

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
プロジェクト管理課 山田 大地

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らなくても（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



掃除ロボット



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

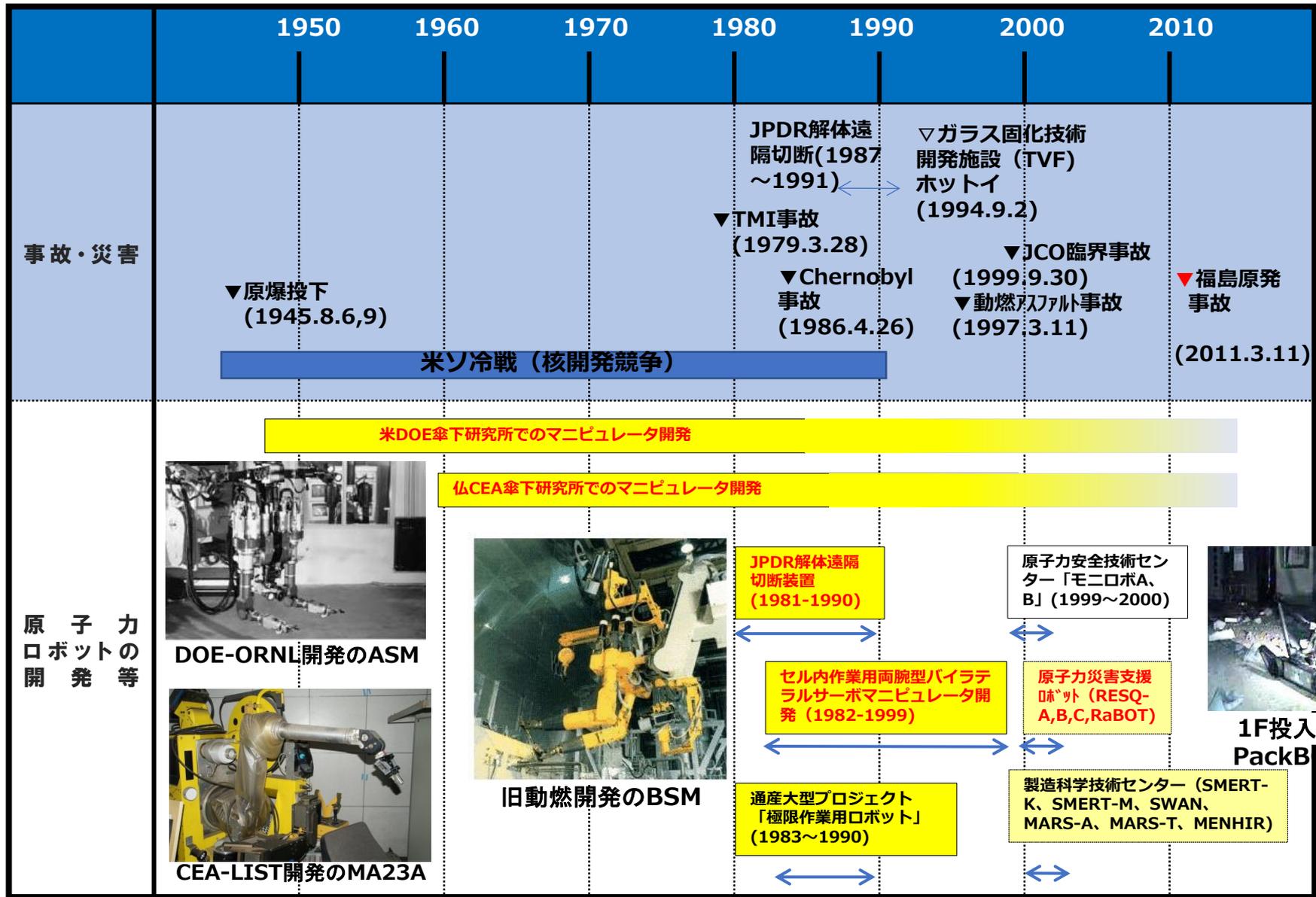
■産業ロボットと同様

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

□安全・確実な作業の実行

原子力保守ロボットの開発経緯



写真出典
<http://books.google.co.jp/books?id=T-Dk9DBd7s4C&pg=PA173&pg=PA173&dq=ORNL+m2+manipulator&source=bl&ots=UKoaRuRUV&sig=keHmjQpYX0ztbpVYPByZIWIM9A&hl=ja&sa=X&ei=5xoqU4uvG8XnAXrqICACQ&ved=0CDUQ6AEwAQ#v=onepage&q=ORNL%20m2%20manipulator&f=true>
<http://photo.tepco.co.jp/date/2011/201104-j/110419-01j.htm>

