

平成 29 年度 博士論文



原子力緊急時ロボットの
運用方策構築に関する研究

指導教員 浅間 一 教授

川妻 伸二

目次

目次	i
図リスト	v
表リスト	ix
第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	2
1.1.1 福島第一原子力発電所事故	2
1.1.2 原子力保守用ロボット	4
1.1.3 原子力緊急時ロボット	8
1.2 原子力緊急時ロボットの特徴と要求機能	12
1.2.1 即応性	13
1.2.2 信頼性	15
1.2.3 除染保守性	16
1.2.4 作業性	16
1.3 本研究の目的	18
1.4 本論文の構成	19
第2章 先行事例	21
2.1 先行事例の調査方針	22
2.2 即応性	23
2.2.1 原子力緊急時ロボットの運用組織等	23
2.2.2 緊急時のロボットと周辺機材の搬送	25
2.2.3 事故発生現場でのロボット操作	28
2.2.4 現場適応性	30
2.2.5 事故発生現場での可搬性	32
2.3 信頼性	33
2.4 除染保守性	36

2.5 作業性.....	38
第3章 要求機能の体系化.....	41
3.1 要求機能.....	42
3.1.1 即応性に係る機能構成と機能要素.....	43
3.1.2 信頼性に係る機能構成と機能要素.....	52
3.1.3 除染保守性に係る機能構成と機能要素.....	58
3.1.4 作業性に係る機能構成と機能要素.....	61
3.2 機構要素と構造要素.....	64
3.2.1 即応性に係る機構要素と構造要素.....	64
3.2.2 信頼性に係る機構要素と構造要素.....	67
3.2.3 除染保守性に係る機能構成と機能要素.....	69
3.2.4 作業性に係る機能構成と機能要素.....	70
3.3 原子力緊急時ロボットの課題.....	73
3.3.1 即応性の課題.....	73
3.3.2 信頼性に関する課題.....	77
3.3.3 除染保守性に関する課題.....	79
3.3.4 作業性に関する課題.....	80
第4章 システム化.....	83
4.1 事故発生現場に直ちにロボットを搬送・運用する上での課題.....	84
4.2 ロボットのシステム化とロボット操作車の提案.....	86
4.3 ロボットのシステム化とロボット操作車の開発.....	88
4.3.1 ロボットの投入, 操作および回収の時間短縮.....	88
4.3.2 遮蔽操作ボックス.....	90
4.3.3 ロボット操作車に搭載し統合化すべきその他の周辺機材.....	93
4.4 システム化とロボット操作車の評価.....	97
4.5 まとめ.....	99
第5章 ユニット化.....	101
5.1 事故発生現場でのロボットシステムの課題.....	102
5.1.1 JAEA-3号ロボットの投入準備.....	102
5.1.2 瓦礫や仮設物の多い事故発生現場での新要求.....	104
5.2 ロボットシステムのユニット化による可搬性向上の提案.....	106
5.3 ロボットシステムのユニット化.....	107
5.4 ロボットシステムユニット化の評価.....	112
5.4.1 JAEA-3号ロボットの福島第一原子力発電所2号機への投入.....	112
5.4.2 分割化の基本方針の策定.....	115
5.5 まとめ.....	117

第6章 被曝管理.....	119
6.1 被曝管理の必要性.....	120
6.2 耐放射線性の概略評価と被曝管理方法の策定の提案.....	124
6.3 耐放射線性の概略評価と被曝管理方法の策定.....	125
6.3.1 ロボットの耐放射線性の律速部品の特定.....	125
6.3.2 半導体素子耐放射線性評価と管理目標値.....	126
6.3.3 運用形態による律速半導体素子の特定.....	127
6.3.4 過去の照射試験結果から耐放射線性の概略評価.....	127
6.3.5 照射試験による耐放射線性評価.....	128
6.3.6 ロボット等の故障時の影響リスクによる管理目標値.....	129
6.3.7 放射線環境下での管理方法の策定.....	130
6.4 耐放射線性の概略評価と被曝管理方法の有効性.....	131
6.5 まとめ.....	133
第7章 除染方策.....	135
7.1 汚染ロボットの除染の課題.....	136
7.2 ロボット等の除染方策の提案.....	137
7.3 ロボット等の除染方策の策定.....	138
7.3.1 汚染管理目標値による保守時の被曝線量試算.....	138
7.3.2 残留汚染調査と汚染形態推測.....	146
7.3.3 ロボット等の汚染部位ごとの除染方策.....	150
7.4 ロボット等除染方策の有効性.....	151
7.5 まとめ.....	152
第8章 結論.....	153
8.1 結論.....	154
8.2 今後の課題.....	158
8.3 今後の方向性.....	160
謝辞.....	163
参考文献.....	167
研究業績書.....	173
付録.....	181

図リスト

図 1-1 2011年3月15日の福島第一原子力発電所1~4号機.....	2
図 1-2 2011.5.17付け東京新聞記事.....	3
図 1-3 1951年頃のRay Goertz博士.....	4
図 1-4 原子力保守用ロボットの例.....	5
図 1-5 原子力発電施設作業ロボット.....	6
図 1-6 両腕型バイラテラルサーボマニピュレータ (試作2号機).....	7
図 1-7 両腕型バイラテラルサーボマニピュレータ (実機).....	7
図 1-8 大型セル遠隔保守システムの例.....	8
図 1-9 屋外調査ロボット.....	10
図 1-10 屋内調査ロボット.....	10
図 1-11 屋内作業ロボット.....	11
図 1-12 原子力緊急時ロボットが行う一連の作業.....	12
図 1-13 原子力施設の過酷事故の発生要因.....	14
図 1-14 本論文の構成.....	19
図 2-1 ドイツKHGのロボット等.....	23
図 2-2 GroupeINTRAのロボット等.....	24
図 2-3 ドイツKHGのトレーラとコンテナ群.....	25
図 2-4 フランスGroupeINTRAのロボット操作・輸送用のバン.....	26
図 2-5 原子力安全技術センタが開発した運搬・制御車.....	26
図 2-6 日本原子力研究所が開発したRESQロボット用コンテナと発電機.....	27
図 2-7 製造科学技術センタが開発したロボットの操作・搬送コンテナ.....	27
図 2-8 LMF ロボットを牽引するSMF ロボット.....	28
図 2-9 33 m マストの先端に取り付けられた遠距離通信用無線アンテナ.....	28
図 2-10 遮蔽を施したロボット操作車EPPBと無人重機を操作するオペレータ.....	29

図 2-11	モニロボ用無線中継器	30
図 2-12	共通プラットフォーム MTS.....	31
図 2-13	福島第一原子力発電所事故に際し改造された Quince ロボット	31
図 2-14	Excavator と電子回路用鉛遮蔽箱	33
図 2-15	チェルノブイリ事故の直後に投入されたロボット	34
図 2-16	福島第一原子力発電所直後に投入されたロボット	35
図 2-17	除染保守用コンテナ内部	36
図 2-18	除染後も汚染が残った Brokk-800	37
図 2-19	ドイツ KHG のロボット群.....	38
図 3-1	原子力緊急時ロボットの要求事項.....	43
図 3-2	チェルノブイリ原子力発電所事故後投入された MF-2 ロボット	46
図 3-3	JAEA-3 号ロボット等を搭載して警戒区域に入るロボット操作車 RC-2. 48	
図 3-4	即応性に係る機能構成と機能要素.....	51
図 3-5	半導体の放射線損傷の形態	53
図 3-6	信頼性に係る機能構成と機能要素.....	58
図 3-7	除染保守性に係る機能構成と機能要素.....	61
図 3-8	作業性に係る機能構成と機能要素.....	63
図 3-9	即応性に係る機構要素と構造要素.....	66
図 3-10	信頼性に係る機構要素と構造要素	69
図 3-11	除染保守性に係る機構要素と構造要素	70
図 3-12	作業性に係る機構要素と構造要素	71
図 4-1	アメリカアイダホ国立研究所から提供された Talon.....	85
図 4-2	ロボット操作車 RC-1	86
図 4-3	ロボット操作車のイメージ	87
図 4-4	改装整備中のロボット操作車 RC-1 と偵察用ロボット JAEA-2 号.....	89
図 4-5	事故発生直後の福島第一原子力発電所の原子炉建屋付近の放射線量.....	90
図 4-6	操作遮蔽ボックス	91
図 4-7	鉄の実効線量透過率	92
図 4-8	遮蔽操作ボックスの軽量化策.....	93
図 4-9	遮蔽操作ボックス上部に取り付けた放射線計測器.....	93
図 4-10	放射線計測器の表示器	94
図 4-11	遮蔽操作ボックス前面に配置した機器	95
図 4-12	ロボット操作車に搭載した発電機	96
図 4-13	福島第一原子力発電所 3 号機前の高線量瓦礫.....	98
図 4-14	福島第一原子力発電所 1, 2 号機共用排気塔付近の高線量部位.....	98
図 4-15	システム化のまとめ	99

図 5-1 RESQ-A をベースに改造した JAEA-3 号ロボット.....	102
図 5-2 分割数と 1 ユニットの重量と運搬人数の概念図	107
図 5-3 三輪背負子	107
図 5-4 カメラ操作ユニットに取り付けたカメラモニタ.....	108
図 5-5 JAEA-3 号の「取っ手」	109
図 5-6 JAEA-3 号の脱着式ショルダーベルト	109
図 5-7 JAEA-3 号ロボットシステムの構成.....	110
図 5-8 JAEA-3 号のユニット 0,1,2,3,4	111
図 5-9 2 号機に投入された JAEA-3 号.....	112
図 5-10 旧体育館に保管されていた JAEA-3 号ロボットシステム.....	116
図 5-11 JAEA-3 号ロボットシステムのユニット 1	116
図 5-12 ユニット化のまとめ	117
図 6-1 福島第一原子力発電所 1 号機原子炉建屋内の放射線量.....	123
図 6-2 ロボット等の被曝管理方法の決定方法.....	126
図 6-3 用形態による律速半導体素子の特定方法.....	127
図 6-4 過去の照射試験結果から耐放射線性評価.....	128
図 6-5 本被曝管理を適用したロボット等	132
図 6-6 被曝管理のまとめ	133
図 7-1 除染方策の策定手順	137
図 7-2 ロボットを保守する際のイメージ図.....	138
図 7-3 無人建設重機の汚染分布のイメージ.....	142
図 7-4 放射線被曝量と人体への影響.....	145
図 7-5 福島第一原子力発電所内で除染を待つ Brokk-90.....	146
図 7-6 福島第一原子力発電所内で除染を待つ Brokk-800D.....	147
図 7-7 Brokk-330D の汚染検査と除染作業	148
図 7-8 Brokk-330D のスプロケット部の除染作業	149
図 7-9 鉛シートを巻きつけた GM 管型放射線計測器	149
図 7-10 除染方策のまとめ	152

表リスト

表 1-1 原子力緊急時ロボットの要求機能.....	13
表 3-1 電子回路の耐放射線性の向上策.....	55
表 3-2 原子力施設での通信伝達性の向上策.....	57
表 3-3 即応性に係る機構要素の必要性と完成度.....	76
表 3-4 信頼性に係る機構要素の必要性と完成度.....	78
表 3-5 除染保守性に係る機構要素の必要性と完成度.....	80
表 3-6 作業性に係る機構要素の完成度.....	81
表 4-1 ベーストラックの選定	88
表 4-2 Web カメラ仕様	95
表 5-1 分割後の JAEA-3 号ロボットシステムの各ユニット	110
表 5-2 機器をそのまま運びセットする場合の所要マンパワー	113
表 5-3 ユニット化して運びセットする場合の所要マンパワー	114
表 6-1 ロボット等の構成部材の耐放射線性の概略評価.....	125
表 6-2 Quince ロボット搭載半導体素子の照射試験結果.....	129
表 6-3 放射線環境下でのロボット等の管理目標値.....	130
表 7-1 各セルからの実行線量率の比.....	143
表 7-2 自然界の放射線による被曝量.....	144
表 8-1 機構要素等の必要性と完成度	155
表 8-2 今後の課題	158

第1章 序論

1.1 本研究の背景	2
1.1.1 福島第一原子力発電所事故	2
1.1.2 原子力保守用ロボット	4
1.1.3 原子力緊急時ロボット	8
1.2 原子力緊急時ロボットの特徴と要求機能	12
1.2.1 即応性	13
1.2.2 信頼性	15
1.2.3 除染保守性	16
1.2.4 作業性	16
1.3 本研究の目的	18
1.4 本論文の構成	19

1.1 本研究の背景

1.1.1 福島第一原子力発電所事故

2011年3月11日14時46分頃に東北地方太平洋沖地震が発生した。福島第一原子力発電所は1号機から3号機が運転中で、これらは自動的に運転が停止されたが、送電線の鉄塔が倒壊するなどしたため外部電源を喪失したため、非常用発電機が自動起動し、原子炉内の燃料を冷却していた。同地震に伴って発生した津波が15時半頃から同発電所を襲った。これらの津波は事前に想定されていた高さをはるかに超える巨大であり、遮水壁を超えて非常用発電機を水没させてしまい、非常用発電機も動かなくなり、同発電所は全電源喪失の状態となった。そのため、原子炉内の燃料の冷却が出来なくなり、冷却水喪失、炉心溶融、水素爆発等をおこすに至った（図 1-1）。



東京電力ホームページ ; http://photo.tepco.co.jp/library/110316/110316_1f_chijou_2.jpg (2016年10月25日アクセス)

図 1-1 2011年3月15日の福島第一原子力発電所1～4号機

炉心溶融、水素爆発等により大量の放射性物質が放出され、原子炉建屋内外の放射

線量が上昇し、緊急時対応のため、作業員が立入れないか、立入れても短時間に制限された。1999年9月30日の東海村JCO事故後に、原子力安全技術センタ、日本原子力研究所および製造科学技術センタで、原子力緊急時ロボットが開発されていたが、これらが事故発生後直ちに、事故発生現場に投入されることはなかった(図1-2)。

10億円原発ロボ不動

5台中4台 廃棄・故障

原子力機構 「保管予算つかず」

一九九九年に茨城県 原研は国の九九年度東海村の核燃料加工会 補正予算で四機種五台社「ジェー・シー・オ」を開発。内訳は●初期「(JCO)」で起きた 情報収集用RESQ-1(臨界事故の処理で数十人が被ばくしたことを用RESQ-1B一台)を受け、国は、原発事故 汚染された気体や液体の際に放射線量や映像を採取する試料等収集などの情報収集と、事用RESQ-1C一台●故障処理をするロボット 放射線レベルが高い現場でも作業可能な放射

福島第一原発事故で、旧特殊法人・日本原子力研究所(現日本原子力研究開発機構)が二〇〇一年に完成させた原子力防災ロボット四機種五台が廃棄されたり、保守管理をせずに放置、動かなくなったりしていたことが分かった。旧科学技術庁(現文部科学省)の予算約十億円で開発されたが、その後、保守管理の予算が付かなかったためという。

開発費はRESQ四台が計約六億円、RaBOTが約四億円だった。文科省原子力安全課原子力防災ネットワークのホームページは「現在、十六日現在も「現在、開発しているロボット」として、その四機種を紹介している。ところが、機構は西の、資料が残っていないので、なぜ国から保守管理の予算が付かなかったか分からない。開発した研究者は無念だったのではないかと話している。

能を誇ったRaBOTを昨年九月に廃棄したと回答した。倉庫に眠ったままだったRESQ四台は福島第一原発事故後、状態を確認したところ、三台は動かず、一台だけはおろろろ動かせない状態のため改造して出動待機中と説明。「二〇〇〇年度以降は国の予算が一切つかず(原研の経費で)消耗品をほそぼそと購入していたが、〇三年以降はメンテナンスができなくなり、さびが浮かぶなど老朽化が進んだ」(報道課)という。同課は「組織が変わり、資料が残っていないので、なぜ国から保守管理の予算が付かなかったか分からない。開発した研究者は無念だったのではないかと話している。」



図 1-2 2011.5.17 付け東京新聞記事

1.1.2 原子力保守用ロボット

原子力分野でのロボットの研究開発や実用化は古くから行われていた。第二次世界大戦中にアメリカでは原子炉や核燃料サイクル等の原子力関連研究が始められた。これらの研究は高放射線かつ高汚染環境下で行われるため、研究者や作業員の放射線被曝を低減することが必要となり、研究や機器等の保守には遠隔操作技術が必要であった。東西冷戦の影響もあり、アメリカ Argonne 国立研究所の Ray Goertz 博士等により、1940年代から機械式マスタースレーブマニピュレータが、1950年代からは電動式マスタースレーブサーボマニピュレータの研究開発が始められた(図 1-3) [1]。フランスでも原子力エネルギー庁の Saclay 研究所で Jean Vertut 博士らにより、1960年代末から機械式マニピュレータの研究開発が、1970年代からはサーボマニピュレータの研究開発が始められた[2][3]。



1970 年以降、日本でも原子力発電所の建設・運転が多数始まった。原子力発電所では、蒸気発生器の熱交換機用配管点検補修や沸騰水型原子力炉の制御棒駆動機構の交換を定期的に行う必要があり、当初は作業員が計測器や工具を用いて実施していたが、

放射線量が高く，作業員の放射線被曝低減が課題となった．そのため，加圧水型原子炉蒸気発生器点検補修ロボットや沸騰水型原子炉制御棒駆動機構交換装置等が開発され，実用化されてきた（図 1-4） [4][5]．

原子力施設内での研究開発や機器保守の作業は，原子力保守用マニピュレータ等の原子力保守用ロボットだけで遂行することは難しく，原子力保守用ロボットで扱いやすいように，改造された計測器や配管継手や電気コネクタ等の工具も開発された．さらには原子力保守用ロボットが動作しやすいように環境を整えた，大型セル方式遠隔保守コンセプト等についても研究され提案されていた[6]．

このような海外での動きを踏まえて，日本でも 1983 年度から 1990 年度にかけて通商産業省（現，経済産業省）の「極限作業ロボットプロジェクト」が行われ，その中で，原子力発電施設作業ロボットに関する研究開発も行われ，作業員用に設計建設された原子力発電所等の中での使用を想定したサーボマニピュレータや四足歩行ロボット等の基礎的な研究開発が行われた（図 1-5） [4][7][8]．

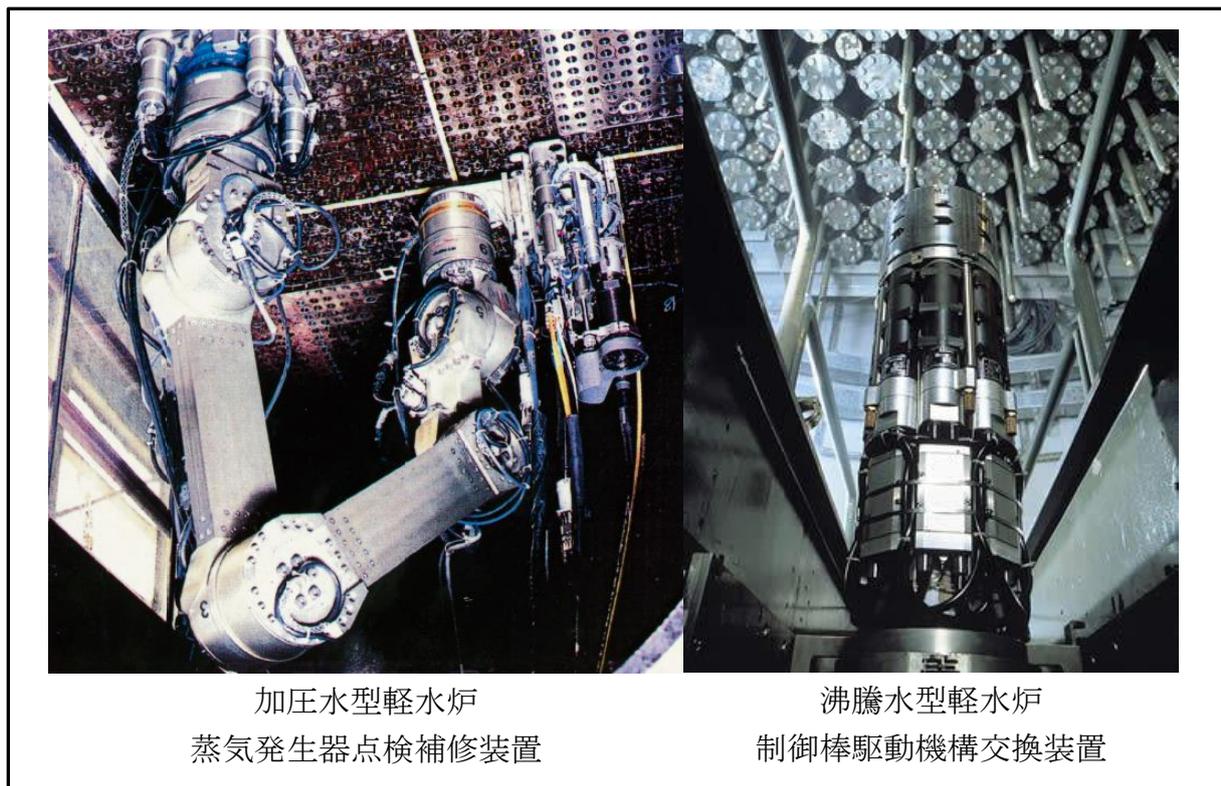


図 1-4 原子力保守用ロボットの例

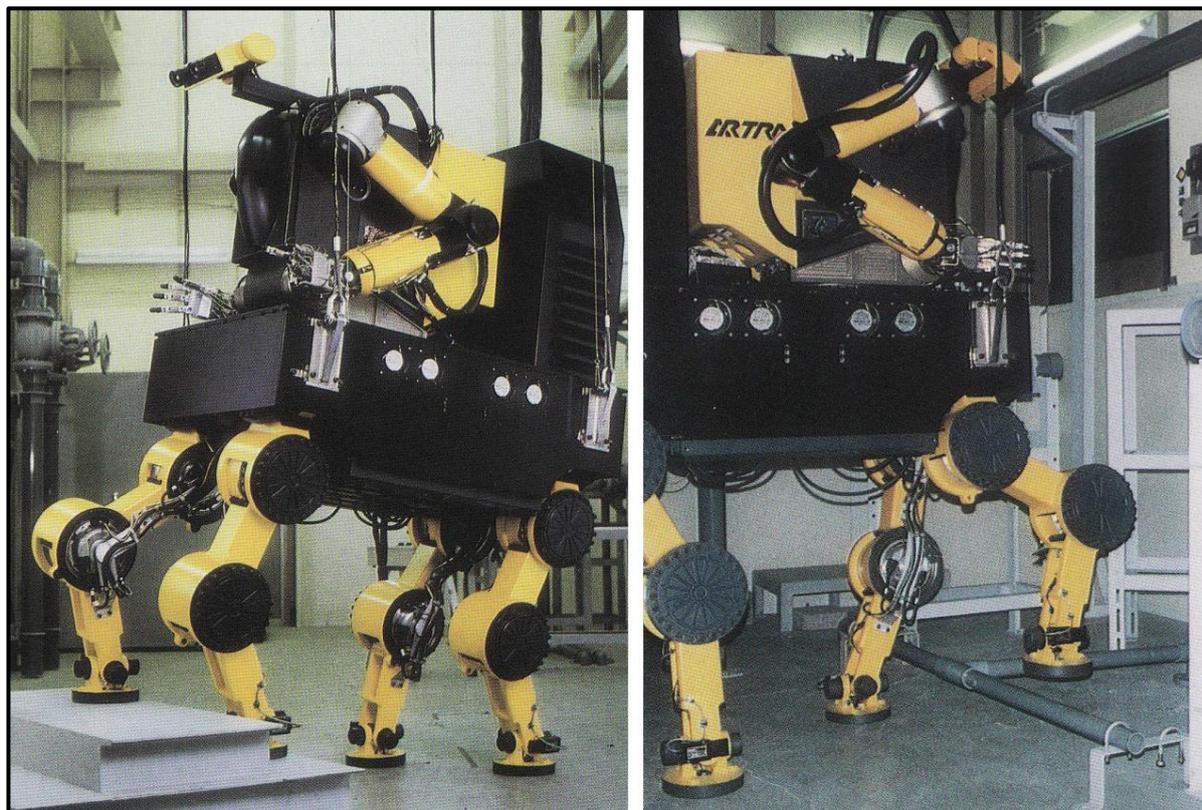


図 1-5 原子力発電施設作業ロボット

さらに、動力炉・核燃料開発事業団（後の核燃料サイクル開発機構，現日本原子力研究開発機構）では，原子力発電所から出る使用済み燃料の再処理に伴い発生する高レベル廃棄物をガラス固化する技術開発施設等において，プロセス機器を遠隔で保守するため，両腕型バイラテラルサーボマニピュレータの開発が 1982 年度から 1999 年度にかけて実施された（図 1-6）[9][10][11][12][13][14].

作業員が操作や保守を行うことを前提とした原子力施設をマニピュレータ等の操作・保守用の装置だけでは，原子力施設内の機器の操作や保守作業を行うことは困難であり，両腕型バイラテラルサーボマニピュレータが動きやすい動線や空間を予め用意し，両腕型サーボマニピュレータでは難しい作業を補完するためのインセルクレーンなどを配置した，大型セル方式遠隔保守システムも併せて開発が行われた。万が一，両腕型バイラテラルサーボマニピュレータやインセルクレーンが故障した場合でも，同じ大型セル内に設置されている他の両腕型バイラテラルサーボマニピュレータやインセルクレーンにより遠隔操作で保守でき，作業員の放射線被曝量を極力低減できるように考慮された研究がなされていた[15].



図 1-6 両腕型バイラテラルサーボマニピュレータ（試作 2 号機）

茨城県東海村にある動力炉・核燃料開発事業団東海事業所で，ガラス固化技術開発試験施設が 1995 年から操業が開始され，高放射線下でかつ高汚染下の環境で機器等を遠隔で保守するため，上述の両腕型バイラテラルサーボマニピュレータと大型遠隔保守システムが採用されている（図 1-7，図 1-8）。

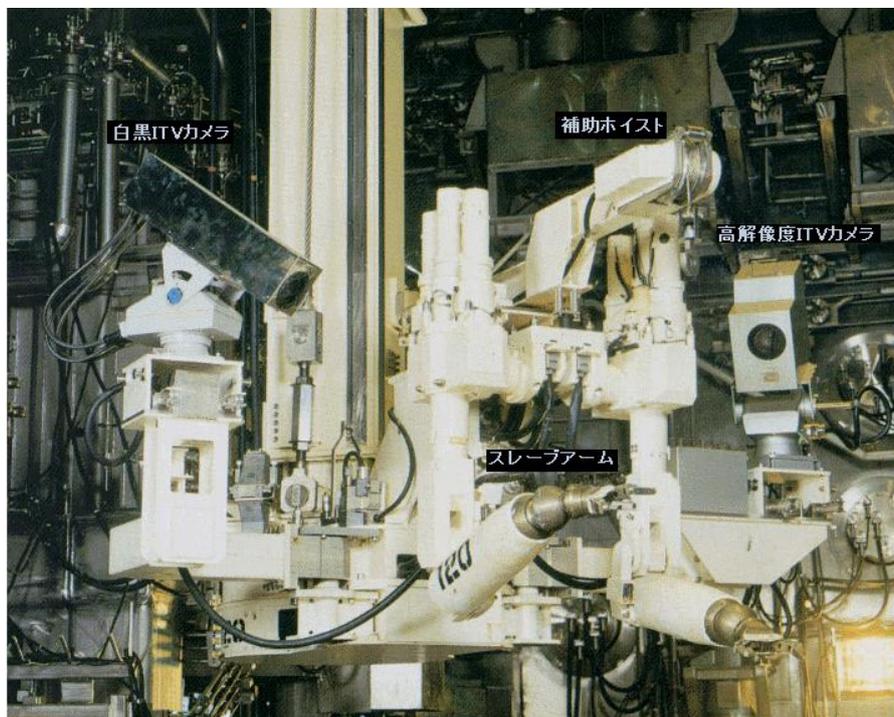


図 1-7 両腕型バイラテラルサーボマニピュレータ（実機）

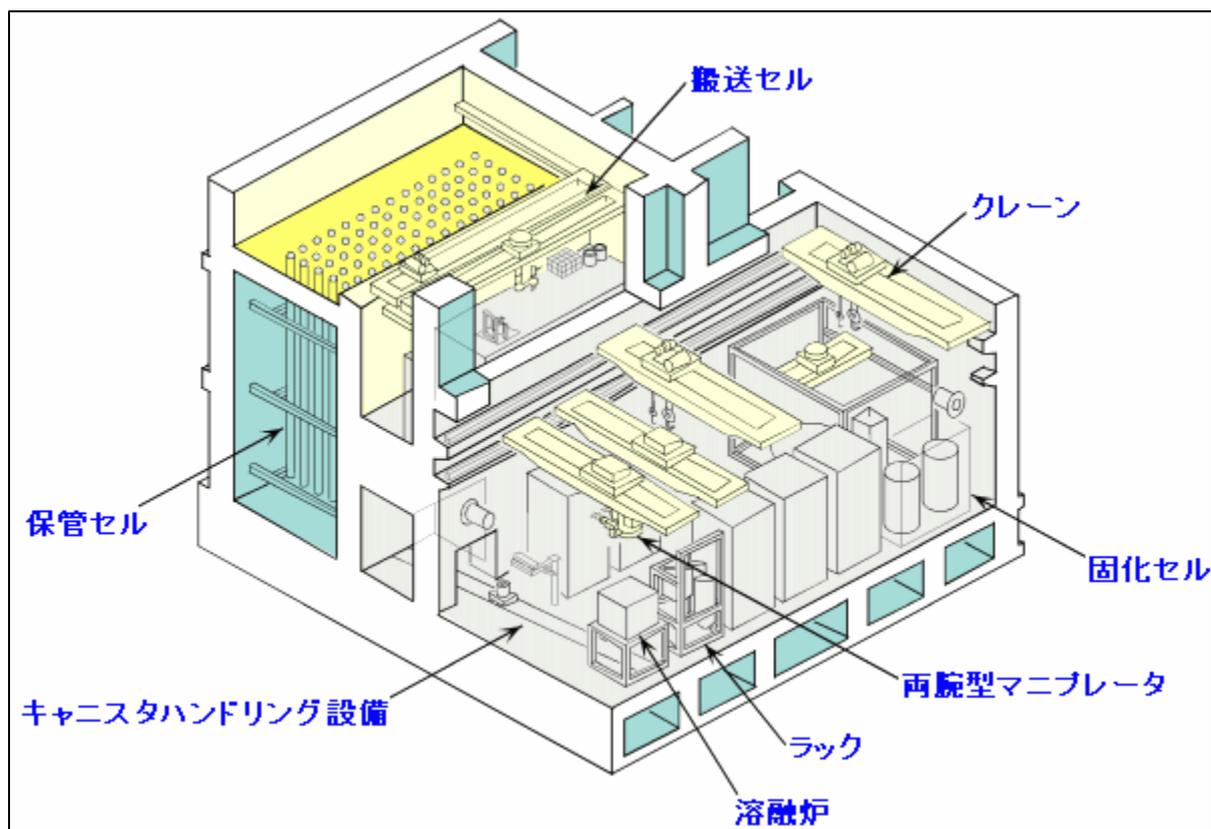


図 1-8 大型セル遠隔保守システムの例

1.1.3 原子力緊急時ロボット

日本では、1999年9月30日に発生した東海村 JCO 臨界事故で、原子力事故発生時に高放射線環境下で作業員に替わって調査や作業を行える原子力緊急時ロボットの必要性が認識された。

原子力緊急時ロボットは三機関が分担して開発された。原子力安全技術センタは、原子力施設で事故が発生した際に屋外で放射線量計測やサンプル採取等の調査を行うモニロボ A およびモニロボ B という屋外調査ロボット開発を行った(図 1-9) [16][17].

また、日本原子力研究所(現、日本原子力研究開発機構)は、原子力施設の扉を開放して施設内に進入して、放射線計測やサンプル採取等の調査を行う、RESQ-A ロボット、RESQ-B ロボット、RESQ-C および RaBOT という屋内調査ロボットの開発を行った(図 1-10) [18][19][20][21].

さらに、製造科学技術センタは、同様に原子力施設の扉を開放して施設内に進入して、バルブ操作や配管の切断等の作業を行う、SMERT-K, SMERT-M, SWAN, MARS-T, MARS-A, MENHIR という屋内作業ロボットの開発が行われた(図 1-11) [22][23].

原子力安全技術センタのモニロボ A と B は青森県六ヶ所村の同センタ防災センタに

保管されており，モニロボ A は運搬・制御車に搭載されて福島第一原子力発電所の復旧作業の拠点となっていた **J-Village** に派遣され待機していたが，機体が大きくかつ重量も重かったことから，原子炉建屋内はもとより，仮設の電源ケーブルや冷却水ホースが敷設されていた同発電所構内に投入することによりこれらを損傷させる恐れがあったことから，投入されることはなかった．原子力研究開発機構の屋内調査用ロボットの内，**RESQ-A** ロボット，**RESQ-B** ロボットおよび **RESQ-C** ロボットは，技術面で改良すべき事項が指摘されていた[24][25][26]．しかしながら，予算不足や運用体制が整備されていなかった等の理由により改良がなされることは殆ど無かった．また同様の理由により故障して動かさない状態のまま保管されていた．**RaBOT** は実用化の課題が多くあるということが指摘されていたため，既に廃棄されていた．製造科学技術センターの屋内作業用ロボットは，維持管理予算が無く，既に廃棄されていた．

原子力保守用のロボットやマニピュレータは，実際の原子力施設で 1970 年代から稼働し今も活用されているのに対し，原子力緊急時ロボットは開発されていたにもかかわらず，福島第一原子力発電所事故に際して，直ちに事故発生現場に投入されることはなかった．

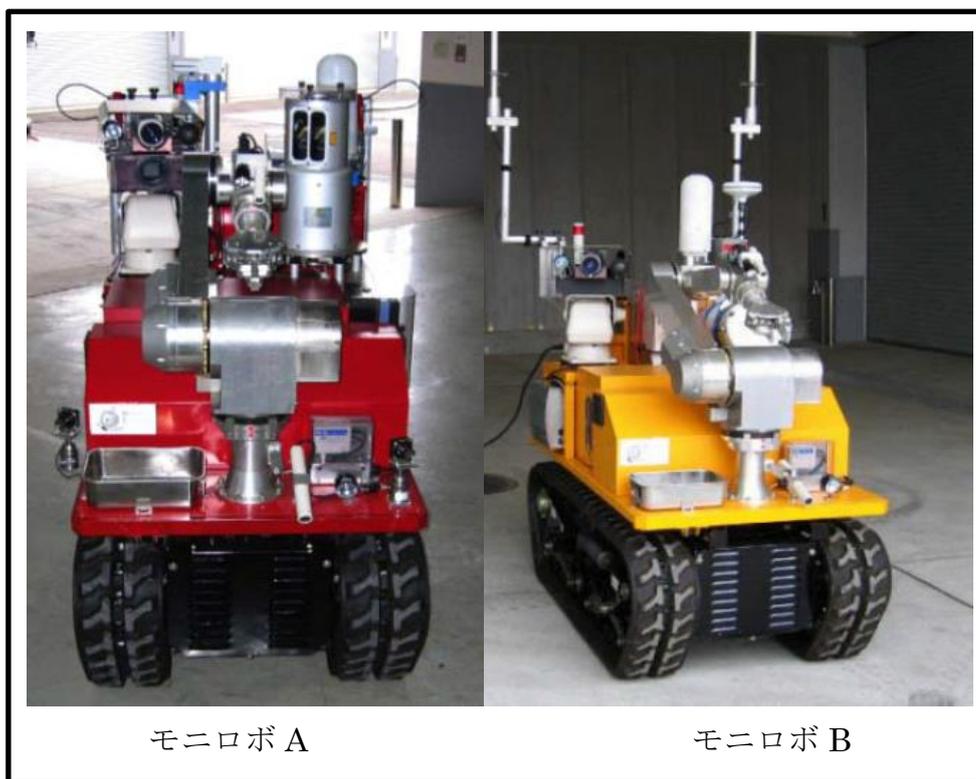


図 1-9 屋外調査ロボット

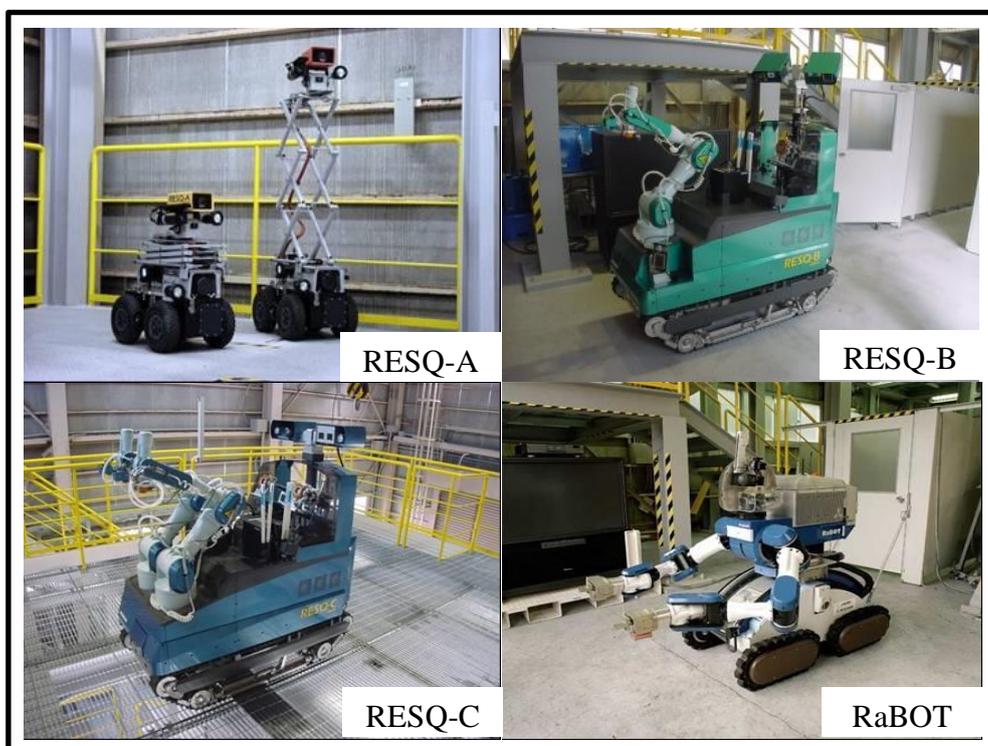


図 1-10 屋内調査ロボット



図 1-11 屋内作業ロボット

1.2 原子力緊急時ロボットの特徵と要求機能

原子力保守用ロボットは、1940年代以降の約70年の年月をかけて、研究開発が行われるとともに実用にも供されてきており、実際の原子力施設での保守作業での経験や教訓がフィードバックされて改良されてきており、その完成度は高められている。一方、原子力緊急時ロボットは、ドイツではKHGが1977年から、フランスではGroupeINTRAが1988年から整備が開始され、モックアップ試験設備での試験や訓練を行っているが、実際の原子力施設での過酷事故で投入された実績はこれまで殆どなかった。日本でも、東海村JCO臨界事故の後に原子力緊急時ロボットが開発されたが、それらを継続的に整備、試験や訓練を行うような運用組織が設けられることはなく、福島第一原子力発電所事故後に直ちに投入されることはできなかった。

原子力緊急時ロボットは、平時から炉心停止不能、炉心冷却不能あるいは放射性物質の大量放出のような過酷事故に備えて保管管理され、事故が発生した場合は直ちに事故発生現場に搬送され、高放射線環境下や高汚染環境下の事故発生現場に投入され、作業員が調査等作業の操作を行い、作業後は回収され、また次の作業のために点検保守されるという、一連の作業を行うものである(図1-12)。原子力用保守ロボットと比較して、原子力緊急時ロボットは、計画的な作業が行えない状況下でも対応できること、放射線環境下でも放射線損傷による故障をおこさないような対策を施すべきこと、緊急時対応が求められる間は放射線環境下でも汚染環境下でもメンテナンスして使用し続けられること、等の特徴を有するべきものと言える。

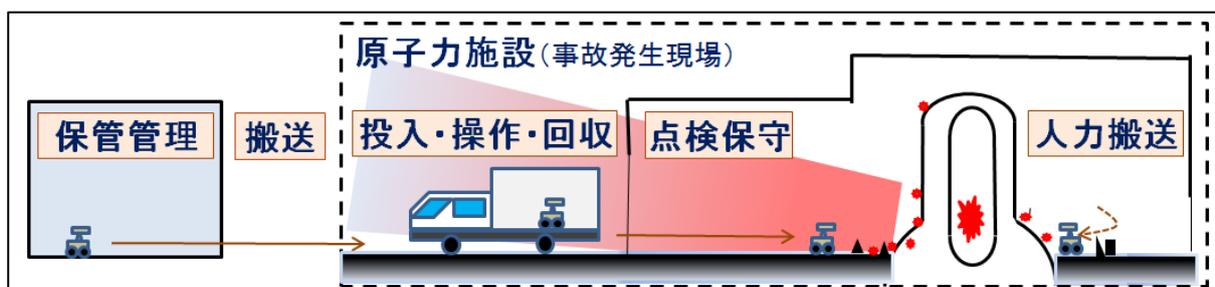


図 1-12 原子力緊急時ロボットが行う一連の作業

原子力施設で使用するという点は原子力保守用ロボット共通であるが、原子力緊急時ロボットが投入されるのは、爆発等で元々の原子力施設の状況とは大きく異なっている可能性があり、どのような状況下でも、あるいは状況がはっきりとわからなくても、投入され調査等の作業を行うことが求められ、即応性が最も特徴的な要求機能と言える。

原子力特有の高放射線環境下や高汚染環境下で使用されるのは原子力保守用ロ

ロボットと同じであり、このような環境下でも故障し難くすべきという点では、原子力保守用ロボットと同じである。さらに、故障の可能性を少なくすることや、部品が故障時した時でも作業を完遂させることが求められる。このようにロボットとしての信頼性という機能では共通点と相違点がともにある。

日頃のメンテナンスや故障した際の修理などは原子力保守用ロボット同様に必要で、ほぼ動揺である。しかしながら、事故発生時にこれらの保守は、短時間で行う必要があったり、場合によっては放射線環境下や汚染環境下で行う必要があったりなど、除染保守性では共通点も相違点もある。

原子力緊急時ロボットが行う作業は、放射線計測、ガス検知、部品や瓦礫等のハンドリングなどの作業であり、原子力保守用ロボットと共通する点は多い。

以上を纏めると、原子力緊急時ロボットに要求される機能は表 1-1 の様になる。

本項では原子力保守用ロボットと比較することで、原子力緊急時ロボットに要求される機能について、原子力保守用ロボットとの相違点に重点を置いて整理する。

表 1-1 原子力緊急時ロボットの要求機能

【要求機能】

- 即応性 : 事故発生時に直ちに現場に搬送, 操作等できること
- 信頼性 : 高放射線環境下でも, 過酷作業を遂行できること
- 除染保守性 : 放射性物質の除染ができ, 保守が容易なこと
- 作業性 : 事故後に必要となる現場状況調査や扉開放ができること

1.2.1 即応性

原子力緊急時ロボットが、原子力保守用ロボットと比べて最も異なり最も重要な機能は、いつどのような状況で起きた過酷事故にも、あるいはその状況の詳細が判らない状況でも対応できる即応性である。

原子力緊急時ロボットは、原子力施設で過酷事故が発生して出動要請があった場合に備えて、いつでも、輸送、操作、作業できる状態で維持管理されていなければならない。

出動要請があった場合に原子力緊急時ロボットは、直ちに事故発生現場となった原

原子力施設に、輸送できなければならない。原子力施設の過酷事故はチェルノブイリ原子力発電所事故や東海村 JCO 臨界事故の様に、原子力施設単独の要因で発生する単独事故だけではなく、福島第一原子力発電所事故の様に、地震や津波等に起因して発生する複合事故もある。複合事故としては、地震や津波のほかに、火山噴火、台風や洪水などの自然災害に起因するものの、テロなどの人為的要因によるものが考えられる（図 1-13）。

複合事故の場合は、道路や橋などの社会インフラも損傷を受けていたり、トレーラやトラック等の輸送手段が容易には手配できなかったりすることもある。このような複合事故の場合でも、事故発生現場となった原子力施設まで、原子力緊急時ロボット等を輸送できなければならない。

過酷事故が起きた原子力施設では、チェルノブイリ原子力発電所事故や福島第一原子力発電所事故の様に、事故が起きている局所だけではなく、オペレータがロボットの操作等を行うような場所も、放射線環境下であったり、汚染環境下であったりしていることが予想される。過酷事故に即応するためには、オペレータの安全を担保しつつ、原子力緊急時ロボットを操作できることも必要である。

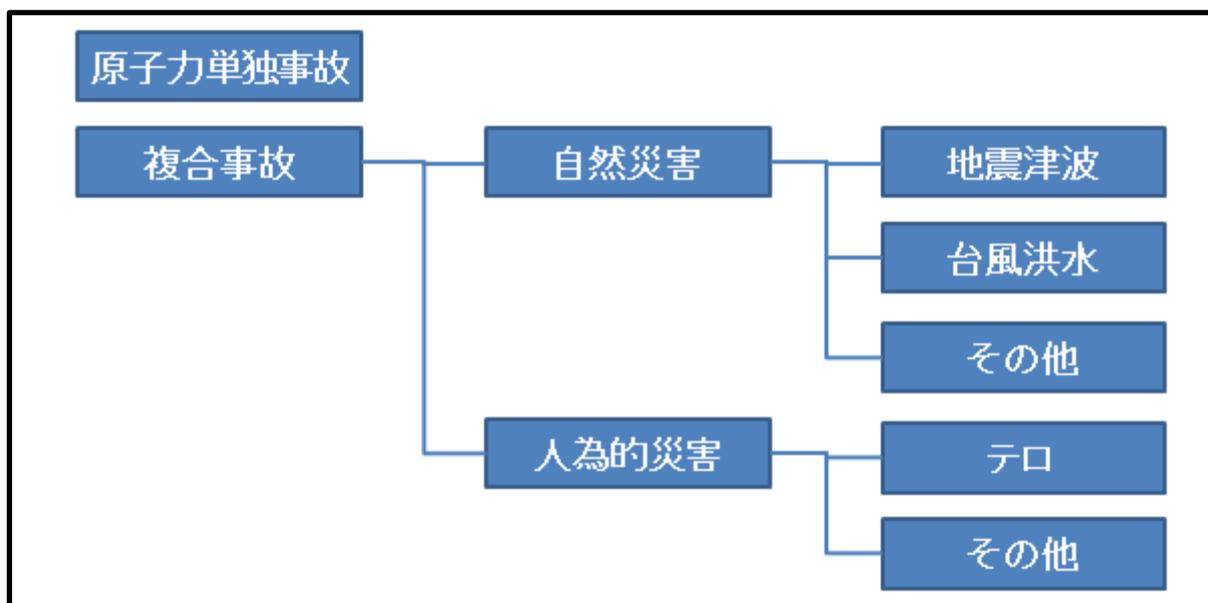


図 1-13 原子力施設の過酷事故の発生要因

原子力保守用マニピュレータ、加圧水型原子炉蒸気発生器点検補修ロボット、沸騰水型原子力制御棒駆動機構交換装置等の原子力保守用ロボットによる原子力施設での保守作業では、作業内容や操作手順を予め十分に時間をかけて検討することが可能で、オペレータも予め操作訓練を実施して万全を期すことが可能である。これに対し、原子力緊急時ロボットは複数の原子力施設を対象とすることが多く、過酷事故の事故収

束や影響拡大抑止のために、直ちに投入、操作する必要がある。過酷事故発生後の現場の状況は多種多様であり、同ロボットはこれに対応して様々な作業を行う必要がある。さらに過酷事故発生下では、作業員や環境の安全が脅かされていることから、直ちに事故発生現場に搬送され、現場に投入されることが重要である。事故発生現場の状況は、多種多様であり、予め、全てに対応したロボットや資機材を用意しておくことは不可能で、事故発生現場で、状況に応じて、ロボット等を改造することができる必要もある。さらに自然災害が発生していることをも考慮すると、電源等のインフラを期待できないばかりか、発電機の燃料、オペレータの食糧、放射線防護服などの資材も、ロボットとともに搬送していく必要がある。

過酷事故が発生した原子力施設でロボットを投入し、操作し、回収するという一連を実施するのは、事故収束や影響拡大抑止という観点から時間的な制約があったり、どれが操作対象機器であるかを見極めたり、放射線環境下での操作の場合にはオペレータ自身の放射線被曝等の懸念もあり、オペレータには相当のプレッシャーがかかってくる。このような状況下では操作訓練を受け十分な技量を有したオペレータでも、オペレーションミスを起こす懸念があり、そのための対策なども必要である。

原子力施設は前述したように即応性が重要であり、その即応性を担保するためには上述のような即応性かかる対策を予め施しておくことが重要となる。

1.2.2 信頼性

原子力保守用ロボットも原子力緊急時ロボットも、保守作業なり、緊急時作業なりを達成するまで、オペレータが意図するような動きをし続ける必要がある。そのためには信頼性が要求される。

信頼性には、通常の機械と同様に、機械的にも電氣的にもあるいは制御的にも故障しないようにしたり、故障しやすい部位については故障した場合に備えて、予備部位を用意したりしておき、故障した場合に自動的に予備部位に切り替わるなどの対策が必要である。原子力保守用ロボットも原子力緊急時ロボットも高放射線下で使用されるものであり、通常の機械機器の信頼性に加えて耐放射線性に関する考慮が必要である。ロボットを構成する部材の中で耐放射線性が懸念されるものは、半導体素子を含む電子回路、ガラスなどの光学部品、グリース、ケーブル、タイヤなどの有機物である。その中でも最も耐放射線性が弱いとされるものは半導体素子である。原子力保守用ロボットの場合、電子回路はマニピュレータ等本体から 200 m ないし 300 m 離れた放射線量の低い場所に配置されることが通常で、そのために長い多芯ケーブルや、電圧降下に対応した電子回路を予め設計開発している。原子力緊急時ロボットは、過酷事故が発生した後、直ちに事故発生現場に搬送、投入されるもので、電子回路を放射線量の低い場所に設置したり、その間の電圧降下等の影響を考慮した電子回路を設

計開発したりすることはできない。さらに実際に投入される場所の放射線量や原子力緊急時ロボットの放射線被曝量も定かではなく、耐放射線性を向上させるだけではなく、電子回路に実装する半導体素子の耐放射線性を把握して、原子力緊急時ロボットの被曝量を管理して、被曝量が耐放射線性を超えないようにする管理することが必要である。このように原子力緊急時ロボットは原子力保守用ロボット同様の耐放射線性が必要であるが、使用される環境の違いから、原子力保守用ロボットと違った耐放射線性にかかる対策も必要となる。

原子力施設では、放射線を遮蔽するためと耐震性を向上させる目的から、コンクリート構築物や鋼構造物が多く、原子力緊急時ロボットも原子力保守用ロボット同様に無線通信の電波も遮蔽されてしまうことから、通信に対する信頼性の確保が重要である。原子力保守用ロボットが原子力建屋内に通信用ケーブルを敷設しておけるのに対して、原子力緊急時ロボットは、予め施しておけない点が異なり、過酷事故発生下で通信インフラを確立させる必要がある。

1.2.3 除染保守性

原子力保守用ロボットも原子力緊急時ロボットも高汚染下で使用されるものであり、放射性物質で汚染されることから、再充電、点検や補修などの保守を行うため、除染保守性の考慮が必要である。

原子力保守用ロボット等では保守の内容や頻度がある程度は想定でき、その内容や頻度に応じて、除染して作業員による保守をしたり、除染せずに他のマニピュレータ等により保守したりするなどの計画を立てることが可能である。

原子力緊急時ロボットでは過酷事故が発生した現場での作業は多種多様であり、必要となる保守作業の内容や頻度を予め全てを想定しておくことは、保守ロボットほど容易ではない。

1.2.4 作業性

原子力保守用ロボットも原子力緊急時ロボットも、プロセス機器の監視や故障部品の交換であったり、事故状況の調査や遮蔽体の運搬であったりと、ある作業を行うことが求められる。

原子力保守用ロボットの作業が予め計画しておくことができるのに対して、過酷事故が発生した後の作業は多種多様で全てを想定して予めすることは非現実的であるとともに、想定しえない作業も多数あることは福島第一原子力発電所事故の経験から明らかである。この過酷事故後に必要となる作業のうち、作業員で実施可能なものは作業員によって実施され、放射線量等の観点から作業員では実施が不可能あるいは危険

な作業を原子力緊急時ロボットが行うことになる。2011年3月11日の福島第一原子力発電所事故が発生してから、原子炉の冷温停止と放射性物質の大量放出の可能性が無くなり当時の野田内閣総理大臣が事故収束宣言を発した2011年12月16日までの緊急時対応期間に、ロボットが行った作業は、主に事故後の状況調査、放射線計測、瓦礫撤去、除染等の作業であった。このような作業は、言い方を変えると、作業員が現場に立入られるか否かの調査作業と、立入ることが困難場合にその原因を取り除くための作業であった。

原子力緊急時ロボットには、爆発等で瓦礫が飛散している現場を走破して目的地点まで到達して、そこに至る迄の状況を放射線計測結果や画像等により調査するとともに、必要に応じて瓦礫撤去や除染等の作業を行い、作業員が入れるようにする作業が求められる。

1.3 本研究の目的

原子力保守用ロボットについては、欧米での研究開発や実用化と並行して、日本でも1970年代から研究開発が進められ、実際の原子力施設での運用が開始されている。原子力施設内のプロセス機器の保守だけではなく、原子力保守用マニピュレータのトラブルや故障の際の保守作業も、他のマニピュレータ等により遠隔操作で行えるようになっており、オペレータや作業員の放射線被曝の低減に寄与している。

日本では、原子力緊急時ロボットが1999年9月30日の東海村JCO臨界事故後に開発されたが、福島第一原子力発電所で事故が発生した際に直ちに投入することはできなかった。福島第一原子力発電所の1号機～3号機の炉心を冷温停止状態に維持でき、当時の野田総理大臣が福島第一原子力発電所の事故収束を宣言した2011年12月16日迄に、約20台のロボット等が投入された。これらのロボットは、投入の前に事故発生現場の状況に併せて改造する必要があったロボットもあれば、投入されたものの帰還できなかったロボット、期待された調査や作業を完遂できなかったロボットも数多くあり、運用方策が十分に確立できているとは言えない状況である。

日本国内には福島第一原子力発電所の他にも約50基の原子力発電所が現存し、今後、再稼働するにせよ廃止措置するにせよ、膨大な潜在的エネルギーを有する核燃料が存在しており、過酷事故が発生する危険性がある。不幸にして再びこれらの原子力発電所で過酷事故が発生した場合に備えて、原子力緊急時ロボットには、直ちに災害現場に搬送でき、事故発生現場で事故収束に必要な操作ができ、必要に応じて除染保守ができる、運用方策の構築が求められている。求められる運用方策は、単にそこにあるものをどのように使うかではなく、事故発生現場の様々な状況でも使える様に、予めロボットや周辺機材の設計方法論である。

本研究の目的は、原子力緊急時ロボットの先行事例を調査し、原子力緊急時ロボットの保管管理から、事故発生現場への搬送、事故発生現場での操作および回収、汚染したロボットの点検保守等の一連の運用を通して、

- ・ 要求機能の体系化、
- ・ ロボットを現場に直ちに投入するための統合化、
- ・ 瓦礫や仮設物がある現場での可搬性の向上、
- ・ 高放射線環境下での被曝管理方法、および
- ・ 保守時の放射線被曝を低減策

の研究を行い、以て、原子力緊急時ロボットの運用方策を設計方法論として構築することである。

1.4 本論文の構成

第2章では、原子力緊急時ロボットの要求事項である即応性、信頼性、除染保守性という観点から、ドイツ原子力緊急時ロボット部隊 KHG、フランス原子力緊急時ロボット部隊、チェルノブイリ原子力発電所事故や福島第一原子力発電所事故の直後に投入されたロボット等の先行事例を調査した。

第3章では、先行事例をふまえ、原子力緊急時ロボットに求められる要求機能ごとに機能構成と機能要素の体系化を行った。

即応性に対する構造要素として、第4章では原子力緊急時ロボットの運用性構築のために行った、システム化した例としてのロボット操作車について述べ、システム化の要件について纏めた、第5章では過酷事故が発生した現場の状況によってはロボット操作車は運用できない場合に必要となる、システムを分割して可搬性を向上させるためのユニット化の例について述べ、ユニット化の要件について述べる。

第6章では、ロボット等に搭載されている市販半導体等の耐放射線性評価を行うとともに、ロボット等の放射線下で運用するうえで必要な被曝管理について述べる。

第7章では、過酷事故が発生した現場で使用して汚染したロボットについて、汚染し易い部位、除染し難い部位の特定と、汚染部位ごとの除染方策について述べる。

最後に、第8章で今後の課題と本論文の結論を述べる（図 1-14）。

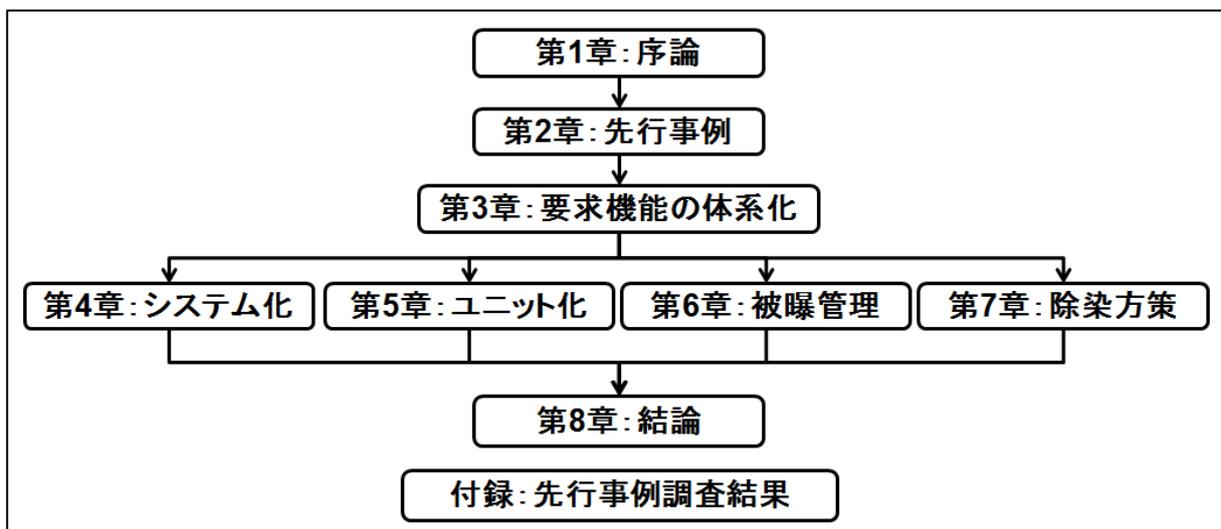


図 1-14 本論文の構成

第2章 先行事例

2.1 先行事例の調査方針	22
2.2 即応性	23
2.2.1 原子力緊急時ロボットの運用組織等	23
2.2.2 緊急時のロボットと周辺機材の搬送	25
2.2.3 事故発生現場でのロボット操作	28
2.2.4 現場適応性	30
2.2.5 事故発生現場での可搬性	32
2.3 信頼性	33
2.4 除染保守性	36
2.5 作業性	38

2.1 先行事例の調査方針

本章では、これまでに整備運用されていた原子力緊急時ロボット部隊、原子力事故でロボットを投入した事例および日本で開発された原子力緊急時ロボットについて調査した。調査対象は、時系列的に、ドイツ原子力緊急時ロボットの運用組織 **KHG**、チェルノブイリ事故時に投入されたロボット、フランス原子力緊急時ロボット部隊 **GroupeINTRA**、東海村 **JCO** 事故後に開発された原子力緊急時ロボット、福島第一原子力発電所事故発生直後に投入されたロボット等である。調査に際しては、第1章で抽出した、即応性、信頼性、除染保守性および作業性という要求機能を満たしていたか否かという観点から、先行事例の調査を行い整理した。

急時段階では使用されていない[32].

