

# 解説 記事

## 本格運用に入った原子力機構・ 楢葉遠隔技術開発センター

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構  
大道 博行 Hiroyuki DAIDO

### 1. はじめに

東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所（以後、東電および福島第一と略す）では廃炉の第1期工程である冷温停止の安定的維持、使用済み核燃料プール内の燃料の取り出しが開始された。4号機では燃料の、より安全な共用プールへの移動が完了した。除染も進み、滞留水処理も継続されている。図1に示されているように第1期から第2期工程に入ったところである。また1号機から3号機までの破損した炉内観察と並行して、廃炉工程上最難関と言われている燃料デブリ取り出しに向けた工法の検討が進められている。図2にデブリの概要を示す。全体で40年と言われている廃炉の本丸に迫る作業が開始されようとしている[1,2]。一方、福島第一の周辺自治体では帰還可能地域が広がりつつあるが、その一方で住民の方々の帰還率は、多くの自治体では10%以下と低いままになっている。廃炉を進め、同時に被災地域の復興を進めることは福島復興に向けた大きな課題となっている。

この両者に応える目的で、廃炉のためのモックアップ（実規模試験体）施設と廃炉に欠かすことのできない遠隔技術の開発の必要性が2011年3月の震災後早くから提唱されてきた。このような中、2013年3月7日の第一回東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策会議において、モックアップ施設の立地場所に関する技術的要件と平成24年度補正予算で国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（原子力機構）に出資して遠隔操作機器・装置の開発・実証施設を整備することが示され、技術要件に基づく候補地の評価等の指示があった。同年5月に開催された第4回の同会議において楢葉南工業団地内に施設を建設することが決まった。それを受けて2013年6月から設計検討を開始し、2015年9月に研究管理棟、2016年2月に試験棟並びに外構が完成し、整備が完了した[3,4]。施設名は楢葉遠隔技術開発センター（以後、当センターと略す）と定められた。当センターは、運営に係る費用の算定に基づき利用料金を定め、利用してい

ただく施設として運用していくことになっている。また、地域の産業再生に資するため福島県内外の中小企業の皆さまへの利用促進、および復興を担う人材育成、教育等の向上に資するため、中小企業、高等教育機関（大学、専門学校、高等専門学校）を対象に利用料金の減額を図る特例措置（一定期間）を認めていただいている。当センターは、廃炉、復興に向け、多くの方々に利用していただくことを前提にした施設であり、その趣旨に従った新しいスタイルの運営が求められている。当センターは福島第一から20km圏内に初めて建設され運用を開始した最初の国立研究開発法人の開発拠点であり、開所以来、三千名を超える方々の施設見学、多数の施設紹介報道等、関係各方面の期待は大きい[5]。

当センターの写真を図3に示す。研究管理棟（4階建：幅35m×奥行25m×高さ20m）と試験棟（1階建：幅80m×奥行60m（図2左下の附属建屋奥行きを加えると79m）×高さ40m）により構成される。次節でそれぞれの建屋内に整備された設備を説明する。

### 2. 施設の現状

#### 2.1 国のプロジェクトの推進

当センターでは廃炉に向けた国のロードマップ[1]に従って喫緊の技術的課題の実証試験を行うことになっている。そのためのモックアップの建設、それをを用いた技術試験が第一の役割である。現在の喫緊の課題である燃料デブリ取出しに際しては、水を満たした作業環境下での作業が望ましいとされている。そのためには破損した原子炉建屋内の機器の水漏れ補修が必要となる。その一環で、原子炉格納容器下部の漏えい箇所の補修・止水技術の開発が国のプロジェクトとして取り上げられている。



