

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)

—令和4年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—  
Research on Radioactive Aerosol Control and Decontamination  
at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Decommissioning  
(Contract Research)  
-FY2022 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource  
Development Project-

福島廃炉安全工学研究所 廃炉環境国際共同研究センター  
東京大学

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

August 2024

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](mailto: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](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

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)  
—令和4年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—

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

東京大学

(2024年5月13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4年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業(以下、「本事業」という)を実施している。

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

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

本研究は、令和3年度に採択された研究課題のうち、「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4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、英国研究グループとの協力のもと、レーザー除染時のエアロゾル拡散制御を行いつつ、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の開発を目的としている。

日本側では、東京大学が保持する試験装置を活用し、水ミストと液滴を用いたエアロゾル拡散抑止技術の確立と、CFD解析を活用した除染時の流れ場評価を実施し、効果的に制御する除染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技術を応用し、模擬放射性物質へのレーザー照射試験を行い、高精度検出器による10nm~10 $\mu$ mの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。

最終成果としては、模擬ウェル試験場において日英の研究成果を活用したモックアップ実験を通じた実証試験を行う。得られた成果は、両国の廃炉現場における高線量エリアのレーザー除染計画に役立つものと期待される。

---

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

Research on Radioactive Aerosol Control and Decontamination  
at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Decommissioning  
(Contract Research)

— FY2022 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

The University of Tokyo

(Received May 13, 2024)

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 FY2022.

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 FY2022.

The present study aims to develop a safe laser decontamination system that can control aerosol diffusion during laser decontamination while simultaneously allowing advanced particle measurement and evaluation, in cooperation with a research group in the United Kingdom.

On the Japanese side, the University of Tokyo will utilize its test equipment to establish an aerosol diffusion suppression technique using water mist and droplets, and to evaluate the flow field during decontamination using CFD analysis to develop a decontamination system that can effectively control aerosol diffusion.

Specifically, by applying technology related to the interaction between aerosol and water interface, we will conduct laser irradiation tests on simulated radioactive materials, measure aerosol particles from 10 nm to 10 μm using high-precision detectors, control particle dispersion through electrochemical treatment of water mist and spray droplets and improve the accuracy of CFD simulations for dispersion control based on the obtained data.

The final outcome will be a demonstration test through a mock-up experiment utilizing research results from Japan and the U.K. at a simulated well test site. The results obtained are expected to be useful for laser decontamination planning of high-dose areas at decommissioning sites in both countries.

**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 .....	8
5. 令和 3 年度 採択課題 .....	10
6. 令和 4 年度 採択課題 .....	12
付録 成果報告書 .....	15

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
Appendix Result Report .....	15

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
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号機ペダスタル燃料デブリ深さ方向の性状同定	山路 哲史	早稲田大学
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃棄物のフッ化技術を用いた分別方法の研究開発	渡邊 大輔	日立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	所属機関
燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成	浅間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティクスを融合したデブリ性状把握手法の開発とティアップ型人材育成	高貝 慶隆	福島大学
放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デブリ劣化機構の解明	大貫 敏彦 (~R2. 3. 31) 竹下 健二 (~R3. 6. 30) 塚原 剛彦 (R3. 7. 1~)	東京工業大学
燃料デブリ分析のための超微量分析技術の開発	永井 康介	東北大学

#### 4. 令和2年度 採択課題

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

公募期間：令和2年3月17日～令和2年5月14日（課題解決型）  
令和2年5月13日～令和2年7月15日（国際協力型）

課題数：10 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 8 課題（若手研究 2 課題、一般研究 6 課題）  
国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英共同研究）

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
$\alpha$ / $\beta$ / $\gamma$ 線ラジオリシス影響下における格納容器系統内広域防食の実現：ナノバブルを用いた新規防食技術の開発	渡邊 豊	東北大学
$\beta$ 、 $\gamma$ 、X線同時解析による迅速・高感度放射性核種分析法の開発	篠原 宏文	日本分析センター
合理的な処分のための実機環境を考慮した汚染鉄筋コンクリート長期状態変化の定量評価	丸山 一平	東京大学
溶脱による変質を考慮した汚染コンクリート廃棄物の合理的処理・処分の検討	小崎 完	北海道大学
マイクロ波重畳 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
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）

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4年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
革新的アルファダスト撮像装置と高線量率場モニタの実用化とその応用	黒澤 俊介	東北大学
3次元線量拡散予測法の確立と $\gamma$ 線透過率差を利用した構造体内調査法の開発	谷森 達	京都大学
$\alpha$ 汚染可視化ハンドフットクロスモニタの要素技術開発	樋口 幹雄	北海道大学
高放射線耐性の低照度用太陽電池を利用した放射線場マッピング観測システム開発	奥野 泰希	京都大学
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

課題名	研究代表者	所属機関
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

本報告書は、以下の課題の令和4年度分の研究成果について取りまとめたものである。

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

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 4 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 R04I034)

成果報告書

令和 5 年 3 月

国立大学法人東京大学

本報告書は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」による委託業務として、国立大学法人東京大学が実施した「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4年度の研究成果を取りまとめたものです。

目次

概略	vi
1. はじめに	1
2. 業務計画	4
2.1 全体計画	4
2.2 研究項目の計画（日本側）	5
2.3 研究項目の計画（英国側）	6
2.4 実施体制	7
3. 令和4年度の実施内容及び成果	8
3.1 レーザー加工による微粒子飛散評価（東京大学）	8
3.1.1 微粒子飛散実験及び解析評価	8
3.1.2 データ評価（連携先：JAEA）	32
3.2 データ評価及びモックアップ試験（再委託先：(株)アトックス）	36
3.2.1 データ評価	36
3.2.2 モックアップ試験	37
3.3 英国側研究成果概要	42
3.4 研究推進	47
4. 結言	49
参考文献	50

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	エアロゾル粒子分析装置.....	12
表 3.1-2	UTARTS 施設に設置可能なノズル寸法 .....	13
表 3.1-3	アクリル試験装置を用いたレーザー照射実験での設定値.....	16
表 3.1-4	UTARTS 施設におけるレーザー照射実験の設定値 .....	19
表 3.1-5	UTARTS 実験における主要パラメータ .....	22
表 3.1-6	数値シミュレーション解析条件.....	27
表 3.2-1	フランジタンクの解体作業用レーザー装置の諸元.....	36

図一覧

図 2.1-1	事業実施計画.....	4
図 2.1-2	英国側事業実施計画.....	4
図 2.4-1	実施体制図.....	7
図 3.1-1	レーザー除染仕様の UTARTS 装置.....	9
図 3.1-2	UTARTS 装置図.....	10
図 3.1-3	エアロゾル濃度計測装置.....	11
図 3.1-4	UTARTS 施設に設置可能なノズル 1~3.....	13
図 3.1-5	アクリル製試験装置でのレーザー除染実験図.....	14
図 3.1-6	レーザー照射後の試験片一式.....	15
図 3.1-7	レーザー照射実験の実施手順.....	16
図 3.1-8	レーザー照射時におけるエアロゾル挙動.....	17
図 3.1-9	(a) 炭素鋼と (b) ステンレス鋼におけるエアロゾル濃度の比較.....	18
図 3.1-10	表面コーティングを施した (a) 炭素鋼と (b) ステンレス鋼における エアロゾル濃度の比較.....	18
図 3.1-11	レーザー照射時におけるエアロゾル挙動.....	20
図 3.1-12	(a) 炭素鋼と (b) コンクリート片におけるレーザー照射強度が及ぼす 平均エアロゾル粒子径への影響.....	20
図 3.1-13	(a) 炭素鋼 (b) ステンレス鋼 (c) コンクリート片における表面 コーティングによる平均エアロゾル濃度の影響.....	21
図 3.1-14	実験手順.....	21
図 3.1-15	スプレー帯電によるエアロゾル除去性能の検証.....	23
図 3.1-16	Euler-Lagrange 法による数値解析手法.....	24
図 3.1-17	解析メッシュ図.....	25
図 3.1-18	スプレー出口における液滴特性.....	26
図 3.1-19	Lagrange 法による液滴と Eulerian による気相分布.....	27
図 3.1-20	スプレー噴射時におけるエアロゾル挙動.....	28
図 3.1-21	数値解析モデルの検証.....	29
図 3.1-22	異なるエアロゾル粒子径における実験とシミュレーション (Case I) の比較...	30
図 3.1-23	異なるエアロゾル粒子径における実験とシミュレーション (Case II) の比較..	31
図 3.1-24	スプレー噴射流量と除染効率の関係 (a) 10 分後 (b) 40 分後.....	32
図 3.1-25	ミスト噴霧による除染効果の影響 (a) ステンレス鋼 (b) コンクリート片.....	33
図 3.1-26	スプレー帯電によるエアロゾル濃度の時刻歴変動.....	34
図 3.1-27	スプレー帯電によるエアロゾル除去性能の検証 (a) CS-CeO <sub>2</sub> コーティング (b) SS-CeO <sub>2</sub> コーティング (c) Concrete-CeO <sub>2</sub> コーティング.....	34
図 3.2-1	模擬ウエルの概要.....	38
図 3.2-2	(株) アトックス大型実験棟天井クレーン.....	39
図 3.2-3	(株) アトックス製壁面除染装置.....	39
図 3.2-4	レーザー除染装置のセットアップ.....	40
図 3.2-5	モックアップ試験の試験計画.....	41

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)
HEPA	: 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、CFD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4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（国立大学法人東京大学（以下、「東大」という。）

- ・東大エアロゾル除去試験（Aerosol Removal Tests using Water Spray in the University of Tokyo：以下、「UTARTS」という。）施設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。それらがエアロゾル評価装置と連動できるように、レーザーパラメータを調整した。
- ・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試験を行った。
- ・UTARTS装置内に非放射性セシウムが浸透したコンクリート製サンプルを設置し、レーザー除染を行い、スプレー効果を確認した。
- ・さらに、原子炉格納容器（以下、「PCV」という。）の壁に堆積した核分裂生成物または $\alpha$ 粒子を模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。
- ・試験結果を基に既存のCFDモデルを改良し、モデルの信頼性を検証した。

#### ②データ評価（連携先：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という。）

- ・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：株式会社アトックス（以下、「(株)アトックス」という。))

#### 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。

#### ②モックアップ試験

- ・モックアップ試験の試験計画を準備した。
- ・解決すべき課題、問題点を摘出し、次年度の計画に反映させた。

### (3) 研究推進（東大）

研究代表者の下で各研究項目間ならびに廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）等との連携を密にして研究を進めた。また、研究実施計画を推進するための打ち合わ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、3カ年計画の2年目である令和4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」という。）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の中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みなされているが、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し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。

一方で、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により、保管コストを大幅に下げることができる[1]。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[2,3]。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[2]。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剥ぎ取る、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

ザーを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[4, 5, 6]。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[7, 8, 9, 10, 11]。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[12]。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 1F 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[13, 14, 15]。

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[7]。このような小さなサイズの放射性微粒子は、肺の奥深くまで侵入可能であり、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、肺胞を通過し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るため、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。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。また数値流体力学 (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、様々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。

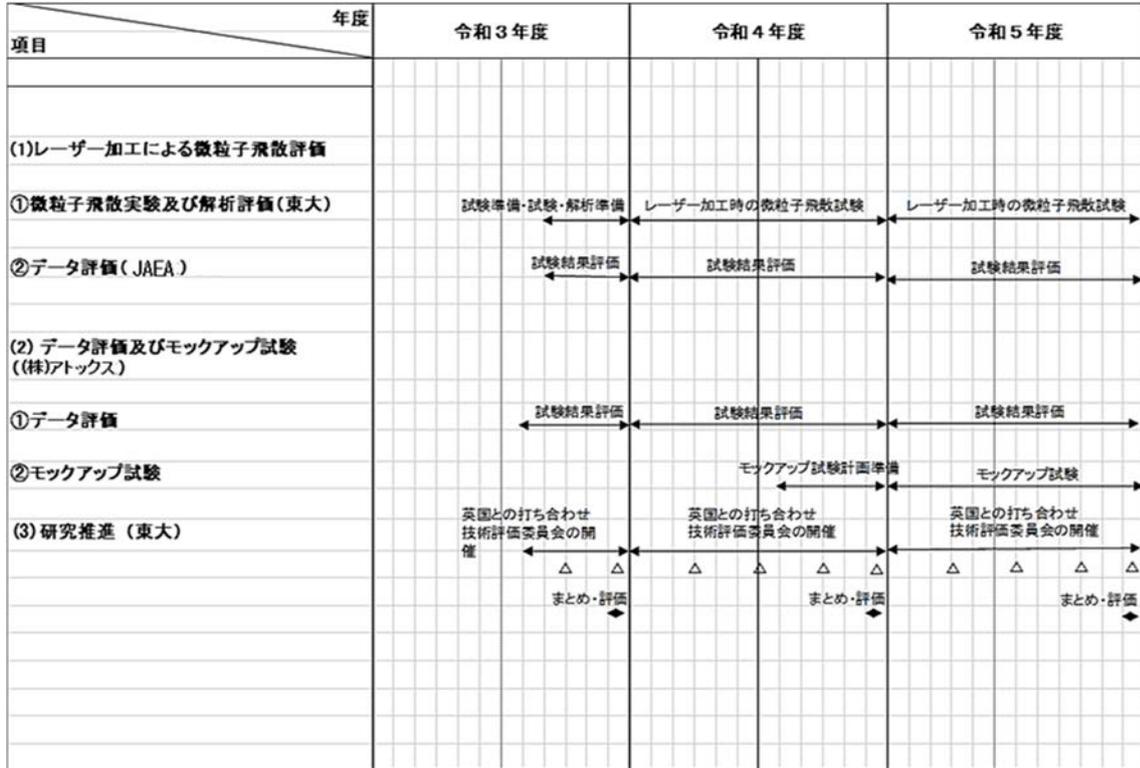


図 2.1-1 事業実施計画

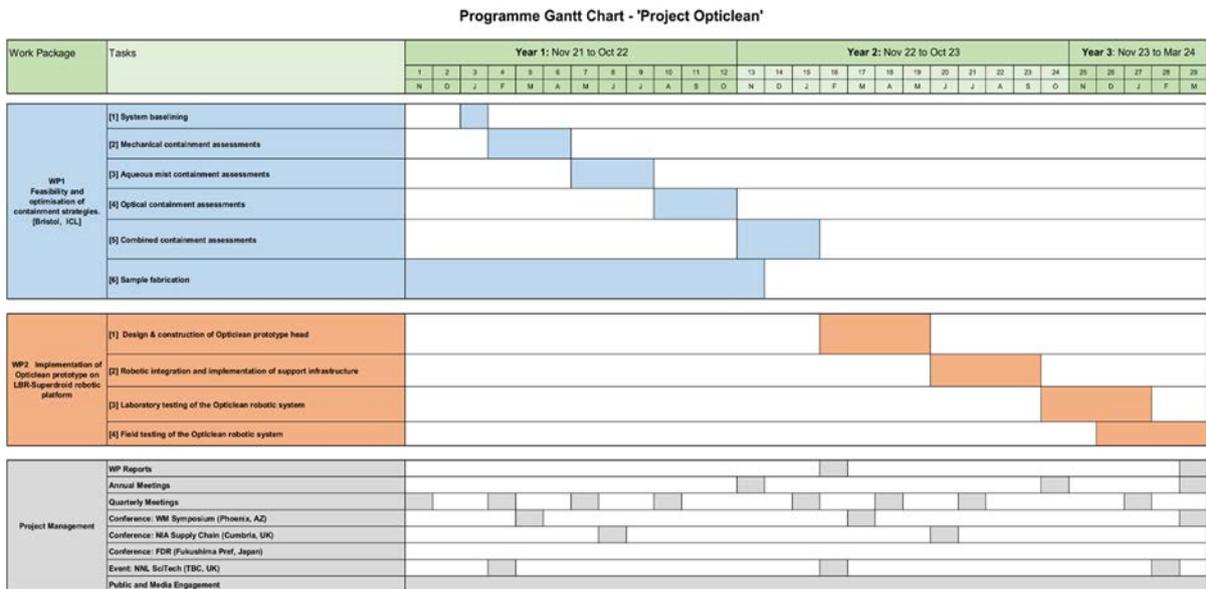


図 2.1-2 英国側事業実施計画

## 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（東大）

#### [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。（東大）
- 4- UTARTS 施設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。
- 5- 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様々な表面に対して行う。
- 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（(株) アトックス）

#### [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。
- 2- 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、(株) 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（JAEA）

#### [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 の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 characterizations 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.

