

多種多数機械を用いた無人化施工システムの開発

福島第一原子力発電所災害復旧工事における遠隔操作

領 木 紀 夫・田 中 敬 二・石 川 利 行

約 20 年前に火山活動を再開した雲仙普賢岳での災害復旧工事を契機に実用化された無人化施工技術は、遠隔操作化技術を核として ICT の飛躍的な進歩により高度化が進み、土工事を中心として実績を積んできた。しかし、多様な災害を想定した場合、従来のショベル系建設機械を中心とした技術では復旧活動ができない場合が生じ、幅広く対応できる技術が求められている。

今回、従来の無人化技術を基に、原子力発電所復旧工事において、多数の建設機械を同時に遠隔操作するシステムを実用化し、さらに大型クレーンの遠隔操作化や吊り下げ式ツール、遠隔燃料給油装置などその支援ツールを開発し、良好な結果を得ている。

本稿ではその内容について報告する。

キーワード：災害復旧，無人化施工，原子力事故，ICT，無線通信，解体

1. はじめに

無人化施工技術は、約 20 年前に火山活動を再開した雲仙普賢岳での災害復旧工事を契機に実用化され、ICT の飛躍的な進歩により高度化が進んできた。しかし昨今の災害復旧工事は、大規模、市街地、特殊作業など多様な形態になってきており、無人化施工技術もさらなる進化が求められ、これら多様な災害復旧に対応する無人化施工技術を開発してきた。

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災では原子力発電所も被害を受け、その復旧工事は高線量下という厳しい環境であり、完全無人化による施工が必要となった。そこで今回、これまでの技術を基に多種多数機械の無人化施工システムを開発し、福島第一原子力発電所復旧工事に適用した。

2. 多様な災害復旧における無人化施工の課題

無人化施工技術は、「人間が立ち入ることができない危険な作業現場において、遠隔操作が可能な建設機械を使用し、作業を行うこと」と定義される。

建設機械の遠隔操作は操作信号やカメラ映像の伝送、およびネットワーク化が主要な要素となっている。遠隔操作に使用する電波は一般に特定小電力無線が用いられてきており、その伝送距離は約 200 m までと短いこと、また、大容量のカメラ映像データを遅延な

く確実に伝送することが課題であった。そのため、近年では、ICT の進歩によって操作信号やカメラ映像の伝送を含めてネットワーク化した無人化施工技術も開発されている。

また、これまでの無人化施工技術は土工事が中心であったが、市街地災害、原子力発電所災害などの復旧では、複雑な地形での作業やコンクリート造・鉄骨造の様々な建物の撤去・解体など多様な対応が求められる。

表 1 にこれら多様な災害復旧に必要な技術、解決すべき課題、その解決方法について整理した。今回、これらの課題を解決した無人化施工システムを実用化し、福島第一原子力発電所復旧工事に適用した。

