

ていかなければならない。また、現状のロードマップでは、格納容器を補修し、水を張り遮蔽した上で燃料デブリの取り出しを行う計画となっているが、実際には、格納容器の水張りのための健全性チェックや補修を行うことは、非常に困難なことが予想されるので、バックアッププランとして、気中での燃料デブリ取り出しのための技術開発も検討が必要となる可能性もある。その場合、機器には格段に高い耐放射性が要求されることから、基盤技術開発からしっかり行う必要が生じると考えられる。

廃炉に向けて開発が求められているロボットや遠隔操作機器は、いずれも新規に開発されるものばかりであり、現場で確実に使用できる装置として完成させるには、研究開発された後も、機能検証、実証試験、さらにはオペレータの訓練などもしっかり行った上で、投入する必要がある。JAEAは、福島廃炉技術安全研究所を設置するとともに、遠隔操作機器・装置実証施設(通称モックアップ施設)の建設・運用を行う計画を進めている。この施設は、今後、開発されたロボットや遠隔操作機器の機能検証・実証試験、オペレータの訓練を行う上で極めて重要な役割を果たす。

5. おわりに

本稿では、東京電力福島第一原子力発電所事故に対して、これまでに活用されたロボットや遠隔操作機器などについて紹介するとともに、今後廃炉に向けて必要となる技術開発について

述べた。

福島原発の今後の廃炉にむけて必要となる除染、汚染水の漏えい箇所の特定・補修、燃料デブリの調査・取り出しなどの多くの作業は、人が行うことが極めて困難な作業であることから、今後の廃炉の成否は、ロボットや遠隔操作機器の開発にかかっているとと言っても過言ではない。廃棄物や汚染水の処理においても、遠隔操作で行うための技術開発を継続的に行っていく必要がある。

【謝辞】

最後に、本稿を執筆するにあたり、東京電力(株)田中勲氏をはじめ、多くの方に情報提供などにご協力をいただいた。この場を借りてお礼を申し上げます。

<参考文献>

- (1) 浅間一：“東日本大震災及び原子力発電所事故に活用されるロボット技術”、ITUジャーナル、Vol.42、No.2、pp.44-47 (2012)
- (2) <http://roboticstaskforce.wordpress.com/>
- (3) http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/20120626_01.html
- (4) http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/121203/20121203_02f.pdf
- (5) <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/conference-j.html>

【筆者紹介】

浅間 一
東京大学 大学院 工学系研究科 教授

● 優良技術図書案内

● メーカー就職希望の理工系学生のために

商品開発の流れと設計のポイント

長縄一智 著 A5判 180頁 定価 1,575円

お問合せは日本工業出版(株)販売課まで 販売直通 03 (3944) 8001 FAX 03 (3944) 0389

解 説

電食による玉軸受の振動上昇に関する研究

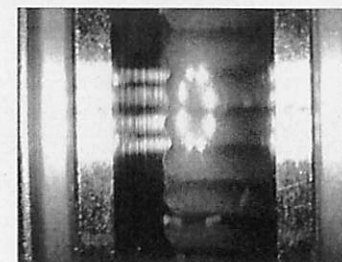
電食によって上昇する振動の周波数は表面損傷形態で異なる

東京理科大学 野口 昭治

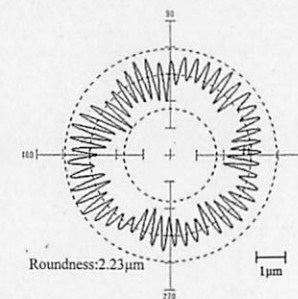
1. はじめに

軸受の英文表記は“bearing”である。動詞である“bear”の意味を調べると、“重さを支える”とある。軸受の役割は、荷重を支えながら回転運動を案内することなので、機能を的確に表している。転がり軸受を使用する際には、要求仕様に沿った検討を行い、機械の寿命を満たすような軸受が選定される。荷重、疲労寿命、回転速度、使用温度、使用環境(例えば高真空中、クリーンルーム内)等多くの項目について検討され、安全率も乗じているので、使用条件や環境が大きく逸脱しない限り、極端に寿命が短くなることはない。

転がり軸受の内外輪間に電圧が加わるとグリース(絶縁膜)を破って転動体と軌道面間で放電が起こり、グリースの黒色化や表面に損傷が生じて、音・振動が上昇する不具合が生じる。この現象は電食と呼ばれ、鉄道車両に使われる軸受の損傷事例として知られている。電食が発生すると軸受の軌道面にリッジマークと呼ばれる縞模様(第1図)が形成され、転動体数の整数倍のうねりになることが多いとされていた⁽¹⁾。しかし、最近の研究によって、リッジマークの形成には転動体と軌道面間の油膜パラメータが約3以上であることが必要であり、油膜パラメータが小さいと振動は上昇するが、リッジマークは形成されず、幅の広い黒色の走行跡(第2



