

福島第一原子力発電所 第2／3号機 格納容器内部調査のための遠隔調査装置の 開発と調査結果について

Development of Remotely-Operated Devices
for Investigation Inside Primary Containment Vessel (PCV)
of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 2 and 3 and Survey Results

東芝エネルギーシステムズ(株)、 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構	杉浦 鉄宰	Tessai	SUGIURA	Nonmember
東芝エネルギーシステムズ(株)、 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構	清水 智得	Chiari	SHIMIZU	Nonmember
東芝エネルギーシステムズ(株)、 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構	小林 大治	Taiji	KOBAYASHI	Nonmember
東芝エネルギーシステムズ(株)、 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構	坂本 直弥	Naoya	SAKAMOTO	Nonmember
東芝エネルギーシステムズ(株)、 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構	久米 直人	Naoto	KUME	Nonmember
東芝エネルギーシステムズ(株)、 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構	畠山 誠	Makoto	HATAKEYAMA	Nonmember

At the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, it is critical to (1) confirm the presence of fuel debris inside the PCV that could be melted fuel as a result of the hydrogen explosion followed by the accident; and (2) conduct in-depth investigations prior to decommissioning. However, the conditions inside the PCVs were unknown. Under this circumstance, International Research Institute for Nuclear decommissioning (IRID) and Toshiba ESS jointly developed devices that can access to the lower part of a PCV and conducted surveys to confirm the current status. Since the conditions for the surveys are different between the PCVs in Units 2 and 3, remotely-operated devices were developed for each unit. In addition, in order to fully understand the spatial conditions inside the pedestal, a spherical image was created for the Unit 2; and the three-dimensional data with SfM processing was restored for the Unit 3.

Keywords: Investigation robot, Decommissioning, Fukushima Daiichi, Melt-Down Accident

1. 緒言

福島第一原子力発電所の第1～3号機では、炉心が熔融し、核燃料が炉内構造物の一部とともに燃料デブリとして、原子炉圧力容器（以下、RPV）の底部から、原子炉格納容器（以下、PCV）の底部に落下した可能性があると考えられている。燃料デブリの分布推定をFig. 1に示す[1]。燃料デブリの取出し手順や工法を検討するため、燃料デブリの位置や分布の情報が求められているが、いまだ確認できていない。

そこで、東芝エネルギーシステムズ株式会社と技術研究組合国際廃炉研究開発機構（以下、IRID）は、燃料デブリの取り出しに先立ち、福島第一原子力発電所第

連絡先: 杉浦鉄宰、〒235-8523 横浜市磯子区新杉田町8、東芝エネルギーシステムズ株式会社、
電話: 045-770-2150
E-mail: tessai1.sugiura@toshiba.co.jp

2号機（以下、2号機）および第3号機（以下、3号機）において、PCV下部にアクセスし、内部の状況調査を可能とする技術開発を行った [2]。本報では、2号機と3号機それぞれのPCV内環境に対応できる遠隔調査装置の概要、およびペダスタル内部の状況を把握するための調査結果のデータ解析に関する概要について報告する。

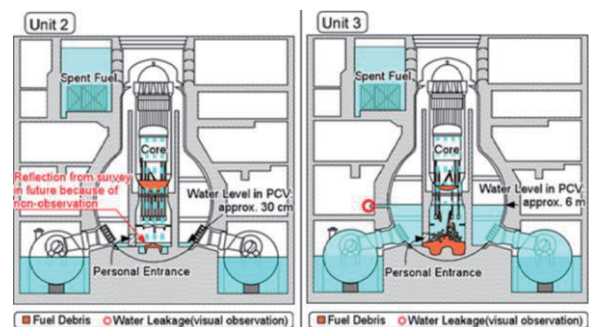


Fig. 1 Estimate of distribution of fuel debris at Units 2 and 3

2. 2号機PCV内部調査

2.1 調査概要

2号機では、Fig. 2に示すようにPCV貫通部（X-6ペネ）より調査装置をPCV内に投入し、PCVペDESTAL内部プラットフォーム上下の内部構造物の状況を調査した[2]。本調査は2017年1月にペDESTAL内プラットフォーム上側の調査（以下、プラットフォーム上側調査）を、2018年1月にプラットフォーム下側の調査（以下、プラットフォーム下側調査）をそれぞれ実施した。プラットフォーム上側調査では、ペDESTAL内構造物の損傷の有無を主に確認し、その調査結果に基づいてプラットフォーム下側調査を行った。プラットフォーム上側調査では、プラットフォーム上のグレーチングの一部が脱落していることを確認した。そこで、プラットフォーム下側調査では、複数ある脱落部のうちの2か所から調査ユニットをペDESTAL床面付近へ吊り降ろす計画とした。次節に、プラットフォーム下側調査で開発した遠隔調査装置について報告する。

