

一般セッション(口頭講演) | 2 放射線: 2.2 発生装置・検出器開発・計測技術

2025年3月16日(日) 13:00 ~ 18:15 会 K501 (講義棟)

**[16p-K501-1~19] 2.2 発生装置・検出器開発・計測技術**

藤原 健(産総研)、島添 健次(東大)、北山 佳治(原子力機構)

13:00 ~ 13:15

[16p-K501-1]

LGAD構造を用いたGaNピクセル粒子位置検出器の作製

○奥村 宏典<sup>1</sup>、飯田 哲<sup>1</sup>、廣瀬 茂輝<sup>1</sup>、板橋 浩介<sup>2,3</sup>、外川 学<sup>2,3</sup>、宮原 正也<sup>2,3</sup>、磯部 忠昭<sup>4</sup>、井村 将隆<sup>5</sup>、西永 慈郎<sup>3,6</sup>、浦崎 圭吾<sup>1</sup> (1.筑波大数理、2.高エネ研、3.QUP、4.理研、5.物材研、6.産総研)

13:15 ~ 13:30

[16p-K501-2]

デジタル波形処理による臭化タリウム検出器のエネルギー分解能改善

○丸山 秀典<sup>1</sup>、野上 光博<sup>1</sup>、人見 啓太郎<sup>1</sup> (1.東北工大)

13:30 ~ 13:45

[16p-K501-3]

TlBr半導体検出器の多変量解析による信号処理の高度化

○田中 清志朗<sup>1</sup>、渡辺 賢一<sup>1</sup>、長谷川 創大<sup>1</sup>、須貝 優介<sup>1</sup>、人見 啓太郎<sup>2</sup>、野上 光博<sup>2</sup> (1.九州大工、2.東北大工)

13:45 ~ 14:00

[16p-K501-4]

ヨウ素ドーピングしたMAPbBr<sub>3-x</sub>I<sub>x</sub>ハロゲン化ペロブスカイト混合結晶の作製と評価○近藤 稜真<sup>1</sup>、大島 龍人<sup>1</sup>、ニラウラ マダン<sup>1</sup> (1.名工大院工)

14:00 ~ 14:15

[16p-K501-5]

耐高温中性子検出器に向けた低B組成BGaN検出器のB組成依存性評価

○工藤 涼兵<sup>1</sup>、櫻井 辰大<sup>1</sup>、小久保 瑛斗<sup>2</sup>、都木 克之<sup>3</sup>、西澤 潤一<sup>3</sup>、岸下 徹一<sup>4</sup>、櫻井 良憲<sup>5</sup>、八島 浩<sup>5</sup>、牧野 高紘<sup>6</sup>、大島 武<sup>6</sup>、本田 善央<sup>7</sup>、天野 浩<sup>7</sup>、井上 翼<sup>1</sup>、青木 徹<sup>3</sup>、中野 貴之<sup>1,3</sup> (1.静大院工、2.名大院工、3.静大電研、4.高エネ研、5.京大複合研、6.量研、7.名大IMaSS)

14:15 ~ 14:30

[16p-K501-6]

球形Liガラスシンチレータの壁効果の評価

○齋藤 優太郎<sup>1</sup>、大島 裕也<sup>1</sup>、渡辺 賢一<sup>1</sup> (1.九大工)

◆ 奨励賞エントリー

14:45 ~ 15:00

[16p-K501-7]

PADC飛跡検出器に及ぼす172 nm紫外線照射効果

○木本 敦<sup>1</sup>、金崎 真聡<sup>1</sup>、山内 知也<sup>1</sup> (1.神大院海事)

◆ 奨励賞エントリー

15:00 ~ 15:15

[16p-K501-8]

高線量率場におけるNd添加Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>近赤外発光シンチレータの放射線応答と吸収線量の評価

○石澤 倫<sup>2,1</sup>、黒澤 俊介<sup>1,3,4</sup>、山路 晃広<sup>1,3</sup>、吉川 彰<sup>1,3,4,5</sup>、高田 卓志<sup>6</sup>、田中 浩基<sup>6</sup> (1.東北大NICHe、2.日本学術振興会PD、3.東北大金研、4.阪大レーザー研、5.(株)C&A、6.京都大複合研)

---

15:15 ~ 15:30

[16p-K501-9]

焦電性結晶による発生X線の結晶表面—ターゲット間距離依存性の考察

○花元 克巳<sup>1</sup>、田辺 悦章<sup>1</sup>、海川 龍治<sup>2</sup>、片岡 隆浩<sup>1</sup>、山岡 聖典<sup>1</sup> (1.岡山大院保、2.龍谷大先端)

---

◆ 奨励賞エントリー

15:30 ~ 15:45

[16p-K501-10]

焦電結晶を用いた小型中性子源の中性子発生プロセス

○大上 楓真<sup>1</sup>、阿保 智<sup>1</sup>、増澤 智昭<sup>2</sup>、三村 秀典<sup>2</sup>、若家 富士男<sup>1</sup> (1.阪大院基礎工、2.静大電研)

---

15:45 ~ 16:00

[16p-K501-11]

小型核融合装置から生じる中性子が水晶振動子振動数に及ぼす影響

○大川 博司<sup>1,2</sup>、高橋 武<sup>1,3</sup>、遠藤 慧一<sup>1</sup>、原田 歩武<sup>1</sup>、椎名 柔<sup>1</sup>、西 惠未<sup>1</sup> (1.HSU未来産業学部、2.ミオヤエナジー(株)、3.(株)エイチアールオー)

---

16:00 ~ 16:15

[16p-K501-12]

酸素17生成断面積の測定 ～ネオン比例計数管の中性子応答～

○谷村 嘉彦<sup>1</sup>、西野 翔<sup>1</sup>、古田 琢哉<sup>1</sup>、岸本 祐二<sup>2</sup>、萩原 雅之<sup>3</sup>、佐藤 大樹<sup>1</sup>、熊谷 友多<sup>1</sup>、松田 洋樹<sup>3</sup>、平田 悠歩<sup>1</sup>、津田 修一<sup>1</sup> (1.原子力機構、2.高エネ研、3.量研機構)

---

16:30 ~ 16:45

[16p-K501-13]

速中性子イメージャーによる高エネルギー加速器施設での中性子飛来方向特定の実証実験

○松村 徹<sup>1</sup>、塩見 公志<sup>2</sup>、南條 創<sup>3</sup>、野村 正<sup>2</sup>、Lim GeiYoub<sup>2</sup>、渡辺 丈晃<sup>2</sup> (1.防衛大、2.KEK素核研、3.阪大理)

---

16:45 ~ 17:00

[16p-K501-14]

符号化開口を用いたガンマ線カメラの距離推定手法の開発

○高橋 慎太郎<sup>1</sup>、神田 健志<sup>1</sup>、佐藤 将吾<sup>1</sup>、田中 香津生<sup>1</sup>、片岡 淳<sup>1</sup> (1.早大理工)

---

17:00 ~ 17:15

[16p-K501-15]

複数のキューブ形状遮蔽体とシンチレータで構成される全方位ガンマ線イメージャーのシミュレーションによる特性評価

○北山 佳治<sup>1</sup>、野上 光博<sup>2</sup>、人見 啓太郎<sup>2</sup> (1.JAEA、2.東北大工)

---

17:15 ~ 17:30

[16p-K501-16]

コンプトン散乱・磁気コンプトン散乱を用いた鉄筋の非破壊検査手法の可能性

藤山 諒<sup>1</sup>、神門 正樹<sup>2</sup>、辻 成希<sup>3</sup>、星 和志<sup>1</sup>、鈴木 宏輔<sup>1</sup>、竹内 浩<sup>4</sup>、○櫻井 浩<sup>1</sup> (1.群大院理工、2.QST関西研、3.JASRI、4.金属技研)

---

17:30 ~ 17:45

[16p-K501-17]

斜入射型X線CT装置を用いた半導体アプリケーション

○大垣 智巳<sup>1</sup>、Wenbing Yun<sup>2</sup>、Sylvia JY Lewis<sup>2</sup>、SH Lau<sup>2</sup> (1.キヤノンMJ、2.Sigray Inc.)

---

17:45 ~ 18:00

[16p-K501-18]

PHITSシミュレーションを用いたフォトンカウンティングCT画像のEnergy Binning依存性

○江坂 怜<sup>1</sup>、星 和志<sup>1</sup>、長谷部 有希<sup>1</sup>、鈴木 宏輔<sup>1</sup>、松村 彰彦<sup>2</sup>、取越 正己<sup>3</sup>、櫻井 浩<sup>1</sup> (1.群大理、2.群大重粒、3.量研機構)

---

18:00 ~ 18:15

[16p-K501-19]

複合現実によるマルチエネルギーX線CTの内部構造の合成表現

○加瀬 裕貴<sup>1,2</sup>、西澤 潤一<sup>3</sup>、佐藤 栄里子<sup>2</sup>、都木 克之<sup>2</sup>、堀田 拓海<sup>4</sup>、Ajith Bandara<sup>6</sup>、青木 徹<sup>1,2,3,5</sup>  
(1.静岡大情、2.静岡大電子研、3.静岡大院光医工、4.東京大、5.ANSeeN、6.中央発明研究所)

---

## LGAD 構造を用いた GaN ピクセル粒子位置検出器の作製

### Fabrication of GaN radiation detectors with low-gain avalanche diode structure

筑波大数理<sup>1</sup>, 高エネ研<sup>2</sup>, QUP<sup>3</sup>, 理研<sup>4</sup>, 物材研<sup>5</sup>, 産総研<sup>6</sup>

○奥村 宏典<sup>1</sup>, 飯田 哲<sup>1</sup>, 廣瀬 茂輝<sup>1</sup>, 板橋 浩介<sup>2,3</sup>, 外川 学<sup>2,3</sup>, 宮原 正也<sup>2,3</sup>, 磯部 忠昭<sup>4</sup>,  
井村 将隆<sup>5</sup>, 西永 慈郎<sup>6</sup>, 浦崎 圭吾<sup>1</sup>

Univ. of Tsukuba<sup>1</sup>, KEK<sup>2</sup>, QUP<sup>3</sup>, RIKEN<sup>4</sup>, NIMS<sup>5</sup>, AIST<sup>6</sup>

○Hironori Okumura<sup>1</sup>, Tetsu Iida<sup>1</sup>, Shigeki Hirose<sup>1</sup>, Kosuke Itabashi<sup>2,3</sup>, Manabu Toagawa<sup>2,3</sup>,  
Masaya Miyahara<sup>2,3</sup>, Tadaaki Isobe<sup>4</sup>, Masataka Imura<sup>5</sup>, Jiro Nishinaga<sup>6</sup>, Keigo Urasaki<sup>1</sup>

E-mail: okumura.hironori.gm@u.tsukuba.ac.jp

窒化ガリウム(GaN)は、はじき出し損傷エネルギーが大きく、室温動作が可能であり、電子正孔対の生成確率が高いことから、長寿命の放射線検出器用材料として優位である。私達は、GaN 縦型 PN ダイオードを用いた重粒子の位置検出を行ってきた[1,2]。陽子線やβ線の検出には、アバランシェ増幅による信号強度の増大が不可欠である。本研究では、時間分解能向上も考慮し、低利得アバランシェ検出器(LGAD)構造を持つ GaN ピクセル検出器を作製し、α線を照射した。

図1のように、p-GaN層直下のゲイン層に高電界が生じる、LGAD 構造を用いてピクセル検出器を作製した。カソード電極として裏面に Ti/Al/Ti/Au 電極を蒸着し、窒素雰囲気 800 度 1 分で熱処理を行った。アノード電極として Ni/Au 電極を蒸着し、酸素雰囲気 500 度 10 分で熱処理を行った。電極サイズ 150 μm、電極間距離 12 μm の 5×5 の 2 次元配列の正方形 pad 電極を、Al ワイヤを用いてパッケージにボンディングした後、Si ASD 読み出し回路に接続した。アメリカンウム 241 (5.48 MeV)を用いてα線照射を行った。

用いたアノード電極の Au 厚さが 25 nm と小さく、ボンディングは 6 か所のみ成功した。6 channel のうちのひとつから得られた、α

線照射に対する検出結果を図2に示す。これは、α線照射により電子正孔対が生成され、その電荷がバイアス印加により一つの pad 電極に到達したためと考えられる。同時刻において 1 channel のみ検出できており、他の pad 電極には信号が現れなかった。今回作製した GaN ピクセル検出器により、粒子の 2 次元位置検出に成功したと言える。

本研究は、TIA かけはしの援助を得て、量研機構重粒子線がん治療装置の共同利用の一環で行われた。[1] H. Okumura *et al.*, JJAP **62**, 064001 (2023). [2] 奥村ら第 70 回応物春 16a-D311-11

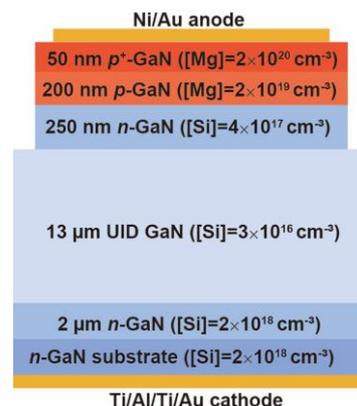


Fig. 1: Schematic figure of GaN LGAD structure.

