



JAEA-Review

2018-029

DOI:10.11484/jaea-review-2018-029

2017年度 櫛葉遠隔技術開発センター年報

Annual Report for FY2017 on the Activities of Naraha Center for
Remote Control Technology Development
(April 1, 2017 - March 31, 2018)

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

March 2019

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, 2019

2017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12月13日受理)

檜葉遠隔技術開発センターは、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所の廃炉作業推進のため、遠隔操作機器・装置による廃炉作業の実証試験・要素試験が実施できる施設である。2017年度は64件の施設利用を支援し、福島第一原子力発電所廃炉作業等の遠隔技術開発に貢献した。また福島県内企業廃炉・除染ロボット関連技術展示実演会等の開催に協力し、地域活性化・福島県の産業復興に貢献するとともに、廃炉創造ロボコンや廃炉実習等の支援を通じて長期に亘る福島第一原子力発電所の廃炉を担う次世代の人材育成に貢献した。

本報告書は、2017年度における檜葉遠隔技術開発センターの施設設備の整備・利用状況及びそれに係る取組み、遠隔基盤技術の開発状況、緊急時対応遠隔機材の整備・訓練等の活動状況について取りまとめたものである。

Annual Report for FY2017 on the Activities of Naraha Center for
Remote Control Technology Development
(April 1, 2017 - March 31, 2018)

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 December 13, 2018)

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 (Fukushima Daiichi NPS), Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. (TEPCO). Naraha Center consists of a Full-scale Mock-up Test Building and a Research Management Building, and various test facilities are installed in them for the decommissioning work of Fukushima Daiichi NPS, TEPCO.

Naraha Center provides the test facilities to various users, such as companies engaged in the decommissioning work, research and development institutions, educational institutions, and so on. Naraha Center started full operations on April 2016 as a base that can be widely used, and the number of the facility use was 64 in FY2017.

This report summarizes the activities of Naraha Center in FY2017, such as utilization of facilities and equipment of Naraha Center, development of remote control technologies, maintenance of the remote control equipments for emergency response, and training for operators by using the equipments.

Keywords: Remote Control Technology, Annual Report, Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Full-scale Mockup Test, Naraha Center for Remote Control Technology Development, JAEA

(Eds.) Toshihide HANARI, Ryo FURUKAWAHARA, Makoto TANAKA, Mitsugu KATO,
Kuniaki KAWABATA, Yoichi KASHIMA

目 次

1	はじめに	1
2	施設・設備の整備・利用状況	2
2.1	実規模試験エリアの整備・利用状況	2
2.2	要素試験エリアの整備・利用状況	3
2.2.1	ロボット試験用水槽	3
2.2.2	モックアップ階段	4
2.2.3	モーションキャプチャ	5
2.3	付帯設備	6
2.4	2017年度の利用状況	7
2.5	利用促進活動	11
2.5.1	知ってもらおう活動	11
2.5.2	使ってもらおう活動	13
2.5.3	満足してもらおう活動	15
3	遠隔基盤技術開発	19
3.1	ロボットシミュレータ	19
3.1.1	開発目標・年度目標	19
3.1.2	年度成果	19
3.1.3	今後の課題	24
3.2	原子力災害対応用ロボットの標準試験法	25
3.2.1	開発目標・年度目標	25
3.2.2	年度成果	25
3.2.3	今後の課題	29
3.3	VRシステム	29
3.3.1	整備目標・年度目標	29
3.3.2	年度成果	29
3.3.3	今後の課題	30
4	原子力緊急事態支援用遠隔操作資機材の整備と運用	31
4.1	原子力災害対策特別措置法及び同法「計画等命令」の改正と原子力機構の対応	31
4.2	遠隔機材の整備目標・年度成果	34
4.3	要員の育成・訓練目標・年度成果	36
5	まとめ	39
	参考文献	40

付録

付録 1	櫛葉遠隔技術開発センターの組織・業務概要	-----	42
付録 2	2017年度 外部発表リスト・表彰	-----	43
付録 3	施設の見学件数、見学者数一覧	-----	46
付録 4	施設利用者へのアンケート調査	-----	48

Contents

1	Introduction	1
2	Outline of Facilities	2
2.1	Mock-up Test Area	2
2.2	Component of Test Area	3
2.2.1	Robot Test Pool	3
2.2.2	Mock-up Stairs	4
2.2.3	Motion Capture System	5
2.3	Ancillary Equipments	6
2.4	Situation of Utilization in FY2017	7
2.5	Promotional Activities for Utilization	11
2.5.1	Activities to Inform	11
2.5.2	Activities to Use	13
2.5.3	Activities to Satisfy	15
3	Development Activity of Remote Technology in FY2017	19
3.1	Robot Simulator	19
3.1.1	Development Goal and Annual Targets	19
3.1.2	Results	19
3.1.3	Summary	24
3.2	Standard Test Method for Nuclear Emergency Response Robots	25
3.2.1	Development Goal and Annual Targets	25
3.2.2	Results	25
3.2.3	Summary	29
3.3	VR System	29
3.3.1	Development Goal and Annual Targets	29
3.3.2	Results	29
3.3.3	Summary	30
4	Operation and Maintenance of Remote Control Equipment for Nuclear Emergency Response	31
4.1	Background	31
4.2	Maintenance Goal and Result of Remote Control Equipment	34
4.3	Goal and Result of Training for Operators	36
5	Summary	39
	References	40

Appendix

Appendix 1	Organization of Naraha Center for Remote Control Technology Development	42
Appendix 2	Awards and Presentation List of FY2017	43
Appendix 3	Classification and Number of Facility Visits and Visitors	46
Appendix 4	Questionnaire Survey for Facility Users	48

1 はじめに

東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所（以下、「1F」と略す。）の事故により原子炉圧力容器、原子炉格納容器（以下、「PCV」と略す。）が損傷して放射性物質が漏えいしたため、この廃炉作業は高線量・高汚染環境での作業となり、様々な遠隔操作機器・装置の活用が必須である。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」と略す。）福島研究開発部門福島研究開発拠点櫛葉遠隔技術開発センター（以下、「櫛葉センター」と略す。）は、1F廃炉作業等に携わる企業や公的研究機関、大学等による遠隔操作機器・装置を用いた実証試験・要素試験が実施できる試験棟及びバーチャルリアリティ技術を用いた作業員訓練システム（以下、「VRシステム」と略す。）等を備えた研究管理棟を有している。

本報告書では、2017年度における櫛葉センターの施設設備の整備・利用状況及びそれに係る取組み、遠隔基盤技術の開発状況、緊急時対応遠隔機材の整備と訓練等の活動状況について取りまとめ、報告する。

2 施設・設備の整備・利用状況

楡葉センターの主な施設は、各種試験ができる「試験棟」(1階建：長さ 60 m×幅 80 m×高さ 40 m)と「研究管理棟」(4階建：長さ 35 m×幅 25 m×高さ 20 m)からなる。図 2-1 に楡葉センターの全景を示す。

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、要素試験エリアには遠隔操作機器・装置等の性能評価を行う設備が整備されている。一方、実規模試験エリアには国際廃炉研究開発機構(以下、「IRID」と略す。)により整備された実規模試験体が設置されている。研究管理棟では、VR システムや規模の異なる複数の会議室を備えている。この他、長期利用者等のために機材保管が可能な倉庫も整備している。2017 年度は、IRID 及び産業界等における廃炉作業に向けた技術開発試験、大学関係者の研究開発試験や人材育成に関わるサマースクールの他、試験棟全域を用いた大規模なイベントが行われた。



図 2-1 楡葉センターの全景

2.1 実規模試験エリアの整備・利用状況

試験棟の実規模試験エリアは、組立エリア、試験エリア及び解体エリアに区分けされている。現在、実規模試験エリアには PCV 漏えい箇所の補修・止水技術確立のため、IRID が PCV 下部の一部を模擬した実規模試験体を設置している^[1]。この試験体は、1F 2 号機の PCV 下部にあるベント管、サブプレッションチェンバ(以下、「S/C」と略す。直径約 9 m。)やトーラス室壁面等を模擬している。試験体のサイズは実寸大で、円環状の S/C を 8 等分して、その一つを切り出した形としている。実規模試験体の製作中の様子を図 2.1-1 左に示す。

2017 年度は、IRID/株式会社東芝(現・東芝エネルギーシステムズ株式会社)が 6 月 24 日に、

配管端部であるクエンチャやストレーナ等を止水することを目的とした S/C 内充填止水技術の打設試験を実施した^[2]。また、7月31日には IRID/日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社が S/C を支える脚部の耐震補強を目的として、S/C 内脚部補強技術の打設試験を実施した^[3]。各試験の様子を、図 2.1-1 中央及び右に示す。これらの成果^{[1][2][3]}は、経済産業省/廃炉・汚染水対策事業費補助金により得られたものである。



図 2.1-1 実規模試験体の製作状況^[1] (左)、充填止水試験の様子^[2] (中央)、脚部補強試験の様子^[3] (右) ※写真引用元：IRID Web ページ、R&D Topics (<http://irid.or.jp/topics/>)

2.2 要素試験エリアの整備・利用状況

2.2.1 ロボット試験用水槽

ロボット試験用水槽は、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。水温を変更できるとともに、水質も上水、工業用水、濁水等に変更可能である。さらに、水槽には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ジブクレーンも装備されており、重量のある水中ロボット等の移動も可能である。2017年度は、新たに水槽上部に橋げたを設置し、利用者が行う濁水試験においてロボットを水槽上部中央部に移動して試験が実施された。表 2.2.1-1 にロボット試験用水槽の主な仕様を、図 2.2.1-1 にロボット試験用水槽の外観と利用の様子を示す。

表 2.2.1-1 ロボット試験用水槽の仕様

項目		内容
主要寸法		幅 8 m×全高 8.5 m 水槽：直径 4.5 m×深さ 5 m
観察窓		幅 800 mm×高さ 500 mm 側面上部（高さ 4 m）、中央（高さ 1 m）、下部（高さ 0.5 m）に各 4 か所設置
水温		常温～60℃
水質		上水、工業用水、塩水、濁水
付帯設備	ジブクレーン	電気トロリ結合式 定格荷重：500 kg
	水中カメラ	高輝度 LED 48 個 カメラ画素：52 万画素
	架橋	長さ 5 m、幅 1 m

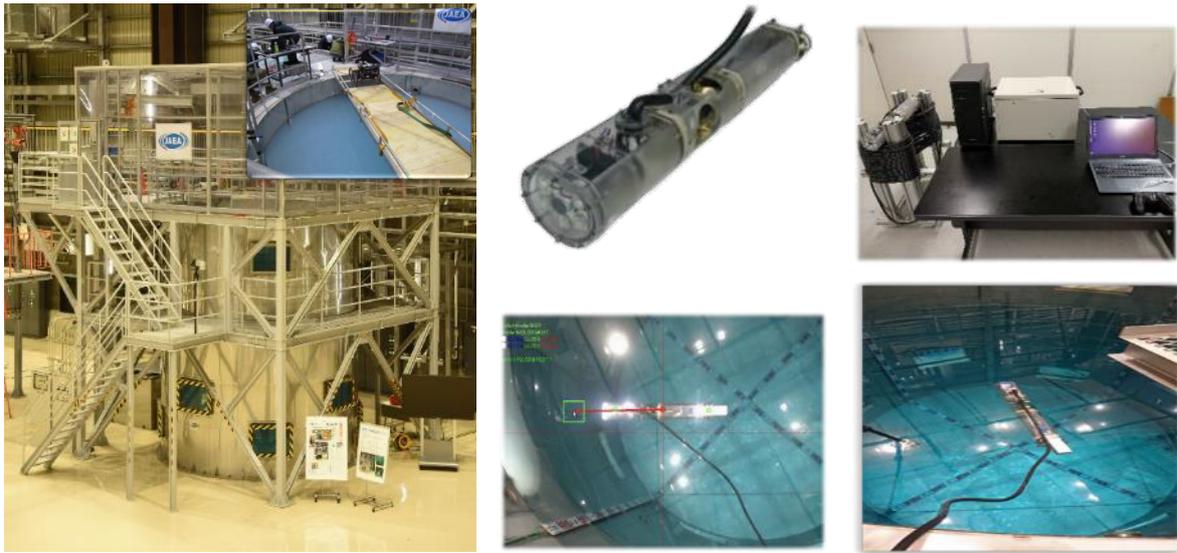


図 2.2.1-1 ロボット試験用水槽外観と利用（株式会社タカワ精密）の様子

2.2.2 モックアップ階段

モックアップ階段は、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なっている。表 2.2.2-1 に示すように、傾斜角度、手摺幅、蹴上高さ等を変更することができる。

2017 年度は、可搬型モーションキャプチャ（Vicon 社 Vero V2.2）を導入したことに伴い、モックアップ階段にてモーションキャプチャによる計測が可能となり、クローラ型ロボット等の階段昇降の様子を定量的に計測できるようになった。図 2.2.2-1 にモックアップ階段の外観と利用の様子を示す。

表 2.2.2-1 モックアップ階段の仕様

項目	内容
全寸法	幅 7 m×奥行 5 m×高さ 7 m
傾斜角度	40°、41°、42°、43°、51°、55°（左記角度に変更可能）
手摺幅	700 mm、800 mm、900 mm、1,000 mm（左記幅に変更可能）
踏板材質	縞鋼板またはグレーチング（入替可能）
蹴上高さ	180～230 mm（10 mm ずつ調節可能）
猿梯子	高さ 3.3 m：1 台／1.5 m：1 台

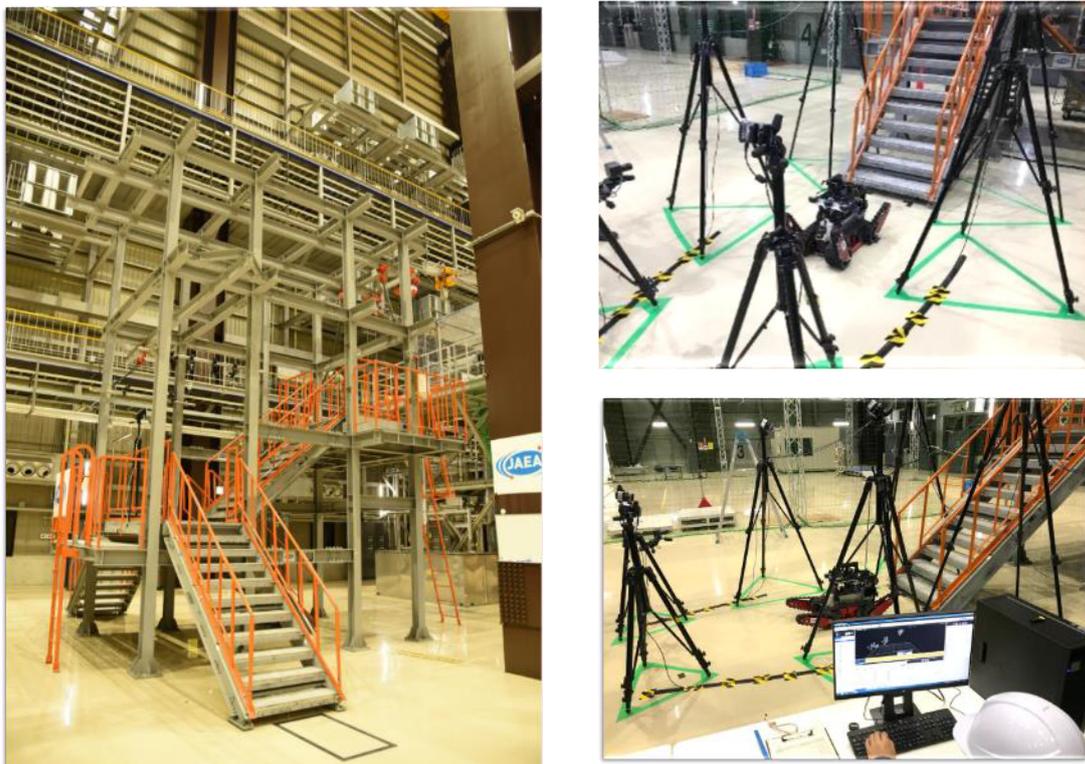


図 2.2.2-1 モックアップ階段と利用（会津大学）の様子

2.2.3 モーションキャプチャ

モーションキャプチャは、1F 内に散乱している瓦礫等をロボットが踏破する際の動作検証や、災害時に荷物を運ぶドローンの動作検証等の利用が想定されている。表 2.2.3-1 にモーションキャプチャの仕様を示す。本モーションキャプチャのエリアは幅 15 m、奥行き 15 m、高さ 7 m の空間で、16 台の高速カメラやビデオカメラを設置して、高精度に計測可能な設備となっている。計測範囲としてはカメラ位置を高さ 7 m の位置にした場合、幅 10 m×奥行き 10 m×高さ 2 m で計測でき、専用の治具でカメラ位置の高さを 1.5 m 程度に変更することにより幅 6 m×奥行き 6 m×高さ 5 m の範囲に変更が可能である。本モーションキャプチャは 2.0 ms の時間分解能で計測でき、得られた位置情報（x、y、z の 3 方向）の時間変化から速度、加速度等の分析・評価が可能である。2017 年度は、利用者が持ち込んだロボットの動作計測に多く活用された。例えば、若狭湾エネルギー研究センターでは、複数の操作者が除染ロボットを操作し設定ルートを走行して動作の軌跡を比較評価した。図 2.2.3-1 にモーションキャプチャと利用の様子を示す。

