

【産業競争力懇談会 2011年度 プロジェクト 最終報告】

【災害対応ロボットと運用システムのあり方】

2012年2月24日

産業競争力懇談会 **COCN**

【エグゼクティブサマリ】

1. 本プロジェクトの目的

2011年3月11日に発生した東日本大震災とそれに伴って発生した福島第一原子力発電所の事故は、災害対策用のロボットシステムの必要性を再確認させた。搜索・偵察用の防災ロボットや遠隔操作の建設機械による無人化施工システムは一部現場に投入されているが、まだ性能的には不十分である。また事故を起こした原子炉については、最終的には原子炉そのものの除染と解体が必要となるが、そのためのロボットシステムの開発も必要である。

こうした災害対応ロボットの技術開発については、民間企業が将来の利益を求めて実施するのはほとんど不可能であり、大学等が公的な資金を得て実施しているのが今までの状況である。技術的な課題としては駆動機構、電源、自律制御、遠隔操縦のマンマシンインタフェースなどのロボットに共通した課題、温度・放射線・寸法形状等の情報の取得、伝送、解析や地図の生成などの情報系に関する課題、耐放射線、耐熱、耐水などの使用環境に関する課題等があげられる。また、地上型以外のロボット、水中用、飛行型、壁面や配管の表面や内面を移動するようなロボットの研究開発も必要である。

さらに、こうしたロボットシステムについては単に技術開発を行えばいいというものではなく、長期的な運用体制を確立しなければいざというときに利用することはできない。

今回、このような認識の下に、COCNプロジェクトとして防災ロボットワーキンググループ(WG)、無人化施工WG、原子炉解体ロボットWGを組織して、これからの日本が災害に対して安心、安全な社会を作り上げていくために必要な災害対応ロボットとその運用体制についての提言をとりまとめた。

2. 本プロジェクトの提言

1) 具体的な開発テーマと開発体制

防災ロボットWGにおいては、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、原子力プラント内調査・モニタリングロボットシステムの開発及び原子力プラント内遠隔危険作業ロボットシステムの開発が提案された。無人化施工WGにおいては、遠隔操作型瓦礫処理システム、災害対応に最適な運搬技術、大型構造物躯体解体・構築技術及び水中版瓦礫処理運搬システムの開発が提案された。原子炉解体ロボットWGでは、原子力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システム及びコンクリート構造物のロボット化切断技術の開発が提案された。

こうした技術の開発と同時に災害対応ロボットを商品として完成させるためには、製造コストの削減や商品としてのメンテナンス性や耐久性の確保等に加え、ユーザーが使いやすいシステムとするための開発も必要である。そのためにも、技術開発に当たっては、大学等の研究開発機関だけでなく、関係企業が、搜索／偵察ロボット、無人化施工システム、原子炉解体用ロボットシステムなど、開発するテーマ毎に、ユーザーを含むコンソーシアムを組んで開発するような体制を作り上げていくことも必要であろう。

2) 実験フィールドの重要性

また、ロボットの開発速度を速め、必要な改良を進めていくためには専用の実験フィールドを確保することが望ましい。瓦礫や発電所設備のモックアップ等を配置し、そこで開発途上のロボットや無人化施工システムの試験また原子炉解体のモックアップテストを行うことにより、問題点の把握を的確、迅速に行うことが可能となる。また、その地域内では無線の使用を緩和したり、放射線管理区域を設ける等の措置をとることにより、様々な実態にあった試験も可能になる。さらに、こうした実験フィールドを用いることにより、原子力災害対策ロボット等の性能試験方法の標準化に関するデータを取得することも可能になる。こうしたフィールドを活用して、米国のDARPA Grand Challenge や Urban Challenge のような手法により研究開発の進捗が見える化し、大学等の研究レベルの底上げを図り、技術の実適用を推進することも重要である。こうした施設を今回の大震災の被災地に設置することも検討するべきである。

3) 災害対応ロボットの運用体制

原子力発電所の事故等の災害発生時に防災ロボット等を活用するためには、即応体制がとれる常設組織と訓練された人材と機材が必要である。フランスとドイツにおいてはそうした組織が常設されている。こうした常設機関を創設し、防災ロボットや無人化施工用の機材を配置し専門の要員を確保訓練することが必要である。なお、こうした機関は一般の地震、火山噴火、水害等の災害や大規模産業事故等にも対応することが可能になると考えられる。我が国においては、近い将来にも高い確率で大規模地震等の発生が予測されている。その際、経済産業活動を停止させないための災害予防と緊急災害情報収集のためのロボット技術が必要である。そのためにも平時からロボットを設備や建物の点検・整備などに継続的に活用することによって、人材・機材を育成し維持していくことが望まれる。

また、想定外の災害に対応するためには、現場の状況に合わせた構成変更や迅速な改造開発が重要であるが、そのためにはユーザーとしての専門的組織体と開発側との密接な連携が不可欠である。さらに、原子炉の廃炉工事の実作業においても、個々の企業がばらばらに対応するのではなく、専門的組織体を作って人材・技術の育成・維持を図り、国内外の市場ニーズに対応していくことが考えられる。

また防災用ロボットや無人化施工システムの効率的な運用を図っていくためには防災用ロボット専用の帯域の確保と高い電波出力の承認が必要である。

3. 産業競争力の強化の視点

ロボット産業は、今後、我が国の製造業のコアとなる産業として期待されている。またそれを支えるロボット技術は自動車、情報機器等広い範囲の製品に導入されその機能や性能を向上させることとなる。日本は長く産業用ロボットの分野で世界をリードし、技術的にも世界のトップレベルを誇ってきた。しかし、防災用のロボットについては、研究は進められてきたものの製品化や現場への配備という面では遅れをとっていた。今回の事故で明らかのようにこうした技術は今後日本ばかりでなく、世界における安心・安全を確保するために不可欠な技術である。この分野

において我が国は潜在的には世界一流の能力を有しており、この機会にそれを産業に結びつける必要がある。

捜索・偵察ロボットの場合、原子炉事故現場に必要な台数は多くないが、非常時用の装備としての需要や通常災害時における利用のための需要も想定される。また、事故・災害時以外のニーズとして、安全・安心の確保のため工場や施設内のパトロール、メンテナンスへの応用等も期待される。例えば、老朽化した設備や建物を修繕・補強することによって、災害に強いインフラを構築する必要があるが、その点検などのコストを下げるためにはロボット技術の適用が有効である。

無人化施工技術についても、開発された技術をベースにしてさらなる技術開発を行うことにより大規模鉱山や、大規模建築現場などの応用分野に展開することも期待される。

原子炉解体用ロボットについては、福島第一原子力発電所事故への対応とは別に、今後世界で年間二十数ヶ所のペースで発電用原子炉が廃炉されるといわれており、いわゆる「廃炉ビジネス」の中核技術としての需要が発生すると考えられる。将来は最先端のロボット装備を保有して解体ビジネスを国際的に展開するような方向も考えられる。

4. 本プロジェクトの成果と今後の課題

今回のプロジェクトにおいては提言を取りまとめると同時に、関係の省庁に対し予算化等の対応について働きかけを行った。その結果、平成23年度第三次補正予算や平成24年度予算においてロボット関係の予算が認められたが、原子力事故対応の部分以外については不十分であり、また、運用体制については政府ベースではまだ検討もほとんど行われていない。

今後、福島第一原子力発電所事故を収束するのに貢献するロボットの開発を進めるのと同時に、地震、津波をはじめとする自然災害や産業事故に迅速に対応可能なロボット関連技術の開発とその運用体制について引き続き内容を精査するとともに、その実現のための方策につき提言していく必要がある。

目 次

【エグゼクティブサマリ】	2
【目 次】	5
【はじめに】	6
【プロジェクトメンバー】	7
【本 文】	
1. プロジェクトの背景	8
2. 東日本大震災及び福島第一原子力発電所事故におけるロボットの活用事例及び今後の大規模災害や大規模産業事故におけるロボットの活用可能性	10
3. 災害対応ロボットに関する技術開発と運用体制に関する課題	12
3. 1 技術開発に関する課題	
3. 2 運用体制に関する課題	
3. 3 電波の有効利用に関する課題	
4. 防災ロボットに関する提言	15
4. 1 総論	
4. 2 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	
4. 3 プラント内調査・モニタリングロボットシステムの開発	
4. 4 プラント内遠隔危険作業ロボットシステムの開発	
5. 無人化施工システムに関する提言	22
5. 1 総論	
5. 2 遠隔操作型ガレキ処理システム	
5. 3 災害対応に最適な運搬技術	
5. 4 大型構造物躯体解体・構築技術	
5. 5 瓦礫処理運搬システム(水中版)	
6. 原子炉解体用ロボットシステムに関する提言	35
6. 1 総論	
6. 2 原子炉解体手順と技術開発項目の提案	
6. 3 開発・運用体制について	
7. 産業競争力強化の観点から期待される効果	43
8. 提言の実現のために	44
参考資料：	
参加メンバーリスト	45
会議開催状況	48

【はじめに】

COCNでは、毎年春に会員からの新たな提案を中心に推進テーマを決定していますが、特に今年度は大きな震災の直後ということもあり、震災から復興や再生に、短期あるいは中長期で貢献できるテーマについても取り上げていくこととしました。その結果、今年度テーマの一つとして「災害対応ロボットと運用システムのあり方」プロジェクトを取り上げることになりました。

今回の東日本大震災では、震災と津波により2万人以上の人が犠牲になり、多くの建物や施設が破壊、流出してその被害の大きさはいうまでもありません。それに伴って発生した福島第一原子力発電所の事故は広い範囲に放射性物質を飛散させ、そのため、現在でも多くの周辺住民の皆様が避難させられています。事故を起こした原子炉は、ようやく冷温停止段階に達しましたが、建屋内部における環境の測定、汚染物質の除去、周辺建屋の解体、最終的には原子炉そのものの除染と解体に至るまでの課題は非常に多くなっています。地震や津波そのものによる被災者の捜索や瓦礫の撤去等ロボットや無人化施工システムに期待されるものは多く、また原子力発電所事故については、放射能汚染濃度が非常に高く人間による作業が困難な箇所が多いため、ロボット技術の活用が不可欠です。

我が国のロボット技術は産業用ロボットを中心に世界をリードしてきていますが、こうした災害対策分野のロボット技術について研究開発は進められていたものの、実用化は十分ではありませんでした。その理由の一つにはこうしたロボットは事故、災害などの有事に必要とされるため平時から運用体制を確立しておくことが必要ですが、そうしたものがなかったということが上げられます。

今回のプロジェクトでは、東京大学の浅間一先生をリーダーとしてCOCN内外の関係企業、大学、研究所の皆様が参加され、大規模災害や原子力事故に対応するロボットの3つの分野、すなわち、防災ロボット、無人化施工システム及び原子炉解体ロボットに関し、技術開発課題及び運用体制について議論を重ねられ、短期間の間に提案をまとめていただきました。この提案を実行することにより、直接的には我が国ロボット技術の向上に帰するだけでなく、我が国社会だけでなく世界の安全安心を確保することにつながるものです。今後確実に発生が予想される大地震などの自然災害や事故による被害を最小化し、迅速に回復することは、今回の大震災の例で明らかのように産業競争力確保の要ですが、それだけでなく、このプロジェクトで提案されているような技術は、この分野において世界的に大きな競争力を持つことになると考えられます。

提案の実現のためには産官学による協力が不可欠であります。すでに政府におかれては震災復興のための補正予算や平成24年度の概算要求の中で予算措置等を取られておりますが、引き続きこの提言に示された事項の実現のための施策がとられることを要望いたします。

産業競争力懇談会会長(代表幹事)

榊原 定征

【プロジェクトメンバー】

リーダー 浅間 一 東京大学大学院教授
サブリーダー 齊藤莊藏 日立GEニュークリア・エナジ(株)会長
WG1主査 田所 諭 東北大学大学院教授
WG2主査 鶴岡松生 鹿島建設(株)機械部部長
WG3主査 齊藤莊藏 日立GEニュークリア・エナジ(株)会長

メンバー（COCN会員）

鹿島建設(株)、清水建設(株)、新日本製鐵(株)、(株)東芝、(株)日立製作所、富士通(株)、
三菱重工業(株)、三菱電機(株)
京都大学、早稲田大学、東京大学、(独)産業技術総合研究所

メンバー（COCN会員外）

(株)熊谷組、(株)小松製作所、大成建設(株)、日立建機(株)、安川電機(株)、(株)竹中工務店

オブザーバー

(一社)日本ロボット学会、(社)日本ロボット工業会、(一社)情報通信技術委員会
(独)土木技術研究所、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構、(独)日本原子力研究開発
機構
経済産業省、文部科学省、国土交通省、総務省

事務局

(財)製造科学技術センター

参加者氏名については巻末の参考資料参照

1. プロジェクトの背景

2011年3月11日に発生した東日本大震災は、地震とそれによって生じた大津波のために東北から関東に至る沿岸地域に大規模な被害をもたらした。津波被災地では、被災直後における生存者や遺体の捜索には人手を頼るしかなく、災害発生から1年近くが経過して、ようやく復興作業が軌道に乗りつつあるとは言え、現在でも大量の瓦礫処理は大きな問題となっている。産業面でも耐震補強や津波対策の不足による生産設備への影響は甚大であり、長期間にわたってサプライチェーンが寸断され、我が国のみでなく世界の経済活動に大きな影響を与えた。福島第一原子力発電所においては、地震により送電鉄塔が倒れて外部電源を喪失したのに加えて、津波による浸水で非常用発電設備が損傷したために非常用冷却装置が働かず、核燃料の温度上昇により炉心溶融と水素爆発が発生し、広い範囲に放射性物質を飛散させた。そのため、現在でも発電所から20km以内の警戒区域は全面的に立ち入りが制限され、その外周部でも計画的避難地域に指定された住民が避難させられている。また、直接被災した原子力発電所のみならず、定期点検等で発電を停止した原子力発電所の再稼働が認められなくなっているため、我が国全体で大幅な発電能力の不足が生じ国民生活や産業活動に大きな影響を与えている。事故を起こした原子炉は、冷温停止状態にはなったが、建屋内部における環境の測定、汚染物質の除去、周辺建屋の解体、最終的には原子炉そのものの除染と解体に至るまでの課題は非常に多い。

震災や火山の爆発等の自然災害対策として、捜索用のロボットや、遠隔操作の建設機械による無人化施工システムなどの開発が行われてきた。無人化施工システムについては、1991年の雲仙普賢岳の火砕流による被災地域の復旧工事のために開発されたものが、その後も一定規模で使い続けられており、今回の原子炉事故現場にも投入されている。被災建物内における捜索／偵察用のロボットについては、1995年の阪神淡路大震災のあとから研究がスタートし、文部科学省の大大特（大都市大震災特別プロジェクト）や、経済産業省／NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）の戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクトで開発されてきたが、配備がなされておらず、実際の災害現場への投入実績はほとんどなかった。唯一、Quinceについては、放射線モニター等の機材を搭載し、6月から福島第一原子力発電所の現場への投入が始まった。一方で、災害対応機関に配備が進んでいる水中ロボットは、津波災害現場で使用されている。

