

委託研究「先進放射線計測技術の開発」 (研究開発テーマ：Ⅲ 先進放射線計測技術の開発) 研究成果報告概要

研究開発の概要

(研究実施期間) 平成29年度～令和4年度

(目的)

核医学診断装置の高度化や再処理施設、原子力施設における可視化技術の開発には超高感度・高エネルギー分解能を有するガンマ線検出器が必要である。このため、本研究では高原子番号、高密度を有する新しい化合物半導体である臭化タリウムを用いた超高性能ガンマ線検出器の実用化を目的とする。先進放射線計測技術に基づく放射線高度利用産業を六ヶ所村を中心とした青森県内に興すに値する検出器の開発技術を獲得する。

(必要性)

ガンマ線の計測には主にシンチレーション検出器と半導体検出器が使用される。シンチレーション検出器は間接変換型の検出器であるためにエネルギー分解能が低いという欠点がある。また、一般に広く使用されているゲルマニウム半導体検出器は非常に優れたエネルギー分解能を示すが液体窒素による冷却が必要となる。このため、室温で動作し、高検出効率を示し、優れたエネルギー分解能を有するガンマ線検出器の開発が求められている。

(新規性)

本研究ではガンマ線検出器として実用化されていない化合物半導体である臭化タリウムを用いて開発を行うところにその最大の新規性がある。臭化タリウムは高原子番号および高密度を持つためガンマ線の吸収効率が非常に高くガンマ線検出器材料として有望である。しかしながら、長期安定性などの特性が十分ではなく実用化には至っていないのが現状である。本研究では臭化タリウム検出器の実用化を目指した研究を行う。

(独創性)

本研究では新しい化合物半導体である臭化タリウムに着目し材料開発から研究を行うため、他では真似することができない独創性の高い、純国産の技術が研究成果として得られる。青森県量子科学センターにて結晶を自ら育成し、検出器の開発、評価を一貫して行うため、検出器評価の結果を直接、結晶育成、検出器製作へ反映させることが可能であり、独創的かつ戦略的に研究を進めることができる。

(有用性)

本研究では室温で動作し、高いガンマ線検出効率を有し、高いエネルギー分解能を示す半導体ガンマ線検出器の開発を行う。本研究の成果は核医学診断装置、再処理・原子力施設監視装置、PIXE、PIGEなどへの応用が可能である。これらの新しい検出器の開発成果は製品化や事業化が期待されるものである。本研究の成果は青森県発・純国産の放射線検出器の開発に繋がり、当該地域の放射線高度利用産業の振興に直結するものであり有用性が極めて高い。

研究成果

1. 青森県量子科学センターにおける検出器開発環境の構築

青森県量子科学センターにて先進放射線計測技術の開発を行うために、そのキーテクノロジーである半導体検出器開発に関わる研究体制の構築を行った。結晶育成実験室では電気炉を用いて臭化タリウム結晶の精製および育成を行った。検出器開発実験室では育成した結晶の切り出し、研磨を行い、真空蒸着法で電極の形成を行った。検出器評価実験室では密封線源を用いて製作した半導体検出器の評価を行った。図1は青森県量子科学センターにおける半導体検出器開発の流れを示している。結晶の育成から検出器の製作、特性評価までを一貫して行うことで独創的かつ戦略的に検出器開発を行うことができる。

2. PIXE用X線検出器の開発

青森県量子科学センターで開発した臭化タリウム検出器を同センターの他研究分野に応用することで最大限のシナジー効果を得るために、量子科学センターにて研究が推進されているPIXE (Particle Induced X-ray Emission)への応用を目指して検出器開発を行った。既存のSi検出器では検出が困難な高エネルギーのX線を検出可能な臭化タリウム検出器の開発を行った。電極形状および電圧印加方法を改善することでエネルギー分解能と検出効率を両立させた検出器を開発した。開発した臭化タリウム検出器を用いて密封線源からのX線を検出することに成功した(図2)。