表 2.2.3-1 モーションキャプチャの仕様

項目	内容
主要寸法	幅 15 m×奥行き 15 m×高さ 7 m
計測範囲	幅 10 m×奥行き 10 m×高さ 2 m 幅 6 m×奥行き 6 m×高さ 5 m
計測精度	±1.5 mm
カメラ	Vicon 社 T20S 16 台
ソフトウェア	Vicon 社 Nexus2.0 Network
録画カメラ	Vicon 社 BonitaVideo

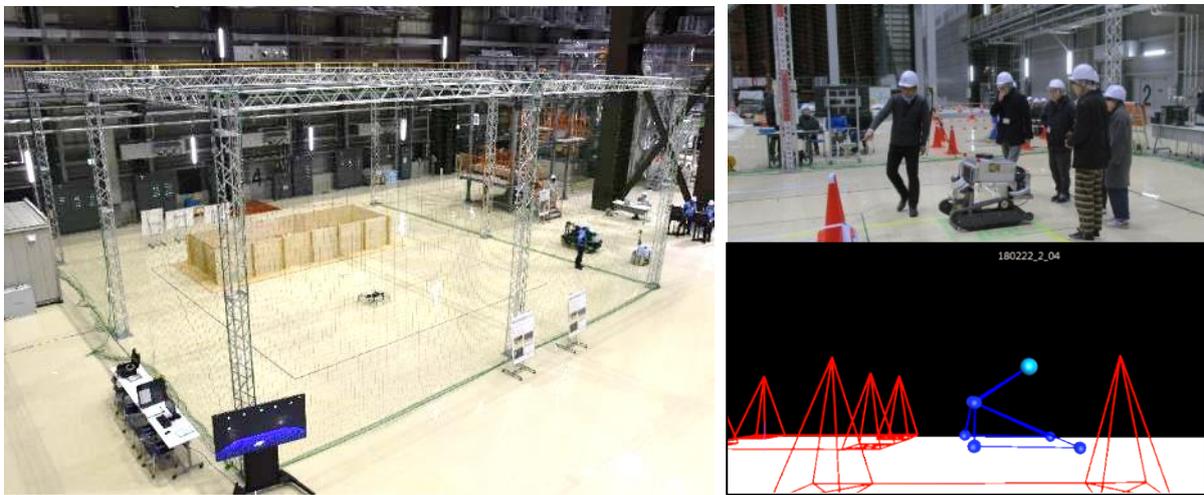


図 2.2.3-1 モーションキャプチャと利用（若狭湾エネルギー研究センター）の様子

2.3 付帯設備

試験棟内での各種試験の効率的な実施を支援する目的で、各種付帯設備を備えており、目的に応じて利用者が使用することができる。付帯設備としては、工作機械や計測機器類、瓦礫を模擬できる単管パイプやグレーチングの他、米国立標準技術研究所（以下、「NIST」と略す。）が開発し、ASTM International が規格として発行している災害対応ロボットの標準試験法^[4]（以下、「NIST-STM」と略す。）に係る標準試験体がある。試験の経過を記録する場合は映像記録装置を用いて任意の場所にて撮影ができる。また、産業技術総合研究所の Choreonoid^[5]をベースに開発したロボットシミュレータも整備しており、1Fの原子炉建屋内部や要素試験設備をコンピュータ上で再現し、各々が開発したロボットの動作確認や操作訓練ができるようになっている。これらの資機材の他、電気・水・圧縮空気の供給や無料 Wi-Fi の利用が可能となっている。これらの付帯設備を活用することにより、試験環境の提供や利用者が持ち込んだ遠隔操作機器等のメンテナンスも速やかに行えるようになっている。今後も利用者のニーズを反映し、設備の拡充を進める。利用可能な設備及び備品等を表 2.3-1 に示す。

表 2.3-1 利用可能な設備及び備品一覧

名称	仕様等	
ロボットシミュレータ	コンピュータ上でロボットの動作検証が可能	
標準試験体	ASTM E2828-11	
電気	交流 100 V 20 A 交流 200 V 20 A	
上水	口径 25A 供給圧力 0.15 MPa	
工業用水	口径 50A 供給圧力 0.3 MPa	
圧縮空気	口径 25A 供給圧力 0.7 MPa	
名称	メーカー	型式、仕様等
映像記録装置	パナソニック	WV-ASN200 (定点・可搬各 5 台)
天井クレーン	京和工業	30 t (補巻 5 t)
高所作業車	北越工業	ENTN080-2 (作業床高さ 8 m)
フォークリフト	TOYOTA	定格荷重 5 t
卓上旋盤	光畑製作所	L-5000D
卓上フライス盤	光畑製作所	BM-1000
ボール盤	遠州工業	EUD-500
卓上糸鋸盤	旭工機	SAM60
メタルソー切断機	日立工機	CU 15SC
溶接機	日動工業	DIGITAL-1020
各種工具	-	ドライバー、レンチ、電動工具等

2.4 2017 年度の利用状況

檜葉センターは、2016 年度より供用施設として外部への施設利用を本格的に開始した。2017 年度の利用件数は 64 件と、前年度の 38 件より大幅に増加した。利用実績の一覧を表 2.4-1 に示す。図 2.4-1 に利用目的、図 2.4-2 に利用者区分を年度ごとに比較したものを示す。また、図 2.4-3 に施設利用種別の内訳を示す。前年度に比べ、1F 廃炉関連の利用が増加していることが分かる。

表 2.4-1 2017 年度の利用実績

No.	利用者区分	利用期間	利用内容 (概要)
1	官	4/10～12	現場作業前の資器材の操作性確認
2	産	5/22～6/30	施工性確認試験
3	官	5/17	会議開催
4	産	7/3～8/31	施工性確認試験
5	産	6/12～16	水中ロボットの試験
6	産	6/16	VR システムを使用した作業計画検討
7	官	6/20	リスクベース設備管理 180 委員会
8	官	5/29	評議会
9	産	5/29～6/30	S/C 内充填止水施工性確認試験
10	学	8/8	広域災害に対応する技術基盤調査研究委員会
11	官	8/21～25	夏季休暇実習生受入れ (試験用水槽)
12	学	7/21	モーションキャプチャでの試験
13	官	8/21～25	夏季休暇実習生受入れ (ロボット試験エリア・試験用水槽)
14	産	8/2	水槽を利用した水中ロボットの試験及び取材
15	学	8/4	Green Program 海外学生研修
16	産	8/8～10	水中ロボットの試験とドローン飛行試験
17	産	8/24	VR システムを使用した水中ロボットの試験計画検討
18	学	9/6～8	サマースクール
19	学	9/5	廃炉創造ロボコンサマースクール
20	産	9/19	J ヴィレッジ再開に係る運営会議
21	産	9/21～22	水中ロボットの試験とドローン飛行試験
22	産	9/29	J ヴィレッジ再開に係る運営会議
23	産	9/25～29	マニプレータの展示
24	官	10/2～6	水槽利用 廃炉加速化研究 (文部科学省補助金)
25	産	7/14～9/29	無人飛行機研究開発
26	産	10/19	市町村における自家消費野菜の放射能検査支援業務のための第 38 回基礎講座
27	産	7/24～10/26	S/C 内充填止水施工性確認試験
28	学	11/9、11/20	水中グライダー用翼の運動試験
29	官	12/4	会議
30	産	12/6～12/8	水中ロボットの試験とドローン飛行試験
31	学	12/4～12/6	クローラロボットのモックアップ階段踏破試験
32	学	12/13	水中翼の飛行試験・水中ロボット位置検出システム実験

33	産	11/27～12/ 22	FRM 実機検証
34	学	12/15～16	廃炉創造ロボコン
35	官	12/19～20	企業マッチング会の開催（ロボットのデモ、展示等）
36	官	12/25	東京電力職員との対談
37	学	1/15	モックアップ階段におけるクローラロボットの走行試験
38	産	1/15	ドローンの飛行練習
39	学	1/19	ステップフィールドでの試験
40	産	7月～1月 (2日間を4回開催)	線量計測従事者講習
41	産	1/29～31	水中ロボットの試験とドローン飛行試験
42	産	1/9～12、2/1～16	試験用水槽における水中 ROV の試験
43	産	11/20～2/19	昇温給水設備等の点検・整備
44	官	12/11～2/1	資機材操作要員の技能養成
45	官	2/22～23	遠隔操作ロボットの实習及びセミナー
46	官	2/27	段ボールモックアップの製作
47	産	2/19	ドローンの飛行練習
48	産	3/2	ロボット及びコンプトンカメラの試験
49	産	10/2～3/31	無人飛行機研究開発
50	産	10/13、10/26、11/24、 2/22	J ヴィレッジ再開に係る運営会議
51	産	12/25～3/14	ベント管止水打設試験
52	産	2/13～3/28	実規模試験における作業工程の確認
53	学	2/18～19、 3/12～13、3/18～19	廃止措置に係る学生実験
54	産	2/28～3/3	実規模試験における作業工程の確認
55	学	3/22、23	日英共同研究プロジェクト
56	産	3/5～7	水中ロボットの試験とドローン飛行試験
57	学	3/12	Green Program 海外学生研修
58	産	3/26～28	水中ロボット試験
59	官	年間（365日）	実規模試験体を用いた実証試験
60	官	年間（365日）	試験計画・工程調整等
61	官	4日/週間程度(年間)	遠隔操作ロボットの整備・開発等
62	産	11/6～3/31	1/1 スケールベント管止水試験
63	官	1～3月	遠隔基盤研究開発等
64	学	3/14～15、3/30	水中翼の飛行試験・水中ロボット位置検出システム実験

※ 表中の利用者区分欄は利用者の分類を示している。産は産業界、官は官界、学は学界の利用者を示す。

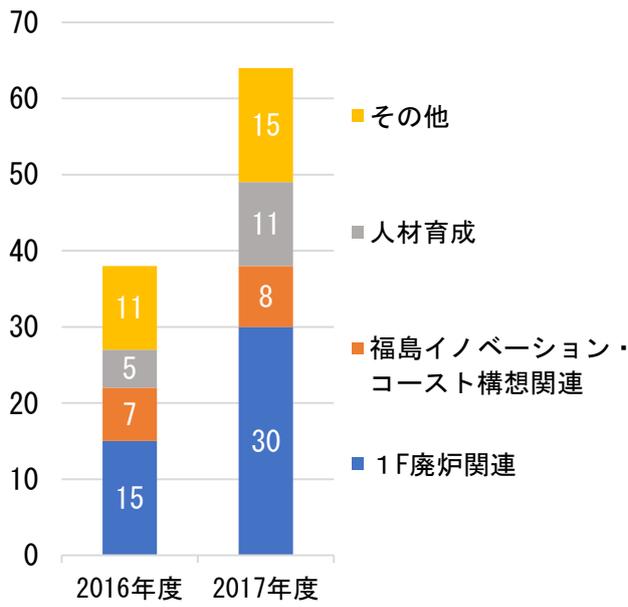


図 2.4-1 利用目的の 2016 年度との比較

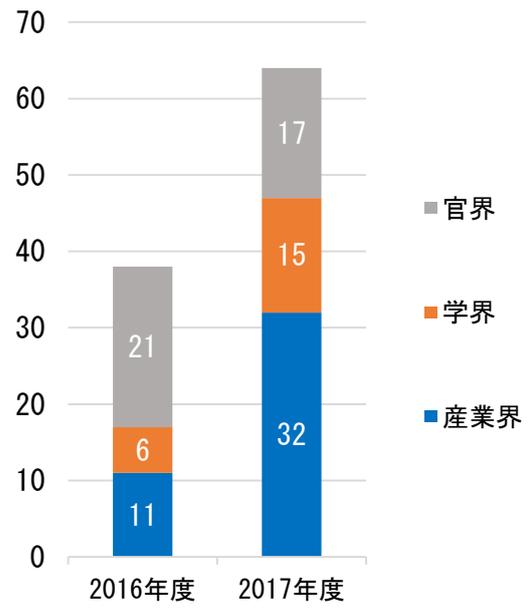


図 2.4-2 利用者区分の 2016 年度との比較

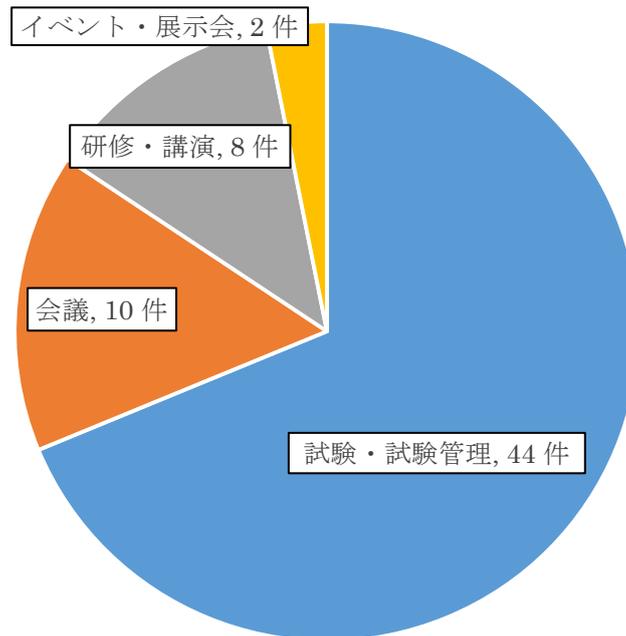


図 2.4-3 施設利用種別の内訳

2.5 利用促進活動

檜葉センターの施設利用の促進を図るべく「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を以下に示す。

2.5.1 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

- ・ 利用者向けや一般向け等に適した視察コース、パンフレット、説明者による対応を工夫した。
- ・ 2018年1月29日（月）に開所以来累計で見学者1万人を達成した（図2.5.1-1）。2017年度の実績は、件数334件、人数4,284人であった。



図 2.5.1-1 見学者1万人達成イベント

ii) 地域企業との連携

- ・ 2017年11月22日（水）、23日（木）に開催されたロボットフェスタふくしま2017での展示及びデモを実施した。
- ・ 2017年12月20日（水）福島県廃炉・除染ロボット技術研究会主催の「福島県内企業・大学 廃炉・災害対応ロボット関連技術 展示実演会」に協力した。

iii) 施設公開等（地元の方々等を対象）

- ・ 2017年11月26日（日）にマジカル福島2017と同時開催した。

iv) Fukushima Research Conference on Remote Technology in Nuclear Facilities

- ・2017年11月29日（水）、30日（木）に「原子力施設における遠隔機材」をテーマとして開催した。浅間 一教授（東京大学）による基調講演、Raymond Sheh氏（豪州 Curtin University）、斉藤 陽平氏（美浜原子力緊急事態支援センター）、Michael Gustmann氏（独国 Kerntechnische Hilfsdienst GmbH）、Jean-Louis Portier氏（仏国 Groupe INTRA）による講演等を実施した。

v) 檜葉センター施設利用相談会の開催

- ・2018年3月16日（金）に地元企業等を対象として各設備の利用事例の紹介及び標準試験法の開発状況等を紹介し、利用促進活動を実施した。

vi) 檜葉センターホームページの更新

- ・最新情報を適宜、ホームページに更新した。また、ホームページへのアクセス状況をモニターしたところ、2017年度は1年間で283万回あり、内訳として、外部からは80%、内部から20%であった。図2.5.1-2に月ごとのアクセス件数内訳、図2.5.1-3に年間のアクセス件数内訳を示す。11月にアクセス件数が多い理由として、Fukushima Research Conference on Remote Technology in Nuclear Facilities や2017国際ロボット展等、檜葉センターが開催または参加するイベントが多くあったためと考えられる（アクセス件数：ページを表示するごとに1件としてカウント）。

