

## 6.1 無人化施工

### 【災害復旧・危険箇所／無人化施工】

技術名	原子炉建屋解体がれきの自動搬送システム
番号	No. 6.1-1
発注者	東京電力(株)
施設名	福島第一原子力発電所
所在地	福島県双葉郡大熊町夫沢北原
工事名称	福島第一原子力発電所ガレキ収集・運搬業務委託
施工期間	2012年7月～
施工者	鹿島建設(株)
キーワード	自律走行、汎用重機、放射線環境

#### (1) 概要

東京電力福島第一原子力発電所の原子炉建屋解体・がれき撤去工事で発生する高線量がれきの構内保管施設への搬送作業は、遠隔操作型や放射線遮蔽型の建設機械を導入することで、搬送作業時の被ばく線量低減が行われてきた。しかし、より放射線量の高いがれきの発生が予想され、一層の被ばく量の抑制、操作ミスの低減、作業効率の向上が更なる課題となった。これに対して、従来の遠隔操作ではなく使用する建設機械の自動化によって、人手を省き、安全で安定した作業効率を実現して、搬送作業に伴う諸課題を一気に解決することを検討した。その結果、知能型移動ロボットなどで利用されている走行経路の自動認識、障害物の自動検知などの計測・制御技術を応用した自律型自動運転システムを開発し、実作業へ投入した。

開発・導入したシステムは、作業用の建設機械にセンサやコンピュータを搭載し、自己位置・姿勢計測、走行路確認、障害物検知などの走行に関わる情報を取得するとともに、その情報を基に自律的に判断し、発進・停止、方向変換、速度調整などを行い、自動走行するものである。今回自動化した具体的作業は次の2つである。

- a. クローラダンプによる屋外での搬送作業（原子炉建屋～構内保管施設の約1km）
- b. フォークリフトによる構内保管施設での搬送作業（地上～地下倉庫内の約800m）



図-1 原子炉建屋解体状況(東京電力 HP より)

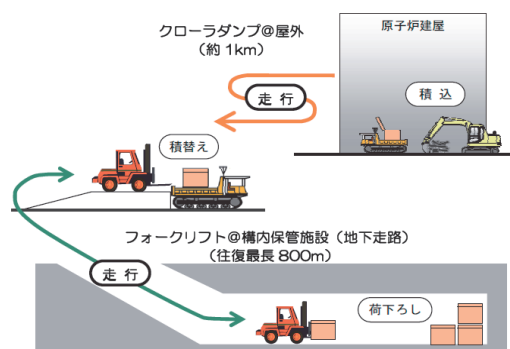


図-2 搬送システムの概要

## (2) 技術詳細

### 1) クローラダンプ自動走行システムの概要

本システムは、高線量がれき（鉄筋コンクリートがら及び鉄骨）を積み込んだ鋼製コンテナを、原子炉建屋解現場から構内保管施設の入り口までの約 1km をクローラダンプで自動搬送するもので、走行路にはカーブ数箇所を含め、斜路、狭隘な道路が含まれている。クローラダンプに搭載した様々な計測機器とコンピュータにより、事前に設定した走行経路上の前方障害物の有無などの情報をリアルタイムで計測、認識、判断、制御することによって目的地まで無人かつ全自動で走行させるものである。

クローラダンプへの自動走行開始指示や車載カメラ映像の確認はクローラダンプの前方を走行する先導車から行っている。従来は先導車からオペレータが走行路の状態やクローラダンプの様子を直接見ながら遠隔操作で走行させていた。本作業はすべて夜間に行われるため照明が届く範囲という条件もあり、先導車とクローラダンプの離隔距離は 30m 程度しか取ることができなかった。本システムの開発により、先導車のオペレータは走行中に伝送されてくる機械の動作状況を監視するだけでよくなるため、離隔距離を 100m 程度取ることが可能となり、作業員の被ばく量を十分の一以下に低減させることができた。



