

原子力災害対応ロボットと 櫛葉遠隔技術開発センター

日本原子力研究開発機構
櫛葉遠隔技術開発センター
モックアップ試験施設部 遠隔基盤整備室
山田 大地

自己紹介

山田 大地 (1984) 出身 徳島県

- 2002 ～ 2006年 徳島大学
- 2006 ～ 2008年 徳島大学大学院 修士課程
 - 研究内容: 顔文字の表情認識
- 2008 ～ 2011年 富士ソフト株式会社
 - 業務内容: 移動ロボットの基本知能モジュールの開発に従事
- 2011 ～ 2014年 筑波大学大学院 博士課程
 - 研究内容: 生活環境における移動ロボットの自律ナビゲーション
- 2014 ～ 2015年 埼玉大学 研究員
 - 業務内容: 人と協調移動するロボット車椅子の研究開発
- 2015 ～ 現在 日本原子力研究開発機構
 - 所属: 楢葉遠隔技術開発センター 遠隔基盤整備室

原子力災害を題材にロボットについて紹介

目次

1. はじめに

- 原子力災害におけるロボットへの期待

2. ロボットによる原子力災害対応

- これまでの事故でロボットに何ができたのか、何ができなかったのか
 - チェルノブイリ
 - ジェーシーオー
 - 福島

3. 事故対応からの教訓と今後の展望

- まだ足りないものは何か、どうあるべきか

4. 楢葉遠隔技術開発センター

- 現在どのような取り組みがされているのか

5. まとめ

1. はじめに

原子力災害におけるロボットへの期待

ロボットとは？

□ 明確な定義はない

□ 一般的に以下のようなものがロボットと呼ばれる傾向がある

■ 操作者がその場にいなくても
(自律的或いは遠隔地で)作業する機械

■ 人や動物を模した機械



産業ロボット



ロボット掃除機



飛行ロボット
(ドローン)



ヒューマノイド



ロボットの主な利点

- 人の能力を超えた作業
- 人が侵入困難な環境での作業

■ 自動化

写真引用

<http://robonable.typepad.jp/news/2010/06/>
<https://www.irobot-jp.com/storeproduct/700series/>
<https://jp.ifixit.com/Teardown/Parrot+AR.Drone+Teardown/3984>

http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2009/pr20090316/pr20090316.html
http://www.peoplechina.com.cn/zhuanti/2010-06/11/content_278757.htm

原子力とロボット

□ 従来から人に代わって高放射線環境での保守作業をする役割を担ってきた

■ 原子炉等での作業

□ ロボットが活動しやすい環境を用意すると安全・確実な作業が期待できる

■ 産業ロボットと同様

原子力施設におけるロボットによる作業の利点

■ 作業員の危険の低減

■ 人にできない作業の実施

災害対応とロボット

- 災害現場は未知の極限環境となる
- 現在、未知の極限環境において活躍するロボットの事例がある



惑星探査ローバー

[画像引用:JAXA Webサイト]



無人化施工

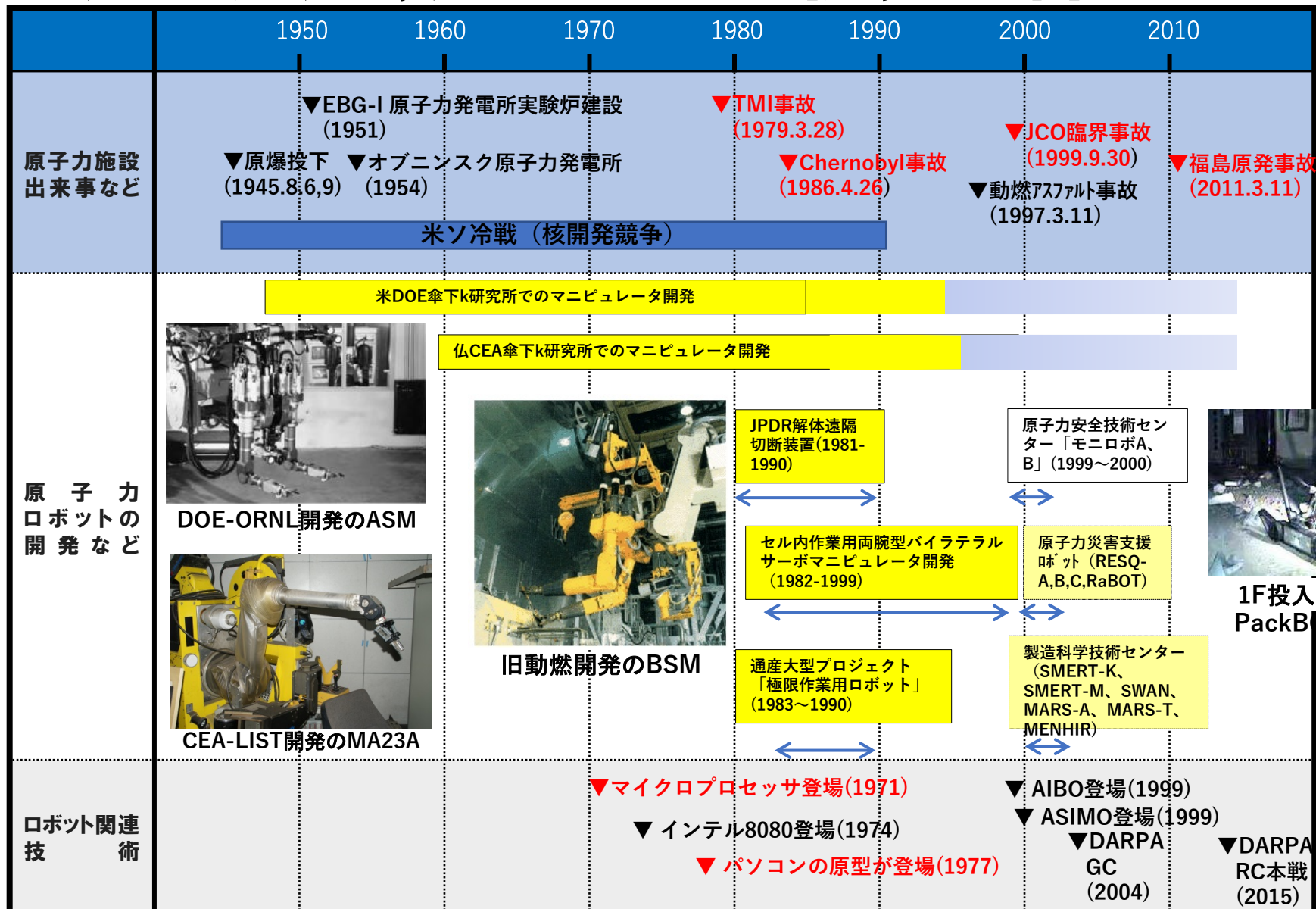
[画像引用:玉石重機株式会社 Webサイト]

