

原子力発電所の事故対策に求められる ロボット技術

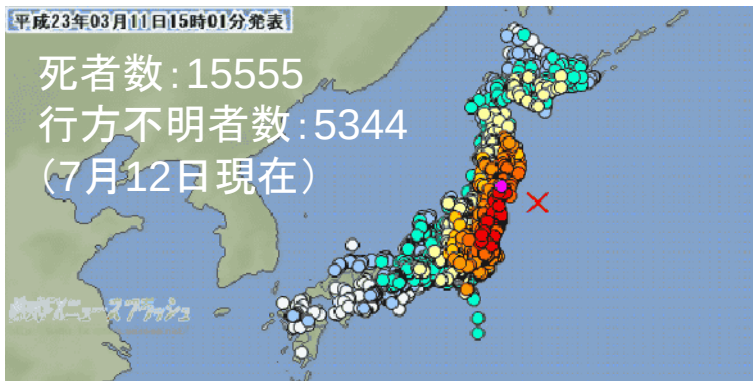
対災害ロボティクス・タスクフォース 主査
リモートコントロール化特別プロジェクトチーム
東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻
浅間 一

<http://www.robot.t.u-tokyo.ac.jp/asamalab/>

東日本大震災(地震, そして津波)

地震

- 2011年3月11日14:46
- マグニチュード:M9.0
- 最大震度:7



津波

- 30分~1時間後
- 最大波高:23[m]



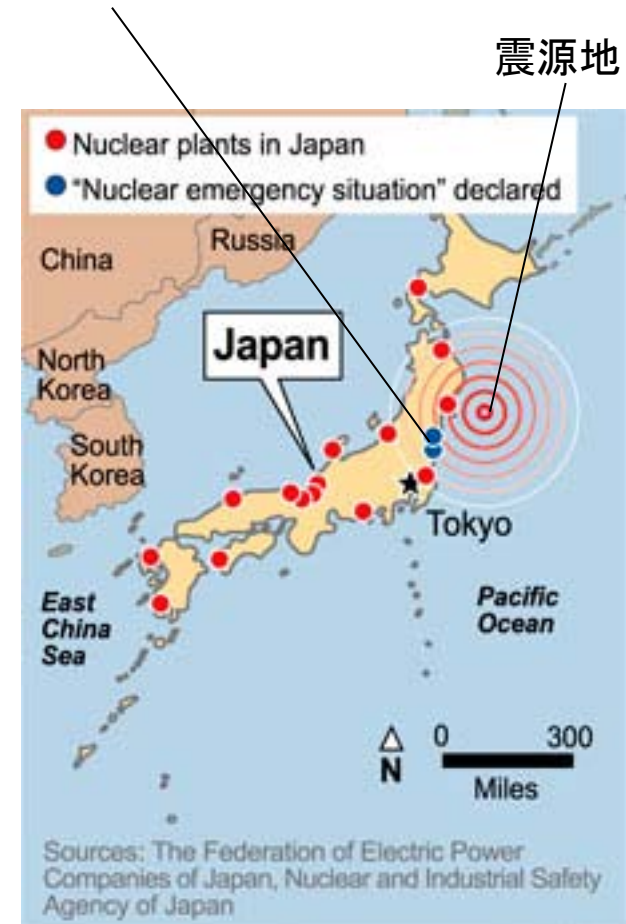
阪神淡路大震災

M7.3 死者数および行方不明者数:6437

福島第一原子力発電所事故

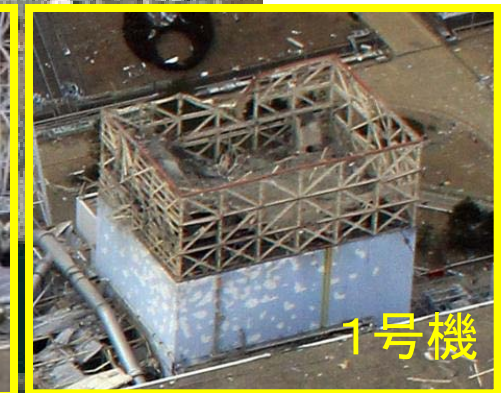
- 地震発生 (14:47)
- 電源停止
- 非常用ディーゼル発電機作動
- 原子炉停止 (SCRAM)
- 津波襲来
- 燃料タンクおよび発電機被災
- 全交流電源喪失(SBO: Situation of Black Out) (15:39)
- 原子炉および燃料貯蔵プールの冷却系異常
- 冷却水の減少
- メルトダウン
- 水素爆発(3月12日～14日, 1, 3, 4号機)