図1 福島第一廃炉のロードマップ

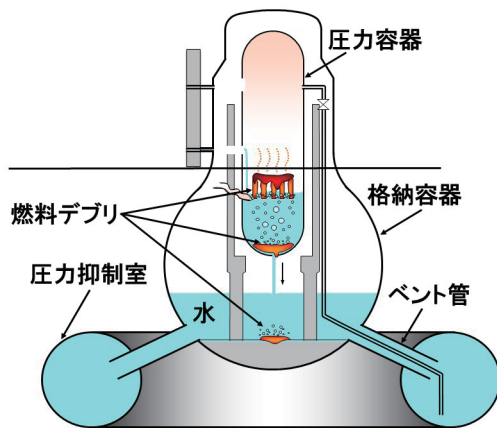


図2 福島第一事故後の格納容器内の断面図。溶融した燃料と構造材が交じり合って压力容器を突き破って水で満たされた格納容器下部へ落下していると考えられている。



図3 楢葉南工業団地内に建設された楢葉遠隔技術開発センターの航空写真（2016年6月）。敷地面積は36,000 m<sup>2</sup>である。

このため当センターには、技術研究組合国際廃炉開発機構 (IRID) によりモックアップが整備された [6]。図4に示す沸騰水型原子炉の格納容器下部のドーナツ状の圧力抑制室 (Suppression Chamber) の1/8セクターとそれと格納器を結ぶベント管1本が組み立てられている。これを図5に示す。この図ではダウンカマーと呼ばれるベント管と繋がっている水の通り道が写っているが、ここに止水のためアラミド系繊維を用いたバルーン (風船) を挿入し、膨らませて水の通り道を塞ぐ。さらに新たに開発された流水中でも固まるセメント系止水剤をその中と周囲に挿入して止水する。次のステップでは圧力抑制室に水中不分離コンクリートを注入して止水の効果を調べるなどステップを追って適用性確認試験を行うことになっている。これらの作業は福島第一の作業床面を想定したモックアップの上部床面から遠隔技術により行うことになっている。当センターのバーチャルリアリティシステムを用いて前もって、このような作業検討・確認が

行われている。試験後は、試験棟の外部に移動し、止水の状況を細部にわたり検証することになっている。また、この実規模試験体は止水材や水を入れると約5,400トンの重量になる [6]。このためこれを支える床には、厚さ2mのコンクリートの施工が行われている。このように時宜にあった国のプロジェクトを当センターにおいて継続的に実施し、廃炉に貢献していくことが期待される。

## 2.2 バーチャルリアリティシステム

福島第一廃炉の推進に向けて、作業を円滑に進め作業者の安全確保のため、作業環境を模擬し、事前の作業計画の検討、作業員の教育及び遠隔操作機器の操作訓練等が可能な没入型バーチャルリアリティ (VR) システムを整備した。このシステムにより図6に示すように前左右下の4面のスクリーンで囲んだ空間 (CAVE型) に4台のプロジェクターを使って立体表示したい物体をスクリーン上に映し出すことができる。すなわち細かい間隔で表示された3次元の離散的座標群を基に5台のコンピューターで作成された体験者の目線の点投影像が左右それぞれの目 (両目の近傍のトラッキングセンサー) に向けて1秒間に左右合わせて最大60枚映し出され、映像に同期したスイッチを備えた眼鏡により体験者の両目を通じて立体感のある映像が違和感なく認識される。このようにして3次元の立体情報をそのまま体験者の目線で3次元空間として体験することができる。これを用いると福島第一の廃炉作業現場を、臨場感を持って体験可能である。現在、福島第一の2号機のデータが表示されているが、順次1号機、3号機のデータのVRでの表示を行っていくことになっている。また体験者が通過する各位置における放射線の線量率と体験開始からの総被ばく線量の表示が可能であり、実際の作業の許容時間の目安を得ることも可能である。廃炉作業の準備として本システムを使った研修プログラムの検討を関係団体、企業等と開始したところである。このシステムは廃炉に使う遠隔機器の動きを3次元的に映し出すことも可能であり、工法の検討や訓練に用いることも可能である。

