野瀬 嘉太郎², 吉野 賢二¹宮崎大工¹, 京大院工²

E mail: hn21214@student.miyazaki-u.ac.jp

1. はじめに

CdTe はバンドギャップ約 1.5 eV を有し、Si や Ge に比べて原子番号が大きい II-VI 半導体であるため、放射線検出器として広く注目されている。放射線検出器としての CdTe は高い電荷収集効率と高抵抗化が求められる。Ga ドーピングされた CdTe は、In と同様に Cd サイトに Ga 原子が置換することで n 型ドーパントとして寄与することが知られており、In に比べて Ga は偏析係数が高く、結晶内に均一に分布しやすいといわれている [1]。しかしながら、Ga-doped CdTe 単結晶の報告例はほとんどない。これは、Ga ドーパントが均一かつ高抵抗化を実現しやすい一方で、DX センターなど準安定な深い欠陥準位が顕在化しやすく、キャリア輸送特性や暗電流の安定性に悪影響を及ぼす可能性が指摘されているためである [2]。本研究では、放射線検出器用材料の結晶成長に主に用いられる移動ヒーター法 (THM 法) により Ga-doped CdTe 単結晶を作製し、伝導型制御やキャリアの自己補償プロセスを含む基礎物性および電気特性を評価した。

2. 実験方法

CdTe チャンク (5N) に Ga ショット (4N) を 0.1, 0.3, 0.5, 1.0 mol% の各ドーパ率で添加し、融液成長を用いて多結晶を作製した。その後、得られた Ga-doped CdTe 多結晶を Te 溶媒 (feed CdTe : Te = 50:50 mol %) とともに石英管に真空封入し、THM 法を用いて、単結晶成長させた。得られた単結晶を X 線回折 (XRD) 測定、X 線ロッギングカーブ (XRC) 測定、走査型電子顕微鏡 (SEM)、エネルギー分散型 X 線分析 (EDX)、高周波誘導結合プラズマ分析 (ICP)、ホール効果測定により評価した。

3. 実験結果および考察

XRD 測定より Ga に起因する異相は検出されず、EDX マッピングにより、Cd、Te、および Ga が結晶内に均一分布していることが観察された。ICP 測定にて Ga の含有率は低く、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 付近で Ga ドーピングの限界に達した。Fig. 1 に ICP の濃度とホール効果測定のカリヤ濃度の関係を示す。ドーパ率 0.3, 0.5, 1.0 mol% のサンプルでカリヤ濃度は約 10^{15} cm^{-3} と低く、キャリアが電気的に活性しなかったことが確認された。移動度はドーパ率の増加に伴って明確に低下した。これは、Ga ドーピングによる不純物散乱の増加と $\text{Ga}_{\text{Cd}}\text{-V}_{\text{Cd}}$ 複合欠陥 (A センター) や DX センターによる深いトラップ準位の増加が原因と考えられる。一方、ドーパ率 0.1 mol% のサンプルはカリヤ濃度が約 10^8 cm^{-3} 、比抵抗は約 $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ の高抵抗を示した。 $\text{Ga}_{\text{Cd}}\text{-V}_{\text{Cd}}$ 複合欠陥による自己補償が働き、n 型キャリアが抑制されたことが考えられる。

4. まとめ

本研究では、THM 法を用いて Ga-doped CdTe 単結晶を成長させ、自己補償を伴う n 型転移などの基礎物性を評価した。本研究での Ga ドーパントによる n 型化は限定的であり、自己補償効果および DX センターの影響が示唆された。一方、ドーパ率 0.1 mol% の試料では室温で高抵抗化 (約 $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$) が達成され、放射線検出器材料としての高抵抗化要件を満たす可能性が示された。

5. 引用文献

- [1] V. Babentsov et al. *Crystal Research and Technology: Journal of Experimental and Industrial Crystallography* 36, 535–542 (2001).
[2] E. Płaczek-Popko et al. *Optica Applicata* 38, 559–565 (2008).

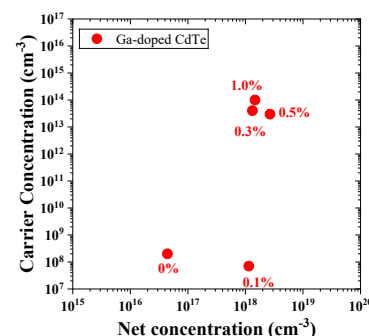


Fig. 1 Comparison of Ga concentration measured by ICP and carrier concentration obtained from Hall effect measurements

BGaN 中性子検出器における基板 off 角がデバイス性能に及ぼす影響

Impact of Substrate Off-Angle on Device Performance for B_{GaN} Neutron Detectors

¹ 静大院工, ² 名大院工, ³ 近大原研, ⁴ 名大 ImaSS, ⁵ 静大電研

○ 斎藤僚太¹, 工藤涼兵¹, 櫻井辰大¹, 小久保瑛斗², 若林源一郎³,

本田善央⁴, 天野浩⁴, 井上翼¹, 青木徹⁵, 中野貴之^{1,5}

Shizuoka Univ.¹, Nagoya Univ.², Kindai Univ.³, ImaSS Nagoya Univ.⁴, R.I.E. Shizuoka Univ.⁵

○ R. Saito¹, R. Kudo¹, T. Sakurai¹, E. Kokubo², G. Wakabayashi³,

Y. Honda⁴, H. Amano⁴, Y. Inoue¹, T. Aoki⁵, T. Nakano^{1,5}

E-mail: saito.ryota.21@shizuoka.ac.jp

緒言 B_{GaN} は中性子捕獲断面積が大きな ¹⁰B 原子を半導体構成元素として含むことから、新しい中性子検出半導体として期待されている[1]。このような中性子半導体検出器は中性子イメージングや原子炉内核計装など幅広い利用が期待されている。中性子イメージングセンサーにおいては小型および高感度といった特性が期待され、原子炉内核計装においては高温かつ高放射線環境下において耐性が高く、かつ高 n/γ 弁別比の中性子検出特性が期待されている。これらの技術において結晶成長技術が重要な基幹技術となっているが、高い非混和性ゆえに高 B 濃度 B_{GaN} や高い結晶性の B_{GaN} 成長が困難となっている。結晶性向上および不純物濃度の低減には成長温度の高温化が解決策の一つであるが、高温での B_{GaN} 成長は表面に吸着した原子の脱離を引き起こし、ボイド形成が起こることが報告されている[2]。そこで、本研究では基板の off 角度に着目し、off 角を変化させることで基板表面における原子の取り込みを変化させることで成長温度の高温化および結晶性の改善を検討した。

実験方法 GaN および B_{GaN} 結晶成長には有機金属気相エピタキシー(MOVPE)法を用いた。III 族原料には TMGa、TMB を使用し、V 族原料には NH₃ を使用した。off 角依存性評価を行うために off 角が 0.05°, 0.2°, 0.25°, 0.5°, 1°, 2° の c 面 sapphire 基板を用いて B_{GaN} 成長を行った。成長温度依存性評価においては成長温度 870~1080 °C で B_{GaN} を成長させた。電気特性評価、放射線検出特性評価を行うために各 off 角度(0.2°, 0.5°)の sapphire 基板上に、B_{GaN} 膜厚:1 μm, 5 μm の pin ダイオードを作製した。

結果と考察 基板 off 角依存性について、X 線 Rocking Curve (XRC)測定 of the FWHM と AFM を用いて評価を行った。B_{GaN}(0002)面 XRC-FWHM の基板 off 角依存性を Fig.1 に示す。同程度の結晶性であったが、基板 off 角度が 0.5° off の時、XRC-FWHM が最も小さくなった。これは基板 off 角が 0.5° off より小さい時と比較してテラス幅が短くなっており、ステップ端での取り込みが増えたことで、結晶性が向上したと考えられる。さらに、成長温度依存性についても評価を実施した。B_{GaN} の XRC-FWHM で評価した場合、0.5°-off 基板における B_{GaN} 最適成長温度は 1030 °C であり、0.2°-off 基板の最適成長温度 (1000 °C) と比較して 30 °C 高い温度となった。そこで、各 off 基板を用いて最適成長温度にて pin ダイオードを作製し、放射線検出特性評価を実施した。α 線検出測定により得られたエネルギースペクトルを Fig. 2 に示す。α 線測定の結果、0.5°-off 基板の α 線エネルギースペクトルの FWHM は 32 % であり、0.2°-off 基板の FWHM : 40 % と比較して小さくなった。これは B_{GaN} 成長温度の高温化により結晶性が向上したことで α 線検出測定特性が向上したことを示唆している。これらの結果より基板 off 角度および成長温度の高温化が B_{GaN} 検出器の特性改善に寄与することが示唆された。

参考文献 [1] T. Nakano, *et al.*, JAP **130** (2021) 124501 [2] K. Ebara, *et al.*, JJAP **58** (2019) SC1042

謝辞 本研究の一部は、中部電力・株式会社 原子力安全技術研究所共同研究、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、近畿大学原子炉等利用共同研究、岩谷科学技術特別研究助成、科研費補助金(19H04394、23H00099)の援助により実施された。

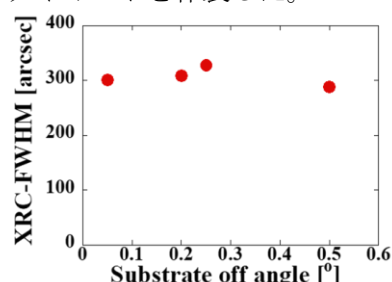


Fig.1 Effect of substrate misorientation on FWHM of X-ray rocking curve measurements of B_{GaN}

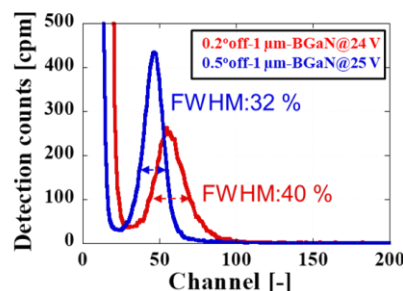


Fig.2 FWHM of alpha particles energy spectrum of pin-B_{GaN} grown on substrates with different off-angles

透明コンポジットシンチレータの中性子応答に関する検討

Study on neutron response in transparent composite scintillators

九大工¹, ○(D1)大島 裕也¹, 齋藤 優太郎¹, 渡辺 賢一¹

Kyushu Univ.¹, °Yuya Oshima¹, Yutaro Saito¹, Kenichi Watanabe¹

E-mail: Oshima.yuya.140@s.kyushu-u.ac.jp

中性子を利用した新しい放射線治療の一つであるホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) において、治療の安全性及び治療効果の確認のためには、照射中性子量の評価が重要である。熱中性子の計測技術の確立のために、我々の研究グループでは、発光時定数の短い Li ガラスシンチレータを用いた光ファイバ型中性子検出器の開発を進めてきた。しかし、従来使用してきたランダム形状の小片シンチレータでは、モンテカルロシミュレーションのための体系の記述が困難であり、壁効果や自己遮蔽の影響を正確に評価することができなかった。これを受けて、Li ガラスシンチレータの形状制御の手法として、透明コンポジット法を提案している。透明コンポジット法とは、粉末状の Li ガラスと紫外線硬化樹脂を混合し、成型したのちに硬化させる方法である。

これまでに、透明コンポジットシンチレータを用いて熱中性子の計測を行い、 ${}^6\text{Li}(n,t)\alpha$ 反応によるエネルギーピークが現れた信号波高分布を得られている。しかし、透明コンポジットシンチレータに用いる Li ガラス粉末の粒径は ${}^6\text{Li}(n,t)\alpha$ 反応によって発生する荷電粒子の飛程と同程度かそれ以下の大きさであり、エネルギーピークの形成機構が不明瞭であった。今回は、PHITS を用いて透明コンポジットシンチレータを再現し、荷電粒子の飛跡や付与エネルギーを確認することでエネルギーピークの形成機構を考察した。荷電粒子の飛程の合計と同程度

である $40\text{ }\mu\text{m}$ の粒径では、飛程の長い triton 粒子の多くが発生元の Li ガラスから飛び出しているが、隣接する Li ガラス中で停止しており、幅のあるエネルギー付与がなされていた。これにより Li ガラスのバルクより幅はあるがピークを形成できると分かった。さらに、透明コンポジットシンチレータ中の Li ガラスの粒径を変化させながら同様の計算を行い、エネルギーピーク位置やピーク幅の拡がりの変化を確認した。Fig. 1 に粒径ごとの付与エネルギーを発光量換算した図を示す。triton と alpha 粒子の飛程の合計より大きな粒径ではエネルギーピークの位置は同じであるが、粒径が小さくなるにしたがって低波高側にシフトし、alpha 粒子の飛程以下まで小さくなるとエネルギーピークの位置は収束することがわかった。現実には、粒径を小さくしていくにしたがって、透光性が下がり集光効率は減少するため、これらを加味して粒径を決定する必要がある。

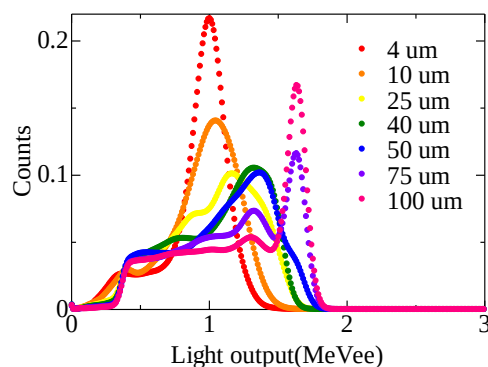


Fig. 1 Dependence of the light output spectra on a particle size of Li glass in transparent composite scintillators

ソルボサーマル法により作製した希土類共添加 YF₃ ナノ蛍光体の作製と評価

Synthesis and Characterization of Rare-Earth Co-Doped YF₃ Nanophosphors Prepared by the Solvothermal Method

静岡大院¹, 静岡大電子研², 静岡大情³ ○(M2)吉村 成生¹, (M1)山口 瑚太郎¹, 小南 裕子¹,
原 和彦^{1,2}, 都木 克之², 青木 徹^{1,2,3}

Grad. School of Integrated Sci. & Technol., Shizuoka Univ.¹, Res. Inst. Electron., Shizuoka Univ.²,
Faculty of Informatics, Shizuoka Univ.³ ○Naruki Yoshimura¹, Yamaguchi Kotaro¹,
Hiroko Kominami¹, Kazuhiko Hara^{1,2}, Katsuyuki Takagi², Toru Aoki^{1,2,3}
E-mail: kominami.hiroko@shizuoka.ac.jp

1. 緒言

光線力学療法 (Photodynamic Therapy, PDT) は、1970 年代より癌や眼科疾患に応用されてきた非侵襲的治療法であるが、照射する光の透過性に限界があり、体の深部への適用は困難である。そこで近年では、X 線の高い透過性を活かし、体内で発光を誘起する X 線励起型 PDT (XPDT) が注目されている。この治療法に用いられる蛍光体には、X 線励起により光増感剤に作用する紫外～可視領域で発光することに加え、体内で使用することを前提とした高い生体適合性や、血流を阻害しない粒子径 (100 nm 以下) であることが求められる。本研究では、これらの要件を満たす材料として希土類共添加フッ化物蛍光体に着目した。ソルボサーマル法を用いてナノ粒子化を試み、得られた試料の生成相および発光特性について評価を行った。

2. 実験方法

本研究では、ナノサイズ結晶の合成に適したソルボサーマル法を用いて YF₃:Tb³⁺,Ce³⁺を作製した。原料粉末をエタノールに分散・攪拌した後、オートクレーブに封入し、200 °C で加熱・加圧処理を行った。得られた生成物は遠心分離によって回収した。試料は Ce³⁺濃度を 3% に固定し、Tb³⁺濃度を変化させた。また、得られた試料に対して、粉末 X 線回折 (XRD) 測定、フォトルミネセンス (PL) 測定、X 線ルミネセンス (XL) 測定、透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察により評価を行った。

3. 結果と考察

Fig.1 に Tb³⁺ の添加量を変化させた YF₃:Ce³⁺,Tb³⁺試料の XRD パターンを示す。この結果より、母体である YF₃ 相の結晶構造は立方晶(Cubic)と斜方晶(Orthorhombic)の 2 相が存在することがわかった。また、半値幅から求めた結晶子サイズは、どの試料も約 30 nm 程度であった。次に、Fig.2 に同試料の PL スペクトルを示す。Ce³⁺→Tb³⁺間のエネルギー遷移挙動を評価する目的で、Ce³⁺の励起に最適な 255 nm の

励起波長を用いた。短波長側の 2 つの鋭いピークは、Ce³⁺の 5d→4f 遷移に、長波長側の 4 つのピークは長波長側の 4 つのピークは Tb³⁺の ⁵D₄→⁷F_J (J = 6, 5, 4, 3) に対応する 4f→4f 遷移に起因する発光である。Tb³⁺の 4f→4f 遷移は本来禁制であるが、Ce³⁺からのエネルギー移動により ⁵D₄準位が励起されることで発光が確認された。また、Tb³⁺濃度 2% の試料で Ce³⁺、Tb³⁺の発光どちらも強くなった。これはエネルギー移動と濃度消光のバランスが最適化された結果と考えられる。

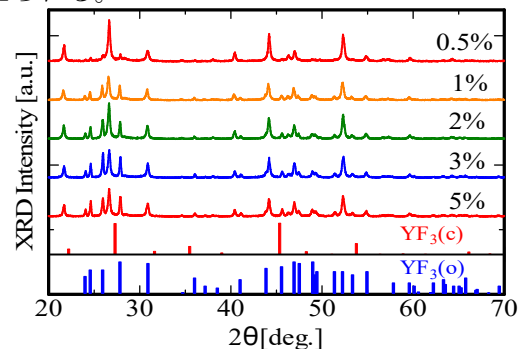


Fig.1 XRD patterns of YF₃:Ce³⁺,Tb³⁺ nanoparticle with different Tb concentration

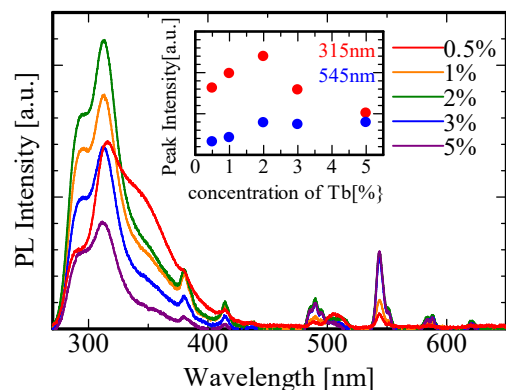


Fig.2 Photoluminescence Spectra of YF₃:Ce³⁺,Tb³⁺ with different Tb concentration

4. まとめ

PDT への応用を目的とし、ソルボサーマル法により作製した YF₃:Ce³⁺,Tb³⁺の特性評価を行った。PL 測定結果から Ce³⁺→Tb³⁺間のエネルギー遷移を確認できた。今後は、添加濃度の最適化を行っていく予定である。

近赤外発光 Nd 添加 Lu_2O_3 シンチレータの高輝度化に向けた要因解明

Study on Enhancing the Luminescence Intensity of

Near-infrared Nd-doped Lu_2O_3 Scintillator東北大金研¹, 東北大 NICHe², 阪大レーザー研³, (株) C&A⁴○(P)石澤 倫¹, 黒澤 俊介^{1,2,3}, 山路 晃広^{1,2}, 吉川 彰^{1,2,3,4}IMR, Tohoku Univ.¹, NICHe, Tohoku Univ.², Institute for Laser Eng., Osaka Univ.³,
C&A Corporation⁴,○ Satoshi Ishizawa¹, Shunsuke Kurosawa^{1,2,3}, Akihiro Yamaji^{1,2}, Akira Yoshikawa^{1,2,3,4}

【背景】化学的に安定かつ高融点(2200℃以上)である酸化物シンチレータを中心に、 γ 線をはじめとする放射線検出用途に適した高密度材料系の探索を進めている[1]。とくに廃炉作業などの高線量率場において用いる線量測定用検出器への応用を念頭に、近赤外発光を有する Nd 添加 Lu_2O_3 単結晶($\rho=9.4 \text{ g/cm}^3$)に着目し、その開発に取り組んできた。これまでに育成した結晶について発光特性を評価した結果、 $\sim 1 \text{ kGy/h}$ 程度の高線量率環境においても良好な信号対ノイズ比を示すことが明らかとなった[2]。本研究では、これら良好な特性をさらに向上させるため、同一母材組成に対し複数の濃度で Nd を添加した Lu_2O_3 単結晶を育成し、近赤外発光の強度向上を目的として詳細な特性評価を行った。

【実験方法】 $\text{Nd}_x\text{Lu}_{2-x}\text{O}_3$ ($x = 0.5, 1, 2 \%$)焼結体を準備し、コアヒーティング法(CH法)により育成した単結晶を用いて、粉末 X 線回折(XRD)による相同定等を行った。得られた数十のサンプルに対して X 線励起ラジオリミネッセンス(RL)及び透過率を測定し、同程度の透過率が得られた試料の中から代表的なサンプルを選びフォトルミネッセンス(PL)やフィールドエミッション電子プローブマイクロアナライザー(FE-EPMA)等による組成分析を行い、詳細に解析した。

【結果と考察】図 1 に近赤外領域における各 Nd 濃度の X 線励起発光スペクトル(Nd^{3+} , $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$)を示す。最も高い発光強度を示したのは、仕込み組成として 1%の Nd を添加した試料であった。なお Nd2%添加

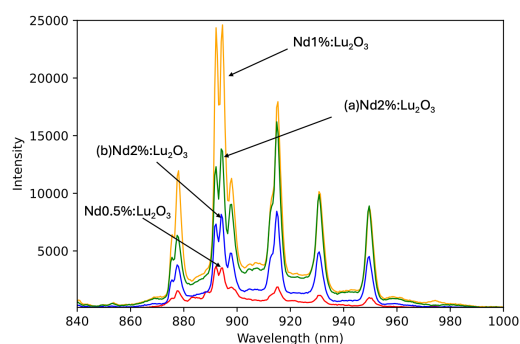


Fig. 1. Radioluminescence spectra of Lu_2O_3 crystal doped with Nd.

試料に関しては、発光強度に特徴的な差が見られた 2 試料のスペクトルを併せて示した。Nd0.5% および 1% 添加試料では最大発光ピーク波長は $\sim 890 \text{ nm}$ であるのに対し、Nd2% 添加試料では $\sim 915 \text{ nm}$ に観測された。Nd 添加量の増加に伴い、透過率スペクトルにおいて 890 nm 付近に吸収ピークが強く現れることから、自己吸収による $\sim 890 \text{ nm}$ の発光強度低下に起因して、Nd2% 添加試料では吸収ピークから離れた $\sim 915 \text{ nm}$ に最大発光ピークが現れる可能性が示唆された。本発表では、これらの結果に加え、詳細な組成情報や発光特性等についても報告する。

References [1] S. Ishizawa, S. Kurosawa, A. Yoshikawa et al., Optical Materials **142**, (2023) 113941, [2] 石澤、黒澤、吉川ら、第 72 回春季応用物理学会 2025 年 3 月 16 日。

**D(d, n) 中性子源に対する
EJ-276 プラスチックシンチレータの n- γ 弁別特性評価
Evaluation of n- γ discrimination characteristics of an accelerator-driven
D(d,n) neutron source using EJ-276 plastic scintillator**

東北大量子¹

○(M1) 浅川 大洋¹, 石原 慎太郎¹, 辻本 隆文¹, 横山 祐貴¹, 丸田 京華¹,
三輪 美沙子¹, 相澤 直人¹, 加田 渉¹, 松山 成男¹

Department of Quantum Science and Energy Engineering, Tohoku University¹,

○Taiyo Asakawa¹, Shintaro Ishihara¹, Takafumi Tuzimoto¹, Yuki Yokoyama¹, Kyoka Maruta¹,
Misako Miwa¹, Naoto Aizawa¹, Wataru Kada¹, and Shigeo Matuyama¹

E-mail: asakawa.taiyou.q8@dc.tohoku.ac.jp

γ

小型加速器駆動中性子源は、本邦の中性子施設の選択肢が限定的となる中で重要な役割を果たしている。東北大学高速中性子実験室（Fast Neutron Laboratory: FNL）では、4.5 MV ダイナミトロン加速器と ${}^7\text{Li}(\text{p}, \text{n})$ 、 $\text{T}(\text{d}, \text{n})$ 、 $\text{D}(\text{d}, \text{n})$ 等の各ターゲット反応を利用した単色中性子場により、核融合材料の断面積測定や検出器評価を行ってきた [1]。その利用性を拡充するためには、加速器ビームパルス化に加え、中性子発生量・フルエンス評価が必要不可欠である。本研究では、4.5 MV ダイナミトロン加速器のパルス駆動化と、開発してきた $\text{D}(\text{d}, \text{n})$ 中性子源を用いた簡便な n- γ 弁別特性により中性子発生量を簡便に評価する体系の構築に取り組んだ。パルス駆動においては、高圧ターミナルに搭載されたスイープ、リトレース、バンチャーにより、パルス幅 2 ns、繰り返し 2~0.25 MHz のビームを得ることをめざす。中性子計測においては、液体シンチレーション検出器に代わり、プラスチックシンチレーション検出器（EJ-276）の利用可能性を評価した。EJ-276 に、 $\text{D}(\text{d}, \text{n})$ 中性子源からの中性子を入射させ、付帯する光電子増倍管アノード信号を Digital Pulse Processor(DSP)(APV8104, Techno-AP)を用いて処理した。検出器角度 0°での条件下で得られた全電荷量と減衰成分の比率による中性子(n)- γ 線(γ)弁別結果を図 1 に示す。中性子エネルギーが 2MeV 相当以上では、シンチレーション減衰時間が明確に γ 線と差異が生じた。DSP 信号の縦軸のおよそ 200ch 以上が中性子事象を示す結果となり、中性子と γ 線の事象の分離が確認できた。従来検出器に比べ、プラスチックシンチレーション検出器は多重化が容易であり、今後、単色中性子場や関連する中性子照射場の展開[2]において、計測体系構築の簡素化が期待される。

参考文献

[1] K. Ogawa, et al., Fusion Engineering and Design, vol 218, 115214, 2025.

[2] 辻本 隆文 他, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会, [24a-12E-7], 2024 年 3 月 24 日.

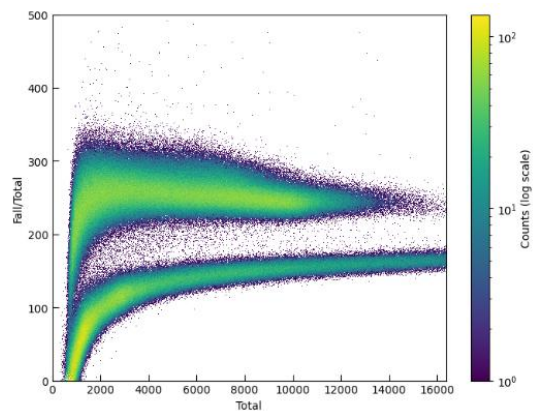


図 1 EJ-276 を用いた加速器駆動 $\text{D}(\text{d}, \text{n})$ 反応中性子の n- γ 波形弁別例.

レーザーエッチングによる TlBr 結晶の表面処理 Surface Treatment of TlBr Crystal by Laser Etching

東北工大工, °元井 祥一朗, 泉 直士, 小野寺 敏幸

Tohoku Inst. Tech., (B)°Shoichiro Motoi, (B)Naoto Izumi, Toshiyuki Onodera

E-mail: t_onodera@tohotech.ac.jp

1.はじめに

臭化タリウム (TlBr) は、ガンマ線検出器への応用が期待できる化合物半導体であるが、硬度が低い(knoop 硬度 12 程度)ため、物理的な圧力が加わるデバイス化工程では変形の恐れがある。切断や研磨工程で生じた大きな凹凸は、電極界面に局所的な電界の集中を引き起こす。その結果、陰極界面には Tl のデンドライトが発生し、デバイス動作が不安定になる。以上の背景より、結晶表面の平滑化は、TlBr 検出器の安定動作に欠かせない技術と考え、本研究では、試料への物理的な接触をせずに結晶表面を平滑化できるレーザー加工に注目した。実験では、Yb:KGW (イットリウムドープ・カリウム・ガドリニウム・タングステン) レーザーで TlBr 結晶の表面を走査し、結晶性の評価を行った。

2 実験方法

レーザー加工には、LIGHT CONVEARSION 製の PHAROS を用いた。レーザーの条件は、中心波長 1030 nm、パルス幅 260 fs、繰り返し周波数 10 kHz、ステージ移動速度 1 mm/s、加工ピッチ 50 μm として大気中において加工した。試料には、#2000 で研磨した幅 12 mm×7 mm、厚さ 1.97 mm の TlBr 結晶を用い、結晶表面の半分をレーザー加工した。全自動多目的 X 線回折装置を用いて、加工した TlBr 結晶の $2\theta/\theta$ 測定を行い、面内の結晶性を評価した。

3.実験結果

図 1 は、機械研磨及びレーザー加工した TlBr 結晶の表面である。機械研磨部分とレーザー加工部分の表面を比較したところ、後者は明瞭な傷が少なく平坦性が高いことが確認できた。レーザー加工後試料表面には、レーザー照射によって生じた酸化タリウムと推測される褐色の粉体が残存したが、アセトン又はエタノールを用いた超音波洗浄により除去できた。図 2 は、 $2\theta/\theta$ のマッピング測定で得られた (110) の回折ピークの強度分布である。図が示すようにレーザー加工による結晶性の低下は見られなかった。

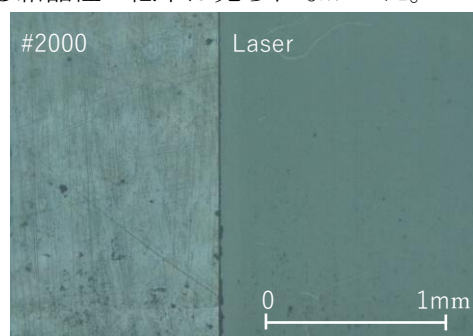


Fig.1. Surface observation of mechanical polishing and laser processed TlBr crystal.

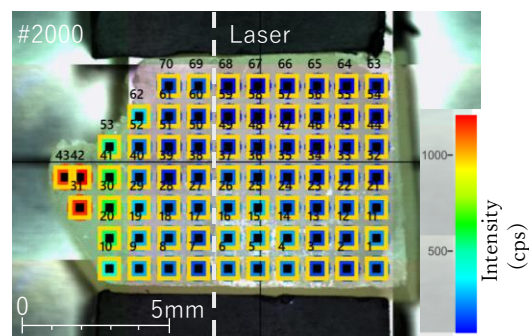


Fig.2. Intensity distribution of (110) diffraction at surface of TlBr crystal .

ブリッジマン法による TlBr 結晶のシード成長

Seed Growth of TlBr Crystals by the Bridgeman Method

東北工大工, °鈴木 孝行, 堀 蓮斗, 小野寺 敏幸

Tohoku Inst. Tech. (B) °Takayuki Suzuki, (B) Rento Hori, Toshiyuki Onodera

E-mail: t_onodera@tohtech.ac.jp

1.はじめに

臭化タリウム (TlBr) ガンマ線検出器の早期実現が望まれている。実用化された半導体結晶の多くは、高品質かつ均一化な結晶を得るため、シード成長が欠かせない技術になっている。一方、TlBr は自然核成長による結晶育成が一般的であり、シード成長の基礎技術は確立されていない。そこで本研究では、シード成長させた TlBr 結晶の育成を目指してブリッジマン法を用いた育成を行い、シード部と熔融部の結晶方位の角度差からシード成長の有無を評価した。

2.実験方法及び結果

2.1 シード結晶の育成およびシーディング位置の特定

内径 $\phi 7.8 \text{ mm} \times 17 \text{ mm}$ の石英管に TlBr 原料を約 4 Pa で真空封入してブリッジマン法によりシードとなる TlBr 結晶を育成した。育成条件は降下速度:5 mm/h、4 段で構成されるヒーターの設定温度は、上部から 510 °C、510 °C、510 °C、440 °C であった。

内径 $\phi 8.3 \text{ mm}$ の石英管に純度 99.99 % の TlBr 粉末を約 4 Pa で真空封入し、石英管をブリッジマン炉に設置し、上部ヒーターの上から 230 mm の位置に 20 分間固定した後、粉末と熔融部の境界からシーディング位置を推測した。

2.2 シード成長

内径 $\phi 7.85 \text{ mm}$ の石英管にシード結晶($\phi 7.8 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$)と TlBr 原料(14.8 g)を入れ、約 4 Pa で真空封入した。石英管をシーディング位置に固定し、2 mm/h の速度で結晶成長させた。

2.3 試料の切断、研磨

シード成長させた TlBr 結晶 $\phi 7.85 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ にオリフラをつけ、ワイヤーソーを用いて厚さ 5 mm 間隔で 20 枚のウェハに切断した。その後、切断したウェハの片面を #2000 で研磨した。

2.4 極点測定の結果

XRD による極点測定の前に $2\theta/\theta$ 測定を行い、ウェハ面の法線方向に近い方位は (211) と確認し、極点測定では、 $2\theta/\theta$ を (111) に固定した。図 1 は、極点測定で得られた α と β の分布である。図から、シーディング位置の前後で α 、 β の角度が変わらないため、シードの方位に従って TlBr 結晶が成長したと分かった。

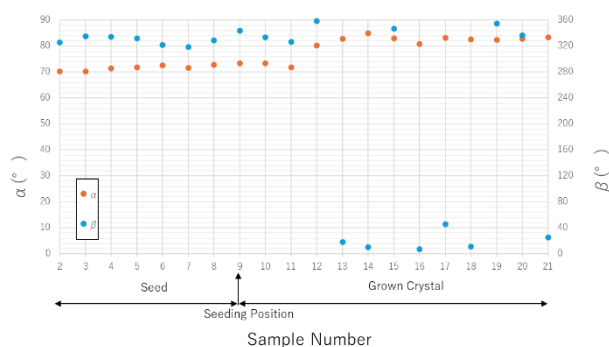


Fig. 1. Distribution of α and β measured by (111) pole figure measurement of grown TlBr crystal using a seed.

ヘテロエピタキシャルダイヤモンド検出器の電荷輸送特性

Charge Collection Characteristics of Heteroepitaxial Diamond Detectors

東北工大¹、Orbray(株)²、都立大³、大阪大⁴、東北大⁵

○三浦 誠也¹、石丸 和嗣¹、小野寺 敏幸¹、小山 浩司²、金 聖祐²、

眞正 浄光³、毎田 修⁴、人見 啓太郎⁵

Tohoku Inst. Tech.¹, Orbray Co.Ltd.², Tokyo Metropolitan Univ.³, Osaka Univ.⁴, Tohoku Univ.⁵,
(B)○Seiya Miura¹, (B) Kazushi Ishimaru¹, Toshiyuki Onodera¹, Koji Koyama², Seong-Woo Kim²

Kiyomitsu Shinsho³, Osamu Maida⁴, Keitaro Hitomi⁵

E-mail: t_onodera@tohtech.ac.jp

1.はじめに

従来の線量計として使用されてきた電離箱にはいくつかの課題がある。まず、感度が低いため、検出効率を高めるには体積を大きくしなければならず、装置の大型化が避けられない。また、空気などの気体を検出媒体とするため、電離箱で得られる線量は実際に人体が受ける被曝線量に直接置き換えることが出来ない。これらの課題を解決するため、近年、ダイヤモンドを用いた放射線検出器が注目されている。ダイヤモンドは電離箱に比べて、非常に高い感度を持つため検出器の小型化が可能である。さらに、ダイヤモンドと人体の実効原子番号はどちらも6であり、ダイヤモンドを検出媒体とすることで、人体と等価な線量評価が期待できる。また、ダイヤモンドは分光特性にも優れており、より高精度な放射線測定が可能となる。近年では、オーブレイ株式会社がヘテロエピタキシャル成長により、直径2インチのダイヤモンド基板の開発に成功し、更なる口径拡大が見込まれており、ダイヤモンド検出器の実用化に期待が高まっている。本研究では、このような背景を踏まえ、ダイヤモンド検出器の電荷輸送特性を評価することを目的とした。

2.実験方法及び結果

金電極を形成したダイヤモンド検出器 (4.5 mm×4.5 mm×0.5 mm) を用いて、陽極または陰極に ²⁴¹Am のα線を照射し、バイアス電圧を−500 V〜500 V とし波形整形時間を 6.0 μs と設定し、α線のエネルギースペクトルを取得した。各バイアス電圧における 5.48 MeV のピーク位置を取得し、ヘクトの式を最小二乗法で近似することにより、担体のμτ積を算出した。図1は、測定で得られた担体の電荷輸送特性のμτ積である。正孔と電子のμτ積は、(μτ)_h: 3.12×10⁻⁵ cm²/V, (μτ)_e: 8.07×10⁻⁶ cm²/V であった。

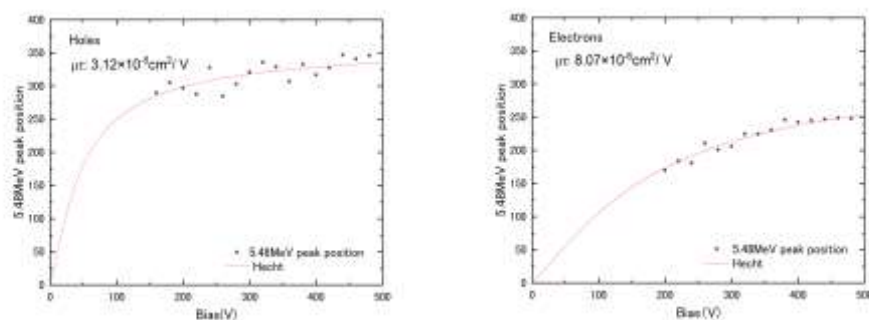


Fig.1. Charge transport properties of holes and electrons in heteroepitaxial diamond detector.

ピンホールガンマカメラによる黒鉛中の Co-60 の 3 次元分布イメージングの検討

Investigation of 3D imaging of Co-60 in graphite using pinhole gamma camera

都市大¹, °(M2) 高林 佑丞¹, 河原林 順¹

Tokyo City Univ.¹, °Yusuke Takabayashi¹, Jun Kawarabayashi¹

E-mail: oubutsu@jsap.or.jp

【背景】 小型研究炉の廃止措置の際に、研究炉で使用されていた黒鉛ブロックから Co-60 ガンマ線が観測された場合、2つのパターンが考えられる。1つ目は、黒鉛ブロック内の不純物が放射化した場合であり、2つ目は黒鉛ブロック表面に錆が付着し、放射化した場合である。錆の付着であれば Co-60 が黒鉛表面に留まっている可能性が高く、Co-60 の 3 次元位置分布を測定することにより主因を区別し、黒鉛ブロックの除染を行える可能性がある。ピンホール型ガンマカメラを用いて 3 方向からブロックを撮影し、ML-EM 法で再構成することでブロック内の Co-60 の 3 次元位置分布の取得することを目的とし、模擬体系で位置検出が可能であるかどうか検討した。

【実験】 内部に Co-60 標準線源を埋め込んだブロック (5cm×10cm×20cm, PLA 樹脂) を作成した。撮影にはイメージングプレート(IP)とピンホールコリメータを組み合わせたピンホール型ガンマカメラを用いた。ガンマカメラは、x,y,z 軸の 3 方向から、ブロック中心とコリメータ中心との距離が 15cm の位置になるように配置し、3 方向から撮影した。また、ブロックを縦、横、高さ方向に 3 分割し全体を 3×3×3 の 27 個のボクセルに区分した。

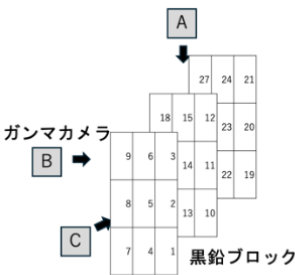


図 1 にブロックに対するガンマカメラの配置位置と定義したボクセル番号を示す。各ボクセルに 60Co 線源の存在を仮定した時の検出器応答は、PHITS を用いてシミュレーションし、得られた画像をガウシアンフィルタ(カーネル数 7、シグマ 1)で平滑化して使用した。

図 1: コリメータの配置位置とボクセル番号

【結果と考察】 図 2 に、線源の位置がボクセル 9 とした場合の撮影データを再構成した結果を示す。線源の位置が正確に推定された。しかし、3つのガンマカメラの位置から最も遠いボクセルであるボクセル 25 にも一部推定された。IP は低エネルギー光子に対して感度が高いため、ノイズが影響している可能性が考えられる。

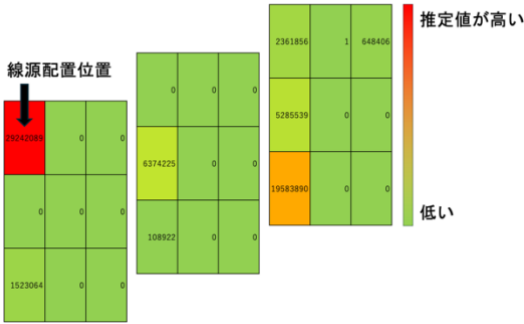


図 2: 再構成結果

【参考文献】 A. Miura, J. Kawarabayashi and N. Hagura, "3D Measurement of RI Distribution by 3-Row Multi-Pinhole Collimator Camera," 2023 IEEE (NSS MIC RTSD), Vancouver, BC, Canada, 2023, pp. 1-1, doi: 10.1109/NSSMICRTSD49126.2023.10338252.

