



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
(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 Inspection Technology for Pipes in
High Background Radiation Environments
(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
福井大学

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

November 2025

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

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
(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

福井大学

(2025 年 6 月 19 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 (以下、「東京電力」という。) 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 5 年度に採択された研究課題のうち、「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」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。

本研究は、東京電力へのヒアリングで配管内部観察について示された、(1)水素含有量、(2)析出物の存在、(3) α 線/ β 線の放出核種の有無の 3 つのニーズに対応する技術を総合的に開発することを目的に、下記の 2 つの研究を実施している。

まず、既存の非破壊検査装置の小型化と非破壊で配管内部をイメージング可能な専用の放射線検出器の開発により、レーザ等を用いた非破壊検査により配管内の情報を取得すること及び配管内の α 核種の有無や配管等の内部状況を明らかにすることを目的とする。

また、高線量率環境下における α 核種の可視化、 β 核種の弁別判定を行う装置を開発するとともに配管内の内容物を調査する技術を開発する。開発した技術の展開は、東京電力、民間企業によって実用化されることを見込む。

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、福井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 Inspection Technology for Pipes in High Background Radiation Environments
(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

University of Fukui

(Received June 19, 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 FY2023, this report summarizes the research results of the “Development of inspection technology for pipes in high background radiation environments” conducted in FY2023.

The following two studies are being conducted with the aim of comprehensively developing technologies to address the three needs indicated in the hearing with TEPCO regarding observation of the inside of piping: (1)Hydrogen content, (2)Presence of precipitates, (3)Presence or absence of α/β radiation emitting nuclides.

First, by downsizing existing nondestructive inspection equipment and developing a dedicated radiation detector capable of nondestructively imaging the inside of piping, we aim to obtain information on the inside of piping by nondestructive inspection using lasers, etc., and to clarify the presence or absence of α -nuclides in piping and the internal conditions of piping, etc.

In addition, we will develop equipment to visualize α -nuclides and discriminate β -nuclides in high dose rate environments, as well as technology to investigate the contents of the piping.

Deployment of the developed technology is expected to be put into practical use by TEPCO and private companies.

Keywords: Non-destructive Inspection, Laser Ultrasonic, Piping, High Background, Active Thermography, Low Energy Gamma Rays

This work was performed by University of Fukui 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ッ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
α / β / γ 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
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

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

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

(契約番号 R05I108)

成果報告書

令和 6 年 3 月
国立大学法人福井大学

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、国立大学法人福井大学が実施した「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」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
2.2 実施体制	.....	2-2
2.3 令和5年度の成果の目標及び業務の実施方法	.....	2-3
3. 実施内容及び成果	.....	3-1
3.1 非破壊検査を応用した配管ジオメトリ可視化技術開発	.....	3-1
3.1.1 レーザ超音波計測による配管内付着物の遠隔評価（再委託先：大阪大学）	...	3-1
3.1.2 アクティブサーモグラフィを用いた配管検査方法の適用（再委託先：神戸大学）		3-6
3.1.3 水素ガスの簡易検知方法の調査（再委託先：東北大学）	.....	3-28
3.2 配管内放射線イメージング技術開発	.....	3-31
3.2.1 低エネルギーγ線検出器の開発（再委託先：東北大学、埼玉大学、 連携先：原子力機構）	.....	3-31
3.2.2 水中のα線検出のための(α,n)(n,γ)反応による高エネルギーγ線検出器 (連携先：原子力機構)	.....	3-39
3.2.3 内視鏡型小型放射線計測装置の開発（再委託先：埼玉大学、連携先：原子力機構）		3-43
3.3 研究推進	.....	3-52
4. 結言	.....	4-1
参考文献	.....	5-1

執筆者リスト

事業代表者

国立大学法人福井大学

特命教授

鳥居 建男

再委託先機関

国立大学法人大阪大学

教授
講師林 高弘
森 直樹

国立大学法人神戸大学

教授
准教授
助教阪上 隆英
塩澤 大輝
小川 裕樹

国立大学法人東北大学

特任准教授
特任助教
助教黒澤 俊介
山路 晃広
村上 力輝斗

国立大学法人埼玉大学

助教

小玉 翔平

連携先

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

グループリーダー
研究副主幹
研究員眞田 幸尚
森下 祐樹
佐々木 美雪

表一覧

表 3-1	使用した赤外線の様	3-11
表 3-2	材料特性	3-12
表 3-3	配管内探査用ツール	3-49

図一覧

図 2-1	研究の概観	2-1
図 2-2	実施体制	2-2
図 3-1	レーザ照射位置による超音波発生エネルギーの変化	3-2
図 3-2	実験システム	3-4
図 3-3	用いたアルミパイプと受信及び付着物の位置	3-5
図 3-4	可視光 LDV による計測で得られたパイプ内面の付着物画像	3-5
図 3-5	新しく導入した赤外線 LDV による画像化結果	3-5
図 3-6	断熱温度場法の模式図	3-6
図 3-7	時系列赤外線画像データの構造	3-8
図 3-8	PCA 処理の概念図	3-8
図 3-9	パルス加熱装置	3-10
図 3-10	ステップ加熱装置	3-10
図 3-11	ステンレス鋼-付着物解析モデル	3-12
図 3-12	FEM 解析モデル	3-12
図 3-13	ステップ加熱時の FEM 解析モデル	3-13
図 3-14	ステップ加熱時の鋼板表面の温度分布変化	3-14
図 3-15	ステップ加熱時の温度時系列変化	3-15
図 3-16	パルス加熱時の鋼板表面の温度分布変化	3-16
図 3-17	パルス加熱時の温度時系列変化	3-17
図 3-18	付着物試験体の可視画像	3-18
図 3-19	付着物試験体の形状寸法	3-18
図 3-20	パルス加熱後の冷却過程での表面温度変動	3-19
図 3-21	パルス加熱後の冷却過程での温度分布画像	3-19
図 3-22	ステップ加熱後の冷却過程において得られた表面温度変動	3-20
図 3-23	ステップ加熱の終了から 20 秒後に得られた温度分布画像	3-20
図 3-24	フラッシュ加熱時の位相差分布（板厚 2 mm 試験体）	3-21
図 3-25	ステップ加熱時の位相差分布（板厚 2 mm 試験体）	3-22
図 3-26	PCA 処理のための赤外線画像のトリミング範囲	3-23
図 3-27	パルス加熱後のデータに対する PCA 解析結果	3-23
図 3-28	ステップ加熱後のデータに対する PCA 解析結果	3-24
図 3-29	模擬配管サンプル	3-24
図 3-30	アクティブサーモグラフィ計測システム	3-27
図 3-31	水素ガスの簡易検知方法調査のために令和 5 年度購入した物品の例の写真	3-29
図 3-32	水素ガス検知テープに水素ガスを照射したときの写真	3-29
図 3-33	水素照射有無による水素ガス検知テープの反射率の変化	3-30
図 3-34	²⁴¹ Am 線源を用いて測定した LCS シンチレータの波高値スペクトル	3-31
図 3-35	低エネルギー γ 線検出器の概念図	3-32
図 3-36	低エネルギー γ 線検出器の写真	3-32
図 3-37	低エネルギー γ 線検出器を用いた線源測定の写真	3-33
図 3-38	モンテカルロシミュレーションの計算体系	3-34

図 3-39	シミュレーションで計算した γ 線の飛跡（緑色の線）	3-34
図 3-40	モンテカルロシミュレーションで計算した二つのシンチレータ （1 層目：YAP:Ce と 2 層目：BGO）のエネルギー付与の関係	3-35
図 3-41	線源の外観写真	3-36
図 3-42	デジタイザで取得した検出器の出力電圧波形	3-36
図 3-43	Charge integration 法による弁別	3-37
図 3-44	線源測定 of 弁別の結果	3-37
図 3-45	分類後の結果	3-38
図 3-46	核燃料取扱施設で観測される典型的な γ 線スペクトル	3-39
図 3-47	シミュレーションモデル	3-40
図 3-48	検出部の厚さにともなう光子計数率の変化	3-40
図 3-49	宇宙線データ取得試験体系	3-41
図 3-50	屋内での宇宙線観測スペクトル（1, 290, 000 秒）	3-42
図 3-51	二種類の光ファイバー（2 m、20 m）で読み出した Ce:GGAG シンチレータの X 線励起シンチレーション発光スペクトル	3-44
図 3-52	千代田テクノルコバルト照射施設での実験の概略図	3-44
図 3-53	光ファイバー先端に接着した Ce:GGAG シンチレータ	3-45
図 3-54	千代田テクノルコバルト照射施設での測定の写真	3-45
図 3-55	高線量（ $\sim 10^3$ Gy/h）地点で照射した際の Ce:GGAG の発光が 20 m の光ファイバー を通過する様子の写真	3-46
図 3-56	$\sim 10^3$ 、 $\sim 10^2$ 、 $\sim 10^1$ Gy/h 地点で照射した際の Ce:GGAG のシンチレーション 発光スペクトル	3-46
図 3-57	Ce:GGAG シンチレータの発光強度と照射線量との相関	3-47
図 3-58	ミミズ型管内走行ロボット「SooHa®」概要	3-48
図 3-59	ミミズ型管内走行ロボットの耐久試験用試験体（テストピース）ユニット外観	3-50

略語一覧

AO モード	: Asymmetric 0-th mode (反対称モード)
BGO	: Bismuth germanium oxide
CLADS	: Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (廃炉環境国際共同研究センター)
Ce:GGAG	: Cerium-doped Gadolinium Aluminium Gallium Garnet ($\text{Ce:Gd}_3(\text{Ga, Al})_5\text{O}_{12}$)
EOF	: Empirical Orthogonal Function (経験的直交関数)
FEM	: Finite Element Method (有限要素法)
FFT	: Fast Fourier Transform (高速フーリエ変換)
LDV	: Laser Doppler Vibrometar (レーザドップラー振動計)
PCA	: Principal Component Analysis (主成分解析)
PHITS	: Particle and Heavy Ion Transport code System
SLS	: Scanning Laser Source technique (レーザ弾性波源走査法)
SVD	: Singular Value Decomposition (特異値分解)
YAP:Ce	: Yttrium Aluminum Perovskite activated by Cerium
原子力機構	: 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
東京電力	: 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
福井大学	: 国立大学法人福井大学
大阪大学	: 国立大学法人大阪大学
神戸大学	: 国立大学法人神戸大学
東北大学	: 国立大学法人東北大学
埼玉大学	: 国立大学法人埼玉大学

概略

本研究は、東京電力ホールディングス株式会社（以下、「東京電力」と略す。）へのヒアリングで配管内部観察について示された、(1)水素含有量、(2)析出物の存在、(3) α 線/ β 線の放出核種の有無の三つのニーズに対応する技術を総合的に開発するため、既存の非破壊検査装置の小型化及び非破壊で配管内部をイメージング可能な専用の放射線検出器を開発し、レーザ等を用いた非破壊検査により配管内の情報を取得するとともに、配管内の α 核種の有無や配管等の内部状況を明らかにすることを目的とする。特に、高線量率環境下における α 核種の可視化、 β 核種の弁別判定を行う装置を開発するとともに、配管内の内容物を調査する技術を開発する。開発した技術の展開は、東京電力、民間企業によって実用化されることを見込む。

1. はじめに

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」と略す。）廃炉作業においては、多くの配管等を切断・撤去する必要があるが、多くの冷却水、試薬類及びガス用の配管類が存在しており、その内部の状況確認は廃炉作業の大きな課題となっている。また、内容物の中には、内容物の有無、液体の有無、放射性物質濃度、水素濃度等がわからない場合、適切な切断方法や対策（内容物の飛散防止対策等）を選定することが困難となる。特に、配管内において α 核種の有無の把握で事故進展の把握や廃炉作業における放射線防護の観点から極めて重要である。実際に東京電力へのヒアリングによると、UやPuなどの α 線放出核種を含む核種の存在も確認されており、配管内の放射性核種濃度の探査が求められている。また、これらの配管は比較的空間線量率の高い場所にあることが多く、配管の破損による内容物の漏えいはスムーズな廃炉作業の大きな妨げとなることが容易に想定される。

本事業では、レーザ等を用いた非破壊検査により配管内の情報を取得するとともに、配管内の α 核種の有無を中心に内部状況を配管外及び小径の内視鏡型測定器の開発を行うことにより、配管等の内部状況を明らかにする。特に、高線量率環境下における α 核種の可視化、 β 核種の弁別判定を行う装置を開発するとともに、配管内の内容物を調査する技術を開発する。大量の $\beta \cdot \gamma$ 線放出核種によるバックグラウンド放射線環境の中での廃炉作業で幅広く適用可能な要素技術であり、その利活用の範囲は大きい。

2. 業務計画

2.1 全体計画

本研究の概観を図 2-1 に示す。本研究での想定環境では、一般的に用いられる X 線などの放射線による非破壊検査方式を用いることができない。そこで、放射線を用いない非破壊検査の方法開発として、①非破壊検査を応用した配管ジオメトリ可視化技術開発を研究テーマとして設定した。また、配管内には α 線を放出する U や Pu 等が含まれる可能性があるため、そのような核種の有無を確認することを目的とし、②配管内放射線イメージング技術開発の二つを研究テーマとして設定した。

これらの大きな研究テーマに対し、さらに可能性のある技術を見出し、以下のような小テーマを設定した。

①非破壊検査を応用した配管ジオメトリ可視化技術開発

- 【①-1】 レーザ超音波計測による配管内付着物の遠隔評価
- 【①-2】 アクティブサーモグラフィを用いた配管検査方法の適用
- 【①-3】 水素ガスの簡易検知方法の調査

②配管内放射線イメージング技術開発

- 【②-1】 低エネルギー γ 線検出器の開発
- 【②-2】 水中の α 線検出のための $(\alpha, n)(n, \gamma)$ 反応による高エネルギー γ 線検出器
- 【②-3】 内視鏡型小型放射線計測装置の開発

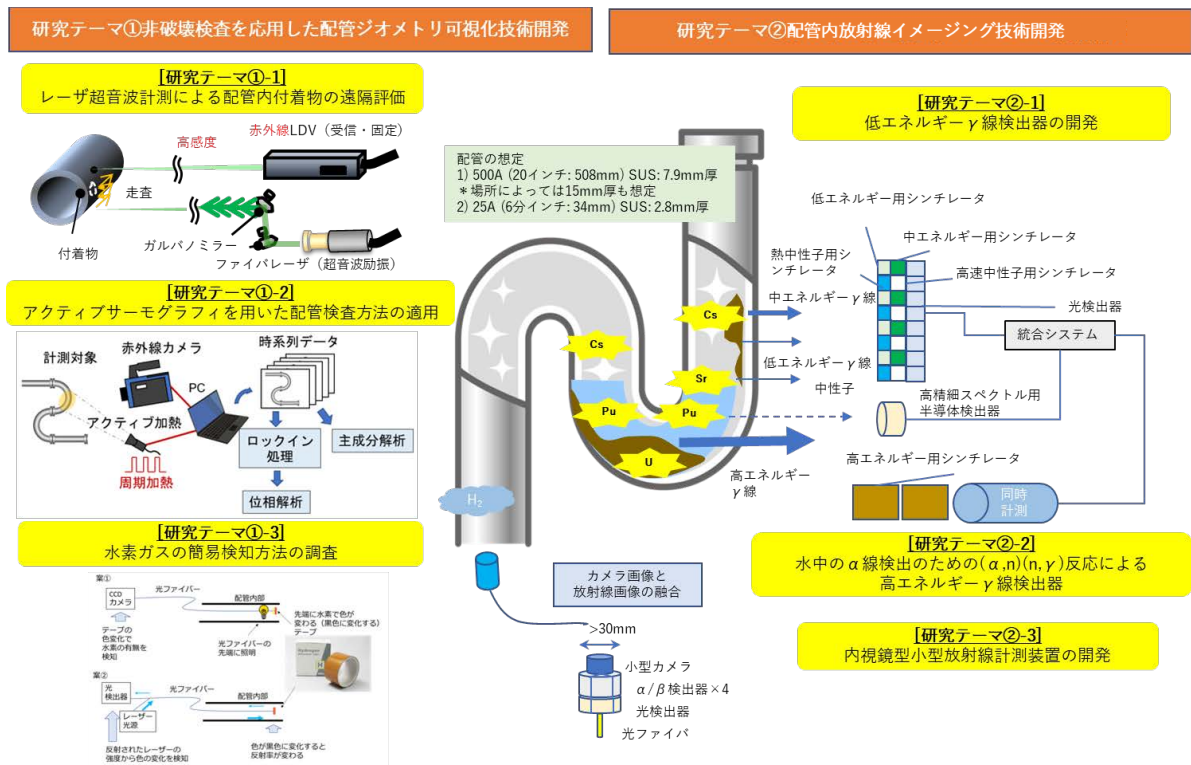


図 2-1 研究の概観

2.2 実施体制

実施体制を図 2-2 に示す。

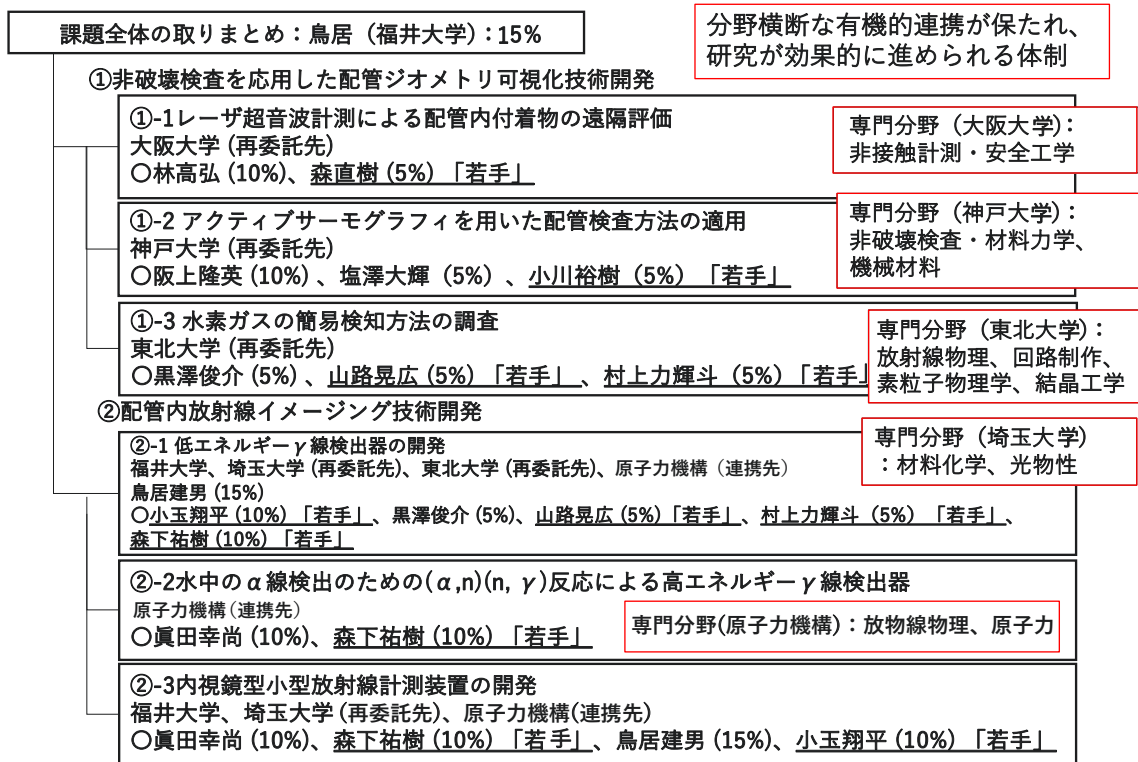


図 2-2 実施体制

2.3 令和5年度の成果の目標及び業務の実施方法

本業務では、東京電力へのヒアリングで配管内部観察について示された、(1)水素含有量、(2)析出物の存在、(3) α 線/ β 線の放出核種の有無の三つのニーズに対応する技術を総合的に開発するため、既存の非破壊検査装置の小型化及び非破壊で配管内部をイメージング可能な専用の放射線検出器の開発により、レーザ等を用いた非破壊検査により配管内の情報を取得するとともに、配管内の α 核種の有無や配管等の内部状況を明らかにすることを目的とする。特に、高線量率環境下における α 核種の可視化、 β 核種の弁別判定を行う装置を開発するとともに、配管内の内容物を調査する技術を開発する。ここでは、令和5年度の成果目標及び実施方法を述べる。

① 非破壊検査を応用した配管ジオメトリ可視化技術開発

[①-1] レーザ超音波計測による配管内付着物の遠隔評価

(再委託先：国立大学法人大阪大学（以下、「大阪大学」と略す。))

内部の付着物により局所的な曲げ剛性が小さくなることを利用し、付着物が存在する箇所にレーザを照射すると波形が小さくなると予想していることから、初めにこの現象を実験的に検証し、付着物の種類や付着の強度により得られる画像にどのような影響を与えるかを調べ、薄板による付着物検出の基礎実験及び付着物検出に対する最適周波数帯域の検討を行う。さらに、赤外線レーザドップラー振動計（LDV）を用いた遠隔計測により画像を取得する配管内付着物の画像化実験を目指す。

[①-2] アクティブサーモグラフィを用いた配管検査方法の適用

(再委託先：国立大学法人神戸大学（以下、「神戸大学」と略す。))

配管に対してパルス加熱あるいは周期加熱を付加した場合において、配管表面に現れる温度変動及びその分布を数値解析的、実験的に評価するアクティブサーモグラフィ法の配管内部検査への適用性を検討する。さらに、配管内部検査の高精度化・高効率化に適した、熱負荷の形態や大きさ、熱負荷周期に関する評価を行う。

令和5年度には、時系列非定常温度変動の分布を高速かつ高精度に計測できる赤外線サーモグラフィとそのデータ解析を可能とする、アクティブサーモグラフィ計測システムの構築を最優先で行う。計測システムの実使用環境を考慮して、遠隔から非接触に対象物に熱負荷を与えることができる加熱システムの設計・製作を行う。

[①-3] 水素ガスの簡易検知方法の調査（再委託先：国立大学法人東北大学

（以下、「東北大学」と略す。))

水素ガスに反応するテープを用いた簡易的な水素ガス検出器について、準備を進める。特に、配管内部という暗所での色の確認であるため、実際に同様の暗所を筒などで再現して、その撮像について評価を行う。ここでは感度補正なども含めて考察を行う。

② 配管内放射線イメージング技術開発

[②-1] 低エネルギー γ 線検出器の開発（再委託先：東北大学、国立大学法人埼玉大学（以下、「埼玉大学」と略す。）、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」と略す。))

候補となるシンチレータ材料の選定とその準備を行う。そのため、シンチレータや実験機材を購入し、本研究課題の実施環境を整える。シンチレータは、発光量・エネルギー分解能・発光波長を比較条件として最適なものを選定する。また、実験室内で簡便な基礎評価を行えるように、小型X線源を導入してX線励起発光スペクトル測定装置をセットアップする。

[②-2] 水中の α 線検出のための (α, n) (n, γ) 反応による高エネルギー γ 線検出器
(連携先：原子力機構)

設計及び線源を用いた基礎的な性能評価を行う。「低エネルギー γ 線検出器」では、検出器として時間特性に優れるシンチレータとエネルギー分解能に優れる半導体の両方を検討する。シンチレータは、埼玉大学とも協議し最適なものを選定する。シンチレータと光検出器を組み合わせる放射線検出器を構成する。また、半導体検出器も整備する。これらの検出器の信号をデジタイザで収集するためのソフトウェアを構築する。

[②-3] 内視鏡型小型放射線計測装置の開発（再委託先：埼玉大学、連携先：原子力機構）

内視鏡型小型放射線計測装置の試作機開発を行い、非破壊検査後詳細な配管内部調査を想定し、内視鏡をイメージした放射線検出器と小型カメラを組み合わせたシステムの開発を行う。検出器は、4 方向の α 線及び β 線の方角を検知するため、四つの検出器を進行方向と垂直に配置し、各検出器の信号割合により、検出器通過部の放射能を特定する。また、線源を用いた測定を行い、 α 線及び β 線が測定できることを確認する。さらに、検出器の搭載プラットフォームとしてミミズ型ロボットの基礎性能試験を行う。

