

平成28年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「Ce:GAGG シンチレータ結晶における大型結晶製造
プロセスの低コスト化」

研究開発成果等報告書

平成29年 5月

担 当 局 東北経済産業局
補助事業者 株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

目 次

第 1 章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景と目的	4
1-1-2 研究概要及び目標	5

1-2 研究組織

1-2-1 管理体制	6～7
1-2-2 研究者・管理者氏名	6～7
1-2-3 協力者氏名	6～7

1-3 成果概要

1-3-1 高結晶化率 3 インチ径 Ce:GAGG 結晶の開発	8
1-3-2 分割型高耐久性断熱材の開発	8
1-3-3 Ce:GAGG 結晶のシンチレータアレイ化技術の開発	8
1-3-4 事業化に向けての調査と市場性	8
1-4 当該研究開発の連絡窓口	8

第 2 章 本 論

2-1 高結晶化率 3 インチ径 Ce:GAGG 結晶の開発

2-1-1 高結晶化率 Ce:GAGG 結晶育成技術の開発	
2-1-2 3 インチ径 Ce:GAGG 結晶の作製技術の開発	
2-1-3 作製した 3 インチ径 Ce:GAGG 単結晶の分析・評価	

2-2 分割型高耐久性断熱材の開発

2-2-1 分割型断熱材の設計	
2-2-2 高耐久性断熱材の開発	

2-3 Ce:GAGG 結晶のシンチレータアレイ化技術の開発

2-3-1 Ce:GAGG 結晶のシンチレータアレイの作製	
2-3-2 Ce:GAGG 結晶のシンチレータアレイの評価	

2-4 事業化へ向けた取り組み

2-4-1 シンチレータ市場の調査

2-4-2 事業化へ向けた市場の調査

第3章 全体総括 12~13

3-1 研究開発成果のまとめ

3-2 研究開発後の課題

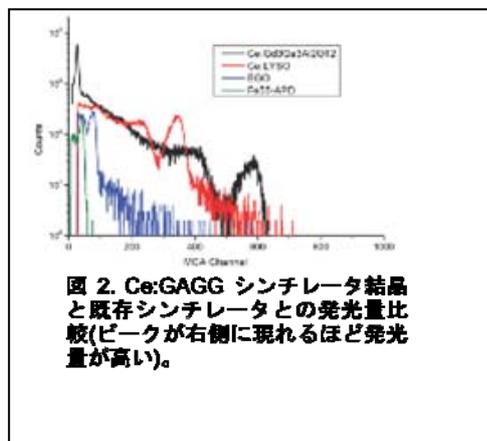
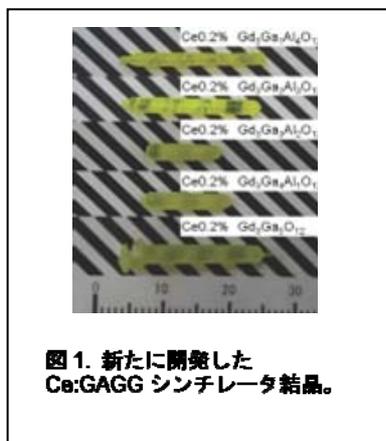
3-3 事業化展開について

