

# 解説 記事

## 原子炉格納容器内部調査装置の 開発および実証 ～ 形状変化形ロボット～

日立 GE ニュークリア・エナジー（株） 岡田 聡 Satoshi OKADA  
石澤 幸治 Koji ISHIZAWA  
高橋 良知 Yoshinori TAKAHASHI  
国際廃炉研究開発機構（IRID） 遠藤 洋 Hiroshi ENDO

### 1. 概要

福島第一原子力発電所の廃止措置に向け、原子炉格納容器（PCV）内部を調査するための装置を開発した [1] [2]。PCV 内は放射線量が高く、放射性物質飛散防止の観点から、小口径の配管から内部へアクセスする必要があり、装置の小型化が必須となる。また、内部での調査時は通路であるグレーチング上を安定して走行することが求められる。そこで、配管の通過と、調査時のグレーチング上の平面走行を両立させるため、開発したロボットは、形状変化が可能であることをコンセプトとした。

PCV 内部調査は、炉心から溶融し地下階に拡がったと想定される燃料デブリの分布を調査することを最終目的としている。その一環として、地下階調査に用いる装置開発に必要な情報を取得するため、2015 年 4 月、1 号機の 1 階のグレーチング上の調査を実施した。本報では、形状変化型ロボットの開発概要と、PCV 内部の調査結果について論ずる。

### 2. 形状変化型ロボットの開発

#### 2.1 PCV 内部調査の概要と適用対象

図 1 に、PCV 内部調査の概要と本ロボットの適用対象を示す [3]。PCV 内部調査は、炉心から溶融して落下した燃料デブリの分布状態を把握することを目的としている。特に 1 号機の場合、燃料デブリはペDESTAL外に広がっている可能性があるため、ペDESTALの外側の調査を優先的に実施することとされている。図 1 に示すように、最終的には燃料デブリの状態を直接調査するため、地下階を調査することになる。今回の調査は、ペDESTAL外の地下階調査に必要な装置開発に資するため、そのアクセスルートとなる 1 階部分の状況調査を実施したもので、図中の X-100B ペネ（通過貫通部）から挿入し、ペDESTAL外周の 1 階グレーチング上を調査対象とした。

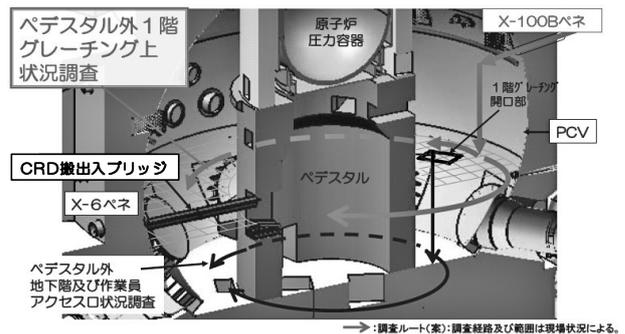


図 1 PCV の概要と適用対象 [3]

#### 2.2 形状変化型ロボットのコンセプト

表 1 に、2.1 節に示した適用対象における課題と、それを解決するためのコンセプトを示す。今回、開発したロボットは、配管内の通過と平面走行を両立するために、走行部位によって形状を変化させる構成とした。また、これまでの調査によると、PCV 内部は最大約 70Sv/h 程度と、高い放射線環境であると想定されているため、使用する機器には、耐放射線性が求められる。そこで、電子機器を極力搭載しない構成とすることで、耐放射線性を確保した。さらに、PCV 内部の暗部かつ蒸気で満たされた環境に対応するため、照明として指向角の異なる複数種類の LED を組合せたハイブリッド照明を採用した。

