

# 福島第一原子力発電所建屋内の環境改善と遠隔除染技術開発

Development of Remote Decontamination Technologies Improving Internal Environment of Reactor Buildings at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station

堀田 浩司 林 弘忠 酒井 仁志

■HOTTA Koji ■HAYASHI Hirotsada ■SAKAI Hitoshi

東日本大震災時の東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故により、原子炉建屋内は、高濃度の放射性物質で汚染された。今後の原子力発電所の廃止措置に関連する作業を進めていくうえで、建屋内の環境を改善していくことが重要である。

東芝は、大震災以降4年以上にわたり、除染工事や国家プロジェクト「原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発」に参画することで、建屋内の雰囲気放射線量率の低減を目指して環境改善活動を行ってきた。これらの活動を通して、除染に適した様々な装置や支援技術を開発し、現場で適用して環境の改善に大きく貢献している。

The reactor buildings at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station of Tokyo Electric Power Co., Inc., which was seriously damaged by the Great East Japan Earthquake of March 11, 2011, have been highly contaminated by radioactive materials. To safely and efficiently advance the processes related to the forthcoming decommissioning of the reactors, it is necessary to improve the hazardous environment inside the reactor buildings.

During the more than four years that have elapsed since the Great East Japan Earthquake, Toshiba has been implementing various measures to reduce the ambient dose rates inside the reactor buildings through decontamination work and participation in a national project for the development of remote decontamination technologies for reactor buildings. A variety of vehicles and technologies to support decontamination work have been developed through these activities, and are significantly contributing to improvement of the environment inside the reactor buildings.

## 1 まえがき

福島第一原子力発電所(以下、福島第一と略記)は、東日本大震災時の事故により原子炉建屋(RB: Reactor Building)が高濃度の放射性物質で汚染され、廃止措置が決定している。そのため、福島第一1~3号機のRB内環境改善活動の一つとして、東芝は、国家プロジェクト(以下、国プロと略記)などにより遠隔除染技術を開発し、主として2号機及び3号機のRB除染工事への適用を図ってきた。RB内の除染工事は、現場の汚染が明確でない状況のなかで、試行錯誤しながらも東京電力(株)と協力して取り組むことで、相応の成果を上げつつある。

ここでは、これらの活動により得られた成果や知見に基づいて、RB内環境改善活動の概要、遠隔除染装置、及びこれらを支援する技術について述べる。

## 2 福島第一における環境改善活動の概要

### 2.1 2号機格納容器健全性調査のための除染工事

2号機は、原子炉上部から漏えいした放射性物質を含んだ蒸気がRB内に拡散し充満したことから、汚染物は床面、壁面、天井、及び機器の表面に付着して、乾燥し固着した状態であると推定された。また、事故時に機器上面などに堆積していたほこりなどにも汚染物が付着し、遊離性汚染物として存在

している<sup>(1)</sup>。

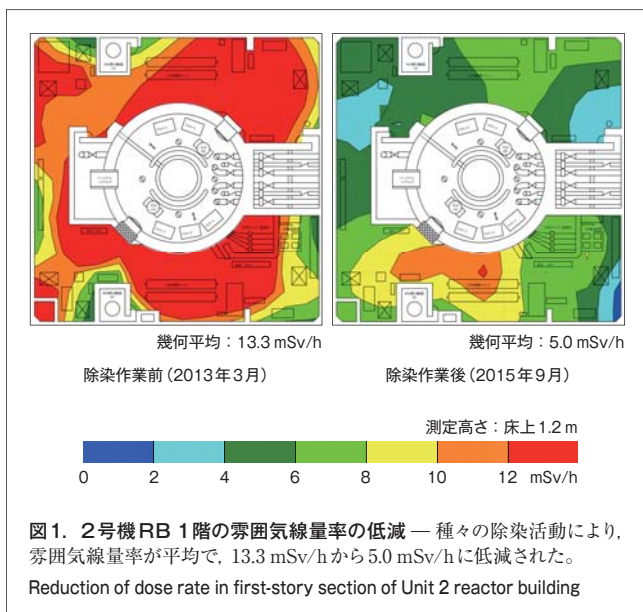
このような状況に対し、格納容器の健全性調査では、RBの1階通路部の放射線量(以下、線量と略記)低減を図る必要があり、まず遠隔操作による床面の散水ブラシ洗浄を実施した。そのうえで、壁面2m程度の高さまでの散水洗浄、5m程度の高さまでの拭取りや吸引などの除染作業を遠隔操作で順次実施した。これらの作業により、RB1階通路部の雰囲気線量率は、除染前には平均13.3mSv/h程度であったものが5.0mSv/h程度と全般的に低減し、1日の1人当たりの現場作業可能時間は、当初の10分程度から30分程度まで確保可能となった。除染作業前(2013年3月)と除染作業後(2015年9月)との雰囲気線量率を比較して図1に示す。