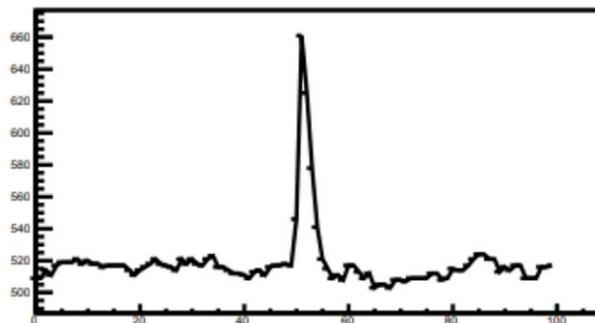


Fig. 2: Signal from an alpha particle using pixel detector with GaN LGAD structure.

# デジタル波形処理による臭化タリウム検出器のエネルギー分解能改善

Improving the energy resolution of TlBr detectors using digital waveform processing

東北大<sup>1</sup>, ○(D)丸山 秀典<sup>1</sup>, 野上 光博<sup>1</sup>, 人見 啓太郎<sup>1</sup>

Tohoku Univ<sup>1</sup>, Shusuke Maruyama<sup>1</sup>, Mitsuhiro Nogami<sup>1</sup>, Keitaro Hitomi<sup>1</sup>

E-mail: maruyama.shusuke.s5@dc.tohoku.ac.jp

1. 緒言 再処理施設や原子力施設、医療施設 (核医学)などにおいて、ガンマ線のイメージング、核種同定可能なイメージングスペクトロメータにおいては、従来は Ge 検出器や CdZnTe 検出器が主に用いられてきたが、Ge 検出器は冷却が必要であり且つ高コストであり、CdZnTe 検出器は検出効率やコストに課題があるため、室温動作可能であり且つ高効率、低コストである検出器の開発が望まれてきた。本研究はこれらの検出器に代わる室温動作可能であり、且つ低コストである検出器の開発を目的としており、高い原子番号と密度を有し、優れたエネルギー分解能(1% @662 keV 程度)を示す TlBr(臭化タリウム)を用いた検出器開発を行っている。イメージング且つエネルギースペクトルが取得可能な形状として、ピクセル型の検出器を用いて、デジタル波形処理を行い、エネルギースペクトルの測定から、将来的にはイメージングを目標に研究を行っている。

2. 実験 約 4 mm 厚の TlBr ピクセル型検出器に対して、<sup>137</sup>Cs (662 keV) からのガンマ線を照射し、デジタイザで波形を取得し、ガンマ線スペクトル測定を行った。エネルギー分解能向上を図るために、クラスタリング法を行い、波高値補正を行った。補正前後の 2 次元プロットを Fig.1 に、補正前後の波高値分布を Fig.2 に示す。今回は、デジタル波形処理方法として、クラスタリング法によりエネルギー分解能改善を示すことができたが、今後はイメージングを視野に、他の手法も検討し、イメージングスペクトロメータの開発を行っていく。

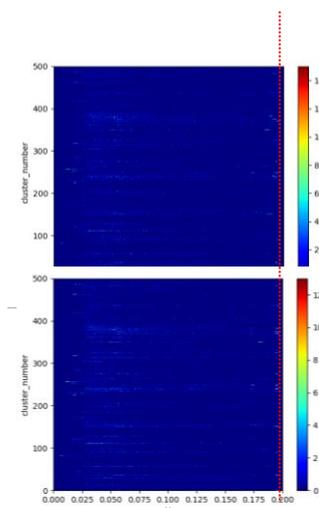


Fig. 1 2D pulse height spectra (original (top) and corrected (bottom)).

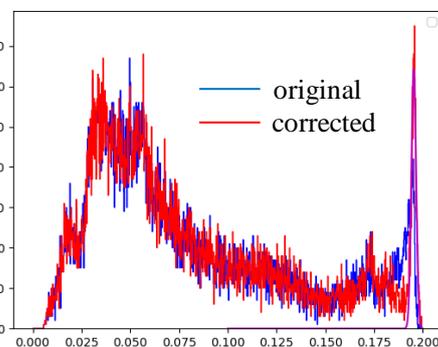


Fig. 2 pulse height spectra (original and corrected).

## TlBr 半導体検出器の多変量解析による信号処理の高度化

Study on advanced signal processing by multivariate analysis of TlBr semiconductor detectors

九州大<sup>1</sup>, 東北大<sup>2</sup> °(B)田中 清志朗<sup>1</sup>, 須貝 優介<sup>1</sup>, 長谷川 創大<sup>1</sup>, 渡辺 賢一<sup>1</sup>,  
野上 光博<sup>2</sup>, 人見 啓太郎<sup>2</sup>

Kyushu Univ.<sup>1</sup>, Tohoku Univ.<sup>2</sup>, °(B)Seishiro Tanaka<sup>1</sup>, Yusuke Sugai<sup>1</sup>, Sota Hasegawa<sup>1</sup>,  
Kenichi Watanabe<sup>1</sup>, Mitsuhiro Nogami<sup>2</sup>, Keitaro Hitomi<sup>2</sup>

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できる。しかし正孔の移動度は電子の 10 分の 1 以下と非常に低く、計数率特性を悪化させず、かつ高いエネルギー分解能を得るには、電子のみの誘起信号を用いる単極性電荷有感法と、信号波高の相互作用位置依存性を最小化するスモールピクセル効果を活用する必要がある。現在、これらを活用可能な検出器構造の 1 つとしてガード電極付き単ピクセル検出器が用いられており、高いエネルギー分解能を得ることが報告されているが、有感体積が結晶の極一部に限定されるという問題がある。ガード電極とピクセルアノード電極間に電圧差を設けることで有感体積を拡大させることができるが、エネルギー分解能が劣化することが問題であった。本研究では、信号波形の多変量解析に基づく信号補正方法について、シミュレーションを用いて考察を行ったうえで、最適な補正方法について検討を行う。

**2.実験** ガード電極付き単ピクセル検出器は、ガード電極がピクセルアノードを囲むように配置されている。有感体積を増加させるために印加電圧を( $V_{\text{anode}}, V_{\text{guard}}, V_{\text{cathode}}$ )=(0 V, -200 V, -500 V)にした際の信号補正前後の波高分布を Fig. 1 に示す。エネルギー分解能は向上しているが、期待ほどの効果は得られなかった。各相互作用位置で得られたシミュレーション波形を主成分分析し、得られた第 1 主成分の検出器中央断面における二次元ヒストグラムを Fig. 2 に示す。得られる信号波高値が、アノードと相互作用位置の間の距離に依存する一方で、主成分分析で得られる第 1 主成分は、それとは異なる依存性を示すことがわかった。結果として、信号波形のみで信号波高値補正を行うことが困難であることがわかった。今後、信号波形のみならず、他のパラメータとの組み合わせについても検討を進める予定である。

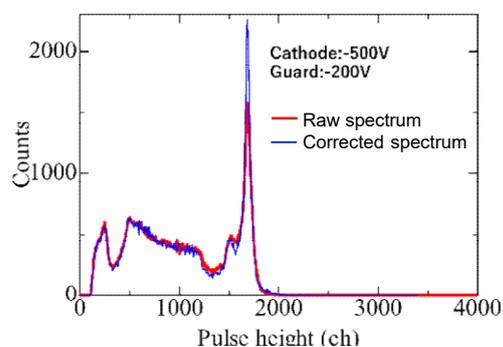


Fig1. Pulse height spectra obtained from the guarded-single-pixel TlBr detector. ( $V_{\text{anode}}, V_{\text{guard}}, V_{\text{cathode}}$ )=(0 V, 0 V, -500 V)

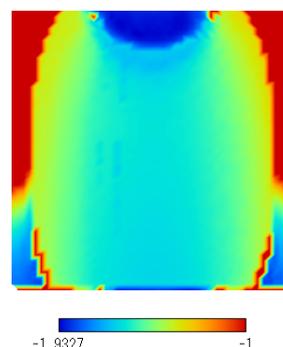


Fig2. Two-dimensional histogram of the first principal component of signal pulse shapes in the guarded-single-pixel TlBr detector

## ヨウ素ドーピングした $\text{MAPbBr}_{3-x}\text{I}_x$ ハロゲン化ペロブスカイト混合結晶の作製と評価 Growth and characterization of Iodine-doped $\text{MAPbBr}_{3-x}\text{I}_x$ mixed halide perovskite crystals

名工大院工, °(M1)近藤 稜真, (B)大島 龍人, ニラウラ・マダン  
Nagoya Inst. of Tech., °Ryoma Kondo, Ryuto Oshima, Madan Niraula  
E-mail: r.kondo.801@stn.nitech.ac.jp

[はじめに]

ハロゲン化鉛ペロブスカイト半導体は高い放射線吸収効率や電荷輸送特性、さらに大きなバンド幅を持つため、室温動作可能な次世代放射線検出器用材料として期待されている。本研究室では逆温度結晶化法(ITC法)にて  $\text{MAPbBr}_3$  や  $\text{MAPbI}_3$  単結晶作製を行っている<sup>1,2)</sup>。 $\text{MAPbBr}_3$  は大面積化や形状制御が簡単であり、一方  $\text{MAPbI}_3$  は高抵抗化が可能である。そこで本研究では大面積かつ高抵抗の結晶を得るために、 $\text{MAPbBr}_3$  結晶作製時に MAI を添加し、混合結晶の作製と評価を行った。

[実験方法]

ITC法を用いて混合結晶を作製した。 $\text{MAPbBr}_3$  作製時は  $\text{PbBr}_2$  と  $\text{MABr}$ (モル比 1 : 1)を DMF に溶かし、1M の溶液を作製した。また、混合結晶作製時は  $\text{MABr}$  と MAI の濃度和が 1M となるように MAI の濃度を 0.0M~0.3M の間で変化させた。作製した結晶は XRD、PL および透過率測定により評価を行った。また結晶両面に金電極を蒸着し、電気特性評価を行った。

[実験結果]