原子力施設用のロボットとしては、原子炉のメンテナンス用の遠隔操作装置が実用化されている。またモニタリング、捜索、軽作業用のロボットについては、1999年のJCO事故対応として2001年に試作され、一定の性能は検証されたが、その後、運用主体が見いだせなかったこともあり、現物は運用できる形で残っておらず、今回の事故で使用されることはなかった。

あらためていうまでもなく、こうした災害、事故現場の人間が接近することが困難な場所において、ロボットやロボット技術を利用した無人化・遠隔化システムの有用性はきわめて大きい。特に放射能汚染領域での作業は、作業員の被ばく線量規制から人手による作業が困難であり、無人で行うことが必要である。今回、福島原発においても、米国製の軍事用ロボットが投入されたことが、世界最高の技術を持つと喧伝されていたはずの国産のロボットが間に合わなかった、という批判を交えた形で大きく報道された。無人化施工システムについてはあまり報道されていないが、建設無人化施工協会の協力により、全国から多数台が動員され福島第一原子力発電所の現

場で稼働している。

これから日本が災害に対して安心、安全な社会を作り上げ、また福島原発事故を完全に収束させていくためには、防災ロボットや無人化施工システムの技術開発を進め、その運用体制を確立するとともに、最終的な原子炉の解体・撤去を行うロボットについても、技術的難度が高く、ステップを踏んだ開発が必要であることから、速やかに着手することが必要である。今回、このような認識の下に関係者が集まり、COCNプロジェクトとして提案をとりまとめることにした次第である。

2. 東日本大震災及び福島第一原子力発電所事故におけるロボットの活用事例及び今後の大規模災害や大規模産業事故におけるロボットの活用可能性

2. 1 東日本大震災におけるロボット活用の実績

東日本大震災においては、後に述べるように潜在的な利用シーンが想定されるものの、捜索／偵察ロボットや無人化施工システムの利用は限られたものであった。福島第一原子力発電所の事故においては、敷地内における放射能レベルが非常に高く、また原子炉建屋内においては、人が活動できる許容レベルを大きく超えていることにより、捜索／偵察ロボットや無人化施工システムの導入が検討された。

当初敷地内には津波と水素爆発により瓦礫が散乱しており、燃料冷却のための緊急作業を行うにもアクセスができない状況であったが、遠隔操縦のブルドーザーや油圧ショベルを全国から集めることにより、第一段階の瓦礫の除去を行うことができた。捜索／偵察ロボットによるモニタリングについては、米国から iRobot 社製の軍用偵察ロボット PackBot 2 台が提供され、1 階部分について、内部の撮影及び放射線量や環境などの測定が実施された。しかし階段等の登坂能力やロボットの機能の制約があり、その利用には限界がある。国産技術による Quince は、6 月により早く現場に投入され、2 階以上の部分の観測や試料の採取等性能を発揮したが、まだ試作段階であり、いろいろと改善を要することも多い。また、今回の場合、空中からの偵察・モニターが有効であり外国製の無人ヘリ T-Hawk が利用された。

2. 2 大規模災害や産業事故におけるロボット活用の可能性

今回の事態を踏まえ、今後の大規模災害や大規模産業事故におけるロボットの活用可能性について、原子力関連の事故とそれ以外の災害、事故とに分けて考察する。

地震と津波において、流出した建造物の中に取り残された遺体の捜索や生存者の発見に対して捜索／偵察ロボットがさらに活用できた可能性は大きい。その形態としては、水中ロボットのみならず、水上・地上走行、壁登り、狭所潜り込み、飛行などさまざまなものがあり、今後の研究開発が必要である。ただ今回のように、被災が非常に広域にわたる場合を想定すると、資機材の配備と展開の方法については検討の余地がある。一方で局地的な地震や洪水、火山噴火等の場合には、全国に配備してある装備を集中して展開することが可能である。2011 年の夏には大型台風により流出土砂によるせき止め湖が出現したが、そうした危険な事態における偵察や工事には捜索／偵察ロボットや無人化施工システムの活用が非常に有効である。また、今回の大震災では水中に大量の瓦礫が発生したが、視界が悪く危険な水中瓦礫の奥深くでも捜索／偵察が可能なシステムの開発が期待される。また石油コンビナートや化学物質を使った工場等における大規模産業事故の際にも、捜索／偵察ロボットや無人化施工システムの活躍の場は大きいものと思われる。

これらのロボットやシステムが緊急災害時に活用されるためには、研究開発によって実用性を高めることはもとより、平時から運用され、使用できるオペレータの訓練やメンテナンスの体制が整えられていることが必要である。そのためには、プラント・工場設備や社会インフラの点検

や補修等に対して、災害対応ロボットを継続して開発・適用していくことが重要と考えられる。

2. 3 原子力関連の事故におけるロボット活用の可能性

原子力関連の事故の場合、放射能汚染領域での作業は、作業員の放射線被ばく線量を最小限にするために、できるだけ無人で行うことが必要である。搜索／偵察ロボットについてはすでに限られた形ではあるが活用されているが、使用目的、使用環境に応じた要求仕様を明確化して開発に当たるとともに、開発後の運用体制を確立する必要がある。また今後より放射線環境の厳しい原子炉建屋内で様々な作業を行うことが必要になると考えられるが、そうした作業を無人で行うことのできるロボットを開発する必要がある。1999年のJCOの臨界事故の後、軽作業を行えるロボットの開発を行ったが、1年ほどの短期間にも関わらずターゲットを絞ることにより、要求される機能を果たすことのできるロボットを開発することができた。しかし開発したロボットが運用できる形で維持されなかったため福島事故に使えなかった。もし稼働できたとしても、今回の現場においてはモニタリングやドア開け以上の作業はできなかったと思われるが、そうした技術を生かして、より汎用的な作業ロボットを継続的に開発することが必要である。

福島第一原子力発電所の原子炉は、冷温停止状態となったあと、放射線量の減少を待ち、その後燃料を撤去し、原子炉を解体することとなる。その間、建屋内の瓦礫の撤去、作業／解体用クレーンの設置、使用済み核燃料プールからの燃料取り出し、原子炉容器からの燃料取り出し、原子炉建屋及び原子炉の解体等、非常に長期間を要する作業がある。これらの作業は今までとは比較にならない高放射線環境下で実施する必要がある、無人で作業を行うための機材を開発する必要がある。なお、スリーマイルアイランドにおいては建屋の崩壊等はなかったため、燃料取り出しまでの作業は専用のロボットや自動装置で実施したと伝えられている。また、チェルノブイリにおいては、原子炉解体ではなく、建屋全体をコンクリートで覆ういわゆる石棺化により放射性物質を封じ込める対応がとられたため、原子炉解体のためのロボットなどは開発されていない。

我が国においては、1985年から94年にかけて日本原子力研究所の動力試験炉JPDRを解体した実績があるが、商用炉については、現在、日本原子力発電(株)の東海第一発電所の解体に着手しているところである。JPDRでは種々の解体用ロボットを使用した、福島の場合はより大型であり、また放射能による汚染はJPDRの場合とは比較にならず、さらに燃料が溶融しているところから作業には大きな困難が予想される。今回福島原子炉の解体撤去については、原子炉からの燃料の取り出しまでに10年以上の期間を要すると考えられているが、すべての作業は無人・遠隔操作で行う必要がある、そのための解体ロボットシステムの開発を行う必要がある。我が国でも、すでに浜岡1、2号機が商業運転を終了しており、こうした原子炉の解体・廃炉は今後世界的にも増加すると考えられる。福島第一原子力発電所の原子炉解体のために必要となるロボットや無人化施工技術は一般の原子炉解体にも利用できるものであり、その意味からも原子炉解体用ロボットシステムの開発は重要である。

大規模自然災害用ロボットと原子炉用ロボットには、技術的共通要素も多く、併せて開発していくことが望ましい。

3. 災害対応ロボットに関する技術開発と運用体制に関する課題

3. 1 技術開発に関する課題

災害対応ロボットの技術開発については、民間企業が将来の利益を求めて実施するのはほとんど不可能であり、大学等が公的な資金を得て実施しているのが今までの状況である。詳細は各論に譲るが、技術的な課題としては、駆動機構、電源、自律制御、遠隔操縦のマンマシンインタフェースなどのロボットに共通した課題、温度・放射線・寸法形状等の情報の取得、伝送、解析や地図の生成などの情報系に関する課題、耐放射線、耐熱、耐水などの使用環境に関する課題等があげられる。また、地上型以外のロボット、水中用、飛行型、壁面や配管表面／内面を移動するようなロボットの研究開発も必要である。こうした技術の開発と同時に災害対応ロボットを商品として完成させるためには、製造コストの削減や商品としてのメンテナンス性や耐久性の確保等に加え、ユーザーが使いやすいシステムとするための開発も必要である。さらには、災害の多様性から、状況に合わせた構成の変更や改造が必要であり、ユーザーとの密接な連携が必要である。

そのためには技術開発に当たっては、大学等の研究開発機関だけでなく、関係企業が、搜索／偵察ロボット、無人化施工システム、原子炉解体用ロボットシステムなど、開発するシステム毎に、ユーザーを含むコンソーシアムを組んで開発するような体制を作り上げていくことも必要であろう。

また、ロボットの開発速度を速め、必要な改良を進めていくためには専用の実験フィールドを確保することが望ましい。瓦礫や発電所設備のモックアップ等を配置し、そこで開発途上のロボットや無人化施工システムの試験を行うことにより、問題点の把握を的確、迅速に行うことが可能となる。また、その地域内では無線の使用を緩和したり、放射線管理区域を設ける等の措置をとることにより、様々な実態にあった試験も可能になる。さらに、こうした実験フィールドを用いることにより、災害対策ロボット等の性能試験方法の標準化に関するデータを取得することも可能になる。こうしたフィールドを活用して、米国の DARPA Grand Challenge、Urban Challenge のような手法により、大学等の研究レベルの底上げを図り、技術の実適用を促進することも重要である。

3. 2 運用体制に関する課題

災害対応ロボットは、安心・安全な社会を築いていくために必要不可欠なものであるが、利用が想定される場面は災害や事故の発生時ということになるため、通常時においてはそれを使うことはない。そのためそうした設備の所有者も主に公的機関ということになるが、実際には予算の問題もあり配備が進まないことになる。

その中で無人化施工システムについては、プロジェクトの背景でも述べたように、1991年の雲仙普賢岳の火砕流の被災地域における復旧工事のために開発され、その後も有珠山の噴火や岩手宮城内陸地震などの被災地の応急対策工事や復旧工事など、人が入ることが危険な地点における工事で国の予算により施工が行われ、現在でも100台近くの油圧ショベルやクローラードンプが稼働可能な状態で保持されている（建設無人化施工協会資料）のは特筆されるべきことである。

防災ロボットについては、大大特プロジェクトで開発されたものがNPO法人国際レスキューシステム研究機構と各地の消防本部との協力で試験されており、配備の打診もなされたが性能的にまだ問題があることや、購入、運用の予算が確保できないことから実際に配備されているものはほとんどない。JCO事故後の原子力防災ロボットプロジェクトでは、開発当時、海外ではドイツにおけるKHG、フランスにおけるGroupe Intraといった原子力事故対応の常設機関が組織されており、そこでは事故対応のロボットと除染や輸送用を含む様々な機材を所有し常時訓練も行っているということで、そうした機関が日本でも必要だという報告をまとめたが取り上げられるところとならず、開発したロボットについても、東京消防庁などで試験が行われたものの、採用されることとならなかった。

今回の福島原子力事故に対する対応についてはいろいろ議論はあるが、即応体制がとれる常設組織と訓練された機材と人材の必要性があることは異論がないところであろう。Groupe Intraの例では、常時スタッフ20人が待機し、事故発生後5時間以内に出動し24時間以内には現場に機材を移動してミッション開始が可能であるとしている。機材としては6種類のロボット、4種類の無人化施工機械に加え、ガンマカメラを搭載したヘリコプターやコントロール車両、除染車両等を配備している。ドイツ、フランスとも経費は国と電力会社が分担しているようである。国土面積あたりの原子力発電所数が世界一でしかも地震帯に位置している日本において、常設の原子力防災機関がないということは、あり得ないのではないだろうか。米国には常設機関はないが非常時にはNRCの要請で軍の核兵器対策の専門部隊が対応することになっており、日本の場合とは比較にならない。

こうした常設機関を国に置くとした場合は、防衛省、消防、警察、それに新設される原子力保安機関などが考えられるが、広域的な対応が必要であるということからすると、自治体ベースで運営されている消防、警察が中核となるのは難しそうである。ドイツ、フランスにならい電力会社に出資を求め、官民協同の機関とすることも含め検討すべきだろう。また、ロボットや防災機器の配備については集中的でなく、即応性も考えて個々の原子力発電所等に配備するという考え方もある。例えば石油コンビナート等災害防止法では一定以上の貯蔵能力を持つ施設に自衛消防隊の設置と3点セットと称する高性能な消防車の配置を義務づけていることなどは参考になろう。

こうした機関を作るためには、そこで勤務する要員が不可欠である。要員は原子力発電所に関する専門知識に加え、訓練により有事の際に現場においてロボット等の運用あるいは指揮に当たる能力を高める必要がある。しかし実際にはそうした災害が常時生じるわけではなく、他の災害対応機関やメーカー・事業者との人事交流が不可欠である。要員の士気を維持するためには、自らはロボット等の運用に習熟するとともに、全国に配備されたロボット等の運用者に対し研修を行う際の教官となることも考えていくべきである。これにより、ロボット等の運用者の裾野が広がり、各サイトに配置されたロボット等のオペレータの確保も可能になる。

3. 3 電波の有効利用に関する課題

防災ロボットの遠隔操作のためには、映像などの大容量データおよびリアルタイム性が重要なコマンドデータのための無線通信が不可欠である。災害時には複数台のロボットが共同で作業を

進める必要があるが、現在電波法で認められている無線LAN等の電波帯域は決定的に不足している。また、数km先の遠隔操作が求められているが、認められた電波出力は不足である。

これらを解決するためには、電波法の規制緩和・規制変更によって、防災ロボット専用の周波数帯の割り当てと高い電波出力の許可がなされることが必要である。ロボットの開発と運用訓練のためには、平時から使用が許可されていなければならない。現在テレビの地デジ化により空いたいわゆるホワイトスペースの利用が検討されているが、防災ロボット用に一定のバンドを割り当てることが望まれる。

4. 防災ロボットに関する提言

4. 1 総論

原子力プラント内で必要な作業は、調査・モニタリング・軽作業などの情報収集を主たる目的とするものと、工事や除染などの実作業を主とするものに大別される。いずれも、作業員の被爆や危険性を最小限に抑える目的のため、ロボットにより作業を代替することが必要なケースが多い。ロボットは1台で様々な作業を行うことはできないため、プラットフォームを共通化してセンサやツールなどを交換する方式とするなど、できるだけ汎用化することによって、今後顕在化すると予測される様々なニーズや予期しない災害に備えることが望ましい。