現在、更なる線量低減を目指し、ダクト内の除染や機器撤去を実施中である。

### 2.2 3号機格納容器健全性調査のための除染工事

3号機のRB内は、2号機と同様に放射性物質を含んだ蒸気で充満した状態であったが、水素爆発によりRBの上部が崩壊し、汚染したコンクリート片やコンクリート粉が飛散した状態になった<sup>(1)</sup>。除染工事は現在、2号機と同様にRBの1階通路部の線量低減を図るため、床面に堆積している小さい瓦礫(がれき)の回収、粉じんの回収、床面の散水ブラシ洗浄、及び壁面低所の散水洗浄を、遠隔操作で継続実施中である。

今後は、国プロにおいて開発中の高所除染装置を用いて、配管やダクト類が入り組んで存在する、床面から5~8mの高



除染の場所	対象箇所の汚染状態		
	遊離性汚染	固着性汚染	浸透汚染
オペフロ (5階)	—	—	高圧水 はつり装置
上部階 (2~4階)			
高所 (1階)			
中所 (1階)	中所除染装置		—
低所 (1階)	残存瓦礫 回収装置	ドライアイス プラスト除染装置	

■ 国プロで当社が開発 (装置名なしは開発中)  
■ 国プロで他社が開発を担当  
□ 国プロ以外で当社が開発

図2. 除染装置開発マトリックス — 遊離性汚染, 固着性汚染, 及び浸透汚染の3種類の汚染に対応できる装置を開発し実機適用している。  
Decontamination equipment development matrix

所の除染を計画している。

### 2.3 3号機燃料取出し用カバー設置のための除染工事

3号機RBの5階オペレーティングフロア (以下、オペフロと略記) では、水素爆発により、天井と壁面がほぼ崩壊し、これらが瓦礫となってオペフロ上に散乱し堆積していた。また、水素爆発に伴い、残っている床面躯体 (くたい) も健全な強度を保っていない箇所が存在している。このような状況に対し、大型クレーンで瓦礫を撤去した後、超高圧水やスキャブリングと呼ばれるコンクリート表層はつり<sup>(注1)</sup>技術を用いて、除染を実施した。

現在、粉じん及び瓦礫類の吸引除去による仕上げの除染作業を継続して実施中である。

## 3 遠隔除染装置

福島第一では、除染対象物の形状や、汚染の種類、除染対象へのアクセスルートなどが多岐にわたることから、種々の装置を開発し現場で適用してきた (図2)。

以下に、当社が開発し適用してきた遠隔除染装置について述べる。

### 3.1 高圧水はつり装置

水素爆発を起こした3号機のオペフロに適用した高圧水はつり装置は、約250 MPaの超高圧水でコンクリート表面から約1 cmの深さまでをはつり、同時に吸引回収を行う装置である (図3)。

