



高線量かつ不可視環境下での炉内可視化を可能とする
レーザー偏向検出型超音波広帯域3Dイメージングシステムの開発
(委託研究)

— 令和6年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 —

Development of a Laser Deflection-type Ultrasonic Wideband 3D Imaging System
for In-vessel Visualization in High-radiation and Non-visible Environments
(Contract Research)

– FY2024 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
東京科学大学

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

June 2026

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
原子力科学研究所 プロモーション・オフィス 科学技術情報課
〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4
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, Promotion Office, Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

高線量かつ不可視環境下での炉内可視化を可能とするレーザ偏向検出型超音波広帯域
3D イメージングシステムの開発
(委託研究)

—令和6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

東京科学大学

(2026年3月9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、令和元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、さまざま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・基盤的研究およ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6年度に採択された研究課題のうち、「高線量かつ不可視環境下での炉内可視化を可能とするレーザ偏向検出型超音波広帯域3Dイメージングシステムの開発」の令和6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、デブリ切り出し作業の安全性を最大限保証するため、作業中におけるダストおよび濁水環境下での炉内構造物／燃料デブリ形状および飛散物の可視化を数メートルオーダーの距離で可能とし、ロボットや作業アームへの搭載を鑑みて、小型かつ可搬性に優れた超音波装置を用いたレーザ偏向検出型超音波広帯域3Dイメージングシステムの開発を目的としている。令和6年度は、超音波イメージングシステムのイメージング性能評価および高度化／高速化検討、数値シミュレーション、システム試作と実スケール検証、耐放射線性検証、超音波サブミリ測距システムの構築、LIBSへの超音波サブミリ測距システムの適用、計測システムのバッテリー駆動遠隔化などを行い、本報告書に取りまとめた。

本報告書は、日本原子力研究開発機構の英知事業における委託業務として、東京科学大学が実施した成果を取りまとめたものである。

廃炉環境国際共同研究センター：〒979-1151 福島県双葉郡富岡町大字本岡字王塚 790-1

Development of a Laser Deflection-type Ultrasonic Wideband 3D Imaging System
for In-vessel Visualization in High-radiation and Non-visible Environments
(Contract Research)

— FY2024 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

Institute of Science Tokyo

(Received March 9, 2026)

The Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), Japan Atomic Energy Agency (JAEA), has been conducting the Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project (hereafter referred to “the Project”) from FY2019.

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 FY2024, this report summarizes the research results of the “Development of a laser deflection-type ultrasonic wideband 3D imaging system for in-vessel visualization in high-radiation and non-visible environments” conducted in FY2024.

The present study aims to maximize the safety of debris-cutting operations by enabling visualization of in-vessel structures, fuel debris shapes, and scattered particles at distances on the order of several meters, even under dusty and turbid water conditions during work. To achieve this, a compact and portable ultrasonic device suitable for mounting on robots and manipulator arms is employed to develop a laser deflection-type ultrasonic wideband 3D imaging system. In FY2024, the project carried out imaging performance evaluation and studies for the advancement and acceleration of the ultrasonic imaging system, numerical simulations, prototyping and full-scale verification of the system, radiation resistance tests, construction of a sub-millimeter ultrasonic ranging system, application of the ultrasonic sub-millimeter ranging system to LIBS, as well as battery-powered remote operation of the measurement system. These outcomes are summarized in this report.

Keywords: Decommissioning, 3D Imaging, High-radiation, Non-visible Environments, Laser Deflection

This work was performed by Institute of Science 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
8. 令和 6 年度 採択課題	16
付録 成果報告書	19

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
8. Accepted Proposal in FY2024.....	16
Appendix Result Report	19

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 (～R6. 3. 31) 北川 祐一 (R6. 4. 1～)	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）

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
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

8. 令和6年度 採択課題

令和6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6年3月1日～令和6年4月25日（課題解決型）

令和6年1月17日～令和6年4月17日（研究人材育成型）

課題数：9 課題

研究人材育成型廃炉研究プログラム 2 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 7 課題

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6年度 採択課題一覧

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に向けた遠隔ロボット-計測技術の統合のための研究教育人材育成	斉藤 拓巳	東京大学
燃料デブリ研究と SEEM 学構築を基軸とした研究人材育成	渡邊 豊	東北大学

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
高放射線耐性を有する無線データ伝送用チップセットの要素開発(ベースバンド回路開発)	宮原 正也	高エネルギー加速器研究機構
高放射線耐性を有する無線データ伝送用チップセットの要素開発(高周波アナログ回路開発)	白根 篤史	東京工業大学
高線量かつ不可視環境下での炉内可視化を可能とするレーザ偏向検出型超音波広帯域 3D イメージングシステムの開発	木倉 宏成	東京工業大学
視界不良・高線量下での空間認識のための超音波可視化技術	林 高弘	大阪大学
耐放射線性を有するレーザスキャナと AI・画像処理による 3D モデリング法の開発	福田 知弘	大阪大学
データ駆動型オンサイト診断技術:長期的健全性を確保するための微生物腐食リスク予測	若井 暁	海洋研究開発機構
デブリ取り出しの安全性確保を目的とした中性子源等のイメージング手法の研究	松林 錦	京都大学

本報告書は、以下の課題の令和6年度分の研究成果について取りまとめたものである。

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
高線量かつ不可視環境下での炉内可視化を可能とするレーザ偏向検出型超音波広帯域3Dイメージングシステムの開発	木倉 宏成	東京工業大学

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 6 年度

日本原子力研究開発機構

英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

高線量かつ不可視環境下での炉内可視化を
可能とするレーザ偏向検出型超音波広帯域

3D イメージングシステムの開発

(契約番号 R06I102)

成果報告書

令和 7 年 3 月

国立大学法人東京科学大学

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、東京科学大学が実施した「高線量かつ不可視環境下での炉内可視化を可能とするレーザ偏向検出型超音波広帯域 3D イメージングシステムの開発」の令和 6 年度分の研究成果を取りまとめたものである。

目次

概略	vi
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	2-1
2.1 全体計画	2-1
2.2 実施体制	2-2
2.3 令和6年度の成果の目標および業務の実施方法	2-3
3. 実施内容および成果	3-1
3.1 超音波イメージングシステムの開発	3-1
3.1.1 イメージング性能評価および高度化/高速化検討（再委託先：室蘭工業大学）	3-1
3.1.2 超音波数値シミュレーション（再委託先：エネルギー総合工学研究所）	3-6
3.1.3 システム試作と実スケール検証	3-10
3.2 計測システムの実用化検討	3-19
3.2.1 超音波イメージングシステムの耐放射線性検証	3-19
3.2.2 超音波サブミリ測距システムの構築（再委託先：室蘭工業大学）	3-21
3.2.3 LIBS への超音波サブミリ測距システムの適用（連携先：原子力機構）	3-23
3.2.4 計測システムのバッテリー駆動遠隔化（再委託先：玉浦ラボ）	3-26
3.3 研究推進	3-29
4. 結言	4-1
参考文献	5-1

執筆者リスト

研究代表者

国立大学法人東京科学大学	准教授	木倉 宏成
--------------	-----	-------

再委託先

国立大学法人室蘭工業大学	助教	荘司 成熙
--------------	----	-------

一般財団法人エネルギー総合工学研究所	主管研究員	都築 宣嘉
--------------------	-------	-------

合同会社玉浦ラボ	代表社員	玉浦 裕
----------	------	------

連携先

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構		狩野 貴宏
---------------------	--	-------

表一覧

表 2-1 全体計画表	2-1
表 2-2 月別年間計画表	2-3
表 3-1 計算サーバの主な仕様	3-7
表 3-2 超音波トランスデューサ条件	3-13
表 3-3 レーザ光源波長	3-13
表 3-4 可搬型 LIBS システムの電力仕様	3-25
表 3-5 LIBS システムの運転条件と消費電力・バッテリー重量	3-27
表 3-6 搬送車と測定装置を含めた可動範囲 10 m での稼動条件	3-27
表 3-7 電子基板の耐放射線性の検討	3-27
表 3-8 耐放射線性試験に使用した市販バッテリーの基本性能	3-28
表 3-9 市販バッテリーの耐放射線性試験の結果	3-28

図一覧

図 2-1	実施体制図	2-2
図 3-1	水中用 LDER.....	3-1
図 3-2	LDER 受信指向性.....	3-2
図 3-3	発散波生成水中用超音波送信プローブ	3-3
図 3-4	発散波伝搬シミュレーション結果	3-3
図 3-5	水中イメージング基礎システムおよび性能評価環境	3-4
図 3-6	LDER-DWI における座標系.....	3-5
図 3-7	LDER-DWI による物体形状イメージング実験体系およびイメージング結果	3-6
図 3-8	超音波伝搬挙動計算 計算形状	3-7
図 3-9	SWAN21 による超音波伝搬挙動計算.....	3-8
図 3-10	凸型発信振動子の場合の計測点 1 および 7 での x、y 変位	3-9
図 3-11	平面型発信振動子の場合の計測点 1 および 7 での x、y 変位	3-10
図 3-12	改良した中規模モックアップ試験設備	3-11
図 3-13	光音響プローブシステム構築図	3-12
図 3-14	光音響プローブを用いた水中/気中専用超音波イメージングシステム	3-12
図 3-15	光音響プローブシステム実際の測定環境	3-12
図 3-16	固体型光音響プローブ	3-14
図 3-17	開放型光音響プローブ	3-14
図 3-18	超音波周波数 1 MHz で素子径を変化させた際の超音波音圧分布	3-15
図 3-19	前項で使用した水中用超音波トランスデューサの超音波音圧分布	3-15
図 3-20	素子径と各地点最大音圧の関係	3-16
図 3-21	前項で使用した水中用超音波トランスデューサと各地点最大音圧の関係.....	3-16
図 3-22	光音響プローブシステムによって受信された液体中を伝播する超音波信号....	3-17
図 3-23	光音響プローブシステムで受信された信号のフーリエ変換スペクトル	3-17
図 3-24	東京科学大学が有する模擬実験施設	3-18
図 3-25	楢葉の実験水槽で行った設置テスト	3-18
図 3-26	試作した耐放射線性検証用の超音波センサおよび光音響プローブ	3-19
図 3-27	耐放射線性を測定するシステム	3-20
図 3-28	測定距離と放射線量との関係（令和 6 年 8 月時点）	3-20
図 3-29	超音波サブミリ測距基盤システム	3-21
図 3-30	超音波測距ソフトウェアの表示例	3-21
図 3-31	波形立ち上がり時間の検出	3-22
図 3-32	測距性能検証実験	3-22
図 3-33	測距結果	3-22
図 3-34	超音波測距におけるセンサ形状の影響	3-23
図 3-35	制御対象の電動ステージ	3-24
図 3-36	動作確認に用いた模擬データ（左図）と模擬データの 3 次元イメージ（右図）	3-24
図 3-37	各イベントにおける消費電力	3-25

略語一覧

CLADS	: Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science	(廃炉環境国際共同研究センター)
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)
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	
UVP	: Ultrasonic Velocity Profiler	(超音波流速分布計測法)
eUVP	: educational UVP	(教育用超音波流速分布計測システム)
LIBS	: Laser Induced Breakdown Spectroscopy	(レーザ誘起ブレイクダウン分光法)
LDER	: Laser-Deflection-based Echo Receiver	(レーザ偏向式エコー受信装置)
PAI	: Phased Array Imaging	(位相配列超音波イメージング)
FMC	: Full Matrix Capture	(全マトリクス信号収集法)
TFM	: Total Focusing Method	(全領域焦点化法)
PWI	: Plane Wave Imaging	(平面波イメージング)
DWI	: Diverging Wave Imaging	(発散波イメージング)
DAS	: Delay-And-Sum	(遅延和)
CF	: Coherence Factor	(コヒーレンス係数)
CCF	: Circular CF	(円形コヒーレンス係数)
GUI	: Graphical User Interface	(グラフィカルユーザインタフェース)
APD	: Avalanche Photodiode	(雪崩型光ダイオード)
NIR	: Near Infrared Ray	(近赤外線)
TOFD	: Time Of Flight Diffraction	(TOFD 法)
LFP	: Lithium Ion Phosphate	(リン酸リチウムイオン)
東京科学 大学	: 国立大学法人東京科学大学	
室蘭工業 大学	: 国立大学法人室蘭工業大学	
エネルギー総 合工学研究所	: 一般財団法人エネルギー総合工学研究所	
玉浦ラボ	: 合同会社玉浦ラボ	

概略

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。）の廃炉に関しては、未だにさまざまな技術的課題が残されている。そのなかでも炉内における燃料デブリの切り出し作業の安全な遂行のためには、作業中に発生するダストや濁水環境下でも状況を正確に把握できる技術の確立が不可欠である。しかしながら、現行の炉内モニタリング技術では視界不良下での構造物や飛散物の検知が困難であり、作業中のリスク管理に課題が残る。

これまで 1F 廃炉に向けたさまざまな技術研究を行っており、既に基礎開発が終わった技術も存在している。その一例として、イメージング性能の大幅な向上を目指し、レーザ光と超音波の相互作用を利用した新しい超音波信号受信手法である光音響プローブが開発された。光音響プローブは従来の光音響効果とは異なり、超音波（疎密波）によって生じるレーザ光の偏向現象を利用して光波により音波を検出する装置である。超音波による疎密波によってレーザ光が偏向する現象を利用し、従来の超音波振動子では実現しえなかった超広角・広帯域の瞬時超音波受信を原理レベルで実現しており、これにより従来の超音波センサのみでは実現不可能な距離における高解像イメージング画像を取得する可能性が示されている。

一方、現段階において光音響プローブを実際の炉内環境を想定した数メートル規模の距離における高精度モニタリングには、さらなる性能向上とシステム統合が必要である。また、デブリ周囲の元素分布把握に向けた LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) 技術との連携、自動焦点調整機能の実装、さらにはバッテリー駆動による遠隔化技術、そして、放射線環境下での耐久性検証についても、今後の研究開発課題として残されている。

かかる状況下、本研究では「高線量かつ不可視環境下での炉内可視化を可能とするレーザ偏向検出型超音波広帯域 3D イメージングシステムの開発」と題して、国立大学法人室蘭工業大学（以下、「室蘭工業大学」と略す。）、一般財団法人エネルギー総合工学研究所（以下、「エネルギー総合工学研究所」と略す。）、合同会社玉浦ラボ（以下、「玉浦ラボ」と略す。）、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。）との共同研究体制を構築し、レーザ偏向検出型超音波広帯域 3D イメージング技術の実用化に向けた基礎性能評価、耐放射線性検証、LIBS 連携技術の開発、小型高性能バッテリーによるシステム遠隔化に取り組む。

本研究においては、デブリ切り出し作業の安全性を最大限保証するため、作業中におけるダストおよび濁水環境下での炉内構造物／燃料デブリ形状および飛散物の可視化を数メートルオーダーの距離で可能とし、ロボットや作業アームへの搭載を鑑みて小型かつ可搬性に優れた超音波装置を用いたレーザ偏向検出型超音波広帯域 3D イメージングシステムの開発を目的とする。さらに、それらを実際の事故炉心で使用することを鑑み、元素分布の分析を可能とする LIBS と分析効率を上げるためのサブミリオーダーでの測距技術の開発、さらには遠隔計測のための小型高性能バッテリーの開発を含め、数百 Gy/h の環境で動くことを前提に耐放射線性の確認と放射線防護対策を検討することを目的とし、令和 6 年度から令和 8 年度までの 3 年間の研究期間を通して目的を達成する。

1 年目として令和 6 年度は、超音波イメージングシステムの開発に向けて、イメージング性能評価および高度化／高速化検討については、既存の光音響プローブを用いた超音波イメージング基礎システムにおける、計測可能距離や解像度などのイメージング性能を評価するための実験環境および装置を構築した。超音波周波数や受信点数などが上記イメージング性能へ与える影響を構築する実験装置を用いて評価した。また、性能向上に向けた課題点を抽出・整理した。超音波数値シミュレーションについては、超音波伝搬シミュレーションソフトウェアを活用し、超音波イメージングシステムの基礎設計やイメージング試験結果の検証を行い、システム構成や試験結果の妥当性を示した。システム試作と実スケール検証については、光音響プローブを用いた水中

