

福島第一原子力発電所における廃炉・汚染水・処理水対策への取り組み

Efforts for Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station and Management of Contaminated and Treated Water

中原 貴之 NAKAHARA Takayuki 杉浦 鉄宰 SUGIURA Tessai 奈良部 徹 NARABE Tohru

2011年3月11日に発生した東日本大震災とそれに伴う津波により、東京電力ホールディングス(株)(以下、東京電力HDと略記)福島第一原子力発電所(以下、1Fと略記)1～3号機は炉心を損傷する未曾有の事故に至り、事故直後から現在まで、官民一体となった事故収束と、安全確保に向けた対策が進められてきた。

このような中で、東芝エネルギーシステムズ(株)は、使用済み燃料プールからの燃料取り出し設備の設置、原子炉格納容器内部の状況調査、及び汚染水処理設備の設置などで貢献してきた。これらの知見を生かし、廃炉・汚染水・処理水対策に引き続き取り組んでいる。

Since the reactor cores of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (hereafter referred to as “1F”) Units 1 to 3 were seriously damaged by the Great East Japan Earthquake and the ensuing tsunami on March 11, 2011, both the public and private sectors have been steadily working to control the aftermath of the accident and ensure the safety of the damaged facilities.

Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation has been making significant contributions to these endeavors, including the installation of equipment for removing fuel from the spent fuel pools, investigations of the interiors of the reactor primary containment vessels (PCVs), and installation of facilities for contaminated water treatment. Utilizing our experience and expertise in these areas, we are continuously making efforts to address the decommissioning of 1F and the management of the contaminated and treated water.

1. まえがき

東京電力HDは、2011年4月に「福島第一原子力発電所・事故の収束に向けた道筋」⁽¹⁾を取りまとめた。その後、関係者の懸命の努力により、同年12月には原子炉は、いわゆる“冷温停止状態”に達し、不測の事態が発生した場合も、敷地境界における被ばく線量が十分低い状態を維持できるようになった。これを受けて、内閣総理大臣から、事故そのものは収束に至ったと判断された。

同年12月に、廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議において、「東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」⁽²⁾(以下、中長期ロードマップと略記)が決定され、東芝エネルギーシステムズ(株)は、中長期ロードマップにおけるマイルストーン達成に貢献してきた。ここでは、その取り組みと成果について述べる。

2. 中長期ロードマップ達成に向けた具体的取り組み

2.1 3号機における使用済み燃料プールからの燃料取り出し

3号機は、水素爆発により、原子炉建屋の天井や構造物などが瓦れきとなって使用済み燃料プール(以下、プールと

略記)内に落下した。震災当時のプールには、566体の燃料が貯蔵されており、この燃料を全て取り出すことが、中長期ロードマップの重要なマイルストーンとして設定されていた。

当社は、プール内の瓦れきを撤去し、燃料を取り出す設備と、その複雑な作業を可能とするツールを開発した。この設備は、主に燃料を取り扱うための燃料取り扱い機と、燃料を収めた構内輸送容器を取り扱うクレーンとで構成されており、作業者の被ばくを低減するために、遠隔での操作を可能とした。図1に、燃料取り扱い機とクレーンを示す⁽³⁾。

上記の瓦れき撤去、燃料取り出し作業を可能とするために開発した主なツールとして、瓦れき把持移動具、及び燃料



図1. 燃料取り扱い機とクレーン

主に燃料を取り扱うための燃料取り扱い機と、燃料を収めた構内輸送容器を取り扱うクレーンで構成されており、作業者の被ばくを低減するために、遠隔での操作を可能とした。

Fuel handling machine and crane to remove fuel debris

ハンドルの変形に対応した燃料つかみ具について述べる。

(1) 瓦れき把持移動具 図2に、瓦れき撤去用のマニピュレーターを示す。燃料取り扱い機に設置した2台のマニピュレーターは、プール内に堆積した瓦れきを把持し移動する装置である。右側のマニピュレーター先端をカッターに取り替えることで、左側のマニピュレーターでつかんだ鉄筋をカッターで切断し、搬出可能な長さへ調整することも可能とした。

(2) 燃料ハンドルの変形に対応した燃料つかみ具 瓦れき落下の影響による燃料ハンドルの変形も確認されており、通常の燃料つかみ具フックでは先端が変形した燃料ハンドルの内側スペースに入らず、把持できない状態であった。そこで、つかみ具のフックに高強度の材料を使用して小さくすることで、変形した燃料ハンドルの内側スペースにも先端が入るように工夫した。図3に、ハンドル変形燃料つかみ具のフック形状を示す。フック形状はハンドルの外れ防止として燃料の荷重が掛かった状態では開かない構造とした。