本研究では、大気汚染と機器汚染を軽減するための手法として、重力による沈降を促すための微粒子の合体促進を検討する。重元素レーザー微粒子分析（HELPA）システムを用いて、アブレーションされた微粒子のサイズ分布とアブレーションルームの空間的な広がりを検証する。次に、物質の封じ込めと回収のため3つの異なる方法の有効性を調査する。それらは以下の通りである：

- 機械的封じ込めと回収
- 水性ミストによる封じ込めと回収
- 光学的封じ込めと回収

その後、実験室での研究成果を基に、プロトタイプを日本（福島）と英国（セラフィールド、各種マグノックス）の両国のレガシー原子力発電所が抱える非常に複雑な廃炉の課題に合わせて特別に調整する。実験室研究で得た知識を応用し、現場配備可能なプロトタイプ・システムを構築する。このシステムは、LBR-Superdroid ロボット運搬プラットフォームに取り付けられ、この斬新な全光学的廃炉ツールの安全な遠隔操作を実証する。本提案手法を OPTICLEAN システムと呼ぶ。

さらに、処理と特性評価機能からなる包括的なレーザーベースの洗浄ソリューションの開発を目指していることから、既存の遠隔ラマン検査システムを OPTICLEAN プロトタイプに組み込むことも検討する。HELPA LIBS システムと組み合わせることで、1回の配備で前処理材料の分類（及び関連する作業計画）とポストクリーニング評価の両方の実施が可能となることが期待される。

2.4 実施体制

本研究の実施体制を図 2.4-1 に示す。

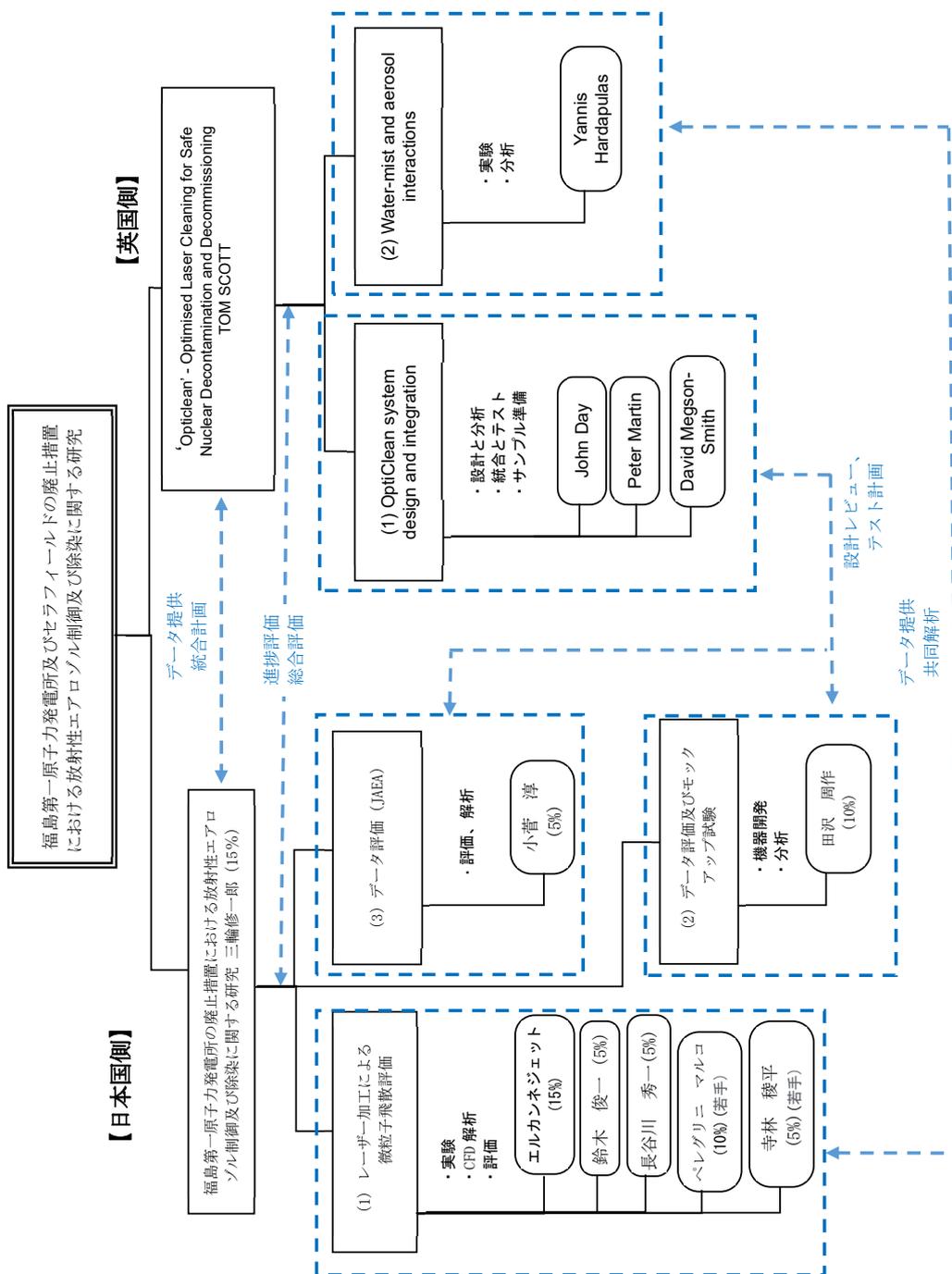


図 2.4-1 実施体制図

### 3. 令和4年度の実施内容及び成果

#### 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

本研究では、英国の研究者と共同で、高度な粒子検出・特性評価システムとエアロゾル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構築を目標としている。エアロゾル分散制御では、シンプルな機械的封じ込めフードから光学的レーザーシールドに至るまで、エアロゾル粒子の新しい除去・封じ込め方法を共同で検討する。

東大ではこれまでに、レーザー切断や除染の用途での放射線によるリスクを低減させるため、ウォーターミストやウォータースプレーの使用による効果的な放射線分散制御方法の開発に従事してきた。本研究では、レーザー除染時に発生するエアロゾル粒子特性のデータから、ウォーターミストとウォータースプレーによる除染効率化を検討する。また、水ミスト粒子を帯電させ、エアロゾル粒子と水ミスト粒子間の吸引力効果についても併せて検証を行う。本実験は東大原子力専攻に設置されている UTRATS 施設で行い、レーザー除染やミストとスプレーの同時使用等、複数の現象を同時に検証することが可能となっている。また、複数の計測点でエアロゾル挙動を測定し、CFD シミュレーションモデルの検証に用いる予定である。本研究により構築される CFD モデルは、様々なレーザー操作シナリオで検証され、効果的で安全な除染と廃炉計画の制定に貢献できるものと期待される。

本研究では、ウォーターミストとスプレー技術に加え、レーザー除染技術を新たに組み合わせることで、廃炉時の微粒子飛散を防ぐ除染効果の検証を目標としている。この技術が確立されれば、1F での遠隔の廃炉作業への貢献が期待される。また、この方法は、放射線のホットスポットの除去にも有効であると考えられる。特に、シールドプラグや PCV 壁、構造物に付着した高濃度放射性エアロゾル粒子をレーザー除染により除去し、スプレーやウォーターミストとの相互作用により飛散を防ぐ効果が期待される。このように、本技術は作業前の除染や作業中の微粒子飛散防止に活用できるため、高線量環境下での作業員の安全確保や電子機器の動作時間延長が可能となる。また、本技術は有害な化学物質やアスベスト粉塵などの物質に汚染された建物や、構造物の表面洗浄、解体作業への適用にも効果的であると考えられる。

##### (1) 試験装置概要

レーザー除染またはレーザークリーニングは、高強度レーザービームを使用して表面から汚染物質やコーティングを除去する非破壊的な方法である。その際、照射面より微粒子が発生し、作業員や周辺住民に健康被害を及ぼす可能性がある。本研究では、エアロゾル除去実験を行うために、UTARTS 施設を用いた。UTARTS 施設は、レーザークリーニングを安全かつ効果的に実施するための環境を提供し、異なるミスト濃度、スプレー液滴特性、スプレーシステムによるエアロゾル除去性能の評価を可能とする試験装置である。

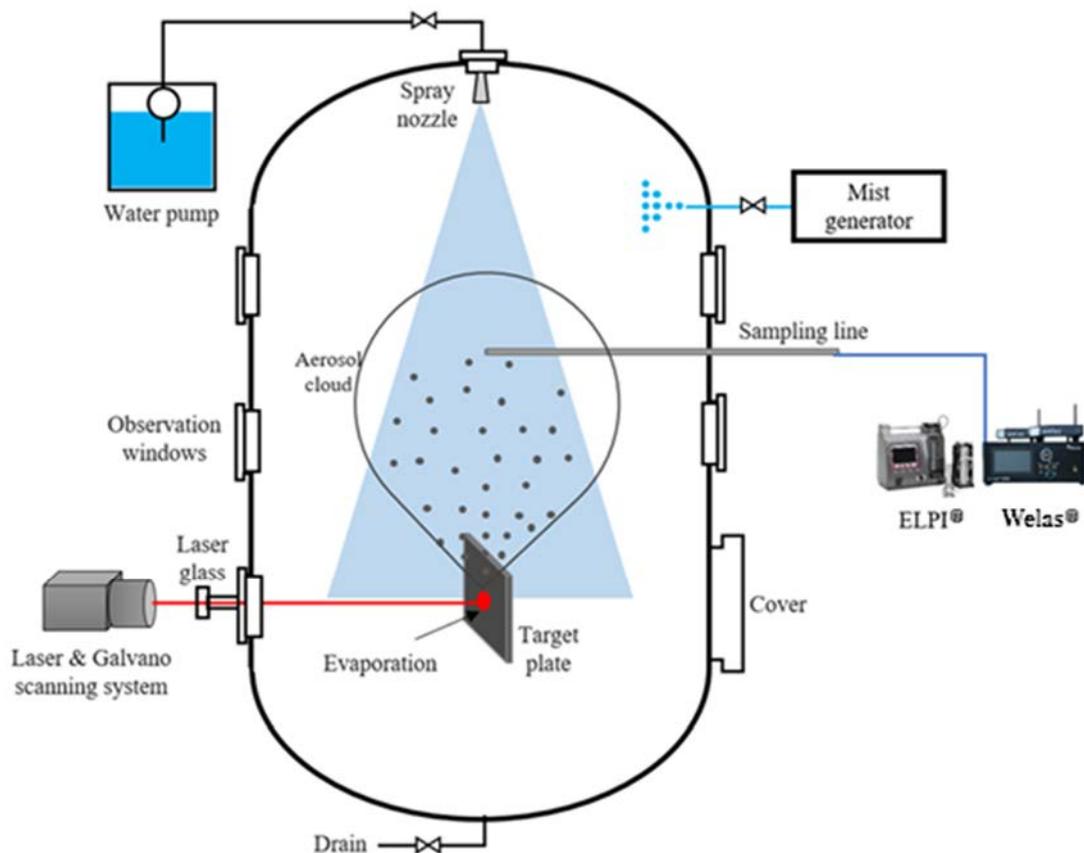


図 3. 1-1 レーザー除染仕様の UTARTS 装置

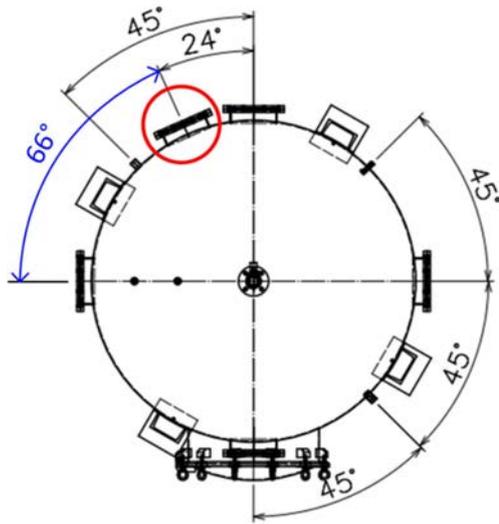
図 3. 1-1 は、UTARTS 施設の試験容器、計測器、関連機器の概略レイアウトを示したものである。本設備は円筒容器と、異なるサブシステムで構成されており、以下にその詳細を説明する。

### ① 円筒容器

エアロゾルの捕捉実験は、図 3. 1-2 (a) に示すように、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で行われる。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 [7]。実験セットアップには、13 個の光学観察窓と、容器内部へのアクセス用マンホールが 1 つ含まれている。光学窓は、実験現象の観察や、液滴速度場と液滴サイズ分布を測定するための光学測定に使用することが可能であり、水平方向に対して 66° の角度で設置されている (図 3. 1-2 (b))。この角度は、液滴表面で反射したレーザー光と屈折したレーザー光が同じ光強度となり、形成されたフリッジパターンが後処理で鮮明になる方法を利用した Interferometric Laser Imaging for Droplet Sizing (ILIDS) 法による液滴サイズ測定への応用を想定したものである [12-15]。



(a) 円筒容器



(b) 液滴観測に用いる光学窓  
図 3.1-2 UTARTS 装置図

② ミスト発生装置

ミスト発生には、超音波ミスト発生装置を使用する。この装置からサブミクロンオーダーの水ミストを発生させ、容器内へのミストの分散を行う。エアロゾル粒子やミストは、容器内に分散された後、容器内で拡散し、互いに衝突、干渉することで、大きな粒子クラスターへと凝集する。ミスト有無の実験条件におけるエアロゾル除去性能を濃度レベルにより比較することで、提案した凝集法の性能を検証するとともに、ミスト濃度がエアロゾルスプレーの捕捉効率に与える影響についても検証することが可能となる。

③ エアロゾル濃度計測装置



(a) Dekati® ELPI®+



(b) Welas® digital 2000

図 3.1-3 エアロゾル濃度計測装置

本実験に用いるエアロゾル濃度測定システムとして、サンプリングチューブ、ヒーターラップチューブ、電気式低圧インパクター (Dekati® ELPI®+)、光散乱スペクトロメーター (Welas® digital 2000) を組み合わせて使用している (図 3.1-3)。Dekati® ELPI®+は粒径 0.006~10 μm、Welas® digital 2000 は粒径 0.2~10 μm の粒子測定に使用される。エアロゾルのサンプリングフ

ローは、2 点の計測点より吸引することが可能であり、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サイズ分布を測定するための測定機器内へ流入する。

エアロゾルアナライザー Welas® digital 2000 は、光散乱分光計システムで、 $<1 \text{ P/cm}^3$  から  $106 \text{ P/cm}^3$  の粒子濃度と  $0.2 \sim 10 \text{ }\mu\text{m}$  の範囲の粒子径を、絶対測定誤差  $\pm 0.01 \text{ }\mu\text{m}$ 、相対誤差 5 % の精度で計測が可能である [7]。Welas® digital 2000 の上流にはリボンヒーターを設置した吸引チューブが設置されており、エアロゾルアナライザー内の加熱式キュベットとともに  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  に加熱され、エアロゾル粒子濃度測定時のミスト排除の役割を担っている。

これに対し、Dekati® ELPI®+ は、リアルタイムで粒子を測定するための粒度分布測定器である。Dekati® ELPI®+ は、 $0.006 \sim 10 \text{ }\mu\text{m}$  の広い粒子径範囲において、 $10 \text{ Hz}$  のサンプリングレートで粒度分布と濃度を測定することが可能である。Dekati® ELPI®+ の高温設定では、 $180 \text{ }^\circ\text{C}$  のエアロゾルを直接サンプリングすることも可能である。また、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回収して化学組成の分析を可能としている。さらに、Dekati® 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使用することができる。本研究に用いた以上の粒子分析装置の詳細について、表 3.1-1 に示す。

表 3.1-1 エアロゾル粒子分析装置

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)	$0.006 \sim 10 \text{ }\mu\text{m}$	$0.2 \sim 10 \text{ }\mu\text{m}$
Measurement range ( $C_n$ )	Stage 14: $0.1\text{-}1.7 \times 10^4 \text{ P/cm}^3$ Stage 1: $240\text{-}7.9 \times 10^6 \text{ P/cm}^3$	$1\text{-}10^6 \text{ P/cm}^3$
Withstand temperature	up to $180 \text{ }^\circ\text{C}$	up to $250 \text{ }^\circ\text{C}$ for aerosol sensor
Sampling flow rate	$10 \text{ L/min}$	$5 \text{ L/min}$

#### ④ スプレーシステム

UTARTS 装置におけるスプレーシステムは、水タンク、水ポンプ、Full Cone スプレーノズル、流量計、圧力計で構成されている。以下の実験では、異なる粒度分布を持つ噴霧液滴を生成できる 3 つの Full Cone スプレーノズルを使用する。図 3.1-4 は、ノズル 1~3 の写真である。これらはいずれもスプレーシステム社から購入したものであり、その型式はそれぞれ 1/8 GG-SS3004、TG3.5、TG2 である。また、3 つのノズルのオリフィス径は、それぞれ  $1.2 \text{ mm}$ 、 $1.7 \text{ mm}$ 、 $1.2 \text{ mm}$  である。以下の実験における 3 つのノズルの噴射流量は、それぞれ、 $2 \text{ L/min}$ 、 $3 \text{ L/min}$ 、 $2 \text{ L/min}$  である。3 つのノズルは、いずれもノズル出口から  $300 \text{ mm}$  下に設置されている。詳細を表 3.1-2 に示す。



図 3.1-4 UTARTS 施設に設置可能なノズル 1～3

表 3.1-2 UTARTS 施設に設置可能なノズル寸法

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

## ⑤ アクリル製試験装置

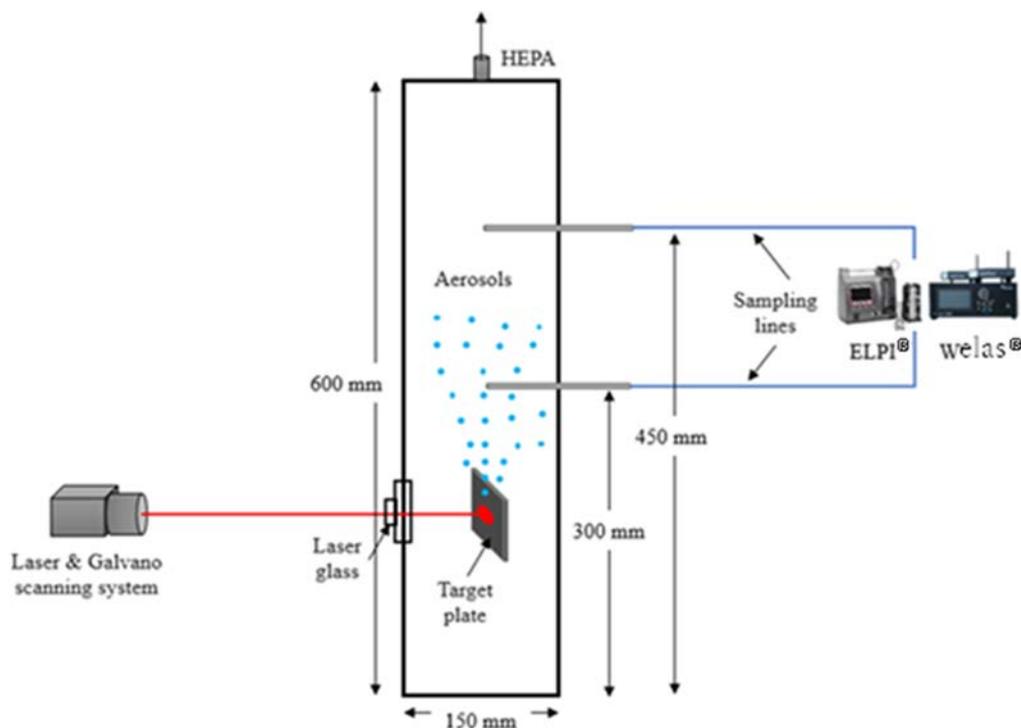


図 3.1-5 アクリル製試験装置でのレーザー除染実験図

令和4年度においては、レーザー照射部位ならびに除染部の詳細観測を行うため UTARTS 施設以外に、図 3.1-5 に示すようなアクリル製の小型のレーザークリーニング試験装置を用いた。本試験装置は、空気中の粒子やエアロゾルの測定に繋がるエアロゾル定量化への使用も目的としている。装置で使用されているアクリル壁は、粒子画像流速測定 (PIV) や Shadowgraph 法の測定で最大限の視界を確保できるよう、高品質で光学的に透明なアクリルで作られている。高さの異なるサンプリングラインには、ELPI® と Welas® のデバイスが接続されている。エアロゾル測定には、上部のサンプリングライン (レーザーターゲットから 300 mm 上) を使用した。

## ⑥ ガルバノスキャニングシステム

以上①～⑤に示した UTARTS 装置やエアロゾル評価機器がレーザー除染に適用できるよう、構成を行った。具体的には、エアロゾル評価装置と連動できるよう、レーザーパラメータを調整した。加工用レーザー光源には、中心波長 1080 nm、最大出力 1.5 kW の連続発振 (CW) ファイバーレーザー (レイカス社、RFL-C1500) を使用した。デジタルコントローラーには NCL-151 (ニシハラ社製) を使用し、最大出力は 1.5 kW である。

