

# 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 (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 a High-resolution Imaging Camera  
for Alpha Dust and High-dose Rate Monitor  
(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

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

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  
(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 10 月 2 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 4 年度に採択された研究課題のうち、「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」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。

本研究では、二つの検出器の開発を実施している。一つ目は、作業員の安全の確保のための  $\alpha$  線核種の炉内の分布を明らかにする技術の実現を目指し、スミヤロ紙上に付着するより細かい  $\alpha$  線核種を含む微細なダストの詳細な分布の可視化を可能にする技術の開発である。令和 4 年度の研究開始時は資材等の準備からはじまり、優れた位置分解能と高感度化を目指した検出素子などの材料開発や光検出器などのハード及びソフトウェアの準備を順調に行うことができた。また、令和 5 年度末までに発光波長が 500–800 nm かつ 5.5 MeV の  $\alpha$  線入射で、発光量が 70,000 光子相当の目標値の中に入る材料開発などを実施することができた。さらに、画像から  $\beta$ 、 $\gamma$  線等との分別ができるようなアルゴリズムの開発を進めることができた。

二つ目は、光ファイバーを用いた超高線量率場での線量率モニタの開発である。こちらについても、高感度化を目指した検出素子などの材料開発及びシミュレーション体系の構築とその解析ができた。モニタとしての実証試験も実施して、20 mSv/h 未満から 1 kSv/h 以上までの線量のダイナミックレンジを有することがわかり、現場適用に対応可能な検出器の開発が進められた。

---

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 a High-resolution Imaging Camera for Alpha Dust and High-dose Rate Monitor  
(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 October 2, 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, 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 FY2022, this report summarizes the research results of the “Development of a high-resolution imaging camera for alpha dust and high-dose rate monitor” conducted in FY2023.

The present study aims to develop a high-resolution imaging camera for alpha dust and a high-dose rate monitor. To realize the high-resolution imaging camera for alpha dust, we have developed novel scintillation materials with emission bands of 500-800 nm. Moreover, we have prepared several materials for the camera and software.

We have also developed novel scintillation materials with emission bands of 650-1,000 nm, and simulation studies have been conducted for the high-dose-rate monitor system consisting of optical fiber. In addition, we demonstrated this monitoring system, and the dose-rate dynamic range was found to be 20 mSv/h to 1 kSv/h.

Keywords: Alpha Dust Imaging, High Dose Rate, Scintillator, Alpha Rays, Gamma Rays, Simulation, Red or Infrared

---

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
汚染土壤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	齊藤 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 肇	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 康一朗	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 号機ペデスタル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 G E ニュークリア・エナジー
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	淺間 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タイアップ型人材育成	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
$\beta$ 、 $\gamma$ 、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
マイクロ波重畠 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 啓太朗	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	淺間 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 $\gamma$ 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
$\alpha$ 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 (～R5.3.31) 理化学研究所 (R5.4.1～)	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センジ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
動画像からの特微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イ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
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

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

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

(契約番号 R05I054)

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「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」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 .....	vi
1. はじめに.....	1-1
2. 業務計画 .....	2-1
2.1 全体計画 .....	2-1
2.2 実施体制 .....	2-2
2.3 令和 5 年度の成果の目標および業務の実施方法 .....	2-3
2.3.1 ナローバンドギャップ材料の開発 .....	2-3
2.3.2 放射線顕微鏡の開発 .....	2-3
2.3.3 高線量率場モニタの開発 .....	2-3
2.3.4 研究推進 .....	2-3
3. 実施内容および成果 .....	3-1
3.1 ナローバンドギャップ材料の開発【令和 4 年度～令和 5 年度】 .....	3-1
3.1.1 ナローバンドギャップ材料の開発【令和 4 年度～令和 5 年度】 .....	3-1
3.1.2 まとめ .....	3-1
3.2 放射線顕微鏡の開発【令和 4 年度～令和 5 年度】 .....	3-2
3.2.1 撮像部の開発【令和 4 年度～令和 5 年度】 .....	3-2
3.2.2 エネルギー取得部の開発（再委託先：三菱電機）【令和 4 年度～令和 5 年度】 .....	3-4
3.2.3 実証試験（連携先：原子力機構）【令和 4 年度～令和 5 年度】 .....	3-7
3.2.4 まとめ .....	3-12
3.3 高線量率場モニタの開発【令和 4 年度～令和 5 年度】 .....	3-13
3.3.1 モニタの開発【令和 4 年度～令和 5 年度】 .....	3-13
3.3.2 照射試験（再委託先：京都大学）【令和 4 年度～令和 5 年度】 .....	3-13
3.3.3 光学シミュレーション（再委託先：三菱電機）【令和 4 年度～令和 5 年度】 .....	3-18
3.3.4 まとめ .....	3-22
3.4 研究推進 .....	3-23
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

黒澤 俊介

助教

山路 晃広

再委託先

三菱電機株式会社

研究員

林 真照

笹野 理

国立大学法人京都大学

教授

田中 浩基

助教

高田 卓志

連携先

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

研究主幹

森下 祐樹

表一覧

表 3.3.1 シンチレータの屈性率に対する集光効率 ..... 3-19

## 図一覧

図 2.1.1	全体計画図	.....	2-1
図 2.2.1	実施体制図	.....	2-2
図 3.2.1	開発中の撮像部の概念図	.....	3-2
図 3.2.2	シンチレータシート作製の様子	.....	3-3
図 3.2.3	シンチレータシートと $\alpha$ 線撮像の様子	.....	3-3
図 3.2.4	放射線顕微鏡の写真	.....	3-4
図 3.2.5	ORCA®-Quest を用いた放射線顕微鏡による $\alpha$ 線画像	.....	3-5
図 3.2.6	$\alpha$ 線スポットを抽出して領域設定した画像例	.....	3-5
図 3.2.7	取得画像から作成した輝度値の頻度分布	.....	3-6
図 3.2.8	新型の EMCCD カメラを用いた高分解能の $\alpha$ 線イメージング装置の写真	.....	3-7
図 3.2.9	さまざまな放射線応答に関する測定時の様子	.....	3-8
図 3.2.10	$\alpha$ 線、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線、中性子線の分布画像	.....	3-9
図 3.2.11	$\alpha$ 線、 $\gamma$ 線、中性子線スポットの強度プロファイル	.....	3-9
図 3.2.12	$\alpha$ 線、 $\gamma$ 線と中性子線の識別のための画像処理手順	.....	3-10
図 3.2.13	$\alpha$ 線スポットの検出・計測結果	.....	3-10
図 3.2.14	$\alpha$ 線と $\gamma$ / 中性子線同時入射時の弁別結果	.....	3-11
図 3.2.15	核燃料物質取扱施設での試料測定の様子	.....	3-11
図 3.3.1	電位計と電離箱の外観写真	.....	3-14
図 3.3.2	低線量率と電位計の電流値の関係	.....	3-14
図 3.3.3	高線量率と電位計の電流値の関係	.....	3-15
図 3.3.4	コバルト 60 照射施設の PHITS の計算モデル概略図	.....	3-15
図 3.3.5	線源からの距離と線量の関係	.....	3-16
図 3.3.6	迷路構造の位置における線量と距離の関係	.....	3-16
図 3.3.7	光学濃度と高線量領域の線量との関係	.....	3-17
図 3.3.8	光学濃度と低線量領域の線量との関係	.....	3-18
図 3.3.9	光学系シミュレーションの体系概略図	.....	3-19
図 3.3.10	光学系シミュレーションでの体系図と光路例 (緑線)	.....	3-19
図 3.3.11	シンチレータの屈性率に対する集光効率の変化	.....	3-20
図 3.3.12	シンチレータ径を変えたときのシミュレーション体系	.....	3-20
図 3.3.13	シンチレータ径を変えたときの相対集光効率	.....	3-21
図 3.3.14	試作回路の評価セットアップ	.....	3-21
図 3.3.15	試作回路の出力と参照ソースメータ出力の関係	.....	3-22

### 略語一覧

CLADS	:	Collaborative Laboratories for (廃炉環境国際共同研究センター) Advanced Decommissioning Science
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)
東電	:	東京電力ホールディングス株式会社
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
東北大学	:	国立大学法人東北大学
京都大学	:	国立大学法人京都大学
三菱電機	:	三菱電機株式会社
PHITS	:	Particle and Heavy Ion Transport code System

## 概略

本研究課題では、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（以下、「1F」と略記。）の廃炉を迅速に行うために、炉内のデブリなどに含まれる放射性物質の分布およびその先の工程として、作業員立ち入りの際の安全の確保のための $\alpha$ 線核種を含むダスト（ $\alpha$ ダスト）の形態把握のための検出器を開発する。ここで、前者を高線量率モニタ、後者を放射線顕微鏡と名付けて開発を進めている。前者では高い放射線量の下での放射線計測になり、後者では100  $\mu\text{m}$ 以下の位置分解能と信号自体が低計数であるといった条件での放射線計測になることから、どちらも非常に高い感度が求められる。

これらの感度を達成するためには、検出器の検出素子部分に使われるシンチレータ材料の高発光量化や適切な発光波長の選択、光検出器やその周辺機器の最適化などが必要である。さらに、迅速な検出器の実現に向けて、シミュレーションによるデザインの検討や線量等の校正場（コバルト60  $\gamma$ 線照射施設など）の線量分布のより詳細な情報を得ることが重要である。

以上を踏まえ、本研究課題2年目の令和5年度は、これらの検出器にかかるシンチレータ材料の探索、検出器ハードの部材の準備、ソフトウェア・シミュレーション解析の整備をメインに行つた。そして、放射線顕微鏡用および高線量率場モニタ用シンチレータとして、発光波長がそれぞれ500–800 nmおよび650–1,000 nmを満たす当該材料を開発した。

放射線顕微鏡の開発では、検出器部分の開発およびエネルギーと画像それぞれの解析方法の構築ができ、 $\alpha$ 線粒子とそれ以外の粒子の判別方法が確立しつつある。

さらに、高線量率場モニタとしては、これまでよりも線量率の測定下限値を低くでき、20 mSv/h未満から1 kSv/h以上までの線量のダイナミックレンジを有する高線量率場モニタを実現した。あわせて線量率のシミュレーション、光学シミュレーションなどの構築もできた。

## 前年度までの成果報告書：

- ・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（委託研究）  
平成30年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業  
JAEA-Review 2019-038 <https://doi.org/10.11484/jaea-review-2019-038>
- ・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（委託研究）  
令和元年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業  
JAEA-Review 2020-039 <https://doi.org/10.11484/jaea-review-2020-039>
- ・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（委託研究）  
令和2年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業  
JAEA-Review 2021-044 <https://doi.org/10.11484/jaea-review-2021-044>
- ・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（委託研究）  
令和3年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業  
JAEA-Review 2022-065 <https://doi.org/10.11484/jaea-review-2022-065>
- ・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（委託研究）  
令和4年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業  
JAEA-Review 2024-016 <https://doi.org/10.11484/jaea-review-2024-016>

## 1. はじめに

1F の廃炉を迅速に行うために、まずは炉内のデブリなどに含まれる放射性物質の分布、言い換えると線量分布を把握する必要がある。そして、作業員の立ち入りの際の安全の確保のための  $\alpha$  線核種を含むダスト（ $\alpha$  ダスト）の炉内の分布を明らかにする技術の実現が求められている。

ダストとして舞う放射線核種、特に、体内被ばくの影響が高い  $\alpha$  線を放出する核種を含むダストやデブリの取り扱いは重要な問題である。仮に 10  $\mu\text{m}$  程度の直径をもつダストの場合、マスク等の防護では体内への取り込みを完全に防げない可能性があり、体内被ばくのリスクが高まる。 $\alpha$  線核種はその半減期が 100 年以上であり、どうしても無視できない問題である。

そもそもどのようなダストやデブリが存在するかがわかつておらず、その核種、ダストサイズの形状の把握が、まずは喫緊かつ重要となっている。ダストの大きさとしては不明ではあるものの、これまでの核燃料施設・MOX 加工施設でのダストから推測として 10  $\mu\text{m}$  程度以下であると考えられることから、まずはそのサイズを把握できるような撮像装置の開発が急がれている。そして、平成 30 年度採択の「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」（令和 3 年度終了）においては、10  $\mu\text{m}$  程度以下の位置分解能を達成することができたが、さらなる位置分解能の向上が要請された。

また、平成 30 年度採択の「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」（令和 3 年度終了）においては、上記のダスト調査の前の段階として、数  $\text{Sv}/\text{h}$  程度以上の非常に高い高線量率場の把握に対応すべく、光ファイバーを用いた高線量率場モニタの開発を進めていた。これについても引き続き、さまざまな現場やその状況に適用できるような要請があった。

