



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5年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—

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

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

福島廃炉安全工学研究所 廃炉環境国際共同研究センター
東京大学

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

September 2025

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

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

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

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

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

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

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

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

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

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5年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—

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

東京大学

(2025年3月17日受理)

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

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

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

本研究は、令和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3年度から令和5年度分の研究成果について取りまとめたものである。

本研究では、英国研究者との協力の下、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を共同で調査する。

日本側は、レーザー切断及び除染用途での放射線リスクを低減するため、ウォーターミストとウォータースプレーの利用に基づく放射性分散制御方法を開発する。英国側から提供されたエアロゾル粒子のデータに基づき、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向上させるため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(東京大学エアロゾル除去試験施設)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等を検証する。また、CFD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エアロゾル測定を実施する。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。最終年度においては、実スケールでの作業及び除染効果を検証するため、モックアップ試験を実施し、本研究により構築した除染システムを評価検証する。

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)

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

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

The University of Tokyo

(Received March 17, 2025)

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

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

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

Among the adopted proposals in FY2021, this report summarizes the research results of the “Research on radioactive aerosol control and decontamination at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station decommissioning” conducted from FY2021 to FY2023.

The present study aims to develop a safe laser decontamination system that integrates advanced particle detection and characterization systems with aerosol dispersion control, in collaboration with UK researchers. For aerosol dispersion control, new containment methods ranging from simple mechanical containment hoods to optical laser shields are jointly investigated.

The Japanese team will develop a radioactive dispersion control method based on the use of water mist and water spray to reduce radiation risks during laser cutting and decontamination applications. Based on data on aerosol particles provided by the UK team, the potential to enhance aerosol scrubbing efficiency will be explored. Additionally, the effect of charge enhancement will be evaluated.

The UK team will develop laser-based aerosol containment methods and conducting experiments to improve the condensation of aerosol particles and mist in spray scrubbing. The development of aerosol removal technologies and strategies will be carried out through comprehensive experimental and computational studies. Experiments will be conducted at UTARTS facility to verify simultaneous operations such as laser decontamination, cutting, and spray operations. Aerosol measurements will also be performed to obtain high spatial resolution data that can better validate CFD models.

In the final year, mock-up tests will be conducted to verify the system's operation and decontamination performance at full scale, evaluating the decontamination system developed through this research.

Keywords: Decommissioning, Aerosol, Laser Cleaning, Multiphase Flow, CFD, Droplet,
Radioactive Materials, Scrubbing

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
7. 令和 5 年度 採択課題	14
付録 成果報告書	17

Contents

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

This is a blank page.

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要

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

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

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

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

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

2. 平成 30 年度 採択課題

平成 30 年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

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

平成 30 年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

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

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

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

課題解決型廃炉研究プログラム

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

3. 令和元年度 採択課題

令和元年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

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

課題解決型廃炉研究プログラム 4 課題

国際協力型廃炉研究プログラム 4 課題（日英 2 課題、日露 2 課題）

研究人材育成型廃炉研究プログラム 4 課題

令和元年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
ウラニル錯体化学に基づくテーラーメイド型新規海水ウラン吸着材開発	鷹尾 康一朗	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DESTAL燃料デブリ深さ方向の性状同定	山路 哲史	早稲田大学
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃棄物のフッ化技術を用いた分別方法の研究開発	渡邊 大輔	日立GE ニュークリア・ エナジー
アパタイトセラミックスによる ALPS 沈殿系廃棄物の安定固化技術の開発	竹下 健二 (～R3. 6. 30) 塚原 剛彦 (R3. 7. 1～)	東京工業大学
拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームによる圧力容器内燃料デブリ調査への挑戦	高橋 秀治	東京工業大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

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

研究人材育成型廃炉研究プログラム

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

4. 令和2年度 採択課題

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

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

課題数：10 課題

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

令和2年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリにおける特性の経年変化と環境劣化割れの調査	楊 会龍 (~R4.7.31) 村上 健太 (R4.8.1~)	東京大学
健全性崩壊をもたらす微生物による視認不可腐食の分子生物・電気化学的診断及び抑制技術の開発	岡本 章玄	物質・材料 研究機構

課題解決型廃炉研究プログラム

【一般研究】

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

5. 令和3年度 採択課題

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

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

課題数：12 課題

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

令和3年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

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

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

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

6. 令和4年度 採択課題

令和4年度は、2つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和4年3月1日～令和4年5月6日（課題解決型）

令和4年4月7日～令和4年6月16日（国際協力型 日英共同研究）

課題数：8 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 6 課題

国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）

令和4年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

7. 令和5年度 採択課題

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

公募期間：令和5年3月1日～令和5年4月14日（課題解決型）

令和5年4月12日～令和5年6月15日（国際協力型 日英共同研究）

課題数：9 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 7 課題

国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）

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

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

令和5年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

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

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

本報告書は、以下の課題の令和 3 年度から令和 5 年度分の研究成果について取りまとめたものである。

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 5 年度

日本原子力研究開発機構

英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

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 R05I050)

成果報告書

令和 6 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3年度～令和5年度の研究成果を取りまとめたものです。

目次

概略	vii
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	2-1
2.1 全体計画	2-1
2.2 研究項目の計画（日本側）	2-2
2.3 研究項目の計画（英国側）	2-3
2.4 実施体制	2-4
3. 実施内容及び成果	3-1
3.1 レーザー加工による微粒子飛散評価	3-1
3.1.1 微粒子飛散実験及び解析評価【令和3年度～令和5年度】	3-1
3.1.2 データ評価（連携先：原子力機構）【令和3年度～令和5年度】	3-25
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）	3-28
3.2.1 データ評価【令和3年度～令和5年度】	3-28
3.2.2 モックアップ試験【令和4年度～令和5年度】	3-29
3.3 英国側研究成果概要	3-35
3.4 研究推進	3-37
4. 結言	4-1

執筆者リスト

研究代表者

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

再委託先

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

表一覽

Table 3-1	Parameters of laser cleaning experiments in acrylic test section.....	3-4
Table 3-2	Experimental parameters	3-12
Table 3-3	Conditions of simulation cases for optimization of spray system.....	3-20

図一覧

Fig. 2-1	実施計画	2-1
Fig. 2-2	英国側実施計画	2-1
Fig. 2-3	実施体制図	2-4
Fig. 3-1	Illustration of the aerosol collection mechanisms by a falling spray droplet	3-1
Fig. 3-2	Agglomeration method for aerosol particles using water mist.....	3-2
Fig. 3-3	Schematic of the laser cleaning on the acrylic test section.....	3-3
Fig. 3-4	Various laser-irradiated test specimens	3-4
Fig. 3-5	Stainless-steel (SS304) surface after laser irradiation of 10 s for laser powers	3-5
Fig. 3-6	Line profiles of the stainless-steel (SS304) surface after 10 s of laser irradiation for laser powers	3-6
Fig. 3-7	Stainless-steel (SS304) surface irradiation area after laser irradiation of 10s for laser powers	3-6
Fig. 3-8	Stainless-steel (SS304) surface after laser irradiation of 30s for laser powers	3-7
Fig. 3-9	Line profiles of the stainless-steel (SS304) surface after 30 s of laser irradiation for laser powers	3-7
Fig. 3-10	Stainless-steel (SS304) surface irradiation area after laser irradiation of 30 s for laser powers	3-8
Fig. 3-11	Carbon-steel (SS400) surface after laser irradiation of 10 s for laser powers	3-8
Fig. 3-12	Line profiles of the carbon-steel (SS400) surface after 10 s of laser irradiation for laser powers	3-9
Fig. 3-13	Carbon-steel (SS400) surface irradiation area after laser irradiation of 10 s for Laser powers	3-9
Fig. 3-14	Comparison of the volume of the material (excluding the material accumulated) removed due to laser irradiation	3-10
Fig. 3-15	Comparison of the irradiation area after the laser irradiation.....	3-10
Fig. 3-16	UTARTS facility with charging system	3-11
Fig. 3-17	Designs of single-electrode configurations	3-12
Fig. 3-18	Effects of charging configuration in charging spray	3-13
Fig. 3-19	Effects of electrode configuration in charging spray	3-14
Fig. 3-20	Schematic of the laser cleaning and aerosol scavenging on UTARTS facility	3-15
Fig. 3-21	Temporal aerosol concentration during and after the laser irradiation .	3-15
Fig. 3-22	Effect of laser power on mean aerosol concentration for concrete....	3-16
Fig. 3-23	Effect of surface coating on mean aerosol concentration for concrete.	3-16
Fig. 3-24	Illustration of Euler-Lagrange simulation approach for aerosol spray scavenging adopted in this study	3-17

Fig. 3-25	Effect of spray nozzle	3-18
Fig. 3-26	Comparison of experimental and simulation results of total aerosol removal rate	3-20
Fig. 3-27	Droplet and gas characteristics for the sprays from the virtual Nozzle 4A	3-22
Fig. 3-28	Droplet and gas characteristics for the sprays from the virtual Nozzle 4B	3-23
Fig. 3-29	Effect of flow rate on simulated aerosol removal rates	3-24
Fig. 3-30	Aerosol concentration after laser cleaning of carbon-steel (SS400) surface	3-26
Fig. 3-31	Aerosol concentration after 40 s laser cleaning of stainless-steel (SS400) surface	3-27
Fig. 3-32	Aerosol concentration after 40 s laser cleaning at 1.5 kW laser power	3-28
Fig. 3-33	モックアップ試験装置の概要	3-30
Fig. 3-34	モックアップ試験工程	3-31
Fig. 3-35	CeO ₂ 塗装サンプルへのレーザー照射結果	3-33

略語一覧

原子力機構	: Japan Atomic Energy Agency (国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)
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
東大	: 国立大学法人東京大学
アトックス	: 株式会社アトックス
UTARTS	: Aerosol Removal Tests using Water Spray in the University of Tokyo (東大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、数値流体力学（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（以下、「ミスト」と呼ぶ。）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、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へとつなげることを目的としている。

前年度までの成果報告書：

- ・令和3年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業（委託研究）
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
JAEA-Review 2022-061, DOI :10.11484/jaea-review-2022-061
- ・令和4年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業（委託研究）
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
JAEA-Review 2024-031, DOI :10.11484/jaea-review-2024-031

以下に、令和5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」と略す。））
 - ・ 東大エアロゾル除去試験施設（UTARTS）において加工用レーザーのパラメータを制御し、エアロゾル生成への影響を評価した。
 - ・ 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。
 - ・ 令和4年度の試験結果に基づき、放射線誘発表面電荷に改良を加えたスプレーを使用して試験を行った。
 - ・ 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、「原子力機構」と略す。））
 - ・ 原子力機構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うとともに、実機適用に関する助言を行った。

(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、「アトックス」と略す。））

- ① データ評価
 - ・ モックアップ試験により得られた成果について、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最終評価を行い、改善点を提言した。
- ② モックアップ試験
 - ・ モックアップ試験に向けた具体的な課題、問題点を摘出し、試験計画を準備した。
 - ・ 日本側で開発したエアロゾル分散制御システムと英国チームで開発した装置を用いたモックアップ試験を行った。

(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合せや会議等を開催する。また、パートナーの英国側と適宜打合せを実施した。

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

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、原子炉格納容器（以下、「PCV」と略す。）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。ほとんど全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過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。

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

実施計画を Fig. 2-1 及び英国側の実実施計画を Fig. 2-2 に示す。

項目	年度					
	令和3年度		令和4年度		令和5年度	
(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(東大)	試験準備	試験・解析準備	レーザー加工時の微粒子飛散試験	レーザー加工時の微粒子飛散試験		
②データ評価(原子力機構)		試験結果評価	試験結果評価	試験結果評価		
(2) データ評価及びモックアップ試験 (アトックス)						
①データ評価		試験結果評価	試験結果評価	試験結果評価		
②モックアップ試験			モックアップ試験計画準備	モックアップ試験		
(3) 研究推進 (東大)		英国との打合せ 技術評価委員会の開催	英国との打合せ 技術評価委員会の開催	英国との打合せ 技術評価委員会の開催		
		△ まとめ・評価	△ まとめ・評価	△ まとめ・評価	△ まとめ・評価	△ まとめ・評価

Fig. 2-1 実施計画

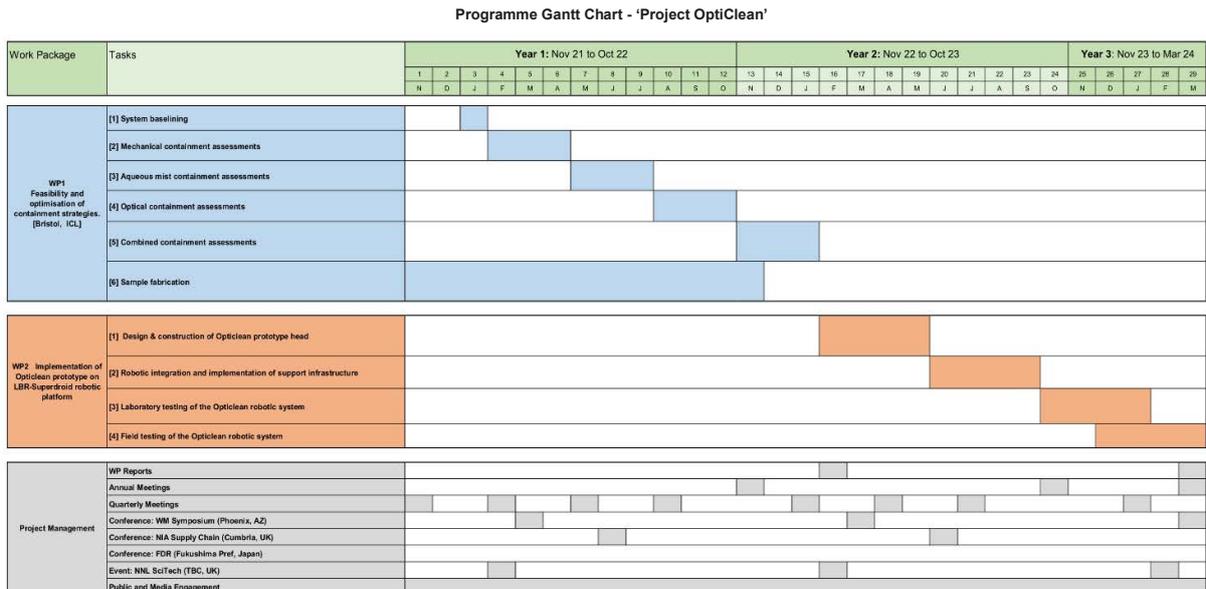


Fig. 2-2 英国側実施計画

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- 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う。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する。
- 2- 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う。
- 3- 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する。
- 4- 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する。
- 5- 原子力機構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う。

(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）

[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、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（連携先：原子力機構）

[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、原子力機構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。重元素レーザークリーニング微粒子分析 (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 Fig. 2-3 に示す。

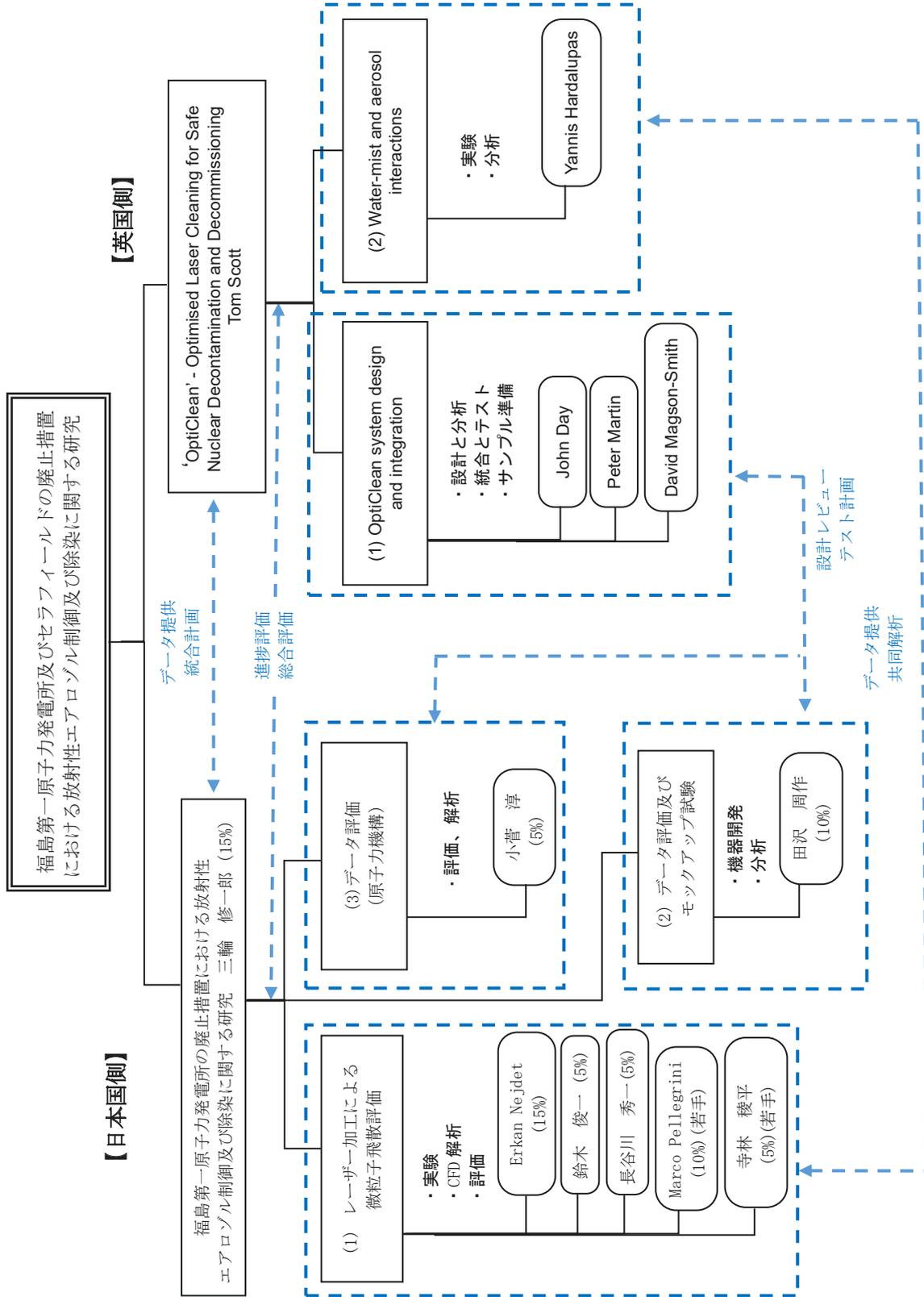


Fig. 2-3 実施体制図

3. 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

3.1.1 微粒子飛散実験及び解析評価【令和3年度～令和5年度】

シビアアクシデント時に PCV 内で発生する放射性エアロゾル粒子を除去する際、スプレーを用いた手法はエアロゾルの存在を確実に減少させ、崩壊熱による燃料デブリの冷却をも促進し、廃炉作業に適用可能な手法の一つである。Fig. 3-1 に示すように、液滴とエアロゾルの相互作用として、ブラウン拡散、インターセプション、慣性インパクション等の機械的プロセスに加え、拡散泳動や熱泳動等の泳動現象や静電相互作用等、様々なメカニズムが挙げられる。