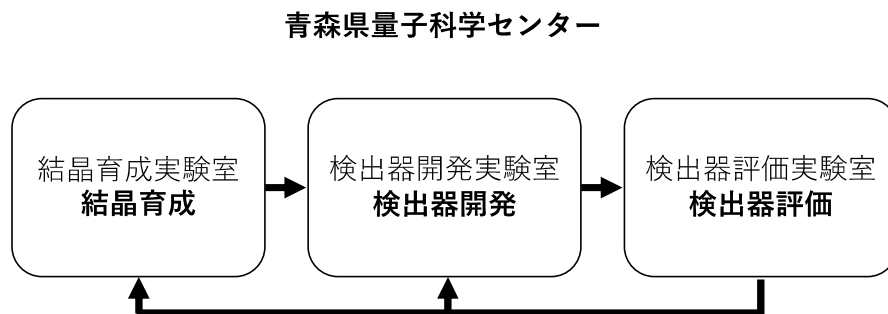


図1 青森県量子科学センターにおける検出器開発

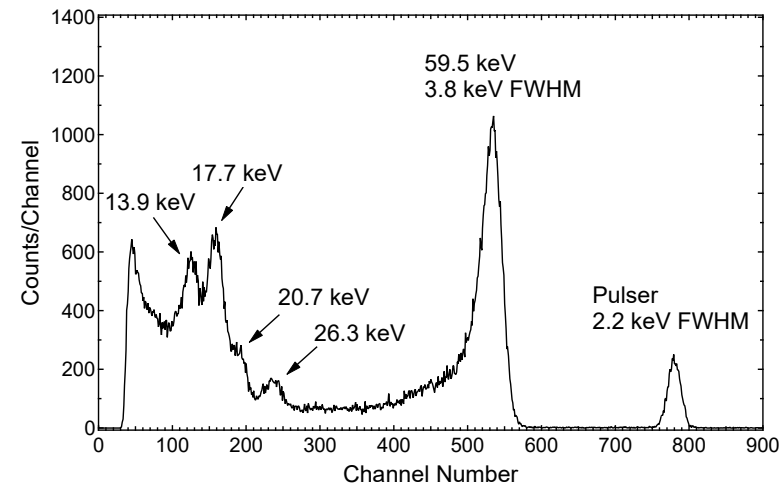


図2 TlBr検出器から得られた ^{241}Am スペクトル(-50 °C)
M.Nogami et al., NIM, B477 (2020) 43-45.

研究成果

3. PIXEビームラインへの応用

青森県量子科学センターで開発したTlBr検出器をPIXEへ応用した。同センターPIXEビームラインにTlBr検出器を設置した。20 MeVの陽子線を鉛ターゲットに照射しK-X線の測定を行ったところ、鉛からの $K\alpha$ 線、 $K\beta$ 線の検出に成功した。これはTlBr検出器を用いた世界初のIn Beam実験によるPIXEスペクトル取得である。図3にTlBr検出器から得られたPIXEスペクトルを示す。

4. PIGEへの応用

青森県量子科学センターのPIXEビームラインでは20 MeV陽子線の照射により発生するガンマ線を検出するPIGE (particle-induced gamma-ray emission) が可能である。PIXEビームラインに開発したTlBr検出器を設置し、測定試料としてPIXE法では検出が困難な低原子番号元素であるリチウム(Li)およびフッ素(F)を含むフッ化リチウム(LiF)結晶を選択した。20 MeVの陽子線をLiF結晶に照射し、ガンマ線スペクトルの測定を行った。図4にTlBr検出器から得られたLiF結晶のPIGEスペクトルを示す。図から分かるように20 MeVの陽子線を照射した際に放出されるフッ素からの197 keVのガンマ線およびリチウムからの478 keVのガンマ線をTlBr検出器を用いて検出することに成功した。これはTlBr検出器を用いた世界初のPIGEスペクトルの取得である。TlBr検出器は小型・高感度であるため、従来用いられてきた大型のGe検出器に比べて設置・運用が容易であり、様々なビームラインへの応用が可能である。

