

JAEA-Review 2022-061 DOI:10.11484/jaea-review-2022-061

# 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 (委託研究)

 一令和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–
 Research on Radioactive Aerosol Control and Decontamination at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Decommissioning (Contract Research)
 -FY2021 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project-

福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター 東京大学

> Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science, Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development The University of Tokyo

February 2023

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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。(<u>https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja</u>) 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(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) 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 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課 〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, 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 (<u>https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en</u>).

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 Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2023

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 (委託研究)

一令和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-

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター

#### 東京大学

(2022年11月1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(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始めとした原 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、研究課題のうち、令和3年度に採択された「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」の令和3年度の研究成果について取りまとめ たものである。

本研究は、英国の研究者と協力して、エアロゾル分散制御をしながら、同時に高度な微粒子測 定と評価が可能な安全なレーザー除染システムを開発することを目的としている。

日本側では、CFD 解析を活用して、セシウム等を浸透した物質へのレーザー加工により発生する 放射性エアロゾルを水ミストとスプレーにより効果的に制御するシステムを開発する。

具体的には、エアロゾルと水界面の相互作用に関連する英国側研究成果を活用してレーザー加 工を行い、高精度検出器による 10 nm~10 µm の広範囲なエアロゾル粒子の計測、水ミストやスプ レー液滴の電気化学的処理による粒子分散制御、並びに得られたデータを基にして分散制御に関 する CFD シミュレーションの精度向上を目指す。

最終的には日英の研究成果を活用して、両国の試験施設において実証試験を行うことにより、 今後、両国の廃炉現場において適用可能性のある高線量エリアのレーザー除染計画に役立てる。

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、東京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

i

### JAEA-Review 2022-061

Research on Radioactive Aerosol Control and Decontamination at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Decommissioning (Contract Research) — FY2021 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project —

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

### The University of Tokyo

(Received November 1, 2022)

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 FY2021.

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 FY2021, this report summarizes the research results of the "Research on radioactive aerosol control and decontamination at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station decommissioning" conducted in FY2021.

The present study aims to develop a safe laser decontamination system that simultaneously incorporates an advanced particle detection and characterization system together with aerosol dispersion control in collaboration with the UK researchers. By using the UK partner's fundamental studies related to aerosol and water interface interactions, various methods such as electro-chemical processing of water-mist particles and spray droplets will be applied for effective control of ultra-fine aerosol particle dispersions in a large containment volume. With the help of advanced aerosol analyzers, the aerosol particles having a wide range of sizes such as varying from 10 nanometers to 10 micro-meters will be sampled, and time-resolved highspatial resolution aerosol distribution data will be obtained for advanced CFD validation for the planning of laser decontamination activities. In the last year of the project, all know-hows acquired in two years will be implemented into integrated cleaning system tested in the mockup facilities in the UK and Japan. The outcome of this research is expected to provide an enhanced radiological safety during the decommissioning activities in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station and Sellafield sites by remediation of hot-spot regions.

Keywords: Fukushima Decommissioning, Laser Cleaning, Droplet, Aerosol, CFD

This work was performed by The University of Tokyo 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
5.	令和3年度 採択課題 10
付	録 成果報告書

### Contents

1.	Outline c	of Nuclear	Energy	Science	& Tecł	nnology	and	Human	Resource	Development	Proje	ct
	•••••	•••••			• • • • •		• • • •		••••		••••	. 1
2.	Accepted	Proposal	in FY20	18	• • • • •				••••••		••••	. 2
3.	Accepted	Proposal	in FY20	919	• • • • •				••••••		••••	. 5
4.	Accepted	Proposal	in FY20	20	• • • • •		• • • •				••••	. 8
5.	Accepted	Proposal	in FY20	21					••••••			10

Appendix Result Rep	port	3
---------------------	------	---

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。

- 1 -

### 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	(日英共同研究)	

### 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	山﨑 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	渡邉 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(日英共同研究2課題、日露共同研究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
ー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	渡邉 大輔	日立GE 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

研究人材育成型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	
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ックスを融合した 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 (R2.4.1~)	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

JAEA-Review 2022-061

### 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	(日英共同研究)	

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)会議での審議を経て、採 択課題を決定した。

### 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	渡邉 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
	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)

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・日露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 ターベースの高度化	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

課題名	研究代表者	所属機関
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
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

本報告書は、以下の課題の令和3年度の研究成果を取りまとめたものである。

~ ~ ~ /	
/ 7 / /	
141	

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

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3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

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 (契約番号 R03I147)

### 成果報告書

## 令和4年3月

## 国立大学法人東京大学

JAEA-Review 2022-061

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、国立大学法人東京大学が実施した「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」の令和3年度の研究成果を取 りまとめたものです。

### 目次

概略	v vi
1.	はじめに
<ol> <li>2.</li> <li>2.</li> <li>2.</li> <li>2.</li> </ol>	業務計画41 全体計画42 研究項目の計画(日本側)53 研究項目の計画(英国側)6
2. 3. 3.	4 実施体制
3. 3. 3.	2 データ評価及びモックアック試験(再会記先:アトックス)       28         3.2.1 データ評価       28         3 英国側研究成果概要       32         4 研究推進       33
4. 参考	結言

### 執筆者リスト

### 事業代表者

国立大学法人東京大学	准教授	三輪 修一郎
	特任教授	鈴木 俊一
	特任准教授	Marco Pellegrini
	教授	長谷川 秀一
	助教	寺林 稜平
	客員研究員	Erkan Nejdet
委託先		

株式会社ア	トックス	課長	田沢 周作

連携先

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究員 小菅 淳

### 表一覧

表 3.1-1	エアロゾル分析器の詳細	. 12
表 3.1-2	UTARTS 噴流ノズル寸法の詳細	. 12
表 3.1-3	CFD 計算に使用した UTARTS 噴流ノズル寸法の詳細	. 17
表 3.1-4	Main parameters of the simulation	. 23
表 3.2-1	実績事例1からの本課題における反映事項	. 29
表 3.2-2	実績事例2からの本課題における反映事項	. 30
表 3.2-3	1F(BWR)で使用されている塗装剤の一部	. 30

図一覧

図 2.1-1	事業実施計画	4
⊠ 2.1-2	英国側事業実施計画	4
⊠ 2.2-1	実施体制図	7
図 3.1-1	UTARTS 試験装置概略図	8
図 3.1-2	UTARTS 外観と観察窓	9
図 3.1-3	UTARTS エアロゾル発生装置1	0
図 3.1-4	ミスト生成装置による球径分布1	1
図 3.1-5	带電放射線誘発装置1	3
図 3.1-6	放射線誘発表面電荷の影響1	4
図 3.1-7	ビーム輸送計算 (a)計算体系 (b)計算結果1	5
図 3.1-8	UTARTS レーザー照射体系1	5
図 3.1-9	UTARTS 計算ドメイン1	6
図 3.1-10	異なるノズル組合せによる UTARTS 内における流況シミュレーション結果1	8
図 3.1-11	異なるノズルと流量条件組合せによるエアロゾル粒子除去率1	9
図 3.1-12	Imperial College London レビテータを模擬した CFD 計算領域2	0
図 3.1-13	a)計算領域における液滴 b)液滴周囲の流況 c)液滴によるエアロゾル粒子捕獲.2	1
図 3.1-14	音響場再現における CFD 計算領域2	2
図 3.1-15	計算領域における圧力波(上)定常波、(下)定常波崩壊後の圧力波2	4
図 3.1-16	CFD 圧力波標準偏差コンター図 2	5
図 3.1-17	レーザー照射試験に使用したサンプル2	5
図 3.1-18	エアロゾル粒子径計測結果2	7
図 3.1-19	液滴スプレー流入に伴う平均エアロゾル粒子径2	8
図 3.2-1	模擬ウエル施設3	1

### 略語一覧

JAEA	: Japan Atomic Energy Agency (国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)
CFD	:Computational Fluid Dynamics(数値流体力学)
CLADS	:Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (廃炉環境国際共同研究センター)
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
阪大	: 国立大学法人大阪大学
高純度研	:株式会社高純度化学研究所
UTARTS	: Aerosol Removal Tests using Water Spray in the University of Tokyo (東京大学エアロゾル除去試験施設)
PCV	:Primary Containment Vessel(原子炉格納容器)
НЕРА	:High Efficiency Particulate Air