3. 実施内容及び成果

3.1 非破壊検査を応用した配管ジオメトリ可視化技術開発

3.1.1 レーザ超音波計測による配管内付着物の遠隔評価（再委託先：大阪大学）

(1) レーザ弾性波源走査法（SLS）による薄板状構造の画像化

SLS を用いた付着物評価について述べる前に、SLS を用いた薄板状材料裏面の画像化の原理について説明する。レーザを金属材料に瞬間的に照射すると、熱弾性効果やアブレーションの作用により弾性波が発生する[1][2][3][4]。一般に、レーザ出力が大きい場合には、材料表面がアブレーションを起こし、その瞬間的な作用により超音波が発生する。また、アブレーションを起こさない程度のレーザ出力の場合には、熱弾性効果により超音波が発生する。本研究では、材料表面に損傷を与えないように、熱弾性効果が起こる程度のレーザ出力で実験を行った。レーザを薄板材料の表面に瞬間的に照射すると、屈曲振動をする低周波のラム波反対称モード（A0 モード）が発生する[6]。研究責任者らの過去の研究[5][6][7][8][9][10][11][12][13][14]では、レーザ照射点の板厚によって曲げ剛性が異なり、それにとまって発生する屈曲振動エネルギーが変化するという現象を利用して、薄板裏面の損傷やパイプ内面の減肉を画像として取得した。ここでは、付着物によって曲げ剛性が増大することによる振動エネルギーの減少を画像化する。図 3-1 は、その原理を示した模式図である。レーザ照射点が板厚の薄い損傷部直上であれば、曲げ剛性が小さいため、発生する弾性波は大きくなる（図 3-1(a)）。一方でレーザ照射点が板厚の厚い健全部であれば、曲げ剛性が大きいため、発生する弾性波は小さくなる（図 3-1(b)）。また、レーザ照射点が板厚のさらに厚い、物体が付着した部分であれば、さらに曲げ剛性が大きくなるため、発生する弾性波はさらに小さくなると考えられる（図 3-1(c)）。本研究では、この予想のもと、付着物の画像化を行う。すなわち、励振用のレーザを走査しながら、レーザ照射点から離れた固定位置において振動波形を計測すると、レーザ照射点の板厚によって波形の大きさが変化し、その波形の振幅変化やスペクトルピーク変化をマッピングすることにより、図 3-1(d)のような分布が得られる。そして、このような分布を2次元的に得ることにより、レーザ照射点直下の付着物の様子が画像として取得できると考えている。

SLS による画像化に関する研究責任者らの研究では、拡散した後の波動場を利用することで受信位置に依存せず、枝分かれ管のような複雑な形状でも内部減肉を画像化できることを示した[10]。また、LDV や無線マイクロフォンを用いることで、遠隔からの計測による損傷画像化を実現した[10][12][14]。さらに、レーザ走査の高速化による画像化の乱れについて詳細に解析し、受信点を複数にすることでスプリアス画像が低減できることを示している[10]。

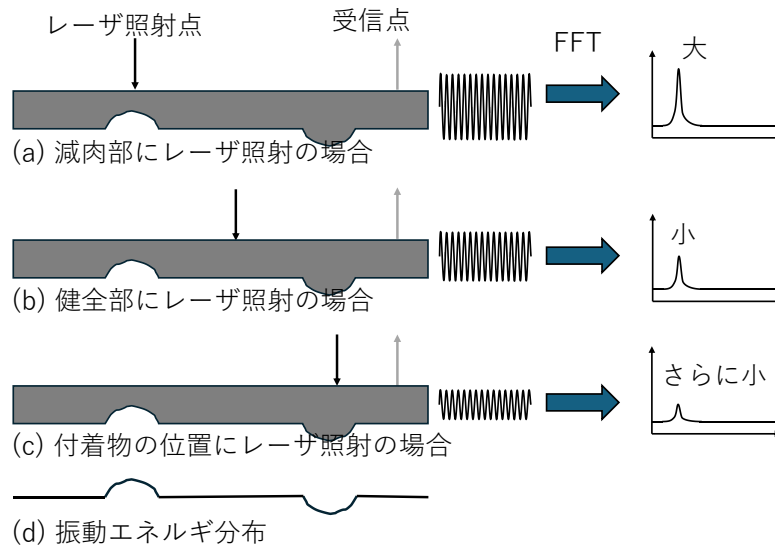


図 3-1 レーザ照射位置による超音波発生エネルギーの変化

(2) 実験セットアップと画像化手法

・レーザ変調による超音波励振

一般に、弾性波を発生させるためには大きなパルス出力が必要であるため、Q-switch の YAG レーザや CO₂ レーザなどが利用されてきた[1][2]。しかし、これらのレーザ装置はパルス出力であるため、発生する弾性波の周波数制御や波形制御が不可能であり、発生する弾性波はパルス状の広帯域波に限られ信号レベルが小さくなるという問題があった。一方でファイバーレーザにおいては、レーザ出力の ON-OFF や振幅変調を外部信号によって実現できるようになってきており、弾性波の励振において、長い持続時間のバースト波やチャープ波といった任意の波形を作り出すことが可能となる。

弾性波の励振にファイバーレーザを採用することによって、バースト波やチャープ波の利用が可能となるが、バースト波では狭帯域であるため、構造内の共振が顕著に表れてしまい鮮明な画像を取得できない。一方でチャープ波の場合、広帯域であるため構造内の共振による影響が小さくなり、より鮮明な画像を取得できる。しかし、完全に遠隔からの検査を考える以上、波形測定に LDV を用いることを考えており、チャープ波で励振される弾性波の信号レベルは多くの場合不十分である。

そこで、先行研究[13]において、連続波レーザに異なる周波数の外部変調信号を直列につなげた変調波形を用いて弾性波を励振することで損傷画像を取得できることが示されている。本稿でも連続波を出力するファイバーレーザ (Fujikura FLC-0300S、波長 1,095 nm、最大出力 300 W) に外部信号により変調を掛けることで弾性波を励振した。外部変調信号には、デジタル-アナログ変換器 (DA 変換器、NI、USB-6351) からの矩形波を用いた。レーザに変調信号を掛けていなければ連続波が出力されているが、1 周期が $1/f_1$, $1/f_2$, $1/f_3$ の矩形の信号を直列に繋いだものを変調信号として与えると、それに対応する変調したレーザ光が出力する。そのレーザを材料に照射することで、レーザ出力と概ね似通った時間間隔の弾性波が励振される。この弾性波を計測しフーリエ変換すると、 f_1 , f_2 , f_3 にピークを持つ周波数スペクトルが得られる。この周波数ピークは、時間波形がノイズに埋もれているような場合でも検出しやすいことが多い。そのため、本手法において、レーザを用いることで SN 比が小さくなってしまふものの、このようなレーザ変調手法を用いた超音波計測手法により SN 比の大幅な改善をもたらし、ひいては付着物の画像化を可能とする。

- ・複数周波数による画像の鮮明化手法

本研究では、SLS を用いて得られる画像を鮮明化するために文献[11]に倣い、複数の周波数の弾性波を同時に励振することで得られる、それぞれの周波数スペクトルピーク値による画像を平均化した。

SLS によって得られる画像は、損傷があるなどで板厚が薄くなっている領域は黒く（スペクトルピークが大きい）、一方で板厚が大きい部分は白く（スペクトルピークが小さい）表されるが、実際に得られる画像には、損傷部分以外にも黒く表される領域が存在する。これは構造全体の共振に由来する模様であることがわかっている。この共振による模様は、励振する弾性波の周波数によって変化するため、先行研究[13]では 3 種類の周波数を直列に接続した変調信号をレーザに与えて、同時に複数周波数の弾性波を励振していた。このように励振された弾性波の波形から得られる周波数スペクトルには複数のピークが現れるため、それぞれの周波数スペクトルピーク値の平均値から平均画像を取得した[11]。本研究でも同様に共振模様による影響が低減するため、この複数の周波数による平均化手法を用いた。

- ・実験システム

図 3-2 に付着物検出の基礎実験として、本研究で用いた実験システムを示す。試験体と計測装置間の距離は、約 3.5 m として実験を行った。ファイバーレーザには上記で述べたように、DA 変換器から変調信号を与えることで変調したレーザ光を検査対象に照射することで、変調信号に合った周波数の弾性波を励振した。レーザ照射点は、2 個のミラーを回転ステージにより微小回転させることによりパイプ表面上の 2 次元走査できるようにしてあり、それらのミラーの前の光路上にある、凹レンズ($f = -50$)と凸レンズ($f = 200$)間の距離を調整することで、概ねパイプ表面においてスポット径を約 0.3 mm となるように設定した。走査距離は水平方向約 $\Delta x = 4$ mm, 鉛直方向約 $\Delta y = 4$ mmとしているが、パイプ表面については、曲面のため厳密には同一間隔とはなっていない。また、各照射点において変調したレーザ光を 10 ms 照射し、波形はレーザ照射の瞬間から 20 ms 間収録した。

LDV により検出された波形は、アンプで 60dB 増幅された後、アナログ-デジタル変換器（AD 変換器、NI、USB-5133）を通して PC に取り込み、画像化処理を行った。レーザ照射から 20 ms 分の波形を収録し、パソコン内で 1 kHz のハイパスフィルタと 80 kHz のローパスフィルタを施した後、高速フーリエ変換（FFT）に掛け、上記で示した方法により画像を取得した。

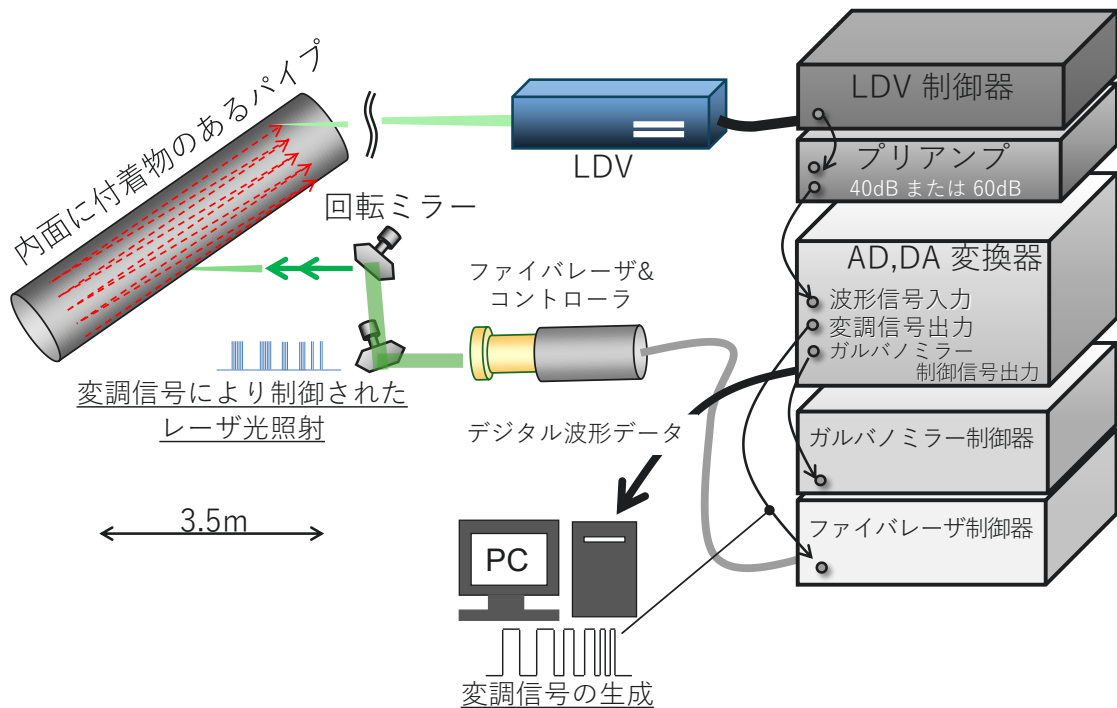


図 3-2 実験システム

(3) パイプ内面の付着物の画像化

ここでは、図 3-3 のような内部に付着物をつけたアルミニウムパイプを試験体した場合の画像化結果を示す。試験体の寸法は、外径 115 mm、長さ 1,000 mm、厚さ 3 mm であり、端面から約 270 mm の位置に付着物を取り付けた。ここでは、円弧上の内表面に密着するように、エポキシパテを付着物として採用した。エポキシパテは、直径約 50 mm の円状で厚さは約 10 mm とした。この試験体の表面 170 mm×200 mm の画像化範囲で実験を行った。

あらかじめ実施した基礎的な付着物の画像化検討において、(a)低周波数帯域 (5、7、9 kHz)、(b)中周波数帯域 (15、17、19 kHz) 及び(c)高周波数帯域 (25、27、29 kHz) の 3 タイプの周波数を比較したところ、(a)の低周波数帯域が最適であることを確認した。そこで、変調信号は 5、7、9 kHz の三つの周波数の波形を直列に繋ぎ、それぞれの波形を 3.3 ms、全体を 10 ms とした。なお、この低周波数がより画像化に有利な理由は、SN 比がよりよいこと、もう一つはその周波数帯域内での構造全体の共振模様と付着物サイズの関係によるものと考えられる。

波形の受信には、パイプ上の 1 点で LDV (Polytec OFV-505/OFV-5000、可視光) を用いた。LDV は、励振用レーザ装置のすぐ横において、試験体までの距離は約 3.5 m として波形を計測した。LDV での計測点は、アルミニウムパイプの左端から約 100 mm とし、この位置にレーザの受光をよくするために再帰反射テープを貼り付け、振動を受信した。図 3-4 は、5、7、9 kHz の周波数ピークの平均値をプロットした分布図である。中央は振動エネルギーが小さいことを示す淡い色であり、外周に文献[9]でみられたような輪郭が形成されている。これにより付着物の位置や形状、大きさは概ね捉えることができしており、3.5 m 程度離れた実験室内での計測では十分に付着物を検出することができたといえる。

次に、新しく導入した赤外線 LDV (Polytec VFX-F-110/VFX-I-160、1,550 nm) により、同じ付着部の画像を取得した結果を図 3-5 に示す。図 3-4 を得た場合と同程度の波形が得られたが、現段階では計測ソフトウェアが新しい LDV に対応しきれておらず、図 3-5 に示

すような3倍の粗い走査点 ($\Delta x, y = 12 \text{ mm}$) での計測結果のみが得られている。図 3-4 のように中央に付着物を示す淡い色の箇所と、濃い輪郭の箇所が不鮮明ではあるが確認できおり、少なくとも図 3-4 のような結果が得られることは期待できる。また、走査点が粗い場合にはノイズによる信号の変化か、付着物によるものなのかが判別しにくいことも、この結果は示している。

今後は、早急にソフトウェアを新しい装置に対応させ実験を進める。



図 3-3 用いたアルミパイプと受信及び付着物の位置

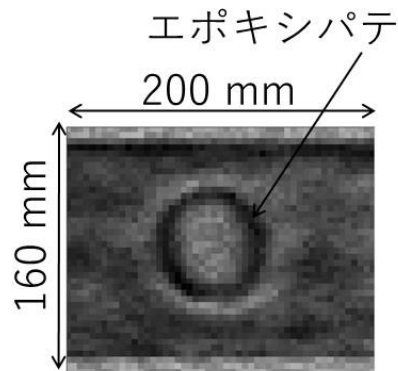


図 3-4 可視光 LDV による計測で得られたパイプ内面の付着物画像

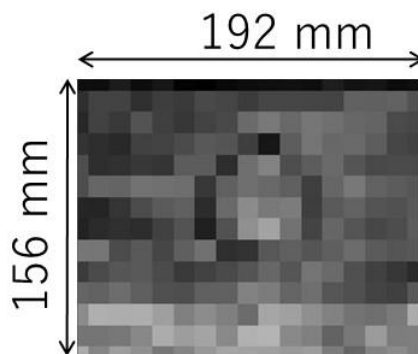


図 3-5 新しく導入した赤外線 LDV による画像化結果
調整段階で自作ソフトウェアが対応しておらず計測点が粗い ($\Delta x, y = 12 \text{ mm}$)

(4) 結言

本研究では、1F 廃炉作業において必要になる配管内部の付着物の検出を遠隔から実行することを目的とし、レーザ弾性波源走査法を用いた画像化手法を付着物検出に応用するための実験結果を示した。パイプ内部の付着物が適切に画像化されており、本手法の有効性を確認することができた。今後は、赤外線 LDV を本格導入するとともに、検査システムの小型化を進め、実験室外での計測ができるように改良する。

3.1.2 アクティブサーモグラフィを用いた配管検査方法の適用（再委託先：神戸大学）

(1) はじめに

本研究では、非破壊・非接触で配管内部の状態を把握する手法として、アクティブサーモグラフィ法による配管内付着物の非破壊評価に関する基礎検討を行った。アクティブサーモグラフィ法は、検査対象に強制的に熱負荷を与えることで熱移動を発生させ、付着部と非付着部の熱伝導の違いによって生じる表面の温度変化を赤外線サーモグラフィ装置で計測する手法である。この手法は、非接触で遠隔から検査を行うことが可能なため、十分な安全性を確保することができ、足場を組む等の事前の準備が不要である。また、2次元画像による測定なので、短時間に広範囲を効率よく検査でき、被計測物の内部の評価が可能であるといった他の非破壊試験法にはない特長を有している。

本研究では、まず時系列非定常温度変動の分布を高速かつ高精度に計測できる赤外線サーモグラフィとそのデータ解析を可能とするアクティブサーモグラフィ計測システムを構築した。アクティブサーモグラフィ法では、物体に強制熱負荷を与えている過程あるいは熱負荷後に得られる時系列赤外線画像データに対して、配管内容物の検出精度向上を目的としたデータ解析処理を行う。本研究では、まずフーリエ解析による温度変動波形の位相解析を実施し、配管裏面状態と位相との関係を明らかにして計測システムに反映させることを試みた。その過程では、数値解析的に得られた時系列非定常温度分布データをもとに配管内部状態の推定を行う数値シミュレーションを行い、アクティブサーモグラフィ法の配管検査への適用性を検討した。

また、実使用環境を考慮して、遠隔から非接触に対象物に熱負荷を与えることができる加熱システムを試作し、基礎実験を行った。基礎実験としては、原子炉配管に付着物が内在した状態を模擬して、ステンレス板の裏面にパテを付着させた試験体を製作し、試験体に対してパルス加熱及びステップ加熱を行った場合の時系列温度変動データをもとに付着物の位置や形状を同定できることを確認した。さらに、得られた温度変動データに対して主成分解析（PCA）を用いた波形解析処理を適用することにより、付着物の検出精度の向上を試みた。以下に本研究で得られた成果を総括する。

(2) アクティブサーモグラフィ法

近年、赤外線サーモグラフィ装置の性能が飛躍的に高まっていることにより、物体表面温度の高精度な可視化計測に基づく状態監視技術及び非破壊検査技術に注目が集まっている。赤外線サーモグラフィ法の中で最も広く用いられているのが、断熱温度場の検出に基づく欠陥検出手法である。本研究でも配管内面の物体同定に断熱温度場法を適用した。断熱温度場法による付着物検出の模式図を図 3-6 に示す。検査対象の表面に対して、一様な熱負荷を与えたとき、検査対象には面外方向の熱拡散が生じる。検査対象に付着物が存在すると、付着部と非付着部の熱伝導の違いによって表面に温度差が生じる。この表面温度変動を測定することで、付着物の位置や形状等を特定することが可能となる。また、配管裏面に付着物が存在する場合には、付着物への熱移動が生じること

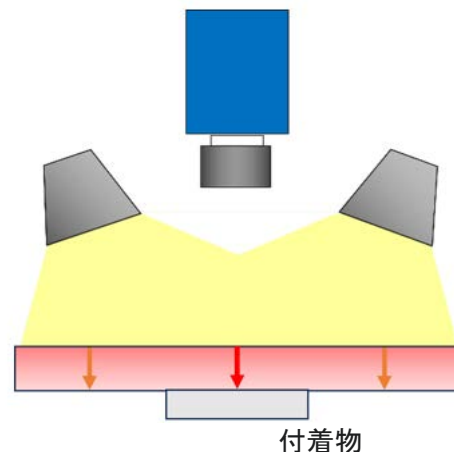


図 3-6 断熱温度場法の模式図

により、加熱過程での温度上昇、冷却過程での温度降下に違いが生じる。このような加熱過程及び加熱後の温度変動の特徴を解析することにより、配管裏面の付着物の有無を同定できる可能性があり、さらには裏面に存在する付着物がどのようなものであるかを推定できる可能性がある。

断熱温度場法における加熱・冷却時の熱応答に関するデータの解析方法として、本研究ではロックイン処理並びに PCA 処理を採用した。

ロックイン処理は、配管裏面の状態に起因する微小な変化を抽出するため、ノイズ改善及び熱応答データのフーリエ解析による位相の変化傾向から配管裏面状態の推定を行うものである。加熱過程においては、加熱機器からの赤外線反射の影響で温度変化が正しく計測できない可能性があるため、本研究では熱負荷後の非定常温度変動曲線を以下に示すように、フーリエ級数展開したときの係数 $V_{\sin,n}$ 及び $V_{\cos,n}$ をもとに位相 ϕ_n を算出し、これらから温度変動傾向の特徴を数値化し、付着物に関する形状パラメータと関連付けることを試みた。

$$f(t) = \frac{V_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (V_{\cos} \cos \frac{2\pi n}{T} t + V_{\sin} \sin \frac{2\pi n}{T} t) \quad \text{式(1)}$$

$$\begin{aligned} V_{\cos,n} &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos \frac{2\pi n}{T} t dt \\ V_{\sin,n} &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin \frac{2\pi n}{T} t dt \end{aligned} \quad \text{式(2)}$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{V_{\sin,n}}{V_{\cos,n}} \right)$$

一方、PCA は時系列データの特徴を複数の変数で捉えることで、データの特徴を強調するデータ解析手法であり、時系列温度変動データに含まれる付着部と非付着部の温度変動の違いを特徴量として強調し、画像として抽出する手法である。PCA は経済学の分野でよく用いられる統計手法で、複数の変数間の共分散を少数の合成変数で説明し、共分散行列の固有値問題の解として得ることがもともとの方法である。つまり、相関があるとみられるデータ群において一つの変数がこの相関を作っているものと仮定し数学的に算出する。これを第一主成分と呼ぶが、これ自体は数学的な計算結果に過ぎないため、分析者がこの意味を解釈する必要がある。現在では PCA はさまざまな分野に応用されており、データ圧縮やパターン認識などによく用いられている。PCA 処理で計算負荷を軽減する技術として特異値分解 (SVD) が用いられる。SVD を用いた PCA 処理の手順を以下に説明する。

実験から得た赤外線画像データを図 3-7 に示す。また、PCA 処理の概略図を図 3-8 に示す。

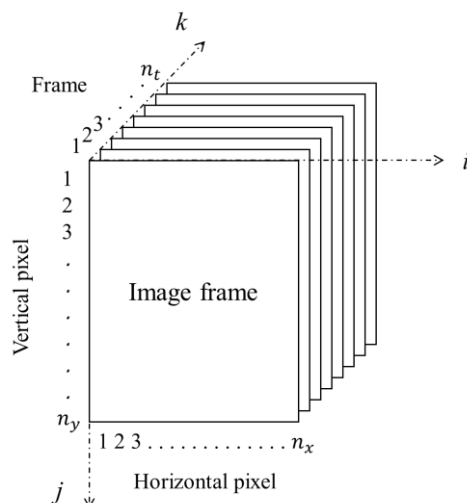


図 3-7 時系列赤外線画像データの構造

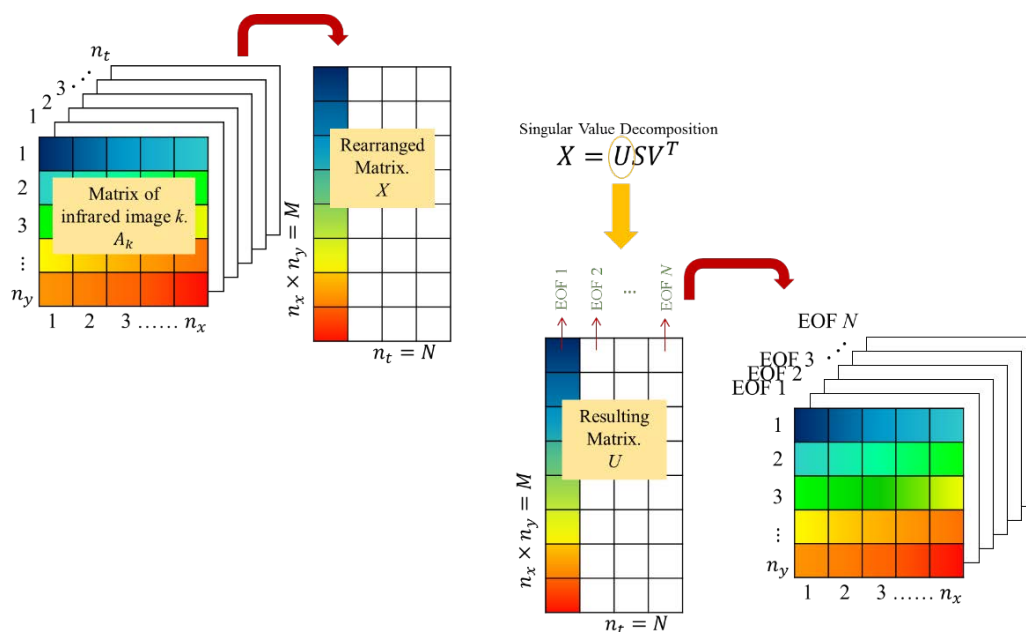


図 3-8 PCA 処理の概念図

図 3-8 に示したように赤外線画像データは、ピクセル数 $n_x \times n_y$ の赤外線画像が n_t フレーム分ある 3 次元画像行列である。そのため、赤外線画像データを PCA 処理に適用するには、3 次元行列を 2 次元行列に変換する必要がある。変換の方法について、まず式(3)に示される k フレーム目の $n_x \times n_y$ ピクセルから成る行列 A_k を、式(4)で示す列ベクトル $\mathbf{x}_k$ に並び替える。

$$A_k = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n_y} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n_x1} & \cdots & a_{n_x n_y} \end{pmatrix} \quad k = 1, 2, \dots, n_t \quad \text{式(3)}$$

$$x_k = \begin{pmatrix} a_{11} \\ \vdots \\ a_{1n_y} \\ \vdots \\ a_{n_x1} \\ \vdots \\ a_{n_xn_y} \end{pmatrix} \quad k = 1, 2, \dots, n_t \quad \text{式(4)}$$

