解 説

独仏における原子力緊急時ロボット

Robots for Nuclear Emergency in Germany and France

川 妻 伸 二* *日本原子力研究開発機構

Shinji Kawatsuma* *Japan Atomic Energy Agency

1. は じ め に

東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓から、原子力緊急時の事故収束と影響拡大防止のため、ロボット等資機材とそれらの運用組織を整備する必要性が認識された。国内では民間・大学等により同発電所廃炉を目的とした、より実用的なロボット等の開発が進められる一方、電気事業者は2013年1月23日に「原子力緊急事態支援センター」を設置し資機材の調達・管理や操作要員の訓練を実施するとともに、「原子力緊急事態支援組織」を2015年度中に本格運用させるための具体的な対応準備を進めている[1]。また日本原子力研究開発機構でも2012年10月から小規模ながら過去の遠隔技術開発の知見を基礎として原子力緊急時のためのロボット等資機材の整備運用に着手したところである。

ドイツおよびフランスでは、原子力緊急時にロボット等をあらかじめ整備しておき運用する組織が、1970年代あるいは1980年代に設立されており、約30年の経験を蓄積している。これらの経験は日本においても役立つ貴重なものである。本稿では、両組織が有するロボット等資機材とそれらの運用方法について概要を解説する。

2. ドイツ KHG (Kemtechnische Hilfsdienst GmbH)

2.1 概要

ドイツでは1960年代に原子力に関する研究開発がユーリッヒ原子力研究所およびカールスルーエ原子力研究所で始められ、試験研究炉が稼働し始めた。試験研究炉での事故等の緊急時に備えて、カールスルーエ原子力研究所内に、KHTというチームが設けられ、ロボット等資機材とともにそれらの運用体制についても整備が始められた。

1970年代に入ると商業用原子力発電所の操業が開始されるようになり、放射線防護令第53条で、電力会社、核燃料

サイクル関連企業、再処理事業者、国の研究機関に対して、原子力事故時にプラントの安定化、事故原因の調査、事故影響の除去を行うための機器と設備を事前に手配することが義務付けられた。その結果KHTを改組してKHG[2]が設立された。KHG設立当初はロボット等資機材、モックアップ設備や倉庫等はカールスルーエ原子力研究所でKHTが使用していたものを借用していた。その後、カールスルーエ原子力研究所近傍にKHGの敷地を取得して、倉庫やモックアップ設備等を徐々に整備してきている。

KHGの運営にかかわる年間経費はおよそ6M€で、1977年当時の負担割合はそれぞれ、電力会社87.6%、核燃料サイクル事業者4.6%、再処理事業者1.2%、国の研究機関6.6%である。現在KHGが緊急時にかかわる契約を結んでいるのは電力会社、核燃料サイクル事業者、再処理事業者、国の研究機関の43社である。KHGの年間予算は80年代から90年代にかけて増額されてきたが、1999年に年間6M€に固定された。

緊急時は契約者等からの要請で出動する。勤務時間外にKHGにかかってきた出動要請の電話は、隣接するKIT(Karlsruhe Institute of Technology, 旧カールスルーエ原子力研究所)に転送される。KITでは24時間体制が敷かれており、KITからKHGの担当者に連絡され、出動する体制となっている。

KHGの常勤者は23名で、うち計画管理担当が6名でロボット等オペレータが17名である。さらに、電力、核燃料サイクル企業、原子力研究施設の職員でロボット等の操作訓練をして緊急時はKHGのオペレータの下でロボット操作を行う協力オペレータも140名いる。ロボットオペレータは定期的に、3~4人ずつ再教育訓練を受けている。

緊急時には、招集後2時間以内に、KHG近傍に住んでいる者の中から16名を招集する。現地に派遣する第一陣はこの16名のなかから編成される。更に8時間以内に60名、24時間以内にもう60名、合計120名が招集される。このうちKHG近傍に居住していないものは、必ずしもKHGではなく、現地近傍のあらかじめ指定された場所で合流することになっている。