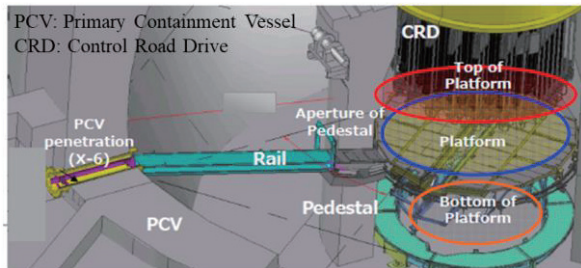


Fig. 2 Investigation area for Unit 2

2.2 プラットホーム下側調査向け遠隔調査装置

遠隔調査装置の主要構成をFig. 3に示す。遠隔調査装置は、直径約110mmのガイドパイプに、折曲げ機構および、径の異なる同心の円筒を組み合わせた伸縮式パイプを接

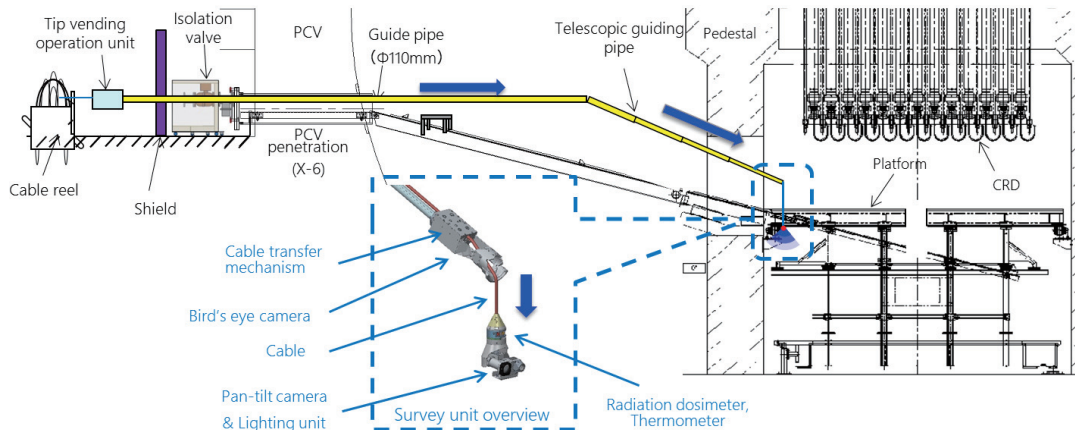


Fig. 3 Schematic of remotely-operated devices for Unit 2

続し、その先端に調査ユニットを取り付けた。ガイドパイプは長尺になることから、ガイドパイプの強度向上と調査ユニットの軽量化を図った。

2.2.1 調査ユニット

調査ユニットは、ケーブル送り機構（調査ユニット監視用の俯瞰カメラ付き）、パンチルトカメラ（外部照明および温度計・線量計付き）によって構成した。調査ユニットの仕様と外観をそれぞれTable 1、Fig. 4に示す。パンチルトカメラはケーブル送り機構によって昇降可能で、上下・左右の首振り機能によってペDESTAL内を広範囲で撮影することができる。プラットフォーム上側調査にて、PCV内は暗闇のほか霧環境であることを確認されたため、霧による照明のハレーション対策が求められた。

Table 1 Basic specification of survey unit

Dimensions / Weight	Approx.40 cm/ Approx.2 kg
Features	Two Cameras (Pan-tilt camera, Bird's eye camera), Lighting unit (LED), Telescopic mechanism of lighting Cable transfer mechanism, Radiation dosimeter, Thermometer
Radiation Hardness	Approx. 1,000Gy (gray)