レーザーヘッドにはガルバノスキャニングシステムが取り付けられており、レーザーとガルバノメーター、レンズから構成され、ガルバノメーターは高速モーターに搭載され、高速かつ高精度に動作する。ミラーの位置はコントローラーで制御され、モーターに信号を送ってミラーは目的の方向へと作動する。ガルバノスキャナのレンズは、レーザーによる発熱を最小限に抑えるため、一般的に石英やサファイア等の材料で構成されている。

(2) 試験サンプル

レーザー照射の実験に使用したテスト材料は、様々な炭素鋼、ステンレス鋼及びコンクリート表面で構成されており、これらは産業用途で一般的に使用されていることからベース材料として選択した。本研究では PCV の壁に堆積した核分裂生成物または  $\alpha$  粒子を模擬したナノ粒子を模擬するため、コーティング試料として  $ZrO_2$ 、 $CeO_2$  及び CsI を選定し、異なる表面やコーティングに対する有効性を包括的に評価することを目的とした。図 3.1-6 に、レーザー照射後の試験体イメージを示す。



図 3.1-6 レーザー照射後の試験片一式

(3) アクリル試験装置を用いたレーザー照射実験

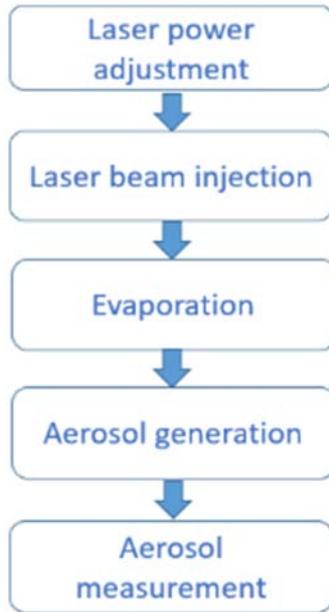


図 3.1-7 レーザー照射実験の実施手順

レーザー照射実験の手順を図 3.1-7 に示す。レーザー出力を調整し、ガルバノスキャニングシステムを用いて 998 mm の遠方の試験片に焦点を合わせ、直径 25.4 mm、厚さ 5 mm の AR（反射防止）コート UVFS（紫外線溶融シリカ）広帯域（1050～1700 nm）精密ガラスウィンドウを通して試験片に照射する。レーザービームが試験片に照射されると、材料表面が蒸発し、多量のエアロゾル粒子が発生する。粒子濃度はサンプリングラインを通して前述した Dekati® ELPI®+と Welas® digital 2000 で測定される。レーザー照射実験のパラメータは、表 3.1-3 に示す通りである。

表 3.1-3 アクリル試験装置を用いたレーザー照射実験での設定値

Parameter	Value
Irradiation power	0.9 kW-1.5 kW
Irradiation time	10 s
Irradiation area	5 mm (Circle)
Line distance in each scan	0.5 mm
Impactor type	Sintered
Test specimens	Carbon-Steel (CS) 25×25×5 mm <sup>3</sup> ; Stainless-Steel (SS) 25×25×5 mm <sup>3</sup>

(4) レーザー出力によるエアロゾル特性の影響

図 3.1-8 は、炭素鋼及びステンレス鋼表面へのレーザー照射による発生エアロゾルの時間変化を示している。レーザー照射時間は 10 秒、レーザー出力は 0.9~1.5 kW の範囲で変化させた。ガルバノスキャンによるスキャン間の線距離は 0.5 mm である。サンプリングラインは照射位置から 300 mm 上部にあり、ELPI に到達するまでの経過時間から、エアロゾルは約 2 秒遅れて検出された。1 μm 以上のエアロゾルは、レーザー照射中は照射初期時のみ検出され、重力沈降により時間とともに濃度が急速に低下する傾向にある。また、レーザー出力上昇に伴い、エアロゾル濃度も上昇する傾向が確認された。

図 3.1-9 から、レーザー出力の影響は炭素鋼表面でより顕著に現れる傾向にあることが分かる。炭素鋼とステンレス鋼は化学組成が異なることから、レーザー洗浄時のエアロゾル発生挙動が異なると考えられる。炭素鋼をレーザーで洗浄した場合、炭素含有量が多いため、ステンレス鋼よりも多くのエアロゾルを生成する傾向がある。また、炭素鋼は炭素の含有量が比較的多いため、酸化しやすいことに加え、表面が粗く多孔質な状態となり、除去効率が阻害される可能性が示唆される。このことから、炭素鋼におけるレーザークリーニングの際はエアロゾルが比較的多量に発生することが考えられる。一方、ステンレス鋼はクロムを多く含むため、腐食や酸化に対する耐性があることに加え、ステンレス鋼の表面は、一般的に炭素鋼の表面よりも滑らかで均一である。そのため、レーザークリーニングの際、同じレーザー出力であれば、炭素鋼と比較しエアロゾルが発生しにくいことが考えられる。

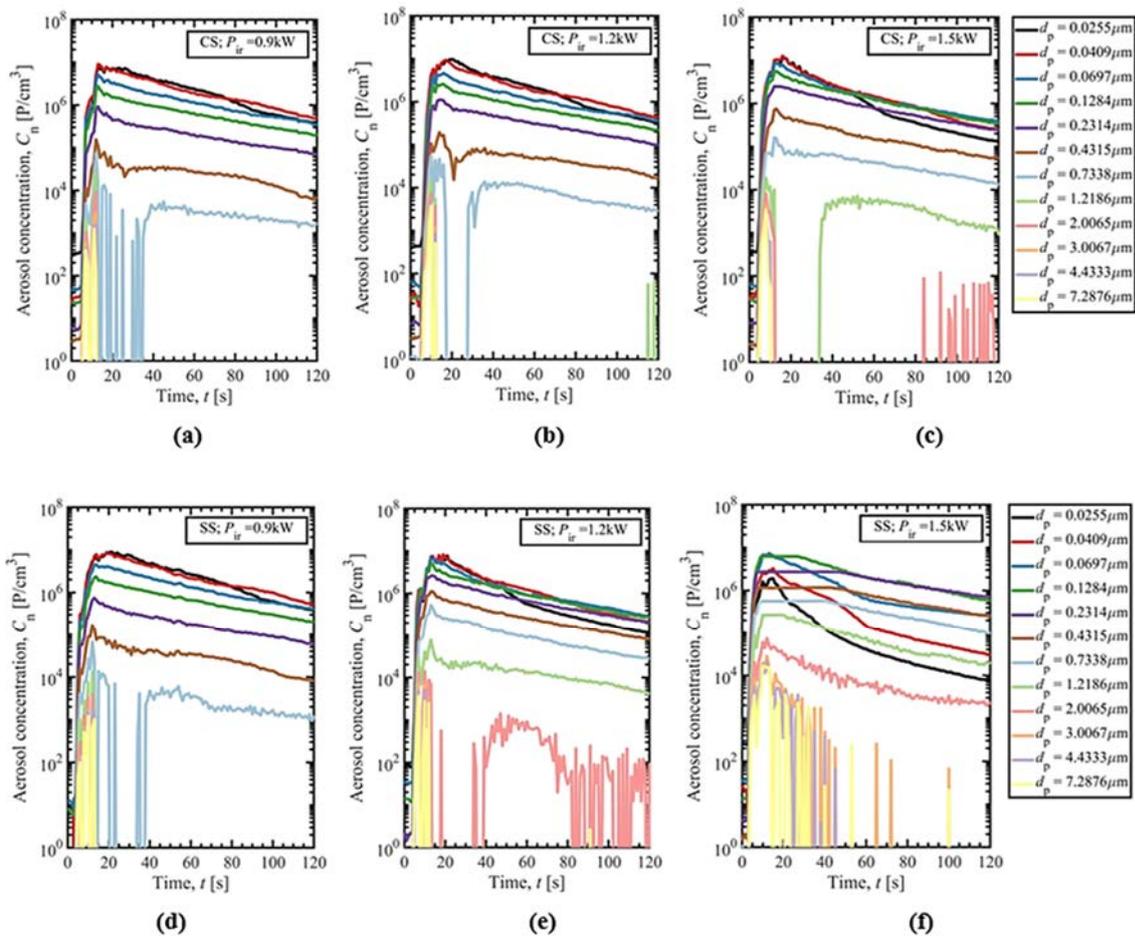


図 3.1-8 レーザー照射時におけるエアロゾル挙動

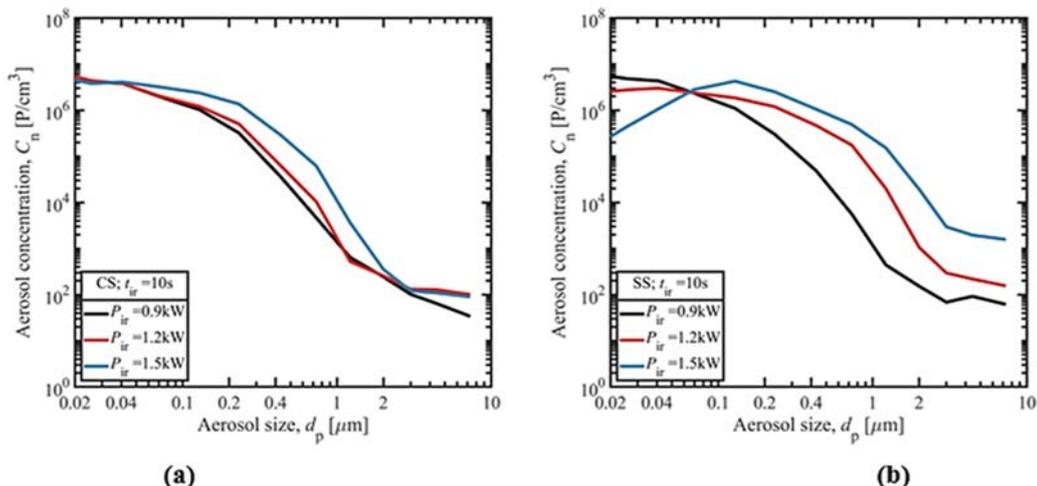


図 3.1-9 (a) 炭素鋼と (b) ステンレス鋼におけるエアロゾル濃度の比較

(5) 表面コーティングによる影響

PCV の壁に堆積した核分裂生成物または  $\alpha$  粒子を模擬したナノ粒子も含んだ内壁塗料として、 $ZrO_2$ 、 $CeO_2$ 、 $CsI$  の 3 種類を選定し、試料表面に塗布した。炭素鋼は空気や水分に触れると、酸化反応を起こし、表面に錆（赤褐色）が形成される。錆の成分は主に水和酸化第二鉄であり、その生成は大気条件と水と酸素の存在に依存する。錆は鉄の外表面で発生し、下層を環境にさらし続けることで徐々に金属を弱らせることで知られ、次式により表される。



炭素鋼に  $CsI$  コーティングを施した後、時間が経過して表面が酸化した時点で実験を行った。この外側の酸化層は、基材よりも厚く、弱く、多孔質である可能性があり、その結果、レーザークリーニングで洗浄しやすく、エアロゾルの発生量も多くなる。そのため、図 3.1-10 に示すように、炭素鋼、ステンレス鋼のいずれの素材においても、酸化した  $CsI$  コーティングの表面は、他のコーティングに比べてエアロゾル濃度が増加する傾向にあることが分かった。

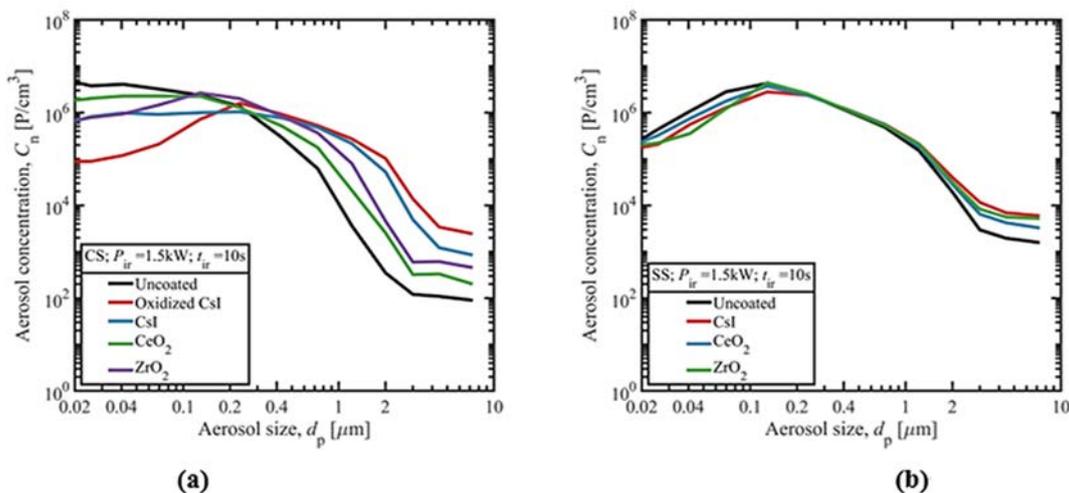


図 3.1-10 表面コーティングを施した (a) 炭素鋼と (b) ステンレス鋼におけるエアロゾル濃度の比較

(6) UTARTS 施設におけるレーザー照射実験

UTARTS 施設での実験においては、前述した炭素鋼とステンレス鋼に加え、非放射性セシウムが浸透したコンクリート製サンプルを設置し、異なる表面に 1.5 kW のクラス 4 ファイバーレーザーを照射した。レーザー照射後の第 2 段階としては、発生したエアロゾルをスプレーやミストで捕集し、スプレー捕獲の効果を検証する。レーザー照射により発生したエアロゾルの粒子濃度は、照射領域から 500 mm 上、スプレーノズルから 1,000 mm 下のサンプラインを通して Dekati® ELPI®+により測定される。レーザー照射実験のパラメータを表 3.1-4 に示す。

表 3.1-4 UTARTS 施設におけるレーザー照射実験の設定値

Parameter	Value
Irradiation power	0.9 - 1.5 kW
Irradiation time	30 s
Irradiation area	5 mm (Circle)
Line distance in each scan	0.1 mm (Carbon-Steel; Stainless-Steel) 0.5 mm (Concrete)
Test specimens	Carbon-steel (CS) 50×50×5 mm <sup>3</sup> Stainless-steel (SS) 50×50×5 mm <sup>3</sup> Concrete 150×150×30 mm <sup>3</sup>
Spray flow rate	2 - 4 liters/min
Mist size range	0.4 - 0.9 μm
Mist peak concentration	~19000 P/cm <sup>3</sup> (at $D_{mist} = 0.675 \mu m$ )

図 3.1-11 は、炭素鋼及びコンクリート表面へのレーザー照射による発生エアロゾルの時間変化を示している。レーザー照射時間は 30 秒で、UTARTS 施設内ではエアロゾルを均一に混合するために 80 L/分の流速で混合空気を吹き込んでいる。エアロゾルは、サンプラインが照射位置から 500 mm 上方にあり、サンプラインを通して ELPI のインパクタープレートに到達するまでの時間を取得するため、約 10 秒の遅延をもって ELPI で検出された。ここでは、ガルバノスキャニングシステムによるラインバイラインのレーザー照射により、最初の 40 秒間にエアロゾル濃度の大きな変動が見られ、使用したレーザーは連続型であるが、準連続型レーザークリーニングの印象を与える。大粒子径エアロゾルの濃度は、重力沈降により時間の経過とともに急速に減少した。図 3.1-12 は、(a) 炭素鋼表面と (b) コンクリート表面の発生エアロゾル濃度に対するレーザー出力の影響を示している。レーザー出力を 0.9 kW から 1.5 kW に上げると、炭素鋼とコンクリート表面のエアロゾル濃度の増加が確認された。