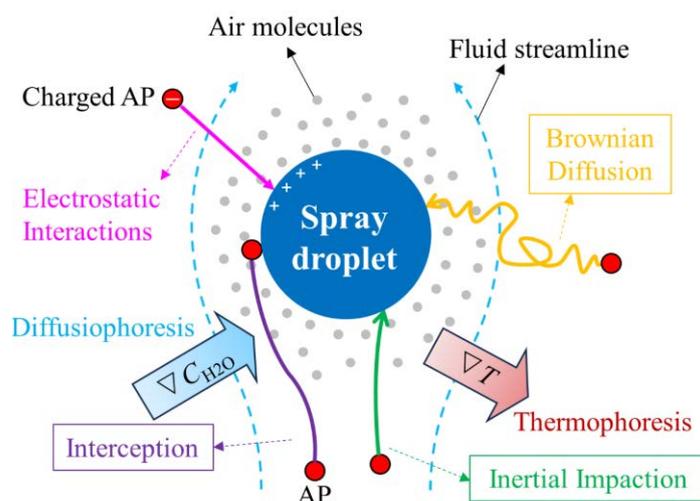


Fig. 3-1 Illustration of the aerosol collection mechanisms by a falling spray droplet

1F 廃止措置時に生成され则认为される 0.1~1 μm 範囲のグリーンフィールドギャップとされる粒子群は捕集効率が低いことが知られており、液滴による除去が困難であることが指摘されている。このため、スプレーを用いたエアロゾル補足を 1F 廃止措置に応用する際、出される核分裂生成物の低減や汚染水の発生を最小限に抑えることを考慮した上で、グリーンフィールドギャップ範囲のエアロゾル粒子の捕捉効率を高めることが重要と考えられる。エアロゾルの捕集効果を高める方法として、Fig. 3-2 に示したエアロゾルとミストの凝集により「エアロゾル集合体」を生成し、グリーンフィールドギャップの粒子をエアロゾル「クラスター」に変換させる手法を採用することとした。具体的には、エアロゾル粒子を凝集させるためにミストを施設内に噴射した後に、水スプレーを用いた実験を行い、エアロゾル除去の効果についての検証を行う実験手順である。

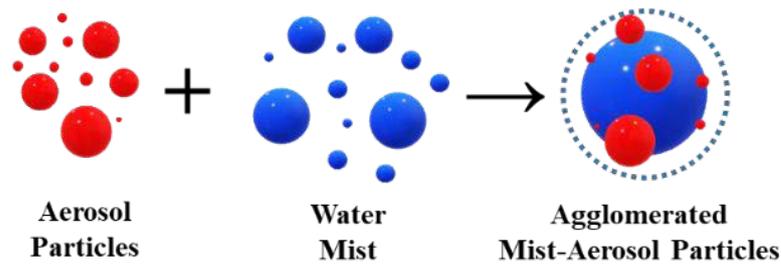


Fig.3-2 Agglomeration method for aerosol particles using water mist

以上の研究背景を踏まえ、令和3年度～令和5年度までの成果概要を以下に記す。

【令和4年度までの概要】

令和3年度には、レーザーを用いたエアロゾル捕集実験を行うための実験装置、UTARTSを東大に設置した。スプレー噴射システムは、水槽、水ポンプ、フルコンスプレーノズル、流量計、圧力計で構成し、異なる液滴系の生成が可能なノズルを複数備えた。

加工用のレーザー光源として、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(FITEL、FEC1500S)を使用した。以上の構成より、鉄、酸化鉄、 ZrO_2 、 TiO_2 、SiCを含む様々なテストサンプルを準備し、レーザー出力を調整しつつエアロゾル発生実験を実施した。発生したエアロゾルは、サンプリングラインを通して電子式低圧インパクト(Dekati® ELPI®+)デバイスにて粒子径が測定された。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。また、照射出力により、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。

廃炉作業時の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された。

令和4年度は、UTARTS装置に加え、アクリル製試験装置も使用し、レーザー除染時のエアロゾル挙動の目視観測と粒子分布計測を行った。それらがエアロゾル評価装置と連動できるよう、レーザーパラメータの調整を行った。本研究では、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。

実験の結果から、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。

【令和5年度実施内容及び成果】

令和5年度は、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うとともに、加工用レーザーのパラメータを制御することで、エアロゾル生成への影響の評価を行った。Fig.3-3に試験装置の概略図を示す。本試験装置は、エアロゾル拡散挙動を定量化するため、粒子画像流速測定(PIV)とShadowgraphy測定のために用いており、異なる高さのサンプリングラインにおいて、光散乱スペクトロメーターWelas®(機器の詳細については令和4年度報告書を参照されたい)と接続し、微粒子濃度の計測を実施した。

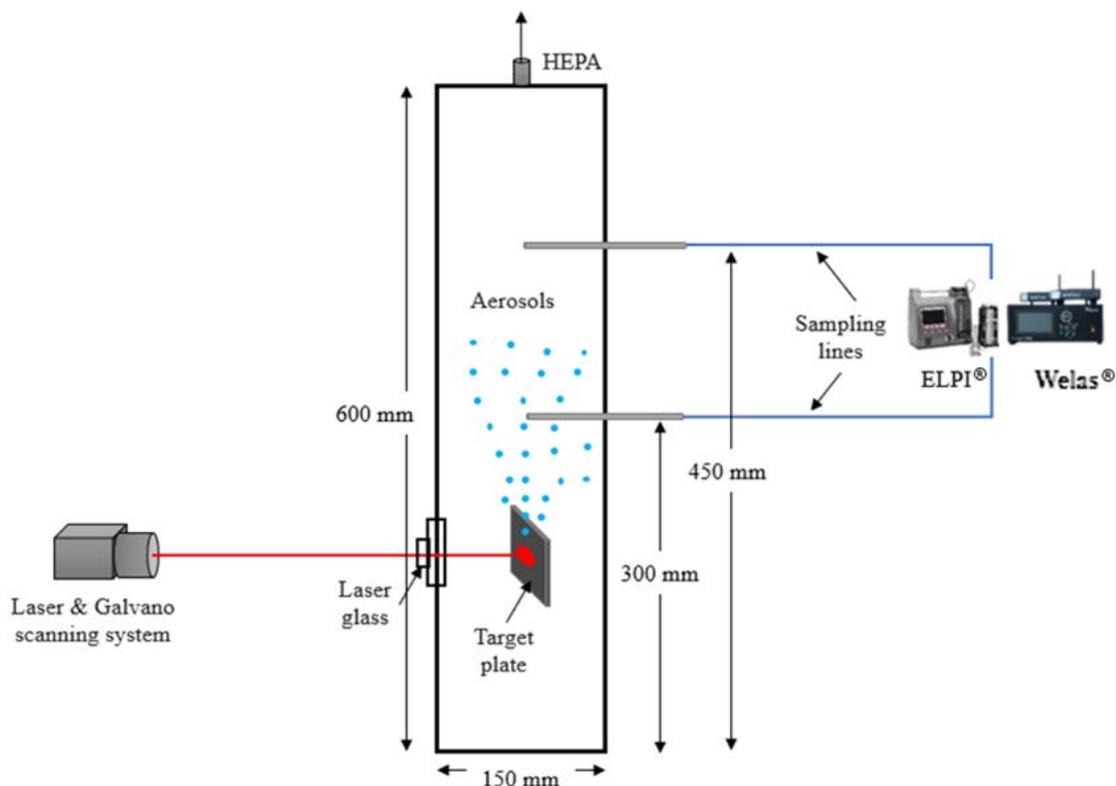


Fig. 3-3 Schematic of the laser cleaning on the acrylic test section

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 (Raycus Fiber Laser Technologies 製、RFL-C1500) を使用した。デジタルコントローラとして最大出力 1.5 kW の NCL-151 (株式会社 NISHIHARA 製) を使用した。また、ガルバノスキャニングシステムをレーザーヘッドに取り付け、試験片表面のクリーニング対象部分のスキャンを実施した。ガルバノスキャニングシステムは、レーザー、ガルバノメーター、集光レンズで構成されており、ターゲット領域を高精度でスキャンすることが可能であることから、レーザー除染、切断、溶接の用途に有用である。ミラーの位置はコントローラによって制御され、コントローラからモーターに信号が送られる。また、レーザーから発生する熱量を最小限に抑えるため、レンズは通常、石英やサファイアなどの高品質な素材で作られている。本実験の場合、ガルバノスキャニングシステムの焦点距離は 900 mm で、有効焦点距離は 998 mm であった。

レーザークリーニング実験に使用されたテスト材料は、様々な炭素鋼、ステンレス鋼、コンクリート表面から構成されており、これらは工業用途で一般的に使用されていることから、令和 4 年度に引き続き、照射対象の材料として選定した。さらに、コーティングされた表面に対するレーザークリーニングの効果を検証するために、 ZrO_2 、 CeO_2 、 CsI によるコーティングを施した (Fig. 3-4)。コーティングされた表面へのレーザー除染実験を実施することで、表面に付着した汚染物質の除去を検討する上でのエアロゾル粒子挙動や粒子分布が明らかになることが期待される。



Fig. 3-4 Various laser-irradiated test specimens

本実験では実験毎にレーザーパラメータを調整し、ガルバノスキャニングシステムを使用して 998 mm の遠距離試験片に集光し、直径 25.4 mm、厚さ 5 mm の AR (反射防止) コート UVFS (Ultra Violet Fused Silica) 広帯域 (1050~1700 nm) 精密ガラス窓を通して試験片への照射を行った。レーザー除染試験の実験条件を Table 3-1 に示す。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、大量のエアロゾル粒子が発生する。この際の粒子濃度は、サンプリングラインを通して Dekati® ELPI®+ と Welas® digital 2000 装置によって測定した。

Table 3-1 Parameters of laser cleaning experiments in acrylic test section

Parameter	Value
Irradiation power	0.6 kW-1.5 kW
Irradiation time	10 s、30 s
Irradiation area	Circle (Φ5 mm) ; Square (10×10 mm ²)
Line distance in each scan	0.5 mm
Impactor type	Sintered
Test specimens	Carbon-steel (SS400) 25×25×5 mm ³ Stainless-steel (SS304) 25×25×5 mm ³

レーザー除染時に表面がどのように除去されるかを理解し、レーザー出力や表面コーティングなどの要因が除去プロセスにどのように影響するかを評価するため、キーエンス 3200 プロフィロメーターを使用し、照射後のサンプル表面の解析を行った。

Fig. 3-5、Fig. 3-8、Fig. 3-11 は、レーザー処理された表面を視覚的に表したもので、500%に拡大表示したものである。また、異なるレーザー出力設定で照射した領域を Fig. 3-7、Fig. 3-10、Fig. 3-13 に示す。これらのテストサンプルの線形分布を Fig. 3-6、Fig. 3-9、Fig. 3-12 の通り作成した。さらに、レーザー出力に伴う除去率ならびに照射面積の変化を Fig. 3-14 及び Fig. 3-15 に示した。これらの結果から、レーザー出力の上昇とともに照射領域が徐々に拡大することが確認されたが、表面から除去された材料の体積量は、0.9 kW から 1.2 kW の出力レベルでは大きな差は見られず、比較的一定であった。しかしながら、この閾値を超えた場合、レーザー出力 1.5 kW の結果に示された通り材料除去量は顕著に増加する傾向が見られた。着目すべき点として、保護層でコーティングされた表面はコーティングを施していない表面と比較し、照射による除去量が少なかったことである。これは、レーザー照射中にコーティングの一部がレーザー熱を吸収し、除去される材料の量が減少したためと考えられる。

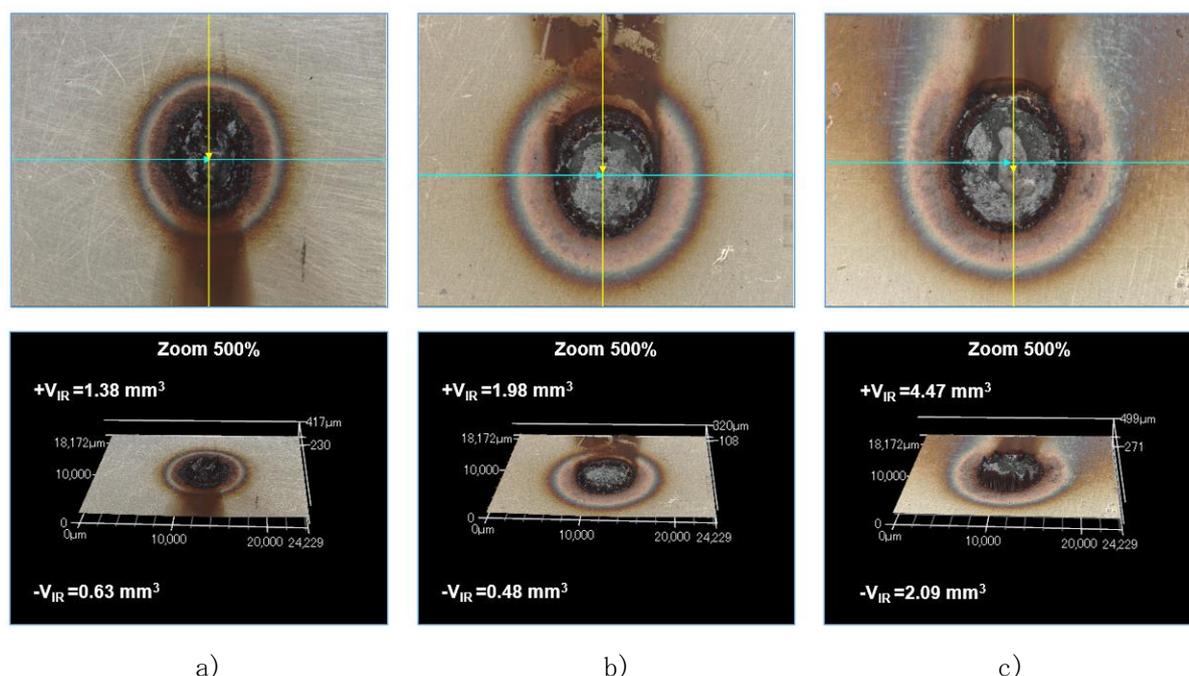


Fig. 3-5 Stainless-steel (SS304) surface after laser irradiation of 10 s for laser powers
 a) Pir= 0.9 kW, b) Pir= 1.2 kW, c) Pir= 1.5 kW

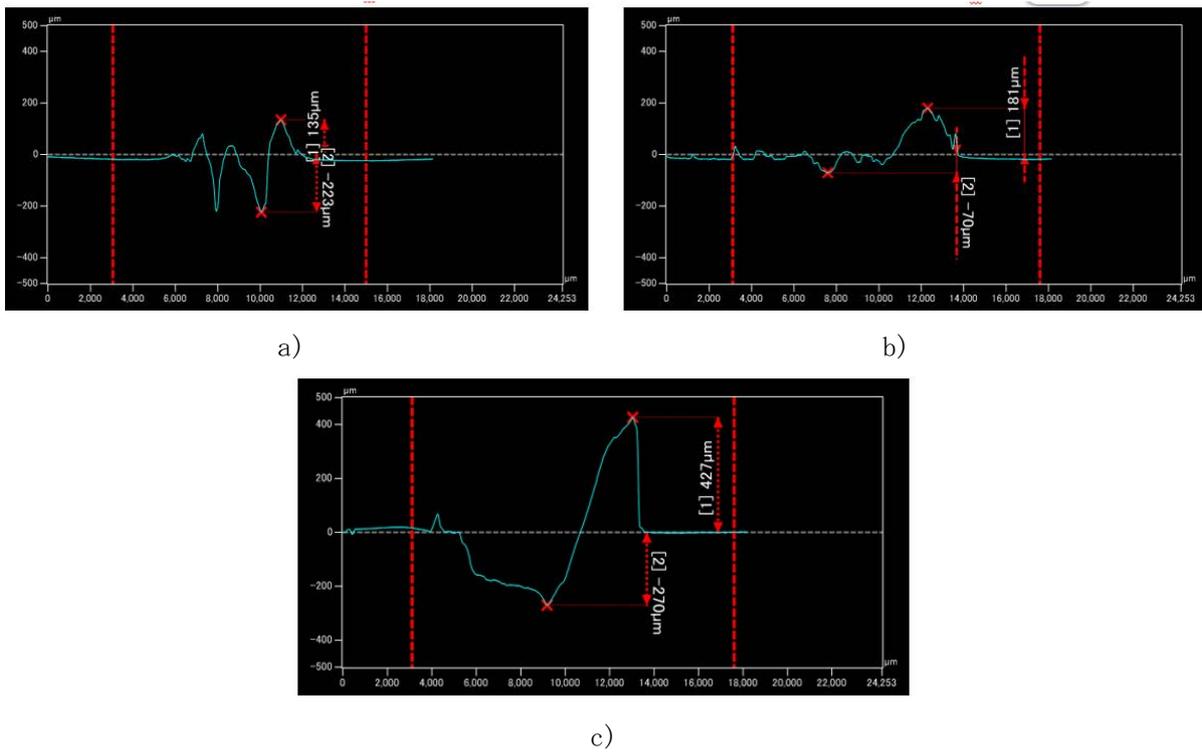


Fig.3-6 Line profiles of the stainless-steel (SS304) surface after 10 s of laser irradiation for laser powers a) $P_{ir}= 0.9$ kW, b) $P_{ir}= 1.2$ kW, c) $P_{ir}= 1.5$ kW

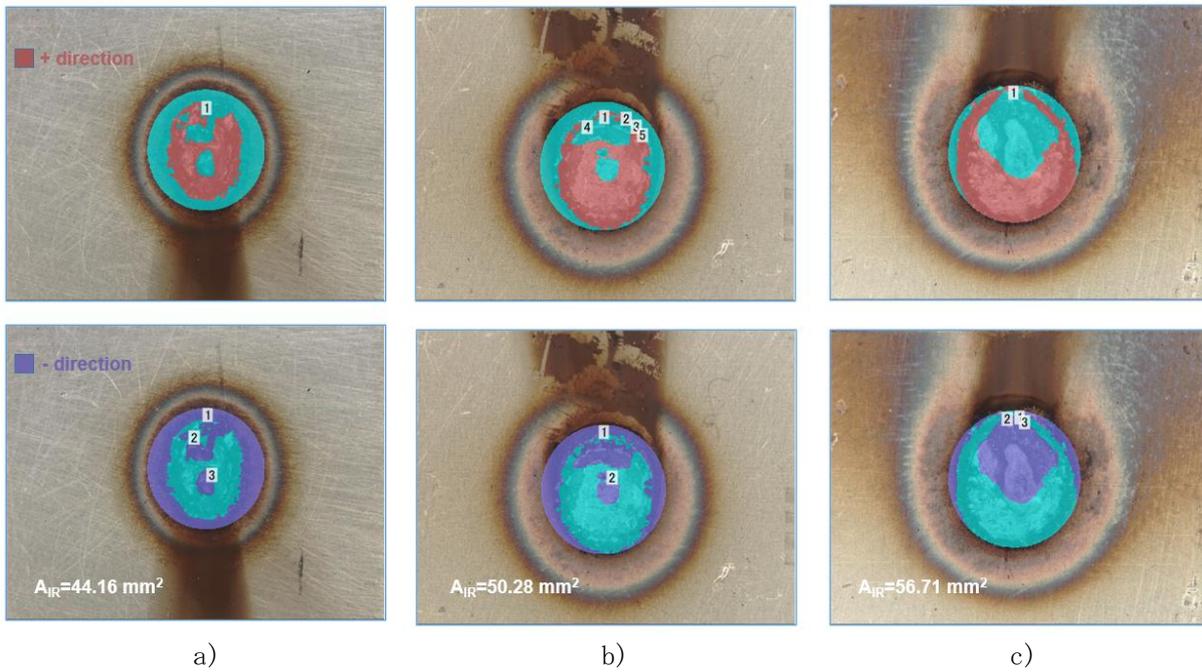


Fig.3-7 Stainless-steel (SS304) surface irradiation area after laser irradiation of 10 s for laser powers a) $P_{ir}= 0.9$ kW, b) $P_{ir}= 1.2$ kW, c) $P_{ir}= 1.5$ kW