Fig.1 に MAI のモル濃度を 0.0M~0.3M まで変化させて作製した結晶の透過スペクトルを示す。MAI が混合されることで吸収端が長波長側にシフトしていることが分かる。また Fig.2 に混合結晶の抵抗率を示す。比較のため、 $\text{MAPbI}_3$  の抵抗率も示してある。MAI の添加により抵抗率に変化が表れ、 $\text{MAPbBr}_3$  単体結晶より高抵抗化になる事が確認できた。

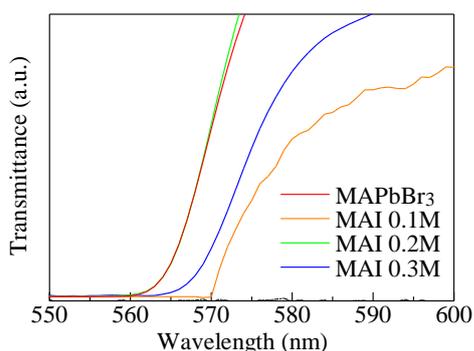


Fig.1 Transmittance spectra of  $\text{MAPbBr}_{3-x}\text{I}_x$  crystal

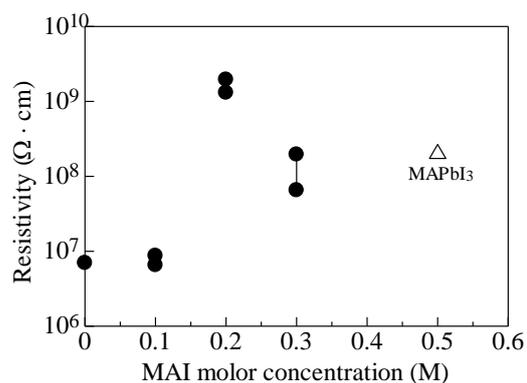


Fig.2 Resistivity variation of  $\text{MAPbBr}_{3-x}\text{I}_x$  crystal

謝辞 本研究は JSPS 科研費 の助成を受けたものです。

1)丸山 泰世 他, 2024年, 第71回応用物理学会 春季学術講演会(22p-12E-11)

2)高木 優貴 他, 2022年, 第83回応用物理学会 秋季学術講演会(21a-B201-11)

# 耐高温中性子検出器に向けた低 B 組成 B GaN 検出器の B 組成依存性評価

## Impact of B-composition on Low-B-BGaN detector for Neutron Detector with High-temperature Tolerance

静大院工<sup>1</sup>, 名大院工<sup>2</sup>, 静大電研<sup>3</sup>, 高エネ研<sup>4</sup>, 京大複合研<sup>5</sup>, 量研<sup>6</sup>, 名大 I MaSS<sup>7</sup>  
 °工藤涼兵<sup>1</sup>, 櫻井辰大<sup>1</sup>, 小久保瑛斗<sup>2</sup>, 都木克之<sup>3</sup>, 西澤潤一<sup>3</sup>, 岸下徹一<sup>4</sup>, 櫻井良憲<sup>5</sup>, 八島浩<sup>5</sup>,  
 牧野高紘<sup>6</sup>, 大島武<sup>6</sup>, 本田善央<sup>7</sup>, 天野浩<sup>7</sup>, 井上翼<sup>1</sup>, 青木徹<sup>3</sup>, 中野貴之<sup>1,3</sup>  
 Shizuoka Univ.<sup>1</sup>, Nagoya Univ.<sup>2</sup>, R.I.E.<sup>3</sup>, KEK<sup>4</sup>, KURNS.<sup>5</sup>, QST<sup>6</sup>, I MaSS Nagoya Univ.<sup>7</sup>  
 °R. Kudo<sup>1</sup>, T. Sakurai<sup>1</sup>, E. Kokubo<sup>2</sup>, K. Takagi<sup>3</sup>, J. Nishizawa<sup>3</sup>, T. Kishishita<sup>4</sup>, Y. Sakurai<sup>5</sup>,  
 H. Yashima<sup>5</sup>, T. Makino<sup>6</sup>, T. Ohshima<sup>6</sup>, Y. Honda<sup>7</sup>, H. Amano<sup>7</sup>, Y. Inoue<sup>1</sup>, T. Aoki<sup>3</sup>, T. Nakano<sup>1,3</sup>  
 E-mail: kudo.ryohei.19@shizuoka.ac.jp

**【緒言】** 核計装中性子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る。現在開発が行われている高温ガス炉 (HTGR) や高速増殖炉では炉内温度が 500 °C 以上となり、従来の核計装技術の利用が困難であることから、新たな高温動作が可能な核計装技術が期待されている。高温で動作する耐環境性の高い放射線検出器として B GaN 中性子検出器の利用が期待され開発が行われている。超高ドーズ環境となる原子炉内部にてパルス計測を実現するためには B 組成を極限まで抑えて中性子検出を行う必要がある。しかしながら、BN モル分率が 1 % 以下の低 B 組成領域での詳細な B 組成依存性は評価されていない。本研究では BN モル分率を 1 % 以下に制御した B GaN を作製し、低 B 組成領域における組成依存性の評価を行った。

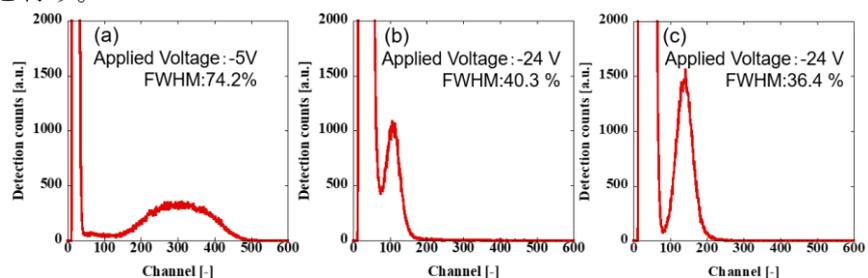
**【実験方法】** 本研究では有機金属気相エピタキシー (MOVPE) 法を用いて B GaN 層およびデバイス構造の成長を行った。B GaN 層の膜厚はすべてのデバイスで 1 μm とした。B GaN 層の構造特性評価には SEM 観察および X 線回折 (XRD) 測定を用いた。作製した B GaN 検出器を用いて放射線検出測定を行った。α 線照射測定における放射線源には <sup>241</sup>Am 密封放射線源を使用した。中性子照射は京都大学研究用原子炉 (KUR) の重水中性子照射設備にて、熱中性子束  $1 \times 10^8 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  で行った。

**【結果】** 低 B 組成領域における BN モル分率の異なる 3 つの B GaN 膜を作製し、B GaN (0002) XRD-2θ/ω 測定および (0002) X 線ロックアップカーブ (XRC) 測定の半値全幅 (FWHM) により BN モル分率および結晶性を評価した。測定結果から、BN モル分率が 0.41 % で XRC-FWHM が 358 arcsec、0.51 % で 414 arcsec、0.63 % で 335 arcsec であり、下地層である GaN の XRC-FWHM: 300 arcsec と比較して結晶性が悪化したものの、良好な結晶性を有する B GaN 層の成長が確認された。

各 B GaN 膜を用いてデバイスを作製し、α 線検出特性を評価した。Fig.1 に各 B GaN デバイスにより得られた α 線エネルギースペクトルを示す。XRC 測定から得られた結晶性の傾向とは異なり、0.41% のデバイスでスペクトルピークの FWHM が最大となった。0.41% のデバイスにおいては、耐圧が低く -7V 程度でスペクトルの検出が困難になることから、印加電圧 -5V にて測定を行っており、他のデバイスの印加電圧 (-24V) よりも低くなっている。μτ (移動度寿命積) の測定結果より、-3V 以上で全空乏化されていると考えられるが、中性領域の抵抗が高く電圧降下により空乏層にかかる電圧が十分ではなく、有感層領域が狭くなっていることなどが考えられる。

さらに各サンプルを KUR にて中性子照射を行った結果、α 線検出特性結果を引き継いだ中性子スペクトルピークを確認した。しかしながら中性子検出効率は B 組成に対して線形的な関係性を示さず、0.41% の試料においては中性子検出効率がシミュレーション結果の 1/100 程度となっており有感層領域の縮小が中性子検出にも影響を及ぼしている可能性が示唆された。詳細な内容および考察については当日報告を行う。

**【謝辞】** 本研究の一部は科研費補助金 (19H04394、23H00099)、名古屋大学未来材料・システム研究所における共同利用・共同研究、京都大学複合原子力科学研究共同利用研究の援助により実施された。



**Fig. 1** α-particles-energy-spectra of B GaN devices with BN mole fractions of (a)0.41 %, (b)0.51 %, (c)0.63 %

## 球形 Li ガラスシンチレータの壁効果の評価

### Evaluation of the wall effect in spherical Li glass scintillators

九大工<sup>1</sup> ○齋藤 優太郎<sup>1</sup>, 大島裕也<sup>1</sup>, 渡辺 賢一<sup>1</sup>

Kyushu Univ.<sup>1</sup> ○Yutaro Saito<sup>1</sup>, Yuya Oshima<sup>1</sup>, Kenichi Watanabe<sup>1</sup>

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、中性子計測技術を確立することは必要不可欠である。我々は、発光時定数が短い 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碎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  $\mu\text{m}$ の球形 Li ガラスシンチレータの作製が可能となった。

加工した直径 270  $\mu\text{m}$ の Li ガラス球の写真を図 1 に示す。この加工技術により、形状を制御することが可能となり、応答の正確な評価が可能となる。

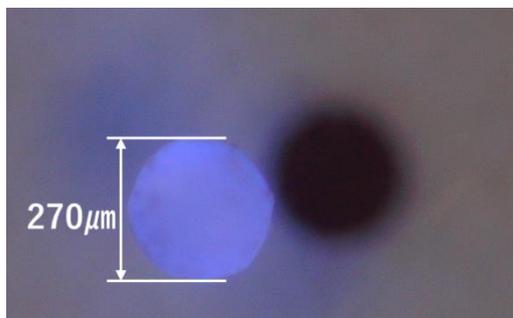


Fig. 1 Photograph of a small Li glass sphere

球形 Li ガラスシンチレータの検出器応答評価においては、 ${}^6\text{Li}(n,t)\alpha$  反応に付随して起こる壁効果を考慮に入れることが重要である。壁効果は、発生する高エネルギー荷電粒子がシンチレータ外まで飛び出し、結果として低い信号波高の信号が形成される現象であり、中性子感度を、単純に  ${}^6\text{Li}(n,t)\alpha$  反応数から予測されるものより低下させてしまう。本研究では、熱中性子照射によって得られた信号波高分布と、モンテカルロシミュレーションコード PHITS を用いた解析を基に、壁効果の寄与率を評価した。実験では、直径 220  $\mu\text{m}$ の Li ガラスシンチレータを光電子増倍管の入射窓に直接設置し、熱中性子照射を実施した。一方、シミュレーションにおいては、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 に両者を比較した結果を示す。

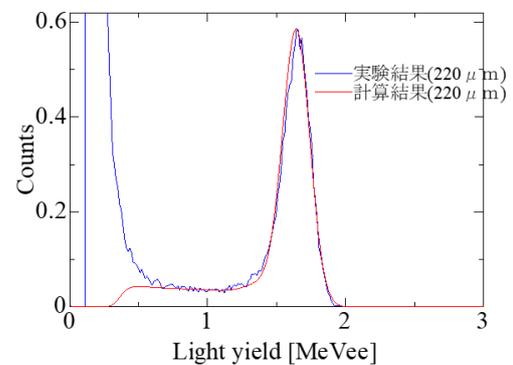


Fig. 2 Pulse height spectra obtained from a small spherical Li glass scintillator

## PADC 飛跡検出器に及ぼす 172 nm 紫外線照射効果

### Effects of 172 nm UV lights on PADC track detector

神大院海事<sup>1</sup>, <sup>○</sup>(M1)木本 敦<sup>1</sup>, 金崎 真聡<sup>1</sup>, 山内 知也<sup>1</sup>

Kobe Univ.<sup>1</sup>, (M1) Atsushi Kimoto<sup>1</sup>, Masato Kanasaki<sup>1</sup>, Tomoya Yamauchi<sup>1</sup>

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. 本研究では PADC 中に形成される放射線損傷の特徴を理解するため, 一光子あたり最大一か所の分子鎖切断が生じる紫外線照射効果について検討を行う. 波長 172 nm の真空紫外光 (以降 VUV) 照射による官能基の密度低下挙動を赤外線分光 FT-IR によって分析した. また VUV がもたらす副次的反応として, 酸素分子の解離励起によってオゾンが生成する. 本研究では, 大気中, また窒素雰囲気中での VUV 照射を行い, PADC の表面近傍で生じる光化学反応について FT-IR を用いた定量的な分析を行った.