／気中それぞれの専用超音波イメージングシステムを開発・試作し、その送信側超音波センサの形成音場特性や受信側超音波プローブの特性などのセンサ性能を評価し明らかにした。また、超音波イメージングシステムの実規模における実用化を検討するため、国立大学法人東京科学大学（以下、「東京科学大学」と略す。）が有する設備を改良した模擬施設にて実験を行った後、原子力機構櫛葉遠隔技術開発センターにおける大型水槽試験場を活用し、オンサイト遠距離イメージング試験を行い、実用化に向けた課題を整理した。計測システムの実用化検討に向けて、超音波イメージングシステムの耐放射線性検証については、超音波センサおよび超音波プローブの耐放射線性を明らかにした。超音波サブミリ測距システムの構築については、近距離場において超音波によるサブミリオーダー測距を実現するため、超音波周波数や振動子サイズによる計測精度への影響を考慮したセンサ条件を選定するとともに、LIBSにおける焦点距離調整への応用を考慮したセンサ形状を設計した。LIBSへの超音波サブミリ測距システムの適用については、超音波イメージングシステムで取得した測定対象物の3次元データを想定し、電動ステージ制御による形状再現確認の基礎試験を実施した。また、LIBSシステムのバッテリー駆動化に向け、各機器の電力仕様を抽出整理し必要なバッテリー仕様を決定した。計測システムのバッテリー駆動遠隔化については、超音波イメージングシステムおよびLIBSシステムのバッテリー駆動化について、必要バッテリー性能を整理するとともに、バッテリーの耐放射線性について検証し明らかにした。

以上より、1年目として令和6年度の業務項目を実施し、所期の目標を達成した。

令和7年度は、上述の令和6年度で得た成果・知見を活かして、超音波イメージングシステムの開発、計測システムの遠隔化および耐放射線性検証を推進する。

1. はじめに

1Fの廃炉作業においては、依然として多くの技術的課題が残されており、とりわけ炉内燃料デブリの切り出し作業を安全に実施するためには、作業中に発生するダストや濁水環境下でも正確な状況把握が可能な技術の確立が重要となる。しかし、現在の炉内モニタリング技術では、視界不良の環境下で構造物や飛散物を的確に検知することが難しく、作業時のリスク管理に課題が残されている。これに対し、1F廃炉に向けたさまざまな技術開発が進められており、既に基礎開発を完了した技術も存在する。その一例として、イメージング性能の大幅な向上を目指し、レーザー光と超音波の相互作用を利用した新しい超音波信号受信手法である光音響プローブが開発された。光音響プローブは従来の光音響効果とは異なり、超音波（疎密波）によるレーザー光の偏向現象を検出することで音波情報を取得する装置である。この方式により、従来の超音波振動子では実現できなかった超広角・広帯域での瞬時超音波受信を原理的に可能とし、これまで到達できなかった距離においても高解像度のイメージング画像を得る可能性が示されている。

そこで、本研究では「高線量かつ不可視環境下での炉内可視化を可能とするレーザー偏向検出型超音波広帯域3Dイメージングシステムの開発」と題する研究を立ち上げ、デブリ切り出し作業の安全性を最大限保証するため、作業中におけるダストおよび濁水環境下での炉内構造物／燃料デブリ形状および飛散物の可視化を数メートルオーダーの距離で可能にするため、令和6年度から令和8年度までの3年間の研究期間を通して、3次元的かつ広域な超音波イメージング領域を生成する周波数多重化超音波送信センサおよびレーザーによる超音波検出法であり、高解像画像化を実現する光音響プローブを組み合わせたレーザー偏向検出型超音波広帯域3Dイメージングシステムを開発する。また、その計測技術をデブリ中の元素分布調査を可能とするLIBSに組み合わせることにより遠隔自動焦点調整を可能とする。さらに、上記の超音波およびLIBS計測をサポートする小型高性能バッテリーを組み合わせ、超音波システムおよびバッテリーの耐放射線性検証を東京科学大学コバルト照射施設等で行うことで、1Fの事故炉心周辺を想定した環境下でも実働する遠隔計測装置の構築をする。

以上の計測技術を室蘭工業大学、エネルギー総合工学研究所、玉浦ラボ、原子力機構とで協働して開発することで、1F廃炉に資する研究を行うことが本事業の目的である。

2. 業務計画

2.1 全体計画

本研究では、3 年を通して研究課題達成のため、大別して二つの研究項目と研究推進を設定する。各項目における研究を遂行することで、本研究におけるリアルタイム長距離高解像3次元超音波イメージングシステムと炉内環境下における状況把握を実現する。

本業務の全体計画表を表 2-1 に示す。本業務では、令和6年度から令和8年度までの3年間の研究期間を通して上述の目的を達成する。

表 2-1 全体計画表

項目	年度	令和6年度	令和7年度	令和8年度
(1) 超音波イメージングシステムの開発	①イメージング性能評価および高度化/高速化検討 (室蘭工業大学)	性能評価試験	センサ改良と信号処理高度化	センサおよび信号処理改良
	②超音波数値シミュレーション (エネルギー総合工学研究所)	環境構築とセンサ設計	試験結果妥当性検証	試験結果妥当性検証
	③システム試作と実スケール検証 (東京科学大学)	設備改良とシステム試作	センサシステム試作と検証試験	実用化試験と課題整理
(2) 計測システムの実用化検討	①超音波イメージングシステムの耐放射線性検証 (東京科学大学)	実験準備	計測システムの耐放射線性検証	システム改良と検証試験
	②超音波サブミリ測距システムの構築 (室蘭工業大学)	システム設計	システム試構築と性能評価	システム改良
	③LIBSへの超音波サブミリ測距システムの適用 (原子力機構)	システム設計	システム統合化検討	システム統合化と影響評価
	④計測システムのバッテリー駆動遠隔化 (玉浦ラボ)	必要バッテリー仕様整理	バッテリーの耐放射線性検証	計測システムとの統合試験
(3) 研究推進 (東京科学大学)	課題整理・技術評価委員会開催	△	課題解決法整理・技術評価委員会開催	△
	報告書作成	△	報告書作成	△

2.2 実施体制

実施体制を図 2-1 に示す。

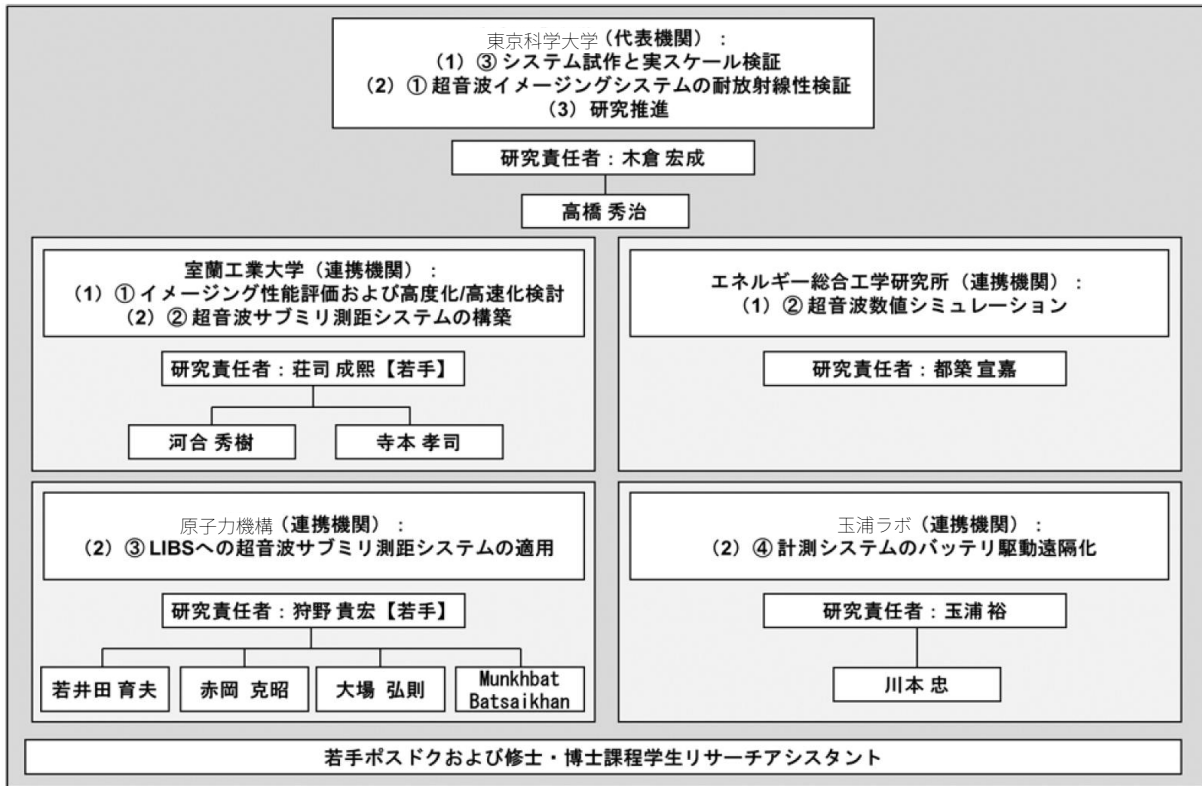


図 2-1 実施体制図

2.3 令和6年度の成果の目標および業務の実施方法

令和6年度の計画概要は以下のとおりとする。令和6年度の本業務の月別年間計画表を表2-2に示す。

表 2-2 月別年間計画表

実施日程	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
(1) 超音波イメージングシステムの開発	試験環境構築および性能評価試験						
① イメージング性能評価および高度化/高速化検討 (室蘭工業大学)	←		→			←	
② 超音波数値シミュレーション (エネルギー総合工学研究所)	←		→			←	
③ システム試作と実スケール検証 (東京科学大学)	←		→			←	
(2) 計測システムの遠隔化および耐放射線性検証	計画策定						
① 超音波イメージングシステムの耐放射線性検証 (東京科学大学)	←		→			←	
② 超音波サブミリ測距システムの構築 (室蘭工業大学)	←		→			←	
③ LIBSへの超音波サブミリ測距システムの適用 (原子力機構)	←		→			←	
④ 計測システムのバッテリー駆動遠隔化 (玉浦ラボ)	←		→			←	
(3) 研究推進 (東京科学大学)	課題整理・技術評価委員会開催						
	←		→			←	

(1) 超音波イメージングシステムの開発

① イメージング性能評価および高度化/高速化検討 (再委託先：室蘭工業大学)

既存の光音響プローブを用いた超音波イメージング基礎システムにおける、計測可能距離や解像度などのイメージング性能を評価するための実験環境および装置を構築するとともに、超音波周波数や受信点数などが上記イメージング性能へ与える影響を構築する実験装置を用いて評価することを目標とする。また、性能向上に向けた課題点を抽出・整理する。

② 超音波数値シミュレーション (再委託先：エネルギー総合工学研究所)

超音波伝搬シミュレーションソフトウェアを活用し、超音波イメージングシステムの基礎設計やイメージング試験結果の検証を行い、システム構成や試験結果の妥当性を示す。

③ システム試作と実スケール検証

光音響プローブを用いた水中/気中それぞれの専用超音波イメージングシステムを開発・試作し、その送信側超音波センサの形成音場特性や受信側光音響プローブの特性などのセンサ性能を評価し明らかとする。また、超音波イメージングシステムの実規模における実用化を検討するため、東京科学大学が有する設備を改良した模擬施設にて実験を行った後、原子力機構櫛葉遠隔技術開発センターにおける大型水槽試験場を活用し、オンサイト遠距離イメージング試験を行い、実用化に向けた課題を整理することを目標とする。

(2) 計測システムの実用化検討

①超音波イメージングシステムの耐放射線性検証

超音波センサおよび光音響プローブの耐放射線性を明らかとすることを目標とする。

②超音波サブミリ測距システムの構築（再委託先：室蘭工業大学）

近距離場において超音波によるサブミリオーダー測距を実現するため、超音波周波数や振動子サイズによる計測精度への影響を考慮したセンサ条件を選定するとともに、LIBS における焦点距離調整への応用を考慮したセンサ形状を設計する。

③LIBS への超音波サブミリ測距システムの適用（連携先：原子力機構）

超音波イメージングシステムで取得した測定対象物の 3 次元データを想定し、電動ステージ制御による形状再現確認の基礎試験を実施する。また、LIBS システムのバッテリー駆動化に向け、各機器の電力仕様を抽出整理し必要なバッテリー仕様を決定する。

④計測システムのバッテリー駆動遠隔化（玉浦ラボ）

超音波イメージングシステムおよび LIBS システムのバッテリー駆動化について、必要バッテリー性能を整理するとともに、バッテリーの耐放射線性について検証し明らかとすることを目標とする。

(3) 研究推進

研究代表者のもとで各研究項目間ならびに廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）等との連携を密にして研究を進める。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催する。

3. 実施内容および成果

3.1 超音波イメージングシステムの開発

3.1.1 イメージング性能評価および高度化/高速化検討（再委託先：室蘭工業大学）

(1) 令和6年度実施内容および成果

本研究において開発を目指す光音響プローブを用いた超音波イメージングシステムの性能評価を行うため、水中イメージング用の基礎システムの構築を行い、また、性能評価環境の整備を行った。基礎システムとして、単一受信光音響プローブと送信用超音波プローブを組み合わせたイメージングシステムを構築した。

図 3-1 に水中用単一受信光音響プローブの構成概略および外観を示す。構築した光音響プローブは、新規に導入したダイオードレーザコントローラ (CLD1011LP、Thorlabs Inc.)、ダイオードレーザ (LP660-SF60、Thorlabs Inc.)、コリメートレンズ、二つの光学セルおよび直角プリズム、受光用マルチモード光ファイバ、Si フォトディテクタ (PDA100A2、Thorlabs Inc.)、ハイパスフィルタおよび A/D コンバータ (PicoScope 5442D、Pico Technology Inc.) からなる。水中用光音響プローブは、二つの光学セル内に直角プリズムを内装し、各セルは一定の距離間隔で配置する。このとき、一方のセル上部からレーザ光を入射し、セル間にレーザ光照射後、その透過光をもう一方のセル上部に配置したマルチモード光ファイバにより受光する。これにより、セル間に到来した超音波エコーをレーザ光により受信する。特に、本システムでは音波によるレーザ光の偏向現象を利用してエコーを受信することから、LDER (Laser-Deflection-based Echo Receiver) と呼称する。まず、構築した光音響プローブの超音波受信指向性を確認した。図 3-2(a) (b) に示すように、レーザ光軸周方向および軸方向それぞれにおいて入射角度 -90° \sim 90° の方向から超音波パルスを照射し、その受信強度から受信指向性を確認した。図 3-2(c) (d) は、レーザ光軸周方向および軸方向受信指向性の結果であり、横軸は超音波到来方向、縦軸は最大値で規格化した信号強度である。レーザ光軸周方向については、エコー到来方向に関係なく音波強度のみにより偏向角が決まるため、ほぼ一定の信号強度であり、無指向性受信が可能であることが確認された。また、軸方向については、入射角が増加するにつれ光軸直交方向の屈折率勾配が小さくなるため、信号強度が減少し、高い指向性 (半値幅 3.2°) となることが確認された。