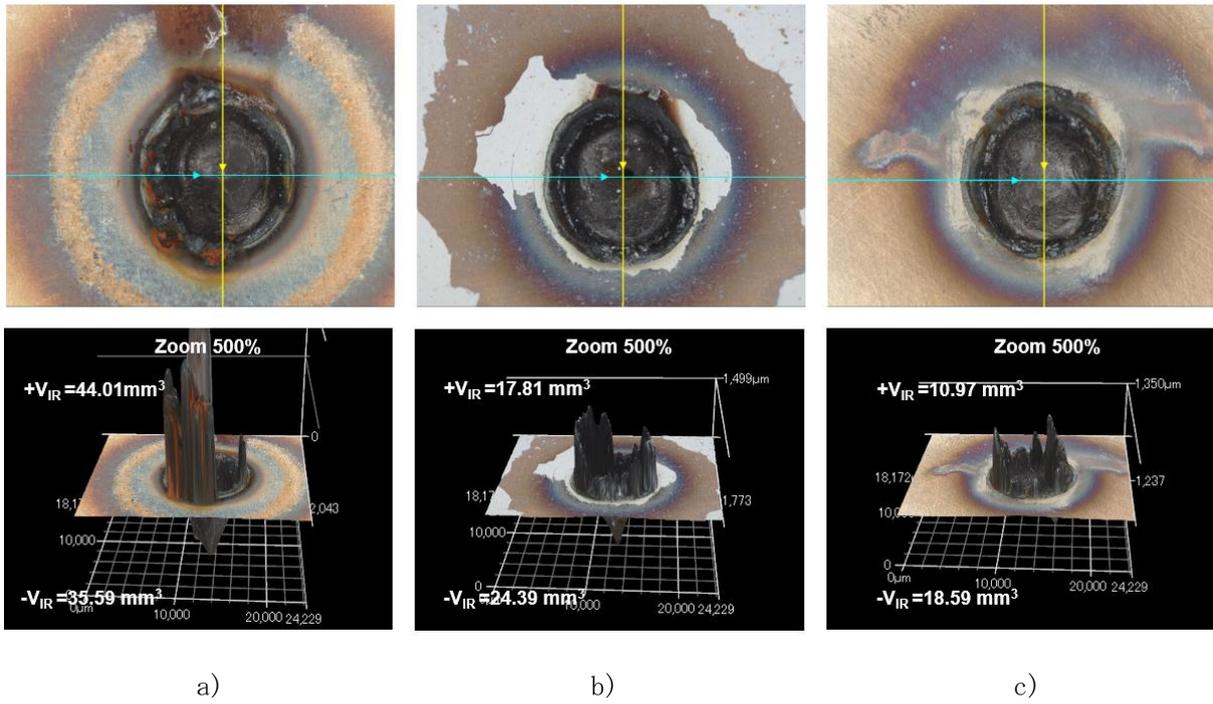


Fig.3-8 Stainless-steel (SS304) surface after laser irradiation of 30 s for laser powers
 a) Pir= 0.9 kW, b) Pir= 1.2 kW, c) Pir= 1.5 kW

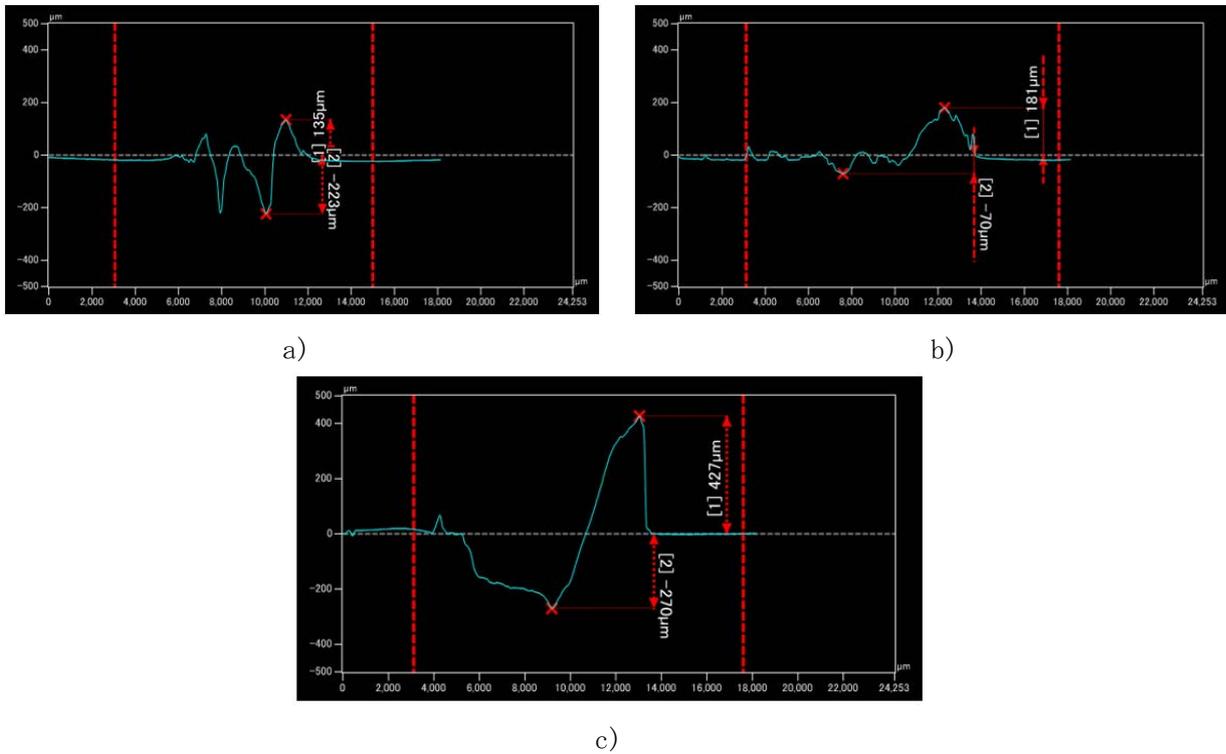


Fig.3-9 Line profiles of the stainless-steel (SS304) surface after 30 s of laser irradiation for laser powers a) Pir= 0.9 kW, b) Pir= 1.2 kW, c) Pir= 1.5 kW

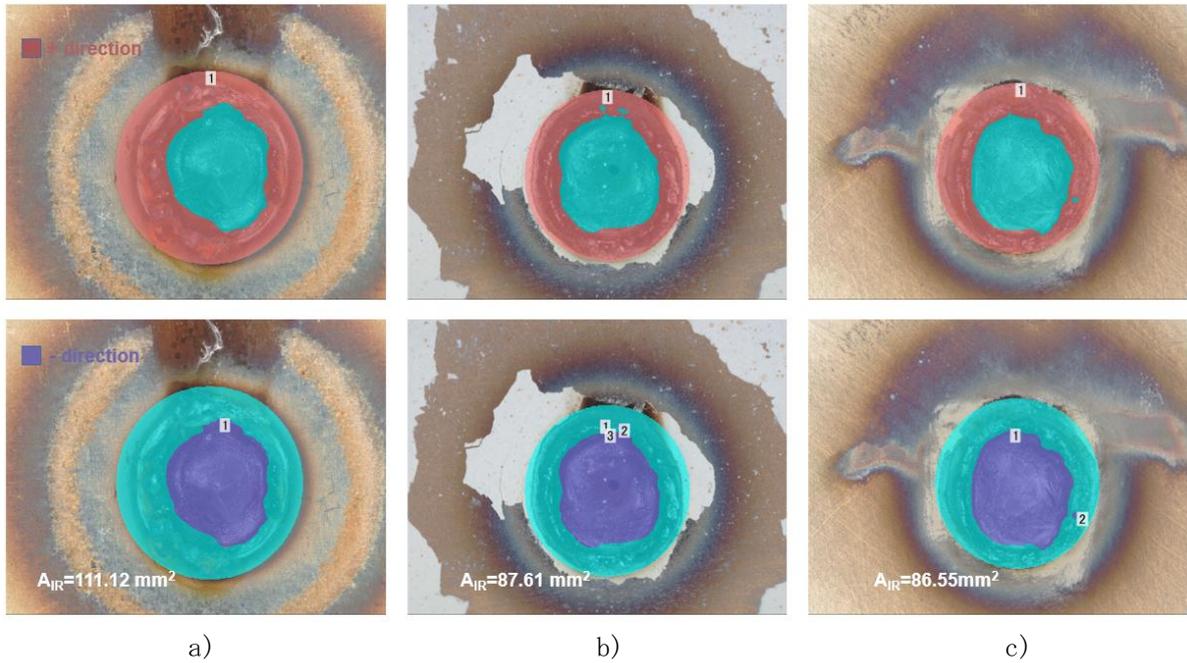


Fig.3-10 Stainless-steel (SS304) surface irradiation area after laser irradiation of 30 s for laser powers a) $P_{ir}= 0.9$ kW, b) $P_{ir}= 1.2$ kW, c) $P_{ir}= 1.5$ kW

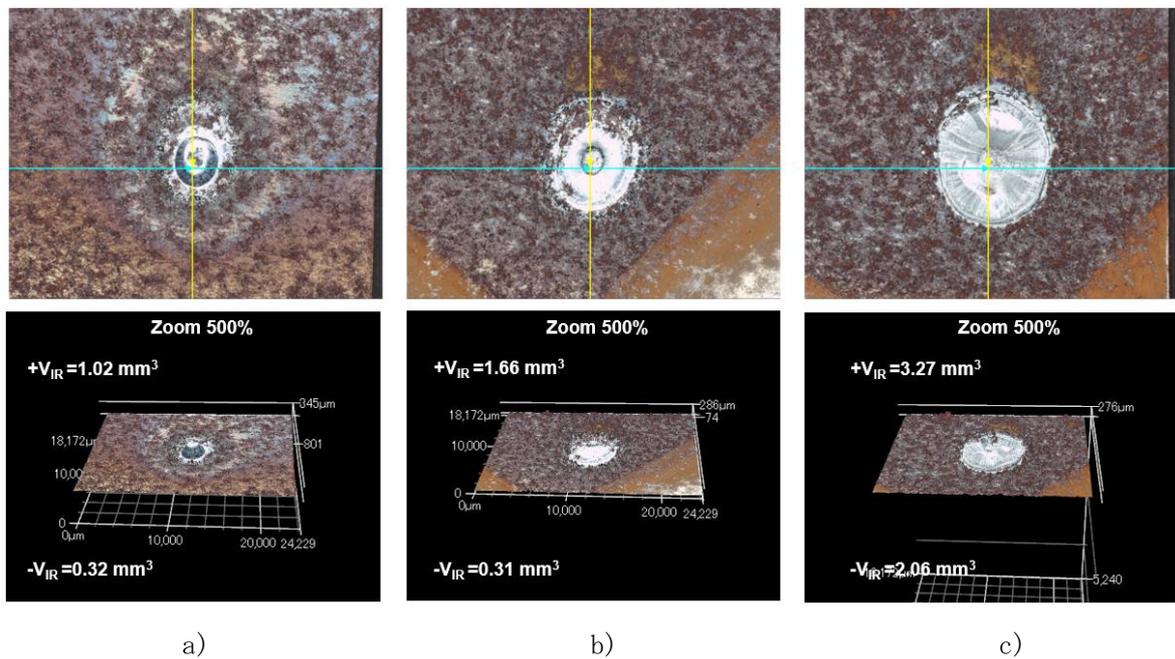


Fig.3-11 Carbon-steel (SS400) surface after laser irradiation of 10 s for laser powers a) $P_{ir}= 0.9$ kW, b) $P_{ir}= 1.2$ kW, c) $P_{ir}= 1.5$ kW

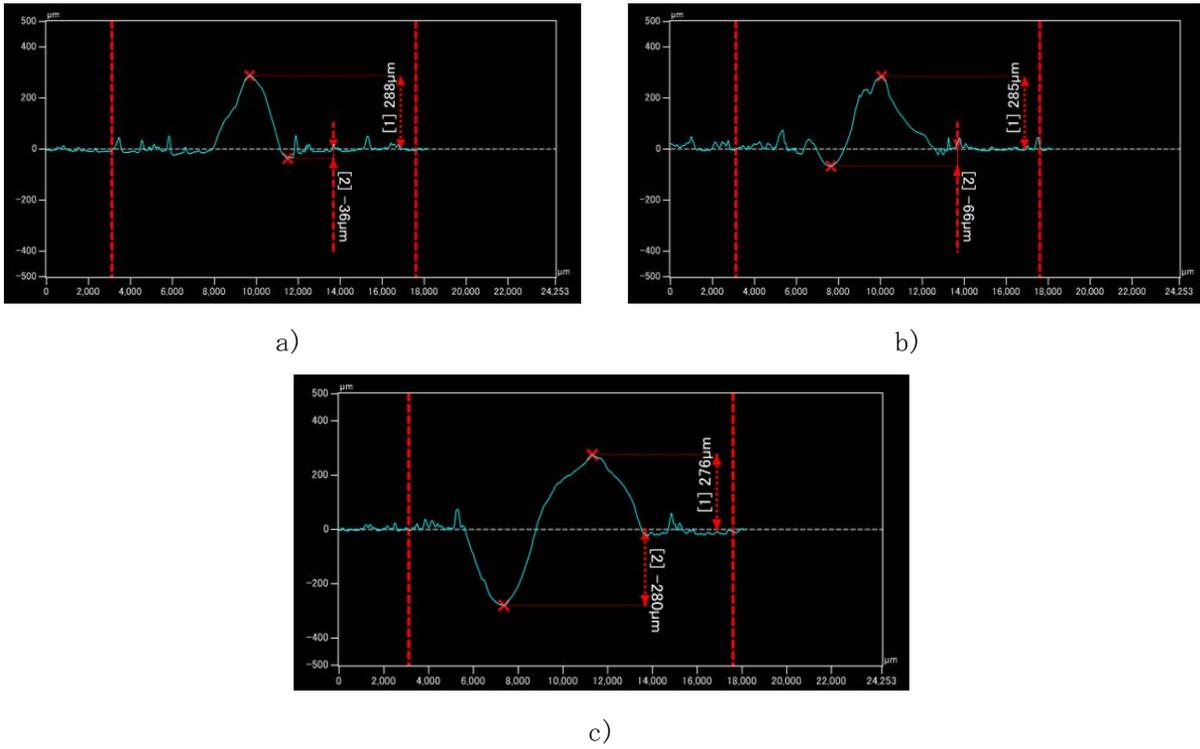


Fig.3-12 Line profiles of the carbon-steel (SS400) surface after 10 s of laser irradiation for laser powers a) $P_{ir}= 0.9$ kW, b) $P_{ir}= 1.2$ kW, c) $P_{ir}= 1.5$ kW

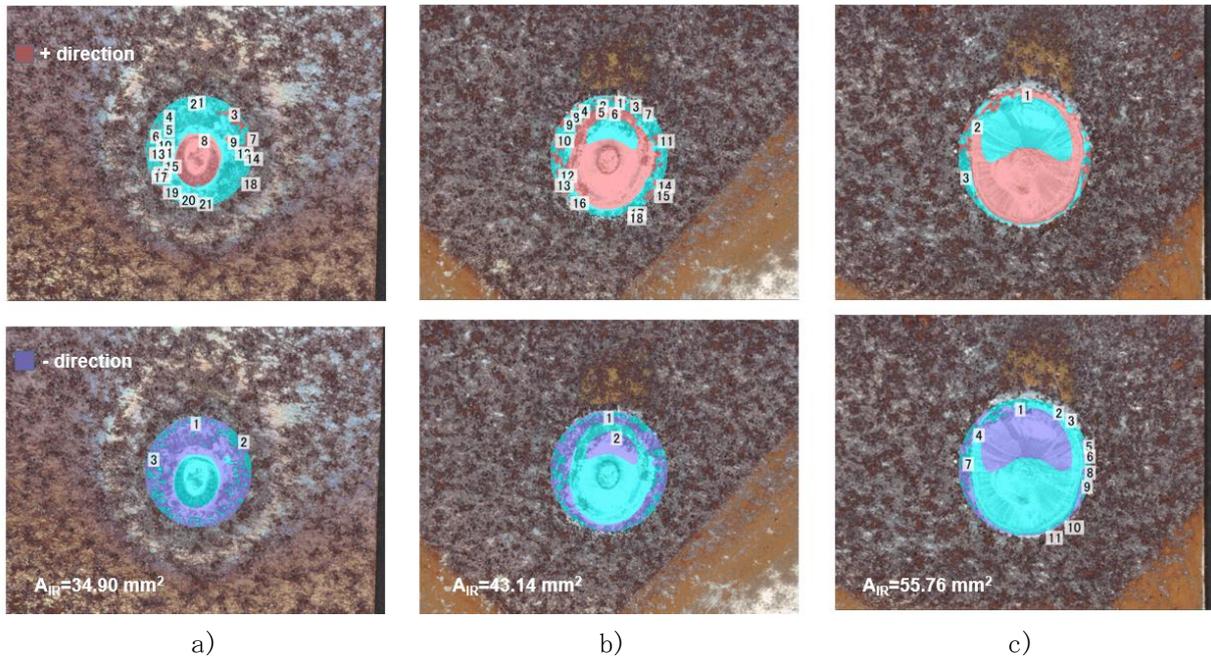


Fig.3-13 Carbon-steel (SS400) surface irradiation area after laser irradiation of 10 s for laser powers a) $P_{ir}= 0.9$ kW, b) $P_{ir}= 1.2$ kW, c) $P_{ir}= 1.5$ kW

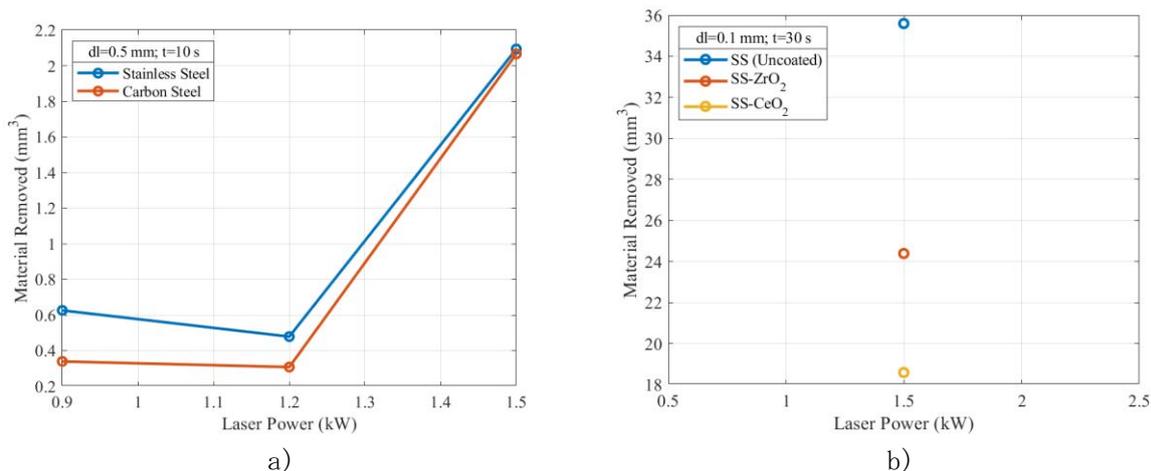


Fig. 3-14 Comparison of the volume of the material (excluding the material accumulated) removed due to laser irradiation