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景と目的

2011年3月11日の東日本大震災後、福島第一原子力発電所において生じた原発事故により、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{131}I 等の放射性同位元素の大量飛散によって東北のみならず日本全国で、放射能による住民への影響が懸念されている。そのため、原発事故以後は、一般市民の放射能汚染に対する不安の高まりから放射能計測装置の需要が大幅に増加したが、これまで研究施設や原子炉関連施設等の高線量下でしか需要がなかった放射能測定装置では、その急速に増大した高感度放射能測定装置への需要に対応しきれなかった。そのため、多数の外国産放射能測定装置が国内に流入したが、その中には安価ではあるが放射線に対する十分な感度を具備しないものも多く存在した。さらに、原発事故以降、被災地周辺で生産された野菜等の食品の放射線量検査が行われているが、現在の $\text{Tl}:\text{CsI}$ や $\text{Tl}:\text{NaI}$ の既存シンチレータを用いた既存放射能測定装置では感度、測定速度とも十分ではなく、十分に全件検査が行えていない。さらに、既存シンチレータはエネルギー分解能が十分ではないために、放射線核種の弁別が難しく、原発事故由来の放射線核種である ^{134}Cs および ^{137}Cs の高精度な定量化や魚介類等での生態濃縮が確認されている $^{100\text{m}}\text{Ag}$ との分離が不可能であった。一方、ゲルマニウム(Ge)半導体を用いた放射能測定装置は、エネルギー分解能に優れているため放射線核種の弁別が可能であり、上記用途に用いられてきたが、有効原子番号・密度が小さいために放射線に対する感度が低く、常に冷却をしないと使用できない。そのため、冷却設備が必須であり、測定装置が大型化する上、その価格も高額になるため大型設備でしか利用されていない。したがって、より高感度で放射線核種弁別が可能な程エネルギー分解能が良いシンチレータ結晶が求められている。そのような中で、東北大学吉川(サブリーダー)らはこれまで培ってきた世界屈指の単結晶育成技術を駆使して新規シンチレータ単結晶材料の探索を行い、既存のシンチレータの特性を凌駕する高発光量・高エネルギー分解能を有するCe添加 $\text{Gd}_3(\text{Ga},\text{Al})_5\text{O}_{12}$ [Ce:GAGG]単結晶を開発した(図1)。この国産のCe:GAGG結晶は既存のガンマ線用シンチレータ結晶であるBGOの10倍の発光量、2倍の密度を有し、 $\text{Tl}:\text{NaI}$ シンチレータと比較しても1.5倍程度の発光量、2倍程度のエネルギー分解能、1/10程度の蛍光寿命を示すことが明らかになり、次世代の放射線核種弁別機能を有した高性能放射線測定装置用ガンマ線シンチレータとして有望視されている(図2)。さらに、近年高発光量・高エネルギー分解能を示すことで注目されているCe:LaBr₃シンチレータ結晶と比べても遜色ない発光量・エネルギー分解能を有しながら、ほとんど内在バックグラウンドがなく、Ce:LaBr₃では問題となる吸湿性がない。以上の事から、開発したCe:GAGG結晶は総合的にその特性を考えると非常に実用化に適したシンチレータ材料であることが分かった。そのため、当該結晶材料の開発後に多くの結晶材料や放射線関連の国際会議にて発表を行った結果、各国の研究機関・企業からの注目が集まり、現在では当該結晶の研究が盛んに行われている。



1-1-2 研究概要及び目標

東北大学ではさらに当該シンチレータ結晶の量産化を見越して、そのバルク単結晶の製造手法の確立を行ってきており、現在では Cz 法を用いて図 3 に示すような直径 2 インチの Ce:GAGG 単結晶がクラックフリーで製造できるまでになっている。当該結晶の大型バルク結晶が得られるようになったことから、Ce:GAGG シンチレータ素子を搭載した放射能測定装置の開発が大きく進展した。その一例として図 4 に示した Ce:GAGG シンチレータ素子を搭載したハンディタイプの放射線測定器 GAMMASPOTTER(ガンマスポッター, FGS-02A)を古河機械金属とともに開発し、既に実用化している。

しかし、Ce:GAGG はその化学式を見ても分かるように、希土類のセリウム(Ce)およびガドリニウム(Gd)、希少元素のガリウム(Ga)を比較的高濃度に結晶内に含有する。そのため、原料コストが大きく既存の BGO シンチレータ等と比べると製造コストが大きくなってしまふ。そこで、当該結晶の製造コストの削減のため更なる大口径化した単結晶の作製技術の開発を由利工業(株)、東北大学の共同で行ってきた。しかし、3 インチ径のバルク結晶の育成には 6 インチ径のイリジウム(Ir)坩堝を用い、これまでの結晶化率である 40%程度での結晶育成を行った場合、イリジウム坩堝の大きな変形が生じてしまった。これは、坩堝内に残存した 60%の原料融液が固化する際に膨張し、坩堝壁に応力がかかってしまったためである。そこで、東北大学では坩堝変形の原因となる低結晶化率を改善するため、Ce:GAGG 結晶の育成に最適な仕込組成(Ce 濃度)、坩堝内添加量(チャージ量)、結晶育成速度(引上げ速度)、炉内温度分布(温度勾配、面内温度均一性)等を探索してきた。その結果、結晶化率を改善するための結晶育成条件を発見し、それを用いることで 3 インチ径の Ce:GAGG 結晶の作製が可能になると期待される。



