

簡易非破壊測定に向けた革新的な
 $n \cdot \gamma$ シンチレーション検出システムの開発
(委託研究)

－令和5年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業－

Development of an Innovative n/γ Scintillation Detection System for
Simple Non-destructive Measurements
(Contract Research)

－ FY2023 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource
Development Project –

福島廃炉安全工学研究所 廃炉環境国際共同研究センター
東北大学

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,
Fukushima Research and Engineering Institute
Tohoku University

January 2026

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。
本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の
条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）
より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課
〒 319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under
the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section,
Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan

E-mail: ird-support@jaea.go.jp

簡易非破壊測定に向けた革新的な $n \cdot \gamma$ シンチレーション検出システムの開発
(委託研究)

－令和5年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業－

日本原子力研究開発機構 福島廃炉安全工学研究所
廃炉環境国際共同研究センター

東北大学

(2025年9月30日受理)

日本原子力研究開発機構(JAEA) 廃炉環境国際共同研究センター(CLADS)では、令和5年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業(以下、「本事業」という。)を実施している。

本事業は、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所(1F)の廃炉等をはじめとした原子力分野の課題解決に貢献するため、国内外の英知を結集し、様々な分野の知見や経験を従前の機関や分野の壁を越えて緊密に融合・連携させた基礎的・基盤的研究及び人材育成を推進することを目的としている。

平成30年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省からJAEAに移行することで、JAEAとアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築した。

本研究は、令和5年度に採択された研究課題のうち、「簡易非破壊測定に向けた革新的な $n \cdot \gamma$ シンチレーション検出システムの開発」の令和5年度の研究成果について取りまとめたものである。

令和5年度に1Fでは、原子炉格納容器(PCV)からの燃料デブリの取り出しが予定され、さらに、将来的には段階的な取り出し規模の拡大が検討されている。

本研究では、標的試料取り出し時のスクリーニングならびに連続監視に資する、革新的なシンチレーション放射線検出システムを開発する。また、1Fをはじめとした原子力施設廃止措置の炉内調査に資する遠隔測定システムを実用化する。より具体的には、(1)革新的な中性子・ γ 線核種弁別シンチレータの研究(東北大学)、(2)センサーならびに信号処理システムの小型化(東京大学)、(3)多様な放射線場構築と特性評価(産業技術総合研究所)、(4)簡易非破壊測定システムの開発とホットセル内実証試験(原子力機構)の各要素技術に対し、垂直統合的に研究を展開することでPCV内や各受け入れセル内において、10 Gy/hを超える環境下で γ 線、中性子線を弁別し、それぞれの線量率と核種同定を同時に行う検出器の開発に向け、令和5年度に計画した各研究項目に関する研究開発を実施した。

本報告書は、日本原子力研究開発機構の英知事業における委託業務として、東北大学が実施した成果を取りまとめたものである。

廃炉環境国際共同研究センター：〒979-1151 福島県双葉郡富岡町大字本岡字王塚 790-1

Development of an Innovative n/γ Scintillation Detection System for Simple Non-destructive Measurements
(Contract Research)

— FY2023 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project —

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,
Fukushima Research and Engineering Institute
Japan Atomic Energy Agency
Tomioka-machi, Futaba-gun, Fukushima-ken

Tohoku University

(Received September 30, 2025)

The Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), Japan Atomic Energy Agency (JAEA), had been conducting the Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project (hereafter referred to “the Project”) in FY2023.

The Project aims to contribute to solving problems in the nuclear energy field represented by the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (1F), Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. (TEPCO). For this purpose, intelligence was collected from all over the world, and basic research and human resource development were promoted by closely integrating/collaborating knowledge and experiences in various fields beyond the barrier of conventional organizations and research fields.

The sponsor of the Project was moved from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology to JAEA since the newly adopted proposals in FY2018. On this occasion, JAEA constructed a new research system where JAEA-academia collaboration is reinforced and medium-to-long term research/development and human resource development contributing to the decommissioning are stably and consecutively implemented.

Among the adopted proposals in FY2023, this report summarizes the research results of the “Development of an innovative n/γ scintillation detection system for simple non-destructive measurements” conducted in FY2023.

At 1F, removal of fuel debris from the primary containment vessel (PCV) is scheduled for FY2023, and a phased expansion of the removal scale is being considered in the future. As a solution to the above problem, this study will develop an innovative scintillation radiation detection system for screening and continuous monitoring during target sample removal. To develop a remote measurement system that contributes to in-vessel investigations for decommissioning of nuclear facilities such as 1F. More specifically, we will develop vertically integrated research into the following elemental technologies: (1)development of innovative high-performance scintillation materials for thermal neutron / gamma-ray discrimination (Tohoku University), (2)downsizing of censer and signal processing system (the University of Tokyo), (3)construction and characterization of various radiation fields (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology), and (4)development of a simple non-destructive measurement system and hot cell demonstration test (JAEA). By vertically integrating elemental technologies, R&D on each research item planned in FY2023 was conducted to develop a detector that can discriminate gamma-ray and neutron radiation in environments exceeding 10 Gy/h and simultaneously identify the dose rate and nuclide of each in PCVs and in each acceptance cell.

Keywords: Scintillators, Thermal Neutron / Gamma-ray Discrimination, Radiation Detectors

This work was performed by Tohoku University under contract with Japan Atomic Energy Agency.

目次

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要	1
2. 平成 30 年度 採択課題	2
3. 令和元年度 採択課題	5
4. 令和 2 年度 採択課題	8
5. 令和 3 年度 採択課題	10
6. 令和 4 年度 採択課題	12
7. 令和 5 年度 採択課題	14
付録 成果報告書	17

Contents

1. Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project	1
2. Accepted Proposal in FY2018.....	2
3. Accepted Proposal in FY2019.....	5
4. Accepted Proposal in FY2020.....	8
5. Accepted Proposal in FY2021.....	10
6. Accepted Proposal in FY2022.....	12
7. Accepted Proposal in FY2023.....	14
Appendix Result Report	17

This is a blank page.

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要

文部科学省では、「東京電力（株）福島第一原子力発電所の廃止措置等研究開発の加速プラン（平成 26 年 6 月文部科学省）」等を踏まえ、平成 27 年度から「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」（以下、「本事業」という。）を立ち上げ、「戦略的原子力共同研究プログラム」、「廃炉加速化研究プログラム」及び「廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」を推進している。

具体的には、国内外の英知を結集し、国内の原子力分野のみならず様々な分野の知見や経験を、機関や分野の壁を越え、国際共同研究も含めて緊密に融合・連携させることにより、原子力の課題解決に資する基礎的・基盤的研究や産学が連携した人材育成の取組を推進している。

一方、日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という。）では、平成 27 年に廃炉国際共同研究センター（以下、「CLADS」という。現：廃炉環境国際共同研究センター）を組織し、「東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」等を踏まえ、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所廃炉（以下、「1F 廃炉」という。）に係る研究開発を進めている。

また、平成 29 年 4 月に CLADS の中核拠点である「国際共同研究棟」の運用を開始したことを踏まえ、今後は CLADS を中核に、廃炉の現場ニーズを踏まえた国内外の大学、研究機関等との基礎的・基盤的な研究開発及び人材育成の取組を推進することにより、廃炉研究拠点の形成を目指すことが期待されている。

このため、本事業では平成 30 年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省から JAEA に移行することで、JAEA とアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築することとし、従来のプログラムを、①共通基盤型原子力研究プログラム、②課題解決型廃炉研究プログラム、③国際協力型廃炉研究プログラム、④研究人材育成型廃炉研究プログラム（令和元年度より新設）に再編した。

2. 平成 30 年度 採択課題

平成 30 年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

共通基盤型原子力研究プログラム	11 課題（若手研究 6 課題、一般研究 5 課題）
課題解決型廃炉研究プログラム	6 課題
国際協力型廃炉研究プログラム	2 課題（日英）

平成 30 年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
被災地探査や原子力発電所建屋内情報収集のための半自律ロボットを用いたセマンティックサーベイマップ生成システムの開発	河野 仁	東京工芸大学
汚染土壌の減容を目的とした重液分離による放射性微粒子回収法の高度化	山崎 信哉	筑波大学
ラドンを代表としたアルファ核種の吸入による内部被ばくの横断的生体影響評価	片岡 隆浩	岡山大学
炉心溶融物の粘性及び表面張力同時測定技術の開発	大石 佑治	大阪大学
iPS 細胞由来組織細胞における放射線依存的突然変異計測系の確立	島田 幹男	東京工業大学
レーザー共鳴イオン化を用いた同位体存在度の低いストロンチウム 90 の迅速分析技術開発	岩田 圭弘	東京大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
放射性核種の長期安定化を指向した使用済みゼオライト焼結固化技術の開発	新井 剛	芝浦工業大学
燃料デブリ取り出しを容易にするゲル状充填材の開発	牟田 浩明	大阪大学
レーザー蛍光法を用いた燃料デブリ変質相の同定	斉藤 拓巳	東京大学
過酷炉心放射線環境における線量測定装置の開発	岡本 保	木更津工業 高等専門学校
レーザー加工により発生する微粒子の解析と核種同定手法の開発	長谷川 秀一	東京大学

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
合金相を含む燃料デブリの安定性評価のための基盤研究	桐島 陽	東北大学
ガンマ線画像スペクトル分光法による高放射線場環境の画像化による定量的放射能分布解析法	谷森 達	京都大学
燃料デブリ取出し時における放射性核種飛散防止技術の開発	鈴木 俊一	東京大学
アルファダストの検出を目指した超高位置分解能イメージング装置の開発	黒澤 俊介	東北大学
ナノ粒子を用いた透明遮へい材の開発研究	渡邊 隆行	九州大学
先端計測技術の融合で実現する高耐放射線燃料デブリセンサーの研究開発	萩原 雅之	高エネルギー 加速器研究 機構

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
放射性微粒子の基礎物性解明による廃炉作業リスク低減への貢献	五十嵐 康人	茨城大学
放射線耐性の高い薄型 SiC 中性子検出器の開発	三澤 毅	京都大学

3. 令和元年度 採択課題

令和元年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

共通基盤型原子力研究プログラム 7 課題（若手研究 2 課題、一般研究 5 課題）

課題解決型廃炉研究プログラム 4 課題

国際協力型廃炉研究プログラム 4 課題（日英 2 課題、日露 2 課題）

研究人材育成型廃炉研究プログラム 4 課題

令和元年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
ウラニル錯体化学に基づくテーラーメイド型新規海水ウラン吸着材開発	鷹尾 康一郎	東京工業大学
動作不能からの復帰を可能とする多連結移動ロボットの半自律遠隔操作技術の確立	田中 基康	電気通信大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
一次元光ファイバ放射線センサを用いた原子炉建屋内放射線源分布計測	瓜谷 章	名古屋大学
低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ストレス状態の検討	鈴木 正敏	東北大学
単一微粒子質量分析法に基づくアルファ微粒子オンラインモニタリングに向けた基礎検討	豊嶋 厚史	大阪大学
幹細胞動態により放射線発がんを特徴付ける新たな評価系の構築	飯塚 大輔	量子科学技術 研究開発機構
耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発	梅沢 仁 (～R2. 3. 31) 大曲 新矢 (R2. 4. 1～)	産業技術総合 研究所

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
Multi-Physics モデリングによる福島 2・3 号機ペDESTAL燃料デブリ深さ方向の性状同定	山路 哲史	早稲田大学
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃棄物のフッ化技術を用いた分別方法の研究開発	渡邊 大輔	日立GE ニュークリア・ エネルギー
アパタイトセラミックスによる ALPS 沈殿系廃棄物の安定固化技術の開発	竹下 健二 (～R3. 6. 30) 塚原 剛彦 (R3. 7. 1～)	東京工業大学
拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームによる圧力容器内燃料デブリ調査への挑戦	高橋 秀治	東京工業大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
高い流動性および陰イオン核種保持性を有するアルカリ刺激材料の探索と様々な放射性廃棄物の安全で効果的な固化	佐藤 努	北海道大学
再臨界前の中性子線増に即応可能な耐放射線FPGA システムの開発	渡邊 実	静岡大学 (～R3. 3. 31) 岡山大学 (R3. 4. 1～)

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取出し臨界安全技術の高度化	小原 徹	東京工業大学
微生物生態系による原子炉内物体の腐食・変質に関する評価研究	金井 昭夫	慶應義塾大学

研究人材育成型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成	浅間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティクスを融合したデブリ性状把握手法の開発とティアップ型人材育成	高貝 慶隆	福島大学
放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デブリ劣化機構の解明	大貫 敏彦 (～R2. 3. 31) 竹下 健二 (～R3. 6. 30) 塚原 剛彦 (R3. 7. 1～)	東京工業大学
燃料デブリ分析のための超微量分析技術の開発	永井 康介	東北大学

4. 令和2年度 採択課題

令和2年度は、2つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和2年3月17日～令和2年5月14日（課題解決型）

令和2年5月13日～令和2年7月15日（国際協力型）

課題数：10 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 8 課題（若手研究 2 課題、一般研究 6 課題）

国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）

令和2年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリにおける特性の経年変化と環境劣化割れの調査	楊 会龍 (～R4. 7. 31) 村上 健太 (R4. 8. 1～)	東京大学
健全性崩壊をもたらす微生物による視認不可腐食の分子生物・電気化学的診断及び抑制技術の開発	岡本 章玄	物質・材料 研究機構

課題解決型廃炉研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
遮蔽不要な臨界近接監視システム用ダイヤモンド中性子検出器の要素技術開発	田中 真伸	高エネルギー 加速器研究 機構
$\alpha/\beta/\gamma$ 線ラジオリシス影響下における格納容器系統内広域防食の実現:ナノバブルを用いた新規防食技術の開発	渡邊 豊	東北大学
β 、 γ 、X線同時解析による迅速・高感度放射性核種分析法の開発	篠原 宏文	日本分析 センター
合理的な処分のための実機環境を考慮した汚染鉄筋コンクリート長期状態変化の定量評価	丸山 一平	東京大学
溶脱による変質を考慮した汚染コンクリート廃棄物の合理的処理・処分の検討	小崎 完	北海道大学
マイクロ波重畳 LIBS によるデブリ組成計測の高度化と同位体の直接計測への挑戦	池田 裕二	アイラボ

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
革新的水質浄化剤の開発による環境問題低減化技術の開拓	浅尾 直樹	信州大学
無人航走体を用いた燃料デブリサンプルリターン技術の研究開発	鎌田 創	海上・港湾・ 航空技術 研究所

5. 令和3年度 採択課題

令和3年度は、2つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和3年3月16日～令和3年5月17日（課題解決型）
令和3年4月13日～令和3年7月1日（国際協力型 日英共同研究）
令和3年7月12日～令和3年8月18日（国際協力型 日露共同研究）

課題数：12 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 8 課題
国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）、2 課題（日露）

令和3年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究	前田 匡樹	東北大学
燃料デブリ周辺物質の分析結果に基づく模擬デブリの合成による実機デブリ形成メカニズムの解明と事故進展解析結果の検証によるデブリ特性データベースの高度化	宇埜 正美	福井大学
ジオポリマー等による PCV 下部の止水・補修及び安定化に関する研究	鈴木 俊一	東京大学
世界初の同位体分析装置による少量燃料デブリの性状把握分析手法の確立	坂本 哲夫	工学院大学
アルファ微粒子の実測に向けた単一微粒子質量分析法の高度化	豊嶋 厚史	大阪大学
連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究	人見 啓太郎	東北大学
中赤外レーザー分光によるトリチウム水連続モニタリング手法の開発	安原 亮	自然科学研究機構

課題名	研究代表者	所属機関
福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハイブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構築・安全評価	中瀬 正彦	東京工業大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
福島第一原子力発電所の廃止措置における放射性エアロゾル制御及び除染に関する研究	Erkan Nejdet (～R4. 1. 31) 三輪 修一郎 (R4. 2. 1～)	東京大学
燃料デブリ取り出しのための機械式マニピュレータのナビゲーションおよび制御	浅間 一	東京大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
福島第一発電所 2、3 号機の事故進展シナリオに基づく FP・デブリ挙動の不確かさ低減と炉内汚染状況・デブリ性状の把握	小林 能直	東京工業大学
非接触測定法を用いた燃料デブリ臨界解析技術の高度化	小原 徹	東京工業大学

6. 令和4年度 採択課題

令和4年度は、2つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。

公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和4年3月1日～令和4年5月6日（課題解決型）

令和4年4月7日～令和4年6月16日（国際協力型 日英共同研究）

課題数：8 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 6 課題

国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）

令和4年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
革新的アルファダスト撮像装置と高線量率場モニタの実用化とその応用	黒澤 俊介	東北大学
3次元線量拡散予測法の確立と γ 線透過率差を利用した構造体内調査法の開発	谷森 達	京都大学
α 汚染可視化ハンドフットクロスモニタの要素技術開発	樋口 幹雄	北海道大学
高放射線耐性の低照度用太陽電池を利用した放射線場マッピング観測システム開発	奥野 泰希	京都大学 (～R5.3.31) 理化学研究所 (R5.4.1～)
障害物等による劣悪環境下でも通信可能なパッシブ無線通信方式の開発	新井 宏之	横浜国立大学
無線 UWB とカメラ画像分析を組合せたリアルタイム 3D 位置測位・組込システムの開発・評価	松下 光次郎	岐阜大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
耐放射線プロセッサを用いた組み込みシステムの開発	渡邊 実	岡山大学
マイクロ・ナノテクノロジーを利用したアルファ微粒子の溶解・凝集分散に及ぼすナノ界面現象の探求	塚原 剛彦	東京工業大学

7. 令和 5 年度 採択課題

令和 5 年度は、2 つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和 5 年 3 月 1 日～令和 5 年 4 月 14 日（課題解決型）

令和 5 年 4 月 12 日～令和 5 年 6 月 15 日（国際協力型 日英共同研究）

課題数：9 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 7 課題

国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）

これらの提案について、外部有識者から構成される審査委員会において、書面審査及び面接審査、日英共同研究については二国間の合同審査を実施し、採択候補課題を選定した。

その後、PD（プログラムディレクター）・PO（プログラムオフィサー）会議及びステアリングコミッティでの審議を経て、採択課題を決定した。

令和 5 年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
遮蔽不要な耐放射線性ダイヤモンド中性子計測システムのプロトタイプ開発	金子 純一	北海道大学
簡易非破壊測定に向けた革新的な $n \cdot \gamma$ シンチレーション検出システムの開発	鎌田 圭	東北大学
ペデスタル部鉄筋コンクリート損傷挙動の把握に向けた構成材料の物理・化学的変質に関する研究	五十嵐 豪	名古屋大学
動画像からの特徴量抽出結果に基づいた高速 3 次元炉内環境モデリング	中村 啓太	札幌大学
放射性コンクリート廃棄物の減容を考慮した合理的処理・処分方法の検討	小崎 完	北海道大学

課題名	研究代表者	所属機関
高バックグラウンド放射線環境における配管内 探査技術の開発	鳥居 建男	福井大学
PCV 気相漏洩位置及び漏洩量推定のための遠隔 光計測技術の研究開発	椎名 達雄	千葉大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
革新的分光画像解析による燃料デブリの可視化 への挑戦と LIBS による検証	牟田 浩明	大阪大学
燃料デブリ除去に向けた様々な特性をもつメタカ オリンベースのジオポリマーの設計と特性評価	Yogarajah Elakneswaran	北海道大学

本報告書は、以下の課題の令和 5 年度分の研究成果について取りまとめたものである。

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
簡易非破壊測定に向けた革新的な $n \cdot \gamma$ シンチレーション検出システムの開発	鎌田 圭	東北大学

研究成果を取りまとめた成果報告書を付録として添付する。

付録

成果報告書

This is a blank page.