福島第一原子力発電所



By Janet Loehrke, USA TODAY

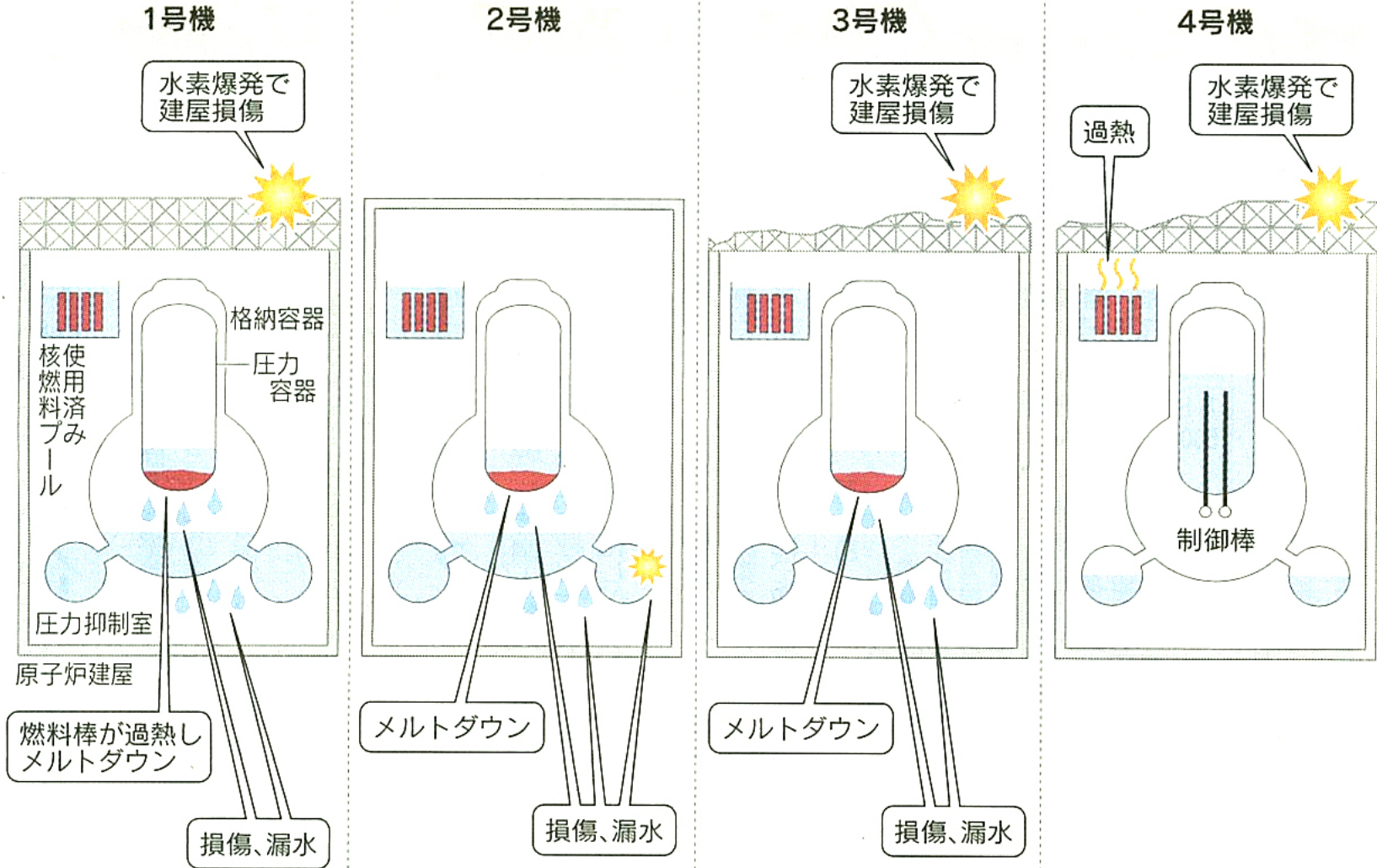
現状



各原子炉の状況

日本経済新聞

福島第1原発1～4号機の状況



福島第一原子力発電所災害対策復旧特別PT



特別PT:

- (1) 放射線遮蔽・放射性物質放出低減対策(中長期対策)
- (2) 放射線燃料取り出し・移送
- (3) リモートコントロール化
- (4) 長期冷却構築
- (5) 放射性滞留水の回収・処理
- (6) 環境影響評価