図-3 クローラダンプへの自動化機器の実装

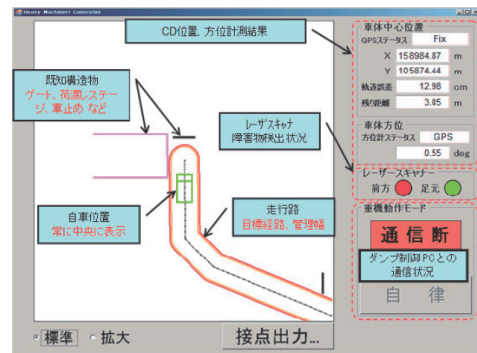


図-4 自動運転状況のモニタ画面

### 2) フォークリフト自動走行システムの概要

クローラダンプで構内保管施設まで自動走行したのち、コンテナはフォークリフトに積みかえられ、構内保管施設内の保管場所まで搬送される。構内保管施設内の走行路は地上の入口部から保管場所まで傾斜 7% のスロープや切り返し部を含む約 800m の走路（幅：約 5.8m）となっている。



図-5 フォークリフト全景

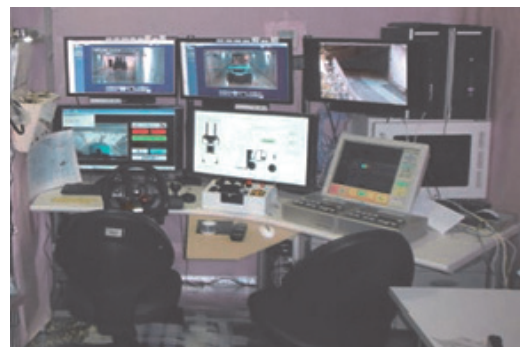


図-6 遠隔オペレータ室

今回の作業に対応するため、当初、遠隔操作型のエンジンフォークリフトを導入し遠隔操作のみで搬送を行うことが計画されていた。しかし、カメラ映像だけでフォークリフトを安全にスムーズに走行（前・後進、停止、回転、方向転換）をさせることは容易ではなく、オペレータの習熟に時間がかかることや、操作ミスによる構内保管施設への衝突や、積み荷の落下などが懸念されていた。また、自動走行を実現するには車両の位置と姿勢のデータは必要不可欠だが、フォークリフトの走行路は屋内となり衛星観測が行えないため、走行中の位置計測にGPSは利用できない。一方、電磁誘導方式による自動搬送車（AGV）のシステムでは、走行路にあらかじめ信号線等を埋設するための工事が必要となること等により、今回の稼働現場には適用が困難であった。このため、独立行政法人産業技術総合研究所デジタルヒューマン工学研究センターとの共同研究成果であるレーザスキャナ方式の位置姿勢計測技術を活用した。本技術は、フォークリフトの前後左右に設置した4台のレーザスキャナによって車体周囲の空間形状を計測し、その形状から車体の周囲構造物との相対位置姿勢関係をコンピュータで解析するものである。これによって得られる施設内における車体の位置・姿勢データを基に、走行路の状況やフォークリフトの保管施設における位置と姿勢がリアルタイムで計測できるようになり、障害物検知や保管施設との衝突回避を行いながら全自動で走行することが可能となった。

