



JAEA-Review

2018-014

DOI:10.11484/jaea-review-2018-014

## 平成28年度 櫛葉遠隔技術開発センター一年報

Annual Report for FY2016 on the Activities of  
Naraha Center for Remote Control Technology Development  
(April 1, 2016 - March 31, 2017)

櫛葉遠隔技術開発センター

Naraha Center for Remote Control Technology Development

福島研究開発部門

福島研究開発拠点

Fukushima Research Institute  
Sector of Fukushima Research and Development

December 2018

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<https://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Institutional Repository Section,  
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2018

平成 28 年度 檜葉遠隔技術開発センター年報

日本原子力研究開発機構  
福島研究開発部門 福島研究開発拠点  
檜葉遠隔技術開発センター

(2018 年 8 月 7 日受理)

檜葉遠隔技術開発センターは、試験棟と研究管理棟から構成され、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所（1F）の事故後の廃止措置作業に向けて必要となる各種試験設備が設置されている。廃止措置作業に携わる企業や研究開発機関、教育機関など幅広い利用者がこれらの試験設備を用いて遠隔操作ロボットの特性把握や性能評価を通じてロボット開発など効率的にできるほか、多くの企業が一堂に会して展示会、廃止措置に係る有識者の会議開催など様々な利用ができる拠点として、平成 28 年 4 月より本格的な運用を開始した。平成 28 年度の施設利用件数は 38 件である。また、建設当時から多くの方々の関心を集め、平成 28 年度には 4,212 名の視察・見学者を受け入れた。今後も引き続き幅広い分野での利用を受け入れるとともに、利用者のニーズを的確に反映した試験設備の拡充を進めて利用促進を図り、1F の廃止措置および福島復興における遠隔技術の研究開発拠点として展開してゆく。

本報告は、当センターにおいて平成 28 年度に実施した遠隔技術開発、緊急時対応遠隔機材の整備と訓練、要素試験エリア等の利用状況などの活動状況についてまとめたものである。

Annual Report for FY2016 on the Activities of Naraha Center for  
Remote Control Technology Development  
(April 1, 2016 - March 31, 2017)

Naraha Center for Remote Control Technology Development  
Fukushima Research Institute  
Sector of Fukushima Research and Development  
Japan Atomic Energy Agency  
Naraha-machi, Futaba-gun, Fukushima-ken  
(Received August 7, 2018)

The Naraha Center for Remote Control Technology Development (Naraha Center) was established in Japan Atomic Energy Agency (JAEA) to promote decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (1F), Tokyo Electric Power Company Holdings (TEPCO). The Naraha Center consists of a mock-up test building and a research management building, and various test facilities are installed in them for the decommissioning work after the accident of 1F, TEPCO.

Using these test facilities various users, such as companies engaged in decommissioning work, research and development institutions, educational institutions etc., can efficiently develop remote-controlled robots through performance evaluation of them. Furthermore, various facility uses are also possible to make such as exhibitions that many company persons have met together, experts' meetings on decommissioning.

The Naraha Center started full operations from April 2016 as a base that can be widely used, and the number of the facility use in FY2016 was 38. In addition, many people were interested since its construction, and 4,212 visitors have visited in FY2016. We will continue to accept the use in various fields and promote the utilization of test facilities based on the needs of users. Moreover, we will contribute as a research and development base for remote control technologies in the decommissioning of 1F and the Fukushima regional reconstruction.

This report summarizes the activities of the Naraha Center in FY2016, such as development of remote control technologies, maintenance and training of remote control equipment for emergency response, use of component test areas, and so on.

Keywords: Remote Control Technology, Annual Report, Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Full-scale Mock-up Test, Naraha R&D Center, JAEA

---

(Eds.) Yusuke CHIBA, Mitsugu KATO, Nobuhisa NOSAKI, Kuniaki KAWABATA,  
Shinji KAWATSUMA

## 目 次

1	はじめに	1
2	施設の概要	2
2.1	実規模試験エリア	4
2.2	要素試験エリア	6
2.2.1	ロボット試験用水槽	6
2.2.2	モックアップ階段	7
2.2.3	モーションキャプチャエリア	8
2.2.4	付帯設備	9
2.3	VR システム	10
3	平成 28 年度の活動	11
3.1	遠隔技術開発による付加価値の創出	13
3.1.1	ロボットシミュレータ	13
3.1.2	ロボット試験フィールドの整備	17
3.1.3	VR システムの整備	21
3.2	遠隔・非接触での材料評価技術開発	24
3.2.1	開発の背景と経緯	24
3.2.2	研究内容と成果	24
3.2.3	まとめと今後の展開	25
3.3	炉内構造物、燃料デブリ取り出し技術開発	27
3.3.1	開発の背景と経緯	27
3.3.2	研究内容と成果	27
3.3.3	まとめと今後の展開	27
3.4	緊急時対応遠隔機材の整備と訓練	29
3.4.1	遠隔機材の整備	29
3.4.2	要員の育成	29
3.5	利用促進活動	31
3.5.1	知ってもらおう活動	31
3.5.2	使ってもらおう活動	32
3.5.3	満足してもらおう活動	32
3.6	平成 28 年度の利用状況	34
4	まとめ	36
	参考文献	37
	付録	38
	付録 1 櫛葉遠隔技術開発センターの組織	38
	付録 2 平成 28 年度 外部発表リスト	40

付録 3	表彰・特許	43
付録 4	施設の見学者数一覧	44
付録 5	檜葉遠隔技術開発センターの利用手続き	46
付録 6	施設利用者へのアンケート調査	47

Contents

1	Introduction	1
2	Outline of Facility	2
2.1	Mock-up Test Area	4
2.2	Component Test Area	6
2.2.1	Robot Test Pool	6
2.2.2	Mock-up Stairs	7
2.2.3	Motion Capture Area	8
2.2.4	Ancillary Facility	9
2.3	VR System	10
3	Activity in FY2016	11
3.1	Creation of Added Value by Technology Development for Remote Control	13
3.1.1	Robot Simulator	13
3.1.2	Maintenance of Robot Test Field	17
3.1.3	Maintenance of VR System	21
3.2	Development of Material Evaluation Technology with Remote and Non-contact	24
3.2.1	Background	24
3.2.2	Results	24
3.2.3	Summary	25
3.3	Technology Development on Core Internals/Fuel Debris Removal	27
3.3.1	Background	27
3.3.2	Results	27
3.3.3	Summary	27
3.4	Maintenance and Training of Remote Control Equipment for Emergency Response	29
3.4.1	Maintenance of Remote Control Equipment	29
3.4.2	Personnel Training	29
3.5	Activities on Use Promotion	31
3.5.1	Activities to Inform	31
3.5.2	Activities to Use	32
3.5.3	Activities to Satisfy	32
3.6	Situation of Utilization in FY2016	34
4	Summary	36
	References	37
	Appendix	38

Appendix 1	Organization of Naraha Center for Remote Control Technology	
	Development	38
Appendix 2	External Presentation List of FY2016	40
Appendix 3	Awards and Patents	43
Appendix 4	Number of Visitors	44
Appendix 5	Procedures for Using of Naraha Center for Remote Control Technology	
	Development	46
Appendix 6	Questionnaire Survey for Facility Users	47

## 1 はじめに

東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所（以下、「1F」という）の事故後の廃止措置作業においては、高線量率であるため人による作業が困難、あるいは作業時間が制限されている。このため、通常の原子力施設の廃止措置作業とは異なり、多くの作業を遠隔操作機器・装置等で行う必要がある。

平成 25 年に経済産業大臣が議長を務める福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議において、廃止措置に向けた遠隔操作機器・装置の開発およびモックアップ試験施設の整備が決定された。

この決定に基づき、日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という）は経済産業大臣からの要請を受け、モックアップ試験施設の整備に着手した。当該施設は 1F から近いことが望ましいため、平成 25 年当時、避難指示解除準備区域であった檜葉町の檜葉南工業団地の場所に設置することを決定した。整備した檜葉遠隔技術開発センター（以下、「檜葉センター」という）は、1F の事故後、1F から 20 km 圏内に国が作った最初の施設である。図 1-1 に檜葉センターの建設から本格運用に係る中長期展望を示す。

檜葉センターは、試験棟と研究管理棟から構成され、廃止措置に向けて必要となる各種試験設備が設置されている。廃止措置作業に携わる企業や研究開発機関、教育機関など幅広い利用者がこれらの試験設備を用い、遠隔操作ロボットの特性把握や性能評価を通じてロボット開発などを効率的にできるほか、多くの企業が一堂に会して展示会、廃止措置に係る有識者の会議開催など幅広く利用できる拠点として、平成 28 年 4 月より本格的な運用を開始した。

建設当時から多くの方々の関心を集め、平成 28 年度には 4,212 名の視察・見学者を受け入れるとともに、平成 28 年度の施設利用は 38 件となった。今後も引き続き幅広い分野での利用を受け入れるとともに、利用者のニーズを的確に反映した試験設備の拡充を進めて利用促進を図り、1F 廃止措置および福島復興における遠隔技術の研究開発拠点として展開してゆく。

### 檜葉遠隔技術開発センターは**建設整備**段階から**本格運用**段階へ移行

項目	年度						
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
福島第一原子力発電所廃止措置		デブリ取出し方法方針決定 ▽				デブリ取出し開始	▽
イノベーション・コースト構想			ロボットテストフィールド 建設			ワールドロボットサミット大会 (福島・愛知)	
				ワールドロボットサミットプレ大会(東京)▽		▽▽	
JAEA 檜葉遠隔技術開発センター <small>(2016年4月1日より実規模試験・要素試験エリアの運用開始 2017年4月1日よりVRシステムの運用開始)</small>			実規模試験エリア: 止水実規模実証試験 (~2017年)				
	建設		要素試験エリア: 廃炉創造ロボコン、ロボット展示・実演会など				
			VRシステム: 作業計画、作業員の教育・訓練				

(出典：第 12 回モックアップ試験施設専門部会、平成 29 年 7 月 21 日)

図 1-1 檜葉センターの建設から本格運用に係る中長期展望

## 2 施設の概要

廃止措置作業においては、燃料デブリの取り出しが一つの大きな課題である。このため、「原子炉格納容器（以下、「PCV」という）内等の状況調査」、「PCV 内等の除染」および「PCV 下部漏えい箇所止水」などの作業をしなければならない。これらは高放射量率環境下での作業になるため、遠隔操作機器（ロボット）で行う必要がある。

この高放射線量率下での作業を行う前に、機器の配置や損傷状況などを模擬した環境下での作業訓練や作業環境を模擬した施設・設備を用いた各種実証試験を行う必要がある。このため、1F での実作業に先立ち開発した技術の実証ができる施設の建設が決定された。原子力機構は、経済産業大臣から遠隔試験施設の建設要請を受け、1F 事故後、20 km 圏内の避難指示解除準備区域であった檜葉町の檜葉南工業団地への建設に着手した。檜葉センターは、日本で初めて、原子力災害を主目的としたロボットなど遠隔技術の実証試験施設として国が作った施設である。

本センターは、各種試験が出来る「試験棟」（1階建て：幅 80 m、奥行き 60 m、高さ 40 m）と「研究管理棟」（4階建て：幅 35 m、奥行き 25 m、高さ 20 m）とから構成されている。図 2-1 に檜葉センターの全景、図 2-2 に檜葉センターの試験棟の平面図を示す。

試験棟は、広大な屋内に要素試験エリアと実規模試験エリアがあり、遠隔操作機器・装置の性能評価を行う設備が整備されている。一方、研究管理棟では、バーチャルリアリティ（以下、「VR」という）を用いた作業訓練システムや会議室を備えている。



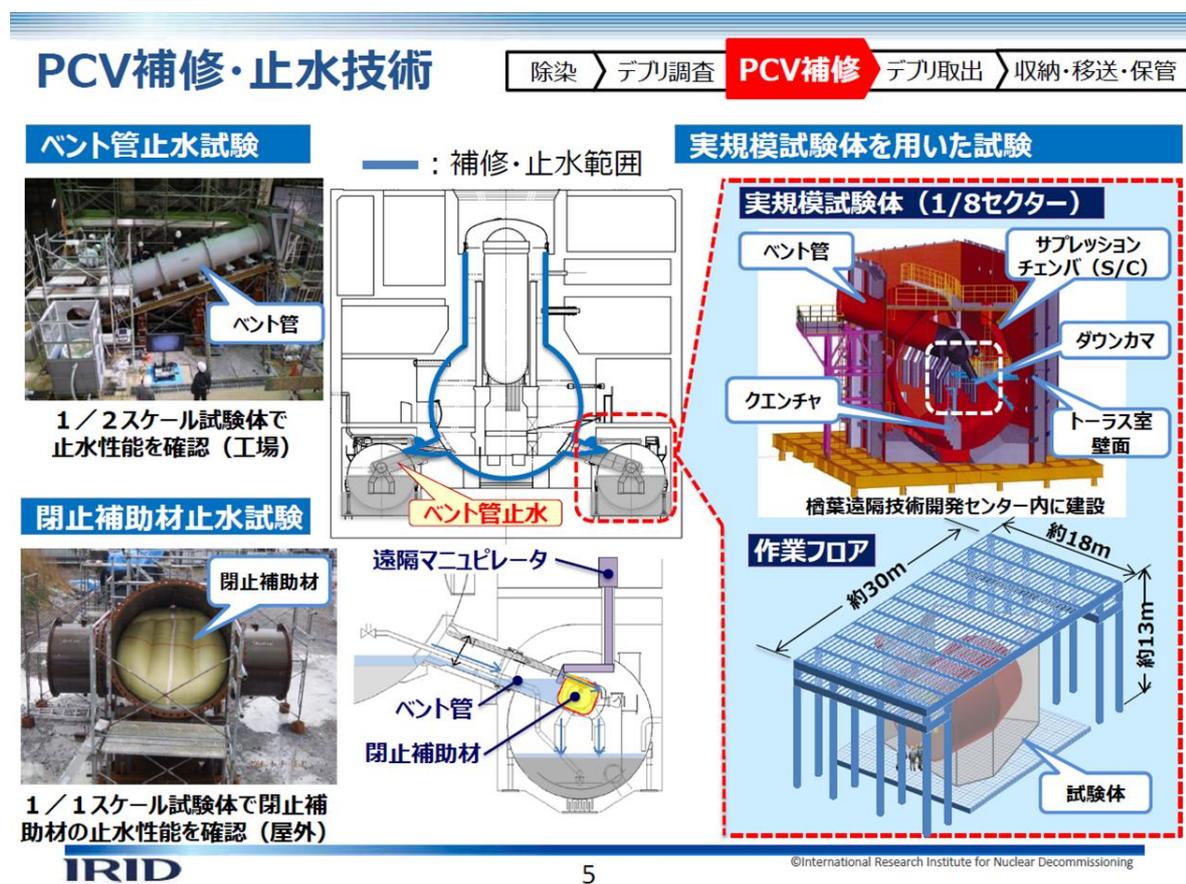
図 2-1 檜葉センターの全景



図 2-2 櫛葉センターの試験棟平面図

## 2.1 実規模試験エリア

試験棟エリアは、実規模試験エリアとして、組立エリア、試験エリア、解体エリアに区別されている。現在、実規模試験エリアには、原子炉格納容器漏えい箇所の補修・止水技術確立（図 2.1-1）のため、技術研究組合国際廃炉研究開発機構（以下、「IRID」という）が制作したドーナツ型の原子炉格納容器下部を実寸大で 1/8 セクターを模擬した実規模試験体（図 2.1-2）が設置されている。この試験体は、1F2 号機の PCV 下部にあるベント管、サプレッションチェンバ（S/C）やトラス室壁面などを模擬している。試験体のサイズは実寸大で、円環周状の S/C を 8 等分して、その一つを切り出した形としている（図 2.1-1 参照）。