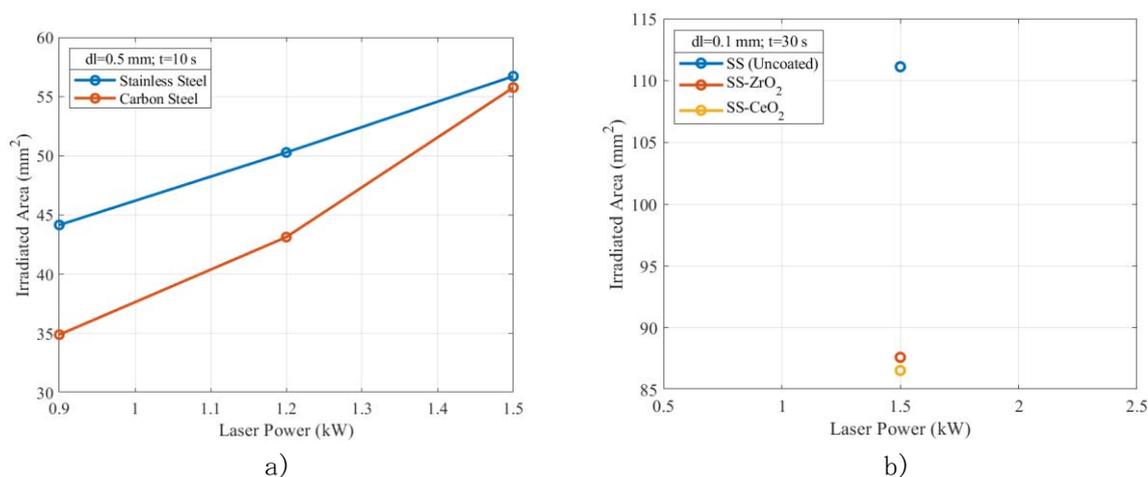
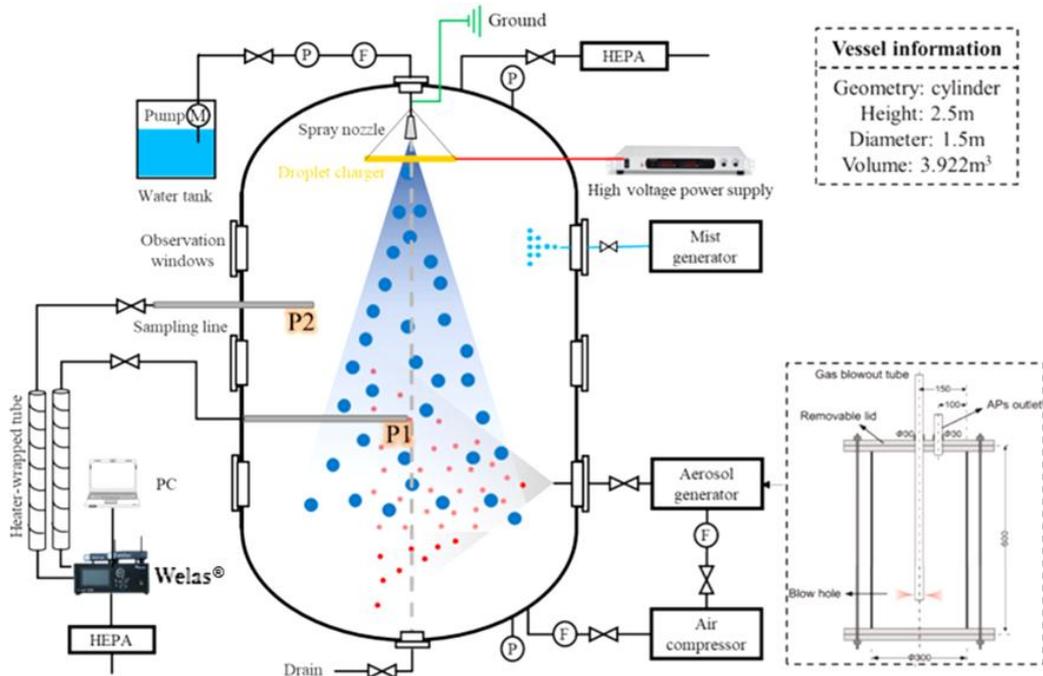


Fig. 3-15 Comparison of the irradiation area after the laser irradiation

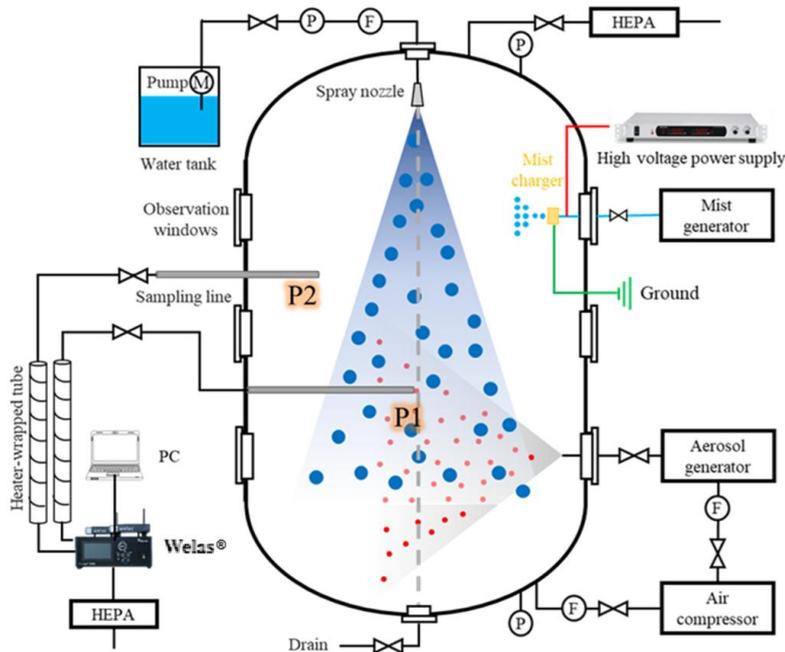
次に、エアロゾルの放射線誘発表面電荷の影響を調査するため、帯電した粒子を使用しての試験を行った。エアロゾルの捕捉をさらに向上させるため、表面電荷されたミスト或いはスプレーによるエアロゾル捕捉を有用な選択肢として検討を行った。令和5年度は、内径100 mmの真鍮リングに対し、-15 kVの電源を用い、スプレー液滴を帯電させ、エアロゾル除去に関する実験を行った。より現実的な条件において帯電の有効性が確認されたことから、原子力発電所の廃止措置における帯電スプレーの利用が、放射性エアロゾルの除去に効果的であることが確認された。

Fig. 3-16に電極を新たに搭載したUTARTS試験装置図を示す。本実験では、模擬放射性微粒子としてZrO₂粒子を使用した。容器内に設置した2か所のサンプリングラインを介してWelas® 3000に接続し、エアロゾルのサイズ分布等の計測を実施した。Fig. 3-16(a)ならびに(b)に帯電スプレーと帯電ミスト機構を搭載した改良型UTARTS装置の模式図を示す。帯電システムには高電圧電源と電極が含まれている。出力電圧(V)が0から30 kVの範囲で、正または負の極性が選択可能な高電圧電源を使用した。高電圧電源は電極に接続され、ノズル/パイプ出口付近に電場を形成し、スプレーされた液滴/ミストを帯電することが可能となる。電極については、Fig. 3-17に示すよう

に、単一電極設定のための4つの形状を検討した。Model 1はリング型の幾何形状で、断面は円形となっている。Model 2はリング型であるが、断面が半四角形であり角を有する形状となっている。Model 2-ReはModel 2の逆型で、角が電極下部に位置している。Model 3はシリンダー型の幾何形状である。本実験では、液滴の帯電区間を増加させるため、異なる内径(D)を持つModel 1の真鍮製電極を複数組み合わせさせた2つの多電極モデルを設計した。リング間の距離は10 mmとした。



(a) Charging-spray configuration



(b) Charging-mist configuration

Fig.3-16 UTARTS facility with charging system

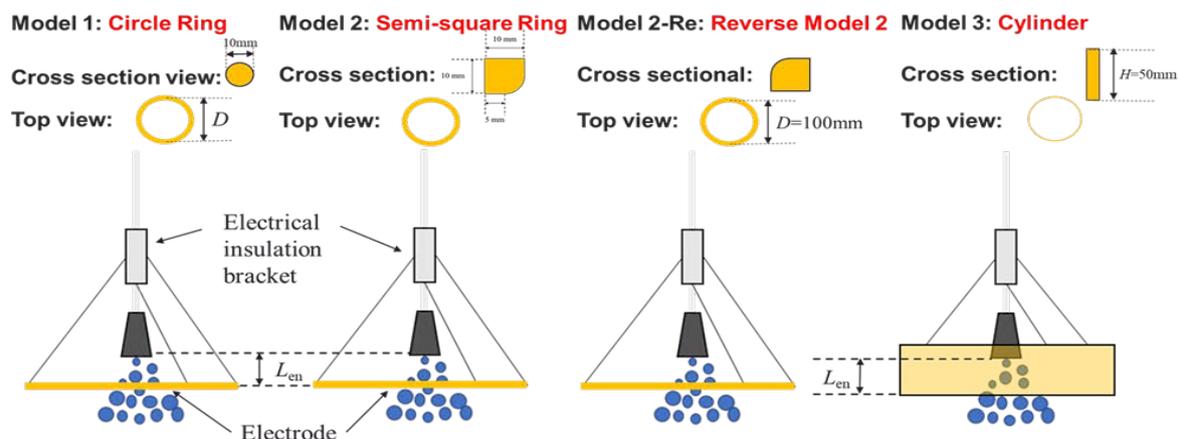


Fig. 3-17 Designs of single-electrode configurations

実験手順としては、エアロゾル粒子を UTARTS 施設に 2 分間程注入した後、粒子群を均一に分散させるため、容器の底から約 70 L/分の速度で乾燥空気を 5 分程度注入する。その後、帯電させたミストを目標とする濃度レベルに設定した上で 15 分間程度注入し、エアロゾルミスト凝集を促進させるため「アイドリング状態」に維持する。次に、水スプレーを容器に注入し、注入時間帯のエアロゾル特性を測定し、除去効率の時間的変化を観測する流れとなる。実験条件を Table 3-2 に示す。

Table 3-2 Experimental parameters

Parameter	Value
Electrode model	11 different models
Distance between nozzle outlet & electrode (L_{en}) [mm]	10 ~ 50
Applied voltage (V) [kV]	0 ~ 30
Applied polarity	Positive, negative
Spray flow rate (Q) [L/min]	1, 1.5, 2
Mist concentration	0, Low C_{mist} , High C_{mist}
Sample material	Stainless-steel, Carbon-steel, Concrete
Coatings	Oxidized layer, CeO_2 , ZrO_2

電圧と極性を変化させた際のエアロゾル除去効果の一例を Fig. 3-18 に示す。横軸が粒子径、縦軸が実験開始 5 分後のエアロゾル除去効率であり、異なる電圧値 (Fig. 3-18(a)) ならびに極性 (Fig. 3-18(b)) による違いを図示した。この結果から、エアロゾル除去効率は電圧の増加とともに顕著に向上する傾向が確認された。これは、電極内を通過した液滴への帯電量が電圧に比例するためと考えられる。また、電極に適用される電圧が-10 kV を超えると、エアロゾル除去効率の向上は次第に収まることが分かった。このことから、電圧の上昇が多くの帯電液滴を生成するのに効果的である一方で、供給電圧の増加に伴い水滴が電極表面上に堆積し、シールド効果を引き起こす可能性が示唆された。さらに、電極表面のコロナ放電や空間充電等の効果も除去効率の最大値を決定付ける要因であると考えられる。

Fig. 3-18(b) は、極性の変化に伴うエアロゾル除去効率の影響を示している。正と負の電圧供給の両方がエアロゾル除去効率を向上させることが示されているが、同一の絶対値での極性を比較した場合、エアロゾル粒子の除去効率は負の電圧供給の方が高くなることが示されている。これは、エアロゾル粒子が容器内へ注入中にトリボ帯電等により帯電することが要因として挙げられ、本実験条件の場合、UTARTS 容器内へ注入したエアロゾル粒子の極性が負であることを示唆している。結果として、両極性でのスプレー帯電は、エアロゾルの除去を改善するにあたり効果的な手法の一つであることが示されたが、現場への応用の際は粒子の帯電に応じて、電圧ならびに極性を変化させる選択肢を有することが望ましいと考えられる。

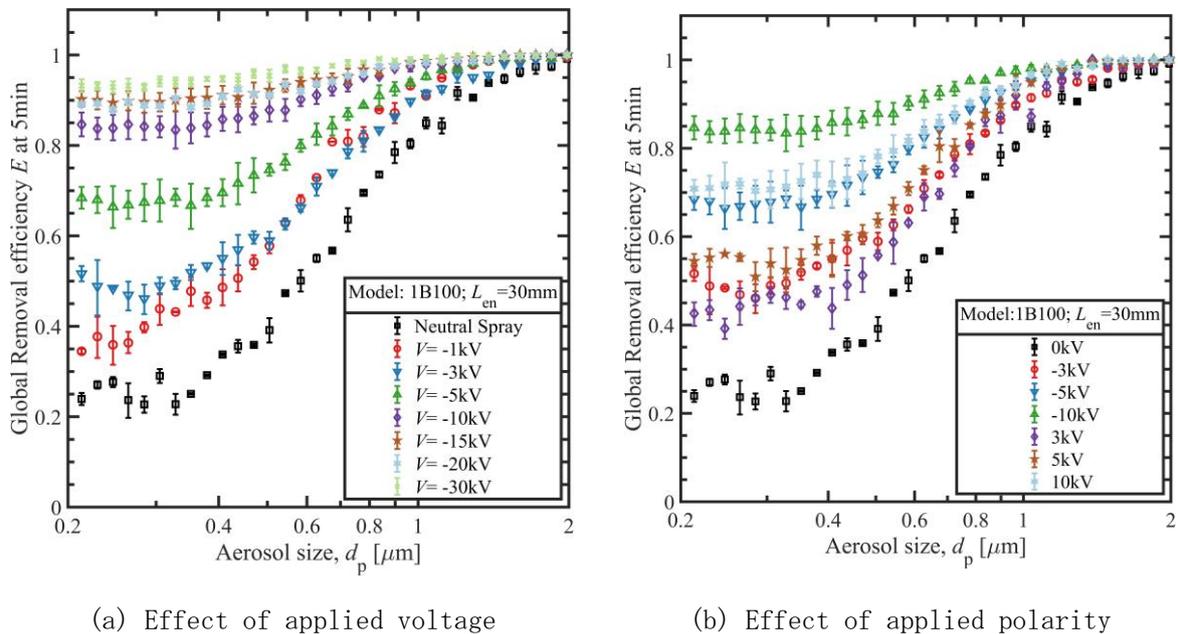


Fig.3-18 Effects of charging configuration in charging spray

次に、電極の位置、サイズ、材質、形状によるエアロゾル除去効率への影響を Fig. 3-19 に示す。この実験結果から、これらのパラメータはエアロゾルの除去効率に顕著な効果をもたらすことが示されている。このことから、適切に設計された電極をスプレーノズル下流に配置することで、より高いエアロゾル除去効率を得られることが考えられる。また、帯電領域を拡大することも

より効果的なエアロゾルの除去に役立つことが考えられるが、液滴の堆積は課題点の一つとして挙げられることから、配置箇所の選定も重要であることが考えられる。解決策の一つとして、コーン形状の電極を採用することも一案として挙げられる。また、本実験では帯電スプレー条件下での、スプレー流量とミストを添加した際のエアロゾル除去向上効果についても確認した。

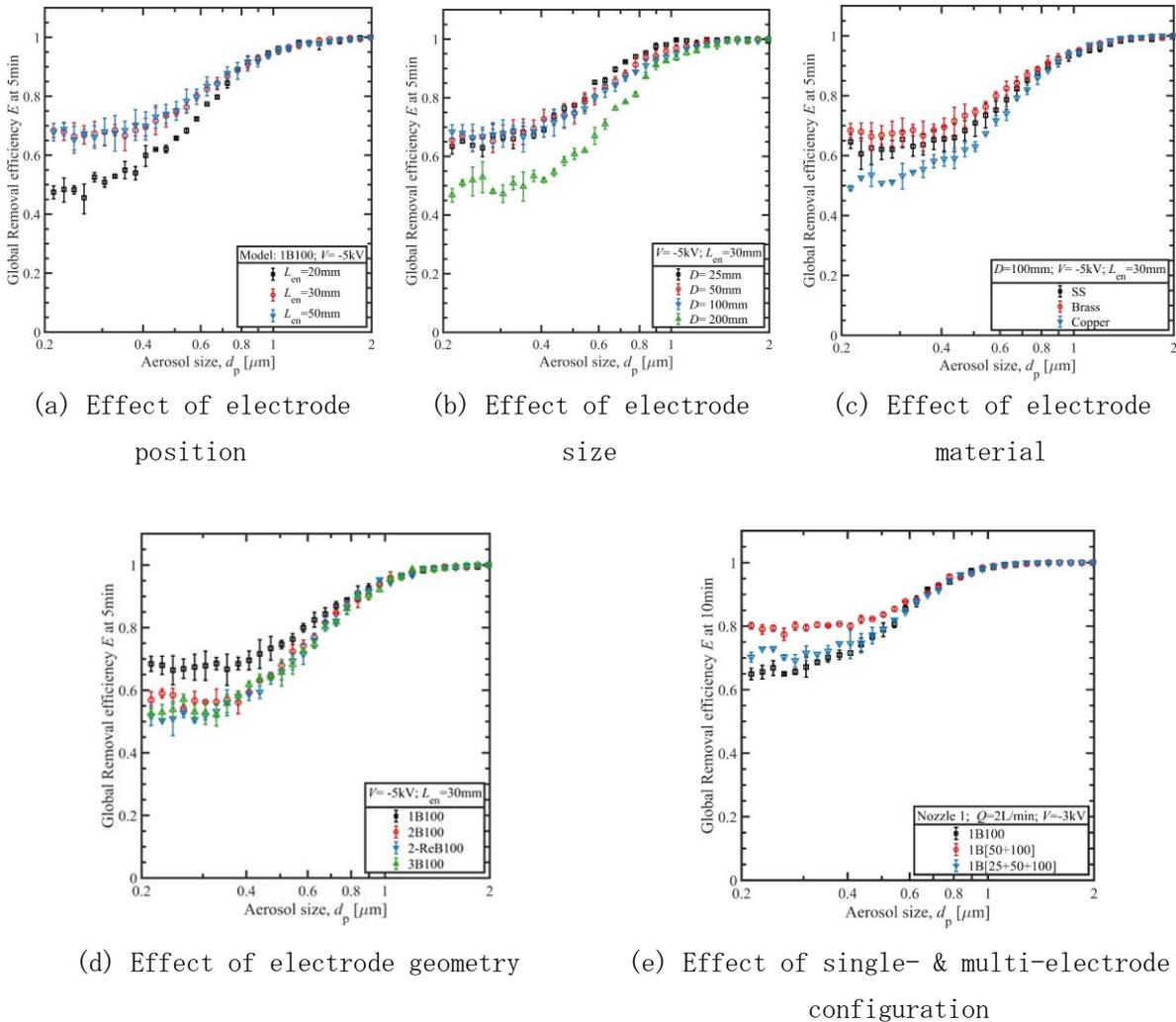


Fig.3-19 Effects of electrode configuration in charging spray

続いて、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。Fig. 3-20 にレーザー除染実験時のレイアウト図を示す。実験結果として、コンクリート表面にレーザー照射した際に生成されたエアロゾルの時間変動を Fig. 3-21 に示す。金属製サンプルと比較し、コンクリート表面ではエアロゾル生成量が顕著に高かったことから、ガルバノスキャンのライン間隔を 0.5 mm に変更するなどして、レーザーパラメータの調整を行った。結果的に、コンクリート表面に照射されたレーザーエネルギー密度は金属表面時よりも 5 倍程低下したが、生成されたエアロゾル濃度は金属表面と同等の挙動を示した。レーザー出力と、コンクリート表面にて生成されたエアロゾル濃度の関係を Fig. 3-22 に示す。レーザー出力を 0.9 kW から 1.5 kW に増加させると、エアロゾル濃度もそれに対して増加する傾向が確認された。Fig. 3-23 に非放射性セシウムに加え、模擬汚染物質をコンクリート表面に塗布した際のエアロゾル生成挙動を示す。