■ 原子力災害に対するロボットの主な役割

作業員の危険の低減・人にできない作業の実施

- 未知区域の調査(線量・画像・形状等の計測、サンプリング)
- 高放射線量下での作業(瓦礫の撤去、除染、ドアの開放)

原子力施設のロボットの開発経緯



写真出典

<http://books.google.co.jp/books?id=T-Dk9DBd7s4C&pg=PA173&lpg=PA173&dq=ORNL+m2+manipulator&source=bl&ots=UKoaRuUv&sig=keHmjQpYX0ztbpVYPByZiWIM9A&hl=ja&sa=X&ei=5xoqU4uvG8XnIAxrlCACQ&ved=0CDUQ6AEwAQ#v=onepage&q=ORNL%20m2%20manipulator&f=true>

<http://photo.tepco.co.jp/date/2011/201104-j/110419-01j.htm>

2. ロボットによる原子力災害対応

これまでの事故でロボットに何ができたのか、
何ができなかったのか

チェルノブイリ原子力発電所事故

- 1986年4月26日午前1時23分
- 旧ソビエト連邦(現ウクライナ) チェルノブイリ原子力発電所
- 水蒸気爆発を伴う事故が発生(4号機)
 - 核燃料物資で汚染された瓦礫や放射化した黒鉛ブロックが飛散
- 国際原子力事象評価尺度レベル 7:
(深刻な事故)
- 約50台のロボットが投入された

チェルノブイリ原子力発電所に投入されたロボット

□STR-1

- 月面探査ロボットをベースに開発されたロボット
- タービン建屋屋上に飛散した瓦礫の撤去に使用
- 高放射線環境下で使用したため損傷
 - ロボットが動かなくなった後は、
人が短時間の作業で交代しながら、瓦礫を撤去



汚染瓦礫を除去するSTR-1(左)とその残骸(川妻伸二氏 提供)

チェルノブイリ原子力発電所に投入されたロボット

□D-355W

- コマツ製の水陸両用無線操縦ブルドーザ
- サイト内に飛散した瓦礫の撤去に使用
- 電子機器が放射能により損傷、比較的短い期間で使用できなくなった



https://www.google.co.jp/search?q=komatsu+d-355w&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=jF3bUaWsEsuPkgXR54GgDg&ved=0CF0QsAQ&biw=1169&bih=727#facrc=&imgdii=&imgcr=SpMsbtAOjUY6tM%3A%3ByK54pKd1IQs3dM%3Bhttp%253A%252F%252Fchzo86.narod.ru%252Fpic%252FKomatsu%252FKomatsu_02.jpg%3Bhttp%253A%252F%252Fchzo86.narod.ru%252FKomatsu.htm%3B500%3B357

チェルノブイリ原子力発電所に投入されたロボット

□KLIN

- 戦車を改造したもの
- 線量の調査、瓦礫の撤去、除染のために開発
- 飛散した黒鉛の撤去、汚染された表土の剥離作業を実施
- 高放射線環境下で使用したため損傷



KLIN(神戸大学 横小路教授提供)

他にも多数のロボットが放射線による損傷・汚染を受けた

チェルノブイリ原子力発電所に投入されたロボット

□MF-2

- ドイツが提供
- タービン建屋屋上に飛散した瓦礫の除去に使用
- ケーブルが長すぎて電圧降下が大きく再充電できなかった
別途充電設備を用意している間に、放射線により損傷



MF2 (Kemtechnische Hilfsdienst. GmbH Gustmann氏提供)

想定外の事態で機能しなくなることがある

チェルノブイリ原子力発電所事故 まとめ

ロボットで何ができたか？

- 瓦礫の撤去を中心に活躍
 - 作業員の被ばく低減

ロボットで何ができなかったか？

- 原子力災害対応
 - 放射線による損傷した機材が多く見られる
 - 原子力災害を想定した機材ではなく、別用途の機材を改造していた
- 機能上の想定外
 - 動源力の問題（再充電できない）
 - 機材の運用上で基本的な部分についても問題を経験するまで意識していない

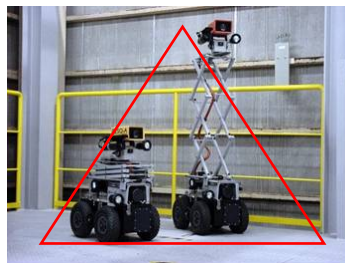
茨城県東海村JCOの臨界事故

- 1999年9月30日
- 茨城県東海村 燃料工場JCO
- 中濃縮度ウランを規程量を超えて燃料調整槽で取り扱ったため臨界
 - 日本で初の臨界事故 3名が大量被ばく、内2名が死亡
- 国際原子力事象評価尺度レベル 4
(局所的な影響を伴う事故)
- 災害時高放射線環境下で作業を行うロボット等の必要性が認識された