X 線 CT 画像のセグメンテーションに基づく三次元可視化表現

3D visualization representation based on segmentation of X-ray CT images

静岡大情¹, 静岡大電子研²

○加瀬 裕貴^{1,2}, 都木 克之², 青木 徹^{1,2}

Shizuoka Univ. Info.¹, Shizuoka Univ. R.I.E.²

E-mail: kase.hiroki@shizuoka.ac.jp

3D X 線 CT (以下、3DX 線 CT) は、医療・非破壊検査を含む多様な分野において、物体内部の構造を把握する手段として重要な役割を果たしている。近年では、X 線 CT データの 3 次元レンダリングを応用し、手術計画や教育に資する可視化技術の研究が進められている。しかし、等値面抽出によるサーフェスレンダリングでは、図 1 のように観察したい対象臓器以外の不要なメッシュが残ることが多く、観察部位に特化した表示が困難である。本研究では、機械学習による臓器セグメンテーションと、複合現実 (Mixed Reality: MR) 環境を組み合わせた 3D 可視化システムを構築し、観察者が直感的に内部構造を理解できる環境の実現を目指した。実験では、腹部 CT サンプル(静脈相)に

対して、ディープラーニングを用いた医用画像のセグメンテーションツールである MONAI Label を使用し、臓器ごとにそれぞれセグメンテーションを行い、3D モデルの色づけを行った。また、臓器ごとのセグメンテーションデータを断面に応じて二次元方向に重畳させることで、特定の位置・方向におけるそれぞれの臓器の配置が確認可能となった。仮想空間上では、それぞれの臓器の表示/非表示の切替が可能なインタラクション UI を実装することで、観察者は対象臓器に絞った観察が可能となり、視覚的に理解しやすくなった。本研究により、機械学習ベースのセグメンテーションと MR 表示技術を統合した新たな 3D 可視化支援システムを構築した。

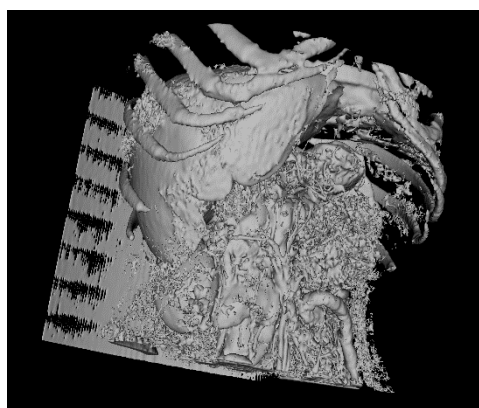


Fig1. Surface rendering of 3D X-ray CT data of the abdomen with a threshold set for the liver.

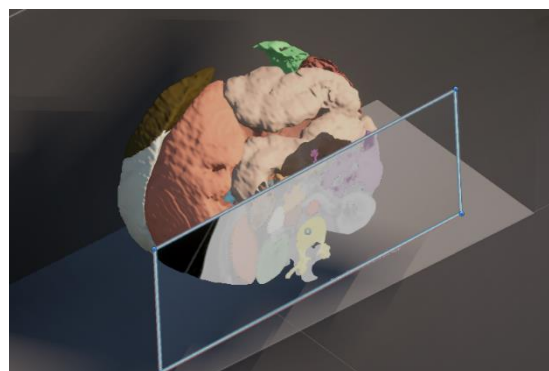


Fig2. 3D Representation of the internal structure with segmentation of each organ

放電型プラズマ中性子源の立方体電極の中性子生成率

Neutron Production Rate of Discharge Plasma Neutron Source with Cubic Electrode

大澤 穂高¹, 森山 慧¹

¹ Faculty of Engineering Science, Kansai Univ. 3-3-35 Yamate-cho, Suita, Osaka. 564-8680, Japan

E-mail: osawa@kansai-u.ac.jp¹

1. Introduction

放電型プラズマ中性子源は数 Pa 程度の重水素中のグロー放電により中性子を発生させる装置である。この装置の内部中心に設置する陰極には直流で-30kV 程度の電圧を印加することで、発生した重水素イオンを静電的に閉じ込める。そのためこの方式を慣性静電閉じ込め核融合という。電源を切ると即座に中性子発生が止まるため安全で取り扱いのしやすい簡易な中性子源としての利用ができる。従来、電極には球形もしくは円筒形の電極を用いられてきた。また電極の数は1つであることが多い。

当研究室では複数の電極を用いて並行運転ができる装置について研究を行ってきた。その際に用いている電極の形状は隙間なく電極を並べるために立方体の構造を用いている。その構造を図1に、写真を図2に示す。陽極はステンレス製で直径 0.9mm の格子で構成されている立方体形状で一辺が 8cm である。陰極は直径が 1mm のモリブデン製でほぼ立方体形状で一辺が 4cm 程度である。陰極は陽極に対して 45 度の角度を持たせて設置している。この電極の1つについて中性子生成率の測定を行った。

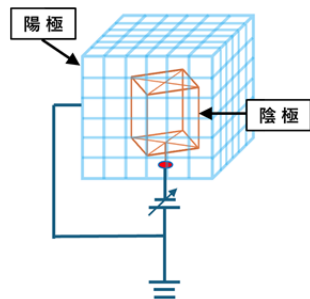


図 1. 立方体電極の構造



図 2. 立方体電極の写真

2. Experiment & Results

立方体電極 1 つを真空容器中央に配置し真空ポンプにて大気を排気し 5Pa の重水素ガスで真空容器内部を満たし、陰極に-10kV, 2.5mA を印加してグロー放電を行った。その際の装置内部を上方から撮影した写真が図3である。

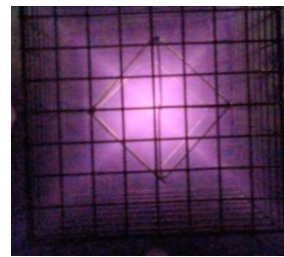


図 3. 上方からの放電写真 (5Pa, -10kV, 2.5mA)

この状態から徐々にガス圧を低くし 1.3Pa, 42.5kV まで放電を行った。この時に発生した中性子をポリエチレンで囲った 3He カウンタにて 30sec 計測した結果を図4に示す。

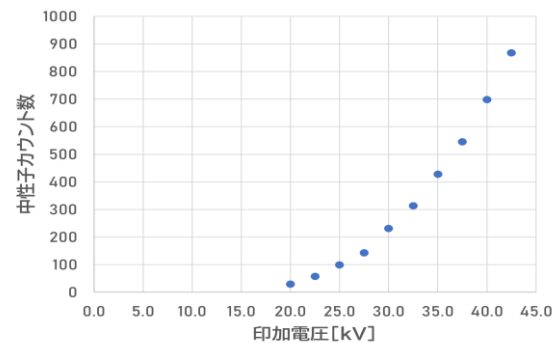


図 4. 電圧に対する中性子カウント (30sec)

この計測で印加電圧 V に対しての中性子カウント N は、 $N \propto V^{4.4}$ となり、印加電圧の 4.4 乗もの中性子カウントを得ることができた。

3. Conclusions

従来の球形状の電極では、印加電圧の 2 乗程度の中性子しか得ることができなかったのに比べて、立方体形状の電極では印加電圧の 4.4 乗もの中性子を得ることができた。この理由は、図3の様に斜め方向の十字状の放電を維持することができ、この固定された放電経路で重水素イオンが往復することでイオン同士の衝突核融合が増え高効率になったと考えられる。

レーザーパルスを用いた CdTe 放射線検出器における キャリア輸送特性の経時変化とその温度依存性に関する研究

Study of time and temperature dependences of carrier transport characteristics in CdTe semiconductor radiation detectors using laser pulses

静岡大院¹, 静大電研² ○富板 大輝¹, 杉本 竣¹, 長縄 柊¹, 青木 徹^{1, 2}, 伊藤 哲^{1, 2}

Shizuoka Univ.¹, RIE, Shizuoka Univ.²,

○Daiki Tomiita¹, Shun Sugimoto¹, Shu Naganawa¹, Toru Aoki^{1, 2}, Tetsu Ito^{1, 2}

E-mail: ito.tetsu@shizuoka.ac.jp

1. 緒言

次世代の放射線検出器材料として注目されている CdTe は長時間の連続利用で性能が劣化する「ポラリゼーション」現象が確認されている。この現象の原因の1つとして、深い準位への電荷トラップに伴う内部電界の変化が考えられている。本研究では、深い準位への電荷トラップの熱的影響に着目し、キャリア輸送特性の温度依存性を評価することとした。ショットキー型 CdTe 放射線検出器に放射線に疑似したレーザーパルスを入射し、キャリアの発生位置を固定しながら各温度における出力信号の経時変化を観察した。

2. 実験方法

試料は、ショットキー型 CdTe(In/CdTe/Pt)を用いた。厚さは 0.5 mm で、 $z = 0$ mm を陽極、 $z = 0.5$ mm を陰極とした。電圧を印加した検出器の劈開面にレーザーパルス(パワー:10.3 nW, 波長:850 nm, 周期:500 Hz)を入射し、発生した電荷が電極に到達した際の信号をプリアンプで増幅した後、オシロスコープで出力波形を平均化して取得した。出力波形のベースからピークまでの高さを波高値と定義した。温度はペルチェ素子を用いて制御し、25 °C ~ 45 °C の範囲で 5 °C 刻みに変化させ、各温度における波高値の経時変化を記録した。

3. 実験結果

Fig.1 にショットキー型 CdTe の陰極($z = 0.40$ mm)照射における各温度での波高値の経時変化を示す。波高値は、初めに時間の経過とともに減少し、その後緩やかに増加する2段階の現象が確認された。波高値の減衰時間定数 τ は温度上昇に伴い短くなった。これは、温度上昇により負の空間電荷の蓄積レートが速くなり、内部電界が低下して電荷収集効率が悪化するまでの時間が短くなったためと考えられる。波高値の時間変化に対して指数関数フィッティングすることで τ を求め、アレニウスプロットを作成し、その傾きより深い準位の価電子帯からのエネルギーレベル E_A を算出したところ $E_A = 1.03 \pm 0.12$ eV と求まった。また、波高値が減少後に緩やかに増加する現象については、蓄積した電荷が準位から脱離したことが要因と推察される。講演ではこの電荷の蓄積と脱離を基にポラリゼーション機構について議論を行う。

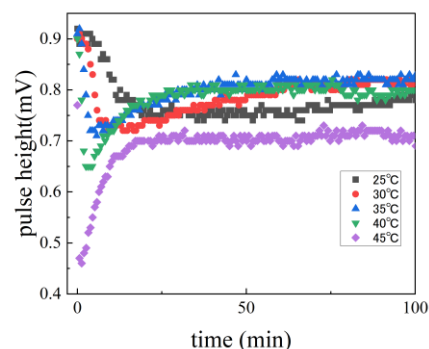


Fig.1 Time dependence of pulse height

β線スペクトルアンフォールディングによる核種分析手法の研究

Study on isotope analysis method using β-ray spectrum unfolding

福井工業大学 ○(M1)米村 空, 西沢 博志

Fukui University of Technology ○Sora Yonemura, Hiroshi Nishizawa

E-mail: mn25002sy@edu.fukui-ut.ac.jp

【緒言】原発廃炉や管理区域の汚染状況調査およびその除染作業においては、核種ごとに対応方法が異なるため、汚染の核種構成を調査しなくてはならない。核種の分析は、γ線スペクトル分析法が一般的だが、γ線を放出せずβ線のみを放出する核種には適用できないため、化学分離操作法¹⁾が行われている。しかし、この操作には手間と時間がかかってしまう。そこで、測定時間を大幅に短縮する手法としてβ線スペクトルを解析して核種分析する方法が考えられる。しかし、γ線スペクトルの測定と比較すると、β線では核種毎の形状差が少なく、明確なピークがないため、各々の核種を識別することが難しい。本研究では、混合核種のβ線スペクトルを測定し、このスペクトルを核種毎に分離するβ線スペクトルアンフォールディングの実現可能性の検討を行うことが目的である。

【原理】各核種の強度比ベクトルを X 、各核種の検出器応答関数マトリックスを R 、エネルギースペクトルの測定結果を M とすると、

$$M=RX \qquad \qquad \qquad \cdot \cdot \cdot \cdot (1)$$

の関係がある。 X を求める手法はいくつか存在するが、ここでは、最小二乗法を適用し、

$$X=(R^TR)^{-1}R^TM \qquad \text{(ただし、} R^T \text{は} R \text{の転置行列)} \qquad \cdot \cdot \cdot \cdot (2)$$

により、各核種の強度比を求めることを試みる。

【方法】今回は、最初の原理検証として、永続平衡となっている⁹⁰Sr/⁹⁰Yのスペクトル分離を試みる。すなわち、 $X(^{90}\text{Sr}, ^{90}\text{Y})=(1,1)$ が期待される結果である。

検出器はCsIシンチレータ(10×10×10mm³)+PINフォトダイオードとし、密封線源⁹⁰Sr/⁹⁰Yを用いてβ線のスペクトルを測定した。

【結果と考察】密封線源⁹⁰Sr/⁹⁰Yの測定結果をFig.1に示す。⁹⁰Srと⁹⁰Yの最大エネルギー546keVと2280keVのスペクトルの終端がそれぞれ確認できた。式(2)によりアンフォールディングを行った結果、期待される $X(^{90}\text{Sr}, ^{90}\text{Y})=(1,1)$ の結果が得られなかったため、結果に影響を及ぼす各因子について推定を行った。

推定要因のまとめをTable 1に示す。現時点では、定性的な推定にとどまっているが、①は、ディスクリレベルを160keV～100keVに変化させて検証した結果、条件によって $X=(1,0.88) \sim X=(1,1.24)$ の結果となり、影響があると考えられる。②は、BG計数率が相対的に非常に小さいためほぼ影響がないと考えられる。③は、測定時間を15分から6時間にして、統計誤差を低減すると、アンフォールディング結果が $X=(1,1)$ に近づいたため影響はあったと考えられる。④は、距離を変えたシミュレーションでも結果的にほとんど変化が無かったためほぼ影響がないと考えられる。⑤は、ピーク位置決定の際の重心法の有無でエネルギー校正式が変化し、ディスクリレベルのエネルギーの大きさにも波及すると推定されるため最も影響があると考えられる。

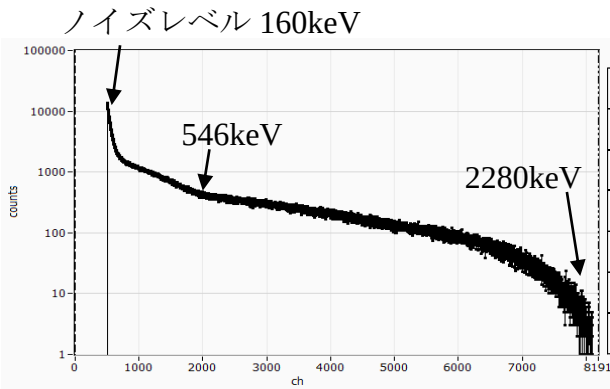


Table 1 Estimated factors affecting the unfolding results

要因	結果
①ディスクリレベル	影響あり
②BGカウントの混入	ほぼ影響なし
③統計誤差	影響あり
④線源と検出器の距離の違い	ほぼ影響なし
⑤エネルギー校正の正確さ	最も影響が大きい
⑥実験と計算のエネルギー分解能の違い	未実施

Fig.1 Result of the energy spectrum measurement of ⁹⁰Sr/⁹⁰Y

【参考文献・引用文献】

1)放射能測定法シリーズ No.2「放射性ストロンチウム分析法」，日本分析センター (2003)

Si 半導体検出器の構造的なガンマ線影響

Structural Effects of Gamma Radiation on Silicon Semiconductor Detector

釧路高専¹, 北海道大学² ○(B) 小林 奈和¹, 渡部 勝喜¹, 斉藤 直輝², 井戸川 慎之介¹

NIT, Kushiro College¹, Hokkaido University²

○N. Kobayashi¹, K. Watabe¹, N. Saitou², S. Idogawa¹,

E-mail: s240708@kushiro.kosen-ac.jp

はじめに

放射線耐性の評価に用いる大線源照射は、規模や安全管理の面から高専の授業や研究への導入が困難であり、敷居の高さが課題となっている。本研究では、管理が比較的容易な放射線源であるコバルト 60 (^{60}Co) を用い、安全かつ低コストで半導体デバイスの構造的な放射線影響を明らかにすることを目的とし、pn 接合面の形状が異なる検出器を作製・比較した。

設計と製作

フォトダイオード(PD)における不純物拡散層の形成には、Spin on Glass 法を用いた。n 型 Si(100)基板(厚さ 625[μm], 抵抗率: 10~[$\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$])の両面に、p 型(ホウ素)および n 型(リン)の SOG 剤を塗布し、窒素雰囲気下で 1150[$^{\circ}\text{C}$], 2 時間の熱拡散処理を行った。接合面の形状は、異方性エッチングにより Si ウエハ表面に凹凸を形成した後、不純物拡散を行うことで制御した(Fig.1)。検出器のサイズは、寄生容量の低減と電荷収集効率の向上のため $2 \times 2[\text{mm}^2]$ に加工した。計測用回路は、電荷増幅回路および反転増幅回路で構成される。検出部は、可視光の影響を避けるためアルミケースで遮光し、pn 接合端は UV レジンにより気密封止した。

製作 PD の評価

測定では、PD に逆バイアスを印加して空乏層を形成し、その領域に入射したエネルギーによって発生するキャリアを、計測用回路を通じてオシロスコープで観測した。回路調整にあたっては、PD の寄生容量に応じて初段アンプ(電荷増幅器)のキャパシタ容量を調整する必要がある。測定結果から、本研究により安全かつ低コストに半導体デバイスが構造的に受ける放射線影響を観測可能であることを示した。

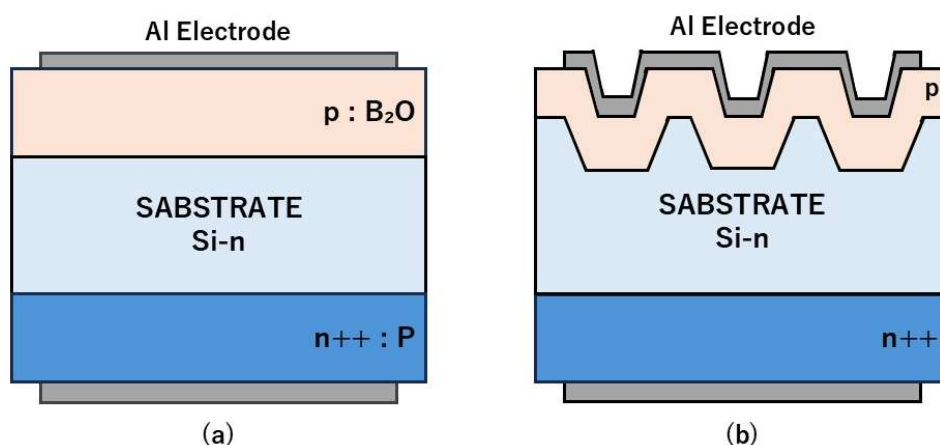


Fig. 1. Cross section of pn junction. (a) Conventional detector (b) Anisotropic etching detector

謝辞

本研究は、令和 7 年度原子力規制人材育成事業・学生研究課題の助成を受けて行いました。

中性子源スペクトル測定のための簡易型減速体系の検討

Study on a simplified moderator system for neutron source spectrum measurement

近大院総理工¹, 近大理工², 近大原研³ (M2) 井谷豪人¹, 東大輝², 大和田連¹, 若林源一郎³

Kindai Univ.^{1,2}, KUAERI.³, [○]Taketo Itani¹, Daiki Azuma², Ren Ohwada¹, Genichiro Wakabayashi³

E-mail: 2433340468e@kindai.ac.jp

【背景】

近畿大学原子力研究所が保有する Pu-Be 中性子源は、これまで原子炉起動用の目的にのみ利用されてきたが、最近は検出器のテストなど様々な目的で利用されるようになった。しかし、線源の特性に関する情報が乏しく、定量的な評価も行われてこなかった。

本研究では、CsI シンチレータの放射化と簡易型減速体の適用により、中性子源のエネルギースペクトルを求める方法について検討する。

【原理】

本研究では、ポリエチレン板を用いて複数の減速体系を作り、各体系で放射化した CsI シンチレータの放射能からアンフォールディング法によって中性子源スペクトルを求めることを想定する。

図 1 は減速体系のイメージである。ポリエチレン板を組み合わせて作った減速体の一边を 10~30 cm まで 2 cm ずつ変化させた 11 体系と金属を内部に含む 4 体系を合わせた 15 体系とする。これらの体系について PHITS を用いて応答関数を計算した。次に、中性子源スペクトルを仮定し、各減速体系における CsI シンチレータの放射能を計算した。得られた放射能を用いて、アンフォールディング法によって中性子源スペクトルが再現できるのかを検証した。

【結果及び考察】

図 2 にシミュレーション計算により得られた応答関数を示す。図 3 にアンフォールディング法による中性子源スペクトルの再現性を検証した結果を示す。この結果から、一様分布の初期スペクトルから中性子源スペクトルがある程度再現できることが分かった。今後実測に向けて再現性の検討をさらに進める。

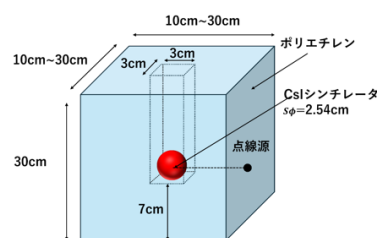


Fig. 1 Conceptual diagram of the moderator used in the calculation

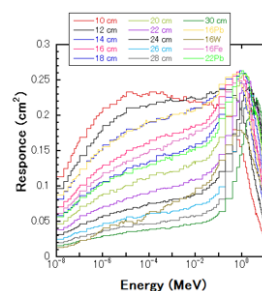


Fig. 2 Response function obtained by the PHITS code

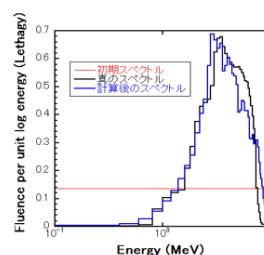


Fig. 3 Neutron source spectrum obtained by unfolding method with uniform distribution as initial spectrum

水素の2次元元素組成分布可視化を目的とした μ -ERDA システムの開発

Development of a two-dimensional hydrogen elemental composition imaging
by micro-ERDA system using ion microbeams

東北大・量子¹ ○(M1)後藤 健暉¹, 丸田 京華¹,
三輪 美沙子¹, 遠山 翔¹, 加田 渉¹, 松山 成男¹

Department of Quantum Science and Energy Engineering, Tohoku University¹,

○(M1)Takeaki Goto¹, ○Kyoka Maruta¹, Misako Miwa¹,

Sho Toyama¹, Wataru Kada¹, and Shigeo Matsuyama¹

E-mail: goto.takeaki.p7@dc.tohoku.ac.jp

昨今の持続可能なクリーンエネルギーキャリアとして、水素は重要な元素の1つであり、その貯蔵・輸送を担う材料の開発は高い関心を集めている。しかしながら、水素原子はその特徴から分析が困難な元素の1つでもある。イオンビーム分析法の中で、弾性反跳粒子検出法 (Elastic Recoil Detection Analysis: ERDA) は試料表面の水素を高感度分析が可能な手法として知られている。さらに、集束ビーム技術と組み合わせることで、 μm レベルの空間分解能を有する ERDA(μ -ERDA) システムが実現可能となる。[1]しかし、ERDA では分析時に試料を傾けて照射をすることから、照射範囲の一部でしか集束ビームの焦点が合わず、空間分解能の不均一化という課題が新たに生じる。

本研究では、これらの課題を解決し、高い空間分解能での μ -ERDA システムの実現を目指す。まず、システムの焦点深度の最適化のため、Focal Guide[2]を用い、ビーム光学系の計算評価を施した。弱集束条件では、 75° 傾いた試料に対して $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ の分析範囲において十分な収束が担保されることが示された。これに基づき、東北大学 4.5MV Dynamitron 加速器の MBII-AQUA マイクロビームラインにおいて、実験した。サンプルには、メッシュ構造を有する金薄膜層を付帯させた高分子薄膜模擬試料(図1)での μ -ERDA 実験(図2)では、スキャン範囲 $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ の領域で均一に高分子薄膜由来の水素元素像を取得することができた。本発表では開発した μ -ERDA システムの概要、および複数の模擬試料を用いた分析結果について報告する。

参考文献

[1]Saito, M, et al., *Nucl. Instr. and Meth.Sec.*

B,450(2019),304-309

[2] Matsuyama, S., et al., *Nucl. Instr. and Meth.Sec.*

B,540(2023),158

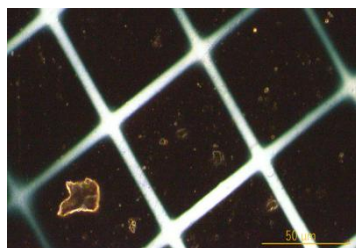


図1 Cu メッシュを用い PET 膜上に形成した Au パターン

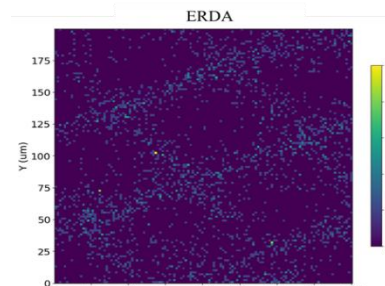


図2 模擬試料の μ -ERDA システムでのイメージング例

局所的に生成された原子に対する共鳴イオン化質量分析のための イオン光学系の検討

Investigation of ion optics in resonance ionization mass spectrometry for locally generated atoms

名古屋大¹, 工学院大² ○(M2) NI JINGYI¹, 石倉 大輔¹, 木村 奎斗¹,
望月 拓海¹, 寺林 稜平¹, 坂本 哲夫², 富田 英生¹

Nagoya Univ.¹, Kogakuin Univ.² ○(M2) Jingyi Ni¹, Daisuke Ishikura¹, Keito Kimura¹,

Takumi Mochizuki¹, Ryohei Terabayashi¹, Tetsuo Sakamoto², Hideki Tomita¹

E-mail: h-tomita@energy.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

原子力発電所の廃炉プロセスにおいて、燃料デブリ等の複雑な試料中に含まれる微量放射性核種の正確な同位体組成分析は不可欠である。しかし、燃料デブリ分析は、その複雑な性状、溶解困難性、高空間分解能、および同重体干渉抑制が求められる点で多くの課題を伴う。これらの課題解決のため、測定試料を局所的に原子化し、共鳴イオン化質量分析（RIMS）を行う同位体分析法を開発している。今回は、本手法に適した引き出し電極について基礎検討を行った。

2. 局所的な原子化法と組み合わせた共鳴イオン化質量分析システムとイオン光学系

局所的な原子化法と組み合わせた共鳴イオン化質量分析システムの体系を Fig. 1 に示す。イオン銃またはレーザーアブレーションにより固体試料を原子化し、その原子化領域の直上に高繰り返し率波長可変 Ti:Sapphire レーザーを照射し、生成された原子を共鳴イオン化する。イオンは引き出し電極により収集・加速され、飛行時間質量分析計により質量分析される。

試料間距離を短縮し、電極開口部の形状を設計することで、パルス引き出しを用いても質量電荷比の大きなイオンも効率的に引き出し・検出することが可能となると期待される。SIMION によるイオンビーム軌道の詳細なシミュレーション計算(Fig.2)により、電極形状や印加電圧等の条件を系統的に調査した結果について報告する。

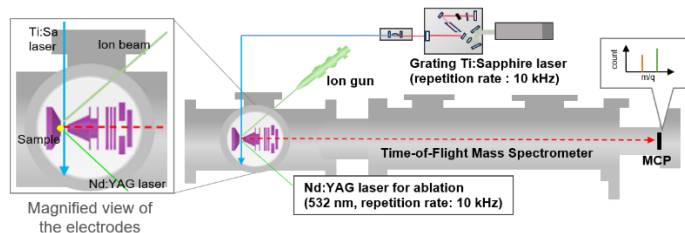
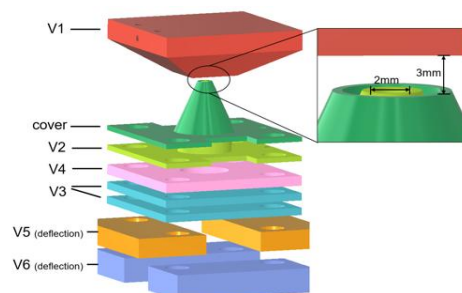
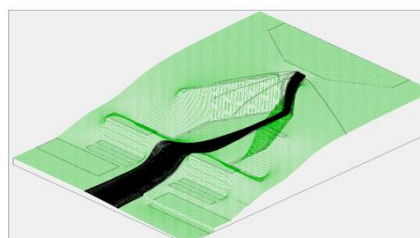


Figure 1. Schematic of the experimental setup



a) 3D shape of the accelerating electrode



b) Potential and ion trajectory

Figure 2. Design and Simulation of the Electrode

謝辞 本研究の一部は英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業（JPJA21P21465994）の助成を受けたものである。

1MV タンデム加速器により発生するイオンビームを 励起源とする準単色 X 線照射システムの開発

Development of a quasi-monochromatic X-ray irradiation field using an ion beam from 1MV tandem accelerator

東北大量子

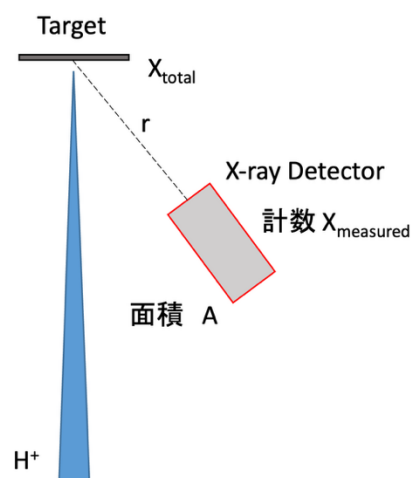
○加田 渉, 松本 卓己, 松尾 美祐, 大塚 勇輝, 遠山 翔, 三輪 美沙子, 松山 成男

QSE, Tohoku Univ.

○Wataru Kada, Takumi Matsumoto, Miyu Matsuo, Yuki Ohtsuka, Sho Toyama,
Misako Miwa, and Shigeo Matsuyama
E-mail: wataru.kada.a4@tohoku.ac.jp

透過力の高い放射線である X 線は材料科学、環境科学、生物学、医学といった学術分野に限らず非破壊検査といった工業利用や医療診断など幅広く利用されている。X 線を利用した各種診断技術の高度化には検出器の開発・評価が必要不可欠であり、そのエネルギー特性は、より厳密には多様なエネルギー帯の光子を用いて評価することが求められる。他方、従来の X 線源では、連続 X 線スペクトルの中から特定のエネルギー成分を単色化する手法が主流であり、純粋な意味での単色の X 線の照射には大型施設が必要不可欠である。実験室規模で高品質な準単色 X 線を安定して供給できる照射システムの開発には潜在的技術要求が存在すると考えられる。

そこで本研究では、荷電粒子励起 X 線(Particle Induced X-ray Emission: PIXE)技術の応用技術である PIXE-micron-computer tomography(CT)[1]等を単色 X 線源と見立てた検討を実施した。東北大学 1MV タンデム・ペレトロン加速器 (NEC) を主要装置として、PIXE 体系において線量計や検出器を配置し準単色 X 線照射場の評価を行った。加速器からの H^+ ビームを、単一金属薄膜ターゲット (アルミニウム、ニッケル、金) に照射し、各金属固有の特性 X 線を発生させた。X 線スペクトル評価には、図 1 に示すような体系にて Si(Li)/Ge 半導体検出器を用い、単色性を確認した。1 MeV 程度の水素イオンビームでは発生する X 線強度は 10^6 [photons/sec/pA] 程度となり、線源としては微弱であるものの、検出器応答評価としては十分な強度が想定できた。特性 X 線計数を指標に、ビーム電流の微調を行うことで、線量率を調整可能とした。照射環境に小型の線量計を配置することで、照射強度に応じた線量計応答の変動を評価できた。本体系に対し、さらに H^+ ビームの加速エネルギーを 40-100 keV 程度まで低減させても同様の技術展開は可能であり[2]、小型加速器と組み合わせることで、将来的により小規模に準単色 X 線照射場の構築が期待できる。



参考文献

- [1] S. Matsuyama, et al., Nucl. Instr. Meth. Sec.B 348,(2015) pp.123-126.
- [2] 加田 渉(2010). 大阪大学大学院工学研究科 博士論文.

図 1 イオンビームを励起とする
特性 X 線の計測体系概念図.

低軌道宇宙環境に対応する 小型加速器を用いた低 LET 粒子線照射場の構築

Development of a low linear energy transfer particle irradiation field for the low-earth-orbit electric device test using a small accelerator

東北大量子

°(M1)石原 慎太郎, 柴沼 直希, 大塚 勇輝, 遠山 翔, 加田 渉, 松山 成男

Department of Quantum Science and Energy Engineering, Tohoku University,

°Shintaro Ishihara, Yuki Otsuka, Naoki Shibamura,

Sho Toyama, Wataru Kada, Shigeo Matsuyama

E-mail: ishihara.shintaro.q2@dc.tohoku.ac.jp

宇宙開発の近年の潮流において、民間主導の New Space への関心の増大から、小型衛星を活用した事業展開が注目を集めている[1]。特に低軌道 (Low Earth Orbit: LEO) での衛星コンステレーションでは、開発の高速化、低コスト化を目標として、市販の民生部品 (Commercial Off-The-Shelf: COTS) の導入が進んでいる。しかし、COTS 半導体デバイスは宇宙放射線、特に低線エネルギー付与 (Linear Energy Transfer: LET) 荷電粒子によるシングスイメント効果 (Single Event Effect: SEE) への耐性評価が不十分である[2]。特に、デバイスプロセスの微細化により、SEE の発生 LET 閾値が低下する可能性が増大することから、LEO 環境での影響評価が重要となるが、専用の放射線照射場の整備が十分でない。そこで、本研究では、低エネルギー加速器を用いて、低 LET 荷電粒子環境を再現可能な模擬宇宙線場を構築した。

本研究では、東北大学ペレトロン加速器 (1 MV) を用い、粒子種 (H^+ , He^{2+})・フラックス (10^2 - 10^8 / cm^2/s)・単色性 (Full-Width at Half Maximum: FWHM < 10 %) といった要件を満たす照射場を構築した。目的とする粒子数での照射制御を可能とするため、微小電流計による電流計測、Si 半導体検出器による粒子計数に加え、シンチレータによる発光を指標とした間接測定法を開発することで、精密な照射粒子数制御を可能とした。照射場の概要図を Fig. 1 に示す。ZnS:Ag シンチレータからの発光はレンズ付きファイバーフィードスルー経由で取得し、高強度時には ND フィルタを通して PMT により測定することで、電流計測と粒子計数がカバーできない (10^5 - 10^8 / cm^2/s) 範囲での緻密な照射量評価を可能とした。本発表では、照射場の汎用化に向けた光検出系の簡素化や SEE の基礎評価例について報告する。

参考文献

- [1] K. Hasegawa, Communications Society Magazine, No.68, 295-300, 2024.
- [2] D. Kobayashi, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 68, no. 2, pp. 124-148, 2021.

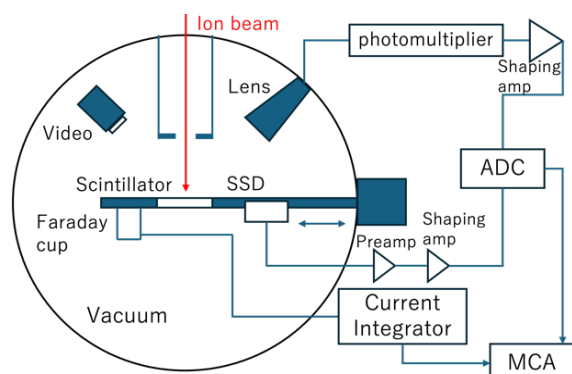


Fig.1 Schematic of Low LET charged particle irradiation field in a small accelerator.

電子線 FLASH 照射場における Cr, Si, Mg 共添加 Al₂O₃ セラミックス板の熱蛍光特性

Thermoluminescence Properties of Cr, Si, and Mg Co-doped Al₂O₃ Ceramics Plates under Electron FLASH Irradiation Field

東京都立大学¹, 京大複合原研²,

○(M1) 栗林花風¹、大久保綾乃¹、田中浩基²、松林錦²、*眞正浄光¹

Tokyo Metropolitan Univ.¹, Kyoto Univ.²,

○Hana Kuribayashi¹, Ayano Okubo¹, Hiroki Tanaka², Nishiki Matsubayashi²* Kiyomitsu Shinsho¹

*E-mail: shinsho@tmu.ac.jp

近年、極めて高い線量率を短時間で照射する FLASH 照射技術が注目されており、従来の放射線治療と比較して正常組織への損傷低減が期待されている。一方で、線量率依存性の影響により FLASH 照射場での線量測定は従来法では困難である。そのため、高線量率場に適した新たな線量測定法の開発が不可欠である。本研究では、光子線や陽子線に対する線量分布測定が可能な Cr, Si, Mg 共添加 Al₂O₃セラミックス板による電子線 FLASH 照射場での測定を行った。

電子線照射は京都大学複合原子力科学研究所 KURNS-LINAC を使用し、電子線のエネルギーは 8 MeV、パルス幅は 5 μ s とし、照射ポートからの距離を変化させながら 1 パルスずつ照射した。TL 素子は、10×10×0.7 mm³ と 200×200×0.7 mm³ の Cr, Si, Mg 共添加 Al₂O₃セラミックス板を用いて、蛍光ガラス線量計とラジオクロミックフィルムとの点線量と線量分布の比較、検討を行った。Fig.1 では照射ポートからの距離と線量の関係を示す。照射ポートからの距離が短くなるほど線量率は高くなる。距離が 1000 mm 以上(線量率 10⁶ Gy·s⁻¹以下)のとき、本 TL 素子と蛍光ガラス線量計、ラジオクロミックフィルムの線量値は一致した。一方、距離が 1000 mm(線量率 10⁶ Gy·s⁻¹)より短くなるほど、蛍光ガラス線量計と他の線量計との差が大きくなった。Fig.2 では、距離が 475 mm(線量率 10⁷ Gy·s⁻¹)のときの 200×200×0.7 mm³の本 TL 素子とラジオクロミックフィルムの線量分布を示す。両者は概ね一致した線量分布を示したが、照射野中心付近の線量に着目すると、本 TL 素子が約 8 Gy 高い値を示した。これは、Fig.1 の同一線量率の結果と矛盾しなかった。以上より、本 TL 素子は電子線 FLASH 照射場においても線量依存性の影響を受けることなく、点線量および線量分布測定の双方が可能であることが示唆された。

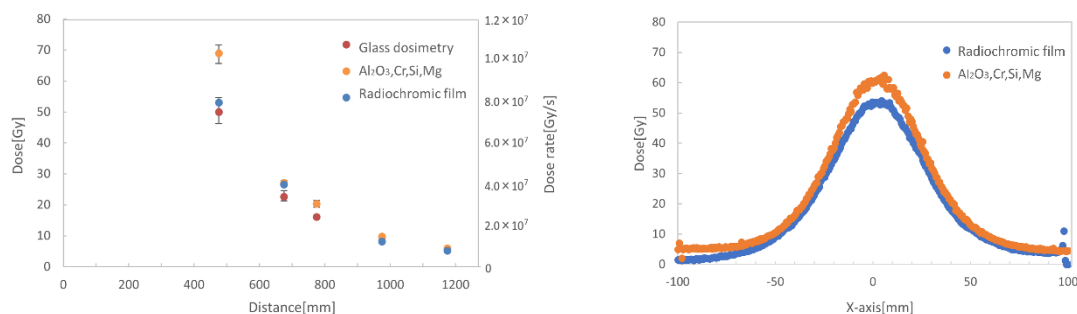


Fig.1 Distance from the irradiation port and dose curves

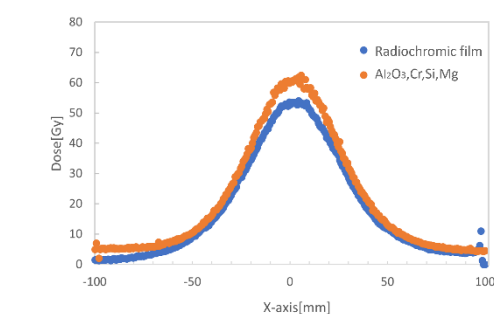


Fig.2 FLASH Irradiation Dose distribution curves

シンチレータ型 PC-CT システムにおける YGAG シンチレータの最適化と性能評価

Optimization and Performance Evaluation of YGAG Scintillator in Scintillator-Based Photon-Counting CT Systems"

金沢大¹, 早大理工², プロテリアル³, [○]緑川柊麻¹, 有元誠¹, Fitri Lucyana¹,
大島美礼¹, 古田優¹, 片岡淳², 皆川遼太郎², 呂膺昊², 川島広貴¹,
小林聡¹, 奥村健一郎¹, 寺澤慎祐³, 前野優太³

Kanazawa Univ.¹, Waseda Univ.², Proterial Ltd.³, [○]S. Midorikawa¹, M. Arimoto¹,
F. Lucyana¹, M. Oshima¹, Y. Furuta¹, J. Kataoka², R. Minagawa², T. Ro²,
H. kawashima¹, S. Kobayashi¹, K. Okumura¹, S. Terazawa³, Y. Maeno³

E-mail: m2252010348@stu.kanazawa-u.ac.jp

X線CT (Computed Tomography) は、X線を利用して被写体内部の構造を非破壊で可視化する技術であり、主に医療分野で広く利用されている。一方、従来のCT装置では、X線のエネルギー情報を取得できないという課題がある。これに対し、近年では低被ばく化と多色化を可能とする光子計数型CT (Photon Counting CT; PC-CT) が注目されている。2021年に販売された世界初の臨床PC-CTシステムでは、検出器にCdTe半導体が使用されている。

そこで我々は、半導体検出器と比較して製造コストが低く、費用対効果に優れるシンチレータベースの検出器を用いたPC-CTシステムの開発を進めている。本システムでは、シンチレータによってX線光子が可視光へ変換された後、光半導体素子であるMPPC (Multi-Pixel Photon Counter) によって電荷増幅され、後段の回路で信号処理が行われる。臨床では、 ~ 100 MHz/mm²程度の高いカウントレートでCT撮影が行われる。したがってPC-CTでは、高い時間応答性とカウントレート耐性を実現する検出器構成が要求される。

本研究では、このような要求を満たす検出器の実現に向けて、シンチレータの最適化を目的とした性能比較実験を行った。具体的には、成分比の異なる4種類のYGAGシンチレータ (プロテリアル製) について、エネルギー分解能、およびカウントレート耐性を評価した。その結果、シンチレータの発光特性とエネルギー分解能、カウントレートとの間に相関が認められた (Figure 1)。本発表では、これらの結果に加え、CT撮影、濃度推定の結果についても報告する。

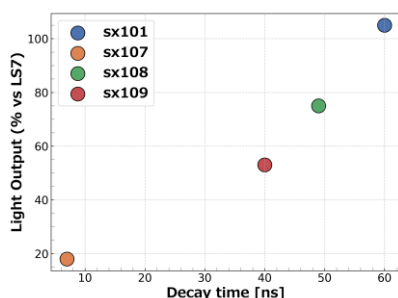


Figure1: Light Emission Characteristics of Each Scintillator

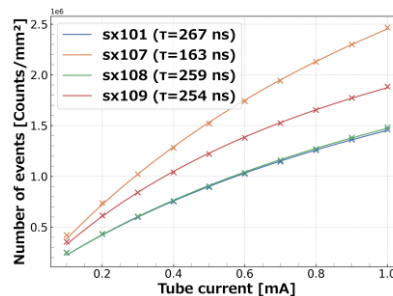


Figure 2: Count Rate Tolerance of Each Scintillator

単結晶ダイヤモンド検出器による 診断 X 線領域での放射線誘起電流測定

The quantification of the radiation-induced current by means of
a single crystal diamond detector within the diagnostic X-ray energy range.

