

原発事故対応のための遠隔操作機器の開発と運用

浅間 一*

1. はじめに

平成23年3月11日に生じた東日本大震災および津波によって、東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故が発生した。当時、1～3号機は稼働中であり、SCRAM（炉心への制御棒挿入による原子炉内臨界反応の緊急停止）には成功したものの、津波によって冷却機能が失われ、その結果、燃料プールに燃料が残っていた4号機も含め、水素爆発が発生した。1～3号機の圧力容器の中の燃料はメルトダウンしていると考えられている。

原子力発電所の事故対応においては、放射線量が非常に高い環境で様々な作業を行う必要があり、ロボットや無人化施工をはじめとする様々な遠隔操作機器の投入が求められた。平成24年からは、廃炉に向けた中長期措置が開始され、さらなる遠隔操作機器の開発、適用が必要となっている。

本稿では、福島第一原子力発電所の事故対応においてこれまでに行われた産学官連携による遠隔操作機器導入の取り組みを概観するとともに、また今後の中長期措置・対策における遠隔操作機器開発を、いかに産学官が連携して行うべきかについて述べる。

2. 緊急対応

これまで、原発の事故直後の緊急対応において活用されたロボット技術、遠隔操作技術については、すでに別報で述べた¹⁾。ロボット関連研究者や技術者は、対災害ロボティクスタスクフォースを立ち上げ、産学官連携によって、国や東京電力の緊急対応において様々な技術的サポートを行った²⁾。遠隔操作技術は、緊急対応以降も様々な作業において、利用され続けている。

例えば、平成23年11月には、PackbotやWarriorを用いて3号機の原子炉建屋の格納容器機器ハッチ前部の雰囲気線量の調査が行われた。格納容器内での作業を進めるには、機器ハッチにアクセスし、これを開けなければならない。しかし、この調査の結果、870mSv/hという非常に高い線量が測定され、除染や遮蔽を行わなければ、作業員がこの領域に入るのは困難であることが判明した。

千葉工業大学や東北大学などによって開発されたQuinceは改造され、2号機の原子炉建屋内の2階以上の部分の調査などに使用された¹⁾。圧力容器をスプレー冷却系による冷却が検討された際には、スプレー冷却系の配管等の健全性をチェックする必要があったが、Quinceは、その調査などにも利用された。ただ、その後、遠隔操作によるオペレーションフロアなどの調査ミッションで、有線の通信ケーブルを切断してしまい、3階部分で動作不能に陥り、そのまま置き去りにされている。その後、新たにQuince2（写真1）が開発・投入され、2号機の燃料プール周辺やTIP室の線量測定や映像撮影調査などに使用されている。

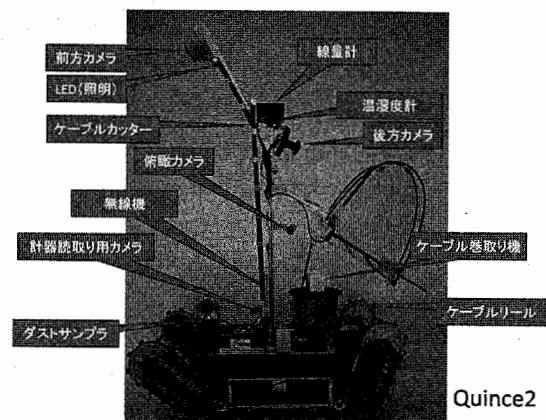


写真1 改造されたQuince2号機（千葉工業大学小柳栄次氏提供）

* 東京大学大学院 工学系研究科精密機械工学専攻 教授

また、3号機の原子炉建屋のオペレーションフロア上部のガレキ撤去作業が、クローラクレーンなどの建設機械の遠隔操作によって行われている。3号機やその周辺は放射線量が非常に高く、建設機械に人が搭乗して作業を行うことが困難であるため、無人化施工が採用された。

さらに、平成24年4月には、新たにトピー工業が開発した「サーベイランナー」(写真2)が、福島第一原子力発電所2号機の圧力抑制室(トラス室)の調査に使用された。ここには圧力容器や格納容器の損傷によって、大量の汚染水が存在していることがわかっているが、サーベイランナーを有線ケーブルによって遠隔操作し、圧力抑制室上部のキャットウォーク上を走行させ、圧力抑制室の詳しい様子、汚染水の状態の調査、放射線量の計測などが行われた。ただし、汚染水が漏水している損傷箇所を発見するには至っていない。