Running mark (1.82mm)



第1図 内輪軌道面に形成されたリッジマークと真円度

福島原発で活用されたロボット技術

東京大学 浅間 一

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所の事故後、高放射線環境下でのさまざまな作業において、ロボットや遠隔操作機器の活用が求められた¹⁾。事故直後は、それらの機器がなかなかスムーズに導入できなかったものの、これまでに20種類以上のロボットや遠隔操作機器が投入され、事故対応や廃炉に向けての作業において、多大な貢献を果たしている。本稿では、これまでにどのようなロボットや遠隔操作機器が導入されたかについて紹介するとともに、現在廃炉に向けて行われている技術開発について解説する。また、今後、福島原発の廃炉に向けてどのような技術開発を行う必要があるか、さらに今後起こりえる原子力事故に対する備えとして何をすべきかについて述べる。

2. 福島原発事故におけるロボット技術活用のニーズ

事故直後の緊急対応におけるロボットや遠隔操作機器のミッションは、状況把握、原子炉や使用済み燃料プールの冷却とその安定化、汚染物質の封じ込め、ガレキの除去による作業環境改善などであったが、冷温停止後（平成24年1月以降）は、主目的が廃炉に向けた使用済み燃

料プールからの燃料や燃料デブリの取り出しに移行している。しかし、現場で様々な作業を行っている作業員の被曝を低減することが何よりも重要なミッションである。

事故直後は、政府と東京電力が、福島第一原子力発電所の災害対策復旧のための6つの特別プロジェクトチーム（PT）を設置した。そのうちのひとつがリモート・コントロール化PTであり、ここで緊急対応におけるロボットや遠隔操作機器を現場に導入するための議論が行われた。

政府と東京電力は、福島第一原子力発電所・事故の収束に向けた道筋として、当面の取り組みのロードマップを作成し、それに沿って様々な緊急対応の活動が行われた。事故発生直後、原子炉建屋の周辺は放出された汚染物質により放射線量が非常に高く、作業員が接近することも非常に困難な状況であり、様々な場面でロボットなど遠隔操作可能な機器の活用が求められた。しかし、事故直後の緊急対応においては、極めて混乱した状況が存在した。遠隔操作機器のユーザーである東京電力は、どこにどのようなロボット技術が存在するのかを十分に把握することができず、逆にロボット開発を行う研究者やロボット製造業者は、どこにどのようなニーズが存在するのかをなかなか把握できなかった。そこで、ロボット関係の研究者や技術者が

集まり、災害対応の状況に関する情報交換を行うとともに、対災害ロボティクスタスクフォース（ROBOTAD：ROBOTics Taskforce for Anti-Disaster）²⁾を設立し、投入可能なロボット技術に関する情報収集を行うとともに、ロボットで用いられている部品の耐放射線性能や、原子炉建屋内でのロボットを遠隔操作するための無線通信の可否など、災害現場や事故現場にロボットを導入するための技術的な議論をWeb上で、あるいは会合を持ちながら行い、リモート・コントロール化PTに対して様々な情報を提供するなどの支援活動を行った。

緊急対応、および廃炉措置におけるロボット技術活用の具体的なニーズは、注水冷却、建屋内外の調査（映像による把握、放射線量、温度、湿度、酸素濃度等の計測）、瓦礫除去、機材の運搬・設置、サンプル（ダスト、汚染水、燃料デブリなどのサンプル）の採取、遮蔽、除染など、非常に多岐に渡った。その作業内容のみならず、場所、環境条件も非常に多様であり、この多様なニーズに対し、これまでに様々なロボット技術が投入された。

3. 事故対応で活用されたロボット技術

(1) 冷却

東京電力福島第一発電所の事故発生直後は、原子炉や使用済み燃料プールの冷却が最大の課題であった。安定な注水を行う手段として、平成23年3月22日より、コンクリートポンプ車による注水が4号機で行われた。使用されたのは、Putzmeister社製および中国三一重工社製のコンクリートポンプ車である。その後、数台が1、3、4号機において導入され、遠隔操作できるように改造された。コンクリートポンプ車は、ぞうさん、キリン、マンモス、シマウマなどの愛称で呼ばれていた。遠隔操作では、コンクリートポンプ車のブームの先端に照明とカメラを設置し、免震棟からカメラ画像をモニタリング