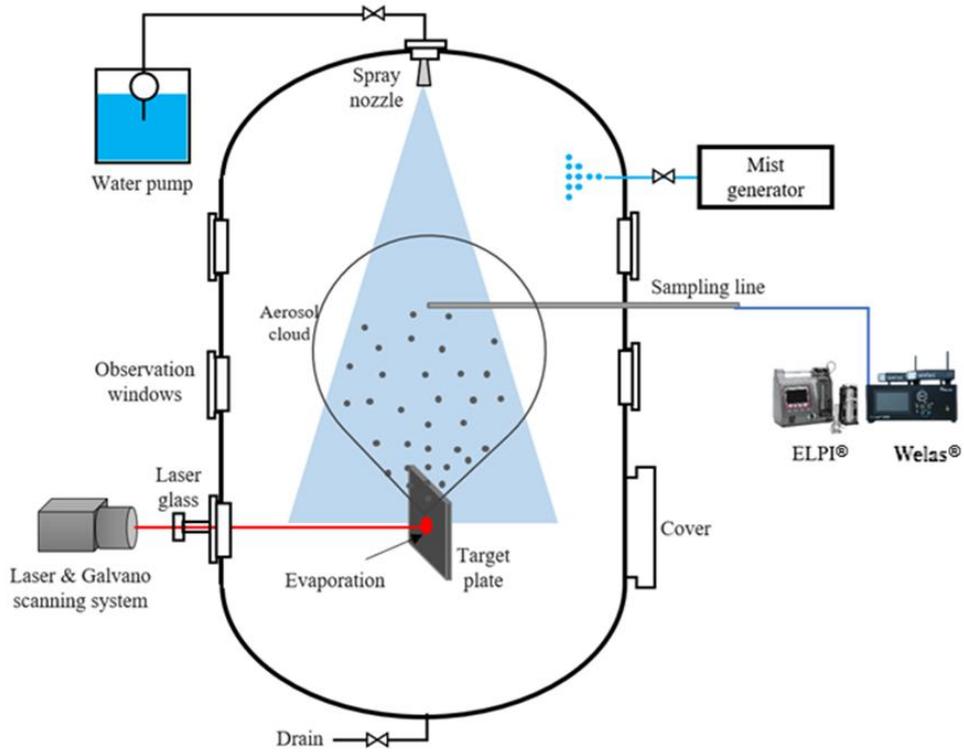


Fig.3-20 Schematic of the laser cleaning and aerosol scavenging on UTARTS facility

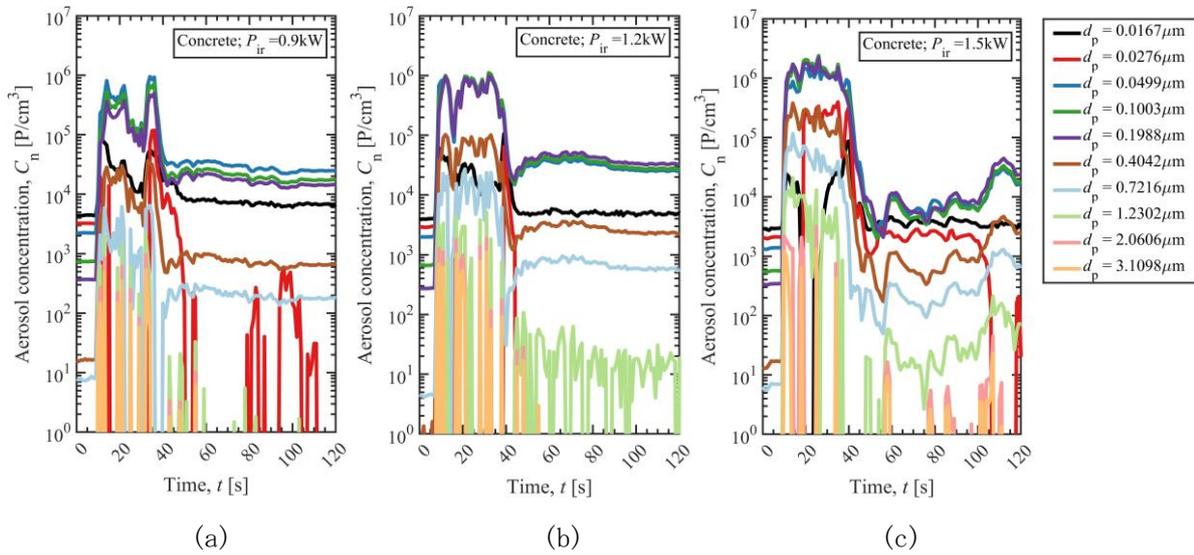


Fig.3-21 Temporal aerosol concentration during and after the laser irradiation

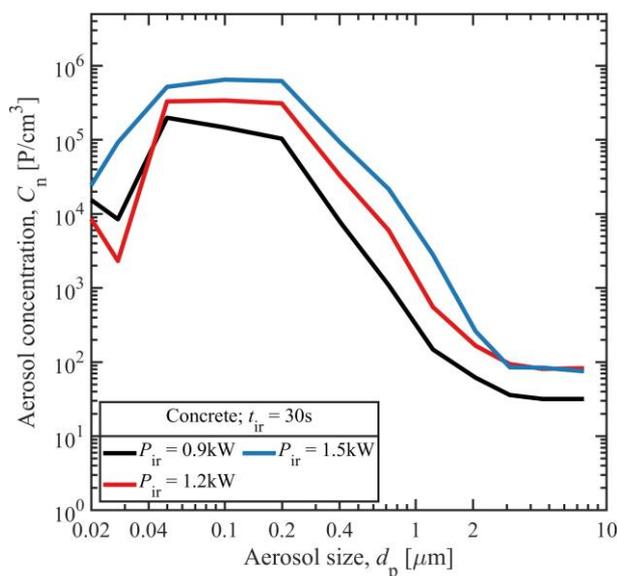


Fig. 3-22 Effect of laser power on mean aerosol concentration for concrete

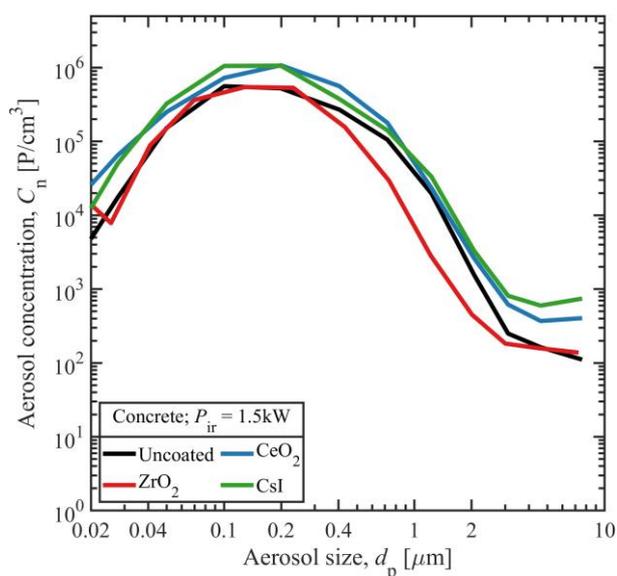


Fig. 3-23 Effect of surface coating on mean aerosol concentration for concrete

試験結果を基に既存の CFD モデルを改良し、モデルの信頼性の検証を行った。これらの実験的研究を通して、基礎的な知見及び基盤を築いたが、複雑な混相流現象が絡むエアロゾル除去プロセスをより深く理解するためには、CFD ツールを活用した解析は 1F 廃止措置の評価にも有益であると考えられる。

Fig. 3-24 に本研究にて採用した解析手法を示す。本解析では、粒子を含む連続気体についてはオイラー法を考慮した。一方、拡散する噴霧液滴の動きはラグランジュ追跡法を採用した。連続相と分散相の間の相互作用を推定するため双方向結合を用いた。大きさの異なる均一分散エアロゾル粒子（典型的には、ストークス数の小さいサブミクロンサイズのものは、連続気相中の別

個の種として考慮される。受動スカラー輸送方程式を導入し、気体中の全種に対する連続方程式を解く。噴霧中のエアロゾルの除去を評価するために、慣性インパクション、拡散、インターセプションを含む異なるメカニズムによるエアロゾルの掃去を推定する数値モデルを開発し、実装した。数値モデルの詳細を以下に紹介する。

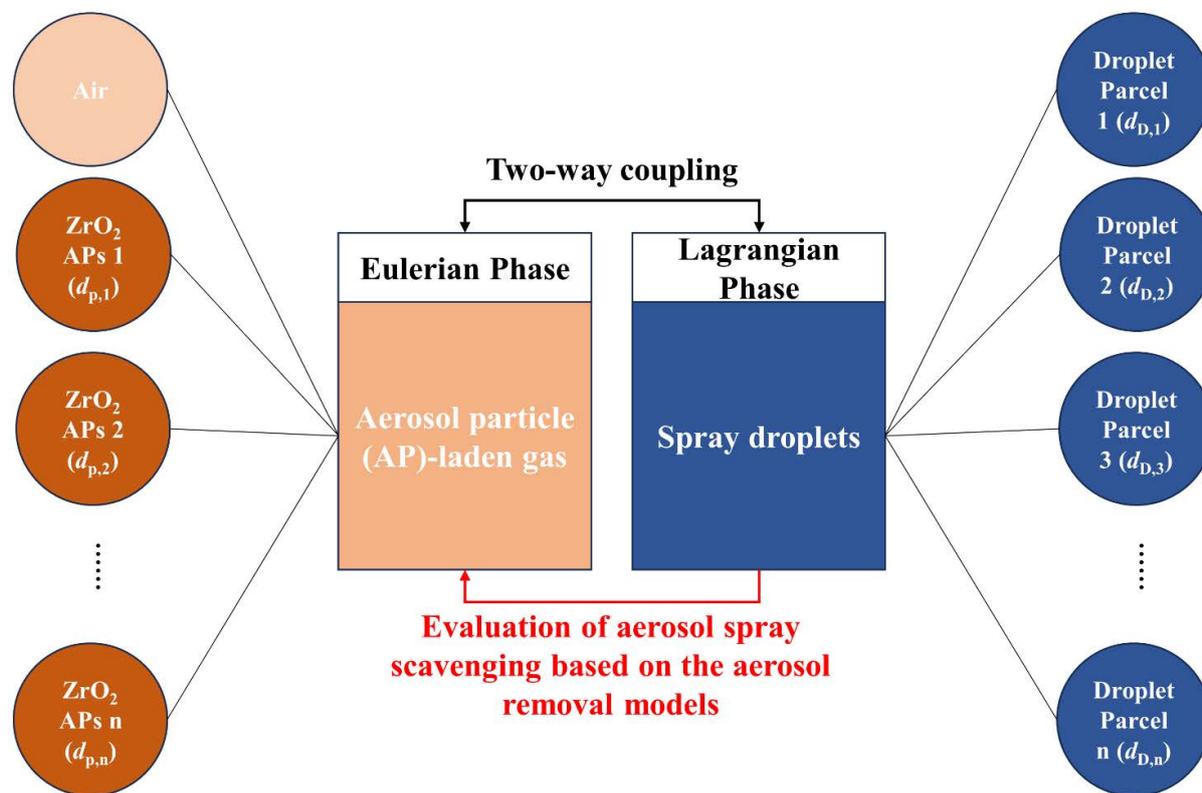


Fig. 3-24 Illustration of Euler-Lagrange simulation approach for aerosol spray scavenging adopted in this study

スプレーノズルの数値解析には、汎用 CFD ソフトウェアである STAR-CCM+にて提供されるインジェクターモデルを使用した。この STAR-CCM+には、インジェクターからのスプレー噴射を特徴付けるモデルが複数提供されており、理論及び先行研究結果より提唱された噴流崩壊モデルが組み込まれている。また、液滴と容器内壁との相互干渉を数理的に解くための境界条件についても考慮する必要がある。本解析においては、内壁と衝突する液滴は消散するように設定し、容器下部に堆積する液相や、内壁を下降する液膜の挙動は計算対象外とした。エアロゾル粒子については、 ZrO_2 粒子を選定し、容器全体に均一に分散する形で初期条件として設定した。エアロゾル粒子の初期濃度とサイズ分布については、実験で得られた初期測定データを使用した。流動場雰囲気は、UTARTS と概ね同等な、温度 298 K 及び大気圧として設定した。全ての解析ケースで、低いクーラント数条件 ($Co < 1$) を維持するため、時間ステップは 10^{-3} 秒に設定し、全体のシミュレーション時間は 1200 秒とした。本研究項目では、異なるメッシュ条件やスプレー構成（異なるスプレーフロー率やスプレーノズル設計など）を含む、計 10 通りのシミュレーションを実行した。

スプレーノズルの効果を検証するため、異なるスプレーノズルにおける 600 秒間のエアロゾル除去効率を比較した結果を Fig. 3-25 に示す。結果に示された通り、シミュレーション結果が実験結果と高い精度で一致していることが確認された。Nozzle 3 を採用した場合、エアロゾル除去効率が最も高く、Nozzle 1 及び Nozzle 2 が、次に Nozzle 4 が最も低い除去効率であった。この結果は、単にスプレー空間を増加させるだけではエアロゾルの除去効率に結びつかず、液滴や気相流れ場の特性（例えば、液滴の速度とサイズ、気相の循環強度）も重要であることが示唆されている。この解析結果から、高速液滴の生成が可能な拡張スプレー角を備えたスプレーシステムが、エアロゾル粒子除去を効率よく実施する上で効果的であると考えられる。

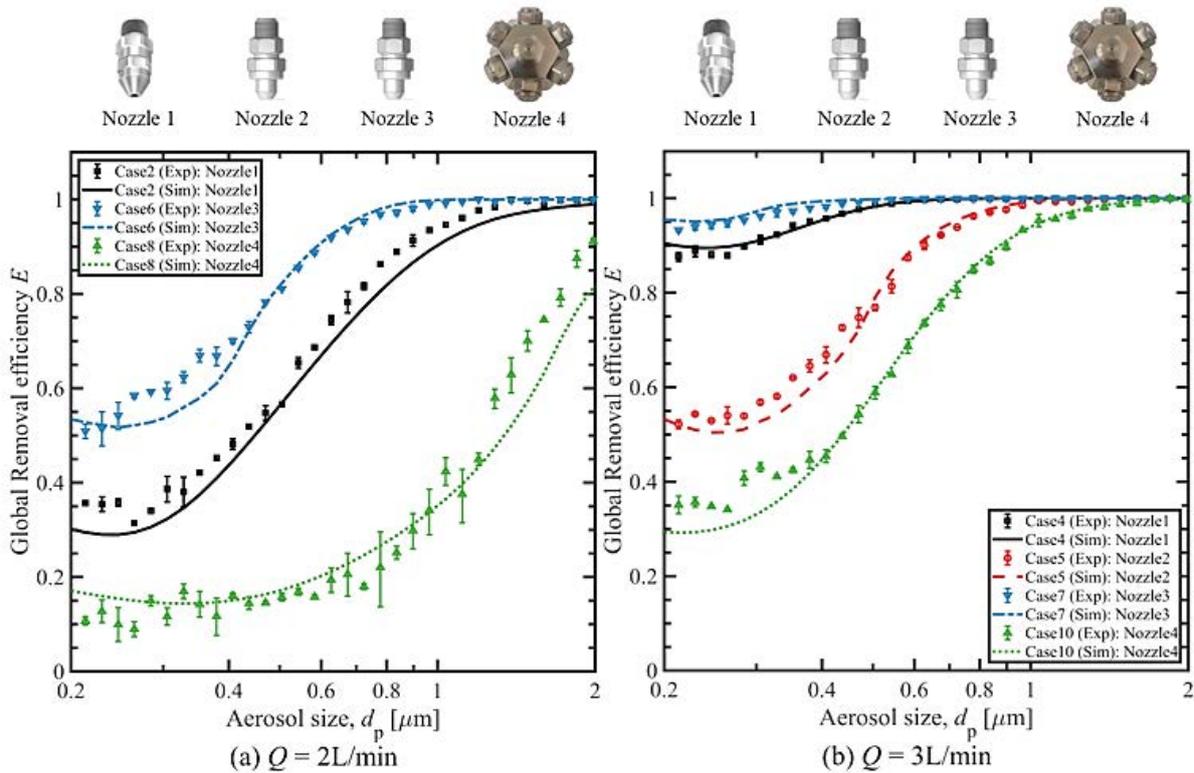


Fig. 3-25 Effect of spray nozzle

($t_{\text{spray}} = 600\text{s}$; “Exp” and “Sim” means experimental and simulation results, respectively)

本解析によるエアロゾル除去結果を検証するため、全エアロゾル除去率 λ を導入し、UTARTS 容器内におけるエアロゾル粒子の質量変化のバランスを次式により評価した。

$$\frac{dm_{p,\text{total}}(t_{\text{spray}})}{dt} = -\lambda m_{p,\text{total}}(t_{\text{spray}}) + S_{\text{source}} + S_{\text{deposition}} \quad \text{式(3-1)}$$

ここで、 S_{source} と $S_{\text{deposition}}$ はエアロゾル粒子の生成と消滅項である。本研究では、UTARTS 内ではスプレーの活性化後、容器内に追加のエアロゾル粒子が注入されることはなく、エアロゾル粒子の

堆積速度は UTARTS の予備試験からの測定に基づくスプレー掃除と比較して無視できる量であるため、エアロゾル質量のソース及び損失項は無視できるものと仮定した。以上の過程から、式(3-1)より、次の相関関係が導かれる。

$$m_{p,\text{total}}(t_{\text{spray}}) = m_{p,\text{total}}(0s)e^{-\lambda_{\text{spray}}t_{\text{spray}}} \quad \text{式(3-2)}$$

実験的な総エアロゾル除去率 λ_{Exp} を決定するためには、特定のスプレー噴射時間内で測定されたデータポイントに対してフィッティングを行う必要がある。一方、解析された総エアロゾル除去率 λ_{Sim} の計算には、各時間ステップの計算から得られたデータに対してフィッティングを行う。Fig. 3-26 は、総エアロゾル除去率の実験結果とシミュレーション結果の比較を示している。実験とシミュレーションの総エアロゾル除去率の偏差は10%未満であることが分かる。また、スプレー流量を上げるとエアロゾル除去率が向上することも確認できる。さらに、Nozzle 3 は Nozzle 1、Nozzle 2 及び Nozzle 4 と比較して、エアロゾル粒子を迅速に除去するのに適した性能を有していることが分かる。これらの結果は、スプレーの流量とノズル寸法の間関係を整理する上で、重要な知見であると考えられる。

最後に、シミュレーション結果を統計的に検証するため、次式に定義される Root Mean Square Percentage Error (RMSPE) と Mean Absolute Percentage Error (MAPE) を用いて比較を行った。

$$\text{RMSPE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_j \left(\frac{\lambda_{\text{Sim}}(t_{\text{spray},j}) - \lambda_{\text{Exp}}(t_{\text{spray},j})}{\lambda_{\text{Exp}}(t_{\text{spray},j})} \right)^2} \quad \text{式(3-3)}$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_j \left| \frac{\lambda_{\text{Sim}}(t_{\text{spray},j}) - \lambda_{\text{Exp}}(t_{\text{spray},j})}{\lambda_{\text{Exp}}(t_{\text{spray},j})} \right| \times 100\% \quad \text{式(3-4)}$$

式(3-3)と式(3-4)を使用した RMSPE と MAPE の計算値は、それぞれ 0.06804%と 6.172%となった。この誤差指標は、本解析シミュレーション結果が実験データと相応な精度であると考えられるが、異なるスプレー構成のケースに対するさらなる検証も実機適用を想定するにあたり必要と考えられる。

