

平成 30 年度

文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業  
英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

遠隔操作技術及び核種分析技術を基盤とする  
俯瞰的廃止措置人材育成

成果報告書

平成 31 年 3 月  
国立大学法人 東京大学

本報告書は、文部科学省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平成 26－30 年度「遠隔操作技術及び核種分析技術を基盤とする俯瞰的廃止措置人材育成」の成果を取りまとめたものです。



## 目次

	頁
概略	xi
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	
2.1 全体計画	2-1
2.2 各年度計画	2-1
3. 業務の実施内容及び成果	
3.1 遠隔操作技術に関する研究	3.1-1
3.1.1 高所・狭隘部アクセスとそれらの遠隔操作インタフェースの開発	3.1-1
3.1.2 遠隔水中活動機器の要素技術開発と人材育成プログラムの作成 (再委託先：福島大学)	3.1-67
3.1.3 遠隔マニピュレーションシステムの設計・評価に関する基盤的研究と 柔軟なシステム構築が可能な人材育成 (再委託先：神戸大学)	3.1-88
3.2 核種分析に関する研究	3.2-1
3.2.1 ガンマ線 CT システムの開発	3.2-1
3.2.2 微量分析システムの開発	3.2-32
3.3 廃止措置に関する俯瞰的人材育成	3.3-1
3.3.1 廃止措置に関する講義	3.3-1
3.3.2 廃止措置教育プログラム	3.3-3
3.4 研究推進	3.4-1
4. 結言	4-1

表一覧

	頁
表 3.1-1	セグメントの性質 . . . . . 3.1-17
表 3.1-2	フランジ乗り越えのためのパラメータ設定 . . . . . 3.1-18
表 3.1-3	Helical-Crawler-Gait のセグメントのパラメータ . . . . . 3.1-20
表 3.1-4	複雑な形状の配管内移動のための形状設計パラメータ . . . . . 3.1-25
表 3.1-5	分岐に対応する dodge part のパラメータ . . . . . 3.1-26
表 3.1-6	曲管に対応する dodge part のパラメータ . . . . . 3.1-27
表 3.1-7	配管のせん断方向のずれに対応する dodge part のパラメータ . . . . . 3.1-27
表 3.1-8	部分的に塞がれた配管に対応する dodge part のパラメータ . . . . . 3.1-28
表 3.1-9	径が変化する配管に対応するパラメータ . . . . . 3.1-29
表 3.1-10	作製した主な FRP . . . . . 3.1-82
表 3.1-11	平成 27 年度以降に実施したロボットプログラミング講座 . . . . . 3.1-85
表 3.2-1	放射線検出器のガンマ線検出特性 . . . . . 3.2-4
表 3.2-2	代表的なシンチレーション検出器及び半導体検出器の特性比較 . . . . . 3.2-5
表 3.2-3	評価のために作製した OPD . . . . . 3.2-9
表 3.2-4	素子の製作条件 . . . . . 3.2-12
表 3.2-5	放射線分布測定用素子の製作条件 . . . . . 3.2-14
表 3.2-6	検出効率の比とエネルギーの関係 . . . . . 3.2-19
表 3.2-7	製作したコンプトンカメラの角度分解能 . . . . . 3.2-27
表 3.2-8	構成元素の半定量分析の結果 . . . . . 3.2-38
表 3.2-9	土壌から抽出したウランキャリアの加速器質量分析 . . . . . 3.2-50
表 3.2-10	経験的な予測から算出した核燃料再処理施設の高放射能処理廃液に含まれる $^{237}\text{Np}$ 、 Pu 同位体 ( $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{240}\text{Pu}$ )、 $^{241}\text{Am}$ 及び $^{244}\text{Cm}$ の放射能強度比と L X 線収量比 . . . . . 3.2-62
表 3.3-1	廃止措置特論 E 講義内容 (水曜日 4 限 14:55-16:40) . . . . . 3.3-1

図一覧

	頁
図 1-1	システム統合のイメージ . . . . . 1-2
図 3.1-1	吸着・巻き取り機構を有する飛行ロボットの飛行・観測タスク . . . . . 3.1-1
図 3.1-2	永電磁フォルダの動作原理 . . . . . 3.1-2
図 3.1-3	永電磁フォルダを利用した吸着機構と吸着機構を搭載した飛行体 . . . . . 3.1-2
図 3.1-4	受動回転球殻プロテクタを有する飛行ロボット . . . . . 3.1-3
図 3.1-5	強化型球殻ジョイントの応力集中評価と強化型球殻ジョイントで構築した 球殻を有する飛行ロボットのコンクリート衝突試験 . . . . . 3.1-3
図 3.1-6	搭載カメラ映像に映る球殻プロテクタの除去 . . . . . 3.1-4
図 3.1-7	打音装置を搭載した飛行ロボットの開発 . . . . . 3.1-4
図 3.1-8	クレーン懸架による能動スコープカメラの遠隔操作の概念図 . . . . . 3.1-5
図 3.1-9	小径配管から格納容器内にアクセス可能な索状ロボットの概念図 . . . . . 3.1-5

図 3.1-10	空気噴射式方向制御装置	3.1-6
図 3.1-11	配管内推進機構	3.1-7
図 3.1-12	配管内移動のためのセルフロック機構を用いた保持力発生装置	3.1-7
図 3.1-13	索状ロボットの遠隔操作のための視触覚提示インタフェース	3.1-8
図 3.1-14	オープンスペースで移動可能な柔軟シャフト型索状ロボット	3.1-8
図 3.1-15	能動スコープカメラの接触状態の推定	3.1-9
図 3.1-16	配管内推進索状ロボットの推進性能評価の様子	3.1-9
図 3.1-17	配管内推進機構の改良	3.1-10
図 3.1-18	空気噴射型能動スコープカメラの接触状態の推定と姿勢との重畳表示の様子	3.1-10
図 3.1-19	星形タイヤを搭載した移動ロボット	3.1-11
図 3.1-20	提案システム概要図	3.1-13
図 3.1-21	へび型ロボットの構造	3.1-14
図 3.1-22	背びれ曲線と Frenet の標構	3.1-15
図 3.1-23	提案手法の概要	3.1-16
図 3.1-24	セグメントの結合	3.1-16
図 3.1-25	case A のセグメント構成の詳細	3.1-18
図 3.1-26	case B のセグメント構成の詳細	3.1-18
図 3.1-27	捻転動作とシフト制御	3.1-19
図 3.1-28	シミュレーション結果 (配管直径 100 mm)	3.1-19
図 3.1-29	Helical-Crawler-Gait のセグメント	3.1-20
図 3.1-30	シミュレーション結果 (段差登り)	3.1-20
図 3.1-31	へび型ロボットのモジュール試作	3.1-21
図 3.1-32	へび型ロボットの外観と防塵用カバーを装着したへび型ロボット	3.1-22
図 3.1-33	フランジを持つ 110 mm のパイプの走破 (実機実験)	3.1-22
図 3.1-34	楕状の外殻形状を持つへび型ロボット	3.1-22
図 3.1-35	はしご登り動作の目標形状	3.1-23
図 3.1-36	はしご登り実験	3.1-23
図 3.1-37	複雑な形状の配管内移動のための形状設計	3.1-24
図 3.1-38	guide part の有無による比較	3.1-24
図 3.1-39	guide part の形状の概略	3.1-25
図 3.1-40	guide part の形状の設計	3.1-26
図 3.1-41	分岐に対応する目標形状	3.1-27
図 3.1-42	曲管に対応する目標形状	3.1-27
図 3.1-43	配管のせん断方向のずれに対応する目標形状	3.1-28
図 3.1-44	部分的に塞がれた配管に対応する目標形状	3.1-28
図 3.1-45	径が変化する配管に対応する目標形状	3.1-29
図 3.1-46	捻転とシフト制御	3.1-30
図 3.1-47	シフト制御による軸方向の変位の捻転動作による補償	3.1-30

図 3.1-48	ねじれ角の補償	3.1-31
図 3.1-49	$\phi_{rot}$ の定義	3.1-31
図 3.1-50	dodge part の回転	3.1-31
図 3.1-51	シミュレーション結果 (曲管)	3.1-32
図 3.1-52	シミュレーション結果 (せん断方向のずれ)	3.1-32
図 3.1-53	シミュレーション結果 (部分的に塞がった箇所)	3.1-32
図 3.1-54	シミュレーション結果 (不連続な径の変化)	3.1-32
図 3.1-55	軌道構造体自動施工システムの概要	3.1-34
図 3.1-56	開発した分岐モジュール (Ver. 2)	3.1-34
図 3.1-57	連結施工可能な高剛性分岐モジュールを実現する機構的な工夫	3.1-35
図 3.1-58	性能評価実験結果	3.1-36
図 3.1-59	人間が重い物体を運ぶ時の方法	3.1-37
図 3.1-60	道具に必要とされる機能と物体・ロボットにかかる力	3.1-37
図 3.1-61	ロボットが使う道具	3.1-38
図 3.1-62	簡単な検証過程の例	3.1-39
図 3.1-63	ロボットの転倒と滑り	3.1-40
図 3.1-64	ロボットの自由度設計	3.1-40
図 3.1-65	開発した物体を大きな力で押すことのできるロボット	3.1-41
図 3.1-66	滑らず傾けることのできるアクチュエータの向きの探索	3.1-41
図 3.1-67	2 台の移動ロボットの協調	3.1-42
図 3.1-68	物体の 6 次元運動に対応した移動ロボット	3.1-43
図 3.1-69	マニピュレーション可能なロボット配置の領域と最適解	3.1-43
図 3.1-70	導出した配置での物体の傾け	3.1-44
図 3.1-71	高重量物体を支え搬送する移動ロボット	3.1-44
図 3.1-72	提案したアルゴリズムにより求められたマニピュレーション手順の例	3.1-45
図 3.1-73	魚眼カメラ映像からの俯瞰映像生成	3.1-46
図 3.1-74	故障に対して頑健なカメラ配置	3.1-47
図 3.1-75	カメラ故障時の俯瞰映像の提示	3.1-47
図 3.1-76	ガンマ線照射実験の様子	3.1-48
図 3.1-77	ガンマ線照射によるカメラ故障に対応した補完処理による俯瞰映像提示	3.1-48
図 3.1-78	従来の俯瞰映像提示システムの課題	3.1-49
図 3.1-79	遮蔽領域の表示	3.1-49
図 3.1-80	俯瞰映像上への障害物・遮蔽領域の重畳表示	3.1-50
図 3.1-81	俯瞰映像提示実験の環境	3.1-50
図 3.1-82	鮮明透過色を用いた俯瞰映像上での遮蔽領域の描画	3.1-51
図 3.1-83	手掌部圧刺激の力覚代行効果を確認するための実験装置	3.1-52
図 3.1-84	複数被験者による実験結果	3.1-53
図 3.1-85	手掌部への圧刺激を活用した遠隔操作用コントローラ	3.1-54
図 3.1-86	多様な握り方に対応するための可変機構	3.1-54

図 3.1-87 遠隔操作シミュレータ	3.1-55
図 3.1-88 SEA の構成図	3.1-55
図 3.1-89 SEA を用いたコントローラ試作例	3.1-56
図 3.1-90 内部構造	3.1-56
図 3.1-91 遠隔操作に用いたロボット	3.1-56
図 3.1-92 ロボット遠隔操作時の状況	3.1-57
図 3.1-93 移動ロボットを用いたガンマ線 CT	3.1-57
図 3.1-94 誤差影響検討のためのシミュレーション環境	3.1-58
図 3.1-95 検出器の位置姿勢の不確実性と放射線源の位置推定誤差の関係	3.1-58
図 3.1-96 放射線源位置推定のシミュレーション環境	3.1-59
図 3.1-97 MLEM 法による放射線源推定シミュレーションの結果	3.1-59
図 3.1-98 実験に使用した移動ロボット	3.1-59
図 3.1-99 放射線源位置推定実験の環境	3.1-60
図 3.1-100 放射線源位置推定の結果	3.1-60
図 3.1-101 実験に使用した移動ロボット及びセンサ	3.1-61
図 3.1-102 実験環境の様子	3.1-62
図 3.1-103 生成された環境地図	3.1-62
図 3.1-104 SLAM による自己位置推定結果を用いた放射線源位置の推定	3.1-63
図 3.1-105 2 爪把持と 3 爪把持	3.1-68
図 3.1-106 立体カム機構	3.1-69
図 3.1-107 3 爪ペンチカムのカム配置	3.1-69
図 3.1-108 試作した 3 爪及び 2 爪ピンチングデバイス及びモータ付き 3 爪ピンチングデバイス	3.1-70
図 3.1-109 把持試験に使用した対象物	3.1-70
図 3.1-110 平行爪ハンドのコンセプト	3.1-71
図 3.1-111 粒径 0.5 mm の模擬燃料デブリのピックアップ	3.1-71
図 3.1-112 燃料デブリ・サンプリング用ロボット・マニピュレータシステム	3.1-72
図 3.1-113 コンパクトに巻き取り可能なサンプリング用アーム	3.1-72
図 3.1-114 初期に開発したコンパクトに巻き取り可能なサンプリング・アーム	3.1-73
図 3.1-115 初期に開発したコンパクトに巻き取り可能なサンプリング・アームのための 巻き取りドラム	3.1-73
図 3.1-116 関節部の構造	3.1-74
図 3.1-117 関節部のフレキシブルモードとリジッドモードの切り替え	3.1-74
図 3.1-118 チェーンの連結方法	3.1-74
図 3.1-119 チェーンならびに巻き取りドラムのシステム設計	3.1-75
図 3.1-120 静止座標系と機体座標系	3.1-76
図 3.1-121 制御システムのブロック図	3.1-77
図 3.1-122 小型水中ロボット実験機	3.1-77
図 3.1-123 自由視点 TV 法による 3 次元復元の原理	3.1-78

図 3.1-124	水中で撮影されたテスト画像の例と復元された 3 次元シーン	3.1-79
図 3.1-125	揺れるカメラ運動のモデル化	3.1-80
図 3.1-126	陸上での実験装置と復元された 3 次元シーン	3.1-80
図 3.1-127	シミュレーションにより人工的に生成された 3 次元的に運動するカメラ画像と 復元された 3 次元シーンの例	3.1-81
図 3.1-128	水中画像を取得する実験水槽とカメラ	3.1-81
図 3.1-129	実際の対象物と復元されたシーン	3.1-82
図 3.1-130	作製した FRP の代表的な外観 (50×50 mm)	3.1-83
図 3.1-131	3 点曲げ試験結果	3.1-83
図 3.1-132	Web カメラ照射試験の様子	3.1-84
図 3.1-133	使用した教材	3.1-85
図 3.1-134	プログラム作成中の様子	3.1-86
図 3.1-135	SfM 技術の紹介に用いた点群データ	3.1-86
図 3.1-136	新たに開発したパラメータ調整用ユーザインタフェース	3.1-90
図 3.1-137	構築した遠隔操縦プラットフォーム操縦席	3.1-90
図 3.1-138	タスク用ターゲット概観とスイッチ押下順	3.1-91
図 3.1-139	各手法でのタスク完了時間	3.1-91
図 3.1-140	マスタ移動距離の操縦速度ごとのヒストグラム	3.1-92
図 3.1-141	実験に使用したマスタ・スレーブシステム	3.1-93
図 3.1-142	マスタアームハンドル部分	3.1-94
図 3.1-143	2 種類のカメラ配置	3.1-94
図 3.1-144	操作力の異なるマスタアームでの CCE 評価	3.1-95
図 3.1-145	操作力の異なるマスタアームでのタスク達成度	3.1-95
図 3.1-146	異なるカメラ配置での CCE 評価	3.1-96
図 3.1-147	異なるカメラ配置でのタスク達成度	3.1-96
図 3.1-148	マスタアーム (Haption 社製 Virtuouse 6D35-45)	3.1-97
図 3.1-149	タスクに用いたスイッチの配置	3.1-98
図 3.1-150	操縦席での画面表示	3.1-98
図 3.1-151	タスク完了時間の比較	3.1-98
図 3.1-152	インデキシング回数の比較	3.1-99
図 3.1-153	檜葉遠隔技術開発センターでの研修の様子	3.1-101
図 3.1-154	レスキューロボットコンテストでの展示の様子	3.1-102
図 3.2-1	直交配置によるガンマ線源の計測例	3.2-4
図 3.2-2	コンプトン散乱を用いた例	3.2-4
図 3.2-3	半導体パラメータ測定システムにより得た CdTe 半導体検出器の電圧と リーク電流の関係	3.2-6
図 3.2-4	半導体パラメータ測定装置で計測したシリコン半導体検出器の特性例	3.2-6
図 3.2-5	有機フォトダイオードの原理	3.2-7
図 3.2-6	プラスチックシンチレータ上に形成した OPD	3.2-7

図 3.2-7	線量計素子の試験体系	3.2-8
図 3.2-8	線量計素子の X 線量に対する応答	3.2-8
図 3.2-9	製作した素子の構造	3.2-9
図 3.2-10	素子 1 の写真	3.2-9
図 3.2-11	素子 3 の写真	3.2-9
図 3.2-12	素子 1 及び素子 3 に関する X 線照射実験結果	3.2-10
図 3.2-13	X 線分布測定結果	3.2-10
図 3.2-14	インクジェット塗布装置	3.2-11
図 3.2-15	OPD を用いる放射線検出	3.2-12
図 3.2-16	製作した OPD	3.2-12
図 3.2-17	製作した素子	3.2-13
図 3.2-18	X 線強度と X 線誘起電流	3.2-13
図 3.2-19	X 線強度と単位有感部面積あたりの X 線誘起電流の関係	3.2-14
図 3.2-20	放射線分布測定用素子	3.2-14
図 3.2-21	インクジェット塗布装置によって製作した素子における X 線照射位置と X 線誘起電圧の関係	3.2-15
図 3.2-22	複数の検出器に対するフィルタ機能の付加	3.2-16
図 3.2-23	線源エネルギー分解能についてマトリクスとなる可能性	3.2-16
図 3.2-24	フィルタとエネルギー付与の関係：スズ (0.1 mm)	3.2-17
図 3.2-25	フィルタとエネルギー付与の関係：チタン (0.1 mm)	3.2-17
図 3.2-26	スズ 0.1 mm 厚を用いた場合	3.2-17
図 3.2-27	チタン 0.1 mm 厚を用いた場合	3.2-18
図 3.2-28	検出素子の原理	3.2-18
図 3.2-29	検出素子を積層した検出器	3.2-19
図 3.2-30	$^{137}\text{Cs}$ に対する検出素子波高分布	3.2-19
図 3.2-31	シリコン検出器への入射角度と検出効率のエネルギー依存性	3.2-20
図 3.2-32	シリコン検出器への入射角度と検出効率の関係	3.2-20
図 3.2-33	トランジスタの特性変化	3.2-21
図 3.2-34	$^{57}\text{Co}$ からのガンマ線に対して計算した検出器におけるエネルギースペクトル	3.2-21
図 3.2-35	$^{60}\text{Co}$ からのガンマ線によるエネルギースペクトル	3.2-22
図 3.2-36	指向性を求める体系	3.2-22
図 3.2-37	ガンマ線源による計数率分布と角度の関係	3.2-23
図 3.2-38	Dynamic ToT 回路	3.2-23
図 3.2-39	Dynamic ToT 回路の直線性	3.2-24
図 3.2-40	検出器とともに搭載した Dynamic ToT 回路	3.2-24
図 3.2-41	線源位置	3.2-25
図 3.2-42	ポジション A	3.2-25
図 3.2-43	ポジション B	3.2-25
図 3.2-44	ノイズ評価に用いたロボットシステム	3.2-26

図 3.2-45	X線場における有機薄膜線量計の試験	3.2-26
図 3.2-46	フレキシブル線量計のX線場における応答	3.2-27
図 3.2-47	コンプトンカメラの構成	3.2-27
図 3.2-48	コンプトン散乱の模式図	3.2-28
図 3.2-49	本研究で開発した小型コンプトンカメラの断面図	3.2-28
図 3.2-50	開発したコンプトンカメラにより測定した <sup>137</sup> Csの波高スペクトル	3.2-29
図 3.2-51	奥行き方向分解能に関する視差の影響	3.2-29
図 3.2-52	空間分解能と線源までの距離との関係	3.2-30
図 3.2-53	ロボットに搭載したコンプトンカメラ	3.2-30
図 3.2-54	測定点の配置	3.2-31
図 3.2-55	測定環境の様子	3.2-31
図 3.2-56	求められたガンマ線線源分布	3.2-31
図 3.2-57	多重検出器型 ICP 質量分析法 (MC-ICPMS 法)	3.2-33
図 3.2-58	デイリーイオン検出器を備えた多重検出器	3.2-33
図 3.2-59	レーザー励起による原子・分子発光	3.2-34
図 3.2-60	レーザー試料導入法 of 概念図	3.2-35
図 3.2-61	両面テープを用いて回収した模擬デブリ試料	3.2-36
図 3.2-62	模擬デブリ試料 (太さ 0.5 mm) から得られた質量スペクトル	3.2-37
図 3.2-63	LA-ICP-MS 法により得られた様々な元素の信号情報	3.2-37
図 3.2-64	自動ローディングを想定した試料セル設計	3.2-38
図 3.2-65	ナノ粒子から得られた信号プロファイル	3.2-40
図 3.2-66	フェムト秒レーザー試料導入法を用いたナノ粒子計測	3.2-41
図 3.2-67	ArF エキシマレーザー試料導入法を用いたナノ粒子計測	3.2-41
図 3.2-68	信号プロファイルを用いた分析元素存在形態解析	3.2-42
図 3.2-69	東京大学タンデム加速器研究施設における <sup>236</sup> U-AMS の基本構成	3.2-44
図 3.2-70	<sup>236</sup> U-AMS のための土壌試料の前処理フローチャート	3.2-45
図 3.2-71	デブリの同位体比を $^{236}\text{U}/^{238}\text{U} = 3.5 \times 10^{-3}$ 、キャリア量を 100 $\mu\text{g}$ とした場合の AMS 試料中の予想される同位体比	3.2-45
図 3.2-72	負イオンクーラーテストベンチ外観	3.2-47
図 3.2-73	負イオンクーラーテストベンチの構成	3.2-47
図 3.2-74	イオンクーラー入り口における減速電圧と透過率の関係	3.2-48
図 3.2-75	燃料デブリ模擬試料	3.2-49
図 3.2-76	王水に溶解したデブリ模擬試料	3.2-49
図 3.2-77	Voigt 関数によりフィッティングした超微細構造の蛍光スペクトル	3.2-51
図 3.2-78	レーザー波長の時間変化	3.2-51
図 3.2-79	スパッタ後の銅粉末	3.2-52
図 3.2-80	混合元素の発光スペクトル	3.2-52
図 3.2-81	開発した帰属プログラム	3.2-53
図 3.2-82	Tm 金属の発光スペクトルの検量線	3.2-54



図 3. 2-83	固体試料の準備の様子	3. 2-55
図 3. 2-84	ステンレスの発光スペクトル	3. 2-55
図 3. 2-85	TES 型マイクロカロリメータの動作概念	3. 2-57
図 3. 2-86	$^{239}\text{Pu}$ 線源から放射される $\text{U L X}$ 線のエネルギースペクトル	3. 2-59
図 3. 2-87	$\text{U L}_{\alpha 1}$ X 線ピークと $\text{U L}_{\alpha 2}$ X 線ピークを Voigt 関数でフィッティングした結果	3. 2-60
図 3. 2-88	$^{241}\text{Am}$ 線源から放射される $\text{Np L X}$ 線のエネルギースペクトル	3. 2-60
図 3. 2-89	$^{244}\text{Cm}$ 線源から放射される $\text{Pu L X}$ 線のエネルギースペクトル	3. 2-61
図 3. 2-90	$^{237}\text{Np}$ 線源から放射される $\text{Pa L X}$ 線と $\text{U L X}$ 線のエネルギースペクトル	3. 2-61
図 3. 2-91	TES 型マイクロカロリメータを用いて $\text{Pu}$ 廃液試料から放射される $\text{L X}$ 線を計測した場合に予測されるエネルギースペクトル	3. 2-62
図 3. 2-92	TES 型マイクロカロリメータを用いて高放射能処理廃液試料から放射される $\text{L X}$ 線を計測した場合に予測されるエネルギースペクトル	3. 2-63

#### 略語一覧

AMS	: Accelerator Mass Spectrometry (加速器質量分析)
CCE	: Crossmodal Congruency Effect
CRD	: Control Rod Drive (制御棒駆動機構)
CT	: Computed Tomography (コンピュータ断層撮影法)
DC	: Daly Collector (デイリー検出器)
DR	: Dilution Refrigerator (希釈冷凍機)
dToT	: dynamic Time-over-Threshold
EM	: Electron Multiplier (電子増倍)
ESO	: Extended State Observer (拡張状態オブザーバ)
FC	: Faraday Collector (ファラデー検出器)
F.P.	: Fission Products (核分裂生成核種)
FRP	: Fiber-Reinforced Plastics (繊維強化プラスチック複合材料)
FWHM	: Full Width at Half Maximum (半値全幅)
HMD	: Head Mounted Display (ヘッドマウントディスプレイ)
ICP-MS	: Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (誘導結合プラズマ質量分析)
IGZO	: Indium Gallium Zinc Oxide (インジウム・ガリウム・亜鉛・酸素から構成されるアモルファス半導体)
IMU	: Inertial Measurement Unit (慣性計測装置)
IZO	: Indium Zinc Oxide (酸化・インジウム酸化亜鉛)
LA	: Laser Ablation (レーザーアブレーション)
LAMIS	: Laser Ablation Molecular Isotopic Spectrometry (レーザーアブレーション分子同位体分光法)
LIBS	: Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (レーザー誘起励起分光法)

LiDAR : Light Detection And Ranging (3次元測域センサ)  
LPD : Laser Photo Detachment (レーザー光脱離法)  
MLEM : Maximum Likelihood Expectation Maximization (最尤推定-期待値最大化)  
OPD : Organic Photodiode (有機フォトダイオード)  
ORD : Organic Radiation Detector (有機半導体放射線検出器)  
PEDOT : Polyethylenedioxythiophene (ポリエチレンジオキシチオフェン)  
PET : Positron Emission Tomography (陽電子放射断層撮影法)  
PSS : Polystyrene sulfonate (ポリスチレンスルホン酸)  
P3HT : Poly (3-hexylthiophene) (ポリ (3-ヘキシルチオフェン) )  
ROS : Robot Operating System (ロボットオペレーティングシステム)  
SEA : Series Elastic Actuation (シリーズ・エラスティック・アクチュエーション)  
SfM : Structured from Motion (ストラクチャードフロムモーション)  
SIFT : Scale Invariant Feature Transform (スケール不変特徴変換)  
SLAM : Simultaneous Localization And Mapping (自己位置推定と地図生成の同時遂行)  
SPECT : Single Photon Emission Computed Tomography (単一光子放射断層撮影法)  
SQUID : Superconducting Quantum Interference Device (超伝導量子干渉計)  
SVM : Support Vector Machine (サポートベクトルマシン)  
TES : Transition Edge Sensor (超伝導転移端センサ)  
ToT : Time-over-Threshold  
TRU : Trans-Uranium (超ウラン元素)  
UAV : Unmanned Aerial Vehicle (無人航空機)  
UI : User Interface (ユーザインタフェース)  
VR : Virtual Reality (バーチャルリアリティ)  
ZMP : Zero Moment Point (ゼロモーメントポイント)

## 概略

福島第一原子力発電所の廃止措置は、溶け落ちた核燃料が最大のリスク源として存在するほか、高放射線環境下、大量かつ多核種の放射性廃棄物といった非常に特殊な環境での作業となる。このため、廃止措置を安全着実に進めるにあたっては、ロボット工学、化学工学、原子力工学、物理工学など総合的な学術を俯瞰的に理解し、かつ、専門領域については世界トップクラスの実力を持つ人材が必要である。一部の専門領域のみのエキスパートでは、複雑な要因が絡み合う廃止措置においては役に立たず、また、危険に繋がる可能性さえある。このことから、廃止措置に関する専門的な研究（遠隔操作や核種分析等）に関する、トップクラスの専門家であるだけでなく、廃止措置全体を総合的に俯瞰してリスクを最適化することのできる人材が必須となる。本人材育成事業においては、主として遠隔操作技術と核種分析技術に関する専門的な研究教育を推進するとともに、総合工学としての廃止措置を俯瞰的に理解できる人材を養成することを目的とした。

実施体制としては、中核機関である東京大学大学院に、本研究を統括する研究教育拠点（以下、拠点と呼ぶ。）を構成し、拠点が中心となって研究・教育を遂行した。また、拠点は、福島大学、神戸大学、日本原子力研究開発機構、福島高専、会津大学、京都大学、九州大学、東北大学、富山高専、アトックスの連携機関とアライアンスを構成し、定期的なセミナーや協同の俯瞰的教育プログラムなどを進めた。中核機関である東京大学だけではなく、連携機関における人材育成についても、アライアンスが責任を持って遂行した。

具体的には、廃止措置に関する専門的な研究に関する専門家であるだけでなく、廃止措置全体を総合的に俯瞰してリスクを低減できる人材が必要となることから、遠隔操作技術と核種分析技術に関する専門的な研究開発を行うとともに、キャリアパスを考慮した、総合工学としての廃止措置を俯瞰的に理解できる人材の養成を実施した。以下に業務の実績を述べる。

## 平成 26 年度の実績

### (1) 遠隔操作技術に関する研究

#### ① 高所・狭隘部アクセスとそれらの遠隔操作インタフェースの開発

高所・狭隘部アクセス可能なロボット、及び、それらの遠隔操作インタフェースの概念設計・基礎検討を行い、これらの研究開発及びこれらを用いた人材育成を行うための設計・準備を行った。

#### ② 遠隔水中活動機器の要素技術開発と人材育成プログラムの作成（再委託先：福島大学）

遠隔水中活動機器の要素技術に関する基礎的検討を行い目標性能を設計した。また、人材育成システムに関しても基礎的な検討を行い、試行準備を行った。

#### ③ 遠隔マニピュレーションシステムの設計・評価に関する基盤的研究と柔軟なシステム構築が可能な人材育成（再委託先：神戸大学）

現有のロボットアームを活用して、次年度以降の遠隔マニピュレーションに関する基盤研究を推進するための遠隔操縦のミニマムプラットフォームを構築した。中核拠点の東京大学と連携しながらセミナーを企画し、研究に参画する学生を中心に積極的に参加させた。

また神戸大学での特別講演会や日本原子力研究開発機構での見学会を企画した。

## (2) 核種分析に関する研究

### ① ガンマ線 CT システムの開発

既存の放射線検出器の動作特性の検討結果を踏まえて、本研究で開発する（2 光子同時計数による）ガンマ線 CT システムに用いるための放射線検出部の概念設計を行った。具体的には、研究担当実施者と研究に参画する学生が、ガンマ線 CT システムに用いるための放射線検出器として、シンチレータ、気体検出器、半導体検出器等について検討を行い、検出効率と空間分解能の観点から、半導体検出器を用いる検出部の概念設計を行った。

### ② 微量分析システムの開発

分析対象となる試料の性状、既往の分析手法を踏まえるとともに、タンデム型加速器質量分析の検出器及びレーザー光倍波発生装置の導入を行い、微量分析プロトコルの概念設計を行った。

## (3) 廃止措置に関する俯瞰的人材育成

### ① 廃止措置に関する講義

俯瞰的な廃止措置教育カリキュラムを構築するために、講義シラバスを作成するとともに、講義内容の体系化について検討を行った。

### ② 廃止措置教育プログラム

廃止措置セミナーを、東京及び福島において 2 回開催するとともに、実施結果をベースにセミナーの手法について評価を行った。

## (4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連絡を密にして研究を進めた。

## 平成 27 年度の実績

### (1) 遠隔操作技術に関する研究

#### ① 高所・狭隘部アクセスとそれらの遠隔操作インタフェースの開発

高所・狭隘部アクセス可能なロボット、及び、それらの遠隔操作インタフェースのプロトタイプ的设计を行った。高所・狭隘部アクセス可能なロボットに関しては、機能性の向上と、大規模なセンサデータのデータ解析を行うとともに、基礎実験を行った。遠隔操作インタフェースに関しては、触覚への情報提示を活用したインタフェースのプロトタイプを試作した。また、これらの研究開発及びこれらを用いた人材育成の試行を行った。

#### ② 遠隔水中活動機器の要素技術開発と人材育成プログラムの作成（再委託先：福島大学）

遠隔水中活動機器の要素技術に関する試作を行い、その性能評価を実施した。具体的には、立体カムを用いた高精度 3 爪ハンドの試作と評価を行った。また、カメラ画像の時系列を利用した 3 次元復元の方式を確立した。さらに、複合材料の作製に関する予備実験を行うとともに、遮蔽効果の評価方法の予備試験を行った。人材育成システムに関しては、試行を行い、課題を抽出した。

#### ③ 遠隔マニピュレーションシステムの設計・評価に関する基盤的研究と柔軟なシステム構築が可能な人材育成（再委託先：神戸大学）

遠隔マニピュレーションシステムの性能指標の基礎検討を行うとともに、操作性の良い

遠隔マニピュレーションシステムの設計条件の検討を行った。人材育成では、中核拠点の東京大学と連携しながらワークショッププログラムを企画するとともに、国内での遠隔マニピュレーションの関連施設の視察等を通じた人材育成プログラムを企画した。

## (2) 核種分析に関する研究

### ① ガンマ線 CT システムの開発

半導体検出器等の信号読み出し増幅器、リーク電流計測システム、線量校正装置、X線照射装置及びスペクトル計測システムを整備し、本研究で開発するガンマ線 CT システムに用いるための放射線検出素子と高放射線下での動作について検討・評価を行った。

### ② 微量分析システムの開発

微量試料に対する分析手法の検討を行った。既の実績のある分析試料処理法を基礎としながらもこれを微量に対して適用し、誘導プラズマ結合質量分析 (ICP-MS) 及び加速器質量分析 (AMS) に最適な試料形態にする方法を検討した。また、AMS に用いるためのイオンクーラーを設計し、レーザー発生装置を組み込んで、チャンバー内にレーザー光を導入できるようにし、核種分析感度の向上を図った。さらに、レーザー光出力の強化及び高精度な波長計の導入により、同位体シフトに対応したレーザー分光分析装置の検討を行った。

## (3) 廃止措置に関する俯瞰的人材育成

### ① 廃止措置に関する講義

講義を試行し、課題を抽出するとともに講義シラバスの見直しを行った。

### ② 廃止措置教育プログラム

廃止措置セミナーを、東京、福島、富山及び神戸において4回開催するとともに、セミナー手法について評価を行った。また、サマースクールを茨城県東海村及びスウェーデン・ウプサラにおいて開催するとともに、サマースクールについて評価を行った。さらに、インターンシップの具体化を行い試行した。企画・開催にあたっては、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が行う、廃炉基盤研究プラットフォームを含む、廃炉研究開発連携会議等の場において、関係機関との連携を密にして実施した。福島第一原子力発電所の現地調査等に参加した。また学内外の専門家を招聘して議論することで、重要研究課題を抽出した。

## (4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連絡を密にして研究を進めた。また、本研究の推進にあたっては、現在、文部科学省が推進・検討している「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」に基づき、原子力機構が構築した「廃炉国際共同研究センター」での共同研究、人材育成への参画も含めた検討を行った。

## 平成 28 年度の実績

### (1) 遠隔操作技術に関する研究

#### ① 高所・狭隘部アクセスとそれらの遠隔操作インタフェースの開発

高所・狭隘部アクセス可能なロボットの機能性のさらなる向上のため、推進機構及び制御手法の改良を行い、その後、推進性能、制御性能について模擬フィールドを用いて試験を行い、機能性向上を検証した。また、それらのロボットの遠隔インタフェースを試作し、

映像提示技術の有効性や、操作性の向上や作業時間の短縮について効果を検証した。また、ガンマ線 CT システムとの統合に向けた基礎検討として、ガンマ線検出器を搭載するための遠隔操作ロボットの要件を定め、模擬検出器搭載状態での動作検証を行った。これらの開発にあたっては、国内外の学会等での情報収集や関連研究者との議論を行いつつ進めた。

② 遠隔水中活動機器の要素技術開発と人材育成プログラムの作成（再委託先：福島大学）

遠隔水中活動機器の要素技術に関する試作を行い、その性能評価を実施した。具体的には、微量サンプリングを想定した、立体カムを用いた高精度並行爪ハンドの試作と評価を行った。まず直径 30 mm 程度の 2 爪で試作・評価を行い、さらなる小径化ならびに 3 爪化についても検討した。さらに、複数カメラの画像から奥行き画像を生成して維持する画像インタフェースを開発した。特に奥行き画像の提示方法に着目し、ユーザにディスプレイ画像やポリゴン画像、デジタルリフォーカスによる提示を比較し、それによる操作性の違いを検討した。また、開発 FRP 材の遮蔽効果を評価し、曲げ試験や引張試験により温度依存性を含めた機械的特性の評価を行った。その結果を用いて水中ロボットで適用可能な部分を検討した。人材育成システムに関しては、小・中学生対象のロボット製作教室を行った。

③ 遠隔マニピュレーションシステムの設計・評価に関する基盤的研究と柔軟なシステム構築が可能な人材育成（再委託先：神戸大学）

燃料デブリのサンプル採取など廃炉措置において必要とされる遠隔マニピュレーション作業を考慮し、視覚提示も含めた遠隔マニピュレーションシステムの性能評価法の検討を進めるとともに、オペレータの技能評価への応用を検討した。人材育成では、中核拠点の東京大学と連携しながら檜葉モックアップ施設の有効活用法について検討するとともに、国内の廃炉措置関連施設の視察等を通じた人材育成プログラムを企画した。

(2) 核種分析に関する研究

① ガンマ線 CT システムの開発

放射線検出部の概念設計の結果を踏まえて、放射線検出素子を組み込んだガンマ線 CT システムの検出部の設計を行い、そのガンマ線応答特性に関して、個々のガンマ線光子の挙動を追跡することの可能な GEANT4 モンテカルロシミュレーション計算を用い、放射線検出素子に対するガンマ線の入射方向に対する感度分布としての指向性、放射線検出素子において電子を生成する確率としての検出効率、入射したガンマ線の検出位置の広がりとしての空間分解能など、複数光子を用いて放射線源の位置情報を得るガンマ線 CT を実現する上で重要な基本性能についての検討・評価を行った。

② 微量分析システムの開発

平成 27 年度の成果を踏まえて、微量試料に対する分析手法の高度化を行った。特に、誘導結合プラズマ質量分析（ICP-MS）及び加速器質量分析（AMS）における測定結果の評価を進めた。具体的には、分析対象試料量を変化させ（少量化していき）、測定結果との関係を調べ、収率を評価した。また、得られた知見を踏まえて、試料処理法をマニュアル化し、教育のための資料として残した。AMS においては、平成 27 年度に構築した負イオンクローラーの最適化を行った。具体的にはキャリアガスとビームトランスミッションの関係を調べ、キャリアガスの最適フロー条件とその時のビームトランスミッションを測定した。

レーザー分光においては、光源として小型・簡便な半導体レーザーの利用を試みた。

### (3) 廃止措置に関する俯瞰的人材育成

#### ① 廃止措置に関する講義

平成 27 年度のフィードバックを踏まえて講義を実施し、課題を抽出するとともに講義シラバスの見直しを行った。

#### ② 廃止措置教育プログラム

廃止措置セミナーを、東京、福岡、京都及び会津において 4 回開催するとともに、セミナー手法について評価を行った。また、サマースクールを福島県檜葉町及びアメリカにおいて開催するとともに、サマースクールについて評価を行った。さらに、大学間連携による次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンスに参加した。また、学内外の専門家を招聘して議論することで、重要研究課題を抽出した。

### (4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連絡を密にして研究を進めた。また、本研究の推進にあたっては、現在、文部科学省が推進している「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」に基づき、日本原子力研究開発機構が平成 29 年 3 月に福島県富岡町に整備予定の廃炉国際共同研究センター「国際共同研究棟」における研究・人材育成の実施に向けた準備・検討を行った。また、福島第一原子力発電所の廃炉に向けた基礎・基盤研究の推進協議体である「廃炉基盤研究プラットフォーム」の運営に取り組んだ。

## 平成 29 年度の実績

### (1) 遠隔操作技術に関する研究

#### ① 高所・狭隘部アクセスとそれらの遠隔操作インタフェースの開発

高所・狭隘部アクセス可能なロボットについては、移動性能向上のための制御及び機構の開発を行った。遠隔操作インタフェースについては、俯瞰映像提示における描画の正確性の向上及び、視触覚を融合した遠隔操作インタフェースの効果検証を行った。また、(2)①で開発されるガンマ線 CT システムとの統合に向け、放射線源位置の推定手法を開発するとともに、ガンマ線検出器のプロトタイプを搭載した移動ロボットによる線源位置推定実験を行い、妥当性を検証した。これらの開発にあたっては、国内外の学会等での情報収集や関連研究者との議論を行いつつ進めた。

#### ② 遠隔水中活動機器の要素技術開発と人材育成プログラムの作成（再委託先：福島大学）

遠隔水中活動機器の要素技術に関する開発を引き続き進めるとともに、実現場に近い状況を想定した試作・評価を行った。具体的には、平成 28 年度に基本設計を行ったコンパクトに収納可能な可撓性伸縮アームの改良試作を行うとともに、これまで開発を続けてきた高精度 2 爪あるいは 3 爪ハンドを本アーム先端に取り付け、(2)②での微量分析のための微量サンプリングを行うことを想定した評価を実施した。画像インタフェースに関しては、水中で可撓性伸縮アームに取り付けられたカメラからの 3 次元復元を目標に、揺れるカメラから得られた画像列からの 3 次元復元の精度の検証を行った。さらに、耐放射線性に優れた FRP 材の開発においては添加金属を変えて放射線の遮蔽効果の評価と機械特性の評価を継続した。得られた成果から遠隔水中活動機器への適用可能性を引き続き検討した。人材育成に関して

は小中学生対象のロボット製作教室を継続して開催し、講義の中で、廃炉現場で使われているロボットの話を行った。

③ 遠隔マニピュレーションシステムの設計・評価に関する基盤的研究と柔軟なシステム構築が可能な人材育成（再委託先：神戸大学）

動作範囲の限られたマスタアームによる遠隔操縦法や様々な形状の物体把持など、廃炉措置において必要となり得る遠隔マニピュレーションの基盤技術の開発を進めるとともに、臨場感をはじめとする様々な観点からの遠隔マニピュレーションシステムの設計指針と性能評価手法を検討した。人材育成では、国内の廃炉措置関連施設の視察等を通じた人材育成プログラムを継続して企画するとともに、アウトリーチ活動も継続的に推進した。

(2) 核種分析に関する研究

① ガンマ線 CT システムの開発

平成 28 年度に実施したシミュレーション計算による基本性能検討結果を受けて、実際にガンマ線検出素子に加えてデータ取得装置及び線量計を搭載したガンマ線 CT システムのプロトタイプを製作し、(1)①の遠隔操作ロボットとの統合について検討した。プロトタイプ機器を用いて高放射線場における複数光子を取得する際の基本特性を評価した。

② 微量分析システムの開発

標準溶液を用いて、模擬微量試料を作製しウラン同位体の定量のためのプロトコルを実験的に検討した。具体的には、ICP-MS により  $^{238}\text{U}$  及び  $^{235}\text{U}$  の濃度を測定した上で、試料残液に  $^{238}\text{U}$  キャリアを加え、平成 28 年度までに構築した手順で AMS ターゲットを作成し、AMS により  $^{236}\text{U}$  を定量した。ICP-MS と AMS の結果を有機的に比較検討することで、ウラン濃度、ウラン同位体比 ( $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  及び  $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) を評価した。負イオンクーラーについては、テストベンチにより、核種の負イオン化に最適な化学形の検討、最適なビームパラメータ、チャンバー内のガス圧などの基礎データを採取するとともに、実ラインへの実装を検討し、課題を抽出した。レーザー分析装置については、時間分解を取り入れることで高度化を図った。また、(1)②でのサンプリングとの連携について検討した。

(3) 廃止措置に関する俯瞰的人材育成

① 廃止措置に関する講義

平成 28 年度のフィードバックを踏まえて講義を実施し、課題を抽出するとともに講義シラバスの見直しを行った。

② 廃止措置教育プログラム

廃止措置セミナーを東大にて開催するとともに、機械学会、原子力学会等学会での発表を通じた人材育成を行った。次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンスを東大の主催で、福島県富岡町の文化交流センター学びの森にて開催した。サマースクールは、国内では JAEA 檜葉遠隔技術開発センターにおいて、国外ではフランスにおいて開催し、評価を行った。また、学内外の専門家を招聘して燃料デブリ取り出し、廃棄物管理及び遠隔技術についてブレインストーミングを行い、廃炉の重要研究課題を抽出するとともに、新たな燃料デブリ取り出し代替案を構築し、(1)及び(2)の研究へのフィードバックを行った。

(4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連絡を密にして研究を進めた。また、本研究の推進に



あたっては、日本原子力研究開発機構廃炉国際共同研究センター「国際共同研究棟」における研究・人材育成の実施に向けた検討を行った。また、福島第一原子力発電所の廃炉に向けた基礎・基盤研究の推進協議体である「廃炉基盤研究プラットフォーム」の運営に取り組んだ。

## 平成 30 年度の実績

### (1) 遠隔操作技術に関する研究

#### ① 高所・狭隘部アクセスとそれらの遠隔操作インタフェースの開発

高所・狭隘部アクセス可能なロボットについては、開発したシステムの評価と改良を行った。遠隔操作インタフェースについては、より効果的な提示のための方法について検討した。また、ガンマ線検出器を移動ロボットに搭載し、放射線源分布推定実験を行った。これらの開発にあたっては、国内外の学会等での情報収集や関連研究者との議論を行いつつ進めた。

高所・狭隘部において、対象に大きな力を発生できる移動ロボットシステムを開発し、実機実験により重量物のハンドリング性能を評価した。

#### ② 遠隔水中活動機器の要素技術開発と人材育成プログラムの作成（再委託先：福島大学）

小型軽量エンドエフェクタ・マニピュレータ機構に関しては、サンプリング法（ピッキング、切削等）の開発ならびに巻き取りドラムの開発とシステム化を行い、水中ロボットへの搭載に向けた検討を行った。画像インタフェースに関しては、水中でアームに取り付けられたカメラからのシーンの復元を目標に、3 次元的に揺れる画像列及び画像ノイズが復元精度に与える影響を検証した。また、開発した画像インタフェースシステムを水中ロボットに搭載して性能試験を実施した。さらに、耐放射線性に優れた FRP 材の開発においては、耐放射線性に優れた FRP 材の遮蔽効果を向上させ、その材料を用いて水中ロボットの制御装置ボックスを製作し、性能試験を実施した。小中学生対象のロボット製作教室を継続開催し、講義の中で、廃炉現場で使われているロボットの紹介を行った。また、ロボット製作教室の評価とまとめを行った。

#### ③ 遠隔マニピュレーションシステムの設計・評価に関する基盤的研究と柔軟なシステム構築が可能な人材育成（再委託先：神戸大学）

本研究プロジェクトでこれまでの研究で得られた遠隔マニピュレーションの基盤技術（操縦の負担軽減手法を含む）を活かした高度な遠隔操縦プラットフォームを構築し、さらにはこれまでの研究で得られた遠隔マニピュレーションシステムの設計指針と性能評価手法をまとめることで、廃炉措置において必要となる遠隔操縦システムの開発、評価に寄与した。また神戸大学に構築したプラットフォームを、遠隔マニピュレーション技能認証拠点として今後も継続使用できるように整備することを検討した。人材育成では、国内の廃炉措置関連施設の視察等を通じた人材育成プログラムを総括する企画を行うとともに、これまで継続的に行ってきたアウトリーチ活動の企画も行った。

具体的には、動作範囲の限られたマスタアームによる遠隔操縦法についてはこれまで継続的に研究を進めてきたマスタの移動速度に依存したスケール変換法において、スケール変換パラメータの調整を容易にするユーザインタフェースを新たに開発し、実環境での評価実験によりその有効性を検証した。遠隔操縦の操作性を評価する指標としては、平成 29

年度からシステムとの「一体感」を客観的に評価する具体的手法として CCE (Crossmodal congruency effect) を検討してきたが、平成 30 年度はこの CCE が遠隔操縦システムとの「一体感」を正しく評価できるのかを検証した。

また平成 28 年度の成果とした遠隔操縦におけるマスタ・スレーブ間の接続の繰り返しの伴う手先姿勢誤差の修正法に平成 30 年度は改良を加え、実環境で実験を行って有効性を確認できた。

以上の平成 30 年度の成果を含む 5 年間の研究で得られた成果は、神戸大学の遠隔操縦プラットフォームという形で集約され、今後も遠隔マニピュレーション技能認証拠点として継続使用するために、システムの拡張性を高める検討を行った。

人材育成では、国内の廃炉措置関連施設の視察等を通じた人材育成プログラムを総括する企画として檜葉遠隔操作技術開発センターにて講義とロボット実習を含む研修を行った。アウトリーチ活動は、平成 30 年度も引き続き第 18 回レスキューロボットコンテストにおいてブース出展を行った。

## (2) 核種分析に関する研究

### ① ガンマ線 CT システムの開発

平成 29 年度に製作したガンマ線 CT システムプロトタイプの特性試験を行うとともに小型化を進め、集積回路を用いたデータ取得用ボードの製作を行った。ガンマ線 CT システムを遠隔操作ロボットに搭載して、ガンマ線場における線源分布計測を行い、シミュレーション計算と比較し、ガンマ線 CT システムとしての特性を求めた。

システムは 10 kg 以下への軽量化に成功し、1 m 以上離れた位置から点線源を用いて測定した結果、30 cm 程度の位置分解能を得ることができた。

### ② 微量分析システムの開発

質量分析では、平成 29 年度に開発した標準溶液を用いた微量試料の分析プロトコルを基礎に、今年度は、(1)②の遠隔操作による採取を念頭に置き、固体微粒子の模擬試料を対象としてウラン同位体の分析を試みた。分光分析では、平成 29 年度までに開発したプラズマを利用した分光分析装置の基本性能を評価した。

固体微粒子の模擬試料としては、ステンレス材から 0.5 mm 及び 1 mm の模擬試料を作成した。また、分光分析では、発光分析により、定量分析に必要な検量線を取得することができた。

## (3) 廃止措置に関する俯瞰的人材育成

### ① 廃止措置に関する講義

平成 29 年度のフィードバックを踏まえて講義を実施し、課題を抽出するとともに講義シラバスの見直しを行った。

### ② 廃止措置教育プログラム

廃止措置セミナーを東京大学にて開催するとともに、機械学会、原子力学会等学会での発表を通じた人材育成を行った。また、次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンスに参加し、発表とともに他大学学生との交流を深めた。サマースクールは、国内では JAEA 檜葉遠隔技術開発センターにおいて、国外では英国において開催し、評価を行った。また、学内外の専門家を招聘して燃料デブリ取り出し、廃棄物管理についてブレインストーミン

グを行い、廃炉の重要研究課題を抽出するとともに、新たな燃料デブリ取り出し代替案を構築した。

#### (4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連絡を密にして研究を進めた。また、本研究の推進にあたっては、日本原子力研究開発機構廃炉国際共同研究センター「国際共同研究棟」における研究・人材育成の実施に向けた検討を行った。また、福島第一原子力発電所の廃炉に向けた基礎・基盤研究の推進協議体である「廃炉基盤研究プラットフォーム」の運営に取り組んだ。

具体的には、毎月1回（計11回）の連携会議を実施するとともに、平成31年3月28日に最終成果報告会を東京大学において実施した。また、東京大学の博士課程学生1名を特別研究生として「国際共同研究棟」に滞在させ研究・人材育成を実施した。

## 1. はじめに

福島第一原子力発電所において廃止措置を進めるにあたり、最大の課題は、高放射線環境下における燃料デブリの同定と、その安全な回収、管理である。燃料デブリの存在する炉心付近の線量は非常に高く、人間の立ち入りはもちろん電子機器においても短時間で劣化してしまうため、その場での定量分析さえも困難なことが予想される。燃料デブリを全て取り出すためには、燃料デブリの調査・サンプリング・分析を繰り返し行い、徐々に燃料デブリの状態や性質を明らかにしつつ、作業を進める必要がある。そして、その全てのプロセスにおいて、高線量環境下における調査・作業、高放射性物質のハンドリングなどが要求される。これらの作業現場は高所や狭隘部などでありロボットのアクセスは困難である。加えて、高所・狭隘部での遠隔操作では臨場感が欠落するため、ロボット・機器の操作が難しい。そのためのロボット・遠隔操作機器及びインタフェースの新規な開発が不可欠となる。また、オンサイトにおける分析だけではなく、遠隔機器によるサンプリングを実施し、オフサイトでの分析を行うことも必要である。その際、線量を考慮すると、できるだけ微量なサンプルにより高精度な分析を行うことが望ましい。

本研究では、遠隔機器によるアクセスとオンサイト分析及び、遠隔機器による微量サンプル回収技術とオフサイト分析を進めることによって、燃料デブリの回収に必要な環境情報を取得するための技術開発を行うことを目的とする。このためには遠隔操作技術の専門的な知識を持つ人材と、核種分析技術の専門的な知識を持つ人材を育成し、これらの技術を有機的にシステム化することによって目的を実現する。あわせて、これらの具体的な課題を進めるためには、廃止措置に関する基礎的な知識を持つとともに、現場における俯瞰的なリスクを把握できる人材の育成が必須である。遠隔技術もしくは核種分析技術の専門的な知識だけではなく、これらを統合したシステムとしての技術開発に繋げるとともに、発電所全体のリスクを俯瞰できることが、現実の廃止措置に役立つ。つまり机上の研究だけではなく、現場に直結した研究開発を進めることのできる人材育成が必須である。

具体的には、まず、遠隔操作技術によって燃料デブリにアクセスし、その様子、線量、分布、形状、性状など、オンサイトで調査・分析を行う。遠隔機器を用いた初期分析では、その放射線場の測定、さらに放射線源の位置及び核種特定を広く行うことで、放射線を含めた環境の把握が必要とされる。そこで、本研究では複数の遠隔機器にガンマ線検出器を搭載することでコンピュータトモグラフィー（CT）の原理を利用し、放射線源の位置及び核種特定をする上で必要となる基礎研究を行う。さらに、遠隔機器に搭載する際の問題点（重量など）や測定における精度（位置決めなど）について、測定機器のみでは検討困難な事項についてもあわせて検討していく。このようにして、その場での放射線計測により、概要の把握が可能になった段階で燃料デブリをはじめとして精密分析の必要な箇所を明らかにしていく。

次に、燃料デブリ取り出しに向けた環境把握及び燃料デブリの分析のためには、当初は遠隔操作技術によって現場試料をサンプリングし、それを外部に移送して、オフサイトで詳細な分析を行うことが考えられる。得られた調査・分析結果は、次のさらなる調査やサンプリングの計画にフィードバックされる。遠隔操作技術は、遠隔操作される機器・ロボット及びそれを遠隔操作するためのインタフェースから構成される。本研究では、高線量で狭隘・複雑な極限環境で調査・作業箇所にアクセスし、必要な調査・作業を遠隔操作によって実施するための遠隔操作機器・ロボット及びその遠隔操作インタフェースの要素・システム技術に関して、我々の研究開発成果をベースとして福島第一原子力発電所でそのまま既に用いている技術を基盤技術として活用し、研究開発を行う。サンプリングに際して

は、サンプリング量をできるだけ微量に抑えることで放射能を低減するとともに、前処理を最小限にすることで、分析時の被ばく量を可能な限り抑える。これらを実現するためには、微量試料のサンプリング手法、取り扱い手法、試料利用効率の高い分析法などの開発が挙げられる。このような実験的な検討を通じて福島第一原子力発電所の廃止措置に適した分析法の確立を目指すものである。

以上の遠隔操作技術の開発と分析技術の開発は、孤立したものではなく、相互のフィードバックが不可欠である。さらに、実際のフィールドにおける作業においても、遠隔操作技術と核種分析技術の密接な相互関係が求められる。まず遠隔操作により、目的箇所までガンマ線計測機器を運び、そこで複数の遠隔機器の位置を相関的に変化させながら測定を行うことで、線源位置の特定を行う。これにより、オフサイト分析が必要な部位、例えば燃料デブリの可能性の高い領域を決定する。分析領域が決定されると、サンプリング機器を遠隔操作することで、試料の取得を行い、オフサイトにて分析を行う。その結果に対して、異なるサンプリング法あるいは異なる分析手法に応じたサンプリング法により試料の取得を繰り返すことで、分析が必要な部位における多角的な情報を得ることが可能になる。遠隔操作技術と分析技術の統合イメージを図 1-1 に示す。

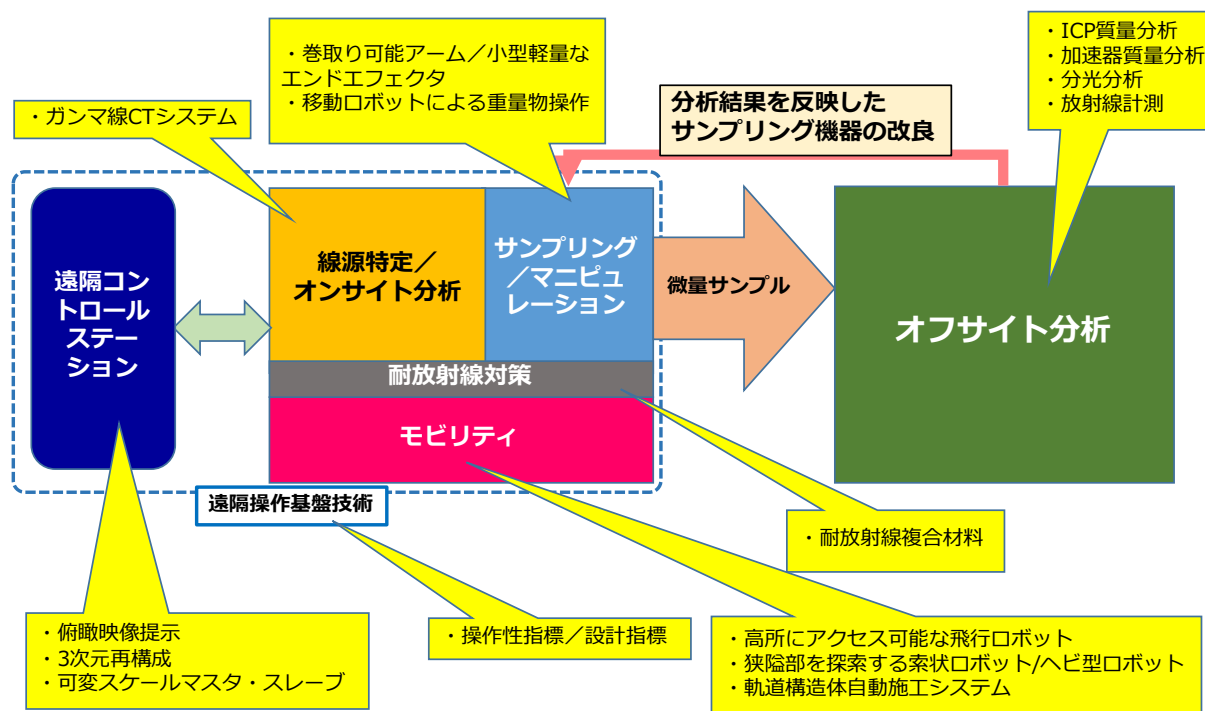


図 1-1 システム統合のイメージ

このような遠隔操作技術と核種分析技術のそれぞれの境界条件の相互的検討作業は、これまで異なる分野で行われてきた教育・人材育成においても、新たな融合効果を期待することができる。具体的には、精密・機械分野における、原子核レベルでの物理化学の導入と原子力分野における遠隔操作技術をはじめとする人材育成に関しては、2つの面から進めていく。1つは、福島廃炉における現実的問題に対する問題設定と、遠隔機器・微量分析など先端技術の研究開発を通して、それに対する解決法を提示できるような学生の育成である。しかしながら、それだけでは、福島廃止措置のような複合的問題を解決することは難しいことから、サマースクールや福島廃止措置の講義を開設することで、俯瞰的な視点を持った学生の育成もあわせて進める。このように両面から進めることで、俯瞰的廃止措

置人材の育成を進めていく。

具体的には、中核機関である東京大学大学院に、本研究を統括する研究教育拠点（以下、拠点と呼ぶ。）を構成し、拠点が中心となって、講義、研究交流会、サマースクール、セミナーなどを遂行する。また、拠点は、福島大学、神戸大学、日本原子力研究開発機構、福島高専、会津大学、京都大学、九州大学、東北大学、富山高専、アトックスの連携機関とアライアンスを構成し、定期的なセミナーや協同の俯瞰的教育プログラムなどを進めていく。中核機関である東京大学だけではなく、連携機関における人材育成についても、アライアンスが責任を持って遂行する。これらのアウトプットとして、福島第一原子力発電所廃止措置の核となり得る専門家、特に、遠隔操作技術と核種分析技術において先導的研究を推進できる専門家を中心とし、廃止措置における俯瞰的なリスクを評価し、安全な廃止措置プロジェクトの中核となることのできる専門家を輩出する。

## 2. 業務計画

### 2.1. 全体計画

福島第一原子力発電所の廃止措置は、非常に特殊な環境での作業となるため、総合的な学術を俯瞰的に理解し、かつ、専門領域にも通じた人材が必要である。このことから、廃止措置に関する専門的な研究に関する専門家であるだけでなく、廃止措置全体を総合的に俯瞰してリスクを低減できる人材が必須となる。本人材育成事業においては、遠隔操作技術と核種分析技術に関する専門的な研究開発を行うとともに、キャリアパスを考慮した、総合工学としての廃止措置を俯瞰的に理解できる人材を養成することを目的とする。

### 2.2. 各年度計画

各年度計画を以下に示す。

#### 平成 26 年度

##### (1) 遠隔操作技術に関する研究

###### ① 高所・狭隘部アクセスとそれらの遠隔操作インタフェースの開発

高所・狭隘部アクセス可能なロボット、及び、それらの遠隔操作インタフェースの概念設計・基礎検討を行い、これらの研究開発及びこれらを用いた人材育成を行うための設計・準備を行う。

###### ② 遠隔水中活動機器の要素技術開発と人材育成プログラムの作成（再委託先：福島大学）

遠隔水中活動機器の要素技術に関する基礎的検討を行い目標性能を設計する。また、人材育成システムに関しても基礎的な検討を行い、試行準備を行う。

###### ③ 遠隔マニピュレーションシステムの設計・評価に関する基盤的研究と柔軟なシステム構築が可能な人材育成（再委託先：神戸大学）

現有のロボットアームを活用して、次年度以降の遠隔マニピュレーションに関する基盤研究を推進するための遠隔操縦のミニマムプラットフォームを構築する。中核拠点の東京大学と連携しながらセミナーを企画し、研究に参画する学生を中心に積極的に参加させる。また神戸大学での特別講演会や櫛葉モックアップ施設での見学会を企画する。

##### (2) 核種分析に関する研究

###### ① ガンマ線 CT システムの開発

既存の放射線検出器の動作特性の検討結果を踏まえて、本研究で開発する（2 光子同時計数による）ガンマ線 CT システムに用いるための放射線検出部の概念設計を行う。

###### ② 微量分析システムの開発

分析対象となる試料の性状、既往の分析手法を踏まえるとともに、タンデム型加速器質量分析の検出器及びレーザー光倍波発生装置の導入を行い、微量分析プロトコルの概念設計を行う。

##### (3) 廃止措置に関する俯瞰的人材育成

###### ① 廃止措置に関する講義

俯瞰的な廃止措置教育カリキュラムを構築するために、講義シラバスを作成するとともに、講義内容の体系化について検討を行う。

## ② 廃止措置教育プログラム

廃止措置セミナーを、東京及び福島において、合計 2 回開催するとともに、実施結果をベースにセミナーの手法について評価を行う。

## (4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連絡を密にして研究を進める。

## 平成 27 年度

### (1) 遠隔操作技術に関する研究

#### ① 高所・狭隘部アクセスとそれらの遠隔操作インタフェースの開発

高所・狭隘部アクセス可能なロボット、及び、それらの遠隔操作インタフェースのプロトタイプ的设计を行う。高所・狭隘部アクセス可能なロボットに関しては、機能性の向上と、大規模なセンサデータのデータ解析を行うとともに、基礎実験を行う。遠隔操作インタフェースに関しては、触覚への情報提示を活用したインタフェースのプロトタイプを試作する。また、これらの研究開発及びこれらを用いた人材育成の試行を行う。

#### ② 遠隔水中活動機器の要素技術開発と人材育成プログラムの作成（再委託先：福島大学）

遠隔水中活動機器の要素技術に関する試作を行い、その性能評価を実施する。具体的には、立体カムを用いた高精度 3 爪ハンドの試作と評価を行う。また、カメラ画像の時系列を利用した 3 次元復元の方式を確立する。さらに、複合材料の作製に関する予備実験を行うとともに、遮蔽効果の評価方法の予備試験を行う。人材育成システムに関しては、試行を行い、課題を抽出する。

#### ③ 遠隔マニピュレーションシステムの設計・評価に関する基盤的研究と柔軟なシステム構築が可能な人材育成（再委託先：神戸大学）

遠隔マニピュレーションシステムの性能指標の基礎検討を行うとともに、操作性の良い遠隔マニピュレーションシステムの設計条件の検討を行う。人材育成では、中核拠点の東京大学と連携しながらワークショッププログラムを企画するとともに、国内での遠隔マニピュレーションの関連施設の視察等を通じた人材育成プログラムを企画する。

### (2) 核種分析に関する研究

#### ① ガンマ線 CT システムの開発

半導体検出器等の信号読み出し増幅器、リーク電流計測システム及びスペクトル計測システムを整備し、本研究で開発するガンマ線 CT システムに用いるための放射線検出素子について検討・評価を行う。

#### ② 微量分析システムの開発

微量試料に対する分析手法の検討を行う。既の実績のある分析試料処理法を基礎としながらもこれを微量に対して適用し、誘導プラズマ結合質量分析（ICP-MS）及び加速器質量分析（AMS）に最適な試料形態にする方法を検討する。また、AMS に用いるためのイオンクーラー及びレーザー分光分析装置の検討を行う。

### (3) 廃止措置に関する俯瞰的人材育成

#### ① 廃止措置に関する講義

講義を試行し、課題を抽出するとともに講義シラバスの見直しを行う。



## ② 廃止措置教育プログラム

廃止措置セミナーを、東京、福島、富山及び神戸において4回開催するとともに、セミナー手法について評価を行う。また、サマースクールを茨城県東海村及びスウェーデン・ウプサラにおいて開催するとともに、サマースクールについて評価を行う。さらに、インターンシップの具体化を行い試行する。企画・開催にあたっては、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構等が行う、他採択拠点等を含む、産学官連携検討会（仮称）等の場において、関係機関との連携を密にして実施する。

## (4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連絡を密にして研究を進める。また、本研究の推進にあたっては、現在、文部科学省が推進・検討している「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」に基づき、原子力機構が構築する「廃炉国際共同研究センター」での共同研究、人材育成への参画も含めた検討を行う。

## 平成 28 年度

### (1) 遠隔操作技術に関する研究

#### ① 高所・狭隘部アクセスとそれらの遠隔操作インタフェースの開発

高所・狭隘部アクセス可能なロボットの機能性のさらなる向上のため、推進機構及び制御手法の改良を行い、その後、推進性能、制御性能について模擬フィールドを用いて試験を行い、機能性向上を検証する。また、それらのロボットの遠隔インタフェースを試作し、映像提示技術の有効性や、操作性の向上や作業時間の短縮について効果を検証する。また、ガンマ線CTシステムとの統合に向けた基礎検討として、ガンマ線検出器を搭載するための遠隔操作ロボットの要件を定め、模擬検出器搭載状態での動作検証を行う。これらの開発にあたっては、国内外の学会等での情報収集や関連研究者との議論を行いつつ進める。

#### ② 遠隔水中活動機器の要素技術開発と人材育成プログラムの作成（再委託先：福島大学）

遠隔水中活動機器の要素技術に関する試作を行い、その性能評価を実施する。具体的には、微量サンプリングを想定した、立体カムを用いた高精度並行爪ハンドの試作と評価を行う。まず直径30 mm程度の2爪で試作・評価を行い、さらなる小径化ならびに3爪化についても検討する。さらに、複数カメラの画像から奥行き画像を生成して維持する画像インタフェースを開発する。特に奥行き画像の提示方法に着目し、ユーザにディスパリティ画像やポリゴン画像、デジタルリフォーカスによる提示を比較し、それによる操作性能の違いを検討する。また、開発FRP材の遮蔽効果を評価し、曲げ試験や引張試験により温度依存性を含めた機械的特性の評価を行う。その結果を用いて水中ロボットで適用可能な部分を検討する。人材育成システムに関しては、小・中学生対象のロボット製作教室を行う。

#### ③ 遠隔マニピュレーションシステムの設計・評価に関する基盤的研究と柔軟なシステム構築が可能な人材育成（再委託先：神戸大学）

燃料デブリのサンプル採取など廃炉措置において必要とされる遠隔マニピュレーション作業を考慮し、視覚提示も含めた遠隔マニピュレーションシステムの性能評価法の検討を進めるとともに、オペレータの技能評価への応用を検討する。人材育成では、中核拠点の

東京大学と連携しながら檜葉モックアップ施設の有効活用法について検討するとともに、国内の廃炉措置関連施設の視察等を通じた人材育成プログラムを企画する。

## (2) 核種分析に関する研究

### ① ガンマ線CTシステムの開発

放射線検出部の概念設計の結果を踏まえて、放射線検出素子を組み込んだガンマ線CTシステムの検出部の設計を行い、そのガンマ線応答特性に関して、個々のガンマ線光子の挙動を追跡することの可能なGEANT4モンテカルロシミュレーション計算を用い、放射線検出素子に対するガンマ線の入射方向に対する感度分布としての指向性、放射線検出素子において電子を生成する確率としての検出効率、入射したガンマ線の検出位置の広がりとしての空間分解能など、複数光子を用いて放射線源の位置情報を得るガンマ線CTを実現する上で重要な基本性能についての検討・評価を行う。

### ② 微量分析システムの開発

平成27年度の成果を踏まえて、微量試料に対する分析手法の高度化を行う。特に、誘導結合プラズマ質量分析（ICP-MS）及び加速器質量分析（AMS）における測定結果の評価を進める。具体的には、分析対象試料量を変化させ（少量化していき）、測定結果との関係を調べ、収率を評価する。また、得られた知見を踏まえて、試料処理法をマニュアル化し、教育のための資料として残す。AMSにおいては、平成27年度に構築した負イオンクーラーの最適化を行う。具体的にはキャリアガスとビームトランスミッションの関係を調べ、キャリアガスの最適フロー条件とその時のビームトランスミッションを測定する。レーザー分光においては、光源として小型・簡便な半導体レーザーの利用を試みる。

## (3) 廃止措置に関する俯瞰的人材育成

### ① 廃止措置に関する講義

平成27年度のフィードバックを踏まえて講義を実施し、課題を抽出するとともに講義シラバスの見直しを行う。

### ② 廃止措置教育プログラム

廃止措置セミナーを、東京、福岡、京都及び会津において4回開催するとともに、セミナー手法について評価を行う。また、サマースクールを福島県檜葉町及びアメリカ・パークレーにおいて開催するとともに、サマースクールについて評価を行う。さらに、大学間連携による次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンスに参加する。また、学内外の専門家を招聘して議論することで、重要研究課題を抽出する。

## (4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連絡を密にして研究を進める。また、本研究の推進にあたっては、現在、文部科学省が推進している「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」に基づき、日本原子力研究開発機構が平成29年3月に福島県富岡町に整備予定の廃炉国際共同研究センター「国際共同研究棟」における研究・人材育成の実施に向けた準備・検討を行う。また、福島第一原子力発電所の廃炉に向けた基礎・基盤研究の推進協議体である「廃炉基盤研究プラットフォーム」の運営に取り組む。

## 平成 29 年度

### (1) 遠隔操作技術に関する研究

### ① 高所・狭隘部アクセスとそれらの遠隔操作インタフェースの開発

高所・狭隘部アクセス可能なロボットについては、移動性能向上のための制御及び機構の開発を行う。遠隔操作インタフェースについては、俯瞰映像提示における描画の正確性の向上及び、視触覚を融合した遠隔操作インタフェースの効果検証を行う。また、(2)①で開発されるガンマ線CTシステムとの統合に向け、放射線源位置の推定手法を開発するとともに、ガンマ線検出器のプロトタイプを搭載した移動ロボットによる線源位置推定実験を行い、妥当性を検証する。これらの開発にあたっては、国内外の学会等での情報収集や関連研究者との議論を行いつつ進める。

### ② 遠隔水中活動機器の要素技術開発と人材育成プログラムの作成（再委託先：福島大学）

遠隔水中活動機器の要素技術に関する開発を引き続き進めるとともに、実現場に近い状況を想定した試作・評価を行う。具体的には、平成28年度に基本設計を行ったコンパクトに収納可能な可撓性伸縮アームの試作を行うとともに、これまで開発を続けてきた高精度2爪あるいは3爪ハンドを本アーム先端に取り付け、(2)②での微量分析のための微量サンプリングを想定した評価を実施する。画像インタフェースに関しては、水中で可撓性伸縮アームに取り付けられたカメラからの3次元復元を目標に、揺れるカメラから得られた画像列からの3次元復元の精度の検証を行う。さらに、耐放射線性に優れたFRP材の開発においては添加金属を変えて放射線の遮蔽効果の評価と機械特性の評価を継続する。得られた成果から遠隔水中活動機器への適用可能性を引き続き検討する。人材育成に関しては小中学生対象のロボット製作教室を継続して開催し、講義の中で、廃炉現場で使われているロボットの話をを行う。

### ③ 遠隔マニピュレーションシステムの設計・評価に関する基盤的研究と柔軟なシステム構築が可能な人材育成（再委託先：神戸大学）

動作範囲の限られたマスタアームによる遠隔操縦法や様々な形状の物体把持など、廃炉措置において必要となり得る遠隔マニピュレーションの基盤技術の開発を進めるとともに、臨場感をはじめとする様々な観点からの遠隔マニピュレーションシステムの設計指針と性能評価手法を検討する。人材育成では、国内の廃炉措置関連施設の視察等を通じた人材育成プログラムを継続して企画するとともに、アウトリーチ活動も継続的に推進する。

## (2) 核種分析に関する研究

### ① ガンマ線CTシステムの開発

平成28年度に実施したシミュレーション計算による基本性能検討結果を受けて、実際にガンマ線検出素子に加えてデータ取得装置及び線量計を搭載したガンマ線CTシステムのプロトタイプを製作し、(1)①の遠隔操作ロボットとの統合について検討する。プロトタイプ機器を用いて高放射線場における複数光子を取得する際の基本特性を評価する。

### ② 微量分析システムの開発

標準溶液を用いて、模擬微量試料を作成しウラン同位体の定量のためのプロトコルを実験的に検討する。具体的には、ICP-MSにより $^{238}\text{U}$ 及び $^{235}\text{U}$ の濃度を測定した上で、試料残液に $^{238}\text{U}$ キャリアを加え、平成28年度までに構築した手順でAMSターゲットを作成し、AMSにより $^{236}\text{U}$ を定量する。ICP-MSとAMSの結果を有機的に比較検討することで、ウラン濃度、ウラン同位体比（ $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 及び $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$ ）を評価する。負イオンクーラーについては、テストベ

ンチにより、核種の負イオン化に最適な化学形の検討、最適なビームパラメータ、チャンバー内のガス圧などの基礎データを採取するとともに、実ラインへの実装を検討し、課題を抽出する。レーザー分析装置については、時間分解を取り入れることで高度化を図る。また、(1)②でのサンプリングとの連携について検討する。

### (3) 廃止措置に関する俯瞰的人材育成

#### ① 廃止措置に関する講義

平成28年度のフィードバックを踏まえて講義を実施し、課題を抽出するとともに講義シラバスの見直しを行う。

#### ② 廃止措置教育プログラム

廃止措置セミナーを東大にて開催するとともに、機械学会、原子力学会等学会での発表を通じた人材育成を行う。次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンスを東大の主催で、福島県富岡町のJAEA廃炉国際共同研究センターにて開催する。サマースクールは、国内ではJAEA楡葉遠隔技術開発センターにおいて、国外ではフランスにおいて開催し、評価を行う。また、学内外の専門家を招聘して燃料デブリ取り出し、廃棄物管理及び遠隔技術についてブレインストーミングを行い、廃炉の重要研究課題を抽出するとともに、新たな燃料デブリ取り出し代替案を構築し、(1)及び(2)の研究へのフィードバックを行う。

### (4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連絡を密にして研究を進める。また、本研究の推進にあたっては、日本原子力研究開発機構廃炉国際共同研究センター「国際共同研究棟」における研究・人材育成の実施に向けた検討を行う。また、福島第一原子力発電所の廃炉に向けた基礎・基盤研究の推進協議体である「廃炉基盤研究プラットフォーム」の運営に取り組む。

## 平成 30 年度

### (1) 遠隔操作技術に関する研究

#### ① 高所・狭隘部アクセスとそれらの遠隔操作インタフェースの開発

高所・狭隘部アクセス可能なロボットについては、開発したシステムの評価と改良を行う。遠隔操作インタフェースについては、より効果的な提示のための方法について検討する。また、ガンマ線検出器を移動ロボットに搭載し、放射線源分布推定実験を行う。これらの開発にあたっては、国内外の学会等での情報収集や関連研究者との議論を行いつつ進める。

#### ② 遠隔水中活動機器の要素技術開発と人材育成プログラムの作成（再委託先：福島大学）

小型軽量エンドエフェクタ・マニピュレータ機構に関しては、サンプリング法（ピッキング、切削等）の開発ならびに巻き取りドラムの開発とシステム化を行い、水中ロボットへの搭載に向けた検討を行う。画像インタフェースに関しては、水中でアームに取り付けられたカメラからのシーンの復元を目標に、3次元的に揺れる画像列及び画像ノイズが復元精度に与える影響を検証する。また、開発し

た画像インタフェースシステムを水中ロボットに搭載して性能試験を実施する。さらに、耐放射線性に優れたFRP材の開発においては、耐放射線性に優れたFRP材の遮蔽効果を向上させ、その材料を用いて水中ロボットの制御装置ボックスを製作し、性能試験を実施する。小中学生対象のロボット製作教室を継続開催し、講義の中で、廃炉現場で使われているロボットの紹介を行う。また、ロボット製作教室の評価とまとめを行う。

③ 遠隔マニピュレーションシステムの設計・評価に関する基盤的研究と柔軟なシステム構築が可能な人材育成（再委託先：神戸大学）

本研究プロジェクトでこれまでの研究で得られた遠隔マニピュレーションの基盤技術（操縦の負担軽減手法を含む）を活かした高度な遠隔操縦プラットフォームを構築し、さらにはこれまでの研究で得られた遠隔マニピュレーションシステムの設計指針と性能評価手法をまとめることで、廃炉措置において必要となる遠隔操縦システムの開発、評価に寄与する。また神戸大学に構築したプラットフォームを、遠隔マニピュレーション技能認証拠点として今後も継続使用できるように整備することを検討する。人材育成では、国内の廃炉措置関連施設の視察等を通じた人材育成プログラムを総括する企画を行うとともに、これまで継続的に行ってきたアウトリーチ活動の企画も行う。

(2) 核種分析に関する研究

① ガンマ線CTシステムの開発

平成29年度に製作したガンマ線CTシステムプロトタイプの実験を行うとともに小型化を進め、集積回路を用いたデータ取得用ボードの製作を行う。ガンマ線CTシステムを遠隔操作ロボットに搭載して、ガンマ線場における線源分布計測を行い、シミュレーション計算と比較し、ガンマ線CTシステムとしての特性を求める。

② 微量分析システムの開発

質量分析では、平成29年度に開発した標準溶液を用いた微量試料の分析プロトコルを基礎に、平成30年度は、(1)②の遠隔操作による採取を念頭に置き、固体微粒子の模擬試料を対象としてウラン同位体の分析を試みる。分光分析では、前年度までに開発したプラズマを利用した分光分析装置の基本性能を評価する。

(3) 廃止措置に関する俯瞰的人材育成

① 廃止措置に関する講義

平成29年度のフィードバックを踏まえて講義を実施し、課題を抽出するとともに講義シラバスの見直しを行う。

② 廃止措置教育プログラム

廃止措置セミナーを東京大学にて開催するとともに、機械学会、原子力学会等学会での発表を通じた人材育成を行う。また、次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンスに参加し、発表とともに他大学学生との交流を深める。サマースクールは、国内ではJAEA 梶葉遠隔技術開発センターにおいて、国外では英国において開催し、評価を行う。また、学内外の専門家を招聘して燃料デブリ取り出し、廃棄物管理についてブレインストーミングを行い、廃炉の重要研究課題を抽出するとともに、新たな燃料デブリ取り出し代替案を構築する。

#### (4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連絡を密にして研究を進める。また、本研究の推進にあたっては、日本原子力研究開発機構廃炉国際共同研究センター「国際共同研究棟」における研究・人材育成の実施に向けた検討を行う。また、福島第一原子力発電所の廃炉に向けた基礎・基盤研究の推進協議体である「廃炉基盤研究プラットフォーム」の運営に取り組む。

### 3. 業務の実施内容及び成果

#### 3.1. 遠隔操作技術に関する研究

##### 3.1.1. 高所・狭隘部アクセスとそれらの遠隔操作インターフェースの開発

###### (1) 原子炉建屋内探査のための飛行ロボットの開発 (H26-H30)

クローラロボットが探査できない建屋内部の高所の狭隘な場所を探査するロボットの開発が期待されている。被災した福島第一原発の建屋内部は、国産のクローラロボット Quince 等を利用した調査や線量計測が行われた。この調査の過程で、瓦礫により道が塞がれている場所や、損傷箇所が高所にありクローラロボットに搭載したカメラでは確認が行えない場所が存在した。廃炉に向けた作業を円滑に進めるためには、このような場所にアクセスすることを可能にする飛行ロボットの開発が必要不可欠である。

我々は、本委託期間を通じて、①建屋内や廊下の天井付近の構造物に吸着しその場で 30 分以上の定点観測を可能にする吸着型定点観測飛行ロボットの開発、②高所・狭隘部の目視点検を可能にする受動回転球殻を有する飛行ロボットの開発、③打音点検を可能にする打音装置を搭載した飛行ロボットの開発を行ってきた。以下、各ロボットの詳細を説明する。

###### ① 吸着型定点観測飛行ロボットの開発 (H26-H27)

吸着型定点観測飛行ロボットの機能の概要を図 3.1-1 に示す。観察対象の近くまで飛行し、近くの鋼材でできた梁に永久磁石で吸着する。吸着後にウィンチを使って対象に近づいて、機体に搭載した小型・広視野のカメラで対象を観察する。吸着している間はプロペラの回転を停止することで、消費電力を抑える。観察後は、吸着機構を脱着して次の観察場所に移動する。

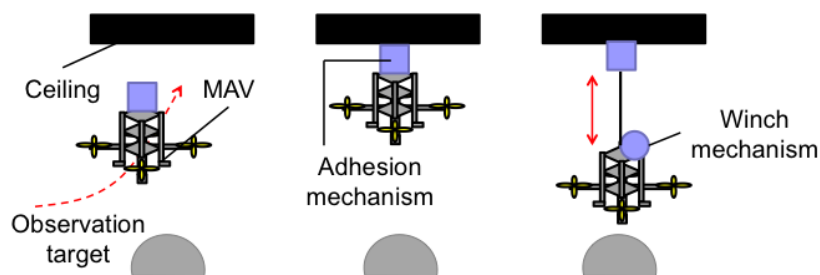


図 3.1-1 吸着・巻き取り機構を有する飛行ロボットの飛行・観測タスク

最初に、磁力とバネ機構を利用した吸着機構を開発した [1]。この吸着機構の課題は、吸着力を切り替える際に、内部で機構が引っかかり、脱着が失敗することであった。そこで、吸着力と脱着力を確実に切り替えられる吸着方式の開発に取り組んだ。この課題を克服するために、永電磁フォルダを利用した吸着機構の開発を行った [2]。

永電磁フォルダを利用した吸着機構の原理を図 3.1-2 に示す。永久磁石の磁力を利用して対象に吸着する。加えて、永久磁石の磁力を電磁石で補うことでより強い磁力で吸着すること、電磁石で逆方向きの磁力を発生することで磁力を限りなく小さくして脱着することができる。基本性能を検証する実験で、吸着力を約 2 倍に高められること、確実に吸着と脱着を切り替えられることを確認した。ま

た、開発した吸着機構を飛行ロボットに搭載して飛行試験を行った（図 3.1-3）。プロペラを回転して飛行している時と、吸着してプロペラを停止させた時の消費電力を実測した結果、ホバリングで対象を観察した場合で 10 分程度しかなかった飛行時間を、吸着することで 60 分以上に大幅に引き延ばせることを確認した。

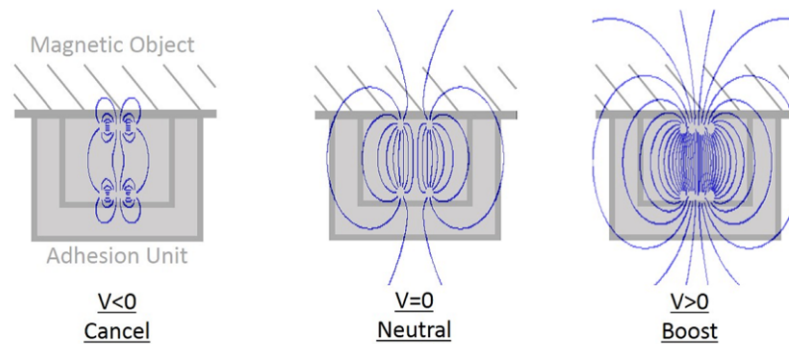


図 3.1-2 永電磁フォルダの動作原理：（左）脱着（磁石の磁力を電磁石でキャンセル）、（中）吸着（磁石の磁力で吸着）、（右）吸着力増強（磁石と電磁石の磁力で吸着）