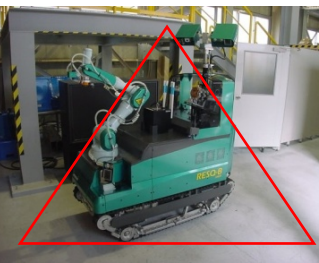
JCOの事故をうけて開発されたロボット



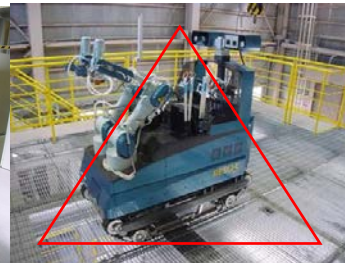
モニロボA、B
原子力安全技術
センタ



初期情報収集ロボット
RESQ-A



詳細情報収集ロボット
RESQ-B



サンプリング収集ロボット
RESQ-C

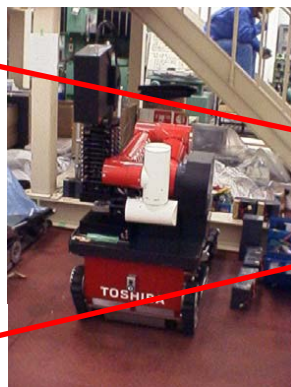


耐放射線性作業ロボット
RaBOT

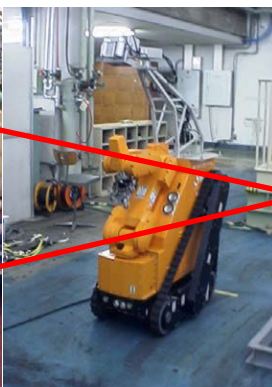
日本原子力研究所（現、日本原子力研究開発機構）



作業支援ロボッ
ト
SMERT-K



作業支援ロボッ
ト
SMERT-M



軽作業ロボットSWAN



作業ロボット
MARS-A



重量物運搬ロボッ
ト
MARS-T



耐放射線性ロボット
MENHIR



2011/3/11時点で不可動だったもの。



2011/3/11時点で廃棄されていたもの。

（写真提供：川妻伸二氏）

製造科学技術センタ

JCOの事故をうけて開発されたロボットのその後

□平成11年度に4種5台開発 (二次補正予算事業)

- 初期情報収集ロボット 2台
- 詳細情報収集ロボット 1台
- サンプリング収集ロボット 1台
- 耐放射線作業ロボット 1台

しかし

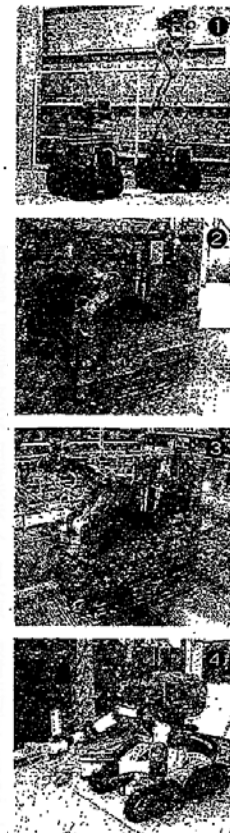
2011年3月11日には
4台が不可動・廃棄となっていた

- 開発費のみで
保守管理の予算はつかず
- メーカーに作らせて終了
 - ・技術者不在となった
- 運用体制も議論されていなかった

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」



2011年5月17日 東京新聞

JCOの事故をうけて開発されたロボット まとめ

何ができたか？

- 原子力災害対応ロボットの開発

何ができなかったか？

- 運用

- ☐物があっても使う人がいない

- 保守管理

- ☐物はいずれ壊れる
- ☐技術は使われないと技術者はいなくなる

福島第一原子力発電所事故

- 2011年3月11日午前14時46分
- 日本 福島第一原子力発電所
- 1～3号機が炉心融解。1、3号機で水素爆発が発生し、放射性物質が大量放出
 - 地震（震度6強）により送電線の鉄塔が倒壊したが、非常用発電機により炉心冷却を維持
 - その後、津波（14m）により、非常用発電所（海拔10m）が浸水し、全電源喪失
- 国際原子力事象評価尺度レベル 7（深刻な事故）
- 1～3号機の建屋内、建屋付近の線量が極めて高くなり、人での作業が困難となったため、事故収束宣言*（2011年12月16）までに20台あまりのロボットが投入された

事故収束宣言*：原子炉を冷温停止状態にすることができたことから宣言

福島第一原子力発電所事故での緊急時対応ロボット

□モニロボA

- 原子力安全技術センターが所有するロボット
- 防災訓練などに参加していた
- ガンマ線や中性子線の計測やちりの採取ができることから東京電力へ貸出された(2011年3月16日)
- 原子炉冷却のための仮設のケーブル等を損傷させることを懸念し、投入を断念

放射線量、危険な場所はロボットで測定 文科省が貸与

朝日新聞 2011年3月16日22時47分

(前略) 今後、放射能汚染が激しい場所を調査する必要も生じるため、文部科学省は、人が近づけない危険な場所のガンマ線などの放射線量を測定できる無線操縦で動く防災モニタリングロボットを東京電力に貸し出した。

財団法人原子力安全技術センター(東京都)が所有するロボットで、同センターは「防災訓練などに参加したことはあるが、現場で実際に利用するのは初めてと思う」と話している。