ロシアでは、旧ソ連時代から多くの原子力発電所が操業され[33]、世界第4位の原子力発電容量を有しているが、ドイツのような原子力施設を運営する事業者による原子力緊急時ロボットの保管管理はされていない。ロシアは、現在も原子力発電所を積極的に建設しているほか、発展途上国に対してもロシア製原子力発電所の輸出を活発に行っており、原子力緊急時ロボットの運用組織を設立して、原子力緊急時に備えてロボット等の保管管理を行う動きもある[34].

フランスでは、1973年の石油危機を踏まえ、1970年代から原子力開発を加速し、2017年1月末時点で世界第2位の原子力発電を誇っている[35]. 旧ソ連チェルノブイリ原子力発電所事故を踏まえ、原子力発電所で過酷事故が発生した時に、1988年に原子力発電所を有するフランス電力公社、核燃料工場や核燃料再処理工場を有するCOGEMA社（現、AREVA社）、原子力研究施設を有する原子力庁（現、原子力・代替エネルギー庁）が出資して、高線量率下で作業員に替わって作業できる原子力緊急時ロボット部隊GroupeINTRAを設立した（図2-2）[36].

GroupeINTRAは、KHGと同様、専従職員約25名、年間予算約10M€の規模であるが、原子力施設での事故発生時に備えて24時間対応できる体制を有している。



図 2-2 GroupeINTRA のロボット等

日本では1999年9月30日のJCO臨界事故後に、原子力施設内で事故による高放射線下で作業員に替わって調査や作業ができる、原子力緊急時ロボットが開発されたが、これらを運用する組織が設置され、平時から点検整備やモックアップ試験結果に基づく改良などは行われなかった。2011年3月11日に福島第一原子力発電所で過酷事故が発生した際にも、原子力緊急時ロボットの多くは点検整備されておらず不可動

状態か廃棄されており，事故収束や影響拡大などの作業に，直ちに投入されることはなかった。

2.2.2 緊急時のロボットと周辺機材の搬送

ドイツ KHG は，過酷事故発生時に，放射線計測器やロボット等の機材を，トラックバンやトレーラ・コンテナに搭載して事故発生現場に輸送することを想定している（図 2-3） [30]。事故発生現場へのロボット等の機材の搬送に陸送を想定している背景には，ドイツではアウトバーン等の高速道路網が整備されていること，地震等が少なく陸路が全く使えなくなるような可能性が小さいことが背景にあると考えられる。また，ドイツでは海岸線が短く，原子力施設の多くは内陸に点在していることから，海運は考慮されていないものと考えられる。さらに，空輸体制を平時から整備するのはコストがかかることから空輸は想定されていない。



図 2-3 ドイツ KHG のトレーラとコンテナ群

フランス GroupeINTRA もドイツ KHG 同様，トレーラによる陸送を基本としている。その背景には，ドイツ同様，高速道路網が整備されていること，地震が少ないことがある。近年は，小型の偵察ロボットなどにはワゴン車の整備も行われている（図 2-4） [29]。



図 2-4 フランス GroupeINTRA のロボット操作・輸送用のバン

日本で東海村 JCO 臨界事故後に開発された原子力緊急時ロボットも事故発生現場への輸送は陸送を原則としていた。原子力安全技術センターが開発した屋外調査用ロボットは、ロボットを運搬するため、8tトラックを改造した運搬・制御車が併せて整備されており、陸送が想定されていた(図 2-5) [16][17]。



図 2-5 原子力安全技術センターが開発した運搬・制御車

日本原子力研究所が開発した屋内調査用ロボットの内、情報収集用ロボット RESQ-A, RESQ-B, RESQ-C は、20 ft コンテナ 2 台に搭載して、原子力施設で過酷事故が発生した場合は、トレーラと運転手を手配してコンテナを事故発生現場に搬送できるように考慮されていた[18][20][21]. しかしながら、コンテナに搭載した制御機材等のために必要なディーゼル発電機 2 台が別途用意されており、これらはトラックと運転手を手配して、コンテナとは別に事故発生現場に搬送する必要があった(図 2-6).



図 2-6 日本原子力研究所が開発した RESQ ロボット用コンテナと発電機

製造科学技術センターが開発した屋内調査用ロボットは、ロボットの搬送やロボット制御盤を 4 台のコンテナに搭載して、トレーラと運転手を手配して事故発生現場に移動できるように整備されていた(図 2-7) [22][23]. しかしながら、4 台のコンテナに搭載した制御機材等に必要な電源を供給するためにディーゼル方式の専用電源装置と 4 台のコンテナに電力を給電するためのケーブル収納ボックスが別途用意されており、これらはトラックと運転手を手配して、コンテナとは別に事故発生現場に搬送する必要があった.



図 2-7 製造科学技術センターが開発したロボットの操作・搬送コンテナ

2.2.3 事故発生現場でのロボット操作

ドイツ KHG は、数 km 離れて放射線量の低い所にロボット制御用のコンテナを駐車して、そこからロボットを遠隔操作することを想定している。そのため、屋外用ロボットで牽引するコンテナに屋内用ロボットを搭載して、建屋近傍まで搬送して、屋内ロボットを原子力施設建屋の屋内に進入させることとしている（図 2-8） [30]。さらに遠距離から無線通信用に 33m マストの先に取り付けたアンテナも用意している（図 2-9） [30]。



図 2-8 LMF ロボットを牽引する SMF ロボット



図 2-9 33 m マストの先端に取り付けられた遠距離通信用無線アンテナ

旧ソ連チェルノブイリ原子力発電所事故では、高濃度に汚染された黒鉛や瓦礫の撤去に国内外から提供寄付されたロボットが多数投入された。これらのロボットには、有線通信のものもあれば無線通信のものもあった。2013.2.18 に行ったチェルノブイリ原子力発電所 Syda 副所長へのインタビュー結果によれば、有線通信ロボットはケーブル長の制約から、オペレータはロボットから数十 m 以内から操作する必要があったほか、無線通信のロボットも原子炉建屋内には遮蔽体等が多くあったため、無線の途絶等の障害が多く、十分に遠く離れた場所から操作することはできなかった。そのため、ロボットを操作するために鋼鉄製の遮蔽ボックスを製作し、オペレータはその中から操作した。

フランス GrouperINTRA は、チェルノブイリ原子力発電所炉心暴走水蒸気爆発事故でオペレータが放射線下でロボット操作する必要があることが認識されたため、遮蔽体を有し鉛窓越しにロボットを操作できるロボット操作車 EPPB が整備された。(図 2-10)。



図 2-10 遮蔽を施したロボット操作車 EPPB と無人重機を操作するオペレータ

日本は東海村 JCO 臨界事故後に開発されたロボット原子力安全技術センターが開発した屋外調査用ロボットは、前述の運搬・制御車から屋外調査用ロボット、モニロボ A またはモニロボ B を、ロボットに搭載された TV カメラの画像を見ながら操作できるようになっている[16][17]。

運搬・制御車を放射線量の低い、遠い場所に駐車し、モニロボを操作するため、無線中継器が用意されていた(図 2-11)。この無線中継器はモニロボが自ら持ち運び、無線の感度が低くなり始めたところに設置することで1km以上離れた所から無線通信で遠隔操作できるように設計されていた。

運搬・制御車はロボットの昇降用スロープ、ロボット操作盤、電源供給装置等を備えていたが、放射線量の低い場所でロボットの昇降を行うためこれらの作業は、オペ

レータが車外に出て操作することとなっていた。



図 2-11 モニロボ用無線中継器

2.2.4 現場適応性

ドイツ KHG は、現場でロボットの簡易な補修を行うための簡単な工具等を搭載したコンテナも用意しているが、ドイツ KHG の Michael Gustmann 氏へのインタビューによれば、「幸いにして原子力緊急時での出動経験はなく、事故発生現場の状況に併せた最適化や改造を図った経験はなく、どの程度の状況に対応できるかは不明である」とのことであった。

ドイツ KHG は設立後、30年を超える運用経験や、チェルノブイリ原子力発電所事故や福島第一原子力発電所事故での事例をふまえ、ロボットの移動機構部（プラットフォーム）を共有化し、ロボット走行部に搭載するツールや、ロボット走行部で牽引できるトレーラ搭載型のツールを多数用意している。これらの組合せを変えることにより、短時間で、多種多様な事故発生現場での状況に可能な限り対応できる、MTS ロボットの開発を行っている。

MTS ロボットは、KHG が開発した、屋内外の調査や軽作業用に利用できる、共通プラットフォームであり、状況に応じて、無線中継器や除染装置などを搭載出来るようになっている（図 2-12）。



図 2-12 共通プラットフォーム MTS

福島第一原子力発電所事故では、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とが共同で開発していた災害対応ロボット **Quince** を、事故発生現場の状況に合わせた改造が実施された (図 2-13) [37][38].

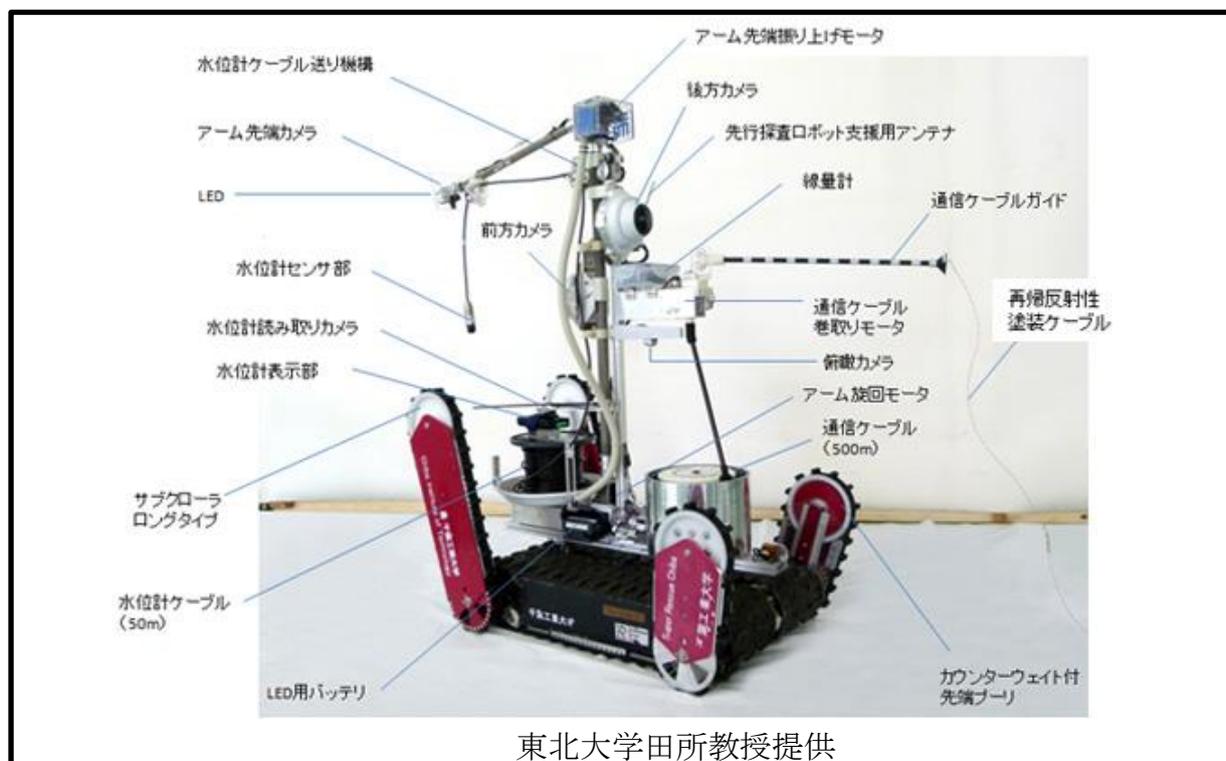


図 2-13 福島第一原子力発電所事故に際し改造された Quince ロボット

原子炉建屋内では、建屋構造物、遮蔽体、制御盤など、無線通信に障害を及ぼすものが多く、無線通信は困難と判断されたため、ツイストペアケーブルによる有線通信に改造された。さらに、水位計の設置ができる治具も追加装備された[37]。

2.2.5 事故発生現場での可搬性

東海村 JCO 臨界事故後に開発された原子力緊急時ロボットで、日本原子力研究所が開発した情報収集ロボットの中の RESQ-A ロボットは原則として、コンテナに搭載した制御装置から有線通信または無線通信で操作することを想定して開発された。

万が一の場合は、ロボット、制御装置、ケーブルをトレーラから取り外せるように考慮されていた。これは、制御装置を搭載したコンテナを適切な位置に駐車できないことを想定してのことであったが、これらの持ち運び性や、事故発生現場での再組立てする際に、全面マスク、防護服やゴム手袋をした状態で行い易いようにまでは考慮されていなかった。

2.3 信頼性

原子力緊急時ロボットも原子力保守用ロボットも信頼性は重要であるが、産業用ロボット等の一般的なロボットと最も異なる点は、高放射線下で使用されるため、耐放射線性に係る信頼性が最も重要な要求機能である。その耐放射線性に係る信頼性を担保するため、耐放射線性の向上に係る先行事例がいくつか見られた。

ドイツ KHG が整備した無人重機 Excavator は、電子回路を 2 種類有している。一つ目の電子回路は通常の半導体素子を用いた電子回路で、ガンマ線を 1/10 に遮蔽できる鉛遮蔽箱に内蔵することで耐放射線性を通常の電子回路の 10 倍に向上させている。二つ目の電子回路は、一つ目の電子回路が放射線損傷した場合に備えたもので、通常の半導体素子を用いている点は変わらないが、Excavator を帰還させるのに必要な最小限の機能のみに限定した電子回路で、一つ目の電子回路よりも小さく製作されており、ガンマ線を 1/100 に遮蔽できる鉛遮蔽箱内に設置することで耐放射線性を、100 倍に向上させている。以上のような構造にしていることで、Excavator は一つ目の電子回路で放射線損傷が発生するまで使用し、一つ目の電子回路が放射線損傷した場合には二つ目の電子回路に切り替えて、Excavator での作業を中断し終了し Excavator を帰還させ、電子回路を交換することになっている（図 2-14）[29][30]。



図 2-14 Excavator と電子回路用鉛遮蔽箱

1986 年 4 月 26 日午前 1 時 23 分（日本時間同日午前 6 時 23 分）に、旧ソ連（現ウクライナ）のチェルノブイリ原子力発電所 4 号機で水蒸気爆発を伴う事故が発生した。水蒸気爆発により高放射線かつ高汚染環境となった下で、飛散した瓦礫の撤去や原子炉付近の状況調査を行うため、戦車に排土板を取り付けて無線操作可能にした KLIN, 日本から提供されたラジコン D-355W, ドイツから提供された MF-2, MF-3, 旧ソ連が開発中だった月面探査車ルノホートを改造した STR-1 等、約 50 台のロボット

が投入された。これらの多くは、半導体の放射線損傷や瓦礫が飛散する災害現場ではロボットのケーブルなどの問題があり、すぐに操作不能となった（図 2-15）。



図 2-15 チェルノブイリ事故の直後に投入されたロボット

東海村 JCO 事故後に開発された原子力緊急時ロボットでは、製造科学技術開発センターが開発した屋内作業用ロボットの内、MENHIR は耐放射線性強化型ロボットである。通常の IC や LSI 等の集積度の高い半導体素子よりディスクリット半導体素子の方が耐放射線性が高いことを利用して、ディスクリット半導体からなる電子回路を構成することで、MENHIR の電子回路は $10E4$ Sv の耐放射線性を有している[22][23]。

福島第一原子力発電所事故の直後に、無人建設重機、Packbot, Brokk, Talon, Quince 等のロボットが投入された（図 2-16） [37][38][39][40]。しかしながら、これらは元々原子力用途に開発されたロボットではなく、電子回路には市販の半導体素子が使用さ

れており、これらの耐放射線性が未確認であった。これらロボットを運用する東京電力等も経験が無く、ロボットの被曝管理をどのように行うべきかについても経験を有していなかった。



図 2-16 福島第一原子力発電所直後に投入されたロボット

2.4 除染保守性

原子力緊急時ロボットのみならず原子力保守用ロボットの保守に際しては、ロボットが汚染して、その汚染によるオペレータや作業員が放射線被曝をすることが課題となる。そのため通常の保守に先立って、ロボットの除染が必要となる。原子力保守用ロボットでは原子力施設内の一画に保守やそれに先立つ除染のためのエリアが設けられ、保守や除染を行うオペレータや作業員の、二次汚染を防ぐためのグローブボックスや放射線被曝を防ぐために遮蔽体が設けられていることが多い。それに対して原子力緊急時ロボットでは、事故が発生した現場での除染が必要となる。

ドイツ KHG では、オペレータや作業員の被曝低減のため、ロボットを過酷事故が発生した原子力施設に投入した後に点検保守する場合に備えて、偵察ロボットのような小型ロボットや、作業用ロボットのような大型機器の部品を、点検保守に先立ち、除染することを想定している。そのため、汚染拡大防止、作業員やオペレータが全面マスクや防護服を着用する際の身体的負担を軽減するため、除染用のグローブボックスを有する点検保守用コンテナを用意している（図 2-17）。



図 2-17 除染保守用コンテナ内部

福島第一原子力発電所事故では、3号機原子炉建屋の上部で水素爆発が発生し、柱や梁の一部が崩落し、大物搬入口の上に落下した。その結果大物搬入口も崩壊し、大物搬入口全体を解体撤去に、スウェーデンの Brokk 社製の Brokk-90 1台、Brokk-330 2台、Brokk-800D 1台の合計4台緊急輸入され、2011年5月10日から、3号機大物搬入口の解体工事に投入された[38]。

大物搬入口全体を解体撤去作業は小型無人重機の Brokk ロボットにとって負荷が大

きく、点検保守が必要となった。軽度の点検保守はオペレータにより行われたが、重度の点検保守を行うためには、Brokk社の専門家による作業が必要であった。彼らはスウェーデンやイギリスの大使館から、福島第一原子力発電所に近づかないよう勧告を受けており、BrokkロボットをBrokk社の専門家による重度の点検保守を行うためには、Brokkロボットを除染して福島第一原子力発電所から搬出する必要があった。

そのために、Brokkロボットの高圧水スプレーによる除染が行われたが、福島第一原子力発電所から20kmの範囲等に設定されていた警戒区域から機器を搬出する際に、機材等の汚染レベルを計測するスクリーニングが義務づけられており、搬出基準として設定されていた100 CPM以下まで除染することができなかった。



図 2-18 除染後も汚染が残った Brokk-800

2.5 作業性

ドイツ KHG, フランス GroupeINTRA, 東海村 JCO 臨界事故後に開発された原子力災害対応ロボット等の事故に備えて予め準備されたロボットの多くは, 屋外用, 屋内用を問わず, その殆どが, 不整地や瓦礫が散乱した場所での移動することを想定して, クローラ型の移動機構を有している[30]. また, チェルノブイリ事故や福島第一事故で投入されたロボットの多くもクローラ型の移動機構を有していたが, チェルノブイリ事故の飛散瓦礫撤去に用いられた STR-1 の様に, 事故発生現場での状況を踏まえて開発整備されたものには, 車輪型の移動機構を有したものもあった.



図 2-19 ドイツ KHG のロボット群

ドイツ KHG, フランス GroupeINTRA, 東海村 JCO 臨界事故後に開発された原子力災害対応ロボット等の, 事故に備えて予め準備されたロボットの多くには, 放射線計測機器が搭載されていた. また, チェルノブイリ事故や福島第一事故で投入されたロボットに要求された調査機能の多くは, TV 画像取得と放射線計測であった.

事故に備えて予め準備されたロボットには, LMF, EOLE, EROS, RESQ-B, RESQ-C, RaBOT, SWAN, MARS-A, MENHIR にもロボットアームやマニピュレータ等を有しており, ドア開閉や資料採取などの軽作業を想定していた. 福島第一事故では Packbot ロボットに搭載されたアームで原子炉建屋の二重扉の開放作業に用いられた.

2.6 まとめ

即応性については、日本では原子力緊急時ロボットを開発していたが、それらを運用する組織は整備されていなかった。ドイツやフランスでは、原子力緊急時ロボットの開発や整備のみならず、運用組織も整備されていたが、幸いにして過酷事故が発生した原子力施設での運用実績はなく、搬送性や現場適用性等で課題が残っていた。搬送性の中でも陸送性を向上させるため、コンテナ等を考慮していた例はあったが、自然災害との複合災害では、トレーラや特殊資格を有した運転手の確保に困難をきたすという課題があった。また中型トラック程度では、1台のトラックでの搬送容量に制限があった。事故発生現場でのロボットの運用については、ロボットのみならず、周辺機材を含めた統合化を図った例もあったが、大規模システムとなり、搬送性に困難を伴っていた。

信頼性については、産業用ロボット等は異なり、原子力保守ロボットも原子力緊急時ロボットも半導体を含む電子回路の耐放射線性が重要視されていた。原子力保守用ロボットでは、耐放射線性を考慮することで、大規模システムになることに大きな問題はないものの、原子力緊急時ロボットでは大規模システムにしないで、耐放射線性を含む被曝管理することが達成できていなかった。

除染保守性については、水スプレーが有効であることは認識されていたが、過酷事故等で爆発を伴うような事故現場での汚染形態を考慮した除染方策は確立していなかった。

第3章 要求機能の体系化

3.1 要求機能	42
3.1.1 即応性に係る機能構成と機能要素	43
3.1.2 信頼性に係る機能構成と機能要素	52
3.1.3 除染保守性に係る機能構成と機能要素	58
3.1.4 作業性に係る機能構成と機能要素	61
3.2 機構要素と構造要素	64
3.2.1 即応性に係る機構要素と構造要素	64
3.2.2 信頼性に係る機構要素と構造要素	67
3.2.3 除染保守性に係る機能構成と機能要素	69
3.2.4 作業性に係る機能構成と機能要素	70
3.3 原子力緊急時ロボットの課題	73
3.3.1 即応性の課題	73
3.3.2 信頼性に関する課題	77
3.3.3 除染保守性に関する課題	79
3.3.4 作業性に関する課題	80

3.1 要求機能

日本では福島第一原子力発電所事故後の2012年に原子力災害特別措置法が改正されるまで、原子力施設の過酷事故に備えて、予め運用組織を設置して、平時から原子力緊急時ロボットを運用したことはなく、原子力緊急時ロボットの運用方策を念頭に置いて、整備した例はなかった。ドイツやフランスでは、原子力施設の過酷事故に備えて、緊急時ロボット部隊を有していたが、実際に過酷事故に対して運用した例は殆どなかった。

今後日本で、原子力発電所を再稼働するにせよ、廃炉にするにせよ、現時点で、50基余りの実用発電用原子炉、2基の研究開発段階発電炉、2か所の使用済み核燃料再処理工場、数か所の核燃料加工工場が存在し、これらには多くの核燃料が保管され、膨大なエネルギーを内在していることから、平時から原子力緊急時ロボットを整備するとともにこれらを運用する組織を設置しておくことは不可欠で、原子力緊急時ロボットの要求機能を体系化しておくことは重要である。

本章では、第1章で抽出した原子力緊急時ロボットに求められる、即応性、信頼性、除染保守性、作業性という4つの要求機能(図3-1)について、第2章のドイツKHG、チェルノブイリ原子力発電所事故、フランスGroupeINTRA、福島第一原子力発電所事故等の先行事例の調査結果を踏まえて、体系化を行う。

機能構成や機能要素の中には、同時に要求されるもの、どれか一つが満たされていれば十分なもののほか、事故が発生した現場の状況や必要となる作業によって同時に要求されるもの、どれか一つが満たされればよいかが変わるものもある。

本項の要求機能の体系化を説明する図の中では、同時に要求されるものは「and」結合子を、どれか一つが満たされていれば十分なものは「or」結合子を、そして、事故が発生した現場の状況や必要となる作業によって変わるものについては「and or」結合子を用いることとする。

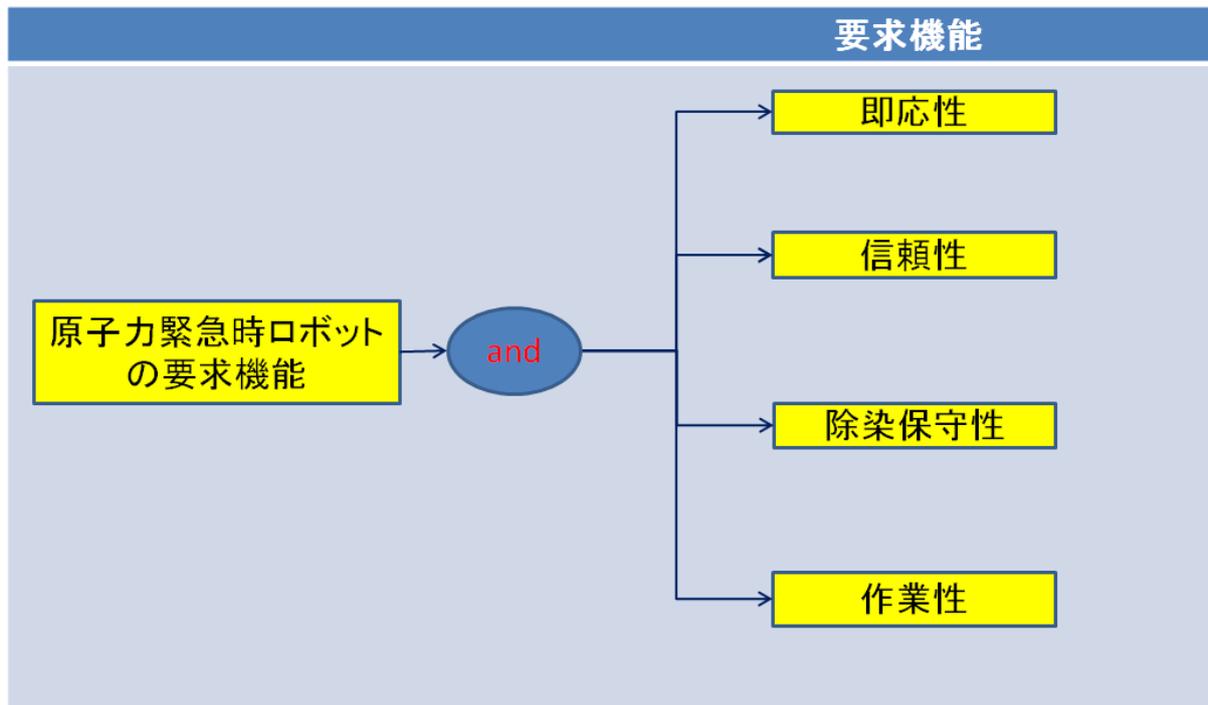


図 3-1 原子力緊急時ロボットの要求事項

3.1.1 即応性に係る機能構成と機能要素

原子力緊急時ロボットは、原子力施設での過酷事故が発生した際に、直ちに原子力施設に搬送され、作業員が立入れないあるいは立入るには危険な、高放射線かつ高汚染の環境下で、作業員に替わって、先行調査、扉開放、遮蔽体設置などの作業に供されるものである。これらの作業を直ちに行える即応性は原子力緊急時ロボットの要求機能の中で最も重要なものである。

東海村 JCO 臨界事故後に開発された原子力緊急時ロボットの殆どが福島第一原子力発電所事故の際に不可動状態であった。このようなことを二度と起こさない様に、平時からロボット等を維持管理する機能、過酷事故が発生して出動要請があった場合に直ちに原子力施設に原子力緊急時ロボット等を搬送できる機能、過酷事故が発生して放射線環境下や汚染環境下で操作するオペレータの放射線安全の確保できる機能、過酷事故の状況に合わせてロボット等を短時間で最適化できる機能、事故収束や影響拡大抑止等の精神的重圧のかかる作業を最小限にできるような操作性等が必要である。

原子力緊急時ロボットは、過酷事故が起きた時に用意するのではなく、平時から予め準備しておくことが必要であり、保管段階から、搬送段階、投入操作段階、回収点検保守段階に至る全ての段階を想定して、即応性という要求機能のための構成要素や

機能要素が必要となる。

3.1.1.1 技能者確保

1) 整備能力

1999年の東海村 JCO 臨界事故後に、原子力安全技術開発センタ、日本原子力研究所（現、日本原子力研究開発機構）および製造科学技術開発センタで原子力緊急時ロボットが開発されたが、これらのロボットを整備・運用する組織は設置されなかった。その結果、福島第一原子力発電所事故が発生した際には、これらのロボットの多くは廃棄されたり、保管されてはいても点検保守されておらず不可動状態であったりと、直ちに過酷事故の現場に投入されることはできなかった。このような事態が起きていた背景には、ロボット等の維持管理に係る予算が確保されず、専任の運用組織や要員が配置されず、兼務で担当していた担当者は目前の他の業務に注力せざるを得なかったことが、直接的な原因であった。その根底には、事故は起こさないように最大限の努力を注力していたため、万が一起きた時の事故の事故原因の調査、その原因の排除または影響拡大防止という、事故が発生した場合の対策に対する配慮が十分でなかったことがある。原子力緊急時ロボットを過酷事故がおきた原子力施設に速やかに投入するためには、常にロボット等を可動状態に保つ整備するとともに、ロボットをいつでも投入できるように維持する機能が重要である。

1999年の東海村 JCO 臨界事故後に、核燃料サイクル開発機構（現、日本原子力研究開発機構）が、Execil 社製のガンマ線可視化計測装置 2 台を保有していたが、福島第一原子力発電所事故が発生した際に、2 台とも不具合があり、機械部品のみならず、制御用パーソナルコンピュータ（PC）の再調整または交換の必要もあった。しかしながら 1 台は Windows95 を OS とする PC で制御されており、もう一台は Windows98 を OS とする PC で制御されており、ともに制御ボードには ISA バスが用いられていた。Microsoft 社のサポートは、Windows95 については 2002 年に、Windows98 については 2006 年に、終了しており、ISA ボードも 2011 年時点では殆ど販売されておらず、代替 PC の手配が困難であった。原子力緊急時ロボット等の整備については、単にロボットや周辺機材を可動状態に維持するだけではなく、ロボットや周辺機材に使用されている機器の PC 等の部品等を定期的に更新できることも必要である。

近年、ロボット等の遠隔技術の中でもドローン等の新技術が多数出てきており、これらの要項性も確認されつつある。このような新技術についても常にウォッチし、状況に応じてこれら新技術を導入することも重要である。

部品等の更新にあたっては、ニッケル水素電池からリチウムイオン電池あるいはリチウムポリマー電池へ移行されつつあるロボット用バッテリーについては、ニッケル水素電池 1 セルあたりの起電力が 1.2V でありバッテリーパックの電圧が 12VDC、24VDC または 48VDC であるのに対し、ニッケルポリマー電池では 1 セルあたりの起

電力が**3.7V**でありバッテリーパックの電圧が**11.1VDC**または**22.2VDC**となること、バッテリーの維持管理の容易性等についても留意する必要がある。

2) 操作能力

前述の屋内調査用ロボットのうち **RESQ-B** と **RESQ-C** の 2 台は、その操作が複雑で、製作メーカーからの 1, 2 度の操作指導やマニュアルだけでは、日本原子力研究所職員による操作は困難であった。そのために、職員が日頃からロボット操作を行い、ロボット操作に習熟し難い状況であったことも、前述の原子力緊急時ロボットの不可動の遠因になったとも考えられる。原子力緊急時ロボットが、過酷事故が起きた際に速やかに事故発生現場への搬送、投入・操作・回収を行えるためには、日頃からロボットや周辺機材の操作を行い、操作に習熟しておくとともに、ロボットの性能の限界等をオペレータが見極めておくことも重要である。オペレータの習熟度を向上させ、熟練オペレータを確保しておくことが重要である。

チェルノブイリ原子力発電所事故では、ドイツ **KHG** から事故現場の状況を調査するための調査ロボットや瓦礫撤去のための作業用ロボットが提供され、日本からも無線操作可能なラジコン重機が提供され、事故発生後の原子炉建屋周辺の放射線測定や高放射化した瓦礫の撤去に用いられている。しかしながらドイツ **KHG** も日本も、ロボットや無人重機のオペレータは派遣していなかった。その根底には東西冷戦終結前で、交流の少なく、オペレータ等の安全管理の方法や基準も良く判らない、旧ソ連の原子力施設にオペレータを派遣することが躊躇されたことがあったであろうことは想像に難くない。また、事故現場の状況が十分に判らない中、また指揮命令系統が不明確な状況で、オペレータ等を高放射線かつ高汚染環境という環境に派遣することはできなかったものと推察される。

旧ソ連の技術者は、慣れないドイツ **KHG** のロボットや日本製の無人重機を熟知していないばかりか、操作訓練も受けていないまま、これらロボットや無人重機の操作や点検保守を行うのに、様々な苦勞に直面したことが容易に想像される。

チェルノブイリ事故の際に旧ソ連に提供された、ドイツ **KHG** の作業用ロボット **MF-2** が、タービン建屋の構造物に乗り上げて転倒しそうになったり (図 3-2) , ロボットの再充電に時間がかかる過ぎて結果として電子回路の放射線損傷に至った背景に、旧ソ連のオペレータが、ロボットの操作や保守に不慣れだったことが遠因となっていた可能性もある。



図 3-2 チェルノブイリ原子力発電所事故後投入された MF-2 ロボット

福島第一原子力発電所事故ではアメリカ iRobot 社から東京電力に提供された Packbot ロボットが東京電力に引き渡された 2011 年 3 月 24 日に、事故現場から 100km 以上離れた茨城県土浦市内で、iRobot 社の職員から東京電力本店職員および東京電力から依頼を受けた関連企業の職員に、操作訓練が実施された。福島第一原子力発電所から遠く離れた場所で教育訓練が行われた理由は、アメリカ大使館がアメリカの一般人に対して福島第一原子力発電所 50mile (80km) 圏内から退避するよう勧告していたためである。その後、4 月 17 日の 1 号機および 3 号機のタービン建屋から原子炉建屋に続く二重扉を開けるのに投入されるまで、福島第一原子力発電所の 5 号機等で操作訓練が行われた。東京電力職員および東京電力から依頼を受けた関連企業職員は、それまでロボットの操作経験が無い者であり、Packbot ロボット 2 台のアームを操作して、二重扉の内側のレバーを回転させて扉を開けられるようになるまで、相当の日数を要した。アメリカ、アイダホ国立研究所から提供された Talon ロボットは、茨城県つくば市でアメリカ政府から日本政府経由で東京電力に引渡を受け、その場所でアイダホ国立研究所職員から東京電力本店職員に教育訓練が行われた。教育訓練場所がつくば市であった理由は、前述の Packbot ロボットの時と同じ理由であった。また、フランス Groupe INTRA がロボット提供を申し出た際に、アメリカの事例と同

様に、フランス **GroupeINTRA** はオペレータを日本に派遣することはできず、東京電力から依頼を受けた企業の職員が **GroupeINTRA** のロボットを保管管理するとともに操作訓練を行っている仏シノン原子力発電所に出向いて、ロボットの操作訓練を受けている。さらにドイツ **KHG** がロボットの提供を申し出た際も、ドイツ **KHG** がオペレータを日本に派遣することはできず、日本からオペレータ要員をドイツに派遣して操作訓練を受けさせるよう求められた。

以上から判るように、過酷事故の発生した原子力施設で、ロボットや周辺機材を有効に投入・操作・回収できるか否かは、オペレータの操作能力にも大きく依存する。予めロボットの操作に習熟し、ロボットで何が出来るか、何が出来ないかを熟知した、高度な操作能力を有したオペレータを養成する必要がある。

以上述べてきたように、技能者確保にはロボットの整備機能に加えて、オペレータの操作能力が重要である。

3.1.1.2 搬送性

原子力緊急時ロボットを事故が発生した原子力施設に直ちに搬送することは、即応性の観点上、最も重要である。

チェルノブイリ原子力発電所事故や東海村 **JCO** 臨界事故の様に、原子力災害が単独で発生した場合のみならず、福島第一原子力発電所事故の様に自然災害と複合して原子力災害が発生した場合でも、要求されるものである。

1) 陸送性

搬送の中で、陸送は最も一般的で、ドイツ **KHG** やフランス **GroupeINTRA** でも陸送を主に考えており、日本で東海村 **JCO** 臨界事後に開発された原子力緊急時ロボットの開発でもコンテナや大型トラックによる陸送性が基本に考えられていた。ドイツやフランスのみならず日本でも高速道路網が発達しており、陸送は他の搬送方法に比べて比較的安価ある。さらに平時の訓練等にも、安価に利用可能である。

福島第一原子力発電所事故の際には、原子力安全技術センターのモニロボ **A** ロボットは、運搬・制御車に搭載されて、保管されていた青森県六ヶ所村の原子力安全技術センター防災センターから緊急時対応の拠点となっていた福島県双葉郡楡葉町の **J-Village** に陸路で搬送された。

米アイダホ国立研究所から提供された **Talon** ロボットは、茨城県ひたちなか市の **JAEA** 原子力緊急時支援・訓練センターで、**JAEA** のロボット操作車 **RC-1** に搭載されて、**J-Village** 経由で、福島第一原子力発電所に陸路で搬送された。**JAEA-3** 号ロボットも茨城県ひたちなか市でロボット操作車 **RC-2** に搭載されて、**J-Village** 経由で福島第一原子力発電所に陸路で搬送された。**Talon** ロボットと **JAEA-3** 号ロボットの搬送に際しては、途中地震で被害を受け、鉄板で仮補修しただけのた山間道を走行する必要もあった。これらロボットの搬送に際しては、トラックドライバーの手配が試みられた

がトラックドライバーを手配することはできなかった。東北地方太平洋沖地震という自然災害下のためトラックドライバーが不足していたことに加え、福島第一原子力発電所事故という原子力災害であったため放射線による影響を懸念され、多くの業者をあたったが断られた。その結果、いずれも日本原子力研究開発機構職員と東京電力職員がロボット操作車を運転して搬送を行った（図 3-3）。



図 3-3 JAEA-3 号ロボット等を搭載して警戒区域に入るロボット操作車 RC-2

以上より、原子力緊急時を搭載したロボット操作車は、運用組織のオペレータにより運転操作可能なことが必要である。さらに自然災害と複合した原子力災害が発生した場合は、高速道路や幹線道路も損傷を受けている可能性が高く、応急補修した道路や山間道を運用組織の要員が運転可能な、小回りの利く車両を準備しておく必要がある。

2) 空輸・海運性

自然災害と複合した原子力災害が発生した場合は、高速道路や幹線道路の応急補修が間に合わなかったり、山間道も損傷を受けて通行できなかったり、あるいはこれらが通行可能であっても多くの避難者や復旧作業用車両で大渋滞が発生している可能性もある。そのために空輸や海運も考慮しておく必要がある。これらは陸送と異なりこれだけで完結することが少なく、空輸や海運のあと、空港又は港湾から事故が発生した原子力施設迄の陸送が必要となることが多い。さらに海運の船舶や空輸の航空機は、陸送の車両の様に、過酷事故が発生した原子力施設内で待機してオペレータの休憩・

仮眠場所として使用することは不可能である。これらのことも考慮に入れて、空輸・海運性を考慮しておく必要がある。

3.1.1.3 放射線安全性

原子力施設で過酷事故が発生した場合、事故現場付近は高放射線下かつ高汚染下になることが予想され、このような環境下では投入操作されるロボットが高放射線下かつ高汚染下におかれる。ロボットほどではないにせよ、オペレータも放射線下かつ汚染下で、原子力緊急時ロボットの投入・操作・回収等の作業を行う必要があることを考慮する必要がある。

放射線下かつ汚染下におかれるオペレータの放射線被曝低減をはかるため、放射線源からの距離をとる、放射線下での作業（投入・操作）時間を短縮する、遮蔽体を用意するなどの、対策を図る必要がある。

1) 距離

高放射線環境から距離をとる方法として、過酷事故で高放射線環境になった現場には遠隔操作型ロボットを投入し、オペレータはより低い放射線環境下でロボット等の操作を行うことで、高放射線環境下から距離を取ることが可能となる。

2) 時間短縮

原子力緊急時ロボットを操作するためには有線又は無線通信による操作が必要となるが、原子力施設内は随所に配置されている遮蔽体だけではなく、電源盤や大口径バルブなど、無線通信の障害になるものが多数ある。また、有線通信の場合でも、ロボットで運んだり、引き摺ったりできるケーブルには長さに制約があり、オペレータはある程度はロボットに近い場所から操作せざるを得ない。そのため、オペレータもある程度の放射線下あるいは汚染下での投入・操作にかかる作業を行うことが求められる。

そのため、ロボットを過酷事故が発生している現場で、待機場所から事故発生現場への運搬や投入したり、事故発生現場近傍での操作や回収したりする時間を短くすることが必要となる。

3) 遮蔽

原子力緊急時ロボットの運用で、操作は時間を要するものであり、事故発生現場近傍での操作ではオペレータの放射線被曝を低減するための遮蔽を考慮する必要がある。

3.1.1.4 現場適応性

ロボットを運用する際にはロボット単体のみで運用することは難しく、また実際の事故発生現場の状況が様々であることは前述したとおりである。ロボットを、様々な状況下に適応させて、運用できるようにすることが重要である。しかもこの適用させる作業は、事故が発生する前または事故発生後短時間で行えるようにしておくことが

重要である。

1) 統合化

実際の事故発生現場ではロボット単体で運用することが難しく、平時から、事故発生現場迄の搬送、事故発生現場での投入、操作および回収作業、ならびに保線されたロボットの点検保守までの一連の運用を通して必要となる周辺機材を含むロボットシステムとして運用するのが現実的である。そのために予めこれらのロボットと周辺機材を、一括で運搬・投入するための統合化が必要となる。

2) 組合せ

事故発生現場でロボットに求められる作業は、後述する様に、作業員やロボットオペレータが立入れるところから作業を行う場所までの移動と、作業場所での調査やマニピュレーションである。これらの組合せを、事故発生前に予め予測して準備しておくことは重要であるが、予め全ての状況や作業内容に合わせてロボットを準備しておくことは現実的ではない。事故発生後に、移動のための機構と調査等作業のための機構の組合せを変えて、現場の状況や必要となる作業に併せられるようにすることも重要である。

3) 部品共用性

事故発生現場の状況は様々であり、上述の統合化や組合せによるだけでは現場適用できない可能性は大きい。場合によってはロボットの改造を短時間で行う必要がある。改造を容易に行うためには、複数のロボットや周辺機材に用いる部品の共用化を図ることで、予備品の保管量を限定したり、他機材から流用したりすることも可能となる。

4) 可搬性

飛散している瓦礫や事故収束のために仮設した機材等によって、ロボットと周辺機材をトラックなどに搭載して一括して事故発生現場で運用できない場合もあり得る。作業員やオペレータがロボットと周辺機材を人力で運んで、運用できることも要求されることもあり得る。そのため、ロボットとその周辺機材の可搬性について、考慮しておく必要がある。

3.1.1.5 操作性

原子力保守用ロボットは、1970年代から実際の原子力施設で運用され始め、経験と教訓がフィードバックされており、ロボットや周辺機材の操作性についても研究開発がなされている。1980年代から人間工学的考慮に基づいたマンマシンインターフェースの研究が行われ、モニター、スピーカ等表示機器を配置するとともに、オペレータの手足の動きやすさを考慮したコントローラ等操作機器を用意するものもあった。一方、原子力緊急時ロボットは、可搬性を高めるために、表示機器や操作機器は小型軽量化を図る必要があるなどの制約が多い。また、保守作業と異なり、緊急時対応は、予め想定した通りの提携作業ではなく、オペレータがロボットから送られてくるカメラ画像などを認識し、状況を判断し、その上で操作することが求められる。さらに原

原子力緊急時ロボットのオペレータは、放射線環境かつ汚染環境下で、防護マスクや防護服を着装した状態で、ロボット操作を行う必要があり、場合によっては、環境の詳細が判らなかつたり、作業時間を制限されたりと、極めて厳しい精神的負担や肉体的負担がかかる。

1) マンマシンインターフェース

ロボットオペレータは、後述するように、放射線下あるいは汚染下のような環境で操作することを想定した教育訓練を受けるが、上記のような精神的かつ肉体的負担を受ける環境下での操作を想定しておく必要がある。このような厳しい環境下では操作ミスは起り得るものとして、原子力緊急時ロボットのマンマシンインターフェースは、操作ミスを起こし難いような人間工学的配慮がなされるべきである。

2) フェールセーフ

前述の様に、操作ミスが起きないようにマンマシンインターフェースとしても、操作ミスが万が一起こった場合に備えておく必要がある。そのために万が一、オペレータが操作ミスを起こしたとしても、ロボットが自ら外界等をセンシングして、障害物との衝突の危険性などを検知した場合は、オペレータの操作に係らず動作を停止し、オペレータに状況を知らせ、オペレータからの新たな指示を待つ必要がある。

以上、即応性に関する機能構成と機能要素を纏めると図 3-4 のようになる。

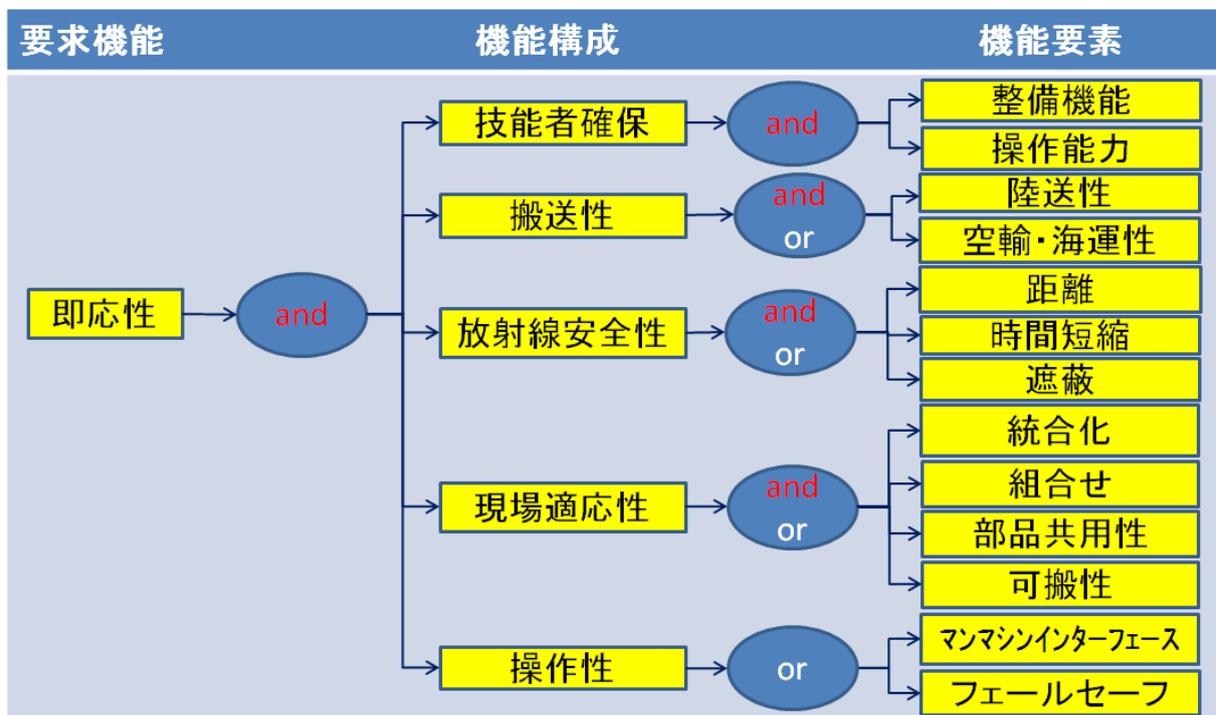


図 3-4 即応性に係る機能構成と機能要素

3.1.2 信頼性に係る機能構成と機能要素

原子力緊急時ロボットの役割は、作業員に代わって、過酷事故が発生した現場まで移動し、現場状況の調査等を行い、そしてロボットを投入された元の場所まで戻ってくるという、一連の作業を遂行することである。過酷事故が発生した時の事故収束や影響拡大抑止等のために、役割を達成するためには、ロボットがきちんと作業を遂行できる信頼性が重要である。

チェルノブイリ原子力発電所事故の際の緊急時対応や福島第一原子力発電所事故の際の緊急時対応等では、ロボットは上記のような一連の作業を複数回、繰り返して行う必要があった。このように、緊急時対応では、繰り返しロボットを投入・操作・回収する必要があることは明らかで、その間トラブル等を起こすことなく、作業を完遂できるまでの信頼性が要求される。

原子力緊急時ロボットは、耐故障性や、部分的に故障した際にロボットとしての機能を維持するための冗長性等の信頼性を有する必要がある。それらに加えて、原子力緊急時ロボットは過酷事故が発生した際に、事故収束や影響拡大抑止に係る作業を行うものであり高放射線環境下で使用することから、ロボットの耐放射線性を評価するとともに高放射線下で安全に使用するための管理目標値を設定するなどの被曝管理方法を確認するなどの、被曝管理方法も必要となる。

原子力施設は、施設自身の耐震性や放射線遮蔽のため、厚さが1m以上もある鉄筋コンクリート製の壁、鉄、鉛あるいはタングステン製の遮蔽体が随所に配置されており、無線通信用の電波も遮られてしまうことから、このような施設内でもロボットとオペレータの操作装置間の通信の伝達性を確保することが求められる。さらに過酷事故が発生した際には、ロボット以外にも緊急時対応のためのモニタリング装置やトランスシーバーなど多数の機器が無線通信を使用することが予想される。実際、福島第一原子力発電所事故の際には、多くの機器が無線通信を使用したため、無線の衝突や干渉という通信障害が発生している。このように、耐故障性や冗長性だけではなく、被曝管理や通信性という機能構成や機能要素が必要となる。

3.1.2.1 被曝管理

第6章で後述するように、ロボット等を構成する部材の中で、耐放射線性が低いのはCPUやCCD等の集積度の高い半導体素子であり、ロボットの耐放射線性はカメラを含む電子回路に用いられる半導体素子の耐放射線性に依存している。高放射線下で使用するロボットの信頼性を確保するうえでは、半導体素子の耐放射線性の評価、半導体素子の耐放射線性の強化、半導体の耐放射線性の被曝管理目標値の設定、半導体の被曝評価方法等が必要となる。

半導体素子に放射線を照射した時の損傷形態は、シングルイベント効果、トータルドーズ効果、はじき出し効果の三種類がある（図 3-5）。

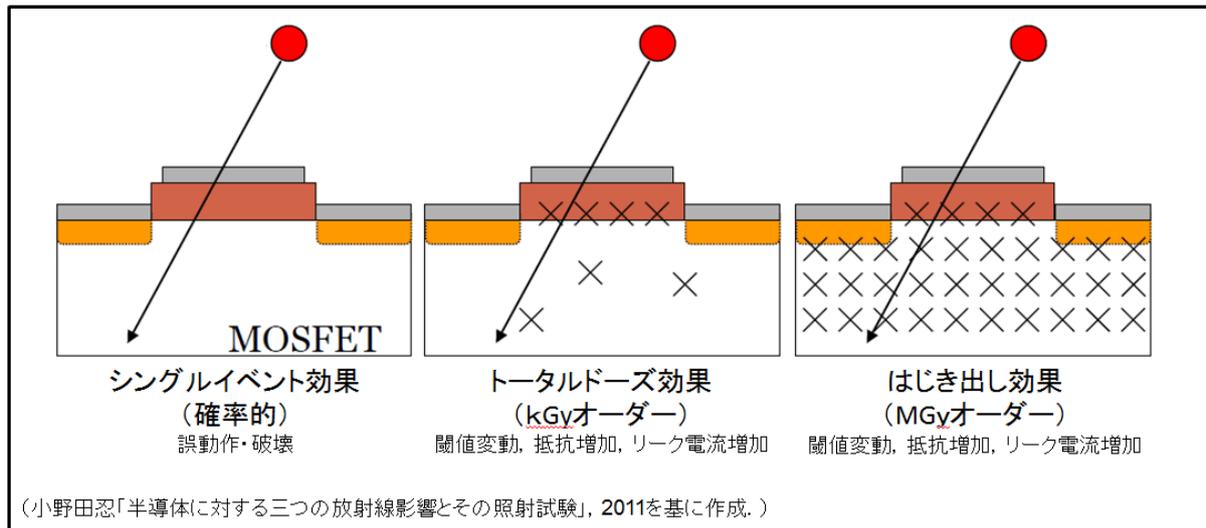


図 3-5 半導体の放射線損傷の形態

シングルイベント効果はアルファ線のような重粒子線が半導体素子を通過した際に、電荷が移動してしまうことにより、半導体素子が誤動作するものである。場合によっては半導体素子の酸化膜等が破損して、半導体素子そのものが破損することもある。宇宙ロケットや宇宙探査船が、上述のヴァン・アレン帯を通過する際に、シングルイベント効果が発生することが知られている。原子力施設では、アルファ線などにより起り得るが、アルファ線の飛程は **2-3cm** であり、また核燃料が被覆管内にとどまっている限り、シングルイベント効果は殆ど問題とされないと考えられる。

トータルドーズ効果は、ガンマ線等が半導体素子を通過する際に、半導体膜やゲート部の原子の電子を励起させて、正孔が生成してしまい、その結果としてゲート電圧の閾値が変動したり、ゲート通過時の抵抗値が増加したり、リーク電流が増加したりする現象である。原子力施設では最も可能性の高い放射線損傷の形態である。

はじき出し効果は、アルファ線やベータ線など、比較的エネルギーの強い粒子線によるもので、半導体膜や酸化膜だけではなく、半導体母材に発生した正孔などの放射線損傷が、半導体膜付近に移動してしまいその結果、トータルドーズ効果と同様に、ゲート電圧の閾値が変動したり、ゲート通過時の抵抗値が増加したり、リーク電流が増加したりする現象である。原子力施設ではベータ線による放射線損傷の可能性はありうるが、ベータ線はアルミホイルで遮蔽できるものであり、核燃料が被覆管内から出てしまってその表面から放射されるものであり、通常の原子力施設や過酷事故を起

こした原子力施設では、はじき出し効果は殆ど問題とならないと考えられる。

1) 半導体素子の耐放射線性評価

半導体素子の耐放射線性は、半導体の母材、製造プロセスおよび集積度等に大きく依存することが知られている。ロボットを構成する部品や材料の中で最も耐放射線性が低いのが電子回路中の半導体素子であることから、ロボットの耐放射線性は事実上半導体素子の耐放射線性により律速されている。そのため、ロボットに使われている半導体素子の耐放射線性を調べておくとともに、必要に応じて耐放射線性を向上する対策が必要である。半導体素子の耐放射線性は、上述の様に、母材や製造プロセスに依存していることに加えて、型番が同じでも製造ロットが異なると半導体素子の耐放射線性が変わること、同一ロットでも個体差がある程度はあることが知られている。

原子力施設の保守ロボットでは、予めマニピュレータに使うのと同種の半導体素子を用いて、放射線による照射試験を行い、半導体素子の耐放射線性を確認しておき、より高い精度で耐放射線性を知る必要がある時は、実際のマニピュレータに使うのと同じ型番、同じロットの半導体素子による放射線照射試験を実施して、耐放射線性を評価することが可能である。一方、既に開発されたり存在していたりするロボットを緊急時に投入する場合、ロボットの電子回路に使用されているものと同じ型番あるいは同一ロットの半導体素子が入手できずに照射試験ができなかったり、照射試験を実施する時間的な余裕がなかったりする場合は、過去の照射試験データ等から推測する方法もありうる。

2) 半導体素子の耐放射線性の向上

半導体素子の耐放射線性が、目標とするロボットの耐放射線性に達しない場合は、半導体素子の耐放射線性の向上策を講じる必要がある。

① 高耐放射線性半導体素子開発を行う方法

前述のように半導体素子の母材や製造プロセスを、耐放射線性の高いものに変更した半導体素子を開発する方法。原子力保守用ロボットのために開発した例がある[46]。

② 市販半導体素子に補償回路を追加して耐放射線性を向上させる方法

半導体素子に放射線、特にガンマ線が照射された時の放射線影響である、ゲート電圧の閾値が変動量、ゲート通過時の抵抗値が増加量、リーク電流が増加量を事前に把握しておき、その変化量を補償する回路を製作する方法が考えられる。