全フレームの列ベクトルを配置し、行列 X を作る。

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_{n_t}) \quad \text{式(5)}$$

この行列 X が赤外線画像データの 2 次元画像行列である。ここで、2 次元画像行列のサイズは $M \times N$ ($M = n_x \times n_y$, $N = n_t$) とする。この行列 X を特異値分解する。

$$X = USV^T \quad \text{式(6)}$$

ここで、行列 S は特異値を対角成分に持つ対角行列であり、特異値は大きさの降順で配置されている。行列 V^T は行成分に大きさの降順に並べられた固有ベクトルで成っており、行列 S の特異値は行列 V^T の固有ベクトルと対応している固有値でもある。行列 V^T の各行を PC と呼ぶ。行列 U の各列は、主成分空間内でデータ群の座標を与える経験的直交関数 (EOF) である。図 3-8 に示したように、これらの EOF を 2 次元画像に再構成することで、もとの赤外線画像データのコントラストを強めた処理画像を得る。また、この EOF も行列 S の特異値と対応しており、対応する特異値の値が大きいほど EOF が有している基データの情報量が多い。多くの場合、分散の 95% 以上は最初の一〜五つ前後の EOF が有しているため、特異値の値が小さいときの EOF は無視されることが多い。

(3) 実験的検討に用いた装置の概要

・加熱装置

本研究では、熱負荷を与える方法としてパルス加熱法及びステップ加熱法を用いた。パルス加熱法では、フラッシュランプ等を用いて検査対象にパルス状の短時間の熱負荷を与えた。パルス加熱法の利点として、加熱時間が約 0.004 s と瞬間的であるため、検査時間が短く、高効率な検査が可能である。一方で欠点として、短時間に熱負荷を集中させるため、瞬間的に表面温度が非常に高くなり、赤外線サーモグラフィ装置の計測範囲を超えてしまうといった点が挙げられる。本研究ではパルス加熱装置として、Comet 製のキセノン・フラッシュランプ (NDT-24H) 4 灯を使用した。パルス加熱装置の外観及び本研究で使用したフラッシュランプを図 3-9 に示す。キセノン・フラッシュランプに加え、最大出力 3,200 W の電源ユニット 4 基、さらに、小さい電源容量でも高出力のフラッシュランプを使用可能にするために電源ユニットのチャージを小電力で順次行うことができるシーケンサを用いた。

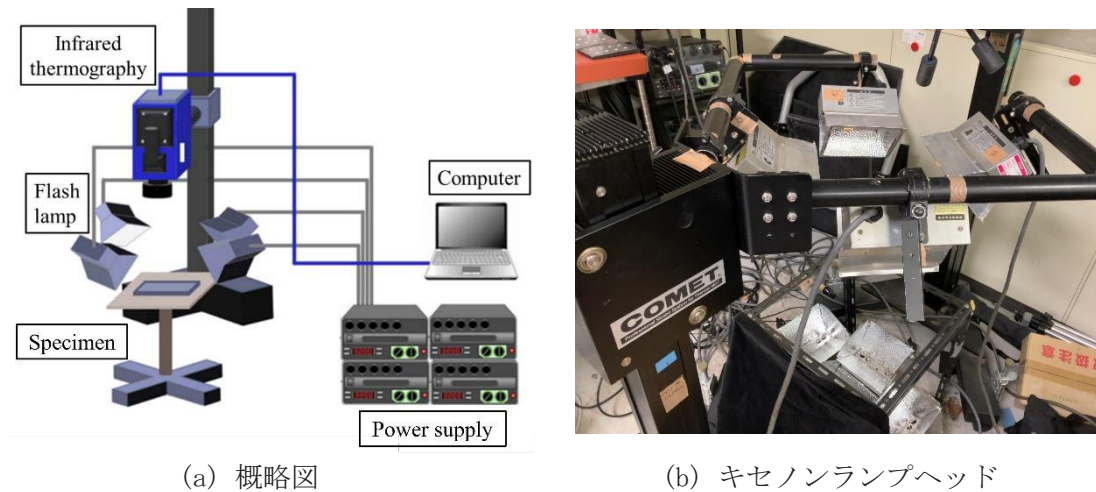


図 3-9 パルス加熱装置

ステップ加熱法とは、ハロゲンランプ等を使って、検査対象に持続時間の長いステップ状の熱負荷を与えることにより、検査対象に面外方向の熱移動を生じさせる手法である。ステップ加熱法の特徴として、ステップ状の熱負荷を比較的長い時間、検査対象に与えることにより、パルス加熱法では計測できない加熱過程の表面温度分布を計測することができる。また、ステップ加熱法では、全体として与える熱量がパルス加熱法と比較して大きいいため、パルス加熱法では検出できない低い熱伝導性を持つ材料や深い欠陥を有する場合の検査に適している。本研究では、ステップ加熱装置として投光器（CHP500）1灯を使用した。ステップ加熱装置の外観及び本研究で使用した投光器を図 3-10 に示す。本投光器は、放射スペクトルが近赤外域であるため、 $0.7\ \mu\text{m}$ ～ $2.5\ \mu\text{m}$ の波長の赤外線を照射することが可能である。

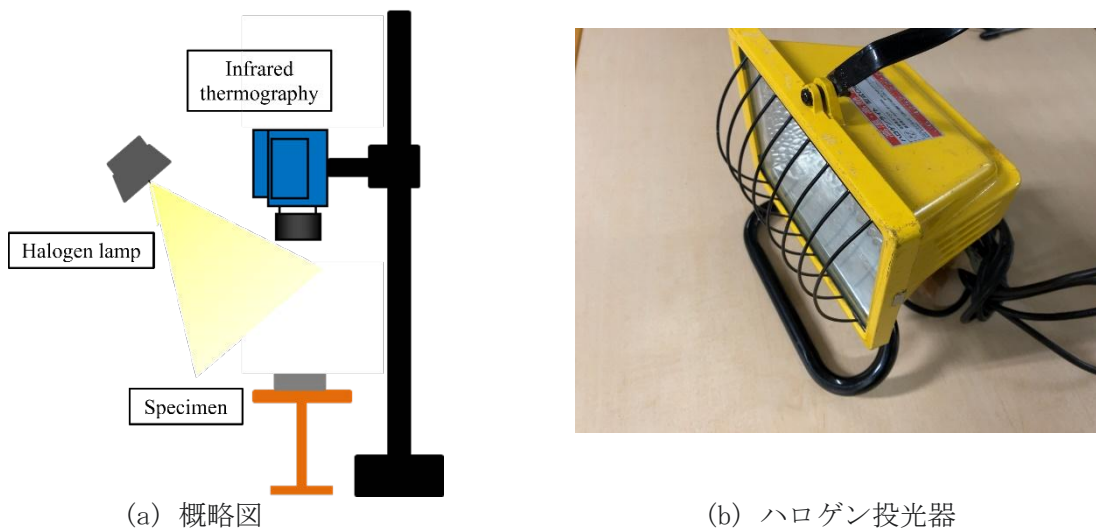


図 3-10 ステップ加熱装置

・赤外線カメラ

本研究では、赤外線カメラとして InSb (Indium antimonide) センサを搭載した赤外線サーモグラフィ (FLIR Inc. 製、SC7500 及び X6981) を使用した。赤外線カメラの仕様を表 3-1 に示す。赤外線カメラから出力される赤外線放射エネルギーに関するデジタルデータは、検査対象表面から放射される赤外線エネルギーを 12 bit 整数値で表したもので、赤外線強度値と呼ぶ。

表 3-1 使用した赤外線の仕様

	X6981	SC7500
Spectral Range	3-5 μm	1.5-5.1 μm
Resolution	640×512 pixels	320×256 pixels
Frame Rate		up to 383 Hz
NETD at 25 $^{\circ}\text{C}$	<20 mK	<20 mK
Standard Temperature Range	<20 mK	5 $^{\circ}\text{C}$ -300 $^{\circ}\text{C}$
Sensor Cooling	Stirling closed cycle cooler	Stirling closed cycle cooler

(4) 配管内部の付着物を模擬した数値解析モデルを用いたシミュレーション

アクティブサーモグラフィ法による配管裏面状態の検査の実現可能性を検討するため、数値解析的に得られた時系列非定常温度分布データをもとに配管内部状態の推定を行う数値シミュレーションを行った。数値解析手法としては、汎用有限要素解析ソフトウェアの MARC を使用した。

・解析対象モデル

原子炉配管内に付着物が内在する状態を簡易的に模擬した、図 3-11 に示すような鋼板と裏面の付着物をモデル化したものを用いた。150 mm×150 mm×厚さ c mm のステンレス板と、直径 47 mm、高さ 3 mm の円柱形上の付着物で構成されている。ステンレス板の鋼種は SUS430 であり、付着物としてアクリル樹脂である。有限要素法 (FEM) 解析モデルを図 3-12 に示す。ステンレス板から空気への熱伝達を考慮するため、空気層に挟まれたステンレス板・アクリルのモデルを作成した。空気層の境界条件としては断熱境界条件を与えた。初期温度は一様に 20 $^{\circ}\text{C}$ とした。解析に用いた SUS430、アクリル樹脂及び空気の物性値を表 3-2 に示す。モデルには、一定時間の均質な熱負荷を与えるステップ加熱及び短時間で強力な熱負荷を与えるフラッシュ加熱の 2 種類をそれぞれ与えた。

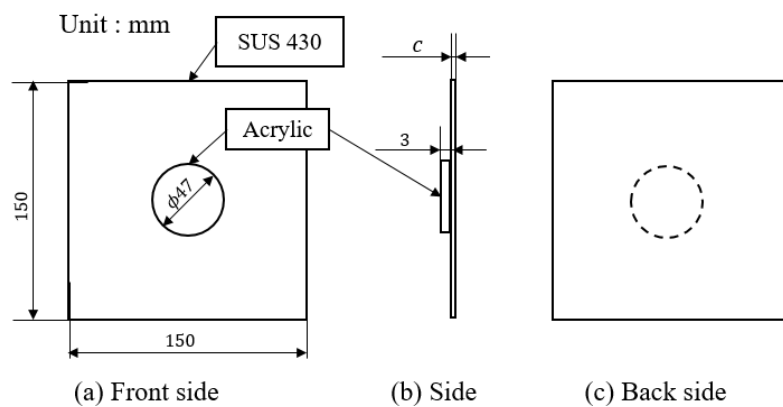


図 3-11 ステンレス鋼-付着物解析モデル

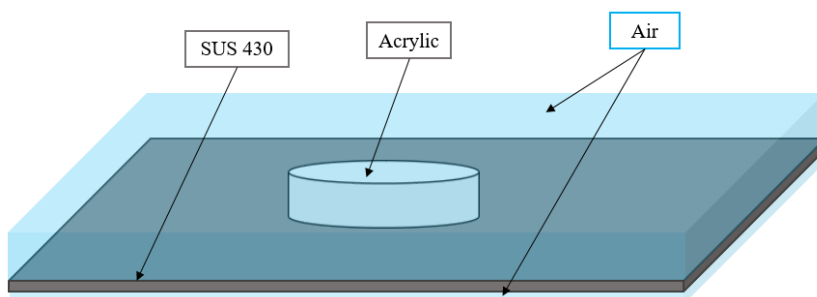


図 3-12 FEM 解析モデル

表 3-2 材料特性

Material	SUS 430	Acrylic	Air
Density ρ [kg/m ³]	7,700	1,850	1.21
Specific heat c [J/(kg · K)]	460	1,470	1,006
Thermal conductivity λ [W/(m · K)]	26.4	0.21	2.56×10^{-2}

・数値解析結果

○ステップ加熱

一定時間の熱負荷与え、その後冷却を与えるステップ加熱時の温度変動を FEM 解析するために、付着物の反対面側の鋼板表面に一樣の熱流束 $q=1.78 \times 10^{-3} \text{ W/mm}^2$ を 5 秒間与え、その後 20 秒間の断熱条件を与えた。FEM 解析モデルの概要を図 3-13 に示す。板厚 c を 1.0、2.0 及び 5.0 mm の 3 種類とした。熱負荷開始後の鋼板表面の温度分布変化を図 3-14 に示す。図 3-14 より、いずれの鋼板の板厚においても付着物が存在している場所では、付着物がない場所より温度が低い領域が現れており、板厚が小さいほど早い時間から低温領域が現れていることがわかる。鋼板の場所ごとの温度時系列変化を図 3-15 に示す。温度の低下速度及び低下量が大きいことがわかる。ここで、測定個所は付着物が存在する領域の中心部と付着物がない 2 点の計 3 点とした。図 3-15 より、いずれの板厚でも付着物の裏側である Point A では、Point B、C と比較して加熱終了時での温度が最も低く、加熱終了後の冷却過程においても他の 2 点より、温度の低下速度が大きいことがわかる。板厚が 5 mm の場合では、加熱過程よりも冷却過程のほうが、付着物の有無による温度変動への影響が顕著であった。以上の結果から、ステップ加熱により加熱及び冷却過程における付着物が熱伝導に与える影響を鋼板表面の温度変動を測定することで、付着物の有無を検出できることがわかった。

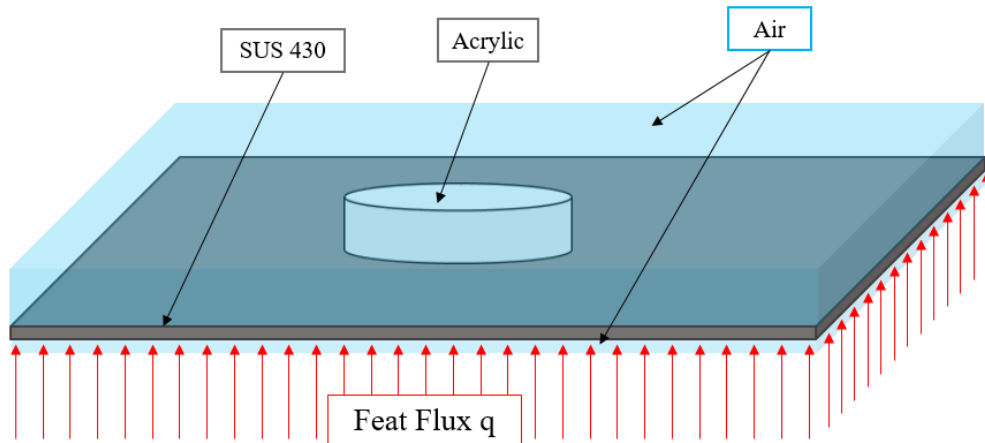


図 3-13 ステップ加熱時の FEM 解析モデル

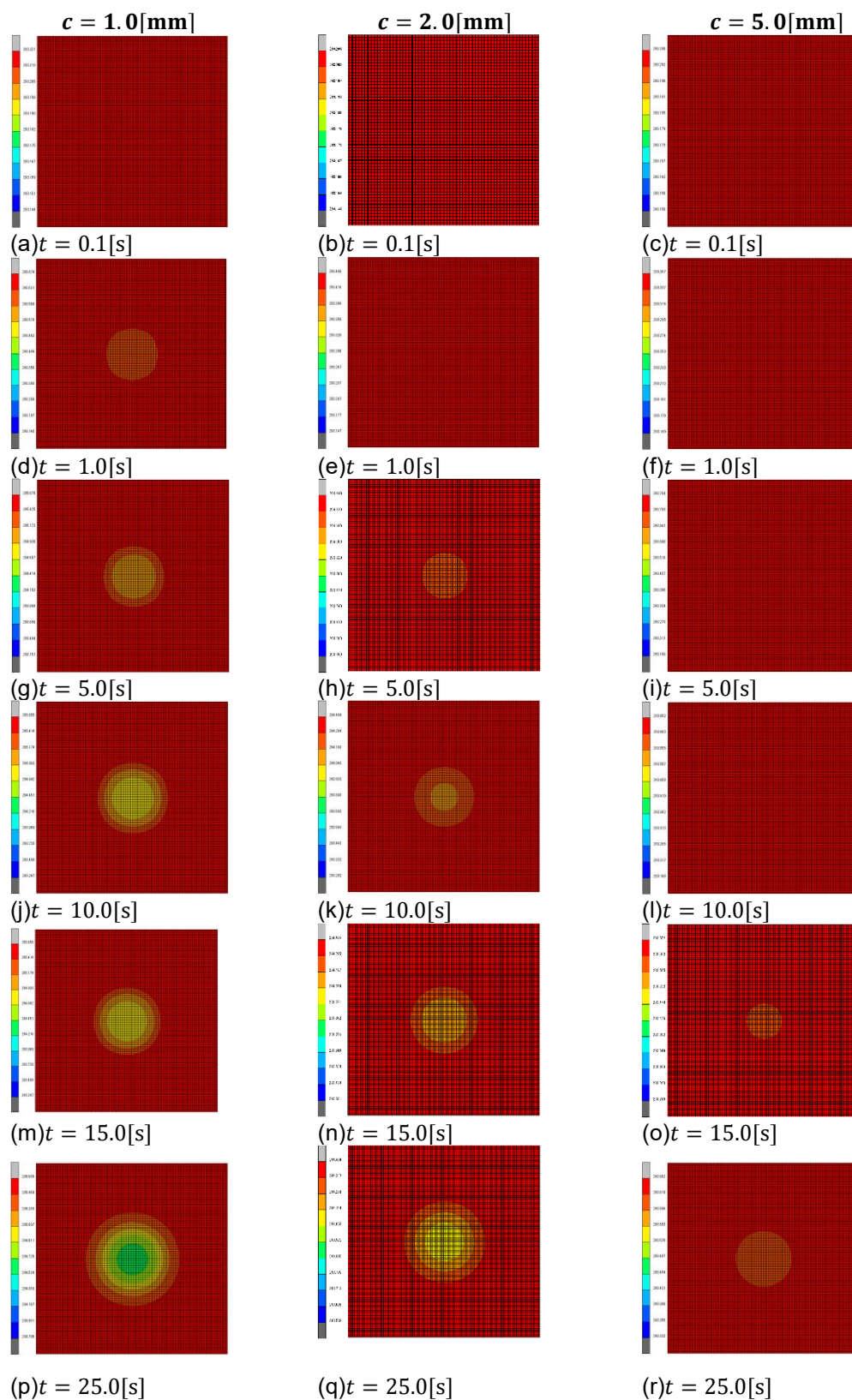


図 3-14 ステップ加熱時の鋼板表面の温度分布変化

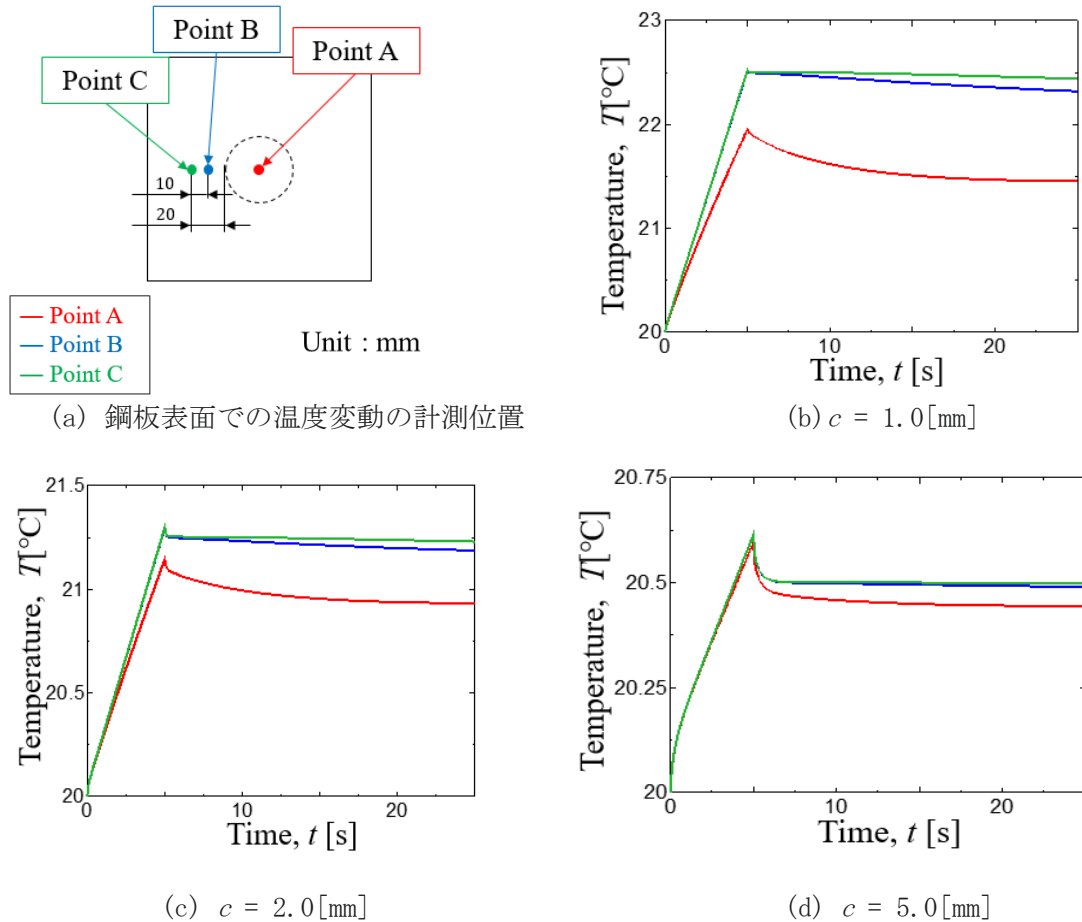


図 3-15 ステップ加熱時の温度時系列変化

○パルス加熱

瞬間的に高い熱負荷を与えるパルス加熱の温度変動を FEM 解析するため、付着物の裏面の鋼板表面に $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ の初期温度境界条件を与え、その他の節点の初期温度を $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ として、その後の熱伝導解析を行った。解析時間は 20 秒間とした。板厚 c を 1.0、2.0 及び 5.0 mm の 3 種類として解析を行った。鋼板表面の温度分布の変化を図 3-16 に示す。図 3-16 より、ステップ加熱時と同様に、付着物が存在する位置で温度が低い領域が時間とともに現れていることがわかる。鋼板表面での温度時系列変化を図 3-17 に示す。図 3-17 より、付着物が存在する位置では、付着物がない 2 点と比較して冷却過程において温度の低下速度が大きく、ステップ加熱と同様の傾向が現れていることがわかる。板厚が大きくなるほど、付着物が存在する位置と付着物がない位置との温度差が小さい。

以上の FFEM 解析により、ステップ加熱及びパルス加熱のいずれにおいても加熱及び測定面の裏面に存在する付着物の影響により、冷却過程において温度の低下速度が大きくなるという違いが現れることが明らかとなった。