これらの設備、ツールを準備してきたことにより、2019年4月から開始され、2021年2月に完了したプール内の全燃料566体の取り出しに貢献した。

2.2 原子炉格納容器内部調査

中長期ロードマップでは、溶け落ちた燃料（以下、燃料デブリと略記）の取り出し開始をマイルストーンとして設定している。燃料デブリ取り出し工法を検討していく上で、原子炉格納容器（PCV：Primary Containment Vessel）の内部状況調査は重要であり、2号機及び3号機について、PCV内部の状況を調査した。高線量下での作業であったため、遮蔽による環境改善や事前の訓練など、万全を期した準備を行った。また、PCV内の雰囲気気が外部に漏れいしな

いよう、閉じ込め機能を備えた挿入装置を設計した。これらの調査結果は、今後の燃料デブリ取り出し方法の検討に大きく貢献するものである。

2.2.1 2号機の原子炉格納容器内部調査

2号機では、原子炉本体を支える基礎（以下、ペDESTアルと略記）内の調査を、2017年から2019年の間に段階的に行った。ペDESTアル内の構造物の概要と、各調査の範囲を図4に示す。プラットフォーム上調査及びペDESTアル底部調査^(注1)は燃料デブリ落下の有無及び構造物状況の把握、

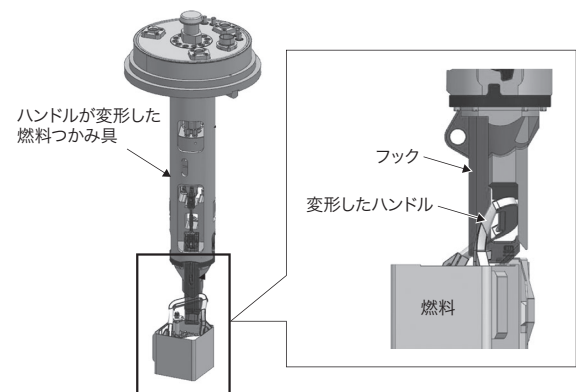


図3. ハンドルが変形した燃料つかみ具

つかみ具のフックに高強度の材料を使用して小さくしたことで、変形した燃料ハンドルのスペースにも入り、ハンドルが変形した燃料を把持することが可能である。

Grappling tool for fuel with deformed handle

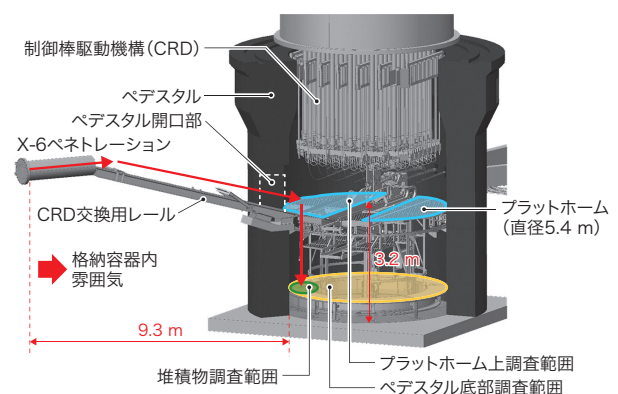


図4. 2号機における原子炉格納容器内部調査の範囲

青色と黄色の領域は、プラットフォーム上及びペDESTアル底部における燃料デブリ落下の有無及び構造物状況をカメラで調査した箇所。緑色の領域は、燃料デブリの可能性がある堆積物に接触して性状を調査した箇所である。

Investigation area inside pedestal of 1F Unit 2

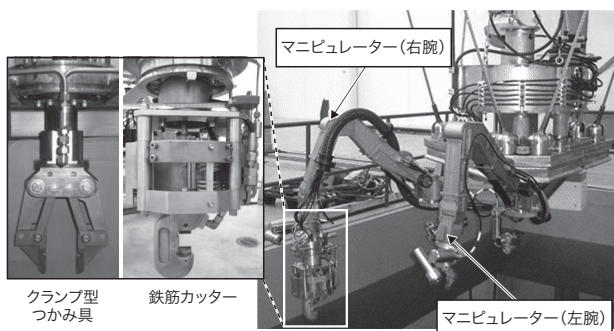


図2. 瓦れき撤去用マニピュレーター

2台のマニピュレーターを両腕のように使って作業でき、先端の治具を取り替えることで、瓦れきの把持・移動に加えて、鉄筋の切断作業も可能となる。

Manipulators to remove rubble

(注1) 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構の一員として、「廃炉・汚染水対策事業」に関する補助事業の一環で実施。