当面の取り組み(課題／目標／主な対策)のロードマップ 6/17改訂版

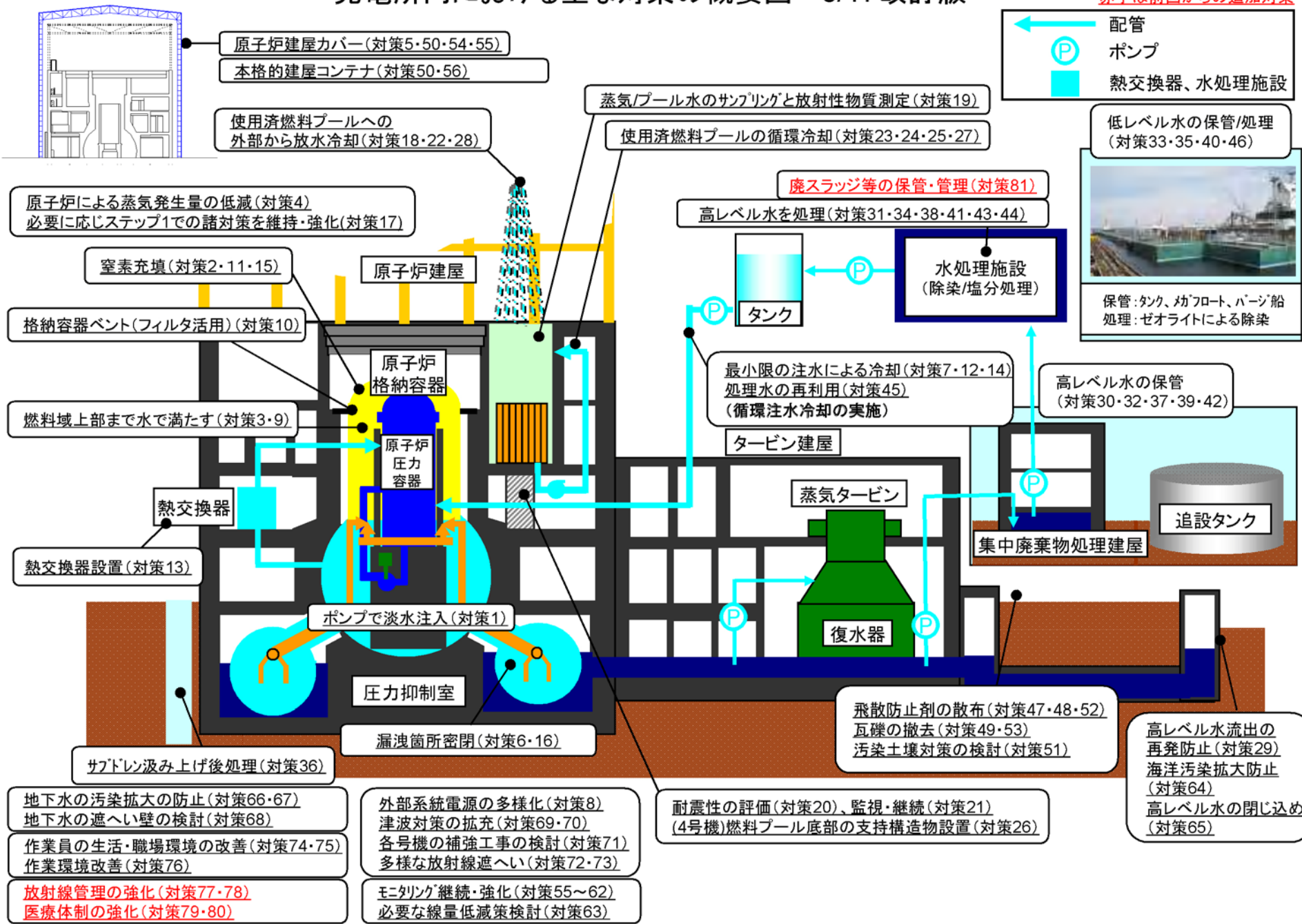
①

赤字:前回からの追加点、青字:変更点

課題		初回(4/17)時点	ステップ1(3ヶ月程度) ▼現時点(6/17)	ステップ2 (ステップ1終了後3～6ヶ月程度)	中期的課題
I. 冷却	(1) 原子炉	淡水注入	最小限の注水による燃料冷却(注水冷却) 滞留水再利用の検討／準備 窒素充填 格納容器漏洩箇所の密閉の検討／実施 作業環境改善	循環注水冷却(開始) 安定的な冷却 循環注水冷却(継続) 格納容器冠水 熱交換機能の確保	冷温停止状態 構造材の腐食破損防止 ※一部前倒し
	(2) 燃料プール	淡水注入	注入操作の信頼性向上／遠隔操作 循環冷却システム(熱交換器の設置)	注入操作の遠隔操作 熱交換機能の検討／実施	より安定な冷却 燃料の取り出し
II. 抑制	(3) 滞留水	放射性レベルの高い水の移動 放射性レベルの低い水の保管	保管／処理施設の設置 保管施設の設置／除染処理	保管／処理施設拡充 除染／塩分処理(再利用)等 廃スラッジ等の保管／管理 海洋汚染拡大防止	減汚染水全体の低 本格的な水処理施設の設置 建屋内滞留水の処理完了 廃スラッジ等の処理 海洋汚染拡大防止(継続)
	(4) 地下水		地下水の汚染拡大防止	海洋汚染拡大防止 (保管／処理施設拡充計画にあわせてサブドレン管理) 地下水の遮へい壁の検討	海洋汚染拡大防止 汚染土壌の固化等 地下水の遮へい壁の構築
	(5) 大気・土壌		飛散防止剤の散布 瓦礫の撤去	飛散抑制 原子炉建屋カバーの設置(換気システム付) 原子炉建屋コンテナの検討	飛散抑制(継続) 原子炉建屋コンテナ設置
	III. 除染モニタリング	⑥ 低減・測定公表	発電所内外の放射線量のモニタリング拡大・充実 はやく正しくお知らせ	避難指示／計画的避難／緊急時避難準備区域の放射線量を十分に低減	環境の安全性を継続確認・お知らせ
IV. 対策等	(7) 余震・津波・他	余震・津波対策の拡充、多様な放射線遮へい対策の準備	拡大防止 (4号機燃料プール)支持構造物の設置	拡大防止 各号機の補強工事の検討／実施	拡大防止 各号機の補強工事
V. 環境改善	(8) 生活・職場環境		作業員の生活・職場環境の改善		作業員の生活・職場環境改善(継続)
	(9) 放射線医療・管理			放射線管理・医療体制の改善	放射線管理・医療体制改善(継続)