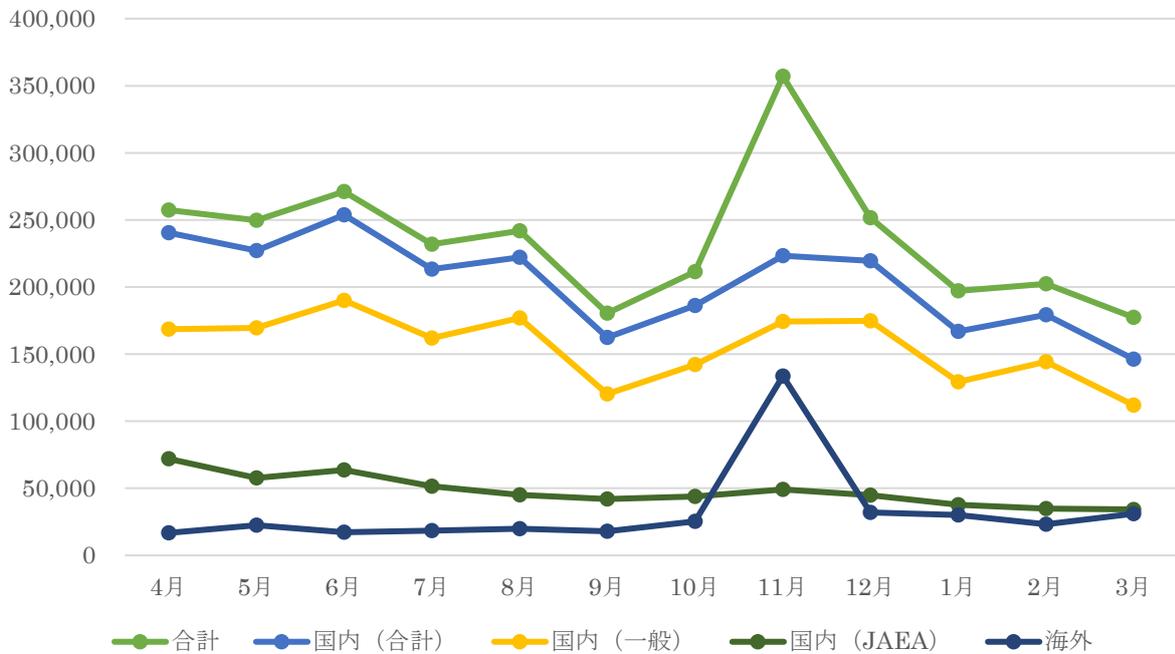


図 2.5.1-2 月ごとのアクセス件数内訳

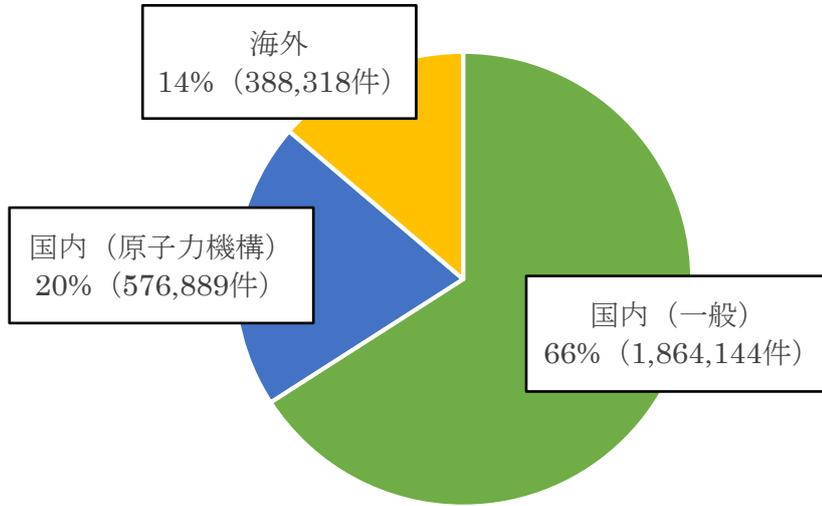


図 2.5.1-3 年間のアクセス件数内訳

2.5.2 使ってもらおう活動

i) 大学等に関わる利用

大学等の教育機関は、人材育成の観点でサマースクールによる利用やロボット研究開発の実験場として利用している。表 2.5.2-1 に利用実績を示す。

表 2.5.2-1 大学等の利用実績

No.	大学等名称	利用内容
1	東京大学	サマースクール
2	福島工業高等専門学校	サマースクール、第2回廃炉創造ロボコン
3	福島大学	水中グライダー用翼の運動試験、 水中翼の飛行試験・水中ロボット位置検出システム実験
4	東北大学	ステップフィールド ロボット走行試験
5	東京工芸大学	モックアップ階段 ロボット走行計測試験
6	東京工業大学	廃止措置に係る学生実験、日英共同研究プロジェクト
7	東洋大学	モーションキャプチャ ドローン飛行試験
8	福井大学	ロボット実習及びセミナー
9	会津大学	クローラロボットのモックアップ階段踏破試験

ii) 福島イノベーション・コースト構想に関わる利用

福島イノベーション・コースト構想⁶⁾の重点分野産業の裾野拡大、復興の加速化を進めるために実施されている福島県地域復興実用化開発等促進事業補助金の公募事業による利用が4件（企業3件、大学1件）あり、2017年度はそれらを含めて福島イノベーション・コースト構想に関連する利用が8件（企業4件、大学4件）あった。

iii) 産学連携コーディネーターによる利用促進

利用促進活動として、各種イベント、大学、研究機関及び企業（特に、視察されて試験装置に興味を持って頂いた企業等）に訪問し、檜葉センターの紹介及び施設利用の説明を実施した結果4件の利用が得られた。

活動の内訳は以下のとおり。

- | | |
|---------------|--------|
| 1) 大学・キャンパス訪問 | : 13 件 |
| 2) 公的機関訪問 | : 12 件 |
| 3) 企業等訪問 | : 5 件 |
| 4) イベント対応 | : 23 件 |

iv) 福島県内企業との協力

福島県内企業と屋内不要物解体撤去ロボット、水中ロボット、ドローンについて勉強会を行った結果、水中ロボットは「平成29年度地域復興実用化開発等促進事業費補助金」の公募に採択された。本事業を技術面から支援し、2017年度は3回（計20日間）檜葉センターの利用に繋げることができた。屋内不要物解体撤去ロボット及びドローンは企業間の具体的な協力・調整がつかなかったため、利用にはいたらなかった。

v) 原子力関係企業への情報提供

1F内において作業等を実施している業者等で構成される福島原子力企業協議会（2018年1月10日）約45社、安全衛生推進協議会（2018年1月25日）45社に対して、それらの定例会議の場において檜葉センターの紹介、資料配布等を行った。

vi) 地元自治体、工業団地への利用促進活動

施設利用相談会（2018年3月16日）に向けて、檜葉町、檜葉南工業団地企業各社（約20社）、広野町、広野工業団地（約25社）、富岡町等に紹介を行った。利用相談会当日は、13社24名（清水建設株式会社、パナソニック株式会社他）の参加を得た。

vii) 福島県内各市への利用促進活動

福島県内主要都市における産学官連携組織である、いわき産学官ネットワーク協会、郡山地域テクノポリス推進機構、福島市産学連携、産業サポート白河、株式会社ゆめサポート南相馬等に対して檜葉センターの紹介とともに、関係企業や大学等への紹介依頼を行った。今後とも情報交換や企業への情報提供の相互協力を継続的に進めることとした。

2.5.3 満足してもらった活動

i) 利用者の意見

2017年度には、64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（詳細は、付録4 施設利用者へのアンケート調査を参照）。

表 2.5.3-1 に施設利用者からの主な感想、表 2.5.3-2 に施設利用者からの主な意見・要望を示す。

表 2.5.3-1 施設利用者からの主な感想

利用目的	感想
試験	<p>今回はじめて利用させて頂きましたが、関係者の方々の親切な丁寧な対応のおかげで困惑することなく進めることができました。</p> <p>こちらの不備でご迷惑をお掛けするかたちとなってしまう申し訳ありませんでした。また、機会があるごとに利用させて頂きたいと思っておりますので、どうぞよろしくお願いいたします。</p>
会議	<p>いつも、丁寧に対応いただき感謝しています。また、訪問の度に異なった内容を用意していただいて参加者に大変好評を得ています。</p>
その他	<p>今回は弊社のロボット2種のデモンストレーションを行わせていただきありがとうございました。機器の最大限の性能を発揮でき、披露させて貰えたと思っております。また、立ち会われた原子力機構の職員の方々のご協力も多大にあつてのことだと感謝しております。</p>

表 2.5.3-2 施設利用者からの主な意見・要望

利用目的	意見・要望
試験	<p>モーションキャプチャの高さ方向の計測範囲が横方向に比べ狭いと感じました。せっかく計測用のやぐら（ゲージ）が高くセットアップされているのに、実は、その高さの半分程度までの範囲しか計測できないということが、もったいないように思います。モーションキャプチャの高さ方向の計測範囲も、左右・奥行方向と同様に広くとれると、ドローンのような空間移動するロボットの計測が容易に行えて便利になると感じました。今の計測可能高さの2倍はほしいと感じました。計測可能範囲が拡大すれば、計測を一度に広範囲に行えるので効率化が図れると考えます。</p> <p>是非とも、高さ方向の計測範囲の拡大（今の2倍）をご検討いただきたく、お願い申し上げます。</p>
試験	<p>GPS機能が微弱に思われるので、改善の方向で検討して頂きたいと思います。</p>
試験	<p>今回、2回目の利用となりますが、改めて気づいたことを書かせていただきます。</p> <p>① 水槽上部への実験機材の運搬がかなり大変と感じました。機材を小分けにすればよいのかもしれませんが、それでもアクセス階段は比較的狭く・急です。ホイストがありますので、あれを活用するなどして、上まで荷物を上げられると便利かと思いました。</p> <p>② 添付のような、水中でのモーションキャプチャが販売されています。これを水槽に設置していただくと、他にはないとても有用な設備になるように思います。是非、ご検討いただければと思います。</p> <p>なお、小型の作業台を設置していただきありがとうございました。とても便利でした。</p>
試験	<p>借用できる機材・工具類の一覧があると、分かりやすい。</p>
試験	<p>利用料金について、長期の試験場利用時に土日や年末年始など試験を実施しない休日にも、利用料金が課金されますが、できれば割引などいただけると助かります。</p>
試験	<p>破格の利用料金と思います。今後もこの利用料金体系を維持していただけますとありがたいです。</p>
試験	<p>正直に申し上げますと、利用料金は割高に感じた。しかし福島県近傍で同じ条件で利用できるエリアを探す時間がなく、速やかに対応頂けたためとても助かりました。</p>

ii) 利用相談会での意見

2018年3月16日に実施した施設利用相談会参加者からの意見を表 2.5.3-3 に示す。

表 2.5.3-3 利用相談会参加者からの主な意見

項目	意見
参加した感想	<ul style="list-style-type: none"> ・ 今後デブリの取り出しに向け VR システムの技術を生かし、線量低減するための作業計画を検討する必要があるため、今回の相談会にとっても満足しました。 ・ システムが良い。 ・ それぞれのデモが有り、実感できた。 ・ ロボットの動きを見たかった。 ・ 水槽のカメラが不十分。
本施設を利用したいか（今後3年間程度の期間）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 現状、VR システムで1号機内が確認できれば最適だと思料します。 ・ VR シミュレータを現場の現状把握のツールとして活用することは考えられる。ただし、表示用データや活用方法について検討しないと何とも言えない。 ・ 業務上必要性が出てきた段階でご相談させていただきたい。 ・ 遠隔地のため、コスト面含めて来年度の取組みの中でご相談させて下さい。 ・ 様々な方々にも、素晴らしい施設があるということを共有していきたい。
その他、意見・感想	<ul style="list-style-type: none"> ・ VR システムは説明でもありました通り、デブリ取り出しに向け、非常に役立つものだと改めて感じました。1号機～4号機の内部調査を1日でも早く終え、施工計画の基となることを期待しております。 ・ 原子力機構と共に装置の開発が行えれば。

iii) 利用者の意見に基づく設備の改良

利用者アンケート及び利用者からの直接の意見を踏まえ、試験設備等の充実・改善を実施した。意見と原子力機構の対応を表 2.5.3-4 に示す。

表 2.5.3-4 利用者からの設備改良に関する意見と原子力機構の対応

No.	利用者の意見	原子力機構の対応
1	モーションキャプチャにおけるドローン飛行でもっと高く飛ばして計測したい（現行高さ 2 m の 2 倍位）。	モーションキャプチャのカメラ位置変更治具を購入しカメラ位置変更を可能とし、高さを 2 m から 5 m と計測範囲を広げた。
2	水槽上部に水槽の真ん中までアクセスできる張り出し台があると良い。	ロボット試験水槽内の上部に橋げたを設置し、真ん中までアクセス可能としロボットの動作・位置確認を容易にした。
3	水槽内にスケールがあると位置確認などに便利である。	試験水槽内の縦と底面にスケール板を取り付け、位置確認を容易にした。
4	利用申請システムの利用操作の利便性向上してほしい。	一時保存及び過去申請書の読込機能や複写機能を追加するなど、システムの改良を実施した。
5	水槽試験について、容易に濁水試験の事前検証などができる環境がほしい。	塩ビで簡易水槽を製作し濁水試験の事前検証及び各種試験に応用可能とした。
6	モックアップ階段でのロボット走行における動作計測が可能にしてほしい。	モックアップ階段に可搬型モーションキャプチャを導入し動作計測を可能にした。

3 遠隔基盤技術開発

檜葉センターでは、施設の利用価値を高めるための遠隔基盤技術の開発研究も行ってきた。遠隔技術による廃炉作業を支援するための技術開発として、ロボットシミュレータについてはこれまでに開発した機能の高度化と檜葉センターの設備との連携を目的に、VR システムと連携させた 3 次元可視化補助システム、モーショキャプチャシステム、マルチコプタや通信障害等の模擬機能を実装した。また、ロボット試験場の整備として、1F 原子炉建屋の作業環境を構成する材質等に注目して試験場の設計・開発を行うとともに、PCV 内へのアクセスルートを模擬した試験場の開発・拡張を行った。一方、VR システムでは、1F の環境データ整備として 2 号機 PCV 内部（事故前）及び原子炉建屋 1 階通路部（事故後）、PCV 貫通部（事故前）部分等を整備した。

3.1 ロボットシミュレータ

3.1.1 開発目標・年度目標

檜葉センターでは、1F 廃炉作業を支援する遠隔技術開発として、オペレータのロボット操縦技能の向上・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（以下、「シミュレータ」と略す。）を開発している。2016 年度までに Choreonoid^[5]をプラットフォームとしたシミュレーションシステムの構築、当該システムで動作する水中・空中での物理運動を模擬するプラグイン（Choreonoid の拡張機能）・ガンマカメラを模擬するプラグイン等の拡張機能の実装及び当該システムと有線 LAN 接続して使用できる通信障害模擬装置の製作を行った。これまでのシミュレータの開発によって、陸地を走行するロボット、水中を遊泳するロボット及び空中を浮遊するロボットのシミュレーションが可能となり、さらにそれらと合わせて通信状態が悪い状況下でのロボット操縦の試行を模擬することや放射線環境下でロボットが受ける放射線量を簡易に計算することが可能となった^{[7][8]}。

2017 年度は、これまでに開発したシミュレータの機能の高度化と檜葉センターの設備との連携を目的に、シミュレータとモーショキャプチャシステムを連携させたモーショキャプチャプラグイン開発と、VR システムと連携させた 3 次元可視化補助システム開発を行った。さらに、これまでの開発知見に基づいてマルチコプタシミュレーションプラグインの使用方法・設定方法の改良と、通信障害模擬装置の機能を Choreonoid の拡張機能として組み込む通信障害シミュレーションプラグインについて研究開発を行った。

本節では、2017 年度に実施した各種プラグイン及び 3 次元可視化補助システムの開発について述べる。

3.1.2 年度成果

3.1.2.1 モーショキャプチャプラグイン開発

檜葉センターでは、実機ロボットの運動計測用に光学式モーショキャプチャを設置している。光学式による計測では、計測対象物に運動計測の目印となるマーカと、そのマーカの運動を捕捉

するための複数台のトラッキングカメラを使用して、時系列的な計測対象物の座標を記録する。このカメラの配置と計測対象物へのマーカの取付け位置は運動計測において、計測の範囲と精度に影響を及ぼす可能性があるため、特に精度を必要とする計測においては、十分な調整が必要である。しかしながら、この調整作業は計測範囲や計測対象物に合わせて、試行錯誤的に行う必要がある。特に視野角を考慮に入れたトラッキングカメラの配置は完了までに時間がかかる場合がある。そこで、目的とする計測内容に適したトラッキングカメラの配置を事前に検証する機能をシミュレータに導入するために、モーションキャプチャプラグインを開発した。

本プラグインでは、シミュレータに実装されているカメラ機能を利用して、トラッキングカメラを模擬したカメラモデルをシミュレーション空間内に自由に配置できるものとした。また、マーカは、計測対象とするロボットモデルの任意の点に設定可能とした。シミュレーション時は、配置したトラッキングカメラの視野角内にマーカが存在するかを探索し、続いてマーカが存在する時、トラッキングカメラとマーカ間に他の物体が存在するかを探索することで、物陰に隠れていない全てのマーカをトラッキングカメラが捕捉する仕組みとなっている。本プラグインの開発によって、事前にシミュレーションでのトラッキングカメラの配置検討及び検証が可能となり、試行錯誤的となっていた調整作業の効率化が図られた。

