

原子力発電所の保全ロボットの現状と今後

－その3－ 株式会社日立製作所の取組み－

株式会社日立製作所 齊藤 英世 Hideyo SAITO
 株式会社日立製作所 佐々木 典 Tsukasa SASAKI
 株式会社日立製作所 田中 敬二 Keiji TANAKA

1. 緒言

原子力発電所では、機器の交換、分解点検、検査、修理工事等において、さまざまな遠隔装置（ロボット）が使用されている。「ロボット」とはチェコスロバキアの作家チャペックの戯曲中の造語で、本来は機械仕掛けの人工人間を意味することは有名であるが、原子力発電所で実用化されているロボットは、人間が容易に近づけない放射線環境における遠隔作業化、作業者の被ばく低減、作業の効率化（定検期間の短縮）、作業の信頼性向上（機械化）等を目的に開発、導入されてきた。日立においても、古くは各種の交換装置等、狭隘部で大型機器を取り扱うための機械系を主とする装置を開発し、その後は周辺技術の進歩により、そのような機械系装置の高速化・高度化を進めると共に、様々なセンサを搭載し、信号処理を行う検査・点検装置を開発してきた。最近では経年プラントの原子炉における損傷事例により、これまでよりも更に狭隘な環境となる原子炉内での検査、補修装置を開発している。

本稿では、上記の遠隔操作装置全てを「保全用ロボット」として括り、その技術状況を紹介する。

2. 保全用ロボットへの取組み

原子力発電所に設置されている機器の保守・点検では、スペースや環境の制約から人間による作業が困難で、汎用の機械を使用できないことが多かったことから、各種の遠隔メンテナンス装置や検査装置を機器に合わせて開発し、使用してきた。このような保全用ロボットの開発は、ニーズや運転実績に応じて大略、表-1に示すような流れになっている。

初期の段階で実用化した代表的遠隔装置には、原子炉へ燃料集合体を装荷するために燃料を掴み移送する自動燃料取替機、原子炉下部から挿入される制御棒駆動機構（CRD）の遠隔自動交換装置などがある。これ

らは定期検査期間のクリティカル工程に関わる作業でもあるため、現在でもなお一層の高速化・高度化を図る努力を続けている。

作業者の被ばく低減の分野では、CRDの分解、洗浄を遠隔で行う分解洗浄装置を開発、実用化している。また、床面や配管内の放射性汚染物質を取り除くための各種除染装置の開発も行ってきた。

遠隔点検を行うロボットとしては、人に代わってパトロールを自動で行う移動式点検ロボットや水中で遠隔操作の点検・検査を行う水中ロボット、株式会社ジェー・シー・オー（JCO）での臨界事故等を教訓とした防災ロボットなどを開発してきている。これらのロボットは単独で移動して人間に代わって仕事を行うことができるので、チャペックが創造したロボットの概念にかなり近づいてきているとも言えるが、最近のセンサ技術、通信技術、コンピュータ技術等の発展に伴ってさらなる高機能化が期待される。

検査の分野では、原子炉圧力容器（RPV）や配管の検査で、超音波検査（UT）を遠隔で行う各種自動UT装置を開発し、実用化してきている。最近では炉内機器用のUT装置や検出した欠陥の大きさをより精度よく検出するための技術開発にも注力している。

また、近年では原子炉シュラウドの交換工事のよう

表-1 原子力発電所の保全ロボット開発経緯

年代	1970年代	1980年代	1990年代	2000年代
全体的な動き		軽水炉改良標準化	軽水炉技術高度化	高経年化対応、事象対応
技術開発動向	専用自動化機器開発	汎用自動化機器開発	新型軽水炉対応	高経年化対応検査・補修・予防保全開発
個別技術開発	自動燃料取替機	■開発	□□□□□□□□実運用、改良開発	□□□□□□□□
	CRD遠隔自動交換装置	■開発	□□□□□□□□実運用、改良開発	□□□□□□□□
	CRD分解洗浄装置	■開発	□□□□□□□□実運用、改良開発	□□□□□□□□
	除染装置		■■開発	□□□□□□□□実運用、改良開発
	移動式点検ロボット		■■開発	□□□□□□□□実運用、改良開発
	水中ロボット		■■開発	□□□□□□□□実運用、改良開発
	自動ISI装置	■■開発	□□□□□□□□	□□□□□□□□実運用、改良開発
	原子炉機器補修・予防保全		■■開発	□□□□□□□□実運用
	防災ロボット			□□□□□□□□
				開発