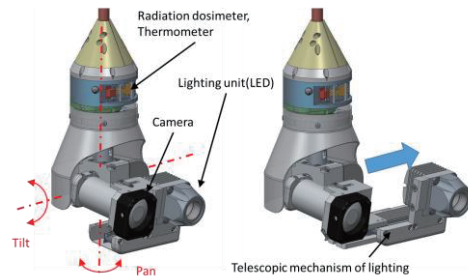


Fig. 4 Overview of survey unit

この対策のためにはカメラと外部照明の位置を離す（即ち、光軸をずらす）ことが有効であるが、調査ユニットがガイドパイプ内に納まっている状態では寸法制約で難しいことから、調査ユニットがペDESTAL内にアクセスした後に外部照明を伸展させる照明伸展機構を採用した。

2.2.2 画像処理によるペDESTAL内天球画像

調査で取得する映像だけではペDESTAL内の空間全体の状況を把握することが難しいため、調査完了後のデータ解析では天球画像を作成する。調査映像は照明伸展機構を用いても低減しきれない霧によるハレーションの影響が残ることが予測されるため、カメラ映像に対して鮮明化処理を施し、視認性を高めた静止画をつなぎ合わせて天球画像を作成する計画とした。

2.3 ペDESTAL内での調査計画

調査ユニットを吊り降ろす2つの脱落部は、Fig. 5に示すようにペDESTAL開口部の内壁から近いもの（以下、脱落部①）と、脱落部①よりプラットフォーム中心に近いもの（以下、脱落部②）を候補とした。天球画像の作成のため、各脱落部の吊り降ろしルート上に複数の停止ポイントを設け、パンチルト機構で周囲の映像を取得する計画とした。

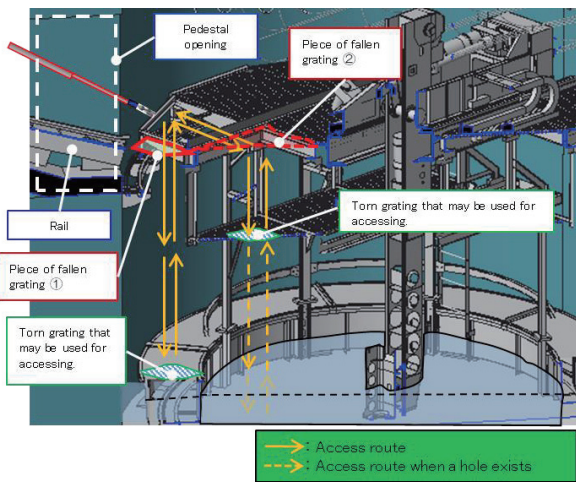


Fig. 5 Plans of survey unit access root

2.4 調査結果

調査の結果、脱落部②にはペDESTAL底部へアクセスできる穴は無かったが、脱落部①からケーブルトレイの上側まで調査ユニットをアクセスさせることに成功した。脱落部①への吊り降ろしルート上で測定した温度は21.0℃、空間線量率は最大8 Gy/hであった[3]。

プラットフォームの上側の天球画像を Fig. 6 に示す[4]。プラットフォームの上側にある構造物のうち、ペDESTAL開口部から見て左側の構造物(TIP案内管、PIPケーブル、

グレーチング等)は右側に対して比較的損傷していることを確認した。

プラットフォーム下側調査の天球画像を Fig. 7およびFig. 8にそれぞれ示す [4]。作業員アクセス口方向はFig. 7が、調査ユニットを吊り降ろした箇所の下側は Fig. 8 がそれぞれ示している。ペDESTAL底部には全域にわたり堆積物があり、小石状・粘土状の堆積物が存在している (Fig. 7、Fig. 8)。CRD交換機の回転フレーム、中間作業架台のフレーム、およびプラットフォームの支柱などの構造物が残存していることが確認された (Fig. 7) また、作業員アクセス口近傍のケーブルトレイの手前は、堆積物の高さが周辺より高いことが確認された。燃料集合体の一部(上部タイププレート)が落下していることが確認された (Fig. 8)。