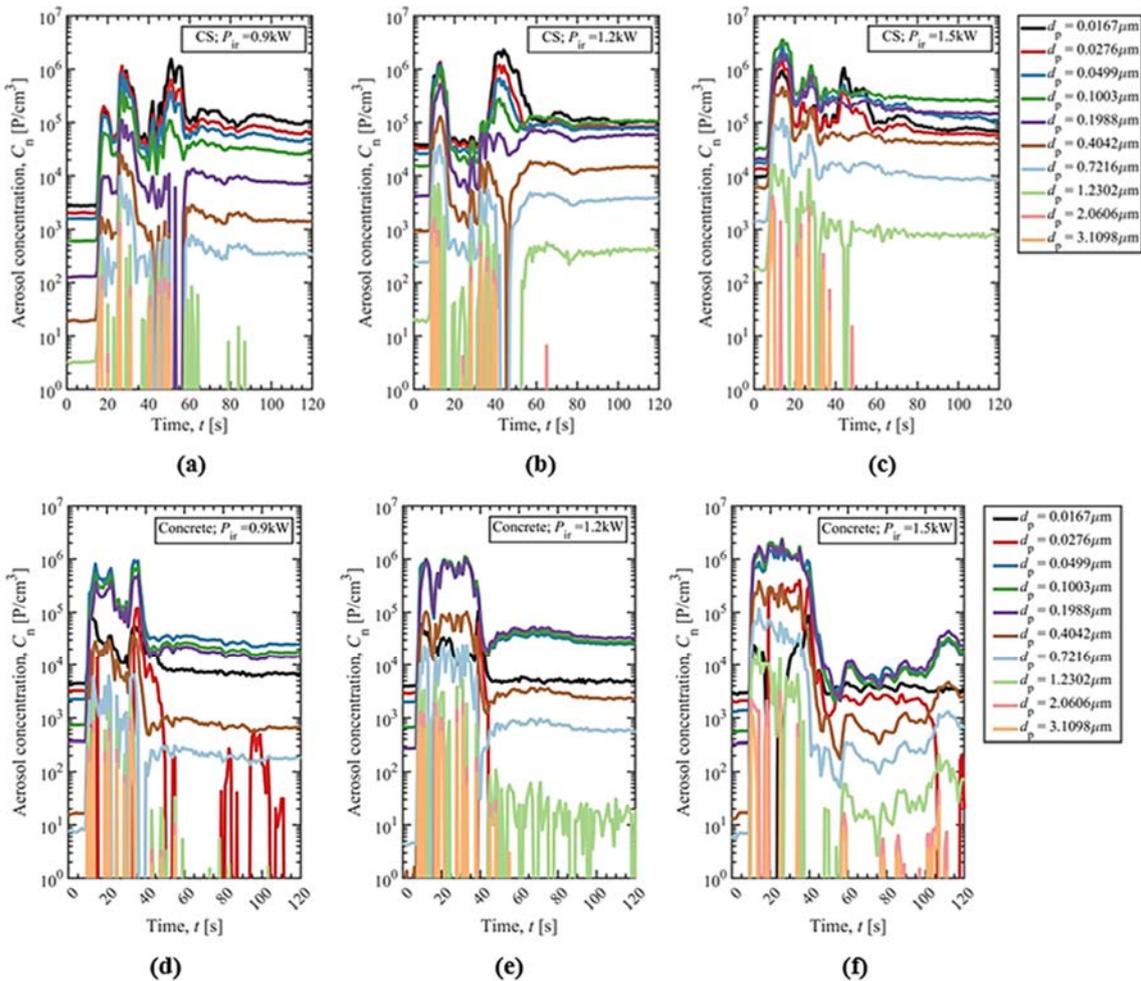


図 3.1-11 レーザー照射時におけるエアロゾル挙動

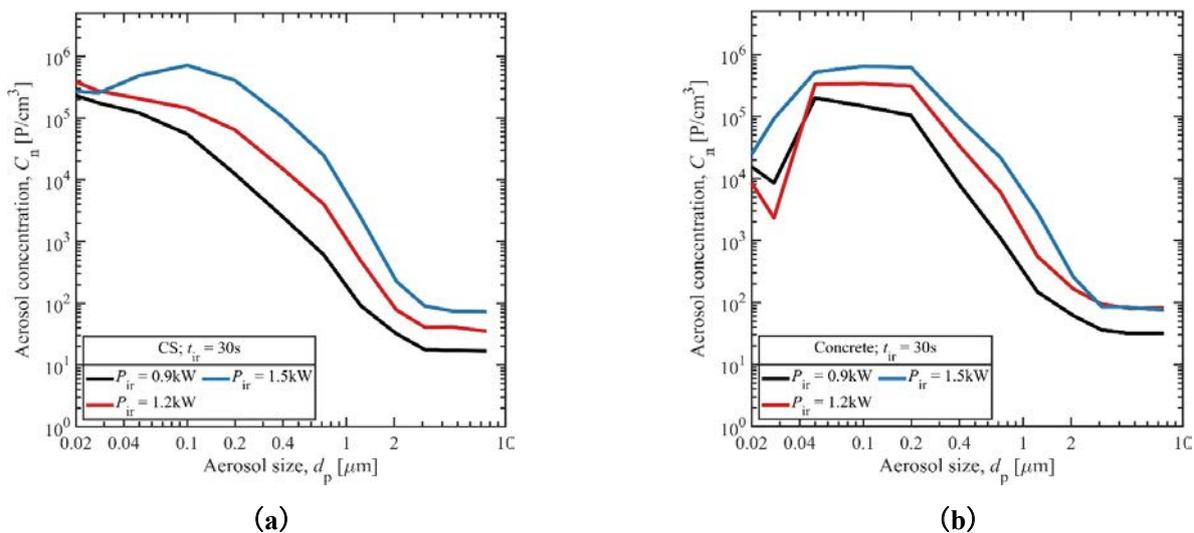


図 3.1-12

(a) 炭素鋼と (b) コンクリート片におけるレーザー照射強度が及ぼす平均エアロゾル粒子径への影響

(7) 表面コーティングの効果

炭素鋼、ステンレス鋼、コンクリート基材の平均エアロゾル濃度に対する表面コーティングの影響を図 3.1-13 に示す。アクリル試験装置と同様に、炭素鋼表面では他のコーティングに比べ、酸化 CsI コーティングの表面でエアロゾル濃度が増加した。コンクリート面では、エアロゾルの発生率が相対的に高いことから、各スキャンのライン間隔を金属面の 0.1 mm からコンクリート面の 0.5 mm に拡大した。その結果、レーザーエネルギー密度は 1/5 倍に減少したが、エアロゾル濃度は金属表面と同様の傾向が示された。

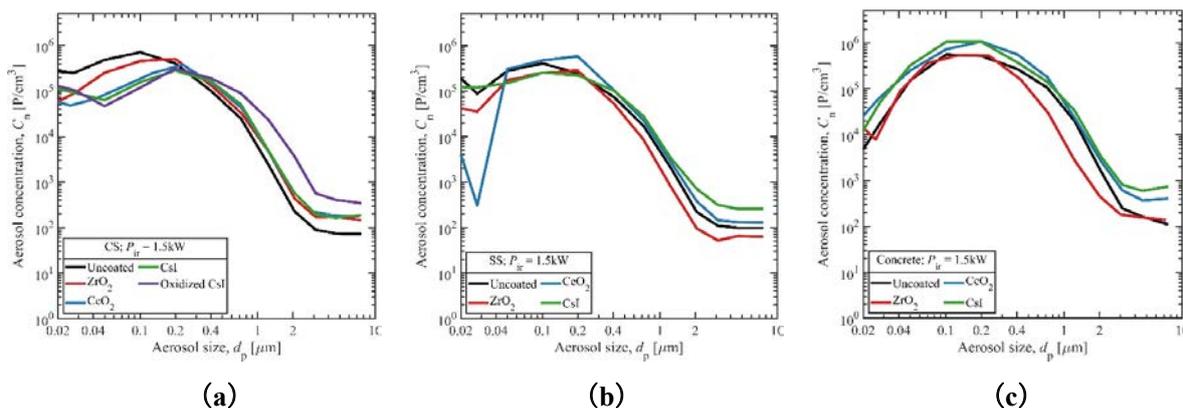


図 3.1-13

(a) 炭素鋼 (b) ステンレス鋼 (c) コンクリート片における表面コーティングによる平均エアロゾル濃度の影響

(8) UTARTS 施設でのスプレー洗浄実験

各試験におけるエアロゾル捕集実験手順を図 3.1-14 に示す。エアロゾルを容器内で十分に混合させた後にミスト噴射と計測を開始した。エアロゾルの混合は、容器内の均質性を可能な限り高めるため、清浄な圧縮空気を 80 L/min の流量で容器底部に噴射した。この空気注入は、容器が加圧されないように、エアロゾルの出口バルブを開いた状態で行われた。UTARTS 施設でのミストスプレー実験の概要は表 3.1-5 に示す通りである。

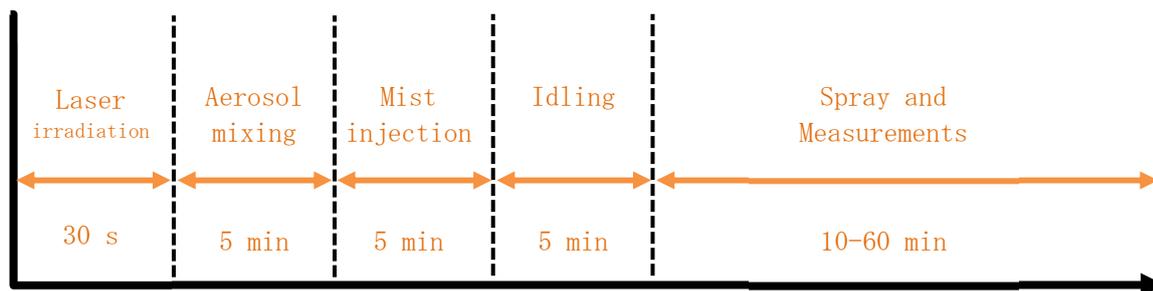


図 3.1-14 実験手順

表 3. 1-5 UTARTS 実験における主要パラメータ

Parameter	Value
Test specimens	Carbon-Steel (SS400); Stainless-Steel (SS304); Concrete
Mist size range	0.4 - 0.9 $\mu\text{m}$
Mist peak concentration	$\sim 19000 \text{ P/cm}^3$ (at $D_{\text{mist}} = 0.675 \mu\text{m}$ )
Spray nozzle model	1/8GG-SS3004
Spray nozzle orifice diameter	1.2 mm
Spray flow rate	2 - 4 liters/min
Nozzle distance from the top	300 mm

## (9) エアロゾル除去効率に及ぼすスプレー帯電の影響

エアロゾルの放射線誘発表面電荷の影響を検証するため、帯電したエアロゾル粒子による実験を行った。本節(8)では、スプレーによるエアロゾル除去効率を向上させる方法として、ミスト噴射やスプレー流量の増加等の方法を紹介した。これに加え、除去効率を高める新たな手段として、スプレーやミストを帯電させる方法が提案されている。エアロゾルと液滴の両方を帯電させることで効果が向上する可能性はあるが、エアロゾルを負または正に帯電する必要があるため、ここで紹介する結果は実際の条件よりも高くなる可能性がある。電気力は液滴に蓄積された電荷の数に依存するので、レイリー限界で示されるように、液滴は大きい方が、効率が良いはずである。10 mm の銅管と直径 100 mm の帯電器を使用し、ノズルの先端は帯電器から約 20 mm 上に位置するようにした。充電器の電圧は高電圧ジェネレーターで制御し、ジェネレーターモジュールによってプラスまたはマイナスの電圧を発生させることができる。今回の実験では、ジェネレーターの電圧を-15 kV に設定した。

レーザー照射した炭素鋼、ステンレス鋼、CeO<sub>2</sub> コーティングしたコンクリート表面で、スプレー帯電の効果を理解するために3つの実験を実施した。スプレー帯電の個別効果を評価するため、ミスト噴射をオフにしたまま、スプレー噴射のみを2 L/min の流量で実施した。結果は、帯電させない同じパラメータと比較し、図 3. 1-15 に示した。

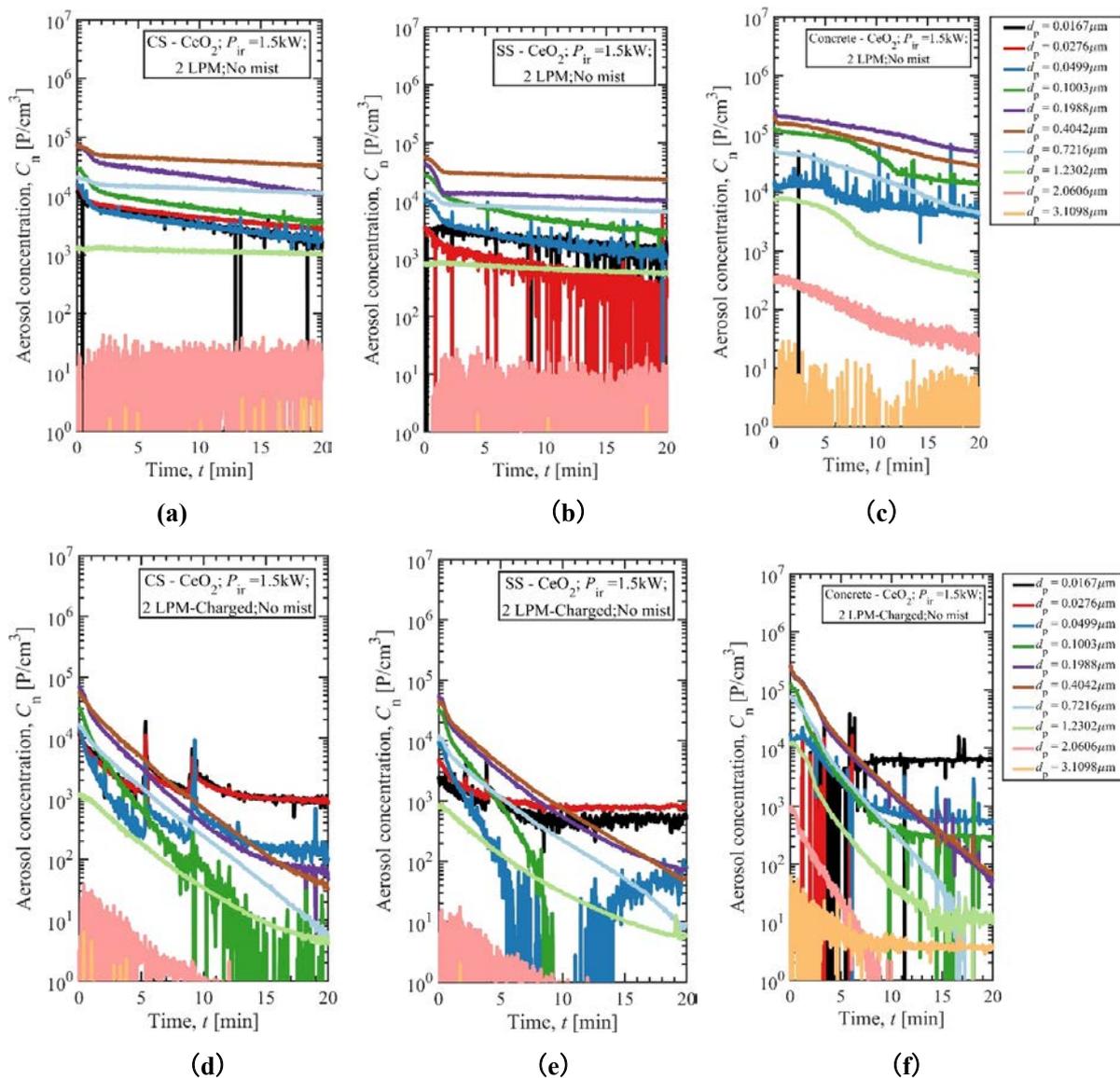


図 3.1-15 スプレー帯電によるエアロゾル除去性能の検証

(10) 微粒子飛散の数値シミュレーション

UTARTS での実験結果を基に、既存の CFD モデルを改良し、微粒子飛散現象におけるモデルの検証を実施した。水噴霧液滴によるエアロゾル除去の数値シミュレーションは、図 3.1-16 に示すように、Euler-Lagrange 法を用いて行った。連続相（粒子を含んだ気体）の記述にはオイラー法を、分散相（噴霧液滴）の記述にはラグランジュ法を用いている。連続相は、空気と小さな二酸化ジルコニウム ( $ZrO_2$ ) 粒子で構成されている。直径の異なる  $ZrO_2$  粒子は、連続相では異なる気体種とみなされ、拡散と対流によって輸送される。粒子は十分に小さく（本研究では  $0.2 \sim 1 \mu m$ ）、ストークス数 (St) が 1 以下であるため、浮遊粒子は気相の流れに追従し、気相と同じ速度を持つものと仮定した。連続相と分散液滴相は、抗力によって互いに干渉する。これらの相互作用は、カップリングモデルによって説明され、エアロゾルの除去は、質量保存式におけるソースとシンク項として考慮される。

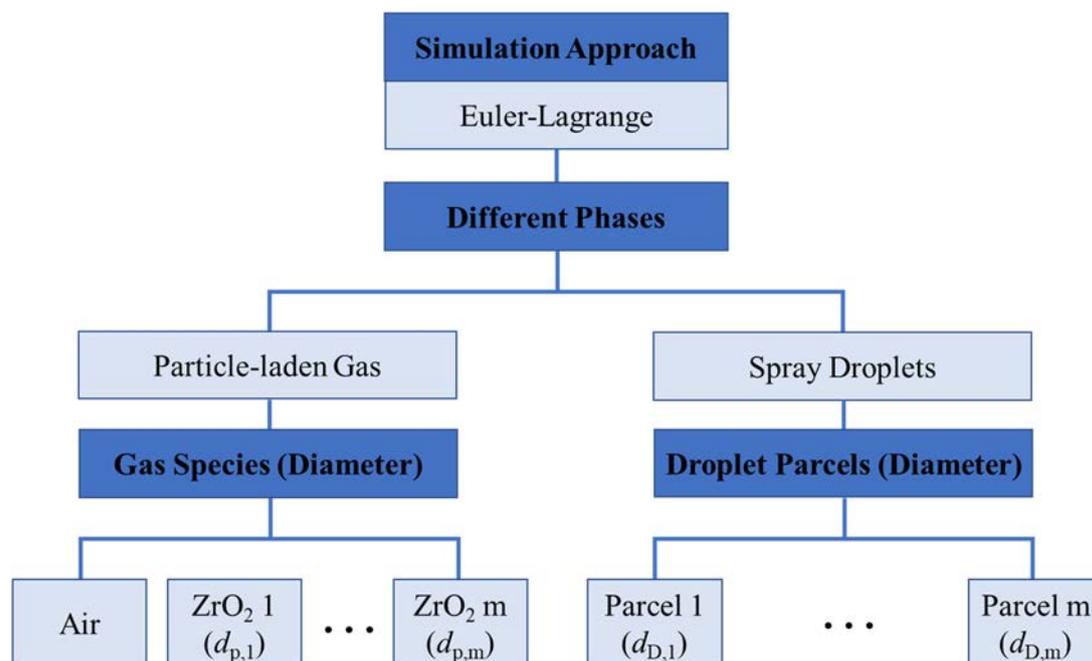


図 3.1-16 Euler-Lagrange 法による数値解析手法

エアロゾル粒子は、様々な捕集機構により液滴表面に捕集される。本研究では、水噴霧液滴によるエアロゾルの捕捉をシミュレーションするために、機械的捕集機構（慣性インパクション、インターセプション、ブラウン拡散）を考慮したエアロゾル除去モデルを開発した。異なる位相の制御方程式と、異なる捕集機構の捕集効率を計算するための経験式を以下に示す。なお、スプレー液滴と粒子を含んだ気体の温度はともに室温であるため、エネルギー保存式は考慮していない。

粒子を含んだ気相をシミュレートするための受動的スカラー輸送

連続相の記述にはオイラー法が用いられ、粒子を含んだ気相の全質量移動方程式は、次式で表される。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}_G) = \dot{\rho}_s \tag{2}$$

ここで、 $\rho$  は気体密度、 $t$  は時間、 $\mathbf{U}_G$  は気体速度、 $\dot{\rho}_s$  はスプレー液滴によるエアロゾルの除去をモデル化するシンク項である。気相中のすべての種は受動的なスカラー輸送方程式で解かれ、エアロゾル粒子のみがスプレー液滴による捕獲によって消費される。気相中の個々の化学種に対する質量方程式は、次式で表される。

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}_G Y_i) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla Y_i) = \dot{\rho}_s^i \tag{3}$$

$$\dot{\rho}_s = \sum_i \dot{\rho}_s^i \tag{4}$$

ここで、 $Y_i$  は  $i$  番目のガス種 ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ) の直径  $d_{p,i}$  のエアロゾルの質量分率、 $\mu_{eff}$  は有効粘度で、層流粘度と乱流粘度の和、すなわち  $\mu_{eff} = \mu_L + \mu_T$  として定義される。ソース項はエアロゾル粒子種に対してのみ非ゼロである。運動量輸送方程式は

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}_G}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}_G \mathbf{U}_G) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \mathbf{U}_G) + \nabla \cdot [\text{dev}(\mu_{eff} (\nabla \mathbf{U}_G)^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_s \quad (5)$$

として表され、 $p$  は圧力、 $g$  は重力加速度、 $F_s$  は噴霧液滴によって引き起こされる運動量源項である。 $dev$  は  $dev(A) = A - 2/3 I \text{tr}(A)$  として定義される非対称テンソルの偏差部分を表す。