3. 福島第一原子力発電所復旧工事における無人化施工システムの概要

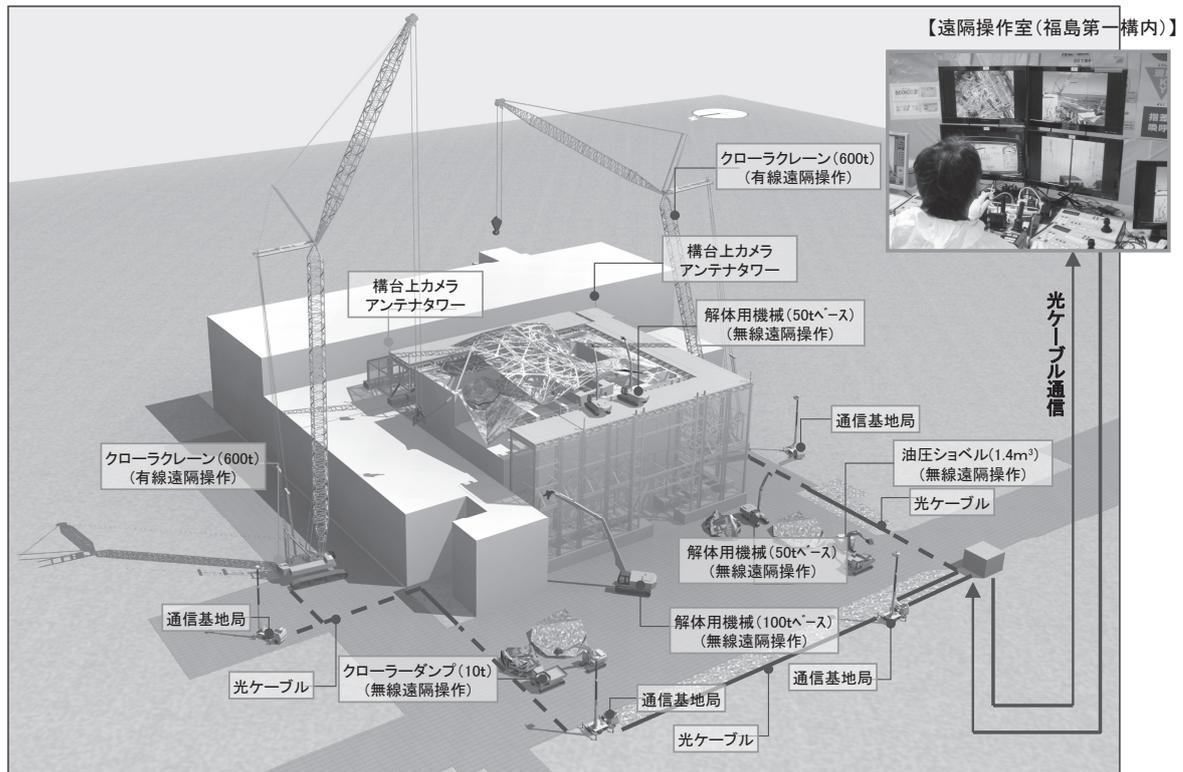
本復旧工事では、現場から約 500 m 離れた低放射線エリアに遠隔操作室を設置し、そこから解体用機械 8 台を同時に稼働させ、さらに大型クレーン 2 台を用いて作業を進める計画を立案した。また、一部の解体用機械は高さ約 30 m のステージ上部でも作業を行う必要があった。

これら条件の下で構築した無人化施工システムを図 1 に示す。

本システムは、サイトに配置される大型クローラク

表一 多様な災害における課題と解決方法

必要技術	解決すべき課題	解決方法
多数建設機械の遠隔操作	無線による映像伝送	ネットワーク負荷低減・遅延対策
多種建設機械の遠隔操作	無線による操作信号伝送	光ケーブル・大容量無線通信
立ち入り禁止エリア外からの遠隔操作	長距離大容量通信	メッシュ型無線LANの構築
多工事下における安定した遠隔操作	限られた無線周波数	不具合発生時の対応能力強化
広範囲における施工	通信の安定性	大型解体用機械やクレーン遠隔化の実証
狭隘な場所での施工	柔軟な無線通信設備の構築	無線周波数の選択
様々な地形・障害がある中での施工	ロバスト性の高い通信	
解体などを伴う多様な作業	多種建設機械の遠隔化に伴う操作性・安全性の確認	



図一 無人化施工システム

レーン、解体用機械、吊り下げ式解体ツールや監視カメラなどと、遠隔操作室に配置される操作機器類と監視モニタ、及びこれらをつなぐ有線・無線のネットワークで構成される。

解体用機械は地上4箇所、構台上2箇所に設置した通信基地局と交信し、建屋周囲のあらゆるエリアでの作業が可能である。大型クローラークレーンには光ケーブルによる有線での遠隔操作方式を採用した。また、通信基地局と遠隔操作室間も信頼性の高い光ケーブルで接続し、大容量通信を確保した。

また、機械の稼働エリアに対して建物が占める範囲が広く、死角ができやすいため、固定カメラを16台設置してオペレータの視野を確保するとともに、大型クローラークレーン装着カメラの映像も共用し、俯瞰的に現場を見て構内の状況を把握できるようにした。