発電所内における主な対策の概要図 6/17改訂版

赤字は前回からの追加対策



原子力発電所の事故対応・復旧における ロボットのニーズ

ミッション

- － 冷却系の安定化・冷温停止
- － 封じ込め
- － 廃炉・解体
- － 現場作業員の被爆の低減

・タスク

- － 瓦礫除去
- － サーベイマップの自動作成(放射線測定)
- － 建屋(原子炉建屋, タービン建屋)内調査(画像, 温度, 湿度, 酸素濃度, 等)
- － 計測機器などの設置, サンプル採取
- － 遮蔽, 除染
- － 機材の運搬
- － 配管・機器の設置

ROBOTADとは

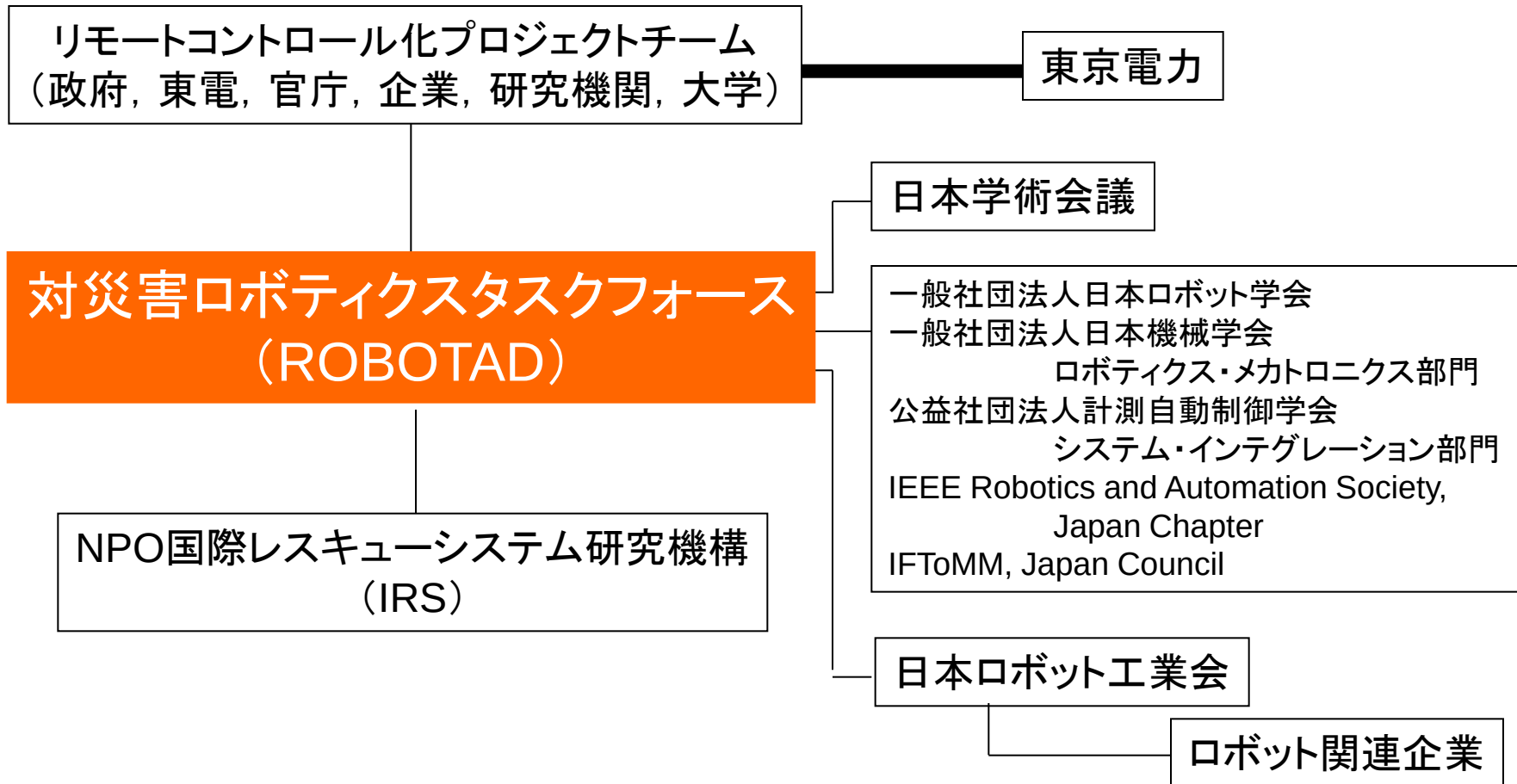
ROBOTics Task force for Anti-Disaster
(ROBOTics - Temporary Active Duty)
<http://roboticstaskforce.wordpress.com/>

Anchorman: 中村仁彦

Chairman: 浅間 一

- 3月31日設立. ロボット技術に関する専門家・科学者集団
- 東日本大震災と福島原子力災害の対応・復旧・復興のためのロボット技術適用
- 主な活動内容(緊急性の高い活動)
 - 動作環境やミッションに応じた最適なロボット技術・ソリューションの提供
 - 現場での補強, 改造も含めた導入・運用における実働支援
 - そのための技術情報の発信
- これまでの実績
 - ロボット技術導入のための具体的技術的検討(耐放射線機能, 走破性, 通信, 等)
 - HPによる技術的情報や導入実績などの発信
 - リモートコントロール化PTへの協力
- 関連5学会・日本学術会議・産業界との連携
- 窓口: 国際レスキューシステム研究機構(IRS)