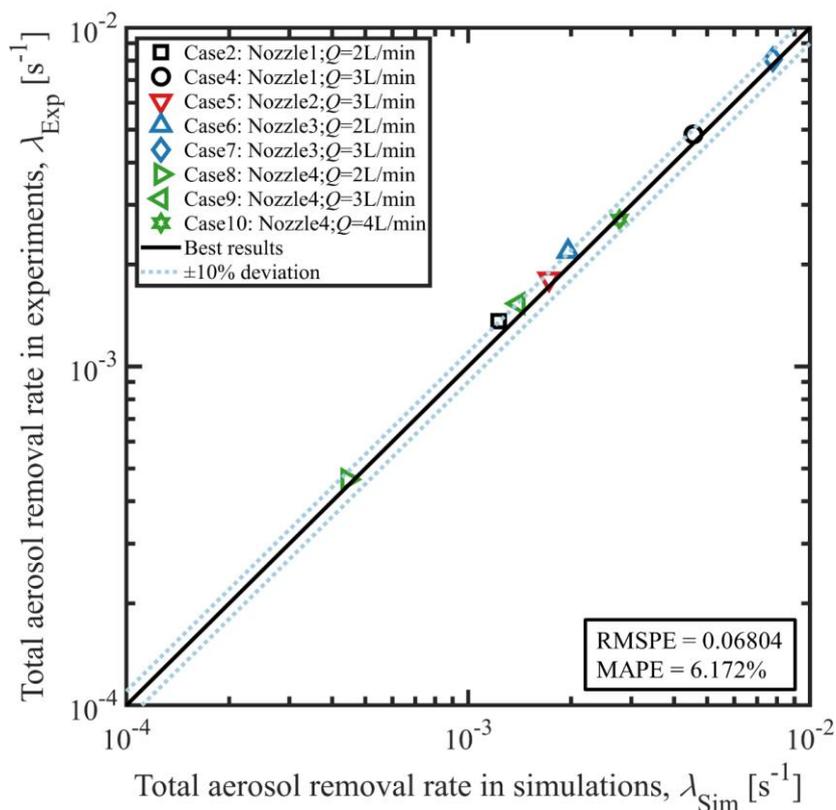


Fig. 3-26 Comparison of experimental and simulation results of the total aerosol removal rate

続いて、Table 3-3 に示した Nozzle 4A (Virtual 4A) 及び 4B (Virtual 4B) を使用した解析結果について述べる。Nozzle 4A 及び 4B は、実験に用いた Nozzle 4 の特性（オリフィス直径、スプレー角、液滴サイズ分布）を模擬する形で設定し、スプレー速度をそれぞれ 20 及び 30 m/s としている。

Table 3-3 Conditions of simulation cases for optimization of spray system

Case No.	Nozzle No.	Initial droplet velocity, U_b [m/s]	Spray flow rate, Q [L/min]
11			2
12	Virtual 4A	20	3
13			4
14			2
15	Virtual 4B	30	3
16			4

Fig. 3-27 及び Fig. 3-28 は、それぞれ Nozzle 4A (Virtual 4A) 及び Nozzle 4B (Virtual 4B) による液滴と UTARTS 内を滞留する気相の特性を図示している。Fig. 3-27(a)-(f) 及び Fig. 3-28(a)-(f) に示される液滴の特性を比較すると、中心部のスプレー液滴濃度は周辺領域よりも高いことが分かるが、スプレー液滴は広く分散しながら容器内に広がる傾向にあることが分かる。一方、より高いスプレー流量と液滴速度を使用した条件では、より密な液滴が気相とのドラッグ相互作用に貢献することから、気相速度が向上することが分かる。この気相流速の向上は、容器内壁周辺から高濃度のスプレー液滴ならびにエアロゾル粒子を再循環させることで、エアロゾルの除去効率が向上することが示唆される。Fig. 3-29 では、実験で使用したノズルとシミュレーションでのノズルによる総エアロゾル除去率を比較している。ここから、より広いスプレー領域と高い液滴スプレー速度を使用することで、エアロゾル除去性能が大幅に向上することが定量的に示されている。実際のノズルを使用するケースでは、エアロゾル除去率は主に、より密なスプレー液滴とより大きな液滴速度によって増加し、慣性衝撃とガス再挿入の強度によって除去効率が大幅に向上する。また、同じノズル (Nozzle 4A または Nozzle 4B) を使用する際、より高いスプレー流量の使用により、より多くのスプレー液滴が生成されるため、高いエアロゾル除去率の達成が可能となる。Fig. 3-29 に示す Nozzle 4A 及び Nozzle 4B によるエアロゾル除去率を比較すると、比較的高い値から液滴速度を増加させることでエアロゾルの除去を加速させる効果が見られる。これは、液滴速度を増加させることで各スプレー液滴の残留時間も短くなる。このことから、より高い流量を使用するケースにおいては、エアロゾル粒子との相互作用/収集のための各液滴の合計時間が短縮されることから、総合的なエアロゾル除去率にも影響を及ぼすことが考えられる。

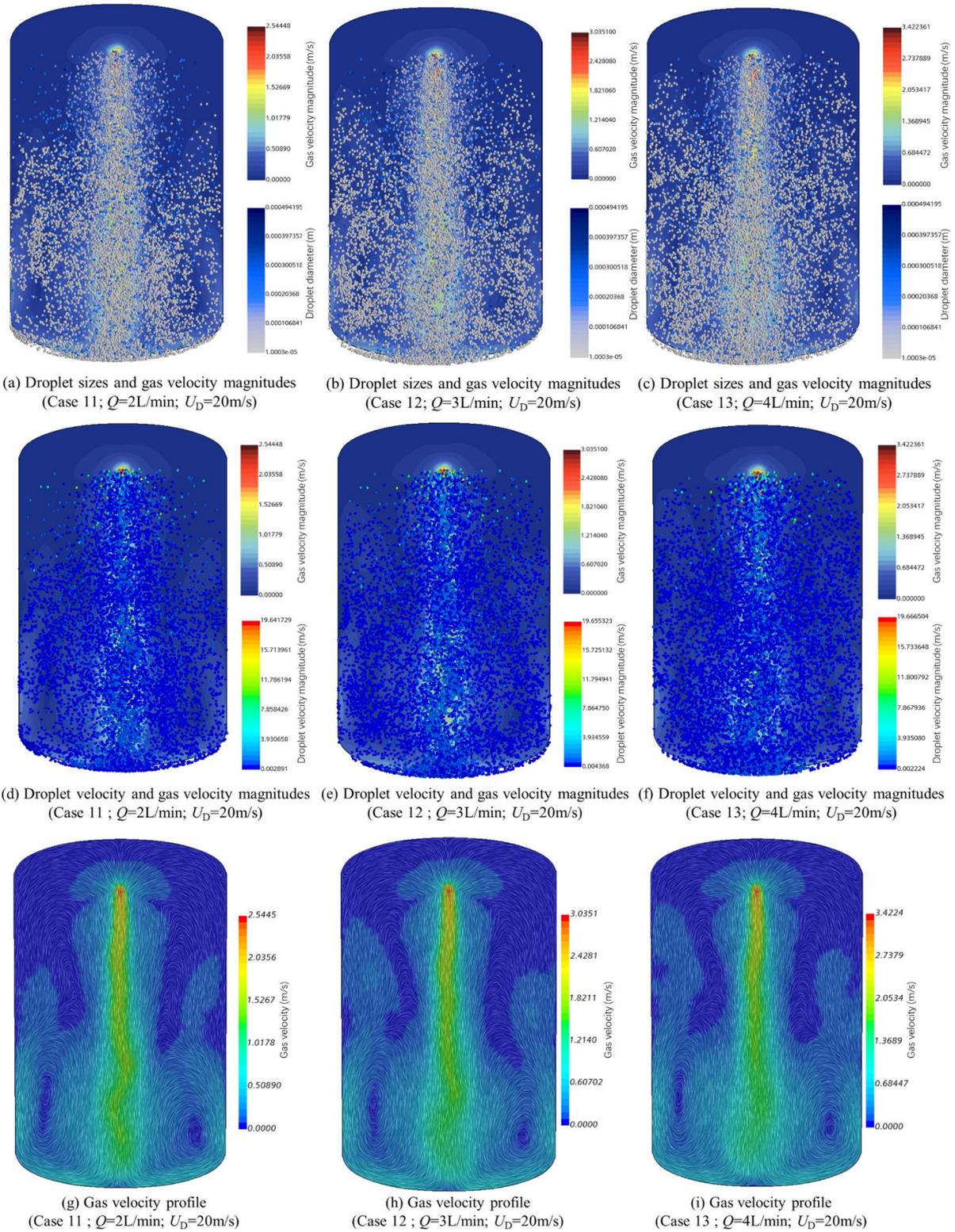


Fig.3-27 Droplet and gas characteristics for the sprays from the virtual Nozzle 4A

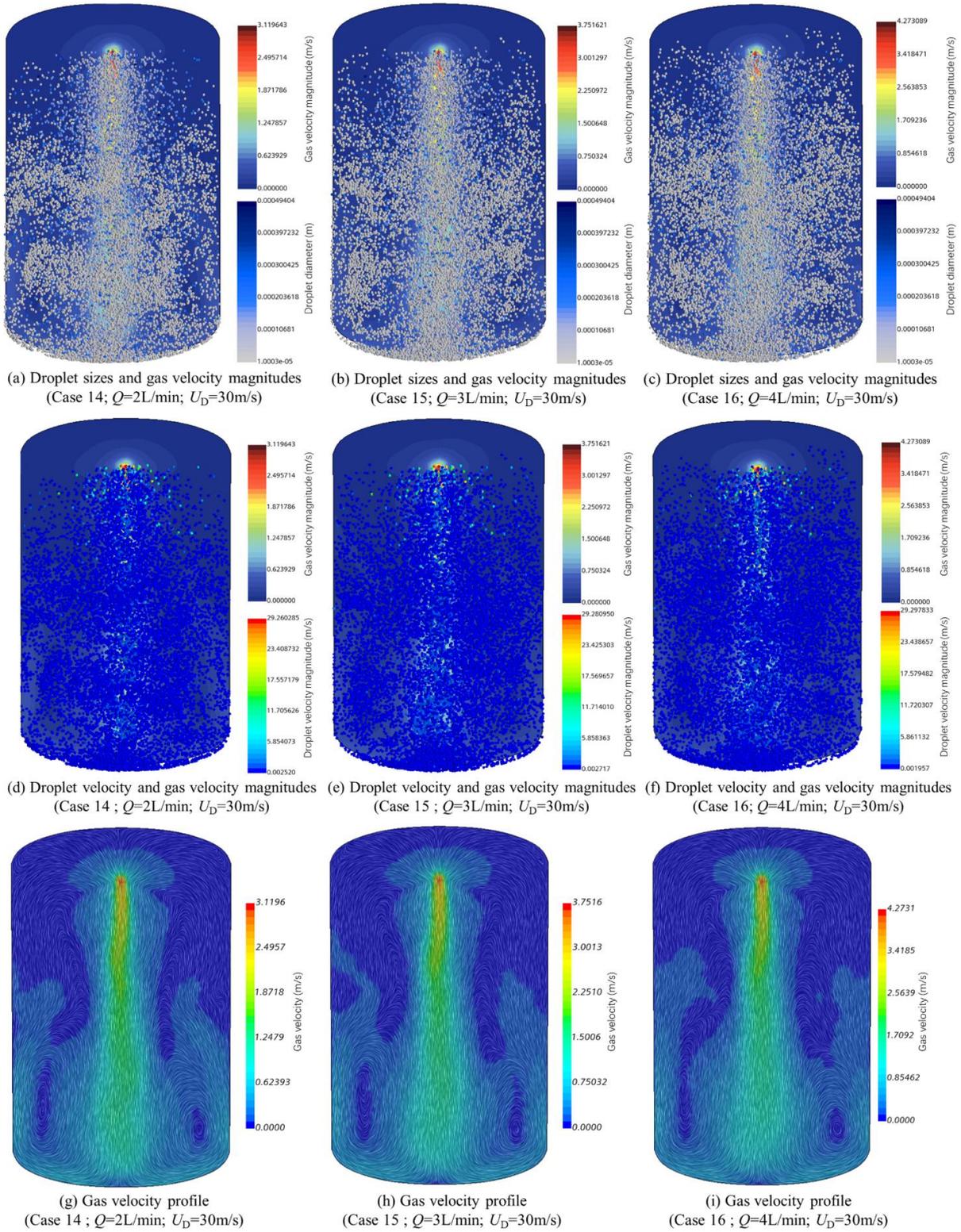


Fig.3-28 Droplet and gas characteristics for the sprays from the virtual Nozzle 4B

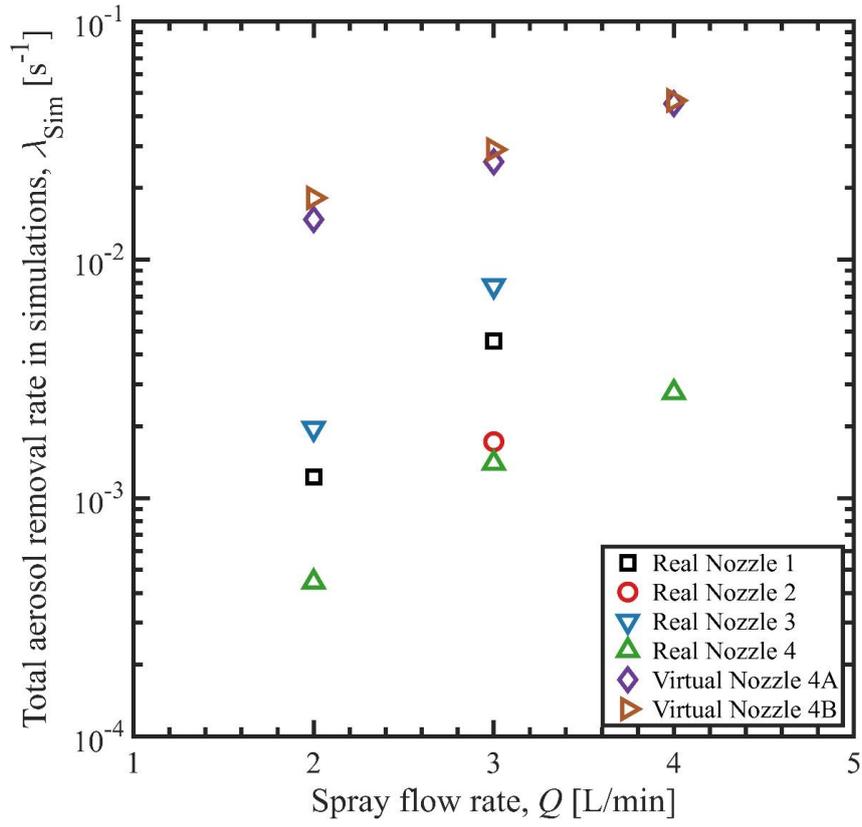


Fig. 3-29 Effect of flow rate on simulated aerosol removal rates

3.1.2 データ評価（連携先：原子力機構）【令和3年度～令和5年度】

放射性同位元素に汚染された汚染材料をクリアランスレベルまで除染を行うためには、金属母材の微細亀裂内に入り込んだ汚染まで削り取る必要があり、そのためには、金属母材を 100 μm 程度、表面を溶融することなく削り取る必要がある。原子力機構では高出力のファイバーレーザーを小さいスポット径で集光することで高パワー密度状態を作り出し、高速で掃引することで金属表面を瞬時に蒸発させ母材表面の効率的な除染を目指している。これらの保有技術を基に本研究成果の評価を行った。

【令和4年度までの成果概要】

令和3年度では、原子力機構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。

令和4年度では、令和3年度に引き続き、原子力機構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。

【令和5年度実施内容及び成果】

原子力機構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うとともに、実機適用に関する助言を行った。UTARTSにおいて実施したレーザー照射試験の結果から、除去された材料の体積は、表面に蓄積された材料の体積よりも小さいことが分かった。この観察結果は、レーザー洗浄プロセス中に試料の体積が保存されていないことを示している。理想的には、除去された材料の体積は、蓄積された材料の体積と発生したエアロゾル粒子の体積の合計に等しいはずである。この矛盾をさらに深く掘り下げるため、高出力レーザーを用いたレーザー実験を繰り返し、材料除去プロセスに関わる物質収支をより深く理解した。ただし、今回はガルバノスキャンシステムを用いたレーザー照射領域は正方形（10×10 mm^2 ）である。エアロゾルのサンプリングには Welas® Promo 3000 が使用され、その後レーザーでスキャンされたサンプルは、キーエンス 3200 プロフィロメーターで分析された。試料の重量は、質量バランスの目的でレーザー実験の前後に測定された。

Fig. 3-30～Fig. 3-32 は、レーザー出力（0.6～1.5 kW）、照射時間（40～50 秒）、材質（炭素鋼、ステンレス鋼）を変えた試料のエアロゾルサイズ分布を示す。試料には、 ZrO_2 と CeO_2 の2種類のコーティングが施されている。コーティングの平均厚さは 6.8-7.6 μm である。レーザー出力を上げると、全てのケースでエアロゾル濃度が増加する。Fig. 3-30(a)では、SS400、1.5 kW の場合、0.3 μm より大きい粒子ではエアロゾル濃度はゼロである。これは、エアロゾル濃度が Welas 装置の測定限界より高く、濃度を測定できなかったためである。同様のことが SS400-鍍表面照射でも起こり（Fig. 3-30(e)）、特定のサイズでは濃度が測定範囲より高く、1.5 kW のケースでは非現実的な濃度プロットを示している。前項で観察したように、表面にコーティングが施されているため、レーザーパワーが吸収され、レーザークリーニングによるエアロゾルの発生がコーティングされていない表面よりも少量であった。

また、英国の研究チームに得られた研究成果の評価を行うとともに、実機適用に関する助言を行った。英国チームが実施しているオプティクリーンプロジェクトでは、レーザー除染プロセスの支援のため、超音波トランスデューサーが含まれたミスト発生システムが新たに開発されてい

るが、レーザー除染中に発生するエアロゾル粒子を効率的に捕捉する機構としての新規性が認められるとともに、ミスト発生システムを水タンク上部に取り付けることで、システムのコンパクト化の実現が可能であることが特徴である。このことから、スペースに限りのある廃炉現場においても比較的容易に導入が可能であることは長所である。一方で、トランスデューサーにより発生するミストは、チューブを通じてレーザーヘッドへ流入するが、水タンクからレーザーヘッドまでの距離に応じてチューブ長さの調整も必要となる。このことから、発生したミストが、チューブ内部の壁面との干渉により液膜となってしまう、ミスト移流の阻害や、ミストそのものの消失が懸念される。しかしながら、除染性能を検証するためのレーザー誘起ブレイクダウン分光法 (LIBS) 機構を導入していることから、上述した懸念事項を定量的に検証するためのシステムが構築されていることは、本システムの研究開発を進める上で評価できるものと考えられる。以上の評価ならびに助言を日英双方の研究グループと共有し、実機適用に向けた知見の拡充を行った。