に発電所の大掛かりな修理工事を、被ばく低減を図りながら遠隔で安全確実に作業できるようにするための各種遠隔補修装置も開発、実用化してきた。

3. 各種保全用ロボット

3-1) 保守・点検・検査

(1) 制御棒駆動機構 (CRD) 交換装置

制御棒駆動機構 (改良型沸騰水型原子炉 (ABWR) では205体/プラント) は10年間に1回の保守点検が行なわれる。CRD交換装置は、定期検査時に平均21体のCRDの保守点検を行うためにCRDを原子炉から取外し、点検・保守後に再び原子炉へ取付けるための装置である。CRD交換装置は原子炉直下の下部ドライウエル内に設置される装置本体部分とCRD交換装置制御室に設置される制御装置からなる。

CRD交換装置本体は、原子炉下部に据付けられている全てのCRDにアクセスできるよう、下部ドライウエルに旋回可能な円形のプラットホームを有している。プラットホームが旋回し、CRD取扱装置がプラットホーム上を走行することにより、CRD取扱装置は下部ドライウエル内全域を平面移動、CRDにアクセスし、CRDの昇降、着脱、横転を行う。(図-1)

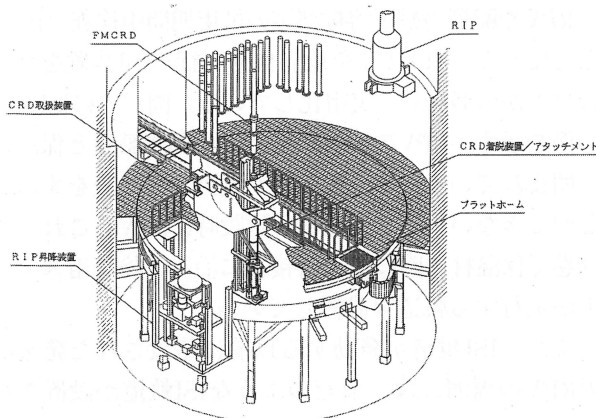


図-1 CRD交換装置 (ABWR用)

CRD交換装置により取外されたCRDはカートによりCRD補修室へ運び出され、点検・保守が終了すると再びカートにより下部ドライウエルに運び込まれ、CRD交換装置により原子炉へ取付けられる。

CRDの取外し取付けを行う下部ドライウエル内は、温度、湿度、放射線とも作業環境として厳しいことか

ら、一連の作業を自動および遠隔操作で行うことが期待される。これを可能にすべく、本装置はCRD交換装置制御室と下部ドライウエル内とを結ぶITV・通話設備一式を備えたシステムとして構成されている。制御装置上の操作パネルには操作性向上を目的とした運転操作ガイダンス表示機能が組み込まれており、また、作業時間や作業内容の管理を容易にするための操作ログ自動記録機能も備えている。

(2) インターナルポンプ取扱装置

インターナルポンプ (以下、RIP) は、ABWRの原子炉冷却材を循環させて炉心を冷却する重要機器であり、RPV底部に10台が直接設置されている。RIPの構成部品は、各部品ごとに点検頻度や点検方法が決められており、特にインペラ・シャフトと水中モータは、定検時に原子炉から取外して点検しなければならない。RIP取扱装置は、この点検のためにRIP構成部品を原子炉から取外し/取付けするための遠隔操作装置であり、原子炉の上部からインペラ・シャフトなどを取外す上部取扱装置と原子炉直下の下部ドライウエル側からRIPモータを取外す下部取扱装置により構成される (図-2)。RIP取扱作業は定期検査工程のクリティカル作業であるため、作業性が良く、信頼性の高い取扱装置が求められており、日立ではRIP取扱装置の開発にあたり、実機RIPおよび実規模模擬炉内構造物などを用いた十分な機能確認を行っている。