写真2 サーベイランナー(東京電力株式会社提供)

3. 中長期対策

東京電力は、事故発生直後から、ロードマップを作成し、それに従って、事故対応の作業を進めてきた。具体的には、緊急対策をステップ1(事故発生から3か月程度)、冷温停止までをステップ2(平成23年末まで)として作業が実施され、日本政府は平成23年度末にすべての原子炉の冷温停止を達成したと宣言した。

これに伴い、作業は、廃炉に向けての中長期対策・措置に移行することになった。原子力委員会「東京電力株式会社福島第一原子力発電所における中長期措置検討専門部会」において、原子炉建屋内の燃料の取り出しと廃炉に向けて行うべき作業と、その大まかな工程、それを推進する体制などについて議論

が行われ、報告書としてまとめられた³⁾。このロードマップでは大まかに、使用済燃料プール内の燃料の取り出しを開始するまでをPhase 1(2年以内)、燃料デブリ(メルトダウンした炉内の燃料)の取り出しが開始されるまでをPhase 2(10年以内)、廃止措置終了までをPhase 3(30~40年後)としており、これに沿って必要な研究開発、作業が始められている。

しかし、いまだに原子炉建屋内部の状態は、十分に把握できない状況が続いている。特に最大の難関は、燃料デブリの取り出しである。1~3号機の圧力容器の中にあつた核燃料は、メルトダウンし、格納容器に一部落ちていていると考えられている。また、圧力容器、格納容器、圧力抑制室などは破損しており、そこから大量の汚染水が流出している。現在、計画されている燃料デブリ取り出しまでのシナリオは、原子炉建屋内の除染、格納容器漏えい箇所の調査・止水、格納容器内の調査・補修、格納容器・圧力容器への水張り、炉内調査・サンプリング、炉心燃料取り出し、となっている。放射線量の高い環境での作業がほとんどであることから、その成否は、遠隔操作機器の開発・導入にかかっていると言っても過言ではない。

しかるに、これらのミッションや環境条件は、ロボットなどの遠隔操作機器の開発にとって、極めて厳しい。作業を行う環境は障害物が多く複雑であり、移動だけととっても、グレーチング上の走行、階段や梯子の昇降、垂直面やトラスの表面の移動、水中での移動など多様な機能が要求される。格納容器内は非常に狭くて暗く、多くの障害物などが存在し入り組んでいる。無線通信は届きにくく、有線通信だとケーブルが絡みやすい。また、水がある環境や、水中での作業が想定され、耐水性も要求される。汚染水の中で、損傷箇所の特定制すること自体、非常に難しいが、その汚染水が濁っているケースもある。さらに、それらに加えて高線量の環境でも安定して計測・操作することが求められている。平成24年3月に行われた、工業内視鏡、熱電対、線量計などを用いた2号機の格納容器の内部調査では、格納容器内の滞留水の水位は60cm位しかなく、最高約73Sv/hという極めて高線量の環境であることが判明した。いずれにせよ、こういった遠隔操作機器の技術開発は、過去に例がない極めて困難なものであり、まさにグランドチャレンジである。

4. 産業競争力懇談会からの提言

ロボット技術や遠隔操作技術は、情報技術も含め、災害対応における様々な支援技術として期待されている⁴⁾。東日本大震災発生後、産業競争力懇談会 COCN (Council on Competitiveness-Nippon) の平成23年度プロジェクトとして「災害対応ロボットと運用システムのあり方」が立ち上がり、産業界からの提言として、災害対応のために開発すべきロボット技術やその運用システムのあり方について取りまとめられた⁵⁾。ここでは、防災ロボット、無人化施工システム、原子炉解体システムの三つのWGを設置し、田所諭教授(東北大学)、鶴岡松生氏(鹿島建設株式会社)、齋藤荘蔵氏(日立GEニュークリア・エナジー株式会社)が各WGの主査を、著者がプロジェクトリーダーを、製造科学技術センターが事務局を務めた。各WGでまとめた、これから取り組むべき研究開発課題は以下の通りである。

(1) 防災ロボット (WG1)