施設内には、状況把握や計測が困難な場所（高所、上階、地下、水中など）が多数有る。情報収集のためには、対象箇所までセンサ（カメラ、線量計等）やサンプリング装置（マニピュレータなど）を移動させて計測を行うことによって、状況を把握し作業計画に反映させる必要がある。

実作業としては、除染や遮蔽板の設置によって線量率を下げて人間による作業の安全化を図ること、重量物の運搬などを支援して作業負担を軽減すること、配管工事等の危険を伴う作業を代替すること、が重要である。

これらのロボットシステムはいずれも、現場の環境条件や性能条件の制約を受ける。

また、システムを効果的に開発し、使用するために必要な共通事項として、性能試験評価法の確立・性能試験評価フィールドの設置、キーとなる基盤技術の開発と検討、遠隔操縦卓・センサインタフェース・情報収集データベースの標準化、が重要である。

4. 2 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

（1）性能試験評価法の確立と性能試験評価フィールドの設置

各ロボットの現場適用性能や使用条件を定量的に評価できるようにすることによって、ユーザー側での作業判断や機材選択を容易にし、開発側での目標・要求仕様・問題点を明確化するとともに、オペレータの訓練基準を定めることが必要である。それによって、防災ロボットの実用化を促進し、現場配備・作業使用に至る障壁を下げることができる。

この目的のために、ロジスティクス、運動、センシング、作業、無線、エネルギー、耐環境性、耐久性、などに関する試験評価方法を標準化する。また、この基準に則って、性能試験評価フィールドを設置することが必要である。設置場所の選定にあたっては、万が一の被害拡大時でも試験を継続できること、専門家アドバイザーが確保しやすいこと、運用コストなどを考慮し、実質的な成果を上げられるようにしなければならない。

（2）キーとなる基盤の開発と検討

簡易的に設置できる高出力のアドホック無線は、さまざまな防災ロボットに共通の課題であり、基盤技術として整備すること、専用の周波数帯域を確保することによって配備と開発の両面から実用性の高い機材としていくことが必要である。原子力対応ロボットのコストを抑制するためには、専用品と比べて安価に入手可能な部品の耐放射線性能に関するデータベースの作成が不可欠である。

（3）遠隔操縦卓の仕様、搭載センサインタフェース、収集情報・作業記録データベースの標準

化

投資効率を高め、世界的競争力を確保するために、オープンアーキテクチャ標準化を行うことが必要である。この種のロボットはマーケットが小さいため、複数社が個別開発を行う形態は効率的でない。日本企業が連合して標準化を行い、それを世界的標準とすることによって、開発効率を高め、マーケットの整備を図ることが可能と考えられる。それによって、災害対応・汎用保全ロボットの実用化と普及を促進できる。

以上をまとめたものを、図4. 2. 1に示す。

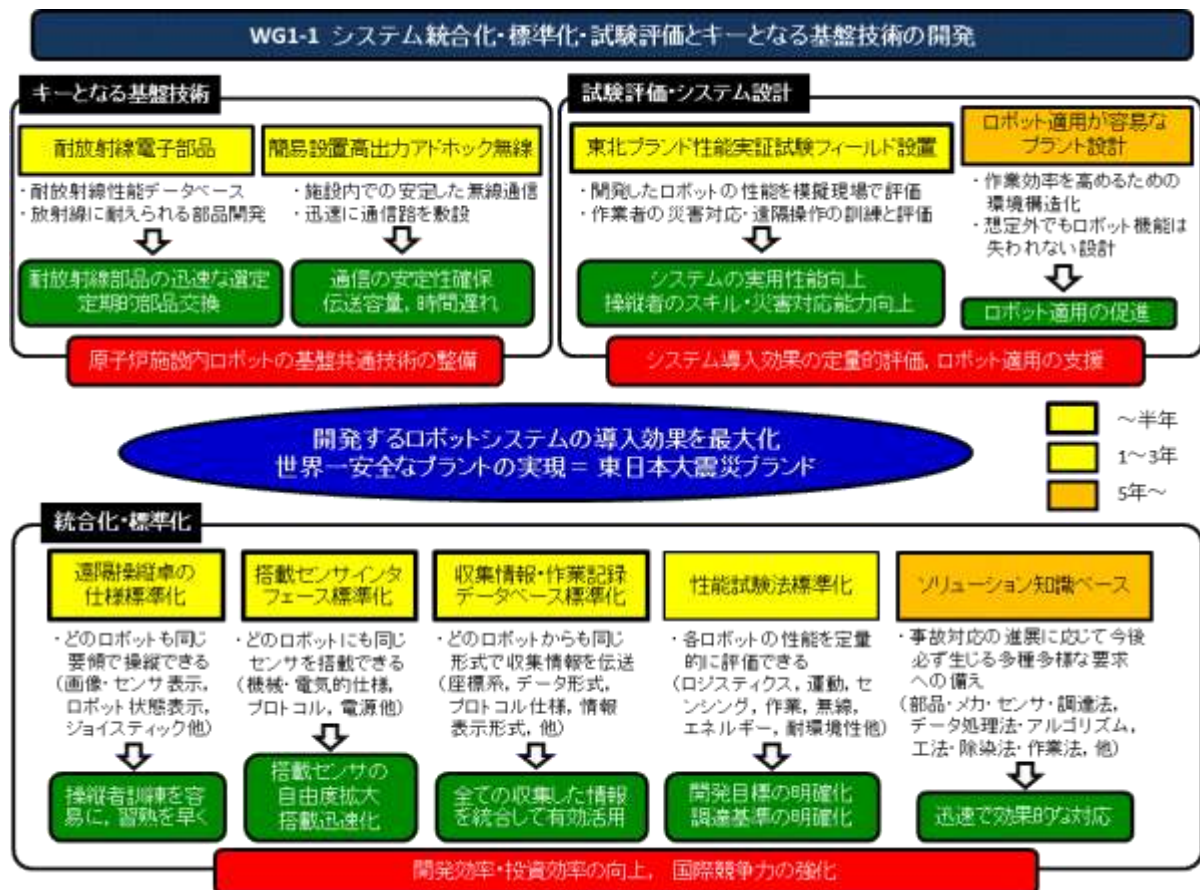


図4. 2. 1 システム統合化・標準化・試験評価とキーとなる基盤技術の開発のイメージ

4. 3 プラント内調査・モニタリングロボットシステムの開発

（1）移動プラットフォームの開発

原子力プラント内のすみずみで調査・モニタリング・軽作業を行うことができるように、共通的に使用可能な走破性の高い移動プラットフォームを開発する必要がある。現在我が国には十分な性能と信頼性を持つ各種プラットフォームが存在せず、研究開発と実用化・事業化が必要である。

具体的には、45度の階段、段差、障害物などがあってもプラント建屋上階や地階などすみずみまで移動可能な地上移動プラットフォーム、障害物や錆などがあっても高さ5mのコンクリートや鉄などの壁面を移動できる壁移動プラットフォーム、配管や障害物があっても建屋内外高所

に安全に移動可能な空中移動プラットフォーム、狹隘、屈曲などの条件にかかわらず配管の内外を移動できる配管用プラットフォーム、配管や障害物にかかわらず原子炉建屋地下階などの水中を移動できるプラットフォーム、が必要である。

これらのプラットフォームは、現場で必要とされる様々な環境条件（温度、高線量率、高湿度など）で動作する必要がある、狹隘部での移動や旋回、軽量・コンパクト、迅速性などの性能を備えていなければならない。バッテリーは4時間程度の連続作業を可能とすることが望ましく、搬入後すぐに作業を開始できる必要がある。防塵・防水が必要であり、防爆が望ましく、除染が容易でなければならない。

（２）調査・モニタリング・軽作業の機能の開発

原子力プラントにおいては、種々の要求がある。調査や異常点検としては、作業環境条件、ガス漏洩、臭い、水漏れ、液体、火災、火花、爆発、亀裂、隙間、減肉、穴、塗料剥げ、錆、構造損傷、緩み、脱落などが必要である。作業のモニタリングとしては、安全確認、作業環境監視、進捗監視、精度チェック、路面状況確認、音声対話支援、緊急事態支援、要救助者支援などが必要である。

そのためには、映像（静止画・動画）、音、3次元形状、線量率、 γ 線源、温度画像、ガス濃度、温度・湿度などのセンシングの機能が必要である。また、液体、ガス、ダスト、粉体、固体、スミヤ式採取、土壌、植物などをサンプリングできる機能も必要である。

これらの結果を集約し、プラント内のどこで何が起きているかを「見える化」することが必要である。そのためには、各種センサに加えて、センサからの情報を図面上に記録する機能、収集情報をリアルタイム伝送する機能、3次元マッピングする機能、3次元位置計測する機能が必要である。また、軽作業（センサの移動、サンプリング、センサの設置、軽ドア・フタ開閉、軽量物運搬、軽溶接など）を行う機能が必要である。

そのためには、通信がプラント内全域で安定して行えることが必要であり、大容量データの伝送や通信遅れが短いことが必要である。無線の場合にはアドホック中継機能が、有線の場合には通信ケーブルのハンドリングが必要である。また遠隔操作は、オペレータにとって容易に高い操縦性を発揮できることが望まれ、標準化された操縦卓に加えて、短期で操縦訓練が完了できること、半自律機能などによって操縦が支援されること、単純作業が自動化されること、オペレータが高い没入感を持てること、が望まれる。

（３）試験フィールドでの実証試験、改良による実用性能の向上

システムを標準試験フィールドで繰り返し試験を行って改良すると共に、操縦者の訓練を行い、現場で必要な作業を実用的なレベルで行えるようにする必要がある。平時から使われるような体制作りが望ましい。こうしたフィールドを活用して、RoboCup や米国の DARPA Grand Challenge、Urban Challenge のような手法により、研究開発の進捗が見える化し、競争的な環境の醸成によって技術革新を促進することも重要である。

以上をまとめたものを、図4. 3. 1に示す。

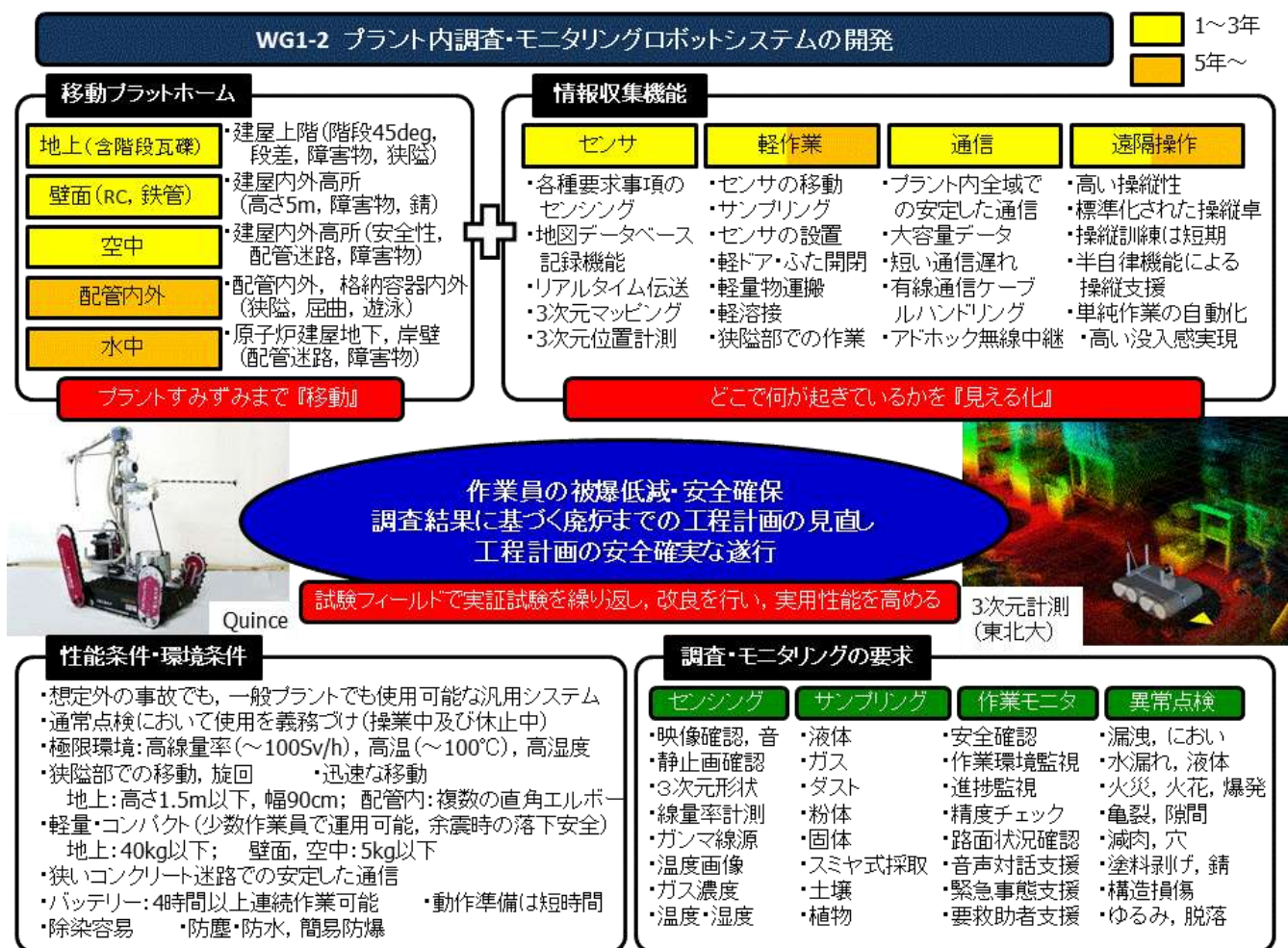


図 4. 3. 1 プラント内調査・モニタリングロボットシステムの開発のイメージ

4. 4 プラント内遠隔危険作業ロボットシステムの開発

(1) 汎用重作業移動プラットフォームの開発

作業員に代わって作業を行うためのツールを移動させるためのプラットフォームが必要である。これは 4. 3 で提案したプラットフォームと比べて、重量物(数十 kg 以上)の取り扱いが必要な点が異なっており、そのため比較的大型でありながら狭隘部での移動旋回が可能な地上移動ロボットの形態となると考えられる。

移動台車としては、段差乗り越え機能が必要不可欠であるが、必要に応じて移動能力を拡大するためのレール・リフター・建機などを併用する必要がある。マニピュレータは作業に応じた自由度、ツールが着脱可能であること、マスタースレーブやジョイスティックによる遠隔操作が必要である。作業によっては、双腕や複数台の協調作業が必要となるケースが想定される。