概略

本研究では、英国の研究者と協力して、エアロゾル分散制御をしながら、同時に高度な微粒子 測定と評価が可能な、安全なレーザー除染システムを開発することを目的としている。日本側で は、数値流体力学(以下、「CFD」と略す。)解析を活用して、セシウム等が浸透した物質へのレー ザー加工により発生する放射性エアロゾルを水ミストとスプレーにより効果的に制御するシステ ムを開発し、最終的には日英の研究成果を活用して、両国の試験施設において実証試験を行うこ とにより、今後、両国の廃炉現場において適用可能性のある高線量エリアのレーザー除染計画を 実施している。

以下に、令和3年度の成果の概略を述べる。

(1) レーザー加工による微粒子飛散評価

①微粒子飛散実験及び解析評価

- ・東京大学エアロゾル除去試験施設(以下、「UTARTS」と略す。)施設において加工用レーザーの利用を可能にするため光学系の設計を行った。
- ・UTARTSの測定システムを超微粒子の測定が可能なように変更及び改善した。
- ・新しいエアロゾル粒子分析装置及びエアロゾル発生用レーザー装置により、予備的なスプ レー及び水ミスト試験を実施した。
- ・令和4年度の実験を計画するために、CFDによる予備的なシミュレーションを行った。
- ・エアロゾルの放射線誘発表面電荷の影響を調査するために、帯電したエアロゾル粒子を使用して試験を行った。
- ・原子炉格納容器(以下、「PCV」と略す。)の壁に堆積した核分裂生成物または a 粒子を摸擬したナノ粒子も含んだ内壁塗料を使用して上記試験を行った。

②データ評価(連携先: JAEA)

JAEA で実施している研究知見を基に、日英の研究成果の評価を行った。

- (2) データ評価及びモックアップ試験(再委託先:アトックス)
  - ①データ評価
    - ・各機関の試験の進捗状況の確認を行った。
    - ・過去に実施されたレーザー除染法の知見(課題、問題点)を整理した。
    - ・廃炉現場への適用性の観点から具備すべき仕様、性能を整理した。
    - ・各機関で実施した当該年度の研究成果について、過去に得られた知見を踏まえて、現場の除染技術への適用の可能性について評価を行った。
    - ・解決すべき課題、問題点を摘出し、令和4年度の計画に反映させた。
- (3)研究推進(東京大学)

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(以下、「CLADS」と略 す。)等との連携を密にして研究を進めた。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等 を開催した。またパートナーの英国側と適宜打ち合わせを実施した。

以上、令和3年度の業務項目を実施し、所期の目標を達成した。

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。)では、PCVの 放射線量が極めて高く、廃炉作業遂行のためには、作業者と環境の放射線安全性確保に多くの課 題がある。ほとんどすべての作業で電子部品または機械部品の頻繁な交換が必要であり、燃料デ ブリを除去した後でも、原子炉構造物や機器・配管などの解体において PCV 内の高放射線雰囲気 で作業するという困難な課題を解決する必要がある。レーザーやプラズマカッターなどの熱切断 方法は、放射性エアロゾルの発生率が高い選択肢と見なされているが、高出力で自由度が高いな ど機械的切断操作に勝る点があるため、将来の廃炉計画にこれらの熱切断技術を組み込んだ最適 な戦略を盛り込む必要がある。

近年の原子力規制委員会 原子力規制庁の評価では、PCV 上部にあるシールドプラグにおいて、 特に2号機及び3号機の放射線レベルが高いことが報告されている。これは、事故時に発生した 放射性物質がプラグ間の空隙を通って原子炉建屋上部に流れ込んだ可能性を示している。このよ うなホットスポット領域は、PCV内のその他の場所においても存在している可能性があり、廃炉作 業中の放射線被ばくのリスクを高める可能性がある。このような高放射線環境下での作業環境を 事前に改善することは極めて重要であり、レーザー除染技術は、放射線のホットスポットを除去 し、PCVの放射線量を低減するなど、放射線によるリスクを大幅に軽減することが期待される。

1960年に T. H. Maiman がルビーレーザーを用いて初めてレーザー発振に成功して以来、学術的 な興味だけでなく、医学や工業、軍事をはじめ様々な分野で使われている。特に、レーザーを用 いた加工技術は、モノづくりにとってなくてはならない技術である。基本的にレーザー加工はレー ザー光を材料表面に照射することで熱に変換して材料の加工処理を行う。材料を切る・削るな どに代表される切削加工や材料同士を熱で溶かして接合するレーザー溶接などが一般的に用いら れている。さらに、比較的パワーの低いレーザーを材料表面に照射し材料表面に加熱処理をする ような表面焼き入れ、表面合金化や短パルスレーザーを照射によって材料内に衝撃波を発生・伝 搬させ、加工硬化や圧縮残留応力を付与するレーザーピーニングなどの表面改質技術がある。

ー方で、レーザーを用いて表面に付着した汚染物を除去するレーザークリーニング技術も、1970 年代から提案されている。レーザーを用いた表面クリーニング技術は、非接触で遠隔操作可能で、 二次廃棄物の発生量が少ないという特徴がある。レーザーによるクリーニング技術は、1973年に 初めて芸術作品のクリーニングに適用する手法として J.F. Asmus らのグループによって提案され た[1]。彼らは、破損しやすい大理石の彫刻表面に付着した硬い汚染物を母材の大理石を傷つける ことなしにレーザーで取り除けることを示した。しかしながら、当時は、レーザー装置の規模が 大きく、レーザーのパワーも十分でなかったためクリーニング処理速度も遅く実用化は難しかっ た。近年のファイバーレーザーをはじめとする急速なレーザー技術の進歩により、持ち運び可能 で屋外でも作業が可能なレーザークリーナーも市販され始めている[1][2]。最近でも、E. Di Francia らのグループが、Cu が母材となる文化的遺物上に付着している反応性腐食生成物を母材 に損傷を与えることなく除去するための低母材侵入性のある選択的なレーザー洗浄手法の開発が 報告されている[4]。

このレーザークリーニング技術は、1Fでの事故による放射性物質の環境汚染や、原子炉の廃止 処置に伴う汚染された放射性廃棄物の除染技術として適応可能である。適切な方法を用いて除染 を行い、保管すべき放射性廃棄物の量を減らすことは、保管コストを大幅に下げることができる[5]。 一般的に用いられている除染方法として、化学除染、機械除染、電解研磨除染、ブラスト除染 などがあり、除染対象物の状況によりそれぞれ使い分けられている。これらの除染方法には多 くの欠点がある。特に、除染作業による作業被ばくのリスクがある。また、有害な放射性化学溶 液など、長期保管が必要な二次廃棄物が大量に発生するという問題もある[6]。これらの除染方法 と比較して、レーザー技術を使用した除染方法は、遠隔作業が可能であり、作業者の被ばくを減 らすことができる。また、この除染方法は非接触除染であるため、放射性廃棄物として長期間保 管が必要となる二次廃棄物の発生を大幅に削減することができる。つまり、レーザークリーニン グの特徴である、"非接触、遠隔操作可能で、二次廃棄物の発生量が少ない"という特徴はレー ザー除染ではさらに強力な長所となっている。

近年、1Fでは、処理水を貯蔵するためのフランジタンクを解体するためにレーザー除染技術が 使用されている[7]。母材表面に付着した放射性汚染物や母材の上に塗られた塗料が汚染している 場合、これらを除染するには、レーザーを照射し表面の汚染物を剝ぎ取る、または塗料を蒸発除 去するようなレーザークリーニング技術の延長で十分である。このような除染では低出力のレー ザーが用いるのが一般的である。一方、原子炉の廃止措置により、汚染物質(一次冷却材系配管、 原子炉容器壁等)からなる放射性廃棄物が大量に発生する。これらの放射性汚染は、母材表面だ けでなく母材の応力腐食割れ亀裂や孔食に内部まで侵入し、除染を難しくしている。これらを除 染する場合には金属母材を削り取るような除染が必要になる。そのため、高出力のレーザーを用 いて除染を行うと、金属表面に熱が集中し表面が溶融してしまうため、放射性同位体元素が逆に 金属材料に浸透してしまう[8][9][10]。その結果、溶融体内に残った放射性同位体元素は均一に 金属母材内に分布してしまい、この放射性汚染物を取り除くことが困難になり、高い除染効率が 得られない。