しながら、注水が安定に行えるようにブーム等を無線LANによって操作した。

(2) 瓦礫除去

平成23年4月6日より、無人化施工機械による瓦礫除去が開始された。事故直後の福島第一原子力発電所内には、津波によって発生した瓦礫と、原子炉建屋の水素爆発によって発生した瓦礫が多数存在した。特に、水素爆発によって発生した瓦礫は、放射線レベルが高く、発電所内での復旧作業の大きな妨げとなっていた。そこで、大成建設、鹿島建設、清水建設のJV（共同企業体）が、高線量作業環境における作業員の被ばく線量の低減を目的として、無人化施工機械を用いた瓦礫の除去を行った。具体的には、バックホウ（アイアンフォーク）、バックホウ（ニブラ）、クローラダンプ（11t）、オペレータ車、カメラ車などが複数台使用された。

先端のアタッチメントをアイアンフォークに付け替えたバックホウを遠隔から無人で操作し、瓦礫をコンテナに収納するとともに、クローラダンプを遠隔から無人で操作し、コンテナ保管場所まで輸送する。この無人化施工機械を用いた発電所内の瓦礫除去作業は、11月までの約7ヶ月間実施され、約56,000m²のエリアに存在した、約20,000m³の瓦礫（屋外のみ）を除去することに成功した。

その後も、平成23年5月10日より、3号機の原子炉建屋大物搬入口内外において、遠隔操作機器を用いた瓦礫除去が開始された。使用された機器は、米国QinetiQ社製のTalonやBob Cat、スウェーデンBrokk社製のBrokk-90やBrokk-330などである。水素爆発を起こした原子炉建屋の内部も放射線レベルの高い瓦礫が多く存在しており、それらの除去がこれらの機器を用いて行われた。なお、Talonには、アイダ国立研究所から提供されたもの1機と、QinetiQ社から直接供与されたもの2機があったが、瓦礫除去に使用されたのは後者である。その後、平成25年7月25日には、3号機原子炉建屋内1階

ガレキ等の障害物の撤去作業に遠隔操作重機ASTACO-SoRa（日立エンジニアリング・アンド・サービス社製）が使用されている。

また、水素爆発を起こした原子炉建屋の最上階瓦礫の除去作業が遠隔操作によって行われた。4号機の原子炉建屋上部の瓦礫については、放射線量レベルが低かったために、建設機械を用い有人作業で撤去を行ったが、3号機の原子炉建屋上部の瓦礫については、放射線量レベルが高いために、作業員の被ばく線量低減のため、原子炉建屋周辺に構築した構台および地盤面より、クレーンやバックホウ（ニブラ）など、遠隔操作による無人重機を用いて実施された。

また、鹿島建設は、平成25年6月24日に3号機の放射線レベルの高い瓦礫の搬送作業の完全自動化を達成したと発表した。原子炉建屋の瓦礫撤去作業現場から構内保管施設までの約1kmを無人化クローラダンプによって、構内保管施設入口から保管場所までの傾斜角7%のスロープや切り返し部を含む往復約800mの走路を無人化フォークリフトによって自動運搬している。

(3) 調査

平成23年4月17日から、米国iRobot社製のPackbot（2台）を用いて原子力建屋の内部の調査が開始された。当初Packbotは、建屋内の放射線量・雰囲気温度・雰囲気湿度・酸素濃度の測定に用いられたが、その後も、Packbotは、炉心スプレイ（CS）系の健全性確認や原子炉建屋1階部分の調査などにたびたび用いられている。

平成23年6月には、千葉工業大学、東北大学、国際レスキューシステム研究機構（IRS）、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）などが開発したQuinceが投入された。Quinceは、瓦礫上などの走破性に優れていることから、階段の昇降が必要となる建屋内のミッションで活用された。平成23年6月24日に行われた地下の汚染水のサンプリングと水位計の設置のミッ

ションには失敗したものの、平成23年7月8日には2号機の3階部分の調査、平成23年7月8日には、Packbotとともに、Quinceは炉心スプレイ（CS）系の健全性確認に活用され、大いなる貢献を果たした。平成23年10月20日には2号機の5階部分の調査に成功したが、帰還の際に通信のトラブルによって3階部分で動作不能となった。その後、同形の機種として、Quince 2、Quince 3が投入され、2号機原子炉建屋1階MSIV室調査など、現在でも建屋内の調査などに活用されている。

この他にも、日本原子力研究開発機構（JAEA）が開発した調査用ロボットJAEA-3、TOPY工業が開発したSurvey Runner、三菱電機特機システムが開発したFRIGO-MA、ホンダと産総研が開発した高所調査用ロボット、東芝が開発した4足歩行ロボットと小型走行車などが、人が進入することが困難な原子炉建屋内の様々な調査に用いられた。