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]



地雷撤去ロボット

[画像引用:広瀬・福島研究室 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)

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

□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除去に使用
- 高放射線環境下で使用したため損傷



汚染瓦礫を除去するSTR-1（左）とその残骸（JAEA川妻氏提供）

チェルノブイリ原子力発電所事故

□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&tbn=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=jF3bUaWsEsuPkgXR54GgDg&ved=0CF0QsAQ&biw=1169&bih=727#acr= &imgdii= &imgrc=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事故

□KLIN

- 戦車を改造したもの
- 飛散した黒鉛の撤去、汚染された表土の剥離作業
- 高放射線環境下で使用したため損傷



KLIN (神戸大 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事故

□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 (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

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

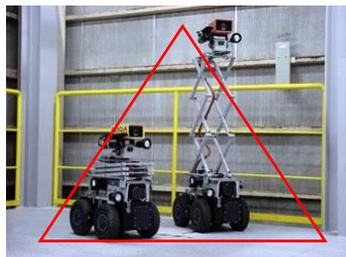
何ができなかったか？

- 放射線対策
 - 原子力災害を想定した機材ばかりではなく、別の用途の機材を改造していた
- 想定外の問題 (MF-2が再充電できず)
 - 動力源という基本的な部分とはいえ、経験するまでは問題を意識していない

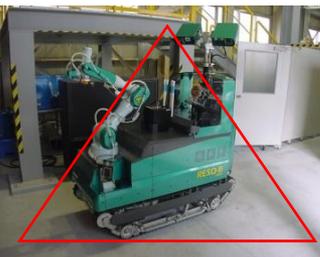
JCOの事故をうけて開発されたロボット



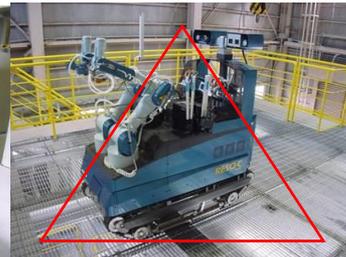
モニロボA、B
原子力安全技術
センタ



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

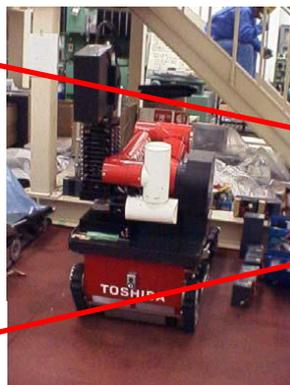


耐放射線性作業ロボット
RaBOT

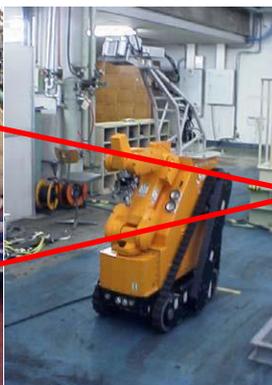
日本原子力研究所（現、日本原子力研究開発機構）



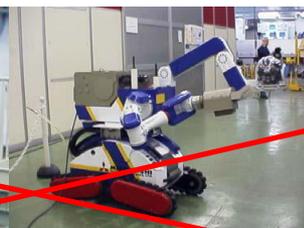
作業支援ロボット
SMERT-K



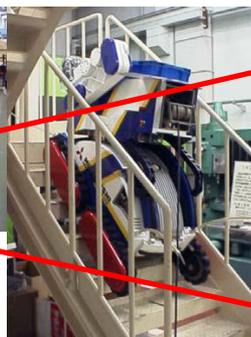
作業支援ロボット
SMERT-M



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。

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

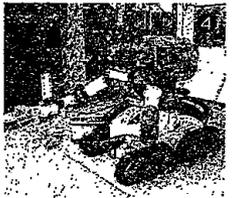
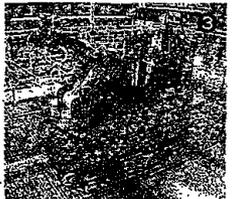
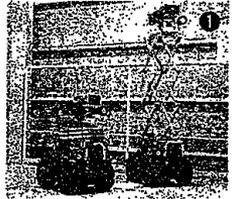
しかし