そこで、本研究において放射線顕微鏡および高線量率モニタの二つの検出器開発に着手した。

## 2. 業務計画

## 2.1 全体計画

全体計画図を図 2.1.1 に示す。

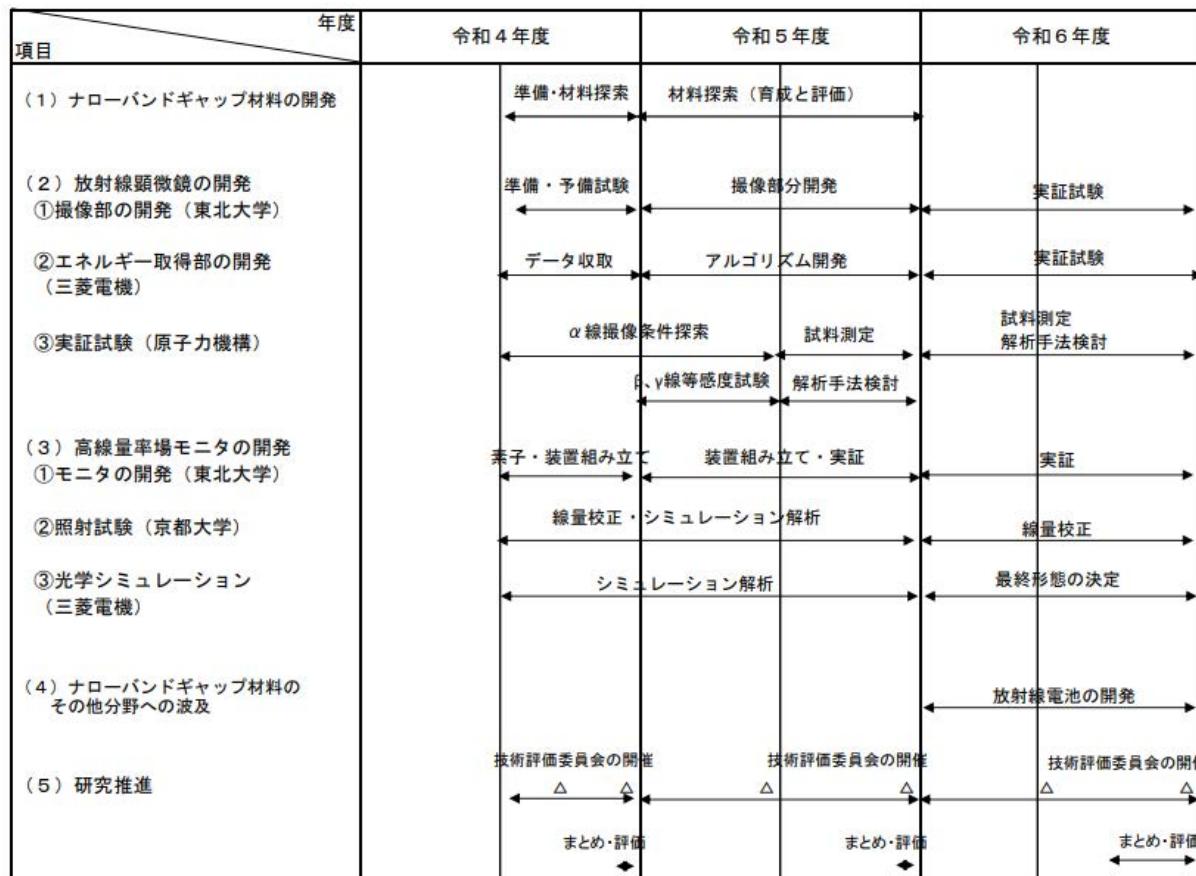


図 2.1.1 全体計画図

## 2.2 実施体制

実施体制を図 2.2.1 に示す。

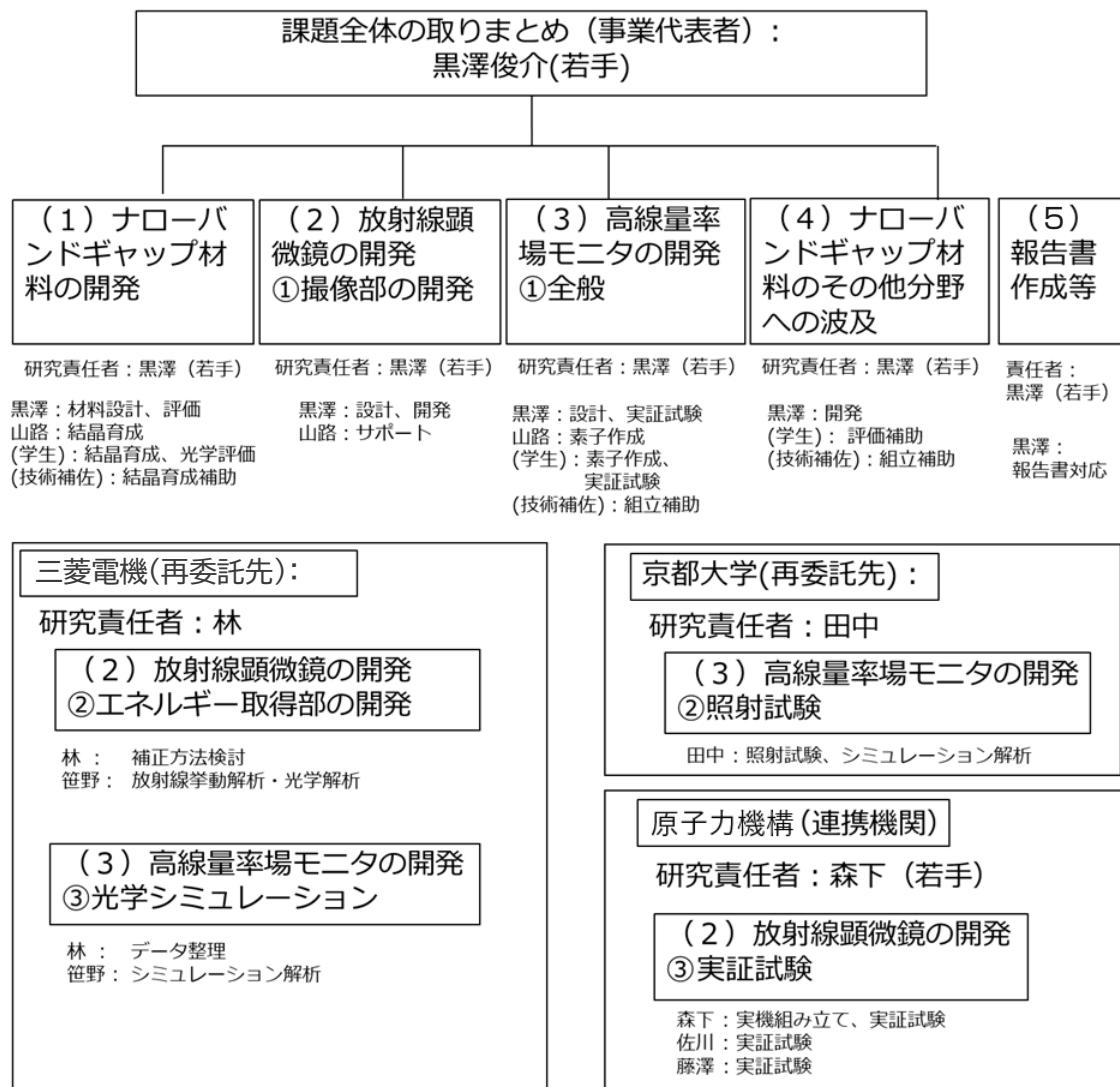


図 2.2.1 実施体制図  
(若手は申請時の年齢が 40 歳以下)

## 2.3 令和5年度の成果の目標および業務の実施方法

### 2.3.1 ナローバンドギャップ材料の開発

令和4年度に引き続き、放射線顕微鏡用シンチレータとして、500–800 nmの発光波長をもつ材料の開発を進め、なおかつ5.5 MeVの $\alpha$ 線入射で発光量が70,000光子相当の材料を見出す。また、高線量率場モニタとして、発光波長が650–1,000 nmをもつ材料を見出す。

### 2.3.2 放射線顕微鏡の開発

#### 1) 撮像部の開発

$\alpha$ 線イメージングのための装置開発を進め、三菱電機株式会社（以下、「三菱電機」と略記。）と協力してエネルギー測定部のアンフォールディング法について、具体的な運用法を確立する。

#### 2) エネルギー取得部の開発（再委託先：三菱電機）

令和4年度に引き続き、ノイズとなる $\gamma$ 線の識別（除去）を行い、画像からエネルギースペクトルを取得する。また、このスペクトルから簡便に $\alpha$ 線を識別できるアンフォールディング法について最適化を進める。具体的には、従来の測定幾何条件を考慮した応答関数の構築に加えて、光伝搬を考慮した応答関数により測定に即した応答関数を構築する。

#### 3) 実証試験

（連携先：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」と略記。））

CMOSカメラを用いた $\alpha$ 線撮像のための解析手法を検討する。また、 $\beta$ 、 $\gamma$ 線等感度試験を行う。実際の汚染試料等を用いたイメージングを進める。

### 2.3.3 高線量率場モニタの開発

#### 1) モニタの開発

令和4年度に引き続き、モニタの開発を進め、20 mSv/h未満から1 kSv/h以上までの線量のダイナミックレンジを有するモニタを開発する。

#### 2) 照射試験（再委託先：国立大学法人京都大学（以下、「京都大学」と略記。））

令和4年度に引き続き、京都大学複合原子力科学研究所のコバルト60照射施設にて、国立大学法人東北大学（以下、「東北大学」と略記。）と協力しながら照射試験を実施し、その結果を東北大学、三菱電機、原子力機構へフィードバックする。あわせて、感度関数等に使うシミュレーション解析も進める。また、シンチレータ素子、その他高線量率場モニタの関連部材の放射線耐性実験等も実施する。

#### 3) 光学シミュレーション（再委託先：三菱電機）

高線量率場モニタ等の形状や適用素材および計測処理の最適化を目指し、光学系のシミュレーション研究を進める。適用素材については屈折率の観点等から議論する。

### 2.3.4 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。

### 3. 実施内容および成果

#### 3.1 ナローバンドギャップ材料の開発【令和4年度～令和5年度】

##### 3.1.1 ナローバンドギャップ材料の開発【令和4年度～令和5年度】

###### 【令和4年度までの概要】

令和4年度には、放射線顕微鏡用シンチレータとして、500-800 nm の発光波長をもつ材料の開発準備とその開発を進めた。加えて、高線量率場モニタとしての目標波長である 650-1,000 nm に発光波長をもつ材料の開発の準備と実際の探索を進めた。

###### 【令和5年度の実施内容および成果】

令和4年度に引き続き、放射線顕微鏡用シンチレータとして、500-800 nm の発光波長をもつ材料の開発を進めた。その探索方法は令和4年度の当該報告書の記述と同様である[1]。そのため、簡単に紹介すると主たる合成方法は固相反応法による粉体焼結を採用し、その後粉末X線回折（粉末XRD）による相の同定、X線または電子線による組成分析を行った。さらに、X線励起による発光波長の測定を行い、目的の波長条件に合致するような材料の探索を実施した。

その結果、放射線顕微鏡用シンチレータとしての目標波長である 500-800 nm および高線量率場モニタとしての目標波長である 650-1,000 nm にも合致する材料の開発に成功した。

##### 3.1.2 まとめ

令和4年度に引き続き、酸化物を中心に探索を行い、放射線顕微鏡用シンチレータとして、500-800 nm の発光波長をもつ材料の開発を進め、なおかつ 5.5 MeV の  $\alpha$  線入射で発光量が 70,000 光子相当の材料を開発した。また、高線量率場モニタとして発光波長が 650-1,000 nm をもつ材料を開発できた。

酸化物、硫化物などの材料を中心に、単結晶ないしは多結晶合成法によって候補材料を育成した。

### 3.2 放射線顕微鏡の開発【令和4年度～令和5年度】

#### 3.2.1 撮像部の開発【令和4年度～令和5年度】

##### 【令和4年度までの概要】

令和4年度には、CMOSカメラの購入などの撮像部分の準備、組み立てを行った。

##### 【令和5年度の実施内容および成果】

令和4年度に引き続き、 $\alpha$ 線イメージングのための装置開発を進めた。図3.2.1は開発中の撮像部の概念図であり、アルファダストからの $\alpha$ 線をシンチレータにて可視光などに変換して、レンズで結像して光学カメラ(CMOSカメラ)で撮像する機構が基本的な構成である。

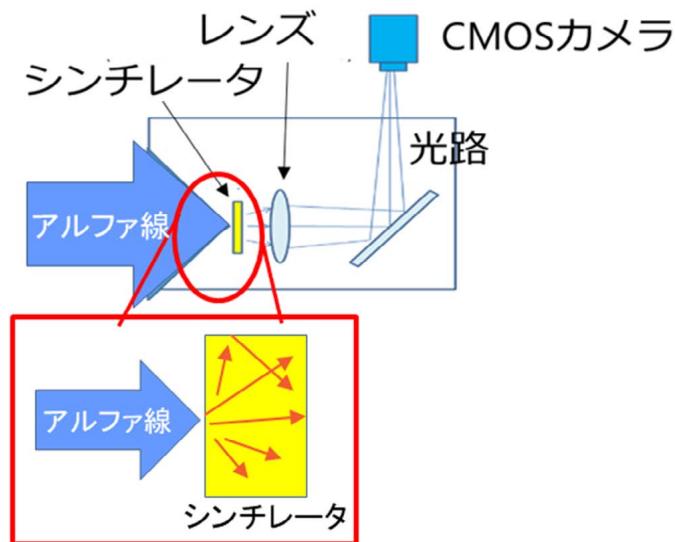


図3.2.1 開発中の撮像部の概念図

令和5年度の開発事項の一つとして、 $\alpha$ 線の信号を光に変換させるシンチレータ素子部分の構造の開発がある。材料は3.1節で記述した作業によって合成した結晶をベースとして、シート型のシンチレータ素子の構築に向けた研究開発を進めた。