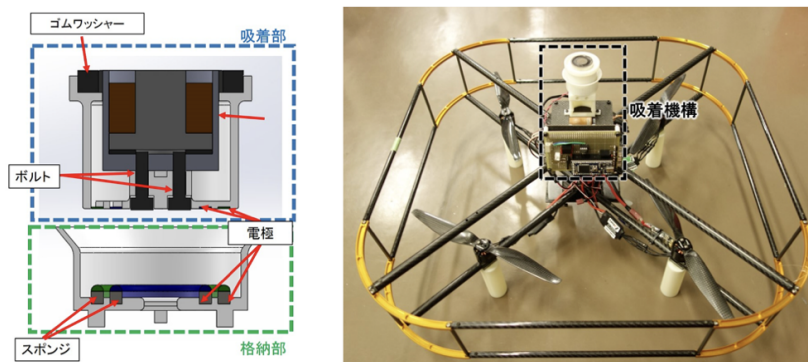


図 3.1-3 永電磁フォルダを利用した吸着機構（左）と吸着機構を搭載した飛行体（右）

## ② 受動回転球殻を有する飛行ロボットの開発（H28-H29）

建屋内の高所で狭隘な場所を探索する受動回転球殻を有する飛行ロボットを図 3.1-4 に示す。受動的に回転する球殻で飛行ロボットを保護するとともに、球殻の間から入ってくる物からプロペラを守るプロペラガードを搭載した飛行ロボットを開発した。内部のプロペラガードの有効性はシュガーバックテストや飛行実験を行い確認した [3]。

外部の受動回転球殻は、強い衝撃に耐えられる構造になっている。受動回転球殻を有する飛行ロボットは 1 m 程度の大きさで 3 kg 程度の重さがあり、飛行時の衝撃で球殻が壊れないようにする必要があった。そこで、受動回転球殻のジョイント形状を改良して、飛行中に周囲のコンクリート壁などに衝突しても壊れない強化型の球殻を開発した。図 3.1-5 に強化前の球殻ジョイントと、強化型球殻ジョイントと、その強化型球殻ジョイントを搭載した飛行ロボットの衝突実験の様子を示す。強化前の球殻ジョイントに力を加えると、ジョイントとボールの繋ぎ目に力が集中していた。衝突時にはこの部分に力が集中し、ボールやジョイントが破断することがあった。強化型の球殻ジョイントでは、3 本のポールが互い違いに重なるように形状を変更することで、ポールを支持する部分が 2 点に



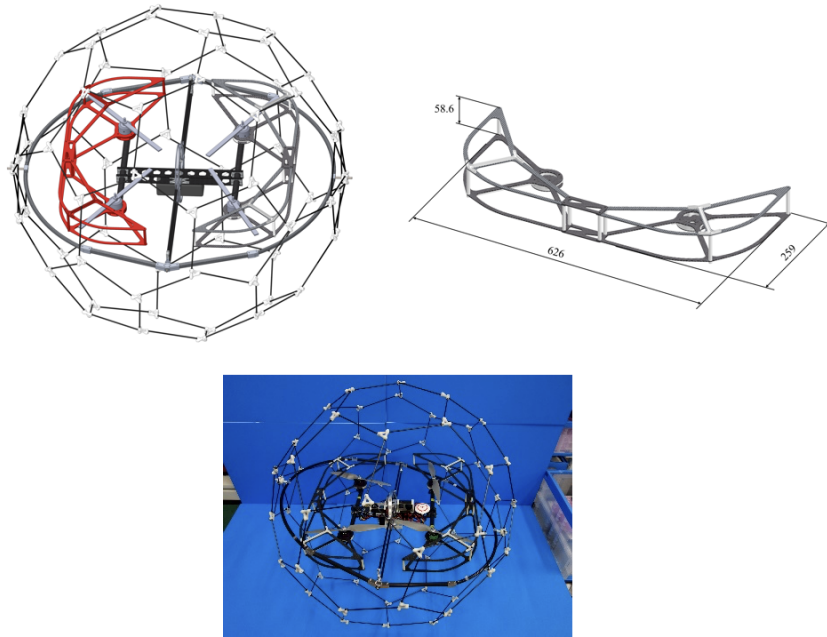


図 3.1-4 受動回転球殻プロテクタを有する飛行ロボット（左側：受動回転球殻プロテクタを有する飛行ロボット、右側：球殻内部に設置したプロペラガード）

増えたこと、また、ジョイントとボールの接触する面積が大きくなったことで過度な力の集中を抑制し、ジョイントやボールが破断することがなくなった。自由落下の衝突試験においても、飛行速度の7倍の速度でコンクリート壁に衝突させても壊れなかった。強化前の球殻よりも強い衝撃に耐えられることを確認した。飛行試験を繰り返し行い、高所の狭隘部をぶつかりながら撮影できることを確認した。

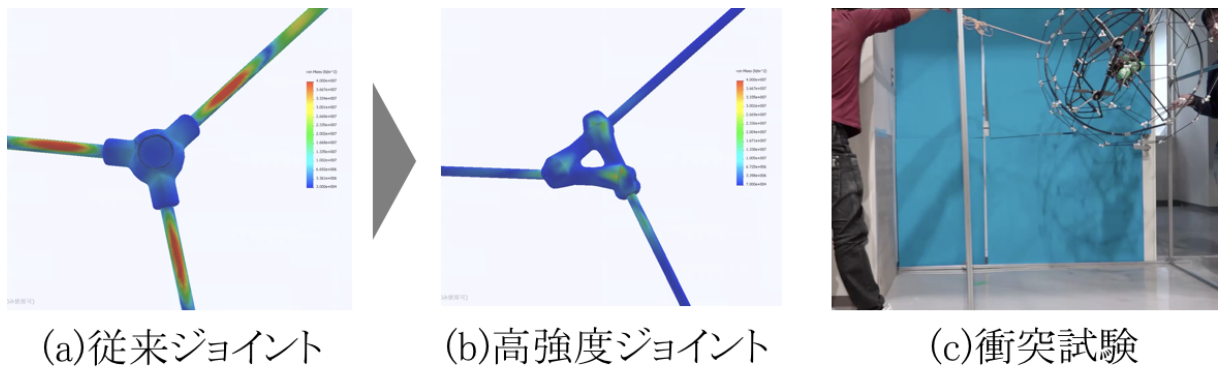


図 3.1-5 強化型球殻ジョイントの応力集中評価 ((a), (b)) と強化型球殻ジョイントで構築した球殻を有する飛行ロボットのコンクリート衝突試験 (c)

操縦インターフェースの改善も行った。飛行ロボットに搭載したカメラの映像には球殻のフレームが写っている。映像に映る球殻の存在が目障りに感じるようになった。この問題を解決するため、球殻の姿勢を推定し、画像中に写る球殻を消す技術の開発を行い、オフラインで有効性を検証した。

図 3.1-6 に球殻を除去した映像の例を示す。元の画像の部分と、消された画像の部分が判断しやすい合成画像を生成することを試みた。具体的には、画像中の球殻のフレームが写っている部分を削除し、そのエリアを周囲の色で補完することで球殻のない画像を合成した。また、補完した箇所が分

かるように、周囲とは異なる輝度で合成を行った [4]。

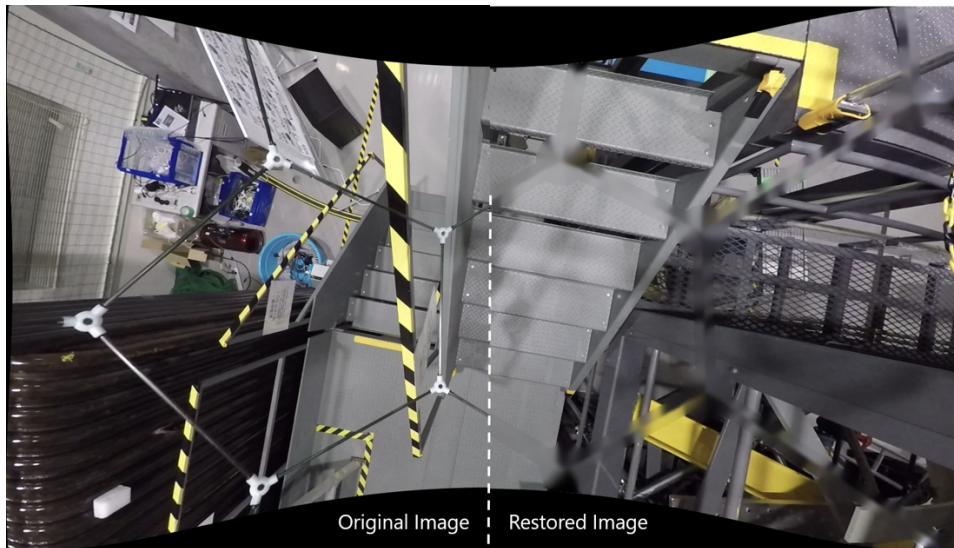


図 3.1-6 搭載カメラ映像に映る球殻プロテクタの除去（左側：除去前の映像、右側：除去後の映像）

### ③ 打音点検を可能にする打音装置を搭載した飛行ロボットの開発 (H30)

打音装置を搭載した飛行ロボットを図 3.1-7 に示す。球殻の内部から打音点検ができるように、分割球殻を有する飛行ロボットを開発した。また、飛行ロボットは、クワッドロータの機体をベースに、スラスト用にもう 1 つのプロペラを搭載した機体を開発した。打音に同期してこのスラスト用のプロペラを回転することで、打音によって生じた反力を打ち消して、打音装置を押しつけて打音点検を行うことができるようになった。室内の模擬壁を利用して、飛行中の打音の試験を行った。実験から、飛行しながら打音ができること、飛行中に球殻が周囲に触れても落ちることなく飛行を続けられること確認した [5]。

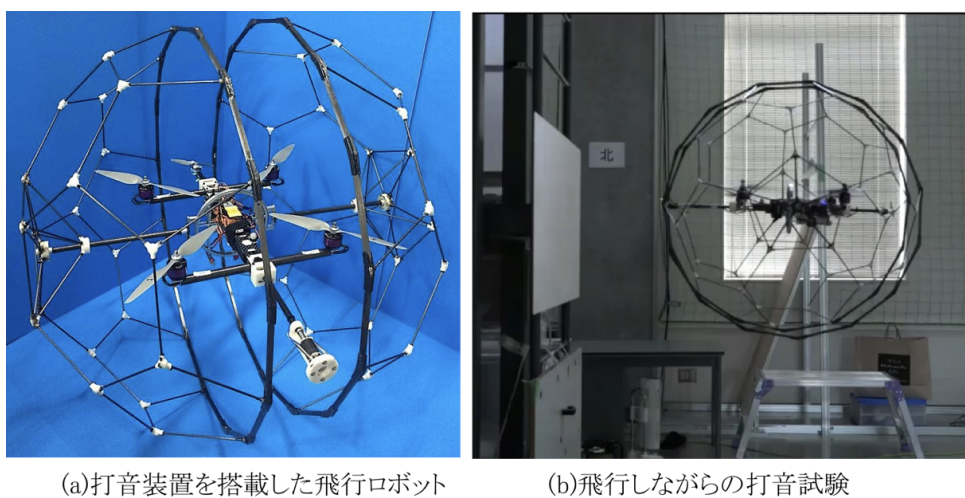


図 3.1-7 打音装置を搭載した飛行ロボットの開発

## (2) 狭隘部を探索する索状ロボットの開発 (H26-H30)

### ① 研究の目的

大地震や事故災害で被災した建物内部の状況確認や被災者の探査を行う際には、建物内部にアプローチする経路が限られるため、特殊な移動機構を搭載した遠隔操作型のロボットシステムが必要となる。本テーマでは、数 cm の狭隘部の探査や細い配管から破損した建物内部に進入が可能な索状ロボットの研究開発を行う。具体的には、廃炉に関する 2 種類の索状ロボットを対象とする。1 つ目は、福島第一原発建屋の倒壊状況調査で利用された索状ロボット（能動スコープカメラ）を対象に、瓦礫上での推進性能や遠隔操作を向上させるための技術の研究開発を行う（図 3.1-8）。このロボットは、清水建設と共同開発され、平成 28 年 4 月から 1 号機建屋のオペレーションフロア調査に利用された [6]。2 つ目は、原子炉格納容器にアクセスし、内部を探査するための配管内移動索状ロボットの研究開発を行う（図 3.1-9）。

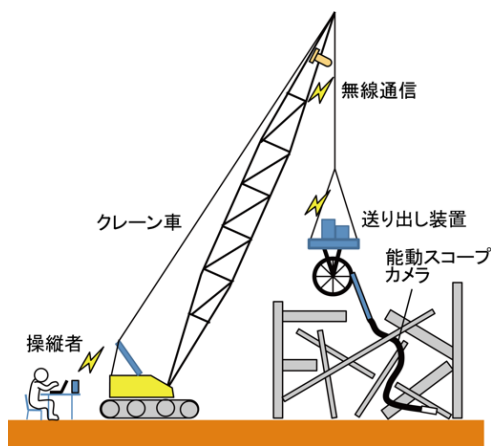


図 3.1-8 クレーン懸架による能動スコープカメラの遠隔操作の概念図

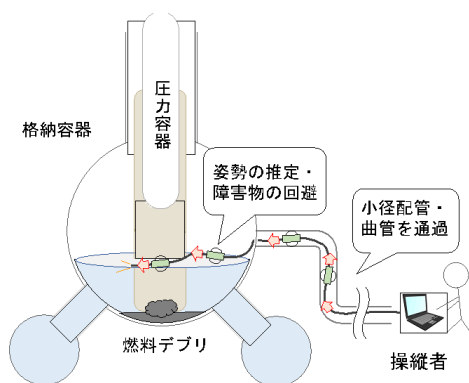


図 3.1-9 小径配管から格納容器内にアクセス可能な索状ロボットの概念図

平成 26～27 年度はこれらのロボットの概念設計・基礎検討及び試作と基礎的な評価を行った。平成 28 年度は前年度までに抽出された課題に対して、機能性のさらなる向上のため、推進機構及び制御手法の改良を行い、推進性能、制御性能について、模擬フィールドを用いて試験を行い、機能性向上を検証した。平成 29 年度は移動性能向上のための制御及び機構の開発を行った。平成 30 年度は開発したロボットの評価と改良を行った。

## ② 狭隘部を探索するロボットの概念設計・基礎検討及び試作 (H26-H27)

一般に、数 cm の狭隘部の探索は、押し込み力を先端まで伝えることができないため、奥深くまで挿入することができなかった。我々が開発する索状ロボット（能動スコープカメラ）は、ケーブル全面に取り付けられた繊毛振動駆動機構により、ケーブル全体が推進力を発生することで、狭隘部の奥深くまで容易に挿入することが可能である [7]。一方、原発事故などの大規模の倒壊事故では、能動スコープカメラの操作者が瓦礫の挿入口まで近づけないことがある。そこで図 3.1-8 の概念図に示すように、クレーンによって懸架された送り出し装置から遠隔操作で能動スコープを挿入するシステムを前提に、このシステムの性能を向上させるために必要な要素技術の基礎検討、及び実証実験によりそのコンセプトの有効性を確認してきた [8]。本期間では、まず、この遠隔操作型索状ロボットの走破性と方向選択性能を向上させる手法として、空気噴射式のノズルと方向制御装置の試作と改良を行った。空気噴射ノズルの形状の見直しを行い、流体力学の観点から、発生力を最大化するためのチョーク流れの条件を導出し、ノズルの穴と流速の関係を検討した。首振り動作に必要な力の向きと大きさを前提に、最適な形状を検討した結果、図 3.1-10 に示すノズル形状を設計した。3D プリンタによってこのノズルを試作し、発生力がほぼ設計通り得られていることを確認した。また、基本動作性能の評価の結果、索状ロボットの段差乗り越え性能や、配管内での推進速度などの能力を向上できることを確認した。

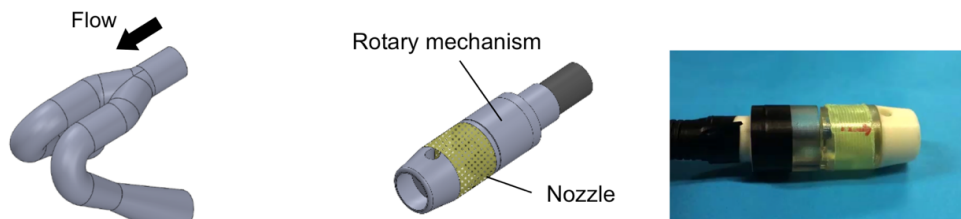


図 3.1-10 空気噴射式方向制御装置（左：ノズル形状、中：先端部機構、右：試作機）

また、図 3.1-9 の概念図に示すように、原発事故の格納容器内の調査を前提に小径の配管内を高速に移動かつオープンスペースでの推進及び障害物回避が可能なロボットについて概念設計と基礎的検討を行った。推進機構の候補として、セルフロック機構を有するインパクト駆動型配管内推推進機構 [9] や、柔軟中空シャフトアクチュエータを用いた推進機構などについて検討し、試作を行った。図 3.1-11 に提案する中空構造を持つ柔軟シャフトアクチュエータを利用した推進機構の概念図を示す。この機構は、柔軟な空気圧アクチュエータを 2 つ組み合わせることで中間部のベルトを展開し、配管内の保持動作と推進動作を切り替えることが可能である。推進動作はチューブ上の可動部をスライドさせることで実現し、従来の推進機構よりも大きなストローク長を取れることが特長である。2 つのユニットを組み合わせた試作機を製作し、50A 配管内の推進速度の評価を行った結果、水平配管では平均 100 mm/s（従来比約 10 倍）、鉛直配管では平均 40 mm/s で推進できることを確認した [10]。

## ③ 推進機構及び制御手法の改良と性能試験 (H28)

平成 27 年度まで開発してきた配管内推進機構の配管内通過性能を向上させるための保持機構の改良を行った。また、遠隔操作型索状ロボットの瓦礫探索時の制御性を改良するために触覚提示を遠隔



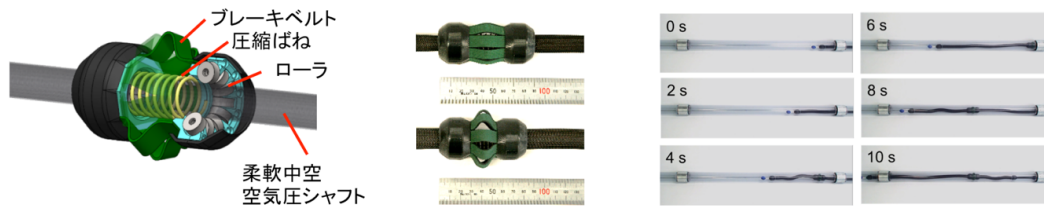


図 3.1-11 配管内推進機構（左：概念図、中：ベルトの展開、右：水平配管の推進）

操作インターフェースに実装し、操作性の向上を確認した。

まず、配管内移動機構については、保持力の増大と曲管の通過性能を向上させるために、平成 27 年度に検討したセルフロック現象を用いた保持力発生機構 [10] を、柔軟シャフトアクチュエータを用いた推進機構に応用した。この機構により、50A 配管内において最大 69.7 N の保持力を発生できることを確認し、従来通過不可能だったエルボ管を通過できることを実験により確認した（図 3.1-12） [11]。また、保持力発生ユニットの弾性特性をモデル化し、保持力発生のために必要な印加圧力の決定を求めた。さらに、エルボ管通過時に曲管部とロボット本体との摩擦を低減させる曲管通過動作を提案し、実験によりエルボ管における接触力が 53% 低減できることを示した [12]。

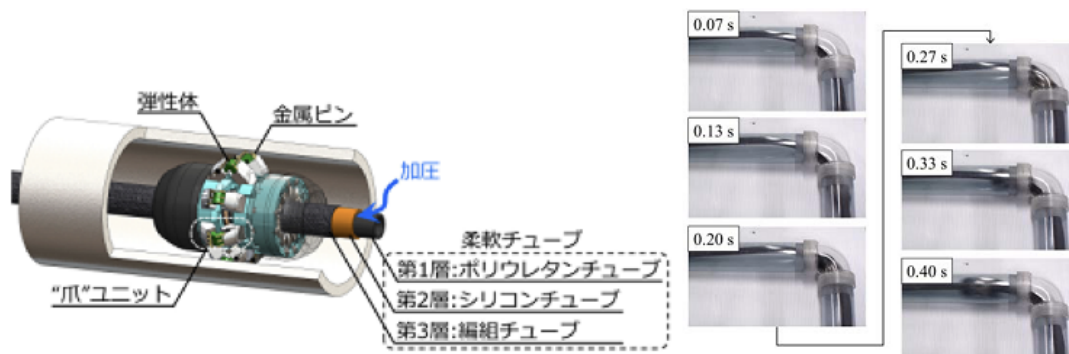


図 3.1-12 配管内移動のためのセルフロック機構を用いた保持力発生装置（左：セルフロック機構の概要、右：エルボ管通過実験）

次に、索状ロボットの遠隔操作インターフェースについて説明する。これまで、狭隘な瓦礫内を索状ロボットで探査した際に、先端のカメラの視野外でロボットが環境と接触すると、接触に気付かずにスタックしてしまうなど、遠隔操作の上で課題があった。平成 28 年度は、図 3.1-13（左）に示す振動情報を用いた接触方向の推定と視触覚情報を用いた提示システムを提案し、遠隔操作システムの試作機を用いて、操縦者の環境把握能力に影響するか調査した。まず、触覚センシング手法に関して、ロボット先端部の 4 つの振動センサの値を用いて接触方向と強度を推定する手法を提案し、予備実験により少なくとも 93.8% の確率で推定できることを確認した。また、実験では、操作の接触に対する反応時間の向上を確認した。さらに、視触覚提示の有無の条件で操縦時間あたりの接触回数を計測した結果、視触覚提示がある条件で衝突回数が減少することを確認した。これにより、触覚情報の提示により、環境に対して接触の認識能力が向上することを確認した [13]。

#### ④ 移動性能向上のための制御及び機構の開発 (H29)

索状ロボットによる原子炉圧力容器内の調査を目的として、圧力容器にアクセスするガイド配管を

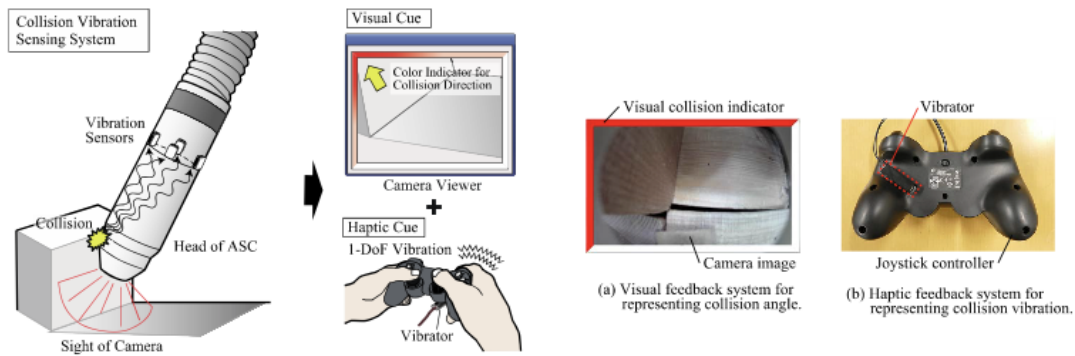


図 3.1-13 索状ロボットの遠隔操作のための視触覚提示インタフェース（左：センシングと提示の概念図、右：開発した視触覚ディスプレイ）

走行した後に、オープンスペースに侵入し進路を変更するための推進機構の開発と、平成 28 年度まで開発してきた索状ロボットとの統合を行った。まず、進路選択のために索状体の先端に配置可能で、側方に移動するための空圧式回転アクチュエータの開発を行った。この機構は、索状ロボットの柔軟シャフトに巻き付けた複数のチューブに空気を印加することによって、チューブを覆うカバー状の回転体を高速かつ高トルクで無限に回転させる。軽量かつシンプルな構造であるので、細径のロボットにも実装可能である [14]。また、従来の索状型ロボットと統合し、配管から外に出てオープンスペースでの推進が可能なロボットを提案した。図 3.1-14 に示すように、提案するロボットは、先端に取り付けた前述の回転アクチュエータを用いて左右方向への操舵力を発生する [15]。

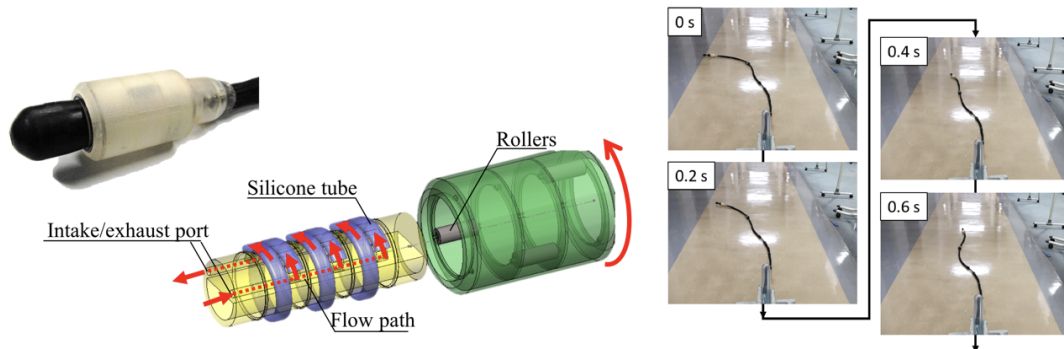


図 3.1-14 オープンスペースで移動可能な柔軟シャフト型索状ロボット（左：空圧式回転アクチュエータの機構、右：オープンスペースでの進路選択実験）

また、索状ロボットの遠隔操作インタフェースについて、平成 28 年度まで開発してきた能動スコープカメラの先端部の接触方向の触覚提示技術に加えて、さらに、索状体挿入部中盤の接触状況を推定するセンシング技術を検討し、プロトタイプ機による確認を行った [16]。図 3.1-15 に示すように、能動スコープカメラに内蔵する複数の振動モータと振動センサの組を用いて、環境との接触の有無による振動波形の変化を機械学習によって判別可能かを検証した。実験の結果、3つの連なるブロックの接触の全ての組み合わせについて、8割以上の正答率で判別できることが確認された。

### ⑤ 開発したシステムの評価と改良 (H30)

配管内移動索状ロボットに関して、開発したシステムの配管推進性能を評価し、曲管の通過性能と耐久性の改良を行った。推進性能については、東北大学レアメタル総合棟実証フロアに設営した水、

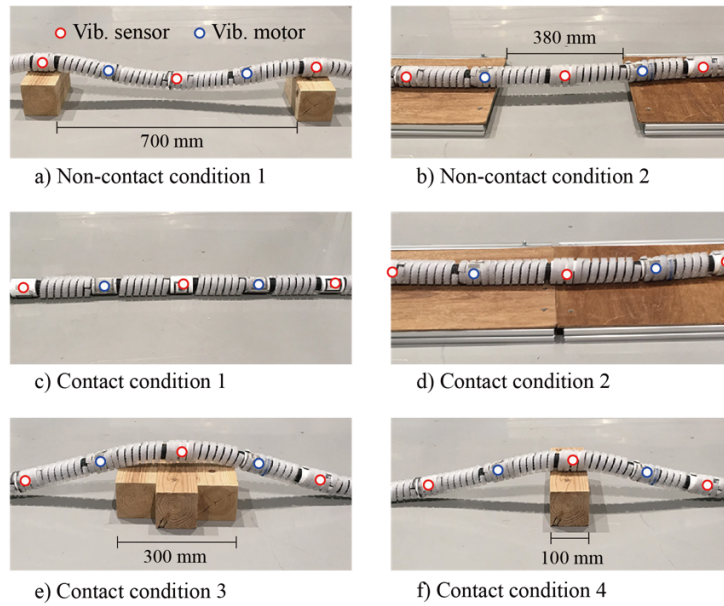


図 3.1-15 能動スコープカメラの接触状態の推定

錆、油などを設けた模擬配管において、平成 29 年度まで開発した金属ピンを用いたセルフロック機構により推進が可能であることを確認した (図 3.1-16)。また、スライダモジュールを 2 台、全長約 20 m の索状ロボットを用いて、曲管を含む 50A 模擬配管での通過性能を評価した結果、曲管通過性能に制限があることが確認された。そこで、曲管の通過性能を改善するために、スライダ部に弾性要素を付与して接触力を低減させる機構 (図 3.1-17 (左)) を考案し [17]、さらに、スライダ機構全体の金属化による耐久性・保持力の向上を行った (図 3.1-17 (右))。

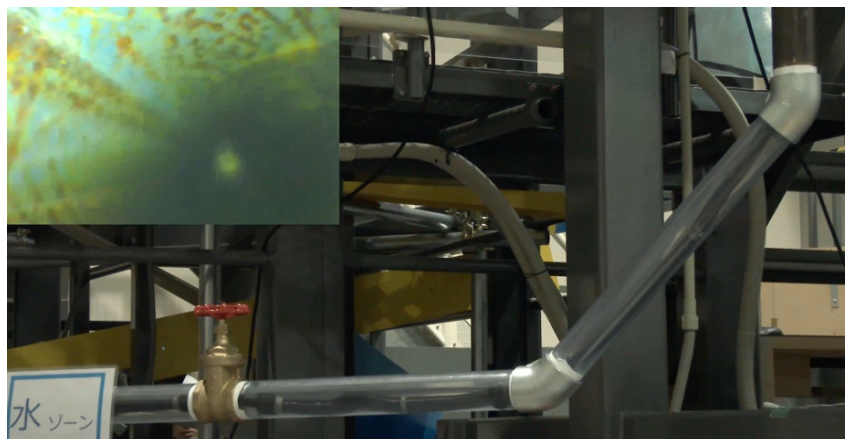


図 3.1-16 配管内推進索状ロボットの推進性能評価の様子

また、これまで開発してきた空気噴射を用いた能動スコープカメラの性能を福島ロボットテスト・フィールドのプラント実験棟の瓦礫を用いて評価を行い、空気噴射による瓦礫の段差・ギャップ乗り越え性能の向上を確認した。空気噴射により、200 mm 程度の段差乗り越えが可能であること、粉碎されたコンクリート瓦礫上でも推進が可能であることが確認された。また、平成 29 年度まで開発し



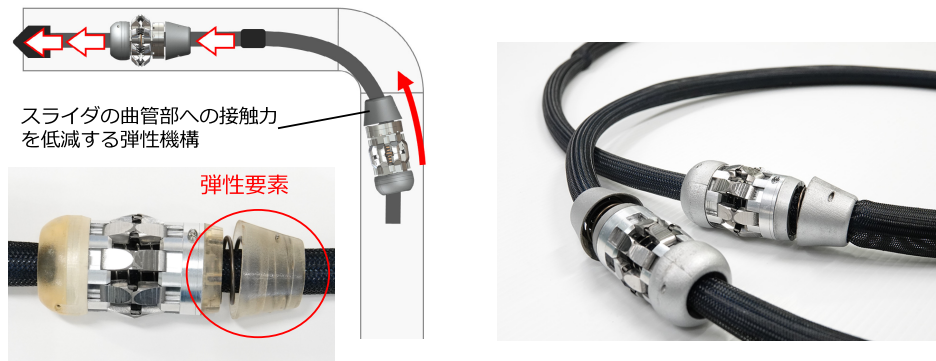


図 3.1-17 配管内推進機構の改良（左：スライダ弾性要素による曲管通過性向上、右：スライダ金属化による耐久性向上）

てきた振動センサを用いた接触推定が模擬瓦礫上でも動作することを確認した。さらに、学習データを複数の素材や姿勢で取得することで、Support Vector Machine (SVM) を用いた機械学習の精度を 80~100% の範囲で改善することができた。また、瓦礫内のロボット筐体の接触分布推定し、IMU を用いた姿勢推定の結果と重畳して表示するシステムを開発した。福島ロボットテストフィールドでの評価の結果、図 3.1-18 に示すように、瓦礫内の離散的な接触状況をオペレータに提示可能であることを確認した [18]。



図 3.1-18 空気噴射型能動スコープカメラの接触状態の推定と姿勢との重畳表示の様子（福島ロボットテストフィールドでの評価）

### (3) 星形タイヤを搭載した移動ロボットと遠隔操作インターフェースの開発 (H26)

#### ① 星形タイヤを搭載した移動ロボットの設計

現在、遠隔操作レスキューロボットはフリッパークローラ型が主流である。クローラは接地面積が大きく、不整地でも滑りにくく安定して走行ができ、ここにフリッパー機能を取り付けることでクローラの高さ以上の段差を乗り越えることができる。しかしオペレータには走行速度とフリッパーの角度の同時操作が要求され大きな負担となっていた。特にフリッパーの角度をロボット搭載カメラの映像や姿勢データ等を頼りに地形に合わせ適切に操作することは非常に難しく、オペレータの熟練を要する。そこで平成 26 年度新規開発した遠隔操作ロボットには、単純な操作で不整地の走行が可能



な機構を採用し、ロボットの取得情報とインタフェースを工夫することでオペレータの負担を軽減した。開発したロボットは四輪駆動の車輪型とし、タイヤには5つの突起を持つ星型のタイヤを採用した。これはタイヤ車輪半径以上の段差を乗り越えられないという車輪駆動ロボットの弱点を補えるもので、車輪系の2/3以下であれば特別な操作をしなくても段差を乗り越えられる能力を持つ。また通常の車輪が1点で接地するのに対し、星型タイヤでは2点で接地できる上、瓦礫などと窪みをかみ合わせるようにして車体を安定させることができる。

また、本体の中心に受動ロール機構を取り付けることで4つの車輪が常に地面と接地できるようにし、機体の安定性と走行性能の向上を図った。車体は低く狭隘地へのアクセスも可能であり、重心も低いため転倒の可能性も低い。前方には小型のフリッパークローラも搭載しており、スタック状態から抜け出すことも可能である。このようにロボットの機構自体に工夫を施すことで安定性を向上させ、オペレータの負荷を低減させた（図 3.1-19）。

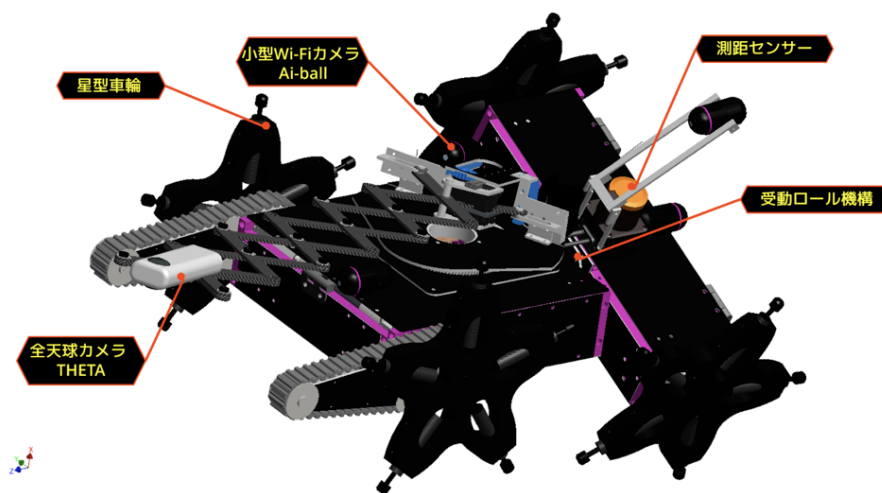


図 3.1-19 星形タイヤを搭載した移動ロボット

## ② 遠隔操作インタフェース開発

次に、遠隔操作ロボットのインタフェースを説明する。まず、ロボットの操作は市販されているゲームパッドで行う。操作する対象は「左右のタイヤの回転速度」、「左右のフリッパーの角度」、「アームのピッチ角・ヨー角・直動長さ」である。これら进行操作するため、オペレータに提示される画面には、移動モードとアームモードの2つを用意した。移動モードでは、現在のロボットの姿勢を3Dモデルで表現したものとその時の周辺の距離データ、電源電圧値、カメラの映像などを表示する。カメラはロボットの4箇所に取り付けられており、前方カメラ、後方カメラ、俯瞰カメラ、アームカメラとなっている。ここで、前方後方カメラは前方と後方を写すカメラで、俯瞰カメラはロボットを操作しやすいように後方の上部からロボットを俯瞰するような位置に設置したカメラである。アームカメラとはアームの根本に取り付けられており、アームの先端部を目標位置に移動させるために使うが、移動モードではその映像は表示されない。また、本ロボットのカメラにはAi-Ballという超小型のWi-Fiワイヤレスネットワークカメラを用いている。そのために、カメラの取り付け位置は配線やネットワークの設定などによらず自由に決めることができ、また台数の増減も自在であるので、タスクに応じて必要な時に必要な場所の映像を取得することができる。また、ロボットを目標の位置に移動させた後で、周辺の詳細な情報を収集するためにアームモードへと切り替えを行う。アームモー

ドでは画面上に、アームに搭載された各種センサの値、アームカメラの映像、アームの現在の形状の3Dモデルなどが表示される。このモード切り替えは画面の表示に関するものだけであるので、どちらのモードであっても移動とアームの操作を行うことは可能である。

### ③ アバタを用いた移動マニピュレータの遠隔操作インタフェース開発

近年、人に危険が及ぶ恐れのある場所などで、人間に代わってロボットに作業をさせる試みがなされている。移動体とマニピュレータアームで構成されたロボットである移動マニピュレータは、移動と作業両方が可能であり、様々な環境や状況で用いられている。

一般的に移動マニピュレータは自由度が高く、その操作は簡単ではない。ロボットの操作に広く用いられているジョイスティックやゲームパッドでは、入力できる自由度の数が限定され、同時に多自由度の入力を行うことは困難である。自由度の高いロボットを直感的に操作する手法として、身体動作を用いる手法が提案されている。例えば、ヒューマノイドロボットを操作者の動きに合わせて操作する手法は多く研究されている。しかし、このような手法ではロボットの構造が限定され、より簡単な構造を持つ移動マニピュレータに適応させることは難しい。

本研究では、移動マニピュレータの構造によらず、操作者が自分の体のように操作し、ロボットに遠隔地で作業を実行させる遠隔操作システムの実現を行う。

提案システムの概要図を図 3.1-20 に示す。以下で提示手法・操作手法に分けて説明する。本システムにおける提示手法では、操作者がロボットのいる遠隔地を任意の視点で見ることを可能とすることを目指す。人間と構造が異なる移動マニピュレータは、人間の頭に対応するハードウェアを持たない。そのため、機体のどこにカメラを搭載しても、操作者が自分の目で見えるような視覚情報を得ることはできない。そこで、ロボット搭載のセンサ情報を用いて仮想空間に遠隔地環境を3次元復元し、そこに操作者を表す人型CG(アバタ)を配置する。ただし、ここでロボットの機体は提示しない。操作者の身体の動作を測定し、その動きをアバタに反映させ、アバタの目の位置から見える空間を操作者が装着したヘッドマウントディスプレイ(HMD)へ提示する。

本システムの操作手法については、操作者自身が遠隔地において作業を行っているようにロボットを操作できることを目指す。移動マニピュレータによる作業の実現において、本質的に重要なのはアーム手先の位置・姿勢のみであり、アームリングや移動体は適切に動作していればそれほど重要でないと考えられる。そのため、操作者の手の位置・姿勢を測定し、それをアーム手先の位置・姿勢の目標として移動マニピュレータの移動体とアーム関節角を制御する。

このようにすることで、操作者は、ロボットを見ながら機体の自由度を操作するのではなく、ロボットを意識せず、その場に自分がいるかのように遠隔地環境を見て、自分が行っているかのように作業を実行できる。

本システムでは、操作者の身体の動きをセンシングしているため、非常に多くの動作の情報を使うことができる。その情報をロボットの制御に用いることで、様々な動作をさせることができると考えられる。例えば、テーブルの下の物体を取る時、人間は屈んで腕を伸ばすような動作を行うと想定される。ロボットは環境をセンシングしなくても、その動作から腕の上に障害物があると推定でき、それを避けるように動く制御を生成できると考えられる。

本システムはロボットの種類や台数への制約がほとんどないため、用いる状況に応じて様々なロボットを導入できる。本研究では、地上を移動する移動マニピュレータ1台を想定しているが、高所での作業が必要な環境であれば、Unmanned Aerial Vehicle(UAV)にアームを取り付けたロボット

であっても、本システムを適用できると考えられる。また、将来的には、移動マニピュレータを複数台導入し、環境や操作者の行う作業に応じてロボットを協調させたり、切り替えたりすることができると考えられる。

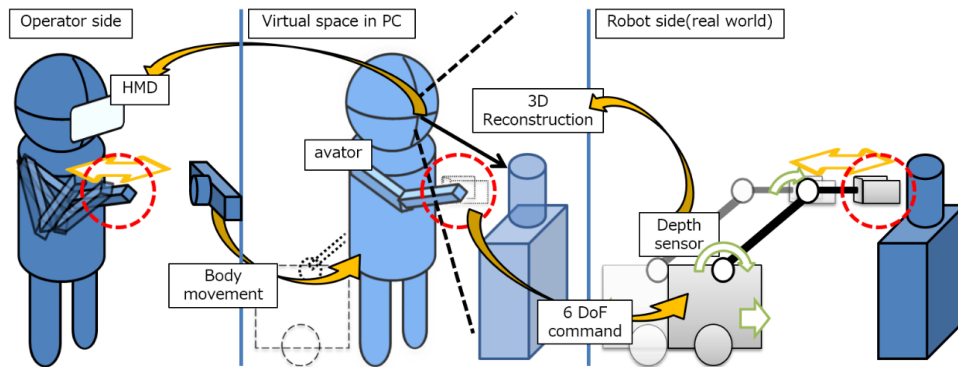


図 3.1-20 提案システム概要図

#### (4) ヘビ型ロボットの開発 (H27-H30)

##### ① はじめに

生物のヘビは手足のない単純な形態であるが多くの自由度を持ち、砂地、沼地、樹上、狭所など多様な環境での移動を実現している。このようなヘビの特性を応用したヘビ型ロボットは同じモジュールを連結した単純な構造でありながら、多様な移動形態を実現可能である。これによりヘビ型ロボットは多様な環境への適応が可能であると期待されている。特にレスキュー活動やインフラ点検など、人の進入が困難な環境での活用が期待されている。ヘビ型ロボットは超冗長システムであるため、制御の困難さを克服するための手法が考えられている。

文献 [19] では、目標関節角軌道を歩容関数として定式化し、数個のパラメータを変化させることで sidewinding や lateral rolling など多様な歩容を実現する手法が提案されている。Rollinson ら [20] は、拡張カルマンフィルタを用いて関節角度から現在のロボットの形状を推定し、歩容パラメータを設定するコンプライアンス制御手法を提案した。これにより、半自律的に環境の変化に対応することを可能にし、径の連続的に変化する箇所や曲管、分岐がある配管内部での移動を実現した。しかし、ヘビ型ロボットの目標形状が複雑な場合には、目標関節角を直接定式化することは困難である。

目標形状を連続曲線として設計し、ヘビ型ロボットの形状をその曲線に近似することで歩容を設計する手法が提案されている。この手法では、ヘビ型ロボットの機械的構造を抽象化して連続曲線として考えることができるため、複雑な形状を設計しやすいという利点がある。山田ら [21] は目標形状の曲率と振率を用いて各関節管の内側と外側を移動する螺旋捻転運動を提案した。さらに、曲螺旋 [24] を設計し、常螺旋と繋ぐことにより曲管での移動を実現した。また、配管外部の段差を乗り越える動作として、螺旋尺取り方式 [25] を提案した。この方式では、離散的に円柱を把持して体を支持し、把持する部分を順次送ることにより段差の乗り越えを実現した。また、配管外部の枝部を乗り越える動作として螺旋進行波 [26] を提案した。この動作では、螺旋に波を送ることで螺旋の接線方向への移動を可能にした。

複雑な形状の設計においては、空間曲線を解析的に表現することは困難である。そこで、竹森らの

目標角度を求める手法を提案した。ロボットの関節構成に関わらず適用可能であり、計算コストが低いという利点から、この手法を用いた様々な移動形態が提案されている [22-26]。亀川ら [22, 23] は螺旋形状を目標形状とし、Takemori ら [27] は直線、円弧、螺旋といった単純曲線を連結して目標形状を設計する手法を提案した。この手法では、特性が既知な形状を組み合わせるため、直感的に設計することができる。また、曲率や捩率が既知であるため、計算により求める必要がない。さらに、この手法を用いて、フランジ付近の部位を局所的に持ち上げる形状を設計することで、配管外部のフランジ乗り越えを実現した。他にも、不整地の移動、はしご登り [28] を実現した。

ヘビ型ロボットは狭所へ進入可能な長所を持つため、配管内の点検作業での活用が期待されている。配管内の移動は螺旋捻転運動 [22, 23] により実現されている。しかし、配管内部では (i) 分岐、(ii) 曲管、(iii) S 字部、(iv) 径の不連続に変化する箇所、(v) 径の連続的に変化する箇所、(vi) せん断方向にずれた箇所、(vii) 部分的に塞がっている箇所など配管形状の変化する箇所が存在する。そのため、多様な形状の配管内を移動可能な制御手法が求められる。Rollinson ら [20] は、(i)、(ii)、(iv) における制御手法を提案した。亀川ら [24] は曲螺旋の設計により (ii)、(iii) に適用可能な手法を提案した。このように、(i)-(iv) における制御手法が提案されている。しかし、(v)-(vii) が存在する配管内の移動は従来手法では実現が困難である。また、配管形状ごとに用いる制御手法が異なる場合、制御手法の切り替え時の対応が困難である。よって、全ての配管形状に対して統一的な制御手法によって対応できることが望ましい。

本研究では複雑な形状の配管内部を移動する統一的な制御手法を提案する。この手法では、2つの螺旋形状とそれらを繋ぐ自由形状で構成された連続曲線を用いる。この自由形状を配管形状に合わせて設計し、シフト制御により前方の配管へ移ることで (i)-(vii) の全ての配管内を移動可能となる。本報告では、曲管、分岐、せん断方向のずれ、部分的に塞がっている箇所、径の変化する箇所について目標形状を設計し、物理シミュレーションにより提案手法の有効性を検証した。

## ② 背びれ曲線を用いた形状近似 (H27)

本研究で想定するヘビ型ロボットは、図 3.1-21 に示すようにピッチ軸関節とヨー軸関節を交互に連結した構成である。関節を 90 度ずつ違う向きに連結することで 3 次元的な動きを可能にしている。リンクの長さは全て等しく  $l$ 、 $i$  番目の関節の角度を  $\theta_i$  と定義する。各関節の目標角を個別に指定することができるとする。ロボットの関節角を求めるために用いる山田らの手法 [21] について説明する。図 3.1-22 において、 $e_1(s), e_2(s), e_3(s)$  は Frenet の標構と呼ばれる、正規直交基底をなす単位ベクトルである。 $e_1(s)$  は曲線の接線方向の単位ベクトル、 $e_2(s)$  は曲線の法線方向のうち、弧の内側向きの単位ベクトル、 $e_3(s)$  は  $e_1(s) \times e_2(s)$  で得られる。この座標系は曲線の形状に依存する。一方、ヘビ型ロボットには上下の向きが存在するため、それを考慮した座標系を考える必要がある。ヘビ型ロボットを連続体とみなしたモデルに対し、背びれ座標系  $e_r(s), e_p(s), e_y(s)$  を設定する。 $e_r(s)$  は曲線の接線方向を向いており  $e_1(s)$  と同じである。 $e_p(s), e_y(s)$  はそれぞれその点におけるピッチ軸、ヨー軸の向きを向いた単位ベクトルであり、これらを機体座標系の基底ベクトルと定義する。この座標系はロボットの各部分の姿勢によって決まる。

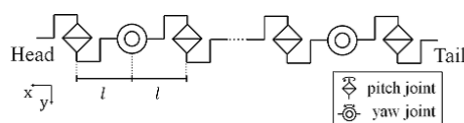


図 3.1-21 ヘビ型ロボットの構造

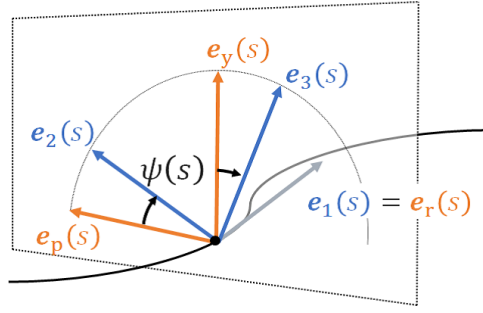


図 3.1-22 背びれ曲線と Frenet の標構

図 3.1-22 に示すように Frenet の標構と背びれ座標系との  $e_1(s)$  軸周りの捩れ角を  $\psi(s)$  とおくと、次の式が成り立つ。

$$\kappa_p = -\kappa(s) \sin \psi(s) \quad (3.1-1)$$

$$\kappa_y = \kappa(s) \cos \psi(s) \quad (3.1-2)$$

$$\psi(s) = \int_0^s \tau(s) ds + \psi(0) \quad (3.1-3)$$

この  $\kappa_p(s), \kappa_y(s)$  は、Frenet-Serret の公式における曲率を機体座標系におけるピッチ軸方向成分と、ヨー方向成分に分解したものに相当する。 $\psi(0)$  は積分定数であり、捩れの初期値にあたる任意の数である。この値を変化させることで機体座標系全体が曲線を軸に回転し、捻転動作を生じる。これらを用いて、各関節の目標角度を次のように計算する。

$$\theta_i^d = \begin{cases} \int_{s_h+(i-1)l}^{s_h+(i+1)l} \kappa_p(s) ds & (i : \text{odd}) \\ \int_{s_h+(i-1)l}^{s_h+(i+1)l} \kappa_y(s) ds & (i : \text{even}) \end{cases} \quad (3.1-4)$$

$s_h$  は目標となる連続曲線上にあるヘビ型ロボットの先頭位置である。 $s_h$  を動かすことで、曲線のうちのロボットに近似する範囲を変更するシフト制御を行うことができる。

### ③ 単純形状を連結した背びれ曲線 (H27)

本研究では曲率と捩率が既知の単純な形状を連結して目標形状を設計する手法を提案する。以下では、連結する形状要素のそれぞれを「セグメント」と呼び、これらを連結して目標形状を構成する方法について説明する。

#### 1) セグメントの連結による形状構成

この手法の概観を図 3.1-23 に示す。近似手法は前節で説明したものを示す。この手法では各セグメントの曲率と捩率は既知であるため、セグメント内部の形状の再現は容易である。しかし、セグメントの連結部において Frenet の標構が不連続になるため、その部分の表現に工夫が必要である。先頭から数えて  $i$  番目のセグメントのことを「セグメント  $i$ 」と呼ぶ。セグメント  $i$  とセグメント  $(i+1)$  の連結部  $i$  における弧長  $s$  の値を  $s_i$  とする。ただし、1 つ目のセグメントの先頭位置を  $s = s_0$  とする。セグメント  $i$  とセグメント  $(i+1)$  は  $s = s_i$  を接点として接していなければならない。連結部  $i$  の様子を図 3.1-24 に示す。連結部の直前の点  $s_{i-}$  と直後の点  $s_{i+}$  を次のように定める。

$$s_{i-} = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} s_i - \epsilon \quad (3.1-5)$$

$$s_{i+} = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} s_i + \epsilon \quad (3.1-6)$$

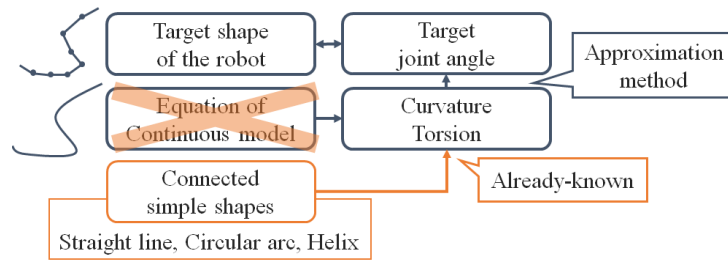


図 3.1-23 提案手法の概要

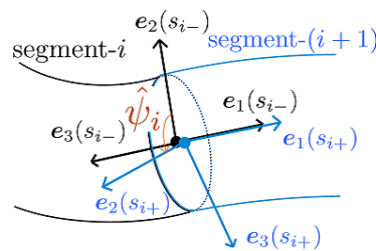


図 3.1-24 セグメントの結合

$s = s_{i-}$  はセグメント  $i$  の終端、 $s = s_{i+}$  はセグメント  $(i+1)$  の始端である。 $s_i$  における Frenet の標構、曲率及び捩率は  $s_{i-}$  のもので代表することにする。ただし、先頭部分である  $s = s_0$  については  $s_{i-}$  のもので代表させる。次に、連結部での捩れについて考える。図 3.1-24 に示したように、 $e_1(s_{i-})$  を軸とする  $e_2(s_{i-})$  と  $e_2(s_{i+})$  の向きの差を  $\hat{\psi}_i$  とする。この  $\hat{\psi}_i$  は設計パラメータである。この捩れを近似の計算に反映させるために、式 (3.1-3) を以下のように置き直す。

$$\psi(s) = \int_0^s \tau(s) ds + \sum_{i=0}^n \hat{\psi}_i u(s - s_i) \quad (3.1-7)$$

$$\hat{\psi}_0 = \psi(0) \quad (3.1-8)$$

$\hat{\psi}_0$  を変化させることで捻転動作を行うことができる。また、 $u(s)$  は次のステップ関数である。

$$u(s) = \begin{cases} 0 & (s < 0) \\ 1 & (s \geq 0) \end{cases} \quad (3.1-9)$$

以上より、各セグメントの曲率及び捩率が既知であれば、式 (3.1-1)、式 (3.1-2)、式 (3.1-4)、式 (3.1-7) を用いてヘビ型ロボットの形状を近似することができる。目標形状を設計する時には各セグメントの形状と、連結部での捩れの角度  $\hat{\psi}_i$  を定めればよい。

## 2) 単純形状の性質

本研究ではセグメントの形状として、最も単純な螺旋、円弧、直線を用いる。ただし、セグメントを構成する形状は曲率、捩率などの性質が明らかであればどのようなものでも良い。各セグメントの

性質を表 3.1-1 にまとめる。螺旋（本研究では常螺旋のことを指す。）は曲率、捩率がともに非 0 で一定の曲線である。半径  $a_i$ 、傾き  $b_i$ 、中心角  $\phi_i$  によって形状を定める。螺旋のピッチ、つまり螺旋が一周した時の高さの変化量を  $p_i$  とすると次式が成り立つ。

$$b_i = \frac{p_i}{2\pi} \quad (3.1-10)$$

表 3.1-1 セグメントの性質

type	curvature $\kappa_i$	torsion $\tau_i$	length $l_i$
helix	$\frac{a_i}{a_i^2+b_i^2}$	$\frac{b_i}{a_i^2+b_i^2}$	$\phi_i \sqrt{a_i^2 + b_i^2}$
circular arc	$\frac{1}{r_i}$	0	$\phi_i r_i$
0	0	$l_i$	

#### ④ 歩容設計 (H27)

前節で提案した表現手法を用いてヘビ型ロボットの二種類の新しい歩容を設計した。

##### 1) フランジ乗り越え動作

ヘビ型ロボットは螺旋捻転動作を用いて配管に沿って移動することができる [20]。本研究ではフランジのような不連続に配管の太さが変化する障害物を乗り越える歩容を提案する。

##### セグメント形状の決定

この歩容では螺旋の途中で障害物を跨ぐための「橋部」を設けている。橋部の形状は後に説明する橋の高さと幅を指定することで決まる。幾何学的関係から求められる橋の高さの境界値  $h_b$  が次のように定義される。

$$h_b = \sqrt{(r_c \sin \alpha_h)^2 + 2r_h r_c + r_h^2} - r_h + r_c \quad (3.1-11)$$

$h_b < h$  の場合を case A、 $h_b > h$  の場合を case B とし、それぞれで目標形状の構成が異なる。

まず、case A の場合を考える。case A のセグメント構成の詳細を図 3.1-25 に示す。先頭から順にセグメント 1 からセグメント 11 までの 11 つのセグメントにより構成される。両端のセグメント 1 と 11 はどちらも半径が  $r_h$ 、ピッチが  $p_h$  の螺旋で、ロボットの全身を覆うことができるだけの十分な長さを持つとする。セグメント 6 は螺旋の軸と平行であり、セグメント 3、4、8、9 は螺旋の軸と垂直な平面上にある。セグメント 5、7 は螺旋の軸と平行な同一の、あるいは別の平面上にある。全ての円弧の半径を  $r_c$  と定める。橋部の高さ  $h$  はセグメント 6 の円柱からの距離、幅  $h$  はセグメント 4 と 8 の距離である。

目標形状を満たすために、各セグメントのパラメータを表 3.1-2 のように定める。セグメント 2、10 の中心角  $\alpha$ 、中心角  $\beta$ 、セグメント 6、7 の間の捩れ角  $\gamma$ 、セグメント 4、8 の直線の長さ  $l_s$  は高さ  $h$  と幅  $d$  を定めると幾何学関係から求めることができる。

$h < h_d$  の場合、図 3.1-26 のような case B の形状になる。この場合、 $l_s = 0$  となり、 $\beta$ 、 $\gamma$  は case A とは異なる幾何学的関係式から求められる。

##### シフト制御と捻転動作の併用

図 3.1-27 の上側に示すように、シフト制御だけを行うとフランジに対して橋部の位置が変化して



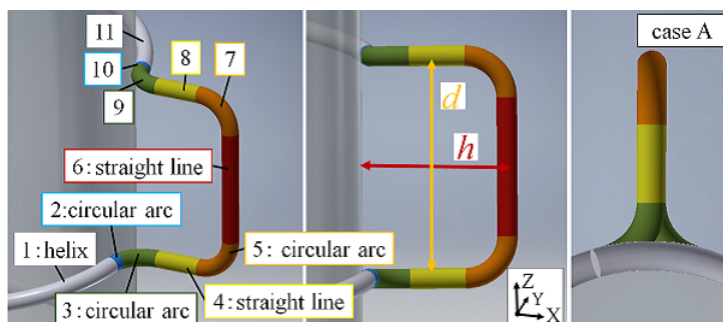


図 3.1-25 case A のセグメント構成の詳細

表 3.1-2 フランジ乗り越えのためのパラメータ設定

$i$	type	parameter	$\hat{\psi}_i$
1	helix	$(a_i, b_i) = (r_h, \frac{p_h}{2\pi})$	$-\frac{\pi}{2}$
2	circular arc	$(r_i, \phi_i) = (r_c, a_h)$	$-\frac{\pi}{2}$
3	circular arc	$(r_i, \phi_i) = (r_c, \beta)$	0
4	straight line	$l_i = l_s$	$-\frac{\pi}{2}$
5	circular arc	$(r_i, \phi_i) = (r_c, \frac{\pi}{2})$	0
6	straight line	$l_i = d - 2r_c$	$\gamma$
7	circular arc	$(r_i, \phi_i) = (r_c, \frac{\pi}{2})$	0
8	straight line	$l_i = l_s$	$\frac{\pi}{2}$
9	circular arc	$(r_i, \phi_i) = (r_c, \beta)$	$\frac{\pi}{2}$
10	circular arc	$(r_i, \phi_i) = (r_c, \alpha_h)$	$\frac{\pi}{2}$
11	helix	$(a_i, b_i) = (r_h, \frac{p_h}{2\pi})$	-

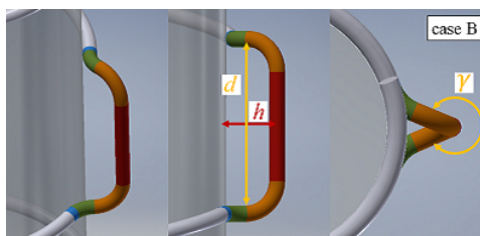


図 3.1-26 case B のセグメント構成の詳細

しまうため、ロボットがフランジと衝突してしまう。フランジを乗り越える間、橋部が常にフランジを跨いでいる状態に保つために、図 3.1-27 の下側に示すようにシフト制御と捻転制御を同時に行う。

### シミュレーション

提案した歩容の有効性を検証するために、COPPELIA ROBOTICS 社の V-REP [29] を用いてシミュレーションを行った。関節数は 31、リンク長 80 mm、ロボットの直径 80 mm、1 リンクあたりの質量 0.25 kg、最大関節トルク 4.0 Nm である。ロボットの関節は P 制御で行われ、V-REP の設定において P ゲインは 1.0 とした。ロボットと環境との間の摩擦係数は全て 1.0 とした。また、ゲーム用のコントローラを用いて、シミュレータの出力画面を見ながら、ヘビ型ロボットを操作する簡易な操作



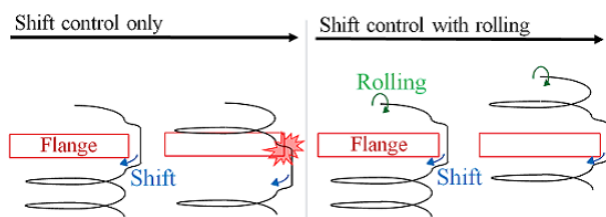


図 3.1-27 捻転動作とシフト制御

インタフェースを作成した。

鉛直に伸びる配管上のフランジを乗り越える 2 通りのシミュレーションを行った。キーボードからコマンドを入力することでロボットを操作した。フランジの厚さを 50 mm とし、配管の直径が 100 mm、フランジの直径が 200 mm の場合と、配管の直径が 200 mm、フランジの直径が 300 mm の場合のシミュレーションを行い、どちらも乗り越えに成功した。シミュレーションの様子を図 3.1-28 に示す。図の下側に書かれている内容は各時刻における操作内容である。

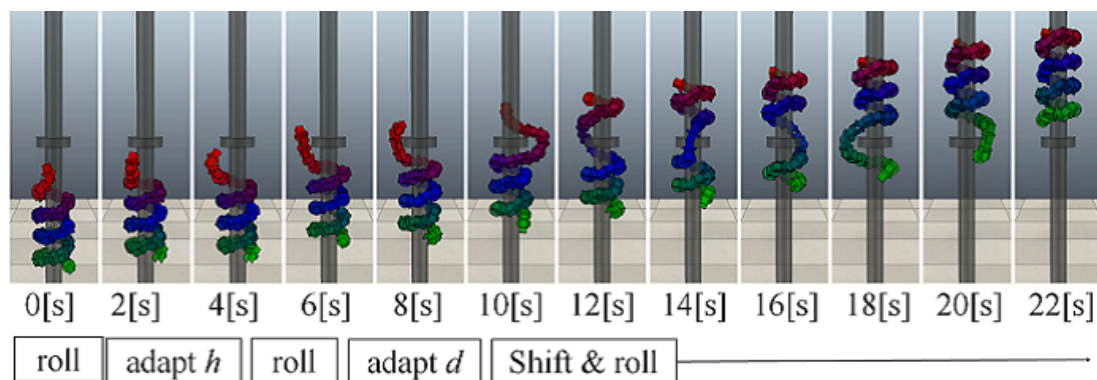


図 3.1-28 シミュレーション結果（配管直径 100 mm）

## 2) Helical-Crawler-Gait (H27)

### セグメント形状の決定

高速移動が可能で、かつ不整地においても推進可能な歩容として「Helical-Crawler-Gait」を提案する。この形態では「Loop-Gait 推進」[30]のようにロボット全体がクローラーベルトのように振舞うため凹凸面への適応性が高く、またロボットの両端を連結するような特殊な機構を必要としないため様々なヘビ型ロボットに適用することが可能である。また、接地箇所が複数存在するため安定性が高く、不整地の移動に適していることが期待できる。また、Pedal-Gait 推進 [31] よりも高速であり、Sidewinding 推進 [32] よりも推進に必要な幅が小さい。Helical-Crawler-Gait のセグメント構成を図 3.1-29 に示す。この形状は、4 つのセグメントを 1 単位とし、それを交互に螺旋の巻く向きを変えながら繰り返した形状である。直線セグメントと円弧セグメントが接地しており、螺旋セグメントが浮いている。螺旋半径  $r_h$ 、螺旋のピッチ  $p_h$ 、螺旋間の距離の余裕  $d_w$ 、円弧半径  $r_c$  の 4 つの値を定めることで、形状が表 3.1-3 のように決まる。 $h$ 、 $l_s$  は幾何学的関係から算出できる。

シフト制御を行うことによって図 3.1-29 の x 軸方向に推進することができる。また、捻転動作によって y 軸方向に推進可能であるため、全方向移動が可能である。

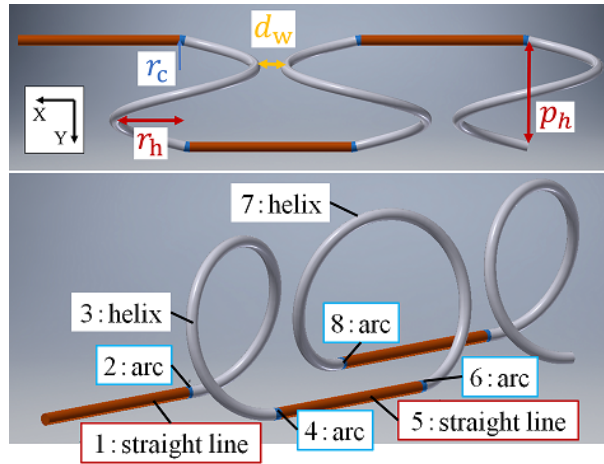


図 3.1-29 Helical-Crawler-Gait のセグメント

表 3.1-3 Helical-Crawler-Gait のセグメントのパラメータ

$i$	type	parameter	$\hat{\psi}_i$
1	straight line	$l_i = l_s$	0
2	circular arc	$(r_i, \phi_i) = (r_c, \alpha_h)$	$\pm \frac{\pi}{2}$
3	helix	$(a_i, b_i, \phi_i) = (r_h, \mp \frac{p_h}{2\pi}, 2\pi)$	$\pm \frac{\pi}{2}$
4	circular arc	$(r_i, \phi_i) = (r_c, \alpha_h)$	0

### シミュレーション

提案した Helical-Crawler-Gait 歩容の有効性を検証するために、COPPELIA ROBOTICS 社の V-REP [29] を用いてシミュレーションを行った。ヘビ型ロボットの仕様は前節のフランジ乗り越え動作と同じである。Helical-Crawler-Gait では螺旋セグメントが車輪のように働くことで段差、階段を乗り越えられることが期待できる。形状パラメータ、段差の高さを変えながら複数のパターンでシミュレーションを行った。段差を登るための特別な制御は行わずに、単純に段差に向かって推進した結果、 $r_h = 100 \text{ mm}$ 、 $p_h = 300 \text{ mm}$ 、 $d_h = 160 \text{ mm}$ 、 $r_c = 100 \text{ mm}$  の場合に最大となる  $250 \text{ mm}$  の段差を越えることができた。この場合のシミュレーションの様子を図 3.1-30 に示す。

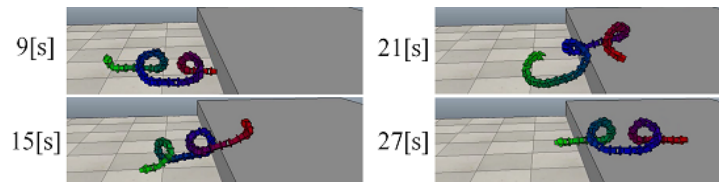


図 3.1-30 シミュレーション結果 (段差登り)

シミュレーションの結果、この歩容では螺旋の半径よりも倍以上も大きな段差を乗り越えられることが分かった。図 3.1-30 のように、段差に接触している部分がロボットの後ろの部分の推進力によって壁面に押し付けられ、十分な摩擦力が得られた結果上向きの力が発生している。また、ロボットが最大トルクのある位置制御であるために、全体として環境に適応している。これらの性質により、重心位置を低く保ったままの形状で段差を乗り越えることができた。

## ⑤ ヘビ型ロボットの開発と実機実験 (H27-H28)

### 1) ヘビ型ロボットのモジュールの試作 (H27)

ヘビ型ロボットを構成するモジュールの試作を行った。このモジュールを連結することで必要な長さのヘビ型ロボットを構成することができる。図 3.1-31 に試作した 6 モジュールを示す。図 3.1-31 の上側にある 3 つはそれぞれモジュール単体であり、下側にあるのが 3 つのモジュールを連結したものである。各モジュールにはサーボモータが 2 つ搭載されており、それらはステンレス製のフレームで連結されている。その外側に 3D プリンタで作製した外装を取り付けることで配線を保護するとともに、外装部分の断面を円形にして捻転動作を行いやすくしている。また外装の周りには摩擦力を大きくするためのスポンジを巻いた。先頭のモジュールはこれらの通常のモジュールとは異なり、測域センサを先頭に取り付ける設計とした。各モジュールにはサーボモータを制御するためのマイコンが搭載されており、外部の制御用コンピュータと CAN 通信でコマンドを送受信する。モータ用の電源は外部から有線で供給する。

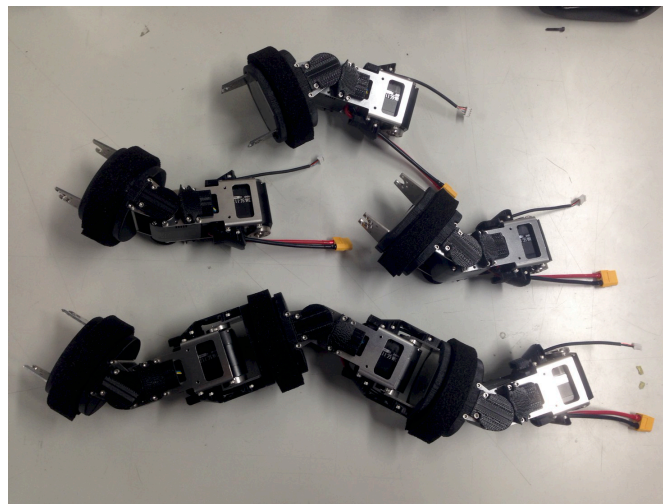


図 3.1-31 ヘビ型ロボットのモジュール試作

### 2) ヘビ型ロボット開発と配管を用いた実機実験 (H28)

30 関節を持つヘビ型ロボットを製作した、また、提案したヘビ型ロボットの運動生成のための軌道生成関節とロボットが軌道に追従するための制御則をヘビ型ロボットに実装し、直径 110 mm のパイプの外側を螺旋捻転運動で上がることができることを実験的に検証した。

#### ヘビ型ロボットの開発

図 3.1-32 に示すような 30 関節を持つヘビ型ロボットを製作した、操作はゲーム用コントローラを用いた遠隔操作であり、ロボット先頭にはカメラを搭載し、無線でオペレータステーションに送信するシステムを構築した。

#### フランジを持つ配管の走破実験

開発した実機を用いたヘビ型ロボットを用いて、配管の外径が約 110 mm、フランジの外径が 210 mm、フランジの厚さが 44 mm の環境設定で実験を実施した。その結果を図 3.1-33 に示す。

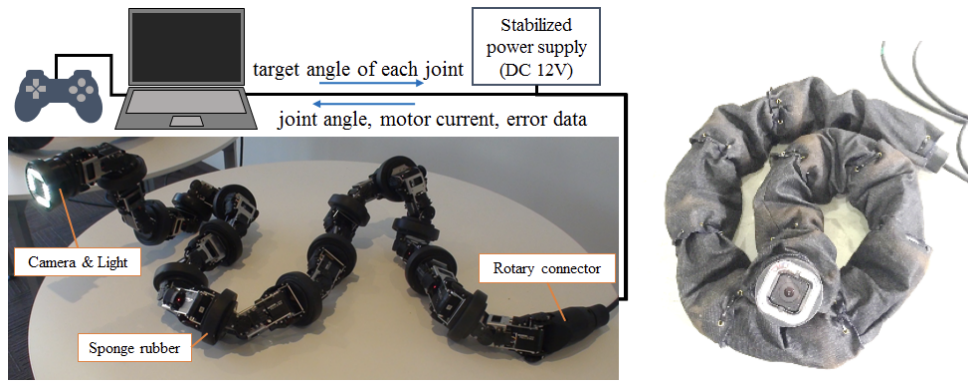


図 3.1-32 ヘビ型ロボットの外観（右）と防塵用カバーを装着したヘビ型ロボット（左）

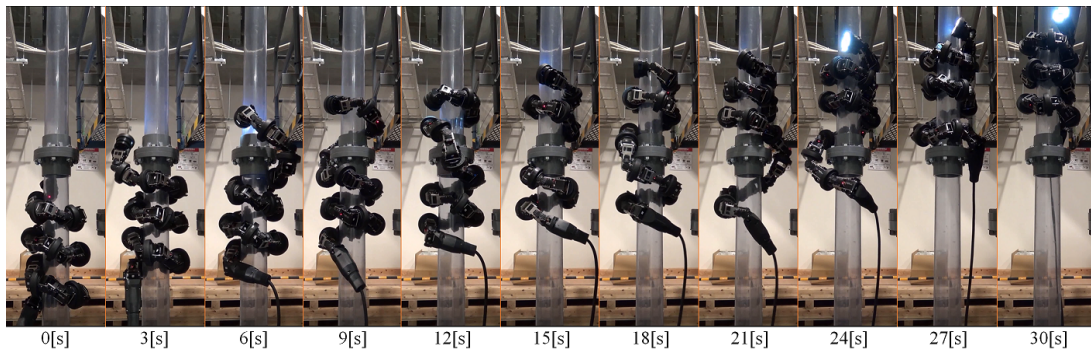


図 3.1-33 フランジを持つ 110 mm のパイプの走破（実機実験）

## ⑥ 滑らかな外殻形状を持つヘビ型ロボットの開発と垂直はしごの昇降実験（H29）

### 1) 楕状の外殻形状を持つヘビ型ロボットの開発

ヘビ型ロボットが環境に引っかかることなく移動するためには、表面形状が滑らかであることが重要である。そこで、本研究では凹凸の少ない外殻形状を持つ有線タイプのヘビ型ロボットを新たに開発した。このヘビ型ロボットは楕状の外殻形状を持つ。この楕状部分により凹凸がない形状が構成されており、かつこの部分は屈曲時には互いに干渉しない。この機構により、広い関節可動域と滑らかな表面形状の両立を実現した。このヘビ型ロボットは有線で電源装置、制御 PC と接続されており、PC から送られるコマンドに基づいて各関節が制御される（図 3.1-34 参照）。

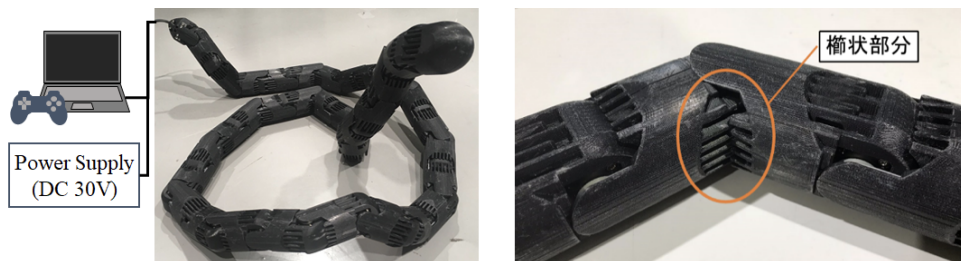


図 3.1-34 楕状の外殻形状を持つヘビ型ロボット



## 2) 垂直はしご登り動作の設計と実機実験

我々が提案した、単純形状を連結することでヘビ型ロボットの目標形状を設計する手法を用いて、はしごを登るための動作を設計した。図 3.1-35 に設計した目標形状を示す。この手法では 3 種のパラメータによって全体の形状を決定することができ、多様なはしごに対して容易に適応する形状を作ることができる。この形状にヘビ型ロボットを近似し、シフト制御を用いて波を送るように順次形状を変化させることではしごを登ることができる。なお、この動作では、有線タイプのヘビ型ロボットにも適用可能なように、はしごの段にケーブルが絡まないようになっている。

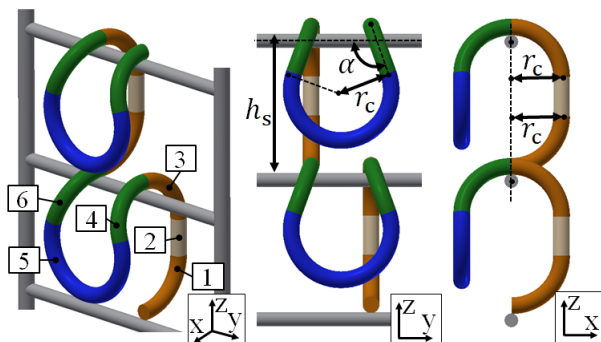


図 3.1-35 はしご登り動作の目標形状

開発したヘビ型ロボットと提案したはしご登り動作の有効性を確認するために、実験を行った。実験では段の間隔が 250 mm のはしごを登ることができた。実験の様子を図 3.1-36 に示す。

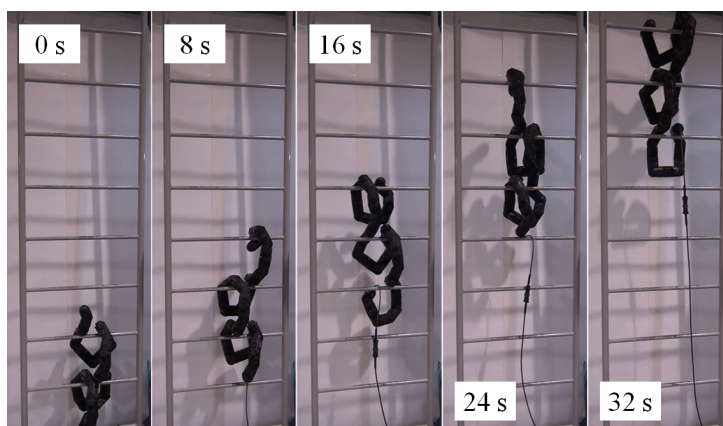


図 3.1-36 はしご登り実験

## ⑦ 複雑な形状の配管内の移動制御 (H30)

### 1) 形状設計の指針

複雑な形状の配管内を移動する動作において、Takemori ら [27] のフランジ乗り越えの動作を参考とする。この動作では螺旋を障害物付近で局所的に持ち上げる形状を設計した。そして、この形状をシフト制御を用いてロボットの後方へ送ることにより、ロボット全体がフランジより先の螺旋部分へ移り、フランジを乗り越えることができる。

この動作を参考として、後方の螺旋から前方の螺旋へとロボット全体が移る動きにより、複雑な形

状の配管内を移動する。また、2つの螺旋を繋ぐ形状を自由形状とすることで、多様な形状の配管内の移動に適用できるようにする。

本研究で対象とする複雑な形状の配管内を移動する動作においてはフランジ乗り越えの場合と異なり、ロボット全体の形状が螺旋の軸に対して非対称である場合があるため、工夫が必要である。

提案する動作の目標形状の構成について説明する。形状の全体図を図 3.1-37 に示す。進行方向に対し、前方の螺旋を front helix part、後方の螺旋を back helix part と呼ぶこととする。また、それぞれの螺旋の軸を front axis、back axis とする。目標曲線を front helix part から軸上に導く部分を front guide part、back helix part から軸上に導く部分を back guide part とする。また、二軸間を繋ぎ、配管や障害物を回避する部分を dodge part とする。この dodge part を配管形状に合わせて設計することで、多様な形状の配管に適応することができる。そして、この部分をシフト制御によりロボットの前方向後方に送ることでロボット全体が front helix part へ移り、前方の配管への移動が実現される。

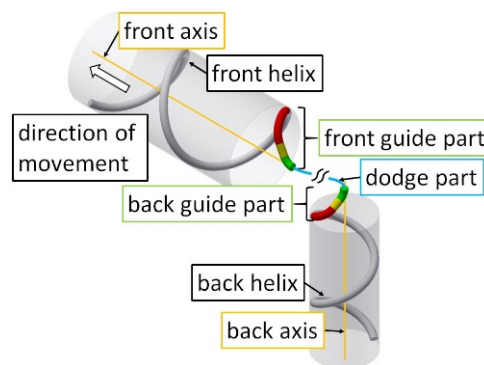


図 3.1-37 複雑な形状の配管内移動のための形状設計

Dodge part の両端を螺旋から軸上に導く目的について説明する。図 3.1-38 の左側に示すように、dodge part の端点が各螺旋の軸上にない場合について考える。後述するように、シフト制御と捻転動作により guide part は各軸周りに回転し、dodge part の二端点の相対位置が変化してしまう。Dodge part はこの相対位置の変化を考慮し形状を適切に変化させていく必要があるが、その設計は困難である。そこで、図 3.1-38 の右側に示すように、dodge part を各螺旋の軸上に導くための guide part を導入する。これにより、guide part が各軸周りに回転しても dodge part の二端点の相対位置は変化しない。そのため、dodge part の形状を一定に保つことができ、ロボットの形状を適切に変化させることができる。

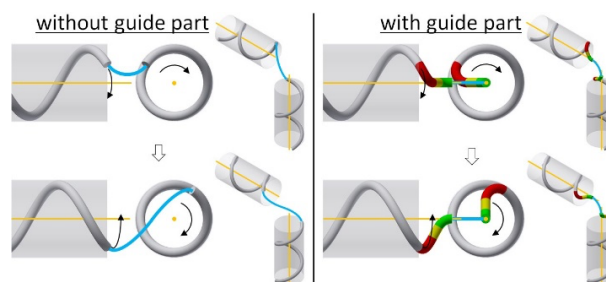


図 3.1-38 guide part の有無による比較

## 2) Helix part と Guide part の設計

Back helix part の半径  ${}^b r_h$  は配管の内径とヘビ型ロボットのリンク径によって決まるパラメータである。また、back helix part のピッチ  ${}^b p_h$  は設計パラメータである。Front helix part についても同様に半径  ${}^f r_h$ 、ピッチ  ${}^f p_h$  とする。

Guide part の形状を図 3.1-39 に示す。また、各セグメントのパラメータを表 3.1-4 に示すように定める。Dodge part のセグメント数を (0 以上の整数) とする。セグメント 2 - 4 は back guide part、セグメント  $5 + n_d - 7 + n_d$  は front guide part を構成する。各 guide part はそれぞれ同様の形状であり、前後の螺旋形状に応じたパラメータを持つ。そのため、以下の説明においては、back guide part について取り上げる。 ${}^b p_h$ 、back guide part の螺旋の半径  ${}^b r_{in}$ 、円弧の半径  $r_c$  を定めることでその他のパラメータは計算によって求められる。

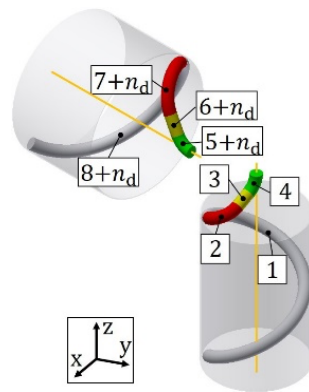


図 3.1-39 guide part の形状の概略

表 3.1-4 複雑な形状の配管内移動のための形状設計パラメータ

part	seg no. $j$	type	parameter	$\hat{\psi}_j$
back helix part	1	helix	$(a_j, b_j) = ({}^b r_h, \frac{{}^b p_h}{2\pi})$	0
	2	helix	$(a_j, b_j, \phi_j) = ({}^b r_{in}, \frac{{}^b p_{in}}{2\pi}, {}^b \beta)$	0
back guide part	3	straight line	$l_j = {}^b l_s$	$\frac{\pi}{2}$
	4	circular arc	$(r_j, \phi_j) = (r_c, \frac{\pi}{2} - {}^b \alpha_h)$	$\phi_{offset} + {}^b \phi_{rot}$
front guide part	$5 + n_d$	circular arc	$(r_j, \phi_j) = (r_c, \frac{\pi}{2} - {}^f \alpha_h)$	0
	$6 + n_d$	straight line	$l_j = {}^f l_s$	$\frac{\pi}{2}$
	$7 + n_d$	helix	$(a_j, b_j, \phi_j) = ({}^f r_{in}, \frac{{}^f p_{in}}{2\pi}, {}^f \beta)$	0
front helix part	$8 + n_d$	helix	$(a_j, b_j) = ({}^f r_h, \frac{{}^f p_h}{2\pi})$	0

Back guide part を  $xy$ -平面に投影した図を図 3.1-40 に示す。図 3.1-40 の左側の各点は各連結部を  $xy$ -平面上に投影したものであり、それぞれ右側の各点と対応している。セグメント 2 は螺旋形状であり、back helix part 終端の接線方向から back axis の方へ目標曲線の向きを変える。セグメント 2 の軸が back axis と平行になるように設計することで、図 3.1-40 において全ての螺旋が円または円弧形状となり、幾何関係の計算が容易になる。

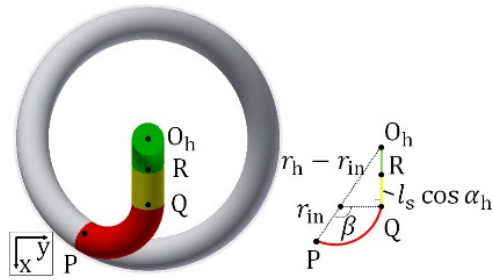


図 3.1-40 guide part の形状の設計

このセグメント構成を実現するため、セグメント 2 のピッチ  ${}^b p_{in}$ 、中心角  ${}^b \beta$ 、セグメント 3 の長さ  ${}^b l_s$  を計算により求める。螺旋の軸を平行にするため、リード角  ${}^b \alpha_h$  を次の式を満たすように定める。

$${}^b \alpha_h = \arctan \frac{{}^b p_h}{2\pi {}^b r_h} = \arctan \frac{{}^b p_{in}}{2\pi {}^b r_{in}} \quad (3.1-12)$$

この関係から、 ${}^b p_{in}$  は次式により得られる。

$${}^b p_{in} = \frac{{}^b r_{in} {}^b p_h}{{}^b r_h} \quad (3.1-13)$$

また、図 3.1-40 に示した幾何学的な関係より、 ${}^b \beta$ 、 ${}^b l_s$  は以下のように求められる。

$${}^b \beta = \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{{}^b r_{in}}{{}^b r_h - {}^b r_{in}} \quad (3.1-14)$$

$${}^b l_s = \frac{\sqrt{({}^b r_h - {}^b r_{in})^2 - {}^b r_{in}^2} - r_c \{1 - \cos(\frac{\pi}{2} - {}^b \alpha_h)\}}{\cos {}^b \alpha_h} \quad (3.1-15)$$

このセグメント構成を実現するためには、 ${}^b l_s \geq 0$  となる必要がある。

$\phi_{offset}$  は dodge part の向きを配管形状に適した向きに合わせるためのパラメータである。

### 3) Dodge part の設計

Dodge part の形状は配管形状に合わせて自由に設計することができる。分岐、曲管、せん断方向のずれ、部分的に塞がっている箇所、径の変化する箇所について具体例を提案する。

#### 分岐

分岐に対応する目標形状を図 3.1-41 に示す。また、各セグメントのパラメータを表 3.1-5 に示す。Dodge part のセグメント数は  $n_d = 1$  である。Dodge part は半径が配管の半径  $r_{junc}$ 、中心角が分岐の曲がる角度  $\phi_{junc}$  の円弧のセグメントである。

表 3.1-5 分岐に対応する dodge part のパラメータ

seg-j	type	parameter	$\hat{\psi}_j$
5	arc	$(r_j, \phi_j) = (r_{junc}, \phi_{junc})$	$\pi - {}^f \phi_{rot}$

#### 曲管

曲管に対応する目標形状を図 3.1-42 に示す。また、各セグメントのパラメータを表 3.1-6 に示す。Dodge part のセグメント数は  $n_d = 1$  である。Dodge part は半径が曲管の曲がる半径  $r_{bend}$ 、中心角が曲管の曲がる角度  $\phi_{bend}$  の円弧のセグメントである。