③ ディスクリート半導体素子による電子回路で耐放射線性を向上させる方法

半導体素子の耐放射線性はその集積度により大きく依存することが知られており、集積度の低いディスクリート半導体素子で構成した電子回路を開発して、ロボットに搭載することで、電子回路の耐放射線性を向上させることができる。

④ 半導体素子に放射線遮蔽を施す方法

半導体素子を含む電子回路を鉄、鉛あるいはタングステンなどの重金属に「より遮

蔽する方法が考えられる。電子回路を極力小さく製作してもそれを覆う遮蔽体は数十 kg から数百 kg になることから、中型以上のロボットにしか採用できない。また原子力緊急時ロボット等を廃棄する際に、鉛などはそのまま廃棄できないことなども考慮する必要がある。

⑤ 半導体素子を含む電子回路をロボット本体から移動する方法

ロボット本体からサーボモータドライバ等の電子回路からなる制御部を外し、放射線量の低い環境、例えばオペレータが操作する操作卓などに移動する方策がある。これらの場合、ロボット本体と制御部のあいだを多芯ケーブルでつなぐ必要がある。多芯ケーブルは太く長距離のケーブルをリールに巻いてロボットに搭載することはできず、ロボットはこの多芯ケーブルを引きずって走行する必要があり、ロボットの走破性能を大きく低下させることも考慮する必要がある。

⑥ 半導体素子を含む電子回路を交換する方法

ロボットの放射線被曝量が、市販半導体素子などからなる電子回路の耐放射線性を超える前に電子回路を基盤単位などで交換する方法が考えられる。この方法、特に市販半導体を使用する場合は、耐放射線性が低いことから、比較的放射線被曝が低い場合にしか適用できない。また頻繁に電子回路を交換する必要があることから、電子回路を用意に交換できるようにするとともに、交換後の調整も容易に行えるようにする必要がある。

以上を纏めると表 3-1 のようになる。

表 3-1 電子回路の耐放射線性の向上策

		開発コスト	開発期間	その他
1)	高耐放射線性半導体素子を開発する方法	大	長期間 (2-3年以上)	小型軽量化が可能
2)	市販半導体に補償回路を追加する方法	中	中期間 (1-2年)	
3)	ディスクリート半導体素子による電子回路で耐放射線性を向上させる方法	中	中期間 (1-2年)	中型以上のロボットにしか適用できない
4)	半導体素子に放射線遮蔽を施す方法	小	短期間	中型以上のロボットにしか適用できない
5)	半導体素子を含む電子回路をロボット本体から移動する方法	中	中期間 (1-2年)	
6)	半導体素子を含む電子回路を交換する方法	極小	短期間	比較的low被曝の環境にしか適用できない

3) ロボットの被曝管理目標値の設定

前述した電子回路の耐放射線性向上方法のどの方法を採用するにせよ、向上策を講じずにロボットが本来有している耐放射線性まで使うにせよ、ロボットが放射線損傷により不可動になると、作業を完遂できなくなるだけではなく、不可動となったロボットが後続のロボットの作業の支障になることもあり得る。

そのため、ロボットの耐放射線性を評価したうえで、ロボットの被曝管理目標値を設定して、被曝管理を行う必要がある。管理目標値を設定するうえでは、ロボットの耐放射線性を律速している半導体素子の耐放射線性には個体差が大きいことから、適切な裕度を持たせておくことが必要である。

4) ロボットの被曝量評価方法

前小節で述べたロボットの被曝管理目標値を、ロボットの被曝量が上回らないように、ロボットの放射線被曝量を計測しながら、ロボットの被曝管理を行うことが重要である。最も放射線損傷し易い部位が電子回路の半導体素子であることを考えると、放射線被曝を計測する放射線集積線量計は電子回路近傍にあることが望ましい。しかしながら、電子回路の設置場所がロボットの内部奥であったり、遮蔽体内であったりした場合は、放射線集積線量計の値を確認するのに時間がかかる可能性もある。その場合、汚染したロボットからオペレータや保守要員の放射線被曝量が増大する可能性がある。そのため、放射線集積線量計の値と電子回路の放射線集積被曝量の相関関係が明らかな場合は、オペレータや保守要員が容易に放射線集積被曝量を確認できる場所に変更することも考慮すべきである。

3.1.2.2 通信性

1) 伝達性

過酷事故発生時に原子力発電所等に近づくことができず、1～数 km 離れた遠隔地からの通信が伝達できる機能が必要となることが懸念される。原子力発電所等の建屋内には、コンクリート製や鋼板製の遮蔽体に加え、耐震性のために強固な鉄筋コンクリート製の耐震壁などが設置されており、無線通信の電波の到達性が悪くなり、結果として通信の途絶や遅延などが多発することが懸念される。そのため、原子力保守用ロボットでは多くの場合、ケーブルによる有線通信を採用していることが多い。しかしながら、チェルノブイリ原子力発電所事故では約 50 台のロボットが投入され、その多くが有線ロボットであったが、有線ロボットの場合は、瓦礫、柱や壁等にケーブルが干渉したため、ロボットの動力性能に影響が出て、オペレータの想定した動きと異なる動きをすることから、ロボットの操作性にも影響がでた。

福島第一原子力発電所事故後に投入された日本原子力研究開発機構の JAEA-3 号ロボットでは、各モータの信号や動力を複合ケーブルで接続していたことから、複合ケーブルは直径 30 mm 程度のケーブルと太いものになった。この太い複合ケーブルが原

子炉建屋内の構造物等と擦れ合いながら内部に進入する必要があったために、ロボットの前進速度が遅くなったり、ケーブルらに引っ張られて、安定して直進ができなくなったりするなど、動力性能への影響が見られた。

以上を纏めると表 3-2 の様になる。

表 3-2 原子力施設での通信伝達性の向上策

	通信方式	伝達性向上方法	備考
屋外	無線	長距離通信用 マスト付アンテナ	
		無線中継器	<ul style="list-style-type: none"> 通信遅延の懸念 他の無線通信機器との衝突や干渉の懸念
屋内	無線	無線中継器	<ul style="list-style-type: none"> 通信遅延の懸念 原子力施設内の鉄筋コンクリート製構造物や遮蔽物による通信伝達性が損なわれる危険性がある。
	有線		<ul style="list-style-type: none"> 複合ケーブルはロボット動作性能低下の懸念 ケーブルやコネクタの損傷の懸念

2) 通信遅延対策

原子炉建屋内の無線伝達性を確保するため無線中継器を使用した場合、通信途絶や遅延が発生する。ロボット、特に偵察ロボットのような小型ロボットの動力性能を確保する観点から無線通信を用いる場合には、通信途絶や遅延により、オペレータがリアルタイムでロボットやロボット周辺の状況を把握し、判断し、操作することが困難であることから、ロボットが外界センサ等で検知し、障害物等を検知した場合は、ロボットの動作を停止（ドローンの場合はホバリング）したり、オペレータに障害物の存在や動作停止していることを知らせたり、オペレータからの指示を待つて次の操作に入れるような、半自律制御機能も有効と考えられる。

3.1.2.3 耐故障性

原子力緊急時ロボットが緊急時対応中に故障することは、作業が未達成に終わるだけでなく、後続ロボットの作業の障害に繋がる。そのため、原子力ロボットを構成する部品は最先端のものよりも、産業ロボット等で実績のある部品を用いることが望ましい。

3.1.2.4 冗長性

原子力緊急時ロボットで、環境条件等により、実績ある部品を使うことができない場合は、部品を重畳化し、万が一、一つ目の部品が故障しても、バックアップの二つ目の部品により、作業を継続あるいは、作業を中断して帰還できるようにしておく必要がある。冗長化することにより、ロボットや周辺機材が大きくなり、ロボットの搬送性や走破性能などに影響することもあり得る。そのため、冗長化を図ることが必ずしも良い訳ではなく、ロボットシステムとしてはマイナス方向に働く可能性もある。したがって、ロボットが故障した場合のリスク評価を行った上で、冗長化を図るか否かを判断する必要がある。

以上、本項で述べた信頼性という要求機能の機能構成と機能要素を纏めると、図 3-6 のようになる。

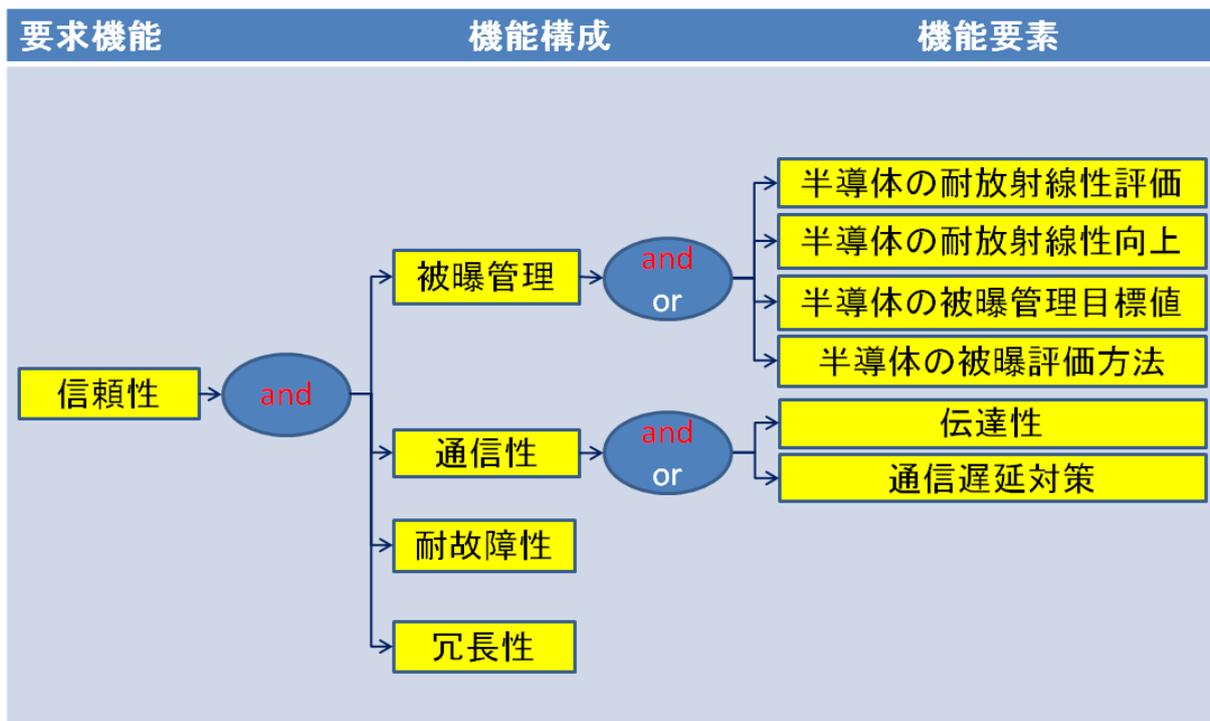


図 3-6 信頼性に係る機能構成と機能要素

3.1.3 除染保守性に係る機能構成と機能要素

原子力緊急時において、ロボットを複数回にわたって投入する必要があることは、チェルノブイリ事故、福島原発事故での先行事例調査結果から明らかである。

特に高汚染下で使用する場合は、ロボットの保守を行うために、除染性や保守性を高めておくことが極めて重要である。

3.1.3.1 除染性

緊急時対応で使用する汚染されたロボットを緊急時対応後に再利用するだけでなく、緊急時対応期間中に繰り返し使用するためには、ロボット等の再充電やバッテリー交換、場合によってはロボットや周辺機材の部品交換を行う必要がある。その際の保守要員やオペレータの放射線被曝を低減させるために、高汚染環境下から帰還してきて汚染されたロボットの除染や、ロボットが汚染しないように防染対策を施しておく必要がある。

1) 除染方策

原子力災害で放射線源として問題になるのは、多くは **Cs-134**、**Cs-137**、**I-131** 等である。**I-131** は半減期が **5.5** 日であり **2** か月で **1/1000** 以下に減衰してしまうとともに、水に容易に溶解しやすいため、水スプレーによる除染が有効である。**Cs** も水等に溶解し易く、多くの場合 **Cs** が吸着したコンクリート粉塵や土壌等がロボットに付着することが、主たる汚染形態であることから、ロボットは水スプレー等による除染が可能なように防水性にしておくことが一般的である。

2) 防染性

Cs が吸着したコンクリート粉塵がロボット等の表面の微細な凹凸部に取り込まれると、水スプレー等だけでは容易には除去しがたい。そのため、ロボット表面を、ステンレス製で鏡面仕上げにしたり、塗装仕上げにしたりすることで、**Cs** が吸着した粉塵が付着しにくいようにすることも重要である。さらに摺動部などに **Cs** 吸着した粉塵が付着したりすると、除染が困難になることから、ビニール製のカバーで覆うなどの防染対策も一般的である。

3.1.3.2 保守性

1) バッテリーの再充電または交換性

事故発生現場に投入され帰還したロボットを再度利用するために、バッテリーの再充電または交換が必要となる。汚染環境下に投入されたロボットも汚染しており、バッテリーの再充電や交換に時間がかかると、オペレータの被曝増加につながる。そのため、バッテリーの再充電や交換は短時間で行える様にしておく必要がある。ロボットは上述のような除染性を考慮して、防水扉を有していることが多く、これを短時間で、容易に開閉できるような工夫も必要である。

2) 給油性

無人建設重機のような大型ロボットの場合は、バッテリー駆動ではなく、エンジン駆動の場合が多く、上記のようなバッテリーの再充電や交換の代わりに、給油という

作業が必要となる。上記同様、防水扉があることが多く、同様に、短時間で、容易に開閉できるような工夫も必要である。

3) 改造容易性

前述のプラットフォーム&ツール機構等の対策を施しておくことにより、過酷事故が発生した現場での状況に、ある程度の対応が可能となることが期待される。しかしながら、過酷現場の発生現場の状況は実に様々であり、プラットフォーム&ツール機構等だけでは、現場の状況に対応できないことも十分に予想される。そのため、必要に応じてプラットフォームとツールを、過酷事故が発生した現場で、オペレータが現場の状況に応じて、現場で改造できることも重要である。しかしながら、短期間で所要の部品を入手したり、改造に協力してくれる企業を手配したりすることは難しく、特に自然災害と複合した災害の場合は、物流も困難になっている可能性がある。

上述のような事故発生現場でオペレータ自身による改造を可能とするために、ロボット（プラットフォーム&ツール）は極力汎用部品で構成しておくとともに、入手困難な防水コネクタ、特殊モータ等は、極力種類を少なくして、備蓄しておくことが必要となってくる。また、ロボット（プラットフォーム&ツール）の制御ソフトウェアはオペレータまたは第三者のソフトウェア職員による改編が可能のように、極力オープンソースで製作する等、ブラックボックス化しないように務めることが重要である。

4) 部品交換性

事故発生現場投入後に帰還したロボットの点検保守で、最も頻度の多い作業は再充電等である。再充電であれば、電池を充電済みのモノに交換するのでも、充電用ケーブルの着脱でもそれほどの時間はかからず、どちらの方法も大差ないと考えられる。ただしバッテリーにリチウムポリマー電池を使用する場合は、充電前のバッテリーの健全性の確認や、発火の危険性がある充電中に監視をする必要がある場合もあり、バッテリーごと交換してしまう方法も考慮しておく必要がある。

一方不具合等の補修の場合、不具合部品の特定、修理、修理後に正常であることの確認などの手順を追って作業する必要があり、このような非定常作業は往々にして時間を要するものであり、この間のオペレータの放射線被曝も考慮する必要がある。対策の一つの方法として、ロボットで不具合の発生頻度が高いと考えられる部品を一括して新品または点検補修済みのものと交換してしまう方法が考えられる。この場合は部品の交換性を高めて、部品交換と正常であることを点検する時間を短縮することを考慮する必要がある。

以上述べてきた、除染保守性に係る機能構成と機能要素を纏めると図 3-7 ようになる。

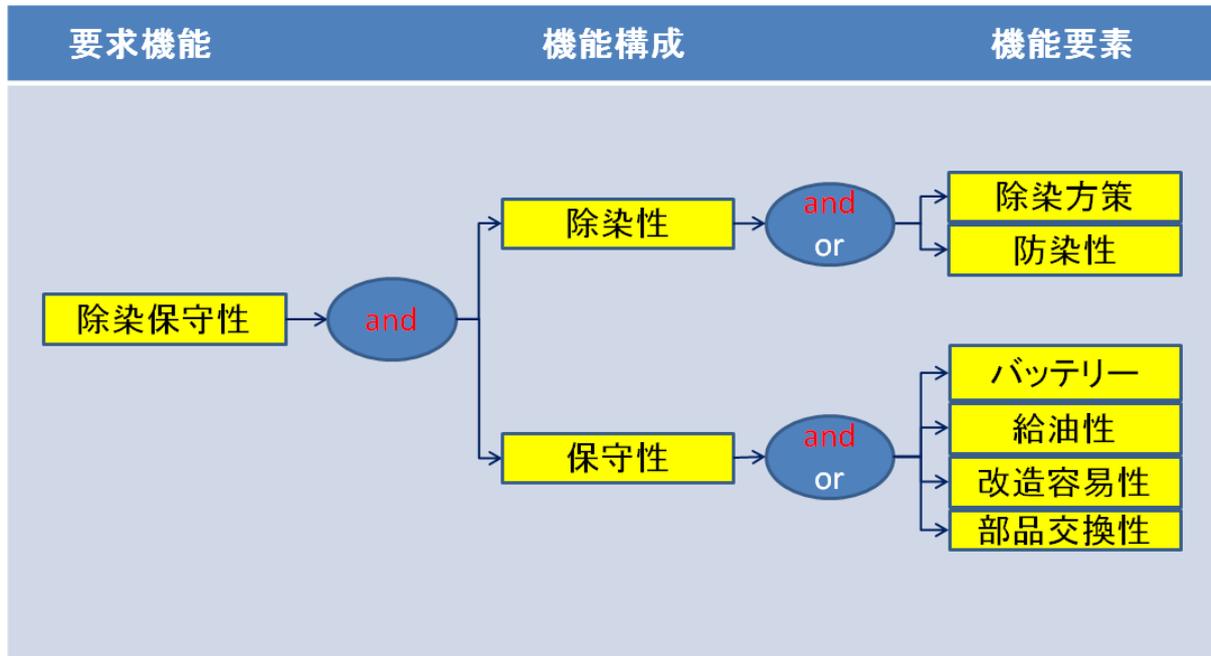


図 3-7 除染保守性に係る機能構成と機能要素

3.1.4 作業性に係る機能構成と機能要素

原子力緊急時ロボットが、作業員に替わって高放射線下、高汚染下で投入される際に期待される作業は、作業員が入域可能か否かを判断するための先行調査や、作業員では危険な場合に、作業員に替わって扉を開放したり、作業員の安全を確保するための遮蔽体を設置したりする作業が主である。

調査するにせよ、扉を開閉するにせよ、遮蔽体を設置するにせよ、ロボットには作業を行う場所まで移動する機能が必須で、その上で作業を行えることが求められる。

作業を行う上で、調査を行うツールとしての調査機器が必要になり、扉開閉や遮蔽体設置にはマニピュレータアームなどのマニピュレーションツールが必要となる。

3.1.4.1 移動機能

1) 走破性

調査や作業を行う場所までロボットは移動する機能が必須で、原子力施設内では、階段や汚染拡大防止のための堰を、場合によっては水素爆発や水蒸気爆発などにより飛散した瓦礫上を走破することも必要である。チェルノブイリ事故では、タービン建屋屋上で飛散した高放射化した黒鉛を撤去するために等に車輪型の移動機構が使われた例はあったが、クローラタイプの移動機構も多用されている。福島原発事故の場合、

JAEA-3号のような車輪型の移動機構もあったが、殆どのロボットの移動機構はクローラ型であった。これらは、走行系ロボットでは走破性が優先された結果と推察される。また、原子炉建屋内の扉は内法で700 mm程度の扉が多用されており、移動機構は、これらの狭隘部を通過できることも要求される。

また、移動機構に要求される可搬重量は、先行調査用の偵察ロボットと、扉開放や遮蔽体設置などの軽作業ロボットでは異なる。前者の偵察ロボットでは搭載機器は、25～35 kg程度のガンマ線可視化計測装置等が想定され、移動機構自体の自重は30～40 kg程度のものとなると思われる。後者の軽作業ロボットでは、扉開放用のアームや遮蔽体を運ぶこと、100 mm程度の堰等の段差を乗り越えることができること、700 mm程度の狭隘部を通過できることなどを考慮すると、移動機構自体の自重は300～400 kgで、可搬重量300～400 kg程度の中型の移動機構とになることが想定される。

2) 飛行性

瓦礫の上部を走破することは、瓦礫の強度や安定性が判らない限り、走破中に転倒や転落の恐れがあり、緊急時では避ける傾向がある。そのため、瓦礫を超えてより奥の状況を調査するためには屋内を飛行できるドローン等も必要になってくる。

3) 水中遊泳性

過酷事象を想定すべき原子力施設は、高いエネルギーを内蔵している使用済み燃料等を有している実用発電用原子炉（原子力発電所）、研究段階発電炉、試験研究炉、再処理施設である。過酷事故が発生した場合に必要となる水中での作業は、主として使用済み燃料を保管するためのプールである水素爆発などにより飛散した瓦礫で使用済み燃料が損傷をしていないか等である。そのため、使用済み燃料の状態を調査するための水中ロボットも必要である。プールで使用するロボットは海中や湖沼で使用するものに比べて、小型で、狭い場所で横方向への移動など小回りの利くものが望まれる。またこれらプール際には転落防止のための柵や燃料取扱い装置のためのレール等が設置されているため、これらを超えて水中ロボットを投入するための道具なども必要となる。

3.1.4.2 調査機能

原子力緊急時の先行偵察用の調査機器としては、作業員が事故発生現場に入域できるか否かの判断に資する調査であり、放射線計測、可燃ガス検知、温湿度計測、音声計測、サンプリング等の機能が必要となる。放射線計測では瓦礫等に阻まれて走行ロボットが進入できない場合に、ガンマ線の飛来方向やそのガンマ線強度を計測できるガンマ線可視化計測装置も重要となる。

3.1.4.3 マニピュレーション機能

先行調査の結果、作業員が入域しても安全と確認されれば、作業員が入域して、状

況を確認して、過酷事故を収束させるための様々な作業の殆どは作業員が行うことになる。しかしながら、過酷事故が発生した原子炉建屋では、建屋内に大量の放射性物質や水素が存在している可能性もあり、内部状況が判らないまま、作業員が原子炉建屋の扉を明けることは危険である。そのため、扉をロボットで開放する必要がある。さらに先行調査の結果、放射線環境が作業員では行えないほど高いことが確認された場合には、作業員が作業できるように、遮蔽体運搬等の作業もロボットで行う必要がある。

以上述べてきた作業性の機能構成と機能要素を纏めると、以下の図 3-8 の様になる。

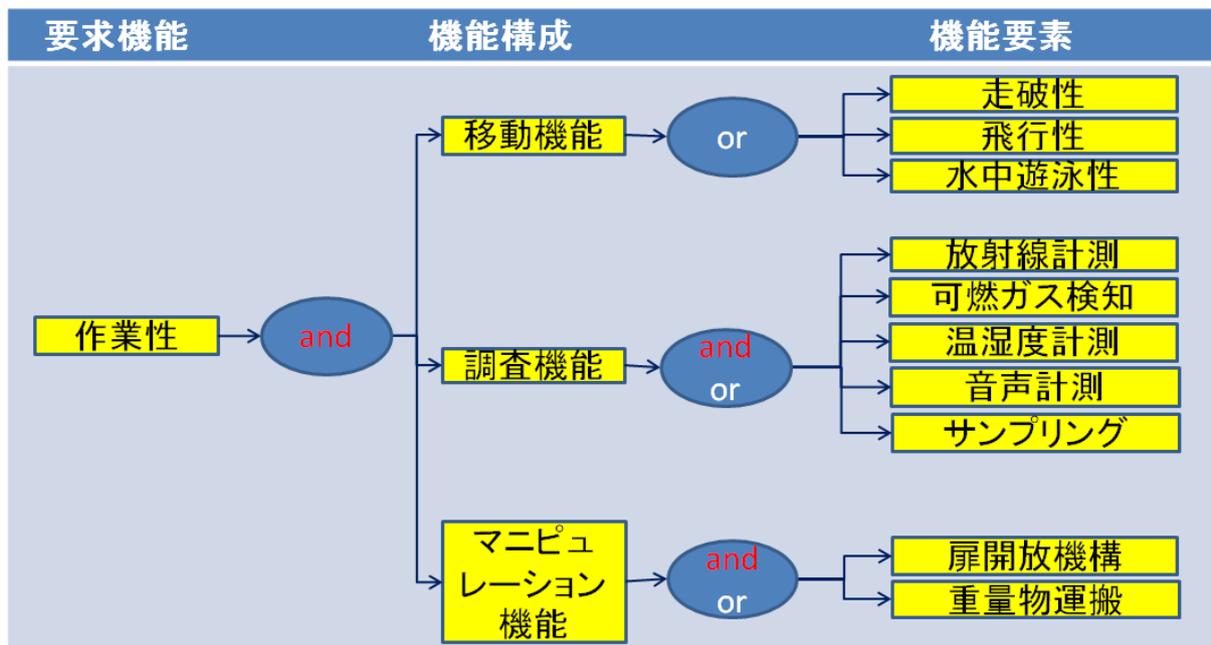


図 3-8 作業性に係る機能構成と機能要素

3.2 機構要素と構造要素

原子力緊急時ロボットの機能構成及び機能要素同様に，原子力保守用ロボットと比較して，原子力緊急時ロボットに必要となる機構要素および構造要素について，これまでに適用可能なものと，それらの完成度を整理する。

3.2.1 即応性に係る機構要素と構造要素

3.2.1.1 技能者確保

1) 整備機能

整備機能に対する機構要素としては，ロボットおよび周辺機材整備のための要員を確保するとともに，平時からこれらの機材をこれらの要員をもって整備しながら，整備に関する教育訓練を行うこと第一の解決策である。

2) 操作能力

操作能力に対する機構要素としては，整備機能と同様に要員を確保するとともに，要員に対する操作訓練が解決策である。

整備機能及び操作能力に対する構造要素としては，予算を確保したうえで運用組織を設立することが考えられる。この例としては，ドイツ原子力緊急時対応ロボット部隊の **KHG** やフランスの **GroupeINTRA** がある。この背景としては国民，原子力事業者あるいは政府として，この必要性を理解できていたからと考えられる。日本でも福島第一原子力発電所事故の後に，このような組織の必要性が認識され，整備されつつある。

3.2.1.2 搬送性

1) 陸送性

陸送に対する機構要素としては，トラックやトレーラが一般的であり，ドイツ **KHG** やフランス **GroupeINTRA**，日本では東海村 **JCO** 臨界事後に開発された原子力緊急時ロボットでも採用されている。

2) 空輸・海運性

自然災害と複合した原子力災害が発生した場合は，陸送では対応できなくなる可能性がある。しかしながら陸送できなくなる可能性可能性と，遠隔緊急時ロボットと周辺機材を運ぶための輸送機や輸送ヘリあるいは船舶を用意しているその事例はない。

福島第一原子力発電所事故の時にも，ごく一部の例を除き陸送でロボットや周辺機材を搬送できている。しかし，今後起きるかもしれない事故でも陸送が必ず可能であるとは言い切れない。その際には自衛隊の輸送機，輸送ヘリあるいは輸送艦による搬送を考慮する必要がある。トラックやトレーラで輸送することを想定していたロボッ

トや周辺機材を，これらの輸送機，輸送ヘリや輸送下で運べるよう，技術的考慮はしておくことが望ましい。

3.2.1.3 放射線安全性

1) 距離

高放射線環境から距離をとるための解決方策としては，遠隔操作型ロボットを用いること自体が，最も代表的な機構要素である。

2) 時間短縮

オペレータが放射線環境下でロボットの投入，操作や回収を短時間で行う方法としては，トラックやトレーラで投入場所まで運搬することとともに，トラックからの積み下ろしや，回収後の積み込みを短時間でを行うためにリフタ等の応用が考えられる。

3) 遮蔽

オペレータの放射線環境下での操作時間を短縮できない場合は，操作時間中の放射線被曝を低減するための遮蔽体をロボットと共に用いることが有効と考えられる。

3.2.1.4 現場適応性

1) 統合化

実際の事故発生現場ではロボット単体で運用することが難しいのは，第2章の調査結果や3.1項の課題の整理で明らかである。原子力緊急時ロボットを実際の事故発生現場で運用するためには様々な資機材を纏めて一括で運搬・投入するための統合化が必要となる。

統合化の例としては，ロボットとそれを運用するのに必要となる様々な機材や資材を，トラックバンを改装したロボット操作車に，一括搭載して運用する方法である。この方法は単に必要な機材や資材を一括化するだけでなく，前述の陸送性や事故発生現場での操作時間の短縮などにも寄与できる。また，車両の選択次第では，自衛隊のC-130輸送機やC-1輸送機のほか，Ch-47輸送ヘリにも搭載可能である。さらに車両であれば，殆どのフェリーにも搭載可能である。

2) 組合せ

事故発生現場での瓦礫や階段を走破したり狭隘部でも通過したりできる移動機構と，その上に搭載して調査や瓦礫撤去などの作業を行うツールを複数ずつ用意しておいて，事故発生後に，その状況に応じて組合せを自在に変更できるようにすることを，福島第一原子力発電所事故後にドイツKHGで検討が始められている。このようなプラットフォーム&ツール機構は，様々な状況に対応できるように予め，計画・設計段階で準備できるため，有効と考えられる。

3) 部品共用性

事故発生現場の状況に併せて，ロボットの改造を短時間で容易に行うためには，部

品そのものを共用化するだけでなく、場合によっては部品とロボット筐体等との取合いやコネクタを共通化しておく方法も有効と考えられる。

4) 可搬性

ロボットおよび周辺機材を纏めて、ワンパッケージとして事故発生現場で運用することが難しい場合は、ロボットと周辺機材を分割して、オペレータ等による可搬性を向上することも有効と考えられる。

3.2.1.5 操作性

1) マンマシンインターフェース

オペレータが厳しい環境下で、ロボットを的確に操作するため、マンマシンインターフェースが必要である。マンマシンインターフェースは、原子力保守用ロボット、自動車運転、列車の運転等での事例が多くあり、これらを流用することが可能である。

2) フェールセーフ

オペレータは厳しい環境下で、ロボットの操作をミスしても、重大事故に繋がらないようにするためフェールセーフ機能が必要である。フェールセーフ機能も、原子力保守用ロボット、自動車運転、列車の運転等での事例を流用することが可能である。

以上、本項で述べた即応性に対する要求機能に関する機能構成と機能要素を纏めると図 3-9 のようになる。

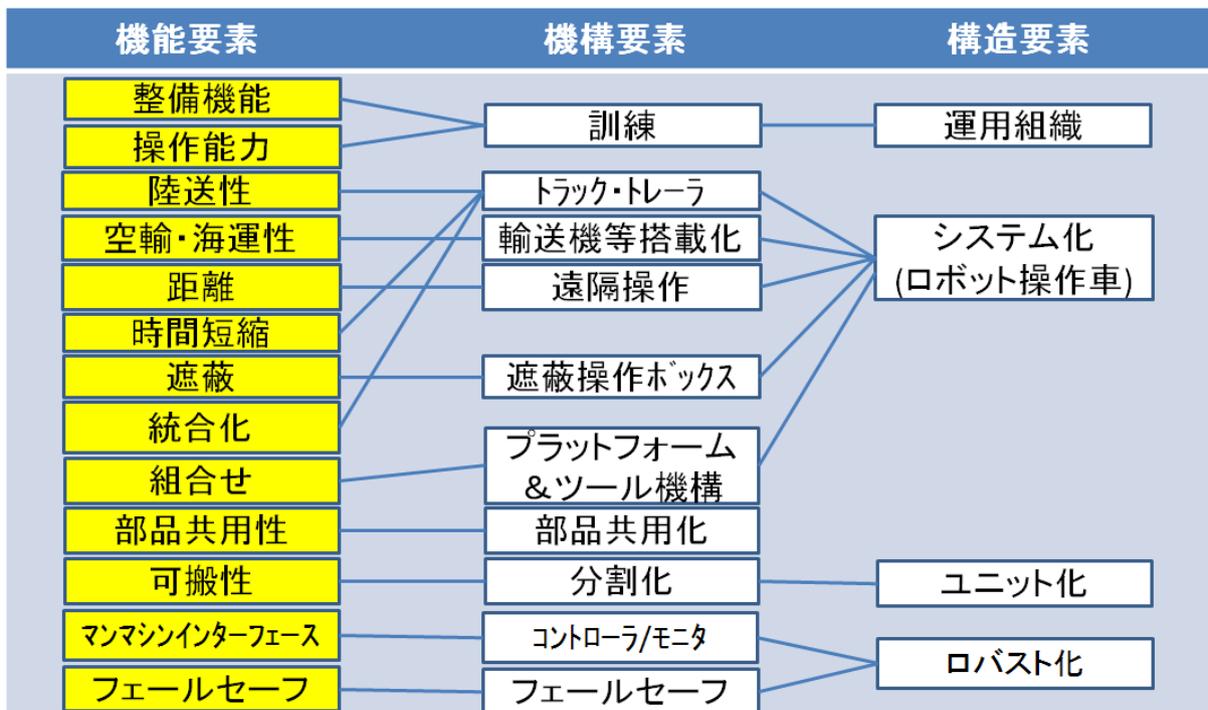


図 3-9 即応性に係る機構要素と構造要素

3.2.2 信頼性に係る機構要素と構造要素

3.2.2.1 被曝管理

1) 半導体素子の耐放射線性評価

半導体素子の耐放射線性を評価する方法としては、すく数の試験体を用いて照射試験を行い統計処理する方法が最も確実な方法である。しかしながら、ロボットの製造時期から期間が経って評価する場合は、ロボットの電子回路に使用されているものと同じ型番あるいは同一ロットの半導体素子が入手できずに照射試験ができなかったり、照射試験を実施する時間的な余裕がなかったりする場合は、過去の照射試験データ等から推測する方法もある。

2) 半導体素子の耐放射線性の向上

① 高耐放射線性半導体素子開発を行う方法

新たに高耐放射線性のために開発された半導体素子は、核兵器が使われるような戦闘で使用されるミサイルや戦闘機に搭載する半導体素子や、地上 2,000~20,000 km に地球を取巻いている重粒子が多く存在するヴァン・アレン帯を通過するための宇宙ロケットや宇宙探査船に用いられる半導体素子に、用いられることが多い。高耐放射線性半導体素子数の需要数は多くなく、日進月歩で改良開発が行われる半導体素子に併せて、耐放射線性化のための開発を継続する必要もあり、半導体素子 1 個当たりのコストが高いことがデメリットである。

② 市販半導体素子に補償回路を追加して耐放射線性を向上させる方法

補償回路を追加する方法としては、原子力施設の遠隔保守のために開発された両腕型バイラテラルサーボマニピュレータ等で採用された実績がある。

③ ディスクリット半導体素子による電子回路で耐放射線性を向上させる方法

ディスクリット電子回路による方法としては、ドイツ KHG の MENHIR ロボット等での採用実績がある。

④ 半導体素子に放射線遮蔽を施す方法

遮蔽による方法としては、ドイツ原子力緊急時対応部隊 KHG の Excavator 等で、採用されている実績がある。

⑤ 半導体素子を含む電子回路をロボット本体から移動する方法

原子力施設の遠隔保守のために開発された両腕型バイラテラルサーボマニピュレータ等で採用された実績がある。

⑥ 半導体素子を含む電子回路を交換する方法

ロボットを使用する放射線環境が比較的低く、電子回路を用意に交換でき、交換後の調整も容易に行える場合には、電子回路を交換する方策も有効と考えられるが、実際に応用されている実績は少ない。

3) ロボットの被曝管理目標値の設定

原子力保守ロボットでは、ロボットごとに照射試験を実施することが多く、その照射試験結果を基に、被曝管理目標値を設定していることが多かった。過去の照射試験結果から、半導体素子の耐放射線性には個体差に加えて、母材や集積度の変更を加味して、ロボットの被曝管理目標値を設定した事例は殆どなかった。

4) ロボットの被曝量評価方法

原子力保守用ロボットでは、放射線量は原子力施設ごとに計測・評価しており、ロボットの放射線被曝量を実測して、放射線損傷による故障を事前に防ぐために、電子回路付近に、放射線集積線量計を設置する事例は少ない。

3.2.2.2 通信性

1) 伝達性

無線中継器の事例としては、ドイツ KHG は最大数 km まで無線が届くように 33 m マストを有したアンテナを装備しているほか、東海村 JCO 事故後に開発された屋外調査用ロボットで、無線中継器を開発している例がある。

原子力発電所等の建屋内で、ロボットに制御信号を送るために、フランス GroupeINTRA では、強化同軸ケーブルを装備している。

2) 通信遅延対策

原子力保守用ロボットでは有線で動力と信号の伝送を行っており、原子力緊急時ロボットでも無線だけではなく有線で行っているものも多く、通信途絶対策を施して運用している例はほとんどない。

3.2.2.3 耐故障性

耐故障性については、原子力保守用ロボットのみならず、自動機械、自動車や鉄道などでの研究開発と実用の事例が多くあり、これらの知見を流用することが可能である。

3.2.2.4 冗長性

冗長性についても、原子力保守用ロボットのみならず、自動機械、自動車や鉄道などでの研究開発と実用の事例が多くあり、これらの知見を流用することが可能である。

以上、本項で述べた信頼性に係る機構要素と構造要素を纏めると、図 3-10 のようになる。

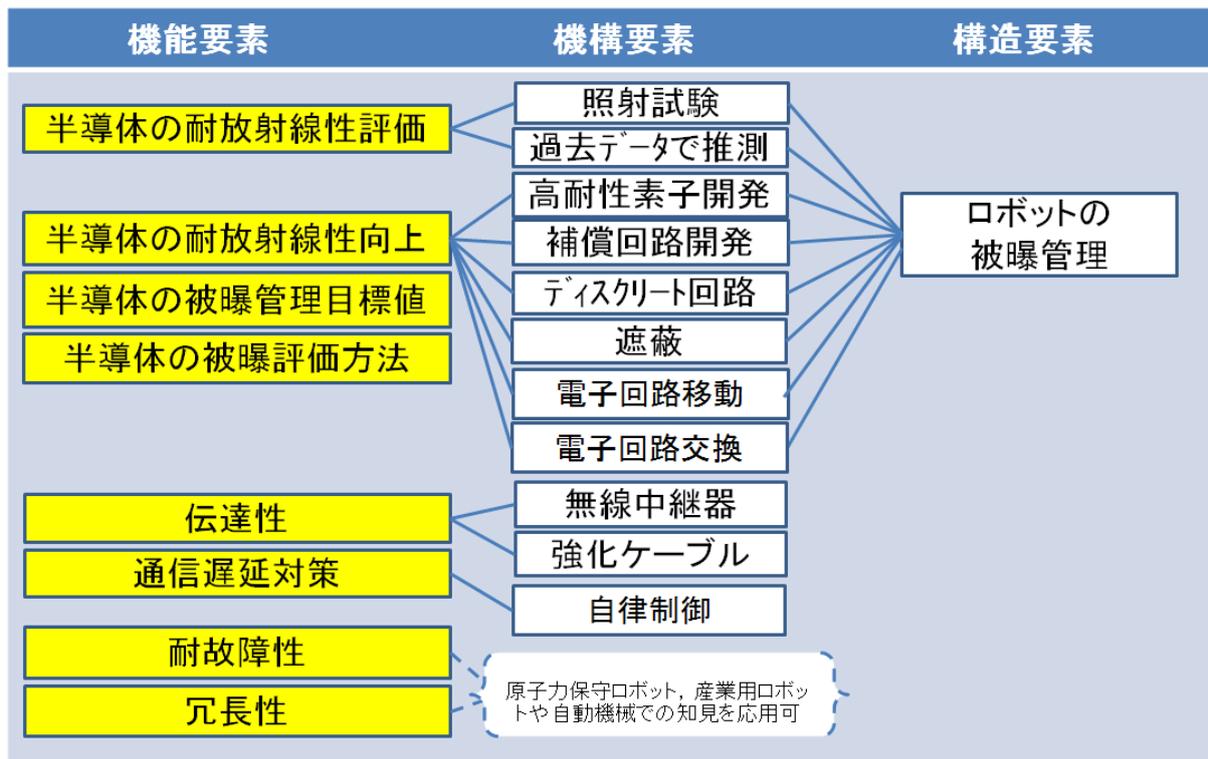


図 3-10 信頼性に係る機構要素と構造要素

3.2.3 除染保守性に係る機能構成と機能要素

3.2.3.1 除染性

1) 除染方策

Cs-134, Cs-137 や I-131 の除染方策としては水スプレーが一般的である。しかしながら部位によっては水スプレーでは除染が困難な場合があることが、福島第一原子力発電所事故で明らかとなり、部位毎の除染方策の確立が必要である。

2) 防染性

水スプレーや前述の部位毎の除染方策でも除染し難い場合には、汚染し難いか除染しやすい材料や塗料の開発,あるいは除染しないような覆いを設けることが望まれる。

3.2.3.2 保守性

1) バッテリーの再充電または交換性

バッテリー再充電用のコネクタ部やバッテリー交換に、自動車等で用いられている工具を用いなくても脱着可能なネジやコネクタが有効で、これらの知見を流用することが可能である。

2) 給油性

給油に、自動車等で用いられている工具を用いなくても脱着可能な機構が有効で、これらの知見を流用することが可能である。

3) 改造容易性

過酷事故が発生した現場の状況に併せて、ロボット等の改造を容易にするために、自動車等で用いられている工具を用いなくても脱着可能なネジやコネクタが有効で、これらの知見を流用することが可能である。

4) 部品交換性

事故発生現場投入後に帰還したロボットの点検保守で、部品交換を容易にするために、自動車等で用いられている工具を用いなくても脱着可能なネジやコネクタが有効で、これらの知見を流用することが可能である。

以上述べてきた、除染保守性に係る機構要素と構造要素を纏めると図 3-11 のようになる。

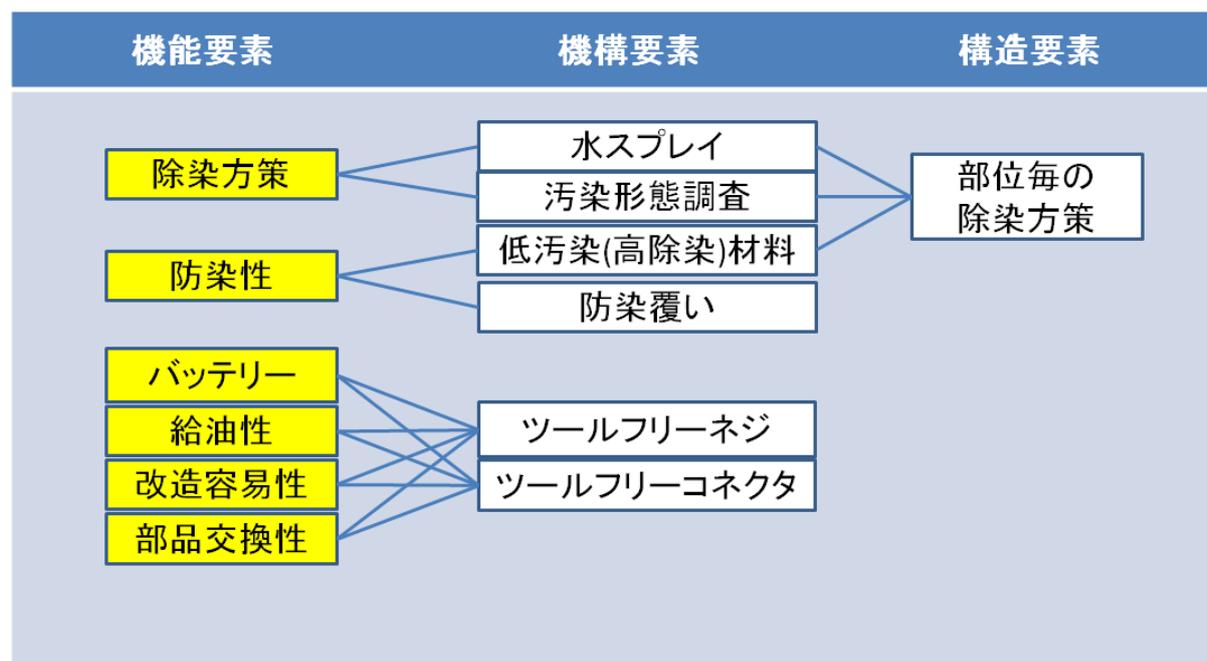


図 3-11 除染保守性に係る機構要素と構造要素

3.2.4 作業性に係る機能構成と機能要素

3.2.4.1 移動機能

1) 走破性

瓦礫や階段、又は狭隘部を操作するための機構要素としては、ドイツ KHG、フラン

ス GroupeINTRA あるいは東海村 JCO 事故後に開発された緊急時ロボットの走行機能としては、クローラやホイールを用いられている事例がある。

2) 飛行性

原子力施設内の瓦礫の上部を走破するのに、ドローン等の新しい技術も有効である。

3) 水中遊泳性

原子力施設内の使用済み燃料プール等の中の調査には、スラスタ駆動による水中ロボットも有効である。

3.2.4.2 調査機能

原子力緊急時の先行偵察用の調査機器としては、放射線量計，ガス検知器，温湿度計，マイク，ダストサンプラ，ヨウ素サンプラ等が有効であり，これらは原子力保守ロボット，産業ロボットや自動機械の知見を流用可能である。

3.2.4.3 作業機能

扉の開放作業や除染作業や遮蔽体運搬設置作業にはマニピュレータ等が有効であり，これらは原子力保守ロボット，産業ロボットや自動機械の知見を流用可能である。

以上述べてきた作業性の機構構成と構造要素を纏めると，以下の図 3-12 エラー! 参照元が見つかりません。の様になる。

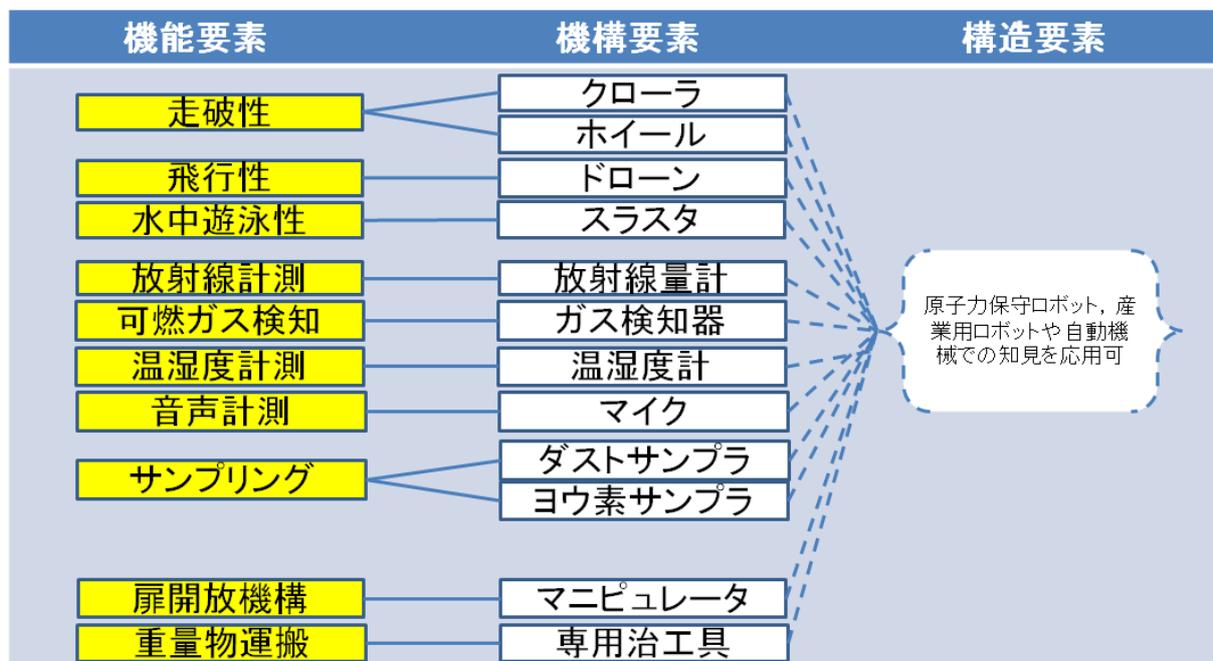


図 3-12 作業性に係る機構要素と構造要素

3.3 原子力緊急時ロボットの課題

前項迄に、原子力緊急時ロボットの要求機能である、即応性、信頼性、除染保守性、作業性毎に、機能構成と機能要素を体系化した。さらに、それぞれの機能要素および機能構成毎に、その機能を満たす可能性のある機構要素または構造要素についても整理した。

要求機能に対する機構要素等については、これまでも考案事例や実施事例はあるが、単なるアイデアや試行段階のものでは、必ずしも十分ではなく、実際の投入事例や実動訓練あるいは模擬訓練等を通じて、実用に耐えうる完成度を有したものでないと、過酷事故が発生した現場で、その機能を十分に発揮できなかったことは、第2章の先行事例からも明らかである。

本項では、前項までに体系化した要求機能毎の機能構成、機能要素に対する機構要素や構造要素の完成度および必要性あるいは緊急性について検証し、原子力緊急時ロボットの各要求機能に関する課題について整理する。

3.3.1 即応性の課題

技能者確保の要求機能のうち整備機能については、運用組織を設置してロボット等の機材の整備を図るとともに、操作能力については機材の基本的な操作方法等を習得する基礎訓練に加え、実際の原子力施設等での様々な制約や環境下での操作に習熟する必要がある。実際の原子力施設を模擬した設備や、実際の原子力施設を利用した応用訓練も必要となる。運用組織を設置して訓練を行っている事例としては、ドイツが、商用原子力発電所が増加する1977年に設置した、原子力緊急時ロボット部隊KHG、フランスがチェルノブイリ原子力発電所事故後の1988年に設置した、原子力緊急時ロボット部隊GroupeINTRAで、基礎訓練や応用訓練を実施している。これらの組織は、幸いにして実際の過酷事故での運用実績はないものの、模擬設備を使用した訓練や、実際に稼働中の原子力施設での実働訓練等の応用訓練により補っている。日本では、東海村JCO臨界事故後に原子力緊急時ロボットの必要性を認めてその開発を行ったものの、運用組織を設置して、ロボット等の維持管理や、オペレータの操作訓練を行うことまでは行っていなかった。福島第一原子力発電所事故後に、原子力緊急時遠隔機材と運用組織の整備を義務付けた改正原子力災害特別措置法の施行に併せて、日本原子力研究開発機構が2012年10月16日に原子力緊急時ロボットの開発整備を開始したが、要員や予算上の制約から、ロボット等機材の整備や基礎的な訓練に留まっている。電気事業者等は共同で、日本原子力発電株式会社原子力緊急時支援センター(J-NEACE)を2012年12月に設立し、ロボットの維持管理と各原子力発電所の運転員にロボットオペレータとしての操作訓練を施している。その後、福井県美浜町に

本格的な訓練施設が2016年12月に建設・運用開始されたことに併せて、発展的に改組されたところである。実際の原子力施設を利用した実動訓練は、原子炉等規制法があり、同法の運用上の課題から、実働訓練を十分に行えるようになるのは今後の課題であると考えられる。運用組織を設置して必要最小限の予算を措置することは、原子力施設を保有する組織や運用組織が一義的に責任を持つべきものであるが、その必要性を認識してその妥当性を支持する国や国民レベルの認識度の問題でもある。

搬送性については、ドイツ原子力緊急時ロボット部隊 KHG やフランス原子力緊急時ロボット部隊 GroupeINTRA など陸送を前提としたトレーラ等の整備、実働訓練や改良を重ねてきている。しかしながら、搬送性は後述する放射線安全性や現場適応性とも密接に関係しており、これらと両立できる機構要素や機構構成としての検討や運用実績を踏まえた、改良開発が必要である。これらの原子力機構や日本原子力発電所の原子力緊急時ロボットの実際の過酷事故時での投入実績は無い状況である。日本では福島第一原子力発電所事故の様に、自然災害との複合災害の可能性が高く、高速度往路や幹線道路が被災して陸送が困難になることも想定され、空輸・海運性も重要な機能要素と考えられる。これは日本特有の機能構成かもしれない。東海村 JCO 事故後の屋外用調査ロボットの運搬制御車や、原子力機構が2012年以降に整備したロボット操作車等は、航空自衛隊の C-130 輸送機で輸送できる寸法形状にしている事例はあるものの、輸送機で実際に事故発生現場に投入した運用経験や、実際に C-130 輸送機に搭載して検証した実績はない。

放射線安全性のうち、放射線源から距離を取るということは、ロボット等を用意することで達成できたと考えられる。ドイツ KHG やフランス GroupeINTRA でロボットを実際に維持管理や運用していることに加えて、日本でも J-NEACE や原子力機構でロボットの維持管理や運用が行なわれたことから達成できていると考えられる。日本では、十分な検討などの維持管理や運用の実績がなく、ドイツ KHG やフランス GroupeINTRA も含めて実際の過酷事故発生現場での運用経験はない。

時間の短縮については、放射線環境下でのオペレータ自身が行う作業時間を短くするため、ロボット等の遠隔機材を事故発生現場に持ち込むためのバントラック等の整備に加えて、実際にロボットを操作できるようにするまでのセットアップに要する時間の低減、必要に応じてオペレータの放射線被曝低減のための遮蔽が必要なことは、チェルノブイリ原子力発電所事故や福島第一原子力発電所事故の先行事例から明らかとなった。ドイツ KHG やフランス GroupeINTRA でも、そのような検討は十分には、なされていない。その背景としては、ロボット等の操作は放射線が十分に低い、遠隔地からロボット等を操作することを念頭に置いていたからで、チェルノブイリ原子力発電所事故や福島第一原子力事故の様に、原子炉建屋での無線の伝達性が十分ではないこと、有線の場合はロボットの動力性能等に影響することからオペレータもある程度はロボットに近づいて、その結果放射線環境下で作業する必要があるということが、

考慮されていなかったからと推測される。このようなオペレータの放射線安全性のための時間や遮蔽のような機能構成は、前述した搬送性の陸運性や後述する現場適応性のシステム化等と密接に関係しており、そのような配慮は十分に検討されてはいないと考えられる。

現場適用性のうち、統合化や組合せについては、ドイツ原子力緊急時ロボット部隊 **KHG** やフランス原子力緊急時ロボット部隊 **GroupeINTRA** 等で部分的に考慮されている例はあるものと思われるが、陸送性や放射線安全性の時間や遮蔽など密接に関係するものを併せて統合した例は殆ど無い。チェルノブイリ原子力発電所事故や福島第一原子力発電所事故が示したものは、「原子力緊急時ロボットは即応性を有さねばならないが、単に、他分野や原子力保守用ロボットで実用化されている技術を統合するだけではなく、原子力緊急時ロボットとして統合化され、その運用を通して、機構要素のみならず構造要素や全体構造としての改良や改善を図って、完成度を上げていったものしか、過酷事故が発生した事故の現場では使えなかった。」ということである。そのため、統合化については、必要性は高いものの、未だ完成度は低いものと判断する。組合せについては、原子力緊急時に想定される様々な状況の全てに応じた準備を予め実施することはできないが、一定程度の可能性のあるものについては準備していること、このような事例は経験とともに蓄積する必要があることから、現時点での必要性は中程度であると判断する。部品共用性については、原子力緊急時ロボットの整備台数が少なく、その必要性は中低でと考えられる。一方で産業用ロボット、鉄道車両や航空機の整備を行う上で、実施している例は多くあり、完成度は高いと判断する。

可搬性については、ドイツ原子力緊急時ロボット部隊 **KHG** やフランス原子力緊急時ロボット部隊 **GroupeINTRA** 等では遠隔操作を基本とすることから、放射線環境下である事故発生現場の中で、オペレータがロボットを持って進み、その先でロボットの操作をするようなことは殆ど検討されていなく、完成度は低いと判断する。

操作性については、原子力緊急時ロボットに限らず、原子力保守用ロボット、あるいは列車の運転や航空機の操縦等の分野でも重要であり、その結果、マンマシンインターフェースのあるべき姿や、万が一のオペレータの操作ミスを考慮したフェールセーフ機能は古くから検討されており、その完成度はかなり高いものと考えられる。

以上を纏めると表 3-3 の様になる。必要性が高いにも関わらず、完成度が低いものについては、早急に研究開発を行う必要があり、備考欄に「○」を付した。

表 3-3 即応性に係る機構要素の必要性と完成度

機能構成	機能要素	機構要素例	必要性	完成度	備考
技能者確保	整備機能	ドイツ KHG , フランス GroupeINTRA 等の運用組織	高	高	
	操作能力	保管施設での基礎的訓練, 模擬設備による訓練, 実施設を利用した訓練	高	高	
搬送性	陸送性	ドイツ KHG やフランス GroupeINTRA などでの高速道路網が整備され, 地震等による高速道路網が寸断されることが無いことを前提としたバントラックやトレーラ等の整備	高	中	○
	空輸・海運性	輸送ヘリ, 輸送機やフェリーへの搭載性を考慮した, 陸送のためのバントラック等の整備	中	中	
放射線安全性	距離	遠隔操作ロボットや機器の整備	高	高	
	時間	事故発生現場への投入や事故発生現場でのロボットのセットアップに要する時間の短縮のための仕組み.	高	中	○
	遮蔽	オペレータ操作場所での遮蔽	高	低	○
現場適応性	統合化	ドイツ KHG やフランス GroueINTRA で部分的に試行した例がある.	高	低	○
	組合せ		中	低	
	部品共用性	産業用ロボット, 鉄道列車, 航空機等での実績がある.	中	高	
	可搬性	爆発を伴う事故現場で適用できるような可搬性の例は殆どない.	高	低	○
操作性	マンマシンインターフェース	原子力保守用ロボット, 鉄道列車の運転, 航空機の操縦等の分野での実績がある.	中	中	
	フェールセーフ		中	中	