3. 3号機PCV内部調査

3.1 調査概要

3号機では、2号機と同様にペDESTAL開口部から調査ユニットをアクセスさせ、ペDESTAL内部の構造物の状況を調査した。3号機の調査範囲の概略を Fig. 9に示す [5]。3号機のPCV内の水位は約6mであることを考慮し、PCV内部の水位より上部にある貫通口(X-53ペネ)を使用して調査することとした。調査対象範囲にアクセスするPCV内のペDESTAL開口部は水中環境となるため、水の中を遊泳し調査する小型ロボットを開発した。

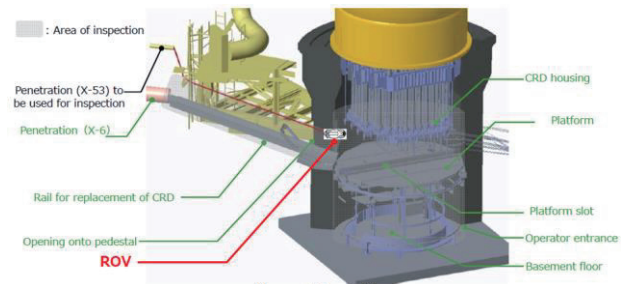


Fig. 9 Schematic of remotely-operated devices for Unit 3

3.2 遠隔調査装置

遠隔調査装置は、直径約13.5 cmのガイドパイプに、折曲げ機構を取り付け、その先端に調査ユニットとして、小型遊泳ロボットを取り付けた。

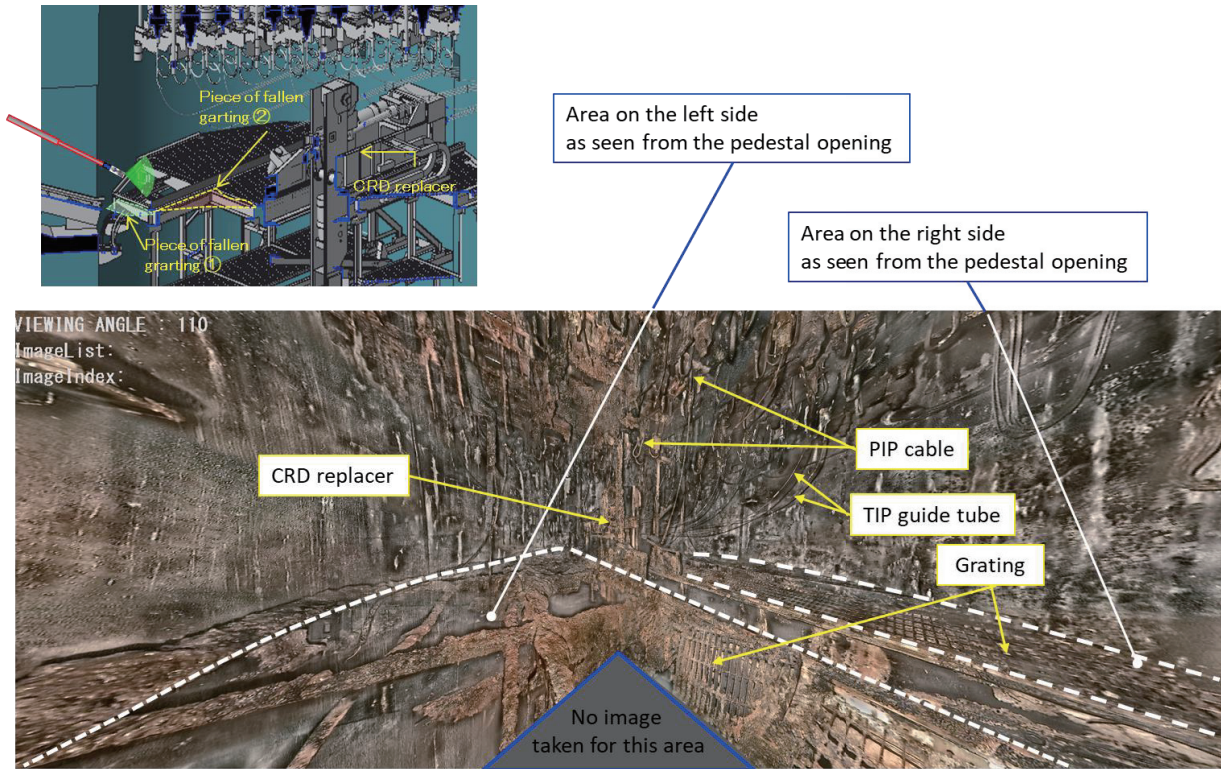