これらのロボットや遠隔操作機器以外にも、米国Honeywell社製の小型無人ヘリT-Hawkによる原子炉建屋の空中からの調査、工業用内視鏡を用いた2号機格納容器内調査、日立製作所製のROV（水中ロボット）による4号機使用済燃料プール内調査・瓦礫分布マップ作成、日立製作所製のバルーンを用いた1号機オペレーションフロア調査などで、ロボット技術が用いられている。また、JAEAのロボット操作車RC-1（日本原子力研究開発機構製）も、米国QinetiQ社製Talonを用いた調査、ガンマカメラを用いた線量分布測定などに用いられた。

平成25年11月13日に、資源エネルギー庁のプロジェクト（後述）によって開発された遊泳調査ロボットが、格納容器からトラス室に漏れいている汚染水を発見した。これは、遠隔技術タスクフォースでの議論に基づき、設置されたWG（主査：九州工大浦環教授）で具体的な検討を行い、日立GEニュークリア・エナジー社が開発したものである。これまでも、汚染水

の漏れい箇所を特定すべく、様々なロボットが投入されてきたが、漏れい箇所を初めて発見できたという点で、特記すべき成果である。

(4) 除染

平成23年6月末から7月上旬にかけて、米国iRobot社製のWarrior及びPackbotを用いて、3号機原子炉建屋の清掃作業が実施された。具体的には、Warriorに掃除機を取り付け、3号機原子炉建屋の床面等の清掃を行い、環境線量の低減が図られたが、これに関しては大きな除染効果は得られなかった。並行して、本格的な遠隔除染方法の検討が始められた。除染には様々な方法が存在し、除染すべき作業エリアと汚染の程度に応じて、適切な除染方法を選択する必要がある。「建屋内の遠隔除染技術の開発」の技術カタログ^②の公募で、活用可能な技術調査が行われ、汚染状態の推定・調査／汚染経路の推定が行われ、それに基づき汚染の種類が6種類に分類され、また技術カタログで提案された除染技術が整理された^④。

経済産業省資源エネルギー庁は、平成23年度から、発電用原子炉等事故対応関連技術開発費補助金および基盤整備委託費などによって、原子炉建屋内の除染作業、原子炉建屋・格納容器からの漏れい箇所の調査、格納容器内部状況調査、原子炉建屋漏れい箇所止水・格納容器下部補修作業、压力容器／格納容器の腐食に対する長期健全性評価などの研究開発を進めている。実施者は、プラントメーカー3社（日立GEニュークリア・エナジー、東芝、三菱重工業）が主体となっている。この中で、前記検討に基づき原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発が進められ、高圧水ジェット洗浄装置、ドライアイスプラスト除染装置、プラスト除染装置などが開発された。いずれも、モックアップ試験を終えて現場投入に向けて改良中である。

一方、平成25年11月22日から、Pentek社製除染機器が、線量が高く、空中からのアクセスが可能な3号機のオペレーションフロアの除染

に使用されている。Mooseと呼ばれる共通プラットフォームに作業機器（排土用ブレードを有するドーザ、吸引バキューム、はつり作業用スキャブラ）を装備したものが開発され、12月現在、ドーザにより3割程度の線量低減を行った。運用時には、作業機器との間に、通信（有線）・電源ケーブルおよび吸引ホースを中継する装置をクレーンで吊り上げ、その中継装置の下で作業機器を移動させながら除染作業を実施する。また、平成25年11月28日からは、ATOX社が開発した遠隔操作床面除染装置によって、2号機原子炉建屋1階の除染も行われている。この装置は、走行ユニットと中継ユニットから構成される。走行ユニットは、床面に高圧水を供給して除染すると同時に、ヘッド内で排水を吸引する機能を有し、先端部分をジェットヘッド／ブラシヘッドに換装することが可能になっている。中継ユニットは、走行ユニットの給水・排水吸引のためのホースや信号・電源ケーブルの中継用移動台車となっている。

4. 廃炉に向けての 今後のロボット技術開発

前記で紹介した技術以外にも、建屋内（圧力抑制室、格納容器、压力容器など）のさらなる調査、瓦礫除去、除染をはじめとする様々な作業を、極めて多様で複雑な環境で行うためのロボットや遠隔操作機器の開発が現在も進められており、これらも随時導入されることになると思われる。

平成25年11月には使用済み燃料プールからの燃料の取り出しが開始され、中長期ロードマップの第2期に突入した。しかし、廃炉までには30～40年かかると予想されており^⑤、今後も、除染、汚染水の漏れい箇所の特定・補修、燃料デブリの調査・取り出しなど、人が行うことが困難な作業が目白押しであり、廃炉に向けてのロボットや遠隔操作機器開発は、継続的に進め