3.3.2 信頼性に関する課題

原子力緊急時ロボットの信頼性で最も重要かつ関心が高いものは耐放射線性を含む被曝管理である。ロボットの耐放射線性は言い換えれば半導体素子の耐放射線性である。軍事利用目的や宇宙利用目的に使われる半導体素子については半導体素子の母材や製造プロセスを変更することによる耐放射線性を向上させている例が多い。原子力分野で使用されてきた保守ロボット等については、半導体素子を含む電子回路が置かれる放射線環境は、作業員にとっては高すぎるものの、半導体素子を始めとするロボットの構成部材にとっては高すぎることはない場合も多くあり、市販半導体素子をそのまま使うことも可能である。市販半導体素子にとっては高すぎるような放射線環境下では、半導体素子を含む電子回路を鉛等の遮蔽体で覆う方法、予め半導体素子からなる電子部品を放射線量の低い場所に移動させる方法、耐放射線性が比較的高いと言われている低集積度（ディスクリット）なバイポーラ半導体素子で電子回路を構成する方法、集積度が比較的高い市販半導体素子を含む電子回路に、放射線被曝により変化する特性を補償する回路を付加する方法などが取られていることが多い。ドイツの原子力緊急時ロボット部隊 **KHG** では、一部のロボットで半導体素子を含む電子回路に遮蔽を施した例がある。多くの場合、原子力緊急時ロボットを高放射線環境下で使用する時間は短いと想定されることから、市販半導体素子が元々有している耐放射線性で良いとしている例が多いと考えられる。チェルノブイリ原子力発電所事故や福島第一原子力発電所事故での先行事例をみると、原子力緊急時ロボットを続けて長時間使用する例は少ないと考えられ、繰り返し使用する場合は半導体素子を含む電子回路を一体として交換する手法が有効である。半導体素子の技術開発が日進月歩でその母材や製造プロセスが進んできていること、多種の母材や製造プロセスを用いた半導体素子が混在して使用されていることなどを考えると、新たに開発製造された半導体素子の耐放射線性を一々照射試験で確認することは、費用面でも時間遅れの面でも現実的ではなかった。以上述べた様に、予め時間をかけて半導体の耐放射線性を評価することが可能であれば、耐放射線性が十分か否かを評価したり、耐放射線性向上を図ったりすることは可能であるが、既に開発されているロボットを緊急に過酷事故が発生した原子力施設の現場でどの程度の耐放射線性を有しているかを概略評価する手法は必要である。

原子力施設内では、放射線遮蔽や耐震性の観点から鉄筋コンクリート製の厚い壁が多いこと、鉄や鉛などの遮蔽体が多数使用されていることなどから、通信性の伝達性が悪いことは知られており、原子力保守用ロボットやマニピュレータでは有線方式による通信手段が多く使用されていた。ドイツ **KHG** などでは原子力施設内容に無線中継器を用意したり、フランス **Groupe INTRA** では原子力施設で多用されている重厚な

扉に挟まれても断線しない強化ケーブルを開発して使用したりしている。

耐故障性や万一部品が故障した場合のシステムとしての健全性を維持するための部品の冗長性については、ロボットだけでなく列車や航空機の安全性を担保するために多くの手法が開発され実用されていることから、これらの開発成果を流用することが可能であり現実的である。

以上を纏めると表 3-4 の様になる。必要性が高いにも関わらず、完成度が低いものについては、早急に研究開発を行う必要があり、備考欄に「○」を付した。

表 3-4 信頼性に係る機構要素の必要性と完成度

機能構成	機能要素	機構要素例	必要性 (緊急性)	完成度	備考
被曝管理	半導体素子の耐放射線性評価	<ul style="list-style-type: none"> 原子力保守用ロボットで、実際に開発製作されたものについて、使用される半導体素子の照射試験を行って耐放射線性評価した例は多数あり。 既に開発製作されたもので、これまでの照射試験等から事後に評価した例は殆ど無し。 	高	高	
	半導体の耐放射線性向上	<ul style="list-style-type: none"> 高耐放射線性半導体素子開発 市販半導体に補償回路を追加 半導体素子に放射線遮蔽 半導体素子を含む電子回路をロボット本体から移動 半導体素子を含む電子回路を交換 	低 低 中 極低 中	中 中 高 高 高	
通信性	伝達性	強化ケーブルによる有線通信や、無線中継器による対策等が実用化されている。無線中継器による通信遅延が問題となる場合は、有線通信を使用する例が多い。	高	高	
	通信遅延対策		中	中	
耐故障性		列車や航空機での開発・実用化例が多数あり、これらを流用することが現実的。	高	高	
冗長性					

3.3.3 除染保守性に関する課題

原子力保守用ロボットを保守に先立ち除染する方法としては、水による除染が一般的である。この背景には、原子力発電所では鋼材から冷却水中に微量に溶けだした鉄（Fe）やニッケル（Ni）等の元素が、原子炉運転中に原子炉内で多量に放出される中性子によりやコバルト（Co）60等に放射化された腐食生成物（CP）と呼ばれるものによる汚染が主なものであり、使用済核燃料再処理工場ではウラン等の核燃料が中性子による核分裂したセシウム（Cs）134や137およびストロンチウム（Sr）90等の分裂生成物（FP）による汚染が主なものであり、元々水中に存在する元素や、CsやSr等水溶性の元素が主な汚染核種であることによると思われる。水除染は、高压水スプレーによるものが中心であるが、原子力保守用ロボットでは水を含ませたウェスによる拭取り除染も一般的である。これらの除染は、除染保守セルなどで保守要員の放射線被ばくの低減対策がとられた場所で行われることが多く、除染に要する時間的制約は殆ど無い。これに対して原子力緊急時ロボットは、汚染したロボットを保守要員が直接、除染することが多く、保守要員の放射線被ばくを低減することから、時間的制約やロボットからの距離的制約が多くなる。福島第一原子力発電所事故で使用された小型無人重機タイプのBrokkロボットを保守するための除染作業では、時間的制約や距離的制約から、高压水スプレーによる除染が実施されたが、十分な汚染レベルまでに除染することはできなかった。防染方法としては前述のCPやFPの微粒子が付着しにくいように、ロボットの表面に凹凸部を極力少なくするほか、平板部も、表面を金属の場合は磨き仕上げにしたり、塗装したりすることで金属表面の加工痕を少なくする手法がとられている。これらの磨き仕上げや塗装は、CPやFPの付着を少なくするだけでなく、水除染による除染効果を上げることにも役立っている。

保守性については、汚染したロボットのバッテリー交換または充電作業、給油作業、不具合部品の交換や、操作性等向上のための改造の容易性等が求められる。これらは原子力保守用ロボットや原子力緊急時ロボットのみならず、列車、航空機および自動車分野でも同様であり、既に多くの公安がなされており、それらを適用可能と考えられる。

以上を纏めると表 3-5 の様になる。必要性が高いにも関わらず、完成度が低いものについては、早急に研究開発を行う必要があり、備考欄に「○」を付した。

表 3-5 除染保守性に係る機構要素の必要性と完成度

機能構成	機能要素	機構要素 (例)	必要性 (緊急性)	完成度	備考
除染性	除染方策	汚染したロボットを、距離的かつ時間的制約の下での除染方法	高	低	○
	防染性	<ul style="list-style-type: none"> ・ ロボット表面の凹凸の減少 ・ 表面の磨き仕上げ ・ 表面塗装 	中	中	
保守性	バッテリー	列車，航空機および自動車での開発・実用化例が多数あり，これらを流用することが現実的。	高	高	
	給油性				
	改造容易性				
	部品交換性				

3.3.4 作業性に関する課題

移動機能については、これまで災害対応ロボットのみならず多くの移動ロボットの研究開発がなされてきており、瓦礫、陥没、滞留水等により走破することができない場合に備えて、ドローン等の飛行ロボットや水中ロボットなども開発されてきている。

調査機能についても、ロボット用だけではなく、放射線計測を含む、様々な環境計測機器が開発されてきており、これらの成果を適用することが現実的である。

作業機能についても、産業ロボットのアームの機構や制御方法などについて、これまで多くの研究開発がなされてきており、実際に工場の組立てライン等で多く実用化されている。さらに、扉開放等の複雑な作業についても、古くは、太平洋戦争後に復員した多くの傷痍軍人のために力センサ等を用いて扉を開閉できる人工義手の研究開発がなされており、既に多くの実用例がある。さらには介護ロボット等のサービス分野を対象とした多くの研究開発が進められてきている。

以上を纏めると表 3-6 の様になる。

表 3-6 作業性に係る機構要素の完成度

機能構成	機能要素	機構要素 (例)	必要性 (緊急性)	完成度	備考
移動機能	走破性	災害対応ロボットや移動ロボットの研究開発がなされており、その成果を適用するのが現実的である。	高	高	
	飛行性		中	低	
	水中遊泳性		中	高	
調査機能	放射線計測	ロボットのみならず様々な環境の計測用に各種センサの開発が進められており、その成果を流量することが現実的である。	中	高～中	
	可燃ガス検知				
	温湿度計測				
	音声計測				
	サンプリング				
作業機能	扉解放機構	産業用ロボットや人工義手での研究開発が多数なされており、多くの実用化例もある。それらの成果を応用することが現実的である。	中	高	
	重量物運搬		中	高	

以上本項で述べた機能構成および機能要素の中で、必要性あるいは緊急性が高いものの、完成度が低いものについて、表 3-3～表 3-6 の備考欄に「○」を付したが、これらを整理すると以下の様になる。

- ・ 搬送性の内の陸送性
- ・ 放射線安全性の時間
- ・ 放射線安全性の遮蔽
- ・ 現場適応性のシステム化
- ・ 現場適応性の可搬性
- ・ 被曝管理の半導体素子の耐放射線性の評価
- ・ 除染性の除染方策

このうち、始めの 4 項目については、遮蔽体や輸送用車両等を含めたロボットを過酷事故の発生現場で投入・操作するために必要となる周辺機材をシステム化することで、対応可能と考えられ、以下の 4 項目を早急に対応する必要であることが判明した。

1) 原子力緊急時ロボットを事故発生現場で運用するため、ロボット本体のみならず、

操作やオペレータの放射線被曝低減なども考慮したシステム化

- 2) 過酷事故後の爆発により飛散した瓦礫および原子炉冷却や放射性物質大量放出抑制のために仮設された配管やケーブルのため、ロボットシステムをオペレータ自ら搬入組立を行える可搬性
- 3) ロボットの被曝管理方法
- 4) ロボットの除染管理方法

早急に対応を図る必要がある，これら4項目について，本論文の第4章から第7章でこれらの課題について検討をおこなった．

第4章 システム化

4.1 事故発生現場に直ちにロボットを搬送・運用する上での課題	84
4.2 ロボットのシステム化とロボット操作車の提案	86
4.3 ロボットのシステム化とロボット操作車の開発	88
4.3.1 ロボットの投入，操作および回収の時間短縮	88
4.3.2 遮蔽操作ボックス	90
4.3.3 ロボット操作車に搭載し統合化すべきその他の周辺機材	93
4.4 システム化とロボット操作車の評価	97
4.5 まとめ	99

4.1 事故発生現場に直ちにロボットを搬送・運用する上での課題

本章では、3.5 項で明らかにした原子力緊急時ロボットの課題のうち、搬送性の陸送性、放射線安全性の時間短縮と遮蔽および現場適応性の統合化に対する解決策として、システム化について検討する。

ドイツ原子力災害時対応ロボット部隊 **KHG** では、ロボットだけの整備ではなく、事故がおきた原子力施設までロボットを搬送するためのトラックやトレーラ、原子力施設内の事故現場から遠く離れた放射線量の低い場所からロボットを操作するため **33 m** アンテナマスト等も準備していた。

チェルノブイリ原子力発電所事故が発生した直後の対応では、高放射線下でオペレータがロボット操作を行わなければならない、オペレータの放射線被ばくを低減するため遮蔽ボックスを使用したほか、ロボットを繰り返し使用するために再充電しようとしたが電源からの距離が長すぎて電圧降下が激しく、別途、発電機等が必要となった。

フランスではドイツ原子力緊急時ロボット部隊 **KHG** でのロボットの運用経験や、チェルノブイリ原子力発電所事故後の対応での経験を踏まえて、オペレータの放射線被曝を最低限にするための重遮蔽ロボット操作車が装備されていた。

東海村 **JCO** 臨界事故後に開発された原子力災害対応ロボットでは、ロボット等を過酷事故が発生した原子力施設まで運送するためのトラックやコンテナ等も考慮されていたが、ロボット等の開発に重点が置かれ、運用に係る技術開発は「殆ど考慮されていなかった。ロボット等の開発後も、実際の運用、運用するための試験・訓練、維持管理、改良がなされることはなかった。

福島第一原子力発電所事故が発生した際には、原子炉の冷温停止と放射性物質の大量放出抑止が出来て、当時の野田内閣総理大臣が事故収束宣言を発するまでの緊急時対応で、**20** 台以上のロボットが投入された。これ以外にも投入を検討されながら、事故発生現場での投入・操作に課題があると考えられて投入を見送られたロボットも多数あった。

2011 年 **4** 月 **14** 日にアメリカエネルギー省アイダホ国立研究所から **Talon** ロボットが産業総合技術研究所つくばセンタ北サイトに到着し、日本政府を通じて東京電力に提供された (図 4-1)。アメリカから提供されたのは、**Talon** ロボットと操作用コンソールのみであった。この **Talon** ロボットはアメリカ **QinetiQ** 社製であるが、アイダホ国立研究所が開発した放射線計測器と **GPS** により **Google Map** 上に放射線量を表示する放射線量率マッピング装置を有していた。この放射線量率マッピング機能は **GPS** を用いていることから屋外での利用を想定されていたものと思われる。福島第一原子力発電所事故では大量の放射性物質が放出されており、原子炉建屋内のみならず、原子炉建屋周辺の屋外でも空間線量率が高く、建屋周辺の空間線量率のマッピングに

有効なツールと考えられた。しかしながら、提供を受けた東京電力の担当者は、本店職員と柏崎刈羽原子力発電所の運転員であり、**Talon** のようなロボットの操作のみならず、ロボットをどのようにすれば過酷事故が発生している福島第一原子力発電所の構内で有効に運用できるかの知見を有していなかった。

Talon とともにアイダホ国立研究所の技術者も同行してきていたが、アメリカ政府の指示で福島第一原子力発電所から約 **80km (50miles)** 以内に入らないよう勧告されており、東京電力の本店職員と柏崎刈羽原子力発電所運転員が、産業総合技術研究所つくばセンタ北サイトで一旦操作方法について訓練を受けることとなった。

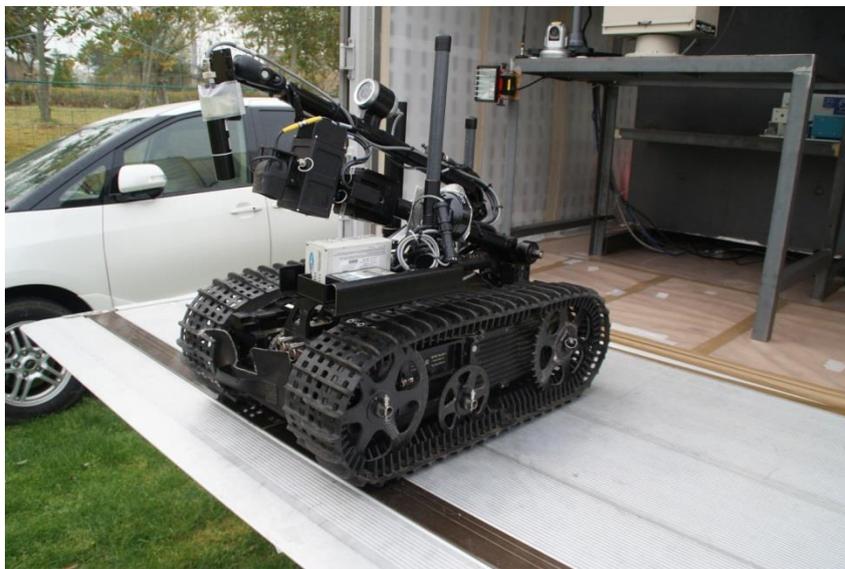


図 4-1 アメリカアイダホ国立研究所から提供された **Talon**

東京電力職員が操作訓練を受け、その上で福島第一原子力発電所事故対応に活用する方法も併せて検討され、以下のような課題があることが判明した。

- 福島第一原子力発電所までの搬送方法
- 福島第一原子力発電所内の事故発生現場での投入方法
- 操作中の操作員被曝低減のための対策
- 現場でのロボット操作・回収・再充電用電源等周辺機材の準備

これらの課題は、3.5 項で明らかにした原子力緊急時ロボットの課題のうち、搬送性の陸送性、放射線安全性の時間短縮と遮蔽および現場適応性の統合化に関する課題の具体的な事例である。

4.2 ロボットのシステム化とロボット操作車の提案

3.5 項で明らかにした原子力緊急時ロボットの課題のうち，搬送性の陸送性，放射線安全性の時間短縮と遮蔽および現場適応性の統合化の解決策として，具体的には，アメリカエネルギー省アイダホ国立研究所から東京電力に提供された放射線計測機能付き Talon ロボットを複芝第一原子力発電所の事故現場に投入するため，ロボットの運用に必要となる周辺機材を含めたロボットシステムを構築するとともに，実際の事故現場に適応可能とするためのロボット操作車を提案した（図 4-2）。



図 4-2 ロボット操作車 RC-1

原子力施設は，耐震性，放射線遮へい，放射性物質の閉じ込めのため，鉄筋コンクリート製の壁，さらに鉄や鉛製の遮蔽体などが存在する．そのためロボットを遠隔操作するための無線の伝達性が悪く，オペレータはロボットから遠く離れて十分に放射線量の低い場所から遠隔操作することはできず，オペレータはロボットの比較的近くまで近づいて，ある程度の放射線量もある場所から操作する必要があった．システム化に際しては，ロボットの遠隔操作性に加えて，オペレータの放射線被曝低減等も考慮する必要があった．放射線被曝低減の三原則は，線源から距離をとること，線量率の高い場所で作業する時間を短縮すること，遮蔽を施すことであると言われている．上記の様にロボット操作のため，ある程度線源に近く線量率が高い場所で操作せざるを得ないため，ロボットの操作性に加えて，作業時間の短縮，遮蔽体の設置なども必

要であった。

上述のような課題を解決するため、福島第一原子力発電所事故の状況を踏まえ、以下のような機能を整備することが必要であることが判明した。

- ▶ オペレータの被曝低減のため
 - ✓ ロボットの投入，操作および回収に要する時間を短縮すること
 - ✓ 最も時間を要するロボットの操作中，オペレータを放射線被曝低減のための遮蔽体を設置すること
 - ✓ 放射線管理機器を設置すること
- ▶ ロボットの遠隔操作性，通信の確保と保守
 - ✓ 遮蔽体ごしにロボットを操作するための，操作性の確保
 - ✓ ロボットの再充電用電源の追加設置

以上から、被ばく低減や通信性を確保するための機材を一括して福島原子力発電所まで搬送でき、事故が発生した現場にロボットや周辺機器を短時間で投入でき、操作中のオペレータの操作性を確保するためのカメラ等を装備し、ロボットの回収時に汚染したロボットを除染することを可能とする、ロボット操作車の整備を提案した。そのロボット操作車のイメージをに図 4-3 示す。

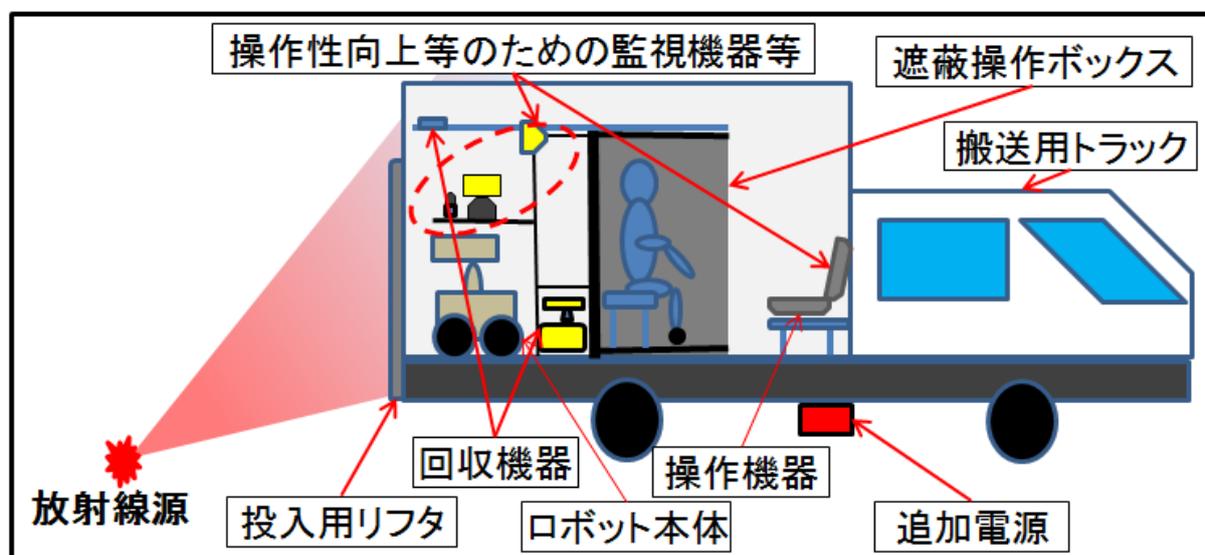


図 4-3 ロボット操作車のイメージ

4.3 ロボットのシステム化とロボット操作車の開発

4.3.1 ロボットの投入，操作および回収の時間短縮

日本原子力研究開発機構は、1999年9月30日の東海村 JCO 事故後に、原子力災害対応ロボット開発を行っていたが、2003年頃から、開発は事実上休止状態で、点検整備も殆ど行えていなかった。福島第一原子力発電所事故が発生したときには、1台のロボットは廃棄され、その他の4台のロボットは不可動状態であった。急遽、不可動であった原子力災害対応ロボットを、福島第一原子力発電所事故の状況にあったロボットシステムに改造して、事故発生現場に投入するため、ロボットの改造整備だけではなく、ロボットを事故が発生した場所に運搬するとともに、災害の発生していた1F構内での、短時間でロボットの投入と撤収を速やかに行うこと、線量率が既に上昇していた福島第一原子力発電所事故敷地内でオペレータの放射線被曝量を低減させるための遮蔽体が必要と判断した。

このような周辺機材を搭載するロボット操作車のベースとなるトラックとしては、コンテナ、大型車、中型車、乗用車等が考えられた。それぞれの得失は表 4-1 のとおりである。

表 4-1 ベーストラックの選定

	専門資格	取扱性 (熟練技能)	可積載量	入手性 (複合災害発生時)
コンテナ	要	要	8t～	トレーラと運転手の手配困難
大型車	要	要	5t～	運転手の手配困難
中型(8t)車	要	不要	～5t	
中型(5t)車	不要 <small>普通免許で、運転可</small>	不要	1.5～2t	
乗用車	不要	不要	0.5t程度 (不十分?)	

前述のようなロボットを含む周辺機材を統合化してワンパッケージとして事故発生現場に搬送したり、事故発生現場で投入，操作，回収を行ったりするためには、積載量の大きいコンテナ車や大型車の方が望ましかった。一方、原子力施設の事故だけ

ではなく、地震と津波で東日本全体が被災している、各地の被害対応を行っていたり、物流が滞っていたりした状況下で、専門資格や熟練技能を有した運転者を手配することは困難状況であった。ロボットオペレータが運転可能な中型車が適していると判断した。また、トラックからロボットを地面に降ろしたり、ロボットを回収してトラックに積み込むための時間を短縮するため、リフタが装備されていることが好ましいと考えた。物流が滞っていることも考慮して、リフタ付き 5t 中型車(積載量 1.5t)を採用することとした(図 4-4)。



図 4-4 改装整備中のロボット操作車 RC-1 と偵察用ロボット JAEA-2 号

このトラックは、日本原子力研究機構が原子力緊急時支援研修センタに保有していたものであった。東海村 JCO 臨界事故後に開発され不可動ながら保有していた原子力災害対応ロボット RESQ-A ロボットを偵察用ロボットとして改造整備中だった JAEA-2 号ロボットを福島第一原子力発電所に搬送するために、準備中のものであった。

4.3.2 遮蔽操作ボックス

ロボット操作車により、ロボットと周辺機材からなるロボットシステムを事故発生現場に短時間で搬送、投入、回収することは可能となるが、ロボットの操作に要する時間の短縮は期待できなかった。原子炉建屋付近の線量率は、1号機と2号機の間や3号機大物搬入口付近では100 mSv/hを超える値も計測されていたが、概ね～100 mSv/h程度であった(図4-5)。

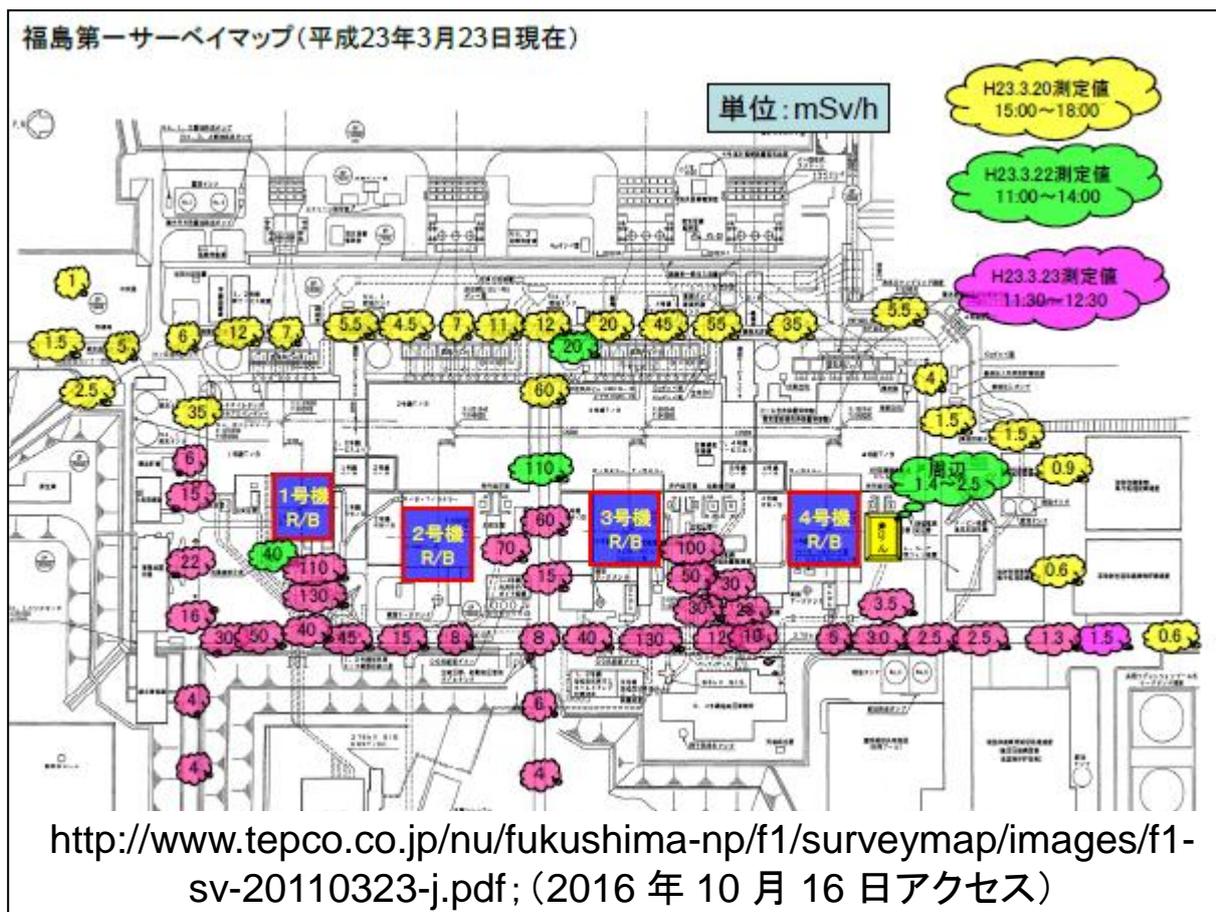


図 4-5 事故発生直後の福島第一原子力発電所の原子炉建屋付近の放射線量

当時の緊急時の従事者の許容被曝線量が100mSvから250mSvに引き上げられたことを考慮しても、1回のロボット操作を30分と仮定すると、1回あたりの放射線被曝量は50mSvとなり、5回程度操作しただけで、許容被曝線量を超えてしまうことになる。熟練オペレータが殆どいないこと、オペレータの教育訓練に時間がかかることを考えると、オペレータの放射線被曝を低減することは重要と考えられた。そのため、ロボット操作車に遮蔽操作ボックスを搭載して、ロボットを操作する間のオペレー

タの放射線被曝の低減を図ることとした（図 4-4，図 4-6）．操作遮蔽ボックス内の放射線量を 10mSv/h 程度とすることとして，操作遮蔽ボックスの遮蔽能力は 1/10 を目標とした．



図 4-6 操作遮蔽ボックス

過酷事故で原子炉建屋内や原子炉建屋周辺に放出された放射性物質は，気体状のヨウ素と事故直後の高温下で気化して飛散後固化するセシウムであり，これらの放射性物質の核種は I-129, I-131, Cs-134, Cs-137 である．I-129 は β 線放出核種で放出エネルギーが 0.154 MeV と小さく，I-131 は 0.606 MeV と比較的大きいものの半減期が 8 日で，事故後 1-2 ヶ月後のロボットを投入しようとしていた時にはその影響は殆ど少ないと考えられた．Cs-134 と Cs-137 は事故発生現場に固化した状態で飛散しているものと想定された．

遮蔽操作ボックスを短時間で製作するため，既存の 1 m×1 m×0.7 m の放射性廃棄物収納容器を流用し，遮蔽体を付加することとした．遮蔽体は入手容易性，加工容易性，放射性廃棄物として処分する際の容易性から鋼板とすることとし，当時入手可能だった 16 mm 厚の鋼板を使用することとした．代表的な Cs-137 の γ 線を 1/10 に遮蔽するには鉄板で 77mm の厚さが必要であった（図 4-7，参考文献[41] を基に赤線と赤字を追加）．

目標の 1/10 遮蔽を達成するためには、鋼板を 5 枚を重ねる必要があり、前面、両側面、底面、上面の 5 面を遮蔽すると約 2.5t となり、トラックバンの可載積載量 1.5 t をオーバーし、ロボットや周辺機器を搭載できないことが判明した。そのため、遮蔽操作ボックスの軽量化を図る必要が発生し、主たる放射線源が存在する前面のみ鋼板 5 枚重ね (80mm) とし、両側面と底面は 3 枚重ね (48mm) とし、上面は状況に応じてタングステンシート等で追加遮蔽することとした。その結果、遮蔽操作ボックスの重量は 1.5t 以内に収めることとした (図 4-8)。

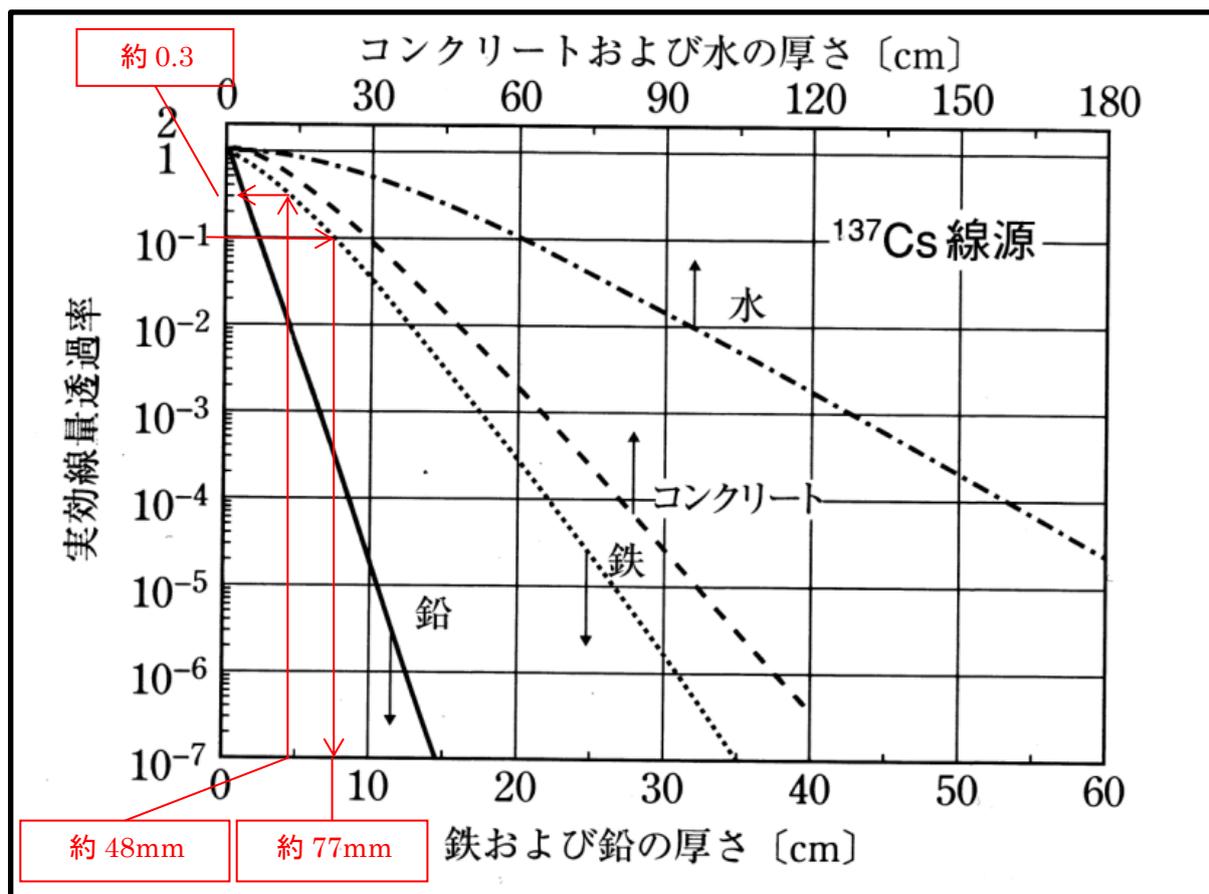


図 4-7 鉄の実効線量透過率

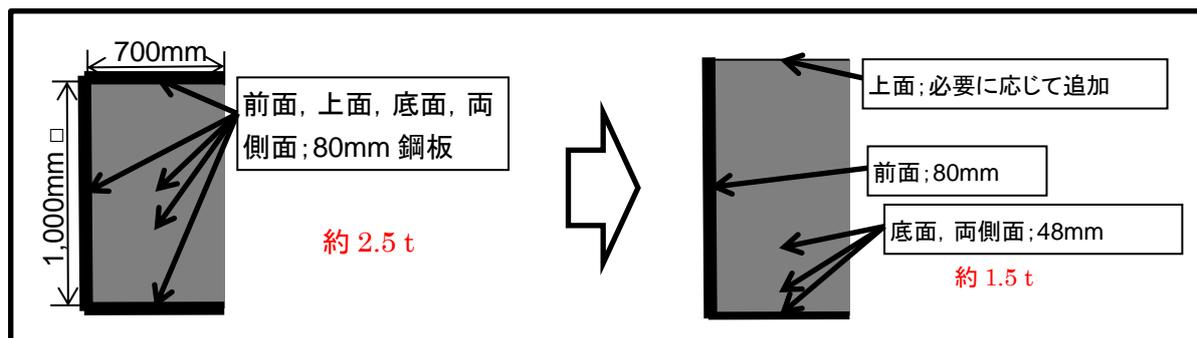


図 4-8 遮蔽操作ボックスの軽量化策

4.3.3 ロボット操作車に搭載し統合化すべきその他の周辺機材

回収したロボット付近の空間線量率を測定するため、放射線計測器をロボットの回収位置の上部に設置し（図 4-9）、その測定結果は遮蔽操作ボックス内に表示するようにした（図 4-10）。放射線計測器は、高速増殖炉原型炉もんじゅから提供を受けた、日本冶金化学工業株式会社製のテレテクタを、改造したものである。検出部はガイガーミュラー管（GM 管）で 10 Sv/h 程度までの主にガンマ線を測定することができるものである。

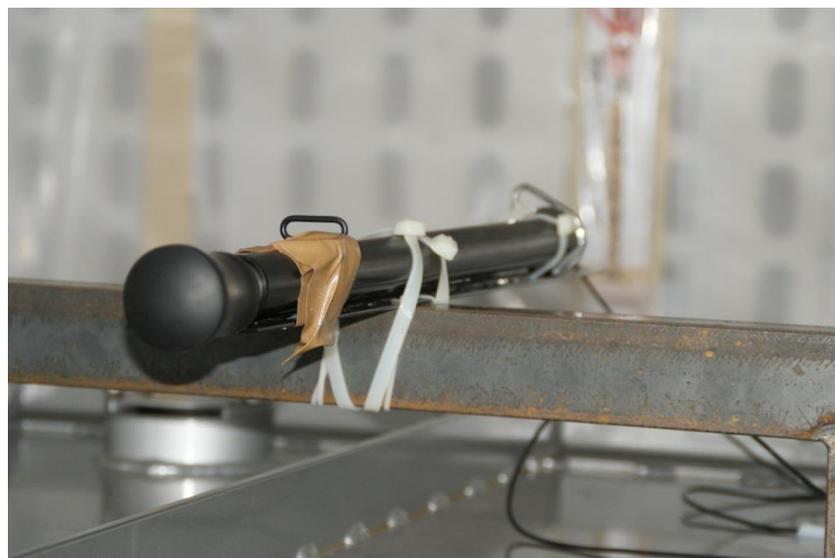


図 4-9 遮蔽操作ボックス上部に取り付けた放射線計測器



図 4-10 放射線計測器の表示器

遮蔽操作ボックスから操作することで、オペレータの放射線被曝量の低減を図れた。しかしながら、その反面、遮蔽操作ボックスからロボットを操作するため、オペレータはロボットを直視することができず、ロボットに搭載しているカメラ画像だけで操作をすることになる。さらにロボットが調査対象に近づくことができても、カメラの画角だけの映像しか取れず、ロボットの周辺を含む、俯瞰的な相対関係を把握することは困難であった。また、Talon ロボット操作用のコントローラに装備されている通信用アンテナもコントローラごと遮蔽操作ボックス内に移動してしまうので、通信を確保できなくなることが判明した。

そのため、遮蔽操作ボックス前面にロボット格納スペースを確保した上で、その上部に遮蔽ボックスの外、操作中のロボットの周辺や調査対象物の全体を把握するための監視機器と通信アンテナ等を装備した（図 4-11）。

まずロボットを俯瞰的に監視するため、ズーム、パン、チルト機能付きの Web カメラを装備した（表 4-2） [42]。

また、ロボット操作車からロボットまでの位置の距離を測定するために、レーザ測域センサと周辺に発熱体があるか否かを確認するための赤外線カメラも搭載した。

さらにガンマ線がどの方向から飛んできているかを測定できるガンマカメラも搭載した。

表 4-2 Web カメラ仕様

ズーム	12 段階 42 倍ズーム (21 倍光学ズーム, デジタル 2 倍ズーム)
画角	左右 : 2.6 度 (光学) / 1.3 度 (デジタル) ~51 度 上下 : 1.9 度 (光学) / 0.9 度 (デジタル) ~38 度
パン(左右)	±175 度
チルト (上下)	0 度~+90 度 (天井設置時)
回転速度	パン : 最大 300 度/秒, チルト : 最大 200 度/秒
画素数	約 32 万画素 (1/4 インチ CCD イメージセンサー)
レンズ焦点	ワイド : 5mm~∞, テレ : 1m~∞
レンズ明るさ	F1.6~3.6
対応照度	0.09 ルクス~100,000 ルクス



図 4-11 遮蔽操作ボックス前面に配置した機器

ロボットを災害現場に投入した後は、ロボット、ケーブル、クローラ等が汚染することが予想された。特にケーブルやクローラは直接地面と接触するだけでなく、材質がゴムで多孔質であり、放射性セシウムが付着した細かな粉じんが入り込むことから、汚染が高くなることが予想された。そのため、ロボットを汚染地域から持ち出して再充電することは困難と考えられた。さらに監視機器等にも電源が必要で、ロボット操作車のシガーライターからの給電だけでは不十分と考えられた。そのため内燃式発電機を搭載することを検討した。しかしながらトラックバンの荷室内に設置するとその排気ガスでオペレータの環境が悪化することから、荷室下部に固定金具を設けてガソリン駆動の可搬式発電機を設置した（図 4-12）。

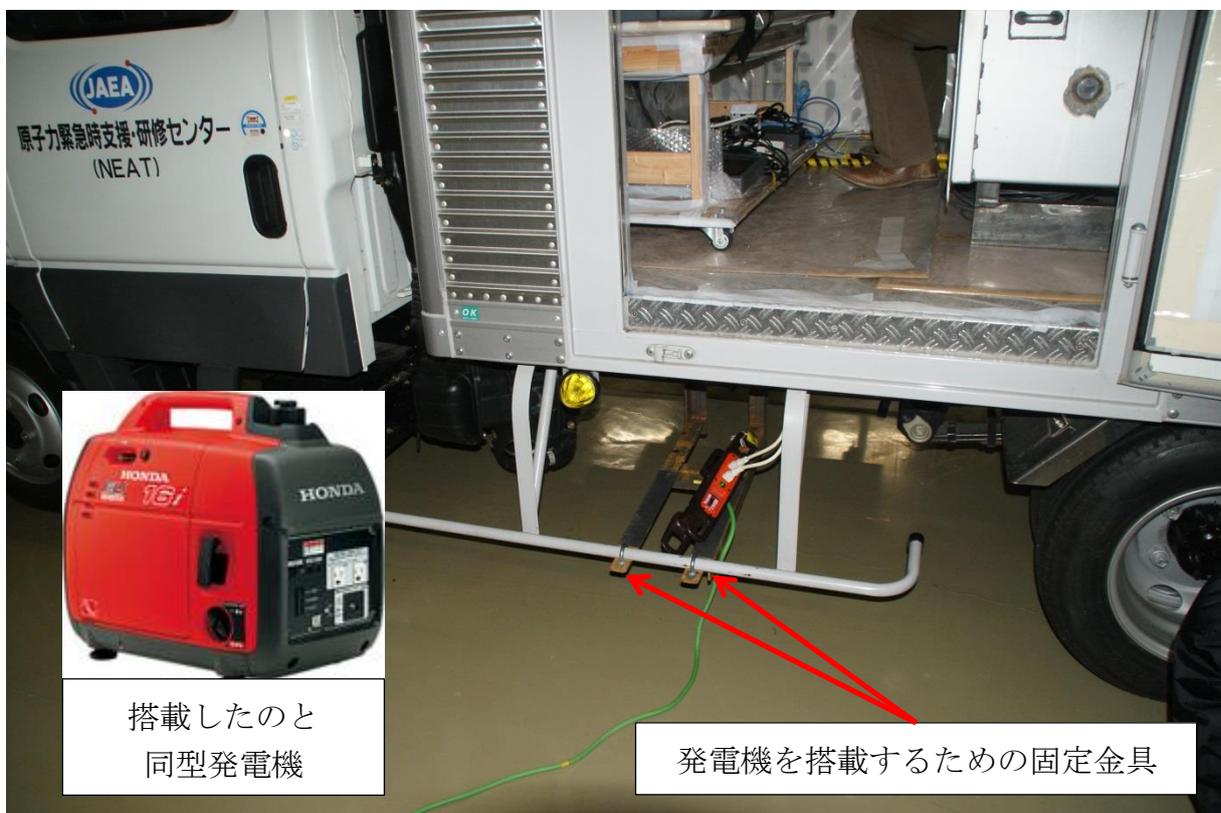


図 4-12 ロボット操作車に搭載した発電機

4.4 システム化とロボット操作車の評価

福島第一原子力発電所事故の際に、アメリカアイダホ国立研究所から提供された **Talon** ロボットは単体では事故の発生した現場で活用することは難しかったが、**Talon** ロボットを活用する上で必要な機器を一括して搭載したロボット操作車を改装整備したことで、福島第一原子力発電所に搬送し、事故発生現場で投入、操作および回収することができた。

その際に、オペレータはロボット操作車から降りることはなく、ロボット操作車内からリフトを操作して、**Talon** ロボットを福島第一原子力発電所内で運用することができた。

その結果として、福島第一原子力発電所 3 号機の大物搬入口前に高放射線瓦礫があることを発見し無人重機による優先的な撤去を可能とし、周辺環境の空間線量率低減につなげることができた (図 4-13)。また、1.2 号機共用排気塔付近の高線量部位を発見することができ、作業員等が不用意に近づくことを防止でき、作業員の放射線被曝低減に役立つことができた (図 4-14)

オペレータの放射線被曝量は、遮蔽操作ボックスの採用により、ロボット操作 1 回あたりの操作時間を 30 分として 100mSv/h の線量率を 10~3mSv/h に低減することが可能となった。ロボット操作車により、放射線環境下での作業時間が短縮できたことにより、実際の放射線被曝量は、さらに低減することができた。

一方で、実際に福島第一原子力発電所事故対応で **Talon** を搭載してロボット操作車 **RC-1** を使用したことで、以下のような教訓が判明し、今後のロボット操作車の設計改装に役立つ情報が明らかとなった。

- ロボット操作のための俯瞰カメラ等の配置が操作性に大きく影響する
- ロボット回収のための放射線計測計はもっと回収ロボットの近傍が好ましい
- 汚染ロボットの除染のための高圧水スプレイの飛散水対策が必要

チェルノブイリ原子力発電所事故あるいは福島第一原子力発電所事故ではロボットを単体で過酷事故が発生した現場で活用することは殆ど不可能であった。ロボットを保管場所から事故が発生した現場までの搬送、事故が発生した現場での投入・操作・回収までの一連の作業の中で必要となる周辺機器なども含めたシステムとして構築することで、作業員に替わって、作業員が立入れないか長時間滞在できない環境下で、ロボットを活用することが可能となる。システム化の良し悪しがロボットを活用できるか否かの要である。

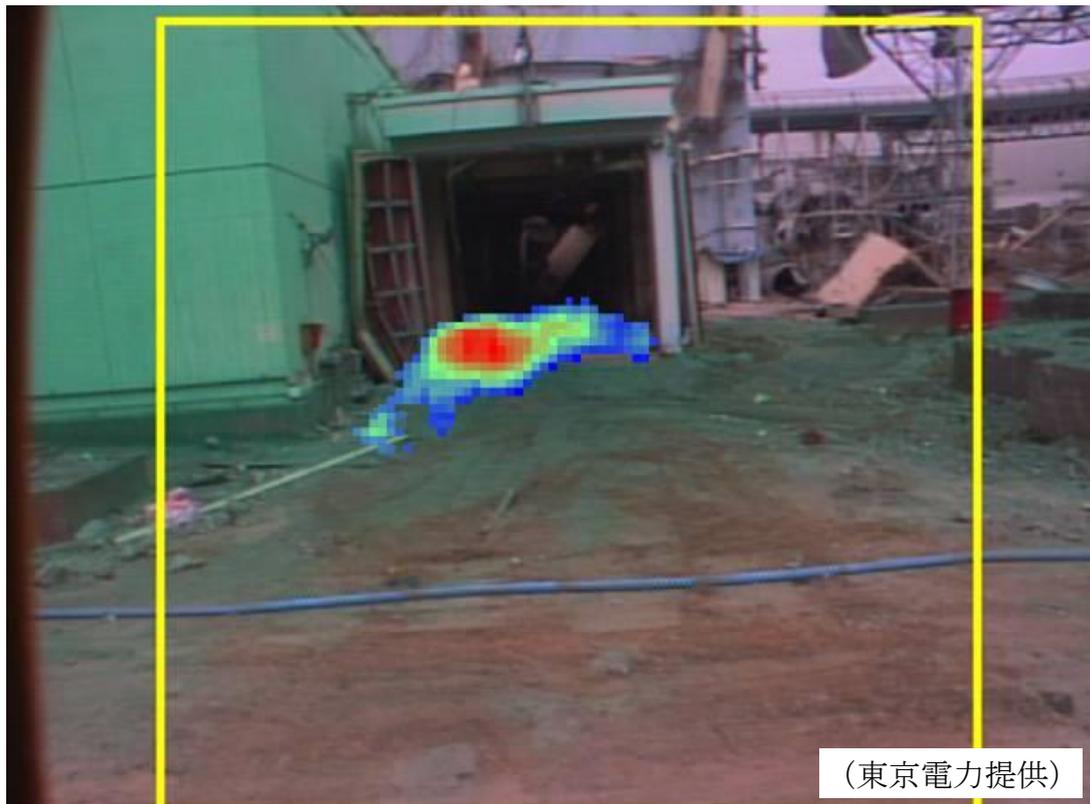


図 4-13 福島第一原子力発電所 3号機前の高線量瓦礫



図 4-14 福島第一原子力発電所 1, 2号機共用排気塔付近の高線量部位

4.5 まとめ

原子力緊急時ロボットを事故が発生した原子力施設の放射線下かつ汚染下の環境下で、投入・操作するためには、原子力緊急時ロボットだけではなく、操作員の放射線被曝低減のための遮蔽体を含む機材や放射線防護服などの資材を纏めて、現場に搬送、運用できるシステム化がなされていないという課題があった。

本章で解決策として、原子力緊急時ロボット、遮蔽体、ロボットを操作するための周辺機材、ロボットの投入や回収のためリフト等を含めたシステム全体を搭載したロボット操作車を提案し、開発した。

その結果、ロボット操作車により原子力緊急時ロボットを福島原発事故に投入するロボットシステムを構築でき、高線量部位を特定することができた

以上を整理すると図 4-15 の様になる。

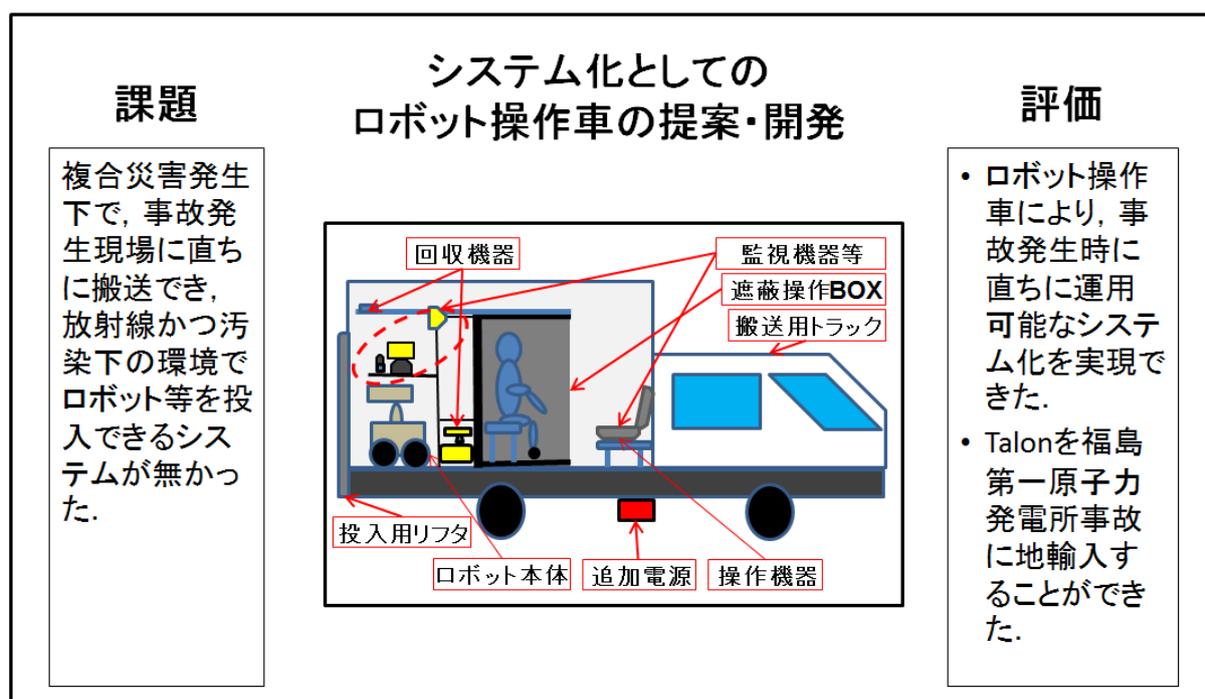


図 4-15 システム化のまとめ

第5章 ユニット化

5.1 事故発生現場でのロボットシステムの課題	102
5.1.1 JAEA-3号ロボットの投入準備	102
5.1.2 瓦礫や仮設物の多い事故発生現場での新要求	104
5.2 ロボットシステムのユニット化による可搬性向上の提案	106
5.3 ロボットシステムのユニット化	107
5.4 ロボットシステムユニット化の評価	112
5.4.1 JAEA-3号ロボットの福島第一原子力発電所2号機への投入	112
5.4.2 分割化の基本方針の策定	115
5.5 まとめ	117

5.1 事故発生現場でのロボットシステムの課題

本章では、3.5 項で明らかにした原子力緊急時ロボットの課題のうち、現場適応性の可搬性に対する解決策として、可搬性について検討する。

5.1.1 JAEA-3 号ロボットの投入準備

第4章で述べた Talon ロボットとロボット操作車 RC-1 を福島第一原子力発電所に投入する作業と並行して、日本原子力研究機構は、ガンマ線が飛来する方向を検知することができるガンマカメラの開発とそれを搭載して遠隔操作可能な移動機構からなる JAEA-3 号ロボットの改造整備を進めていた。

JAEA-3 号の移動機構は、第1章 1.1 項で述べた RESQ-A ロボットをベースに改造して整備した。RESQ-A ロボットは福島第一原子力発電所事故後に確認した結果、故障して不可動であったため、2000-2001 年にかけて本ロボットの開発を依頼したメーカーに修理を依頼したが、東北地方太平洋沖地震とそれに伴う巨大津波でメーカーも被災していたことと、修理用部品等の入手が困難であったことから、修理を断られた。日本原子力研究開発機構自身による修理を模索したものの、コンピュータ部およびサーボドライバ部等の制御装置が、フランスサイバネティクス社製のコントローラユニットを使用しており、その内部はブラックボックス状態であったため、修理には部品の発注と輸入に時間がかかることが判明し、RESQ-A ロボットの筐体、モータ、駆動部を残して制御部分は新たに改造・整備することとした（図 5-1）。

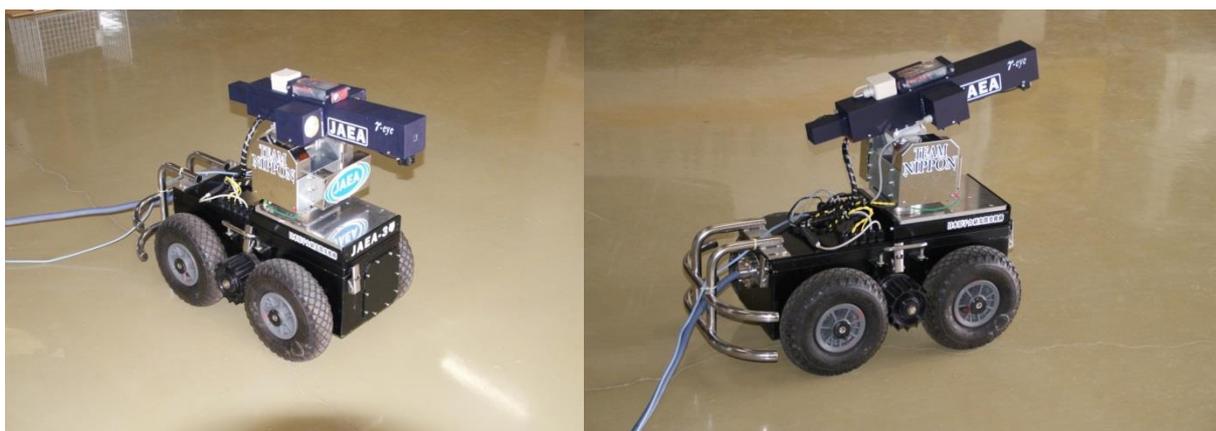


図 5-1 RESQ-A をベースに改造した JAEA-3 号ロボット

JAEA-3 移動機構の改造整備に際しては、これまでに投入または投入が想定されていたロボットに比べてより高線量率下で使用すると想定されたこと、ガンマカメラに

よる放射線飛来位置計測には、より長時間かかると想定されたことから、以下のような方針の下、改造を行うこととした。

- ✓ **JAEA-3** 号ロボットは、作業員が原子炉建屋内に立入って作業するのに先立ち、画像情報の取得だけではなく、放射線量率、高汚染部位や空气中汚染密度等を測定することを目的としており、そのため、ガイガーミュラーチューブ（GM管型）放射線量率計、ガンマ線可視化計測装（ガンマカメラ）、空間中の放射性物質収集するダストサンプラおよびヨウ素サンプラ等、合計 **35kg** 程の計測機器を搭載する。
- ✓ ロボットの移動機構には **35kg** 程の計測機器を搭載する必要があり、ロボットの総重量が大きくなり、電力消費が多くなることから、ロボット内のバッテリーで駆動すると動作可能時間が短くなると想定されたことから、操作卓側から有線で電力を供給する。
- ✓ 耐放射線性を向上させるため、半導体素子を多用しているサーボドライバなどの電子回路は、放射線被曝が多くなると想定される **JAEA-3** 号移動機構には搭載せず、放射線被曝が少なくなると推測されたオペレータ操作器側に配置する。**JAEA-3** 号の移動機構本体には専用カメラは搭載せず、後述の第 6 章で耐放射線性が照射試験で **150 Sv** 以上あることを確認しガンマカメラに搭載した **Web Camera** で **JAEA-3** 号ロボットの操作を行うこととした。一方、**JAEA-3** 号ロボットの移動機構には半導体素子を含む電子回路を搭載していないため、移動機構としての機能は数万 **Sv** 程度耐えるものと推定された。万が一、このカメラが放射線損傷で故障したとしても、他のロボットを救援に向かわせ、そのロボットが取得した画像を見ながら、**JAEA-3** 号の移動機構を操作して、帰還させることができるものと判断した。
- ✓ バッテリーは **JAEA-3** 号のモータの起動時の動力を突入電流への追従が可能なように、自動車のエンジン起動用セルモータにも使用されていて、モータ等の起動時の突入電流に追従が可能な鉛バッテリーを用いる。
- ✓ 東北地方太平洋沖地震とそれに伴う巨大津波により、ロボットを構成する部品を製造する工場が稼働停止しており、道路網が寸断されて物流が滞っていた状況で、入手可能な部品で **JAEA-3** 号ロボットの改装整備を行う。
- ✓ **JAEA-3** 号ロボットおよびその周辺機器を含む一式の、過酷事故が発生した福島第一原子力発電所までの搬送、事故発生現場での投入と操作、汚染したロボットの回収までを考慮して、第 4 章で述べたシステム化を図ることとし、操作中のオペレータの放射線被曝を低減するための遮蔽操作ボックス、監視カメラなども併せて、東京電力が調達して提供された **8t** ロングボディートラックを改装してロボット操作車 **RC-2** として整備する。
- ✓ 第 4 章で述べた **Talon** ロボットとロボット操作車 **RC-1** の経験をふまえ、原子