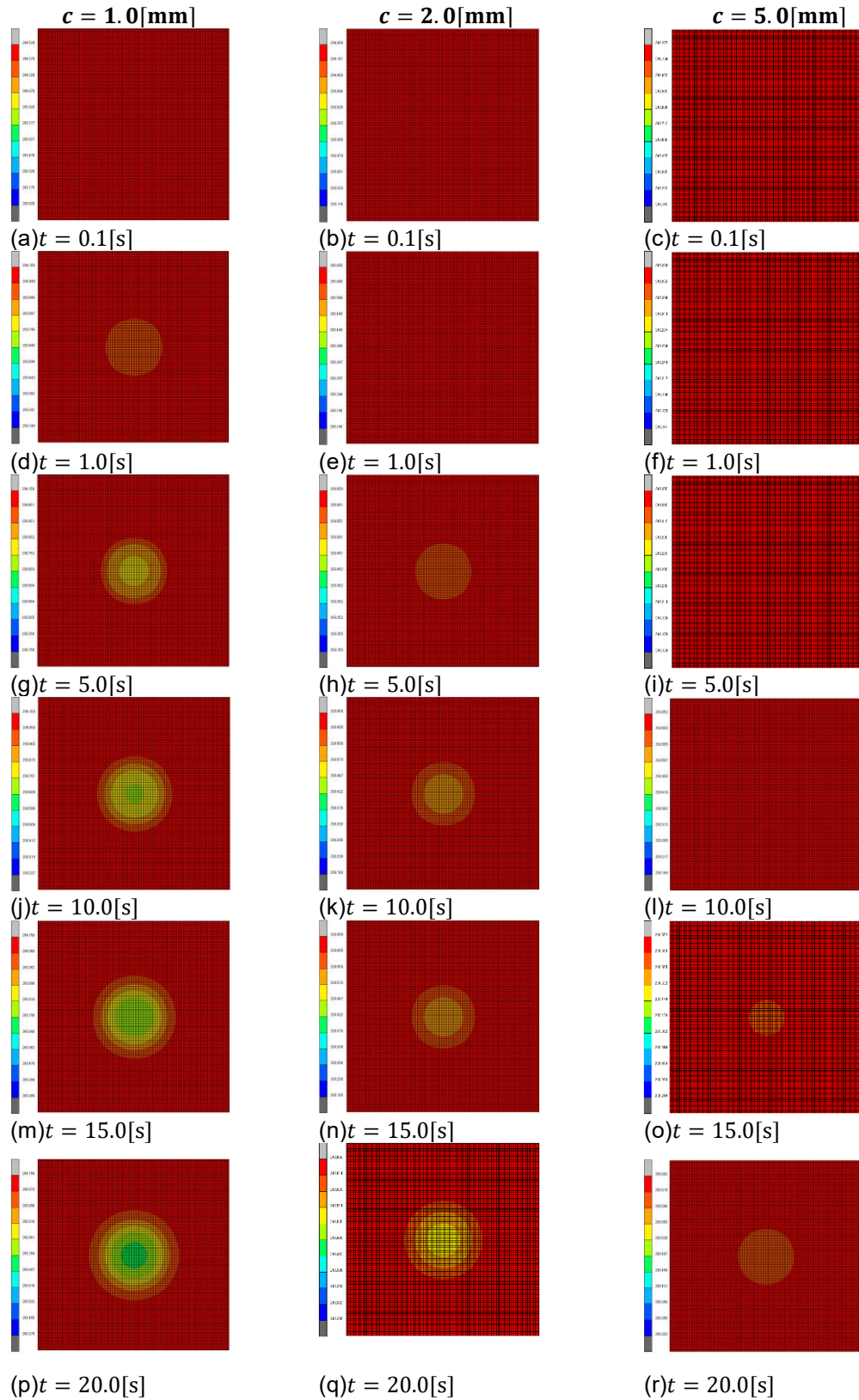


図 3-16 パルス加熱時の鋼板表面の温度分布変化

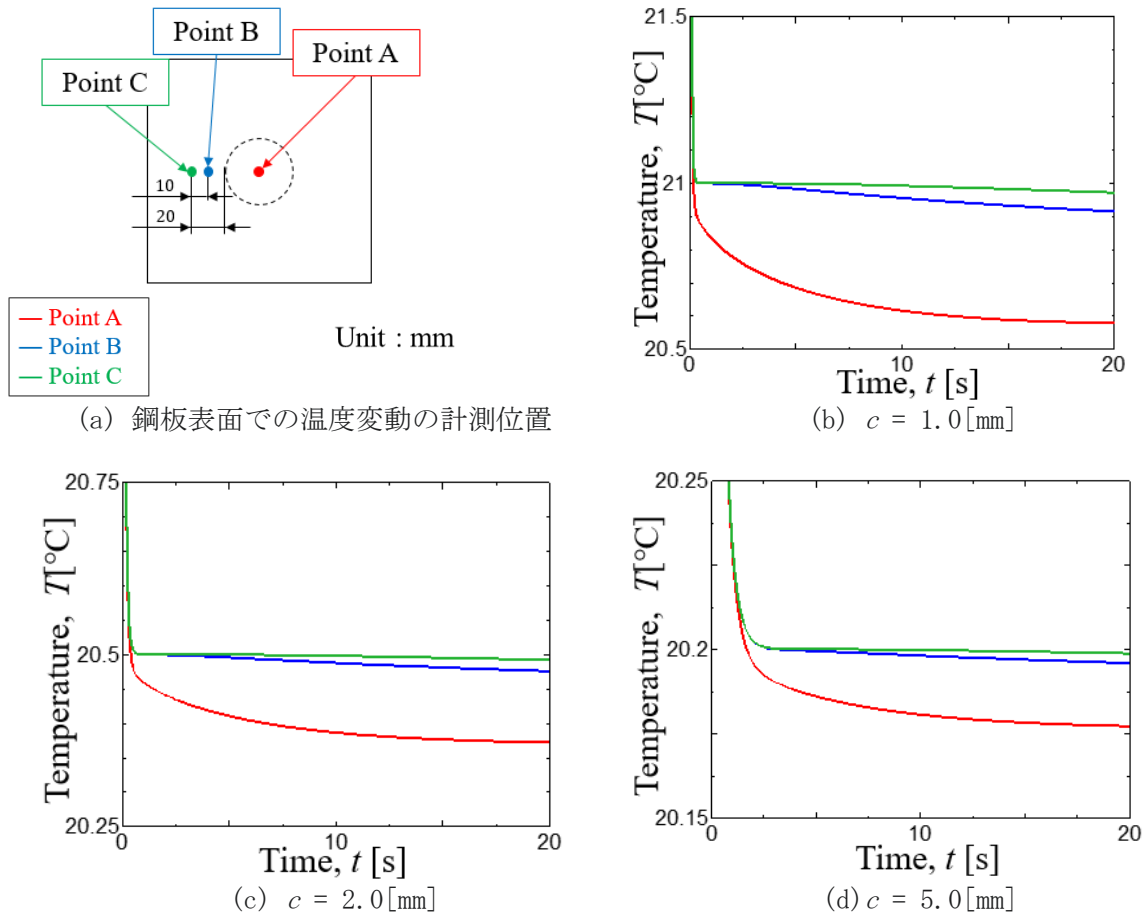


図 3-17 パルス加熱時の温度時系列変化

(5) 配管内部の付着物を模擬した試験体に対する実験的検討

・試験サンプル

原子炉配管の裏面に付着物が存在する状態を簡略的に模擬するため、ステンレス平板の裏面にエポキシ樹脂のパテを付着させた試験体を製作し、アクティブ赤外線サーモグラフィ法による付着部検出の可能性を検討した。

実験に用いた試験体の可視画像を図 3-18 に、試験体の形状及び寸法を図 3-19 にそれぞれ示す。SUS430 ステンレス平板の中央に付着物を模擬したアクリル樹脂製のパテを接着させた。平板の板厚は、1.0 mm 及び 2.0 mm の 2 種類とした。本実験では、より理想に近い放射率での計測結果を得るため、各試験体につや消し黒色塗料を塗布した状態で計測を行った。

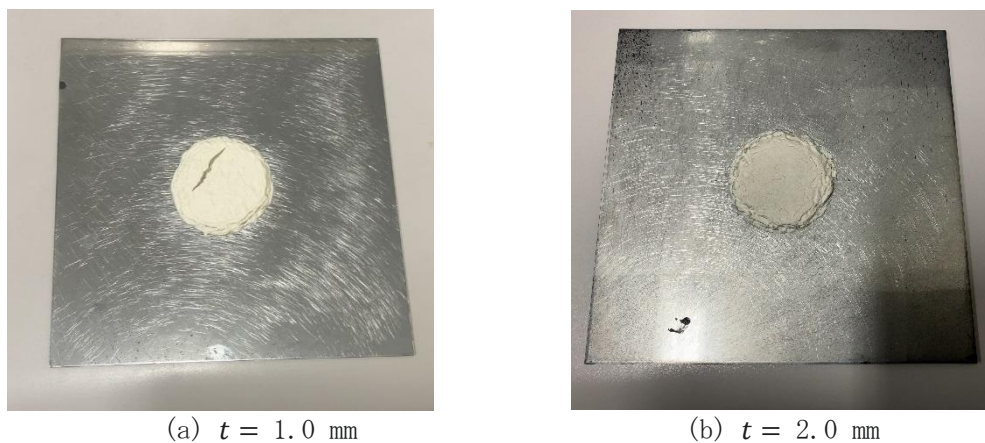


図 3-18 付着物試験体の可視画像

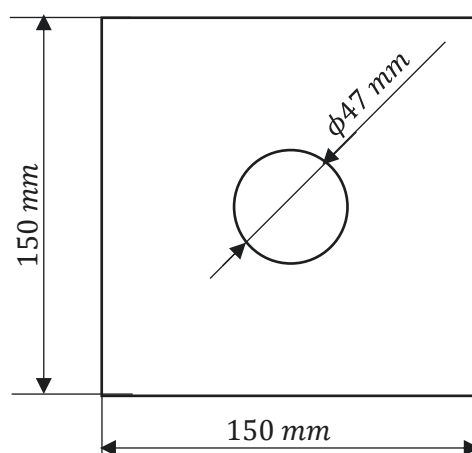


図 3-19 付着物試験体の形状寸法

・実験結果

○赤外線画像による評価

厚さ 1 mm の試験体に対して、12,800 J のパルス加熱を行った場合に得られた、加熱後の冷却過程での表面温度変動を図 3-20 に示す。図 3-20 より付着物ありの部分での温度低下の傾向は付着物なしの部分のそれらとは異なっていることがわかる。しかしながら、付着物なしの部分での温度の絶対値の違い（温度むら）が大きくなっている。このため、温度分布画像で表示すると図 3-21(a)に示すように付着物の検出に至る画像を得ることができなかった。この傾向は、図 3-21(b)にあわせて示した板厚 2 mm の試験体の場合も同様であった。

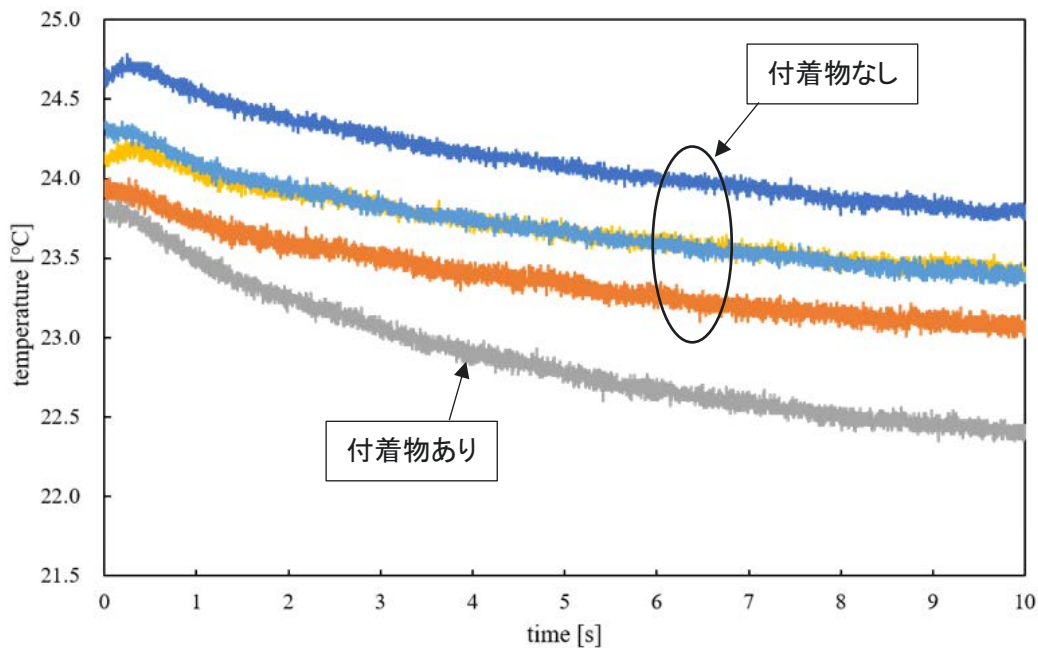
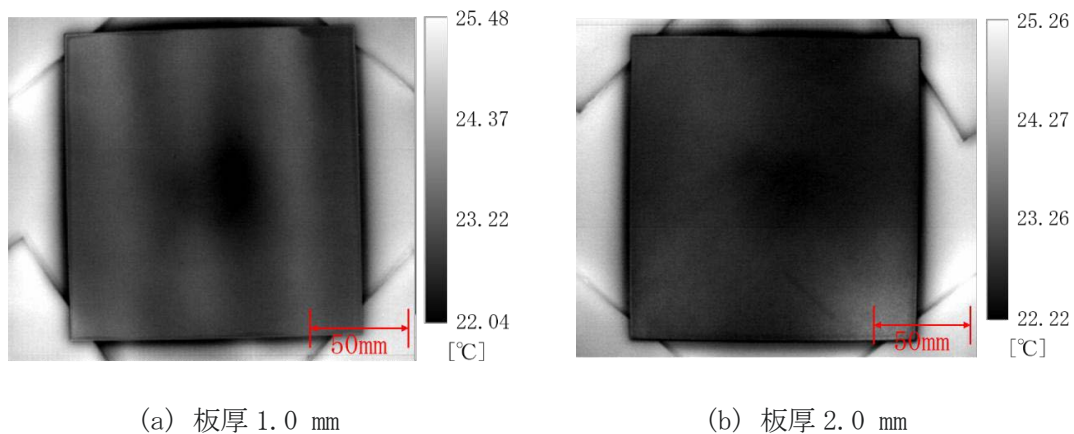


図 3-20 パルス加熱後の冷却過程での表面温度変動



(a) 板厚 1.0 mm

(b) 板厚 2.0 mm

図 3-21 パルス加熱後の冷却過程での温度分布画像

次に、厚さ 1 mm の試験体に対して、投光器により 20 秒間加熱した後の冷却過程において得られた表面温度変動を図 3-22 に示す。図 3-22 より、付着物ありの部分と付着物なしの部分で大きな温度差が生じていることがわかる。また、ステップ加熱の終了から 20 秒後に得られた温度分布画像を図 3-23 に示す。図 3-23 より、厚さ 1 mm の試験体において、付着物の有無によって温度差が生じており、付着部の存在を検出できていることがわかる。また、厚さ 2 mm の試験体においては、どちらの画像でも付着物の有無による温度差が生じているが、投光器による加熱時間が 20 秒の場合と比べて、40 秒の場合のほうが付着部と非付着部のコントラストが大きくなっており、付着部を明瞭に検出できていることがわかる。加熱時間が長いほど伝熱量が大きくなり、付着物の有無による温度差が大きくなったと考えられる。また、図 3-23(a) と図 3-23(b) を比較すると、板厚 2 mm の試験体のほうが付着部の検出性が低下していることがわかる。その原因として、板厚による熱容量の大きさの違いにより付着物の有無による温度差が小さくなったことが考えられる。

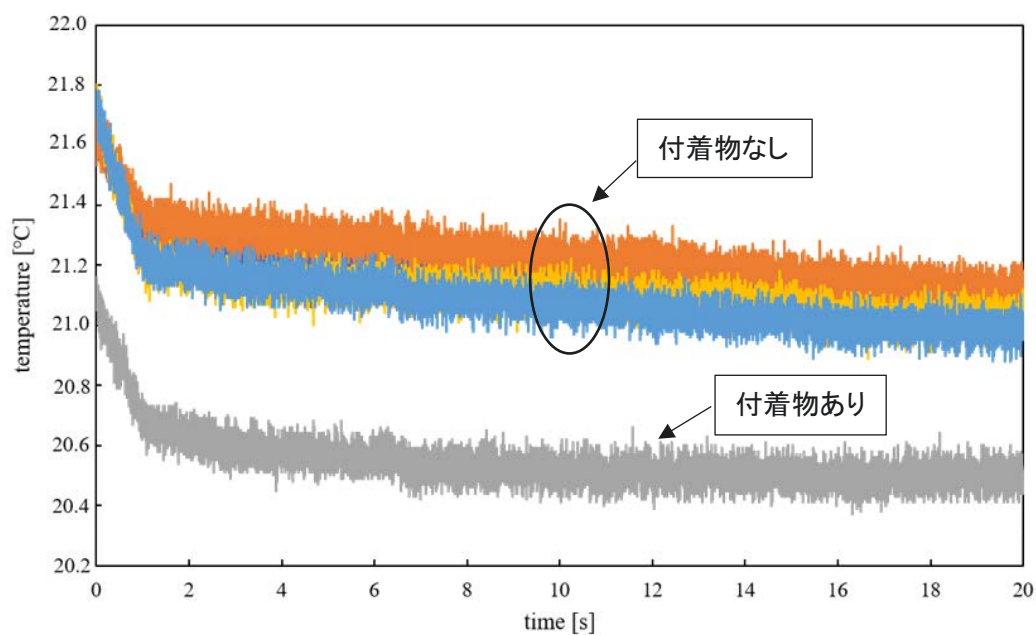
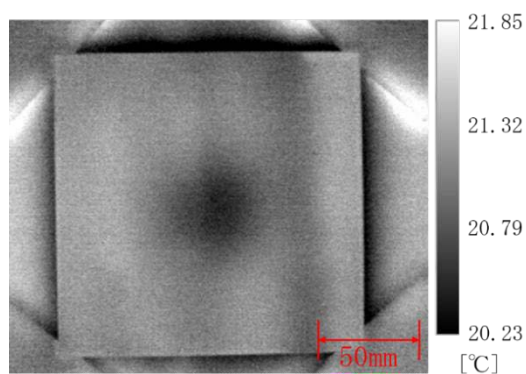
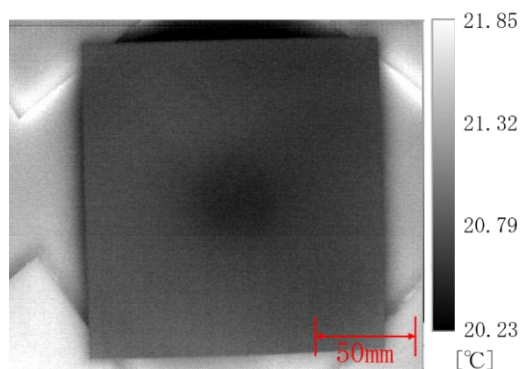


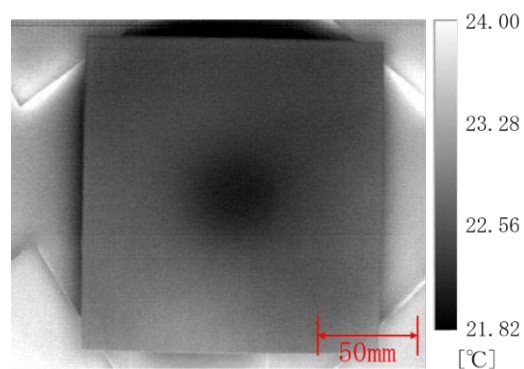
図 3-22 ステップ加熱後の冷却過程において得られた表面温度変動



(a) 板厚 1.0 mm (加熱時間 20 秒)



(b) 板厚 2.0 mm (加熱時間 20 秒)



(c) 板厚 2.0 mm (加熱時間 40 秒)

図 3-23 ステップ加熱の終了から 20 秒後に得られた温度分布画像

○ フーリエ解析による評価

前項で得られた測定結果に対して、フーリエ解析による評価を行った。温度変動データに対するフーリエ解析では、加熱後の冷却過程での温度低下挙動をフーリエ級数係数及び位相値のパラメータを用いて表現する。前項の赤外線画像による評価で示したように、付着物の有無の影響によって温度低下速度が異なる場合では、級数係数の大きさ、または位相値の違いとして表れる。

厚さ 2 mm の試験体に対するパルス加熱時に得られた温度計測における FFT 解析による位相値分布を図 3-24 に示す。ここで、スペクトル強度が最も大きな周波数における位相値を用いており、付着物の有無を比較するために、式(5)のように付着物がない位置を参照点とした位相差を算出した。

$$\Delta\phi = \phi_n - \phi_{n,\text{ref}} \quad \text{式(7)}$$

図 3-24 より、付着物が存在する領域において、高い位相差が現れていることがわかる。これは、付着物の熱伝率が空気層よりも大きいため、温度低下の速度が大きいことを示唆しているものと考えられる。

次に、厚さ 2 mm の試験体に対するステップ加熱時に得られた温度計測における FFT 解析による位相値分布を図 3-25 に示す。図 3-25 より、ステップ加熱と同様に、付着物が存在する領域において高い位相差が現れていることがわかる。試験体端部で大きな位相差を示している。これは試験片端部からの熱拡散が生じていることを示唆しているものと考えられる。

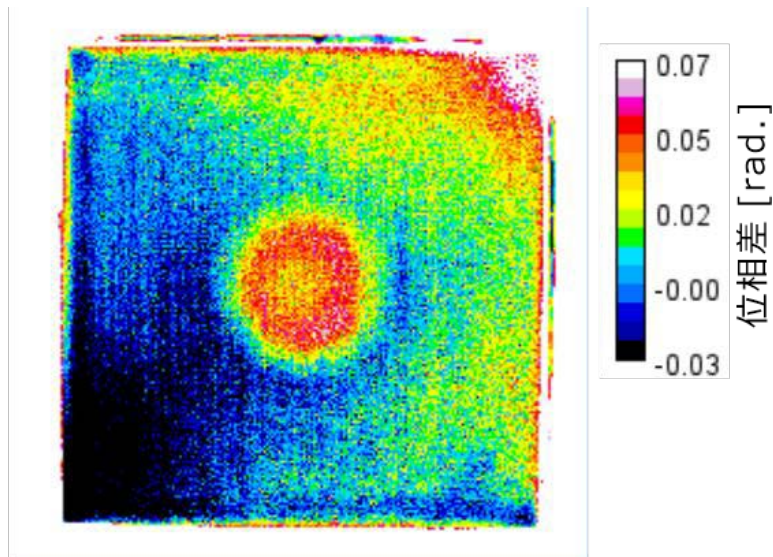


図 3-24 フラッシュ加熱時の位相差分布（板厚 2 mm 試験体）

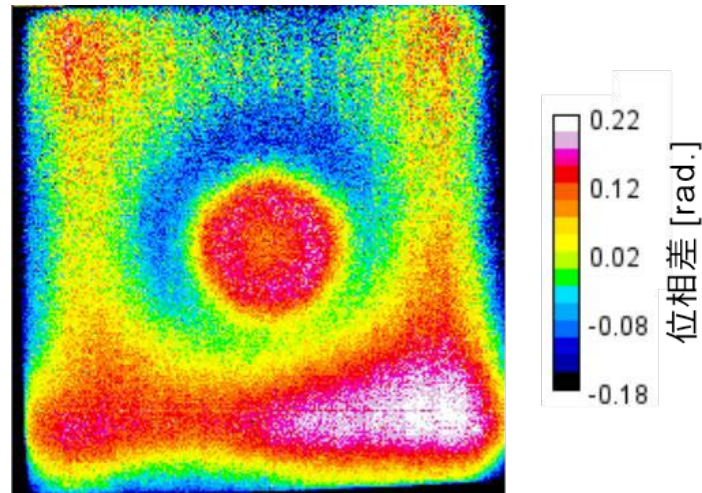


図 3-25 ステップ加熱時の位相差分布（板厚 2 mm 試験体）

○ PCA 処理による評価

試験体の付着部をより明瞭に検出するために、赤外線画像に対して PCA 処理を施した。付着部周りの赤外線画像データをトリミングし、加熱終了から 5 秒間（1,915 フレーム）を PCA 処理区間として PCA 処理を行った。赤外線画像のトリミング範囲を図 3-26 に示す。ただし、パルス加熱実験については、加熱直後の赤外線画像データにはランプからの光の反射によって赤外線センサの計測範囲を超えた飽和値が含まれているため、この飽和値がなくなったフレームから PCA 処理を行った。パルス加熱及びステップ加熱の赤外線画像から得られた PCA 処理結果のうち、最も明瞭に付着物を検出できた EOF 画像を、図 3-27 及び図 3-28 にそれぞれ示す。

図 3-27 より、パルス加熱の赤外線画像では確認することができなかった付着部の形状が、PCA 処理を施すことによって検出できていることがわかる。特に、図 3-18(a)に示した厚さ 1 mm の試験体では、付着物のパテの硬化時に割れが生じているが、図 3-27(a)の赤丸部に同一の形状が確認できる。これは付着物とその割れによる熱伝達の過程の違いを示しており、PCA 処理により付着物の形状及び付着物に内在する欠陥も検知できると考えられる。

図 3-28 より、投光器によるステップ加熱実験の場合にも、PCA 処理を施すことによって赤外線画像よりも明瞭に付着部を検出できていることがわかる。図 3-28(a)より、EOF 画像で付着物の割れは確認できなかった。この理由については、今後実験を重ねていくことで検討する予定である。また、試験体の板厚を大きくした場合には、付着部の検出性が低下しており、前述のパルス加熱の場合と同様の原因が考えられる。