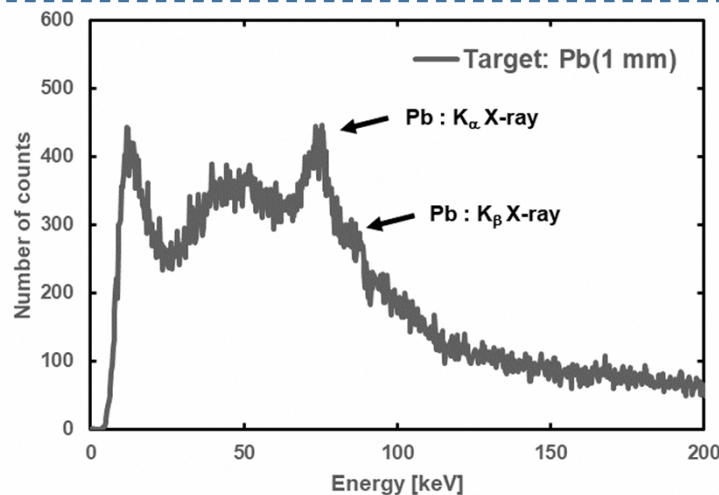


図3 TlBr検出器から得られたPIXEスペクトル
M.Nogami et al., IJPIXE, 29 (2019) 53-59.

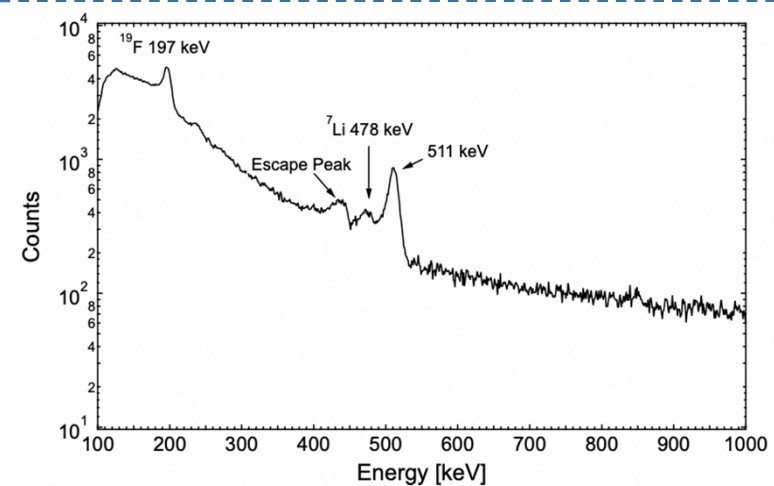


図4 TlBr検出器から得られたPIGEスペクトル
K.Hitomi et al., IJPIXE, 30 (2020) 63-68.

研究成果

5. 対称型臭化タリウム検出器システムの開発

臭化タリウム検出器は長期の安定動作のために印加電圧の極性反転が必要となる。本研究では極性反転に適した、電極構造が対称である対称型臭化タリウム検出器の開発を行った。開発した対称型臭化タリウム検出器システムの評価を行うために室温において ^{137}Cs 密封線源を用いてガンマ線スペクトルの測定を行った。印加電圧を500 Vとして、極性反転時間を5分として検出器を24時間動作させた。本計測システムの極性反転による不感時間は約280 msであった。図5に得られた ^{137}Cs ガンマ線スペクトルを示す。検出器は662 keVのガンマ線に対して補正無しで5.1% FWHMのエネルギー分解能を示した。

6. 対称型臭化タリウム検出器を用いた環境放射線の測定

開発した対称型臭化タリウム検出器システムは室温において安定に動作するため、環境放射線の測定への応用を行った。青森県量子科学センター研究員室B-1の机上に検出器システムを設置し155時間連続で計測を行った。図6に本測定により得られたガンマ線スペクトルを示す。155時間の測定期間中、検出器は安定に動作した。検出器結晶の体積が約2 mm × 2 mm × 5 mmと小さいために代表的な天然放射性核種である ^{40}K からの1461 keVのガンマ線によるピークは観測されなかった。開発した検出器システムは極めて安定に動作するため微弱な室内のガンマ線バックグラウンド計測が行える事が示された。