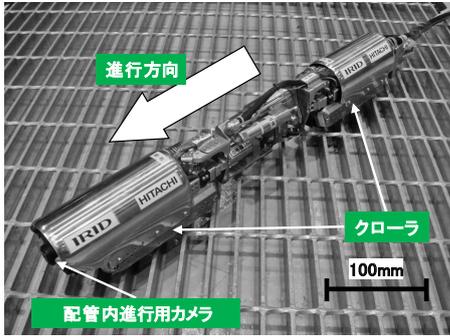
表 1 開発課題とロボットのコンセプト

課題	コンセプト
配管内通過と平面走行の両立	走行部位によって形状を変化
耐放射線性向上	電子機器を極力搭載せず
視認性確保	ハイブリッド照明

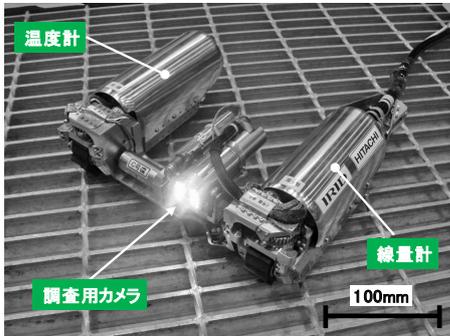
#### 2.3 走行部位に応じたロボット形状の変化動作

図 2 に、走行部位に応じたロボットの形状を示す。カメラを搭載した本体に対し 2 つのクローラを直線に配置した状態と、本体と 2 つのクローラを直角に配置した状態の 2 つの形

状を自在に変形する機構とした。これにより、図1の狭隘な配管内の通過と、グレーチング上の安定走行の両立が可能になる。



(a) 配管内走行形状



(b) 平面走行形状

図2 走行部位に応じたロボットの形状

図3に、2.2節に示した2つの形状におけるクローラの動作を示す。平面走行時は、左右のクローラを同一方向に駆動することで前後進動作をさせ、反対方向に駆動することで旋回動作をさせる。また、配管内走行時は、左右のクローラ反対方向に駆動することで、前後進動作をさせる。



動作	管内走行時		平面走行時	
	左(後)	右(前)	左	右
前進	正転	反転	正転	正転
後進	反転	正転	反転	反転
右旋回			正転	反転
左旋回			反転	正転

(a) 管内走行時 (b) 平面走行時

図3 走行時のクローラ動作

## 2.4 耐放射線性の向上

今回開発した形状変化型ロボットは、耐環境性、特に耐放射線性を向上するために、電子機器を極力搭載しない構

成とした。一般に、モータ駆動による移動装置は、回転数を検知するためのエンコーダや、駆動量を制御するためのモータドライバを実装するが、本開発のロボットは、本体に搭載しない構成とした。図4に、耐放射線性向上のための機器配置の概略を示す。回転数はモータ電流検知方式とした。また、モータドライバは、制御装置に組み込むことで、ロボット本体には、モータのみ搭載する構成とした。また、搭載するカメラについても、同様に、CCD センサのみをロボットに搭載し、処理基板は、制御装置に搭載することとした。これにより、PCV 内部環境に適用するロボット本体には、電子機器を殆ど搭載しない構成とすることができ、耐放射線性を向上することができる。

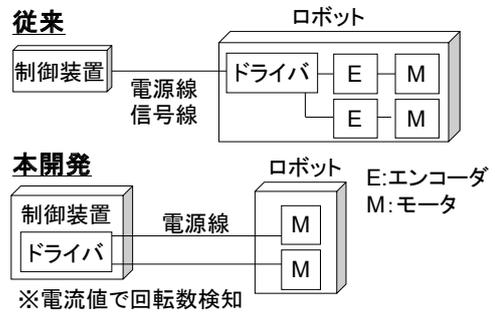


図4 耐放射線性向上のための機器配置

## 2.5 ハイブリッド照明による視認性確保

### 2.5.1 カメラユニットの構成

2012年10月に実施された格納容器内調査の結果[4]、内部は蒸気が充満していることが明らかとなっているため、蒸気環境下での視認性を確保する必要がある。蒸気環境下では、照明光度を上げると強いハレーションが生じるため、一般的な高輝度LEDを用いることができない。そこで、照明光度の低い小型のLEDを用い、効率的に照射するため、近距離用と遠距離用に、指向角を変えたハイブリッド構成の照明とした。図5に、本ロボットに搭載したカメラユニットの構成を示す。カメラの周辺に遠距離用の指向角20°のLED、その周辺に近距離用の指向角50°のLEDを配置した。