#### 【結果と考察】

本研究では, 公称厚さ 100  $\mu\text{m}$  のフクビ化学工業社製 BARYOTRAK (PADC) を化学エッチングによって厚さ 3  $\mu\text{m}$  以下とし, その薄膜に対して, ウシオ電機社製紫外線照射装置 (UER20H-172C) により 172 nm 波長の VUV 照射を行った. 分析には日本分光社製の FT/IR-6100S を使用し, 官能基ごとに VUV 照射前後の赤外線吸収スペクトルの吸光度を測定した. Fig.1 に大気中および窒素雰囲気中の官能基別相対吸光度を示す. (a) Ether(エーテル基)は, 両環境下で同様のフルエンス依存性を示した. カーボネートエステルを構成する(b)C-O-C 結合は大気中照射においてより顕著に減少した. 一方で, (c)C=O(カルボニル基) は, 大気中照射ではほとんど減少しなかった. 窒素雰囲気では, 重イオン照射と同様にカーボネートエステルがまとまって損傷を受けるが, 大気中では C-O-C のみが損傷を強く受けている. 講演では, 損傷後に形成される OH 基の評価, また VUV 照射によるドライエッチング効果を検証するため, 薄膜厚さの測定結果についても報告をする.

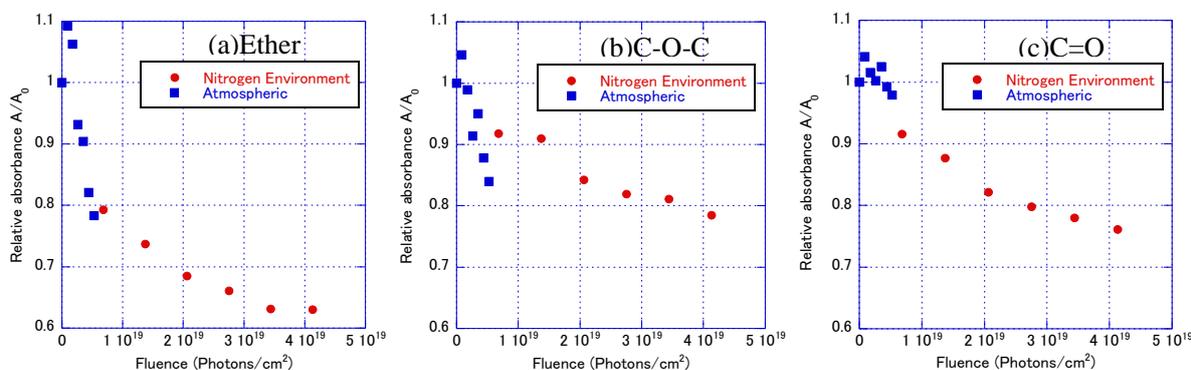


Fig.1 Changes in the relative absorbance of each functional group with photon fluence

## 高線量率場における Nd 添加 Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 近赤外発光シンチレータ の放射線応答と吸収線量の評価

Evaluation of the radiation response and absorbed dose of Nd-doped Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
near-infrared emitting scintillator in high dose rate region

東北大 NICHe<sup>1</sup>, 日本学術振興会 PD<sup>2</sup>、東北大金研<sup>3</sup> 阪大レーザー研<sup>4</sup>,  
(株) C&A<sup>5</sup>, 京大複合研<sup>6</sup>

○(P)石澤 倫<sup>1,2</sup>, 黒澤 俊介<sup>1,3,4</sup>, 山路 晃広<sup>1,3</sup>, 吉川 彰<sup>1,3,4,5</sup>, 高田 卓志<sup>6</sup>, 田中 浩基<sup>6</sup>

NICHe, Tohoku Univ.<sup>1</sup>, JSPS Research Fellow (PD)<sup>2</sup>, IMR, Tohoku Univ.<sup>3</sup>, Institute for Laser Eng.,  
Osaka Univ.<sup>4</sup>, C&A Corporation<sup>5</sup>,  
Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto Univ.<sup>6</sup>

○(PC) Satoshi Ishizawa<sup>1,2</sup>, Shunsuke Kurosawa<sup>1,3,4</sup>, Akihiro Yamaji<sup>1,3</sup>, Akira Yoshikawa<sup>1,3,4,5</sup>,  
Takushi Takata<sup>6</sup>, Hiroki Tanaka<sup>6</sup>

E-mail: [satoshi.ishizawa.a2@tohoku.ac.jp](mailto:satoshi.ishizawa.a2@tohoku.ac.jp)

当研究グループは廃炉等の高線量場での放射線量測定用に、シンチレータ、光ファイバーならびに光検出器からなる遠隔線量計の開発を行っている[1]。シンチレータには $\gamma$ 線を検出するために高有効原子番号、かつ光ファイバーで生じるチェレンコフ光などのバックグラウンドを考慮して赤-近赤外発光の特性が求められている。当研究グループではこれまでに2 mm<sup>3</sup>程度のNd1%添加Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $\rho$ : 9.4 g/cm<sup>3</sup>,  $Z_{\text{eff}}$ : 69, 融点: 2,490°C)結晶をCore Heating法により開発し、~660 Gy/h (<sup>60</sup>Co線源)高線量率場での基礎発光特性を報告した[2]。しかし、Nd1%添加Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を遠隔線量計用シンチレータとして実用化するには、比較的低線量下での応答特性の評価も重要な指標となる。また<sup>60</sup>Coの校正場以外での利用を考えると、本実証試験を踏まえ各放射性核種に対する線量率推定法を開発する必要がある。そこで本研究では660 Gy/h未満におけるNd1%添加Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の応答特性を調べる実証試験を行うとともに、推定法開発の前段としてシミュレーションによる実証試験のNd1%添加Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>吸収線量を模擬する応答関数の開発に取り組んだ。

京都大学複合原子力科学研究所(KURNS)の~60 TBqの<sup>60</sup>Co線源を用いて6, 19, 28, 52, 98, 195, 366, 660 Gy/hの線量率領域に2 mm<sup>3</sup>程度のNd1%添加Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>結晶を設置し、線量に応じた発光を20 mの光ファイバー(S.600/660, Fujikura)で伝送させ、CCDアレイ高感度光ファイバースペクトロメーター(QE Pro-FL, Ocean Insight)で発光スペクトル等を取得した。上記実験をモデル化したシミュレーション体系の構築や吸収線量の計算にはParticle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) [3]を使用した。

Figure 1に6, 19, 28, 52, 98, 195, 366, 660 Gy/hの線量率領域において取得したNd1%添加Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の発光スペクトルを示す。最大発光強度の波長は~897 nmであり、その他870-940 nmにNd<sup>3+</sup>由来の特徴的な発光を複数観測し、線量率が低くなるにつれ発光強度は減少した。また、実験と同条件の~60 TBqの<sup>60</sup>Co線源をPHITSのシミュレーション体系に配置し、各線量率におけるNd1%添加Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の吸収線量の算出を試みた。なお、水に対する線量率の位置分布については公表されていたが[4]、線源付近の詳細なモデル化は困難であった。そこで本研究では手始めに、<sup>60</sup>Coの崩壊に伴う $\beta$ 線や光子の水へのエネルギー付与を明らかにしつつ、シミュレーション体系における水に対する線量分布を計算した。本発表ではKURNSにおける実験ならびにPHITSを用いた吸収線量評価に関する研究開発の詳細を報告する。

References [1] S. Ishizawa, S. Kurosawa, A. Yoshikawa et al., *Optical Materials*. **142**, (2023) 113941.

[2] 石澤、黒澤、吉川ら、第85回秋季応用物理学会 2024年9月19日。

[3] T. Sato et al., *J. Nucl. Sci. Technol.* **61**, (2024) 127.

[4] N. Sato et al., Available from: [www.rii.kyoto-u.ac.jp/gamma/doseratesheet.pdf](http://www.rii.kyoto-u.ac.jp/gamma/doseratesheet.pdf).

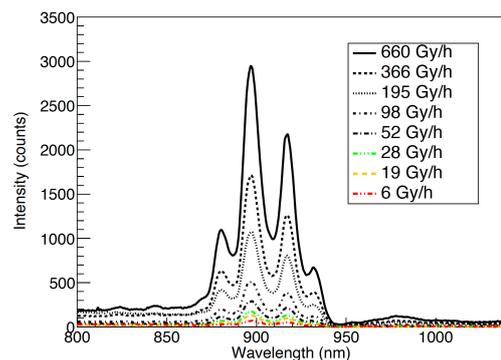


Fig. 1. Radioluminescence spectra of Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> crystal doped with 1%Nd under the dose rate of 6 to 660 Gy/h (<sup>60</sup>Co)

## 焦電性結晶による発生 X 線の結晶表面-ターゲット間距離依存性の考察

Consideration for the Dependence of the X-ray Energy and Intensity Produced by a

Pyroelectric Crystal on the Gap Length between the Crystal Surface and the Target

岡山大院保<sup>1</sup>, 龍谷大先端<sup>2</sup> ◦花元 克巳<sup>1</sup>, 田辺 悦章<sup>1</sup>, 海川 龍治<sup>2</sup>, 片岡 隆浩<sup>1</sup>, 山岡 聖典<sup>1</sup>

Okayama Univ.<sup>1</sup>, Ryukoku Univ.<sup>2</sup>, ◦Katsumi Hanamoto<sup>1</sup>, Yoshinori Tanabe<sup>1</sup>, Ryuji Kaigawa<sup>2</sup>,

Takahiro Kataoka<sup>1</sup>, Kiyonori Yamaoka<sup>1</sup>

E-mail: hana@md.okayama-u.ac.jp

【はじめに】真空中で金属ターゲットに対向させた焦電性結晶を加熱・冷却すると結晶表面に高電圧が発生し、電子が加速されてX線が発生する。この現象は真空放電の一種であり、X線の発生は、結晶表面とターゲット間（ギャップ）における絶縁破壊の前駆電流によるものと考えられる。絶縁破壊電圧はギャップ長に依存することから、発生X線のエネルギーと強度はギャップ長に依存することがわかっている[1]。今回、発生X線のギャップ長依存性について考察した。

【実験と結果】z-cutのLiTaO<sub>3</sub>単結晶（直径30mm，厚さ5mm）とTaターゲット（厚さ10μm）を平行に配置し（ギャップ長：2-20mm），気圧約10<sup>-3</sup>Paの真空槽中で結晶を加熱した。このときに発生したX線のエネルギースペクトルから最大電圧とX線カウントを得た。最大電圧はギャップ長の増加とともに増加し，ギャップ長が14mmを超えると減少した。X線カウントはギャップ長が10mm以上でギャップ長の増加とともに急増し，ギャップ長が16mmを超えると減少した[1]。

【考察】焦電性結晶表面からターゲットに流れた電子電流を積分した総電荷に対する最大電圧をFig. 1に，X線カウントをFig. 2に示す。図では短ギャップ群（2.6-8.0mm）のデータを白丸で，長ギャップ群（10.0-16.0mm）のデータを黒四角で示している。短ギャップ群では総電荷の増加に対して，最大電圧は減少傾向にあり，X線カウントはほとんど変化がないことがわかる。一方，長ギャップ群では総電荷に対する関連性が見られない。このことから，X線が発生するとき起こっている現象は短ギャップ群と長ギャップ群では異なっていることが示唆された。

【謝辞】本研究の一部はJSPS 科研費JP22659221, JP24591764, JP22K07232の助成を受けた。

[1] 花元克巳, 片岡隆浩, 山岡聖典, 第66回応用物理学会春季学術講演会, 9p-M103-3, 2019.