このロボットは高さ150センチ、長さ150センチ、幅80センチ、重さ約600キロ。小型戦車のような形をしている。無限軌道によって、最大毎分40メートルの速さで移動できる。前方にマジックハンドが付いており、それで積んでいる無線中継基地を途中で下ろしながら前に進むことで、約1.1キロ離れたところから無線操縦ができるという。

同センターは、もう1台モニタリングロボットを所有している。ガンマ線に加え、中性子線の測定や空中に漂っているちりを捕まえることもでき、「こちらのロボットも近く出動させる予定」と話している。

同省ではこのほか、ヘリコプターなどを使って空からの測定も行うよう防衛省と調整している。



福島第一原子力発電所事故での緊急時対応ロボット

□74式戦車

- 防衛省が派遣（3月20日）
- 耐放射線性あり
- サイト内に散らばった瓦礫を撤去し、作業員の活動を支援する目的で派遣
- 原子炉冷却のための仮設のケーブル等を損傷させることを懸念し、投入を断念（2011年3月21日）



2011/4/29 J-Villageで撮影 川妻氏



ケーブルやホース

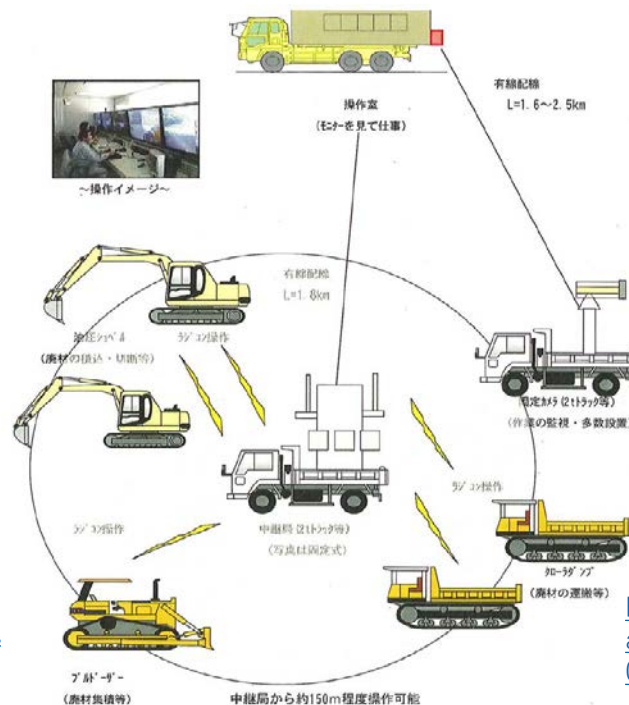
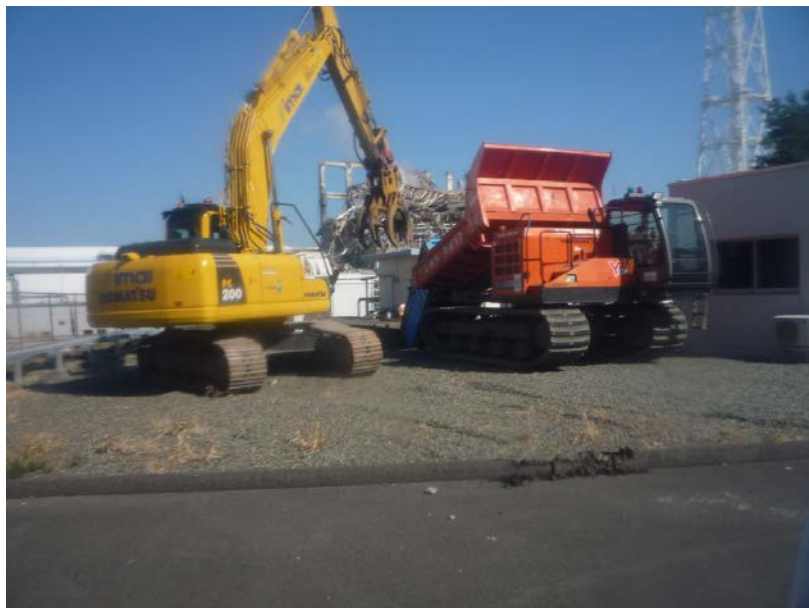
東京電力Webページ

<http://photo.tepco.co.jp/date/2012/201209-j/120911-29-j.html>: (2016.10.14アクセス)

福島第一原子力発電所事故での緊急時対応ロボット

□無人化施工

- 無線で操縦できる重機のシステム
雲仙普賢岳の噴火(1991年)を契機に開発されている
- 原子炉建屋周辺の瓦礫撤去を目的に試運転(2011年4月5日～)
- 1号機から4号機までの道路の瓦礫の撤去に従事(2011年11月初旬まで)



http://www.tepco.co.jp/en/news/110311/images/110411_1f_system1_5

<http://www.nsra.or.jp/safe/fdecomi/haifu02-02-06.pdf>

福島第一原子力発電所事故での緊急時対応ロボット

□T-Hawk

- 米Honeywell International社製 小型無人飛行機
- 原子炉建屋やその屋上等の撮影、空中の放射性物質測定の実施（2011年4月14日～）
- 空中の放射性物質測定時にエンジントラブルにより不時着