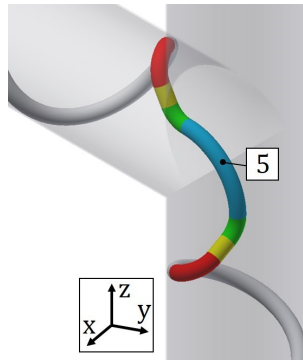


図 3.1-41 分岐に対応する目標形状

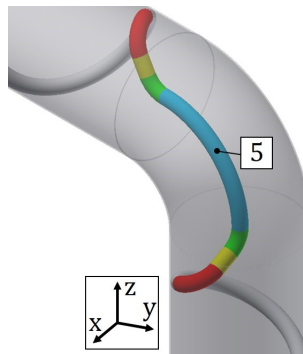


図 3.1-42 曲管に対応する目標形状

表 3.1-6 曲管に対応する dodge part のパラメータ

seg-j	type	parameter	$\hat{\psi}_j$
5	arc	$(r_j, \phi_j) = (r_{\text{bend}}, \phi_{\text{bend}})$	$\pi - {}^f\phi_{\text{rot}}$

### 配管のせん断方向のずれ

配管のせん断方向のずれに対応する目標形状を図 3.1-43 に示す。また、各セグメントのパラメータを表 3.1-7 に示す。Dodge part のセグメント数は  $n_d = 4$  である。Dodge part は半径  $r_c$ 、中心角  $\gamma_s$  の 4 つの円弧のセグメントで構成される。

表 3.1-7 配管のせん断方向のずれに対応する dodge part のパラメータ

seg-j	type	parameter	$\hat{\psi}_j$
5	arc	$(r_j, \phi_j) = (r_c, \gamma_s)$	$\pi$
6	arc	$(r_j, \phi_j) = (r_c, \gamma_s)$	$\pi$
7	arc	$(r_j, \phi_j) = (r_c, \gamma_s)$	$\pi$
8	arc	$(r_j, \phi_j) = (r_c, \gamma_s)$	$\frac{\pi}{2} - {}^f\phi_{\text{rot}}$

配管の軸のせん断方向のずれの長さ  $d_{\text{shear}}$  によって、 $\gamma_s$  は次のように計算される。

$$\gamma_s = \arccos \left( 1 - \frac{d_{\text{shear}}}{4r_c} \right) \quad (3.1-16)$$

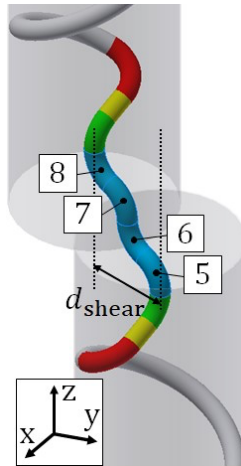


図 3.1-43 配管のせん断方向のずれに対応する目標形状

### 部分的に塞がれた配管

部分的に塞がっている箇所に対応する目標形状を図 3.1-44 に示す。また、各セグメントのパラメータを表 3.1-8 に示す。Dodge part のセグメント数は  $n_d = 5$  である。Dodge part は半径  $r_c$ 、中心角  $\gamma_{pb}$  の 4 つの円弧のセグメントと長さ  $l_{pb}$  の直線のセグメントで構成される。Dodge part の幅  $d_{pb}$  と高さ  $h_{pb}$  の 2 つのパラメータにより形状は決定される。

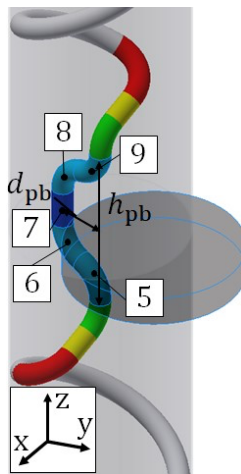


図 3.1-44 部分的に塞がれた配管に対応する目標形状

表 3.1-8 部分的に塞がれた配管に対応する dodge part のパラメータ

seg- $j$	type	parameter	$\hat{\psi}_j$
5	arc	$(r_j, \phi_j) = (r_c, \gamma_{pb})$	$\pi$
6	arc	$(r_j, \phi_j) = (r_c, \gamma_{pb})$	0
7	line	$l_j = l_{pb}$	0
8	arc	$(r_j, \phi_j) = (r_c, \gamma_{pb})$	$\pi$
9	arc	$(r_j, \phi_j) = (r_c, \gamma_{pb})$	$-\frac{\pi}{2} - {}^f\phi_{rot}$

幾何的な関係より、 $\gamma_{pb}$  と  $l_{pb}$  は次のように計算される。

$$\gamma_{pb} = \arccos \left( 1 - \frac{d_{pb}}{2r_c} \right) \quad (3.1-17)$$

$$l_{pb} = h_{pb} - 4r_c \sin \gamma_{pb} \quad (3.1-18)$$

### 径の変化する箇所

径の変化する箇所に対応する目標形状を図 3.1-45 に示す。また、各セグメントのパラメータを表 3.1-9 に示す。Dodge part のセグメント数は  $n_d = 1$  である。Dodge part は長さ  $l_{dif}$  の直線のセグメントである。この形状は軸対称であり、dodge part の向きを調整する必要がないため、 $\phi_{offset} = 0$  とする。

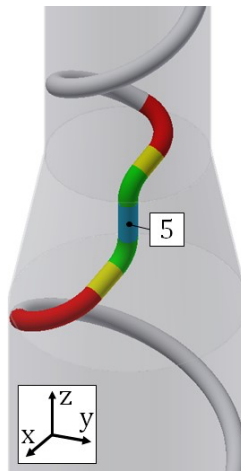


図 3.1-45 径が変化する配管に対応する目標形状

表 3.1-9 径が変化する配管に対応するパラメータ

seg-j	type	parameter	$\hat{\psi}_j$
5	line	$l_j = l_{dif}$	$\pi - {}^f\phi_{rot}$

#### 4) 複雑な形状の配管内を移動する手順

複雑な形状の配管内を移動する手順について説明する。初期状態において  $s_h = s_4$  とすることで、先頭にカメラを搭載している場合は前方を見ることができる。

1. 捻転動作により配管形状の変化する箇所へ近づく。
2. 先頭位置を適切な位置に合わせたら捻転を止める。
3. Dodge part の向きが配管と合うように  $\phi_{offset}$  を調整する。
4. シフト制御により前方の配管へと移る。

このような手順によって、前方の配管へ移動することができる。

## Dodge part の位置の固定

ロボットが配管と衝突することなく移動するためには、配管に対して dodge part の位置を一定に保つ手法が必要となる。以下では、例として分岐の場合の図を用いて説明する。

まず、軸方向の変位について考える。図 3.1-46 の左側に示すように、シフト制御のみを行うと配管に対して dodge part に軸方向の変位が生じるため、ロボットが配管と衝突してしまう。図 3.1-46 の右側のようにシフト制御による軸方向の変位を捻転動作によって打ち消すことができる。図 3.1-47 に示す関係から、このような動作を実現するための連結部 1 におけるロボットの体幹周りの回転角速度  ${}^b\dot{\psi}_{\text{roll}}$  はシフト制御の速度  $\dot{s}_h$  を用いて次式の関係によって求められる。

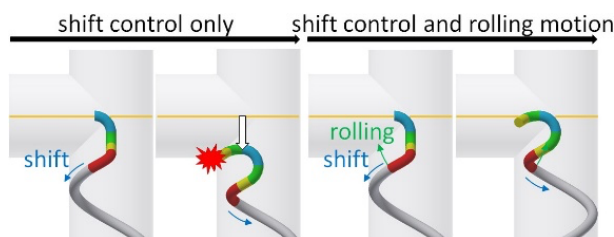


図 3.1-46 捻転とシフト制御

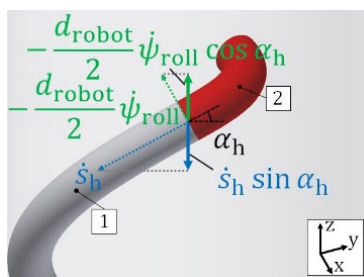


図 3.1-47 シフト制御による軸方向の変位の捻転動作による補償

$$-\frac{d_{\text{robot}}}{2} {}^b\dot{\psi}_{\text{roll}} \cos^b \alpha_h = \dot{s}_h \sin^b \alpha_h \quad (3.1-19)$$

ここで、 $d_{\text{robot}}$  はヘビ型ロボットのリンク径である。また、捻転の回転軸は  $s$  の増加する向きを正とする。

次に、軸周りの回転について考える。図 3.1-48 の左図に示すように、dodge part が軸周りに回転すると配管に対する向きが変化するため、ロボットが配管と衝突してしまう。Dodge part の回転を打ち消すために、連結部 4 における捩れ角  $\hat{\psi}_4$  の項を変化させる。そのために図 3.1-49、図 3.1-50 に基づいて、 ${}^b\dot{\phi}_{\text{rot}}$  を  $\dot{s}_h$  と  ${}^b\dot{\psi}_{\text{roll}}$  を用いて次式で定める。

$${}^b r_h {}^b\dot{\phi}_{\text{rot}} = \dot{s}_h \cos^b \alpha_h - \frac{d_{\text{robot}}}{2} {}^b\dot{\psi}_{\text{roll}} \sin^b \alpha_h \quad (3.1-20)$$

## 5) シミュレーション

シミュレーションにより、提案手法の有効性を検証した。シミュレーションで用いたヘビ型ロボットは、[28] で開発されたロボットを想定している。リンク数が 36、リンク長が 70 mm、リンク径が 56 mm、1 リンクあたりの質量が 160 g、関節アクチュエータの最大トルクが 4.0 Nm である。物理シ

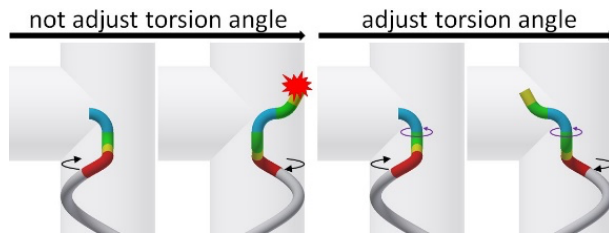


図 3.1-48 ねじれ角の補償

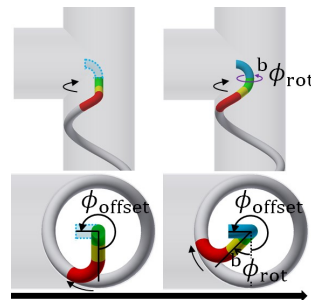


図 3.1-49  $\phi_{rot}$  の定義

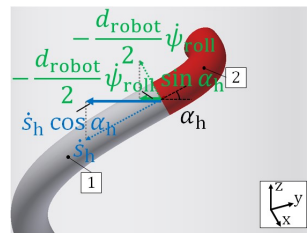


図 3.1-50 dodge part の回転

ミュレータは COPPELIA ROBOTICS 社の V-REP [29] を用いた。ヘビ型ロボットと配管との間の摩擦係数は 0.5 とした。

曲管、せん断方向のずれ、部分的に塞がっている箇所、径が不連続に変化する箇所の 4 種類の配管形状を持つ水平面上に置かれた配管内を移動するシミュレーションを行った。配管は内径 194 mm とし、径の変化する箇所のシミュレーションのみ内径 290 mm の配管も用いた。配管の内径が 194 mm の場合のパラメータは  $m r_h = 69$  mm、 $m p_h = 501$  mm、 $m r_{in} = 31$  mm とした。また、配管の内径が 290 mm の場合のパラメータは  $m r_h = 117$  mm、 $m p_h = 556$  mm、 $m r_{in} = 53$  mm とした。ここで、添え字  $m$  にはそれぞれ  $b$  または  $f$  が入る。いずれの場合も  $r_c = 90$  mm とした。

Dodge part の位置が配管に対してずれた場合には、捻転により軸方向の位置を調整し、 $\phi_{offset}$  の調整により向きを調整した。

### 曲管

曲管の曲がる半径は 100 mm、角度は 90 deg である。シミュレーションの様子を図 3.1-51 に示す。シミュレーションの結果、曲管のある配管内を移動することができた。

### せん断方向のずれ

せん断方向のずれの長さは水平方向に 100 mm である。シミュレーションの様子を図 3.1-52 に示す。シミュレーションの結果、せん断方向にずれている配管内を移動することができた。

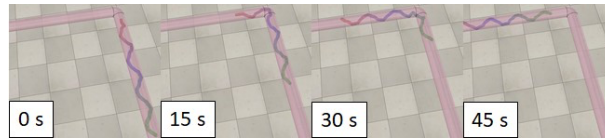


図 3.1-51 シミュレーション結果（曲管）

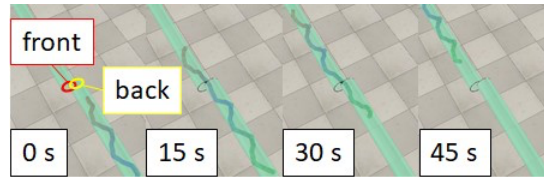


図 3.1-52 シミュレーション結果（せん断方向のずれ）

### 部分的に塞がっている箇所

配管と軸が 100 mm ずれた厚さ 50 mm、直径 194 mm の円盤が配管を部分的に塞いでいる。Dodge part のパラメータは  $d_{pb} = 50$  mm、 $h_{pb} = 249$  mm とした。シミュレーションの様子を図 3.1-53 に示す。シミュレーションの結果、部分的に塞がっている配管内を移動することができた。

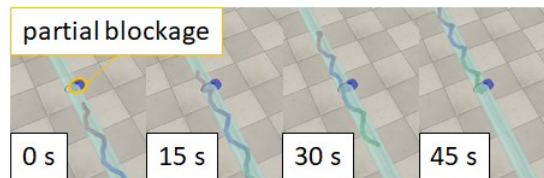


図 3.1-53 シミュレーション結果（部分的に塞がった箇所）

### 径が不連続に変化する箇所

配管の内径は 194 mm から 290 mm に不連続に変化する。Dodge part のパラメータは  $l_{dif} = 0$  mm とした。シミュレーションの様子を図 3.1-54 に示す。シミュレーションの結果、径が不連続に変化する配管内を移動することができた。

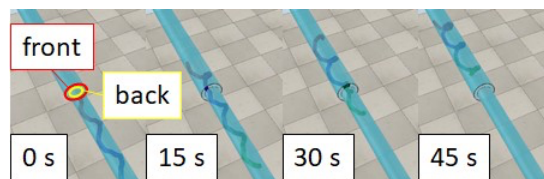


図 3.1-54 シミュレーション結果（不連続な径の変化）

## ⑧ おわりに

本研究では、複雑な形状の配管内を移動するヘビ型ロボットの制御手法を提案した。まず、2つの螺旋を自由形状で繋ぐための形状を設計した。そして、この自由形状を配管形状に合わせて設計することで、曲管、分岐、せん断方向のずれ、部分的に塞がっている箇所、径が変化する箇所といった多様な形状の配管内の移動に適用した。また、曲線の一部の位置を環境に対して一定に保つための方法を提案した。シミュレーションでは従来手法で実現されていた曲管内の移動に加え、従来手法では困

難であり、実現されていなかったせん断方向のずれ、部分的に塞がっている箇所、径が不連続に変化する箇所の4種類の配管形状を持つ水平面上に置かれた配管内の移動を実現した。

## (5) 軌道構造体自動施工システム (H26-H30)

### ① 平成 29 年度までの成果

福島第一原子力発電所事故現場は、高放射線環境であるために有人作業が困難であり、ロボットによる資材運搬代行が求められている。既存のクローラ型の移動ロボットや歩行ロボットでは、高所・狭隘部での繰り返しの移動には遠隔操作を行うオペレータの多大な労力が必要となる。

そこで本研究では、環境適応性が高いモジュラーロボットの概念を適用し、図 3.1-55 に示すような、ロボットが移動しやすい作業環境を自ら構築する軌道構造体自動施工ロボットシステムの実現を目指してきた [33]。このシステムでは、モジュール化された構造材を専用のロボットが運搬し、これを施工ロボットが受け取って連結施工することで作業・運搬ロボット用の3次元的な足場を構成することを狙ったものである。

これまで本プロジェクトにおいて4年間に亘り以下の開発を行ってきた。

**平成 26 年度** 発泡樹脂で脚柱を展開・接地・固定する軌道構造体支持機構の開発：直進モジュールの荷重を支持するためには、モジュール5個に1個程度、軌道構造体を床や壁に固定する必要がある。そこで、発泡樹脂の化学変化を用いて（電気アクチュエータを用いずに）この固定を実現する機構を開発した。

**平成 27 年度** 軌道構造体の分岐を実現する分岐モジュール (Ver. 1) の開発：軌道構造体の方向転換及び分岐を実現するためには分岐モジュールと呼ばれるターンテーブルを有するモジュールが必要になる。このターンテーブルには電子回路及び電気アクチュエータを内蔵するため、放射線の影響を踏まえて定期的に破損部位を交換可能な仕組みが必要である。そこでターンテーブルをユニット化し、このユニットごと交換可能な仕組みを開発した。

**平成 28 年度** 軌道構造体におけるレールの複線化を実現する軸回転モジュールの開発：軌道構造体の複数の面を移動可能とし、軌道を複線化するためにはモジュールの軸方向に面を移動可能とする必要がある。そのために軸回転を実現するモジュールを開発した。分岐モジュール同様に故障部位を交換可能な仕組みも実現した。

**平成 29 年度** 分岐モジュールの可動部を遠隔操作で交換するロボットの開発：分岐モジュールの可動部を交換可能な遠隔操作ロボットの開発を行った。

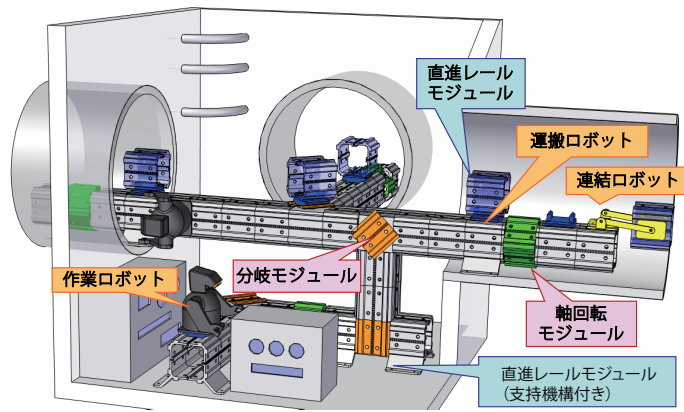
これにより、軌道構造体を延伸させるために必要なコア技術の確立が大きく進展した。平成 30 年度は平成 27 年度に開発した分岐モジュールにおいて、検討できていなかった機能・性能について設計検討を行った。

### ② 平成 30 年度の成果：扁平旋回機構を搭載した高剛性な軌道構造体分岐モジュールの開発

#### 目的と成果

Fukui and Kanayama らは着脱可能なターンテーブルにより軌道の分岐と高放射線環境での故障対策を実現した [34]。しかし分岐モジュールの連結施工と、連結施工後の軌道の剛性確保は未検証であった。そこで平成 30 年度の研究の目的は、遠隔操作ロボットによって連結施工可能で、ロボットの通行や軌道構造体の支持に十分な剛性が確保された分岐モジュール (Ver. 2) の開発とした。





本プラットフォームは以下の3種の要素より構成される  
**静的構造物**：直進レールモジュール  
**動的ロボット構造物**：分岐モジュール，軸回転モジュール  
**施工ロボット**：連結ロボット，運搬ロボット

図 3.1-55 軌道構造体自動施工システムの概要

開発した分岐モジュール (Ver. 2) の 3D CAD モデル及び外観を図 3.1-56 に示す。

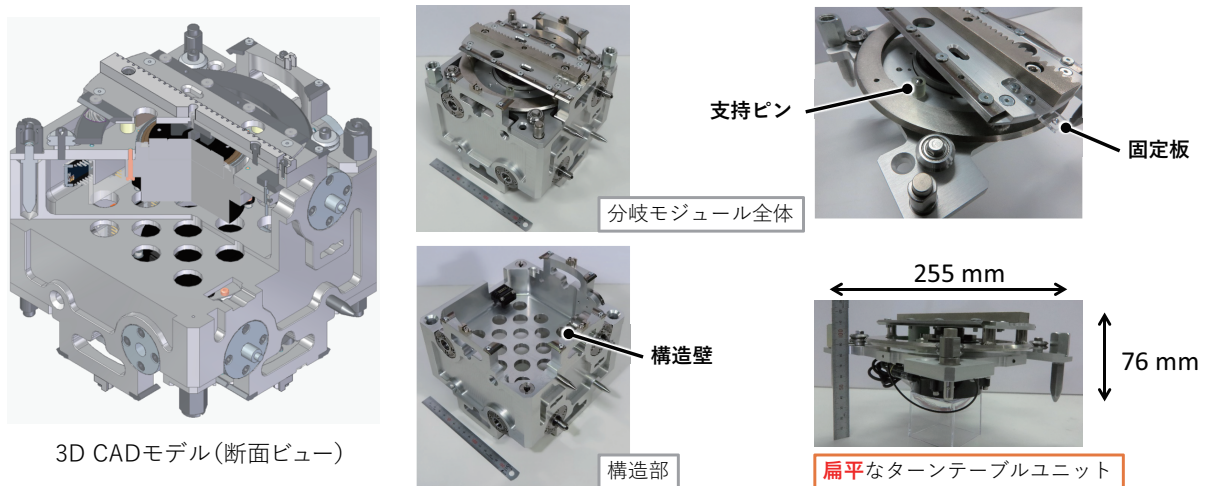


図 3.1-56 開発した分岐モジュール (Ver. 2)

### 連結施工可能な高剛性分岐モジュールを実現する設計上の工夫

先行研究で発生し得る連結施工時の意図しないターンテーブルの旋回を防止するために、図 3.1-57 (a) に示すように連結ロボットが把持するターンテーブルの回転を抑制する板を設け、施工完了後にターンテーブル自体のモータでその板を破断させる手法を提案する。この手法には新たにモータを加えることなく要求を満たせるという利点がある。

またターンテーブル上で連結施工を行う場合の連結ロボットの姿勢を維持するため、図 3.1-57 (b) に示すようにターンテーブルに加わる連結ロボット自体の大きなモーメントを支持するピン機構を開発した。回転方向を事前に定義する必要があるが、小型軽量という利点がある。

また図 3.1-57 (c) に示すように分岐モジュールの中央部に構造壁を入れ剛性を大幅に向上した。



構造壁の空間確保のため円形Vガイドレール・ホイールを組み合わせた縦横比が76:181 mmの扁平なターンテーブル機構を開発した。

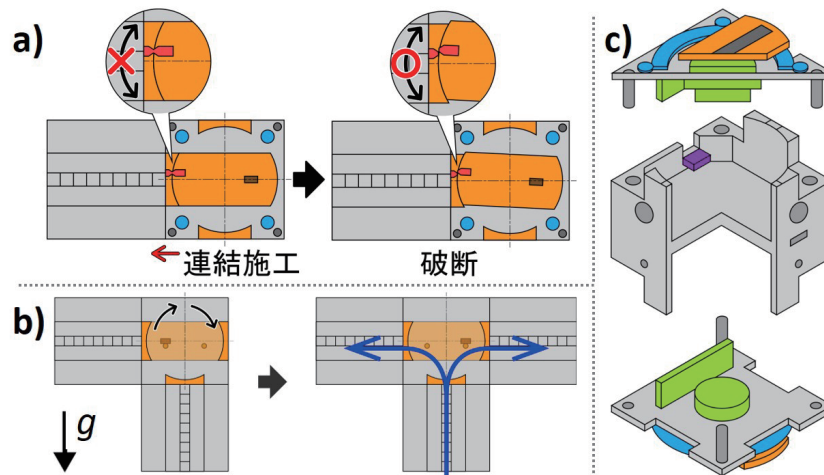


図 3.1-57 連結施工可能な高剛性分岐モジュールを実現する機構的な工夫

### 性能評価実験

実際の施工手順に沿って分岐モジュールの連結施工、固定板破断、分岐モジュールへの連結施工の実験を行った。

図 3.1-58 左に示す、水平での直進モジュールへの分岐モジュール連結施工は、固定板の有無に関わらず実現できた。ターンテーブル旋回モータによって固定板を破断させ、固定状態の切り替えが可能なることを示した。ターンテーブルの位置決めを保証する機構としては有効であると考えられる。

水平での分岐モジュールへの直進モジュール連結施工を実現できた。分岐モジュールへの側面からの連結施工姿勢維持実験(図 3.1-58 中央)により、支持ピンでのターンテーブル回転支持機構の連結ロボット姿勢維持への有効性が示された。一方、側面からの連結施工について、連結するモジュール同士の連結面の位置合わせに失敗するという問題が確認された。連結ロボット足周り・被連結モジュール間のガタや、分岐モジュールの円形Vガイドレール機構のガタ、連結アームへかかる連結モジュールの荷重により、連結ロボットが傾いていることが原因として考えられる。

また図 3.1-58 右に示すように、構造部の剛性について有限要素法による応力解析を行った。施工計画上の最大荷重をかけたところ、変形が 0.1 mm 以下となり、開発した分岐モジュールが十分に高い剛性を持つことが確認された。

### (6) 狭隘部において大型の物体を搬出する小型ロボット (H26-H30)

人が立ち入ることのできない場所に無人ロボットが立ち入る場合には、その経路の障害となる物体を搬出することで、あらかじめ経路を確保する必要がある。また、その経路自体に人が立ち入ることのできない場所、障害物の搬出作業自体も無人ロボットが行う必要がある。このような状況では、障害物の搬出の作業をすることのできる空間は非常に限られていることが多いと考えられ、従来の重機等が立ち入ることは難しい。また、障害物を環境と接触させずに搬出することも難しく、環境との接触を考慮した搬出方法を常に考える必要がある。そこで本研究では、狭隘部において大型の物体を搬出することに適した小型ロボットの開発を行うとともに、環境との接触を考慮しながら開発したロ

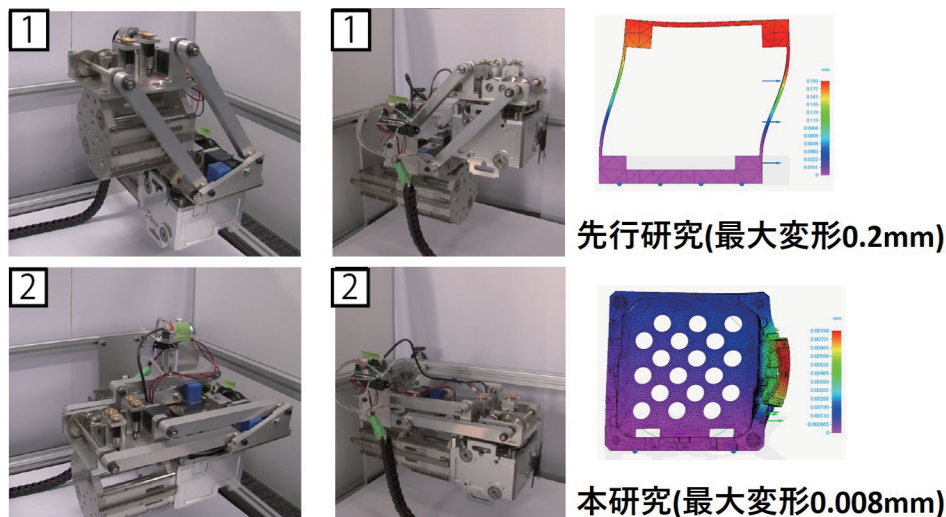


図 3.1-58 性能評価実験結果

ボットを用いて大型の重量物体を搬出する手法の提案を行った。

### ①狭隘部において大きな力を発生する小型ロボット群の概念設計 (H26)

平成 26 年度には、上述の目的を達成するために必要な項目の調査とロボットの概念設計を行った。広い空間を走り回り、その中で作業を行うロボットを移動マニピュレータと呼ぶ。その多くは、車輪やクローラ機構で構成される移動体部に、多関節型マニピュレータから構成されるアーム部が搭載されている。移動マニピュレータは、床に固定されている通常のマニピュレータと比較して、可動範囲が広く、前述のように多くの障害物の存在する経路を含む、様々な環境での適用が期待できる。物体を操作する機能はロボットの重要機能であるが、世に存在する移動マニピュレータは、床に固定されていないため、自重に対するペイロード（操作できる物体の質量）比が低い。例えば、研究用途でしばしば用いられる 5 自由度移動マニピュレータの Kuka youbot の場合、自重 25.8 kg に対して、ペイロードが 0.5 kg であり、比が 0.02 である [35]。また、Barrett Technology WAM Arm は自重 25.0 kg に対して、可搬重量 4.0 kg であり、比が 0.16 である [36]。Rethink 社の Baxter Research Robot は移動ロボットではないが、自重 139.0 kg（台座を含む）に対して可搬重量 2.3 kg であり、比が 0.02 である [37]。扱う物体の質量が増大しても上記の比がそのまま保たれると仮定した場合、例えば 20.0 kg のものを持ち上げようとする、上記の中で比の最も高い WAM Arm 相当で 125.0 kg の自重が必要となる。すなわち、ロボットがかなり大型化されることが分かる。しかしながら前述したようにロボットが作業する環境は狭隘であり、そのようなことを避ける設計が重要である。以上の議論を含む平成 26 年度の調査により、現状の移動マニピュレータは、自重比で極めて軽量の物体しか扱えない（すなわち可搬重量が小さい）短所を有しており、その適用範囲が著しく限定されているということが分かった。

一方、人が引っ越し作業や部屋の模様替えの際に大型重量物体を搬送する場合を想定すると、例えば、図 3.1-59 に示すように、作業者が物体を持ち上げることなしに傾けながら、台車等を床と物体との間に差し込み、床面との摩擦を軽減させることで大型物体を搬送している場合が多い。これによって人にかかる負荷が軽減される。そこで、本研究では、この傾けの例のように、物体と環境との接触を維持した状態での操作と、物体の底面への台車の挿入による物体搬送という仕組みを、移動マ

ニピュレータ制御に適用することを考える。すなわち、ロボットが台車等の道具を用いて、物体をきちんと把持せず環境を利用して操作する。物体を把持しないマニピュレーションは、グラスプレス・マニピュレーションと呼ばれる [38]。これより移動ロボットの可搬重量が小さく、大型で高重量の物体の搬送が困難であるという問題の解決を目指す。

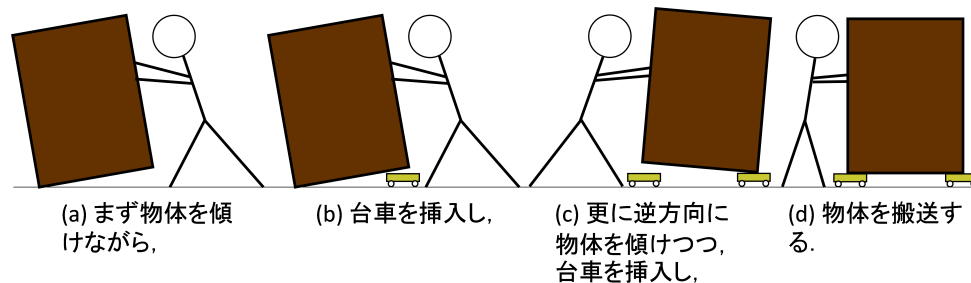


図 3.1-59 人間が重い物体を運ぶ時の方法

また、平成 26 年度には、以下のような議論を通した概念設計を遂行した。はじめに、道具に必要なとされる機能と物体やロボットにかかる力を考えた (図 3.1-60)。物体について考えると、まず、搬送時には、物体は自身の重力がきちんと支えられなければならない (図 3.1-60(a))。そして床面との間の摩擦を小さくして搬送を容易にしたい (図 3.1-60(b))。その準備として物体を傾ける際には、接地点が滑らない (図 3.1-60(c)) ようにしなければならない。この時、ロボットについて考えると、ロボットが物体に力を加えた時に、物体からの反力によってロボットが転倒しない (図 3.1-60(d)) ことが必要となる。このうち図 3.1-60(b) と図 3.1-60(c) は相矛盾する要求であり、設計時に工夫が必要である。

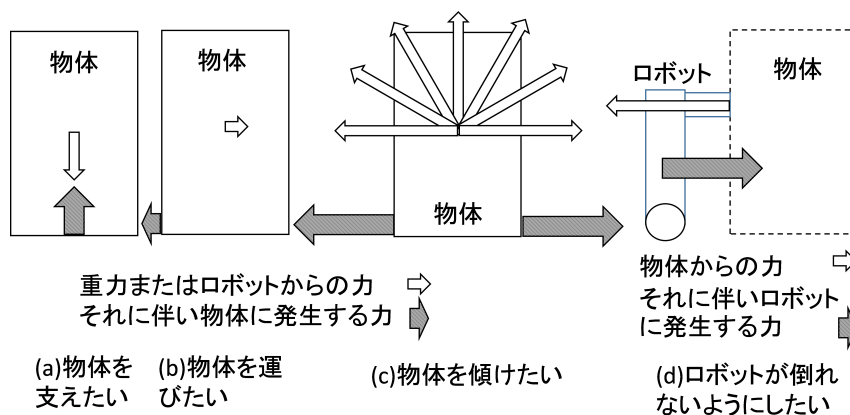


図 3.1-60 道具に必要なとされる機能と物体・ロボットにかかる力

前述の図 3.1-60(a)～(d) を達成する何らかの工夫が必要であると考えた。ここでは、図 3.1-60(a)～(c) を実現するため、床面との摩擦力を十分に発生させる機構が必要である。平成 26 年度には、その解決策として、摩擦可変型台車を概念設計した (図 3.1-61(a))。台車には図 3.1-61(a) の重力補償の機能があり、状況に応じて床面との摩擦を制御するために台車の車輪部にブレーキをつけ、それをロボットより制御可能な構成とした。ハードウェア実装としてはエアシリンダ駆動で滑り止め板を床面に押し付けて制動をかける機構となっており、無線通信でロックの切り替えが可能である。これで図 3.1-60(b)、(c) が実現できる。さらに図 3.1-60(d) を実現するには、先と同様に摩

擦力の増加と転倒の防止が必要である。平成 26 年度には、それを実現するために、転倒防止用アウトリガを設計した(図 3.1-61(b))。概念設計に際しては、建設機械に用いられるアウトリガを参考にした。滑りの抑制に対しては、接地面にゴム板を貼り付けてロボットと床面間の摩擦力の増加を図った。なおこのアウトリガの存在によりロボットが巨大化することを避けるため、必要な時のみ展開する格納式とした。その上で、ロボット本体へのアウトリガの設置場所を検討した。候補をロボットの前方、中部横及び後部とし、転倒を抑制する効果やロボットサイズを考慮した上で設置場所をロボット後方に定めた。その後、ロボットと作用する力を数理モデル化してアウトリガのパラメータを決定した。

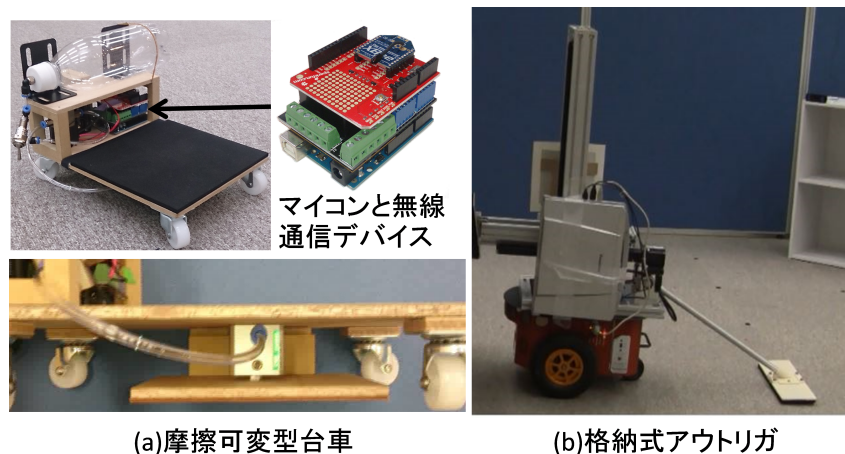


図 3.1-61 ロボットが使う道具

平成 26 年度には、これらの概念設計の検証を行うため、実際にロボットと道具を製作し、簡単な実験を行った。実験の詳細は以下の通りである。2 台のロボット(物体傾斜用と台車搬送用)が台車を用いて大型重量物を搬送することを考える。物体を台車に積載する手順は以下の通りとした。物体傾斜ロボットがアウトリガを展開し、搬送対象物を押して 1 回目の傾け操作を行う。

1. 台車搬送ロボットが搬送対象物と床の隙間に台車を挿入する。
2. 物体傾斜ロボットがアウトリガを格納し、搬送対象物の反対側に移動する。
3. 挿入してある台車をロックし、物体傾斜ロボットがアウトリガを展開し、2 回目の傾け操作を行う。
4. 台車搬送ロボットが残りの台車を挿入する。
5. 台車のロックを解除し、物体傾斜ロボットがアウトリガを格納し搬送対象物を押して目的地まで運ぶ。

遠隔操作により、自重約 25.0 kg、可搬重量約 2.5 kg のロボット 2 台を用いて約 25.0 kg の物体の搬送に成功した(図 3.1-62)。状況に応じた台車やアウトリガの制御により、適切な搬送ができていることが分かる。このことは先ほどの道具を用いることで、自重に対するペイロードが大幅に増大したことを示している。平成 26 年度の成果として、作業時間が余計にかかる、システムが複雑になる等の短所も存在するものの、狭隘な環境下でより高度な作業を実現する方法論として道具を用いる方針の有用性を確かめることができた。



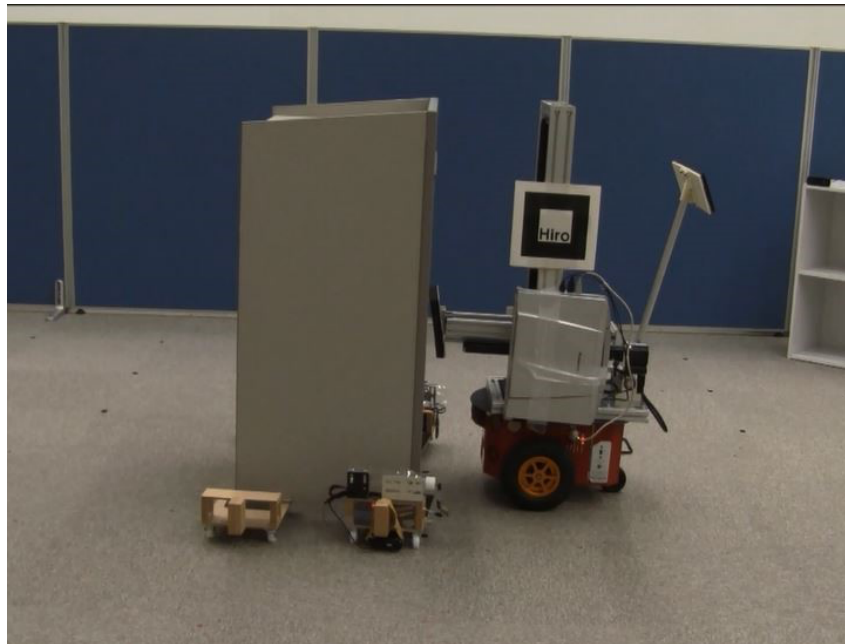


図 3.1-62 簡単な検証過程の例

## ② 転倒することなく大きな力を発生させる移動ロボットの開発 (H27-H29)

平成 27 年度からは、平成 26 年度の調査と概念設計、それに基づく検証実験の結果を踏まえ、狭隘部において大きな力を発生する小型ロボットの設計を行った。平成 26 年度の調査では、狭隘部においては自身の質量やサイズよりも大型で高重量な物体も扱う必要があることが分かった。前述のように概念設計では、移動ロボットによる重量物体のマニピュレーションに伴う諸々の問題をロボットの機構により解決し、複数のロボットの協調を利用することで、大型物体に対して搬送を含む多様なマニピュレーションを可能にする方法を提案した。移動ロボットが重量物をマニピュレーションする際に特に問題となるのが、図 3.1-63 のような転倒と滑りである。転倒は、ロボットが作業を行う際の物体からの反力によりロボット自身が耐えられない時に発生する。滑りは作業によって生じる反力がロボットと床面、ロボットと物体間で働く摩擦力を上回った際に生じる。平成 27 年度には、このような転倒、滑りの問題に対応しながら、可能な限り大きな力を発揮する移動ロボットのための機構を実現した。転倒、滑りが生じる条件について整理した上で、これらの問題を解決するための機構と、この機構を用いて大型物体をマニピュレーションする際に最大限の力を環境に作用させる手法について以下のように提案した。

一般にロボットが物体を押す際には、機構の設計に関わらず、ロボットは床面と傾け対象物との間で力をやりとりすることになる。例えば、図 3.1-64(a) のような直動 2 自由度のアクチュエータを組み合わせた機構では、鉛直方向のアクチュエータと水平方向のアクチュエータが発揮する力をそれぞれ制御することによって、ロボットが発揮する力が決定される。この時、機構が発揮する力によってロボットが床から受ける反力と、物体から受ける反力が釣り合う必要があり、結果として機構は、力の方向によって決まる床面上の代表点となるゼロモーメントポイント (Zero Moment Point; ZMP) から、物体との接点を結んだ直線方向に力を及ぼしていると仮想的に考えることができる。ZMP が、外乱や力の制御によって、ロボットの車輪周辺などの、ロボットの姿勢が安定する領域の境界へと移動した時、ロボットはその領域の端を中心として転倒する。そこで、本研究では、図 3.1-64(b) の

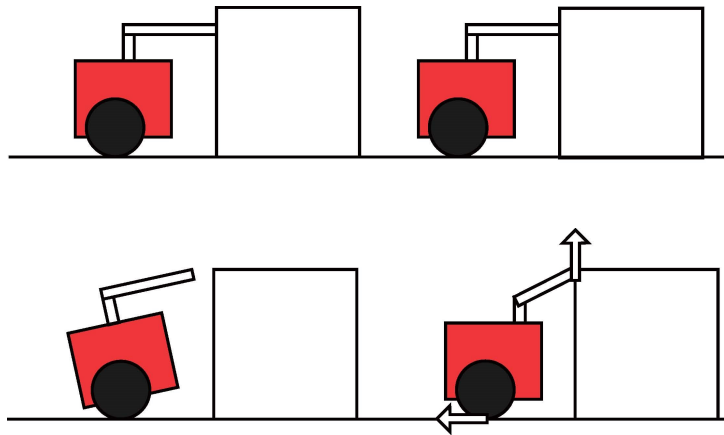


図 3.1-63 ロボットの転倒と滑り

ような、直動1自由度のアクチュエータを備えたリンクを持ち、リンクの根本の回転関節を通じてロボットと繋がっている機構を考える。この機構で、根本の回転関節を受動関節とした場合、機構からロボットへ、ロボットを回転させる力が伝わることはなく、ロボットは転倒しない。また、この受動関節が常に床面と接することによって、2自由度のアクチュエータを用いた例のような力の制御の必要がなく、安全かつ簡易に大きな力を発揮することが可能になる。

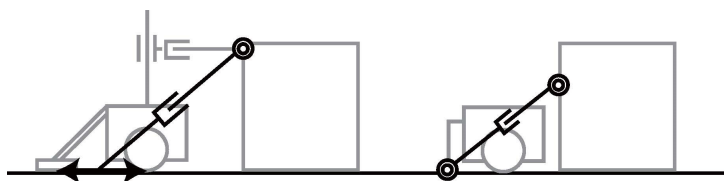


図 3.1-64 ロボットの自由度設計

これらを踏まえて、以下の仕様を満たすロボットの開発を行った。

- 直動1自由度のアクチュエータを用いて力を発揮する。
- ロボットが機構の角度を自由に変更できる。
- 作業時は力を発揮する機構の片方の端点が床面付近に固定される。
- 機構からロボットへ作業反力が伝わらない。

ここでは、以上の要求仕様に対して図 3.1-65 に示す機構を設計した。ロボットには、3輪のオムニホイールが取り付けられており、これにより、全方向に動くことが可能である。直動アクチュエータは移動中は、取り付けられたベルトによって巻き上げられており、地面から離れた状態を維持する。また、このベルトは直動アクチュエータの角度を定めるためにも使われる。押し作業の際には、これをゆるめる。これによって、作業反力によって直動アクチュエータが後方に動くことがあっても、ロボットを後方に転倒させるような力は働かない。作業時には、このアクチュエータをおろすことによって力を発揮する機構の片端が床面に固定され、反力がこの端点へと印加される。摩擦を大きくするため、アウトリガの底面、及び物体との接触点に設けられているエンドエフェクタにはゴム材を用いている。この機構により、前述のように地面と操作対象の物体の表面を直動アクチュエータで直線で結び、大きな力を転倒することなく加えることができる。

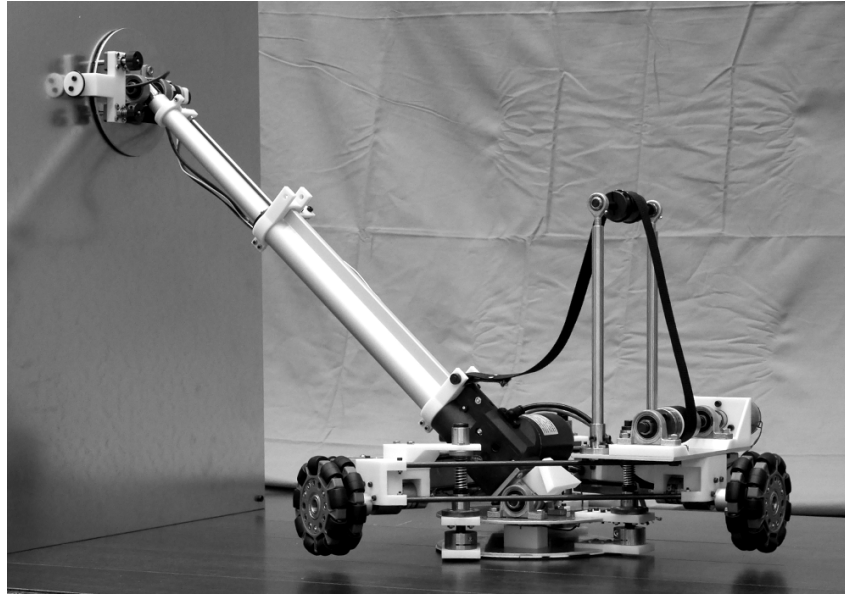


図 3.1-65 開発した物体を大きな力で押すことのできるロボット

ロボットが滑らずに作業可能な力の範囲は、ロボットが物体を押す角度、ロボットと床面、物体間での静止摩擦係数、及びロボットの自重によって決定される。ロボットが物体に及ぼす力  $f$  が最大になり得るのは、物体側の摩擦円錐の上端に  $f$  が存在する時であり、これが、ロボットがマニピュレーションの際に発揮できる力の限界である。ロボットが作業を開始する前にはロボットと床面、物体間での静止摩擦係数は未知である。つまり、物体に作用させることのできる力の範囲も未知であることとなり、自身の発揮できる最大の力を知るためにロボットは作業前にこの範囲を探索することが必要になる。本研究では、ロボットに備え付けられたセンサを用いて、以下のアルゴリズムでこの範囲を探索した。

1. 初期状態は、ロボットがアクチュエータの先端のエンドエフェクタを可能な限り高い位置で接触する位置に維持する。
2. エンドエフェクタを伸ばして物体と接触させる。
3. ロボットのアクチュエータの先端に取り付けられた力センサで、物体との接触を判定する
4. ロボットのエンドエフェクタに取り付けられた滑り検出センサで、滑りの判定をする。
5. 滑りがなければ探索を終了し、アクチュエータの接触角度を低くした上で 2~4 を再度繰り返す。

このアルゴリズムを用いて、実際に作業可能な範囲の探索を行った（図 3.1-66）。その結果、83.0 kg の物体を、床面と機構がなす角度が 0.60 rad の時、滑りを起こさずに傾け可能であった。



図 3.1-66 滑らず傾けることのできるアクチュエータの向きの探索



また、物体の底面の摩擦係数が小さく、1台の移動ロボットでは傾け操作が不可能な場合に、2台の移動ロボットが協調して傾けを実行する実験も行った。この場合には、2台のロボットの相対的な配置によって、ロボットが傾けに必要な力が大きく異なる。2台の摩擦の範囲を考えながら、ロボット2台の配置を考える必要があり、問題が複雑である。そのため最適化により、小さな力で傾向け作業を実行できるロボットの配置を求める手法を提案した。実際に実験を行い、2台のロボットで、40.7 kgの大型物体を傾けられることを示した（図 3.1-67）。

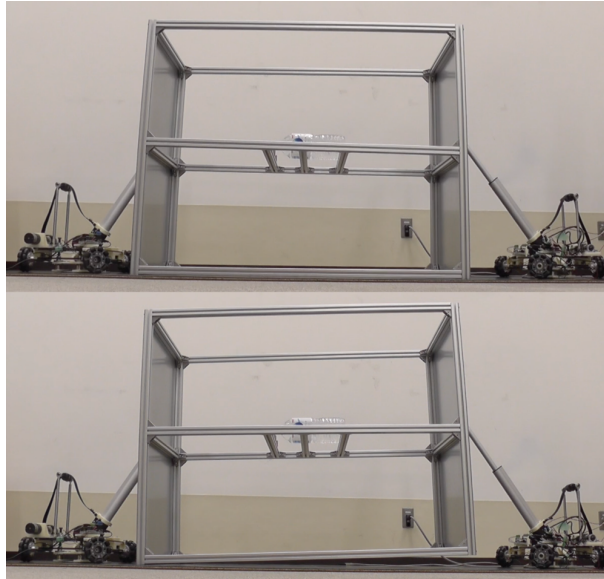


図 3.1-67 2台の移動ロボットの協調

### ③ 大型物体の環境との接触を伴う6次元運動を実現する移動ロボットの拡張と計画法の提案 (H30)

平成29年度までに開発した移動ロボットは、物体を平面内で動かすことを前提としていた。これに対して、一般的な物体の操作は、3次元空間での並進と回転を含む、より複雑な6次元運動であることの方が多い。そこで、平成30年度には、ロボットの機構を改良し、物体の6次元運動に対しても、転倒することなく大きな力を加えることができる機構の開発を行った。基本的な機構の原理は平面運動の場合と同じで、床面と操作対象の物体とを直動アクチュエータを介して直線で結ぶことができればよい。その際に、機構的に求められることは、直動アクチュエータ以外の自由度を全て受動化し、床面と物体に対して直動アクチュエータが点接触しているとみなすことができる構造である。そこで、平成30年度に開発したロボットは、複数の受動回転関節を組み合わせることで、これを実現した。このロボットを図 3.1-68 に示す。その他の機構は、前述のロボットと同じであり、ベルトを介してマニピュレータを持ち上げ、ロボットは移動し、目的の位置にマニピュレータを設置する。

このロボットを用いて、物体の傾けを行う際には、先の実験と同様に様々な拘束を考慮し、ロボットの配置を考える必要がある。特に、物体の6次元運動を考える場合、摩擦力の方向や、その滑りに対する限界、物体を傾ける方向など、多くの制約が存在し、より問題が難しくなる。平成30年度には、これらの制約を定式化した上で、目的のマニピュレーションが可能なロボットの配置の領域を求め、さらに最適化により適切なロボットの配置を導出する汎用的な手法を提案した。そのなかで、最適化の評価関数として、ロボットの位置決め誤差に対するロバストさを用いることで、開発したロ

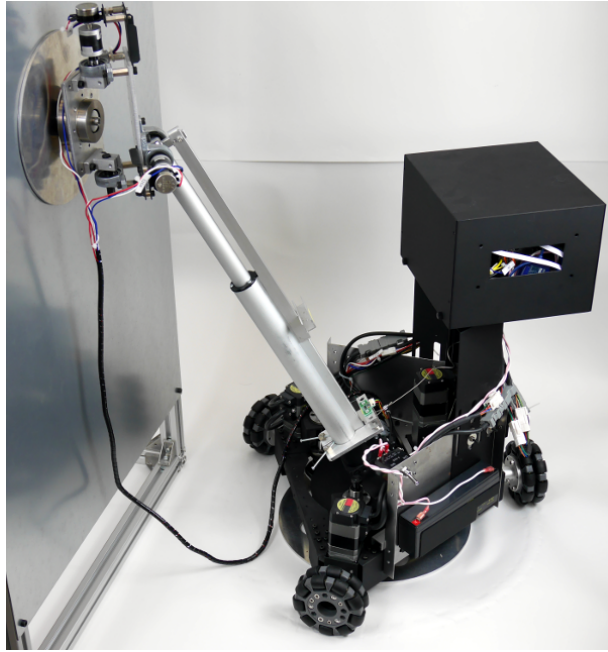


図 3.1-68 物体の 6 次元運動に対応した移動ロボット

ボットの出す力が位置決め誤差の影響を大きく受けるという問題を解決した。実際に三角柱型の物体を傾けるという課題に対し、提案手法を適用する実験も実施した。与えられた物体の形状と摩擦係数等の物理パラメータに対し、提案手法は図 3.1-69 に示すマニピュレーションが可能なロボットの配置領域と、位置決め誤差に最もロバストなロボットの配置を導出した。さらに、この最適なロボットの配置に開発したロボットを配置することで、実際に導出した解の検証を行い、マニピュレーションが可能であることを確かめた (図 3.1-70)。

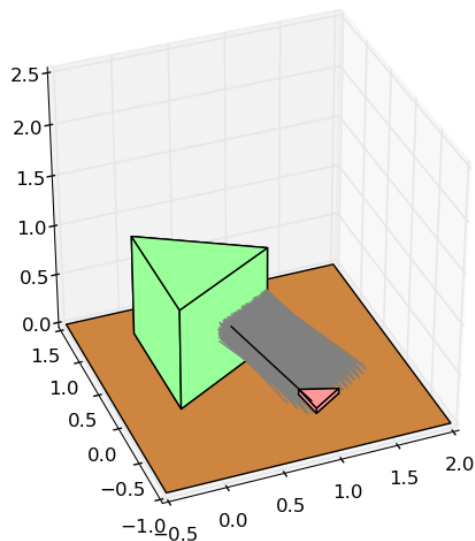


図 3.1-69 マニピュレーション可能なロボット配置の領域と最適解

平成 30 年度には、平成 26 年度の概念設計の際に提案した物体搬送のための台車の概念を発展させ、先の移動ロボットとは別の移動ロボットとして開発した。このロボットも、大きな力が加えられても転倒することなく物体を支える必要があることから、先と同様に受動回転関節を組み合わせ、床

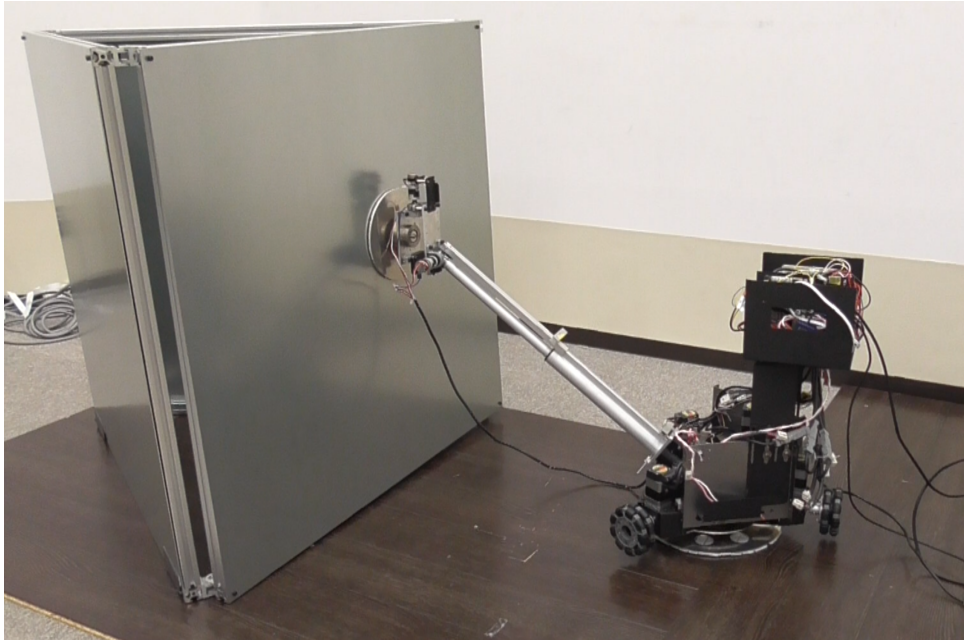


図 3.1-70 導出した配置での物体の傾け

面と物体との間を直線で結び、これらの接触が点接触と等価にみなせる機構を開発した。実際に開発したロボットを図 3.1-71 に示す。

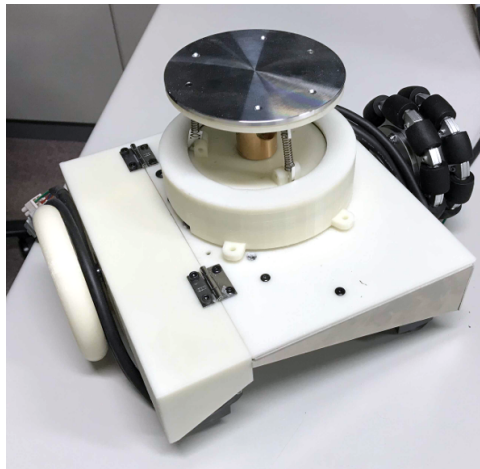


図 3.1-71 高重量物体を支え搬送する移動ロボット

また、平成 30 年度には、前述の物体を押すことに特化した移動ロボットと、物体を支え、搬送することに特化した移動ロボットを組み合わせ、さらに、物体が環境に接触する状況で、自動的に搬送の手順を求めるアルゴリズムを開発した。このような状況では、動員するロボットの組み合わせや、環境と物体との接触の仕方の組み合わせが膨大に存在するため、与えられた課題を実現するための手順を現実的な時間で探索することが非常に難しい。そのため、本研究では、起こり得る物体と環境の接触のパターンとロボットと物体との接触を抽象的に表し、その状況で物体をマニピュレーションするのに必要なロボットの組み合わせを運動学の観点から、求める方法を提案した。さらに、これらの接触の組み合わせのうち遷移可能な組み合わせを同じく運動学の観点から効率的に導出する手法も提案した。これによって、複数のロボットと物体と環境との間の複雑な接触の組み合わせが存在する場

合でも、効率良く搬送等のマニピュレーションの手順を求めることが可能となった。例えば、部屋の隅に置かれ、その3面が壁と床面に接触する立方体を、先の搬送用移動ロボットにマニピュレーション用の移動ロボットを用いて載せ、目的地まで運ぶ課題を考える。提案した手法を用いることで、これらのロボットと物体と環境との間で発生し得る接触のうち、運動学の観点から可能な組み合わせを求め、さらにその接触状態の遷移を網羅的に記述することが可能である。さらにその遷移のうち、最も手順の少ないものを求めると、例えば、図 3.1-72 に示すマニピュレーションの遷移が得られる。あとは、前述のようにそのマニピュレーションが可能なロボットの配置を最適化によって求めることで、目的の課題を遂行できる。

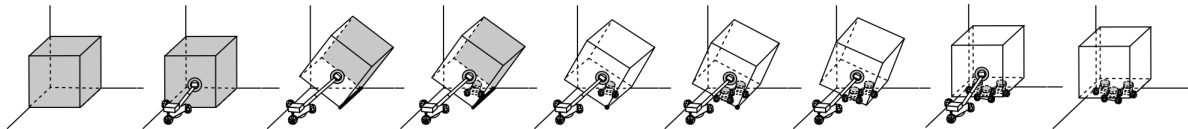


図 3.1-72 提案したアルゴリズムにより求められたマニピュレーション手順の例

以上のように平成 26 年度から平成 30 年度までの研究で、狭隘部において大型の物体を搬出することに適した 2 種類の小型ロボットの開発を行い、さらに、環境との接触や複数台のロボットが存在する場合にマニピュレーションの手順を効率良く導出する手法を提案した。これによって、人が立ち入ることのできない場所に無人ロボットが立ち入り、その経路の障害となる物体を搬出する等の作業に必要な技術の一部を実現することができた。

#### (7) 移動ロボットの遠隔操作インタフェースのための映像提示技術 (H26-H29)

移動ロボットの遠隔操作においては、ロボット周囲の状況を映像でオペレータ（操縦者）に伝えることが極めて重要となる。本研究では、移動ロボットの遠隔操作インタフェースのための映像提示技術として、俯瞰映像提示システムの開発を行った。

##### ① 俯瞰映像提示システムの概念設計 (H26)

遠隔操作を行うための移動ロボットには通常、カメラが取り付けられており、オペレータはカメラ映像を見ながら遠隔操作を行う。この際、ロボットの進行方向の向きに取り付けられたカメラからの一人称視点の映像のみでは周囲の環境との相対的な関係を把握することが難しいという問題がある。

この問題に対して、ロボットと周囲環境を同時に観察可能な視点からの映像、つまり三人称視点（俯瞰視点）の映像を用いて操縦する方法が有効である。遠隔操作可能な建設機械による無人化施工等では、作業現場に設置したカメラや移動カメラ車などを用いて三人称視点を提供することが行われている [39]。

しかし、福島第一原子力発電所の廃止措置においては、作業現場に固定カメラを設置することは必ずしも容易ではなく、また、1 台のロボットのみで作業を行う必要がある状況も多い。このような状況で三人称視点の映像をオペレータに提示する最も簡単な方法の 1 つは、ロボット自身を上方から見下ろせる高い位置に広角カメラを搭載することである。この方法は非常に有効であるが、ロボット本体に対してカメラが上方に大きく突き出た形状となるため、狭隘部で動作する場合にはカメラが障害物と接触する恐れがある。

以上より、平成 26 年度は移動ロボット本体から飛び出さないように設置したカメラを用いて、ロボットと周囲環境を同じ映像内に提示する俯瞰視点映像提示技術の概念設計を行った。



ロボットの前後左右に向けて4台の魚眼カメラを設置する。各魚眼カメラで取得される映像は、広視野ではあるが非常に歪みが大きい。そこで、これらの映像の歪みを画像処理によって補正すると同時に、真上からの俯瞰映像となるよう、視点変換の画像処理を施す。そして、4枚の映像を合成することで全方位の俯瞰映像を生成する（図3.1-73）。なお、ロボット自身は魚眼カメラで撮影できないため、事前に上から撮影した画像を準備しておき、俯瞰映像に合成する。

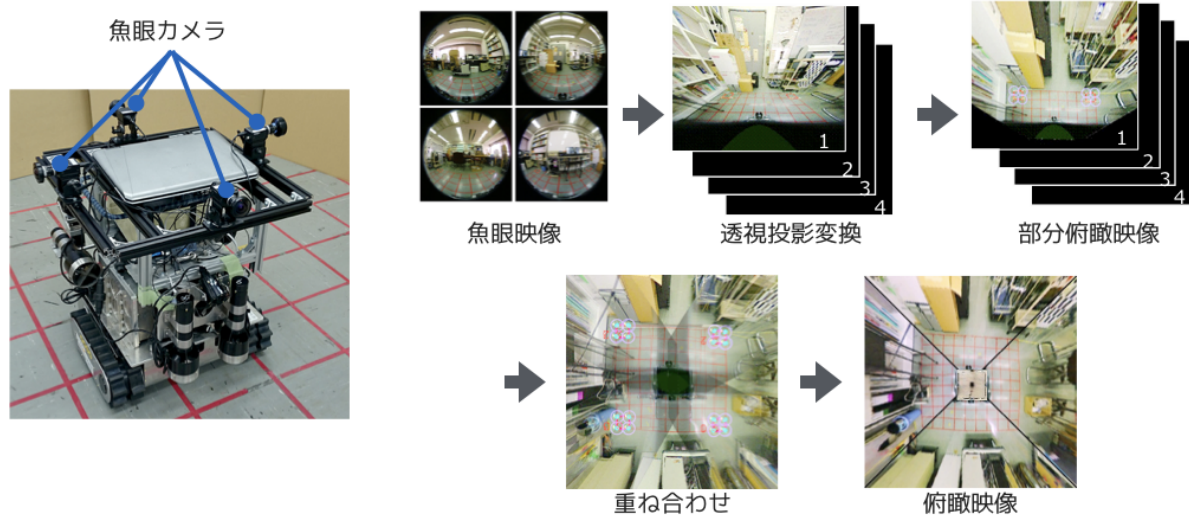


図 3.1-73 魚眼カメラ映像からの俯瞰映像生成

## ② 俯瞰映像提示システムの耐故障性向上（H27）

俯瞰映像提示システムを廃止措置の現場に適用するために解決すべき課題の1つとして、耐故障性が挙げられる。放射線の影響や障害物との衝突等、様々な要因によりカメラが故障する可能性がある。俯瞰映像提示システムでは、複数の魚眼カメラ映像を統合することで提示映像を生成しているため、カメラが故障した場合、オペレータに提示される映像には欠損が生じ、操作性の低下を招く。

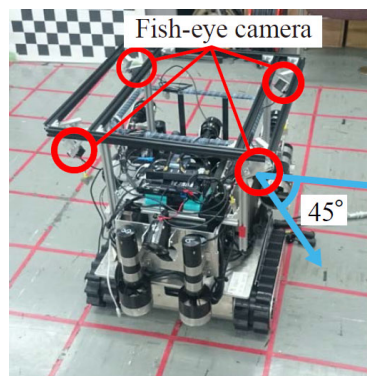
この問題に対して、カメラそのものの耐放射線性等を向上させるというアプローチはもちろん重要であるが、それだけではなく、システム全体として故障に対する頑健性を向上させることが非常に重要である。システム全体としての頑健性向上にあたっては、システムの構成要素に冗長性を組み込むというアプローチが有効である。

そこで本研究では、俯瞰映像提示システムに用いるカメラ群の広角性に着目し、カメラ故障時にも全方位の撮影が可能となるような配置法を構築した。隣接するカメラ同士が視野を補い合うようにカメラを配置することで、あるカメラが故障した際にも残りのカメラで視野欠損を補うことが可能となる。また、複数カメラの映像を統合する際に、複数映像の境界部のテクスチャのずれを最小化する映像統合手法を構築した。

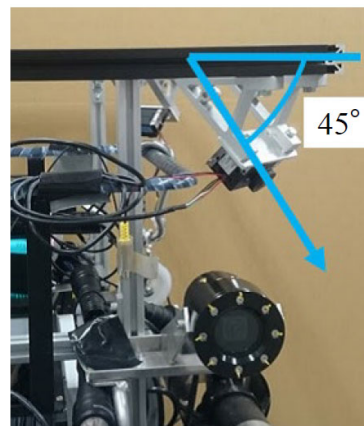
提案手法では、図3.1-74に示すように、移動ロボットの角部に斜め45度下向きに魚眼カメラを設置することにより、隣接するカメラ同士が視野を補い合うことができる。

右上カメラ故障を仮定した状況での俯瞰映像を図3.1-75に示す。図3.1-75(a)は欠損視野の補完なしの俯瞰映像であり、図3.1-75(b)は提案手法による俯瞰映像である。実験結果より、カメラ故障時にも俯瞰映像を生成可能であることが示された。

さらに、提案手法が放射線によるカメラ故障時にも正しく動作することを確認するため、株式会社

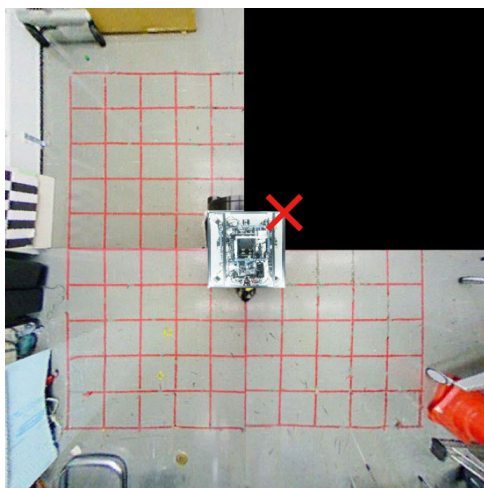


(a) 角部へのカメラ設置

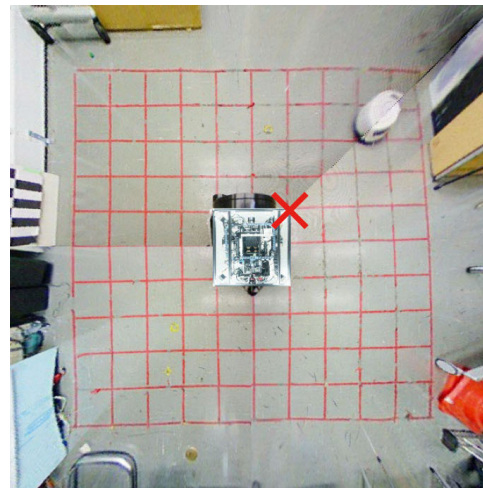


(b) カメラの設置方向

図 3.1-74 故障に対して頑健なカメラ配置



(a) 補完処理なし



(b) 補完処理あり

図 3.1-75 カメラ故障時の俯瞰映像の提示

アトックス技術開発センターにおいてガンマ線照射実験を行った。実験では、 $^{60}\text{Co}$  密封線源（約 1.0 PBq）を用い、ロボットを想定した  $600 \times 600 \times 500 \text{ mm}$  のアルミフレーム角部に図 3.1-76 のように魚眼カメラを設置した。

照射開始後 23 分で 1 台目が故障し、その後 54 分、82 分、94 分でそれぞれカメラが故障した。4 台のカメラの故障までの積算線量の平均は 180.1 Gy であった。実験の結果、図 3.1-77 のように、欠損視野の小さい俯瞰映像を生成可能であることが確認された。

### ③ 俯瞰映像上での障害物情報の提示 (H28-H29)

平成 27 年度までに提案した手法により、移動ロボットの遠隔操作においてカメラ故障時にも頑健な俯瞰映像提示が実現できたが、図 3.1-78 のように、床面より高さのある障害物を俯瞰映像上で正確な位置に描画できないという問題があった。

図 3.1-78(a) の赤線で囲まれた部分に存在する物体は、俯瞰映像上では、図 3.1-78(b) の赤点線部分に表示されるのが理想的であるが、平成 27 年度までのシステムでは、ここには何も表示されていない。このままでは、オペレータが周囲環境を誤認し、ロボットと障害物の衝突を招く危険性が

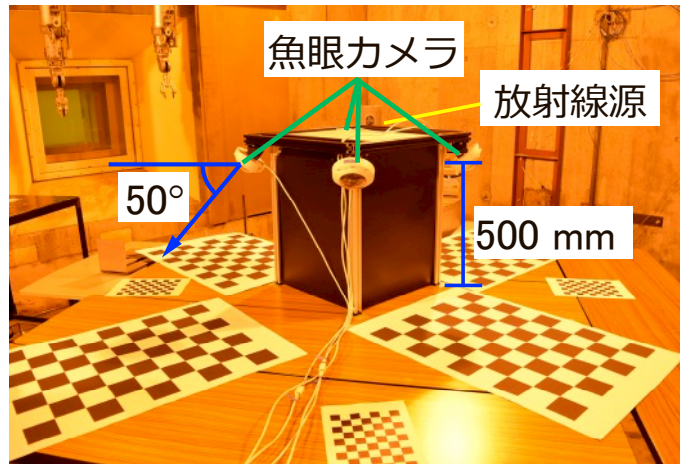


図 3.1-76 ガンマ線照射実験の様子

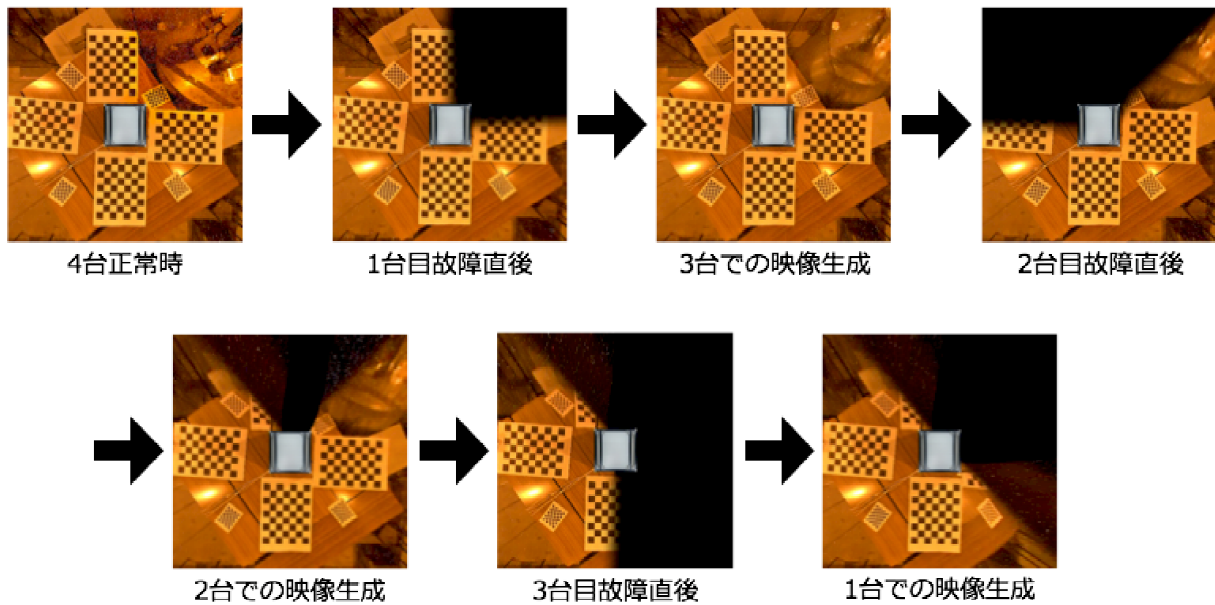


図 3.1-77 ガンマ線照射によるカメラ故障に対応した補完処理による俯瞰映像提示

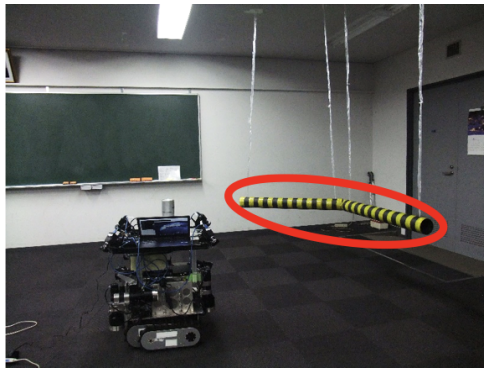
ある。

この問題に対して、平成 28 年度は複数台の魚眼カメラに加えて、3 次元測域センサ (LiDAR) をロボットに搭載し、これらから得られる情報を統合することで、床面より高さのある障害物を俯瞰映像上に正確に提示する手法を構築した。

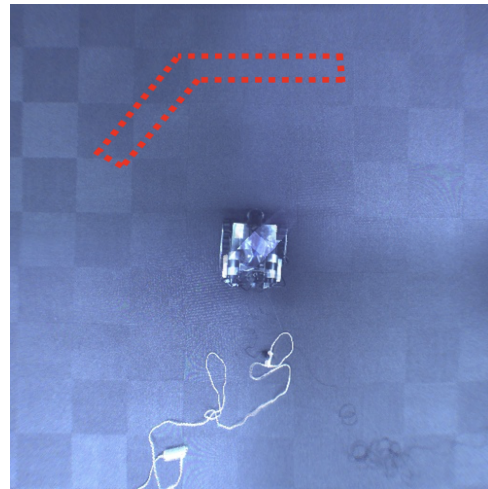
3 次元測域センサを用いることで、ロボット周囲環境の点群情報が得られる。これら点群の高さ情報を用いることで、床上に存在する障害物の点群のみを抽出する。事前のキャリブレーションにより求めた魚眼カメラの内部パラメータ、及び 3 次元測域センサと魚眼カメラの相対位置姿勢を用いて、3 次元測域センサによって得られた障害物上の点  $(x_w, y_w, z_w)$  とそれに対応した魚眼カメラ画像中の点  $(u_f, v_f)$  の関係を求めることができる。この関係から、障害物の各点に対して色情報を付与することができる。

このようにして得られた色付きの点群を床面に射影することで障害物の色情報を俯瞰映像上に重畳





(a) 床面より高さのある物体が存在する状況



(b) 従来手法で提示される俯瞰映像

図 3.1-78 従来の俯瞰映像提示システムの課題

表示する。

一方、ロボットから見て点群よりも遠方の領域については正しい情報が得られていないので、遮蔽領域と定義し、俯瞰映像上に警告色を提示する（図 3.1-79）。

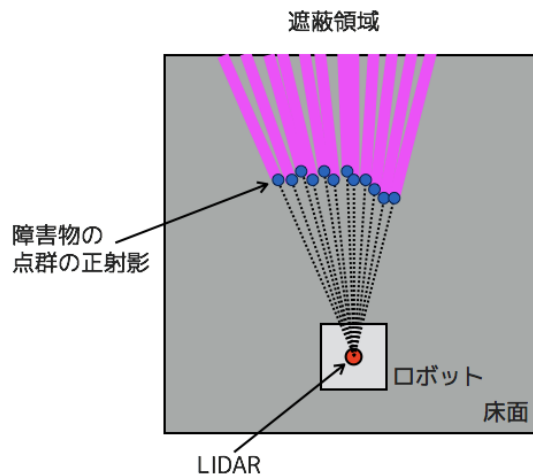


図 3.1-79 遮蔽領域の表示

提案手法の有効性を確認するため、実験を行った。実験では、Velodyne 社製 3 次元測域センサを用い、障害物及び遮蔽領域が俯瞰映像上に正しく描画されるかを検証した。得られた映像の一例を図 3.1-80 に示す。

この図から分かるように、提案手法により俯瞰映像上への障害物及び遮蔽領域の正確な描画が実現できた。

一方、このように警告色で遮蔽領域を塗りつぶしてしまう方法では、遮蔽領域に含まれているその他の障害物や床面に関する画像情報を視認することができず、結果としてオペレータに提示される情報が不正確になってしまう。

そこで平成 29 年度は、遮蔽領域について鮮明な透過色を用いて描画するよう手法を改良した上で、

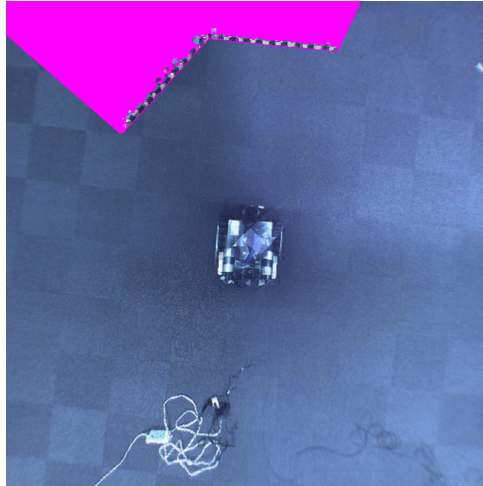


図 3.1-80 俯瞰映像上への障害物・遮蔽領域の重畳表示

遮蔽領域内の床面に関する情報や他の障害物が正確に描画されるかどうかを検証するための実験を行った。実験環境を図 3.1-81 に示す。

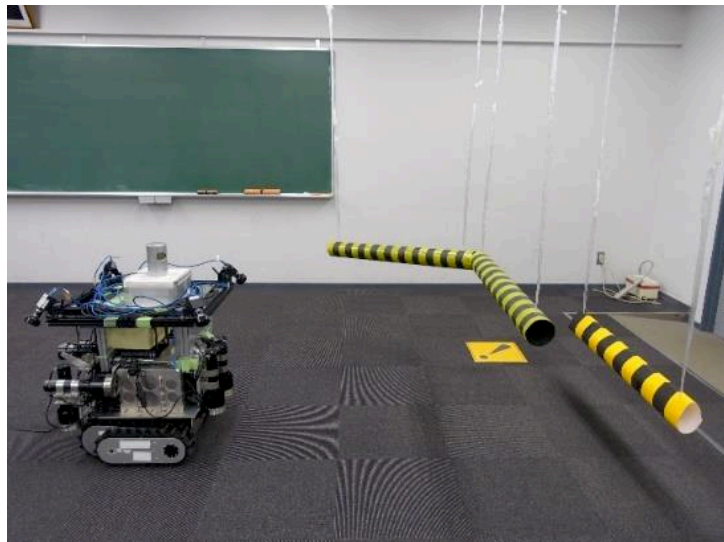


図 3.1-81 俯瞰映像提示実験の環境

図 3.1-82 に、提案手法により生成された俯瞰映像の例を示す。

この図から、床面のテクスチャ情報及び複数の障害物情報が正確に俯瞰映像上に提示されていることが分かる。俯瞰映像を 1 枚生成するのに要する計算時間は約 100 ms であり、実時間での処理が可能であることを確認した。

#### (8) 遠隔操作インターフェースのための触覚情報提示技術 (H26-H28、H30)

本研究項目では、ロボットのための新しい遠隔操作インターフェースとして、コントローラを操作する手の手掌部に触覚（皮膚感覚）的な刺激を与えることで遠隔地の力情報を疑似的に再現提示する技術の研究開発を行った。具体的には、ツールを握る手のひらに圧力刺激を加えると、実際には外力が働いていないにも拘らず、あたかもツールから押されているかのような感覚を錯覚することを本研究において見出した。その知見に基づき、圧力発生機構を内蔵したゲームパッド型のロボット操作コ

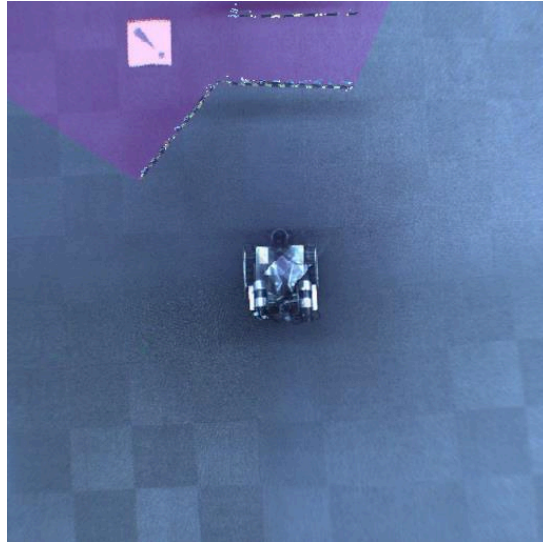


図 3.1-82 鮮明透過色を用いた俯瞰映像上での遮蔽領域の描画

ントローラを開発した。開発したコントローラでは、コントローラを握る手のひらに圧力刺激を加えることで、オペレータに外力を錯覚させる。これによって、遠隔地の情報をユーザに伝達することが可能である。また、より効果的に感覚を提示するために、コンパクトな構造で大きな圧力刺激を発生する手法について検討を行い、シリーズ・エラスティック・アクチュエーション (Series Elastic Actuation; SEA) と呼ばれる機構を用いることで、圧力刺激を増大可能であることを確認した。

#### ① 平成 29 年度までの成果

ロボットの遠隔操作において、遠隔地のロボットからの力覚情報をユーザにフィードバックすることは、臨場感や操作性を向上する上で重要である。しかし、力覚情報のフィードバックにはいくつかの技術的な課題がある。1つ目の課題は、安定性と機構透明性のトレードオフである。遠隔地からの力情報をフィードバックする遠隔操作系においては、安定性と機構透明性 (= 遠隔地の力情報をどれだけクリアに伝達できるかの指標) との間にトレードオフの関係があることが知られており [40]、両者を高いレベルで両立することは難しい。安定性の確保は遠隔操作の安全性を考えた場合には必須事項であるため、一般的には機構透明性を犠牲にせざるを得ない。しかし、機構透明性が低いと、遠隔地の情報が正しく操作者に伝わらない懸念がある。

もう1つの課題としては、力のフィードバックのためにはコントローラが機械的に接地されている必要がある、という点が挙げられる。操作者に力覚を伝える、すなわち、力を及ぼすためには、その反力を受ける部分が必須である。そのため一般的には、力覚提示用のデバイスは床面や机の上に設置して反力を受ける構造となっている。一方、廃炉用途向けに開発されているロボットの多くは、その簡便性や普遍性から、ゲーム機用のパッド型コントローラなどの簡易でコンパクトなデバイスをインタフェースとして採用している例が多い。そうしたコントローラは接地部分を持たないため、一般の力覚提示技術を単純に採用することは難しい。

本研究では、上記の2点の課題を鑑みて、触覚情報 (= 皮膚刺激) によって力覚情報を代用する手法を研究した。皮膚への触覚刺激により力覚情報の不足を補う、あるいは、力覚情報を代替することができれば、上記の安定性と透明性のトレードオフに囚われずにフィードバックを行うことが可能となる上、反力を受ける接地点がなくとも刺激の提示が実現できる可能性がある。従来研究におい

て、触覚刺激による力覚代行の例としては、手に高周波数の振動を与えて力覚情報の高周波成分を補おうとするもの [41]、指先に圧力を加えることで力覚情報を補強、もしくは、代行しようとするもの [42]、さらには、指先や手掌部の皮膚を接線方向に引っ張ることで力覚を代行しようとするもの [43] などが報告されている。本研究では、操作者により少ない負担で目的とする力覚情報を提示するために、これまで活用例の少ない「手掌部への圧力刺激」を用いる方法を検討した。

手掌部への圧力刺激により力覚を代行あるいは補強できるかを確認するため、図 3.1-83 に示すセットアップを用いて効果を検証した。本セットアップは、市販の力覚提示装置 (3D systems 社、Geomagic Touch) のスタイラス部 (= 力覚提示用のハンドル) を、手掌部刺激機構を組み込んだ自作デバイスに置き換えたものである。スタイラス部の動きは水平方向の 1 自由度のみに限定されている。ユーザが右手でスタイラスを握って左に動かすと、力覚提示装置からは右向きの反力が、また、手掌部刺激機構からは右手の手掌部に対する圧力が提示されるよう構成されている。手掌部刺激機構はボイスコイルモータの先端に刺激子を取り付けたものであり、モータに流す電流量により刺激量を制御する構成となっている。

実験では、はじめに被験者に対して、力覚提示装置から一定の力 (1.7 N = 参考力) を提示し、その力を記憶してもらった。次に、力覚提示装置と手掌部刺激機構の両者から、変位に比例した刺激量 (左に押し込むほど、バネのように「力」と「手掌部への圧力」が強くなる。) を発生させ、はじめに記憶した参考力と、同じ大きさの力を感じた位置と、その位置での力覚提示装置の発生力を記録した。