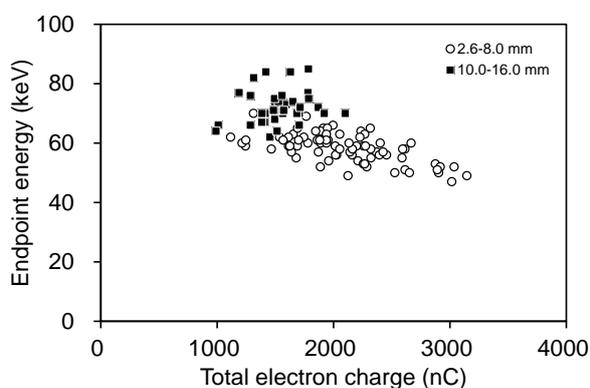


Fig. 1 Endpoint energy vs. total electron charge.

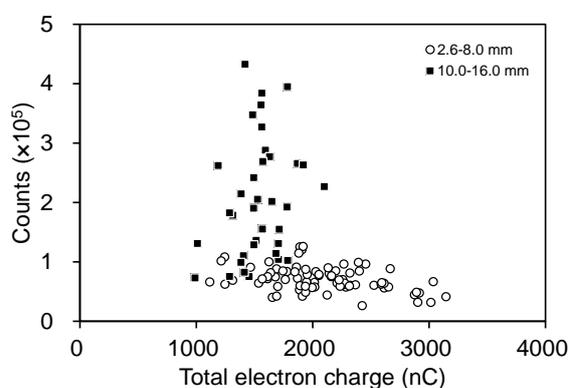


Fig. 2 X-ray counts vs. total electron charge.

## 焦電結晶を用いた小型中性子源の中性子発生プロセス

### Neutron generation process at small neutron source using pyroelectric crystal

阪大院基礎工<sup>1</sup>, 静大電研<sup>2</sup> ○大上楓真<sup>1</sup>, 阿保智<sup>1</sup>, 増澤智明<sup>2</sup>, 三村秀典<sup>2</sup>, 若家富士男<sup>1</sup>

Osaka Univ.<sup>1</sup>, Shizuoka Univ.<sup>2</sup>, ○F. Ooue<sup>1</sup>, S. Abo<sup>1</sup>, T. Masuzawa<sup>2</sup>, H. Mimura<sup>2</sup>, F. Wakaya<sup>1</sup>

E-mail: u959364c@ecs.osaka-u.ac.jp

我々のグループで研究している中性子源は低圧の  $D_2$  ガス中に、焦電結晶を取り付けた銅板と重水素化ポリマーを塗布した銅板を対向させる非常に簡単な構造である [1, 2]。結晶加熱により発生した強電場により、イオン化した重水素が重水素化ポリマーが塗布された銅板に向かって加速され、D-D 反応による中性子の発生を期待した。真空チャンバー内にこの構造を作製し、レーザで焦電結晶を加熱したところ中性子は検出されたが、その検出量は少なかった。この線源は中性子発生に関与するパラメータが多くすべての条件での実験が困難であること、内部状態の計測が不可能であることから、実験のみで検出量の増大はできなかった。そこで、線源内部状態の可視化により効率的な最適条件の探索を可能とするため、シミュレータの開発を行うことにした。前回、加速イオンとして  $D^+$  を想定し、その発生確率を実験結果とのフィッティングで決定したシミュレータについて報告した。しかし、その後  $D^+$  発生確率を文献調査 [3] したところ、フィッティングで求めた値よりも著しく小さいことが判明した。そこで、本研究では  $D^+$  を用いない新しい中性子発生プロセスの検討と新たな中性子発生プロセスを取り入れたシミュレータの開発を行った。

Fig.1 に新たに検討した中性子発生プロセスを示す。(1) 焦電結晶をレーザで加熱することで分極が減少。(2) 結晶表面の補償電荷 ( $O^+$ ) が過剰になり強電場が発生。(3) 過剰な補償電荷の一部が強電界により脱離。(4)  $O^+$  と  $D_2$  の散乱により  $D_2^+$  が発生。(5)  $D_2^+$  も電界により加速。(6)  $D_2^+$  が高エネルギーで重水素化ポリマーと衝突し、D-D 反応で中性子が発生。 前回の報告で想定していた  $D^+$  の発生は  $D_2$  の解離、D のイオン化の二過程が必要であった。これに対して  $D_2^+$  の発生は  $O^+$  と  $D_2$  の散乱一過程のみで、発生確率も中性子発生に十分な値である [4]。次に新たなプロセスを組み込んだシミュレータの開発を行った。この線源内の粒子数は非常に多くすべての粒子の運動を計算することは難しいため、(1)-(3) のプロセスは実験結果からモデル化、(4), (5) のプロセスはモンテカルロ法、(6) は核反応断面積を用いた計算法、これらを組み合わせて用いた。開発したシミュレータを用いて、 $D_2$  ガス圧力と結晶-ターゲット間距離をパラメータに中性子発生数を計算したところ、実験結果と同様の傾向を示していた。

**[謝辞]** 本研究の一部は、生体医歯工学共同拠点の支援を受けたものです。

[1] 大上他, 第85回 秋季応物, 20a-D62-10 (2024) [2] 大上他, 第34回 日本MRS 年次大会, E3-O17-004 (2024) [3] R. K. Janev, et al., "Collision in Low-Temperature Hydrogen Plasmas", Juel-4105, Berichte des Forschungszentrums Jülich, Germany (2003) [4] A. V. Phelps, J. Phys. Chem. Ref. Dat. 19 (1990) pp. 653-675.

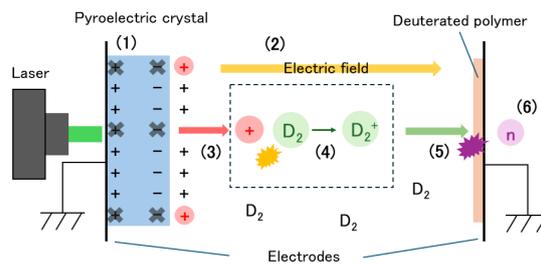


Fig. 1: Schematic diagram of neutron source using pyroelectric crystal and neutron generation process.

## 小型核融合装置から生じる中性子が水晶振動子振動数に及ぼす影響

### Effects of Neutrons from Compact Fusion Devices on Quartz Crystal Resonator Frequency

HSU<sup>1</sup>, ミオヤエナジー (株)<sup>2</sup>, (株)エイチアールオー<sup>3</sup>

○大川 博司<sup>1,2</sup>, 高橋 武<sup>1,3</sup>, 遠藤 慧一<sup>1</sup>, 原田 歩武<sup>1</sup>, 椎名 柔<sup>1</sup>, 西 恵未<sup>1</sup>

HSU<sup>1</sup>, MIOYAENERGY Inc.<sup>2</sup>, HRO Inc.<sup>3</sup>

○Hiroshi Okawa<sup>1,2</sup>, Takeru Takahashi<sup>1,3</sup>, Keiichi Endo<sup>1</sup>, Amu Harada<sup>1</sup>, Yawara Shiina<sup>1</sup>, Emi Nishi<sup>1</sup>

E-mail: [hiroshi-okawa@happy-science.university](mailto:hiroshi-okawa@happy-science.university)

**概要:** 慣性静電閉じ込め式核融合 (IECF) は、装置本体がテーブルに載るサイズであり、主に小型中性子源としての実用化が期待されている。我々は、線形 IECF 装置性能を研究する一方、この装置を用いた中性子応用研究として、水晶振動子に熱中性子束を  $10^5 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  程度照射した後の、振動数変化について調査した。中性子照射後の水晶振動子の振動数は、数 Hz 程度変化した。

#### 実験方法と結果

線形 IECF 装置全体の写真を Fig.1 に示す。中央が核融合炉としての真空チャンバーであり、紫色の重水素プラズマの発光の様子が見られる。真空チャンバーの構造を Fig.2 に示す。線形 IECF チャンバーは、円柱形であり、中央に円筒形の陰極を配置し、両端には円筒形の陽極を配置している。その真空チャンバー内に重水素ガスを注入し、およそ 1Pa に調整した状態で、陰極に外部よりマイナス数十キロボルトの電圧を印可すると、円筒形の中心軸線に沿ってプラズマが生じ、その際に数十ミリアンペアの電流が流れる。この時、プラズマを構成している重水素イオンは、陰極中心軸上の強い電界ポテンシャルに引き寄せられて往復運動を開始するが、そのエネルギーが核融合反応に至っているため、中性粒子等との衝突時に核融合し、2分の1の確率で中性子が発生する。

この装置から放出する中性子束を約  $5 \times 10^2 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  に調整し、一定時間水晶振動子に照射した。実験に用いた水晶振動子は、ピエゾパーツ株式会社製の QCM (水晶振動子マイクロバランス法) 素子であり 9MHz で発振する。実験では中性子密度の高い装置陽極背面※に水晶振動子を設置し、装置

と振動子の間に厚さ 40 mm のポリエチレンブロックを介すことで、重水素核融合から生じる 2.45MeV の中性子を熱中性子へと減速させて照射した。照射前後の振動数は、中性子照射量との関係は見出せないものの、いずれも 7Hz 未満の変化をしている。(Fig.3)

※参考文献: 長谷川純ら, “直線型慣性静電核融合中性子源における中性子照射場のモンテカルロ計算”, 第 41 回プラズマ・核融合学会年会, 2024 年 11 月。

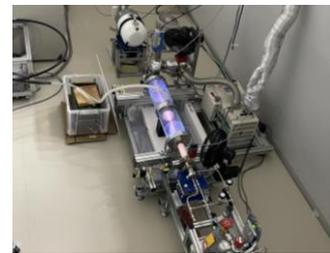


Fig.1. linear IECF equipment

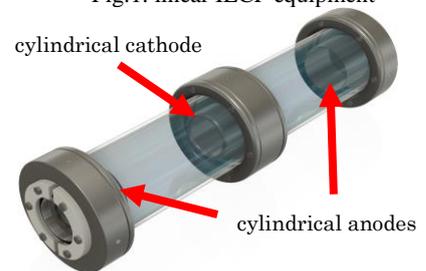


Fig.2. Linear IECF vacuum chamber

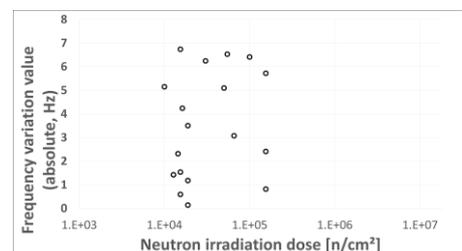


Fig.3. Neutron fluence and frequency variation

## 酸素 17 生成断面積の測定 ～ネオン比例計数管の中性子応答～

### Cross-section Measurements for O-17 Production – Response of Neon Proportional Counter for Neutron -

原子力機構<sup>1</sup>, 高エネ研<sup>2</sup>, 量研機構<sup>3</sup> ○谷村 嘉彦<sup>1</sup>, 西野 翔<sup>1</sup>, 古田 琢哉<sup>1</sup>, 岸本 祐二<sup>2</sup>,  
萩原 雅之<sup>3</sup>, 佐藤 大樹<sup>1</sup>, 熊谷 友多<sup>1</sup>, 松田 洋樹<sup>3</sup>, 平田 悠歩<sup>1</sup>, 津田 修一<sup>1</sup>

