

福島第一原子力発電所事故と 災害対応ロボット

日本原子力研究開発機構
廃炉環境国際共同研究センター
遠隔技術ディビジョン 空間情報応用制御研究グループ

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

原子力災害を題材に、災害対応ロボットについて講義

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
 - JCO
 - 福島第一原子力発電所

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. まとめ

1. はじめに

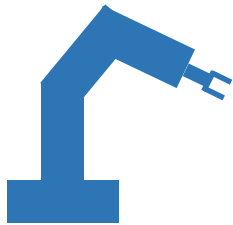
原子力災害におけるロボットへの期待

ロボットとは？

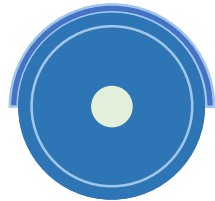
■明確な定義はない

■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

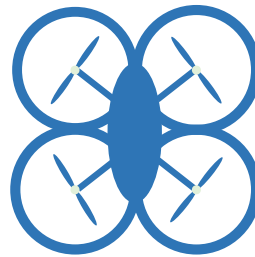
- ・ **操作者がその場にいなくても
(自律的あるいは遠隔地で)作業する機械**
- ・ 人や動物を模した機械



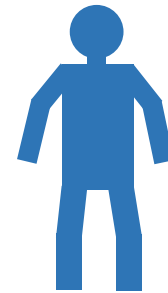
産業ロボット



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

- ・ 機械が得意な作業

■人が侵入困難な環境での作業

- ・ 大きさや移動方法の違い
- ・ 耐久性

■自動化

原子力とロボット

原子力分野におけるロボットへの期待

- 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への期待がある
 - ・ 作業員の被ばくの低減
 - ・ 施設の稼働率の向上

