

福島第一原子力発電所廃炉作業の進捗と遠隔装置類の実機適用状況

東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故を受け、日立グループは、発電所構内の除染作業、環境整備、汚染水対策、使用済み燃料取り出し、燃料デブリ取り出しなどに必要な技術開発および現地作業を進めている。

本稿では、福島第一原子力発電所の廃炉作業の進捗と、開発した遠隔装置類のうち、がれき撤去などの環境整備作業に用いた双腕重機ロボット「ASTACO-SoRa」、燃料デブリ取り出しの計画策定に必要な情報を取得するために実施した原子炉格納容器内部調査に用いた形状変化型ロボット「PMORPH」および「潜水機能付きボート」、高放射線環境下での重作業を実現する柔構造アーム「筋肉ロボット」について紹介する。

岡田 聡 | Okada Satoshi

足立 浩一 | Adachi Hirokazu

1. はじめに

福島第一原子力発電所の廃止措置においては、発電所構内の除染作業、環境整備、汚染水対策、使用済み燃料取り出し、燃料デブリ取り出しなど、さまざまな作業が必要であり、日立グループでは、そのために必要な技術開発および現地作業を進めている。

本稿では、これまでの技術開発および現場作業の進捗状況と、主な遠隔装置について述べる。開発してきたロボットのうち、作業ロボットとしては、狭い空間で重作業を行う双腕重機ロボット「ASTACO-SoRa」、高放射線環境に対応するため電子基板を極力使用せず流動アクチュエータとバネ構造を組み合わせた柔構造アーム「筋肉ロボット」、調査ロボットとしては、狭陰部から高放射線領域に進入し原子炉格納容器（PCV：Primary

Containment Vessel）内部を調査する形状変化型ロボット「PMORPH」、PCVの地下水中部分を調査する「潜水機能付きボート」について、装置の特徴と実機適用状況を解説する¹⁾。

2. 福島第一原子力発電所の廃炉作業の進捗

福島第一原子力発電所では、「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、「ロードマップ」と記す。）に基づき、汚染水対策、使用済み燃料プールからの燃料取り出し、燃料デブリ取り出し、廃棄物対策などの廃炉作業を進めている。

本章では、汚染水対策、使用済み燃料プールからの燃料取り出し、燃料デブリ取り出しに関する日立グループの取り組み状況を示す。

2.1

汚染水対策

汚染水は、原子炉内の溶融した燃料を冷やすために注入した水が溶融燃料に直接接触したり、破損した建屋に流入する雨水や地下水が建屋地下階に溜まっている放射性物質を含む水と混ざったりすることで発生する。

建屋に流入する地下水量を低減するには、建屋周辺に設置した井戸（サブドレン）にて地下水をくみ上げて地下水水位を低下させると同時に建屋内に設置したポンプにて建屋内滞留水水位を低下させる対応が必要である。日立グループは、サブドレンでくみ上げられた地下水を浄化する設備（サブドレン他浄化設備）や建屋内滞留水をくみ上げて汚染水処理設備に移送する設備（建屋内滞留水移送装置）を設置し、汚染水発生量の抑制に貢献した。さらに、建屋内滞留水移送装置のポンプ位置を各建屋最下階の床ドレンサンプ内に変更し、滞留水移送を実施することで最下階の床面露出状態を維持し、ロードマップでの目標工程であった「2020年内の建屋内滞留水処理完了」を達成した^{※), 3)}。

また、汚染水処理設備で処理した水を濾過、イオン交換などにより放射性核種（トリチウムを除く）を告示濃度限度を下回る濃度まで低減させる設備（高性能多核種除去設備）を開発・設置後、2015年に処理運転を開始し、2023年2月に使用前検査に合格した。ALPS（Advanced Liquid Processing System）処理水は福島第一原子力発電所の敷地内に設置されたタンクに保管されているが、今後、海水で希釈して海洋に放出される予定である。

2.2

使用済み燃料取り出し

4号機原子炉建屋は、3号機PCVから水素を含むベントガスが排気管経由で流入したため、水素爆発が発生し建屋上部が大きく破壊された。日立グループは、建屋上部オペレーティングフロア（以下、「オペフロ」と記す。）上に積み重なったがれきを撤去し、株式会社竹中工務店に協力して燃料取り出し用カバーおよび燃料取り扱い設備類を設置後、使用済み燃料プール内に散乱していたがれきの撤去を実施した。プール内のがれき撤去と並行して東京電力ホールディングス株式会社により燃料取り扱い設備を用いた使用済み燃料プール内の燃料の取り出しが実施され、2014年12月下旬に1,535体の燃料が撤去さ