ドイツ各地の原子力施設までの輸送は、原則としてアウ

原稿受付 2013年11月20日

キーワード: Robots, Nuclear Emergency, KHG, GroupeIN-TRA

*〒100-8577 千代田区内幸町 2-2-2

*Chiyoda-ku, Tokyo

図 1 ロジスティクストレーラ

図 2 配管内走行小型偵察ロボット

トバーンによる陸送が想定されている。第一陣は乗用車やワゴン車に放射線モニタリング機器や偵察用のロボット等資機材を搭載して、アウトバーンを平均 120 [km/h] で走行し、12 時間以内に現地に到着する。そのために 8 台の乗用車と 3 台のバンを保有している。第二陣はトレーラに収納または搭載された、全身計測装置、身体除染車、サンプル分析設備、各種ロボットを、平均 80 [km/h] で走行して現地に向かう。第三陣には器材除染装置を搭載したトレーラのほか、オペレータの休憩設備や装備品を収納しているロジスティクストレーラ（図 1 参照）等も含まれ、これらも平均 80 [km/h] で走行して現地に向かう。

これらの車両は原則として 1 人で 1 台を運転する。

また、KHG は後述するフランスの GrouoeINTRA と協力関係にあり、ロボットの共同調達・部品融通等を図っている。

2.2 主な遠隔機材等

KHG はロボットを全部で 12 台保有している。主要なものは以下のとおりである。

1) 小型管内ロボット

150 [cmφ] の配管内を通れる小型のロボット（図 2）で、本機単独で配管内を調査することもあるが、瓦礫等を偵察ロボットが走破できないような場合は、蛇腹ホースを作業員または中型の作業ロボットで敷設して、その中を走行して、瓦礫等障害物の向こう側を偵察することも想定している（図 3 参照）。

2) MF3

初期（1970～1980 年代）に開発されたロボットで、四つのクローラを有しており、作業員通路も通過できる（図 4 参照）。原則として有線通信である。現在は 2 台保有してい

図 3 仮設蛇腹配管

図 4 MF3

図 5 MF6

図 6 MF4

るが、1986 年のチェルノブイリ事故時には別の 1 台が旧ソ連に供与され、原子炉建屋地下階の偵察に使われた。今後は後述する MTS に置き換えていく計画である。

3) MF6

MF6 は無線でも有線でも通信可能な偵察用ロボットである（図 5 参照）。

現在 2 台を保有している MF6 も MF3 同様、今後後述する MTS に置き換えていく計画である。

4) MF4

MF4 は屋内用ロボットで、アームやカメラを搭載しており軽作業を行えるようになっている（図 6）参照。発電機等を搭載したトレーラを牽引することでより長時間連続して使用することも可能である。ただ、トレーラ付きでは狭いところでは使い難い。

図 7 EROS

図 8 LMF

図 9 MTS

図 10 操作車内の MTS 操作卓

5) EROS

EROS は KHG と協力関係にあるフランスの Groupe IN-TRA と共同でフランスの Cybernetics 社から調達されたロボットである (図 7 参照)。共同調達のみならずその予備品管理を融通し合うことも考慮されている EROS には耐放射線性の 2/3 インチ撮像管型白黒カメラと遮蔽体付き CCD カメラを搭載している。

6) LMF

LMF は Cybernetics 社が開発したロボットであり、2001 年に日本の製造科学技術センターが開発した MENHIR の

図 11 除染装置を搭載した MTS

図 12 SMF

図 13 LMF 搭載トレーラをけん引する SMF

原型となったロボットである。

LMF にはマスタースレーブマニピュレータの MA-23M とパワーアームの MAESTRO が搭載されている (図 8 参照)。

7) MTS

独 Telerob 社から購入したクローラ型の屋内外両用の多目的ロボットである (図 9, 10 参照)。ロボットと操作者間の通信中継器を搭載するほか、除染装置や解体装置等のモジュールも搭載できる (図 11 参照)。

8) SMF

屋外用のロボットで、走行台車に大型アームを搭載しており、ドラム缶などのハンドリングも可能である (図 12 参照)。チェルノブイリ事故時に旧ソ連に提供した MF2 は、使用されていたタービン建屋屋上まで数 100 [m] 離れていた電源から充電を行う必要があったため電圧降下が大きく再充電ができず、新たな電源を用意したときには電子部品が放射線損傷して使用できなかった。これらの教訓を基に、SMF はバッテリー駆動ではなくディーゼル駆動となっている。更に電子回路は 2 種類有しており、一つめはフルスペックの電子回路を薄めの遮蔽箱に納め、二つめは、一つめの電子回路が放射線損傷したときのバックアップ用で、ロボットを帰還させるのに最低限必要な電子回路が倍の厚みの遮蔽箱に納められている。