本 CFD 解析は UTARTS 容器を模擬した 3 次元形状 (高さ 2.5 m、直径 1.5 m、容積 3.92 m<sup>3</sup>) を用いて実施した (図 3.1-17)。スプレーノズルは容器上面から 30 mm 下に設置した。メッシュの生成には、プリズムレイヤー、トライアングルサーフェスリメッシャー、ポリヘドラルメッシャー、自動表面修復の各モデルを使用し、最適化を行った。エアロゾルの掃引には中央の噴霧領域が重要となるため、容器の中央部のメッシュを直径 0.75 m に微細化した。エアロゾル粒子とスプレー液滴の相互作用に焦点を当て、容器内壁付近の境界層を 2 層追加し、合計で 167,844 個のセルを生成した。シミュレーションした物理時間は、スプレー作動後の 1,200 秒である。

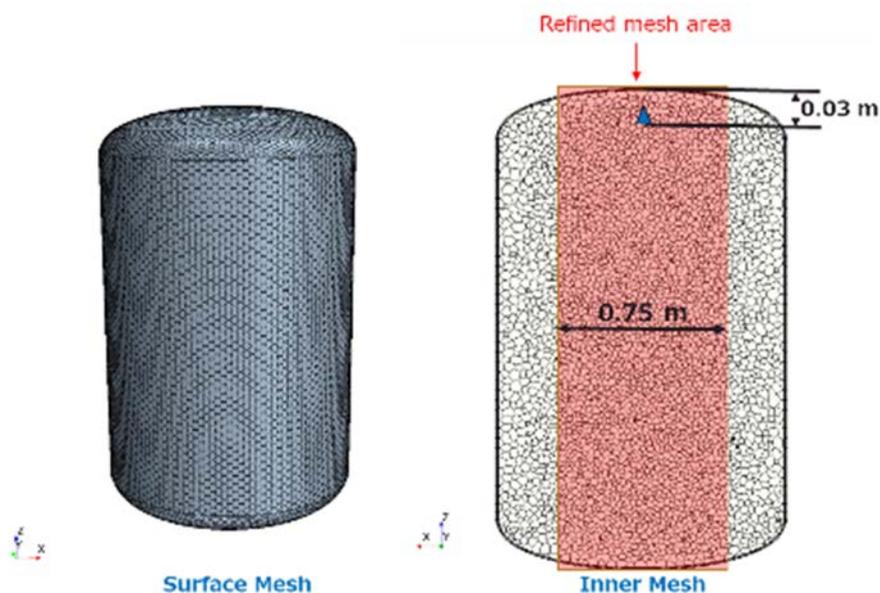


図 3.1-17 解析メッシュ図

実験ケースの検証には、2 種類のフルコンスプレーノズルを使用した実験ケースを参照した (図 3.1-18)。ノズルから噴射される噴霧液滴のシミュレーションには、STAR-CCM+ の固体噴射装置のモデルを適用した。両ノズルのオリフィス径は 1.2 mm とし、スプレー噴射流量は両シミュレーションケースとも 2 L/min とした。シミュレーションケース I ではノズル 1、シミュレーションケース II ではノズル 2 の液滴サイズ分布と噴霧角度をそれぞれ測定したものを使用した。スプレー液滴は容器内壁に衝突すると消滅するため、容器下部プレナムでのスプレー水の蓄積は無視した。時間ステップは、低クーラント数を確保するため 0.001 秒とした。

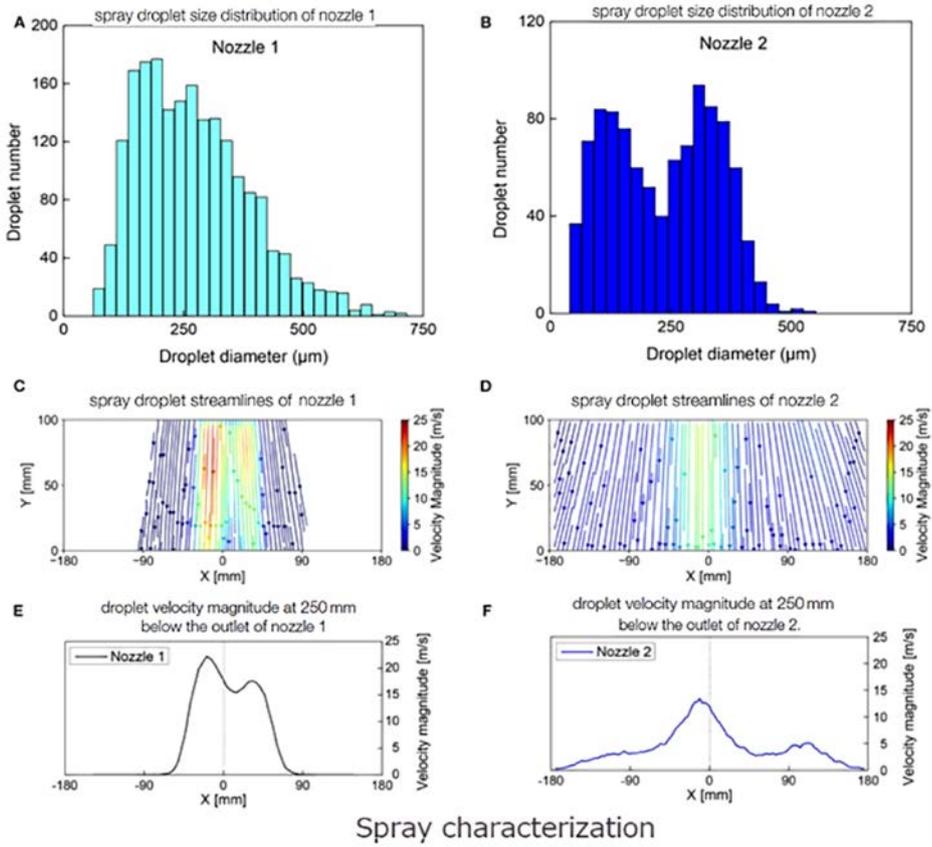


図 3.1-18 スプレー出口における液滴特性[11]

表 3.1-6 に示すように、直径 0.2~1 μm の ZrO<sub>2</sub> エアロゾル粒子の代表的な 9 つのサイズグループを、AP2~AP10 と名付けた 9 つのガス種として扱った。また、直径の異なる初期エアロゾル質量は、測定された実験データの情報を使用した。シミュレーション開始時には、エアロゾル粒子は容器内に均一に分散されていると仮定した。

表 3.1-6 数値シミュレーション解析条件

Case I			Case II		
	$d_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	Initial mass [mg]		$d_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	Initial mass [mg]
AP2	0.198	0.42	AP2	0.198	0.65
AP3	0.305	2.24	AP3	0.305	3.20
AP4	0.407	7.32	AP4	0.407	9.38
AP5	0.505	18.94	AP5	0.505	20.43
AP6	0.583	31.07	AP6	0.583	27.66
AP7	0.724	38.14	AP7	0.724	24.31
AP8	0.778	38.66	AP8	0.778	22.43
AP9	0.899	35.50	AP9	0.899	17.82
AP10	1.038	33.12	AP10	1.038	15.52

図 3.1-19 に、シミュレーションケースにおける噴霧液滴と気相の速度のシミュレーション結果を示す。図中の球形はスプレー液滴を表し、凡例色はスプレー液滴の直径である。スプレー液滴は容器内壁への衝突とともに消滅する。スプレー角度が  $27^\circ$  (Case I) の場合、スプレー液滴は容器の垂直壁面には到達しない。一方、噴霧角度が  $66^\circ$  (Case II) では、噴霧液滴は容器の垂直壁に到達する。シミュレーションでは双方向の結合を考慮したため、気相の速度はスプレー領域内で他の領域よりも大きくなっている。これは連続相と分散液滴相間の抗力に起因している。また、ノズルから異なるサイズの液滴が生成されていることから、本手法が液滴サイズ分布のシミュレーションを適切に実施できていることが分かる。

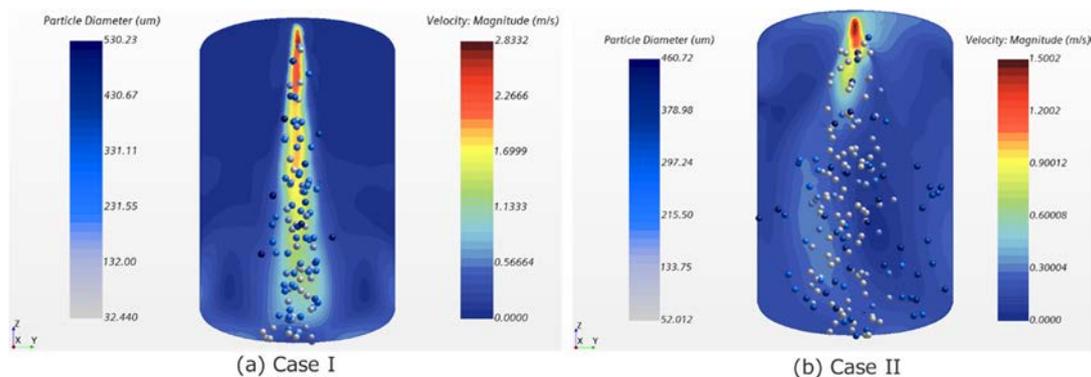


図 3.1-19 Lagrange 法による液滴と Eulerian による気相分布

図 3.1-20 は、エアロゾル粒子のエアロゾル質量分率の時間変化を示している。Liang et al. (2020) [7]のシミュレーションと同様、噴霧活性化中に、噴霧液滴が粒子を含んだ気体の再循環渦構造が容器内で形成される。この渦構造は、粒子を含んだ気相を中央の噴霧領域へと導く駆動源としての効果が期待される。

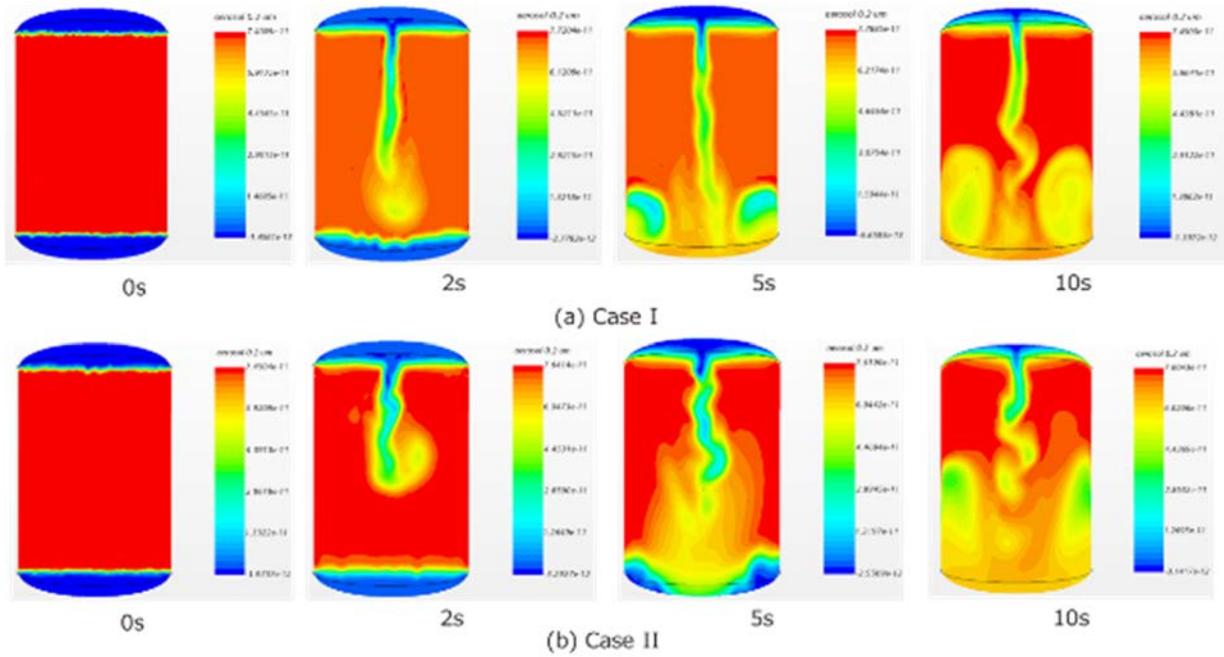
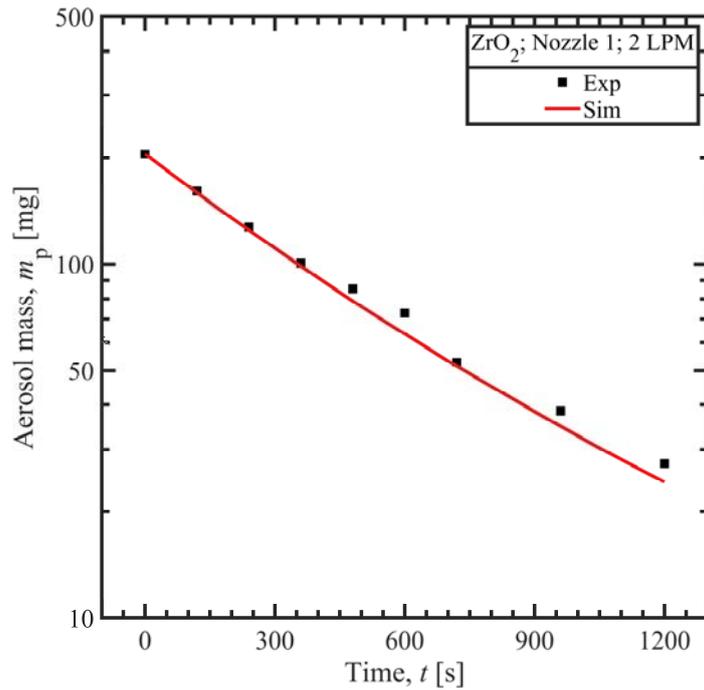
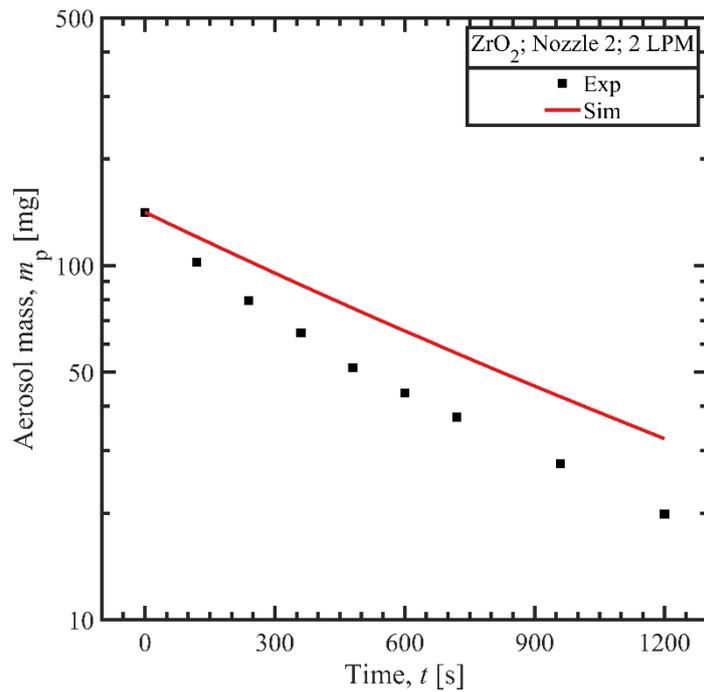


図 3.1-20 スプレー噴射時におけるエアロゾル挙動

CFD を用いたエアロゾル除去モデルの検証は、図 3.1-21 に示すように、エアロゾル質量の時間変化を実験とシミュレーションとで比較することで行った。図 3.1-21 (a) は Case I、図 3.1-21 (b) は Case II である。Case I では、シミュレーション結果と実験データとの間に良い一致が見られるが、Case II では、エアロゾルの除去効率を過小評価している。



(a) Case I

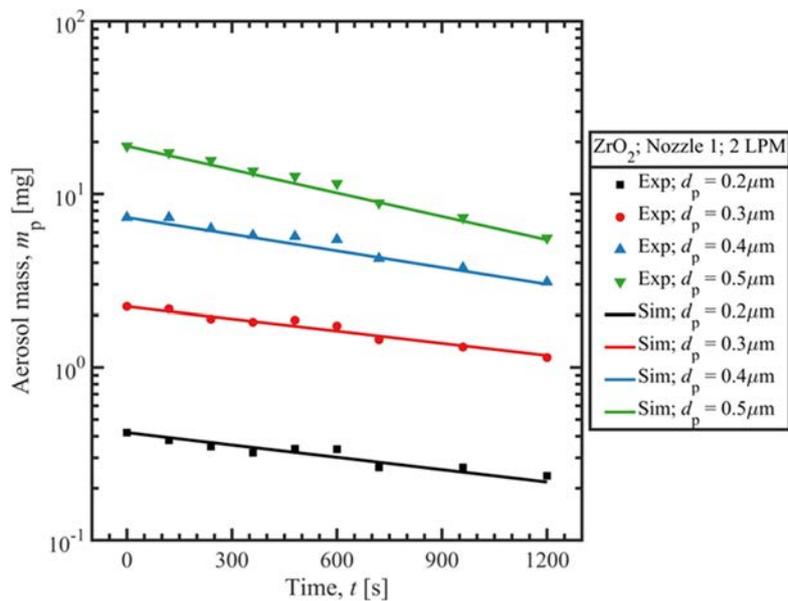


(b) Case II

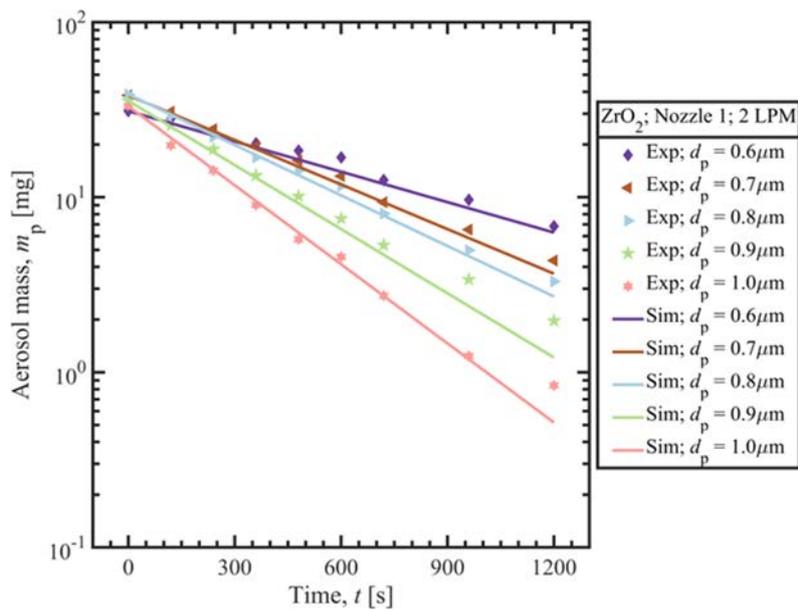
図 3.1-21 数値解析モデルの検証

さらに、粒径の異なるエアロゾル質量の時間変化について数値モデルの検証を行った。図 3.1-22 に示すように、Case I では、シミュレーション結果は実験データと良く一致した。一方、図 3.1-23 に示す Case II では、 $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$  の粒子サイズにおいてシミュレーション結果は実験結果と良好の一致を示したが、粒径  $0.6 \sim 1 \mu\text{m}$  の粒子では過大評価の傾向が見られた。この結果の