## 2.3 遠隔技術開発用要素試験装置

福島第一の建屋内での調査・廃炉作業等に必要な遠隔操作機器の開発には、その作業に適した機器の評価法の開発が望まれている。このような要望に応えるため手始めとして水中調査ロボットや水環境で使う遠隔機器・装置の機能確認を行う水中ロボット試験水槽、遠隔操作機器・装置の動作を精度良く測定するモーションキャプ

チャー、福島第一の建屋内の階段を模擬するモックアップ階段を整備した。その模式図を図7に示す。

図7(a)に示す水中ロボット試験用水槽の水は60°Cまで加温することが可能である。観察窓は12箇所設けられており水中のロボット等の運動を観察し評価することができる。海水も使用可能である。この水槽は廃炉も含め水環境下の多方面の作業訓練や工法の開発等に用いることが期待されている。

図7(b)に示すモーションキャプチャーは、図上部の丸で示した16台の高速度カメラ(最大2000フレーム/秒、空間分解能を高く維持すると500フレーム/秒)と被写体の運動する空間により構成される。被写体に取り付けられた再帰性反射体(入射光線の方のみに反射する塗料を塗布した物)をマーカーとした赤外線域の同時ストロボ撮影により、複数台のカメラそれぞれから見た被写体に取り付けられたマーカーの方向を測定し、三角測量の要領でマーカーの動きを3次元デジタル情報として記録する装置である。大きさは幅15m、奥行き15m、高さ7mであり、計測範囲はそれぞれ10m、10m、2mである。そのとき位置精度は±1.5mmとなっており、測定範囲を大きくすると精度は悪くなる。この装置は福島第一への適用に向けた走行ロボットやドローンの動作解析に用いることが可能であり、それらの開発および評価に用いることが期待される。当センターでは廃炉とともに福島復興を目指した浜通りイノベーション・コースト構想[7,8]への貢献も目指しており、本装置は遠隔装置の解析はもちろん、医学や介護、スポーツなどへの

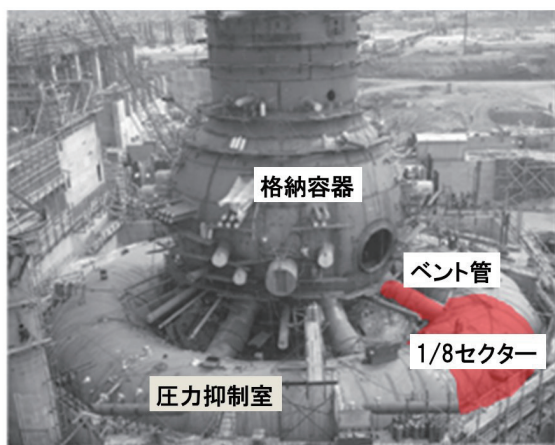


図4 福島第一と同型の沸騰水型原子炉の原子炉格納容器とドーナツ状の圧力抑制室(ドーナツ断面の直径8m)、両者を結ぶベント管の写真。(Browns Ferry Nuclear Power Plant Unit One from Wikipedia) 写真右下のベント管と圧力抑制室の1/8セクターの実寸大模型が図5に対応する。

貢献も期待される。多くのユニークな利用を当センターのスタッフとともに実行していただけるよう、準備を行っている。



図5 技術研究組合国際廃炉研究開発機構(IRID)の圧力抑制室の止水のためドーナツ状の抑制室を1/8にカットした実寸大モックアップ装置(断面の直径8m)の組み立て。



図6 福島第一廃炉に向けた没入型バーチャルリアリティシステム

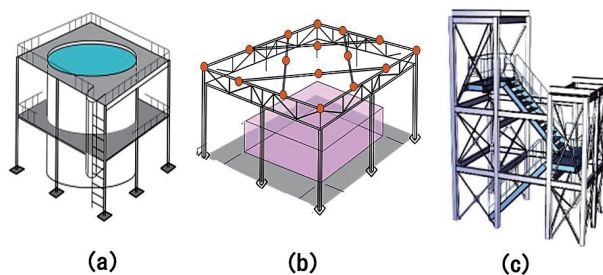


図7 試験棟内の遠隔技術要素試験装置 (a) 水中ロボット試験用水槽、(b) モーションキャプチャー、(c) モックアップ階段



図8 災害時対応ロボットに向けた対称標準試験法 (Symmetric Standard Test Method) に準拠した試験場。縦横それぞれ10cm、長さ10, 20, 30, 40, 50 cmの角材により構成されている。