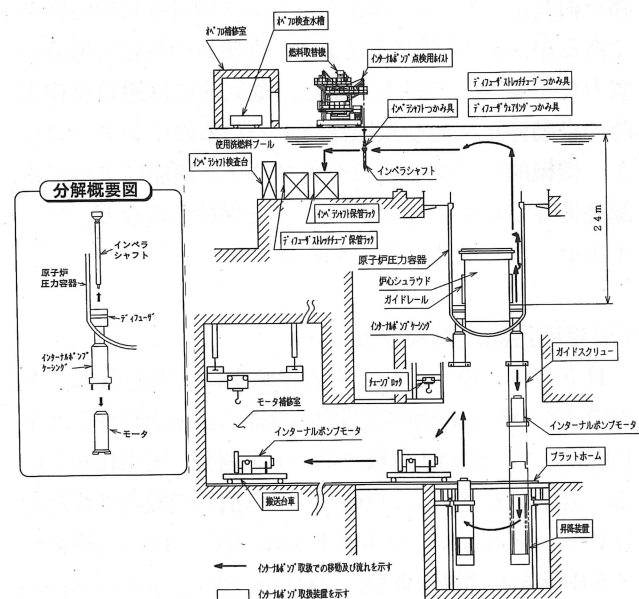


図-2 RIP取扱装置

上部のRIPインペラ・シャフトつかみ具は、オペレーションフロアを走行する燃料取替機のRIP点検用ホイストのワイヤーに接続され、RPV内壁と炉心シュラウド間の狭隘部で水中下24mに設置されているインペラ・シャフト（約φ550×3300mm, 730kg）を遠隔操作でつかみ、取外すための装置である。水中での遠隔操作のため、取扱装置には耐放射線性水中TVカメラが搭載され、水中リミットスイッチで着座状態を検出し、エアシリンダ駆動のグラブプルでインペラ・シャフトのつかみ/はなしを行う。炉心シュラウドに設置されたガイドレールに沿って位置決めされる取扱装置は、遠隔水中下でインペラ・シャフトを高精度に取扱うことを可能としている。また、電気的なインターロックにより誤操作を防止するとともに、エアシリンダ内にスプリングを組み込み、エア源喪失などの不慮の事態でも吊り荷を落とすことがないようにするなど、機械的にもフェイルセーフな構造となっている。

一方、下部のRIP昇降装置は、下部ドライウェルに設置されているCRD交換装置のプラットホームに取付けられ、RPV直下の下部ドライウェル側からRIPケーシング内に据付けられているRIPモータ（約φ600×2000mm, 3.5ton）を取外し/取付けするための装置である。プラットホームの旋回によってRIPケーシングへの位置決めした後、2本のガイドスクリュー（台形ねじ）をRIPケーシングに接続し、ナットを上昇/下降させることによって、RIPモータの取付け/取外しを行う。RIPモータの取扱いは、原子炉直下の狭隘な状況下で3.5tonの重量物を約3.5m上昇させ、RIPケーシング内に据付ける作業であるが、RIP昇降装置により、作業員の被ばく低減や省力化を実現している。また、電気的には過負荷検出時の自動停止機能や誤操作防止のためのインターロック、機械的には減速機のセルフロック機能によって電源喪失時でも昇降中のRIPモータを保持するなど、フェイルセーフな構造となっている。

(3) 格納容器内点検装置

日立では、原子力発電所の運転中に人間が入ることのできない原子炉格納容器内の機器の点検を行うことを目的として、移動式点検ロボットを開発、実用化している。全体システムは、点検ルートに沿って敷設された走行レールを走行するロボット本体（図-3）、点検データを中継する現場中継盤、点検データの表示とロボットを遠隔操作する操作盤等から構成されている。ロボット