Fig. 6 Spherical image (Top of platform, Unit 2 PCV),

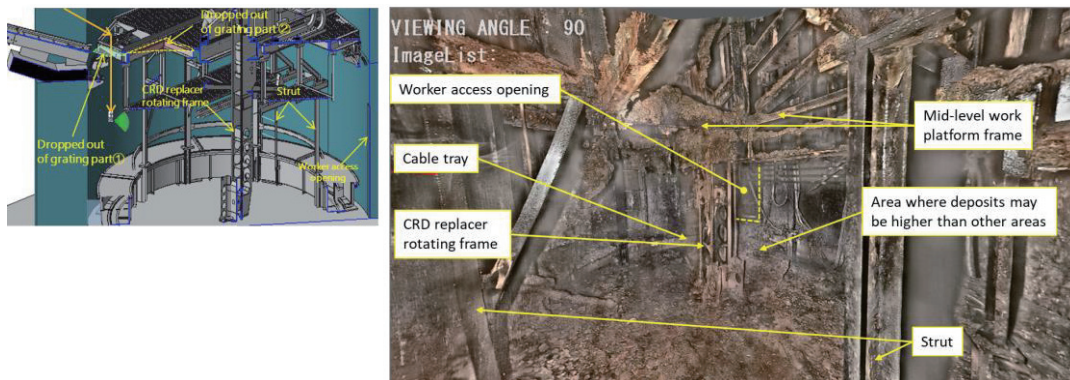


Fig. 7 Spherical image (Bottom of pedestal ①, Unit 2 PCV)

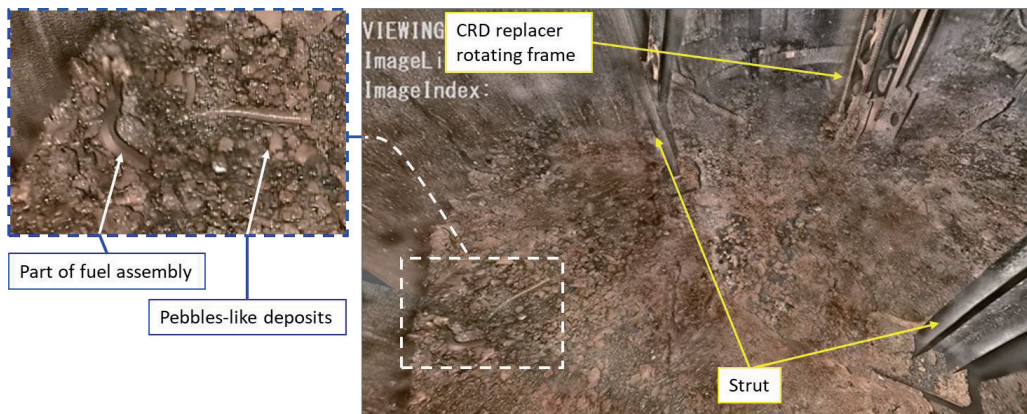


Fig. 8 Spherical image (Bottom of pedestal ②, Unit 2 PCV)

3.2.1 調査ユニット

小型遊泳ロボットは、Fig. 10 [6]に示すように、外径約13 cmの本体の前方に上下首振り可能なチルトカメラと、カメラのチルト動作に同調する高輝度 LED 照明を搭載している。また、暗闇・堆積物の舞い上がり等に対する視認性を向上させ、本体中央部の昇降用スラストと後部の前後推進用スラストで水中を3次的に自由に浮遊し調査することができる [2]。小型遊泳ロボットの仕様をTable 2に示す。