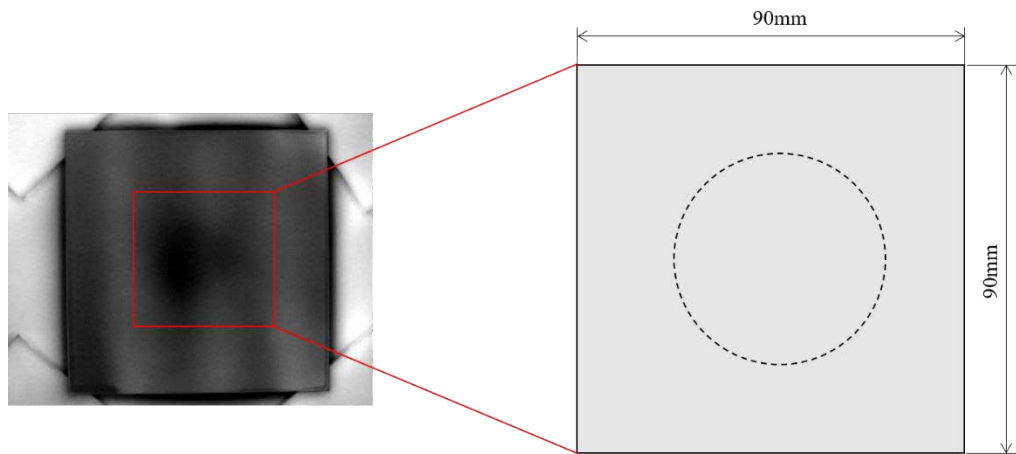
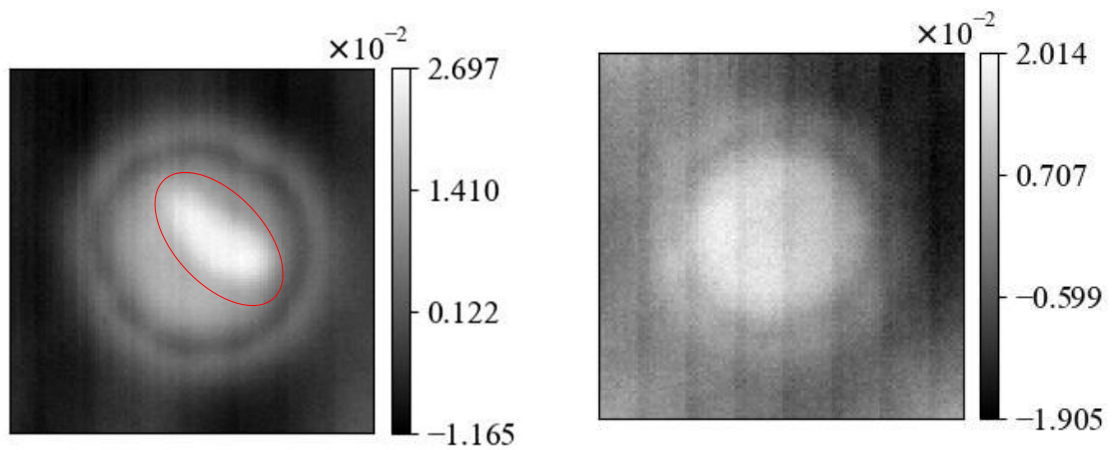


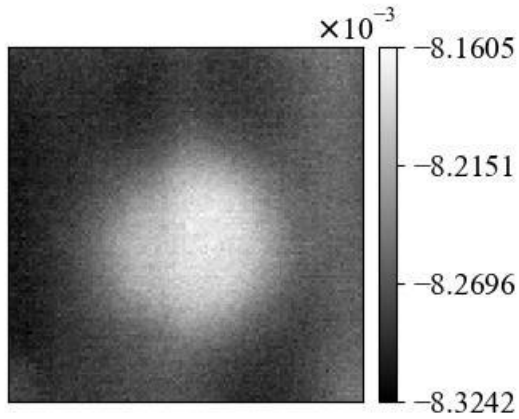
図 3-26 PCA 処理のための赤外線画像のトリミング範囲



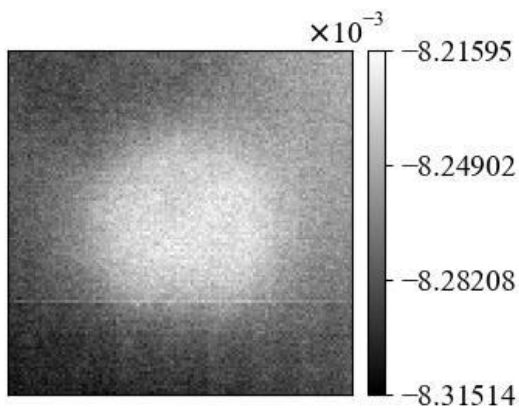
(a) 板厚 1.0 mm、EOF2

(b) 板厚 2.0 mm、EOF3

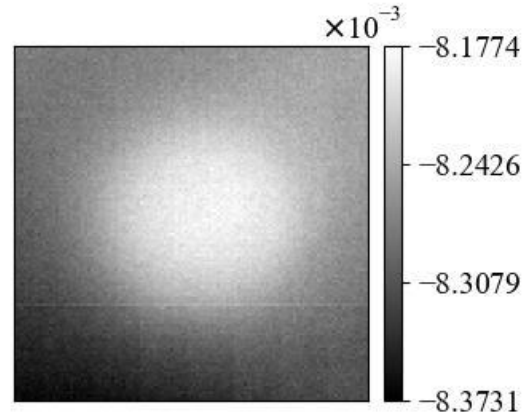
図 3-27 パルス加熱後のデータに対する PCA 解析結果



(a) 板厚 1.0 mm (加熱時間 20 秒)、EOF1



(b) 板厚 2.0 mm (加熱時間 20 秒)、EOF1



(c) 板厚 2.0 mm (加熱時間 40 秒)、EOF1

図 3-28 ステップ加熱後のデータに対する PCA 解析結果

(6) 配管試験体の製作

原子炉配管内部の滞留物や配管裏面の付着物を遠隔から非破壊・非接触に検出できることを実験的に確認するための模擬配管サンプルを製作した。製作した模擬配管の外観及び詳細仕様及び令和 6 年度の計測実施計画の概要を記したものを図 3-29 に示す。



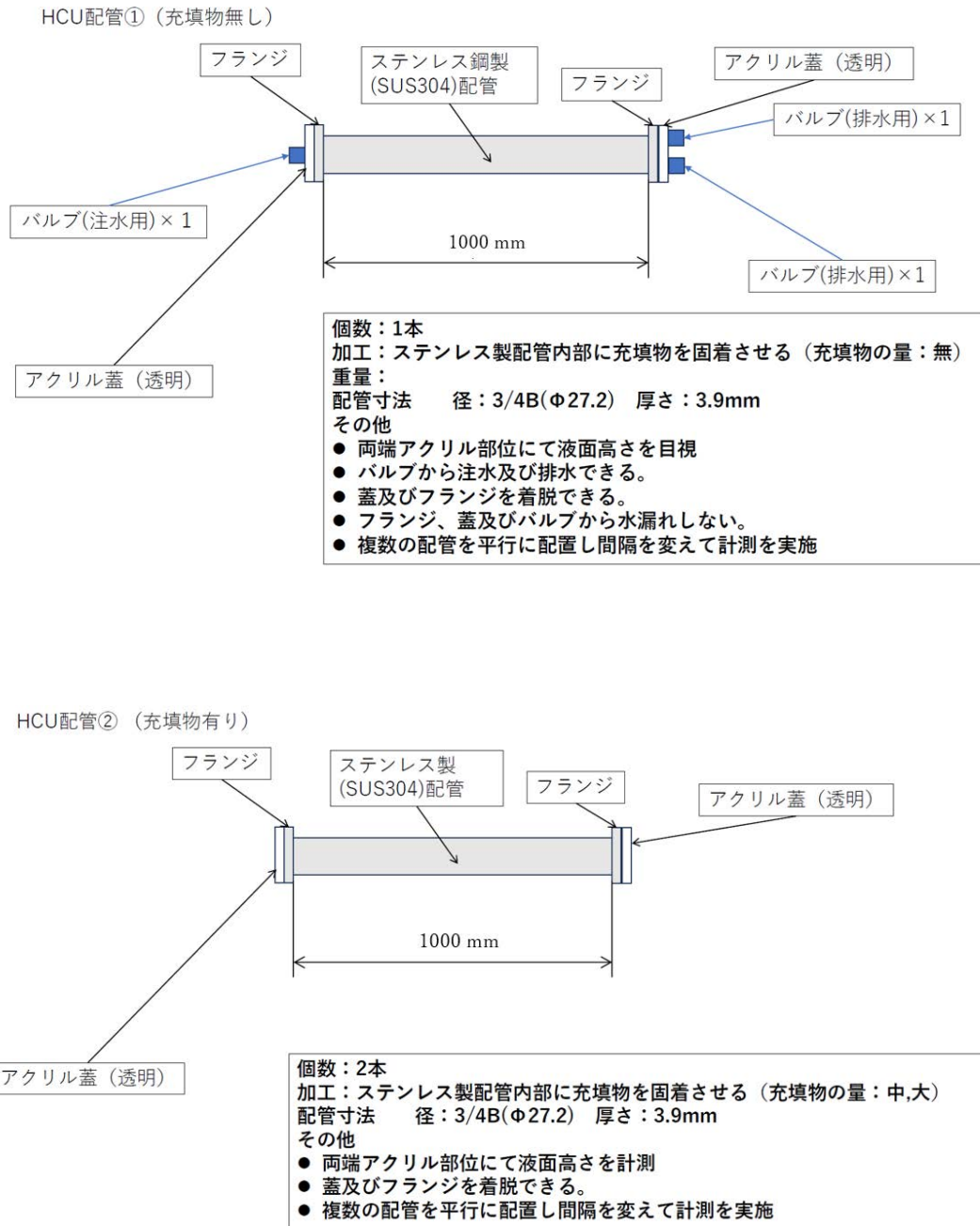
全体



注水時 (HCU配管③)

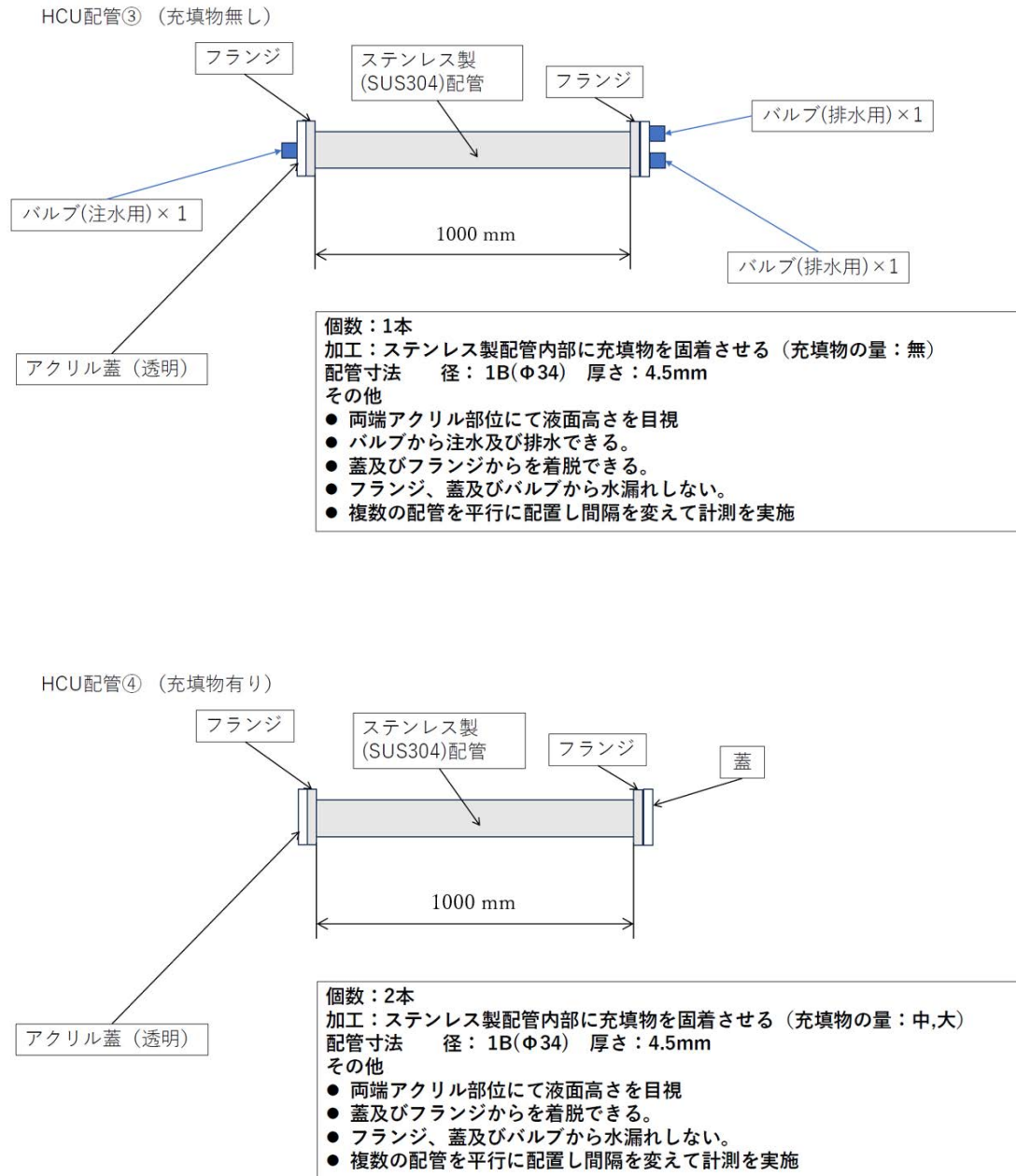
(a) 試験体の外観

図 3-29 模擬配管サンプル (1/3)



(b) 試験体の詳細仕様 (1/2)

図 3-29 模擬配管サンプル (2/3)



(b) 試験体の詳細仕様 (2/2)

図 3-29 模擬配管サンプル (3/3)

(7) まとめ

時系列非定常温度変動の分布を高速かつ高精度に計測できる赤外線サーモグラフィとそのデータ解析を可能とする、図 3-30 のようなアクティブサーモグラフィ計測システムを構築した。データ解析手法として、フーリエ解析による温度変動波形の位相解析及び PCA 処理による温度変動波形解析を実施し、配管裏面状態推定の可能性について検討した。数値解析的に得られた時系列非定常温度分布データをもとに配管内部状態の推定を行う数値シミュレーションを行い、アクティブサーモグラフィ法の配管検査への適用性を検討した。また、実使用環境を考慮して、遠隔から非接触に対象物に熱負荷を与えることができる加熱システムを試作し基礎実験を行った。基礎実験としては、原子炉配管に付着物が内在した状態を模擬して、ステンレス板の裏面にパテを付着させた試験体を製作し、試験体に対してパルス加熱及びステップ加熱を行った場合の時系列温度変動データをもとに付着物の位置や形状を同定できることを確認した。さらに、得られた温度変動データに対して波形解析処理を適用することにより、付着物の検出精度が向上することが確認できた。

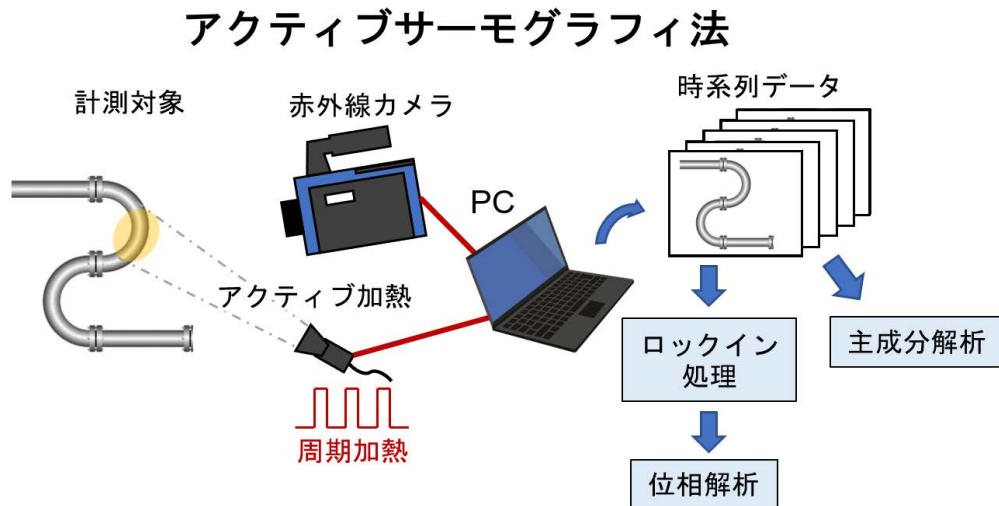


図 3-30 アクティブサーモグラフィ計測システム

3.1.3 水素ガスの簡易検知方法の調査（再委託先：東北大学）

(1) はじめに

本項目では、水素ガスを簡易的に検出する方法について研究開発を行う。水素ガスは空気に比べて密度が小さく「軽い」ため、配管内の上部、逆 U 字になっているところなどにたまりやすい。これらの配管内部に水素ガスの存在があれば、爆発の可能性が上がり、廃炉作業の大きな障壁となる。そのため、水素の有無を検出する必要がある。

一般的な水素検出としては、次のような方法が考えられる。

- (ア) 触媒効果を持つ白金やパラジウムなどと接触して生じる燃焼熱の変化を利用する方法（接触燃焼方式）
- (イ) 水素ガスの熱伝導度が高いことを利用して、この熱伝導率を計測する方法（気体熱伝導方式）
- (ウ) 金属酸化物半導体の表面での、水素ガスの吸着による電気伝導度の変化を利用（半導体方式）
- (エ) 酸素センサと似たような仕組みで、基準電極として個体電極を用い、水素ガスへの感応材料として固体電解質を使用し、発生した電位差で検知する方法（個体電解質方式）

しかし、これらの方法では高線量率場では半導体などが動作しない、せまい配管などで機材が入らない、液体を使うために液漏れの心配があるなどの問題点がある。そこで今回、後述のとおり、水素ガスに反応して変色するテープを用いてその変色をモニタすることで、配管中の水素濃度を検出する簡便な方法での水素検出法について開発を進めた。そして、その実現可能性を探った。

(2) 環境構築

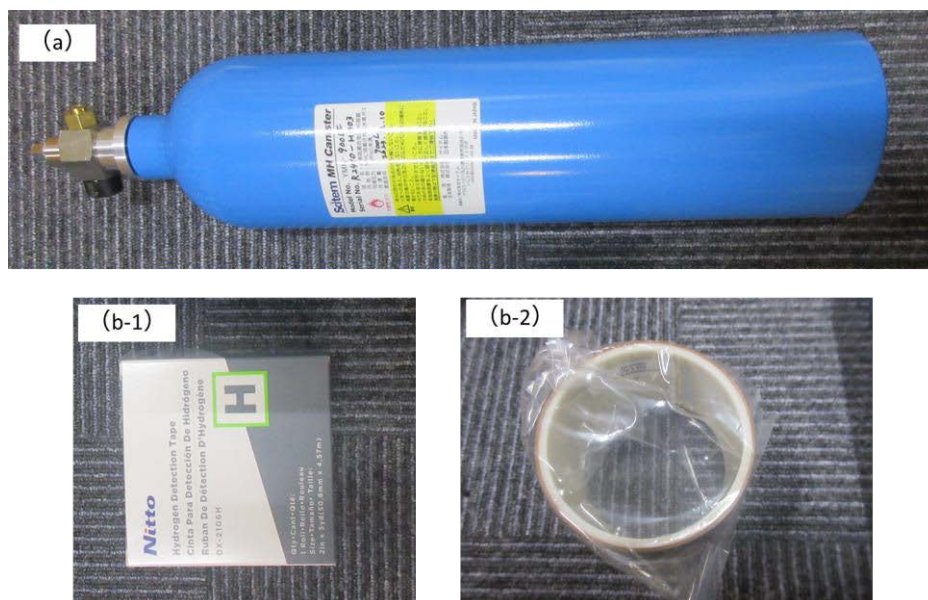
水素ガスに反応するテープを用いた簡易的な水素ガス検出器について準備を進め、図 3-31 (a) のように水素ガス発生のためのボンベ（水素吸蔵合金キャニスター）や水素ガスに反応して変色するテープ（水素検知テープ）、配管を簡易的に再現するための塩化ビニル管などを購入した。なお、図 3-31 (b-1) (b-2) に当該テープ（日東電工（株）日東、水素検知テープ DX-2106H）の写真を載せる。これらの部材を用いて試験環境を構築した。

(3) 水素照射による水素検知テープの応答試験

構築したセットアップを用いながら、まずはテープの一部に水素を吹きかけて、その際の色の変化について観察を行った。照射した水素の量は、ボンベからの水素を調整弁を用いて空間内の圧力を特定の気圧にして、空気との混合ガスを合成した（混合比は、水素 100% から 10% 程度とした）。そして、この混合ガスをチューブを使い水素検出テープに吹きかける（暴露、照射した）。このときの流量はほぼなく、テープの一部分がチューブの内径分程度水素に照射されている状況である。なお、水素暴露時間は 1 分程度とし、実験環境温度は 25℃とした。

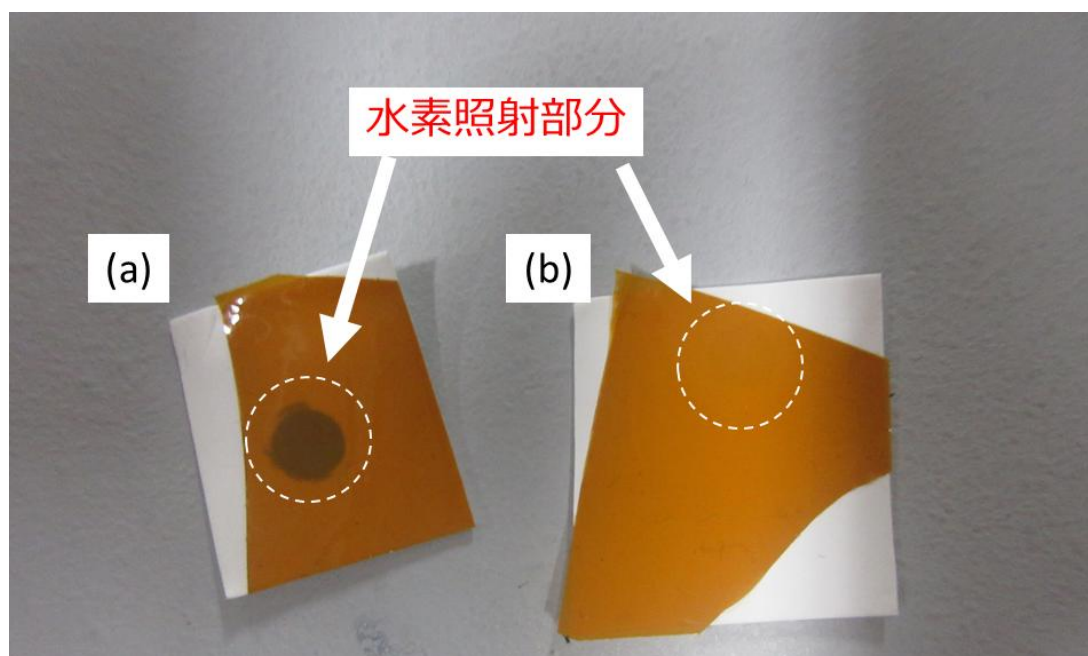
図 3-32 には、照射した後の変化の様子がわかる写真を載せる。トータルの照射水素量はたまかな値であるが、1 気圧換算で 10 及び 1 mL 分程度とした。1 mL 分のときは、水素 10%、空気 90% の混合ガスの照射とした。写真ではわかりづらいものの、1 mL 分（1 気圧）でも色の変化は目視で判別できた。また、これらの反射スペクトルは図 3-33 のようになり、水素照射とその量に応じて反射スペクトルとその反射率が変化していることがわかった。このことより、波長を測定することで濃度の推定が行えることが示唆できた。また、

この結果から最低限 1 mL 分の水素（大気圧）でも反応があり、作業環境下で確実に透過率変化があることを前提により保守的に見積もっても、10 mL 分程度が下限値であるといえた。今後は、さらなる仔細や暗所・配管条件下での評価を行う。