炉建屋内あるいは建屋近傍では電源を確保できないことから、JAEA-3号ロボットのバッテリーの再充電は、ロボット操作車に別途整備するガソリン駆動の可搬式発電機から供給する。

5.1.2 瓦礫や仮設物の多い事故発生現場での新要求

2011年5月になって、福島第一原子力発電所でのJAEA-3号ロボットの投入することを念頭に、実際に福島第一原子力発電所で、Packbot等のロボット操作にあたっていたオペレータ等によるJAEA-3号ロボットの操作訓練を日本原子力研究開発機構原子力緊急時支援研修センターで実施した。

その結果、福島第一原子力発電所内では、原子炉の冷温停止や放射性物質の大量放出抑止とともに、原子炉建屋内での作業環境を改善するための作業が行われていて、その結果、JAEA-3号ロボットの投入が想定されていた2号機原子炉建屋1階の内部の状況が変化してきていたことが明らかとなってきた。

- ✓ 原子炉建屋近傍、特に作業員や物品の動線は瓦礫等の撤去も進んできたものの、当初、想定されていた2号機の大物搬入口付近の放射線量は今なお高く、ロボット操作車を用いたとしても、ロボット操作車内からロボットの投入、操作および回収を行うオペレータの放射線被曝量が、許容レベルを超えそうであること。
- ✓ タービン建屋側から原子炉建屋に至るルートは線量は空間線量率が低く、オペレータが出入りできることが判ったものの、タービン建屋内や原子炉建屋内には、原子炉の冷温停止を行うための仮設ケーブルや仮設ダクトが敷設されていること、原子炉建屋内の作業環境改善と放射性物質の大量放出抑止のための空調システムとそのための排気ダクトや動力線が敷設されていること。これらの仮設物を作業員が誤って踏んだり傷つけたりしないようにするために、工事現場で用いる鉄パイプ、足場材やコンパネ等によりこれら仮設物を養生するとともに、作業員が通っても良い場所を確保するとともに制限していること。
- ✓ そのため、タービン建屋側から原子炉建屋にアクセスする場合、ロボット操作車はもとより台車等も使うことができず、ロボットシステムは分割して、オペレータが、人力で操作場所まで搬送し、操作場所でシステムを再組立てする必要があること。
- ✓ アクセスルート上には、養生部には数十cmの段差があること、1m×0.7m位の狭隘部を通る必要があること、かつ0.7m幅でほぼ直角に曲がる通路があることから、オペレータはこれらの段差、狭隘部、曲り角を、ロボットシステムを持って、通っていく必要があること。
- ✓ 原子炉建屋内およびタービン建屋内は、過酷事故で炉心熔融時に発生した水素が

残留している可能性が否定できないこと、作業員の作業環境を確保することから、火気使用が禁止されており、ガソリン駆動の発電機は使用できないこと。

- ✓ 操作場所に約 **1m×1m×0.7m** の大きさがあり、重量も **1.5 t** ほどある遮蔽ボックスは持ち込むことはできない。そのため、タービン建屋の扉の陰の放射線量の比較的低い場所からロボット操作を行うため、ロボットを時々直視（チラ見）するようなことはできず、ロボットを監視する俯瞰カメラを用意する必要があること。
- ✓ 原子炉建屋内は放射性セシウムが付着した埃が積もっていて、ロボットを投入すると汚染すると予想されること。

福島第一原子力発電所 2 号の原子炉建屋に投入するに当たり、これらの新たに追加された要求に合う様に、**JAEA-3** 号ロボットシステムを改造することが必要となった。

5.2 ロボットシステムのユニット化による可搬性向上の提案

過酷事故が発生した原子力施設内の現場では、爆発による瓦礫等が飛散していたり、事故収束のための仮設ホースやケーブルが敷設されていたりするため、ロボットと周辺機材からなるロボットシステムを、オペレータが人力で段差、狭隘部や狭い曲り角を通過して運搬し、操作場所で容易に再組立てができ、ロボット操作できることが必要であった。

そのため、以下のような基本方針に基づいて、ロボットシステムを分割し、ユニット化することを提案した。

- ✓ 原則として各ユニットオペレーター一人で運搬可能なこと
- ✓ 運搬は飛散した瓦礫や仮設されたホースやケーブルが存在する環境下でも運搬が容易であること
- ✓ 放射線環境下でもある操作場所で容易に再組立て再調整が容易なこと

5.3 ロボットシステムのユニット化

ロボットシステムのユニット化に際しては、1システム当たりの分割数を増やせば、1ユニット当たりの重量は軽くなり、オペレーター一人による運搬は容易となるが、その一方で運搬に要する人数が増加したり、オペレータが何往復もしたりする必要が出てくる（図 5-2）。

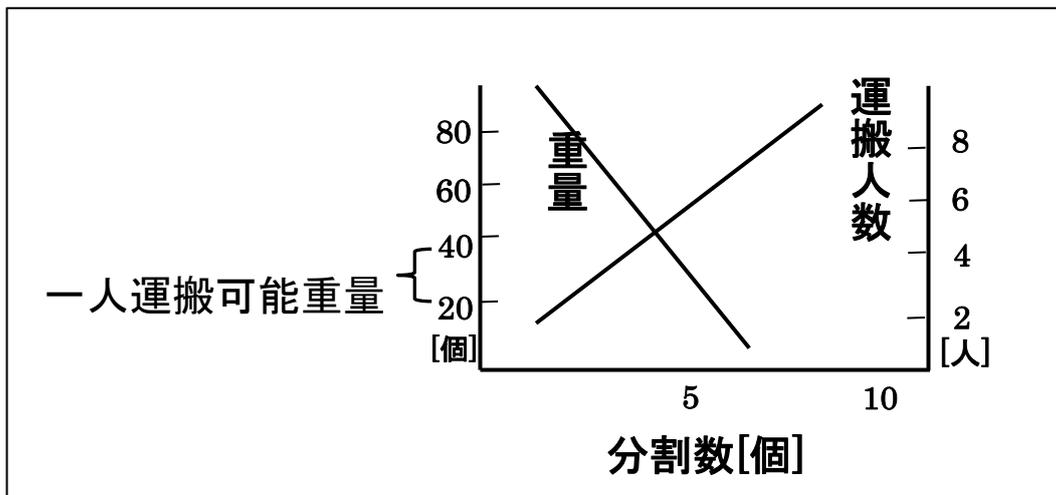


図 5-2 分割数と1ユニットの重量と運搬人数の概念図

各ユニットの重量は、図 5-3 に示すような三輪背負子などを用いることにより、原則として 25~35kg 程度以下に分割することとした。



図 5-3 三輪背負子

また再組立てが、容易かつ短時間で達成できるように分割はケーブル部にコネクタを追加することを原則とした。



図 5-4 カメラ操作ユニットに取り付けたカメラモニタ

ガンマカメラを搭載しているロボットの本体である移動機構の重量は約 35 kg あり、ガンマカメラ等の放射線計測機器等の重量も約 35 kg あり、合計で約 70kg あった。原則通りであれば 2 個以上に分割することになるが、移動機構とガンマカメラを二つに分割した場合、放射線計測機器の専門家がない場所で、分割されていたユニットを接続した後の微調整には技量が必要と考えられ、ロボットオペレータに加えて放射線計測機器の専門家も放射線環境下に送りこんだり、放射線環境下での微調整に時間を要してしまったりすることとなり、より多くの作業員により多くの放射線被曝をさせてしまうことが懸念された。そのため、移動機構本体と放射線計測機器とは分割せず、オペレータ 2 人で、狭隘部を通過して搬送できるように改造することとし、以下のような改造を行った。

- ✓ 作業員二人で、ガンマカメラを搭載した状態のロボットを持てるようにロボットの両側に取り手を設ける。
- ✓ 足元が悪く狭い狭隘部を通過していく途中で、万が一、作業員の一人が手を滑らすようなことがあった場合、もう一人の脚部に 70kg のロボットとガンマカメラが当たることになる。そのため、脱着式のショルダーベルトを 2 本装着し、それぞれの作業員が襷掛けのようにかけることで、搬送中、ひとりが手を滑らしても、もう一人の脚部をロボットやガンマカメラが直撃しないようにする。

以上のような再改造の結果、JAEA-ロボットの移動機構とガンマカメラは図 5-5 および図 5-6 のようになった。



図 5-5 JAEA-3 号の「取っ手」

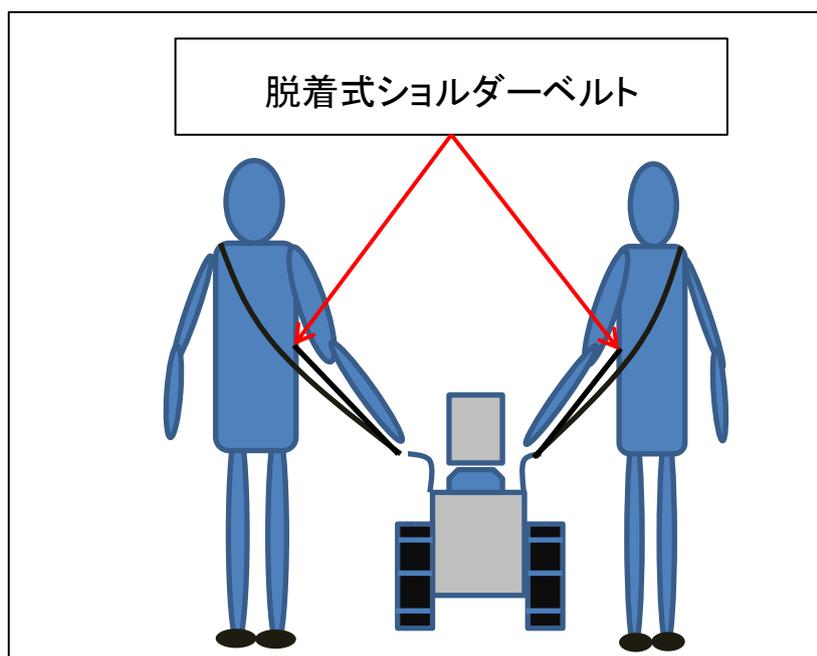


図 5-6 JAEA-3 号の脱着式ショルダーベルト

以上の結果、システム全体としては、表 5-1、図 5-7 および図 5-8 のように 5 個のユニットに分割でき、6 人のオペレータによる搬送が可能となった。

表 5-1 分割後の JAEA-3 号ロボットシステムの各ユニット

Unit No.	Content	Remarks	Weight
0	ロボット	ガンマカメラ搭載	約 70 kg
1	俯瞰カメラ	画像はユニット2の制御ユニットに取り付けたモニターに映す.	約 15 kg
2	制御部	ロボットのモータドライバの他, ユニット1のカメラ制御部も搭載.	約 25 kg
3	ケーブル	ケーブルはロボット制御用の多芯ケーブル, ガンマカメラ制御用のツイストペアケーブルおよび牽引ワイヤーを束ねて被覆チューブで覆ったもの	約 25 kg
4	バッテリー	普通自動車用の 12v 鉛バッテリー2基と DC/AC コンバータを搭載したもの	約 35 kg

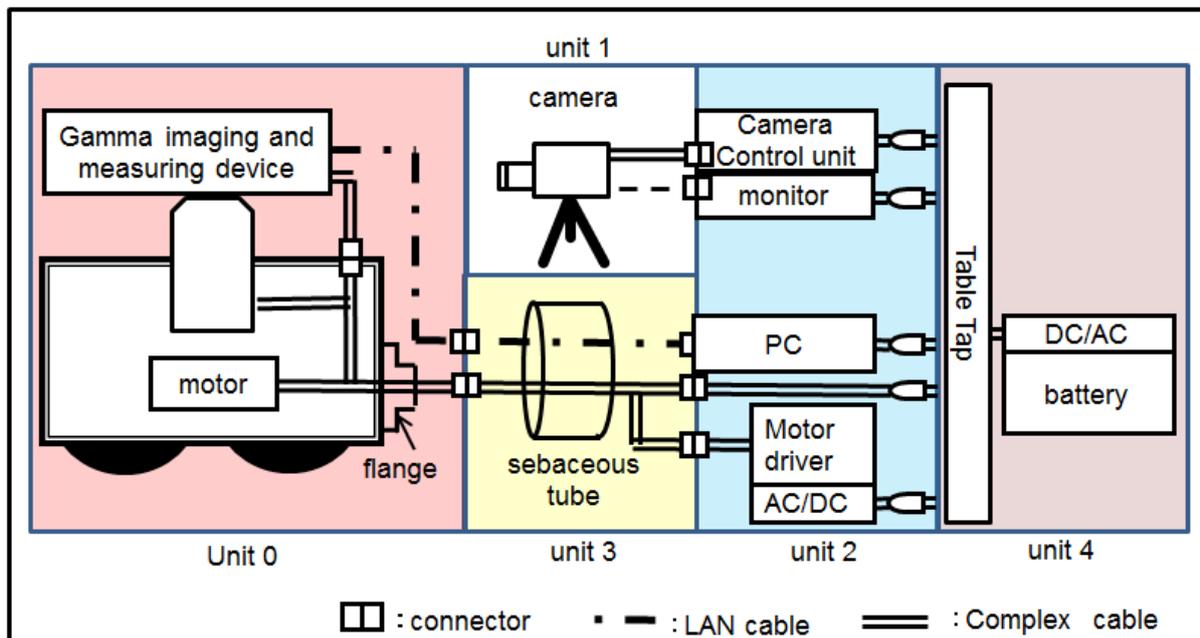


図 5-7 JAEA-3 号ロボットシステムの構成



図 5-8 JAEA-3 号のユニット 0,1,2,3,4

5.4 ロボットシステムユニット化の評価

5.4.1 JAEA-3 号ロボットの福島第一原子力発電所 2 号機への投入

分割化して、作業員により搬送可能なように改造した JAEA-3 号は、2011 年 9 月 23 日に 2 号機原子炉建屋内の高汚染部位調査に使用することができた[38][43][43].



図 5-9 2 号機に投入された JAEA-3 号

JAEA-3 号ロボットは既に福島第一に投入されて、持出しが困難なため、JAEA-3 号ロボットを持ち出して、分割化による搬入がどの程度容易になったかを検証することは困難なため、机上検討で評価を行った(表 5-2, 表 5-3)。その結果、ユニット化することにより、操作場所までオペレータによる運搬時間とセットアップに要する時間と人数が半減できることが判明した。

これは主に周辺機器をバラバラに運ぶのに比べて、ユニット化、すなわち三輪背負子に 25~35kg 程度のものを搭載し、それらについては予め固縛・結線しておくことで、搬送に係る人数が減少できること、コネクタの接続箇所が減りセットアップ時間が減ることなどから、移動と要する人数が減ることによってマンパワー(man・min)を減ら

すことが可能となった。また、ユニット化することにより、放射線環境の現場で接続しなければいけないコネクタの数が減り、接続に係るマンパワー(man・min)を減らすことも可能となった。

これらの結果により、オペレータの人数や作業時間が減り、オペレータの放射線被曝を減らすことが可能となった。

表 5-2 機器をそのまま運びセットする場合の所要マンパワー

項目	重量	運搬に係るマンパワー (man×min)	接続時間に係るマンパワー (man×min)
ロボット本体	70kg	$2 \times (0.5 + 1 + 0.5)^{*1} = 4$	$2 \times 1 = 2$
監視カメラ 三脚 カメラコントローラ カメラ用ケーブル	約 5kg	$2 \times (0.5 + 1 + 0.5)^{*1} = 4$	$7 \times 1 = 7$
ガンマカメラ用 PC 同 AC/DC ロボットドライバ 同 AC/DC ジョイスティック ロボットカメラボックス 監視カメラモニタ	2kg 1kg 2kg×2 1kg×2 1kg 3kg×1 1kg×1 1kg×1	$3 \times (0.5 + 1 + 0.5)^{*1} = 6$	$9 \times 1 = 9$
ケーブル 50m	約 10kg	$2 \times (0.5 + 1 + 0.5)^{*1} = 4$	$3 \times 1 = 3$
バッテリー DC/AC インバータ	7kg×2 2kg×1	$3 \times (0.5 + 1 + 0.5)^{*1} = 6$	$2 \times 1 = 2$
所要時間合計：47 man・min			
*1 運搬に係る時間はバラバラの機器またはユニットを持つに要する時間をそれぞれ 0.5 分、持った状態で歩いて移動するのに 1 分、機器やユニットを置くのに 0.5 分と仮定した。			

表 5-3 ユニット化して運びセットする場合の所要マンパワー

項目	重量	運搬に係るマンパワー (man×min)	接続時間に係るマンパワー (man×min)
ロボット本体	70kg	$2 \times (0.5 + 1 + 0.5) = 4$	$1 \times 1 = 1$
監視カメラ 三脚 カメラコントローラ カメラ用ケーブル	約 5+1kg	$1 \times (0.5 + 1 + 0.5) = 2$	$1 \times 1 = 1$
ガンマカメラ用 PC 同 AC/DC ロボットドライバ 同 AC/DC ジョイスティック ロボットカメラボックス 監視カメラモニタ キャリア	2kg 1kg 2kg×2 1kg×2 1kg 3kg×1 1kg×1 1kg×1 1kg×1	$1 \times (0.5 + 1 + 0.5) = 2$	$4 \times 1 = 4$
ケーブル 50m キャリア・ボックス	約 10kg 約 2kg	$2 \times (0.5 + 1 + 0.5) = 4$	$3 \times 1 = 3$
バッテリー DC/AC インバータ キャリア	7kg×2 2kg×1 1kg×1	$1 \times (0.5 + 1 + 0.5) = 2$	$0 \times 1 = 0$
所要時間合計 : 24 man・min			
*1 運搬に係る時間はバラバラの機器またはユニットを持つに要する時間をそれぞれ 0.5 分, 持った状態で歩いて移動するのに 1 分, 機器やユニットを置くのに 0.5 分と仮定した.			

後日 (2013.12.12), 実際に JAEA-3 号を福島第一原子力発電所で搬入・操作したオペレータと面談しし, 分割ユニット化した JAEA-3 号ロボットシステムを, 2 号機に投入した際の感想をインタビューすることができた. そのインタビュー結果は以下の通りであった.

- ✓ 2 号機では大物搬入口の線量率が高く, ロボット操作車を大物搬入口に入れて,

ロボットを運用することはできなかった。

- ✓ 分割し、ユニット化したおかげで、ロボットシステムをタービン建屋側の通路側の扉まで、仮設機器やそのための足場等で狭くなっていた通路を通過して、オペレータにより持ち込み、投入することができた。
- ✓ ロボット（ユニット0）を二人で持った時の重心が（取っ手やスリングベルトを装着するポイントより）高い所にあり、持ち上げた時のバランスは悪く、苦勞した。
- ✓ ケーブルの持ち運び・取り回しに苦勞をした。

5.4.2 分割化の基本方針の策定

5.1 節から 5.3 節までの検討を踏まえ、以下のような分割・ユニット化の基本方針を策定した。

- ✓ 現場での組立・分解が簡単かつ確実にできるように、ケーブルやホース部をコネクタ等で接続できるよう分割する（信頼性確保の為ロボット本体や操作卓は分割しない）。
- 1 ユニット当たりの重量は、原則、オペレーター一人で運搬できる **25-35 kg** とする。
- ✓ 各ユニットは段差のあるところでもけん引可能で、かつ瓦礫が散乱したところでは背負って運べるように、三輪キャリア付背負子に搭載固縛する。
 - ✓ 汚染が予想される所ではキャリアを自立させたまま接続、使用が可能とする。
 - ✓ 牽引ケーブルやタイヤなど汚染の可能性が高いものは、当該部位だけを分割できるようにする。これらの運搬は、袋等に収納して汚染核拡大防止を図る。
 - ✓ ロボット本体は組立てが複雑かつ防水性などの信頼性を損なうものは、**2-3 人**で運搬できるように、取手や搬送治具を用意し、一人あたりの負担が **25-35 kg** とする。また、作業員の一人が手を滑らしても他の作業員に負担が急激に増えて、作業員の転倒、ロボット本体の落下に繋がらないよう、スリングベルトにより体で懸架できることとする



図 5-10 旧体育館に保管されていた JAEA-3 号ロボットシステム



図 5-11 JAEA-3 号ロボットシステムのユニット1

5.5 まとめ

過酷事故が発生した現場では様々な復旧作業が同時並行的に行われており、その結果様々な仮設物が敷設されており、原子力緊急時用のロボットシステムを一式ロボット操作車に搭載した状態で投入、操作、回収することは不可能という課題があった。

オペレータが人力で持運べて、事故発生現場で容易に組立てて使用できるユニット化の提案を行った。JAEA-3号の福島第一事故現場への投入にあたり、原則としてユニットあたり25~35kgのユニットに再構成するとともに、分割すると再組立て等に時間を要するものは、分割ユニット化せず、オペレータ二人で一括して取り扱えるようなユニットとした。

ユニット化したことで運搬や再組立てに係る時間を短縮すること可能となり、事故発生現場で使用可能なことを示すとともに、福島第一原子力発電所2号機原子炉建屋1階で、高放射線部位の調査に使用されたことからユニット化が有効であったことを示した。

以上を整理すると図5-12の様になる。

課題	周辺機器を含めて、分割ユニット化による可搬性向上の提案	評価
<p>オペレータによる可搬性が無く、混乱する事故現場でロボットを投入することが、できなかった。</p>	<ul style="list-style-type: none"> • コネクタ等で再組立可能なように分割し、ユニット化する。 • 25-35 kg/ユニットにし、けん引や背負える三輪キャリア付背負子に搭載固縛する。 • 汚染が予想される所ではキャリアを自立させたまま接続、使用が可能とする。 • ロボット本体等再組立て困難なものは2-3人で運搬できるよう、取手や搬送治具を用意する。 	<ul style="list-style-type: none"> • オペレータ自ら搬送し、ロボットを事故現場に投入できる分割、ユニット化を実現した。 • JAEA-3号ロボットを福島第一原子力発電所に投入することができた。

図 5-12 ユニット化のまとめ

第6章 被曝管理

6.1 被曝管理の必要性	120
6.2 耐放射線性の概略評価と被曝管理方法の策定の提案	124
6.3 耐放射線性の概略評価と被曝管理方法の策定	125
6.3.1 ロボットの耐放射線性の律速部品の特定	125
6.3.2 半導体素子耐放射線性評価と管理目標値	126
6.3.3 運用形態による律速半導体素子の特定	127
6.3.4 過去の照射試験結果から耐放射線性の概略評価	127
6.3.5 照射試験による耐放射線性評価	128
6.3.6 ロボット等の故障時の影響リスクによる管理目標値	129
6.3.7 放射線環境下での管理方法の策定	130
6.4 耐放射線性の概略評価と被曝管理方法の有効性	131
6.5 まとめ	133

6.1 被曝管理の必要性

本章では、3.5 項で明らかにした原子力緊急時ロボットの課題のうち、半導体の耐放射線性評価への解決策として、ロボットの被曝評価について健闘する。

原子力施設で使用される保守用ロボットやマニピュレータは、長時間にわたって高放射線環境下で使用されることが多く、高い耐放射線性が求められるため、放射線損傷を起こし易い半導体等は、極力ロボット本体には搭載せず、サーボドライバを含む電子回路の多くは操作卓近傍の制御盤内に配置することが多かった[14]。高集積半導体を含む電子回路を放射線量の低い場所に移動する方法は、両腕型サーボマニピュレータで採用されているが、モータやセンサと電子回路間を 100 芯以上の信号線や動力線で数 10～数 100 m の距離を接続する必要があった。そのため太い複合ケーブルで長い距離を引き回す必要があった。さらにサーボドライバとサーボモータ間の動力線では、その距離に応じて電圧降下を考慮する必要もあった。

動力炉・核燃料開発事業団（現、日本原子力研究開発機構）では、高速炉使用済燃料再処理や高レベル廃液ガラス固化など高放射線下作業のために、1982 年から大型セル内遠隔保守技術の開発を進めてきた。これは幅 10 数 m、高さ 10 数 m、長さ約 20m のセルと呼ばれる、厚さ約 1m50cm 程度の放射線遮へいのためのコンクリートで囲まれた部屋の中に、使用済み燃料や高レベル廃液など高放射線性物質を内蔵あるいはそれらにより汚染されたプロセス機器を配置し、これらのプロセス機器の保守補修が必要となった時に、遠隔操作型クレーン、両腕型サーボマニピュレータ等により、プロセス機器を保守や補修したり、場合によってはリプレースしたりしようというものである。両腕型サーボマニピュレータは使用していない時も、高放射線下の大型遠隔セル内に保管されるため、より高い耐放射線性が要求された。そのため、集積度の高い半導体を用いた電子回路には、電子回路を線量率の低い場所に移設する方法、電子回路の中の高集積半導体を複数の低集積半導体に置き換えたディスクリット回路にする方法、半導体の放射線損傷に伴う特性変化を把握して、その変化を補償する回路を付加する方法等の対策が取られた。動力炉核燃料開発事業団では、上記のように両腕型バイラテラルサーボマニピュレータとその周辺の機器や装置の耐放射線性を向上させるため、文献から得られた半導体等の照射試験データや、自ら行った半導体等の照射試験データを蓄積し、「耐放射線性機器・材料データベース」として構築・整備した[45]。

第 1.1 節で述べた東海 JCO 臨界事故の後に開発された原子力災害対応ロボットは、高放射線下で使用することが想定されていたが、比較的短時間の調査や軽作業のみを想定されており、殆どは、市販の半導体を使用しており、耐放射線性は 10～100 Sv 程度と想定される。Rabot, MARS-A や MENHIR 等は、電子回路に光学エンコーダーや集積度の高い半導体を使用せず、レゾルバや集積度の低いディスクリット半導体を

用いており、1000 Sv 程度の耐放射線性を有していると想定される。

半導体等を使用した電子回路の耐放射線性を向上させる方法としては、3.3.1.2 小節で述べた様に、以下の6方法が考えられる。

- 1) 高耐放射線性半導体素子開発を行う方法
- 2) 市販半導体素子に補償回路を追加して耐放射線性を向上させる方法
- 3) ディスクリート半導体素子による電子回路で耐放射線性を向上させる方法
- 4) 半導体素子に放射線遮蔽を施す方法
- 5) 半導体素子を含む電子回路をロボット本体から移動する方法
- 6) 半導体素子を含む電子回路を交換する方法

半導体素子を含む電子回路全体を鉛や鉄などで遮へいする方法は、ドイツ KHG の Excavator 等での実施例があるが、遮蔽体の重量が 100kg~1,000kg 単位で増加するため、比較的小型のロボットでは動力性能が大きく損なわれる。Excavator 等の無人建設重機などの大型ロボットでは採用可能であるが、それまでに日本で開発されてきた無人建設重機では、半導体を含む電子回路がエンジン、制御装置、センシング装置、通信装置などに分散しているため、何か所にも遮蔽体を設置することが必要になる。更に CCD や CMOS を使用しているカメラを鉛等で覆うことは、カメラとしての機能を果たせなくなる。半導体数個のみを遮蔽するやり方もあり得るが、電子回路自体を特殊仕様に新たに設計製作し直すというデメリットもある。

CPU 等の高集積半導体自体の耐放射線性を向上させるのは、アメリカ等で軍事用に開発した例がある。アメリカで開発された耐放射線性半導体素子を輸入して使用方法もあるが、耐放射線性半導体素子が高価なことに加え、半導体素子の詳細仕様が開示されないこと、耐放射線性が保証されないこと、使用を終えた時には製造メーカーに CPU 等半導体素子を返品するか、再利用不可能なように廃棄したことの証明することが求められる。原子力施設内で使用する遠隔操作機器の多くは高放射線下のみならず、高汚染下にあり、このような環境下で装置や機器の中から CPU 等半導体を回収したり、再利用不可能となるように破壊したりすることは、作業員の被曝量の増加が懸念され、現実的ではない。そのため、動力炉・核燃料開発事業団（現、日本原子力研究開発機構）では、軍事用耐放射線性半導体と同様の手法で、半導体耐放射線性を考慮した母材や製造プロセスで、耐放射線性半導体を製作することを試みた例がある[46]。しかしながら、CPU 等半導体の開発に費用と期間がかかるほか、日進月歩で進化し続ける CPU 等半導体素子の製造技術に併せて、常に新たな CPU 等半導体の製作をし続ける必要があり、原子力分野でこのような方法は殆ど例が無かった。そのため、無人建設重機、Brokk, Quince などに適用するには時間がかかり福島第一原子力現実性は低いと判断された。

放射線損傷をより受けにくい低集積半導体からなる電子回路に置き換える方法や高集積半導体の放射線による放射線損傷とその特性変化[47]を把握してその特性変化

分を補う補償回路を付加する方法は、補償回路の例としては、放射線により発生した電子孔のため、オペアンプ等の増幅率が変動するため、定期的に増幅率を自動的に計測し、増幅率の設定をし直す、というようなものである。比較的低コストで、原子力などの民生用ロボットでは、現実的な方法と考えられる。しかしながら、いずれも、電子回路を設計し直し、製作しなおす必要があることから、無人建設重機、**Brokk**、**Quince** などに適用するには時間がかかり福島第一原子力発電所事故では現実性は低いと判断された。

2011年3月11日に発生した東日本太平洋沖地震に伴い発生した大津波により東京電力福島第一原子力発電所で発生した事故では、水素爆発に伴い大量の瓦礫とともに、放射性物質が原子炉建屋の内外に放出された。その結果、原子炉建屋周辺の放射線量は100 mSv/hを超える場所が複数観測されたが、概ね100 mSv/h以下であった(図4-5)。また原子炉建屋内では1,000 mSv/hを超える場所が複数観測されたが、概ね1,000 mSv/h以下であった(図6-1)。原子炉建屋周辺で1,000 hあるいは原子炉建屋内で100 h程度使用した場合の総被曝放射線量は100 Sv程度である。これらの値は、両腕型マニピュレータ等の原子力保守用ロボットの使用環境の100 Sv/h、年間の総被曝線量1 MSvと比べると極めて低いものであった。そのため、3.3.1.2小節で述べた様な、市販半導体を使った無人建設重機やロボットでも、総被曝線量が耐放射線性を超える前に、半導体素子または半導体素子が使われている電子回路ごと交換することができれば、福島第一原子力発電所の事故現場で使用できる可能性があった。

土砂災害用に開発され、雲仙普賢岳等で実際に用いられている無人建設重機、遠隔操作型小型建設重機**Brokk**は既に開発され使用されていたり、海外から輸入手続き中だったりするものであった。そのためこれら無人建設重機やロボットに使用されている電子回路の半導体素子と同じ型番で同じロットの半導体素子を入手して、照射試験を実施して、これらの耐放射線性を確認することはできなかった。

無人建設重機や**Packbot**ロボット等が原子炉建屋周辺や原子炉建屋1回で使用されるのに対し、研究開発中の災害対応ロボット**Quince**ロボットは、より放射線量が高いと予想された原子炉建屋5階に投入されることが計画された。

無人建設重機、**Packbot**ロボットおよび**Quince**ロボットを福島第一原子力発電所の過酷事故が発生した現場に投入するにあたり、これらのロボットの耐放射線性の評価をする必要となった。この必要性は、政府・東電福島原子力発電所事故対策統合本部の下に設置されたリモートコントロール化プロジェクトチームにおいても指摘され、汎用半導体や材料の耐放射線性の評価と放射線管理方策を検討することとした。

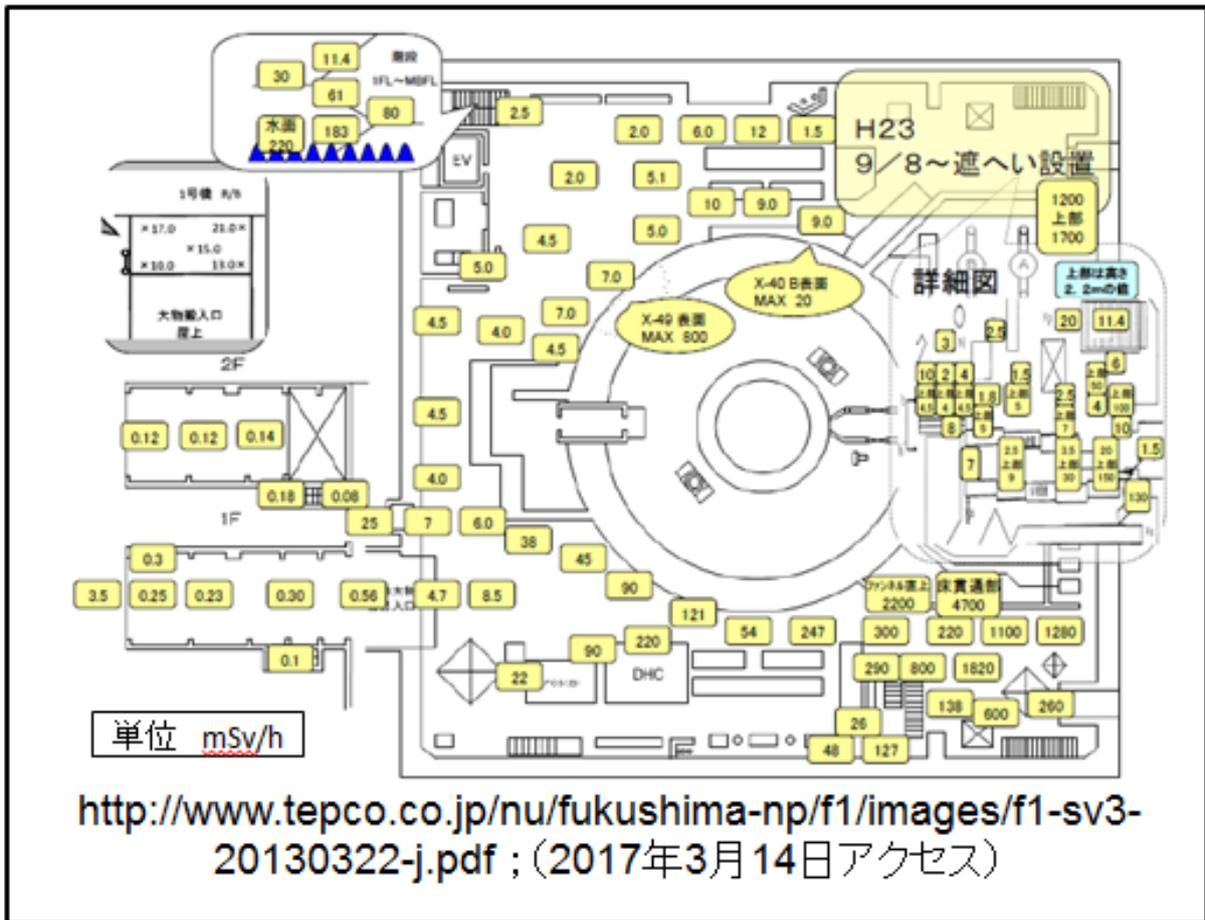


図 6-1 福島第一原子力発電所 1号機原子炉建屋内の放射線量

6.2 耐放射線性の概略評価と被曝管理方法の策定の提案

放射線環境下でを使用することを前提とせずに関係や使用されている、無人建設重機や、Packbot ロボット等を福島第一原子力発電所の過酷事故発生現場で使用するに当たり、どの程度の耐放射線性を有しているのか、どのような被曝管理を行えば良いかを、無人建設重機やロボットを運用するオペレータ達には判らなかつた。

無人建設重機や Packbot ロボット等については、既に開発あるいは雲仙普賢岳島の現場で使用されている機材であったため、これらに使用されている半導体素子と同じ型番や同一ロットの半導体素子を手に入れることが不可能であったこと、まずは放射線環境下でも使用可能か否かが一番の関心事であったことから、原子力保守用ロボットの時に行った構成部材の照射試験結果等を基に、原子力緊急時ロボットを高放射線下で使用する際の耐放射線性評価や被曝管理方法の策定を提案した。

より放射線量の高い2号機5階等への投入が計画されていた Quince については、研究開発段階のロボットであったことから、同一ロットではないものの同一型番の半導体素子、あるいは類似型番の半導体素子を手に入れ可能であったことから、照射試験をおこなった上で、半導体素子の耐放射線性の概略評価を行うことを提案した。

6.3 耐放射線性の概略評価と被曝管理方法の策定

6.3.1 ロボットの耐放射線性の律速部品の特定

耐放射線性を議論する際、本来であれば、部品や材料の吸収線量[Gy]に対して、機能や性能が劣化したとか喪失したとかを論じるべきである。吸収線量は、被曝線量あるいは照射線量[Sv]に、部品や材料ごとに固有の吸収効率(0~1)を掛けて求まるものである。したがって一台のロボットを構成している複数の部品や材料の吸収線量は、同じ量の放射線被曝をしているが、吸収線量が微妙に異なるために吸収線量は異なる。ロボットの放射線被曝を管理するという観点からは、吸収線量では混乱することが懸念され、実務的には被曝線量[Sv]を用いる方が適当で混乱が少ないと思われる。そのため、本章では参考文献から引用した場合等を除き、原則として、吸収線量[Gy]ではなく、被曝線量[Sv]で、耐放射線性を議論することとする。

動力炉・核燃料開発事業団(現、日本原子力研究開発機構)では1980年代から1990年代初頭にかけて、バイラテラルサーボマニピュレータ等ロボット等の開発等を行い、これらロボット等の耐放射線性を評価するために、ロボット等を構成しているモータ、ギア、潤滑油(グリース)、タコジェネレータ、サーボドライバ、コンピュータ、カメラ、無線機等の部品等から構成されており、耐放射線機器・材料データベースを構築した[45]。このデータベースを基に、ロボット等の耐放射線性を評価した。

ロボット等を構成する部品等のうち、絶縁材や被覆材や潤滑剤などの有機材料と半導体素子は、耐放射線性が低いことが知られていた。そのため、有機材料としてケーブルとオイル、更に半導体の耐放射線性をまとめた(表6-1)。その結果、CPUやCCDなど集積度の高い半導体の耐放射線性が~100 Svであるのに対して、集積度の低いBipolar半導体、オイルやケーブルなどの有機材料の耐放射線性は少なくとも10 kSv程度であることから、ロボット等の耐放射線性は、CPUやCCD等が律速していることを特定した。

表 6-1 ロボット等の構成部材の耐放射線性の概略評価

	Material	Radiation Tolerance
1	CCD/CPU	~100 Sv
2	Bipolar Transistor	~10,000 Sv
3	Bipolar Op. Amp.	~100,000 Sv
4	Oil	~10,000 Sv
5	Rubber	300,000~3,000,000 Sv
6	Cable	1,000,000~100,000,000 Sv

6.3.2 半導体素子耐放射線性評価と管理目標値

半導体素子の耐放射線性は、その母材に依存するほか、その製造プロセス、言い方を変えれば集積度に大きく依存する。さらには製造ロットによっても耐放射線性が大きく変化する[45].

このように半導体素子は、様々な要因により耐放射線性が変わることから、本来であればロボットに搭載する半導体素子あるいは電子回路の状態での照射試験を行い、耐放射線性を評価することが望ましい。

福島第一原子力発電所事故後に投入が計画された、無人建設重機、Packbot ロボットや Talon ロボットは既に開発や製造が終了して年月が通っていること、操作訓練や投入準備に使用されていること等から、半導体素子の型番を調査して、同一型番の半導体素子やできることならば同一ロットの半導体素子を手に入手して、照射試験を行うことは不可能であった。

そのため、これらのロボット等を投入するに際して、ロボット等が単独運用か複数運用か、半導体の照射試験の実施が可能か否か、放射線損傷による故障が発生時のリスクの大きさなどから、図 6-2 のようにロボット等の被曝管理目標値の決定方法を検討することとした。

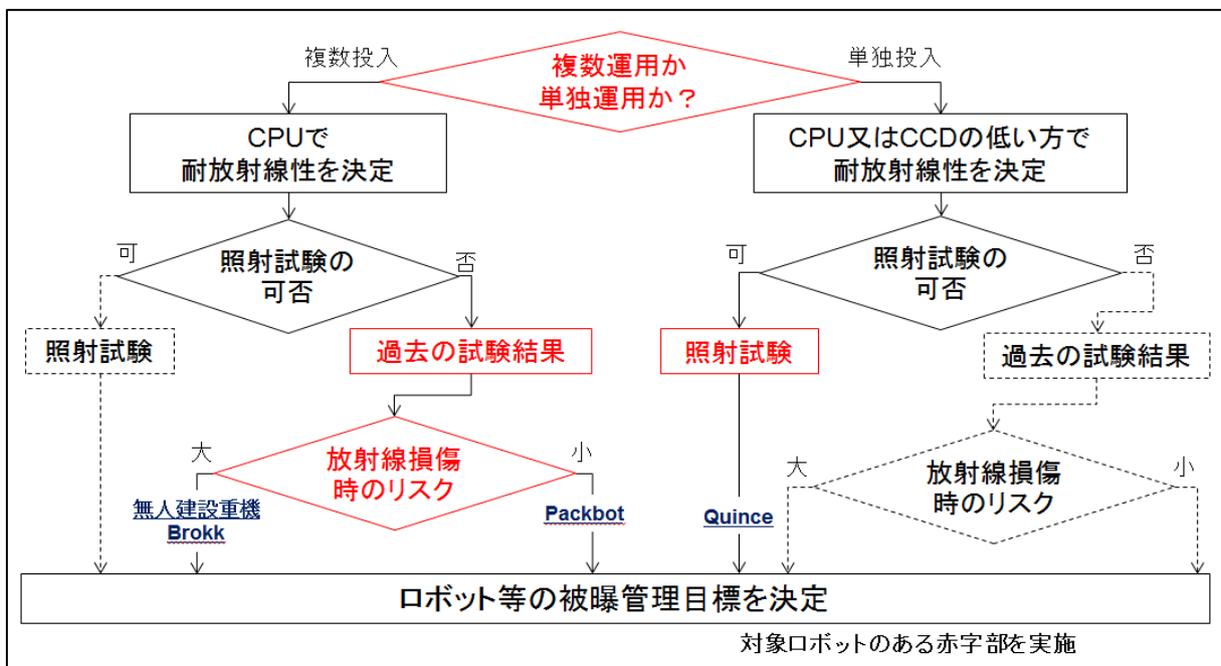


図 6-2 ロボット等の被曝管理方法の決定方法

6.3.3 運用形態による律速半導体素子の特定

ロボットを複数運用するか、又は単独運用するかにより、どの半導体素子が、ロボット等の耐放射線性を律速するかの特定を行った。

複数で運用する場合は、仮に CCD の損傷によりカメラ画像が見られなくなったとしても、同に運用されている他のロボット等のカメラ画像により、論証ロボットを操作して、回収することが可能である。CPU 等が損傷するとロボット等のモータ等の制御ができなくなり、ロボットの回収が困難となる。

そのため、複数運用の場合は CPU が、単独運用の場合は CCD または CPU の何れか耐放射線性の低い方が、ロボットの耐放射線性を律速すると判断した（図 6-3）。

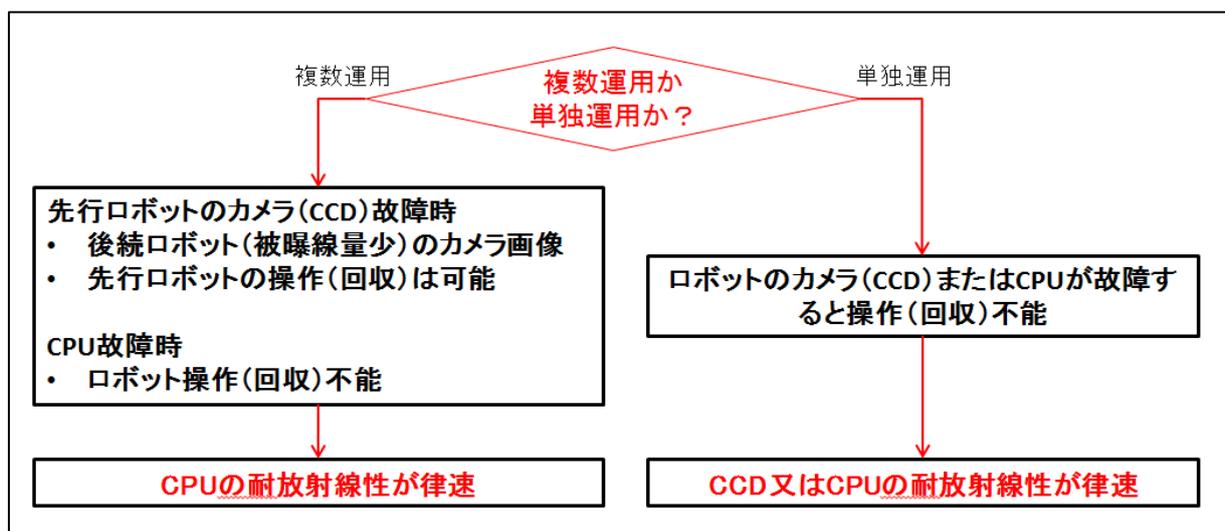


図 6-3 用形態による律速半導体素子の特定方法

6.3.4 過去の照射試験結果から耐放射線性の概略評価

福島第一原子力発電所事故発生直後、投入が計画されたロボット等は、無人建設重機、Packbot、Brokk 等であり、既に開発製造されていたものを国内外から集めてきて、複数ロボットで運用しようとしていたものである。そのため、製造時の半導体素子と同一型番、同一ロットの半導体素子を収集して照射試験を行うことは不可能であった。

そのため、過去の照射試験結果から、耐放射線性を評価することとした。

半導体素子の耐放射線性を体系的に整理したものとしては、前述の動力炉・核燃料開発事業団が構築した「耐放射線機器・材料データベース」[45]があったが、その他に、東海村 JCO 臨界事故後に製造科学技術センタ（MSTC）が原子力災害対応ロボッ

トを開発する過程で行った半導体素子等の照射試験結果[22]もあった。それに加えて、政府・東電福島原子力発電所事故対策統合本部リモートコントロール化プロジェクトチームを通じて、アメリカエネルギー省アイダホ国立研究所に照会した結果、CPU等の耐放射線性は30～50Svとの回答も得られていた。これらから、過去の半導体素子について、CPUの耐放射線性は～100Svと判断した（図6-4）。

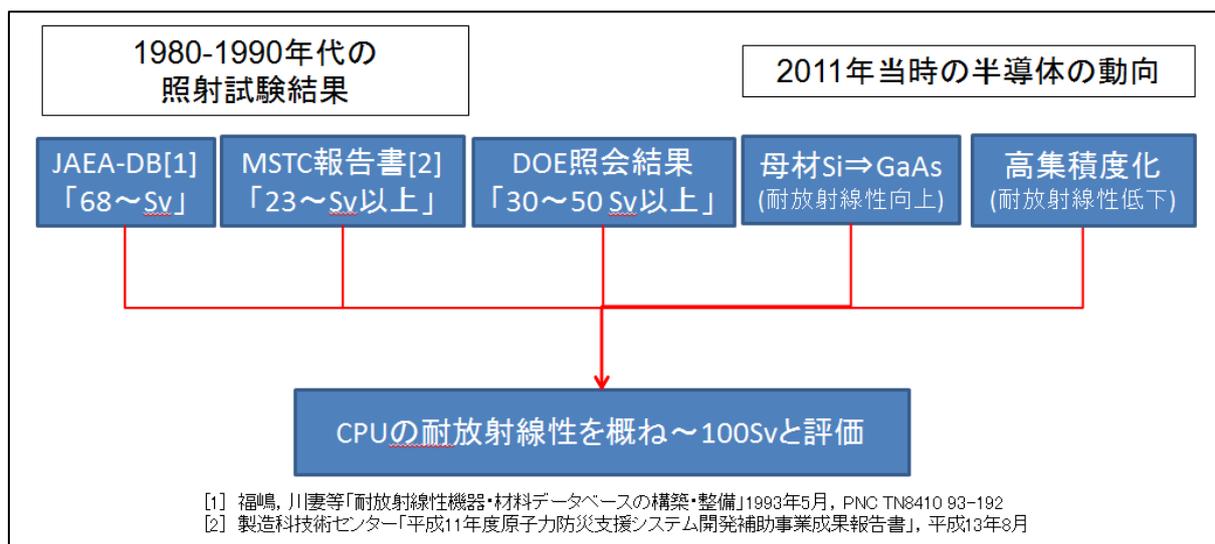


図 6-4 過去の照射試験結果から耐放射線性評価

6.3.5 照射試験による耐放射線性評価

東北大学、千葉工業大学および国際レスキューシステム研究機構が共同で研究開発中であった Quince ロボットを原子炉建屋内でも、放射線量率が高いと想定された地下階や5階オペレーションフロアへの投入が検討されており、それらでの空間線量率は1～10 Sv/hとも予想されていた。

Quince ロボットの被曝線量は50 Svを超えることも想定された。想定される被曝線量は、1980-90年代の照射試験結果データベースを基にした CCD/CPU の耐放射線性の概略評価 50 Sv を超える可能性もあった。1980～1990年代の半導体素子の母材が Si であったのに対し、2011年当時の半導体素子の主流は GaAs に移行しつつあり、母材レベルでは GaAs を母材とする半導体素子の耐放射線性が高いことは知られていた。また、Quince ロボットは研究開発段階のものであり、搭載されている電子回路の半導体素子については同型番の素子が入手可能な状況であった。そのため、Quince ロボットに搭載する CCD や CPU 等の半導体素子の放射線照射試験を2011年4月に、日本原子力研究開発機構高崎研究所のガンマ線照射試験施設で実施した。その結果、

カメラは集積線量 169 Sv で故障したが、制御回路等に必要となる CPU などの半導体は 200 Sv 以上の耐放射線性を示した（表 6-2） [37]。半導体の耐放射線性はロットによってばらつくことが知られており、照射試験に供した試験体数が少ないことからリスクはあるものの、Quince に搭載予定の CPU は 200 Sv 以上の、カメラは 150 Sv 程度の耐放射線性を有すると判断した。

階段昇降可能なロボットが Quince ロボットのみで、1 台で原子炉建屋の上層階の調査に使用することが計画されていたことから、万が一の故障時に、他のロボットの画像情報の提供などの支援や、作業員の入域による通路わきへの蹴り寄せ等は、期待できなかった。そのため、CPU だけではなく CCD の耐放射線性の低い方を以て、ロボットの耐放射線性とすべきと判断した。Quince ロボットに搭載予定の CPU やサーボドライバは 200 Sv 以上、CCD カメラは 200Sv 以上もしくは 169Sv の耐放射線性を有していた（表 6-2）。一方、Quince ロボットに搭載予定のレーザー測域センサは 124.2Sv とより低い耐放射線性を示したが、万が一、故障した場合でも、ロボットに搭載したカメラの画像情報で機関操作は可能と判断した。半導体素子の耐放射線性にはロットによるばらつきに加えて、個体差によるばらつきもあることから Quince の耐放射線性は 150 Sv と判断した。

表 6-2 Quince ロボット搭載半導体素子の照射試験結果

Device	Total dose[Sv]	Condition
CPU board, POE device	206.0	Functional after irradiation
Motor driver boards	206.0	Functional after irradiation
Laser scanner, UXM-30LN	229.0	Functional after irradiation
Laser scanner, Eco-scan FX8	225.0	Functional after irradiation
CCD Camera, Axis 212	219.5	Functional after irradiation
Laser scanner, URG-04LN	124.2	Defected after 124.2 Sv.
CCD Camera, CY-RC51KD	169.0	Detected after 169.0 Sv.