- ・プラント内調査・モニタリングロボットシステムの開発
- ・プラント内遠隔危険作業ロボットシステムの開発
- ・システム統合化・標準化・試験評価とキーとなる基盤技術の開発

(2) 無人化施工システム (WG2)

- ・遠隔操作型瓦礫処理システム(機械装置含む)の開発装置
- ・災害対応に最適な運搬技術(機械・施工システム)の開発
- ・原子力施設解体・仮設構築のためのロボットシステム
- ・ガレキ処理運搬システム(水中版)の開発

(3) 原子炉解体ロボット (WG3)

- ・災害対応エンジニアリング支援システム
- ・コンクリートサンプリング・表面除染ロボット
- ・機械・電気品解体物の放射線モニタリング・除染・分別技術
- ・原子炉解体ロボット、原子炉解体システム
- ・コンクリート構造物の切断技術のロボット化

なお、平成23年度前期に検討した上記研究開発課題などについては、平成23年度第三次補正予算、平成24年度概算要求のプロジェクト立案に貢献すべく、経済産業省、文部科学省、総務省、国土交通省をはじめとする関係省庁への説明が行われた。平成23年度は、経済産業省資源エネルギー庁「発電用原子炉等事故対応関連技術開発費補助金」(平成23年

度三次補正予算)、経済産業省・NEDO「災害対応無人化システム研究開発プロジェクト」(平成23年度三次補正予算)など、福島第一原子力発電所の収束に向けた技術開発プロジェクトが立ち上がったが、ここでも COCN の提言が反映されている。

前者では、ステップ2以降の中長期的な事故処理に速やかに着手するための技術調査や計画策定(建屋内にアクセスするための除染方法の検討など)を前倒しで実施するとして、10億円が計上されている。また後者は、放射線量が高く、人が全く立ち入れない、または長時間作業できない場所で、人間に代わって作業を行う又は作業を支援するロボットの開発等を行うとして、10億円が計上されており、作業移動機構、計測・作業要素技術、災害対策用作業アシストロボットなどの開発が進められている⁶⁾。

ただし、これらの予算措置は、福島第一原子力発電所の収束に向けての予算措置のみであり、今後起こり得る原子力施設の事故対応の備えとしての技術開発やその運用システムの実装までには至っていない。また、自然災害やその他の事故対応のための予算立てについては、文部科学省や国土交通省でも、様々な検討が行われているが、まだほとんど実現できていない。

さらに、これらの経済産業省の複数のプロジェクト間での連携、さらには総務省ネットワークロボットプロジェクト⁷⁾や、TVホワイトスペースを活用した災害・防災向けデータ伝送システムの周波数共用技術に関する検討⁸⁾などとの連携も重要である。また、今後、遠隔操作機器の実用化を加速するには、ユーザとしての消防、防衛、警察などの省庁とも連携を図り、技術開発を進める必要がある。

一方、運用システムや体制についても議論が行われつつある。これまでのプロジェクトでは、プロトタイプ開発までしか行われず、実際の災害発生時に活用できるロボットや機器が存在しなかった。この経験からの教訓として、こういった遠隔操作機器の実用化指向の研究開発拠点、現場で使用可能な実用化技術開発、メンテナンスや改良、さらにはオペレータの訓練までも含む運用体制など、運用システムのあり方について議論を行っている。

産業競争力懇談会のプロジェクトは、平成24年度も継続して実施し、まだプロジェクトとして実装されていない福島原発事故対応のロボット技術開発以外の災害対応ロボットの研究開発項目や運用システムのあり方に関する、さらに詳細な提言をまとめて

いく予定である。

5. 技術カタログ

原子力委員会「東京電力福島第一原子力発電所中長期措置検討専門部会」の報告書³⁾では、福島第一原子力発電所の事故の収束・廃炉に向けての作業においては、日本の叡智、さらには世界の叡智を結集して、これにあたるべきであると述べられている。これは、原子炉内の燃料デブリの取り出しという難問を解決するための技術開発を、原子力プラントメーカーだけで閉鎖的に行うのではなく、日本中、あるいは世界中に存在するあらゆる技術や知識を総動員してやり遂げないとならないということを意味している。そしてそれは日本の税金を使用して行う以上、日本全体の技術力、競争力の向上につながる形で技術開発を進めることも考慮すべきである。