令和 5 年度

日本原子力研究開発機構

英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

簡易非破壊測定に向けた革新的な $n \cdot \gamma$ シンチレーション
検出システムの開発

(契約番号 R05I104)

成果報告書

令和 6 年 3 月

国立大学法人東北大学

本報告書は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」による委託業務として、国立大学法人東北大学が実施した「簡易非破壊測定に向けた革新的な $n \cdot \gamma$ シンチレーション検出システムの開発」の令和 5 年度分の研究成果を取りまとめたものである。

目次

概略	vii
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	2-1
2.1 全体計画	2-1
2.1.1 革新的な中性子・ γ 線核種弁別シンチレータの研究	2-1
2.1.2 センサーならびに信号処理システムの小型化（再委託先：東京大学）	2-1
2.1.3 多様な放射線場構築と特性評価（再委託先：産総研）	2-2
2.1.4 簡易非破壊測定システムの開発とホットセル内実証試験（連携先：原子力機構）	2-2
2.1.5 研究推進	2-2
2.2 実施体制	2-3
2.3 令和5年度の成果の目標及び業務の実施方法	2-4
2.3.1 革新的な中性子・ γ 線核種弁別シンチレータの研究	2-4
2.3.2 センサーならびに信号処理システムの小型化（再委託先：東京大学）	2-4
2.3.3 多様な放射線場構築と特性評価（再委託先：産総研）	2-4
2.3.4 簡易非破壊測定システムの開発とホットセル内実証試験（連携先：原子力機構）	2-5
2.3.5 研究推進	2-5
3. 実施内容及び成果	3-1
3.1 革新的な中性子・ γ 線核種弁別シンチレータの研究	3-1
3.1.1 熱中性子線用新規構造化シンチレータの開発	3-1
3.1.2 γ 線用シンチレータの性能改善	3-13
3.1.3 シンチレータの微細加工とパッケージング技術開発	3-13
3.2 センサーならびに信号処理システムの小型化（再委託先：東京大学）	3-14
3.2.1 1 GHz 動作小型信号処理基盤の開発	3-14
3.2.2 波形弁別型リアルタイム処理アルゴリズムと復元手法の開発	3-15
3.3 多様な放射線場構築と特性評価（再委託先：産総研）	3-17
3.3.1 大線量標準場での試験と放射線場評価	3-17
3.3.2 中性子標準場での試験、光子・中性子混在場の評価	3-21
3.3.3 光子・中性子混在場の構築と試験	3-23
3.3.4 連続光子場の構築と試験	3-25
3.3.5 まとめ	3-27
3.4 簡易非破壊測定システムの開発とホットセル内実証試験（連携先：原子力機構）	3-28
3.4.1 簡易非破壊測定システムの開発	3-28
3.4.2 まとめ	3-33
3.5 研究推進【令和5年度】	3-34
4. 結言	4-1
参考文献	5-1

執筆者リスト

研究代表者

国立大学法人東北大学

准教授

鎌田 圭

再委託先

国立大学法人東京大学

准教授

島添 健次

国立研究開発法人産業技術総合研究所

研究員

石井 隼也

連携先

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究副主幹

冠城 雅晃

表一覧

表 3.1-1	シンチレータ相候補の諸特性	....	3-1
表 3.1-2	^6Li 含有相の諸特性	....	3-2
表 3.1-3	令和 5 年度作製した共晶シンチレータ	....	3-12
表 3.3-1	Cs-137 線源場における試作検出素子 (CeBr_3 :3 mm×3 mm×3 mm) の正味計数率とデットタイム	....	3-18
表 3.3-2	Co-60 線源場における検出素子 (CeBr_3 :3 mm×3 mm×3 mm) の正味計数率とデットタイム	....	3-18
表 3.3-3	産総研大線量標準場 (Cs-137 線源) の各基準位置における光子フルエンス率	....	3-19
表 3.3-4	Kromek 社製薄型 CdZnTe 半導体検出器 (GR05+) のエネルギー分解能	....	3-19
表 3.3-5	中性子検出素子 ($\text{LaBr}_3/\text{LiBr}$:3 mm×3 mm×1 mm) の熱中性子検出効率	....	3-23
表 3.3-6	中性子検出素子 ($\text{LaBr}_3/\text{LiBr}$:3 mm×3 mm×3 mm) の熱中性子検出効率	....	3-23
表 3.3-7	連続 X 線場における空気カーマ率絶対測定のための物理定数及び補正係数の値	....	3-27
表 3.3-8	連続 X 線場 (最大定格出力:100 W) における測定結果	....	3-27

図一覧

図 2.2-1	実施体制図	....	2-3
図 3.1-1	育成した Tl:CsI/ ⁶ LiBr 結晶 (左) と 1 mm 厚結晶 (右)	....	3-2
図 3.1-2	Tl:CsI/ ⁶ LiBr の粉末 XRD パターン	....	3-2
図 3.1-3	Tl:CsI/ ⁶ LiBr の SEM-BEI	....	3-3
図 3.1-4	Tl:CsI/ ⁶ LiBr の RL スペクトル	....	3-3
図 3.1-5	Tl:CsI/ ⁶ LiBr の CL スペクトル	....	3-4
図 3.1-6	Tl:CsI/ ⁶ LiBr における中性子励起の波高値スペクトル	....	3-4
図 3.1-7	Tl:CsI/ ⁶ LiBr の減衰時間	....	3-5
図 3.1-8	中性子励起と γ 線励起それぞれの波高値スペクトル	....	3-5
図 3.1-9	Tl:CsI/ ⁶ LiBr の PSD マッピング	....	3-6
図 3.1-10	Slow/Total ratio のヒストグラムとフィッティングカーブ	....	3-6
図 3.1-11	Ce, 0.5%Sr:LaBr ₃ 育成単結晶	....	3-7
図 3.1-12	Ce, 0.5%Sr:LaBr ₃ の PSD マッピング	....	3-7
図 3.1-13	Slow/Total ratio のヒストグラムとフィッティングカーブ	....	3-8
図 3.1-14	Ce, Sr:LaBr ₃ / ⁶ LiBr の育成結晶写真 (左) と 1 mm 厚結晶 (右)	....	3-8
図 3.1-15	Ce, Sr:LaBr ₃ / ⁶ LiBr の RL スペクトル	....	3-9
図 3.1-16	Ce, Sr:LaBr ₃ / ⁶ LiBr の中性子励起の波高値スペクトル	....	3-9
図 3.1-17	Ce, 1%Sr:LaBr ₃ / ⁶ LiBr の減衰カーブ	....	3-10
図 3.1-18	中性子線励起と γ 線励起の波高値スペクトルの比較	....	3-10
図 3.1-19	Ce, Sr:LaBr ₃ / ⁶ LiBr の PSD マッピング (左) と Slow/Total ratio のヒストグラム及びフィッティングカーブ (右)	....	3-11
図 3.1-20	加工を実施したシンチレータの写真 (1 mm×1 mm×0.1 mm サイズ)	....	3-13
図 3.1-21	パッケージング品の外観写真	....	3-13
図 3.2-1	設計した 2ch 入力小型 AD 変換-FPGA デジタル信号処理基盤	....	3-14
図 3.2-2	高計数率対応 SL-TOT 方式のシミュレーション波形	....	3-15
図 3.2-3	放射線計測の基本となる微分、積分フィルタの実装	....	3-16
図 3.3-1	Cs-137 線源場における試作検出素子 (CeBr ₃) の応答スペクトル	....	3-17
図 3.3-2	Co-60 線源場における試作検出素子 (CeBr ₃) の応答スペクトル	....	3-17
図 3.3-3	CdZnTe 半導体検出器を用いたスペクトル測定の様子	....	3-20
図 3.3-4	計算と実測 (CdZnTe 半導体検出器) により得られたエネルギー スペクトルの比較	....	3-20
図 3.3-5	放出率評価及び検出素子の試験に利用した黒鉛パイル	....	3-21
図 3.3-6	中性子標準場における試作検出素子 (LaBr ₃ /LiBr:3 mm×3 mm×1 mm) の応答スペクトルとガウスフィッティング (赤線)	....	3-22
図 3.3-7	中性子標準場における試作検出素子 (LaBr ₃ /LiBr:3 mm×3 mm×3 mm) の応答スペクトルとガウスフィッティング (赤線)	....	3-22
図 3.3-8	購入した Cf-252 線源	....	3-24
図 3.3-9	γ 線・中性子混在場試験の構想図	....	3-24
図 3.3-10	計算された模擬散乱線場のエネルギースペクトル	....	3-26
図 3.3-11	連続光子場での空気カーマ率絶対測定の様子	....	3-27

図 3.4-1	寸法が 3 mm×3 mm×3 mm の CeBr ₃ 結晶を石英窓付のアルミパッケージで密封したシンチレータ	....	3-28
図 3.4-2	寸法が 3 mm×3 mm×1 mm (厚さ) の共晶体 LaBr ₃ /LiBr を石英窓付のアルミパッケージで密封したシンチレータ	....	3-28
図 3.4-3	寸法が 3 mm×3 mm×3 mm (厚さ) の共晶体 LaBr ₃ /LiBr を石英窓付のアルミパッケージで密封したシンチレータ	....	3-29
図 3.4-4	高線量率測定用の検出素子の試作	....	3-30
図 3.4-5	革新的なシンチレータを PMT に接合した様子	....	3-30
図 3.4-6	簡易非破壊測定システムで利用する信号処理ブロックダイアグラム	....	3-31
図 3.4-7	CeBr ₃ シンチレータ (3 mm×3 mm×3 mm) における Cs-137 線源の γ 線スペクトル測定の結果	....	3-32
図 3.4-8	LaBr ₃ /LiBr シンチレータ (3 mm×3 mm×1 mm) の Cs-137 線源ならびに Cf-252 線源のスペクトル測定結果	....	3-32
図 3.4-9	LaBr ₃ /LiBr シンチレータ (3 mm×3 mm×3 mm) の Cs-137 線源ならびに Cf-252 線源のスペクトル測定結果	....	3-33

略語一覧

CLADS	: Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science	(廃炉環境国際共同研究センター)
原子力機構	: Japan Atomic Energy Agency	(国立研究開発法人日本原子力研究開発 機構)
1F	: 東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所	
WASTEF	: Waste Safety Testing Facility	(廃棄物安全試験施設)
東京大学	: 国立大学法人東京大学	
東北大学	: 国立大学法人東北大学	
産総研	: 国立研究開発法人産業技術総合研究所	
FPGA	: Field Programmable Gate Array	
PSD	: Pulse Shape Discrimination	

概略

東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所（以下、1F と記す。）では、令和5年度に原子炉格納容器（以下、PCV と記す。）からの燃料デブリの取り出しが予定され、さらに、将来的には段階的な取り出し規模の拡大が検討されている。一方で、燃料デブリ（標的試料）は総量、性状、かさ密度、表面線量率、核種インベントリという特性の変動が大きく、部分ごとに組成が異なる可能性があり、放射線計測器に求められる遮蔽や検出素子形状の最適化が困難になる課題がある。本研究では、このような課題の解決策として、標的試料取り出し時のスクリーニングならびに連続監視に資する、革新的なシンチレーション放射線検出システムを開発する。1F をはじめとした原子力施設廃止措置の炉内調査に資する遠隔測定システムを実用化する。より具体的には、(1) 革新的な中性子・ γ 線核種弁別シンチレータの研究（国立大学法人東北大学（以下、東北大学と記す。）、(2) センサーならびに信号処理システムの小型化（国立大学法人東京大学（以下、東京大学と記す。）、(3) 多様な放射線場構築と特性評価（国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下、産総研と記す。）、(4) 簡易非破壊測定システムの開発とホットセル内実証試験（国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構と記す。）の各要素技術に対し、垂直統合的に研究を展開することで、PCV 内や各受け入れセル内において 10 Gy/h を超える環境下で γ 線、中性子線を弁別し、それぞれの線量率と核種同定を同時に行う検出器の開発を実施する。

1. はじめに

令和5年度に1Fでは、PCVから燃料デブリの取り出し（以下、当該作業と記す。）が予定され、さらに、将来的には段階的な取り出し規模の拡大が検討されている。PCV内は、燃料デブリ、放射性廃棄物、その他の構造物が混在していることから、PCVから取り出す物質は、保管容器、臨界管理、長期健全性、計量管理、さらには将来的な処理処分を考慮するうえで特性評価をすることが有益である。非破壊測定は、上記の特性評価に有力な手法であるが、一方で、各号機の建屋環境ならびに燃料デブリと放射性廃棄物の総量を考慮すると、事前にスクリーニングして仕分けをしておくことで、その後の非破壊測定にかかる負担を減らしスループットを向上させることが期待できる。加えて、当該作業の安全性を向上させるために放射線モニタリングを含めた連続監視が検討されている。しかし、1Fは号機ごとに事故進展が異なり、事故の複雑性から一度にPCVから取り出される標的試料は、総量、性状、かさ密度、表面線量率、核種インベントリという特性の変動が大きく、さらに、取り出し規模が拡大すると部分ごとに組成が異なる可能性があり、放射線計測器に求められる遮蔽や検出素子形状の最適化が困難になることが想定される。

本課題では、上記の解決策として、標的試料取り出し時のスクリーニングならびに連続監視に資する、革新的なシンチレーション放射線検出システムを開発し、以下の実現を目指す。

- ① ホットセル内やPCVに投入し、スポット測定可能な小型軽量の検出素子の構築。
- ② 革新的な構造化シンチレータを用いたPulse Shape Discrimination（以下、PSDと記す。）による中性子・ γ 弁別。
- ③ 高速シンチレータならびに高速デジタル信号処理による超高計数率測定による高線量率場での高感向上。

当該システムでは、発光時間が短くかつエネルギー分解能がよいシンチレータを探索し、1 mm以下スケールの多様な形状の結晶加工とパッケージングの技術と高帯域かつ高計数率測定に優れる測定システムを組み合わせることで、高線量率環境において重厚な遮蔽を必要としないで放射線計測を可能とする。さらに、非破壊測定に利用できる表面線量率、 γ 線スペクトル、中性子束という標的試料の情報を総合的に捉えることができる小型な検出素子を構築する。以下に検出器の具体的な目標性能を示す。

- ・空間線量率が10 Gy/hまでは遮蔽なしで運用可能。
- ・100 Gy/hから1,000 Gy/hの上限線量率に対しては、多層な遮蔽構造で散乱線成分を取り除く数kg程度の軽微な遮蔽（低光子フィルター）を採用。
- ・ γ 線核種（Cs-137、Co-60、Eu-154）の主要ピークに対し、662 keVでエネルギー分解能8.8%（半値幅）以下ならびに1,333 keVで4.5%（半値幅）以下。
- ・中性子線に対し、フルエンス率が $10 \text{ cm}^{-1}\text{s}^{-1}$ において15分以内の検知可能。
- ・1 GHz/14 bit程度以上の高速処理。
- ・検出素子：サイズ $5 \times 5 \text{ cm}$ 以内、重量1.5 kg以下、防水IPX7相当。
- ・20 m以上の長距離伝送。

2. 業務計画

2.1 全体計画

2.1.1 革新的な中性子・ γ 線核種弁別シンチレータの研究

(1) 熱中性子線用新規構造化シンチレータの開発

本研究の熱中性子線用新規構造化シンチレータの開発においては、

シンチレータ相 Ce:REB_3 ($\text{RE}=\text{La, Ce, Y, Gd, Lu}$ 、 $\text{B}=\text{Cl, Br, I}$)

Eu:AEB_2 ($\text{AE}=\text{Mg, Ca, Sr, Ba}$ 、 $\text{B}=\text{Cl, Br, I}$)

Li 含有相 LiB ($\text{B}=\text{Cl, Br, I}$)、 LiAEB_3 、 LiREB_4

これらの組み合わせで、石英封緘型垂直ブリッジマン法により結晶作製を行い、シンチレータ特性を評価する。有望であることが報告されている、 $\text{LaBr}_3/{}^6\text{LiBr}$ 、 $\text{CsI}/{}^6\text{LiBr}$ を用いたパッケージングを先行させる。

(2) γ 線用シンチレータの性能改善

Ce:LaBr_3 では、 Ce 添加量が多いほど、蛍光寿命が短寿命化するものの、自己吸収が増加するため発光量が低下することが知られている。一般にシンチレータ結晶は 1~2 インチ径×1~2 インチ長の大型形状で用いられることが多く、自己吸収による発光量の低下を最小化するため Ce 添加量は 1~5%とされている。一方で、本開発の検出器では 1 mm 角×0.5 mm 厚の微小な結晶を用いることとなる。本項目では、 Ce 濃度を増加させ、 Sr を共添加した LaBr_3 結晶を作製する。

(3) シンチレータの微細加工とパッケージング技術開発

ハロゲン化物シンチレータの SiPM や光電子増倍管（以下、PMT と記す。）との一体パッケージング技術の検討を行う。

2.1.2 センサーならびに信号処理システムの小型化（再委託先：東京大学）

(1) 1 GHz 動作小型信号処理基盤の開発

今回対象とする高線量率下で動作する検出器は、非常に短い 20-30 ns 以下程度の減衰時定数を有する。このような信号から精度高くエネルギー情報を抽出するためには 1 GHz/14 bit 程度以上の高速処理が必要となる。一方で、実際の環境に組み込み可能なシステムとするためには $5 \times 10 \text{ cm}^2$ 程度の小型化が必要なほか、10 Gy/h で動作をさせるためには高計数率下で必要なデータのみデータ記録用媒体に高速伝送することが必要である。ここでは、Field Programmable Gate Array（以下、FPGA と記す。）及び高速アナログ・デジタル変換器 (Analog to Digital Converter:ADC) を実装した多チャンネル入力の小型ボードを開発する。これによりプロジェクト内で開発する高速シンチレータの可搬可能な読み出し信号処理基盤技術を確立する。

(2) 波形弁別型リアルタイム処理アルゴリズムと復元手法の開発

中性子及び γ 線が混在している場においては、中性子と γ 線の弁別が必要となることが考えられる。一般にシンチレータにおいては中性子と γ 線に対して、減衰時定数の異なる応答を行うものが存在する。通常これらの弁別のためには PSD 処理をオフラインで行うか異なる時定数フィルタを用いて外部で波高値を計測することが行われるが、本課題では、全てを FPGA 内で処理することで高計数率下で動作するリアルタイム処理アルゴリズムを開発する。

(3) 高線量率下リアルタイム読出実証試験

上記で開発する高速処理可搬型小型信号処理基板と波形弁別型リアルタイム処理アルゴリズムと復元手法の実証試験を産総研の協力を得て高線量率下 (>10 Gy/h) で動作試験を行う。

2.1.3 多様な放射線場構築と特性評価（再委託先：産総研）

(1) 大線量標準場での試験と放射線場評価

大強度放射線場（Cs-137 線源場、Co-60 線源場）において線源からの距離を変えた各測定点において、線量計ならびに γ 線スペクトロメータを用いて、線量率ならびに光子スペクトルを測定する。これにより、各測定点の放射線場特性を取得して開発した検出素子の応答を定量的に評価する。Cs-137 線源場において、Co-60 密封線源を配置して、Co-60 核種検出試験を実施する。

(2) 中性子標準場での試験、光子・中性子混在場の評価

中性子標準場において検出素子に中性子照射して、検出効率を評価することで検出素子の感度を定量的に評価する（校正）。続いて、 γ 線場中での中性子感度を評価するため、 γ 線場である大強度放射線場において中性子源を配置した場合の光子（ γ 線）と中性子のフルエンスを評価する。

(3) 光子・中性子混在場の構築と試験

上記(2)の評価に基づいて、大強度放射線場に中性子源を配置して、中性子線源の光子・中性子混在場を構築する。

(4) 連続光子場の構築と試験

1F 環境の散乱線場を模擬的に構築するため、放射線源照射装置（Cs-137、Co-60）に加えて、X線発生装置を利用した連続的な光子（X線）場を構築し、光子スペクトルを評価する。

2.1.4 簡易非破壊測定システムの開発とホットセル内実証試験（連携先：原子力機構）

(1) 簡易非破壊測定システムの開発

原子力機構で開発をしてきた高線量率測定用の検出素子と東北大学が作製する高速なシンチレータを組み合わせて、試作の検出素子を作製する。試作検出素子は、産総研で開発する放射線場にて特性評価する。2年目は、令和5年度に抽出した開発項目に従い、必要があれば検出素子を改良する。さらに、ホットセル内に投入するため、検出素子の形状、材質、長距離伝送を考慮したセル内検出素子を構築する。セル内検出素子は、産総研の放射線場で特性評価してから原子力機構/WASTEFでホット試料の測定試験をする。3年目は、令和6年度の性能評価に基づき、必要があれば検出素子のさらなる改良を加える。ホットセル内に周囲を多方向から測定できる測定システムを構築する。

(2) ホットセル内実証試験

令和5年度は、原子力機構/WASTEFのホットセル内で測定対象とするホット試料（RI線源あるいは放射性廃棄物あるいは使用済み核燃料）の選定と試験計画を立案する。令和6年度には、汚染を防ぐために、検出素子とケーブルを養生してセル内に投入する。検出素子への電源供給ならびに信号受信は、検出素子からのケーブルをセル外まで伸ばして実施する。令和6年度では、1個ないし2個のホット試料（RI線源あるいは放射性廃棄物あるいは使用済み核燃料）を測定対象とするが、令和6年度には、収納容器に複数のホット試料を入れた測定対象を構築し、セル内での非破壊測定（パッシブ γ とパッシブ中性子法）を実施する。

2.1.5 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）等との連携を密にして研究を進める。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催する。