技術的な側面

- **環境（作業する場所）**が決まっていれば、開発はしやすくなる
 - 環境に手を入れて、ロボットが活動しやすくすることも可

原子力施設におけるロボット

- 作業員の安全の向上
- 施設の生産性の向上
- 特定の環境で作業する（開発が比較的容易）

災害対応とロボット

- 災害現場は**未知**の環境、**人が負傷・死亡するかもしれない**

災害対応におけるロボットへの期待

- 「**ロボットが壊れるかも**」に置き換えられる

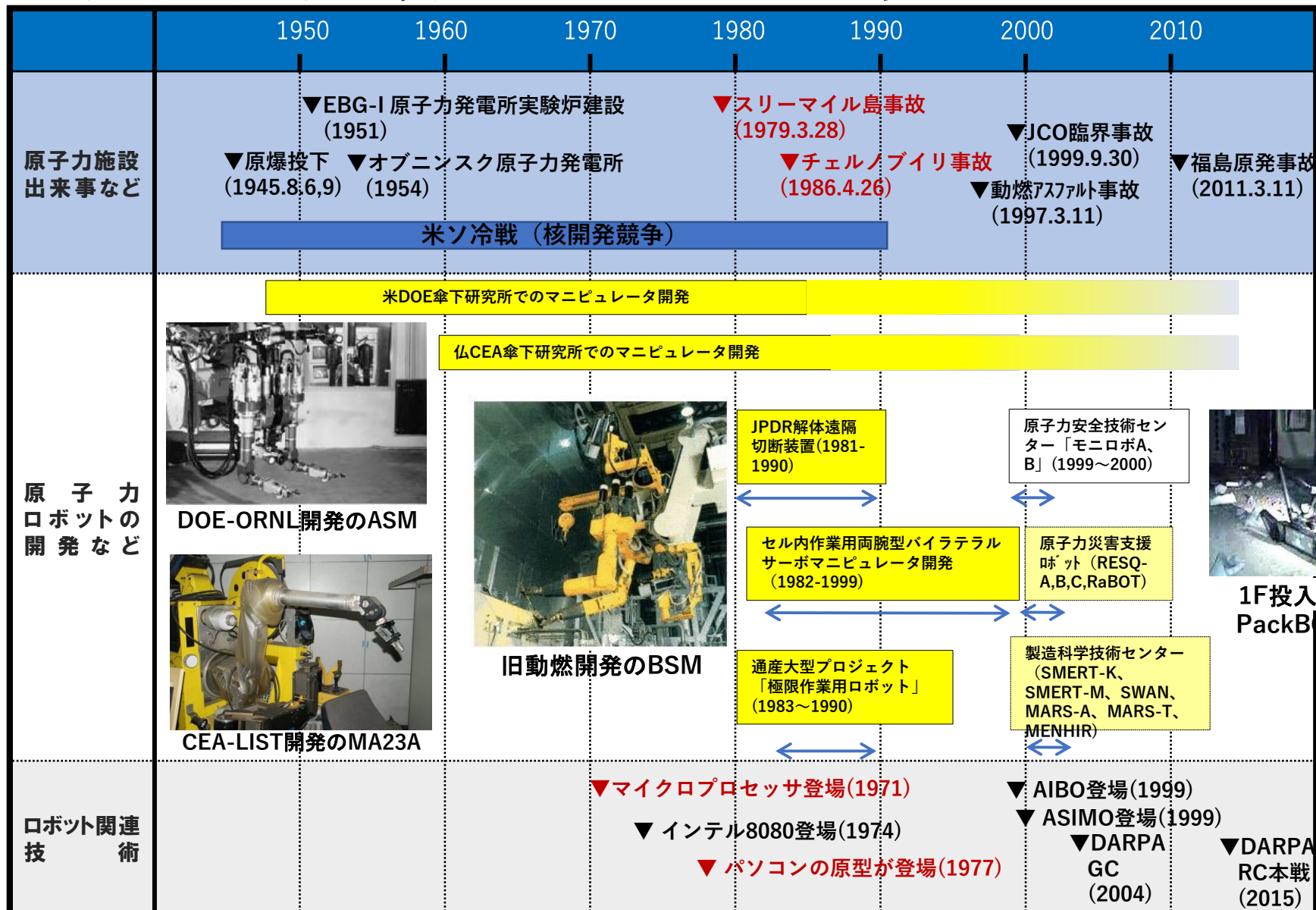
原子力災害で期待されるロボットの主な役割

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

技術的な側面