図 3.1-83 手掌部圧刺激の力覚代行効果を確認するための実験装置

図 3.1-84 に結果を示す。力覚提示装置の発生する力のゲイン (= 変位に対する比率、すなわち、バネ係数) は常に一定であるが、手掌部への刺激量のゲインは 4 段階に変化させており、図 3.1-84 の横軸がそのゲインを表している。縦軸は被験者が参考力と同じ力を感じた際に、実際に力覚提示装置が発生していた力 (以下、等価発生力と呼ぶこととする。) である。手掌部刺激量のゲインが 0 の時 (すなわち、手掌部への刺激がない場合) において、1.7 N の参考力と同じに感じられる等価発生力が 1.7 N を大きく上回っているのは、参考力提示の際には位置によらず一定の力を与え、比較実験ではバネ力を与えたという提示方法の違いに起因するものと考えられる。グラフは右肩下がりの傾向



を示しており、手掌部刺激量のゲインが大きくなるにつれ等価発生力は小さくなっていることから、手掌部を刺激することで力覚を代替できていることが確認できた。

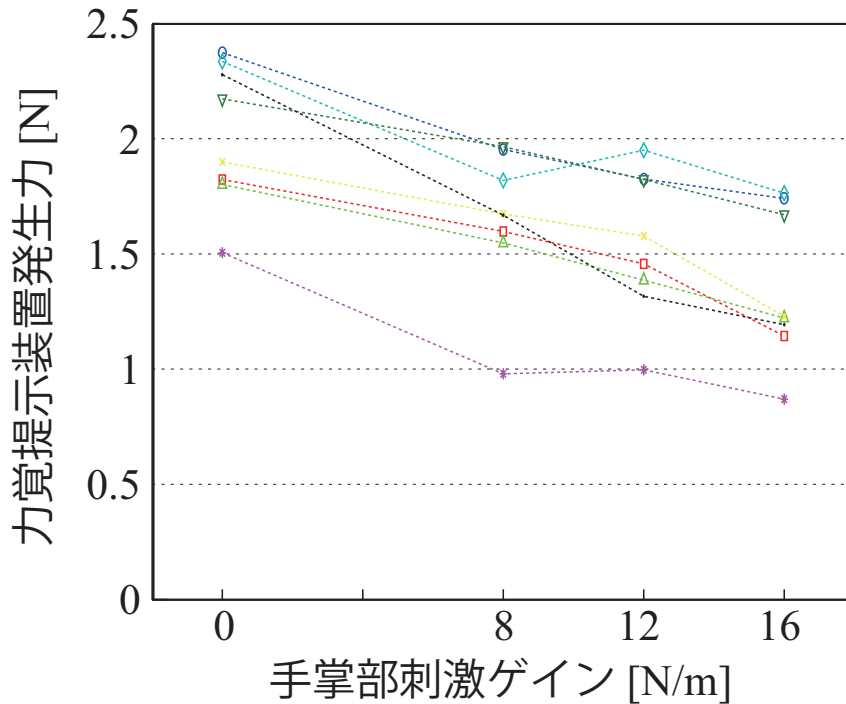


図 3.1-84 複数被験者による実験結果

なお、手掌部の加圧時には実際に手掌部をモータが押しているため、力を感じるのは当然という見方もあり得るかと思うが、ここで重要な点は、手掌部を押すボイスコイルモータの反力は、同じ手の指にかかっている点である。すなわち、ボイスコイルモータは、手の中で膨らむ動きをしているのみであり、並進方向の外力を発生しているわけではない。デバイスを握る指と手掌部はどちらも同じ力で互いに逆向きに押されているが、指側は圧力が薄く広く分布するのに対し手掌部は部分的に大きな圧力が加わることから、人の知覚の非線形性により手掌部の加圧だけが知覚され、それが並進力と錯覚されるものと考えられる。

上記の知見を基に、図 3.1-85 に示すコントローラを開発した。このコントローラは、オペレータの手のひらが当たるグリップ部にボイスコイルモータを内蔵しており、グリップを握る手掌部を加圧することで、あたかもコントローラがオペレータを押し返しているかのような錯覚を生成する。加圧用パーツと手掌部の接触状態が本錯覚現象には重要であることから、多様なオペレータの手にフィットしやすいよう、グリップの角度が変更できるよう構成した (図 3.1-86)。

試作したコントローラにより、シミュレータ内のタンク (戦車車両) を操作するデモンストレーションシステムを試作した事例を図 3.1-87 に示す。シミュレータ部分は汎用のゲームエンジン Unity を用いて構築した。コントローラの 2 つのジョイスティックのピッチ角度を、タンクの左右のクローラの前進/後進に対応させた。一方、タンクからは車体の傾斜角度をフィードバックし、左右それぞれの角度に応じて、コントローラ左右のボイスコイルモータでオペレータの手を加圧する構成とした。タンクが勾配を登っている際には、それに応じた刺激が手掌部に加わることとなり、オペレータは地形を直観的に感じ取ることができる。また、タンクが左右に傾いた場合には、傾きに応じて左右の刺激量に変化するため、左右方向の勾配も直感的に感じ取ることが可能であった。



図 3.1-85 手掌部への圧刺激を活用した遠隔操作作用コントローラ

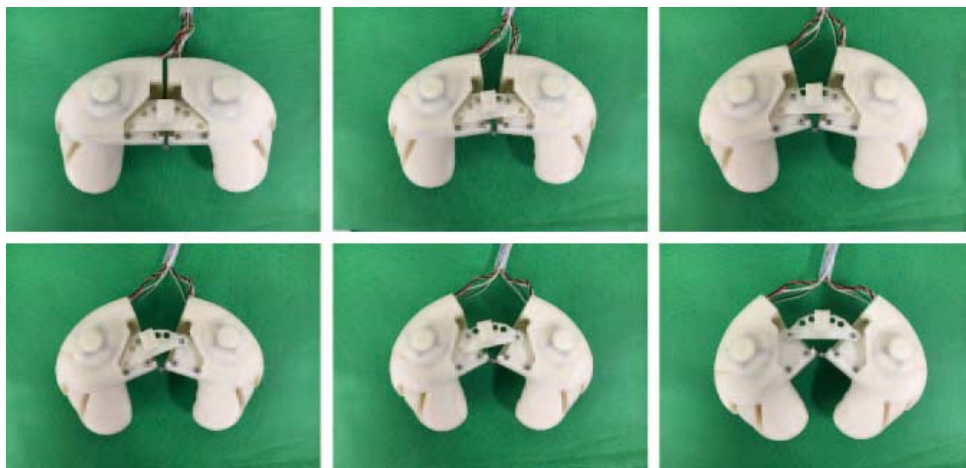


図 3.1-86 多様な握り方に対応するための可変機構

## ② 平成 30 年度の成果

図 3.1-85 のデバイスは十分な操作感を与えるものではあったが、ボイスコイルモータを用いていることから、特定の状況において消費電力が大きくなり過度に発熱する懸念と、加圧力のさらなる増大が困難であるという課題があった。具体的には、ボイスコイルモータではモータ発生力と電流が単純に比例する関係にあるため、持続的な刺激を発生し続けられないといけない場面（例えば、上記のシミュレータの例では、坂を登り続ける場合など。）では、ボイスコイルモータに電流が流れ続けモータが発熱する。また、ボイスコイルモータは直動モータであり減速器が利用できないことから、発生力を大きくしようとする必要があり、より多様な状況において効果的に刺激を提示するためには、こうした点を解決し得る新たな構造を検討することが重要である。

そこで、ボイスコイルモータに代えて、SEA と呼ばれる仕組みを用いることを検討した。SEA では、減速器付き DC モータの先端にバネを取り付け、そのバネを介して運動を出力する（図 3.1-88）。バネの変形量を観測し、その変形量をフィードバック制御することで間接的に発生力を制御する。この手法では、減速器を用いることから小型のモータでも大きな発生力を容易に得ることができる。その反面、動作速度は制限されることになるが、本研究のデバイスでは、単に手掌部を加圧するだけとい



図 3.1-87 遠隔操作シミュレータ

うシステムの特長上、高速な動作は要求されない。また、減速器として非バックドライバブル (= 出力側からモータを回せない特性) なものを採用すれば、モータに一切の電流を流さずとも、一定の発生力を維持し続けることが可能である。こうした特徴を考えると、SEA は本研究に適した機構であると考えられる。

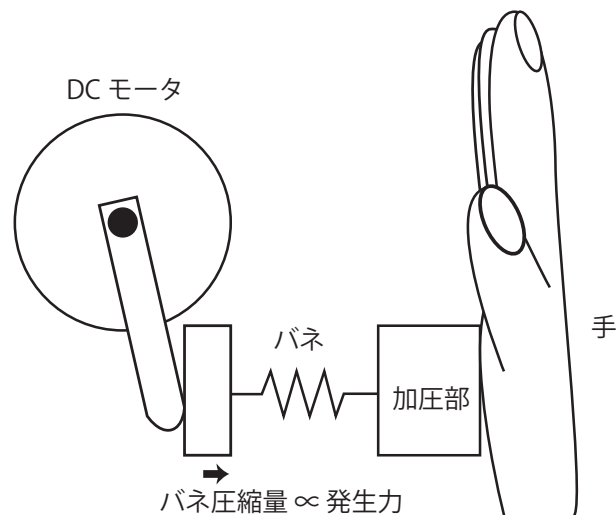


図 3.1-88 SEA の構成図

実際に試作したデバイスの例を図 3.1-89 に、その内部構造を図 3.1-90 に示す。発生力としては図 3.1-85 のデバイスと比較して 2 倍以上の発生力が実現されている。このデバイスを図 3.1-91 のロボットと接続して遠隔操作した。試作デバイスの操作によりロボットのクローラを動作させ、クローラ駆動電流の情報をロボット側から取得し、電流に比例した圧刺激をオペレータにフィードバックした。ただし、デバイスの性質上、前進時の負荷しか再現できないため、ロボット後退時にはフィードバックを遮断する構成としている。動作の様子を図 3.1-92 に示す。ロボット内部コンピュータと、デバイス制御用コンピュータとの間の通信遅延により、フィードバックに遅れが発生しているが、ロボットの動作電流 (= ロボットに加わっている負荷) に対応したバネ圧縮量 (= 手掌部への加圧力) が得られており、ロボット動作がオペレータにフィードバックできていることが確認できる。





図 3.1-89 SEA を用いたコントローラ試作例

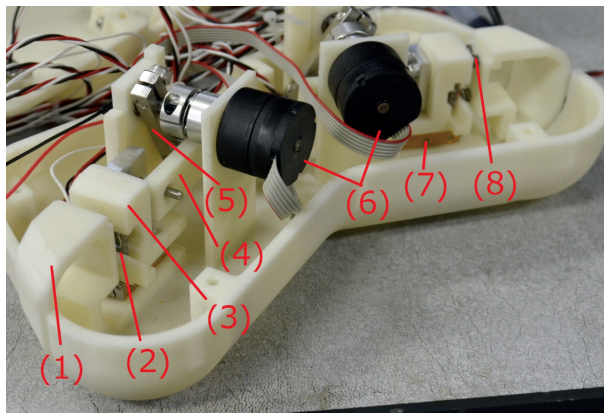


図 3.1-90 内部構造 (1) 加圧部、(2) (8) バネ、(3) バネベース、(4) (5) リンク、(6) DC モーター、(7) リニアガイド

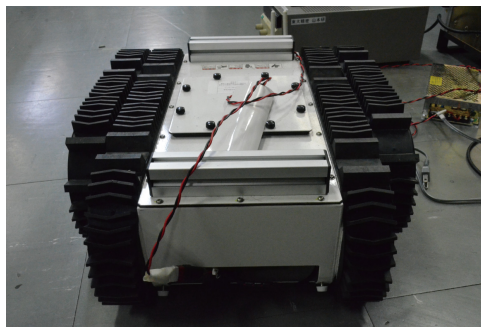


図 3.1-91 遠隔操作に用いたロボット

### (9) 移動ロボットを用いたガンマ線 CT (H28-H30)

空間中の放射線源の位置を推定するために、本研究ではガンマ線検出器を搭載した移動ロボットによるガンマ線 CT システムを構築した。ここでは、図 3.1-93 に示すように、ガンマ線検出器を搭載したロボットが移動することで複数箇所でのガンマ線計測を行い、得られた情報から Computed Tomography (CT) の技術を用いることで放射線源の位置を推定する。

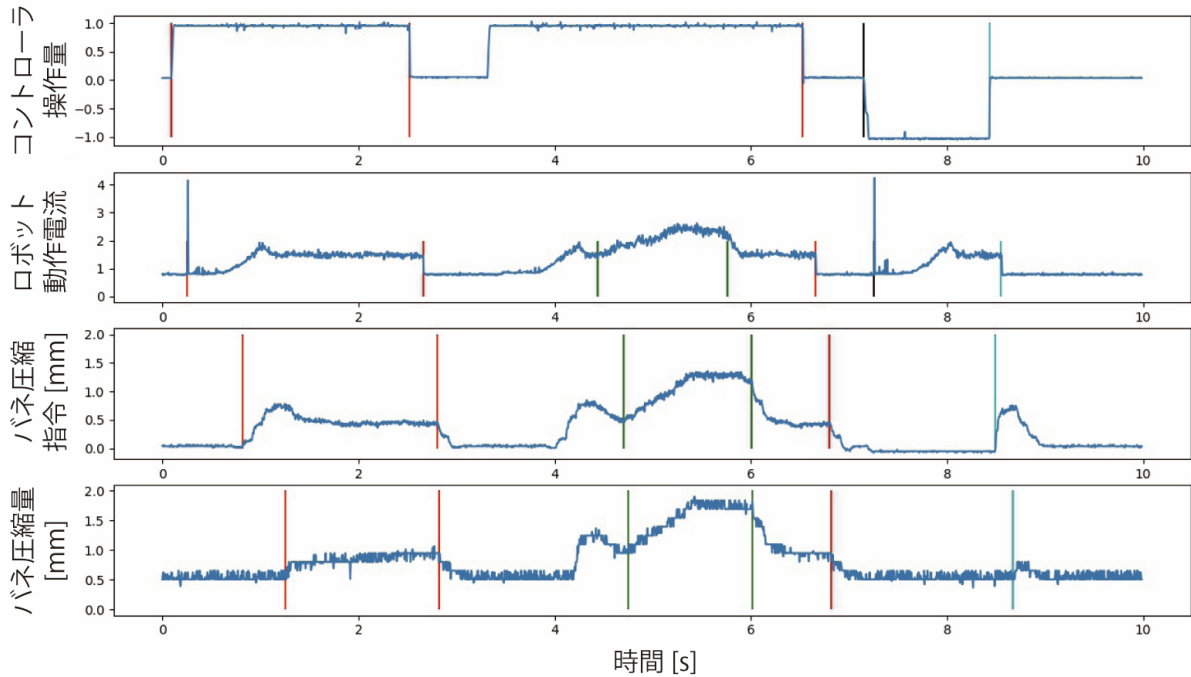


図 3.1-92 ロボット遠隔操作時の状況

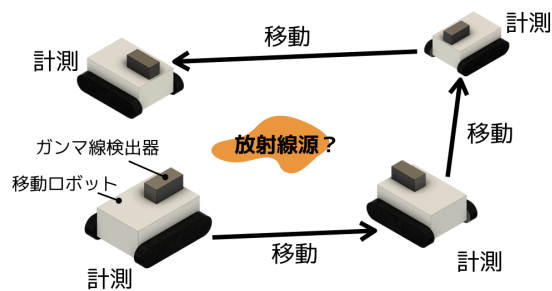


図 3.1-93 移動ロボットを用いたガンマ線 CT

### ① ロボットの位置姿勢誤差が放射線源の位置推定に与える影響の検討 (H28)

CTを行うためには、各計測におけるガンマ線検出器の位置姿勢情報が必要である。医療用の陽電子放射断層撮影法 (Positron Emission Tomography; PET) や単一光子放射断層撮影法 (Single Photon Emission Computed Tomography; SPECT) の場合、検出器の位置姿勢は正確に分かっていることが前提となるが、本研究で想定するような移動ロボット搭載型の検出器の場合、その位置姿勢は未知である。したがって、移動ロボットに搭載されたセンサを用いてロボット自身の位置姿勢を推定する必要があるが、どのような方法を用いても推定誤差を完全になくすことは不可能であり、検出器の位置姿勢には不確実性が残る。

平成 28 年度は、検出器の位置姿勢に含まれる誤差が、放射線源の位置推定結果に対してどの程度の影響を与えるかをシミュレーションによって検証した。ここでは簡単のため、平行多孔型のコリメータとシンチレータを有するガンマ線検出器を想定した。また、ロボットと検出器の相対位置姿勢は既知であるとし、ロボットの位置姿勢誤差は正規分布に従うものとした。計測結果からの画像再構成は単純逆投影法を用いた。

図 3.1-94 のような 2 次元環境中に 4 つの点線源 ( $S_1, S_2, S_3, S_4$ ) があることを想定し、Geant4 を用いてシミュレーションを行った。図 3.1-95 に検出器の位置及び姿勢の不確実性と放射線源の位置推定誤差の関係を示す。

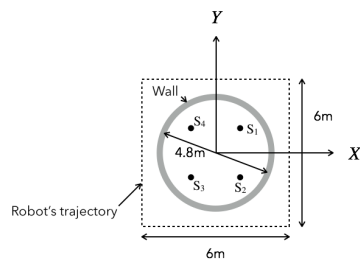


図 3.1-94 誤差影響検討のためのシミュレーション環境

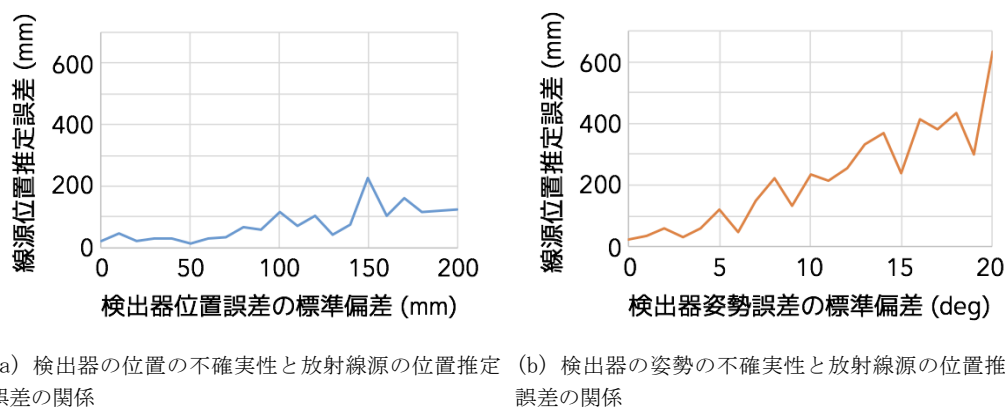


図 3.1-95 検出器の位置姿勢の不確実性と放射線源の位置推定誤差の関係

## ② コンプトンカメラ搭載移動ロボットによる放射線源の位置推定 (H29)

平成 29 年度は、ガンマ線検出器としてコンプトンカメラを想定し、移動ロボットの自己位置推定と CT による画像再構成を統合するシステムを構築した。

先述したように、CT による画像再構成を行うためには、各計測におけるガンマ線検出器の位置姿勢情報が必要である。コンプトンカメラはロボットに固定されているので、ロボットとコンプトンカメラの相対位置姿勢は既知と考えることができるため、ロボットの位置姿勢が分かれば、座標変換によりコンプトンカメラの位置姿勢も導出できる。本研究では、ベイズフィルタに基づいた移動ロボットの自己位置推定を行った。具体的には、既知の地図情報と 2 次元測域センサ及びオドメトリ情報を用い、パーティクルフィルタによる実装を行った。複数の計測点でのガンマ線検出結果からの再構成には、Maximum Likelihood Expectation Maximization (MLEM) 法を用いた。

提案手法の有効性を評価するため、シミュレーションと実機実験を行った。シミュレーションは、図 3.1-96 のような環境を想定し、6 箇所計測した結果を基に再構成を行った。ここで環境地図は事前に取得済みであり、ガンマ線の挙動については Geant4 を用いてシミュレートした。

MLEM 法により 10 回の繰り返し計算を行った後の結果を図 3.1-97 に示す。この図から、提案手法により放射線源の位置が正しく推定できていることが分かる。

実機実験は、コンプトンカメラと 2 次元測域センサを搭載した移動ロボット (図 3.1-98) を用い、

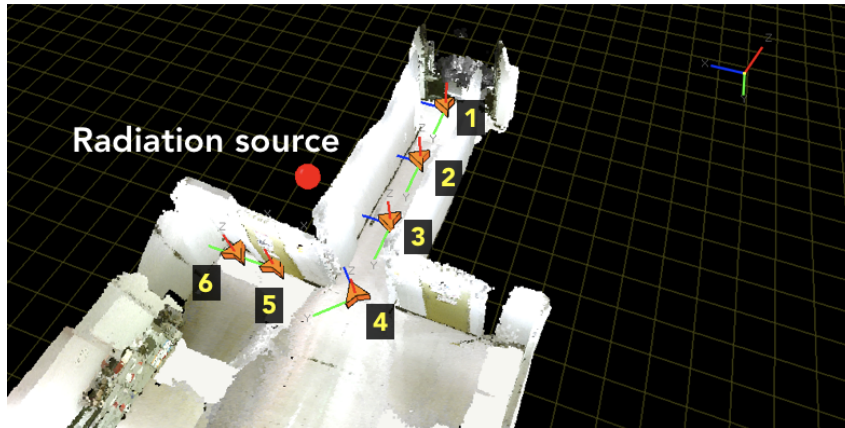


図 3.1-96 放射線源位置推定のシミュレーション環境

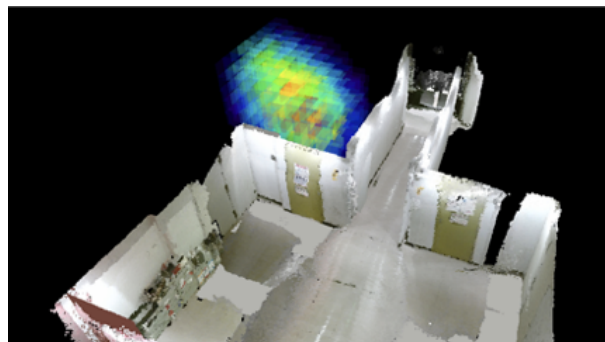


図 3.1-97 MLEM 法による放射線源推定シミュレーションの結果

図 3.1-99 のような環境で行った。環境中には壁面で囲われた  $1 \times 1$  m の領域を用意し、その中に放射線源 ( $^{137}\text{Cs}$ 、2.7 MBq) を配置した。ロボットは、事前に取得した環境地図を基に自己位置推定を行い、コンプトンカメラを用いて 8 箇所ずつ約 30 分ずつの計測を行った。

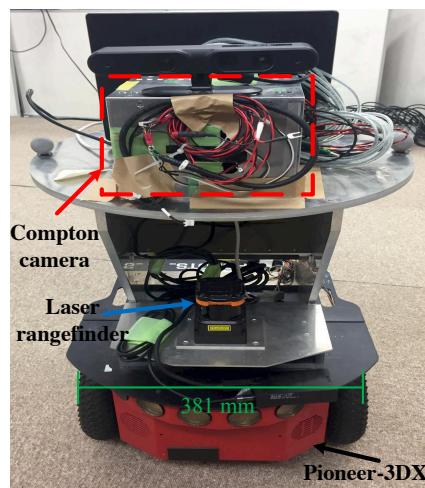


図 3.1-98 実験に使用した移動ロボット

図 3.1-100 に放射線源位置の推定結果を示す。提案手法による推定位置と放射線源位置の真値との誤差は 0.10 m であった。



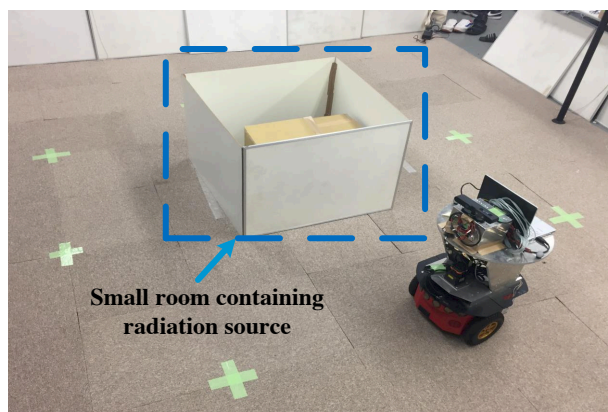


図 3.1-99 放射線源位置推定実験の環境

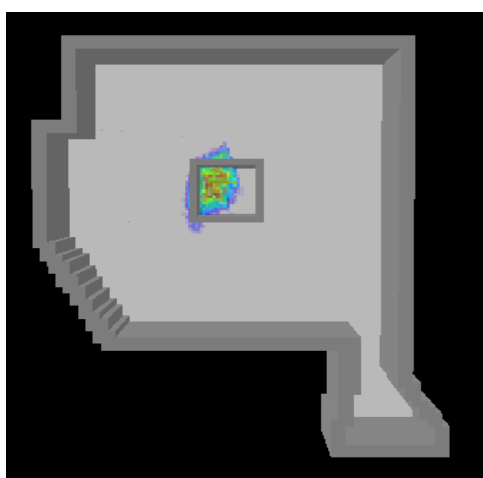


図 3.1-100 放射線源位置推定の結果

### ③ コンプトンカメラ搭載移動ロボットによる空間中の構造物を考慮した放射線源の位置推定 (H30)

平成 29 年度までの成果によって、コンプトンカメラを搭載した移動ロボットによる放射線源位置推定のフレームワークが構築された。一方で、平成 29 年度までは環境の地図情報は既知であるという仮定を置いていた。しかしながら、必ずしも環境の正確な地図情報を事前に得られるとは限らないため、移動ロボットが計測をしながら地図情報も取得することが望ましい。また、図 3.1-100 から分かるように、放射線源の位置推定結果は、壁面で囲われた領域の外の空中にも分布してしまっている。放射線源が固体であることを考慮すると、このような本来存在し得ない位置に推定結果が分布することは好ましくない。

これに対して平成 30 年度は、(i) 3 次元測域センサ (Light Detection And Ranging; LiDAR) を用いた環境地図作成と自己位置推定の同時遂行 (Simultaneous Localization and Mapping; SLAM)、及び (ii) 生成された地図情報を用いた構造物を考慮した放射線源位置の推定、の 2 つの研究開発を行った。

3 次元 LiDAR を用いた SLAM については、各地点で得られた点群同士の位置合わせを行うことで環境全体の点群地図及びロボットの自己位置姿勢を推定するアプローチ [44] を取った。得られた環境地図及びロボットの自己位置姿勢を基に平成 29 年度と同様、MLEM 法を用いて再構成を行う。

本研究では、この再構成の際に上記で得られた環境地図の情報を利用する。放射線源は、LiDAR に

よって計測された構造物表面、もしくは構造物によって遮蔽された未計測領域内に存在する。これは、逆に言うと、LiDAR と計測された構造物との間の計測済みの領域には放射線源は存在しないと考えることができる。したがって、本研究では放射線源が存在し得る領域のみで画像再構成を行うことで放射線源位置を正確に推定することを試みた。

提案手法の有効性を検証するため、実機による実験を行った。実験は、図 3.1-101 に示すような移動ロボット、コンプトンカメラ、3次元 LiDAR を用い、図 3.1-102 のような環境で行った。放射線源としては、構造物の内部に 2.2 MBq の  $^{137}\text{Cs}$  を配置した。ロボットは、10 箇所各約 30 分の計測を行った。

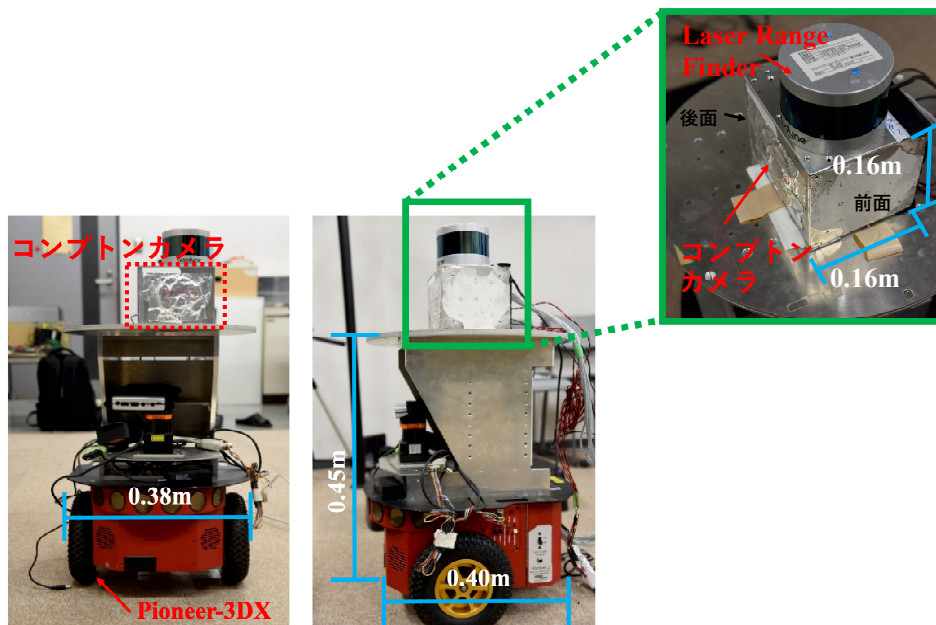


図 3.1-101 実験に使用した移動ロボット及びセンサ

実験の結果生成された環境地図を図 3.1-103 に示す。ここでは図中の赤枠内に存在する 3 つの領域内でのみ 3 次元再構成を行った。

図 3.1-104 に、従来手法と提案手法による、SLAM による自己位置推定結果を用いた放射線源位置の推定結果を示す。

図 3.1-104(a) から分かるように、従来手法による推定では、構造物の外側の、放射線源が存在し得ない領域にも分布してしまっているのに対し、提案手法では図 3.1-104(b) に示すように構造物表面または内部に分布が制限されており、より正確な推定ができていると言える。

## 参考文献

- [1] K. Yanagimura, K. Ohno, Y. Okada, E. Takeuchi, and S. Tadokoro, "Hovering of MAV by Using Magnetic Adhesion and Winch Mechanisms," Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.6250-6257, 2014.
- [2] 小浦慧視, 岡田佳都, カールジョンオーサラーン, 大野和則, 多田隈建二郎, 田所諭, "吸着力を調整できる永電磁式小型軽量吸着機構の開発とマルチコプタ搭載評価," 第 21 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp.148-153, 2016.



図 3.1-102 実験環境の様子

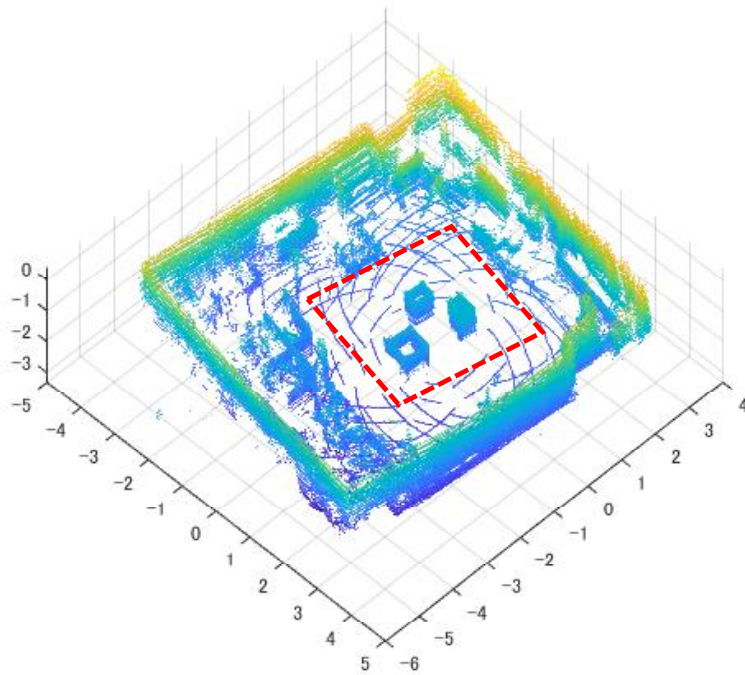
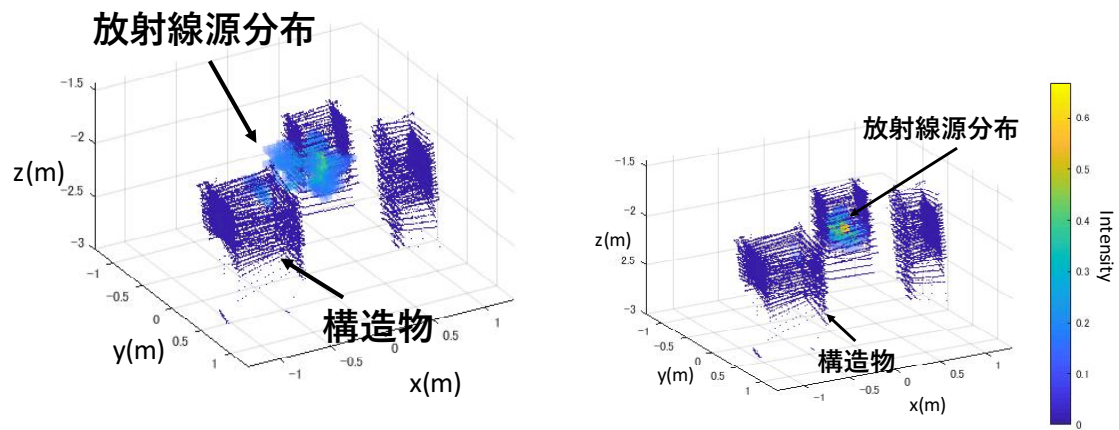


図 3.1-103 生成された環境地図

- [3] 岡田佳都, 小澤将生, 大橋勇斗, 藤浪拓海, 石井拓麻, 大野和則, 田所諭, “受動回転球殻 UAV の安全性向上を目的とした機構改良と定量評価,” 第 22 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp. 331-332, 2017.
- [4] Yoshito Okada, Takuma Ishii, Kazunori Ohno, Satoshi Tadokoro “Real-Time Restoration of Aerial Inspection Images by Recognizing and Removing Passive Rotating Shell of a UAV,” Proceedings of the 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 5006-5012, 2016.





(a) 従来手法による推定結果

(b) 提案手法による推定結果

図 3.1-104 SLAM による自己位置推定結果を用いた放射線源位置の推定

- [5] Carl John Salaan, Kenjiro Tadakuma, Yoshito Okada, Kazunori Ohno, Satoshi Tadokoro, “UAV with Two Passive Rotating Hemispherical Shells and Horizontal Rotor for Hammering Inspection of Infrastructure,” Proceedings of the 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp.769-774, 2017.
- [6] 東京電力, “1号機オペレーティングフロア調査結果(中間)について”, 経産省 廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議(第40回)資料3-2, 2017年3月30日.
- [7] M. Konyo, K. Isaki, K. Hatazaki, S. Tadokoro, and F. Takemura, “Ciliary Vibration Drive Mechanism for Active Scope Cameras,” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 20, No. 3, pp.490-499, 2008.
- [8] J. Fukuda, M. Konyo, E. Takeuchi, and S. Tadokoro, “Remote Vertical Exploration by Active Scope Camera into Collapsed Buildings”, Proceedings of the 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1882-1888, 2014.
- [9] Ye Hua, Masashi Konyo and Satoshi Tadokoro, “Design and analysis of a pneumatic high-impact force drive mechanism for in-pipe inspection robots,” Advanced Robotics, vol. 30, no. 19, pp. 1260-1272, 2016.
- [10] T. Yamamoto, M. Konyo, and S. Tadokoro, “A High-Speed Locomotion Mechanism Using Pneumatic Hollow-Shaft Actuators for In-Pipe Robots,” Proceedings of the 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4724-4730, 2015.
- [11] 山本知生, 昆陽雅司, 多田隈建二郎, 田所諭, “セルフロック現象を用いた配管内ロボットののための大保持力発生機構”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 1A1-09a3, 2016.
- [12] 山本知生, 昆陽雅司, 多田隈建二郎, 田所諭, “柔軟配管内走行ロボットの接触力低減動作による曲管通過性の向上”, 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 1F3-6, 2016.

- [13] Takahito Funamizu, Hikaru Nagano, Masashi Konyo and Satoshi Tadokoro, “Visuo-haptic transmission of contact information improve operation of Active Scope Camera,” Proceedings of the 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1126-1132, 2016.
- [14] 山本知生, 昆陽雅司, 多田隈建二郎, 田所諭, “中空構造を有した小型軽量な空圧回転体,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 2P1-D01, 2017.
- [15] Tomonari Yamamoto, Masashi Konyo, Kenjiro Tadakuma and Satoshi Tadokoro, “A Flexible In-Pipe Robot Capable of Moving in Open Spaces via a Pneumatic Rotary Mechanism,” IFAC-PapersOnLine, vol. 50, no. 1, pp. 1050-1055, 2017.
- [16] 荒木真吾, 永野 光, 昆陽 雅司, 田所 諭, “能動スコープカメラにおける長手方向の接触位置推定方法の検討”, 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 1C6-14, 2017.
- [17] 山本知生, 昆陽雅司, 多田隈建二郎, 田所諭, “空圧駆動柔軟索状ロボットの小曲率曲管通過性能向上のための管壁接触力低減構造”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018, 2A1-A06, 2018.
- [18] 荒木真吾, 永野光, 安部祐一, 昆陽雅司, 田所諭, “能動スコープカメラにおける長手方向の接触位置推定方法”, 第 19 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 1C2-11, 2018.
- [19] M. Tesch, K. Lipkin, I. Brown, R. Hatton, A. Peck, J. Rembisz and H. Choset, “Parameterized and Scripted Gaits for Modular Snake Robots,” Advanced Robotics, vol. 23, no. 9, pp. 1131-1158, 2009.
- [20] D. Rollinson and H. Choset, “Pipe Network Locomotion with a Snake Robot,” Journal of Field Robotics, vol. 33, no. 3, pp. 322-s-336, 2016.
- [21] 山田浩也, 広瀬茂男, “索状能動体の研究 -多関節体幹による連続曲線近似-”, 日本ロボット学会誌, vol. 26, no. 1, pp. 110-120, 2008.
- [22] T. Kamegawa, T. Harada and A. Gofuku, “Realization of cylinder climbing locomotion with helical form by a snake robot with passive wheels,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3067-3072, 2009.
- [23] T. Baba, Y. Kameyama, T. Kamegawa and A. Gofuku, “A snake robot propelling inside of a pipe with helical rolling motion,” Proc. SICE Annual Conference, pp. 2319-2325, 2010.
- [24] T. Kamegawa, T. Baba and A. Gofuku, “V-shift control for snake robot moving the inside of a pipe with helical rolling motion,” Proc. IEEE Int. Symp. on Safety, Security and Rescue Robotics, pp. 1-6, 2011.
- [25] 亀川哲志, 齊偉, 五福明夫, “螺旋尺取り方式を用いて円柱を移動するへび型ロボットの提案”, 計測自動制御学会論文集, vol. 51, no.1, pp. 8-15, 2015.
- [26] W. Qi, T. Kamegawa and A. Gofuku, “Helical wave propagation motion for a snake robot on a vertical pipe containing a branch,” Artificial Life and Robotics, vol. 23, no. 4, pp. 515-522, 2018.
- [27] T. Takemori, M. Tanaka and F. Matsuno, “Gait Design for a Snake Robot by Con-

- necting Curve Segments and Experimental Demonstration,” IEEE Trans. on Robotics, vol. 34, no. 5, pp. 1384–1391, 2018.
- [28] T. Takemori, M. Tanaka and F. Matsuno, “Ladder Climbing with a Snake Robot,” Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 8140–8145, 2018.
- [29] COPPELIA ROBOTICS, “V-REP,” <http://www.coppeliarobotics.com/>
- [30] T. Ohashi, H. Yamada, and S. Hirose, “Loop forming snake-like robot ACM-R7 and its serpenoid oval control,” Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 413–s418, 2010.
- [31] H. Ohno and S. Hirose, “Design of slim slime robot and its gait of locomotion,” Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, vol. 2, pp. 707–715, 2001.
- [32] J.W. Burdick, J. Radford, and G.S. Chirikjian, “A ‘Sidewinding’ Locomotion Gait for Hyper-Redundant Robots,” Advanced Robotics, vol. 9, no. 3, pp. 195–216, 1995.
- [33] Rui Fukui, Yuta Kato, Ryo Takahashi, Weiwei Wan, and Masayuki Nakao, “Automated construction system of robot locomotion and operation platform for hazardous environments - basic system design and feasibility study of module transferring and connecting motions -,” Journal of Field Robotics, Vol.33, No.6, pp.751-764, 2016.
- [34] Rui Fukui, Gen Kanayama, Yuta Kato, Ryo Takahashi, and Shin’ichi Warisawa, “Development of an intersection module for a modularized rail structure - implementation of compliant mechanisms for a replacing task of movable parts -,” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.30, No.3, pp.467-476, 2018.
- [35] [http://www.youbot-store.com/media/pdf/youbot\\_product\\_flyer.pdf](http://www.youbot-store.com/media/pdf/youbot_product_flyer.pdf)
- [36] [http://www.barrett.com/robot/DS\\_WAM.pdf](http://www.barrett.com/robot/DS_WAM.pdf)
- [37] <http://www.nihonbinary.co.jp/Products/Robot/Baxter/>
- [38] 相山康道, 稲葉雅幸, 井上博允, “グラスプレス・マニピュレーションの研究：操作形態の分類とピボット操作の実現”, 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 1, pp. 114-121, 1996.
- [39] 吉田貴, “無人化施工におけるテレロボティクス”, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.6, pp.585-587, 2012.
- [40] D. A. Lawrence, “Stability and transparency in bilateral teleoperation,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.9, No.5, pp.624-637, 1993.
- [41] William McMahan, Joseph M. Romano, Amal M. Abdul Rahuman, Katherine J. Kuchenbecker, “High frequency acceleration feedback significantly increases the realism of haptically rendered textured surfaces,” Proc. IEEE Haptics Symposium 2010, pp.141-148, 2010.
- [42] Domenico Prattichizzo, Claudio Pacchierotti, Stefano Cenci, Kouta Minamizawa, Giulio Rosati, “Using a Fingertip Tactile Device to Substitute Kinesthetic Feedback in Haptic Interaction,” Haptics: Generating and Perceiving Tangible Sensations, pp.125-130, 2010.
- [43] Zhan Fan Quek, Samuel B. Schorr, Ilana Nisky, Allison M. Okamura, William R.

- Provancher, “Sensory augmentation of stiffness using fingerpad skin stretch,” Proc. World Haptics Conference 2013, pp.467-472, 2013.
- [44] Ji Zhang, Sanjiv Singh, “LOAM Lidar Odometry and Mapping in Real-time,” Proceedings of Robotics: Science and Systems, pp.55-63, 2014.

### 3.1.2. 遠隔水中活動機器の要素技術開発と人材育成プログラムの作成（再委託先：福島大学）

#### (1) 5年間の概要

廃止ならびに廃止のための調査には、原子炉やその周辺の水中における広範囲のデータ収集ならびに作業が必要不可欠である。そして、そのロボットは、他の陸上用ロボットを使って目的の調査地点まで運搬しなければならない。また、調査個所には様々な障害物が存在し、狭隘な環境での活動が必須となる。このため、ロボットは小型軽量であるとともに、十分な作業能力を持たなければならない。そのため、小型軽量で高機能なエンドエフェクタ、ならびに軽量で高強度な構造材が必要である。また、電子機器類の誤作動を防止するためには放射線遮蔽効果が大きい構造材であることが望ましい。さらに、水中では中性浮量となるロボットにとって、作業対象物が比較的軽量なものであっても大きな外乱となり、制御性能が著しく低下してしまう。そのため、外乱に強い制御システムが重要となる。また、狭隘環境で活動するロボットは、操作するのに十分な視界が得られないため、操作者への負担が大きい。そのためロボット周囲の状況を直観的に把握し、操作を容易にするための画像インタフェースが必要である。これらのことから、本課題では、以下のような、高線量・狭隘環境で遠隔水中活動するロボットのための要素技術開発を行うことを目的とした。

- (1) 小型で大きな伝動特性を有する立体カム機構とクラウン減速機構を使った、小型軽量な作業用エンドエフェクタならびにマニピュレータを開発する。
- (2) 外乱やモデル変化に対して高いロバスト性を有する拡張状態オブザーバを使った制御システムを開発する。
- (3) ロボットの低い位置に取り付けられた複数のカメラからの画像群から、視点変換技術と3次元復元技術を用いて、遠隔ロボットを俯瞰する画像を生成し操作者に提示するインタフェースを開発する。
- (4) 高い放射線遮蔽能力を有し、軽量で高強度な複合材料を開発する。
- (5) これらの要素技術開発の成果を、人材育成プログラムに反映させる。特に、ロボット競技会等を活用するとともに、ロボット開発の実際を講義・体験させることで実践的な人材育成を行う。

課題(1)では、福島大学で開発された立体カム機構を用いて、粒径0.5~1.0 mmの模擬燃料デブリを確実に把持することのできる3爪ピンチングデバイスを開発した。また、直径100 mmのパイプを通ることができ、長さ3 mに伸長可能な巻き取り型サンプリング用アームを開発した。このアームでは、低融点合金を用いたユニークな関節機構を提案し、ガタがなく、またエンドミル等で燃料デブリを切削することが可能な強度を実現した。

課題(2)では、拡張状態オブザーバ(Extended State Observer; ESO)を用いたロバスト性の高い制御系の設計を行った。その結果を基に、水中ロボットの小型実験機を試作し、制御器の性能試験を実施した。その結果、与えられた外乱の推定が適切に行われており、外乱補償が可能であることを確認した。

課題(3)では、ロボットに取り付けられるカメラが1台の時でも適用できるように、単眼カメラの画像から水中シーンの3次元的な復元を行う手法を開発した。このような手法はStructure from Motion (SfM)と呼ばれ、これまでは主に陸上ロボットに適用されてきた。しかし本課題は水中活動機器であるため、カメラ画像は陸上とは異なり3次元的に大きく運動するものとなり、従来手法を単純に適用するだけでは正確なシーンの復元は難しかった。本研究では、正確なシーンの復元を可能に

する画像間の運動特徴を明らかにし、それに基づいて3次元復元をすることにより水中画像からの正確な3次元シーンの復元を可能にした。

課題(4)では、放射線遮蔽効果の高い繊維強化プラスチック複合材料(Fiber-Reinforced Plastics; FRP)の開発を行い、マット状ガラス繊維に酸化銅(II)粉末を44.4%添加したFRPと平織ガラス繊維に硫酸バリウム粉末を50%添加したFRPで、厚さ1mmの鉛板とほぼ同じ遮蔽効果を得ることができた。また、3点曲げ試験の結果から、平織ガラス繊維+硫酸バリウム粉末(50%添加)FRPで最大曲げ応力は約200MPaであった。これは、アルミ合金より曲げ強度が高いことから、水中ロボットの制御ボックス等で使用できる可能性があることが得られた。

課題(5)では、主として小中学生を対象として、毎年度、ロボットプログラミング講座を実施した。プログラミング実習の前にロボットに関する簡単な講義や説明を行い、福島第一原子力発電所廃炉作業で使用された、日立GEのPMORPHや東芝の水中遊泳ロボット(ミニマンボウ)などの紹介を行った。これらの活動を通して、若年層へ廃炉に関する興味を高めることに貢献できたと考えている。

## (2) 小型軽量の作業用エンドエフェクタの開発(H26-H30)

### ① 研究概要

小型で高精度なつまみ動作のできるピンチングデバイスは、多くが2点でワークを支持する構造であり、様々な形状に対して、安定した把持を行うことは難しい。それに対して、図3.1-105に示すようにワークを3点で支持することができれば、安定した把持が見込めるようになる。そこで、高橋らが開発した立体カム機構[1]を用いて、3点でワークを支持する構造にすることで、小型で高精度なつまみ動作のできる構造のピンチングデバイスを実現した。

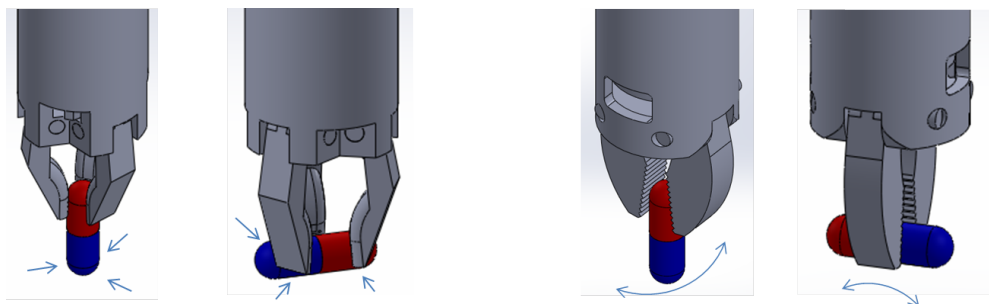


図 3.1-105 2爪把持と3爪把持

立体カム機構は、3次的に構成された2つのカム面を有するカムと、それぞれのカム面に接するフォロアから構成されている。図3.1-106に示すように、フォロアはカム面と接するフォロアアームを2つ有している。これらのフォロアアームがカム面と常に2箇所接触しながら運動するため、理論上のバックラッシュはゼロである。また、本機構は歯車のように歯で力を伝達するのではなく、部品全体で力を受けて伝達するため、比較的高い強度を有し、小型化も容易である。さらに設計時に入出力の角度関係を決めることができ、可逆駆動性も備えている。

3爪ピンチングデバイスは、この立体カム機構をカム上に3組構成することで実現した。設計の結果得られた3爪ペンチカムのカムの配置を図3.1-107に示した[2]。

### ② 平成26～29年度の成果概要

平成26年度は、3爪ピンチングデバイスの基本設計ならびに予備試作を行った。平成27年度は、



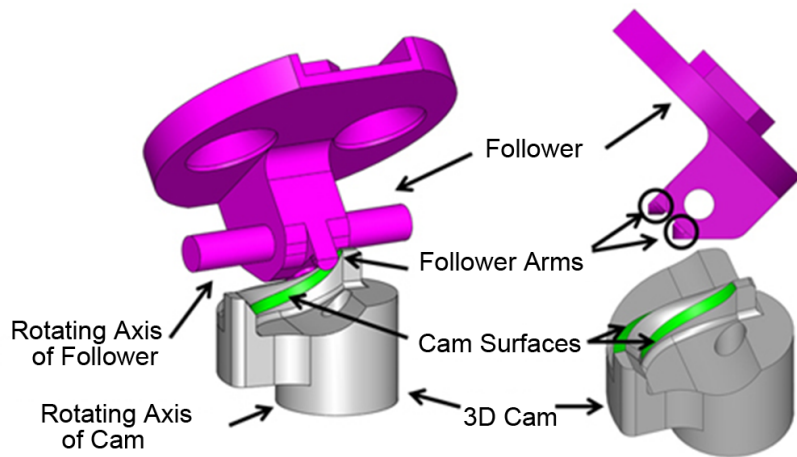


図 3.1-106 立体カム機構

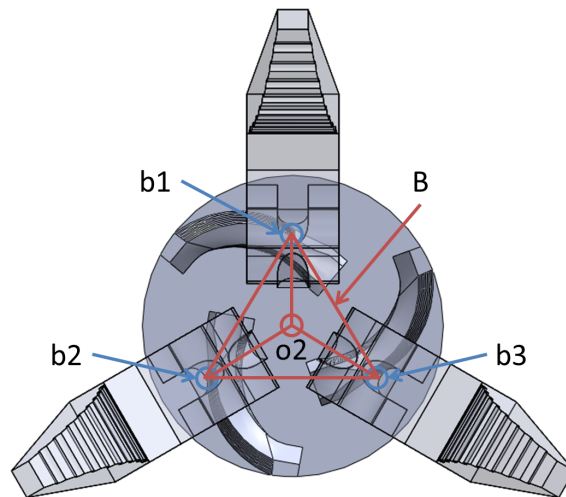


図 3.1-107 3爪ペンチカムのカム配置

図 3.1-108 に示すようなモータ付きデバイスの試作を行うとともに、図 3.1-109 のような様々な対象物の把持実験を行い、球や三角形など平行辺を持たない対象物でも安定して把持できることを確認した。平成 28 年度は、爪の根元関節を平行移動する機構とすることを試み（図 3.1-110）、基本的な動作が行えることが確認できた [3]。平成 29 年度は、別に関節した可撓性伸縮アームの先端に取り付けることを想定した評価を実施した。

### ③ 平成 30 年度の成果

平成 30 年度は、オフサイト分析の一連の作業手順を想定し、粒径 0.5~1.0 mm の模擬燃料デブリを実際に 3 爪ピンチングデバイスで把持する実験を行った。図 3.1-111 は、0.5 mm の模擬デブリを把持するところを示しており、問題なくピッキング動作が行えることを確認した。

### (3) 微量サンプリングに向けたドラム巻き取り型のフレキシブルアーム (H28-H30)

#### ① 研究概要

これまで開発を進めてきた 3 爪ハンドを用いて、原子炉内デブリの微量サンプリングを行うための

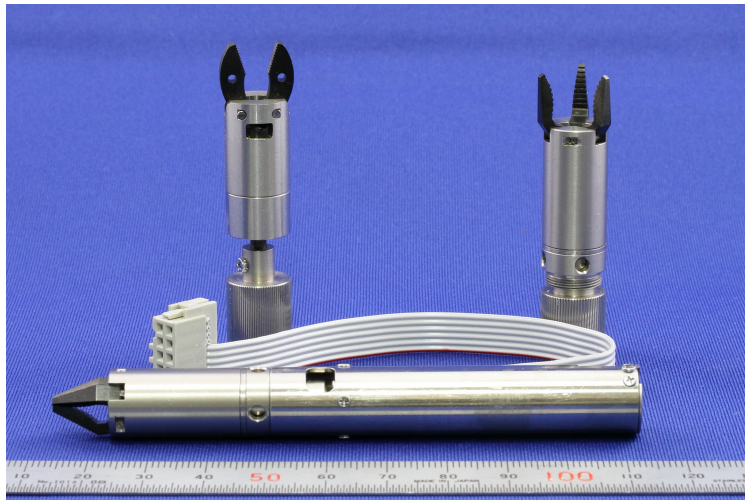


図 3.1-108 試作した 3 爪及び 2 爪ピンチングデバイス及びモータ付き 3 爪ピンチングデバイス

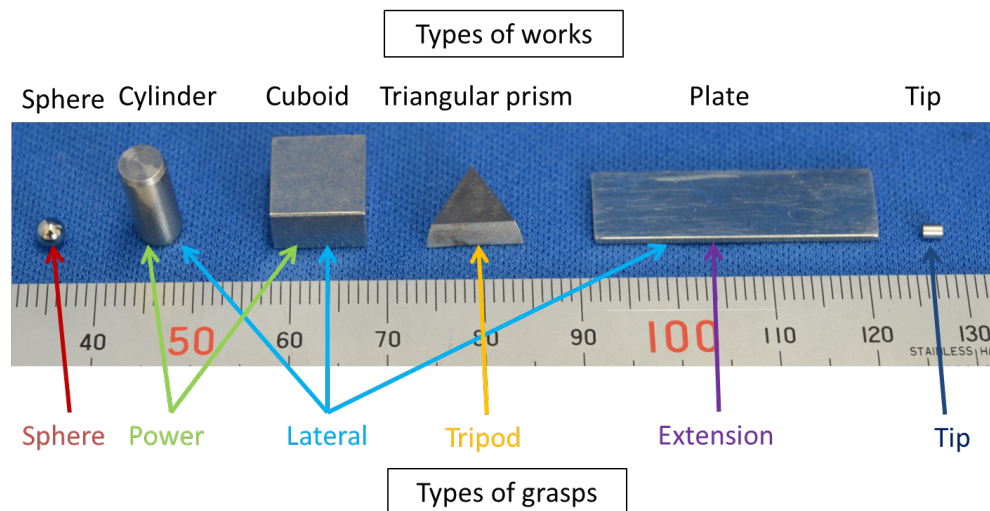


図 3.1-109 把持試験に使用した対象物

アームシステムについて検討を行った。

このシステムでは、図 3.1-112 のような方式で、格納容器内に溶け落ちた燃料デブリをサンプリングすることを想定している。この原子炉内部調査用ロボットは、図に示すように Control Rod Drive (CRD) レールを伝って格納容器内部に進出し、レールの上からアームを伸ばし燃料デブリを採取する。しかし、格納容器へ侵入する穴の直径が約 100 mm である一方で、レールの上から燃料デブリまでの高さが数 m ある。また、燃料デブリの採取は数 10～数 100 mg の微小な量を想定している。

これら一連の課題を解決するために、図 3.1-113 に示すようなコンパクトで巻き取り可能なサンプリングアーム・システムを提案した。このアームシステムは、伸長時には剛性が高く、巻き取り時には直径 100 mm 以内にする事の可能なフレキシブルアームから成る。また、先端には、これまで提案してきた小型 3 爪ピンチングデバイス、もしくは燃料デブリを切削することのできるエンドミル等を装着する。

本サンプリングアームの開発は、平成 28 年度から研究が開始されたテーマである。

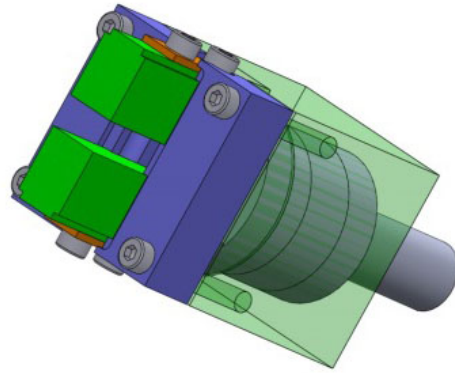


図 3.1-110 平行爪ハンドのコンセプト

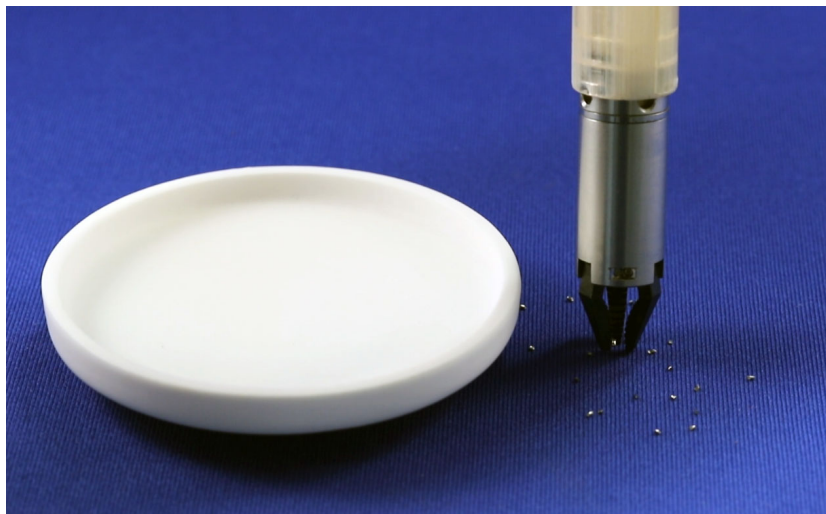


図 3.1-111 粒径 0.5 mm の模擬燃料デブリのピッキング

## ② 平成 28～29 年度の成果概要

平成 28 年度は、図 3.1-113 の予備検討となる図 3.1-114(a) のようなアームの試作を行った [4]。このフレキシブルアームは、チェーンとワイヤ、ハンドによって構成されており、フレキシブルモードとリジッドモードの 2 つのモードがある (図 3.1-114(b))。フレキシブルモードでは、ワイヤの張力とチェーンにかかる力を弱めることで柔軟性を持った巻き取り可能なアームになる。リジッドモードでは、ワイヤの張力とチェーンにかかる力を強めることで剛性を持つアームになる。また、モータの回転をワイヤによりハンドに伝達させ、爪が動いて微細な燃料デブリを把持し採取する。なおこの方式では、アームの巻き取り時に工夫が必要である。すなわち、図 3.1-115(a) に示すように A の方向にドラムが回転するとアームがドラムに巻かれ、Space 部分が生じるためチェーンの実効長さが長くなってしまふ。これを補償するためには、チェーンは D の方向に移動しなければならず、実際にはその方向にチェーンを動かすことはできないので、このままではアームを巻き取ることができない。そのため、チェーンの実効長さが長くなった分だけワイヤを繰り出す必要がある。この問題を解決するため、図 3.1-115(b) に示すような 2 層ドラムを考案した。このドラムは、ドラム A を回転させることによってフレキシブルアームのワイヤを引っ張るとともに、チェーンをドラム B に乗せて巻き取る仕組みである。ドラム A が A' の方向にワイヤを引っ張った際に生じるチェーンの実効長さの伸長

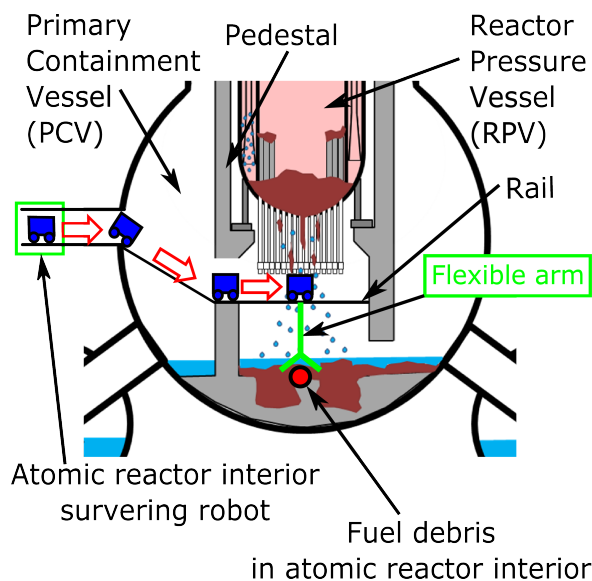


図 3.1-112 燃料デブリ・サンプリング用ロボット・マニピュレータシステム

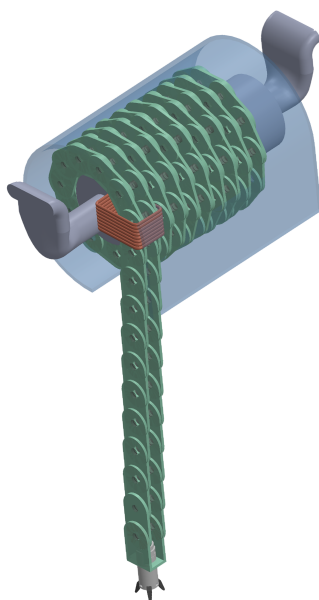


図 3.1-113 コンパクトに巻き取り可能なサンプリング用アーム

分 B' をドラム B が C' の方向に回転して D' の方向にチェーンが移動することで吸収し、結果として巻き取り回収が可能になる。試作ならびに実験を行ったところ、基本的なコンセプトは正しいことが確かめられた。ただし、巻き取り時にワイヤとチェーンが引っかかる現象が見られるなど、改良の余地が残った。

平成 29 年度は、前年度の課題（巻き取り時にワイヤとチェーンが引っかかる現象）の改良を試みた。しかし、最終的にこの解決は困難との結論になったため、新たな方式の検討を行うこととなった。様々な方式を予備試作を行って比較検討した結果、関節部に低融点合金を用いた方式が優れているとの結論を得た [5]。この方式とすることで、冷却時には関節部は「ろう付け」状態となるので、遊び（ガタ）が生じない。また、関節部の加熱方法としては、誘導加熱（Induction Heating）を用いることとした。

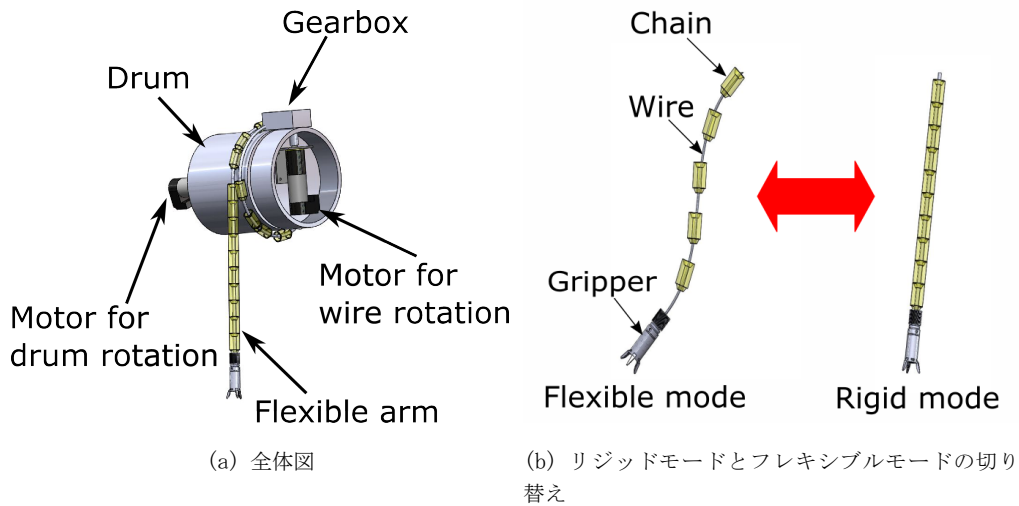


図 3.1-114 初期に開発したコンパクトに巻き取り可能なサンプリング・アーム

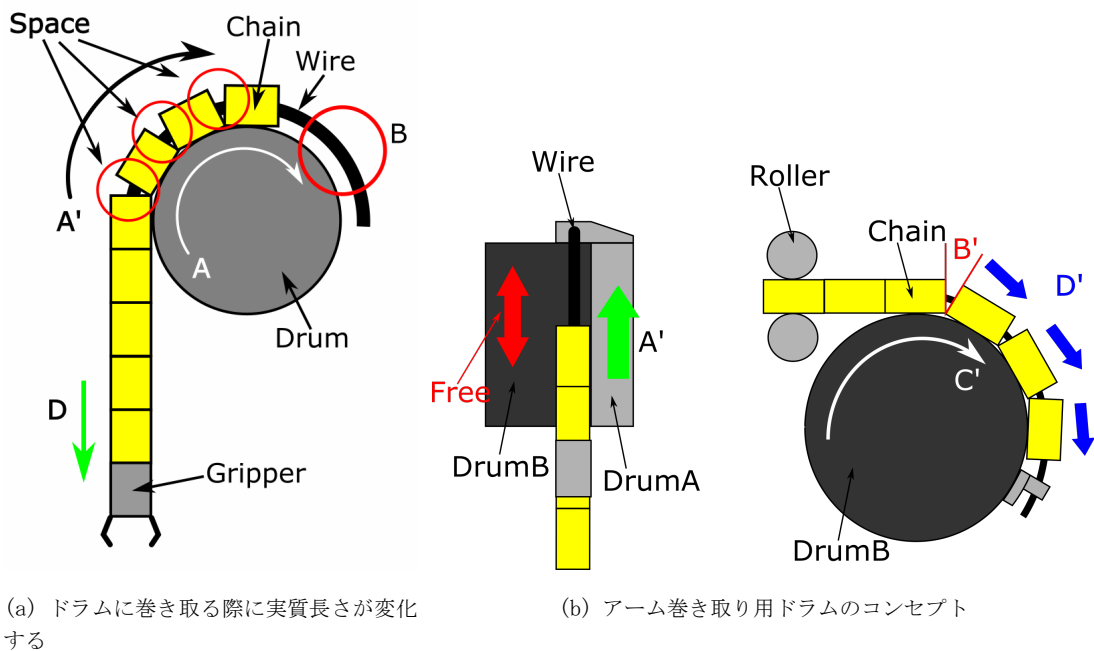


図 3.1-115 初期に開発したコンパクトに巻き取り可能なサンプリング・アームのための巻き取りドラム

### ③ 平成 30 年度の成果

平成 30 年度は、関節部に低融点合金を用いた方式の開発を進めた。最終的に得られた関節部の構造を図 3.1-116 に示す。チェーン構造材 (Chain Plate) には比強度が高く高温にも耐えることのできるガラスエポキシ複合材を使用することとした。また、低融点合金を効率良く加熱するために、ブリキ製の加熱材を組み込んだ。これにより、目標の関節機能を実現することに成功した (図 3.1-117)。また、関節部の加熱法として誘導加熱を使用していることから、関節部が水で濡れていても問題なく加熱することができ、水中ロボットへの搭載にも問題がない。

また、チェーンの連結方法として、図 3.1-118 のように徐々に一方向にずれるような方法を採用している。これは、図 3.1-113 に示すようにドラムへの巻き取りが、特別な機構を用意せずともス



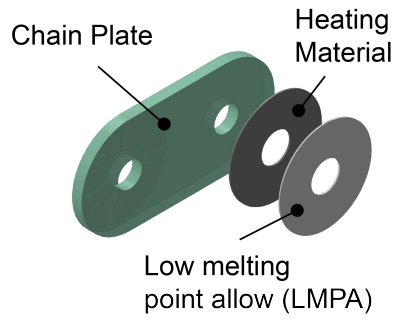


図 3.1-116 関節部の構造

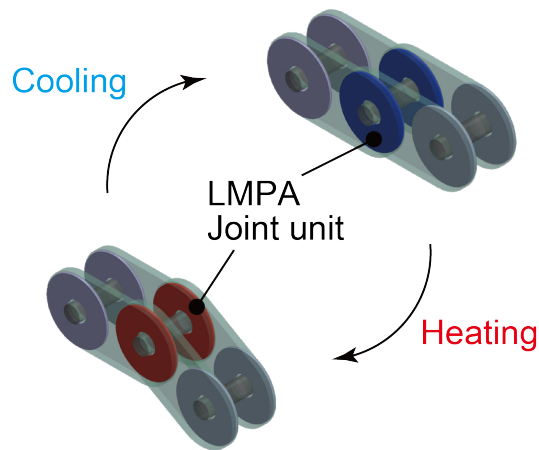


図 3.1-117 関節部のフレキシブルモードとリジッドモードの切り替え

ムーズに行えるようにするためである。

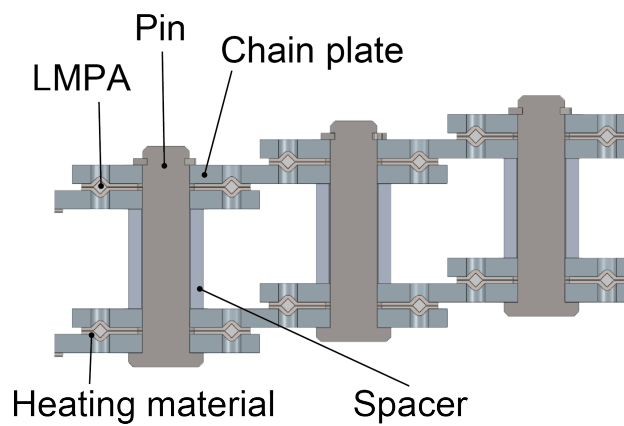


図 3.1-118 チェーンの連結方法

以上の検討の結果を基に、チェーンならびに巻き取りドラムのシステム設計を行った。結果を図 3.1-119 に示す。直径 100 mm 以内に巻き取ることができ、巻き取った際の長さが 182 mm となった。この設計に用いたアーム長は 1 m である。現在、強度試験を実施しているが、この設計だと、目標の押し付け発生力 (10 kgf) を大きく上回る強度が出ており、さらにコンパクトな設計が可能であると考えている。



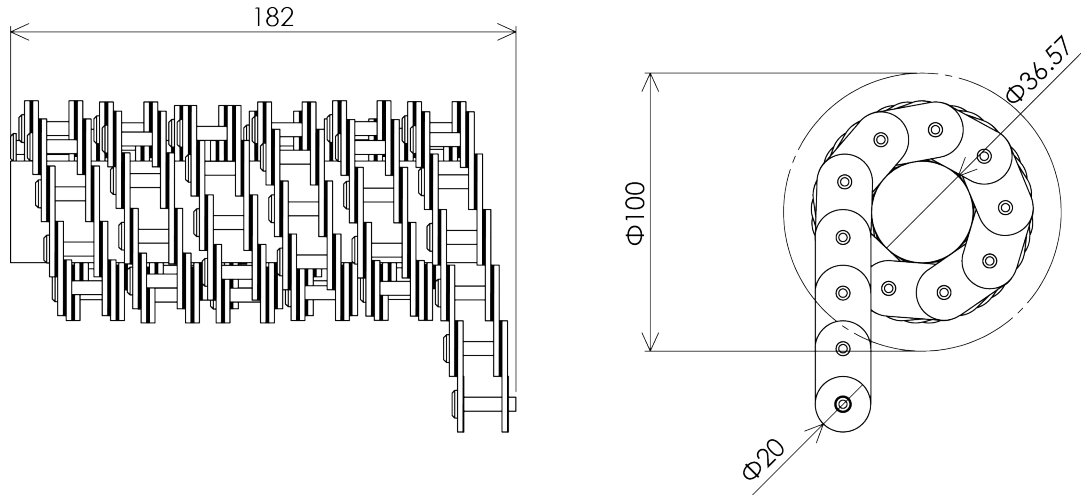


図 3.1-119 チェーンならびに巻き取りドラムのシステム設計

#### (4) 高いロバスト性を有する水中ロボット制御システムの開発 (H26)

##### ① 研究概要

水中ロボットで物体のハンドリングを行う場合、対象物の重量によるバランスの変化や水流などの外乱を補償しつつ位置や姿勢の制御が必要となる。しかし、水中ロボットは水流などの推定が困難な外乱やモデル化誤差が含まれる非線形性システムであり、制御システムのロバスト性を確保することは極めて難しい。この課題に対し、拡張状態オブザーバ [7] (Extended State Observer; ESO) を用いた外乱補償制御に着目した。本手法を用いることによって、ロボットのシステムや外乱が未知であってもロバスト性を有した制御システムの構築が可能となる可能性がある [8]。そこで、水中ロボットへの ESO の適用可能性について検討を行った [6]。

なお本テーマは、平成 26 年度のみ実施した。

##### ② 平成 26 年度の成果概要

図 3.1-120 に示すように静止座標系と機体座標系を定義する。静止座標系での位置及びオイラー角ベクトルを式 (3.1-21)、機体座標系での速度及び角速度ベクトルを式 (3.1-22) とする。

$$\eta = [x \quad y \quad z \quad \phi \quad \theta \quad \psi]^T \quad (3.1-21)$$

$$\nu = [u \quad v \quad w \quad p \quad q \quad r]^T \quad (3.1-22)$$

機体座標系での水中ロボットの運動方程式を式 (3.1-23) に示す [9]。

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau_t + \tau_d \quad (3.1-23)$$

$$M = M_{RB} + M_A$$

$$C(\nu) = C_{RB}(\nu) + C_A(\nu)$$

ここで、 $M_{RB}$ 、 $C(\nu)$  は慣性力及びコリオリ力、 $M_A$ 、 $C_A(\nu)$  は付加質量による慣性力及びコリオリ力を表す。 $D(\nu)$  は流体抗力、 $g(\eta)$  は復元力、 $\tau_t$  及び  $\tau_d$  は入力と外乱である。制御対象となるのは

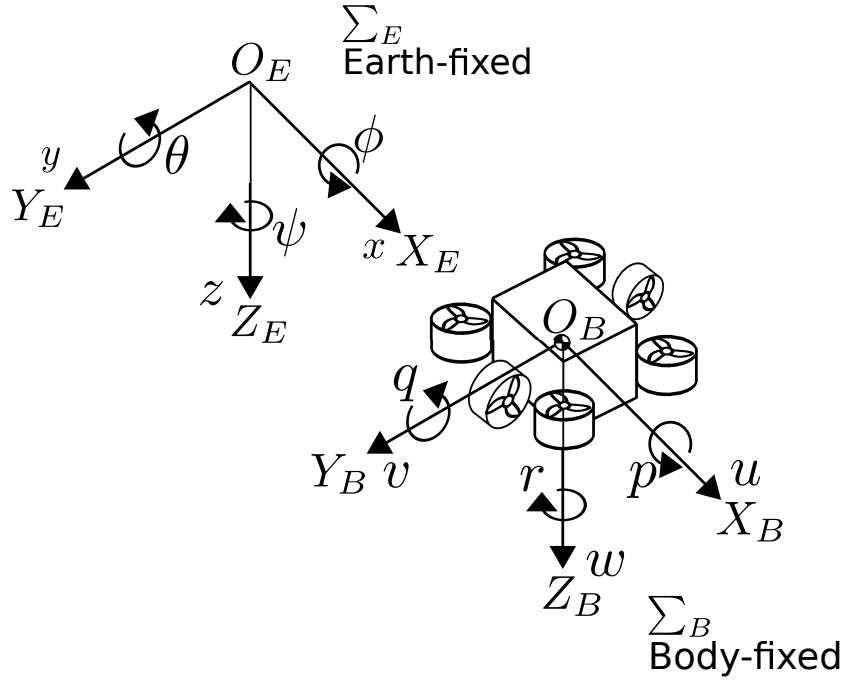


図 3.1-120 静止座標系と機体座標系

静止座標系での位置及びオイラー角ベクトルのため、 $\nu$  と  $\eta$  の間の座標変換行列  $J$  を用いて、水中ロボットの運動方程式は式 (3.1-24) のように表される。

$$\ddot{\eta} = \left\{ \dot{J} - JM^{-1}(C(\nu) + D(\nu)) \right\} J^{-1}\dot{\eta} + JM^{-1}(-g + \tau_t + \tau_d) \quad (3.1-24)$$

式 (3.1-24) を式 (3.1-25) のように表す。

$$\begin{aligned} \ddot{\eta} &= f(\dot{\eta}, \eta) + g(\eta)\tau_t \\ g(\eta) &= JM^{-1} \end{aligned} \quad (3.1-25)$$

$f$  は未知の外乱やモデル化誤差を含む非線形関数であり、 $g(\eta)$  は  $\eta$  に依存する入力係数である。 $g(\eta)$  はオイラー角  $\phi$ 、 $\theta$ 、 $\psi$  に関する非線形関数のため、 $g(\eta)$  をオイラー角について線形化した新たな入力係数  $b$  を用いると運動方程式は式 (3.1-26) のようになる。

$$\ddot{\eta} = f(\cdot) + b\tau_t \quad (3.1-26)$$

このうち、水中ロボットの回転の運動方程式は以下のようになる。

$$\ddot{\phi} = f_\phi(\dot{\phi}, \phi, u) + b_{11}\tau_\phi + b_{12}\tau_\theta + b_{13}\tau_\psi \quad (3.1-27)$$

$$\ddot{\theta} = f_\theta(\dot{\theta}, \theta, u) + b_{21}\tau_\phi + b_{22}\tau_\theta + b_{23}\tau_\psi \quad (3.1-28)$$

$$\ddot{\psi} = f_\psi(\dot{\psi}, \psi, u) + b_{31}\tau_\phi + b_{32}\tau_\theta + b_{33}\tau_\psi \quad (3.1-29)$$

上式より、各運動方程式にそれぞれの入力干渉していることが分かる。そこで、干渉している入力は外乱とみなし、非線形関数  $\xi$  を新たに定義する。

$$\ddot{\phi} = \xi_\phi(\dot{\phi}, \phi, u, \tau_\theta, \tau_\psi) + b_{11}\tau_\phi \quad (3.1-30)$$

$$\ddot{\theta} = \xi_\theta(\dot{\theta}, \theta, u, \tau_\phi, \tau_\psi) + b_{22}\tau_\theta \quad (3.1-31)$$

$$\ddot{\psi} = \xi_{\psi}(\dot{\psi}, \psi, u, \tau_{\phi}, \tau_{\theta}) + b_{33}\tau_{\psi} \quad (3.1-32)$$

各運動方程式に ESO を適用し、制御則を以下のように与える。

$$\tau = \frac{-\hat{\xi}(\cdot) + u_0}{b} \quad (3.1-33)$$

ここで  $\hat{\xi}$  は、ESO によって推定した式 (3.1-30)、(3.1-31)、(3.1-32) の  $\xi_{\phi}$ 、 $\xi_{\theta}$ 、 $\xi_{\psi}$  である。図 3.1-121 に制御システムのブロック図を示す。図中の  $F = \begin{bmatrix} f_1 & f_2 \end{bmatrix}$  はフィードバックゲインであり、 $B$  及び  $C$  は以下の通りである。

以上により、水中ロボットシステムに対する ESO を構成できた。

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix}, \quad C = [1 \ 0 \ 0] \quad (3.1-34)$$

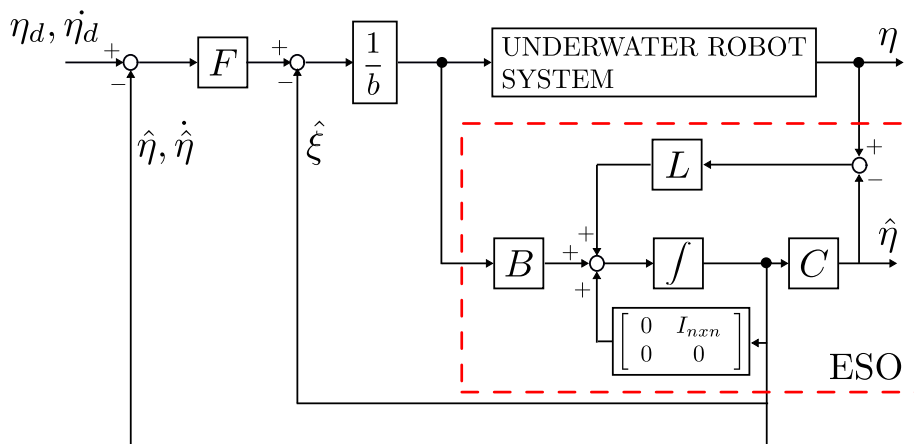


図 3.1-121 制御システムのブロック図

以上の結果を基に、図 3.1-122 (a) に示すような水中ロボットの小型実験機を試作し、制御器の性能試験を実施した。この実験機は、斜めに配置された計 6 個のスラスタを有しており、各スラスタを図 3.1-122 (b) のように動作させることで 3 次元の運動を可能にしている。

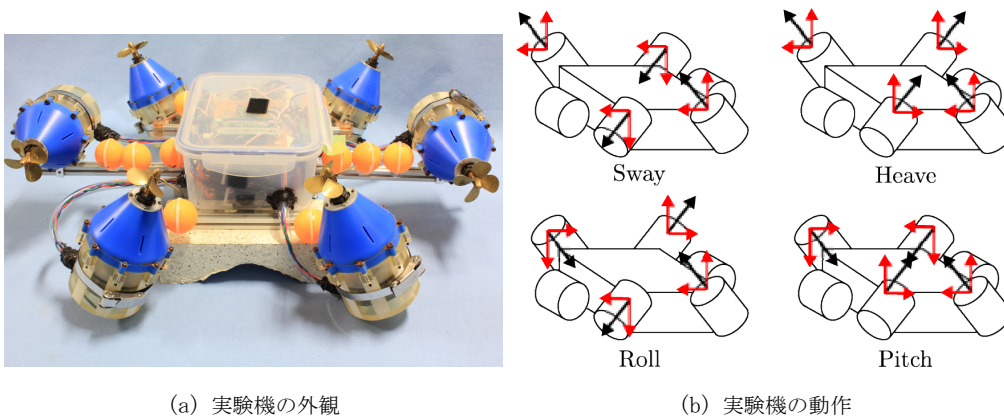


図 3.1-122 小型水中ロボット実験機

Roll 及び Pitch 方向の回転運動について、ESO を用いた外乱補償制御を適用した結果、与えられた外乱の推定が適切に行われており、外乱補償が可能であることを確認した。

## (5) 遠隔水中活動機器のための画像インターフェースの開発 (H26-H30)

### ① 研究概要

地上ロボットでよく使われるレーザーによる距離計測や赤外線による距離計測は、水中では散乱して使えないため、水中活動機器を遠隔操作する際に主に利用するセンサは可視カメラである。

その水中画像は我々の生活環境とは大きく異なるため、操作者がカメラ画像から奥行きを知覚することは困難である。そのためカメラ画像から3次元シーンを復元し操作者に提示することにより、操作性を高めるインターフェースの開発が求められている。

しかし、水中機器の姿勢制御はアクチュエータの特性や外乱の影響により、陸上ロボットより大きく揺れることが予想され、陸上ロボットの技術をそのまま適用するだけでは正確な3次元シーンの復元は困難である。そこで本研究開発では、水中で3次的に大きく運動するカメラ画像からの3次元シーンの復元を行うことを目的とする。

この目的に対して、我々は以下のように問題を分割し、研究開発を行った。

- (A) 小さく運動する水中画像からの3次元復元 (H26-H27)
- (B) 大きく運動する陸上画像からの3次元復元 (H28-H29)
- (C) 大きく運動する水中画像からの3次元復元 (H30)

最終年度に、水中で撮影されたカメラ画像から3次元復元が可能であることを検証した。

### ② 平成26~29年度の成果概要

#### (A) 小さく運動する水中画像からの3次元復元 (H26-H27)

平成26年度と27年度は水中画像からの3次元シーンの復元を中心課題に設定し、カメラ画像のコマ間の変位が小さな範囲で運動するカメラ画像を対象に研究開発を行った。

まず基本的な3次元復元アルゴリズムには、これまで会津大学で研究が行われてきた、自由視点TV法と呼ばれる手法を水中画像に適用し、水中画像の特徴を調査した。

自由視点TV法による3次元復元の特徴は、画像のマッチングに2次元連続動的計画法と呼ばれるアルゴリズムを用いるため多数の特徴点の対応を取ることが可能になり、密な3次元復元が可能になる。また3次元座標の計算には因子分解法を用いている。この原理を図3.1-123に示す。この手法では3次元シーンをポリゴンとして表現するため、自由に視点を動かしてシーンを観察することが可能になる。

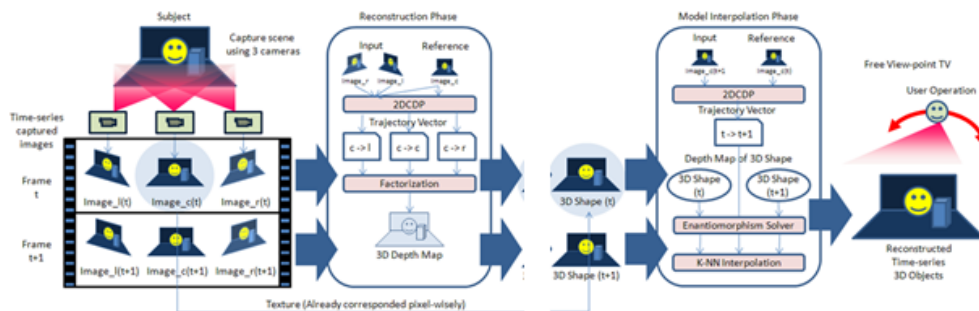


図 3.1-123 自由視点TV法による3次元復元の原理

この原理を福島大学により撮影された、実際の猪苗代湖での水中画像に適用し、3次元復元した結

果を図 3.1-124 に示す。まず、自由視点 TV 法により水中画像からでも 3 次元シーンが復元できることが確認された。次に水中画像の特徴としては、元画像には同じような色の物体（砂、石など）が多く映っているため、画像の特徴が少なく、3 次元復元の点数が少ないことが明らかになった。これは本手法に特有のものではなく、画像特徴量の本質的な課題である。これに関しては画像鮮明化といった前処理によって改善可能だと考えられる。