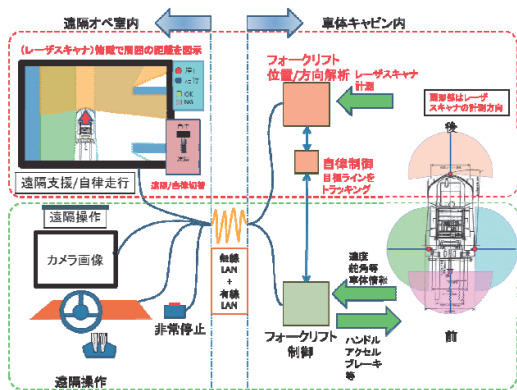


図-7 遠隔操作・自律走行システムの構成

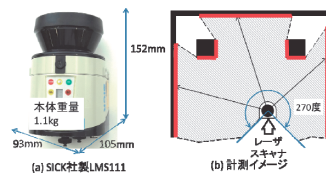


図-8 レーザスキャナ諸元と計測イメージ

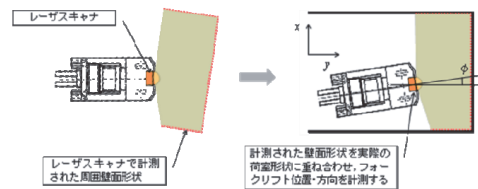


図-9 相対位置・姿勢角の推定

### (3) 結果

高線量がれきを抱えた状態での狭隘部の走行、方向変換を遠隔操縦で行うことは、オペレータにとって緊張感を維持させなければならない過酷な作業であったが、それを自動化したことで、クローラダンプ自律走行システムシステムと同様に、本システム導入の結果、オペレータの熟練度に関係なく一定時間で搬送作業工程を完了できるようになったとともに、コンテナの積替え・定置に専念することが出来るようになり、負担低減が図れた。

参考文献	放射線環境下における建設機械の自動運転システム（平成 26 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集）：鹿島建設（株）三浦悟、日本建設機械施工協会、1-4 ページ、2014 年 11 月
備考	特許登録番号 特許第 5392700 号「障害物検出装置、及び障害物検出方法」 特許申請番号 特開 2010-86035 「誘導システム及び誘導方法」

技術名	無人化遠隔施工システム
番号	No. 6.1-2
発注者	東京電力(株)
施設名	福島第一原子力発電所
所在地	福島県双葉郡大熊町夫沢北原
工事名称	東京電力福島第一原子力発電所解体工事
施工期間	—
施工者	鹿島建設(株)
キーワード	無線 LAN、光ファイバケーブル、放射線環境、長距離

(1) 概要

福島第一原子力発電所3号機災害復旧工事は、原子炉建屋周辺の建屋解体、崩落したガレキの撤去及び燃料プール内の燃料取出し設備を構築するものである。

一般的には解体用重機や大型クレーンを現地で操作し作業を進めることになるのだが、原子炉建屋周辺は放射線量が高く、有人で作業できる時間は放射線防護ベスト等の防護措置を行っても限られてしまう。そこで、作業場所に作業員を配置せずに工事が進められる施工法が必須となり、自然災害復旧工事で用いられてきた「無人化施工システム」をベースに放射線量の低い遠隔地からの操作や狭いエリアでの多数台の解体用重機作業及び大型クローラクレーンの遠隔操作などを可能とする「次世代無人化施工システム」を開発・適用した。解体用重機8台とクローラクレーン2台を同時に500m離れた場所から遠隔操作により、解体・撤去工事を実施した。

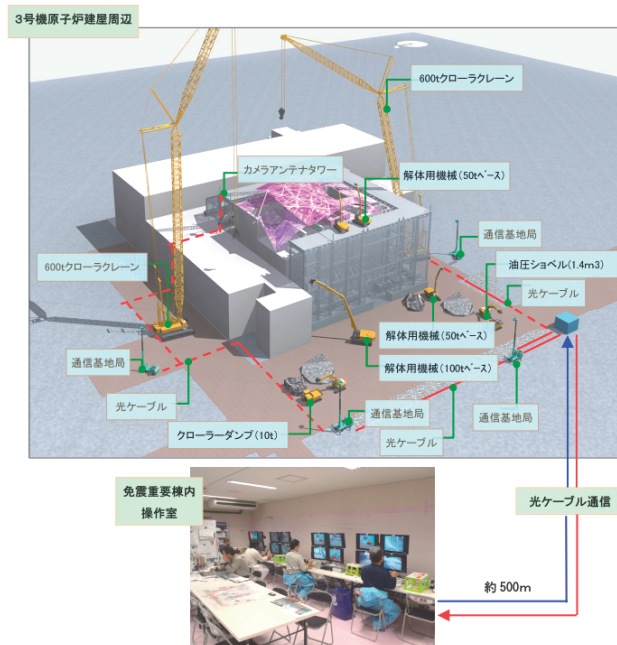


図-1 遠隔操作システムによる原子炉建屋上部の瓦礫解体・撤去イメージ



## (2) 技術詳細

### 1) 建設重機 10 台を同時に無人化施工

複数の重機の操作信号や映像データを確実に伝送するため、作業エリア周囲に張り巡らされた光ファイバーやメッシュ型無線 LAN を用いたネットワークを構築した。これにより重機の位置変化に柔軟に対応し確実に通信できるシステムとなっている。また、建屋上部の瓦礫撤去に用いられる吊り下げカッター機や油圧グラブバケット等の操作については、クローラークレーンジブにアンテナを設置することで正確な無線制御を可能にした。