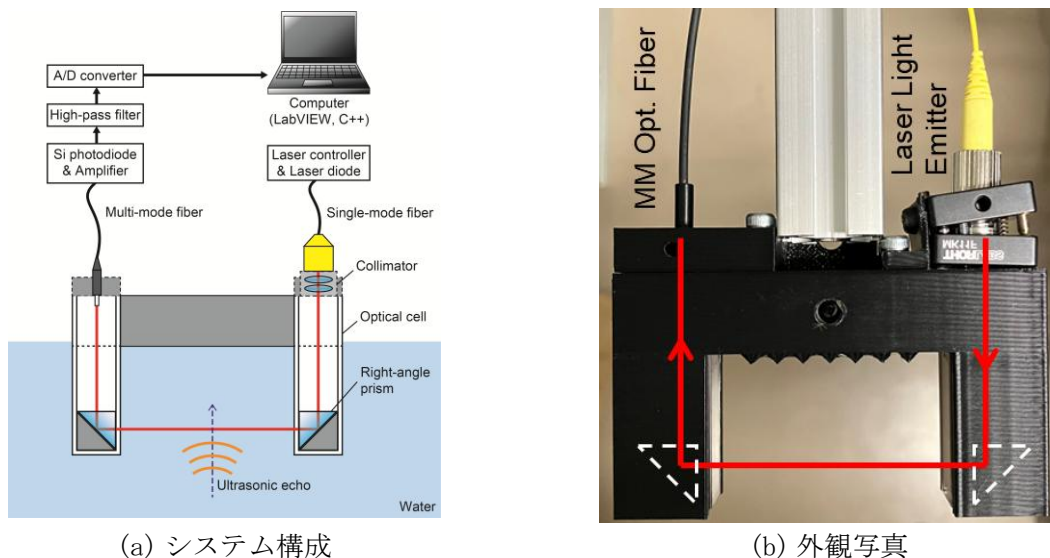


図 3-1 水中用 LDER

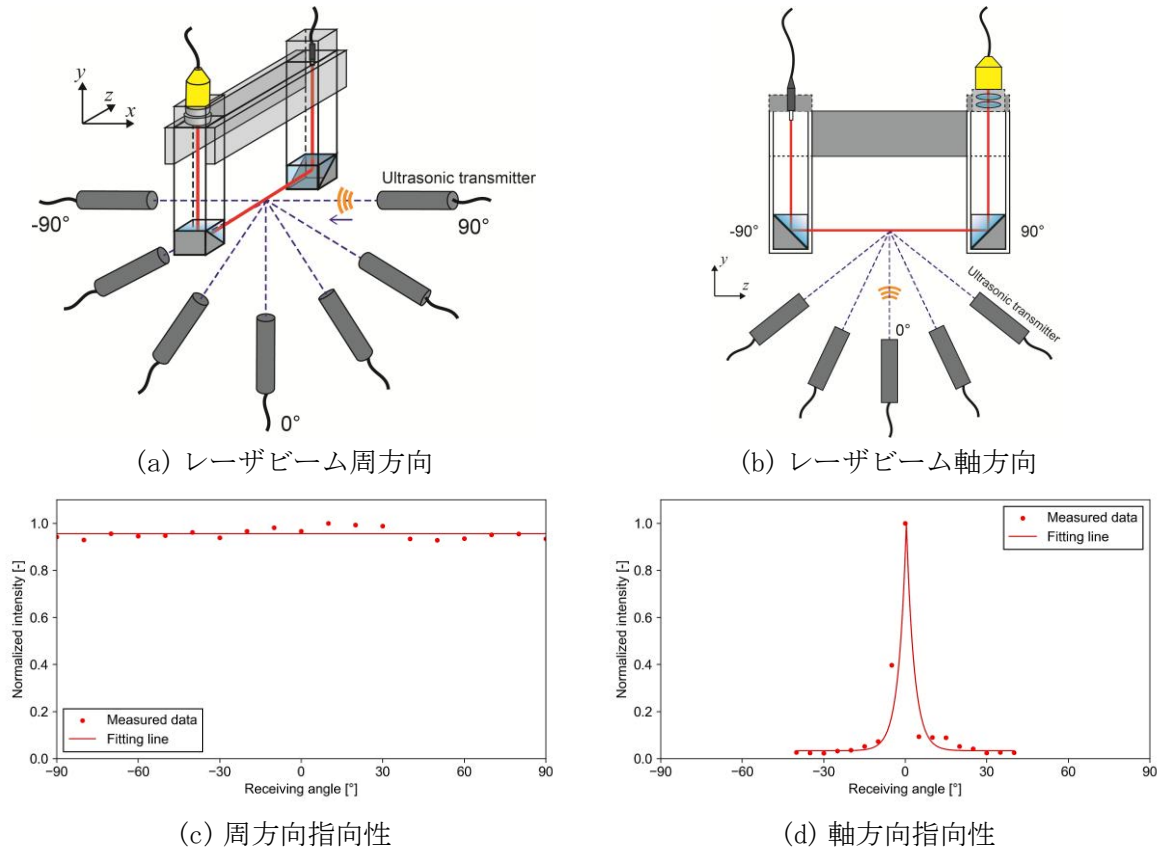


図 3-2 LDER 受信指向性

超音波イメージングは医療や非破壊検査分野において多くの研究がなされており、これまで PAI (Phased Array Imaging)、FMC/TFM (Full Matrix Capture and Total Focusing Method)、PWI (Plane Wave Imaging)、DWI (Diverging Wave Imaging) などのイメージング法が用いられている。本研究の目的を勘案し、本研究ではイメージングのリアルタイム性が高く、イメージング領域が広い DWI によるイメージングを検討することとした。DWI は広角に発散する超音波パルスを送信し、物体からの反射・散乱エコーを全アレイ素子で受信後、開口合成処理により物体形状を再構成する手法である。本研究では、受信側は光音響プローブとなる。令和 6 年度は、広角発散波を発生させる水中 DWI 用送信プローブを新たに設計し、ジャパンプローブ株式会社に製作を依頼した。製作したプローブの外観を図 3-3 に示す。仕様として、発散波を発生させるため曲率半径 73 mm のコンベックストランスデューサとし、発散角 60° となるよう設計した。また、素子高さは 10 mm、超音波中心周波数は 2 MHz、帯域幅は 60%とした。本プローブにより生成される音場形状を超音波伝搬シミュレーションソフトウェア ComWAVE X (伊藤忠テクノソリューションズ株式会社) により確認した。本プローブ仕様により生成されるパルス伝搬の様子を図 3-4 に示す。時間ステップ毎に超音波パルスが拡散し、発散角約 60° にて伝搬することを確認した。



図 3-3 発散波生成水中用超音波送信プローブ

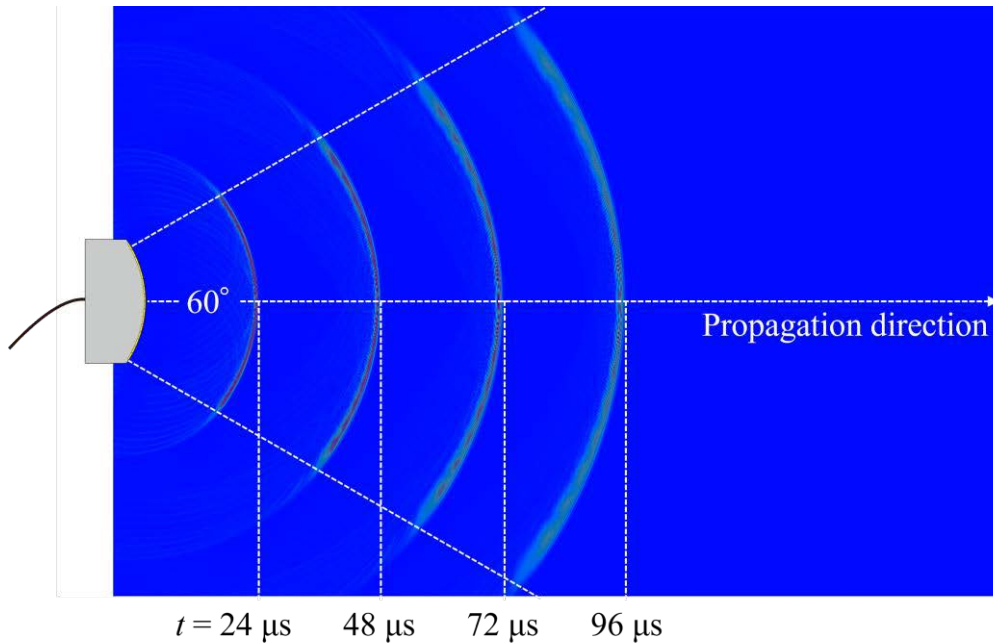


図 3-4 発散波伝搬シミュレーション結果

上記の水中用光音響プローブ (LDER) および送信コンベックスプローブを組み合わせた水中イメージング基礎システム (LDER-DWI) およびその性能評価環境を構築した。構築したシステムおよび性能評価環境を図 3-5 に示す。送信コンベックスプローブは、新規に導入したハイパワー超音波パルサ (JPR-600C、ジャパンプローブ株式会社) により発散波を生成し、イメージング対象物体からの反射/散乱波エコーを LDER により多点受信する。このとき、多点受信するため光音響プローブを複数台用意するか、受信位置を走査する必要がある。本研究初年度である令和 6 年度においては、LDER-DWI の概念実証のため、電動ステージにより受信位置を走査することでエコー信号マトリクスデータを得る仕様とした。

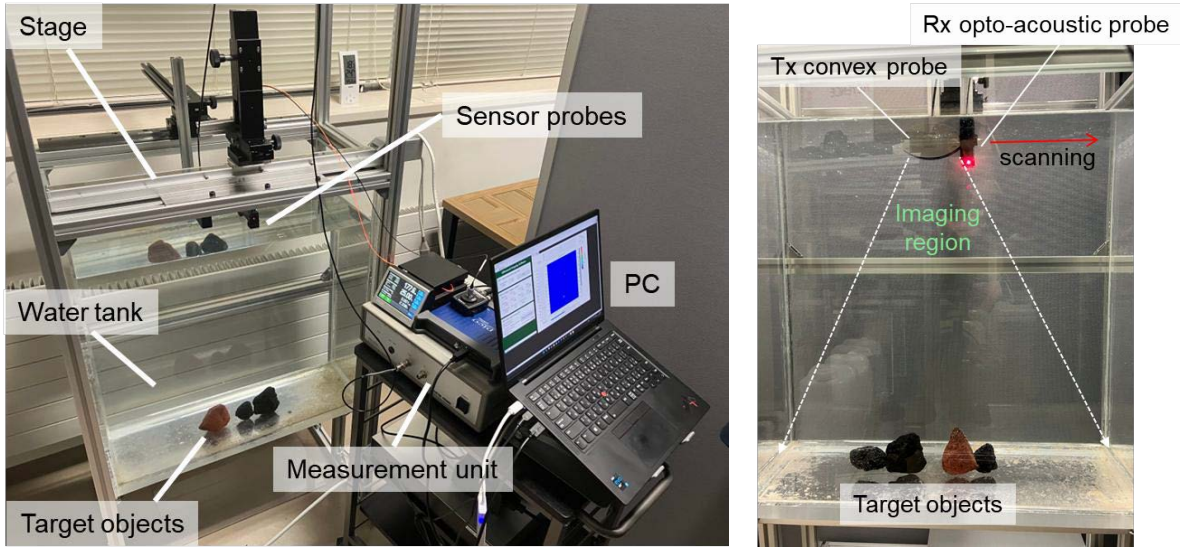


図 3-5 水中イメージング基礎システムおよび性能評価環境

受信したエコー信号マトリクスデータより、物体表面形状を再構成するため、開口合成アルゴリズムの一種である DAS (Delay-And-Sum) を用いた超音波イメージングソフトウェア基盤を構築した。LDER-DWI による物体表面形状イメージングの座標定義を図 3-6 に示す。曲率半径 R のコンバックスプローブより発散波を生成し、物体表面より反射・散乱したエコーを LDER により座標 $(x_r^{(i)}, y_r^{(i)})$ にて受信したとする。ここで、上付き文字 i は LDER による受信位置インデックスである。コンバックスプローブより超音波パルスを送信し、LDER によりエコーを受信したとき、座標 $(x_r^{(i)}, y_r^{(i)})$ におけるエコー信号 $s^{(i)}(t)$ が得られる。各位置にて得られたエコー信号に対し、超音波中心周波数を基準とした直交検波により、複素エコー信号 $s_{IQ}^{(i)}(t)$ を算出する。その後、DAS アルゴリズムにより発散波照射面内における物体表面形状の 2 次元断面像を推定する。座標 (x_p, y_p) におけるエコー強度 (画素値) を算出するため、注目座標 (x_p, y_p) における超音波パルス送信から受信までに要する超音波伝搬時間を計算する。超音波パルスを送信し、イメージング座標 (x_p, y_p) にて反射・散乱後、座標 $(x_r^{(i)}, y_r^{(i)})$ にて受信するまでの伝搬時間 $t^{(i)}$ は次式で得られる。

$$t^{(i)}(x_p, y_p) = \frac{\sqrt{(x_p - x_t)^2 + (y_p - y_t)^2} - R + \sqrt{(x_p - x_r^{(i)})^2 + (y_p - y_r^{(i)})^2}}{c} \quad (1)$$

ここで、 R はコンバックスプローブの曲率半径、 x_t, y_t は曲率半径中心座標、 c は流体音速である。伝搬時間計算後、注目座標に対応する全複素エコー信号を足し合わせることで、注目座標 (x_p, y_p) における画素値 (信号強度) を推定する。

$$I_{DWI}(x_p, y_p) = w_{xCF}(x_p, y_p) \left| \sum_{i=0}^{N_r-1} s_{IQ}^{(i)}(t^{(i)}(x_p, y_p)) \right| \quad (2)$$

ここで、 w_{xCF} はコヒーレンス係数 (Coherence Factor : CF) であり、一般に超音波イメージングにおいて画像化分解能を向上させるために導入され、波形重ね合わせの位相を評価する。注目座標における各受信エコー信号の位相は次式で得られる。

$$\phi^{(i)}(x_p, y_p) = \tan^{-1} \frac{\text{Im} \left[s_{IQ}^{(i)} \left(t^{(i)}(x_p, y_p) \right) \right]}{\text{Re} \left[s_{IQ}^{(i)} \left(t^{(i)}(x_p, y_p) \right) \right]} \quad (3)$$

ここで、 $\text{Re}[\]$ および $\text{Im}[\]$ は複素数における実部および虚部を表す。CFとして従来種々の手法が提案されているが、本研究ではCCF (Circular CF) による重み付けを用いた。CCFによる重み付け係数は、次式により算出される。

$$w_{CCF}(x_p, y_p) = 1 - \sqrt{\text{var}(\cos \phi^{(i)}(x_p, y_p)) + \text{var}(\sin \phi^{(i)}(x_p, y_p))} \quad (4)$$

ここで、 $\text{var}()$ は分散を表す。

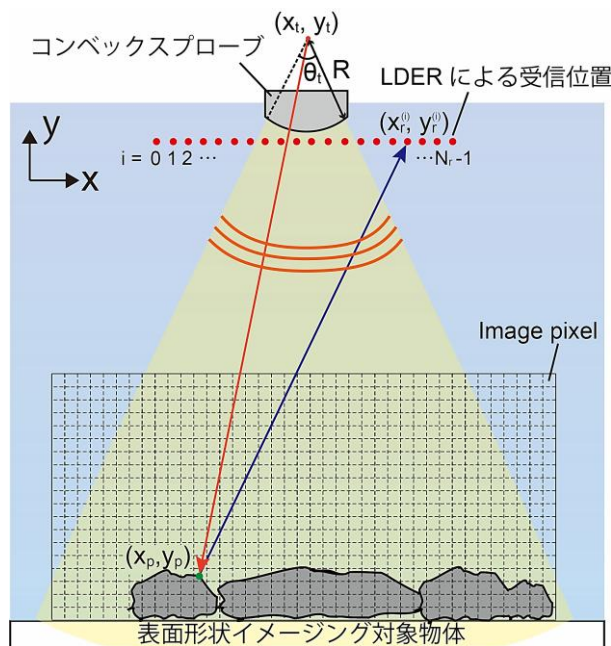


図 3-6 LDER-DWI における座標系

構築したイメージング基礎システムである LDER-DWI による表面形状イメージングの動作確認を実施した。イメージング実験の実験体系を図 3-7(a) 実験体系に示す。イメージング対象としてデブリ形状を模擬するため、火山岩を使用し、水槽底面に設置した。LDERによる受信位置は図 3-7 のとおりである。本システムによりエコー信号を受信し、構築ソフトウェアにより表面形状イメージングした結果を図 3-7(b) イメージング結果に示す。コンベックスプローブの視線方向における表面形状を捉えることが可能であることが確認された。

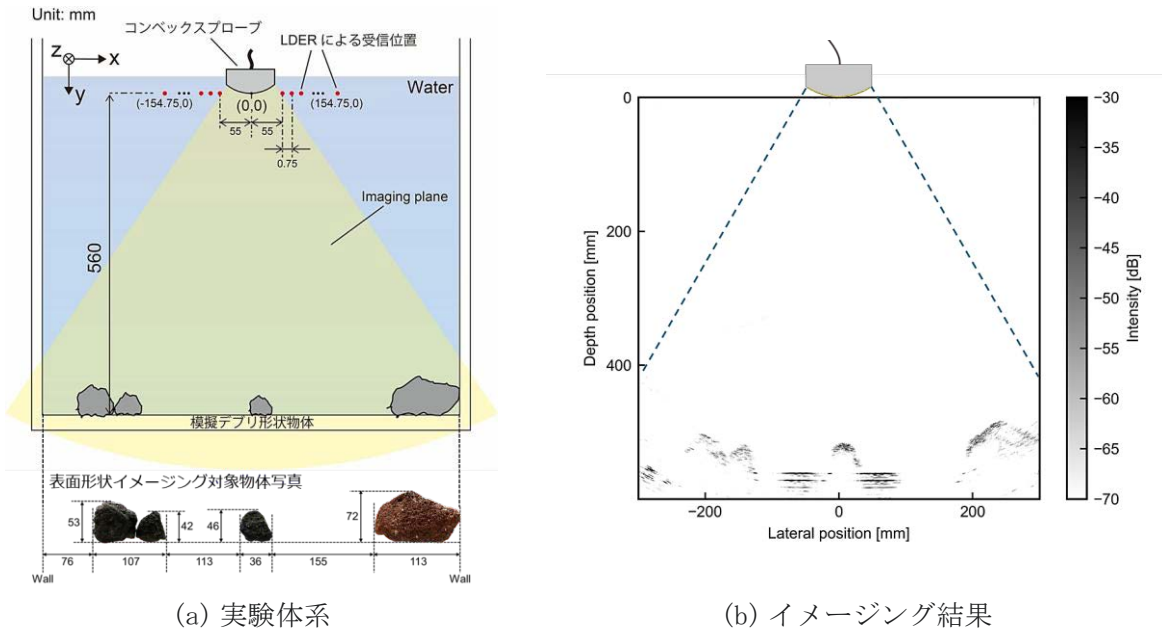


図 3-7 LDER-DWI による物体形状イメージング実験体系およびイメージング結果

本研究初年度においては、超音響プローブを用いた超音波イメージング基礎システムを構築し、物体形状イメージング実施までのハードウェアおよびソフトウェア基盤を整備した。令和 7 年度以降は、リアルタイムイメージングに向けた開口合成処理の高速化や受信点数のスパース化などを検討する予定である。