東北大量子¹, 東北大医², 東京都立大³

○(D) 松本 卓己¹, (D) 藤沢 昌輝², (D) 進藤 僚太², 伊藤 宙¹,
稲葉 洋平², 松本 真之介³, 松山 成男¹, 加田 渉¹

Department of Quantum Science and Energy Engineering, Tohoku University.¹,
Graduate School of Medicine, Tohoku University.², Tokyo Metropolitan University.³

○Takumi Matsumoto¹, Masaki Fujisawa², Ryota Shindo², Sora Ito¹, Yohei Inaba²,
Shinnosuke Matsumoto³, Shigeo Matsuyama¹ and Wataru Kada¹

E-mail: matsumoto.takumi.r1@dc.tohoku.ac.jp

ダイヤモンドはワイドバンドギャップ半導体の一種として理想的な結晶構造を有し、高温環境動作や優れた放射線耐性が期待されるため、放射線検出器として長らく研究開発が進んでいる [1]。他方で、炭素のみで構成されるダイヤモンドは、生体と比較した際に放射線との相互作用の比率が近く、医療現場での線量計測機能でも優位性が期待される。我々は、重粒子線がん治療場において、単結晶ダイヤモンドを用いた線量計の開発を進めており、放射線誘起電流 (RIC : Radiation Induced Current) の測定により、固体電離箱に相当する線量計測機能を示した[2]。重粒子線での RIC 測定における高い信号対雑音比から類推することにより、RIC 測定の適応可能範囲は、さらに線エネルギー付与(LET: Linear Energy Transfer)が低い領域の放射線への拡張性が期待される。しかしながら、これらの放射線領域において十分な測定データの蓄積がなされていない。

そこで本研究では、単結晶ダイヤモンド検出器を用いた診断 X 線領域での RIC 測定を行った。実験には、東北大学医学部に設置された診断用 X 線撮影装置 (DHF-155H-II, HITACHI) を使用した。単結晶化学気相成長法(CVD: Chemical Vapor Deposition)ダイヤモンド検出器(B70073,CIVIDEC)を微小電流計 (KEYTHLEY 2400) に接続し、管電圧 80 kV, 管電流 100 mA, 照射時間 400 ms のパルス状 X 線を 3 回繰り返し測定した。結果を図 1 に示す。診断 X 線領域において、安定したパルス形状の RIC 測定が確認された。本発表では、エネルギー特性等の諸特性評価を報告する。

【謝辞】

本研究の一部は科研費(JP25KJ0591)の助成を受けて実施された。

【参考文献】

- [1] T. Shimaoka, et al., *Functional Diamond*, 1(1), 205–220, 2021.
- [2] T. Matsumoto, et al., *Nucl. Instr. Meth. Sec B*, 554, 163540, 2024.

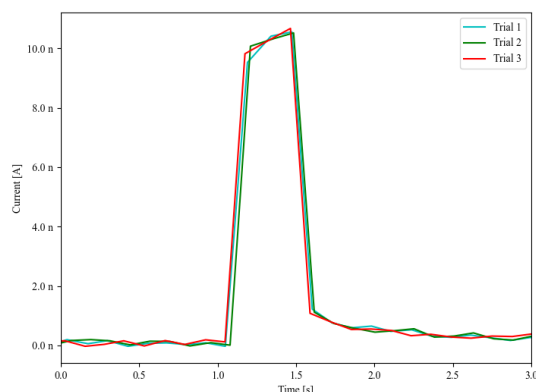


図 1 同一条件(管電圧 80 kV, 管電流 100 mA, 照射時間 400 ms)での X 線照射時の CVD ダイヤモンド検出器からの放射線誘起電流(RIC)測定例。

加熱処理による BeO セラミックス板の OSL 感度増強と測定手法の検討

Enhanced OSL Sensitivity of BeO Ceramic Plates via Thermal Treatment: A Study of Measurement Protocols

東京都立大学¹, 金沢工業大学² ○佐村 春月¹, 岡田 豪², 眞正 浄光¹

Tokyo Metropolitan Univ.¹, Kanazawa Institute of Technology²,

○Haduki Samura¹, Go Okada², Kiyomitsu Shinsho¹

E mail : shinsho@tmu.ac.jp

【背景】 BeO セラミックス板は、生体等価性が高いため、個人被ばく線量計や水吸収線量測定など医療分野で用いるドシメータとして理想的な OSL 素子である。一方で、感度不足や LET 依存性などの課題があり、利用が限定されている。Okada ら¹⁾は、X 線照射後に一定温度で加熱 (pre-heat) 処理を施すことで OSL 強度が変化することを報告しており、高感度化の可能性が示唆されているが、その特性の詳細は不明である。そこで本研究では、pre-heat 処理を含む 4 種類の方法を比較し、OSL 感度への影響を評価した。

【方法】 Elekta 製リニアック (Versa HD) を用いて BeO セラミックス板に 6 MVX 線を 1 Gy および 5 Gy 照射した。OSL 測定は自作装置により実施し、以下の 4 手法を比較した：(1) 通常の OSL 測定、(2) OSL 連続 2 回測定、(3) pre-heat 後の OSL 測定、(4) OSL 測定 + pre-heat 後の再 OSL 測定。

【結果と考察】 Fig. に各手法での OSL 強度を示す。通常の OSL 測定では、照射後に強い OSL 信号が得られる一方で、同一試料を再測定した際にも残留 OSL が観測され、光刺激では解放されないキャリアが存在することが示唆された。さらに、OSL 測定後に加熱処理 (pre-heat) を行うことで、OSL 信号が大きく増強されることが明らかとなった。この手法により、通常の測定と比較して 1 Gy で 1.78 倍、5 Gy で 2.03 倍の出力が得られた。これは、光刺激に対して非活性だったトラップが加熱により活性化し、OSL に寄与するようになったためと考えられる。この結果は、BeO セラミックス内に複数のトラップ準位が存在し、それらを段階的に活性化することで高感度な OSL 測定が可能であることを示している。今後、加熱温度や時間などの条件を最適化することで、医療用ドシメータとしての応用が期待される。

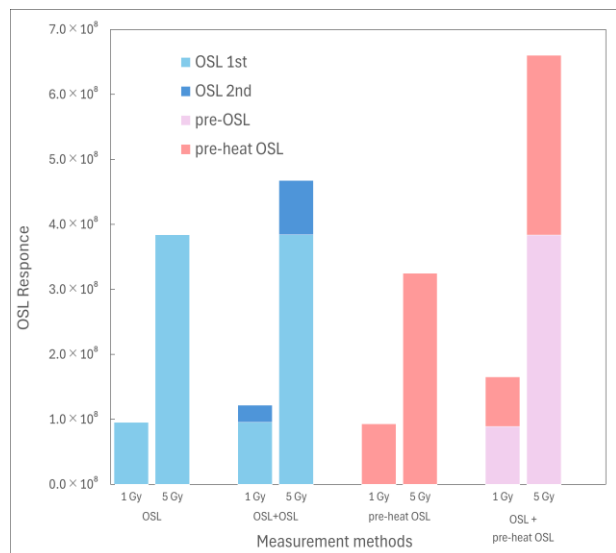


Fig. OSL intensity of BeO ceramic plates for each measurement method

1) Go Okada et.al, Sensors and Materials, Vol. 33, No. 6 (2021) 2117–21

SEEM 学の構築：福島第一原発廃炉における 知見継承と人材育成のためのエスノグラフィーシステム

Establishing SEEM Studies: An ethnographic system for knowledge transfer and
human resource development in the decommissioning of 1F

福井大¹, 東北大², 構造計画研究所³, [○](M2)中尾 虹海¹, (D)吉田 佳乃子¹, 安田 仲宏¹,
高橋 信², 渡邊 豊², 小山 智加³, 米山 照彦³, 小野 晋太郎³

Fukui Univ.¹, Tohoku Univ.², KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc.³, [○]Nanami Nakao¹, Kanoko

Yoshida¹, Nakahiro Yasuda¹, Makoto Takahashi², Yutaka Watanabe², Tomoka Koyama³,

Teruhiko Yoneyama³, Shintaro Ono³

E-mail: ms240909@g.u-fukui.ac.jp

福島第一原子力発電所の廃炉は、ロボットによる調査ですら故障や誤作動を引き起こすほどの高線量環境下で進められている。さらに、水中に沈んだ燃料デブリや遮蔽物の存在により、ロボットの侵入経路や視界の確保も極めて困難である。このような過酷な状況下で進行する廃炉作業は、30～40年以上を要する長期的なプロジェクトとされている。

こうした高い不確実性を伴う環境では、作業の多くが実際の経験に基づく経験則によって進められているのが現状である。また、廃炉の完了には数十年を要するため、今後は事故を知らない世代も含めた継続的な取り組みが求められる。したがって、将来的な人材育成の観点からも、適切なマネジメント手法の確立が重要である。

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「燃料デブリ研究と SEEM 学構築を基軸とした研究人材育成」（東北大学）として採択された事業の中で、新たな学問分野として「SEEM (Severe Environment Engineering and Management)」を提案し、廃炉に限らず他分野への応用も視野に入れた理論と実践的アプローチの構築を目指している。特に、不確実性の高い過酷環境下においても合理的な意思決定を行える人材の育成を目的とし、福島第一原発（1F）の廃炉に関する知見を体系的に記録・継承可能とするデータ集積システム「1F 廃炉エスノグラフィーシステム」の構築を試みている。

本システムでは、公開情報に加えて、作業員や地域住民へのヒアリングから得られる現場の知見や思いも収集・格納する。これらの情報にはキーワードによるタグ付けを行い、時系列で整理することで、事実の把握と教訓の抽出を可能とする。さらに、得られた事例をマネジメント学やリーダーシップ論など既存の学問分野と関連付け、新たな学問体系の構築を目指す。

将来的には、大学におけるカリキュラム開発などにも本システムを活用し、全国的な人材育成の基盤として位置づけることを目指している。本発表では、SEEM 学構築に向けた全体コンセプトと「1F 廃炉エスノグラフィーシステム」の概要について紹介する。

放射線・原子力防災教育に関する小中学校教員の意識調査

Survey of teacher attitudes regarding radiation and nuclear disaster prevention education at elementary and junior high schools

福井大¹, [○](M1)谷山 勇士朗¹, (M1)脇村 匠¹, (M2)中尾 虹海¹, 弓削 湧輔¹,
(D)吉田 佳乃子¹, 安田 仲宏¹

Fukui Univ.¹, [○]Yushiro Taniyama¹, Takumi Wakimura¹, Nanami Nakao¹, Yusuke Yuge¹,

Kanoko Yoshida¹, Nakahiro Yasuda¹

E-mail: ms250953@g.u-fukui.ac.jp

東京電力福島第一原子力発電所事故から14年が経過した。2011年5月1日時点で、福島県の園児・児童・生徒・学生数は前年より17,308人(6.3%)減少しており[1]、その背景には放射線への不安があったと考えられている[2]。文部科学省の「学校安全の推進に関する計画に係る取組状況調査(令和5年度実績)」[3]によれば、現在、全国の97.9%の学校が地震を想定した避難訓練を実施している一方で、原子力災害対策重点区域にある学校のうち、原子力防災訓練を実施しているのは54.1%にとどまっている。しかし、訓練の頻度や実施上の課題については十分に明らかになっていない。本研究では、小中学校における放射線教育および原子力防災教育の現状と課題を把握するため、教員を対象としたアンケート調査を実施した。

全国の小中学校に勤務する教員400名を対象に、Web上で予備的なアンケート調査を行った。調査は選択式および自由記述式の質問で構成し、放射線教育および原子力防災教育の実施状況、課題認識、教育・訓練実施における大学の支援への期待などを尋ねた。

その結果、放射線教育および原子力防災教育のいずれについても、約8割の教員がその重要性を認識していることが分かった。一方で、放射線教育については約5割の教員が自身の知識や経験の不足を課題として挙げ、原子力防災教育については約6割の教員が「何を教えるべきか分からない」と回答した。また、教員の経験年数や担当教科によって意識に差があり、福島事故当時にまだ教職に就いていなかった若手教員では、原子力防災教育への関心が比較的低い傾向がみられた。放射線教育については、理科・保健体育・社会を担当する教員において特に意識が高く、その重要性の認識や理解度も高い傾向が確認された。原子力防災訓練の実施率は全国的に2割未満、定期的に行っている学校に限ると約1割にとどまった。原発立地道県に所在する学校(回答者95名)においても、定期的な訓練を実施していると答えた教員は3割未満にとどまった。また、訓練を実施している教員と未実施の教員とでは、実施上の課題認識に違いがみられた。未実施の教員は「どのように行えばよいのか分からない」という漠然とした不安を抱えているのに対し、実施している教員は具体的な訓練内容の設計や実施方法に苦慮していた。大学からの支援については、全体の7割以上の教員が肯定的に評価した一方、そのうちの約7割が「実施は難しい」とも感じていた。支援に対する期待がある一方で、時間の確保や教員への負担増といった懸念も多く寄せられており、今後は学校現場の実情に即した柔軟な支援体制の構築を行政と相談しつつ、大学においては教材開発、出前講座などを検討していきたい。

[1] 文部科学省、平成23年度学校基本調査(2012)。

[2] 日本経済新聞、「被災3県の児童生徒2万6000人減 福島が大半、11年5月」(2012)。

[3] 文部科学省、学校安全の推進に関する計画に係る取組状況調査(2023)。

2 Ionizing Radiation | Oral presentation : 2.1 Radiation physics, Material development and characteristic evaluation

[7a-N107-1~8] 2.1 Radiation physics, Material development and characteristic evaluation

[7a-N107-1]

Response evaluation of the optical fiber-based neutron detectors using a spherical Li glass scintillator

○Yutaro Saito¹, Yuya Oshima¹, Kenichi Watanabe¹ (1.Kyushu Univ.)

[7a-N107-2]

Growth and scintillation properties of Cs₂LiGdCl₆:Ce scintillators for thermal neutron detection

○Ryosuke Kawabata^{1,2}, Masao Yoshino^{2,3,4}, Kei Kamada^{2,3,4}, Takahiko Horiai^{3,4}, Kim Kyoung Jin^{2,3,4}, Naoko Kutsuzawa⁴, Rikito Murakami^{2,4}, Akihiro Yamaji^{2,3}, Shunsuke Kuosawa^{2,3}, Yuui Yokota^{2,3}, Hiroki Sato^{2,3}, Takashi Hanada², Akira Yoshikawa^{2,3,4} (1.Grad. Sch. Eng, Tohoku Univ, 2.IMR, Tohoku Univ, 3.NICHe, Tohoku Univ, 4.C&A corporation)

[7a-N107-3]

Development of Optical-guiding Tl:Cs₃Cu₂I₅ crystal scintillator plates for high-resolution and high-sensitivity X-ray imaging

○(M1)Yuhei Nakata¹, Kei Kamada^{2,3,4}, Tetsuo Kudo⁵, Masao Yoshino², Yasuyuki Usuki⁴, Kyoung Jin Kim³, Yuui Yokota², Syunsuke Kurosawa³, Hiroki Sato³, Takashi Hanada², Rikito Murakami², Akihiro Yamaji³, Satoshi Ishizawa², Akira Yoshikawa^{2,3,4} (1.Tohoku Univ., Eng., 2.Tohoku Univ., IMR, 3.Tohoku Univ., NICHe, 4.C&A Corp., 5.Mirai imaging Corp.)

[7a-N107-4]

Recovery of Light Yield and α/β ratio in Aged Ce:LiCAF Scintillators by Annealing

○Takeshi Fujiwara¹, Hiromi Kimura¹ (1.AIST)

[7a-N107-5]

Influences of Si contamination into Cs₂HfI₆

○Shohei Kodama¹, Gaito Shimura¹, Shogo Omiya¹, Shunsuke Kurosawa^{2,3}, Chihaya Fujiwara², Masahiro Kato⁴, Sawako Futagi⁴, Junya Ishii⁴, Ikuo Yanase¹, Hiroaki Takeda¹ (1.Saitama Univ., 2.Tohoku Univ., 3.Osaka Univ., 4.AIST)

[7a-N107-6]

Effects of chemical shift in X-ray linear attenuation coefficients

○Hikaru Katagiri¹, Kazushi Hoshi¹, Ryuga Nagahashi¹, Yuki Furuta¹, Manabu Takahashi¹, Masami Torikoshi², Hiroshi Sakurai¹ (1.Gunma Univ., 2.QST)

[7a-N107-7]

Improving the Accuracy of Effective Atomic Number Calculation in Photon Counting CT

○Takumi Kishi¹, Hiroshi Sakurai¹, Kazushi Hoshi¹, Yuki Furuta¹, Masami Torikoshi² (1.Gunma Univ, 2.QST)

[7a-N107-8]

Quantitative measurement of four-element system using photon counting CT

○Ryuga Nagahashi¹, Yuki Furuta¹, Kosuke Suzuki¹, Kazushi Hoshi¹, Manabu Takahashi¹,
Masami Torikoshi², Hiroshi Sakurai¹ (1.Gunma Univ., 2.QST)

球形 Li ガラスシンチレータを用いた 光ファイバ型中性子検出器の応答評価

Response evaluation of the optical fiber-based neutron detectors using a spherical Li glass scintillator

九大工¹ ○齋藤 優太郎¹, 大島 裕也¹, 渡辺 賢一¹

Kyushu Univ.¹ ○Yutaro Saito¹, Yuya Oshima¹, Kenichi Watanabe¹

E-mail: saito.yutaro.957@s.kyushu-u.ac.jp

ホウ素中性子捕捉療法 (Boron Neutron Capture Therapy: BNCT) は、新しいがん治療法として注目されており、その安全性および治療効果を確認する手段として、中性子計測技術確立することは必要不可欠である。我々は、Li ガラスシンチレータを用いた光ファイバ型中性子検出器の開発を行っている。従来、光ファイバ先端に配置するシンチレータ小片にはバルクシンチレータを粉砕して得られた不規則な形状のものを用いていたが、モンテカルロシミュレーションによる検出器応答の詳細な評価が困難であった。小片を空気流を利用して、紙やすりを内張した円筒内で回転させながら研磨する空力学的研磨法を用いることで、200~500 μm の球形 Li ガラスシンチレータの作製が可能となった。

加工した Li ガラス球を用いて実際に中性子検出器を作製した。Fig. 1 に遮光前の、光ファイバの先端に 270 μm の Li ガラスシンチレータを配置した様子を示す。検出器応答の評価にあたっては、 ${}^6\text{Li}(n,t)$ 反応に起因する壁効果やシンチレータの自己吸収などを考慮する必要がある。本研究では、光ファイバ型中性子検出器の応答評価におけるシミュレーションの有用性を検証した。実験では近畿大学の原子炉 (UTR-KINKI) 及び J-PARC において熱中性子照射を行った。シミュレーションでは、PHITS の標準タリーでは発光量分布の計算が困難なため、Birks の式を組み込んだルーチンを導入し、消光現象を考慮した解析を行った。Fig. 2 に Li ガラスシンチレータの直径 300 μm における実験結果とシミュレーションの比較を示すが、両者はよく一致していることが確認できる。



Fig.1 Enlarged view of Li glass sphere.

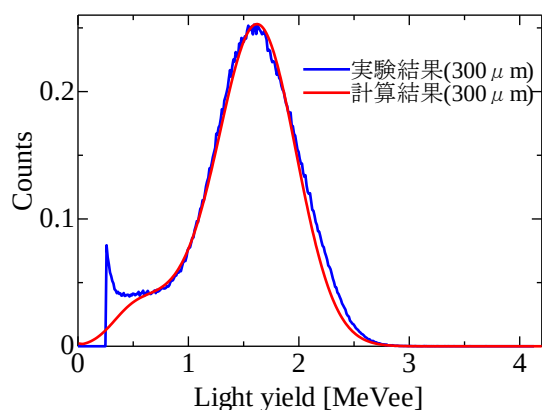


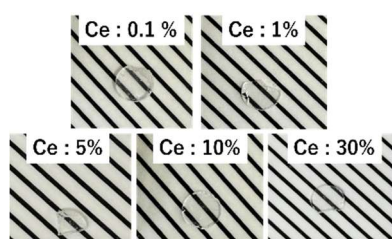
Fig.2 Pulse height spectra obtained from an optical fiber-based neutron detector.

熱中性子検出に向けた Ce 添加 $\text{Cs}_2\text{LiGdCl}_6$ シンチレータの育成および特性評価Growth and scintillation properties of $\text{Cs}_2\text{LiGdCl}_6$:Ce scintillators for thermal neutron detection東北大工¹, 東北大金研², 東北大 NICHe³, 株式会社 C&A⁴, ○(M2)川畑諒輔^{1,2},吉野将生^{3,4}, 鎌田圭^{2,3,4}, 堀合毅彦^{3,4}, Kyoung Jin Kim^{2,3,4}, 沓澤直子⁴,村上力輝斗^{2,4}, 山路晃広^{2,3}, 黒澤俊介^{2,3}, 横田有為^{2,3}, 佐藤浩樹^{2,3}, 花田貴², 吉川彰^{2,3,4}Grad. Sch. Eng, Tohoku Univ.¹, IMR, Tohoku Univ.², NICHe, Tohoku Univ.³,C&A corporation⁴, °(M2)Ryosuke Kawabata,^{1,2}Masao Yoshino,^{3,4}Kei Kameda,^{2,3,4}TakahikoHoriai,^{3,4}Kyoung Jin KIM,^{2,3,4}Naoko Kutsuzawa,⁴Rikito Murakami,^{2,4}Akihiro Yamaji,^{2,3} ShunsukeKurosawa,^{2,3}Yuui Yokota,^{2,3}Hiroki Sato,^{2,3}Takashi Hanada,² andAkira Yoshikawa,^{2,3,4}E-mail: kawabata.ryosuke.r5@dc.tohoku.ac.jp

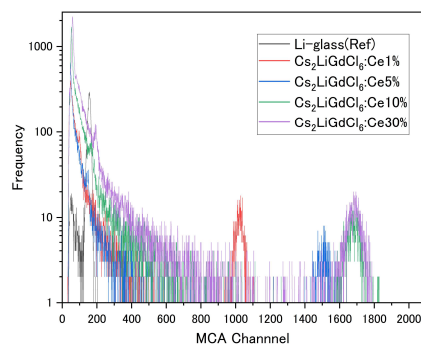
[背景]熱中性子検出器は国土安全保障、ホウ素中性子補足法、非破壊検査など様々な分野で活用されている。中でも高い熱中性子捕獲断面積を持つ ^3He ガス検出器は、機械的・化学的に安定で優れた検出特性を示す。しかし ^3He ガス資源の枯渇と需要増加により、需要と供給の乖離が課題となっている。これに伴い ^3He ガス検出器の代替となる熱中性子検出用シンチレータの開発が進められてきた。 $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6$:Ce (CLYC) [1]や $\text{Cs}_2\text{LiLaCl}_6$:Ce (CLLC) [2]に代表される、 ^6Li を含むエルパソライト構造のシンチレータは熱中性子の捕獲断面積が大きく Ce^{3+} の 5d-4f 発光を示す。これにより優れたシンチレーション特性や中性子(n)/ガンマ線(γ)識別性能を有するため、熱中性子検出用シンチレータとして有望視されている。 $10\%\text{Ce}$ 添加 $\text{Cs}_2\text{LiGdCl}_6$ [3]は ^{137}Cs に由来する γ 線に対して 20,000[photons/MeV]の発光量を持つことが報告されており高いシンチレーション特性を有するが、中性子に対する応答性や n/ γ 識別性能については調査されていない。そこで本研究では Ce 添加 $\text{Cs}_2\text{LiGdCl}_6$ シンチレータを育成し、シンチレーション特性および n/ γ 識別性能について評価を行ったので報告する。

[実験方法] Ar 雰囲気下で各粉末原料を秤量し石英管に封入し、真空下 170°C で 6 時間加熱し原料の脱水を行い、石英管を封じ切った。結晶育成は垂直ブリッジマン法を用いて 1mm/h の引き下げ速度で行った。育成結晶はドライルーム内での切断、研磨後にシンチレーション特性を評価した。

[結果]図 1 に切断・研磨後の $\text{Cs}_2\text{LiGdCl}_6$:Ce (0.1~30%) 結晶を示す。育成した単結晶は全ての Ce 濃度において透明性を有することが確認された。図 2 に ^{252}Cf 線源を用いて測定した $\text{Cs}_2\text{LiGdCl}_6$:Ce (0.1~30%) のエネルギースペクトルを示す。Ce の添加量に伴い発光量が増加し Ce10%および 30%添加 $\text{Cs}_2\text{LiGdCl}_6$:Ce では Li-glass の約 10 倍の光電子数が確認された。当日は詳細な中性子応答性や n/ γ 識別性能についても報告する。

図 1. 育成した $\text{Cs}_2\text{LiGdCl}_6$:Ce (0.1~30%)

[1] Bessiere et al_2004_New thermal neutron scintillators.

図 2. $\text{Cs}_2\text{LiGdCl}_6$:Ce (0.1~30%) エネルギースペクトル[2] Glodo et al_2011_Selected Properties of $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6$, $\text{Cs}_2\text{LiLaCl}_6$, and $\text{Cs}_2\text{LiLaBr}_6$ Scintillators. [3] Rooh et al. - 2010 - Scintillation properties of $\text{Cs}_2\text{LiGdCl}_6$ Ce^{3+} .

高分解能かつ高感度な X 線イメージングに向けた Tl 添加 Cs₃Cu₂I₅ 光導波型シンチレータプレートの開発 Development of Optical-guiding Tl:Cs₃Cu₂I₅ crystal scintillator plates for high-resolution and high-sensitivity X-ray imaging

東北大工¹, 東北大金研², 東北大 NICHe³, 株式会社 C&A⁴, 未来イメージング株式会社⁵

○(M1)仲田 侑平^{1,2}, 鎌田 圭^{2,3,4}, 工藤 哲男⁵, 吉野 将生², 薄 善行⁴, 金 敬鎮³, 横田 有為², 黒澤 俊介³, 佐藤 浩樹³, 花田 貴², 村上 力輝斗², 山路 晃広³, 石澤 倫², 吉川 彰^{2,3,4}

Grad. Sch. Eng., Tohoku Univ.¹, IMR, Tohoku Univ.², NICHe, Tohoku Univ.³, C&A Corp.⁴, Mirai imaging Corp.⁵, ○Y. Nakata^{1,2}, K. Kamada^{2,3,4}, T. Kudo⁵, M. Yoshino², Y. Usuki⁴, Kyoung Jin Kim³, Y. Yokota², S.

Kurosawa³, H. Sato³, T. Hanada², R. Murakami², A. Yamaji³, S. Ishizawa², A. Yoshikawa^{2,3,4}

E-mail : nakata.yuhei.q4@dc.tohoku.ac.jp

【背景】 放射線を可視光に変換するシンチレータは、放射線検出器として医療診断や工業製品の非破壊検査など、幅広い分野で利用されている。特に X 線イメージングでは、短い露光時間で鮮明な画像を得るために、高分解能と高感度の両立が強く求められている。しかし従来のシンチレータ材料では、分解能と感度がトレードオフの関係にあり、その両立が困難であった。そこで本研究グループでは、これまで高分解能と高感度を同時に達成可能な構造化シンチレータとして、全反射を利用した GdAlO₃/α-Al₂O₃ 共晶体[1,2]および光導波型結晶シンチレータ (Optical-guiding Crystal Scintillator: OCS) [3-5]を提案してきた。図 1 に示すように、OCS は低屈折率のガラスクラッドと高屈折率のシンチレータコアで構成され、シンチレータ光が全反射によって光ファイバーのように導波される。これによりコア径を高精細化し、プレート厚を厚くすることで、高分解能と高感度を同時に実現できるという特徴がある。

【実験方法】 本研究では、コア材料に Tl を添加した Cs₃Cu₂I₅ を、クラッドにガラスを用いた OCS プレートを作製した。初めに、外寸 5×5 mm²、数 μm~10 μm 径の中空コアを有するガラスクラッドプレートを準備し、Tl:Cs₃Cu₂I₅ シンチレータを溶融・固化することでコア部分に充填した。

【結果】 作製した OCS プレートをを用いて実際に X 線イメージングを行い、市販のシンチレータ薄板との性能比較を行った。X 線イメージングは、マイクロフォーカス X 線管と市販の X 線テストチャートを用いて行い、分解能はコントラスト伝達関数 (CTF) を算出することで評価した。その結果、作成した OCS は市販の CsI 柱状膜と比較して高い CTF を示すことが確認された。図 2 に作製した OCS の BSE 像を示した。当日は詳細な作製方法に加えて、放射線応答特性およびイメージング評価結果について報告する。

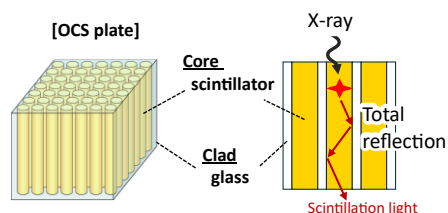


Fig. 1 Conceptual diagram of an OCS plate and the principle of optical waveguide.

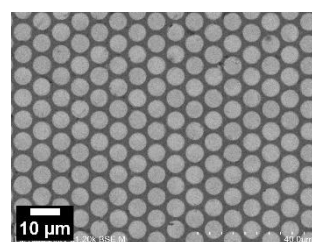


Fig. 2 Cross-sectional BSE image of OCS

- [1] K. Kamada, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 60 (2021) SBBK04 [2] A. Yoshikawa, et al. J. Crystal Growth. 498 (2018) 170-178
[3] R. Yajima, et al., Appl. Phys. Express 16 (2023) 025505 [4] R. Yajima, et al., Ceramics International 49 (2023) 41259-41263
[5] R. Yajima, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 62 (2023) SC1064

Ce:LiCAF シンチレータのアニーリングによる発光量と α/β 比の回復

Recovery of Light Yield and α/β ratio in Aged Ce:LiCAF Scintillators by Annealing

産総研¹

○藤原 健^{1*}, 木村 大海¹

AIST¹

○Takeshi Fujiwara¹, Hiromi Kimura¹

*E-mail: fujiwara-t@aist.go.jp

Ce:LiCaAlF₆ (Ce:LiCAF) は、⁶Li による中性子反応を利用した高感度中性子検出器として注目されており、ガンマ線との識別性を示す α/β 比の高さから³He 代替検出器としての可能性が期待されている。一方で、長期使用により劣化した Ce:LiCAF 結晶は発光量の低下と、 α/β 比の低下が観察された (図 1)。このような劣化した Ce:LiCAF 結晶に対してアニール処理 (260°C、3 時間) を施したことで、その発光特性と α/β 比の回復が確認されたので、それらを詳細に評価した (図 2)。

²⁵²Cf による中性子および ⁶⁰Co、¹³⁷Cs によるガンマ線を用いた波高スペクトルの測定により、アニール後の結晶では全体の発光量の増加とともに α/β 比の顕著な改善が確認された。X 線励起による発光スペクトル測定では、Ce³⁺の特性波長である 300~310 nm 帯域の強度が回復しており、F センターなどの放射線誘起欠陥が除去されたことを示唆している。さらに、透過率測定では、紫外から可視領域にかけての透過率が回復しており、光出力への影響が定量的に示された。

アニールにより α/β 比が回復したメカニズムについては、以下のように考察している。まずチェレンコフ光が主にガンマ線由来の高速電子によって発生し、波長が比較的長いため、結晶劣化の影響を受けにくい。一方、Ce³⁺発光は短波長領域に位置し、劣化の影響を強く受ける。アニールにより Ce³⁺成分が回復することで、ガンマ線による信号中のチェレンコフ成分の相対的寄与が減少し、結果として α/β 比が改善されたと考えられる。

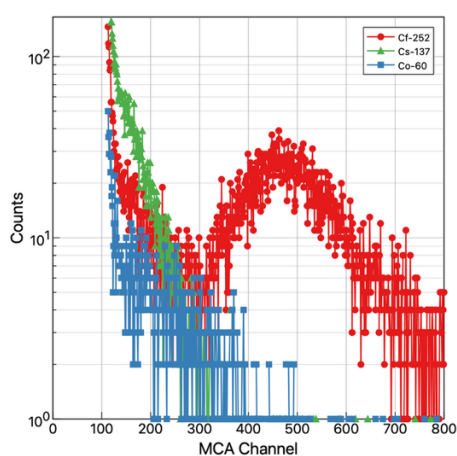


Fig. 1 Neutron and Gamma-ray pulse height spectrum taken with aged Ce:LiCAF crystal

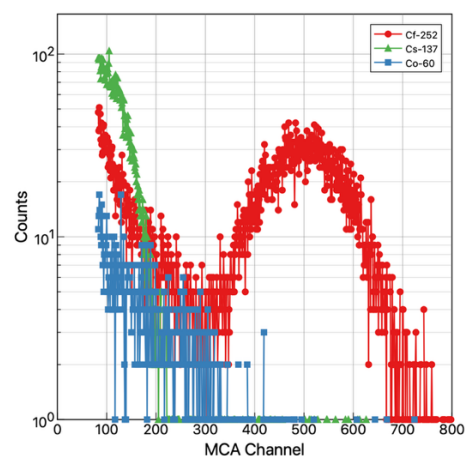


Fig. 2 Neutron and Gamma-ray pulse height spectrum taken with annealed Ce:LiCAF crystal. α/β ratio has been improved.

Cs_2HfI_6 への Si コンタミネーションの影響の調査

Influences of Si contamination into Cs_2HfI_6

埼玉大学¹, 東北大学², 大阪大学³

○小玉 翔平¹, 志村 凱斗¹, 大宮 昇悟¹, 黒澤 俊介^{2,3}, 藤原 千隼²,
加藤 昌弘⁴, 二木 佐和子⁴, 石井 隼也⁴, 柳瀬 郁夫¹, 武田 博明¹

Saitama Univ.¹, Tohoku Univ.², Osaka Univ.³, AIST⁴,

○Shohei Kodama¹, Shogo Omiya¹, Shunsuke Kurosawa^{2,3}, Chihaya Fujiwara²,
Masahiro Kato⁴, Sawako Futagi⁴, Junya Ishii⁴, Ikuo Yanase¹, Hiroaki Takeda¹

E-mail: shokodama@apc.saitama-u.ac.jp

Cs_2HfI_6 は赤色発光（発光波長 690 nm）、高発光量（64,000 photons/MeV）という特徴があるガンマ線用無機シンチレータ材料であり、光ファイバーと組み合わせ、リモート放射線量モニタ用シンチレータ材料として研究されてきた^[1]。われわれは、 Cs_2HfI_6 の高品質単結晶の育成に向け、原料に対する前処理条件を調査してきた。研究の中で、水分が原料に残留することで、石英るつぼと原料が反応して Si が結晶へコンタミネーションすることにより、 Cs_2HfI_6 結晶が変色し、石英るつぼへ固着してしまうことを明らかにした^[2]。本講演では、Si コンタミネーションが Cs_2HfI_6 の光学特性およびシンチレーション特性に及ぼす影響を調査した結果を報告する。

石英るつぼを用いた垂直ブリッジマン法による Cs_2HfI_6 の単結晶育成を行った。原料には HfI_4 と CsI を用い、化学量論比で混合した。 CsI には、原料前処理を施したものと、施していないものを用意し、それぞれの原料から得られた Cs_2HfI_6 結晶を T-CHI (Treated Cs_2HfI_6)、UT-CHI (Untreated Cs_2HfI_6) とする。得られた結晶から単結晶試験片を切り出し、ガンマ線量測定試験を行った。

ガンマ線量検出試験では、T-CHI 結晶と UT-CHI 結晶の一部を樹脂で保護し、20 m 光ファイバーの先端に装着し、ガンマ線を照射したときのシンチレーション発光スペクトルを CCD 分光器で測定した。⁶⁰Co 線源を使用し、ガンマ線量が約 16 Gy/h の点で測定した結果の一部を Figure 1 に示す。T-CHI では明瞭な発光ピークが観察された一方、UT-CHI では発光強度が著しく下がり、ガンマ線量測定試験には使用できないことが分かった。

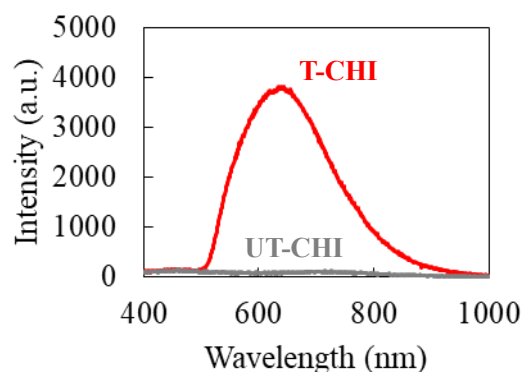


Figure 1. Scintillation spectra of T-CHI and UT-CHI irradiated with gamma-rays (⁶⁰Co). Spectra were measured through a 20-m optical fiber

Reference

[1] S. Kodama *et al.*, *Applied Physics Express*, 13(4), 047002, (2020).

[2] 小玉翔平, 第 72 回応用物理学会春季学術講演会, 16a-K502-6

X線減弱係数におけるケミカルシフトの効果

Effects of chemical shift in X-ray linear attenuation coefficients

群大院理¹, 量子科学技術研究開発機構² ○(M1)片桐 洸¹, 星 和志¹, 長橋龍河¹,

古田 有希¹, 高橋 学¹, 取越 正己², 櫻井 浩¹

Gunma Univ.¹, QST², °Hikaru Katagiri¹, Kazushi Hoshi¹, Ryuga Nagahashi¹, Yuki Furuta¹,

Manabu Takahashi¹, Masami Torikoshi² and Hiroshi Sakurai¹

E-mail: t251g009@gunma-u.ac.jp

高エネルギーX線における軽元素のX線減弱係数スペクトルは1s軌道の光電効果とコンプトン効果で支配される。1s軌道はケミカルシフトを反映するため、1s軌道の光電効果断面積がケミカルシフトの影響を受ける可能性がある。我々は第一原理計算手法であるDV-X α 法を用いて、C₂H₅OHなどの化合物におけるC 1s軌道とO 1s軌道のエネルギー準位 ϵ_K のケミカルシフトを求め、高エネルギーX線における軽元素の光電効果のみを考慮したX線減弱係数スペクトルのケミカルシフトの効果を検討した。式(1)は、注目する元素の核電荷 Z が化学結合より $Z-S_1$ となった場合のエネルギー準位である。式(1)からケミカルシフトを求めることができる。さらに、式(2)によりケミカルシフトが起きている場合のC 1s軌道・O 1s軌道の光電効果のみを考慮したX線減弱係数スペクトル σ_{1s}' を求めることができる[1]。

$$\epsilon_K = (Z - S_1)^2 \alpha^2 mc^2 / 2 \quad (1)$$

$$\sigma_{1s}' = \left(\frac{Z - S_1}{Z} \right)^5 \sigma_{1s} \quad (2)$$

ここで、 σ_{1s} は原子状態の光電効果のみを考慮したX線減弱係数スペクトルであり、NIST データベース[2]から得た。

Fig.1 は見積もったC₂H₅OHのC 1sとO 1sの光電効果のみを考慮したX線減弱係数スペクトルである。C 1sは全体の平均がNISTと比べて約0.85%増加し、O 1sは約2.60%減少していた。

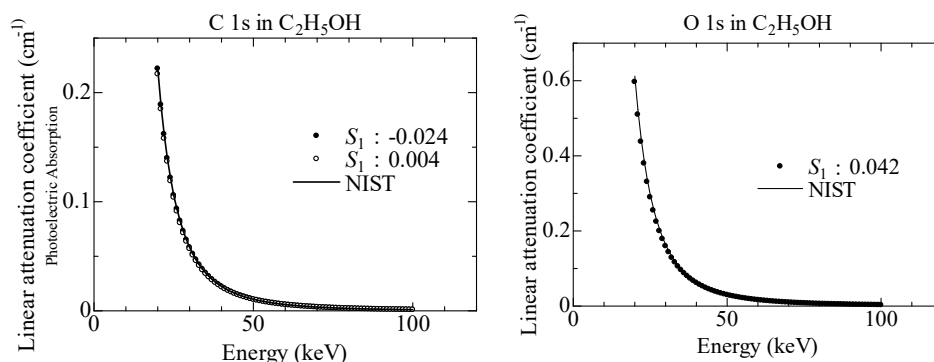


Fig.1 Linear attenuation coefficients considering only the photoelectric effect of C 1s and O 1s in ethanol

[1] Daphne F. Jackson and D.J. Hawkes, Physics Reports 70, no. 3(1981): 169-239.