2.2 実施体制

実施体制を図 2.2-1 に示す。

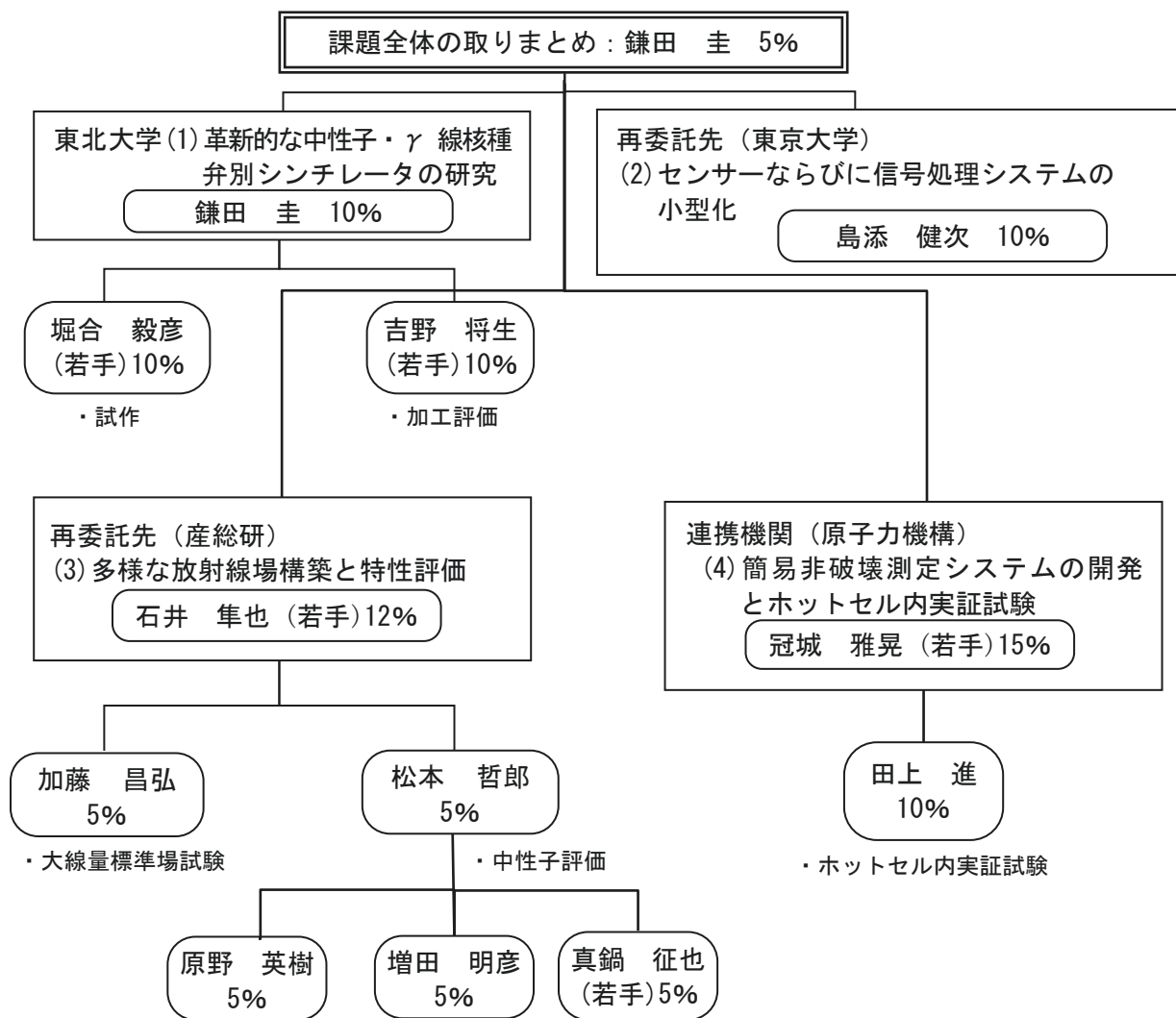


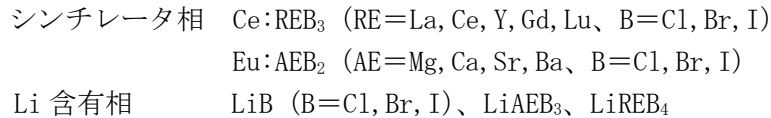
図 2.2-1 実施体制図

2.3 令和5年度の成果の目標及び業務の実施方法

2.3.1 革新的な中性子・ γ 線核種弁別シンチレータの研究

(1) 熱中性子線用新規構造化シンチレータの開発

熱中性子線用新規構造化シンチレータの開発においては、



これらの組み合わせで、石英封緘型垂直ブリッジマン法により結晶作製を行い、シンチレータ特性を評価する。

(2) γ 線用シンチレータの性能改善

CeBr₃を候補材とし、これを1 mm 角×0.5 mm 厚に加工する技術の開発を実施し、石英窓を用いたパッケージを作製する。

(3) シンチレータの微細加工とパッケージング技術開発

ハロゲン化物シンチレータのSiPMやPMTとの一体パッケージング技術の検討を行う。

2.3.2 センサーならびに信号処理システムの小型化（再委託先：東京大学）

(1) 1 GHz 動作小型信号処理基盤の開発

クロックの立ち上がりと立ち下がりを用いることで1 GHz 高速サンプリング可能なシステムを構築する。リアルタイムデジタル帯域フィルタをFPGA内に実装し、波高を抽出することで1イベントの信号量を16 bit まで低減し、高計数率下で動作可能な可搬型5×10 cm²程度の小型高速デジタル波形解析処理ボードの設計試作を開始する。

(2) 波形弁別型処理アルゴリズムと復元手法の開発

中性子と γ 線において異なる応答を示すシンチレータを用いてFPGA内でリアルタイム線種弁別が可能なプログラムを実装し、検証試験を実施する。

2.3.3 多様な放射線場構築と特性評価（再委託先：産総研）

(1) 大線量標準場での試験と放射線場評価

大強度放射線場（Cs-137 線源場、Co-60 線源場）において線源からの距離を変えた各測定点において、試作検出素子の線量率特性を測定する。

(2) 中性子標準場での試験、光子・中性子混在場の評価

中性子標準場において検出素子に中性子を照射して、検出効率を評価することで検出素子の感度を定量的に評価する（校正）。

(3) 光子・中性子混在場の構築と試験

光子・中性子混在場の構築のために、大強度放射線場での設置台を含む中性子線源の配置の決定と中性子線源の放出率測定を行う。

(4) 連続光子場の構築と試験

X線発生装置を利用し、1F環境の散乱線場を模擬する連続的な光子（X線）場を構築する。

2.3.4 簡易非破壊測定システムの開発とホットセル内実証試験（連携先：原子力機構）

(1) 簡易非破壊測定システムの開発

高線量率測定用の検出素子を試作し、東北大学が作製する既存の高速なシンチレータと組み合わせる。さらに、試作の検出素子を評価するための測定機材を整備する。試作検出素子は、2.3.3 項(1)(2)に供する。

2.3.5 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして研究を進める。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催する。

3. 実施内容及び成果

3.1 革新的な中性子・ γ 線核種弁別シンチレータの研究

3.1.1 熱中性子線用新規構造化シンチレータの開発

熱中性子線用新規構造化シンチレータの開発においては、

シンチレータ相 Ce:REB₃ (RE=La, Ce, Y, Gd, Lu, B=Cl, Br, I)

Eu: AEB₂ (AE=Mg, Ca, Sr, Ba, B=Cl, Br, I)

Li 含有相 LiB (B=Cl, Br, I)、LiAEB₃、LiREB₄

などの組み合わせを考慮し、状態図が存在する系で共晶体の育成可能と思われる結晶組成を検討した。また、廃炉用途では 0.1 mm 厚での使用を想定しているので、結晶の透明性はさほど問題にならないが、屈折率差とシンチレータ光の減衰を議論するために屈折率差を考慮に入れた材料選択を行った。

表 3.1-1 にシンチレータ相の候補を示す。また、表 3.1-2 に ⁶Li 含有相の候補を示す。これらのシンチレータと ⁶Li 含有化合物の中から材料設計の指針を満たす 2 相を選択した結果、Tl:CsI/⁶LiBr、Tl:NaI/⁶LiBr、LaBr₃/⁶LiBr (pure、Ce、Sr 共添加)、LaCl₃/⁶LiCl (pure、Ce 添加) の 10 種の母材が有望材として選定された。Tl:CsI 及び Tl:NaI は、 α/β 比がよく、良好な PSD を有する。また、⁶Li 含有相として選択した ⁶LiBr は、Tl:CsI 及び Tl:NaI の発光波長においてシンチレータ相と非常に近い屈折率をもつ ($n=1.7854@540$ 、 $1.7920@415$)。

Ce:LaBr₃ に Sr を共添加すると PSD 特性が向上する。また、それにより α/β 比も向上している。密度が目標値よりも下回っているが、PSD により弁別できる可能性があるので Sr、Ce:LaBr₃/⁶LiBr を材料の候補とした。

Ce:LaCl₃/⁶LiCl は、 α/β 比がよく高速かつ高発光量であったため候補とした。また、LaCl₃ に Ce の添加量を増やしていくと PSD 性能が悪化する。そのため、pure LaCl₃/⁶LiCl も候補とした。また、報告の少ない pure LaBr₃ も pure LaCl₃ と同様に、Ce 無添加の方が PSD 特性に優れる可能性があるため、pure LaBr₃/⁶LiBr 材料の候補に加えた。令和 5 年度は、①Tl:CsI/⁶LiBr、②LaBr₃/⁶LiBr 共晶に注目し、育成と性能評価を実施した。

表 3.1-1 シンチレータ相候補の諸特性

シンチレータ	発光量 (MeV)	蛍光 寿命 (ns)	発光波長 (nm)	密度 (g/cm ³)	α/β 比	PSD 特性	発光波 長での 屈折率
Tl:CsI	55,000 (γ)	900	540	4.51	0.66	○	1.7966
Tl:NaI	43,000 (γ)	230	415	3.67	0.7	○	1.8218
Ce:LaBr ₃	64,000	16	355, 390	5.07	0.36	×	2.21
Ce, Sr:LaBr ₃	71,000	16	355, 390	5.07	0.513	○	-
Pure LaBr ₃	-	-	-	5.07	-	-	-
Ce:LaCl ₃	50,000	28	337, 358	3.85	0.356	×	2.05
Pure LaCl ₃	34,000	-	325, 400	3.85	0.20	○	-

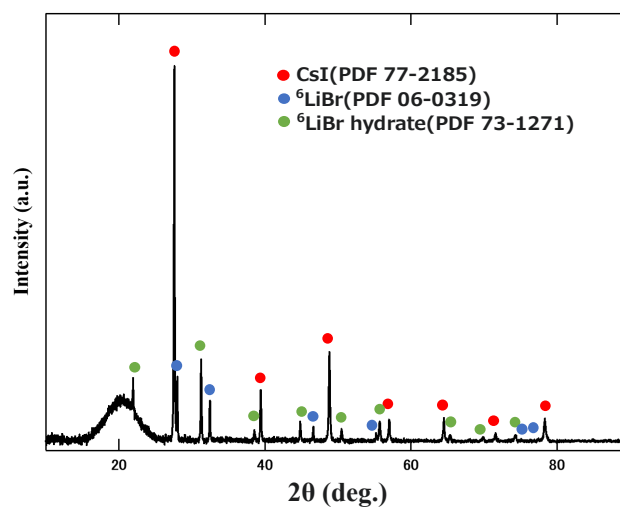
表 3.1-2 ^6Li 含有相の諸特性

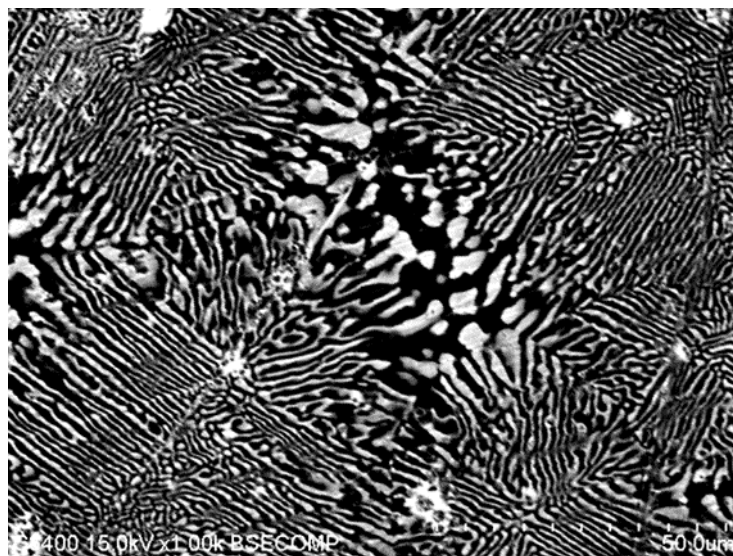
^6Li 含有相	屈折率 (@400 nm)	密度 (g/cm ³)	式量
^6LiF	1.3989	2.64	25.9
$^6\text{LiCl}$	1.6677	2.07	42.4
$^6\text{LiBr}$	1.7933	3.46	86.8
^6LiI	1.9636	4.08	133.8

① $\text{Tl}:\text{CsI}/^6\text{LiBr}$

・結晶育成/構造解析

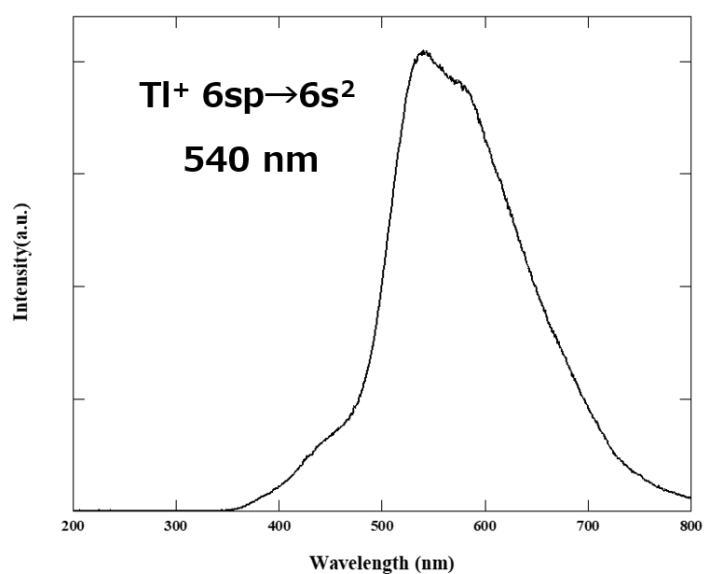
図 3.1-1 に、0.4 mol% TlI -37.5 mol% CsI -60 mol% $^6\text{LiBr}$ の組成において、0.2 mm/min で育成した結晶の写真を示す。屈折率が非常に近い 2 相を選択したため、透明性の高い結晶が育成できた。図 3.1-2 に、粉末 XRD 回析の結果を示す。低角側のブロードなピークは潮解防止用のガラスカバーに由来するピークである。それぞれのピークの同定を行い CsI と LiBr のピークが確認できた。また、図 3.1-3 に SEM-BEI を示す。2 相からなる共晶組織が確認できた。これより、実験で得られた共晶点で結晶育成を行った結果、 CsI と LiBr からなる共晶組成が得られた。

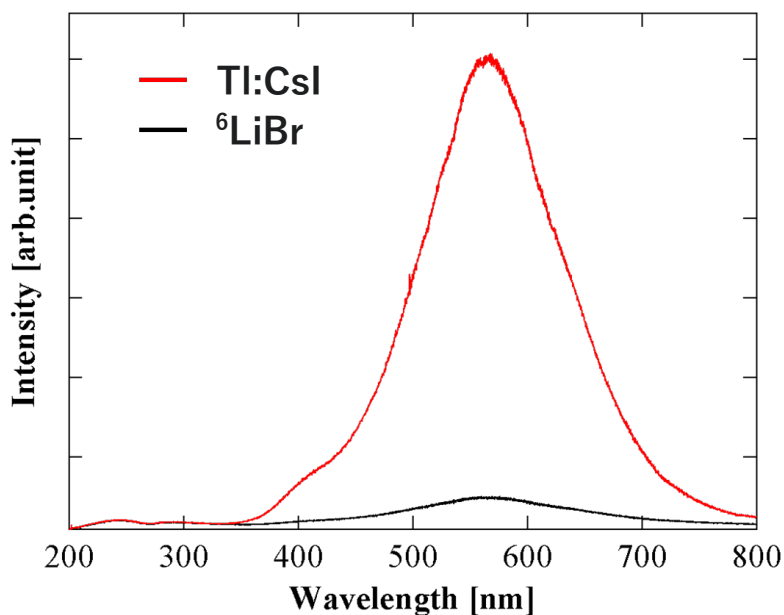
図 3.1-1 育成した $\text{Tl}:\text{CsI}/^6\text{LiBr}$ 結晶（左）と 1 mm 厚結晶（右）図 3.1-2 $\text{Tl}:\text{CsI}/^6\text{LiBr}$ の粉末 XRD パターン

図 3.1-3 Tl:CsI/ $^6\text{LiBr}$ の SEM-BEI

・光学特性・放射線応答評価
(RL/CL 測定)

図 3.1-4 に X 線励起の RL スペクトルを示す。400 nm、480 nm、550 nm、590 nm 付近に観測された発光のピークは、Tl:CsI の Tl^+ によって摂動された自己トラップ電子 (STE) に起因すると考えられ、Tl:CsI 単結晶の結果と同様の結果が得られた[1][2]。また、これらのピークは試料表面に析出した水和物の影響によると考えられる。図 3.1-5 に電子線励起の CL スペクトルの結果を示す。図中の赤線は、Tl:CsI 相の電子線照射下での発光スペクトル、黒線は $^6\text{LiBr}$ 相の発光スペクトルである。この結果より、Tl:CsI/ $^6\text{LiBr}$ は、 $^6\text{LiBr}$ 相では熱中性子が変換され、Tl:CsI 相で可視光に変換される材料設計通りの構造になっていることがわかる。

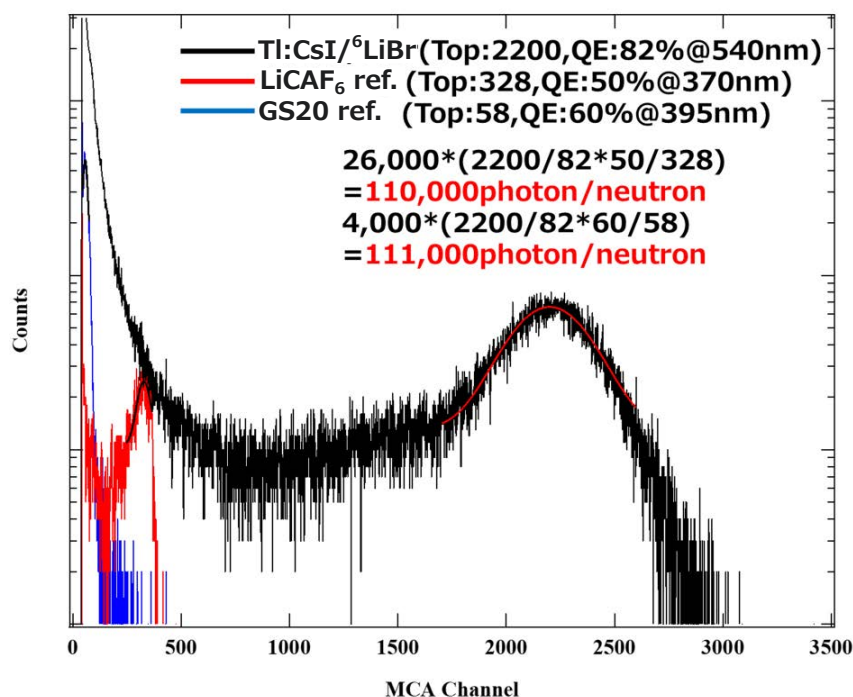
図 3.1-4 Tl:CsI/ $^6\text{LiBr}$ の RL スペクトル