建屋上部での作業には、大型クローラークレーンで吊り下げ、クレーンマストに設置した発信機を用いて遠隔操作を行う機械を開発した。また、構台上で作業を行う解体用機械の給油のため無人給油装置を開発した。本システム上の機械・機器の一覧を表一2に示す。以下に、これらの詳細について述べる。

表一2 ネットワーク接続機械・機器一覧

機械名・機器名	台数
解体用機械	8台
クローラークレーン	2台
吊り下げ式解体ツール	2台
建設機械搭載カメラ用エンコーダ	16台
建設機械搭載カメラ用接点交換機	10台
場内固定カメラ用エンコーダ	16台
場内固定カメラ用操作器	16台

4. ネットワークの構築

(1) メッシュ型無線 LAN の採用

災害時は損傷して不通となってしまった有線設備に代わり、無線設備が様々な用途で多用されるため、無人化施工に使用できる電波が少ないことが想定される。特に 2.4 GHz 帯は一般的な無線 LAN で用いられているため影響を受けやすいが、無人化施工ではこのような状況下でも安定した通信が必要となる。

そこで、本システムでは、遠隔操作信号のみ従来から使用されている 429 MHz 帯の特定小電力無線を採用し、カメラ映像の伝送と切り離すことで、無線不具合が操作・映像の両方へ影響することを防ぐこととした。

カメラ映像伝送には建築工事で実績のある 5 GHz 帯のメッシュ型無線 LAN を採用した。5 GHz 帯の無線は、7 チャンネルとチャンネル数は少ないが、基地局を設置する際に申請が必要であり、限定したエリア内では確実に電波を占有できるため、電波干渉のおそれが少ない周波数帯である。

しかし、5 GHz 帯の無線は、高出力で伝送距離が長いことによる相互干渉や、指向性が強いことによる障害物の影響（電界強度の低下）が懸念され、適切な基地局配置が求められる。そこで、表—3 の確認項目に沿って実証実験を行い、適切な基地局配置計画を可能とした。

表—3 無線実証実験確認項目

障害	確認項目
電界強度の低下 ・移動による距離減衰 ・建物陰への移動 ・アンテナ直下での作業	電界強度低下時の映像品質
	複数映像伝送時の相互干渉
	ハンドオーバー機能
相互干渉	高低差 10 m 程度での伝送機能

(2) ネットワーク負荷低減・遅延対策

無人化施工は緊急性を伴うことが多く、設備の設置作業ですら危険にさらされることになるため、その設備はよりシンプルであることが望ましい。一方で、建設機械を遠隔操作する場合にオペレータの目の役割を果たすカメラの映像は、操作に支障のない解像度を要し、遅延を最小限に抑える必要がある。

これら大容量データ伝送の課題を解決するために、以下のような対策を実施した。

①作業に必要な解像度の評価

通常作業時は HVGA 画質で行い、細かな作業は VGA 画質で行う。HVGA 画質におけるデータ伝送量は VGA の半分となるためネットワーク負荷を半減さ

せることが可能となった。

②アナログカメラの採用

アナログカメラ+エンコーダ・デコーダ方式を採用することで、web カメラを採用する場合に予想される遅延、フリーズの懸念を解消する。また、画質設定の変更を遠隔操作室からできるようにすることで、用途に応じた設定での効率的なデータ伝送を可能とした。

③フルフレーム送信タイミングの調整

一定間隔で送受信するフルフレーム送信のタイミングをずらすことで、データ伝送のピークをカットし、伝送過多によって通信不具合が発生するリスクを軽減した。

これらの対策については、映像遅延・画質の確認を目的とした実機による実験を行った。アナログカメラを直接有線でつないだ映像と、エンコーダ・デコーダでデジタル変換し無線送信した映像を比較し、作業に影響のない遅延、画質であることを確認した（写真—1）。