れた⁴⁾。

1号機原子炉建屋は、震災後の津波により炉心冷却機能が喪失し、損傷した炉心から発生した水素が建屋内に漏れ出し水素爆発が発生した結果、建屋上部が大きく破壊された。2018年から原子炉建屋上部オペフロの北側、中央部のがれき撤去が開始され、日立グループはオペフロ南側に積み重なった天井クレーンおよび燃料交換機を含む、がれきの落下防止・緩和対策を2020年11月までに実施した⁵⁾。建屋全体を覆う大型カバーの完成後、カバー内のがれきを撤去し、燃料取り扱い設備類を設置する計画である。燃料取り出しは東京電力ホールディングスにより2027年～2028年度に開始される計画である。

2.3

燃料デブリ取り出し

震災当時、稼働中であった1～3号機には炉心に燃料が格納されており、震災後の津波により炉心冷却機能が失われた結果、燃料と燃料被覆管、炉内構造物などが溶け、冷えて固まった燃料デブリが炉心、圧力容器底部、PCV内に分布している。日立グループは、本格的な燃料デブリ取り出しに向けた工法検討に資する情報を収集するためにPCVの内部調査などを進めている。

2015年4月に実施した1号機PCV内部調査では、形状変化型ロボット「PMORPH1」を用いてPCV内部（ペDESTアル外地上階）の映像、温度、線量情報を収集し⁶⁾、2017年3月には、PMORPH1のカメラ部分を、カメラ・線量計付きのセンサーユニットを降下・上昇させるウインチで置き換えた「PMORPH2」を用いて、PCV内部（ペDESTアル外地下階）の映像、線量情報および燃料デブリの広がり状況を調査した⁷⁾。

2022年2月から2023年3月まで、「潜水機能付きボート」を1号機PCV地下階に投入して、ペDESTアル内外の詳細目視、ペDESTアル外地下階堆積物の三次元マッピング、ペDESTアル外地下階堆積物の厚さ測定、燃料デブリ検知、堆積物サンプリングなどのPCV内部（ペDESTアル内外）の情報収集、堆積物のサンプリングを実施した^{8), 9)}。

3. 遠隔装置

2章で示した廃炉作業を進めるために、多くの遠隔装置を開発・活用してきた。本章では、遠隔装置の事例について解説する。

※) 1～3号機原子炉建屋、プロセス主建屋、高温焼却建屋を除く。

3.1

双腕重機ロボット「ASTACO-SoRa」

日立グループでは、原子力災害対応の双腕重機ロボット「ASTACO-SoRa」を開発し、適用を進めてきた¹⁰⁾。ロボットの外観を図1に示す。このロボットは、幅980mmと小型の筐体に2本のアームを搭載することにより、建屋内での自由度の高い作業を可能とした。また、2本のアームは高さ約2.5 mまで昇降させることができ、アーム1本当たり150 kg、両アームで合計300 kgの重量を持ち上げることができる。さらに、アーム先端には、つかみ具、切断具、回転具、カメラ付き長尺アームなどを着脱することができ、多様な作業に対応している。ASTACO-SoRaの開発により福島第一原子力発電所の原子炉建屋内における高放射線環境下でもコンクリート片などのがれき除去を遠隔操作にて行うことが可能となった。