本体は走行レールを自動で走行し、あらかじめ設定された所定のポイントを巡回する。ロボット本体にはズームレンズ付きカラーTVカメラ、マイク、温度計などを搭載し、目視点検、異音点検、温度点検を人間に代わって行う機能を有している。目視点検では点検画像を画像処理して、煙、水蒸気などの揺らぎの検知や水たまりの発見、メータの読み取り等を行わせることも可能である。ロボット本体には必要に応じて各種センサを搭載させることができる。特殊で高価なセンサも、移動式点検ロボットに搭載することにより1台で多くの場所が点検できるようになることから、経済性の面でも大きな寄与を果たしている。また、走行レールの厚み（約40mm）のスペースでレールを布設できるので、通路スペースを阻害することなく狭隘スペースにも適用できる。同様な装置は他の原子力施設でも使用されている。



図-3 移動式点検ロボット

(4) 供用期間中検査用装置

RPVや配管の耐圧溶接部等の供用期間中検査（ISI）として行なわれるUTを遠隔自動で行うISI装置を日立は早くから開発し、実用化している。図-4にISI装置の例を示す。RPVの胴板溶接線は生体遮蔽壁と保温材に囲まれているため、検査員が接近して検査をすることができない。そこで発電所建設時にRPVとこれを取り巻く保温材の間にRPV溶接線に沿って検査用スキャナが走行する軌道を設置している。

また、ISI規格が発効する以前に建設された発電所のRPVの周囲には、前記のようなISI軌道が設置されておらず、また、アクセススペースも無い。そのようなRPVについては、RPVの内面側からUTを行う検査装置を開発し検査を行っている。

RPV管台や配管用ISI装置では軌道を仮設し、その軌道上をスキャナが走行する。従来の配管用ISI装置においては、曲管部の検査の際にはセンサを検査員が保持し、ガイド装置を用いて走査しながら検査データを自動収録する半自動装置を使用していたが、現在は完全自動化を図っている。

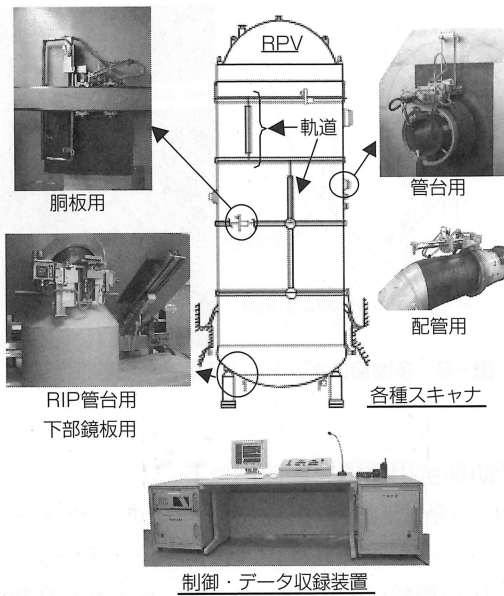


図-4 ISI装置 (ABWR用、スキャナは代表例)

(5) 炉内点検・検査装置

原子炉内機器の目視検査 (VT) は、通常は吊り下げ式の水中TVカメラを検査員が操作して行っている。しかし、炉内機器の損傷事例や、原子炉以外の施設での点検のニーズが有り、より機動性の高いVT用ROV (Remotely Operated Vehicle) を開発し、適用している。また、VTでキズが確認された場合はそのキズの深さをUTで測定する必要がある。炉内構造物のUT装置として、次項に示す予防保全・補修工事と共用又は類似構造物のUT装置の他に、小型のUT用ROVを開発している。

適用箇所、用途に合わせて開発したROVの例を図-5に示す。

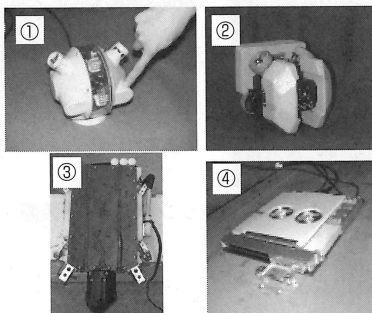


図-5 各種水中ROV

図-5において、①はシュラウドサポートの点検、②はサプレッションチェンバー等の点検に使用されており、③は炉底部の点検、④はUT用に開発したものである。

3-2) 予防保全・補修

炉内構造物や炉底部機器等の炉内機器の予防保全 (応力腐食割れ (SCC) 発生抑制) や補修 (SCC除去、補修溶接) を遠隔操作で行う遠隔保全ロボット技術と遠隔監視操作システムについて紹介する。