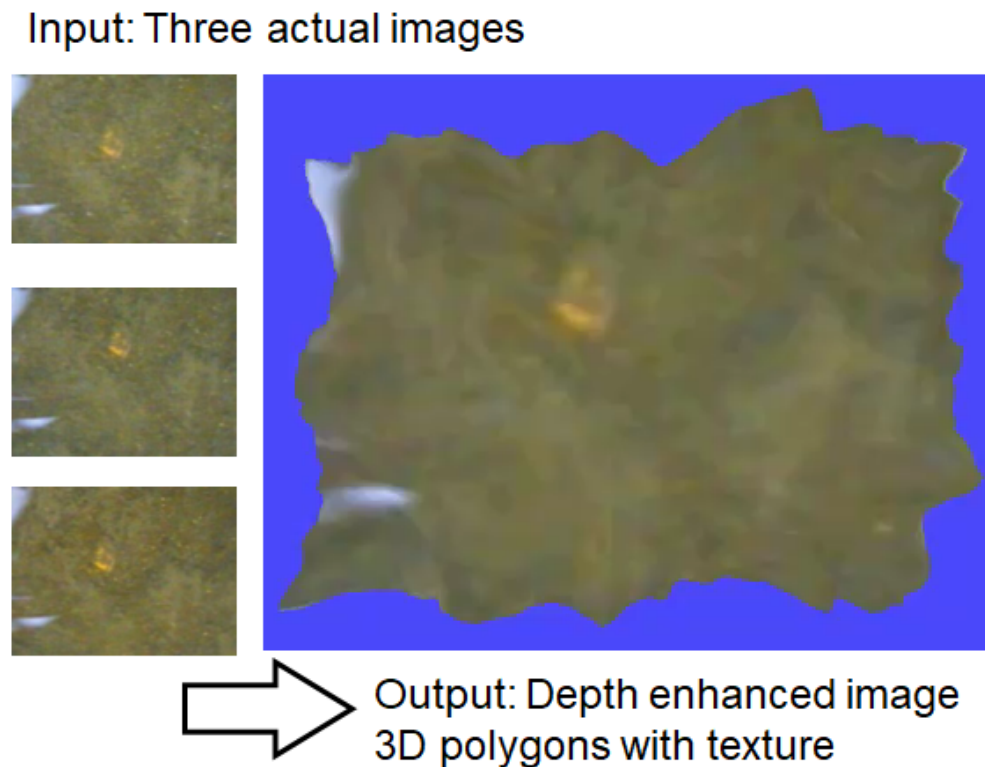


図 3.1-124 水中で撮影されたテスト画像の例と復元された 3 次元シーン

### (B) 大きく運動する陸上画像からの 3 次元復元 (H28-H29)

水中活動機器は水流などの外乱を受けると、3 次元的な位置と向きが大きく変化する。しかし、これまで開発されてきた 3 次元復元技術は陸上ロボットのために開発されたものがほとんどで、2 次元平面上で運動するカメラ画像からの 3 次元復元の事例であった。我々が必要な 3 次元的に大きく運動するカメラ画像からのシーン復元技術はまだ開発されていない。

そこで平成 28 年度と 29 年度は、水中画像に適用する前段階として、陸上で 3 次元的に運動するカメラ画像からの 3 次元シーンの復元手法の開発を行った。

まず、カメラの 3 次元運動のモデル化を行った。陸上でレールの上の台車にロープでカメラを吊り下げ、台車を動かすことにより、カメラが大きく揺れる。この時ロープの長さや固定の方法により、様々な水中での外乱を再現した。図 3.1-125 にそのモデルを示す。

このようにして得られる画像に対して 3 次元復元を行った。その手法には代表的な 3 次元復元手法である画像特徴量に SIFT を、3 次元座標計算にバンドル調整法を採用したものである。図 3.1-126 に実験装置と復元された 3 次元シーンを示す。揺れるカメラから撮影された画像は並進運動と回転運動の両者を含み、特にカメラの向きが異なるため各画像間で共通して映っている物体が少なくなり、

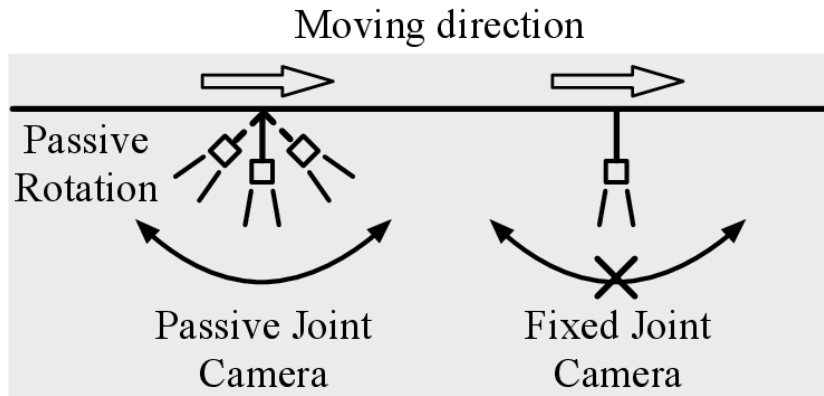


図 3.1-125 揺れるカメラ運動のモデル化

復元されるシーンの特徴点数が小さくなってしまふことが明らかになった。さらに水中画像を模擬して実験装置背景に黒い台座やブルーシートを用いたが、これが画像の特徴を減らすことになり、この理由からも 3 次元復元されるシーンの特徴点数が小さくなった。

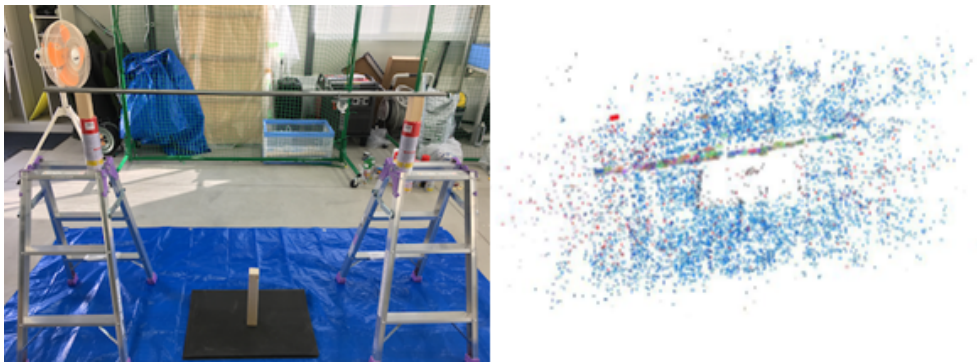


図 3.1-126 陸上での実験装置と復元された 3 次元シーン

画像の背景の特徴に関しては実画像でも少ないことが予想されるため対応が必要だが、これは画像の前処理により対応できると考えている。画像の揺れに起因するマッチング特徴点の少なさに関しては、画像の復元に使う画像を再構成することにより対応できると考えられる。例えば同じ向きの画像を集め、それらから 3 次元シーンを部分的に復元することが可能である。同様に向きに応じて部分シーンを複数作成し、それらを整合することにより大きなシーンが復元できると考えられる。これは本事業終了後の研究課題の 1 つである。

### ③ 平成 30 年度の成果

#### (C) 大きく運動する水中画像からの 3 次元復元 (H30)

平成 30 年度は 3 次元的に運動するカメラから復元するシーンを精細化するために必要なカメラの運動を調査することと、最終的な成果として実際に水中で撮影した画像を対象に 3 次元復元を行い、開発した手法の性能評価を行った。

まず平成 29 年度までの結果より、3 次元シーンの復元に用いる画像群の構成により得られるシーンの特徴点数が変化することが分かった。そこで、平成 30 年度はシミュレーションにより人工的に揺れるカメラとそこから得られる画像を再現し、様々な条件で 3 次元復元を行い、画像とシーンの関



係を調査した。図 3.1-127 にその一例を示す。これはカメラが対象部を中心として回転するような運動で画像を取得した場合である。この時最も精細な復元シーンが得られた。実画像ではこのような理想的な画像は得られない。しかし見方を変え、実画像列から前述のような画像列を再構成し、そこから 3 次元シーンを復元することにより精細なモデルを得ることが期待できる。この点は将来の課題である。

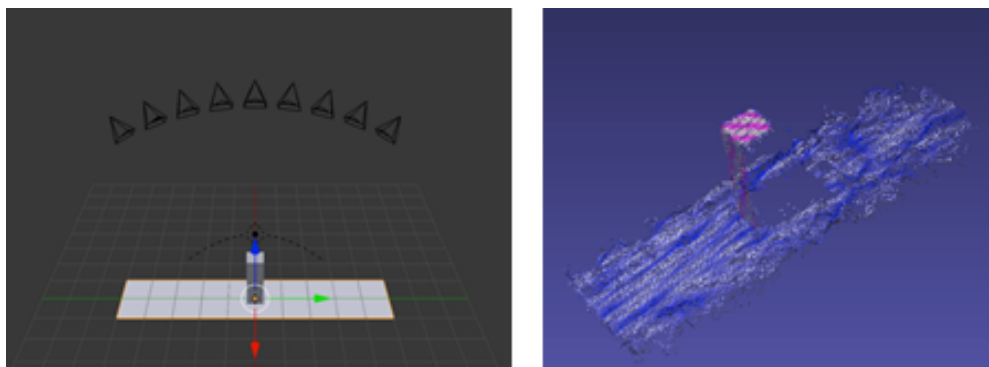


図 3.1-127 シミュレーションにより人工的に生成された 3 次的に運動するカメラ画像と復元された 3 次元シーンの例

最終的な成果として、水中画像からの 3 次元復元を行った。対象として図 3.1-128 に示す福島大学にある実験水槽で画像取得を行った。図 3.1-129 に復元されたシーンを示す。これは揺れが少ない時の結果であるが、密な 3 次元復元結果が得られることが検証された。一方、揺れが多い時は復元されるシーンの点数がこれより少なくなるが、前述のように復元に用いる画像の取捨選択で密なシーンの復元が可能になると考えられる。

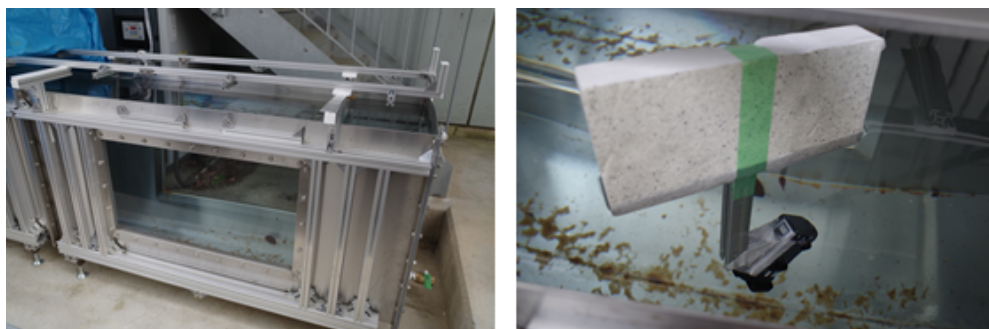


図 3.1-128 水中画像を取得する実験水槽とカメラ

## (6) 耐放射線性に優れた複合材料開発 (H26-H30)

### ① 研究概要

高放射線領域における遠隔水中活動機器の使用を想定し、高い耐放射線能力を有する軽量高強度複合材料の開発を行った。

### ② 平成 26～29 年度の成果概要

平成 26 年度は ABS 樹脂中に鉛フリーハンダ粉末を分散させた複合材料の作製と放射線透過率の測定を行った。平成 27 年度からは遮蔽効果の高い繊維強化プラスチック複合材料 (FRP) の開発を行っ

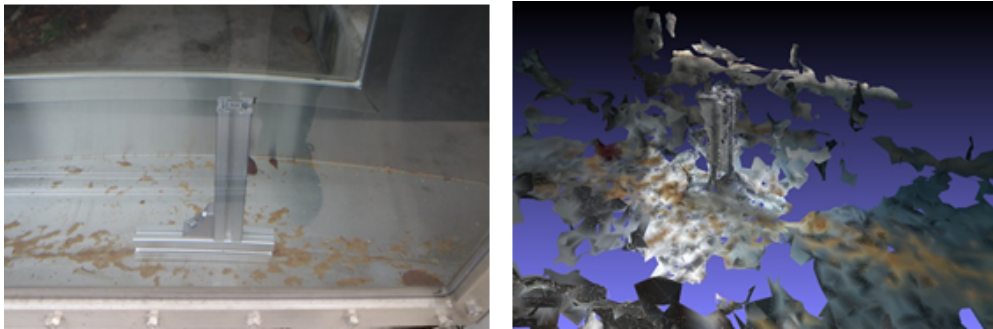


図 3.1-129 実際の対象物と復元されたシーン

た。平成 27～29 年度に開発した材料の一覧を表 3.1-10 に示した。

### ③ 平成 30 年度の成果

これまで及び平成 30 年度に作製した FRP の、繊維と添加粉末の組み合わせを表 3.1-10 に、作製した FRP の代表的な外観を図 3.1-130 にまとめて示す。

表 3.1-10 作製した主な FRP

繊維	樹脂	添加粉末
マット状ガラス繊維	ポリエステル樹脂	酸化銅 (II) (平成 27 年度) 酸化鉄 (平成 28 年度) 硫酸バリウム (平成 29 年度)
平織ガラス繊維	ポリエステル樹脂	硫酸バリウム (平成 30 年度)

作製した FRP の遮蔽効果を、 $^{137}\text{Cs}$  密封線源を用いて評価した結果、マット状ガラス繊維に酸化銅 (II) 粉末を 44.4% 添加した FRP と平織ガラス繊維に硫酸バリウム粉末を 50% 添加した FRP で、厚さ 1 mm の鉛板とほぼ同じ遮蔽効果を得ることができた。

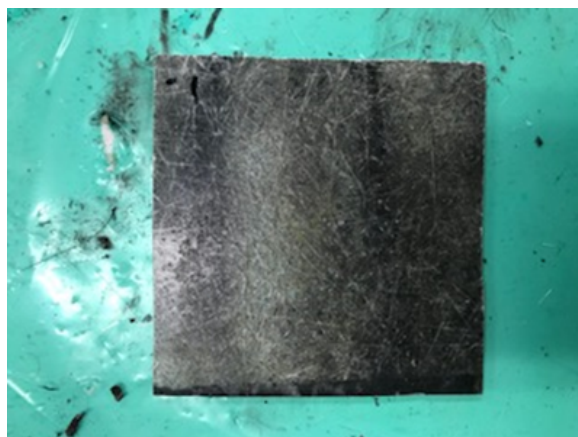
また、3 点曲げ試験の結果から、酸化銅 (II) 粉末添加 FRP では最大曲げ応力が約 150 MPa であったが、平織ガラス繊維 + 硫酸バリウム粉末 (50% 添加) FRP で最大曲げ応力は約 200 MPa であった。50% 硫酸バリウム粉末添加 FRP の 3 点曲げ試験の結果を図 3.1-131 に示す。硫酸バリウム粉末の添加によって層間強度が低下し、層間剥離が発生しやすくなり曲げ強度が低下したものと推測される。しかしながら、アルミ合金より曲げ強度が高いことから、水中ロボットの制御ボックス等で使用できる可能性があることが得られた。

本事業の 5 年間の研究成果のまとめとして、硫酸バリウム粉末を 50% 添加した FRP を、製作した制御装置ボックスと Web カメラの遮蔽材として動的照射試験を実施した。実験はアトックス技術開発センターの照射試験施設を使用し、空間線量率 4.5 Gy/h の地点で 76 時間、累積線量 342 Gy の照射を実施した。2 台の Web カメラを設置し、1 台は遮蔽材を使用し、1 台は遮蔽材を使用せずガンマ線が Web カメラに直接照射されるようにし、比較実験を行った。照射試験終了直前に得られたカメラの画像を図 3.1-132 に示す。

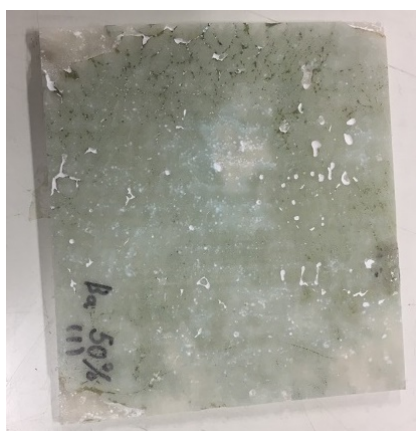
実験前に遮蔽材がなければ 200 Gy 程度で故障すると予想して設置場所を検討した。照射の経過とともに両方の画像に若干のノイズが発生したものの、照射試験終了の 342 Gy まで 2 台の Web カメラは壊れなかった。また、照射を止めるとノイズは消えて元の状態に戻った。



(a) 酸化銅 (II) 粉末 (44.4% 添加)



(b) 酸化鉄粉末 (16.6% 添加)



(c) 平織ガラス繊維+硫酸バリウム粉末  
(50% 添加)

図 3.1-130 作製した FRP の代表的な外観 (50 × 50 mm)

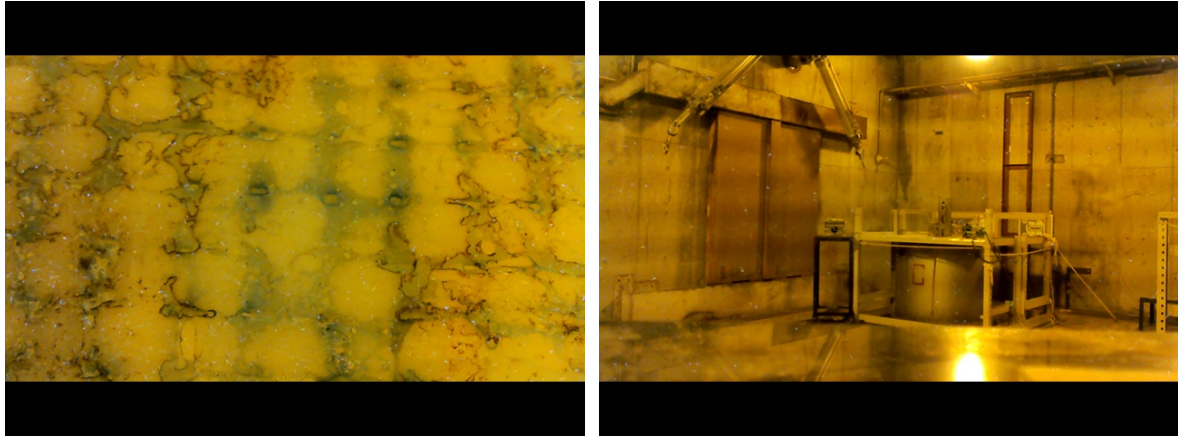


図 3.1-131 3点曲げ試験結果 (左: 硫酸バリウム粉末なし、右: 硫酸バリウム粉末添加)

## (7) 若年層人材育成 (H26-H30)

### ① 概要

原子炉廃止措置に関わる技術者の必要者数が、今後増加していくと考えられるが、原子力関連分野に進学する学生が減少していることから、若年層、特に小中学生からの継続的な原子力や廃炉・放射



(a) 遮蔽材あり

(b) 遮蔽材なし

図 3.1-132 Web カメラ照射試験の様子

線に関する人材育成が必要である。また、放射線に関する講義も入れることで放射線を正しく理解させ、ロボットとともに放射線への興味を持たせるための人材育成内容を実践的に検討した。

## ② 平成 26～29 年度の実施内容

平成 26 年度は、市販のロボット教材を使用してロボット製作に関する公開講座と放射線に関する講義と霧箱観察実習を実施し、教材やカリキュラム等の評価を実施した。公開講座で使用するテキストや競技フィールドは福島高専の 2 年生が全て製作し、講座当日の指導も全て学生が行った。10 名程度での参加者募集を行ったところ、2 週間で 41 名の応募があったため、参加者を 21 名（小学校 2 年生～中学 2 年生）とした。公開講座は、1 回目：ロボットに関する講義・プログラミング練習、2 回目：3 次元 CAD 実習・プログラミング練習、3 回目：放射線に関する講義と霧箱観察・部品の作製、4 回目：競技会を実施した。

平成 27 年度以降は、小中学生の廃炉やロボットへの興味を高めるためのロボットプログラミング講座を、年 2 回ずつ表 3.1-11 の通り実施した。初級講座、上級講座ともに製作するロボットはライトレーサとした。初級講座は小学校低学年対象であることからソースコードの入力は厳しいので、命令ブロックを並べて矢印を接続することで簡単にプログラミングできるソフトを使用した。上級講座は市販の教材である Beauto Rover を主に使用した。どちらの講座も共通して、基本的なプログラミング方法の説明から、ライトレーサプログラムの作成まで説明した後に、競技課題を与えて参加者にオリジナルのプログラムを作成させた。初級講座は市販のロボット教材を使用し、上級講座は福島高専の学生が製作したオリジナルのロボットを使用した。競技内容の検討、コースの作成からテキストの作成まで、全てを福島高専の 3 年生が中心となり実施した。

## ③ 平成 30 年度の実施内容

平成 29 年度に引き続き、2 回のプログラミング講座を実施した（表 3.1-11）。おおまかなカリキュラムは以下の通りである。

1. ロボットに関する簡単な講義または説明
2. 福島第一原子力発電所で使用されたロボットの紹介
3. 簡単なプログラム作成



表 3.1-11 平成 27 年度以降に実施したロボットプログラミング講座

平成 27 年度	<ul style="list-style-type: none"> <li>－ 「自動で動くロボットを作ろう！ (初級講座)」 小学 2～4 年生対象 (参加者 10 名)</li> <li>－ 「自動で動くロボットを作ろう！ (上級講座)」 小学 5 年生～中学 3 年生対象 (参加者 13 名)</li> </ul>
平成 28 年度	<ul style="list-style-type: none"> <li>－ 「自動で動くロボットを作ろう！ (初級講座)」 小学 2～4 年生対象 (参加者 12 名)</li> <li>－ 「自動で動くロボットを作ろう！ (上級講座)」 小学 5 年生～中学 3 年生対象 (参加者 12 名)</li> </ul>
平成 29 年度	<ul style="list-style-type: none"> <li>－ 広野中学生を対象としたロボットプログラミング講座 (参加者 8 名)</li> <li>－ 小高産業技術高校 1 年生を対象としたロボットプログラミング講座 (参加者 20 名)</li> </ul>
平成 30 年度	<ul style="list-style-type: none"> <li>－ 小中学生対象ロボットプログラミング講座 (参加者 10 名)</li> <li>－ 小高産業技術高校生及び平工業高校生を対象としたロボットプログラミング講座 (参加者 8 名)</li> </ul>

#### 4. ライントレースプログラム作成

#### 5. まとめ

プログラミング実習の前にロボットに関する簡単な講義や説明を行い、工業的なロボットの定義や市販されているロボットの紹介とともに福島第一原子力発電所廃炉作業で使用された、日立 GE の PMORPH や東芝の水中遊泳ロボット (ミニマンボウ) などの紹介を行った。その後、プログラミング方法について説明し、まずは自由にロボットを動かすプログラムを作成させた (図 3.1-133、図 3.1-134)。プログラムによってロボットが動くことを理解した後は、ラインレース用のプログラムを作成させた。最後に実施した、小高産業技術高校生及び平工業高校生を対象としたロボットプログラミング講座では最後に動画から 3 次元形状を復元する SFM 技術の紹介も行った (図 3.1-135)。



図 3.1-133 使用した教材

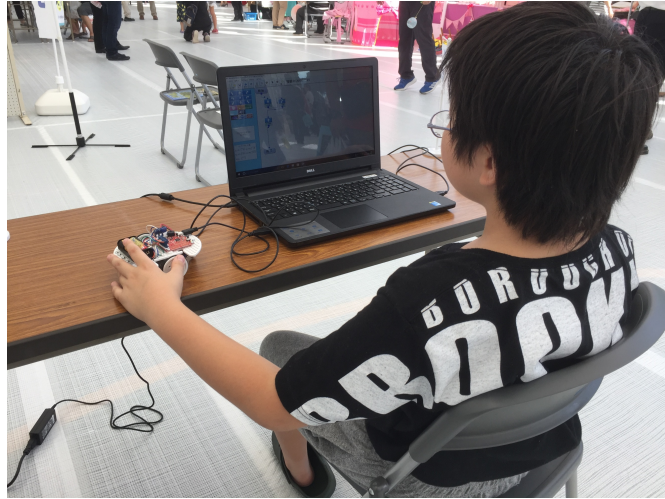


図 3.1-134 プログラム作成中の様子

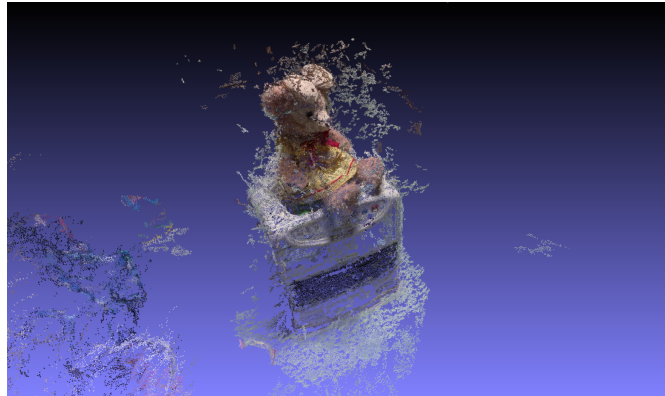


図 3.1-135 SfM 技術の紹介に用いた点群データ

いずれの講座においても参加者は簡単なプログラミングでロボットが動くことに驚くのと同時にとても強い興味を示した。また、廃炉については、小学生はあまり関心を示さなかったが、中学生ではロボット技術で廃炉に関わりたい、廃炉ロボットコンテストに参加したいという希望を持っている参加者も数名いた。

小中高校生を対象にロボットプログラミング講座を実施し、廃炉で使われている技術やロボットを紹介することで、若年層へ廃炉に関する興味を高めることに貢献できたと考えている。

#### 参考文献

- [1] 安沢孝太, 佐々木裕之, 鄭聖熹, 高橋隆行, “低バックラッシュ立体カム機構を用いたロボットハンドの開発～軽量ロボットハンドの試作と関節機構の評価～”, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 7, pp. 889-896, 2010.
- [2] 伊藤究, 伏見雅英, 秦安延, 秦豪一, 高橋隆行, “立体カム機構を用いた対向3指小型ピンチングデバイスの設計と評価”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 1P2-010, 2015.
- [3] 安西香保里, 高橋隆行, “高精度立体カム機構を用いた平行開閉型小型チャックの開発～カ



- ム面の設計及び基礎的評価～”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 2P2-08b4, 2016.
- [4] 渡邊悠太, カニエテ ルイス, 高橋隆行, “原子炉内部調査用ロボットの開発 ～巻き取り可能なサンプリングマニピレータ機構の試作～”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 2P1-R08, 2017.
- [5] 瀬戸徳文, Canete Luis, 高橋隆行, “巻取可能サンプリングアーム用 低融点合金を用いた関節ロック機構の提案”, 次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス (NDEC-3), 2018.
- [6] 神尾終太, 高橋隆行, “湖沼調査用モジュール構造型小型水中ロボットの開発～拡張状態オブザーバを用いた位置及び姿勢制御の検討～”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 2A2-D08, 2015.
- [7] バグスマハワン, 羅正華, 韓京清, 中嶋新一, “拡張状態オブザーバによるロボットの高速・高精度運動制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No 2, pp.244-251, 2000.
- [8] Luis Canete, Takayuki Takahashi, “Development of a Single Controller for the Compensation of Several Types of Disturbances During Task Execution of a Wheeled Inverted Pendulum Assistant Robot,” Proceedings of the 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2414-2420, 2014.
- [9] Thor I. Fossen, Guidance and Control of Ocean Vehicles, pp.5-56, Wiley, 1994.

### 3.1.3. 遠隔マニピュレーションシステムの設計・評価に関する基盤的研究と柔軟なシステム構築が可能な人材育成（再委託先：神戸大学）

#### (1) 遠隔マニピュレーションシステムの設計・評価に関する基盤的研究

本研究プロジェクトでこれまでの研究で得られた遠隔マニピュレーションの基盤技術（操縦の負担軽減手法を含む）を活かした高度な遠隔操縦プラットフォームを構築し、さらにはこれまでの研究で得られた遠隔マニピュレーションシステムの設計指針と性能評価手法をまとめることで、廃炉措置において必要となる遠隔操縦システムの開発、評価に寄与した。また神戸大学に構築したプラットフォームを、遠隔マニピュレーション技能認証拠点として今後も継続使用できるように整備することを検討した。人材育成では、国内の廃炉措置関連施設の視察等を通じた人材育成プログラムを総括する企画を行うとともに、これまで継続的に行ってきたアウトリーチ活動の企画も行った。

具体的には、動作範囲の限られたマスタアームによる遠隔操縦法についてはこれまで継続的に研究を進めてきたマスタの移動速度に依存したスケール変換法において、スケール変換パラメータの調整を容易にするユーザインタフェースを新たに開発し、実環境での評価実験によりその有効性を検証した。遠隔操縦の操作性を評価する指標としては、平成 29 年度からシステムとの「一体感」を客観的に評価する具体的手法として CCE (Crossmodal congruency effect) を検討してきたが、平成 30 年度はこの CCE が遠隔操縦システムとの「一体感」を正しく評価できるのかを検証した。

また平成 28 年度の成果とした遠隔操縦におけるマスタ・スレーブ間の接続の繰り返しに伴う手先姿勢誤差の修正法に平成 30 年度は改良を加え、実環境で実験を行って有効性を確認できた。

以上の平成 30 年度の成果を含む 5 年間の研究で得られた成果は、神戸大学の遠隔操縦プラットフォームという形で集約され、今後も遠隔マニピュレーション技能認証拠点として継続使用するために、システムの拡張性を高める検討を行った。

#### ① 平成 29 年度までの成果のまとめ

##### 1) 遠隔操縦プラットフォームの構築

平成 26 年度から平成 27 年度にかけては、その後の研究の基盤となる遠隔操縦プラットフォームの構築を進め、2 本のマニピュレータに様々な視覚センサを備え、操縦デバイスとしてジョイスティックや様々なマスタアームが接続可能なプラットフォームとした。また平成 27 年度からは、RGB-D カメラを用いた奥行き情報提示の有効性の検証を始めた [1]。

##### 2) 遠隔操縦システムとの「一体感」に着目した操作性指標の検討

平成 27 年度から「機構透明性」に代わる性能指標として「オペレータがあたかも遠隔マニピュレーションシステムを自身の体の一部であるかのように操作できる状態」、すなわち「一体感」に着目し、平成 29 年度には、「一体感」の評価には、簡便で精度の良い手法として Spence ら [15] が考案した「Crossmodal Congruency Effect (以下 CCE)」を使用することとし、CCE を用いて遠隔操縦システムに対する「一体感」を評価することができるかの検証を行った [9]。同時に、機構透明性の異なるシステム間での CCE 評価を比較することで、操作性指標としての妥当性を検証した。

##### 3) 動作範囲の限られたマスタ操縦装置による操作性向上の検討

平成 27 年度から、動作範囲の限られたマスタ操縦装置による遠隔操縦システムの操作性の向上の検討を開始し [3]、平成 28 年度にはマスタの速度に応じてマスタからスレーブへのスケール変換係

数を直接与える方法を提案し [5]、平成 29 年度は提案手法のスケール変換関数のパラメータを操縦者が自身の好みに合わせて調整可能にする機能を導入した [8]。また平成 28 年度まではシミュレーション実験によって検証してきたが、平成 29 年度より実機による検証実験を行った。

#### 4) インデキシング操作中のマスタアームの手先姿勢拘束による操作性向上

平成 28 年度に、インデキシング操作でマスタとスレーブ間の接続を切った際に、マスタアームの姿勢がスレーブアームの姿勢とずれてしまう問題に対し、マスタアームに内蔵されている反力提示用のモータを使って、インデキシング操作中のマスタアームの姿勢をスレーブアームの姿勢に一致するように制御する手法を検討した [4]。手法の検証実験はスレーブ側をシミュレータで行った。

#### 5) 遠隔操縦における一体感実現のための視野提示許容誤差の推定

平成 28 年度に、遠隔操作を行う人間が許容できる誤差及び一体感を得られる範囲の境界線の明確化を目的とし、視覚のみと視覚及び頭部感覚を用いた場合について、それぞれ仮想空間における人間の主観的等価点及び弁別閾の測定を行った [6]。平成 29 年度は、弁別閾の測定方法として調整法よりも測定精度が最も高いとされている恒常法に変更して測定を行った [10]。その結果、視覚のみの場合と比較して頭部感覚を用いると弁別の誤差許容範囲も大きくなることが分かり、さらに頭部の移動量が大きいほど感覚融合 [14] による視覚の許容範囲が広がることが示された。本研究の結果は、与えられたスレーブカメラシステムの誤差が許容誤差内かどうかを判定する性能評価として用いることが可能である。

### ② 平成 30 年度の成果

#### 1) 動作範囲に制限のあるマスタアームによる直感的遠隔操縦法の検討

廃炉作業現場で想定される狭隘な作業スペースに適用するため、導入される遠隔操縦システムには動作範囲が限定されるコンパクトなマスタアームの使用が考えられる。このような動作範囲が限定されるマスタによって広い動作範囲を持つスレーブを操縦するためには通常「インデキシング」操作を行うが、マスタとスレーブの接続を一時的に切断するため、操作が煩雑でスレーブの動作も不連続になる。また、マスタをジョイスティックのような速度指令デバイスとし、スレーブを速度制御で動作させる方法もあるが、細かな位置合わせが必要な精密な作業には不向きである。この他にはマスタ・スレーブ間で位置のスケール変換を行う手法も考えられるが、狭い動作範囲のマスタで広い動作範囲を全て操縦可能にすると位置分解能が低下し、細かな操作が困難になるため、状況に応じてスケール変換率を調整する必要が生じ操作が煩雑になる。これらの対処法で生じる問題は、いずれもマスタ・スレーブ方式の長所である直感性・操作性を損なう。

そこで本研究ではマスタの操縦速度を基にマスタ・スレーブ間のスケール変換を行う手法を提案してきた。この手法では制御モードの切り替えや明示的なスケール変換操作を行う必要なく、操作中のマスタ操縦速度によって自動的に位置のスケール変換が行われるため、広い動作範囲で連続的かつ直感的にスレーブの操縦が可能になると期待できる。平成 30 年度は、これまでの検証実験で問題となっていた「提案手法のパラメータ調整が困難」という点を解決するために、図 3.1-136 に示すような新たなパラメータ調整ユーザインタフェース (User Interface; UI) の開発を行った。この UI では、操縦者がスケール変換関数のグラフとマスタ操縦速度を視覚的に把握することで容易にパラメータ調整ができる。

提案手法の有効性を実機実験により検証した。実験装置は、動作範囲に制限のあるマスタとして

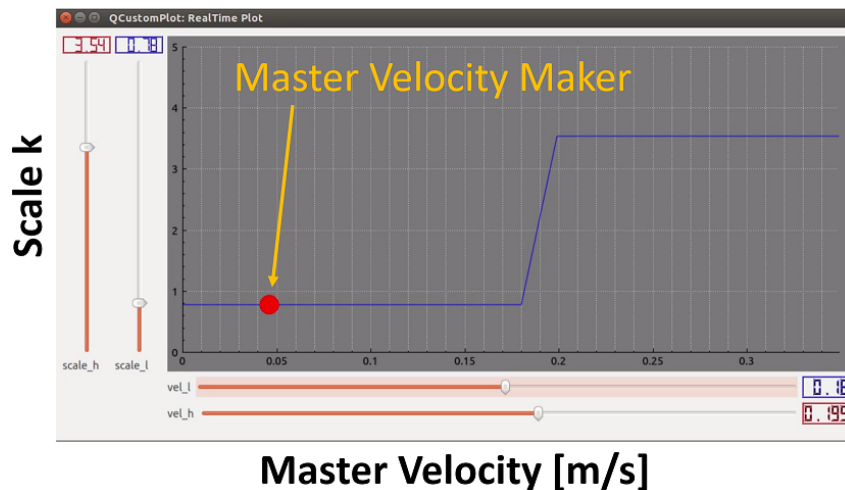


図 3. 1-136 新たに開発したパラメータ調整用ユーザインタフェース

これまでの実験でも使用していた東京エレクトロニクスシステムズ株式会社製ロボット操縦装置「TZZ2001B」を使用し、スレーブには三菱重工業株式会社製汎用 7 軸ロボットアーム「PA10」を使用した。マスタアームのグリップ部にはインデキシングや制御モード・スケール倍率を切り替えるためのスイッチを取り付ける改造を行っている。また、スレーブアームの手先には Optoforce 社製 6 軸力覚センサ「HEX-70-XE」を導入しており、マスタへの力覚フィードバックを実装している。

操縦者に提示する映像は 4K ディスプレイの画面を 4 分割し、それぞれに手先カメラ映像、俯瞰カメラ映像、パラメータ調整 UI、ロボットの姿勢を確認するためのシミュレータ画面を配置した。構築した遠隔操縦席の様子を図 3. 1-137 に示している。

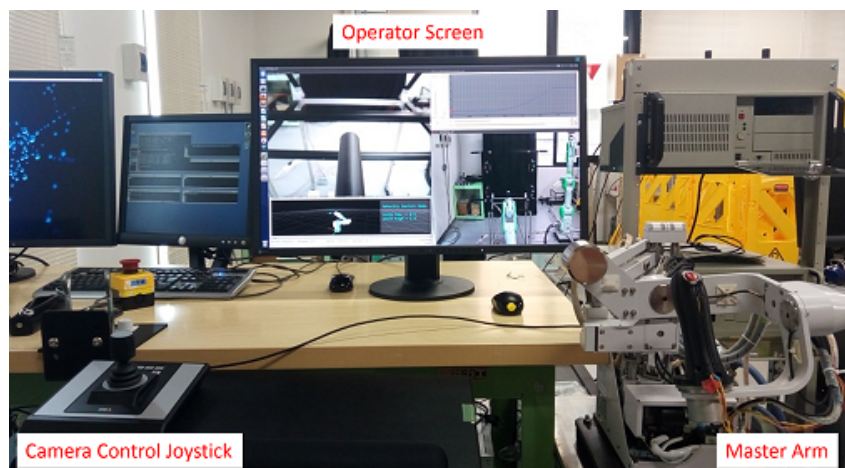


図 3. 1-137 構築した遠隔操縦プラットフォーム操縦席

今回の検証実験では離れた位置に設置した図 3. 1-138 に示すような押しボタンスイッチを連続的に押す操作をタスクに設定した。今回比較を行ったのは手法 1：位置制御、手法 2：位置制御と速度制御の制御モード切り替え、手法 3：スイッチによる位置スケール 2 段階切り替え、手法 4：マスタ操縦速度による位置スケール変換（提案手法）の 4 手法である。なお、全ての手法にパラメータ調整を導入しており、パラメータ調整は実験前のタスク練習時間に被験者が納得するまで行い、実験中はパラメータを固定した。

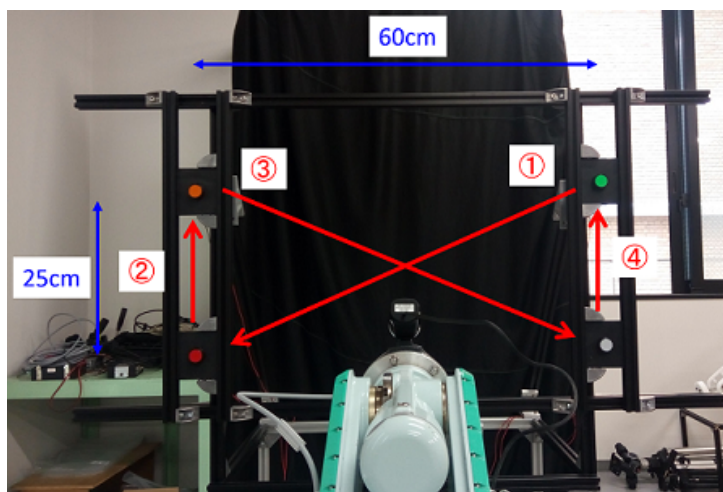


図 3.1-138 タスク用ターゲット概観とスイッチ押下順

タスク完了時間の結果を図 3.1-139 に示す。棒グラフのデータは各被験者の 3 回のタスク完了時間の平均値を、エラーバーは標準偏差を表している。3 名中 2 名の被験者で単一スケールの位置制御に対して提案手法に有意水準 5% で有意差を確認した。また、これまでの実験結果と同様に位置制御と速度制御を組み合わせる手法、スイッチにより位置スケールを切り替える手法に対してはほとんど有意差を確認できず、同等の性能という結果になった。図中の◎、○、△、×は被験者アンケートによる「操作しやすかった手法」の順番を表しており、アンケート結果から同等の結果であっても被験者によって好み異なることが確認された。

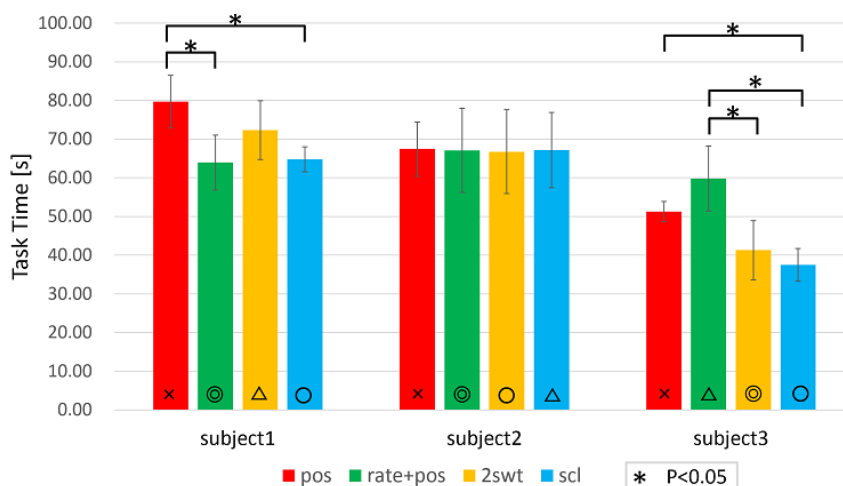


図 3.1-139 各手法でのタスク完了時間

図 3.1-140 は単一スケールの位置制御と提案手法の 2 手法について、被験者がタスク中にマスタを動かした距離をその操縦速度ごとにヒストグラム化したものである (図 3.1-140(a) が Subject2、図 3.1-140(b) が Subject3)。また、重ねて示されている緑色の折れ線グラフは各被験者が調整を行ったスケール変換関数を表している。提案手法に有意差が確認された Subject3 のグラフ (図 3.1-140(b)) では、位置制御に比べ提案手法の方が、全体的にマスタ移動距離が低減されていることが分かる。タスク中のマスタの総操縦距離が 3.47 m から 2.68 m に減少したことからスケール変換の効果を確認できた。対して有意差が確認されなかった Subject2 のグラフ (図 3.1-140(a)) で

は移動距離の低減は確認できず、低速度領域ではむしろ増加していることが分かる。このことからパラメータ調整が適切でなく、スケール変換が効果的に行われなかった可能性がある。

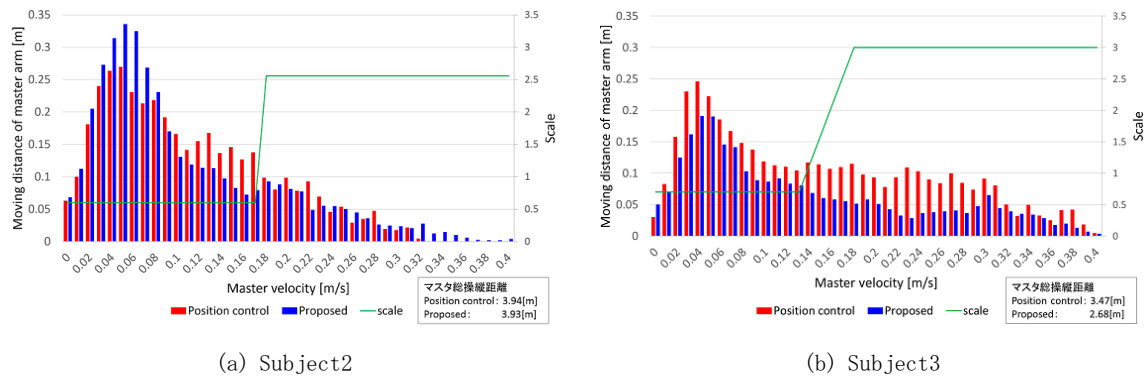


図 3.1-140 マスタ移動距離の操縦速度ごとのヒストグラム

今回新たに開発した UI はパラメータ調整に非常に有効という被験者アンケート結果を得たが、経験のない操縦者にパラメータ調整を全て任せることは困難であったと考えられる。今回の検証実験では、全ての被験者の位置制御におけるマスタ操縦速度-移動距離ヒストグラムグラフで、低速度領域に精密な操作に使用したと考えられるピークが確認され、このピーク付近の速度ではスケールダウンを行うことが望ましいと考えられる。また使用している速度領域の幅などから、その操縦者にとって適するスケールアップ領域も推定できると考えられる。以上のことからマスタ操縦速度-移動距離のヒストグラムデータを基にすることで、操縦者の特性を考慮して提案手法のパラメータ調整をある程度自動化できる可能性があると考えている。

## 2) 遠隔操縦システムとの「一体感」に着目した操作性指標の検討

マスタ・スレーブ方式は、遠隔操縦方法の中でも直感性に優れた手法であると言われている。マスタ・スレーブ方式の操作性の指標としてこれまで「機構透明性」が挙げられており、操縦者と遠隔環境との間に介在する機構の動特性をなるべくキャンセルするよう制御することで、遠隔地の作業対象物の直接操作に近づくことが理想とされていた。ただし、遠隔操縦を行う際には操縦者がシステムを自分の身体の一部のように扱えていれば十分であり、機構透明性は要求条件としては厳しすぎると言える。

そこで本研究では機構透明性を含むさらに大きな操作性の指標として、遠隔操縦システムとの「一体感」に着目し、「一体感」の評価法として簡便で精度の良い Spence らが考案した「Crossmodal Congruency Effect (以下 CCE)」を検討してきた。

遠隔操縦ロボットに対する CCE は以下のような方法で評価される。被験者の右手の親指を下、人差し指を上にした状態で、触覚刺激(振動モータ)が上下の指いずれかに提示される。被験者はできるだけ早く、正確に触覚刺激が上下どちらに与えられたかを左手のボタンで回答する。この時、ほぼ同時に(正確には視覚の反応時間を考慮して 100 ms 早く)視覚刺激(LED)もロボットハンド 4 指のいずれかに提示される。触覚刺激が与えられた指とは異なる指に視覚刺激が与えられた場合、視覚刺激が触覚刺激弁別に干渉し、反応時間の増加、エラー率の上昇などが見られる。この時、視覚刺激の位置(上下)と触覚刺激の位置(上下)が異なる時の反応時間から同一の時の反応時間を引いた値を CCE とする。この触覚刺激に対する視覚刺激の干渉は、触覚刺激と同じ側の手に与えられた視覚刺激が強く引き起こす。よってこの課題によって得られた CCE が大きいほど、視覚刺激が提示される



対象物体が自己身体の一部として認識されていると定量的に評価できる。

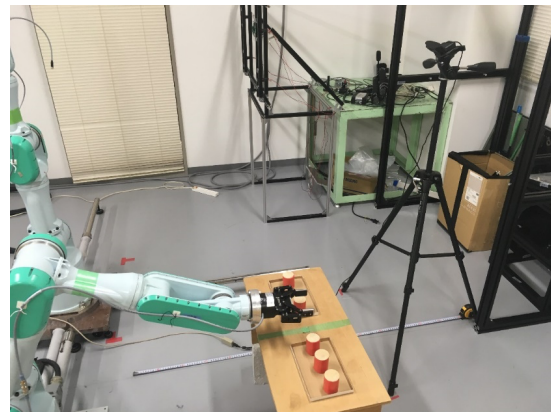
平成 30 年度は、この CCE を用いて評価した遠隔操縦システムとの「一体感」が操作性指標として妥当であるかを検証した。具体的には操作性に影響する以下の要素が異なるシステム間で CCE の比較を行った [11-13]。

1. 操作に必要な力（操作感が軽い／重い）
2. カメラ向き（正面向き／対面向き）

実験装置には図 3. 1-141 に示すような異構造マスタ・スレーブ方式遠隔操縦システムを使用した。スレーブアームとして使用するロボットは三菱重工業株式会社製汎用 7 軸ロボットアーム「PA10」、マスタアームには東京エレクトロニクスシステムズ株式会社製ロボット操縦装置「TZZ2001B」を使用した。PA10 の手先に取り付けるロボットハンドには ROBOTIQ 社製「Adaptive Robot Gripper 2-Finger-85」を使用した。このロボットハンドを動かすための入力デバイスとして、ROBOTIS 社製サーボモータ「Dynamixel シリーズ」（エンコーダのみ使用）を搭載したグリップを設計、製作し図 3. 1-142 のようにマスタアームハンドルの上に取り付けた。遠隔環境の視覚情報はフィールド上に設置した USB カメラから取得した。これらマスタ・スレーブシステムの制御系は ROS（Robot Operating System）上で構築されている。



(a) マスタ側概観



(b) スレーブ側概観

図 3. 1-141 実験に使用したマスタ・スレーブシステム

操作力が異なる実験では、マスタアームからのアシストトルクを最適化したシステムを「System L (Light)」、System L からアシストトルクを半分にしたシステムを「System H (Heavy)」とした。カメラ向きが異なる実験では、フィールドを図 3. 1-143(a) のように確認できるシステムを「System N (Natural)」、図 3. 1-143(b) のように確認できるシステムを「System O (Opposite)」とした。システムごとの実験手順は以下の通りである。

- STEP 1 遠隔操縦システムに対する CCE 評価を行う。
- STEP 2 操作に慣れてもらうための遠隔操縦タスクを行う。
- STEP 3 再度 CCE 評価を行う。

CCE 評価は右側にスレーブアーム、左側に比較用の固定アームを表示させて行った。各ロボットハンドの指先に LED、被験者の右手に振動モータを装着して評価を行う。遠隔操縦タスクは図 3. 1-143

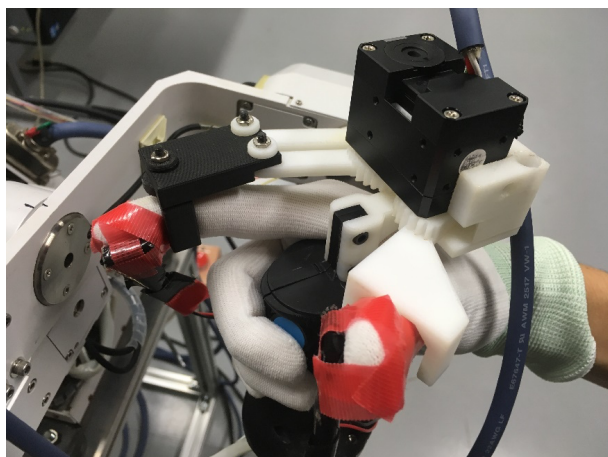
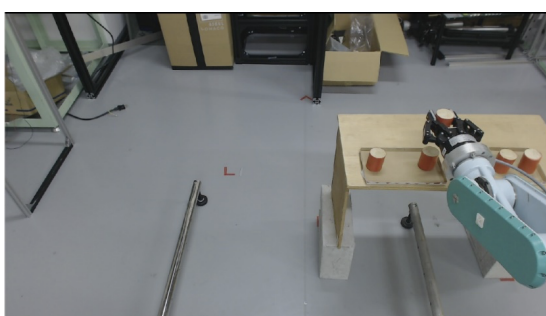
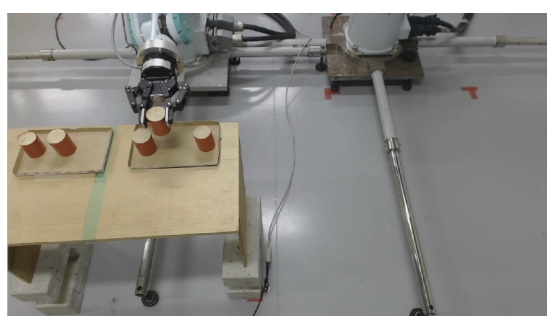


図 3.1-142 マスタアームハンドル部分



(a) 通常画面表示 (System Natural)



(b) 対向画面表示 (System Opposite)

図 3.1-143 2種類のカメラ配置

に示すように、円柱型ターゲットを把持、移動させるタスクを行ってもらい、1セット5分間で3セット行い、移動できたターゲット個数を記録した。

操作力が異なるシステム間比較での CCE 評価のグラフを図 3.1-144 に、タスク達成度として把持移動できたターゲットの個数のグラフを図 3.1-145 に示す。またカメラ向きが異なるシステム間比較での CCE 評価のグラフを図 3.1-146 に、その場合のタスク達成度のグラフを図 3.1-147 に示す。図 3.1-144、図 3.1-146 には全被験者を平均した CCE の値と各条件でのスレーブアームと固定アームに対する CCE の値の差を示してある。

図 3.1-144 より、システム H では固定アームとスレーブアーム間で CCE に明確な差が出ている。また図 3.1-145 より、システム H の方がシステム L よりタスクの成績が良い。同様に、図 3.1-146 でも固定アームとスレーブアーム間で CCE に明確な差が出ており、図 3.1-147 よりシステム N の方がシステム 0 よりタスク成績が良い。このことから、固定アームとスレーブアーム間の CCE 差の明確さ (p 値) から見た「一体感」と、タスク成績の結果は整合していると言え、CCE の操作性指標としての妥当性が示唆された。

またタスク前後での CCE の変化を見ると、図 3.1-144 よりシステム H ではシステム L ほど固定アームとスレーブアーム間での CCE 差に大きな上昇傾向は見られなかった。一方、図 3.1-145 でタスクを通じた習熟度合いを見ると、システム H はシステム L と比較して習熟スピードが遅い。同様に図 3.1-146 よりシステム N の CCE 差は上昇傾向であったが、システム 0 では下降傾向であった。こ

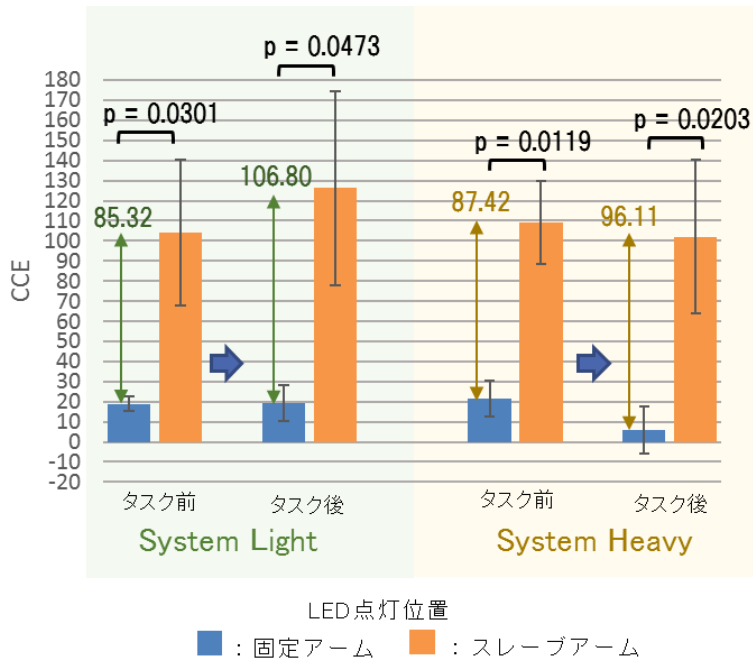


図 3.1-144 操作力の異なるマスタアームでの CCE 評価

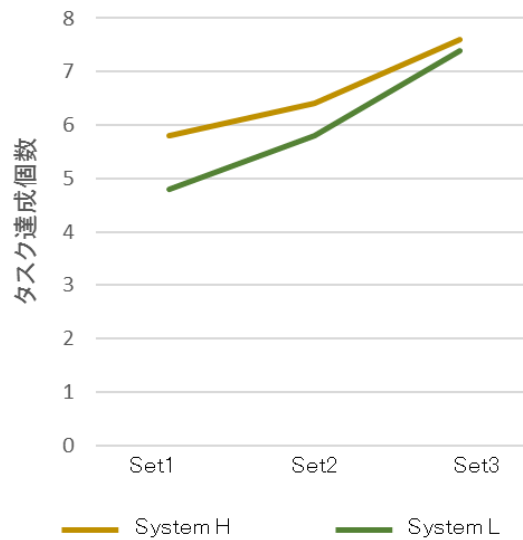
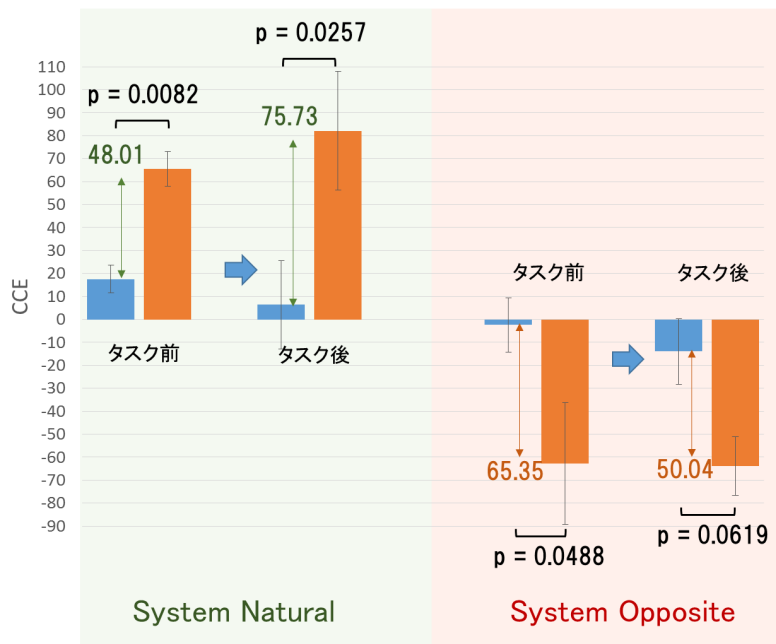


図 3.1-145 操作力の異なるマスタアームでのタスク達成度

の時タスクの習熟度合いは、図 3.1-147 よりシステム N はシステム 0 と比較して習熟スピードが速い。これらの結果は、CCE が操縦者の習熟度評価に利用できる可能性があることを示している。

### 3) 遠隔操縦におけるマスタ・スレーブ間の接続の繰り返しに伴う手先姿勢誤差の修正法の提案と評価

廃炉作業現場では作業スペースも狭隘であることが考えられるため、遠隔操縦においても動作範囲の限られたコンパクトなマスタアームの使用が考えられる。このようなマスタアームによって広い動作範囲を持つスレーブアームを操縦するためにはインデキシングと呼ばれる操作を行う。インデキシングとは、マスタアームが動作範囲の限界まで至った時にマスタアームに取り付けたスイッチなどを



LED点灯位置  
 ■ : 固定アーム    ■ : スレーブアーム

図 3.1-146 異なるカメラ配置での CCE 評価

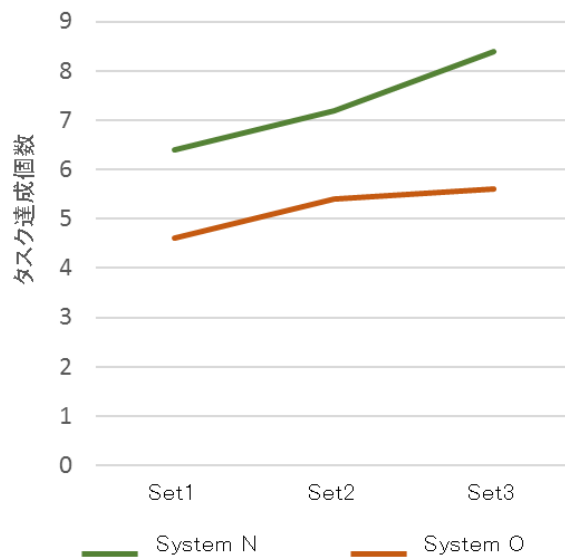


図 3.1-147 異なるカメラ配置でのタスク達成度

用いてマスタとスレーブ間の接続を切断し、マスタアームを動作範囲の余裕のある位置まで戻してから接続を再開し、スレーブアームに加算的に指令を与える操作法である。ただし、マスタとスレーブの接続が切断されている間はマスタの手先位置・姿勢は自由に変更できるため、切断と接続を繰り返すことでマスタとスレーブの手先姿勢に誤差が累積してしまう。この誤差が大きくなると、マスタ・スレーブの長所である直感的操作性を損なう恐れがある。

この問題に対し平成 28 年度に、マスタアームに搭載されているバイラテラル制御用アクチュエー

タを利用して、インデキシング操作中のマスターアームの手先姿勢をスレーブアームの手先姿勢に拘束しておく手法を提案し有効性を検討した [4]。シミュレータを用いた実験によりその有効性は示されたが、実機における有効性が未検証であった。また接続切断時に手先姿勢に大きな誤差がある場合、マスタ手先に急激な姿勢誤差修正トルクが発生してしまう問題があった。また、非接続時に完全に姿勢誤差を修正できず、大きな姿勢誤差を残したまま再接続してしまい、それ以上姿勢誤差が修正されないという問題もあった。

そこで平成 30 年度は、平成 28 年度の成果に改良を加え、上記問題を解決する新たな手法を提案する。まず、急激なトルクが発生する問題に対しては、姿勢誤差を修正するトルク指令値を一次遅れ要素でフィルタリングし、急激な変化を抑制することにより対処した。また、再接続時に大きな誤差が残る問題については、接続中においてもオペレータのスレーブへの指令に悪影響を及ぼさないようにするために、オペレータが手先姿勢誤差を修正する方向にマスターアームを回転させた場合に限りその指令の一部を修正に利用することとした。以上の修正法を加味した手法の有効性を実機実験により検証した。

実験装置として、マスターアームには図 3. 1-148 に示す HAPTION 社製力覚フィードバックデバイス「VIRTUOSE 6D35-45」を使用し、スレーブアームには三菱重工業株式会社製汎用 7 軸ロボットアーム「PA10」を使用した。力覚フィードバックのためスレーブのエフェクタ部分には Optoforce 社製 6 軸力覚センサ「HEX-70-XE」を取り付けている。実験手法は接続中も切断中も制御を特に与えない従来通りの操縦手法と提案手法の制御を行う操縦手法の 2 通りで比較を行った。



図 3.1-148 マスタアーム (Haption 社製 Virtuose 6D35-45)

タスクは図 3. 1-149 に示すように 3 つの異なる傾きをした押しボタン型スイッチを時計回りに順番に押す作業とし、3 周を 1 セットとした。タスク完了時間とインデキシング操作回数を計測し、評価指標として使用した。被験者には図 3. 1-150 に示すように、俯瞰カメラと手先カメラの 2 種類のカメラ映像とシミュレータ画面を提示する。スレーブアームへの指令は基準座標系と同じ座標系で行われ、シミュレータ画面にはスレーブアームの手先座標系と基準座標系が表示されている。

被験者は 3 名であり、タスク完了時間とインデキシング操作回数の結果をそれぞれ図 3. 1-151、図 3. 1-152 に示す。各被験者とも従来手法に対し提案手法ではタスク完了時間が減少しており、提案手法によって操作性が向上していることが分かる。また、インデキシング操作回数とタスク完了時間の短縮幅を比較するとインデキシング操作回数が少ない被験者ほどこの減少幅が大きくなっている。インデキシング操作回数が多い被験者はこまめに自分自身で姿勢誤差を修正していたため、提案手法の



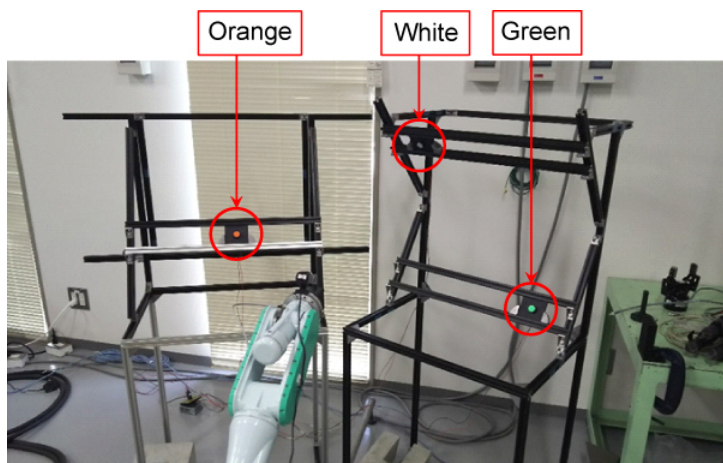


図 3.1-149 タスクに用いたスイッチの配置

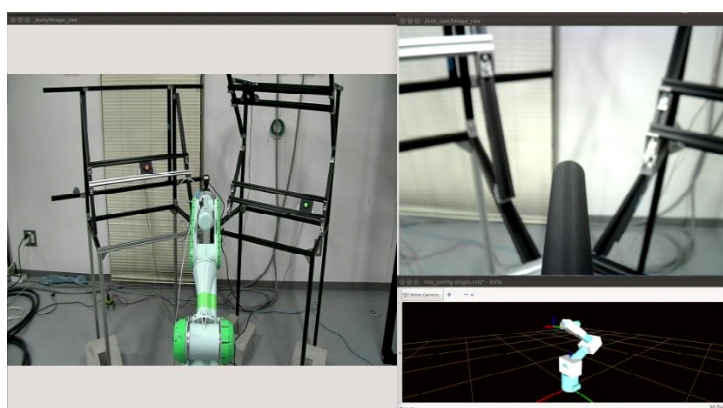


図 3.1-150 操縦席での画面表示

メリットが得られにくかったと考えられる。

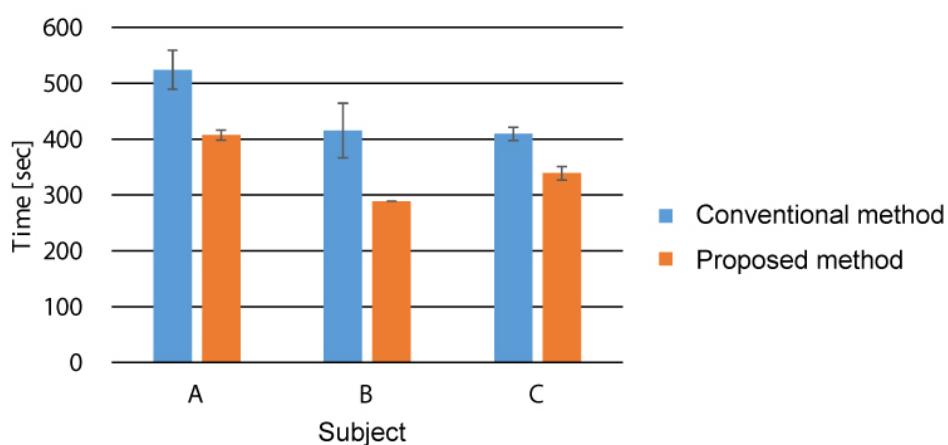


図 3.1-151 タスク完了時間の比較

今回使用したマスタアームは回転関節 6 軸のマスタアームであったが、異なる構造のマスタアームでも実験を行い、マスタアームの構造がもたらす提案手法への影響を考察していきたい。



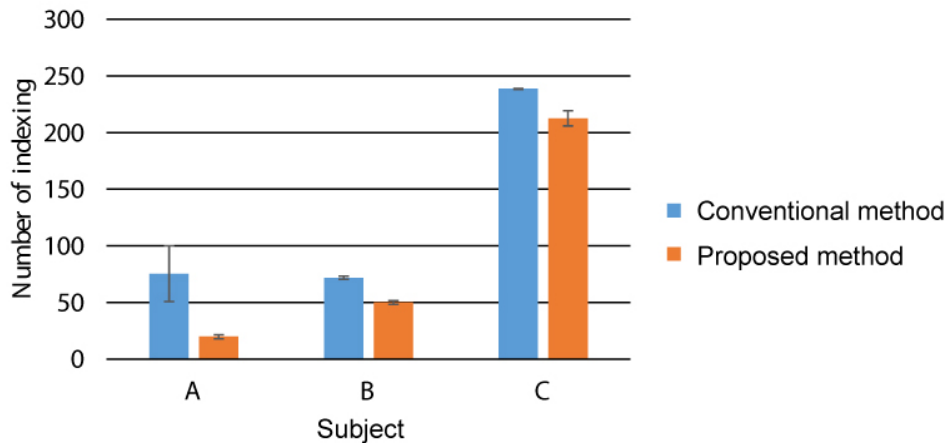


図 3. 1-152 インデキシング回数の比較

#### 4) 遠隔操縦プラットフォームを遠隔マニピュレーション技能認証拠点として継続使用するための検討

本研究では、5年間の研究期間の中で、まず研究の基盤となる遠隔操縦プラットフォームの構築を進めた。その後研究の進行とともにプラットフォームを拡充し、全ての研究成果は本研究プラットフォームを用いてなされた研究によるものである。プラットフォームの現状は図 3. 1-137、図 3. 1-141 などに見ることができる。構築したプラットフォームは、本研究期間終了後も遠隔マニピュレーション技能認証拠点として継続使用するためにはシステムの拡張性を高める必要があると考え、ROS を中核としてシステムの拡張が容易になるように配慮した。このため、図 3. 1-148 のマスタアームなど、プラットフォーム構築の当初は予定になかったマスタアームも比較的用にシステムに接続できるようになり、スレーブアーム先端に取り付けるハンドも用途に応じて容易に変更が可能となっている。

このように、本研究で構築した遠隔操縦プラットフォームは、高い拡張性を有することで、必要に応じて様々な機器の追加拡充が可能となり、継続的に遠隔マニピュレーションの研究プラットフォーム及び技能認証拠点として利用できるものとする。

#### (2) 柔軟なシステム構築が可能な人材育成

アウトリーチ活動は、平成 30 年度も引き続き第 18 回レスキューロボットコンテストにおいてブース出展を行った。

##### ① 平成 29 年度までの成果のまとめ

##### 1) セミナー企画

神戸人材育成セミナー

日時：平成 27 年 12 月 12 日（土） 13:00-17:40

場所：神戸大学統合研究拠点コンベンションホール

参加者：84 名（うち学生 48 名）

## 2) 特別講演会

講演題目： 原子力緊急時対応ロボットシステムの開発経験、1F 事故対応での教訓、今後の展望

講師： 川妻伸二 氏（日本原子力研究開発機構）

日時： 平成 27 年 2 月 28 日（水） 午後 3 時 10 分-4 時 30 分

場所： 神戸大学工学部校舎 5 W棟 301 講義室

参加学生人数： 21 名

## 3) 施設見学会

平成 26 年度： 日本原子力研究開発機構（東海村）

平成 27 年度： 原子力緊急事態支援センター（日本原子力発電株式会社敦賀総合研修センター内）（平成 28 年 2 月 29 日（月））

平成 28 年度： 檜葉遠隔技術開発センター（午前）、福島第 2 原子力発電所（午後）（平成 29 年 3 月 8 日（月））

平成 29 年度： 美浜原子力緊急事態支援センター（平成 30 年 2 月 23 日（金））

## 4) アウトリーチ活動

平成 27 年度： 第 15 回レスキューロボットコンテスト [2] の併設展示会に出展

平成 28 年度： 第 16 回レスキューロボットコンテスト [7] の併設展示会に出展

平成 29 年度： 第 17 回レスキューロボットコンテストの併設展示会に出展

## ② 平成 30 年度の成果

### 1) 施設見学会

最終年度である平成 30 年度は、国内の廃炉措置関連施設の視察等を通じた人材育成プログラムを総括する企画として JAEA の協力の下、檜葉遠隔操作技術開発センターにて講義とロボット実習を含む丸 1 日間の研修を行った。

日時： 平成 31 年 3 月 12 日（火）

場所： 檜葉遠隔技術開発センター

参加者： 教員 1 名、学生 3 名

研修内容： 研修は、まず午前中に原子力ロボットに関する講義のあと、法令とロボットの仕様に関する講義を受講した。その後、午前の 1 時間、昼休みを挟んで午後の 2 時間の計 3 時間で、ドローン、クローラロボット、水中ロボットを用いての実習をそれぞれ 1 時間ずつ行った。最後に、原子力発電に関する講義を受講し、福島第一原子力発電所内部のデジタルデータを基に構築された VR 環境をウォークスルーする VR 体験を行った。研修の様子を図 3.1-153 に示す。

参加学生の報告書によると、このような多様なロボットの操縦体験を通じてオペレータやロボット



(a) 講義



(b) クローラロボット実習



(c) 水中ロボット実習



(d) ドローン実習



(e) VR体験

図 3.1-153 檜葉遠隔技術開発センターでの研修の様子

を整備する技術者の確保の重要性やロボットの操縦訓練の重要性を実感し、災害対応ロボットの管理維持の難しさを知ったようである。また、実習を通して原子力事故に関わる対応は今後も長期的に続く課題であり、災害対応ロボットが抱える課題やロボットの管理、人材育成など様々な観点から遠隔操縦について考えなければならないことを実感したようである。以上より、今回の研修の目的は十分達せられた。

## 2) アウトリーチ活動

平成 30 年度も前年度に引き続きアウトリーチ活動の一環として、第 18 回レスキューロボットコンテストの併設展示に「福島第一原子力発電所の廃止措置のための基盤技術と人材育成」という題目

で、ブース出展を行った（図 3.1-154）。レスキューロボットコンテストは、レスキューを題材としたロボットコンテストで、高校生、高専生、大学生、社会人らがそれぞれチームを組んで出場し、平成 30 年 7 月に予選、8 月に本選競技会が行われ、多くの観客が来場した。



図 3.1-154 レスキューロボットコンテストでの展示の様子

この出展は、8 月 11 日（土）、12 日（日）のコンテスト本選競技会にあわせて開催される展示企画の中で行われ、レスキューロボットコンテストを見に来た一般の人々や小学生の子供たちに、福島第一原子力発電所の現状と廃止措置の難しさ、ロボット技術の必要性を理解してもらうことを目的としたものであった。

出展ブースでは、福島第一原子力発電所の廃止措置の概要を分かりやすく説明したポスターと当研究室で行っている関連研究の内容を一般の人々にも分かりやすく説明したポスターを展示した。あわせて研究成果を体験できるように動作範囲の限られたマスタアームによる遠隔操作のデモ機も用意した。2 日間の出展期間中、多くの人々にブースを訪れてもらい、今回の出展の目的は十分に達せられた。

## 参考文献

- [1] 佐藤有香理, 横小路泰義, 藤田淳, “RGB-D カメラで取得された環境モデルによる遠隔操作マニピュレータの作業性向上”, 第 16 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, 3G2-5, 2015.
- [2] 横小路泰義, 奥川雅之, 宗澤良臣, 山内仁, 土井智晴, 大坪義一, 杉山智章, “RRC レスキューロボットコンテスト実行委員会: 第 15 回レスキューロボットコンテストの総括”, 第 16 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, J3-1, 2015.
- [3] 片山雷太, 水谷慶, 横小路泰義, “動作範囲に制限のあるマスタアームによる直感的遠隔操作法の検討”, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 2D1-03, 2016.
- [4] 永柄孝之, 横小路泰義, “ロボットの遠隔操作におけるインデキシング操作中のマスタアームの手先姿勢拘束の有効性”, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会, 2D1-04, 2016.

- [5] 片山雷太, 水谷慶, 横小路泰義, “動作範囲に制限のあるマスタアームによる直感的遠隔操縦法の検討 第2報:スレーブアーム移動速度及び作業の違いによる有効性の検証”, 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, 1F4-5, 2016.
- [6] 田中, 横小路泰義, “遠隔操作時における一体感獲得のための対象物姿勢誤差の検知限定”, 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 1F4-3, 2016.
- [7] 横小路泰義, 奥川雅之, 宗澤良臣, 山内仁, 土井智晴, 大坪義一, 杉山智章, “RRC レスキューロボットコンテスト実行委員会: 第16回レスキューロボットコンテストの総括”, 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, 2H1-1, 2016.
- [8] 片山雷太, 横小路泰義, 田崎勇一, “動作範囲に制限のあるマスタアームによる直感的遠隔操縦法の検討 第3報:新たなマスタ・スレーブ間の速度マッピング手法についての検証”, ロボティクス・メカトロニクス講演会2017 講演論文集, 2017.
- [9] 田中謙伍, 横小路泰義, “遠隔操縦システムとの「一体感」に着目した操作性指標の検討”, 第35回日本ロボット学会学術講演会, 2G1-01, 2017.
- [10] 田中水輝, 田崎勇一, 横小路泰義, “遠隔操縦における頭部運動下での一体感実現のための視覚提示許容誤差の推定”, 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 1D5-13, 2017.
- [11] 田中謙伍, 田崎勇一, 横小路泰義, “遠隔操縦ロボットとの「一体感」に着目した操作性指標の検討 第2報:マスタアームの操作に要する力が操作性に及ぼす影響の評価”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2018 講演論文集, 1P2-M01 2018.
- [12] 田中謙伍, 田崎勇一, 横小路泰義, “遠隔操縦システムとの「一体感」に着目した操作性指標の検討”, 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 講演論文集, 2018.
- [13] 笹川雅希, 田中謙伍, 田崎勇一, 横小路泰義, “遠隔操縦システムとの「一体感」に着目した操作性指標とその妥当性の検証”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2019, 2019 (発表予定) .
- [14] Marc O. Ernst and Martin S. Banks, “Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion,” *Nature*, Vol.415, pp.429-432, 2002.
- [15] C. Spence, F. Pavani and J.Driver, “Spatial constraints on visual-tactile cross-modal distractor congruency effects,” *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, Vol.4, pp.148-169, 2004.