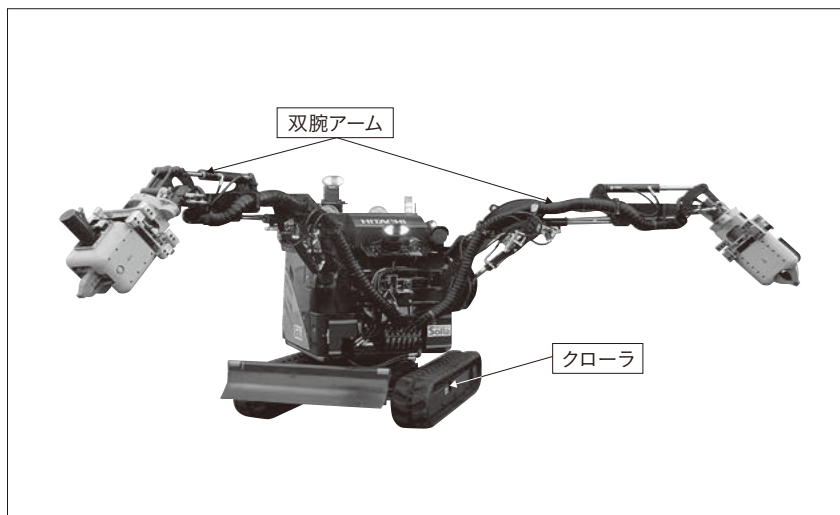


図1 | 双腕重機ロボット「ASTACO-SoRa」の外観

アーム先端のツールを遠隔で交換することが可能であり、建屋内でのさまざまな重作業へ対応できる。

3.2

柔構造アーム「筋肉ロボット」

高放射線環境下での使用のため耐放射線性の低いセンサー類を使用しないこと、狭隘空間での衝突時の対策のため水圧シリンダとバネなどの弾性構造を組み合わせて構成し、対象物や周囲に衝突しても破損させないことを特徴とした「筋肉ロボット」を開発した¹¹⁾。代表的なタイプである4脚+単腕型、双腕型の動作例を図2および図3に示す。図2はPCV内での作業のモックアップ試験状況である。上方の梁をつかんで任意位置に移動し、単腕の先端をさまざまなツールに交換することで効率的に作業を行うことが可能となる。図3は原子炉圧力容器を支持する円筒構造物であるペDESTAL内の落下物などを双腕型で除去するモックアップ試験の状況である。以上のように燃料デブリ取り出しのさまざまな場面での活躍が期待できる。