引用：「燃料デブリの取り出し～IRID が取り組む研究開発の状況～」

IRID シンポジウム 2017 in いわき「燃料デブリ取り出しに挑む」（2017年8月3日）

([http://irid.or.jp/\\_pdf/Sympo2017\\_Okuzumi.pdf](http://irid.or.jp/_pdf/Sympo2017_Okuzumi.pdf))

図 2.1-1 原子炉格納容器漏えい箇所の補修・止水技術概要



引用：「原子炉格納容器（PCV）下部を模擬した実規模試験体の製作完成と試験計画について(2016年4月20日)」、IRID R&D Topix (<http://irid.or.jp/topics/>)

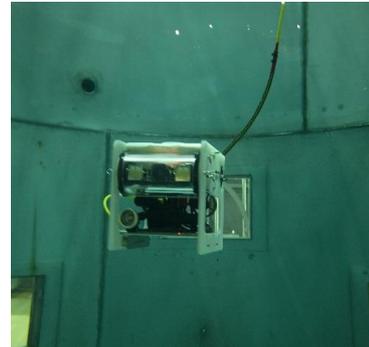
図 2.1-2 実規模試験体

## 2.2 要素試験エリア

### 2.2.1 ロボット試験用水槽

事故の起きた 1F には、原子炉建屋など水没している箇所があるため、水中ロボットが必要である。ロボット試験用水槽（図 2.2.1-1 参照）は、水中ロボットの実証試験に必要な 1F 炉内の水中環境を模擬する円筒形水槽である。水槽は、直径 4.5 m、水深 5 m の円筒状で、付帯設備として昇温装置、水中カメラ、水中照明等が設置されている。水温は最高 60 °C まで昇温できるとともに、水質も上水、工業用水、濁水等に変更可能である。さらに、高さ 0.5 m、1 m および 4 m の周囲 12 箇所を観察窓が設置されており、試験時のロボットの動きを様々な角度から確認することができる。

また、水槽上部フロアにはチェンブロックも装備されているので、重量のある水中ロボット等の移動も可能である。



試験の様子  
(観察窓から撮影)

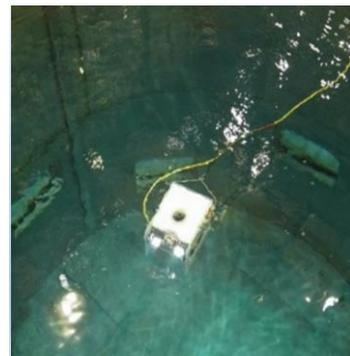


図 2.2.1-1 ロボット試験用水槽

### 2.2.2 モックアップ階段

1F 現場においては、遠隔操作機器・装置として投入されるロボットが越えなければならない障害物の一つとして階段がある。このため、種々の階段を模擬できるモックアップ階段を備えている。この階段は 1F に存在する種々の階段の形状が再現できるよう組み替えが可能な構造としている。具体的には、傾斜角を 40～55 度に可変にでき、蹴上高さを 180～230 mm に組み替えられる。また、手摺の幅や踏板の材質を変更することもできる（図 2.2.2-1 参照）。



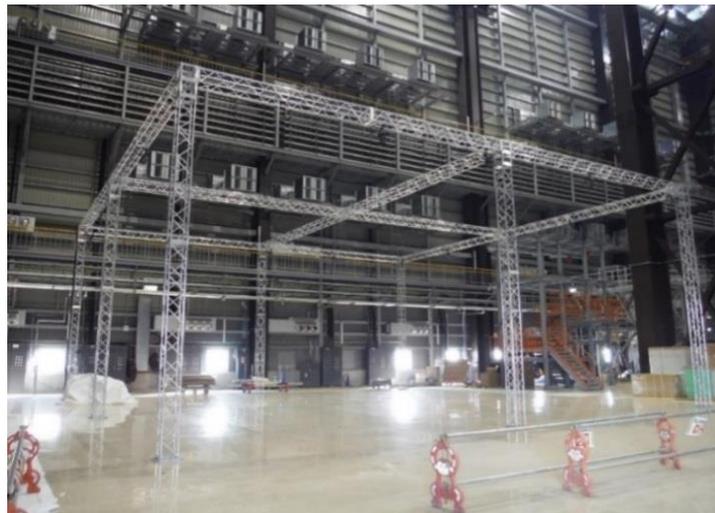
図 2.2.2-1 モックアップ階段

### 2.2.3 モーションキャプチャエリア

モーションキャプチャは、人物や物体の動きをデジタル的に記録する技術である。キャプチャ技術には、光学式、機械式、磁気式などがあり、試験棟に設置されているモーションキャプチャは光学式で、複数のカメラと反射マーカをトラッカーとして用い、撮影および計測空間周囲にカメラを設置して利用する。

本モーションキャプチャエリアは、幅 15 m、奥行き 15 m、高さ 7 m の鉄骨フレームで作られた空間で、フレーム高さ 7 m の水平位置に 16 台の高速カメラやビデオカメラを設置して、幅 10 m、奥行き 10 m、高さ 2 m の広範囲で高精度 ( $\pm 1.5$  mm) に計測が可能である。

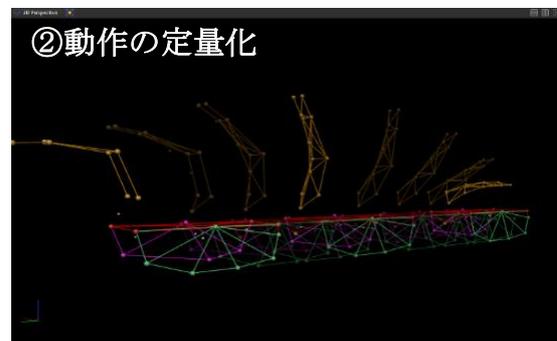
本システムの利用としては様々なものが考えられるが、たとえば 1F 内に散乱している瓦礫などをロボットが踏破する際の動作検証や、1F や周辺の状況を監視したり災害時に荷物などを運ぶマルチコプタ (通称：ドローン) の動作検証などが想定される。本モーションキャプチャエリアでは、ロボットやマルチコプタを動作させた場合の傾き、走行／飛行ルート、滑り等を 0.5 ms の時間分解能で計測できる。得られた位置情報 (x、y、z の 3 方向) の時間変化から、速度、加速度、力などの分析・評価も可能である (図 2.2.3-1 参照)。



(1) モーションキャプチャエリア



(2) 対象物の撮影



(3) 動きをデジタル記録

図 2.2.3-1 モーションキャプチャエリア

## 2.2.4 付帯設備

試験棟内で各種試験を効率的に行えるよう支援する目的で、各種付帯設備を備えており、自由に利用者が使用することができる。付帯設備としては、各種工作機械や 1F 内の作業環境の一部を模擬した単管パイプ、ドア、グレーチング、あるいは NIST-ASTM 標準の対象ステップフィールドがある。また、産業技術総合研究所（以下、「産総研」という）が開発したコレオノイドをベースにしたロボットシミュレータも整備しており、1F の作業環境をコンピュータ上で再現してロボットの動作確認や操作訓練も可能である。

これら付帯設備を活用することにより、利用者が持ち込んだ遠隔操作機器のメンテナンスや試験環境の再設定が速やかに行える。利用可能な設備および備品を表 2.2.4-1 に示す。

表 2.2.4-1 利用可能な設備および備品一覧表

名称	仕様等	
ロボットシミュレータ	産総研が開発するChoreonoidをベースにしたロボットシミュレータ。1Fの作業現場をコンピュータ内に再現しており、ロボットの動作確認や操作訓練が可能。	
標準試験体	対称ステップフィールド（NIST-ASTM E2828-11）	
環境模擬体	コンクリートブロック、H鋼、ケーブルトレイ、単管パイプ、ドア等	
名称	メーカー等	型式、仕様等
映像記録装置	パナソニック	WV-ASN200 カメラ：固定5台、可搬5台
電波用スペクトラムアナライザ	FLUKE	AirCheck Wifiテスター
デジタルマルチメータ	キーサイト・テクノロジー	U3402A
デジタルオシロスコープ	岩通計測	DS-5512-A
トータルステーション	トプコン	PS-103AS
検電器	長谷川電機	HSS-6B、HT-680DB
照度計	コニカミノルタ	T-10A
各種工具	-	ドライバー、レンチ、電動工具等
卓上CNCフライス盤	旋盤市場	PSF-240-CNC
卓上フライス盤	光畑製作所	BM-1000
卓上旋盤	光畑製作所	L-5000D
卓上糸鋸盤	旭工機	SAM60
メタルソー切断機	日立工機	CU 15SC
ボール盤	遠州工業	EUD-500
ハンドリフター	スギヤス	BM-15F(積載荷重:1t)
フォークリフト	コレック	RTP532(積載荷重:0.5t)
高所作業車	北越工業	ENTN080-2(作業床高さ8m)
天井クレーン	京和工業	30t(補巻き5t)

## 2.3 VR システム

仮想現実技術（Virtual Reality Technology）を用いて、事故後の 1F 原子炉建屋内を CAVE 型 4 面スクリーンに再現し、あたかも現場にいるかのような映像を立体視することができる。この機能を駆使して、施設の空間構造、規模感、現場までの移動経路、照明環境、空間線量率等を効率的に把握できる環境を構築している。これにより、たとえば廃止措置に向けた現場作業員の事前教育・反復訓練、作業関係者による現場状況の共有、作業計画の検討・立案や原子炉格納容器（PCV）の下部止水作業に係る遠隔操作機器の初期操作訓練などが可能である。

通常の可視化では、施設・設備配置等の空間構造や規模感を把握することが困難であるが、VR システムを適用することにより、実寸大でかつ立体的に可視化でき利用者目線で様々な場所を表示させて空間構造などを詳細に把握することができる。また、実規模大のモックアップでは困難な施設全体の模擬や繰り返しの試行、現物では困難な極限の試行等も効率的に行える利点がある。

現在、VR システムには 1F の 1 号機～3 号機の原子炉 1 階および地下室の 3 次元 CAD データを整備しており、立体表示することができる。

また、3 次元 CAD データや点群データ等の 3 次元アプリケーションソフトのデータを VR システムに取り込み立体表示することや、異なる 3 次元アプリケーションソフトのデータを合成表示することも可能である。（図 2.3-1 参照）



図 2.3-1 VR システム

### 3 平成 28 年度の活動

平成 28 年 4 月 1 日より檜葉センターの本格運用を開始し、平成 28 年度には檜葉センターの利用促進活動として以下を推進した。なお、檜葉センターの施設利用は、定期公募（1 回/半年）と随時受付での常時施設利用を受け入れられるようにした。また、檜葉センターの利用価値を高めるための研究、遠隔技術の開発研究を行うとともに、災害時における緊急時資機材の整備も行ってきた。

遠隔技術開発による付加価値の創出としては、遠隔技術による廃止措置作業を支援するための技術開発として、オペレータのロボット操縦技術の向上・習熟や、ロボットの設計・開発を目的に、ロボットシミュレータの機能としてマルチコプタ模擬機能とガンマカメラ模擬機能を実装した。また、ロボット試験フィールドの整備では、スロープや階段といった移動ロボット用の設備だけでなく、1F 格納容器内へのアクセスを想定した配管類を模擬した試験体の製作も行った。

一方、VR システムでは、1F の環境データ整備として 1 号機および 3 号機の地下階および 1 階部分を整備した。

遠隔・非接触での材料評価技術開発では、炉内構造物の劣化状態、強度などの健全性評価において、小型レーザーを利用した非接触診断技術により、コンクリート中の超音波の速度変化が適応できることを示した。

炉内構造物、燃料デブリ取り出し技術開発では、炉内構造物や燃料デブリ等を切断するために、レーザーとウォータージェットを組み合わせた切断技術が炉内構造物や燃料デブリ等の除去への適用可能性があることを示した。

緊急時対応遠隔機材の整備と訓練では、1F 事故の教訓と原子力災害対策特別措置法（以下「原災法」という）および同法「計画等命令」第 2 条第 2 項の改正を見据え、原子力機構施設の原子力災害対策に係る遠隔機材の整備等に関する業務を開始し、遠隔機材の改良対応として、マルチコプタの屋内運用を見据え操作性を向上させるための機能（高度維持機能：搭載センサにより床面からの高度計測を行い自動で高度制御する方式）をマルチコプタ（試作機）に追加し適用検討を行った。

さらに、利用促進活動としては、試験棟の要素試験エリアの施設利用を図るために、見学・視察、交流会、学会、シンポジウム、展示会等を通じての「知ってもらおう活動」、施設利用者（特に大学等）との連携、個別対応等による利用促進活動における「使ってもらおう活動」、あるいは施設利用者からのアンケートおよび意見交換を通じた要望を踏まえ、施設の改良、免税を反映した利用料金の改訂など「満足してもらおう活動」を行った。

### 3. 平成28年度 利用促進活動

項目	平成28年度												
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
利用に係るスケジュール	本格運用開始												
	平成28年度下期利用公募						随時受付						
基本方針（委員会等での利用促進方策の検討）	手数料改定（4月1日遡り）			利用料金改定（免税反映）			平成29年度利用公募			随時受付			
	モックアップ試験施設専門部会				各検討会の開催				モックアップ試験施設専門部会				
1. 実規模試験エリアの利用促進活動	新規国プロ(H30～)提案支援 IRIDとの意見交換			IRID、東電、NDF、メーカーとの意見交換			新規国プロ(H30～)提案項目の立案						
2. 要素試験エリア等の利用促進活動	学会・イベント等での周知												
	光国際会議 2016 <sup>*4</sup> 、ロボ・メカ講演会 <sup>*5</sup> 、D&RS2016 <sup>*6</sup> 、日本ロボット学会、日本原子力学会、SICE SI 2016 <sup>*7</sup> 、レーザー学会、日本原子力学会												
	視察・見学者の受入、ロボットテストフィールドシンポジウム (6/12)、Groupe INTRA workshop												
情報発信等	改善・高度化の検討												
	施設公開(7/30)						TUF歩こう会(10/29)			FRC <sup>*8</sup> (遠隔技術:11/24,25)			施設利用相談会

\*1 ロボットシミュレータ検討会、\*2 原子力災害対応ロボットの標準試験法検討会、\*3 施設利用促進検討会/国際協力検討会  
 \*4 光国際会議2016: OPTICS & PHOTONICS International Congress 2016、\*5 ロボ・メカ講演会: ロボティクス・メカトロニクス講演会 \*6 D&RS: Decommissioning and Remote Systems 2016  
 \*7 SICE SI 2016: 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、\*8 Fukushima Research Conference on Remote Technologies for Decommissioning