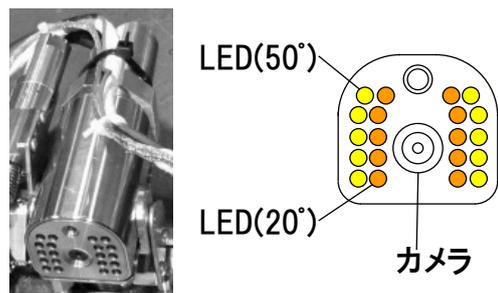


図5 カメラユニットの構成

### 2.5.2 蒸気環境下での視認性確認

ハイブリッド照明の効果を確認するため、蒸気環境下での視認性試験を実施した。図6に試験体系を示す。ロボットの前方に、白黒プレートとグレーチングを設置し、密閉空間で蒸気を充満させて映像を取得した。表2に結果を示す。表には比較のため、出力1W、指向角120°の高輝度LEDを用いた時の結果を示す。また、対象物表面上での照度測定結果から光の透過率を算出し、蒸気の濃さを表現した。本表の結果より、蒸気の有無、透過率に依らず、本ロボットのハイブリッド照明により視認性が確保できることが確認された。



図6 蒸気環境下での視認性確認試験

表2 蒸気環境下での視認性確認結果

蒸気	透過率	高輝度LED (指向角120°)	本ロボットのカメラ (指向角20°+50°)
無	100%		
有	40%		
	20%		

## 3. モックアップ試験による動作確認

### 3.1 エントリの確認

本ロボットは、図1に示した通り、X-100BからPCV内部にエントリするが、具体的には、X-100Bペネに取り付けられている直径100mmの配管（ガイドパイプ）を通過させることになる。図7に、ガイドパイプを模擬したモックアップを用いた、エントリ性の確認状況を示す。図に示す通り、ガイドパイプの前方には、構造物があり、2つのクローラの角度を変えながら、エントリを実施するため、モックアップを用いて、手順の確認を実施した。

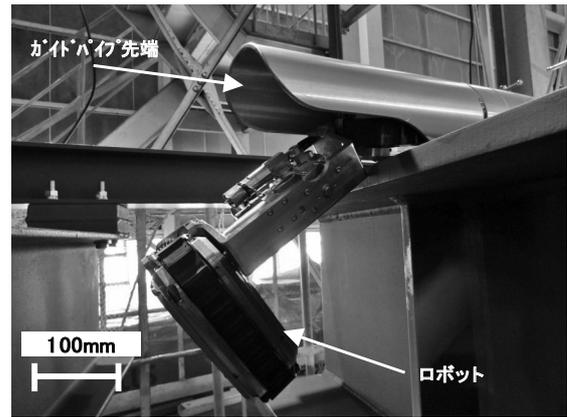


図7 エントリ確認の状況

### 3.2 グレーチング上走行確認

図8に、グレーチング上の走行確認試験を実施した状況を示す。X-100Bの位置からグレーチング上に着座後、図1に示すように、PCV内部をほぼ半周走行し、反対側にあるX-6ペネ周辺まで走行することを目標として実施した。この走行試験においては、障害物が存在した場合の回避方法や、ケーブルを牽引する性能確認等を実施し、走行可能であることを確認した。

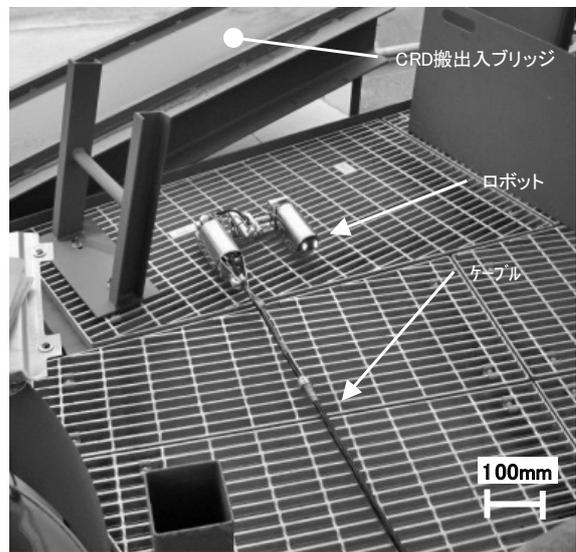


図8 グレーチング上走行確認の状況

## 4. 現地実証試験

### 4.1 実証試験の概要

第2章で示した形状変化型ロボットを、2015年4月10日および4月15日～20日に、福島第一原子力発電所1号機の原子炉格納容器（PCV）内部に投入し、1階部分を調査する実証試験を行った。図9に、調査概要を示す。実証試験は、地下階調査に用いる装置開発に必要な