(1) 点検・補修用遠隔操作ロボット

点検・補修工事用の遠隔作業装置として、遠隔操作ロボットに点検装置 (UT・渦電流検査 (ECT) 装置、レプリカ採取装置等)、補修装置 (研磨装置、放電加工装置 (EDM)、溶接装置等)、および予防保全装置 (ウォータージェットピーニング装置) を交換して取付けて作業を行う方式とし、装置合理化および工法最適化を図っている。遠隔操作ロボットは、オペレーションフロアから約20~30m下の水中で、施工対象位置に各装置をアクセスさせる機能を有している。

1) シュラウド用遠隔操作ロボット

シュラウド用遠隔操作ロボットには、シュラウド内面側、外面側のそれぞれにアクセスするタイプがある。

① シュラウド内面用遠隔操作ロボット

図-6に、シュラウド内面側を対象にした遠隔操作ロボットを示す。遠隔操作ロボットはオペレーションフロアから炉内に設置され、炉心支持板上あるいは制御棒駆動機構ハウジング上に着座する構造となっており、遠隔操作ロボット内部に収納された各装置を、ロボット本体の旋回、昇降、前後伸縮、首振り動作によ

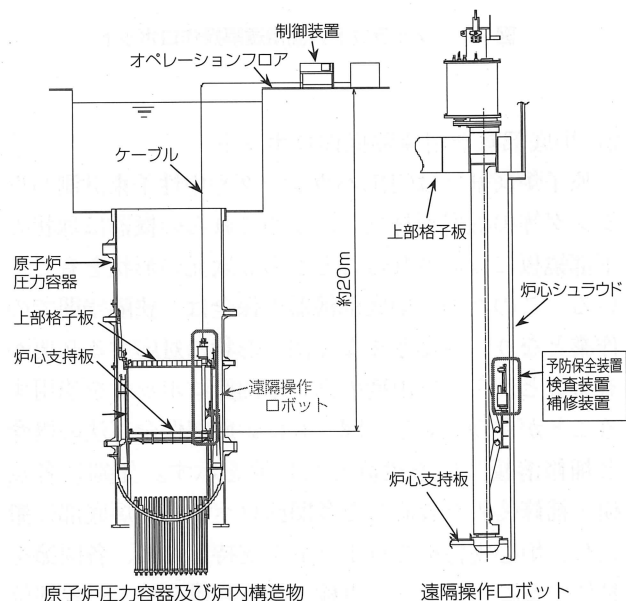


図-6 シュラウド内面用遠隔操作ロボット

り施工対象位置にアクセスさせる機構としている。

② シュラウド外面用遠隔操作ロボット

図-7に、シュラウド外面側を対象にした遠隔操作ロボットを示す。遠隔操作ロボットは、シュラウド上端に設置された駆動装置とアクセスバーを介して、先端に設置された各点検・補修装置をシュラウド外面の対象部位にアクセスさせる構造としている。先端に設置される装置は、ジェットポンプ等に干渉せずに補修対象部位まで装置をアクセスする必要があるため、薄型化を図っている。