$\alpha$ 線は紙1枚でも遮蔽できることから、必要なシンチレータの厚みは組成にも依存するが、通常は6 MeV程度の $\alpha$ 線に対しては30  $\mu\text{m}$ 程度あれば十分である。逆にシンチレータの厚みを厚くしてしまうと、シンチレータ内で生じた光の散乱および焦点をあわせる面の奥行き方向の選択性が広がってしまうため、位置分解能の低下(ハイレゾ化の抑制)につながってしまう。つまり、30  $\mu\text{m}$ 程度の厚みで優れた位置分解能を担保できるような当該シート開発の必要性がある。

図3.2.2には、実際にシンチレータシートを作製する過程の一例について示した。この一例では、潮解性が非常に小さいヨウ化物材料を用いている。また、作製したシンチレータシートに $\alpha$ 線を照射させて図3.2.1のセットアップで撮像を行うと図3.2.3のとおりになり、正しく撮像することに成功した[2]。ここで、位置分解能は得られた像のデータの $\alpha$ 線照射の端で入力信号が10-90%に変化する幅から $16.2 \pm 2.6 \mu\text{m}$ と見積もられた[2]。これらの結果については、[2]にまとめて発表済みである。

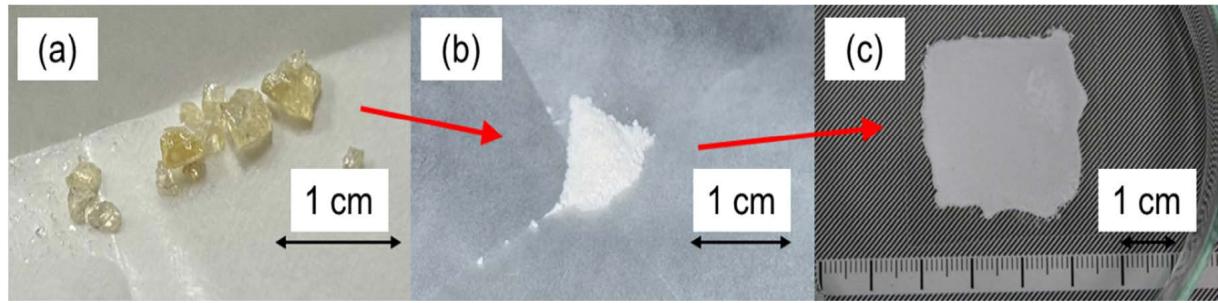


図 3.2.2 シンチレータシート作製の様子[2]  
(a)原材料の写真、(b)粉碎した様子、(c)シート整形している様子

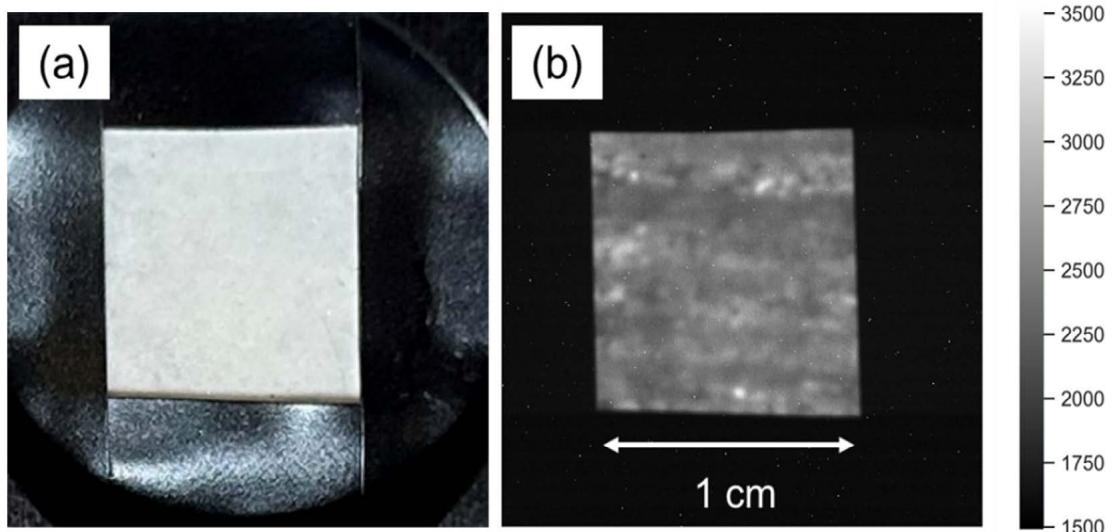


図 3.2.3 シンチレータシートと  $\alpha$  線撮像の様子[2]  
(a)撮像に使用したシートの写真、(b)撮像結果

今回のシート作製方法では図 3.2.3 の撮像結果のように、 $\alpha$  線照射部にて一部のムラができることがわかった。現在、いくつかの方法でシートの作製を試みており、均一にシート状にシンチレータを配する方法の最適化を行っている。

上記のハードウェア開発以外にも、三菱電機と協力してエネルギー測定部のアンフォールディング法について具体的な運用法についても議論を行った（詳細は 3.2.2 項参照）。

関連して、 $\alpha$  線の飛程を使ったエネルギー弁別による核種分析法の実現可能性についても三菱電機と協力して実施し、3.2.2 項のような結果を得た（特に図 3.2.11 などの結果）。

### 3.2.2 エネルギー取得部の開発（再委託先：三菱電機）【令和4年度～令和5年度】

#### 【令和4年度までの概要】

令和4年度には、ノイズとなる $\gamma$ 線の識別（除去）を行い、画像からエネルギースペクトルを取得した。また、このスペクトルから簡便に $\alpha$ 線を識別できるアンフォールディング法について最適化を進めた。結果、放射線顕微鏡の実験系を構築し、シンチレータに $\alpha$ 線を照射し $\alpha$ 線由来の発光スポットを確認することができた。その発光スポットの画像からエネルギースペクトルを取得できることが確認できた。一方で、 $\alpha$ 線の識別にはより高感度な撮像素子を用いて、エネルギースペクトルの分解能を向上させる必要があることがわかった。

#### 【令和5年度の実施内容および成果】

令和4年度に引き続きノイズとなる $\gamma$ 線の識別（除去）を行い、画像からエネルギースペクトルを取得した。また、このスペクトルから簡便に $\alpha$ 線を識別できるアンフォールディング法について最適化を進めた。具体的には、従来の測定幾何条件を考慮した応答関数の構築に加えて、光伝搬を考慮した応答関数にすることでより測定に即した応答関数を構築した。また、 $\alpha$ 線の飛程を使ったエネルギー弁別による核種分析法の実現可能性を東北大学とともに評価した。

結果、東北大学と協力して、新型 CMOS カメラ（浜松ホトニクス社製、ORCA®-Quest）の導入と、それによるシステムの構築を進めることができた。以下に詳細を述べる。

顕微鏡向けのカメラは浜松ホトニクス社 ORCA®-Flash4.0 を使用していた。より高輝度で低ノイズの画像を取得するために浜松ホトニクス社 ORCA®-Quest を導入した。ORCA®-Quest を用いて構築した放射線顕微鏡を図 3.2.4 に示した。

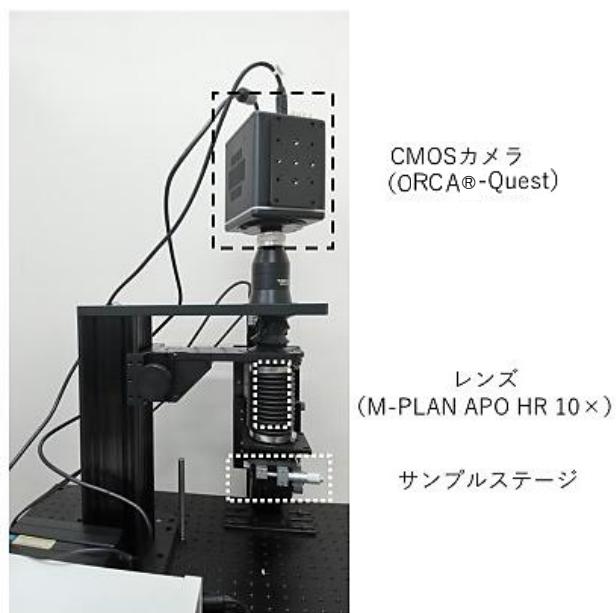


図 3.2.4 放射線顕微鏡の写真

組み上げたセットアップにてシンチレータとして ZnS を設置し、 $^{241}\text{Am}$  線源からの $\alpha$ 線計測を実施して得られた画像を図 3.2.5 に示す。 $\alpha$ 線イベントに応じた発光点を検出できることを確認した。画像拡大した結果を図 3.2.6 に示す。

試計測の条件を説明する。シンチレータは ZnS(Ag) シンチレータ (EJ-444, Eljen Technology、厚み 0.5 mm のプラスチックシンチレータの片面に ZnS 粉末)、 $\alpha$  線面線源  $^{241}\text{Am}$  (Eckert&Ziegler、1 kBq、 $\phi$  16 mm) を使用した。対物レンズは M-PLAN APO HR 10X を使用した。カメラの露光時間は 1 秒に設定、輝度レベルは 16 bit で出力されるよう設定した。

図 3.2.5 は試計測で取得された画像である。画像中にシンチレーション光由来のスポットが多数確認できた。輝度レベルを確認すると暗状態の輝度レベルが平均 200 で、最大 120 程度のばらつきであるのに対して、シンチレーション光由来のスポットは 190 程度となりノイズと十分に切り分けることができる輝度であることがわかった。令和 6 年度中に、より高感度なカメラを入手予定であり、それを用いることでより高い輝度で発光スポットをとらえることが可能になる見通しである。

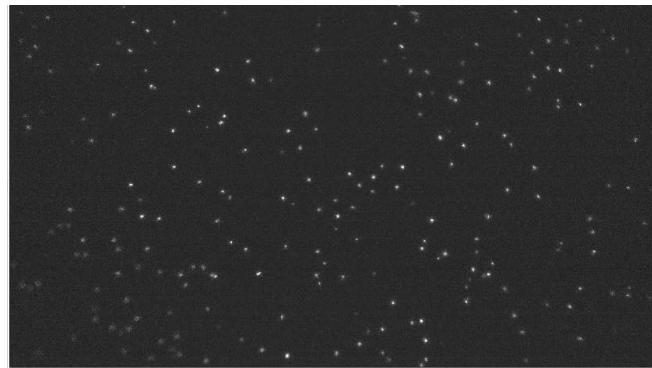


図 3.2.5 ORCA®-Quest を用いた放射線顕微鏡による  $\alpha$  線画像

画像情報から輝度値分布を作成する手順を説明する。画像から閾値以上の発光点を抽出し、 $40 \times 40$  ピクセルサイズ内で最大輝度値のピクセルを中心として図 3.2.6 のように領域を選ぶ。選んだ領域内で閾値以上のピクセルの輝度値を足し合わせて  $\alpha$  線一つごとの輝度値を導出する。このような手順で作成した輝度値の頻度分布を作成した結果を図 3.2.7 に示す。

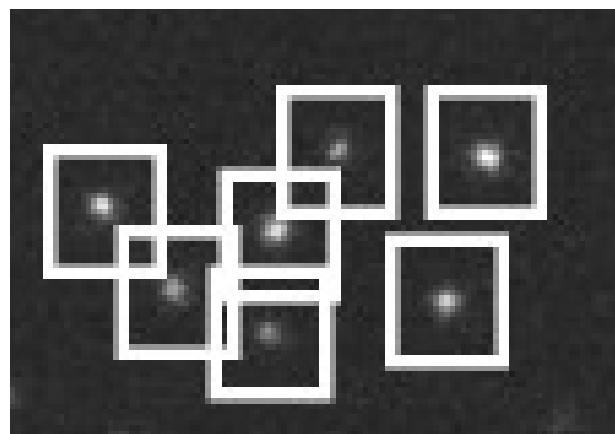


図 3.2.6  $\alpha$  線スポットを抽出して領域設定した画像例

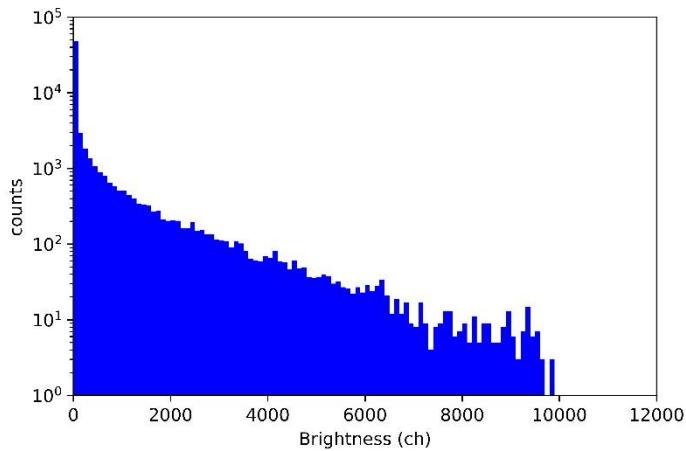


図 3.2.7 取得画像から作成した輝度値の頻度分布

画像取得とともに画像の輝度値から、スペクトル情報となる頻度分布が取得できることを確認でき、新型 CMOS カメラの導入とシステム構築を進めることができた。

三菱電機と協力してエネルギー測定部分の原理実証を進めることができ、飛程距離によるエネルギー分別方法についての運用法について研究を進めて、運用方法について開発した。