最近、表面の熱の効果を抑制するためナノ秒パルスレーザーを用いた除染の研究結果をいくつ かのグループが報告している[11][12][13][14][15]。特に、台湾の Yu-Chieh Lin らのグループ[13] は、手で持ち運ぶことが可能な Passive Q-switched fiber laser とポリゴンスキャナーを組 み合わせたレーザー除染装置を開発し、金属試料(ステンレス鋼、銅、鉄及びアルミニウム)に 模擬的に放射性泥を塗布したものをレーザー除染した結果を報告している。また、ブラジルの A. J. Potiens Jr. らのグループ[15]は、1980 年代まで使われていたアメリシウム 241 などの放射性物 質を塗布した放射性避雷針の廃棄のため、ナノ秒 Nd:YAG レーザーを用いて除染を行い、避雷針の 放射線量を下げるとともに、二次廃棄物の量を減らすことに成功したと報告している。しかしな がら、パルスレーザーは、イニシャルコストやメンテナンスコストが高く、装置の構成が複雑で あることが実用上の欠点となっている。そこで、LDD株式会社の E. J. Minehara は、レーザービー ム品質、エネルギー効率、出力安定性、信頼性に優れた性質を持っている連続波ファイバーレー ザーを小さいスポットに集光することで高パワー密度を実現し、集光スポットをガルバノスキャ ナで高速に掃引するレーザー除染手法を提案している[16]。レーザーの集光スポット径を小さく することで局所的に温度を上げることができ、金属母材を瞬時的に蒸発させることが可能となる。 しかしながら、レーザーの集光スポットが動かなければ、やはり熱が集中し、金属表面が溶融し てしまう。そこで、ガルバノスキャナを用いて高速でレーザーの集光スポットを掃引し除染を行 うことで、金属母材の溶融を抑えて効率的な除染を行うことができる。最近、レーザー照射時の 金属表面のスローモーション画像を撮影し、低速掃引では表面が溶け液滴がレーザーとともに移 動しているが、高速掃引ではほぼ溶融することなしに表面が剥離する様子が報告されており、さ らにこの手法を用いて、IFの事故に由来した放射性物質に汚染された金属部品のレーザー除染に も成功している[17][18][19]。

これらのレーザー除染技術を用いることで、原子力発電所の原子炉の廃止措置によって発生す る高レベル廃棄物を、低レベルまたはクリアランスレベルまで放射線量を下げることにより、放 射性廃棄物の貯蔵コストを大幅に削減することが期待される。

レーザー切断及びレーザー除染操作は、1~100 nm の超微粒子を生成する[20]。このような小 さなサイズの放射性微粒子は、肺の奥深くまで吸入可能であり、通常のフェイスマスクフィルター に捕らえられることなく、肺胞を通って血流に簡単に浸透する。非常に吸入性が高く、HEPA フィ ルターなどの従来の方法では捕捉が難しい粒子であり、大型の閉じ込め機能が必要な PCV での HEPA フィルターではいくつかの理由により、十分に効果的に機能しない可能性がある。また、HEPA フィルターは頻繁に交換する必要があり、粒子状の高レベル廃棄物が増加する。さらに、HEPA フ ィルターを使用した空気吸引では、フィルター内の圧力損失により、吸引パイプが近くに設置さ れていても収集効率が低下する可能性がある。Lee ら[21]は、使用時間によるフィルター効率のわ ずかな低下にもかかわらず、フィルターの下流の総エアロゾル質量が、新しいフィルターを使用 した場合と比較して約 10 倍大幅に増加することを報告している。超微粒子は空気の流れに従い、 水ミストからの慣性力ではなく、むしろ拡散によって相互作用するため、通常のスプレーや HEPA フィルターでは捕集しにくい。

本研究では、英国研究者と協力し、高度な粒子検出及び特性評価システムとエアロゾルの分散 制御を同時に組み込んだ安全なレーザー除染システムの開発を目指している。エアロゾル分散制 御については、単純な機械的封じ込めフードから光学レーザーシールドに至るまでの新しい封じ 込め方法が共同で調査される。

日本側は、レーザー切断及び除染用途のいずれかでの放射線リスクを低減するために、ウォー ターミストとウォータースプレーの共同利用に基づく、効果的な放射性分散制御方法と戦略を開 発する。英国側から提供されたエアロゾル粒子特性データに基づいて、ウォーターミストとウォー タースプレーによるエアロゾルスクラビングの効率を高める可能性を調査する。また、エアロ ゾル粒子とウォーターミスト粒子の間の引力を増加させるためのウォーターミスト粒子への電荷 付与の効果を確認する。

英国側は、エアロゾルのレーザー閉じ込め法を開発しており、スプレースクラビングにおいて エアロゾル粒子とミストの凝縮を改善するための実験を行う。エアロゾル除去技術と戦略の開発 は、包括的な実験と計算研究によって実行される。実験は、UTARTS で行われ、レーザー除染や切 断とスプレー操作の同時作業など、複数の現象を同時に再現する。また、CFD シミュレーションモ デルのより適切な検証を実行できる高空間分解能データを取得するため、いくつかのサンプリン グポイントでエアロゾルを測定する。検証済みの CFD モデルは、効果的で安全な除染及び廃炉計 画を作成するために、さまざまなレーザー操作シナリオで確認する。

本研究課題より期待される成果を以下に示す。

- (1) コンクリート及び金属材料のレーザー除染及び切断操作中のエアロゾルダイナミクス及び エアロゾル特性の理解。
- (2) レーザー除染及び切断時に発生する放射性エアロゾル制御の効果的な戦略と方法の開発。
- (3) 実験データに対して検証された高度な CFD モデルの開発。
- (4) 二国間協力の中で開発される英国側のロボットレーザー除染プラットフォームへのスプレー 及びウォーターミスト技術の適用。
- (5) 上記研究成果を 1F でのレーザー除染または切断戦略の計画と設計に適用する。

### 2. 業務計画

2.1 全体計画

本事業実施計画を図 2.1-1 と図 2.1-2 に示す。



図 2.1-1 事業実施計画

#### Programme Gantt Chart: Project OptiClean



図 2.1-2 英国側事業実施計画

- 2.2 研究項目の計画(日本側)
- (1) レーザー加工による微粒子飛散評価(東京大学)

[研究目標]

- 1. エアロゾルの動力学(時空間分布)と、レーザー切断または除染操作によって放出されるそれらの特性の調査
- 2. 超微粒子であるエアロゾル粒子の効率的な洗浄及び制御方法の開発
- 3. レーザーにより発生する超微粒子の CFD 解析

「方法]

- 1. 表面電荷、形態、及びレーザーによって放出される親水性または疎水性などのエアロゾル特 性を調査する(英国)。
- 2. 以下の特性評価への影響を明らかにするため、レーザー照射パラメータを制御する。
- 3. 項目1のメカニズムに基づいて、エアロゾルのスクラブ及び凝固効率を向上させるために、 スプレー液滴及び水ミストの電気化学的、表面、及び熱的特性を変更する(東京大学)。
- 4. UTARTS 測定システムの変更と改善により、CFD 検証のための高品質で高解像度のデータ生成のために、スプレー操作中に複数のサンプリングポイントにおけるエアロゾル濃度測定を実施する(東京大学)。
- 非放射性セシウムなどの吸収性化学物質を塗装した物体にレーザー除染を行うと同時に、水 ミストとスプレー噴射システムを操作して、双方向リアルタイムエアロゾル分散制御を行う。 レーザー照射は、コンクリートや金属材料などのさまざまな表面に対して行う(東京大学)。
- 6. レーザーによる表面除染中のナノ粒子エアロゾル飛散挙動予測のための CFD ツールを開発 するとともに、実験結果を活用して、エアロゾルモデリングの検証を行う。
- (2) データ評価及びモックアップ試験

[研究目標]

- 1. 試験結果の評価とともに改善点を提言する。
- 2. 日英で開発された超微粒子飛散防止システムのモックアップ試験を行う。

[方法]

- 1. 各機関で実施した研究成果について、過去に得られた知見を踏まえて、現場の除染技術への 適用の可能性について評価を行う。
- 日本側で開発したエアロゾル分散制御システムと英国側で開発した統合レーザー除染シス テムを組み合わせて、株式会社アトックスが保有する大規模モックアップ施設において、実 証試験を実施する。
- (3) データ評価

[研究目標]

1. 試験結果の評価とともに改善点を提言する。

[方法]

1. 各機関で実施した研究成果について、JAEA 研究で得られた知見を踏まえて、現場の除染技 術への適用の可能性について評価を行う。

### 2.3 研究項目の計画(英国側)

This research will initially examine various methods of mitigating atmospheric and instrument contamination whilst promoting particulate coalescence to encourage gravitational driven settling. The studies will be undertaken using the Heavy Element Laser-cleaning Particulate Analysis (HELPA) system to determine the ablated particulate size distribution as well as the spatial extent of the ablation plume. We will then investigate the efficacy of three different, increasingly novel methods for material containment and collection. These are:

- · Mechanical containment and collection
- · Aqueous mist containment and collection
- Optical containment and collection

Then, building upon the outcomes of the laboratory studies the prototype will be specifically tailored to the highly complex decommissioning challenges presented by legacy nuclear sites in both Japan (Fukushima) and UK (Sellafield; various Magnox). We will use the knowledge we have obtained in the laboratory studies to construct a field deployable prototype system. This will be attached to an LBR-Superdroid robotic delivery platform to demonstrate the safe, remote operation of this novel, all optical, decommissioning tool. We, refer to this solution as the OPTICLEAN system.