堆積物調査はペDESTAL底部の堆積物の性状把握を主目的とした。いずれも既設貫通孔であるX-6ペネトレーションに新たに設置した開口を通じて、PCV外から調査ロボットを投入した。

プラットホーム上調査は、2017年1月から2月にかけて実施し、プラットホームの状況をカメラ映像で確認し、後の調査装置の設計に資するデータを取得した。

ペDESTAL底部調査は、2018年1月に実施した。調査ロボットは長尺パイプの先端に付けて空中移動し、ペDESTAL内へ入れた後、釣り竿（ざお）の要領でペDESTAL底部まで降り降ろすコンセプトとした。ペDESTAL底部の調査結果を、図5に示す⁽⁴⁾。これらの映像はPCV内に発生する霧の影響を除去する画像鮮明化技術と、調査エリア全体が分かるようカメラ映像を天球状に合成する技術を用いて作成した。これらの映像により、燃料集合体の一部のほかに、全域にわたって砂状・塊状の堆積物が存在し、燃料デブリの可能性あることを確認した。

堆積物調査⁽⁵⁾は2019年2月に東京電力HDの委託研究として実施した。調査装置外観と調査映像を図6に示す⁽⁶⁾。



図5. 2号機におけるペDESTAL底部全体図と燃料集合体の一部

PCV内に発生する霧の影響を除去する画像鮮明化技術などを駆使して得た映像により、燃料集合体の一部のほかに、全域にわたって砂状・塊状の堆積物が存在し、燃料デブリの可能性あることを確認した。

Part of fuel assemblies at bottom of pedestal of 1F Unit 2

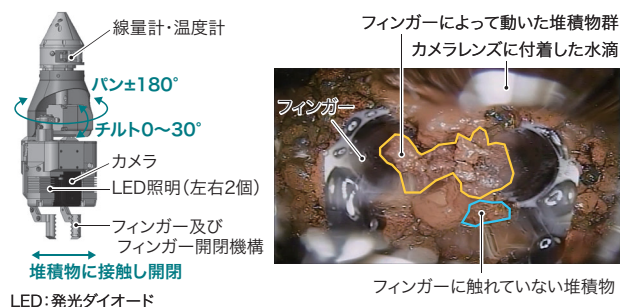


図6. 2号機 調査ロボットと堆積物調査映像

堆積物の一部は、調査ロボット（外形寸法は約30 cm（長さ）×約10 cm（幅）、質量は約1 kg）のフィンガーで把持して動かせることを確認した。

Survey unit for 1F Unit 2 and image of deposits at bottom of pedestal

ペDESTAL底部を6か所、プラットホームのフレーム上を4か所それぞれ調査した。堆積物の一部は調査装置のフィンガーで把持して動かせることを確認した。

2.2.2 3号機の原子炉格納容器内部調査

3号機は、2017年7月に燃料デブリの有無及び構造物の状況把握を目的に調査した^(注1)。調査対象のペDESTAL底部が水没しているため、水中ROV（Remotely Operated Vehicle）を開発した。3次元（3D）の移動による複雑な調査であることから、失敗リスク低減のために大型水槽に実規模モックアップを設置し、様々な試験と訓練を実施した。水中ROVの外観と調査結果に基づくペDESTAL内の3Dマップを、図7に示す⁽⁷⁾。

3Dマップは、カメラ映像に基づきSfM（Structure from Motion）処理を施した3Dデータ及び設計図書による推定に基づいて作成した。ペDESTAL内のほぼ全域にわたって、構造物の損傷や、落下物、溶融凝固物と見られる堆積物が分布していることを確認した。

2.3 汚染水対策

1F事故で発生した大量の放射性汚染水を処理するため、当社は事故直後にセシウム吸着装置（SARRY™）などを納入して放射性セシウムを除去するとともに、原子炉冷却用に再利用できる浄化ループを構築した。また、浄化ループにおいて淡水化装置によって分離された高濃度汚染水からトリチウムを除く62種類の放射性核種を告示濃度限度より十分低いレベルに低減できる設備として、ALPS（Advanced Liquid Processing System）を納入し、2013年3月から運転を開始した。更に2014年9月には設置済みのALPS（以下、既設ALPSと略記）の運転経験から得た知見を反映し