(出典: 第12回モックアップ試験施設専門部会、平成29年7月21日)

図3-1 平成28年度の檜葉センターの利用促進活動

### 3.1 遠隔技術開発による付加価値の創出

#### 3.1.1 ロボットシミュレータ

1Fの事故以降、1Fでは廃止措置に向けた調査や作業（以下、「タスク」という）が行われている。それらのタスクは、複雑且つ放射線量が高い過酷な環境で遂行することが求められるため、遠隔操縦ロボット（以下、「ロボット」という）が人間（作業員）に代わりタスクを行う有効な手段として活用されている<sup>[1]</sup>。

一方で、タスク実行の際は、オペレータ（遠隔操縦ロボットの操縦者）は、ロボットから伝送されるカメラ映像や、その他のセンサから取得した情報に基づいて状況を認識し、ロボットを操縦することが求められる。このため、安全かつ着実に廃止措置に向けたタスクを遂行するためには、事前に十分なロボットの操縦訓練が必要である。また、タスクに対応可能なロボットの設計・開発の迅速化も重要である。

そこで楢葉センターでは、遠隔技術による廃止措置作業を支援するための技術開発として、オペレータのロボット操縦技術の向上・習熟やロボットの設計・開発を目的とした「ロボットシミュレータ」の開発を行っている<sup>[2], [3], [4]</sup>。

本開発では、Choreonoid<sup>[5]</sup>をプラットフォームとしたシミュレータの整備・開発を行い、平成27年度は、1F原子炉建屋内でのタスクについて検討・調査を行った。水中用ロボットを活用したタスクを想定した水中での物理シミュレーション機能やロボットの遠隔操縦に伴う通信品質の低下を模擬できる通信制御装置等の開発を行い、1Fの現場でのニーズが高い走行型、遊泳型のロボットを対象としたロボットシミュレータの基礎システムを開発してきた。

一方、近年小型のマルチコプタの技術の活用・応用に注目が集まっており、1Fにおいても実際に現場調査に利用されている例がある<sup>[6]</sup>。マルチコプタの運用においても、オペレータの操縦技術の向上・習熟がタスク遂行に必要であると考え、マルチコプタを含む飛翔体の運動・振る舞いを模擬する機能を開発することとした。また、放射線環境下という作業条件に着目し、線量情報を可視化するためのガンマカメラ模擬機能の開発も実施することとした。

以下に、平成28年度に実施したロボットシミュレータのためのマルチコプタ模擬機能およびガンマカメラ模擬機能について詳細に述べる。

##### 3.1.1.1 マルチコプタ模擬機能開発

本機能は、廃止措置作業において屋外の放射線モニタリングや1F原子炉建屋内等の調査に活用が見込まれるマルチコプタを模擬するためのものである。本機能を使用することで、ロボットシミュレータのユーザが自身でマルチコプタモデルを設計・製作し、シミュレータ上の作業空間を飛行させることが可能となる。まず、機能設計にあたり、マルチコプタの飛行動作シミュレーションに関する要件を以下の2つに整理した。

飛行動作時にマルチコプタが流体（空気等）から受ける力を計算し、外力としてマルチコプタモデルに作用させることができること。

マルチコプタの動力源となるロータデバイスをマルチコプタモデルに設定でき、マルチコプタを制御する内部プログラムから、ロータデバイスに出力させる推力およびモーメントを設定できること。

前者の流体から受ける抵抗力を計算するために、前提条件として、シミュレータ上の作業空間内は一様な流体で満たされているものとし、このときの作業空間を満たす流体の設定は、密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ と粘性 $[\text{Pa}\cdot\text{s}]$ で与えるものとした。また、マルチコプタに作用させるべき外力の要素を抽出し、以下の表面法線力、表面接線力、浮力、流体付加質量、付加慣性モーメントを外力として与えるものと仮定した。

以上を考慮して、マルチコプタに流体による外力を与える機能を設計し実装した。

次に、マルチコプタの基本動作（上昇／下降、左旋回／右旋回、ホバリング）を基に、シミュレータに新たに組み込むマルチコプタモデルの設計・製作に必要なロータデバイスの要件を整理し、次の通りとした。

マルチコプタモデルにロータデバイスを複数個設定し、ロータデバイスの推力によってマルチコプタモデルを飛行させることができること。

各ロータデバイスに生じるモーメントが模擬できること。

2 点目については、シミュレーション上で実際にプロペラを回転させることなくマルチコプタの飛行動作を模擬できるように、マルチコプタを制御する内部プログラムからモーメントを直接入力できるものとした。

また、上記の基本的なマルチコプタの飛行動作を模擬する機能に加え、次の 2 つの現象を考慮し、実装を試みた。

## 地面効果

### 壁・天井へマルチコプタが吸い寄せられる現象

両者ともマルチコプタの挙動としてみられる代表的なものである。前者の地面効果とは、地面付近を飛行体が飛行するとき、飛行体が地面との間の気流の影響によって力・モーメントを受ける現象である。また、後者は廃止措置作業環境を想定してマルチコプタが閉空間内を飛行することを想定したものである。これらは非常に複雑であるが、本シミュレータの必要要件である、リアルタイムレスポンスを確保するには、簡易にこれらを計算し模擬する必要がある。そこで、ロータデバイスの推力を壁・天井・地面付近で増加させる効果を持たせることでこれらを実現することとした。これにより、例えば天井付近では上昇する推力が増加し天井に接近し、地面付近では推力の増加により離着陸時の制御が難しくなる。

図 3.1.1-1 は、動作確認用のマルチコプタの簡易モデルを制作し、飛行させた様子である。当該モデルでは、黄色のボディに動力源となるロータデバイスを取り付けたアームを 4 本取り付けており、各アームから下方に伸びる矢印がロータデバイスから出力する推力の方向を示している。

マルチコプタ本体の飛行原理と、飛行時にマルチコプタが受ける流体の影響による抵抗力をシミュレーションに反映させ、ロボットシミュレータ上でマルチコプタ飛行動作の実時間シミュレーション機能を実装した。

### 3.1.1.2 ガンマカメラ模擬機能開発

本機能は、ロボットシミュレータ上において放射線量の分布や放射線源を可視化するために使用されるガンマカメラを模擬する機能である。1Fでの廃止措置作業では、人の被ばくリスクを低減することが求められ、そのためには作業現場の線量分布を事前に遠隔機器で調査する必要がある。また、線量率が極めて高い領域の特定も重要である。ガンマカメラは線量率分布を把握するための有効な手段であり、遠隔機器による線量調査訓練等をロボットシミュレータで実施するために本機能を設計・開発することとした。

一方、放射線の影響を評価するためには、通常、モンテカルロ法等の解析的な数値計算手法で計算されるが、演算には多くの時間を要する。このため、実時間でのシミュレーションを基本として開発しているシミュレータには直接組み込むことはできない。

そこで、プリポスト処理を用いて事前に放射線の影響を評価する演算を行い、その結果のみを放射線環境定義ファイルとしてシミュレーションに取り込むことによって、シミュレータのリアルタイムレスポンスを確保することとした。ここでの放射線環境定義ファイルの作成には、放射線挙動計算コードであるPHITS<sup>7)</sup>を用い、シミュレータ上の作業空間に設置されている物体の影響による放射線の透過・散乱も考慮するものとした。

以上より、事前作成した放射線環境定義ファイルの内容に従って、シミュレータの作業空間内に仮想的に分布した線量率に基づき、カメラ映像に放射線量の大きさを色で表したコンタ画像を透過して重ね合わせた映像を出力することが可能となった。図3.1.1-2(下)の画像は、図3.1.1-2(上)の状況下で、ガンマカメラの映像を出力した例である。図3.1.1-2(下)のガンマカメラ映像では、赤色の箇所が最も線量が大きく、次いで黄色、緑色、青色の順に線量が大きい箇所を表している。

以上のように、ガンマカメラを模擬するための放射線環境定義ファイルの作成・読込、線量評価、ガンマカメラ映像出力の機能を実装した。

### 3.1.1.3 まとめ

本節では、オペレータのロボット操縦技術の向上・習熟や、ロボットの設計・開発を目的に、ロボットシミュレータの機能として平成28年度に開発したマルチコプタ模擬機能とガンマカメラ模擬機能について述べた。今後は、開発した模擬機能を組み合わせ、1F原子炉建屋内部での作業を模擬するコンテンツを製作し、ロボットを操縦するオペレータの技能評価を実施する予定である。

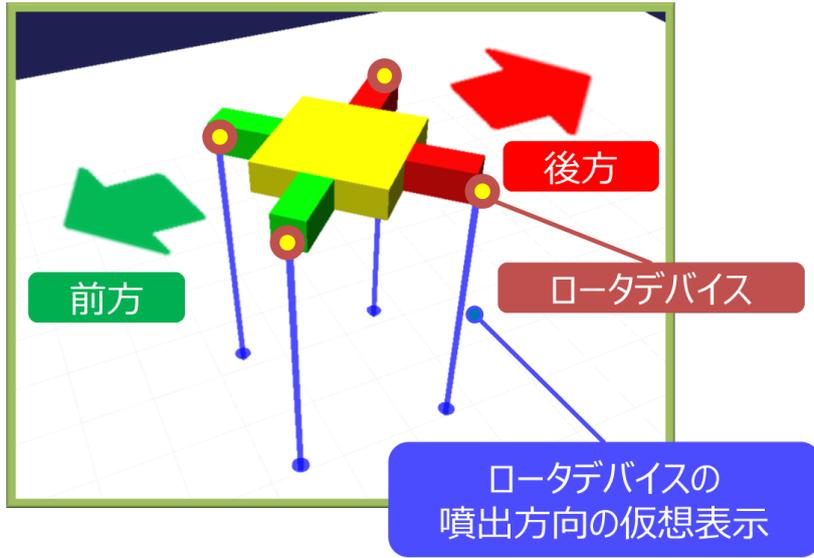


図 3.1.1-1 マルチコプタの飛行シミュレーションの例

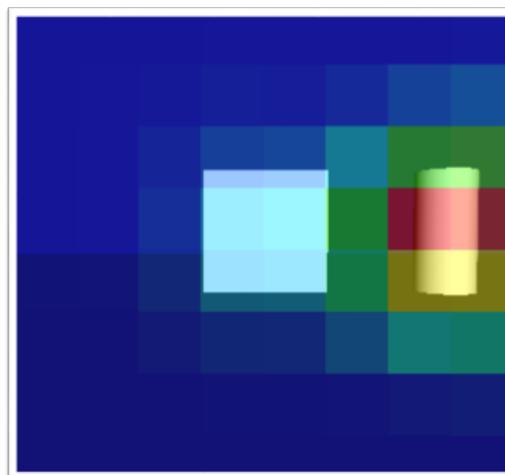
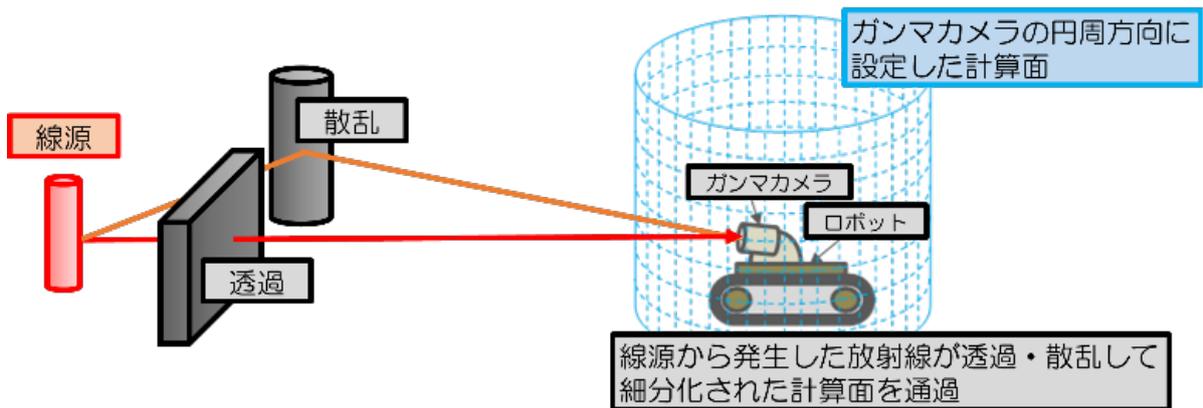


図 3.1.1-2 ガンマカメラシミュレーションの例

### 3.1.2 ロボット試験フィールドの整備

楡葉センターでは、1Fの廃止措置に係る遠隔技術開発を支援するための研究開発を行っており、その1つとしてロボットのための標準試験法開発がある。ロボット等の試験を目的とした技術開発としては、米国国立標準技術研究所で災害対応ロボットの定量的な評価方法の確立を目的としているものがある。この考え方を原子力災害に適用させるよう技術開発することにより、作業現場に投入する前にロボットの性能評価が可能となり、効率的かつ効果的な廃止措置作業の推進に貢献することができる。平成27年度までに、原子力災害対応ロボット用の標準試験法の項目選定のために1Fで行われたロボットによる作業動画の分析を行い、ロボット動作について分類を行った。平成28年度は、この分析結果をもとに、試験体の試作を行った。以下にその詳細について述べる。

#### 3.1.2.1 開発状況

平成27年度には、試験項目の立案および試験体設計に資するため、東京電力ホールディングス株式会社がホームページ上で公開している1Fに投入されたロボットの動画を精査し、実際に行われている動作の抽出作業を行った<sup>8)</sup>。その結果、不整地や階段等の作業に係る時間の割合が大きいことが分かった。また、ロボットに接続されたケーブルが環境中の構造物と干渉する等のトラブルも見られた。続いて、これらの分析結果から作業時間が多い項目として抽出された不整地走行の評価に重点をおいて、現場の作業環境にあるような試験体を製作した(図3.1.2-1)。このような実際の作業環境を簡易的に模擬した試験体での走行試験により、性能の簡易的な確認やオペレータの習熟度向上が可能である。今回、原子炉建屋内では階段の走行が必要不可欠であることから、階段を模擬した試験体を開発した(図3.1.2-1左)。この試験体の特徴として、縞鋼板やグレーチング等、階段踏み板の材質を変更できる。また、複数の組み合わせで試験が可能である。さらに、ケーブルをロボットに装着した際の取り回しの試験も行える試験体(図3.1.2-1右)も開発しており、現場で発生したケーブルに関するトラブルと同等の事象を再現でき、現場に近い環境での試験が可能となっている。このほかにも前述の米国国立標準技術研究所で開発された傾斜面やギャップを整備し、自作した試験体と組み合わせている。これらの試験体は小型の専用台車上に設置することで、試験体の組み合わせを容易に設定・変更できる(図3.1.2-2)。現在、楡葉センターが所有する遠隔操作ロボットを用いて開発した試験体上で、走行試験やケーブル引き回し試験等を行っており(図3.1.2-3)、これらの実験により得られた結果をフィードバックして試験体の改良に繋げていく予定である。