## 3.2. 核種分析に関する研究

### 3.2.1. ガンマ線 CT システムの開発 (H26-H30)

本研究では、分析技術と遠隔操作技術を融合させて、移動体ロボット上に核種分析を可能とする計測装置を搭載することでオンサイトにおいて迅速に核種分析を可能とするようなガンマ線 CT システムの構築をめざして、研究を進めた。平成 26 年度に実施した概念設計から始め、平成 27 年度からは、実際に設計検討を行い、平成 30 年度には装置のプロトタイプングを実施し、模擬環境中におけるガンマ線線源分布計測試験まで行った。

#### (1) ガンマ線 CT の概要

廃止措置において想定される高バックグラウンド放射線下においては、作業者の被曝を抑えて安全に作業を実施する上では、遠隔操作を駆使して作業を行う必要があるが、遠隔操作を行う機器そのものの健全性の問題もあるので、故障や不具合が生じないようにしつつ迅速に作業を行うことが求められる。そのような作業計画を立案する上でも対象となる空間と対象物における放射能分布を計測することが必要である。特に福島第一発電所事故で生じたデブリの取り出しなどでは、どこに核燃料物質がどれだけ存在しているかを押さえて作業計画を立案することが重要である。大まかな情報はミューオンなどの宇宙線を用いたラジオグラフィでも得られるが、核燃料物質はそれ自体が強力な放射線源であり、様々なアーチファクトが生じる可能性もあり、実際に作業を行う上では、直接、ガンマ線を放出する核種を計測対象として、そこから放出されるガンマ線を直接計測して、放射能分布を求めることが、信頼性が高く、対象に関する直接の情報が得られる。これを可能とするものがガンマ線 CT である。ガンマ線源を取り囲むようにガンマ線検出器を配置し、各検出器に入射したガンマ線の強度情報からガンマ線源の強度分布を画像再構成により求めて、対象空間におけるガンマ線源分布情報を得るものである。本手法自体は、医療における核医学分野で実現されており、単一ガンマ線放出核種に対しては、検出器へのガンマ線入射方向を制限して、検出器へ垂直に入射したガンマ線のみを計数するような適当なコリメータを配置した SPECT や陽電子の消滅ガンマ線を用いて対向配置またはリング状に配置した検出器中の適当な 2 個の検出器が同時に計数を示した時のみ、イベントを記録する PET などが知られている。また、最近では、エネルギー情報を高精度に記録することのできるガンマ線検出器を用い、2 層の検出器で同時にガンマ線を計測したイベントを捉え、その際のコンプトン散乱の運動学を利用して検出器へのガンマ線の入射角度を求め、これを利用して画像再構成により対象中の放射能分布を求める、コンプトンイメージングなどが開発されている。

#### (2) ガンマ線 CT と X 線 CT との比較 (H26)

先に述べた宇宙線ミューオンによる透視画像の測定は、厚い格納容器を通して内部情報を得る新規技術であるが、核燃料物質は一般的に重金属で極めて密度が高く重いので、いわゆる従来の X 線 CT を用い、重金属による X 線吸収を介して、核燃料の飛散状況を調べることも考えられる。

このような X 線 CT をガンマ線 CT と比較すると、物質の形状と密度を計測する X 線 CT の場合は、計測対象物質による X 線の減衰を見るものであり、対象とそこから得られる信号は別の種類であるために、もし、いくらでも強い X 線発生装置が使えるのであれば、ある意味では周囲に存在するバックグラウンド放射線の影響を抑え込んで計測を成立させることができる。ところが、ガンマ線 CT の場合はそれほど状況は単純ではない。



一般に廃止措置において問題となると考えられるバックグラウンド放射線としては、 $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、ガンマ線または制動放射によるX線等がある。ただし、 $\alpha$ 線や $\beta$ 線は測定対象に相当接近しない限りは、顕著な影響は及ぼさないので、第一義的には主なバックグラウンド放射線としては、ガンマ線・X線を考えれば良く、X線も対象から離れたところでは影響が小さくなるのと、ガンマ線も散乱により連続エネルギー分布を生じさせるものであるため、ここでは代表的なバックグラウンド放射線としては、ガンマ線で代表させて考えるものとする。

そこで、議論を戻すと、X線CTとは異なり、ガンマ線CTの場合は、信号とバックグラウンドがともに同じガンマ線そのものであり、信号の種類としては区別がつかない。また、放射能の強さは測定対象そのものの属性であり、X線CTのようにプローブとなるX線の強度を強くするようにして、勝手にガンマ線源の強度を高くして、バックグラウンド成分との差をつけていくような芸当を取ることができない。したがって、平成26年度に実施した概念設計という観点からは、信号とバックグラウンドのともに同種のガンマ線をどうやって区別したら良いかという点が大きな問題である。

### (3) バックグラウンドガンマ線の挙動とガンマ線CTシステム概念設計の指針 (H26)

これまでに述べてきたようにガンマ線CTにおいては、バックグラウンドガンマ線をどのように抑制するかが、重要である。測定対象とするガンマ線は、核種に応じた特定のエネルギーを有するので、そのエネルギー情報を用いてバックグラウンド成分と分離することができる。もちろんバックグラウンドガンマ線も $^{137}\text{Cs}$ など特定のエネルギーを持つガンマ線源から放射されるものであるが、周囲物質により散乱されて、連続なエネルギー成分を有するエネルギースペクトルとして検出器に入射して来るので、これとの分離ができればよい。そこで、バックグラウンド成分の影響をエネルギー情報により落とすためには、検出器の有するエネルギー分解能が重要なパラメータとなる。一方、ガンマ線CTにおいては、対象となるガンマ線は検出器に対して特定の方向から飛来するものを同定して計測することになる。バックグラウンドガンマ線は様々な方向から飛来するので、ガンマ線が検出器に入射する方向をコリメータなどを用いて制限して特定の入射方向から来るガンマ線のみを計測することにより、さらにバックグラウンドガンマ線の影響を減らすことができる。一方、同時計数を用いる、PETや、コンプトンイメージングにおいては、2個の検出器で同時に計測を行うことで大幅にバックグラウンドガンマ線を減衰させることができる。今、入射するバックグラウンドガンマ線の検出効率をそれぞれ、 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ とすると、バックグラウンドガンマ線を同時に計数してしまう効率はこれらの積である、 $\varepsilon_1 \varepsilon_2$ となる。今、対象ガンマ線とバックグラウンドガンマ線との検出効率の比を1%程度と仮定すると、同時計数を行った場合の検出効率の比はこの積となって、 $10^{-4}$ 程度まで大幅にバックグラウンドを減少させることができる。

以上のように本研究では、コリメーションの利用と同時計数を積極的に活用し、さらにエネルギー情報を利用することで、高い信号対雑音比を可能とし、 $^{137}\text{Cs}$ や $^{60}\text{Co}$ などの核種から放出される高いガンマ線バックグラウンドにおいて、対象核種の分布が求められるような検出器システムの概念設計を行った。

### (4) ガンマ線CTにおける検出器配置の検討 (H26)

SPECTやPETなど、生体を対象とした核医学におけるガンマ線CTでは、ガンマ線源を取り囲むように検出器を配置することが有効である。これは1つには、生体という限定された被写体を対象としており、既に、どの位置にどのような分布が現れるかについて前提知識を有していることが1つの理由である。一方、廃止措置の現場では、色々な汚染状況が存在しており、どこに放射能があり、どこ

から放射線が飛んで来るかについては予断を許さない状況である。そのような状況で検出器を固定して、どこかに設置すると、稠密に配置するというのであれば、検出器間の領域は感度が落ち、かつ分解能も悪くなる。検出器に入射するガンマ線の絶対量は、立体角により規定されるので、遠距離においては、距離の2乗に反比例して、対象ガンマ線の計数される割合は小さくなっていく。このような状況で、ある程度の短時間で判断を下すのは難しい。そこで、本研究においては、検出器をどこかに固定するのではなく、遠隔操作機器、ロボットに搭載して、それらが移動する過程で、徐々に情報量を上げていって、実質的に、遠隔操作機器の位置情報から、空間分布を求めることができるので、これが最も適していると考えた。特に2台のロボットの協調動作により、線源の探索と線源分布取得、またデブリなどに接近すれば、サンプリングを実施し、ある程度自律的にデータを収集する移動型のガンマ線検出器群として、対象となる線源を2台の遠隔機器により挟み込むことにより、適当な距離を保ちつつ、高い検出効率を実現することができると考えられる。また、線源が空間中のどこから飛んで来るかは分かりにくいので、コリメータを導入して、ある程度ガンマ線の飛来方向を制限し、正確性の高い情報が得られるように概念設計を行った。また、2台のロボットを用いるので、離して設置した2台の検出器間の同時計数を実施し、それにより動作環境が非常に汚染されている状況で最も有効な計画を立てて実践していくことができると思われる。ただし、ガンマ線以外の放射線からの照射や表面汚染を受けて動作不能となる可能性があるため、ロボット全体の放射線防護を行うために、表面汚染などに対応する線量計を別途装着し、そこから得られるデータも行動計画に利用することとする。

従来の核医学分野等におけるガンマ線CTでは、静的配置による個別の計数を行っていたものを、2光子を放出する核種などに限定はされるが、2台の装置により、探索追跡することにより放射能分布を求めて、いわば動的配置による計測を行うものである。このような方式で、2台のロボット間で協調動作を取りながら、追尾計測をしていくためには、質の高いデータを取り、互いに直接の高速通信を行い、行動計画と放射能画像の構成を行っていくことが望ましいと考えられる。図3.2-1は2光子を放出する線源に対して、2台の検出器群で直交する方向の位置情報を得ることができることを示す原理図である。たとえば、 $^{60}\text{Co}$ はほぼ同時に1.17 MeVと1.33 MeVの2本のガンマ線を放出するし、 $^{111}\text{In}$ は85 nsの時間を置いてから、171 keVと245 keVの2本のガンマ線を放出する。これらの同時に放出される2本のガンマ線を前面にコリメータを配置した2つの検出器群で同時に計測することにより、位置情報が求められる。別の配置としては、コンプトン散乱の運動学を利用して、入射して来るガンマ線の散乱角を計測し、検出器内で求めた散乱方向から入射ガンマ線の飛来方向について推定を行い、線源の存在位置を対向する円錐状の存在可能領域を繰り返し計測しながら重ねて求めていく方式として、図3.2-2に示すような検出器配置を取ることも考えられる。この場合においては、検出器にはタングステンなどの原子番号が大きく密度の大きな物質からなるコリメータは不要であり、ロボットなどに搭載する際に軽量化が期待できる。一方、検出器に求められる空間分解能については、エネルギーの高いガンマ線では一次電子の飛程がmm近くになるため、あまり高い空間分解能を掲げても、実際に検出器ピクセルを構成すると電子の飛程で制限されることとなる。そこで、1-2 mm程度のピクセルサイズとして、計測を行うこととする。

#### (5) ガンマ線CTシステムにおける検出器の検討 (H27)

本節では、このようなガンマ線CTシステムにおいて採用すべき検出器について、平成27年度に検討を行った結果について示す。

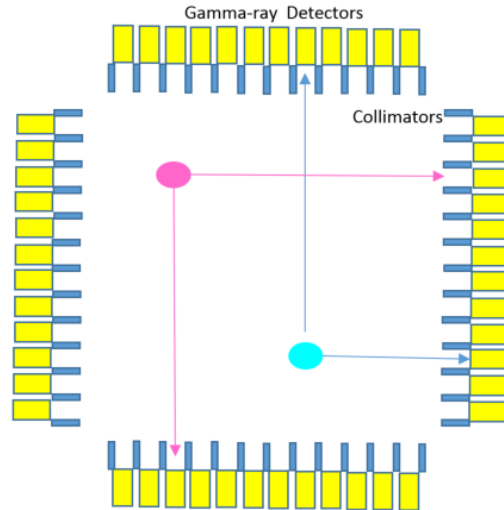


図 3.2-1 直交配置によるガンマ線源の計測例

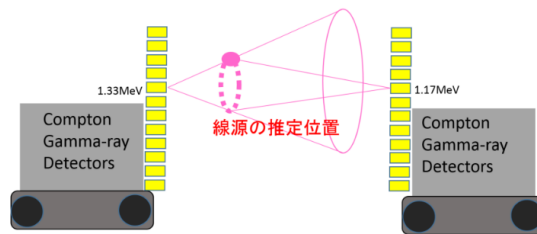


図 3.2-2 コンプトン散乱を用いた例

検出器については、先に述べたように、バックグラウンドガンマ線の抑制を行う必要がある。ガンマ線の抑制には、1) エネルギー情報の利用、2) コリメータによるガンマ線飛来方向の制限、3) 同時計数による対象イベントのみの抽出、の3つの手法を併用するものとする。3つの手法のうち、2) はガンマ線光学系の設計に関係し、3) は信号処理とモジュール間通信などの信号処理・通信回路設計に関係するが、1) については検出器そのものの特性によりほぼ決まってしまう、検出器選択に関しては、この部分の寄与が大きい。そこで、代表的な放射線検出器の特性について表 3.2-1 にまとめた。

表 3.2-1 放射線検出器のガンマ線検出特性

検出器	検出効率	時間分解能	空間分解能	エネルギー分解能	備考
気体検出器	△	○	△	△	高圧ガスが必要
シンチレーション検出器	◎	◎	○	○	
半導体検出器	○	○	○	◎	冷却が必要な場合がある
イメージングプレート	△	×	△	×	
フィルム	△	×	△	×	

表 3.2-1 から分かるように、検出効率、時間分解能、空間分解能、エネルギー分解能を満たすもの

としては、シンチレーション検出器と半導体検出器であり、これらについてさらに比較検討を行った(表 3.2-2)。なお、シンチレーション検出器では冷却の必要はないが、半導体検出器には、ペルチェ素子による冷却が必要であったり、液体窒素を必要とするものもある。

表 3.2-2 代表的なシンチレーション検出器及び半導体検出器の特性比較

検出器	実効原子番号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	エネルギー 分解能 (%)	備考
NaI (Tl)	50	3.67	7	
BGO	74	7.13	15	
LaBr <sub>3</sub> (Ce)	48	3.79	2.8-4	<sup>138</sup> La の自己放射能がある
GAGG (Ce)	51	6.63	5	
SrI <sub>2</sub> (Eu)	49.4	4.55	4	
Ge	32	5.33	0.13	動作温度 77 K
Si	14	2.33	0.45	
CdTe	50	6.06	0.3	-40°C まで冷却した場合
CdZnTe	48.5	5.8	0.5	常温動作
TlBr	58	7.56	1.2	常温動作

以上の表からシンチレーション検出器は、原子番号・密度とも高く、ガンマ線に対して高い検出効率を持つが、エネルギー分解能はいずれも数%程度と制限されている。一方、半導体検出器は、検出効率は多少シンチレーション検出器に劣るものの、エネルギー分解能は1%以下のものが得られている。本研究においては、高いガンマ線バックグラウンド下での利用を前提としているために、検出効率が多少低いことは大きな問題ではない。一方、バックグラウンドガンマ線を除去するための、エネルギー分解能は非常に重要である。そこで、検出器としてはCdZnTe、CdTe、TlBr、Siなどの半導体検出器が有望であると考えられる。Geは動作温度が77 Kと低く、この温度に到達するための冷却系を必要とするため、ロボットなどの機器に搭載する上での困難が考えられる。

また、表 3.2-2 に示した半導体検出器の特性は、チャンピオンデータであり、半導体素子の製造プロセスに依存して結晶粒界などが素子中に入り込むため、品質の高い結晶が必ずしも安定して入手できるわけではない。そこで、どのような種類の半導体検出器を採用するかについては、実際の素子でのばらつきも考えて、得られる特性を個々に評価しておく必要がある。このため、平成 27 年度は半導体パラメータ測定装置を導入して、いくつかのサンプルについて半導体特性としての評価を行った。図 3.2-3 は平成 27 年度に購入した半導体パラメータ測定装置により、8 × 8 × 2 mm の平板型 CdTe 半導体検出器の印加電圧とリーク電流の特性を求めたものである。図 3.2-4 にはシリコン半導体検出器の印加電圧とリーク電流の特性を示した。

これらの測定により、各種の半導体検出器ごとにそれぞれの特性を評価した結果、表面状態の変化等に伴う多少のばらつきはあるが、ガードリングを導入するなどして特性のばらつきを抑え込むことは可能であると考えられ、概念設計の段階としては半導体検出器をガンマ線 CT システムの検出部分として搭載することとした。

## (6) ガンマ線 CT システムに搭載する線量計に関する検討 (H26)

本節では、ガンマ線 CT システムに搭載する線量計についての検討を行った結果について示す。ガ

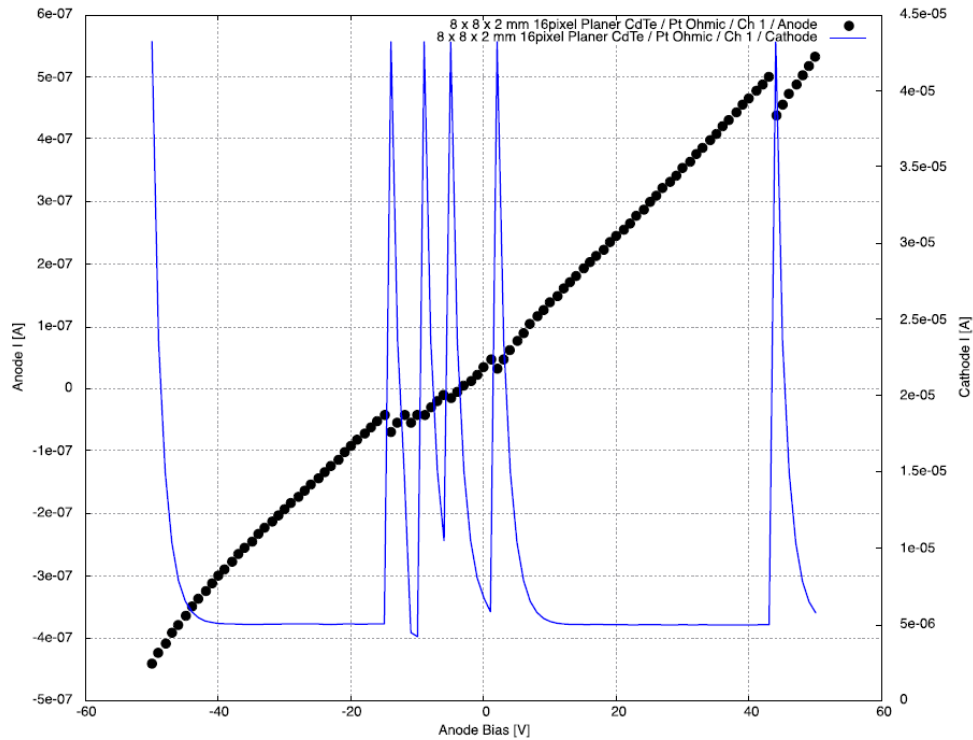


図 3.2-3 半導体パラメータ測定システムにより得た CdTe 半導体検出器の電圧とリーク電流の関係

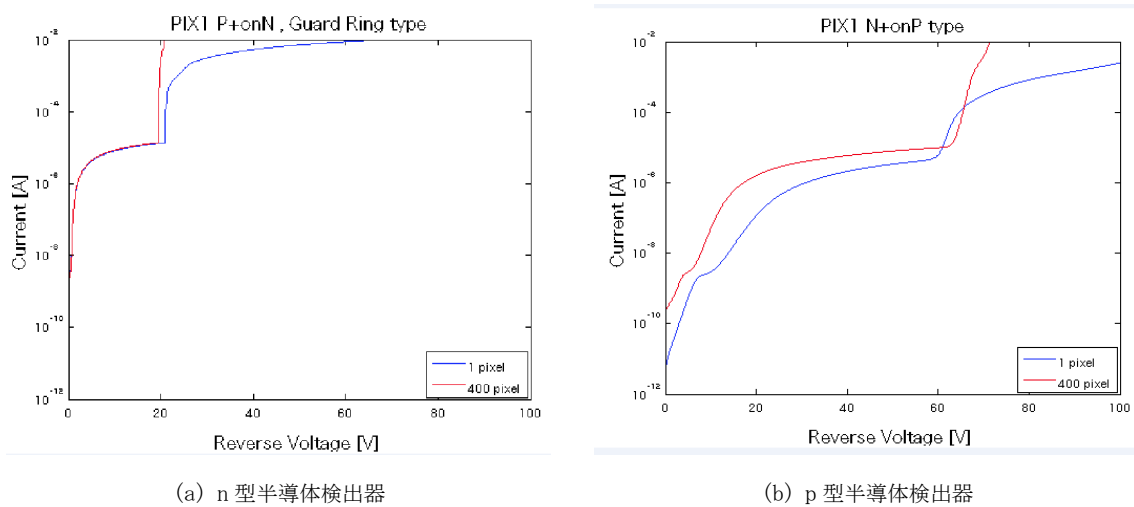


図 3.2-4 半導体パラメータ測定装置で計測したシリコン半導体検出器の特性例

ンマ線 CT システムにおけるガンマ線検出器に対するバックグラウンドとしては、(2) に示したようにガンマ線のみを考えることとしたが、実際に計測動作を行う作業環境においては種々の放射線が存在しており、ロボットなどの移動体に搭載されるガンマ線 CT システムそのものを防護するための線量計の計測対象としては、ガンマ線のみではなく、 $\alpha$  線、 $\beta$  線などを広くカバーする必要がある。また、 $\alpha$  線や  $\beta$  線は僅かな構造物でも遮蔽されるので、ロボットが気づかぬうちに大きな線量を受け、損傷を受ける可能性もある。このため、システム全体を取り囲むような大面積の線量計を搭載することが望ましい。このような線量計は、フレキシブルかつ薄型であることが望ましく、既存の放射線検出器の単純な転用では難しい。そこで、最近技術進展の著しい有機系の半導体に注目し、大面積

かつ薄膜の有機半導体からなる線量計をロボットに巻き付けて、飛程の短い $\alpha$ 線や $\beta$ 線から受ける損傷を未然に防ぐようなことを考えるものとする。平成26年度は、概念設計として、有機フォトダイオード (Organic Photodiode; OPD) とプラスチックシンチレータの組み合わせを用いることを検討した。プラスチックシンチレータは自由な形状に加工が可能であるので、この表面に直接フォトダイオードを形成すれば、原理的にどのような曲面の線量計も製作できることになる。したがって、OPDを直接プラスチックシンチレータの上に形成することについての検討を行った。図3.2-5にOPDの原理を示す。p型半導体とn型半導体の接合界面付近で光により生成された励起子は電子と正孔に分離された後、n型半導体とp型半導体側に収集される。収集効率を上げるには、界面を半導体全体に亘って存在させることが有効であると考えられ、p型半導体とn型半導体を混合して製膜することにより、混合層中にpn接合界面が広く分布するBulk-Hetero型の方式を取ることにする。以上の構造が成立するかどうかを実際にプラスチックシンチレータ上にOPDを堆積させた素子を作製して確認した。図3.2-6に素子の構造を示す。有機層を金属電極で挟んだ構造である。電極には陽極としてIndium Zinc Oxide (IZO)の透明電極を、陰極にはAl電極を用いた。スパッタリングによりプラスチックシンチレータ上にIZOを製膜し、その上からスピコート法により有機層を製膜した。最後にAl電極を真空蒸着により製膜した。本素子の応答について、X線発生装置 (GE:ERESCO 160MF4-R) を用いて実験を行った。実験体系を図3.2-7に示す。X線発生装置の加速電圧を50 kVとし、X線管電流を5 mA~0.5 mAの間で変化させ、各管電流で40秒間X線を照射した。OPDのバイアスは0 Vとし、電流はデジタルエレクトロメーター (ADCMT社 8240) を用いて測定を行った。OPDには逆バイアスを印加せずに測定した。

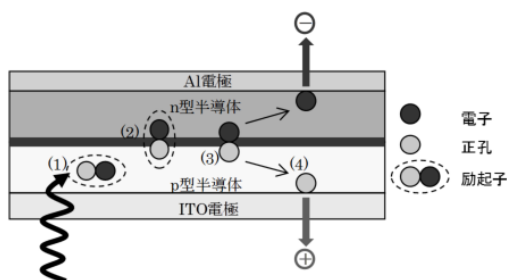


図 3.2-5 有機フォトダイオードの原理

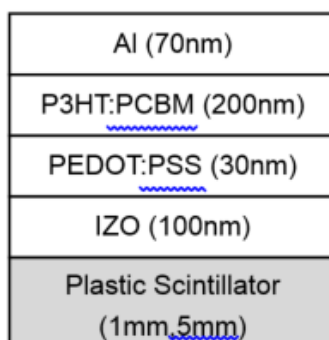


図 3.2-6 プラスチックシンチレータ上に形成した OPD

X線照射実験の結果を図3.2-8に示す。X線管電流と素子から得られる電流の間に比例関係が得ら



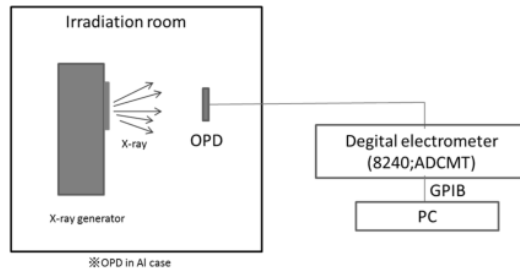


図 3.2-7 線量計素子の試験体系

れた。一方、プラスチックシンチレータの厚さを変えた素子については、必ずしも感度の向上は顕著ではないが、X線誘起電流の増加は見て取れる。以上より、フレキシブルな線量計として、プラスチックシンチレータと OPD の組み合わせが利用できる見通しを得、ガンマ線 CT システムに搭載する線量計として採用することとした。

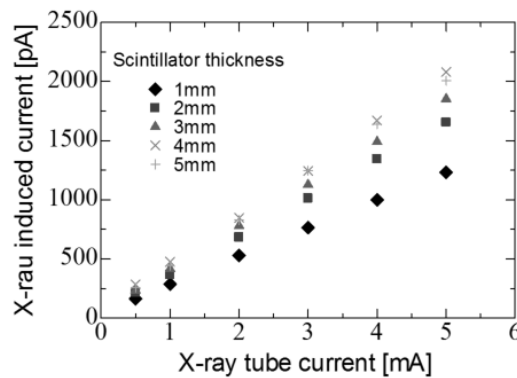


図 3.2-8 線量計素子の X 線量に対する応答

### (7) ガンマ線 CT システムに搭載する線量計に関する検討 (H27)

本節では、ガンマ線 CT システムに搭載する線量計についての検討を行った結果について示す。OPD は、軽量かつ大面積の素子が比較的容易に製作できるという利点を持つ上に形状の可変性が高い。そこで本研究では、廃止措置において形状の自由度が高い検出器として、シンチレータと OPD を組み合わせた放射線検出器について検討を行っている。平成 26 年度までの検討において、複数の素子をプラスチックシンチレータ上に直接、並列配置し、各素子からの電流を独立に読み出すことで放射線分布測定が可能であることを示した。一方、そのような素子では、電流発生量が低いこと及び X 線照射中に電流が徐々に減少することなどが問題点として挙げられた。

そこで平成 27 年度には、プラスチックシンチレータ上に直接素子を製作する方法から、薄い耐薬品性樹脂シート状に素子を製作し、シートをシンチレータに貼り付けることで放射線検出器として動作させる方法について検討した。

有機半導体放射線検出器 (Organic Radiation Detector; ORD) の開発を進めている。本研究では、形状がフレキシブルなフィルム型素子の製作などを通じて、ORD の特性向上を行った。図 3.2-9 に素子構造を示す。耐薬品性樹脂としては、厚さ 25  $\mu\text{m}$  の透明ポリイミドを用いた。製作した素子の形状は表 3.2-3 の通りである。各素子の写真を図 3.2-10 及び図 3.2-11 に示す。各 OPD が十分な柔軟性を有することが分かる。

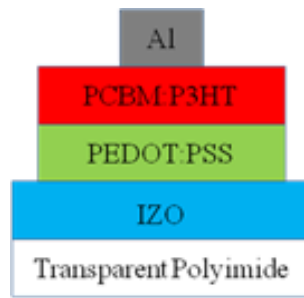


図 3.2-9 製作した素子の構造

表 3.2-3 評価のために作製した OPD

	素子 1	素子 2	素子 3
全体サイズ	10 × 10 mm	20 × 20 mm	10 × 10 mm
各 OPD のサイズ	8 × 4 mm	2 × 4 mm	8 × 4 mm
OPD 素子数	1 個	5 個	1 個
基板	透明ポリイミド (厚さ 25 μm)	プラスチックシンチレータ	

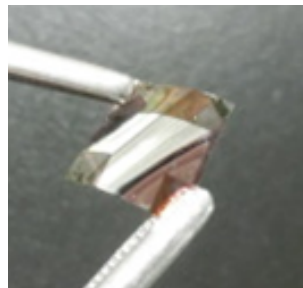


図 3.2-10 素子 1 の写真

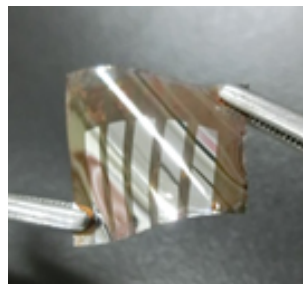


図 3.2-11 素子 3 の写真

製作した素子の放射線誘起電流を評価するため、白色 X 線照射実験を行った。管電圧：50 kV、管電流：5 mA とした場合の実験結果を図 3.2-12 に示す。また、比較のためにプラスチックシンチレータ上に直接素子を製作した構造についても同様の照射実験を行った。フィルム型素子では、従来の素子に比べ約 18 倍の高い X 線誘起電流を検出することができた。また、従来の素子では、X 線を 180 秒間照射している間に、誘起電流が約 9% 減少していた。一方、フィルム型素子では約 0.5% の減少であり、誘起電流の減少を抑えることができた。素子特性が改善された理由としては、耐薬品性樹脂を基板に用いたことでスピコートの際の溶剤によって基板が溶出することがなくなったものと考え

られる。すなわち、従来の素子では、溶出したプラスチックシンチレータによって電荷収集特性が劣化し、電流発生量が抑えられるとともに電荷回収効率も低下していたことが考えられる。

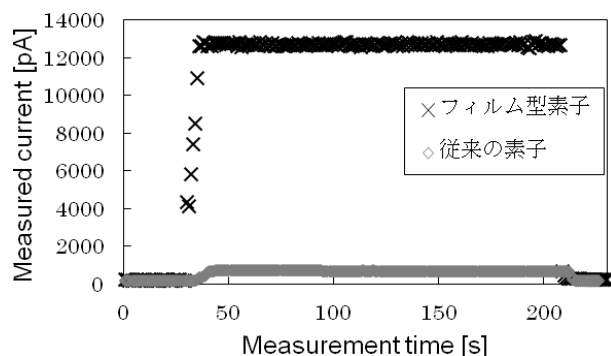


図 3.2-12 素子 1 及び素子 3 に関する X 線照射実験結果

また、5 個の有感部を持つ素子 2 を 25 mm 角の立方体プラスチックシンチレータ表面に設置し、直径 4 mm にコリメートした X 線を位置を変えながら照射し、分布測定実験を行った。実験結果を図 3.2-13 に示す。X 線入射位置を変化させることで測定される電圧が変化していることが分かる。このことから、平成 27 年度に開発したフィルム型素子により X 線分布測定が可能であることが示された。

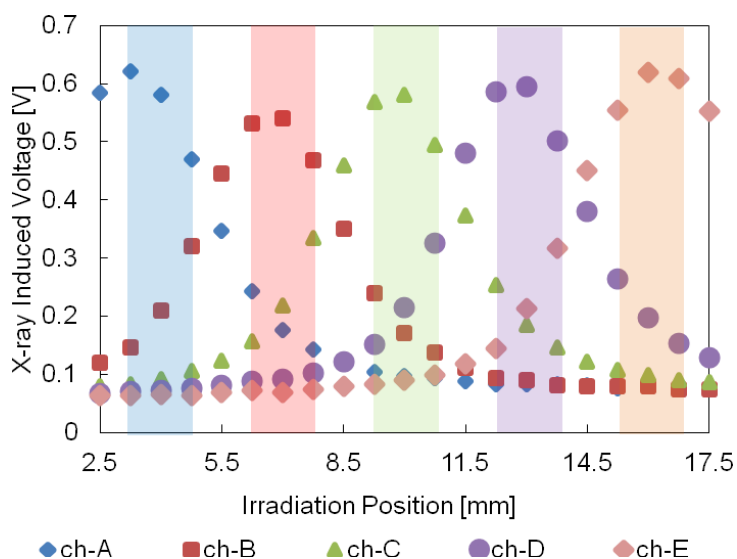


図 3.2-13 X 線分布測定結果

このように、フィルム型素子を製作し、OPD による放射線検出器の特性を向上させた。形状の可変性を活かせば、円筒型などのシンチレータ上への設置も可能である。

#### (8) ガンマ線 CT システムに搭載する線量計に関する検討 (H28)

OPD は、軽量かつ大面積の素子が比較的容易に製作できるという利点を持つ上に形状の可変性が高い。そこで本研究では、廃止措置において形状の自由度が高い検出器として、シンチレータと OPD を組み合わせた放射線検出器について検討を行っている。平成 27 年度までの検討において、プラスチックシンチレータ上に直接、複数の素子を製作し、放射線分布測定が可能であることを示した。また、形状がフレキシブルなフィルム上に OPD を作製し、シンチレータと組み合わせることで放射線計

測が可能であることを示した。このような手法を用いることで、円筒形状など、様々な形状のシンチレータ表面でシンチレーション光の分布が測定可能であることを示した。

平成 28 年度には、さらに素子製作のフレキシビリティを向上させるため、インクジェット塗布装置を用いた放射線測定用素子の製作可能性を検討した。

インクジェット塗布装置は、インクジェットプリンタと同様の方式でインク（材料）を液滴として飛ばして基板に塗布する。プリント基板の配線や半導体ウェハのコーティングなどに使用されており、従来の塗布方法を代替する形で使用範囲が拡大している。

本研究で使用したインクジェット塗布装置 (UIJPS-C-100-LC sn/01501E (Clemia Co. LTD)) を図 3.2-14 に示す。装置の特徴としては、有感部ごとに独立した OPD の形成やノズルを増やすことにより大面積に塗布を行えることなどが挙げられる。また、本装置にはテーブル観察カメラ、液滴観察カメラと 2 台のカメラが搭載されており、材料を塗布した後の基板表面やノズルから材料が吐出されている様子を観察することができる。変更できるパラメータには、X/Y 軸ドット数・ピッチ・バンク数などがある。

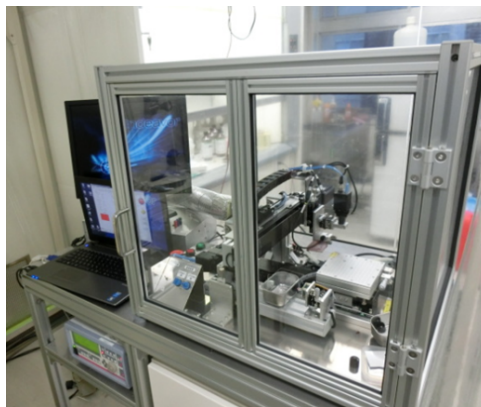


図 3.2-14 インクジェット塗布装置

### ① 検出器の原理及び構造

有機半導体はそれらの価電子帯及び伝導帯の位置によって、p 型または n 型の半導体として機能することが知られている。OPD を利用する放射線検出器の動作原理を図 3.2-15 に示す。プラスチックシンチレータに X 線が入射するとシンチレーション光が発生する。発生したシンチレーション光によって有機半導体混合層（主に p 型層）に励起子が生成される。電氣的に中性である励起子が拡散し、pn 接合界面に到達すると電子と正孔に分離する。その後、電子はアノードである Al 電極に、正孔はカソードである IZO 電極にそれぞれ輸送され、電流として取り出される。

また、励起子が有機固体中で伝搬できる距離は数 nm～数十 nm と非常に短いことが知られている。そのため、pn 接合界面近くで励起子が発生した場合しか電流を取り出すことができない。有機混合層中の pn 接合界面が増えれば、相対的に電流を効率良く取り出すことが可能になる。そこで、本研究では、pn 接合界面が有機混合層中に広く分布する Bulk-Hetero 構造の OPD を用い、効率的な電流の取り出しを試みた。

図 3.2-16 にプラスチックシンチレータ上に製作した Bulk-Hetero 型 OPD の素子構造を示す。素子構造は有機半導体層を金属板で挟んだ構造である。カソードとして Indium Zinc Oxide (IZO) の透明電極を、アノードには Al 電極を用いた。

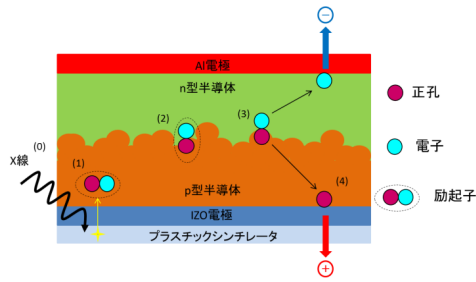


図 3.2-15 OPD を用いる放射線検出

Al
PCBM:P3HT
PEDOT:PSS
IZO
Plastic Scintillator

図 3.2-16 製作した OPD

## ② 素子の製作条件

素子はプラスチックシンチレータ上に、スパッタリング法により IZO 電極を製膜し、その上からスピコート法及びインクジェット法を用いて正孔輸送層 (PEDOT:PSS) と有機半導体層 (PCBM:P3HT) をそれぞれ製作した。インクジェット塗布装置の塗布条件を表 3.2-4 に示す。その後、Al 電極を真空蒸着し、製作を行った。製作した素子を図 3.2-17 に示す。素子-A と素子-B の外形は 20 mm 角で合計の有感部面積が 40 mm<sup>2</sup> とした。素子-A は 2 mm 角の有感部が 10 個並列に並んでいる。素子-B は 8 × 5 mm の有感部 1 個により構成した。素子-C の外形は 10 mm 角で有感部面積を 32 mm<sup>2</sup> とした。また、インクジェット塗布装置を用いて製作した素子-C との比較を行うために、素子-C と同じ大きさと同有感部面積の素子-D をスピコート法により製作した。

表 3.2-4 素子の製作条件

	素子-A	素子-B	素子-C
X 軸ピッチ (mm)	0.07	0.07	0.07
X 軸ドット数	43	150	130
X 軸バンク数	2	1	1
Y 軸ピッチ (mm)	0.05	0.05	0.05
Y 軸ドット数	60	140	100
Y 軸バンク数	5	1	1

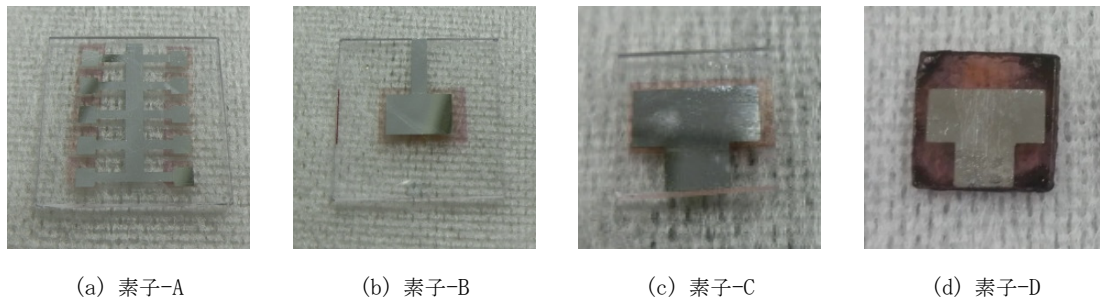


図 3.2-17 製作した素子

### ③ X線照射実験及び結果

製作した素子に対し、白色 X 線発生装置 (GE:ERESCO 160MF-4) からの白色 X 線を照射し、特性評価を行った。白色 X 線発生装置の加速電圧を 50 kV に固定し、X 線の強度を変えるために管電流を 5.0~0.5 mA の間で変化させ、各管電流で 40 秒間 X 線を照射した。素子に印加するバイアスは 0 V とし、電流はデジタルエレクトロメータ (ADCMT 8240) を用いて測定した。X 線照射前に暗電流を測定し、X 線照射中に発生した電流から暗電流を差し引くことで X 線誘起電流を評価した。

各素子における X 線誘起電流の測定結果を図 3.2-18 に示す。また、素子有感部の単位面積あたりの X 線誘起電流を図 3.2-19 に示す。インクジェット法により製作した素子から測定可能な X 線誘起電流が発生することを確認した。また、X 線強度と X 線誘起電流間に線形に近い関係を得ることができた。素子-C と素子-D の結果が示すように、インクジェット法によって製作した素子からの X 線誘起電流はスピコート法によるものと同程度であった。また図 3.2-19 より、合計の有感部面積が同じでも、1 つあたりの有感部面積が小さい素子-A から素子-B より大きな X 線誘起電流が得られることが分かった。このことの原因としては、有感部の大きさを小さくしたことにより、分極や有感部の欠陥による影響が小さくなったことが考えられる。

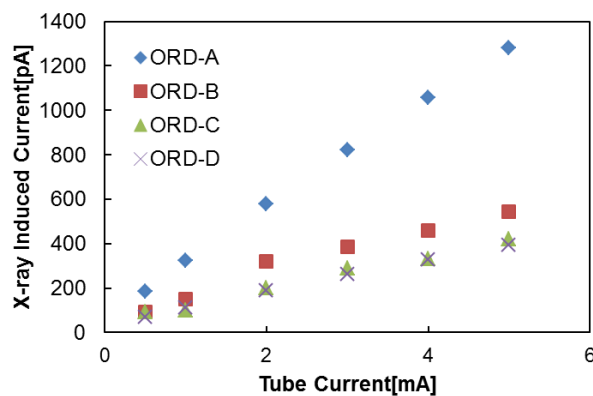


図 3.2-18 X線強度と X 線誘起電流

### ④ X線分布測定実験

放射線分布測定用に図 3.2-20 のような 5 つの有感部を持つ素子を製作した。素子構造は図 3.2-17 と同様である。厚さ 1 mm、大きさ 20 mm 角のプラスチックシンチレータ上に幅 2 mm の IZO 電極を 5 本平行にスパッタし、スピコート法を用いて正孔輸送層、インクジェット装置を用いて有機半導体層をそれぞれ製膜した。インクジェット塗布装置の塗布条件を表 3.2-5 に示す。最後に対向電極



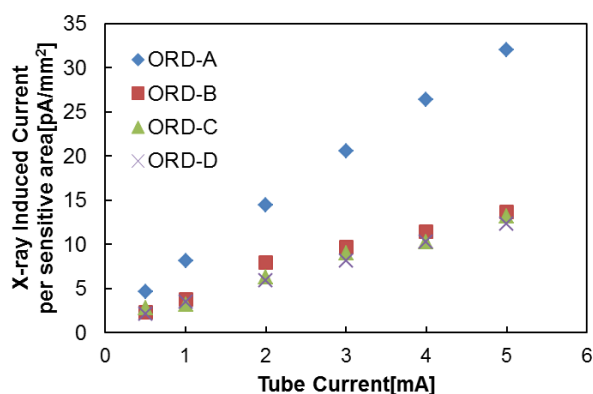


図 3.2-19 X線強度と単位有感部面積あたりのX線誘起電流の関係

(A1) を真空蒸着により製膜し、有感部を5つ持つ放射線分布測定用素子を製作した。有感部はそれぞれ面積を  $8 \text{ mm}^2$  とし、左から順にそれぞれ、ch-A、ch-B、ch-C、ch-D、ch-E とした。

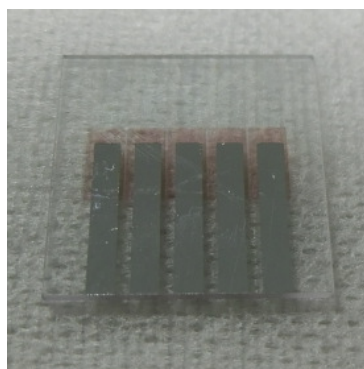


図 3.2-20 放射線分布測定用素子

表 3.2-5 放射線分布測定用素子の製作条件

X 軸ピッチ (mm)	0.07
X 軸ドット数	40
X 軸バンク数	5
Y 軸ピッチ (mm)	0.05
Y 軸ドット数	120
Y 軸バンク数	1

白色 X 線発生装置を用い、照射位置を変えながら X 線分布測定実験を行った。加速電圧を 50 kV とし、可変スリット (OptoSigma SLX-1-L120) を使用し X 線の絞り込みを行った。スリットの間隔は  $2 \times 4 \text{ mm}$  とし、 $0.75 \text{ mm}$  間隔で 21 箇所 X 線を照射した。各有感部からの発生電流は自作 IV 変換回路によって電圧に変化し測定した。

測定結果を図 3.2-21 に示す。隣接する ch 間のクロストークが小さいことと、各 ch に X 線が照射された際に、それぞれの ch の X 線誘起電圧が最大となることが分かった。これらのことより、インクジェット法によって製作した素子を放射線分布測定に適用できるとの知見が得られた。一方で、X

線分布測定結果にオフセットと両端の ch の X 線誘起電圧が大きくなる傾向が見られた。これらの原因としては実験室内の X 線の回り込みが考えられる。

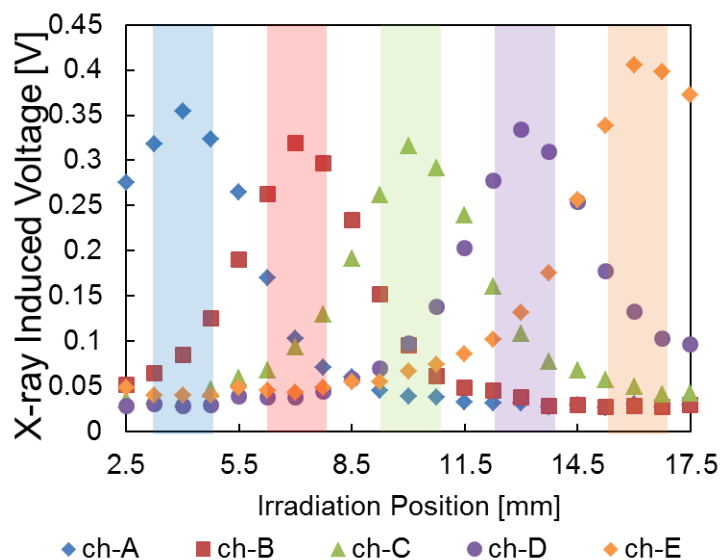


図 3.2-21 インクジェット塗布装置によって製作した素子における X 線照射位置と X 線誘起電圧の関係

### (9) ガンマ線 CT システムに搭載する線量計に関する検討 (H29)

OPD は、軽量かつ大面積の素子が比較的容易に製作できる。また、形状の可変性が高いことから、用途に合わせた自由な検出器設計が可能である。そこで本研究では、廃止措置への適用を念頭に、シンチレータと OPD を組み合わせた放射線検出器について検討を行っている。平成 28 年度までに、形状がフレキシブルなフィルム上に OPD を作製し、シンチレータと組み合わせることで放射線分布計測が可能であることを示した。また、インクジェット塗布装置を用いた放射線測定用素子を製作し、特性評価を行った。

平成 29 年度には、複数の検出器とそれぞれ異なる遮蔽材を用いることで、本検出器によるエネルギー推定の可能性を検討した。

#### ① 電流出力型放射線検出器によるエネルギー推定について

放射線検出器の動作モードとしては低計数率領域に適したパルスモード、高計数率用の電流モード、またその間の計数率の領域で使用されるキャンベルモードがある。パルスモードでは検出器から取得されるパルス信号の波高値を基にパルス波高分布から、入射放射線のエネルギーを推定する。一方、電流モード及びキャンベルモードにおいては、パルス波高値による情報が得られないため、単一の検出器で放射線エネルギーを推定することが難しい。

OPD を用いる開発中の検出器は、現在のところプラスチックシンチレータと非常に薄い (300 nm 程度) 有機層を用い、ほぼ無バイアスの状態で使用している。そのため生成電荷が小さい上に電荷収集効率も低く、パルス計測は行えていない。

電流出力型検出器でエネルギーを推定するには、図 3.2-22 に示すように複数の検出器に特性の異なる遮蔽材を設置し、各検出器に異なるエネルギー依存性を付与する方法が用いられる。エネルギー依存性の異なる複数の電流信号が得られ、あらかじめ求めておいた各検出器の応答関数を用いてアンフォールディングを行うことでエネルギーを推定できる (図 3.2-23)。



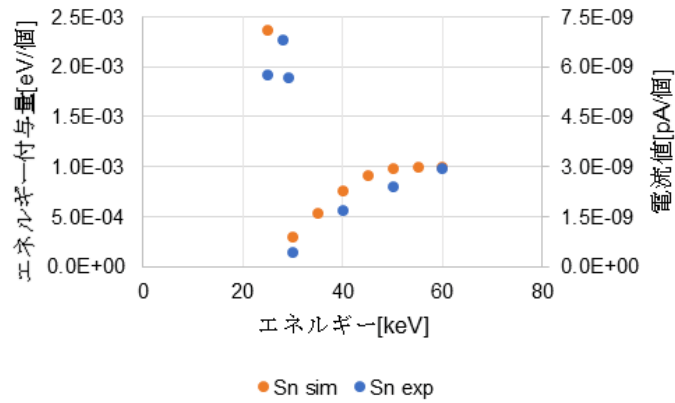


図 3.2-24 フィルタとエネルギー付与の関係：スズ (0.1 mm)

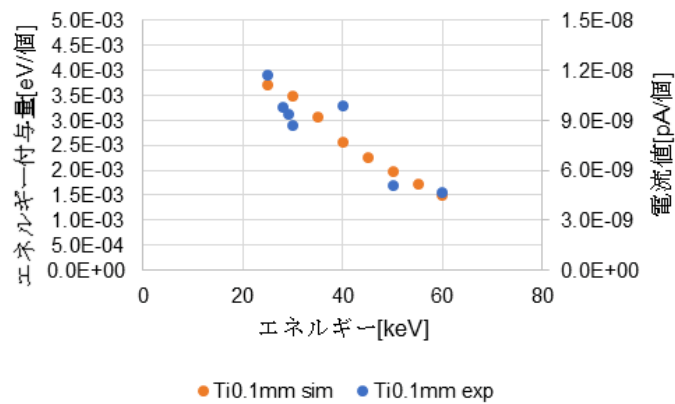


図 3.2-25 フィルタとエネルギー付与の関係：チタン (0.1 mm)

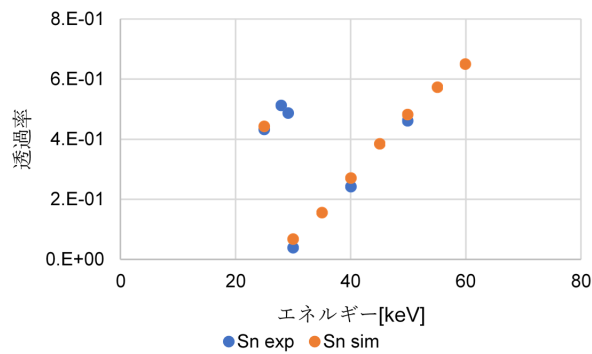


図 3.2-26 スズ 0.1 mm 厚を用いた場合

### (10) 半導体を用いた放射線検出素子の構造 (H27)

本研究においては、平成 26 年度に行った概念設計の結果、半導体検出素子を利用することとした。平成 27 年度はガンマ線 CT の検出部に搭載する放射線検出素子として、具体的にシリコン半導体を用いたストリップ型検出素子についての検討を進めた。ストリップ型シリコン検出器の構造を図 3.2-28 に示す。pn 接合部に逆バイアスがかかることで空乏層が生成される。

空乏層においてガンマ線と主にコンプトン散乱によりエネルギーが付与されたコンプトン電子が結

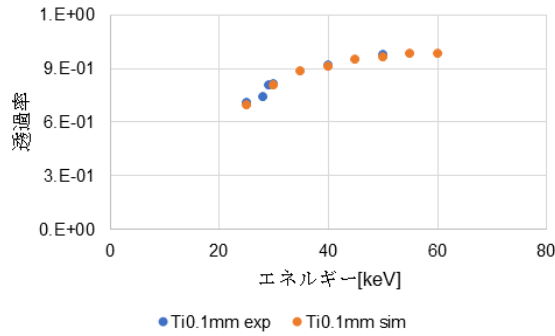


図 3.2-27 チタン 0.1 mm 厚を用いた場合

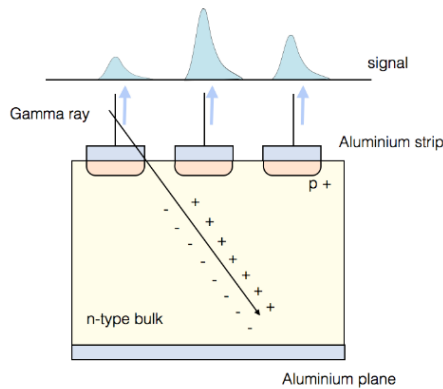


図 3.2-28 検出素子の原理

晶中に自身のエネルギーを付与する際に、正孔と電子が2次的に生成され、それらが空乏層内の電場勾配に従って電極まで誘導され、パルス状の電気信号を生成する。

本検出素子は1次元素子であり、片面にしかストリップを形成しないため、検出素子を1つ用いるのみでは、信号読み出しを片側電極のみから行っているため、検出素子内の反応位置を1次元的にしか特定できない。しかし、この検出素子を多数積層して、ストリップに対して平行な方向からガンマ線を入射させるようにした、3次元構造を有する検出器とすることで入射面での2次元イメージングが可能となる。

図 3.2-29 に積層ストリップ型シリコン検出器のシステムの概念を示した。1つのシリコン検出器レイヤーに、0.5 mm 厚のシリコンの表面に 1 mm ピッチで 50 本のストリップを持たせた有感面積  $50 \times 50 \times 0.5 \text{ mm}^3$  のシリコンセンサ、その後段に信号読み出し用のアナログ電子回路、さらにデジタル回路、インタフェース部が載せられた検出素子モジュールとする。このような構造の検出器においては、ガンマ線が検出素子ストリップと平行に、すなわち検出素子形状としてアスペクト比の高い方向から入射した場合、ガンマ線との相互作用により生成するコンプトン電子は、高いエネルギーが付与されるほどストリップと平行な方向に走行する。したがって、ストリップ型の検出器では、1つのストリップに高いエネルギーを付与するほどストリップ間にまたがる電荷の損失は少なくなり、高い指向性が得られることが期待される。この効果をシミュレーション計算により確認するために、実際の構造を模擬した体系において、モンテカルロ計算コードを用いた計算を実行した。次節の計算にあたっては、レイヤーは 6 mm 間隔で 6 枚積層した状態を用いた。

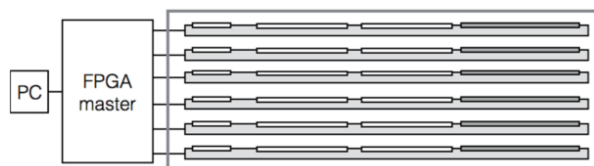


図 3. 2-29 検出素子を積層した検出器

### (11) モンテカルロ計算コード Geant4 を用いた指向性検出器の応答特性 (H27)

前節に示した体系において、粒子輸送モンテカルロシミュレーションを用いて応答特性の計算を行った。

粒子輸送シミュレーションとして、ヨーロッパの研究グループを中心に開発されている Geant4 を用いた計算を実行した。線源を平行ビームと仮定した場合の応答特性を、モンテカルロシミュレーションを用いて評価した。シミュレーションにより得られた  $^{137}\text{Cs}$  から放出される 662 keV のガンマ線を照射した場合のスペクトルを図 3. 2-30 に示す。ここでは、隣り合うストリップに同時に信号が出たものについて、同時計数を適用した場合のスペクトル形状の変化も同時に観測した。この結果、同時計数を適用した場合には、低エネルギー側の成分を抑制することが可能であることが分かった。

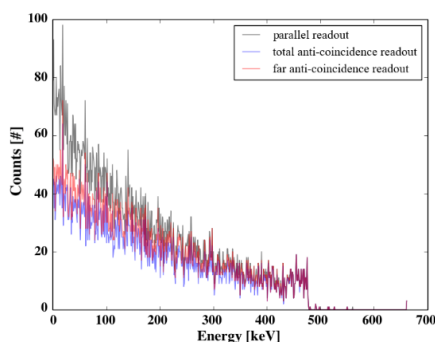


図 3. 2-30  $^{137}\text{Cs}$  に対する検出素子波高分布

次に、ガンマ線がストリップに対して、水平方向から入射した場合と垂直方向から入射した場合の検出効率の比をエネルギーを変えて求めた。この結果を表 3. 2-6 に示す。

表 3. 2-6 検出効率の比とエネルギーの関係

入射ガンマ線エネルギー (keV)	0度と90度入射検出効率の比
60	29.79
100	44.31
300	57.78
600	65.26
1000	73.39

ガンマ線エネルギーが高くなるに従い、垂直入射時と水平入射時の検出効率の乖離が大きくなっていくことが分かる。また、ストリップから斜めに入射した場合、検出素子の対応するストリップには信号が出るとしても、それにより得られる情報は限定されたものであり、位置情報はぼやけた



ものとなる。したがって、水平入射時には多くの情報量に基づく、鮮明な情報が得られるものと考えられる。

次に、このような入射角度情報に関する特性をさらに詳細に試験するために、エネルギーごとの電子の角度分布の情報を図 3. 2-31 に示した。図から分かるようにエネルギーが高くなるにつれて、側面入射の場合の検出効率も高くなっていることが分かる。これらの計算結果から、入射角度分解能として、半導体検出器を用いた場合、60 keV のエネルギー範囲における半値幅として 10 度以下の値が得られることが分かった。一方、ストリップがガンマ線の入射方向に向けられた場合には、検出素子自身が遮蔽体として作用するため、ガンマ線検出効率の低下を招く可能性がある。特にエネルギーが低い場合には、この効果は顕著に出る可能性があるため、これについてもシミュレーション計算を実施して評価を行った。計算に際しては、ガンマ線として平行ビームを仮定し、位置情報は考慮せずに検出器全体で検出されたイベントとしての効率を評価した。この結果を図 3. 2-32 に示した。

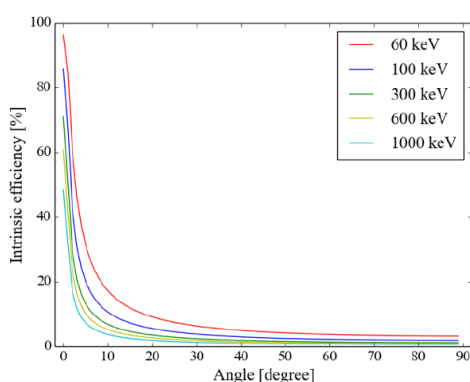


図 3. 2-31 シリコン検出器への入射角度と検出効率のエネルギー依存性

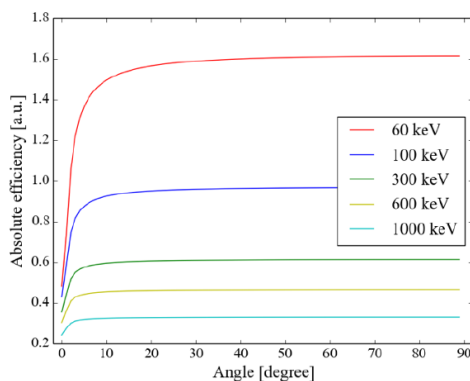


図 3. 2-32 シリコン検出器への入射角度と検出効率の関係

60 keV や 100 keV などガンマ線エネルギーが低い場合には自己遮蔽の効果があり、0 度近傍で検出効率の落ち込む様子が見られるが、エネルギーの高い 600 keV 以上では、入射角 5 度以上では平坦な検出効率を得られることが分かった。

また、シリコン半導体を用いた場合には、特に低エネルギー側のバックグラウンドを小さく抑えることができるため、指向性を担保しつつ、高バックグラウンド環境下において、動作させることができるので、ガンマ線 CT の検出器として、適した特性を持つものと考えられる。

このようにガンマ線 CT の検出器としての半導体検出器の特性を調べる一方、ロボットへの搭載に

関しては、種々の半導体の放射線損傷が問題になる。この試験を行うために、平成 27 年度は X 線照射装置及びドーズキャリブレーションを導入して定量的な線量評価と照射を行う環境を構築した。シリコン半導体については、素粒子・原子核物理における応用の必要性から系統的に調査が行われているが、他の半導体については、データがあまりない。そこで、最近行われている IGZO 半導体について、高線量の照射を行い、特性変化の有無について調べた。図 3. 2-33 にはこの結果の一例を示す。100 Gy 以上の放射線量においてトランジスタの特性が変化していることが分かる。特にゲート電圧が低いところで特性の変化が大きい。福島第一の廃炉への適用を考えると、数 Gy/h の環境において数日でこの線量に達するので、長期間の動作を行うためには、回路上の工夫に加えて、半導体素子レベルでの対策を考える必要があると思われる。

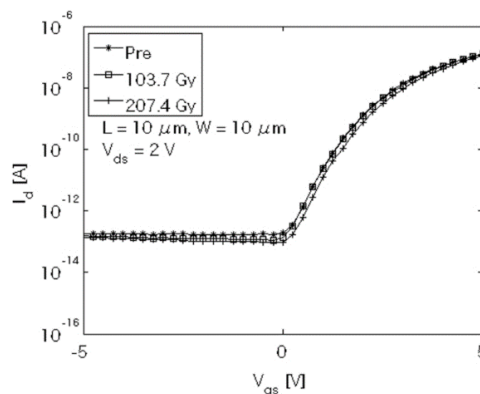


図 3. 2-33 トランジスタの特性変化

## (12) 指向性検出器間の散乱事象の計算結果 (H28)

Geant4 モンテカルロ計算により、 $^{57}\text{Co}$  ガンマ線源の検出器間のガンマ線の散乱の様子を評価するために、検出器近傍での同時計数、検出器遠方での同時計数を求めた。この結果を図 3. 2-34 に示す。

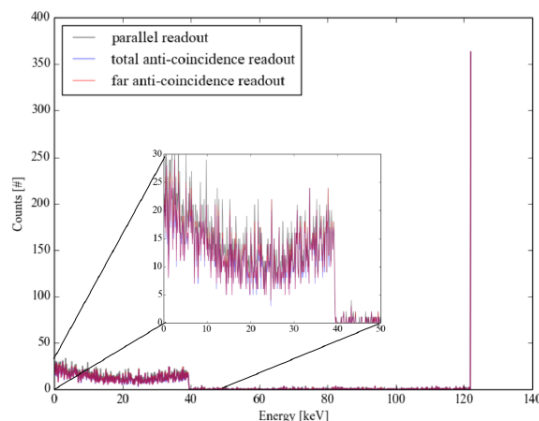


図 3. 2-34  $^{57}\text{Co}$  からのガンマ線に対して計算した検出器におけるエネルギースペクトル

この結果、エネルギーの比較的低い  $^{57}\text{Co}$  のガンマ線に対しては、検出器における散乱の効果は小さく、検出器自身の持つ高いアスペクト比による指向性が示されることが分かった。また、エネルギーの高い  $^{60}\text{Co}$  ガンマ線では、図 3. 2-35 に示すように近隣の検出素子間での散乱イベントの逆同時計数を取ることで、低エネルギー側の成分を抑えることができた。これにより、やはり高い指向

性を有する計測法として用いることができることを示していると言える。図 3.2-36 に示すような体系において、実際に線源を置き、角度を変化させた際に検出器から見える画像の評価としては、図 3.2-37 のような結果が得られた。角度が変化するとともに、計数率が下がっており、特定の方向に対する感度が高く、指向性を実現できていることが分かる。

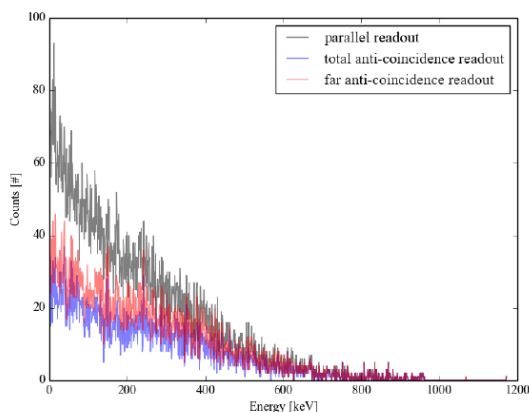


図 3.2-35  $^{60}\text{Co}$  からのガンマ線によるエネルギースペクトル

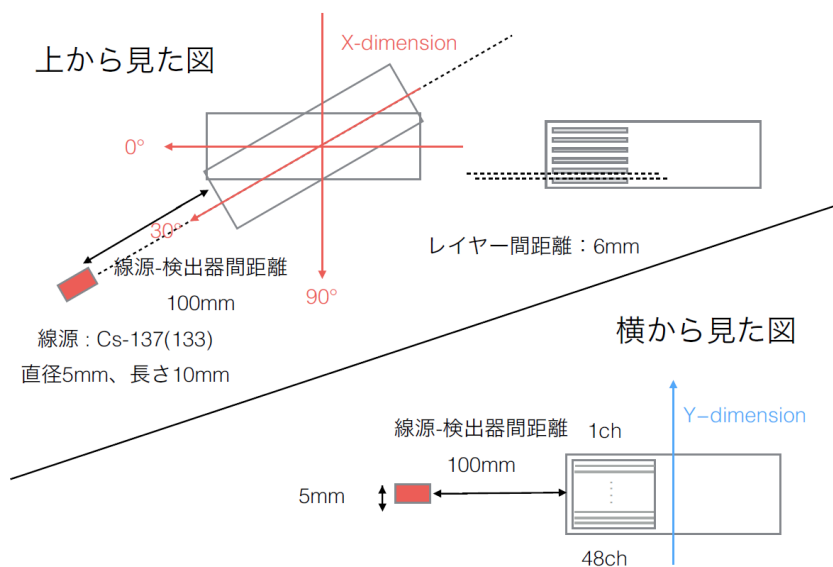


図 3.2-36 指向性を求める体系

### (13) ガンマ線 CT 用信号取得システム (H29)

ガンマ線 CT ではガンマ線の画像を得るために多数のチャンネル数に対して、アナログデータである波高値データを高速に処理する必要がある。波高値をそのまま信号処理しようとする回路規模が大きくなり、その分消費電力も非常に大きくなってしまふ。そこで、この問題を解決するための信号取得手法として、Time-over-Threshold (ToT) 法を用いた。ToT 法は、信号をデジタルデータである時間幅情報へと変換する手法として知られている。波高値の信号電圧と閾値電圧をコンパレータが比較し、信号電圧の方が大きい際にデジタル信号を出力するという仕組みで波高値データをデジタルデータへと変換する。一方、ToT 法の問題点として、波高値から時間幅への変換において線形性が保

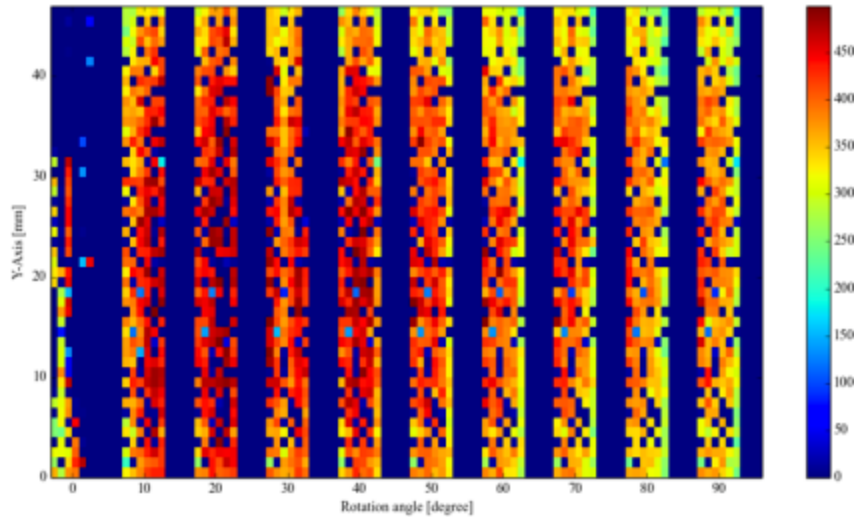


図 3.2-37 ガンマ線源による計数率分布と角度の関係

たれないという点がある。放射線検出回路で用いられる CR-RC 回路の出力電圧は、回路の時定数を  $\tau_s$  としてセミガウシアン形状 ( $V = V_0(t/\tau_s)e^{-t/\tau_s}$ ) となり、閾値を一定とするとコンパレータからの出力には線形性がなくなってしまう。この問題点を解決する手法として、ここでは閾値を動的に変化させて線形性を改善する dynamic Time-over-Threshold (dToT) 法に基づく回路を使用した。回路の構成は図 3.2-38 のように表される。

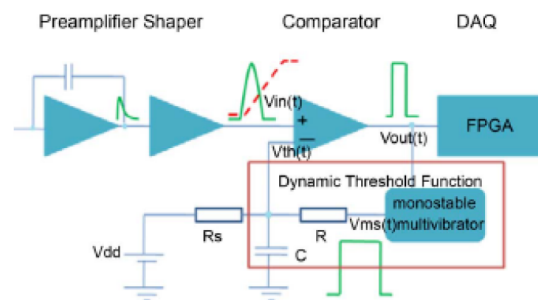


図 3.2-38 Dynamic ToT 回路

Dynamic ToT 回路では、コンパレータ出力に対応したモノステーブル・マルチバイブレータ、及び生成されたパルスにより閾値を変動させる RC 積分回路が搭載されている。信号がコンパレータに入ったタイミングでモノステーブル・マルチバイブレータが遅延時間後にパルスを生じ、RC 積分回路により閾値を変動させる。図 3.2-38 に見られるように、Dynamic ToT 法では、従来の ToT 法に比べて、波高値の差に応じて ToT 幅が大きく変化する。また図 3.2-39 に示すように、出力がエネルギーに対して優れた線形性が保たれていることが分かる。これらの回路を検出器とともにコンパクトにまとめて、プロトタイプシステムを製作した (図 3.2-40)。本システムでは 64 チャンネルの読み出し回路が検出器とともに、200 g の重量にまとめられており、遠隔操作ロボットシステムに搭載することが可能である。

本システムを用いて、図 3.2-41 に示すように線源位置を変化させて、 $^{137}\text{Cs}$  ガンマ線源 (662 keV) を用いて線源画像を取得したものを図 3.2-42、図 3.2-43 に示す。ガンマ線源の位置を変化させる

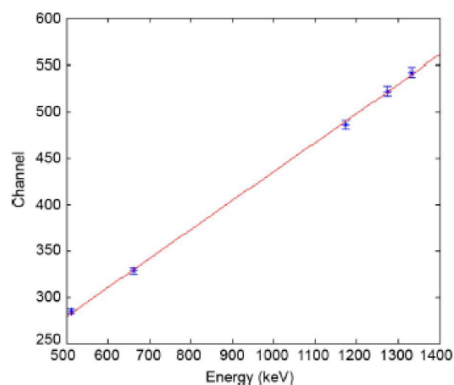


図 3.2-39 Dynamic ToT 回路の直線性

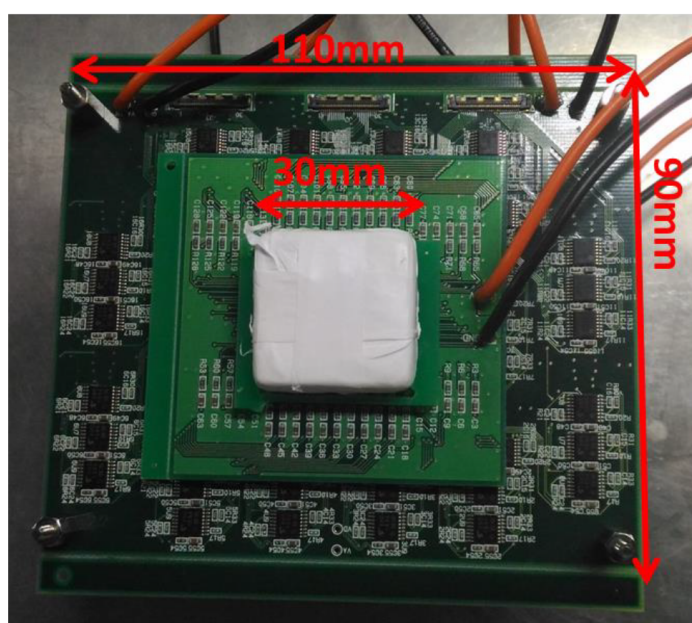


図 3.2-40 検出器とともに搭載した Dynamic ToT 回路

ことによって、異なる位置に画像が得られることが示された。

また、ロボットと組み合わせた放射線計測として、図 3.2-44 に示すようなサーボモータを 4 個用いたロボットシステムを用いてノイズ条件の評価を行ったところ、特に問題なく動作することを確認した。

#### (14) ガンマ線 CT システムの構築と試験 (H30)

平成 30 年度はこれまでに行ってきた開発を統合して、ガンマ線 CT システムとして構築したので、この結果について述べる。

##### ① X 線場中における移動体に搭載した線量計の動作試験

まず、フレキシブル有機薄膜線量計について、図 3.2-45 左に示すような X 線場の存在する環境中で、図右に示すような移動体に有機薄膜型の線量計を載せて試験を行った。移動体には、超音波距離センサ HC-SR04 を前後左右の 4 箇所に貼り付けて、障害物検知と自動操縦を可能にした。77 × 100

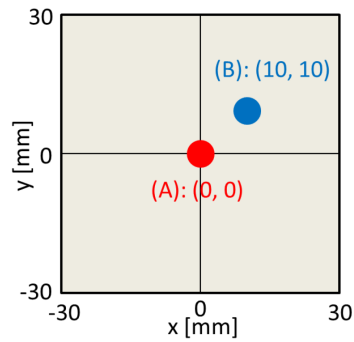


図 3.2-41 線源位置

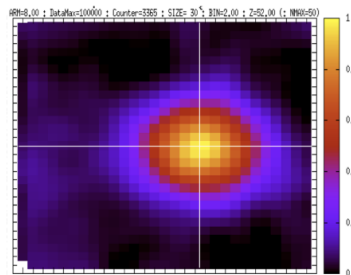


図 3.2-42 ポジション A

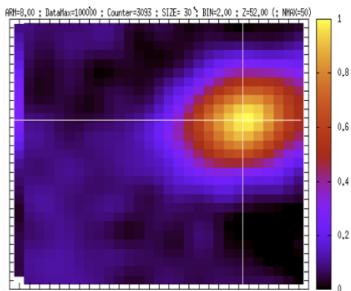


図 3.2-43 ポジション B

cm の平面上で、X 線源から一部に X 線が管電圧 100 kV・管電流 1 mA の条件下で照射されている環境を擬似的に作成した。(図 3.2-45 左中央に X 線源が存在) X 線場の生成には、島津製作所製の X 線管を用いた。

1 秒おきに、前後左右 4 箇所障害物との距離を測定し、得られた距離から進むべき方向を判定するアルゴリズムを作成し、移動体は 1 秒ごとに前後左右 4 方向の障害物を検知し、検知した障害物に接近しない方向を選択して、移動し続けるようにさせた。X 線場の強度分布を計測するために移動体に搭載した Raspberry Pi より、移動速度と移動方向を制御しながら、X 線センサからの電流の計測を行った。

X 線センサの放射線検出の素子が移動体の前進方向から見て 90 度左を向くように設置した。100 mA・100 kV の X 線を照射させた状況下で、秒速 1 cm で移動体を移動させ、放射させた X 線の前を通過する実験をした結果を図 3.2-46 に示した。

この環境下で図 3.2-45 に示す移動体を自動運転させた上で、放射線センサの出力電流を計測する。移動体の位置・向きと、計測された放射線センサの出力電流の大きさから X 線源の位置を推測すると



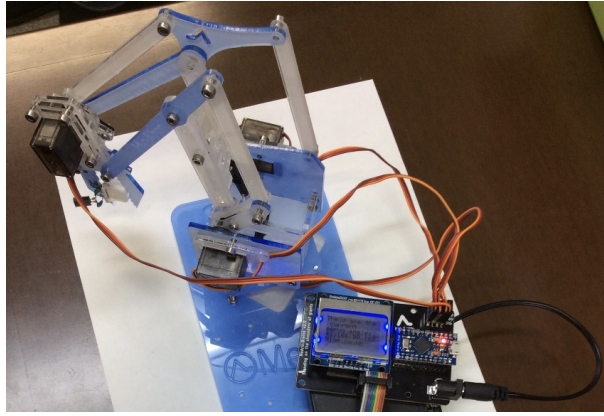


図 3.2-44 ノイズ評価に用いたロボットシステム

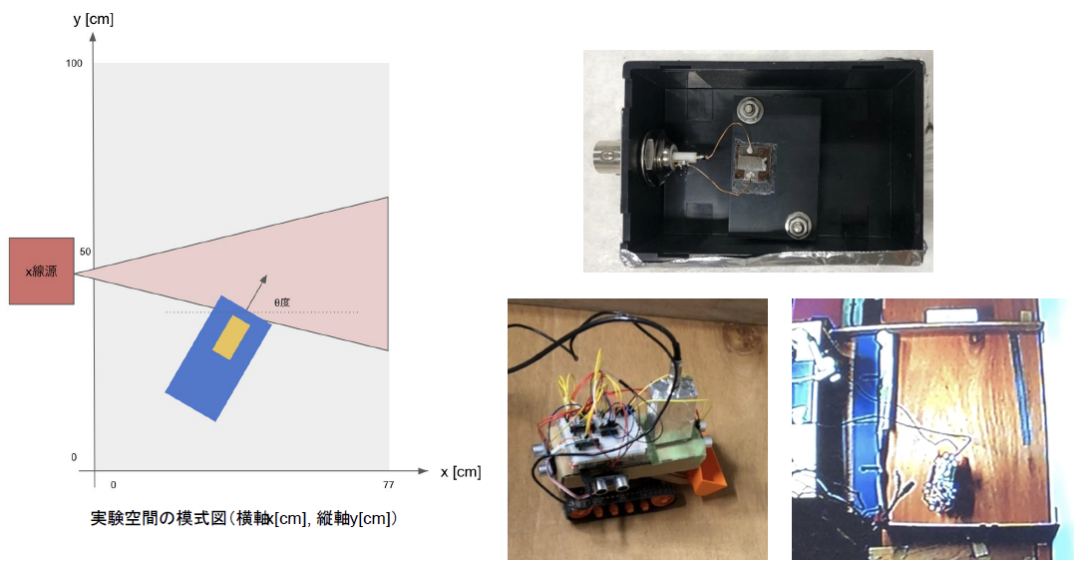


図 3.2-45 X線場における有機薄膜線量計の試験

いう実験を行った。移動体の軌跡は、図 3.2-46 左に示し、計測された電流を同図右に示す。この際の線量率は 170 mSv/h であったが、このように高い線量場を検知することができており、本実験の結果、そのような場を避けて計測を実施することが可能であることのデモンストレーションに成功したと言える。

### (15) ガンマ線 CT システムの実装 (H30)

平成 29 年度までに行ってきた開発の結果、ガンマ線 CT においては、コンプトンイメージング方式を用いることとし、これをロボットシステムに搭載して、イメージングを行うこととした。コンプトンカメラの基本的な構成は、図 3.2-47 に示すように散乱検出器と吸収検出器から成り、図 3.2-48 に示すようなコンプトン散乱前後のガンマ線のエネルギーの変化から、検出器に対するガンマ線の入射角を求めることができる。本研究においては、これまでに製作した検出器の小型化を進め、図 3.2-49 に示すようにロボットに搭載可能な小型のコンプトンカメラを構成した。これを用いて、多数のガンマ線イベントを利用し、再構成を行うことで、ガンマ線の線源分布を求めることができる。

製作したコンプトンカメラにより  $^{137}\text{Cs}$  線源を用いて測定して得られた角度分解能を表 3.2-7 に示す。概ね 10 度程度の角度分解能が得られているので、1 m 位置での位置分解能はおよそ 30 cm 程度

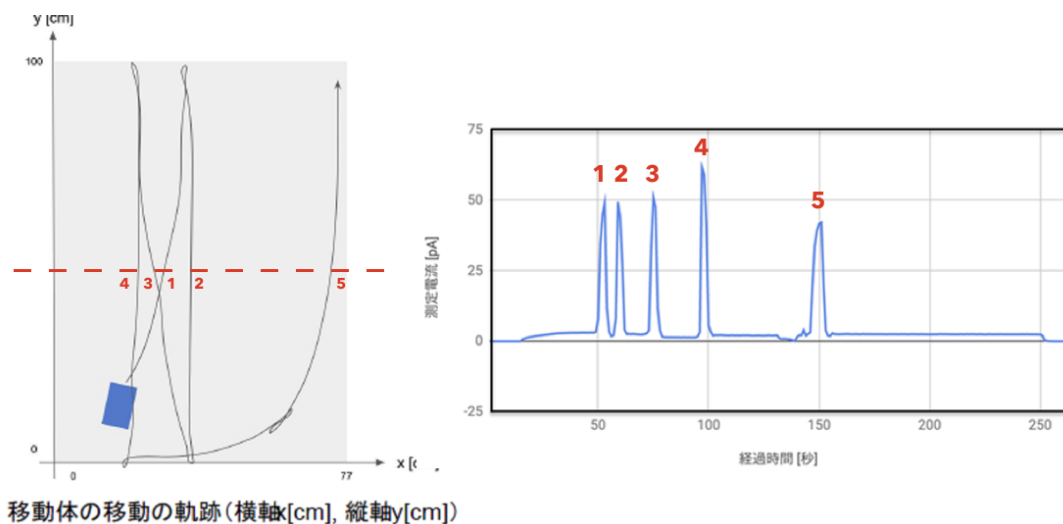


図 3.2-46 フレキシブル線量計の X 線場における応答

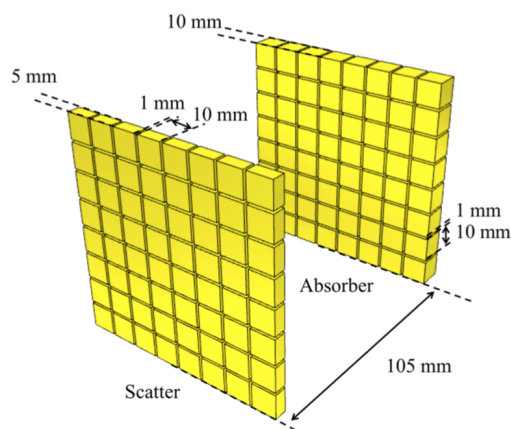


図 3.2-47 コンプトンカメラの構成

となる。また、波高スペクトルを図 3.2-50 に示す。

表 3.2-7 製作したコンプトンカメラの角度分解能

核種	$^{137}\text{Cs}$	$^{134}\text{Cs}$
ガンマ線エネルギー	662	605/796
全検出イベント数	1280913	17693441
コインシデンスイベント数	135790	202840
コンプトンイベント数	21369	43583
角度分解能 X (deg) (FWHM)	10.9	12.0
角度分解能 Y (deg) (FWHM)	11.1	11.2

### ① ガンマ線 CT による奥行き方向分解能

コンプトンカメラの原理によれば、3 次元的な再構成が可能であるので、その意味では、コンプトンカメラを用いれば、ガンマ線 CT が完成するというにはなるのであるが、図 3.2-51 に示した

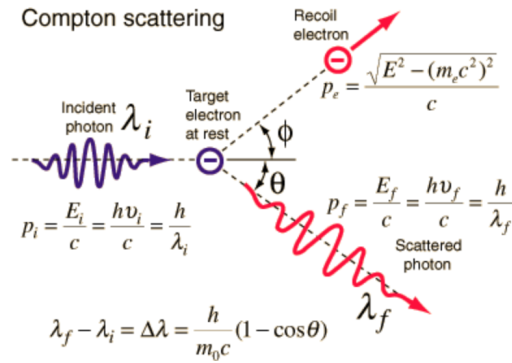


図 3.2-48 コンプトン散乱の模式図

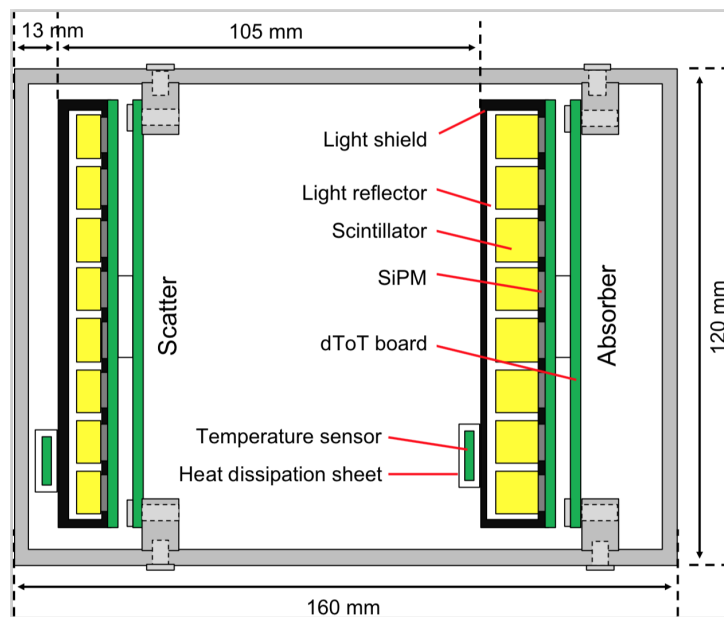


図 3.2-49 本研究で開発した小型コンプトンカメラの断面図

ように、視差の制約があるために、奥行き方向の分解能をコンプトンカメラだけで得るのは難しいと考えられる。図 3.2-52 には、線源までの距離を変化させた時の再構成画像を示しているが、視差が小さくなる場合に、奥行き方向の分解能の劣化が著しい。この点を解決するには、異なる角度から、物体を観察し、第二、第三の離れた位置に検出器を配置したデータを得ることであり、移動ロボットを用いて異なる視点からの計測を行うことでこれが可能になる。

また、別の手法として、汚染された構造物の放射能を求めるには、LiDAR と組み合わせ、まず環境中の構造物のマップを求めておき、そこにガンマ線の情報を投影する、ということが考えられる。このようにすれば、原理的には視点をあまり動かさなくても奥行き方向の情報が得られるが、一方、線源からの距離が離れると、そこから検出器に到達するガンマ線の量は少なくなり、計測に時間がかかる上に、バックグラウンドガンマ線の影響が大きくなり、正確な評価が難しくなるので、やはり、移動体ロボットにガンマ線検出器を搭載して、視点を動かして観測することは有用であると言える。

## ② LiDAR と組み合わせたガンマ線線源分布測定

そこで、最終的には、LiDAR とコンプトンカメラを組み合わせ、ガンマ線 CT を構成することと



図 3.2-50 開発したコンプトンカメラにより測定した  $^{137}\text{Cs}$  の波高スペクトル (全 128 チャンネル)

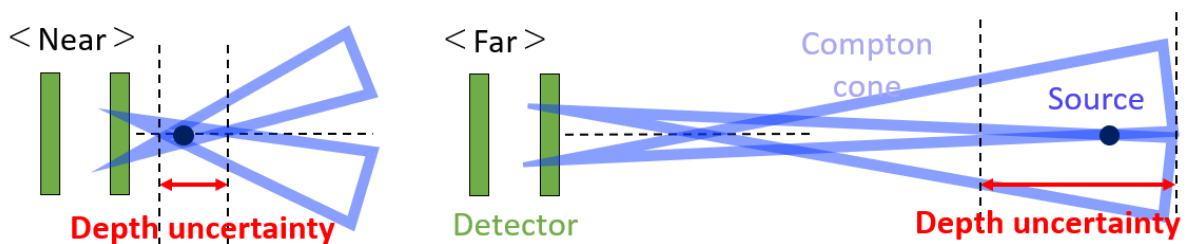


図 3.2-51 奥行き方向分解能に関する視差の影響

した。

図 3.2-53 に、移動ロボットに搭載したコンプトンカメラならびに LiDAR の設置の様子を示した。コンプトンカメラは、データ収集用にダイナミック ToT 法を適用した集積回路基板を用いてコンパクトに実装を行い、 $40 \times 25 \times 20 \text{ cm}$  と小型とし、重量も  $10 \text{ kg}$  以下とすることができた。これを用いて、測定した環境を図 3.2-54 に示す。計測を行った点を図中に観測点として示した。測定対象環境の 3 次元構造を図 3.2-55 に示した。環境中に  $^{137}\text{Cs}$  の点線源 ( $2.2 \text{ MBq}$ ) を設置し、コンプトンカメラで計測したガンマ線データを用いて線源分布を求めたものを図 3.2-56 に示した。線源分布を求

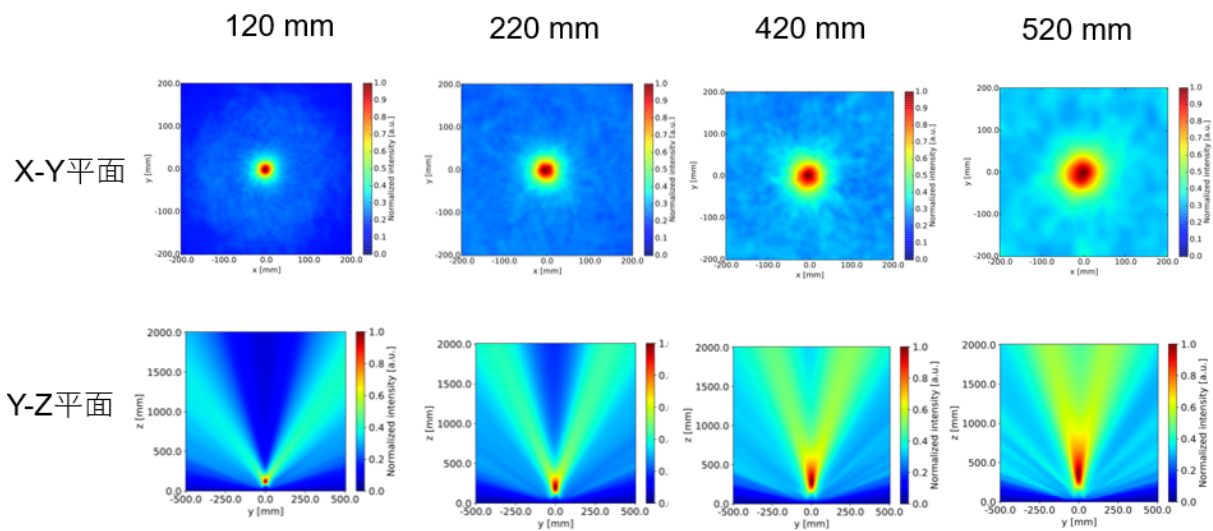


図 3.2-52 空間分解能と線源までの距離との関係

める手法の詳細については、3.1.1節を参照されたい。この図から、線源位置の再現に成功していることが分かる。3.1.1-(9)-③で述べたように、ガンマ線CTシステムとして良好な特性を有していることを確認した。以上により、ガンマ線CTシステムのデモンストレーションに成功した。

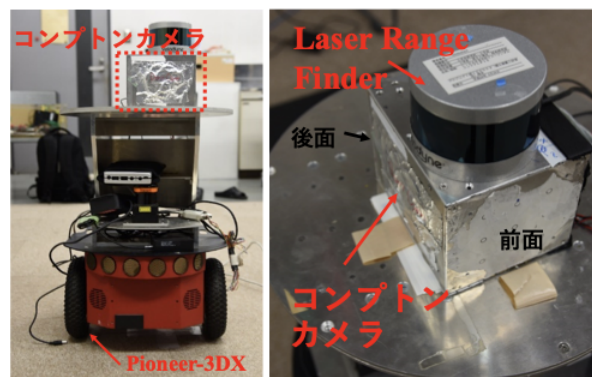


図 3.2-53 ロボットに搭載したコンプトンカメラ



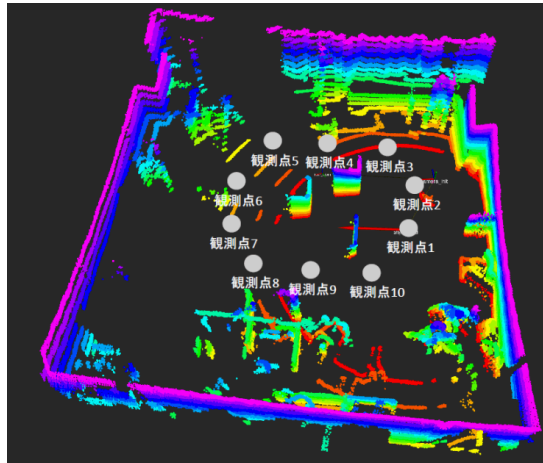


図 3.2-54 測定点の配置

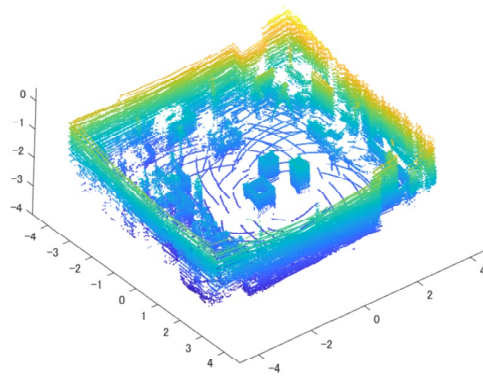


図 3.2-55 測定環境の様子

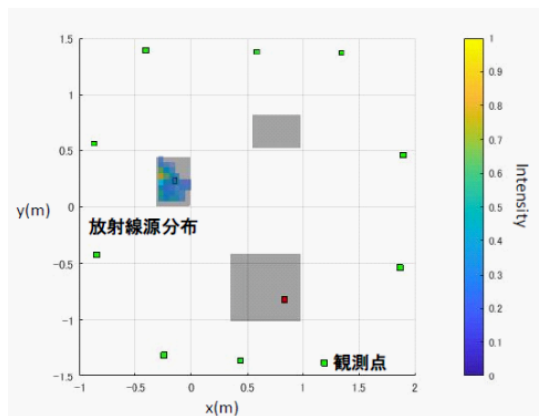


図 3.2-56 求められたガンマ線線源分布



### 3.2.2. 微量分析システムの開発

#### (1) ICP 質量分析計 (ICP-MS)

##### ① ICP 質量分析計 (ICP-MS) 用イオン検出器の開発

質量分析法は、元素あるいは分子をイオン化し、磁場あるいは電場を用いてイオンをその重さ（厳密には質量電荷比）で分離・検出する分析手法である。分光法とは異なり、試料を構成する物質そのものを取り出して分析するため、基本的には破壊分析である。しかし、原子の”個数”を数えるとといった超高感度分析や同位体分析が可能であるため、様々な分析に活用されている。

無機質量分析計の中で、最も分析感度の向上がめざましいのが大気圧高温プラズマをイオン源として用いた質量分析計である。大気圧高温プラズマ (ICP) は、励起温度が非常に高く (8000°C 以上)、さらに大気圧であるがゆえに非常に高い電子密度・プラズマ密度を有するために、イオン化能が高い。これらの特長により、これまで同位体分析が困難であった元素 (例えば Fe、Zr、Hf、W、Os、U、Th など) から安定したイオン化を実現でき、高精度な同位体分析が可能となっている。さらに分析対象元素がイオン源 (プラズマ) 内に滞在する時間が長いため、マトリックス効果の影響を受けにくいなど様々な優れた特長を有する。この ICP をイオン源として用いた質量分析計 (ICP 質量分析計) は、イオン源が大気圧であることから、クロマト分離法、加熱気化法、スパークアブレーション法、レーザーアブレーション法等、様々な試料導入法が適用でき、化学種形態を区別した同位体分析や、固体試料の特定局所部分の同位体分析などにも応用されつつある。また ICP 質量分析計では、試料前処理や分析時間の大幅な短縮が可能であり、来たるべき大規模データ時代に対応できる分析法として注目を集めている。