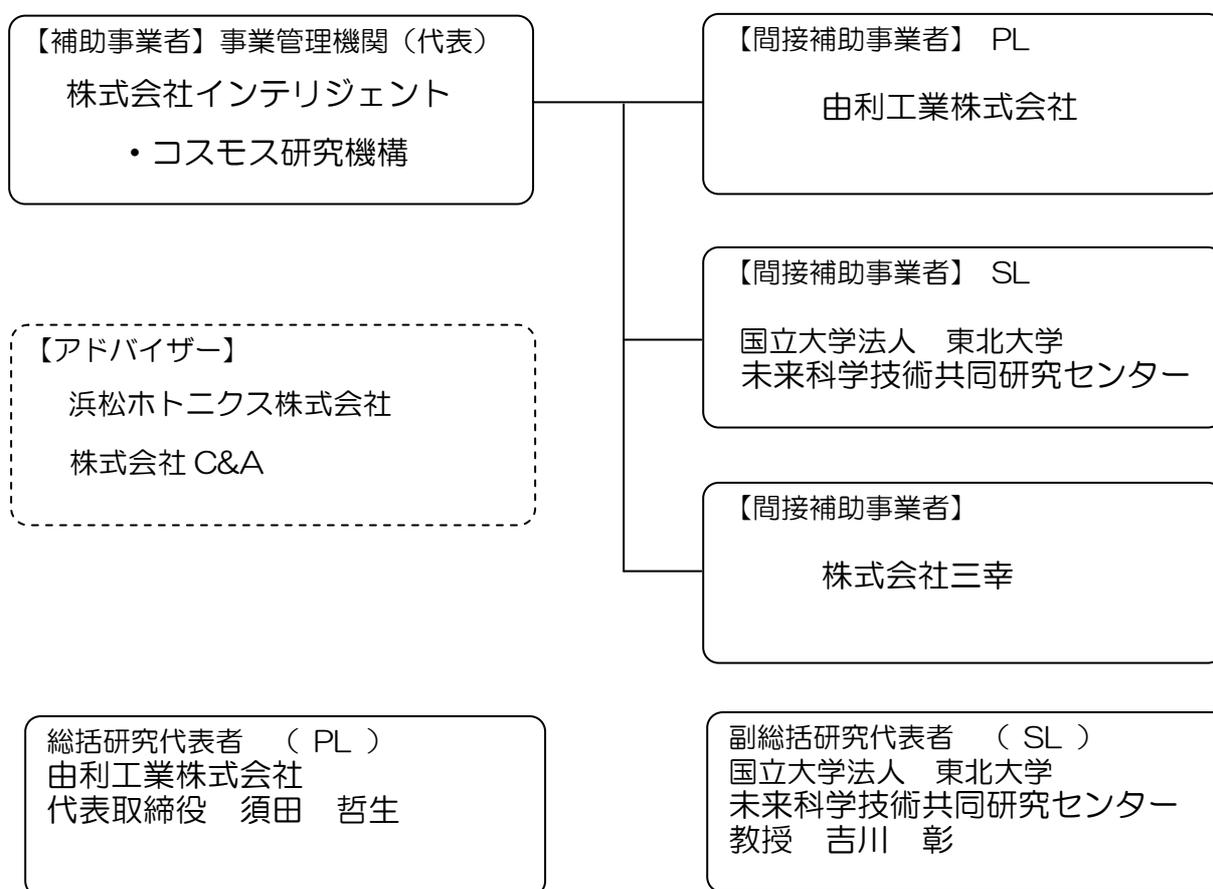
図 3. Cz 法で作製した 2 インチ径 Ce:GAGG シンチレータ結晶。



図 4. Ce:GAGG シンチレータ素子を搭載した放射線測定器。

1-2 研究組織

1-2-1 管理体制



1-2-2 研究者・管理者氏名

(1) 研究員

由利工業株式会社

氏名	所属・役職	備考
須田 哲生	代表取締役 社長	PL
真坂 護	常務取締役	
竹内 靖	執行役員 総務部長	
深澤 慎太郎	経営企画室 兼 新事業開発課 統括係長	
三木 常義	新事業開発課・1 係 統括係長	
伊藤 謙二	新事業開発課・1 係 係長	
高橋 祐介	新事業開発課・1 係	