3.1.2.2 ロボットシミュレータの3次元可視化補助システム開発

シミュレーション用モデルデータの製作では、ロボットや環境を構成するパーツや物体をモデルデータファイルに一行ずつ書き込んで設定する。この時、事前に設計した寸法を正確に設定している場合でも、実際にどのような形状となっているのか、どの程度の大きさとなっているのかを把握したい場合がある。また、ロボットの操縦技能向上を目的とした訓練にシミュレーションを利用する場合においては、シミュレーション空間における操縦ロボットの位置・姿勢や周辺環境との関係を実物大で確認することで、操縦ミスや周辺環境の変化によって発生すると考えられるアクシデントの直感的な理解につながる。シミュレーションの様子は、市販の3Dモデリングソフトやゲームと同様に平面モニターに映像としてのみ出力されるため、その表示方法の制約上、ユーザが確認できるのはシミュレータ画面内に表示可能なシミュレーション空間の一部のみとなっていた。

そこで、楢葉センターの設備であるVRシステムとシミュレータを連携させて、シミュレーション空間内の状況を3次元的かつ実物大で確認できるシステムの開発を行った。図3.1.2.2-1は、VRシステム、シミュレータ及び本システムの関係的模式的に表したものである。VRシステムへの3次元投影には市販のソフトウェアであるEasyVR[®]を利用し、シミュレータに搭載しているGPU（Graphics Processing Unit）からの空間描画の情報を取得することでVRシステムへの投影を可能としている。図3.1.2.2-2は、実際にシミュレーション空間をVRシステムに投影し、ロボットを操縦している様子を示している。本システムの開発によって、シミュレーション空間の実物大3次元表示が可能となり、シミュレーション中のロボットや周辺環境の状態の直感的な把握が可能となった。

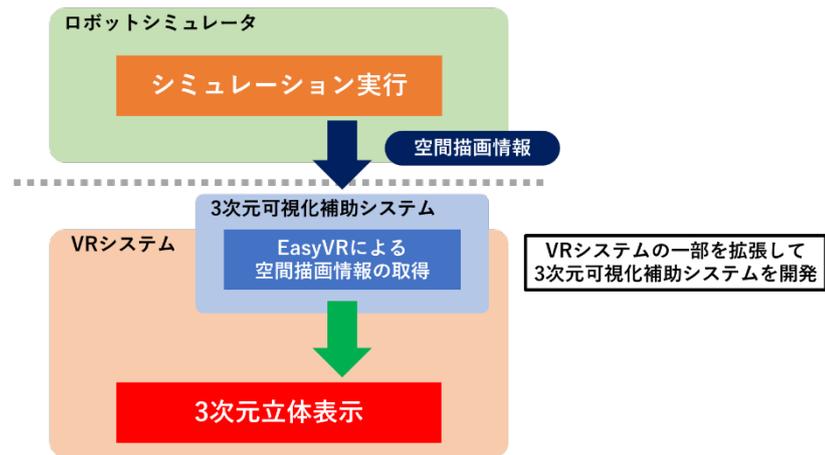


図 3.1.2.2-1 3次元可視化補助システムの模式図

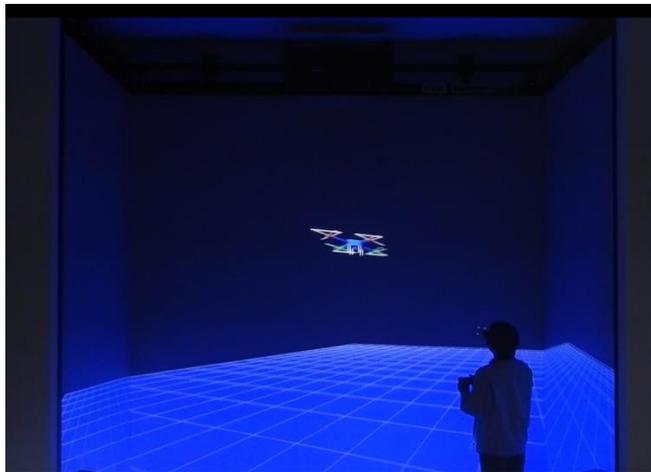


図 3.1.2.2-2 3次元可視化システムを利用したロボット（マルチコプタ）操縦の様子

3.1.2.3 マルチコプタシミュレーションプラグイン開発

マルチコプタは、プロペラの回転によって得られた推力とロータ回転トルクの反作用を利用して飛行する。2016年度は、飛行体の遠隔操縦を模擬するために、ロータの推力・トルクを生成するデバイスと、飛行中にボディが受ける流体（空気）による浮力・付加質量等の影響を運動に反映させる機能をシミュレータに組み込んだ⁸⁾。それらの機能のうち、ロータを模擬する機能について、ユーザが任意に付加情報を記述できるYAML（ファイル拡張子：yaml）と呼ばれるファイルにロータの設定を記述し、ロボットモデルを定義するVRML（ファイル拡張子：wrl）と呼ばれるファイルにマルチコプタの形状を定義するものとしていた。この設定の記述方法は、ファイルが2つに分かれていることによって、マルチコプタの形状を定義したVRMLファイルを編集せずにYAMLファイルを追加製作するのみでシミュレーションを実施できる。一方で、ファイルが分かれていることによってモデルファイルの可読性が悪く、また独自の記述書式であったためChoreonoid本来の記述書式に合わせてロータの設定をモデルファイルに体系的に記述できないという課題があった。そこで、2017年度は、前年度までに開発した空中運動模擬プラグインのロータ設定の記述方法を改良し、1つのファイルにマルチコプタの形状とロータの設定を記述でき

るものとして、マルチコプタシミュレーションプラグインを開発した。

ロータの設定を体系的に記述するためには、ロータの機能を Choreonoid に組み込むことが必要である。Choreonoid にはユーザが追加実装するための多様な機能が標準的に搭載されているが、その1つとしてセンサやアクチュエータを模擬するデバイスと呼ばれる機能がある。デバイスは、ロボットモデルを定義した VRML または Body (ファイル拡張子: body) ファイルに設定を記述し、さらにシミュレーション中はデバイスごとの API (Application Programming Interface) を通じて数値情報の入出力が可能である。Body ファイルとは、Choreonoid に新たに導入されたロボットモデルを簡易かつ体系的に記述できるファイル形式であり、YAML ファイルの記述方法を踏襲した独自形式のファイルである。そこで、ロータの機能を推力・トルクの入出力を行う API をもつデバイスとして追加実装し、Body ファイル形式のモデルファイルへのロータ設定の記述を可能とした。本プラグインの開発により、これまで別ファイルに記述していたロータ設定がマルチコプタモデルファイルに直接記述可能となった。また、1つのモデルファイルにロータを含む全ての設定が記述可能となったことでモデルファイルの可読性が向上し、設定パラメータを容易に確認・編集可能となった。

3.1.2.4 通信障害シミュレーションプラグイン開発

1Fの廃炉作業では、ロボットの遠隔操縦は、通信品質の観点から有線通信を介して行われている。しかしながら、伝送経路が長くなる場合、情報伝達に遅延が生じることがある。また、線量率の高い区域では、ロボットに搭載している機器類が動作不良を起し、正常に通信できないことが考えられる。以上のことから、2016年度までに通信障害模擬装置を開発し、ロボットを遠隔操縦する遠隔操作システムでの通信障害(通信遅延・帯域制限・パケットロス等)を模擬するシステムの構築を行った^[7]。開発した図 3.1.2.4-1 中央に示す通信障害模擬装置は、シミュレータ本体計算機(以下、「サーバ」と略す。)の演算負荷の影響によって正確に通信障害の効果を与えることができなくなる可能性を考慮して、サーバから完全に独立した設計としていた。しかしながら、利便性の観点からするとサーバと通信障害模擬装置が完全に独立していることで、シミュレーションの内容と併せて通信障害模擬効果の設定値を保存できないために、毎回個別に設定し直す必要があることやシミュレーションと連動した通信障害の模擬ができないこと等が課題となっていた。そこで、通信障害効果の設定を操作・保存でき、シミュレーションと連動して動作させるために、通信障害模擬装置の機能をベースとした通信障害シミュレーションプラグインを開発した。



図 3.1.2.4-1 通信障害模擬装置使用時のシステム構成例

本プラグインは、サーバとネットワーク接続されたクライアント計算機（以下、「クライアント」と略す。）間の送信・受信双方向の通信をサーバ側のみで制御して、通信障害（通信遅延・帯域制限・パケットロス）が発生している状況を模擬するものとした。図 3.1.2.4-2 は、通信障害シミュレーションプラグイン使用時のシステム構成例である。通信の制御には、Ubuntu Linux 上で Choreonoid を使用することを前提として、Linux 用のネットワーク設定ツールである iproute2 の tc (traffic control) コマンド^[10]を Choreonoid の物理計算エンジンと連動するサブシミュレータによって実行することで実装することとした。サブシミュレータとは、Choreonoid に組み込まれている機能で、物理計算機能を補足して多様なシミュレーションを付加的に行い、加えてシミュレーションに使用する設定値の画面上での入力と設定値のプロジェクトファイルへの書き込みが可能なものである。しかしながら、tc コマンドをそのまま利用する場合、外向きの通信のみ制御でき、内向きの通信の制御を行うことができない機能的な制約があった。ここで、外向きとはサーバがパケットを送信する方向、内向きとはサーバがパケットを受信する方向のことを示す。

そこで、本プラグインでは iproute2 に加えて、IFB (Intermediate Functional Block) ^[11]と呼ばれるモジュールを使用し、tc コマンドと組み合わせることで内向きの通信制御を実装することとした。図 3.1.2.4-3 は通信障害シミュレーションプラグインの処理の模式図を示している。表 3.1.2.4-1 は、本プラグインで使用する主な tc コマンドである。

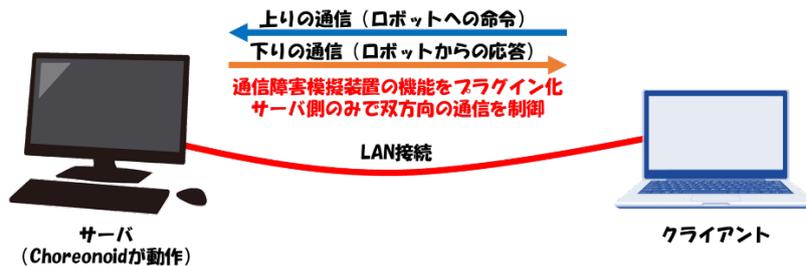


図 3.1.2.4-2 通信障害シミュレーションプラグイン使用時のシステム構成例

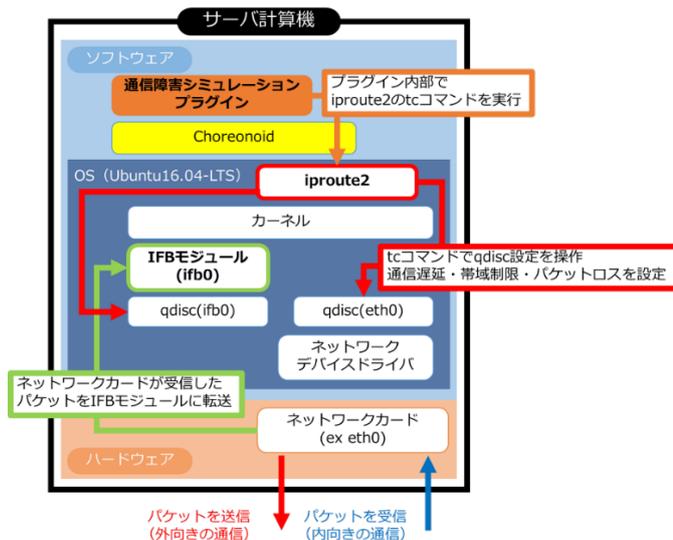


図 3.1.2.4-3 プラグイン内処理の模式図

表 3.1.2.4-1 設定可能な通信障害コマンドの概要

コマンド	単位	設定内容
delay	[ms]	パケットを送信するタイミングを指定した時間分、遅延させる。
rate	[kbit/s]	帯域幅が指定した値になる。
loss	[%]	送信するパケットを指定した割合で廃棄する。

以上の仕組みをサブシミュレータに組み込み、シミュレーション開始時に一度だけ tc コマンドを実行させることで、通信障害効果を Choreonoid 上から付加することが可能となった。また、サブシミュレータの機能を利用して、通信障害効果の設定値をシミュレーションの設定内容を保存する Choreonoid のプロジェクトファイル（ファイル拡張子：cnoid）に書き込む仕組みを取り入れて、シミュレーションの内容ごとに設定値を入力しなおす操作を省略することが可能となった。

さらに、本開発では ping と呼ばれるネットワークの疎通を確認するツールを利用して、本プラグインで設定した上りの通信遅延時間の設定状況を計測・集計した。表 3.1.2.4-2 にその集計結果を示す。表 3.1.2.4-2 から、本プラグインによって設定値にしたがって通信障害の効果が反映されていることを確認した。また、標準偏差が設定値を大きくするごとに大きくなる場合があることが確認された。この事象についてはシミュレーション時の計算負荷が影響していることが考えられるが、今後の改良に向けて調査を行っている。

最後に、3.1.2.3 及び 3.1.2.4 で述べた内容は、福島県公募事業の「模擬プラント用ロボットシミュレータ開発業務」の一環として、2017 年度に檜葉センターが株式会社 FSK より委託を受け実施したものであることを追記する。開発したプラグインは、Choreonoid の Git リポジトリ (<https://github.com/s-nakaoka/choreonoid.git>) にて公開中である。

表 3.1.2.4-2 上りの通信遅延時間の集計結果

設定値 [ms]	最小値 [ms]	平均値 [ms]	最大値 [ms]	標準偏差 [ms]
none	0.16	0.264	0.299	0.023
0	0.172	0.254	0.297	0.022
1	1.175	1.289	1.359	0.044
10	10.177	10.29	10.339	0.121
100	100.192	100.297	100.367	0.316
1000	1000.169	1000.275	1000.328	0.392

3.1.3 今後の課題

本節では、シミュレータの機能高度化・檜葉センター設備との連携として開発したモーショキャプチャプラグインと 3 次元可視化補助システム、並びにマルチコプタシミュレーションプラグイン及び通信障害シミュレーションプラグインについて述べた。今後は、これまでに開発したシステム・プラグイン・装置を活用して、1F の原子炉建屋内での作業を模擬するコンテンツの拡充、さらに複数ロボットを同時に動かすことができるシミュレーション環境の構築を進めていく予定である。

3.2 原子力災害対応用ロボットの標準試験法

3.2.1 開発目標・年度目標

本開発の目的は、原子力施設における緊急時や事故後の廃炉作業に用いられる遠隔操作型ロボットの性能やオペレータの操作習熟度を評価するための標準的な試験方法を開発することである。

1F で発生した事故直後からロボット等の遠隔機器が原子炉建屋内に展開^{[12][13]}されており、その作業結果やそれを記録したビデオ等から作業環境が非常に複雑であることが分かっている。長期間に渡ることが予想されている廃炉作業が効果的に推進されていくためには、要求タスクへの対応可能性を判断するためのロボット性能の評価、オペレータの操作習熟訓練等が必要となってくる。これに関わる技術開発の先行例として、NIST が開発、提案を行っている NIST-STM^[4]があり、このうちの試験法の幾つかが実際にロボット競技会等のタスク環境として取り入れられている。

檜葉センターでは、廃炉作業推進のためにロボット性能やオペレータ技能について事前評価を行う環境や方法を提供する NIST-STM の考え方を取り入れることは重要であると考え、原子力災害時に利用されるロボット等遠隔機器のための標準的な試験場及び試験法について研究開発を行っている。

2017 年度は、前年度に設計・開発を行った原子炉建屋内で調査や情報収集を目的とした遠隔操作型の走行ロボット用の試験場について、特に原子炉建屋でロボットが走行、作業する環境を構成する材質等に注目して設計・開発した。具体的には、検証用ロボットによる開発プロトタイプの試験場での走行試験を行い、試験法立案についての検討を行った。また、前年度に開発を開始した PCV 内部アクセスのための貫通孔等を模擬した配管型試験場についても引き続き開発、拡張を行なった。

3.2.2 年度成果

2016 年度に開発を行った調査や情報収集のための走行型遠隔ロボットの試験場に追加して、原子炉建屋内に多く見受けられる縞鋼板やグレーチング路面を模擬した試験場の設計・開発を行った。NIST-STM の試験場は、一般に入手や加工がしやすい木材を用いて試験場を構成している。しかしながら、原子力災害対応ロボット、特に調査・情報収集のための走行型ロボットの試験場を考えた場合、路面の材質は幾何学的な形状と共に走行性能や操作性に影響を与えるため、この点を考慮してグレーチングや縞鋼板による試験場の開発を行った。図 3.2.2-1 左上はそのプロトタイプを示しており、グレーチングのモジュールは鉄製の枠にグレーチング板を設置したもの(路面寸法 600 mm×1,200 mm)となっている。鉄製の枠は 2 種類の高さ(320 mm、160 mm)を基準として高さ調整(±35 mm)が可能となるものを設計し、平坦な走行環境のみならず組み合わせで段差走行環境を構成可能とした。また、この試験場はグレーチングの隙間の中にナットを設置して、縞鋼板をボルト固定できるようにすることで、表面を縞鋼板に変更することができるようにも設計した。図 3.2.2-1 右上にグレーチング上に縞鋼板を設置した試験場を示す。これらは、前述の NIST-STM との互換性を考慮に入れてサイズ設計を行った。グレーチングと縞鋼板の路面や段差の走行環境を組み合わせることも可能とした。図 3.2.2-1 下は縞鋼板によるスロープ型試験場を示す。NIST-STM のスロープ型試験場の寸法を参考に、素材を原子炉建屋内