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



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RES-Q四台は福
島第一原発事故後、状
態を確認したところ、

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。

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①初期
情報収集用RES-Q
（JCO）で起きた
臨界事故の処理で数十
人が被ばくしたことを
受け、国は、原発事故
の際に放射線量や映像
などの情報収集と、事
故処理をするロボット
開発を本格化させた。

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①初期
情報収集用RES-Q
（JCO）で起きた
臨界事故の処理で数十
人が被ばくしたことを
受け、国は、原発事故
の際に放射線量や映像
などの情報収集と、事
故処理をするロボット
開発を本格化させた。

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

何ができなかつたか？

□運用

- 物があっても使う人がいなければ意味がない

□保守管理

- 物はいずれ壊れる
- 技術は使われないと廃れる

福島第一原子力発電所

□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。前方にマシン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

□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（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)

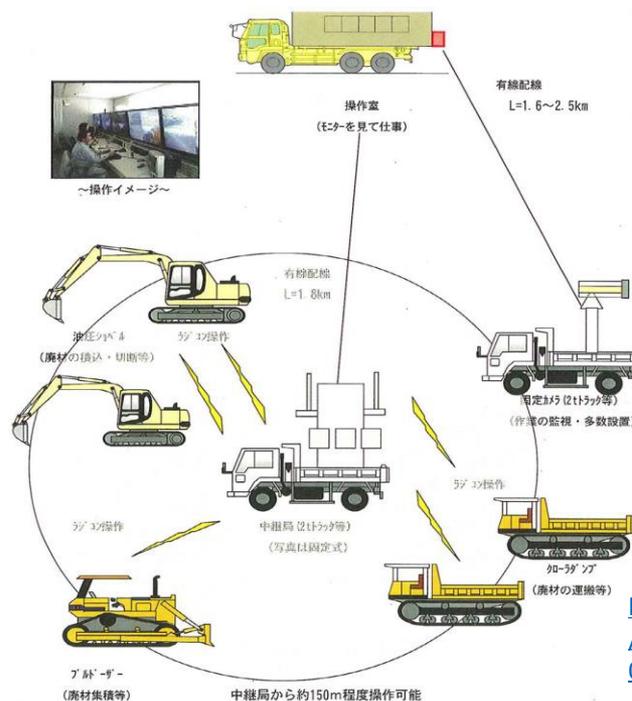
福島第一原子力発電所

□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.jpg



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

福島第一原子力発電所

□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

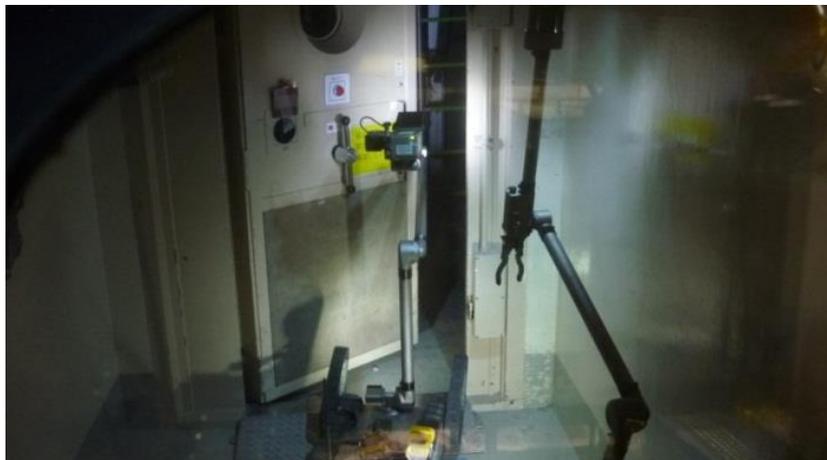
http://ja.wikipedia.org/wiki/RQ-16_T-%E3%83%9B%E3%83%BC%E3%82%AF#mediaviewer/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:MicroAirVehicle.jpg



福島第一原子力発電所

□PackBot

- 米iRobot社製・軍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、その際には時間をかけ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_1.jpg

福島第一原子力発電所

□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

□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～)