また、最近実施されている格納容器内部調査や作業を想定して、ロボットの搬入口として検討されたペネトレーションと呼ばれる配管を模擬した試験体を製作した。製作では、実際の作業でも用いられているX-6ペネトレーション、X-53ペネトレーション、X-100Bペネトレーションや、実際にロボットの挿入時に利用されたガイドパイプ等の寸法を参考とした(図3.1.2-4上)。また、多様な配管経路を構成するため、45度、90度、180度に進行方向を変更させるためのエルボ配管を製作した(図3.1.2-4下)。加えて、製作したステイにより配管の設置高さ・長さを調整することが可能である。上述した走行環境用の試験体と組み合わせることにより、様々な状況を模擬した試験環境が提供でき、オペレータの習熟度向上やロボットの性能把握に活用可能である。今後

は、環境条件の調整方法も含めて改良を行う予定である。

### 3.1.2.2 まとめ

本節では、平成 28 年度に檜葉センターで設計・開発を行ったロボット試験フィールドについて述べた。スロープや階段といった移動ロボット用の設備だけでなく、1F 格納容器内へのアクセスを想定した配管類を模擬した試験体の製作も行った。今後、ハード面の整備だけでなく、詳細な評価手法の開発に向けて、上述した試験体の改良を行いロボット用の標準試験法の具体的な立案を進めていく。

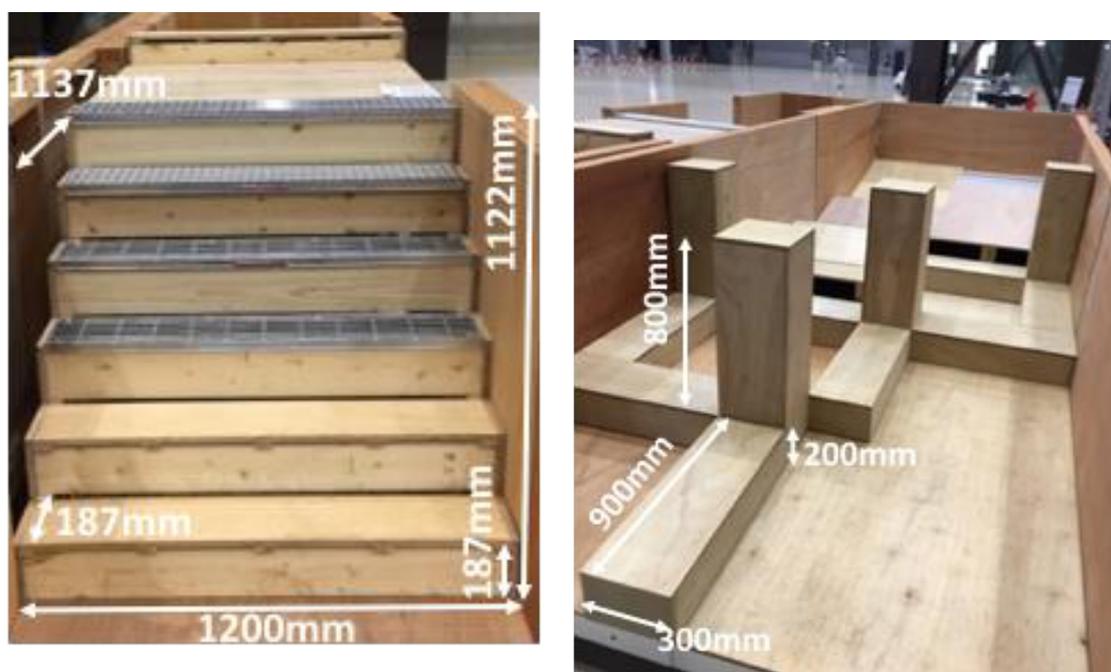


図 3.1.2-1 設計・開発した移動ロボット用試験体



図 3.1.2-2 試験体の組合せ例

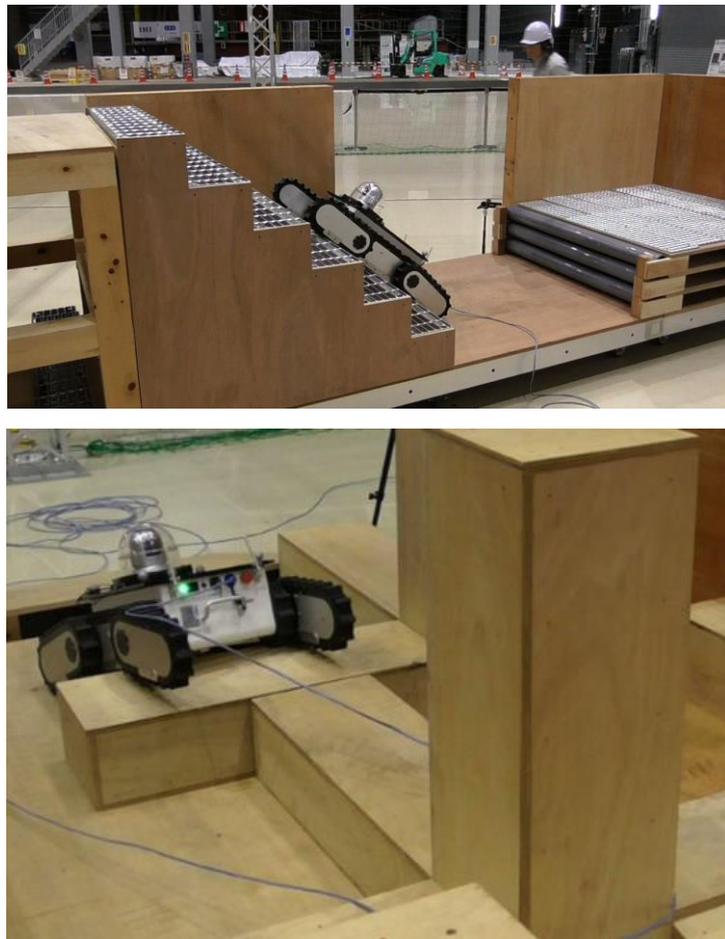


図 3.1.2-3 開発した試験体を用いた走行実験の例



図 3.1.2-4 配管走行ロボット用試験体

### 3.1.3 VRシステムの整備

VRシステムは、廃止措置作業に係る効率的な作業計画の検討や廃止措置に関わる研究開発の支援に活用するため、作業員訓練システム（没入型のVRシステム）として平成27年度に開発・整備したものである。本システムで、1Fの廃止措置作業に係る作業員に対し、仮想空間を用いて国内最大級の大型スクリーン内に事故後の1F原子炉建屋内の構造、放射線環境を再現することができる。このあたかも1F原子炉建屋内に居るような環境を提供することにより、施設の構造に対する理解度の向上や格納容器下部の補修に係る作業などに対する教育や訓練が可能である。

VRシステムの主な構成を図3.1.3-1、機能を図3.1.3-2示す。VRシステムの機能を最大限に活かすためには、1Fの1号機から3号機の環境データを整備することが必要である。環境データの整備としては、平成27年度には2号機の原子炉建屋1階および地下階トラス室の整備を行い、平成28年度には1号機と3号機の原子炉建屋1階および地下階トラス室の整備を実施した。

なお、環境データは、事故後にロボットを投入してレーザースキャンで取得した点群データおよびその際取得できなかった部分については事故前のCADデータで補完して3次元VRコンテンツ化したデータである。平成28年度までに整備した環境データの詳細を表3.1.3-3に示す。



主な構成機器	4. データ管理用サーバ
1. CAVE型4面スクリーン	5. システム管理用計算機
2. トラッキングシステム	6. データ編集用計算機
3. 映像生成用クラスター	7. 遠隔操作機器関連用操作卓

図 3.1.3-1 VRシステムの構成

＜基本機能＞

- 模擬空間閲覧機能  
    (ウォークスルー機能)
- 空間線量/被ばく線量計算・表示機能
- 照明設定機能
- 物体間の寸法測定機能
- 物体の属性データ表示機能
- 任意物体投入/干渉箇所表示機能     など

図 3.1.3-2 VR システムの基本機能

表 3.1.3-3 VR システムの環境データ整備状況

		地下階	1階	2-5階	格納容器内
1号機	点群	✓	✓		
	CAD	✓*c1-b	✓*c1-1		
2号機	点群	✓	✓		
	CAD	✓*c2-b	✓*c2-1		
3号機	点群	✓	✓		
	CAD	✓*c3-b	✓*c3-1		

\*c1-b:事故後データがない箇所は事故前でのデータで補間  
S/C下半分は事故前の情報

\*c1-1:事故後データがない箇所は事故前でのデータで補間

\*c2-b:事故後データがない箇所は事故前でのデータで補間  
S/C下半分は事故前の情報

\*c2-1:事故後データがない箇所は事故前でのデータで補間

\*c3-b:事故前のデータは未整備。

\*c3-1:事故前のデータは未整備。

一方、原子炉格納容器漏えい箇所補修・止水技術の確立において、ベント管止水のために使用する遠隔操作機器（以下、「FRM」という）は、容易に近づくことができない高放射線量率環境の作業で使用される。このため、現場作業に先立って、FRMをVRシステムに取り込み、現場の状況に対応してFRMの機能検証や操作訓練が重要である。このため、FRMをVRシステムに取り組み、機能検証や操作訓練ができるようFRMのシミュレーション試験用にVRデータの整備を行っている。

平成27年度には、入手した実機の図面等からの設計情報に基づき、基礎的な訓練ができるようにFRMをVR用データとして整備した。平成28年度は、これに引き続き、FRMの詳細設計情報と操作訓練者からの情報を基に精度アップを図るとともに実際に用いる操作卓を設置する（図3.1.3-4）など機能拡充を図った。これにより、原子炉格納容器下部の補修作業について、遠隔操作機器の動作をVR空間上で実スケールにて高精度かつ立体的に確認することができ、迅速かつ効果的な作業手順の確認や操作者の操作訓練が可能となった。



図 3.1.3-4 FRM の操作卓の変更

## 3.2 遠隔・非接触での材料評価技術開発

### 3.2.1 開発の背景と経緯

1Fの廃止措置に向けた作業において、炉内構造物の劣化状態、強度などの健全性評価が重要である。構造物の強度に影響を与えるものとしては、熱、放射線、水分、外力や内部応力により生成するき裂などがある。これらを検査する方法として、一般的には下記の①～③が行われている。

表面のき裂は、目視や遠隔画像機器等で判断する。

内部のき裂は、打音法、超音波探傷などで判断し、いずれも音波の伝わりを計測する。

実際にコア抜きして物理的強度を測定する。

しかしながら、高線量の1F原子炉内では、作業員の被ばくを考慮すると、人が近づいての作業は困難なため、遠隔で行う診断法が望まれている。これらを遠隔により実施するため、檜葉センターでは遠隔技術とのマッチングの良い小型レーザーを用いて研究開発を行っている。ここでは、前記①～③のうち、②に着目した研究内容、得られた成果、それらを踏まえた今後の展開について紹介する。

### 3.2.2 研究内容と成果

1Fの事故時解析では、原子炉建屋内の原子炉格納容器内部温度が最も高くなった1号機において、約800℃以上に上昇したことが日本原子力学会等で報告されている<sup>[9]</sup>。コンクリートは、高温にさらされるとその性質が大きく変化する。すなわち、100℃程度までは大きな変化はないが、それ以上の温度に上昇すると、セメント硬化体が水和生成物の脱水により収縮し、骨材が膨張する。また、加熱されたコンクリートは、その後、水分を吸収することによっても性質が変化することが知られている。檜葉センターで進めているレーザー遠隔診断技術により、廃止措置の工法策定等に対し重要な情報提供が期待できる。

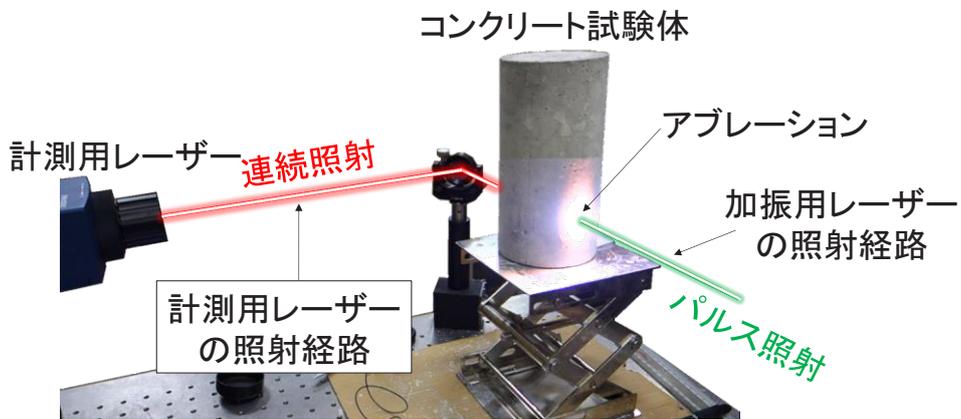
図3.2.2-1に檜葉センターで行ったレーザーによるコンクリート診断の予備試験の様子を示す。強いレーザーを対象物に照射すると、対象物表面ではプラズマが発生するとともに、高温になった対象物表面の物質が放出される現象（アブレーション）が起こり、その反作用で高い圧力が発生し対象物内部に向けて超音波が励起される。この超音波は対象物内部を伝播するため、検出器等で計測し評価することで、内部欠陥の有無、その大きさ等の評価や、超音波の伝播速度を変化させる物質の特性変化の検知が可能となる。検出器では、波長の異なるレーザーを用いて超音波の検出を行っている。基本原理はドップラー効果で、計測用レーザーを照射した部分の変位と速度を検出する。

予備試験では、加熱されたコンクリートのレーザー診断の可否を判断することを目的として、試験体直径100mm、長さ200mmの試験体を部分的に熱劣化させるために、ホットプレートを用いて底面へ10分間の加熱処理を行った。熱電対および赤外線サーモグラフィで測定した加熱の様子を図3.2.2-2に示す。この加熱処理では、加熱面近傍の温度が200℃以上に上昇したことが確認できた。10分間の加熱後は、室温まで大気中で自然冷却した後、到達温度の異なる箇所において診断試験を行った。加熱面からの距離と超音波（縦波）の伝播時間の関係は、高温に加熱された場所ほど、超音波の伝播時間が長くなっていることが確認できた。この伝播時間の差異は、温度変化に伴う弾性係数、質量密度等の変化を反映したものと予想され、機械強度との関連付け

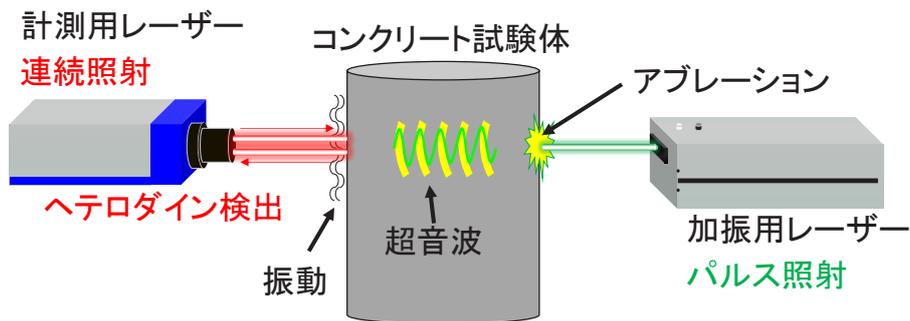
が期待でき、レーザー診断によりコンクリートの劣化の判断が可能であることを見出した。

