

災害復旧を支援する遠隔操作型ロボット

Technologies for Disaster Recovery Support Robots

寺井 藤雄 上原 拓也 中島 透

■TERAI Fujio ■UEHARA Takuya ■NAKAJIMA Toru

2011年3月11日の東日本大震災で被災した福島第一原子力発電所の事故対応では、原子炉建屋内の状況や放射線量を一刻も早く把握することが重要であった。しかし、放射線による被ばくの危険性があるため、人が事故現場に近づいて情報を収集することは困難であり、安全な場所からの遠隔操作で動作し、人に代わって現場を調査できるロボットや機器が必要とされた。

東芝は、このようなニーズに早期に対応するため、既存技術も活用したクローラ走行車と、放射性物質の分布を可視化できるガンマ(γ)カメラを組み合わせた遠隔操作型ロボットを開発し、震災から約2か月後の2011年5月に、原子炉建屋の入口付近において放射線量を測定した。その後、使用済み燃料貯蔵プール内をモニタリングできる遠隔操作型水中カメラを開発し、プール内に落下したがれきの調査を支援した。

At the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, which was damaged by the Great East Japan Earthquake of March 11, 2011, it was important to immediately confirm the situation of the nuclear reactors and the radiation levels after the accident. However, it was extremely difficult for workers to gather information in the area around the accident site due to the risk of radiation exposure. Robots and observation equipment remotely controlled from safe areas with a low level of radiation were found to be essential to improve the ability to collect information on behalf of workers.

To make it possible to immediately resolve such situations, Toshiba has developed technologies for the following disaster recovery robots: (1) a remote-controlled gamma-ray measurement robot consisting of a crawler vehicle using our existing technologies and a gamma-ray camera that can visualize the levels of radioactive materials in different colors, which was used to measure radiation levels near the No. 1 nuclear reactor in May 2011; (2) a six-axis articulated mobile robot that can ascend and descend stairs and clear away rubble; and (3) a remote-controlled underwater camera that can monitor the inside of a nuclear reactor spent fuel pool, which assisted in investigation of the rubble in the No. 3 nuclear reactor spent fuel pool.

1 まえがき

東北地方太平洋沖地震とそれに伴って発生した巨大津波により、福島第一原子力発電所では多くの非常用電源が被水し浸水して、全交流電源の喪失や交流電源を用いる冷却機能の停止という事態に陥った。1号機と3号機では、格納容器から漏えいした水素が原因と考えられる爆発により、それぞれの原子炉建屋の上部が破損した⁽¹⁾。事故直後から原子炉施設内の状況把握が必要となったが、高レベルの放射線環境下では人が容易に近づくことが困難であり、遠隔操作可能なロボットによる調査が必要となった。

2011年4月4日には経済産業省が中心となって、原子炉建屋内の状況把握や放射線量測定などの作業に使用可能なロボットの選定が行われた⁽²⁾。しかし、平常時の原子炉建屋内のモニタリングを想定して開発されたロボットがほとんどで、高い放射線量の環境下でがれきなどが堆積した建屋内の調査をすぐに実行できるロボットはなかった。更に、ロボットを動作させるためには専任のオペレーターが必要で、現場作業員へのトレーニングも課題となった。最初に投入されたロボットは、米国iRobot社製のPackBotで、爆弾処理や危険地帯

への潜入と調査など、危険を伴う役割を人間に代わって行えることから採用された。

東芝は、グループの総力を挙げて冷却維持管理とグリーンフィールド化に向けた対応を行うとともに、放射線量の調査、汚染水の処理、及び除染処理などの作業や、ロボットなど必要な機器の開発を同時に進めている。現場調査では、最初に放射線量を調査したり放射線源を特定したりする作業が必要とされ、その後、床や壁の汚染物をサンプリングしたり使用済み燃料貯蔵プール(以下、プールと呼ぶ)内に落下したがれきの状態を確認したりする作業が必要とされた。

ここでは、これらの調査を実現させるために、当社が緊急支援活動の一環として短期間で開発した2種類の遠隔操作型ロボットと遠隔操作型水中カメラにつき、技術と特長などを述べる。