情報を取得するために実施したものであり、具体的には、X-100B ベネに設置されたガイドパイプからロボットを投入し、1 階グレーチング上を反時計回り、時計回りに進行し、PCV 内部の映像、温度、放射線線量率等の情報取得と、地下階アクセス開口部、CRD 搬出入ブリッジ等の状況調査を目的とした。

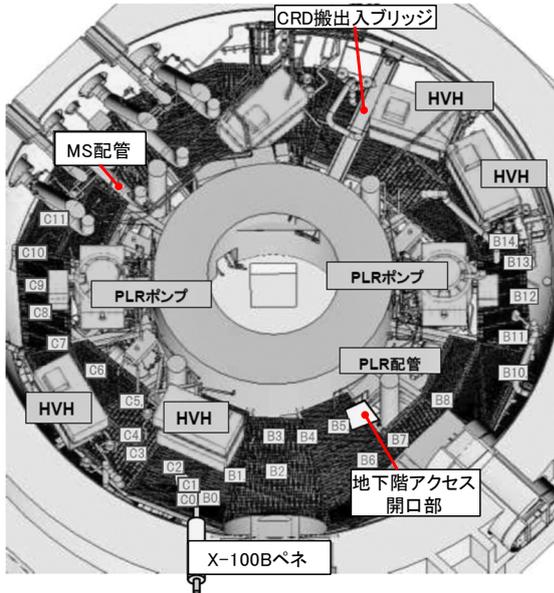


図 9 PCV の概要と適用対象

#### 4.2 実証試験で得られた情報

今回の実証試験で得られた情報を列挙する。

- ① グレーチング上の状況としては、表 3 に示す通り、線量率は最大約 10Sv/h、温度は最大約 21℃であり、特に高い部分は確認されなかった [5]。

表 3 グレーチング上の温度および線量率 [5]

測定点	線量率 (Sv/h)	温度 (℃)
B3	7.4	17.8
B4	7.5	19.2
B5	8.7	19.4
B7	7.4	19.5
B11	9.7	19.2
B14	7.0	20.2
C2	6.7	19.6
C5	8.3	19.5
C6	7.7	19.4
C9	4.7	20.8
C10	5.3	21.1
C11	6.2	20.7

- ② 図 10 に、空調機 (HVH) 損傷有無の確認状況を示す。この結果より、空調機 (HVH) 等の既存の設備には、大きな損傷がないことが確認できた。

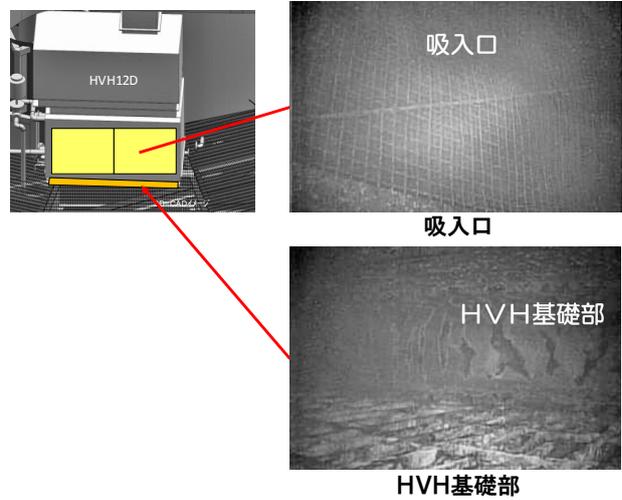


図 10 空調機 (HVH) 損傷有無の確認状況 [5]

- ③ 地下階調査において、地下階へのアクセスに使用する可能性がある開口部を調査した。図 11 に、確認状況を示す。本結果より、今後の調査に支障となるような干渉物が周囲にないことが確認できた。