Additionally, as we are aiming to develop a comprehensive laser-based cleaning solution consisting of processing and characterisations capabilities, we also aim incorporate our existing remote Raman inspection system into the OPTICLEAN prototype. In combination with the HELPA LIBS system, this will allow for both pre-process material classification (and associated task planning) with posts cleaning assessments to be conducted with a single deployment.

2.4 実施体制

本研究実施体制画を図 2.2-1 に示す。



図 2. 2-1 実施体制図

**7** - 29 -

- 3. 令和3年度実施内容及び成果
- 3.1 レーザー加工による微粒子飛散評価(東京大学)
- 3.1.1 微粒子飛散実験及び解析評価
- 3.1.1.1 試験装置概要

本研究では、エアロゾル捕集実験を行うための実験装置 UTARTS を構築した。UTARTS は、霧の濃度、噴霧液滴の性質、エアロゾルの性質が異なる噴霧システムによるエアロゾルの除去性能を評価することが可能である。本課題においては、超微粒子の測定が可能となるよう、既設の測定システムの改善を行った。



図 3.1-1 UTARTS 試験装置概略図

図 3.1-1 は、試験容器、計測器、及び関連機器の概略レイアウトを示したものである。UTARTS は、円筒形の容器と異なるサブシステムで構成されており、以下にその詳細を説明する。図 3.1-2 に示すように、UTARTS は高さ 2.5 m、内径 1.5 m、総体積 3.92 m<sup>3</sup>のステンレス製格納容器内と なっており、エアロゾルの掃気実験が実施可能な設計となっている。一般的に使用される楕円形 のヘッドは、底面の半径と深さの比が 2:1 になるように設計されている。実験装置は、13 個の光 学観察窓と、内部アクセス用のマンホール1個を備えている。光学観察窓は、実験現象の観察、 液滴速度場と液滴サイズ分布の計測のための光学計測に使用することが可能となっている。 図3.1-2に示すように、水平方向に対して66°の角度で2つの光学窓を備えている。この角度では、 液滴表面からのレーザー光の反射と屈折が同じ光強度となり、形成されたフリンジパターンが後 処理に非常に明確であるため、ILIDS(Interferometric Laser Imaging for Droplet Sizing)法 による液滴サイズ測定に最も適した角度となっている[22]。マンホールは、実験後のメンテナン ス作業や清掃のための使用を目的としている。



図 3.1-2 UTARTS 外観と観察窓

UTARTS では、レーザー洗浄や切断によるエアロゾル発生とは別に、エアロゾル発生システムが 装備されており、異なる濃度のエアロゾルを発生させることが可能となっている。エアロゾル発 生装置内に粒子を入れ、コンプレッサーからの気流をエアロゾル発生装置に噴射して粒子を吹き 上げ、形成されたエアロゾル粒子流が UTARTS 内へと導かれる。図 3.1-3 にエアロゾル発生装置の 写真と設計図を示す。





図 3.1-3 UTARTS エアロゾル発生装置

また、UTARTS には超音波ミスト発生装置が備えられており、装置内での均一なミスト生成が可能な仕様となっている。本装置により、サブミクロンの水ミストを発生させ、容器内にミストを分散させることが可能となる。図 3.1-4 にミストサイズ分布を示す。低濃度ミストのピークレベルは 12566.82 P/cm<sup>3</sup>、高濃度ミストのピークレベルは 18922.43 P/cm<sup>3</sup>であり、低濃度ミストと高濃度ミストのピークレベルはほぼ同一である。いずれのミスト濃度においても、ミスト粒子径は 0.4~0.9 µm の範囲が支配的で、平均球径 0.675 µm にピークがある。また、直径が 2~10 µm の範囲にある比較的大きなミスト粒子も混在する。エアロゾル粒子とミストは容器内に分散された後、容器内をランダムに対流し、互いに衝突して大きな粒子クラスターに凝集することが確認されている。ミスト有無の実験ケースについて、濃度レベルを変えてエアロゾルの除去性能を比較 することで、エアロゾル凝集の性能を検証するとともに、エアロゾルの噴霧捕捉効率の程度に及ぼすミスト濃度の影響についての調査も可能となる。



図 3.1-4 ミスト生成装置による球径分布

エアロゾル濃度測定システムは、サンプリングチューブ、ヒーターラップチューブ、電気式低 圧衝撃装置 (Dekati® ELPI®+)、光散乱分光器 (Welas® digital 2000) にて構成されている。Dekati® ELPI®+は粒径 0.006~10 um、Welas® digital 2000 は粒径 0.2~10 um の粒子測定を目的としてい る。エアロゾルのサンプリングは、UTARTS内に2か所の測定ポイントを設けることで実施する形 となる。サンプルフローはその後、掃気実験中のエアロゾル粒子濃度と粒度分布を測定するため の測定器内へと導かれる。エアロゾルアナライザーWelas® digital 2000 は、光散乱スペクトロ メーターシステムで、1 P/cm<sup>3</sup>未満から 106 P/cm<sup>3</sup>までの粒子濃度と 0.2~10 µm の範囲の粒子径 を、絶対測定誤差±0.01 µm、相対誤差5%の精度で測定可能となっている[22]。本研究において は、エアロゾルアナライザーWelas® digital 2000の前にヒーター巻きパイプを設置し、エアロ ブルアナライザー内の加熱式キュベットとともに150 ℃に加熱し、エアロゾル粒子濃度測定時の ミストを十分に除去している。Dekati® ELPI®+は、リアルタイム粒子計測用の粒度分布測定装置 であり、6 nm ~10 µm の広い粒子径範囲において、10 Hz のサンプリングレートでリアルタイム に粒度分布と濃度の測定が可能となっている。ELPI®+の高温バージョンでは、180 ℃のエアロゾ ルを直接サンプリングすることも可能とされている。粒子はカスケードインパクターでサイズ分 類されるため、リアルタイム測定後に粒子を回収して化学組成の分析も可能であるのに加え、さ らに、ELPI®+は、従来の重量式インパクターによる測定と同様に、粒子の電荷サイズ分布測定に も応用可能となっている。粒子分析装置の詳細を表 3.1-1 に記す。

Aerosol Analyzer	Dekati® ELPI®+	Welas® digital 2000
Working principle	Electrical low-pressure impactor	Light-scattering spectrometer
Particle type	Solid, liquid	Solid, liquid
Measurement range (size)	0.006∼10 µm	0.2∼10 µm
Measurement range (C <sub>n</sub> )	Stage 14: 0.1-1.7×10 <sup>4</sup> P/cm <sup>3</sup> Stage 1: 240-7.9×10 <sup>6</sup> P/cm <sup>3</sup>	$1-10^6$ P/cm <sup>3</sup>
Withstand temperature	up to 180 $^\circ\!\mathrm{C}$	up to 250 °C for aerosol sensor
Sampling flow rate	10 L/min	5 L/min

表 3.1-1 エアロゾル分析器の詳細

スプレー噴射システムは、水槽、水ポンプ、スプレーノズル、流量計、圧力計で構成されている。本研究においては、異なる粒度分布を持つ噴霧液滴を生成できる3つのフルコーンのスプレーノズルを使用した。表3.1-2 に本実験に使用する3つのノズル(Nozzle 1~3)の詳細を記載する。ノズルのオリフィス径は、それぞれ1.2 mm、1.7 mm、及び1.2 mmとなっており、噴射流量は、それぞれ2 L/min、3 L/min、2 L/minである。3つのノズルは、UTARTS 装置内のノズル出口から300 mm 下に設置されている。

	Nozzle 1	Nozzle 2	Nozzle 3
Model	1/8GG-SS3004	TG3.5	TG2
Orifice diameter	1.2 mm	1.7 mm	1.2 mm
Injection flow rate	2 L/min	3 L/min	2 L/min
Distance from the top of the vessel	300 mm	300 mm	300 mm