この装置は、クレーンでつり上げられてオペフロに設置された後、ノズルが装置下部の所定枠内を自動で動き、装置下部

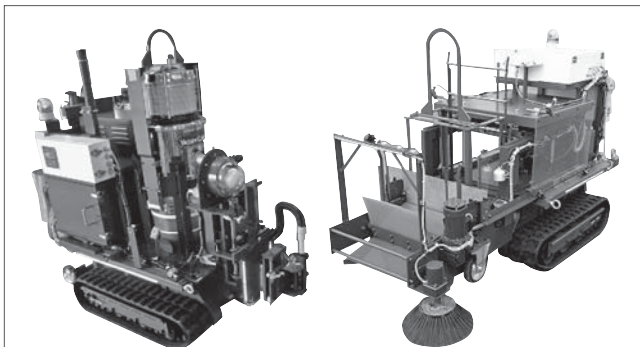
(注1) コンクリートで作られた壁などの表面を砕いたり削ったりする作業。



のはつり除染を行う。その操作は免震重要棟のリモート室から遠隔で行っている。1回の除染操作で、約15 m<sup>2</sup>の面積を2時間以内で除染可能である。この装置で吸引が困難な粉じん類を回収するため、仕上げ吸引を行う装置を別途準備し、適用している。

### 3.2 残存瓦礫回収装置

3号機RB 1階には、水素爆発の際に飛散したコンクリート片や粉じんが堆積していた。このため、床面の散水ブラシ洗浄に先立ち、コンクリート片や粉じんの回収が必要であった。



粉じん吸引装置

小瓦礫かき取り装置

図4. 残存瓦礫回収装置 — 水素爆発で飛散したコンクリートくずをかき取ったり吸引したりして回収する装置で、3号機RB 1階で使用されている。

Debris collection vehicles

RB内の残存瓦礫回収装置を図4に示す。小瓦礫かき取り装置は、かき取り刃により200 mm以下の瓦礫を回収容器に回収する。粉じん吸引装置は、固体だけでなく水や泥も吸引して回収できる。両装置ともにバッテリー駆動により遠隔で操作する。また、回収容器は別の遠隔装置で搬出する。

### 3.3 中所除染装置

中所除染装置は、RB 1階の高さ2～5 mの中所の機器表面を対象として開発された装置である。2号機RB 1階通路部で使用した中所除染装置は、東京電力(株)所有の小型重機のアーム先端に伸縮アームを取り付け、拭取りや吸引ができる構造である。拭取りの場合には伸縮アーム先端に拭取り用のモップを接続し、吸引の場合には吸引回収装置を後段の台車に搭載し、伸縮アームの先端に取り付けた吸引口とホースで接続する。