移動プラットフォームに備えられる通信、遠隔操作、センサに関する必要要件は 4. 3 で述べた内容と共通である。

(2) 遠隔重作業ツールの開発

作業員に代わって遠隔で作業を行うためには、それぞれの作業に応じて取り替えられる作業ツ

ールが必要である。

原子力プラントでは、作業員が入域して安全に作業ができるようにするために、放射性物質の除染のニーズが最も高い。除染のためには、小型瓦礫の除去（大型瓦礫は建機で除去）、吸引による粉塵除去、ジェット水洗浄回収による付着物除去、コンクリート表面のハツリ（機械的手段、レーザなど）による染み込んだ線源の除去、などの方法があり、現場状況に応じて選択できなければならない。

建屋内への重量物（放射線遮蔽板、配管工事資機材等）の運搬を支援することは重要である。また、被爆量を低減するために、汚染物の運搬も重要な作業である。

配管等の工事は危険を伴うため、ロボットによる支援が求められている。具体的には、汚染水フィルタ交換、配管接続・切断・穴開け、溶接、ボルト締緩、フランジ開閉、バルブ開閉、チェーン切断、汚染水漏れ処理、リフター・レール等設置、などが必要であり、ツール交換によって対応できる必要がある。

建機やロボットのメンテナンスは被爆を伴うため、ロボット化のニーズがある。具体的には、機材の除染、給油、刃の研削、グリス給油脂、エンジンスタート、故障修理などである。

また、配線作業（電源、通信インフラ敷設）のニーズもある。

以上のような作業を、4. 3で述べたような厳しい現場条件で行えることが求められている。

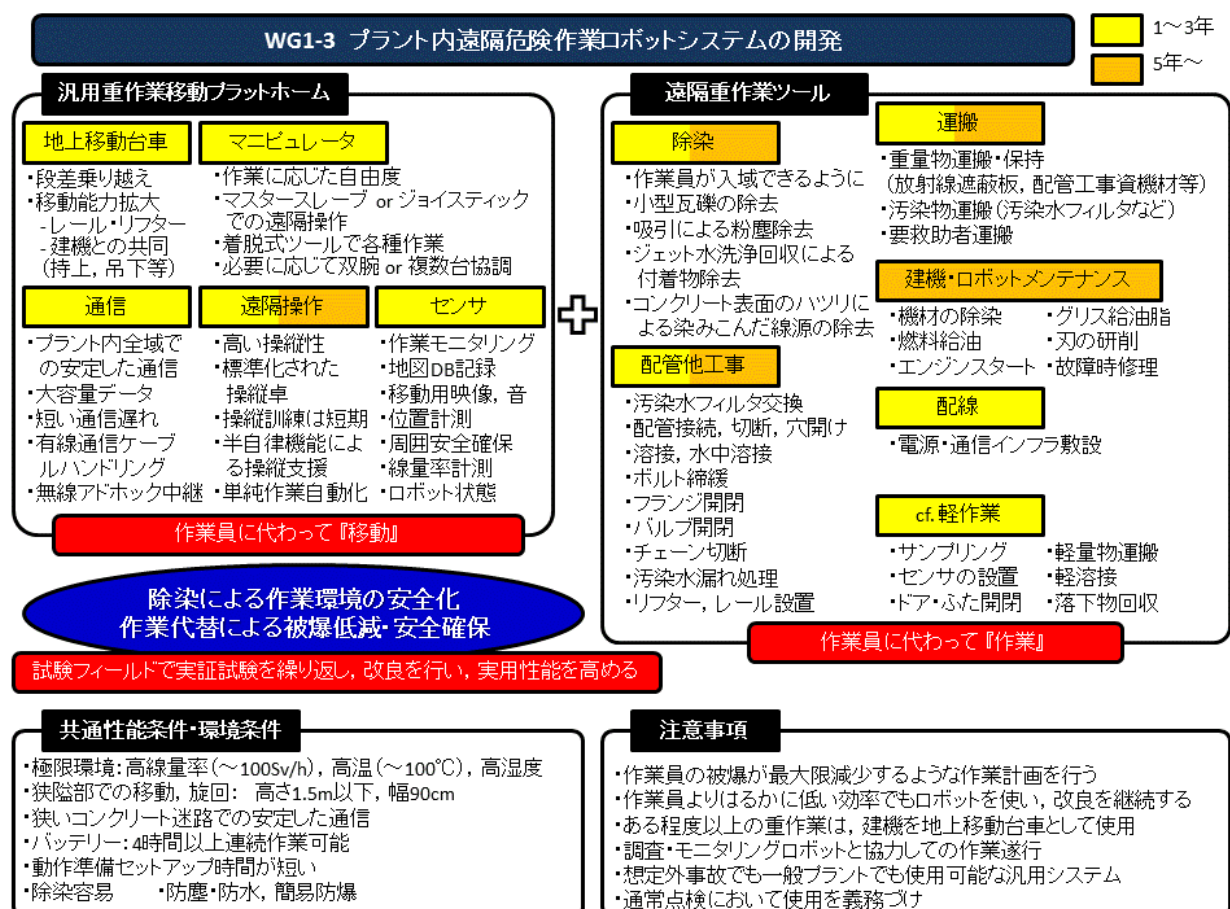


図 4. 4. 1 プラント内遠隔危険作業ロボットシステムの開発のイメージ

(3) 試験フィールドでの実証試験、改良による実用性能の向上

4. 3と同様に、システムを標準試験フィールドで繰り返し試験を行って改良すると共に、操縦者の訓練を行い、現場で必要な作業を実用的なレベルで行えるようにしていく必要がある。これも同様に、平時から使われるような体制作りが望ましい。こうしたフィールドを活用して、RoboCupや米国のDARPA Grand Challenge、Urban Challengeのような手法により、研究開発の進捗を見える化し、競争的な環境の醸成によって技術革新を促進することも重要である。以上をまとめたものを、図4. 4. 1に示す。

以上の提案の主要な開発項目と所要資金、開発期間を表4に示す。資金、期間ともに現時点での概略推定であり、今後具体的なスペックを想定し、より精査する必要がある。

表4 主要項目の開発所要資金及び開発期間

テーマ名	概要	所要資金	期間
耐放射線電子部品	・耐放射線性能データベース	1億円	3年
簡易設置高出力アドホック無線	・施設内での安定した無線通信 ・迅速に通信路を敷設	3億円	3年
性能実証試験フィールド設置	・開発ロボットの性能を模擬現場で評価 ・作業員の災害対応・遠隔操作の訓練と評価	1億円	5年
ロボット適用容易な原子力プラント設計	・想定外災害時でもロボット適用が容易な設計	プラント設計方法の検討に含まれる	
遠隔操縦卓の仕様標準化	・どのロボットも同じ要領で操縦できる（画像・センサ表示、ジョイスティック、他）	2千万円	3年
搭載センサインタフェース標準化	・どのロボットにも同じセンサを搭載できる（機械・電氣的仕様、プロトコル、電源、他）	2千万円	3年
情報収集・作業記録データベース標準化	・どのロボットからも同じ形式で情報収集を伝送（座標系、データ形式、プロトコル、他）	2千万円	3年
性能試験法標準化	・各ロボットの性能を定量的に評価できる（評価試験を含む）	1億円	5年
ソリューション知識ベース	・多種多様な要求への備え（部品・メカ・センサ・調達法、データ処理法、工法、他）	2千万円	5年
地上移動プラットフォーム＋情報収集機能	・建屋上階・地下等での移動・情報収集（階段、段差、障害物、狭隘、他）	10億円	3年
壁面移動プラットフォーム＋情報収集機能	・建屋内外高所での移動・情報収集（5m高、障害物、錆、他）	10億円	3年
空中移動プラットフォーム＋情報収集機能	・建屋内外高所での移動・情報収集（安定性、配管迷路、障害物、他）	10億円	3年

配管内外移動プラットフォーム＋情報収集機能	・配管内外、格納容器内外での移動・情報収集（狹隘、屈曲、遊泳、他）	15億円	5年
水中移動プラットフォーム＋情報収集機能	・建屋地下、岸壁、格納容器内等での移動・情報収集（配管迷路、障害物、他）	15億円	5年
災害情報収集センサ	3次元形状、ガンマカメラ、GIS、マッピング、位置計測、リアルタイム伝送、情報表示、他	2億円	3年
災害時軽作業	サンプリング、センサ設置、軽ドア・ふた開閉、運搬、軽溶接、狹隘部作業、落下物回収、他	3億円	3年
災害時通信	プラント内全域をカバー、安定性、大容量、短い時間遅れ、通信ケーブルハンドリング、アドホック中継、他	簡易設置高出力アドホック無線に含まれる	
災害時遠隔操作	操縦性、標準化、半自律操縦支援、自動化、没入感、他	3億円	5年
汎用重作業移動プラットフォーム	地上移動台車、マニピュレータ、通信、遠隔操作、センサ、他	10億円	4年
遠隔除染	瓦礫除去、吸引、水洗、ハツリ、他	10億円	5年
遠隔配管他工事	フィルタ交換、配管接続・切断・穴開け、溶接、ボルト・フランジ・バルブ開閉、チェーン切断、水漏れ修繕、リフター・レール設置、他	10億円	5年
重量物運搬	運搬・保持（放射線遮蔽板、配管資機材等）、汚染物運搬、要救助者運搬、他	汎用重作業移動プラットフォームに含まれる	
建機・ロボット遠隔メンテナンス	機材除染、燃料・グリス給油脂、刃の研削、エンジンスタート、故障時修理、他	5億円	5年
遠隔配線	電源・通信インフラ敷設	5億円	3年

5. 無人化施工システムに関する提言

5. 1 総論

建設作業における無人化施工システム技術は、一般の建設機械を無線遠隔操作することで災害発生後の危険な区域に操作者を立ち入らせることなく安全に復旧作業を行う技術であり、この実現に必要な遠隔操作、画像伝送、無線通信システムの総称である。

この技術は、前述のように雲仙普賢岳の噴火による火砕流・土石流の被災地域における復旧工事を契機に開発され、有珠山の噴火による災害、新潟県中越地震、岩手・宮城内陸地震による災害等の復旧に適用されてきた。

今回の震災では、福島第一原子力発電所の災害後、放射線下での建屋周辺の瓦礫の撤去、飛散防止剤散布等に、この技術が利用されている。

しかし、この技術は特殊な環境下で使うことが前提であるがために、適用可能な建設機械の機種や台数が限定されていること、カメラ画像を目視しながらの遠隔操作には経験による習熟が必要で、これを満たす操作者が少数であること等の課題がある。

今回の震災では、被害範囲が広範で、被災の状況が多岐にわたるため、津波の被災地に残る瓦礫処理等、従来の遠隔操作の建設機械の機種では、対応できない作業が生じている。

また、移動距離に制約のある特殊な用途をもったロボットを、目的の場所に到達させるための運搬手段としてのニーズや、ロボットと無人化施工建設機械を組み合わせることによるトータルの無人化作業といった新しい視点での技術開発の必要性が顕在化している。

これより、無人化施工システムの技術的課題としては、

- ・ 遠隔操作型瓦礫処理システム
- ・ 災害対応に最適な運搬技術
- ・ 大型構造物躯体解体・構築技術
- ・ 瓦礫処理運搬システム（水中版）

の4つの目的を実現するために必要な技術開発とし、その中には無線通信技術や、遠隔操作者を支援する画像技術等を包括したものとする。

また、制度と運用体制に関する課題としては、従来の無人化施工建設機械は、通常は遠隔操作機能を使用せずに一般の建設作業に使われており、災害時には遠隔操作機能により無人化施工に使用されることが多い。

今回の開発機は、瓦礫処理等は専用機能となるために、民間所有による運用は困難であることが想定される。このため、機械の配備、維持管理、運転操作、試験・実証フィールドについては、あらたな体制が必要になる。また、遠隔操作には光ファイバ通信や特殊な無線環境が必要になるため、重要施設で災害が発生した場合を想定して、無人化施工機械投入後、迅速に稼働するための専用通信インフラを事前に構築することに関しても併せて十分な考慮が必要である。

5. 2 遠隔操作型ガレキ処理システム

【目的及び必要性】

東北地方での地震・津波災害により発生した瓦礫撤去を早期に円滑に実施するために、瓦礫は一時保管場所に殆ど分別されずに雑多なものが集積され山積み状態となっている。そのため腐敗物を含んで異臭を強くはなっていたり、多くの害虫が発生していたり、劣悪な作業環境になっているところも多い。これらの瓦礫処理を適切に行うためには、重機による粗選別を行った後に種々の選別機による瓦礫の選別を行って、可燃物・不燃物・金属類・土壌等再資源に選別しなければならない。この粗選別作業を安全に行うために遠隔操作型粗選別用双腕重機の開発が望まれる。

瓦礫除去における遠隔操作では、画像を見ながら瓦礫の状況の確認、一時分別や除去作業をおこなわなければならない。分別作業を効率的に行うためには、直感的な操作システムとダイレクトな臨場感を実現するマンマシンインタフェースが不可欠である。また、現場から伝送される遠隔操作用の画像だけでは対象物を十分判別できないケースも考えられるため、各種センサ情報を含めた操作者への情報提供も必要で、対象物の物性判別を支援する判別支援システムが必要と考えられる。伝送容量によっては画像自体も不十分な画質しか得られない場合もあり、画像伝送法の改善やその他の情報等も含めた安定的で効率的な通信技術の開発も合わせて行う必要があるものと考えている。

本提案では、瓦礫処理に適した遠隔操作型の双腕作業機を開発し、副腕で瓦礫の物性判別や放射性汚染検知等の補助作業を行いながら、主腕で分別作業を行うことで、一時保管場所における粗選別を安全かつ効率的に行うことを目的とする。

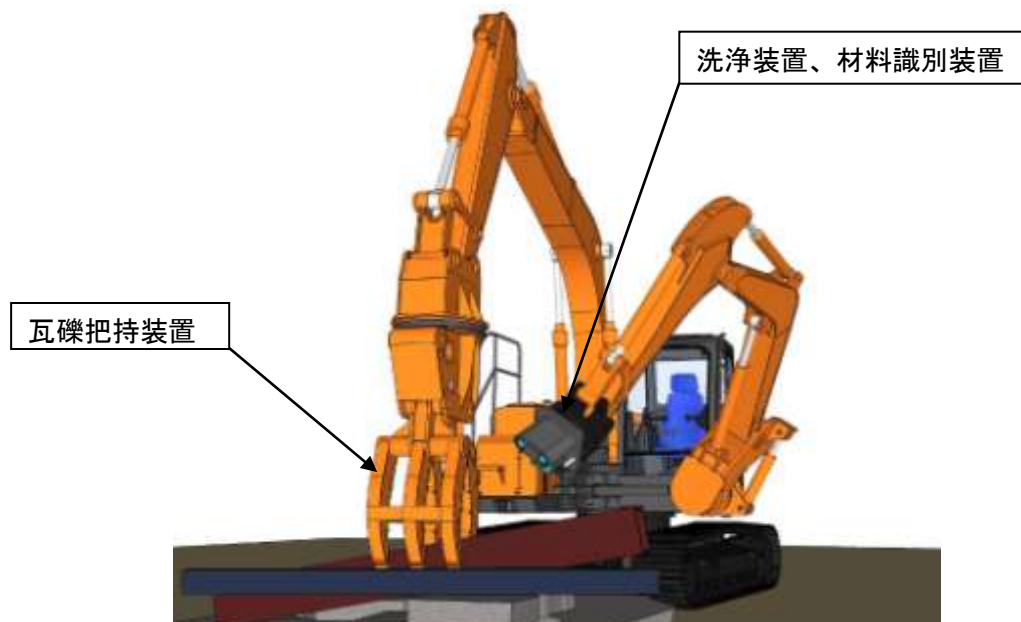


図 5. 2. 1 遠隔操作型双腕作業機

【必要な技術開発項目】

(1) ガレキ処理に適した遠隔操作型双腕作業機の開発

双腕の主ブームで瓦礫の処理を補助腕で瓦礫の洗浄や識別、計測等を行う。

(2) 直感的な操作システムとダイレクトな臨場感を実現するマンマシンインタフェースの開発 現状の画像伝送による画像では奥行感を得ることが難しく、対象物の把持、切断等の作業を行うには困難が伴うため、対象物の三次元計測法及び計測結果の提示方法を開発する。