3.1.2 超音波数値シミュレーション（再委託先：エネルギー総合工学研究所）

超音響プローブの開発に際して、その超音波に関する特性を検討するために、超音波に関する数値解析コードを実行するための計算サーバ等を導入し、超音波伝搬挙動解析コードとして SWAN21 を導入した。また、その計算のための環境構築を行った。

● SWAN21

SWAN21 は、ジャパンプローブ株式会社製の 2 次元超音波伝搬挙動解析コードである。特徴としては、直感的な GUI (Graphical User Interface) による簡単操作、GPU、CPU の複数コアの並列計算も考慮した高速計算の実現、縦波 (P 波)、横波 SV 波、横波 SH 波、ガイド波、表面波の伝搬解析が可能となっていること、V 透過法、タンデム法、TOFD (Time Of Flight Diffraction) 法など各種手法の超音波伝搬解析やアレイ探触子の評価、集束超音波解析と焦点評価などが可能となっていることである。ソルバとしては、愛媛大学中畑和之教授らが提案している動弾性有限積分法 (Elastodynamic Finite Integration Technique) を用いており、応力、速度、変位を計算している。入力に応力と速度、出力は応力、速度、変位とすることが可能となっている [1]。

(1) 計算条件

超音響プローブに関する超音波挙動シミュレーション計算は、その計測が想定される形状に関して、センサ設計の担当者と相談のうえ、図 3-8 のような 2 次元形状とした。計算形状の上方に超音波発振用の送信振動子を凸型の場合は、図のように円の一部 (円弧) を発信用振動子とすることで設定を反映した。また、凸型との比較用に送信振動子を直線状

とした形状においても計算を行った。形状の下部には、超音波を反射するためのφ1 mmのステンレスワイヤ3本が形状を貫通しているような形状を再現した。また、形状の外側との境界面は吸収境界とした。この形状でステンレスワイヤにあたる3点から返ってくる超音波の様子に関して、送信振動子の周辺に設定した12個の計測点での様子を収録するように設定して計算を行った。送信する超音波は2 MHzの1波長分とした。

計算には本事業で購入した計算サーバを用いた。その計算サーバのスペックを表3-1に示す。

表 3-1 計算サーバの主な仕様

CPU	Intel Xeon Gold 6542Y (2.9 GHz、24 cores、60 MB cache、250 W TDP)
Memory	256 GB (DDR5-5200)
SSD	M.2 1.92 TB NVMe
GPU	NVIDIA T400 4 GB PCI
OS	Windows11 Professional

SWAN21の設定として、メッシュサイズを0.03 mm、時間分解能を0.0035 μsと設定した。その場合、メッシュ数が約8,900万となり、計算時間はおよそ12 h程度を要した。また、計算形状を図3-8に示す。

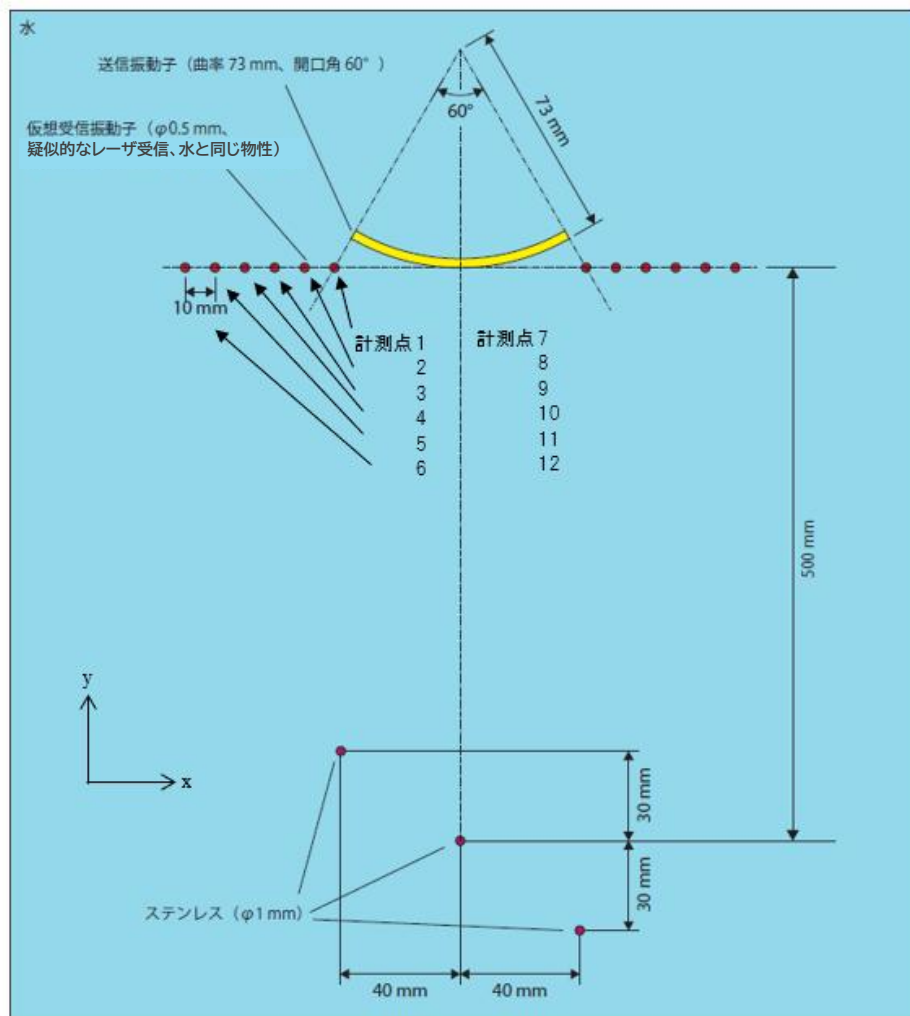


図 3-8 超音波伝搬挙動計算 計算形状

(2) 計算結果

全体的な超音波伝搬の様子について、(a)凸型発信振動子、(b)直線状発信振動子のそれぞれに関して、i)約 20 μs (発信直後)、ii)約 160 μs (ステンレスワイヤでの反射寸前)、iii)約 180 μs (ステンレスワイヤでの反射後)、iv)約 310 μs (各計測点に到達寸前)での計算形状全体の様子を図 3-9 に示す。なお、図 3-9 では x 方向と y 方向の合成変位について示しており、青色は変位が 0、それが赤になるほど変位が大きいことを示している。各図をみると形状の側面で超音波が消去され切らず一部反射しているが、それ以外に特に不自然な挙動をしている点はない。

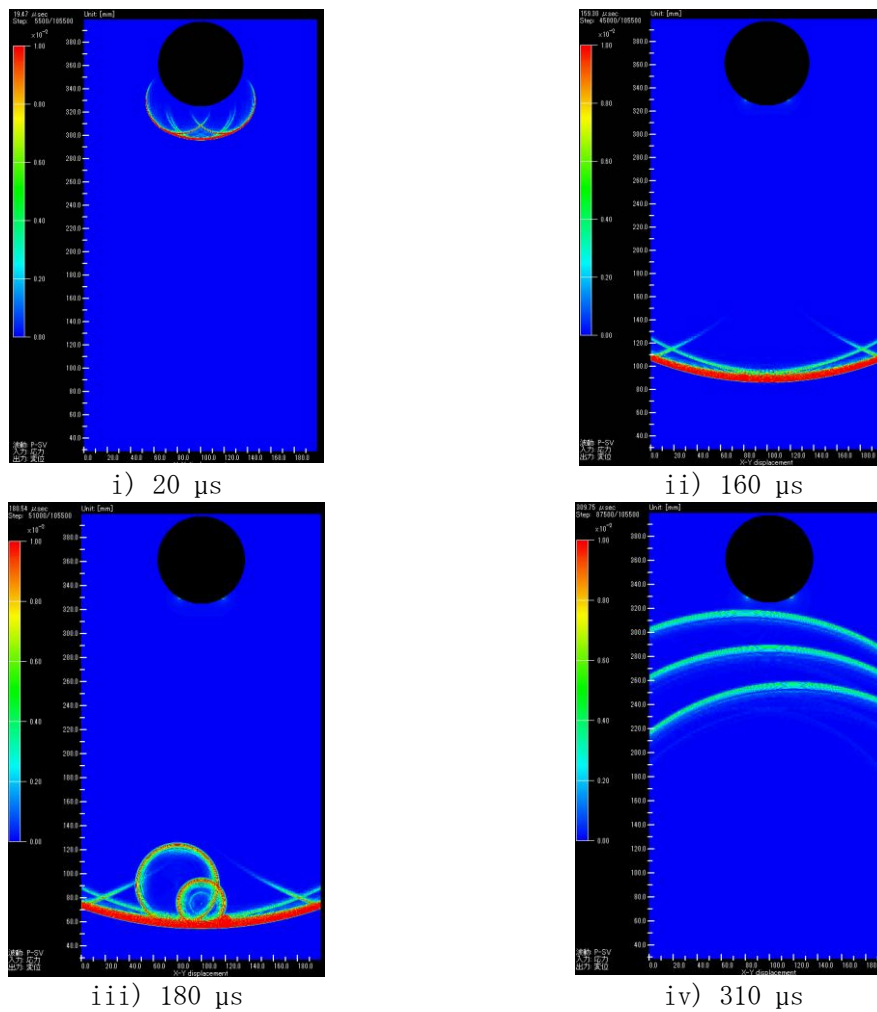
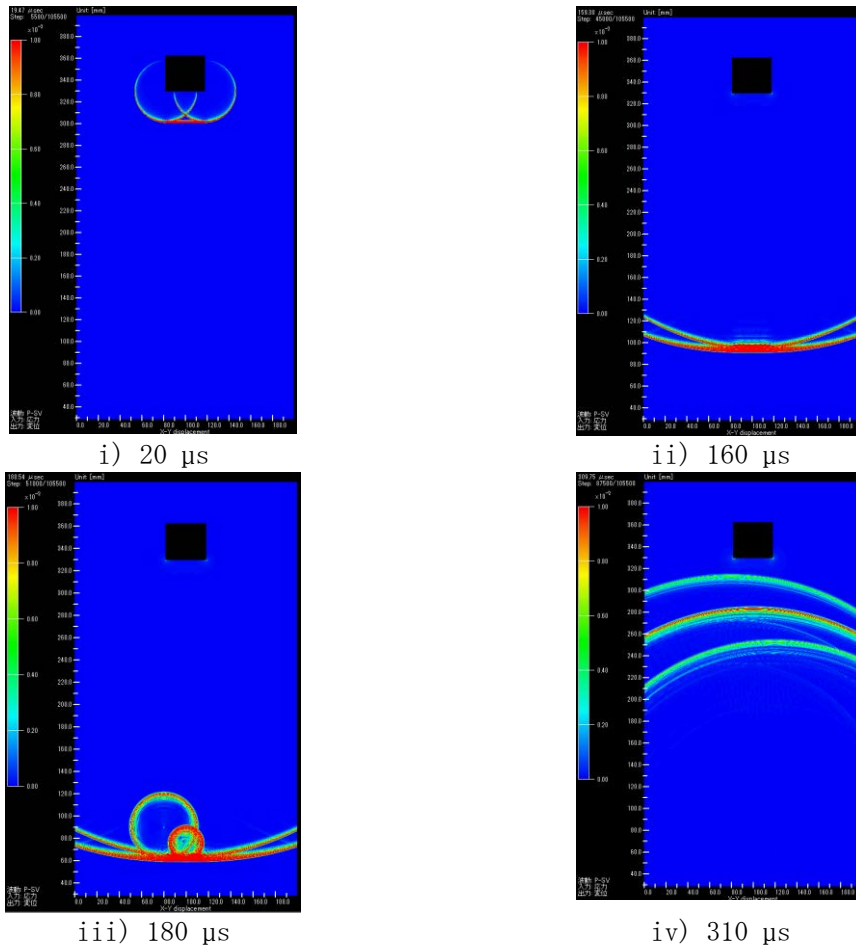


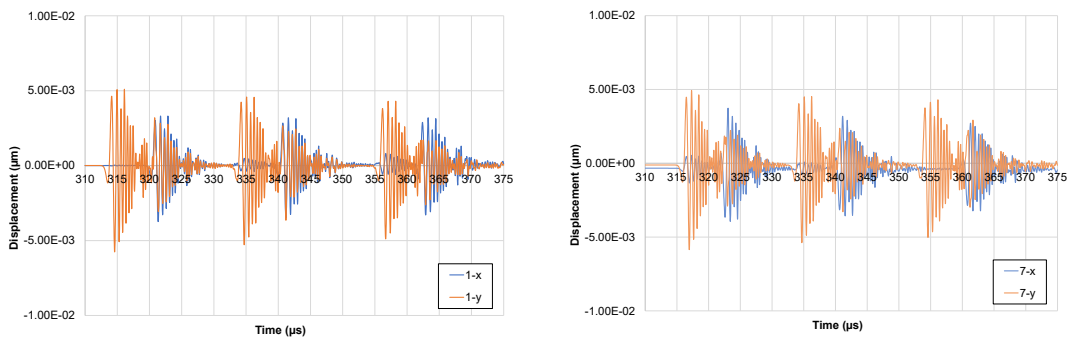
図 3-9 SWAN21 による超音波伝搬挙動計算 (1/2)



(b) 直線状発信振動子

図 3-9 SWAN21 による超音波伝搬挙動計算 (2/2)

続いて、各計測点での結果の詳細を検討する。図 3-10 は凸型の発信振動子を用いた場合の発信振動子に近い計測点 1 および 7 の x 方向、y 方向の変位を示したものである。なお、ここでは反射波による信号のみを示し、送信時の影響はカットしている。3 本のワイヤでの 3 回の反射波がそれぞれ 320 μs 、340 μs 、360 μs あたりに到達していることがわかるほか、最初に到達している波は y 変位が主成分であることから、縦波であることがわかる。



i) 計測点 1

ii) 計測点 7

図 3-10 凸型発信振動子の場合の計測点 1 および 7 での x、y 変位 (計測点については図 3-9 参照)

続いて、直線状発信振動子を用いた場合の同様の図を図 3-11 に示す。波の到達時間はほぼ変わらないが、2 番目に到達した波の振幅が大きく、その影響が出る時間も長い。2 番目に到達する波は、図での下部のステンレスワイヤのうち中央のものであるが、直線状の発信振動子の場合は振動子から出た波の多くが中央のワイヤに到達して反射し、計測点にも中央のワイヤによる反射波が強調されて届くことがわかる。最大振幅で比較すると、凸型振動子の場合は1 番目、2 番目、3 番目とほぼ同等の振幅の超音波が返り、それらの解析が容易であるのに対して、直線状振動子の場合は、2 番目のセンサ正面から返ってくるシグナルに関しては大きく、ほかのものは小さくなることがわかり、分析の際にその特性がわるい影響を与える可能性が考えられる。本研究での光音響プローブは、1F 廃炉にともなうデブリ切断作業の監視として用いる想定としており、その場合は広い範囲の形状等を計測する必要がある。その場合、前者のどの方向にも同等の大きさの超音波が返ってくる形状、すなわち凸型の発信振動子のほうが好ましいことが、計算結果から明らかとなった。

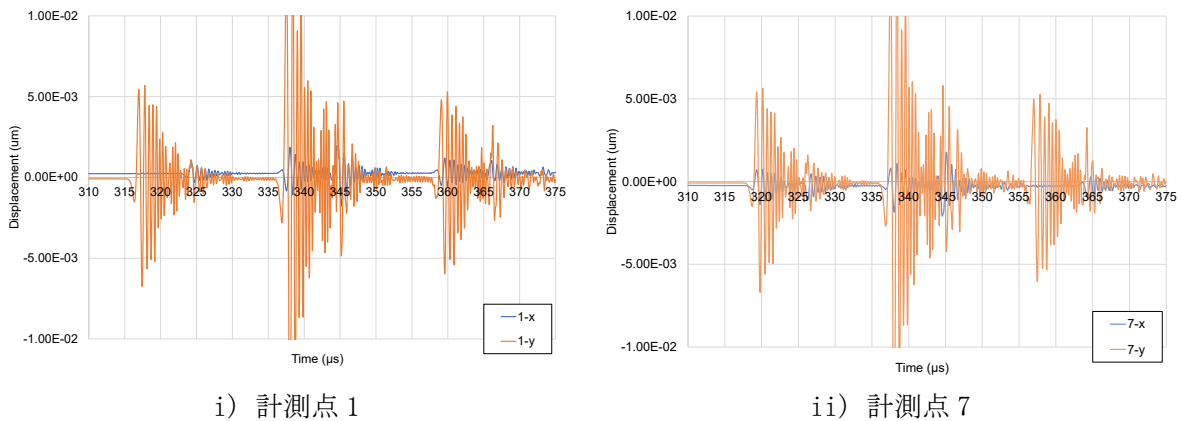


図 3-11 平面型発信振動子の場合の計測点 1 および 7 での x、y 変位
(計測点については図 3-9 参照)