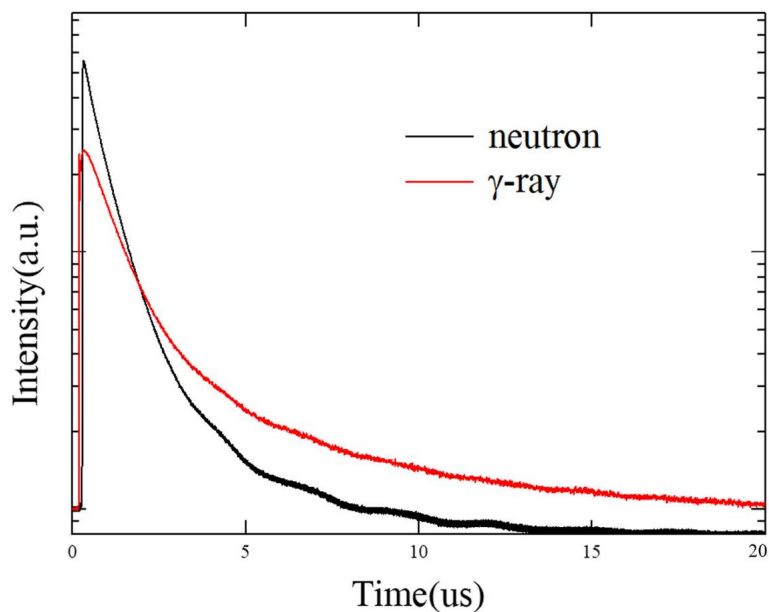
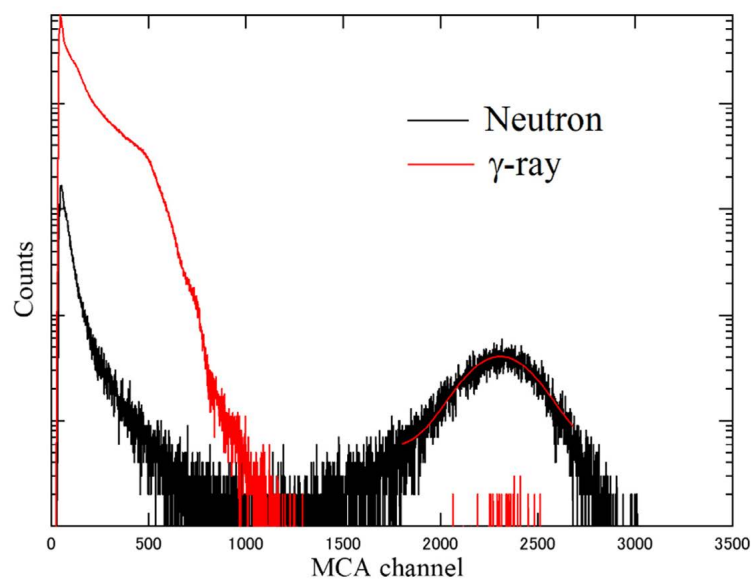
図 3.1-5 Tl:CsI/⁶LiBr の CL スペクトル

・放射線応答特性

図 3.1-6 に APD を用いて測定した中性子励起の波高値スペクトルを示す。標準試料として、絶対発光量を測定済みの Eu:LiCAF₆ (26,000 photons/neutron) を使用し、APD の QE を用いて補正を行った。その結果、発光量はおよそ 110,000 photons/neutron と見積もられた。

図 3.1-7 に減衰時間測定の結果を示す。減衰時間は 2 成分あり、580 ns (62.8%) と 1,793 ns (37.2%) であった。また、 γ 線励起の減衰時間も 2 成分あり、964 ns (56.0%) と 5,473 ns (44.0%) であった。図 3.1-8 に中性子励起と γ 線励起それぞれの波高値スペクトルを示す。両者に大きな開きがあった。

図 3.1-6 Tl:CsI/⁶LiBr における中性子励起の波高値スペクトル

図 3.1-7 Tl:CsI/ 6 LiBr の減衰時間図 3.1-8 中性子励起と γ 線励起それぞれの波高値スペクトル

・PSD 特性

図 3.1-9 に PSD マッピングを示す。 α 線励起と γ 線励起が非常によく分かれた PSD マッピングが得られた。図 3.1-10 に Slow/Total のヒストグラムとフィッティングカーブを示す。エネルギーが 500 KeVee の値をもつデータを用いて FOM を計算した結果 2.916 となった。

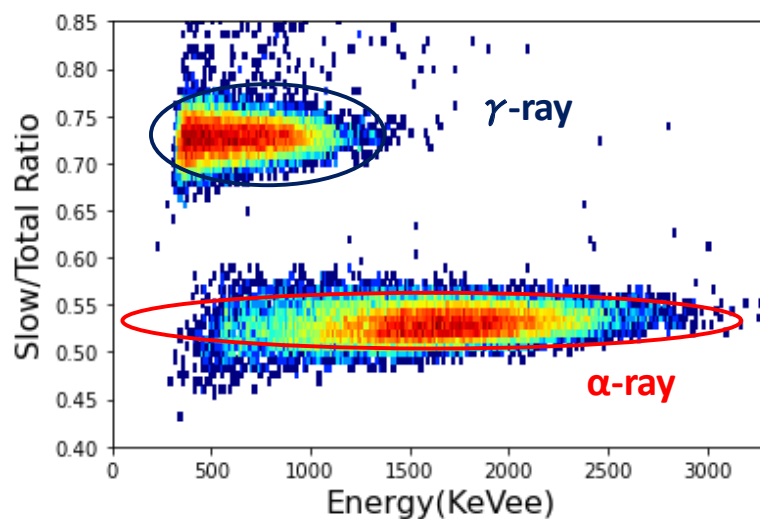


図 3.1-9 Tl:CsI/⁶LiBr の PSD マッピング

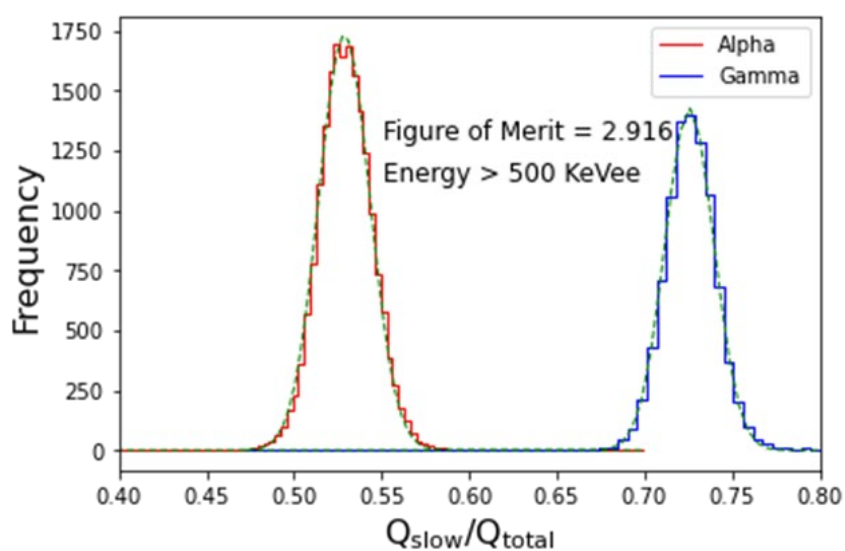


図 3.1-10 Slow/Total ratio のヒストグラムとフィッティングカーブ

② Ce, Sr:LaBr₃/⁶LiBr

・Ce, Sr:LaBr₃を用いた PSD 測定

Ce, Sr の共添加による PSD 特性の向上が実際にみられるのかを共晶体と同様の育成方法を用いて、0.01 mm/min で Ce, 0.5%Sr:LaBr₃ を育成し、評価を行った。育成した結晶を図 3.1-11 に示す。PSD マッピングを図 3.1-12 に示す。Ce:LaBr₃/⁶LiBr の PSD マッピングと比較して、0.5%の添加で α 線と γ 線がよく分かれていて、PSD が向上していることがわかる。また、図 3.1-13 に Slow/Total ratio のヒストグラムとフィッティングカーブを示す。エネルギーが 500 KeVee 以上の値をもつデータを用いて FOM を計算した結果 2.343 となった。よって、共晶体においても Sr, Ce 共添加で PSD が向上する可能性が示唆された。



図 3.1-11 Ce, 0.5%Sr:LaBr₃ 育成単結晶

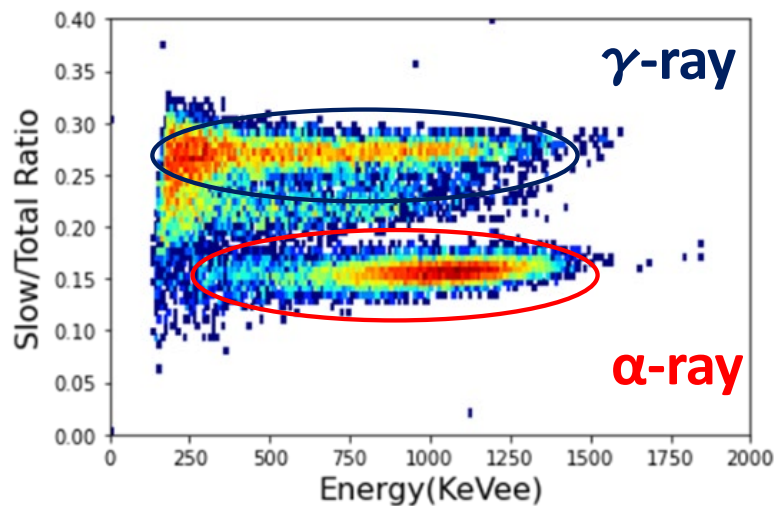


図 3.1-12 Ce, 0.5%Sr:LaBr₃ の PSD マッピング

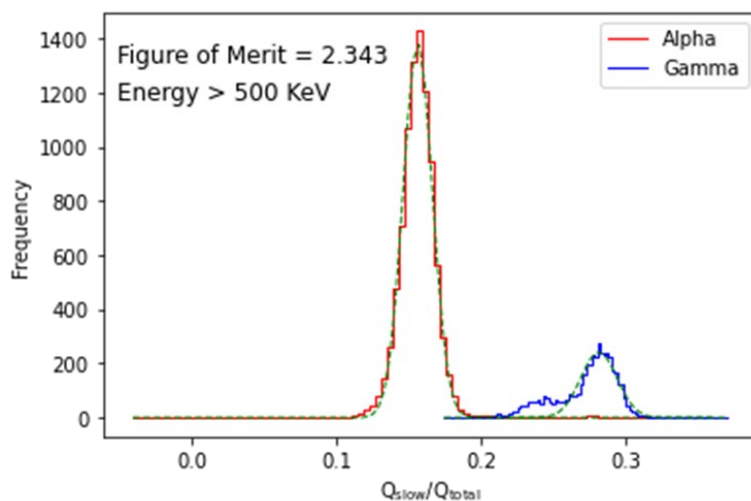
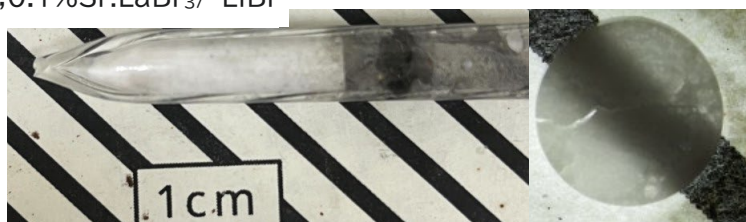


図 3.1-13 Slow/Total ratio のヒストグラムとフィッティングカーブ

・結晶育成

5%Ce, 0.1%Sr:LaBr₃/⁶LiBr、5%Ce, 0.5%Sr:LaBr₃/⁶LiBr、5%Ce, 1.0%Sr:LaBr₃/⁶LiBr の異なる Sr 添加量で、0.2 mm/min の育成速度で育成した結晶の写真を図 3.1-14 に示す。後ろの線が透過するほどの透明性を有してはいたが、結晶が脆く研磨しづらくなっていた。

① 5%Ce,0.1%Sr:LaBr₃/⁶LiBr



② 5%Ce,0.5%Sr:LaBr₃/⁶LiBr



③ 5%Ce,1.0%Sr:LaBr₃/⁶LiBr



図 3.1-14 Ce, Sr:LaBr₃/⁶LiBr の育成結晶写真 (左) と 1 mm 厚結晶 (右)

・RL 測定

図 3.1-15 に X 線励起の RL スペクトルを示す。390 nm 付近のシングルピークが得られた。

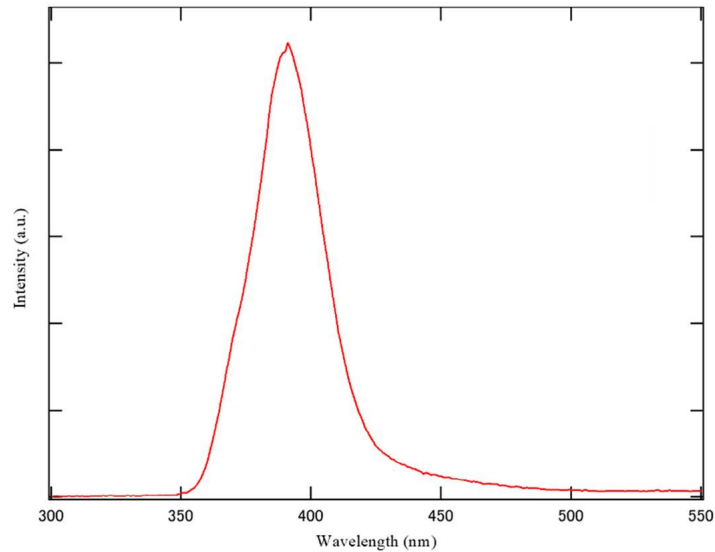


図 3.1-15 Ce, Sr:LaBr₃/⁶LiBr の RL スペクトル

・放射線応答特性

図 3.1-16 に PMT を用いて測定した中性子励起の発光量を示す。標準試料の ⁶Li-glass と比較した結果、発光量はおよそ 25,000 photons/neutron と見積もられた。また、Sr 添加量の変化による発光量の変化はわずかだった。図 3.1-17 に減衰カーブを示す。中性子励起、 γ 線励起ともに減衰時間は一つの成分で、その値は 18 ns であった。また、図 3.1-18 に中性子線励起と γ 線励起の波高値スペクトルの比較を示す。 γ 線励起の最大付近に中性子励起のピークトップが存在していた。

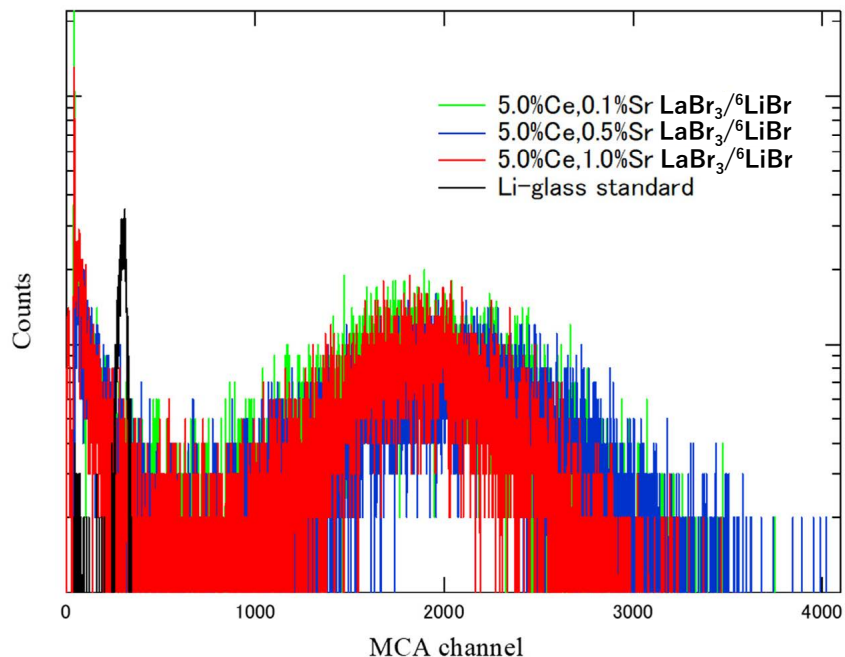


図 3.1-16 Ce, Sr:LaBr₃/⁶LiBr の中性子励起の波高値スペクトル

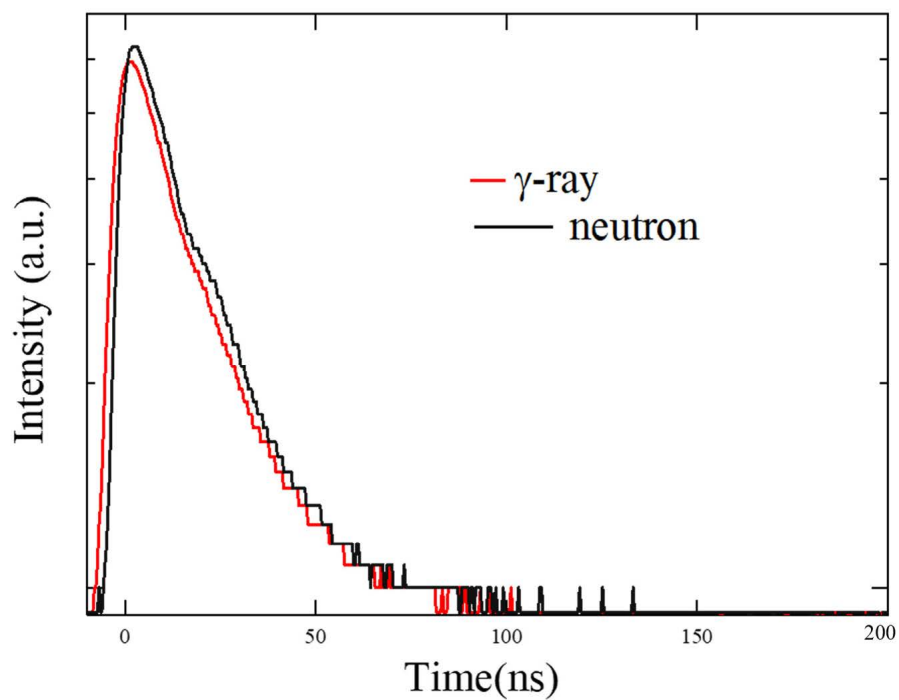


図 3.1-17 Ce, 1%Sr:LaBr₃/⁶LiBr の減衰カーブ

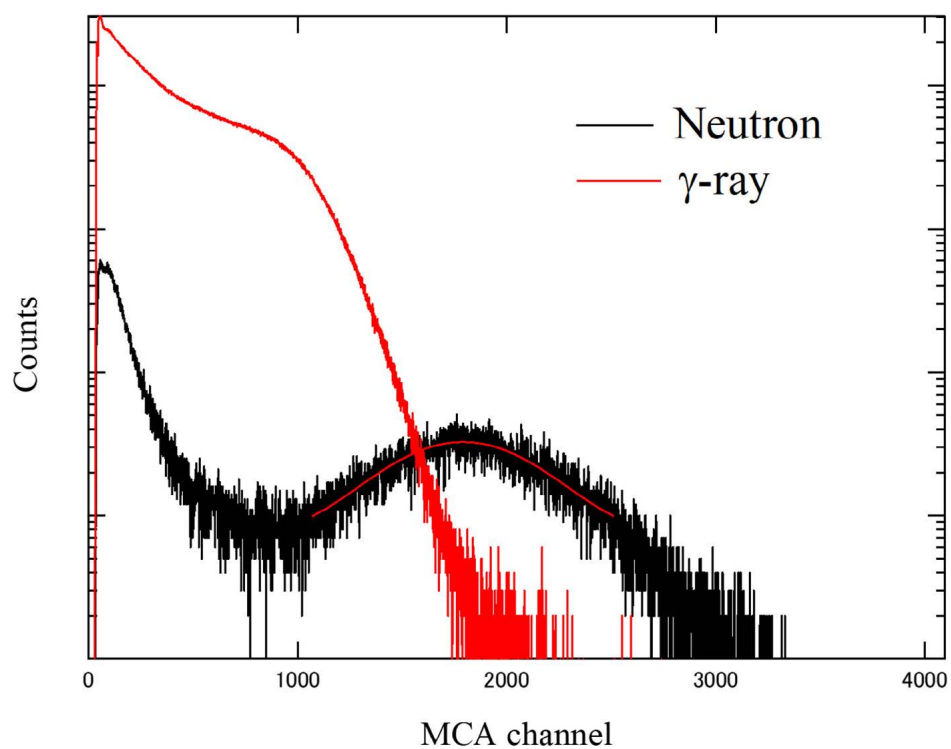


図 3.1-18 中性子線励起と γ 線励起の波高値スペクトルの比較

・ PSD 特性

図 3.1-19 に PSD マッピングと Slow/Total ratio のヒストグラム及びフィッティングカーブを示す。Ce;LaBr₃/⁶LiBr の PSD マッピングよりも若干 α 線と γ 線での差はみられたが、Ce, Sr:LaBr₃ 単結晶ほどくっきりと分離しないものの PSD 性能が確認された。また、それぞれについて、Sr0.1%のサンプルのみ 250 KeVee 以上、ほかのサンプルは 500 KeVee 以上のエネルギーをもつデータを用いて計算した FOM は 0.248、0.454、0.597 であり添加量の増加にともないわずかな向上がみられた。