① 対象物の三次元計測技術の開発

イ. ステレオ画像処理法等の画像による三次元計測技術の開発

ロ. レーザーレンジファインダーによる三次元計測

ハ. 三次元計測結果提示技術の開発（計測結果の二次元画像への重畳等）

② 対象物の計測・提示技術

イ. 高精度重量計測技術の開発

ロ. 材質計測技術の開発

・対象物の密度測定による材料識別

・X線検査による材料識別

・マルチスペクトルカメラ等による外観識別

ハ. 臨場感提示・操作技術の開発

③ 遠隔画像・無線情報伝送技術

遠隔操作者と重機間は、無線通信で画像や各種情報の送受信を行うので、画像は出来るだけ高精細である必要があり、また操作支援のための距離情報やその他の種々の情報も同時に伝送するため、限られた通信帯域の中で効率的な画像・情報伝送技術が必要である。

【現状の技術レベル】

(1) 遠隔操作型双腕重機

NEDO委託事業において、階上に機械を載せ順次上層階から解体を行う階上解体工法に適用する双腕作業機の研究実績あり。（'06～'10年度）

(2) 三次元計測技術

画像計測、レーザーレンジファインダー（LRF）、計測法等がロボット技術の中で開発されているが、屋外でのロバスト性に問題が多く、得られた距離画像や計測結果と二次元画像へのリアルタイム対応付け等に課題が多く残されており、効率的で実用的な提示法はない。

(3) 対象物の計測・提示技術

重量物の重量計測は未だ100kg程度の分解能であり遠隔操作には不十分。瓦礫分別対象の材質については、鉄、非鉄、アルミなど識別単体としては存在するが、効率的に知る手段や一括処理するシステムはない。

【海外との比較】

対象物の識別技術に関して、空港、港湾等での手荷物検査装置など複数あるが、国内技術と同

等であり応用は可能と考えられる。その他については不明。

5. 3 災害対応に最適な運搬技術

【目的および必要性】

平常時の陸上輸送は、トラックがその主役である。国内輸送量の90%はトラックで運ばれており、物流の動脈となっている。ただしトラックは、舗装路面の高速走行を目的としたものであり、地震や津波、土砂崩れなどの際に発生する、きわめて悪化した路面状況に対してはまったく無力である。一方不整地の運搬車両としてオフロードダンプトラックやアーティキュレートダンプトラック(図5. 3. 1)がある。これらは鉱山などの非舗装路での資材運搬用として開発されたものであるが、走行路の整備は必要であり、瓦礫が積み重なったような災害現場を走破することはできない。また災害復旧時の無人化施工では、運搬車両としてクローラダンプ(図5. 3. 2)が用いられている。しかしクローラダンプは、圃場や土木現場などの軟弱地の走行を前提としたもので、瓦礫や崩落土砂などの凹凸面に対する走破性は高くない。



図5. 3. 1 アーティキュレートダンプトラック



図5. 3. 2 クローラダンプ

災害時こそ、迅速に物資や資材を搬送する要求は高いが、瓦礫や土砂を乗り越えてこれらを運ぶ手段は、現状では皆無に等しい。また東日本大震災のように、津波の被害が広範囲に及ぶ場合には、被災地は半水没の状態となり、現場への接近はより困難を極める。いきおいヘリコプターによる空中輸送が用いられるケースが多いが、機材調達の困難さ、積載重量の制限、地形や天候の影響を受けやすいなどの問題点は避けられない。

現有技術の中には、災害の際の機材等の緊急輸送や復旧時の瓦礫や土砂の搬出に際し、迅速かつ安定的に対応できる手段は見当たらず、新しいシステムの早急な研究開発が望まれる。

【必要な技術開発項目】

災害の発災直後は、多様な瓦礫や土砂が走行路に散乱している。このような状況下でも、緊急対応のための機材や計測器、ロボット等を現地に搬入する手段が必要である。このためにはきわめて高い対地適応性を有する走行車両が求められる。一般にクローラ式車両の対地適応性は高いが、ブルドーザーのような固定式のクローラでは、安定かつ安全に障害物を乗り越えることはできない。一部の特殊車両で研究開発が進められているマルチクローラ(図5. 3. 3)や可変形状式のクローラ(図5. 3. 4)、あるいはそれらを統合・発展させた新しい走行機構の開発が必要

である。またスリップの少ない滑らかな走行制御を実現するために、クローラが走行曲率に応じて屈曲するフレキシブルクローラ(図5. 3. 5)の適用も長期的には検討されるべきである。一方復旧作業時は、大きな瓦礫や土砂は除去されているものの、平時のような平滑な走行路はまだ確保できていない状況と予測される。このような状況下では、準対地適応性を有する高速・高積載の車両のニーズが高いとも考えられる。高速走行のために装輪式を採用し、高機能の能動サスペンションにより対地適応性を実現するとともに、多輪式として低接地圧化を図る必要があるであろう。これに類似した車両として装輪装甲車があるが(図5. 3. 6)、その機能をさらに拡張した車両が必要である。



図5. 3. 3 マルチクローラ

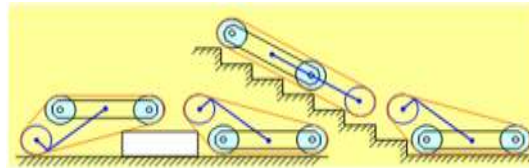


図5. 3. 4 可変形状クローラ



図5. 3. 5 フレキシブルクローラ



図5. 3. 6 装輪装甲車の足回り

また津波等により走行路が水没していることも考えられ、クローラ式、装輪式のいずれの車両の場合にも、ある程度までの水深を走破できる機能を有することが望まれる。さらに原発事故や崩落の危険性が高い場所など、人が近づくことができない領域を走行する可能性は高く、遠隔または自律での走行制御は不可欠である。このためにはオペレータへのパノラミックな動画像の提供、姿勢安定制御や障害物回避等の遠隔操作の支援システムなど、多様な技術の開発が必要である。また複数の車両の運行管理や遠隔での車両の健康管理、故障の場合に容易に車両を排除できる自動被牽引化、燃料の無人補給なども重要な技術課題である。さらに各車両の操作方式を共通化して、熟練オペレータの員数をそろえなくても運行が可能なシステムを構築することも大切な視点のひとつである。

【現在の技術レベル】

レスキューロボットや惑星探査ローバーなど、走破性の高い無人・遠隔車両の研究は進んでいる。いくつかの要素技術はそれらの研究の中に見出すことができる。しかしこれらの研究の多くは実験室レベルの評価に留まっており、実際のフィールドへの適用については未解決の部分が多い。また車両の大きさが、ここで想定する災害の緊急対応や復旧作業に対しては小さすぎることで、走行速度が十分でないことなどから、実用システムを目指した新規の技術開発は不可欠と考えられる。

5. 4 大型構造物躯体解体・構築技術

【目的及び必要性】

原子炉施設のコンクリート構造物は堅牢で、一部は放射化あるいは放射能汚染していることから、これらの構造物の解体には、作業員の放射線被ばく及び二次廃棄物の発生を極力抑制できる解体技術が必要となる。このような環境下での作業では、遠隔操作による解体ロボットでの作業が求められる。また、解体作業のための仮設構造物を構築するための技術も重要である。放射性廃棄物の処分費用は非常に高価であるため、高放射化コンクリートの解体においては、コンクリート中の放射化レベルに応じて、対象となる部位のみを区分して解体する技術が必要である。

ロボット技術(RT)から見てみると、現状の建設機械のほとんどがシングルフロントであり、単体では複雑な解体作業が行えない。一方、双腕建機を用いた場合でも、重量物の切断に伴う重量変化への対応をはじめ、破損・変形部材や複雑形状装置(バルブ等)の把持・操作は難度が高い。一般的に、無人化施工では奥行き感を捉えにくく、厳密な位置決めには多大な労力を要する。加えて、周囲環境の破壊や双腕同士の衝突の回避なども重大な懸案事項となる。これらの問題を解決するため、三次元映像支援による操作性の向上ならびにRTを用いた操作支援による双腕協調性や外乱適応性を高める操作者支援システムの開発意義は大きい。これらの技術導入により、繰り返し作業による操作者の疲労軽減および、作業効率や安全性の向上が図れる。

以上をまとめると以下の項目となる。

- 原子炉施設のコンクリート構造物は堅牢で、解体には、作業員の放射線被ばく及び二次廃棄物の発生を極力抑制できる解体技術が必要であり遠隔操作による解体ロボットでの作業が不可欠である。
- 放射化レベルに応じて、対象部位のみを区分して解体する技術やガス溶断やボルト締結等、施工精度の必要な作業が求められる。
- ロボット単独では作業地点にアクセスすることが難しく搬入や位置決め、動力源供給等に対して、既存の建設機械との組み合わせで、作業ロボットの活動支援を行うことも可能である。
- 現在、建設機械の遠隔操縦には、2D映像を用いているが、車体姿勢の把握が難しく、直感的な操作が行えるように、3D映像システムを統合したシステムによる操作性の向上ならびにRT(Robot Technology)を用いた操作支援による外乱適応性を高める操作者支援システムの開発意義は大きい。

【必要な技術開発項目】

必要な開発項目を以下に示す。

- ・ 広範囲対応遠隔現況及び変位測量及び転送、3D・CAD化技術の検討
- ・ 遠隔解体作業装置の検討（S、RC、SRC造の切断・破碎・把持・搬出等）
- ・ ロボット搬出入用無人化機械と施工ロボットの組み合わせ検討
- ・ 3DCADデータを用いた躯体遠隔解体支援システムの検討
- ・ 3D映像システムを統合した操作支援システムの検討
- ・ 遠隔操作による不具合対処技術（ロボット回収・修理・部品交換等）の検討

以下は重要な開発要素を示す。

- ・ 複雑な把持・操作を可能とする複腕多自由度油圧ロボットの開発
- ・ 操作型油圧ロボットにおけるコンプライアンス制御法の確立
- ・ 操作者の奥行き感の補償のための三次元映像支援システムの構築
- ・ 位置決めを容易にするためのICチップ内蔵型構造部材の開発
- ・ 操作者負担軽減のための重量物積込作業の準自動化技術
 - ――設計図面DBに基づく積み込み作業におけるパスプランニング
 - ――周囲環境保護のためのロボット全表面における障害物回避制御
- ・ 電子装置の耐放射線機能
- ・ 防振対策（遠隔操作がブーム先端の揺れに影響されない技術）
- ・ 協調運転（操作）機能（アームとブーム、作業者と作業車）
- ・ ロボットシステムのアタッチメント化（電源、通信、油圧の供給）
- ・ 遠隔臨場感提示技術（3D映像の活用）
- ・ 迅速に現場投入ができ、かつ場内移動が容易な大型作業支援機の開発

【現在の技術レベル】

（株）日立建機は、双腕多自由度油圧ロボットを試作・検証済みである。（株）安川電機は、配電線保守作業ロボットシステムを実用化している。早稲田大学は、準自動化・操作者支援技術の開発実績がある。しかし、遠隔操作による解体技術は、JPDR（BWR：1.5万kW）などの小型炉での実績はあるが、100万kWクラスの大型炉の解体技術は進んでいない。特に今回の福島第一原子力発電所のように建屋外部が汚染された例は少ないため、こうした取り組みは少ない。

部分的な解体ロボット等は知られているが、全体をロボットで解体する事例は見られない。英国の大学にて Brokk を改良し、双腕建機ロボットの基礎研究を実施(双腕衝突回避など)がある。原子炉以外の解体構築ロボット化は事例がなく、少ないと思われる。

無人化施工WG 原子力解体SWG



5. 5 瓦礫処理運搬システム(水中版)

【目的及び必要性】

今回の東日本震災のような大規模な津波の発生時や土石流等の瓦礫処理等で、水際、浅水域での瓦礫処理を行うことを目的とする。

水底の瓦礫回収は、対象物が見えない状況で実施するため作業効率も悪く回収不能な場合が多い。また、土石流、泥流などの除去作業時は通常の運搬機が利用できないため、対応が困難であった。更に、浅海域における瓦礫回収は、船舶の喫水条件等により対象となる水際、浅水域は作業船などを利用できないため、船舶によらない水陸両用瓦礫回収技術が望まれている。

【必要な技術開発項目】

位置情報を主体とした港湾用工事の支援システム(図5. 5. 1 2周波GPS受信機やDGPS受信機を利用し、船舶の位置管理を実施し、深浅測量や浚渫、杭、漁礁などの設置を行う)はあるが、今般の事態に適用するには以下に示すような課題がある。



図5. 5. 1 港湾用工事の支援システムの例
(株式会社ニコン・トリンプル カタログより)

(1) 水陸両用ベースマシン技術

船舶が入れない浅水域で作業するための耐水施策を施した鋼製クローラ等のベースマシンの検討。またそれらの建機が水没するような場所で作業を行うための水陸両用遠隔操作化、水中仕様対策、誘導システム等の検討。

(2) 水中作業支援システム

水中において安全走行するための乗員/操作者への補助情報の提供やそのインターフェースに関する検討。例えば、双腕化して片方をセンサブローブにして対象物の情報を取得する方法などの検討。

(3) 作業計画実施支援システム

作業計画のベースとなる濁った水底の詳細地形 および 瓦礫の3次元マップ作成技術の検討。取得した3次元データによる遠隔操作建機の安全対策等の作業補助技術の検討。

これらの各種技術について必要となるレベルを早急に把握し、水中瓦礫処理を実現するには、水底地形3Dマップ作成装置、水陸両用の遠隔操作型油圧ショベル および 運搬車等からなる瓦礫処理運搬システム(水中版)(図5. 5. 2)の試作・試験施工を実施する必要がある。