2 遠隔操作型γ線測定ロボット

2.1 目的

事故現場の復旧作業では、作業員が目的の場所に一刻も早く入るのではなく、事前に放射線量などを把握して作業計画

を立てることが極めて重要である。先に投入されたPackBotによる放射線量の測定は、ロボットに組み付けた小型線量計の値をカメラで読み取るものであり、線量計付近の放射線量をピンポイントで測定するものであった。そのため、この方法ではロボットが移動できる面内の放射線量しか測定できず、広い建屋内の線量測定には多くの時間が必要となる。

当社は、ピンホールを通過する γ 線を放射線センサで測定し、ビデオカメラで撮影した映像を信号処理で重ね合わせることで、放射線量の分布を可視化できる γ カメラ技術を保有している。この γ カメラを遠隔操作が可能なクローラ走行車に搭載することで、壁や天井から測定位置へ飛来する放射線の線量分布を、従来方法より短時間で測定することが可能である⁽¹⁾。

2.2 システム構成

事故現場では、一刻も早く調査することが求められたため、これまで開発してきた技術を組み合わせることでシンプルな構成とした。ロボット外観と操作盤を図1に、また、システム構成を図2に示す。 γ カメラ、PTZ (Pan Tilt Zoom) カメラ、及び照明をクローラ走行車に搭載し、約50 m離れた比較的放射線量の低い環境から、図1(b)の操作盤で遠隔操作を行う。ク

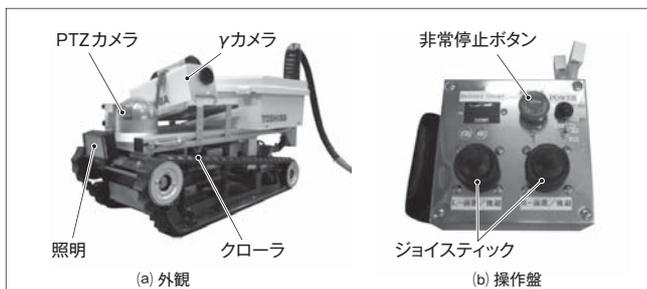
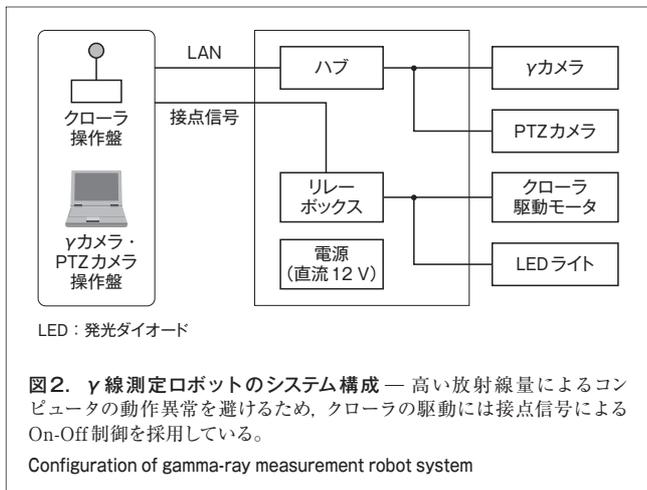


図1. γ 線測定ロボット — 階段の昇降が可能なクローラ走行車に放射線量の高低を色の違いで可視化できる γ カメラを搭載し、現場の放射線量の分布を遠隔操作で取得できる。

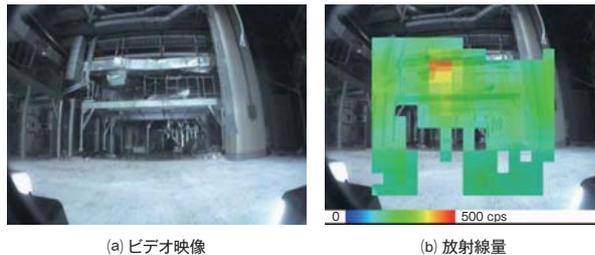
Gamma-ray measurement robot



LED：発光ダイオード

図2. γ 線測定ロボットのシステム構成 — 高い放射線量によるコンピュータの動作異常を避けるため、クローラの駆動には接点信号によるOn-Off制御を採用している。

Configuration of gamma-ray measurement robot system



cps : counts per second (1秒当たりの放射線の計数率)

*データ提供元：東京電力(株)

図3. γ 線測定ロボットによる調査結果 — γ カメラで検出した放射線量をビデオカメラの映像に重ね合わせて表示することで、放射線源を容易に特定することができる。