上記の計算をもとに、超音波送信センサの設計に関して、凸型の形状が好ましいと判断した。

3.1.3 システム試作と実スケール検証

(1) 光音響プローブを用いた水中/気中専用超音波イメージングシステムの開発および試作

本研究では、従来の東京科学大学で培われた超音波流速分布計測法 (UVP : Ultrasonic Velocity Profiler) を用いた超音波計測システム [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12] の知見をもとに、超音波装置として東京科学大学が開発研究を行ってきた eUVP (educational UVP) を活用した超音波送信受信を将来は取り入れることを念頭に、光音響プローブを用いた水中/気中それぞれの専用超音波イメージングシステムを開発・試作し、その送信側超音波センサの形成音場特性や受信側光音響プローブの特性などのセンサ性能を評価し明らかとする。超音波イメージングシステムの実規模における実用化を検討するため、図 3-12 に示すように、東京科学大学が有する中規模モックアップ試験設備の整備および改良を行い、実用化検討の実験に向けた準備を行った。

本研究では、視界不良な極限環境下 (濁水・ミスト・高線量など) において構造物や燃料デブリの 3 次元可視化を実現するために、レーザ光路変動による非接触超音波受信技術「光音響プローブ」に着目し、水中用および気中用の専用超音波イメージングシステムをそれぞれ開発・試作した。

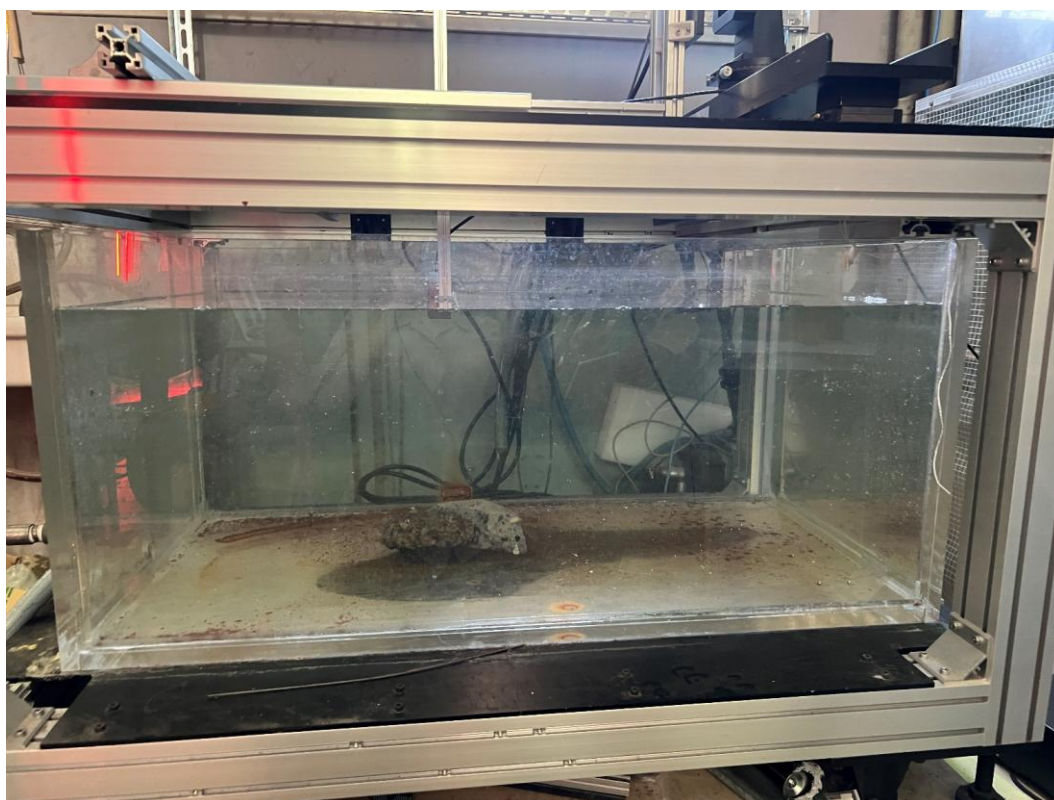


図 3-12 改良した中規模モックアップ試験設備

① 光音響プローブシステムの開発・試作

構築した光音響プローブシステムの概略図を図 3-13 に示す。半導体光ファイバレーザ装置から、コリメータを装着した送光用光ファイバにレーザを送り、送光用光ファイバと受光用光ファイバレーザの光軸上に超音波を照射する。光偏向現象により、レーザビーム光が曲がるため、受光用光ファイバで取得した超音波信号を光検出器である APD (Avalanche Photodiode) コンバータでデジタル信号に変換し、オシロスコープで可視化する。これにより、光で超音波を聞く光音響プローブシステムを構築した。光音響プローブシステムを用いた水中／気中専用超音波イメージングシステムを図 3-14 に、光音響プローブシステム実際の測定環境を図 3-15 に示す。また、測定時に使用した超音波トランスデューサ条件を表 3-2 に、レーザ光源波長を表 3-3 に示す。

水中における超音波パルス受信時では、波長 635 nm の可視レーザ光を用い、水中での低吸収特性を活かして高効率な伝搬・受信を目指した。光源には高出力の半導体レーザを、受光部には可視波長に対応した APD (APD410A2/M) を搭載した。

一方、気中用では空気中での散乱・吸収を最小限に抑えるため、波長 1,550 nm の近赤外レーザを用いた。光源からのビームはコリメータによって整形され、受光には NIR (Near Infrared Ray) 帯域に高感度な APD (同型機種の別波長特性) を使用した。プローブ本体は軽量のアルミ筐体で構成され、振動対策としてゴム脚や遮蔽シールドも施されている。これら 2 種類のシステムは、共通の光学検出原理に基づきながらも、それぞれの使用環境 (水中／気中) に最適化された構成となっており、応用現場の条件に応じた柔軟なシステム展開が可能である。

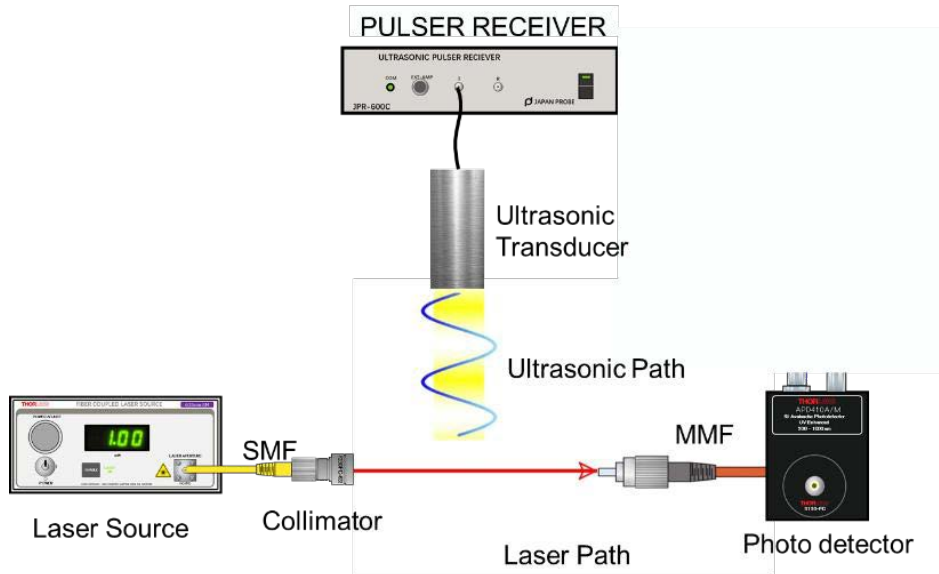


図 3-13 光音響プローブシステム構築図

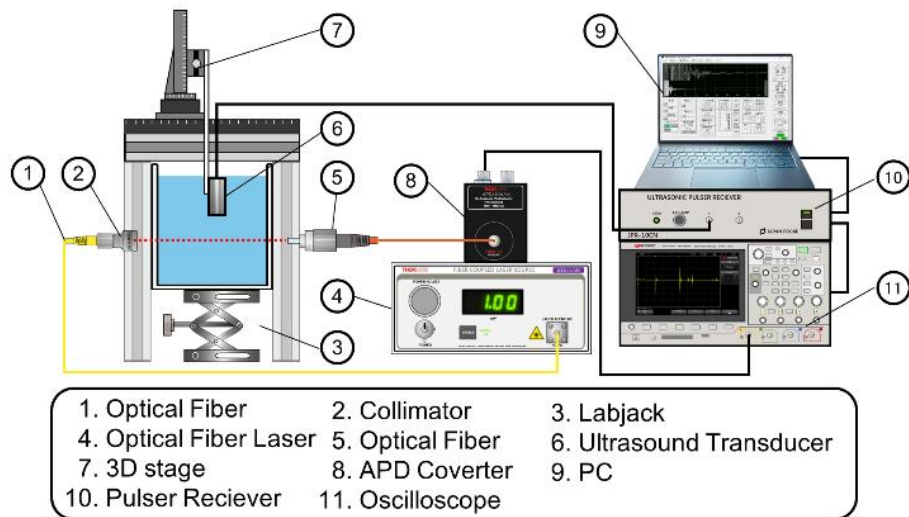


図 3-14 光音響プローブを用いた水中/気中専用超音波イメージングシステム

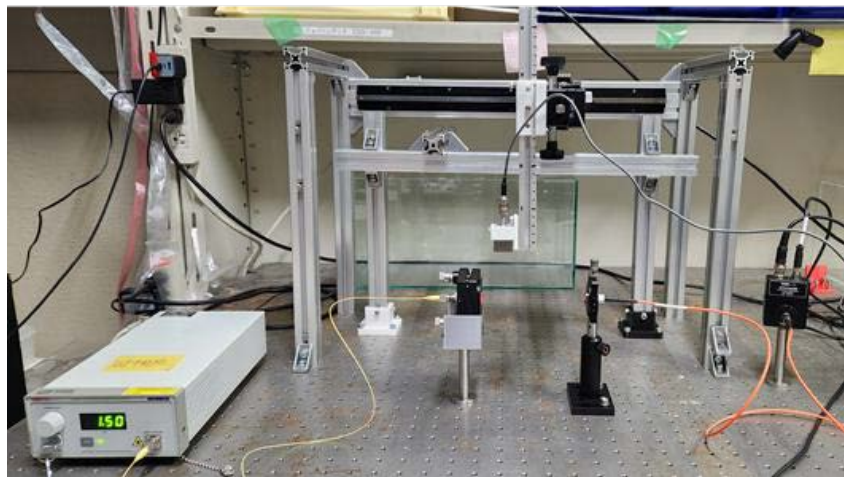


図 3-15 光音響プローブシステム実際の測定環境

表 3-2 超音波トランスデューサ条件

超音波トランスデューサー	
中心周波数	振動子サイズ
水中受信	
1 MHz	φ 13 mm
2 MHz	φ 10 mm
4 MHz	φ 5 mm
8 MHz	φ 3 mm
気中受信	
200k Hz	14 × 20 mm
1M Hz	14 × 20 mm

表 3-3 レーザ光源波長

レーザ光源波長	
水中受信	635 nm (可視光)
気中受信	1,550 nm (不可視光)

② 光音響プローブシステムを用いた光音響プローブセンサの開発・試作

光音響プローブシステムを応用した光音響プローブセンサの開発・試作を行った。

図 3-16 および図 3-17 に示すように、固体型と開放型 2 種類の光音響プローブセンサを設計した。固体型光音響プローブセンサの試作については、光ファイバレーザから照射されたレーザ光はコリメータによってビーム状に集光され、Dove プリズムを通じて受光用光ファイバに入射する。Dove プリズムの底面には超音波センサを装着し、プリズム内部で超音波パルスを伝播させる構造を採用した。超音波はターゲットから反射した後、再びプローブ光に入射し、信号を受信する。プリズムの厚さは 20 mm とし、実験で使用した外径 φ 16 mm 2 MHz 超音波センサが突出しないよう設計した。

開放型光音響プローブセンサについては、その名称が示すとおり、プローブ光がセンサの開放部に露出している構造をもつセンサである。固体型光音響プローブセンサがプローブ光を固体ジャケット内に進ませるのに対し、開放型光音響プローブセンサではプローブ光が測定媒質中を直接進むという違いがある。開放型光音響プローブセンサでは、プローブ光を光学的に曲げて測定媒質内を直接進行させる設計が適している。したがって、一般的に光を曲げる光学素子として用いられる三角柱形状のプリズムが最適である。今回の設計では、プリズムを収容する透明なジャケットとして、外寸 12.5 mm × 12.5 mm × 45 mm、内寸 10 mm × 10 mm × 42 mm の一般的なディスプレイセルを使用した。

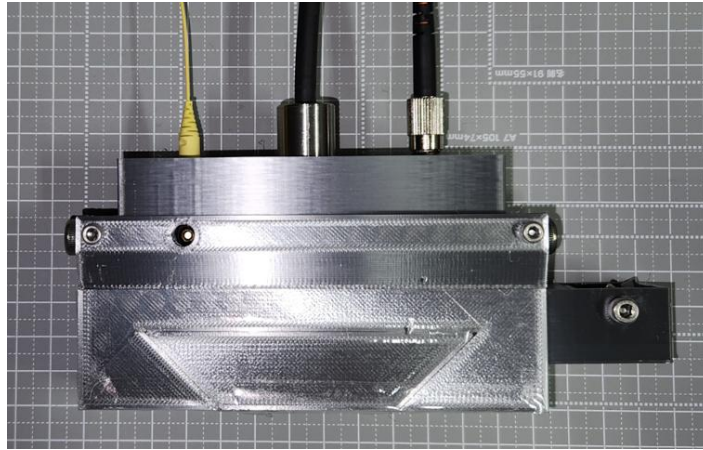


図 3-16 固体型光音響プローブ

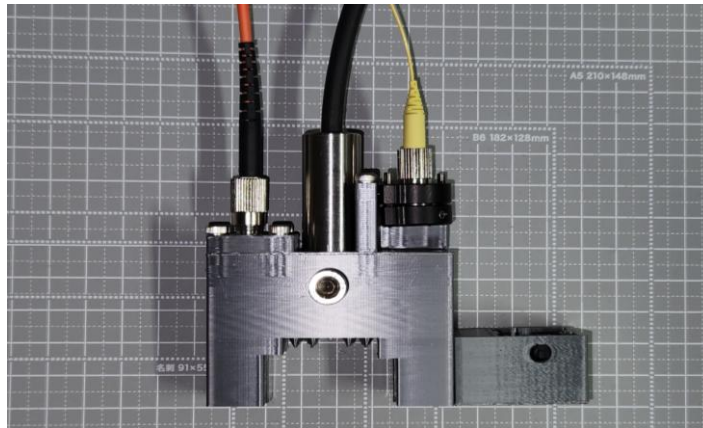


図 3-17 開放型光音響プローブ

(2) 送信側超音波センサの形成音場特性

送信側超音波センサの形成音場特性を評価するため、有限要素法に基づく超音波伝播シミュレーションソフトウェア SWAN21 を用いて音場解析を実施した。図 3-18 に示すように、超音波素子の直径を変化させた際の音圧分布についてシミュレーションによって比較した。超音波周波数は全て 1 MHz である。また、図 3-19 に示すように、前項で使用した水中用トランスデューサ（表 3-2）について、音場特性をシミュレーションによって比較した。水上部から送信された超音波パルスは、距離に応じて減衰する。図 3-19(c) (d) に示すように、高周波数で素子径が小さいトランスデューサから送信された超音波パルスは、減衰が著しく、炉内デブリのイメージングで想定されるセンサから対象物との距離を考慮すると、適応が難しいと考えられる。図 3-20 に超音波素子から 40 mm、80 mm、120 mm、160 mm、地点での素子径と最大音圧の関係を示す。全ての地点において、素子径と最大音圧に正の相関がみられる。また、図 3-21 に各地点における前項で使用した水中用トランスデューサと最大音圧の関係を示す。高周波数の超音波トランスデューサは、1 MHz や 2 MHz の超音波トランスデューサと比較して、減衰が著しいことが定量的にも示された。よって、形成音場特性の観点から超音波周波数 1 MHz、素子径 13 mm のトランスデューサに利点があることが示唆された。一方で超音波イメージングにおいて、解像度と超音波周波数には正の相関があるため、炉内デブリのイメージングにおいては、最適な条件の選定と信号処理などによる高距離適応化が必要である。