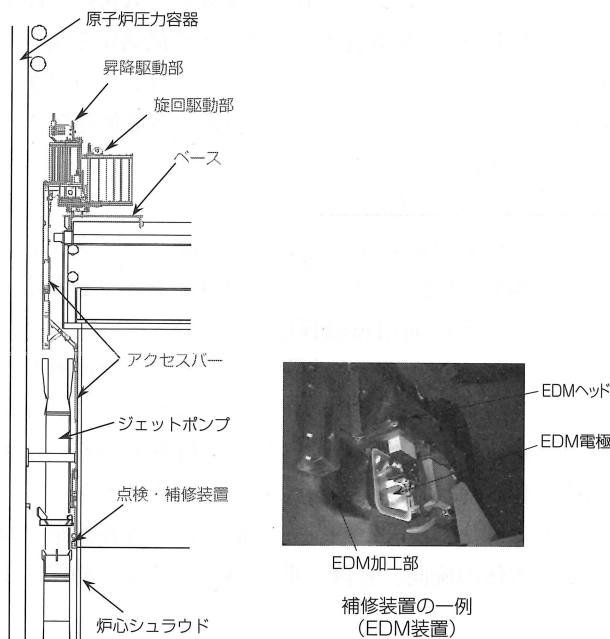


図-7 シュラウド外面用遠隔操作ロボット

2) 炉底部機器用遠隔操作ロボット

原子炉底部にはCRDハウジングや中性子束計測ハウジング等の機器が林立し、かつこれらの機器は球状の下部鏡板に設置されることから3次元の形状を有している。このため、炉底部機器の保全是、狭隘空間での作業となり、さまざまな寸法・形状に対応する必要があることから、自由度の高い多関節ロボットを適用することが有効である。図-8に炉底部保全工法と補修溶接装置を設置した状態を示す。先端に各点検・補修装置を設置した多関節ロボットを炉底部に搬入し、炉心支持板でロボットを支持した後、各関節を動作することにより、点検・補修装置を施工対象部位にアクセスさせ、高度な遠隔操作を可能としている。

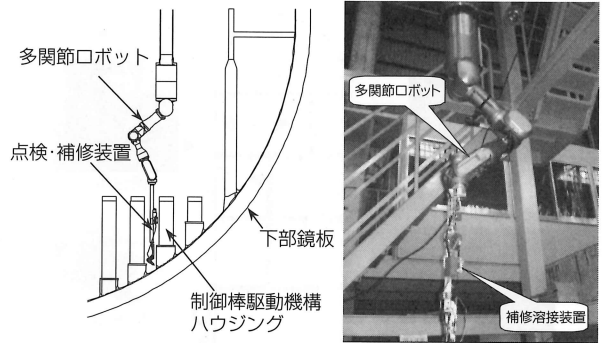


図-8 多関節ロボットによる炉底部機器保全工法

(2) 予防保全用遠隔操作ロボット

SCCの発生抑制に有効な技術であるウォータージェットピーニング (WJP) は、キャビテーションによる高圧の衝撃圧力によって、施工部表面に圧縮残留応力を発生させるものである。噴射距離、噴射角度等の施工条件の実用範囲が広く、更に対象物に当たった後の反射噴流や廻り込み噴流も残留応力改善に利用できる等の特徴を有している。

WJP装置に関しては、炉内機器やRPVの主要な溶接線に対するさまざまなWJP装置を開発し、広範に適用している。図-9に、WJP装置の一例として炉底部のCRDハウジング用WJP装置を示す。本装置は、装置の設定や取扱い作業性向上、設定時間短縮を図るために、多段ガイド機構が採用されている。



図-9 CRDハウジング用WJP装置

(3) 遠隔監視操作システム

最近の3次元CAD、ネットワーク等のデジタル技術は目覚ましい進歩を遂げており、自動車産業等、製造分野ではこれら技術の導入により、業務効率向上が図られている。原子炉内の保全工事では、その内容によっては10種類以上の装置を遠隔操作で使用する場合もある。それら装置類を円滑に操作するために、保全用装置のモニタ

リング（監視）とオペレーション（操作）の双方向制御型のシミュレーションを用いることで、3次元CADによる装置モニタリングと装置の遠隔操作をリンク可能とするシステムを構築した。このモニタリングとオペレーションの双方向制御可能なシミュレーションを核とした遠隔監視操作システムの概要を図-10に示す。