また、新型 CMOS カメラ（浜松ホトニクス社製、ORCA®-Quest）を導入し、システムの構築を進めることができた。

### 3.2.3 実証試験（連携先：原子力機構）【令和4年度～令和5年度】

#### 【令和4年度までの概要】

令和4年度には、新型のCCDカメラ等を用いた $\alpha$ 線撮像のための最適な撮像条件（レンズ、ジオメトリ、パラメータ等）を見出すための試験を行った。

#### 【令和5年度の実施内容および成果】

令和5年度には、下記のとおりCMOSカメラを用いた $\alpha$ 線撮像のための解析手法を検討し、 $\beta$ 、 $\gamma$ 線等感度試験を行う。実際の汚染試料等を用いたイメージングを進めた。

##### (1) $\alpha$ 線イメージヤーに対する他の放射線の照射試験

令和4年度の試験において、我々は新型のEMCCDやCMOSカメラを使用した高分解能の $\alpha$ 線イメージングに成功した[1]。しかし、1Fを含むいくつかの廃炉現場では $\beta$ 線、 $\gamma$ 線、中性子線も存在しており、これらの放射線と $\alpha$ 線を区別して測定することが重要である。過去の研究においてCMOSアレイセンサーに対する放射線の影響を調査し、さまざまな種類の放射線に対する応答を示すことがわかった[1]。この研究では、放射線の種類ごとにイメージセンサーの応答が特有であることがわかった。また、中性子線による損傷が発生することを報告している。

そのため本研究では、開発した $\alpha$ 線イメージヤーに各種放射線を照射し、その影響を調査した。さらに、 $\alpha$ 線と他の放射線を区別する方法を開発した（図3.2.8）。

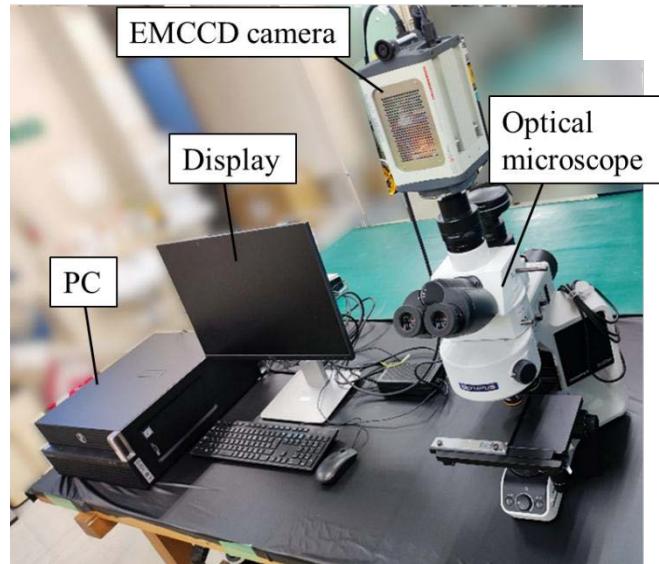


図3.2.8 新型のEMCCDカメラを用いた高分解能の $\alpha$ 線イメージング装置の写真[3]

##### (2) $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線、中性子線の測定のセットアップ

$\alpha$ 線、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線、中性子線など、数種類の放射線源を用いて測定を行った。 $U_3O_8$ と $^{241}Am$ を $\alpha$ 線源として用い、 $^{90}Sr$ と $^{36}Cl$ を $\beta$ 線源として用いた。さらに、 $^{137}Cs$ の $\gamma$ 線を測定し、 $^{252}Cf$ とAm-Beの中性子線を測定した。

図3.2.9に線源測定の様子を示す。 $\alpha$ 線源と $\beta$ 線源をXYZステージに設置し測定を行った。 $\alpha$ 線源と $\beta$ 線源はレンズ、シンチレータを使用して測定した。画像は5倍の倍率、1秒間隔で収集した。 $\gamma$ 線および中性子線の照射は、照射装置にカメラを設置して行った。

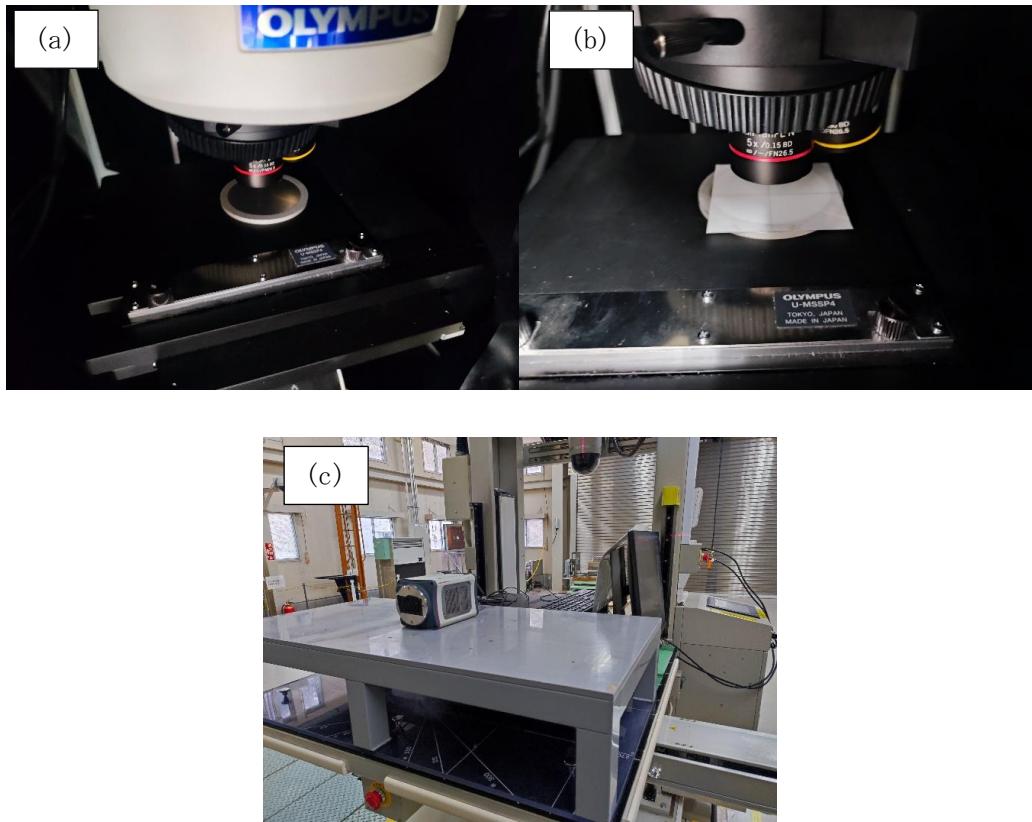


図 3.2.9 さまざまな放射線応答に関する測定時の様子[3]  
 (a) 線源測定の様子。  $\alpha$  線源と  $\beta$  線源を XYZ ステージに設置し測定。  
 (b)  $\alpha$  線源と  $\beta$  線源およびシンチレータの配置。 (c)  $\gamma$  線照射の様子

### (3) $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線、中性子線の測定の結果

図 3.2.10 に  $\alpha$  線、 $\beta$  線、 $\gamma$  線、中性子線の分布を示す画像の例を示す。 $\alpha$  線を測定すると、 $\alpha$  線によるスポットが確認された。一方で、 $\beta$  線を測定したところスポットは確認されなかった。また、 $U_3O_8$  線源 は  $\alpha$  線と  $\beta$  線の両方を放出するが、 $\alpha$  線のみが観測された。

$\gamma$  線と中性子線を測定したところ、複数のスポットが確認された。このスポットはシンチレータがない状態でカメラのみの場合にも確認された。これは  $\gamma$  線や中性子線がカメラの CCD センサーと直接相互作用し、ノイズとして検出されていると考えられる。スポットの分布は  $\alpha$  線とは異なり、スポットのサイズも  $\alpha$  線よりも小さく信号強度は飽和していた (16 bit= 65, 535)。

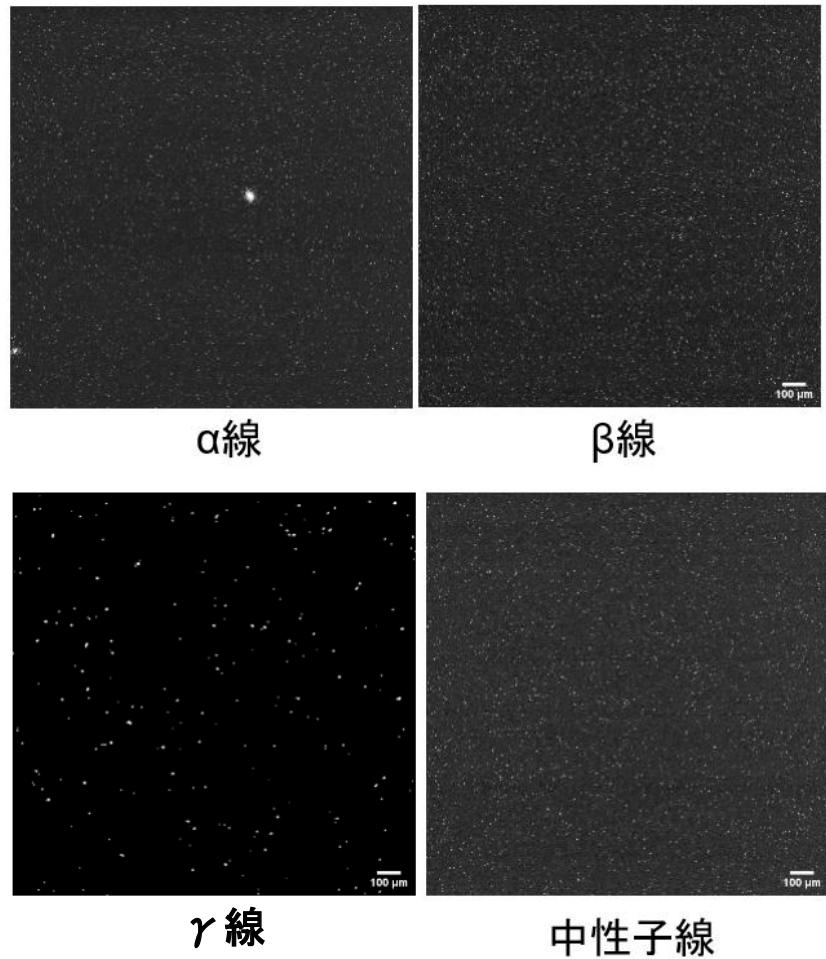
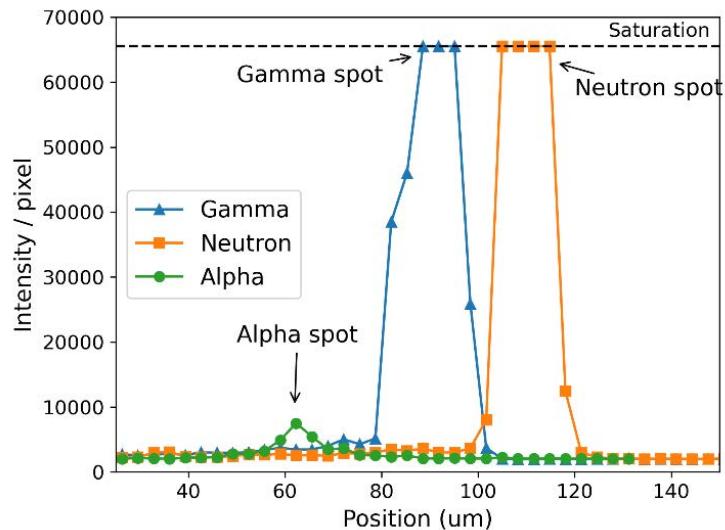
図 3.2.10  $\alpha$  線、 $\beta$  線、 $\gamma$  線、中性子線の分布画像[3]

図 3.2.11 に  $\alpha$  線、 $\gamma$  線および中性子線スポットの強度プロファイルを示す。 $\alpha$  線の場合、ピーク値は 7,500 であったが、 $\gamma$  線や中性子線の場合は強度が飽和する (66,536、図 3.2.11 の横線)。これは強度の違いを利用して  $\alpha$  線と  $\gamma$  線 (中性子線) を識別可能であることを示している。

図 3.2.11  $\alpha$  線、 $\gamma$  線、中性子線スポットの強度プロファイル[3]

(4)  $\alpha$  線、 $\gamma$  線と中性子線の識別画像処理

$\alpha$  線、 $\beta$  線、 $\gamma$  線、中性子線はそれぞれ異なる画像分布を示すため、その特徴を利用して放射線の種類を区別することができる。本研究では、 $\alpha$  線と $\gamma$  線または中性子線を区別することを目的として手法開発を行った。

$\alpha$  線と $\gamma$  線または中性子線を区別するための画像処理を図 3.2.12 に示す。まず、16 bit 画像を 8 bit 画像に変換する。次に、平滑化フィルター（ガウスフィルター）を適用してノイズを除去した。その後、 $\alpha$  線のみを識別するように上限と下限の閾値が設定され、 $\gamma$  線と中性子線に由来する高強度の信号が除去された。次に、画像値が 2 値化された。最後に、OpenCV ライブラリの `findContours` 関数を使用して、 $\alpha$  線スポットの数を測定した。