ROBOTADの位置づけ



日本ロボット技術関連学術団体共同声明(4月4日)

東日本大震災およびそれに伴う福島原子力災害に対する 日本のロボット技術の適用に関する声明

一般社団法人日本ロボット学会
一般社団法人日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門
公益社団法人計測自動制御学会システム・インテグレーション部門
IEEE Robotics and Automation Society, Japan Chapter
IFTToMM, Japan Council

東日本大震災およびそれに伴う福島原子力災害への対策およびそれからの復興に向け貢献するとの強い決意のもと、ロボット技術に関連する学術団体が専門の観点から技術上の問題ならびにその適用と運用の方策などに関して発言する。

わが国には災害対策にかかわるロボット技術の研究開発の蓄積がある。また、わが国のロボット技術関連学術団体は世界の災害対策に関わるロボット技術にも深く関与しており、世界の研究開発機関との密接な協力体制も築いてきた。東日本大震災およびそれに伴う福島原子力災害の対策措置および復旧・復興に対しても、活用可能なロボット技術は数多く存在する。そこで、東日本大震災と福島原子力災害への対策およびそれからの復興に対して国内外のロボット技術を早急に役立てるべく、日本ロボット技術関連団体は、最先端のロボット技術とそれに関与する科学者・技術者を総動員し、日本学術会議および産業界と連携しながら*1、動作環境やミッションに応じた最適なロボット技術の提供、現場での補強、改造も含めた導入・運用における実働支援、そのための技術情報の発信を、迅速かつ積極的に行う。

技術的情報に関しては、各学術団体のホームページ*2等で逐次発信するとともに、情報共有・意見交換の場を設ける。

なお本件に関しては、超学会組織「対災害ロボティクス・タスクフォース」*3が担当し、「特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構」*4を窓口とする。

ロボット関連の産・学の動向

学の活動

- 日本学術会議
 - 4月13日緊急提言
- 総合科学技術会議
 - 第4期科学技術基本計画の見直し
- 日本ロボット学会
 - 東日本大震災関連委員会
- 日本機械学会
 - 東日本大震災調査・提言分科会

産の活動

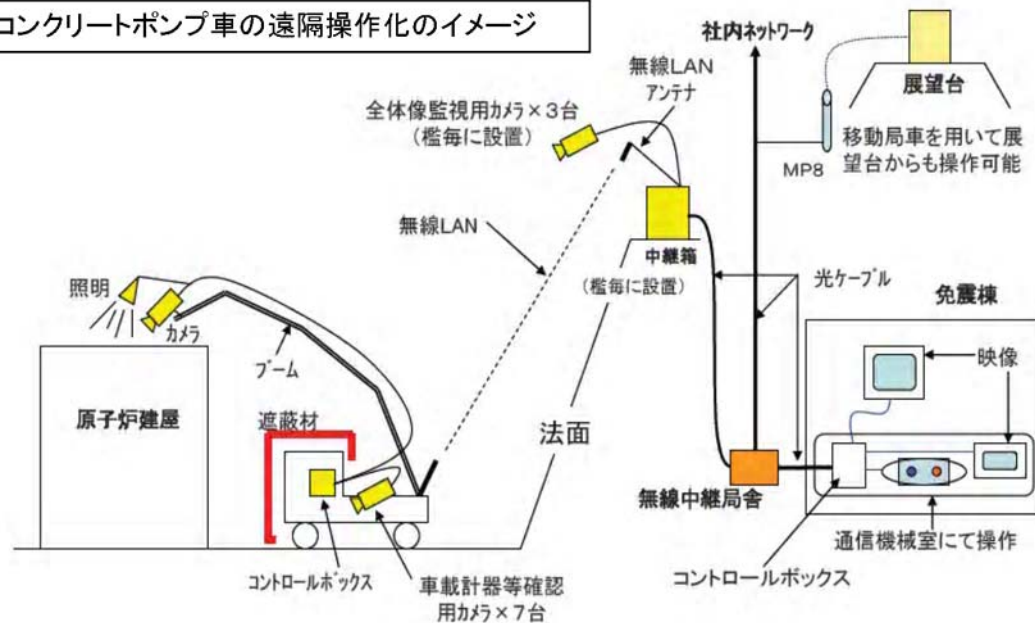
- 日本経団連
 - COCN(産業競争力懇談会)
 - プロジェクト災害対応ロボットと運用システムのあり方」
- ロボットビジネス推進協議会
 - 復興支援とRT活用WG

コンクリートポンプ車による 注水の自動化

- 3月22日 4号機に注水開始
- 現在, 1, 3, 4号機において
キリン等による注水



コンクリートポンプ車の遠隔操作化のイメージ



(東京電力提供)

ブーム先端へのカメラ等の設置



4号機 "ぞうさん2号" による注水状況

無人化施工機械の導入

- 4月6日 瓦礫処理無人化施工開始
- 大成建設・鹿島建設・清水建設JV
- 使用機械 (4/6導入台数／総予定台数)
 - バックホウ(アイアンフォーク) (1台／2台)
 - バックホウ(ニブラ) (0台／1台)
 - クローラダンプ(11t) (1台／3台)
 - オペレータ車 (1台／2台)
 - カメラ車 (1台／9台)