Keiji Nagatani, Seiga Kiribayashi, Yoshito Okada, Kazuki Otake, Kazuya Yoshida, Satoshi Tadokoro, Takeshi Nishimura, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi, Mineo Fukushima, Shinji Kawatsuma, “Emergency Response to the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using Mobile Rescue Robots”. Journal of Field Robotics 30(1). 44–63. 2013

6.3.6 ロボット等の故障時の影響リスクによる管理目標値

6.3.4 節により、過去の照射試験結果から、CPU 等の集積度の高い半導体の耐放射線性は～100Sv と評価されたが、型番や製造ロットにより母材や製造プロセスが微妙に異なることから、耐放射線性にも個体差が出ることが予想され、管理目標値は裕度

を持って設定することが求められた。

裕度は、ロボットが万が一故障した際の影響リスクにより、影響リスクの小さいロボットについては、極力長く使用し続けることが望まれた。その結果、万が一故障した場合に作業員が短時間立入って、ロボットを回収または排除することの可能な小さなものについては、損傷確率がほぼ0となる20Svと設定した。故障した場合に回収や排除が難しいものについては損傷確率をある程度認めることとして30Svと設定した。

6.3.7 放射線環境下での管理方法の策定

前節までの検討結果を踏まえて、既に開発製造棟を終えていて、同一型番、同一ロットの半導体素子を入手不可能で、複数運用を前提としていて、万が一放射線損傷した場合の影響リスクが大きい無人建設重機等については20Sv、既に開発製造棟を終えていて、複数運用を前提としていて、万が一放射線損傷した場合の影響リスクが小さいPackbotロボット等については30Sv、同一型番、同一ロットの半導体素子の照射試験が実施できたQuinceロボットは150Svと設定した（表6-3）。

表 6-3 放射線環境下でのロボット等の管理目標値

複数運用	過去試験から評価	無人重機等	20 Sv
		Packbot等	30 Sv
単独運用	照射試験実施	Quince	150 Sv

6.4 耐放射線性の概略評価と被曝管理方法の有効性

本章での検討を踏まえ、「汎用重機やロボットにおける耐放射線性評価と管理方法の基本的な考え方」をまとめ、2011年4月25日に開催された政府・東京電力福島原子力発電所事故対策統合本部リモートコントロール化チームの基に設置された建設機械等の放射線耐性に関する検討会の第2回会合に報告し、参加メンバーの了承を得て、2011年4月27日に開催された政府・東京電力福島原子力発電所事故対策統合本部リモートコントロール化プロジェクトチームに報告した。本「耐放射線性評価と管理方法」は、建設重機やロボットの製造開発や運用を行っていた同検討会メンバーに配布するとともに、超学会組織「対災害ロボティクス・タスクフォース(ROBOTAD)」の協力を得て、同組織の公式ブログ上で公開した[48]。

この「耐放射線性評価と管理方法」は無入建設重機や Brokk を投入した大成建設、Packbot や Quince を投入した東京電力において運用された。その結果、福島第一原子力発電所事故の緊急時対応として2011年12月16日迄に、20台余りの無人重機やロボットが投入されたが、これらで放射線損傷が原因で未帰還となっているロボットは確認されていない。

さらに、今後の課題として、今後の「耐放射線性評価と管理方法」の改訂に所要の課題として、以下の項目を明確化することができた。

- ▶ ロボット等に用いられる半導体は日進月歩であることから、今後広く普及すると考えられる炭化ケイ素やダイヤモンド半導体についても照射試験データを取得し、CPU等半導体の耐放射線性の概略評価を進めていく必要がある。しかしながら、電子回路に使用される半導体の種類は多種多様であり、これらすべての、最新の半導体の照射試験データを蓄積しておくことは、相当の労力と予算を必要とし、このための予算を確保することは、平時が続く中では徐々に困難となり、結果として予算を確保できず、「耐放射線性の概略評価と被曝管理方法」の更新を行っていくことも不可能となる。このような状況を回避する方策として、放射線による損傷のレベルが最も大きいCPUやCCDについてのみ、照射試験を継続し、「耐放射線性の概略評価と被曝管理方法」の改訂の可否を検討しておくだけでも有効であると考えられる。
- ▶ 現時点では原子炉建屋内でのロボット等の使用が主と考えられるが、今後は格納容器内や原子炉容器内に進入する機器や装置が必要となる。これまでの格納容器内部調査の結果[50]から、10-100Sv/h程度の放射線環境以上となることが予想される。
- ▶ このような高放射線環境下では、半導体母材のガリウムヒ素や炭化ケイ素に伴う半導体の耐放射線性向上に期待するだけでは不十分であり、CPUやCCD

など高集積半導体の放射線による放射線損傷とその特性変化を把握して、その特性変化分を補う補償回路を付加する方法についても、今後整備する必要がある。



図 6-5 本被曝管理を適用したロボット等

6.5 まとめ

原子力緊急時ロボットを事故発生した原子力施設の高放射線下で運用するうえでの耐放射線性や被曝管理方法に関する「耐放射線性の概略評価と被曝管理方法」が無く、ロボットを投入しても何時放射線損傷による故障が発生するか判らない状況であった。

本章では耐放射線性の概略評価とロボットの被曝管理方法からなる「耐放射線性評価と管理方法」の作成を提案し、原子力保守用ロボット開発時に行った照射試験のデータを基に、諸処の条件の違いはあるものの、原子力緊急時ロボット用の「耐放射線性評価と管理方法」を作成した。

その結果、福島第一原子力発電所事故後、原子炉の停止、炉心の冷却、放射性物質の大量放出防止ができ、当時の野田内閣総理大臣の事故収束宣言が出るまでの、緊急時対応期間で投入された20余台のロボットに、放射線損傷による故障は発生しなかった。これにより、「耐放射線性評価と管理方法」の有効性を確認できた。

以上を整理すると図 6-6 の様になる。

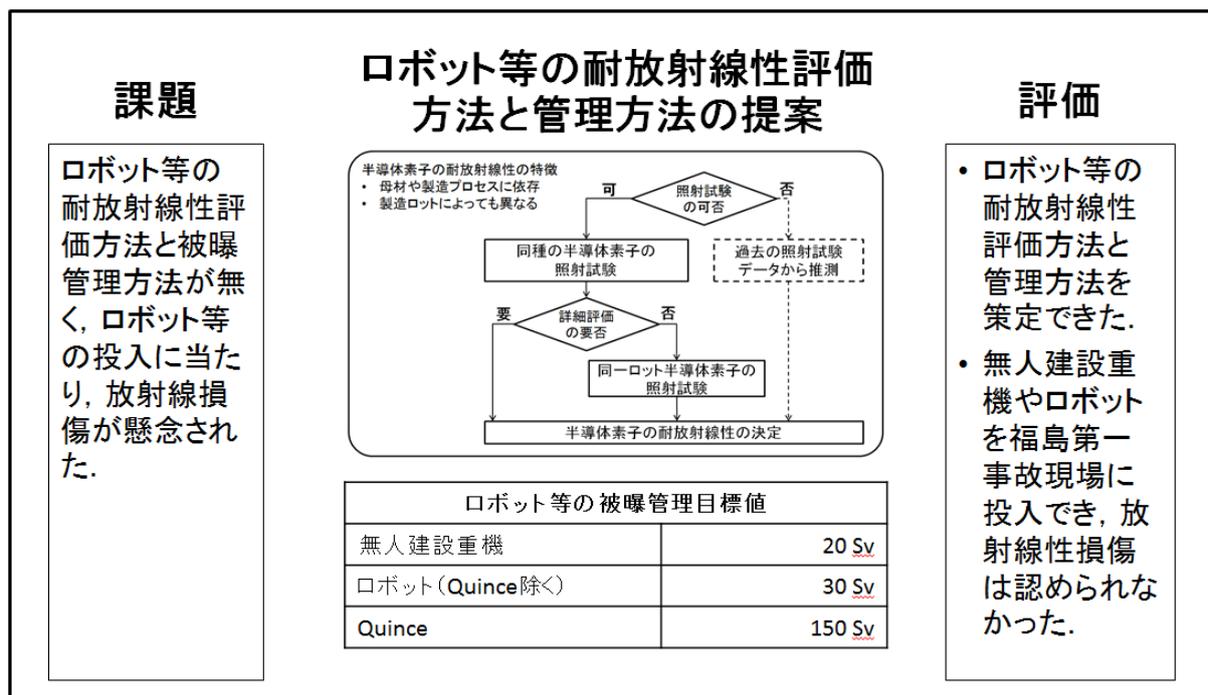


図 6-6 被曝管理のまとめ

第7章 除染方策

7.1 汚染ロボットの除染の課題	136
7.2 ロボット等の除染方策の提案	137
7.3 ロボット等の除染方策の策定	138
7.3.1 汚染管理目標値による保守時の被曝線量試算	138
7.3.2 残留汚染調査と汚染形態推測	146
7.3.3 ロボット等の汚染部位ごとの除染方策	150
7.4 ロボット等除染方策の有効性	151
7.5 まとめ	152

7.1 汚染ロボットの除染の課題

本章では、3.5 項で明らかにした原子力緊急時ロボットの課題のうち、現場適応性の可搬性に対する解決策として、可搬性について検討する。

福島第一原子力発電所事故では、緊急時対応や廃炉の作業のために、多くの無人建設重機やロボットが用いられている。無人建設重機やロボットを有効に活用するためには、点検保守を行って常に可動状態に維持することが重要である。ロボットや無人建設重機は、点検保守を行っていないと不可動となり廃棄物となってしまうほか、突発的な故障による事故等の危険もあり得る。

福島第一原子力発電所 3 号機原子炉建屋の水素爆発により、大物搬入口付近に飛散した瓦礫等の撤去を行うために、スウェーデン製の遠隔操作小型重機 **Brokk 90** 一台、**Brokk 330D** 二台と **Brokk 800D** 一台が用いられた。これら無人建設重機は、瓦礫撤去等の作業により高度に汚染していたため、2011 年 7 月に高圧水スプレーによる除染が行われたが、除染後も当時の持出し基準である **100kCPM** を上回っていた無人建設重機やロボットの汚染管理や除染は重要な課題である。

7.2 ロボット等の除染方策の提案

ロボット等の除染方策の必要性が認識され、除染方策を提案することとし、検討をおこなった。

検討に際しては、当時の除染目標として定められていた 100 kCPM の妥当性、言い方を変えると 100kCPM での保守作業時等のオペレータ等の放射線被曝量が十分に小さいことを確認した。

その上で、福島第一原子力発電所の事故後の緊急時対応で運用され、水スプレー等により 100kCPM 以下まで除染できなかった、遠隔操作小型重機 Brokk 90 および Brokk 800D の残留汚染の調査をロボットの部位毎に実施し、残留汚染部位毎の汚染形態を推測し、部位毎の除染方策を策定し、その方法による Brokk ロボットの再除染を行い、除染方策の策定を行うこととした（図 7-1）。

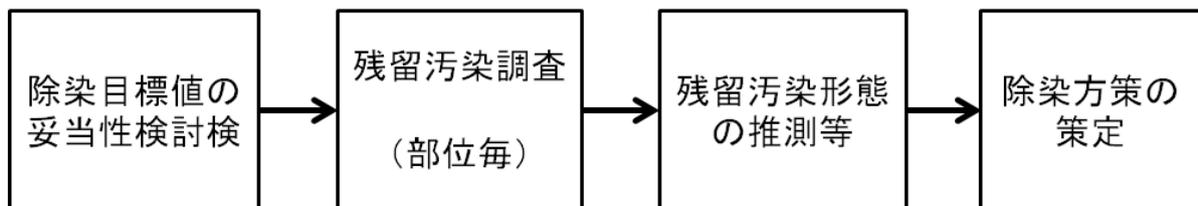


図 7-1 除染方策の策定手順

7.3 ロボット等の除染方策の策定

7.3.1 汚染管理目標値による保守時の被曝線量試算

ロボットや無人建設重機の汚染管理の目標値は、福島第一原子力発電所事故に伴い設定された警戒区域からロボットや無人建設重機を退域させる際に、ロボット等に残留する汚染の上限をスクリーニングレベルとして設定された。

福島第一原子力発電所事故に伴い設定された警戒区域からロボットや無人建設重機を退域させる際のスクリーニングレベルは、事故後の段階では **100 kCPM** と定められていた。その後、平成 24 年 10 月時点では、原子力施設で一般的に用いられている管理区域設定の基準となる表面汚染密度を参考に、**13kCPM** と定められた[51]。

本節では、ロボットや無人建設重機に残る、スクリーニングレベル以下の汚染によるメンテナンス要員が受ける放射線被曝量を試算し、その影響がオペレータや作業員に与える影響についても確認する。

オペレータや保守要員が点検保守を行っている間に被曝する放射線量を試算するために、ロボットの大きさを幅 1m、高さ 0.5m と、無人建設重機の大きさを幅 5m、高さ 2m と仮定し、2011 年 7 月時点でのスクリーニングレベルの **100 kCPM** で一様に汚染されているとした場合の放射性物質量のすべてが、ロボット表面の中央に点線源としてあるとし、オペレータまたは保守要員はロボット表面中央から **0.5 m** の点で点検保守作業を行い、**1m** の位置で工具交換などの付帯作業を行うことを想定して、点線源として存在しているとして、オペレータ等の場所での放射線量率を試算した（エラー! 参照元が見つかりません。）。

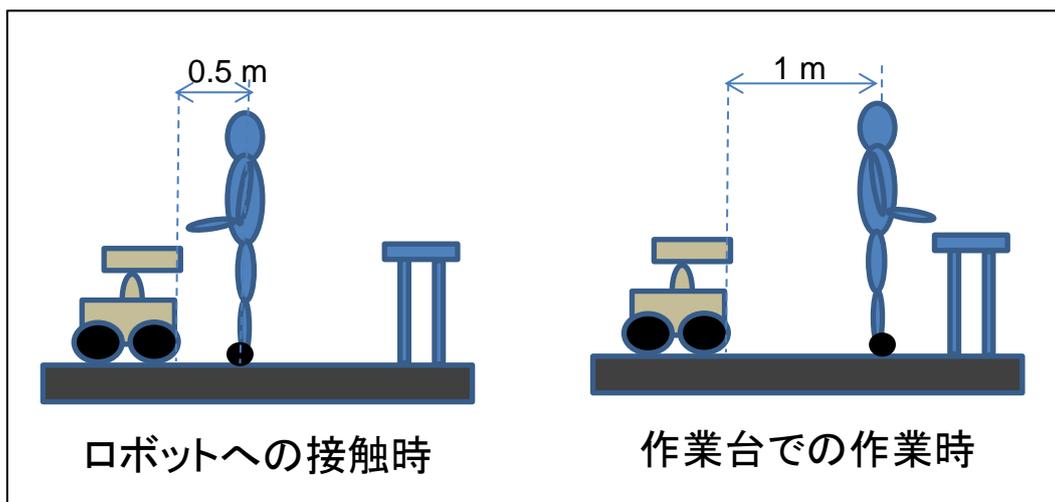


図 7-2 ロボットを保守する際のイメージ図

汚染している放射性物質は、福島第一原子力発電所 1, 2 および 3 号機の床から採取したコンクリートコアサンプリングを 2012 年 8 月に分析した結果では Ag-110m, Sb-125, Cs-134 および Cs-137 が検出されており, Ag-110m および Sb-125 は Cs-134 および Cs-137 と比べて 1/10~から 1/100 程度と微量であり, Cs-134 と Cs-137 の比は概ね 2/3:1 の割合で存在していることが知られている[52]. オペレータおよび保守要員の放射線被曝量は Cs-134 および Cs-137 からによるものが支配的と考えられる.

点線源から r [m]離れた場所での放射線量(実効線量率) E_r は次式で求められる[53].

$$E_r = \frac{S \times \Gamma}{r^2} \left[\frac{\mu Sv}{h} \right] \quad (1)$$

ここで S , Γ , r は以下の通り.

S : 放射性同位元素の数量 (MBq)

Γ : 実効線量率定数

r : 評価点までの距離 (m)

Cs-134 と Cs-137 の複数の核種があることから, それぞれの核種の存在割合 R_i , 核種ごとの実効線量率定数を Γ_i とすると以下の様になる.

$$E_r = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{R_i S \times \Gamma_i}{r^2} \right) \left[\frac{\mu Sv}{h} \right] \quad (2)$$

さらに S はロボット表面の汚染密度 s [MBq/cm²] にロボットの作業者に面した表面の面積 d [cm²] の積であることから (2) 式は以下の様になる

$$E_r = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{R_i s d \times \Gamma_i}{r^2} \right) \left[\frac{\mu Sv}{h} \right] \quad (3)$$

さらに, 汚染密度 s は以下の式で求められる.

$$s = C \text{ [kCPM]} \times 10^3 / \varepsilon \varphi d \text{ [MBq/cm}^2\text{]}$$

ここで

C : サーベイメータカウント数[CPM]

ε : ガンマ線 (光子エネルギー) 計数効率

φ : ガンマ線 (光子エネルギー) の放出率

d' : ガンマ線 (光子エネルギー) 計数面積

である

よって,

$$E_r = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{R_i C \times 10^3 / \varepsilon \varphi d' d \times \Gamma_i}{r^2} \right) \left[\frac{\mu S v}{h} \right] \quad (4)$$

核種ごとの実効線量率定数 Γ_i は以下の値であることが知られている[54].

$$\Gamma_1 = 2.11 \times 10^{-1} \quad (\text{Cs-134 の実効線量率定数}) \quad (5)$$

$$\Gamma_2 = 7.79 \times 10^{-2} \quad (\text{Cs-137 の実効線量率定数}) \quad (6)$$

R_1 と R_2 は、2012.8時点でのCs-134とCs-137の比率は2/3 : 1であることから以下の式がなりたち、この式から求めることが出来る.

$$R_1 : R_2 = \frac{2/3}{\left[\left(\frac{1}{2} \right)^{\left(\frac{t}{T_1} \right)} \right]} : \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{2} \right)^{\left(\frac{t}{T_2} \right)} \right]}$$

ここで、 t , T_1 , T_2 は以下の通り.

$$t = 1.4167 \text{ [y]} \quad (\text{事故後の経過年数 1 年 5 ヶ月})$$

$$T_1 = 2.0648 \text{ [y]} \quad (\text{Cs-134 の半減期})$$

$$T_2 = 30.167 \text{ [y]} \quad (\text{Cs-137 の半減期})$$

よって、核種ごとの比率 R_1 と R_2 は以下の様になる.

$$R_1 = 0.51 \quad (7)$$

$$R_2 = 0.49 \quad (8)$$

さらに

$$C = 100 \text{ [CPM]} \quad (9)$$

$$\varepsilon = 0.1 \quad (10)$$

$d' = 5 \times 5 = 25 \text{ [cm}^2\text{]}$: ガンマ線 (光子エネルギー) 計数面積である

φ_i は以下の式で求められる.

$$\varphi = \sum_{i=1}^2 R_i \varphi_i$$

Cs-134 および Cs-137 の 1 壊変あたりのガンマ線 (光子エネルギー) 放出率 φ_i は核種ごとに 1 壊変あたりに放出されるガンマ線 (光子エネルギー) の放出率を合算して求められる[41].

i	核種	光子エネルギー[MeV]	光子毎の放出率	核種毎の放出率 φ_i
1	Cs-134	0.563	0.084	2.186
		0.569	0.154	
		0.605	0.976	
		0.796	0.855	
		0.802	0.087	
		1.365	0.030	
2	Cs-137	0.662	0.851	0.922
		0.0321	0.058	
		0.0365	0.013	

核種が 1 壊変ごとに放出されるガンマ線（光子エネルギー）の放出率は、Cs-134 の放出率 φ_1 と Cs-137 の放出率 φ_2 は以下の様になる。

$$\varphi_1 = 2.186$$

$$\varphi_2 = 0.922$$

よって

$$\varphi = 1.567 \quad (11)$$

偵察ロボットのような小型のロボットからオペレータが 0.5m および 1m で作業する場合の放射線量率は、(4) 式に (5) ~ (11) を代入して以下の様になる。

$$E_{\text{robot},r=0.5} = 0.9967[\mu\text{Sv/h}]$$

$$E_{\text{robot},r=1} = 0.2491 [\mu\text{Sv/h}]$$

オペレータまたは保守要員が午前午後の 2 回に分けて、全面マスクやタイベックスーツなどの放射線防護具を装着して、それぞれロボットから 0.5 [m]の場所で 1 [h], 1 [m]の場所で 1 [h]作業し防護具を脱装するとして、1 日当たりの被曝放射線量は、 $(0.9967 \times 1 + 0.2491 \times 1) \times 2 = 2.492 [\mu\text{Sv}]$

となる。年間 100 日程度、作業するとして、0.2492 mSv と一般公衆の被ばく限度である。

無人建設重機のように表面積が 5m×2m のように大型の場合は、ロボット表面からの距離 0.5m と比べて線源の分布範囲の方が大きいため、線源を図 7-3 の様に 0.5m×1m 毎に 20 のセルに分割して、それぞれの距離を考慮した線量率評価を行った。

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20

図 7-3 無人建設重機の汚染分布のイメージ

各分割面のオペレータや保守要員までの距離 r をもとめ、最も近い分割面からの実効線量率と各分割面からの実効線量率の比を求めた。その結果 20 に分割した各セルからの実効線量率の比はそれぞれ表 7-1 のようになり、それらの比の合計は 3.25 となる。

その結果、5mW×2mH の表面積を持ち、表面に 100 kCPM の汚染が残る無人建設重機から 0.5 [m]離れた場所にいるオペレータや保守要員の放射線量(実効線量率)は、 $0.9967 \times 3.25 = 3.239$ [$\mu\text{Sv/h}$]となり、1 [m]離れた場所での放射線量(実効線量率)は 0.8098 [$\mu\text{Sv/h}$] となる。同様の仮定で一日当たりの放射線被曝量は、 $(3.239 \times 1 + 0.8098 \times 1) \times 2 = 8.098$ [μSv]となる。

同様の仮定で一年間の放射線被曝量は、0.8098 [mSv]となる。無人建設重機を点検保守する場合の年間被ばく量は一般公衆の被曝上限である年間 1 [mSv]である。

表 7-1 各セルからの実行線量率の比

j	r_j	Ej/E18
1	2.55	0.0384
2	1.87	0.0715
3	1.58	0.100
4	1.87	0.0715
5	2.55	0.0384
6	2.29	0.0477
7	1.50	0.111
8	1.12	0.199
9	1.50	0.111
10	2.29	0.0477
11	2.12	0.0556
12	1.22	0.168
13	0.707	0.500
14	1.22	0.168
15	2.12	0.0556
16	2/06	0.0589
17	1.12	0.174
18	0.500	1.000
19	1.12	0.174
20	2.06	0.0589
合計		3.25

放射線は自然界にも存在しており、年間の被曝量は、表 7-2 に示す通り、都道府県の平均値で 1.1~2.6mSv 程度であり、全国平均で 1.5mSv である。ロボットや無人建設重機に残る汚染からオペレータや保守要員が曝される放射線被曝量を上回っている[55].

表 7-2 自然界の放射線による被曝量

線源		全体(mSv/yr)		U-238系列 ⁴⁾ からの被曝量(mSv/yr)			備考	
		範囲	平均	範囲	平均	主要核種		
外部被ばく	宇宙線	0.22 - 0.44 ¹⁾	0.26	-	-	-	放射線医学総合研究所(2004) もとに算出	
	大地からの放射線	0.14 - 0.44 ²⁾	0.30	0.026 - 0.095 ²⁾	0.06	Bi-214, Pb-214	「日本の地球化学図」をもとに算出。	
内部被ばく	ラドン吸入	0.38 - 1.3 ³⁾	0.59	0.38 - 1.3 ³⁾	0.59	Rn-222 ⁵⁾	放射線医学総合研究所(2004) もとに算出	
	食物等摂取	U Th	0.13 - 0.23	0.18	0.13 - 0.23	0.18	Po-210, Pb-210	会沢大、山本ほか(1994) 及び放射線医学総合研究所、丸山(1995) もとに算出
		Kほか	0.20	0.20	-	-	-	放射線医学総合研究所、丸山(1995)、内山(1981) もとに算出
合計		1.1 - 2.6	1.5	0.54 - 1.7	0.83	Rn-222 ⁵⁾ , Po-210		

1) 県平均の変動幅。
 2) 10パーセントから90パーセント。
 3) 県平均の変動幅。
 4) U-235系列の放射線影響は小さい。
 5) ラドン子孫核種の影響を含む。

ラドン温泉に1日滞在すると5.3μSvという報告[56][57]もあり，無人建設重機のメンテナンス作業一日での被曝量を上回っている。また，胸部X線コンピュータ断層撮影検査では6.9mSvとされている（図7-4）。

人体が放射線被曝したときの影響としては，一時に多量の放射線を被曝したときにおきる確定的影響と，低線量の放射線を慢性的に被曝したときにおきる確率的影響とがある。確定的影響は，数100~1000mSv以上の放射線を一時に被曝する急性被曝の際に起きるもので，下痢，下血，白血球減少，脱毛などの特有な症状が出る。100mSv未満での臨床例はない。

確率的影響は，低線量放射線を継続的に被曝する慢性的ひばくの際に起きるもので，累積被曝線量100mSvあたり「がん罹患やがんによる死亡率のリスク（発がん率）」が0.5%程度増加するとされている。

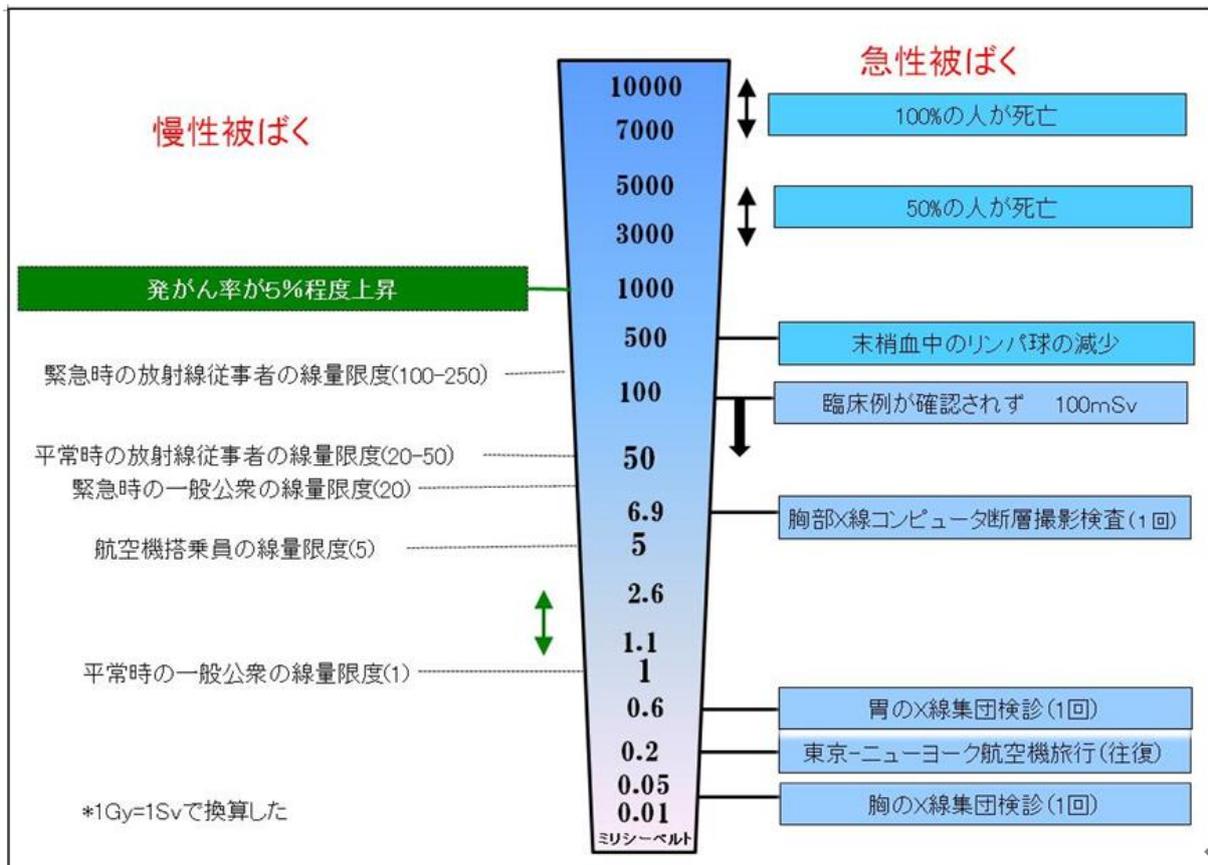


図 7-4 放射線被曝量と人体への影響

1986年4月26日に発生した旧ソビエト連邦(現ウクライナ共和国)のチェルノブイリ原子力発電所4号機の事故では、乳幼児および小児の甲状腺がんが増加したことが知られているが、事故で大気中に放出されたヨウ素131が乳幼児や小児の甲状腺に蓄積する傾向があること、事故後の退避勧告が遅れたこと、ヨウ素131で汚染された牛乳の摂取制限が遅れたことにより、乳幼児や小児の甲状腺が多量の放射線被曝をした結果と考えられている。成人住民は、セシウム137やセシウム134による内部被曝や外部被曝をしたと考えられるが、がん全体の発生率上昇や、死亡率上昇、非腫瘍性疾患罹患率上昇等は、25年たっても認められていない[58]。インド・ケララ地方は空間線量が年間平均4mSv、最大70mSvと高いが、疫学調査では他の地域に比べても発がんリスクの上昇は認められていない。三朝温泉は古くからラドン温泉として有名であるが、温泉地区の疫学調査では、発がんリスクは全国平均の0.46~0.54と低いとの報告もある[59]。

以上から、スクリーニングレベル未満の汚染が残るロボットや無人建設重機のメンテナンスの被曝量による影響は無視できるレベルであり、スクリーニングレベルを汚染管理(除染)目標値とするのは妥当と考えられる。

7.3.2 残留汚染調査と汚染形態推測

日本原子力研究開発機構のロボット操作車 RC-1 は、アメリカから提供された Talon や放射線計測機器等を搭載して、2011年5月1日から福島第一原子力発電所構内に投入された。メンテナンスのため、2011年7月23日から24日に汚染検査と除染を行った。車体外表面では、タイヤや泥除けが車体と比べ高く、1.5-6.4kCPM であった。車体内部では、ビニールで養生した荷台表面で 1.4-3.0kCPM であったが、運転席座席では数 kCPM 程度、床カーペット（起毛マット）上では 30-95kCPM と高い値を示した。これは、運転者の放射線防護服や靴に同伴して汚染された粉塵や泥砂が持ち込まれたものと推測される。床マットを剥いで再測定した結果、バックグラウンド（1-2kCPM）レベルに下がった。これらから、車体内部の汚染も相当量あり、可能な限りビニール等で養生し、保守点検前に、これら養生ビニールを交換することで汚染を低く保つことが可能と考えられる。

3号機原子炉建屋の水素爆発により、大物搬入口付近に飛散した瓦礫等の撤去に、スウェーデン製の無人重機 Brokk-90 一台、Brokk-330D 二台と Brokk-800D 一台が用いられた。これら遠隔重機は作業により汚染していたため、高圧水洗浄による除染が行われたが、除染後も 100kCPM を上回っていた。そのため、汚染状況等の調査を行った。



図 7-5 福島第一原子力発電所内で除染を待つ Brokk-90



図 7-6 福島第一原子力発電所内で除染を待つ Brokk-800D

汚染調査の結果、クローラ、スプロケット、ツール部、底部の汚染が高かった。クローラ、スプロケット、ツール部はクエン酸をしみこませた紙タオルでの拭き取りを試みたが、拭き取った後の紙タオルの放射線量は高くなく、油汚れや赤錆があることが確認された。底部は拭き取る際に、粉塵や砂等が残っていることが確認された。

以上より、これらの部位は、汚染したコンクリート粉などが油汚れや赤錆内に取り込まれたり、高圧スプレイ水が十分にかかっていなかったりすることによるものと推測される。

これらの遠隔重機は、洗剤による油汚れ落とし、ワイヤーブラシやサンダーによる錆落としを行った結果、汚染を落とすことができた。

一方、汚染検査や除染の過程で、ラジエター等に高圧水を掛けてしまうとラジエターのフィン部が変形してしまい、内部にスプレイ水が掛からなくなるばかりか、ラジエターとしても機能しなくなることが懸念される。



図 7-7 Brokk-330D の汚染検査と除染作業

これらの作業はバックグラウンドの高い場所で行われ、除染効果の測定が困難であった。作業場所のバックグラウンドが高いと、汚染が落ちたのか否かの判断ができないことが課題として摘出された。放射線測定器の一種である GM 管に鉛シートを何重かに巻きつけ、指向性を持たせることで、測定したい部位の汚染レベルをある程度は測れることもわかった。



図 7-8 Brokk-330D のスプロケット部の除染作業

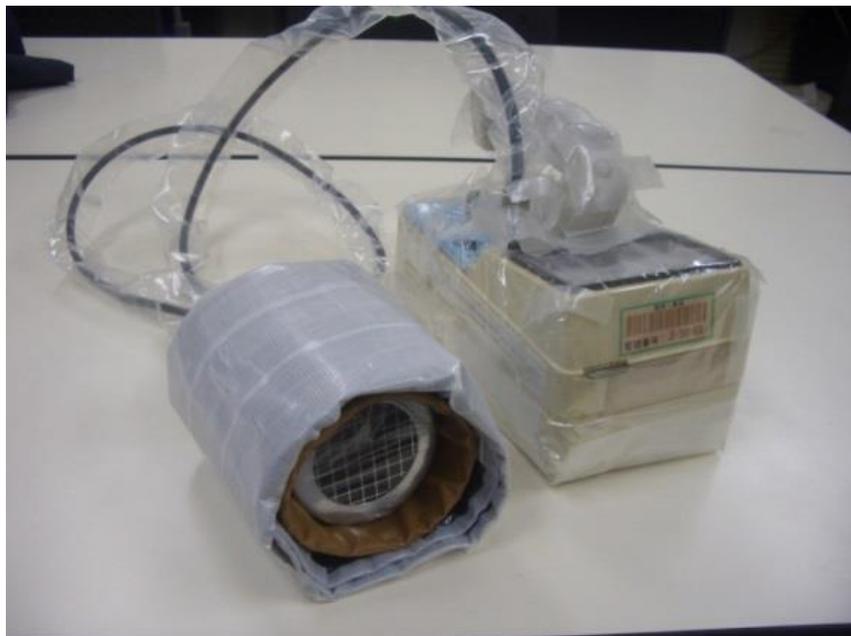


図 7-9 鉛シートを巻きつけた GM 管型放射線計測器

7.3.3 ロボット等の汚染部位ごとの除染方策

これまでの事例から、建設重機等の汚染管理方法を以下のように整理した。

- ✓ 事故発生（爆発）後投入した建設重機等の汚染は、放射性セシウムが微細な塵埃、コンクリート粉、土壌等に付着したものによるもの（以下、汚染粉体という）が主と推測され、粉体と接触する部位（タイヤ、クローラー、泥除け、車体底部）等が高い傾向にある。これら接触部位の除染には高圧水スプレーが有効である。その際に、狭隘部や車体底部には十分な高圧水がかからないこともあるので留意するとともに、十分な高圧水がかからない場合にはブラシや拭き取りを併用することが有効である。また、ラジエーター部は高圧スプレーで変形するのでスプレー水の圧力を調整するなどの注意が必要。
- ✓ タイヤ、ゴム製クローラ、ケーブル等では汚染粉体が、ゴム表面のポーラス（微小空洞）に取り込まれていて、水スプレー等では十分な除染ができないことが考えられる。保守時のオペレータ等の放射線被曝低減という目的からは、保守時用のタイヤ、ゴム製クローラ、ケーブル等を用意しておき、保守の間のみ交換する方法が有効である。
汚染している、タイヤ、ゴム製クローラ、ケーブル等は、ロボットを再度事故発生現場に投入する際に再利用することも有効と考えられ、保守の間に汚染を他の機材に広げないように保管用袋に収納するとともに、オペレータ等の被曝に繋がらないように、保守作業場所から離して保管することが重要である。ラジエーターも隙間に粉体が入り込んでいて、高圧水スプレーを十分にかけてられないこともあることから、ラジエーターの交換も考慮しておくことが有効である。
- ✓ 油汚れや、赤さび部には汚染粉体を取り込んでいる可能性があり、また高圧水スプレーでは十分に除去できないことから、必要に応じて、洗剤や（ブラシ、サンダー、グラインダー等の）機械的除染が有効である。
- ✓ シートやフロアマットには操作員の衣服や靴等で運ばれた汚染粉体が入り込まれていて線量が高い。シートは予めビニール養生を行うとともに、フロアマットは適宜、交換することが有効である。
- ✓ 汚染廃液の飛散により雰囲気線量が上昇するので、廃液を排水枡などに回収することが望ましい。
- ✓ バックグラウンド（BG）レベルによっては、汚染(サーベイ) 検査が困難になるため、検査場所を確保するとともに、サーベイメータを鉛等で円筒状に遮へいする等して指向性を持たせることも有効である。

7.4 ロボット等除染方策の有効性

Brokk ロボットを投入した後の汚染の調査結果、通常の高圧水スプレーでは十分に除染できず、当時の持出し基準（スクリーニングレベル）の **100 kCPM** を大幅に下回ることができなかった。除染し難い部位の調査と汚染形態の考察することにより、除染し難い部位に対する効果的な除染方法を策定することができた。この除染方法に基づいて、**Brokk** ロボットを再度除染した結果、**Brokk** ロボットを当時の持出し基準（スクリーニングレベル）の **100 kCPM** を下回るまで除染することができ、専門のメンテナンス要員による重整備を受け、再度福島第一原子力発電所内で再使用することが可能となった。このことより、ロボットの汚染部位ごとの除染方策の有効性が確認された。

チェルノブイリ原子力発電所事故や福島第一原子力発電所事故から、過酷事故が発生すると、緊急時対応は半年以上位年近く継続して行う必要があることが明らかとなった。原子力緊急時ために予め用意できるロボットの数は限定的であり、これらのロボットは一度、投入した後も、点検保守を行いながら、繰り返し使用することが重要である。場合によっては、ロボットを事故現場の状況に応じて改造を行う必要も出てくる。そのためにはロボットの除染を効果的に行わないと、点検保守を行う作業員の過度の放射線被曝が懸念される。本章で策定して除染方法により、過酷事故が発生した現場に投入したロボットでも、点検保守の際に過度な被曝が懸念されないレベルまで除染することがかろうとなった。

本章で策定したロボット等の除染方法は、過酷事故が発生した現場で使用される原子力緊急時ロボットだけではなく、原子力施設の保守ロボットやマニピュレータあるいは原子力廃止措置のためのロボットの除染にも役立てることができる可能性がある。

7.5 まとめ

- ✓ 事故発生した原子力施設の高汚染下で使用し汚染した **Brokk** ロボットを高圧スプレーによる除染を行っても、目標の汚染レベルを下回らず、メンテナンス要員によるロボット等の重整備が行えなかった。
- ✓ 汚染ロボットの部位ごと汚染状況の調査と除染方策の策定を提案した。
- ✓ 事故発生現場の高汚染下で使用して汚染した原子力保守用ロボットの部位ごとの汚染状況を調査し、部位ごとに汚染状況が異なることを明らかにし、汚染部位ごとの除染方策を立案した。
- ✓ 汚染部位ごとの除染方策により、**Brokk** ロボットの除染を行い、目標レベルを下回ることができ、メンテナンス要員による重整備を行うことが可能となった。以上を整理すると図 7-10 の様になる。

課題	除染方策の提案			評価
<p>事故現場で汚染したロボット等の除染方策が無く、汚染ロボットによるオペレータや保守作業員の被曝が懸念された。</p>	汚染部位	除染方法	備考	<ul style="list-style-type: none"> • 5tトラックによる陸送力の増強 • リフタによるオペレータの発災現場での降車の不要化 • 遮蔽操作BOXによる放射線の被曝低減 • 周辺機器の一括搭載
	筐体	高圧水スプレー	<ul style="list-style-type: none"> • 当初の方法通り。 • ラジエーター部は低圧で。 	
	底部・機器裏側	高圧水スプレー	<ul style="list-style-type: none"> • スプレーが当たらない場合は拭取り。 	
	油污れ部	洗剤による洗浄		
	赤錆部	機械的錆落とし	<ul style="list-style-type: none"> • ワイヤブラシ、サンダー、グラインダー 	
	タイヤ、ケーブル	----- -	<ul style="list-style-type: none"> • 除染困難。 • 保守時は交換。 • 汚染物は別管理。 	
運転席・床	カーペット等除去	<ul style="list-style-type: none"> • 事前のビニール養生等 		

図 7-10 除染方策のまとめ

第8章 結論

8.1 結論.....	154
8.2 今後の課題.....	158
8.3 今後の方向性.....	160

8.1 結論

本研究では、運用実績の殆ど無かった原子力緊急時ロボットについて、要求機能を体系化し、完成度の低い機構要素や構造要素しかなかったものに対して、システム化、ユニット化、被曝管理および除染方策について完成度を向上させるための解決策の提案などを行い、原子力緊急時ロボットの運用方策の構築を行った。

第1章では原子力保守用ロボットと比較することで、即応性、信頼性、除染保守性および作業性を原子力緊急時ロボットの要求機能として抽出した。

第2章では、ドイツとフランスの原子力緊急時ロボット部隊、原子力事故でロボットを投入した事例および日本で開発された原子力緊急時ロボットについて調査した。その上で、即応性、信頼性、除染保守性および作業性という要求機能ごとに、それぞれの解決策として示される機構要素、構造御要素について完成度や課題を明らかにした。

第3章では、原子力緊急時ロボットの要求機能である、即応性、信頼性、除染保守性および作業性について、原子力保守用ロボットと比較して、原子力ロボット特有あるいは極めて重要な機能構成、機能要素を細分化して体系化を図った。さらに、機能構成あるいは機能要素に対して、2011年3月11日に発生した福島第一原子力発電所事故の緊急時対応時点で適用できる可能性のあった構造要素および機構要素も体系化するとともに、その完成度についても整理した。その結果、福島第一原子力発電所事故のような過酷事故発生時に、原子力緊急時ロボットを直ちに、搬送、投入、操作、回収、点検保守等の一連の運用を行う上で、必要性が「高」にもかかわらず、完成度が「高」ではない機構要素しかなかった、ロボットを現場に直ちに投入するための統合化、瓦礫や仮設物がある現場での可搬性の向上、高放射線環境下での被曝管理方法、および保守時の放射線被曝を低減策の研究が必要なことを明らかにした。

第4章では、ロボットを現場に直ちに投入するためのロボット操作車によるシステム化を提案し実現したことにより、搬送性の「陸送性」、放射線安全性の「時間」と「遮蔽」および現場適用性の完成度を向上することができた。

第5章では、瓦礫や仮設物がある現場での可搬性の向上策として、ロボットシステムの分割トユニット化を提案し実現したことにより、現場適応性の「可搬性」を向上させることができた。

第6章では、高放射線環境下でのロボット等の被曝管理方法として、耐放射線性の評価と被曝管理方法を提案し実現したことにより、既に開発製作されたロボットで、照射試験によりその耐放射線性を実施できないロボットの耐放射線性評価を実施でき、また被曝管理方法としての管理目標値を設定できたことで、既存ロボットを放射線環境下で使用して、放射線損傷による故障から免れる方法を確立できた。

第7章では、保守時の放射線被曝の低減策として、汚染したロボットを事故発生現

場近くでも確実に実施できる「除染方策を提案し、実現することができた。

第4章から第7章の研究により、必要性が「高」にもかかわらず、完成度が「中」または「低」であったものについて、その完成度高めることができた（表8-1）。その結果、福島第一原子力発電所事故直後に、無人建設重機、Talor ロボット、Brokk ロボット、Quince ロボット、JAEA-3号ロボット等の投入に貢献し、原子力緊急時ロボットの運用方策の有効性を実証することができた。

表 8-1 機構要素等の必要性と完成度

	機能構成	機能要素	機構要素等	必要性	完成度
即 応 性	技能者確保	整備機能	ドイツ KHG , フランス GroupeINTRA, 日本 J-NEACE 等の運用組織	高	高
		操作能力	保管施設での基礎的訓練, 模擬設備による訓練, 実施設を利用した訓練	高	高
	搬送性	陸送性	ドイツ KHG やフランス GroupeINTRA などでの高速道路網が整備され, 地震等による高速道路網が寸断されることが無いことを前提としたバントラックやトレーラ等の整備	高	<u>中→高</u>
		空輸・海運性	輸送へり, 輸送機やフェリーへの搭載性を考慮した, 陸送のためのバントラック等の整備	中	中
	放射線安全性	距離	遠隔操作ロボットや機器の整備	高	高
		時間	事故発生現場への投入や事故発生現場でのロボットのセットアップに要する時間の短縮のための仕組み.	高	<u>中→高</u>
		遮蔽	オペレータ操作場所での遮蔽	高	<u>低→高</u>
	現場適応性	システム化	ドイツ KHG やフランス	高	<u>低→高</u>
		最適化	GrouoeINTRA で部分的に試行した例がある.	中	低

		可搬性		高	<u>低→高</u>
	操作性	マンマシンインターフェース	原子力保守用ロボット, 鉄道列車の運転, 航空機の操縦等の分野での実績がある.	中	中
フェールセーフ		中		中	
信頼性	被曝管理	半導体の耐放射線性評価	<ul style="list-style-type: none"> 原子力保守用ロボットで, 実際に開発製作されたものについて, 使用される半導体素子の照射試験を行って耐放射線性評価した例は多数あり. 既に開発製作されたものについて, これまでの照射試験等から, 事後に評価した例は殆ど無し. 	高	高
		半導体の耐放射線性向上	<ul style="list-style-type: none"> 高耐放射線性半導体素子開発 市販半導体に補償回路を追加 半導体素子に放射線遮蔽 半導体素子を含む電子回路をロボット本体から移動 半導体素子を含む電子回路を交換 	低 低 中 極低 中	中 中 高 高 高
	通信性	伝達性	強化ケーブルによる有線通信や, 無線中継器による対策等が実用化されている. 無線中継器による通信遅延が問題となる場合は, 有線通信を使用する例が多い.	高	高
		通信遅延対策		中	中
	耐故障性		列車や航空機での開発・実用化例が多数あり, これらを流用することが現実的.	高	高
	冗長性				

除染保守性	除染性	除染方策	汚染したロボットを, 距離的かつ時間的制約の下での除染方法	高	<u>低</u> →高
		防染性	<ul style="list-style-type: none"> ロボット表面の凹凸の減少 表面の磨き仕上げ 表面塗装 	中	中
	保守性	バッテリー	列車, 航空機および自動車での開発・実用化例が多数あり, これらを流用することが現実的.	高	高
		給油性			
改造容易性					
部品交換性					
作業性	移動機能	走破性	災害対応ロボットや移動ロボットの研究開発がなされており, その成果を適用するのが現実的.	高	高
		飛行性		中	低
		水中遊泳性		中	高
	調査機能	放射線計測	ロボットのみならず様々な環境の計測用に各種センサの開発が進められており, その成果を流量することが現実的	中	高～中
		可燃ガス検知			
		温湿度計測			
		音声計測			
	サンプリング				
	作業機能	扉解放機構	ロボットや人工義手での研究開発が多数なされており, その成果を流用することが現実的	中	高
		重量物運搬		中	高

8.2 今後の課題

本研究では、「原子力緊急時ロボットの運用方策構築に関する研究」を行い、原子力緊急時ロボットの要求機能を体系化し、それらに対する機構要素や構造要素で必要性が「高」にも関わらず、完成度が「高」ではないものについて、その完成度「高」とすることができ、福島第一原子力発電所事故は、無人建設重機、Talon ロボット、Brokk ロボット、Quince ロボット、JAEA-3 号ロボット等の運用に貢献することができた。

一方で、2012年10月には改正原子力災害特別措置法が施行され、原子力施設で過酷事故等が発生し、放射線量が高くなり作業員が立入れない様な環境下でも、緊急時対応作業ができるロボット等の遠隔機材とそれを運用する組織の整備が義務づけられた。そのため、表 8-1 で整理された課題のうち、必要性が「中」で、完成度が「中」あるいは「低」のものについて、完成度を高めていくことが、今後の課題である(表 8-2)。完成度を高めていくうえで、原子力緊急時ロボットは実際の過酷事故が発生した現場で運用した経験が殆ど無いため、モックアップ施設や原子力施設での試験や訓練を通じて得られた経験や教訓をフィードバックすることが重要である。

表 8-2 今後の課題

	機能構成	機能要素	必要性	完成度
即応性	搬送性	空輸・海運性	中	中
	現場適応性	最適化	中	低
	操作性	マンマシンインターフェース	中	中
		フェールセーフ	中	中
信頼性	被曝管理	半導体の耐放射線性向上	極低～中	中～高
	通信性	通信遅延対策	中	中
除染保守性	除染性	防染性	中	中
作業性	移動機能	飛行性	中	低
	調査機能	放射線計測	中	中～高
		可燃ガス検知		
		温湿度計測		
		音声計測		
サンプリング				

さらに、本研究で完成度を「高」とすることができた「被曝管理」についても、半導体素子の進歩が目覚ましく、新たな母材を用いてより集積度が高くなるような製造プロセスによる半導体素子が市場に出回り始め、ロボット等にもこのような半導体素子が使われ始めていることから、これらの半導体素子についても照射試験を行い、「耐放射線性の概略評価と被曝管理方法」を更新していく必要がある。

8.3 今後の方向性

本研究では、原子力緊急時ロボットに必要な、要求機能、機能構成および機能要素、ならびにそれらの解決策として提示されていた機構要素や構造要素の体系化を行うとともに、福島第一原子力発電所事故時点での完成度から、喫緊の課題であったシステム化、ユニット化、被曝管理および除染方策について解決策を提案、実現し、運用方策の構築を行った。前項 8.2 項では、運用方策を向上させるために必要となる課題を纏めた。本項では、原子力緊急時ロボットの運用方策向上のための研究が、今後どうあるべきかについて述べる。

原子力緊急時ロボットは、世界的に見ても、そのマーケットは大きくない。したがって、その研究開発も、産業用ロボットや他のサービスロボットの研究と比べて、限定的なものと思われる。一方で日本では原子力発電所の再稼働、廃炉に加えて、再処理工場の操業開始を控えており、原子力を一定程度維持するにせよ、原子力から撤退するにせよ、数十年間は原子力施設で過酷事故が発生する可能性はある。さらに世界的には、ロシア、中国、インドを始めとした国々では原子力の利用拡大の方針を打ち出して、積極的に開発投資を行っている。このような状況下で原子力緊急時ロボットは、今まで以上にその必要性を増しており、運用方策の研究もその重要性を増していることも事実である。

日本でも原子力事業者による原子力緊急時ロボットの運用が開始され始めており、平時の保管管理や訓練を通じて明らかになるであろう新たな課題を含めて、運用者と研究者が連携して、ニーズオリエンテッドな研究開発を進めていくことが望まれる。また世界的にも、原子力に特化した緊急時ロボットの整備運用を行っているのは、現時点ではドイツ KHG とフランス GroupeINTRA しかない。したがって、これら運用者を中心に、世界中の原子力緊急時ロボットの研究者とのネットワークを構築して、研究開発の素地を育成していくべきである。

技術的には、今後の廃炉、特に福島第一原子力発電所の廃炉では、高放射線下での作業が増えていくことが容易に予想される。そのため半導体をはじめとする、耐放射線性の向上策の研究は加速すべきである。さらに高放射線環境は遮蔽体等で覆っており、無線通信の伝達性や遅延という課題も今まで以上に重要性を増してくることが予想される。伝達性は有線通信や無線中継器である程度の改善は図れると思慮するが、通信遅延対策は重要な課題として残る。原子力緊急時ロボットの様に、遠隔操作型のロボットでは、ロボットの制御ループの中にオペレータが含まれており、オペレータはロボットから送られてくる情報を基に状況の認識、次に行うべき操作の判断および決定、そしてロボットへの指示を行う役割を担っており、通信遅延は状況の認識やロボットへの指示に、致命的となりかねない。これらを解決する方策として、ロボット自身が状況認識を行い、オペレータがそれまでに認識していた状況と異なる場合は、

作業を一時中断して、あるいは現状を維持する動作を取りながら、ロボットが認識した状況オペレータに伝え、オペレータからの新たな支持を待つというような半自律的な制御機構も重要となってくると思われる。さらに、ロボットを緊急対応の期間中、再充電や点検保守を行い続けるためにも、ロボットの除染保守性の向上が重要性を増してくると思量する。特にロボットの再充電や点検保守には、オペレータは全面マスク、放射線防護服および何重ものゴム手袋を装着して行う必要がある。そのため、ロボットの除染保守性の向上には、このような状況で点検や保守を行う必要があることを念頭に、ツールフリーで、短時間で、点検保守が行えるような解決策の提案が望まれる。いずれに見せよ、原子力災害は一国に留まらない可能性が高く、世界的なネットワークを構築して、運用者からのニーズにターゲットを当てた研究開発が望まれる。

原子力緊急時ロボットの研究開発は、原子力事業者等にとっては、直接的に利益を生み出すものではなく、事前に投資し難いものである。ドイツが原子力発電を本格化させる 1970 年代に、原子力緊急時ロボットの必要性を認めていた。フランスではチェルノブィリ事故の教訓として原子力緊急時ロボットの必要性を認めていた。日本でも、原子力事業者だけではなく、政府や国民が原子力緊急時ロボットの必要性を認識する必要があると思われる。

謝辭

東京大学教授浅間一先生には、研究生として3年間受け入れて頂くとともに、その後の期間を合わせて5年間にわたり、本研究の構想段階から論文として纏めるまで、実に様々な事柄について、指導頂きお世話になりました。浅間先生には心からお礼を申し上げます。

東京大学准教授山下淳先生には、研究への取り組み姿勢から、論文の書き方に至るまで、様々なご指導を頂きました。お礼を申し上げます。

東京大学特任准教授田村雄介先生には、論文のチェックから、機材の使い方などまで、実に様々なことについて、ご指導頂きました。お礼を申し上げます。

東京大学教授梅田靖先生、東京大学教授中村仁彦先生、東京大学特任教授鈴木俊一先生には、副査として審査とともに、論文を完成させるうえでの、事細かなご指導を頂きました。お礼を申し上げます。

東京大学助教安琪先生、山川技術専門員、浅間・山下研の学生の方々には、本研究を論文として纏めるにあたり、論文への事細かなコメントから、簡易製本機の使い方など子細なことまで教えて頂き、大変感謝しております。

早稲田大学の故加藤一郎教授および故川瀬武彦教授の両先生には、在学中に制御工学やロボット工学の手ほどきを頂きました。また、動力炉・核燃料開発事業団に就職し、サーボマニピュレータ開発を担当していた際には、優しく見守って頂くとともに、時には大学に呼び出して厳しくご指導いただきました。何時までもご心配をおかけして申し訳ありませんでした。

日本原子力研究開発機構の五十嵐幸氏（当時）、小林忠義氏、鈴木義晴氏、中川林司氏、福嶋峰夫氏、岡田尚氏、中井宏二氏、三村竜二氏、金山文彦氏、平野氏、赤井氏には、本研究の基となった福島第一原子力発電所事故直後のJAEAのロボットを用いた緊急対応や原子力緊急時遠隔機材整備改良のために、時には徹夜も厭わず、身を粉に、ご協力頂きました。特に福嶋峰夫氏には、論文投稿や学会発表に際し、議論にお付き合い頂くとともに、原子力ロボットの専門家としての立場から貴重なご意見を多数頂きました。

東北大学教授田所諭先生、東北大学准教授永谷圭司先生、東北大学准教授大野和則先生、東北大学助教竹内栄二郎先生には、福島第一原子力発電所事故時の緊急対応を行った中で、ロボット操作車RC-1に搭載した赤外線カメラやレーザー距離計をきわめて短時間で製作して頂きました。

東京電力株式会社（現、東京電力ホールディングス）の田中勤氏（当時）、及川景清氏（当時）、八木直人氏、荒畑太一朗氏には、Talonとロボット操作車RC-1及びJAEA-3号の福島第一原子力発電所事故現場への投入に際して、関係方面との調整でご尽力頂きました。

大成建設の立石洋二氏、伊東章氏には、福島第一原子力発電所内でのBrokk等のロ

ロボット除染試験，電子回路の照射試験に際してご協力頂きました。

原子燃料工業の山本茂氏（当時）には，東日本大震災で混乱している中，耐放射線性カメラをご提供頂きました。そのカメラは JAEA3 号の俯瞰カメラとして福島第一原子力発電所内に投入させて頂いた。

フランス製モータを駆動させるためのモータドライバの調達に際して，東日本大震災で混乱していて，多くのメーカーに断られたなか，澤村電気株式会社には，フランス製モータにも適用可能な部品（基盤）を，手持ち部品の中から，短時間で選定して頂き，ご提供頂きました。

東京大学名誉教授佐藤知正先生には，現場での技術開発に終始していた私に，このようなロボットの研究に携わる機会を与えて頂きました。先生のお言葉がなければ，私がこのようなロボット研究に携わることはありませんでした。心からお礼申し上げます。

故白井万次郎福山大学元教授，岡崎幸子上智大学名誉教授には，本研究を纏める過程で激励頂くとともに，「悩む」ことの大切さを教えて頂きました。有難うございました。

参考文献

参考文献をまとめて以下に示す. 本文中の[]内の数字は, 以下の文献番号を表している.