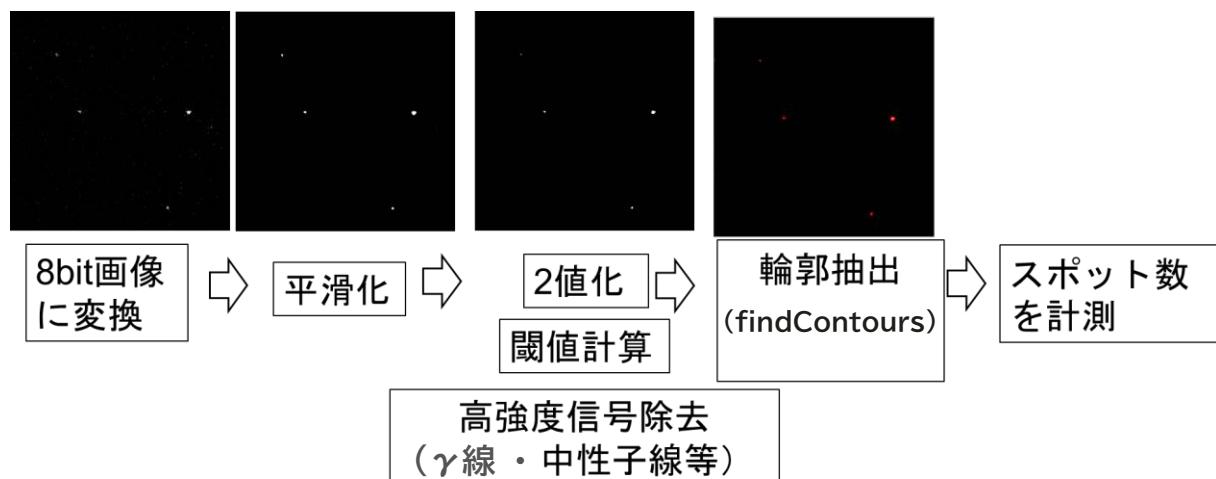


図 3.2.12  $\alpha$  線、 $\gamma$  線と中性子線の識別のための画像処理手順[3]

図 3.2.13 に $\alpha$  線スポットの検出・計測結果を示す。 $^{241}\text{Am}$   $\alpha$  線源の放射能は  $2,720 \text{ Bq}/5 \text{ cm}^2$  であった。図 3.2.13(a) の画像には、個々の  $\alpha$  線を表すスポットが確認される。図 3.2.13(b) の画像処理後の画像では、この  $\alpha$  線のスポットが赤い線で囲まれており、正確に抽出できていることがわかる。また、図 3.2.13(c) に示すように、時間ごとの  $\alpha$  線スポットの数を計測することができた。

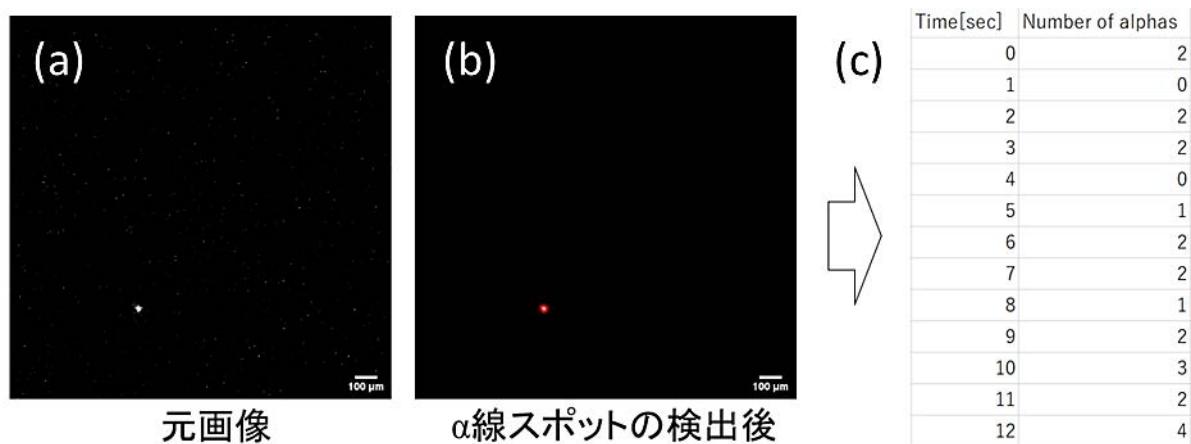


図 3.2.13  $\alpha$  線スポットの検出・計測結果[3]

図 3.2.14(a)に $\alpha$ 線と $\gamma$ 線が同時に入射した画像を示す[3]。図 3.2.14(b)の画像処理適用後の画像では、 $\alpha$ 線のスポットのみが検出され $\gamma$ 線によるスポットは完全に除去されている。

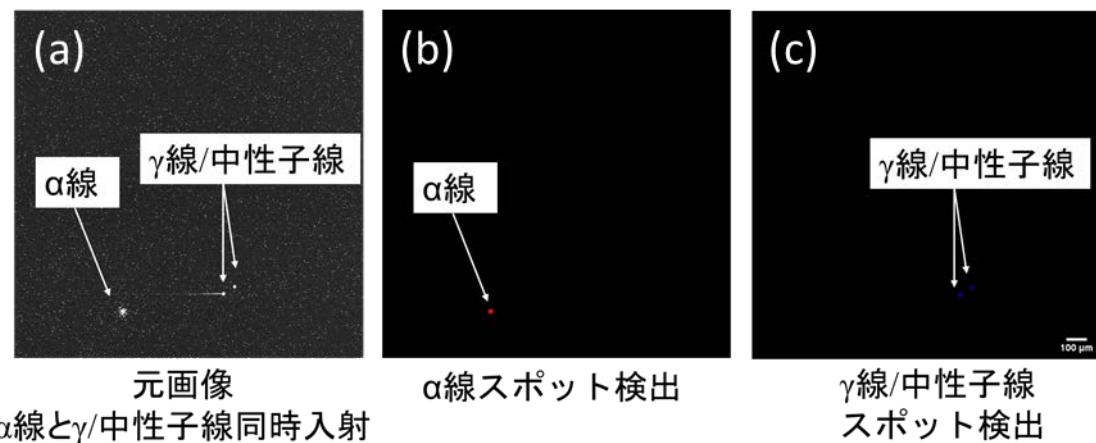


図 3.2.14  $\alpha$ 線と $\gamma$ /中性子線同時入射時の弁別結果[3]

#### (5) 核燃料物質取扱施設での試料測定の結果

開発した $\alpha$ 線イメージヤーを核燃料物質取扱施設に持ち込み、試料の測定を行った（図 3.2.15）。 $\alpha$ 核種と $\beta$ 核種が混在する試料（スミヤ試料、空気集塵ろ紙試料）を測定した。測定の結果、 $\beta$ 核種に埋もれる $\alpha$ 線の画像を得ることができた。測定を継続してデータを拡充するとともに、今後画像解析など詳細解析を行い、 $\alpha$ 線を識別できるようにしていく。

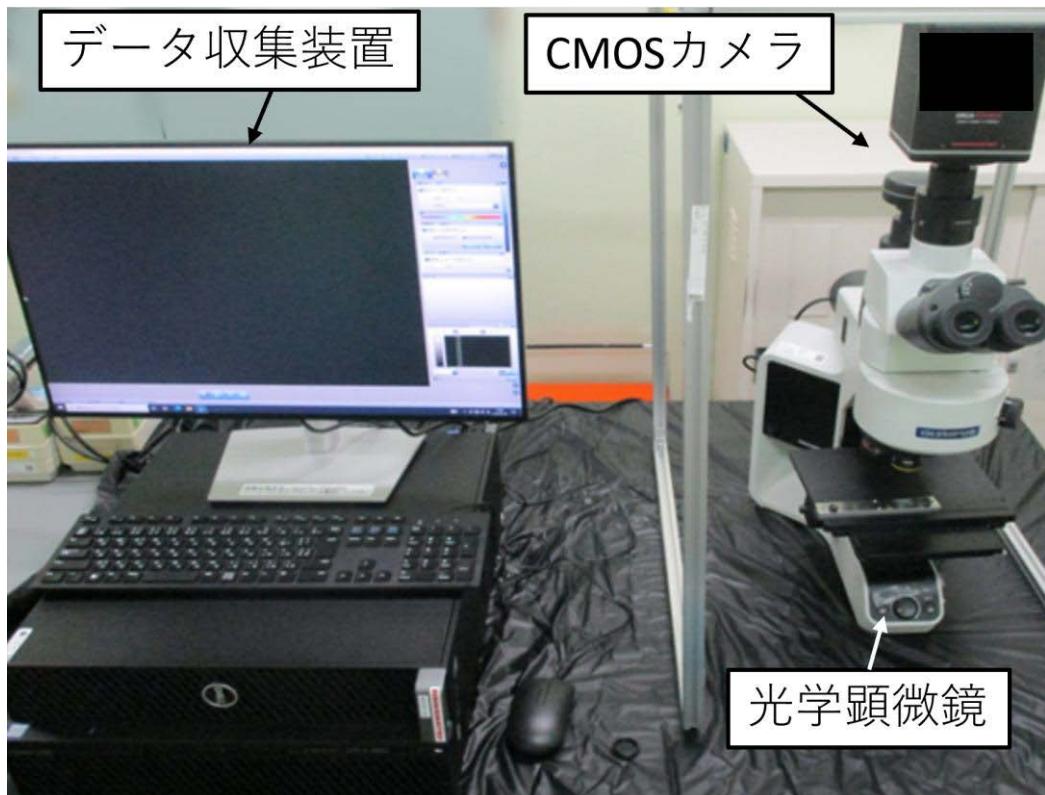


図 3.2.15 核燃料物質取扱施設での試料測定の様子

### 3.2.4 まとめ

本研究では、撮像にかかるハードウェアの開発として、シンチレータシートの開発などを実施できた。さらには、エネルギー取得部分や画像の粒子判別などについてのソフトウェアの開発も進めることができた。例えば、開発した $\alpha$ 線イメージャーを用いて、 $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線、中性子線を識別する手法を開発した。

画像から $\beta$ 、 $\gamma$ 線等との分別ができるようなアルゴリズムの開発を進めることができ、CMOSカメラを用いた $\alpha$ 線撮像のための解析手法についても、確立ができつつある状態にまで進むことができた。原子力機構内の核燃料デブリを模擬デブリとして撮像も行えた。

測定の結果、放射線の種類による画像分布の違いを明らかにした。さらに、異なる放射線の識別手法を開発した。開発された方法は、さまざまなバックグラウンド放射線下での $\alpha$ 線測定に有望である。

### 3.3 高線量率場モニタの開発【令和4年度～令和5年度】

#### 3.3.1 モニタの開発【令和4年度～令和5年度】

##### 【令和4年度までの概要】

$\text{Cs}_2\text{HfI}_6$  シンチレータを素子化して高線量率場モニタに組み込んで、下限値 80 mSv/h まで測定することができた。

##### 【令和5年度の実施内容および成果】

令和4年度に引き続き、高線量率場モニタの開発を京都大学、三菱電機と協力して進めた。基本的なセットアップの詳細などは過去の報告書のものと同様で、シンチレータでの応答について、京都大学複合原子力科学研究所のコバルト60照射施設にて照射試験を実施した。

令和5年度は、ノイズ部分についてもより正確に考慮して計測可能な範囲を求めた点と酸化物のシンチレータにて評価をした点がこれまでの差分となる。前者のノイズとは、(i)高線量率場のため、光ファイバー自体がチレンコフ発光もしくは光ファイバー内部の欠陥や不純物によるシンチレーション発光および(ii)光学素子の案電流などのノイズに分けることができる。

#### 3.3.2 照射試験（再委託先：京都大学）【令和4年度～令和5年度】

##### 【令和4年度までの概要】

京都大学複合原子力科学研究所のコバルト60照射施設にて、東北大学と協力しながら照射試験を実施し、その結果を東北大学、三菱電機、原子力機構へフィードバックした。あわせて感度関数などに使うシミュレーション解析の準備も行った。

##### 【令和5年度の実施内容および成果】

令和4年度に引き続き、京都大学複合原子力科学研究所のコバルト60照射施設にて、東北大学と協力しながら照射試験を実施し、その結果を東北大学、三菱電機、原子力機構へフィードバックした。あわせて感度関数等に使うシミュレーション解析も進めた。また、シンチレータ素子、その他高線量率場モニタの関連部材の放射線耐性実験等も実施した。以下にその詳細を述べる。

開発するモニタは、20 mSv/h 未満から 1 kSv/h 以上までの線量のダイナミックレンジを有することを目標としており、その照射ができる線量場が必要である。京都大学複合原子力科学研究所のコバルト60照射施設は、 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  線源から距離とともに線量が減衰することで線量を変化させることができる。一方で、照射室の壁からの散乱線は  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  線エネルギー 1.1、1.3 MeV よりも低くなり、モニタの感度に影響を与えることから、照射位置におけるエネルギースペクトルを評価する必要がある。

ここでは、照射実験に供するための線量評価とシミュレーションを実施した内容について報告する。令和5年度は、低線量領域での線量測定を可能とする電離箱を導入した。図 3.3.1 に外観写真を示す。