国立大学法人東北大学未来科学技術共同センター

氏名	所属・役職	備考
吉川 彰	東北大学未来科学技術共同研究センター 教授	SL
横田 有為	東北大学未来科学技術共同研究センター 准教授	
長谷川 史彦	東北大学未来科学技術共同研究センター 副センター長	
黒澤 俊介	東北大学金属材料研究所 准教授	
上村 博	東北大学未来科学技術共同研究センター 産学連携研究員	
武田 悠佳	東北大学金属材料研究所 技術補佐員	

株式会社三幸

氏名	所属・役職	備考
神永 俊浩	代表取締役 会長	
奥野 敦	代表取締役 社長	
前田 孝弘	取締役	
西村 裕之	富山第二工場長	
相羽 奈緒子	管理部 経理担当	

(2)管理者氏名 (事業管理機関)

株式会社インテリジェンス・コスモス研究機構

氏名	所属・役職	備考
矢口 仁	産学官連携インキュベーション事業部 事業部長	
猪股 則夫	産学官連携インキュベーション事業部 統括マネージャー	
齋藤 昭一郎	産学官連携インキュベーション事業部 プロジェクトマネージャー	
池田 由美	産学官連携インキュベーション事業部 担当	

1-2-3 協力者氏名

アドバイザー 氏名	所属・役職	備考
中村 重幸	浜松ホトニクス株式会社 固体事業部 固体第五製造部 第29部門 部門長	
鎌田 圭	株式会社 C&A 代表取締役社長	
庄子 育宏	株式会社 C&A 部長	

1-3 成果概要

1-3-1 高結晶化率 3 インチ径 Ce:GAGG 結晶の開発

Ce:GAGG2インチ径単結晶の製造につきましては、目標通り結晶化率60%を達成しまして、その後、再現性のある安定した育成条件を確立いたしました。

また、3インチ径Ce:GAGG結晶の作製技術につきましては、割れや振れといった品質の課題を整理し、結晶育成の製造技術にかかわる設計を大きく見直した結果、3インチ径Ce:GAGG結晶化率60%以上を達成することが出来た。

さらに作製した2および3インチ径Ce:GAGG単結晶材料において、既存のCe:GAGG単結晶とほぼ同等の性能を示すことが確認できた。さらに、蛍光寿命を高速化したGFAGおよび高エネルギー分解能にしたHR-GAGGについても評価を行い、実際に目的とする特性が達成できていることを確認した。

1-3-2 分割型高耐久性断熱材の開発

Ce:GAGG単結晶の製造につきましては、1800°Cを超える高融点材料であるがジルコニア (ZrO₂) やアルミナ (Al₂O₃) 製の耐熱・耐久性を要求される。そこで耐熱衝撃性と機械的強度を示す最適な緻密度を保持する断熱材を開発し、10回以上の結晶育成に耐えることができる分割型断熱材を設計した。この設計を1インチ径の単結晶育成に適用すると20回以上壊れることなく使用でき、目的とする十分な耐熱性を有していることがわかった。Y₂O₃添加ZrO₂では、既存のCaO添加ZrO₂に比べてさらに高い耐熱性を示すことがわかった。

1-3-3 Ce:GAGG 結晶のシンチレータアレイ化技術の開発

0.4×0.4×5mm³や0.17×0.17×5mm³等の様々なピクセルサイズのCe:GAGG結晶素子を用いたシンチレータアレイを作製するとともに、Ga/Al比を変えたCe:GAGG結晶素子についてもシンチレータアレイを得た。

さらに評価においてもガンマ線源¹³⁷Csおよび⁶⁰Coを用いて行ったシンチレータアレイの2次元マッピング評価では、0.4×0.4×5mm³シンチレータアレイで各ピクセルの分離に成功し、さらにGa_{2.7}/Al_{2.3}の組成素子を用いることでエネルギー分解能の改善に成功した。