【現在の技術レベル】

(1) 水陸両用ベースマシン技術：車両を水中で作動可能とする技術はあるが、瓦礫のある水底の走行に適した走行装置(脚まわり)、長時間の使用など実用面での課題は多い。陸上での遠隔操作については実績があるが、水中で使用するためのノウハウは少ない。

(2) 水中作業支援システム：瓦礫のあるような水中を走行する車両の実績はなく、安全走行す

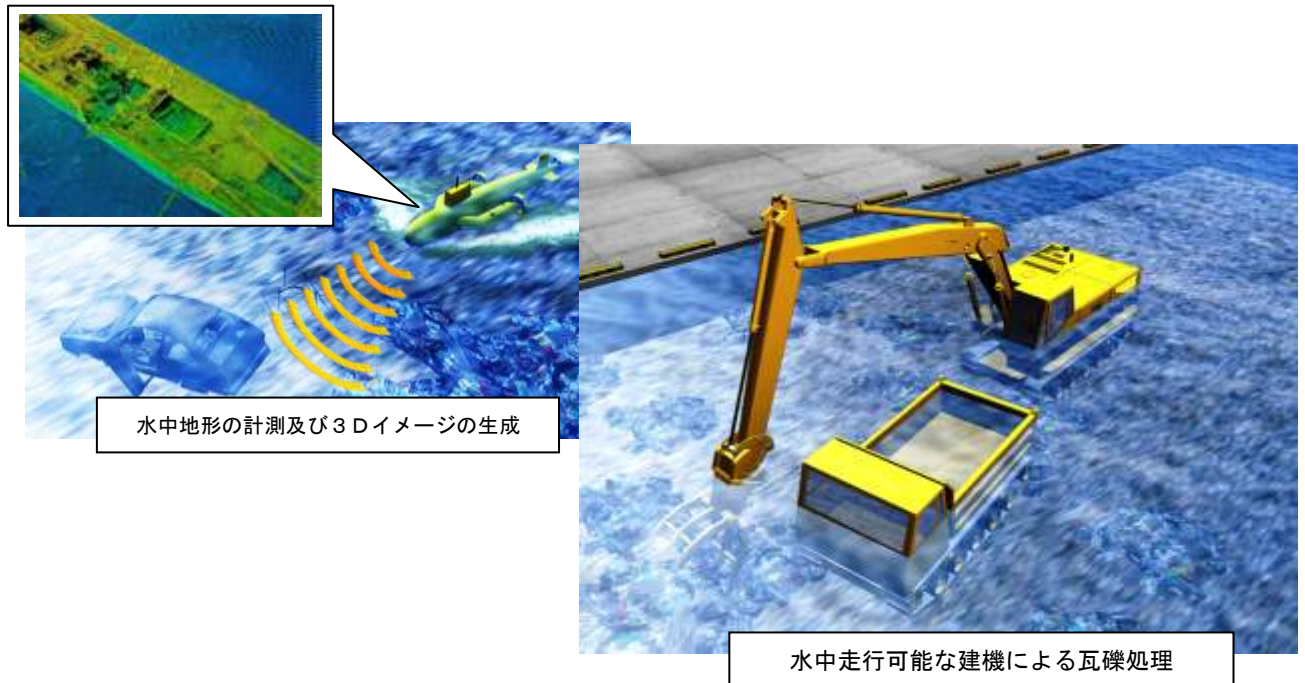
るための乗員/操作者への補助情報の提供やそのインターフェースに関する技術も少ない。
例えば、陸上での操作対象物の画像に代わる２次元イメージを提供するセンサ（ソナー）はあるが、今回の用途に耐えうるものはないため開発が必要である。

- （３）作業計画実施支援システム：水底地形を計測するためのセンサ（ソナー）に関する技術は精度１０mm程度のものが開発されている。また、これらのセンサを用いた３次元マップの生成についても開発されているが、今回の用途に特化したものではない。

陸上では情報化施工が実施されているが、水中でのガレキ処理の作業計画および実施に必要なデータに関するノウハウは少ない。更に遠隔操作のデータによる作業補助技術も未成熟である。

【海外との比較】

- （１）水陸両用ベースマシン技術：同様な用途での実施例はない。
- （２）水中作業支援システム：同様な用途での実施例はない。
- （３）作業計画実施支援システム：水底地形の計測については精度１０mm程度のものが実用（市販）され、３次元マップの生成も実用化されている。また、これらは各種施工などに適用できるものと考えられるが、今回の用途に合致するものではないと考えられる。



- a. 水中地形について、事前に航走体等（有人/無人いずれも可）を用いて計測。
 7. 水深は Max5m 程度、水は澄んでいる。
 - イ. 航走体の3次元位置情報は正確に得られる。
 - ウ. 範囲は基準点から半径 500m 以内（範囲は基準点を増やせば拡張される）
- b. 計測結果を 3D 処理し、工事計画、建機作業へのイメージを作成（オフライン処理）。
- c. 水中のガレキ掘削、破碎等。（b. で作成したイメージを見ながら）
 7. オペレータは付近の水上から操作、建機のみ水没。
 - イ. 水深が浅いところは、オペレータ乗車。
 - ウ. 建機には作業時の補助情報提供するための各種センサを装着。補助情報は、車両前方地盤強度、掘削後地形、把持物情報（質量、硬/軟）など。
- エ. 走行装置（脚まわり）は、戦闘車両に近い方式、更に障害物に強い（小型ロボットのような）方式を比較する。
- d. クローラダンプでの運搬。
- e. 作業後、再度航走体等を用いて水中地形計測。
 7. 水は濁っている。
- f. 3D 処理、工事計画（b. 項）にもどる。

図 5. 5. 2 ガレキ処理運搬システム（水中版）

以上の提案の主要な開発項目と所要資金、開発期間を表5に示す。資金、期間ともに現時点での概略推定であり、今後具体的なスペックを想定し、より精査する必要がある。

表5 主要な開発項目と所要資金、開発期間

開発項目	開発費用	開発期間
5.2 遠隔操作型ガレキ処理システム	3 億／年	1 年～3 年
5.3 災害対応に最適な運搬技術 (1) 短期課題 ・既存技術の運搬車両への織込み -マルチクローラ -多輪走行 -パノラマ画像伝送 等 (2) 中期課題 ・要素技術の改良開発と車両への織込み -可変形状クローラ -アクティブサスペンション -ステレオパノラマ画像伝送 -自動燃料給油システム -走行操作支援技術 等 (3) 長期課題 ・新規要素技術の開発 -フレキシブルクローラ -被災地の自律走行 -走行臨場感のオペレータ呈示 等	3 億円 (車両実証実験含む) 6 億円 (車両実証実験含む) 3 億円 (要素技術実証実験による有望技術の抽出)	1～2 年 3～5 年 5～年
5.4 大型構造物躯体解体・構築技術 ・広範囲対応遠隔現況/変位測量・3DCAD 化技術 ・遠隔解体作業装置(構造物の解体・搬出等) ・施工ロボット搬出入用無人化機械 ・3DCAD 躯体遠隔解体支援システム ・3D映像システム操作支援システム ・遠隔操作不具合対処技術(修理・部品交換等)	1 億円 (2 年) 3 億円 (3 年) 1 億円 (1 年) 1 億円 (2 年) 2 億円 (3 年) 2 億円 (2 年) 計 10 億円	3 年

5. 5 瓦礫処理運搬システム(水中版) (1) 水陸両用ベースマシン技術 双腕でないショベル1台、クローラ1台 (2) 水中作業支援システム ナビのハード+αではなく、建機へのセンサー プローブ取付、作業支援情報表示(ソフトとハード) (3) 作業計画実施支援システム ナビソフトではなく、高精度ソナー(自律走行体 はなし、船舶等の簡易手段で代用)と作業計画支援 ソフト(表示機能含む)	6.1 億円 3 億円 3 億円	3 年 (1 年目車両 設計、 2 年目製作、 3 年目試験) 3 年 (1-2 年目 システム設 計 3 年目 試験・改良)
---	---------------------------------------	---

6. 原子炉解体用ロボットシステムに関する提言

6.1 総論

原子力発電所は、運転を終了した後、『廃止措置』（廃炉と略す）として、原子炉施設の解体撤去、撤去物の処理・処分、及び跡地有効利用のための作業が行われる。2011年9月末現在、電気出力3万kW以上の非軍事用発電炉では、世界で121基が運転を終了し、うち11基が廃止措置を完了している。日本では、ふげん、東海発電所、浜岡原子力発電所1、2号機が廃止措置段階にあり、事故を起こした福島第一原子力発電所1～4号機も廃炉にすることが決定されている。日本では唯一、旧日本原子力研究所の動力試験炉JPDRが廃止措置を完了しており、その実績は貴重であるが、電気出力が1.5万kWであるので上記の数には含まれない。

廃炉工事は放射性物質で汚染もしくは放射化された設備機器や構造物を解体撤去することから、作業員の被ばく線量の管理と発生する放射性廃棄物の処理・処分が重要な課題である。

1) 作業員の放射線被ばく線量の管理・低減

原子力安全委員会が昭和60年12月19日に決定した「原子炉施設の解体に係る安全確保の基本的考え方」には以下のように規定されている。

- i. 高線量率の場所における作業、及び高線量率の物質を取り扱う作業に当たっては、適切な遮蔽体又は遠隔操作装置を活用すること。
- ii. 作業を実施する前に目標線量を設定し、適宜、被ばく線量と比較検討し、被ばくの低減に反映させること。
- iii. 作業開始前に放射線モニタリングを行い、作業目標線量の設定、及び適切な放射線管理計画の立案に資すること。

これまでの世界の廃炉工事における被ばく線量のデータを表6.1.1に示す。総被ばく線量の目標数値は決められていないが、今後の大型の原子炉施設や事故で汚染された施設の廃炉工事では被ばく線量が増加するため、これを最少化する方策が求められる。

表6.1.1 廃止措置における総被ばく線量の実績

No.	プラント	電気出力	炉型	総被ばく線量	備考
1	JPDR	1.5万kW	BWR	0.3人・Sv	
2	SHIPPING・ポート	5.2	PWR	10.1	
3	エルクリバー	2.4	BWR	0.75	
4	TMI	96	PWR	55.4	注1

注1：溶融燃料取出し迄、解体未実施

2) 放射性廃棄物の処理・処分

原子炉解体に伴い発生する放射性廃棄物は低レベル放射性廃棄物に分類されるが、表6.1.2に示すように、放射性物質濃度の高いものから順に、L1、L2、L3、CR（クリアランスレベル）に区分され、その処分方法が定められている。

表 6. 1. 2 低レベル放射性廃棄物の区分と処分方法

区分	定義	代表核種の濃度	処分方法
L1	比較的濃度高	Tc99<100テラBq/t α線物質<100ギガBq/t	【余裕深度埋設】地下50～100m程度の人工構築物中に埋設し300年間管理
L2	比較的濃度低	Co60<1ベタBq/t Cs137<100テラBq/t α線物質<10ギガBq/t	【コンクリートビット埋設】地下10m程度の人工構築物中に埋設し300年間管理
L3	濃度極低	Co60<10ギガBq/t Cs137<100メガBq/t	【素掘トレンチ埋設】直接地下に埋設し30～50年間管理
CR	汚染レベル極低 放射性物質扱い不要	—	通常の産業廃棄物として処分

〔出展〕文部科学省放射線審議会事務局：資料第24-3号「日本における放射性廃棄物の埋設処分の概要について」（平成21年1月13日）

発電用原子炉施設の解体に伴う廃棄物の発生量を表 6. 1. 3 に示す。100万kW級の原子炉の解体で約50万tの廃棄物が発生する。L1～L3廃棄物は全体の中で小さな割合ではあるが、輸送・処分に要する費用が大きいことから、二次廃棄物について考慮する必要はあるものの、除染によって高濃度の廃棄物量を極力減らすなど、全体コストの最少化を図る必要がある。

表 6. 1. 3 原子炉施設の廃止措置に伴い発生する廃棄物量

区分	炉型			PWR（110万kW級）		
	金属	コンクリート	合計	金属	コンクリート	合計
比較的濃度高	0.01	0	0.01	0.01	0.01	0.02
比較的濃度低	0.2	0.1以下	0.2	0.2	0.1以下	0.3
濃度極低	1以下	1以下	1	0.2	0.1	0.3
放射性物質の扱い不要	3	50	53	4	45	49
合計	4	50	55	4	45	50

〔出展〕総合エネルギー調査会：原子力部会報告書、商業用原子力発電施設の廃止措置に向けて（1997年1月）を元に作成、端数処理のため合計は合わないことがある。

3）本プロジェクトの位置づけ

国内外の廃炉の実績により解体工事が技術的に可能であることは実証されているが、これまでの実績は初期の小型炉が中心であり、今後の大型発電用原子炉の解体工事は新たな挑戦である。特に福島第一原子力発電所の原子炉施設は、原子炉建屋や機械・電気品が高度に汚染されており、原子炉解体ロボットによる無人化作業のニーズが大きい。本プロジェクトでは、これまでの国内外の実績を参考にして、原子炉施設を安全に、かつ合理的・経済的に解体するために必要とされる技術開発項目とその開発・運用体制について検討した。

6. 2 原子炉解体手順と技術開発項目の提案

原子炉解体の作業手順を図 6. 2. 1 に示す。全体を通して、①作業者の被ばく線量低減、②高濃度の放射性廃棄物の最少化、③解体作業コスト低減・工期短縮、を図ることが重要であり、これらを達成するために必要であると考えられる5つの技術開発項目を以下に提案する。

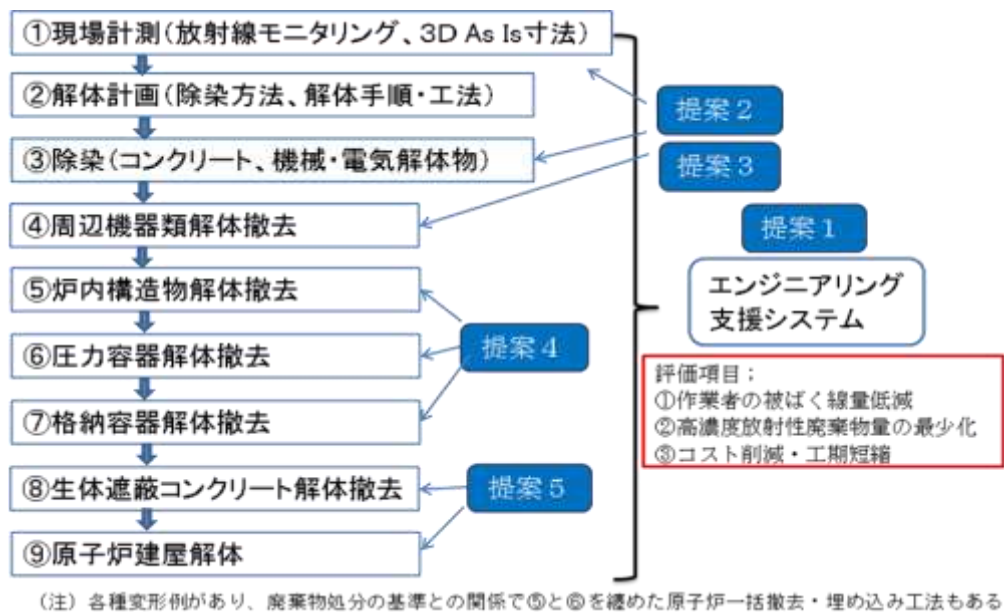


図 6. 2. 1 原子炉解体の手順と評価項目

(1) 災害対応エンジニアリングシステム (提案1)