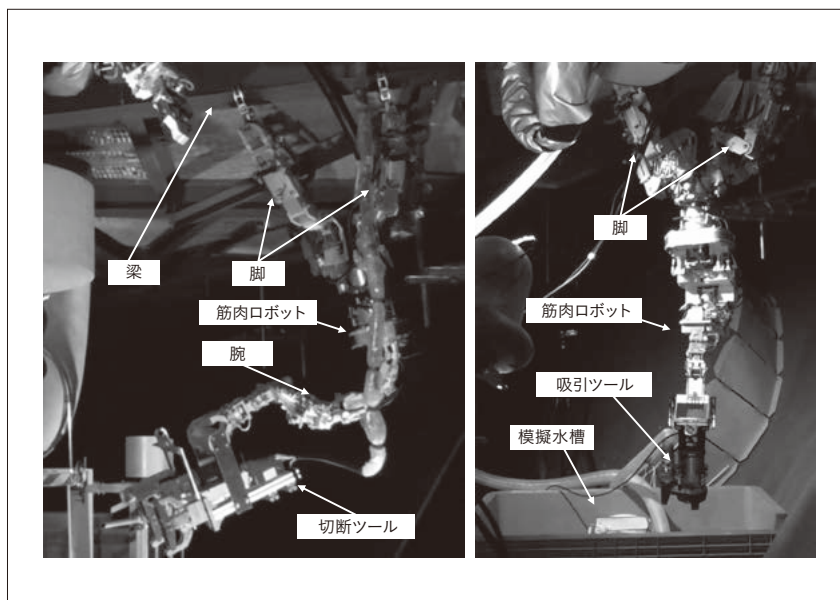


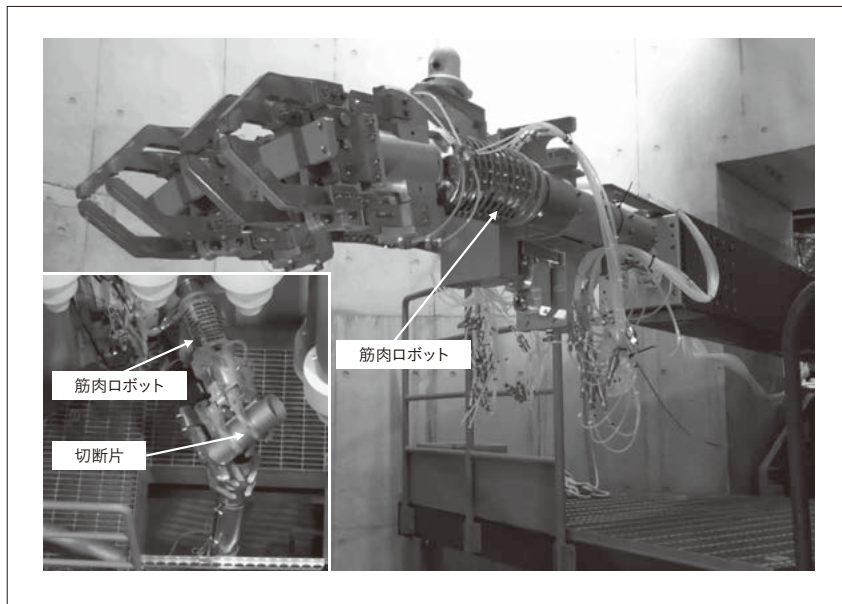
図2 | 4脚+単腕型筋肉ロボット

移動用の4脚でグレーティング支持梁を把持し、任意の位置で施工することが可能である。単腕の先端をさまざまなツールに交換することで多様な作業を実施することが可能である。

左の写真は切断ツールで干渉物の撤去作業を実施しているもの、右側の写真は吸引ツールを設置するところを示す。

図3 双腕型筋肉ロボット

このロボットは、2本の柔構造アームを備えたタイプである。左下の写真のように両腕で対象物を把持し、切断する。その後、把持した一方を撤去することを繰り返し撤去作業などを進めることが可能である。



3.3

形状変化型ロボット「PMORPH」

2015年4月に実施した、1号機PCV内の1階グレーチング上調査（B1調査）に用いた、PMORPH1の外観を図4に示す¹²⁾。(a)はガイドパイプ通過時の形状、(b)はグレーチング上を走行し調査を実施するときの形状である。PMORPH1は、二つのクローラの中に調査用のカメラを搭載している。このカメラは、コ型の状態で前方を向き、また上下のチルト機構を搭載しており、PCV内の構造物の状態を目視にて調査可能である。また、グレーチング上の環境を調査するため放射線線量計と温度計を搭載している。調査の結果、線量率や温度の分布を把握するとともに、既設構造物に大きな破損がないことが分かった⁶⁾。

さらに、2017年3月に実施した1号機PCV内の地下階調査（B2調査）に用いた、PMORPH2の外観を図5に示す¹²⁾。PMORPH2は、PMORPH1の調査用カメラに代えて、地下階にセンサーユニットを降下させるためのウインチを搭載している。また、センサーユニットにはカメラ

と線量計を搭載した。調査の結果、地下の落下物や堆積物の状況を把握するとともに、床面に近づくほど、線量率が高くなることが明らかとなった⁷⁾。

3.4

潜水機能付きボート

PCVの下部や原子炉建屋の地下階には、事故により燃料冷却水や地下水が滞留しており、PCV内地下階のペDESTAL外部を調査するため、潜水機能付きボートを開発した⁸⁾。その外観を図6に示す。今回開発したROV（Remotely Operated Vehicle）は、潜水機能付きボート5種類と小型ボート1種類の合計6種類で構成される。ROV-Aはケーブルが既設設備に絡まることを防ぐために、ガイドリングを地下構造物に磁力で取り付ける機能を有する。ROV-Bは堆積物3D（Three Dimensions）マッピング、ROV-Cは堆積物厚さ測定、ROV-Dは燃料デブリ検知、ROV-Eは堆積物サンプリングの機能を有している。また、ROV-A2は広域を目視することが可能な小型ボートである。