廃止措置計画では、微量元素の迅速かつ精密な同位体分析が重要である。最近の ICP 質量分析計では、主成分から ppm 以下の微量元素までを、ダイナミックレンジ 8 桁以上で分析するシステムも市販されており、ダイナミックレンジが 5~6 桁というのはさほど難しい技術ではないように思われるかもしれない。しかし、定量分析の場合、分析誤差・精度は数%あるいはそれ以上であるのに対し、同位体分析においては 1% の分析誤差は議論に大きな支障をきたす。このため、精密同位体分析においては、複数のイオン検出器を用いて分析対象となる同位体を同時に検出・計測する手法 (多重検出器型質量分析法) が用いられる (図 3.2-57)。従来の多重検出器型質量分析計では、ファラデー検出器 (Faraday Collector; FC) が用いられてきたが、FC は、 $10^8 \sim 10^9$  cps 以上の強い信号の計測に用いられる。FC は、このような強いイオン信号を連続して計測しても、増倍率が時間的にほとんど変化しないことが最大の特徴である。しかしその一方で、FC では微弱電流を、 $10^{10} \sim 10^{12}$  Ω、あるいはそれ以上の高抵抗で増幅するため、高抵抗の熱ノイズ (Johnson Noise: 抵抗内での電子の熱的な運動が電流として計測されてしまう。) が高く、およそ 1000 cps レベルより微弱な同位体信号の正確な計測は難しい。そこで我々の研究グループでは、高感度イオン検出器を複数用いた多重検出方式をいち早く実用化し [1]、さらに、時間安定性が高く、またダイナミックレンジも広い次世代高感度イオン検出器である Daly (デイリー) イオン検出器を用いた多重イオン検出装置を世界に先駆けて実用化した [2]。

デイリー検出器 (Daly Collector; DC) は、イオンを二次電子、光に変換し、検出するものである [3]。質量分離されたイオンをさらに加速 (10~30 kV) し、デイリーノブ (Daly knob) と呼ばれる金属に衝突させ、二次電子を発生させる。発生した二次電子は、デイリーノブの高電圧で加速さ

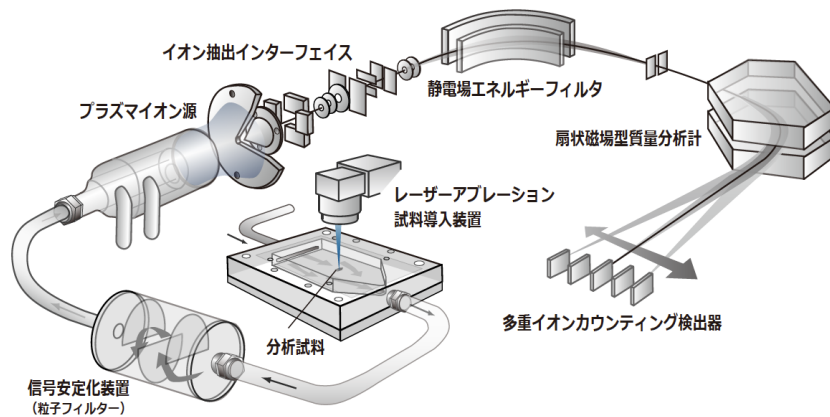


図 3.2-57 多重検出器型 ICP 質量分析法 (MC-ICPMS 法)

れ、シンチレータに衝突し光に変換される。こうして発生した光の強さ（光度）を計測する場合や、光のパルス数を数える場合がある。Electron Multiplier (EM) と同様に、パルスカウント方式を採用することでバックグラウンドの低減と、信号出力直線性の改善が図れるため、最近ではパルスカウント方式が用いられることが多い。

DC の特長はイオンを再加速し、高エネルギーで金属に衝突させる点である。これにより、重元素でも電子の発生効率の低下がなく、高感度なイオン検出が可能となっている。さらにイオンが衝突するデリレーノブ上の面積が広い上、検出するのが光であることから、検出器に与える負荷が小さく、検出器の性能劣化（増倍率やバックグラウンドの経時変化）が少ないことも特長である。さらにイオン衝突部の面積が広いことから、イオンの位置感応性が小さく、イオンビームの入射許容範囲が広く、安定した出力、質量スペクトルの平坦性が得られる。こうした特長から、DC は高感度精密同位体分析に活用されてきた。その一方で、DC は物理的なサイズが大きく、多重検出方式には適さないと考えられてきた。そこで講演者らの研究グループでは、Nu Instruments 社の協力の下、Daly 検出器の小型化を図るとともに、さらにイオン検出器部分に設置したイオン反射レンズ (deflector) により質量分散を大きくし、複数の Daly 検出器を並べることが可能となった (図 3.2-58)。

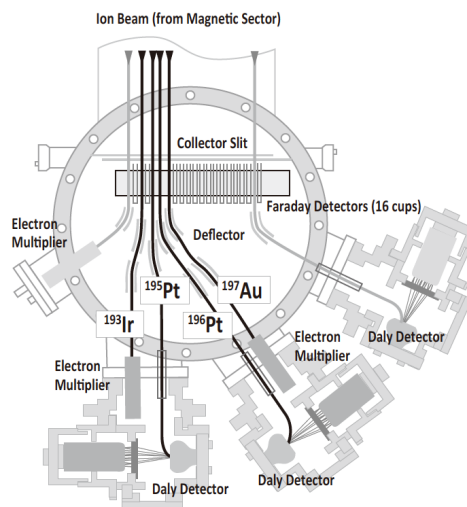


図 3.2-58 デリレーイオン検出器を備えた多重検出器

DCの特長の1つが高い増幅率安定性である。従来のマルチプライアー式検出器(EM)を用いた同位体比( $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ )分析では、検出器の増倍率の変化から観測される同位体比が経時的に変化してしまう。一方でDCを組み合わせた多重検出法では観測される同位体比の変化は0.4%以下であり、DCがEMに比べ高い出力安定性を持つことが分かった。さらにDCのもう1つの大きな特長は、 $10^7$  cpsにも及ぶ強い信号をパルスカウントで計測できる点である。前述の通り、多重検出器型質量分析計を用いた同位体分析では、信号の統計誤差が分析精度を左右する大きな要因の1つである。統計誤差の影響を低減するには、できるだけ多くのイオンを計測する必要がある。こうした場合、微弱な信号を長い時間に亘り測定することでは対応はできず、高感度な質量分析計を用いて、短時間で一気に強い信号を計測する必要がある。こうした要請に対応するためには、強い信号強度を正確に測定する必要が高まっており、将来的にデイリー検出器は有用なイオン検出法になるものと期待できる。

## ② レーザーアブレーション法の応用1: LIBS-LAMIS分光法(H30)

廃止措置では、試料を回収できず、遠隔にて分析を行う必要がある場面も想定される。そこでレーザーアブレーション(Laser Ablation; LA)に伴う原子・分子発光を用いて元素分析を行う試みも行った。レーザーアブレーションでは高いエネルギーを短時間で試料の局所部分に印加するため、レーザー照射点は非常に高温となる。この高温により、試料を構成する元素が励起され、その元素特有の波長の光を発する(原子発光現象)。この発光現象を利用して試料を構成する元素を分析するのがレーザー誘起励起分光法(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy; LIBS法)である(図3.2-59)。LIBS法では、試料を特定のセルに格納する必要がないため、場合によっては遠隔分析も可能という利点も有しており、極限環境(宇宙環境や原子炉内等)での元素分析に期待ができる。さらにレーザーエネルギーにより発せられた光を用いて試料構成元素の同位体組成情報を引き出す試みも始まっている。

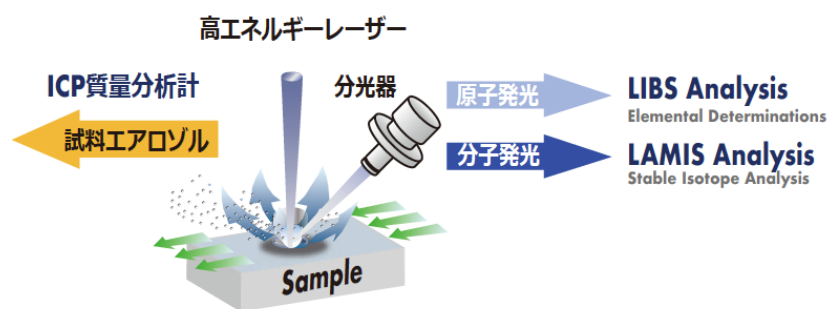


図 3.2-59 レーザー励起による原子・分子発光

原子発光に見られる同位体効果(同位体間での原子発光線の波長の違い、同位体シフト)は非常に小さい。例えばホウ素の同位体( $^{10}\text{B}$ 、 $^{11}\text{B}$ )の原子発光線の同位体シフトは僅か2.5 pmである。ホウ素の原子線を利用して同位体分析を行うためには、非常に高分解能の分光器が必要である上、分光段階での光量の損失(感度の低下)が大きく、分光的手法による同位体分析は実用的ではない。しかしレーザーアブレーションにより発生する光は原子発光(LIBS光)だけではない。レーザー照射により生成した試料構成元素は、他の試料構成元素(同じ元素が結合することもある)や雰囲気ガス(大気中であれば酸素や窒素)と結合し、分子振動に由来する発光を生じる。この分子発光は、原子の結合に由来する発光線であるため、その発光線には結合の振動に由来する周期構造が見られる。大気中でレーザーアブレーションすると、グラファイトの炭素と大気中の窒素が結合したC-N結合由来

の発光線が見られる。一方で、ヘリウム雰囲気下でレーザーアブレーションを行うと C-C 結合に由来する分子発光が卓越する（スワンバンド）。いずれの発光線にも分子振動に由来する波状のスペクトルが見られる。この波の周期は、結合する原子の質量に依存するため、同位体間で大きな違いとなる。先ほどのホウ素の例を挙げると、B-O 結合の分子振動の同位体効果は 730 pm 程度であり、原子発光の同位体シフトと比べ数百倍の大きさとなる [4, 5]。さらに LAMIS 信号は化学結合を反映した発光現象であるため、将来的には固体試料中での分析元素の化学種形態（酸化物なのか塩化物か、あるいは二価なのか三価なのか、等）に関する情報を引き出せる可能性もある。固体試料の化学種形態情報は、LA-ICP-MS 法では得られない情報であるため、今後は LA-ICP-MS 法と LIBS/LAMIS 法を組み合わせることで全く新しい分析が実現できる可能性がある。

### ③ レーザーアブレーション法の応用 2 : LA-ICP-MS 法 (H26-H30)

最近ではレーザーの高出力化・小型化も進み、ハンディータイプの LIBS 装置も市販されている。その一方で、LIBS 法では分析元素信号が試料の化学組成や表面状態に応じて変化するため、正確な定量分析を行うことが困難である。さらに分析元素によっては試料の構成成分・共存成分からスペクトル干渉を受けることがあり、定量分析の際には系統誤差に細心の注意を払う必要がある。こうした理由から、元素検出感度や定量性能において、LIBS 法に比べ LA-ICP-MS 法 (図 3.2-60) が有利であると考えられている。

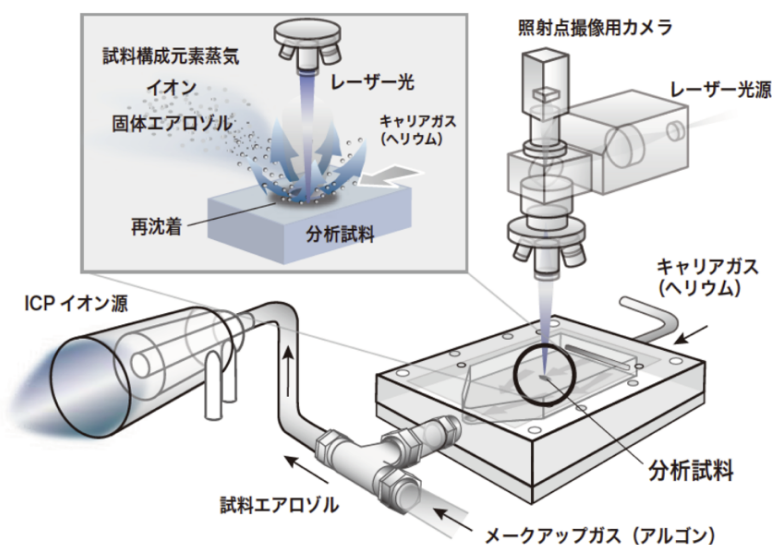


図 3.2-60 レーザー試料導入法の概念図

廃炉措置では、高い分析感度とともに分析の迅速性も重要となる。例えば放射性核種の分布状況（マッピング分析）を調べるためには、数十～数百以上の試料を分析する必要があり、さらに多くの場合、分布状況の時間変化（時系列分析）が必要となる。こうした、高感度・迅速性に対応するため、本研究では平成 26 年度から ICP-MS 法にレーザーアブレーション（LA）試料導入法を組み合わせた分析法（LA-ICP-MS 法）の開発を続けてきた（図 3.2-60）。平成 29 年度までに、レーザー波長の短波長化（紫外線化）やレーザーの短パルス化（フェムト秒レーザーの導入）により、生成する試料エアロゾルを大幅に微細化でき、分析感度の向上や、元素分別効果の低減、さらには分析再現性の改善などが達成できた。

通常の LA-ICP-MS 法では、分析試料はレーザー照射の効率が最大限になるように分析面は研磨処



理を行う。さらに分析試料は密閉容器内に格納した状態でレーザーアブレーションを行う。しかし廃止措置では、試料は必ずしも表面研磨などの処理を行うことはできず、さらにセル内に格納することも難しい場面が想定される。そこで本研究では、1) 試料のサンプリング法、及び2) 遠隔操作による試料格納に対応するセルの改造、を行った。

### 1) 試料サンプリング法 (H30)

通常の LA-ICP-MS 法での分析では、試料の分析面は研磨処理される。これにより、レーザー光をより正確に絞り込むことができる上、レーザーの乱反射によるエネルギー損失の影響を最小限に抑えることができる。しかし放射線量の高い試料などは研磨あるいは通常の樹脂埋包・保持が難しい。そこで本研究では、両面テープを用いてワイヤー状の試料を付着・回収したものを、直接化学分析することとした（研磨処理等を行わなかった。）。回収した試料の写真を図 3.2-61 に示す。

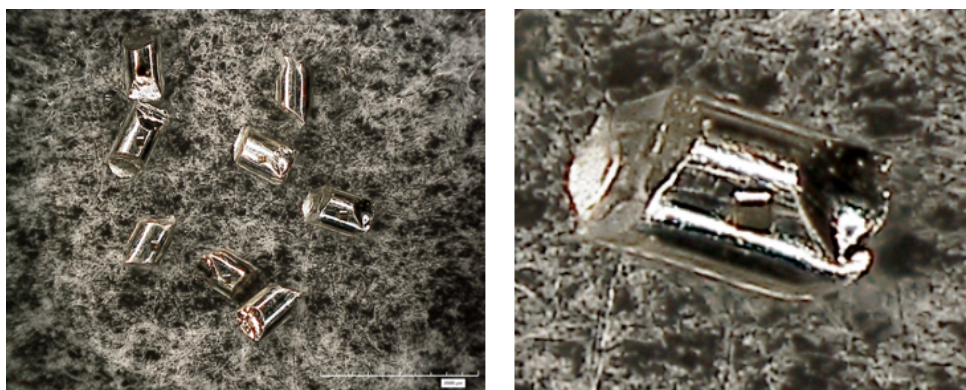


図 3.2-61 両面テープを用いて回収した模擬デブリ試料（右は拡大図）

両面テープで回収した模擬デブリ試料は、太さ 0.5 mm 及び 1 mm のワイヤー状ステンレスを切断したものである。このうち図 3.2-61 は太さ 0.5 mm のワイヤー状試料である。破片 8 個を机の上に散布し、両面テープにて回収したものであり、固定処理や研磨処理などは行っていない。この試料をそのまま LA-ICP-MS 法の試料セルに格納し、レーザー照射を行った。レーザーは、東大・地殻化学実験施設で独自に開発したガルバノ光学系を装備したフェムト秒レーザーアブレーション装置である。今回の分析では、 $100 \times 100 \mu\text{m}$  領域を、10 秒で高速アブレーションした（アブレーション痕を図 3.2-61 右図に示す。）。この LA-ICP-MS 法による分析で得られた質量スペクトル（40~140 Da 範囲）を図 3.2-62 に、また信号プロファイルを図 3.2-63 に示す。

今回の試料の化学組成は公表されていないが、鉄、ニッケル、クロム、マンガン等の主成分から、マグネシウム、チタン、タンタル、ジルコニウム等の微量成分まで安定した信号が得られていることが分かる。さらに、太さの違う試料でも、元素信号の強度や安定性にはほとんど差異がなく、試料の太さの影響はほとんどないことも明らかとなった。以上の実験から、試料のサイズとして 0.5 mm (500  $\mu\text{m}$ ) 程度があれば元素分析が可能であることが明らかとなった。

次に得られた分析信号強度から、構成成分の定量分析を行った。0.5 mm 試料及び 1 mm 試料から、それぞれ 5 箇所 ( $100 \times 100 \mu\text{m}$ ) を高速多点アブレーションを行い、得られた信号強度データを NIST SRM664 (鉄鋼標準試料) を用いて校正・定量化した。得られた元素濃度を表 3.2-8 に示す。分析した固体試料はランダムな場所に、またランダムな方向で並んでいる。さらに試料はワイヤー状のものを切断したものであるため、レーザーアブレーションに最適な平坦面は得られなかった。したがっ

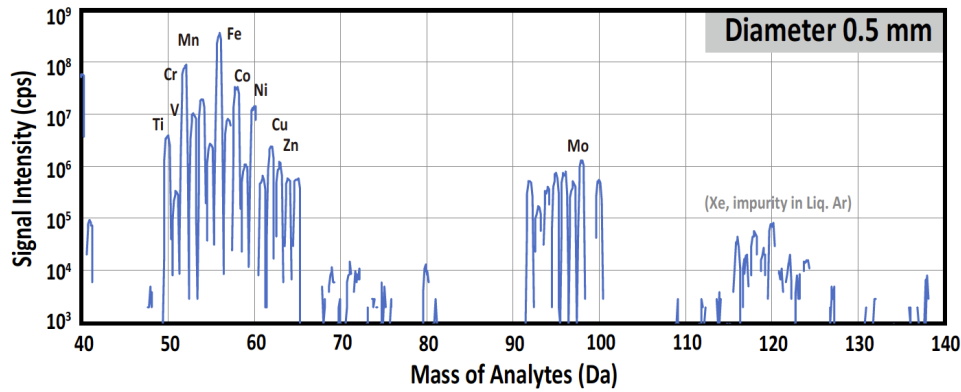


図 3.2-62 模擬デブリ試料（太さ 0.5 mm）から得られた質量スペクトル

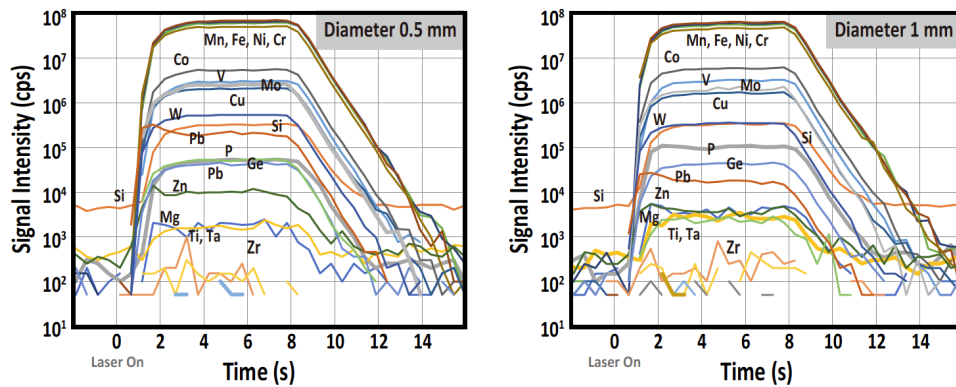


図 3.2-63 LA-ICP-MS 法により得られた様々な元素の信号情報（左は太さ 0.5 mm、右は太さ 1 mm の模擬デブリ試料）

て、レーザーアブレーションは、局面上、あるいは傾斜面上で行うこととなった。このため 5 箇所のアブレーションから得られた信号強度の再現性は 3~10% 程度（5 回の定量結果の標準偏差： $2\sigma$ ）となっており、最適条件（研磨した試料を平坦に設置したもの）での繰り返し再現性（多くの元素で  $2\sigma = 5\%$  以下）がやや低下している。

表 3.2-8 の結果から、今回の試料は鉄、ニッケル、クロムの合金であることが分かる。もし主成分組成が分かれば、主成分による内標準補正を行い、繰り返し再現性や定量分析の高精度化が可能である。しかし今回の分析では、未知のマトリックス組成の分析、という前提で定量分析を行ったため、鉄を用いた内標準補正は行わなかった。信号強度の記載でも述べた通り、5 スポットの各データによる定量結果と、5 回の繰り返し再現性の平均値を示す。試料の大きさ（直径 0.5 mm 及び 1 mm）による繰り返し再現性（分析精度）の差異は見られない。0.5 mm 程度のサイズがあれば多元素同時分析が可能であることが示せた。

## 2) 試料セルの改造 (H29)

LA-ICP 質量分析法では、高エネルギーレーザーを用いて試料の一部を気化あるいはエアロゾル化し、質量分析計内でイオン化することで元素の分析を行う。このため生成したガスあるいはエアロゾルをプラズマイオン源まで輸送する必要がある。このため分析試料は密閉容器に格納し、ヘリウムガスをを用いて試料エアロゾルをプラズマイオン源まで輸送する。現状の試料セルはマニュアルで開閉するため、遠隔での試料取り込みが困難であった。そこで平成 29 年度は、自動エアロック機能を適用



表 3. 2-8 構成元素の半定量分析の結果

d = 0.5 mm	<sup>25</sup> Mg	<sup>29</sup> Si	<sup>31</sup> P	<sup>51</sup> V	<sup>53</sup> Cr	<sup>55</sup> Mn	<sup>57</sup> Fe	<sup>59</sup> Co	<sup>60</sup> Ni	<sup>65</sup> Cu	<sup>95</sup> Mo	<sup>182</sup> W
Spot 1	1.40	3092	348	1069	192749	13457	1005128	1971	90804	3913	3410	253
Spot 2	1.27	2858	335	1008	182239	12804	1022535	1853	85657	3697	3288	244
Spot 3	1.34	2735	332	991	178573	12563	1027575	1825	84370	3629	3250	242
Spot 4	1.33	2832	325	980	176340	12514	1031359	1791	82870	3571	3212	237
Spot 5	1.34	2800	320	985	177146	12583	1031668	1803	83152	3555	3210	238
Average	1.33	2863	332	1006	181410	12784	1023653	1848	85371	3673	3274	243
2SD	0.10	272	22	73	13461	785	21987	145	6463	290	165	13
%2SD	7.3	9.5	6.5	7.3	7.4	6.1	2.1	7.8	7.6	7.9	5.0	5.3
d = 1.0 mm	<sup>25</sup> Mg	<sup>29</sup> Si	<sup>31</sup> P	<sup>51</sup> V	<sup>53</sup> Cr	<sup>55</sup> Mn	<sup>57</sup> Fe	<sup>59</sup> Co	<sup>60</sup> Ni	<sup>65</sup> Cu	<sup>95</sup> Mo	<sup>182</sup> W
Spot 1	3	2883	550	1063	168447	11907	1044141	2047	80253	2942	2918	171
Spot 2	2	3296	677	1108	177399	12452	1029744	2137	83766	3066	3007	177
Spot 3	5	3085	475	1088	172192	12220	1037851	2080	82040	3023	2982	173
Spot 4	2	2836	449	1044	165671	11788	1050650	2011	78614	2895	2883	168
Spot 5	3	2723	404	991	157069	11287	1065195	1910	74640	2731	2785	162
Average	2.9	2965	511	1059	168155	11931	1045516	2037	79863	2931	2915	170
2SD	2.1	454	214	90	15195	890	26888	169	6998	261	176	12
%2SD	71.5	15.3	41.8	8.5	9.0	7.5	2.6	8.3	8.8	8.9	6.0	6.8

\* 内部標準化補正は行われていない（生の信号強度データに基づく校正）

できる新型のセルを設計した（図 3. 2-64）。この試料セルでは、ロボットで回収された試料を抽斗状の試料トレーに入れ、前面から押し込む形で密閉性を確保できるため、アクチュエーター等を利用することで自動化が容易となる。さらに、試料トレーを複数個用意することで、複数の試料を連続で分析できる上、試料の保管にも対応できる。現在、我々の研究室では、自動ローディングシステムに対応した LA システムの開発を進めており、ロボットによるサンプリングとの結合も可能であると考えている。

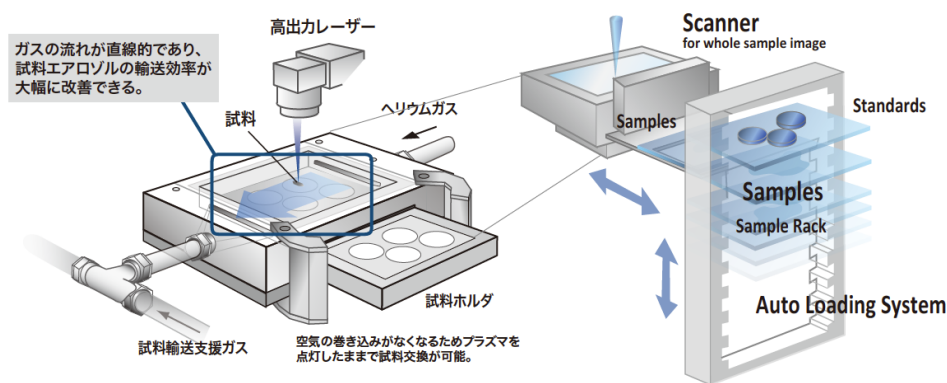


図 3. 2-64 自動ローディングを想定した試料セル設計

#### ④ ICP-MS 法を用いた微粒子（ナノ粒子）の高感度・高速分析（H26-H29）

これまでの研究を通じて、LA-ICP-MS 法を用いることで、分析前処理を最小限に抑えつつ（小片にしてセルに格納する。）、高感度かつ迅速な元素・同位体分析が可能であることが示された。まだ実践分析には応用できていないが、今後はサンプラーと自動ローダー（図 3. 2-64）の統合により、現場分析をかなり実現レベルに高めることができると考えられる。その一方で放射性核種及び物質の拡散・輸送に大きな影響を持つ微細粒子（ミクロンあるいはサブミクロン粒子）に対しても、高感度かつ迅

速な分析法を開発する必要がある。特に 0.5  $\mu\text{m}$  以下の粒子はナノ粒子 (nanoparticle) と呼ばれ、通常のフィルター (中性能フィルター及び HEPA フィルター) でも捕集されない。したがって、こうしたナノ粒子の動態を把握することは、放射能物質の拡散や施設内で作業をするヒトへの影響を把握する上で重要な知見を提供する。そこで平成 29 年度は、ICP 質量分析計を用いることで、ナノ粒子の高感度かつ迅速な分析法 (元素、サイズ及び数密度) を調べる分析法の開発を行った。

天然には様々な微粒子が存在する。特に 100 nm 以下の微粒子は「ナノ粒子」と呼ばれ、主として高い比表面積及び量子サイズ効果により特異的な物性あるいは反応性を示し、電子、材料、生命、医療など様々な研究分野に活用されている。一方でナノ粒子は、その高い反応性や生体分子との強い相互作用のために生体機能への影響が懸念されており、ナノ粒子の環境動態評価や生態系への影響を評価する気運が急速に高まりつつある。特に欧州では、ナノ粒子の製造・取り扱いに規制がある上、食品に対しては 1~100 nm のナノ粒子の使用が制限されている。これまでナノ粒子のサイズ分析には電子顕微鏡法、X 線小角散乱法、動的光散乱法などの方法が用いられてきたが、これらの方法では分析前処理が複雑である上、環境関連試料のように存在量が低い場合 ( $\text{mgL}^{-1}$ ~ $\mu\text{gL}^{-1}$ ) は、迅速な分析が困難であった。近年になって ICP-MS 法によるナノ粒子計測が注目を集めている (例えば [6])。ICP-MS 法では、導入されたナノ粒子はプラズマ内で原子化・イオン化され質量分析計によって元素分離・検出される。イオンパルス信号の面積からナノ粒子の構成原子数 (サイズ) を、またイオンパルス信号の頻度からナノ粒子の溶液中での個数濃度を決定することが可能である。さらに信号の時間プロファイルを高分解能で比較することで、分析元素が溶解成分として存在していたか、あるいは粒子状に存在していたかを区別することができ、元素の拡散・輸送過程の解明に重要な知見を与える。

既に ICP-MS 法を用いてナノ粒子の環境動態や生体への影響を評価する研究が行われつつあるが、その一方で従来の ICP-MS 法では小さなナノ粒子の検出、例えば金ナノ粒子では 20 nm 以下程度の粒子が検出できないという問題があり、さらに小さなナノ粒子の検出が可能な分析法の開発が期待されている。そこで本研究では、イオン透過効率の高い磁場型 ICP-MS と、ダイナミックレンジを広めたイオン検出方式を組み合わせることで、ナノ粒子の高感度・高速検出を試みた。

ナノ粒子から得られる信号は非常に短時間 (平均 0.3 ミリ秒) なものである。この短い信号を定量的に検出するとともに、時間プロファイルの変化を詳細に比較するためには、信号の読み出し速度 (時間分解能) を高める必要がある。本研究では、ナノ粒子から得られる信号を詳細に計測することを目的に、信号読み出し速度を 20000~100000 Hz に高めた (通常の ICP-MS のイオン計測システムでは 50~1000 Hz)。これにより、ナノ粒子信号を定量的に計測することが可能であり、ICP イオン源に導入されたナノ粒子のサイズ情報と、信号プロファイルを正確に捉えることに成功した (図 3.2-65)。

時間分解能を高めた計測では、得られる信号強度の時系列データ量が膨大となる。例えば読み出し速度 50000 Hz での計測では 1 秒間の測定で 5 万行のデータとなる。この膨大なデータ量を高速で処理するために、本研究では独自のナノ粒子検出及び計測用のソフトウェア (NanoQuant) を開発した。ナノ粒子計測用のソフトウェアは既に市販化されているが、計算のアルゴリズムが一般に公表されておらず、どのような計算式で処理が行われているのかが不明瞭である。また、試料中のナノ粒子濃度が高い場合に起こり得る、2 つ以上のナノ粒子が同時に入ってしまうことへの対策が不完全であり、定量的な解析を行う上で問題となる。NanoQuant では、検出されたナノ粒子の全ピークを視覚的に確認でき、万が一、複数の信号が重なった場合でも、効果的に排除することが可能であり、より高い定量性が確保できる。

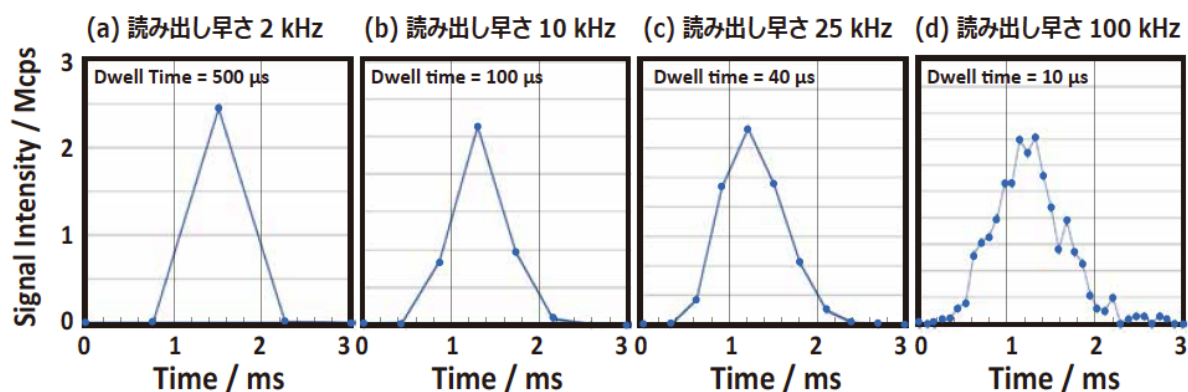


図 3.2-65 ナノ粒子から得られた信号プロファイル

### ⑤ LA-ICP-MS 法を用いたナノ粒子のイメージング分析 (H26-H29)

これまでの分析により、信号読み出しを高速化した ICP-MS と信号処理ソフト (NanoQuant) を組み合わせることで、ナノ粒子の正確なサイズ分析と個数濃度分析が可能であることが分かった。そこで本分析システムに、レーザー試料導入法 (LA 法) を組み合わせることで、ナノ粒子の直接計測を試みた。

大気粉塵捕集用石英フィルター上にナノ粒子 (Au の 40 nm サイズ標準試料) を含む溶液を滴下し自然乾燥させた (図 3.2-66 左)。この石英フィルターをレーザーアブレーションし、本研究で開発した ICP-MS 計測システムによりナノ粒子を計測した。NanoQuant を用いてサイズ分析した結果、Ti:S フェムト秒レーザーを用いた場合、ナノ粒子の大部分は破碎されることが分かった (図 3.2-66 右)。これはフェムト秒レーザーが金属物質に対して高いアブレーション効率を持つことが原因であると考えられる。金属物質は一般的に高い熱拡散速度を持つため、通常のナノ秒レーザーでは効率良く加熱・アブレーションすることができない。これに対してフェムト秒レーザーでは、熱拡散速度 (ピコ秒レンジ) よりも短い時間でレーザーエネルギーを試料に付加できるため、金属試料でも効果的なアブレーションが可能である (例えば [7, 8])。したがって、Au や Ag といった金属製のナノ粒子においても、フェムト秒レーザーを照射した場合、そのエネルギーでナノ粒子がさらに微細化するものと考えられる。この結果から、フェムト秒レーザーを用いた LA-ICP-MS 法では金属製ナノ粒子のサイズ分布は難しいと考えられる。

そこで本研究では、ナノ秒レーザーであり、さらに波長の短い ArF エキシマレーザー (波長 193 nm) を用い、ナノ粒子のアブレーション実験を行った。ArF エキシマレーザーは、ナノ秒レーザーであり、基本的に金属物質のアブレーションには不向きである。さらに ArF エキシマレーザーは、波長が真空紫外領域であり、多くの金属物質で反射されやすくなる。したがって ArF エキシマレーザーでは、ナノ粒子の破碎を最小限に低減できると期待される。ArF レーザーを用いてアブレーションを行い、本研究で開発した ICP-MS システムでナノ粒子 (Au の 40 nm 及び 60 nm のサイズ標準試料) サイズを計測した結果を図 3.2-67 に示す。この図から、エキシマレーザーを用い、さらにエネルギーを低めに設定することでナノ粒子のサイズ分析が可能であることが分かる。

図 3.2-67 の結果は、ArF エキシマレーザーを用いることでナノ粒子のサイズ分析が可能であることを示すとともに、溶存成分の影響が無視できないことも示している。この結果の基となった信号強度の時間プロファイルを図 3.2-68 に示す。図 3.2-68 上でパルス状に現れている信号がナノ粒子の

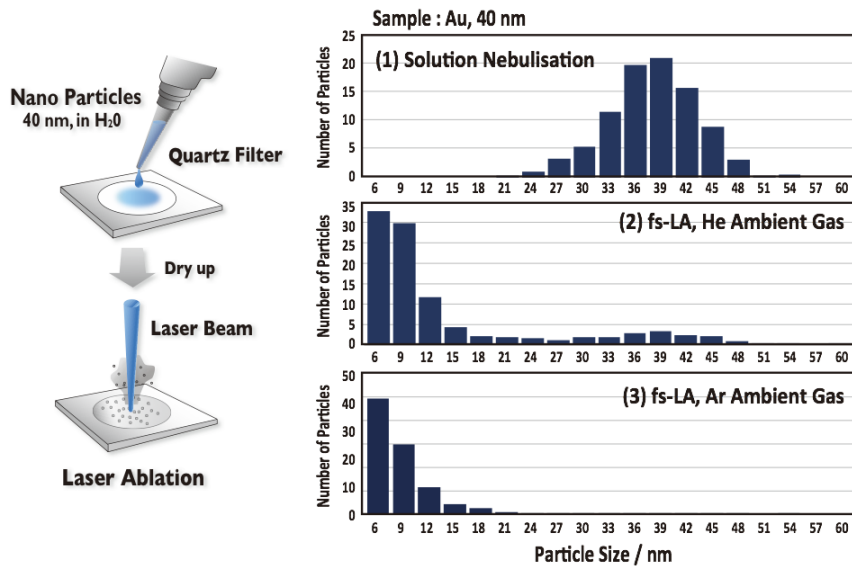


図 3.2-66 フェムト秒レーザー試料導入法を用いたナノ粒子計測

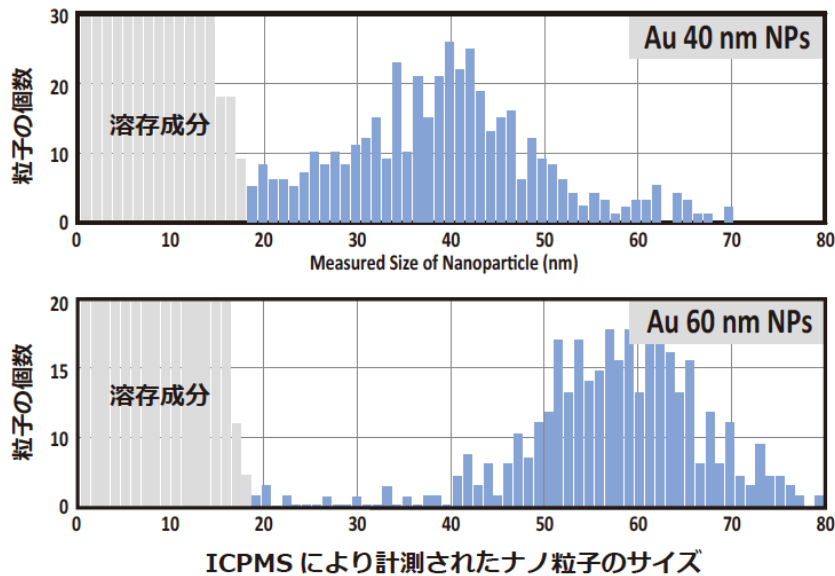
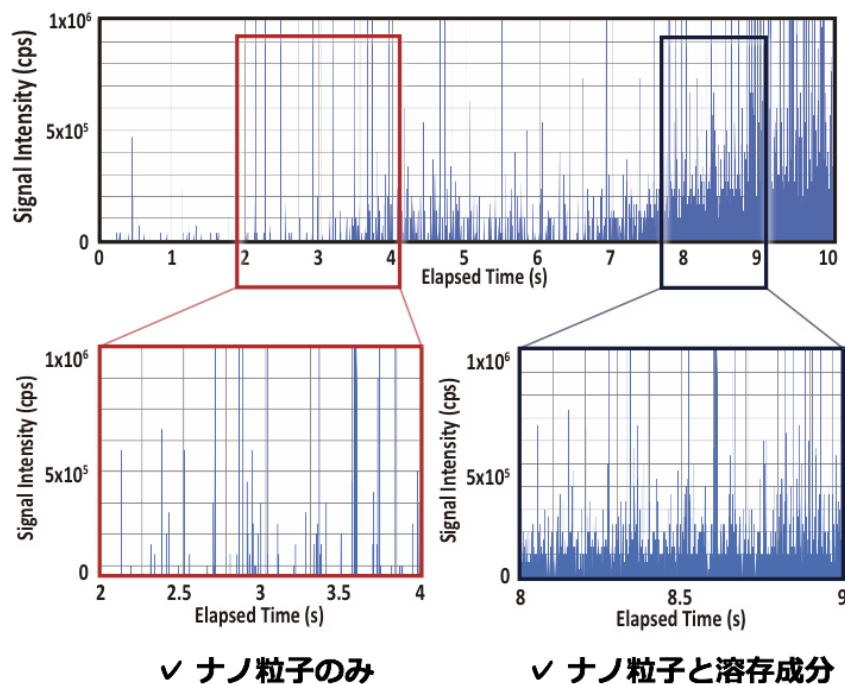


図 3.2-67 ArF エキシマレーザー試料導入法を用いたナノ粒子計測

信号であり、パルス 1 個がナノ粒子 1 個に対応している。観測時間 2~4 秒の間では、バックグラウンドが低く、ナノ粒子由来のピークのみが観測できている。これは試料の分析領域（レーザーアブレーションしている領域）には、ナノ粒子のみが存在し、溶存成分（厳密には溶存成分が乾固して形成された塩）はほとんどないことを示している。一方で観測時間 8~9 秒の間では、非常に高いバックグラウンドがあり、その上にナノパーティクル由来のピークが観測されている（図 3.2-68）。これは試料の分析領域に、ナノ粒子と溶存成分が共存していたことを示している。したがって、ICP-MS から得られた信号時間プロファイルを解析することで、分析元素がどのような形態で存在していたかを判別することも可能である。

これまで ICP-MS 法は元素濃度及び同位体組成情報のみを提供する分析法であると考えられてきた。しかし本研究で開発した計測技術を応用することで、従来の濃度・同位体組成情報に加え、分析



✓ ナノ粒子のみ

✓ ナノ粒子と溶存成分

図 3.2-68 信号プロファイルを用いた分析元素存在形態解析

対象元素の存在形態に関する情報を引き出すことも可能であると期待できる。福島第一原子力発電所からは様々な粒子状物質の拡散も確認されている。本分析法を応用することで、将来的には分析元素の存在形態や粒子サイズに関する知見を引き出すことが可能となり、より厳密な元素拡散機構の解析が可能になるものと期待できる。さらにレーザーアブレーション法は、サンプリング部（レーザー装置）と分析装置（ICP-MS）が分離可能である。本研究で用いた装置はレーザー装置と ICP-MS の距離は 3~4 m であるが、減感が問題とならない場合、両装置を 10~20 m 程度離すことも可能であり（元素分析感度が 1/2~1/3 程度にまで減衰する。）、高い放射能を有する試料の分析時に操作者の被曝量を最小限に抑えることも可能であるなど、さらに分析局面に合わせた改造も可能である。

## (2) 加速器質量分析 (Accelerator Mass Spectrometry; AMS)

平成 26 年度から平成 29 年度は、デブリ分析や環境影響評価分析を目指して、 $^{236}\text{U}$ -AMS を開発した。加速器装置側では、ターミナル電圧 2.4 MV、イオン電荷 5+ を用いた測定系を構築した。試料前処理では、デブリ分析用と環境試料分析用とで異なる考え方のスキームを考案した。平成 29 年度までに、環境試料として土壌試料を処理し、実際に  $^{236}\text{U}$  の測定に成功した。一方デブリ分析用には、キャリアを用いる方法が有効であることを見出し、またキャリアとしては土壌中のウランを抽出する方法を考案した。一方、さらなる難測定核種の測定方法や、さらに高感度なアクチノイド同位体分析を目指し、全く新しい同重体分離手法であるレーザー光脱離法の開発を進めた。技術的な要点である、負イオンを減速しながらも空間的に拡散させないための「イオンクーラー」を設計・製作し、これをテストするためのテストベンチビームラインを構築した。このテストベンチを用いてイオンクーラーのビーム透過実験を行い、実際の加速器質量分析ラインへ実装するための条件を出すことができた。

平成 30 年度は、デブリのオフサイト分析をシミュレートし、固体微粒子模擬試料を作製し、これに対して  $^{236}\text{U}$  を分析するための模擬実験を行った。その際、平成 29 年度までに考案したキャリアー

法を実践し、実際に加速器質量分析の測定までを行い、十分実用的な手法であることをデモンストラートした。

## ① $^{236}\text{U}$ -AMS (H26-H29)

### 1) イントロダクション

$^{236}\text{U}$  は  $^{235}\text{U}$  の中性子捕獲により生成する。原子炉内では核燃料の燃焼度に比例して  $^{236}\text{U}$  が生成するため、 $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$  は燃焼度の優れた指標となる。通常、原子炉燃料に用いられるウランでは、 $^{235}\text{U}$  は数%に濃縮されているため、燃焼によって生成する  $^{236}\text{U}$  の  $^{238}\text{U}$  に対する同位体比  $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$  は、 $10^{-3}$  のオーダーとなり、これは、環境中での同位体比（天然状態で  $< 10^{-11}$ 、グローバルフォールアウトの影響を受けた土壌でも  $< 10^{-7}$ ）に比べると遥かに高い。したがって、環境中に核燃料起源のウランが漏出すれば、その影響は明白に検知できる。さらに、燃料デブリ中の  $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$  を測定することによって、燃焼度が直接推定できるため、燃料棒の配置・交換履歴と照らし合わせることによって、ソースの燃料棒が同定でき、廃止措置においては極めて重要な情報となる。

$^{236}\text{U}$ （もしくは  $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$  比）の測定には、ICP-MS などの質量分析計による測定の試みがあるが、環境中の同位体比は極めて小さいため、存在比感度（abundance sensitivity）の点で厳しい面がある。一方、本研究で進めている、加速器質量分析法（AMS）では、加速器によるイオンの運動方向への加速により、速度の運動方向に垂直な成分が相対的に小さくなるため、存在比感度で有利である。また、タンデム加速器に特有な荷電変換部では、干渉する同重分子イオンを解離させることができるため、その後の質量分析系で排除できる。これらの特質を活かし、本研究では、東京大学タンデム加速器研究施設（MALT）において加速器質量分析による  $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$  測定システムを開発した。

### 2) 加速器質量分析システムの開発

#### 加速器装置

$^{236}\text{U}$  の検出における最大の妨害要因は、同位体の  $^{235}\text{U}$  である。 $^{236}\text{U}$ -AMS（AMS を用いて  $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$  同位体比を測定可能としたシステムをこのように呼ぶ。）において、イオン源では、 $\text{UO}^-$  という酸化物のイオン源で引き出す。その際、僅かながら  $\text{UOH}^-$  も生成する。そのため、 $^{236}\text{UO}^-$  と  $^{235}\text{UOH}^-$  は同じ質量数となり、同時に加速器に入射してしまう。タンデム加速器の荷電変換により、最終的には  $^{236}\text{U}^{5+}$  及び  $^{235}\text{U}^{5+}$  となり、運動量、質量数ともに僅かに異なるが、極めて近い軌道を通り、最終検出器に到達してしまう。東京大学タンデム加速器研究施設（MALT）における  $^{236}\text{U}$ -AMS では、この軌道の僅かのずれを利用して、スリットや静電偏向器の設定値の最適化を計算・実験の両面から行い、バックグラウンドが、 $^{236}\text{U}/^{238}\text{U} \sim 3 \times 10^{-10}$  のシステムを構築した（図 3.2-69）。

#### ターゲット

加速器質量分析のイオン源部に装填する試料をターゲットと呼ぶ。ターゲットは、負イオンを生成するのにふさわしい化学形を選択する。 $^{236}\text{U}$ -AMS においては、ウラン濃度の低い試料の前処理を行う関係で、鉄粉 3 mg にウラン 3  $\mu\text{g}$  を含むものが適切であることを確認した。

#### $^{236}\text{U}$ -AMS のための試料前処理法の検討

実際の廃炉工程を進めていく中で、ウラン同位体比  $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$  の測定は 2 つの意味で重要な意味を持つ：



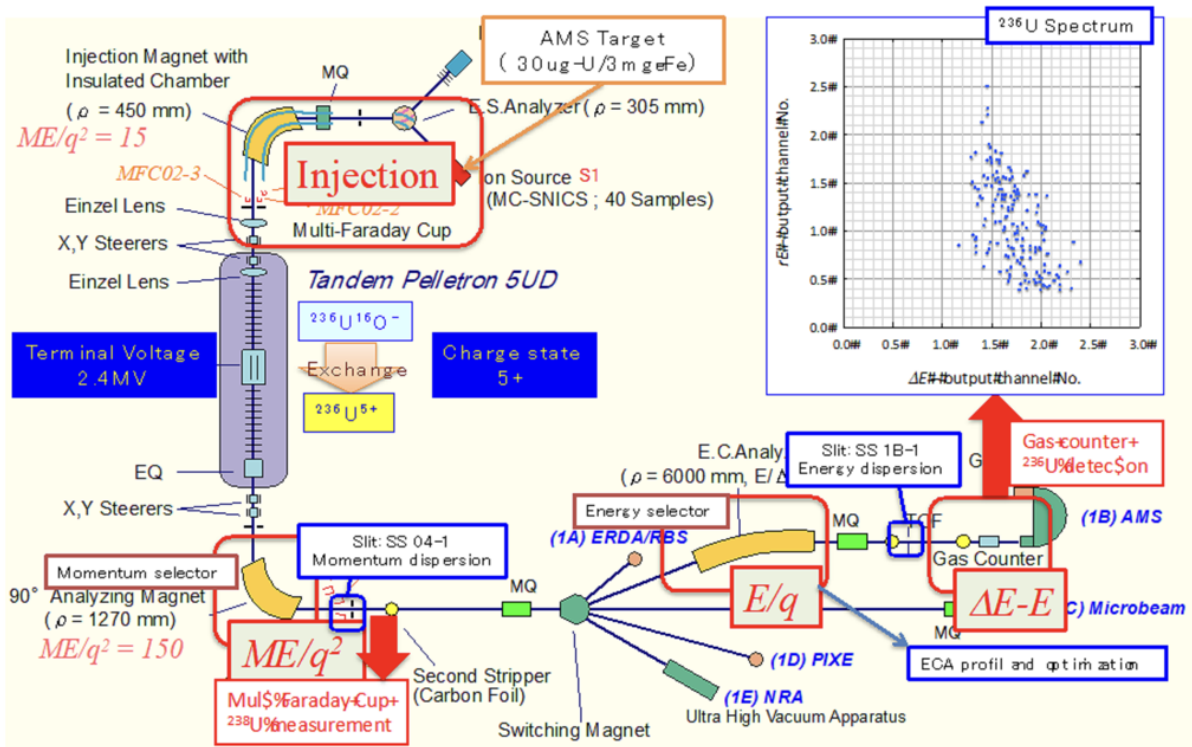


図 3.2-69 東京大学タンデム加速器研究施設における  $^{236}\text{U}$ -AMS の基本構成

**原子炉周辺の環境評価** 原発事故起源のウランがどの程度周辺環境に、漏洩しているかを調査する際に、同位体比  $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$  は、グローバルフォールアウト起源のウランとの混合率を推定するために決定的な指標となる。これについては、 $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$  定量のための土壌処理プロトコルを検討し、図 3.2-70 のフローチャートに示す前処理手順を確立し、実際に福島第一原子力発電所近傍の土壌に対し、この方法を適用し、 $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$  の測定に成功した。

**燃料デブリ中のウラン同位体比の測定** 一方、核燃料中のウラン同位体比  $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$  は、核燃料の燃焼度によって決まるため、デブリ中の  $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$  は、そのデブリがどの燃料棒由来のものかを推定するために重要な指標となる。ただし、現時点では、デブリがどのような場所にあるか、どのような形で存在するか不明である上に、高い放射能を持っていると予想されるため、技術的観点からも法規制上の観点からもどの程度の量を持ち出せるのか、予測がつかない。しかし、高感度な加速器質量分析 (AMS) の特徴を活かせば、極微量のデブリ試料に対してもキャリアを加えることによって測定が可能となる。図 3.2-71 は、 $^{236}\text{U}/^{238}\text{U} = 3.5 \times 10^{-3}$  の微量デブリに、異なるウラン同位体比を持つキャリアを加えた場合の、測定対象試料中のウラン同位体比を示したものである。キャリアとしては  $^{238}\text{U}$  のみを含むものが理想的であるが、そのようなキャリアは入手困難である。現在入手可能なウランキャリアとしては、ICP-MS 用の標準試料である spex 社の XSTC-622 があるが、我々の測定により、ウラン同位体比は、 $^{236}\text{U}/^{238}\text{U} = 3.2 \times 10^{-5}$  であることが分かっている。図 3.2-71 によれば、このキャリアでは、デブリの量が  $1 \mu\text{g}$  以下では、測定値に差が出ないため、定量が困難となる。キャリアとしては、同位体  $^{236}\text{U}/^{238}\text{U} = 1.0 \times 10^{-8}$  以下のものが望ましい。そのようなキャリアとして、原発事故の影響を受けていない土壌からウランを抽出することを考えた。土壌は、グローバルフォールアウト

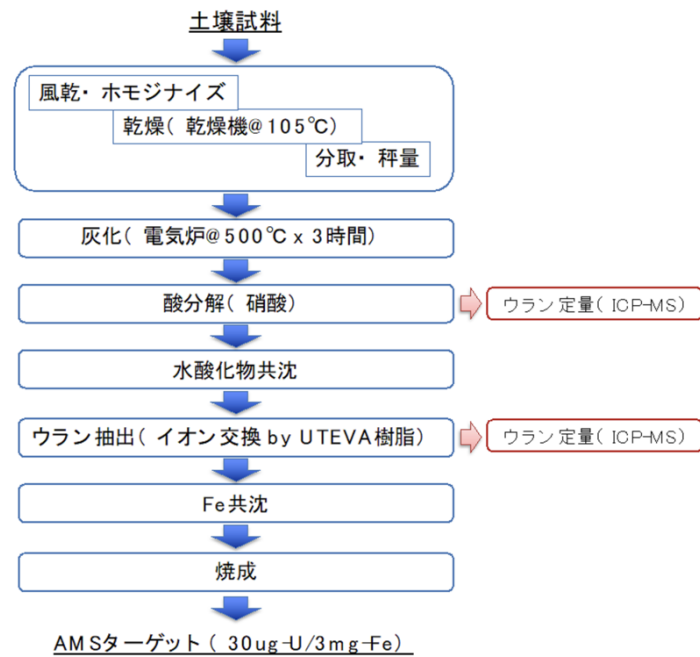


図 3. 2-70  $^{236}\text{U}$ -AMS のための土壌試料の前処理フローチャート

の影響で、 $^{236}\text{U}/^{238}\text{U} = 1.0 \times 10^{-9}$  程度のウランを含むと考えられるが、これをキャリアとして使えば、図 3. 2-71 により、1 ng 程度のデブリでも測定可能であることが示されている。

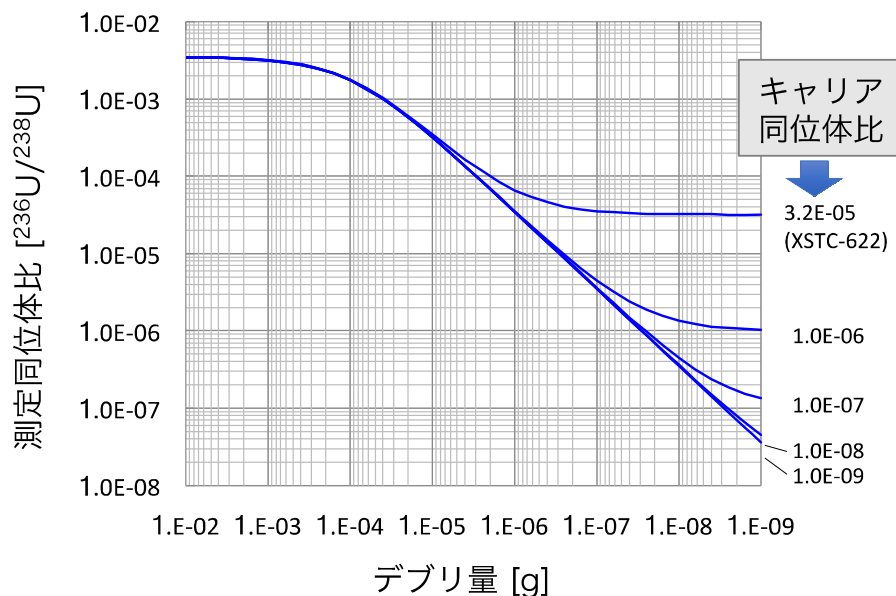


図 3. 2-71 デブリの同位体比を  $^{236}\text{U}/^{238}\text{U} = 3.5 \times 10^{-3}$ 、キャリア量を  $100 \mu\text{g}$  とした場合の AMS 試料中の予想される同位体比

キャリア法を用いる場合、試料中の  $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$  比を算出するためには、試料中の  $^{238}\text{U}$  量を測定する必要がある。 $^{238}\text{U}$  の定量には ICP-MS を用いる。ICP-MS を用いる場合、 $^{235}\text{U}$  の定量も可能となる。 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  比が分かると、 $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$  の結果と有機的に比較することによって、試料

の起源についての、より確かな情報が得られる。

### 標準試料 XSTC-622 に対する、ICP-MS 及び AMS の結果の評価

XSTC-622 について、 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 0.0024$  (ICP-MS)、 $^{236}\text{U}/^{238}\text{U} = 3.0 \times 10^{-5}$  (AMS) という結果が得られた。 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  については、ウランの天然の同位体比  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 0.00725$  と比較すると明確に低い結果となった一方、 $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$  は極めて高い値を示している。このことから、XSTC-622 が使用済み核燃料を原料としていることが推察される。同様の測定を福島第一原子力発電所のデブリに当てはめれば、燃料の  $^{235}\text{U}$  濃縮度が分かっているため、燃焼度も正確に推定できるものと考えられる。

## ② 負イオンクーラー (H26-H29)

### 1) イントロダクション

加速器質量分析では、加速器によってイオンに付与したエネルギー (通常、MeV/nucleon 程度) を利用して同重体を分離することが技術的な鍵である。そこでは、原子核中の電荷の違いを、物質との相互作用の違いとして利用し、分別する。しかし、アクチノイドや核分裂生成核種 (Fission Products; F.P.) では、核種自体の質量数が大きいため、同重体との原子核の電荷の違いが相対的に小さくなり、この原理に基づく同重体分離能力には限界がある。

近年、陽子数の違いだけでなく、目的核種と同重体核種の電子配置の違いを利用した同重体の分離の研究が進められている。その1つの技術として、レーザー光脱離法 (Laser Photo Detachment; LPD) がある。この手法では、イオンビームとレーザーを反応させ、電子親和力の違いを利用して同重体核種のみを選択的に中性化して分離する。LPD が実用化すれば、測定には従来大規模な加速器が必要であった  $^{36}\text{Cl}$  や  $^{59}\text{Ni}$  がより小さい施設で測定できるようになるだけでなく、 $^{90}\text{Sr}$  や  $^{135}\text{Cs}$  のような難測定核種の検出、さらに、アクチノイド核種 ( $^{236}\text{U}$  等) の高感度測定の実現が期待される。これらの核種は廃止措置において重要な分析対象核種であるが、まだ分析法が確立していない核種もあり、LPD による測定により廃止措置における廃棄物の処理・処分法の確立に貢献できると考えられる。

同重体の抑制にはイオンビームとレーザーを十分に反応させることが重要であり、イオンビームを減速しレーザーとの相互作用時間を稼ぐことが効果的である。そのための装置として負イオンクーラーの開発を進めた。

### 2) 負イオンクーラーの設計・構築

LPD の実現には、イオンビームとレーザー光の相互作用時間をなるべく大きくする必要があり、そのため、一旦負イオンとして引き出したイオンビームを減速して、速度を数十 eV にまで落とすことが必要である。本研究はこの減速、及び相互作用後の再加速を行うための装置を、負イオンクーラーと称して、設計・製作した。イオンビームを減速すると、一般にはビームは広がる。これを抑えるために、高周波四重極でトラップするとともに、He などの気体分子と衝突させることにより、“衝突冷却”の原理も導入した。すなわち、四重極の周囲をアパーチャなどで区切ることにより、差動排気システムを構築して、四重極内 (相互作用場) のガス圧を制御できるようにした。このガスフローシステムは、衝突冷却を実現するだけでなく、ガスを反応性のガスとすることにより、化学反応を利用した同重体分別への応用も視野に入れている。原子イオンの場合、検出したい核種と、妨害同重体核種の電子親和力の関係が望ましくない場合もある。そうした場合でも、分子イオンとして引き出すと、その関係が逆転する場合もある。

本研究では、具体的に、負イオンとレーザー、または、負イオンと反応性ガスの相互作用による同重体分離を想定して、実際にチャンバーを設計・製作し、これを組み込んだテストベンチビームラインを構築した（図 3.2-72 及び図 3.2-73）。

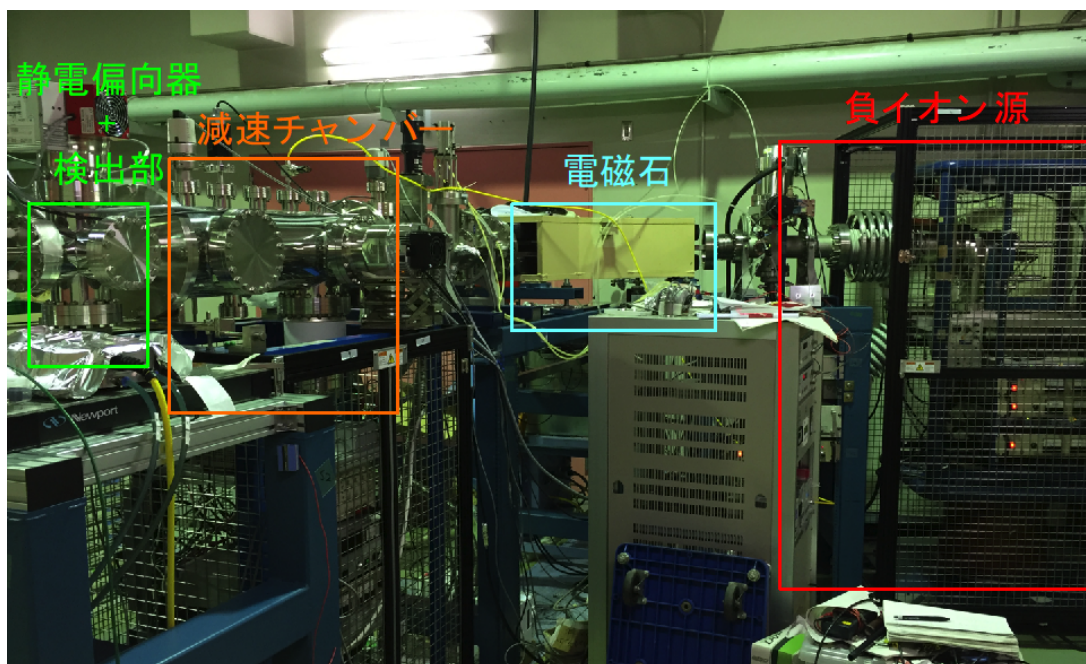


図 3.2-72 負イオンクーラーテストベンチ外観

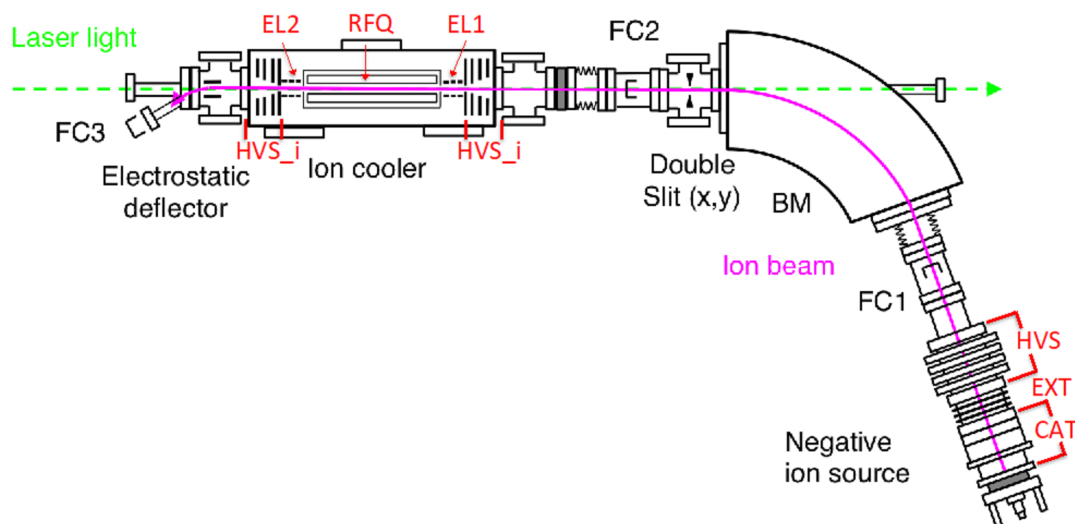


図 3.2-73 負イオンクーラーテストベンチの構成

### 3) 実ラインへの実装にあたっての検討課題

イオンクーラーを実際の加速器質量分析システムの入射ビームラインに実装するにあたっての検討課題を抽出するための実験を行った。

まず、負イオンのビームトランスミッションのキャリアガス圧力依存性については、計算では 1 Pa 程度の圧力が最適であることが分かったが、実際に本研究で作成したテストベンチの負イオンクー

ラーにガスを導入すると、ガス導入口部分でグロー放電が発生することが分かった。ガス導入の絶縁構造を改善する必要がある。

次に、ビーム透過率を最大化するために、負イオンクーラーに入射する前に設けたスリットを最適化したところ、ビーム位置は、 $-x$ 、 $-y$  の方向に偏っており、またビーム径は  $x$  方向に扁平な形となった。これは、本テストベンチの分析電磁石の偏向角が  $70$  度であることと、適切な収束レンズを備えていないことが原因と考えられる。

また、イオンクーラー入り口における減速電圧と透過率の関係が、単調なものではなく、周期的とまではいかないものの、増減を持つものであることが分かった (図 3.2-74)。これは、イオンクーラー内の高周波電場の影響で生じるビーム束の“節”が、変化するためと考えられる。

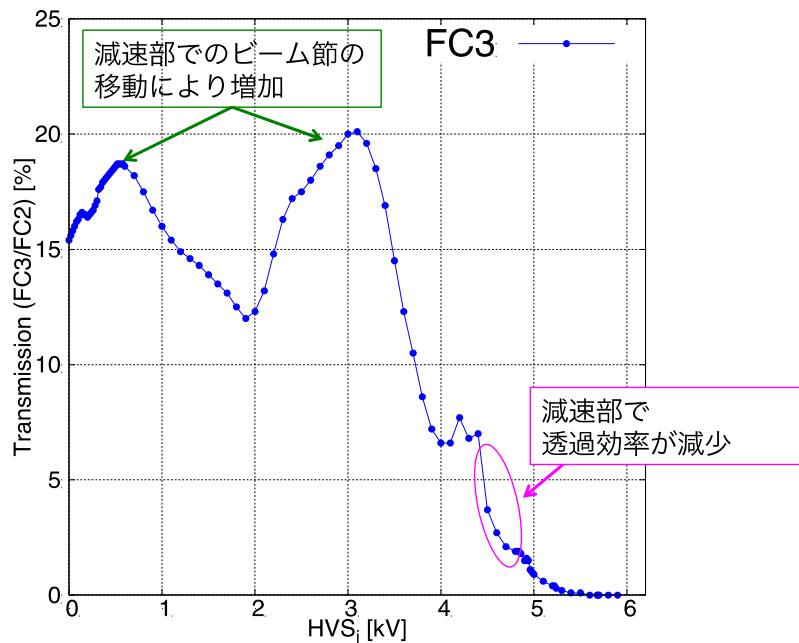


図 3.2-74 イオンクーラー入り口における減速電圧と透過率の関係

以上の結果から、実ラインへの実装にあたっては、以下のことを検討する必要があることが分かった：

- 分析電磁石はビームの収束の観点から偏向角  $90$  度が望ましく、また静電 Q レンズなどの収束系を配置することが望ましい。
- イオンクーラーのジオメトリ (特にビーム束の節のでき方) と電位構成を最適化する。
- イオンクーラーチャンバー内へのガス導入にあたって、ガス導入の絶縁構造を最適化する。

### ③ 固体微粒子模擬試料を対象としたウラン同位体分析測定シミュレート (H30)

#### 1) イントロダクション

廃炉過程におけるデブリ分析では、ロボットによるサンプリングで得られた固体微粒子をオフサイトへ持ち帰り、精密分析を行うという場面が想定される。平成 30 年度は、ステンレスを材料とした固体微粒子を作製し、加速器質量分析による  $^{236}\text{U}$  の測定をシミュレートした。



## 2) 固体微粒子模擬試料

ステンレス (SUS304) 線 ( $\phi 0.5$  mm と 1 mm) を直径と同じ長さにニッパーで切断した円柱状の燃料デブリ模擬試料が作製された。大きさが、 $0.5 \pm 0.1$  mm のものと  $1.0 \pm 0.2$  mm のものの 2 種類作製された (図 3.2-75)。この固体微粒子模擬試料は、各研究室に配布され、マニピレーターによるピックアップテスト、LA-ICP-MS による組成定量分析、レーザー分光分析などが行われたが、本研究室では、加速器質量分析用の試料分解を行った。

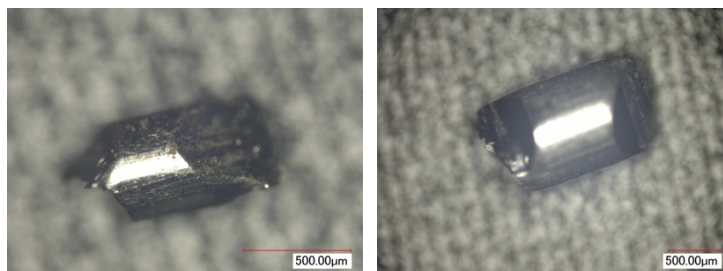


図 3.2-75 燃料デブリ模擬試料

## 3) 固体微粒子模擬試料からの AMS 用試料作成

上記、固体微粒子模擬試料について濃硝酸と王水 (硝酸:塩酸が 1:3 の溶液) を用いて分解実験を行った。模擬試料に濃硝酸 10 mL を用いて分解した場合、0.5 mm、1 mm のどちらの試料についても 2 時間加熱したところ、0.5 mm 模擬試料は分解することができたが、1 mm 模擬試料は残渣が残り完全に分解することができなかった。王水 10 mL を用いた場合は常温でも速やかに溶解し、溶液化することができた。最終的に王水を用いれば 0.1 mL で溶解することができることが分かった (図 3.2-76)。その後、蒸発乾固を行い硝酸で溶解し、キャリアを加えることによって AMS 試料 (AMS 用ターゲット) を作成できることが分かった。王水で分解を行うと密閉容器を用いることができ、速やかに分解できるため、実際のデブリを分解する際も被曝の影響を最小限にすることができると考えられる。

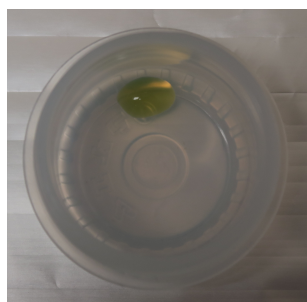


図 3.2-76 王水に溶解したデブリ模擬試料

## 4) 土壌からのキャリア用ウランの抽出と AMS 測定

平成 29 年度までの検討によって、微量のデブリ (もしくは微量ウラン) 試料については、ウランキャリアを用いる方法が有効であること、キャリアは、土壌から抽出できることを予測した。そこで平成 30 年度は、実際に土壌を処理し、抽出したウランをキャリアとして使用することを想定し、実際に AMS 用のターゲットを作成、実際に  $^{236}\text{U}$  を測定した。



本研究では、福島第一原子力発電所近傍の土壌で、表層から 10 cm の部分の土壌 5 g を用いた。表層から 10 cm の深度では、揮発性の核種である  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{129}\text{I}$  ともに、事故起源のものでも侵入しておらず、ウランにおいては、事故起源のものは存在しない。この土壌について、図 3.2-70 に示す方法でウランの抽出を行った。固体微粒子擬似試料を溶解して得られる成分とほぼ等しい、鉄の標準液を加えて共沈させ、焼成して AMS ターゲットとした。

AMS の条件としては、加速電圧 2.4 MV、ウランイオンの電荷は 5+ を用いた。測定結果を表 3.2-9 に示す。有為なカレントが得られていること、またウランの同位体比が  $^{236}\text{U}/^{238}\text{U} = 10^{-8} \sim 10^{-9}$  を示していることから、事故前のフォールアウトのウランの同位体比と整合し、また、デブリ分析のキャリアとして十分使えることが示された。

2) において固体微粒子模擬試料の溶解に成功していることと、本実験の成功を総合すれば、実際の微量なデブリ試料に対する分析のプロトコルをシミュレート実験で確認できたと言える。

表 3.2-9 土壌から抽出したウランキャリアの加速器質量分析 (OKM は土壌試料)

Sample name	Measurement time (s)	$^{236}\text{U}$ counts	$^{238}\text{U}$ (5+) current (pA)	$^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$	
Blank	2500	2	0.00±0.22	-	-
OKM-06	2500	16	4.89±1.24	1.05E-08±3.73E-09	36%
OKM-08	2500	42	3.69±0.58	3.64E-08±8.05E-09	22%
OKM-09	2500	17	8.59±0.34	6.34E-09±1.56E-09	25%
OKM-10	2500	13	5.16±0.11	8.07E-09±2.24E-09	28%
XSTC622-2	300	20981	31.35±6.74	1.79E-05±3.84E-06	22%
XSTC622-3	300	18659	26.49±4.14	1.88E-05±2.94E-06	16%

### (3) 分光分析

#### ① グロー放電分光システムの開発 (H26-H29)

ロボットサンプリングされた試料を安価に、迅速に、再現性良く分析するための分光分析システムの開発を行った。今回は数ある手法のうち、高電圧印加により発生する安定な放電プラズマであるグロー放電を用いたグロー放電分光法の開発を行った。本手法は、放電プラズマの中でグロー放電のみ達成可能なスパッタリングと呼ばれる手法を用いることで、固体試料の直接的な気相化が可能である。また放電プラズマ中の電子衝突により気相化した原子は様々なエネルギー準位へ励起することができるため、励起原子蒸気源としても機能する。平成 28 年度までに本手法による実験装置系を製作して、機能することを確認した。

平成 29 年度においては、製作した実験装置系において、飽和吸収分光によりターゲット元素 Tm の超微細構造の分光を報告した。さらに Tm の金属箔についてレーザー光路上の吸収分光を用いて、Lambert-Beer 則により定量評価を行った。この結果、Tm 吸収分光での原子密度は  $1.2 \times 10^9$  (個 $\cdot\text{cm}^{-3}$ ) として評価された。また本手法を用いて固体試料としては、管・塊・線・箔・板・液相乾固物への適用性を示した。加えて、電気伝導性のない試料の場合は、試料表面上の電気伝導性を付与する操作により適用可能なことを示した。

#### ② 超微細構造の遷移確率 (H30)

飽和吸収分光では信号が小さかった核スピンによる摂動により 461 MHz の分裂により生じた超微細構造を蛍光スペクトルより追証を行った。蛍光スペクトルを Voigt 関数によりフィッティングした結果 (図 3.2-77)、2 つのピークの面積比は  $1.40 \pm 0.147 : 1$  となった。そこで核スピンを考慮し

た遷移確率である Clebsche-Gordan 係数の検討を行ったところ 1.35 : 1 となり、概ね理論式を追証する結果となった。なお、今回対象としている Tm は質量数 169 (核スピン  $I = 1/2$ ) の核種のみが安定同位体として 100% を占めている。このため、エネルギー分裂幅は超微細構造定数の A 係数に比例する。実験結果より A 係数を求めたところ  $660 \pm 10$  MHz として得られた。これは既報 [9] の 656.5 MHz とよい一致が見られることが確認された。

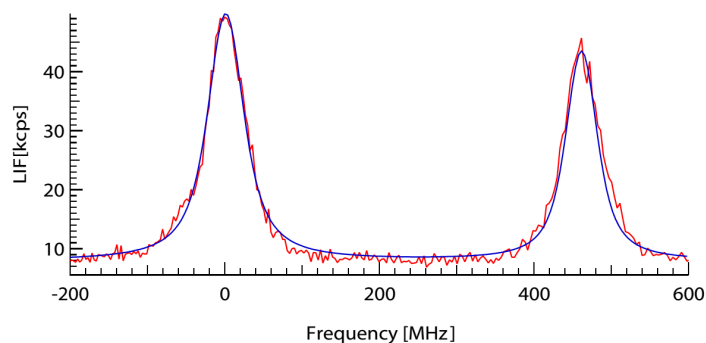


図 3.2-77 Voigt 関数によりフィッティングした超微細構造の蛍光スペクトル

### ③ レーザーの波長安定化 (H30)

レーザー波長は温度や振動などの外部環境により変化する。これはドリフト現象として知られている。しかし、吸収分光には適切なレーザー波長が求められる。そこで波長安定化が必要になるが、今回はレーザー光をエタロンに入射することで得られるフリンジ信号からロックインアンプによりエラー信号を生成して、そのゼロ点へPID フィードバックを行う Top of Resonance 法 [10] を検討した。その結果 PID100 (Toptica Photonics) の導入を行い、数 MHz のオーダーで波長安定化を行った (図 3.2-78)。波長ロックを解除すると、100 MHz のオーダーでの揺らぎを見ることができる。これによりエタロンに対して波長安定化が可能なシステム系の構築に成功した。

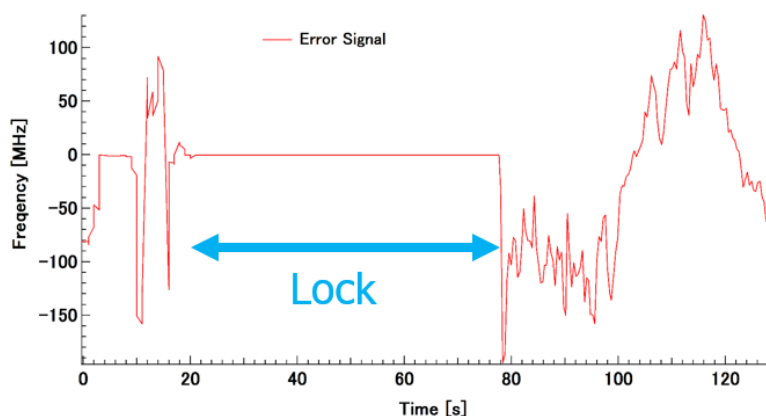


図 3.2-78 レーザー波長の時間変化

### ④ 試料の適用範囲の拡大 (H30)

ロボットサンプリングされた試料の形状は様々なものと予想される。分析にあたり、化学的な前処理を行う分光法などもあるが、作業従事者の被ばくや廃液発生の観点からそのような操作は望ましく

ないと言える。平成 30 年度は、真空容器内での飛散が懸念されて試みていなかった粉末試料への適用を行い、適用可能なことを示した。粉末試料は放電プラズマの高温条件で熔融・固形化することが分かった (図 3. 2-79)。これにより市販の金属試料の形状については適用性を示した。



図 3. 2-79 スパッタ後の銅粉末

今回、想定される放射性廃棄物の化学形は極めて複雑と予想されるため、分析には困難を伴うと考えられる。そこで試料として予想される複数成分系を有する混合試料溶液へ本手法の適用を検討した。今回は、23 元素混合溶液 ICP 用標準溶液 (Merck、ICP Standard IV) を用いた。混合試料は 1 族・2 族・遷移金属・貴金属・13 族・14 族・15 族の元素が硝酸溶液として調製されており、溶液中の金属の価数は 1、2、3 となっている。この溶液の乾固物を用いたところ、スパッタリングにより金属の価数が 0 である中性原子として蒸気発生していることを確認した (図 3. 2-80)。これにより複雑な化学形の試料でも前処理することなく蒸気発生可能なことを示した。なお、分光器の分解能の性能が不十分なため信号が干渉する Ag、Co、Li や単元素の観測データの取得ができなかった Bi、Cd、Tl は帰属できなかったが、その他の 17 元素については単元素のスペクトルデータから帰属に成功した。

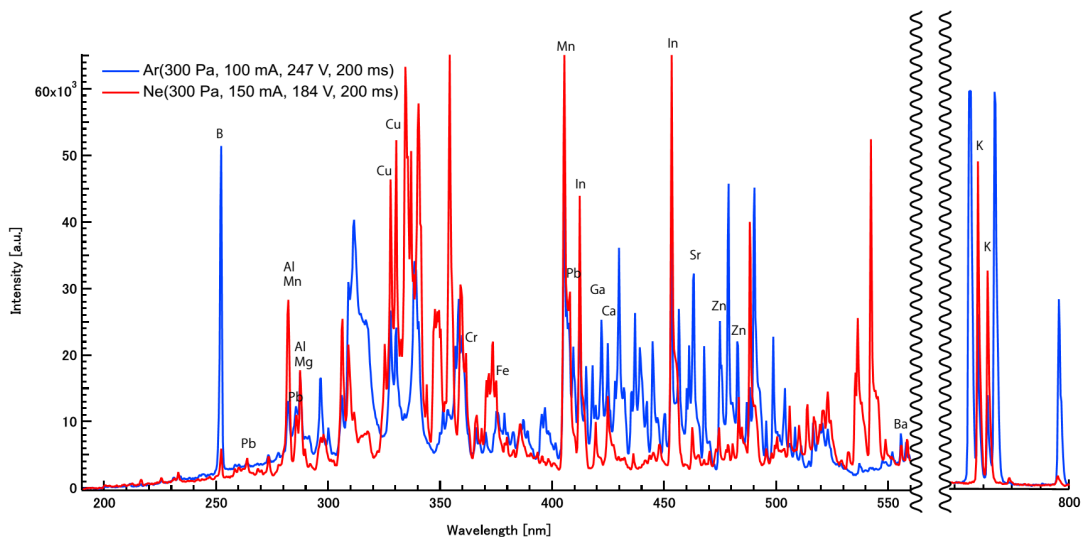


図 3. 2-80 混合元素の発光スペクトル

### ⑤ 発光スペクトルの帰属プログラムの開発 (H30)

試料の成分系が複雑になるほど既報のデータベースとの対比に基づく帰属に時間がかかるという新しい課題が生じた。そこで、その作業の簡素化を図ることにした。本実験で測定される発光スペクトルの解析上の課題として (i) 試料中の対象元素のほかに高压ガス中の窒素分子・バッファガスである Ne・電極に用いた Ti がスペクトル上に現れること、(ii) 実験条件によりピーク高さが様々にな

ること、が挙げられる。そこで今回は、プログラムによる帰属を検討した。

近年、CPU のスペックの向上に伴い機械学習の進展が著しく、分光学における帰属においても用いられるようになってきた。国内では島津製作所・富士通・富士通研究所による質量スペクトルを画像として認識し、帰属を行うアルゴリズムの開発 [11] や電子エネルギー損失分光法 (EELS) への適用 [12] なども報告されている。当初これらの手法の検討を行ったが、大量の学習データや強力な CPU の必要性などの課題が見えてきたので、スペクトルの特徴抽出による帰属を検討した。

今回開発した帰属アルゴリズムは、以下の 2 つの工程から構成される。最初に、単元素の発光スペクトルを複数取得して、各元素において特徴的なピークの波長位置を抽出して単元素のデータベースを構築する。その後、単元素のデータベースを未知試料のスペクトルに対して適用する (図 3. 2-81)。なお、開発言語はライブラリの充実や読みやすさの観点から python とした。

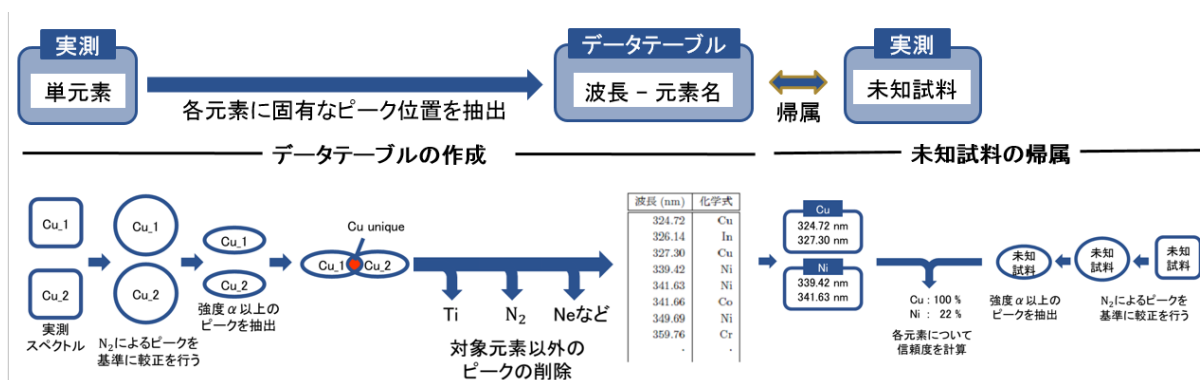


図 3. 2-81 開発した帰属プログラム

今回は帰属の精度を評価するために信頼度と呼ばれるパラメータを定義した。ある元素 A についての信頼度は (元素 A のデータベースのうち未知試料のピークと一致した数) / (データベース内の元素 A のピーク数) として与えた。また注目する特徴的なピークを弁別するための閾値設定を規格化した強度に対して調節できるようにした。具体的なデータベースの作成におけるアルゴリズムは以下の通りである。実測された単元素の発光スペクトルに対して、窒素分子による振動ピークを基準に、波長校正を行う。次に閾値以上のピークのみ注目して電極材料元素である Ti や高压ガス中の窒素分子やバッファガスである Ne に関するピークを削除した。その結果得られた、元素と波長の対応関係をデータベースとした。同様のフローチャートで、未知試料についても解析を行った。このプログラムを用いて 2 元素成分系 (黄銅, Cu+Zn) までの帰属は成功したが、3 元素成分系 (洋白, Cu+Zn+Ni) では閾値の設定をうまく行わないと Ni の帰属ができなかった。この原因として、分光器の分解能が十分なものでないためピークの区別ができなかったことや Ni の励起寿命が長いために強度が小さくなることに起因することが考えられる。分光器の性能により、本アルゴリズムをもって、より精度の高い帰属が図れると考えられる。

### ⑥ 分光システムの定量評価 (H30)

発光分光による定量評価を試みた。条件は Ne 300 Pa、電流は 90-130 mA、光源と集光レンズの間の立体角は  $0.013\pi$  (str) とした。電極上に滴下した試料 (100  $\mu$ L) の濃度は 100 ppm、250 ppm、500 ppm、1000 ppm とした。発光分光ではスペクトルピークが干渉するものもあるが、今回は、Tm の発光線のうち、そのような干渉が起きにくい 418.7616 nm に着目した。この検量線を  $1\sigma$  で取ったものを図 3. 2-82 に示す。このうち、130 mA の条件において検量線の  $R^2$  値は 0.998 として得られ、