Results of investigation using gamma-ray measurement robot

ローラ走行車の制御は、放射線の影響で動作異常となるリスクを避けるため、コンピュータを使用せずリレーによるOn-OFF回路で構成した。移動指令は、左右のクローラを独立して正転又は逆転するだけの単純な動作にしたことで、初めて操作する作業員でも、数時間のトレーニングで容易に操作できる。クローラの選定では、通商産業省工業技術院 (現、経済産業省) が推進した「原子力防災支援システム」(2000年) の中で原子力施設内の作業監視支援ロボットを開発した際のノウハウを生かし、傾斜角40°の階段の昇降も可能である^{(3), (4)}。

2.3 原子炉建屋内の放射線測定結果

約1か月で装置を開発し、震災以前に当社が開発した γ カメラを搭載して、5月20日に1号機原子炉建屋の大物搬入口付近で放射線量の分布を測定した⁽⁵⁾。大物搬入口から南側二重扉付近を調査したときの結果を図3に示す。図3(a)はビデオカメラで撮影した映像で、図3(b)は γ カメラで検出した放射線量をビデオ映像に重ね合わせたものである。青色部が線量が低いエリアで、赤色部が高いエリアを示しており、放射線の分布を短時間で容易に特定することができた。

3 遠隔操作型移動作業ロボット

3.1 目的

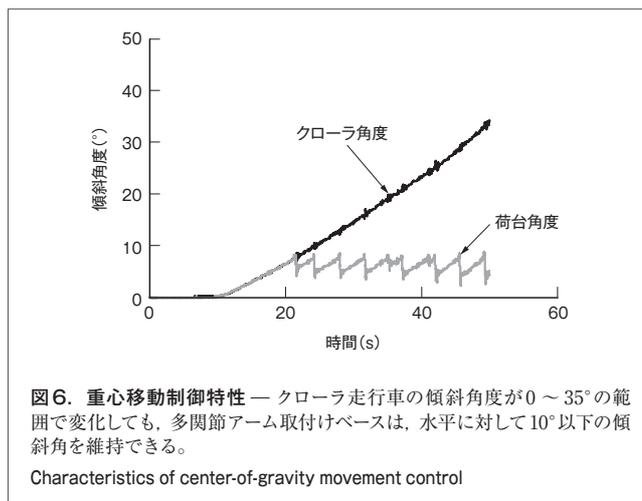
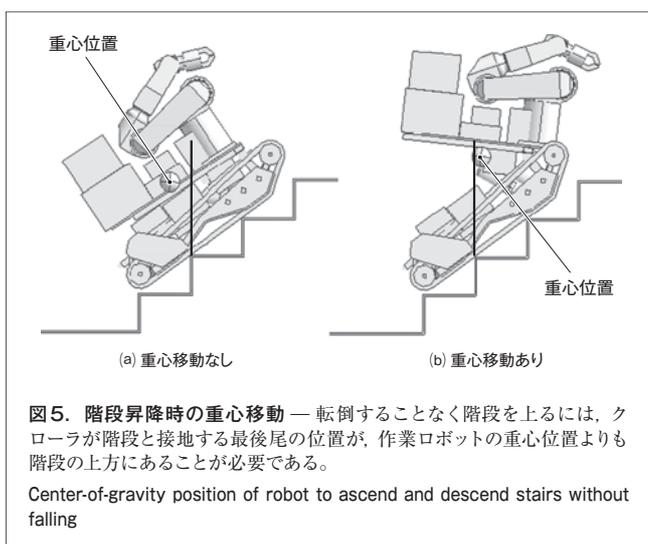
建屋内の調査では、階段などの段差を乗り越えたり、がれきなどを除去したり、放射線による汚染物をサンプリングしたりする作業も必要である。これらの作業を実現するには、広い可動域を持つ6軸垂直多関節アームなどをクローラ走行車に搭載して、安全な場所から遠隔操作するのが効果的である。しかし、可搬質量が5 kg程度の6軸垂直多関節アームでも、コントローラを含めた質量は約60 kgとなり、段差の乗越えなど機動性を備えることは難しい。そこで、作業アームを搭載するクローラ走行車に重心移動機能を持たせることで、階段などの段差を乗り越えられるようにした移動作業ロボットを