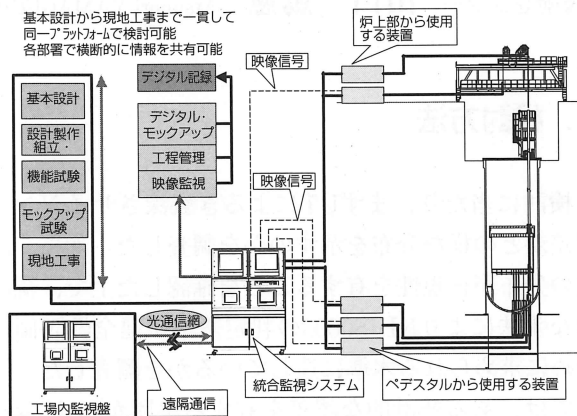


図-10 遠隔監視操作システムの概要

モニタリング機能により保全装置の施工状況と作業全体の状況を切替えて描写し、装置位置をリアルタイムで取得することにより、効率的な作業が可能となる。併せて、各種装置と炉内監視カメラの映像を監視盤に集中させ、画面に最大16分割で表示可能とした。これにより、作業者は必要な映像データを選択的に利用可能となり、モニタリング機能と併せて作業効率向上が期待できる。更に、光通信網や専用通信回線を併用することで、現場から工場へも同様の映像を送信することが可能であり、将来的には、保全工事現場以外の場所に居ながらにして現場の装置の操作することも可能である。図-11には、作業状況を監視カメラで撮影した映像（左）と同一アングルで描画させた3次元シミュレーション映像（右）の例を示す。このように、シミュレーション映像により監視カメラ映像と同等のアングルでの監視を実施することが可能である。

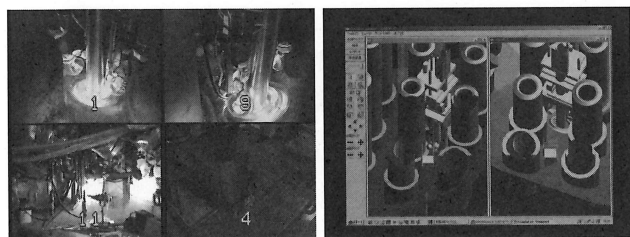


図-11 遠隔モニタリングの例

(4)原子力防災ロボット

原子力施設での万一の事故発生時、人に代わって事故現場の様々な情報を収集することを目的としたロボットとして、日本原子力研究所殿と共同で原子力防災ロボット「情報遠隔収集ロボット：RESQ（Remote Surveillance Squad）」を開発した。本ロボットは、災害発生時の初期情報収集を目的とした小型軽量な車輪駆動方式のRESQ-A、災害状況の詳細情報収集を目的として階段を昇降可能なクローラ機構とドア開閉対応が可能なマニピュレータと映像の無線伝送機能等を有するRESQ-B、2本のマニピュレータを使用する試料採取も可能なRESQ-Cの3種4台のロボットから構成され、役割に応じて災害時の情報遠隔収集を可能としている。いずれのロボットも動力源にバッテリーを搭載しケーブル無しで1時間程度の駆動が可能となっている。また、ロボットと操作卓は、車輛搭載式コンテナに収納し現場近傍まで搬送できる機動性を有している。

- ・ RESQ-A（初期情報収集用）

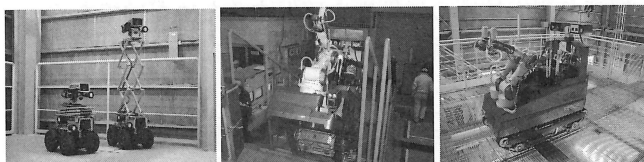
小型軽量で人が持つこともでき、初期情報を迅速に収集する。

- ・ RESQ-B（詳細情報収集用）

40° 階段などを踏破して、放射線量、温湿度、距離、風向・風速など、多種多様な計測を行う。

- ・ RESQ-C（試料等情報収集用）

2本のマニピュレータを使用して、気体、液体、固体の試料採取などを行う。



写真提供：日本原子力研究所殿

図-12 原子力防災ロボット「RESQ」

4. まとめ

本稿では、原子力機器の点検・保守の効率化、被ばく低減、信頼性向上のために日立が開発に取組み、実用化してきた各種保全ロボットについて述べた。

今後は、発電所の高経年化、効率的な運用の点で、各種保全技術開発への期待は益々高まるものと考えられる。今後もそのようなニーズに応えるべく、開発に取組み、先進的な技術を提供していきたい。

(平成17年 8月11日)