JAEA<sup>1</sup>, KEK<sup>2</sup>, QST<sup>3</sup>, Yoshihiko Tanimura<sup>1</sup>, Sho Nishino<sup>1</sup>, Takuya Furuta<sup>1</sup>, Yuji Kishimoto<sup>2</sup>,  
Masayuki Hagiwara<sup>3</sup>, Daiki Sato<sup>1</sup>, Yuta Kumagai<sup>1</sup>, Hiroki Matsuda<sup>3</sup>, Yuho Hirata<sup>1</sup>, Syuichi Tasuda<sup>1</sup>

E-mail: tanimura.yoshihiko@jaea.go.jp

安定同位体である  $^{17}\text{O}$  は標識物質 (トレーサー) としての活用が期待されているが、天然存在比が 0.037% と希少で濃縮が困難なため、 $^{20}\text{Ne}(n, \alpha)^{17}\text{O}$  反応を用いた高純度生成手法を開発している。 $^{20}\text{Ne}(n, \alpha)^{17}\text{O}$  の反応断面積については、数少ない実験から評価された核データしか存在せず、精度良いデータが必要となった。そこで、ネオンガスを充てんした比例計数管と単色中性子を用いた断面積測定を試みた。

実験は、放射線分野で唯一の JIS 登録試験所で放射線測定器の高精度の試験・校正が可能な原子力機構の放射線標準施設棟 (FRS) の 5.0MeV 単色中性子標準場で行った。断面積測定では測定体系中のネオン原子の個数が大きく影響する。そこで、中性子フルエンスの絶対測定用として開発された長軸型反跳陽子比例計数管<sup>1)</sup>を断面積測定に用いた。当該計数管は二重管構造で有感領域を精確に決められる特徴を有しており、計数ガスを水素からネオンに置き換えることにより  $^{20}\text{Ne}(n, \alpha)^{17}\text{O}$  の断面積測定を可能とした。

実験の様子を Fig.1 に示す。加速された重陽子を重水素ガスタargetに入射させて、 $^2\text{H}(d, n)^3\text{He}$  反応で発生した 5.0MeV 単色中性子を試験に用いた。比例計数管で測定された波高分布と PHITS コードで計算した波高分布を Fig.2 に示す。計算では、評価済核データライブラリ JENDL-5 を使用した。実測と計算の両方で、4.4MeV 及び 3.5MeV 付近に基底状態及び励起状態の  $^{17}\text{O}$  が生成される  $^{20}\text{Ne}(n, \alpha_0)^{17}\text{O}$  反応及び  $^{20}\text{Ne}(n, \alpha_1)^{17}\text{O}$  反応のピークが観測された。PHITS による計算 (図の青色点線) では  $^{20}\text{Ne}(n, \alpha_1)^{17}\text{O}$  反応が過大となることが分かった。この原因として、PHITS の計算では  $^{20}\text{Ne}(n, \alpha)^{17}\text{O}$  の全断面積のデータのみを用いており、基底状態、励起状態それぞれの断面積データを使用していないことがわかった。これらの反応を分離計算して、実測に合うようにフィッティングした結果を Fig.2 中に赤線で示した。実測結果をよく再現できており、 $^{20}\text{Ne}(n, \alpha)^{17}\text{O}$  の反応断面積の評価に利用可能であることが分かった。

謝辞：本研究は、科研費・基盤(B) (JP23K26592) の助成を受けて実施したものである。

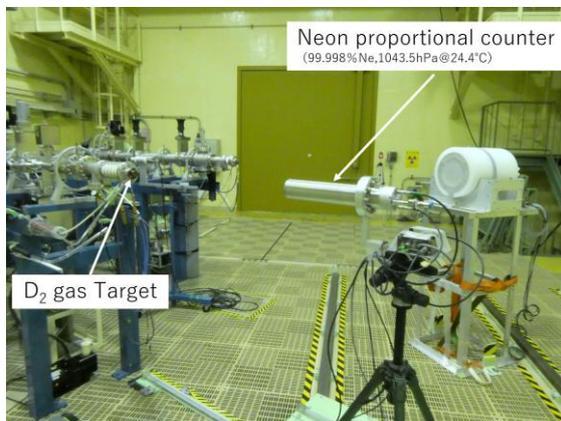


Fig.1 Experimental setup

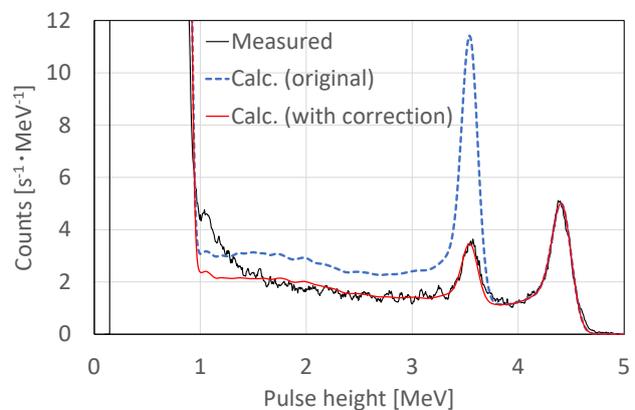


Fig.2 Measured and calculated pulse height spectra

参考文献： 1) JAEA-Research 2006-065

# 速中性子イメージャーによる 高エネルギー加速器施設での中性子飛来方向特定の実証実験

## Measurement of neutron directions using the fast-neutron imager at high-energy accelerator facilities

防衛大<sup>1</sup>, KEK 素核研<sup>2</sup>, 阪大理<sup>3</sup> °松村 徹<sup>1</sup>, 塩見 公志<sup>2</sup>, 南條 創<sup>3</sup>,  
野村 正<sup>2</sup>, GeiYoub Lim<sup>2</sup>, 渡辺 丈晃<sup>2</sup>

NDA<sup>1</sup>, KEK IPNS<sup>2</sup>, Osaka Univ.<sup>3</sup> °Toru Matsumura<sup>1</sup>, Koji Shiomi<sup>2</sup>, Hajime Nanjo<sup>3</sup>,  
Tadashi Nomura<sup>2</sup>, GeiYoub Lim<sup>2</sup>, Hiroaki Watanabe<sup>2</sup>

E-mail: toru@nda.ac.jp

高エネルギー加速器を用いた素粒子原子核実験において、バックグラウンド中性子が実験に影響を与えることがある。例えば、J-PARCにおけるKOTO実験では、30 GeVの1次陽子ビームラインで発生した中性子が、中性K中間子稀崩壊の探索感度に影響を与える。よって、遮蔽体を貫けて飛来する中性子の方向を特定できる装置は、バックグラウンド中性子に対する遮蔽を強化する上で有用である。今回我々は、J-PARCハドロン実験施設のKL実験エリア遮蔽体上部において、速中性子イメージャーを用いた中性子飛来方向の測定を行った (Fig. 1)。中性子ビーム (主に高エネルギーの $\gamma$ 線と中性子) がビーム軸上 $\gamma$ 線検出器によって散乱されるため、遮蔽体上部には下から上に向かって熱エネルギーから数百 MeV までの幅広いエネルギー分布を持つ中性子が飛来する。

測定に用いた速中性子イメージャーは、大きさが20 mm四方で厚さが3 mmのリチウムガラスシンチレータ17枚と厚さ10 cmのポリエチレン球殻から構成されており、10 MeV以下の中性子に対して飛来方向をリアルタイムに再構成することが可能である。

Fig. 2は、ビーム強度81 kW、高さ1 mかつ実験エリア上流端から14.7 mの位置で10分間測定して得られた中性子強度分布である。予想通り、遮蔽体下部から上向きに中性子が飛来している様子が観測された。この結果は、速中性子イメージャーが加速器施設における中性子バックグラウンド源の位置特定に利用できることを示唆している。

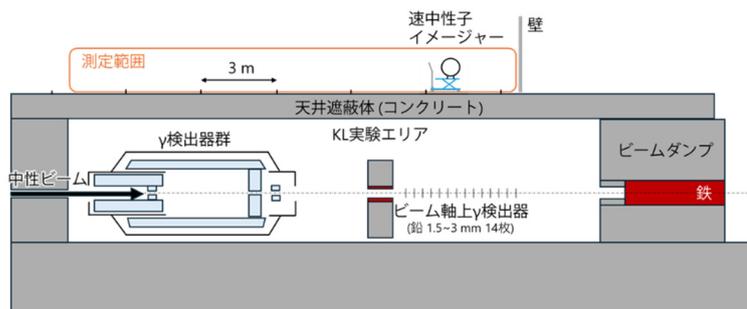


Fig. 1 KL area and location of the neutron imager (side view)

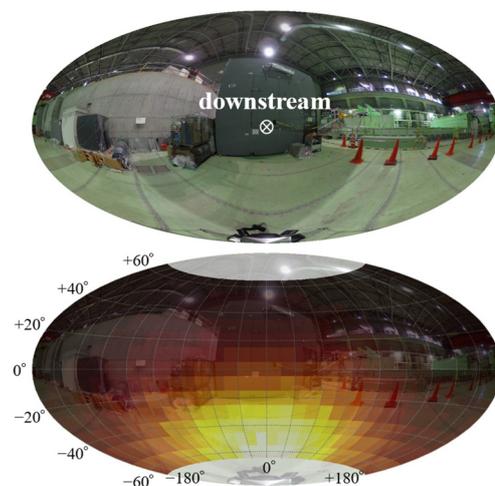


Fig. 2 (top) All around view from the imager  
(bottom) reconstructed neutron intensity

# 符号化開口を用いたガンマ線カメラの距離推定手法の開発

## Development of a Distance Estimation Method for Gamma-Ray Cameras Using Coded Aperture

早大理工<sup>1</sup>, <sup>○</sup>(M1)高橋 慎太郎<sup>1</sup>, 神田 健志<sup>1</sup>, 佐藤 将吾<sup>1</sup>, 田中 香津生<sup>1</sup>, 片岡 淳<sup>1</sup>  
Waseda Univ.<sup>1</sup>, <sup>○</sup>Shintaro Takahashi<sup>1</sup>, Takeshi Kanda<sup>1</sup>, Shogo Sato<sup>1</sup>, Kazuo Tanaka<sup>1</sup>, Jun Kataoka<sup>1</sup>  
E-mail: shintaro\_t@akane.waseda.jp

放射線イメージングにおける符号化開口技術は、高エネルギー天文学における遠方天体の位置決定のために開発された手法である。近年、放射線イメージング技術は医療診断や産業検査など幅広い分野での活用が進んでいるが、近距離線源への符号化開口イメージングの応用には課題が残されている。具体的には、投影過程の非線形性により従来の遠方線源向け再構成手法の適用が困難であり、再構成過程における偽像の発生などの技術的課題が存在する。特にガンマ線イメージングにおける距離推定は、可視光での手法と比較して発展途上であり、単眼での距離推定手法は確立されていない。