2号機屋上に緊急着陸するT-Hawk

<http://photo.tepco.co.jp/date/2011/201106-j/110624-01j.html>



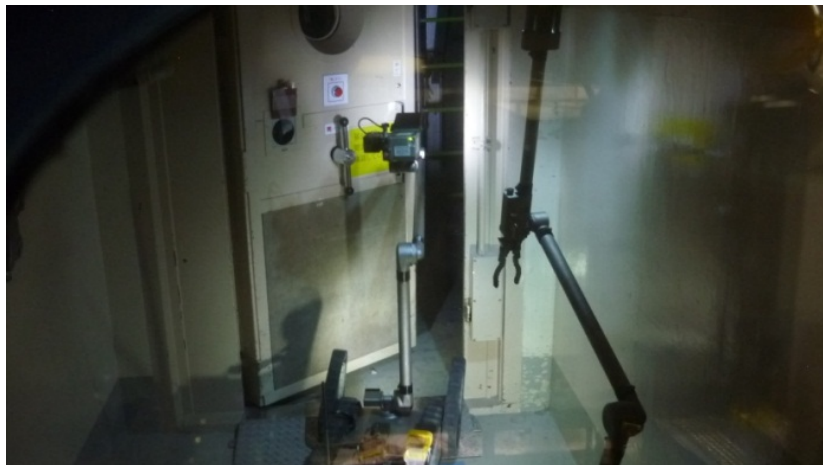
T-Hawk

http://ja.wikipedia.org/wiki/RQ-16_T-%E3%83%9B%E3%83%BC%E3%82%AF#mediaviewer/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:MicroAirVehicle.jpg

福島第一原子力発電所事故での緊急時対応ロボット

□PackBot

- 米iRobot社製・軍事用に使用されている
- 5000台以上生産されていた
- 危険物検出オプションをベースに原子力発電所へ対応
- 原子炉建屋内部調査、清掃、二重扉の開閉などのミッションを実施（2011年4月17日～）
- カメラが曇ることがあったものの、
その際には時間をおいてミッションの実施した



http://www.tepco.co.jp/en/news/110311/images/110417_1f_1_1.jpg



http://www.tepco.co.jp/en/news/110311/images/110419_1f_1.jpg

福島第一原子力発電所事故での緊急時対応ロボット

□Brokk

- スウェーデン Brokk社製 遠隔操作が可能な電機・油圧式解体ロボット
- 海外の原子力施設での解体実績が豊富
- Brokk90・1台、Brokk330・2台、Brokk-800D・1台が他のロボットと
(Talon 米QinetiQ North America社: Bobcat 2台 米 Bobcat Company社)
3号機原子炉建屋大物搬入口崩壊部の瓦礫除去を実施
(2011年5月10日～)



BROKK 800D in Fukushima Daiichi

福島第一原子力発電所事故での緊急時対応ロボット

□Talon

- 米 QinetiQ North America社製 多目的軍事ロボット
- 同時多発テロのWorld Trade Centerビルやアフガニスタンの爆弾処理等で使用されていた
- CBRNE/Hazmat*モジュールの追加で空間線量のマッピングができる
- 3号機原子炉建屋大物搬入口崩壊部の瓦礫除去、線量調査、カメラ画像による3号機付近の監視を実施(2011年5月11日～)



http://www.tepco.co.jp/en/news/110311/images/110429_1f_10.jpg

福島第一原子力発電所事故での緊急時対応ロボット

□RC-1

- 日本原子力研究開発機構のロボット搬送・操作用車両
- Talonの線量マッピングのために開発
- 遮蔽されたコンテナ内からロボットの操作が可能
- カメラ、照明、温度カメラや線量等の計測器を搭載