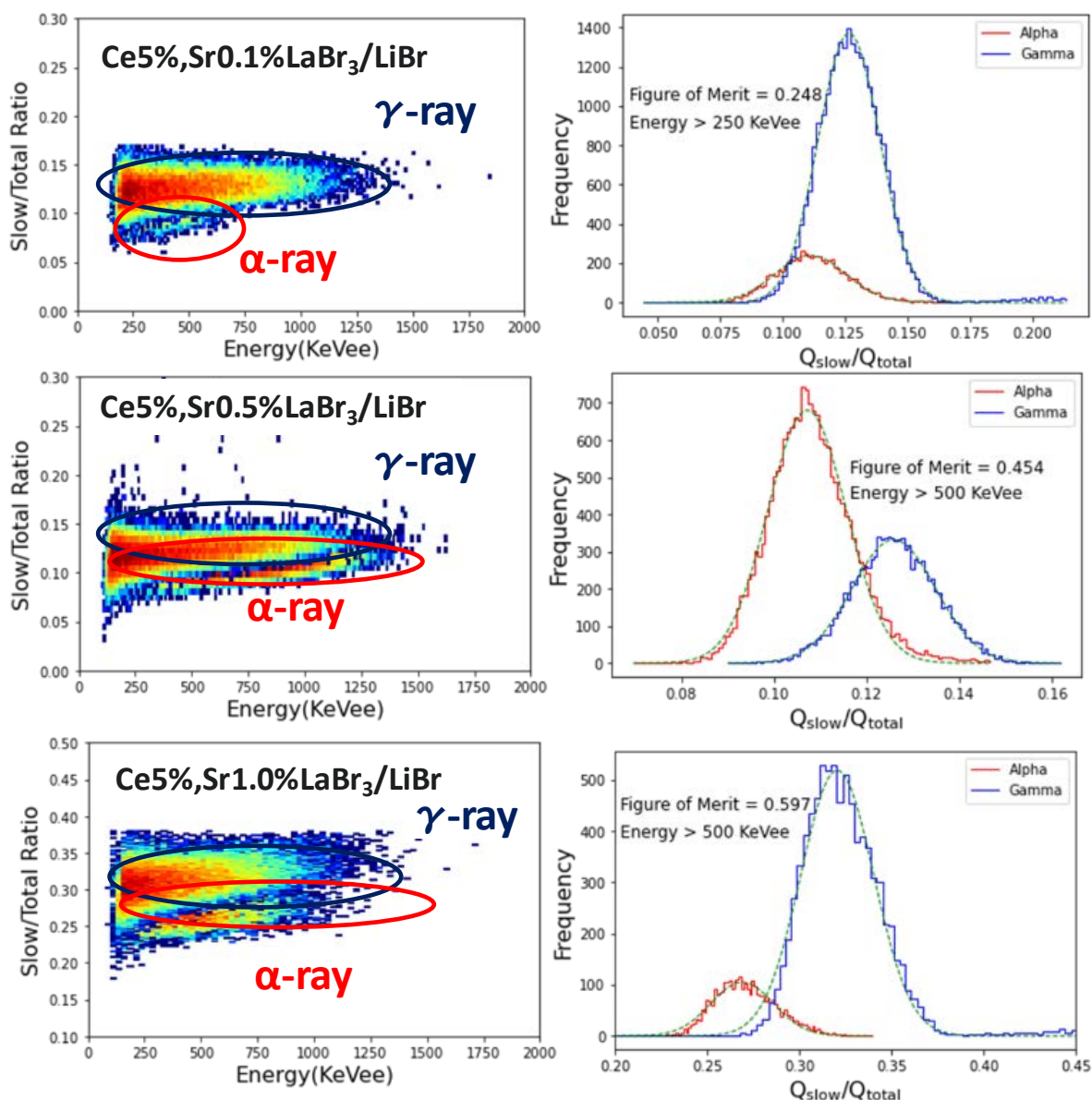




図 3.1-19 Ce, Sr:LaBr₃/⁶LiBr の PSD マッピング (左) と Slow/Total ratio のヒストグラム及びフィッティングカーブ (右)

③ まとめ

中性子線シンチレータの材料設計指針を満たす材料として、Tl:CsI/⁶LiBr、Tl:NaI/⁶LiBr、LaBr₃/⁶LiBr (pure、Ce, Sr 共添加)、LaCl₃/⁶LiCl (pure、Ce 添加) を選択した。令和 5 年度は、Tl:CsI/⁶LiBr、LaBr₃/⁶LiBr (Ce, Sr 共添加) に関しては共晶作製と性能評価を実施した。その結果、シンチレータ相の α/γ 線弁別性能から期待される n/ γ 線弁別性能やシンチレータ特性との相関を有しており、材料設計指針の有効性を確認した。その結果を表 3.1-3 に示す。特に、110,000 光子/n の突出した発光量と優れた n/ γ 弁別性能を有する Tl:CsI/⁶LiBr が新たに見出された。蛍光寿命は長いものの、突出した発光量と PHD 特性から、より容易な計測回路による n, γ 弁別の可能性が示された。LaBr₃/⁶LiBr (Ce, Sr 共添加) については、発光量が目標値をやや下回ったものの、育成条件や添加濃度の最適化により発光量増加の可能性がある、蛍光寿命は目標値より 1 桁高速な 18 ns を示した。今後、中性子線用検出器の候補材として検出器の試作を進める計画である。

表 3.1-3 令和 5 年度作製した共晶シンチレータ

	発光量 (photons/ neutron)	中性子励起の 減衰時間 (ns)	γ 励起の 減衰時間 (ns)	PSD (FOM)	密度 (g/cm ³)	⁶ Li 含有量 (mol%)	1mm ウエハ 写真
目標値	30,000	数百 ns 以下			4.2 以下	20 以上	
Tl:CsI/ ⁶ LiBr	110,000	580 (62.8%), 1793 (37.2%)	964 (56.0%), 5473 (44.0%)	○ (2.916)	3.88	35	
Ce,Sr: LaBr ₃ / ⁶ LiBr	~25,000	18	18.1	△ (0.451)	3.86	35	

3.1.2 γ 線用シンチレータの性能改善

令和5年度は、 CeBr_3 を候補材とし、これを1 mm 角 \times 0.5 mm 厚に加工する技術の開発を実施し、石英窓を用いたパッケージを作製し、得られた結晶を用いて微細結晶加工技術開発を進め、露点 -40°C のドライルーム内での、シングルワイヤーソーを用いた結晶切断を実施し、さらに、研磨盤を用いた0.1~3 mm 厚までの結晶加工を実施した。結果を図3.1-20に示す。パッケージに適しかつ使用用途にあわせたサイズを調整することが可能であることを実証し、0.1、0.3、1、3 mm 厚の結晶サンプルが得られた。得られたシンチレータ結晶サンプルに対し、気密パッケージを行うべく、運用面の調査のもと製造仕様の抽出を行い、形状設計を行い各パーツの試作を実施した。評価試験用の0.5~3 mm 厚 \times 3 mm 角程度のシンチレータ結晶を内包するアルミ製のパッケージとなる。図3.1-21にパッケージング品の外観写真を示す。

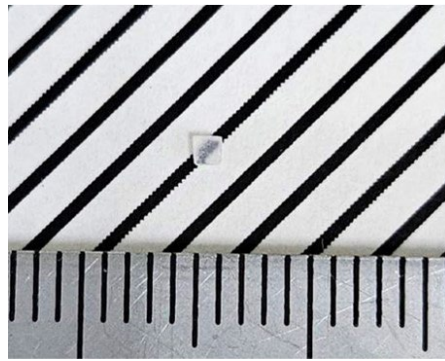


図 3.1-20 加工を実施したシンチレータの写真 (1 mm \times 1 mm \times 0.1 mm サイズ)

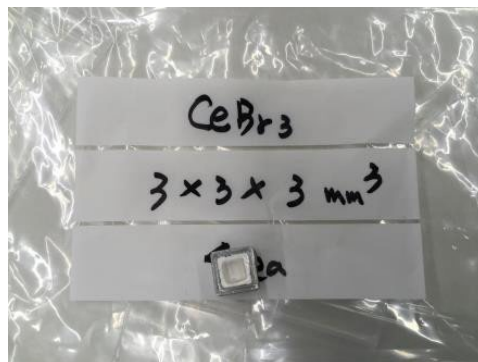


図 3.1-21 パッケージング品の外観写真

3.1.3 シンチレータの微細加工とパッケージング技術開発

ハロゲン化物シンチレータの SiPM や PMT との一体パッケージング技術の検討を進めた。 Ce:LaBr_3 単結晶を $6\times 6\times 3\text{ mm}^3$ に加工・研磨し、半導体光検出器である SiPM と組み合わせて特性を評価した。MPPC は、浜松ホトニクス社製の表面実装品 S13360-6025PE を選定し、使用した。具体的には、ハーメチックシール用ステムベース、リッドキャップを選定し、封止テストを行っている。来年度以降に、PMT との一体パッケージや、特性の劣化が起きないか詳細に測定を行っている。

3.2 センサーならびに信号処理システムの小型化（再委託先：東京大学）

3.2.1 1 GHz 動作小型信号処理基盤の開発

本研究においては、最終的に 10 Gy/h 程度までの線量率下で動作可能なシステムの構築を目指している。これまでの研究グループで行ってきた研究において、 CeBr_3 等の数十ナノ秒の高速時間応答を有するシンチレータを用いることで、高線量率下でのスペクトロスコピーが可能であることがわかってきている[3]。一方で、高速応答を行うため、高速のサンプリングが必要とされ、これまでの検討においては外部の ADC サンプリングによるデジタルシステムを用いることが多く小型化は行われてこなかった。本課題では、高速シンチレータ用の小型で可搬可能なデジタル信号処理システムを構築する。具体的には、500 MHz のクロックの立ち上がり立ち下がりを利用することで 1 GHz に相当するデジタルシステムを構築する。令和 5 年度は、リアルタイムデジタル帯域フィルタを FPGA 内に実装し、波高を抽出することで 1 イベントの信号量を 16 bit まで低減し、高計数率下で動作可能な可搬型 5 cm×10 cm 程度の小型高速デジタル波形解析処理ボードの設計試作を開始した。データ転送としては 1 Gbps の通信速度を有する SiTCP を用いた Ethernet 読出を採用した。デジタル信号処理チップとしては Xilinx 社製の Kintex-7 FPGA (XC7K160T) の FCBGA タイプを用いた。AD 変換器としては Analog Devices の AD9684、14 bit、500 MSPS を用いて設計を行った。図 3.2-1 に設計した基盤の設計図を示す。入力は 4ch（LEMO コネクタ）とし、5 V の外部単電源で操作可能である。JTAG ピンからの FPGA プログラムの書き込みにより、今後複数のデジタルフィルタ機能の実装を予定している。

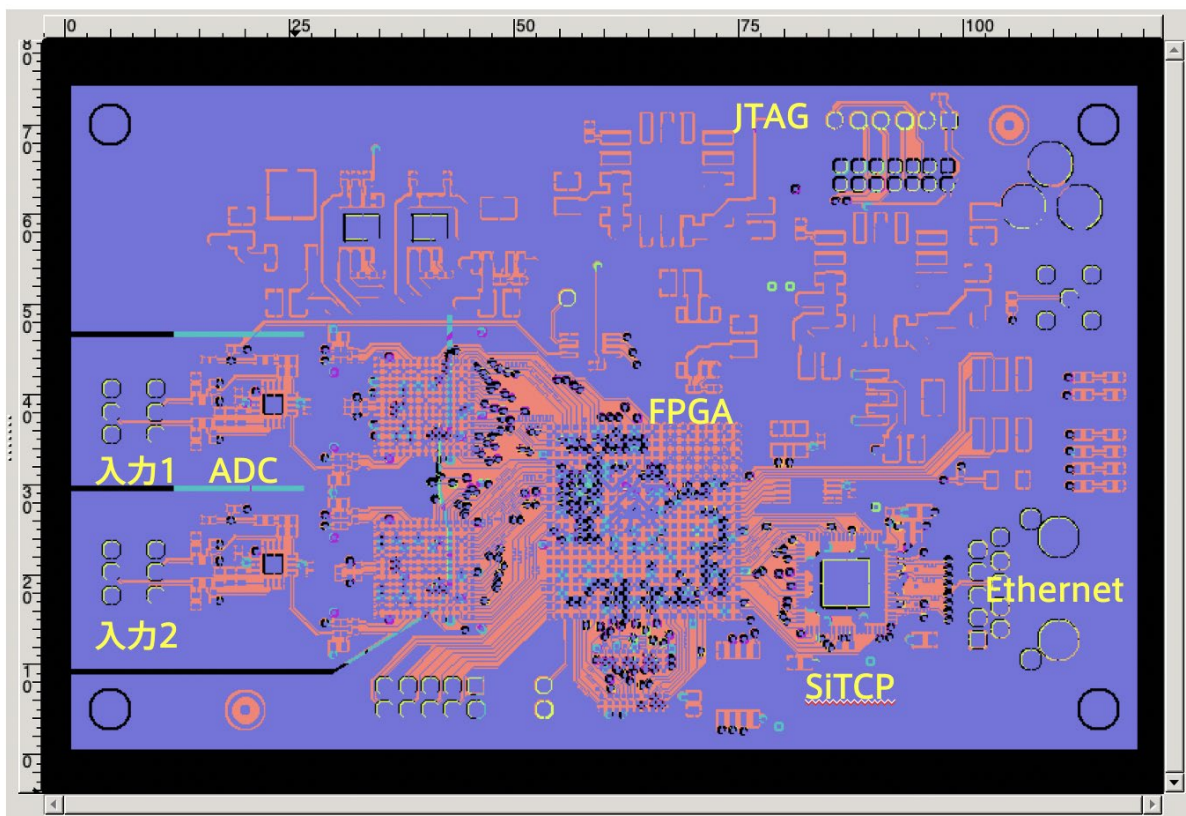


図 3.2-1 設計した 2ch 入力小型 AD 変換-FPGA デジタル信号処理基盤

上記の手法は波形の AD 変換に立脚した手法である。一方で、 γ 線のスペクトロスコピーのみを対象とするような場合においては、検出器を小型化し複数配置することで高計数率を達成する可能性も考えられる。そのような場合には簡易な信号処理システムが必要とされ、Time Over Threshold (TOT) のような低消費電力かつデジタル信号処理と相性のよい手法も候補の一つとなる。通常の TOT では、線形性の悪さからスペクトロスコピーは不可能であるが、研究グループで開発してきた Slew rate Limited TOT (SL-TOT) 方式[4][5]を実装することで、エネルギー情報の正確な計測が可能となる。ここでは SL-TOT 方式をさらに高速化することで、パルス幅を縮小し、 >2 Mcps/ch での動作が可能な 64ch の集積回路の設計を実施した。これにより 10 Gy/h のような非常に高い計数率が想定されるような環境においてもスペクトロスコピーが可能となると想定される。図 3.2-2 に波形のシミュレーション図を示す。ピンクの線が信号波形、黄色がコンパレータの出力を示しており、エネルギーに比例したデジタルパルスが生成されていることがわかる。

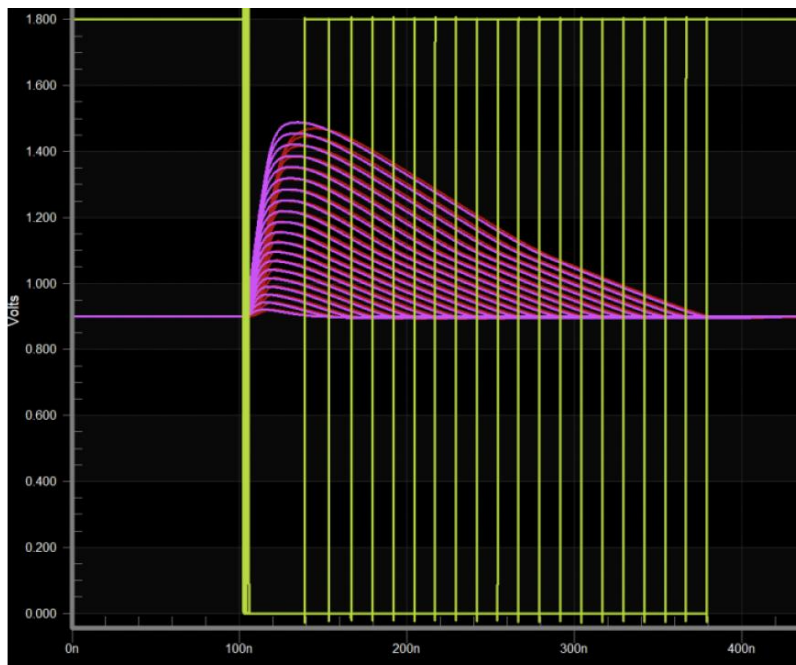


図 3.2-2 高計数率対応 SL-TOT 方式のシミュレーション波形

3.2.2 波形弁別型リアルタイム処理アルゴリズムと復元手法の開発

ある種類のシンチレータにおいては、中性子から放出される α 線等の荷電粒子と γ 線から放出される電子の反応において異なる応答を示す。そのため波形処理により中性子と γ 線の弁別が可能であることが知られている。本手法自体は一般的であるが、このような信号処理を高線量率下で行おうとした場合、従来のような外部 ADC を用いてデジタル変換した後にソフトウェアで解析する方式では、データ通信量の問題から困難になることが考えられる。そこで本課題では、従来から行われてきた微分積分フィルタ (CR-RC フィルタ) やガウシアンフィルタ、台形フィルタなどをデジタルフィルタとして FPGA 内に実装し、必要な波高値等の情報のみを取り出して転送することを計画している。令和 5 年度は、まず基本的なフィルタである微分フィルタ、積分フィルタの微分方程式から差分方程式を導出し、FPGA などのデジタル信号処理回路に実装可能な形とし、プログラムを作成した。また、図 3.2-3 に示すようにプログラムを実装し、波形を

サンプリングすることでフィルタの実証、波高値計測の検証試験を実施した。3.2.1 で設計開発している FPGA をベースとした Data Acquisition Board (DAQ) に実装することで複数のフィルタの情報を並列的にリアルタイム処理し、それらの結果を用いて複合的な情報から線種を判別する手法を開発する予定である。

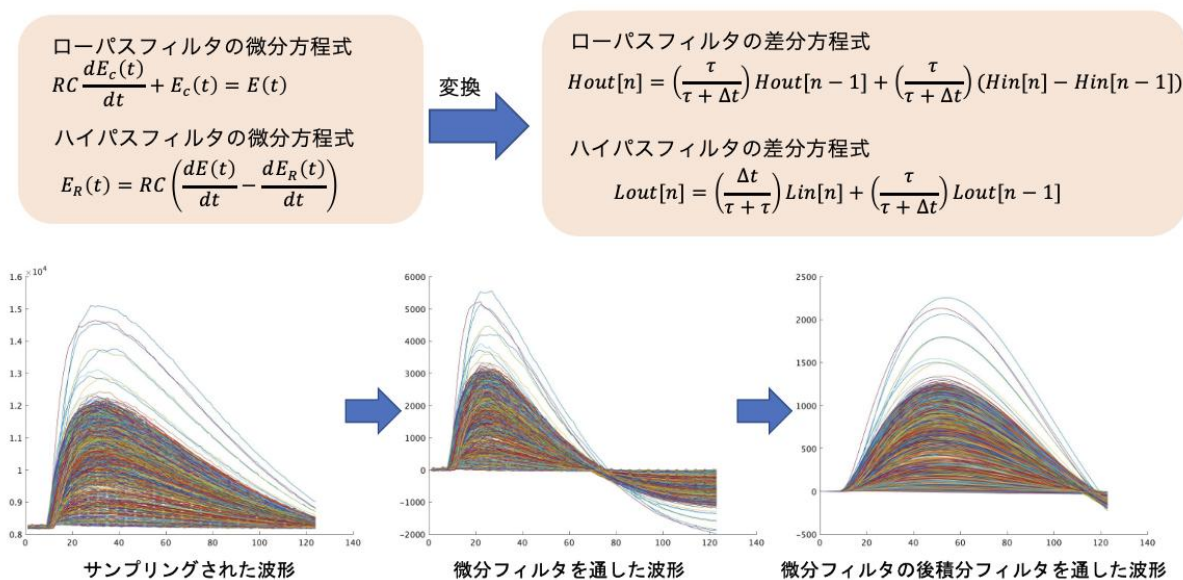


図 3.2-3 放射線計測の基本となる微分、積分フィルタの実装

3.3 多様な放射線場構築と特性評価（再委託先：産総研）

3.3.1 大線量標準場での試験と放射線場評価

① 大線量標準場での試験

令和 5 年度は、産総研の Cs-137 線源場ならびに Co-60 線源場において、原子力機構が開発した試作検出素子について、照射線量率を変化させたときの応答（スペクトル、計数率、デットタイム）を取得した（表 3.3-1、表 3.3-2）。図 3.3-1 ならびに図 3.3-2 は、3.4 節で述べる測定システムを利用して、寸法が 3 mm×3 mm×3 mm の CeBr₃ を利用した試作検出素子（CeBr₃）による Cs-137 線源場ならびに Co-60 線源場における応答スペクトルである。