1-3-4 事業化に向けての調査と市場性

川下企業からのアドバイスを受けました。シンチレータは、検出器の基礎特性を決める素材である為、シンチレータ特性がどのようなもので検出器の仕様が決まる。光変換効率、発光スピード、

自発光、エネルギー分解能等、他のシンチレータと比べてどの程度の有意性があるか、コストメリットがどの程度あるかという点から製品企画がなされるケースが多い。

アプリ仕様としては、医療、環境、セキュリティ、高エネルギー分野などの一部に広がる可能性は期待される。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社インテリジェント・コスモス研究機構
産学連携インキュベータ事業部 プロジェクトマネージャー 齋藤昭一郎
TEL: 022- 279-9811(代) FAX: 022-279-8880
〒989 - 3204
宮城県仙台市青葉区南吉成六丁目6番地の3

第2章 本論

Ce:GAGG結晶は、優れた発光量とエネルギー分解能等を有することから次世代のガンマ線シンチレータとして高性能放射能検査装置への搭載が期待されている。本事業では、当該結晶の量産化における製造プロセスの低コスト化を目的とし、高結晶化率3インチ径バルク結晶の作製技術とそれに用いる断熱材の高耐久性化の開発を行う。さらに、開発した結晶のシンチレータアレイ化技術を確立し、検出器メーカーが搭載可能な製品レベルを達成する。

2-1 高結晶化率 3 インチ径 Ce:GAGG 単結晶の開発

2-1-1 高結晶化率 Ce:GAGG 単結晶育成技術の開発

東北大学から技術移管された技術を基に、Ce:GAGG2インチ径単結晶の育成回数を重ねる中で結晶化率52.3%、有効長128mmをすでに達成、その後の育成により有効長160mm弱を育成し、結晶化率61.9%に達し目標値である結晶化率60%を達成した。その後は、Ce:GAGG2インチ径単結晶につきましては、再現性のある安定した育成条件を確立いたしました。さらに1インチ径では長さ150mm～300mm、2インチ径でも100mm～150mm（結晶化率60%以上）を達成した。

2-1-2 3 インチ径 Ce:GAGG 単結晶の作製技術の開発

3インチ径単結晶育成では、結晶育成条件とそれを取り囲む育成炉の断熱材構成の評価を実施した。結晶育成においては、品質課題として割れや振れが発生、原因を整理した。さらに分割型断熱材の評価においては、6分割形状で評価を進めてみたが使用回数が増すに従い、ゆがみよる変形が生じた。実態を整理して分割数、形状、厚みを検証項目に挙げ評価を継続した。そこで結晶育成の作製技術にかかわる設計を見直した結果、3インチ径Ce:GAGG結晶化率60%以上を達成した。また、当初の設計よりも原材料、断熱材構成、貴金属部材が全体の10%の低コスト化が実現できた。

さらに、達成に向けて結晶品質の安定化には、原材料を溶かし込む貴金属の取り扱いがとても重要であることがわかった。

断熱材では、2分割仕様から4分割提案を行い実施した結果、育成回数10回以上は耐える事ができることがわかった。さらに分割タイプでは4分割仕様が割れや歪みがなく交換頻度が少なく、安定した生産ができることがわかった。

2-1-3 作製した 3 インチ径 Ce:GAGG 単結晶の分析・評価

由利工業社が作製した 2 および 3 インチ径 Ce:GAGG 単結晶材料を、初年度に整備した評価装置（発光量測定、エネルギー分解能測定、蛍光寿命測定）を用いて、放射線応答評価を行った。

単結晶は、6 mm 角で厚さ 1 mm のサンプル形状に切り出して評価した。¹³⁷Cs 線源を用いたガンマ線励起下の波高値スペクトル測定の結果からは、60,000 ph/MeV 以上の発光量を示し、6%程度のエネルギー分解能を示した。

また、蛍光寿命測定では、70～100 ns 程度的高速成分が確認され、これらのシンチレーション特性は、既存の Ce:GAGG 単結晶とほぼ同等の性能であることが分かった。さらに、Mg を共添加することで蛍光寿命を高速化した GFAG 単結晶では、70ns 程度の蛍光寿命を示し、Ga/Al 比を変えることで高エネルギー分解能にした HR-GAGG 単結晶では 5%を切るエネルギー分解能を達成した。