表 3.1-2 UTARTS 噴流ノズル寸法の詳細

また、本課題においては、エアロゾルの放射線誘発表面電荷の影響を調査するため、帯電した 液滴・エアロゾル粒子を使用しての予備試験を実施した。図 3.1-5 に本実験に使用した帯電装置 を、図 3.1-6 に表面電荷とエアロゾル粒子の除去率との関係を示す。これらの結果から、東京大 学エアロゾル除去試験施設である UTARTS を利用することにより、エアロゾル除去に対してスプレー 電荷が有効であることが確認された。



図 3.1-5 帯電放射線誘発装置



図 3.1-6 放射線誘発表面電荷の影響

加工用のレーザー光源としては、中心波長 1070 nm・最大 1.5 kW の連続発振(CW) ファイバー レーザー(古河電気工業株式会社、FEC1000S-7)を使用した。デジタルコントローラーには NCL-151 (株式会社 NISHIHARA)を用い、最大出力 1.5 kW を 100 %として任意の出力を設定した。本レー ザー付属のレーザーヘッド(株式会社レーザックス、LXD30S)は2枚のレンズ(焦点距離 F=100 nm と F=200 nm の組)を用いて、2枚目のレンズから200 nm の位置でビーム直径を2倍(ファイバー コア径 14 µm×2 = 28 µm)に拡張するものである。一方、本実験においては、照射ターゲットを チャンバー中央(照射用ウィンドウから790 nm)に設置する必要がある。このため、付属ヘッド のみでは外部からの照射のためには焦点距離が不十分であった。そこで、レーザーヘッドに加え、 ターゲット位置で十分なビーム径を持つようレーザーを輸送するレンズ光学系の設計・構築を 行った。

今回のターゲットは薄い平板であり、ビーム径が小さすぎるとレーザー照射に耐えられず容易 に貫通してしまう危険があった。そこで、今回の実験ではあえて焦点位置をターゲットからずら し、ターゲット位置でビーム径が100~200 µm となることを設計の目標とした。レーザー輸送計 算ソフトである reZonator [23]を用いて、レーザーヘッド光学系に2枚の輸送用レンズペア (F=200 mm、 F=1000 mm)を加えてビーム輸送計算を行った。図 3.1-7 (a)に計算体系を、図 3.1-7 (b)に計算 結果を示す。なお、レーザーヘッドのレンズ位置については、メーカーより正確な値が得られな かったため、ヘッド筐体外部からおおよその位置を推定した。結果より、ウィンドウから 790 mm の位置でビーム直径が140 µm (ファイバーコア径の10 倍)となるようなレンズ光学系の設計が できた。

本計算をもとに、F=200 mm、F=1000 mmの2枚についてARコート付きのレンズ(型番等は図3.1-7(a)に記載)を調達し、レーザー照射体系を構築した。図3.1-8にその外観を示す。照射位置の確認は、レーザーヘッドに付属したガイド用赤色レーザー光で行った。





図 3.1-8 UTARTS レーザー照射体系

3.1.1.2 CFD モデル概要

エアロゾル粒子を含む汚染物質低減のための噴霧シミュレーションは、複雑な流動現象を CFD 計算モデルに考慮する必要がある。具体的に、エアロゾル運動は直接衝突だけでなく、ブラウン 拡散、乱流拡散、温度拡散、密度拡散等の機構に依存することが知られている。本研究における CFD モデル構築は、Imperial College London で行われる音響浮遊装置内での単一液滴の小規模実 験と、UTARTS の中規模施設で行われるスプレーによるナノメートルサイズのエアロゾルの懸濁液 の吸着現象において、既存の計算モデルを検証することを目的としている。

図 3.1-9 に UTARTS の計算モデル外観を示す。支持構造物を無視するため、レーザー照射プレートは容器中央に浮遊する形で構築されている。令和 3 年度の計算では、プレートは断熱条件を持つ単純な壁と仮定しており、エアロゾルの発生を考慮しない状態で、CFD 計算の妥当性確認を実施した。





	Nozzle 1	Nozzle 2
Nozzle geometry		
	GG-30 1/8" to 3/4" male conn. Removable cap and vane	<b>TG Spray Tip</b> Use with T or TT bodies and tip retainer
Spray angle	26~32	46~50
Expected droplet size	$1 \text{ mm}{\sim}5 \text{ mm}$	0.1 mm∼1 mm

表 3.1-3 CFD 計算に使用した UTARTS 噴流ノズル寸法の詳細

CFD+ラグランジュ法を用いた解析では、流れは通常の CFD モデル (ナビエ・ストークス方程式 +乱流モデル)で解きながら、ラグランジュ・アプローチによるスプレー液滴のモデル化を検討 した。ここでのラグランジュ粒子は、エアロゾルを除去するために使用されるスプレー液滴とし ており、詳細なシミュレーションでは、噴霧の流量と角度の影響を調べた。液滴を容器内の流れ に沿って再循環させるため、双方向のカップリングが使用されている。

図 3.1-10 に誘導された流れと噴霧液滴の結果を示す。上図は、表 3.1-3 に記されたコーン角 26 度の Nozzle 1 の結果、下図は、コーン角 46 度の Nozzle 2 の結果である。本解析において、エア ロゾル粒子は考慮されていないが、エアロゾルの除去法として 2 つの可能性が考えられる。1 つ は直接衝突によるスプレー領域での除去、もう 1 つはエアロゾルがスプレーコーンに巻き込まれ るスプレーコーン外での再循環によるものである。噴流照射角度が小さく、流量が少ない場合、 図 3.1-10a)では、ノズルの外側に比較的小さな領域が存在、そこでは緩やかな再循環が形成され る。この領域に含まれるエアロゾルは、スプレー液滴に干渉・遭遇する確率が高くなるが、この 領域より上部に対流するエアロゾルは、スプレーコーン内に輸送されず、継続して浮遊する形と なる。流量が増加すると再循環領域は拡大し、より多くのエアロゾル粒子の除去が可能となる。 また、スプレー角度が大きい場合、エアロゾルがスプレーの相互作用によって排除される領域は さらに小さくなっていく傾向が確認された。これらの定性的な結果は、過去に行われた実験的分 析によって裏付けられており、図 3.1-11 に示されている。令和 3 年度の結果から、小粒子径の場 合、Nozzle 2 の使用が高い除去率を示した。

### JAEA-Review 2022-061



図 3.1-10 異なるノズル組合せによる UTARTS 内における流況シミュレーション結果

- a) Nozzle 1, 2 1/min b) Nozzle 1, 3 1/min c) Nozzle 2, 2 1/min
- d) Nozzle 2, 3 1/min



図 3.1-11 異なるノズルと流量条件組合せによるエアロゾル粒子除去率[24]

3.1.1.3 エアロゾル粒子と単一液滴の動的効果の検証

エアロゾル除去に関する噴霧現象の解析の難しさの1つは、発生する液滴の数が多く、その1つ 1つの現象の詳細を得ることができないことである。レビテータは、単一の液滴の動的効果を 研究し、エアロゾル除去プロセスに関する情報を得るために使用できる比較的簡単な装置である。 本研究の協力先である Imperial College London にはエアロゾル浮遊装置があり、日英共同研究 においても活用される予定であり、その形状は図 3.1-12 に示したものとほぼ同じである。このレ ビテータは、単一の液滴へのエアロゾルの沈着を研究するために、ガスと浮遊エアロゾルの流れ を注入することが可能となっている。



図 3.1-12 Imperial College London レビテータを模擬した CFD 計算領域

単一スプレー液滴へのエアロゾルインパクションのシミュレーションでは、UTARTS で行われた ものとは異なる解析方法を採用しており、液滴は VOF (Volume of Fluid) で、エアロゾルはラグ ランジュ粒子として計算を実施している。連続相の流れは通常のナビエ・ストークス+乱流のア プローチでシミュレートされているが、初期段階では、液滴を中心に浮遊させたままガスの流れ を展開する簡略化された方法を用いた。これは、液滴が上方に移動したり、落下したりしないよ う、重力を適切に修正して得られた形である。液滴、周囲の流れ、エアロゾル分布の予備的な結 果を図 3.1-13 に示す。

#### JAEA-Review 2022-061



図 3.1-13 a) 計算領域における液滴 b) 液滴周囲の流況 c) 液滴によるエアロゾル粒子捕獲

上記の結果から、STAR-CCM+を用いた本 CFD 解析により、液滴によるエアロゾルの捕獲シミュレートが可能であることを示している。令和3年度の解析は探索的なシミュレーションであるため、令和4年度以降に向けた検討事項として挙げられるのが、音響場の再現である。Imperial College Londonの実験にて実在する音響場が現在の CFD 計算では予測されていないため、液滴周りの速度場はレビテータ内の速度場と一致しない可能性がある。従って、VOF による液滴挙動の解析が適切か否かは、現段階では明らかでは無いが、基礎的な現象を対象とした物理的に複雑な実験の模擬を可能とする手法の1つであることは確かである。