また、SMF は屋内用ロボットを搭載したトレーラを、原

図 14 Bucket Loader

図 15 Bucket Loader 操作卓

図 16 通信用 30[m] マスト

子炉建屋近くまで牽引していくことも可能である（図 13 参照）。

9) Bucket Loader

建設重機をベースに改造されたものであり（図 14 参照）、高放射線下での土木作業を行うことができるように、車体後部の遮蔽箱に電子回路を納めている。

操作は Bucket Loader を搭載したトレーラ用の牽引車の中に専用の操作卓が設けられている（図 15 参照）。

10) その他

KHG は現地でロボット等資機材を使用する際に、発災地点から極力離れていて、より安全な場所にロボット操作のコンテナを配置し、操作することを想定している。そのためにロボット操作コンテナの傍には 30[m] まで伸びるマスト搭載コンテナを配置し（図 16 参照）、マストの先端に無線用アンテナを装備するほか、建屋入り口や建屋内部には、前述した MTS に無線中継器を搭載して、遠隔機材までの通信を確保できるように配慮されている。

また、KHG では、ロボットごとに担当者を決め、その担当者に教育訓練内容の検討から実施、メンテナンス、改良の計画立案、実施までを責任を持って行わせることで、マイロボット意識を持たせて、モチベーションの維持を図ろうとしている。

図 17 MF2[3]

11) チェルノブイリ事故時に提供されたロボット

チェルノブイリ事故が発生した際、KHG から、MF2（図 17 参照）、MF3、Bucket Loader の 3 台が旧ソ連に提供された。

MF3 はモスクワ経由でチェルノブイリに送られ、原子炉建屋の地下階の偵察に用いられた。MF3 の残骸は、現在チェルノブイリ市郊外にある Robot Cemetery（ロボット墓場）と呼ばれる場所で見ることができる。

MF-2（幅 1.5[m]、3.5[t]、バッテリー駆動の電動モーター方式）もモスクワ経由でチェルノブイリに送られ、タービン建屋上部に飛散した瓦礫撤去に用いられた。前述したように再充電する際の電源ケーブルが長く電圧降下が大きく再充電できなかった。新たに電源を用意して再充電したときには、電子部品が放射線で損傷していて動けなくなっていた。

遠隔操縦の Bucket Loader もモスクワに送られたが、チェルノブイリ発電所には届いていない。その理由は不明である。

2.3 その他

KHG ではロボットそのものの高機能化を求めるというよりは、原子力事故発生時の対応をいかに行うかという現実的な解を見つけるべく、蛇腹ホースを敷設して瓦礫を走破したり、ロボットでトレーラを牽引し、そのトレーラに様々な機器を搭載するなどの工夫をしている。さらにロジスティクスと情報共有にも注力しており、現地での職員や応援者の登録、着替え装備、休憩などを行うロジスティクスコンテナや指揮者用コンテナのほか、遠隔機材の操作コンテナにはロボット等が取得した映像情報などを集約して、事故対策本部に送れるような通信機材（衛星回線含む）等を多数保有している。

このように、ロボット単体の整備ではなく、目的解決型のロボットシステムを整備しているとともに、情報共有装置やロジスティクスにも多大な努力を払っている。

3. フランス GroupeINTRA

3.1 概要

フランスでは 1986 年 4 月 26 日のチェルノブイリ原子力発電所（ChNPP）4 号機の事故後の 1988 年に、フランス電力公社（EDF）、フランス原子力庁（CEA）および核燃料

サイクル企業 COGEMA 社（現 AREVA 社）の三者が出資して GroupeINTRA [4] [5] が設立された。GroupeINTRA とはフランス語で「事故時にロボットで介入する組織」という意味である。

1995 年当時の予算は、(ユーロ導入時のレート $1\text{€} = 6.5\text{F}$ で換算して) 年間約 10 M€ で、負担割合は EDF50%, CEA37.5%, COGEMA 社（現 AREVA 社）12.5% である。2012 年時点では 4 M€ まで削減されていた。これは電力会社や AREVA 社から経費削減を求められた結果である。