### 3.2.3 まとめと今後の展開

予備実験により、レーザーを利用した診断技術により、熱処理したコンクリート中の超音波の速度が加熱温度の履歴により変化することを示した。平成 29 年度は、1F で使用されているコンクリートと同等に調合した試験体を用いて、超音波の伝播時間とコンクリートの温度履歴の関係を実験により定量化する。同時にこの速度変化の物理的要因を検討する。それらを踏まえ、1F 廃止措置へ向けたコンクリート健全性評価に資する汎用データベースの作成を目指す。その上で、ロボット等の遠隔技術と組み合わせたレーザー装置の検討を行い、1F の現場で使用可能な診断システムの開発を目指す。



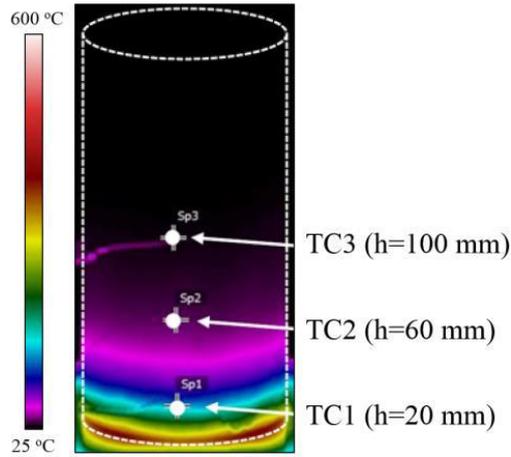
(a) 外観写真



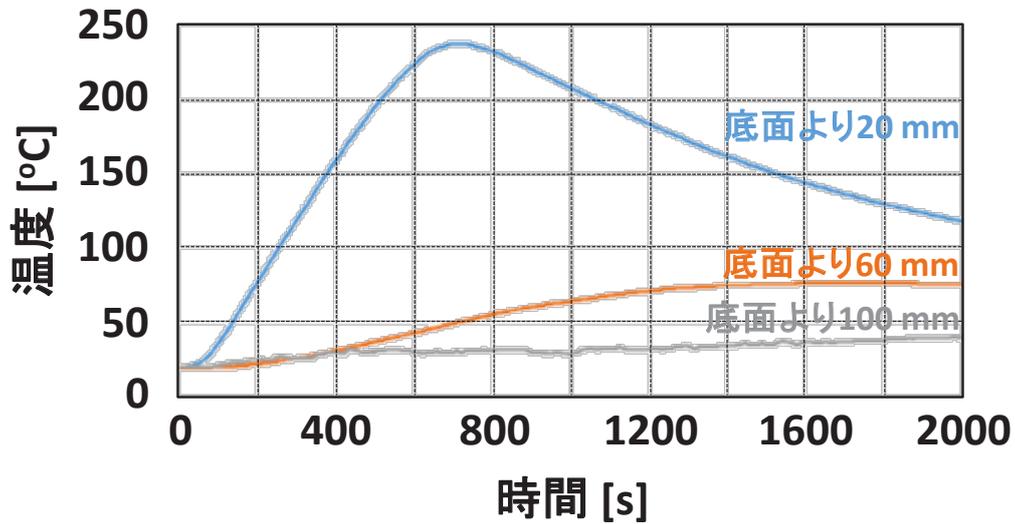
(b) 模式図

図 3.2.2-1 レーザーを用いたコンクリート診断

レーザーによるコンクリート診断の様子。遠隔操作により加振用レーザーを対象物に照射することで超音波を発生させ、計測用レーザーにより超音波信号を測定する。



(a) 赤外線サーモグラフィで測定した温度分布



(b) 熱電対で測定した熱履歴

図 3.2.2-2 コンクリート試験体の熱処理温度の履歴

熱処理時の温度履歴。赤外線サーモグラフィで測定した温度分布は、熱処理時の最高温度を示しており、加熱面近傍が 200 °C 以上の温度に加熱されたことが確認できる。

### 3.3 炉内構造物、燃料デブリ取り出し技術開発

#### 3.3.1 開発の背景と経緯

1F の安全で確実な廃止措置の実施は、国民の高い関心となっている。1F の廃止措置作業では遠隔操作技術により、炉内構造物や燃料デブリ等を切断し、取り出すことができる大きさに加工する必要がある。また、公衆被ばくの低減や汚染拡大防止等の観点から、放射性ダストの飛散防止が求められる。

レーザー技術は、加工に伴う反力が少ないことや、加工ヘッドがコンパクトであり遠隔操作機器とのマッチングが良い等の優れた特長を有していることから、廃止措置作業における切断技術の一つとして期待される。ただし、従来のレーザー切断技術では、レーザー照射によって対象物を溶融し、大量のガスによりその溶融物を除去するため、ダストが大気中に飛散することが大きな課題となっていた。そこで、ダストの飛散抑制に有効なウォータージェットとレーザーを組み合わせた切断技術の開発を進めてきた。本研究は、原子力機構、日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社および株式会社スギノマシンの 3 機関による共同研究である。

#### 3.3.2 研究内容と成果

溶融等で変形した炉内構造物、燃料デブリ等の取出しにおいては、その厚さが不定で、加工に伴う粉塵の回収が必要であることから、表面から連続的に削り取って回収していく除去方法（以下、「はつり除去加工」という）が有力と考えられる。ここでは、レーザーとウォータージェットを組み合わせた方式を採用し、レーザーで対象物を溶かし、ウォータージェットで除去するはつり除去加工を実施した。図 3.3.2-1 に加工時の様子を示す。まず、レーザー加工ヘッドとウォータージェットノズルを同時に動かし、1 ラインの走査を行うことでレーザー照射部の金属を除去し、細い溝を形成する。次に、加工後の溝が少し重なるようにレーザー加工ヘッドとウォータージェットノズルを図に示すように移動させ、2 ライン目を走査する。

図 3.3.2-2 にはつり除去加工後の表面状態を示す。加工後は、表面の金属が除去できており、この加工をさらに何度も繰り返すことによって対象物を所定の広さと深さで、表面から順に削り取ることが可能であることを示した。また、加工の際に削り取られた除去物は、適切な回収装置により加工に伴う粉塵と併せて回収する予定で、この回収技術の確立は今後の課題である。

#### 3.3.3 まとめと今後の展開

本節で述べたレーザーとウォータージェットを組み合わせた切断技術は、炉内構造物や燃料デブリ等の除去への適用可能性があることを示した。さらに、本技術は対象物に応じてレーザー出力や、ウォータージェット圧力を制御できるため、様々な状況に対し柔軟に対応することが期待できる。例えば、燃料デブリに含まれる硬くてもろい金属酸化物（セラミックスの一種）に対しては、レーザーをその表面に集光することで砕くことが可能であることが、既往の研究において実証されている。この技術も大量のアシストガスを必要としないことからその有用性が示されている。種々の物質の入り交じり合った複雑な形状が予想される燃料デブリを模擬した試験体への適用はこれからの課題であるが、本技術の柔軟性が大いに発揮されるものと期待される。今後は、これらの各課題に対する技術の確立に向け、引き続き研究開発を進める。

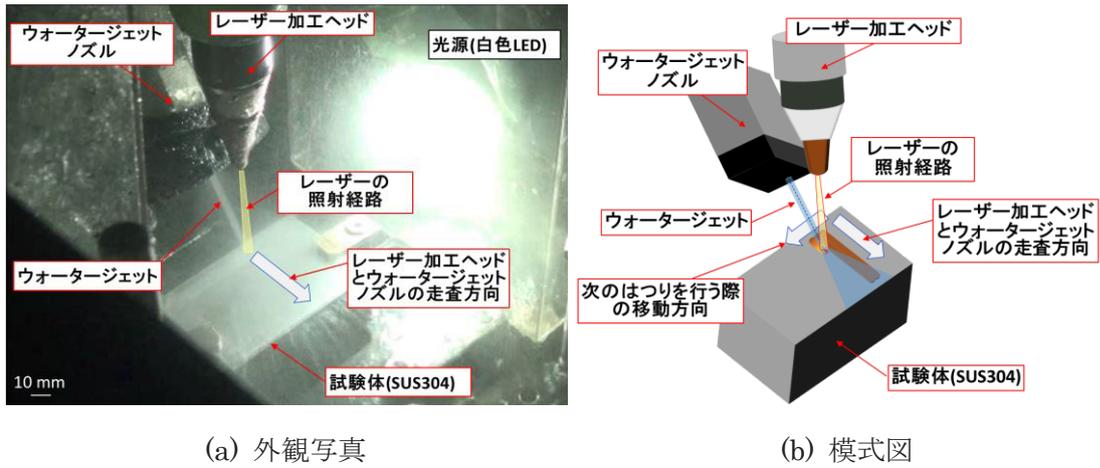


図 3.3.2-1 レーザーとウォータージェットによるはつり試験

レーザーとウォータージェットによるはつり試験の様子。試験体であるステンレス鋼（SUS304）表面に連続波のレーザーを照射し、その位置にウォータージェットをパルス状（断続的）に噴射させ、表面のはつりを行った。

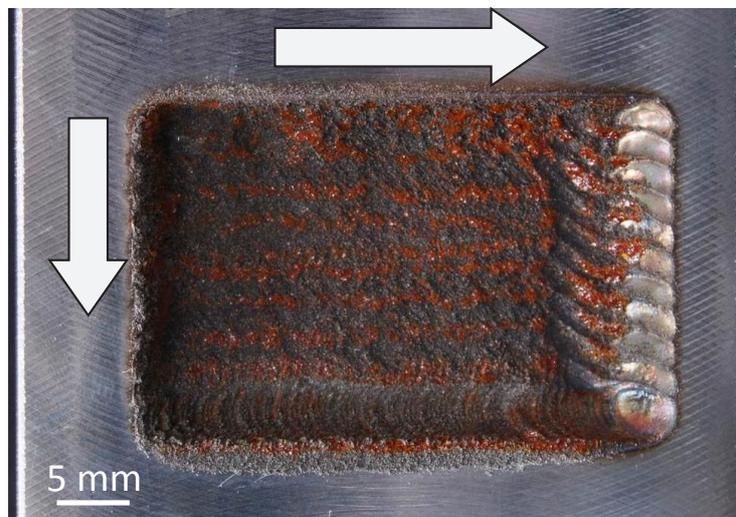


図 3.3.2-2 はつり除去加工後の試験体表面

はつり除去加工後の試験体表面の状態。はつりの深さ（紙面垂直方向）は 3.8 mm。右向き矢印は加工する際の走査方向、下向き矢印は、左から右へはつりを行った後、次のはつりを行う際の移動方向。

### 3.4 緊急時対応遠隔機材の整備と訓練

プロジェクト管理課では、1F 事故の教訓と原災法および同法「計画等命令」第 2 条第 2 項の改正を見据え、平成 24 年 10 月から原子力機構施設の原子力災害対策に係る遠隔機材の整備等に関する業務を実施している。平成 28 年度は、前年度まで東海駐在（核燃料サイクル工学研究所）で本業務を行っていた要員が、檜葉センターにおいて業務を開始した。

#### 3.4.1 遠隔機材の整備

先行事例である美浜原子力緊急事態支援センターの遠隔機材および、1F 事故の事例教訓を踏まえ、遠隔機材等の整備および改良を行っている。表 3.4.1-1 に現有する主な整備機材を示す。

平成 28 年度は、主に現有機材の維持管理を目的としたメンテナンス（点検・調整・修理）を実施するとともに、予備品・消耗品の補充を実施した。また、遠隔機材の改良として、マルチコプタの屋内運用を見据え、操作性を向上させるための機能（高度維持機能：搭載センサにより床面からの高度計測を行い自動で高度制御する方式）をマルチコプタの試作機に追加し、適用性を調べた。図 3.4.1-1 に整備している偵察用ロボットを示す。

#### 3.4.2 要員の育成

将来、原子力機構が原災法計画等命令第 2 条第 2 項第 7 号の適用を受けると、現在 3.4.1 の業務に従事している者が「原子力緊急事態支援組織」の構成員となり、下記業務を実施することが想定される。そこで、人事異動等により「原子力機構施設の原子力災害対策に係る遠隔機材の整備等に関する業務」の従事経験者が減少していることから、新規配属者に対して OJT による要員の育成として、遠隔機材の操作訓練を実施し、技能向上を図るとともに、遠隔機材等の維持管理、整備作業を通じて機材の知見を継承した。

【原子力緊急事態支援組織】（\*先行事例を踏まえた原子力事業者防災業務計画の改正案より）

防災業務計画等命令第 2 条第 2 項第 7 号に規定する、放射性物質による汚染により原子力事業所災害対策に従事する者が容易に立ち入ることができない場所において、当該対策を実施するために必要な遠隔操作が可能な装置その他の資材又は機材を管理し、原子力災害が発生した事業所への支援を行う原子力機構内組織をいう。

##### 1) 平常時の主な業務

資機材の集中管理、資機材の機能向上および拡充、資機材操作要員の養成訓練（支援組織要員、原子力機構内各事業所の要員）、原子力防災訓練への協力。

##### 2) 原子力災害発生時の原子力緊急事態支援組織の対応および発災事業者への支援内容

原子力機構対策本部長からの支援指示を受け、支援組織の要員を招集し、資機材の輸送準備を実施した後、発災事業所（特定事象が発生した事業所）へ要員を派遣する。

遠隔機材は発災事業所の後方支援拠点にて発災事業所の資機材操作要員へ引き渡す。

表 3.4.1-1 主な遠隔機材一覧

分類	名称	用途等	整備台数
遠隔操作資機材	偵察用ロボット	現場の撮影、放射線測定等	2台
	作業用ロボット	試料採取、障害物撤去等の軽作業	2台
	マルチコプタ (小型無人ヘリ)	高所からの偵察(屋外)	4台
運搬車両	ロボット運搬車両	遠隔機材の搬送	3台
現地活動用 資機材等	作業用資機材	作業用工具、予備パーツ類他	1式
	一般資機材	照明、小型発電機、サニタリー用品ほか	1式

※整備台数は、予備を含む。



(1) J-5 ロボット



(2) J-6+JT-23 ロボット

図 3.4.1-1 偵察用ロボット

### 3.5 利用促進活動

檜葉センターの施設利用を図るべく活動して「知ってもらおう活動」、「使ってもらおう活動」、「満足してもらおう活動」をキーワードとして活動を行ってきた。

それぞれの活動内容としては以下に示す通りである。

#### 3.5.1 知ってもらおう活動

##### i) 視察・見学を通じた檜葉センターの事業紹介、利用案内

視察・見学者に応じて、利用者向け、一般向け等と視察コース、パンフレット、説明者を使い分けて対応

##### ii) イノベーション・コースト構想との連携

ロボットテストフィールドシンポジウム（6/12（日） 南相馬市）で展示・デモ  
南相馬ロボット産業協議会での檜葉センターの紹介

ふくしまみらいビジネス交流会

2/27 （月） 南相馬：ポスター展示

3/6 （月） 檜葉センター：ポスター展示および運営支援

##### iii) 地域企業との連携

- ・ 11/19 （土） ロボットフェスタふくしま 2016 での展示・デモ・講演（紹介）
- ・ 12/7 （水） 福島県廃炉・除染ロボット技術研究会主催「展示実演会」への協力
- ・ 1/18 （水） 企業間勉強会 いわきものづくり塾 特別編『廃炉コース』講演  
(12/20（火） 施設見学)