令和4年度の解析に向け、音響場の再現を計算するにあたり、工学院大学の先行研究を参照した。工学院大学においては、超音波式粒子浮遊装置を用いて液滴を浮遊させることに成功しており、最近の論文[25]では、液滴内と液滴外の圧力場と流速の測定結果が報告されている。



本解析では、工学院大学の研究成果を参考に、CFDによる定在波の主な挙動と流れ場の再現の可 否について予備的な確認を行った。定在波の発生は液滴周りの速度場に影響を与えるため、この 点は Imperial College London の設備を適切に検証するための基礎となる。図 3.1-14 に示すよう に、本 CFD 計算では、底部ホーンと上部反射板で圧力振動を入力とする二次元形状で実施してい る。定在波を発生させるために波の反射が生じるように領域が設計されているが、より確実な計 算解を得るため、上部からの反射波を入力として与えている。周波数とメッシュサイズを含めた 詳細を表 3.1-4 に記す。

Number	Units	Description
347.28	m/s	speed of sound
18277.89	Hz	target frequency
0.019	m	acoustic wavelength
0.00095	m	required mesh resolution
0.95	mm	required mesh resolution
47.5	mm	Height of the solution domain
0.0475	m	Height of the solution domain
2.5	-	Wavelengths in the domain
18	mm	radius of the solution domain
48349.11	mm <sup>^</sup> 3	Volume of the solution domain
56392.02	-	Required mesh count (Ideal Hexa)
3.E-06	S	Required time step
0.000137	S	Time to travel sound wave along with height direction i.e least required Physical Time in STAR-CCM+
50	-	Least required Time Level in STAR-CCM+
20		Inner Iteration
1000		Least required iterations in STAR-CCM+
10000		Required iterations in STAR-CCM+ for 10 cycles

### 表 3.1-4 Main parameters of the simulation

解の精度を上げるため、本解析においては、空間3次(MUSCL3次)、時間2次の設定でシミュ レーションを実施した。数学的には2.5波長の領域が得られるよう周波数が設定されているため、 定在波の発生が考えられるが、数値近似や自由境界条件等の要因により、このような解は得られ ていない。このことから、実際の実験においても、小さな振動や外的要因で定在波が砕けたり、 再生したりすることが考えられる。しかしながら、CFDを用いたシミュレーションで重要なのは、 液滴の浮遊を維持するために、圧力ができるだけゼロ近似となるような節点を領域内に作ること である。



図 3.1-15 計算領域における圧力波 (上)定常波、(下)定常波崩壊後の圧力波

図 3.1-15(上)に示すように、初期条件での圧力波は定在波に近い形態となる。この状態では、 仮想的な完全定在波は完全に平らな波で表現される。シミュレーションでは、やがて波が砕け、 図 3.1-15(下)のように正弦波状に復帰する。節点(緑、青、黄色の点で表現)は常にゼロ値の 周辺、特に中央付近に位置しているが、この挙動を確認する1つの方法として、圧力の標準偏差 をプロットしたのが図 3.1-16である。予備計算では、圧力場の標準偏差は同程度に一致した。実 験での節点はシミュレーションと比較してより明確でゼロに近いが、令和4年度以降の計算に向 けての基礎解析としては十分な精度が確認された。



### **CFD** simulation

図 3.1-16 CFD 圧力波標準偏差コンター図

3.1.1.4 非放射性セシウムを模擬したレーザー除染実験

令和3年度に実施したレーザー照射予備実験として、図3.1-17に示すように、様々なテスト表面(鉄;酸化鉄)をサンプルとして準備した。令和3年度は鉄板(Iron plate、Oxidized plate) を使用し、非放射性セシウム模擬材に対してレーザー照射を行う際に発生する粒子径を計測する ため、出力を変えた赤外線レーザービームを用いて照射実験を実施した。また、PCVの壁に堆積し た核分裂生成物またはα粒子を摸擬したナノ粒子を含んだ内壁塗料(SiC、ZrO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>)を使用し て予備試験を行った。



図 3.1-17 レーザー照射試験に使用したサンプル

本実験においては、実験毎に異なるレーザー出力を調整し、レンズを用いて 130 cm 離れた試験 片にレーザー光を集光させ、光学窓を通して円筒容器内の試験片に照射する。レーザービームが 試験片に衝突すると、材料の蒸発が発生する。その過程で、エアロゾル粒子が表面より発生し、 サンプリングラインを通じて Dekati® ELPI®+と Welas® digital 2000 装置にて粒子濃度の測定が 行われる。

3.1.2 データ評価 (連携先: JAEA)

本実験においては未酸化の鉄板(鋼板)と表面酸化を生じた鉄板を準備し、出力を変えた赤外線レーザービームを使ってサンプルへの照射を実施した。発生したエアロゾルは、サンプリングラインを通して Dekati® ELPI®+デバイスにて粒子径が測定された。図 3.1-18 に異なる試験面における平均粒子濃度計測結果を示す。レーザー出力の上昇に伴い、平均粒子濃度も上昇することが確認された。エアロゾル粒子のサイズ分布は、レーザー出力の影響を受けないことも本実験により明らかとなった。ZrO<sub>2</sub>及び TiO<sub>2</sub>コーティングに使用されたナノ粒子は、生成されたエアロゾルと同程度の大きさ(~0.15 µm)であり、ZrO<sub>2</sub>と TiO<sub>2</sub>は粒子径が異なっていたが生成したエアロゾルの粒径は~0.15 µm で差はなかった。SiC の場合は 0.1 µm と小径であった。これを考慮し、粒子サイズが比較的小さい(0.045~0.065 µm)SiC ナノ粒子で別の表面を作成し、図 3.1-18 に示すように、レーザー照射により 0.1 µm 以下のエアロゾルの生成が確認された。

SiC コーティングのレーザー洗浄実験後、発生したエアロゾルを捕捉するため液滴スプレー実験を実施した。本実験ではミスト発生装置は使用せず、ノズルによる液滴スプレーのみを考慮した。スプレー噴流実験の結果を、図 3.1-19 に示す。液滴スプレーは流量 2 LPM で 30 分間実施したが、図 3.1-19 からエアロゾル濃度に大きな変化は見られないことが分かる。これは、SiC ナノ粒子の疎水性が高く、粒子径が小さいため、水スプレーによるエアロゾルの捕捉が阻害されたためと考えられる。



図 3.1-18 エアロゾル粒子径計測結果



図 3.1-19 液滴スプレー流入に伴う平均エアロゾル粒子径

令和3年度の実験では、レーザー出力ならびにコーティング材の種類がレーザー照射により発 生したエアロゾル粒子濃度へ与える影響を分析するために実施したものである。本実験において は、様々なテスト表面を準備し、異なる出力の赤外線レーザービームを使用して照射を実施した。 レーザーパワーの増加に伴い、平均粒子濃度が上昇することが確認された。また、照射パワーに より、発生するエアロゾル濃度を制御することが可能であることも示唆された。同様の傾向は非 放射性セシウムが浸透したコンクリート製サンプルにおいても見られると考えられるが、照射に より生成される溶融スラグの影響に関しては、令和4年度以降に検証予定である。また、1Fにお ける廃炉作業にレーザー照射を考慮する上で、生成されるエアロゾルの性質(疎水性、親水性) と粒子径分布は重要なパラメータとなることが示唆された。令和4年度以降は、レーザー照射に より生成されたエアロゾル粒子径を大きくするため、ミスト凝集を伴う実験も実施する予定であ る。

3.2 データ評価及びモックアップ試験(再委託先:アトックス)

3.2.1 データ評価

株式会社アトックスは、民間企業として初めて原子力施設から放射性物質による汚染の除去業 務を受託し、原子力施設の総合的なメンテナンス技術を半世紀にわたって築き上げてきた。除染 の技術としては、ブラスト除染装置、電解除染装置、側面除染機、薬液を用いた除染方法の開発 を進めてきた。一方、レーザーを用いた表面の除染技術は、化学薬品を使用せず、また機械的に 削ったり、ブラストでガラスやセラミックス、氷などをぶつけて除去する技術とは異なり、非接 触で遠隔に操作でき、二次廃棄物の発生が少なく、安全で環境に優しい技術として本研究に期待 を寄せている。令和3年度は、各機関の試験の進捗状況の確認を実施しつつ、レーザー除染に関 する実績例の調査を実施し、レーザー除染法の知見(課題、問題点)を整理した。本節3.2では、 2 つの実績例について紹介し、廃炉現場への適用性の観点から具備すべき仕様、性能を表に整理 する。