これらの課題を解決するため、本研究では検出器に投影される影の Structural Similarity Index Measure (SSIM) を用いた単眼での距離推定手法を提案した。この手法は、正しい線源距離における再構成画像から計算される影が、測定データと最も高い類似度を示すという特性を利用している。さらに、単眼をステレオ構成とし両眼でのマッチングを行うことで、問題となる偽像の抑制に成功した。

提案手法の有効性を検証するため、タングステン製マスク (MURA Rank7, 厚み 5.0mm) を符号化開口とし、GAGG シンチレータアレイと MPPC アレイによる検出部を組み合わせたガンマ線カメラを開発した。評価実験では、まず  $^{133}\text{Ba}$  (81keV) 点線源を用いた単眼測定により、影の構造類似度を用いた距離推定手法の基本性能を実証した。さらに、 $^{22}\text{Na}$  (511keV) 点線源を用いたステレオ測定では、マスク部の透過率が 30%程度となる不完全遮蔽条件下においても安定した三次元位置推定を実現し、近距離ガンマ線源の位置推定における本手法の有効性を確認した。

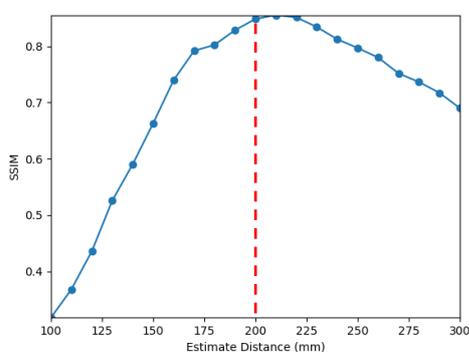


Fig 1 Results of Monocular Distance Estimation

Using SSIM

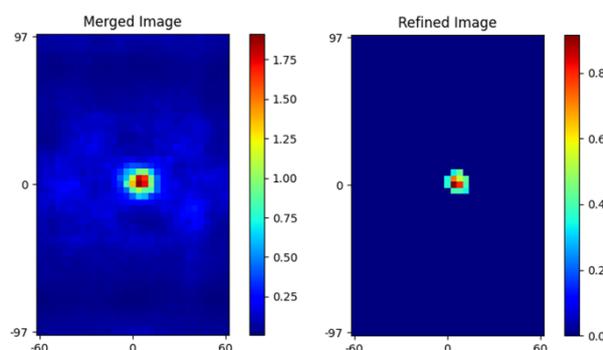


Fig 2 Reduction of Artifacts

in Stereo Imaging

# 複数のキューブ形状遮蔽体とシンチレータで構成される 全方位ガンマ線イメージャーのシミュレーションによる特性評価

## Simulation Study on the Performance of a 4 pi Gamma-Ray Imager

### with Multiple Cube-Shaped Shields and Scintillators

JAEA<sup>1</sup>, 東北大工<sup>2</sup> °北山 佳治<sup>1</sup>, 野上 光博<sup>2</sup>, 人見 啓太郎<sup>2</sup>

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

E-mail: kitayama.yoshiharu@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、大きさ  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  の GAGG シンチレータ 8 個、鉛遮蔽体 18 個、空乏 1 個を  $3 \times 3 \times 3$  構造で配置したイメージャーの特性を評価し [1, 2]、 $^{137}\text{Cs}$  線源に対して角度分解能  $5^\circ$  (結像強度ラインプロファイルの半値幅) でイメージングできることを実験で確認した。

しかし、ガンマ線の入射方向によってはイメージング精度が低下することも確認した。図 1 (a) に、8 検出器 C3G を用いて、3 m 先に配置された 10 MBq の  $^{137}\text{Cs}$  を 10 分間測定した条件のシミュレーション結果を示す。白い矢印で示した真の線源位置 (方位角  $120^\circ$ 、仰角  $30^\circ$ ) に結像が見られないことが分かる。全視野のうち、約 14% の方向でこのような低精度方向が確認された。

これまでの研究 [3]から検出器を増やすことで視野全域のイメージング精度が向上することが示唆されている。そこで、今後 24 個の検出器と 40 個の鉛遮蔽体を  $4 \times 4 \times 4$  構造に配置した新しい C3G を製作する予定である。本研究は、製作予定の 24 検出器 C3G の特性をシミュレーションによって事前評価したものである。8 検出器 C3G ではイメージング精度が低かった方向においても図 1 (b) に示すように高い精度で結像することが確認された。本発表では、空間分解能をはじめ多核種イメージング、再構成アルゴリズムや装置設計に関する詳細を報告する。今後は 24 検出器 C3G を基本モジュールとして装置の大規模化や複数測定点によるデータ統合などを検討する。

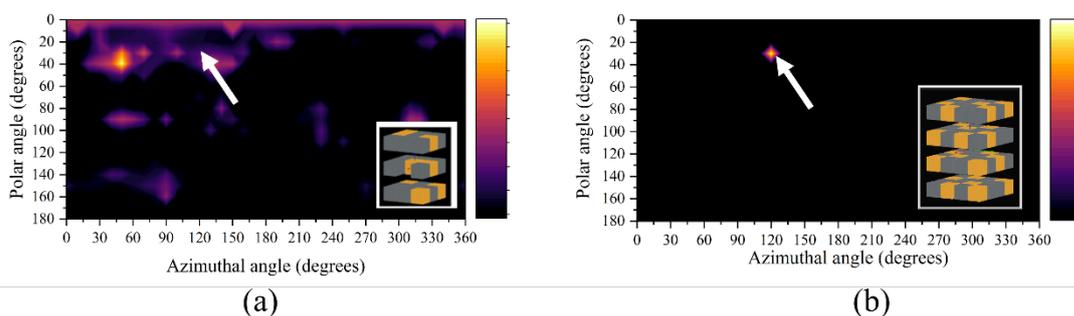


図 1.  $^{137}\text{Cs}$  のイメージングシミュレーション結果。検出器数を増やすことでイメージング精度が大幅に向上したことが分かる。(a) 8 検出器 C3G によるイメージング結果 (b) 24 検出器 C3G によるイメージング結果。

本研究は JSPS 科研費 JP23759195 の助成を受けたものです。

[1] Y. Kitayama, M. Nogami, and K. Hitomi, *Jpn. J. Appl. Phys.* (2024), 63, 032005

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

[3] Y. Kitayama, M. Nogami, and K. Hitomi, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 (2024).

## コンプトン散乱・磁気コンプトン散乱を用いた鉄筋の 非破壊検査手法の可能性

(Possibility of non-destructive testing for a reinforcing steel bar by Compton scattering and magnetic Compton scattering)

群大院理工<sup>1</sup>、QST 関西研<sup>2</sup>、JASRI<sup>3</sup>、金属技研<sup>4</sup>

藤山 諒<sup>1</sup>、神門正城<sup>2</sup>、辻成希<sup>3</sup>、星和志<sup>1</sup>、鈴木 宏輔<sup>1</sup>、竹内浩<sup>4</sup>、櫻井 浩<sup>1</sup>

Gunma Univ.<sup>1</sup>, KPSI-QST<sup>2</sup>, JASRI<sup>3</sup>, MTC<sup>4</sup>

Ryo Fujiyama<sup>1</sup>, Masaki Kando<sup>2</sup>, Naruki Tsuji<sup>3</sup>, Kazushi Hoshi<sup>1</sup>, Kosuke Suzuki<sup>1</sup>,

Hiroshi Takeuchi<sup>4</sup>, Hiroshi Sakurai<sup>1</sup>

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

コンクリート内部の鉄筋腐食の評価方法として分極抵抗法[1]がある。しかしながらこの手法ではリード線を鉄筋に1部通すためドリルなどによるコンクリート破壊をとまなう。一方、近年レーザー逆コンプトン散乱を用いた高エネルギー準単色 X 線光源の研究が報告されており[2]、高エネルギー X 線が新しい非破壊プローブとなりうる。そこで、本研究では、コンプトン散乱 X 線の強度・S パラメーター・円偏光 X 線を用いた磁気コンプトン散乱効果を用いたコンクリート・鉄筋・鉄筋酸化物の検出・弁別する手法を検討すべく、鉄筋コンクリートの模擬試料として、塩化ビニールパイプにモルタル補修材である速乾内外用スーパーパテを充填し、中心に鉄くぎを埋め込んだ (Fig.1) 試料の測定結果を報告する。

測定は SPring-8-BL08W で行った。試料には 0.5 mm w × 1.2 mm h のスリットで成形された 182.6 keV の楕円偏光 X 線を入射し、散乱角 115° で散乱したコンプトン散乱 X 線のエネルギースペクトルを Ge 半導体検出器で検出した。プロジェクト磁石を用いて 0.3 T の磁場を散乱ベクトルの方向に印加し鉄くぎの中心軸と垂直に磁場を反転させながら計測した。

Fig. 2 にコンプトン散乱 X 線の強度、磁気コンプトン散乱効果及び S-パラメーター [3]の場所依存性を示す。測定した場所は、Fig. 1 で示される x 軸上である。コンプトン散乱 X 線強度は x=0 mm の鉄くぎに対応した場所でピークとなる。x=±10 mm 付近は塩化ビニールパイプに対応している。モルタル補修材は密度が小さいため散乱強度が小さい。磁気コンプトン散乱効果は x=0 mm 中心の鉄くぎに対応した場所で大きく、塩化ビニールパイプの壁およびモルタル補修材では小さい。

[1]日本コンクリート工学会：物理化学的解釈に基づく電気化学的計測手法の体系化に関する研究委員会報告書 JCI-C88,pp.101-123,2015

[2] C. Thornton et al., arXiv:2404.09270v1,

[3] K. Suzuki et al. J. Synchrotron Rad. 24, 1006-1011 (2017).

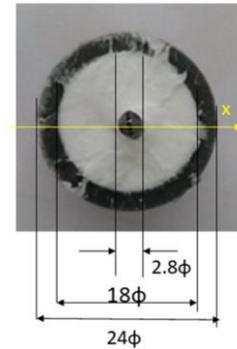


Fig. 1 測定試料(Top view)

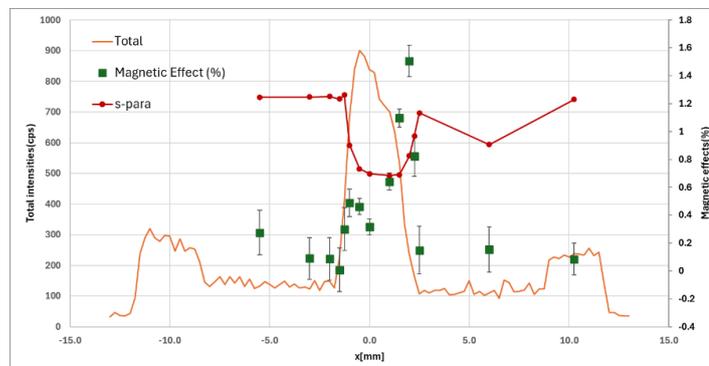


Fig. 2 コンプトン散乱強度・S-パラメーターおよび磁気コンプトン散乱効果の場所依存性

## 斜入射型 X 線 CT 装置を用いた半導体アプリケーション

### Semiconductor application by oblique incidence X-ray CT device

キヤノン MJ<sup>1</sup>, Sigray Inc.<sup>2</sup> °大垣 智巳<sup>1</sup>, Wenbing Yun<sup>2</sup>, Sylvia JY Lewis<sup>2</sup>, SH Lau<sup>2</sup>

Canon Marketing Japan Inc.<sup>1</sup>, Sigray Inc.<sup>2</sup>,

°Tomomi Ogaki<sup>1</sup>, Wenbing Yun<sup>2</sup>, Sylvia JY Lewis<sup>2</sup>, SH Lau<sup>2</sup>