- ロボットは未知の環境で十分機能するのか？
 - 過去の原子力災害ではどうだったのか？

原子力施設のロボットの開発経緯

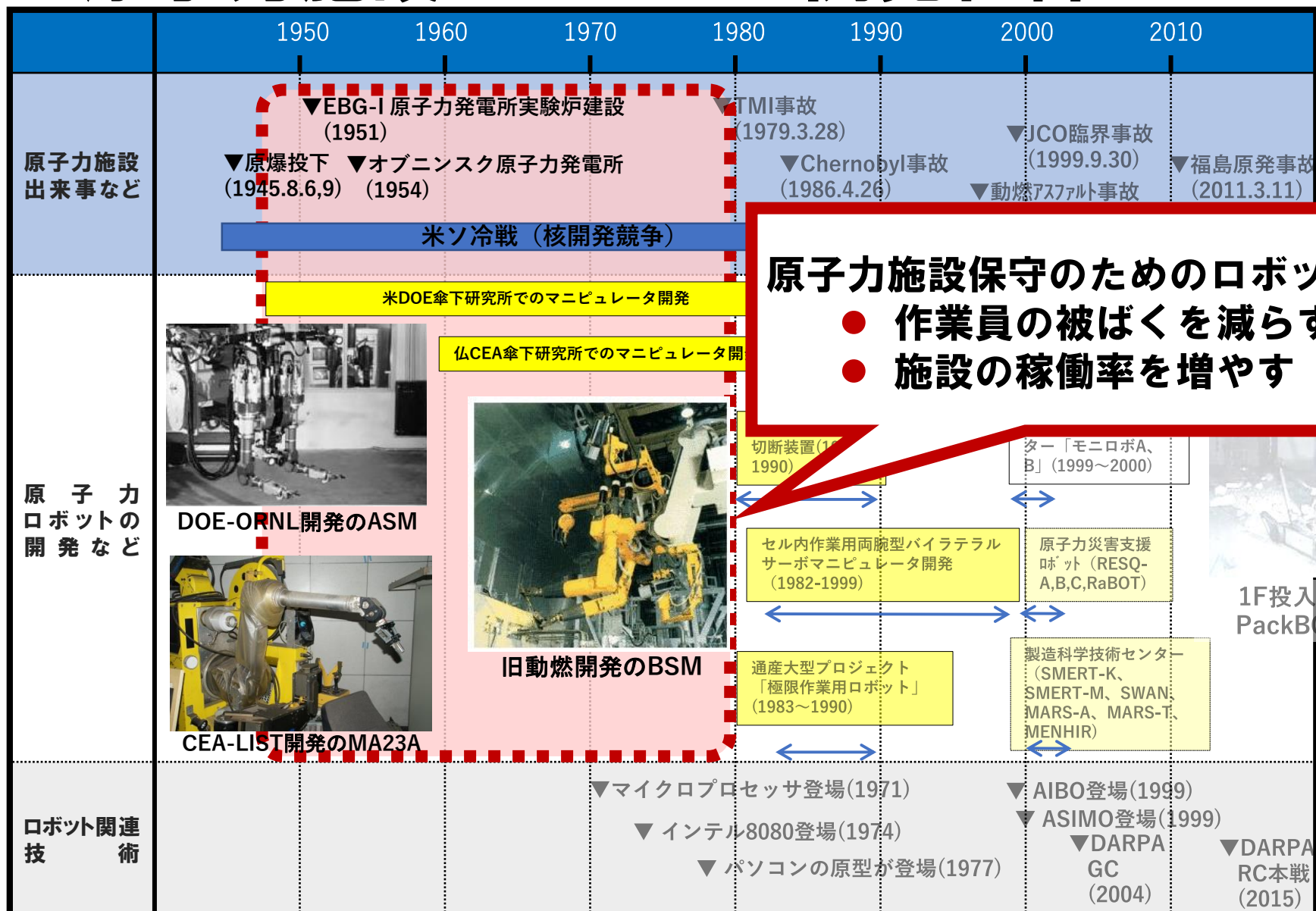


写真出典

<http://books.google.co.jp/books?id=T-Dk9DBd7s4C&pg=PA173&lpg=PA173&dq=ORNL+m2+manipulator&source=bl&ots=UKoaRuRUBv&sig=keHmijQpYX0ztbpVYPByZiWIM9A&hl=ja&sa=X&ei=5xoqU4uvG8XnlAXrqICACQ&ved=0CDUQ6AEwAQ#v=onepage&q=ORNL%20m2%20manipulator&f=true>