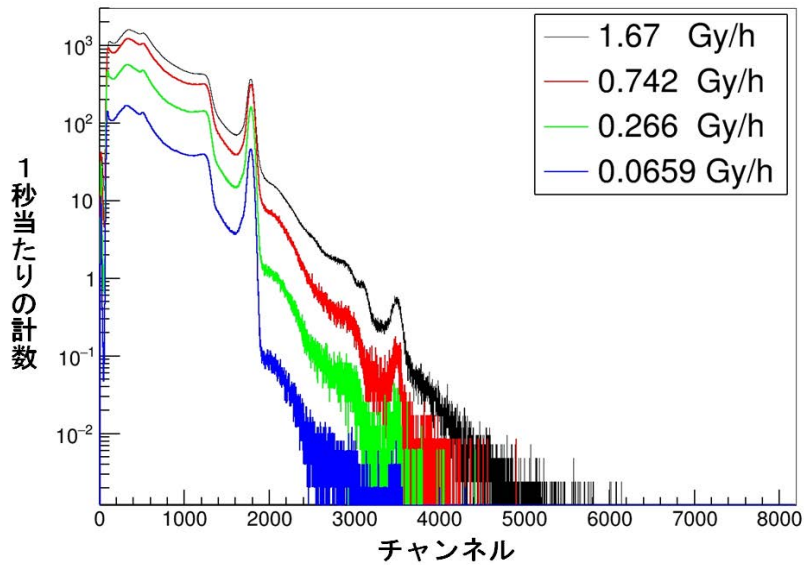


図 3.3-1 Cs-137 線源場における試作検出素子（CeBr₃）の応答スペクトル

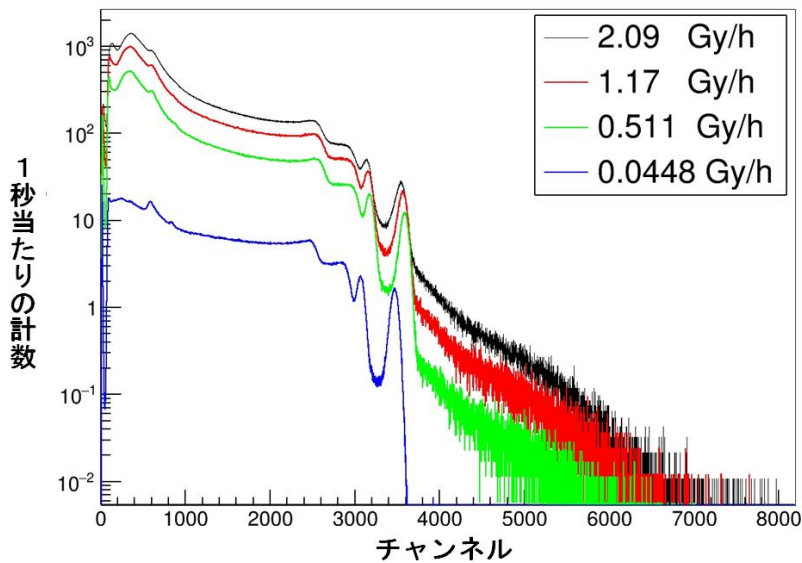


図 3.3-2 Co-60 線源場における試作検出素子（CeBr₃）の応答スペクトル

表 3.3-1 Cs-137 線源場における試作検出素子 (CeBr₃:3 mm×3 mm×3 mm) の正味計数率とデットタイム

照射線量率 (Gy/h)	全正味計数率 (秒 ⁻¹)	デットタイム (%)
1.67	2.12×10^6	44.5
0.742	1.24×10^6	31.0
0.266	4.44×10^5	13.4
0.0659	1.14×10^5	3.74

表 3.3-2 Co-60 線源場における検出素子 (CeBr₃:3 mm×3 mm×3 mm) の正味計数率とデットタイム

照射線量率 (Gy/h)	全正味計数率 (秒 ⁻¹)	デットタイム (%)
2.09	1.89×10^6	41.7
1.17	1.04×10^6	27.2
0.511	4.48×10^5	13.5
0.0448	2.38×10^4	0.81

② 大線量標準場の放射線特性評価

令和5年度は、Cs-137 γ 線場の照射装置のジオメトリを用いた数値シミュレーションを行い、主要な γ 線と散乱線の割合を計算し、基準位置におけるフルエンス率を決定した。さらに、その妥当性検証のために薄型 CdZnTe 半導体検出器 (Kromek 社製、GR05+、結晶サイズ:5 mm×5 mm×5 mm) を用いたスペクトル測定を行った。

産総研が大線量標準場を用いて行う標準供給は、主に電離箱式検出器を対象とした線量率 (空気カーマ率及び水吸収線量) の校正であるため、フルエンス率の絶対値の情報はこれまで必要とされなかった。しかし、スペクトル計測型の検出器のより定量的な応答の評価には、線量率よりもフルエンス率の方が適している。

最大光子エネルギー E_{\max} まで分布する光子の空気カーマ K_{air} とエネルギー微分光子フルエンス $d\phi/dE$ の関係は以下のとおり書くことができる。

$$K_{\text{air}} = \int_0^{E_{\max}} E \frac{d\phi}{dE} \left(\frac{\mu_{\text{tr}}(E)}{\rho} \right)_{\text{air}} dE$$

$(\mu_{\text{tr}}(E)/\rho)_{\text{air}}$ は空気に対する質量エネルギー転移係数であり、この値は加藤 (2014) [6] で公開されている値を内挿することで各エネルギーに対応する値が得られる。これより、特定のエネルギー E' の光子フルエンスは、以下のように書ける。

$$\phi_{E'} = \frac{K_{\text{air},E'}}{E' \left(\frac{\mu_{\text{tr}}(E')}{\rho} \right)} = \frac{K_{\text{air}}}{E' \left(\frac{\mu_{\text{tr}}(E')}{\rho} \right)} \left(\frac{K_{\text{air},E'}}{K_{\text{air}}} \right)$$

ここで、 $(K_{\text{air},E'}/K_{\text{air}})$ は、全光子による空気カーマに対する特定エネルギーの光子の割合であり、これは照射装置を模擬したジオメトリを用いて数値シミュレーションを行うことで計算できる。数値シミュレーションには、光子・電子輸送の計算コードである Electron Gamma Shower Version 5 (EGS5) [7] を使用した。

産総研大線量標準場では、1.0 m ほどの各基準位置における空気カーマ率が国家標準器のグラフナイト壁空洞電離箱を用いた絶対測定で決められている。産総研が校正に用いる最大の空気カーマ率は線源距離 1.0 m の約 1.1 Gy/h であるが、これよりもさらに線源距離を短くすることが可能であり、本事業では 40.9 cm まで検出器を近づけて試験を実施した。EGS5 を用いた計算においても、40.9 cm 含めた各基準位置において計算を行った。この際、光子フルエンス計算のための観測面の面積は、各線源距離において 3.5 cm×3.5 cm とした。表 3.3-3 に各線源距離の空気カーマ率、EGS5 により計算した Cs-137 核種から放出される主要 γ 線である 662 keV γ 線が全空気カーマに対して占める割合、それらをもとに計算したフルエンス率を示す。線源距離 40.9 cm における空気カーマ率は線源距離 1.0 m の空気カーマ率から距離二乗測で得られた推定値である。

EGS5 による計算で得られた 662 keV γ 線割合の妥当性評価のために、本事業で購入した薄型 CdZnTe 半導体検出器を用いた大線量標準場のエネルギースペクトルの測定を行った。事前の薄型 CdZnTe 半導体検出器の性能評価として、産総研の保有する表示付認証機器線源 (Ba-133、Cs-137、Co-60) を用いたエネルギー分解能の評価を行った。解析ソフトウェアは、Kromek 社製の KSpect (ver. 14.24.3.243) を使用した。その結果を表 3.3-4 に示す。

薄型 CdZnTe 半導体検出器は、Cs-137 γ 線 (662 keV) に対して 2.0% 以下の FWHM の高いエネルギー分解能をもつが、信号の立ち上がり時間や減衰時間が μ s オーダーと長く、高線量率の測定には限界がある。そのため、線源と検出器間に遮蔽鉛 (10 cm×10 cm×10 cm) を設置し、検出器に入射する γ 線を減少させて測定を行った。検出器と遮蔽鉛はそれぞれ線源距離 2.0 m、1.0 m の位置に設置した。測定のセットアップの様子を図 3.3-3 に示す。Cs-137 γ 線照射装置、遮蔽鉛、CdZnTe 結晶を EGS5 のジオメトリとして仮定し、評価したエネルギー分解能も考慮して計算したエネルギースペクトルと実測した薄型 CdZnTe 半導体検出器の波高分布を図 3.3-4 に示す。図中の縦軸のスケールは線形である。数値シミュレーションでは CdZnTe 結晶を取り囲むハウジングや入射窓が定義されていないため、低エネルギーほど正確ではない。Cs-137 γ 線のエネルギーである 662 keV に対する各散乱成分の実測との違いは数倍程度の差の範囲内であった。令和 6 年度以降は、薄型 CdZnTe 半導体検出器により得られた実測の結果と数値シミュレーションによる計算結果からフルエンス率の不確かさ評価についても検討する。

表 3.3-3 産総研大線量標準場 (Cs-137 線源) の各基準位置における光子フルエンス率

検出器距離(m)	空気カーマ率(Gy h ⁻¹)	662 keV γ 線割合	フルエンス率(m ⁻² s ⁻¹)
0.409	6.4	79.2%	4.52×10 ¹²
1.0	1.07	80.4%	7.67×10 ¹¹
2.0	0.266	81.3%	1.92×10 ¹¹

表 3.3-4 Kromek 社製薄型 CdZnTe 半導体検出器 (GR05+) のエネルギー分解能

放射性核種	エネルギー(keV)	FWHM(%)
Ba-133	81.00	9.43
Ba-133	302.85	2.56
Ba-133	356.02	2.21
Cs-137	661.66	1.62
Co-60	1173.24	1.23
Co-60	11332.50	1.18

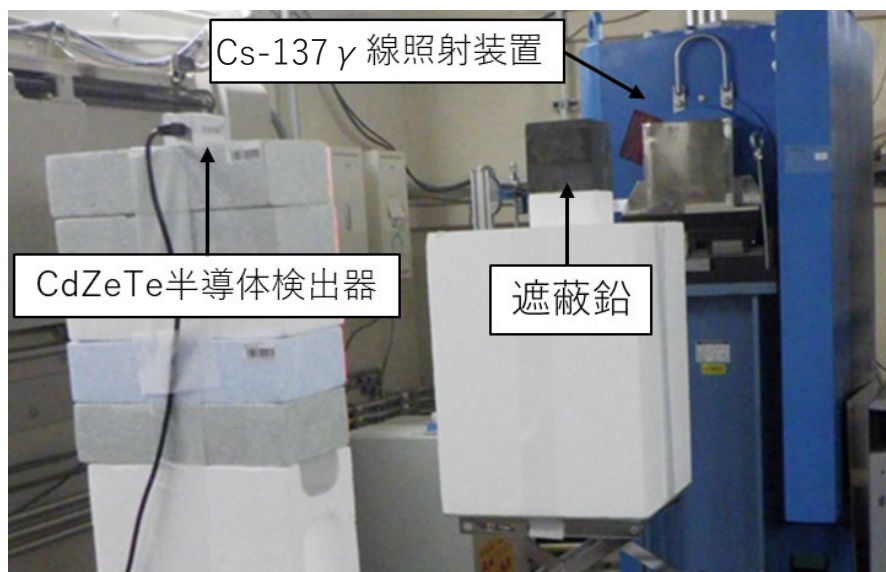


図 3.3-3 CdZnTe 半導体検出器を用いたスペクトル測定の様子

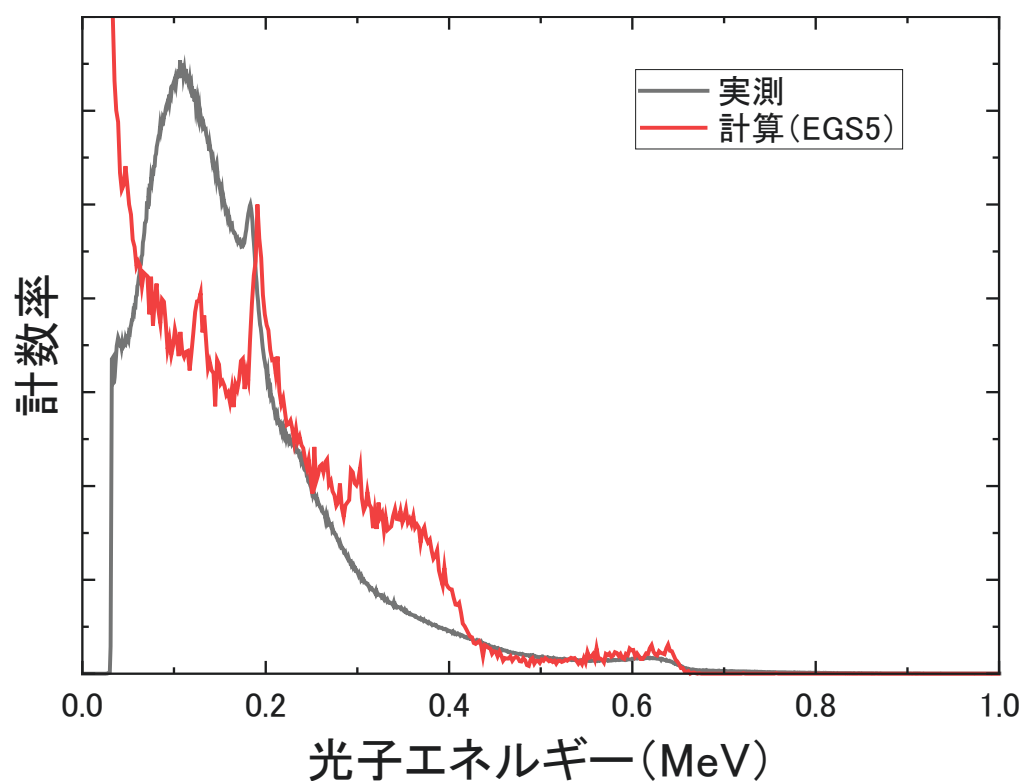


図 3.3-4 計算と実測 (CdZnTe 半導体検出器) により得られたエネルギースペクトルの比較

3.3.2 中性子標準場での試験、光子・中性子混在場の評価

① 検出素子の中性子検出効率評価（校正）

令和5年度は、東北大学が作製したシンチレータと原子力機構が開発した試作検出素子を組み合わせて、熱中性子の単位フルエンスに対する検出効率を評価した（表 3.3-5、表 3.3-6）。評価に用いた産総研・黒鉛パイルを図 3.3-5 に示す。黒鉛パイルは高純度の黒鉛ブロックを定盤上に組み上げた構造となっており、幅 230 cm、高さ 190 cm、奥行 190 cm である。上面には黒鉛パイル中心に線源を装荷するための線源孔を有している。試験においては、黒鉛パイル中心に標準用 $^{241}\text{Am-Be}$ 中性子線源を設置し、放出された速中性子を黒鉛で減速させることにより熱中性子場を生成した。試験では黒鉛パイル表面から 40 cm の基準位置（図中の☆位置）に検出素子を設置した。また、同箇所の熱中性子フルエンスは、He-3 比例計数管（Centronic 社製 SP9）を用いた測定で決定し、令和6年3月4日時点で $61.4 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ （相対拡張不確かさ 10% ($k = 2$)) であった。当該 He-3 比例計数管の熱中性子フルエンスに対する応答は、黒鉛パイル内の線源から 90 cm 位置（図中の○位置）において校正を行い、金箔の放射化法により導出したフルエンス率をもとに決定している。

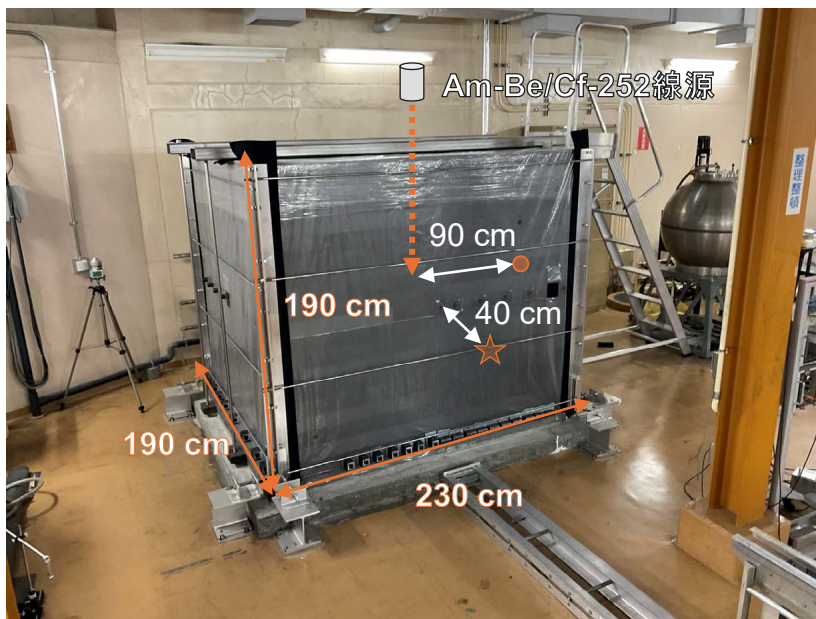


図 3.3-5 放出率評価及び検出素子の試験に利用した黒鉛パイル

図 3.3-6 ならびに図 3.3-7 は、3.4 節で述べる測定システムを利用して、寸法が $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ と $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ の $\text{LaBr}_3/\text{LiBr}$ を利用した試作検出素子 ($\text{LaBr}_3/\text{LiBr}:3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 1\text{ mm}$) ならびに試作検出素子 ($\text{LaBr}_3/\text{LiBr}:3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$) により、同中性子場において応答スペクトルを取得したものである。

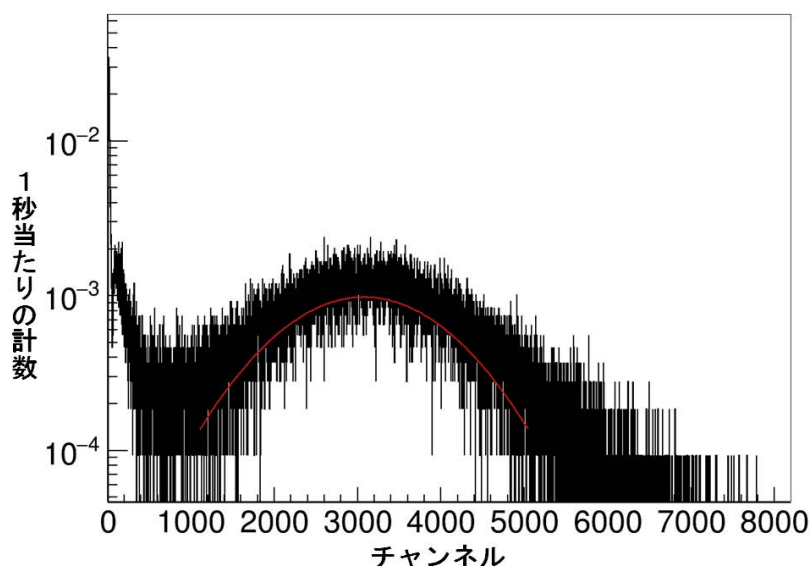


図 3.3-6 中性子標準場における試作検出素子 ($\text{LaBr}_3/\text{LiBr}:3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 1\text{ mm}$) の応答スペクトルとガウスフィッティング (赤線)

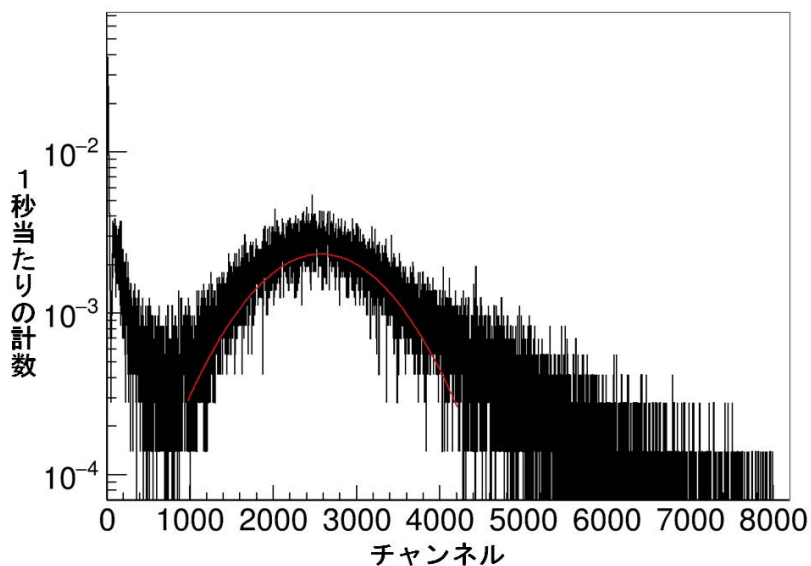


図 3.3-7 中性子標準場における試作検出素子 ($\text{LaBr}_3/\text{LiBr}:3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$) の応答スペクトルとガウスフィッティング (赤線)