##### iv) 施設公開等（地元の方々等を対象）

- ・ 7/30 （土） 檜葉町サマーフェスティバル 2016 と同時開催
- ・ 10/29 （土） 秋空散策あるこう会と同時開催
- ・ 11/6 （日） マジカル福島 2016 と同時開催

##### v) Fukushima Research Conference on Remote Technology for Decommissioning

- ・ 11/24（木）、25（金）に開催。延べ 83 名参加  
(英豪仏韓米アルゼンチンからの参加者 含む)

##### vi) 檜葉センター施設利用相談会の開催

- ・ 3/21 （火） 地元企業等を対象に、施設利用の具体例や、利用者による事例紹介、ロボットシミュレータや標準試験法の開発状況などを紹介

3.5.2 使ってもらおう活動

i) 大学等との連携

東京大学	サマースクール
福島工業高等専門学校	サマースクール、第1回廃炉創造ロボコン
福島大学	水中グライダー試験
福井大学	廃炉実習
他2件	

ii) 見込み利用者への個別対応

- ・視察で興味を示した企業へフォロー

iii) 見込み利用者との意見交換・打合せによる利用促進

- ・企業訪問による説明 5件
- ・電話によるコンタクト 2件
- ・メールなどによるコンタクト 3件
- ・利用に結びついた実績等 3件

3.5.3 満足してもらおう活動

平成28年度には、38件の施設利用を受け入れた。施設利用者に対して、アンケート調査を実施し、利用者の動向を調査した。その結果、施設について大多数が満足していること、リピーターが増えつつあることなどが示された。(利用者アンケートは付録6参照)

以下に施設を利用して満足していただいている意見を示す。

利用目的	満足の意見
研修	実験のサポート・スタッフの方の対応は非常に丁寧で、これ以上ないほどの素晴らしい環境だと思います。
試験	このたびは当室の「遠隔操縦式小型偵察システムの性能確認試験」に、施設供用を始めとする多大なご支援を頂きましたこと、感謝申し上げます。ありがとうございました。
試験	試験中においても、休日の試験、突発的な資機材貸し出し等にもご対応いただき、効率的かつ効果的な試験を実施することができました。
試験	本試験ではモーションキャプチャシステムによるマルチコプタの挙動データ取得が大きな比重を占めていました。その点も、機材の扱いについてはお互いに不慣れな面もあったため、苦戦した一幕もありましたが、結果的には計測ノウハウについての試行錯誤の機会を設けることができ、また第一週半ばには確実なデータ取得が可能となったことから、大変貴重な経験となりました。

試験	今回弊社が利用した「研究室 5」および附属棟内は、常に清潔感ある状態が保たれており、弊社および協力会社の各利用者からの評判は非常に良かった。
会議	展示会と重なりご多忙な中、利用促進課のご担当様には丁寧に対応頂き、出席者もスムーズに参集できました。引続き宜しくお願い致します。
試験	我々も初めて使用させて頂いたので、今後について色々と検討します。 具体的には、自走式ロボットの試験を含め活用させて頂きたいと思います。 又シュミレーションシステムなども使わせて頂きたいと思い検討中です。 我々の 2 次元画面と異なり臨場感があるので最終確認に使わせて頂ければと考えています。
イベント	職員の方には荷物の搬入、搬出など快く対応していただき、大変お世話になりました。ありがとうございました。
イベント	多くの研究機関などから有効活用されるようになると良いと感じました。

### 3.6 平成 28 年度の利用状況

檜葉センターは平成 28 年 4 月 1 日より外供用施設として外部への施設利用を本格的に開始した。

平成 28 年度は表 3.6-1 に示すように、38 件の利用があった。施設利用者の内訳および施設利用目的の内訳を図 3.6-1 および図 3.6-2 に示す。

表 3.6-1 平成 28 年度における施設利用の実績

No.	利用期間	利用目的	利用場所	利用内容(概要)
1	年間(365日)	試験	試験棟	実規模試験体を用いた実証試験
2	3日/週間程度	試験	研究管理棟・試験棟	遠隔操作ロボットの整備・開発等
3	4月1日～9月30日	試験管理	研究管理棟	試験計画・工程調整等
4	5月18日	会議	研究管理棟	会議開催
5	6月23, 24日	訓練	試験棟	遠隔機材の操作訓練
6	7月8日	試験	試験棟	水中ロボットの試験
7	7月15日～9月16日	準備作業	試験棟、屋外	試験準備作業
8	9月5～9日, 9月12～16日	研修	研究管理棟・試験棟	夏季休暇実習生受入れ
9	10月1日～3月31日	試験管理	研究管理棟	試験計画・工程調整等
10	10月16～29日	試験	試験棟	小型飛行体の試験
11	11月7日～12月13日	試験	試験棟	施工性確認試験
12	11月14日	会議	研究管理棟	会議開催
13	12月6日～7日	展示会	試験棟	企業マッチング会の開催(ロボットのデモ、展示等)
14	12月26日	会議	研究管理棟	高校生と東電との対談
15	1月11,12日	試験	試験棟	小型飛行体の試験
16	2月3日	試験	試験棟	水中ロボットの試験
17	2月15日	会議	研究管理棟	学会専門委員会
18	2月21～24日	研修	研究管理棟・試験棟	ロボット実習及びセミナー
19	2月27日～3月17日	試験	試験棟	小型飛行体の試験
20	3月6日	イベント	研究管理棟	イノベーション・コースト構想マッチングイベントのセミナー開催
21	8月30日～9月8日	デモ	試験棟	ロボットの顧客向けデモ
22	10月14日	会議	研究管理棟	会議開催
23	12月7日	会議	研究管理棟	会議開催
24	12月20日～27日	教育・訓練	試験棟	1Fに係る作業者の教育・訓練
25	11月6日	イベント	研究管理棟	マジカル福島2015 VR体験
26	1月20日～2月20日	試験	試験棟	施工性確認試験準備作業
27	2月20～24日	試験	試験棟	水中ロボットの試験
28	2月21日～3月31日	試験	試験棟	施工性確認試験
29	2月26日	試験	試験棟	小型飛行体の試験
30	3月27～29日	試験	試験棟	水中ロボットの試験
31	3月31日	試験	試験棟	ドローンの飛行試験
32	8月8～10日	研修	研究管理棟	サマースクールの開催
33	9月2日	研修	試験棟	サマースクールの開催(「廃炉創造ロボコン」関連)
34	11月22～24日	研修	試験棟	学生実験カリキュラム
35	12月2～3日	イベント	試験棟	「廃炉創造ロボコン」
36	1月21日	試験	試験棟	ロボットの走行試験
37	1月24日	試験	試験棟	水中グライダー用翼の運動試験
38	3月8～3月9日	研修	研究管理棟	学生研究 ロボットシミュレータの講習

### 施設利用者の産学官内訳

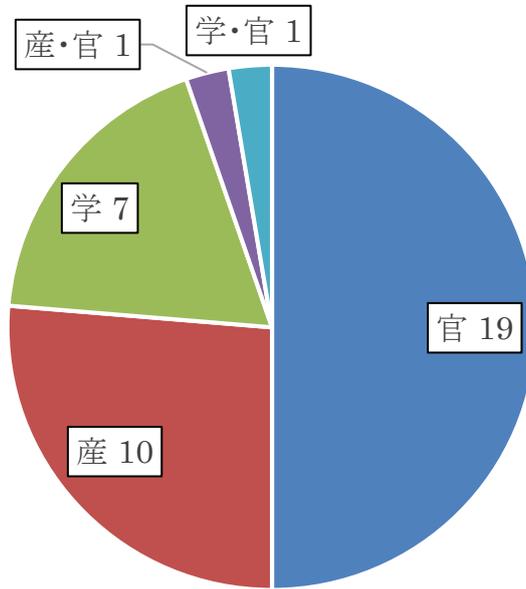


図 3.6-1 施設利用者の内訳

### 施設の利用目的

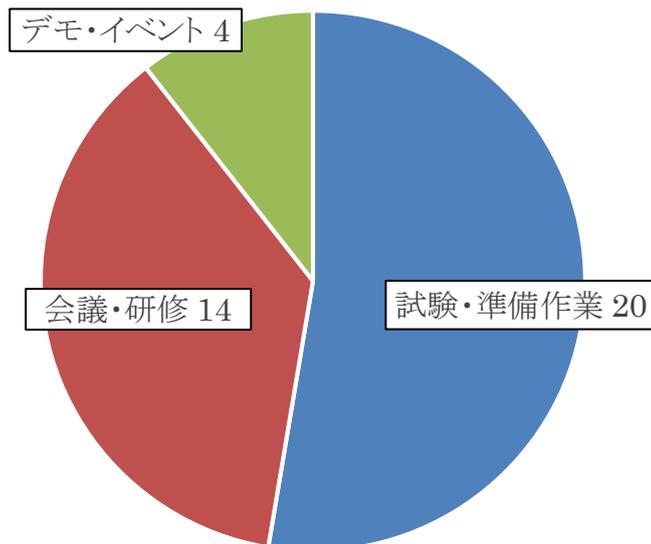


図 3.6-2 施設利用目的の内訳

#### 4 まとめ

楢葉センターは、1Fの廃止措置推進のために遠隔操作機器（ロボット等）の開発・実証試験を行う施設で、平成28年4月から本格運用を開始した。モックアップ試験施設部の施設運用課\*で「知ってもらおう活動」として視察対応など、利用促進課で「使ってもらおう活動」として施設利用を進め、また、利用技術開発部\*の遠隔基盤開発室\*およびホット試験技術開発室\*で遠隔技術に関する研究開発を進めた。

平成29年3月末までに行政関係、企業、教育現場等から4,212名の視察者が来所し、また、国内外のテレビ新聞などのメディアに約144件が紹介された。施設利用としては、企業関連、大学等から38件を受け入れた。

楢葉センターに整備している作業員訓練を行うための最新のVRシステム、遠隔操作機器の開発実証試験を行うための試験設備について、遠隔基盤整備室の災害対応ロボットに係る研究開発と利用促進課の外部利用の促進に係る業務の一体的な運営、連携を行うことにより、より広い分野からの施設利用の拡大を図っていく必要がある。また、個々の視察の他に各種イベントや施設公開等をとおして同センターを広く紹介するとともに、利用者のアンケート等から、利用者の視点も取り込んだニーズの対応を検討し、今後より多くの廃止措置関連企業や大学等が、継続的に施設利用をしやすくする工夫を行う必要もある。さらに、資源エネルギー庁、原子力損害賠償・廃炉等支援機構（略称：NDF）、IRIDおよび東京電力ホールディングス株式会社と意見交換等を持ちながら、長期にわたる原子炉の廃止措置技術の実証試験を継続して行う。

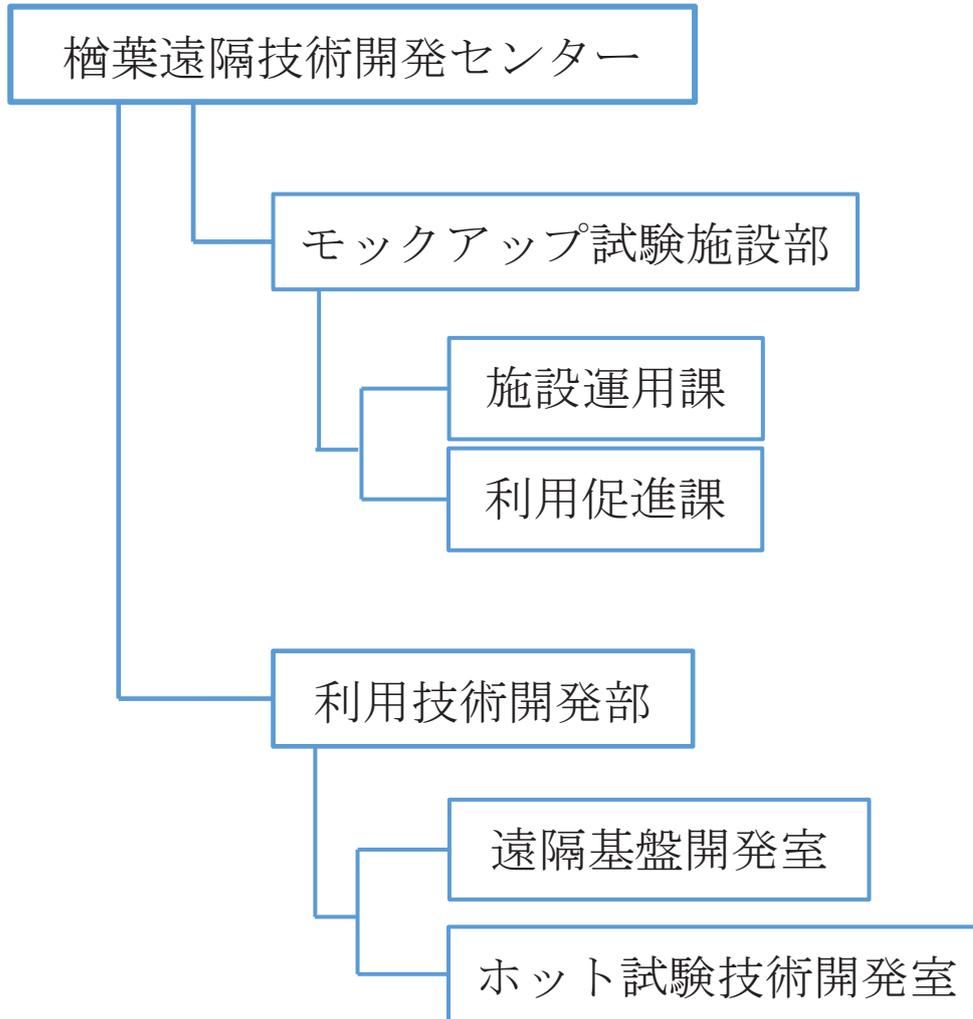
\*報告対象期間に対応する組織名（平成28年1月から平成29年3月末まで）

参考文献

- [1] 大道武生, “原子力ロボットの記録と教訓”, 日本ロボット学会誌, 32 巻, 1 号, pp.2-9, 2014.
- [2] 鈴木健太, 磯和 充, 川端邦明, 鳥居建男, “原子力災害対応ロボットシミュレータの開発”, 日本原子力学会 2016 春の年会, 2016.
- [3] 鈴木健太, 川端邦明, 磯和 充, 鳥居建男, “原子力災害対応ロボット開発支援のためのロボットシミュレータ開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 2016.
- [4] 鈴木健太, 磯和 充, 伊藤倫太郎, 堀内一憲, 川端邦明, “遠隔操縦ロボットに係るシミュレーション機能及び周辺技術開発”, 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, 2016.
- [5] Nakaoka, S., “Choreonoid: Extensible Virtual Robot Environment Built on an Integrated GUI Framework”, Proc. of the 2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp.79-85, 2012.
- [6] 東京電力ホールディングス株式会社, “福島第一原子力発電所 1/2 号機排気筒ドローンによる調査結果 2016 年 10 月 20 日”,  
<http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2016/index-j.html>(参照:2017 年 9 月 15 日).
- [7] Sato, T et al., Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52, J. Nucl. Sci. Technol., vol.50, no.9, pp.913-923, 2013.
- [8] 谷藤祐太, 白崎令人, 毛利文昭, 川端邦明, “原子力災害対応ロボットの標準試験法の導入に向けて”, 日本原子力学会 2016 年春の年会, 2016.
- [9] 正木 洋, 後藤靖之, 小林保之, 紺谷 修, 澤田祥平, “過酷事故を経た鉄筋コンクリート物性把握のための基礎試験 (その 1) 全体計画”, 日本原子力学会 2014 年秋の年会, 2014.

