

福島第一原子力発電所の早期収束安定化

- これまで経験したことのない未知なる領域、燃料デブリ取り出し他への取組み -

Mitsubishi Activities for Stabilization and Decommissioning of
Tokyo Electric Power Company Fukushima Daiichi Nuclear Power Station
-Efforts to Unknown Territory with no Previous Experience ; Fuel Debris Retrieval -



藤本 博之*¹
Hiroyuki Fujimoto

河西 賢一*²
Kenichi Kawanishi

山本 暁男*²
Akio Yamamoto

下鍋 典昭*³
Noriaki Shimonabe

島田 隆*⁴
Takashi Shimada

涌田 邦晴*⁵
Kuniharu Wakuda

三菱重工業(株)は、福島第一原子力発電所事故の初期段階より、早期安定化に向けて、原子力分野のこれまでの経験を活かしながら、総合研究所や社内他部門の技術力及び国内外他社との積極的な連携により、多様な支援を行ってきた。本報では、これまでの取組みを技術的側面から紹介する。また、今後早期安定化達成の根幹で、最も技術的ハードルの高い燃料デブリ取り出しが計画されており、技術開発への参画、各種対応を積極的に進め、早期安定化の実現に貢献して行く所存である。

1. はじめに

三菱重工業(株)(以下、当社は、2011 年3月 11 日の東日本大震災直後から“緊急支援対策本部”を設置し、放射線遮蔽物などの緊急物資の提供や、大量の汚染水を貯蔵するためのメガフロートの改造及び汚染水処理システムなどの提案を行ってきた⁽¹⁾。また、福島第一原子力発電所は沸騰水型軽水炉 (BWR:Boiling Water Reactor) で、当社が取扱う加圧水型軽水炉 (PWR: Pressurized Water Reactor) と炉型は異なるが、事故収束へ向けて当社グループの技術の総力を結集した取組みを実施した。本報では、これまでの取組みを技術的側面から紹介するとともに、今後廃止措置において最も技術的ハードルの高い燃料デブリ取り出し作業に関する当社の技術開発への参画、各種対応の詳細について紹介する。

2. 当社のこれまでの取組み

2.1 全般

当社のこれまでの取組みと廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議中長期ロードマップ⁽²⁾との関係を図1に示す。

本図の通り、当社は事故初期段階から、現在に至るまで、発電所構内外の安定化対策にかかわるさまざまな取組みを行なっている。それらの取組みの一部を以下に紹介する。

*1 原子力セグメントデコミプロジェクト室 主席技師

*3 原子力セグメント機器設計部 主席チーム統括

*5 原子力セグメントデコミプロジェクト室 次長

*2 原子力セグメント機器設計部 主席技師

*4 原子力セグメントデコミプロジェクト室 主幹プロジェクト統括 工博

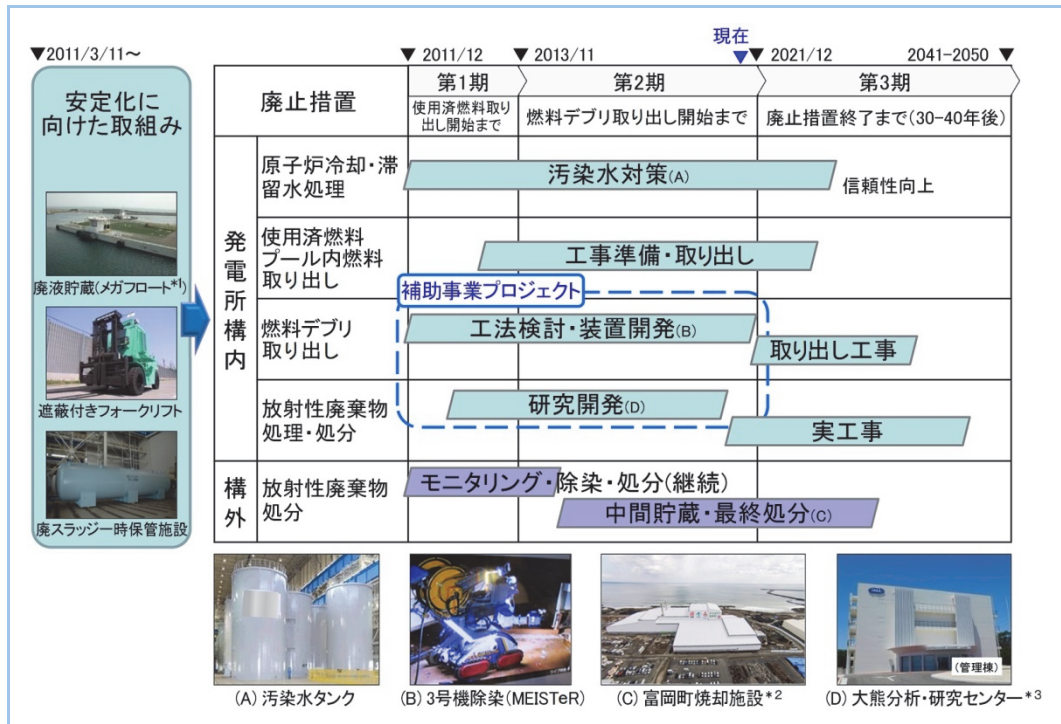


図1 中長期ロードマップと当社の取組み実績

(政府中長期ロードマップ⁽³⁾に基づき当社にて作成したもの)*1 出典:東京電力ホールディングス (<https://photo.tepco.co.jp/date/2011/201105-j/110521-02j.html>)