中性子検出の評価方法として、熱中性子ピーク近傍でガウシアンフィッティング（詳細は 3.4 節に示す。）を実施して得られた最尤関数の中心値（ μ ）ならびに分散値（ σ ）から以下の二つの閾値（TH1、TH2）を設定して、それ以上の正味計数率を中性子信号とみなす三つの方法で評価した（表 3.3-5、表 3.3-6）。

$$\text{TH1} = \mu - 2\sigma$$

$$\text{TH2} = \mu - 3\sigma$$

表 3.3-5 中性子検出素子（LaBr₃/LiBr:3 mm×3 mm×1 mm）の熱中性子検出効率

条件	閾値（チャンネル）	計数率(秒 ⁻¹)	フルエンス率当たり (cm ²)
TH1	1091	3.27	0.0531
TH2	99	3.68	0.0599

表 3.3-6 中性子検出素子（LaBr₃/LiBr:3 mm×3 mm×3 mm）の熱中性子検出効率

条件	閾値（チャンネル）	計数率(秒 ⁻¹)	フルエンス率当たり (cm ²)
TH1	1007	6.08	0.0991
TH2	225	6.53	0.106

上記の評価で利用した 2 個の結晶の寸法は、3 mm×3 mm×3 mm と 3 mm×3 mm×1 mm で、体積比で 3 倍である。いずれも、同じ組成のシンチレータ（LaBr₃/LiBr）であることから、⁶Li 量も 3 倍である。一方で、検出効率としては、2 倍程度に留まり、⁶Li 量と矛盾する。これは、結晶厚の違いによる PMT への集光度の違い、または、新素材を利用しているため、個体差がある可能性も考えられる。上記については、令和 6 年度以降の LaBr₃/LiBr を含めた共晶体結晶の研究において検討を進めていく。

3.3.3 光子・中性子混在場の構築と試験

令和 5 年度は、光子・中性子混在場における試験のための構想を行った。現状の大線量標準場に中性子線源を置くだけでは、中性子による散乱線の影響が大きく、定量的な評価が難しいことが想定される。散乱中性子の影響を十分に小さくできるような試験方法について検討し、線源及び固定治具や架台についての仕様を決定した。

また、光子・中性子混在場構築のために、図 3.3-8 に示した表示付認証機器中性子線源（Eckert & Ziegler Isotope Products 社製 CF230140100U、Cf-252、3.7 MBq）を購入し、中性子フルエンス率を決定するうえで重要となる中性子放出率を決定した。放出率評価においても図 3.3-5 に示した黒鉛パイルを利用した。産総研では、イギリス国立物理学研究所にて 10 年ごとに標準用 ²⁴¹Am-Be 線源を校正し、その他の線源の校正は相対測定法[8]によって行っている。黒鉛パイルの長軸方向に中心から 90 cm 位置（図中の○位置）における中性子フルエンスが、線源の中性子スペクトルに関わらず中性子放出率に概ね比例することが確認されている。今回も同様の原理に基づき、標準用 ²⁴¹Am-Be 線源及び今回購入した Cf-252 線源をそれぞれ黒鉛パイル中心に設置し、線源から 90 cm 位置に設置した He-3 比例計数管（Reuter-Stokes 社製 P5-0806-220）による測定を行った。He-3 比例計数管の計数率の比は、中性子フルエンスの比に対応しているため、標準用 ²⁴¹Am-Be 線源と Cf-252 に対する計数率を比較することで、中性子放出率を導出した。Cf-252 線源の中性子放出率は、令和 5 年 12 月 22 日時点で $4.36 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ （相対拡張不確かさ 4.0%($k=2$))と導出された。



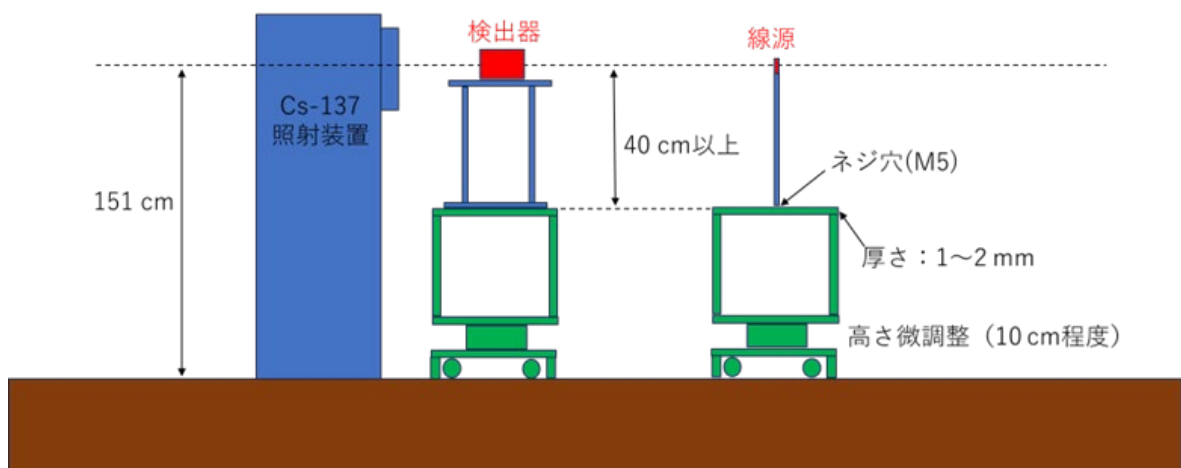
図 3.3-8 購入した Cf-252 線源

(本研究内で設計・作製を行った治具を付け、放出率評価を行った。)

産総研大線量標準室の既存の台車では、構成部材の体積が大きく、構造も複雑である。散乱中性子の影響の低減し、令和6年度以降に数値シミュレーションによる散乱線評価を行うためにも、台車の構成材料を基本アルミニウムとし、検出器と中性子線源付近の部材を薄くし、単純な構造とする必要がある。

令和6年度以降に実施する予定の光子・中性子混在場の試験では、検出器設定位置での γ 線・中性子の各フルエンス率を柔軟に変更できるようする必要がある。そのためCs-137線源、検出器、中性子線源のそれぞれの位置関係を任意の距離で設定できるように、検出器と中性子線源を固定する台車をそれぞれ作製する。また、検出器と線源を固定する治具についても中性子標準場と同様のものを作製することで、 γ 線と中性子それぞれの応答と混在場での応答を定量的に評価できる。

以上の観点から γ 線・中性子混在場試験環境を構想した。構想図を図3.3-9に示す。令和6年度に台車及び検出器・線源固定治具を作製し、混在場での試験を実施する。

図 3.3-9 γ 線・中性子混在場試験の構想図

3.3.4 連続光子場の構築と試験

令和 5 年度は、Cs-137 線源場の線量の国家標準器であるグラファイト壁空洞電離箱を用いて、加速器 X 線の線量率を放射線防護における線量の基準である空気カーマ率として絶対測定を実施した。数値シミュレーションにより、絶対測定のために必要な補正係数を計算し、基準点（ターゲット表面から 1.5 m）における空気カーマ率を決定した。

産総研では、近年の RI 供給不足に対応するために小型加速器による線量校正場の整備を進めており、令和 5 年には、最大加速エネルギー 1 MeV 弱の X 線照射装置を用いて、模擬 Cs-137 γ 線場を構築した[9]。この X 線場は連続的なエネルギー分布ではあるが、Cs-137 γ 線場と同じ実効エネルギーをもつ。しかし、現状の加速器スペック（最大 100 W）では、産総研大線量標準場の線量率（1 Gy/h）以上の線量率で照射することはできず、1/40 程度（最大 25 mGy/h）である。本事業では、Cs-137 線源からの γ 線がコンプトン散乱を経てそのエネルギーを低減させ連続的な分布として観測される光子に対する応答評価用の試験場の構築を行った。

線形加速器は、高周波（5.3 GHz）により電子を 1 MeV 弱まで加速し、タングステンターゲットとの衝突により制動 X 線を生じる。この制動 X 線は、低エネルギーから加速電子の最大エネルギーまでの連続的な分布をもつが、そのままではタングステンによる低エネルギーの特性 X 線の成分が顕著となる[10]。

一般的な放射線場において、特定の RI による γ 線を除く連続成分は高エネルギーから低エネルギーにかけて徐々にフルエンスが高くなるように分布する[11]。このような連続的な X 線場を形成するために、ISO-4037-1:2019[12]で規定される Wide spectrum series と同様な線質を形成すること目的に、銅とアルミニウムを付加フィルタとして用いた。

本研究で開発する検出素子は、高線量率環境でも利用可能なものであるため、X 線を減弱させるフィルタの厚さは薄い方が望ましい。一方で、フィルタを薄くし過ぎると低エネルギー成分の割合が大きくなってしまう。線量の絶対測定に用いるグラファイト壁空洞電離箱は、空気とグラファイトの放射線相互作用の違いを補正する必要があるが、この補正は 150 keV 以下の光子に対しては変化が大きくなるため、それ以下のエネルギーの光子フルエンスが支配的となると線量測定の不確かさが大きくなる。200 keV 前後でフルエンスが減少するような連続 X 線場を形成するように、加速器内のターゲット周辺及びフィルタを模擬したジオメトリを用いて数値シミュレーション（EGS5）を行い、フィルタをアルミニウム、銅の厚さをそれぞれの 1.0 cm と決定した。その数値シミュレーションの計算結果を図 3.3-10 に示す。また、比較のために Cs-137 からの γ 線の放出率を同グラフに示す。グラフの縦軸は、それぞれのフルエンスの最大値を 1 として規格化されている。

Spencer-Attix の空洞理論に基づき、グラファイト壁空洞電離箱による電流 i_c の測定から基準位置における空気カーマ率 \dot{K}_{air} は、以下の式で得られる[12][13]。

$$\dot{K}_{\text{air}} = \frac{i_c}{\rho_{\text{air}} V_c} \frac{W_{\text{air}}}{e} \frac{1}{1-g} \left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_{\text{graphite}}^{\text{air}} \left(\frac{L_{\Delta}}{\rho} \right)_{\text{air}}^{\text{graphite}} \prod_i k_i$$

ここで、 ρ_{air} は空気の密度、 V_c は空洞の体積、 W_{air} は空気の W 値、 e は電荷素量、 g は制動放射によるエネルギー損失の割合、 $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{graphite}}^{\text{air}}$ は空気とグラファイトの質量エネルギー吸収係数比、 $(L_{\Delta}/\rho)_{\text{air}}^{\text{graphite}}$ はグラファイトと空気の制限電子阻止能比、 k_i は空気カーマ率を定義通り求めるために必要な各補正係数である。 ρ_{air} は電流測定と同時に基準位置付近の温度 T (°C) と気圧 P (hPa) を測定し、以下の式から求める。

$$\rho_{\text{air}} = \rho_0 \frac{273.15}{273.15 + T} \frac{P}{1013.25}$$

ここで、 ρ_0 は温度 0 °C、気圧 1013.25 hPa の乾燥空気密度である。

実測と計算により得られた連続 X 線場のエネルギースペクトルを用いて、グラファイト壁空洞電離箱による空気カーマ絶対測定のための補正係数を計算した。基準位置はタングステンターゲット表面からビーム軸上の 1.5 m の位置とし、補正係数は J. Ishii et al. [14] に記載される方法を用いて計算した。開発した連続 X 線場における空気カーマ率絶対測定のための物理定数及び主な補正係数の値を表 3.3-7 に示す。また、基準位置でのグラファイト壁空洞電離箱による X 線測定の様子を図 3.3-11 に示す。

線形加速器の X 線出力は、半減期が長く（年オーダー）1 日当たりの減衰が無視できるレベルの RI（Cs-137、Co-60 など）が放出する γ 線ほど安定していない。そのため、実際の校正では照射口と付加フィルタの間に X 線出力モニタ用の透過型電離箱を設置し、その電流値で規格化した線量率を用いる。具体的には、校正する測定器の指示値を M とするとき、以下の式で校正定数 N_K を求める。

$$N_K = \frac{(\dot{K}_{\text{air}}/i_m)}{(M/i'_m)}$$

i_m 及び i'_m は、標準器と校正する測定器のそれぞれの照射時におけるモニタ用电離箱から得られる電流値である。構築した連続 X 線場において、加速器最大定格出力での照射時にグラファイト壁空洞電離箱で得られる電流値 i_c 、モニタ用电離箱電流値 i_m 、空気カーマ率 \dot{K}_{air} を表 3.3-8 に示す。電流測定の実験標準偏差は、グラファイト壁空洞電離箱とモニタ用电離箱 0.1% 以下だった。構築した連続 X 線場の基準位置での空気カーマ率は、産総研大線量標準場の線源距離 2.0 m で設定される値よりも大きく、一般的な放射線作業環境よりも十分に高い線量率である。

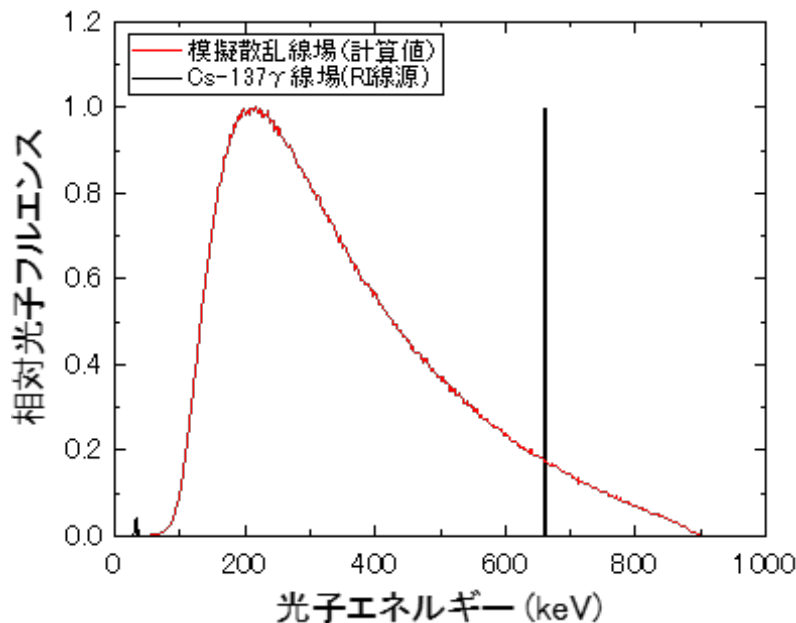


図 3.3-10 計算された模擬散乱線場のエネルギースペクトル

表 3.3-7 連続 X 線場における空気カーマ率絶対測定のための物理定数及び補正係数の値

物理定数及び補正係数	説明	値
ρ_0 / kg m ⁻³	乾燥空気密度	1.2930
V_c / cm ³	空洞体積	62.6845
W_{air} / J C ⁻¹	空気の W 値	33.97
g	放射分率	1.0010
$(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{graphite}}^{\text{air}}$	質量エネルギー吸収係数比	1.0014
$(L_{\Delta}/\rho)_{\text{air}}^{\text{graphite}}$	制限電子阻止能比	1.0043
k_{wall}	壁による散乱と吸収の補正	1.0523
k_{nu}	X 線場の不均一性の補正	0.9757
k_{stem}	電離箱ステムによる散乱の補正	0.9518



図 3.3-11 連続光子場での空気カーマ率絶対測定の様子

表 3.3-8 連続 X 線場（最大定格出力:100 W）における測定結果

電流、空気カーマ率	値
グラファイト壁空洞電離箱電流値 (i_c/A)	1.77×10^{-10}
モニタ用电離箱電流値 (i_m/A)	1.50×10^{-8}
空気カーマ率 ($\dot{K}_{\text{air}}/\text{mGy h}^{-1}$)	264

3.3.5 まとめ

令和 5 年度は、令和 6 年度以降に実施予定の γ 線・中性子混在場での試験のための事前実験として、産総研の γ 線標準場（Cs-137 線源場、Co-60 線源場）及び熱中性子標準場で、原子力機構が開発した試作検出素子の応答試験を行った。 γ 線・中性子混在場については、大線量標準場に適用予定の中性子線源の放出率を決定し、台車や固定治具の仕様を固め、構想図を作成した。また、連続 X 線試験場の構築も進め、 γ 線の線量一次標準器を用いた測定により、その線量率の絶対値を決定した。

3.4 簡易非破壊測定システムの開発とホットセル内実証試験（連携先：原子力機構）

3.4.1 簡易非破壊測定システムの開発

令和 5 年度は、簡易非破壊測定システムに利用するため、(1)高線量率測定に向けた検出素子の試作ならびに(2)性能試験を実施した。

(1) 高線量率測定用の検出素子の試作

① 利用した革新的なシンチレータ

令和 5 年度では、3.1 節で説明している革新的なシンチレータの中から、東北大学により作製された CeBr_3 ならびに共晶体の $\text{LaBr}_3/\text{LiBr}$ 利用して試作検出素子を構築した。 γ 線スペクトル測定では、寸法が $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ の CeBr_3 結晶を石英窓付のアルミパッケージで密封したシンチレータ（図 3.4-1）。一方で、中性子測定用としては、 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ （厚さ）（図 3.4-2）ならびに $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ （厚さ）（図 3.4-3）の $\text{LaBr}_3/\text{LiBr}$ 結晶を同様に石英窓付アルミパッケージで密封したシンチレータを利用した。結晶の密封方法については、すでに 3.1 節で述べたとおりである。



図 3.4-1 寸法が $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ の CeBr_3 結晶を石英窓付のアルミパッケージで密封したシンチレータ



図 3.4-2 寸法が $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ （厚さ）の共晶体 $\text{LaBr}_3/\text{LiBr}$ を石英窓付のアルミパッケージで密封したシンチレータ



図 3.4-3 寸法が 3 mm×3 mm×3 mm (厚さ) の共晶体 LaBr₃/LiBr を石英窓付のアルミパッケージで密封したシンチレータ

② 高線量率用測定に向けた検出素子の試作

簡易非破壊測定システムに利用するための検出素子の試作（以下、試作検出素子と記す。）を作製した。試作検出素子では、令和 6 年度以降に実施予定であるホットセル内実証試験で利用予定である。そのため、これまで原子力機構で実施してきた高線量率環境下での γ 線スペクトルや中性子測定の経験を活かし[15][16]、試作検出素子は、ホットセル内の高線量率環境下において放射線計測をすることを前提に設計し、さらに、ホットセル内での運用も考慮した小型化を進めた。まず、光センサーとしては、令和 5 年度に選定したシンチレータの特性がいずれも発光量が多く、発光時間が短い、発光波長は 400 nm 付近であるという発光特徴がある。そのため、光センサーとしては PMT を利用し、さらに、以下の機種を選定した。

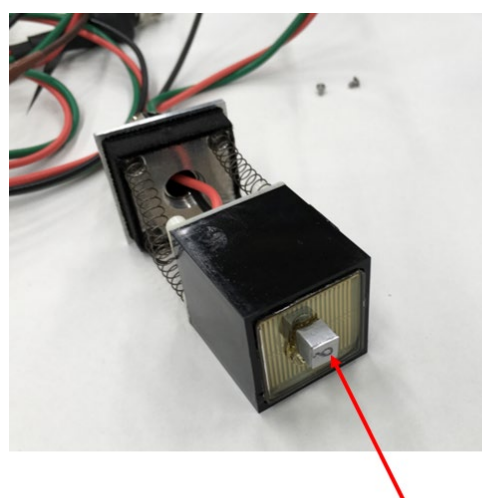
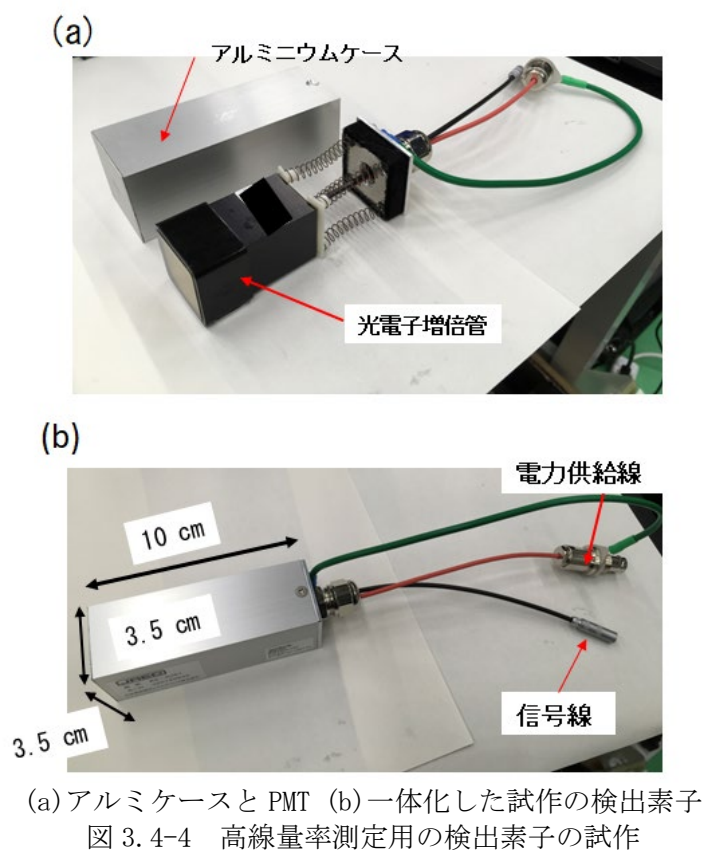
光センサー：PMT（浜松ホトニクス社製 R11265U）