(a) 水素ガス供給ポンプ（水素吸蔵合金キャニスター）、(b-1) (b-2) 水素検知テープ

図 3-31 水素ガスの簡易検知方法調査のために令和 5 年度購入した物品の例の写真



点線円内に照射：(a) 約 10 mL 分の水素照射、(b) 約 1 mL 分の水素照射

図 3-32 水素ガス検知テープに水素ガスを照射したときの写真

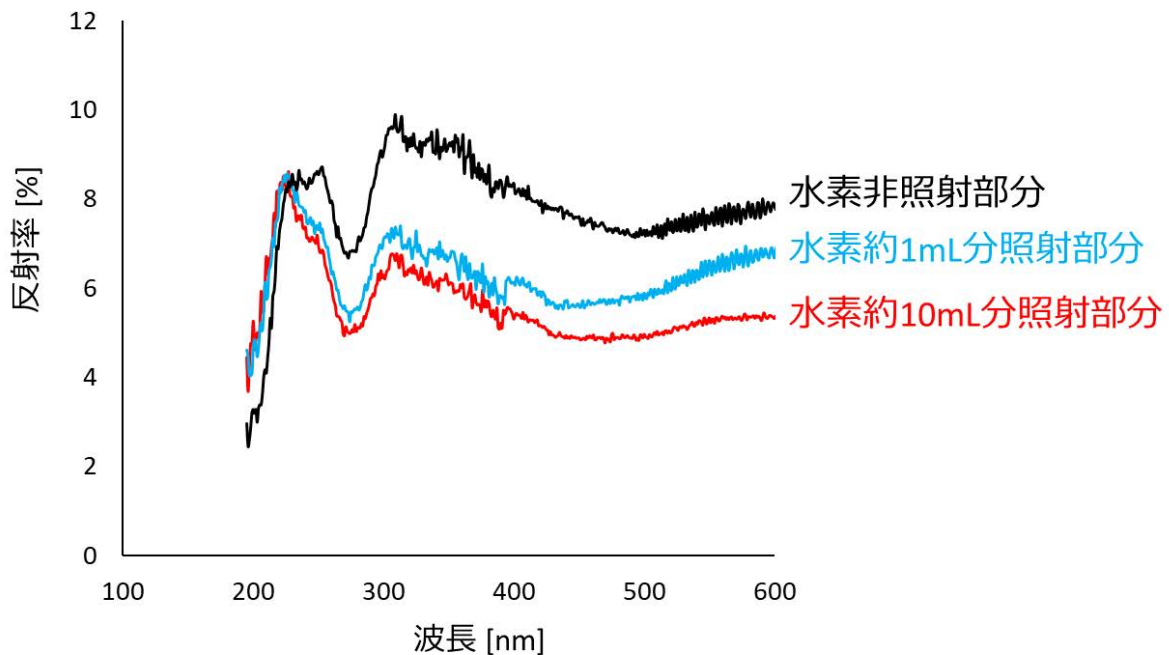


図 3-33 水素照射有無による水素ガス検知テープの反射率の変化

(4) まとめ

本研究では、配管内の水素の存在を簡便に確認するための方法について調査を進めた。その結果、水素に反応して変色するテープとその変色を観察する手法を用いて、水素の有無について確認することが可能であることがわかった。

後者の変色を観察する方法は、光ファイバーを用いて実証を行うが、反射率等の測定ではないものの、これまでに実際の 1F 内にて光ファイバーを用いた分光測定の実験はあり、当該簡易水素検出システムの構築は、問題なく令和 6 年度以降に構築できると期待できる。

そこで、令和 5 年度の結果を受けて、令和 5 年度に購入した光ファイバーと令和 6 年度に購入予定の簡易分光器などを用いて、より現場に近い環境で水素検出の下限値などについて見積もっていく。なお、本報告書では、約 1 分の水素照射（水素暴露）時間での結果を掲載したが、当該時間の最適化（概ね 1～20 分程度の範囲を想定）についても現場の意見等を伺いながら検討する。

3.2 配管内放射線イメージング技術開発

3.2.1 低エネルギー γ 線検出器の開発（再委託先：東北大学、埼玉大学、連携先：原子力機構）

(1) 低エネルギー測定用シンチレータの開発

^{241}Am から発せられる低エネルギー（59.5 keV）ガンマ線の検出を目指し、まずはシンチレータ単体と ^{241}Am 線源を使用した波高値スペクトル測定を行った。フッ化物シンチレータと同等の低密度・低実効原子番号を有するリチウム・カルシウム・シリケート（LCS）シンチレータの結晶を育成し、単結晶試験片を製作した。小型 X 線源（AMPTEK 製、Mini-X）を用いて励起したところ、紫外～青色領域で LCS シンチレータが発光することを確認した。当該領域は、光電子増倍管の波長感度とマッチングがよいため、光電子増倍管（浜松ホトニクス製、R7600U）と ^{241}Am 線源を用いて LCS シンチレータの波高値スペクトルを測定した（図 3-34）。 ^{241}Am 線源を用いて測定した LCS シンチレータの波高値スペクトルは、LCS を ^{241}Am と密着させてアルファ線の信号を測定した場合と、LCS シンチレータと ^{241}Am 線源の間に鉛板を置いて低エネルギーガンマ線の信号を測定した場合の波高値スペクトルである。データの取得に成功し、得られたデータをもとに実用的なシンチレータの選定を行った。

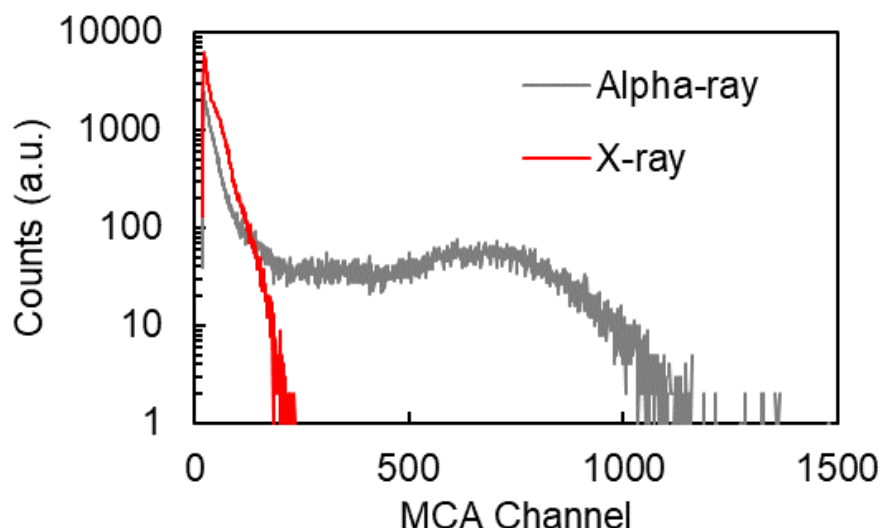


図 3-34 ^{241}Am 線源を用いて測定した LCS シンチレータの波高値スペクトル

(2) 弁別型低エネルギー検出器の試作

^{137}Cs 等のバックグラウンド γ 線下で、 ^{241}Am から放出される 59.5 keV の γ 線を選択的に検出するための γ 線検出器を開発した。

エネルギーが低い γ 線は、検出器表面の浅い領域にエネルギーを落とす。それに対してエネルギーが高い γ 線は、検出器の深い領域までエネルギーを落とす。したがって、浅い領域を検出するシンチレータと深い領域を検出するシンチレータの積層構造にすることにより、 ^{241}Am の γ 線を検出できると考えた。また、シンチレータの密度が高ければ高いほど高エネルギーの γ 線の検出効率が上がる。また、シンチレータが厚いほど γ 線の検出効率が上がる。

そこで、シンチレータを積層した γ 線検出器を開発した。検出器のシンチレータとして、薄い YAP シンチレータと BGO シンチレータで構成した。YAP シンチレータを 1 層目とし、2 層目にアクリルライトシンチレータ BGO シンチレータを重ねた。BGO シンチレータの底面を 2 インチ光電子増倍管に光学結合した。光電子増倍管として、浜松ホトニクス製の H7195 を採用した。光電子増倍管に印加する高電圧を -1,500 V に設定した。

図 3-35 に低エネルギー γ 線検出器の概念図を示す。光電子増倍管からの出力アナログ信号を CAEN 製デジタイザ (DT5730s) に入力した。一つ一つのイベントの波形情報を PC に収集した。図 3-36 に測定システム (低エネルギー γ 線検出器) の写真を示す。また、図 3-37 に低エネルギー γ 線検出器を用いた線源測定の写真を示す。

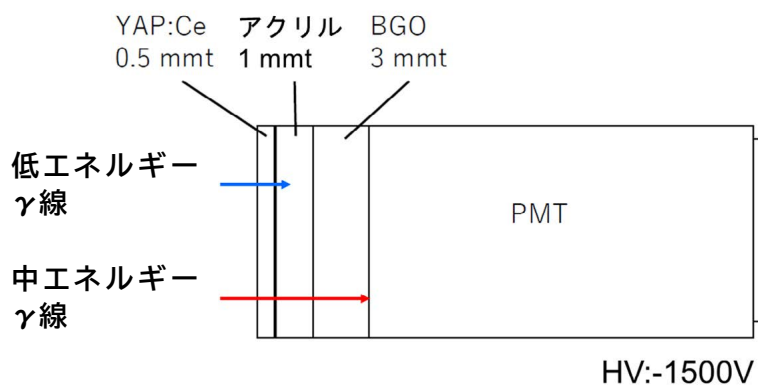


図 3-35 低エネルギー γ 線検出器の概念図



図 3-36 低エネルギー γ 線検出器の写真



図 3-37 低エネルギー γ 線検出器を用いた線源測定の写真

(3) モンテカルロシミュレーション計算

検出器の実現性を確認するため、モンテカルロシミュレーションによる計算を行った。計算には Geant4 というシミュレーションツールキットを使用した。検出器と同様 YAP:Ce シンチレータ、アクリル、BGO シンチレータで構成した。シンチレータの厚みは、実際の検出器と同様、YAP:Ce シンチレータが 0.5 mm、アクリルが 1.0 mm、BGO シンチレータが 3.0 mm とした。図 3-38 にシミュレーションで再現した計算体系を示す。二つのシンチレータである 1 層目：YAP:Ce と 2 層目：BGO それぞれのエネルギー付与を 1 入射粒子ごとにそれぞれ計算した。 γ 線入射エネルギーは、それぞれ 59.5 keV (^{241}Am の γ 線) 及び 662 keV (^{137}Cs の γ 線) とした。ヒストリー数は、それぞれ 10^8 で計算を行った。なお、今回の計算では、エネルギー分解能は考慮していないが、別途エネルギー分解能を考慮した計算も実施した。

図 3-39 にシミュレーションで計算した γ 線の飛跡（緑色の線）を示す。図の左から右側に向かって並行ビームを入射している。59.5 keV の γ 線の場合、多数の γ 線が 1 層目（YAP:Ce シンチレータ）で停止していることがわかる。一方で、662 keV γ 線の場合、 γ 線が 2 層目のシンチレータ（BGO シンチレータ）まで到達し、透過していることがわかる。このように計算結果から、 γ 線のエネルギーによって深さ方向の到達距離が異なることがわかった。これにより、二つのシンチレータのエネルギー付与の比を確認することで、1 層目のエネルギー付与が大きい場合は低エネルギー γ 線（数十 keV）、2 層目のエネルギー付与が大きい場合は中エネルギー γ 線（数百 keV）と識別ができる可能性がある。

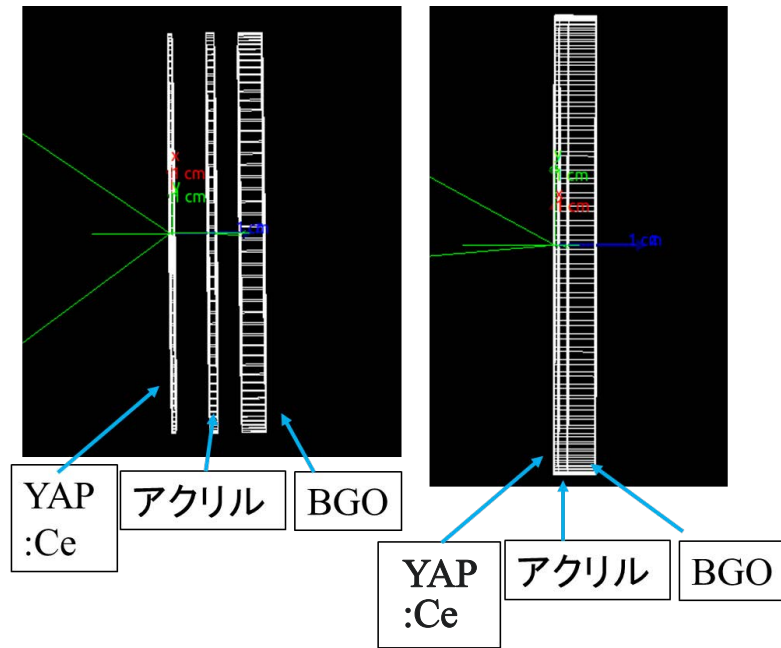


図 3-38 モンテカルロシミュレーションの計算体系

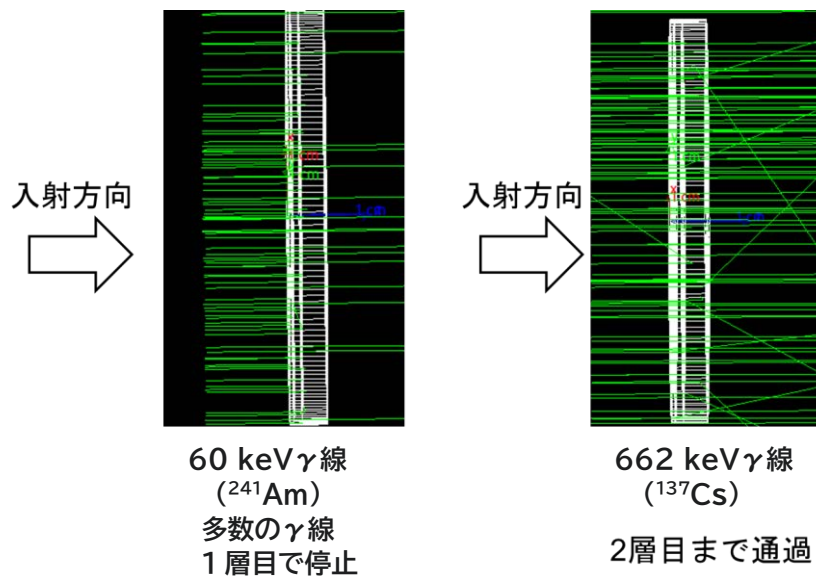
図 3-39 シミュレーションで計算した γ 線の飛跡（緑色の線）

図 3-40 にモンテカルロシミュレーションで計算した二つのシンチレータ（1 層目：YAP:Ce と 2 層目：BGO）それぞれのエネルギー付与の関係を示す。横軸が YAP:Ce シンチレータにおけるエネルギー付与、縦軸が BGO シンチレータにおけるエネルギー付与を示している。図をみてわかるとおり、59.5 keV の γ 線入射の場合、ほとんどのエネルギーを 1 層目（YAP:Ce）で付与していることがわかる。一方で、662 keV の γ 線入射の場合、1 層目（YAP:Ce）でもエネルギーを付与するが、同時に 2 層目（BGO）でもエネルギー付与していることがわかった。右の図の 0.662 MeV から斜めの線がみられるが、これは 0.662 MeV の γ 線が 1 層目：YAP:Ce と 2 層目：BGO にそれぞれエネルギーを分配して付与していることを示している。

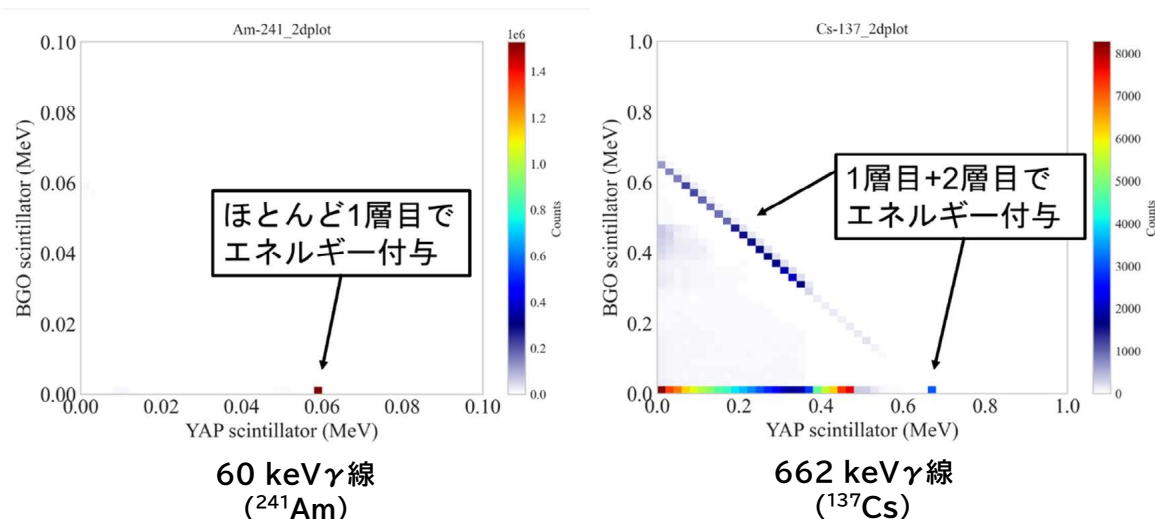


図 3-40 モンテカルロシミュレーションで計算した二つのシンチレータ
(1 層目 : YAP:Ce と 2 層目 : BGO) のエネルギー付与の関係

(4) 線源測定

シミュレーション計算により、1 層目のエネルギー付与が大きい場合は低エネルギー γ 線、2 層目のエネルギー付与が大きい場合は中エネルギー γ 線と識別ができる可能性を確認した。そこで、実際に検出器を構築し測定を行った。

1 層目と 2 層目のそれぞれのシンチレータで弁別測定ができることを確認するため、線源を用いた測定を行った。まず、 α 線源を用いて確認を行った。 α 線は必ず 1 層目のみにエネルギーを落とすため、弁別可能性を確認することができる。 α 線源を検出器の前面に置き測定を行った。 α 線源としては、コイン状の ^{241}Am 線源を使用した。図 3-41 に使用した線源の外観写真を示す。また、 ^{137}Cs γ 線源を同様に検出器前面に置き測定を行った。

図 3-42 にデジタイザで取得した出力電圧波形を示す。サンプリングレートは、500 MS/s であるため 2 nsec 間隔で電圧をサンプリングしている。まず、 α 線を入射させたとき 1 層目 (YAP:Ce) の速い信号を確認した。次に、 γ 線を入射した場合、1 層目 (YAP:Ce) の速い信号と 2 層目 (BGO) の遅い信号を確認した。また、速い信号と遅い信号が重なった同時イベントも確認することができた。

1 層目と 2 層目のシンチレータの弁別手法について示す。波形に対し、二つのゲートを設定し、二つのゲートの積分比を取ることで弁別を行った。積分比 = $\text{Gate1}/\text{Gate2}$ として計算した。この手法は、Charge Integration 法などと呼ばれている。今回、Gate1 を 60 nsec、Gate2 を 600 nsec に設定した。積分比が高い場合、1 層目 : YAP となり、積分比が低い場合 2 層目 : BGO となる (図 3-43)。

図 3-44 に線源測定の弁別の結果を示す。今回、積分比が 0.3 以上を area1、0.3 未満を area2 と設定した。 α 線を測定した場合、area1 に計数のクラスターが確認された。これは 1 層目 (YAP:Ce) の発光であることを示している。area1 と area2 の計数比を確認したところ 1,165.79 であった。一方、 γ 線を測定した場合、area1 と area2 の両方に計数のクラスターが確認された。これは 1 層目 (YAP:Ce) と 2 層目 (BGO) の発光であることを示している。YAP と BGO のクラスターの間に計数がみられるが、これは 1 層目 (YAP:Ce) と 2 層目 (BGO) の同時発光イベントと考えられ、シミュレーション計算の結果と同様の結果となっている。area1 と area2 の計数比を確認したところ 0.76 であった。



図 3-41 線源の外観写真

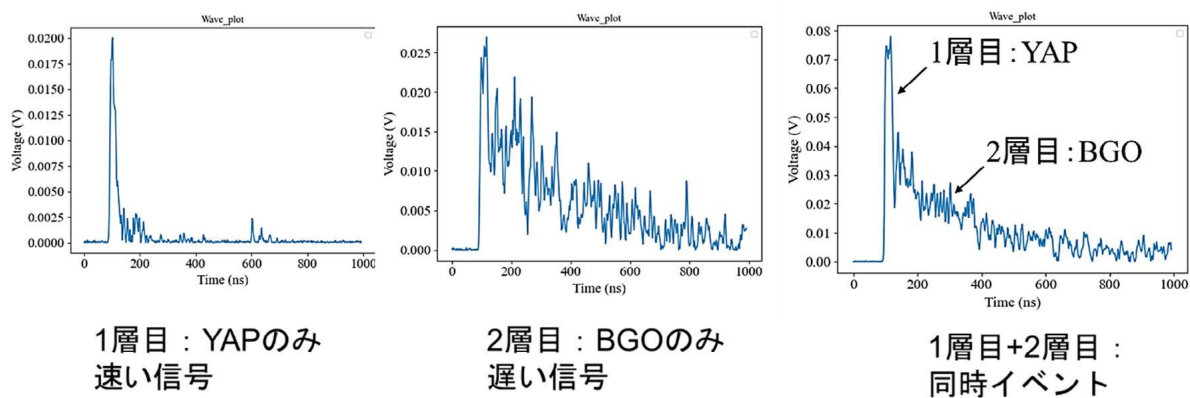


図 3-42 デジタイザで取得した検出器の出力電圧波形

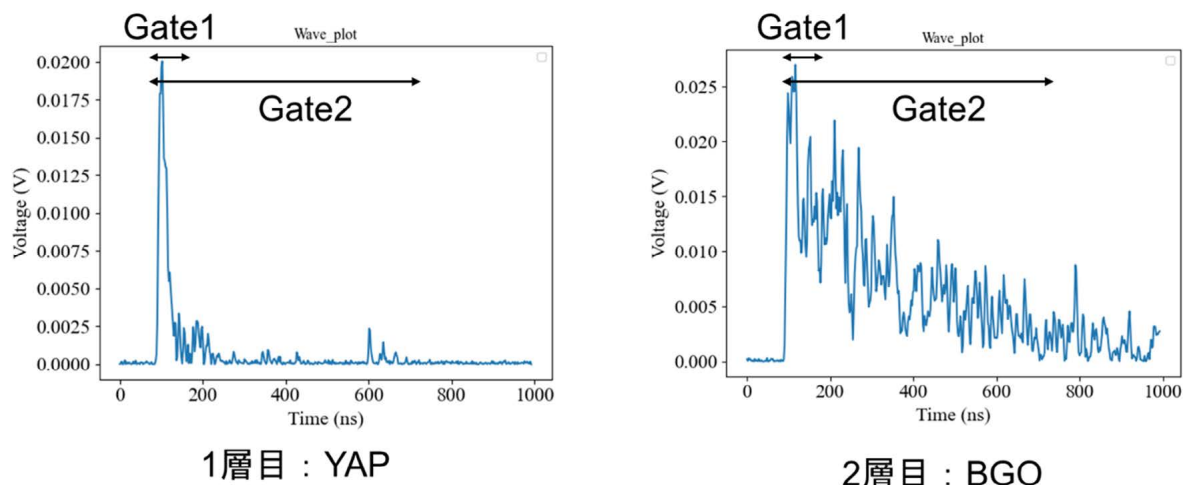


図 3-43 Charge integration 法による弁別

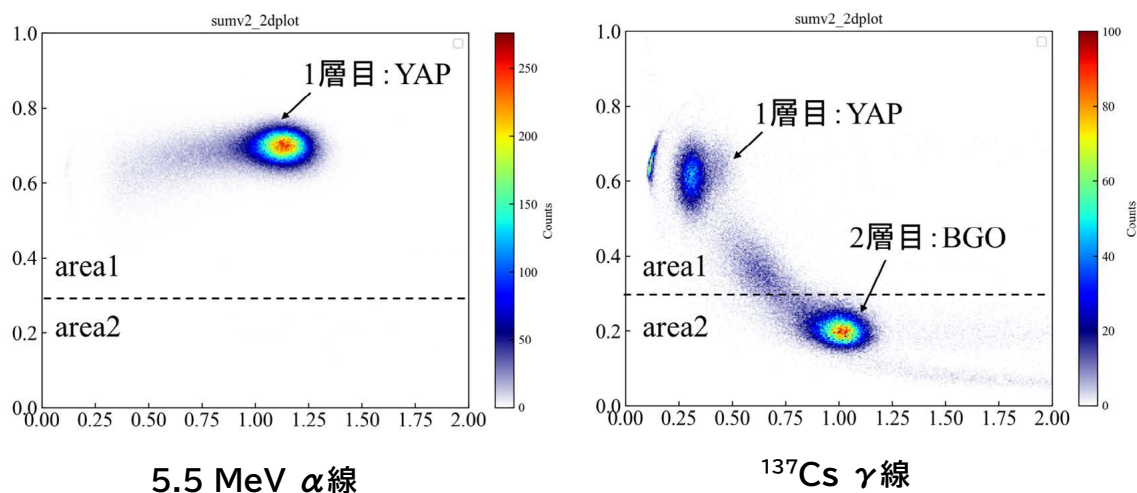


図 3-44 線源測定の変別の結果

(5) 機械学習による弁別

^{241}Am 線源の α 線と ^{137}Cs 線源の γ 線に対して、機械学習のアルゴリズムを適用し両者の弁別を検討した。機械学習では訓練データとテストデータの両方が必要になる。訓練データはモデルの学習に用い、テストデータを用いて検証を行う。機械学習への入力として、図 3-42 に示すようなデジタイザで取得した検出器の出力電圧波形を使用した。この波形データを 12 個のビンに平均化した。また、データに対しラベルを ^{241}Am 線源の α 線は“1”、 ^{137}Cs 線源の γ 線は“2”と付し、訓練データを作成した。訓練データとして、それぞれ 10,000 イベントのデータを用いた。テストデータには、測定した波形データを用いた。機械学習のアルゴリズムには、サポートベクターマシンを用いた。実装には、Scikit-learn という Python 用の機械学習ライブラリを用いた。