(東京電力提供)



処理前



コンテナ１個分の処理後



積み込み時配置



ガレキ積み込み



コンテナふた

ガレキ積み込み作業（約２時間）



仮置き場設置作業



仮置き場状況（コンテナ周辺約 2.5mSv/h）

移送・仮置き場設置作業（約１時間）



定置時配置



遠隔操作重機によるガレキ撤去作業

(撤去前)

(コンテナ: $3.2 \times 1.6 \times 1.1\text{m}$ 、約 4m^3)

1号 原子炉建屋周辺

(撤去後)



(仮置の瓦礫収集コンテナ)

(東京電力提供)

小型無人ヘリコプターの導入

- 4月10日 小型無人ヘリコプターによる空撮開始
- 1～4号機原子炉建屋, タービン建屋およびその周辺を撮影
- 使用機械
 - ハニーウェル社(Honeywell(米))製 T-Hawk
 - 操縦範囲:10km程度
 - 航続時間:50分
 - 映像撮影:可動式カメラ・赤外線カメラによる夜間撮影や操作端末への動画伝送など
 - 飛行性能:ホバリングによる空中静止。GPSによる自律飛行・マニュアル飛行が可能。

(東京電力提供)



ハニーウェル社(Honeywell(米))製
T-Hawk



離陸



操作室



1号機南東角建屋カバー柱



3号機西側より建屋内部



4号機東側より建屋内部

Packbotの導入

- 4月17, 18日 Packbot導入
 - 原子炉建屋内の放射線量・雰囲気温度・雰囲気湿度・酸素濃度の測定
- 使用機械
 - iRobot社製Packbot 2台
 - 寸法:長さ70×幅53×高さ(アーム格納時)18 [cm]
 - 重量:35[kg]
 - 機能:各種モニタリング(放射線量, 温度, 湿度, 酸素濃度), カメラ, マニピュレータ



パックポットによる
原子炉建屋の現場確認

(東京電力提供)



Packbot



Packbotが二重扉を開ける様子



二重扉出口付近



1号機原子炉建屋1階



2号機原子炉建屋1階



3号機原子炉建屋1階

ロボット操作車 (TEAM NIPPON)

日本原子力研究開発機構

- 放射線計測やロボット操作を迅速かつ安全に行えるよう、トラックバンに鉄板80mm遮へいオペレーションBOX、発電機等を装備
- オペレーションBOXは、ガンマカメラ、監視カメラ、照明、テレテクタ等を装備
- オペレーションBOX内からは、ガンマカメラ等による線源特定や、ロボットを遠隔操作しての線量計測や安全確認が可能



(↑)ロボット操作車の外観

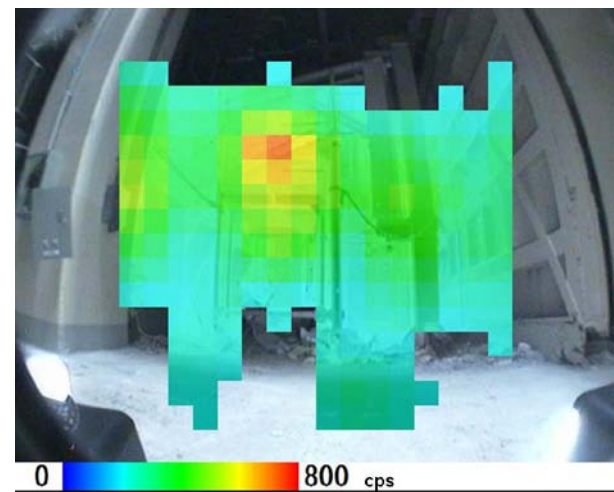
(←)ロボット操作車の装備

γ カメラによる放射線源・線量測定

- 5月22日 γ カメラを搭載したロボット導入・計測



(東京電力提供)



Quinceによる サンプリング・水位計設置ミッション 6月24日



福島第一2号機原子炉建屋 線量率の測定結果(7月8日実施)