写真—1 映像遅延の確認状況

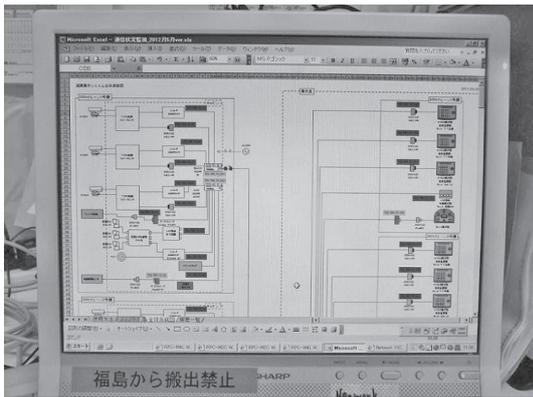
(3) 不具合発生時対応能力の強化

無人化施工においては、各種不具合発生時に、現場に立ち入ることなく原因を絞り込めることが重要である。

そこで、システム障害発生時に迅速な対応ができるよう、「不具合機器探索プログラム」と「メッシュ型無線 LAN 監視プログラム」を導入した。

①不具合機器探索プログラム

このプログラムは、機器ごとの通信状況を確認するためのものであり、ネットワーク障害が発生した際に、どの機器に異常があるかを迅速に探索することができる。全ての機器に割り当てられた IP アドレスに向けて一斉に信号を発信、レスポンス時間を測定することで異常がある機器を速やかに特定し、異常のない機器を青色、異常がある機器を赤色に表示する。写真—2



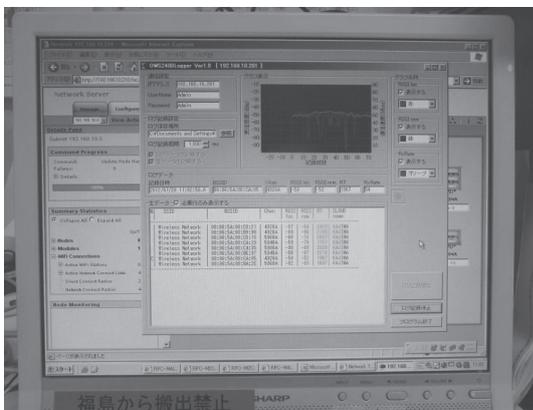
写真一２ 不具合機器探索プログラム

にこのプログラム画面の一部を示す。

②メッシュ型無線 LAN 監視プログラム

遠隔操作建設機械のオペレータは、常に遠隔操作室でメッシュ型無線 LAN を経由した映像を見ながら操作するため、映像が送られ続けていることが重要になる。

そこで、カメラ画像に異常が発生した際に、監視プログラムによりそれが無線の不具合か否かを速やかに判断し、原因の絞込みを迅速に行えるようにした。写真一３は無線監視プログラムの画面である。



写真一３ メッシュ型無線 LAN 監視プログラム

5. 多種機械の遠隔操作化

(1) 大型解体機の遠隔化

建設機械の遠隔操作では、オペレータが作業状態や周囲の状況をいかにリアルタイムで、かつ正確に把握できるかが重要な課題である。そのためには、カメラの設置台数と設置位置、ズームやチルトなどの仕様を見極めるとともに、映像の遅延が操作に影響しないことを事前に検証する必要がある。

写真一４は大型解体用機械による遠隔操作の実機実験の状況である。実証実験においては、複数のオペ



写真一４ 大型解体用機械の遠隔操作実証実験

レータによって操作性を確認することを目的に、高さ20 m を超える建物の解体工事での実証を行った。

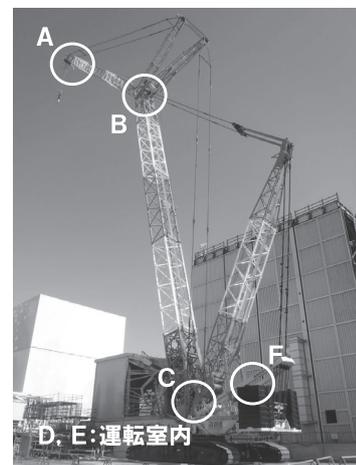
(2) 大型クレーンの遠隔化

大型クレーンの遠隔操作では、吊り荷の状況や安全装置から出力される情報など、ショベル系機械に比べてより多くの情報を取得することが必要である。また、これらの情報の途切れ・遅延は重大事故につながるおそれがあるため、データの伝送は信頼性が高く、遅延も最小限にとどめる必要がある。