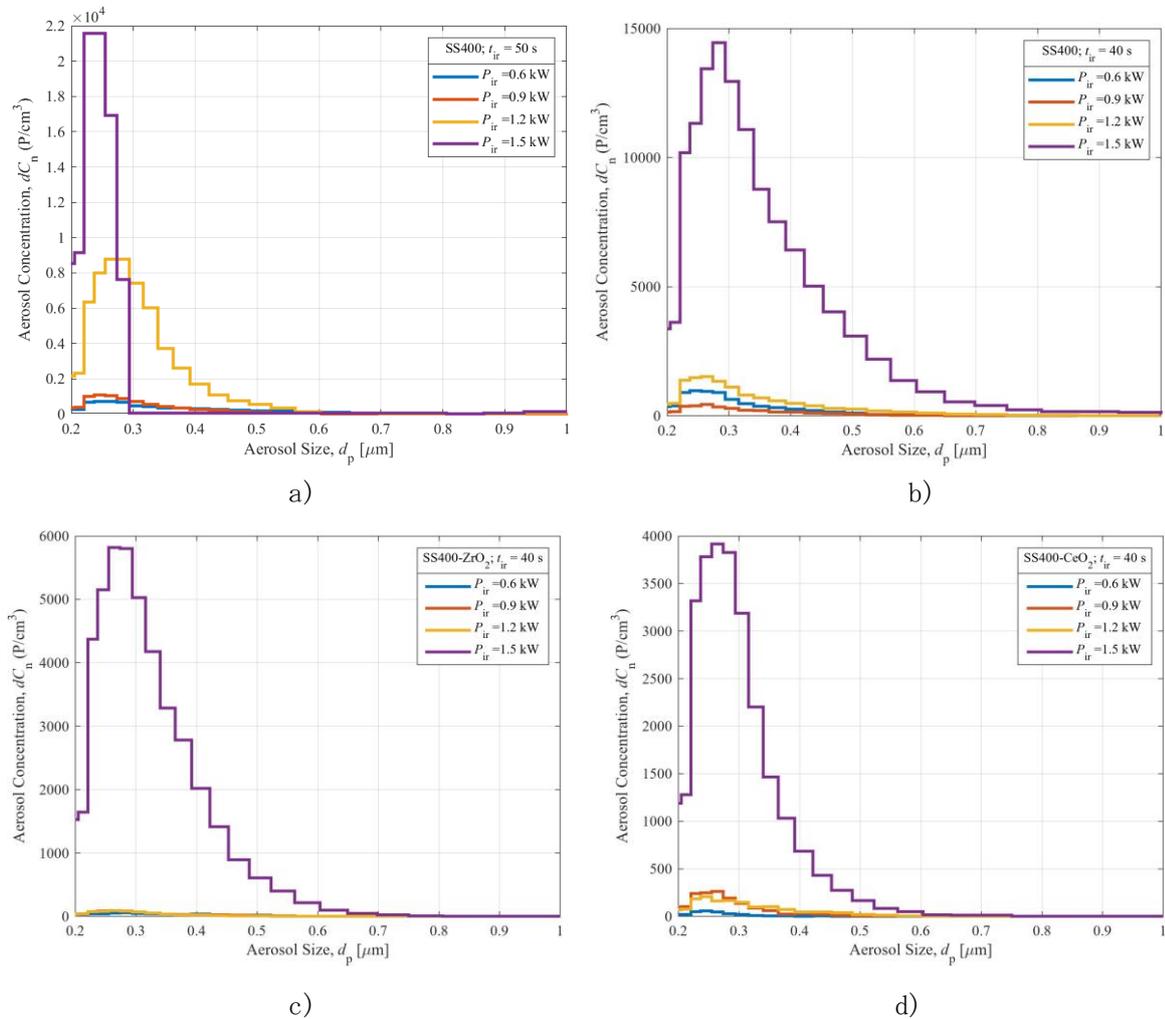
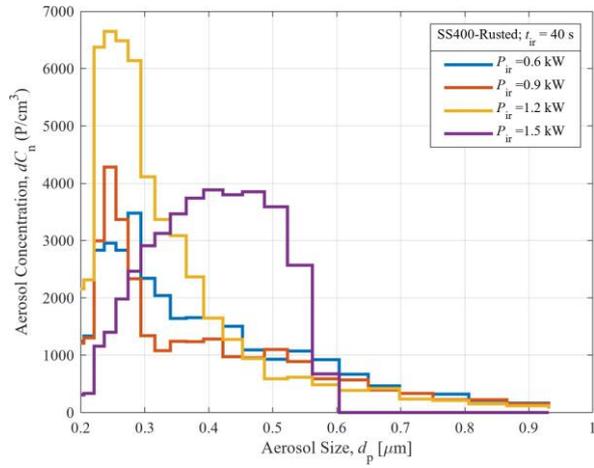


Fig.3-30 Aerosol concentration after laser cleaning of carbon-steel (SS400) surface (1/2)

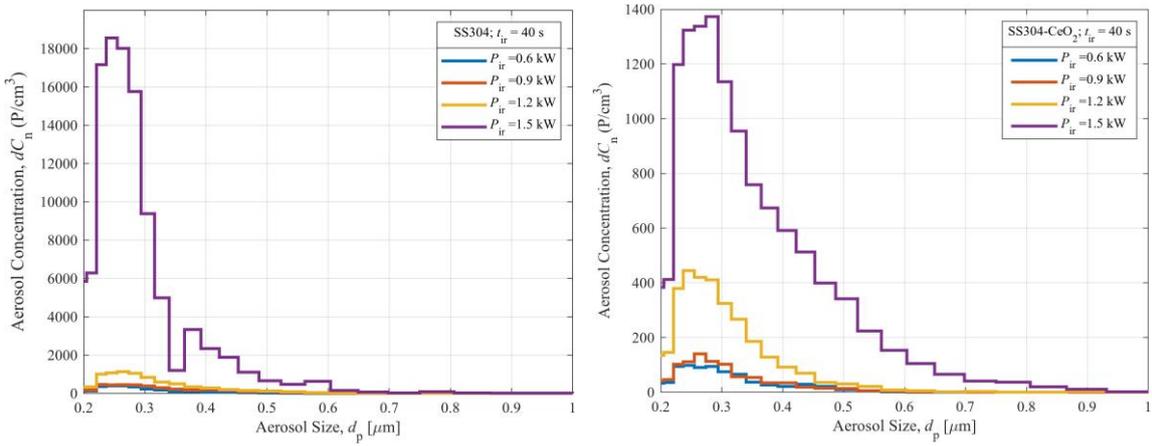
- a) Uncoated, $t_{\text{ir}}=50$ s; b) Uncoated, $t_{\text{ir}}=40$ s
- c) ZrO_2 coated, $t_{\text{ir}}=40$ s; d) CeO_2 coated, $t_{\text{ir}}=40$ s



e)

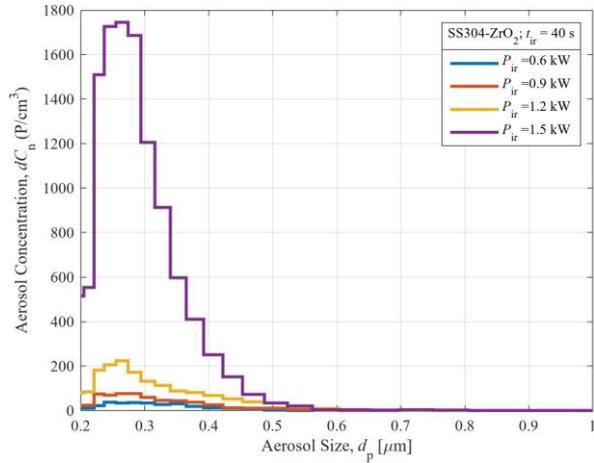
Fig.3-30 Aerosol concentration after laser cleaning of carbon-steel (SS400) surface (2/2)

e) Rusted, $t_{ir}=40$ s



a)

b)



c)

Fig.3-31 Aerosol concentration after 40 s laser cleaning of stainless-steel (SS304) surface a) Uncoated; b) CeO₂ coated; c) ZrO₂ coated

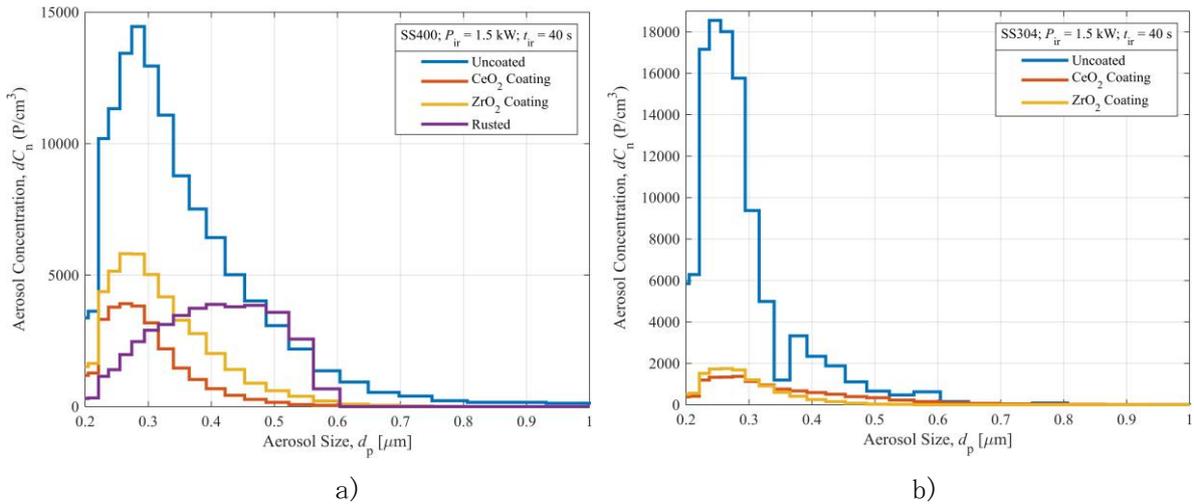


Fig.3-32 Aerosol concentration after 40 s laser cleaning at 1.5 kW laser power
 a) Carbon-steel (SS400) and b) Stainless-steel (SS304) surface

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【令和3年度～令和5年度】

モックアップ試験により得られた成果について、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最終評価を行い、改善点を提言した。

【令和4年度までの成果概要】

令和3年度では、各機関の進捗状況の確認を行い、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。また、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。各機関の進捗状況の確認を行い、各機関で実施した令和3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。さらに解決すべき課題、問題点を摘出し、令和4年度の計画に反映させた。

令和4年度では、令和3年度に引き続き各機関の進捗状況の確認を行い、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。また、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。各機関の進捗状況の確認を行い、各機関で実施した令和3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。さらに、解決すべき課題、問題点を摘出し、令和5年度の計画に反映させた。

【令和5年度実施内容及び成果】

令和5年度は、モックアップ試験により得られた成果について、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最終評価を行い、改善点を提言した。これまでに得られた廃炉現場への適用性の観点から具備すべき仕様、性能等の情報を整理した。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熔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。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」についての調査及び評価を行った。遠隔でレーザー除染する工法は、被ばく低減として有効性が示された。レー

ザーヘッド周りを「回収フード」で囲み強力に吸引回収することでダスト拡散防止とし、「タンク内」も負圧管理とした。圧力が、大気圧>タンク内>回収フード内となるように、タンク内を負圧にする吸引機と回収フードからダストを回収する吸引機の風量のバランスを調整することで、ダスト拡散防止措置として有効性が示された。本工法に関するさらなる検討項目として、フィルタの目詰まり対策が考えられる。除染対象面積が大きいと、レーザー除染作業中にフィルタにトラップされたダストにより目詰まりが生じ、圧力のバランスが狂う可能性がある。また、タンク1基あたりフィルタが廃棄物として約5 m³発生すると評価されており、さらなる廃棄物の低減も求められるであろう。本研究で開発しているミストでフィルタ層にトラップする技術は、乾式フィルタの交換頻度を低減させることに繋がり、フィルタの目詰まり防止及び廃棄物低減への有効策の1つと考えられる。

また、限られた試験期間で円滑に試験を実施し最大の成果を挙げるため、試験前にブリストル大を訪問して試験装置を確認し、さらにブリストル大学チームとのオンライン定期ミーティングを通じモックアップ試験装置の詳細仕様を確認した。確認した仕様を基に、アトックス側で必要な電気、圧縮空気、水、クレーン等の必要なユーティリティや試験サンプルを準備した。加えてモックアップ試験期間中の詳細試験工程もブリストル大学チームと協議し、試験で使用するレーザーのクラスに応じた保護具の準備やレーザー区画設定等の安全対策を実施した。

3.2.2 モックアップ試験【令和4年度～令和5年度】

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、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した。

【令和4年度までの成果概要】

令和4年度では、モックアップ試験の試験計画を準備した。また、解決すべき課題、問題点を摘出し、令和5年度の計画に反映させた。

【令和5年度実施内容及び成果】

モックアップ試験に向けて具体的な課題、問題点を摘出し、試験計画の準備を行った。また、日本側で開発したエアロゾル分散制御システムと、英国チームで開発した装置を用いたモックアップ試験を実施した。令和5年10月10日から10月20日にかけて、本研究の再委託先であるアトックスの技術開発センター大型実験棟に備わっている模擬ウェルにてモックアップ試験を実施した。アトックスは日本の原子力産業の創成期より半世紀以上に亘り原子力関連施設のメンテナンスを手掛けており、その経験に基づき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。

(1) 試験内容

① モックアップ試験装置

モックアップ試験で用いたレーザー除染システムはレーザー発振器、レーザースキャンヘッド、7軸ロボットアーム、マウントフレーム、吸盤とエア制御装置からなる真空吸着システム、ミスト生成・回収タンク等から構成される (Fig. 3-33)。

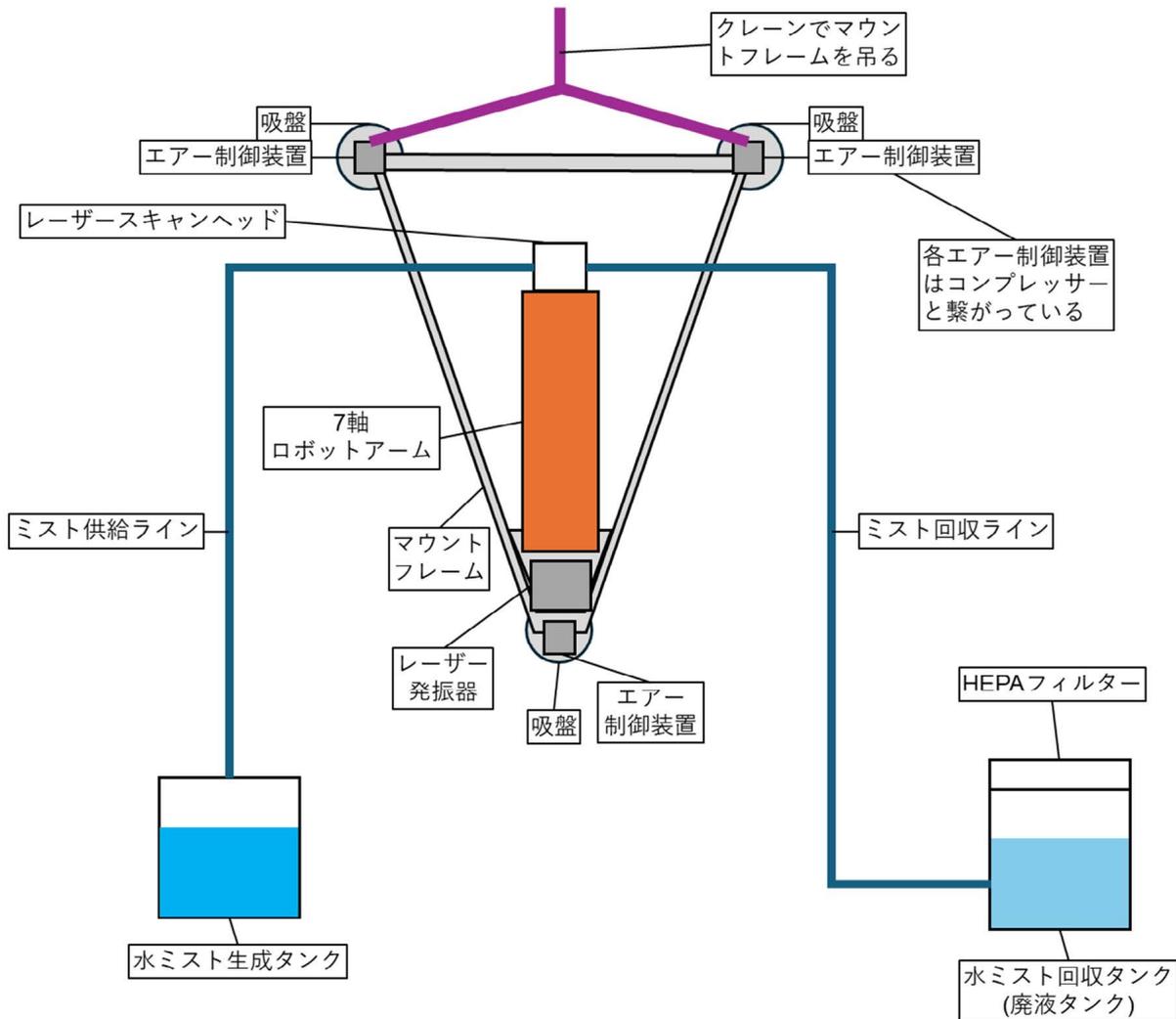


Fig. 3-33 モックアップ試験装置の概要

レーザーヘッドはロボットアームに取り付けられており、ロボットアームとレーザー発振器はマウントフレームに取り付けられている。マウントフレームは、壁面に安定して吸着可能な3点支持とするため三角形に構成されており、総重量は80 kg程度である。

マウントフレームをクレーンで吊り、レーザー照射対象壁面まで移動し吸盤を壁面に付着させる。その後、吸盤内に真空を発生させることで装置を壁面に吸着させ位置を固定する。位置の固定後、ロボットアームを操作することでレーザー照射箇所を制御する。マウントフレームを壁面に吸着させ固定させることで、ロボットアームはマウントフレームの外側にもアクセス可能であり、1回の位置決め設置で広範囲の除染が可能ないように設計されている。

真空吸着について、本試験装置は吸引ではなく圧縮空気を用いたベンチュリ効果により真空を発生させることで、汚染した空気を吸引し拡散してしまうことを防いでいる。

また、吸盤内真空圧のモニタリングシステムが搭載されており、真空度が下がった際に必要な分だけ追加で圧縮空気を送り込むシステムとなっている。この機能により、必要な圧縮空気量を最小限に抑えることが可能である。

レーザースキャンヘッドは3Dプリンターで作製されている。レーザー照射の際にはレーザースキャンヘッドを壁面と軽く接触させ、対象から反射したレーザーがヘッド内から外に出ることを防いでいる。

レーザー照射時にはレーザーヘッド内へミストを流しており、照射によって発生したエアロゾル粒子をミストで捕捉しミストごと回収し、エアロゾル粒子を回収タンクでトラップする仕組みとなっている。ミスト生成タンク内が陽圧、ミスト回収タンク内が陰圧に調整されており、その圧力差でミストを運搬する仕組みである。なお、ミスト回収タンクは水中でエアロゾル粒子を回収できなかった場合の対策として、タンク上部にHEPAフィルタを備えている。前述のロボットアーム操作やレーザー照射のON/OFFといったシステム制御は全てリモート制御が可能となっている。

② 試験場所

モックアップ試験は、アトックス技術開発センターの原子炉模擬ウェルにて実施した。原子炉模擬ウェルは原子炉の1/4カットモデルで、直径12m、深さ8mあり、110万kW級BWRの模型で、残りの2辺はPWRキャビティの壁面を模擬した構造物となっている。

③ 試験工程

モックアップ試験は、令和5年10月10日から10月20日にかけて実施した。期間内の工程をFig. 3-34に示す。

実施内容	10/8	10/9	10/10	10/11	10/12	10/13	10/14	10/15	10/16	10/17	10/18	10/19	10/20	10/21
	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土
装置組立														
床上での試運転														
装置の壁面取付確認														
レーザー照射試験														
片付け														

Fig. 3-34 モックアップ試験工程

④ 試験手順

レーザー照射試験の基本的な手順は、以下の通りである。

- 1) 原子炉模擬ウェル壁面に塗装や錆等の表面処理を施した金属板サンプルを取り付ける。
- 2) 大型実験棟のクレーンでマウントフレームを吊り上げ、原子炉模擬ウェル内部へ降ろす。
- 3) クレーンを操作し、マウントフレームの吸盤が原子炉模擬ウェル壁面に接するまで移動させる。
- 4) 吸盤が壁面に接したら圧縮空気を送りエア制御装置を作動させ、マウントフレームを原子炉模擬ウェル壁面に固定する。
- 5) 金属板サンプルに向け、レーザーを照射する。
- 6) 出力やスキャン回数等のパラメータを変更し、レーザー照射を繰り返す。