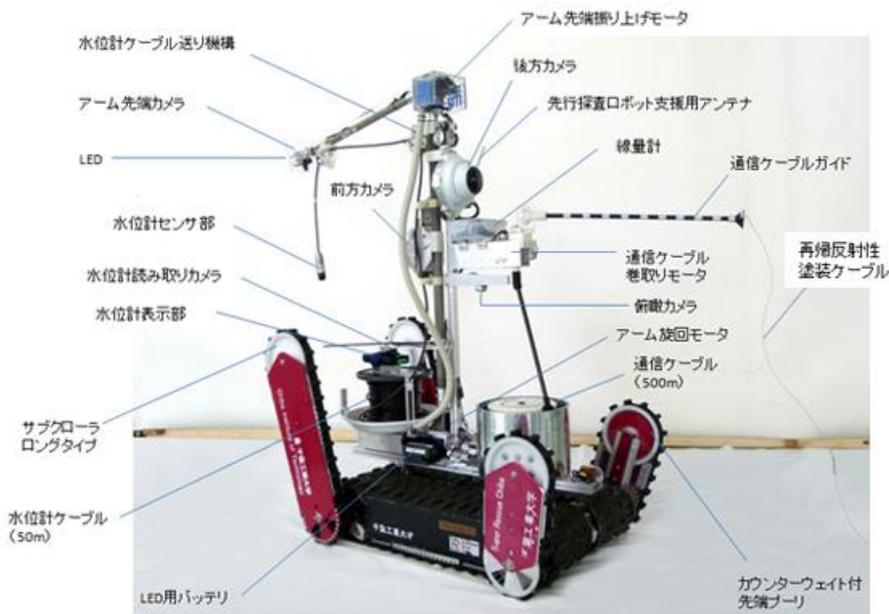


http://www.tepco.co.jp/en/news/110311/images/110429_1f_10.jpg

福島第一原子力発電所

□ Qunice

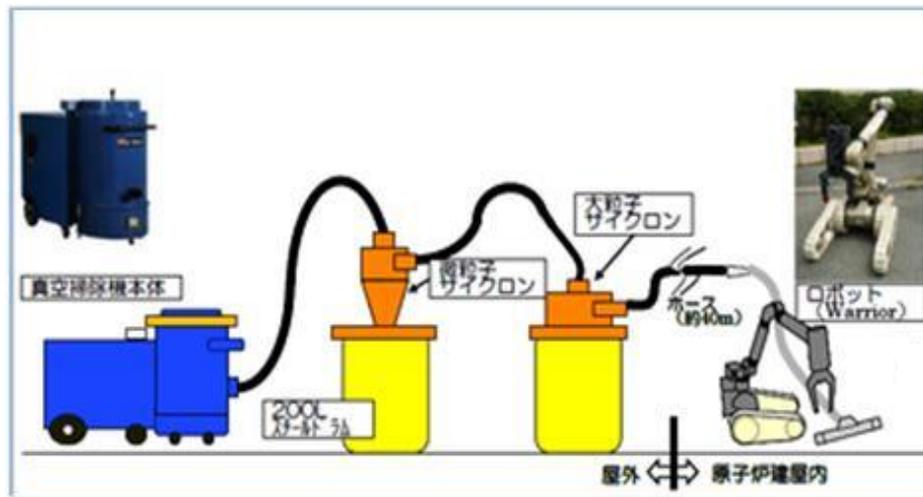
- 千葉工業大学、東北大学、国際レスキューシステム研究機構が開発
- 様々なレスキュー現場を想定した実証実験を繰り返していた
- 東京電力から要請をうけて原子炉建屋の調査用に開発
- 建屋内の調査を実施（2011年6月24日～）



福島第一原子力発電所

□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



Vacuuming using Warrior

福島第一原子力発電所

□ 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



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 まとめ

何ができたか？

□早い対応

- 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？

□速い対応（24Hというレベルの速さ）

- 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
- 速い対応
 - 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）

ロボットの維持運用体制を整える

維持運用体制の整備

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

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**
 - 実地訓練
 - 実証試験
- **試験・訓練場所の確保**