開発した(図4)。

3.2 特長

6軸垂直多関節型アームとロボットコントローラを搭載したことで、移動作業ロボットの重心位置はクローラ走行車の荷台よりも高い位置となる。階段昇降時の状態を図5に示すが、転倒しないで階段を上ることができる条件は、クローラが階段と接地する最後尾の位置が、作業ロボットの重心位置よりも階段の上方にある必要がある。図5(a)の状態では重心位置が階段の下方にあるため、作業ロボットは下方に転倒してしまう。転倒を回避するには、クローラの長さを階段の下方へ伸ばすことや、作業ロボットの重心を階段の上方に移動させることが必要である。このロボットでは、クローラ走行車が階段を上ることで、クローラ走行部の角度が変化しても、多関節アーム取付けベースの角度を水平に保つことで、作業ロボットの重心位置を階段の上方に移動できる機構を採用した(図5(b))。クローラ走行車を平地から35°まで徐々に変化させた場合の、多関節アーム取付けベースの平地に対する傾斜角度の変化を図6に



示す。クローラ走行部が35°まで傾いても、多関節アーム取付けベースは平地に対して10°以下の傾斜角度を維持することで、階段昇降時に作業ロボットの重心位置を階段の上方に移動できる。

また、床や壁などの表面付着物のサンプリングでは、ろ紙などをこすり付けてふき取る方法で回収するが、押しつけ力が大きいとろ紙が破損してしまい、逆に押しつけ力が弱いと十分なふき取りができず、表面の汚染状態を精度よく測定できなくなる。そこで、この作業ロボットでは、アーム先端に加わる力を各軸のトルク値から求め、アーム先端に設けたスマイヤパッドの押しつけ力を一定にするコンプライアンス制御を採用している⁽⁶⁾。

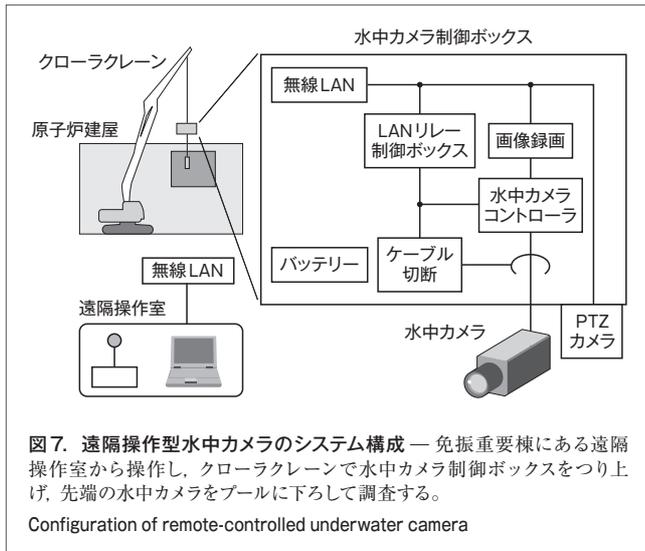
4 遠隔操作型水中カメラ

4.1 目的

3号機原子炉建屋5階のオペレーションフロアの天井は大きく損傷し、プール内にも多くのがれきが落下している。燃料を安全に取り出すためには、まず、プール内にあるがれきの堆積状態を詳細に把握する必要がある。しかし、オペレーションフロアは、高い放射線量の影響で人が容易に近づくことができない。そこで、数百m離れた場所から遠隔操作ができる水中カメラ装置を開発した。

4.2 システム構成

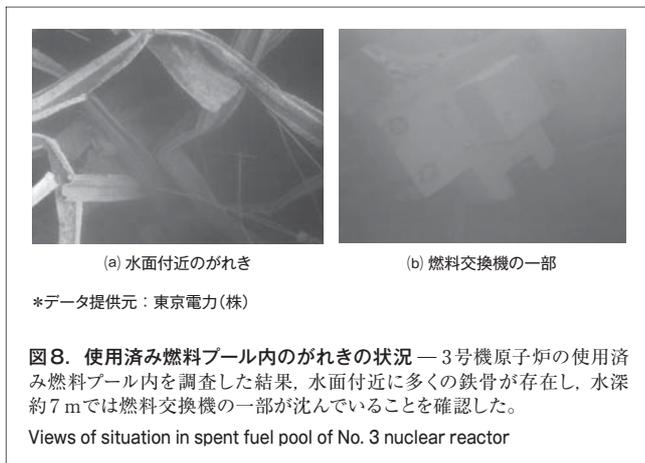
遠隔操作型水中カメラのシステム構成を図7に示す。水中カメラ制御ボックスと水中カメラは、3号機原子炉建屋脇に設置されたクローラクレーンによりつり上げられ、水中カメラをプール内に入れる。プール内に入った水中カメラは、パン、チルト、ズーム、焦点、絞り、及び照明の機能を備えており、免震重要棟の遠隔操作室からの制御で調査を行う。遠隔操作通信は、免震重要棟にある遠隔操作室から原子炉建屋近傍までは既設の有線LANを使用し、そこからクレーンにつり下げられた制御ボックスまでは無線LANを使用して行われる。また、水