原子力委員会の報告書では、中長期措置に必要な研究開発は国が責任を持って進めることが明記されており、これに基づいて、政府と東京電力は、中長期対策会議運営会議・研究開発推進本部委員を組織し、国が主導的に関与する形で事故収束への取組を進めている。

その具体的な一つの方策として、技術カタログの整備が行われている⁹⁾。これは、原子力プラントメーカーが、国内外の各種研究機関や民間会社が所有する、除染技術、除染の遠隔操作関連技術、格納容器の点検／補修等の遠隔操作等の走行機器や計測機器に関連する技術など、中長期措置における研究開発に適用可能な技術を広く調査・把握し、これを技術カタログとしてまとめ、これを活用しながら開発を進めるといふものである。

技術カタログの使い方には2種類あると考えられる。まず一つは、具体的に要求される作業に対し、必要な技術を、この技術カタログの中から探索し、利用可能なもの、ベストなものを選択・調達する、あるいは有用なキーテクノロジーを有する研究機関や企業と共同開発する、という方法である。一方、もう一つは、この技術カタログに掲載されている要素技術の技術情報に基づき、ソリューションを設計する、という方法である。

今回は、公募を行い、応募された技術を実用性などから評価して収録する、というやり方で技術カタログを作成しているが、必ずしも有用な技術が網羅できているわけではない。公募の広報の限界から、このような技術情報を収集していること自体、十分

周知されているわけでもないし、応募を控えたケースもある。一方、今後30～40年の間に、機器の機能は改善されるであろうし、新たな技術も開発されるであろう。したがって、今回作成する技術カタログはあくまでも初期データであり、今後も継続的に新たなデータを収集し、技術カタログの更新・メンテナンスを行うことが重要になると考えられる。これは、現在、中長期対策研究開発推進本部が旗振り役となって進めているが、学術団体の協力も含め、今後具体的にどのように技術カタログの整備・メンテナンスの作業を行うか、検討する必要がある。

6. ソリューションの導出

技術カタログの作成と、その活用によって、広く有用な技術を動員して、研究開発を行う準備が進められているものの、それだけでは目的とするミッションを達成することは難しい。前述のような中長期措置における各ミッションや作業をいかに行うか、そのソリューションの導出がポイントである。

一般的に、専門化された分野では、集団の内部だけでは、視野や発想が単調で、画一的・限定的になりがちになる。新たな問題の解決、ソリューションに導出においては、多様な専門分野の素人的な発想も、ときに有効となる¹⁰⁾。原子力プラントメーカーは、ソリューション導出においても、バックアッププランも含め、自由で多様なアイデアや工夫を日本や世界の叡智を結集して集め、その中から有効な方策を選択し、講じていくことが重要である。コンテストやコンペティション（競技会）などを行い、ソリューションを広く募る方策も有効であろう。米国では、DARPAがDisaster Response Robotsの新たなRobotics Challenge（競技会）を発表した¹¹⁾。福島第一原子力発電所の事故をベースに、課題が設定されており、研究開発費の補助も受けることができ、優勝チームには200万ドル賞金が支払われる。まさに、福島第一原子力発電所の中長期措置においては、このような方策も柔軟に取り入れながら、戦略的に有効な方法論を模索し、構築していくことが肝要である。

7. おわりに

本稿では、福島第一原子力発電所の事故対応や中長期措置において、これまでに行われた、あるいは進行中の産学官連携による取り組みについて述べた。現状の技術では、遠隔操作機械によってできる作業

は非常に限られており、人に比べ効率も悪いが、効率やコストを優先して作業員が作業を行えば、作業員の被曝は増加し、リスクは増加する。作業員の被曝を低減するためにも、遠隔操作技術をできるだけ活用することが重要である。

遠隔操作機器を開発する上で、様々な技術的課題があるが¹²⁾、それ以外にも運用上の、あるいは政策面での多くの課題が残されている^{13) 14)}。今後は、その問題を解決策を構築し、それを実行に移していく必要がある。