[2] M. J. Berger, J. H. Hubbell, S. M. Seltzer, J. Chang, J. S. Coursey, R. Sukumar, D. S. Zucker and K. Olsen, (2010), NIST Standard ReDatabase8(XGAM) [<https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database>]

フォトンカウンティング CT における実効原子番号の算出精度の向上

Improving the Accuracy of Effective Atomic Number Calculation in Photon Counting CT

群馬大院理工¹, 量子科学技術研究開発機構² ○(M1)岸拓実¹, 星和志¹, 古田有希¹, 取越正己², 櫻井浩¹

Gunma University.¹, Takumi Kishi, Kazushi Hoshi, Yuki Furuta, Masami Torikoshi, Hiroshi Sakurai

E-mail: t251g013@gunma-u.ac.jp

従来の X 線 CT では、物質の特定を行うことは困難であった[1]。だが、フォトンカウンティング CT は一つ一つの光子を計数して線減弱係数を測定しており、物質弁別を行うことは可能となる。本研究では、3d 遷移金属の非破壊検査を想定し、原子番号 20-30 程度の物質の実効原子番号を求める手法を検討する。

k をエネルギー、 ρ_e を電子密度、 F と G と H を定数とすると、線減弱係数スペクトル $\mu(k)$ は式 (1) で表される。[2]

$$\mu(k) = \rho_e [Z^4 F(k) + G(k) + (Z - Z^{0.5}) H(k, Z)] \quad (1)$$

第 1 項は光電効果、第 2 項は非弾性散乱 (コンプトン散乱)、第 3 項は弾性散乱である。櫻井らは 6-13 の実効原子番号について、第 1 項および第 2 項を考慮し、電子密度、実効原子番号を 5% 以下の精度で求めることができた[3]。一方、非破壊検査等で想定する 3d 遷移金属を峻別するためには、2% 程度の精度が必要である。本研究では、NIST の XCOM[4] を利用して、第 3 項を考慮して実効原子番号をシミュレーションした結果と理論値の原子番号との差を Fig. 1 に示す。なお、式(1)における F, G, H を求めるためにキャリブレーション元素 (Mg, Al, Ti または Ti, Fe, Cu) を用いた。その結果、式(1)における第 3 項まで考慮した場合は、キャリブレーション元素のカバーする実効原子番号の範囲で 1% 程度の誤差で実効原子番号が求められ、3d 遷移金属の峻別が可能であることが分かった。

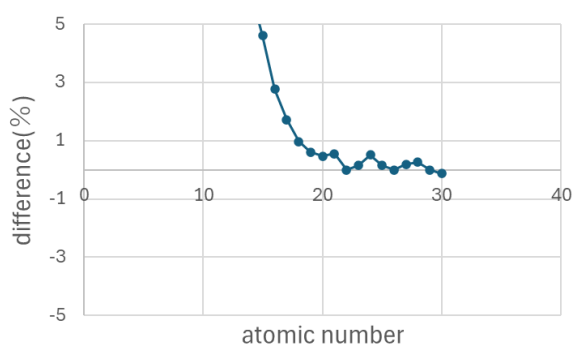


Fig.1 Difference of effective atomic number calculation with calibration material of Mg, Al and Ti (left), and Ti, Fe, Cu (right)

[1] R. E. Alvarez and A. Macovski, Phys. Med. Biol. 21, 733-744 (1976).

[2] Daphne F. Jackson and D.J. Hawkes, Phys. Rep. 70, pp169-233, (1981).

[3] H. Sakurai et al., Nucl. Instrum. Meth B 542, 234-241 (2023).

[4] <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>

フォトンカウンティング CT を用いた 4 元系元素の定量

Quantitative measurement of four-element system using photon counting CT

群馬大院理工¹, 量子科学技術研究開発機構² ○(M2) 長橋 龍河¹, 星 和志¹,

古田 有希¹, 鈴木 宏輔¹, 高橋学, 取越 正己², 櫻井 浩¹

Gunma University¹, QST² ○Ryuga Nagahashi¹, Kazushi Hoshi¹,

Yuki Furuta¹, Kosuke Suzuki¹, Manabu Takahashi¹, Masami Torikoshi² and Hiroshi Sakurai¹

E-mail: t241d039@gunma-u.ac.jp

現在, 従来 CT の改良は物理的に限界を迎えつつある. 従来 CT に代わる次世代型 CT として, フォトンカウンティング CT が注目されており, さらなる被ばく量の低減, 高い空間分解能, 物質弁別能・定量化などの様々な臨床応用の可能性が期待されている. 我々は, フォトンカウンティング CT を用いて, 水, エタノール, 酢酸およびそれらの混合溶液の線減弱係数スペクトルを測定・解析することによって, H, C, O など軽元素の組成が定量できることを報告した^[1]. ここで, 同様の手法を用いることで H, O, Cl, Na や H, O, Cl, K のような 4 元系においても元素組成が定量できるのではないかと考えた. そこで本研究では NaCl 水溶液や KCl 水溶液について, NIST の XCOM データベース^[2]の値を用いたシミュレーション結果と測定からの解析結果を比較することを目的とする.

Fig.1 は NIST の XCOM データベースの値を用いたシミュレーション結果を表している. これらの結果から, 4 元系の軽元素の組成も定量できることがわかった.

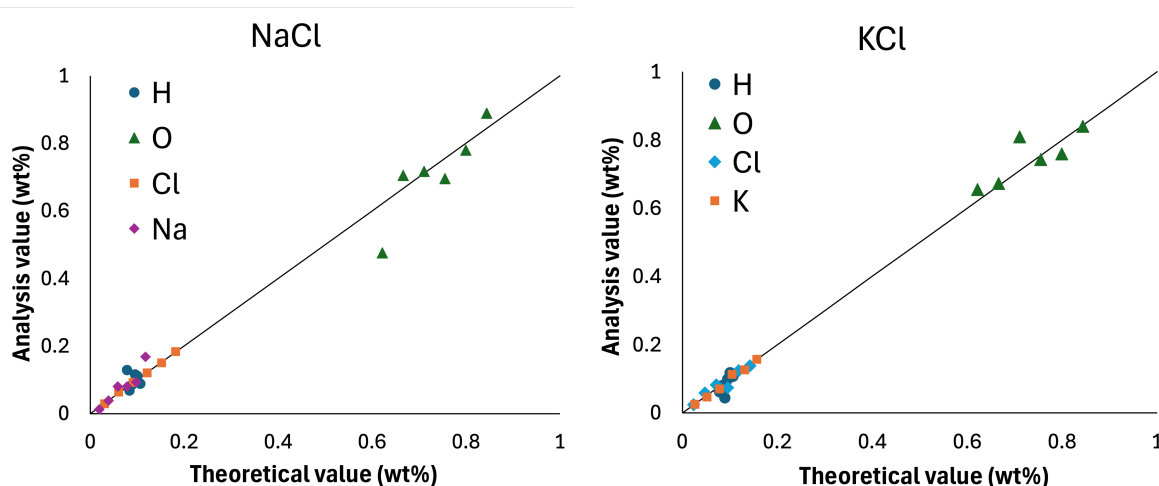


Fig.1 Theoretical and analytical values of elemental composition

[1]古川 修平, 長橋 龍河, 長谷部 有希, 星 和志, 鈴木 宏輔, 取越 正己, 櫻井 浩, [25p-12E-9]フォトンカウンティング CT を用いた元素分離, 2024 年第 71 回応用物理学会春季講演会, 2024 年 3 月, 東京都市大学

[2] M. J. Berger, J. H. Hubbell, S. M. Seltzer, J. Chang, J. S. Coursey, R. Sukumar, D. S. Zucker and K. Olsen, (2010), NIST Standard Reference Database 8 (XCOM) [<https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database>]

2 Ionizing Radiation | Oral presentation : 2.1 Radiation physics, Material development and characteristic evaluation

[8a-N107-1~7] 2.1 Radiation physics, Material development and characteristic evaluation

[8a-N107-1]

Basic study on coplanar grid structure TlBr detectors

○Yusuke Kawai¹, Yusuke Sugai¹, Seishiro Tanaka¹, Kenichi Watanabe¹, Keitaro Hitomi², Mitsuhiro Nogami² (1.Kyushu Univ., 2.Tohoku Univ.)

[8a-N107-2]

Evaluation of annealing process of vacuum-deposited polycrystalline TlBr films

○(D)Kohei Toyoda^{1,2}, Katsuyuki Takagi^{2,3}, Hiroki Kase³, Toru Aoki^{1,2,3} (1.Shizuoka Univ. C.M.M.P., 2.ANSeeN, 3.Shizuoka Univ. R.I.E.)

[8a-N107-3]

Study on signal processing of non-biased coplanar-grid TlBr detectors

○Seishiro Tanaka¹, Watanabe Kenichi¹, Sugai Yusuke¹, Kawai Yusuke¹, Hitomi Keitaro², Nogami Mitsuhiro² (1.Kyushu Univ., 2.Tohoku Univ.)

[8a-N107-4]

Evaluation of two-dimensional carrier transport properties of TlBr semiconductors based on signal shape analysis induced by pulsed laser irradiation

○Yusuke Sugai¹, Kenichi Watanabe¹, Seishiro Tanaka¹, Yusuke Kawai¹, Mitsuhiro Nogami², Keitaro Hitomi² (1.Kyushu Univ., 2.Tohoku Univ.)

[8a-N107-5]

Influence of Work Function on the Forward Current Characteristics

○Katsuyuki Takagi^{1,2}, Toshiyuki Takagi², Hiroki Kase¹, Akifumi Koike², Toru Aoki^{1,2}, Hidenori Mimura^{1,2} (1.RIE, Shizuoka Univ., 2.ANSeeN)

[8a-N107-6]

Examination of high temperature neutron detector using BGaN on AlGaN

○Toru Oikawa¹, Ryohei Kudo¹, Ryota Saito¹, Eito Kokubo², Genichiro Wakabayashi³, Tetsuichi Kishishita⁴, Yoshinori Sakurai⁵, Hiroshi Yashima⁵, Takahiro Makino⁶, Takeshi Ohshima⁶, Yoshio Honda⁷, Hiroshi Amano⁷, Yoku Inoue¹, Toru Aoki⁸, Takayuki Nakano^{1,8} (1.Shizuoka Univ., 2.Nagoya Univ., 3.Kindai Univ., 4.KEK, 5.KURNS, 6.QST, 7.IMaSS Nagoya Univ., 8.R.I.E.)

[8a-N107-7]

[Invited Talk] Laser Spectroscopy of ²²⁹Th:CaF₂ Crystals toward the Realization of a Nuclear Clock

○Sayuri Takatori¹, Kjeld Beeks², Ming Guan¹, Takahiro Hiraki¹, Georgy Kazakov², Adrian Leitner², Ira Morawetz², Takahiko Masuda¹, Ryoichiro Ogake¹, Koichi Okai¹, Thomas Riebner², Noboru Sasao¹, Fabian Schaden², Felix Schneider², Thorsten Schumm², Kotaro Shimizu¹, Tomas Sikorsky², Luca Toscani de Col², Akihiro Yoshimi¹, Koji Yoshimura¹ (1.Okayama Univ., 2.TU Wien)

コプレナ型 TlBr 検出器に関する基礎検討

Basic study on coplanar grid structure TlBr detectors

九州大¹, 東北大², °河合 雄祐¹, 須貝 優介¹, 田中 清志郎¹, 渡辺 賢一¹,
人見 啓太郎², 野上 光博²

Kyushu Univ.¹, Tohoku Univ.², °Yusuke Kawai¹, Yusuke Sugai¹, Seishiro Tanaka¹

Kenichi Watanabe¹, Keitaro Hitomi², Mitsuhiro Nogami²

E-mail: kawai.yusuke.881@s.kyushu-u.ac.jp

1. 緒言 ガンマ線検出器材料としての応用が期待されている化合物半導体の一つに、臭化タリウム（以下、TlBr）がある。TlBr は広いバンドギャップを有しており、室温での動作が可能であることに加え、高い原子番号と密度を持つことから、優れたガンマ線の吸収特性を示し、高い検出効率が見込まれている。TlBr 検出器で高いエネルギー分解能と大きな有感体積を得るためには、電極構造を工夫する必要がある。これら二つを両立可能な電極構造として、コプレナ型検出器がある。従来のコプレナ型検出器は、高いエネルギー分解能と大きな有感体積が得られることが期待できる一方で、近接するグリッド電極間に電位差を設ける必要があり、これに伴う漏れ電流の影響も懸念されている。そこで、無バイアスコプレナ型を提案し、これらに関する検討を行った。

2. 信号波高値の相互作用位置依存 各電極への誘起電流を計算可能なシミュレーションコードを用い、TlBr 検出器内での相互作用位置により、信号波高値がどのように変化するかを検討した。検出器寸法はいずれも $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ とし、上面にアノード電極グリッドを複数配置した。複数の電極グリッドは交互に対となっており、両者の信号の差分信号を取得し、その差分信号の波高値を取得している。どちらの電極に回収されるかで、差分信号の極性は変わるため、常に極性が正となるように処理を行っている。波高値の相互作用位置依存を示したものを Fig. 1 に示す。Fig. 1 a), b) は 5 本のグリッド電極で交互で組になっている。a) はグリッド間に電位差を設けており、b) は電位差なしとなっている。電位差なしの場合、どちらの電極に回収されるかで信号波高値に差が生じることが分かった。また c) は 9 本のグリッド電極の結果であるが、グリッド本数を増やしても、この程度では電極間の波高値の差が劇的に減少することは無いことが分かった。

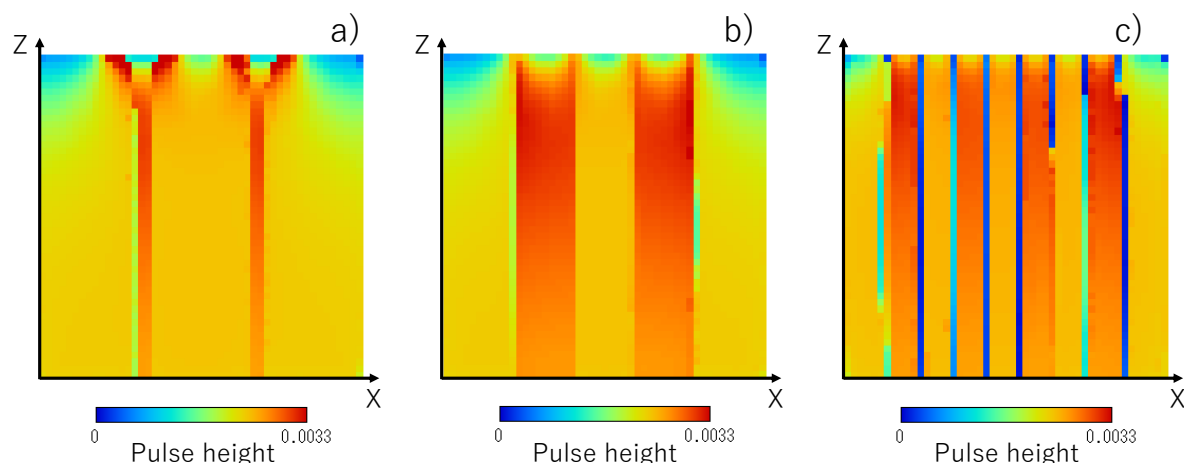


Fig. 1 Two dimensional color map of signal pulse heights as a function of interaction point in a coplanar grid TlBr detector. a) Number of grid strips: 5, biased between each anode. b) 5 strips, non-biased. c) 9 strips, non-biased.

真空蒸着法で成膜した TlBr 多結晶膜のアニールの評価

Evaluation of annealing process of vacuum-deposited polycrystalline TlBr films

静岡大院光医工¹, ANSeeN², 静岡大電子研³

○(D) 豊田 耕平^{1,2}, 都木 克之^{2,3}, 加瀬 裕貴³, 青木 徹^{1,2,3}

Shizuoka Univ. C.M.M.P.¹, ANSeeN², Shizuoka Univ. R.I.E.³

°Kohei Toyoda^{1,2}, Katsuyuki Takagi^{2,3}, Hiroki Kase³, Toru Aoki^{1,2,3}

E-mail: toyoda.kohei.22@shizuoka.ac.jp

背景

臭化タリウム (TlBr) は 2.68eV のバンドギャップを持つ半導体材料である。TlBr は大きな原子番号 (81, 35) と高い密度 (7.56g/cm³) を持つため、X 線・ γ 線に対して高い吸収効率を示す。これらの優れた物性から、TlBr は室温動作半導体検出器に適した材料として研究が進められている。TlBr は蒸気圧が高く、真空雰囲気にて抵抗加熱によって容易に揮発させることができるため、真空蒸着による薄膜の形成が可能である。真空蒸着法による成膜は、大面積を必要とする X 線 FPD (Flat Panel Detector) の製造に適している可能性がある。真空蒸着で得られた多結晶膜に対し、熱処理を行うことで、欠陥の低減が期待できる。本研究は、真空蒸着で成膜した多結晶 TlBr 膜に対し、成膜後のアニールを行い、処理前後の特性変化を比較した。

実験方法および結果

真空蒸着法によって 10mm×10mm の Si 基板に多結晶 TlBr 膜を得た。TlBr 膜(膜厚 30 μ m)に Au 電極を形成し検出器を作成した(図 1)。この検出器に対し、電気炉にてアニール処理を行った。特性評価として、エネルギーが大きくパルス検出ができる可能性の高い ²⁴¹Am α 線および ¹³⁷Cs γ 線のパルス検出特性を評価した。本発表は、アニール処理前後の特性の比較およびアニールの有効性について報告する。

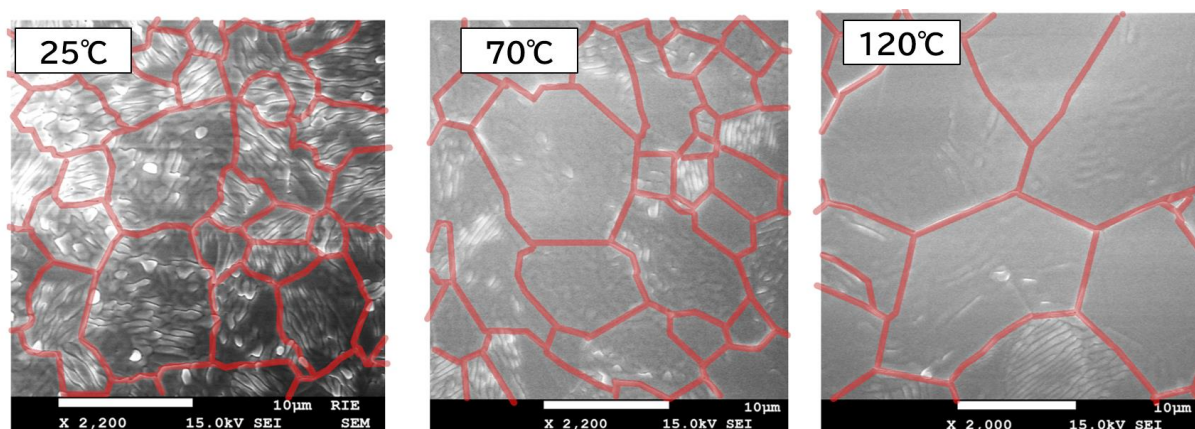


Fig.1 Surfaces of 3 samples with different substrate temperatures during film deposition.

無バイアスコプレーナグリッド型 TlBr 検出器の 信号処理に関する検討

Study on signal processing of non-biased coplanar-grid TlBr detectors

九州大¹, 東北大² °田中 清志朗¹, 河合 雄祐¹, 須貝 優介¹, 渡辺 賢一¹,
野上 光博² 人見 啓太郎²

Kyushu Univ.¹, Tohoku Univ.², °Seishiro Tanaka¹, Yusuke Sugai¹, Sota Hasegawa¹,
Kenichi Watanabe¹, Mitsuhiro Nogami², Keitaro Hitomi²

E-mail: tanaka.seishiro.954@s.kyushu-u.ac.jp

1.緒言 ガンマ線検出器材料として期待される化合物半導体の一つに臭化タリウム(以下、TlBr)がある。TlBr 検出器は広いバンドギャップを有し室温での動作が可能であり、高い原子番号と密度により高い検出効率が期待されている。TlBr は正孔の移動度が電子の 10 分の 1 以下であり、電子のみの誘起信号を用いる単極性電荷有感法と重み付き電位の勾配を工夫した電極構造が必要となる。そこで今回は重み付き電位がアノード近辺で急激に変化するように、細長い二つの陽極を互い違いに設置したコプレーナグリッド型電極に着目した。通常、コプレーナグリッド型電極では、二つの陽極間に電位差を設け、片方の陽極で電荷を回収するが、今回は、無バイアスでの動作を検討した。無バイアス化は両陽極間でのリーク電流の影響を無くし、さらに有感体積拡大を狙えるが、両電極の重み付き電位の差により波高分布が劣化してしまう。本研究ではこの課題に対処するため波形データの多変量解析による信号処理法を検討した。

2.実験 シミュレーションにてコプレーナグリッド電極を作成し。無バイアスでの差動信号読み出しを行い、信号波高値を得た。また、得られた信号に対し波形弁別処理を行い波高値補正を試みた。Fig. 1 にシミュレーションで得られた信号波高値の相互作用位置依存性を表す二次元カラーマップを示す。電荷が収集される電極によって波高値が異なるため縞模様のような波高分布が確認された。波形弁別処理による波高値補正前後の波高分布を Fig. 2 に示す。シミュレーションで得られた波形に対し主成分分析を行い、主成分の値を用いてクラスタリングを行い、クラスターに対応した補正値を元の波高値に乗じた結果、電荷収集効率の均一化を図れることが確認された。

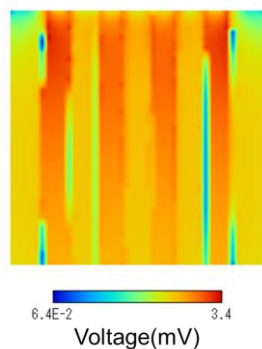


Fig1. Two-dimensional color map of signal pulse heights as a function of interaction positions in the non-biased coplanar-grid TlBr detector.

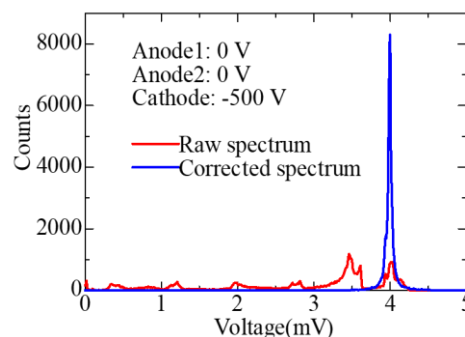


Fig2. Pulse height spectrum obtained from the non-biased coplanar-grid TlBr detector. ($V_{\text{anode1}}, V_{\text{anode2}}, V_{\text{cathode}} = (0 \text{ V}, 0 \text{ V}, -500 \text{ V})$)

パルスレーザー誘起信号波形解析による TlBr 半導体の二次元キャリア輸送特性評価

Evaluation of two-dimensional carrier transport properties of TlBr semiconductors based on signal shape analysis induced by pulsed laser irradiation

九州大¹, 東北大² °須貝 優介¹, 渡辺 賢一¹, 田中 清志朗¹, 河合 雄祐¹,
野上 光博², 人見 啓太郎²

Kyushu Univ.¹, Tohoku Univ.², °Yusuke Sugai¹, Kenichi Watanabe¹, Seishiro Tanaka¹,
Yusuke Kawai¹, Mitsuhiro Nogami², Keitaro Hitomi²

E-mail: sugai.yusuke.031@s.kyushu-u.ac.jp

1. 緒言 ガンマ線検出器として実用化が期待される化合物半導体の一つに、臭化タリウム(TlBr)がある。TlBr 検出器は広いバンドギャップを有し室温動作が可能であることに加え、高い原子番号と密度を有することから高い検出効率が期待できるという利点を持つ。高品質かつ大型の検出器を実現するには、電荷輸送特性が均一な結晶の育成が重要である。我々のグループでは電子線後方散乱回折 (EBSD) 等を用いた結晶性評価のほか、パルスレーザーを結晶表面に照射して生成した電荷キャリアの移動度を飛行時間法(TOF 法)により評価するシステムの構築および改良を重ねてきた。従来は移動度の評価が主であったが、信号波形の形状を詳しく解析することで結晶性と関係する種々の特性を抽出できる可能性について検討した。

2. 実験 EBSD による結晶方位分布評価を行った後、結晶面全体に金電極を真空蒸着し直径 18 mm のディスク状プレナ型 TlBr 検出器を製作した。波長 405nm のパルスレーザー光をレンズで集光し、カソード電極側から照射した。これにより、表面付近で生成された電子正孔対のうち、主に電子の移動による誘起信号を取得できる。結晶粒界付近に照射した際に得られた信号波形の例を Fig. 1 に示す。信号の立ち上がりから、立下り部分が最大値の 50%を下回るまでの時間を飛行時間 t_F と定義した。EBSD による結晶方位分布と、 t_F の二次元分布を Fig. 2、Fig. 3 に示す。結晶粒界付近で、飛行時間が長くなる傾向が確認できた。また、信号波形から粒界の深さ方向の情報を取得できる可能性がある。

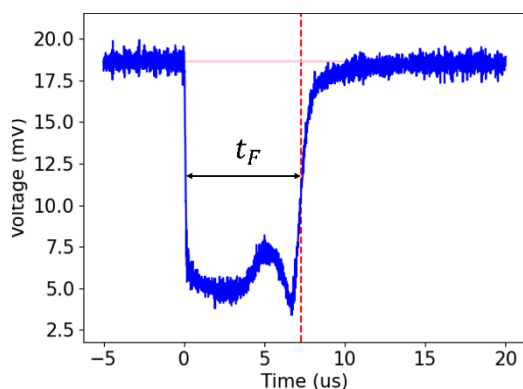


Fig.1 Signal waveform induced by electron drift.

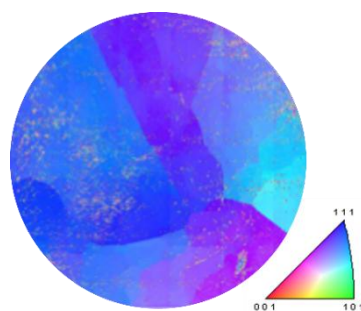


Fig.2 Crystal orientation map of TlBr crystal wafer obtained by EBSD.

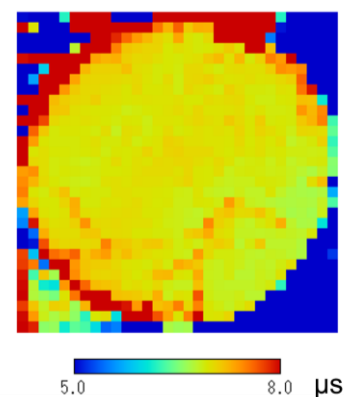


Fig.3 Two-dimensional distribution map of t_F in the TlBr detector.

ショットキー型 CdTe 検出器の順方向電流特性に及ぼす仕事関数の影響

Influence of Work Function on the Forward Current Characteristics

of Schottky-type CdTe Detectors

静岡大電子研¹, ANSeeN²

都木 克之^{1,2}, 都木 利之², 加瀬 裕貴¹,

小池 昭史², 青木 徹^{1,2}, 三村 秀典^{1,2}

Shizuoka Univ. R.I.E.¹, ANSeeN Inc.²

°Katsuyuki Takagi^{1,2}, Toshiyuki Takagi², Hiroki Kase¹,

Akifumi Koike², Toru Aoki^{1,2}, Hidenori Mimura^{1,2}

E-mail: takagi.katsuyuki@shizuoka.ac.jp

テルル化カドミウム (CdTe)は高い原子番号と密度を有し放射線に対して高い感度を持つため、室温動作半導体検出器として用いられている。CdTe 検出器は電極の違いによるショットキー型とオーミック型が用途に応じて使い分けられるが、ショットキー型の順方向特性を利用すれば、単一デバイスで二つの特性を両立できる可能性がある。我々は先に、このコンセプトの一例として Ag 電極を用いた CdTe 検出器の諸特性を報告した。[1]本報告では、従来のショットキー型 CdTe で観測される過剰な順方向電流の起源を解明するため、電極材料の異なる複数の CdTe 検出器について順方向電流特性を比較・解析した。

本研究では、市販の In ショットキー、Al ショットキー、Pt オーミック (いずれもアクロラド社製) に加え、同社製 CdTe バルク上に本研究で独自に作製した Cu および Ag ショットキー電極を持つ計 5 種類の検出器を評価した。Cu および Ag 電極デバイスには既報[1]の電気的エイジング処理を施し、In ショットキー電極に匹敵する良好な逆バイアス特性を得た。

図 1 にこれら検出器の順方向電流特性を示す。比較のため、オーミック型の実効抵抗率 $2 \times 10^9 \Omega \text{ cm}$ を併記した。順方向印可時、正孔注

入側となる陽極はオーミック電極 (Pt または Au) で統一されている。それにも関わらず順方向電流に大きな差異が観測されたことから、この違いは陰極に起因すること、すなわちショットキー電極からの電子注入が主要因であることが示唆された。

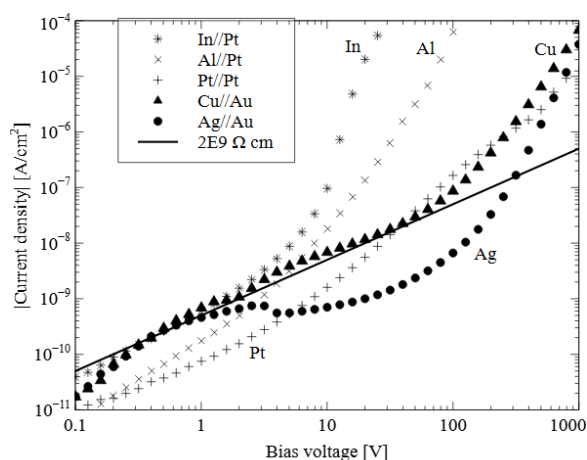


図 1 Forward characteristics of various CdTe detectors.

[1] 都木克之、他、第 72 回応用物理学会春季学術講演会、1

6a-K502-9

耐高温中性子検出器に向けた AlGa_N 層上の BGaN 層を用いたデバイスの初期検討

Examination of high temperature neutron detector using BGaN on AlGa_N

静大院工¹, 名大院工², 近大原研³, 高エネ研⁴, 京大複合研⁵, 量研⁶, 名大 ImaSS⁷, 静大電研⁸
 ○及川徹¹, 工藤涼兵¹, 斎藤僚太¹, 小久保瑛斗², 若林源一郎³, 岸下徹一⁴, 櫻井良憲⁵, 八島浩⁵,
 牧野高紘⁶, 大島武⁶, 本田善央⁷, 天野浩⁷, 井上翼¹, 青木徹⁸, 中野貴之^{1,8}

Shizuoka Univ.¹, Nagoya Univ.², Kindai Univ.³, KEK⁴, KURNS⁵, QST⁶, ImaSS Nagoya Univ.⁷, R.I.E⁸

°T. Oikawa¹, R. Kudo¹, R. Saito¹, E. Kokubo², G. Wakabayashi³, T. Kishishita⁴, Y. Sakurai⁵,

H. Yashima⁵, T. Makino⁶, T. Ohshima⁶, Y. Honda⁷, H. Amano⁷, Y. Inoue¹, T. Aoki⁸, and T. Nakano^{1,8}

E-mail: oikawa.toru.20@shizuoka.ac.jp

緒言 核計装システムは原子炉を安全に運用するために重要な技術であり、高温かつ高放射線雰囲気といった過酷環境下での中性子計測が必要である。次世代炉として開発されている高温ガス炉 (HTGR) では炉内温度が 600~950 °C と高温となることから、従来の核計装技術の利用が困難である。したがって、新たな高温動作可能な中性子検出器が期待されている。そこで高温動作が可能かつ、耐放射線性にも優れた放射線検出器としてワイドギャップ半導体である BGaN 中性子検出器が期待されている。従来の BGaN デバイスでは、BGaN/GaN 積層構造を用いて BGaN ダイオードの作製を行っていた。この構造では BGaN 層の引張歪によりクラックが発生するという課題があった。そこで本研究では、高温耐性向上に向けた結晶性改善の検討として BGaN 結晶の歪制御に取り組んだ。下地の n 型層を GaN から AlGa_N 層に置き換えることで、BGaN 層にかかる歪応力を変化させ、デバイスの結晶性および特性の向上を図った。

実験方法 本研究では有機金属気相エピタキシー (MOVPE) 法を用いて AlGa_N 及び BGaN 結晶を作製した。III 族原料には TMGa、TMB、TMAI を使用し、V 族原料には NH₃ を使用した。pin 構造作製における p 型 GaN 層のドーパントには Mg、n 型 AlGa_N 層のドーパントは Si を用いた。c-sapphire 基板上に GaN バッファ層を形成した後、AlGa_N 層を膜厚 1.2 μm、BGaN 層を膜厚 1, 3, 5 μm 成長した。BGaN 結晶の構造特性評価には SEM 観察及び XRD 測定を用いた。BGaN 中性子検出器には p-GaN/i-BGaN/n-AlGa_N の pin 構造を用いて、放射線検出測定を行った。

結果と考察 GaN および AlGa_N 層上に形成した BGaN 層の結晶性を評価した。GaN バッファ層上に形成した BGaN 層では、BGaN 膜厚の増加に伴い結晶性が低下することが確認された。一方、AlGa_N 層上に形成した BGaN 層では、膜厚の増加によらず結晶性がほぼ一定であった。この結果は、AlGa_N 層を用いることで格子定数差が低減され、BGaN 層中の歪みが抑制されたことを示唆しており、BGaN 層

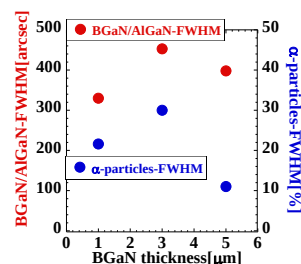


Fig.1 Thickness dependence of α-particles FWHM and XRC FWHM with α-particles.

の格子緩和が抑制されたことで結晶性が向上したと考えられる。さらに AlGa_N 層を用いた各 BGaN 膜厚のデバイスについて α 線検出測定を実施した。XRC 測定結果及び α 線検出ピークの各 FWHM 値を Fig.1 に示す。α 線検出ピークの FWHM は XRC の FWHM と同様の傾向となることが確認された。α 線の検出スペクトルの広がり結晶性に依存していることが示唆された。Fig. 2 に α 線検出スペクトルの印加電圧依存性を示す。印加電圧の増加に伴い検出ピークが高エネルギー側へシフトすることが確認された。この結果は印加電圧の増加により、有感層領域が拡大し電荷収集効率が向上したことが示唆される。20 V 以上では、ピーク位置が一定となることから、BGaN 層全体が有感層として機能していると考えられる。この結果から得られた BGaN 層の移動度寿命積は、GaN バッファ層を用いた場合と比較して向上しており、歪制御による結晶性向上が影響していると考えられる。

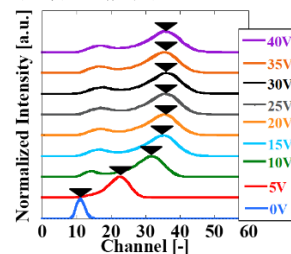


Fig.2 α-particles detection peak and applied voltage dependence of detection efficiency.

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、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、近畿大学原子炉等利用共同研究、京都大学複合原子力科学研究所共同利用研究、岩谷科学技術特別研究助成、科研費補助金 (19H04394、23H00099) の援助により実施された。

原子核時計実現に向けたトリウム 229 添加 CaF_2 結晶のレーザー分光

Laser Spectroscopy of $^{229}\text{Th}:\text{CaF}_2$ Crystals toward the Realization of a Nuclear Clock

岡山大基礎研¹, ウィーン工科大² ○高取沙悠理¹, Kjeld Beeks², 管明¹, 平木貴宏¹,
Georgy Kazakov², Adrian Leitner², Ira Morawetz², 増田孝彦¹, 大懸遼一郎¹, 岡井晃一¹,
Thomas Riebner², 笹尾登¹, Fabian Schaden², Felix Schneider², Thorsten Schumm²,
清水航太郎¹, Tomas Sikorsky², Luca Toscani de Col², 吉見彰洋¹, 吉村浩司¹

Okayama Univ.¹, TU Wien², ○Sayuri Takatori¹, Kjeld Beeks², Ming Guan¹, Takahiro Hiraki¹,
Georgy Kazakov², Adrian Leitner², Ira Morawetz², Takahiko Masuda¹, Ryoichiro Ogake¹, Koichi
Okai¹, Thomas Riebner², Noboru Sasao¹, Fabian Schaden², Felix Schneider², Thorsten Schumm²,
Kotaro Shimizu¹, Tomas Sikorsky², Luca Toscani de Col², Akihiro Yoshimi¹, Koji Yoshimura¹

E-mail: takatori@okayama-u.ac.jp

トリウム 229 (^{229}Th) は、約 8.4 eV という原子核としては例外的に低い第一励起準位（アイソマー準位）を有し、レーザーによる直接制御が可能な原子核である。このユニークな準位を用いた「原子核時計」は新たな周波数標準としての応用が期待されている。これまでアイソマー準位のエネルギー不定性が障壁となりレーザー励起の実現は困難であったが、2023 年にはアイソマー準位からの脱励起光の直接観測によりエネルギーと寿命が精密に測定され [1, 2]、さらに 2024 年にレーザー励起の成功が報告される [3-5] など、当該分野は近年急速な発展を遂げている。

本研究では、 ^{229}Th のレーザー励起へ向け Xe ガス中の四光波混合を利用した真空紫外（VUV）パルスレーザーの開発を行った。具体的には 2 台のチタンサファイア共振器と BBO 非線形結晶を用いた第 3 高調波変換により発生した IR (786 nm) および UV (249 nm) のパルスを Xe ガスセル中で重ね合わせアイソマー準位に対応する VUV (148 nm) パルスの発生を行った。さらに、我々のグループはこれまで放射光 X 線を用い第 2 励起準位を経由してアイソマー準位を安定に生成する独自の励起手法によるアイソマー準位の探索を実施しており [2, 6]、その過程で放射線や照射光起因の背景事象を効果的に除去できる高感度な検出器システムを有している。現在、開発した VUV レーザーと検出器システムを用いて ^{229}Th を添加したフッ化カルシウム結晶 ($^{229}\text{Th}:\text{CaF}_2$) を標的とした分光実験が進行中である。本講演では、開発した VUV レーザーおよび検出器システムの概要とともに、 $^{229}\text{Th}:\text{CaF}_2$ 結晶を用いたレーザー分光実験の進捗状況について報告する。

[1] S. Kraemer et al., Nature 617 706 (2023).

[2] T. Hiraki et al., Nat. Commun. 15, 5536 (2024).

[3] J. Tiedau et al., Phys. Rev. Lett. 132, 182501 (2024).

[4] R. Elwell et al., Phys. Rev. Lett. 133, 013201 (2024).

[5] C. Zhang et al., Nature 633, 63 (2024).

[6] T. Masuda et al., Nature 573, 238 (2019).

2 Ionizing Radiation | Oral presentation : 2.2 Radiation generators, Detector development, Measurement technology

[10a-N107-1~8] 2.2 Radiation generators, Detector development, Measurement technology

[10a-N107-1]

A quantitative study on direct and indirect effects of VUV on PADC track detectors

○Atsushi Kimoto¹, Masato Kanasaki¹, Tomoya Yamauchi¹ (1.Kobe Univ.)

[10a-N107-2]

An attempt to describe the enhanced bulk-etching-rate by the formation density of hydroxyl group in PADC detectors

○REO YAMADA¹, Atsushi Kimoto¹, Hayato Seiichi¹, Tamon Kusumoto², Satoshi Kodaira², Sachiko Tojo³, Masato Kanasaki¹, Tomoya Yamauchi¹ (1.Kobe Univ., 2.QST, 3.SANKEN)

[10a-N107-3]

Development of an X-ray camera "SUIM" for observing the upper atmosphere

○Haruno Takamoto¹, Ayaki Takeda¹, Eisuke Kurogi¹, Tomitaka Tanaka¹, Reika Arikawa¹, Yuto Shibata¹, Koji Mori¹, Kumiko Nobukawa², Reo Matsui², Yuma Aoki², Satoru Kuwano², Yuto Takeshima², Shotaro Sato², Satoru Katsuda³, Takeshi Tsuru⁴, Hiroyuki Uchida⁴, Kazuhiro Nakazawa⁵, Masayohsi Nobukawa⁶, Takayoshi Kohmura⁷ (1.Univ. of Miyazaki, 2.KINDAI Univ., 3.Saitama Univ., 4.Kyoto Univ., 5.Nagoya Univ., 6.Nara Univ. of Edu., 7.Tokyo Univ. of Sci.)