図 3-45 に分類後の結果を示す。“1”は ^{241}Am α 線、“2”は ^{137}Cs γ 線と分類された結果を示す。概ね ^{241}Am α 線と ^{137}Cs γ 線の分類ができていることがわかる。また、誤分類されたイベントも確認され、波形の前処理やパラメータの最適化により改善されることが考えられる。

16	1.00E+00				16	2.00E+00			
17	1.00E+00				17	2.00E+00			
18	1.00E+00	^{241}Am α 線			18	2.00E+00	^{137}Cs γ 線		
19	1.00E+00				19	2.00E+00			
20	1.00E+00				20	1.00E+00			
21	1.00E+00				21	2.00E+00			
22	1.00E+00				22	2.00E+00			
23	1.00E+00				23	2.00E+00			
24	1.00E+00				24	2.00E+00			
25	1.00E+00				25	2.00E+00			
26	1.00E+00				26	2.00E+00			
27	1.00E+00				27	2.00E+00			
28	1.00E+00				28	2.00E+00			
29	1.00E+00				29	2.00E+00			
30	2.00E+00				30	2.00E+00			
31	1.00E+00				31	2.00E+00			
32	1.00E+00				32	2.00E+00			
33	1.00E+00				33	2.00E+00			
34	1.00E+00				34	2.00E+00			
35	1.00E+00				35	2.00E+00			

図 3-45 分類後の結果

(6) まとめ

α 線（低エネルギー γ 線）を測定した場合、1層目（YAP:Ce）に主に計数を確認し、中エネルギー γ 線を測定した場合、1層目と2層目に計数を確認した。シンチレータの組み合わせにより、低エネルギー γ 線に感度を持つ検出器を開発できる可能性があることを確認した。

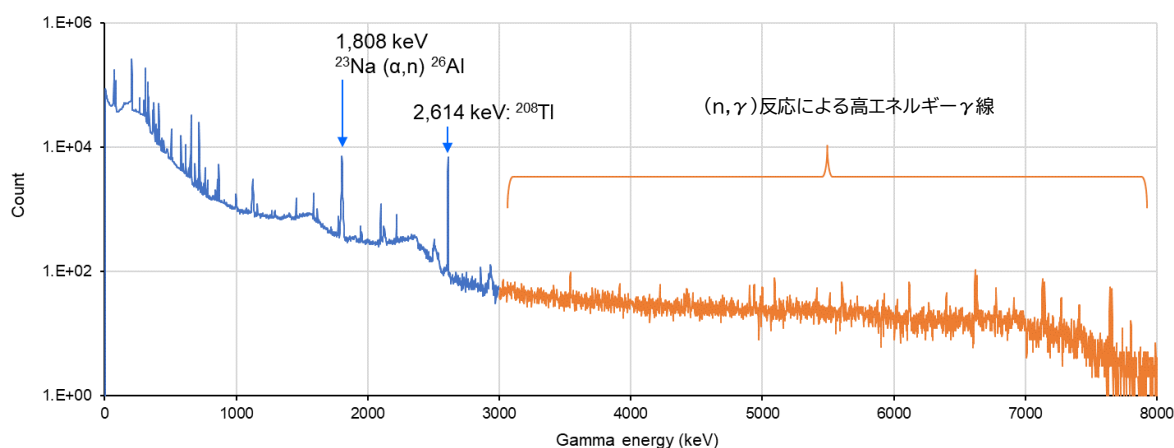
現時点では、低エネルギー γ 線検出器、配管内 α β 検出器、高エネルギー γ 線検出器をそれぞれ個別に開発しているが、それぞれがオリジナルで開発・最適化したものであり、従来技術と異なる利点（例えば、特定の放射線のみに感度）を有している。これらを配管に同時適用することにより、従来技術と異なる有益な情報をもたらす可能性がある。今後は、シンチレータの最適な組み合わせを試験し見出すとともに現場での試験を進めていく。

3.2.2 水中の α 線検出のための (α, n) (n, γ) 反応による高エネルギー γ 線検出器 (連携先：原子力機構)

(1) はじめに

核燃料取扱施設での作業環境の γ 線スペクトルにおいて、核燃料物質と周辺の物質の (α, n) 反応や (n, γ) 反応により 3 MeV 以上の高エネルギー γ 線が観測されている。図 3-46 に典型的なプルトニウム取り扱い施設での γ 線スペクトル結果を示す[15]。このように比較的高エネルギー側に、Na との (α, n) 反応で生み出される ^{26}Al の 1,800 keV の γ 線及び SUS の構成物質と (n, γ) 反応で発生する 3 MeV 以上の γ 線が検出される。これらの γ 線は検出効率が低い、バックグラウンドに影響されにくい面では有利と考えられる。また、このような高エネルギー γ 線は、水中に含まれる核種でも検出可能である。そこで、本研究では、低エネルギーのバックグラウンドが高い現場や水中に含まれる α 線放出核種の検知を目的として、高エネルギー γ 線の検出器の開発を目指す。研究のステップとしては、まずは 3 MeV 以上の γ 線に特化した検出器を設計し、放射線の方角を特定できるシステムの開発を目標とする。最終的には、3.2.1 項の検出器システムとの統合を想定する。

令和 5 年度は、既存の検出器を用いて屋内での宇宙線を計測することにより異なった検出器における高エネルギーのレスポンスについて試行的に試験を行った。



(原子力機構 再処理施設の環境で Ge 検出器を用いた 1,000 s の測定)

図 3-46 核燃料取扱施設で観測される典型的な γ 線スペクトル

(2) モンテカルロシミュレーション

3 MeV 以上の高エネルギー γ 線を観測するためには、放射線検出器の検出部を大きくすることで検出確率を高めることができるが、どの程度の結晶サイズが必要かあらかじめ把握しておく必要がある。そこで、本開発では、Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) を用いたモンテカルロシミュレーションにより、検出部の厚さにともなう高エネルギー γ 線の検出率を計算し、測定に最適な検出部のサイズを評価した。図 3-47 に計算モデルを示す。検出部は 1 インチ直径の円柱で、その厚さは 1~10 cm とした。検出部の素材は NaI (密度 3.67 g/cm³) とし、周辺には空気が存在している体系とした。検出部先端表面上から、各エネルギーの光子が放出されるものとし、光子のエネルギーは 2、4、6、8、10 MeV とした。シミュレーションでは、各エネルギーの光子が放出されたときの各検出部に対する付与エネルギースペクトル (PHITS:T-Deposit) を計算した。

図 3-48 に検出部の厚さにともなう光子計数率の変化のシミュレーション結果を示す。図 3-48 をみると、検出器を厚くすることで計数率が増加する傾向が得られたが、厚さがおおよそ 6 cm 以上になると線源エネルギーに関係なく計数率の上昇がみられなくなった。これらの結果から、NaI を用いた高エネルギー γ 線の観測において、検出部の厚さを 6 cm 以上にしても、さほど検出効率は上昇しないことがわかった。

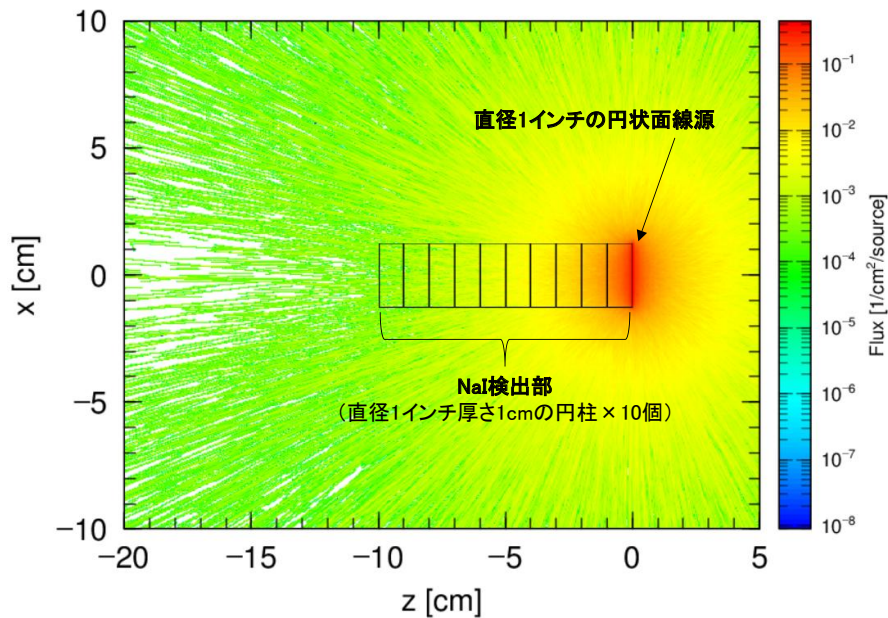


図 3-47 シミュレーションモデル

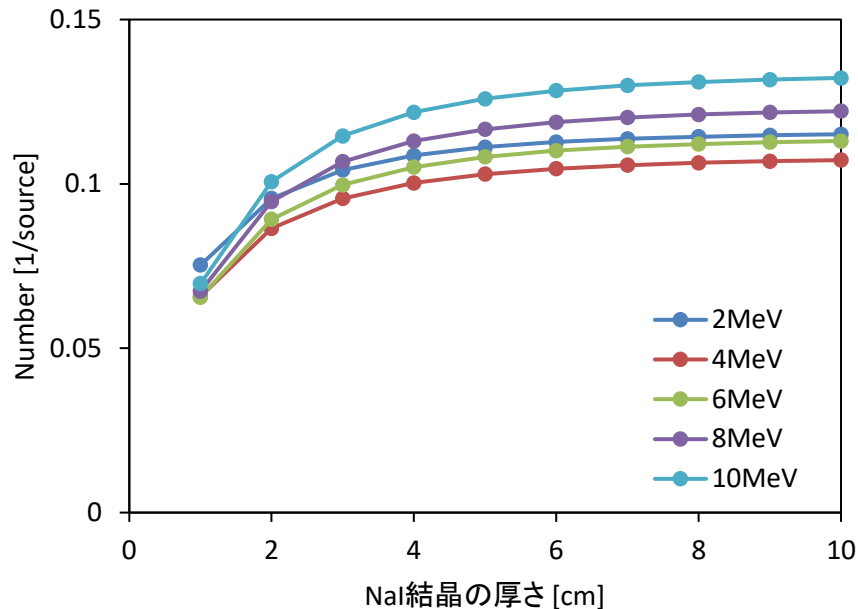


図 3-48 検出部の厚さにともなう光子計数率の変化

(3) 試験体系

実際の検出器設計に資するため、屋内で宇宙線を長時間観測することで結晶の大きさとレスポンスの関係を調査した。試験には、2 インチφ及び5 インチφの円筒状の NaI の結晶を配置したγ線スペクトル型検出器を用いた。両者の検出器を原子力機構南相馬施設の屋内に配置し、1,290,000 秒（約 15 日間）スペクトルを蓄積した。準備したγ線スペクトル検出器を用いた試験体系を図 3-49 に示す。



図 3-49 宇宙線データ取得試験体系

(4) 試験結果

宇宙線及び施設の建屋で散乱した2次γ線によるγ線スペクトルをに図 3-50 に示す。2 インチの NaI γ線スペクトルと比較して、5 インチの NaI スペクトルは全体的に計数率が高く、4,000 keV 以下で 3.3 倍、4,000 keV 以上で 2.8 倍であった。この結果から当然ではあるが、検出器の大きさと高エネルギーγ線に対するレスポンスは差が生じることが確認できた。一方、シミュレーションの結果は線源に対し、検出器の結晶の長さを変化させた平行入射の条件で計算したため、あまり大きく差が出なかった。この結果は、γ線が検出器を投下する長さではなく、検出器の表面積に依存することを示しており、令和 6 年度以降の実機の設計には、検出器の表面積を最適化する必要があることを示している。

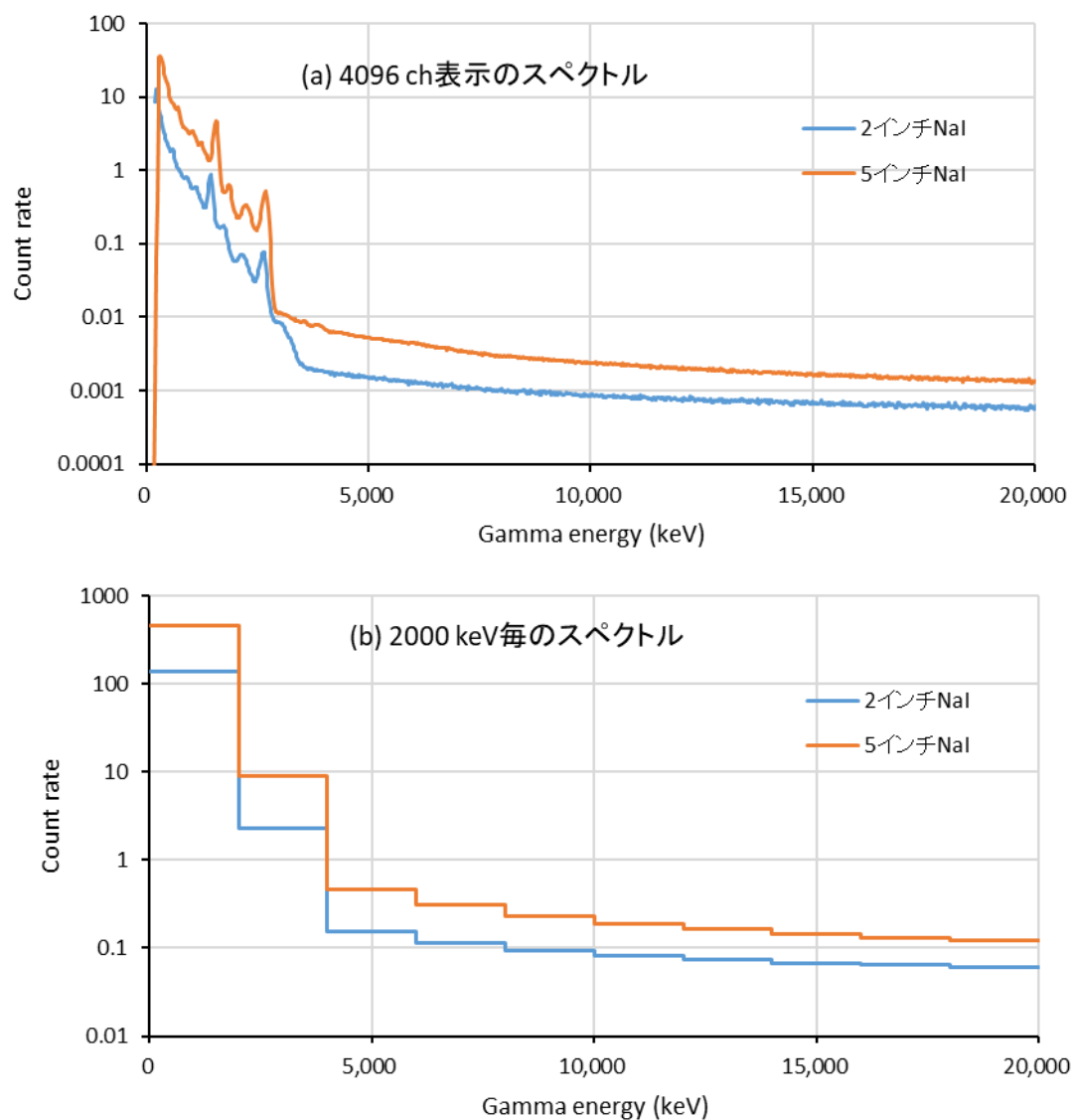


図 3-50 屋内での宇宙線観測スペクトル (1,290,000 秒)

(5) まとめ

大きさの異なる NaI スペクトルメータを利用して、高エネルギー γ 線に対する基礎的な性能を確認した。令和6年度以降の (α, n) (n, γ)反応による高エネルギー γ 線検出器の設計に活用する。

3.2.3 内視鏡型小型放射線計測装置の開発（再委託先：埼玉大学、連携先：原子力機構）

(1) はじめに

本開発では、破壊検査後詳細な配管内部調査を想定し、内視鏡をイメージした放射線検出器と小型カメラを組み合わせたシステムの開発を行う。開発する測定システムは、得られたデータをケーブル等を用いてリアルタイムにデータを取得できるものとし、小型カメラの写真撮影情報と放射能測定情報を統合することで、最終的には配管内部の3次元放射能分布の可視化を目指す。探査用の放射線検出器は、 α 線及び β 線の方角を検知するため、複数の検出部を配管内進行方向と垂直に配置し、各検出器の信号割合により、検出器通過壁面部の放射能を特定するシステムを想定している。また、開発する装置を配管内を調査可能なロボットへ搭載することで、測定作業者の安全を確保しつつ、効果的な内部調査を行うことができる測定システムを構築することを目指す。なお、本システムは、ステンレス鋼 25A スケジュール 10S（外径 34 mm、内径 28.4 mm、2.8 mm 厚）の内部の探査を対象目標としている。

本システム開発にあたり令和5年度においては、まず配管内を探査できるロボットの選定及びその性能確認を行った。あわせて選定した配管探査用ロボットが高線量下においても運用可能であるか、耐放射線性を評価する試験を行うための試験体ユニットの製作を行った。以降に選定した検出器及び配管探査用ロボットと製作した試験体ユニットの詳細について示す。

(2) 配管検査用シンチレータの選定

1F 原子炉建屋内は、高線量であり、人間が立ち入っての配管調査には限界がある。また、既存の放射線検出器は、電源を要するため、水素ガスが配管内に滞留している箇所では、何らかの原因で水素爆破を引き起こす恐れがある。本課題では、遠隔地から安全に放射線検出を行うには、光ファイバーの先端にシンチレータを装着したシンチレーション検出器が適すると想定し、低エネルギー γ 線及び高エネルギー γ 線を検出可能で、かつ光ファイバーとのマッチングがよいシンチレータを選出しすることを目指している。

令和5年度では、実験機器を揃え、光ファイバーを用いたシンチレータの発光読み出し試験を行う実験環境を構築した。まず、短い光ファイバー（2 m、Thorlabs 製、コア径：～1500 μm ）と長い光ファイバー（20 m、フジクラ製、コア径：～600 μm ）を使用し、小型 X 線源（AMPTEK 製、Mini-X）を用いてシンチレータの発光がみられるか確認した。配管調査への適応可否を検討するシンチレータとして黄色（540 nm 付近）で発光し、高い発光量を有する γ 線用シンチレータ $\text{Ce:Gd}_3(\text{Ga, Al})_5\text{O}_{12}$ （Ce:GGAG、C&A 製）を購入した。

短い光ファイバーと長い光ファイバーの先端に Ce:GGAG シンチレータを設置し、X 線を照射した際のシンチレーション発光スペクトルを図 3-51 に示す。20 m の光ファイバーを使っても Ce:GGAG シンチレータの発光スペクトル形状には変化がみられず、540 nm の黄色発光でも光ファイバーと組み合わせて利用できる可能性を見出した。

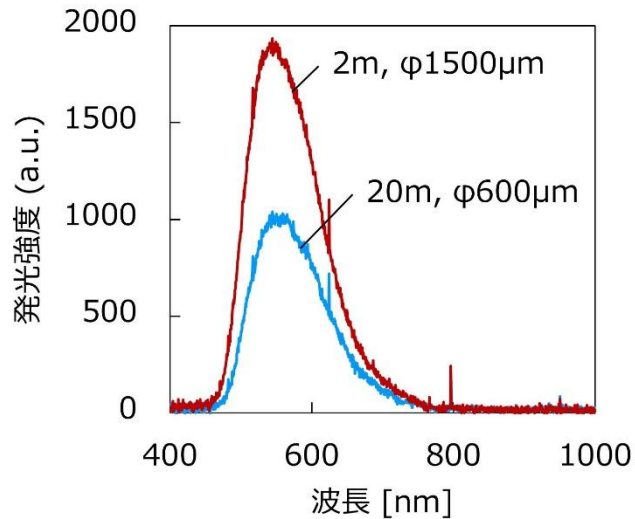


図 3-51 二種類の光ファイバー（2 m、20 m）で読み出した Ce:GGAG シンチレータの X 線励起シンチレーション発光スペクトル

次に、配管内にて局所的に高線量の γ 線源が滞留していることを想定し、東北大学の黒澤氏の協力のもと、東京工業大学科学技術創成研究院・ゼロカーボンエネルギー研究所・千代田テクノロコバルト照射施設の大強度 γ 線源 (^{60}Co) を利用した。図 3-52～図 3-54 に実験のセットアップ概略図を示す。千代田テクノロコバルト照射施設に 20 m 光ファイバー及び本事業で購入した小型 CCD 分光器（GoyaLab 製、IndiGo VIS-NIR）と Ce:GGAG シンチレータを持ち込み、実験を行った。光学グリスを使用して Ce:GGAG シンチレータを光ファイバーの先端に接着し、反射材（テフロンテープ）で覆った。Ce:GGAG を空間線量 $\sim 10^3$ 、 $\sim 10^2$ 、 $\sim 10^1$ Gy/h の点に置き、 ^{60}Co 線源からの γ 線を照射した際のシンチレーション発光スペクトルを測定した。

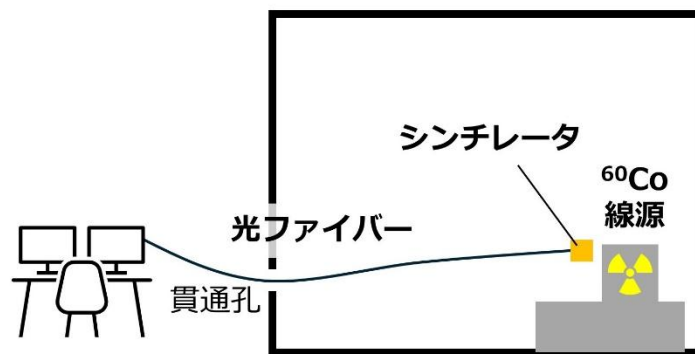


図 3-52 千代田テクノロコバルト照射施設での実験の概略図



図 3-53 光ファイバー先端に接着した Ce:GGAG シンチレータ



図 3-54 千代田テクノロコバルト照射施設での測定の写真

図 3-55 に Ce:GGAG シンチレータを $\sim 10^3$ Gy/h の地点に設置して、 γ 線を照射したときの写真を示す。線量が高く、Ce:GGAG シンチレータの発光量も大きいため、20 m の光ファイバーを通っても目視ではっきりとみえるほど、Ce:GGAG シンチレータが強く発光している様子がわかる。図 3-56 には Ce:GGAG シンチレータを $\sim 10^3$ 、 $\sim 10^2$ 、 $\sim 10^1$ Gy/h 地点に設置して、 γ 線を照射した際のシンチレーション発光スペクトルを示す。いずれの線量でも 540 nm 付近に発光ピークがみられた。 $\sim 10^1$ Gy/h の地点では発光強度が大きく落ちているものの、弱い発光でも 20 m 光ファイバーを通して検出できることがわかった好例である。最後に図 3-57 に照射地点の線量と発光強度をプロットした図を示す。今回は 3 点しか取得していないが、発光強度は線量に対しよい線形性を示しており、Ce:GGAG シンチレータと光ファイバーを使った γ 線量のモニタリングは、可能であることを示唆する結果を得ることができた。