で見受けられる縞鋼板にして製作した。大小2つのタイプを開発し、どちらも傾斜角は 15° 、幅は1,200 mm、斜面長さは大が1,200 mm（両端高低差339.7 mm）、小が600 mm（両端高低差179.7 mm）とした。図3.2.2-2は、検証用サブクローラ付き移動ロボットによって、開発した試験場を組み合わせた環境において試験走行を行っている様子を示す。現在、開発した試験場を用いたPCV周辺のキャットウォークと呼ばれる手摺り付きグレーチング通路での情報収集タスクを模擬した試験法について検討をしており、モーションキャプチャによるロボットの動作計測や試験遂行時間等に基づいて課題設定の妥当性について検証を行っている。



図 3.2.2-1 開発したグレーチング・縞鋼板を用いたロボット走行用試験場

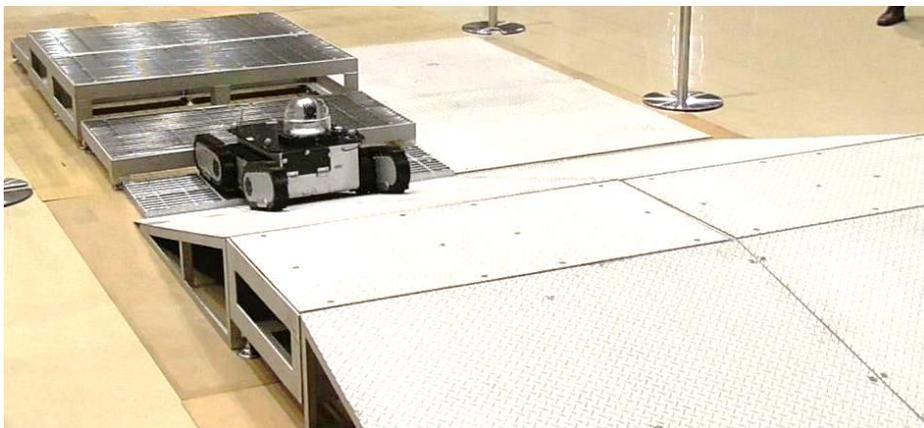


図 3.2.2-2 グレーチング・縞鋼板を用いた試験場でのロボット走行の様子

また、2016年度から開始したPCV内部調査の本格化を踏まえた配管型試験場について開発を継続した。PCV内部アクセスは、調査用遠隔機器がPCV貫通孔（ペネトレーション）の金属管状箇所もしくは、ペネトレーション部に新たに設置した貫通孔を経由して実施されている^{[14][15][16]}。2016年度においては、現場で利用されている上述のペネトレーションやガイドパイプ等の寸法を参考に配管モジュールを試作した（JIS規格の配管用ステンレス鋼管の口径550A、150A、100Aに相当。材質はSUS304）。これに加えて2017年度は、廃炉現場を想定した試験内容に応じて多様な環境を設定する必要があることから、配管モジュールを組み合わせることで多様な配管や貫通孔の試験環境を実現するための周辺機器の開発を行った。具体的には口径150A、100Aタイプの配管モジュール（各モジュールの長さは1,000mm）の設置高さや相互に接続することで配管長さを調整するために図3.2.2-3左に示す配管モジュール専用の架台を設計開発し、図3.2.2-3中央、右のような貫通孔模擬試験場を組み立て可能とした。配管モジュールに取り付けたフランジと架台設置用のプレートを用いて、配管モジュール中心の接地面からの高さを300mmから1,800mmまで、100mm刻みで高さを設定可能となっている。1F1号機^[14]、3号機^[15]では、小口径の貫通孔を通じてPCV内へロボットを展開して調査作業を実施しており、開発した配管モジュールと上述のグレーチングや縞鋼板モジュールを組み合わせることで図3.2.2-4左に示すように1号機PCV内アクセス環境の模擬ができ、また配管モジュールとプールを組み合わせることで図3.2.2-4右に示すように3号機PCV内アクセス環境の模擬を行うことができる。これに対して、2号機^[16]では、貫通孔部からロボットを挿入後、制御棒駆動機構（以下、「CRD」と略す。）交換用レール上を移動し、堆積物除去作業を実施した後にPCV内にアクセスをしている。そこで、2号機PCV内アクセス環境を模擬した試験環境の整備を目的として、新たに貫通孔とCRDレール部を組み合わせた試験場の設計・開発を行った。開発した試験場を図3.2.2-5左に示す。施策した試験場ではX-6ペネトレーションに小口径の貫通孔を通した環境を模擬しており、小口径貫通孔部には口径150A、100Aタイプの配管モジュールが設置可能である。図3.2.2-5左ではCRDレール部の長さは3mの例を示しているが、多様な試験条件に対応するためには、このレール部分の延長、縮小が必要になる。そこで、これを実現するために、レール部分の長さ0.5mのプレート状のパーツを接続することで構成した。レール部の傾きは、レール支持部への取り付け高さを調整することで15°、19°、24°に設定が可能である。また現在、CRDレール部と上述のグレーチング試験場を組み合わせた環境を設定し、図3.2.2-5右に示すように、レール斜面とグレーチング面をロボットで走行する試験法について小型の移動ロボットを用いて検討を行っている。



図 3.2.2-3 配管型試験場の構成例

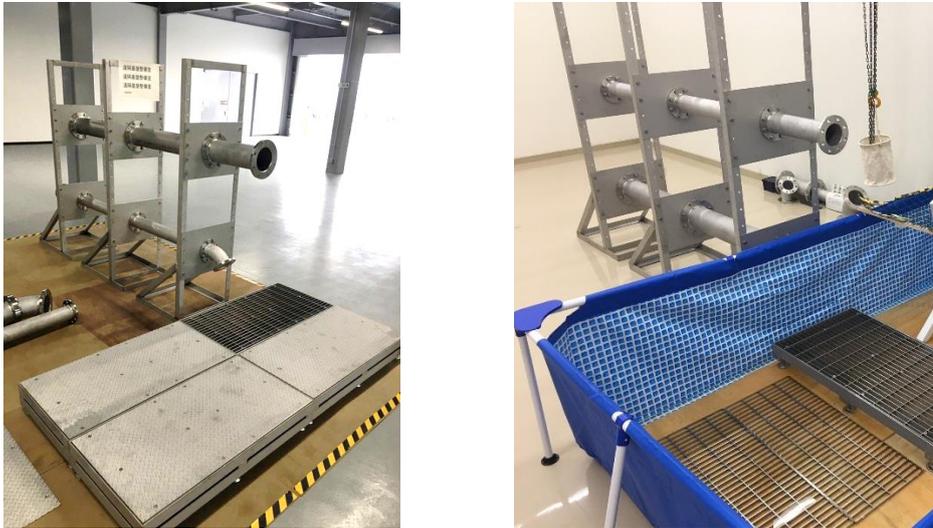


図 3.2.2-4 PCV 内へのアクセスを模擬した配管とグレーチングを組み合わせた試験場の例



図 3.2.2-5 貫通孔と CRD レール部を模擬した試験場

3.2.3 今後の課題

2017年度の開発により、原子炉建屋内の走行路面環境を模擬する試験場やPCV内調査用ロボットの導入環境を模擬する試験場の開発を行った。今後試験場の開発としては、PCV内アクセスルートである配管／貫通孔周辺部分からのロボット挿入・移動、グレーチング路面上の移動、冷却水等の水中での移動といった燃料デブリ調査で必要となるプロセスを総合的に試験する環境を設定するために開発を継続する予定である。また、現在検証中である試験法案について基本課題を設定し、ロボット開発者等に情報を提示していく予定である。これにより、専門家の意見のフィードバックや実施試験結果に基づいてより妥当かつ実際的なものへと改良していく。

3.3 VR システム

3.3.1 整備目標・年度目標

VRシステムは、廃炉作業に係る効率的な作業計画の検討や作業訓練を支援することを目的とし、没入型のVRシステムとして2015年度から開発・整備を行っている。本システムは、1Fの廃炉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。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より、施設の構造に対する理解度の向上やPCV下部の補修作業等に対する教育や訓練が可能である。VRシステムの機能を最大限に活かすためには、1F1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。これらの環境データを整備し、廃炉作業を効率的に進めるのに必要な作業計画の検討を支援することを目標とする。

2017年度は、1F2号機原子炉建屋からPCV内部へのアクセスを含めた調査等の作業計画の検討を支援するために必要な環境データの整備を行った。

3.3.2 年度成果

2017年度は現在実施されている1F2号機内部調査^[17]等をより効率的に実施できるようにするため、1F2号機原子炉建屋躯体部全域（事故前）、1階西側通路部（事故後）、PCV内部第2層の一部区画、PCV貫通部（事故前）の3D-CADデータを追加整備した。これにより図3.3.2-1に示すような原子炉建屋内からペネトレーションを通り、PCV内部を調査するという一連の流れを3D-CADデータ上で確認することが可能となった。

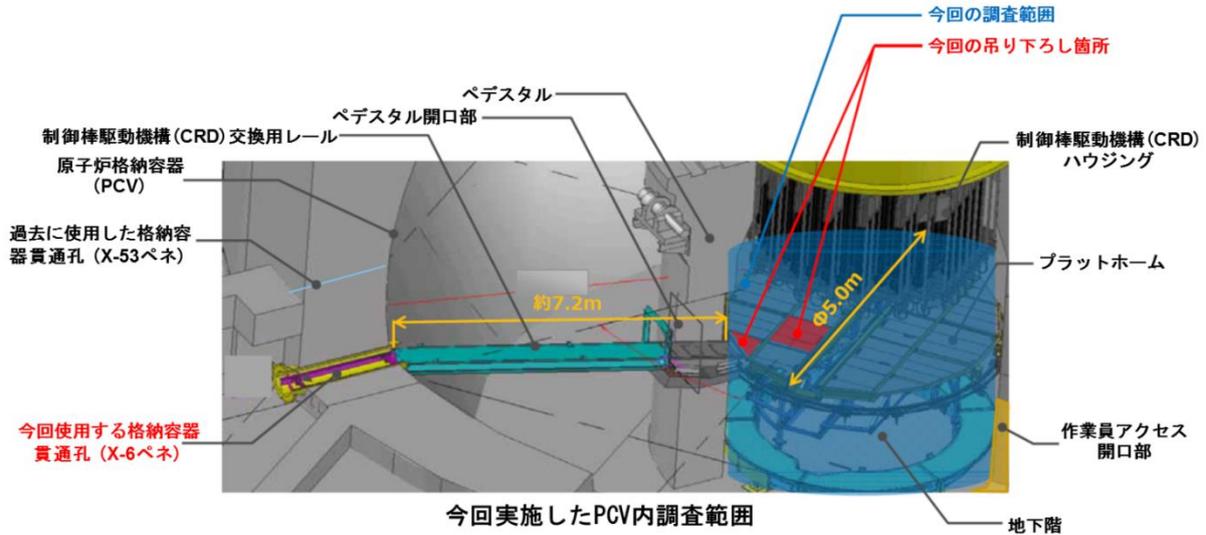


図 3.3.2-1 1F2 号機 PCV 内部調査^[17]時のアクセスルート
 (出典：東京電力ホールディングス株式会社)

3.3.3 今後の課題

これまで環境データの整備は既に計測されている点群データをもとに 3D-CAD を作成、その後 3D-CAD データから VR コンテンツを作成という手順を基本として進められてきた。しかし、従来の方法では点群データの計測後、VR システムへ反映されるまでの作業期間が長く、今後内部調査が行われた際、これまでの作業フローではリアルタイムに進んでいく内部調査に環境データの整備が間に合わない可能性がある。そのため、今後環境データを整備する際には従来の方法とは異なる方法で進める必要がある。これらの問題に対処するため、現在内部の作業環境を更新し、内部調査結果を迅速に環境データとして整備可能な体制を構築できるよう計画 중이다。

4 原子力緊急事態支援用遠隔操作資機材の整備と運用

2012年10月から実施している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に加え、2017年度に行われた法令改正への対応として、原子力機構内7施設（後述）から選出された要員に対する訓練及び、楢葉センター内の要員に対する訓練業務を開始した。

4.1 原子力災害対策特別措置法及び同法「計画等命令」の改正と原子力機構の対応

原子力災害対策特別措置法及び同法「計画等命令」第2条第2項第7号の改正が、2017年10月30日に実施された。この対応のため原子力機構は、原子力機構内の対象の5拠点7施設（原子力科学研究所（以下、「原科研」と略す。）研究用原子炉 JRR-3（以下、「JRR-3」と略す。）、核燃料サイクル工学研究所（以下、「核サ研」と略す。）東海再処理施設（以下、「再処理」と略す。）、大洗研究所（以下、「大洗研」と略す。）材料試験炉 JMTR（以下、「JMTR」と略す。）、同高温工学試験炉 HTTR（以下、「HTTR」と略す。）、同高速実験炉常陽（以下、「常陽」と略す。）、高速増殖原型炉もんじゅ（以下、「もんじゅ」と略す。）、新型転換炉原型炉ふげん（以下、「ふげん」と略す。））について、原子力事業者防災業務計画（以下、「防災業務計画」と略す。）の改訂を行い、楢葉センターに遠隔操作資機材（以下、「遠隔機材」と略す。）の整備と運用を行う原子力緊急事態支援組織*（以下、「支援組織」と略す。）を設置した。支援組織の遠隔機材の運用体制を図 4.1-1 に、遠隔機材による現場対応のイメージを図 4.1-2 に示す。

* 原子力緊急事態支援組織（原子力事業者防災業務計画より抜粋）

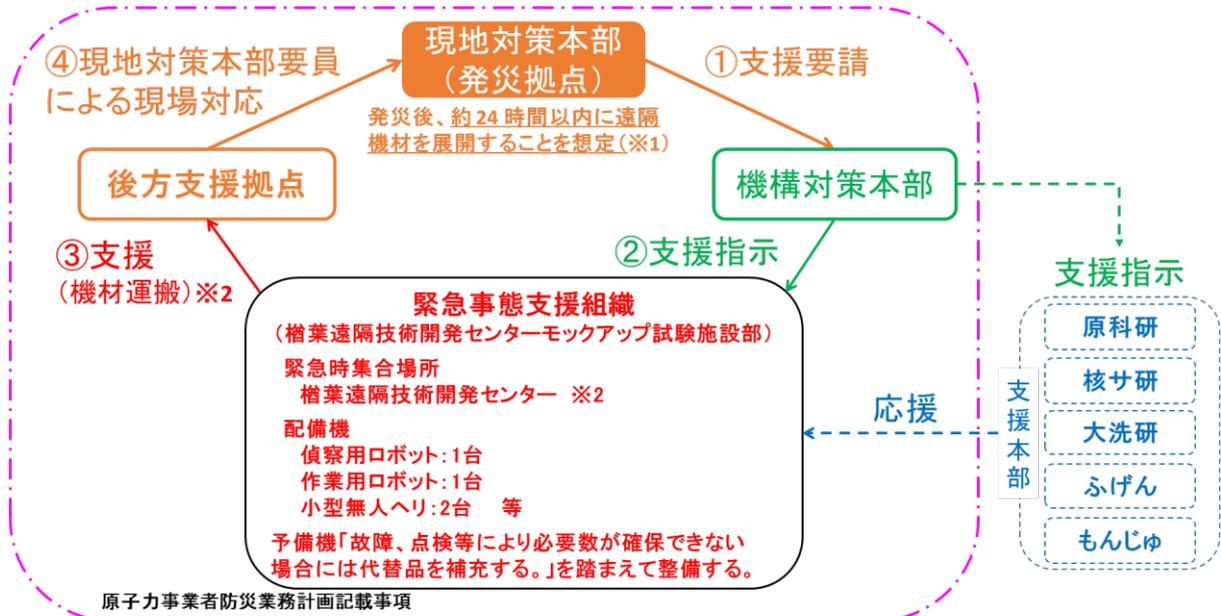
原子力災害対策特別措置法及び同法「計画等命令」第2条第2項第7号に規定する「放射性物質による汚染により原子力事業所災害対策に従事する者が容易に立ち入ることができない場所」において、当該対策を実施するために必要な遠隔操作が可能な装置その他の資材又は機材を管理し、原子力災害が発生した事業所への支援を行う組織をいう。