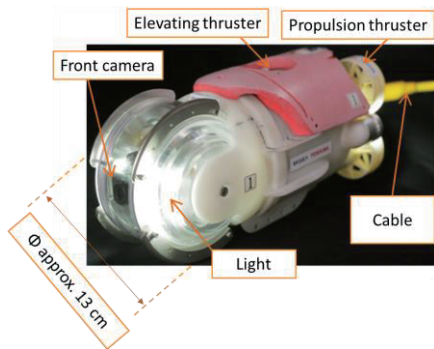


Fig. 10 Overview of survey unit

Table 2 Basic specification of survey unit

External Dimensions	Outer diameter : Approx. 13cm Length : Approx. 30 cm
Weight	In the air : Approx. 2 kg Underwater : 0 kg
Features	Two cameras Front LED lights(10W×2×2) Rear LED lights (10W×2) (All are with light control function)
Radiation Hardness	Approx. 200Gy (gray)

3.2.2 SfMによるの構造物三次元データの復元

3号機の調査では、2号機のプラットフォーム下調査と同様に、カメラ映像だけではペDESTAL内全体の状況把握が難しい。また、小型遊泳ロボットは水中で完全に静止できず、2号機の調査のように天球画像の作成に必要なデータを得ることは困難である。そこで、取得した映像データを、複数画像の特徴点を照合して視点の違いを算出することで3次元形状を復元する Structure from Motion (SfM) で処理し、事故後のペDESTAL内構造物の状況を三次元データとして復元する計画を立てた。また、小型遊泳ロボットがアクセスできる範囲は制限があり(次節

参照)、ペDESTAL内全体の網羅が難しい。そこで、映像に映っていないが位置を推定できる構造物は、設計情報と組み合わせて復元する計画とした。

3.3 ペDESTAL内での調査計画

小型遊泳ロボットは有線による操作を行うことから、PCV内の既設構造物などによるケーブルの引っ掛かりリスクがある。プラットフォームの上側ではTIP案内管やTIPサポートなど構造物が密集しているエリアがあるため、プラットフォームの上側では密集エリアを除いた箇所を優先的に調査する計画とした。また、プラットフォーム下側へのアクセスは、構造物の密集エリアを避けたプラットフォーム中央にあるスロット開口部から行う計画とした。

3.4 調査結果

映像データおよび設計情報に基づいて復元したペDESTAL内構造物の配置をFig. 11に示す [7]。ペDESTAL内の状況を全体的に把握することを目的として復元したため、構造物の配置は厳密でなく、おおよその位置である。

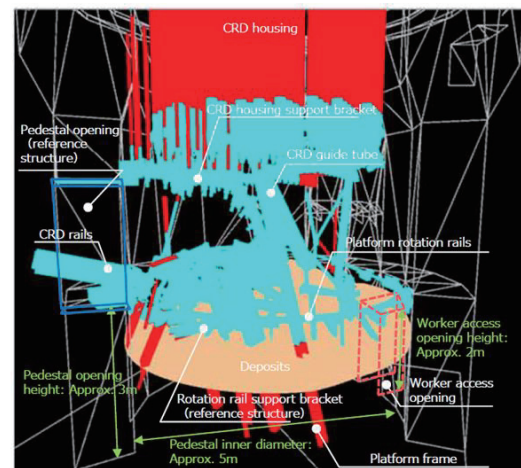


Fig. 11 Structures inside Unit 3 PCV

映像データおよび推定に基づいて復元したペDESTAL内の堆積物の範囲をFig. 12に示す(構造物は非表示) [7]。映像で確認された堆積物は周辺構造物の位置から堆積高さを推定し、映像で確認できなかった堆積物は、確認したポイントを補間している。堆積物と構造物の3次元復元結果をFig. 13に示す [7]。ペDESTAL内部では、CRDハウジング支持金具の脱落やプラットフォームがレールから外れているなど、各構造物の相対的な位置を視覚的に確認できる。堆積物はペDESTAL中心部が高く、中心から離れるほど低くなっている。