⑤ 試験対象

本モックアップ試験では、レーザー照射サンプルとして以下3種類の表面処理を施したサンプルを用意した。

- 1) CeO₂ 塗装
- 2) 鍍
- 3) 蛍光塗料塗装

CeO₂ 塗装サンプル及び鍍サンプルは、レーザー出力やスキャン回数等のパラメータを変更した際の剥離状況の変化を確認するため、蛍光塗料塗装サンプルはミストによるダスト回収及び回収タンクでのトラップ状況を確認するために用いた。

(2) 試験結果

CeO₂ 塗装サンプルへのレーザー照射試験の様子及び試験結果を Fig. 3-35 に示す。Fig. 3-35 では、レーザー出力とスキャン回数を変更させて計 25 条件でレーザー照射をした結果が、照射エリア毎に 5 行×5 列で示されている。

各行はレーザー出力が一定でスキャン回数を変更した照射エリアを示す。一方で、各列はスキャン回数が一定でレーザー出力を変更した照射エリアを示している。レーザー出力は、20 W を 100%として 10、25、50、75、100%の 5 種類、スキャン回数は 1、4、8、16、24 回の 5 種類である。

したがって Fig. 3-35 では、例えば一番左下の照射エリアはレーザー出力 10%、スキャン回数 1 回の照射結果を示している。レーザーのパルス周波数は全ての照射で 20 kHz である。Fig. 3-37 より、スキャン回数を増やすと塗装がより剥離していること、同じスキャン回数の場合はレーザー出力を上昇させると剥離量が増えること、レーザー出力が高すぎると金属板表面を酸化させ変色させてしまうことが確認できた。

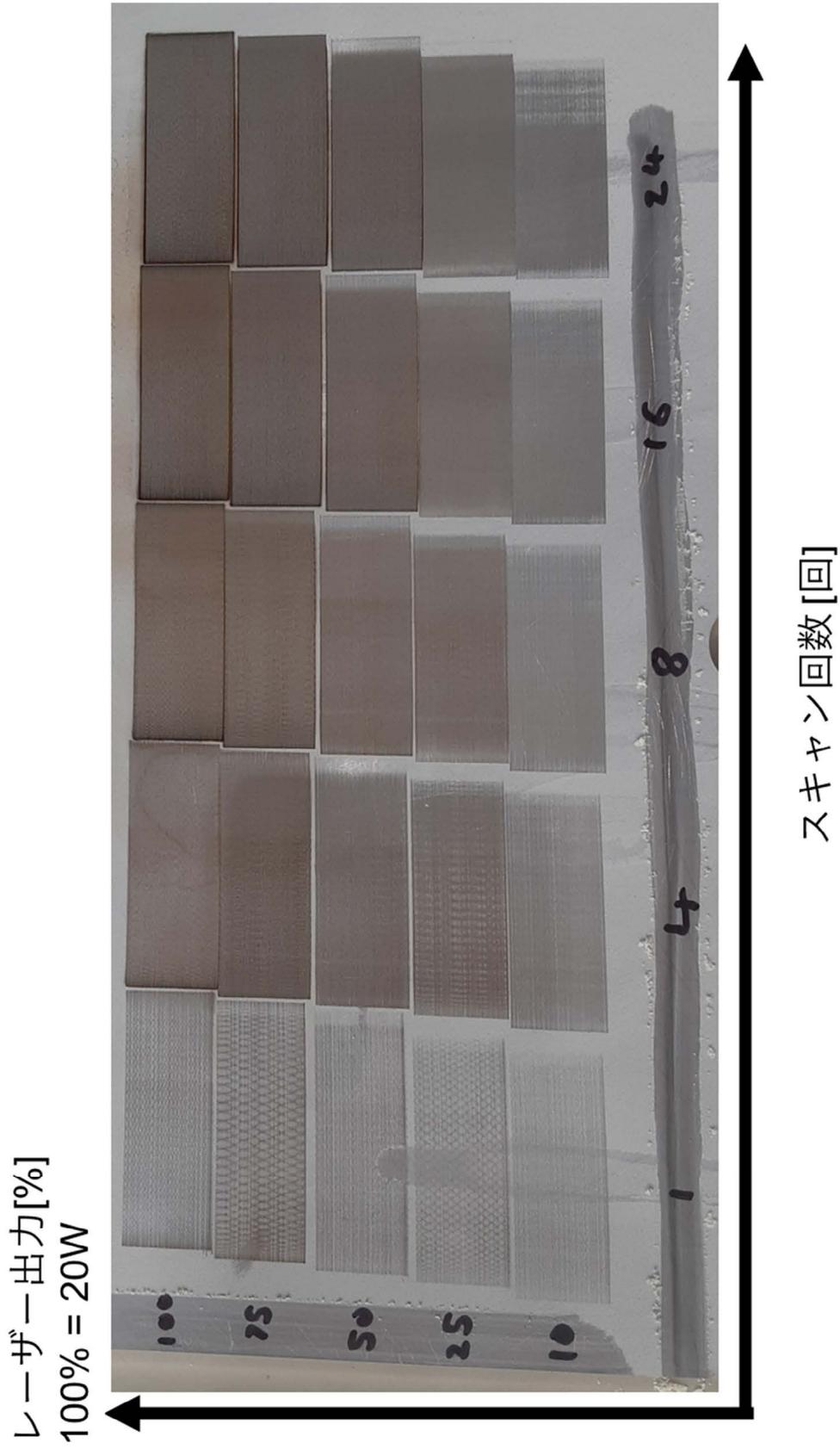


Fig. 3-35 CeO₂ 塗装サンプルへのレーザー照射結果

(3) 考察

① 現場の除染技術への適用の可能性

モックアップ試験では、レーザー出力やスキャン回数を変更した試験を複数回実施し、金属板上の塗装や錆が剥離できると及び剥離したダストが回収できることが確認できた。加えて、回収したダストが回収タンクでトラップされ、フィルタまで到達していないことが確認できた。これらの結果から、除染技術として適用の可能性を確認できたと言える。

また、本システムの特長の一つである「ミストを用いて放射性物質を回収し汚染拡大を防止する」という発想は、新規性及び独創性を持つものである。特に、ミストの流れ方向を除染対象面方向ではなく、ダストを吸引回収する空間内部を満たす方向とし、レーザー光とミストを直交させるという点に新規性・独創性がある。

放射線管理の観点から、汚染拡大を防止できるだけでも現場の放射線管理業務の負担低減につながると考えられる。

なお、本システムは原子炉建屋の壁面といった広範囲の除染への適用可能性よりも配管等の資機材除染への適用可能性が高いと感じた。今後さらに開発を進め、複雑な形状の資機材にも対応できるようになると本技術の活用幅が広がると思われる。

なお、本システムの除染効果と適用性を向上させる手法として、数百 kHz や MHz オーダーの高いパルス周波数を持つレーザーシステムの使用が考えられる。現在の 20 kHz のレーザーパルス周波数の 10 倍から 100 倍であり、処理速度の向上が期待される。

(4) システム改善への提案

① ミスト吸引回収効率

モックアップ試験では、レーザーヘッドが模擬ウェル底部に位置していたのに対し、ミスト吸引回収装置を建屋 1 階に設置していた。そのため吸引揚程が高く、ミストの吸引回収効率が低下してしまっていたのではないかと推測された。今後、吸引回収装置をレーザーヘッドに近い位置に設置するような装置設計・系統設計とすれば、ミスト吸引回収効率を上げ、ミストをより効率的にヘッドから漏らさず回収できると考えられる。

② スキャン面積・速度

実用化にあたっては、縦横方向それぞれスキャン幅を広げ、より広い面積の除染にも対応できるようにする必要があると考えられる。

③ レーザーヘッドの汚染面への付着

レーザーヘッドを壁面に付着させるシステムだが、それが壁面の汚染を引きずってしまう可能性があり、確認及び検討が必要だと考えられる。

④ ミストによるダスト回収システム（＝湿式の処理系）の必要性

英国での過去のレーザー除染試験にて発生した微粒子が、HEPA フィルタを一部すり抜けてしまう事象が発端となり、本ダスト回収システムを考案したとのことであった。そのため、HEPA フィルタでのダスト回収を前提としないシステムを作る、という発想は十分理解できるものである。

一方で、アトックスが実施した過去の HOT 試験や、大成建設株式会社による 1F でのレーザーによるタンク内面除染では、HEPA フィルタのみ（＝乾式の処理）で問題なく浄化ができていた。本システムの開発を進めていく上で、ミスト回収方式（＝湿式の処理）が必要な理由や採用した場合の利点についてより詳しい説明があると、理解が進み他技術との差別化を図れると考えられる。

⑤ 廃水処理方法

ミスト回収タンク内の廃水には、汚染核種や塗料成分等の様々な成分が含まれることとなり、廃水処理の方法について検討する必要があると考えられる。

3.3 英国側研究成果概要

Research Activities

Development of Mist Generation and Capture System

Continuing from a previous fiscal year's activities, a high-efficiency 400 W mist generator system was further engineered to optimize the laser cleaning process. Various mist generation techniques, including ultrasonic transducers, were evaluated. The selected system was identified as the most effective in producing a dense mist suitable for cleaning applications. This dense mist significantly enhances the interaction between the laser and contaminants, thereby improving the cleaning performance. To ensure a cleaner working environment, a mist capture system was further optimized from previous year's design to extract mist from the atmosphere. This system utilizes centrifugal forces alongside bubble filtration to effectively capture the generated mist, thereby minimizing potential hazards and enhancing overall safety.

In this fiscal year, with the cooperation of the University of Tokyo's research team, the laser header section design was further improved by adopting CFD analysis to optimize the mist injection and suction pipeline, and utilizing 3D printer to manufacture a laser header satisfying the design criteria determined from the CFD analysis. The original circular header design proposed in previous year was modified to rectangular shape to (1) conduct efficient line laser scanning, and (2) improve mist injection and collection within the header section. The outer edge of the header is equipped with a rubber material to completely seal the gap in between laser header and irradiated surface. This treatment will ensure that aerosols generated under laser irradiation will interact with the mist and none of the particulates will escape to the atmosphere.

A comprehensive study on robotic scan methodologies, encompassing both raster and Lissajous patterns, was carried out. These methodologies were integrated into a KUKA LBR iiwa 14 utilizing ROS 2 and Moveit 2, enabling the robot to adeptly scan surfaces during the cleaning process. The implementation of these advanced scanning techniques ensures a more efficient and thorough cleaning by minimizing redundant scanning operations. Optimizing the scanning process in this manner significantly enhances the overall cleaning efficiency and effectiveness.

In order to optimize the laser header design coupled with an aerosol collection system using water mist, CFD analysis was carried out to assess the fluid flow distribution within the chamber. STAR-CCM+ was utilized to conduct the calculation. Polyhedral and prism layer meshes with 0.1 mm cell size was utilized to create the calculation domain. The velocity field results showed that flow tends to be centralized within the chamber, and potential generation of negative pressure zone near the corner section became concern. In order to resolve the issue, the header design was further modified by adopting curved edge. This modification was applied and manufactured using a 3D printer.

From the additional CFD analysis, significant improvement on velocity field within the header chamber was confirmed due to the modification, and it was selected as the final design for the mockup experiment in ATOX. A mounting rig for the KUKA system was completed in this fiscal year, inspired by observations from the Kashiwa facility, to prepare for the mockup experiment. This rig is suspended from a crane and lowered into the Reactor Pressure Vessel (RPV) mockup in October 2023. A custom laser cleaning head and various characterization tools will be attached to the KUKA system's toolhead. To ensure stability, pneumatic suction cups will secure the rig to the side of the RPV. The design of this rig leverages the craning systems commonly found in nuclear sites, enabling the effective deployment of the OptiClean solution.

During the mockup experiment in October 2023, the team from Bristol assembled above mentioned system in ATOX facility, located in Kashiwa, Japan. The low-power pulsed laser at the end of a robotic arm was assembled, and a supporting frame that can be craned into the damaged reactors from above was installed at ATOX facility. Industrial suction cups secure the frame to the reactor surface, stabilizing the robotic arm in a fixed position. This setup enables the laser to clean complex surfaces efficiently without harming the underlying steel structure, thereby minimizing waste. ATOX provided a full-scale mock-up of the Fukushima reactor, allowing the team to test the robotic system and experiment with different parameters in a controlled environment. To prevent contamination of the surrounding atmosphere, an ultrasonic device was used to create a water mist, which was directed past the laser beam to mix with the displaced particles. These particles were then extracted to a separate containment vessel. The University of Tokyo team focused on fluid dynamic modeling to optimize the mist generation system and its flow path around the laser beam. The mockup experiment facilitated a successful demonstration of the robotic arm's capability to clean rusty surfaces without damaging the underlying steel. It also showcased the robot's ability to securely attach to the smooth walls of the reactor chamber.

3.4 研究推進

令和5年度は、受託研究機関の下で各研究項目ならびに CLADS 等との連携を密にし、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合せに加え、英国側との Joint Meeting を定期的開催した。

●Japan-UK Joint Meeting

【期間】 令和5年4月14日（金）

【場所】 Teams

【出席者】・ University of Bristol : Tom Scott、David Magson-Smith、Jon Day
 ・ Imperial College : Yannis Hardalupas
 ・ 東大 : 三輪 修一郎、鈴木 俊一、Marco Pellegrini、Avadhesh Sharma
 ・ 原子力機構 : 小菅 淳
 ・ アトックス : 田沢 周作

●Japan-UK Joint Meeting

【期間】 令和5年6月9日（金）

【場所】 Teams

【出席者】・ University of Bristol : Tom Scott、David Magson-Smith
 ・ Imperial College : Yannis Hardalupas
 ・ 東大 : Avadhesh Sharma
 ・ アトックス : 田沢 周作

●Japan-UK Joint Meeting @ U. Bristol

【期間】 令和5年7月25日（火）

【場所】 University of Bristol

【出席者】・ University of Bristol : Tom Scott、David Magson-Smith
 ・ 東大 : 三輪 修一郎
 ・ アトックス : 柴田 浩平

●Japan-UK Joint Meeting @ Imperial College

【期間】 令和5年7月27日（木）

【場所】 Imperial College

【出席者】・ Imperial College : Yannis Hardalupas
 ・ 東大 : 三輪 修一郎

●Japan-UK Joint Meeting

【期間】 令和5年8月4日（金）

【場所】 Teams

【出席者】・ University of Bristol : Tom Scott、David Magson-Smith
 ・ Imperial College : Yannis Hardalupas
 ・ 東大 : Avadhesh Sharma
 ・ アトックス : 田沢 周作

4. 結言

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に役立てることを実施している。

令和 3 年度は、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。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を使用してレーザー除染の実験を実施した。

令和 4 年度は、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。

以下に、3 カ年計画の 3 年目である令和 5 年度の業務実績を記す。

(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

- ・ UTARTS 施設において加工用レーザーのパラメータを制御することで、エアロゾル生成への影響を評価した。

加工用レーザーの強度を少しずつ変化させた上で、UTARTS 施設内に設置したサンプルより生成されるエアロゾル粒子の挙動ならびに粒径分布の影響を調査した。レーザーのパラメータとエアロゾルの発生に関連性があることが、実験的に示された。

- ・ 令和 4 年度の試験結果に基づき、放射線誘発表面電荷に改良を加えたミストならびにスプレーを使用して試験を行った。

異なる電荷をスプレーに付与するため、新たな電極の設計を行った。異なる内径の電極を連結させる構造がエアロゾル除去の効率上昇につながることを実験的に示した。

- ・ 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。

汎用 CFD ソフトウェアである STAR-CCM+ 使用し、既存の UTARTS 設備を模擬したメッシュ構造を改良し、スプレーとエアロゾルの挙動を数値的に検証した。実験で得られた除去効率値と比較し、CFD に搭載されているモデルの信頼性は概ね妥当であることが示された。

② データ評価（連携先：原子力機構）

- ・ 原子力機構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うとともに、実機適用に関する助言を行った。

原子力機構では、高出力レーザーを用いた表面除染実験の経験があることから、UTARTS の実験に対しどのようなポスト処理や解析が妥当であるか等の情報共有があった。

(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

・モックアップ試験により得られた成果について、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最終評価を行い、改善点を提言した。

アトックスにある BWR ウェル部を模擬した施設において、モックアップ試験を実施した。アトックスがこれまでに手掛けた廃炉関係のプロジェクトやロボット技術の知見から、現場の観点から様々な提言が共有された。

② モックアップ試験

- ・モックアップ試験に向けた具体的な課題、問題点を摘出し、試験計画を準備した。
- ・日本側で開発したエアロゾル分散制御システムと英国チームで開発した装置を用いたモックアップ試験を行った。

当初の計画通り、最終年度後半にモックアップ試験を英国チームと実施した。英国チームのロボットを日本にて動かす準備を行うにあたり、アトックス施設を使用する上で必要な改良点や修正点が事前に共有された。本モックアップ試験では、日本側で開発したミスト生成機構をレーザーヘッド部に取り入れるとともに、除染部に逆流等が生じることがないように、事前に CFD 解析を複数回実施し、ヘッダーの設計を最適化させた上でモックアップ試験を実施した。

(3) 研究推進

研究代表者の下で、各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして研究を進めた。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合せを実施した。英国チームとは Teams を用いたオンライン会議を定期的実施し、英国側の課題やモックアップ試験に向けたマイルストンの確認等、効率的に行うことができた。

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

本事業により確立した技術を福島第一原子力発電所の廃炉へ適用を検討する際、以下のポイントが重要となると考えられる。

- 解体作業を進める上で、操作自由度が比較的に高いレーザー除染・切断技術は重要な役割を担うものと考えられる。
- 除染時に想定されるエアロゾル粒子は、従来のフィルタでは捕捉が困難なグリーンフィールドギャップ範囲のものも含まれており、エアロゾル捕獲が確実に遂行可能な体系の構築が重要となる。
- 本事業により得られた結果に示された通り、多角ノズルを用いた水噴流によるエアロゾル捕獲は、除去性能としては効果的である反面、多量の汚染水を発生させてしまう懸念がある。ミストを用いた凝集に重点を置き、フィルタにて捕獲する手法も効果的かと考える。
- 電荷を有した噴流・ミストによるエアロゾル除去については、ラボスケールでの効果は本事業にて確認できたが、実規模のスケールでの性能についても検証を行い、廃炉作業への適用可能性を継続して調査する必要がある。
- レーザー除染によるエアロゾル発生機構を CFD 等で計算する際は、初期条件（レーザー出力、口径等）の付与が重要となる。この点に関しては、基礎実験を継続し、レーザー出力とエアロゾル濃度の関係性を定量的に見出す必要があると考える。

最終年度は、本事業のフィナーレである日英共同でのモックアップ試験が最大のテーマとなっており、研究計画表を参考に2年間の歳月をかけて準備を積み重ねてきた。モックアップ試験を令和5年度秋ごろに計画通りに実施することができるよう、日英双方で複数回の現地ミーティングを行い、実物のロボットを動かしながらモックアップ試験時に想定される課題を抽出・解決する作業を複数回繰り返す等、入念な調整が行われた。本試験を成功裏に終えることができたのは、各機関の技術（東大とインペリアル大のエアロゾル捕捉技術、原子力機構のレーザー除染技術、ブリストル大学とアトックスのロボット応用技術）によるシナジー効果に加え、3年間かけて築いた日英チーム双方の信頼関係と、円滑なコミュニケーションによる結果であったと考える。特に、英国チームの研究推進体制は、日本の組織とは異なるアプローチを有しており、参考となる気付きが多々あった反面、日本国内の研究体制の長所が再確認できた面もあった。このような「気付き」とそれにより生まれる新たな「着想・発想」こそが、本二国間事業により得られた最大の成果ではないかと考える。

This is a blank page.