1) 平常時の主な業務

遠隔機材の集中管理、遠隔機材の機能向上及び拡充、遠隔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及び発災事業者への支援内容

原子力災害発生時は、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、遠隔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）の後方支援拠点へ要員を派遣することになっている。また、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遠隔機材操作員へ引き渡すことになっている。



- ※1 発災後、初期対応があっても事象拡大して作業員立入不可の線量になる迄、1F事故及び他事例(独12h、仏24h)より24時間程度と想定。
- ※2 陸上輸送を基本とし、自衛隊の輸送機等でも輸送できるよう、一度に輸送する機材の重量や大きさなどに配慮している。

図 4.1-1 支援組織の遠隔機材の運用体制

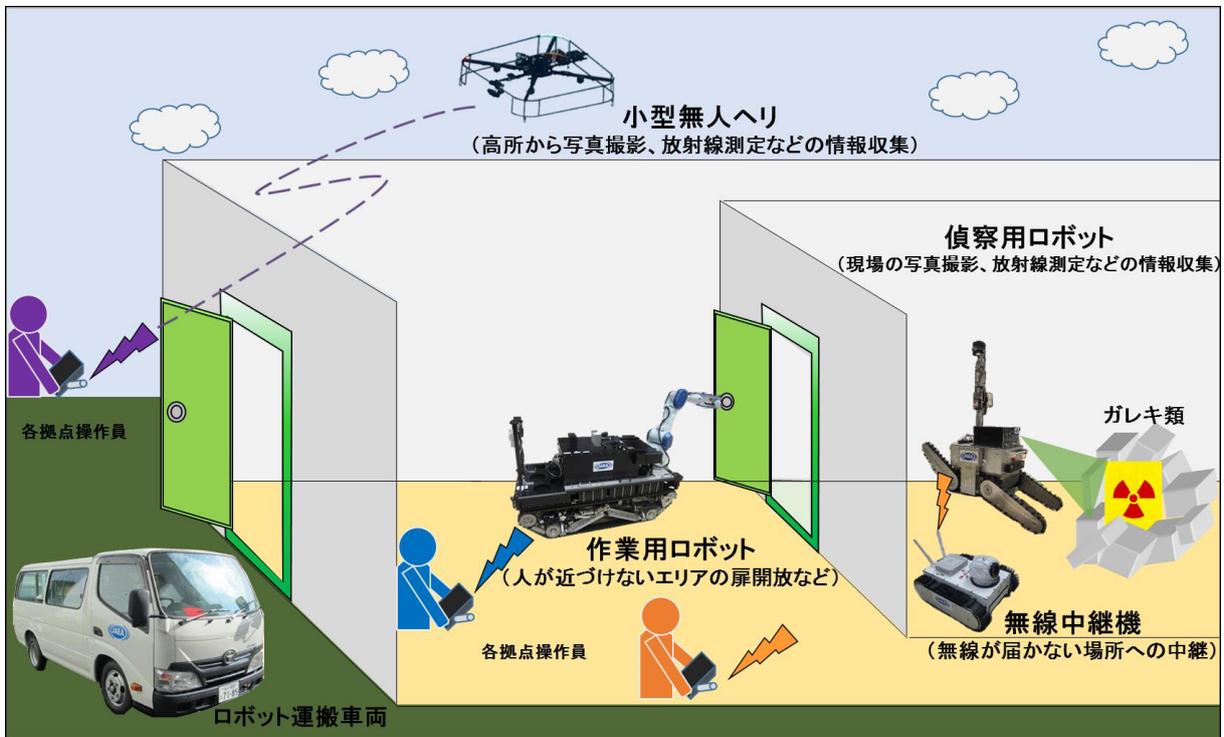


図 4.1-2 遠隔機材による現場対応のイメージ

防災業務計画では、2020 年度から支援組織の本格運用を開始するとし、本格運用時の遠隔機材等の保有数量を明記している。防災業務計画に記載の遠隔機材（本格運用時）を表 4.1-1 に示す。また、保有数量の根拠及び予備機材について、同表の下に示す。なお防災業務計画では、本報告書における遠隔機材を資機材と称している。

表 4.1-1 防災業務計画に記載されている遠隔機材一覧（本格運用時）

分類	名 称	数量	保管場所
遠隔操作 資機材	偵察用ロボット（現場撮影、放射線測定）	2 台	試験棟の一部及び 付属建屋の一部、車 庫の一部、倉庫の一 部
	作業用ロボット（障害物撤去等）	2 台	
	小型無人ヘリ（高所からの偵察）	2 台	
現地活動 用資機材	作業用資機材	1 式	
	一般資機材	1 式	
搬送用車両	資機材等搬送用車両	2 台	

※ 遠隔機材については 1 回/年の頻度で保守点検を行う。また、故障、点検等により必要数が確保できない場合には代替品を補充する。

保有数量の根拠

防災業務計画対応の先行事例として、電気事業者に関するものがある。この防災業務計画に記載されている遠隔機材のうち小型ロボット（現場偵察）6 台に比べて、原子力機構の偵察用ロボットが 2 台の根拠を以下に記す。

基本的な考え方として、原子力機構の所掌する施設は、

- 1) 試験研究炉であり発電炉と比べ小出力である。
- 2) 電気事業者は 16 か所の発電所をカバーするために配備しているものとするが、原子力機構では 5 拠点（7 施設）である。
- 3) 原子力機構の 7 施設のうち 4 施設は廃止措置に向けた対応（準備）を行っている。

以上から、偵察用ロボットの保有数を電気事業者の事例の 1/3（5 拠点/16 発電所、3 施設/16 発電所から数値の多い）の 2 台とした。なお、その他の遠隔操作ロボットは協調、補助作業等を実施するために 2 台とした。上記を踏まえて、屋外の瓦礫等の撤去作業は各拠点に配備されている重機で行うこととした。

予備機材について

本格運用時の保有数量には予備数量は含んでいないが、増備・更新により 2019 年度までに予備機材として、偵察用ロボット（2 台）、作業用ロボット（2 台）、小型無人ヘリ（2 台）、ロボット運搬車両（2 台）を確保する計画である。電気事業者の先行事例も別途予備機材を確保している。

4.2 遠隔機材の整備目標・年度成果

先行事例である電気事業者の防災業務計画において、支援組織として運用されている日本原子力発電株式会社美浜原子力緊急事態支援センターの遠隔機材の整備状況及び 1F 事故の教訓を踏まえ、防災業務計画に従って遠隔機材等の整備を実施している。

防災業務計画では、2019 年度までの代替運用期間に遠隔機材の整備及び運用体制の確立が必要としている。2017 年度に偵察用ロボットの台車部分（プラットフォーム）1 台の新規整備を実施した。また、2016 年度に引続き、現有機材のメンテナンス（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。さらに、本格運用に必要な新規遠隔機材導入のため、2018 年度以降に整備予定の機材の仕様検討を実施した。表 4.2-1 に主な遠隔機材一覧を、図 4.2-1 に現有する主な遠隔機材を示す。

表 4.2-1 主な遠隔機材一覧

分類	名称	用途等	保有台数
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	試料採取及び障害物除去等の軽作業	2 台
	小型無人ヘリ (マルチコプタ)	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、サニタリー用品他	1 式

※ 保有台数は、予備及び訓練用を含む。



(1) J-11 偵察用ロボット (プラットフォーム部)
(偵察機材は次年度整備予定)



(2) J-6+JT-23 作業用ロボット



(3) JH-202 小型無人ヘリ

図 4.2-1 現有する主な遠隔機材

4.3 要員の育成・訓練目標・年度成果

災害発生時の遠隔機材の操作は、養成訓練を受けた発災事業所の遠隔機材操作員が行うこととなっており、放射線管理班とともに現場にて実施する。そのため、4.2の業務に従事している者が支援組織の構成員となり、以下の訓練等を実施した。

原子力機構内7施設の遠隔機材操作要員に対する教育・訓練として、操作員養成訓練（基本的操作を習得する訓練で、初級訓練と称している。）を2回にわたり、合計13名に対して実施した。

表 4.3-1 に操作員養成訓練の実績を、図 4.3-1 に操作員養成訓練の状況を示す。

表 4.3-1 操作員養成訓練の実績

	実施日	技能養成レベル	受講者人数 (所属拠点・施設)
第1回	2017年12月11 ～14日(4日間)	初級	大洗研・常陽 2名 大洗研・JMTR 2名 大洗研・HTTR 2名
第2回	2018年1月29日 ～2月1日(4日間)		核サ研・再処理 2名 もんじゅ 1名 ふげん 2名 原科研・JRR-3 2名



図 4.3-1 操作員養成訓練の状況 (2017年12月14日)

支援組織要員に対する教育・訓練として、年間を通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。

支援組織として原子力機構内 5 拠点の総合防災訓練へ参画し、茨城地区では大洗研、原科研及び核サ研、敦賀地区ではもんじゅ及びふげんの各総合防災訓練において通報連絡訓練を実施した。大洗研、もんじゅ及びふげんの当該通報連絡訓練時には、楢葉センター内において遠隔機材の運搬車両への積載訓練も実施した。表 4.3-2 に各総合防災訓練における通報連絡訓練及び楢葉センター内の運搬車両への積載訓練の実績を示す。

表 4.3-2 各総合防災訓練における通報連絡訓練及び
楢葉センター内の運搬車両への積載訓練の実績

拠点	通報連絡訓練実施日	楢葉センター内の運搬車両への積載訓練
大洗研	2018年1月17日	ロボット運搬車両 RC-3 に偵察用ロボット J-5 及び小型無人ヘリ JH-201 を積載し楢葉センター内を移動
原科研	2018年1月26日	机上訓練
核サ研	2017年11月27日	机上訓練
もんじゅ	2018年2月16日	ロボット運搬車両 RC-3 に偵察用ロボット J-4 及び小型無人ヘリ JH-201 を積載し楢葉センター内を移動、通信訓練も実施
ふげん	2018年2月9日	ロボット運搬車両 RC-3 に偵察用ロボット J-4、小型無人ヘリ JH-201 及びバッテリー充電器を積載し楢葉センター内を移動

また、支援組織として遠隔機材の実働を伴う要素訓練として、檜葉センターから原子力機構内7施設の后方支援拠点までの遠隔機材の搬送及び搬送先における動作確認を、茨城地区及び敦賀地区に対して実施した。表 4.3-3 に遠隔機材の実働を伴う要素訓練の実績を示す。

表 4.3-3 遠隔機材の実働を伴う要素訓練の実績

実施日	2018年2月19日	2018年2月22、23日
実施地区	茨城	敦賀
対象施設	HTTR	ふげん、もんじゅ
后方支援拠点	核サ研 (今回訓練では、東海本部を核サ研と想定)	敦賀事業本部 (今回訓練では、ひばり社宅グラウンドを敦賀事業本部と想定)
搬送ルート	檜葉センター(一般道)⇒広野IC(常磐道)⇒日立南太田IC(一般道)⇒東海本部	檜葉センター(一般道)⇒広野IC(常磐道)⇒つくばJCT(圏央道)⇒八王子IC(東名)⇒御殿場JCT(新東名)⇒豊田東JCT(東名)⇒米原JCT(北陸道)⇒敦賀IC(一般道)⇒ひばり社宅グラウンド
使用車両	ロボット運搬車両 RC-3	
搬送した遠隔機材	偵察用ロボット J-4	
訓練概要	原子力機構対策本部より支援指示を受けた支援組織は、原子力緊急時における対策を行うための遠隔機材を后方支援拠点まで搬送・引渡し、拠点操作者による遠隔機材の動作訓練を行う。	

5 まとめ

1F の廃炉作業は、高線量・高汚染環境での作業であるため様々な遠隔操作機器・装置を用いなければならず、これまで国内外に例がない。1F の廃炉作業を安全かつ確実に進めるためには、十分な事前準備が必要であり、楡葉センターは廃炉作業に携わる企業や公的研究機関、大学等による遠隔操作機器・装置を用いた実証試験・要素試験が実施できる施設を整備し、2016 年度から本格運用してきた。

2017 年度は、利用促進計画に基づき学会、講演会、各種イベント、展示会、施設利用相談会等を通して広く広報活動を行うとともに、新たに産学連携コーディネーターを整備し企業・大学等への利用の働きかけを強化した。その結果、2017 年度の施設利用実績は 64 件となり、2016 年度の施設利用実績 38 件から大幅に増加させることができた。今後、さらなる施設利用の拡大に繋げるため、アンケート調査等による利用者の分析を行い、施設整備計画の参考とした。

また、福島県内企業廃炉・除染ロボット関連技術展示実演会等の開催に協力し、施設の利用促進と地域活性化・福島県の産業復興に貢献した。人材育成についても、文部科学省「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」における廃炉創造ロボコン、サマースクール及び廃炉実習等を支援し、長期に亘る 1F の廃炉を担う次世代の人材育成に貢献した。

見学については、2017 年度は約 330 件、約 4,300 名の見学者が訪れ、2015 年 10 月の一部運用開始から延べ 10,500 人を超えるに至った。国内外のメディアによる取材等、多くの注目を集めるとともに、地元地域の小・中・高・高専生をはじめ県内外の高校や大学からも多数訪れており、廃炉作業への理解醸成の場として貢献した。

遠隔基盤技術開発として、実践的なロボット開発に資する原子力災害対應用ロボットの標準試験を行うための試験場の整備を行い、原子炉建屋でロボットが走行や作業する環境を模擬し構成材質等に注目した試験場の設計・開発を行った。また PCV 内部アクセスルートを模擬した試験場の開発・拡張を行った。さらにシミュレータについては、これまでに開発した機能の高度化と楡葉センターの設備との連携を目的にモーションキャプチャ、マルチコプタシミュレーション、通信障害シミュレーションのそれぞれのプラグイン開発と、VR システムと連携させた 3 次元可視化補助システム開発を行った。VR システムについては、1F2 号機の PCV 内部（事故前）及び建屋内 1 階の通路部（事故後）、PCV 貫通部（事故前）等の 3D-CAD データを整備・拡充して本格運用を開始した。

原子力緊急時対応遠隔機材の整備については、2020 年度からの原子力緊急事態支援組織の本格運用に向け、今後整備予定の遠隔機材の仕様検討を実施した。また、原子力機構内 7 施設の遠隔機材操作要員に対する操作員養成訓練（初級訓練）を実施した。さらに、原子力機構内 5 拠点の総合防災訓練に参画し、運搬車両への遠隔機材の積載訓練や遠隔機材による要素訓練を実施した。