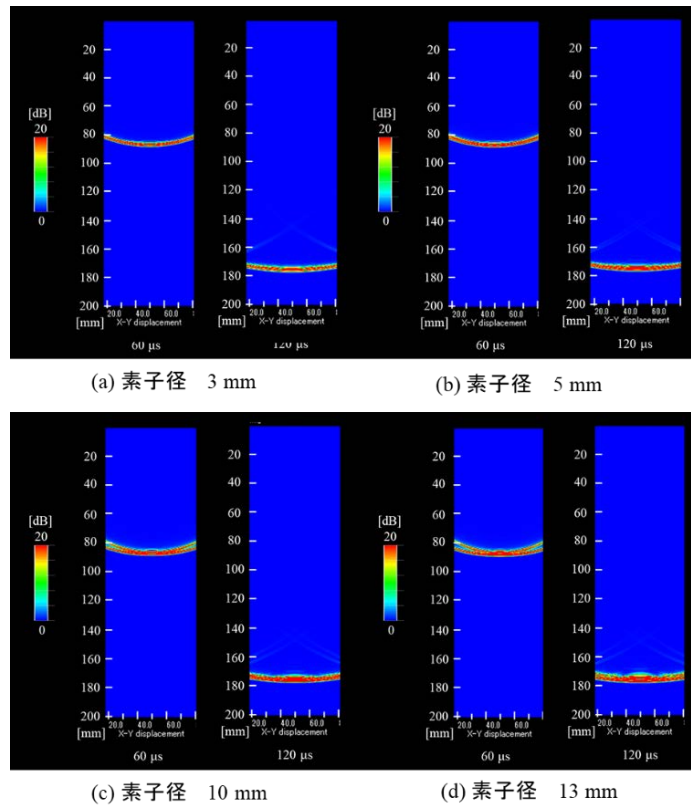


図 3-18 超音波周波数 1 MHz で素子径を変化させた際の超音波音圧分布

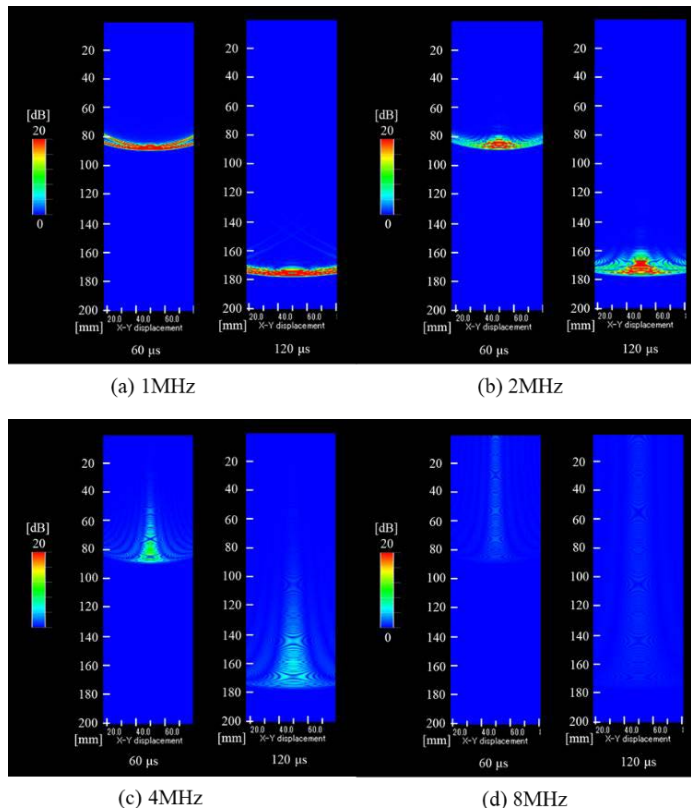


図 3-19 前項で使用した水中用超音波トランスデューサの超音波音圧分布

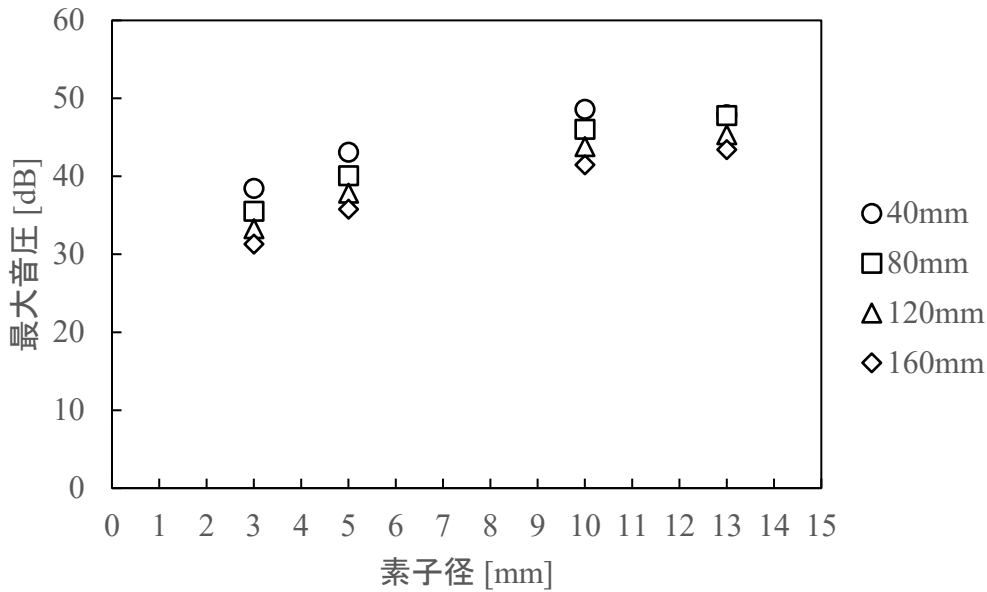


図 3-20 素子径と各地点最大音圧の関係

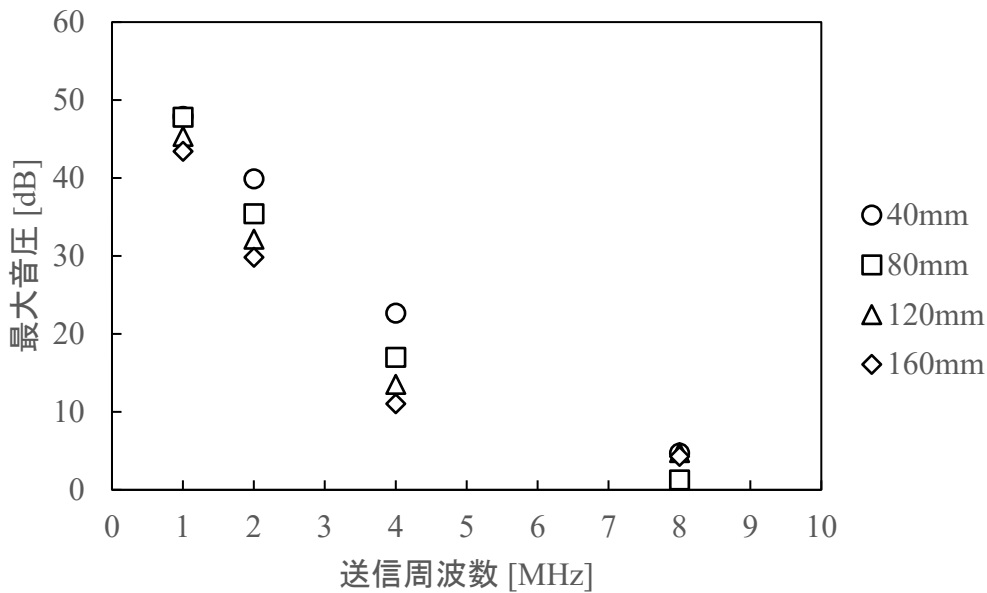


図 3-21 前項で使用した水中用超音波トランスデューサと各地点最大音圧の関係

(3) 受信側光音響プローブの特性

図 3-22 は、各基本周波数で超音波パルスを送信した際に、光音響プローブシステムによって水中で受信された波形を示している。図 3-23 は、光音響プローブシステムによって受信された信号のフーリエ変換波形を示している。従来の超音波プローブは、その共振周波数によって感度周波数帯が制限されており、使用する超音波周波数に適したプローブの選定が必要であった。それに対して、光音響プローブは物理的な受信素子を用いないため、非常に広い周波数帯域にわたって超音波を検出することが可能である。また、空気中での超音波パルスの受信も確認された。

これらの結果から、光音響プローブシステムは、水中および空気中の両方において縦波超音波を受信できることが示された。本実験では、水中では可視レーザー光を、空気中では近赤外レーザー光を使用することで、流体の特性に応じたレーザー光源の最適な選定が可能となり、柔軟なシステム構成を実現できることが確認された。

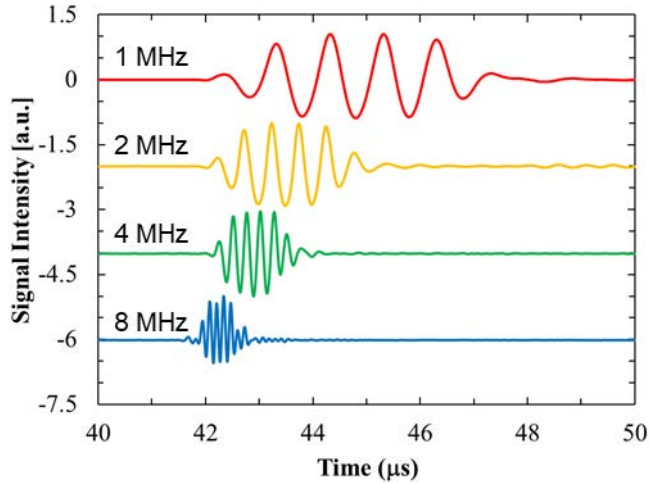


図 3-22 光音響プローブシステムによって受信された液体中を伝播する超音波信号

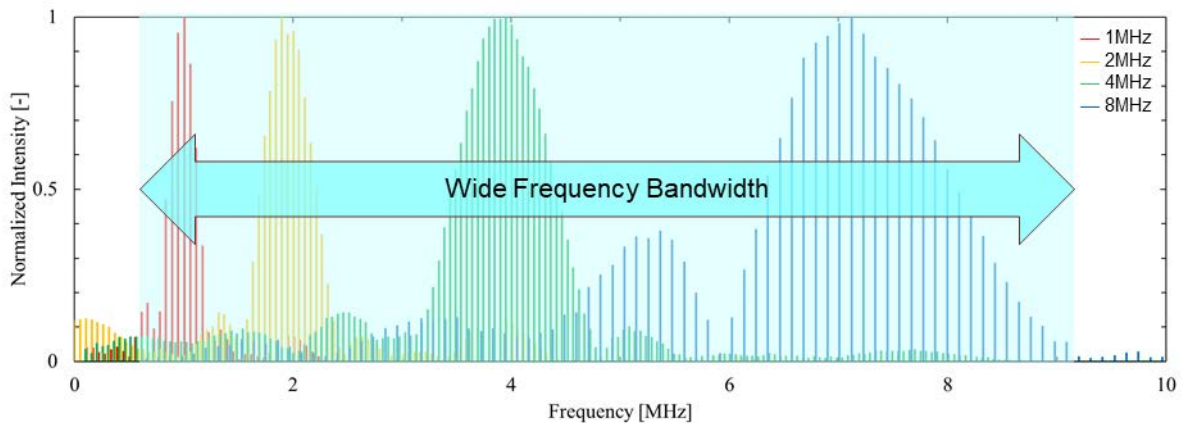
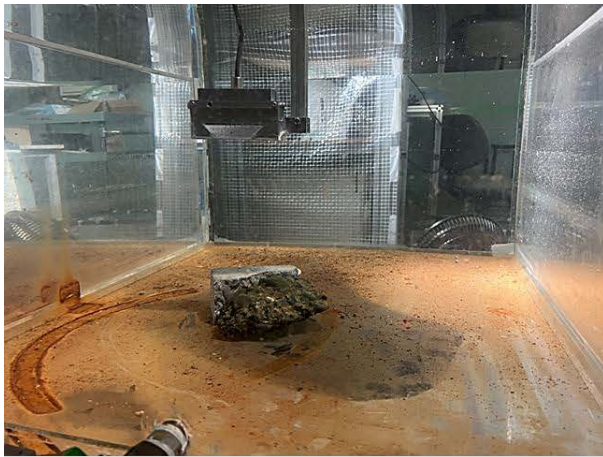


図 3-23 光音響プローブシステムで受信された信号のフーリエ変換スペクトル

(4) 超音波イメージングシステムの実規模の検討

実スケール検証のため、大型水槽内で光音響プローブにより超音波受信可能な実験体系を構築した。図 3-24 に示すように、高さ 500 mm、長さ 1,100 mm、幅 750 mm のアクリル水槽に水を満たし、水槽上部にアルミフレームにて作成した高さおよび長さ方向に可変な光音響プローブ取り付け機構を設置した。また、実用化に向けた課題を整理することを目標とするため、図 3-25 に示すように、原子力機構樹葉遠隔技術開発センターにおける大型水槽試験場を活用し、実験水槽に試作器を実装して模擬テストを行った。



(a) 個体型光音響プローブセンサ



(b) 開放型光音響プローブセンサ

図 3-24 東京科学大学が有する模擬実験施設

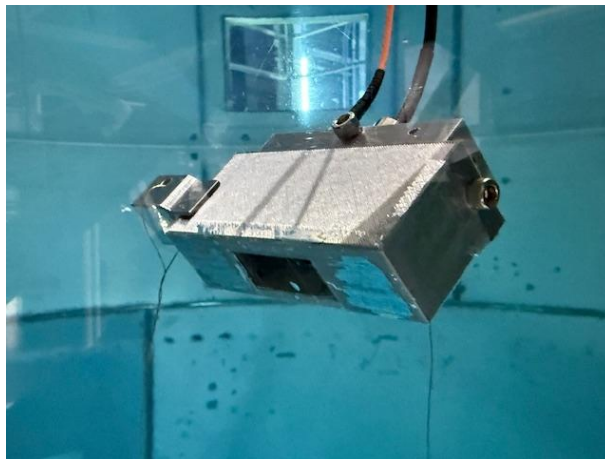


図 3-25 楢葉の実験水槽で行った設置テスト

3.2 計測システムの実用化検討

3.2.1 超音波イメージングシステムの耐放射線性検証

(1) 耐放射線性検証用の超音波センサおよび光音響プローブの試作

図 3-26 に 3D プリンターを活用して試作した耐放射線性検証用の「超音波センサおよび光音響プローブ」を示す。光ファイバレーザから照射されたレーザ光は、コリメータによってビーム状に集光され、プリズムを通じて受光用光ファイバに入射する構造となっている。プリズムの底面には超音波センサを装着し、プリズム内部で超音波パルスを伝播させる構造を採用した。超音波はターゲットから反射した後、再びプローブ光に入射し、信号を受信する。プリズムの厚さは 20 mm とし、実験で使用した外径 ϕ 16 mm の 2 MHz 超音波センサが突出しないよう設計した。

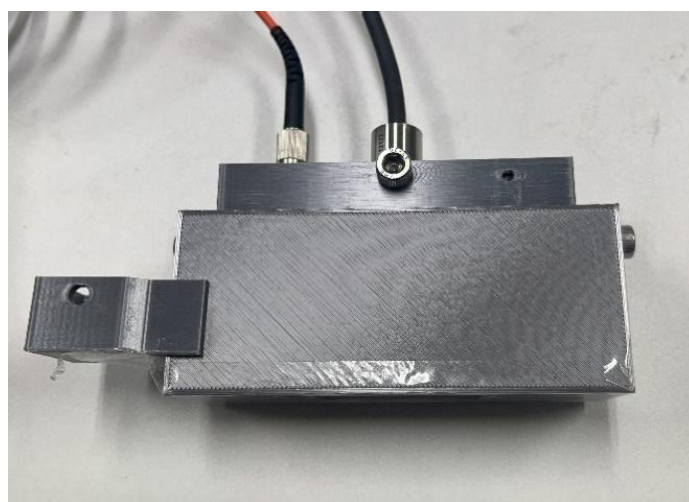


図 3-26 試作した耐放射線性検証用の超音波センサおよび光音響プローブ

(2) 耐放射線性能検証方法の実験手順の検討

令和 7 年度実施予定の「超音波センサおよび光音響プローブ」の耐放射線性能の評価は、照射前後のセンサ性能の変化を比較して行う。実験手順として、まず本研究「実施項目 (1)③システム試作と実スケール検証（東京科学大学担当）」で令和 6 年度試作した「イメージングシステム」を用いて、令和 6 年度試作した「超音波センサおよび音響プローブ」（図 3-26）の評価を照射前に行い、その後コバルト 60 照射室で一定線量の γ 線を照射する。照射後に再度センサおよびプローブの性能を「イメージングシステム」を用いて行い、性能低下の要因を分析する。その結果に基づき改良を加え、再度照射実験を行うというサイクルを繰り返し、最適なセンサ構成の開発を目指す。