第1章

- [1] Goertz,R.C., Thompson,W.M., “ELECTRONICALLY CONTROLLED MANIPULATOR”, Nucleonics Vol. 12, No. 11, 1954.11.01
- [2] Vertut J., and al, “Bilateral Servo Manipulator MA23 in Direct Mode and Via Optimized Computer Control”, 2nd Remotely Manned Syst. Technol. Conf., 1975.
- [3] Vertut J., Coiffet P., “Teleoperation, Evolution des techniques”, vol. 3A, Hermes, Paris, France, 1984.
- [4] 日本ロボット学会東日本震災関連委員会原子力関係記録作成分科会:“原子力ロボット記録と提言”, pp. 66-115, 2014.10.1.
- [5] 山本智他, “炉内点検技術と高経年化プラントへの適用”, 保全学会第2回学術講演会要旨集, 2005.7
- [6] M.J.Feldman and J.R.White, “REMOTEX – A NEW CONCEPT FOR EFFICIENT REMOTE OPERATIONS AND MAINTENANCE IN NUCLEAR FUEL REPROCESSING, Proceedings of ANS National Topical Meeting FUEL CYCLES FOR THE 80’s, 1980.9.29-10.2
- [7] “工業技術院大型プロジェクト”, 極限作業ロボット研究開発技術報告書極限作業ロボット技術研究組合, 1990.12
- [8] 極限作業ロボット技術研究組合, “極限作業ロボット(原子力ロボット)の研究開発”, 日本原子力学会誌, Vol. 34, No. 12, 1992
- [9] “原子力用ロボット”, 日本原子力学会誌 Vol. 25, No. 11, PP. 857-894, 1983.11
- [10] 檜原英千世, “核燃料サイクル施設用遠隔保守技術の開発”, 動燃技報 No. 49, 1984.3
- [11] Kawatsuma, et al, “The status of two-arm bilateral servomanipulator system development”, Proceedings of the international topical meeting on remote systems and robotics in hostile environments, 1987.3
- [12] 藤田雄二, 他, “両腕型サーボマニプレータの操作性改良”, 動燃技報 No.68, 1988.12
- [13] 川妻伸二, 他, “サーボマニプレータの操作性に関する考察”, 計測自動制御学会, 第32回学術講演会予稿集, PP 251-252, 1993
- [14] 三木 安夫, 川野邊 一則, 小林 雄一, 小泉 務, 青嶋 厚, “両腕型サーボマニプレータの開発総括報告書”, 2000.3.
- [15] KOIZUMI T, KAWATSUMA S, et al, “Remote maintenance test of two-arm bilateral servo-manipulator system”. Proc Conf Remote Syst Technol Vol. 37th,

-
- PP 129-135, 1989.
- [16] 財団法人原子力技術安全センター, “防災モニタリングロボット”, パンフレット, 2009.5.19
 - [17] 財団法人原子力安全技術センター, “原子力安全技術センターにおけるモニタリングシステムの開発状況”, 2008.3.21
 - [18] 小林 忠義, 宮島 和俊, 柳原 敏, “原研における事故対応ロボットの開発 (その1) 情報遠隔収集ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌Vol. 19, No.6, pp.706～709, 2001
 - [19] 柴沼 清, “原研における事故対応ロボットの開発 (その2) 耐環境型ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌Vol. 19, No.6, pp. 710～713, 2001
 - [20] 小林忠義, 宮島和俊, 柳原敏, “情報収集ロボットの開発”, 月刊消防, 2001.6
 - [21] 小林忠義, 宮島和俊, 柳原敏, “原子力施設事故時に対応する情報遠隔収集ロボットの開発”, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演論文集, 2002.12.19-21, 神戸
 - [22] 財団法人製造科技術センター, “平成11年度 原子力防災支援システム開発補助事業成果報告書”, 2001.8
 - [23] 間野隆久, 濱田彰一, “原子力防災支援システムの開発”日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 6, pp 714～721, 2001.9
 - [24] 防災ロボット評価専門部会, “防災ロボット評価報告書”, 平成15年3月
 - [25] 日本原子力研究所, “平成15年度緊急時モニタリング機器運用等調査成果報告書”
 - [26] 日本原子力研究所, “平成16年度緊急時モニタリング機器運用等調査成果報告書”

第2章

- [27]原子力百科事典 ATOMICA, “ドイツの原子力発電開発 (14-05-03-03)”, 2009.12
- [28] 濱田彰一, 間野隆久, “欧米における原子力防災ロボットの調査報告”, 日本ロボット学会誌 Vol. 19, No. 6, pp. 678-684, 2001.9
- [29] 川妻 伸二, “独仏における原子力緊急時ロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol. 32, No. 1, pp. 25-31, 2014.
- [30] Michael Gustmann, “KHG The German Nuclear Emergency Response Team”, Presentation at France-German-Japan Workshop on Emergency Response Robotics, Tokai, 2013.11
- [31]原子力百科事典 ATOMICA, “アメリカの原子力発電開発 (14-04-01-02)”, 2016.1
- [32] Bonnie A. Osif, Anthony J. Baratta, Thomas W. Conkling, “TMI 25 YEARS LATER”, 27 March 2011, PENN STATE PRESS
- [33]原子力百科事典 ATOMICA, “ロシアの原子力発電開発 (14-06-01-02)”, 2010.3
- [34] KRUSANOV, “NEW ROBOTIZED TECHNOLOGY of DECONTAMINATION RADIOACTIVE POLLUTED GROUND”, Presentation material at GroupeINTRA workshop, Fontevraud-L'Abbaye, France, 2012.6

- [35]原子力百科事典 ATOMICA, “フランスの原子力発電開発の状況 (14-05-02-02)”, 2010.3
- [36] Michel Chevallier, “Groupe INTRA : Activities and Organization in France”, Presentation at France-German-Japan Workshop on Emergency Response Robotics, Tokai, 2013.11
- [37] Keiji Nagatani et. al “Emergency Response to the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using Mobile Rescue Robots” Journal of Field Robotics 30(1), 44–63, 2013
- [38] Shinji Kawatsuma, Mineo Fukushima, Takashi Okada, "Emergency response by robots to Fukushima-Daiichi accident: summary and lessons learned", Industrial Robot Vol. 39 Iss 5, 2012, pp. 428 – 435
- [39] 立石洋二, 植木睦央, “企業からみた福島第一原子力発電所災害への対応 –福島第一原子力発電所における無人化施工での瓦礫撤去–”, 日本ロボット学会誌, Vol. 32, No. 2, pp151-153, 2014
- [40] 井上猛雄, “災害とロボット –大震災から見えてきたロボットのあり方–”, 平成 24 年 4 月 25 日, オーム社

第 3 章

第 4 章

- [41] 財団法人日本アイソトープ協会, “アイソトープ手帳 11 版 1 刷”, 2011.1.27
- [42] <http://sol.panasonic.biz/security/netwkcaml/lineup/hcm580spc.html#STITLE02> ; (2016.10.16 アクセス)

第 5 章

- [43] 川妻 伸二, “日本原子力研究開発機構の原子力災害ロボット –福島第一原子力発電所事故の緊急対応とその教訓–”, RANDEC ニュース, pp. 8–11, 2012.2.
- [44] Shinji Kawatsuma, et al, “JAEA Robotics’ Emergency Response to FUKUSHIMA-DAIICHI accident –Summary and Lessons learned–”, The seventeenth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2012 (AROB 2012), Oita, Japan, 2012.1.19-21

第 6 章

- [45] 福嶋, 川妻等, “耐放射線性機器・材料データベースの構築・整備”, 1993.5, PNC TN8410 93-192
- [46] 動力炉・核燃料開発事業団東海事業所, “耐放射線マイクロコンピュータの開発”,

1998.3, PNC TJ8216 98-003

- [47] Takashi Yokoseki, et al, “Recovery of the Electrical Characteristics of SiC MOSFETs Irradiated with Gamma-rays by Thermal Treatments”, Materials Science Forum Vols. 821-823, 2015, pp 705-708, Trans Tech Publications, Switzerland
- [48] 後川, 大西, “耐放射線強化素子研究の現状”, 1986, 応用物理 第 55 卷 第 3 号, p225(25)-233(33)
- [49] 政府・東電福島原子力発電所事故対策統合本部リモートコントロール化プロジェクトチーム, “汎用重機やロボットにおける耐放射線性評価と管理方法の基本的な考え方 第 1 版”, 2011.4.27, <https://roboticstaskforce.files.wordpress.com/2011/05/20110427-rcpt-radiation.pdf>; (2017年4月23日アクセス)
- [50] 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所 1 号機原子炉格納容器内部調査結果について”, 2012.10.10, http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_121010_03-j.pdf; (2016年10月18日アクセス)

第 7 章

- [51] 川妻, “放射線の基礎および建設重機の汚染管理”, 建設の施工企画 2012 年 7 月号
- [52] Koji Maeda, Shinji Sasaki, Misaki Kumai, Isamu Sato, Mitsuo Suto, Masahiko Ohsaka, Tetsuo Goto, Hitoshi Sakai, Takayuki Chigira and Hirotohi Murata, “Distribution of radioactive nuclides of boring core samples extracted from concrete structures of reactor buildings in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant”, Journal of Nuclear Science and Technology, 2014, Vol 51, Nos 7-8, pp 1006-1023.
- [53] 公益財団法人原子力安全技術センター, “放射線施設のしゃへい計算 実務マニュアル”, 2015
- [54] 公益財団法人原子力安全技術センター, “放射線施設の遮蔽計算実務 (放射線) データ集”, 2015
- [55] 佐藤他, “環境中ウラン濃度と環境放射線への寄与”, デコミッションング技報, 第 38 号, 2008.11
- [56] 下, “放射線量と健康影響 —ラドン温泉と福島原発事故—”, 健康文化 46 号, 2011.10
- [57] 下ほか, “岐阜県の一温泉施設のラドン濃度と被曝線量試算”, 温泉科学第 55 巻 第 4 号, 2006.3

[58] 国連科学委員会報告書

[59] 大山ハルミ，山田武，“低線量放射線の健康影響——放射線ホルミシス”，
RADIOISOTOPES, Vol. 46, No. 5, pp 360-370, 1997

研究業績書

<本研究に関連する研究業績>

投稿論文

1. **Shinji Kawatsuma**, Mineo Fukushima, Takashi Okada, “Emergency response by robots to Fukushima-Daiichi accident; Summary and lessons learned”, Industrial Robot: An international Journal, Vol. 39, Iss 5, pp428-435, 2012
2. **川妻伸二**, 浅間一, “市販CPU等半導体素子を使用したロボット及び無人建設重機の耐放射線性評価と放射線環境下での管理方法”, 日本ロボット学会誌, Vol. 34, No. 8, pp552-557, 2016
3. **Shinji Kawatsuma**, Ryuji Mimura, Hajime Asama, “Unitization for portability of emergency response surveillance robot system: experiences and lessons learned from the deployment of the JAEA-3 emergency response robot at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants”, ROBOMECH Journal (2017)4:6, DOI 10.1186/s40648-017-0073-7

国際会議

1. Mineo Fukushima, **Shinji Kawatsuma**, Takashi Okada, “Radiological emergency response to Fukushima Daiichi Accident ; Teleoperation and robotics of JAEA”, Proceedings of American Nuclear Society Embedded Topical on Decommissioning, Decontamination and Reutilization (DD&R 2012), 2012.6
2. **Shinji Kawatsuma**, Hajime Asama, “Basic decontamination methodology of robots and robot control vehicles”, Proceedings of American Nuclear Society 2014 Annual Meeting; Embedded Topical Meeting on Decommissioning and Remote Systems (D&RS 2014), Reno, NV, 2014.6
3. **Shinji Kawatsuma**, Kuniaki Kawabata, Yoshihiro Tsuchida, Yuta Tanifuji, “Analysis of emergency response robots deployed for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants' accidents”, Decommissioning and Remote Systems 2016 (D&RS 2016), Pittsburgh, PN, 2016.7

国内会議

1. **川妻伸二**, 岡田尚, 福嶋峰夫, 中井宏二, 三村竜二, 金山文彦, “遠隔操作技術にかかわる福島第一原子力発電所事故対応,1; 原子力機構における遠隔操作技術支援の概要”, 日本原子力学会2012年春の年会, 2012.3
2. 岡田尚, 中井宏二, 五十嵐幸, **川妻伸二**, “遠隔操作技術にかかわる福島第一原子力発電所事故対応,2; ロボットコントロール車の開発”, 日本原子力学会2012年春の年会, 2012.3
3. 三村竜二, 金山文彦, 岡田尚, **川妻伸二**, “遠隔操作技術にかかわる福島第一原子力発電所事故対応,3; ガンマ線可視化計測装置搭載偵察プラットフォームの

開発”，日本原子力学会2012年春の年会，2012.3

4. **Shinji Kawatsuma**, Ryuji MIMURA, Fumihiko Kanayama, Koji Nakai, Hajime Asama, “Reconstruction of JAEA robots for the Fukushima NPP accidents emergency response - Utilizing for conveyance and reassembly at the confused area by accidents -”, ROBOMECH2013, Tsukuba, Japan, 2013.5

招待講演

1. **Shinji Kawatsuma**, “JAEA Robotics’ Emergency Response to FUKUSHIMA-DAIICHI Accident - Summary and Lessons Learned -”, Proc. “The Seventeenth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2012 (AROB 17th ’12)”, Beppu, Oita, Japan, January 19-21, 2012
2. **Shinji Kawatsuma**, “Robotic lessons learned in emergency response to Fukushima Daiichi NPP”, keynote speech of euRathlon 2013, Berchtesgaden, Germany, 2013.9.24-25

解説記事・研究紹介

1. **川妻伸二**, “日本原子力研究開発機構の原子力災害ロボット; 福島第一原子力発電所事故への緊急対応とその教訓”, Science Academy of Tsukuba, No. 20, pp15-18, 2011.10
2. **川妻伸二**, “日本原子力研究開発機構の原子力災害ロボット; 福島第一原子力発電所事故の緊急対応とその教訓”, RANDECニュース, No. 90, pp11-13, 2012.2
3. **川妻伸二**, “福島第一原子力発電所事故におけるロボットによる緊急対応の概要と教訓”, ロボット, No. 206, pp39-46, 2012.5
4. **川妻伸二**, “放射線の基礎及び建設重機等の汚染管理”, 建設の施工企画, No. 749, pp67-71, 2012.7
5. **川妻伸二**, “福島原発事故におけるロボット等による緊急対応の概要と今後の課題”, デコミッションング技報, 第46号, pp14-26, 2012.9
6. **川妻伸二**, “独仏における原子力緊急時ロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol. 32, No. 1, pp 25-31, 2014
7. **川妻伸二**, “耐放射線性技術”, 日本ロボット学会第30回記念学術講演会, 2012.9
8. **川妻伸二**, “ロボット操作車とJAEA-3号”, 日本機械学会誌, Vol. 117, No. 1151, 2014.10

出版・特集号

1. 東日本大震災合同調査報告書編集委員会, “東日本大震災合同調査報告 機械編 第二部 第5章 5.4.3.3 ロボット操作車とTALONおよびJAEA-3号”, pp 215-218, 2013.7.31
2. 日本ロボット学会東日本震災関連委員会原子力関係記録作成分科会, “原子力ロボット記録と提言, 2.章 原子力ロボットの貢献”, pp 4-15, 2014.10.1

<その他の研究業績>

投稿論文

1. Keiji Nagatani, Seiga Kiribayashi, Yoshito Okada, Kazuki Otake, Kazuya Yoshida, Satoshi Tadokoro, Takeshi Nishimura, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi, Mineo Fukushima, **Shinji Kawatsuma**, “Emergency Response to the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using Mobile Rescue Robots”, Journal of Field Robotics 30(1), 44–63, 2013

国際会議

1. Hiroshi Rindo, **Shinji Kawatsuma**, Kenji Kudo, Hideo Saiki, “Development of the decommissioning cost estimation method for the nuclear facilities”, Proceedings ANS Topical Meeting on Decommissioning, Decontamination and Reutilization, 2004
2. Takuji Yoshida, Naoto Katayose, **Shinji Kawatsuma**, Nobuo Iwasawa, “The Clearance and disposal of uranium contaminated waste in Japan”, Proceedings of International Conference on Nuclear Energy System for Future Generation and Global Sustainability (GLOBAL 2005), 2005.10
3. Kenji Kudo, **Shinji Kawatsuma**, Hiroshi Rindo, Kozo Watabe, Hiroyuki Tomii, Naoto Yagi, Tadashi Fukushima, Kazuhisa Zaitso, “Comprehensive cost estimation method for decommissioning”, Proceedings of 14th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-14), 2006.7
4. Jun Ishibashi, Kazuhiko Sato, **Shinji Kawatsuma**, “Natural uranium nuclides in the environment of Japan”, Proceedings of 16th Pacific Basin Nuclear Conference (PBNC-16), 2008.10
5. **Shinji Kawatsuma**, Yoshiaki Nakatsuka, Takayuki Tokizawa, “Study on strategy for uranium contaminated waste from dismantling of uranium related facilities”, Decommissioning, Decontamination and Reutilization Topical meeting (DD&R2010)
6. Fumihiko Kanayama, Nagahiro Hayashi, **Shinji Kawatsuma**, “Decontamination experiment for floor of Fukushima Daiichi reactor building”, Proceedings of American Nuclear Society Embedded Topical on Decommissioning, Decontamination and Reutilization (DD&R 2012), 2012.6
7. Kazunori Ohno, **Shinji Kawatsuma**, Eijiro Takeuchi, Kazuyuki Higashi, Satoshi Tadokoro, Takashi Okada, “Robotic Control Vehicle for Measuring Radiation in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant”, 9th IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR2011), Kyoto, Japan, November 1-5, 2011

-
8. Keiji Nagatani, Seiga Kiribayashi, Yoshito Okada, Kazuki Otake, Kazuya Yoshida, Satoshi Tadokoro, Takeshi Nishimura, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi, Mineo Fukushima, **Shinji Kawatsuma**, “Gamma-ray irradiation test of Electric components of rescue mobile robot QUINCE --Toward emergency response to nuclear accident in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station in March 2011--”, 9th IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR2011), Kyoto, Japan, 2011.11.1-5
 9. **Shinji Kawatsuma**, Takahisa Mano, “Employment scheme and industrialization of disaster robots”, IEEE Region10 Humanitarian Technology Conference 2013 (R10-HTC2013), 2013.8
 10. Koji Maeda, Shinji Sasaki, Misaki Kumai, Isamu Sato, Masahuiko Ohsaka, Mineo Fukushima, **Shinji Kawatsuma**, Tetsuo Goto, Hitoshi Sakai, Takayuki Chigira, Hirotohi Murata, “Results of detailed analyses performed on boring cores extracted from the concrete floors of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant reactor buildings”, Proceedings of International Nuclear Fuel Cycle Conference; Nuclear Energy at a Crossroads (GLOBAL 2013), 2013.9
 11. **Shinji Kawatsuma**, “Start up of Naraha Remote Technology Development Center”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2015), 2015.10
 12. Kuniaki Kawabata, Yoshihiro Tsuchida, Yuta Tanifuji, **Shinji Kawatsuma**, Tatsuo Torii, “Start up of Naraha Remote Technology Development Center and consideration of deployed robot operation for new standard testing method”, International Workshop on the Use of Robotic Technologies at Nuclear Facilities, Gaithersburg, MD, 2016.2
 13. **Shinji Kawatsuma**, “Start-up of Naraha Remote Technology Development Center”, Workshop of GroupeINTRA, Fontevraud-l'Abbaye, France, 2016.6

国内会議

1. **川妻伸二**, 八木直人, 福島正, 安念外典, 佐藤博, 村上統一, 保坂克美, “核燃料サイクル施設における廃止措置時の安全評価,1; 安全評価手法を用いた廃止措置工程の立案方法の検討”, 日本原子力学会 2006 年秋の大会, 2006.9
2. **川妻伸二**, 八木直人, 福島正, 安念外典, 佐藤博, 村上統一, 保坂克美, “核燃料サイクル施設における廃止措置時の安全評価,2; 廃止措置工程の立案の評価結果”, 日本原子力学会 2006 年秋の大会, 2006.9
3. **川妻伸二**, 武部慎一, 大内優, 小澤一茂, 八木直人, 佐藤和彦, 森本靖之, 福島正, 石橋純, “ウラン廃棄物処分方策の提案”, 日本原子力学会2007年秋の大会, 2007.9
4. **川妻伸二**, 石橋純, 森本靖之, “ウランのクリアランスレベルの検討”, 京都大学原子炉実験所放射性廃棄物管理専門研究会, 2007.11

5. 佐藤和彦, 石橋純, 八木直人, 川妻伸二, “環境中のウランの線量寄与に関する考察,1; 環境中ウランの分布”, 日本原子力学会2008年秋の大会, 2008.9
6. 八木直人, 石橋純, 佐藤和彦, 川妻伸二, “環境中のウランの線量寄与に関する考察,2; ウランからの線量評価”, 日本原子力学会2008年秋の大会, 2008.9
7. 中塚嘉明, 川妻伸二, 時澤孝之, “ウラン廃棄物の処理処分技術開発,1; ウラン廃棄物処理処分の基本方針”, 日本原子力学会2010年秋の大会, 2010.9
8. 大橋裕介, 中塚嘉明, 川妻伸二, 秦はるひ, 綱嶋康倫, 村田雅人, 時澤孝之, 杉杖典岳, “ウラン廃棄物の処理処分技術開発,2; 澱物のウラン廃棄物からのウラン溶解試験”, 日本原子力学会2010年秋の大会, 2010.9
9. 綱嶋康倫, 中塚嘉明, 川妻伸二, 大橋裕介, 村田雅人, 時澤孝之, 杉杖典岳, 秦はるひ, “ウラン廃棄物の処理処分技術開発,3; 澱物類のセメント固化範囲確認試験”, 日本原子力学会2010年秋の大会, 2010.9
10. 三村竜二, 岡田尚, 川妻伸二, 福嶋峰夫, “環境中に線量率マッピングシステムの開発”, 日本原子力学会2012年秋の大会, 2012.9
11. 金山文彦, 林長宏, 佐藤勇, 川妻伸二, 福嶋峰夫, “福島第一原子力発電所原子炉建屋床面を想定した除染試験,1; 非放射性Csを使用した除染基礎試験”, 日本原子力学会2012年秋の大会, 2012.9
12. 臼杵俊之, 佐藤勇, 金山文彦, 須藤光雄, 前田宏治, 小山真一, 川妻伸二, 福嶋峰夫, 所大志郎, 関岡健, 石ヶ森俊夫, “福島第一原子力発電所原子炉建屋床面を想定した除染試験,2; 模擬汚染水の床材・壁材に対する浸透挙動評価”, 日本原子力学会2012年秋の大会, 2012.9
13. 川瀬豪, 伊東章, 時吉正憲, 川妻伸二, 福嶋峰夫, “遠隔操作重機の耐放射線性の検証”, 日本原子力学会2012年秋の大会, 2012.9
14. 三村竜二, 岡田尚, 川妻伸二, 福嶋峰夫, “環境中における線量率マッピングシステムの開発”, 日本原子力学会2012年秋の大会, 2012.9
15. 矢板由美, 酒井仁志, 遠藤洋, 大谷知未, 高橋嘉明, 及川景晴, 村田裕俊, 福嶋峰夫, 川妻伸二, “「建屋内の遠隔除染技術の開発」基礎データ取得結果,1; プロジェクトの概要と基礎データ取得計画”, 日本原子力学会2013年春の年会, 2013.3
16. 熊井美咲, 前田宏治, 佐藤勇, 逢坂正彦, 福嶋峰夫, 川妻伸二, 後藤哲夫, “「建屋内の遠隔除染技術の開発」基礎データ取得結果,4; サンプル詳細分析結果”, 日本原子力学会2013年春の年会, 2013.3
17. 鬼塚博徳, 矢野雅洋, 根本裕二, 高橋拓也, 金田雅之, 村田裕俊, 千金良貴之, 福嶋峰夫, 川妻伸二, “「建屋内の遠隔除染技術の開発」基礎データ取得結果,5; 基礎データ取得結果の総括と今後の計画”, 日本原子力学会2013年春の年会, 2013.3
18. 熊井美咲, 前田宏治, 佐藤勇, 逢坂正彦, 川妻伸二, 後藤哲夫, “「建屋内の遠隔除染技術の開発」基礎データ取得結果,7; ボーリングコア試料の簡易除染試験結果”, 日本原子力学会2013年秋の大会, 2013.9
19. 西村昭彦, 羽成敏秀, 中村将輝, 松永幸大, 下村拓也, 大道博行, 中井宏二,

山田大地, 井崎賢二, 川妻伸二, “福島の復興に向けた檜葉遠隔技術開発センターにおける人材育成の試み; レーザー技術およびロボット技術の夏期実習”, 日本原子力学会2016年春の年会, 2016.3

20. 鳥居建男, 川妻伸二, 小島久幸, 北見俊幸, 大道博之, 河村弘 “研究拠点向上のための遠隔技術開発,1; 檜葉遠隔技術開発センターの運用開始と遠隔技術開発”, 日本原子力学会2016年春の年会, 2016.3
21. 谷藤祐太, 白崎令人, 毛利文昭, 山田大地, 土田佳裕, 川端邦明, 鳥居建男, 川妻伸二, “研究拠点向上のための遠隔技術開発,4; 原子力災害対応ロボットの標準試験法の導入に向けて”, 日本原子力学会2016年春の年会, 2016.3

招待講演

1. 川妻伸二, “原子力発電所事故のための放射線計測機器開発等の動向”, 第60回応用物理学会学術講演会, 2013.3
2. Shinji Kawatsuma, Kuniaki Kawabata, “Development of Nuclear Emergency Response Robots at Naraha Remote Technology Center relevant to the laser technology”, OPTICS and PHOTONICS International Congress 2016 (OPIC2016), 2016/05, Yokohama, May 17-20, 2016

解説記事・研究紹介

1. 富居博行, 松尾浄, 白石邦生, 渡部晃三, 斉木秀男, 川妻伸二, 林道寛, 財津和久, “原子力施設における廃止措置の費用評価手法”, デコミッションング技報, 第31号, pp11-20, 2005.3
2. 川妻伸二, 石川敬二, 松原達郎, 堂野前寧, 今川康弘, “スウェーデン・スタズビック社における金属廃棄物の熔融除染とフリーリリース”, デコミッションング技報, 第33号, pp67-74, 2006.3
3. 斎藤公明, 川妻伸二, “福島原発事故後の一般環境の線量率分布状況と計測機器開発動向等”, 放射線, Vol. 39, No. 4, 2014
4. 川妻伸二, “原子力ロボットの貢献; 実用化例”, 日本ロボット学会第30回記念学術講演会, 2012.9
5. 川妻伸二, “檜葉遠隔技術開発センターと原子力緊急時遠隔機材”, デコミッションング技報, 第54, pp24-32 2016.9

その他

1. 船坂英之, 此村守, 川妻伸二, “「大規模エネルギー源として経済的で核不拡散性があり固有の安全性と環境への安全性を備えた原子炉及び核燃料サイクル」セミナー出席報告”, 核燃料サイクル開発機構 JNC-TN1200 2001-002, 2001.1
2. 福島峰夫, 川妻伸二, 和田孝雄, 山本隆一, 田中康正, “耐放射線性機器・材料データベースの構築・整備”, 動力炉・核燃料開発事業団 PNC-TN8410 93-192, 1993.5

3. 長谷川信, 近藤等士, 亀井玄人, 平野史生, 三原守弘, 高橋邦明, 船橋英之, 川妻伸二, 植田浩義, 大井貴夫, 兵藤英明, “地層処分低レベル放射性廃棄物の安全評価解析と物量変動の処分場への影響に関する検討・評価(共同研究)”, 日本原子力研究開発機構 JAEA-Research 2011-003, 2011.2
4. 大内優, 武部慎一, 川妻伸二, 福島正, “国際機関及び諸外国におけるウラン廃棄物に関連した規制動向の調査報告”, 日本原子力研究開発機構 JAEA-Review 2012-019, 2013.2

特許

1. 登録番号 02103978(平成 8 年 2 月 21 日), 「遠隔着脱コネクタ装置(権利満了)」
2. 登録番号 02103979(平成 8 年 2 月 21 日), 「遠隔着脱コネクタ装置(権利満了)」
3. 登録番号 02065830(平成 7 年 6 月 23 日), 「マスターマニプレータ(権利満了)」
4. 登録番号 02055767(平成 7 年 3 月 30 日), 「マスターマニプレータ(権利満了)」
5. 登録番号 02133768(平成 8 年 9 月 10 日), 「管継手部のシール性試験装置(権利満了)」
6. 登録番号 02668614(平成 9 年 7 月 4 日), 「ロールインラックシステムのコネクタバンク機構(権利満了)」
7. 登録番号 2933787(平成 11 年 5 月 28 日), 「保持板付金属 O リング(権利満了)」
8. 登録番号 5963165(平成 28 年 7 月 8 日), 「可搬型放射線測定装置及びそれを用いた放射線測定方法」
9. 登録番号 6004393(平成 28 年 9 月 16 日), 「垂直面線量率マップ作成装置」

表彰

1. 1989 年 10 月 2 日, 動力炉・核燃料開発事業団理事長賞・開発功績賞「両腕型バイラテラルサーボマニプレータの開発」

付録

1.	ドイツの原子力緊急時ロボット部隊 KHG.....	184
1.1.	Excavator	187
1.2.	MF-2.....	189
1.3.	MF-3.....	190
1.4.	MF-4.....	190
1.5.	MF-6.....	191
1.6.	SMF.....	192
1.7.	LMF	193
1.8.	EROS.....	194
1.9.	MTS.....	194
2.	スリーマイルアイランド事故直後に投入されたロボット	196
3.	チェルノブイリ事故直後に投入されたロボット等	197
3.1.	KLIN	199
3.2.	コマツ製建設重機.....	199
3.3.	MF-2.....	200
3.4.	STR-1.....	201
3.5.	MF-3.....	203
3.6.	Excavator	203
3.7.	チェルノブイリ原子力発電所 Syda 副所長等へのインタビュー結果	203
4.	フランスの原子力緊急時対応ロボット部隊.....	206
4.1.	EBULL.....	207
4.2.	EPELL.....	208
4.3.	EBLENNE.....	209
4.4.	EPPB.....	209

4.5.	EOLE.....	210
4.6.	EROS.....	211
4.7.	VERI2B.....	212
5.	東海村 JCO 臨界事故後に開発されたロボット.....	215
5.1.	屋外調査用ロボット.....	216
5.2.	屋内調査用ロボット.....	219
5.3.	屋内作業用ロボット.....	222
6.	福島第一原子力発電所事故直後に投入されたロボット等.....	225
6.1.	モニロボ A.....	227
6.2.	74 式戦車.....	229
6.3.	無人建設重機.....	230
6.4.	T-Hawk.....	232
6.5.	Packbot.....	233
6.6.	Brokk.....	235
6.7.	Bobcat.....	237
6.8.	Talon.....	238
6.9.	Quince.....	239
6.10.	Warrior.....	242
6.11.	JAEA-3.....	243
6.12.	福島第一原子力発電所事故の緊急時対応ロボットのまとめ.....	246

付録では, 本研究の過程で調査した, ドイツ原子力緊急時ロボット部隊 **KHG**, スリーマイルアイランド原子力発電所事故直後に投入されたロボット, チェルノブイリ原子力発電所事故直後に投入されたロボット, フランス原子力緊急時ロボット部隊 **GroupeINTRA**, 東海村 **JCO** 臨界事故後開発されたロボットおよび福島第一原子力発電所事故直後に投入されたロボット等について, 今後の研究開発に資するために時系列的に整理する.

1. ドイツの原子力緊急時ロボット部隊 KHG

旧西ドイツでは 1955 年から、Karlsruhe および Jurich の原子力研究センターで原子力発電や核燃料サイクルに関する研究開発を開始し、1962 年に実験炉での発電に成功し、1967 年から小規模な実証炉レベルで商業用原子力発電所が稼働を開始した(原子力百科事典 ATOMICA「ドイツの原子力発電開発 (14-05-03-03)」). Karlsruhe 原子力研究センター (現 Karlsruhe Institute of Technology : KIT) には、原子力研究所内の実験施設での万が一の過酷事象に備えて、ロボット等の遠隔機材で緊急時対応を行うことのできる原子力緊急時チーム (KHT) を有していた。

1970 年代になると本格的な商業原子力発電所が続々と営業を開始し始めた。これを受けて、旧西ドイツの放射線防護令に基づき、正式名称を Kerntechnische Hilfsdienst GmbH (KHG) という原子力緊急時組織が 1977 年に電力会社、核燃料製造関連企業、核燃料再処理工場、国の原子力に関連する研究機関が出資して設立された。

KHG は、原子力緊急時の①プラントの安定化、②事故原因の調査、③事故影響の除去を行うため、モニタリング、除染、ロボット等の機材と要員を有する。KHG は設立当初は Karlsruhe の原子力センター内に居を構えて活動を開始していたが、のちに同センター近傍に独自の敷地と建屋を取得して、そこを拠点に活動をしている (図 1)。

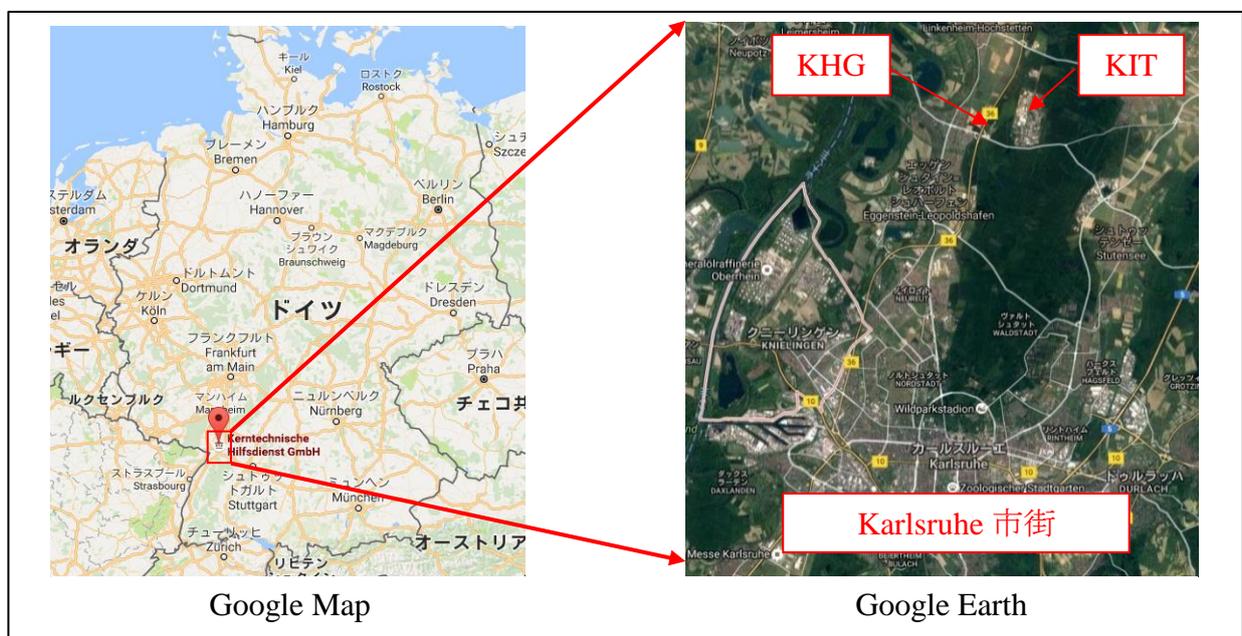


図 1 ドイツ KHG の位置

ドイツ KHG の年間予算は 2013 年時点で約 6M€である。専従職員は、管理部門職

第三陣は、器材のメンテナンスや長期にわたるロジスティクスに係る資機材等をコンテナに搭載しトレーラで、平均 80km/h で発災地に向かうこととなっている。

MF-2~MF-6 は、1980 年代にドイツで開発されたロボットで、MF-2 は後述するチェルノブイリ原子力発電所事故に提供されたが、MF-3、MF-4、MF-6 は今（2013.2.20 時点）でも現役で運用されている。また、ロボットだけではなく、ロボットを発災地で遠隔に活用するためのロボット除染用コンテナ、ロボットの修理装置を搭載したコンテナ、ロボットオペレータが着替えや休憩できるロジスティック用のコンテナなども整備されている。さらに、発災現場で活動するロボットが収集した画像データなどの情報を選択や編集して、KHG 本部や発災事業者の本部にリアルタイムで伝送できるコンテナも用意している（図 3）。



図 3 ドイツ KHG のトレーラとコンテナ群

1990 年代後半からは、後述するフランスの原子力ロボット部隊 **GroupeINTRA** が設立されたこともあり、フランス製のロボットを KHG と **GroupeINTRA** とで共同調達し、調達コストや予備品の共有を図った。

2000 年代に入ってから、ロボットのプラットフォームを新規に開発し、上部に搭載するツールなどを変えることで、ロボットのプラットフォームの調達コストや予備品の共有を図ってきている。

福島第一原子力発電所事故では、KHG が保有しているロボットを東京電力に提供することとし、東京電力に、ドイツ国内でのロボット等の操作訓練と引渡しを申し入れたが、既に米国のロボット等が福島第一原子力発電所に投入されていることから、ドイツのロボットが日本に来て福島第一原子力発電所の事故現場に投入されることはなかった。

福島第一原子力事故ではロボットと操作卓間の通信に苦勞し、結果としてロボットの操作卓も建屋内に搬入したことを踏まえて、KHG では無線通信と有線通信とを組合

せて、屋外の操作卓から屋内のロボットまで通信できる新たなシステムも開発している。

1.1. Excavator

Excavator は遠隔地から操作可能な建設重機であり、後述する福島第一原子力発電所事故の際に屋外瓦礫を撤去するために投入された無人建設重機と似たものである（図 4）。



図 4 ドイツ KHG の Excavator

本ロボットは原子力災害時にはコンテナに搭載されて、専用トレーラで発災現場に向かうことになっている。また発災現場では、オペレータは通常の建設重機のように、**Bucket Loader** に搭乗して操作できるほか、専用トレーラ内の運転席と助手席の後方中央部やや高い位置に設けられた遠隔操作専用の席からジョイスティックを用いて目視で遠隔操作可能なようになっている。専用トレーラのフロントウィンドウ上部に設けられたモニタを見ながら遠隔操作できるようにもなっている（図 5）。

作業場所から数 km 離れた場所に専用トレーラを移動して遠隔操作する場合に備えて、先端にアンテナを取り付けたトレーラ搭載型の 33 m マストも有している（図 6）。

本ロボットの特筆すべき点は、無線通信および制御に必要な電子回路を 2 種類用意してことである。一つ目の電子回路は通常のもので、放射線を 1/10 に減衰できる厚みの鉛遮蔽 BOX 内に収納されている。万が一この一つ目の電子回路が放射線損傷した場合に備えて、二つ目の電子回路は、最小限必要な機能だけにして小型化を図っており、放射線を 1/100 に減衰できる鉛遮蔽 BOX 内に収納している。これにより、一つ目の電子回路が放射線損傷で動かさないようになった場合でも、二つ目の電子回路により、作業を中止して、作業現場から脱出して戻って来られる様になっている（図 7）。

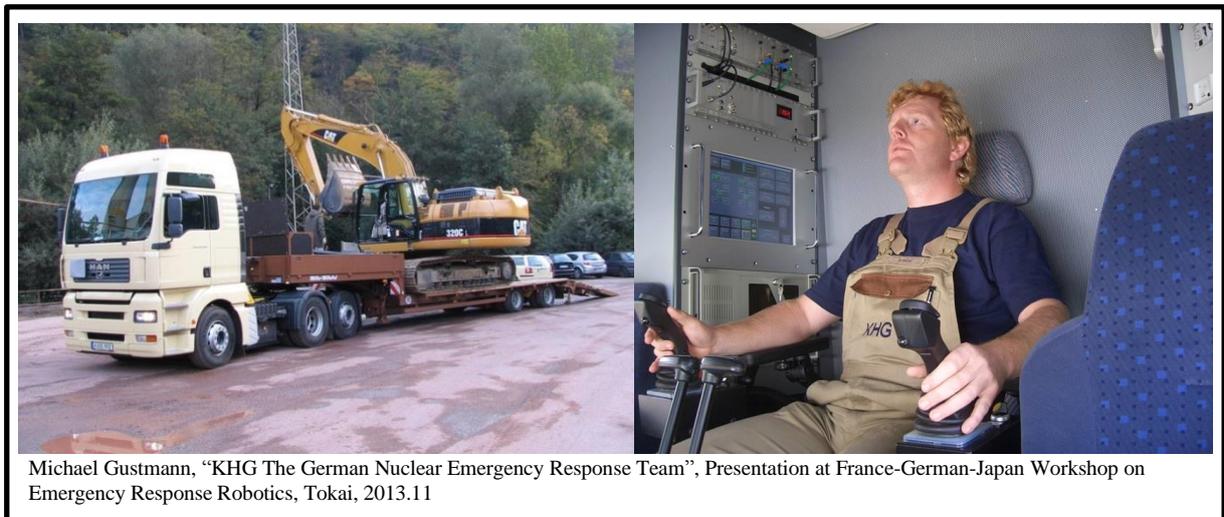


図 5 Excavator の専用トレーラと専用トレーラ内の遠隔操作機器



図 6 33 m マストの先端に取り付けられた遠距離通信用無線アンテナ



図 7 Excavator に搭載された電子回路用遮蔽 BOX

1.2. MF-2

MF-2 は 1977 年 KHG 設立後、初期に開発されたロボットのひとつで、屋内外で利用できるロボットであり、簡単な作業ができるようなアームを有している（図 8）。



図 8 MF-2

本ロボットは、後述するチェルノブイリ原子力発電所 4 号機炉心溶融水蒸気爆発事故の際に旧ソビエト連邦に提供された。爆発した原子炉建屋の隣のタービン建屋屋上に飛散した瓦礫等を除去するために投入された。そのため、MF-2 は、現在、KHG では運用に供されていない。

1.3. MF-3

MF-3 は 1977 年 KHG 設立後、初期に開発されたロボットのひとつで、屋内で利用できるロボットであり、角度が可変のサブクローラを有しており、階段等の昇降も可能である。本ロボットの操作はクレーンのペンダント操作器の様な首かけ式の操作器から行えるようになっている（図 9）。

本ロボットの 1 台は、後述するチェルノブイリ原子力発電所 4 号機炉心溶融水蒸気爆発事故の際に、ドイツから旧ソビエトに提供され、爆発した原子炉建屋の地下階の調査に使用された。現在（2013 年 2 月 20 日時点）でも 2 台の MF-3 が KHG において、緊急時に備えている。



図 9 KHG で現在も運用されている MF-3 と操作器

1.4. MF-4

MF-4 は 1977 年 KHG 設立後，初期に開発されたロボットのひとつで，屋内外で利用できるロボットであり，簡単な作業ができるようなアームとアームによる操作を，斜め後方から監視できる俯瞰カメラも有している（図 10）。



図 10 MF-4 と移動可能操作卓

遠隔操作は原子炉建屋内の比較的放射線が低い所から操作することが想定されており，PC 等を収納可能な操作卓が用意されており，この操作卓はハンドパレットローダー等により発災現場内で移動可能なように工夫されている。

1.5. MF-6

MF-6 は 1977 年 KHG 設立後，初期に開発されたロボットのひとつで，屋内で利用できる簡易ロボットである。

三輪ホイール式であり，階段や瓦礫の多く飛散しているような発災現場ではなく，比較的アクセスの容易な発災現場で使用されることを想定している。ロボット上部には放射線計測計等を搭載可能である（図 11）。

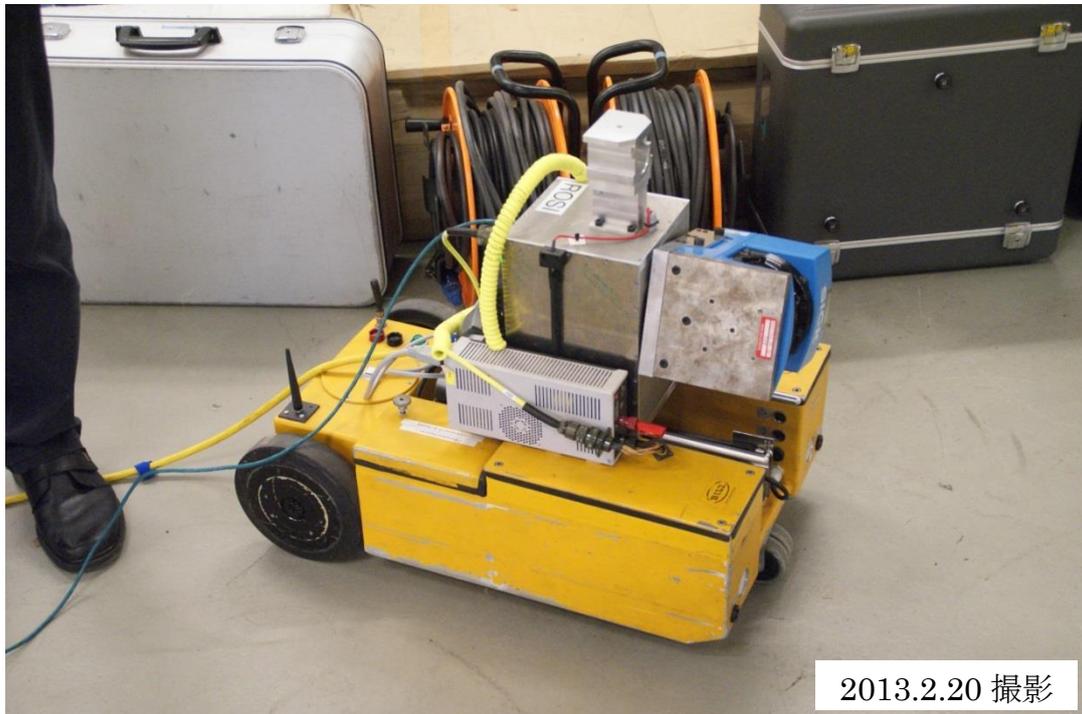


図 11 MF-6

1.6 SMF

SMF は MF-2 の後継機種として、MF-2 同様屋内外での使用を想定して開発されたものである（図 12）。

本ロボットは、遠隔操作可能なスロープ付きトレーラを牽引して、屋内用ロボットを屋外から屋内に搬送することもできる。



図 12 SMF

1.7. LMF

LMF はフランス CEA（原子力エネルギー庁；現，原子力・代替エネルギー庁）が開発したマニピュレータ等の技術をベースに，Cybernetics 社が開発したロボットであり，主として屋内での使用を目的として開発されており，メインローラーの他に，前後にサブローラを有しており，階段も走行可能となっている．また，扉の開閉等器用な作業が可能な M-23A マスタースレーブマニピュレータを右腕として有しており，重量物を取り扱うためにパワーマニピュレータを左腕として有している（図 13）．



図 13 LMF による扉開放操作訓練

1.8. EROS

EROS (図 14) は 1988 年の GroupeINTRA 設立後，合同調達されたもので，緊急時には独仏間で，予備部品等を融通できるようになっている。



図 14 KHG に配備されている EROS

1.9. MTS

MTS は，KHG が 2000 年代に入って，屋内外の調査や軽作業用に利用できる，共通プラットフォームを開発している。MTS 上部には，状況に応じて様々な装置を搭載可能となっている。KHG は，標準プラットフォームとして，複数台の MTS を整備している。

MTS に除染装置を搭載したり (図 15) ，通信中継器を搭載したり (図 16) ，その場の状況に応じて搭載するツールを交換することが可能となっている。標準プラットフォームとして複数台の MTS を整備することで，機材の予備品の備蓄や，オペレータの教育訓練という観点から効率化を図れるようになっている。



Michael Gustmann, "KHG The German Nuclear Emergency Response Team",
Presentation at France-German-Japan Workshop on Emergency Response
Robotics, Tokai, 2013.11

図 15 除染装置を搭載した MTS



図 16 無線中継器を搭載した MTS

2. スリーマイルアイランド事故直後に投入されたロボット

アメリカ合衆国ペンシルベニア州のスリーマイルアイランド原子力発電所の2号機では、1979年3月28日に国際原子力事象評価尺度レベル5の炉心溶融事故が発生した。溶融燃料の一部が冷却水とともに原子炉建屋から補機建屋等に流出した。事故の収束作業は中央操作室での遠隔操作が主であり、その後の補機建屋等の除染にロボットが投入されることはあったが、緊急対応にロボット等が使われることはなかった。

3. チェルノブイリ事故直後に投入されたロボット等

1986年4月26日午前1時23分（日本時間同日午前6時23分）に、旧ソビエト連邦（現ウクライナ）のチェルノブイリ原子力発電所4号機（図17）で水蒸気爆発を伴う事故が発生した。同機は旧ソビエト連邦で開発され、旧ソビエト連邦内でのみ建設されている黒鉛減速軽水沸騰冷却型（RMBK型）である。事故発生当時は外部電源が喪失した際に、タービン発電機の回転エネルギーで発電し、その電力で主循環ポンプと非常用炉心冷却系のポンプを運転する試験を行っていた。その試験の過程で、原子炉が不安定になり、制御棒を挿入した際にRMBK型特有の「急激な過出力」が発生して、水蒸気爆発が発生したものと推測されている（原子力百科事典 ATOMICA「チェルノブイリ原子力発電所事故の概要（02-07-04-11）」）。

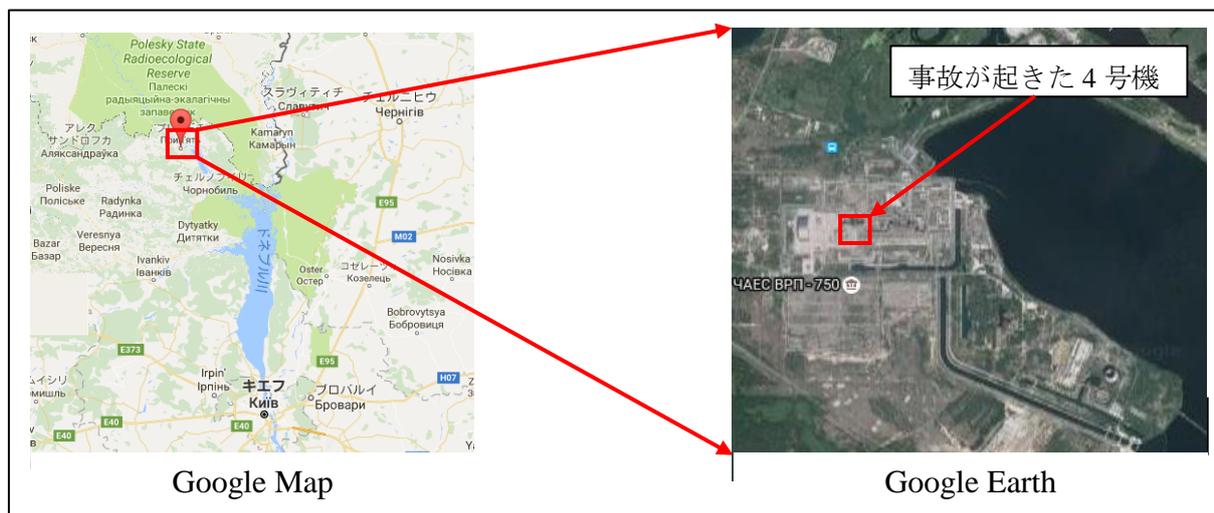


図 17 チェルノブイリ原子力発電所の位置

チェルノブイリ原子力発電所4号機の水蒸気爆発は国際原子力事象評価尺度レベル7（深刻な事故）という史上最悪の原子力事故で（図19）、今も30km圏内は立ち入りが規制されている。2013.2.18に行った、チェルノブイリ原子力発電所 Syda 副所長へのインタビューでは、「事故直後に高濃度に汚染された黒鉛や瓦礫の撤去に約50台のロボットが使用された。高濃度に汚染されたものは、使用後に地中に埋設処分されてしまった。」とのことであった。比較的汚染の低かったロボットは除染された後、今も立ち入りが制限されているチェルノブイリ市内に展示されている（図18）。

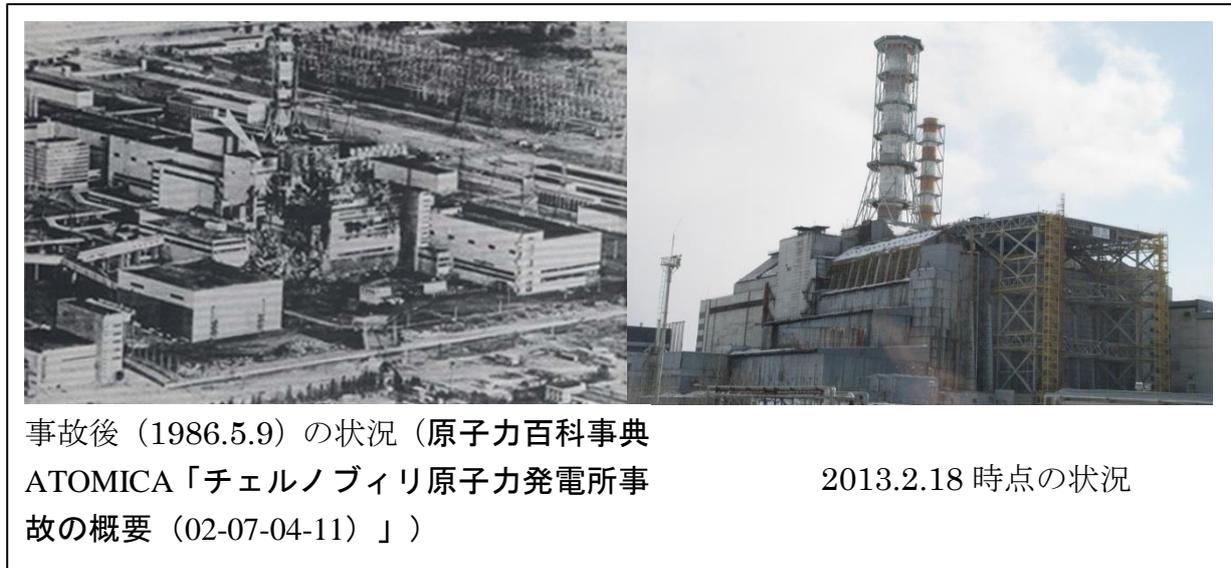


図 19 チェルノブイリ発電所 4 号機の事故後と 2013.2.18 時点の状況



図 18 チェルノブイリ事故直後に使用されたロボット

水蒸気爆発により飛散した瓦礫は、核燃料物質等により汚染されたものや原子炉の中で放射化した中性子減速材の黒鉛ブロック等であった。これら瓦礫の周辺は放射線が高くなっており、作業員が容易に近づけない状況であった。そのためこれら瓦礫の

撤去には、戦車に排土板を取り付けた KLIN や日本から提供されたラジコン重機が用いられた。爆発をおこした原子炉建屋の隣にあるタービン建屋の屋上に飛散していた瓦礫の撤去にはドイツから提供された MF-2 や旧ソビエト連邦が開発を進めていた月面探査車ルノホート等が使用された。原子炉建屋の地下階調査にはドイツから提供された MF-3 が使用された。そのほかにも多数のロボットが投入されたが、2013.2.18 に行ったチェルノブイリ原子力発電所 Syda 副所長へのインタビューでは、「半導体の放射線損傷や瓦礫が飛散する災害現場ではロボットのケーブルなどの問題があり、十分に機能しなかった。」としている。

3.1. KLIN

KLIN は戦車に排土板（ブレード）を装着したもので（図 20），屋外に飛散した放射化した中性子減速材の黒鉛や，高濃度に汚染したコンクリート瓦礫等の除去に使用された。また，KLIN は瓦礫撤去後も汚染していた表土の剥離にも使われた。



図 20 KLIN

3.2. コマツ製建設重機

日本からもロボットが提供されている。遠浅の浜辺で万が一建設重機が転倒すると、建設重機オペレータが溺れる危険性があることから、小松製作所が開発中であったラジコンで遠隔操作できるように開発されていた D-355W（図 21）である。

D-355W については小松製作所内にも当時の詳細なデータは残っていないとのことであるが，原子炉建屋近傍の高放射線下で，水蒸気爆発により飛散した放射化した中性子減速材の黒鉛ブロックや高濃度に汚染した瓦礫の撤去に使われたものの，半導体

部品の放射線損傷により不可動となってしまった。



図 21 コマツ製作所製建設重機 D-355W

3.3. MF-2

MF-2 は前述のドイツ KHG から提供されたロボットで、爆発した原子炉建屋の隣にあるタービン建屋の屋上に飛散した、多量の放射化した中性子減速材の黒鉛や高濃度に汚染したコンクリート瓦礫等の撤去に用いられた (図 22) .

MF-2 は、タービン建屋の屋上に飛散した瓦礫等を撤去するのにもちいられたが、2013.2.20 に行った、ドイツ KHG の Michael Gustmann 氏へのインタビューでは、「使用後はバッテリー交換ではなく、外部電源から再充電する必要があった。4 号機建屋内付近に使用可能な電源は無く、遠く離れた場所からケーブルを仮設して給電したところ、電圧降下が大きく、再充電することは不可能であった。そのため、MF-2 をタービン建屋の屋上に待機させたまま、新たな仮設電源を設置することにしたが、その設置作業に時間がかかった。再充電ができた時には、ロボットの半導体が既に放射線損傷しており、MF-2 を再起動することができなかった。」とのことであった



図 22 タービン建屋屋上で瓦礫等の撤去に用いられている MF-2

3.4. STR-1

STR-1 は当時の旧ソ連が開発中だった月面探査用ロボット，ルノホートを急遽，チェルノブイリの瓦礫撤去用に改造したものである。STR-1 はタービン建屋屋上の瓦礫撤去に使用された。STR-1 は小型軽量で，構造的にもシンプルで，タービン建屋屋上の瓦礫撤去には有効であったが，チェルノブイリ原子力発電所の Syda 副所長へのインタビューでは，「他のロボット同様，半導体の耐放射線性が十分ではなく，長時間使用することはできなかった。」とのことであった。



<http://chernobyl.in.ua/wp-content/uploads/str-chernobyl-robot-.jpg>(2017.3.2 アクセス)

図 23 チェルノブイリ原子力発電所 4号機タービン建屋屋上で瓦礫撤去する STR-1

STR-1 は、数台が改造されタービン建屋屋上で使用されたようであるが、うち 1 台の残骸とおぼしきものは、チェルノブイリ市内に残されていた (図 24) .



図 24 チェルノブイリ市内に展示されている STR-1 の残骸

3.5. MF-3

原子炉建屋内部，特に地下階の状況を調査するために，ドイツ KHG から MF-3 ロボット 1 台が提供され，地下階で使用された。

チェルノブイリ市内で，MF-3 の残骸と思われるものが展示されていた（図 25）

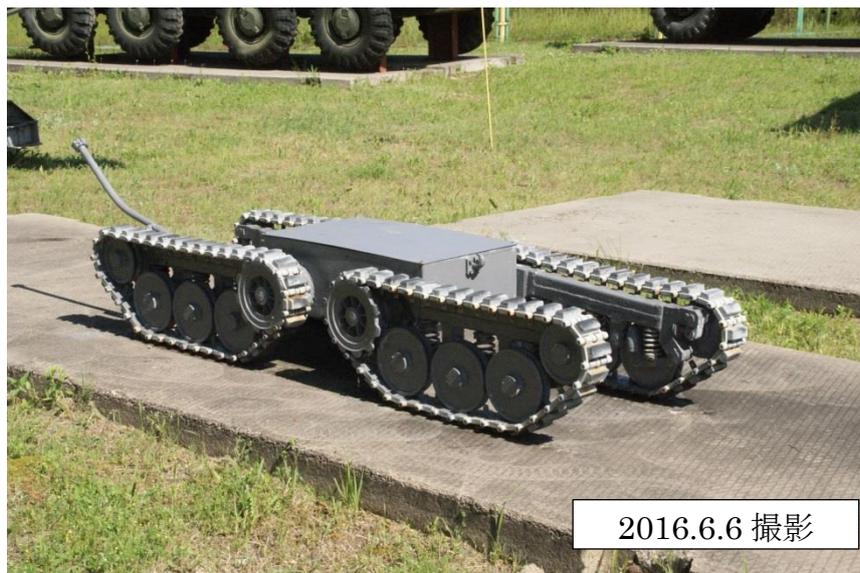


図 25 チェルノブイリ市内に展示されている MF-3 の残骸

3.6. Excavator

前述の Excavator と同じものがチェルノブイリ原子力発電所 4 号事故のために旧ソビエト連邦に提供され，モスクワに送られたが，途中で行方不明になり，実際にチェルノブイリには投入されなかった。また，現在どこにあるのかについても不明である。

3.7. チェルノブイリ原子力発電所 Syda 副所長等へのインタビュー結果

チェルノブイリ原子力発電所 4 号機の炉心溶融・水蒸気爆発事故から 30 年余りが経過している。ウクライナでは同事故の対応にある一定期間従事したものは合計勤続 25 年で年金が支給されることとなっており，同事故の緊急対応でロボット投入に係った技術者の多くは既にリタイアしており，当時のロボット投入の状況を知る人は極めて少なくなっている。当時のロボット投入の状況を知る数少ない貴重な経験者のひとりであるチェルノブイリ原子力発電所の Syda 副所長と面談して，当時のロボット投入状況を聞ける機会（2013.2.18 および 2016.6.6）に得ることができた。Syda 副所長等から聴取した，事故直後の緊急対応でのロボット投入に係る知見を纏めて以下に示

す.