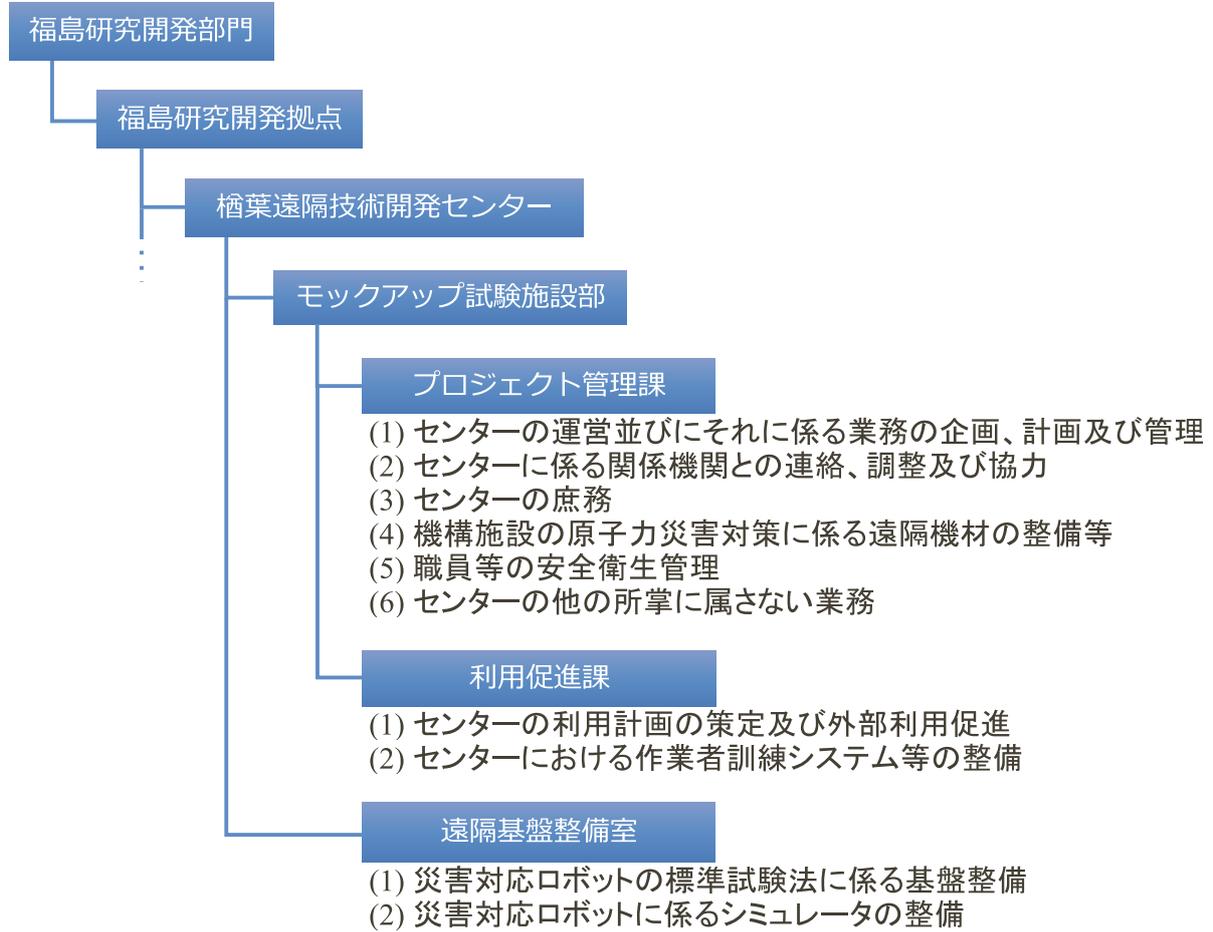
参考文献

- [1] IRID R&D Topics, “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)”, [http://irid.or.jp/topics/原子炉格納容器 \(pcv\) 下部を模擬した実規模試験/](http://irid.or.jp/topics/原子炉格納容器(pcv)下部を模擬した実規模試験/) (参照 2018年12月6日).
- [2] IRID R&D Topics, “原子炉格納容器漏えい箇所の補修技術の実規模試験 圧力抑制室 (suppression chamber, S/C) 内充填止水技術の実規模試験について [IRID/東芝] (2017年6月24日)”, <http://irid.or.jp/topics/原子炉格納容器漏えい箇所の補修技術の実規模試-2/> (参照 2018年12月6日).
- [3] IRID R&D Topics, “原子炉格納容器漏えい箇所の補修技術の実規模試験 圧力抑制室 (suppression chamber, S/C) 脚部補強技術の実規模試験について [IRID/日立 GE ニュークリア・エナジー] (2017年7月31日)”, <http://irid.or.jp/topics/原子炉格納容器漏えい箇所の補修技術の実規模試-3/> (参照 2018年12月6日).
- [4] National Institute of Standards and Technology, Guide for Evaluating, Purchasing, and Training with Response Robots Using DHS-NIST-ASTM International Standard Test Methods,
https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/el/isd/ks/DHS_NIST_ASTM_Robot_Test_Methods-2.pdf (accessed 2018-12-6).
- [5] 中岡 慎一郎, “拡張可能なロボット用統合 GUI 環境 Choreonoid”, 日本ロボット学会誌, vol.31, no.3, pp.12-17, 2013.
- [6] 一般財団法人福島イノベーション・コースト構想推進機構, “平成29年度事業計画”, <http://fipo.or.jp/pdf/235970.pdf> (参照 2018年12月6日).
- [7] 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.
- [8] 鈴木 健太, 磯和 充, 堀内 一憲, 伊藤 倫太郎, 川端 邦明, “原子力災害対応に向けたシミュレーション技術開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 2017.
- [9] FiatLux, バーチャルリアリティランチャーソフトウェア EasyVR,
<http://www.fiatlux.co.jp/product/virtual/easyvr/index.html> (参照 2018年12月6日).
- [10] Qiita, “tc コマンドの使い方”,
https://qiita.com/hana_shin/items/d9ba818b49aca87b2314 (参照 2018年12月6日).
- [11] Qiita, “Linux でパケット受信障害のエミュレーション”,
<https://qiita.com/tanachiu/items/9bb8d96e0ad0ebd9dd85> (参照 2018年12月6日).
- [12] 東京電力ホールディングス株式会社, “動画・写真ライブラリー: 写真集”,
https://photo.tepco.co.jp/_home.html (参照 2018年12月6日).
- [13] Nagatani K., Kiribayashi S., Okada Y., Otake K., Yoshida K., Tadokoro S., Nishimura T., Yoshida T., Koyanagi E., Fukushima M. and Kawatsuma S., “Emergency Response to the Nuclear Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using Mobile Rescue Robots”, Journal of Field Robotics, vol.30, no.1, pp.44-63, 2013.

- [14] 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 号機 原子炉格納容器内部調査について”, <https://photo.tepco.co.jp/date/2017/201703-j/170327-01j.html>
(参照 2018 年 12 月 6 日).
- [15] 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 3 号機 PCV 内部調査進捗～19 日調査速報～”, <https://photo.tepco.co.jp/date/2017/201707-j/170719-01j.html>
(参照 2018 年 12 月 6 日).
- [16] 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 2 号機 原子炉格納容器内部調査について ～自走式調査装置による調査結果～”,
<https://photo.tepco.co.jp/date/2017/201702-j/170216-01j.html> (参照 2018 年 12 月 6 日).
- [17] 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 2 号機 原子炉格納容器内部調査～19 日調査速報～【参考配布】福島第一原子力発電所 2 号機 原子炉格納容器内部調査実施結果 (速報)”, <https://photo.tepco.co.jp/date/2018/201801-j/180119-01j.html> (参照 2018 年 12 月 6 日).

付録

付録 1 檜葉遠隔技術開発センターの組織・業務概要



付録2 2017年度 外部発表リスト・表彰

1. 外部発表

原著論文（査読有り）

- ・川妻 伸二, “レーザーとロボット技術の連携による福島第一原子力発電所廃止措置作業”, レーザー研究, vol.45, no.7, pp.413-417, 2017.

投稿・解説記事等

- ・大道 博行, “レーザーのインフラ点検・補修への応用」特集号によせて”, レーザー研究, vol.45, no.7, pp.397-398, 2017.
- ・山田 大地, “廃止措置に挑む JAEA 櫛葉遠隔技術開発センター”, アトモス:日本原子力学会誌, vol.59, no.7, pp. 399-403, 2017.
- ・谷藤 祐太, “福島第一原子力発電所廃止措置における櫛葉遠隔技術開発センターの取り組み”, 原子力年鑑 2018, pp.96-97, 2017.
- ・荒川 了紀, “櫛葉遠隔技術開発センターの取り組み”, エネルギーレビュー, vol.37, no.10, pp.17-18, 2017.

国際会議

- ・Yamada T., Nguyen P. L., Shibata T., Nishimura A., Koyama S., Daido H., Shimada Y., Kotyaev O., Kurahashi S., “Development of laser techniques for decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station”, OPTICS & PHOTONICS International Congress 2017 (OPIC2017), LSSE3-5, 2017.
- ・Kawabata K., Tanifuji Y., Mori F., Shirasaki N., Hanari T., “Design of a Test Method for Remotely Operated Robots Utilized for Decommissioning Tasks”, Proceedings of International Congress on Advanced Nuclear Power Plant (ICAPP2017), 17476, 2017.
- ・Hanari T., Takebe T., Yamada T., Daido H., Ishizuka I., Omori S., Kurosawa K., Sasaki G., Nakada M., Sakai H., “Demonstration of laser processing technique combined with water jet technique for retrieval of fuel debris at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station”, Proceedings of International Congress on Advanced Nuclear Power Plant (ICAPP2017), 17444, 2017.
- ・Kawabata K., Suzuki K., Isowa M., Horiuchi K., Ito R., “Development of a Robot Simulation System for Remotely Operated Robots for Operator Proficiency Training and Robot Performance Verification”, Proceedings of 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI2017), pp.561-564, 2017.

- Kawabata K., Tanifuji Y., Mori F., Shirasaki N., Hanari T., “Towards Enhancement of Test Facilities for Supporting Nuclear Decommissioning by Remote Technology”, Proceedings of 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2017), WeA3.2, 2017.
- Hanari T., Kawabata K., “3D Reconstruction of Working Environment based on Structure from Motion for decommissioning”, Fukushima Research Conference on Remote Technologies in Nuclear Facilities, 2017.
- Tanifuji Y., Shirasaki N., Ishiyama H., Kawabata K., “Development of Standard Test Method for Nuclear Emergency Response Robots”, Fukushima Research Conference on Remote Technologies in Nuclear Facilities, 2017.
- Suzuki K., Horiuchi K., Kawabata K.: “Development of Simulation Technology for Nuclear Emergency Response”, Fukushima Research Conference on Remote Technologies in Nuclear Facilities, 2017.

国内会議・講演会

- 川端 邦明, 毛利 文昭, 谷藤 祐太, 白崎 令人, 羽成 敏秀, “遠隔操作移動ロボットののための試験場の開発”, 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, 2P1-R10, 2017.
- 鈴木 健太, 磯和 充, 堀内 一憲, 伊藤 倫太郎, 川端 邦明, “原子力災害対応に向けたシミュレーション技術開発—マルチコプタ, ガンマカメラシミュレーション—”, 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, 2P1-R11, 2017.
- 川端 邦明, 毛利 文昭, 白崎 令人, 谷藤 祐太, 羽成 敏秀, “遠隔操作機器による廃炉作業のための試験場の整備”, 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講演論文集(SI2017), pp.1086-1089, 2017.
- 羽成 敏秀, 川端 邦明, 鈴木 健太, “福島第一原子力発電所の廃止措置に向けた複数画像から立体復元による作業環境情報収集”, 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講演論文集 (SI2017), pp.1090-1095, 2017.
- 伊藤 倫太郎, 鈴木 健太, 堀内 一憲, 川端 邦明, 川妻 伸二, 鈴木 宏幸, 出倉 利紀, “VRを用いた廃止措置用遠隔操作機器の操作訓練機能の開発”, 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講演論文集 (SI2017), pp.1105-1108, 2017.
- 山田 大地, “原子炉建屋内調査のためのSLAM研究支援用センサデータベースの作成”, 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講演論文集 (SI2017), pp.3422-3426, 2017.

招待講演等

- ・川端 邦明, “廃止措置のための遠隔技術開発支援の取り組み”, 計測自動制御学会中部支部・信州地区計測制御講演書き, 上田市, 長野, 2017.
- ・川端 邦明, “廃炉のための遠隔技術・作業支援技術開発の取り組み”, 第5回アジアの安心・安全に関する技術基盤研究会, 檜葉町, 福島, 2017.
- ・川端 邦明, “遠隔技術による廃止措置のための支援施設と支援技術開発—JAEA 檜葉遠隔技術開発センターの取り組み—”, 2017 国際ロボット展, 江東区, 東京, 2017.
- ・川端 邦明, “ロボットシミュレータによる遠隔機器・ドローン操作訓練”, いわきものづくり塾廃炉コース 特別編, いわき市, 福島, 2018.
- ・Kawabata K., “JAEA Commitment to the Revitalization of Fukushima”, Fukushima Panel: Update on the Revitalization of Fukushima and The Surrounding Area, Waste Management 2018, Phoenix, USA, 2018.

2. 表彰

原子力機構内表彰

1) 理事長表彰

表彰年月日 : 2017 年 10 月 1 日

区分 : 研究開発功績賞

受賞名 : 燃料デブリ等の取出しに係るレーザーと水噴流加工技術の開発

グループ名 : レーザー及び水噴流組合せ加工技術開発グループ

外部表彰

1) 計測自動制御学会システムインテグレーション部門 2017 年度部門表彰

表彰年月日 : 2017 年 12 月 21 日

区分 : 貢献表彰

受賞名 : SI2016 プログラム委員長として貢献

受賞者名 : 川端 邦明

2) 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

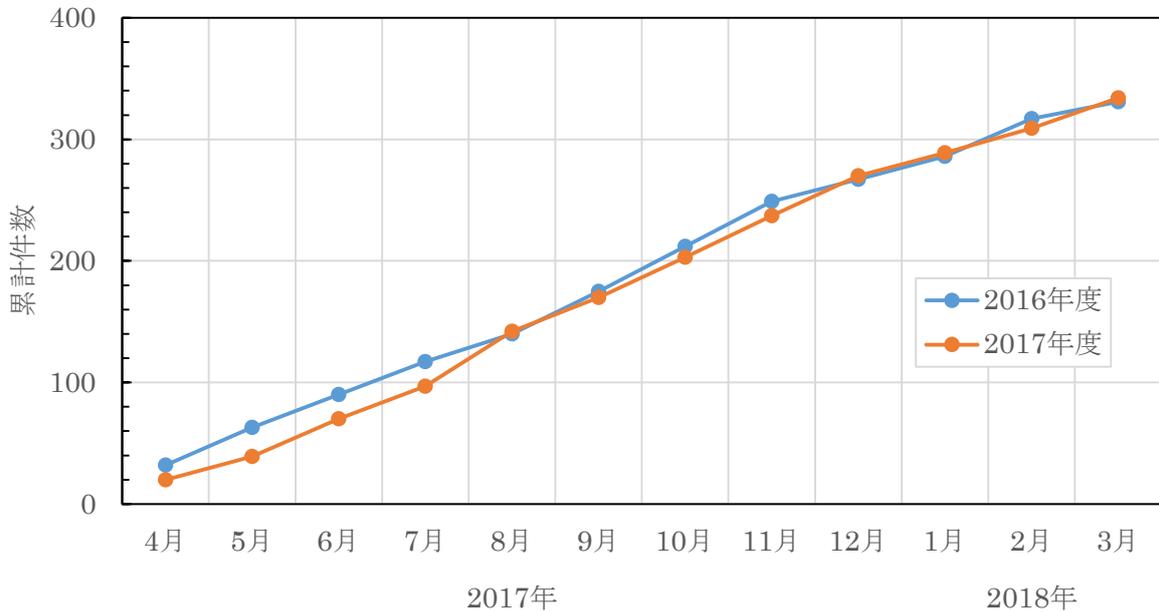
表彰年月日 : 2017 年 12 月 23 日

区分 : 優秀講演賞

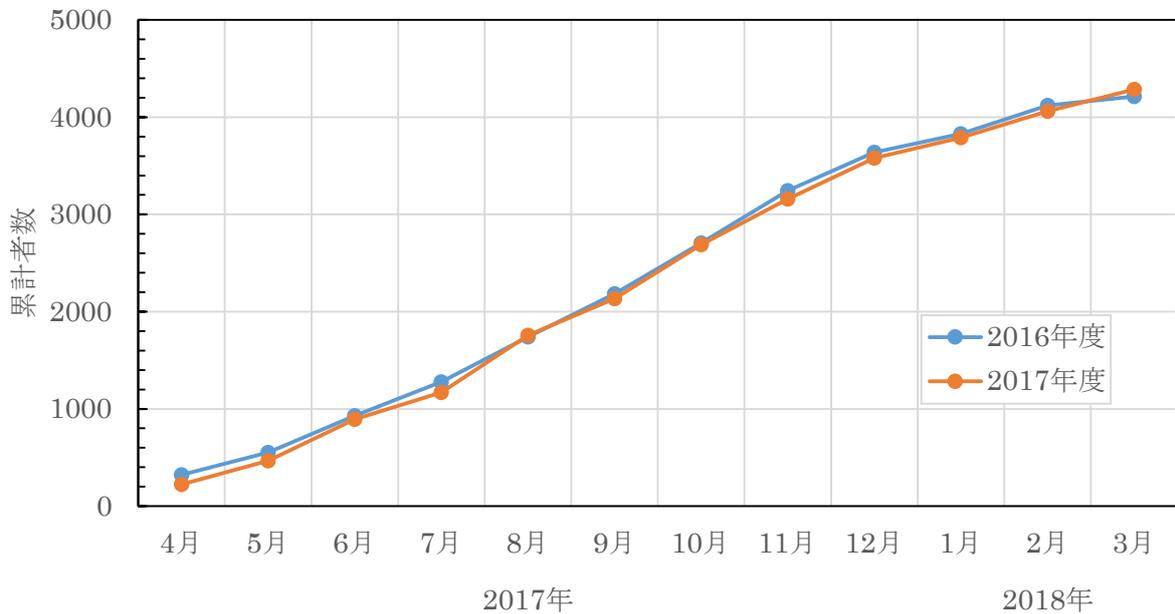
受賞名 : 福島第一原子力発電所の廃止措置に向けた複数画像からの立体復元による
作業環境情報収集

受賞者名 : 羽成 敏秀、川端 邦明、鈴木 健太

付録3 施設の見学件数、見学者数一覧



付図 3-1 2017 年度 累計見学件数



付図 3-2 2017 年度 累計見学者数

2017 年度の見学累計件数、見学累計者数は付図 3-1、付図 3-2 の通りである。見学累計件数、見学累計者数共に 2016 年度と比較して 2017 年度は傾向に変わりはないことが分かる。また件数、見学者数の合計は 2016 年度が 331 件で 4,212 名、2017 年度が 334 件で 4,284 名と 2016 年度から両方微増する結果となった。