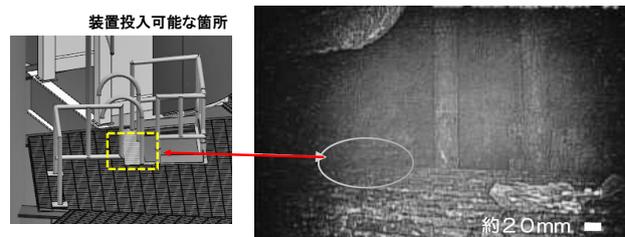


図 11 地下階アクセス開口部の確認状況 [5]

- ④ ③で示した地下階への開口部以外に、今後の調査で使用する可能性のあるアクセスルート进行调查した。結果を図 12 に示す [6]。反時計回りのルートは、CRD 搬出入ブリッジの手前で、構造物が障害となり進行できないこと、時計回りのルートは、MS 配管の脇から、更に奥まで進行できることが確認できた。

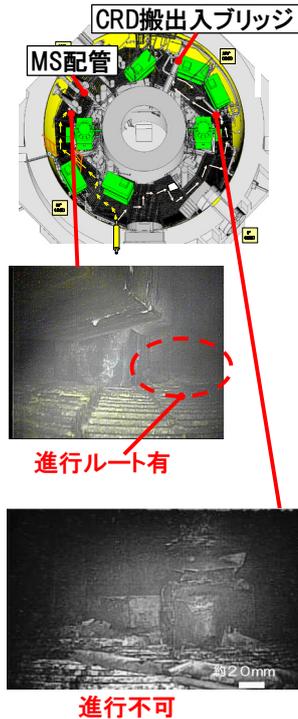


図 12 アクセスルートの確認状況 [6]

## 5. まとめ

本報では、PCV 内部調査用の形状変化型ロボットを開発し、1号機の内部調査を実施した。その結果、地下階調査用装置を開発するために必要な情報を取得すること、開発した形状変化型ロボットの実機における動作性を確認することができた。今回、開発した技術、得られた情報に基づき、今後、地下階の調査計画、および調査装置の開発を進める。

## 謝辞

本開発は、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 年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金」にて実施したものである。

## 参考文献

- [1] 日立製作所, 日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社, 「福島第一原子力発電所での燃料取り出しに向けた調査用の水中走行遊泳型ロボット・形状変化型ロボットを開発」, 2014.3.10, 日立製作所 HP, <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2014/03/0310e.html>
- [2] 岡田聡, 他, 「格納容器内部調査向け形状変化型調査装置の開発」, 日本原子力学会, 2014 年春の年会予稿集, pp.138-143, 2008.

- [3] IRID, 「原子炉格納容器内部調査装置（形状変化型ロボット）の作業訓練の実証について」, IRID HP, 2015.2.3, <http://irid.or.jp/research/20150203/>
- [4] 東京電力株式会社, 「福島第一原子力発電所1号機原子炉格納容器内部調査結果について」, 東京電力 HP, 2012.10.15, [http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts\\_121015\\_02-j.pdf](http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_121015_02-j.pdf)
- [5] 東京電力株式会社, 「原子炉格納容器内部調査技術の開発」ペデスタル外側\_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」, 東京電力 HP, 2015.4.30, [http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2015/images/handouts\\_150430\\_01-j.pdf](http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2015/images/handouts_150430_01-j.pdf)
- [6] IRID, 「原子炉格納容器内部調査装置（形状変化型ロボット）の実証試験の実証について（2015年4月20日）」, IRID HP, 2015.4.20, <http://irid.or.jp/research/20150420/>

(平成 27 年 9 月 4 日)

## 著者紹介

著者：岡田 聡  
 所属：日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社 原子力設計部 主任技師  
 専門分野：産業用フィールドロボットの研究開発

著者：石澤 幸治  
 所属：日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社 原子力計画部 技師  
 専門分野：過酷環境に適用するロボットの研究開発

著者：高橋 良知  
 所属：日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社 原子力計画部 主任技師  
 専門分野：原子力用遠隔取扱い装置の開発

著者：遠藤 洋  
 所属：国際廃炉研究開発機構 研究管理部 副部長  
 専門分野：原子力用ロボット、燃料運搬装置等の開発