直線性が良く、分析システムとして mg 量程度の試料であっても分析可能なことを示した。

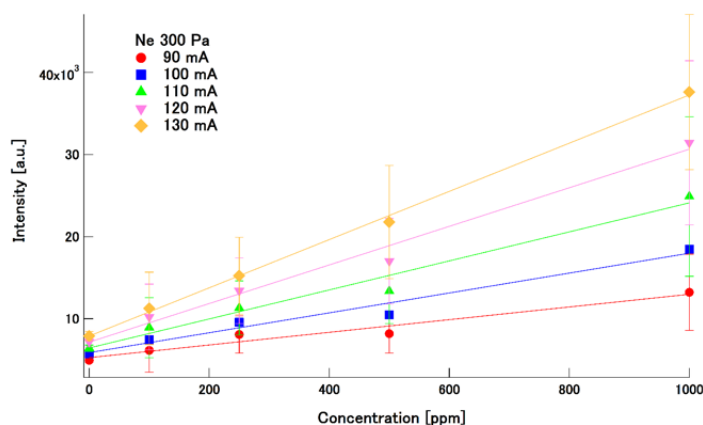


図 3.2-82 Tm 金属の発光スペクトルの検量線

当該波長における検出限界は 61 ppm となった。グロー放電による発光分光法の検出限界が 1-100 ppm [13] であることを踏まえると、この値は概ね妥当と考えられる。発光取得の光学系を改善する（立体角を大きくするなど）により、この値はさらに改善可能と考えられる。なお、バックグラウンドとしてバッファガス由来の光が検出されるため、切片において強度を持つ。以上をもって、分光分析では、平成 29 年度までに開発したプラズマを利用した分光分析装置の基本性能を評価した。発光分析により、定量分析に必要な検量線を取得することができた。

#### ⑦ 模擬サンプリング試料の主成分分光 (H30)

模擬試料として供給されたステンレス小片を本システム系に全く前処理せずに、電極に設置して分光を行ったところ（図 3.2-83）、主成分である鉄元素の発光スペクトルが観測された（図 3.2-84）。しかし、ステンレスに混在するクロムなどの元素は確認できなかった。この原因として、まず分光器の分解能が不十分であることが考えられる。その結果、含有濃度が少ない元素のピークが強度の大きい鉄のピークの裾野に隠れてしまった。本実験より、サンプリング試料（固体）に前処理を全く施すことなく、発光分光分析を行えることを確かめることができた。微量元素を分析するためには、より高い分解能を持つ分光器により、広範な波長領域を観測する必要があると思われる。

#### (4) TES 型マイクロカロリメータによる超ウラン元素の L X 線スペクトル計測

先行研究で試作した超伝導転移端センサ (Transition Edge Sensor; TES) 型マイクロカロリメータを用いて、 $^{241}\text{Am}$  と Pu 同位体混合線源、 $^{244}\text{Cm}$  標準線源及び  $^{237}\text{Np}$  標準線源の L X 線スペクトル計測実験を実施し、半値全幅 100 eV より優れたエネルギー分解能による主要な L X 線ピークの明確な同定を実証した。加えて、TES 型マイクロカロリメータを用いた計測で得られたピークが明確に同定できる TRU の L X 線エネルギースペクトルに基づいて、L X 線ピーク同定による主要な TRU の非破壊分析が期待されることを示した。

#### ① はじめに

廃炉作業では、Pu 同位体を含む超ウラン元素 (TRans-Uranium; TRU) を安全に計量管理する必要がある。安全管理上問題になる Pu 同位体はエネルギーが 4.9~5.8 MeV の  $\alpha$  線を放射して U に壊変する。この時に放出される  $\alpha$  線は透過力が弱いので、物質内の Pu を外部からの  $\alpha$  線スペクトル計測



図 3.2-83 固体試料の準備の様子

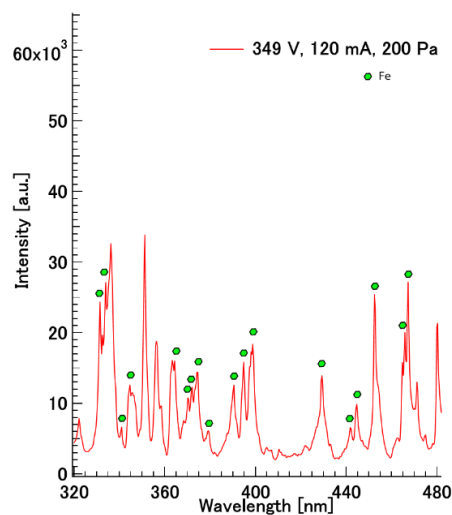


図 3.2-84 ステンレスの発光スペクトル

により分析することは不可能である。さらに、Pu 同位体の  $\alpha$  崩壊生成核種である U からの  $\gamma$  線放射率は  $\alpha$  崩壊あたり 0.05% 以下と非常に低く、微量なプルトニウム同位体の  $\gamma$  線スペクトル計測による同定は困難である。

一方、Pu 同位体の  $\alpha$  崩壊生成物の U 元素からは、内部転換によりエネルギーが 13~17 keV の L X 線が  $\alpha$  崩壊あたり数% から 10% 程度の確率で放射される。そこで、汚染トラブル時の体外放射線計測や放射性廃棄物の非破壊測定には、Ge 半導体検出器を使用した L X 線スペクトル計測が適用される。ただし、Pu 試料の L X 線エネルギースペクトルは、近接して多数のピークを有する。通常使用される Ge 半導体検出器は、これら多数の L X 線を弁別できるほどの十分なエネルギー分解能はなく、試料に混在する  $^{237}\text{Np}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{244}\text{Cm}$  などの TRU から放射される L X 線との弁別は困難である。さらに、計測されたスペクトルから元素や同位体を分析する際に必要となる、Pu などの TRU の  $\alpha$  崩



壊あたりの L X 線放射率に関する実験データがほとんど存在せず、理論値との一致が良くない。Pu 同位体の L X 線測定においては基礎的な L X 線放射率のデータが重要である。主要な L X 線ピークを半値全幅 100 eV より優れたエネルギー分解能でスペクトル計測することが可能となれば、TRU の  $\alpha$  崩壊あたりの L X 線放射率に関する高い信頼性の評価値が得られ、Ge 検出器による Pu 測定の精度の向上に有効である。

半導体検出器より優れた検出感度とエネルギー分解能性能を達成する次世代の X 線検出器として、熱容量が十分小さくなる極低温に保持された物質に入射した X 線光子のエネルギーを温度上昇として精度良く計測するマイクロカロリメータがある。マイクロカロリメータは、X 線エネルギーを熱に変換する吸収体、微小な温度上昇を計測する温度計及び X 線エネルギー吸収による熱を冷熱浴に排熱する熱結合から構成される。超伝導薄膜の超伝導転移領域における急激な電気抵抗変化を温度計として利用する TES 型マイクロカロリメータは、エネルギー 1.5 keV の Al K $\alpha$ X 線ピークを半値幅 0.87 eV という非常に優れたエネルギー分解能で計測しており、既に実用段階に入っている。

先行研究で試作した単ピクセル TES 型マイクロカロリメータ [14] 及び 4 ピクセル配置型マイクロカロリメータ [15] を用いて、 $^{241}\text{Am}$  と Pu 同位体混合線源、 $^{244}\text{Cm}$  標準線源及び  $^{237}\text{Np}$  標準線源の L X 線スペクトル計測実験を実施する。

## ② TES 型マイクロカロリメータによる超ウラン元素 L X 線スペクトル計測実験 (H26-H29)

マイクロカロリメータとは、吸収体に入射した X 線光子のエネルギーを温度上昇に変換し、入射エネルギーに比例した温度上昇を計測する検出器である。TES 型マイクロカロリメータでは、電気抵抗が超伝導-常伝導相転移領域において非常に急峻な温度依存性を示す超伝導薄膜を温度計として利用する。図 3.2-85 に TES 型マイクロカロリメータの X 線光子検出過程を示す。

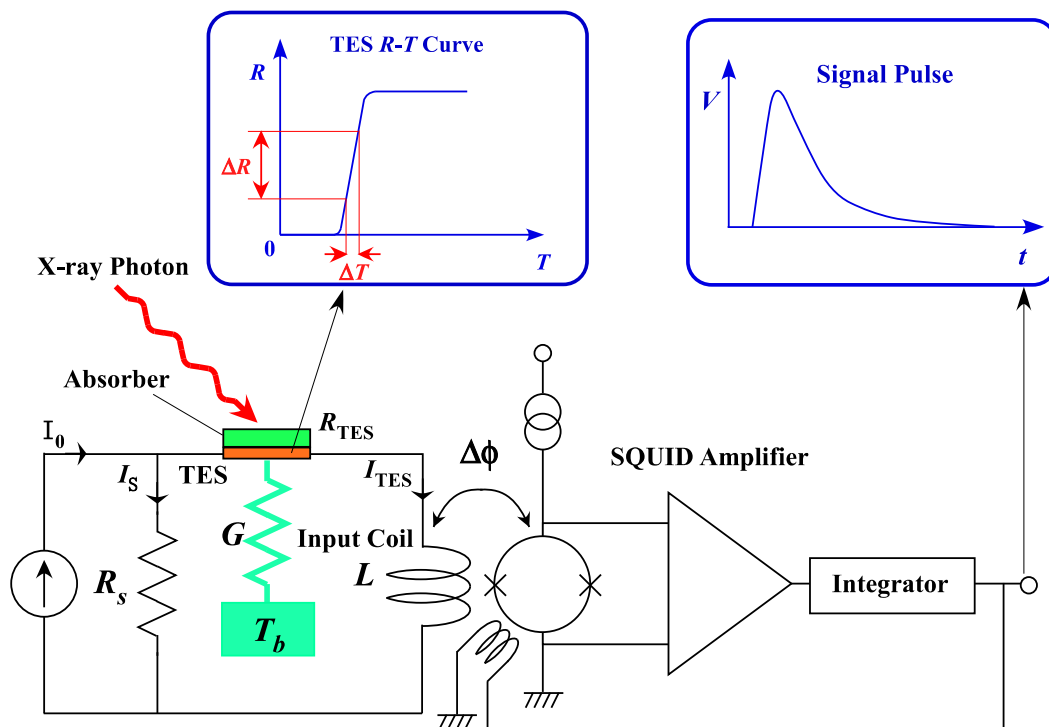


図 3.2-85 TES 型マイクロカロリメータの動作概念

電気抵抗  $R$  の温度  $T$  に対する依存性を利用した温度計の感度は  $\alpha = d(\ln R)/d(\ln T)$  で与えられる。温度計感度  $\alpha$  はマイクロカロリメータの性能を決定する重要なパラメータであり、 $\alpha$  の値が大きいほど高感度の温度計である。半導体温度計では  $\alpha$  の値は 5 程度であるが、相転移領域における TES の  $\alpha$  の値は数 100 から 1000 程度と非常に大きい。TES は入力コイル  $L$  と直列に接続され、シャント抵抗  $R_S$  は TES と  $L$  に並列に接続されている。この回路に直流電流  $I_0$  を通電すると、 $R_S$  と TES とに、それぞれ、 $I_S$  及び  $I_{TES}$  の電流が流れる。この時、TES には定電圧  $V_B$  が印加されるように  $R_S$  の値を  $R_{TES}$  より十分に小さくする。TES 素子内のジュール発熱  $P_B = V_B^2/R_{TES}$  と温度  $T_b$  の冷熱浴にコンダクタンス  $G$  を介して流れる熱流とのバランスで動作温度が決まる。入射 X 線が吸収されることにより素子の温度が  $\Delta T$  上昇し、TES の電気抵抗が  $\Delta R$  だけ増加するので、コイル  $L$  を流れる  $I_{TES}$  の変化に比例する磁束の変化  $\Delta\phi$  が超伝導量子干渉素子 (SQUID) を使った増幅器により電圧パルスとして出力される。この時、TES の電気抵抗の急激な増加に伴い、定電圧が印加されている TES のジュール発熱は急激に減少するので、コンダクタンスを介して熱浴へ流れる熱流による冷却が強くなり、TES の電気抵抗値が  $R_{TES}$  の動作点へ回復する速度が増加する。このような負のフィードバックを電熱フィードバックと呼ぶ。電熱フィードバックで動作している TES 型マイクロカロリメータのエネルギー分解能は、半値幅で  $\Delta E = 2.35\sqrt{k_B C T^2 \sqrt{8n}/\alpha}$  となる。ここで、 $k_B$  はボルツマン定数、 $C$  は TES 型マイクロカロリメータの実効的熱容量、 $T$  は動作温度であり、 $n$  は 3 から 5 の間の値を取る定数である。

使用した TES は Ti/Au の 2 層構造を有し、超伝導転移温度は 100~200 mK の範囲である。エネルギー 10~20 keV の入射 L X 線光子を 50% 以上の効率で吸収するために、TES の上面には厚さ 5.0  $\mu\text{m}$  の金を吸収体として積層している。TES 型マイクロカロリメータ及び SQUID アレイ増幅器チップは、GE7031 ワニスで検出器ホルダーに接着される。

TRU 元素を取り扱う実験施設では、TES 型マイクロカロリメータの動作温度を維持するために液体ヘリウムを使用することは非常に困難である。そこで、TES 型マイクロカロリメータを 100 mK 領域に保持して L X 線光子検出器として動作させるため、遠隔ヘリウム冷却ループ方式ギフォード・マクマホン (GM) クライオクーラー分離型無冷媒  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  希釈冷凍機 (無冷媒 Dilution Refrigerator; 無冷媒 DR) [16] を使用した。検出器ホルダーは、無冷媒 DR のコールドステージに取り付けた。

TRU であるプルトニウム同位体は厳格な法規制に従って使用条件等が大きく制限される。そのため、先行研究では、 $^{239}\text{Pu}$  同位体から放射される L X 線スペクトル計測に、肺モニタ校正用  $^{239}\text{Pu}$  同位体含有リンパ節形状チェック線源を 3 個使用した。3 個の  $^{239}\text{Pu}$  同位体含有リンパ節形状チェック線源の放射能強度は全体で 185 kBq であった。 $^{241}\text{Am}$  同位体から放射される L X 線スペクトル計測には、放射能強度 370 kBq の樹脂密封型  $^{241}\text{Am}$  チェック線源を使用した。 $^{239}\text{Pu}$  含有リンパ節形状チェック線源と樹脂密封型  $^{241}\text{Am}$  チェック線源は極低温に冷却すると破損する。そこで、無冷媒 DR の直径 25 mm、厚さ 1 mm のベリリウム X 線入射窓の前の適当な位置に  $^{239}\text{Pu}$  含有リンパ節形状チェック線源と樹脂密封型  $^{241}\text{Am}$  チェック線源を取り付けた。

一方、 $^{237}\text{Np}$  同位体と  $^{244}\text{Cm}$  同位体から放射される L X 線スペクトル計測では、電着型チェックソースを使用し、無冷媒 DR 内の検出器ホルダー直近に線源を取り付けた。 $^{237}\text{Np}$  と  $^{244}\text{Cm}$  電着型チェックソースの放射能強度は、それぞれ、200 Bq と 4 kBq であった。無冷媒 DR 内の TES 型マイクロカロリメータの前に取り付けた  $^{237}\text{Np}$  または  $^{244}\text{Cm}$  電着型チェックソースは、 $\alpha$  崩壊で放射される  $\alpha$  線を止めるために厚さ 150  $\mu\text{m}$  のポリイミドテープで覆った。

スペクトル計測実験では、SQUID アレイ増幅器から出力される TES 型マイクロカロリメータの L X 線検出信号パルスをデジタル変換し、PC に記録した。

### ③ 検出信号パルスの解析 (H26-H29)

PC に記録された信号パルスには、立ち上がりと減衰時定数が異なる様々な波形のものが含まれていた。信号パルスの波形と入射 L X 線光子の TES 型マイクロカロリメータにおける吸収位置との関係を解析することで、吸収体に入射した L X 線光子の検出事象に対応する信号パルスの立ち上がり時定数は 15~20  $\mu\text{s}$  及び減衰時定数は 150~200  $\mu\text{s}$  であることが分かった。吸収体に入射した L X 線光子の検出事象に対応する信号パルスのパルス波高分布を求めるために、最適フィルター法を用いた。最適フィルター法では、波高値で規格化した信号パルスの波形は等しいと仮定されている。しかしながら、L X 線光子のエネルギー領域により波高値で規格化した信号パルスの波形は僅かながら変化する。そこで、吸収体に入射した L X 線光子の検出事象に対応する信号パルスを、TRU 線源から放射される L X 線を  $L_\alpha$ 、 $L_\beta$  及び  $L_\gamma$  のエネルギー領域に対応する波高値を有する信号パルス 3 つのグループに分け、それぞれのグループごとに最適フィルター法を用いて検出信号パルスを解析し、検出信号のパルス波高分布を求めた。

先行研究の L X 線スペクトル計測実験では、10 日間以上の長期に亘り無冷媒 DR を運転して TES 型マイクロカロリメータによる L X 線検出信号パルスを PC に記録した。無冷媒 DR の長期運転では、検出器ホルダー温度に僅かな変動が観測された。TES 型マイクロカロリメータの応答特性は動作温度に強く依存するので、検出器ホルダーの温度変動は検出信号パルスの波高値に影響を与えた。そこで、TES 型マイクロカロリメータの動作温度に対応する検出信号パルスのベースライン電圧を用いて、動作温度変動の検出信号パルス波高値への影響を補正した。

通常のスเปクトル計測で得られる L X 線のピーク幅は、TES 型マイクロカロリメータのインパルス応答に対するエネルギー分解能による幅と L X 線の自然幅の合成である。計測で得られたエネルギースペクトルから TES 型マイクロカロリメータのエネルギー分解能を評価するためには、自然幅を考慮したピーク解析が必要である。本研究では、自然幅を有するエネルギー  $E_0$  の L X 線ピークを以下のような Lorentz 型関数で仮定した。

$$L(E; A, \Gamma, E_0) = \frac{A}{\pi} \frac{\Gamma}{(E - E_0)^2 + \Gamma^2} \quad (3.2-1)$$

ここで、 $E$  はスペクトルにおけるエネルギー、 $A$  はピークの高さ、 $\Gamma$  は半値半幅である。また、エネルギー  $E_0$  の L X 線に対する TES 型マイクロカロリメータのインパルス応答を以下のような Gauss 型関数で仮定した。

$$G(E; B, \sigma, E_0) = \frac{B}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(E - E_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.2-2)$$

ここで、 $B$  はピークの高さであり、TES 型マイクロカロリメータのエネルギー  $E_0$  の L X 線に対するエネルギー分解能の半値全幅は  $2.35\sigma$  である。このように仮定すると測定で得られた L X 線ピークは (3.2-1) 式と (3.2-2) 式の畳み込みである以下のような Voigt 関数で近似することができる。

$$V(E; \Gamma, \sigma, E_0) = \int_{-\infty}^{\infty} G(y; \sigma, \mu) L(E - y; \Gamma, E_0) dy \quad (3.2-3)$$

本研究では、計測で得られたエネルギースペクトルに現れる L X 線のピーク形状を、(3.2-3) 式の Voigt 関数でフィッティングして、TES 型マイクロカロリメータのエネルギー分解能を求めた。

#### ④ TRU 線源の L X 線スペクトル (H26-H29)

$^{239}\text{Pu}$  線源からは  $^{239}\text{Pu}$  同位体の  $\alpha$  崩壊に伴い U L X 線が放射される。図 3.2-86 は検出信号パルス解析で得られた  $^{239}\text{Pu}$  線源から放射される U L X 線のエネルギースペクトルであり、図中に主要な U L X 線ピークを示している。図 3.2-87 は測定で得られた  $U L_{\alpha 1}$  X 線ピークと  $U L_{\alpha 2}$  X 線ピークを Voigt 関数でフィッティングした結果である。図 3.2-87 の実線と破線は、それぞれ、TES 型マイクロカロリメータの応答の実験結果と L X 線ピークの自然幅のフィッティング曲線を示す。エネルギーが 13.618 keV で自然幅が 11.7 eV の  $U L_{\alpha 1}$  X 線ピークでの TES 型マイクロカロリメータのエネルギー分解能は半値全幅 (Full Width at Half Maximum; FWHM) で 59 eV であった。

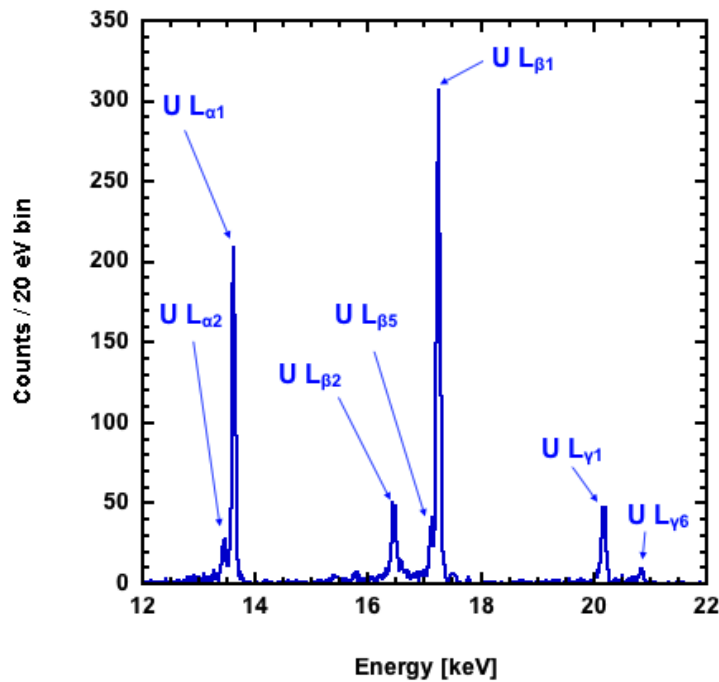


図 3.2-86  $^{239}\text{Pu}$  線源から放射される U L X 線のエネルギースペクトル

$^{241}\text{Am}$  線源からは  $^{241}\text{Am}$  同位体の  $\alpha$  崩壊に伴い Np L X 線が放射される。図 3.2-88 は検出信号パルス解析で得られた  $^{241}\text{Am}$  線源から放射される Np L X 線のエネルギースペクトルであり、図中に主要な Np L X 線ピークを示している。エネルギーが 13.946 keV で自然幅が 11.8 eV の  $Np L_{\alpha 1}$  X 線ピークでの TES 型マイクロカロリメータのエネルギー分解能は FWHM で 34 eV であった。

$^{244}\text{Cm}$  線源からは  $^{244}\text{Cm}$  同位体の  $\alpha$  崩壊に伴い Pu L X 線が放射される。図 3.2-89 は検出信号パルス解析で得られた  $^{244}\text{Cm}$  線源から放射される Pu L X 線のエネルギースペクトルであり、図中に主要な Pu L X 線ピークを示している。エネルギーが 14.276 keV で自然幅が 12.2 eV の  $Pu L_{\alpha 1}$  X 線ピークでの TES 型マイクロカロリメータのエネルギー分解能は FWHM で 43 eV であった。

$^{237}\text{Np}$  線源では  $^{237}\text{Np}$  同位体の  $\alpha$  崩壊により、 $^{233}\text{Pa}$  同位体が生成される。さらに、 $^{233}\text{Pa}$  同位体の  $\beta^-$  崩壊により  $^{233}\text{U}$  同位体が生成される。 $^{237}\text{Np}$  線源における  $^{237}\text{Np}$  同位体の  $\alpha$  崩壊と  $^{233}\text{Pa}$  同位体の  $\beta^-$  崩壊には放射平衡が成立するので、 $^{237}\text{Np}$  線源からは Pa L X 線と U L X 線が放射される。図 3.2-90 は検出信号パルス解析で得られた  $^{237}\text{Np}$  線源から放射される Pa L X 線と U L X 線のエネルギースペクトルであり、図中に主要な Pa L X 線と U L X 線ピークを示している。 $^{233}\text{Pa}$  同位体から放射される  $\beta^-$  線の物質通過で発生する制動放射により、図 3.2-86、図 3.2-88 及び図 3.2-89 のエ

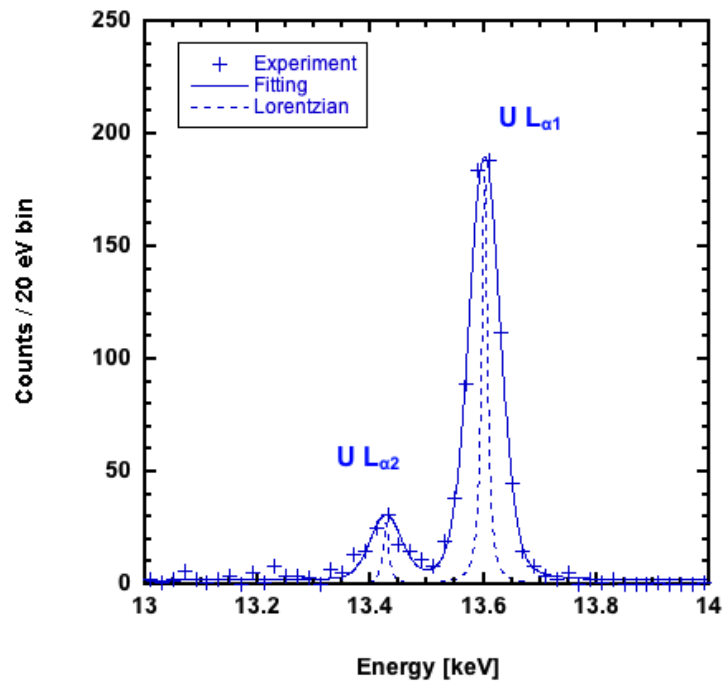


図 3.2-87 U  $L_{\alpha 1}$  X線ピークとU  $L_{\alpha 2}$  X線ピークをVoigt関数でフィッティングした結果

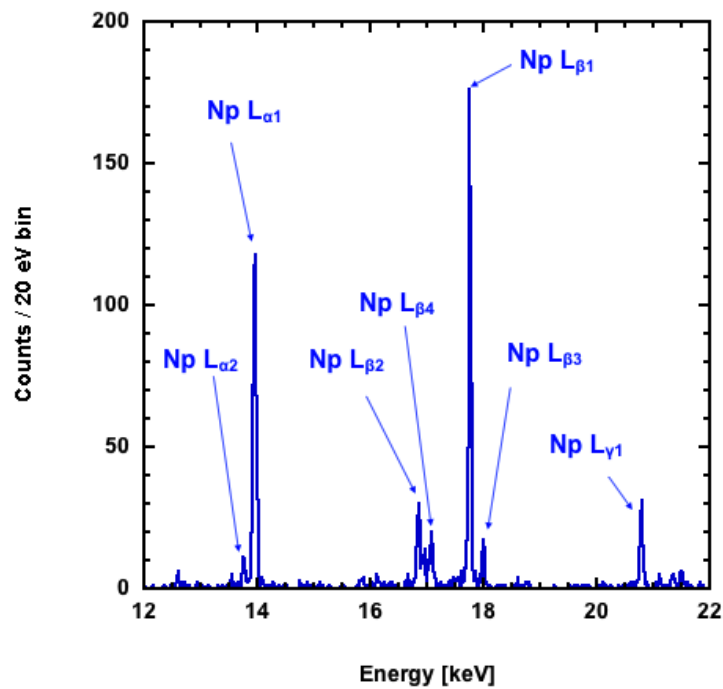


図 3.2-88  $^{241}\text{Am}$ 線源から放射されるNp L X線のエネルギースペクトル

エネルギースペクトルと比較してバックグラウンドが高いことが分かる。エネルギーが 13.291 keV で自然幅が 11.1 eV の Pa  $L_{\alpha 1}$  X線ピークでの TES 型マイクロカロリメータのエネルギー分解能は FWHM で 65 eV であった。

⑤ TES 型マイクロカロリメータ L X線スペクトル計測による TRU 非破壊分析の検討 (H30)

TES 型マイクロカロリメータを用いた計測で得られたピークが明確に同定できる TRU の L X線

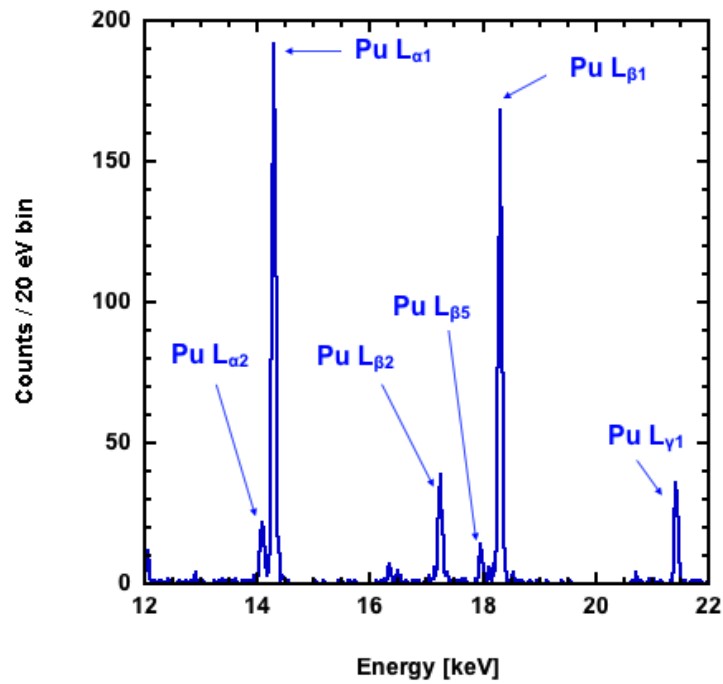


図 3.2-89  $^{244}\text{Cm}$  線源から放射される Pu L X 線のエネルギースペクトル

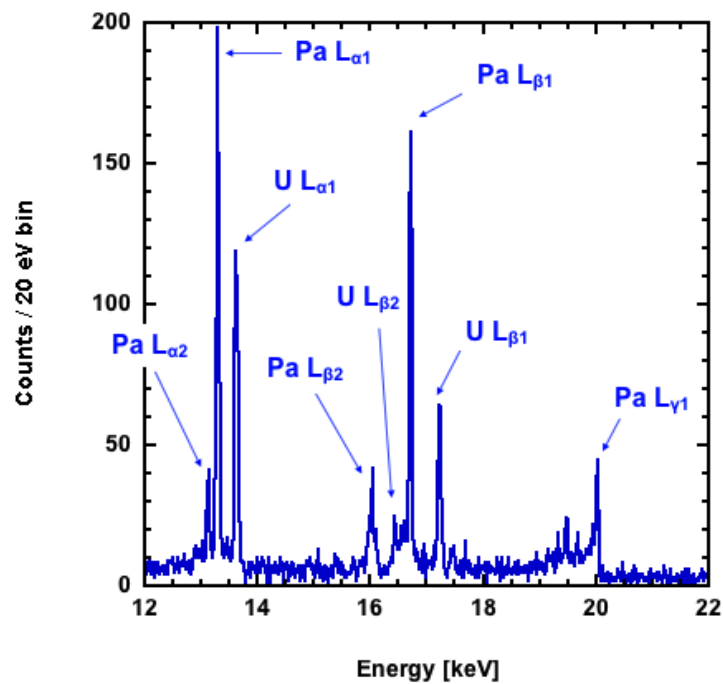


図 3.2-90  $^{237}\text{Np}$  線源から放射される Pa L X 線と U L X 線のエネルギースペクトル

エネルギースペクトルを解析することで、TRU から放射される主要な L X 線の実効的なエネルギー分解能と検出効率の実験値が得られる。これらの実験値を用いて TRU 非破壊分析の実現性を検討した。

まず、10 年稼働した核燃料再処理施設の Pu 廃液について検討した。この場合、Pu 廃液には主要な TRU として、 $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{240}\text{Pu}$  及び  $^{241}\text{Am}$  が含まれると仮定した。さらに、スペクトル計測を行う場合の Pu 同位体から放射される L X 線の収量と  $^{241}\text{Am}$  同位体から放射される L X 線の収量は等し



いと仮定した。TES 型マイクロカロリメータを用いて Pu 廃液試料から放射される L X 線を計測した場合に予測されるエネルギースペクトルを図 3.2-91 に示す。図 3.2-91 に示されるように、U 同位体と Np 同位体の  $L_{\alpha}$ 、 $L_{\beta}$  及び  $L_{\gamma}$  領域の明確な L X 線ピークにより Pu 同位体と  $^{241}\text{Am}$  同位体の同定が期待される。

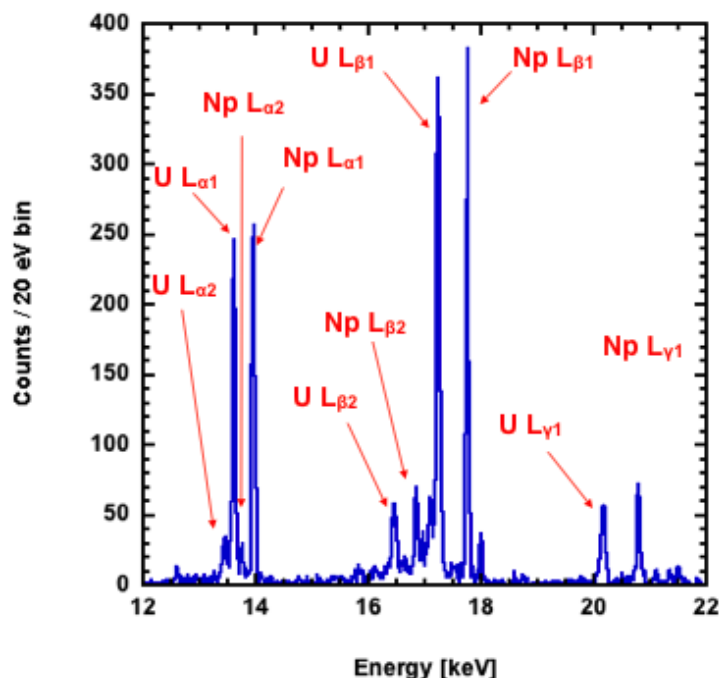


図 3.2-91 TES 型マイクロカロリメータを用いて Pu 廃液試料から放射される L X 線を計測した場合に予測されるエネルギースペクトル

次に、核燃料再処理施設の高放射能処理廃液について検討した。処理廃液には、 $^{237}\text{Np}$ 、 $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{240}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Am}$  及び  $^{244}\text{Cm}$  の TRU が含まれると仮定した。経験的な予測から算出した処理廃液に含まれる  $^{237}\text{Np}$ 、Pu 同位体 ( $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{240}\text{Pu}$ )、 $^{241}\text{Am}$  及び  $^{244}\text{Cm}$  の放射能強度比と L X 線収量比を表 3.2-10 に示す。表 3.2-10 の TRU 放射能強度比と L X 線収量比を使用して、TES 型マイクロカロリメータを用いて高放射能処理廃液試料から放射される L X 線を計測した場合に予測されるエネルギースペクトルを図 3.2-92 に示す。図 3.2-92 から、L X 線ピークを同定することによる主要な TRU の非破壊分析が期待される。

表 3.2-10 経験的な予測から算出した核燃料再処理施設の高放射能処理廃液に含まれる  $^{237}\text{Np}$ 、Pu 同位体 ( $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{240}\text{Pu}$ )、 $^{241}\text{Am}$  及び  $^{244}\text{Cm}$  の放射能強度比と L X 線収量比

	放射能強度比	L X 線収量比
$^{237}\text{Np}$	0.01	0.17
Pu 同位体 ( $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{240}\text{Pu}$ )	0.25	0.71
$^{241}\text{Am}$	1	1
$^{244}\text{Cm}$	0.25	0.058

## ⑥ まとめ

先行研究で試作した TES 型マイクロカロリメータを用いて、 $^{241}\text{Am}$  と Pu 同位体混合線源、 $^{244}\text{Cm}$

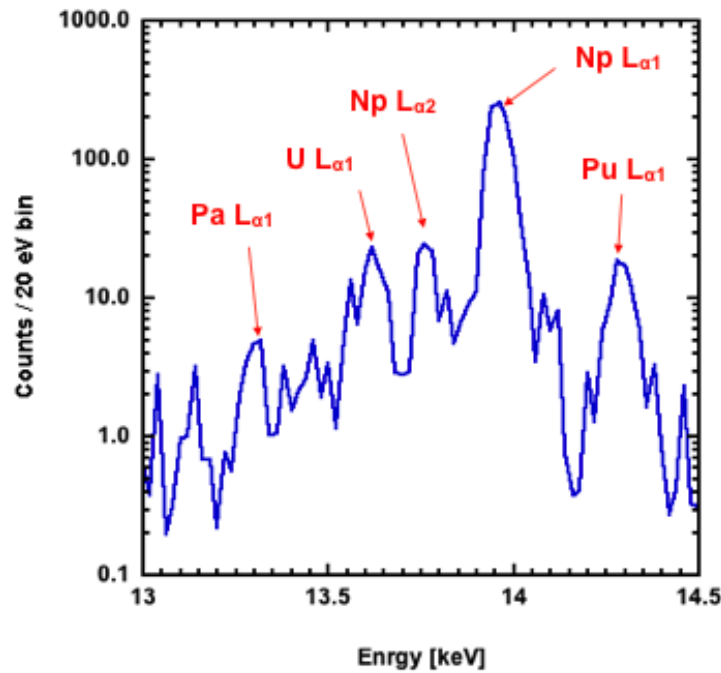


図 3.2-92 TES 型マイクロカロリメータを用いて高放射能処理廃液試料から放射される L X 線を計測した場合に予測されるエネルギースペクトル

標準線源及び  $^{237}\text{Np}$  標準線源の L X 線スペクトル計測実験を実施し、半値全幅 100 eV より優れたエネルギー分解能による主要な L X 線ピークの明確な同定を実証した。加えて、TES 型マイクロカロリメータを用いた計測で得られたピークが明確に同定できる TRU の L X 線エネルギースペクトルに基づいて、L X 線ピーク同定による主要な TRU の非破壊分析が期待されることを示した。

#### 参考文献

- [1] K. Hattori, S. Sakata, M. Tanaka, Y. Orihashi, T. Hirata, "U-Pb age determination for zircons using laser ablation-ICP-mass spectrometry equipped with six multiple-ion counting detectors," *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, Vol.32, pp.88-95, 2017.
- [2] Hideyuki Obayashi, Michitaka Tanaka, Kentaro Hattori, Shuhei Sakata, Takafumi Hirata, "In-situ  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  Isotope Ratio Measurement using Dual-Daly Ion Counting ICP-Mass Spectrometer," *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, Vol.32, pp.686-691, 2017.
- [3] N. R. Daly, "Scintillation Type Mass Spectrometer Ion Detector," *Review of Scientific Instruments*, Vol.31, No.3, pp.264-267, 1960.
- [4] Richard E. Russo, Alexander A. Bol'shakov, Xianglei Mao, Christopher P. McKay, Dale L. Perry, Osman Sorkhabi, "Laser Ablation Molecular Isotopic Spectrometry," *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, Vol.66, No.2, pp.99-104, 2011.
- [5] Richard E. Russo, Xianglei Mao, Jhanis J. Gonzalez, Vassilia Zorba, Jong Yoo, "Laser Ablation in Analytical Chemistry," *Analytical Chemistry*, Vol.85, No.13,

- pp. 6162-6177, 2013.
- [6] 小林恭子, “ナノ粒子分析のためのシングルパーティクル ICP-MS”, *ぶんせき*, 2016, No. 10, pp. 414-417, 2016.
- [7] 平田岳史, 坂田周平, 藤本万寿人, “レーザーアブレーション ICPMS の進歩と展望”, *ぶんせき*, 2016, No. 1, pp. 9-16, 2016.
- [8] Y. Makino, S. Ohara, M. Yamada, S. Mukoyama, K. Hattori, S. Sakata, Y. Tanaka, T. Suzuki, A. Shinohara, T. Matsukawa, K. Yokoyama, T. Hirata, “Quantitative elemental bioimaging protocol using femtosecond-laser ablation-ICP-mass spectrometry coupled with glass standard reference material,” *Metallomics: Recent Analytical Techniques and Applications*, Yasumitsu Ogra and Takafumi Hirata (Eds.), Springer, pp. 93-106, 2017.
- [9] N. Kolachevsky, A. Akimov, I. Tolstikhina, K. Chebakov, A. Sokolov, P. Rodionov, S. Kanorski, V. Sorokin, “Blue laser cooling transitions in Tm I,” *Applied Physics B*, Vol. 89, pp. 589-594, 2007.
- [10] E. D. Black, “An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization,” *American Journal of Physics*, Vol. 69, No. 1, pp. 79-87, 2001.
- [11] 満塩勝, “分析化学における人工知能”, *ぶんせき*, 2018, No. 9, pp. 377-378, 2018.
- [12] S. Kiyohara, T. Miyata, K. Tsud, T. Mizoguchi, “Data-driven approach for the prediction and interpretation of core-electron loss spectroscopy,” *Scientific Reports*, Vol. 8, 13548, 2018.
- [13] A. Bengtson, “Quantitative depth profile analysis by glow discharge,” *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, Vol. 49, pp. 411-429, 1994.
- [14] K. Maehata, K. Nakamura, T. Yasumune, K. Ishibashi, K. Takasaki, K. Tanaka, A. Odawara, A. Nagata, “Development of a TES microcalorimeter for spectroscopic measurement of LX-rays emitted by transuranium elements,” *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 47, No. 3, pp. 308-313, 2010.
- [15] K. Maehata, M. Maeda, N. Iyomoto, K. Ishibashi, K. Nakamura, K. Aoki, K. Takasaki, K. Mitsuda, K. Tanaka, “Response of a superconducting transition-edge sensor microcalorimeter with a mushroom-shaped absorber to L X rays emitted by transuranium elements,” *IEICE Transactions on Electronics*, Vol. E98.C, pp. 178-185, 2015.
- [16] K. Maehata, T. Hara, T. Ito, Y. Yamanaka, K. Tanaka, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, “A dry  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  dilution refrigerator for a transition edge sensor microcalorimeter spectrometer system mounted on a transmission electron microscope,” *Cryogenics*, Vol. 61, pp. 86-91, 2014.

### 3.3. 廃止措置に関する俯瞰的人材育成

#### 3.3.1. 廃止措置に関する講義

##### (1) 平成 29 年度までの成果

平成 26 年度に準備を行い、平成 27 年度からは廃止措置に関する講義（英語）を各年度 13 回に亘り修士・博士向けに実施した。内容としては、福島第一廃炉の現状から将来の課題まで、技術のみならず社会科学的知見も含めた幅広くかつ深掘した講義を実施した。具体的には、福島第一原子力発電所事故の概要についての講義の後、通常発電所の廃止措置とは何か、また事故炉の廃止措置との相違点は何かについて講義を行った。

また、現在及び将来行われる福島第一の廃止措置に関する研究開発の取り組みと課題、オンサイトの高線量現場で必須技術となるロボット技術（遠隔操作技術）の適用、核種分析技術・放射線計測技術、オフサイトを含んだ環境影響評価、バックエンドとして極めて重要となるデブリ燃料管理技術や廃棄物管理について講義を行った。

さらには、ハード技術ばかりではなく、社会との接点をどうすべきかなどのリスクコミュニケーションと社会的リスクの影響について議論を行い、総括として事故炉のリスク評価と管理に関する講義を行った。

以上のように、本講義では、福島第一原子力発電所廃止措置の現状の課題のみならず将来何を行う必要があるかなど、様々の視点から幅広く盛り込まれて議論され、福島第一廃止措置に対する学生理解度を深めることができた。

##### (2) 平成 30 年度の成果

平成 29 年度のフィードバックを踏まえて、より最新の情報を盛り込むなど、内容を見直して講義を実施し（表 3.3-1）、原子力国際専攻、精密工学専攻を中心に 30 名程度の学生が受講した。

表 3.3-1 廃止措置特論 E 講義内容（水曜日 4 限 14:55-16:40）

月日	担当教員	講義内容
9 月 26 日	岡本孝司	福島第一原子力発電所事故概要
10 月 3 日	岡本孝司	通常発電所の廃止措置
10 月 10 日	鈴木俊一	福島第一原子力発電所の廃止措置概要 (1)
10 月 17 日	鈴木俊一	福島第一原子力発電所の廃止措置概要 (2)
10 月 24 日	長谷川秀一	核種分析技術
10 月 31 日	松崎浩之	環境影響評価（オフサイト含み）
11 月 7 日	寿楽浩太	廃止措置の社会的側面
11 月 21 日	高橋浩之	放射線計測技術
11 月 28 日	浅間一	遠隔操作技術 (1)
12 月 5 日	田村雄介	遠隔操作技術 (2)
12 月 12 日	鈴木俊一	燃料デブリ管理技術
12 月 19 日	斉藤拓巳	廃棄物管理
1 月 9 日	岡本孝司	リスク評価とリスク管理

平成 30 年度の講義、及び学生からのレポートから、引き続き最新の情報を盛り込む必要があるという課題が抽出された。この課題に対応するべく講義シラバスの見直しを行い、次年度以降の各回の講義内容に反映させることとした。

### 3.3.2. 廃止措置教育プログラム

#### (1) 平成 29 年度までの成果

##### ① 廃止措置人材育成セミナー

廃炉人材育成教育の一環として、学生発表・討論を含めた人材育成セミナーを実施した。各年度に実施した概要を以下に示す。

1. 第 1 回東京大学人材育成セミナー  
開催日時 平成 26 年 12 月 11 日 (木)  
開催会場 東京大学本郷キャンパス工学部 2 号館 212 号室  
参加人数 87 名
2. 第 2 回福島人材育成セミナー  
開催日時 平成 27 年 2 月 24 日 (火)  
開催会場 コラッセふくしま 4 階 401 会議室  
参加人数 62 名
3. 第 3 回東京大学人材育成セミナー  
開催日時 平成 27 年 6 月 29 日 (月)  
開催会場 東京大学本郷キャンパス武田先端知ビル 5 階武田ホール  
参加人数 68 名
4. 第 4 回富山人材育成セミナー (第 13 回グリーンイノベーション研究会と共催)  
開催日時 平成 27 年 9 月 8 日 (火)  
開催会場 富山県民共生センター サンフォルテホール  
参加人数 77 名
5. 第 5 回神戸大学人材育成セミナー  
開催日時 平成 27 年 12 月 12 日 (土)  
開催会場 神戸大学総合研究拠点 コンベンションホール  
参加人数 84 名
6. 第 6 回東京大学・福島高専人材育成セミナー  
開催日時 平成 28 年 3 月 2 日 (水)  
開催会場 いわき産業創造館  
参加人数 63 名
7. 第 7 回東京大学人材育成セミナー  
開催日時 平成 28 年 6 月 4 日 (土)  
開催会場 東京大学本郷キャンパス工学部 2 号館 212 号室  
参加人数 63 名
8. 第 8 回九州大学人材育成セミナー  
開催日時 平成 28 年 9 月 21 日 (水)  
開催会場 九州大学伊都キャンパス 総合学習プラザ 大講義室  
参加人数 47 名
9. 第 9 回京都大学人材育成セミナー



開催日時 平成 28 年 12 月 10 日 (土)  
開催会場 京都大学桂キャンパス C3 棟講義室 1  
参加人数 45 名

10. 第 10 回会津大学人材育成セミナー

開催日時 平成 29 年 3 月 3 日 (金)  
開催会場 会津大学先端 ICT ラボ 2 階カンファレンススペース  
参加人数 50 名

11. 福島第一原子力発電所の廃炉に向けた研究及び人材育成に関する東京大学・IRID ワークショップ

開催日時 平成 29 年 11 月 1 日 (水)  
開催会場 東京大学本郷キャンパス 工学部 11 号館講堂、工学部 14 号館プロジェクト室  
参加人数 147 名

② 国際サマースクール

平成 27 年度はスウェーデン、平成 28 年度はアメリカ、平成 29 年度はフランスを訪問し、廃止措置関連施設を視察した。以下に各年度におけるサマースクールの概要を示す。

平成 27 年度

開催日程 平成 27 年 6 月 14 日 (日) ~20 日 (土)  
開催場所 スウェーデン  
参加者 教員 + 学生 11 名  
訪問先 SKB (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.) (Clab (使用済み核燃料の中間貯蔵施設)、Aspo Hard Rock Laboratory (地層処分に関する研究施設)、Canister Laboratory (使用済み核燃料貯蔵容器の研究所))、KTH (Royal Institute of Technology)、Studsvik AB、Uppsala University  
概要 スウェーデンにおける廃炉及び廃棄物処分に関する施設を視察するとともに、シビアアクシデント及び分析に関するセミナーを実施した。

平成 28 年度

開催日程 平成 28 年 7 月 11 日 (月) ~15 日 (金)  
開催場所 アメリカ  
参加者 教員 + 学生 13 名  
訪問先 DOE ハンフォードサイト、PNNL、KURION、NASA Johnson Space Center  
概要 米国における廃止措置現場及び宇宙開発現場を視察し、最新技術を把握した。また、原子力と宇宙分野における技術の類似点ならびに相違点について議論を行った。

平成 29 年度

開催日程 平成 29 年 7 月 3 日 (月) ~8 日 (土)  
開催場所 フランス  
参加者 教員 + 学生 16 名  
訪問先 CEA Saclay、CEA Cadarache、国際熱核融合実験炉 (ITER)、CEA Marcoule、Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS)

概要 フランスの原子力研究を実施している CEA において福島第一原子力発電所廃炉に関係する施設を視察し、フランスにおける最新廃炉技術を把握した。また、核融合炉の建設・保守技術や遠隔・ロボット技術を開発している LAAS を視察し、最新の遠隔技術を把握した。

### ③ 国内サマースクール

#### 平成 27 年度

開催日程 平成 27 年 8 月 3 日（月）～4 日（火）

開催場所 JAEA 東海

参加者 教員 + 学生 22 名

概要 遠隔・分析に関わる学生からの研究発表後、BE 技術開発建屋見学、燃料試験施設見学、マニプレータ取り扱い体験、原子力施設災害対応ロボット開発箇所見学を行った。

#### 平成 28 年度

開催日程 平成 28 年 8 月 8 日（月）～10 日（水）

開催場所 JAEA 檜葉遠隔技術開発センター

参加者 教員 + 学生 11 名

概要 東大、JAEA からの講演の後、施設見学を行った。その後、福島第一原子力発電所の 1 階高所除染をどのように実施するかグループ討論を行い、最終日には IRID、ATOX、教員からの講評を行った。

#### 平成 29 年度

開催日程 平成 29 年 9 月 6 日（水）～8 日（金）

開催場所 JAEA 檜葉遠隔技術開発センター

参加者 教員 + 学生 10 名

概要 IRID、JAEA からの講演の後、施設見学を行った。その後、福島第一原子力発電所の格納容器（Primary Containment Vessel; PCV）止水をどのように実施するかについてグループ討論を行い、最終日には教員からの講評を行った。

### ④ 原子力関連施設視察

#### 1. 福島第一原子力発電所視察

開催日程 平成 28 年 2 月 1 日（月）

参加人数 22 名

#### 2. 女川原子力発電所視察

開催日程 平成 28 年 6 月 1 日（水）

参加人数 教員 +14 名

#### 3. 島根原子力発電所視察

開催日程 平成 28 年 9 月 20 日（火）

参加人数 教員 +8 名

#### 4. 敦賀地区原子力施設視察

開催日程 平成 29 年 12 月 18 日（月）、19 日（火）

開催場所 敦賀発電所、普賢、もんじゅ、美浜原子力緊急事態支援センター  
参加人数 教員＋学生 6名

## ⑤ インターンシップ

### 平成 27 年度

開催日程 平成 28 年 2 月 18 日（木）～19 日（金）

開催場所 ATOX 技術開発センター

参加者 2 名

概要 一般の環境と放射線管理区域の違いや、導入されるロボットの設計概論について講義を受けた。加えて、実際の機体の見学や組み立て・操作を行い、廃炉現場で今まきに行われていること、検討されていること、課題となることを実体験することで、幅広い視点を得ることが可能となった。

### 平成 28 年度

開催日程 平成 29 年 2 月 20 日（月）～21 日（火）

開催場所 ATOX 技術開発センター

参加者 3 名

概要 廃止措置における工事と放射線管理、放射線影響についての説明を受け、放射線環境下でのロボット操作に関する知識を得た。

### 平成 29 年度

開催日程 平成 29 年 11 月 27 日（月）～12 月 11 日（月）

開催場所 ATOX 技術開発センター

参加者 4 名

概要 ガンマ線照射施設及び照射試験について説明を受け、水の放射線分解試験を行い、水素等のガス発生に関する知識を得た。

## ⑥ 次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス

廃炉人材育成を推進するため、「廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」採択 7 機関とともに廃炉研究を行っている学生主体のカンファレンスを共催し、学生間の意見交換促進ならびに廃炉研究へのモチベーション向上を図った。

平成 27 年度は東北大において、平成 28 年度は東工大において、平成 29 年度は東大グループの福島大、会津大、福島高専の協力を得ながら東大主催で福島県富岡町の学びの森にて開催し、大学及び産業界との連携を強化した。

### 平成 27 年度

開催日時 平成 28 年 3 月 16 日（水） 9:40-18:10

開催会場 東北大学青葉山キャンパス カタールホール 他

参加人数 226 名

### 平成 28 年度

開催日時 平成 29 年 3 月 7 日（火） 9:00-17:30

開催会場 東京工業大学 大岡山キャンパス 西 9 号館・デジタル多目的ホール

参加人数 245 名

## 平成 29 年度

開催日時 平成 30 年 3 月 19 日（月） 9:20-17:30

開催会場 富岡町文化交流センター学びの森（福島県双葉郡富岡町）

参加人数 242 名

### ⑦ 廃炉に関する重要研究課題抽出

廃炉に本質的に必要な課題を見つけるには、従来の現状から考える意図的計画法とは異なるエンドステート（最終状態）から考える仮説指向計画法も有効な手段である。事故炉の廃止措置を俯瞰的視点で捉えるため、燃料デブリ取り出し、廃棄物管理、及び遠隔技術の 3 分野に分けてブレンスティングを実施した。実施にあたっては原子力の専門家他、化学プラント、再処理技術、土木技術などに関する内外の専門家の意見を反映した。燃料デブリ取り出しにおいて、本質的に何が幹であるか上位概念を議論した結果、コンパクトな空間で放射性物質を安定に閉じ込めてから取り出すことが重要であるという概念を構築した。

以上、上記教育プログラムを通じ、廃炉研究を実施している学生は、研究目標の明確化や廃炉に対する理解度の深堀ができ、自らの研究モチベーション向上を図ることが可能となった。

## (2) 平成 30 年度の成果

### ① 廃止措置人材育成セミナー

#### 次世代廃炉人材育成セミナー

平成 26 年度のプログラム開始より 4 年が経過したことから、第 1 期の採択機関である 3 大学（東京大学、東京工業大学、東北大学）が中心となり、本プログラムのこれまでの成果を振り返るとともに、これからの廃炉人材育成の新たな展開を議論することを目的としたセミナーを開催した。本セミナーでは、各大学の研究成果の紹介だけでなく、プログラムを経て学部・大学院を卒業した学生たちが、福島第一原子力発電所の廃炉をはじめとして、社会の中でどのように廃止措置に関与・貢献し、活躍しているか発表した。また、3 大学の経験を踏まえ、これからの廃炉人材育成をどのように進めていくべきか、有識者を交えてパネル討論を行った。

開催日時 平成 30 年 5 月 17 日（木） 13:00-17:15

開催場所 東京大学本郷キャンパス武田先端知ビル 5 階武田ホール

参加人数 118 名

#### 東京大学 廃止措置研究・人材育成等強化プログラム最終成果報告会

平成 26 年度のプログラム開始より 5 年が経過し、平成 30 年度が最終年度となることから、本プログラムのこれまでの成果を報告するとともに、これからの廃炉研究・人材育成の新たな展開を議論することを目的として成果報告会を開催した。本報告会では研究成果の紹介とともに、学生及び教員より得られた成果と今後の課題について会場からの意見も聞きながら討論を行った。

開催日時 平成 31 年 3 月 28 日（木） 13:00-17:00

開催場所 東京大学本郷キャンパス 山上会館大会議室

参加人数 60 名

## ② 国際サマースクール

開催日程 平成 30 年 7 月 1 日（日）～8 日（日）

開催場所 イギリス

参加者 教員 + 学生 17 名

訪問先 NNL Workington Laboratory (Mock-up facility)、Createc Technologies、Sel-lafield site、Berkeley site、UKAEA、Oxford Technologies

概要 英国において廃炉を実施中のセラフィールド原子力サイトを訪問し、廃炉作業を視察した。また廃炉の遠隔技術を開発している NNL の Workington Laboratory では、廃炉懸隔技術やレーザー切断技術を、Createc Technologies 社では俯瞰的な線量分布測定技術を視察した。またバークレイ原子力サイトを訪問し、廃止措置解体現場を視察した。オックスフォードでは、英国原子力研究所 UKAEA (RACE) を訪問し、トカマク型核融合炉の保守遠隔技術を、Oxford Technologies 社においてドーンレイ原子力サイトにおける遠隔解体技術や福島廃炉で使われる燃料デブリサンプリング技術について説明を受けた。これらの経験を通じて、学生は最新の廃炉技術に触れるとともに、長期に亘る廃止措置においてはリスクとコストのバランスが重要であることを学んだ。

## ③ 国内サマースクール

開催日程 平成 30 年 8 月 20 日（月）～22 日（水）

開催場所 JAEA 櫛葉遠隔技術開発センター

参加者 教員 + 学生 11 名

概要 IRID、JAEA、東大からの講演の後、施設見学を行った。その後、福島第一原子力発電所における燃料デブリのサンプリング及び分析をどのように実施するかグループ討論を行い、最終日には教員から講評を行った。

## ④ 原子力関連施設視察

開催日程 平成 30 年 11 月 19 日（月）～20 日（火）

開催場所 日本原燃、東北電力東通発電所、電源開発大間原子力発電所、むつ科学技術館

参加者 教員 + 学生 17 名

概要 下北半島にある原子力関連施設である日本原燃において再処理工場等のサイクル施設を視察した。また、東北電力東通原子力発電所において発電プラント及び周辺断層を視察、電源開発大間原子力発電所において建設現場を視察し、発電所現場状況及び遠隔技術の適用に関する知見を深めた。

## ⑤ 次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス

4 回目となる同会議に学生が参加し、他大学・高専の学生や社会人と意見交換を実施し、人的ネットワークを構築した。

開催日時 平成 31 年 3 月 23 日（土） 9:20-16:30

開催場所 富岡町文化交流センター学びの森（福島県双葉郡富岡町）

参加人数 191 名

**⑥ 廃炉に関する重要研究課題抽出**

燃料デブリ取り出し、及び廃棄物管理についてブレインストーミングを実施し、重要課題を抽出した。特に燃料デブリ取り出しに関しては、新たな燃料取り出し代替案を提案し、保全学会、原子力学会、化学工学会、ICMST 国際学会等において講演を行った。



### 3.4. 研究推進

#### (1) 平成 29 年度までの成果

##### ① 情報交換

月に 1 回程度の定期的なプロジェクト会議を開催して情報交換を推進するとともに、研究代表者の下で研究者間の連絡を密にして研究を推進した。

##### ② 国内外の廃炉に関する活動への参画

###### JAEA/GLADS

文部科学省が推進している「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」に基づき、日本原子力研究開発機構の廃炉国際共同研究センター「国際共同研究棟」における研究・人材育成に向けた準備・検討を行った。

CLADS メンバーとの情報交換・議論を行うとともに、具体的な人材育成を行うための制度についての協議を行った。

###### 廃炉基盤研究プラットフォーム

福島第一原子力発電所の廃炉に向けた基礎・基盤研究の推進協議体である「廃炉基盤研究プラットフォーム」の運営に取り組んだ。

具体的には、NDF が策定した 6 課題に対して設置された分科会において、主査やメンバーとして参画し、本事業で実施したブレインストーミングの結果を紹介するなど、議論を行った。

#### (2) 平成 30 年度の成果

##### ① 情報交換

定期的にプロジェクト会議を開催して情報交換を推進するとともに、研究代表者の下で研究者間の連絡を密にして研究を推進した。

###### ● 第 1 回プロジェクト会議

開催日 平成 30 年 4 月 26 日

場所 東京大学工学部 14 号館 430 会議室

出席者 11 名（TV 会議参加者を含む）

###### 主な議題

- 次世代廃炉人材育成セミナーについて
- イギリス国際サマースクールについて
- 平成 30 年度の予定について
- FRC (Fukushima Research Conference) について

###### ● 第 2 回プロジェクト会議

開催日 平成 30 年 5 月 31 日

場所 東京大学工学部 14 号館 430 号室

出席者 12 名（TV 会議参加者を含む）

###### 主な議題

- イギリス国際サマースクールについて
- 次世代廃炉人材育成セミナー報告
- 廃止措置特論 E 講義について
- OECD NEA NEST について
- 今後の予定について

● **第 3 回プロジェクト会議**

開催日 平成 30 年 6 月 21 日

場所 東京大学工学部 14 号館 430 号室

出席者 10 名 (TV 会議参加者を含む)

**主な議題**

- 国際サマースクールについて
- NDF 廃炉研究開発連携会議の報告
- OECD NEA NEST について
- 今後の予定について

● **第 4 回プロジェクト会議**

開催日 平成 30 年 7 月 20 日

場所 東京大学工学部 14 号館 430 号室

出席者 9 名 (TV 会議参加者を含む)

**主な議題**

- 国際サマースクールの報告
- 国内サマースクールについて
- 今年度の経費執行について
- 今後の予定について

● **第 5 回プロジェクト会議**

開催日 平成 30 年 8 月 24 日

場所 東京大学工学部 14 号館 430 号室

出席者 9 名 (TV 会議参加者を含む)

**主な議題**

- 国内サマースクール報告
- シンポジウム・セミナー等について
- 今後の予定について

● **第 6 回プロジェクト会議**

開催日 平成 30 年 9 月 27 日

場所 東京大学工学部 14 号館 430 号室

出席者 12 名 (TV 会議参加者を含む)

**主な議題**

- 基本コンセプト、システム統合図について
- 経費執行について
- 今後の予定について

● **第7回プロジェクト会議**

開催日 平成30年11月5日

場所 東京大学工学部14号館430号室

出席者 11名 (TV会議参加者を含む)

**主な議題**

- システム統合図について
- 社会連携講座について
- 経費執行について
- 今後の予定について

● **第8回プロジェクト会議**

開催日 平成30年11月29日

場所 東京大学工学部14号館430号室

出席者 12名 (TV会議参加者を含む)

**主な議題**

- P0中間フォローについて
- 最終成果報告会について
- 経費執行について
- 今後の予定について

● **第9回プロジェクト会議**

開催日 平成31年1月8日

場所 東京大学工学部14号館430号室

出席者 11名 (TV会議参加者を含む)

**主な議題**

- P0中間フォローについて
- 最終成果報告会プログラムについて
- 経費執行状況について
- 今後の予定について

● **第10回プロジェクト会議**

開催日 平成30年2月7日

場所 東京大学工学部14号館430号室

出席者 12名 (TV会議参加者を含む)

**主な議題**

- 最終成果報告会プログラムについて
- NDEC-4について
- 今後の予定について

● **第11回プロジェクト会議**

開催日 平成31年2月28日

場所 東京大学工学部14号館430号室

出席者 10名 (TV会議参加者を含む)

### 主な議題

- 最終成果報告会について
- 成果報告書（最終年度版）について
- 今後の予定について

## ② 国内外の廃炉に関する活動への参画

### JAEA/CLADS

文部科学省が推進している「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」に基づき、日本原子力研究開発機構の廃炉国際共同研究センター「国際共同研究棟」における研究・人材育成を実施した。

具体的には、東京大学の博士課程学生 1 名を特別研究生として「国際共同研究棟」に滞在させ、研究・人材育成を実施した。

### 廃炉基盤研究プラットフォーム

福島第一原子力発電所の廃炉に向けた基礎・基盤研究の推進協議体である「廃炉基盤研究プラットフォーム」の運営に取り組んだ。

具体的には、NDF が策定した 6 課題に対して設置された分科会において、主査やメンバーとして参画し、議論を進めている。

## 4. 結言

本業務では、廃止措置に関する専門的な研究に関する専門家であるだけでなく、廃止措置全体を総合的に俯瞰してリスクを低減できる人材が必要となることから、遠隔操作技術と核種分析技術に関する専門的な研究開発を行うとともに、キャリアパスを考慮した、総合工学としての廃止措置を俯瞰的に理解できる人材の養成を実施した。

### 平成 26 年度の実績

#### (1) 遠隔操作技術に関する研究

##### ① 高所・狭隘部アクセスとそれらの遠隔操作インタフェースの開発

高所・狭隘部アクセス可能なロボット、及び、それらの遠隔操作インタフェースの概念設計・基礎検討を行い、これらの研究開発及びこれらを用いた人材育成を行うための設計・準備を行った。

##### ② 遠隔水中活動機器の要素技術開発と人材育成プログラムの作成（再委託先：福島大学）

遠隔水中活動機器の要素技術に関する基礎的検討を行い目標性能を設計した。また、人材育成システムに関しても基礎的な検討を行い、試行準備を行った。

##### ③ 遠隔マニピュレーションシステムの設計・評価に関する基盤的研究と柔軟なシステム構築が可能な人材育成（再委託先：神戸大学）

既存のロボットアームを活用して、次年度以降の遠隔マニピュレーションに関する基盤研究を推進するための遠隔操縦のミニマムプラットフォームを構築した。中核拠点の東京大学と連携しながらセミナーを企画し、研究に参画する学生を中心に積極的に参加させた。また神戸大学での特別講演会や日本原子力研究開発機構での見学会を企画した。

#### (2) 核種分析に関する研究

##### ① ガンマ線 CT システムの開発

既存の放射線検出器の動作特性の検討結果を踏まえて、本研究で開発する（2 光子同時計数による）ガンマ線 CT システムに用いるための放射線検出部の概念設計を行った。具体的には、研究担当実施者と研究に参画する学生が、ガンマ線 CT システムに用いるための放射線検出器として、シンチレータ、気体検出器、半導体検出器等について検討を行い、検出効率と空間分解能の観点から、半導体検出器を用いる検出部の概念設計を行った。

##### ② 微量分析システムの開発

分析対象となる試料の性状、既往の分析手法を踏まえるとともに、タンデム型加速器質量分析の検出器及びレーザー光倍波発生装置の導入を行い、微量分析プロトコルの概念設計を行った。

#### (3) 廃止措置に関する俯瞰的人材育成

##### ① 廃止措置に関する講義

俯瞰的な廃止措置教育カリキュラムを構築するために、講義シラバスを作成するとともに、講義内容の体系化について検討を行った。

##### ② 廃止措置教育プログラム

廃止措置セミナーを、東京及び福島において 2 回開催するとともに、実施結果をベースにセミナーの手法について評価を行った。

#### (4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連絡を密にして研究を進めた。

#### 平成 27 年度の実績

##### (1) 遠隔操作技術に関する研究

###### ① 高所・狭隘部アクセスとそれらの遠隔操作インタフェースの開発

高所・狭隘部アクセス可能なロボット、及び、それらの遠隔操作インタフェースのプロトタイプ的设计を行った。高所・狭隘部アクセス可能なロボットに関しては、機能性の向上と、大規模なセンサデータのデータ解析を行うとともに、基礎実験を行った。遠隔操作インタフェースに関しては、触覚への情報提示を活用したインタフェースのプロトタイプを試作した。また、これらの研究開発及びこれらを用いた人材育成の試行を行った。

###### ② 遠隔水中活動機器の要素技術開発と人材育成プログラムの作成（再委託先：福島大学）

遠隔水中活動機器の要素技術に関する試作を行い、その性能評価を実施した。具体的には、立体カムを用いた高精度 3 爪ハンドの試作と評価を行った。また、カメラ画像の時系列を利用した 3 次元復元の方式を確立した。さらに、複合材料の作製に関する予備実験を行うとともに、遮蔽効果の評価方法の予備試験を行った。人材育成システムに関しては、試行を行い、課題を抽出した。

###### ③ 遠隔マニピュレーションシステムの設計・評価に関する基盤的研究と柔軟なシステム構築が可能な人材育成（再委託先：神戸大学）

遠隔マニピュレーションシステムの性能指標の基礎検討を行うとともに、操作性の良い遠隔マニピュレーションシステムの設計条件の検討を行った。人材育成では、中核拠点の東京大学と連携しながらワークショッププログラムを企画するとともに、国内での遠隔マニピュレーションの関連施設の視察等を通じた人材育成プログラムを企画した。

##### (2) 核種分析に関する研究

###### ① ガンマ線 CT システムの開発

半導体検出器等の信号読み出し増幅器、リーク電流計測システム、線量校正装置、X 線照射装置及びスペクトル計測システムを整備し、本研究で開発するガンマ線 CT システムに用いるための放射線検出素子と高放射線下での動作について検討・評価を行った。

###### ② 微量分析システムの開発

微量試料に対する分析手法の検討を行った。既の実績のある分析試料処理法を基礎としながらもこれを微量に対して適用し、誘導プラズマ結合質量分析（ICP-MS）及び加速器質量分析（AMS）に最適な試料形態にする方法を検討した。また、AMS に用いるためのイオンクーラーを設計し、レーザー発生装置を組み込んで、チャンバー内にレーザー光を導入できるようにし、核種分析感度の向上を図った。さらに、レーザー光出力の強化及び高精度な波長計の導入により、同位体シフトに対応したレーザー分光分析装置の検討を行った。

##### (3) 廃止措置に関する俯瞰的人材育成

###### ① 廃止措置に関する講義

講義を試行し、課題を抽出するとともに講義シラバスの見直しを行った。

###### ② 廃止措置教育プログラム



廃止措置セミナーを、東京、福島、富山及び神戸において4回開催するとともに、セミナー手法について評価を行った。また、サマースクールを茨城県東海村及びスウェーデン・ウプサラにおいて開催するとともに、サマースクールについて評価を行った。さらに、インターンシップの具体化を行い試行した。企画・開催にあたっては、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が行う、廃炉基盤研究プラットフォームを含む、廃炉研究開発連携会議等の場において、関係機関との連携を密にして実施した。福島第一原子力発電所の現地調査等に参加した。また学内外の専門家を招聘して議論することで、重要研究課題を抽出した。

#### (4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連絡を密にして研究を進めた。また、本研究の推進にあたっては、現在、文部科学省が推進・検討している「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」に基づき、原子力機構が構築した「廃炉国際共同研究センター」での共同研究、人材育成への参画も含めた検討を行った。

### 平成 28 年度の実績

#### (1) 遠隔操作技術に関する研究

##### ① 高所・狭隘部アクセスとそれらの遠隔操作インタフェースの開発

高所・狭隘部アクセス可能なロボットの機能性のさらなる向上のため、推進機構及び制御手法の改良を行い、その後、推進性能、制御性能について模擬フィールドを用いて試験を行い、機能性向上を検証した。また、それらのロボットの遠隔インタフェースを試作し、映像提示技術の有効性や、操作性の向上や作業時間の短縮について効果を検証した。また、ガンマ線 CT システムとの統合に向けた基礎検討として、ガンマ線検出器を搭載するための遠隔操作ロボットの要件を定め、模擬検出器搭載状態での動作検証を行った。これらの開発にあたっては、国内外の学会等での情報収集や関連研究者との議論を行いつつ進めた。

##### ② 遠隔水中活動機器の要素技術開発と人材育成プログラムの作成（再委託先：福島大学）

遠隔水中活動機器の要素技術に関する試作を行い、その性能評価を実施した。具体的には、微量サンプリングを想定した、立体カムを用いた高精度並行爪ハンドの試作と評価を行った。まず直径 30 mm 程度の 2 爪で試作・評価を行い、さらなる小径化ならびに 3 爪化についても検討した。さらに、複数カメラの画像から奥行き画像を生成して維持する画像インタフェースを開発した。特に奥行き画像の提示方法に着目し、ユーザへのディスプレイ画像やポリゴン画像、デジタルリフォーカスによる提示を比較し、それによる操作性の違いを検討した。また、開発 FRP 材の遮蔽効果を評価し、曲げ試験や引張試験により温度依存性を含めた機械的特性の評価を行った。その結果を用いて水中ロボットで適用可能な部分を検討した。人材育成システムに関しては、小・中学生対象のロボット製作教室を行った。

##### ③ 遠隔マニピュレーションシステムの設計・評価に関する基盤的研究と柔軟なシステム構築が可能な人材育成（再委託先：神戸大学）

燃料デブリのサンプル採取など廃炉措置において必要とされる遠隔マニピュレーション作業を考慮し、視覚提示も含めた遠隔マニピュレーションシステムの性能評価法の検討を

進めるとともに、オペレータの技能評価への応用を検討した。人材育成では、中核拠点の東京大学と連携しながら檜葉モックアップ施設の有効活用法について検討するとともに、国内の廃炉措置関連施設の視察等を通じた人材育成プログラムを企画した。

## (2) 核種分析に関する研究

### ① ガンマ線 CT システムの開発

放射線検出部の概念設計の結果を踏まえて、放射線検出素子を組み込んだガンマ線 CT システムの検出部の設計を行い、そのガンマ線応答特性に関して、個々のガンマ線光子の挙動を追跡することの可能な GEANT4 モンテカルロシミュレーション計算を用い、放射線検出素子に対するガンマ線の入射方向に対する感度分布としての指向性、放射線検出素子において電子を生成する確率としての検出効率、入射したガンマ線の検出位置の広がりとしての空間分解能など、複数光子を用いて放射線源の位置情報を得るガンマ線 CT を実現する上で重要な基本性能についての検討・評価を行った。

### ② 微量分析システムの開発

平成 27 年度の成果を踏まえて、微量試料に対する分析手法の高度化を行った。特に、誘導結合プラズマ質量分析 (ICP-MS) 及び加速器質量分析 (AMS) における測定結果の評価を進めた。具体的には、分析対象試料量を変化させ (少量化していき)、測定結果との関係を調べ、収率を評価した。また、得られた知見を踏まえて、試料処理法をマニュアル化し、教育のための資料として残した。AMS においては、平成 27 年度に構築した負イオンクーラーの最適化を行った。具体的にはキャリアガスとビームトランスミッションの関係を調べ、キャリアガスの最適フロー条件とその時のビームトランスミッションを測定した。レーザー分光においては、光源として小型・簡便な半導体レーザーの利用を試みた。

## (3) 廃止措置に関する俯瞰的人材育成

### ① 廃止措置に関する講義

平成 27 年度のフィードバックを踏まえて講義を実施し、課題を抽出するとともに講義シラバスの見直しを行った。

### ② 廃止措置教育プログラム

廃止措置セミナーを、東京、福岡、京都及び会津において 4 回開催するとともに、セミナー手法について評価を行った。また、サマースクールを福島県檜葉町及びアメリカにおいて開催するとともに、サマースクールについて評価を行った。さらに、大学間連携による次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンスに参加した。また、学内外の専門家を招聘して議論することで、重要研究課題を抽出した。

## (4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連絡を密にして研究を進めた。また、本研究の推進にあたっては、現在、文部科学省が推進している「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」に基づき、日本原子力研究開発機構が平成 29 年 3 月に福島県富岡町に整備予定の廃炉国際共同研究センター「国際共同研究棟」における研究・人材育成の実施に向けた準備・検討を行った。また、福島第一原子力発電所の廃炉に向けた基礎・基盤研究の推進協議体である「廃炉基盤研究プラットフォーム」の運営に取り組んだ。

## 平成 29 年度の実績

### (1) 遠隔操作技術に関する研究

#### ① 高所・狭隘部アクセスとそれらの遠隔操作インタフェースの開発

高所・狭隘部アクセス可能なロボットについては、移動性能向上のための制御及び機構の開発を行った。遠隔操作インタフェースについては、俯瞰映像提示における描画の正確性の向上及び、視触覚を融合した遠隔操作インタフェースの効果検証を行った。また、(2)①で開発されるガンマ線 CT システムとの統合に向け、放射線源位置の推定手法を開発するとともに、ガンマ線検出器のプロトタイプを搭載した移動ロボットによる線源位置推定実験を行い、妥当性を検証した。これらの開発にあたっては、国内外の学会等での情報収集や関連研究者との議論を行いつつ進めた。

#### ② 遠隔水中活動機器の要素技術開発と人材育成プログラムの作成（再委託先：福島大学）

遠隔水中活動機器の要素技術に関する開発を引き続き進めるとともに、実現場に近い状況を想定した試作・評価を行った。具体的には、平成 28 年度に基本設計を行ったコンパクトに収納可能な可撓性伸縮アームの改良試作を行うとともに、これまで開発を続けてきた高精度 2 爪あるいは 3 爪ハンドを本アーム先端に取り付け、(2)②での微量分析のための微量サンプリングを行うことを想定した評価を実施した。画像インタフェースに関しては、水中で可撓性伸縮アームに取り付けられたカメラからの 3 次元復元を目標に、揺れるカメラから得られた画像列からの 3 次元復元の精度の検証を行った。さらに、耐放射線性に優れた FRP 材の開発においては添加金属を変えて放射線の遮蔽効果の評価と機械特性の評価を継続した。得られた成果から遠隔水中活動機器への適用可能性を引き続き検討した。人材育成に関しては小中学生対象のロボット製作教室を継続して開催し、講義の中で、廃炉現場で使われているロボットの話を行った。

#### ③ 遠隔マニピュレーションシステムの設計・評価に関する基盤的研究と柔軟なシステム構築が可能な人材育成（再委託先：神戸大学）

動作範囲の限られたマスタアームによる遠隔操縦法や様々な形状の物体把持など、廃炉措置において必要となり得る遠隔マニピュレーションの基盤技術の開発を進めるとともに、臨場感をはじめとする様々な観点からの遠隔マニピュレーションシステムの設計指針と性能評価手法を検討した。人材育成では、国内の廃炉措置関連施設の視察等を通じた人材育成プログラムを継続して企画するとともに、アウトリーチ活動も継続的に推進した。

### (2) 核種分析に関する研究

#### ① ガンマ線 CT システムの開発

平成 28 年度に実施したシミュレーション計算による基本性能検討結果を受けて、実際にガンマ線検出素子に加えてデータ取得装置及び線量計を搭載したガンマ線 CT システムのプロトタイプを製作し、(1)①の遠隔操作ロボットとの統合について検討した。プロトタイプ機器を用いて高放射線場における複数光子を取得する際の基本特性を評価した。

#### ② 微量分析システムの開発

標準溶液を用いて、模擬微量試料を作製しウラン同位体の定量のためのプロトコルを実験的に検討した。具体的には、ICP-MSにより $^{238}\text{U}$ 及び $^{235}\text{U}$ の濃度を測定した上で、試料残液に $^{238}$

Uキャリアを加え、平成28年度までに構築した手順でAMSターゲットを作製し、AMSにより<sup>236</sup>Uを定量した。ICP-MSとAMSの結果を有機的に比較検討することで、ウラン濃度、ウラン同位体比 (<sup>235</sup>U/<sup>238</sup>U及び<sup>236</sup>U/<sup>238</sup>U) を評価した。負イオンクーラーについては、テストベンチにより、核種の負イオン化に最適な化学形の検討、最適なビームパラメータ、チャンバー内のガス圧などの基礎データを採取するとともに、実ラインへの実装を検討し、課題を抽出した。レーザー分析装置については、時間分解を取り入れることで高度化を図った。また、(1)②でのサンプリングとの連携について検討した。

### (3) 廃止措置に関する俯瞰的人材育成

#### ① 廃止措置に関する講義

平成 28 年度のフィードバックを踏まえて講義を実施し、課題を抽出するとともに講義シラバスの見直しを行った。

#### ② 廃止措置教育プログラム

廃止措置セミナーを東大にて開催するとともに、機械学会、原子力学会等学会での発表を通じた人材育成を行った。次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンスを東大の主催で、福島県富岡町の文化交流センター学びの森にて開催した。サマースクールは、国内ではJAEA 楡葉遠隔技術開発センターにおいて、国外ではフランスにおいて開催し、評価を行った。また、学内外の専門家を招聘して燃料デブリ取り出し、廃棄物管理及び遠隔技術についてブレインストーミングを行い、廃炉の重要研究課題を抽出するとともに、新たな燃料デブリ取り出し代替案を構築し、(1)及び(2)の研究へのフィードバックを行った。

### (4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連絡を密にして研究を進めた。また、本研究の推進にあたっては、日本原子力研究開発機構廃炉国際共同研究センター「国際共同研究棟」における研究・人材育成の実施に向けた検討を行った。また、福島第一原子力発電所の廃炉に向けた基礎・基盤研究の推進協議体である「廃炉基盤研究プラットフォーム」の運営に取り組んだ。

## 平成 30 年度の実績

### (1) 遠隔操作技術に関する研究

#### ① 高所・狭隘部アクセスとそれらの遠隔操作インタフェースの開発

高所・狭隘部アクセス可能なロボットについては、開発したシステムの評価と改良を行った。遠隔操作インタフェースについては、より効果的な提示のための方法について検討した。また、ガンマ線検出器を移動ロボットに搭載し、放射線源分布推定実験を行った。これらの開発にあたっては、国内外の学会等での情報収集や関連研究者との議論を行いつつ進めた。

高所・狭隘部において、対象に大きな力を発生できる移動ロボットシステムを開発し、実機実験により重量物のハンドリング性能を評価した。

#### ② 遠隔水中活動機器の要素技術開発と人材育成プログラムの作成（再委託先：福島大学）

小型軽量エンドエフェクタ・マニピュレータ機構に関しては、サンプリング法（ピッキング、切削等）の開発ならびに巻き取りドラムの開発とシステム化を行い、水中ロボットへの搭載に向けた検討を行った。画像インタフェースに関しては、水中でアームに取り付

けられたカメラからのシーンの復元を目標に、3 次元的に揺れる画像列及び画像ノイズが復元精度に与える影響を検証した。また、開発した画像インタフェースシステムを水中ロボットに搭載して性能試験を実施した。さらに、耐放射線性に優れた FRP 材の開発においては、耐放射線性に優れた FRP 材の遮蔽効果を向上させ、その材料を用いて水中ロボットの制御装置ボックスを製作し、性能試験を実施した。小中学生対象のロボット製作教室を継続開催し、講義の中で、廃炉現場で使われているロボットの紹介を行った。また、ロボット製作教室の評価とまとめを行った。

③ 遠隔マニピュレーションシステムの設計・評価に関する基盤的研究と柔軟なシステム構築が可能な人材育成（再委託先：神戸大学）

本研究プロジェクトでこれまでの研究で得られた遠隔マニピュレーションの基盤技術（操縦の負担軽減手法を含む。）を活かした高度な遠隔操縦プラットフォームを構築し、さらにはこれまでの研究で得られた遠隔マニピュレーションシステムの設計指針と性能評価手法をまとめることで、廃炉措置において必要となる遠隔操縦システムの開発、評価に寄与した。また神戸大学に構築したプラットフォームを、遠隔マニピュレーション技能認証拠点として今後も継続使用できるように整備することを検討した。人材育成では、国内の廃炉措置関連施設の視察等を通じた人材育成プログラムを総括する企画を行うとともに、これまで継続的に行ってきたアウトリーチ活動の企画も行った。

具体的には、動作範囲の限られたマスタアームによる遠隔操縦法についてはこれまで継続的に研究を進めてきたマスタの移動速度に依存したスケール変換法において、スケール変換パラメータの調整を容易にするユーザインタフェースを新たに開発し、実環境での評価実験によりその有効性を検証した。遠隔操縦の操作性を評価する指標としては、平成 29 年度からシステムとの「一体感」を客観的に評価する具体的手法として CCE（Crossmodal congruency effect）を検討してきたが、平成 30 年度はこの CCE が遠隔操縦システムとの「一体感」を正しく評価できるのかを検証した。

また平成 28 年度の成果とした遠隔操縦におけるマスタ・スレーブ間の接続の繰り返しの伴う手先姿勢誤差の修正法に平成 30 年度は改良を加え、実環境で実験を行って有効性を確認できた。

以上の平成 30 年度の成果を含む 5 年間の研究で得られた成果は、神戸大学の遠隔操縦プラットフォームという形で集約され、今後も遠隔マニピュレーション技能認証拠点として継続使用するために、システムの拡張性を高める検討を行った。

人材育成では、国内の廃炉措置関連施設の視察等を通じた人材育成プログラムを総括する企画として檜葉遠隔操作技術開発センターにて講義とロボット実習を含む研修を行った。アウトリーチ活動は、平成 30 年度も引き続き第 18 回レスキューロボットコンテストにおいてブース出展を行った。

(2) 核種分析に関する研究

① ガンマ線 CT システムの開発

平成 29 年度に製作したガンマ線 CT システムプロトタイプの実験を行うとともに小型化を進め、集積回路を用いたデータ取得用ボードの製作を行った。ガンマ線 CT システムを遠隔操作ロボットに搭載して、ガンマ線場における線源分布計測を行い、シミュレーシ

ヨン計算と比較し、ガンマ線 CT システムとしての特性を求めた。

システムは 10 kg 以下への軽量化に成功し、1 m 以上離れた位置から点線源を用いて測定した結果、30 cm 程度の位置分解能を得ることができた。

## ② 微量分析システムの開発

質量分析では、平成 29 年度に開発した標準溶液を用いた微量試料の分析プロトコルを基礎に、平成 30 年度は、(1)②の遠隔操作による採取を念頭に置き、固体微粒子の模擬試料を対象としてウラン同位体の分析を試みた。分光分析では、平成 29 年度までに開発したプラズマを利用した分光分析装置の基本性能を評価した。

固体微粒子の模擬試料としては、ステンレス材から 0.5 mm 及び 1 mm の模擬試料を作製した。また、分光分析では、発光分析により、定量分析に必要となる検量線を取得することができた。

## (3) 廃止措置に関する俯瞰的人材育成

### ① 廃止措置に関する講義

平成 29 年度のフィードバックを踏まえて講義を実施し、課題を抽出するとともに講義シラバスの見直しを行った。

### ② 廃止措置教育プログラム

廃止措置セミナーを東京大学にて開催するとともに、機械学会、原子力学会等学会での発表を通じた人材育成を行った。また、次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンスに参加し、発表とともに他大学学生との交流を深めた。サマースクールは、国内では JAEA 榎葉遠隔技術開発センターにおいて、国外では英国において開催し、評価を行った。また、学内外の専門家を招聘して燃料デブリ取り出し、廃棄物管理についてブレインストーミングを行い、廃炉の重要研究課題を抽出するとともに、新たな燃料デブリ取り出し代替案を構築した。

## (4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連絡を密にして研究を進めた。また、本研究の推進にあたっては、日本原子力研究開発機構廃炉国際共同研究センター「国際共同研究棟」における研究・人材育成の実施に向けた検討を行った。また、福島第一原子力発電所の廃炉に向けた基礎・基盤研究の推進協議体である「廃炉基盤研究プラットフォーム」の運営に取り組んだ。

具体的には、毎月 1 回（計 11 回）の連携会議を実施するとともに、平成 31 年 3 月 28 日に最終成果報告会を東京大学において実施した。また、東京大学の博士課程学生 1 名を特別研究生として「国際共同研究棟」に滞在させ研究・人材育成を実施した。

以上、5 カ年計画の業務項目を実施し、所期の目標を達成した。