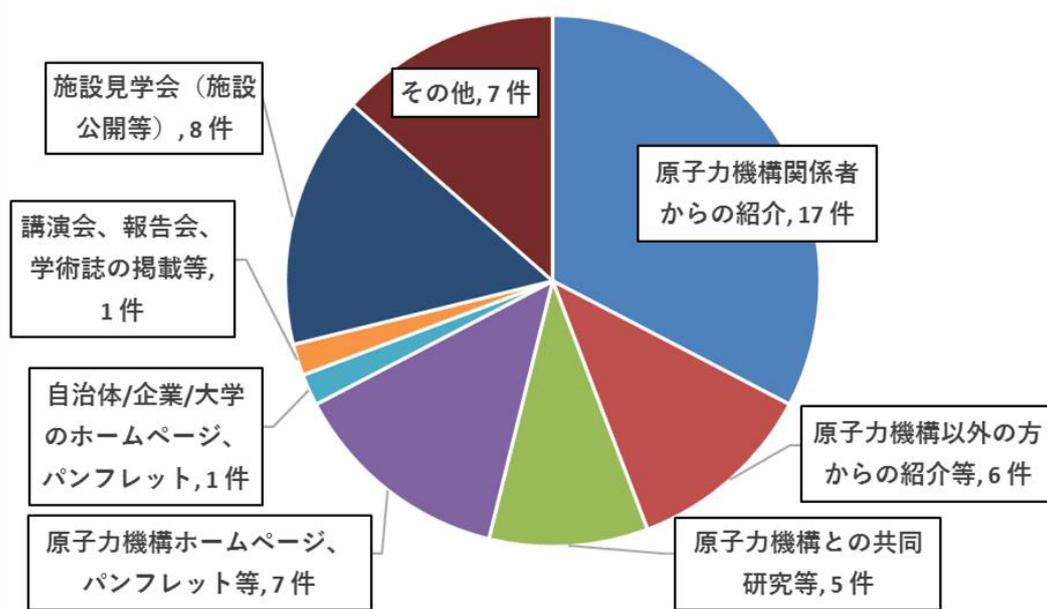
一方県内外からの見学件数、見学者数では、2016年度は県外:228件で2,588名、県内:103件で1,624名であるが、2017年度は県外:267件で3,428名、県内:67件で856名であった。2016年度と比較して県外の見学件数、見学者数が増えているという結果から、県外の方は福島県や楡葉センターに対して興味を向けられている度合いがより増していると考えられる。県内の方に関しては見学件数、見学者数が大きく減少しているが、これは認知度が増したと捉えることができる。

学生の見学件数、見学者数では、2016年度は小中高:7件で200名、高専・大学:25件で398名であるが、2017年度は小中高:13件で292名、高専・大学:43件で573名であった。2017年度は産学コーディネーターが活動を開始した年であり、その活動の一環で各大学等に訪問したこと、2016年度にサマースクールや廃炉創造ロボコンで楡葉センターが高専・大学の先生方の目に触れる機会があったこと、利用促進活動として学会や展示会等で大学の先生と直接話す機会が多かったことから、高専・大学の見学件数、見学者数が大幅に増えたと考えられる。小中高に関してはあまり楡葉センターとの接点がなかったことから高専・大学に比べ見学件数、見学者数はあまり増加していないが、見学者数が2016年度から約100名と増えていることから、その認知度は確実に増加していると思われる。

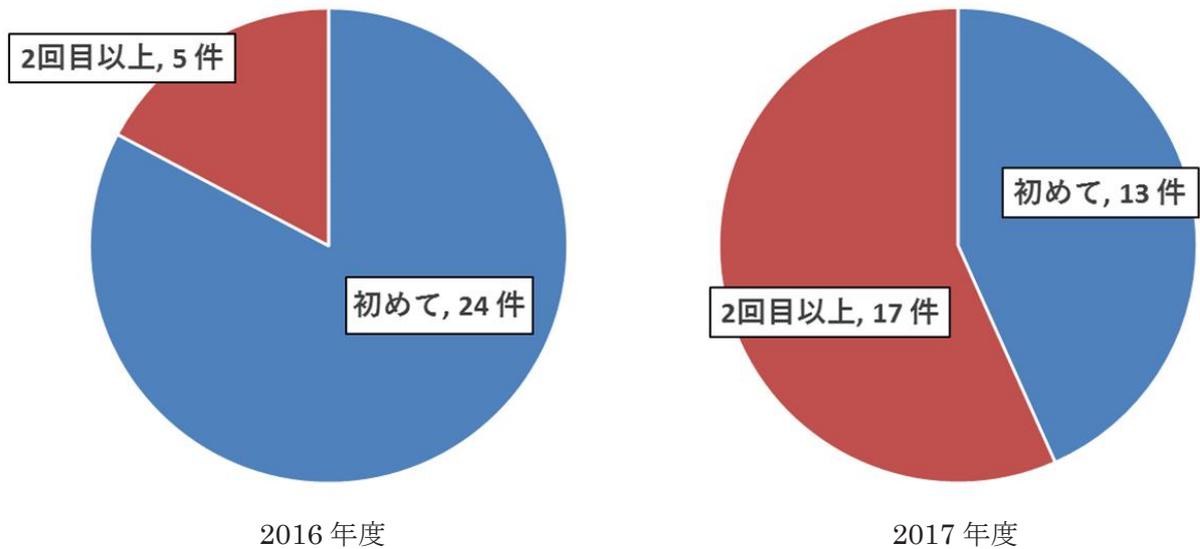
付録 4 施設利用者へのアンケート調査

2017 年度には、64 件の施設利用を受け入れた。2016 年度と同様に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。調査の結果、施設について大多数が満足していること、リピータが 2016 年度より増えていること等が示された。今後、施設への要望や不満等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。

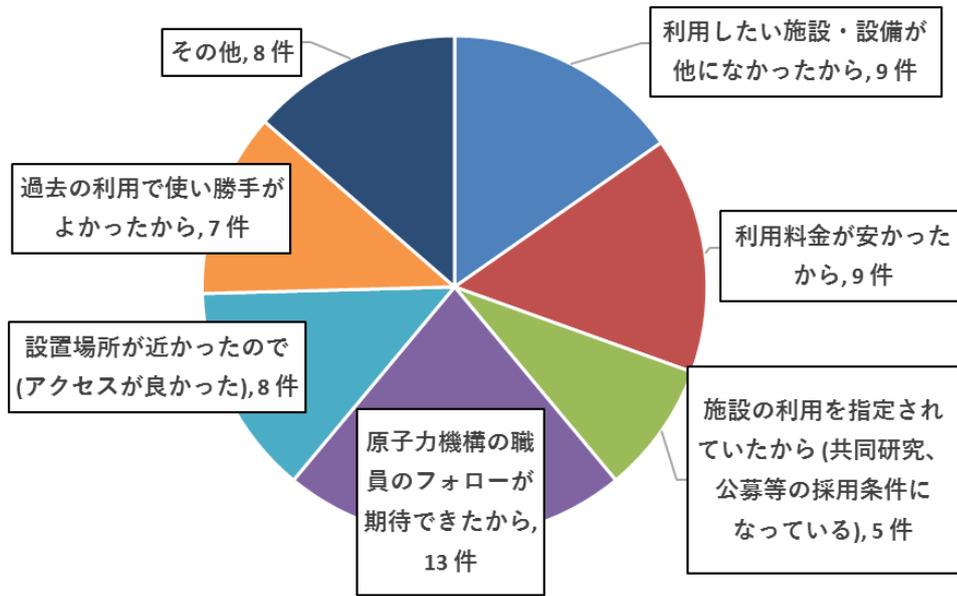
以下、アンケート結果について示す。



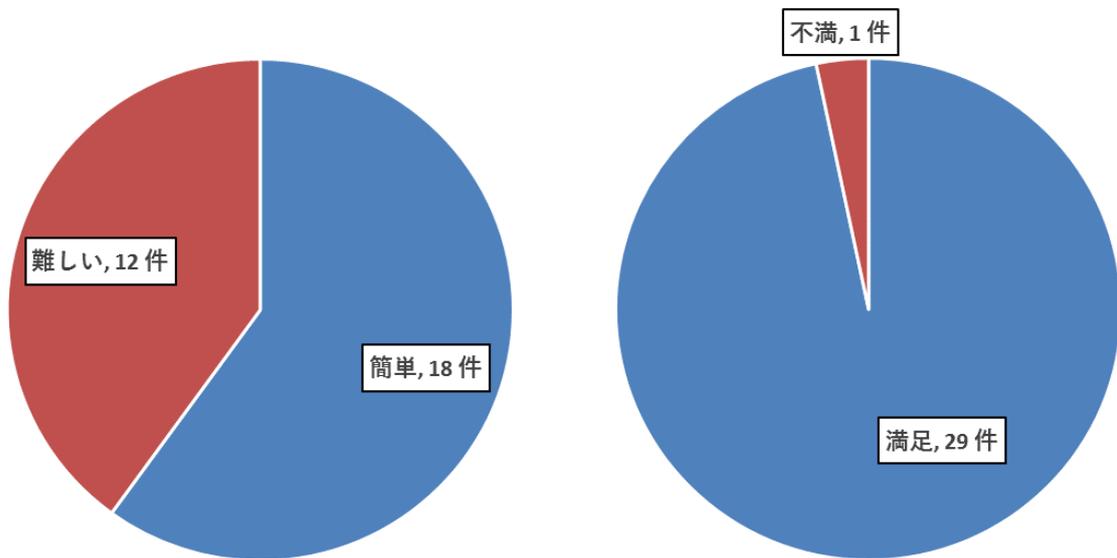
付図 4-1 施設を何から知ったか？



付図 4-2 利用回数は？



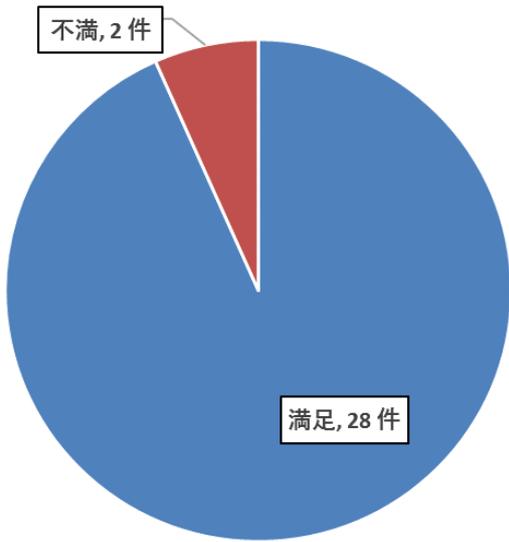
付図 4-3 利用した理由は？



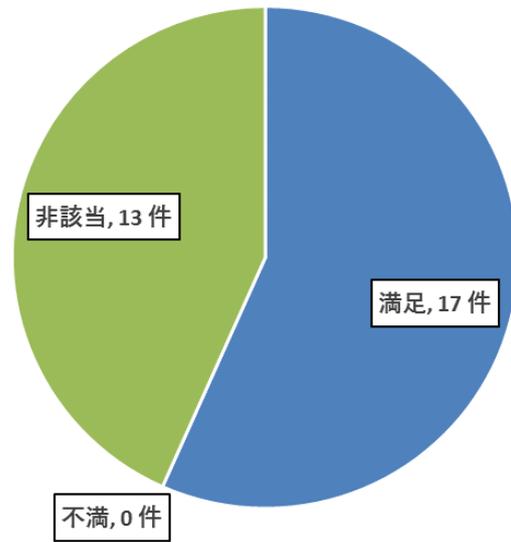
(1) ホームページからの申し込みによる
利用手続きは？

(2) 利用に当たって担当者の対応は？

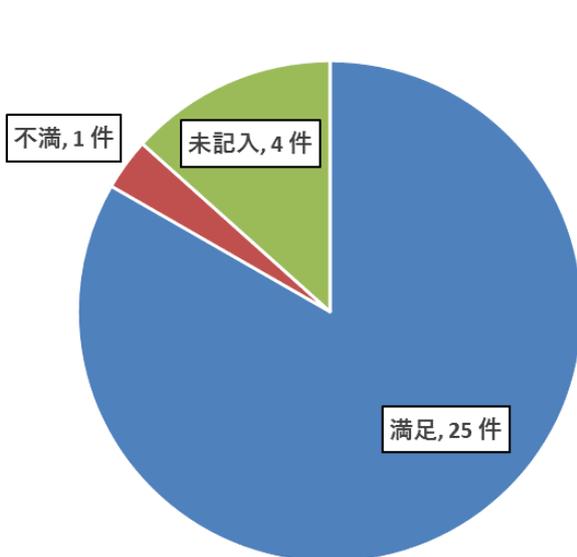
付図 4-4 利用に当たっての満足度は？ (1/2)



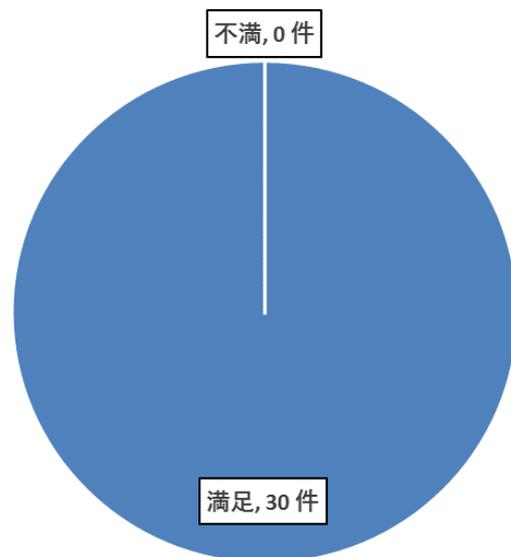
(3) 利用料金は？



(4) 技術的な支援は？

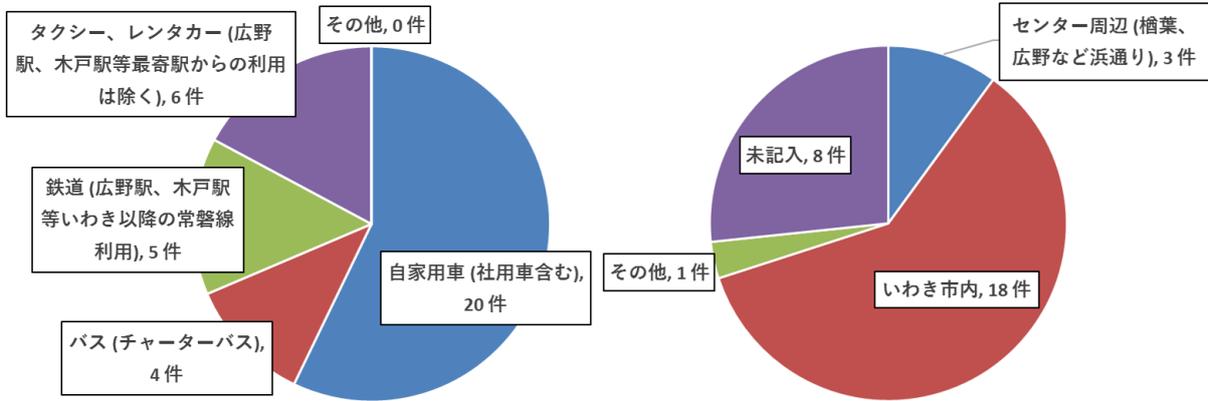


(5) 施設・設備の使い勝手は？



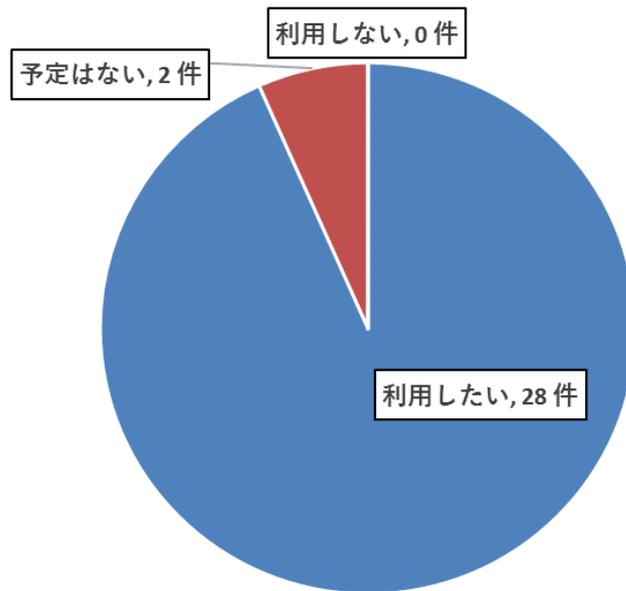
(6) 施設・設備の利用期間・時間は？

付図 4-4 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 4-5 交通機関・宿泊施設について



付図 4-6 今後 3 年間程度の利用予定は？

This is a blank page.

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 ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(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 ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(e)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
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 ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光路長	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
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 ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ 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 ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
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 ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
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 ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
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 ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
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 ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	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 ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ 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 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ 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 ¹¹ 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 ⁵ 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 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm ²) ² =10 ⁻²⁸ m ²
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	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π)A m ⁻¹

(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 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ 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 ⁻⁴ 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	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