原子炉事故等の大きな困難が伴うような事態において、事故の拡大を防ぎ、また二次災害を回避するために、救助・復旧の作業計画を適切かつ効率的に立案することが要求される。そのためには作業方法・工程、作業量・作業時間、被ばく線量、廃棄物量などを事前検討し最適化する必要があるが、様々な要因が輻輳する事故の場合には、作業計画の策定は非常に困難なものとなる。これを支援するため、次の三つの要素から構成される災害対応エンジニアリングシステムの開発を提案する。

○**災害現場計測**；作業計画の策定においては、現場の状況を正確に把握することが重要であり、計測によって建屋や設備の3次元情報や、空間中のガス、液体、放射線量等に関する環境情報を収集する必要がある。近年、例えば水中も含む現況計測(現場の3次元スキャンによるモデル構築)やSLAM技術(自己位置推定と環境地図作成の同時実行)によるマップ作成技術など、様々なセンシング技術が開発されているが、災害現場に適用するための開発が必要である。

○**災害作業空間データベース**；上記の収集された情報を活用するためには、それらを一元的にデータベース(DB)化し、災害対応に係わる全てのステークホルダーが共有できるようにすることが重要である。また計測情報だけでなく、既存の情報も収集し、設備・部品、建築時モデル、現場の実画像・動画像、放射能インベントリ・分布等の情報を統合化し、災害作業空間DBを構築する。そして、災害現場の状況を容易にかつ正確に把握できるDBの可視化・検索機能を用意する。

○**災害対応エンジニアリング支援**；上記DBを用いて災害対応の計画策定を支援する機能を開発する。例えば、作業者の被ばく量を評価したり、瓦礫撤去や解体などの作業の物理シミュレーションを行い、作業の可能性や効率を評価し作業工程の立案を行う。また、ロボットを用いた作業では、把持・切断・接合・搬送の計画を行い、直観的な操作インターフェースでポジショニング・

衝突回避を行う機能を実現する。これらの機能には、C A D（コンピュータによる設計）やC A E（工学シミュレーション）によるデジタルエンジニアリング技術を利用できる。

なお、実験フィールドに原子炉設備のモックアップを設置してこのシステムの検証を行うことはきわめて有用である。

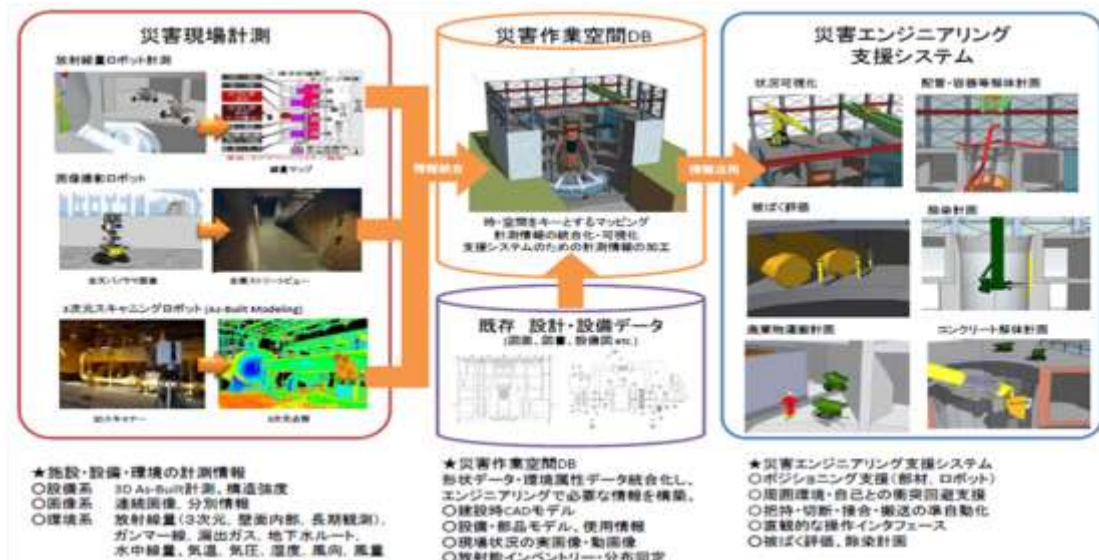


図6. 2. 2 災害対応エンジニアリングシステム

（2）コンクリートサンプリング・表面除染ロボット（提案2）

大型発電用原子炉の解体や一般の原子炉の事故時において、放射能レベルが高く人が近寄れない場合に、人に替わって遠隔でコンクリートのサンプリングや深さ数十mmまでの浸透汚染部除去を行う作業ロボットを提案する。これを使った作業環境改善や解体事前除染により作業の合理化や安全性を高めることができる。開発項目は、①原子炉施設内の段差や障害物の多い環境内を除染対象部位まで移動出来る移動プラットフォーム、②移動プラットフォームに搭載し各種作業（除染、浸透汚染を含む計測調査など）を行う作業モジュール、③これらを遠隔操作するための通信制御技術、④除染時の切削粉塵によるサンプリング試験方法、⑤汚染レベルに応じた除染廃棄物の分別回収方法、⑥その他（機器放射線防護、動力供給など）である。

福島第一原子力発電所の場合は通常の原子炉解体とは状況が大きく異なるが、作業環境改善を図るための除染や共通移動プラットフォームとして利用できる。調査・軽作業ロボットとして、日本には千葉工大の探査用防災ロボット（Quince）や日本原子力研究開発機構のJ A E Aシリーズ等があり、海外では軍事用調査ロボット（TALON、PackBot）などがあるが、提案のような作業ロボットはない。

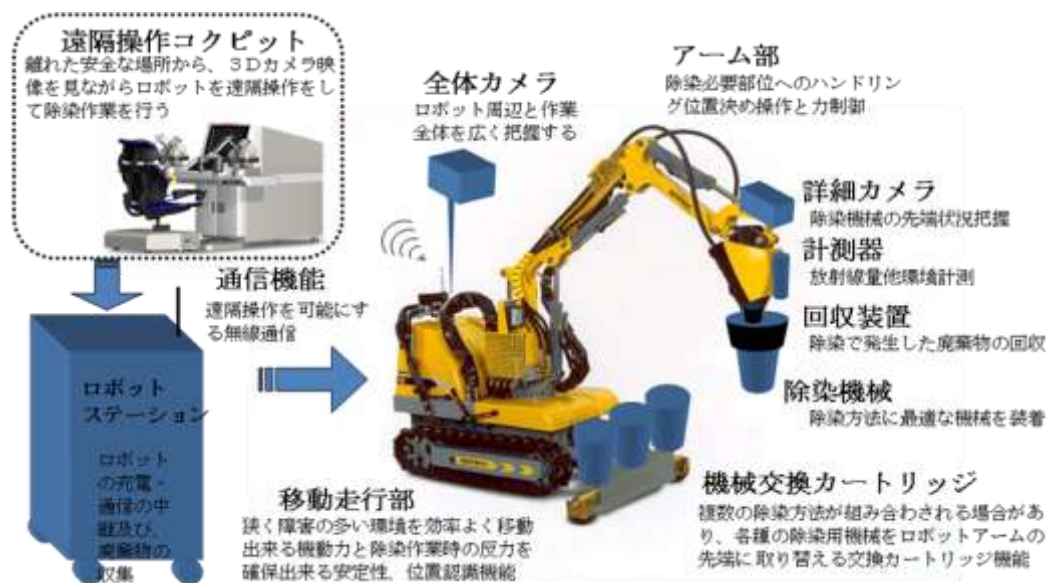


図6. 2. 3 コンクリートのサンプリング・表面除染ロボットのイメージ

(3) 機械・電気品解体物の放射線モニタリング・除染・分別技術（提案3）

原子炉施設の解体時に発生する機械・電気品の放射性廃棄物の処理・処分費用は高価であり、濃度が高いものほど費用がかかるため、合理的、経済的に処理・処分することが重要である。そのためには、解体対象物の汚染の状況に応じて、①解体前に解体対象物の線量をモニタリングし除染する、②線量をモニタリングしながら解体・分別・収納する、③解体後に解体品の線量を測定し分別・収納することが考えられ、これらを無人作業で実施するシステムの開発を提案する。特に福島第一原子力発電所では機械・電気品が高度に汚染されているためその必要性が高い。

構成技術として、①機械・電気品の放射線モニタリング・除染技術、②解体・分別システム、③自動分別に適した廃棄物収納容器の開発が必要であり、全体として運用方法やメンテナンス方法等を考慮したシステムを構築する。

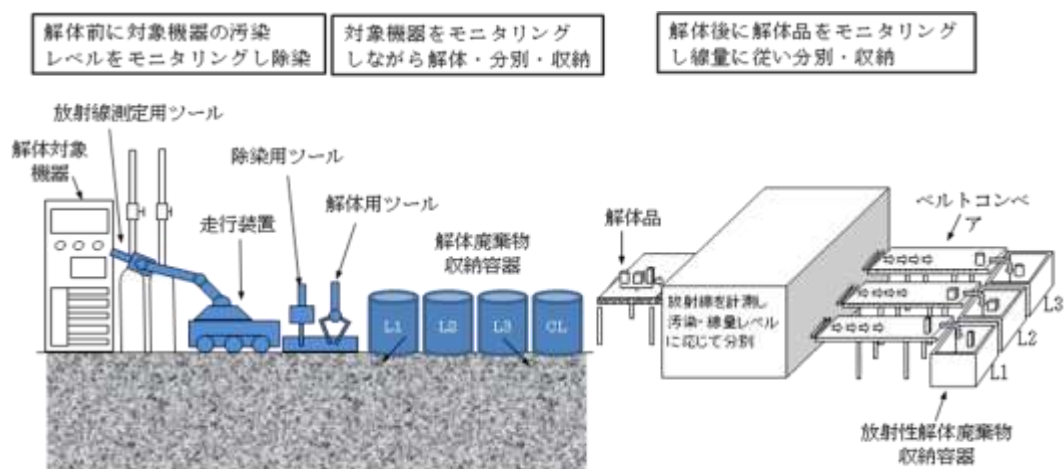


図6. 2. 4 機械・電気品解体物のモニタリング・除染・分別技術のイメージ

（４）原子炉解体ロボットシステム（提案４）

放射線量が高い場所での解体・撤去作業は、作業員の被ばくを避けるために遠隔操作で行う必要がある。これまで、通常の原子炉の解体では、解体対象物に適合する寸法や機能を持った装置を開発・適用することにより作業が行われてきた。しかし、福島第一原子力発電所では、損傷・変形した炉内構造物や原子炉容器等の解体・撤去を行う必要があるため、想定外に変形した構造に対応できる遠隔解体装置の開発が必要となる。また、通常の場合でも、対象プラント毎に開発する必要がなければ工事コストを削減できることから、種々の寸法・形状に対応できる解体ロボットの開発が望まれる。更に、従来の遠隔解体装置のメンテナンス作業は、作業員が接近して行う必要があり、被ばくの問題があることから、無人でメンテナンス作業を行うことができるシステムの開発が望まれる。

以上のことから、炉型や出力による解体対象物の寸法・形状の差異や事故等による変形があっても対応可能な解体ロボットシステムの開発を提案する。システムのイメージを図6. 2. 5に示すが、汎用性を有する装置を組み合わせることにより、様々な状況に対応できるロボットシステムの構築を目指す。

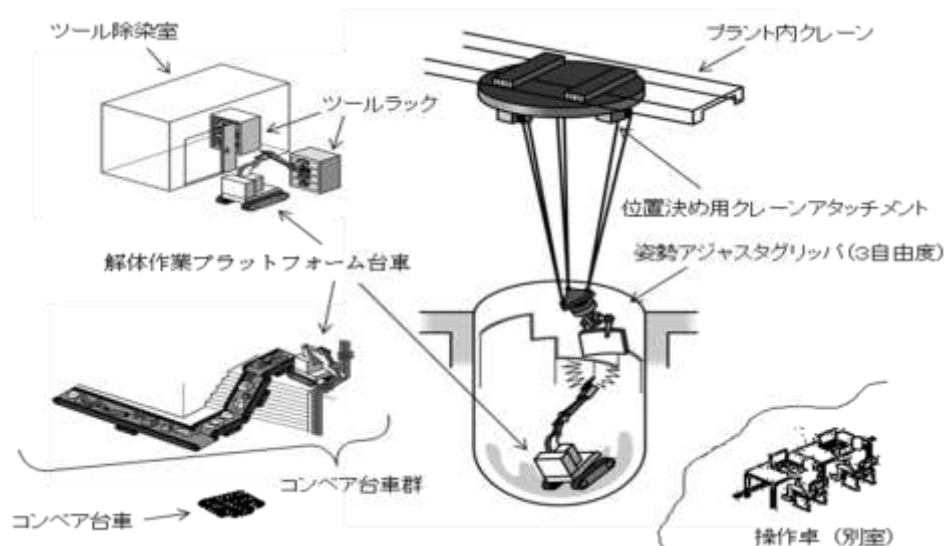


図6. 2. 5 原子炉解体ロボットシステムのイメージ

（５）コンクリート構造物の切断技術のロボット化（提案５）

原子炉施設のコンクリート構造物は堅牢で、生体遮蔽壁などは壁が厚く一部は放射化あるいは放射能汚染していることから、これらの解体には、作業員の放射線被ばくや二次廃棄物の発生を極力抑制できる技術が必要となり、遠隔操作ロボットでの作業が求められる。また、発生する放射性廃棄物の処分費用は非常に高価で放射能濃度の高い廃棄物ほど高価となるため、コンクリート構造物の放射能レベルに応じて、速く、正確に対象となる部位のみを分別して解体する技術が必要となる。

以上のことから、①コンクリート構造物の切断ツール（ディスクカッター、コアカッター等）、②解体物の把持・積込みツール、③解体物の搬出ツール、④二次廃棄物（切断時の粉塵等）の回

収・処理ツール、⑤トラブル時対処ツール（ロボットの回収・修理・部品交換等）などから構成されるコンクリート建造物の切断技術のロボット化を提案する。図6. 2. 6にイメージ図を示す。

福島の場合は通常の原子炉施設の廃止措置とは状況が大きく異なるが、建屋内のがれき撤去、作業口等の拡張や観測孔の削孔、及び汚染した原子炉建屋等の解体に利用できる。



図6. 2. 6 コンクリート建造物の切断技術ロボット化のイメージ

以上の5つの提案の主要な開発項目と所要資金、開発期間を表6. 2. 1に示す。資金、期間ともに現時点での概略推定であり、今後具体的なスペックを想定し、より精査する必要がある。