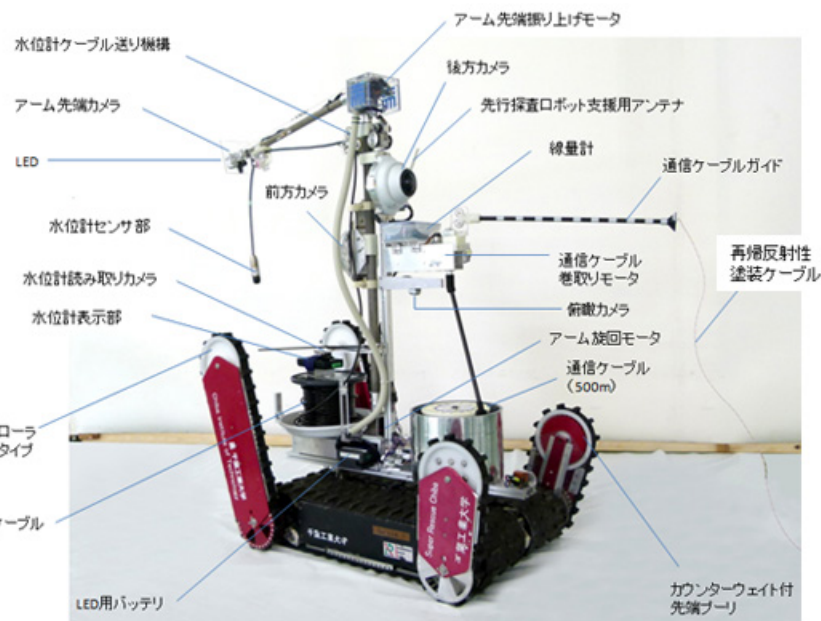


撮影・提供 川妻伸二氏

福島第一原子力発電所事故での緊急時対応ロボット

□Qunice

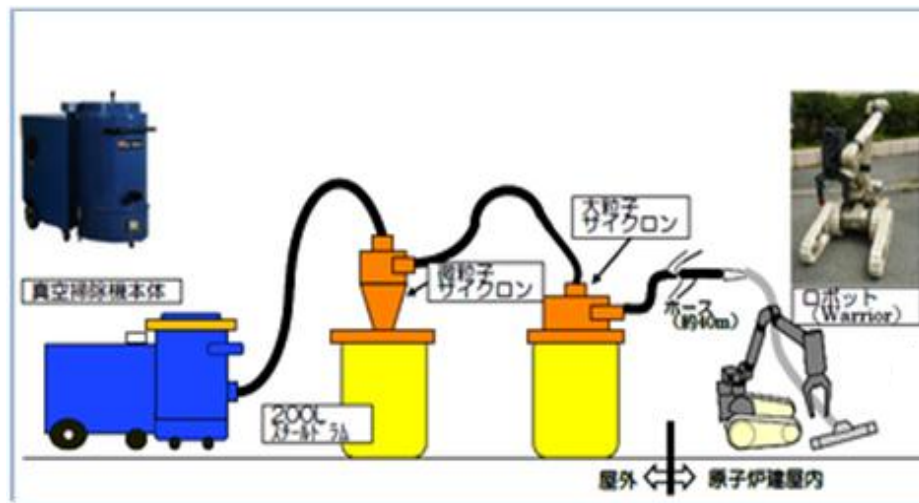
- 千葉工業大学、東北大学、国際レスキューシステム研究機構が開発
- 様々なレスキュー現場を想定した実証実験を繰り返していた
- 東京電力から要請をうけて原子炉建屋の調査用に開発
- 建屋内の調査を実施（2011年6月24日～）



福島第一原子力発電所事故での緊急時対応ロボット

□Warrior

- 米 iRobot社製の多目的用遠隔ロボット
- 大型のロボットで瓦礫の撤去や清掃作業が可能
- 3号機原子炉建屋内の清掃作業を実施（2011年7月1日～）



Vacuuming using Warrior

<http://photo.tepco.co.jp/date/2011/201107-j/110702-01j.html>

福島第一原子力発電所事故での緊急時対応ロボット

□ JAEA-3

- JCOの事故を受けて開発したRESQ-Aを改造した機体
- 放射線計測のために、ガンマ線可視化装置やガイガー・ミュラー (GM) 管を搭載
- 2号機原子炉建屋の高放射線部位調査を実施 (2011年9月23日～)



ガンマ線可視化計測装置を搭載したJAEA-3



ガンマ線可視化画像(校正室内)



2011/9/23 福島第一 2号機に投入
<http://photo.tepco.co.jp/date/2011/201109-j/110928-01j.html>

福島第一原子力発電所事故後の 災害対応ロボットの動き

「**原子力災害対策特別措置法**に基づき原子力事業者が
作成すべき原子力事業者防災業務計画等に関する命令」

(平成二十四年文部科学省・経済産業省令第二号)

• 第二条 二項

前項に掲げるもののほか、原子力事業者のうち実用発電用原子炉を設置する者は、法第七条第一項の原子力事業者防災業務計画には、次に掲げる事項を定めなければならない。

• 第二条 二項 七号

放射性物質による汚染により原子力事業所災害対策に従事する者が容易に立ち入ることができない場所において当該対策を実施するために必要な**遠隔操作が可能な装置**その他の資材又は機材及びこれらを管理するための**組織の整備及び運用**に関すること。

福島第一原子力発電所事故 まとめ

何ができただか？

- 早い対応（機材の開発の観点）
 - 原子力災害以外の用途で使用されているロボットが短い期間で対応利用されている
- 瓦礫の撤去のみならず、調査も実施

何ができなかったか？

- 早い対応（災害対応の観点: 1分1秒を争うという早さ）
 - 実際投入された多くのロボットは改造・開発の時間を要した
 - 原子力災害用に整備されていたロボットは少なかった
 - 極めて早い時期に派遣されたロボットは現場の都合で投入を断念
 - 防災計画・訓練の段階でロボットの使用の検討が必要

4. 事故対応からの教訓と今後の展望

まだ足りないものは何か、どうあるべきか

事故対応からの教訓の整理

原子力災害に対するロボットの主な役割

- 作業員の危険の低減
- 人にできない作業の実施

何ができたか？どこまでできたか？

- 原子力災害対応ロボットの開発
 - 瓦礫の撤去等の作業
 - 空間線量計測や画像取得などの調査

十分であったか？何ができなかったか？

- 運用保守管理
 - 原子力災害対応専用のロボットの多くは不可動だった
- 早い対応（災害対応の観点：1分1秒を争うという速さ）
 - 事態が収束するまでは1分1秒を争う
- 想定外の事態への対応
 - 現場の状況への対応、無線の確保、搬送方法の確保、カメラが曇る、階段で滑る etc

今後の展望（山田の見解）

を述べる前に皆さんにも
一緒に考えていただきたいと思います

今後の展望（山田の見解）

ロボットの維持運用供給体制を整える

維持運用供給体制の整備

人財の確保

■技術者・オペレータ

仕事として成り立つこと

■お金をどうするか？

□従事者の生活

■場所をどうするか？

□機材の管理

効率化
低コスト化

緊急時には即応性が要求される

防災の計画時点での検討

信頼性が重要

■どういう条件で？

■何が？

■どこまでできるのか？

試験・訓練・計画のサイクル

■想定外を想定内にする

□実機訓練

□実証試験

■試験・訓練場所の確保

まとめ

□これまでの原子力災害対応ロボット

- 原子力災害対応に貢献できるロボットは以前からある
- 事故時の技術レベルに合わせて活躍の幅を広げている
- ただし、投入までに時間がかかっている（●ヶ月というレベルで）