図7(c)にモックアップ階段を示す。階段の傾斜角度は40度から55度までの範囲で6通り変えることができる。手摺の幅も700mmから1000mmまで変えることが可能である。また階段のステップの変更、踏み板を縞鋼板やグレーチングに取り替えることも可能である。接続する複数の階段を駆け上がる際、その方向を変えることが可能であり、廃炉に伴う様々なロボット等の動作試験が可能である。

図8にアメリカ国立標準技術研究所 (National Institute of Standards and Technology: NIST) で開発された標準試験法に従って木材で作った試験装置の写真を示す。写真のように対称に窪みが配置されており、この中でロボットを走らせることにより瓦礫での走行性能を評価する。この手法は2001年9月11日に起こった、テロによるニューヨーク世界貿易センタービルの倒壊現場で活動したロボットの、更なる性能向上を目指して考案されたものである。さらに建屋内の代表的な模擬環境物となるガレキ、扉及び鉄骨類なども準備している。これらを用いると廃炉に係わる遠隔技術の要素試験が可能である。これら施設は利用者の多様な要望や廃炉技術の要請に従って必要に応じて仕様変更や増設を行っていくことになっている。

### 3. 本格的施設利用の開始

当センターは2016年2月、3月の施設のお試し利用(トライアルユース)を経て、4月1日より利用者に定められた利用料金をお支払いいただきながら利用していただく業務を開始した。福島第一の廃炉に資する利用を最優先としつつも、福島復興に繋がる利用でも多くの成果を期待している。ここでは各装置を用いた試験の一例を紹介する。

図7(c)で紹介したモックアップ階段を上る緊急時対応ロボットを図9に示す。モーションキャプチャー装置を用いたドローンの飛行解析の様子を図10に示す。大きさ約80cm四方のドローンの四隅に反射体を取り付け、カメラで多方向からストロボ撮影する。飛行の様子の一フレームを図10(a)に示す。その結果をコンピューターに取り込み、時々刻々の3次元的数据を取得することができる。これを図10(b)に示す。このデータを用いるとドローンの飛行に伴う各場所の速度、加速度、姿勢、方向などがデジタル情報として得られ、定量的性能評価に役立つことができる。この装置は廃炉に用いる遠隔機器の性能評価に役立つことはもちろんだが、それに留まらない。例えば手術ロボット、介護ロボット、熟練作業の定量的把握やスポーツにおける運動機能の解析など、いろいろなことに役立つことが可能と思われる。図11に水中ロボット試験用水槽の中で照明をしつつ撮影をしている水中ロボットの様子を示す。ケーブルを通じてモーターを駆動し、水槽中を自由に泳ぎまわることができる。図12に示すように、原子炉の燃料プールの監視に使うロボットの動作解析、評価などが可能である。濁水中でのソナーの試験や対象物の水中レーザー測距、点群情報取得などの訓練も可能と思われる。このように持ち込まれたロボットやドローン、各種機器をすぐに動作させ、評価することが可能になっている。さらに利用者の御希望に従って暗くした中での試験や知財保護のための秘密保持環境の設定なども可能である。