2-2 分割型高耐久性断熱材の開発

2-2-1 分割型断熱材の設計

Cz 法によるバルク単結晶の製造では、育成方向の温度勾配や径方向の温度均一性が安定した結晶育成やクラックフリーの結晶を実現するために非常に重要である。そのため、結晶育成時には高周波誘導加熱により加熱元となる貴金属坩堝の周囲にセラミックス断熱材が配置される。当該断熱材は、結晶育成する物質の融点に従って、高温で耐久性のある材料が用いられ、特に Ce:GAGG 等の 1800°C を超える融点を有する材料の単結晶作製では、ジルコニア(ZrO₂)やアルミナ(Al₂O₃)製の耐熱性を有するセラミックス断熱材が用いられる。しかし、これらの結晶育成では、断熱材が大きな温度勾配下や昇温・冷却課程で使用されるため、劣化が激しく、従来数回の使用で断熱材に割れ等の破損が生じていた。さらに、現状の断熱材は一体型であり、一部が破損した場合、全てを新品に取り換える必要があった。この断熱材の交換は単結晶材料を量産する上で、製造コストを増大させる要因の 1 つとなっていた。

今回、断熱材の破損した部分のみの交換が可能になる 4 分割型ジルコニア(ZrO₂)断熱材を設計・開発し、更に厚みの最適化を行うことで、結晶育成に必要な断熱効果および温度勾配を得ることができ、かつ 10 回以上の単結晶育成を可能である事を確認した。

これにより断熱材コストの削減を実現、量産レベルで使用可能であることを見出した。

2-2-2 高耐久性断熱材の開発

断熱材中の添加材の濃度や種類を変えることで高温における耐熱衝撃性および機械的強度が変化することが分かっており、それらを最適化することで高耐久性化が可能である。また、断熱材の緻密度によっても耐熱衝撃性と機械的強度が制御でき、特に緻密質の材料は機械的強度が強く、多孔質の材料は耐熱衝撃性に強いことが分かっている。そこで、【2-2-1】の結果と併せ、耐熱衝撃性と機械的強度がどちらも強い最適な緻密度を有する断熱材の開発を行った。

断熱材への添加材を既存の CaO と新たに開発した Y₂O₃ の両方で試作し、東北大学で耐久評価を実施した。

最終的に、耐久性とコストを総合的に判断し、CaO 添加の ZrO₂ 断熱材を量産適応材料とした。

2-2-3 高耐久性断熱材の評価・分析

三幸社が開発した分割型断熱材を用いて実際に 1 インチ径の単結晶育成を行う環境下で 20 回もの負荷試験を行い、その耐久性の確認を行った。また、同時に既存の CaO 添加 ZrO₂ 断熱材に加えて、新たに開発した Y₂O₃ 添加 ZrO₂ 断熱材の負荷試験も行い添加剤の違いによる耐久性の変化を検証した。分割型断熱材構造を用いることで、実際に単結晶育成を行う条件下で 20 回以上壊れることなく使用することができ、目的とする十分な耐熱性を有していることが分かった。

ただし、既存の CaO 添加 ZrO₂ 断熱材では 20 回もの負荷試験の後では、断熱材の一部に欠け等が目立つようになったのに対して、Y₂O₃ 添加 ZrO₂ 断熱材は負荷試験の後も全く欠け等が発生しなかった。

その結果、Y₂O₃ 添加 ZrO₂ 断熱材では、既存の CaO 添加 ZrO₂ 断熱材に比べてさらに高い耐熱性を示すことが分かった。

2-3 Ce:GAGG 結晶のシンチレータアレイ化技術の開発

2-3-1 Ce:GAGG 結晶のシンチレータアレイの作製

0.9×0.9×8mm³ や 0.4×0.4×5 mm³、0.17×0.17×5 mm³ 等の様々なピクセルサイズの Ce:GAGG 結晶素子を用いたシンチレータアレイの作製を行った。最適な加工方法や反射材の選定を行うことで、目的とするシンチレータアレイを作製することに成功した。さらに、エネルギー分解能の優れたシンチレータアレイを作製するため、Ga/Al 比を変えた Ce:GAGG 結晶素子に関してもシンチレータアレイの作製を行った。