□原子力災害対応ロボットの課題と今後の展望

- 皆さんにも一緒に考えていただきたいと思います

5. 檜葉遠隔技術開発センター

現在どのような取り組みがされているのか

福島研究開発部門

福島研究開発拠点（福島県）

環境における放射線状況の把握、環境回復に向けた研究開発

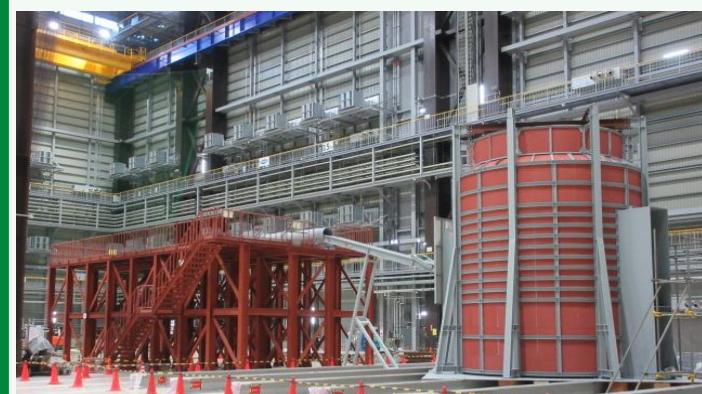
福島環境安全センター
(福島県環境創造センター（三春）内)

楢葉遠隔技術開発センター

NARREC NARaha center
for
ナレック REremote Control technology development



大規模な試験ができる空間



出展：資源エネルギー庁ウェブサイト
(https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/debris_3.html)

ロボットの試験をするための設備

モックアップ
階段



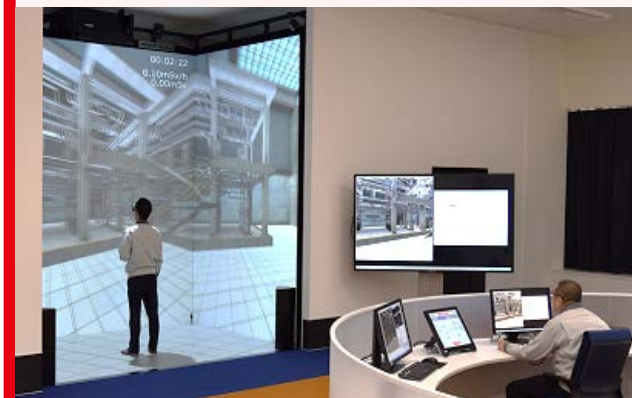
ロボット
試験用水槽



大型モーションキャプチャ



現場を仮想で
体験するための設備



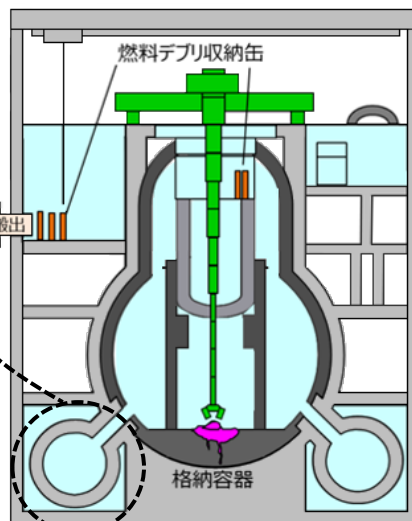
実規模試験エリア



実規模大の1/8カット



原子炉格納容器下部の実規模試験体
写真引用 [IRID Webページ]



□ 原子炉等の大規模設備の
模擬体による試験エリア

□ 2017年度、原子炉建屋下部の
補修・止水試験をIRID*が実施

□ 実規模大の試験体を用いた
統合的試験

- 作業工程の確認
- 補修・止水技術の集積

要素試験エリアの模擬試験設備

□ 廃止措置や一般災害において、
ロボットに要求される性能を試験するための設備



全体寸法	幅7.4m, 奥行 5.8m, 高 7.5m
傾斜角度	40,41,42,43,51 ,55度(6段階)
手すり幅	有効幅: 600,700,800, 900,1000mm (5段階)
階段周り 方向	90度(左右周) 180度(左右周)
踏み板	縞鋼板、 グレーチング