寸法：30 mm×30 mm×18.7 mm

有感面：23.5 mm×23.5 mm

カソード：ウルトラバイアルカリ（UBA）

シンチレータと PMT を組み合わせ、十分な遮光ならびに電磁雑音遮蔽を施すことで低雑音となりエネルギー分解能を向上に繋がる。そのため、シンチレータを取り付けた PMT を一体にして収納し、遮光ならびに電磁雑音遮蔽できる専用のアルミニウムケースでハウジングできるような検出素子を試作した（図 3.4-4(a)）。試作した検出素子の寸法は、35 mm×35 mm×100 mm である小型な直方体型の形状である（図 3.4-4(b)）。これは、令和 6 年度以降に実施予定のホットセル内の作業において、マニピレータによる検出素子の操作性も考慮した設計となっている。同検出素子は、シンチレータを接合して利用するが、図 3.4-5 に示すように、選定シンチレータパッケージを PMT の中心になるように設定して、その後にアルミハウジングケースで PMT とシンチレータを一体化して利用している。



革新的なシンチレータ

図 3.4-5 革新的なシンチレータを PMT に接合した様子

(2) 測定機材の整備

放射線計測器の信号処理では、アナログ信号処理とデジタル信号処理に大別できる。従来 PMT のアノード信号をパルス処理する方法として、PMT からのアノード信号を電荷集積型増幅した信号を波形形成回路に入れるというアナログ信号処理を実施し、その波高値をマルチチャンネルアナライザで読み取ることで信号の電荷相当の値を得ることができる。令和 5 年度に整備した信号処理回路では、PMT のアノード信号を ADC に直接入れて、ディ

ジタル信号に変換している（図 3. 4-6）。ADC の仕様は、量子ビットが 14 ビットで、1 Gsps（1 ns 間隔のサンプリング）である。波形情報を取得している[17]。また、ADC において信号波形をデジタル値に変換したものを FPGA という書き換えが可能な集積回路に入れてデジタル信号処理している。ADC から入力された 1 Gsps の波形情報については、エネルギー（スペクトル）取得する Slow 系として 1 Gsps の信号情報を 8 ns 間隔の平滑化フィルタでノイズを除去して、その後、さらに FPGA 内でデジタル信号のローパスフィルタをかけている。フィルタリングされたデジタル波形情報の積分値が信号の電荷相当として計算された値（QDC）については、その後、FPGA から専用の LAN イーサネット変換カードに入力され、LAN ケーブルを介して PC まで転送している。一方で、Fast 系として、1 Gsps で得られた波形情報から信号の重なり（パイルアップ）を検出することで、パイルアップとして検出した信号については PC へ伝送する QDC 値から除外している。

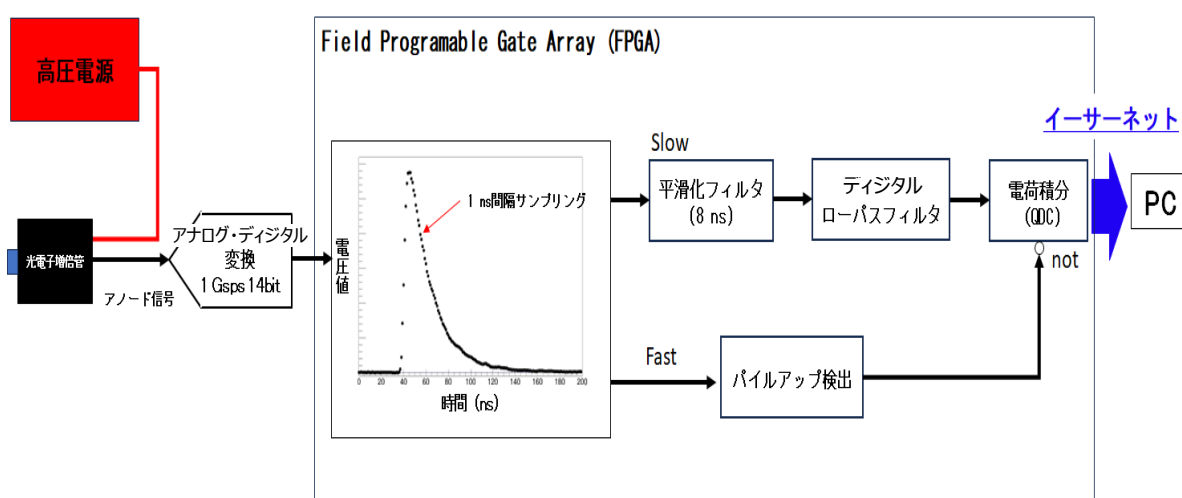


図 3. 4-6 簡易非破壊測定システムで利用する信号処理ブロックダイアグラム

(3) 性能試験

試作した検出素子ならびに測定機材の性能試験を実施した。

① CeBr₃ シンチレータ

試作検出素子に CeBr₃（3 mm×3 mm×3 mm）を投入して、Cs-137 線源を利用して、検出素子ならびに測定機材の性能評価を実施した。図 3. 4-7 に測定した γ 線スペクトル結果を示す。Cs-137 (Ba-137m) の γ 崩壊における放出エネルギーである 662 keV の全エネルギー吸収ピークが確認できる。同ピークにおけるエネルギー分解能を評価するため、ピーク近傍においてガウシアン分布（式）をフィッティング関数として想定し、最小二乗法によるフィッティングを実施した（図 3. 4-7 赤線）。

$$\text{Fit}(Q) = A \times \exp\left(-\frac{(Q - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

ここで、パラメータはチャンネル番号 (Q)、ピークの高さ (A)、中心値 (μ)、分散 (σ) を示している。また、最適化したパラメータ値より、ピーク位置における相対エネルギー分解能 (R_E)（以下、エネルギー分解能と記す。）を次のように定義した。

$$R_E = 100 \times \frac{2 \ln(2) \sigma}{\mu}$$

評価されたエネルギー分解能は、3. 9%である。

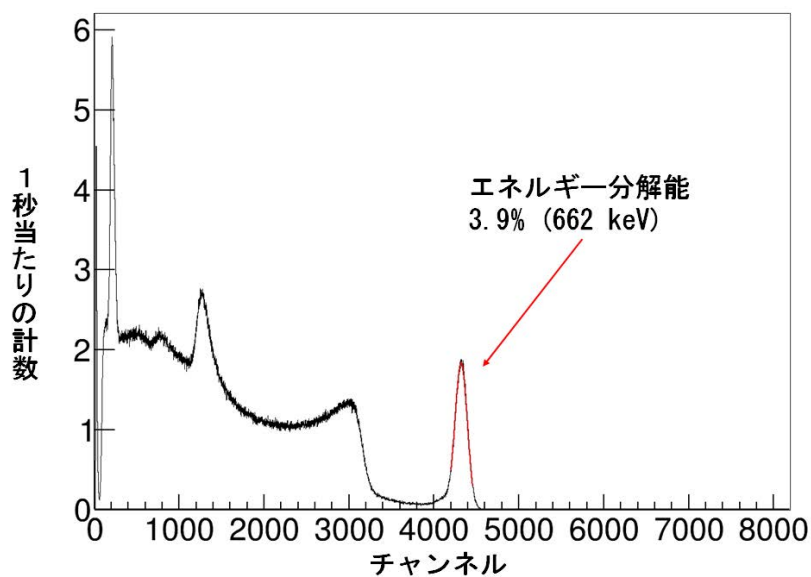


図 3.4-7 CeBr₃ シンチレータ (3 mm×3 mm×3 mm) における Cs-137 線源の γ 線スペクトル測定の結果

② 熱中性子シンチレータ (LaBr₃/LiBr)

続いて、中性子検出用のシンチレータの評価も実施した。図 3.4-8 ならびに図 3.4-9 は、結晶寸法が 3 mm×3 mm×1 mm ならびに 3 mm×3 mm×3 mm の LaBr₃/LiBr シンチレータを利用して、Cs-137 ならびに Cf-252 の線源を測定したときの結果である。

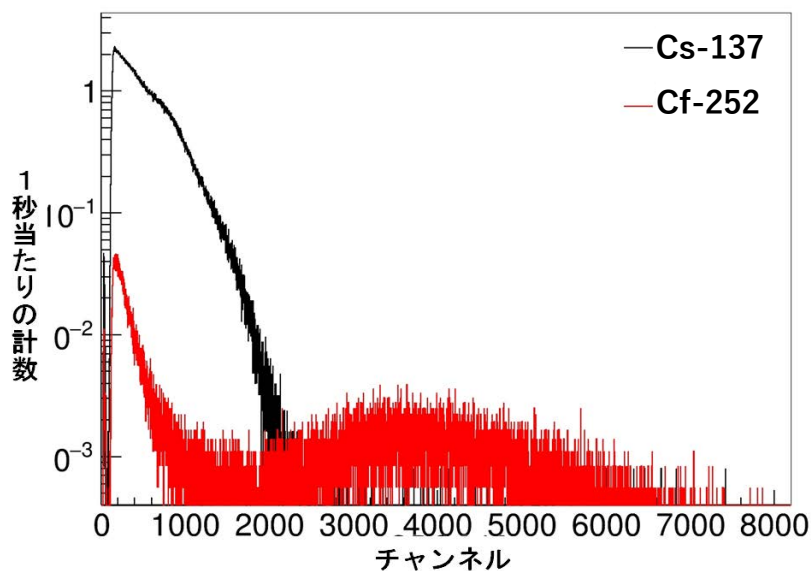


図 3.4-8 LaBr₃/LiBr シンチレータ (3 mm×3 mm×1 mm) の Cs-137 線源 ならびに Cf-252 線源のスペクトル測定結果

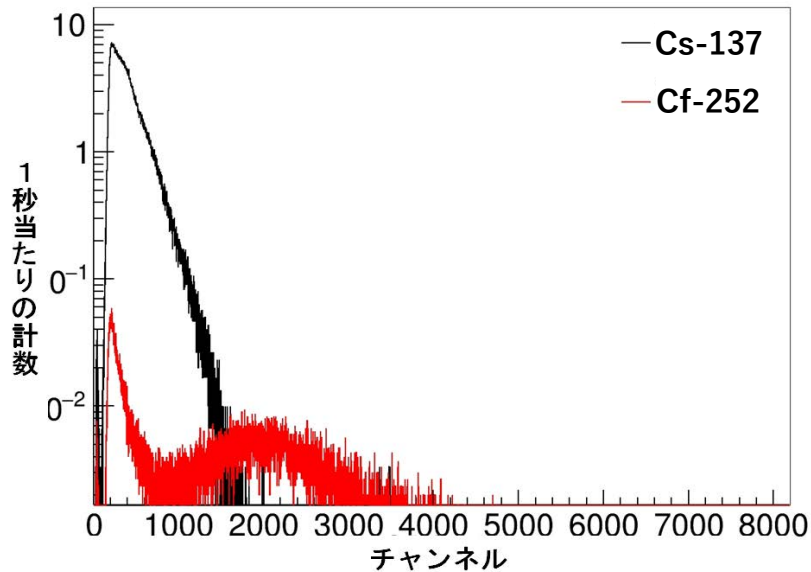


図 3.4-9 LaBr₃/LiBr シンチレータ (3 mm×3 mm×3 mm) の Cs-137 線源
ならびに Cf-252 線源のスペクトル測定結果

3.4.2 まとめ

同測定システムの照射場試験結果については、3.3 節において産総研と共同で実施し、示している。

① γ 線スペクトルシステム

令和 5 年度では、CeBr₃ を試作の検出素子に利用して測定システムを開発した。同システムのエネルギー分解能は、662 keV のエネルギー 3.9% という評価結果であり、CeBr₃ の典型的なエネルギー分解能 (4% 程度) と比較すると、優れた結果である。これは、シンチレータの品質が高くかつ整備している測定システムの性能が十分よいことを示している。令和 6 年度以降には、令和 5 年度に開発したシステムのさらなるエネルギー分解能向上を目指し、東北大学で開発中の LaBr₃:Ce, Sr を基本と測定システムの開発を行う。

② 中性子測定

令和 5 年度には、LaBr₃/LiBr シンチレータ (結晶寸法 3 mm×3 mm×1 mm) ならびに LaBr₃/LiBr シンチレータ (3 mm×3 mm×3 mm) を利用した測定システムを開発した。3 mm×3 mm×1 mm では、 γ 線源 (Cs-137) と中性子線源 (Cf-252) の γ 線応答に対して中性子ピークの分離が可能であることを示唆した結果であるが、一方で、3 mm×3 mm×3 mm の結晶を利用した結果では、 γ 線応答が中性子ピークに被り、分離が厳しいことを示唆しているため、共晶体結晶の種類選定あるいは結晶生成方法も含めて東北大学と協力した開発が必要になると考える。

3.5 研究推進【令和5年度】

研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして研究を進めた。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催した。詳細は以下のとおりである。

英知事業 キックオフミーティング

日時：令和5年6月22日 15:00～17:00

場所：WEB（ZOOM）

議題：それぞれの機関の研究課題の確認と顔合わせ。

英知事業 第一回研究会

日時：令和5年8月30日 15:00～17:00

場所：東京大学

議題：それぞれの機関の研究内容の紹介と今後の具体的な研究スケジュールの策定、次回研究会の日程計画。

英知事業 第二回研究会

日時：令和5年10月30日 13:00～15:30

場所：WEB（ZOOM）

議題：それぞれの機関の研究状況の報告、次回研究会の日程計画。

英知事業 第三回研究会

日時：令和6年1月16日 14:00～16:00

場所：WEB（ZOOM）

議題：それぞれの機関の研究状況の報告、中間報告に向けた報告書作成に関する打合せ、次回研究会の日程計画。

英知事業 現場打合せ

日時：令和6年2月27日 13:00～15:00

場所：WEB（ZOOM）

議題：産総研での試験に向けたシンチレータ仕様の策定。

4. 結言

令和5年度に1Fでは、PCVから燃料デブリの取り出しが予定され、さらに、将来的には段階的な取り出し規模の拡大が検討されている。一方で、燃料デブリは、総量、性状、かさ密度、表面線量率、核種インベントリという特性の変動が大きく、部分ごとに組成が異なる可能性があり、放射線計測器に求められる遮蔽や検出素子形状の最適化が困難になる課題がある。本研究では、このような課題の解決策として、標的試料取り出し時のスクリーニングならびに連続監視に資する、革新的なシンチレーション放射線検出システムの開発を進めている。当該システムでは、発光時間が短くかつエネルギー分解能がよいシンチレータを探求し、1 mm以下スケールの多様な形状の結晶加工とパッケージングの技術と高帯域かつ高計数率測定に優れる測定システムを組み合わせることで、高線量率環境において重厚な遮蔽を必要としないで放射線計測を可能とする。さらに、非破壊測定に利用できる表面線量率、 γ 線スペクトル、中性子束という標的試料の情報を総合的に捉えることができる小型な検出素子を構築する。

令和5年度には、 γ 線スペクトルシステムとして CeBr_3 を用いた結晶加工、パッケージング技術の開発を進めた。さらに、パッケージされた CeBr_3 を試作の検出素子に利用して測定システムを開発した。同システムのエネルギー分解能は、662 keVのエネルギー3.9%という評価結果であり、 CeBr_3 の典型的なエネルギー分解能（4%程度）と比較すると優れた結果である。これは、シンチレータの品質が高くかつ整備している測定システムの性能が十分よいことを示している。令和6年度以降には、令和5年度に開発したシステムのさらなるエネルギー分解能向上を目指し、東北大学で開発中の $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ 、 Sr を基本とする測定システムの開発を行う。

中性子測定としては、東北大学において開発され、各結晶サイズでのパッケージングを実施した $\text{LaBr}_3/\text{LiBr}$ シンチレータ（結晶寸法3 mm×3 mm×1 mm）ならびに $\text{LaBr}_3/\text{LiBr}$ シンチレータ（3 mm×3 mm×3 mm）を利用し、中性子測定システムを開発した。3 mm×3 mm×1 mmでは、 γ 線源（ Cs-137 ）と中性子線源（ Cf-252 ）の γ 線応答に対して中性子ピークの分離が可能であることを示唆した結果であるが、一方で、3 mm×3 mm×3 mmの結晶を利用した結果では、 γ 線応答が中性子ピークに被り、分離が厳しいことを示唆しているため、共晶体結晶の種類選定あるいは結晶生成方法も含めて東北大学と協力した開発を推進していく。

上記で確認された信号出力を想定し、令和5年度は高計数率下で動作可能な可搬型8 cm×10 cm程度の小型高速デジタル波形解析処理ボードの設計試作を開始した。今後、複数のデジタルフィルタ機能の実装を予定している。

さらに令和5年度は、産総研の γ 線標準場（ Cs-137 線源場、 Co-60 線源場）及び熱中性子標準場で原子力機構が開発した試作検出素子の応答試験を行った。 γ 線・中性子混在場については、大線量標準場に適応予定の中性子線源の放出率を決定し、台車や固定治具の仕様を固め、構想図を作成した。また、連続X線試験場の構築も進め、 γ 線の線量一次標準器を用いた測定により、その線量率の絶対値を決定した。

参考文献

- [1] Y. Yan, X. Zhang, H. Li, Y. Ma, T. Xie, Z. Qin, S. Liu, W. Sun, E. Lewis, An optical fiber sensor based on La2O₂S:Eu scintillator for detecting ultraviolet radiation in real-time, *Sensors (Switzerland)*, 18, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18113754>
- [2] V. Nagirnyi, S. Zazubovich, V. Zepelin, M. Nikl, G.P. Pazzi, A new model for the visible emission of the CsI: Tl crystal, *Chem. Phys. Lett.*, 227, 1994, pp.533-538. [https://doi.org/10.1016/0009-2614\(94\)00857-4](https://doi.org/10.1016/0009-2614(94)00857-4)
- [3] M. Kaburagi et al. Gamma-ray spectroscopy with a CeBr₃ scintillator under intense γ -ray fields for nuclear decommissioning, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 988, 2021, 164900.
- [4] T. Orita, M. Uenomachi, K. Shimazoe, & H. Ikeda, Time and Energy Resolving Time-over-Threshold ASIC for MPPC module in TOF-PET system (ToT-ASIC2), *Journal of Instrumentation*, 18(09), 2023, P09033.
- [5] T. Orita, A. Koyama, M. Yoshino, K. Kamada, A. Yoshikawa, K. Shimazoe, & H. Sugawara, The current mode Time-over-Threshold ASIC for a MPPC module in a TOF-PET system, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 912, 2018, pp.303-308.
- [6] 加藤秀起, 光子の物質に対する質量エネルギー転移係数, *日本放射線技術学会雑誌*, vol.70, no.7, 2014, pp.684-691. https://doi.org/10.6009/jjrt.2014_jsrt_70.7.684
- [7] H. Hirayama et al., The EGS5 Code System, *KEK Report*, 2005-8, 2005.
- [8] H. Harano et al., Convenient method of relative calibration of the neutron source emission rate between different source types, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 53(3), 2006, pp.1413-1417.
- [9] J. Ishii et al., Accelerator-driven photon reference field for replacement of ¹³⁷Cs γ -ray, *Metrologia*, vol.60, 042101, 2023. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/acd8c0>
- [10] 日本原子力研究開発機構 安全研究センター, 令和4年度新たな実用量への対応に係る線量計測上の課題に関する研究～二次標準機関及び原子力施設における調査研究～事業成果報告書, 令和4年度原子力規制庁委託成果報告書, 20221408, 2023.
- [11] ISO 4037-1, X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy - part 1: radiation characteristics production methods, 2019.
- [12] L.V. Spencer and F.H. Attix, A theory of cavity ionization, *Radiat. Res.* vol.3, 1955, pp.239-358.
- [13] A.E. Nahum, Water/air mass stopping power ratios for megavoltage photon and electron beams, *Phys. Med. Biol.*, vol.23, 1978, pp.24-38.
- [14] J. Ishii et al., The NMIJ air kerma primary standard for high energy X-ray beams in 300-450 kV, *Biomed. Phys. Eng. Express.*, vol.8, 015021, 2021. <https://doi.org/10.1088/2057-1976/ac3e89>

- [15]M. Kaburagi et al., Gamma-ray spectroscopy with a CeBr_3 scintillator under intense γ -ray fields for nuclear decommissioning, Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A, vol.988, 2021, 164900.
- [16]M. Kaburagi et al., Neutron/gamma-ray discrimination based on the property and thickness controls of scintillators using Li glass and $\text{LiCAF}(\text{Ce})$ in a gamma-ray field Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A, vol.1046, 2023, 167636.
- [17]M. Kaburagi et al., A cubic CeBr_3 gamma-ray spectrometer suitable for the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A, vol.971, 2020, 164118.