不一致は、粒子のストーク数 (St) が増大することから、流線に沿った移流が阻害されるためと考えられる。

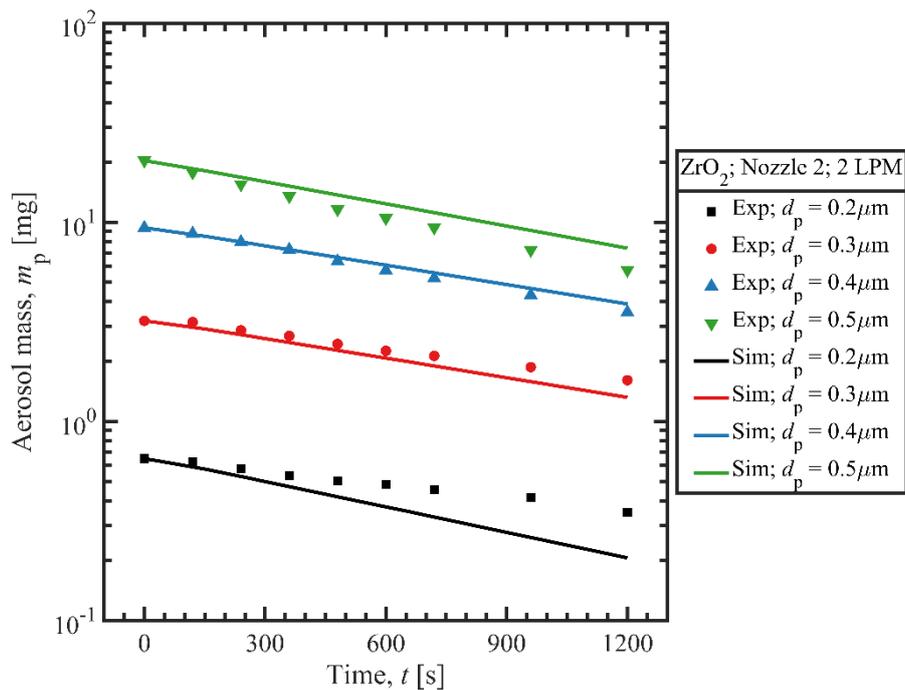


(a) AP2 – AP5

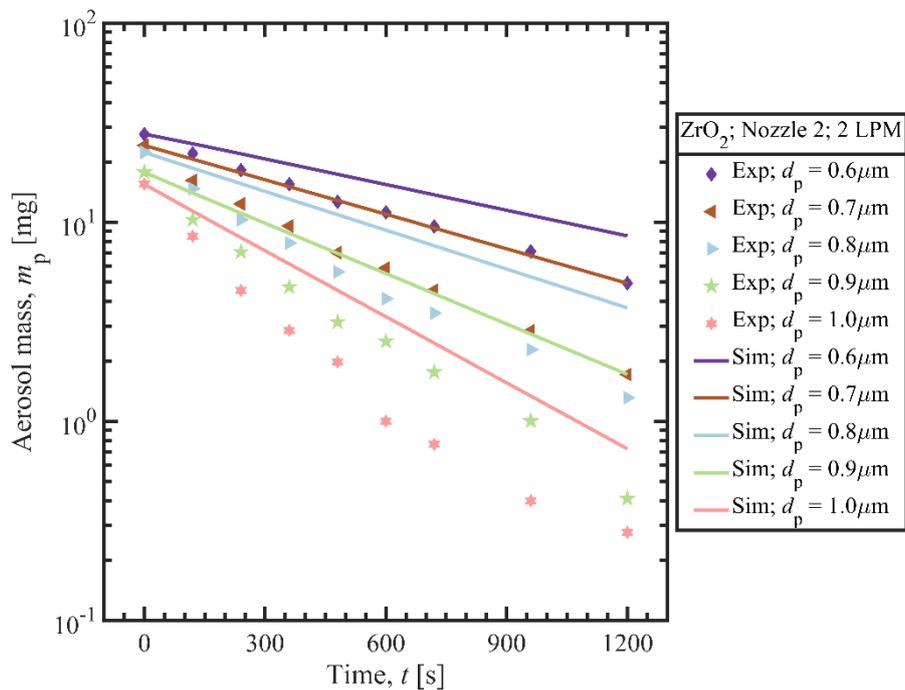


(b) AP6 – AP10

図 3.1-22 異なるエアロゾル粒子径における実験とシミュレーション (Case I) の比較



(a) AP2 – AP5



(b) AP6 – AP10

図 3.1-23 異なるエアロゾル粒子径における実験とシミュレーション (Case II) の比較

3.1.2 データ評価 (連携先: JAEA)

本項では、レーザー照射実験により得られたデータについて、東大-JAEA との連携により行った評価結果について述べる。エアロゾル除去効率  $E$  は、噴霧前の濃度に対する噴霧前後のエアロゾル粒子濃度差  $C_n$  (単位: P/cm<sup>3</sup>) の比率で定義される。

$$E = \frac{(C_{n|0|} - C_{n|t|})}{C_{n|0|}} \tag{6}$$

(1) エアロゾル除去効率に及ぼすスプレー噴霧の影響

エアロゾル除去効率に及ぼすスプレー噴霧の影響として、噴霧流量はスプレー液滴の数、微粒化、速度等の複数のパラメータへ多大な影響を与えることが考えられる。図 3.1-24 は、ステンレス鋼の表面に対して、2~4 L/min の異なる流速でスプレーを噴射し、(a) 10 分後と (b) 40 分後のエアロゾル除去効率 ( $E$ ) の比較を示している。除去効率 ( $E$ ) は、粒子径  $0.04 \mu\text{m} \leq d_p \leq 1 \mu\text{m}$  のエアロゾル粒子では、エアロゾル粒子径が大きくなるにつれて除去効率が徐々に高くなる傾向が見られる。これは、エアロゾル粒子とスプレー液滴の間の慣性衝突によるものと示唆されるが、具体的な移流メカニズムに関しては関連文献の調査も含め、検証中である。

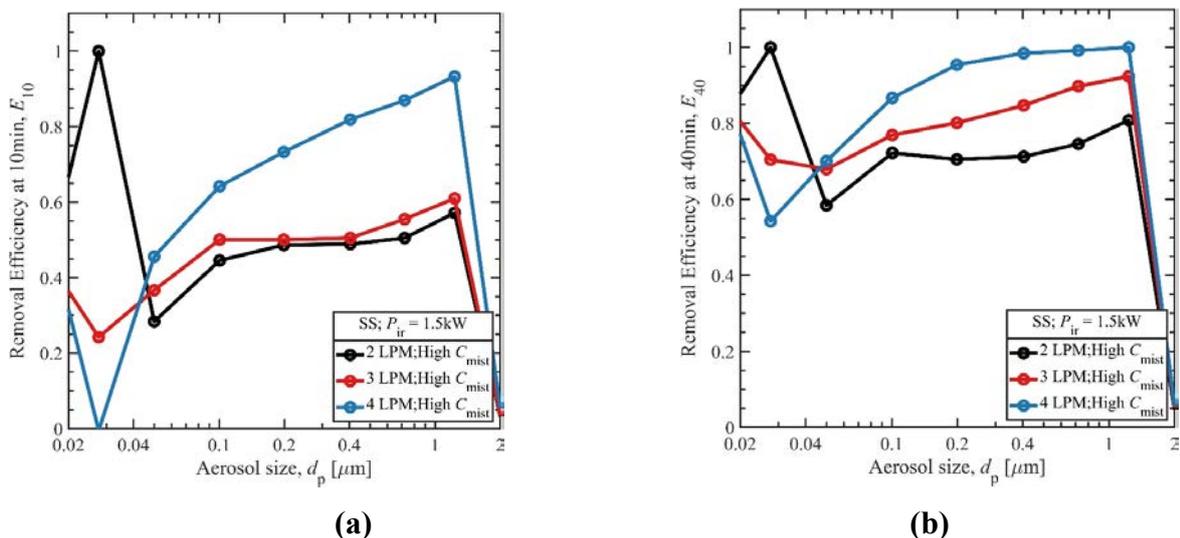


図 3.1-24 スプレー噴射流量と除去効率の関係 (a) 10 分後 (b) 40 分後

(2) エアロゾル除去効率に及ぼすミストの影響

ミスト噴射によるエアロゾルの凝集効果を検証するための実験を実施した。図 3.1-25 に、(a) ステンレス面、(b) コンクリート面について、噴射前にミストがある場合とない場合のエアロゾル粒子の除去効率を比較している。ステンレス鋼表面では、水ミストによりエアロゾル粒子の除去効率が向上していることが確認できる。これに対し、コンクリート表面のレーザー洗浄で発生するエアロゾルに対しては、ミストによる効果は限定的であることが示唆された。コンクリート表面のエアロゾルに対しては、ミストの有無を問わず比較的高い除去効率が確認されている。これはコンクリート中で最も高い組成である親水性 SiO<sub>2</sub> (60 %以上) による影響と考えられる。

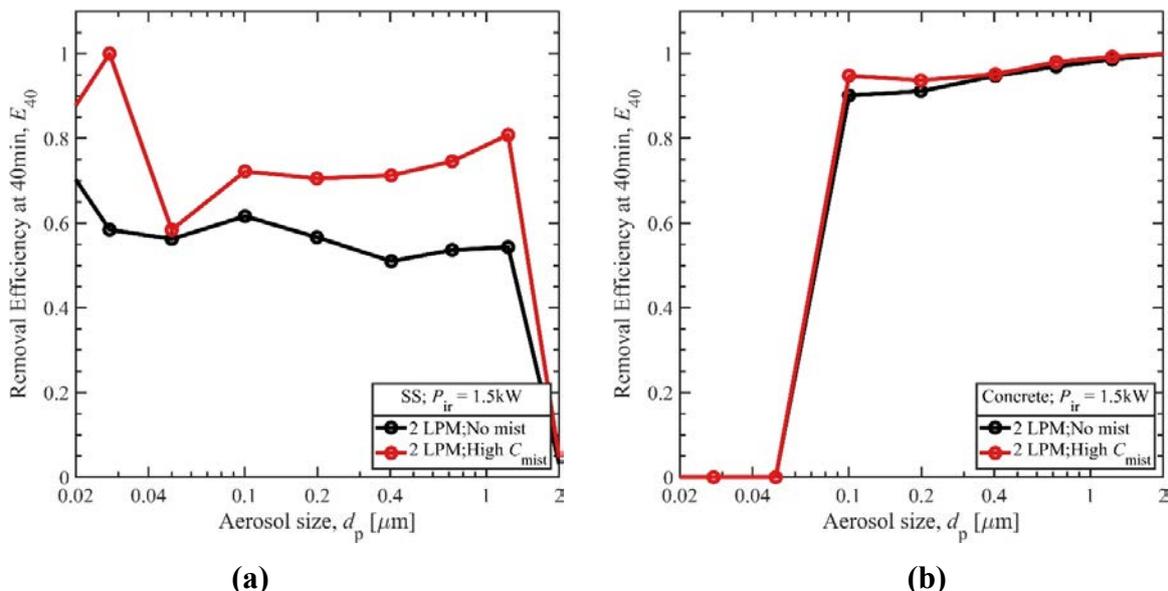


図 3.1-25 ミスト噴霧による除染効果の影響 (a) ステンレス鋼 (b) コンクリート片

(3) エアロゾル除去効率に及ぼすスプレー帯電の影響

帯電したエアロゾル粒子による実験結果について、エアロゾルの放射線誘発表面電荷の影響を検証した。レーザー照射した炭素鋼、ステンレス鋼、 $\text{CeO}_2$  コーティングを施したコンクリート表面のサンプルにおいて、スプレー帯電の効果を検証するための実験を行った。スプレー帯電の個別効果を評価するため、スプレー噴射のみを 2 L/min の流量で実施した。帯電させない場合の粒子濃度との比較を、図 3.1-26 と図 3.1-27 に示す。図 3.1-26 は、 $\text{CeO}_2$  を表面コーティングした様々なサンプルにて実施した通常スプレーと (a-c)、帯電させた (d-e) 液滴におけるエアロゾル濃度を示す。エアロゾル濃度は、帯電させた液滴を使用した条件においては、計測開始と同時に急速に減少し、図 3.1-27 に示すように高い除去効率を得られた。特に、2  $\mu\text{m}$  以上の粒子径においては極めて効果的な除去効率が確認された (図 3.1-27 (a, b))。帯電の効果は比較的長時間維持される傾向にあり、本実験においては噴射後 10 分経過後も、高い除去効率が確認することができた。また、鉄板とコンクリートによる傾向の違いも見られ、コンクリートの場合は粒径を問わず比較的高い除去率が維持される傾向が見られた (図 3.1-27c)。このことから、スプレー帯電の使用は、ミストとスプレーの除去効率をさらに向上させることが示唆されるとともに、除染対象となる素材にも依存することを確認した。令和 5 年度においては、帯電スプレー効果について更なる検証を行う予定である。

(4) 日英の研究成果の評価

日英それぞれの研究チームにて開発されたミスト発生機構と、エアロゾル回収機構についての評価を行った。はじめに、日英双方ともに市販の超音波トランスデューサーを用いたミスト発生システムを採用しており、生成されるミスト径のオーダーは比較的同等とみなすことができる。しかしながら、除染部へのミスト注入方法が大きく異なり、英国チームがポンプ吸引による強制対流によりミストとエアロゾルの相互干渉を促進させているのに対し、日本側の UTARTS は容器内へノズルを介して注入する自然対流により均一に供給している。これは、ミストとエアロゾルの相互干渉領域を、ロボットアームに取り付けられたヘッダ部のみに限定した英国チームの設計と、実機容器を除染領域と仮定した UTARTS との違いによるものである。この違いは、ミスト回収方法にも表れており、ポンプにより吸着水をすべて吸引する設計である英国と、システム (容器) 内にプール状態で捕獲する日本側の処理方法にも表れている。英国チームの設計の場合、除染効率を上げるためにも、ヘッダと除染部平面の気密性を極力確保することが望ましく、湾曲部や構造体への除染には更なる設計の改良を含めた検討が推奨される。

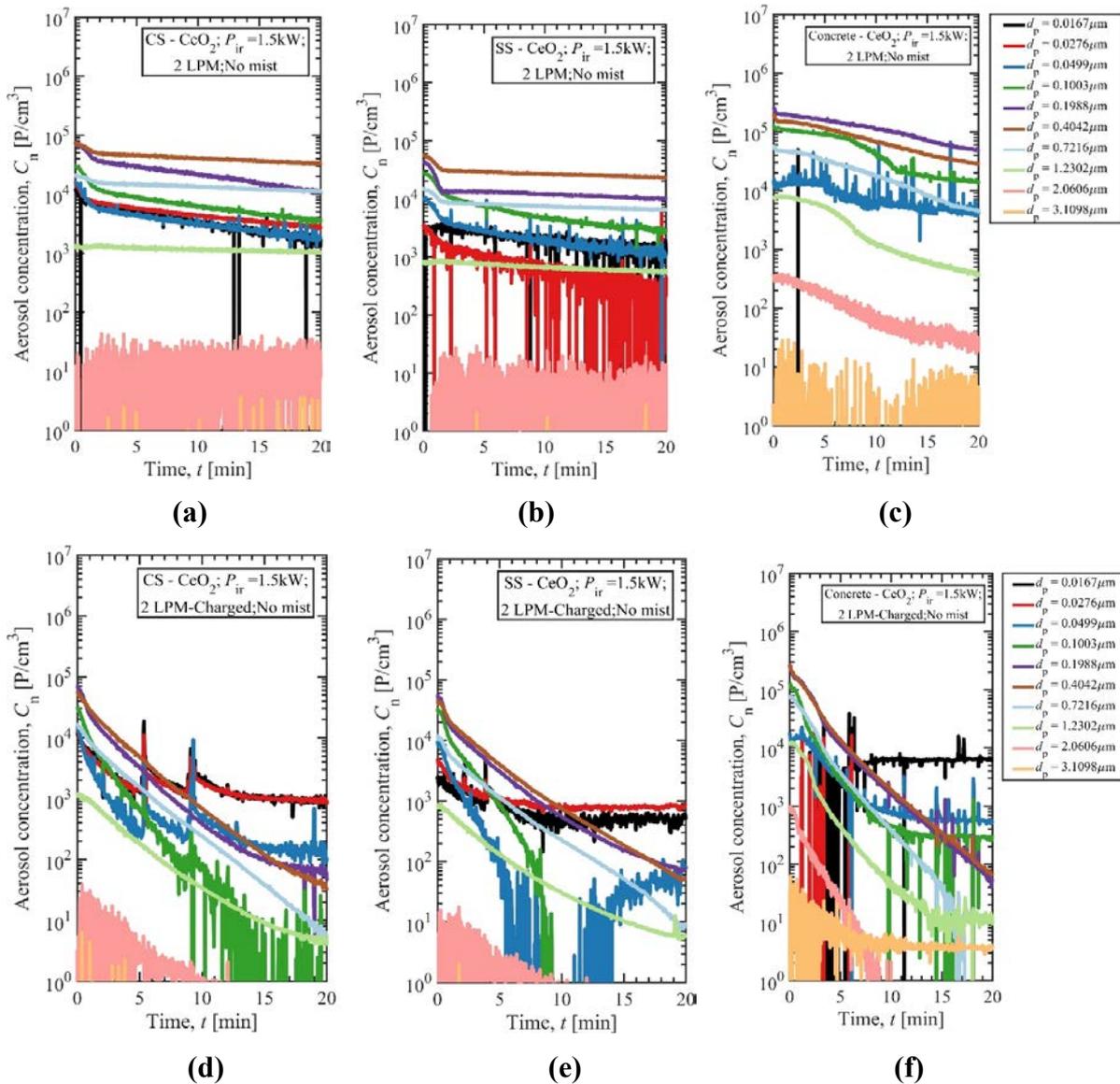


図 3.1-26 スプレー帯電によるエアロゾル濃度の時刻歴変動

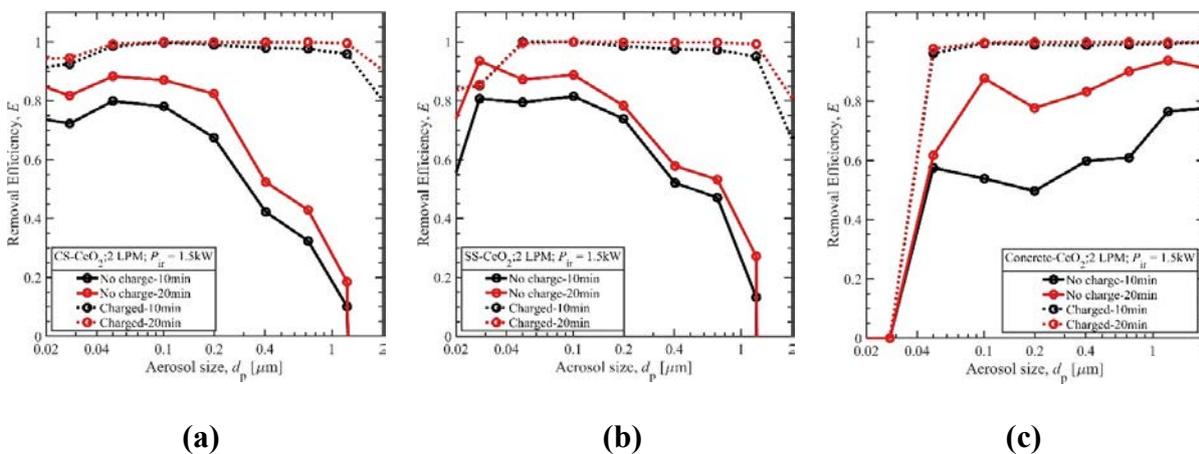


図 3.1-27 スプレー帯電によるエアロゾル除去性能の検証

(a) CS-CeO<sub>2</sub> コーティング (b) SS-CeO<sub>2</sub> コーティング (c) Concrete-CeO<sub>2</sub> コーティング