モックアップ階段



全体寸法	直径 4.5m, 水深 5.0m
水温調整 範囲	常温～60℃
試験可能 な水質	淡水、濁水、 塩水

試験用水槽

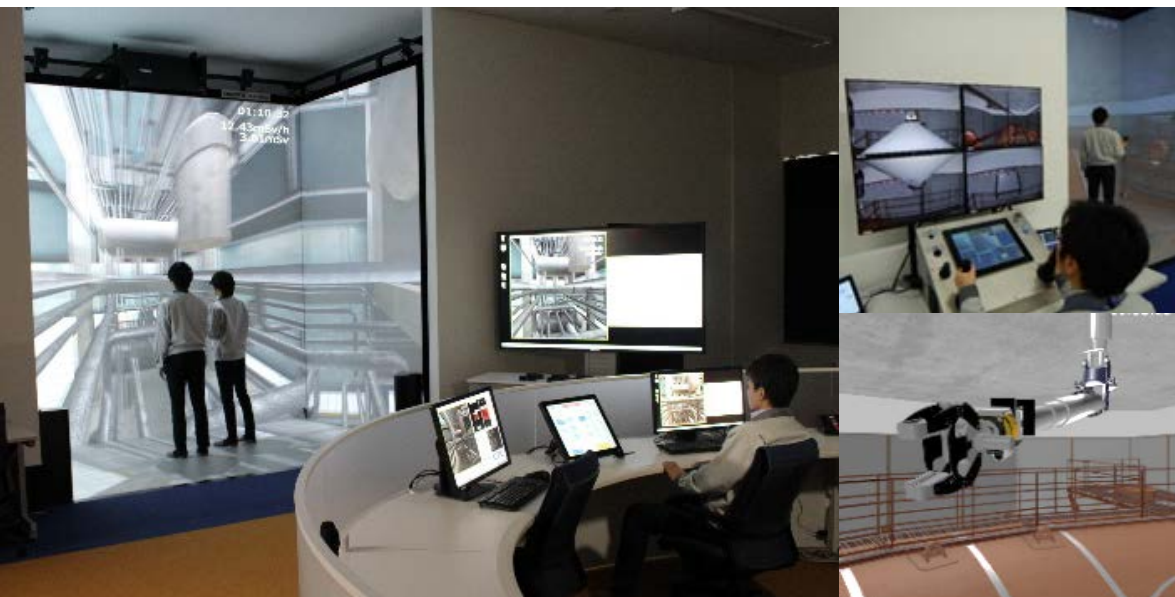
計算科学による支援設備

□バーチャルリアリティシステム

- 仮想空間に侵入した感覚を提示
- 1,2,3号機のデータが提示可能
- 現地での作業手順のシミュレーション
- 作業員の訓練・教育、作業手順の計画・確認

□シミュレータ

- 実機の代わりにシミュレータ上で試験・訓練
 - 実機の用意するコストの低減
- 1,2,3号機のデータで試験可能



バーチャルリアリティシステム

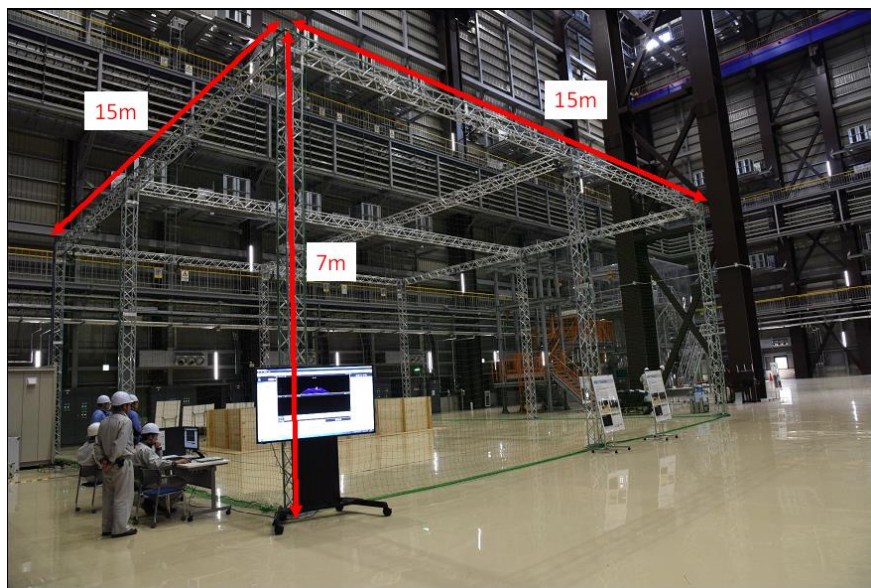


階段昇降のシミュレーション

ロボットの試験・評価法

□大型モーションキャプチャ

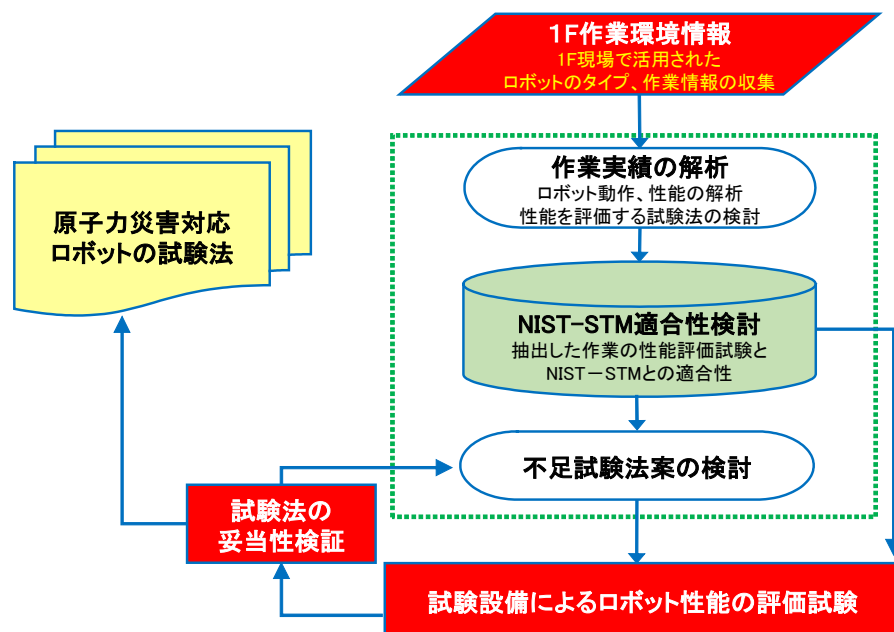
- ロボットの動きを計測して、
定量的に評価
- 大型なので以下などに適している
 - ドローンの試験
 - 試験フィールドの仮設



モーションキャプチャ

□原子力災害対応ロボット試験法の開発

- 原子力災害特有の課題に対する
ロボットの性能・オペレータの技能の
試験法



原子力災害対応ロボット試験法開発フロー

まとめ

□これまでの原子力災害対応ロボット

- 原子力災害対応に貢献できるロボットは以前からある
- 事故時の技術レベルに合わせて活躍の幅を広げている
- ただし、投入までに時間がかかっている（●ヶ月というレベルで）

□原子力災害対応ロボットの課題と今後の展望（山田の見解）

- 運営維持管理
 - 人・お金・場所をどうするか？
- 即応性=計画性の向上
 - 想定外の事象を低減する
 - ロボットの試験、オペレータの訓練が重要