以下に、これらの課題に対応した、大型クレーンの遠隔化システムを示す。

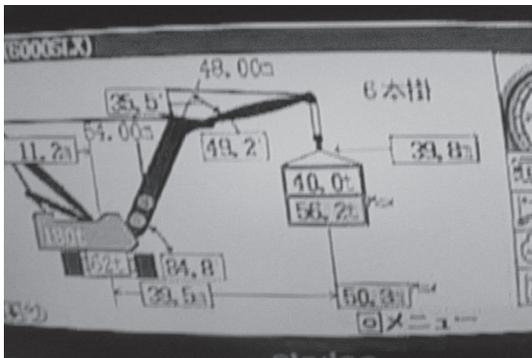
①カメラの設置

写真一５にカメラの配置を示す。ジブ先端カメラAの位置に取り付けられるカメラは運転室で操作する場合においても用いられるカメラである。クレーンの安全な操縦を確保するために以下のカメラを追加した。



写真一５ カメラの配置

- B マスト頂部カメラ
マスト頂部に取り付け、吊り荷を巡回させる高さで、吊り荷の状況を横から映すことが可能である。
- C 運転室上カメラ
運転室の屋根上に取り付け、通常オペレータが運転室で操作する際の目線の映像を映し出す。
- D 運転室内カメラ
運転席付近に取り付け、クレーンの主電源や運転室内の警報ランプの状況を映す。
- E 安全装置用カメラ
安全装置の出力データを映すモニタの前に取り付け、安全装置の情報を映す（写真—6）。



写真—6 カメラEの映像

- F ウインチ用カメラ
クレーン後部に取り付け、ワイヤーが巻かれているドラムを映す。ワイヤーの乱巻きは重大事故につながる可能性があるため、常時監視を行う。
- なお、A、Bのカメラは地上100mに位置するため、420倍の高性能屋外用カメラを選定した。

②音声マイクの設置

運転室内でアナウンスされる荷重値やジブ角度などの音声情報を遠隔操作室で把握するため、運転室内にマイクを配置、音声データとして伝送した。

③操作信号及びカメラ映像の伝送

クレーンの操作信号とカメラ映像の伝送には信頼性の高い光ケーブルによる有線方式を採用した。巡回するクレーンに繋がれる光ケーブルは、クレーンの巡回に追従する治具を介して接続され、断線の危険を回避した。また、画素数や圧縮率を調整し、作業可能なまでの遅延、画質とした。

(3) 吊り下げ式解体ツールの開発

建屋上部の飛散しがれきや鉄骨の解体・撤去では、建屋上部に大型解体用機械を直接載せることができないため、「切断する」「つまむ」「すくい取る」という

作業を建屋外周部に設置した大型クレーンから吊り下げられた機械で行わなければならなかった。「すくい取る」ことが可能な吊り下げ式機械には、ごみ焼却場などで使用されている電動油圧式グラブバケットを活用することができたが、「切断する」および「つまむ」機械は新たな開発が必要であった。

①吊り下げカッター

一般の解体用機械は、地盤や構台に押し込みの反力を取り、構造物を切断する。「切断する」機能を持つ吊り下げカッターには、切断時に機械自体が逃げないように、カッター本体に重量を持たせることで切断性能を確保した。また、カッターを動かす油圧ユニットについては既存油圧ショベルの本体ユニットを転用することで開発期間の短縮を図った（写真—7）。