1 例目は、福井県の産業創出事業に基づく平成 22~23 年度「嶺南地域新産業創出モデル事業補助金」による支援の下で、株式会社西日本クリエイト、株式会社アトックス、若狭技研工業株式 会社、JAEA、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センターの5 社を参加事業者として実施された ものである。空冷方式の CW300W ファイバーレーザー装置を使用することにより、レーザー本来の 特徴を引き出すことができ、二次廃棄物の発生を抑制し、さらに二次廃棄物の回収(剥離と吸引) を同時に行うことができ、これまでの除染方法と比べても作業工程を低減することができた。ま た、JAEA 敦賀廃止措置実証部門 新型転換炉原型炉ふげんよりレーザー除染用金属製汚染廃棄物 を提供して頂き、除染対象物に係わるデータ(寸法、形状、材質、汚染度)を収集した。除染効果 としては、除染係数 DF50~70 を得ることができた。

吸引ダクトのフィルターへの放射能回収率はほぼ 100 %であり、二次廃棄物としては吸引ダクトのフィルターのみが発生すると考えられた。将来的には、原子炉建屋廃止措置関連においても 有効な技術になり得ると考えられた。本事例により得られた知見並びに現場の汚染技術への適用、 本課題への反映事項を表 3.2-1 に示す。

CW300W ファイバーレーザー装置による除染試験		
解決すべき課題・ 問題点	除染対象サンプルの寸法が 35 mm×35 mmの小さい正方形しか切出 せなかったため、サンプル保持台への取付けについて作業性が悪く なった。また、レーザースキャン領域設定に時間を要し、更に、Z 軸の焦点自動制御が作動しなかったことにより、人による焦点距離 調整を行わなければならなかったことも作業性に影響した。レーザ 一除染装置の操作性については、光ファイバーを折らないように細 心の注意を要した。	
廃炉現場への適用性	実際の除染作業は、例えば、原子炉建屋内の壁面の除染であったり、 大きい切断片である場合、Z軸の焦点自動制御が可能であることを 前提とすれば、レーザースキャン領域の初期設定を固定しておけ ば、作業性に問題はないと考えられる。また、将来的には、車両ロ ボットにレーザー除染装置一式を搭載し、遠隔操作できるようにす ることで、作業上の被ばく低減も図ることができる。	
本事業への反映事項	<ul> <li>・操作性、作業性確認の必要性</li> <li>・レーザー装置の安定性確認の必要性</li> <li>・二次廃棄物減容効果確認の必要性</li> </ul>	

表 3.2-1 実績事例 1 からの本課題における反映事項

2 例目は、令和3年に株式会社アトックス技術開発センターにおいて実施したクリーンレーザー ジャパンプロ株式会社製レーザークリーニングシステム「CL1000」によるレーザー除染試験で ある。本試験では、レーザー除染の基本的特性を確認するとともに、本装置を遠隔または自動装 置化するために必要な知見を得ることを目的とした。本課題への反映事項を表 3.2-2 に示す。 本試験により得られた知見は、電気系ユーティリティの設計に必要な消費電力及び漏れ電流の 特性、材料の違いによる特性、パルス周波数による影響、送り速度とトラベルオーバーラップに よる影響、焦点距離による影響、スキャン周波数とスキャンオーバーラップによる影響、駆動機 構、独自性の検討結果などである。今後、本研究を進めるにあたって必要な知見について共有し ていきたい。

	CL1000 によるレーザー除染試験		
	解決すべき課題・ 問題点	<ul> <li>・レーザー使用時の反射光に対する配慮の必要性</li> <li>・除染効果を模擬する塗装剤選択の必要性</li> <li>・ダスト吸引効率向上の必要性</li> </ul>	
۲	廃炉現場への適用性	1Fの廃止措置に適用していくためには、レーザー除染効率、ダス ト回収効率、二次廃棄物減容に加えて適切な遠隔操作を実現する 必要がある。	
	本事業への反映事項	・操作性、作業性確認の必要性 ・レーザー照射条件最適化の必要性 ・1F に使用されている塗装剤等、化学物質調査の必要性	

表 3.2-2 実績事例 2 からの本課題における反映事項

以上、過去に得られた知見を踏まえ、現場の除染技術への適用の可能性について評価を行い、 本課題におけるレーザー除染において解決すべき課題、問題点の抽出を行った。

また、レーザー除染を1Fの廃止措置に適用していくにあたって使用されている塗装剤を把握し、 その塗装剤に対する剥離効果を評価する必要性が考えられる。関西ペイント株式会社の協力をい ただき、1F(BWR)に使用されている塗装剤に関する情報を一部得ることができたので表3.2-3に 示す。

エポマリンRCX(エポマリンRXコンクリ ート)システム	本館コンデンサーピット(1964)本館サービスビ ル(1970)6号機ランドウエストビル(1975)1号 機タービン室(1978)6号機コンクリートダクト (1984)
エポマリンRXM(エポマリンRXメタル) システム	1~6号機排気設備(1971~1977)
エポマリンRXC床用・壁用システム	プロセス建屋(2004)3、4トーラス室(2004) 6号機タービン建屋(2005)3号機リアクター建屋 (2005)6号機リアクター建屋(2005)3号機ター ビン建屋(2006~2007)4号機タービン建屋(2007) 4号機リアクター建屋(2007)6号機リアクター建 屋(2007)

表3.2-3 1F (BWR) に使用されている塗装剤の一部

引き続き、原子力発電所の特に一次系施設用途に使用されている塗装剤について情報収集を行い、本研究最終年度の実証試験に繋げていく予定である。本研究において実施予定となっている株式会社アトックス技術開発センター模擬ウエル施設を図3.2-1に示す。





図 3.2-1 模擬ウエル施設

### 3.3 英国側研究成果概要

The laser decontamination facility at the University of Bristol (UoB), is being upgraded increase the spectral range of the LIBS characterisation measurements.

Prior to this baseline measurements for the instrument were conducted across a variety of analogous substrates. Some differences in the nature of ejected particulates (generated by laser cleaning) were observed - with data collected using real-time insitu particulate measurement equipment.

For example: relative to the particles produced by cleaning of a 'plain' stainless steel surface, it has been found that smaller-sized particles are generated from a painted surface, while larger-sized particles are produced from a cerium oxide-covered surface (the cerium intended to be a non-radioactive replica of uranium/plutonium oxides).

In all cases, HEPA filters (installed in the exhaust of the cleaning chamber) were found to work well in terms of achieving a reduction in particle flux. Additionally, based on SEM/EDX measurements of particles generated by laser cleaning of stainless steel, it appeared that there is a change in the iron:chromium ratio compared to the substrate. This observation perhaps indicated that the laser ablation was resulting in significant disassociation of Fe and Cr. This may be due to their different vapour pressures.

A realtime demonstration of 'progress' of laser cleaning was also conducted. When applied to a CeO2-coated steel sample, LIBS measurements clearly showed a decrease in Ce content with number of cleaning passes, and with most of the CeO2 coating removed after two passes. 3.4 研究推進

令和3年度は、受託研究機関の下で各研究項目ならびに CLADS との連携を密にし、研究を進めた。また、研究実施計画を推進するため、国内参加組織による打ち合わせに加え、英国側との Joint Meeting を定期的に開催した。

●全体会議

【期間】2022年3月22日

【場所】Zoom

【出席者】

- ・東京大学:三輪修一郎、Avadhesh Sharma、鈴木俊一、Marco Pellegrini、Erkan Nejdet、 寺林稜平、長谷川秀一
- ・ JAEA:小菅淳
- ・株式会社アトックス:田沢周作

【用務内容・成果】

令和3年度の研究成果報告ならびに令和4年度の研究の進め方について、これまでの各分担 研究者の進捗状況を踏まえながら議論した。

●Japan-UK Joint Meeting #1

- 【期間】2021年12月9日
- 【場所】Microsoft Teams

【出席者】

- University of Bristol : Tom Scott, David Magson-Smith, John Day
- Imperial College London : Yannis Hardalupas
- ・東京大学:三輪修一郎、鈴木俊一、Marco Pellegrini、Avadhesh Sharma、Erkan Nejdet、 寺林稜平
- ・ JAEA:小菅淳
- ・株式会社アトックス:田沢周作