表6. 2. 1 主要な開発項目と所要資金、開発期間

テーマ名	概要	所要資金	期間
【提案1】 災害対応エンジニアリング 支援システム	作業現場の状況を正確に把握するために計測した各種のデータに基づき、最新のデジタル技術を活用して災害エンジニアリングを支援するシステムを開発する。	3億円	3年間
【提案2】 コンクリートサンプリング・ 表面除染ロボット	段差や障害物がある原子炉内において、除染部位まで移動できる共通移動プラットフォームを開発する。さらに、このプラットフォームに搭載する作業モジュール、通信制御技術、除染時切削粉塵によるサンプリング試験方法などを開発する。	10億円	5年間
【提案3】 機械・電気品解体物の放射線 モニタリング・除染・分別 技術	解体前に、解体対象機器の放射能汚染レベルをモニタリングし、除染を実施する。もしくは解体対象機器の線量をモニタリングしながら解体を行い、解体品の線量に従い分別・	10億円	4年間

	収納する。もしくは、解体後に、解体品の線量を測定し、線量に従い分別・収納する。こうすることで放射性廃棄物の処分費を削減する。このための機械・電気品の放射線モニタリング・除染・分別技術を開発する。		
【提案 4】 原子炉解体ロボット、原子炉解体システム	炉形や出力による廃棄対象物の寸法・形状の差異や、事故等による変形があっても対応可能な解体ロボットシステムを開発する。また、遠隔でのメンテナンスが可能な解体ロボットシステムを開発する。	10 億円	4 年間
【提案 5】 コンクリート構造物の切断技術のロボット化	コンクリート中の放射能レベルに応じて、対象となる部位を、速く正確に区分して、遠隔操作で解体する為に必要となる技術の開発として、①切断技術（ドライ切断）、②切断片の把持・積み込み技術、③解体物搬出技術、④二次廃棄物回収・処理技術、⑤トラブル時等対処技術（ロボット回収・修理・部品交換等）を開発する。	10 億円	5 年間

6.3 開発・運用体制について

日本では、廃炉は事業者の責任で実施されることになっており、その費用を積み立てる制度も運用されている。一方で、これまでは市場が未成熟であることに加えて、原子炉解体には難度が高い多様な特殊技術を要することから、個々の組織による活動には限界があるという事情があり、実用技術の開発は進んでいない。

役目を終えた原子炉を安全かつ合理的に解体することは重要な社会的ニーズである。大学、研究開発機関、事業者、総合土木建築会社、原子炉機器メーカー、ロボットメーカーなどが結集し、国の支援を得て原子炉解体の基盤技術を開発することにより、社会のニーズに応えとともに、産業競争力の強化を図ることが重要である。また、廃炉工事の実作業においても、個々の企業がばらばらに対応するのではなく、専門的組織体を作って人材・技術の育成・維持を図り、国内外の市場ニーズに対応していくことが考えられる。

また、解体のシミュレーションやロボットシステムの実証試験を行うため、原子炉設備のモックアップを設置した実験フィールドを整備することが望まれる。

7. 産業競争力強化の観点から期待される効果

ロボット産業は、今後我が国の製造業のコアとなる産業として期待されている。またそれを支えるロボット技術はロボットのみならず、自動車、情報機器等広い範囲の製品に導入されその機能や性能を向上させることとなる。日本は長く産業用ロボットの分野で世界をリードし、技術的にも世界のトップレベルを誇ってきた。しかし、最近特に産業用以外の部分で米国、欧州、韓国、中国等の追い上げは激しい。防災用のロボットについては現在まで軍事用のものを除いては実需がないため、我が国においても研究は進められてきたものの製品化や現場への配備という面では遅れをとっており、それが今回の福島原発事故において、当初投入できるロボットがないという事態につながった。防災ロボットは最先端のロボット技術の集大成であるといっても過言ではなく、その意味で日本の競争力は大きく損なわれたといえる。

しかし、今回の事故で明らかのようにこうした技術は今後日本ばかりでなく、世界における安心・安全を確保するために不可欠な技術である。この分野において我が国は潜在的には世界一流の能力を有しており、この機会にそれを産業に結びつける必要がある。

捜索・偵察ロボットを見ても原子炉事故現場での直接のニーズは大きくないが、非常時用の装備としての需要や通常災害時における利用のための需要は大きい。もちろんそのためには今よりもコンパクトで性能が高く安価で使い勝手のよい製品が出現する必要がある。また、事故・災害時以外のニーズも安全・安心の確保のため工場や施設内のパトロール、メンテナンスへの応用等より大きいものが期待される。

無人化施工技術についても災害時のみならず、大規模鉱山や、大規模建築現場など今後応用分野として大きなマーケットが見込まれる。

原子炉解体ロボットについては、今後世界で年間二十数ヶ所のペースで発電用原子炉が廃炉されるといわれており、いわゆる「廃炉ビジネス」の中核技術として解体ロボットの需要は大きい。むしろ最先端のロボット装備を保有して解体ビジネスを国際的に展開するような方向も考えられる。

以上のように我が国の産業競争力を強化するため、この報告書で提案された技術開発や運用体制の実現を図っていくべきである。

8 . 提言の実現のために

今回のプロジェクトにおいては提言を取りまとめると同時に、関係の省庁に対し予算化等の対応について働きかけを行い、その結果平成23年度第三次補正予算や平成24年度予算においてロボット関係の予算が認められた。具体的には、表8-1に示すところであるが、経済産業省においては東京電力福島第一原子力発電所1～4号機の廃止措置に向けた研究開発で40億円、災害対応無人化システム研究開発プロジェクトの研究開発に10億円が計上されている。また総務省では災害対応に資するネットワーク・ロボット技術の研究開発に10億円、防衛省では無人偵察システムの開発等に10億円、また国土交通省では大規模災害に迅速に対応可能な無人化施工技術の推進に1200万円が計上されている。しかし文部科学省が要求した自然災害対応ロボットの研究開発予算が認められなかったことなど、原子力事故対応の部分以外については不十分であり、また、運用体制については、政府ベースではまだ検討もほとんど行われていない。

福島第一原子力発電所事故を収束し、また地震、津波をはじめとする自然災害や産業事故に対して迅速に対応可能なロボット関連技術の開発とその運用体制については引き続き内容を精査すると共に、その実現のための方策につき提言していく必要がある。

表 8-1 災害対応ロボット関連の各省庁の予算

経済産業省	東京電力福島第一原子力発電所1～4号機の廃止措置に向けた研究開発	三次補正 20 億円 H24 年度 20 億円
	災害対応無人化システム研究開発プロジェクト	三次補正 10 億円
総務省	災害対応に資するネットワーク・ロボット技術の研究開発	三次補正 988 百万円
国土交通省	大規模災害に迅速に対応可能な無人化施工技術の推進	H24 年度 12 百万円
防衛省	ゲリラや特殊部隊による攻撃への対応特殊部隊攻撃等への対処	
	無人偵察機システムの取得	H24 年度 4 億円
	遠隔操縦式小型偵察システムの研究	H24 年度 6 億円

参考資料

参加メンバーリスト

		機関名	氏名	参加 WG		
				防災	無人化	解体
1	PL	東京大学	浅間 一	○	○	○
2	SPL/WG3 主査	日立GEニュークリア・エナジ	齊藤 莊藏			○
3	WG1 主査	東北大学	田所 諭	○		
4	WG2 主査	鹿島建設	鶴岡 松生		○	
5	企業委員（会員）	鹿島建設	浦嶋 将年			○
6		鹿島建設	加藤 誠	○		
7		鹿島建設	宮崎 康信			○
8		鹿島建設	植木 睦央		○	
9		清水建設	山崎 雄介			
10		清水建設	野澤 剛二郎			
11		清水建設	熊谷 仁志			○
12		清水建設	鈴木 正憲		○	
13		新日本製鐵	徳納 一成	○		
14		新日本製鐵	大石 直樹	○		
15		新日本製鐵	高田 亮平	○		
16		東芝	湯口 康弘	○		
17		東芝	廣瀬 行徳		○	
18		東芝	栗原 賢二			○
19		日立製作所	橋本 安弘	○		
20		日立GEニュークリア・エナジ	米谷 豊	○		
21		日立GEニュークリア・エナジ	園部 正義			○
22		富士通研究所	神田 真司		○	
23		富士通研究所	村瀬 有一	○		
24		富士通研究所	森田 俊彦			
25		三菱重工業	大谷 知未			○
26		三菱重工業	細江 文弘	○		
27		三菱重工業	後藤 通		○	
28		三菱重工業	見持 圭一	○		
29		三菱電機	奥田 晴久	○		
30		三菱電機	野田 哲男	○		
31		三菱電機	荒金 淳	○		
32	企業委員（会員外）	熊谷組	北原 成郎		○	○

33		熊谷組	松村 修治			○
34		コマツ	尾崎 光則		○	
35		コマツ	吉瀬 裕		○	
36		大成建設	立石 洋二		○	
37		日立建機	生田 正治			
38		日立建機	江川 栄治		○	
39		安川電機	横山 和彦		○	
40		竹中工務店	星野 春夫	○		○
41		竹中工務店	鈴木 稔		○	
42	学識経験者	京都大学	松野 文俊	○		
43		京都大学	根 和幸	○		
44		早稲田大学	菅野 重樹			○
45		早稲田大学	岩田 浩康			○
46		東京大学	鈴木 宏正			○
47		産業技術総合研究所	松本 治	○		
48		産業技術総合研究所	神村 明哉	○		
49	団体(オブザーバー)	日本ロボット学会	細田 祐司	○		○
50		日本ロボット工業会	富士原 寛	○	○	○
51		日本ロボット工業会	濱田 彰一			○
52		日本ロボット工業会	畑 能正		○	
53		日本ロボット工業会	三浦 敏道	○		
54		情報通信技術委員会	前田 洋一			
55		情報通信技術委員会	坂口 尚			
56	省庁(オブザーバー)	経済産業省	藤木 俊光			
57		経済産業省	奥田 修司			
58		経済産業省	岡崎 潤	○		
59		経済産業省	北島 明文	○		
60		文部科学省	迫田 健吉	○		
61		文部科学省	假屋園 礼文	○		
62		国土交通省	宮武 一郎		○	
63		国土交通省	山口 崇		○	
64		国土交通省	山元 弘		○	
65		国土交通省	森山 裕二	○		
66		土木技術研究所	藤野 健一		○	
67		総務省	竹内 芳明			
68		NEDO	大久保 一彦			

69		N E D O	真野 敦史			
70		N E D O	川島 正	○		○
71		N E D O	高津佐 功助	○		○
72		日本原子力研究開発機構	川妻 伸二	○	○	○
73		産業競争力懇談会	中塚 隆雄			
74	事務局	製造科学技術センター	瀬戸屋 英雄	○	○	○
75		製造科学技術センター	加藤 雅弘	○	○	○
76		製造科学技術センター	間野 隆久	○	○	○

会議開催状況

1. 合同会議の開催

合同会議

回	月日	時間	場所	内容
第1回	6/27	15:00 - 18:00	東大・工14号館146号講義室	キックオフミーティング
第2回	8/26	15:00 - 18:00	東大・工1号館15号講義室	提案内容の取りまとめ
第3回	1/23	15:30 - 18:00	東大・8号館85講義室	最終報告に向けた審議

2. WGの開催

災害ロボットを3テーマ（①防災ロボット、②無人化施工システム、③原子炉解体ロボット）に分類し、それぞれをWGにて検討した。

WG1「防災ロボット」田所諭主査

回	月日	時間	場所	内容
第1回	6/27	15:00 - 18:00	東大・工14号館146号講義室	キックオフミーティング
第2回	7/13	16:00 - 18:00	東大・工14号館330号講義室	課題の抽出
第3回	7/27	10:00 - 12:00	東大・工14号館330号講義室	課題の整理、作業分担決定
第4回	8/25	13:00 - 15:00	東大・工14号館325号講義室	提案内容の審議1
第5回	9/14	10:00 - 12:00	東大・工14号館330号講義室	提案内容の審議2
第6回	10/20	10:00 - 12:00	東大・工14号館330号講義室	提案内容の審議3
第7回	12/14	16:30 - 18:00	東大・工14号館330号講義室	最終報告へ向けての審議

WG2「無人化施工システム」鶴岡松生主査

回	月日	時間	場所	内容
第1回	6/27	15:00 - 18:00	東大・工14号館321号講義室	キックオフミーティング
第2回	7/6	13:00 - 15:00	鹿島建設会議室	課題の抽出
第3回	7/25	13:00 - 15:00	鹿島建設会議室	課題の整理、作業分担決定
	8/2	10:00 - 12:00	鹿島建設会議室	運搬サブWG
	8/3	10:00 - 12:00	熊谷組会議室	構造物解体・構築サブWG、瓦礫処理サブWG 合同ミーティング
第4回	8/23	14:00 - 16:00	鹿島建設会議室	提案内容の審議1
第5回	10/7	9:30 - 11:30	鹿島建設会議室	提案内容の審議2
	10/14	13:00 - 15:30	清水建設会議室	瓦礫処理サブWG
第6回	12/21	9:30 - 11:30	鹿島建設会議室	最終報告に向けての審議

WG3「原子炉解体ロボット」齊藤莊藏主査

回	月日	時間	場所	内容
第1回	6/27	15:00 - 18:00	東大・工14号館330号講義室	キックオフミーティング
第2回	7/11	13:00 - 15:00	MSTC 会議室	課題の抽出
第3回	7/26	13:00 - 15:00	真福寺会議室	課題の整理、作業分担決定
第4回	8/1	13:00 - 15:00	MSTC 会議室	提案内容の審議1
第5回	8/23	13:00 - 15:00	真福寺会議室	提案内容の審議2
第6回	10/4	13:00 - 16:00	日立製作所会議室	提案内容の審議3
第7回	12/15	10:00 - 12:00	MSTC 会議室	最終報告に向けての審議

関係省庁への提案説明

提案先	月日	時間	相手先場所	内容
経済産業省	9/15	15:00 - 17:30	産業機械課、原子力政策課	提案内容の説明
文部科学省	9/21	18:00 - 19:40	地震・防災研究課	提案内容の説明
国土交通省	9/22	17:40 - 18:20	公共事業企画調整課、砂防部	提案内容の説明
総務省	11/4	16:40 - 17:50	電波政策課、基幹通信課	提案内容の説明
災害ロボット研究会	12/8	10:00 - 11:40	経済産業省会議室（出席：文科、経産、国交、総務、防衛、電事連他）	中間報告の説明

産業競争力懇談会（COCN）

東京都千代田区丸の内一丁目 6 番 6 号 〒100-8280

日本生命丸の内ビル（株式会社日立製作所内）

Tel : 03-4564-2382 Fax : 03-4564-2159

E-mail : cocn.office.aj@hitachi.com

URL : [http : //www.cocn. jp/](http://www.cocn.jp/)

事務局長 中塚隆雄