一方、3号機では、前面に7軸のアームを2台装備した双腕台車の中所除染装置を適用した(図5)。2号機で使用した中

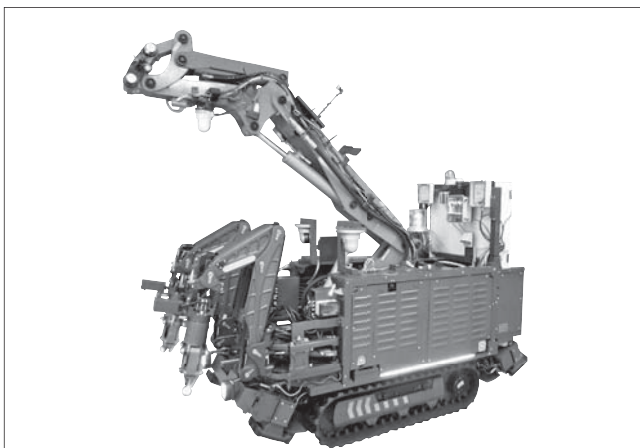


図5. 中所除染装置(双腕台車) — 中所の拭取りや吸引などを行う装置で、3号機RB 1階で使用した。

Dual-arm type decontamination equipment for medium-height parts

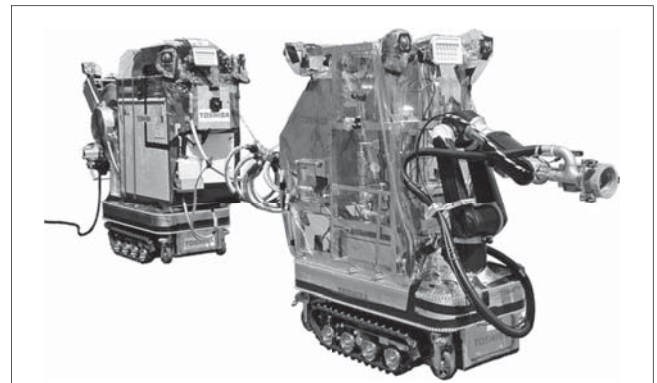


図6. ドライアイスブラスト除染装置 — ドライアイスブラスト除染に必要な機材を全て2台の台車に搭載し、2号機RB 1階で実証試験を実施した。

Dry-ice blast decontamination vehicle

所除染装置と同様に、拭取りと吸引ができるほか、後述するドライアイスブラスト除染装置を接続して使用することや、簡単な撤去作業ができるように考慮した。

### 3.4 ドライアイスブラスト除染装置<sup>1)</sup>

国プロ「平成25年度発電用原子炉等廃炉・安全技術開発補助金(原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発(原子炉建屋1階床面・壁面低所))」で開発したドライアイスブラスト除染装置を図6に示す。

ドライアイスブラスト除染は、ドライアイス噴射時の衝撃と昇華時の膨張により、汚染物を効率的に除去し、二次廃棄物の発生量が少ないことを特徴としている。この装置は、除染装置、回収装置、コンプレッサ、除染ノズル、及び操作アームを2台のクローラ台車上に搭載した構成で、2014年4月に2号機RB内で試験的に投入した。

### 3.5 その他の除染装置

2号機と3号機の除染工事では、前述の当社が開発した除染装置以外にも、以下の装置を適用した。

- (1) ラクーン 床面の散水ブラシ洗浄に使用
- (2) マイスター 床面の粉じん吸引回収に使用
- (3) ウォーリア 床面の瓦礫回収や、床面及び壁面低所の蒸気除染、泡除染などに使用

## 4 環境改善活動効率化のための支援技術

福島第一1～3号機のRB内除染作業が高線量率下での作業であることから、支援技術を検討して実用化を図っている。これらの支援技術は、当社が、装置を用いて走査し取得した3D(3次元)データ及びこれに基づいて作成した3D CADデータをベースとして開発したもので、実用化の段階にあると考えている。

### 4.1 現場状況の把握

レーザ装置を遠隔操作の小型走行台車に搭載し、現場をそ





図7. レーザスキャンデータの例 — 写真のように見えるが点群データであり、それぞれの点がX、Y、Zの位置情報を持つ。  
Example of laser scanning data

の装置で走査することで、現場の機器やその位置情報を採取できる。採取したデータ（以下、レーザスキャンデータと呼ぶ）は、点群のデータであり、それぞれの点がX、Y、Zの位置情報を持っていることから、点間距離を導出できる（図7）。

レーザスキャンデータにより、遠隔装置の通行幅の確認や、作業時の干渉物の確認などを行うことが可能になり、高線量率エリアでの作業員による現場調査が不要になる。また、あらかじめ除染の対象箇所を抽出したうえで、その箇所の除染計画を立案するのに有効に活用できる。

#### 4.2 方向別放射線源の影響評価

ガンマカメラを用いることで、撮影対象における汚染源の相対的な放射線源（以下、線源と略記）強度を測定できる。この測定結果をレーザスキャンデータと重ね合わせることで、線量の強度分布を可視化できる。また、同一箇所でも方向別にガンマカメラで採取したデータを利用することで、その箇所の線量率に対する方向別の線源の影響を評価できる。方向別の線源の影響を評価した例を図8に示す。