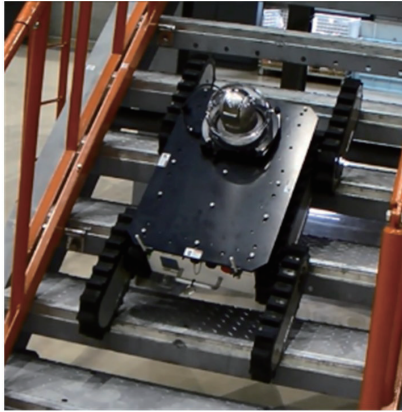


図9 モックアップ階段を登る原子力緊急時対応小型ロボット（幅約 48 cm、重さ 40 kg）



図10 (a) 飛行試験中の室内ドローン（縦と横のサイズはそれぞれ 80 cm）の写真。(b) 白線の先にデジタル化してコンピューター上に表示したドローン。



図11 水中ロボット試験水槽の観察窓付近で照明しながら撮影中の白色の水中ロボット (Remotely Operated Vehicle)。縦、横、奥行きはそれぞれ 30 cm、である。重量は 20 kg である。

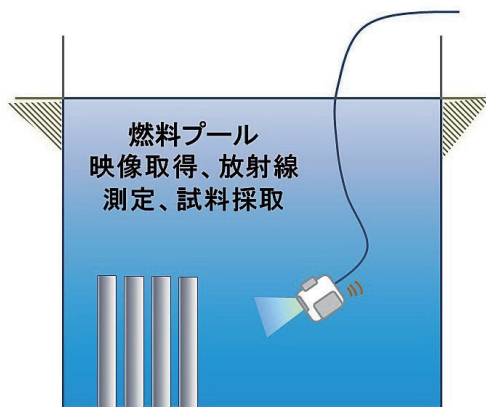


図12 水中ロボット試験水槽を用いた利用の一例。核燃料プールの観察等に向けた遠隔機器の性能評価。

#### 4. 今後の課題と期待

今後、福島第一の炉内の状況が明らかになるにつれ、廃炉の推進にとって新たな技術課題が多数出てくることが予想される。このため当センターの廃炉に向けた試験には国内外の英知の結集が不可欠である。また福島国際研究産業都市（イノベーション・コースト）構想 [7] では、当センターはその中核拠点と位置付けられており、廃炉を含む多方面のイノベーション創出拠点としての役割も期待されている。

このような中、当センターの事業の根幹は、利用者による試験棟の施設や研究管理棟の VR の利用、それを通じた満足、更なる利用である。活発な施設利用を通じて廃炉と復興に貢献していくことが求められている。

さて施設利用の段階は見学、担当者間の利用相談、利用の実施、評価へと進んでいく。それぞれの段階においてセンターのスタッフが専門家として対応し、その対応の中で専門性に更なる磨きをかけるといった好循環を期待している。燃料デブリ取出し工法への適用を目指したレーザー利用に関する国内メーカーとの共同研究も開始されており [9]、今後の施設利用への力量向上に資すると期待される。当センターの利用者としては、(1) IRID 等、国のプロジェクトを推進する組織によるロードマップの要請に直接応える施設利用者、(2) 福島第一の廃炉作業の訓練等、廃炉に直接携わっている会社等、(3) 福島復興を主たる目的とした自治体、商工会議所、地元企業等、(4) 大学、高等専門学校等、高等教育機関、(5) 一般企業等を想定している。ここに示した利用者それぞれに向けた案内、利用相談を行うことを予定している。これまでに、前に示したように IRID の格納容器下部の圧力抑制室近傍の止水技術実証試験がスタートしている。室内でのドローンの飛行訓練、廃炉人材育成事業の一環としての要素試験装置や VR の利用などが行われている。これらの利用後に利用者の満足が得られ、さらなる利用に繋がるのが事業の目的である。このためには施設の利用に際して、きめ細かい専門的知見の提供等による付加価値の付与が極めて重要であり、利用に対応するスタッフの研究開発、技術、管理のプロとしての研鑽は重要である。福島第一の事故後に現れた新たな環境に対し、当センターの事業が原子力に新たな息吹をもたらすことを目指したい。

## 5. まとめ

当センターは本年4月より本格運用を開始したところである。廃炉、復興の技術開発の拠点として、周囲の期待は大きい。利用者の皆様方の意見も踏まえ、より使いやすく有益な施設を目指しており、今後も利用促進に向けた施策立案と実施に向けて関係省庁、関係機関等との連携した取り組みを進めていく所存である。