図 3.3.1 電位計と電離箱の外観写真

電離箱は STANDARD IMAGING 社製の EXRADIN A19 であり、水中、空気中での絶対線量測定を行うことができ、放射線医療の分野で用いられている電離箱を選択した。電離箱の有感体積は  $0.62 \text{ cm}^3$  で、 $\gamma$  線のエネルギー 60 keV から  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  線エネルギー 1.1、1.3 MeV までエネルギー感度は一定である。電位計は EMF ジャパン社製 EMF521R であり、測定レンジは電流で  $\pm 20 \text{ nA}$ 、電荷は  $\pm 200 \text{ nC} \sim \pm 20 \text{ mC}$  の 6 衍自動で切り替えでき、測定ダイナミックレンジが広く、広い線量測定領域をカバーできる。この電離箱と電位計を組み合わせた場合における電荷量と絶対線量との校正は、国家 2 次標準場である医用原子力技術研究振興財団にて校正を行った APPLIED ENGINEERING 社製のリファレンス電離箱 C-110 の値を用いた。100 Gy/h を超える領域での校正試験を実施した。

図 3.3.2 に 10 Gy/h 以下の線量率と電位計で測定された電流値を示す。図 3.3.3 に 100 Gy/h を超える線量率での校正結果を示す。いずれもよい線形性があることを確認した。

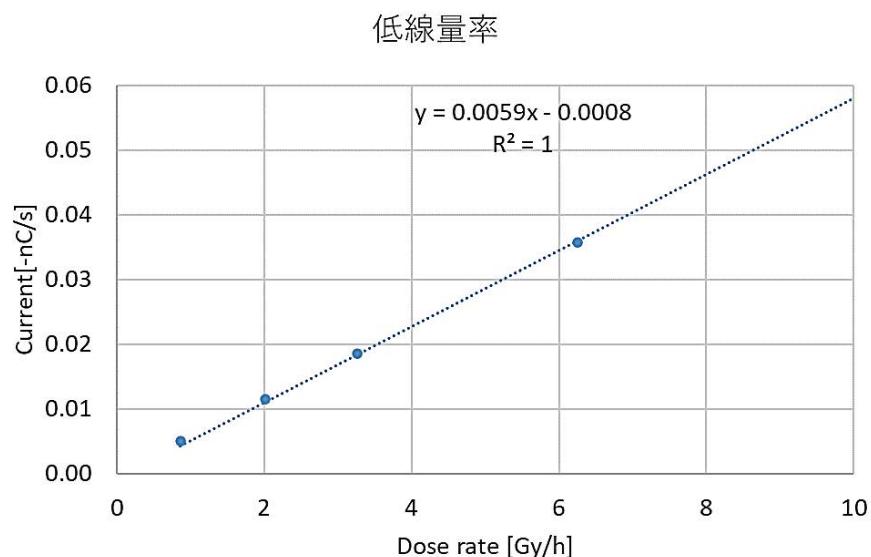


図 3.3.2 低線量率と電位計の電流値の関係

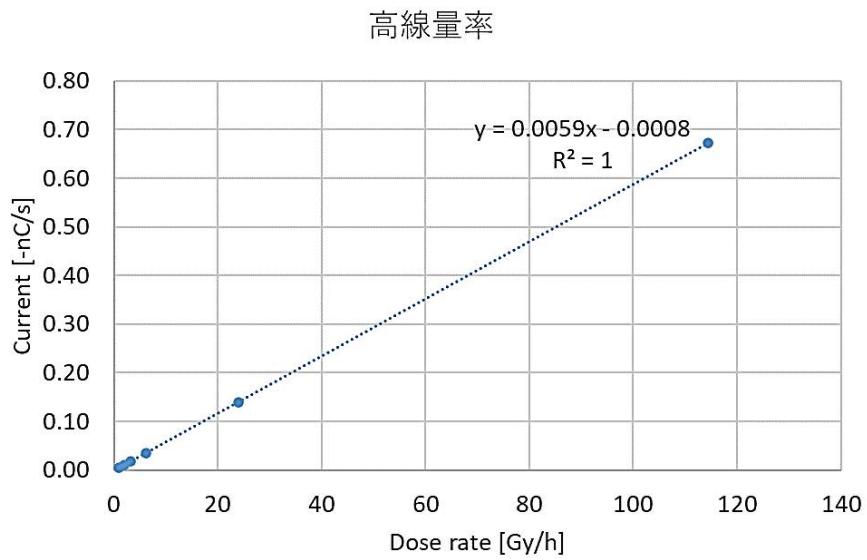


図 3.3.3 高線量率と電位計の電流値の関係

照射室内の $\gamma$ 線のエネルギースペクトルを評価するために、Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) を用いて照射室を模擬した $\gamma$ 線輸送シミュレーションを実施し、校正試験による実験値を比較することで、シミュレーションの妥当性を確認した。

図 3.3.4 に PHITS による照射室内の計算モデル概略図と実測した位置の情報を示す。図中の実線で示した位置は、線源から離れた位置における評価点を示しており、点線は線源を直接みずに散乱線によって線量を減衰させ、20 mSv/h の位置のサーベイを行うための評価点である。

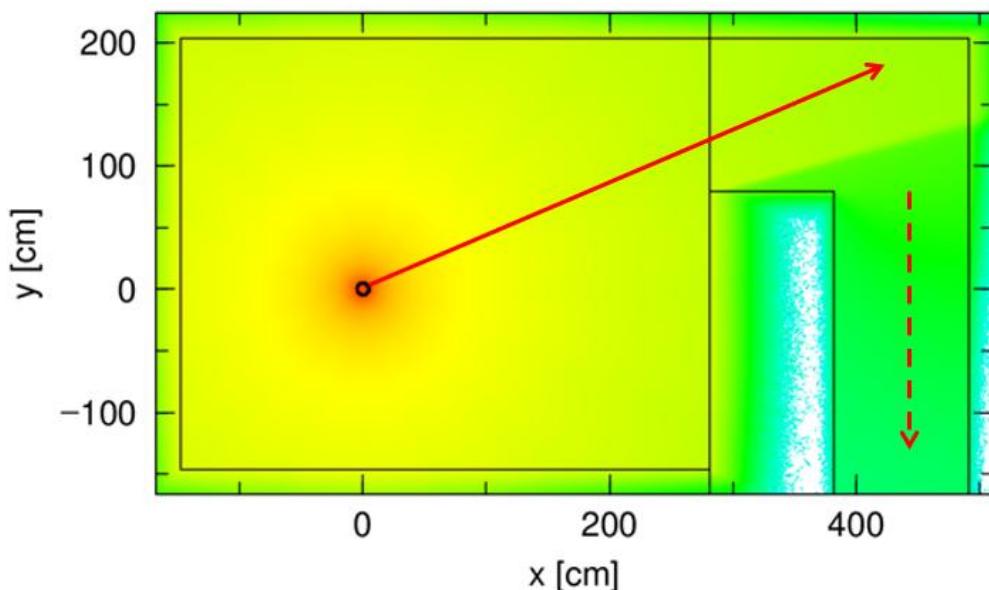


図 3.3.4 コバルト 60 照射施設の PHITS の計算モデル概略図

図 3.3.5 に線源からの距離と線量の関係について実験値と PHITS の計算結果を示す。線源を直接みた場合の距離による減衰は、PHITS の計算結果は実測とよく一致しており、妥当であると評価することができた。

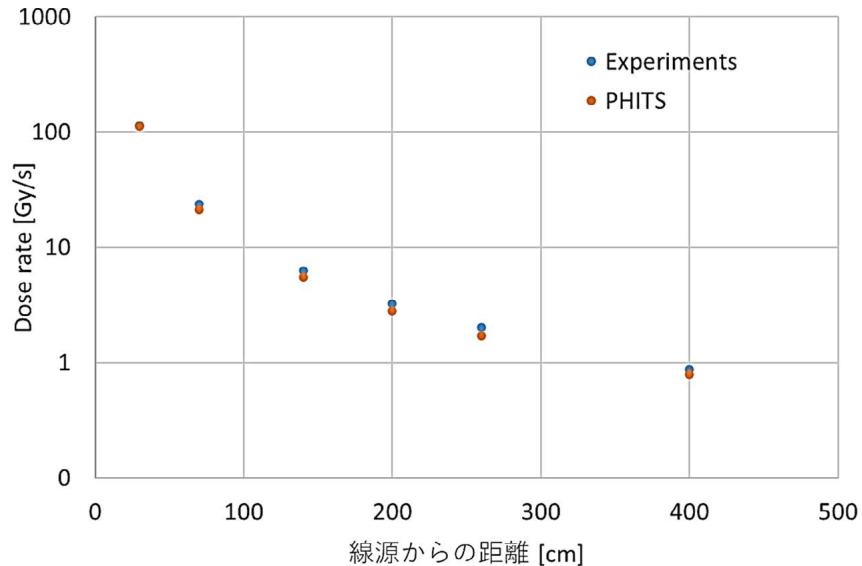


図 3.3.5 線源からの距離と線量の関係

図 3.3.6 にコンクリートによる迷路構造の位置で、線源を直接みない領域における PHITS の計算と実測結果の比較を示す。PHITS による結果が過小に評価していた。コンクリートは典型的な組成、密度を用いてシミュレーションを実施したが、実際のコンクリートとの差異があるため、PHITS が過小評価する傾向があると考える。実際のコンクリートの組成を模擬することは困難であるが、実測に合うように密度をパラメータで振って調整する必要があることがわかった。

また、リファレンス線量計は距離 50 cm の位置までしか測定できず、100 cm 以降は検出限界以下であった。一方で、本研究で導入した電位計と電離箱 A19 は 200 cm の位置まで測定することができる、20 mGy/h 以下の線量率でも評価可能となった。

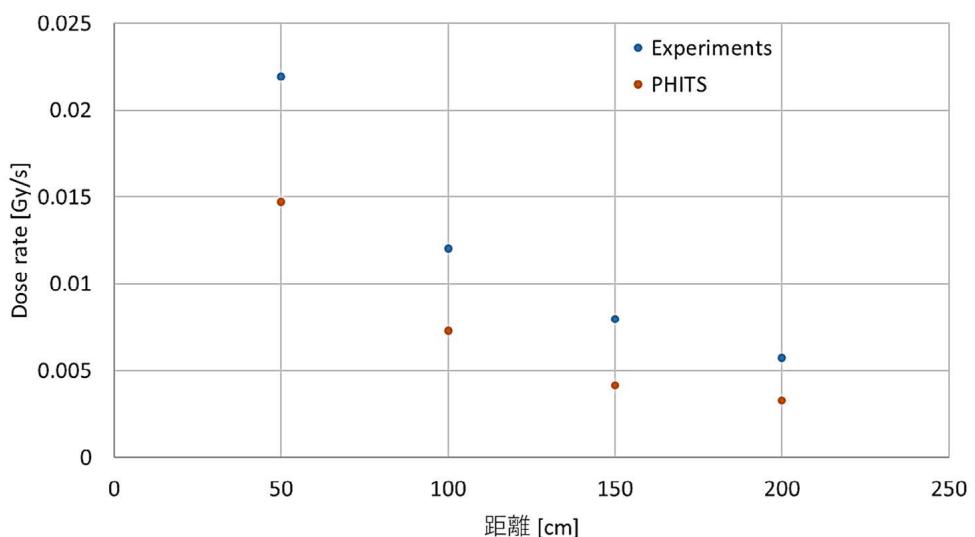


図 3.3.6 迷路構造の位置における線量と距離の関係

電離箱は単一の場所における線量を正確に測定することができるが、本研究では開発するモニタに対してさまざまな線量を照射する必要がある。多点で同時に線量を測定評価するために、ラジオクロミックフィルム (Radiochromic Film: 以下、「RCF」と略記。) 線量計を導入した。RCF は放射線感受性を有する材料である活性層とコーティング材である薄いポリエチレン層で構成されており、重合反応によるフィルムの染色が照射線量と対応することを利用した線量計である。RCF を用いた線量評価手法では、放射線照射によるフィルムの正味の光学濃度 (net Optical Density: 以下、「netOD」と略記。) を測定し、netOD と線量の関係から線量を測定することができる。光学スキャナにより netOD を測定することで、2 次元での線量分布を取得可能である。RCF の構成元素は、主に生体に近い炭素、水素、酸素で構成されており、エネルギー依存性、線量率依存性が小さく、照射後の物理的・化学的処理が不要であることが特徴である。

netOD と線量の関係を測定するために、水ファントム中のさまざまな深さの位置に RCF を設置して照射を実施した。リファレンス電離箱 C-110 により各深さ位置の線量率を測定し、照射時間を変化させることで照射線量を決定した。RCF は高線量用として 10~1,000 Gy の線量領域で測定可能な Ashland 社製 GAFCHROMIC HD-V2 と低線量用として 0.4~60 Gy の線量領域で測定可能な Ashland 社製 GAFCHROMIC EBT-XD の 2 種類を用いた。照射後、EPSON 社製 光学スキャナ ES-G11000 の読み取り中央部分に RCF を設置し、フィルムのそりを防止するため RCF の上に無反射ガラスを載せて読み取りを行った。読み取られた画像は、48 bit の画像で保存し、それぞれの画素ピクセルにおいて RGB の情報が保存される。

netOD は照射したフィルムの光学濃度 (Optical Density: OD) から未照射の OD を差し引くことで求められる。RGB の 3 色のうち、より幅広い線量を取得可能な緑色を選択した。