緊急時は出資者（EDF, CEA または AREVA）の危機センター、パリの緊急事態室（Inter Ministry Emergency Response Office）等からの要請で出動する。勤務時間外に GroupeINTRA にかかってきた電話は、専用の携帯電話に転送されるようになっており、担当者が順番でその携帯電話を持って帰宅して、緊急時の出動要請の電話を受ける体制となっている。

招集後 1 時間以内に GroupeINTRA は出動準備を開始し、3 ないし 5 時間で出動準備を行い、1～12 時間かけて発災現場に車両で移動する。フランス国内で最も遠くにある原子力発電所でも 4～500 [km] 程度であり、24 時間以内には現地での活動を開始できることとしていた。また GroupeINTRA では、福島事故後に EDF 内に設置された、事故時に電源車やポンプ車を事故が発生した原子力発電所に搬送する FARN というチームとともに、ヘリ等で遠隔機材も搬送し 12 時間以内に事故が発生した原子力施設で活動開始できるようにすることを検討中とのことである。

GroupeINTRA の常勤職員は 20 名で、ロボットオペレータは 30 名（外部協力者含む）である。

GroupeINTRA は設立当初は、EDF や CEA の施設や設備を借用して、ロボット等資機材の保管や保守補修、操作員訓練等を実施している。現在はシノン原子力発電所内の廃止措置中のガス炉 A2 の原子炉建屋一階の一部を使用している。屋外用ロボット（無人重機）のためには、シノン原子力発電所の外に訓練用の敷地を有している。

3.2 主な遠隔機材等

1) EOLE

EOLE は屋内用ロボットで（図 18 参照）、直径 2～3 [mm] 程度の細いもので、被覆を強化した同軸ケーブル 300 [m] 程度を車載ケーブルリールで有しており、屋内では原則として有線で操作している。動力はバッテリーである。

耐放射線性は $10\text{E}4 [\text{Gy}]$ とのことである。

2) EROS

EROS は EOLE よりも一回り小さな屋内用ロボットである。調達コストの削減のほか、予備品の融通などを図る目的で、協力関係にあるドイツ独 KHG と連携して Cybernetics 社から 3 台（KHG が 1 台、GroupeINTRA が 2 台）調達したものである（図 19 参照）。

図 18 EOLE

図 19 EROS

図 20 EROS 操作卓

図 21 EBULL

図 22 EPELL

EOLE 同様に、強化型同軸ケーブルによる有線通信で、動力はバッテリーである。耐放射線性も $10\text{E}4 [\text{Gy}]$ を有している。

操作卓はモニタを折り畳んで、人手で運べるようになっている（図 20 参照）。

3) 無人重機

無人重機としては、ブルドーザーの EBULL（図 21 参照）、シャベルカーの EPELL（図 22 参照）、クローラダンプの EBENNE（図 23 参照）を有している。これらの無人

図 23 EBENNE

図 24 EPPB

図 25 EBULL を操作する EPPB 内部

図 26 EPELL を操作する EPPB 内部

図 27 VERI 2B

重機は遮蔽付操作車 EPPB (図 24 参照) から遠隔操作できるようになっている。EPPB は厚さ 30 [cm] の鉛で操作室を遮蔽されていて、操作卓の前には遮蔽窓も用意されており、オペレータが遮蔽窓越しに操作することも可能である (図 25, 26 参照)。無線通信については、10 [m] まで伸長するマスト型のアンテナ車も有しており、低周波数と高周波数の二系統化を行い、無人重機を 10 [km] 離れたところから操作することも可能である。

前述した無人重機よりも小型の無人重機 VERI 2B も開

図 28 遠隔操作車両外観

図 29 遠隔操作車内部

図 30 遠隔操作車に牽引されたトレーラに収められた通信用気球

発されている (図 27 参照)。この操作も、より小型のキャンピングカータイプのバンから行うようになっており (図 28, 29)、通信アンテナは気球に取り付けるようにされている。通信用気球は小型トレーラに納められ、操作車でけん引できるようになっている (図 30)。