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

原子力施設のロボットの開発経緯



原子力施設保守のためのロボット

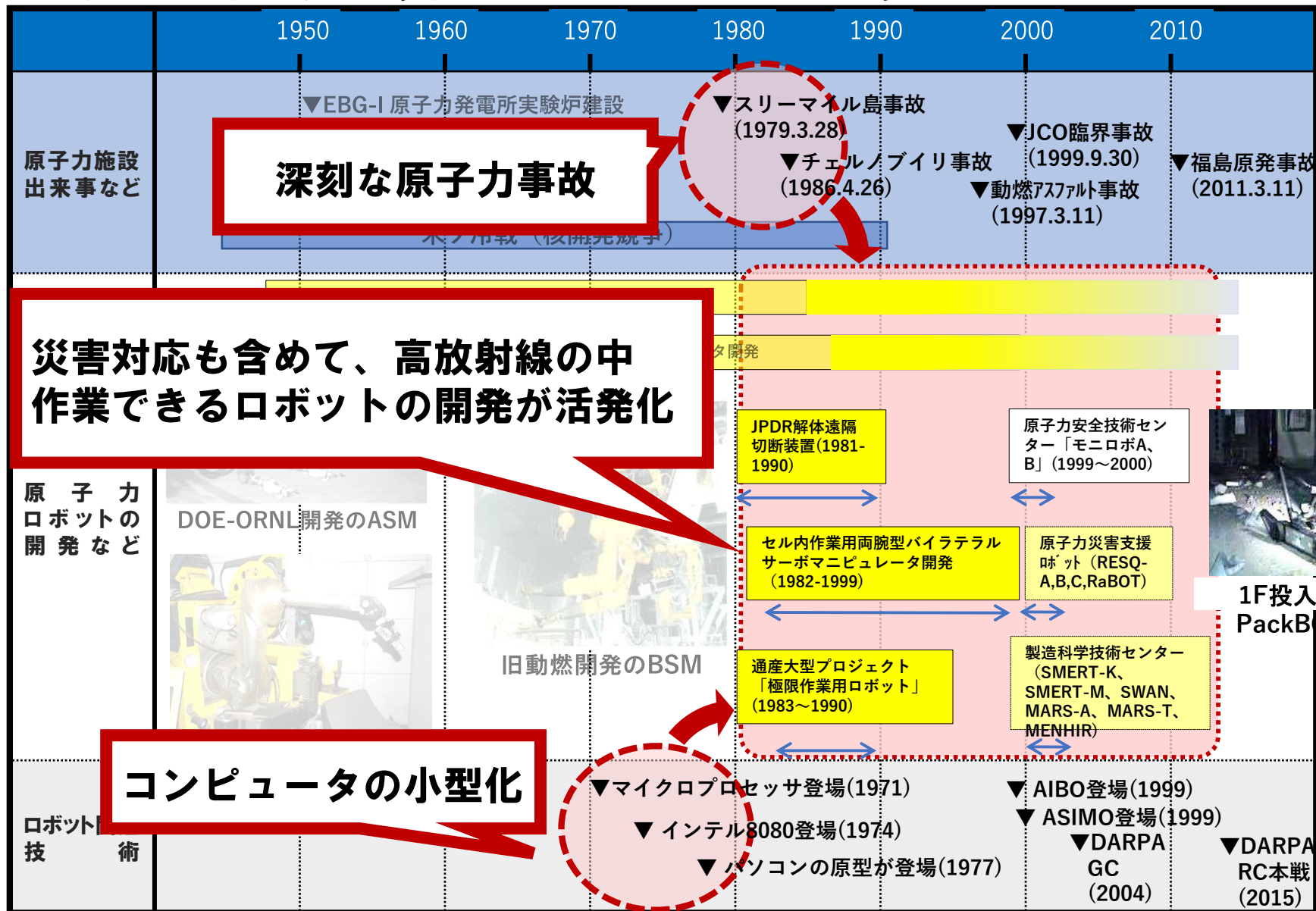
- 作業員の被ばくを減らす
- 施設の稼働率を増やす

写真出典

<http://books.google.co.jp/books?id=T-Dk9DBd7s4C&pg=PA173&lpg=PA173&dq=ORNL+m2+manipulator&source=bl&ots=UKoaRuRUBV&sig=keHmijQpYX0ztbpVYPByZiWIM9A&hl=ja&sa=X&ei=5xoqU4uvG8XnlAXrqCACQ&ved=0CDUQ6AEwAQ#v=onepage&q=ORNL%20m2%20manipulator&f=true>

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

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=keHmijQpYX0ztbpVYPByZlWIM9A&hl=ja&sa=X&ei=5xsoqU4uvG8XnlAXrqCACQ&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

チヨルノービリ／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)
チヨルノービリ／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**放射線により損傷**、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#facrc=&imgdii=&imgcr=SpMsbtAOjUY6tM%3A%3ByK54pKd1lQs3dM%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