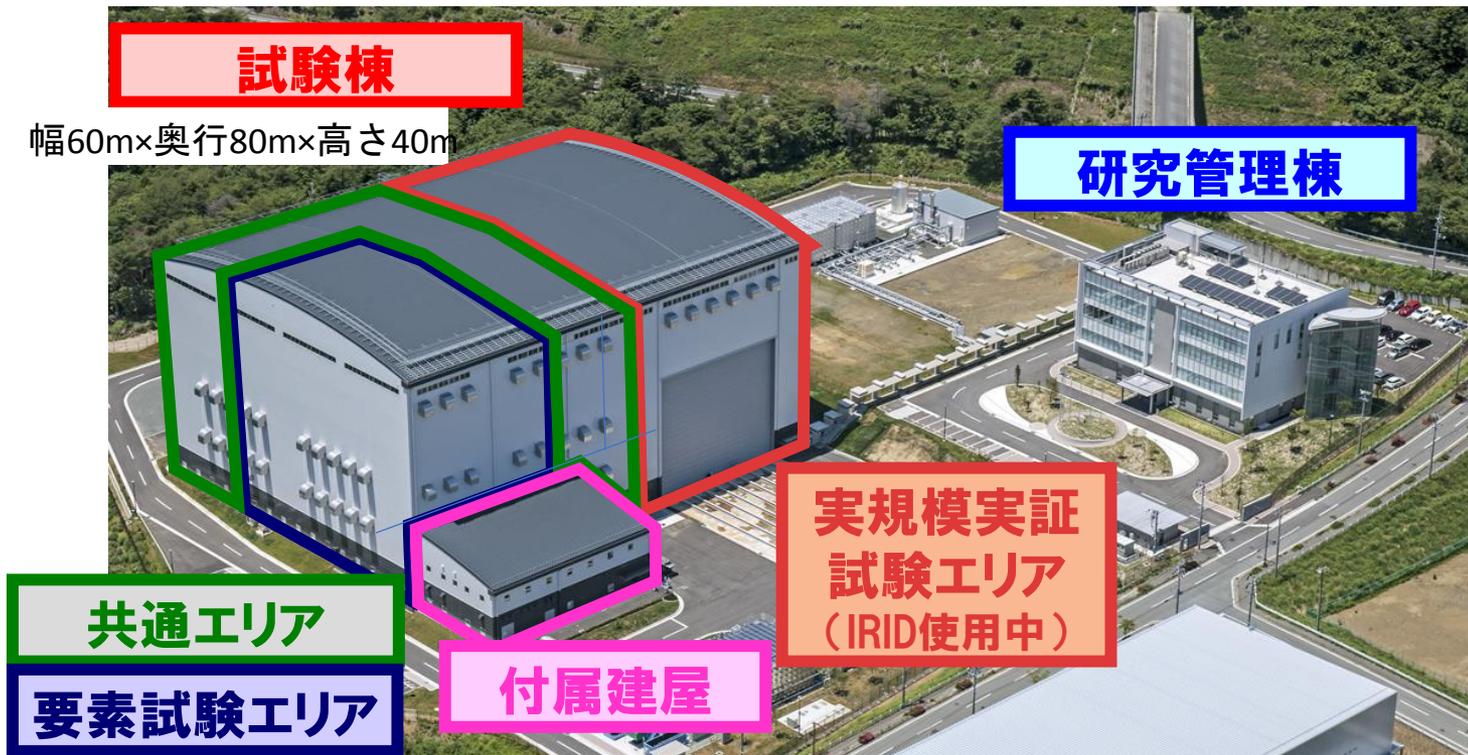
5. 檜葉遠隔技術開発センター

現在どのような取り組みがされているのか

楢葉遠隔技術開発センター

廃止措置や災害対応を中心とした遠隔技術の**研究開発・訓練の場**

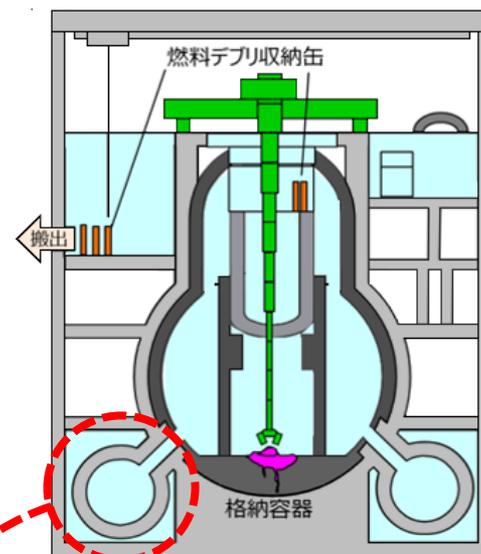
- 模擬試験設備を中心とした実証試験フィールド
- 計算科学(バーチャルリアリティ、シミュレータ)による試験・訓練システム
- ロボットやオペレータの技能の試験法の開発