[10a-N107-4]

Development of a Compact Imaging Cherenkov Spectrometer for the Lunar Radiation Environment Monitor, Lunar-RICHeS

○Riichiro Nakamura¹, Toru Tamagawa^{1,2}, Naoyuki Ota^{1,2}, Keisuke Uchiyama^{1,2}, Tomoshi Takeda^{3,1}, Takayoshi Kohmura⁴, Yuusuke Uchida⁴, Jo Sato⁴, Yuki Watanabe⁴, Masayuki Fujii⁵, Aiko Nagamatsu⁶ (1.RIKEN, 2.TUS, Sci., 3.Hiroshima Univ., 4.TUS, Sci. and Tech., 5.Innovation Hub,JAXA, 6.Utilization Center,JAXA)

[10a-N107-5]

Development of Fiber-type Real-Time Dose Rate Meter with Infrared-Emitting Scintillators II

○Shunsuke Kurosawa^{1,2,3}, Chihaya Fujiwara⁴, Yusuke Urano⁴, Akihiro Yamaji¹ (1.Tohoku Univ. NICHe, 2.Osaka Univ., 3.Tohoku Univ. RCNS, 4.Tohoku Univ.)

[10a-N107-6]

Development of a positron annihilation coincidence Doppler-broadening spectrometer based on anti-coincidence technique

○Koji Michishio¹, Masato Yamawaki¹, Ryan Smith¹ (1.AIST)

[10a-N107-7]

Characterization of PDP Phosphors as Scintillators for Tritium Water Detection.

○Ichiro Nishii¹, Takumi Sato¹, Yuki Abe¹, Kana Fujioka¹, Masanori Hara², Yuui Yokota³, Keisuke Shigemori¹, Kohei Yamanoi¹ (1.ILE, UOsaka, 2.Univ. of Toyama, 3.IMR, Tohoku Univ.)

[10a-N107-8]

Comparison of Fluorescence Nuclear Track Responses from Ag-doped Phosphate Glass

OGO OKADA¹, Masanori Koshimizu², Shin-ichi Sawada³, Hiroshi Koshikawa³, Satoshi Kurashima³, Morihisa Saeki³, Hidehito Nanto¹ (1.KIT, 2.Shizuoka Univ., 3.QST Takasaki)

真空紫外線がPADC検出器の特性に及ぼす直接及び間接効果の定量的研究

A quantitative study on direct and indirect effects of VUV on PADC track detectors

神大院海事¹, [○](M2)木本 敦¹, 金崎 真聡¹, 山内 知也¹

Kobe Univ.¹, (M2) Atsushi Kimoto¹, Masato Kanasaki¹, Tomoya Yamauchi¹

E-mail: 246W310W@stu.kobe-u.ac.jp

【緒言】

PADC は陽子線や中性子, 重イオンに対して高い感度を持つ固体飛跡検出器として様々な分野で活用されている. 我々は PADC 中に形成される放射線損傷についての知見を得るための参照研究として, 真空紫外光 (VUV, 172 nm) の照射効果を調べている. VUV 照射の特徴は, 切断が 1 箇所に限られることと大気中ではオゾンを生み出すことである. これまでに赤外分光を用いて官能基の密度低下挙動を分析した. 結果として VUV 照射によりカルボニル基やエーテル結合を含む官能基が減少する一方で, PADC の骨格であるメチンへの影響は小さいことが明らかになった. 表面近傍に集中してヒドロキシル基が生まれることが示唆された. 本研究では, オゾンによる PADC への間接損傷効果を新たに検討した. また紫外可視 UV-Vis 分光を開始した.

【結果と考察】

フクビ化学工業社製の BARYOTRAK (公称 100 μm) を化学エッチングにより 15 μm 以下の PADC 薄膜試料とし, ウシオ電機社製紫外線照射装置 (UER20H-172C) を用いて波長 172 nm の VUV を照射した. VUV 照射の直接効果は窒素雰囲気中で調べ, 間接効果はアルミ板で試料を保護して VUV 照射を行い, オゾンによる影響のみを評価した. Fig.1 に, UV-Vis 吸収スペクトルを示す. 図中の横軸は波長であり縦軸は吸光度を示している. 未照射試料のスペクトルを見ると 200 nm で吸光度は 2 を超えており, これよりも短い波長ではさらに吸光度が高くなっていると期待される. よって 172 nm の真空紫外線は試料表面で止まると考えられる. 未照射試料では吸収端は 300 nm 付近に見られる. VUV 照射試料では吸収端が長波長側 (400 nm) にシフトし, バンドギャップエネルギーの減少が認められた. VUV 照射の直接効果として顕著な構造変化がある. 一方で, オゾンのみが作用する条件では, 吸収端に顕著な変化は見られず, 構造変化は限定的であると考えられる. 講演では, 比較として Ar 及びプロトン照射後の UV-Vis スペクトルの測定結果についても報告する.

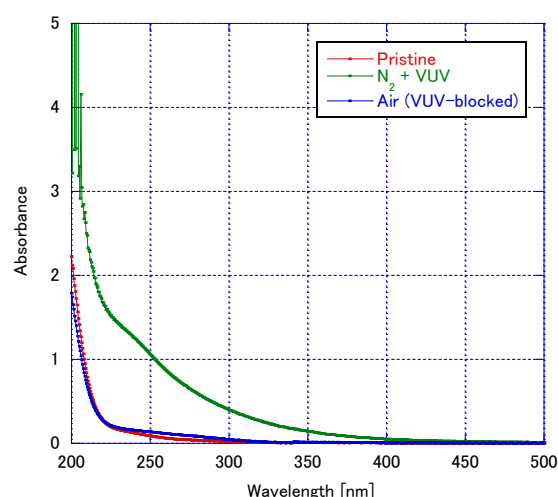


Fig.1 UV-Vis absorption spectra of PADC :
pristine, exposed to VUV and O₃

PADC 検出器中ヒドロキシル基生成密度による バルクエッチング速度記述の試み

An attempt to describe the enhanced bulk-etching-rate by the formation density of hydroxyl group in PADC detectors

神大院海事¹, 量研², 阪大産研³ ○山田 怜央¹, 木本 敦¹, 勢一 隼人¹,

楠本 多聞², 小平 聡², 藤乗 幸子³, 金崎 真聡¹, 山内 知也¹,

Kobe Univ.¹, QST.², SANKEN.³, °Reo Yamada¹, Atsushi Kimoto¹, Seiichi Hayato¹,

Tamon Kusumoto², Satoshi Kodaira², Sachiko Tojo³, Masato Kanasaki¹, Tomoya Yamauchi¹

E-mail: 247w332w@stu.kobe-u.ac.jp

【緒言】

ポリアリルジグリコールカーボネート(PADC)は、最も感度の高いエッチング型固体飛跡検出器である。我々はその高い検出感度を実現させている分子構造上の特性を理解するためにイオントラックの損傷構造をエッチングテストと赤外分光分析によって系統的に評価している。本研究では“飛程がおよそ 50 μm である 6 MeV/u の Xe イオンを照射した PADC 検出器“及び”PADC 薄膜（厚さ 15 μm ）“に対して同条件でガンマ線を照射した。先行研究ではガンマ線照射により、未照射時に円柱形になる核分裂片のピットが、表面近くで半径が大きく、深い部分で半径が小さくなることを確認されている。表面から見ると Fig.1 に示すように、前者は外周部 (Body) として、後者は中央の黒点 (Neck) として観察される。そこで本研究では、核分裂片よりも飛程が長い Xe イオンを用いることでより深い位置での損傷を評価するとともに、赤外分光分析を組み合わせることでヒドロキシル基とバルクエッチング速度の関係性を追求することを目指した。

【バルクエッチング速度及びヒドロキシル基生成量の吸収線量及び線量率依存性】

ガンマ線が生み出す 2 次電子の飛跡群はエッチピットを生み出さず、バルクエッチング速度を増大させる。そこで Xe イオンのエッチピットを利用し、ガンマ線を照射した試料と未照射の試料のバルクエッチング速度をそれぞれ求めた。前者を V_{irr} 、後者を V_b として、それらの比を相対バルクエッチング速度 V_{irr}/V_b と定義する。相対バルクエッチング速度には線量率依存性があり、同一の線量率においては吸収線量の指数関数として記述できる (Fig. 2)。ヒドロキシル基生成密度を定量した。ヒドロキシル基生成量にも線量率依存性が認められ、同一の線量率において吸収線量の指数関数として記述できる (Fig. 3)。ヒドロキシル基密度は感度を決定する損傷の実体であると理解できる。

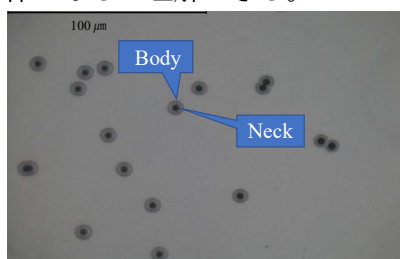


Fig. 1 Etch-pits on the PADC.
(95.1 kGy, 8.8 Gy/s)

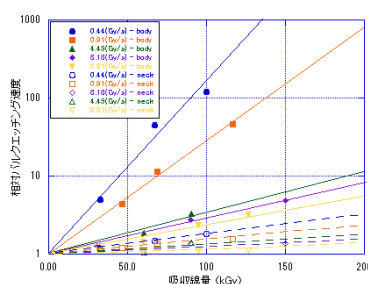


Fig.2. Dose and dose rate effects
on PADC detectors.
(Relative bulk etch rate)

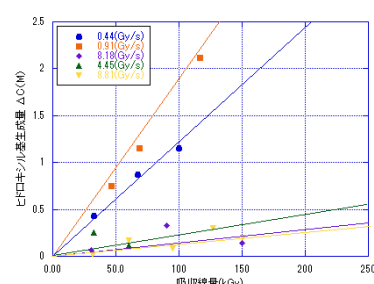


Fig.3 Dose and dose rate effects
on PADC detectors.
(OH group)

超高層大気を観測する X 線カメラ SUIM の開発

Development of an X-ray camera “SUIM” for observing the upper atmosphere

宮崎大¹, 近畿大², 埼玉大³, 京都大⁴, 名古屋大⁵, 奈良教育大⁶,
東京理科大⁷

○(B)高本巴瑠乃¹, 武田彩希¹, 黒木瑛介¹, 田中富貴¹, 有川玲華¹, 柴田夢叶¹,
森浩二¹, 信川久実子², 松井怜生², 青木悠馬², 栗野慧², 竹島優人²,
佐藤彰太郎², 勝田哲³, 鶴剛⁴, 内田裕之⁴, 中澤知洋⁵, 信川正順⁶, 幸村孝由⁷
Univ. of Miyazaki¹, KINDAI Univ.², Saitama Univ.³, Kyoto Univ.⁴, Nagoya Univ.⁵,
Nara Univ. of Education⁶, Tokyo Univ. of Science⁷

○Haruno Takamoto¹, Ayaki Takeda¹, Eisuke Kurogi¹, Tomitaka Tanaka¹,
Reika Arikawa¹, Yuto Shibata¹, Koji Mori¹, Kumiko K. Nobukawa², Reo Matsui²,
Yuma Aoki², Satoru Kuwano², Yuto Takeshima², Shotaro Sato², Satoru Katsuda³,
Takeshi G. Tsuru⁴, Hiroyuki Uchida⁴, Kazuhiro Nakazawa⁵,
Masayohsi Nobukawa⁶, Takayoshi Kohmura⁷

E-mail: takamoto@astro.miyazaki-u.ac.jp

我々は、未だ観測例の少ない高度 100 km 付近の超高層大気を観測するため、SUIM (Soipix for observing Upper atmosphere as Iss experiment Mission) 計画を進めている。高度 100 km 付近のデータを取得することで、気候変動の予測や宇宙天気予報での重要な観測が可能となる。この計画では、我々が独自に開発した X 線カメラを国際宇宙ステーション (ISS) の曝露部に設置されている Materials International Space Station Experiment (MISSE) に 6 ヶ月間搭載し、宇宙 X 線背景放射 (CXB) の大気減光を観測することで、超高層大気の密度を測定する。

現在、X 線 SOI-CMOS ピクセル検出器 (XRPIX 11) を検出部とする X 線カメラ、ソフトウェアの開発を行っている。X 線カメラは、約 290 mm × 120 mm × 95 mm の大きさで (図 1)、CPU 組み込み FPGA (Zynq) とマイコンボード (Spresense) により、XRPIX11、温度・電力センサ等を制御し、自律的に動作する。ソフトウェアは、Linux OS (petalinux) を搭載し、データ取得・保存・スケジュールの管理、ISS との通信等を自律的に行う。

X 線カメラは、2025 年 11 月に米国へ引き渡し、2026 年 4 月に打ち上げ、そして半年間の観測を実施し、その後地球に帰還予定である。本講演では、SUIM 計画における X 線カメラの概要、および、開発状況を報告する。

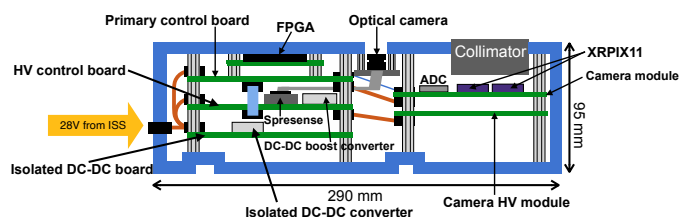


Fig 1. The conceptual diagram of an X-ray camera

月環境放射線モニターLunar-RICheS 搭載 小型撮像チェレンコフ検出器の開発

Development of a Compact Imaging Cherenkov Spectrometer for the Lunar Radiation Environment Monitor, Lunar-RICheS

理化学研究所¹, 東理大理², 広大³, 東理大創域理工⁴,
宇宙研 宇宙探査イノベ⁵, 宇宙研 有人宇宙技術部門⁶

○中村 吏一朗¹, 玉川 徹^{1,2}, 大田 尚享^{1,2}, 内山 慶祐^{1,2}, 武田 朋志^{3,1}

幸村 孝由⁴, 内田 悠介⁴, 佐藤 丞⁴, 渡邊 雄気⁴, 藤井 雅之⁵, 永松 愛子⁶

RIKEN¹, Tokyo University of Science Grad School of Science², Hiroshima University³

Tokyo University of Science Grad School of Science and Technology⁴,

Space Exploration Innovation Hub, JAXA⁵

Space Environment Utilization Center, JAXA⁶,

○Riichiro Nakamura¹, Toru Tamagawa^{1,2}, Naoyuki Ota^{1,2}, Keisuke Uchiyama^{1,2}, Tomoshi Takeda^{1,3}

Takayoshi Kohmura⁴, Yuusuke Uchida⁴, Jo Sato⁴, Yuki Watanabe⁴,

Masayuki Fujii⁵, Aiko Nagamatsu⁶

E-mail: riichiro.nakamura@riken.jp

世界各国の宇宙機関、大学、民間企業は、持続的な月探査に向けたプロジェクトを推進している。月には大気と地磁気がないため、地球低周回軌道に比べて宇宙飛行士が受ける線量が高くなり、その被ばく影響が懸念されている。特に、モジュール壁面を容易に貫通するほどの高エネルギーを持つ銀河宇宙線（GCR）による荷電粒子は、陽子（H）から鉄（Fe）まで多様な種類が存在し、そのエネルギーも MeV/n から GeV/n に至るまで広い範囲にわたる。宇宙飛行士の被ばく寄与が大きいのは、500 MeV/n 以上のエネルギーを持つ H や He 以上の重粒子だ。これまでの能動型宇宙放射線検出器は、粒子が検出媒体にエネルギーを付与する方式により測定しているため、1 GeV/n を超える高エネルギー粒子への対応が難しい。高エネルギー荷電粒子を高精度に測定できるエネルギースペクトル計測器の開発が求められている。

理化学研究所、東京理科大学、JAXA からなる我々の研究グループは、15 MeV - 2 GeV の陽子エネルギーの計測を目指す Lunar-RICheS の開発に取り組んでいる（Fig.1）。本検出器は 15 MeV - 250 MeV を担当する低エネルギー計測部（積層型検出器、JAXA 担当）と 250 MeV - 2 GeV を担当する高エネルギー計測部（小型撮像型チェレンコフ検出器、理化学研究所と東京理科大担当）の 2 つで構成し、両手に収まるほどのコンパクトさながら、幅広いダイナミックレンジで宇宙線を計測する。本講演では高エネルギー計測部の開発状況について報告する。

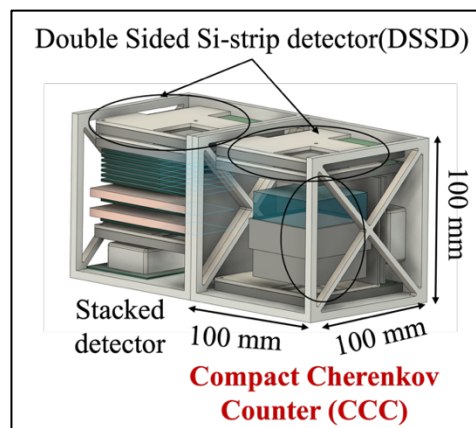


Fig 1. The image of the Lunar-RICheS.

廃炉に向けた光ファイバーと近赤外線発光シンチレータを用いた炉内線量率計測システムの開発の現状報告 2

Development of Fiber-type Real-Time Dose Rate Meter with Infrared-Emitting Scintillators II

東北大 NICHe¹、阪大レーザー研²、東北大ニュートリノ³、東北大工学研究科⁴

○黒澤 俊介^{1,2,3}、藤原 千隼⁴、藤原 千隼⁴、山路 晃広¹

Tohoku Univ. NICHe¹, Osaka Univ. ILE², Tohoku Univ. RCNS³, Tohoku Univ. Eng.⁴

°Shunsuke Kurosawa^{1,2,3}, Chihaya Fujiwara⁴, Yusuke Urano⁴, Akihiro Yamaji¹

E-mail: kurosawa@imr.tohoku.ac.jp, shunsuke.kurosawa.a6@imr.tohoku.ac.jp

福島第一原子力発電所(1F)の廃炉作業において、10Gy/h 程度以上の高線量率環境下におけるリアルタイム線量率を計測する技術が求められており、シンチレータ、全長 100 m 以上の光ファイバー、および CCD 分光器からなり、電流モードで測定するモニタリングシステムが提案されている[1]。ただし主に 550 nm 以下の波長に存在する光ファイバー自身の発光によるノイズ[2]との分別が感度向上のために鍵となっている。本研究ではこれまでにレーザー材料などの発光体としての先行研究がある Cr 添加 $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (Cr:GGG)をはじめとした酸化物、ならびに、新規材料である Cs_2HfI_6 などのハロゲン系を中心に開発したシンチレータの特性と、これらを用いた検出器のシステムについての現状について報告を行う。

酸化物、およびハロゲン化合物それぞれについて、マイクロ引き下げ法、およびブリッジマン法で育成を行い、素子化を行った。粉末 X 線回折などの結晶相の確認や発光強度の評価した後に、コバルト 60 ガンマ線照射装置を用いてシステムとしての評価を行った。あわせて、放射線耐性についても評価を行った。

放射線励起による発光スペクトル測定から、Cr:GGG などの酸化物、および Cs_2HfI_6 などのハロゲン系はどちらも 700 nm 前後の発光波長を持ち、ノイズとの分別がしやすいことが分かった。また、 ^{60}Co 線源ガンマ線照射装置での実験から Cr:GGG 系の線量率ダイナミックレンジは下限が 1 mGy/h 程度であると分った。また、システム化にも取り組んでおり、現場で使えるものを開発している。本講演では、近赤外線発光シンチレータの選定などを中心に現状の研究結果について紹介する。

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

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

アンチコインシデンス式陽電子消滅同時計数ドップラー広がり測定システムの開発

Development of a positron annihilation coincidence Doppler-broadening spectrometer based on anti-coincidence technique

産総研¹ ○満汐 孝治¹, 山脇 正人¹, スミス ライアン¹

AIST¹, ○Koji Michishio¹, Masato Yamawaki¹, Ryan Smith¹

E-mail: koji.michishio@aist.go.jp

陽電子消滅分光法は、固体中の空孔型欠陥やナノ空隙を非破壊で評価できるユニークな分析手法である。陽電子を試料中に注入し、電子との対消滅により放射されるガンマ線の時間やエネルギー分布を測定することで、欠陥や空隙に関する情報が得られる。なかでも、陽電子消滅同時計数ドップラー広がり (Coincidence Doppler-Broadening, CDB) 測定法は、2 台の Ge 検出器で消滅ガンマ線を同時計測することにより、陽電子捕獲サイトの元素分析が可能となる強力な手法である。従来のバルク材の CDB 測定では、陽電子線源 (^{22}Na) を 2 枚の同一試料で挟む必要があり、測定の適用範囲に大きな制限があった。そこで本研究では、線源から放出される陽電子に対してアンチコインシデンス技術 [1] を適用し、1 枚の試料でも測定可能な CDB 測定システムを開発した。

開発した装置の概略を図 1 に示す。本システムでは、試料からの消滅ガンマ線を 2 台の Ge 検出器で同時計測し、ドップラー広がりスペクトルを取得する。 ^{22}Na 線源は試料とアンチコインシデンス検出器 (プラスチックシンチレーターと光電子増倍管で構成) で挟み込まれている。すなわち、アンチコインシデンス検出器への陽電子入射信号が検出された場合、Ge 検出器の同時計数イベントは破棄する論理とすることで、試料からの陽電子消滅ガンマ線イベントのみを選別可能となる。1 枚のステンレス鋼(SUS304)を用いた検証実験により、従来の 2 枚試料を用いた測定と同等の結果が得られ、本システムの有効性が確認された。本講演では、装置の構成、動作原理、および実証実験の結果について報告する。

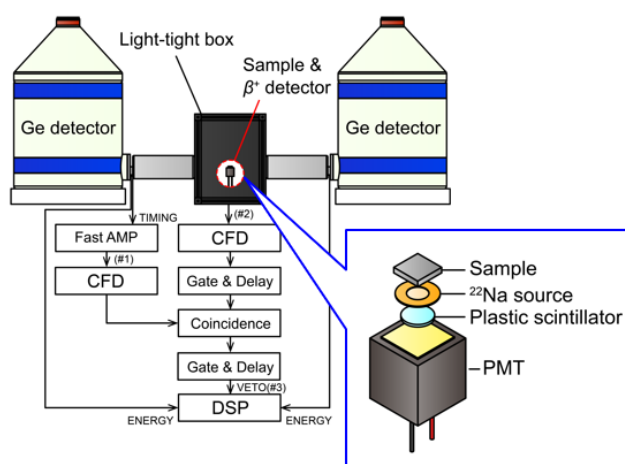


図 1. アンチコインシデンス式陽電子消滅同時計数ドップラー広がり測定システムの概略[2]。

[1] M. Yamawaki *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 50, 086301 (2011).

[2] K. Michishio *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 64, 050905 (2025).

トリチウム水検出用シンチレータとしての PDP 用蛍光体の特性評価

Characterization of PDP Phosphors as Scintillators for Tritium Water Detection.

阪大レーザー研¹, 富山大水素研セ², 東北大金研³

○西井 一朗¹, 佐藤 匠¹, 安部 勇輝¹, 藤岡 加奈¹, 原 正憲², 横田 有為³,

重森 啓介¹, 山ノ井 航平¹

ILE, UOsaka¹, Univ. of Toyama², IMR, Tohoku Univ.³,

○I. Nishii¹, T. Sato¹, Y. Abe², K. Fujioka¹, M. Hara², Y. Yokota³, K. Shigemori¹, K. Yamanoi¹

E-mail: u776017i@ecs.osaka-u.ac.jp

水中のトリチウム濃度測定には、トリチウム放射線を測定する液体シンチレーション検出器が用いられているが、リアルタイム検出が可能であり、かつ放射性有機溶媒が発生しないという利点から、固体シンチレーション検出器の研究開発が進められている。これまでに $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ やプラスチックがシンチレータ材料として研究されてきたが、それ以外の材料についての研究例は少ない。本研究の目的は、トリチウム水濃度 1.5kBq/L を検出可能なシンチレータ材料を探索することである。これまでは、プラズマディスプレイに用いられる4つの粉末状 PDP 用蛍光体(YGE, YBGE, BAM, ZSM)を対象とし、トリチウム水測定を行った。

トリチウムの β 線は非常に弱く、検出には同時計数測定法を用いることが一般的である。本実験では、青色発光する BAM に対しては液体シンチレーション検出器を用い、その他の蛍光体に対しては自前に用意した NIM モジュールを使用して測定した。約 50mg の蛍光体をバイアルに入れ、 1.8ml のトリチウム水により含浸させて計数率を確認した。

BAM の結果を図に示す。トリチウム水の濃度に対して良好な線形性が示された。検出下限濃度は1分間で約 500kBq/L が得られた。NIM モジュールを用いた測定では、その他の蛍光体も同程度の感度を得られることが示唆されたが、低濃度における測定には測定系の感度向上が課題であることが明らかになった。

本実験により、PDP 蛍光体はトリチウム水に対して応答することが確認された。目標感度に到達するためには、表面積を大きくする等の対策が必要であり、今後も応用性を検討する。講演では、その他の蛍光体の検出下限濃度についても報告する。

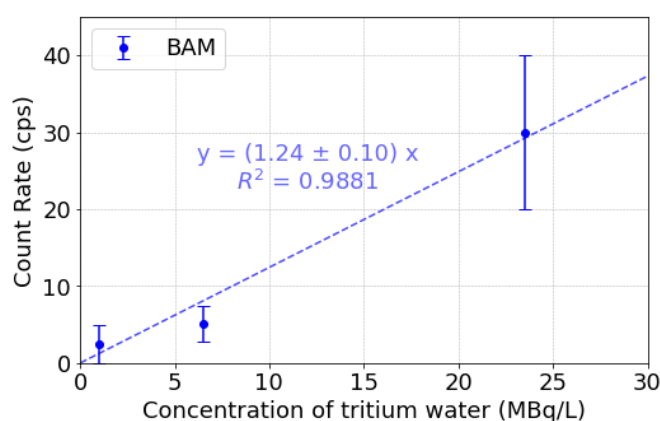


Figure 1. Relationship between the concentration of tritium water and the counting rate.

Ag 添加リン酸塩ガラスにおける蛍光飛跡応答の比較

Comparison of Fluorescence Nuclear Track Responses from Ag-doped Phosphate Glasses

金沢工大¹, 静岡大², QST 高崎研³ °岡田 豪¹, 越水 正典², 澤田 真一³, 越川 博³,
倉島 俊³, 佐伯 盛久³, 南戸 秀仁¹

Kanazawa Inst. of Tech.¹, Shizuoka Univ.², QST(Takasaki)³, °Go Okada¹, Masanori Koshimizu²,
Shin-ichi Sawada,³ Hiroshi Koshikawa,³ Satoshi Kurashima,³ Morihisa Saeki,³ Hidehito Nanto¹
E-mail: go.okada@neptune.kanazawa-it.ac.jp

ラジオフォトルミネッセンス (RPL) とは電離放射線との相互作用により物質中に蛍光中心が形成される現象を指す。素子からの蛍光強度は積算放射線線量に比例することから、RPL は被ばく線量計に応用され、2000 年より千代田テクノルにより事業化されている。また、近年 RPL は被ばく線量計以外に、飛跡検出器としての応用が期待されている。加速された粒子が RPL 材料に衝突すると、その飛程に沿って物質中にエネルギーが付与され、蛍光中心の形成として飛跡情報が記録される。さらに、形成された蛍光中心の分布は蛍光顕微鏡を用いて高分解能で読み出すことができ、可視化することができる。一方、これら RPL の有用性に対し、各種特性を司る材料パラメータなど研究対象が多く残されている。このような背景から、本研究では異なる RPL 材料において蛍光飛跡特性の比較評価をおこなうことを目的とした。

RPL 検出器として用いたガラス試料は熔融急冷法で合成した。具体的には、 $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{P}_2\text{O}_5$ (LAP)、 $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{P}_2\text{O}_5$ (NAP)、 $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{P}_2\text{O}_5$ (KAP) および $\text{CsO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{P}_2\text{O}_5$ (CAP) を母体とし、およそ 0.1 mol% Ag を添加した 4 種類の試料を作製した。得られた試料は QST 高崎研において、20 MeV H^+ 、56 MeV N^{3+} 、75 MeV Ne^{4+} 、150 MeV Ar^{8+} 、322 MeV Kr^{17+} および 454 MeV Xe^{25+} の粒子線をおよそ 10^7 n/cm^2 のフルエンスで照射した。照射後の試料は自作の共焦点蛍光顕微鏡で読み出し、蛍光飛跡分布を取得した。

Fig. 1 に取得した蛍光イメージの例を示す。

同図は Ag 添加 $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{P}_2\text{O}_5$ に 75 MeV Ne^{4+} を照射した試料より得られたものである。イオン飛跡が蛍光として材料中に記録され、取得されている事を確認した。また、得られた像における蛍光飛跡強度の平均値は照射したイオン種に依存し、線エネルギー付与 (LET) に比例して増大することが認められた。さらに、LET に対する感度 (単位 LET 当りの蛍光飛跡強度) は母体材料によって依存し、 $\text{NAP} > \text{KAP} > \text{LAP} > \text{CAP}$ の順であることが認められた。

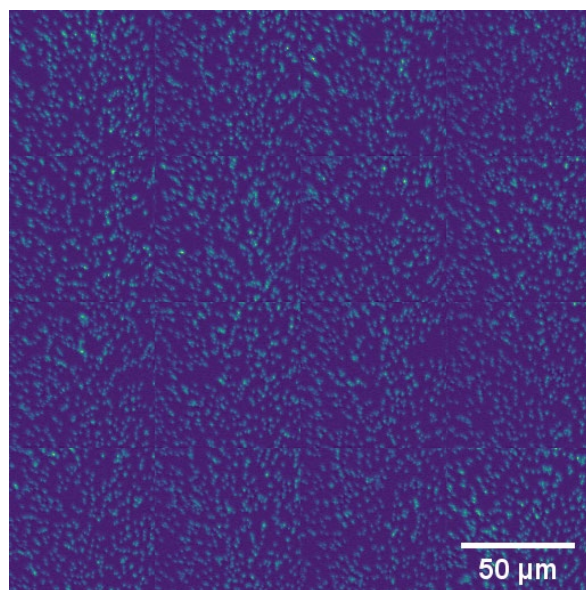


Fig. 1 Fluorescence image of 75 MeV Ne^{4+} ion tracks detected by RPL of Ag-doped $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{P}_2\text{O}_5$ glass.

2 Ionizing Radiation | Oral presentation : 2.2 Radiation generators, Detector development, Measurement technology

[10p-N107-1~9] 2.2 Radiation generators, Detector development, Measurement technology

[10p-N107-1]

Toward the Social Implementation of Solar Cell-Based Radiation Detectors

○Yasuki Okuno^{1,2}, Hiroki Sugimoto³, Yukiko Kamikawa⁴, Tomohiro Kobayashi¹, Yoshie Otake¹
(1.RIKEN RAP, 2.Tohoku Univ., 3.PXP co., 4.AIST)

[10p-N107-2]

Effect of converter-film thickness on solar cell dosimeters

○(B)Ayuto Kobayashi¹, Ryo Yamaguhi¹, Yuji Kurimoto¹, Tamotsu Okamoto¹, Yukiko Kamikawa², Yasuki Okuno³, Tomohiro Kobayashi³ (1.NIT, Kisarazu Coll., 2.AIST, 3.RIKEN)

[10p-N107-3]

Development of neutron dosimeter using CdTe polycrystal by powder sintering method

○(B)Tatsuya Morino¹, Yushiro Takamuku¹, Shintaro Kaminuma¹, Yuji Kurimoto¹, Tamotsu Okamoto¹, Yasuki Okuno², Tomohiro Kobayashi² (1.NIT, Kisarazu Coll., 2.RIKEN)

[10p-N107-4]

Visualization of 3D Thermal Neutron Distribution in Water Using an Organic-Inorganic Perovskite Sensor

○(M1C)Yoshinori Katanaya¹, Yasuki Okuno², Keisuke Yamane¹, Tomohiro Kobayashi², Yoshie Otake² (1.TUT, 2.RIKEN RAP)

[10p-N107-5]

Demonstration of X-ray polarimetric imaging and spectroscopy using a curved silicon Bragg crystal formed by hot plastic deformation

○Daiki Ishi¹, Aoi Ishimure², Yuichiro Ezoe², Kumi Ishikawa², Masaki Numazawa², Hiromi Morishita², Daiki Morimoto², Shunei Miyauchi², Yuto Ogasawara², Naoya Sera², Yu Fukushima², Kazuhisa Mitsuda³, Kohei Morishita⁴, Kazuo Nakajima⁵ (1.ISAS/JAXA, 2.Tokyo Metropolitan Univ., 3.NAOJ, 4.Kyushu Univ., 5.Tohoku Univ.)

[10p-N107-6]

Development of silicon solid-state detectors for super heavy element experiment II

○Fuyuki Tokanai¹, Kouji Morimoto², Daiya Kaji², Pierre Brionnet², Mirei Takeyama¹, Kosaku Kuramoto¹, Kazumasa Kosugi³, Takuya Majima⁴, Keisuke Yasuda⁵ (1.Yamagata Univ., 2.RIKEN Nishina Center, 3.Hamamatsu Photonics, 4.Kyoto Univ., 5.Kyoto Pref. Univ.)

[10p-N107-7]

Crystallographic Orientation Cutting of TlBr Crystals for Gamma-ray Imaging Detectors

○Toshiyuki Onodera¹, Mitsuhiro Nogami², Keitaro Hitomi², Hidenori Toyokawa³ (1.Tohoku Inst. Tech., 2.Tohoku Univ., 3.Konan Univ.)

[10p-N107-8]

Study on a Glass-Gas Electron Multiplier Imaging System

○Hiroyuki Takahashi^{1,2}, Moh Hamdan², Yuki Mitsuya¹, Setsuo Sato¹ (1.The Univ. of Tokyo, 2.Fukushima Institute for Research, Education and Innovation)

[10p-N107-9]

Simulation-Based Performance Evaluation of a 4π Gamma-Ray Imager Utilizing Response Patterns from Multiple Detectors

○Yoshiharu Kitayama¹, Mitsuhiro Nogami², Keitaro Hitomi² (1.JAEA, 2.Tohoku Univ.)

太陽電池を応用した放射線検出の社会実装に向けて

Toward the Social Implementation of Solar Cell-Based Radiation Detectors

理研光量子¹, 東北大², PXP³, 産総研⁴

○ 奥野 泰希^{1,2}, 杉本 広紀³, 上川 由紀子⁴, 小林 知洋¹, 大竹 淑恵¹

RIKEN RAP¹, Tohoku Univ.², PXP Co.³, AIST⁴,

°Yasuki Okuno^{1,2}, Hiroki Sugimoto³, Yukiko Kamikawa⁴, Tomohiro Kobayashi¹, Yoshie Otake¹

E-mail: yasuki.okuno@riken.jp

太陽電池は本来、可視光を電気に変換する素子であるが、放射線に対しても発電する。特に、InGaP、CIGS (Cu(In,Ga)Se₂) 及び、有機無機ハイブリットペロブスカイト (HIOP) 太陽電池などの高い放射線耐性を活かし、照射時の放射線誘起電流を利用することで、放射線検出素子として機能させることが可能である [1]。これらの素子は内蔵電位駆動型であり、外部電源を必要としない点も、長期間の現場設置や人体設置などの工業および医療利用において大きな利点となる。

今後、太陽電池型を、医療、原子力、防災、宇宙開発など多岐にわたる分野での社会的ニーズへの対応に向けて、ダイナミックレンジが 8 桁と大きい安価で広範囲に展開可能な素子の生産体制の構築を目指している。Fig.1 では、その量産化に向けた試作機として作製した(a)HOIP、(b)CIGS および、(c)Si 太陽電池をベースとした太陽電池型放射線検出器(SRD)の外観を示している。HOIP 太陽電池では、ホウ素変換膜の $B(n, \alpha)Li$ 反応を利用した中性子検出特性を有した素子を開発した。これは中性子に対する高い S/N 比を達成することでがん治療であるホウ素捕獲療法 (BNCT) 用途モニタとしての有用性が示されている。CIGS 太陽電池を用いたガンマ線線量計において、広線量範囲にわたる応答特性および放射線耐性が 1F 廃炉環境に耐えうる特性を有していることが示唆された。Si 太陽電池では、放射線耐性は低いものの、膜厚が厚いことで低線量率下での放射線検出に有効性があることから、低コストかつ汎用性の高いガンマ線検出素子として期待できる。

本発表では、これらの素子に対する特性を報告するとともに、社会実装に向けた課題として長期安定性、温度依存性、デバイス量産性、校正方法に関する技術課題について報告する。

[謝辞]本研究の一部は、英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の支援を受けた。

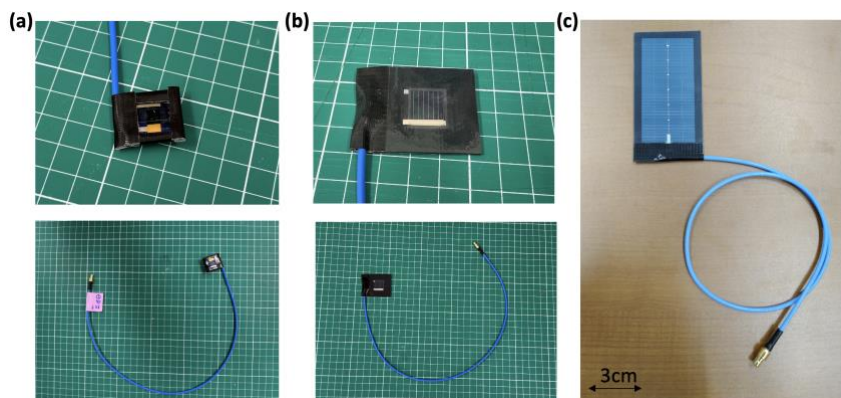


Fig. 1 (a)HOIP, (b) CIGS, and (c) Si solar cell based radiation detector

[1] Y. Okuno, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **64**, 06SP09 (2025).

太陽電池型線量計におけるコンバータ膜厚の影響

Effect of converter-film thickness on solar cell dosimeters

木更津高専¹, 産総研², 理研³

○小林 歩人¹, 山口 諒¹, 栗本 祐司¹, 岡本 保^{1,*}, 上川 由紀子², 奥野 泰希³, 小林 知洋³

NIT, Kisarazu Coll.¹, AIST², RIKEN³

○Ayuto Kobayashi¹, Ryo Yamaguchi¹, Yuji Kurimoto¹, Tamotsu Okamoto^{1,*},

Yukiko Kamikawa², Yasuki Okuno³, Tomohiro Kobayashi³

*E-mail : okamoto@e.kisarazu.ac.jp

1. まえがき

我々はこれまでに中性子を他の放射線種に変換するコンバータとして B₄C 膜、LiF 膜、Gd₂O₃ 膜をスクリーン印刷により作製し、太陽電池と組み合わせて中性子束モニタとして使用できることを明らかにしてきた[1]。

今回、コンバータ膜として数種類の膜厚を有する B₄C 膜、LiF 膜、Gd₂O₃ 膜を作製し、CIGS 太陽電池を用いて中性子検出特性を測定し、コンバータ膜の膜厚の影響を検討したので報告する。

2. 実験方法

B₄C 粉末、LiF 粉末、Gd₂O₃ 粉末およびアクリルバインダ (OLYCOX KC-1700P、共栄社化学㈱) を混合してガラス基板 (Eagle XG) 上にスクリーン印刷し、300°C で 15 分間加熱して B₄C 膜、LiF 膜、Gd₂O₃ 膜を作製した。コンバータ膜の印刷回数を 1 回から 6 回と変化させることで、膜厚を制御した。太陽電池には産総研で作製した CIGS 太陽電池を用いた。光吸収層の厚さは約 2 μm である。太陽電池表面上に、コンバータ膜を接触させて中性子検出特性を測定した。中性子照射には、理研小型加速器中性子源 RANS-II を用いた。中性子線は、コンバータ膜内での荷電粒子の自己吸収効果を避けるため、太陽電池側から照射した。

3. 中性子照射試験

Fig.1 に CIGS 太陽電池と B₄C 膜、LiF 膜、Gd₂O₃ 膜を組み合わせた太陽電池型中性子線量計のコンバータ膜厚と感度の関係を示す。B₄C 膜の場合、今回測定した 20 μm 以上の膜厚において感度の変化が見られなかった。一方、Gd₂O₃ 膜と LiF 膜においては膜厚 70 μm 程度までの範囲で感度が増加する傾向を示した。また、PHITS により、コンバータ膜厚と太陽電池へのエネルギー付与の関係の解析を行った。

その結果、B₄C 膜の場合には、膜厚 3 μm 以上でエネルギー付与が飽和した。これは ¹⁰B による中性子捕獲で生じる α 粒子と ⁷Li 原子核の飛程が数 μm 以下であるためである。一方、LiF 膜、Gd₂O₃ 膜の場合には数十 μm 程度まで感度が増加した。これは ⁶Li による中性子捕獲で生じる ³H 原子核および ¹⁵⁵Gd, ¹⁵⁷Gd による中性子捕獲で生じる内部転換電子の飛程が数十 μm 以上と大きいためである。このように、Fig. 1 の実験結果と PHITS による解析結果は傾向が一致した。

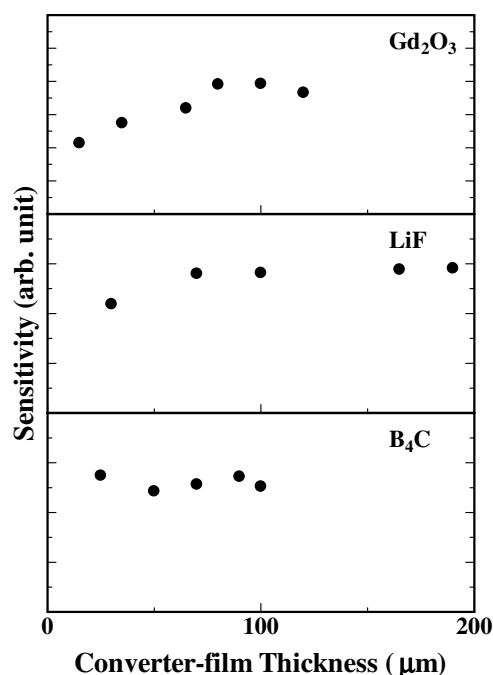


Fig.1 Relationship between sensitivity and converter-film thickness.