図4 PMORPH1の外観

本装置は管内走行時と平面走行時の形状を変更することで、異なる環境条件においても同一装置で安定走行を可能としている。

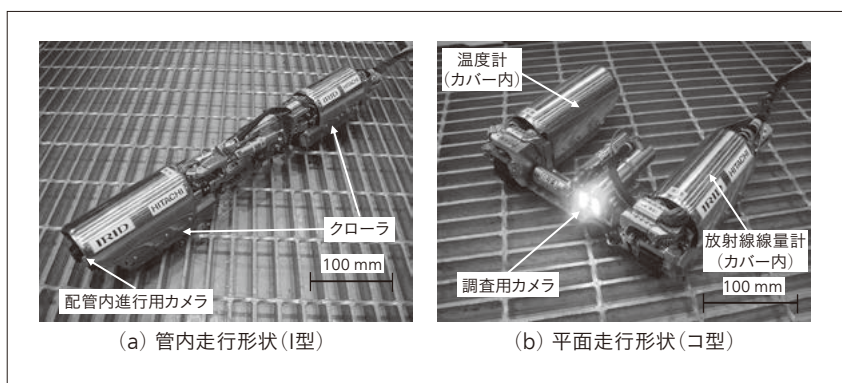


図5| PMORPH2の外観

PMORPH1の移動機構へセンサーユニットを備えたウインチ機構を搭載し、調査範囲を拡大した。

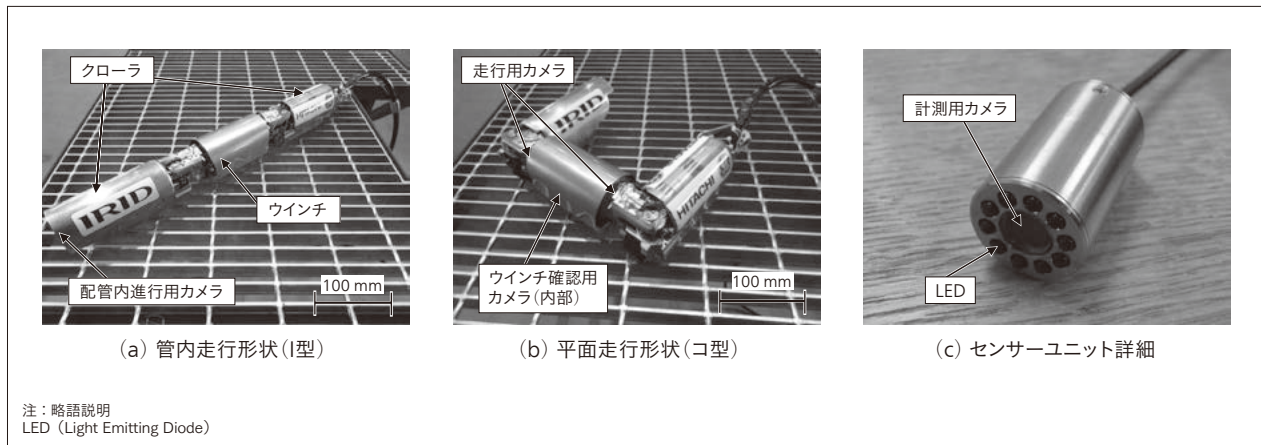
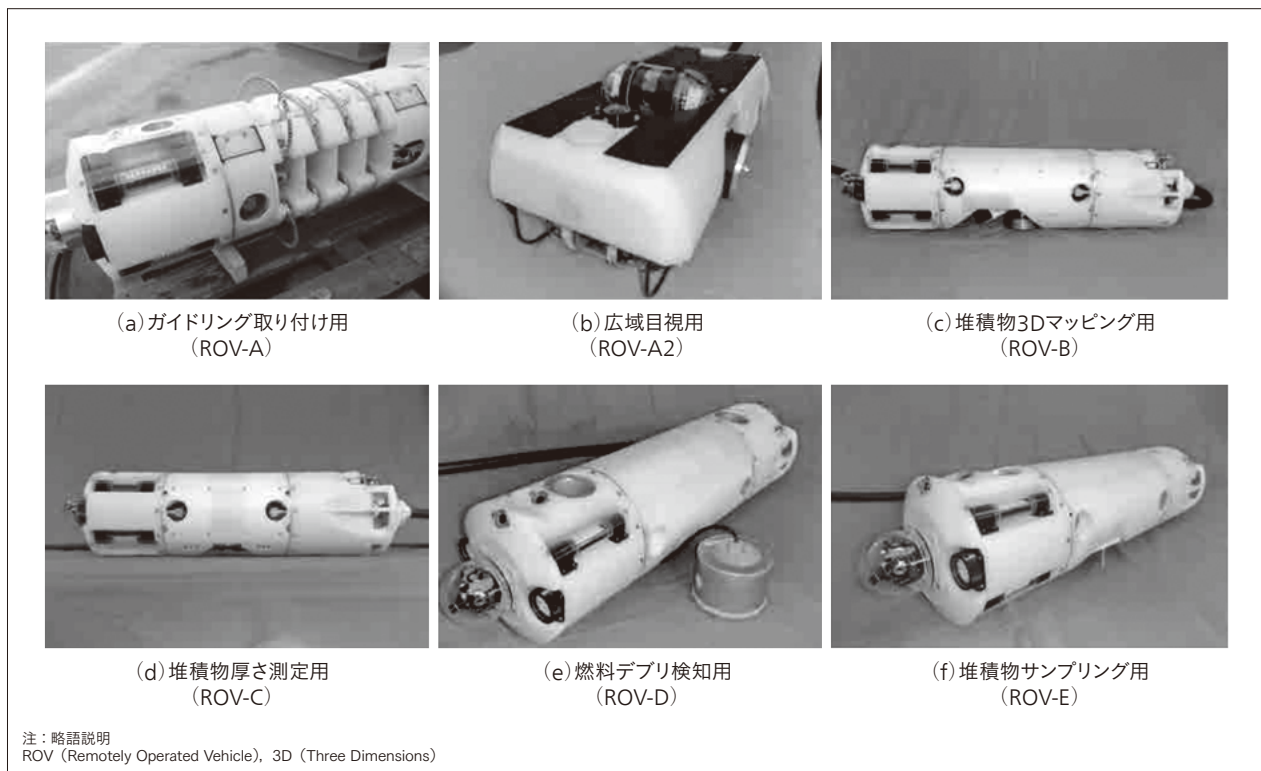