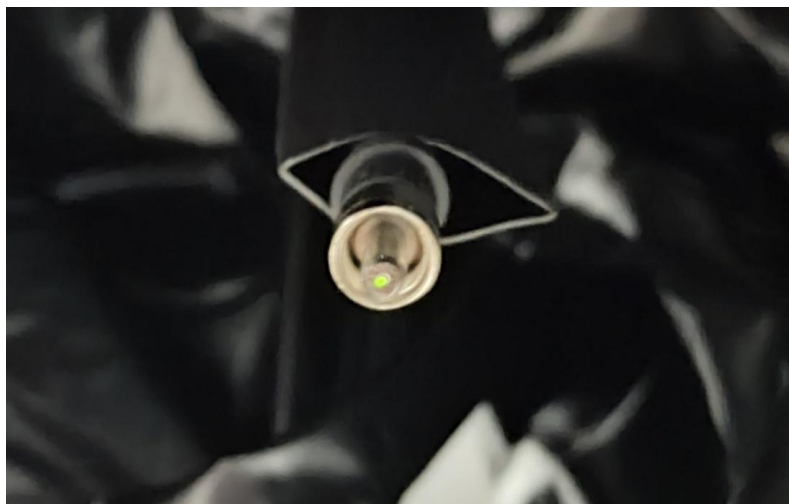


図 3-55 高線量 ($\sim 10^3$ Gy/h) 地点で照射した際の Ce:GGAG の発光が 20 m の光ファイバーを通して見える様子の写真

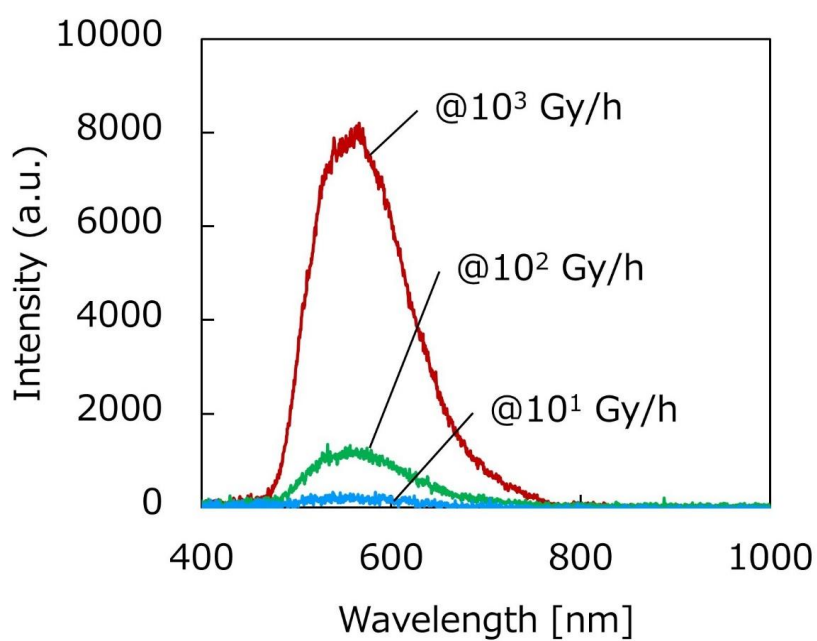


図 3-56 $\sim 10^3$ 、 $\sim 10^2$ 、 $\sim 10^1$ Gy/h 地点で照射した際の Ce:GGAG のシンチレーション発光スペクトル

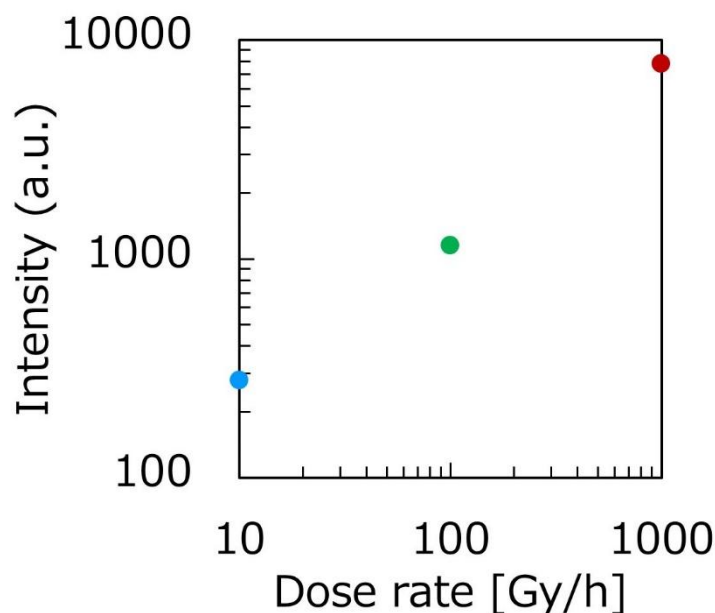


図 3-57 Ce:GGAG シンチレータの発光強度と照射線量との相関

(3) 配管探査用ロボットの選定

高放射線環境下であり、かつ内部状況が未知である配管内部をロボットで探査する場合、ロボットの機能条件として以下の条件を満たす必要があると考えられる。

- ・耐放射線性

放射線に耐性のある材料で構成されたシステムのロボットである必要がある。

- ・柔軟性と機動性

配管内の状況はどのような状況下であるか未知のため、液体や配管内部の付着物等がある状況においても探査を続けることができる、ロバスト性を持ったシステムである必要がある。

- ・安全性

配管内部には水素ガスが存在している可能性もあるため、爆発を誘発するリスクを最小限に抑える必要がある。また、運用作業員の安全性を高めるためにも、簡便でシンプルなシステムで複雑な作業工程を要しないものである必要がある。

本開発では、上記の条件を満たすロボットとして、ミミズ型管内走行ロボット「Sooha®」(株式会社ソラリス製)を選定した。ミミズ型管内走行ロボットの概要を図 3-58 に示す。ミミズ型管内走行ロボットは、胴体に人工筋肉ゴムを使用しており、ゴムに空気を送り込むことでミミズのぜん動運動を模擬し、ロボット自身を前進させることができる。

ミミズ型管内走行ロボットと他の配管探査用ロボットとの機能比較表を表 3-3 に示す。ミミズ型管内走行ロボットは、他のモーター式やヘビ型の電動型ロボットと異なり、空気駆動で動作するのが大きな特徴である。これは配管探査時、水素爆発のリスクを軽減させることができるため、電動型と比較して大きなメリットを持っていると考えられる。また、ミミズ型管内走行ロボットは、空気を送り込むだけで動作するため、非常にシンプルな構造となっており、特別な操作技術を必要としない。ユーザーであらかじめ設定した運動を

させるだけで動作可能となっているため、運用面においてもメリットがある。また、胴体の中はエアーチューブが通っているだけであり、他のカメラや照明、放射線検出器の電源通信ケーブルを通すことで追加装備が可能となる。さらに、ミミズ型管内走行ロボットはゴム素材を使用しているため、放射線に対する耐性がある。配管探査用ロボットは、研究開発段階のものは数多くあるが、民間会社が製品として売り出しているものは少ない。ミミズ型管内走行ロボット「Sooha®」は、製作会社において管内走行試験等を実施しており、また下水道圧送管検査等での運用実績を積み重ねているため、その信頼性と実績はユーザーにとって大きな利点となる。これらを踏まえ、本開発ではミミズ型管内走行ロボット「Sooha®」を選定した。



ミミズ型管内走行ロボット「Sooha®」

100Aタイプ

距離50m前後、最大速度180cm/min

50Aタイプ

距離30m前後、最大速度100cm/min

1.5インチサニタリー管タイプ

距離15m前後、最大速度30cm/min

*カスタマイズ可能



ミミズのように
ぜん動運動で前進する

人工筋肉にエアーチューブで
空気を送り込み胴体を膨らませる



90° ショートエルボ、クランク、U字などの配管においても前進可能であり、垂直走行も可能

図 3-58 ミミズ型管内走行ロボット「Sooha®」概要

表 3-3 配管内探査用ツール



名称	ミミズ型管内走行ロボット 「Sooha®」 https://solaris-inc.com/products/sooha/	配管内探査サービスⅠ型 「配管くん」 https://koeidreamworks.jp/service/robot/	配管用内視鏡スコープ 「premier50M」 https://www.thanko.co.jp/view/item/000000001145
メーカー	株式会社ソラリス	株式会社弘栄ドリームワークス	サンコー株式会社
探査可能な 配管サイズ	100A、50A、1.5S (1.5S内径35.7 mm)	配管径100～150φ	23φ
動作方法	空気駆動 ゴムの収縮により前進	車輪駆動 モータ制御により前進	人力 人がケーブル前進させる
配管内前進動作における耐放射線性	高 機体側での電子制御は一切なく、ゴムが破損しなければ動作可能	中 電子制御のため信号にノイズがあると動作不可になる可能性あり	高 ただし作業員の被ばくリスクは高い
曲がった 配管への対応	可	可	△ 人力のため、テクニックが必要 長距離探査は難しい
水素爆発の 誘発リスク	低	中 電動駆動のため	低
故障時のリスク	○ 引っ張ることで配管内から救出可能	△ 引っ張ることで配管内から救出可能だが、モーターが駆動しない場合救出不可	◎ ケーブルを引っ張るだけでよい
カスタマイズ性	○ 頭部又は後部にセンサー類を取付け可能	△ 機体の改良等が必要となる	○

(4) 試験体（テストピース）ユニットの製作

ミミズ型管内走行ロボットを高線量下にある配管で使用する場合、まずそのロボットの性能及び安全性、耐久性を評価する必要がある。ミミズ型管内走行ロボットは、空気駆動であるため、電子機器や電気信号の不良による動作停止、また、暴走等の危険性はない。ただし、ゴムを収縮させて動作するため、高線量下においてゴムが破損せず、運用可能であるかあらかじめ評価しておく必要がある。

本開発では、ミミズ型管内走行ロボットの放射線耐性を評価するために必要となる、耐久試験用試験体（テストピース）ユニットの製作を行った。本開発で製作した試験体ユニットの外観を図 3-59 に示す。試験体の機器は、治具と制御ボックスからなり、制御ボックスにエアーコンプレッサーで空気を送り込んで使用する。その空気をエアーチューブにより試験用治具のユニットに送りこみ、人工筋肉を収縮させることができる。

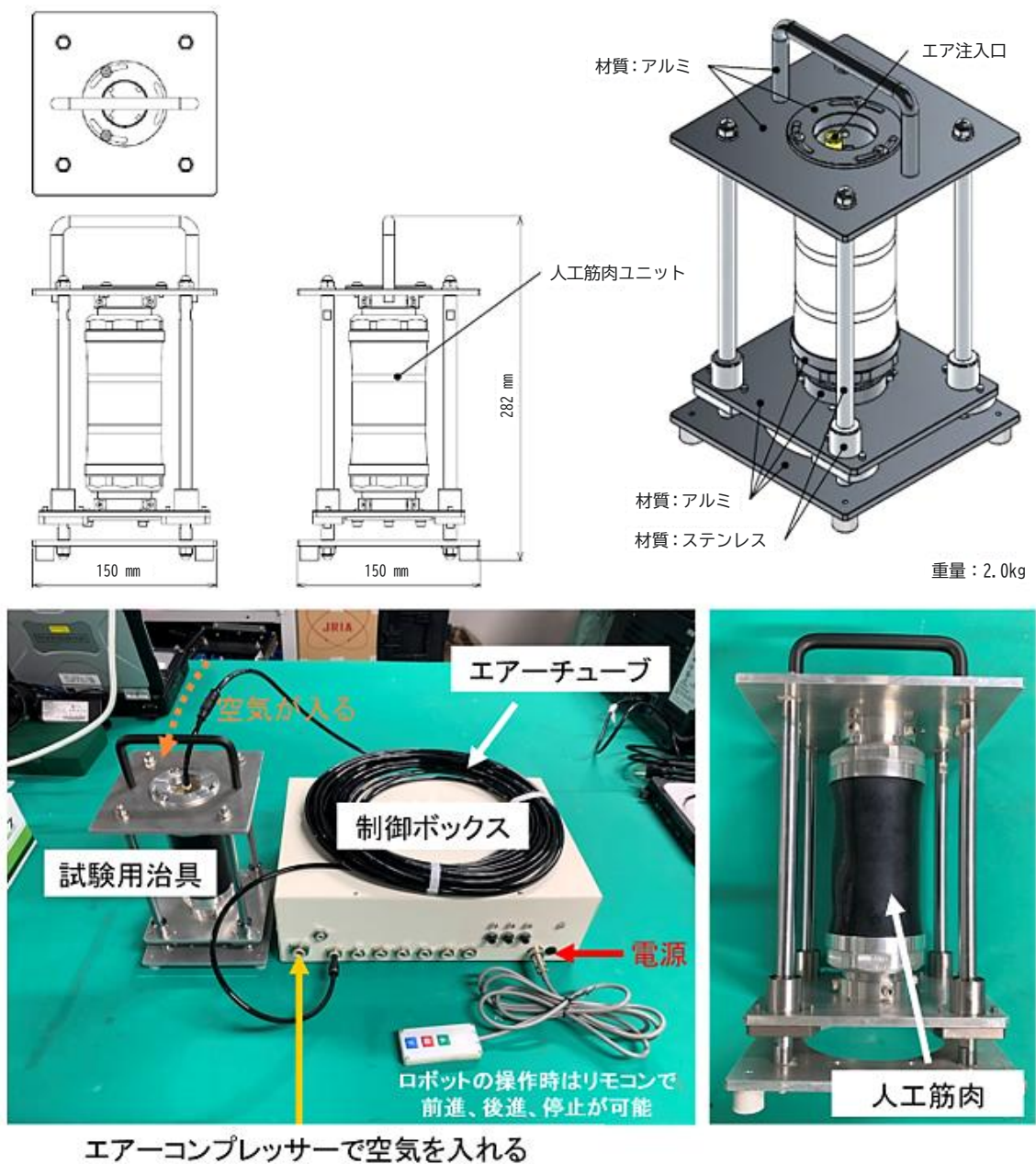


図 3-59 ミミズ型管内走行ロボットの耐久試験用試験体（テストピース）ユニット外観

(5) まとめ

配管内調査用シンチレータの選定を行うための実験環境構築のため、東京工業大学科学技術創成研究院・ゼロカーボンエネルギー研究所・千代田テクノルコバルト照射施設の大強度 γ 線源 (^{60}Co) を利用し、20 m 光ファイバーと Ce:GGAG シンチレータを使った試験を行った。実験は成功し、立ち上げた実験環境を使って今後は、さまざまなシンチレータの選定を行っていく計画である。

また、プラットフォーム選定では、高線量下にある配管内の汚染状況等を調査するための配管内探査用ロボットの選定及びその性能確認を行った。あわせて選定した配管探査用ロボットが高線量下においても運用可能であるか、耐放射線評価試験を行うための試験体（テストピース）ユニットの製作を行った。配管内探査用ロボットとしては、耐放射線性や柔軟性と機動性、防爆性の観点からミミズ型管内走行ロボット「Sooha®」を選定した。

令和 6 年度においては、ミミズ型管内走行ロボットで使用する人工筋肉ゴムの耐放射線性について評価試験を行う。あわせて、ロボット搭載用の放射線検出器製作、また配管内の 3 次元イメージングテスト等を行う予定である。

3.3 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間並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た。また、開発の進展に応じ東京電力とニーズのマッチングを確認しながら、下記のとおり研究実施計画を推進するための会議と 1F5 号機見学等を開催した。

1. キックオフミーティングと 1F 現場視察（9/12、13）研究者：8 名、研究協力者：2 名、オブザーバー（1F 社員）：2 名
2. 中間フォロー前後の進捗打ち合わせ（12/12）研究者：9 名

また、令和 6 年 3 月の日本原子力学会春の年会で研究計画、研究概要とその進捗状況について発表し、専門家間で議論を行った。

4. 結言

以下に3カ年計画の1年目である令和5年度の業務実績を述べる。

(1) 非破壊検査を応用した配管ジオメトリ可視化技術開発

① レーザ超音波計測による配管内付着物の遠隔評価（再委託先：大阪大学）

付着物が存在する箇所にレーザを照射すると、発生する超音波が小さくなる現象を実験的に検証し、付着物の種類や付着の強度により得られる画像にどのような影響を与えるかを調べる付着物検出の基礎実験及び付着物検出に対する最適周波数帯域の検討を行った。さらに、LDVを用いた遠隔計測により配管内付着物の画像化実験を行った。

その結果、平板裏面の付着金属やパイプ内面の付着物が予想どおり画像として取得することが可能であることが示された。

② アクティブサーモグラフィを用いた配管検査方法の適用（再委託先：神戸大学）

時系列非定常温度変動の分布を高速かつ高精度に計測できる赤外線サーモグラフィとそのデータ解析を可能とするアクティブサーモグラフィ計測システムを構築し、フーリエ解析による温度変動波形の位相解析を実施し、配管裏面状態と位相との関係を明らかにして計測システムに反映させた。数値解析的に得られた時系列非定常温度分布データをもとに配管内部状態の推定を行う数値シミュレーションを行い、アクティブサーモグラフィ法の配管検査への適用性を検討した。また、実使用環境を考慮して、遠隔から非接触に対象物に熱負荷を与えることができる加熱システムを試作し基礎実験を行った。

基礎実験としては、原子炉配管に付着物が内在した状態を模擬して、ステンレス板の裏面にパテを付着させた試験体を製作し、試験体に対してパルス加熱及びステップ加熱を行った場合の時系列温度変動データをもとに付着物の位置や形状を同定できることを確認した。さらに、得られた温度変動データに対して波形解析処理を適用することにより、付着物の検出精度が向上することが確認できた。

③ 水素ガスの簡易検知方法の調査（再委託先：東北大学）

水素ガスに反応するテープを用いた簡易的な水素ガス検出器について準備を進めた。特に、配管内部という暗所での色の確認であるため、実際に同様の暗所を筒等で再現し、その撮像について検出下限濃度等の評価を行った。令和5年度は、現場に近い状態での評価に必要なテープ、光ファイバーなどの購入を進めて、準備を進めることができた。また、基礎的な実験も行い、空気との混合により水素濃度を変化させて1～10分程度の暴露したテープの撮像も行い、基準となるデータとして検出下限濃度等の評価が実施できた。

(2) 配管内放射線イメージング技術開発

① 低エネルギーγ線検出器の開発

（国立大学法人福井大学（以下、「福井大学」と略す。）、再委託先：東北大学、埼玉大学、連携先：原子力機構）

埼玉大学は、原子力機構、東北大学と協力してシンチレータ材料を選定し、実施環境を整える。また、X線を照射した際の発光強度を調査し、新たな検出器材料の開発に向けて設計を行った。

福井大学は、原子力機構、東北大学、埼玉大学と協力してγ線検出器の感度試験、角度分布特性、エネルギー特性等の解析調査を行う。また、検出器の最適化設計を行い、モンテカルロ計算により検出器特性を把握し実証性を調査する。さらに、半導体を用いた小型センサの開発実証性を調査した。

東京工業大学の大強度 ^{60}Co 線源による γ 線照射施設の見学や実験環境の構築を行い、埼玉大学などが主に実施した照射試験などの協力を行うなどして実施環境を整えた。あわせて、福井大学、原子力機構、埼玉大学に協力して、実験環境の構築、シミュレーション解析の助言などを行った。

X 線照射でのシンチレータ材料選定において、令和 5 年度は、既存の市販材料から酸化物シンチレータ Ce:GGAG とセレン化物 ZnSe の利用可能性を評価した。ZnSe は大気中の水分及び光学グリスと反応して劣化してしまうため、高温多湿環境が予想される配管内では使用できないことがわかった。

低エネルギー γ 線や中性子のデータを選別することを目的としてシンチレーション検出器を担当し、福井大学等が開発している機械学習のアルゴリズムと組み合わせ、目的とする放射線のデータを得た。また、試作機を開発し、デジタイザ及びデータ収集ソフトウェアを構築して線源を用いた低エネルギー γ 線の測定ができることを確認した。

特に、低エネルギー γ 線検出器の詳細設計を目的とし、GAGG 及び BGO を用いたテストピースを製作した。製作したテストピースの線源試験で得た条件から、モンテカルロシミュレーションで高エネルギー γ 線 (^{137}Cs) と低エネルギー γ 線 (^{241}Am) の波形弁別条件を確認した。本結果をもとに令和 6 年度の実機製作を開始する。

② 水中の α 線検出のための (α, n) (n, γ) 反応による高エネルギー γ 線検出器

(連携先：原子力機構)

高エネルギー γ 線検出器の試作機開発を行い、線源を用いて高エネルギー γ 線が測定できることを確認した。また、検出器の形状は、モンテカルロシミュレーション計算を用いてシンチレータの配置や厚み等の設計を行うとともに検出器を試作した。

高エネルギー検出器については、高エネルギー γ 線に対する NaI の結晶の大きさごとのレスポンスをモンテカルロシミュレーションで計算した。また、シミュレーションをもとに直径 5 インチの NaI 検出器を用いて長時間環境中で測定を行い、高エネルギー光子に対する相対感度を確認した。本結果を用いて令和 6 年度以降、実機製作を行う。

③ 内視鏡型小型放射線計測装置の開発（再委託先：埼玉大学、連携先：原子力機構）

埼玉大学は、最適なシンチレータの選定を調査した。また、信号強度の評価のため X 線励起発光スペクトル測定装置を利用しシンチレータの選定を行った。得られた結果は、原子力機構と共有し、原子力機構が行う試作機の開発につなげた。

現有する光ファイバー及び本事業で購入した小型 CCD 分光器 2 種を用いて、光ファイバーを通した Ce:GGAG シンチレータの X 線励起発光スペクトルの測定に成功した。Ce:GGAG シンチレータは、3 mm 角×1 mm 厚の小型結晶であり、光ファイバー径も最大 10 mm 程度（コネクタ部分）と細い。以上の結果から、原子力機構が検討しているミミズ型ロボットへ搭載可能であることを見出した。

原子力機構は、放射線検出器と小型カメラを組み合わせたシステムの開発を目的として、検出器の設計と搭載設計の条件となるミミズ型ロボットの選定に取り組んだ。

ミミズ型ロボットの性能をモックアップにて確認するとともに、ミミズ型ロボットの耐放射線性を確認するための照射試験用テストピースを製作した。本テストピースを用いて、令和 6 年度に線量率に対するゴムの耐久性を確認する予定である。

(3) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間並びに CLADS 等との連携を密にして研究を進めた。また、開発の進展に応じ東京電力とニーズのマッチングを確認しながら、下記のとおり研究実施計画を推進するための会議、1F5 号機見学等を開催した。

1. キックオフミーティングと 1F 現場視察 (9/12、13) 研究者：8 名、研究協力者：2 名、オブザーバー (1F 社員)：2 名
2. 中間フォロー前後の進捗打ち合わせ (12/12) 研究者：9 名

さらに、令和 6 年 3 月の日本原子力学会春の年会で研究計画、研究概要とその進捗状況について発表し、専門家間で議論を行った

以上、3 カ年計画の 1 年目である令和 5 年度の業務項目を実施し、所期の目標を達成した。

参考文献

- [1] C.B. Scruby, Some applications of laser ultrasound, *Ultrasonics* 27 (1989), pp.195-209.
[https://doi.org/10.1016/0041-624X\(89\)90043-7](https://doi.org/10.1016/0041-624X(89)90043-7)
- [2] C.B. Scruby, L.E. Drain, *Laser Ultrasonics: Techniques and Applications*, CRC Press, 1990.
- [3] S. Krishnaswamy, Theory and Applications of Laser-Ultrasonic Techniques, in:
Ultrasonic Nondestructive Evaluation, CRC Press, 2003, pp.435-494.
<https://doi.org/10.1201/9780203501962.ch7>
- [4] D. A. Hutchins, K. Lundgren, S. B. Palmer, A laser study of transient Lamb waves in thin materials, *Journal of the Acoustical Society of America* 85 (1988), pp.1441-1448.
- [5] T. Hayashi, M. Murase, M.N. Salim, Rapid thickness measurements using guided waves from a scanning laser source., *J. Acoust. Soc. Am.* 126 (2009), pp.1101-1106.
<https://doi.org/10.1121/1.3177268>
- [6] T. Hayashi, M. Murase, T. Kitayama, Frequency dependence of images in scanning laser source technique for a plate., *Ultrasonics* 52 (2012), pp.636-642.
<https://doi.org/10.1016/j.ultras.2012.01.003>
- [7] T. Hayashi, M. Murase, N. Ogura, T. Kitayama, Imaging Defects in a Plate with Full Non-Contact Scanning Laser Source Technique, *Mater. Trans.* 55 (2014), pp.1045-1050.
<https://doi.org/10.2320/matertrans.I-M2014817>
- [8] T. Hayashi, Imaging defects in a plate with complex geometries, *Appl. Phys. Lett.* 108 (2016), 081901. <https://doi.org/10.1063/1.4942599>
- [9] T. Hayashi, M. Fukuyama, Vibration energy analysis of a plate for defect imaging with a scanning laser source technique, *J. Acoust. Soc. Am.* 140 (2016), pp.2427-2436.
<https://doi.org/10.1121/1.4964275>
- [10] T. Hayashi, Non-contact imaging of pipe thinning using elastic guided waves generated and detected by lasers, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 153 (2017), pp.26-31. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.05.006>
- [11] T. Hayashi, High-speed non-contact defect imaging for a plate-like structure, *NDT & E International* 85 (2017), pp.53-62. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2016.10.009>
- [12] T. Hayashi, Defect imaging for plate-like structures using diffuse field, *Journal of the Acoustical Society of America* 143 (2018). <https://doi.org/10.1121/1.5030915>
- [13] A. Maeda, T. Hayashi, Defect imaging from a remote distance by using scanning laser source technique with acoustic microphones, *Mater. Trans.* 59 (2018).
<https://doi.org/10.2320/matertrans.M2017326>
- [14] S. Nakao, T. Hayashi, Non-contact imaging for delamination using diffuse field concept, *Jpn. J. Appl. Phys.* 58 (2019). <https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab0ada>
- [15] 眞田 幸尚, 秋山 聖光, 若山 正喜, 吉崎 裕一, 宮部 賢次郎, 可搬型ゲルマニウム検出器を用いた再処理施設内における器材及び作業環境の γ 線スペクトル測定, *JNC TN8410* 2002-003, (2002), 75p.
<https://jopss.jaea.go.jp/search/servlet/search?4027376> (参照 : 2023 年 6 月 5 日) .