表-1 主要機械

No.	名称	規格	数量
1	解体用建設機械	100t級 50t級	6台
2	運搬車輛機械	クローダンプ	2台
3	大型クローラークレーン	500t吊り	2台
4	吊り下げ式解体用ツール	切断 把持	4機種



図-2 遠隔操作解体用油圧ショベル



図-3 クローラークレーン

### 2) 約 500m 離れた建屋内での遠隔操作により被ばく線量を低減

これまで無線による遠隔操作は 100m程度が限界であったが、作業エリアへ光ファイバーケーブルにて通信信号を送ることで 500m離れた遠隔操作室での遠隔操作が可能となった。建屋内はごく低線量（5 マイクロシーベルト/h 程度）で、オペレータはマスク、タイベックスーツが不要な環境で作業できる。被ばく線量低減を図るとともに、作業時間の大幅な拡大を達成した。技術的には、更に遠隔地の東京都内でも遠隔運転操作が可能である。

### 3) 大型クローラクレーンの無人化

解体部材の撤去などに用いる大型クローラクレーンは(図-3)、操縦席パネルに表示される多くの情報を確認しながら操縦する必要があるため、他の重機のように操作信号の送受信のみでは安全な運用が困難である。そこで重機キャビン内外に複数台の監視カメラやマイクを設置し、映像や警報音などを操作室内で確認できるようにすることで、あたかも運転席にいるような感覚で操作が可能になった。

### 4) 構台上の重機への燃料補給を無人化

今回の解体・撤去作業は、建屋周囲にフレームを構築し、フレームの上に解体重機を載せて作業を行う。比較的放射線量の高い構台上では、重機への燃料供給が課題となる。そこで、解体重機へ無人で燃料を供給するワンタッチ給油装置(図-4)を開発した。

解体用重機にはワンタッチ給油口と燃料タンクガイドが取付けられ、クレーン操作にてガイドに燃料タンクを挿入することで解体用重機に燃料が供給できた。

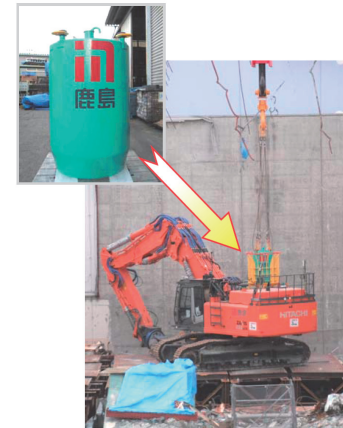


図-4 遠隔給油システム

### (3) 結果

重機の放射線対策として、福島第一原子力発電所構内の比較的放射線量の高い3号機原子炉の瓦礫解体・撤去工事を進めるにあたり、建設重機の制御機器及び通信機器やカメラ装置には鉛シートによる対放射線防護を施し、放射線による機器への影響を低減した。

非常に作業難度の高い原子力発電所の災害復旧工事において、建設機械の無人化遠隔施工システムを適用し目標とした成果を上げることができた。ICTを利用して、操作信号やカメラ映像信号のネットワーク化を進めることによって、従来の無人化施工に比べて、より安定した高速通信が可能となり、建設機械の効率的な稼働、仕様性能を最大限に発揮させることができた。



図-5 遠隔給油用モニター

参考文献	災害復旧工事における無人化施工システムの開発事例(第14回建設ロボットシンポジウム論文集): 鹿島建設(株)飯塚満他、日本ロボット工業会、47-54 ページ、2014年8月
備考	特許登録第5808007号(2015年11月10日) 遠隔操作式重機への燃料供給システム