図6| 潜水機能付きボートのラインアップ

水中を遊泳可能な潜水機能付きボートに各種計測器を搭載し、地下堆積物に関する情報を取得する。(a) はすべてのROVの航行時にケーブルをガイドするリングを取り付ける。(b) は小型で機動性を高めた目視調査用である。(c), (d), (e), (f) はそれぞれ、超音波を用いた堆積物3Dマッピング、超音波を用いた堆積物厚さ測定、放射線検知器による燃料デブリ検知、堆積物サンプリングの各機能を搭載している。



ROVのラインアップを図6に示す。ROV-Bは堆積物の3Dマッピングのために、走査型超音波距離計と水温計を搭載し、ペDESTAL外の大範囲の堆積物表面の点群データを取得する装置である。ROVの中央底面に取り付けたアンカーにより姿勢を安定化し、約2 MHzの超音波距離計を、機械的チルト機構による $\pm 50^\circ$ のメカ走査と、チルト方向と直交する方向に $\pm 50^\circ$ の電子走査を組み合わせることで、三次元の形状計測を実現するものである。

また、ROV-Cは約100 kHzの低周波超音波センサーを用いて、ペDESTAL外の堆積物厚さと堆積物下の床面や燃料デブリ（塊や比重の大きい粉末層）の高さの測定を行うものである。

ROV-Dは、燃料デブリ特有の放射線を調査する装置である。10 Gy/hを超える放射線環境であっても核種分析が可能なガンマ線計測と中性子束計測を同時に実現可能な放射線計測器を搭載している。

ROV-Eは、直径約60 mmの円筒形サンプリング容器を

図7 | 潜水機能付きボートに搭載した各種計測器

水中を遊泳可能な調査装置に各種計測器を搭載し、地下堆積物に関する情報を取得する。超音波を用いた堆積物3Dマッピング、堆積物厚さ測定、燃料デブリ検知、堆積物サンプリングを実施する。

調査装置	計測器	実施内容
ROV-B 堆積物3Dマッピング	・走査型超音波距離計 ・水温計	走査型超音波距離計を用いて堆積物の高さ分布を確認する。
ROV-C 堆積物厚さ測定	・低周波超音波センサー ・水温計	低周波超音波センサーを用いて堆積物の厚さとその下の物体の状況を計測し、デブリの高さ、分布状況を測定する。
ROV-D 燃料デブリ検知	・CdTe半導体検出器 ・改良型小型B10検出器	燃料デブリ検知センサーを堆積物表面に投下し、核種分析と中性子束測定により、デブリ含有状況を確認する。
ROV-E 堆積物サンプリング	・吸引式サンプリング装置	堆積物サンプリング装置を堆積物表面に投下し、堆積物表面のサンプリングを行う。

航続可能時間：約80時間／台。調査のために細かく動くので、柔らかいポリ塩化ビニル製のケーブルを採用した。
(ROV-B：φ33 mm, ROV-C：φ30 mm, ROV-D：φ30 mm, ROV-E：φ30 mm)