- 多くの国々からロボットが提供され、50台以上のロボットを使用（試用）した。
- 有線ロボットはケーブルが瓦礫や構造物に引っ掛るので操作が大変だった。ロボットが作業場所までのアクセス路をどう確保するかが有線ロボットを使っていくうえでの課題である。
- ロボットの操作は多くが無線であったため、ロボットから比較的近いところから操作する必要があり、遮へいボックスを設置して、その中から行った。
- 無人重機を含むロボットの多くは半導体等の放射線損傷で動かなくなった。原子力施設、特に原子力災害時にロボットを使っていくには耐放射線性が課題となる。
- （緊急時対応の後の石棺建設段階では）無線操作の建設重機を建屋内に大型クレーンでつり込み、構造物の解体、瓦礫や解体物の分別やこれらのコンテナ等への収納等を行った。この時は約500m離れた場所から遠隔操作した。
- （緊急時対応の後の石棺建設段階では）運転席を鉛で遮蔽した Putsmeister 社製コンクリートポンプ車を、オペレータがポンプ車に搭乗して操作した。

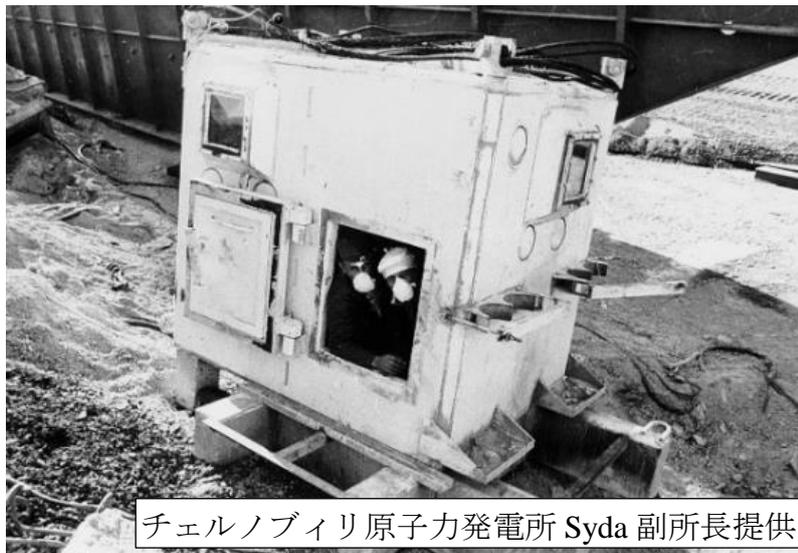


図 26 チェルノブイリ原子力発電所事故で使用された遮蔽操作ボックス



横小路神戸大学教授提供

図 27 石棺建設のためのコンクリートポンプ車による工事



横小路神戸大学教授提供

図 28 運転席に鉛遮蔽を施したコンクリートポンプ車

4. フランスの原子力緊急時対応ロボット部隊

フランスでは、チェルノブイリ原子力発電所事故を踏まえ、原子力施設で炉心溶融・水蒸気爆発のような過酷事故が発生した時に、高線量率下で作業員に替わって作業できる原子力緊急時ロボット部隊を設置する必要性が認識された。

その結果、1988年に原子力発電所を有するフランス電力公社、核燃料工場や核燃料再処理工場を有する COGEMA 社（現、AREVA 社）、原子力研究施設を有する原子力庁（現、原子力・代替エネルギー庁）が出資して、GroupeINTRA を設立した。INTRA とはフランス語で「原子力災害時にロボットで介入する」という意味の言葉の省略語である。

GroupeINTRA は Paris の南西 250km 程のところにある Chinon 原子力発電所内に事務所とロボットの倉庫を有するとともに、原子力発電所に隣接した土地で無人建設重機等の訓練を行える土地を有している（図 29）。

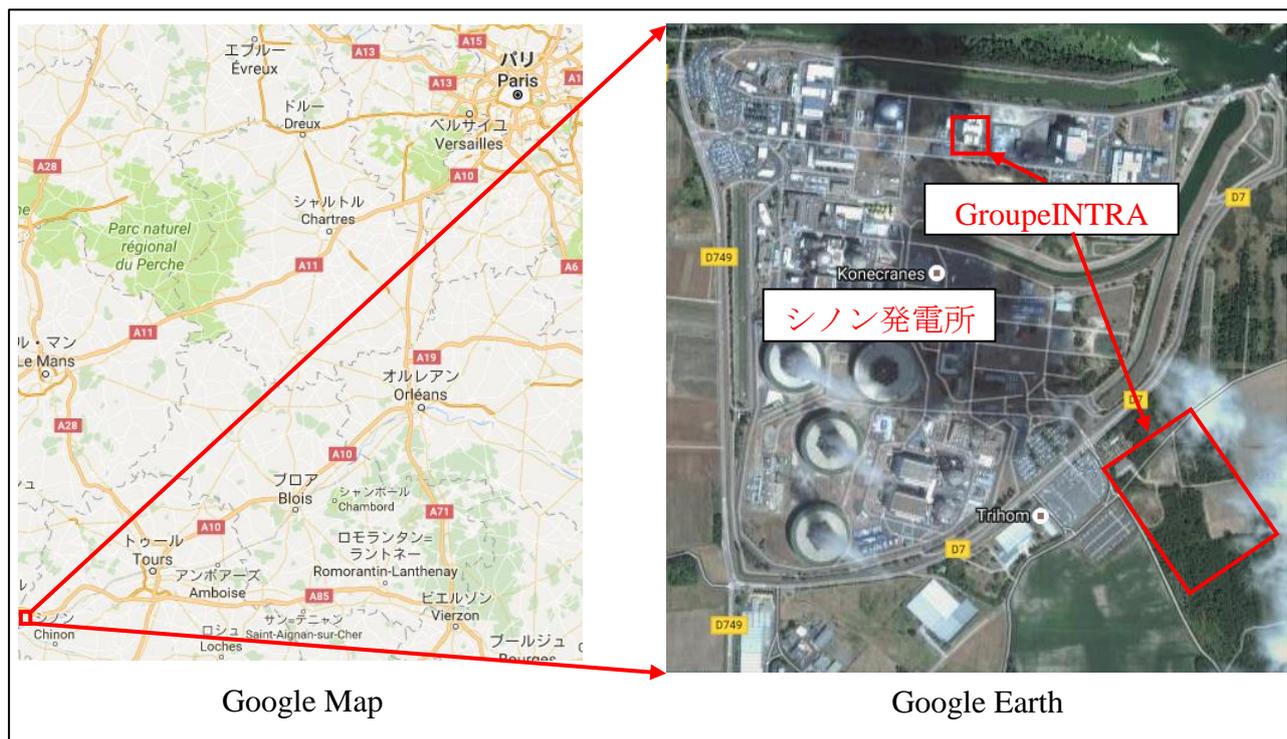


図 29 GroupeINTRA の位置

屋外で土木作業を行える、遠隔操作型のブルドーザ、バックホウ、クローラダンプなど無人建設重機と、屋内での調査や軽作業が可能な遠隔操作型ロボットを有している（図 30）。



図 30 GroupeINTRA のロボット等機材

原子力施設での発災時に備えて 24 時間電話を受け付けられる体制になっており、ロボット等をトラックやトレーラで高速道路を通過して輸送し、24 時間以内に発災した原子力発電所で活動を開始できるようにしている。

さらに、発災現地でロボット等による偵察や作業を統括するとともに、ロボット等に搭載しているカメラや放射線計測器のデータをリアルタイムで Paris の政府機関等に伝送できる情報管理用のコンテナも有している。

年間予算は約 10M€である。専従職員は約 25 名と前述の KHG と同規模であるが、前述の機関の職員でロボット等の操作訓練を受け、発災時に応援に駆け付けるパートタイムオペレータは 20 数名と少ない。

福島第一原子力発電所事故では、GroupeINTRA が有している小型のロボット EROS の提供を東京電力に申し入れた。東京電力の関連企業の職員がフランスの Chinon 原子力発電所で操作訓練を受けている。GroupeINTRA は機材を日本に向けて空輸すべく、大型輸送機 Antonof26 の手配も行っていった。結局、KHG の場合と同様、既に米国のロボット等が福島第一原子力発電所に投入されていることから、フランスのロボットが日本に来て福島第一原子力発電所の事故現場に投入されることはなかった。

4.1. EBULL

EBULL は 1988 年の GroupeINTRA 設立直後に整備されたロボットで、原子力災害発生場所で瓦礫撤去や他のロボットのアクセスルートを緊急整備するために、ブルドーザを遠隔操作可能なように改造されたものである（図 31）。後述する EPPB から鉛ガラスの遮蔽窓越し、または EBULL に搭載したカメラの画像を見ながら遠隔操作できるようになっている。



図 31 EBULL

4.2. EPELL

EPELL は 1988 年の GroupeINTRA 設立直後に整備されたロボットで，原子力災害発生場所で瓦礫撤去や他のロボットのアクセスルートを緊急整備するために，シャベルカーを遠隔操作可能なように改造されたものである（図 32）．後述する EPPB から鉛ガラスの窓越しまたは EBULL に搭載したカメラの画像を見ながら遠隔操作できるようになっている．



図 32 EPELL

4.3. EBLENNE

EBLENNE は 1988 年の GroupeINTRA 設立直後に整備されたロボットで、原子力災害発生場所で瓦礫撤去や他のロボットのアクセスルートを緊急整備するために、クローラダンプを遠隔操作可能なように改造されたものである(図 33)。後述する EPPB から鉛ガラスの窓越しまたは EBULL に搭載したカメラの画像を見ながら遠隔操作できるようになっている。



図 33 EBLENNE

4.4. EPPB

EPPB は 1988 年の GroupeINTRA 設立直後に整備された機材で、原子力災害発生場所で瓦礫撤去や他のロボットのアクセスルートを緊急整備する、遠隔操作型ブルドーザ EBULL、遠隔操作型シャベルカー EPELL および遠隔操作型クローラダンプ EBLENNE を鉛ガラスの窓越しまたは各遠隔操作型建設重機に搭載したカメラの画像を見ながら遠隔操作するものである(図 34)。

EPPB は、通常的大型トラックの様に運転席から運転可能なほか、遠隔操作型建設重機を操作する操作卓からでも、EPPB に搭載されたカメラの画像を見ながら、運転可能である(図 35)。



図 34 EPPB



図 35 EPPB から EPELL と EBULL の操作

4.5. EOLE

EOLE は 1988 年の Groupe INTRA 設立直後に整備されたロボットで、原子力災害が発生した建屋内に進入して、調査や軽作業を行うロボットである。前後にサブクローラを有しており、原子炉建屋内にある堰や階段を走破することができるようになっている（図 36）。

操作卓は両側のモニタを折畳んでキャリーバッグの様にオペレータが運べるようになっている（図 37）。



図 36 EOLE



図 37 EOLE 操作卓

4.6. EROS

EROS は 1988 年の GroupeINTRA 設立直後に整備されたロボットで，原子力災害が発生した建屋内に進入して，調査や軽作業を行うロボットである（図 38）．EOLE より一回り小さくサブクローラは前方のみに有しており，マニピュレータはサブクローラ上に配置されており段差等を乗り越える時でもバランスが取れるように工夫されている．

通信および操作卓は EOLE と同様である。



図 38 EROS

4.7. VERI2B

VERI2B は、屋外用ロボット（図 40）であり、軽作業が可能なマニピュレータを有している。EBULL, EPELL, EBENNE と比べて一回り小さい規模である。

操作はキャンピングカータイプのワゴン車のロボット操作車（図 39）に搭載された操作卓から VERI 2B に搭載されたカメラの画像を見ながら遠隔操作できるようになっている（図 41）。

このロボット操作車には、遮蔽は施されておらず、ロボットの操作場所から離れて空間線量率が十分に低いところから、遠隔操作することを想定している。そのため、無線中継器を備えている。無線中継器は気球に搭載して上空に上げるようになっている。気球は小型のトレーラに収納され、前述のロボット操作車で牽引できるようになっている（図 42）。



2012.6.7 撮影

図 40 VERI2B



2012.6.7 撮影

図 39 VERI2B の操作車



図 41 VERI 2B の操作卓



図 42 無線中継機用気球

5. 東海村 JCO 臨界事故後に開発されたロボット

1999年9月30日に茨城県東海村の核燃料工場，JCO で中濃縮度ウランを規定量を超えて燃料調整槽で取り扱ったことが原因で，日本で初の臨界事故が発生し，3名の従業員が大量被ばくし，うち2名が死に至った．調整槽で継続していた臨界を収束させるために，調整槽冷却用のジャケットと呼ばれる部分から冷却水を抜く作業を行う際，作業員は臨界により放出が続いている放射線に曝されながら，調整槽の傍で冷却水配管のバルブ操作を行う必要があった．この時の教訓として，高放射線環境下で事故収束のための作業を，人に代わって行えるロボット等の必要性が認識された．

そのため，平成11年度の第二次補正予算で，科学技術庁（現，文部科学省）所管の財団法人原子力安全技術センターが建屋外で放射線等の調査を行う屋外調査用ロボットを，同庁所管の特殊法人日本原子力研究所（現，国立研究開発法人日本原子力研究開発機構）が扉を開けて建屋内に進入して調査を行うロボットを，通商産業省（現，経済産業省）所管の財団法人製造科学技術センターが建屋内で事故収束に係る作業を行うロボットを開発した（表1）．

表1 東海村 JCO 事故後に開発された原子力防災ロボット

ロボット		参考文献
分類	型式	
屋外調査用ロボット	モニロボ A	1)
	モニロボ B	2)
屋内調査用ロボット	RESA-A	3)
	RESQ-B	
	RESQ-C	
	RaBOT	4)
屋内作業用ロボット	SMERT-K	5)
	SMERT-T	6)
	SWAN	
	MARS-A	
	MARS-T	
	MENIHR	
1) 原子力技術安全センター：“防災モニタリングロボット”，パンフレット，2009.5.19		
2) 原子力技術安全センター：“原子力安全技術センターにおけるモニタリングシステムの開発状況”，文部科学省ホームページ；		

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/gijyutu/004/014/shiryo/_icsFiles/afie/ldfile/2009/05/13/20080324_01c.pdf

- 3) 小林 忠義, 宮島 和俊, 柳原 敏, “原研における事故対応ロボットの開発(その 1) 情報遠隔収集ロボットの開発” 日本ロボット学会誌 Vol. 19, No.6, pp.706~709, 2001,
- 4) 柴沼 清, “原研における事故対応ロボットの開発(その 2) 耐環境型ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌 Vol. 19, No.6, pp. 710~713, 2001
- 5) 財団法人 製造科技術センター, “平成 11 年度 原子力防災支援システム開発補助事業 成果報告書”, 平成 13 年 8 月,
- 6) 間野隆久, 濱田彰一, “原子力防災支援システムの開発” 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 6, pp 714~721, 2001

屋外調査ロボットは、青森県六ヶ所村の日本原燃株式会社の再処理工場の傍の原子力安全技術センターの防災センターに配備された。屋内調査ロボットは日本原子力研究所の東海研究所（現、同機構原子力科学研究所）内に保管されていたが、適用性調査の結果を踏まえた改造や保守を行う予算がつかず、一部のロボットは安全上の理由から廃棄された。屋内作業用ロボットは保守費用のみならず保管スペースを確保する予算もつかず、すべて廃棄処分された。

5.1. 屋外調査用ロボット

東海村 JCO 事故後に開発された原子力災害対応ロボットの内、財団法人原子力安全技術センターによって開発された屋外調査用ロボット等について述べる。

5.1.1. モニロボ A

モニロボ A は映像取得機能重視仕様で、3D 映像取得と表面温度映像取得ができるようになっている。

その他に、ガンマ線空間線量率計測(~10Gy/h)、カメラ 4 台（パンチルト付全体監視カメラ、前方カメラ、後方カメラ、マニピュレータ先端カメラ）、マイクロホン、2 周波 GPS、温湿度計測、サンプル収納機能を有している。

このロボットは、高さ約 1500mm、全長 1500mm、幅 800mm で、重量は約 600kg あった。



図 43 モニロボ A

5.1.2. モニロボ B

モニロボBは雰囲気計測機能重視仕様で，ダスト捕集，可燃ガス検知，中性子線測定ができるようになっている。

その他に，モニロボ A 同様，ガンマ線空間線量率計測($\sim 10\text{Gy/h}$)，カメラ 4 台（パンチルト付全体監視カメラ，前方カメラ，後方カメラ，マニピュレータ先端カメラ），マイクロホン，2 周波 GPS，温湿度計測，サンプル収納機能を有している。

5.1.3. 運搬・制御車

モニロボはロボットの昇降用スロープ，ロボット操作盤，電源供給装置等を備え，自衛隊の輸送機C-130で空輸できる運搬・制御車も用意している。



図 44 モニロボ B

5.1.4. 無線中継器

運搬・制御車から遠く離れた所や，見通しのきかないも所にあるロボットでも，無線通信で遠隔操作できるように，モニロボ自らが持ち運べる無線中継器も用意されている．無線中継器を用いることで1km以上離れた所から操作することが可能となっていた．



図 45 無線中継器

5.2. 屋内調査用ロボット

東海村 JCO 事故後に開発された原子力災害対応ロボットのうち，特殊法人日本原子力研究所によって開発された屋内調査用ロボット等について述べる。

5.2.1. 初期情報収集ロボット RESQ-A

事故発生後，作業員が近づけなくなった時にまず初期情報を収集するためのロボット，収集ロボット RESQ-A が開発された。RESQ-A は二台あり，一台はガンマ線計測用，もう一台は中性子線計測用である（図 46）。

RESQ-A は発災後早急に現場に運搬して，発災現場で放射線量率の高い場所に近づいて調査可能なように，小型で，4 輪ホイールタイプとなっている。左右の 2 輪ずつを制御することで回転や旋回ができるようになっている。夜間や照明の落ちた建屋内での調査を想定して，照明を備えている。

また小型であるため，障害物の背後にある対象が見難いのを解消するため，カメラや計測器を昇降できるようになっている。



図 46 RESQ-A

5.2.2. 初期情報収集ロボット RESQ-B

RESQ-B は、階段や段差を乗り越えてより調査対象に近づけるように走行部がクローラタイプになっている。さらに建屋床面や調査対象物の表面の放射性物質汚染密度を濾紙で拭き取りサンプルできるようにアームも一台有している（図



図 47 RESQ-B

47) .

5.2.3. 初期情報収集ロボット RESQ-C

RESQ-C はさらに建屋内の扉を開放して内部に進入できるようにアーム 2 本を有している (図 48) .



図 48 RESQ-C

5.2.4. 耐放射線性ロボット RaBOT

RaBOT は、より高放射線下でも調査が可能なように、モータの位置センサーを耐放射線性の弱い光エンコーダーからレゾルバに変えたり、制御回路には耐放射線の弱い CMOS 等の半導体素子から、バイポーラ素子などからなるディスクリート回路に置き換えたりして、ロボットとしての耐放射線性を強化したものである (図 49) .



図 49 RaBOT

5.3. 屋内作業用ロボット

東海村 JCO 事故後に開発された原子力災害対応ロボットの内，財団法人製造科学技術センターによって開発された屋内調査用ロボット等について述べる(財団法人 製造科学技術センター，“平成 11 年度 原子力防災支援システム開発補助事業 成果報告書”，平成 13 年 8 月，間野隆久，濱田彰一，“原子力防災支援システムの開発” 日本ロボット学会誌，Vol. 19, No. 6, pp 714～721，2001) 。

5.3.1. 作業支援ロボット SMERT-K

SMERT-K は作業現場の状況を急ぐ場合や作業現場が狭隘な場合の作業監視観測することを目的とした小型ロボットである。



図 50 SMERT-K

5.3.2. 作業支援ロボット SMERT-M

SMERT-T は作業現場の状況を詳細に把握する場合タジクアームや昇降リフトに監視観測ユニットを組付け，作業監視観測するロボットである。



図 51 SMERT-M

5.3.3. 軽作業ロボット SWAN

SWAN は一般ドア開閉、小口径弁の開閉、スミヤサンプル採取、ガスおよび炉水資料採取等の作業を行うロボットである。



図 52 SWAN

5.3.4. 作業用ロボット MAER-A

MARS-A は、負圧ドア開閉、弁の開閉、機器配管の開孔、簡易除染等の作業を行うロボットである。



図 53 MARS-A

5.3.5. 重量運搬ロボット MARS-T

MARS-T は重量物をホース、遮へいブロック等を運搬して、階段等を走破できるロボットである。



図 54 MARS-T

5.3.6. 耐放射線性ロボット MENHIR

MENHIR は、前述のドイツ KHG が所有している LMF とほぼ同型のロボットある。主に高放射線下における各種作業を行うため、電子回路やセンサーには比較的耐放射線性の低い光学エンコーダーや MOS 型半導体素子ではなく、比較的耐放射線性の高いレゾルバやバイポーラ型半導体素子を用いて、耐放射線性向上を図っている。



図 55 MENHIR

6. 福島第一原子力発電所事故直後に投入されたロボット等

2011年3月11日14時46分、マグニチュード9.0、最大震度7を観測した、東北地方太平洋沖地震が発生し、福島第一原子力発電所付近では震度6強であった(図56)。この地震により同発電所で運転中であった1号機から3号機はすべて緊急停止された。

送電線の鉄塔の倒壊等により2系統あった商用電源2系統はいずれも喪失したが、非常用発電機が起動し、炉心冷却は継続されていた。

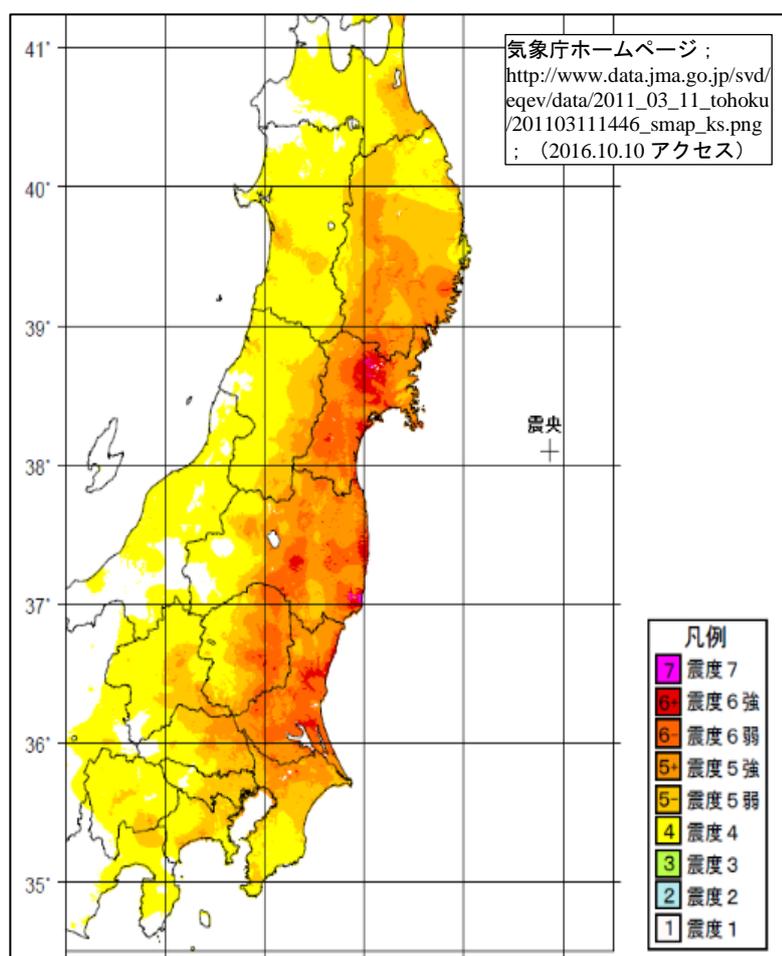


図 56 東北地方太平洋沖地震の震度分布

東北地方太平洋沖地震に伴い巨大津波が発生し、15時35分頃から巨大津波が福島第一原子力発電所を襲い始め、最大の津波は14mを超えるものであった。

この津波により、海拔10mにある1号機から4号機に海水が達した。原子炉建屋やタービン建屋の海側にあった非常用発電所はすべて海水による浸水で非常用発電機も停止し、全電源喪失となった。



図 57 福島第一原子力発電所を襲う巨大津波

この全電源喪失により、1号機は炉心冷却ができなくなり、炉心溶融に至り、3月12日に水素爆発が発生した。3号機も炉心冷却が出来なくなり、炉心溶融に至り、3月14日に水素爆発が発生した。さらに2号機でも炉心冷却が出来なくなり、炉心溶融に至り、放射性物質の大量放出にいたった。

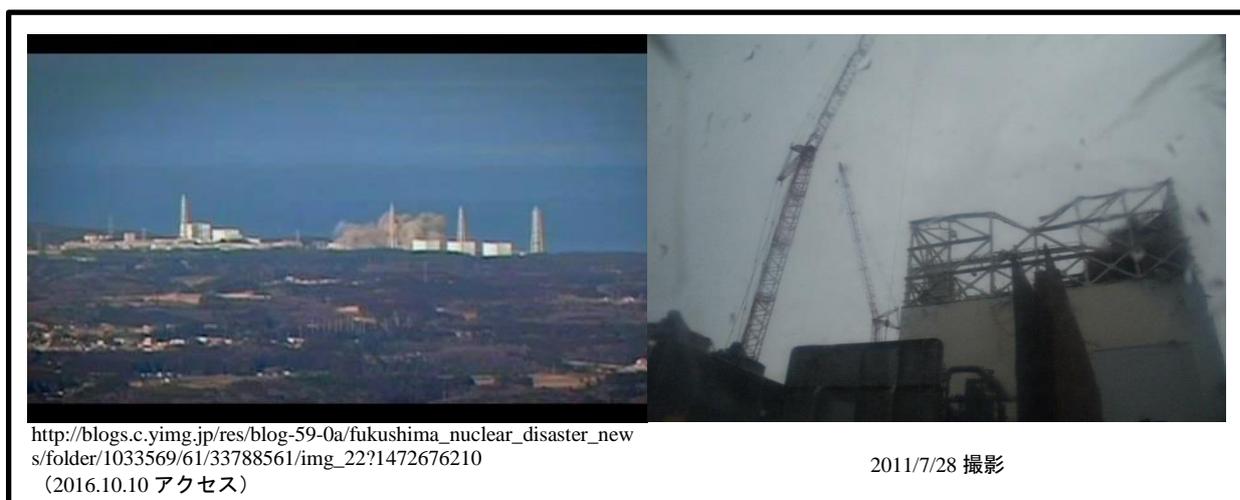


図 58 1号機の水素爆発とその後の状況



図 59 3号機の水素爆発とその後の状況

一連の水素爆発と放射性物質の大量放出により、1号機から3号機の原子炉建屋内と原子炉建屋周辺の放射線量率は極めて高くなり、作業員が原子炉建屋に近づいたり、原子炉建屋内に立ち入ったりすることは、極めて困難となった。

炉心の冷温停止と放射性物質の大量放出が無いことが確認され、野田内閣総理大臣による福島第一原子力発電所事故収束宣言が出された2011年12月16日迄の9か月間に、多くのロボット等の投入が検討され、結果として20台余りのロボットが投入された。

6.1. モニロボ A

東海村 JCO 臨界事故後に開発された原子力災害ロボットの中で、可動状態にあったのは、1.2.4 項で述べたように、原子力安全技術センタが青森県六ヶ所村の防災センタで運用していたモニロボ A とモニロボ B のみであった。福島第一原子力発電所の事故発生後、モニロボ A は、東京電力に貸与された（朝日新聞電子版 2011 年 3 月 16 日 22 時 47 分付け）。



図 60 モニロボ A

運搬・制御車に搭載されて、事故対応の拠点となっていた、福島県楡葉町の J-Village で待機していた。しかしながら、福島第一原子力発電所内は、瓦礫が飛散していたのに加えて、原子炉の冷却等に必要の仮設のケーブルやホースが多数敷設されていた。万一、モニロボ A が仮設のケーブルやホースを踏みつけてしまうと、これらを損傷させてしまい、原子炉の安定や冷却に支障をきたすことが懸念された。さらに、モニロボ A が瓦礫に乗り上げて転倒した場合、600kg あるロボットを人力では起こしなおすことができず、モニロボ A 自体が障害物となってしまうことが懸念され、結果として、モニロボ A の福島第一原子力発電所への投入は断念された。

6.2. 74 式戦車

福島第一原子力発電所では、水素爆発により多数の瓦礫が飛散していたことから、戦車を活用することが検討された。陸上自衛隊静岡県駒門駐屯地の 74 式戦車 2 両に、排土板を装着して、2011 年 3 月 20 日に 20 日午後出発し、J-Village で待機していた（図 61）（日経電子版 2011 年 3 月 20 日 19 時 44 分付）。



図 61 J-Village で待機する 74 式戦車

福島第一原子力発電所内は、前述のように原子力の安定や冷却のため、仮設のケーブルやホースが多数仮設されていた（図 62）。74 式戦車は約 38 トンあり、車体の重さでそれらを傷めるおそれがあることから、投入されることはなかった（NHK ニュース電子版 2011 年 3 月 21 日 21 時 8 分付け）。



図 62 事故直後の福島第一原子力発電所の状況

6.3. 無人建設重機

無人建設重機は、安全な場所にいるオペレータが、画像を見ながら遠隔操作で、土砂等を除去運搬することが可能な機材である。1993年6月3日に発生し、死者行方不明者43名を出した、九州雲仙普賢岳の火砕流事故をきっかけに、開発が始まった。無人建設重機は、火砕流や土石流の恐れが無い時は、オペレータが搭乗して有人操作も可能である。無人建設重機は、降雨に伴う土石流を予防するために河川に溜まっていた土砂を撤去する工事や、2000年の北海道有珠山噴火や、台風による水害などに、継続して使われ、実践での経験を踏まえた改良なども継続して行われていた。

福島第一原子力発電所事故では、無人建設重機（図63）が4月6日に投入され、放射線下で、水素爆発により敷地内に飛散した瓦礫の撤去作業を行った。



東京電力ホームページ： http://photo.tepco.co.jp/library/110411_1/110411_1f_system1_5.jpg ; 2017年3月12日アクセス)

図 63 無人建設重機

作業場所から約1km離れた場所に鉛で遮蔽を施した操作車を配置し、作業場所近傍

に配置した無線中継車やカメラ車と有線で結び、無線中継車を經由して、2台のバックホウ、1台のブルドーザおよび2台のクローラダンプ等合計8台の無人建設重機を遠隔操作して、瓦礫の撤去作業を行った（図64）。この無人建設重機による瓦礫撤去作業は、福島第一原子力発電所での、最初の遠隔操作による作業であった。

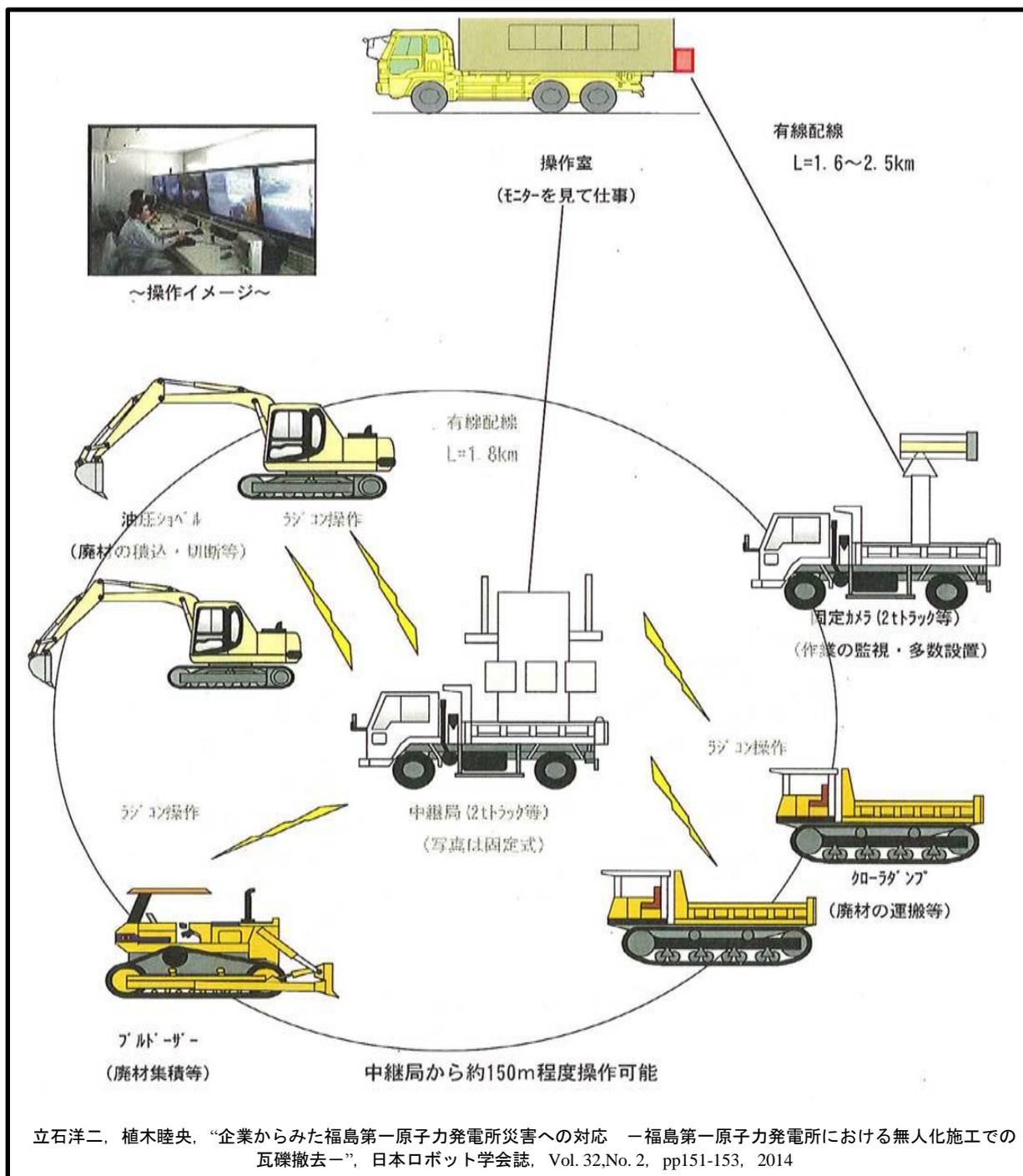


図 64 無人建設重機システム

6.4. T-Hawk

T-Hawk は、ハネウェル社で開発された、オペレーター一人で背負って搬送と操作が可能な、偵察用の小型無人飛行機である（図 65）。

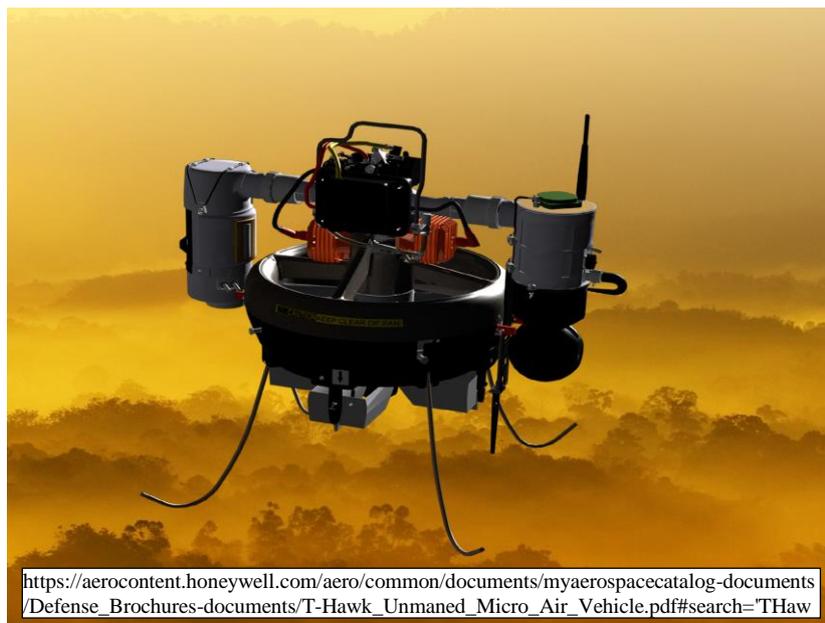


図 65 T-Hawk

福島第一原子力発電所事故では、原子炉建屋周辺の放射線量率が高くなったことから作業員が徒歩で近付くことが困難で、また、多くの瓦礫も飛散しており、トラック等で短時間だけ近づくことも困難であった。

水素爆発後の、原子炉建屋の状況や、瓦礫の飛散状況調査のために、2011年4月14日から用いられた。

2号機原子炉建屋では水素爆発は起きていなかったが、2011年3月12日の1号機水素爆発の際、原子炉建屋のブローアウトパネルが外れ開口部が出来ていた。そこから水蒸気と思われる白い煙が流れ続けていた。この煙の中に放射性物質が含まれているか、含まれているとすればどの程度かを調査するため、ダストとヨウ素を捕集できる小型のサンプラを搭載して2011年6月24日に2号機上空を飛行した。その際に、制御不能となり、2号機屋上に緊急着陸した（図 66）。

それ以降、緊急対応期間終了までは、T-Hawk を福島第一原子力発電所内で飛行させてはいない。



図 66 2号機屋上に緊急着陸した T-Hawk

6.5. Packbot

Packbot は、iRobot 社が開発した偵察用の小型ロボットである。ロボットと操作器をオペレータが1名で背負って運搬できるようになっている。これまでに数千台が生産され、アフガニスタン戦争やイラク戦争等の実戦の場で使われてきた実績を有するロボットである (図 67)。



図 67 Packbot

福島第一原子力発電所では、iRobot 社から 2 台の Packbot が、後述する Warrior とともに東京電力に提供された。3 月 21 日に日本に到着し、3 月 24 日に東京電力に引き渡され、iRobot 社員から東京電力職員等に、2.5 時間程度の操作訓練が行われた。

それまで、東京電力職員が原子力発電所内で、ロボットを運用することは殆どなく、ロボットの専門家もいない中、Packbot の操作訓練が行われた。操作訓練は水素爆発をおこした 1～4 号機とほぼ同型の 5 号機を利用して行われた。

福島第一原子力発電所事故の収束作業が進む中で、原子炉建屋内を調査する必要があるが出てきたが、原子炉建屋内に水素が残留している可能性あり、タービン建屋と原子炉建屋間の扉を開けると、再度水素爆発をおこすことが懸念され、Packbot 2 台で扉を開ける操作訓練が行われた。

2011 年 4 月 17 日、1 号機と 3 号機の原子炉建屋とタービン建屋をつないでいる扉を開放し、水素爆発後の原子炉建屋内部の状況を初めて調査することができた（図 68、図 69）。

その後も原子炉建屋内の調査に Packbot は頻繁に用いられた。しかしながら、5 号機での操作訓練の段階から、階段上での走行性能には限界があると判断されたことから、原子炉建屋 1 階での使用に限定されていた。



図 68 1 号機原子炉建屋に進入する Packbot



図 69 3号機原子炉建屋に進入した Packbot

6.6. Brokk

福島第一原子力発電所事故では、3号機の原子炉建屋上部で水素爆発が発生し、柱や梁の一部が崩落し、大物搬入口の上に落下した。その結果大物搬入口も崩壊し、大物搬入口全体を解体撤去する必要がある。また、他の飛散瓦礫も多く落下してきていたため、空間線量率が高くなり、作業員が近寄ることは不可能であった。

大物搬入口はトレーラが入る程度の幅しかなく、屋外に飛散した瓦礫を撤去回収した無人建設重機では大き過ぎ、作業性が悪くなることが懸念された。その結果、スウェーデンの BROKK 社製の Brokk-90 (図 70) 1台、Brokk-330 (図 71) 2台、BROKK-800D 1台 (図 72) の合計4台緊急輸入され、2011年5月10日から、3号



図 70 Brokk-90

機大物搬入口の解体工事が始まった。本工事には後述する Bobcat 社から提供された Bobcat2 台と、QinetiQ 社から提供された Talon 1 台とともに投入された。のちに Brokk-180 1 台も予備として準備されたが、実際に使用されることはなかった。



図 71 Brokk330



図 72 Brokk-800D

当初は **Talon** で作業全般を監視しながら、**Brokk4** 台で大物搬入口の解体や瓦礫の収集を行い、**Bbcat 2** 台で解体物や瓦礫の廃棄物容器への収納を行うことが想定されていた。作業が進んでいくと、監視作業は **Brokk-90** 等の **Brokk** ロボットで行い、解体物や瓦礫の廃棄物容器へ収納も **Brokk-330** 等の **Brokk** ロボットで行う様になった。

作業の分担が、このようになって行った背景として以下のようなことが考えられる。

- **Brokk** は無人建設重機と比べると小型ではあるものの建設重機であり、**Talon** のような小型の偵察ロボットで監視する視線が低く、**Brokk** や **Bobcat** と同じ程度の高さの視点からの監視が望まれたこと。
- **Brokk** も **Bobcat** も無人建設重機よりは小型ではあるものの、狭い作業エリアでは、6 台の小型建設重機は多すぎたこと。
- **Brokk** の多関節アームで解体物や瓦礫を廃棄物容器に収納できること。
- 複数社の機材は、それぞれ操作方法が微妙に異なり、オペレータの負担になっていたこと。
- 3 号機原子炉建屋の大型搬入口の解体撤去を行った企業は、早い段階から廃炉技術研究の一環として **BROKK** 社のロボットを導入して、操作訓練を行っていた実績があったこと。

なお、**Brokk** ロボットを福島第一原子力発電所に投入する前に、他のロボットと同様、ロボットの耐放射線性を検討する必要がある。第 4 章に述べる耐放射線性の概略評価を行うとともに放射線管理方策も検討し、その放射線管理方策を運用した。

また、試用期間が長期に及ぶことから、ロボットのメンテナンスのため、ロボットの除染を行う必要が発生した。そのため、第 5 章で述べるように、特に汚染密度が高い部位の測定と、汚染部位ごとの効果的な除染方法を考案した。この除染法方によりロボット表面等の汚染密度を低くすることができ、専門家によるメンテナンスを施すことが可能となった。

使用期間がさらに長期に及ぶ場合に備えて、2011 年 8 月には、電子回路の照射試験を行い、より精度高い耐放射線性の評価を実施した。

これらの結果から、**Brokk** では放射線損傷による故障は一度も発生しておらず、またメンテナンス不足による故障も起きていない。

6.7. Bobcat

Bobcat は **Bobcat** 社が開発したもので、無線通信で遠隔操作可能な小形無人重機である (図 73)。

福島第一原子力発電所事故発生後、Bobcat 社から東京電力に Bobcar2 台が提供され、3号機大物搬入口の解体撤去工事に用いられた。



図 73 Bobcat

6.8. Talon

Talon は QinetiQ 社が開発した偵察用のロボットで、Packbot よりも、一回り大きく（図 74），必要に応じてツールなどを追加設置できるようになっている

福島第一原子力発電所事故では Qinetiq 社から 1 台と、アメリカエネルギー省アイダホ国立研究所から 1 台が（図 75）提供された。



図 74 Talon



図 75 DOE/INL から提供された Talon

前者の Talon は、前述の Brokk や Bobcat とともに、3号機原子炉建屋大物搬入口の解体撤去工事に用いられた。

後者の Talon はアイダホ国立研究所で改造が施されており、放射線計測器と GPS（全地球測位システム）を搭載しており、別途、放射線計測用に用意された計測用 PC 上に映した GoogleMap 上に放射線計測をした位置をドットで示し、その時の放射線量率の計測結果をドットの傍に数値で表示するとともに、放射線量率の数値によってドットの色を青、緑、黄色、オレンジ、赤と変化させることができるようになっている。

6.9. Quince

Quince 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とが協力して開発した災害対応ロボットである（図 76）。機体本体のほぼ全てをクローラで覆われており、高い走行性能を有しており、瓦礫上や階段などでも走破することができた。

福島第一原子力発電所事故の緊急対応に投入するにさいして、無線の通りにくい原

子炉建屋内でも通信が可能なように、ツイストペアケーブルへの改造などが施された。

さらに **Quince** は、**Packbot** では行わなかった階段の昇降を行い、原子炉建屋の地下階や上層階に階段をいくことが期待された。一方で地下階や上層階は原子炉建屋 1 階と比べてより高い放射線量率であることも想定された。そのため、第 6 章に述べるように、耐放射線性の概略評価に加えて、電子回路に用いる部品レベルでの照射試験を行い、より精度の高い耐放射線性評価を行った。

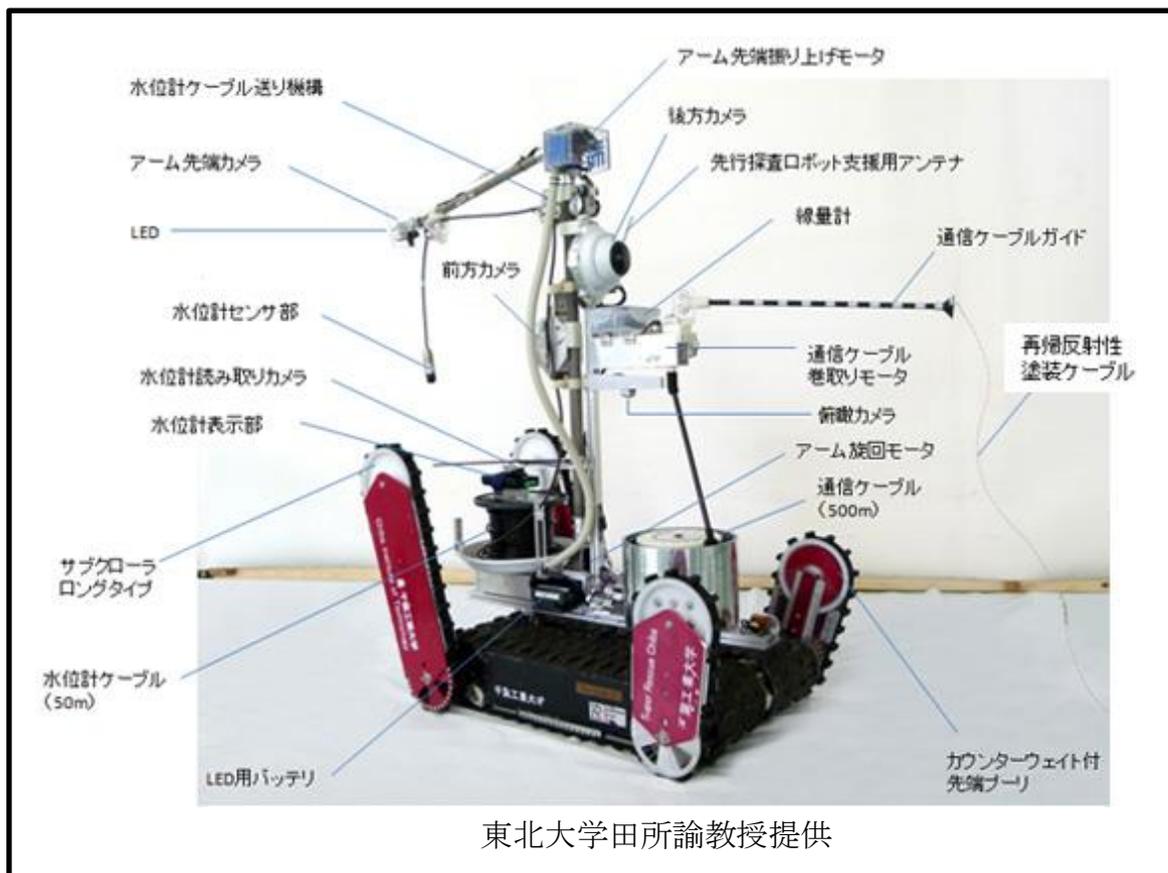


図 76 Quince

その結果、原子炉建屋内の上層階に行くことができた最初のロボットである。地下階への階段は踊り場の幅が狭くロボットが回転できなかったこと、また一部の階段では、水素爆発により手摺が内側に曲がってしまって障害となっていけなかったが（図 77），殆どの階段を走破することができたロボットである。



図 77 3号機の2階から3回への階段

2011年10月20日には2号機5階のオペレーションフロアまで到達することができ、原子炉の直上部にあたる部位で880mSvという高い放射線量になっていることが判り、2号機では放射線物質が水蒸気とともに原子炉上部から漏れ出て、1号機の水蒸気爆発で外れたブローアウトパネルから原子炉建屋外に放出されたことを裏付けることができた。5階オペレーションフロアからの帰路、通信ケーブルの断線と思われる故障に見舞われ、未帰還となった。

6.10. Warrior

Warrior は iRobot 社が，重量物の運搬や負傷兵の救護を想定して，開発したロボットで（図 78），これまでに 50 台程度が製造されている。

福島第一原子力発電所事故では，Packbot とともに 3 月に東京電力に提供されたが，すぐに活用されることはなかった。



図 78 Warrior

前述の 3 号機大物搬入口の解体撤去工事終了後も，3 号機の原子炉建屋内の放射線量が大きく，床に堆積している粉じんに放射性セシウムが付着していることが原因と考えられ，この粉じんを取り除くため清掃システムが準備された（図 79）．このシステムは大型の掃除機のようなもので，Warrior が先端部を把持して，ホースを引きずりながら走り回って，床に堆積をした粉じんを除去した（図 80）．

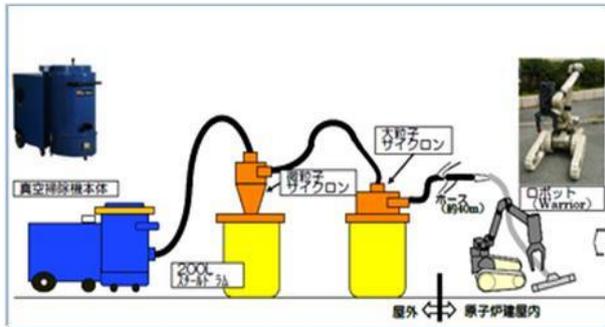


図 79 Warrior による清掃システム



図 80 3号機南側で清掃（除染）する Warrior

6.11. JAEA-3

JAEA-3 号は東海村 JCO 臨界事故後に開発された屋内用調査ロボット RESQ-A2 台

のうちの1台を改造したものである。福島第一原子力発電所事故後に、不可動であることを確認後、製造したメーカーに修理を依頼したが、当該メーカーの工場も被災しており、修理を断られた。そのため日本原子力研究開発機構で改造された（図 81）。

RESQ-Aは無線通信で操作可能なロボットであったが改造に際しては、スリーマイルアイランド原子力発電所事故の除染作業のためにロボットの例に倣った。具体的には、ロボット本体には、半導体を用いず、モータドライバを含む電子回路は操作卓側に配置してその間を有線で結んだ。これにより耐放射線性が10,000Sv オーダーまで向上させることができるほか、作業が長引いても、バッテリー切れを心配することなく使用が可能になるほか、万が一故障した場合はケーブルを引っ張ることでロボットを回収できるように計画された。

有線ケーブルは、専用ケーブルを特注で製造する時間がなかったことから、通信系のLANケーブルと動力系の複合ケーブルとを束ねて、ケーブルカバーで覆った。そのため、ケーブル径が25mm程度になり、ロボットがケーブルを引きずって進む必要があったことから、ロボットの走行性能は、RESQ-Aの時と比べて明らかに劣った。一方で、重く太いケーブルを引きずっていくが故の劣った走行性能であったが、オペレータの技量の違いにより、ロボットの動きに差が大きかったことも、試験や操作訓練の過程で判明した。

JAEA-3号ロボットにはガンマ線可視化計測装置も搭載していた（図 82）。



図 81 JAEA-3号



図 82 ガンマカメラの画像

6.12. 福島第一原子力発電所事故の緊急時対応ロボットのまとめ

本節では、第 2.5 節での調査結果と、公開されている参考文献（表 2）等を基に、事故発生後、原子炉の冷温停止と放射性物質の大量放出が無いことが確認されて野田内閣総理大臣（当時）が事故収束宣言を発生するまでの緊急時対応期間に、どのようなロボットが投入され、どのようなオペレーションが行われ、どのようなトラブルに見舞われたかを整理する。

表 2 参考文献

参考文献	
1	立石洋二，植木睦央，“企業からみた福島第一原子力発電所災害への対応 — 福島第一原子力発電所における無人化施工での瓦礫撤去—”，日本ロボット学会誌，Vol. 32,No. 2, pp151-153, 2014
2	Shinji. KAWATSUMA, Mineo FUKUSHIMA and Takashi OKADA “Emergency response by robots to Fukushima-Daiichi accident: summary and lessons learned” Industrial Robot: An International Journal (2012)
3	第 34 回原子力委員会資料第 1-5 号； http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2012/siryo34/siryo1-5.pdf (2016.10.14 アクセス)
4	運用実績の収集・アーカイブ化； http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/130426/130426_01h.pdf (2016.10.14 アクセス)

6.12.1 緊急時対応期間中の投入ロボット数

緊急対応期間中に投入されたロボットを（表 3）に整理した。

表 3 福島第一原子力発電所事故の緊急時対応期間に投入されたロボット等

	ロボットの用途		名称等	台数
	瓦礫撤去	屋外	作業	無人重機
屋内		調査（監視）	Talon	1 台
		作業	BobCat	2 台
		作業	BROKK	4 台
調査	屋外	調査	T-Hawk	2 台
		調査	Talon	1 台
	屋内	調査	Packbot	2 台
		調査	Quince	1 台
		調査	JAEA-3	1 台
除染	屋内	作業	Warrior	1 台

緊急対応で投入されたロボット 23 台中、約 7 割の約 16 台が瓦礫除去や除染の走行型の作業用で、約 2 割の約 5 台が走行型の調査用、約 1 割の 2 台が飛行型の調査ロボットであった。

投入されたロボットの 7 割が瓦礫撤去などの作業用であったのは、当初は屋内外に飛散した高放射線性の瓦礫を撤去して、空間線量率を下げるとともに、より小型の調査用ロボットのアクセス路を確保することが必要だったことによるものと思われる。

6.12.2. 緊急時対応期間中のロボットオペレーション

緊急時対応期間中のロボットによるオペレーションを表 4 に整理した。

表 4 福島第一原子力発電所事故の緊急時対応期間中のロボットオペレーション

	日付	場所	ロボット	作業内容等
1	4/6~	屋外	無人建設重機 8台	敷地内の瓦礫撤去 (詳細は不明, 2-30 オペレーションと推定)
2	4/14	1号機周辺	T-Hawk	1号機の上空からの空撮
3	4/15	1,3,4号機周辺	T-Hawk	1,3,4号機の上空からの空撮
4	4/17	1u, 1F	Packbots	1号機原子炉建屋内調査
5	4/17	3u, 1F	Packbots	3号機原子炉建屋内調査
6	4/18	2u, 1F	Packbots	3号機原子炉建屋内調査
7	4/21	1u	T-Hawk	1号機の上空からの空撮
8	4/26	1u-1F	Packbots	1号機原子炉建屋内調査
9	4/27	1-4号機	T-Hawk	1-4号機の上空からの空撮
10	4/29	1u, 1F	Packbots	1号機原子炉建屋内調査
11	5/2~	屋外	Talon	原子炉建屋周辺の空間線量率 マップ作成 (詳細は不明, 10数オペレーションと推定)
12	5/10~	3u, Truck Lock	Talon Bobcat 2台 Brokk-90 1台 Brokk330 2台 Brokk-800D 1台	3号機大物搬入口崩壊部の撤去 (詳細は不明, 2-30 オペレーションと推定)
13	5/10	3u, 1F North	Packbots	1号機原子炉建屋内北側調査
14	5/13	1u, 1F South	Packbots	1号機原子炉建屋内南側調査
15	6/3	1u, 1F South	Packbots	1号機原子炉建屋内南側調査
16	6/24	2u	T-Hawk	2号機海側壁際でのダストサンプリング, 飛行中に制御不能になり, 2号機屋上に緊急着陸.
17	6/24	3u, 1F South	Packbots	3号機原子炉建屋内南側調査

18	6/24	3u, 1F South	Quince	1号機原子炉建屋地下1階への階段を降りて水位計の設置, 踊り場での旋回不能
19	7/1	3u, 1F South	Warrior	3号機原子炉建屋内南側の床面清掃
20	7/2	3u, 1F South	Packbots	3号機原子炉建屋内南側調査
21	7/6	3u, 1F South	Warrior Packbots	3号機原子炉建屋内南側での作業監視
22	7/8	3u, 1F South	Packbots	3号機原子炉建屋内南側での調査
23	7/8	2u, 1-3F	Quince	2号機原子炉建屋内1-3階の調査
24	7/12	3u, 1F South	Packbots	3号機原子炉建屋内南側での監視調査
25	7/22	3u, 1F North East	Packbots	3号機原子炉建屋内北東部調査
26	7/26	3u, 1-2F	Quince	3号機原子炉建屋内1階から2階に走行途中で障害物のため調査中断
27	9/22	2u, 1F	Quince	2号機原子炉建屋内1階調査
28	9/23	2u, 1F	JAEA3 Packbot	2号機原子炉建屋内でのガンマ線可視化計測装置による放射線計測
29	9/23	3u, 1F	Packbots	3号機原子炉建屋内調査
30	9/24	3u, 1F	Quince	3号機原子炉建屋内調査
31	10/13	1u, 1F	Packbots	1号機原子炉建屋内調査
32	10/20	2u, 1-5F	Quince	2号機原子炉建屋内1-5階調査, 帰路で通信ケーブル断線による故障, 未帰還
33	11/2	3u, 1F	Warrior Packbot	3号機原子炉建屋内1階障害物調査
34	11/3	3u, 1F	Warrior Packbot	3号機原子炉建屋内1階障害物調査
35	11/14	3u, 1F North East	Packbots	1号機原子炉建屋内北東部調査 機器ハッチレール部のたまり水 ふき取り作業

36	11/17	3u, 1F North East	Packbots	1号機原子炉建屋内北東部調査機器ハッチレール部のたまり水ふき取り作業
37	11/18	3u, 1F North East	Packbots	1号機原子炉建屋内北東部調査機器ハッチレール部のたまり水ふき取り作業
38	11/19	3u, 1F North East	Packbots	1号機原子炉建屋内北東部調査機器ハッチレール部のたまり水ふき取り作業

緊急対応期間中にロボットで行われたオペレーションのうち、No.1, No.11, No.12 オペレーションについては、複数日にわたって、複数回のオペレーションが行われたものであるが、東京電力のホームページ等の公開文献でオペレーションの概要が明らかでない。

緊急対応期間中に行われたロボットによるオペレーションのうち、各オペレーションの概要が明らかなものは35オペレーションである。

この35オペレーションのうち、14%の5オペレーションは飛行型調査用ロボット T-Hawk によるもので、80%の23オペレーションが走行型調査用ロボット Packbot によるものであり、17%の6オペレーションが走行型調査用ロボット Quince によるものであった。

走破性がより優れている Quince によるオペレーションが17%に対し、Packbot が80%のオペレーションに投入されている。この理由としては以下のようなものが考えられる。

- Packbot は4/17からの8か月間に2台投入されていたのに対し、Quince は研究開発段階の調査用ロボットで、福島第一原子力発電所の事故現場での状況に合わせた改造とオペレータの教育訓練に時間がかかり、6/24の投入から、9/24の通信ケーブル断線で未帰還となる3か月間であったこと。
- Packbot は5000台以上生産され、実践経験が豊富で、それらの経験をフィードバックした改良が施されて完成度が高かったこと。
- Packbot は一人で背負って搬送できるようになっており、汚染して体に密着させて搬送できない場合でも担架を用いて2人で搬送できたこと。
- Packbot は早い時期から投入されており、事故前はロボットを操作したことのないオペレータには、最初に操作方法を覚えたロボットの方が操作するうえでの安心感があったと思われること

6.12.3. 緊急時対応期間中のロボットトラブル等

第一原子力発電所事故の緊急対応期間中に投入されたロボットで、未帰還機等のトラブル内容を表 5 に示す。

表 5 緊急対応期間中に投入されたロボットのトラブル等

	ロボット名	用途	トラブル内容
未帰還機	T-Hawk	調査	制御不能
	Quince	調査	通信ケーブル断線
その他	JAEA-3	調査	太径ケーブルによる走行性不良

緊急対応で投入されたロボットで、未帰還に至るあるいは重篤なトラブルを経験したのは T-Hawk、Quince と JAEA-3 号の 3 台でありいずれも調査用ロボットである。

走行型調査用ロボットの 2 台について見ると、いずれも研究開発段階あるいは故障ロボットを緊急に改造したものであり、実践経験やモックアップ試験等からのフィードバックによる改良が十分ではなかった可能性がある。