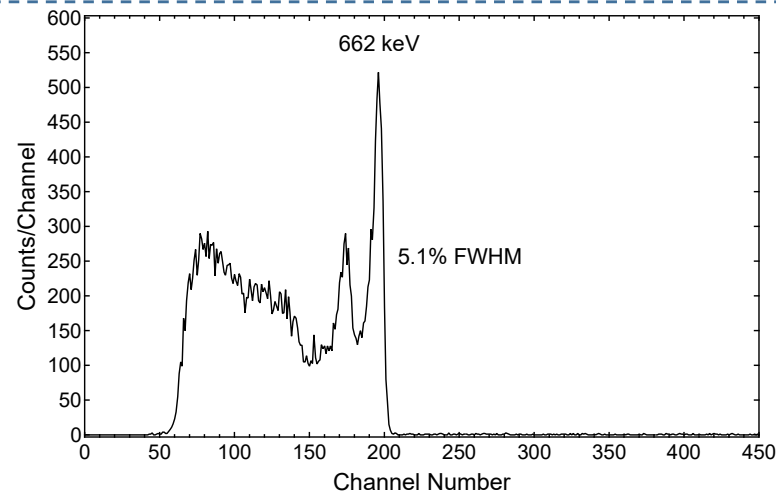


図5 対称型臭化タリウム検出器の ^{137}Cs スペクトル(24時間積算)

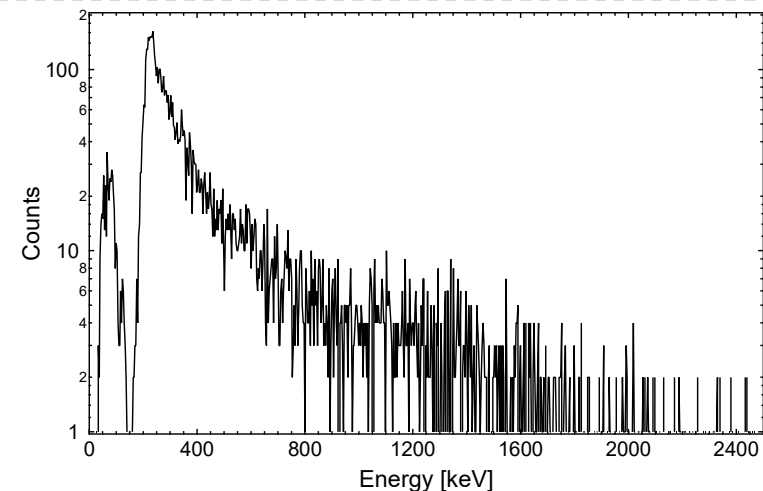


図6 TlBr検出器から得られた研究員室B-1の環境放射線スペクトル

研究発表

1. 25 March 2019、Cultural and Congress Centre of Caldas da Rainha, Portugal、16th International Conference on Particle Induced X-ray Emission (PIXE2019)、Feasibility study of TlBr semiconductor detectors for PIXE applications.
2. 15 October 2019、Antibes, France、24th international conference on Ion Beam Analysis、Characterization of thallium bromide semiconductor X-ray detectors for PIXE applications.
3. 2019年11月15日、東京都市大学 二子玉川夢キャンパス、第35回PIXEシンポジウム、臭化タリウム半導体検出器のPIXEへの応用に向けた基礎研究.
4. 2020年3月、開催中止(発表成立)、第67回応用物理学会春季学術講演会、対称型capacitive Frisch grid TlBr検出器の開発.
5. 23-27 August 2020、Online、SPIE Optics + Photonics Digital Forum、Improvement of energy resolutions in capacitive Frisch grid TlBr detectors with a pulse waveform analysis.

研究会等の開催

無し。

発表論文

1. First in-beam application of thallium bromide semiconductor detectors to particle-induced X-ray emission、International Journal of PIXE、2 September 2021、M. Nogami, K. Hitomi, A. Terakawa and K. Ishii.
2. Feasibility study of TlBr semiconductor detectors for PIXE applications、Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B、15 August 2020、M. Nogami, K. Hitomi, T. Onodera, K. Matsumoto, K. Watanabe, A. Terakawa and K. Ishii.
3. Development of thallium bromide semiconductor detectors for particle-induced gamma-ray emission、International Journal of PIXE、25 October 2022、K. Hitomi, M. Nogami, A. Terakawa and K. Ishii.

青森県内への波及効果

本研究により得られた半導体検出器の開発に関する知見を地域の企業に提供することにより、六ヶ所村を中心とした青森県内に次世代核医学診断装置や先進放射線計測機器の生産拠点を構築し、世界に向けた半導体検出器産業の中心地を形成することが期待できる。本研究によって青森県のブランド力、競争力、発信力を向上させることが可能であり、世界から当該地域が注目されることにより県内の経済・文化が更に発展するものと期待できる。