付録

付録 1 檜葉遠隔技術開発センターの組織\*



\*報告対象期間に対応する組織名（平成 28 年 1 月から平成 29 年 3 月末まで）

檜葉センターの業務概要

・モックアップ試験部：施設運用課および利用促進課の所掌に係る業務を行う。

－施設運用課

- (1) 檜葉センターの運営並びにそれに係る業務の企画、計画および管理に関すること。
- (2) 檜葉センターに係る関係機関との連絡、調整および協力に関すること。
- (3) 檜葉センターの庶務に関すること。
- (4) 原子力機構施設の原子力災害対策に係る遠隔機材の整備等に関すること。
- (5) 前各号に掲げるもののほか、センターの他の所掌に属さない業務に関すること。

－利用促進課

- (1) 檜葉センターの利用計画の策定および外部利用促進に関すること。
  - (2) 檜葉センターにおける作業員訓練システム等の整備に関すること。
- ・利用技術開発部：遠隔基盤開発室およびホット試験技術開発室の所掌に係る業務を行う。

－遠隔基盤開発室

- (1) 災害対応ロボットの標準試験法に係る基盤整備に関すること。
- (2) 災害対応ロボットに係るシミュレータの整備に関すること。
- (3) 作業補助機器の技術開発に関すること。

－ホット試験技術開発室

- (1) 加工・材料特性評価法の開発に関すること。
- (2) 放射線の計測・分析機器の開発に関すること（廃炉国際共同研究センターおよび福島環境安全センター放射線監視技術開発グループの所掌に係るものを除く。）。

付録2 平成28年度 外部発表リスト

原著論文（査読有り）

- ・ Kawabata, K., “A Trajectory Generation Method for Mobile Robot based on Iterative Extension-like Process”, *Artificial Life and Robotics*, vol.21, no.4, pp.500-509, 2016.
- ・ 川妻伸二, 浅間 一, “市販 CPU 等半導体素子を使用したロボットおよび無人建設重機の耐放射線性評価と放射線環境下での管理方法”, *日本ロボット学会誌* vol. 34 no.8, pp.552-557, 2016.
- ・ Kawatsuma, S., Mimura, R., Asama, H., “Unitization for portability of emergency response surveillance robot system: experiences and lessons learned from the deployment of the JAEA-3 emergency response robot at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants”, *Robomech Journal(Internet)*, vol.4, pp.6\_1-6\_7, 2017.

出版論文（査読無し）

- ・ 河村 弘, 山田知典, “東電福島第一原発廃炉に係る研究拠点の構築”, *金属*, vol.86, no.7, pp.580-589, 2016.

投稿・解説記事等

- ・ Kawatsuma, S. et al., “Irradiation Test of Semiconductors Components on the Shelf for nuclear Robots based on Fukushima Accidents”, *QST Takasaki Annual Report 2015*, p.81.
- ・ 川妻伸二, “ 檜葉遠隔技術開発センターと原子力緊急時遠隔機材”, *デコミッションング技報* 第54号, pp.24-33, 2016.

国際会議

- ・ Kawatsuma, S., “Radiation Tolerance of Components On The Shelf”, *International Workshop on Radiation Resistant Sensors and Related Technologies for Nuclear Power Plant Decommissioning 2016*.
- ・ Kawatsuma, S. et al., “Analysis of Emergency Response robots deployed for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants’ Accidents”, *Proceedings of Decommissioning and Remote Systems*, pp.67-69, 2016.
- ・ Suzuki, K. et al., “Development of a Robotic Simulator System for Performance Evaluation and Operator Training”, *Fukushima Research Conference on Remote Technologies for Decommissioning*, 2016.
- ・ Kawatsuma, S., Kawabata, K., “Development of Nuclear Emergency Response Robots at Naraha Remote Technology Center Relevant to the Laser Technology”, *Proceedings of Laser Solutions for Space and the Earth, LLSE9-3*, 2016.
- ・ N. P. Long et al., “Experimental evaluation of performance of concrete removal in pulsed laser irradiation”, *35th International Congress on Applications of Lasers & Electro-optics*, 2016.

- ・ Shimada, K. et al., “Development of a water stoppage technique using the photo-curable resin for decommissioning”, Fukushima Research Conference on Remote Technologies for Decommissioning, 2016.
- ・ Yamada, T. et al., “Evaluation of concrete properties by laser induced ultrasonic waves for reactor decommissioning”, Fukushima Research Conference on Remote Technologies for Decommissioning, 2016.

## 国内学術講演会

- ・ 鈴木健太 他, “原子力災害対応ロボット開発支援のためのロボットシミュレータ開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, 2A1-17a2, 2016.
- ・ 山田知典 他, “レーザー励起超音波によるコンクリート強度の評価”, 日本原子力学会 2016 年秋の大会, 2016, p.2G05.
- ・ 武部俊彦 他, “東京電力福島第一原子力発電所の廃炉に向けたレーザーと水噴流の複合加工技術の開発 (1) 加工特性の評価”, 日本原子力学会 2016 年秋の大会, 2016, p.2C13.
- ・ 羽成敏秀 他, “東京電力福島第一原子力発電所の廃炉に向けたレーザーと水噴流の複合加工技術の開発 (2) 高速度カメラによる観察”, 日本原子力学会 2016 年秋の大会, 2016, p.2C14.
- ・ 柴田卓弥 他, “廃炉・廃止措置に向けた技術開発”, 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 (SI2016), 2016, p.1F2-4.
- ・ 鈴木健太 他, “遠隔操縦ロボットに係るシミュレーション機能及び周辺技術開発”, 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 (SI2016), 2016, p.1F2-3.
- ・ 谷藤祐太 他, “遠隔機器のための試験法開発の取り組み”, 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 (SI2016), 2016, p.1F2-3.
- ・ 磯和 充 他, “Choreonoid を用いた原子力災害対応向けロボットシミュレータ”, 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 (SI2016), 2016, p.2X2-3.
- ・ 川妻伸二, “原子力廃炉に向けたレーザーとロボット技術の融合”, レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会講演予稿集, P.S307pIV05, 2017.
- ・ 川妻伸二 他, “廃炉のためのロボットのための市販半導体回路の照射試験”, QST 高崎研シンポジウム, 2017.
- ・ 島田 梢 他, “光硬化型樹脂の止水への適用性検討; 改良型光硬化型樹脂による止水技術開発”, 日本原子力学会 2017 年春の年会, 2017, p.3H04.
- ・ 佐藤佑真 他, “高温暴露したコンクリートの材料特性と非破壊評価の検討”, 日本原子力学会 2017 年春の年会, 2017, p.M09.
- ・ 西村昭彦 他, “夏期休暇実習制度を通じて敦賀拠点から福島拠点にわたるレーザー技術を活用した原子力人材育成”, 日本原子力学会 2017 年春の年会, 2017, p.2C09.

## その他講演

- ・ Kawabata, K. et al., “Startup of Naraha Remote Technology Development Center and Consideration of Deployed Robot Operation for New Standard Testing Method”, International Workshop on the Use of Robotic Technologies at Nuclear Facilities, Session 2-3, Maryland, USA, 2016.
- ・ 川端邦明, “原子力緊急時対応・廃炉のためのロボット技術”, システム情報科学研究会, 北海道大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻, 札幌, 北海道, 2016.
- ・ 川端邦明, “櫛葉遠隔技術開発センターにおける遠隔技術に関する取り組み”, 廃止措置研究・人材育成等強化プログラム 平成 28 年度国内サマースクール, 櫛葉, 福島, 2016.
- ・ 川端邦明, “日本原子力研究開発機構櫛葉遠隔技術開発センターにおける試験施設について”, 廃炉のためのロボット技術コンペに向けたシンポジウム, 文京区, 東京, 2016.
- ・ Kawabata, K., “Naraha Remote Technology Development Center, JAEA -Test Facilities and Methods to Support Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant”, ASTM Subcommittee E54.09 Response Robot Meeting, ASTM Subcommittee E54.09 Response Robot Meeting, USA, 2017.
- ・ 川端邦明, “日本原子力研究開発機構 櫛葉遠隔技術開発センターにおける活動”, 国家課題対応型 研究開発事業 廃止措置研究・人材育成等強化プログラム 遠隔操作技術及び核種分析技術を基盤する俯瞰的廃止措置人材育成 第 10 回会津大学人材育成セミナー, 会津, 福島, 2017.
- ・ 加瀬 究 他, “レーザーを活用した高性能・非破壊劣化インフラ診断技術の研究開発”, 画像応用技術専門委員会 2016 年度第 5 回研究会, 文京区, 東京, 2017.
- ・ 長谷川 登 他, “レーザーを活用した新しいインフラの保守保全技術の開発”, 第 17 回レーザー学会東京支部研究会/電気学会 光・量子デバイス技術研究会, 港区, 東京, 2017.

## 付録3 表彰・特許

### 1. 表彰

#### (1) 原子力機構内表彰

##### 1) 理事長表彰

表彰年月日：平成28年10月1日

区分：研究開発功績賞

受賞名：研究開発拠点「檜葉遠隔技術開発センター」の整備完遂

グループ名：檜葉センター整備事業グループ

#### (2) 外部表彰

##### 1) 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

表彰年月日：平成28年12月16日

区分：優秀デモンストレーション賞

受賞名：Choreonoidを用いた原子力災害向けロボットシミュレータ

受賞者名：磯和 充、鈴木 健太、伊藤 倫太郎、堀内 一憲、川端 邦明

### 2. 特許

#### (1) 特許出願

出願年：平成28年

出願名：レーザー加工装置及びレーザー加工方法

出願状況：日立GEニュークリア・エナジー株式会社、株式会社スギノマシンと共同出願中

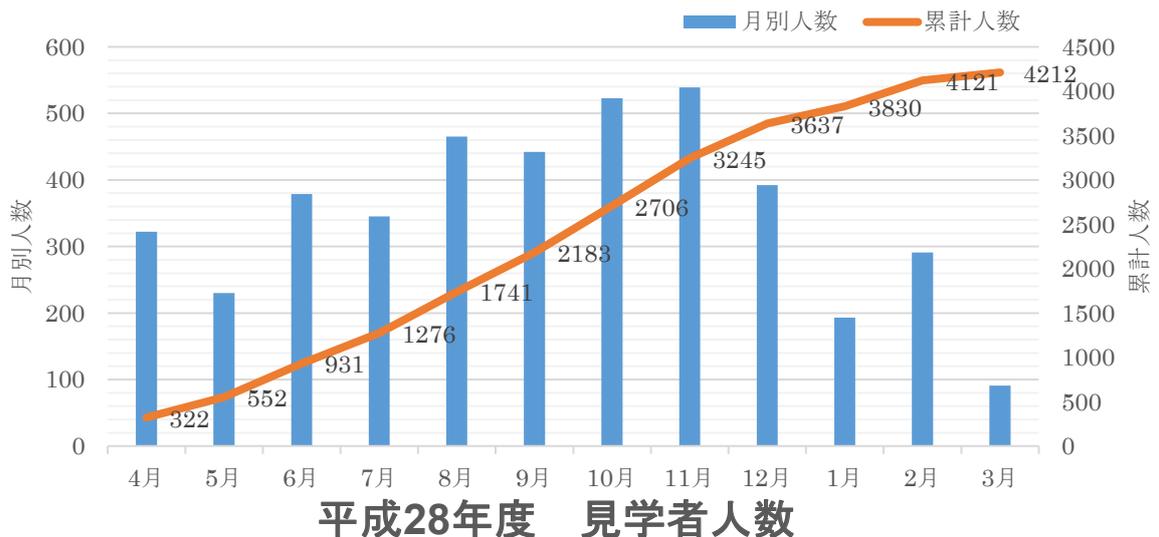
出願者名：大道 博行、山田 知典、羽成 敏秀

付録 4 施設の見学者数一覧

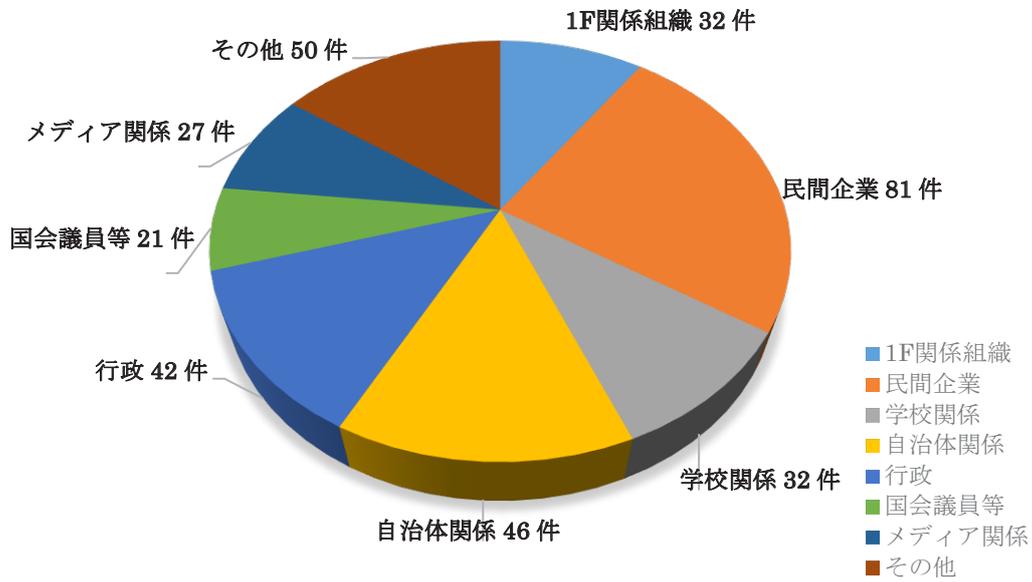
施設の見学件数および見学者数



平成 28 年 4 月 1 日から試験棟の本格運用が開始され、見学の受入も開始した。年度当初と秋頃が特に多く、月平均にすると 28 件であり、一日平均では 1.4 件、一日最大 5 件の見学に対応した。また、県外からの見学が 228 件 (2,588 名)、県内からは 103 件 (1,624 名) であった。



見学件数が年間 331 件に対し、合計人数は 4,212 名であり一件平均約 13 人であった。この内、小中高校生 7 件 (200 名) 大学・高専生 25 件 (398 名) 見学された。



## 平成28年度 組織別見学件数

1F 関係組織・民間企業が最も多かったが、国会議員等・行政・自治体関係者も多く、大臣（3名）や政務官（3名）が見学された。また、県外の原子力施設がある自治体からも8件（130名）の見学があった。その他の中には、美浜町原子力特別委員会他が見学された。