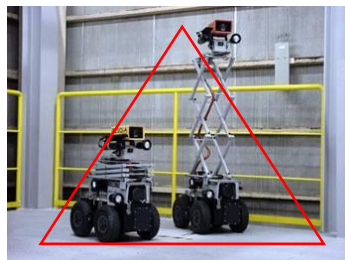
茨城県東海村JCOの臨界事故

- 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？

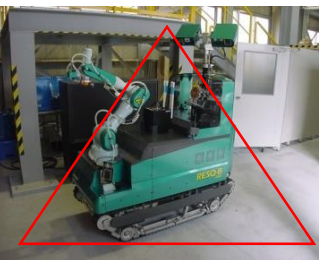
JCOの事故をうけて開発されたロボット



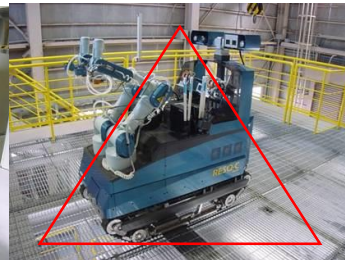
モニロボA、B
原子力安全技術
センタ



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

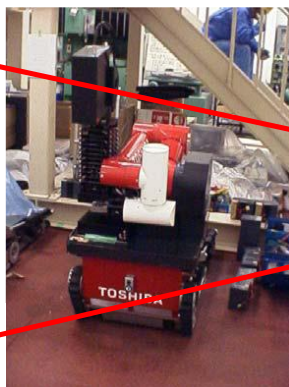


耐放射線性作業ロボット
RaBOT

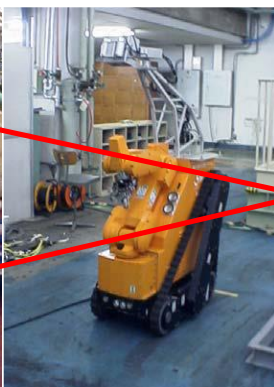
日本原子力研究所（現、日本原子力研究開発機構）



作業支援ロボ
ト
SMERT-K



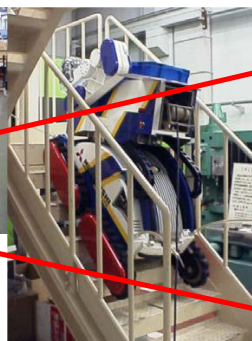
作業支援ロボ
ト
SMERT-M



軽作業ロボットSWAN



作業ロボット
MARS-A



重量物運搬ロボ
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

■1999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

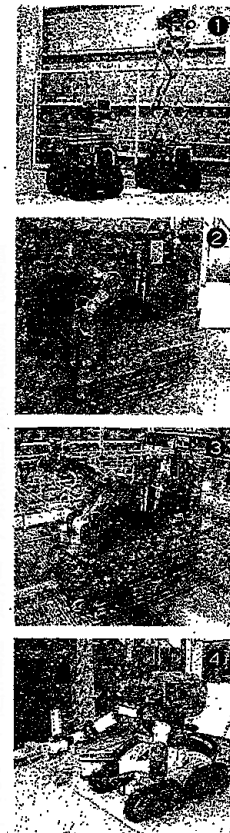
- ・保守管理の予算はつかず
- ・供給については？

■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」



引用: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

何ができただか？

■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**
(災害対応にロボットを使える人)

■保守・供給

- 物はいずれ壊れる
- 技術を供給する**技術者が必要**
 - 持続的な供給のためには産業として成立する必要がある

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

■モノボ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勤させる予定」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

■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>



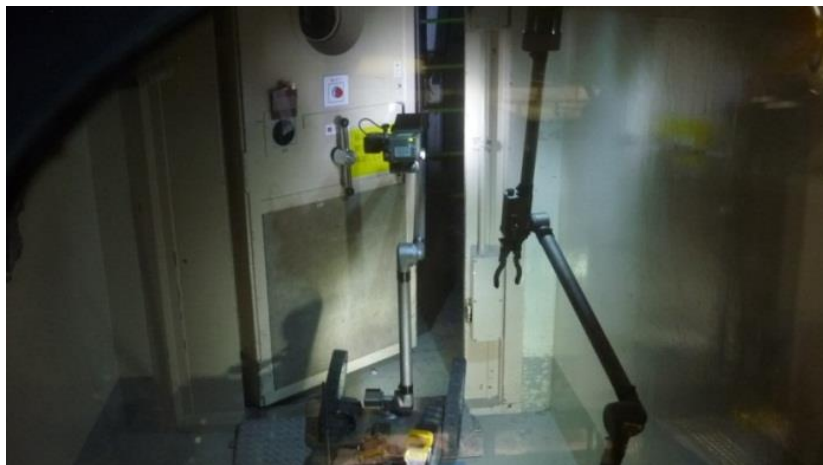
T-Hawk

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:MicroAirVehicling

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～）
- 階段の昇降について確実性に欠けるため1階のみで運用
- 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.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