以上、本研究では、炭素鋼、ステンレス鋼、コンクリートの照射面からのエアロゾル発生に対する CW ファイバーレーザー装置の性能を調べるために、レーザークリーニング実験を実施した。目的は、発生したエアロゾルの粒子濃度に及ぼすレーザー出力と照射面の種類の影響を調査することであった。様々な試験表面を準備し、異なる出力のファイバーレーザービームを用いて洗浄した。エアロゾル濃度が高いことから、廃炉のための放射線ホットスポットの洗浄技術として有効であることが示された。本研究で得られた成果と課題は以下の通りである。

- 1) 水ミスト噴射によるスプレー液滴を利用したエアロゾル粒子捕捉の効果を評価するため、UTARTS チャンバー内でエアロゾル捕捉実験を実施した。水ミストの添加により、ステンレス鋼の照射面においてエアロゾル粒子の除去効率が大幅に向上したことから、1F の遠隔での廃炉作業において、エアロゾルの迅速な除去に不可欠な技術であることが示された。
- 2) コンクリート構造物のレーザー洗浄において、ミストがない状態でも水スプレーの除去効率が非常に高いことを示し、発生するエアロゾルの性質を分析することが非常に重要であることを示した。エアロゾルの性質に応じて異なるエアロゾル除去ツールを活用することで、効果的なエアロゾル除去を行うことができる。
- 3) ミストやスプレーの流量はエアロゾル除去効率を向上させるが、スプレーの帯電はそれを強化するため、スプレーやミストを電氣的に帯電させることが提案されている。これらの知見は、放射性エアロゾルの効果的な除去方法を開発するための貴重な知見となる。
- 4) 噴霧液滴の特性（液滴速度、サイズなど）が異なるため、多孔ノズル噴霧システムでのエアロゾル除去効率は、単孔ノズルのものに比べて低くなることが分かった。本研究で得られた結果は、1F の廃炉作業において、効果的なエアロゾル捕捉のための噴霧システム設計の最適化に役立つと考えられる。
- 5) 多孔式ノズルによるエアロゾル除去において、ミストとエアロゾルの凝集による除去効率向上の効果が確認された。
- 6) 本結果は、一定の噴霧水流量のもとで、与えられたシステムで効果的なエアロゾル除去を達成するための液滴サイズ、スプレー噴流速度及びミスト濃度の最適な組み合わせが存在することを示唆している。
- 7) 一般に、STAR-CCM+を用いた現在のシミュレーションは、実験結果と比較して、妥当な結果を示している。
- 8) 多孔ノズル噴霧によるエアロゾル捕捉のシミュレーションを実施し、検証を行った。ただし、スプレー液滴の初期条件（サイズ分布、最大速度の大きさなど）については、実験により決定する必要がある。
- 9) 帯電液滴を用いた実験による検証とともに、シミュレーションへの実装を検討する。
- 10) レーザー洗浄・切断によるエアロゾル生成率をソース項としてシミュレーションコードへモデル化することが最終的な到達目標として挙げられる。レーザー実験による定量的な測定結果を礎に、令和 5 年度においては更なる解析、追加実験による検証等を進める予定である。

### 3.2 データ評価及びモックアップ試験（再委託先：(株) アトックス）

#### 3.2.1 データ評価

令和3年度は、2つの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）と廃炉現場への適用性の観点から具備すべき仕様・性能について報告した。令和4年度は、連携先であるJAEAの小菅研究員から教授いただいた知見を整理して報告する。

レーザーは、溶かす、切る、削るなどの作用を持つが、除染には削る効果を応用することになる。除染としてはサンドブラストなどの物理的接触による方法と化学処理による方法があるが、それぞれ汚染した微粒子や汚染した化学薬品などの二次汚染廃棄物が発生する問題がある。それに対してレーザーによる除染では二次廃棄物が少なく、汚染部位に限定して除染できる利点がある。

レーザーの制御としては、低出力と高出力、連続とパルスなどコントロールすることにより如何に母材を溶融せずに汚染した表面のみを削り取る条件を見出すかである。パルスレーザーはコントロールし易いが高価であるし、連続パルスは母材の溶融が起こりやすい特徴がある。ファイバーレーザーが登場し照射の多様性が実現し高速操作により母材の溶融を防ぐ技術も開発されている。

レーザーの特徴を生かした除染技術の実用例として、東電による「フランジタンク解体におけるレーザー除染工法の開発」を紹介する。

従来のフランジタンクの解体作業では、放射性物質を含んだダストの飛散抑制のため、事前にタンク内面に塗料を塗布する工程がある[16]。このダストの飛散抑制を目的とした塗料を塗布する工程の代わりに、タンク内面の防食塗装に付着した放射性物質を防食塗装ごと蒸散させて取り除く新技術として、レーザー除染技術が開発された[16, 17]。レーザー除染技術を取り入れることで放射性物質の飛散抑制に加え、タンク内部の放射線量を低減する効果が見込まれる。工法の概要としては、タンク内部に装置を設置し、回転・上昇を繰り返しながら内面へレーザーを照射することで、レーザーが照射された場所の温度を局所的に上昇させ、放射性物質が付着した防食塗装を破壊・除去（蒸散）させる[16]。表3.2-1にレーザー装置の諸元を示す。遠隔操作によりタンク内は無人でレーザー除染を実施可能であり、トラブル発生時は速やかに装置を停止できるシステムとなっている[16]。

表 3.2-1 フランジタンクの解体作業用レーザー装置の諸元 [16]

項目	内容
レーザー種別	ファイバーレーザー
発信方法	連続発振 (CW)
発信波長	1070 ± 50 nm
照射ユニット	3D ガルバノスキャナ
レーザー出力	最大 6000 W
照射速度	1 ~ 20 m/sec

レーザー除染中の安全対策として内部を負圧管理することに加え、タンクの外側に設置した多段階のフィルターを備えた集塵機で飛散物（ダスト）を回収し浄化された空気を排気するシステムを備えている[16]。飛散物の回収状況は、微粒子可視化試験及び高速度カメラにて回収状況の確認を行い、設置した回収フードにより十分に回収できていることが確認された[16]。また、レーザー除染装置近傍に設置した制御室内でタンク内部の負圧管理、フィルターの差圧管理、装置の操作、タンク内部の状況監視がなされた[16]。この実用例は、遠隔操作の実現に重要となる。

以上に記した通り、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。また、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、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。

### 3.2.2 モックアップ試験

英国側からブリストル大学の研究者 2 名が来日し、東大原子力専攻研究施設と（株）アトックス技術開発センターを訪問し、次年度に（株）アトックス模擬ウェル施設にて実施するモックアップ試験について現地調査と試験計画に関する協議を実施した。（株）アトックスでのモックアップ試験場における現地調査では、実際に模擬ウェル内に入り、ブリストル大学の除染ロボットをどのようにウェル内部へ投入するか協議を行った。実験場に設置されているクレーンの可動範囲についても確認を行い、ロボットの投入に問題なく使用可能であることを確認した。

解決すべき課題として、ブリストル大学の除染ロボットに必要な電源や、水供給源の位置についても確認を行い、モックアップ試験までに調整することを確認した。また、ウェル壁面にロボットを滑走させる方法や、除染対象とする対象物の取り付け方法についても解決すべき課題として協議を行った。対策としてはウェル壁面にある既存のボルト穴を使用し、サンプルを固定する方法が提案された。協議時にボルト穴の直径と位置情報等を収集し、ブリストル大学にてサンプルホルダー等を製造する形で対策することとなった。具体的な試験計画に関しては、次年度の進捗により適宜修正していく。以下に、現地調査ならびにミーティング時に挙げた協議内容ならびに課題・問題点と、その対策について具体的に記載する。

#### (1) 模擬ウェル施設の現地調査

模擬ウェル施設は（株）アトックス技術開発センターの大型実験棟に設置された、実物大スケールの原子炉ウェル（燃料交換時等に水張りされる PCV 上部空間）を 4 分割扇型にしたモックアップ施設である。開発装置等の現場を再現した環境での試運転や作業性や安全性の確認を含めた総合的な操作訓練を行っている（図 3.2-1、図 3.2-2）。例えば壁面除染装置の試験及び操作トレーニング（図 3.2-3）や、水深 8 m からの使用済み樹脂の吸上げ試験などの実績がある。レーザーを用いた除染装置の試験を本施設で実施することは本研究が初めてである。

### 模擬ウェル上部写真



- ウェル半径：約5m
- 原子炉ウェル以外を模擬した試験が可能  
なように架台や壁面を構築(左図の青矢印)

### 模擬ウェル内部写真



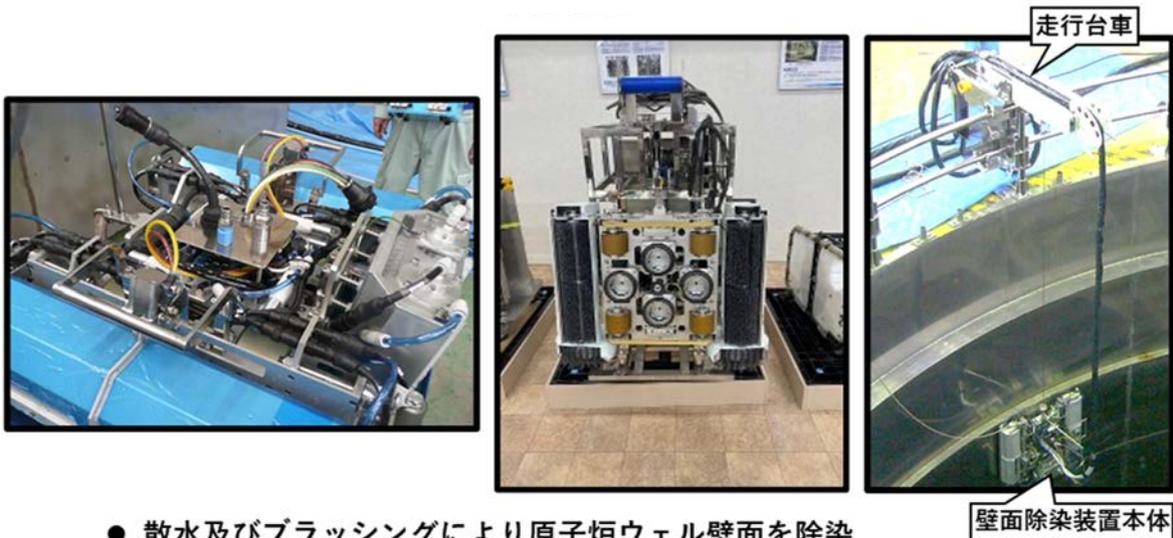
- 壁面の材質：SUS304
- 深さ：約8m

図 3.2-1 模擬ウェルの概要



- 定格荷重：2.8t
- 模擬ウェルへの重量物運搬が可能

図 3.2-2 (株)アトックス大型実験棟天井クレーン



- 散水及びブラッシングにより原子炉ウェル壁面を除染

図 3.2-3 (株)アトックス製壁面除染装置

現地調査では、模擬ウェルの寸法、作業者の動線、クレーンの動作、ステンレス壁への部材取り付け方法等について確認を行った。ブリストル大学が使用する除染ロボットは交流電源供給が必要であるとともに、除染に使用する水供給源も必要となる。模擬ウェルにてモックアップ試験を実施するにあたり、ロボット作動に必要なこれらの供給が問題なく実施できるか、電源位置と水源位置の確認を行い、問題がないことを確認した。以下に、問題点・課題点ならびにそれらの対策について記す。

- (問題点・課題点 1) 除染ロボットの冷却・除染に必要な水供給源の確保
  - ➔ (対策 1) ウェル下部まで延長可能な水ホースの準備
- (問題点・課題点 2) 除染ロボットの作動に必要な交流電源の確保
  - ➔ (対策 2) ウェル下部まで延長可能な電源ケーブルの準備

- (問題点・課題点 3) 除染ロボットのウェル内部への投入ならびに移動方法
  - ➔ (対策 3) 実験場に設置されているクレーンを使用することで解決。可動範囲に問題がないことも現地調査にて確認。
- (問題点・課題点 4) 除染対象となるサンプルのウェル壁面への取り付け方法
  - ➔ (対策 4) ウェル壁面にある複数のボルト穴を使用し、サンプルを固定する方法を検討。具体的な設計・製作はブリストル大学にて着手し、モックアップ試験までに準備を行う。

以上に示した通り、英国チームとの連携を軸に、モックアップ試験に向けた解決すべき課題、問題点を摘出し、対策を決定した。

(2) モックアップ試験

英国側研究チームでは、レーザー照射とそれにより発生するミストを封じ込めて回収する装置とロボットアームを組み合わせたレーザー除染装置をブリストル大学にてセットアップする。図 3.2-4 に示す構想でセットアップしたレーザー除染装置を (株) アトックス技術開発センターの模擬ウェルに持ち込み実証試験を実施する。



図 3.2-4 レーザー除染装置のセットアップ

モックアップ試験の実施時期は令和5年9月後半を予定しており、準備期間と本試験期間を含めた十分な期間が確保できるよう、(株)アトックス技術開発センターの模擬ウェル施設を確保した。

英国側チームは、ロボットアーム KUKA IIWA (22 kg)、スーパーロイド UGV (85 kg)、ブリストル大学特注 OptiClean ヘッド (5 kg) 及びミスト生成・補修装置 (5 kg) を持ち込み、(株)アトックスがクレーンを操作し各装置を適切な位置に配置する。レーザーの出力は 5~20 W (検討中) で UK 230 V、13 A の電源を必要とする。また、水道水の供給を必要とする。

ステンレスプレート (10×10 cm) に Cs、Sr 及び CeO<sub>2</sub> をコーティングし、コーティング層の厚さの変化をハンドヘルド蛍光 X 線分析計 Vanta を用いて計測し、レーザー照射の効果を評価する。また、レーザー照射中に捕集したミストについては回収し、英国に持ち帰り分析する予定である。

以上に述べたモックアップ試験に向けて実施した調査、協議結果を踏まえ、令和5年度のモックアップ試験計画を図 3.2-5 の通り決定した。

実施日程	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
項目												
モックアップ試験												
(1) 英国チーム		1. ロボット調整 2. サンプルホルダー準備					モックアップ試験			試験結果評価		
(2) 日本チーム		1. 必要資材購入 2. ウェル設備の準備					モックアップ試験			試験結果評価		まとめ・評価
				1. 現地視察 2. レーザー洗浄装置の確認		ウェル準備						まとめ・評価

図 3.2-5 モックアップ試験の試験計画

モックアップ試験に用いるロボットならびにレーザー、それに付随する循環系の準備はブリストル大学 (英国チーム) にて実施する。7月中旬を目途に (株)アトックスの施設にて除染作業が行える条件までチューニングを行い、7月末に現地にて英日両チームで確認を行う。この際、(株)アトックスからモックアップ試験場に詳しいエンジニアを派遣し、モックアップ試験の実施が問題なく遂行できるか、実際の動作を確認しながら検証を行う。この時点で更なる問題点・課題点が浮き彫りになった場合は、来日予定の9月末までに調整を行う。この間、日本チーム (東大、(株)アトックス) はウェル設備の確認や、必要な消耗品等を準備し、英国チームの受け入れに備える予定である。モックアップ試験は令和5年度の9月末に実施する予定であり、数日間に渡り、ウェルの壁面に取り付けたサンプルの除染試験を実施し、ロボットの動作、除染性能等を検証する。具体的な除染効率検証はモックアップ試験後に行い、日英双方で定期的に情報交換をしながら解析を進める予定である。

以上の計画概要を基に、「モックアップ試験の試験計画」を準備した。日本側研究チームと英国側研究チームが協力して次年度の業務内容を遂行し、実証試験を成功させる所存である。

### 3.3 英国側研究成果概要

#### Progress Report on the OptiClean Project: April 2022 to March 2023

David Megson Smith

School of Physics,

University of Bristol

April 27, 2023

#### Introduction (はじめに)

The OptiClean Project aims to develop next-generation laser cleaning technologies with real-time integrated efficacy monitoring. This report presents the progress made in the project from April 2022 to March 2023, covering advancements in mist generation, mist capture, LIBS capability, robotic integration, robotic scan methodologies, international collaboration, and custom cleaning head development.

オプティクリーン・プロジェクトは、リアルタイムで統合された有効性モニタリング機能を備えた次世代レーザークリーニング技術の開発を目的としている。本報告書は、2022年4月から2023年3月までのプロジェクトの進捗状況を紹介するもので、ミスト発生、ミスト捕捉、LIBS機能、ロボット統合、ロボットスキャン手法、国際協力、カスタムクリーニングヘッド開発などの進歩を取り上げている。

#### Research Activities (研究活動)

##### Mist Generation and capture System Development (ミスト発生・捕捉システム開発)

A 400W mist generator system was developed to assist the laser cleaning process. Various mist generation systems were investigated, including ultrasonic transducers. The final system was chosen for its effectiveness in creating a dense mist for cleaning applications. This dense mist allows for improved cleaning performance by enhancing the interaction between the laser and contaminants. The mist capture system was designed to remove mist from the atmosphere, ensuring a cleaner working environment. The system employs centrifugal forces and bubble filtration to efficiently capture the mist generated during cleaning, thus reducing potential hazards and improving the overall safety of the process. A schematic of this system can see in Figure 1.