福島第一原子力発電所の事故の中長期措置のための遠隔操作技術開発については、本稿で述べたような形で、開発が開始されている。しかし、今後起こり得る災害や事故への備えをどうするか、いかに個別の災害に対して、災害現場で求められる機器をいかに動的に準備・供給するか、開発された機器をいかに長期にわたり、改良、メンテナンス（使用された機器の除染を含む）、維持するのかが、いかにオペレータの訓練を行うかなど、まだ多くの検討課題が残されている。そのためには、前述のようなロボットの実用化・機能評価・検証のためのモックアップやテストフィールド、開発・運用拠点、さらには、それを運用する組織などについても検討する必要がある。その拠点構想については、国や電事連などで一部議論が始められているが、まだ原子力災害などに限定されており、その他の産業事故や自然災害（地震、津波、台風、火山爆発などを含む）のための拠点についても構築していく必要がある。また、拠点の実現には、地域との連携も重要である。

有事の際には、それを迅速に投入できるような体制を構築することも必要である。災害派遣医療チームDMAT（Disaster Medical Assistance Team）¹⁵⁾は、おおむね48時間以内に緊急医療チームを災害現場へ投入する体制をすでに構築しており、そういったシステムを参考にして、災害対応ロボットオペレーションの体制を検討することも有効であろう。

最後に、福島第一原子力発電所の事故対応措置のための遠隔操作機器の開発が、緊急対応から中長期措置に移行する中で、もう一つ懸念事項がある。それは、緊急時においては、自らの使命感や善意に基づき、献身的に開発や作業に協力し合って行動していた科学者や技術者、組織が、緊急事態自体から定常状態に変化する過程で、それぞれがベネフィットを求めるようになり、協調的な関係が崩れるという問題である。ビジネスや知的財産などを優先すれば、

それは危機対応における団結力阻害要因となる。たしかにベネフィットがなければ、長期的に取り組む動機づけやインセンティブが働かなくなることは理解できる。ただ、JCO事故後のロボット開発のように、緊急性が低くなるにつれ、将来の危機やリスクに対する意識も薄れ、経済的な経営判断の中で、将来への備えが疎かになることが懸念される。

国はこのことをしっかり認識し、長期にわたって一貫した政策を行う必要がある。その一方で、原子力プラントメーカー自身も、社会的に責任ある行動をとることが求められる。原子力プラントメーカーなど、社会資本や社会的に影響が大きい製品やサービスを扱う企業の場合、私企業であってもその社会責任は大きい。今回のように、我々の税金である国の資金が投入され、補助金や委託事業としてそれを使用して開発が行われるのであれば、自ら資金負担をしていたとしても、社会貢献を果たす義務がある。原子力プラントメーカーには、日本の責務とロボット技術全体の将来を担っているという使命感を持って、できるだけオープンな形で開発を進めつつ、社会貢献を果たすと同時に社会をリードしていただくことを期待したい。

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) 原子力委員会：“東京電力(株)福島第一原子力発電所における中長期措置に関する検討結果”，東京電力(株)福島第一原子力発電所中長期措置検討専門部会，(2011).
- 4) 浅間 一：“災害・事故対応に求められるロボット技術”，まてりあ，vol. 51, no. 4, pp. 139-142 (2012).
- 5) 産業競争力懇談会：“災害対応ロボットと運用システムのあり方”，平成23年度プロジェクト最終報告，(2012).
- 6) http://www.nedo.go.jp/koubo/CA3_100013.html
- 7) http://www.soumu.go.jp/main_content/000137847.pdf
- 8) http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/kenkyu/whitespace/02kiban09_03000093.html
- 9) http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/20120227_03.html

- 10) 金出武雄：“素人のように考え，玄人として実行する”，PHP文庫，(2004).
- 11) https://www.fbo.gov/index?s=opportunity&mode=form&id=ee8e770bcfe1fe217472342c67d6bd5a&tab=core&_cview=0
- 12) 浅間 一：“原子力発電所事故対応のための遠隔操作技術”，日本ロボット学会誌，vol. 30, no. 6, (2012). (印刷中)
- 13) 浅間 一：東日本震災および福島第一原子力発電所事故におけるロボット技術の導入とその課題（その1），日本ロボット学会誌，vol. 29, no. 7, pp. 658-659 (2011).
- 14) 浅間 一：東日本震災および福島第一原子力発電所事故におけるロボット技術の導入とその課題（その2），日本ロボット学会誌，vol. 29, no. 9, pp. 796-798 (2011).
- 15) <http://www.dmat.jp/>