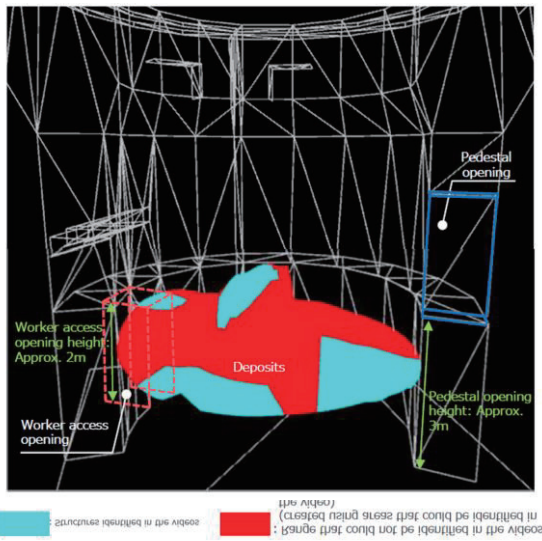


Fig. 12 Deposits inside Unit 3 PCV

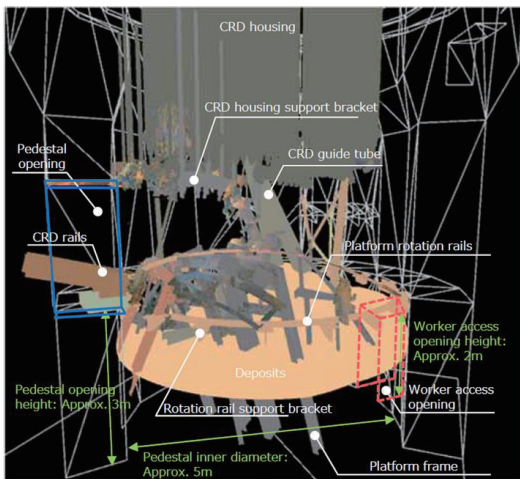


Fig. 13 3D reconstruction results, Unit3 PCV

4. まとめ

炉心溶融を起こした2つの原子力プラントのPCV内に遠隔調査装置でアクセスし、調査を行った。2号機と3号機とでは調査範囲の環境がそれぞれ異なることから、2号機では吊り降ろし型の調査ユニットを、3号機では水中遊泳型の調査ユニットを、それぞれ開発した。また、ペダスタル内部の空間全体の状況を把握するための調査データ解析も、2号機と3号機とでそれぞれ手法を変えて行った。何れの解析結果も、ペダスタル内の構造物や堆積物の状況を確認することができた。より詳細な燃料デブリの確認のためには、PCV内部の調査を続ける必要があると考える。今後も、一般公衆被ばくに影響を与えるこ

とがないよう、放射性物質の飛散防止対策を含む閉じ込め管理を徹底し、安全・確実に調査を進めていく計画である。

謝辞

2号機と3号機に適用した本遠隔調査装置は、技術研究組合 国際廃炉研究開発機構の「原子炉格納容器内部調査技術の開発」プロジェクトで開発したものであり、本成果は、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す。開発・調査にあたっては、東京大学・浅間教授、九州工業大学・浦教授をはじめ、福島第一原子力発電所関係者の皆様に、この場をお借りして御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation, “Technical Strategic Plan 2017 for Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station of Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.”, p.13, http://www.dd.ndf.go.jp/en/strategic-plan/book/20171005_SP2017eOV.pdf.
- [2] 佐伯 綾一, “福島第一原子力発電所 第2/3号機格納容器内部調査の状況について”, 日本機械学会, 第23回動力・エネルギー技術シンポジウム 講演論文集, 2018, No.18-17.
- [3] 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構, “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/事務局会議 (第53回), 2018年4月26日, http://iri.d.or.jp/wp-content/uploads/2018/04/20180426_1.pdf.
- [4] Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc, “Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 2 Primary Containment Vessel Internal Investigation”, 2018.4.26, http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2018/images/handouts_180426_02-e.pdf.
- [5] Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc., “Progress of Unit 3 PCV internal investigation”, 2017.7.18, http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2017/images/handouts_170719_01-e.pdf.
- [6] TOSHIBA Co., Ltd, “New Toshiba and IRID Robot Will Inspect Interior of Primary Containment Vessel at Fukushima Daiichi 3”, 2017.6.15, http://www.toshiba.co.jp/about/press/2017_06/pr1501.htm.
- [7] Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc., “3-D Rendering of Images obtained during the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 3 Primary Containment Vessel (PCV) Internal Investigation(PDF)”, 2018.4.26, http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2018/images/handouts_180426_03-e.pdf.