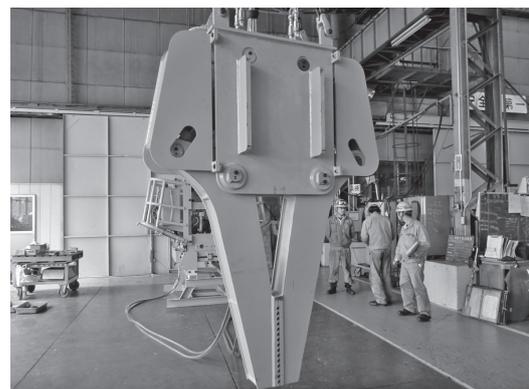


写真—7 吊り下げカッター

②吊り下げ油圧ベンチ

「つまむ」機械として吊り下げ油圧ベンチの開発を行った。この機械は「すくい取る」に対応した電動油圧式グラブバケットの機構を改造した（写真—8）。

なお、これら吊り下げ式解体ツールを遠隔操作に対応させるため、マスト頂部に無線操作基地局を設置した。



写真—8 吊り下げ油圧ベンチ

(4) 無人給油装置

従来の無人化施工では、燃料給油に際して建設機械を補給ヤードまで戻していた。しかし、今回の工事では解体用機械が高所のステージ上に設置された場合など、タイマーに安全な場所へ移動させることができないことから、クレーンによって無人給油が行える装置を開発し、適用した（特許出願中、写真—9）。



写真—9 無人給油装置

給油に用いられる給油タンクはクレーンで吊り下げる方式とし、解体用機械に設けたガイドに沿って装着することで燃料の供給ができるものである。給油口は、ゴミの浸入や燃料の揮発を防止するため、給油タンクの装着が完了する直前に自動で蓋が開閉する機構とした。また、燃料ケージと透明な給油ホースをカメラで見ながら給油を行うことで、タンク内に燃料が残っていないことを確認できるようにした。

6. システムの評価

本システムは、原子力発電所復旧工事において2011年8月から順調に稼働している。施工中であるが、各要素技術の評価を以下に示す。

①映像の遅延

懸念された映像の遅延は、実測値で約0.1秒と、操作に支障のないレベルである。

②ネットワークの安定性

ロバスト性を持たせたシステムにより、建物の陰でも安定した通信を保っている。

③故障モニタリングの効果

不具合時の状態が迅速に判定できて、的確な対応が採れるため、機械の稼働率向上に寄与している。

④大型解体用機械の遠隔操作

初めて30mを超すアームを備えた大型解体用機械の無人化を行ったが、無人化での微妙な操作に対応する動作スピード設定や適切なモニタリングにより、計

画通りの解体能力を発揮することができた。

⑤大型クレーンの遠隔操作

大型クローラクレーンの遠隔操作化は初めてであったが揚重作業上の危険もなく、また大きなトラブルもなく順調に作業できており、クレーンの遠隔操作化が確立できたものとする。なお、通信異常による操作信号や映像信号の不具合は発生していない。

⑥その他の遠隔操作機器

吊り下げ式解体ツールや、無人給油装置などの開発により、特殊作業や付帯作業の無人化を実現した。

7. おわりに

今回、多様な災害復旧への対応を目的にICT技術を活用した無人化施工のシステムを開発し、実用化した。

現在、本システムを難度の高い福島第一原子力発電所3号機復旧工事に適用して良好な結果を得ており、無人化施工技術は多様な災害への対応という面でさらに一歩前進したものとする。加えて、作業員の放射線被曝量低減にも大きく貢献している。

今後は、より多様な災害に対応できるよう、個々の作業に応じた遠隔操作機器、緊急回収などの不具合対応装置、今回の給油装置のような支援ツールなど、ハード面の開発も遅滞なく進めていくことが重要であると考えられる。

JICMA

《参考文献》

- 1) 建設無人化施工協会 技術委員会：無人化施工の推移と展望、建設の施工企画、11月号、pp.6～12、2006年

【筆者紹介】

領木 紀夫（りょうき のりお）
鹿島建設㈱
東京建築支店 機材部
次長



田中 敬二（たなか けいじ）
鹿島建設㈱
機械部 技術4グループ
課長代理



石川 利行（いしかわ としゆき）
鹿島建設㈱
ITソリューション部 施工ITグループ