E-mail: ogaki.tomomi@canon-mj.co.jp

実験室レベルの汎用直交型 X 線 CT 装置の観察視野と解像度は、X 線検出器のピクセルサイズにより制限されます。例えば、典型的な X 線検出器で、ピクセルサイズ 2048×2048、ボクセルサイズ 0.5 $\mu\text{m}$  の場合、観察視野が 1mm×1mm です。これまで、大型電子基板、ウェーハや二次電池パウチセルのように大きな観察視野を必要とするアプリケーションでは、ボクセルサイズを大きくして（低い空間分解能で）測定する必要がありました。

Sigray 社は、特許化された独自機構の斜入射型 X 線 CT 装置を開発し、空間分解能 0.5 $\mu\text{m}$  を達成しました。また、複数 3D スキャンデータを繋げることにより、より広い観察視野での測定が可能です。Fig.1 の左図が空間分解能チャートの全体像、右図が拡大像で、空間分解能 0.5 $\mu\text{m}$  を示しています。Fig.2 は、直径 300mm のウェーハ内の直径 5 $\mu\text{m}$  の TSV のボイドの検出結果を示します。本装置により、大型電子基板、ウェーハや二次電池パウチセルが、高分解能で非破壊観察できるため、観察前のサンプル前処理が軽減され、FA ワークフローの合理化が可能になります。本講演では、斜入射型 X 線 CT 装置の新技术の紹介と半導体アプリケーションの結果を示します。

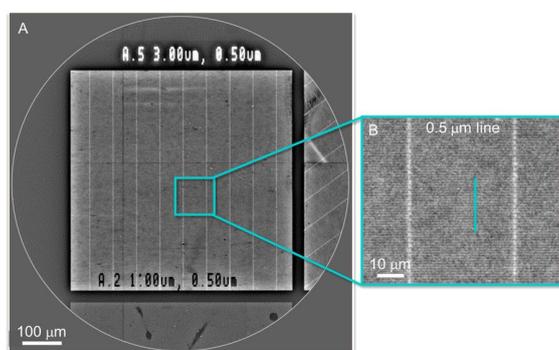


Fig.1 The virtual slice images of 3D data with 0.5 $\mu\text{m}$  spatial resolution anywhere on samples up to 300mm in diameter. The left is a whole FOV and the right is an enlarged image with 0.5 $\mu\text{m}$  L&S pitch.

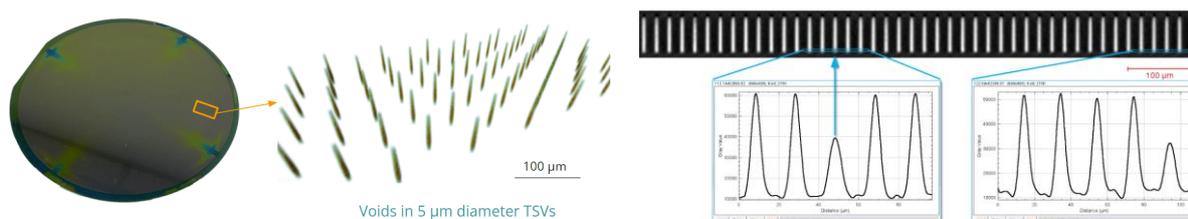


Fig.2 TSVs acquired in full 3D at 0.3 $\mu\text{m}$  voxel size within 6 minutes, showing defects (lower peaks) near the middle and at the far-right in the right figure.

## PHITS シミュレーションを用いた フォトンカウンティング CT 画像の Energy Binning 依存性

Using PHITS Simulation Energy Binning Dependence of Photon-Counting CT Images

群大院理<sup>1</sup>, 群大重粒<sup>2</sup>, 量研機構<sup>3</sup> ◯(M1)江坂 怜<sup>1</sup>, 星 和志<sup>1</sup>, 長谷部 有希<sup>1</sup>, 鈴木 宏輔<sup>1</sup>,  
松村 彰彦<sup>2</sup>, 取越 正己<sup>3</sup>, 櫻井 浩<sup>1</sup>

Gunma Univ.<sup>1</sup>, GHMC<sup>2</sup>, QST<sup>3</sup>, ◯Ren Ezaka<sup>1</sup>, Kazushi Hoshi<sup>1</sup>, Yuki Hasebe<sup>1</sup>, Kosuke Suzuki<sup>1</sup>,  
Akihiko Matsumura<sup>2</sup>, Masami Torikoshi<sup>3</sup>, Hiroshi Sakurai<sup>1</sup>

E-mail: t241d008@gunma-u.ac.jp

X 線 CT 画像におけるカップリングアーチファクトは、X 線が物体を透過する際に生じるビームハードニング効果が主な原因である。この問題に対し、フォトンカウンティング CT (PCCT) を用いることで効果的に軽減できる可能性が示唆されている。我々は PCCT を用いた測定において、Energy Binning 幅を約 4.1 keV 程度まで狭めることでカップリングアーチファクトを大幅に軽減できることを報告している[1]。また、PHITS (Ver.3.32) シミュレーションを用いて CT 画像を生成し、Energy Binning 幅を 4.1 keV と 14.6 keV に設定した場合の比較から、Energy Binning 幅を小さくすることでアーチファクトを抑制できることを明らかにした[2]。

本研究では、さらに詳細な検討を行うため、PHITS (Ver.3.32) シミュレーションを用いて CT 画像を生成し、Energy Binning 幅を 18.7 keV, 14.6 keV, 4.1 keV, 2.0 keV と段階的に変更した場合のカップリングアーチファクトの大きさ  $A_c = 1 - \mu_{\text{center}} / \mu_{\text{edge}}$  ( $\mu_{\text{center}}$ ,  $\mu_{\text{edge}}$  はそれぞれ試料中心および端部の線減弱係数) を求めた。Fig.1 は、直径 5 mm のアルミニウム (Al) 円柱を対象として、Energy Binning 幅を変えて  $A_c = 0$  となるエネルギーを求めた結果である。Energy Binning 幅 18.7 keV では 44.7 keV 以上でカップリングアーチファクトは観測されない。Energy Binning 幅を狭くすれば  $A_c = 0$  となるエネルギーは下がるが、Energy Binning 幅 2.0 keV でも 21.3 keV で  $A_c = 0$  となり、それ以下のエネルギーではカップリングアーチファクトが確認された。この結果から、Binning 幅を狭めても 20 keV 以下のエネルギーではカップリングアーチファクトが生じる可能性があり、低エネルギー成分を排除することで、CT 画像の精度向上が可能であると考えられる。本知見は医用画像計測や PCCT の応用範囲拡大に貢献する。

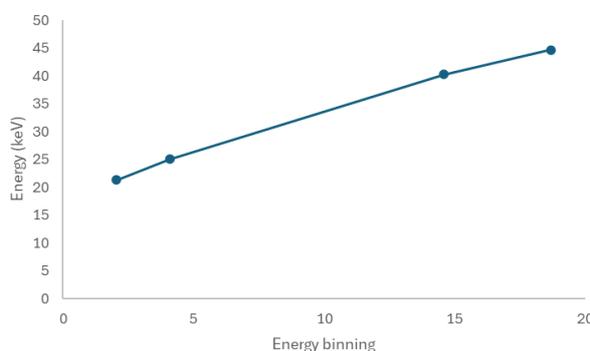


Fig.1 The energy at which cupping artifacts occur in each energy binning.

[1]石崎 賢弥, 星 和志, 古川 修平, 長谷部 有希, 松村 彰彦, 取越 正己, 櫻井 浩, フォトンカウンティング CT におけるビームハードニング効果の検討 (オンライン), 2023 年第 84 回応用物理学学会秋季学術講演会, 2023 年 9 月, 熊本大学

[2]江坂 怜, 星 和志, 長谷部 有希, 鈴木 宏輔, 松村 彰彦, 取越 正己, 櫻井 浩, PHITS シミュレーションを用いたフォトンカウンティング CT 画像の解析, 2024 年第 85 回応用物理学学会秋季学術講演会, 2024 年 9 月, 朱鷺メッセ

# 複合現実によるマルチエナジーX線CTの内部構造の合成表現

## Synthetic Representation of the Internal Structure of a Multi-energy X-ray CT using Mixed Reality

静岡大情<sup>1</sup>, 静岡大電子研<sup>2</sup>, 静岡大院光医工<sup>3</sup>, 東京大<sup>4</sup>, ANSeeN<sup>5</sup>, 中央発明研究所<sup>6</sup>

○加瀬 裕貴<sup>1,2</sup>, 西澤 潤一<sup>3</sup>, 佐藤 栄里子<sup>2</sup>, 都木 克之<sup>2</sup>,

堀田 拓海<sup>4</sup>, Ajith Bandara<sup>6</sup>, 青木 徹<sup>1,2,3,5</sup>

Shizuoka Univ. Info.<sup>1</sup>, Shizuoka Univ. R.I.E.<sup>2</sup>, Shizuoka Univ. M.P.<sup>3</sup>,

Tokyo Univ.<sup>4</sup>, ANSeeN<sup>5</sup>, Chuo Hatsume Inst.<sup>6</sup>

○Hiroki Kase<sup>1,2</sup>, Junichi Nishizawa<sup>3</sup>, Eriko Sato<sup>2</sup>, Katsuyuki Takagi<sup>2</sup>,

Takumi Hotta<sup>4</sup>, Ajith Bandara<sup>6</sup>, Toru Aoki<sup>1,2,3,5</sup>

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

3DX線CTを用いた検査は、医療分野・セキュリティ分野のみならず工業分野の非破壊検査でも行われている。特に、近年では複数の異なるエネルギー情報を利用するマルチエナジーX線CTによって物質弁別を行う研究が進められている。図1はボタン電池(LR44アルカリボタン電池)をX線CTにて撮像し、エネルギー帯ごとに弁別した再構成画像である。亜鉛や二酸化マンガンなどの組成物質によって得られる情報が異なることが見て取れる。我々の研究では、これまでに3DX線CTで撮像された物体の内部構造を複合現実(MR)にて表現し、空間再現ディスプレイとモーションキャプチ

ャーを組み合わせ、立体視をしながらも直感的な操作で内部構造が空間的に把握できるようなシステムを提案してきた。本研究では、複数のエネルギー帯情報を、MRを用いて同時に合成して表示し、容易に空間的に表現することを試みた。断面にDICOMから生成したMPR像を断面の位置・角度に応じて貼り付ける(図2)ことで内部構造が把握できるようなシステムを提案するほか、CTの閾値を自由に変更できるため、低エネルギー帯では負極容器(キャップ)、高エネルギー帯では負極材に閾値を変更させて表示させる方法も可能となった。

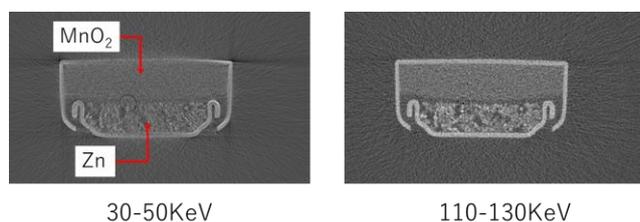


Fig1. Reconstructed image of button battery imaged using multi-energy X-ray CT

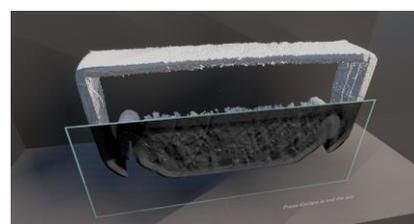


Fig2. 3D-rendered models and boundary surfaces represented in mixed reality