水中カメラがプール内のがれきに引っ掛かった場合、無理に引き上げるとがれきが燃料上に落下し、燃料を損傷させる可能性もあることから、他の機器との干渉状態をオペレーターに知らせる機能を設けている。クレーンでつり上げた状態では水中カメラ制御ボックス内の電力供給が難しいことから、制御ボックス内に充電式バッテリーを搭載し、8時間程度の連続調査が可能な構成とした。

4.3 調査結果

2012年4月13日に、3号機のプール内を調査した⁽⁷⁾結果を図8に示す。図8(a)は、プール水面近くの様子が映え、折れ曲がった鉄骨材が多数存在しているのが確認できる。図8(b)は、プール内のがれきを撮影したもので、プールの上をまたぐように設置されていた長さ14 m、質量35 tの燃料交換機の片側がプール内に落下し、水深約7 mの位置に沈んでいることが初めてわかった。プール内には原子炉建屋の天井や壁の破片と見られるがれきも積み重なっていた。遠隔操作型水中カメラによる調査は、プール内だけでなく、3号機原子炉建屋のオペレーションフロアに積み重なったがれきの隙間から機器ハッチ



内に水中カメラを下ろして、4階や3階のようすを確認する作業も実施した。

5 あとがき

東日本大震災による福島第一原子力発電所の事故対応では、高レベルの放射線の影響で人が容易に近づくことができず、遠隔操作型の作業支援ロボットが必要であった。ここで述べた各ロボットや水中カメラは、既存技術も活用して1~2か月という短期間で開発し、放射線量や水中のがれきを調査するときの作業員の被ばくを最小限に抑えることができた。

今後、より複雑で困難な作業を支援できるロボットの開発を進め、一日でも早い福島第一原子力発電所の廃炉措置の実現に貢献していく。

文 献

- (1) 東京電力. 福島原子力事故調査報告書. 2012, 373p.
- (2) 井上 猛. 災害とロボット — 大震災から見えてきたロボットのあり方 —. オーム社. 2012, 206p.
- (3) 間野隆久 他. 原子力防災システム開発. 日本ロボット学会誌. 19, 6, 2001, p.714-721.
- (4) 辰野恭市 他. ロボットの基盤技術整備 — 今後容易となるロボットシステム構築. 東芝レビュー. 56, 9, 2001, p.2-6.
- (5) 東京電力. 福島第一原子力発電所1号機建屋内. <<http://photo.tepco.co.jp/date/2011/201105-j/110522-01j.html>>, (参照2013-09-20).
- (6) 加藤健二 他. セル生産に適したロボットと制御技術. 東芝レビュー. 64, 1, 2009, p.52-55.
- (7) 東京電力. 福島第一原子力発電所3号機使用済燃料プールのがれき撤去へ向けた内部調査について. <<http://photo.tepco.co.jp/date/2012/201204-j/120413-01j.html>>, (参照2013-09-20).



寺井 藤雄 TERAJ Fujio, D.Eng.

生産技術センター メカトロニクス開発センター 研究主幹, 博士(工学)。メカトロ機器の技術開発に従事。精密工学会, 応用物理学会, 日本技術士会会員。技術士(機械部門)。
Mechatronics Development Center



上原 拓也 UEHARA Takuya

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 機械システム開発部主査。原子炉内保全機器の開発に従事。日本原子力学会, レーザー学会会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center



中島 透 NAKAJIMA Toru

電力システム社 原子力事業部 原子力システム設計部。海外と福島地区の原子力発電所の系統設計及び機器設計に従事。
Nuclear Energy Systems & Services Div.