平成23年 7月11日
東京電力株式会社

ロボットの移動経路
カメラの方向

水圧制御
ユニット付近

1階北東階段前

1階→2階の途中

前方 原子炉補機
冷却系熱交換器

前方 格納容器

2階北東階段前

3階北西階段前



21mSv/h



27mSv/h



35mSv/h



50mSv/h



27mSv/h

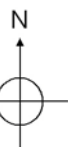


40mSv/h

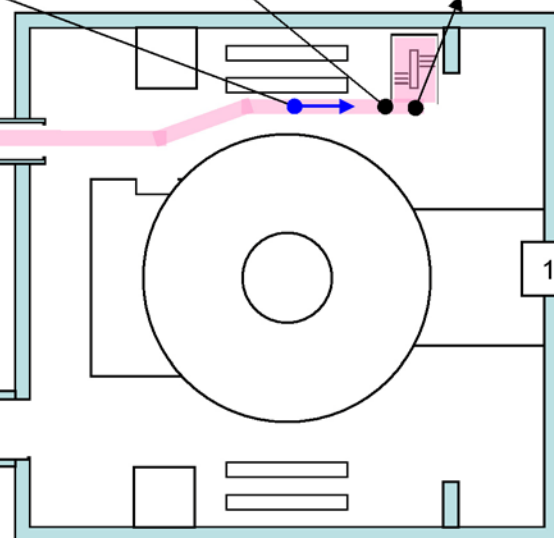


10~12mSv/h

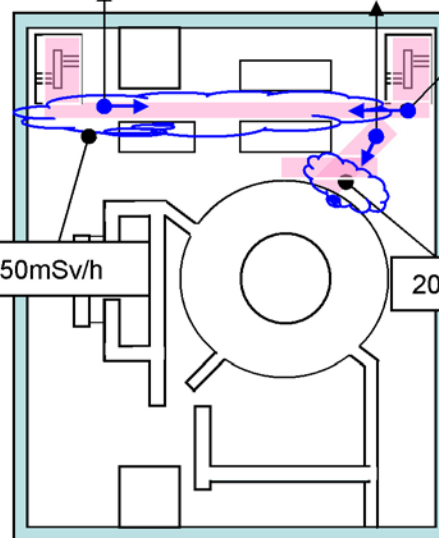
非常用扉



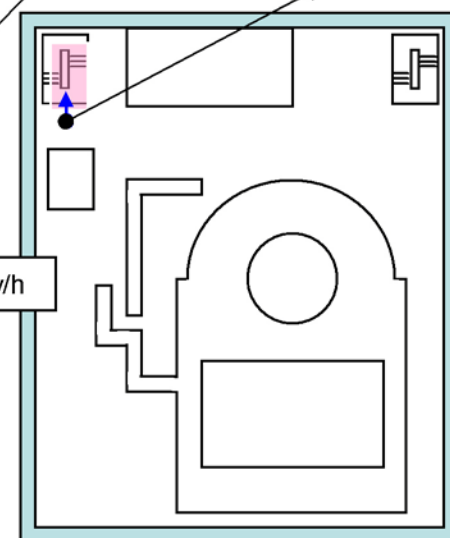
大物搬入口



【1階】



【2階】



【3階】

建屋配置はイメージ (縮尺や配置などは正確ではありません)

福島第一原子力発電所3号機原子炉建屋 Warriorによる清掃作業

(7月2日)

東京電力提供



残されている課題

- 線量・湿度などのモニタリング
- 配管や弁などの状態の把握（遠隔撮影）
- 除染・遮蔽
- 機材の運搬
- 安定冷却のための機器設置
- 建屋カバーの設置
- 燃料の取り出し
- 廃炉・解体

今後導入候補として考えられるロボット

協力：国際レスキューシステム研究機構(IRS)

Packbot



T-Hawk



無人化施工



RMAX



KOHGA3



Talon



Babcat



Quince/Kenaf



モニロボ



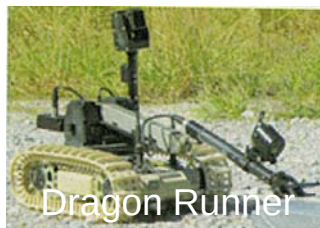
UMRS



Warrior



Dragon Runner



双腕式油圧ショベル



FRIGO-M



蒼竜



Brokk 90



援竜



Paro



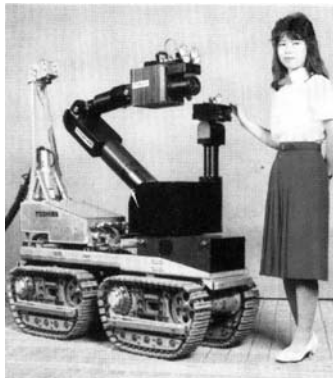
ロボットの現場導入に関する検討事項

- ロボット技術の安易な導入の問題点
 - 現場における機能不全・動作不能・障害物化, 他の作業の妨げ
- 検討事項
 - ロボットに行わせる作業・ミッションの決定
 - 環境条件の調査
 - 空間の広さ, 瓦礫・障害物, 水, 温度, 湿度, 照明条件など.
 - 放射線量
 - ソリューションの決定
 - 適用するロボット技術の選択, 補強・改造・開発
 - 導入計画(被爆許容量の見積, 放射線量の低いエリアからのアクセス, 作業時間の短縮)
 - リソースの競合解消(他の作業との空間的競合, 無線周波数の競合)
 - 準備
 - オペレータによる訓練
 - 操作室の設置・ロボットの退避・除染場所の確保
 - 電源や通信(有線の場合)ケーブルの引き回しの決定
 - マッピング
 - 運用
 - 運用(被爆量のモニタリングと評価)
 - 除染・バッテリー交換・メンテナンス
 - オペレータの被爆低減

原子力ロボット関連プロジェクト

- これまで行われた原子力関連のプロジェクト
 - 原子力プラント点検ロボット(通産省)
 - 極限作業用ロボット(通産省)
 - 原子力基盤技術開発(科学技術庁)
 - JCO 対策原子力防災ロボット(通産省, 科学技術庁, 日本原子力研究所, 原子力安全技術センター, 原子力プラントメーカー)

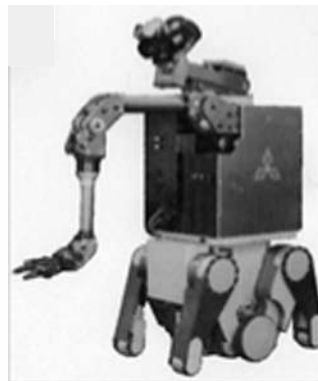
原子力関連点検・作業ロボット



格納容器内点検用ロボット
(東芝)