図13に福島県浜通り地区の原子力機構の研究開発拠点、福島県が推進している南相馬のロボットテストフィールド[10]等、開発拠点を示す。それぞれの役割を明確にしつつ、相補的、相乗的な連携・協力が期待される。また研究開発拠点を含む各方面の福島復興の歩みを加速するためにも、この地域の鉄道等、社会インフラの復旧・整備が急務となっている。

福島第一の廃炉に向けた技術開発は科学技術の粋を集めた、いわば人類の科学技術開発の最前線の一つであると言える。その一方で、当センターに最も近い常磐線木戸駅周辺には多くの民家があるが、夕暮れになると家々から明かりが漏れ、会話が漏れてくる普通の景色は、今は無い。当センターが担う福島第一の廃炉に向けた研究開発の挑戦は、福島復興の使命感とともにあるべきことのように思われる。それとともに、当センターの成果として、高い水準の科学技術を以て行う挑戦にふさわしい普遍的価値を有するものがたくさん生まれてくることも期待している。それら成果は商用炉の廃炉、社会インフラの点検・保守、災害対応等関連分野へと波及していくことが期待される。

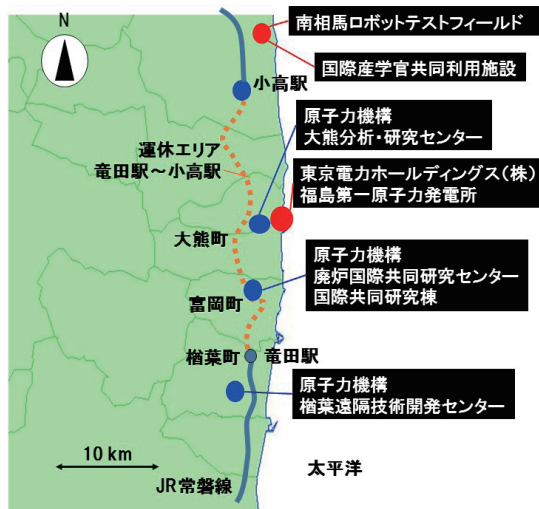


図13 福島第一と浜通り地区の原子力機構の三つの拠点と南相馬のイノベーション創出拠点。常磐線は竜田駅から小高駅まで不通である。(2016年8月時点)

## 参考文献

- [1] 廃炉・汚染水対策関係閣僚会議、“東京電力(株)福島第一原子力発電所1～4号機の廃止措置に向けた中長期ロードマップ”、平成27年6月12日
- [2] 原子力損害賠償・廃炉支援機構(NDF)、“東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン2016”、2016年7月13日
- [3] 河村 弘、“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年3月
- [4] 川妻伸二、“楡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法、2016年8月号
- [5] 原子力機構・楡葉遠隔技術開発センターホームページ：<http://naraha.jaea.go.jp/>
- [6] 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)平成27年度版研究開発成果概要 平成28年3月
- [7] 福島・国際研究都市(イノベーション・コースト)構想研究会報告書—世界が注目する浜通りの再生—、平成26年6月23日
- [8] 拠点を核とした産業集積及び周辺環境整備の課題に係る検討会 イノベーション・コースト構想 議論の整理 平成28年5月27日
- [9] 大道博行、“福島第一原子力発電所の燃料デブリ取出しに資するレーザー技術” Isotope News 2016年3月号 No.743, p.7-11
- [10] ロボットテストフィールド・国際産学官共同利用施設(ロボット)活用委員会について、経済産業省 News Release、平成27年12月21日

(平成28年8月8日)

## 著者紹介

著者：大道 博行

所属・役職：日本原子力研究開発機構福島研究開発部門福島研究基盤創生センター・副所長(兼)楡葉遠隔技術開発センター・センター長

専門分野：レーザー工学、プラズマ科学、レーザーの原子力工学への利用