楢葉遠隔技術開発センター全景

実規模試験エリア

- 原子炉等の大規模設備の
模擬体による試験エリア
- 現在(2017年7月)、
IRID*により原子炉建屋下部の
補修・止水試験を実施中
 - デブリ取り出し工法の
検討のための試験
- 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



デブリ取出工法(冠水工法)のイメージ



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]

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
- 作業員の訓練・教育、作業手順の計画・確認



バーチャルリアリティシステム

□シミュレータ

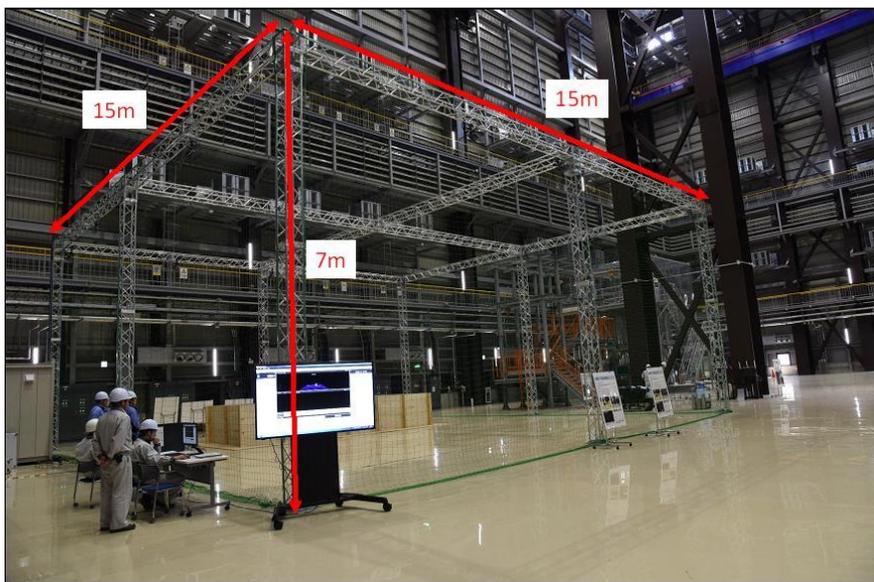
- 実機の代わりにシミュレータ上で試験・訓練
- 実機の用意するコストの低減
- 1,2,3号機のデータで試験可能



階段昇降のシミュレーション

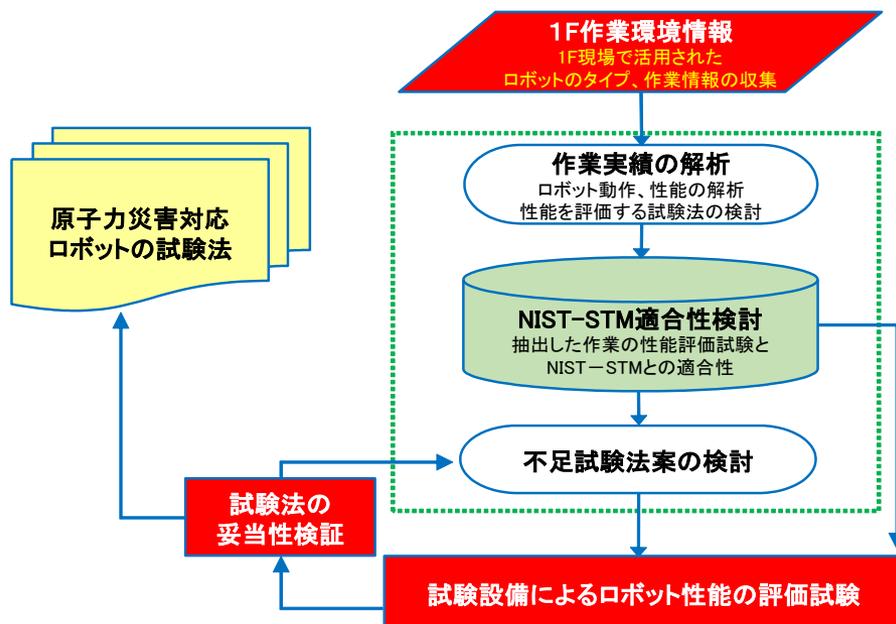
ロボットの試験・評価法

- 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