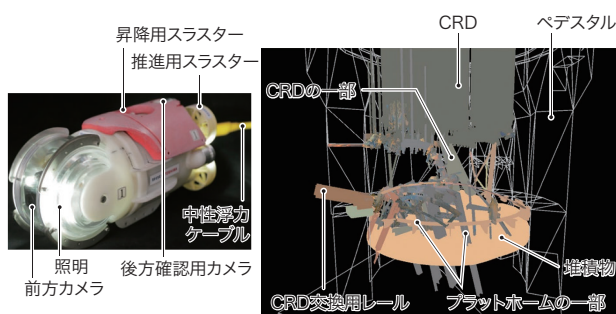


図7. 3号機 調査ロボットとペDESTAL内部の3Dマップ

水没したペDESTAL底部の3Dマップを、水中ROV（外形寸法は、約30 cm（長さ）×約13 cm（外径）、質量は約2 kg）により撮影した映像データと設計情報に基づいて作成した。その結果から、ペDESTAL内のほぼ全域にわたって構造物の損傷や落下物、溶融凝固物と見られる堆積物が分布していることを確認した。

Survey unit for 1F Unit 3 and three-dimensional reconstruction from images of interior of pedestal

て改良を加えたALPS（以下、増設ALPSと略記）の運転を開始した。

2.3.1 既設ALPSと増設ALPSの概要

既設ALPSの系統構成を、図8に示す⁽⁸⁾。既設ALPSは、前処理工程と複数の吸着塔から構成される。系統構成にあたっては事前に試験を実施し、前処理工程に、高濃度汚染水中のコバルトやニッケルなどの重金属を共沈、ろ過により除去する鉄共沈処理と、後工程の吸着塔における放射性核種の吸着を妨害するカルシウムなどを沈殿、ろ過で除去する炭酸塩沈殿処理を導入した。吸着塔及びイオン交換樹脂塔には、各放射性核種を除去するために選定した数種類の吸着材が充填されており、前処理工程の処理水から放射性核種を吸着させて除去する。また、前処理工程で発生す

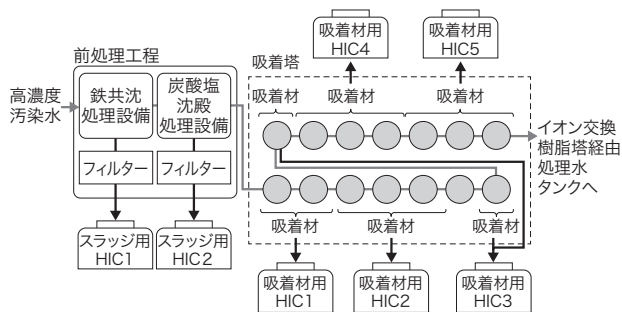


図8. 既設ALPSの系統構成（2013年建設時から2016年改良工事までの構成）

既設ALPSは前処理工程と複数の吸着塔から構成される。発生する沈殿物と使用済み吸着材はHICに排出される。

Configuration of first Advanced Liquid Processing System (ALPS) during 2013–2016 period



図9. 増設ALPSの全景

既設ALPSの処理実績に基づいて鉄共沈工程を削除すると同時に、実液を使用したラボ試験結果から、吸着塔数の追加、吸着材の通水順序変更を適用して、核種除去性能を向上させた。

Second ALPS system

る沈殿物のスラリーと使用済み吸着材は専用の高性能容器（HIC：High Integrity Container）に排出し、一時保管施設に貯蔵する。

増設ALPSは既設ALPSと同様の構成であるが、既設ALPSの処理実績から、鉄共沈工程を削除した。また、実液を使用したラボ試験結果から、吸着塔数の追加、吸着材の通水順序変更を適用し、核種除去性能を向上させた。図9に、増設ALPSの全景を示す。

2.3.2 中長期ロードマップに基づく汚染水処理

設備運転開始以降、既設ALPSと増設ALPSは汚染水処理の主力設備として、中長期ロードマップの汚染水対策のマイルストーンに基づき、2015年5月にタンクに貯蔵した高濃度汚染水の処理を完了した。

2016年は告示濃度限度未満を満足する運用に対応するため、除去性能に不足傾向が見られた放射性ヨウ素について、汚染水中で存在する三つの形態（ヨウ化物イオン、ヨウ素酸イオン、コロイド）の除去に適した吸着材をそれぞれ導入した。