謝辞 本研究の一部は、英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業および日本板硝子材料工学助成会より助成を受けて実施した。

参考文献

- [1] T. Okamoto, et al., Jpn. J. Appl. Phys., vol.64, 06SP04 (2025).

粉末焼結法による CdTe 多結晶を用いた中性子検出器の開発

Development of neutron dosimeter using CdTe polycrystal by powder sintering method

木更津高専¹, 理研²

○(B) 森野達也¹, 高椋勇士朗¹, 上沼伸太郎¹, 栗本祐司¹, 岡本保^{1,*}, 奥野泰希², 小林 知洋²

NIT, Kisarazu Coll.¹, RIKEN²

○Tatsuya Morino¹, Yushiro Takamuku¹, Shintaro Kaminuma¹, Yuji Kurimoto¹,

Tamotsu Okamoto^{1,*}, Yasuki Okuno², Tomohiro Kobayashi²

*E-mail : okamoto@e.kisarazu.ac.jp

1. まえがき

我々はこれまでに太陽電池型中性子線量計の開発を試み、中性子束モニタとして使用できることを明らかにしてきた[1]。しかし、中性子を荷電粒子に変換するためのコンバータ膜を外部に設けているため、生成された荷電粒子が検出素子に到達する前に自己吸収され、検出効率に限界があるという問題点がある。この問題を解決するために、半導体粉末に加えて中性子反応材を粉末状態で混合し、焼結することで一体化デバイスを形成するという新規な製造プロセスを提案する。

今回、粉末焼結法により BN 粉末を添加した CdTe 多結晶を作製し、 γ 線および中性子線照射試験を行なったので報告する。

2. 実験方法

CdTe 粉末、BN 粉末および CdCl₂ 粉末を混合し、プレス機による加圧後、Ar 雰囲気中にて 730°C で 10 分間焼結して CdTe 多結晶を作製した。BN の添加量は約 20mol% である。CdTe 放射線検出器の構造は、銀電極/カーボン基板/CdTe 焼結体/カーボン電極/銀電極となっており、厚さは約 1 mm である。 γ 線照射には東京科学大学千代田テク ノルコバルト照射施設、中性子照射には、理化学研究所小型加速器中性子源 RANS-II を用いた。

3. γ 線・中性子照射試験

Fig.1 に 20 V 印加した CdTe 多結晶の γ 線照射下での電流を示す。BN 粉末添加を行った試料は、添加を行っていない試料と比べ感度が小さくなっているが、どちらの場合も γ 線の線量率にほぼ比例した誘起電流が観測された。

Fig.2 に 20 V 印加した CdTe 多結晶の中性子照射下での電流を示す。RANS-II では中性子と同時に γ 線も発生している。陽子線電流は 38 μ A から 67 μ A の範囲で変化させた。中性子線量率、 γ 線線量率は陽子線電流に比例することがわかっている。Fig.2 によるとどちらの試料でも陽子線電流にほぼ比例した誘起電

流が観測されている。さらに、BN 粉末添加なしの場合に比べて、BN 添加した試料では大きな誘起電流が観測された。この結果は BN 添加した CdTe 多結晶では γ 線のみではなく、中性子線も観測できていることを示唆している。

本研究の一部は、日本板硝子材料工学助成会より助成を受けて実施した。

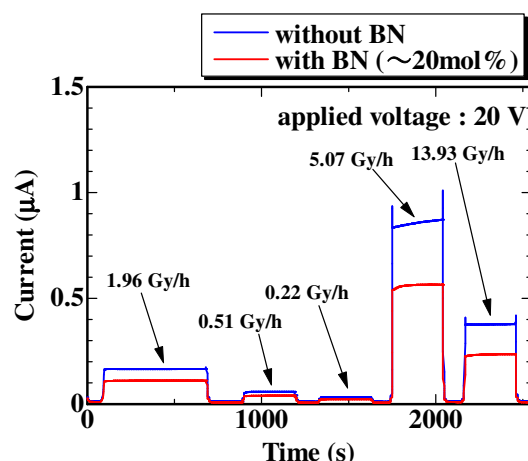


Fig.1 Current generated in the CdTe polycrystals at 20 V application in the γ -ray radiation environment.

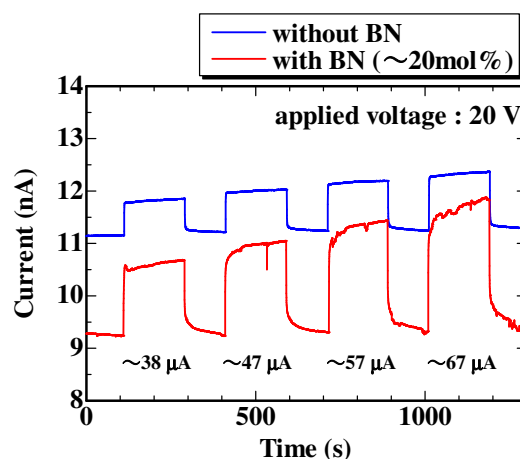


Fig.2 Current generated in the CdTe polycrystals at 20 V application in the neutron radiation environment.

参考文献

- [1] T. Okamoto, et al., Jpn. J. Appl. Phys., vol.64, 06SP04 (2025).

有機無機ペロブスカイトセンサによる熱中性子水中 3 次元分布の可視化

Visualization of 3D Thermal Neutron Distribution

in Water Using an Organic-Inorganic Perovskite Sensor

豊橋技科大¹, 理研光量子², ⁰(M1)刀谷吉徳¹, 奥野泰希², 山根啓輔¹, 小林知洋², 大竹淑恵²

TUT¹, RIKEN RAP²

E-mail: yasuki.okuno@riken.jp

【序論】近年、ホウ素中性子補足療法(BNCT)は、低侵襲ながん治療として注目されている。加速器中性子源が治療に使用されており、その治療精度を保証するため人体中の中性子挙動を 3 次元的に知る必要がある。現状、金箔を用いて水中ファントム内の中性子 3 次元分布を計測する方法が一般的であるが、計測時間の短縮やリアルタイム計測といった課題がある。そのため、我々は新たな BNCT 用検出器として B-10 変換膜を有する有機無機ペロブスカイト半導体(HOIP)センサを開発しており、BNCT 環境中の中性子束を検出できることを明らかにしてきた⁽¹⁾。本研究では、HOIP センサを用いて 3 次元中性子計測システムを開発し、 γ 線や移動時のノイズを解明することで計測精度や時間について評価する。

【実験方法】実験では、5 × 5 mmの有効面積を持つ HOIP センサを用いた、センサは図 1 に示すように理研小型中性子源 RANS-II 内に自動 3 軸ステージ(駿河精機社製, KWL06050M-C1-C)にアルミ治具を取り付け、純水入りの 10 cm 角の亚克力板を設置した。信号は、電流計測器(泰榮エンジニアリング社製, iDC13)により計測した。ステージを 5 mm 間隔で移動させ計測中は 1 秒間停止し、その間の電流の平均値を計測値とした。

【結果と考察】3 次元計測結果を Fig1(b)に示す。5 mm 間隔で取得した結果を連続的な中性子分布として表示している。深さ 20 mm にてセンサ信号が増加する傾向が確認できた。これは RANS-II で発生した高速中性子が水中で減速し、センサの B-10 の捕獲反応が増加したためである。 γ 線 3 次元分布も計測し、中性子信号に対するノイズが、中性子信号に対して優位に低いことが明らかになった。さらに、中性子が Li ターゲット中心から左下方向に偏る挙動が確認された。これはシミュレーション結果から陽子線のターゲット入射角による影響であることが示唆された。

以上より HOIP センサによる 3 次元熱中性子計測は、熱中性子分布やビーム軸の不安定性の観測により BNCT の信頼性の向上に期待できる。

【謝辞】本研究の一部は、GTIE(GAP ファンドプログラム 2024)の支援を受けて実施された。

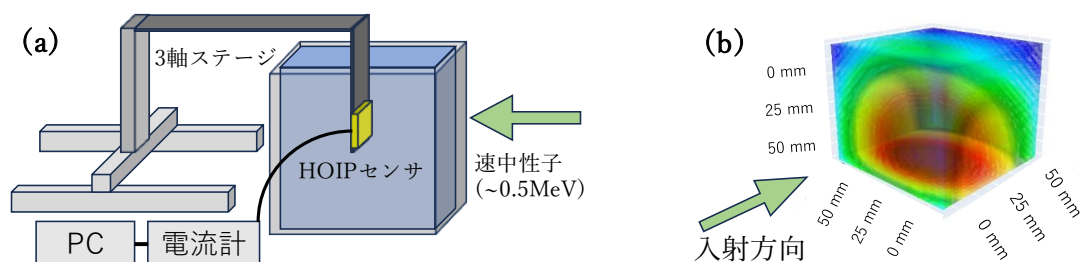


Fig.1 水中熱中性子束の 3 次元分布の(a)計測体系及び(b)計測結果。

(1)Y. Okuno et al., ACS Appl. Electron. Mater.2022, 4, 3411-3420

高温塑性変形技術を用いた湾曲 Si ブラッグ結晶による X 線偏光撮像分光の実証 Demonstration of X-ray polarimetric imaging and spectroscopy using a curved silicon Bragg crystal formed by hot plastic deformation

JAXA 宇宙研¹, 都立大理², 国立天文台³, 九州大工⁴, 東北大金研⁵

○伊師 大貴¹, 石牟礼 碧衣², 江副 祐一郎², 石川 久美², 沼澤 正樹², 森下 弘海², 森本 大輝², 宮内 俊英², 小笠原 勇翔², 世良 直也², 福島 優², 満田 和久³, 森下 浩平⁴, 中嶋 一雄⁵

ISAS/JAXA¹, Tokyo Metropolitan Univ.², NAOJ³, Kyushu Univ.⁴, Tohoku Univ.⁵

○Daiki Ishi¹, Aoi Ishimure², Yuichiro Ezoe², Kumi Ishikawa², Masaki Numazawa², Hiromi Morishita², Daiki Morimoto², Shunei Miyauchi², Yuto Ogasawara², Naoya Sera², Yu Fukushima², Kazuhisa Mitsuda³, Kohei Morishita⁴, Kazuo Nakajima⁵

E-mail: ishi.daiki@jaxa.jp

我々は湾曲 Si 結晶を用いたブラッグ反射型 X 線偏光分光計を開発している。Si 結晶を自由に湾曲させる高温塑性変形技術を活用し、結晶面をずらし基板を湾曲させることで、ブラッグ反射における高い偏光検出感度を維持しつつ、反射可能な波長域の拡大と集光を実現する。さらに、検出器をわざと焦点面からずらすことで、分光も狙う。これまでに試作結晶を用いて本手法で世界で初めて偏光測定を実証してきた (Ueda et al. 2022 Proc. SPIE など)。我々は今回、集光と分光性能の評価を目的として、JAXA 宇宙科学研究所 30 m ビームラインを用いて、曲率半径 1042 mm に球面変形した Si (100) 基板に Fe $K\alpha 1$ (6.404 keV) および $K\alpha 2$ (6.391 keV) を含む連続 X 線を照射し、サンプルと検出器間の距離を変えながら撮影を行った (Figs. 1a,b)。変形後の曲率半径から予想される集光位置はサンプルから 385 mm であり、焦点位置を跨ぐ 308–408 mm の可動範囲の内 5 箇所に検出器を置いて撮像し、本手法で世界で初めて 2 本の輝線に対応するブラッグ反射像を取得することに成功した (Fig. 1c)。得られた反射像からプロジェクションを作成し、像全体の幅の変化および $K\alpha 1$ と $K\alpha 2$ のピーク位置の変化から集光位置を推定した結果、 395 ± 26 mm および 377 ± 12 mm と求まり、予想される集光位置と誤差の範囲内で両者一致した。反射像は本来予想される長方形から台形に広がっており、表面形状の影響により連続成分が予想通りに反射しなかったことが原因と考えられる。本講演では、我々の手法の原理と開発状況について報告する。

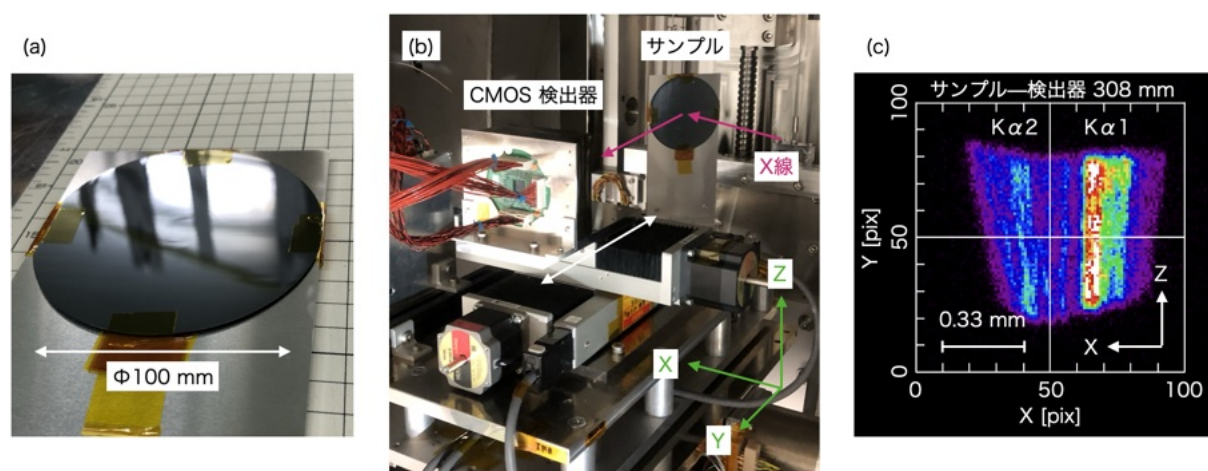


Fig. 1. (a) A curved silicon wafer formed by hot plastic deformation. (b) Experimental setup for Bragg reflection measurements. (c) X-ray image of Bragg reflection from Fe $K\alpha 1$ and $K\alpha 2$ lines.

超重元素実験用シリコン半導体検出器の開発 II

Development of silicon solid-state detectors for super heavy element experiment

○門叶 冬樹¹、森本 幸司²、加治 大哉²、Pierre Brionnet²、武山 美麗¹、倉本 幸作¹、
小杉 和正³、間嶋 拓也⁴、安田 啓介⁵

山形大理¹、理研仁科センター²、浜松ホトニクス³、京大院工⁴、京府大⁵

°Fuyuki Tokanai¹, Kouji Morimoto², Daiya Kaji², Pierre Brionnet², Mirei Takeyama¹,
Kosaku Kuramoto¹, Kazumasa Kosugi³, Takuya Majima⁴, Keisuke Yasuda³
Yamagata Univ.¹, RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science²,
Hamamatsu Photonics K. K.³, Kyoto Univ.⁴, Kyoto Pref. Univ.⁵

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

理化学研究所では、入射ビームと標的との核融合反応によって生成された超重元素 ($Z > 103$) を、気体充填型反跳分離機 (GARIS-II、III) を用いて入射ビームや副生成粒子から分離し、焦点面に設置された検出器で収集する手法により、超重元素の研究が行われている。[1,2]。GARIS の焦点面検出器は、飛行時間検出器と両面シリコンストリップ検出器 (DSSD)、およびその側面を4台のピクセル型 Si 半導体検出器 (pixel-SSD) で囲んだ Si-Box で構成されている (図 1 左)。DSSD では、DSSD に入射した超重元素や、それに続く α 崩壊や自発核分裂事象の位置、時刻、エネルギー情報が観測される。pixel-SSD は、崩壊時に DSSD から飛び出した α 粒子や核分裂片といったエスケープ事象を検出し、超重元素の核種同定精度を向上させる役割を担っている。

我々は、超重元素の核種同定精度の向上を目的として、Si-Box 内の DSSD およびそれを取り囲むすべての pixel-SSD に対し、不感層の薄い新型 Si 半導体検出器の開発を進めている。側面用 pixel-SSD は 60 mm $\times$ 60 mm の有効面積を持ち、16 チャンネル (4 $\times$ 4) にピクセル化された電極を備える。上下面用 pixel-SSD は 123 mm $\times$ 60 mm の有効面積を持ち、32 チャンネル (8 $\times$ 4) のピクセル電極を有する。今回、側面用 pixel-SSD (図 1 右) に施されていた保護膜を除去し、不感層の低減を試みた。本発表では、新たに開発した側面用 pixel-SSD の不感層厚の測定結果と、京都大学宇治キャンパスの 1.7 MV タンデントロン加速器ビームラインに設置された TOF-ERDA (飛行時間-弾性反跳粒子検出法) を用いた測定結果について報告する。

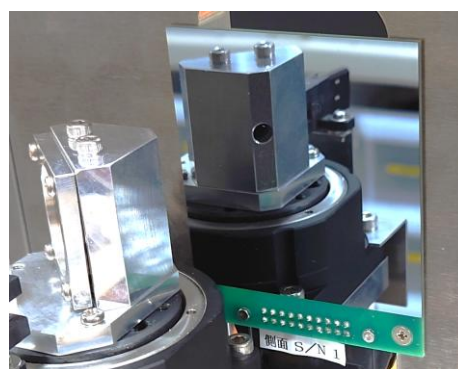
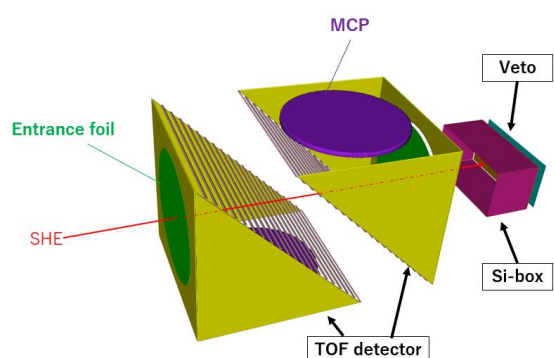


Fig.1 A focal plane detection system for GARIS-II and GARIS-III (left) and the developed pixel-SSD (right).

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).

TlBr 結晶の方位切断

Crystallographic Orientation Cutting of TlBr Crystals for

Gamma-ray Imaging Detectors

東北工大¹, 東北大工², 甲南大³ ○小野寺 敏幸¹, 野上 光博², 人見 啓太朗², 豊川 秀訓³

Tohoku Inst. Tech.¹, Tohoku Univ.², Konan Univ.³, °Toshiyuki Onodera¹, Mitsuhiro Nogami²,

Keitaro Hitomi², Hidenori Toyokawa³

E-mail: t_onodera@tohotech.ac.jp

1. はじめに

極点測定により成長させた臭化タリウム (TlBr) 結晶から切り出したウエハの法線方向に対する特定方位の角度差 ($\Delta\alpha$, $\Delta\beta$) が明らかになった。また、ロッキングカーブの2次元マッピングにより TlBr ウエハにおける面内の結晶性および粒界の存在が明らかになった。以上の成果により、TlBr ガンマ線イメージャの実現にとって欠かせない TlBr 結晶の評価技術を充実させることができた。本研究では、この評価技術を基礎として高品質かつ $\phi 2$ インチを目標とする口径拡大が狙いである。本発表では、TlBr ウエハの品質安定化に寄与すると考えられる TlBr 結晶の方位とデバイス特性に関わる考察を進めるため、極点測定で得られる $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ から特定方位をウエハ面とする TlBr ウエハを取得可能な工程の確立を試みた。

2. 実験方法および結果

試料にはブリッジマン法により育成した TlBr 結晶から切り出した $\phi 8 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ の TlBr 結晶である。機械研磨 (#2000) したウエハ断面に対して X 線回折 (Cu-K α 40 kV, 40 mA) による $2\theta/\theta$ 測定 (2θ : $20 \sim 85^\circ$) を実施した。回折パターンから見出したウエハ断面の法線方向に近い方位に対し極点測定 (χ : $0 \sim 75^\circ$, φ : $0 \sim 360^\circ$) を行い、法線に対する傾斜角度 ($\Delta\alpha$) および方位が傾斜している面内方向 ($\Delta\beta$) を取得した。TlBr 結晶をダイヤモンドワイヤーソの切断治具に固定し、 $\Delta\alpha$ および $\Delta\beta$ をもとにしたゴニオステージおよび面内回転ステージの調整により格子面に対してワイヤーを平行とした。図 1 は、ウエハ断面を (110) として切り出した TlBr 結晶の切断前後の極点図である。図が示すように、(110) の極は、切断によりほぼ中心に観測されてたため、TlBr ウエハの結晶面は、(110) の格子面に対して平行に切り出せていることが分かった。

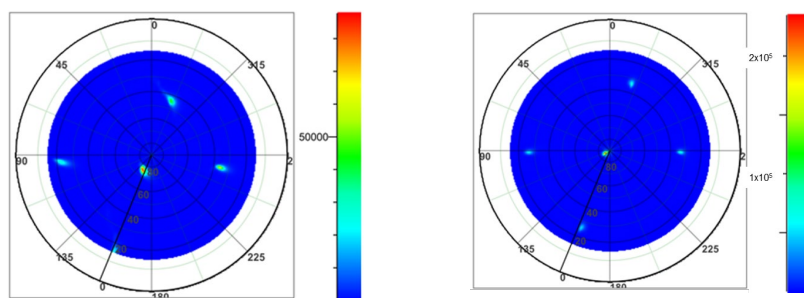


Fig.1. Pole figure of a TlBr crystal for (110) reflection, left: before, right: after (110) orientation cutting.

Glass Gas Electron Multiplier イメージングシステムの研究

Study on a Glass-Gas Electron Multiplier Imaging System

東大工¹, 福島国際研究開発機構², 〇高橋浩之^{1,2}, Moh Hamdan², 三津谷有貴¹, 佐藤節夫¹

School of Engineering, The Univ. of Tokyo¹

Fukushima Institute for Research, Education and Innovation²

E-mail: leo@n.t.u-tokyo.ac.jp

我々は Glass Gas Electron Multiplier (G-GEM) を用いたイメージングシステムの開発を行っている。G-GEM はガラス基板上に多数の細孔をあけた構造により、 $10^3 \sim 10^4$ 程度の高い増幅度を有するマイクロパターンガス検出器の一つであるが、高い増幅度を利用してミュオンなどの信号電荷密度の小さい粒子の飛跡を求めることが可能となると考えられる。また、ガラスと金属のみから構成されるために、封じ切り動作が可能である。現在、我々は、280 mm 角の大面积の G-GEM の直接電荷読み出し方式のシステムの構築に取り組んでおり、図 1 に示すように、アナログデバイス社の FPD 用の 128 ch 電荷積分型増幅器を用いて読み出しを行うシステムの製作を行っており、これを用いて大面积検出器の電荷信号の読み出しを行う予定である。これに加えて、現在、図 2 のように 8ch の波形情報も取得できるようなフロントエンドチップを 6 個搭載させて、波形情報の記録と利用が可能となるような信号読み出しシステムも構築し、回路側の動作までは確認できた。信号の立ち上がり時間などに電子の飛跡と検出器面との位置関係が反映されるため、特にミュオン計測や中性子計測など飛跡の長い信号を扱う場合において、波形情報の追跡は有用な情報を与えることが期待される。講演では、研究の今後の展開について示す。

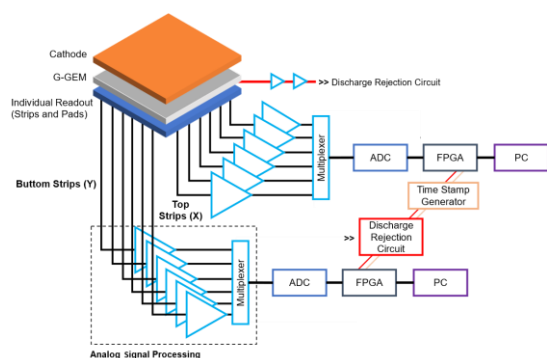


図 1 積分型信号読み出しシステムの全体像



図 2 48ch 波形解析システム

複数検出器の応答パターンに基づく 全方位ガンマ線イメージャーの特性評価シミュレーション

Simulation-Based Performance Evaluation of a 4π Gamma-Ray Imager Utilizing Response Patterns from Multiple Detectors

JAEA¹, 東北大工² °北山 佳治¹, 野上 光博², 人見 啓太郎²

JAEA¹, Tohoku Univ², °Yoshiharu Kitayama¹, Mitsuhiro Nogami², Keitaro Hitomi²

E-mail: kitayama.yoshiharu@jaea.go.jp

我々は複数の立方体シンチレータと遮蔽体を三次元に配置した構造を持つ新しい全方位ガンマ線イメージャー (Coded Cube Camera for Gamma-ray: C3G) を開発している。現在までに 8 個の検出器で構成される C3G により、 ^{137}Cs 線源を結像強度ラインプロファイルの半値幅 5° でイメージングできることを実証した[1]。また最近の研究で、検出器を 8 個から 24 個に増やすことで単一線源のイメージング精度を大幅に向上させることができることを確認した[2]。

本研究では、24 検出器 C3G における、より複雑な線源分布に対するイメージング特性を評価するために、GEANT4 による 3 線源以上の点線源の同時イメージングシミュレーションを実施した。シミュレーションに用いた 24 検出器 C3G は、図 1 に示すように、一辺が 10 mm の立方体の GAGG:Ce シンチレータ 24 個と鉛遮蔽体 40 個で構成される。イメージングターゲットとして ^{137}Cs を仮定し、大きさ 90 mm × 90 mm の面線源から C3G に向けて光子を平行照射した。

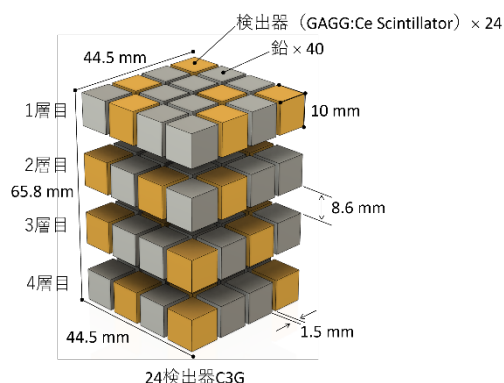


図 1. 24 検出器 C3G の概略図

シミュレーションの結果、図 2 に示すように 20 度ずつ離して置かれた 6 個の ^{137}Cs 線源を分離してイメージングできることを確認した。線源の分離能は方位角方向より仰角方向の方が高くなる傾向が見られた。これは、検出器応答が仰角方向でより大きく変化するため特徴量が弁別しやすいことによると思われる。この知見はジオメトリ設計の際の重要な指標になると考えられるため、今後詳細をさらに検討していく。

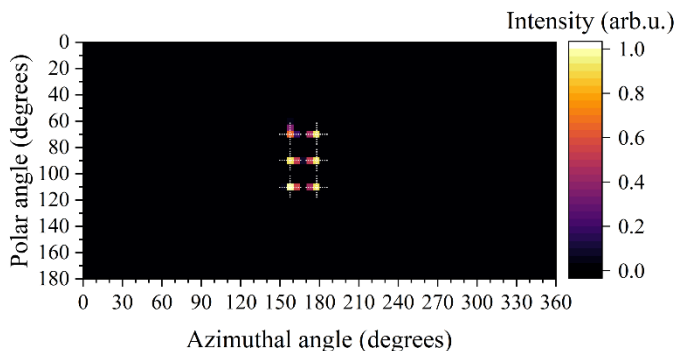


図 2. 3 行 2 列に配置された 6 個の ^{137}Cs 線源のイメージングシミュレーション結果。破線十字が真の線源位置を示す。(10⁷個の光子照射の結果)

今後は特性評価実験に加え、具体的な応用先に応じた設計を進め課題の抽出を行っていく。

本研究は JSPS 科研費 JP23759195 の助成を受けたものである。

[1] Y. Kitayama, M. Nogami, and K. Hitomi, Jpn. J. Appl. Phys. (2024), 63, 076502

[2] Y. Kitayama, M. Nogami, and K. Hitomi, 第 72 回 応用物理学会春季学術講演会 (2025).

2 Ionizing Radiation | Oral presentation : 2.4 Life Sciences, Medical applications, Space and Earth Environment, Radiation Education

[7a-N103-1~10] 2.4 Life Sciences, Medical applications, Space and Earth Environment, Radiation Education

[7a-N103-1]

Development of a high-speed PC-CT system using a large-area 2D MPPC array: (1) Performance evaluation of the core system

○Minoru Oshima¹, Makoto Arimoto¹, Fitri Lucyana¹, Yu Furuta¹, Shuma Midorikawa¹, Jun Kataoka², Ryotaro Minagawa², Takahiro Ro², Hiroki Kawashima¹, Satoshi Kobayashi¹, Kenichiro Okumura¹, Shinsuke Terazawa³, Yuta Maeno³ (1.Kanazawa Univ., 2.Waseda Univ., 3.Proterial Ltd.)

[7a-N103-2]

Development of a high-speed PC-CT system using a large-area 2D MPPC array: (2) Higher speed and clearer energy information

○Takahiro Ro¹, R. Minagawa¹, J. Kataoka¹, M. Arimoto², H. Kawashima², S. Kobayashi², K. Okumura², F. Lucyana², M. Oshima², Y. Furuta², S. Midorikawa², S. Terazawa³, Y. Maeno³ (1.Waseda Univ., 2.Kanazawa Univ., 3.Proterial Ltd.)

[7a-N103-3]

Image quality enhancement and energy information utilization in photon-counting CT via machine learning

○Ryotaro Minagawa¹, Takahiro Ro¹, Jun Kataoka¹, Shogo Sato¹, Makoto Arimoto², Hiroki Kawashima², Satoshi Kobayashi², Kenichiro Okumura², Fitri Lucyana², Minoru Oshima², Yu Furuta², Shuma Midorikawa², Junichi Kotoku³, Shinsuke Terazawa⁴, Yuta Maeno⁴ (1.Waseda Univ., 2.Kanazawa Univ., 3.Teikyo Univ., 4.Proterial Ltd.)

[7a-N103-4]

Development of a TOFPET2 ASIC-based SEB camera for particle therapy beam imaging

○Mitsutaka Yamaguchi¹, Yuto Nagao¹, Michiko Tsuda^{1,2}, Han Gyu Kang¹, Takuya Yabe¹, Eiji Yoshida¹, Taiga Yamaya¹, Makoto Sakai³, Mutsumi Tashiro⁴, Yong-Gen Yin¹, Tomihiro Kamiya¹, Hiroshi Watabe², Naoki Kawachi¹ (1.QST, 2.Tohoku Univ., 3.Kyushu Univ., 4.Gunma Univ.)

[7a-N103-5]

[The 58th Young Scientist Presentation Award Speech] Development of Fiber Insertable Air Ionization chamber for BNCT

○Nishiki Matsubayashi¹, Hiroki Tanaka¹, Takushi Takata¹, Naonori Hu^{2,1}, Mai Nojiri², Tetsuya Mukawa³, Keita Suga³ (1.Kyoto Univ., 2.OMP Univ., 3.SHI Ltd.)

[7a-N103-6]

Study of a new Compton camera technology for beam monitoring of proton therapy

○(D)Takahiro Mizoguchi¹, Hiroshi Muraishi¹, Ryoji Enomoto¹, Hideaki Katagiri², Mika Kagaya³, Takara Watanabe¹, Hikari Tsukamoto^{1,4}, Kosuke Okubo¹, Ryotaro Honda⁵, Masayoshi Shoji⁵, Manobu Tanaka⁵, Daisuke Kano⁶, Yusuke Watanabe¹, Hiromichi Ishiyama⁷ (1.Kitasato Univ., 2.Ibaraki Univ., 3.NIT, Sendai Col., 4.Tokai Univ. Hosp., 5.KEK IPNS, 6.NCCHE, 7.Kitasato Univ. Hosp.)

[7a-N103-7]

Development of a Compton camera specialized for nuclear medicine facilities

○Takara Watanabe¹, Ryoji Enomoto¹, Hideaki Katagiri², Mika Kagaya³, Daisuke Kano⁴, Takahiro Mizoguchi¹, Hikari Tsukamoto^{1,5}, Kosuke Okubo¹, Ryotaro Honda⁶, Masayoshi Shoji⁶, Manobu Tanaka⁶, Yusuke Watanabe¹, Hirohi Muraishi¹ (1.Kitasato Univ., 2.Ibaraki Univ., 3.NIT, Sendai College, 4.NCCHE, 5.Tokai Univ. Hosp., 6.IPNS., KEK)

[7a-N103-8]

Development of a prompt gamma-ray real-time imaging detector for BNCT

○(DC)Yusuke Urano^{1,2}, Shunsuke Kurosawa^{2,3,4,5}, Akihiro Yamaji³, Akira Yoshikawa^{2,3,6}, Nishiki Matsubayashi⁷, Hiroki Tanaka⁷ (1.Department of Mat. Sci., Graduate School of Eng., Tohoku Univ., 2.IMR, Tohoku Univ., 3.NICHe, Tohoku Univ., 4.RCNS, Tohoku Univ., 5.Institute for Laser Eng., Osaka Univ., 6.C&A Corporation, 7.Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto Univ.)

[7a-N103-9]

Basic design of Compton camera used for prompt gamma-ray imaging in boron neutron capture therapy

○(DC)Jiye Qiu¹, Makoto Sakai², Nikolaos Voulgaris¹, Shingo Tamaki¹, Sachie Kusaka¹, Isao Murata¹ (1.Univ. of Osaka, 2.Kyushu Univ.)

[7a-N103-10]

Proposal of a Novel Detection Configuration Using BeO Ceramic Plate and HDPE for Fast Neutron Discrimination in BNCT

○(M2)Leo Takahashi¹, Hiroki Tanaka², Shinnosuke Matsumoto¹, Genichiro Wakabayashi³, Kiyomitsu Shinsho¹ (1.Tokyo Metropolitan Univ., 2.Kyoto Univ., 3.Kindai Univ.)

二次元大面積 MPPC アレイを用いた高速 PC-CT の開発 :

(1) 基盤システムによる性能評価

Development of a high-speed PC-CT system using a large-area 2D MPPC array:

(1) Performance evaluation of the core system

金沢大¹, 早大理工², プロテリアル³ ◯大島 美礼¹, 有元 誠¹, Fitri Lucyana¹, 古田 優¹,
緑川 柊麻¹, 片岡 淳², 皆川 遼太郎², 呂 膺昊², 川嶋 広貴¹, 小林 聡¹,
奥村 健一郎¹, 寺澤 慎祐³, 前野 優太³

Kanazawa Univ.¹, Waseda Univ.², Proterial Ltd.³, ◯M. Oshima¹, M. Arimoto¹, F. Lucyana¹,

Y. Furuta¹, S. Midorikawa¹, J. Kataoka², R. Minagawa², T. Ro²,

H. kawashima¹, S. Kobayashi¹, K. Okumura¹, S. Terazawa³, Y. Maeno³

E-mail: o2415011008@stu.kanazawa-u.ac.jp

フォトンカウンティング CT (PC-CT) は、個々の X 線光子を計数し、そのエネルギー情報を取得できる次世代の医用画像技術である。私たちはこれまでに、高速シンチレータ (YGAG:Ce) と光半導体素子 MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) を組み合わせた 64×1 ピクセルの検出器を用いて、一次元 PC-CT システムを開発した。このシステムで薬剤を注入したマウスの実験を行い、体内に蓄積した薬剤の可視化および濃度推定に成功している。しかし、検出器の撮像領域が小さいため、CT 撮影に約 1 時間を要し、マウスの体内を循環する薬剤の動態評価は困難であった。

本研究では、動態イメージングの実現を目指し、一次元システムを基盤として 1024 チャンネル (64×16 ピクセル) の二次元 MPPC アレイを用いた PC-CT システム (Fig. 1) を開発した。検出器からの信号は 64 チャンネルごとに 6 つのエネルギー閾値を設定できる LSI (大規模集積回路) によって高速に処理される。1 枚の LSI は、一次元システムにおいてその性能が検証されており、二次元システムではこれを 16 枚使用した。性能評価の結果、エネルギー分解能は 42 % (FWHM @59.5 keV)、デッドタイムは約 230 ns であった。さらに、CT 撮影実験の結果、 $13.5 \times 13.5 \times 53$ mm のプラスチック製の物体を従来の 1/16 の時間で撮影することに成功した (Fig. 2)。これらの結果は開発した二次元 PC-CT システムが一次元システムと同等の性能を持ち、動態イメージングの実現に有効であることを示している。本講演では、システムの概要およびイメージングの性能評価について報告する。

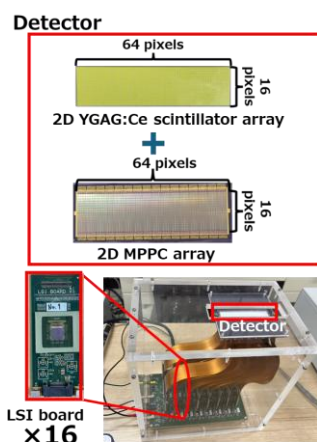


Fig. 2 MPPC-based detector array comprising a 2D YGAG:Ce scintillator array and a 2D MPPC array.



Fig. 1 Left: Plastic object used for imaging. Right: Reconstructed 3D and cross-sectional CT images at 20-30 keV.