4) その他

遠隔機材のほか、HULIDEC と呼ばれるヘリコプター搭載型モニタリング装置を保有している。これは 25 インチ NaI シンチレータをヘリコプター下部に取り付けて、事故が起きた原子力施設周辺の放射線モニタリングをするものである。なお、ヘリコプターは GroupeINTRA が所有しているのではなく、あらかじめヘリコプター運用会社と、緊急時のヘリコプターとパイロットの出動に関する契約をしている。

3.3 その他

遠隔機材と指揮車間の通信は無線で結ばれている。指揮車の無線用アンテナは高さ 10 [m] まで伸ばせるものが用意されていたほか、最近では前述した通信用気球も用意されている。

指揮車には遠隔機材等で収集したリアルタイムの画像情報のほか、放射線モニタリングデータが集まってくる。Chinon にある GroupeINTRA 本部やパリの政府危機管理部署とのネットワークには通信容量に限界があるため、収集したデータを選択あるいは編集する設備と専任の担当者が

指揮車内に配置されている。このことは、GroupeINTRA 本部やパリの政府危機管理部署での意思決定には迅速かつ的確な情報を伝送する必要との考え方が根底にある。

ロボットコントロールコンテナやロボットは同じ（または同様の）ものを2台程度ずつ保有しており、常時1台は出動体制を維持し、もう1台は操作員訓練やメンテナンスを行っている。これらは、次世代機を導入した後もバックアップとして使うことから長期間にわたって使うことを想定している。長期間使用している装置については、部品がすでに製造中止となっているものもあり、万一の故障に備えて一台は部品取りに使うことも考えている。

4. ま と め

以上、ドイツ KHG とフランス GroupeINTRA のロボット等資機材やその運用方法等について述べてきた。

いずれのロボット等も高機能というよりは事故が起きた原子力施設での使用を念頭に、耐放射線性や通信確実性等の信頼性、除染装置や解体装置などの周辺設備、オペレータの安全確保のための操作車を含めたシステム化を図っている。事故の発生した原子力施設までのロボット等資機材の運搬方法についても検討されており、必要に応じてオペレータがロボットや操作車を原子炉建屋内に作業員が持ち運ぶことも考慮している。このように実際に使えるロボット等資機材の整備に配慮している。

また、時間外の出動要請方法、オペレータ等の招集やオペレータのモチベーションの維持向上等、いかにしてロボット等資機材を使うかという運用方法についても配慮している。

原子力緊急時のロボット等資機材の運用組織としてはフロンティアであった彼らには先例となるものはほとんどな

く、彼らなりに事故の起きた原子力施設で「本当に使えるモノ」を目指して試行錯誤を繰り返してきた結果であろう。

原子力緊急時とは、設計想定事象を越える事象、すなわち想定外事象が起きたときのことであり、ロボット等資機材の使用環境や使用目的を明確には想定し得ない。しかしながら我々日本は福島第一原子力発電所事故で、これまでは想定してこなかったような困難な局面で、ロボット等を試行錯誤しながらも運用してきている。これらの経験を踏まえ、想像力を働かせれば、「本当に使えるモノ」を開発整備することも不可能ではない。今後、日本はドイツ KHG やフランス GroupeINTRA と連携し、原子力緊急時遠隔資機材として、「本当に使えるモノ」を開発・整備していくことが真に望まれる。

参 考 文 献

- [1] http://www.fepec.or.jp/news/_icsFiles/afieldfile/2013/10/25/kaniken_20131025.pdf
- [2] <http://www.khgmbh.de/wEnglisch/index.php>
- [3] <http://medusa.sdsu.edu/Robotics/CS556/Lectures/Introduction.pdf>
- [4] <http://www.groupe-intra.com/index2.htm>
- [5] <http://www-pub.iaea.org/iaea meetings/IEM4/29Jan/Chevallier.pdf>

川妻伸二 (Shinji Kawatsuma)

1982 年早稲田大学卒業。動力炉・核燃料開発事業団（現、日本原子力研究開発機構）勤務。1982 年よりサーボマニプレータなど遠隔操作システム、耐放射線性電子回路などの開発に従事。福島第一原子力発電所事故対応のための原子力用ロボット等を担当。2012 年 10 月から原子力緊急時遠隔機材整備に従事。日本原子力学会、日本保健物理学会などの会員。（日本ロボット学会正会員）