この評価結果を用いることで、除染の対象となる線源の所在の参考にでき、遮蔽計画にも活用できる。

#### 4.3 雰囲気線量率の可視化

除染などの作業で環境が改善された後、雰囲気線量率を測定して線量率マップを作成している。この線量率マップをレーザスキャンデータと合成すれば、作業エリアの線量率分布を可視化でき、作業員への線量低減の意識づけや低線量率エリアへの退避及び誘導を効果的に行うことができる（図9）。

#### 4.4 除染装置などのシミュレーション

レーザスキャンデータすなわち点群データから変換した3D CADデータ上に、除染装置のCADデータを任意に配置し、実際の除染時の台車走行や除染作業の動作をシミュレーションできる。これにより、作業の干渉を事前に確認できる。除染装置などのシミュレーションの例を図10に示す。

#### 4.5 走行中の台車の自己位置表示

これまで、遠隔除染装置の走行中の位置は、装置に搭載しているカメラ画像情報から把握してきた。しかし、これはオペ



図8. 方向別線源影響評価の例 — ガンマカメラ画像データとレーザスキャンデータを合成して、方向別線源影響評価を実施した。

Example of directional dose contribution estimation by combining gamma camera image and laser scanning data

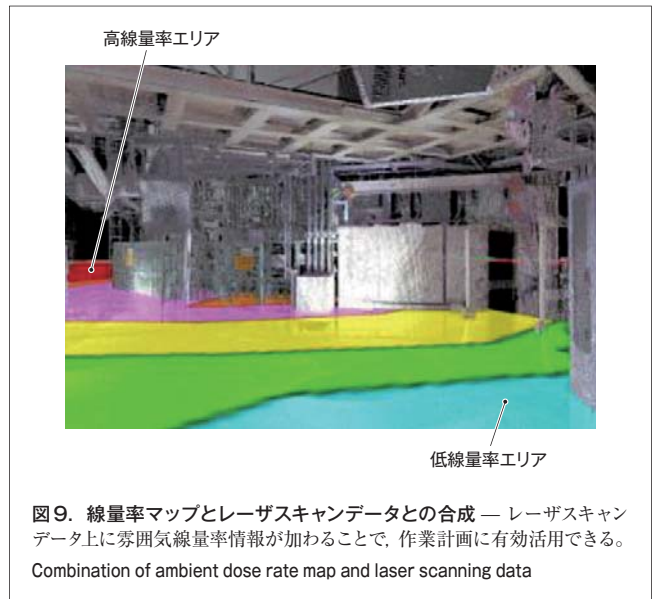
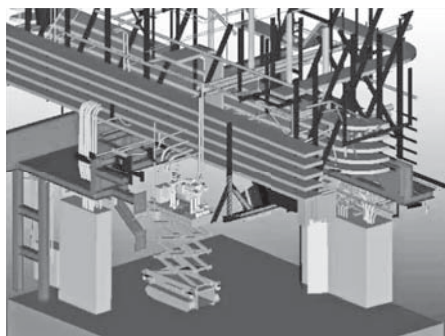


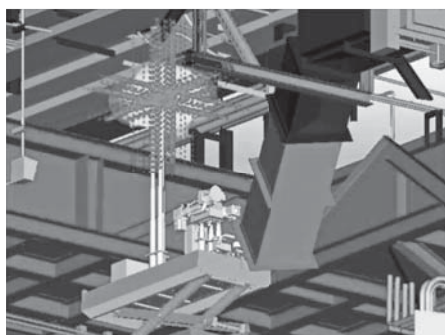
図9. 線量率マップとレーザスキャンデータとの合成 — レーザスキャンデータ上に雰囲気線量率情報が加わることで、作業計画に有効活用できる。