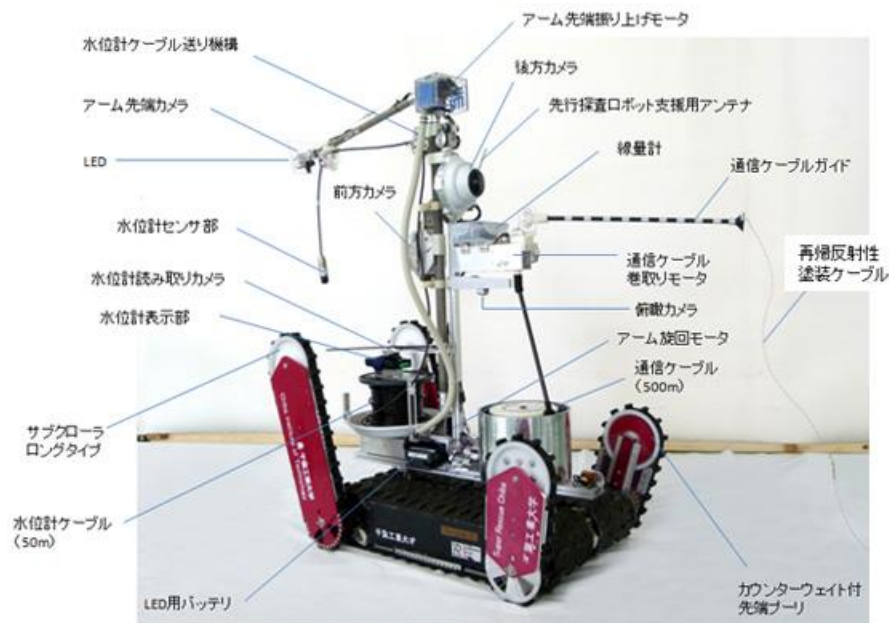


撮影・提供 川妻伸二氏

福島第一原子力発電所事故での緊急時対応ロボット

■Qunice

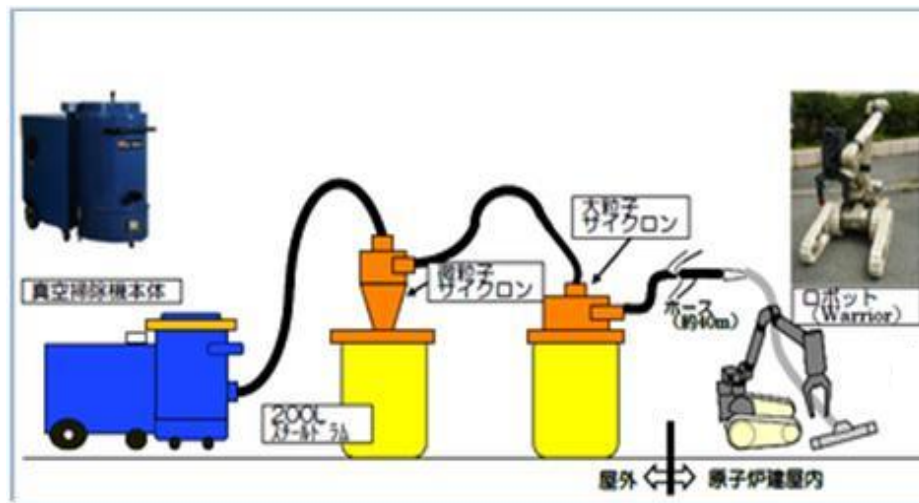
- 千葉工業大学、東北大学、国際レスキューシステム研究機構が開発
- 様々なレスキュー現場を想定した実証実験を繰り返していた
- 東京電力から要請をうけて原子炉建屋の調査用に開発
- オペレータ2名が6週間訓練
- 建屋内の調査を実施（2011年6月24日～）



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・経済産業省令第四号)

・ 第二条 2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 2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・整備の観点）
 - 提供されたロボットが比較的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

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

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・供給
 - ・原子力災害対応専用のロボットの多くは不可動だった
- 災害対応
 - ・1分1秒を争う早さへの対応
 - ・想定外の状況への対応
 - 無線の確保、搬送方法の確保、カメラが曇る、階段で滑る etc

4. 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）

■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