付録 5 檜葉遠隔技術開発センターの利用手続き

檜葉遠隔技術開発センターは、1F の廃止措置や災害対応等のための遠隔操作機器（ロボット等）の開発・実証試験が行える施設です。

1. 利用手続きの流れ



当センターへ利用の申し込みは、電子システムにて行うことより、当センターホームページ下記 URL の利用申請システムへアクセスしてください。

URL : <http://naraha.jaea.go.jp>

2. アクセス

自動車で来られる方へ

常磐自動車道→広野 IC より県道 393 号線と国道 6 号線経由約 4.0 km  
約 8 分

電車（JR）で来られる方へ

JR 常磐線木戸駅→檜葉遠隔技術開発センター約 2 km、約 30 分（徒歩）

※木戸駅からタクシーを利用される方は、タクシー会社に事前予約が必要です。

3. 問い合わせ先

〒979-0513 福島県双葉郡檜葉町大字山田岡字仲丸 1 番 22 号

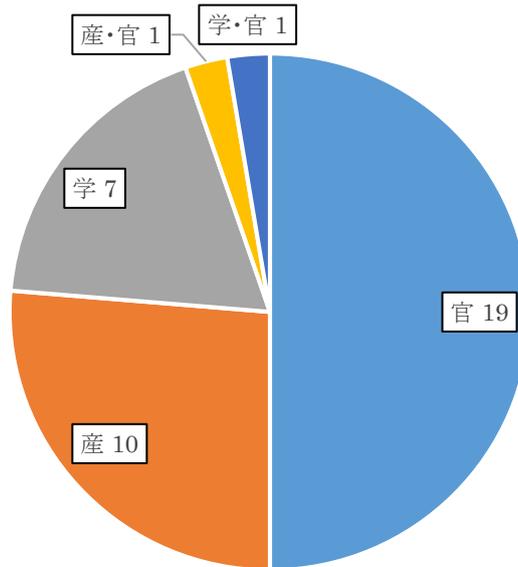
TEL : 0240-26-1040（代表） FAX : 0240-26-1041

URL : <http://naraha.jaea.go.jp/>

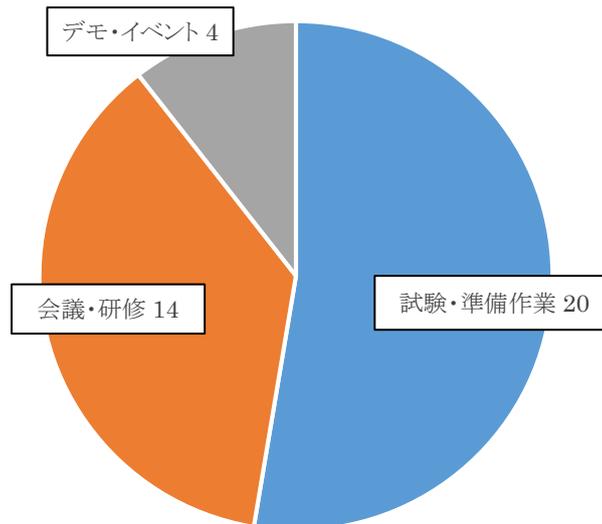
付録 6 施設利用者へのアンケート調査

平成 28 年度には、38 件の施設利用を受け入れた。施設利用者に対して、アンケート調査を実施し、利用者の動向を調査した。その結果、施設について大多数が満足していること、リピーターが増えつつあることなどが示された。今後、施設への要望や不満などについて利用者から具体的に情報を収集して、さらに利用者が使いやすい施設運営に努めてゆく。

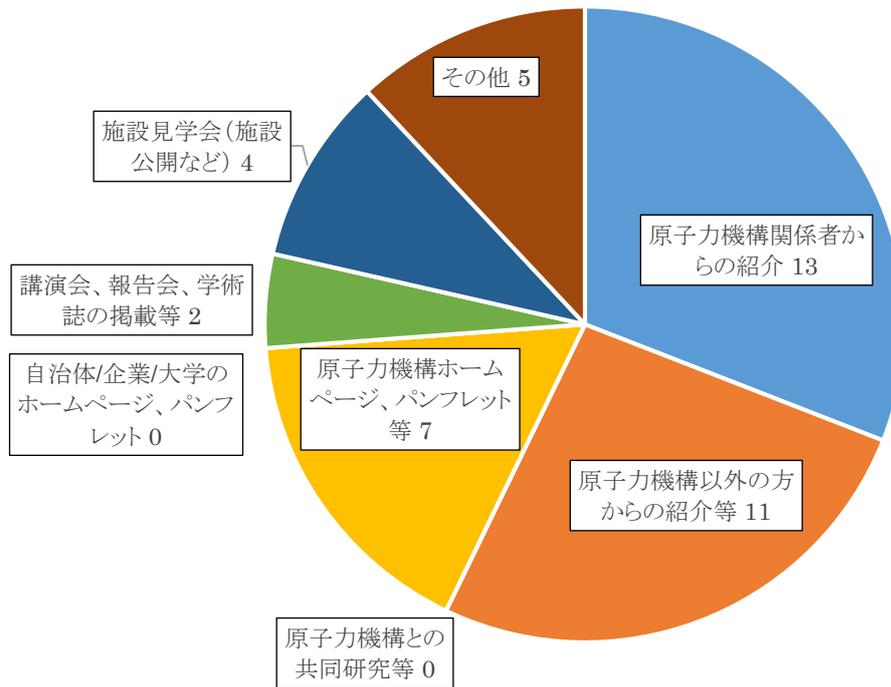
以下、アンケート結果について示す。



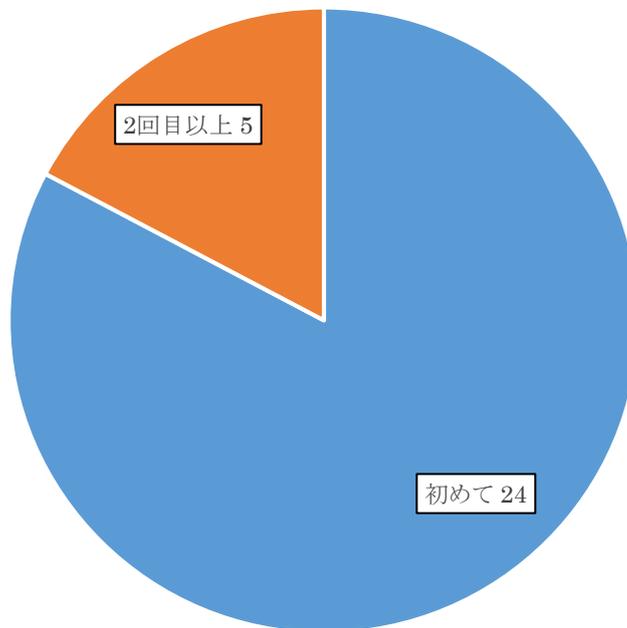
付図 6-1 利用者の所属は？



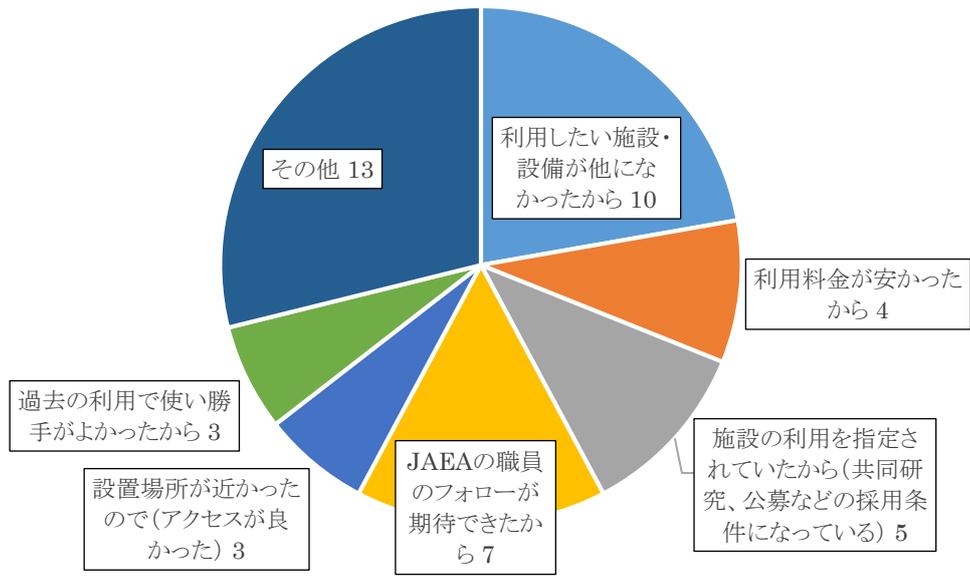
付図 6-2 施設の利用目的は何か？



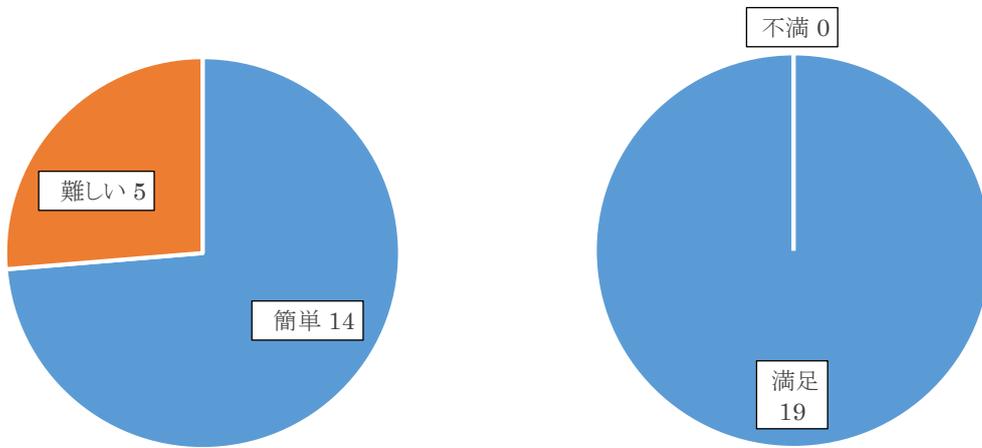
付図 6-3 施設を何から知ったか？



付図 6-4 利用回数は？



付図 6-5 利用した理由は？



(1) ホームページからの申込みによる利用手続きは？ (2) 利用に当たって担当者の対応は？

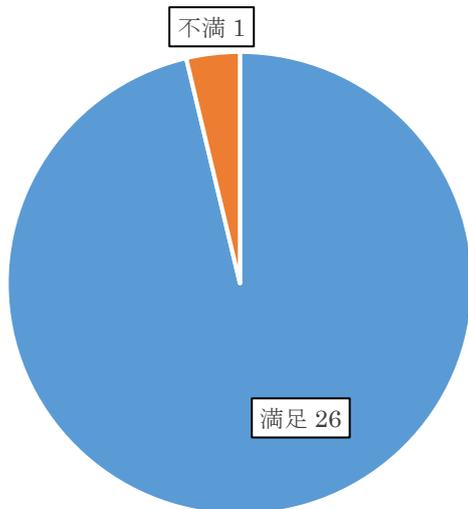
付図 6-6 利用に当たっての満足度は？ (1/2)



(3) 利用料金は？

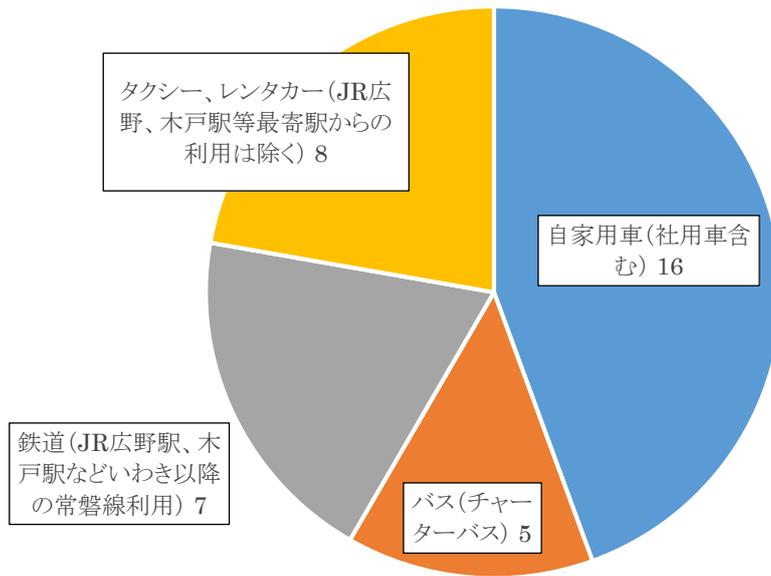


(4) 施設・設備の使い勝手は？

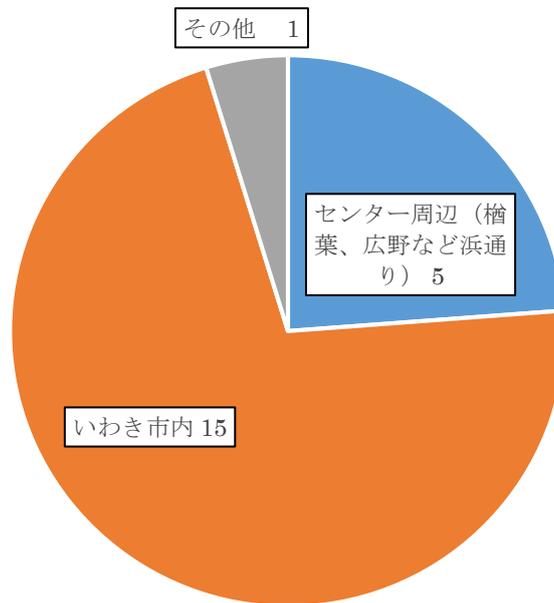


(5) 施設・設備の利用期間・時間は？

付図 6-6 利用に当たっての満足度は？ (2/2)

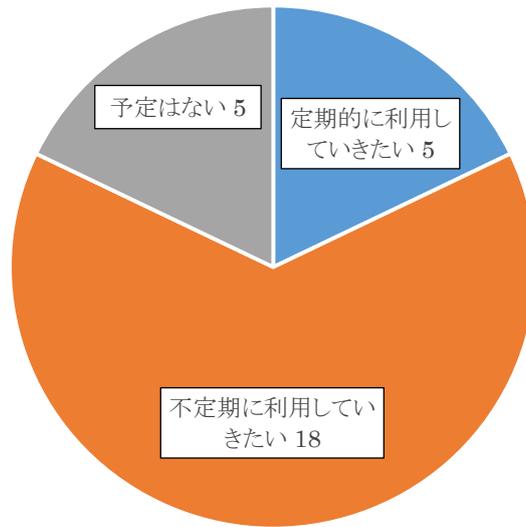


(1) 利用した交通機関は？



(2) 宿泊場所は？

付図 6-7 交通機関・宿泊施設について



付図 6-8 今後 3 年間程度の利用予定は？

# 国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光路長	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
放射線量	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> = s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> = s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>24</sup>	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