2017年には、漏えいリスクが高いとされたフランジ型タンクの解体処理を進める必要があり、タンク内に貯蔵されているストロンチウム処理水（汚染水からSARRY™などによって放射性セシウム、放射性ストロンチウムを処理した水）の処理を加速させるため、排出性を改良した吸着材の導入や運転サポートを行った。これにより、2018年におけるフランジ型タンクに貯蔵されるストロンチウム処理水全てについての処理完了の達成に貢献した。

また、2020年8月には、溶接型タンクに貯蔵されているストロンチウム処理水のうち、日々の水処理に必要な運用タンクを除く全ての水の処理を完了したほか、図10に示すように2023年1月時点で全体の処理量約130万m³のうち既

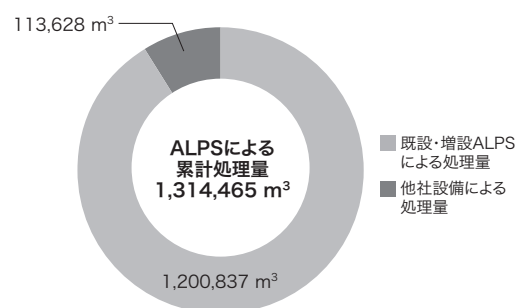


図10. 既設・増設ALPSの処理実績（2023年1月19日時点）

既設及び増設ALPSによる処理量は全体の約90%にあたる約120万m³を達成した。

Total amount of contaminated water treated by first and second ALPS systems (as of January 19, 2023)

設・増設ALPSによる処理量は全体の約90%にあたる約120万m³を達成した。

3. あとがき

2章で述べたように、当社は、1Fの廃炉を進めるにあたり、政府が決定する中長期ロードマップにおける重要なマイルストーンの達成に貢献してきた。

これまで得た知見を生かし、今後も1Fの廃炉・汚染水・処理水対策に貢献していく。

文 献

- (1) 東京電力ホールディングス, “福島第一原子力発電所・事故の収束に向けた道筋”. <<https://www.tepco.co.jp/cc/press/11041702-j.html>>, (参照 2023-02-24).
- (2) 廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議, “東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ”. 経済産業省. <<https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/20191227.pdf>>, (参照 2023-02-24).
- (3) 東芝エネルギーシステムズ, “福島第一原子力発電所3号機使用済燃料プール内からの燃料取り出しに向けて”. 特集・トピックス. <<https://www.global.toshiba.jp/company/energy/topics/nuclearenergy/fukushima-fhm.html>>, (参照 2023-02-24).
- (4) 東京電力ホールディングス, “福島第一原子力発電所 2号機 原子炉格納容器内部調査結果について”. 廃炉・汚染水対策チーム会合 第53回事務局会議. 東京, 2018-04, 経済産業省. 2018, 資料3-3, p.8-12. <<https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2018/05/3-03-02.pdf>>, (参照 2023-02-13).
- (5) 杉浦 鉄宰, ほか, 福島第一原子力発電所2号機の燃料デブリの可能性のある堆積物への接触調査. 東芝レビュー. 2019, 74, 6, p.63-66. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2019/06/74_06pdf/f01.pdf>, (参照 2023-01-23).
- (6) 東京電力ホールディングス, “2019/02/14 (木) 福島第一原子力発電所 2号機 原子炉格納容器内部調査の様子について”. <https://www4.tepco.co.jp/library/movie/detail-j.html?catid=107299&video_uuid=yq53a9f4>, (参照 2023-02-13).
- (7) 東京電力ホールディングス, “福島第一原子力発電所 3号機 原子炉格納容器内部調査 映像からの3次元復元結果”. 廃炉・汚染水対策チーム会合 第53回事務局会議. 東京, 2018-04, 経済産業省. 2018, 資料3-3, 8p. <<https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2018/05/3-03-03.pdf>>, (参照 2023-01-23).
- (8) 東京電力ホールディングス, “多核種除去設備 (ALPS) 確証試験及び設備設計の状況”. 政府・東京電力中長期対策会議運営会議 (第8回会合). 東京, 2012-07, 経済産業省. 2012, 資料3-2滞留水処理, p.8. <https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/120730/120730_01k.pdf>, (参照 2023-01-23).



中原 貴之 NAKAHARA Takayuki
東芝エネルギーシステムズ(株)
パワーシステム事業部 原子力福島復旧・サイクル技術部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



杉浦 鉄宰 SUGIURA Tessai
東芝エネルギーシステムズ(株)
パワーシステム事業部 原子力機械システム設計部
日本原子力学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



奈良部 徹 NARABE Tohru
東芝エネルギーシステムズ(株)
パワーシステム事業部 原子力化学システム設計部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.