(3) 放射線照射試験のための予備試験

東京電力ホールディングス株式会社による事故後 2 回目の試験的取り出し作業は令和 7 年 4 月 23 日に完了したが、前回令和 6 年 11 月よりも“奥”（格納容器の中心部に近いところ）を狙って採取され、放射線量は 20 cm の距離で 1 h あたり約 0.1 mSv と前回の半分（前は毎時約 0.2 mSv）と報告されている。これに基づき、本研究での耐放射線性の線量は γ 線で安全率 10～20 倍と設定すると、実際に廃炉作業で炉心近くの作業を想定して 1～2 mGy/h と設定する必要がある。図 3-27 は東京科学大学コバルト 60 照射室の照射室内に「超音波センサおよび光音響プローブ」を設置する位置について行った予備試

験の様子を示す。また、図 3-28 はコバルト 60 照射室の線源について、令和 6 年 8 月時点での放射線量 (Gy/h) と線源からの距離との検量線を作成したものである。照射実験条件 1~2 mGy/h は線源から 250~300 cm 付近の距離であり、東京科学大学コバルト 60 照射室で実験可能であることを確認した。



図 3-27 耐放射線性を測定するシステム

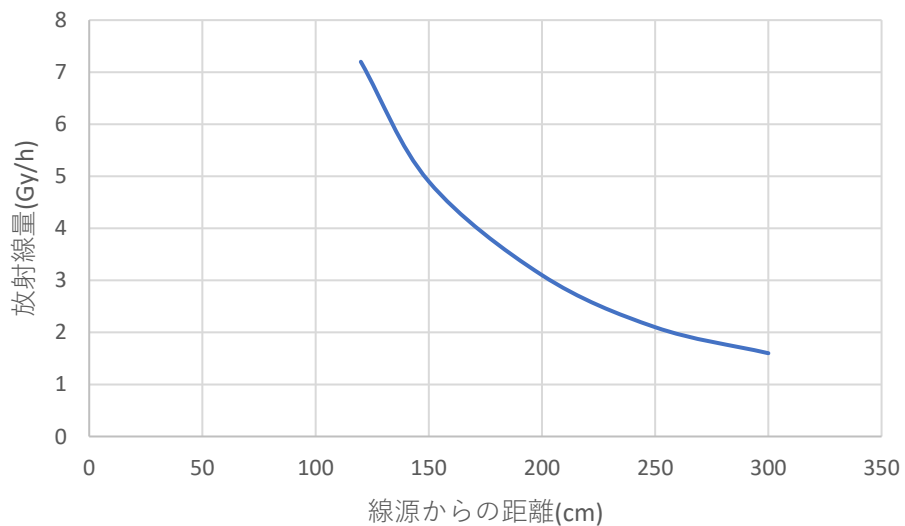


図 3-28 測定距離と放射線量との関係 (令和 6 年 8 月時点)

3.2.2 超音波サブミリ測距システムの構築（再委託先：室蘭工業大学）

LIBS 計測におけるレーザ焦点調整のため、超音波によるサブミリ測距システムの構築を目指し、センシング基盤システムの構築を行った。図 3-29 に構築したシステムを示す。本システムは超音波パルス／レシーバ（自作）、空中超音波トランスデューサ（ジャパンプローブ株式会社）および計測制御用コンピュータからなる。本システムにより空中超音波トランスデューサより超音波パルスを送信し、パルスエコー計測により反射源までの距離を測距する。反射信号の一例を図 3-30 に示す。開発した超音波信号処理ソフトウェアにより、リアルタイムに測距可能な仕様とした。受信波形より距離検出を行うため、ソフトウェア内にて波形の到来時間を検出し、次式により距離に換算した。

$$x = \frac{c\tau_r}{2} \tag{5}$$

波形の到来時間は図 3-31 のように、まず波形ピーク位置を検出し、そのピーク強度がしきい値（本研究ではピーク強度の 5%）まで低下する位置を到来時間とした。



図 3-29 超音波サブミリ測距基盤システム

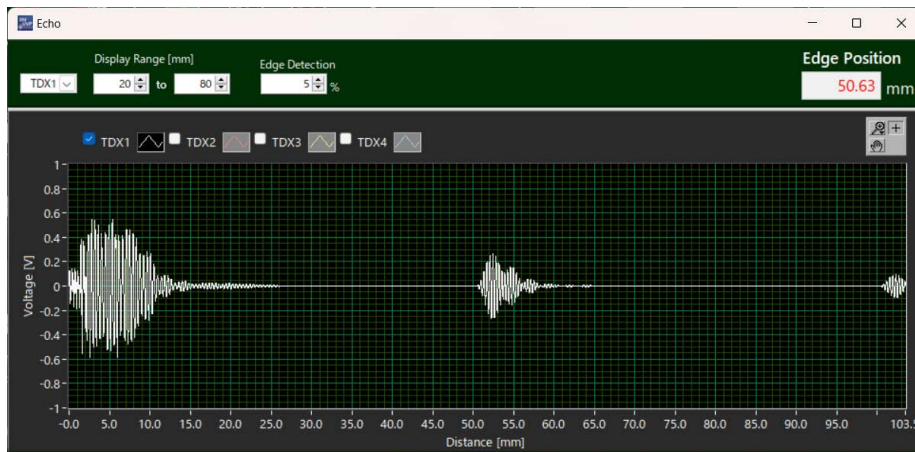


図 3-30 超音波測距ソフトウェアの表示例

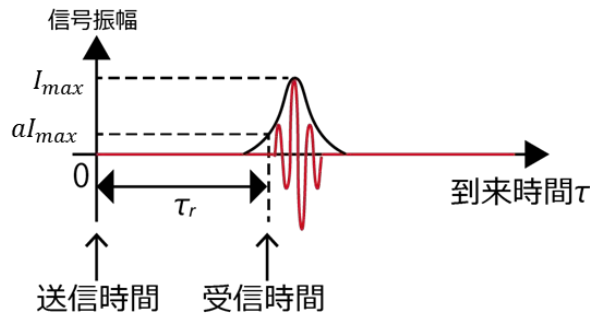


図 3-31 波形立ち上がり時間の検出

システムによる測距性能について、センサおよび超音波反射源が静止した条件下にて検証した。図 3-32 に実験体系を示す。反射源としてアクリルブロックを用い、ブロックを微動ステージ上に静置し、ステージ距離を 50 μm 間隔で移動させた。このとき、各位置における測距を本システムにより実施した。なお、空中超音波トランスデューサは中心周波 400 kHz、超音波素子サイズ 20 mm×20 mm とした。図 3-33 に測距結果を示す。微動ステージの移動に追従した測距結果が得られ、各位置におけるばらつきは±13 μm 程度であった。

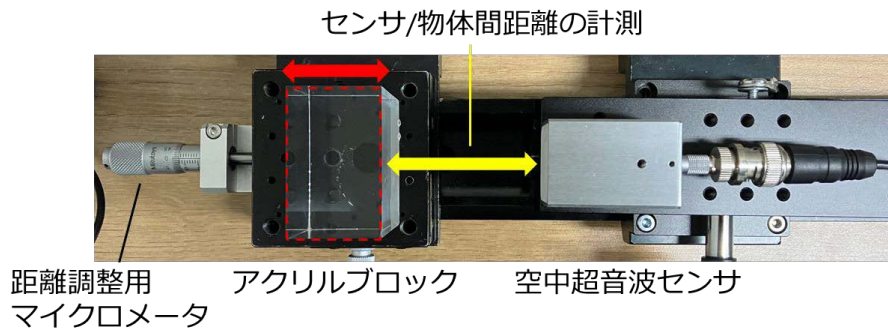


図 3-32 測距性能検証実験

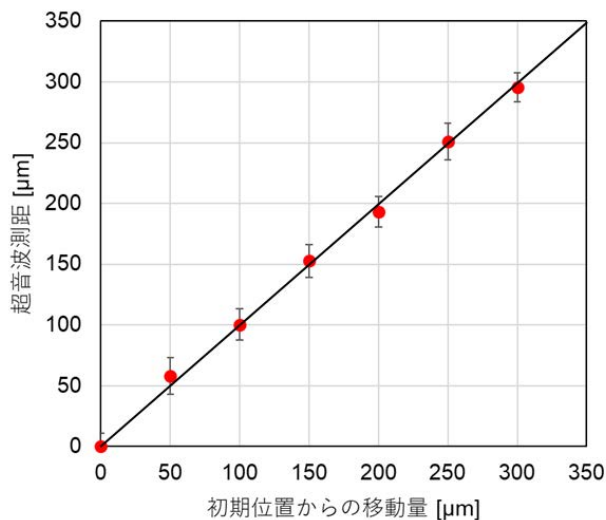
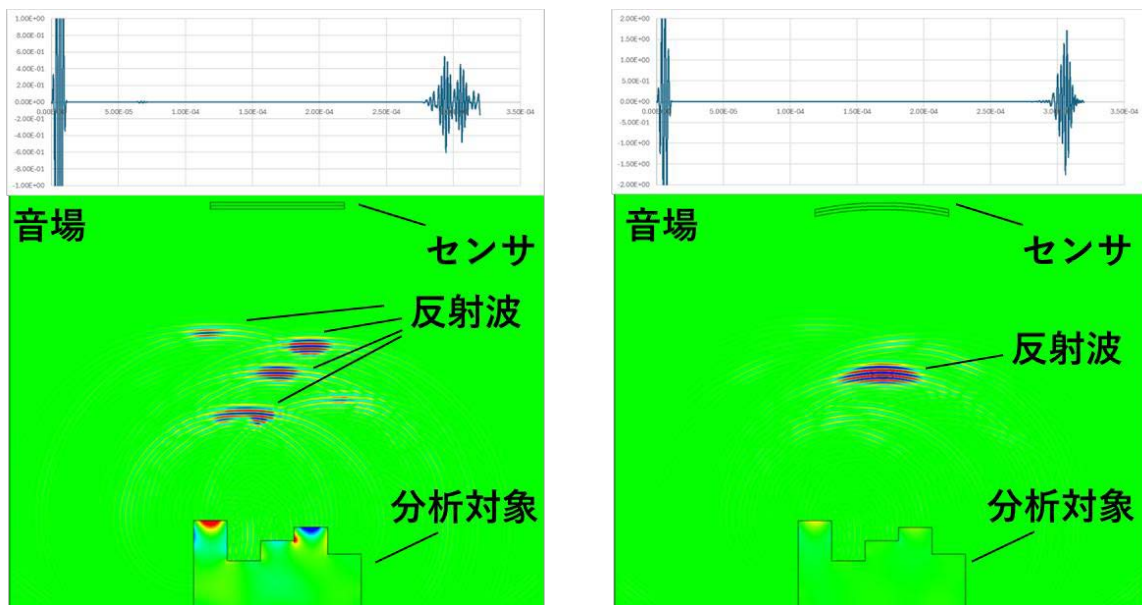


図 3-33 測距結果

本研究初年度における令和6年度において、超音波トランスデューサは汎用品であるフラットタイプトランスデューサを用いた。しかし、空中超音波は送受信音圧を向上させるため、比較的素子サイズが大きくなり、送信波面が広がる。そのため、図3-34(a)の超音波伝搬シミュレーション結果(ComWAVE X、伊藤忠テクノソリューションズ株式会社)に示すように、測距物体形状が複雑な場合、複数の反射波が受信され、測距性能の低下が予想される。よって、図3-34(b)に示すように、センサ形状を湾曲させたフォーカシングトランスデューサを用い、横方向分解能を向上させ、超音波測距の不確かさを低減させる必要があり、今後LIBS計測における焦点位置を勘案したセンサ形状の最適化が必要であることが示唆された。



(a) フラットタイプトランスデューサ (b) フォーカスタイプトランスデューサ

図 3-34 超音波測距におけるセンサ形状の影響

令和6年度においては超音波サブミリ測距システムのハードウェアおよびソフトウェア基盤を構築し、静的環境においてその測距性能を確認した。令和7年度以降、ロボットアームなどへの搭載を鑑みた振動条件下における測距性能の検証ならびに横方向分解能改善のためのセンサ形状最適化、LIBS計測への影響調査を予定している。

3.2.3 LIBS への超音波サブミリ測距システムの適用 (連携先：原子力機構)

LIBSシステムへの超音波サブミリ測距システム適用とバッテリー駆動可能な可搬型LIBSシステムの構築を目標に、令和6年度は以下の2項目を実施した。

(1) 超音波サブミリ測距システム適用に向けたプログラム作成

超音波イメージングシステムで取得される測定対象物の3次元データを想定し、電動ステージを用いた形状再現確認の基礎試験を実施した。本試験では、外部ファイルから座標データを読み取り、3次元電動ステージ(図3-35)を自動制御するプログラムをLabVIEWにより開発した。

開発したプログラムでは、2次元マッピングを想定し、X軸およびY軸方向には一定間隔で移動しながら、Z軸(高さ方向)は外部ファイルに記録された座標値に基づいて制御

する構成とした。図 3-36 に示す実測値をもとに作成した模擬 3 次元データを用いてプログラムの動作を検証した。その結果、電動ステージが想定通りに動作し、形状再現が可能であることを確認した。現在は模擬データを使用しているが、今後は超音波サブミリ測距システムから取得される実データを用いてステージ制御を行えるよう、プログラムの改良を進める予定である。

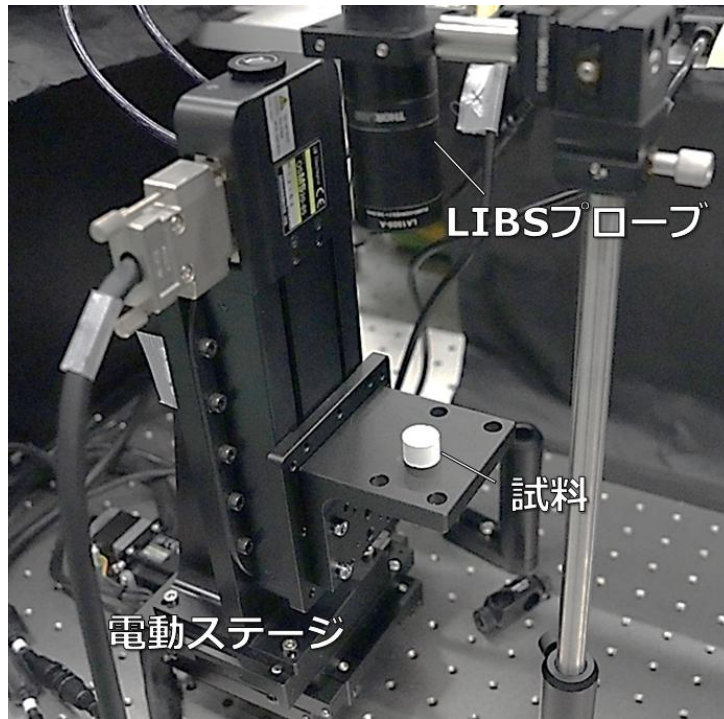


図 3-35 制御対象の電動ステージ

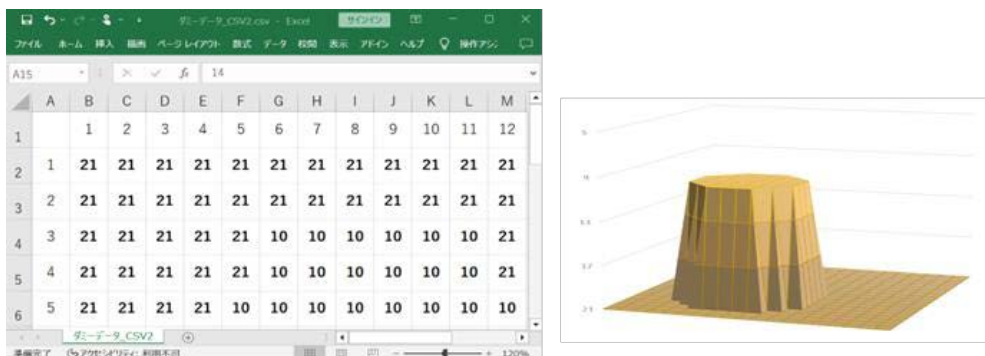


図 3-36 動作確認に用いた模擬データ（左図）と模擬データの 3 次元イメージ（右図）

(2) バッテリ駆動化に向けた仕様検討

従来の可搬型 LIBS システムを対象に、各構成機器の電力仕様を抽出するとともに、簡易型電力計を用いて消費電力の測定を行った。表 3-4 に各機器について電力仕様を抽出・整理したものを示す。これらの値が、各機器において想定される最大消費電力となる。