レーザー洗浄プロセスを支援するため、400 W ミスト発生システムを開発した。超音波トランスデューサーを含む様々なミスト発生システムが調査された。最終的に、クリーニング用途に適した高密度のミストを発生させるのに効果的なシステムを選定した。この高密度ミストにより、レーザーと汚染物質との相互作用が強化され、クリーニング性能の向上が可能となる。ミスト捕捉システムは、大気からミストを除去し、よりクリーンな作業環境を確保するために設計された。このシステムは、遠心力と気泡濾過を採用し、クリーニング中に発生するミストを効率的に捕捉することで、潜在的な危険性を低減し、プロセス全体の安全性を向上させる。本システムの概略図を図1に示す。



Figure 1: The mist generation and capture system utilizing centrifugal forces and bubble filtration.

LIBS Capability Expansion (LIBS 能力の拡張)

The Heavy Element Laser Particulate Analysis (HELPA) system’s LIBS capability was expanded to cover a wavelength range of 200nm to 900nm. This broader range allows for the detection of a greater variety of elements and their associated spectral lines, thus improving the analytical capabilities of the HELPA system. The sensitivity to remnant CeO<sub>2</sub> after various cleaning passes was demonstrated. The resulting spectra show the wealth of information obtained, which provides valuable insights into the cleaning process and can help optimize laser parameters for better cleaning performance.

重元素レーザー微粒子分析（HELPA）システムの LIBS 能力は、200 nm から 900 nm の波長範囲をカバーするように拡張された。この広い範囲により、より多様な元素とそれに関連するスペクトル線の検出が可能になり、HELPA システムの分析能力が向上した。様々なクリーニングパス後の残存 CeO<sub>2</sub> に対する感度が実証された。得られたスペクトルは豊富な情報を示し、クリーニングプロセスに関する貴重な洞察を提供するとともに、クリーニング性能を向上させるためにレーザーパラメータを最適化するのに役立つと考えられる。

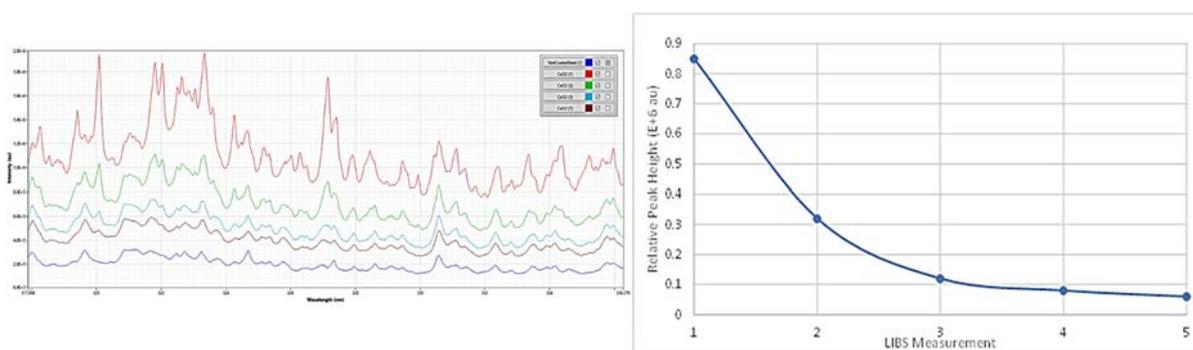


Figure 2: (a) LIBS spectra acquired (intensity vs. wavelength), showing the difference between uncoated samples and various cleaning runs. (b) A narrow region of the spectrum, demonstrating the transition from a CeO<sub>2</sub> spectrum to a clean stainless-steel spectrum by the reduction of the peak height at 327nm.

### Robotic Integration (ロボットインテグレーション)

The KUKA IIWA system was integrated onto a Superdroid HD2 with a fiber-coupled ROS system. The Raman used an 830nm laser (Process Instruments) with a Headwall spectrometer and Andor IDus 420 camera. The integration of the KUKA IIWA system with the Superdroid HD2 allows for more versatile and precise laser cleaning operations, ultimately leading to improved performance and efficiency (Figure 3). Moreover, the fiber-coupled Raman system enables real-time monitoring of the cleaning process, providing valuable feedback for optimizing cleaning parameters and ensuring the desired level of cleanliness is achieved.

KUKA IIWA システムでは、ファイバー結合 ROS システムを搭載した Superdroid HD2 に統合された。ラマンでは、830nm レーザー (Process Instruments) とヘッドウォール分光計、Andor IDus 420 カメラが搭載されている。KUKA IIWA システムと Superdroid HD2 の統合は、より多用途で正確なレーザークリーニング作業を可能にし、最終的に性能と効率の向上が期待される (図 3)。さらに、ファイバー結合ラマンシステムは、クリーニングプロセスのリアルタイムモニタリングを可能にし、クリーニングパラメーターを最適化し、所望の清浄度を確実に達成するための貴重なフィードバックを提供する。



Figure 3: KUKA IIWA system integrated onto a Superdroid HD2 with a fiber-coupled Raman system.

### Robotic Scan Methodologies (ロボットスキャン手法)

A study on robotic scan methodologies, including raster and Lissajous, was conducted. These methodologies were integrated into a KUKA IIWA LBR 14 using ROS 2 and Moveit 2, enabling the robot to effectively scan surfaces during the cleaning process. The adoption of these methodologies allows for more efficient scanning, ensuring that the entire surface is cleaned while minimizing the time spent on redundant scanning operations. By optimizing the scanning process, the overall cleaning efficiency and effectiveness can be significantly improved.

ラスタやリサーチを含むロボットスキャン手法の研究が行われた。これらの方法論は、ROS 2 と Moveit 2 を使用して KUKA IIWA LBR 14 に統合され、洗浄プロセス中にロボットが効果的に表面をスキャンすることを可能にした。これらの方法論の採用により、より効率的なスキャンが可能になり、冗長なスキャン作業に費やす時間を最小限に抑えながら、表面全体を確実にクリーニングすることができる。スキャンプロセスを最適化することで、全体的な洗浄効率と効果を大幅に改善することができる。

### International Collaboration (国際協力)

In January 2023, the Japanese side of the OptiClean project and ATOX CO., LTD. were visited. Specifically, we went to Professors Suzuki and Miwa's research labs in Tokai, as well as the ATOX facility in Kashiwa, Chiba. A mockup of the Fukushima RPV (Reaction Pressure Vessel) at the ATOX facility was

examined to gather insights for future development. This collaboration has already led to advancements in the project (see below) and will continue to enhance the overall effectiveness of our development.

2023年1月、オプティクリーン・プロジェクトの日本側と（株）アトックスを訪問した。具体的には、東海村にある鈴木特任教授と三輪准教授の研究室と、千葉県柏市にある（株）アトックスの施設を訪問した。（株）アトックスの施設では、福島原発のRPV（反応圧力容器）のモックアップを調査し、今後の開発のための知見を収集した。このコラボレーションはすでにプロジェクトの進展に繋がっており（下記参照）、今後も開発全体の効果を高めていくであろう。

#### Rig Design for KUKA System (KUKA システムのリグ設計)

A rig for mounting the KUKA system is currently being designed, based on observations from the Kashiwa facility (Figure 4). The rig will be suspended from a crane and lowered into the RPV mockup in September. A custom laser cleaning head, along with characterization tools, will be mounted on the KUKA system's toolhead. Pneumatic suction cups will be used to stabilize the rig on the side of the RPV. The design of this rig allows for the OptiClean solution to effectively utilise craning system that are usually found within nuclear sites. The mockup reaction pressure vessel at ATOX will be an excellent demonstrator of this, thus expanding the potential applications of the OptiClean technology.

KUKA システムを搭載するためのリグは、柏の施設での観察に基づいて現在設計中である（図4）。リグはクレーンで吊り下げられ、9月にRPVモックアップに下ろされる予定である。特注のレーザークリーニングヘッドと特性評価ツールがKUKAシステムのツールヘッドに取り付けられる。RPVの側面でリグを安定させるために、空気圧吸引カップが使用される。このリグの設計により、OptiCleanソリューションは、通常原子力施設内で見られるクレーンシステムを効果的に利用することが可能である。（株）アトックスのモックアップ圧力容器は、この優れた実証装置となるため、オプティクリーン技術の最適なデモンストレーションとなることが期待される。

#### Custom Laser Cleaner and Scan Head Development (カスタムレーザークリーナーとスキャンヘッドの開発)

Due to budget constraints, a quotation from IPG Photonics for a laser cleaning and scan head was deemed unfeasible. Instead, a custom laser cleaner and scan head are being developed to meet the project's requirements while remaining within budget. Developing a custom laser cleaner and scan head ensures the technology aligns with the project's specific needs.

予算の制約上、IPG Photonics 社からのレーザークリーニング・スキャンヘッドの見積もりは実現不可能と判断された。その代替案として、カスタムレーザークリーナーとスキャンヘッドを予算内に収めながら、プロジェクトの要求を満たすために開発している。カスタムレーザークリーナーとスキャンヘッドを開発することで、本技術がプロジェクト固有のニーズに合致すると期待される。

#### Collaboration with Imperial College London (インペリアル・カレッジ・ロンドンとの共同研究)

The OptiClean team is currently collaborating with Yannis Hardalupas and colleagues from Imperial College London to design a custom particulate uptake experiment. This experiment will use acoustic levitation to trap mist droplets while monitoring them with Raman spectroscopy in the HELPA system. The goal is to clean CeO<sub>2</sub> from a surface and monitor the particulate uptake on a single mist droplet in real-time. This unique approach will provide detailed insights into the interaction between the mist droplets and the contaminants, helping to optimize the cleaning process and improve the overall performance of the OptiClean system.

OptiClean チームは現在、インペリアル・カレッジ・ロンドンの Yannis Hardalupas 氏らと共同で、カスタム微粒子取り込み実験を設計している。この実験では、音響浮遊を利用してミスト液滴を捕捉する一方、HELPA システムでラマン分光法を用いてミスト液滴をモニターしい

る。本実験の目標は、表面から  $\text{CeO}_2$  を洗浄し、1つのミスト液滴の微粒子取り込みをリアルタイムでモニターすることである。このユニークなアプローチにより、ミスト液滴と汚染物質との相互作用に関する詳細な洞察が得られ、洗浄プロセスの最適化と OptiClean システムの全体的な性能向上への貢献が期待される。

#### Conclusion (結論)

The OptiClean Project has made significant progress between April 2022 and March 2023. Key developments include the mist generation and capture systems, expansion of LIBS capability, robotic integration, and international collaboration. Further work is ongoing to design a custom laser cleaner and scan head, as well as a rig for mounting the KUKA system. Collaboration with Imperial College London aims to develop a custom particulate uptake experiment to monitor cleaning efficacy in real-time. These advancements and collaborations position the project to achieve its goals of developing next-generation laser cleaning technologies with integrated real-time efficacy monitoring.

OptiClean プロジェクトは、2022年4月から2023年3月にかけて大きな進展を遂げた。具体的には、ミスト発生と捕捉システム、LIBS能力の拡大、ロボット統合、国際協力などである。さらに、カスタムレーザークリーナーとスキャンヘッド、KUKAシステム搭載用リグの設計が進行中である。インペリアル・カレッジ・ロンドンとの共同研究は、洗浄効果をリアルタイムでモニターするカスタム微粒子取り込み実験の開発を目指している。これらの進歩や共同研究は、統合されたリアルタイムの有効性モニタリングによる次世代レーザークリーニング技術の開発というプロジェクトの目標達成に向けたものである。



Figure 4: Schematic of the proposed mounting rig for the KUKA system, (excluding stabilization using pneumatic suction cups).

#### Acknowledgements

I would like to express my gratitude to my colleagues at the School of Physics, University of Bristol, for their continuous support and collaboration in the OptiClean Project. Special thanks to the Japanese side of the OptiClean project and ATOX CO., LTD. for sharing their invaluable insights and facilities during my visit in January 2023. I am also grateful for the ongoing collaboration with Yannis Hardalupas and his team at Imperial College London in developing the custom particulate uptake experiment.

### 3.4 研究推進

令和4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 を定期的開催した。

#### ●Japan-UK Joint Meeting #1

【期間】2022年5月13日(金)

【場所】Teams

【出席者】

- University of Bristol : Tom Scott, David Magson-Smith, Jon Day
- Imperial College : Yannis Hardalupas
- 東京大学 : 三輪 修一郎、鈴木 俊一、Marco Pellegrini, Avadhesh Sharma
- JAEA : 小菅 淳
- (株) アトックス : 田沢 周作

#### ●Japan-UK Joint Meeting #2

【期間】2022年7月8日(金)

【場所】Teams

【出席者】

- University of Bristol : Tom Scott, David Magson-Smith
- Imperial College : Yannis Hardalupas
- 東京大学 : Avadhesh Sharma
- (株) アトックス : 田沢 周作

#### ●Japan-UK Joint Meeting #3

【期間】2022年10月28日(金)

【場所】Teams

【出席者】

- University of Bristol : Tom Scott, David Magson-Smith, Jon Day
- Imperial College : Yannis Hardalupas
- 東京大学 : 三輪 修一郎、Avadhesh Sharma
- (株) アトックス : 田沢 周作

●Japan-UK Joint Meeting #4

【期間】 2023 年 2 月 17 日（金）

【場所】 Teams

【出席者】

- University of Bristol : Tom Scott, David Magson-Smith, Jon Day
- Imperial College : Yannis Hardalupas
- 東京大学 : 三輪 修一郎、Avadhesh Sharma
- (株) アトックス : 田沢 周作

#### 4. 結言

令和4年度には、異なるレーザー出力と、テスト表面により生成されるエアロゾル粒子挙動について実験、解析の観点から検証を行った。実験においては様々な試験サンプルを準備し、異なるレーザー出力による照射実験ならびにエアロゾル発生挙動の検証を実施した。レーザー出力の増加に伴い、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(東大)とデータ評価(JAEA)を実施し、以下の成果を得た。

- ・UTARTS 施設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。それらがエアロゾル評価装置と連動できるように、レーザーパラメータを調整した。
- ・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試験を行った。
- ・UTARTS 装置内に非放射性セシウムが浸透したコンクリート製サンプルを設置し、レーザー除染を行い、スプレー効果を確認した。
- ・試験結果を基に既存の CFD モデルを改良し、モデルの信頼性を検証した。

以上の結果から、JAEA との連携によりデータ評価を行った。本研究結果から、レーザー除染法により発生するエアロゾル濃度は、スプレー噴射によって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)と寸法(粒子径)に加え、生成されたエアロゾル粒子の質量は解析を行う上での初期条件として重要なパラメータとなる。最終年度である令和5年度においては、照射表面の詳細観察とエアロゾル粒子の組成解析を実施する予定である。

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5年度の計画に反映させた。

参考文献

- [1] A. B. Lopez, E. Assunção, L. Quintino, J. Blackburn, and A. Khan, High-Power Fiber Laser Cutting Parameter Optimization for Nuclear Decommissioning, *Nucl. Eng. Technol.*, 49(4), pp.865-872, 2017.
- [2] K. Tamura and S. Toyama, Laser Cutting Performances for Thick Steel Specimens Studied by Molten Metal Removal Conditions, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 54(9), pp. 1011-1017, 2017.
- [3] H. A. El-Hofy, *Fundamentals of Machining Processes; Conventional and Nonconventional Processes*, Second Edition., CRC Press, 2013.
- [4] K. Ardon-Dryer, Y.-W. Huang, and D. J. Cziczo, Laboratory Studies of Collection Efficiency of Sub-micrometer Aerosol Particles by Cloud Droplets on a Single-Droplet Basis, *Atmos. Chem. Phys.*, Vol.15, no.16, pp.9159-9171, 2015.
- [5] C. Journeau, J. Moneris, B. Tormos, L. Brissonneau, E. Excoffier, V. Testud, C. Chagnot, and D. Roulet, Fabricating Fukushima Daiichi In-Vessel and Ex-Vessel Fuel Debris Simulants for the Development and Qualification of Laser Cutting Technique, *Proc. ERMSAR, Eur. Rev. Mtg Sev. Accident Res.*, Warsowie, Poland, 2017.
- [6] S.M. Greenfield, Rain Scavenging of Radioactive Particulate Matter from the Atmosphere, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 14(2), pp.115-125, 1957.
- [7] H. Liang, Development of an Effective Spray System for Aerosol Dispersion Control during the Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Ph.D. thesis, The University of Tokyo, Japan, 2020.
- [8] J.R. Farr and M.H. Jawad, *Guidebook for the design of ASME section VIII pressure vessels*, ASME Press, 2001.
- [9] A.R. Glover, S.M. Skippon, and R.D. Boyle, Interferometric laser imaging for droplet sizing: a method for droplet-size measurement in sparse spray systems, *Applied Optics*, 34(36), pp.8409-8421, 1995.
- [10] T. Kawaguchi, T. Kobayashi, and M. Maeda, Measurement of spray flow by an improved interferometric laser imaging droplet sizing (ILIDS) system, In 10th International Symposium on Applications of laser techniques, pp.209-220, 2002.
- [11] T. Kawaguchi, Y. Akasaka, and M. Maeda, Size measurements of droplets and bubbles by advanced interferometric laser imaging technique, *Measurement Science and Technology*, 13(3), pp.308-316, 2002.
- [12] P. Lemaitre, E. Porcheron, A. Nuboer, and G. Gréhan, Interferometric Laser Imaging development for Droplets Sizing (ILIDS) in hostile environment, ICLASS, Kyoto, Japan. Aug, 2006.
- [13] A. Quérel, P. Lemaitre, M. Brunel, E. Porcheron, and G. Gréhan, Real-time global interferometric laser imaging for the droplet sizing (ILIDS) algorithm for airborne research, *Measurement Science and Technology*, 21(1), 015306, 9p., 2010.
- [14] H. Shen, S. Coëtmelec, G. Gréhan, and M. Brunel, Interferometric laser imaging for droplet sizing revisited: elaboration of transfer matrix models for the description of complete systems, *Applied Optics*, 51(22), pp.5357-5368, 2012.
- [15] M. Brunel and H. Shen, Design of ILIDS configurations for droplet characterization. *Particuology*, 11(2), pp.148-157, 2013.

- [16] 東京電力ホールディングス, “フランジタンク解体におけるダスト飛散抑制対策の選択肢追加 (新技術の開発に伴う工法の追加),” 2019. [Online].  
<https://warp.ndl.go.jp/collections/content/info:ndljp/pid/12477497/www.da.nra.go.jp/file/NR000124144/000275335.pdf> [accessed Mar. 2023].
- [17] 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, 2C09, 2019.

This is a blank page.