図 3.3.7 に高線量用 HD-V2 の校正曲線を示す。横軸は緑色の netOD で、縦軸がリファレンス線量計で導出した線量である。

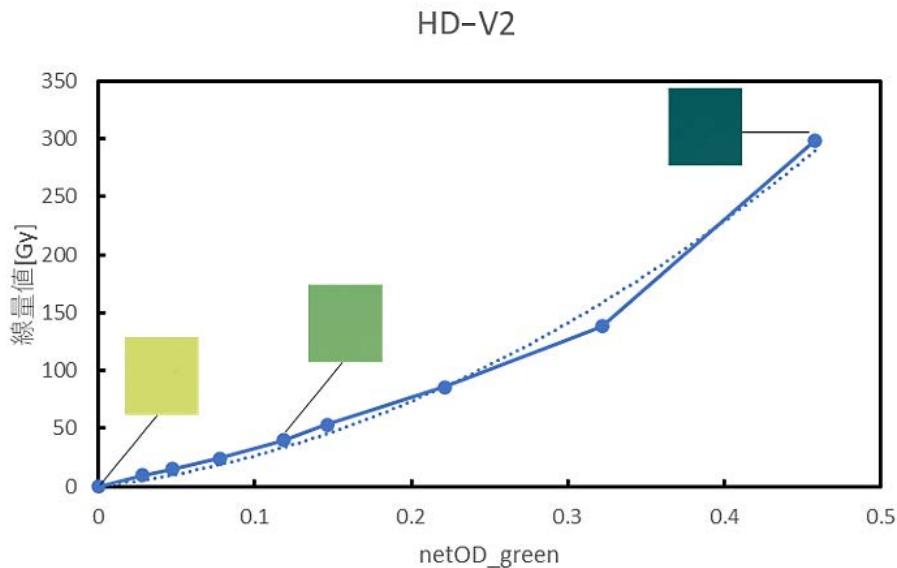


図 3.3.7 光学濃度と高線量領域の線量との関係

図 3.3.8 に低線量用 EBT-XD の校正曲線を示す。また、両方の図中に着色されたフィルムの像もあわせて示す。これらの結果を用いることで、任意の点における線量を一度に取得することができるることを示した。

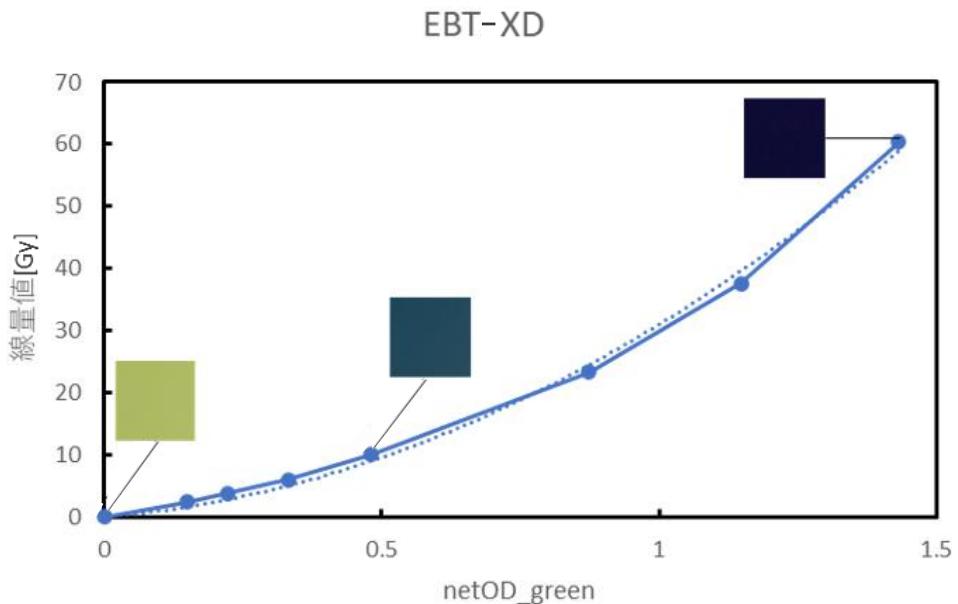


図 3.3.8 光学濃度と低線量領域の線量との関係

以上のことから令和 5 年度は、照射室内の線量率を 20 mGy/h 程度まで多点で正確に測定することが可能となった。令和 6 年度以降は、京都大学複合原子力科学研究所のコバルト 60 照射施設が使用できないため、他のコバルト 60 照射施設における線量率評価に有用な成果を上げることができた。

### 3.3.3 光学シミュレーション（再委託先：三菱電機）【令和 4 年度～令和 5 年度】

#### 【令和 4 年度までの概要】

令和 4 年度には、高線量率場モニタなどの形状や適用素材および計測処理の最適化を目指し、光学系のシミュレーション研究の準備を進めた。適用素材については屈折率の観点などから議論した。結果、光学シミュレーションの入力データとして使用するため、光ファイバーや受光素子などの光学材料の基礎特性を評価する設備を導入し、データを取得可能なことを確認した。また、光学特性の点から候補となる光学材料を選定した。

#### 【令和 5 年度の実施内容および成果】

高線量率場モニタ等の形状や適用素材および計測処理の最適化を目指し、光学系のシミュレーション研究を進めた。適用素材については屈折率の観点等から議論した。

結果、東北大学と協力して、光学系のシミュレーション研究を進めて、光学マウント部分の形状の最適化などについて議論できた。以下に詳細を述べる。

高線量率場モニタのシンチレータとファイバーを接続した検出部の最適化のため、光学シミュレーションによって屈折率とシンチレータサイズの観点から光学シミュレーションを進めた。光学シミュレーションの体系として、図 3.3.9 をシミュレーション内に構築した。モニタ適用可能なサイズを増やすために曲げ半径を小さくする必要があり、令和 5 年度の検討では、光ファイバーに直接シンチレータをマウントする形状として評価を実施した。

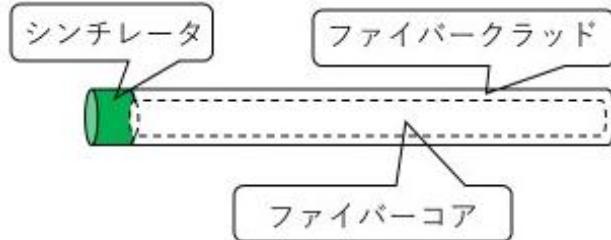


図 3.3.9 光学系シミュレーションの体系概略図

図 3.3.9 の体系でシンチレータの屈折率による集光効率の変化を調査した。図 3.3.9 で示した体系を光学シミュレーション内で模擬したものを図 3.3.10 に示した。光ファイバーの先端に接続されたシンチレータの内部で光を発生させ、ファイバーを伝搬して末端まで到達した光の数を数えることで集光効率を評価した。

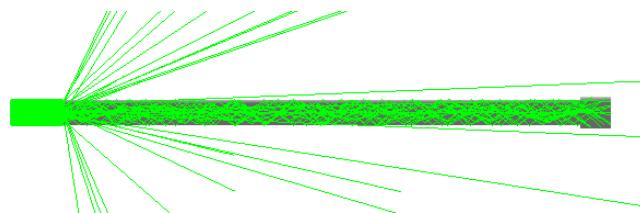


図 3.3.10 光学系シミュレーションでの体系図と光路例（緑線）

構築した光学系シミュレーションでシンチレータの屈折率を変化させたときに受光デバイスで想定される集光効率の変化を調べた。屈折率はシンチレータで想定される 1.5 から 2.1 の範囲とした。光学系シミュレーションでは、シンチレータの領域内部で一様かつ等方的に光が発生すると仮定し、発生させた光の数は  $10^6$  個とした。表 3.3.1 および図 3.3.11 に屈折率に対する集光効率の結果を示した。

屈折率が大きくなるにしたがって、集光効率が減少する傾向を確認した。これはシンチレータとファイバー間の屈折率差によって全反射することが効いていると考えられる。屈折率差が大きい条件では、全反射条件となる臨界屈折率が大きくなるため、ファイバーへ入る光の数が減少する。このためシンチレータからファイバーへ伝搬する光が減るため集光効率も減少している。また、シンチレータで発生した光はさまざまな角度で反射されるため、ファイバー内を伝搬できる角度よりも大きい光が界面から漏れてしまう様子も確認された。

表 3.3.1 シンチレータの屈折率に対する集光効率

シンチレータの屈折率	集光効率 (%)
1.5	26.2
1.6	22.6
1.7	19.7
1.8	17.3
1.9	15.4
2.0	13.6
2.1	12.4

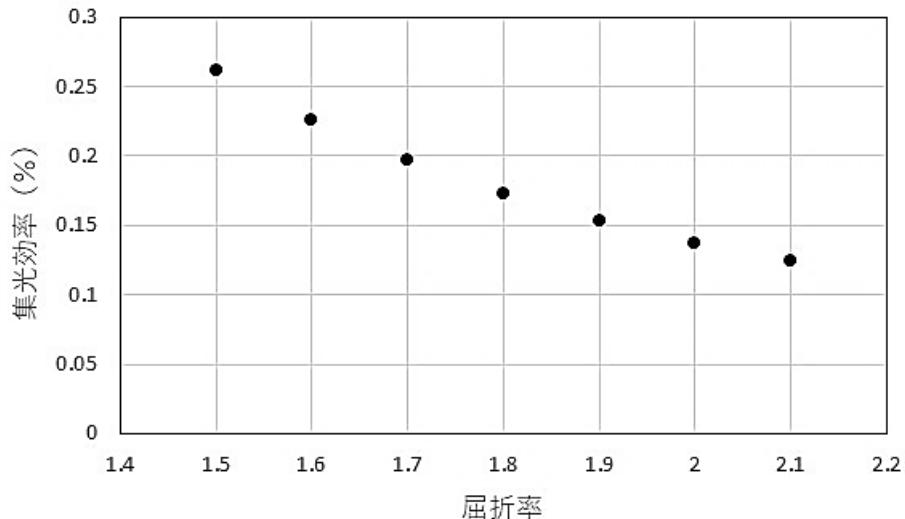


図 3.3.11 シンチレータの屈性率に対する集光効率の変化

ファイバーに直接マウントした場合にシンチレータのサイズを変えたときの集光効率を調査した。今回の調査では、シンチレータ径を変えたときの影響を調査した。図 3.3.12 に示すようにシンチレータ径は、ファイバー径を基準に 1 倍、2 倍、3 倍、4 倍のそれぞれの場合での集光効率を計算した。

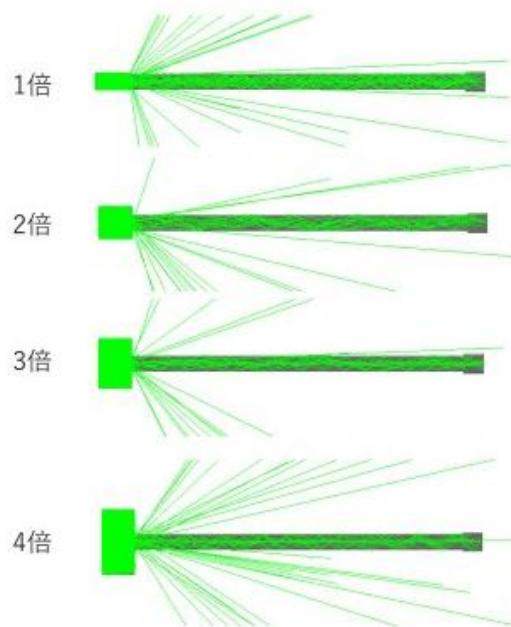


図 3.3.12 シンチレータ径を変えたときのシミュレーション体系

集光効率の変化を図 3.3.13 に示した。シンチレータ径が大きくなる影響により約 10% 集光効率が下がることが確認された。これはシンチレータ径が大きくなった場合には、相対的にファイバーへの出口が小さくなるため、シンチレータ内にトラップされる光の量が増えるものと考えられる。一方で、シンチレータの体積が増加し、 $\gamma$  線への感度が増える増加量に対して集光効率の減少は小さくなる。使用条件によってサイズ調整を行うことで感度向上できる見込みを得た。また、シンチレータ結晶サイズの製造誤差を考慮した場合、シンチレータ径による影響が小さいことが確認された。

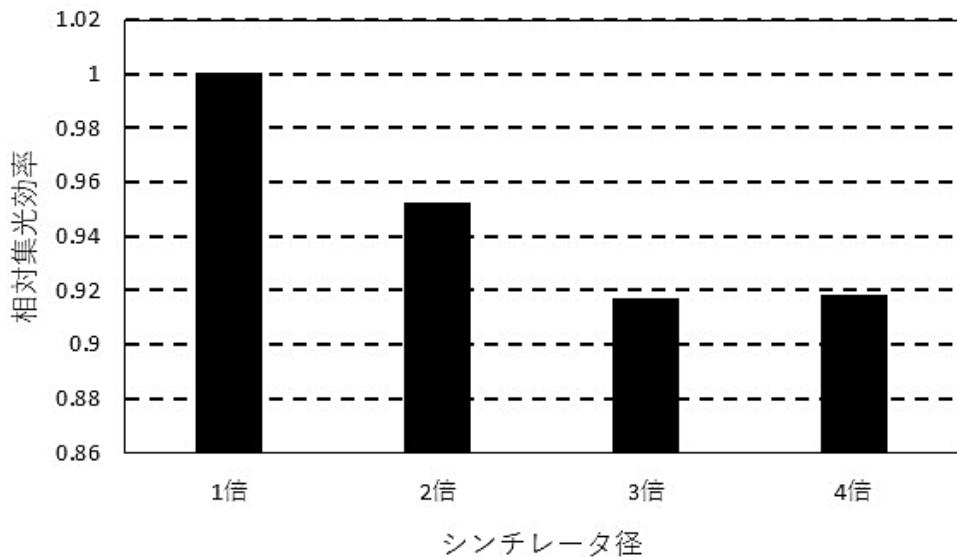


図 3.3.13 シンチレータ径を変えたときの相対集光効率

現地運用に向けた検証として、光電子増倍管からの電流計測を行うための回路試作を実施した。実際に現地運用に即したシンチレータ、ファイバーと光電子増倍管を組み合わせた系に試作回路を接続して測定試験を実施した。測定体系は図 3.3.14 に示すとおりで、試作回路と参照用回路となるソースメータによって、光電子増倍管からの出力を参照用回路と同等に取得できるか評価を実施した。