用いて、堆積物を少量サンプリングする機構を搭載している（図7参照）。

調査の結果、PCV内部（ペDESTAL内外）の堆積物の広がり、放射線の放出状態など、燃料デブリ取り出しの計画策定に資する情報が収集できた。

4. おわりに

本稿では、福島第一原子力発電所の廃止措置に関するこれまでの開発および現場作業の進捗状況と、主な遠隔装置について解説した。

進捗状況としては、汚染水対策、使用済み燃料プールからの燃料取り出し、燃料デブリ取り出しについて示した。また、遠隔装置については、双腕重機ロボット「ASTACO-SoRa」、柔構造アーム「筋肉ロボット」、形状変化型ロボット「PMORPH」、多様な水中調査をする「潜水機能付きボート」に関して解説した。

これらのロボットにより、廃止措置推進に寄与することができたと考える。今後も、長期にわたる廃止措置事業を進めるため、技術開発を進めていく。

謝辞

本稿で述べた装置は、日立グループのロボット技術を活用し開発したものである。そのうち、形状変化型ロボット「PMORPH」と、「潜水機能付きボート」は、資源エネルギー庁の補助事業である平成24年度発電用原子炉等事故対応関連技術開発費補助金、平成25年度発電用原子炉等廃炉・安全技術開発費補助金、平成25～30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金」など、「ペDESTAL内作業用の双腕型筋肉ロボット」は、平成28年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金」により、技術研究組合国際廃炉研究開発機構の事業として開発したものである。また、双腕重機ロボット「ASTACO-SoRa」の開発にあたっては、2006～2010年度に実施されたNEDO委託事業「戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト」により培われた技術的なノウハウが活用されており、関係各位に深く感謝の意を表するものである。

参考文献など

- 1) 岡田聡, 外: 福島第一原子力発電所の廃炉に向けたロボット技術開発と実機適用, 日立評論, 102, 2, 270~275 (2020.3)
- 2) 廃炉・汚染水対策関係関係等会議, 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 (2019.12),
<https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/20191227.pdf>
- 3) 東京電力ホールディングス株式会社, 建屋滞留水処理等の進捗状況について (2020.12),
<https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2020/12/3-1-3.pdf>
- 4) 東京電力株式会社, 福島第一原子力発電所4号機使用済燃料プールからの燃料取り出し完了について (2014.12),
https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2014/images/handouts_141222_04-j.pdf
- 5) 東京電力ホールディングス株式会社, 1号機使用済燃料プールからの燃料取り出し,
<https://www.tepco.co.jp/decommission/progress/removal/unit1/index-j.html>
- 6) 東京電力株式会社, 「原子炉格納容器内部調査技術の開発」ペDESTAL外側_1階グレーチング上調査 (B1調査) の現地実証試験の結果について (2015.4),
http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2015/images/handouts_150430_01-j.pdf
- 7) 東京電力ホールディングス株式会社, 1号機原子炉格納容器内部調査について (2017.3),
http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2017/images1/handouts_170327_14-j.pdf
- 8) 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構, IRIDシンポジウム2022 研究成果報告 1号機 PCV内部調査の実施状況 (2022.12),
https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2023/02/Sympo20221207_02.pdf
- 9) 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構, 東京電力ホールディングス, 1号機 PCV内部調査 (後半) について (2023.3),
https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2023/04/202303301goukiPCVnaibutyousakouhan_.pdf
- 10) 株式会社日立エンジニアリング・アンド・サービスニュースリリース, 原子力災害対応用小型双腕重機型ロボット『ASTACO-SoRa』を開発 (2012.12),
<http://www.hitachi-hgne.co.jp/news/2012/20121207.html>
- 11) 平野克彦, 外: 筋肉ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol. 36, No. 6, pp. 408~411 (2018.7)
- 12) 岡田聡, 外: ロボット技術とAI (人工知能) の動向 原子炉格納容器内部調査装置の開発~形状変化型ロボット「PMORPH(ピーモルフ)」~, 電気評論, Vol. 641, No. 102 (夏季増刊号), pp. 27~31 (2017.6)

執筆者紹介



岡田 聡

日立GEニュークリア・エナジー株式会社 原子力生産本部
福島・廃止措置エンジニアリングセンタ 所属
現在, 福島第一原子力発電所廃止措置向けの燃料デブリ取り出し技術, 調査技術の設計開発に従事
博士(情報科学)
日本ロボット学会会員, 日本原子力学会会員,
日本機械学会会員, 日本保全学会会員



足立 浩一

日立GEニュークリア・エナジー株式会社
福島・サイクル技術本部 福島・サイクルプロジェクト部
福島プロジェクトグループ 所属
現在, 福島第一原子力発電所廃止措置のプロジェクト取りまとめ業務に従事