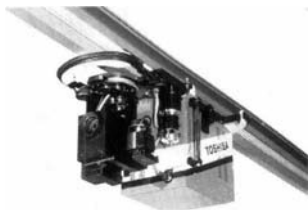
AIMARS
知能作業ロボット
(東芝)



格納容器点検作業ロボット
(三菱重工業)



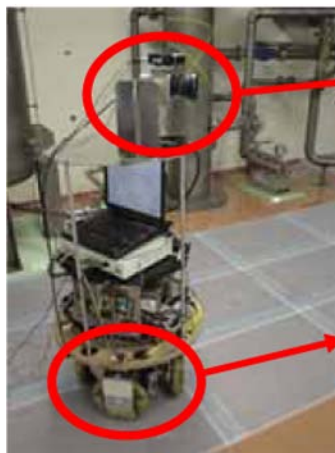
極限作業ロボット
(原子力発電施設作業用)
(複数社, 1983-1990)



モノレール式
点検ロボット



水中
点検ロボット



CCDカメラ、熱画像カメラ
チルト: $-45^{\circ} \sim 90^{\circ}$
パン: $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$
(いずれも水平前方向を原点)



電流センサー、傾斜角
センサー、エンコーダー等



原子力基盤技術原子力用人工知能
(点検用)
(複数研究機関, 1999-2003)

原子力防災支援システム(JCO対策) (プラントメーカー各社, 2001)



MARS-A
(作業用)
(三菱重工業)



MARS-T
(重量物運搬用)
(三菱重工業)



SMERT-K
(作業監視支援用)
(東芝)



SMERT-M
(作業監視支援用)
(東芝)



MENHIR(耐高放射線性対応用)
(仏サイバネティクス)



SWAN(小型軽作業用)
(日立製作所)



情報遠隔収集ロボット(JCO対策) (日本原子力研究所, 2001)



RESQ-A
初期情報収集ロボット
(日本原子力研究所)

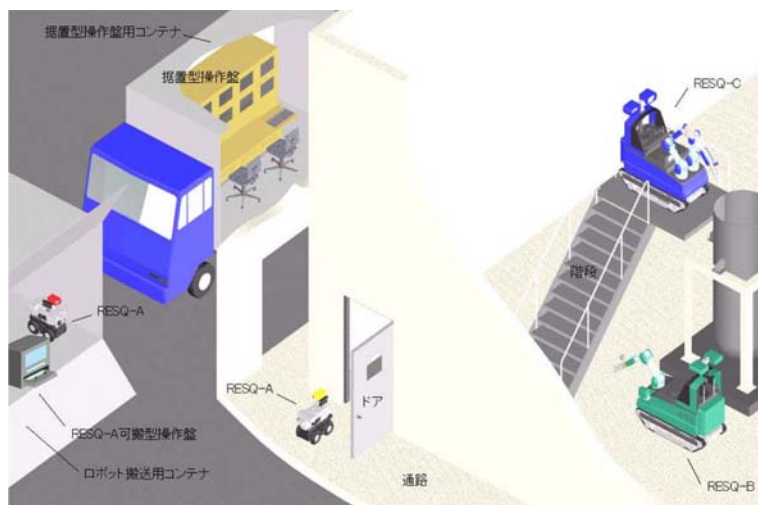


RESQ-B
詳細情報収集ロボット
(日本原子力研究所)



RESQ-C
試料など情報収集ロボット
(日本原子力研究所)

RESQ: Remote Surveillance Squad



事故時におけるシステム全体の活動イメージ

小林忠義, 他: 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.30-33, 2001.

原子力ロボット関連プロジェクト

- これまで行われた原子力関連のプロジェクト
 - 原子力プラント点検ロボット(通産省)
 - 極限作業用ロボット(通産省)
 - 原子力基盤技術開発(科学技術庁)
 - JCO 対策原子力防災ロボット(通産省, 科学技術庁, 日本原子力研究所, 原子力安全技術センター, 原子力プラントメーカー)
- 今回の災害に対して即導入可能なロボットシステムは存在しない.
 - 実際に使用されている原子力用ロボットシステムの多くは, メンテナンス用の専用機であり, 災害対策の様々な状況に対応できる汎用的機能がない.
 - 基盤技術や要素技術開発は行われたものの, 実用化に至らなかった.
 - 実用を目指して開発された汎用的機能を有するロボット開発も行われたが, 維持・運用するための費用が出なかったために, プロトタイプ開発までにとどまった.

日本のロボット技術開発に関して 東日本大震災および福島第一原子力発電所事故 から学ぶべきこと

- 課題
 - 国内ロボット技術のスムーズな導入？
 - これまでの日本のロボット技術開発における問題点の分析と対策
- 開発から運用まで一貫した戦略の必要性
 - 「作る(開発)」と「使う(利用)」のループを回す仕掛け
 - ユーザと一体となったプロジェクト
 - 訓練も含めた運用組織
 - 事故対策・リスク対応を含めたビジネスモデル
 - 国による需要の創出
 - 制度設計