二次元大面積 MPPC アレイを用いた高速 PC-CT の開発 :

(2) 高速化とエネルギー情報の鮮鋭化

Development of a high-speed PC-CT system using a large-area 2D MPPC array:

(2) Higher speed and clearer energy information

早大理工¹, 金沢大², プロテリアル³, [○]呂膺昊¹, 皆川遼太郎¹, 片岡淳¹, 有元誠², 川嶋広貴²,
小林聡², 奥村健一朗², Fitri Lucyana², 大島美礼², 古田優², 緑川柊麻²,
寺澤慎祐³, 前野優太³

Waseda Univ.¹, Kanazawa Univ.², Proterial Ltd.³

[○]T. Ro¹, R. Minagawa¹, J. Kataoka¹, M. Arimoto², H. Kawashima², S. Kobayashi², K. Okumura²,
F. Lucyana², M. Oshima², Y. Furuta², S. Midorikawa², S. Terazawa³, Y. Maeno³

E-mail: rotakahiro@asagi.waseda.jp

フォトンカウンティング CT (PCCT) は、個々の X 線光子を個別にカウントしエネルギー情報を取得することで、物質弁別の精度向上や被曝量・造影剤使用量の低減などが期待される次世代の X 線 CT である。我々の研究グループでは、高価な CdTe や CZT などの半導体検出器とは異なり、安価で高速なセラミックシンチレータと MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) を組み合わせたシンプルな PCCT システムを提案してきた。これまで、単素子から始まり、16 チャンネル、64 チャンネルと段階的にシステムを拡張し、間接変換型 PCCT の有用性を示してきた。しかし、現行の 1×64 チャンネルの一次元システムでは、第一世代型セットアップを用いた CT 撮影に約 1 時間を要しており、この長時間撮影が動物実験での薬剤動態イメージングの実施を制限している。

そこで、本研究では前臨床応用を視野に入れた 16×64 チャンネル (合計 1024 チャンネル) からなる 2 次元センサモジュールを新たに開発した。センサには 1×1×1mm³ ピッチの高性能セラミックシンチレータ (YGAG:Ce) と同寸法の MPPC アレイを実装し、後段の専用読み出し基板には独自設計の微分回路とキャリブレーション機能を搭載することで、従来比 2 倍以上のレート耐性と高い均一性を両立している。本発表では、システムの構成と性能評価結果について報告する。

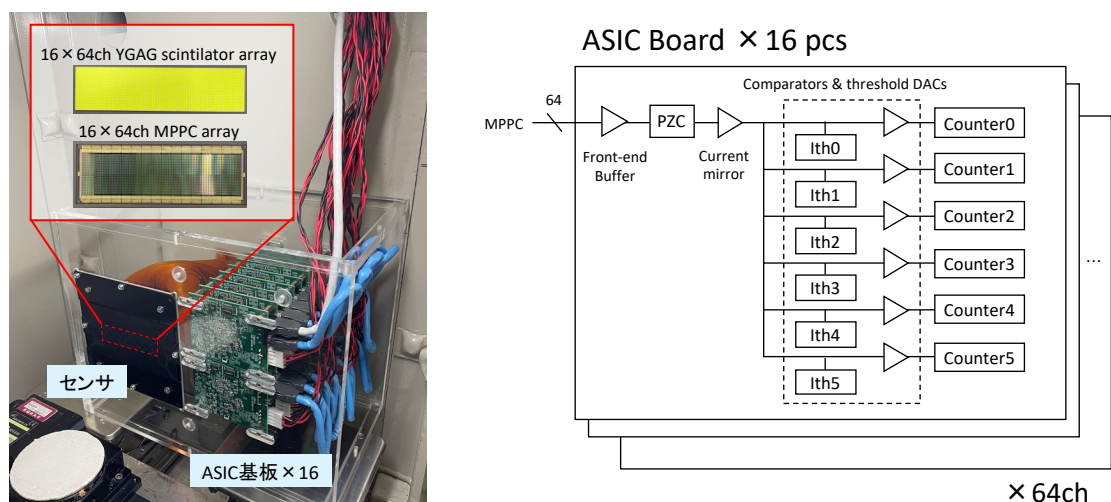


Fig. 1 1024ch PCCT system (left) and ASIC Block Diagram (right)

機械学習によるフォトンカウンティング CT の画質改善とエネルギー情報の活用 Image quality enhancement and energy information utilization in photon-counting CT via machine learning

○皆川遼太郎¹, 呂膺昊¹, 片岡淳¹, 佐藤将吾¹, 有元誠², 川嶋広貴², 小林聡², 奥村健一朗²

Fitri Lucyana², 大島美礼², 古田優², 緑川柊麻², 古徳純一³, 寺澤慎祐⁴, 前野優太⁴

Waseda Univ.¹, Kanazawa Univ.², Teikyo Univ.³, Proterial Ltd.⁴

○R. Minagawa¹, T. Ro¹, J. Kataoka¹, S. Sato¹, M. Arimoto², H. Kawashima², S. Kobayashi², K. Okumura²,

F. Lucyana², M. Oshima², Y. Furuta², S. Midorikawa², J. Kotoku³, S. Terazawa⁴, Y. Maeno⁴

E-mail: min64e15@moegi.waseda.jp

フォトンカウンティング CT(PCCT)は近年注目されている次世代型の CT で、従来 CT とは異なりエネルギー弁別画像を得ることができる。一方で、低エネルギー側では線質硬化などによるアーチファクト、高エネルギー側では X 線統計量の不足によるノイズの影響もあり、臨床応用を含めてエネルギー情報を最大限活かしていないのが現状である。従来 CT では、機械学習を用いた CT 画像の鮮鋭化・ノイズ低減や病変部位の自動判定など応用が盛んに行われているが、PCCT に対する機械学習の適用についてはいまだ系統的に進んでいない。

そこで今回は PCCT への機械学習の適用による画質の改善と、PCCT のエネルギー情報の新たな活用の可能性について調査した。学習モデルにおいて複数のエネルギー情報を使えるように設計し、我々の実機システムで撮影した円柱ファントムや造影剤ファントムの CT データへ適用した。その結果、画像のノイズとアーチファクトの低減、さらには造影剤の濃度推定の精度向上が認められた。本講演ではこれらの結果に加え、マウスデータへの適用結果についても報告する。

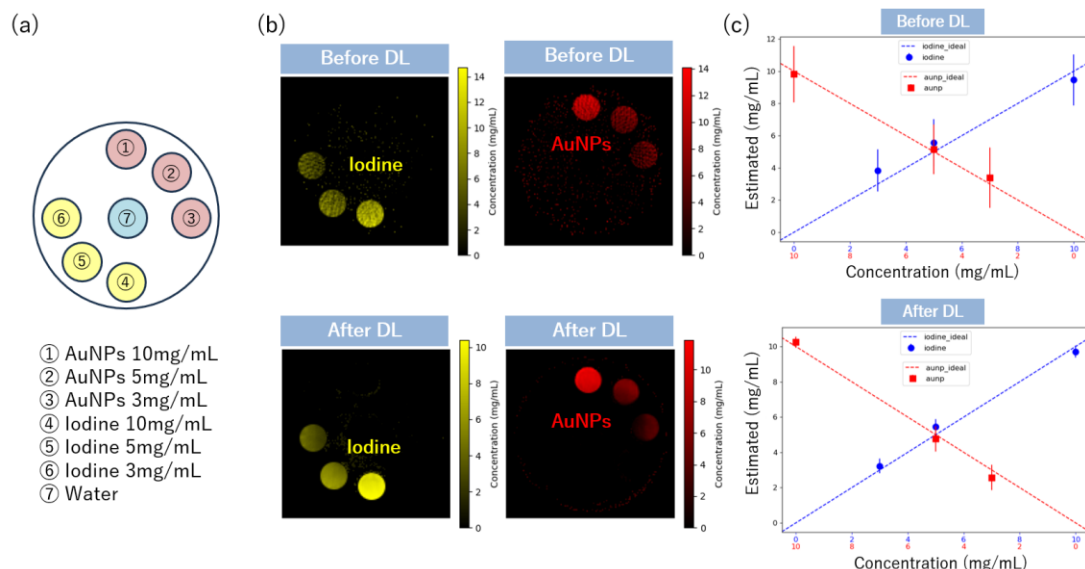


Fig.1 Comparison of contrast agent imaging between before and after applying machine learning.

(a) Phantom configuration (b) K-edge imaging for iodine and gold nanoparticles (AuNPs)

(c) Concentration estimation for each phantom.

粒子線治療ビームイメージングを目的とした TOFPET2 ASIC ベースの SEB カメラの開発

Development of a TOFPET2 ASIC-based SEB camera for particle therapy beam imaging

QST¹, 東北大², 九州大³, 群馬大⁴ °山口 充孝¹, 長尾 悠人¹,

津田 路子^{1,2}, カン ハンギュ¹, 矢部 卓也¹, 吉田 英治¹, 山谷 泰賀¹, 酒井 真理³,

田代 睦⁴, 尹 永根¹, 神谷 富裕¹, 渡部 浩司², 河地 有木¹

QST², Tohoku Univ.², Kyushu Univ.³, Gunma Univ.⁴ °Mitsutaka Yamaguchi¹, Yuto Nagao¹,

Michiko Tsuda^{1,2}, Han Gyu Kang¹, Takuya Yabe¹, Eiji Yoshida¹, Taiga Yamaya¹, Makoto Sakai³,

Mutsumi Tashiro⁴, Yong-Gen Yin¹, Tomihiro Kamiya¹, Hiroshi Watabe², Naoki Kawachi¹

E-mail: yamaguchi.mitsutaka @qst.go.jp

粒子線治療におけるビームの飛程および軌道の正確な可視化は、照射位置のずれを検出し、治療精度の向上を図る上で極めて重要である。本研究では、二次電子制動放射線 (SEB) を利用した非侵襲的なビームイメージング手法 [1-3] の開発を目的とし、1 チャンネルあたり最大 570 kHz の高カウントレートに対応し、64 チャンネルの個別信号読み出しを可能とする TOFPET2 ASIC を、セグメント化された GAGG:Ce シンチレータアレイと組み合わせたピンホール X 線カメラを構築した (Fig. 1)。検出器はピンホールコリメータ付きのハウジングに収められ、短サイクルで照射されるパルス状粒子ビームを対象に時間分解能の評価を実施した。

群馬大学重粒子線医学センターにおいて、290 MeV/u の炭素イオンビームを用いた実証実験を行い、エネルギーデグレーダの厚さに応じたビームプロファイルの変化を解析した。その結果、デグレーダ厚の増加に伴い、ビーム投影像の長さが減少することが確認された。また、パルス構造を有するビーム照射下でのイベント時間分布の測定により、約 5 ms オーダーの時間構造を分離可能な分解能と、30 kcps を超える高い計数性能が実証された。

以上の結果から、本システムは高時間分解能かつ高カウントレートの特性を有し、臨床粒子線治療におけるリアルタイムビームモニタリングへの応用が期待される。

[1] M. Yamaguchi *et al* 2012 Phys. Med. Biol. 57 2843

[2] K. Ando *et al* 2017 Phys. Med. Biol. 62 5006

[3] M. Yamaguchi *et al* 2018 Phys. Med. Biol. 63 045016

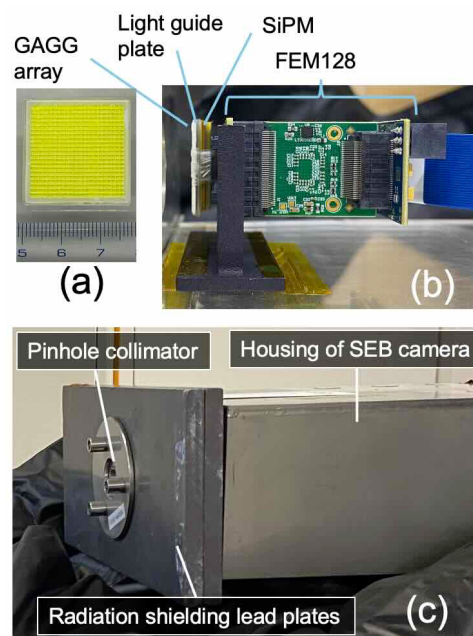


Fig. 1 Photographs of (a) the GAGG array fixed on the light guide plate, which was taken from the side where the light guide plate was attached, (b) the detector connected to the front-end module FEM128 and (c) the SEB camera.

BNCT におけるファイバー挿入可能な空気電離箱の開発

Development of Fiber Insertable Air Ionization Chamber for BNCT

京大複合研¹, 大阪医科薬科大学², 住友重機械工業³

○松林 錦¹, 田中 浩基¹, 高田 卓志¹, 呼 尚徳^{1,2}, 野尻 摩依², 武川 哲也³, 菅 啓大³

Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto Univ.¹, Osaka Medical and

Pharmaceutical Univ.², Sumitomo Heavy Industries Ltd.³ ○Nishiki Matsubayashi¹, Hiroki

Tanaka¹, Takushi Takata¹, Naonori Hu^{1,2}, Mai Nojiri², Tetsuya Mukawa³, Keita Suga³

E-mail: matsubayashi.nishiki.3d@kyoto-u.ac.jp

ホウ素中性子捕捉療法 (Boron Neutron Capture Therapy: BNCT) は、 ^{10}B と熱中性子 ($\sim 0.5\text{eV}$) による核反応を用いた放射線治療であり、腫瘍に対し細胞レベルで選択的にエネルギーを付与することができる。BNCT は従来、研究用原子炉で発生させた中性子を使用してきたが、加速器中性子源を用いた BNCT 治療システムの開発により病院併設が可能となった。サイクロトロン加速器を用いた治療システムは、2020 年に医療機器として承認され、現在では「切除不能な局所進行または局所再発の頭頸部癌」に対して保険診療が実施されている[1]。また国内外で様々な治療システムの開発が進み、今後ますます BNCT の施設及び症例数の増加が期待される。

BNCT 照射場は中性子と γ 線が高強度に混在しており、治療の有効性や安全性の品質保証のため、中性子と γ 線の情報を正しく評価することが重要である。現在は、熱中性子束を金の放射化法、 γ 線線量を TLD (熱蛍光線量計) で測定しているが、リアルタイムに測定できない。先行研究では、空気電離箱とファイバーに装着した LiCaAlF_6 (LiCAF) シンチレータを使用し、中性子と γ 線のリアルタイム同時計測システムの開発を行ってきた[2]。しかし本手法では LiCAF シンチレータを電離箱の壁面に接着しており、電離箱に入射する中性子束と LiCAF シンチレータに入射する中性子束が異なることが問題であった。そこで本研究では、ファイバーを内部に挿入できる電離箱を新たに製作し、 ^{60}Co γ 線照射設備における校正試験と BNCT 照射場において水ファントム深さ 12, 17.5, 37.5, 55, 95mm 位置で熱中性子束と電荷量を測定した。その結果、製作した電離箱は、校正試験では照射線量に対して電荷量が良い線形性を示し、BNCT 照射場では LiCAF シンチレータの摂動効果が約 20% から 8% まで低減することを確認した。また PHITS を用いて製作した電離箱の中性子エネルギーに対する感度を評価した結果、高速中性子に対する感度によって、水ファントム深さごとに補正が必要であることが分かった。

本発表では、研究の概要と製作した電離箱を用いた照射試験結果、高速中性子に対する補正方法について説明する。

[1] T. Kato *et al.*, *Appl. Radiat. Isot.*, 156, 108961(2020).

[2] N. Matsubayashi *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, 1047, 167883(2023).

陽子線治療ビームモニタリングのための 新たなコンプトンカメラ技術の検討

Study of a new Compton camera technology for beam monitoring of proton therapy

北里大院医¹, 茨大理², 仙台高専³, 東海大病院⁴, KEK IPNS⁵, 国がん東病院⁶, 北里大病院⁷

○(D) 溝口 孝大¹, 村石 浩¹, 榎本 良治¹, 片桐 秀明², 加賀谷 美佳³, 渡辺 宝¹, 塚本 ひかり^{1,4},

大久保 幸祐¹, 本多 良太郎⁵, 庄子 正剛⁵, 田中 真伸⁵, 加納 大輔⁶, 渡邊 祐介¹, 石山 博條⁷

Kitasato Univ.¹, Ibaraki Univ.², NIT, Sendai Col.³, Tokai Univ. Hosp.⁴,

KEK IPNS⁵, NCCHE⁶, Kitasato Univ. Hosp.⁷

○Takahiro Mizoguchi¹, Hiroshi Muraishi¹, Ryoji Enomoto¹, Hideaki Katagiri², Mika Kagaya³,

Takara Watanabe¹, Hikari Tsukamoto^{1,4}, Kosuke Okubo¹, Ryotaro Honda⁵,

Masayoshi Shoji⁵, Manobu Tanaka⁵, Daisuke Kano⁶, Yusuke Watanabe¹, Hiromichi Ishiyama⁷

E-mail: mizoguchi.takahiro@st.kitasato-u.ac.jp

がん治療の1つである陽子線治療は、X線を用いた従来の放射線治療と比べて、陽子線が飛程終端で最大エネルギーを付与するブラッグピークを形成するため、正常組織を温存しつつ、腫瘍組織に大きな線量を投与することができる。投与線量の管理は、照射ヘッドに取り付けられた電離箱線量計にて実施されるが、陽子線ビームの飛程変化を検出することは困難である。近年、陽子線ビームと生体原子との核反応により発生するガンマ線の可視化を飛程モニタリングに応用する検討が活発に行われており、4.4 MeV 即発ガンマ線が発生する空間分布と投与される線量分布が類似することが報告されている。我々は 4.4 MeV ガンマ線を高感度に検出するため、多重コンプトン散乱事象も扱える新たなコンプトンカメラ技術を提案する。本手法の測定原理を Fig. 1 に示す。相互作用位置とエネルギーの測定が可能な散乱体検出器と吸収体検出器を準備し、散乱体で 1 ヒット、吸収体で 1 ヒット以上の同時計数事象を対象とする。ここで、吸収体を遮蔽材の裏側に配置することで、4.4 MeV ガンマ線が最初に必ず散乱体で 1 ヒットするように工夫する。これにより、例えば 3 ヒットイベントのヒット順を ${}_3P_3 = 6$ 通りから ${}_2P_2 = 2$ 通りに制限できるので、あとはコンプトン運動学に基づいて E_2 または E_3 のどちらが先にヒットしたかを判別することで、ヒット順を Time of flight 情報を用いずに高い精度で決定できる。Fig. 2 は Geant4 を用いて Fig. 1 に示した検出器配置でシミュレーションを行った際の一例であり、散乱体の前方 30 cm 先に仮定した 4.4 MeV のガンマ線点線源の発生位置を高い精度で再構成できているのが見て取れる。本講演会では、提案手法の原理の詳細、及びシステムの開発状況について報告する。

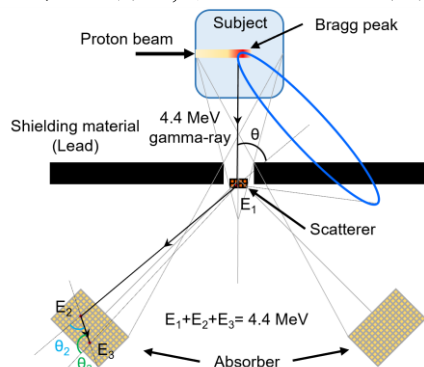


Fig. 1 Schematic view of the principle of the proposed Compton camera for beam monitoring during proton therapy.

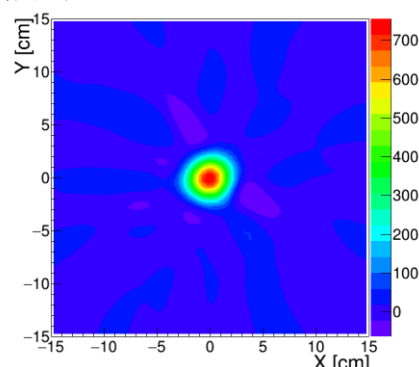


Fig. 2 4.4 MeV gamma-ray reconstructed image using three hit coincidence events as an example.

核医学施設に特化した高感度コンプトンカメラの開発

Development of a high sensitivity Compton camera specialized for nuclear medicine facilities

北里大医衛¹, 茨城大理², 仙台高専³, 国がん東病院⁴, 東海大病院⁵, KEK・素核研⁶

○渡辺 宝¹, 榎本 良治¹, 片桐 秀明², 加賀谷 美佳³, 加納 大輔⁴, 溝口 孝大¹,
塚本 ひかり^{1,5}, 大久保 幸祐¹, 本多 良太郎⁶, 庄子 正剛⁶, 田中 真伸⁶, 渡邊 祐介¹,
村石 浩¹

Kitasato Univ.¹, Ibaraki Univ.², NIT, Sendai College³, NCCHE⁴, Tokai Univ. Hosp.⁵, IPNS., KEK⁶

○Takara Watanabe¹, Ryoji Enomoto¹, Hideaki Katagiri², Mika Kagaya³, Daisuke Kano⁴,
Takahiro Mizoguchi¹, Hikari Tsukamoto^{1,5}, Kosuke Okubo¹, Ryotaro Honda⁶,
Masayoshi Shoji⁶, Manobu Tanaka⁶, Yusuke Watanabe¹, Hirohi Muraishi¹

E-mail: watanabe.takara@kitasato-u.ac.jp

現在、病院の核医学施設において検査・治療で多くの放射性医薬品(¹⁸F、^{99m}Tc、¹³¹I、¹⁷⁷Lu、²⁰¹Tl など)が用いられており、放出される γ 線のエネルギーは 100~500 keV 程度の広いエネルギーレンジである。これらの放射性医薬品は非密封であり、薬剤投与後のシリンジや患者の排泄物(尿・便)などの放射能汚染の可能性が考えられる。核医学施設の放射能汚染箇所の特定の際に業務従事者がサーベイメータを持って放射能汚染の程度が不明な汚染箇所に近づくことで被ばくするリスクがある。近年、電離放射線障害防止規則で眼の水晶体の被ばく限度の見直しが行われ、業務従事者の被ばく管理が急務になっている。もし、遠隔から一度で全方向に渡って汚染箇所を可視化できる装置があれば、速やかに汚染箇所の特定が可能になり業務従事者の職業被ばくの低減に貢献できる可能性がある。このような背景の中、我々は結晶シンチレータを用いて 1 μ Sv/h 程度以下の低線量 γ 線源分布を遠隔から短時間で可視化可能なコンプトンカメラの開発を遂行している。そこで、本研究ではこの技術を応用して、核医学施設におけるすべての放射性医薬品の汚染箇所を 1 台で可視化できる回転型全方位コンプトンカメラの開発を遂行した。

検出部に CsI(Tl)結晶を採用することで 300 keV 以上の γ 線を高感度で測定可能としていたが、300 keV 以下の γ 線を高感度で測定するために CaF₂(Eu)結晶を採用する必要があった。本研究では、100~500 keV 程度の γ 線を高感度で測定するために複数種類(CsI(Tl)、CaF₂(Eu))の結晶シンチレータを用いて検出器の開発を遂行した。3.5 cm 角の結晶と PMT (H11432-100, 浜松ホトニクス(株))を組み合わせたカウンターを 6 本 (3 本ずつ) 用いて、正八面体の各頂点に配置した。開発した検出器の外観を Fig.1 に示す。学会では、開発中の検出器の詳細について報告する。

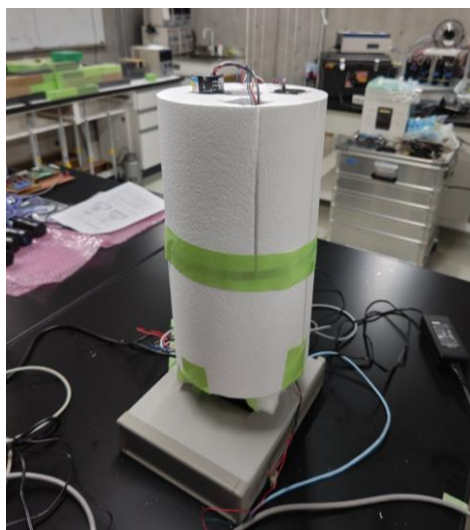


Fig. 1 Photograph of the developed detector

BNCT のための光ファイバー型即発ガンマ線 イメージング検出器の開発

Development of an optical-fiber-based prompt gamma-ray imaging detector for BNCT

東北大工¹, 東北大金研², 東北大 NICHe³, 東北大 RCNS⁴,
大阪大レーザー研⁵, (株) C&A⁶, 京大複合研⁷

○(D) 浦野 雄介^{1,2}, 黒澤 俊介^{2,3,4,5}, 山路 晃広^{2,3}, 吉川 彰^{2,6}, 松林 錦⁷, 田中 浩基⁷

Department of Mat. Sci., Graduate School of Eng., Tohoku Univ.¹, IMR, Tohoku Univ.²,
NICHe, Tohoku Univ.³, RCNS, Tohoku Univ.⁴, Institute for Laser Eng., Osaka Univ.⁵,
C&A Corporation⁶ Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto Univ.⁷

○Yusuke Urano^{1,2}, Shunsuke Kurosawa^{2,3,4}, Akihiro Yamaji^{2,3},

Akira Yoshikawa^{2,5}, Nishiki Matsubayashi⁷, Hiroki Tanaka⁷

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

ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) はホウ素 (^{10}B) と熱中性子の核反応によってガン細胞を選択的に破壊する治療法である[1]。BNCT の適用の可能性拡大に向けて、ホウ素薬剤の薬物動態を空間的に評価する必要があり、マウス体内のホウ素濃度分布を二次元または三次元で、かつリアルタイムで可視化する検出器の開発が求められている。そこで、上記核反応により発生する 478 keV の即発ガンマ線の利用が考案されている。これまで、BNCT では治療中の熱中性子線量のリアルタイムモニターを目的として、プラスチックシンチレータと光ファイバーを組み合わせた検出器が開発されており[2]、その有効性が報告されている。そこでわれわれは、この手法を即発ガンマ線の検出へ応用し、BNCT 用に新たに開発した Tl^+ と Sr^{2+} を共添加した $\text{Cs}_3\text{Cu}_2\text{I}_5$ (Tl,Sr:CCI) 結晶を用いて、光ファイバーと組み合わせたガンマ線検出器を作製した。治療場における熱中性子束は最大で 1×10^9 / cm^2/s でありシングルフォトンカウンティング (SPC) 法による測定が難しいため、シンチレーション発光の信号強度 (電流値) を利用した新検出法の概念検証を行った。

垂直ブリッジマン-ストックバーガー法により Tl,Sr:CCI 結晶を育成し、結晶の相同定は粉末 X 線回折 (XRD) 装置 (D8 Discover, Bruker 社) により行った。 Tl,Sr:CCI 結晶、光ファイバー、光電子増倍管からなる光ファイバー型検出器を作製し、京都大学研究用原子炉 (KUR) にて BNCT 模擬実験を行った。実験は E-3 中性子導管 (熱中性子束: 4.0×10^5 / cm^2/s) および重水台車 (熱中性子束: 1.0×10^9 / cm^2/s) で行い、ホウ酸サンプルの濃度および位置を変えて電流値を測定した。

育成した Tl,Sr:CCI 結晶は粉末 XRD の結果より目的の相が得られていることを確認した。BNCT 模擬実験では治療場に近い環境の重水台車にて、作製した光ファイバー型検出器を用いて電流値測定により、ホウ素 (^{10}B) の濃度依存性 (0, 6.25~5000 ppm) および位置依存性 (20~50 mm) を確認することができた。本講演では、KUR で行った実験の詳細について報告する。

References [1] <https://www.pref.osaka.lg.jp/jigyochousei/bnct-jituyouka/index.html>. [2] A. Ishikawa *et al.*, *Sensors and Materials*, 32, 4(2) (2020).

ホウ素中性子捕捉療法の即発ガンマ線イメージングに適用する コンプトンカメラの基本設計

Basic design of Compton camera used for prompt gamma-ray imaging
in boron neutron capture therapy

阪大工¹, 九大医²

○(DC) 邱 季野¹, 酒井 真理², ヴルガリス ニコラオス¹, 玉置 真悟¹, 日下 祐江¹, 村田 勲¹

Univ. of Osaka¹, Kyushu Univ.²

○Jiye Qiu¹, Makoto Sakai², Nikolaos Voulgaris¹, Shingo Tamaki¹, Sachie Kusaka¹, Isao Murata¹

E-mail: jiyeqiu22@qr.see.eng.osaka-u.ac.jp

ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) とは、低エネルギー中性子をホウ素に蓄積された腫瘍に照射させ、ホウ素中性子捕捉反応 ($^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$) を起こすことで、放出された荷電粒子によりがん細胞を選択的に死滅させることが可能な新しい放射線がん治療法のことである。BNCT を信頼性があるがん治療法としてさらに普及させるには、治療線量のリアルタイム観測が不可欠である。それを実現するため、単光子放射断層撮影 (SPECT) などの放射線イメージング装置で $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ 反応からの 478 keV 即発ガンマ線を体外で計測し、反応位置を特定する方法が多く研究されてきた。しかし、治療である BNCT では高いバックグラウンド放射線が存在しており、それを遮蔽するため長いコリメーターが必要となり、装置が重くなって検出効率が低くなるなどの問題点がある。コンプトンカメラとは、光子のコンプトン散乱運動学に基づき、散乱体と吸収体の二種類の検出器で反応位置と反応エネルギーを測定する装置のことである。コンプトンカメラはコリメーターなしでガンマ線イメージングが可能なので、装置の小型化と検出効率の向上が可能だと考えられる。そこで本研究は、臨床 BNCT の特徴に合わせたコンプトンカメラの装置設計を行った。設計されたコンプトンカメラでは、検出素子として Si と TlBr 半導体検出器の組み合わせを用いており、さらにリチウムポリエチレンとタングステン、鉛によりバックグラウンド中性子と光子を遮蔽する。放射線輸送計算コード PHITS を用い、治療用中性子ビームと Snyder 頭部ファントムを含むシミュレーションを行った。治療用中性子線源からの直接ガンマ線及び治療室の構造を考慮していない場合のシミュレーション結果により、コンプトンカメラの検出素子の位置での中性子強度は約 $10^2/\text{cm}^2/\text{s}$ であり、光子強度は約 $5 \times 10^5/\text{cm}^2/\text{s}$ である。また、二種類の検出素子に対する単位面積当たりの全計数率は $2 \times 10^5 \text{ cps}/\text{cm}^2$ 以下である。さらに、腫瘍中の ^{10}B 濃度は 0~50 ppm の範囲で、 ^{10}B 濃度と検出された 478 keV 即発ガンマ線該当する事象数は線形関係 ($R^2 > 0.99$) になっていることを確認できた。以上の基本設計結果により、コンプトンカメラの臨床 BNCT における即発ガンマ線イメージングへの適用可能性を検討した。

BNCT 照射場における高速中性子弁別測定のための BeO セラミック板と HDPE を用いた新規検出構成の提案

Proposal of a Novel Detection Configuration Using BeO Ceramic Plate and HDPE for Fast Neutron Discrimination in BNCT

都立大¹, 京都大², 近畿大³

○(M2) 高橋 玲央¹, 田中 浩基², 松本 真之介¹, 若林 源一郎³, 眞正 浄光¹

Tokyo Metropolitan Univ.¹, Kyoto Univ.², Kindai Univ.¹

○Leo Takahashi¹, Hiroki Tanaka², Shinnosuke Matsumoto¹, Genichiro Wakabayashi³, Kiyomitsu Shinsho¹

E-mail: shinsho@tmu.ac.jp

[背景] 加速器ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) の品質保証 (QA) では、熱・熱外・高速中性子を弁別して測定する必要がある。しかし、BNCT 照射場には熱中性子が多く、これに起因する(n, γ)反応由来の γ 線が高速中性子測定のノイズ源となる。従来、高密度ポリエチレン (HDPE) コンバータを用いた反跳陽子検出法は知られていたが、 γ 線との弁別が困難であった。本研究では、低中性子捕獲断面積を持つ BeO セラミック板を HDPE コンバータの前後面に配置する新構成により γ 線成分を適切に除去し、高速中性子の信号を抽出する技術を提案する。

[方法] 放射線輸送計算コード PHITS を用いた理論計算を行った。BeO セラミック板 (10 cm 角、0.07 mm 厚) に、3 mm 厚の HDPE コンバータの配置を前面のみ、後面のみ、非設置とした 3 パターンの体系を作成した。各体系で、0.025 eV-28 MeV の中性子エネルギーで BeO セラミック板に付与される線量を評価した。また、広い中性子エネルギー分布での実用性を評価するため、京都大学原子炉 (KUR) や加速器 BNCT システム (C-BENS) の照射場を模擬した計算も行った。

[結果・考察] Fig. 1 に、コンバータ配置による BeO セラミック板への付与線量の比較を示す。Fig. 1a では、1 MeV 以下でコンバータ設置による γ 線量の増加が見られ、特に低エネルギーほどその影響が顕著であった。前面・後面配置間ではいずれのエネルギーにおいても差は小さく、10%以内であった。Fig. 1b では、前面配置時に 50 keV 以上で付与線量が顕著に大きいが、後面配置と非設置の場合で大きな差は無かった。従って、前面・後面配置の差分を取ることで(n, γ)反応由来の γ 線の影響を補正しつつ、反跳陽子寄与の成分を抽出できる可能性が示唆された。

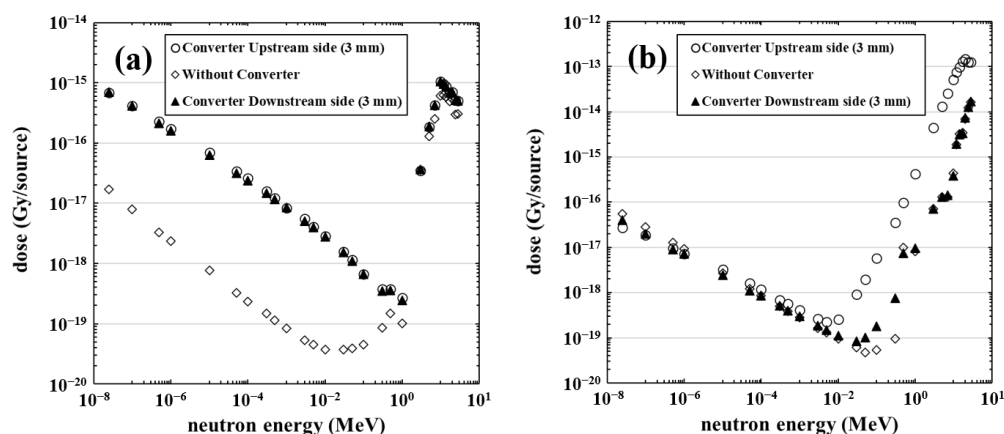


Fig. 1. Comparison of dose to BeO ceramic plate under different HDPE converter placements (a: γ -ray, b: proton)

2 Ionizing Radiation | Oral presentation : 2.4 Life Sciences, Medical applications, Space and Earth Environment, Radiation Education

[9a-N103-1~11] 2.4 Life Sciences, Medical applications, Space and Earth Environment, Radiation Education

[9a-N103-1]

Simulation framework for collimator evaluation using Geant4 and GATE and its application to mouse imaging

○(M1)Maria Yamane^{1,2}, Yuuki Furukawa^{1,2}, Yuusuke Uchida¹, Takayoshi Kohmura¹, Atushi Ochiai³, Mayumi Hirakawa³, Tadayuki Takahashi², Shinichiro Takeda^{4,2}, Miho Katsuragawa^{5,2}, Hugo Allaire², Kazuhisa Ozeki⁶, Kei Higashikawa⁶, Miho Nagai⁶, Kimio Terao⁶ (1.TUS, 2.Kavli IPMU, 3.RIBS, 4.F-REI, 5.Kyoto Univ., 6.Chugai)

[9a-N103-2]

Development of the imaging system to visualize the pharmacokinetics in small animals

○(M2)Yuki Furukawa^{1,2}, Maria Yamane^{1,2}, Tadayuki Takahashi², Shin'ichiro Takeda^{3,2}, Miho Katsuragawa^{4,2}, Hugo Allaire², Shin Watanabe⁵, Takayoshi Kohmura¹, Yuusuke Uchida¹, Atsushi Ochiai⁶, Mayumi Hirakawa⁶, Hiroshi Mizuma^{7,8}, Kazuhisa Ozeki⁹, Kei Higashikawa⁹, Miho Nagayasu⁹, Kimio Terao⁹ (1.Tokyo Univ. of Science, 2.Kavli IPMU, 3.F-REI, 4.Kyoto Univ., 5.ISAS/JAXA, 6.Tokyo Univ. of Science RIBS, 7.Osaka Metropolitan Univ., 8.QST, 9.Chugai Pharmaceutical)

[9a-N103-3]

Development of a Compact Multiprobe System for Monitoring RI Tracers in Plant Bodies

Yuto Nagao¹, ○Mitsutaka Yamaguchi¹, Yong-Gen Yin¹, Nobuo Suzui¹, Yuta Miyoshi¹, Yusaku Noda¹, Kazuyuki Enomoto¹, Michiko Tsuda^{1,2}, Takuya Yabe¹, Hiroshi Watabe², Naoki Kawachi¹ (1.QST Takasaki, 2.Tohoku Univ.)

[9a-N103-4]

Attenuation correction for Carbon-14 quantification by bremsstrahlung measurement with a germanium detector

○(DC)Michiko Tsuda^{1,2}, Taiyo Moro³, Mitsutaka Yamaguchi², Fumiya Sato³, Yuto Nagao², Takuya Yabe², Yong-Gen Yin², Yuta Miyoshi², Nobuo Suzui², Kazuyuki Enomoto², Jun Furukawa⁴, Tomihiro Kamiya³, Hiroshi Sakurai³, Naoki Kawachi², Hiroshi Watabe¹ (1.Tohoku Univ., 2.QST takasaki, 3.Gunma Univ., 4.Tsukuba Univ.)

[9a-N103-5]

Energy Dependence of a Heteroepitaxial Diamond Solid-state Ionization Chamber under Diagnostic X-ray Irradiation

○Kiyomitsu Shinsho¹, Koji Koyama², Seong woo Kim², Keitaro Hitomi³, Osamu Maida⁴, Toshiyuki Onodera⁵, Shimma Hashimoto¹, Kanata Kikkawa¹, Ako Haga¹, Daiki Maruyama¹, Yusuke Koba⁶, Mitsuhiro Nogami³ (1.Tokyo Metropolitan Univ., 2.Orbray Co.,Ltd., 3.Tohoku Univ., 4.Osaka Univ., 5.Tohoku Institute of Technology, 6.QST-NIRS)

[9a-N103-6]

Practical workshop on cosmic ray measurement for undergraduate students

○(B)Kotaro Sugimoto^{1,2}, Shota Takahashi³, Sakura Kato¹, Yuika Mizuno¹, Reo Momiki¹, Takashi Kuroda¹, Kazuo Tanaka^{2,4} (1.Nagoya Univ., 2.Accel Kitchen LLC, 3.KMI,Nagoya Univ., 4.Waseda Univ.)

[9a-N103-7]

Sub-second dynamic rat imaging with an ultrasensitive small animal PET scanner

○(PC)HanGyu Kang¹, Hideaki Tashima¹, Hidekatsu Wakizaka¹, Go Akamatsu¹, Yuma Iwao¹, Chie Toramatsu¹, Taiga Yamaya¹ (1.QST)

[9a-N103-8]

Development of a mouse brain PET scanner with sub-0.5 mm resolution

○(PC)HanGyu Kang¹, Hideaki Tahima¹, Hidekatsu Wakizaka¹, Makoto Higuchi¹, Taiga Yamaya¹ (1.QST)

[9a-N103-9]

Diode-based row-column multiplexing for clinical TOF-PET detectors

○(PC)HanGyu Kang¹, Eiji Yoshida¹, Go Akamatsu¹, Taiga Yamaya¹ (1.QST)

[9a-N103-10]

The effect of body temperature on positronium imaging: An experiment with a clinical PET VRAIN

○Sodai Takyu¹, Tetsuya Hirade², Ken-ichiro Matsumoto¹, Fumihiko Nishikido¹, Go Akamatsu¹, Hideaki Tashima¹, Miwako Takahashi¹, Taiga Yamaya¹ (1.QST, 2.JAEA)

[9a-N103-11]

Monte Carlo simulation of Cherenkov-radiator-integrated MCP-PMT with full modeling of optics and waveform

○(D)Taiyo Ishikawa^{1,2}, Ryosuke Ota^{3,4}, Han Gyu Kang², Fumihiko Nishikido², Hideaki Haneishi¹, Taiga Yamaya^{2,1} (1.Chiba Univ., 2.QST, 3.Hamamatsu Photonics, 4.UC Davis)

Geant4 および GATE を用いたコリメータ評価のためのシミュレーション フレームワークの構築とマウスイメージングへの応用

Simulation framework for collimator evaluation using Geant4 and GATE and its application to mouse imaging

東理大創域理工¹, Kavli IPMU², 東京理科大生命医科学研究所³, 福島国際研究教育機関⁴,
京都大⁵, 中外製薬⁶

○(M1)山根 まりあ^{1,2}, (M2)古川 湧基^{1,2}, 内田 悠介¹, 幸村 孝由¹, 落合 淳志³, 平川 真弓³,
高橋 忠幸², 武田 伸一郎^{4,2}, 桂川 美穂^{5,2}, Hugo Allaire²,
尾関 和久⁶, 東川 桂⁶, 永易 美穂⁶, 寺尾 公男⁶

Tokyo Univ. of science¹, Kavli IPMU²,

Tokyo Univ. of Science Research Institute for Biomedical Sciences³, F-REI⁴,

Kyoto Univ.⁵, Chugai Pharmaceutical Co., Ltd.⁶

○Maria Yamane^{1,2}, Yuki Furukawa^{1,2}, Yuusuke Uchida¹, Takayoshi Kohmura¹, Atushi Ochiai³,

Mayumi Hirakawa³, Tadayuki Takahashi², Shinichiro Takeda⁴, Miho Katsuragawa⁵,

Hugo allaire², Kazuhisa Ozeki⁶, Kei Higashikawa⁶, Miho Nagai⁶, Kimio Terao⁶

Email: 6225532@ed.tus.ac.jp

本研究では、X 線およびガンマ線を用いた放射線イメージングの高性能化を目的として、コリメータの設計・評価を行うためのシミュレーションフレームワークを構築した。Geant4 を用い、入力パラメータに基づいてコリメータの構造を自動生成する機能を開発し、複雑なマスモデルを迅速かつ柔軟に構築可能とした。これにより、多様な設計パターンに対して放射線輸送シミュレーションを実施し、空間分解能や検出効率などの性能指標を一貫した手法で定量的に比較・評価することが可能になり、構造設計と性能評価の試行錯誤を効率的に行える基盤を整備した。

さらに、本研究では XCam-CdTe でのマウスを用いた実証実験の検証のため、GATE (Geant4 Application for Tomographic Emission) にデジタルマウス (MOBY) ファントムを取り入れた。解剖で得られた臓器ごとの放射性薬剤集積比に基づいて設定した模擬的な線源分布による撮像シミュレーションを実施し、得られた投影像から算出した各臓器の集積量と設定値との整合性を検証した。XCam-CdTe は、32×32mm の CdTe 両面ストリップ型検出器を 2 枚とタングステン製ダイバーGINGコリメータを搭載し、広い視野を実現している。本研究のフレームワークを用いることで、金属 3D プリンタの造形により複雑化した構造のコリメータに対しても空間分解能や検出効率の性能評価が可能となった。

さらに、三次元画像の取得に向けて、マウス周囲に設置した検出器を回転させながら複数角度から投影像を取得する回転機構の開発を進めており、画像再構成アルゴリズムの設計を行っている。

本発表では、MOBY ファントムを用いた XCam-CdTe の撮像シミュレーションとマウス実験の測定結果との比較による定量的評価の結果、および最終的に目指す 3D-SPECT システムについて紹介する。

小動物の薬物動態を可視化するイメージングシステムの開発

Development of the imaging system to visualize the pharmacokinetics in small animals

東理大創域理工¹, 東大 Kavli IPMU², F-REI³, 京大理⁴, ISAS/JAXA⁵,

東理大生命研⁶, 阪公大医⁷, QST⁸, 中外製薬⁹

○(M2) 古川 湧基^{1,2}, (M1) 山根 まりあ^{1,2}, 高橋 忠幸², 武田 伸一郎^{3,2}, 桂川 美穂^{4,2},
Hugo Allaire², 渡辺 伸⁵, 幸村 孝由¹, 内田 悠介¹, 落合 淳志⁶, 平川 真弓⁶, 水間 広^{7,8},
尾関 和久⁹, 東川 桂⁹, 永易 美穂⁹, 寺尾 公男⁹

Tokyo Univ. of Science¹, Kavli IPMU², F-REI³, Kyoto Univ.⁴, ISAS/JAXA⁵,

Tokyo Univ. of Science RIBS⁶, Osaka Metropolitan Univ.⁷, QST⁸, Chugai Pharmaceutical⁹

○Yuki Furukawa^{1,2}, Maria Yamane^{1,2}, Tadayuki Takahashi², Shin'ichiro Takeda^{3,2},

Miho Katsuragawa^{4,2}, Hugo Allaire², Shin Watanabe⁵, Takayoshi Kohmura¹, Yuusuke Uchida¹,

Atsushi Ochiai⁶, Mayumi Hirakawa⁶, Hiroshi Mizuma^{7,8},

Kazuhisa Ozeki⁹, Kei Higashikawa⁹, Miho Nagayasu⁹, Kimio Terao⁹

E-mail: 6224531@ed.tus.ac.jp

我々は、小動物の数 mm 程度の微小臓器に集積する複数の放射性核種を明瞭に識別する薬物動態イメージングを実現するため、高い空間分解能と低バックグラウンドを両立したイメージングシステムの開発を行っている。

これまで、硬 X 線領域において優れたエネルギー分解能と位置分解能を有する CdTe 半導体を用いた両面ストリップ型検出器「CdTe-DSD」と、3D プリント技術により作成したタングステン製平行孔コリメータを組み合わせたイメージングシステムの開発が行われてきた。しかし従来のコリメータでは、80 keV の X 線を放出する ²¹¹At を標識した放射性薬剤の撮像には適していたものの、¹¹¹In と ¹²⁵I というように複数核種を組み合わせて投与する場合、¹¹¹In が放出する 171 keV や 245 keV の高エネルギーガンマ線によってコリメータや検出器内部で生じた散乱 X 線が、¹¹¹In や ¹²⁵I が放出する 23 keV や 27 keV の X 線を撮像する際のバックグラウンド成分になることが大きな課題であった。そこで我々は、¹¹¹In や ¹²⁵I を標識した放射性薬剤に対して撮像距離 10 mm で 1 mm の空間分解能と十分な検出感度を実現しつつ、高エネルギーガンマ線の透過率を最大限抑制するようにコリメータの構造パラメータを最適化した新型のタングステン製平行孔コリメータを開発した。最適化にあたっては、数式モデルに基づく数値計算により、コリメータの構造パラメータに伴う空間分解能・検出感度や X 線/ガンマ線の透過率の変化を評価し、要求条件を満たす最適値を導出した。そして、デレンゾファントムやマウスを用いた撮像試験を行い、新型のタングステン製平行孔コリメータによる撮像イメージは、従来のコリメータと比較して高い空間分解能とバックグラウンド成分を低減することができることを示した(Fig.1)。また、放射線シミュレーションにより、バックグラウンド成分に起因する放射線の発生源について評価している。

本発表では、新たに設計したタングステン製平行孔コリメータによる撮像試験の結果と、放射線シミュレーションに基づくバックグラウンド成分の低減策について報告する。

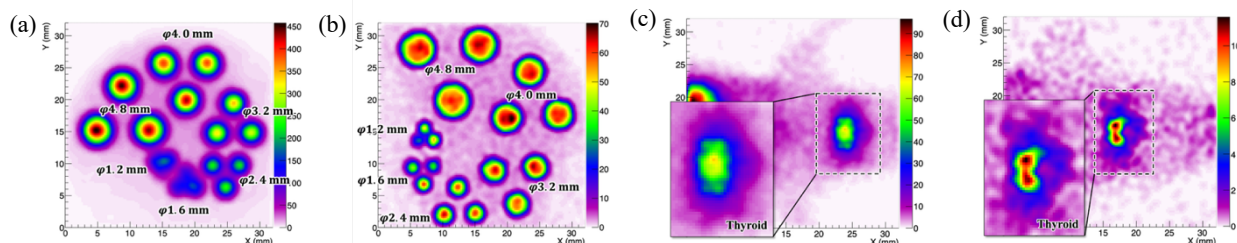


Fig.1 Imaging results of the Derenzo phantom and mouse. (a)(c) Imaging results using the conventional tungsten parallel-hole collimator. (b)(d) Imaging results using the new tungsten parallel-hole collimator.