図 3-37 は、実際に各イベント毎に消費電力を測定した結果を示したものである。レーザー発振、待機、測定処理といった各動作モードにおける電力消費がプロットしている。最大消費電力は、レーザーを 15 Hz で駆動した際に 288 W を記録した。通常の運用におい

ては、装置調整時はレーザ 1 Hz 駆動、通常測定時は 10 Hz 駆動（約 250 W）、連続測定時間はおよそ 3 h、1 日最大 6 h 程度で運用される想定である。なお、待機時にはレーザ非発振状態であり、待機電力のみ消費される。

さらに、省電力化に向けた検討も行った。現状では AC アダプターによる駆動となっているが、各機器を直接 DC 駆動に切り替えることで、さらなる消費電力削減が可能である。例えば、オシロスコープについては、USB 給電タイプの PC オシロスコープを用いることで、5 V×1 A=5 W 程度に抑えられる見込みである。また、計測用 PC についても、AC アダプター駆動のノート PC を活用することで、20 V×5 A=100 W 程度に抑えることが可能となる。以上の検討結果から、通常測定時において最大消費電力は 300 W 未満に収まることから、現状構成のままでも十分にバッテリー駆動によるシステム運用が可能であると判断できる。

表 3-4 可搬型 LIBS システムの電力仕様

	AC			DC		
	V	A	W	V	A	W
従来型光ファイバーLIBS						
カタリナ分光器	100	1.2	120	12	3.5	42
Continuum社製 Minilite II	100	4	400	AC100V		400
カップリングボックス減圧ポンプ	100	1	100	AC100V		100
ディレイジェネレーター	PCより給電			5	1	5
計測用PC	100	3	300	AC100V		300
オシロスコープ	100	0.3	30	AC100V		30
パワーメーター	100	0.5	50	12	0.25	3
全消費電力	1000			880		

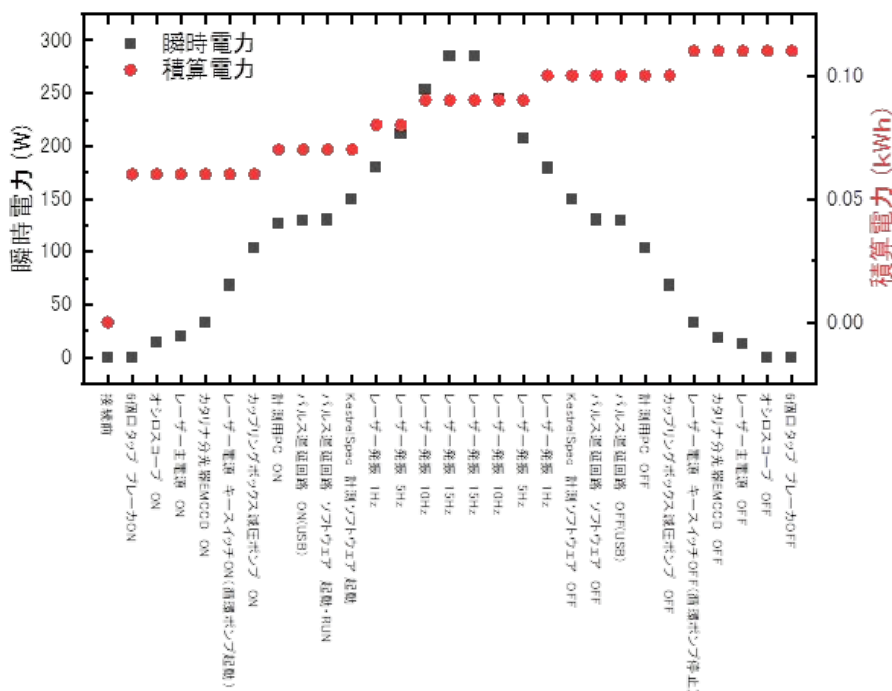


図 3-37 各イベントにおける消費電力

3.2.4 計測システムのバッテリー駆動遠隔化（再委託先：玉浦ラボ）

(1) バッテリーの基本性能

廃炉作業ロボットをバッテリー駆動とするとした場合、耐放射線性は必須であるが、作業内容や作業時間に応じてバッテリーに求められる性能は異なる。バッテリーの性能指標としては大きく、①バッテリー容量とエネルギー密度 (Wh/kg) (作業にともなう消費電力の持続性[何時間もしくは何日間、作業が続けられるか])、②バッテリーのエネルギー出力 (kW/sec) (瞬時に必要なハイパワーを出力して作業ができて、瞬時に高トルク作業を停止するハイパワー出力がどれくらいあるか) の二つがある。これらの指標はそれぞれ下記のように表記される。

①=バッテリー容量 (Wh)。エネルギー密度 (Wh/kg)。

②=C レート (1=60 min 間で出力する電気量 A)。バッテリーの平均出力電位 V の場合には $W=AV$ 。

C レートが 2, 3, …10, …100 と増大すると、出力時間が 60 min の 1/2 倍 (30 min), 1/3 倍 (20 min) , …1/10 倍 (6 min) , …1/100 倍 (6 min) と小さくなる。出力の場合には放電時間に、また、入力の場合には充電時間に相当する。充放電の際、正極と負極のそれぞれでの電極で起こる化学反応速度の大きさ、また、電解質のイオン導電率が流す電流値の大きさに追従しやすいほど C レートは高くできる。したがって、C レートが高くなると電極の化学物質の非可逆的な構造変化が生じて、電極の劣化による電位の低下や電気容量の劣化が起りやすくなる。通常は C レート 1~5 で使用される。高出力作業によっては、C レートが 100~200 など必要とされるが、このようなハイレートのは、まだ一般的に普及しているものではない。

また、充放電回数の大きさもバッテリーの大事な指標であり、充放電回数と耐久性とコストとの関係で作業に即した実用的な性能を設定して開発する必要がある。

実際に LIBS システムの運転に必要な消費電力 (588 Wh) をもとに、運転条件を表 3-5 のように設定した場合 (1 日 5 h、運転日数 7 日) の消費電力から必要となるバッテリー容量を求め (20, 580 Wh)、バッテリーのエネルギー密度を 170 Wh/kg、リチウムイオン (LFP: Lithium Ion Phosphate) 電池および 400 Wh/kg (本研究で試作するバッテリー) としたときのバッテリー重量は、それぞれ 121 kg と 52 kg と試算された。

この運転条件をもとに、今後さらに測定に最適な運転条件を検討する。また、搬送車と装置を含めた全体の重量を 300 g とし搬送車の可動範囲 10 m で、表 3-6 のような稼働条件 (稼働日数 7 日) で、バッテリーの重量は、エネルギー密度 170 Wh/kg で 2.4 kg、400 Wh/kg で 1.0 kg となった。また、クレーンによる 20 kg の物体を 10 m 引き上げる作業を 1 日 5 回、運転日数 7 日としたときのバッテリーの重量は、エネルギー密度 170 Wh/kg で 1.1 kg、400 Wh/kg で 0.48 kg となった。これらの搬送車の稼働とクレーン作業に必要なバッテリーの重量は、測定装置稼働に必要なバッテリー重量の 3%程度である。

表 3-5 LIBS システムの運転条件と消費電力・バッテリー重量

測定システムの運転時間・日数		消費電力 (Wh)
運転時間	1 h	588
1 日当たり運転時間	5 h	2,940
運転日数	7days	20,580
バッテリーのエネルギー密度 (Wh/kg)		バッテリー重量 (kg) 運転条件 (5 h/day、7days)
	400	52
	170	121

表 3-6 搬送車と測定装置を含めた可動範囲 10 m での稼働条件

稼働回数/day	稼働日数 (days)	荷重 (kg)	移動速度 (終速度) (m/s)	移動距離 (m)	加速度 (m/ss)
24	7	300	0.1	10	0.1

(2) 遠隔化への使用可能性

(2)-1 遠隔スイッチングの電子基板の耐放射線性の検討

Wi-Fi でバッテリーを遠隔駆動（スイッチング、出力制御、緊急時シャットダウン、復帰等）するためには、通信機能の電子回路基板の耐放射線性が必須であることから、最初にこれについて調査研究を行いまとめたものが表 3-7 である。ここに示すように、廃炉作業の放射線量を考慮するとポリイミド基板を使用する必要があることがわかった。実際には耐放射線性をさらに高めるために、電子基板システム一式を耐放射線防護シールドで保護する必要もあると考えられるので、これについては令和 7 年度以降に検討する。

表 3-7 電子基板の耐放射線性の検討

基板材料	性能
FR-4基板 (エポキシ樹脂+ガラス繊維)	中程度の耐放射線性。ただし、高線量 ($10^5 \sim 10^6 \text{Gy}$) では劣化する。
ポリイミド基板 (PI基板)	FR-4より耐放射線性が高く、航空宇宙・原子力用途にも使用される。
セラミック基板 (アルミナ、窒化アルミ)	非常に高い耐放射線性。100万Gy超でも性能維持可能。

(2)-2 バッテリー遠隔制御アルゴリズムの検討

ポリイミド基板を想定し、ここでは通常の電子基板材料を使用した Wi-Fi 通信によるバッテリーの沿革駆動について使用可能性を検討し実験を行った。まず、遠隔駆動を制御するバッテリーの制御アルゴリズムを検討した。このアルゴリズムの妥当性と信頼度についてはさらに検討が必要であり、回路基板のマイコン coding を開発することは令和 7 年度に行うこととした。令和 6 年度は、市販の Wi-Fi 通信によるバッテリーの on/off 遠隔操作テストを確認した。

(3) 放射線照射実験用の試験バッテリーの試作と基本性能

(3)-1 市販バッテリーでの性能比較と耐放射線性の試験結果

バッテリー駆動遠隔化への使用可能性については、上記(2)のワイヤレス通信システムの耐放射線性とあわせて、バッテリーそのものの耐放射線性についても廃炉作業に使用できるかどうかを見極めるための検討と実験を行った。

まず、市販されているリチウムイオン電池（表 3-8 に試験に使用した市販バッテリーの基本性能を示す。）について耐放射線性について試験を行い、その結果を表 3-9 に示す。これらの表から耐放射線性があり、発火・発熱の点で安全なものは、AMP 社製の全固体リチウムイオン電池が市販品として利用できることがわかった。

表 3-8 耐放射線性試験に使用した市販バッテリーの基本性能

市販バッテリー		バッテリー性能仕様			
種類	型番	バッテリー容量(Ah)	Crate (測定時)	使用温度範囲 (°C)	安全性
リチウムイオン電池	Kratak	1,900	0.263	-20~+60	× (発火)
ニッケル水素	Panasonic (eneloop)	2,000	0.1	-20~+30	× (発火)
全固体リチウムイオン電池	AMP 9070140	7,500	1	-50~+70	○
全固体リチウムイオン電池	AMP 7197247	22,000	0.2	-40~+55	○

表 3-9 市販バッテリーの耐放射線性試験の結果

試験バッテリー	型番	耐放射線性試験条件		耐放射線性能	
		照射時間 (min)	照射強度 (Gy/h)	容量劣化 (%)	電气的性能の劣化率% (V/min) 電圧減少速度減率
リチウムイオン電池	Kratak	90	260	63	3.16 V 一定(非照射) 3.07 V 一定(照射) 劣化率=3%
ニッケル水素	Panasonic (eneloop)	600	260	5	0.000912 V/min(非照射) 0.00162 V/min(照射) 劣化率=44%
全固体リチウムイオン電池	AMP 9070140	46	260	0	0.0144 V/min(非照射) 0.0141 V/min(照射) 劣化率=2%

(3)-2 放射線照射実験用の試験バッテリーの試作と基本性能

表 3-9 の市販バッテリーの耐放射線性の結果を少し詳しく比較してみると、市販の全固体リチウムイオン電池 (AMP 9070140) は、容量劣化はゼロで、電気的性能の劣化率 2%であり、試験に用いた市販のバッテリーのなかでは耐放射線性に優れていることがわかる。ニッケル水素は容量劣化は小さいが、電気的性能の劣化率は 44%と大きく電気的特性で耐放射線性が劣る。これらの結果から、電解質が全固体であることが耐放射線性に重要と考えられることから、電解質を全固体とするリチウムイオン電池を試作開発することとした。また、(1)で示したように、廃炉作業ロボットとしてはバッテリーのエネルギー密度が 300 Wh/kg が必要であるところから、エネルギー密度を高めるために量子ドットマグネタイトを用いた全固体リチウムイオン電池を設計し、試作した。その基本性能としてのエネルギー密度は理論上 400 Wh/kg であるが、今回の試作バッテリーではその半分程度に止まり、さらなる改良が必要なことがわかった。これらの結果をもとに、令和 7 年度以降からのバッテリー開発を進める。

3.3 研究推進

研究代表者のもと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。

具体的には、令和 6 年 9 月 27 日にキックオフ会議、10 月 21 日に第一回ワークショップ、11 月 22 日に CLADS 見学、12 月 13 日に中間フォローを実施し、研究の進捗状況の共有や課題の協議、関係機関との連携強化を図った。さらに、報告書作成に向けて、複数回にわたりオンライン会議を実施した。

4. 結言

本業務は、1F 廃炉を安全に遂行するため、デブリ切り出し作業を遠距離で監視する新規技術である光音響プローブを用いたレーザ偏向検出型超音波広帯域 3D イメージングシステムの開発を目的とした。光音響プローブは、超音波（疎密波）によって生じるレーザ光の偏向現象を利用し、光波により音波を検出した。これにより従来の超音波振動子では実現しえない超広角広周波数帯の瞬時超音波受信を可能とし、強力超音波送信と組み合わせることで本システムを実現する。そのため、超音波数値解析を援用したイメージングシステムの設計・検証を行うとともに、その性能を実験的に明らかにした。また、本システムをデブリの元素分布計測自動化に応用するとともに、小型高性能バッテリーによる計測システム遠隔化への可能性を模索した。これらシステムの耐放射線性をコバルト照射施設等を用いて確認し、システム開発から現場適用性検証までを一貫して実施した。

参考文献

- [1] ジャパンプローブ株式会社, 製品紹介, “超音波伝搬シミュレータ・SWAN21”, https://www.jp-probe.com/product/?p=1&ca=18&res_id=1406019676-328879 (参照:2025年3月31日)
- [2] Y. Takeda, H. Kikura, et al., Ultrasonic Doppler Velocity Profiler for Fluid Flow, Fluid Mechanics and its Application, Springer, 2012, pp.107-200
- [3] T.T. Nguyen, H. Murakawa, N. Tsuzuki and H. Kikura, Development of multiwave method using ultrasonic pulse Doppler method for measuring two-phase flow, 実験力学 Vol.13, No.3, 2013, pp.277-284
- [4] H. Takahashi, N. Shoji, A. Ito, H. Kikura, FUNDAMENTAL STUDY ON ULTRASOUND SENSING TECHNOLOGY USING PARAMETRIC SOUND, WIT Transactions on Engineering Sciences, Vol.128, 2020, pp.103-111
- [5] H. Takahashi, T. Miyabe, G. Endo, I. Wakaida and H. Kikura, Challenge to Investigation in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant using Telemetry System, The 6th International Forum on Advanced Technologies 2020 (IFAT2020), Tokushima, Japan 2020
- [6] N. Shoji, H. Kikura, H. Takahashi and W. Wongsaroj, Three-Dimensional Velocity Distribution Measurement Using Ultrasonic Velocity Profiler with Developed Transducer, Journal of Flow Control, Measurement & Visualization. Vol.10, No.1, 2022, pp.32-55
- [7] N. Shoji, H. Takahashi and H. Kikura, Leakage Detection and Flowrate Estimation with Three-Dimensional Vector Ultrasonic Velocity Profiler, Proc. of the 12th Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety 2022
- [8] T.T. Nguyen, N. Tsuzuki, H. Murakawa, N.H. Doung, H. Kikura, Measurement of the condensation rate of vapor bubbles rising upward in subcooled water by using two ultrasonic frequencies, International Journal of Heat and Mass Transfer, 99, 2016, pp.159-169
- [9] T. Ihara, N. Tsuzuki, H. Kikura, Application of ultrasonic Doppler Velocimetry to Molten Glass by using broadband phase difference method, Flow Measurement and Instrumentation, 48, 2016, pp.90-96
- [10] M. Batsaikhan, K. Akaoka, M. Saeki, T. Karino, H. Ohba and I. Wakaida, Two-dimensional elemental mapping of simulated fuel debris using laser-induced breakdown spectroscopy, Journal of Nuclear Science and Technology, 2023
- [11] H. Takahashi, N. Shoji, A. Ito and H. Kikura, Fundamental Study on Ultrasound Sensing Technology Using Parametric Sound, WIT Transactions on Engineering Sciences, Vol.128, 2020, pp.103-111
- [12] N. Shoji, H. Kikura, H. Takahashi, K. Teramoto and H. Kawai, Measurement of Solid-Gas-Liquid Three-Phase Flow using Pulsed Ultrasound, Proc. of 14th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, 2023, pp.83-86

This is a blank page.