2-3-2 Ce:GAGG 結晶のシンチレータアレイの評価

【2-3-1】で作製したシンチレータアレイはガンマ線源 ¹³⁷Cs および ⁶⁰Co を用いて 2 次元マッピング評価を行った。¹³⁷Cs および ⁶⁰Co 線源による 2 次元マッピング評価では、0.4×0.4×5 mm³ シンチレータアレイまでエネルギースペクトルのピークを確認でき、各ピクセルの分離に成功した。一方、0.17×0.17×5 mm³ シンチレータアレイでは結晶素子のサイズが小さすぎたことでエネルギースペクトルのピークが確認できず、各ピクセルの分離ができなかった。さらに、エネルギー分解能が高い Ga_{2.7}/Al_{2.3} の組成の結晶素子を用いたシンチレータアレイを作製することで、エネルギー分解能の改善に成功した。その結果、当初の目的であった 3 mm 以下の分解能を十分に達成するシンチレータアレイを確立することができた。

2-4 事業化へ向けた取り組み

2-4-1 シンチレータ市場の調査

世界のシンチレータ市場は、タイプ、用途、地理に基づいてセグメント化されています。タイプに基づいて、世界のシンチレータ市場には、CsI、NaI、なども含まれます。アプリケーションに基づいて、世界的なシンチレータ市場は、医療、原子力発電所、産業、国土安全保障および防衛に大きく分類されます。

シンチレータの技術的進歩、国土安全保障のための放射線検出市場の脅威の増加、PET / CT スキャンの増加、癌の発生率の増加、福島災害後の安全に対する重要な懸念が推進されているシンチレータ市場の成長。しかし、原子力や放射線労働者の不足、発電所数の減少、この市場の成長を妨げる主な要因でもあると示唆する見方もある。

世界的なシンチレータ市場の主な国内企業には、浜松ホトニクス株式会社（日本）、東芝（日本）がごさいます。その他、海外では RMD（米国）、Argus Imaging BV（オランダ）、Mirion Technologies（米国）、Saint-Gobain SA（フランス）、Hitachi Metals America Ltd.（米国）、Canberra Industries、Inc.（米国）および Ludlum Measurements、Inc.（米国）などが挙げられる。

2-4-2 事業化へ向けた市場の調査

市場性の進展としては、放射能検出器市場全体では緩やかな成長で進むところ、高性能・低コストの放射能検出材料についても安全保障や医療画像の市場までの需要を満たす機会が与えられている。また、GAGG の市場においては低エネルギー分野での放射線モニタリング機器や携帯式検知システムへのニーズあり。最終的には小型軽量化、低コスト化、高信頼性、高寿命化が要求されると想定されるので実用化に向けたアプリケーション別の特性要求値を把握することが重要であると考えます。

最終章 全体総括

3-1 研究開発成果のまとめ

3-1-1 高結晶化率 3 インチ径 Ce:GAGG 単結晶の開発

当初の育成炉設計では、結晶育成の品質に影響が生じることが分かり、さらなる育成炉の改良を進めた。合わせて、育成炉を構成する断熱材の形状・厚み・分割数までも含めて見直しをした。

育成炉を構成する断熱材は、結晶を製造する中で温度環境を制御する重要な部分でもあります。さらに、結晶育成を行う上の巨視的要因となる原材料の充填量や貴金属容器サイズ、育成パラメータ、熱的要因、等を整理した結果、高結晶化率 3 インチ径 Ce:GAGG 単結晶を製造することに成功した。この条件を基本におき、より最適化することで製造できることが可能であることが示された。

又、製造した単結晶から 6mm 角で厚み 1mm のサンプル形状に切り出し評価したところ、 ^{137}Cs 線源を用いたガンマ線励起下の波高値スペクトル測定の結果からは、60,000 ph/MeV 以上の発光量を示し、エネルギー分解能では 6%程度、さらに蛍光寿命測定では、70~100ns 程度の高速成分が確認され、既存の Ce:GAGG 単結晶とほぼ同等の特性が示された。