植物 RI トレーサモニタリング用小型多点計測システムの開発

Development of a Compact Multiprobe System for Monitoring RI Tracers in Plant Bodies

QST 高崎研¹, 東北大² 長尾 悠人¹, [○]山口 充孝¹, 尹 永根¹, 鈴木 伸郎¹, 三好 悠太¹,
野田 祐作¹, 榎本 一之¹, 津田 路子^{1,2}, 矢部 卓也¹, 渡部 浩司², 河地 有木¹

QST Takasaki¹, Tohoku Univ.², Yuto Nagao¹, [○]Mitsutaka Yamaguchi¹, Yong-Gen Yin¹, Nobuo Suzui¹,
Yuta Miyoshi¹, Yusaku Noda¹, Kazuyuki Enomoto¹, Michiko Tsuda^{1,2}, Takuya Yabe¹,

Hiroshi Watabe², Naoki Kawachi¹

E-mail: yamaguchi.mitsutaka@qst.go.jp

植物が土壌や大気中の様々な元素をどのように吸収・利用しているかを解明するためには、植物中の多数の箇所（多点）において放射性同位元素（RI）トレーサの動きを非侵襲でモニタリングすることが必要不可欠である。陽電子放射断層撮影（PET）や単一光子放射断層撮影（SPECT）といった RI イメージングは特定の視野内の RI トレーサの分布や動きを解析する上で非常に強力なツールとなるが、植物中の関心領域全体を視野に収めるのが困難な状況が多々生じる。この限界を突破するため、イメージングではなくモニタリングに特化した小型多点計測システムを開発した。

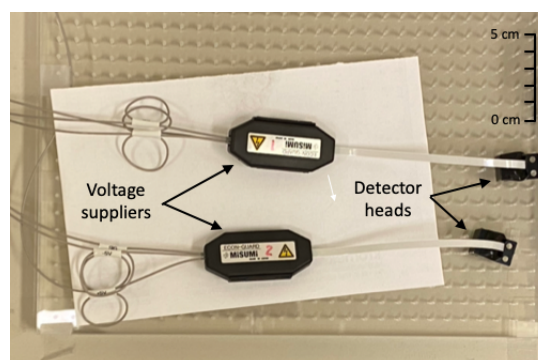


Fig. 1. Photograph of some of the detector head.

小型多点計測システムは 16 個の検出器プローブを持つ。それぞれが Fig. 1 に示すように、検出器ヘッドと電圧供給・調整回路からなり、4 メートルのケーブルを介して計測系に接続されている。検出器ヘッドは 1 cm キューブの高エネルギー分解能 $\text{Gd}_3(\text{Al,Ga})_5\text{O}_{12}(\text{Ce})$ (HR-GAGG) シンチレータとシリコンフォトマル（浜松ホトニクス製 MPPC S14160-6050HS）からなり、アルミニウム製のケース（15 mm×15 mm×16 mm）に収められている。本システムは、単一光子（ガンマ線、特性 X 線）放出核種[1]や純ベータ線放出核種[2]に対応したシングルモードと、ポジトロン放出核種に対応したコインシデンスモードを備え、配線接続を切り替えることで選択可能となっている。

現在、両計測モードを用いた植物 RI トレーサ実験による性能評価を進めており、本発表では、イチゴの葉に $^{11}\text{CO}_2$ を投与し、果実への炭素転流動態をコインシデンスモードにより観察した実験結果について報告する[3]。

[1] M. Yamaguchi, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **61** (2022) 027001.

[2] M. Tsuda, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **64** (2025) 057003.

[3] Y. Nagao, et al., J. Instrum. **19** (2024) P04023.

ゲルマニウム検出器を用いた制動放射測定による C-14 定量のための減衰補正

Attenuation correction for C-14 quantification by bremsstrahlung measurement
with a germanium detector

東北大¹, QST 高崎², 群馬大³, 筑波大⁴ ○(D) 津田 路子^{1,2}, 毛呂 太陽³, 山口 充孝²,
佐藤 史弥³, 長尾悠人², 矢部 卓也², 尹 永根², 三好 悠太², 鈴木 伸郎², 榎本 一之²,
古川 純⁴, 神谷 富裕², 櫻井 浩³, 河地 有木², 渡部 浩司¹

Tohoku Univ.¹, QST Takasaki², Gunma Univ.³, Tsukuba Univ.⁴ ○Michiko Tsuda^{1,2}, Taiyo Moro³,
Mitsutaka Yamaguchi², Fumiya Sato³, Yuto Nagao², Takuya Yabe², Yong-Gen Yin², Yuta Miyoshi²,
Nobuo Suzui², Kazuyuki Enomoto², Jun Furukawa⁴, Tomihiro Kamiya², Hiroshi Sakurai³,
Naoki Kawachi², Hiroshi Watabe¹

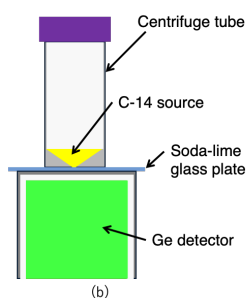
E-mail: tsuda.michiko.p3@dc.tohoku.ac.jp

持続可能な食料生産を加速するためには、光合成産物の動態を正確に把握することが重要である。現在、長い半減期を持つ C-14 から放出される β 線が生体組織と相互作用することで生成される、透過力の高い X 線（制動放射線）は、光合成産物の移行経路を追跡する新たな手段として注目されている。しかし、果実のような厚みのある部位において制動放射線を用いて C-14 を定量的に測定するには、減弱の影響を適切に評価する必要がある。そこで本研究では、ゲルマニウム半導体検出器を用いて C-14 線源から放出される制動放射線のエネルギースペクトルを精密に測定し、そのスペクトル情報を活用した減弱補正の実現可能性について検討した[1]。

実験は筑波大学放射線・アイソトープ地球システム研究センターにて実施した。プラスチック容器に封入した 13 MBq の C-14 線源を、ゲルマニウム半導体検出器(GPGe:GEM40-76)上に配置し (Fig. 1)、5 分間の測定を行った。減弱補正の検討のために線源と検出器の間に吸収体として厚さ 5 mm および 10 mm のガラス板を挿入し、それぞれ同様の測定を行うことで、減弱の影響を評価した。各ガラス板厚さに対応するエネルギースペクトルを取得した(Fig. 2)。その結果、ガラス板の厚さに応じて、減弱の影響を反映したスペクトル形状の変化が確認された。本発表では、このスペクトル変化を活用した減衰補正手法について報告する。



(a)



(b)

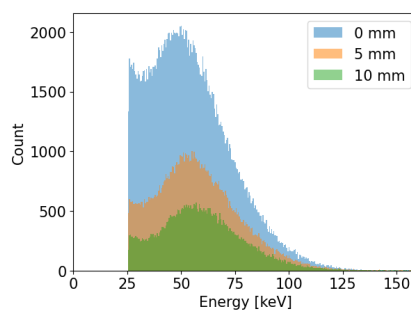


Fig. 1 (a) Photograph of the experimental setup and (b) schematic diagram of the setup. [1]

Fig. 2 Energy spectra obtained from the germanium detector for glass plate thicknesses of 0, 5, and 10 mm. [1]

[1] M. Tsuda *et al* 2025 Jpn. J. Appl. Phys. 64 057003

診断 X 線領域におけるヘテロエピタキシャルダイヤモンド固体電離箱のエネルギー依存性評価

Energy Dependence of a Heteroepitaxial Diamond Solid-state Ionization Chamber under Diagnostic X-ray Irradiation

都立大¹, Orbray 株式会社², 東北大³, 大阪大⁴, 東北工大⁵, QST 放医研⁶ ○真正浄光¹、小山浩司²、金聖祐²、人見啓太郎³、毎田修⁴、小野寺敏幸⁵、(B)橋本心真¹、(B)吉川奏太¹、(B)芳賀亜胡¹、丸山大樹¹、古場裕介⁶、野上光博³

Tokyo Metropolitan Univ.¹, Orbray Co.,Ltd.,² Tohoku Univ.³, Osaka Univ.⁴, Tohoku Institute of Technology⁵, QST-NIRS⁶ ○Kiyomitsu Shinsho¹, Koji Koyama², Seong woo Kim², Keitaro Hitomi³, Osamu Maida⁴, Toshiyuki Onodera⁵, Shimma Hashimoto¹, Kanata Kikkawa¹, Ako Haga¹, Daiki Maruyama¹, Yusuke Koba⁶, Mitsuhiro Nogami

E-mail: shinsho@tmu.ac.jp

近年、ダイヤモンドを用いた放射線検出技術が注目される中で、ヘテロエピタキシャル成長によって得られる大面積ダイヤモンド基板を用いた固体電離箱は、高感度で生体組織との等価性が高く、線量耐性も高いなど、優れた特性を併せ持つことから、診断 X 線領域における次世代線量計としての実用化が期待されている。本研究では、厚さ 0.5 mm、面積 $4 \times 4 \text{ mm}^2$ のヘテロエピタキシャルダイヤモンドを用いた固体電離箱 (Fig.1) を作製し、実効エネルギー 34、44、54 keV の X 線条件下で、線量に対する電荷応答特性およびそのエネルギー依存性を評価した。

測定は、1-500 V の範囲で印加電圧を変化させながら、線量範囲 0.2-15 mGy において実施し、収集電荷量から感度 (nC/mGy) を導出した。その結果、感度は印加電圧の増加に伴い上昇し、電離箱と比較して 2-3 桁高い感度を示した。また光子エネルギーの増加に対してもわずかに上昇する傾向が見られた。(Fig.2) 現在、この原因については、PHITS によるモンテカルロシミュレーションにて解析中である。また、照射後の電荷収集時間を解析した結果、高電圧印加時には電荷収集時間が長くなる傾向が観測された。これは、電界強度が高くなったことにより総収集電荷量が増加するものの、一部キャリアが格子欠陥に捕獲され再放出される影響に起因していると考えられる。

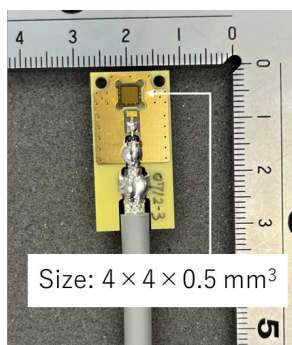


Fig.1 Photograph of the fabricated heteroepitaxial diamond solid-state ionization chamber

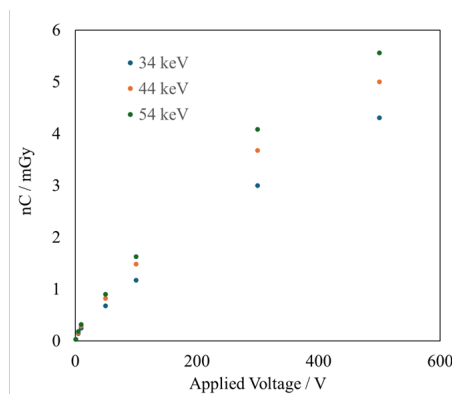


Fig.2 Applied voltage dependence of the sensitivity (nC/mGy) for the heteroepitaxial diamond solid-state ionization chamber

大学生向け宇宙線測定ワークショップの実践

Practical workshop on cosmic ray measurement for undergraduate students

名大理¹, 加速キッチン², 名大 KMI³, 早大理工⁴,

○(B) 杉本 幸太郎¹², 高橋 将太³, (B) 加藤 さくら¹,

(B) 水野 結日¹, (B) 靱木 伶央¹, (B) 黒田 尚志¹, 田中香津生²⁴

Nagoya Univ.¹, Accel Kitchen LLC², KMI, Nagoya Univ.³, Waseda Univ.⁴

○Kotaro Sugimoto¹², Shota Takahashi³, Sakura Kato¹,

Yuika Mizuno¹, Reo Momiki¹, Takashi Kuroda¹, Kazuo Tanaka²⁴,

E-mail: sugimoto.kotaro.h4@s.mail.nagoya-u.ac.jp

宇宙線は地球上のあらゆる場所で観測可能な素粒子であり、大学の学部課程における学生実験でも広く扱われている。しかし、一般的な光電子増倍管 (PMT) を用いた従来の検出器は大型で高電圧を必要とするため、学部初年次の学生にとっては取り扱いが難しく、装置の構造も理解しづらいため、“ブラックボックス”になりがちである。

この課題を解決するため、加速キッチンではシンチレータとシリコン光電子増倍管 (SiPM) を組み合わせた手のひらサイズの宇宙線検出器「Cosmic Watch」(図 1) を中高生に配付し、自宅での宇宙線観測や探究活動を支援してきた。中高生でも自身で組み立て可能なため、仕組みを理解したうえで測定を行うことができる。

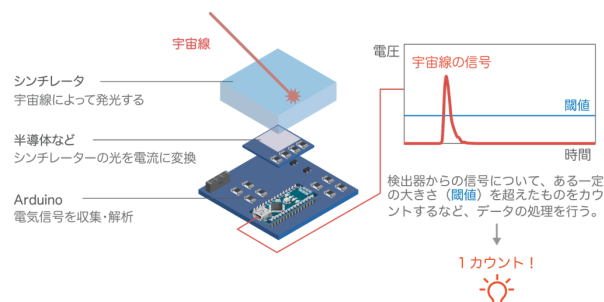


図1 Cosmic Watch の仕組み

大学初年次の学生にも素粒子測定の実験機会をつくるため、名古屋大学で Cosmic Watch の組み立て・測定体験会を実施した。本ワークショップは、名古屋大学理学部生を対象として実施し、企画・運営も高橋将太特任助教の指導の下、理学部1年生の有志が主体的に行った。宇宙線やブラックボックスとなりがちな宇宙線検出器の仕組みを理解するとともに、宇宙線に興味を持つ学生同士の交流を深めることを目的とし、本ワークショップでは KMI 若手研究者の講演やグループに分かれて Cosmic Watch の分解・組立、Cosmic Watch を使った天頂角分布の計測を実施した。

本講演では、ワークショップを通じて得られた教育的効果について報告する。本ワークショップでは名古屋大学理学部生を対象としたが、今後は対象を他学部や宇宙線に興味を持つ小中高生まで広げ、宇宙線に興味なかった人にも面白さを実感できる機会を創出していく。

Sub-second dynamic rat imaging with an ultrasensitive small animal PET scanner

°Han Gyu Kang¹, Hideaki Tashima¹, Hidekatsu Wakizaka¹, Go Akamatsu¹, Yuma Iwao¹, Chie Toramatsu¹,
Taiga Yamaya¹

QST¹, E-mail: hangyookang@gmail.com

Dynamic positron emission tomography (PET) imaging can provide molecular information of living objects as a function of time. However, the temporal resolution of the state-of-the-art PET scanners is over 1 second, which is not fast enough to capture rapidly changing brain or cardiac functions. Previously, we developed the total-body small animal (TBS) PET scanner with 4-layer depth-of-interaction (DOI) detectors to achieve ultrahigh sensitivity. However, the physical performance was not fully evaluated. More importantly, *in vivo* dynamic imaging was not demonstrated. In this study, we present the physical performance and sub-second dynamic PET imaging results of a rat with the TBS-PET scanner. The TBS PET has 155 mm inner diameter and 325.6 mm axial coverage featuring 45% peak sensitivity with an energy window of 250-750 keV (Fig. 1). Each DOI PET detector consisted of 4-layer 16×16 GSOZ crystals (2.8×2.8×7.5 mm³) and an 8×8 array multi-anode PMT. A bolus of ¹⁸F-FDG (21.2 MBq) was injected into an anesthetized rat via tail vein followed by saline injection. Dynamic PET images of a rat were obtained with 0.5 s time frame. In the time activity curves, the time dispersion between the left and right ventricles (1 s) was clearly separated. In conclusion, the TBS-PET enabled sub-second dynamic imaging for rodent models. The detailed dynamic PET analysis results will be presented at the conference.

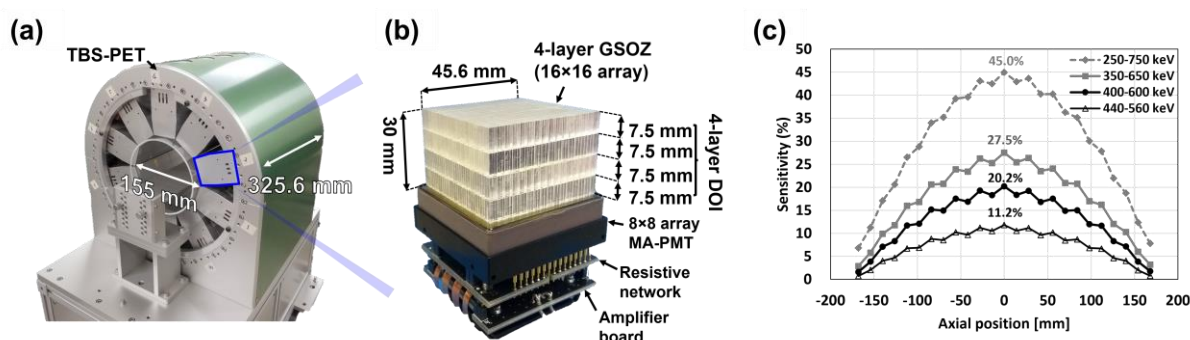


Fig. 1. (a) The TBS-PET scanner with a 4-layer DOI detector, (b) axial sensitivity profiles with different energy windows of 250-750 keV, 350-650 keV, 400-600 keV, and 440-560 keV.

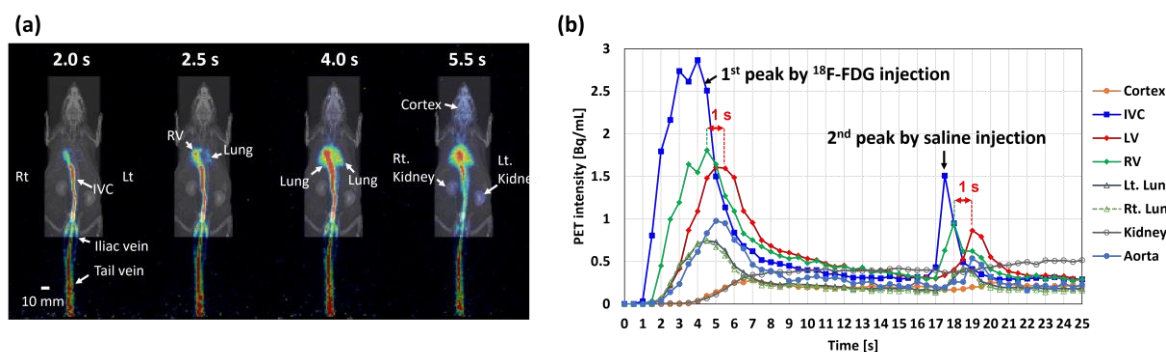


Fig. 2. (a) Selected dynamic rat images with 0.5 s time frame at the post injection times of 2.0, 2.5, 4.0, and 5.5 s, (b) time activity curves of various organs. The first and second peaks by the ¹⁸F-FDG injection and saline injection in the inferior vena cava (IVC) are visualized. The time dispersion (1 s) of the blood flow between the left ventricle (LV) and right ventricle (RV) are clearly separated.

Development of a mouse brain PET scanner with sub-0.5 mm resolution

°Han Gyu Kang¹, Hideaki Tashima¹, Hidekatsu Wakizaka¹, Makoto Higuchi¹, Taiga Yamaya¹
QST¹, E-mail: hangyookang@gmail.com

For mouse brain PET imaging with high quantification accuracy, spatial resolution is the most important parameter. However, the spatial resolution of PET has been limited to over 0.5 mm for the last two decades. Here we report on a mouse brain PET design that can achieve sub-0.5 mm resolution. The developed PET scanner has a 48 mm ring diameter and 23.4 mm axial field of view. The PET scanner consists of 32 depth-of-interaction (DOI) detectors. Each DOI detector consists of a staggered 3-layer LYSO crystal array (crystal pitch=0.8 mm, total thickness= 11 mm) and silicon photomultipliers 5×5 array with a 2.4 mm pixel pitch. The physical performance of the PET scanner was evaluated according to the National Electrical Manufacturers Association NU4 protocol. In vivo mouse brain imaging was performed with ¹⁸F-FITM radiotracer. The peak axial sensitivity was 0.65% with an energy window of 440-560 keV. The spatial resolution was 0.67 mm with filtered back projection at the center. With iterative reconstruction algorithm, the 0.45 mm rod structures were clearly resolved with an average valley-to-peak ratio of 0.655±0.071. The mouse brain structures such as thalamus, hypothalamus, and cerebellum were clearly visualized. In conclusion, the developed mouse brain PET scanner achieved sub-0.5 mm resolution thereby visualizing mouse brain function in detail.

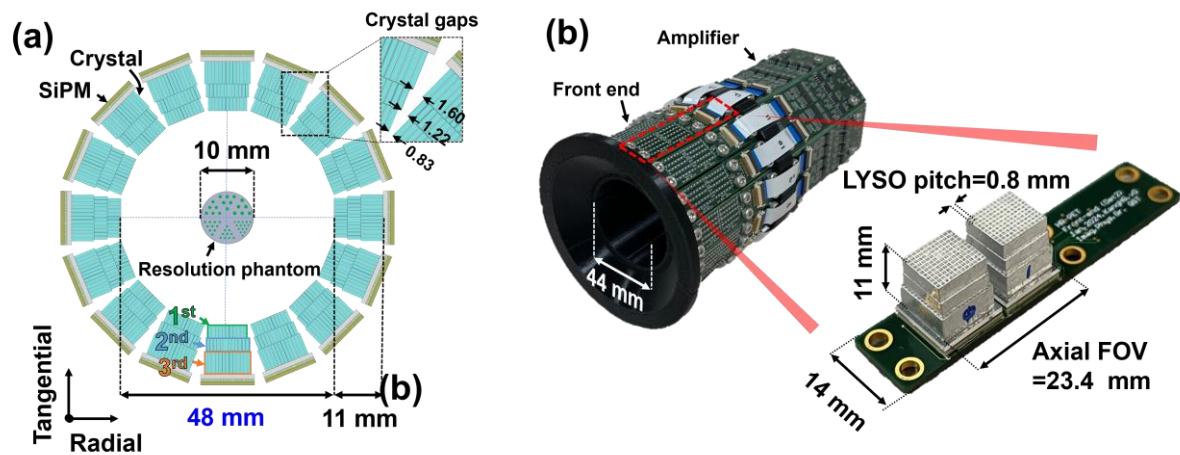


Fig. 1. (a) The schematic drawing of the PET scanner in front view (b) and the developed mouse brain PET scanner with a 3-layer DOI detector.

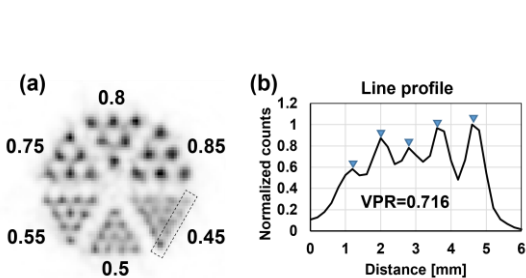


Fig. 2. (a) Reconstructed resolution phantom images with iterative algorithm and (b) the line profile obtained at the outermost side of the 0.45 mm rod structure. The valley-to-peak ratio (VPR) was 0.716.

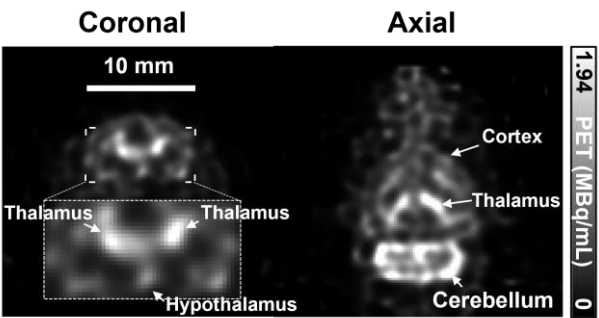


Fig. 3. In vivo mouse brain images obtained with the developed PET scanner using the ¹⁸F-FITM tracer in coronal and axial planes.

Diode-based row-column multiplexing for clinical TOF-PET detectors

°Han Gyu Kang¹, Eiji Yoshida¹, Go Akamatsu¹, Taiga Yamaya¹

QST¹, E-mail: hangyookang@gmail.com

Signal multiplexing is important to reduce the complexity and cost of clinical positron emission tomography (PET) systems. In addition, good coincidence timing resolution (CTR) is also required to improve the image quality of PET by using the time-of-flight (TOF) information. Here, we report a diode-based row-column multiplexing (RC mux) circuit for clinical TOF-PET applications. A TOF detector consists of fast-LGSO crystal 8×8 array (crystal pitch=3.2 mm, thickness=20 mm) and Hamamatsu SiPM 8×8 array (S14160-3050HS, pixel pitch=3.2 mm) with one-to-one coupling (Fig. 1(a)). Custom-made RC mux circuits were developed to reduce the SiPM channels from 64 into 16 (8 x-position + 8 y-position) with diode and resistor materials, respectively (Fig. 1(b-c)). The timing information was obtained from the meantime of the x and y signals. The multiplexed analog signals were digitized by using PETsys TOFPET2 ASIC modules with an energy window of 440-560 keV (Fig. 2(a)). The effects of the RC mux circuits on the CTR were evaluated with the same crystal and SiPM arrays (Fig. 2(b)). The CTR with the diode-multiplexing was 339 ps, which was 4.3% worse and 34.5% better than the case without multiplexing (325 ps) and with resistor-based multiplexing (456 ps). In conclusion, the diode-based RC multiplexing is a cost-effective solution for the development of clinical TOF-PET systems.

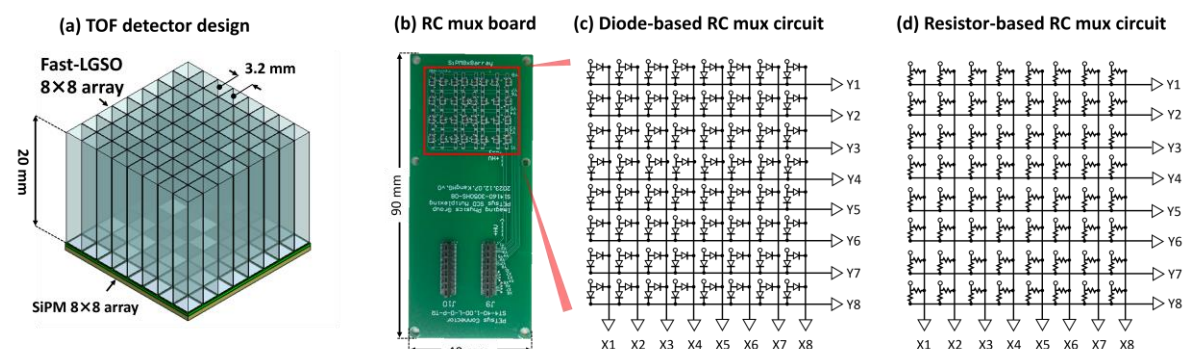


Fig. 1. (a) 3D view of a TOF detector with one-to-one coupling configuration between the fast-LGSO and SiPM array, (b) the developed row-column multiplexing (RC mux) board, (c) schematic circuit diagrams of the multiplexing circuit with diode, and (d) resistor.

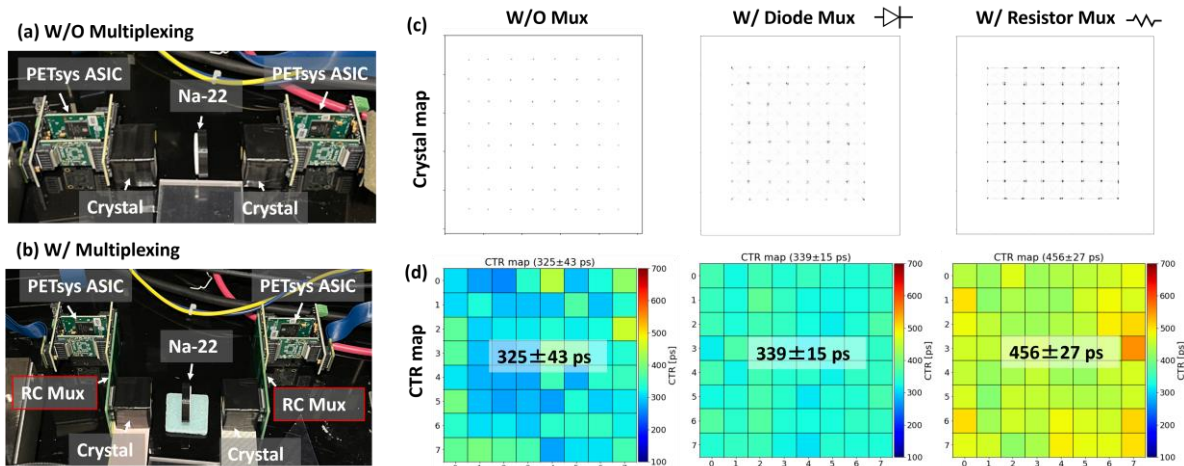


Fig. 2. (a) Experimental setup without multiplexing, and (b) with multiplexing. (c) Crystal maps and (d) CTR maps without multiplexing, with diode-multiplexing, and with resistor-multiplexing schemes.

Positronium imaging における体温の影響: 臨床 PET VRAIN による検証

The effect of body temperature on positronium imaging: An experiment with a clinical PET VRAIN

QST¹, 原子力機構², °田久 創大¹, 平出 哲也², 松本 謙一郎¹,

錦戸 文彦¹, 赤松 剛¹, 田島 英朗¹, 高橋 美和子¹, 山谷 泰賀¹

QST¹, JAEA², °Sodai Takyu¹, Tetsuya Hirade², Ken-ichiro Matsumoto¹,

Fumihiko Nishikido¹, Go Akamatsu¹, Hideaki Tashima¹, Miwako Takahashi¹, and Taiga Yamaya¹

E-mail: takyu.soudai@qst.go.jp

陽電子は生体内で、電子と対消滅を起こす前に 30~40%の確率でポジトロニウム (positronium, Ps) を形成する。Ps が対消滅するまでの時間: Ps 寿命は、周囲の電子密度に依存して変化するため、例えば、低酸素がんイメージングのための酸素分圧センシングに応用できる可能性がある。そこで我々は、陽電子分布ではなく Ps 寿命から診断を行う量子 PET (quantum-PET, Q-PET) の実現を目指している。これまでに、頭部専用臨床 PET 装置 VRAIN を用いて、低酸素状態の腫瘍細胞と健常組織細胞に相当する酸素分圧に調整した Na-22 水溶液の Ps 寿命を測定し、それらの Ps 寿命差約 7 ps の弁別実証を報告している[1]。一方、生体には温度分布があり、体表付近と深部では温度が異なる(Fig. 1 (a))。Ps 寿命は水温によって変化することが知られているため[2]、本研究では、その影響を調べる実験を行った。薄膜 Na-22 線源を純水に接触させ、小型インキュベーターに入れて温度を 25°C、36°C、44.5°Cと変化させた。VRAIN を用いて各々の Ps 寿命を測定した(Fig. 1 (b))。測定された Ps 寿命値は、25°Cで 1.9499 ± 0.0099 ns、36°Cで 1.9135 ± 0.0101 ns、44.5°Cで 1.8769 ± 0.0098 ns であった。これら 3 点を直線近似して解析すると、水温が 35°Cから 37°C付近で Ps 寿命が 3.5 ps/°Cで変化すると算出された(Fig. 1 (c))。Ps 寿命による低酸素イメージングでは、体温の影響を考慮する必要性が示唆された。

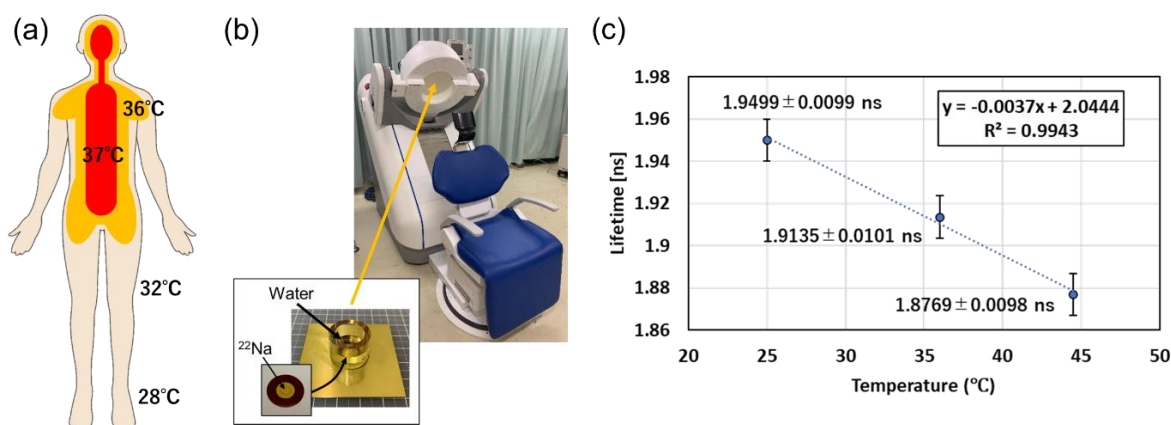


Figure 1. (a) Temperature distribution in the human body (an example). (b) Photos of a Na-22 source and a clinical PET scanner “VRAIN”. (c) A graph of the Ps lifetimes as a function of the temperature in water.

[1] S. Takyu et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 1065, 169514, 2024.

[2] K. Kotera et al., Physics Letters A, 345, 184-190, 2005.

光子伝搬と波形信号のモデル化を組み込んだチェレンコフ輻射体内蔵型 MCP-PMT のモンテカルロシミュレーション

Monte Carlo simulation of Cherenkov-radiator-integrated MCP-PMT with full modeling of optics and waveform

千葉大¹, QST², 浜ホト中研³, カリフォルニア大デイビス校⁴

○(D)石川 大洋^{1,2}, 大田 良亮^{3,4}, カン ハンギュ², 錦戸 文彦², 羽石 秀昭¹, 山谷 泰賀^{2,1}
Chiba Univ.¹, QST², Hamamatsu Photonics³, UC Davis⁴, ○(D)Taiyo Ishikawa^{1,2}, Ryosuke Ota^{3,4}, Han Gyu Kang², Fumihiko Nishikido², Hideaki Haneishi¹, Taiga Yamaya^{2,1},

E-mail: t_ishikawa@chiba-u.jp

[目的] PET では、消滅放射線の飛行時間差(TOF)情報を用いて同時計数線上の線源位置を特定できるが、同時計数時間分解能(CTR)は最新装置でも 200 ps 程度である。一方、チェレンコフ輻射体内蔵型マイクロチャンネルプレート光電子増倍管(CRI-MCP-PMT)により、30 ps の同時計数時間分解能(CTR)が達成され[1]、今後最適化シミュレーションを経て実用化されることが期待されている。そこで本研究では、Geant4 を使用して、詳細なパラメータを組み込んだ CRI-MCP-PMT のモンテカルロシミュレーションモデルを開発した。[方法] 検出器の形状は市販の MCP-PMT (R3809U-50、浜松ホトニクス株式会社) から決定し、チェレンコフ輻射体には厚さ 3.2 mm のフッ化鉛結晶を使用した(Fig. (a))。本モデルにて、単一光子時間分解能 (25 ps FWHM)、実測した単一光子波形、電気ノイズ、波形振幅のばらつきを組み込み、検出タイミングを決定するためのアナログ出力信号を生成する。波形振幅のばらつきと電気ノイズは、実測データを基にガウス関数でモデル化した。CTR を評価するために、検出器ペアの中心から各検出器に向かう 2 本の 511 keV のガンマ線を 2.5×10^7 回生成したときのデータ収集を再現した。最良の CTR を得るために、コンスタントフラクショントイミングにおけるパルス面積ウィンドウと閾値レベルを[1]に倣って最適化した。[結果] パルス面積が増加し、閾値が低下するほど CTR が改善され、最良の CTR は 29.6 ps FWHM となった (Fig. (b))。この結果は、ほぼ同じパラメータで[1]の実験結果(30.1 ps)と良く一致した。[結論] 本シミュレータは、パラメータを変えることで様々な CRI-MCP-PMT のアナログ出力信号の生成でき、CRI-MCP-PMT を用いた超高速 TOF-PET 検出器の設計最適化に有用である。

[1] R. Ota *et al.*, “Coincidence time resolution of 30 ps FWHM using a pair of Cherenkov-radiator-integrated MCP-PMTs,” *Phys. Med. Biol.*, vol. 64, no. 7, p. 07LT01, Mar. 2019.

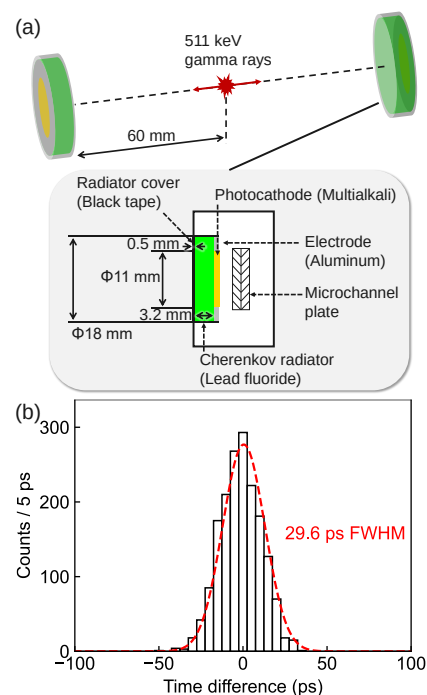


Fig. (a) Simulation setup for CTR measurement. A pair of CRI-MCP-PMTs was placed face-to-face at a 120 mm separation. Back-to-back 511 keV gamma rays were generated at the middle of the detectors. (b) The best CTR histogram was obtained by optimizing the threshold level and pulse area window, which was 29.6 ps FWHM.