Combination of ambient dose rate map and laser scanning data

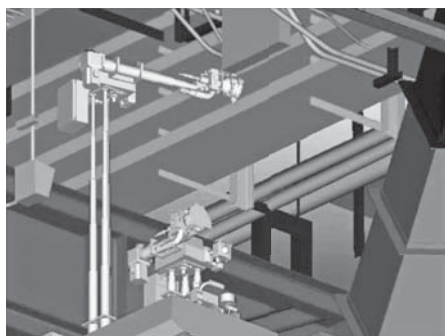
レーターの現場把握度に依存することから、誰でも明確に装置の存在位置を把握できるシステムを検討中である。このシステムは、あらかじめ取得したレーザスキャンデータの写像画像と台車に搭載したカメラ画像の特徴点を比較し、同一画像を見つけ出すことで、カメラ画像のカメラ位置をレーザスキャンデータの位置情報から装置の存在位置として認識する。この方法を用いて、実際に台車の現在位置をレーザスキャンデータ上に表示した例を図11に示す。



建屋内での装置動作



建屋との動的干渉確認



ケーブルダクト間の除染

図10. 除染装置のシミュレーション — 除染装置を3D CADデータ上で動作させ、事前に干渉の確認と、作業のシミュレーションができる。

Confirmation of simulated movement of decontamination vehicle

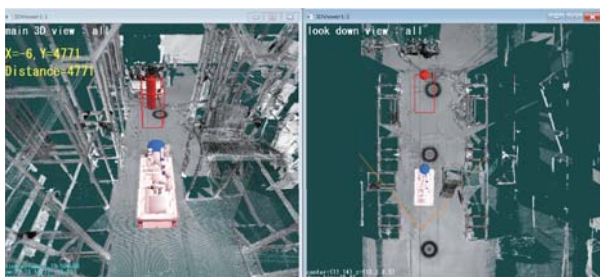


図11. 走行中の装置の自己位置表示例 — レーザスキャナデータ上に自己位置(青)と目標位置(赤)を表示することで、最終的な停止位置決めを効率化できる。

Vehicle position display during operation

## 5 あとがき

これまでの除染作業に加え、部分的な遮蔽や線源撤去により、2号機及び3号機のRB 1階、3号機オペフロの雰囲気線量率は徐々に下がりつつあり、特に2号機RB 1階は、一定時間内の有人作業が可能な状況になっている。また、RB内の汚染状況も明らかになり、今後の効率的なRB内作業計画の立案に寄与することが期待される。

福島第一1～3号機の廃止措置は、原子炉内外に存在する燃料デブリを安全に取り出し、RBの解体撤去あるいは密閉管理を行うものであり、長期にわたる活動となる。今後、様々なステージにおける環境改善要求に対し、当社は、これまでに得られた知見や開発した装置を活用するとともに、必要に応じて新たな技術開発を行うことで、廃止措置を推進していく。

## 謝 辞

この環境改善活動にご協力いただいている、東京電力(株)並びに技術研究組合 国際廃炉研究機構の関係各位に感謝の意を表します。

## 文 献

- (1) 行則 茂 他. 線量低減・除染に関する研究の現状と課題. 日本原子力学会誌. 56, 8, 2014, p.17-20.
- (2) 酒井仁志 他. 東芝の福島第一原子力発電所の環境改善活動と技術開発. デコミッションング技報. 51, 2015, p.24-32.



堀田 浩司 HOTTA Koji

電力システム社 原子力事業部 原子力化学システム設計部グループ長。再処理、放射性廃棄物処理、除染、及び廃止措置のシステム設計に従事。

Nuclear Energy Systems & Services Div.



林 弘忠 HAYASHI Hirotsada

電力システム社 原子力事業部 原子力化学システム設計部主務。除染及び廃止措置のシステム設計に従事。日本原子力学会会員。

Nuclear Energy Systems & Services Div.



酒井 仁志 SAKAI Hitoshi

電力システム社 原子力事業部 原子力化学システム設計部課長代理。除染、放射性廃棄物処理、処分、及び廃止措置のシステム設計に従事。日本原子力学会会員。

Nuclear Energy Systems & Services Div.