3-1-2 分割型高耐久性断熱材の開発

本件、高融点材料である Ce:GAGG 単結晶製造における高耐久性のある断熱材の開発を行った。要求としては、製造される育成炉内の温度環境を最適化する必要がある、さらに部材の破損を抑えた高寿命化を維持することが目的である。今回、4 分割型高耐久性断熱材となるジルコニア (ZrO_2) 材を考案した。その結果、育成環境に必要な保温効果及び熱勾配がつくることが出来、育成回数が 10 回以上使用可能であることを示した。さらに破損箇所が減少して製造コストの削減の繋がり、量産レベルの使用が可能であることを確認できた。

さらに、2 種の添加材料 CaO 添加 ZrO_2 断熱材と新たに考案した Y_2O_3 添加 ZrO_2 断熱材より高耐久性の比較評価を進めた結果、耐久性とコスト面より CaO 添加の ZrO_2 断熱材が量産型には適した材料であると示した。又、新たに考案した Y_2O_3 添加 ZrO_2 断熱材は、高い耐熱性を示すことがわかった。

3-1-3 Ce:GAGG 結晶のシンチレータアレイ化技術の開発

Ce:GAGG 結晶素子を用いたシンチレータアレイの作製を行った。最適な加工方法や反射材の選定を行うことで、目的とするシンチレータアレイを作製することに成功した。

さらに、Ga/Al 比を変えてエネルギー分解能の優れた Ce:GAGG 結晶素子のシンチレータアレイの作製を行い、ガンマ線源 ^{137}Cs および ^{60}Co を用いて 2 次元マッピング評価を行った。

^{137}Cs および ^{60}Co 線源による 2 次元マッピング評価では、 $0.4 \times 0.4 \times 5 \text{ mm}^3$ シンチレータアレイまでエネルギースペクトルのピークを確認でき、各ピクセルの分離に成功した。

エネルギー分解能が高い $\text{Ga}_{2.7}\text{Al}_{12.3}$ の組成の結晶素子を用いたシンチレータアレイを作製することで、エネルギー分解能の改善に成功した。その結果、当初の目的であった 3 mm 以下の分解能を十分に達成するシンチレータアレイを確立することができた。

3-2 研究開発後の課題

3-2-1 高結晶化率 3 インチ径 Ce:GAGG 単結晶の開発

再現性ある製造条件の確認を図ると同時に量産化に向けての更なるコストダウンが大きな課題である。量産価格ですと、10\$~15\$/CC を目標にしてないとビジネスにはならない見解もあり、向こう 5 ヶ年プランで品質を維持したままのコストダウンを図りたいと考えているしだいである。顧客の要求度、アプリケーション別の特性スペックの閾値の把握が必要と考える。さらに事業化に向けての見解としては Ce:GAGG 結晶の放射線耐性や強度、紫外線による変色が特性に影響があるのかという点について確かめる必要があると考える。

3-1-2 分割型高耐久性断熱材の開発

製品化に向けてさらに安定性・信頼性を得る為に、実用化試験を引き続き実施して断熱材製品に付加価値をつけ、他社の市場競争力をつける。

3-1-3 Ce:GAGG 結晶のシンチレータアレイ化技術の開発

0.17×0.17×5 mm³ シンチレータアレイでは結晶素子のサイズが小さすぎたことでエネルギースペクトルのピークが確認できず、各ピクセルの分離ができなかったところが課題である。

3-3 事業化展開について

シンチレータ市場の用途別にみると、医療、安全保障、防衛、原子力発電所などが挙げられる。その中でも注目すべきところとして原発事故による安全性の懸念、高まるセキュリティの脅威、増加するガンの発生率、PET/CT スキャン数の増加が挙げられアジア地域では大きく伸び率を示している予想がされる。さらに、アジアにおける安全保障や新興国での原発産業の増加、医療分野における核イメージングシステムの普及が進んでいる様子もある。

本件の Ce:GAGG 結晶については、環境モニタリング用途が最も多く、それ以外では高エネルギー物理学、宇宙物理学、学術研究の分野で期待されていると推測している。さらに、シンチレータ特性も高い発光出力、高エネルギー分解能、減衰時間の短縮化が要求されることから、用途別のアプリケーションスペックを十分に把握することが必要と考える。

このような市場動向から、国内市場からアジア・新興国へのニーズの高まりも注目したいところと考え、拡販展開を検討していきたい。