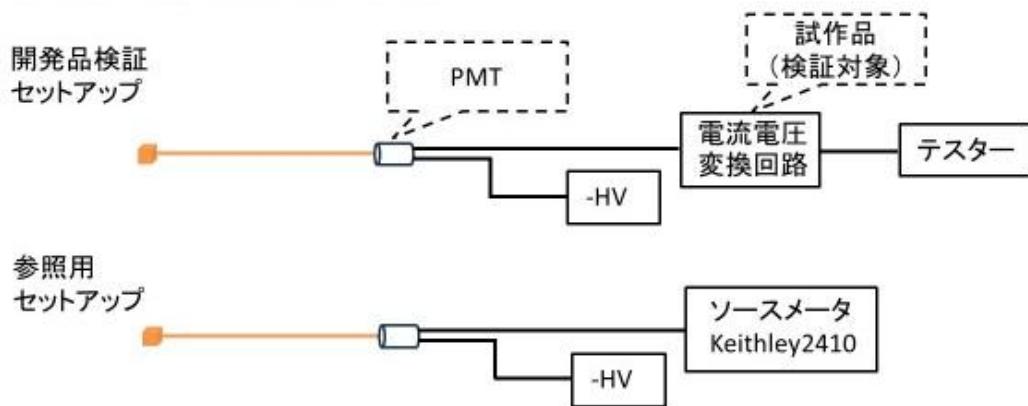


図 3.3.14 試作回路の評価セットアップ

試作回路の出力に対するソースメータの測定結果をプロットしたものを図 3.3.15 に示した。図に示すように、それぞれの出力が直線関係となっており、試作回路の出力が参照用回路と同等の性能となることを確認した。これにより、今後現場適用のために可搬性を向上させた測定装置の作製を進める。

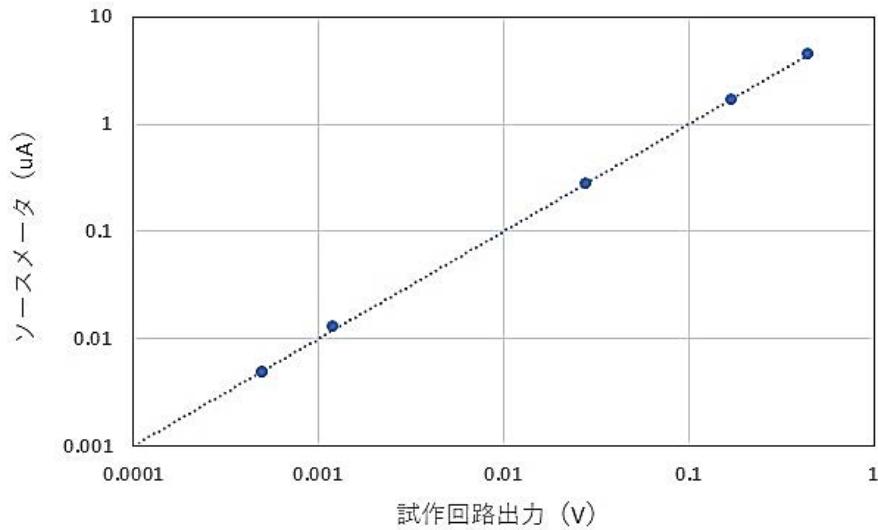


図 3.3.15 試作回路の出力と参照ソースメータ出力の関係

### 3.3.4 まとめ

これまでよりも線量率の測定下限値を低くでき、20 mSv/h 未満から 1 kSv/h 以上までの線量のダイナミックレンジを有する高線量率場モニタを実現することに成功した。あわせて線量率のシミュレーション、光学シミュレーションなどの構築もできた。

### 3.4 研究推進

#### (1) 令和5年度の実施内容および成果

令和4年度に引き続き、本研究を推進するにあたり、東北大大学、三菱電機、原子力機構および京都大学の4者による定例ミーティングを定期的に行うとともに、CLADS等との連携を密にして研究を進めた。また、本研究を通じて下記の発表を行うことができ、東北大大学では在籍した修士学生1名、博士学生1名および博士研究員1名が当該分野に関連する材料開発に携わった。そして、修士1名の学位が授与された。また、助教なども含め、これらの研究では40歳未満の若手・学生が積極的な活動を示し、(2)のような成果・業績も得ることができた。

#### (2) 研究業績

研究の業績(国際学会・海外向け発表等、一部のものを抜粋)は下記のとおりとなり、また、国内研究会などについては、本研究に携わる学生の招待講演もあった。なお、下記の業績の一部には、平成30年度採択の英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業などの寄与分も含む。

##### ①論文：

- [1] Y. Urano, S. Kurosawa, A. Yamaji, A. Yoshikawa and Y. Wu, Alpha-ray imaging with alkali copper halide scintillator, Journal of Instrumentation, 18, 2023, C12009, DOI: 10.1088/1748-0221/18/12/C12009 (査読有) .
- [2] C. Fujiwara, S. Kurosawa, A. Yamaji, A. Yoshikawa, Li<sub>2</sub>HfBr<sub>6</sub> scintillator for neutron and gamma-ray dual detection, Applied Physics Express 16(10), 2023, 102005, DOI: 10.35848/1882-0786/ad03ab (査読有) .
- [3] 松倉 大佑, 黒澤 俊介, 山路 晃広, 田中 浩基, 高田 卓志, 光ファイバー型放射線線量率モニタリングシステムのファイバーノイズ成分を用いた一次元線量率分布測定の適用検討, 放射線, 49巻1号, 2024, pp. 18-22, DOI: 10.11470/houshasen.49.1\_18 (ポスター賞受賞記念による依頼記事) .
- [4] D. Matsukura, S. Kurosawa, C. Fujiwara, A. Yamaji, Y. Ohashi, Y. Yokota, K. Kamada, H. Sato, Y. Masao, T. Hanada, Feasibility study of one-dimensional imaging with an optical fiber for radiation dose-rate monitoring system in the decommissioning process, Journal of Instrumentation 19, 2024, C02053, DOI: 10.1088/1748-0221/19/02/C02053 (査読有) .

##### ②国際学会：口頭：招待講演

- [1] S. Kurosawa, S. Kodama, C. Fujiwara, A. Yamaji, History of Halide Scintillations Materials with Red and Infrared Emissions, OPTICS & PHOTONICS International Congress 2023, 令和5年4月21日発表, 日本・横浜.
- [2] S. Kurosawa, S. Kodama, C. Fujiwara, A. Yamaji, Optical properties for Red and Infrared Emitting Scintillators Containing a Novel Emission Center II, International Congress on Pure & Applied Chemistry (ICPAC) 2023, 令和5年9月14日発表, ハイブリッド形式・オンラインで参加.

③国際学会：口頭：査読有

- [1] 森下 祐樹, 佐川 直貴, 藤澤 真, 黒澤 俊介, 笹野 理, 林 真照, 田中 浩基,  
Measurement of beta, gamma, and neutron radiation using an alpha imager based on a  
CCD camera and discrimination from alpha particles,  
2023 IEEE NUCLEAR SCIENCE SYMPOSIUM AND MEDICAL IMAGING CONFERENCE,  
令和5年11月10日発表, カナダ・バンクーバ.
- [2] S. Kurosawa, A. Yamaji, S. Yamato, A. Yoshikawa, Growth and Scintillation Properties  
of Carbazole and p-Terphenyl, 20th edition of the International Conference on  
Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-20), 令和5年7月31日発表, イタリア・ナポリ.
- [3] D. Matsukura, S. Kurosawa, A. Yamaji, Y. Ohashi, Y. Yokota, K. Kamada, H. Sato,  
S. Toyoda, M. Yoshino, T. Hanada, R. Murakami, T. Horiai, A. Yoshikawa,  
Relationship of Single Crystal Growth and Luminescence Properties of Garnet-type  
Single Crystals for Radiation Dose-Rate Monitoring Systems, 20th edition of the  
International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-20),  
令和5年8月1日発表, イタリア・ナポリ.
- [4] S. Kurosawa, K. Harata, K. Fujioka, Development of hafnium-based transparent oxide  
ceramics for radiation detection, The International Conference on Sintering 2023  
(Sintering 2023), 令和5年8月29日発表, 日本・岐阜.
- [5] D. Matsukura, S. Kurosawa, C. Fujiwara, A. Yamaji, Y. Ohashi, Y. Yokota, K. Kamada,  
H. Sato, S. Toyoda, M. Yoshino, T. Hanada, R. Murakami, T. Horiai,  
Composition optimization using sintered Ce/Cr co-doped red oxide scintillator for  
dose-rate monitoring system for the decommissioning of nuclear power plan,  
The International Conference on Sintering 2023 (Sintering 2023),  
令和5年8月29日発表, 日本・岐阜.
- [6] D. Matsukura, S. Kurosawa, A. Yamaji, Y. Ohashi, Y. Yokota, K. Kamada, H. Sato,  
M. Yoshino, T. Hanada, R. Murakami, T. Horiai, A. Yoshikawa, H. Tanaka, T. Takata  
Development of Red-Light Oxide-Scintillators and Evaluation of the Dose Rate  
Monitoring System for the Decommissioning, 2023 IEEE Nuclear Science Symposium,  
Medical Imaging Conference and Room Temperature Semiconductor Detector Conference  
(IEEE NSS/MIC/RTSD 2023), 令和5年11月6日発表, カナダ・バンクーバ.
- [7] Y. Urano, S. Kurosawa, A. Yamaji, A. Yoshikawa, Y. Wu, Alpha-ray Imaging Measurement  
and Scintillation Properties of  $\text{Cs}_3\text{Cu}_2\text{I}_5$  Crystals, 2023 IEEE Nuclear Science  
Symposium, Medical Imaging Conference and Room Temperature Semiconductor Detector  
Conference (IEEE NSS/MIC/RTSD 2023), 令和5年11月9日発表, カナダ・バンクーバ.
- [8] S. Kurosawa, S. Kodama, C. Fujiwara, D. Matsukura, A. Yamaji, T. Takata, H. Tanaka  
Development of Novel Red and Infrared Emitting Scintillation Materials and Dose-  
Rate Monitoring System with an Optical Fiber, 2023 IEEE Nuclear Science Symposium,  
Medical Imaging Conference and Room Temperature Semiconductor Detector Conference  
(IEEE NSS/MIC/RTSD 2023), 令和5年11月9日発表, カナダ・バンクーバ.

④国際学会：ポスター：査読有

- [1] S. Kurosawa, A. Yamaji, D. Matsukura, C. Fujiwara, A. Yoshikawa,  
Development of a High Dose Rate Real-Time Monitor with Cr-doped  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  Eutectic  
Scintillator Directionally Solidified Eutectics Conference - VII,  
令和5年5月26日発表, トルコ・イスタンブール.

#### 4. 結言

放射線顕微鏡および高線量率場モニタのさらに優れた位置分解能化、高感度化を目指した検出素子などの材料開発、光検出器などのハード、ソフトウェアおよびシミュレーション体系の構築といった開発を順調に行うことができた。得られた結果としては、放射線顕微鏡用および高線量率場モニタ用シンチレータとして、発光波長がそれぞれ 500–800 nm および 650–1,000 nm を満たす当該材料の開発ができ、前者の発光量としても目標値 70,000 光子/ (5.5 MeV  $\alpha$  線) を達成できた。

放射線顕微鏡の開発では、粒子分別のための大変有意義な知見を得ることができた。さらに、高線量率場モニタの開発では、これまでよりも線量率の測定下限値を低くでき、20 mSv/h 未満から 1 kSv/h 以上までの線量のダイナミックレンジを有し、現場適用への道が大きく進んだ。

## 参考文献

- [1] 黒澤俊介、山路晃広、林真照、笹野理、田中浩基、高田卓志、森下 祐樹、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（委託研究）－令和4年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業－JAEA-Review 2024-016, 2024, 61p.  
DOI:10.11484/jaea-review-2024-016
- [2] Y. Urano, S. Kurosawa, A. Yamaji, A. Yoshikawa and Y. Wu, Alpha-ray imaging with alkali copper halide scintillator, Journal of Instrumentation, 18, 2023, C12009.  
DOI:10.1088/1748-0221/18/12/C12009
- [3] Y. Morishita, N. Sagawa, M. Fujisawa, S. Kurosawa, M. Sasano, M. Hayashi, H. Tanaka, Development of a Method for Distinguishing Alpha Particles from Other Types of Radiation Using a High-Resolution Alpha Imager, Radiation Measurements, Vol.181, February 2025, 107371. DOI: 10.1016/j.radmeas.2024.107371