● Japan-UK Joint Meeting #2

【期間】2022年1月21日

【場所】Microsoft Teams

【出席者】

- University of Bristol : Tom Scott, David Magson-Smith, John Day
- Imperial College London : Yannis Hardalupas
- ・東京大学:鈴木俊一、Marco Pellegrini、Avadhesh Sharma、Erkan Nejdet、寺林稜平
- JAEA:小菅淳
- ・株式会社アトックス:田沢周作

● Japan-UK Joint Meeting #3

【期間】2022年3月18日

【場所】Microsoft Teams

【出席者】

- University of Bristol : Tom Scott, David Magson-Smith, John Day
- Imperial College London : Yannis Hardalupas
- ・東京大学:三輪修一郎、鈴木俊一、Marco Pellegrini、Avadhesh Sharma、Erkan Nejdet、 寺林稜平
- ・JAEA:小菅淳
- ・株式会社アトックス:田沢周作

4. 結言

令和3年度に実施した本研究課題においては、発生するエアロゾルの粒子濃度に及ぼすレー ザー出力とテスト表面の影響を分析するために実施したものである。様々なテスト表面を準備 し、異なる出力の赤外線レーザービームを使用して洗浄した。レーザーパワーの増加に伴い、 平均粒子濃度が上昇することが確認された。

研究項目(1)のレーザー加工による微粒子飛散評価においては、微粒子飛散実験及び解析評価(東京大学)とデータ評価(JAEA)を以下実施し、以下の成果を得た。

- ・UTARTS において加工用レーザー照射試験を行い、エアロゾル発生実験を行った。また、それ らがエアロゾル評価装置と連動できるよう、レーザーを設置した。
- ・エアロゾルの放射線誘発表面電荷の影響を調査するために、帯電したエアロゾル粒子を使用して予備試験を行った。
- ・PCVの壁に堆積した核分裂生成物またはα粒子を模擬したナノ粒子も含んだ内壁塗料を使用して予備試験を行った。
- ・試験結果を基に既存の CFD モデルを改良し、予備解析を行った。

以上の結果より、JAEA との連携よりデータ評価を行った。本研究においては、照射パワーに より、発生するエアロゾル濃度の制御が可能と示唆される。生成されるエアロゾルの性質(疎 水性、親水性)と大きさは重要なパラメータとなるため、令和4年度以降の実験において詳細 に検討予定である。また、生成エアロゾルのサイズを大きくするために、今後はスプレー噴射 の前にミスト凝集を行う実験も行う予定である。

研究項目(2)のデータ評価及びモックアップ試験においては、データ評価を実施し、以下の 成果を得た。

- 各機関の試験の進捗状況の確認を行った。
- ・過去に実施されたレーザー除染法の知見(課題、問題点)を整理した。
- ・廃炉現場への適用性の観点から具備すべき仕様、性能を整理した。
- ・各機関で実施した当該年度の研究成果について、過去に得られた知見を踏まえて、現場の除 染技術への適用の可能性について評価を行った。

また、最終年度に実施予定であるモックアップ試験の準備を行い、令和4年度の計画に反映 させた。 参考文献

- J. F. Asmus, C. G. Murphy, and W. H. Munk, Studies on the Interaction of Laser Radiation with Art Artifact, Proceedings of SPIE, vol. 41, pp. 19-27, 1973.
- [2] 藤田和久,豊澤一晃,沖原伸一朗,前橋伸光,高原和弘,秋吉徹明,レーザークリーニング による鋼構造物のメンテナンス,レーザー研究 45, pp. 418-422, 2017.
- [3] 株式会社光響, コンパクトタイプレーザークリーナー, https://www.symphotony.com/wpcontent/uploads/FL-LC\_2021\_1222\_2.pdf(参照:2022年3月31日).
- [4] E. Di Francia, R. Lahoz, D. Neff, E. Angelini, and S. Grassini, Laser Cleaning of Cu-based Artefacts: Laser/corrosion Products Interaction, Acta IMEKO, vol.7, no.3, 104, 2018.
- [5] OECD Nuclear Energy Agency, R & D and Innovation Needs for Decommissioning Nuclear Facilities, 2014.
- [6] Nuclear Energy Agency, Organisation for the Economic Co-operation and Development, Decontamination Techniques Used in Decommissioning Activities: A Report by the NEA Task Group on Decontamination, 2009, 51p.
- [7] 前城直輝,小川智広,佐々木辰茂,竹内良平,長峰春夫,中村弘,フランジタンク解体にお けるレーザー除染工法の開発,日本原子力学会 2019 年秋の大会, 2009, 2019.
- [8] K. H. Leong, B. V. Hunter, J. E. Grace, and M. J. Pellin, Laser-based Characterization and Decontamination of Contaminated Facilities, DOE Scientific and Technical Information Bridge, 1996, 12p.
- [9] R. L. Demmer and R. L. Ferguson, Testing and Evaluation of Light Ablation Decontamination, INEL-94/0134, Idaho National Engineering Laboratory, 1994, 50p.
- [10]L. Li, W. M. Steen, P. J. Modern, and J. T. Spencer, Laser Removal of Surface and Embedded Contaminations on/in Building Structures, Proc. SPIE 2246, Laser Materials Processing and Machining, 1994.
- [11]L. Carvalho, W. Pacquentin, M. Tabarant, A. Semerok, and H. Maskrot, Metal Decontamination by High Repetition Rate Nanosecond Fiber Laser: Application to Oxidized and Eu-contaminated Stainless Steel, Appl. Surf. Sci., vol.256, 146654, 2020.
- [12]G. Greifzu, T. Kahl, M. Herrmann, W. Lippmann, and A. Hurtado, Laser-based Decontamination of Metal Surfaces, Optics and Laser Technology, vol. 117, pp. 293-298, 2019.
- [13]Y.-C. Lin, Y.-Y. Lin, Y.-H. Huang, and A.-C. Chiangc, A Compact and Portable Laser Radioactive Decontamination System Using Passive Q-switched Fiber Laser and Polygon Scanner, Applied Radiation and Isotopes, vol. 153, 108835, 2019.
- [14]Kumar, T. Prakash, M. Prasad, S. Shail, R. B. Bhatt, P. G. Behere, and D. J. Biswas, Laser Assisted Removal of Fixed Radioactive Contamination from Metallic Substrate, Nuclear Engineering and Design, vol. 320, pp. 183-186, 2017.
- [15]A. J. Potiens Jr., J. C. Dellamano, R. Vicente, M. P. Raele, N. U. Wetter, and E. Landulfo, Laser Decontamination of the Radioactive Lightning Rods, Radiation Physics and Chemistry, vol. 95, pp. 188-190, 2014.

- [16]E. J. Minehara, Laser Decontamination device, US Patent No. US9174304B2, Nov. vol.3, 2015.
- [17]峰原英介,新しいレーザー除染機,レーザー研究,vol.40, pp.165-170, 2012.
- [18]小菅淳,峰原英介,猿田晃一,高速掃引,高出力密度ファイバーレーザーを用いたレーザー 除染技術の開発,レーザー学会学術講演会第42回年次大会,2022.
- [19]小菅淳,峰原英介,猿田晃一,高出力密度レーザー光の高速掃引を用いた連続波ファイバー レーザー除染の開発,(1)レーザー除染メカニズムの解明,日本原子力学会2022年春の年会, 2022.
- [20]E. Porcheron et al., Fukushima Daiichi Fuel Debris Retrieval: Results of Aerosol Characterization during Laser Cutting of Non-radioactive Corium Simulants, J. Nucl. Sci. Tech., vol. 58, no. 1, pp. 87-99, 2021.
- [21]MH Lee et al., Performance of Assessment of HEPA Filter against Radioactive Aerosols from Metal Cutting during Nuclear Decommissioning, Nucl. Eng. Tech., vol. 52, no. 5, pp. 1043-1050, 2020.
- [22]H. Liang et al., Improvement of Aerosol Spray Scavenging Efficiency with Water Mist, J. Aerosol Science, vol.153, 105697, 2021.
- [23]Chunosov N. I., reZonator, http://rezonator.orion-project.org(参照:2022年3月31日).
- [24]B. Blaisot, M. Pellegrini, H. Liang, N. Erkan, S. Suzuki, Study of the Aerosol Dispersion Control by a Spray System during Fukushima Daiichi Fuel Debris Retrieval, NURETH 19, 2021.
- [25]K. Hasegawa, Y. Abe, Transport Phenomena of a Droplet in Acoustic Levitation, Int. J. Microgravity Sci. App., vol. 37, no. 2, 370201, 2020.

This is a blank page.