*2 出典:環境省ホームページ

(http://shiteihaiki.env.go.jp/initiatives_fukushima/waste_disposal/tomioka/processing_tomioka.html)*3 出典:国立研究開発法人日本原子力研究開発機構ホームページ(<https://fukushima.jaea.go.jp/oookuma/>)

2.2 初期段階での安定化への取組み

(1) 廃スラッジ一時保管施設

(a) 設備概要

廃スラッジ一時保管施設は、汚染水処理設備等のうち除染装置で放射性物質を凝集沈殿させた際に発生するスラリー状廃液の廃スラッジを安定的に貯蔵するために設置されたものである。当該施設は、壁厚約1mのコンクリート製セル室に設置されるスラッジ貯蔵タンク、オフガス(スラッジ貯蔵タンクからの排ガス)処理設備、換気空調設備、制御設備、ユーティリティ設備などの設備で構成される。施設概要及びスラッジ貯蔵タンクを図2及び図3に示す。設備の納入にあたっては、当社の使用済核燃料再処理プラントや高レベル廃液貯槽等の設計・製作等の経験に基づく知見、国内外でのプラント建設で蓄積されたノウハウをシステム設計や建設工法など、当社の総合力を取入れ事前検証を確実にを行い、また、客先要望に応え2011年11月着工、2012年4月30日据付け完了、5月10日試運転完了という非常に短い工程を実現した。



図2 廃スラッジ一時保管施設概要

(出典:東京電力ホールディングス(https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/120423/120423_02nn.pdf))

図3 スラッジ貯蔵タンク

(b) 事前検証

貯蔵するスラッジを含む廃液性状を把握するために、スラッジの基本性状を調査し、把握した上で凝固、混合試験、攪拌・温度分布解析等を実施し、貯蔵に対する設備の成立性を検証した。主な検証項目の成果を以下に示す。

① スラッジ攪拌性流動解析・評価

廃液保管中のスラッジ固着防止のためバブリングによるスラッジ攪拌性を評価するために、流動解析を実施し、最適なバブリング条件(バブリング管の本数や位置、流量)を確認した。図4に解析結果の一部を示す。

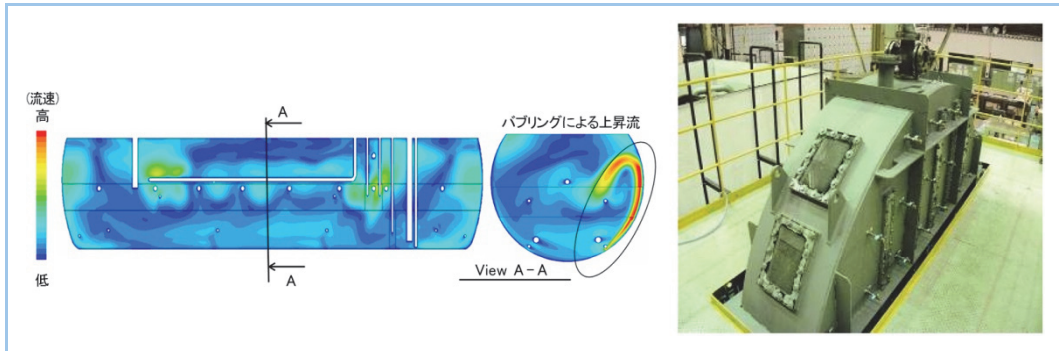


図4 流動解析結果とカットモデル攪拌試験装置外観

② カットモデル攪拌試験

実機タンクのカットモデルで模擬スラッジ廃液を用いて、攪拌試験を実施し、タンク内での攪拌性及び流動解析の妥当性を確認した上で実機での攪拌運転要領を策定した。

(c) 据付け工事

スラッジ貯蔵施設の据付け工事は、福島第一原子力発電所構内において 2011 年 11 月 14 日に開始され、2012 年 4 月 30 日据付け完了、同年 5 月 10 日に試運転完了した。建設工事にあたり、工事期間の短縮を図るため、機器・配管のスキッド化／ブロック化を行った。

(2) 汚染水貯蔵用大型タンク

(a) 設備概要

福島第一原子力発電所においては、原子炉容器の冷却のために使用された水や地下水の流入により発生した汚染された水(汚染水)を保管するために大量のタンクが必要となった。

事故直後段階の保管では、小型のタンクや大型ボルト締結構造のタンクが用いられたが、漏洩のリスク回避や効率的な保管のために短期間で高品質の溶接構造の大型タンクが必要とされた。そこで当社は短納期かつ原子力仕様へ合致した大型タンクを製造、据え付ける計画を提案した。現場での放射線量も考慮し、現地での作業を極力少なくするため工場完成型で海上輸送し、2015 年～2017 年の間に計 192 基を製作・据付けを行った。

(b) 大型タンク設計

タンクの諸元を表1に示す。タンクは工場完成型として輸送することから、発電所構内の輸送やクレーンの揚程、設置場所のレイアウトからタンクの外形を決定している。容量は地震時に発生するスロッシングを考慮、スロッシングの波高が屋根まで届かないように最大水位を決定している。また、短期間で輸送・据付けが可能となるように吊り上げの際には余分な治具や補強部材が必要とならないよう十分な強度を持たせる設計とした(図5)。一方、タンクの据付けに当たっては、地震時に転倒しないことを確認し、基礎ボルトで固定しない構造を採用した。尚、接続される配管をフレキシブルにすることで滑りを許容する設計とした。

表1 タンク諸元

材質	炭素鋼
タンク直径	7～11m
高さ	15m
容量	700～1200m ³
質量(空)	80～100トン

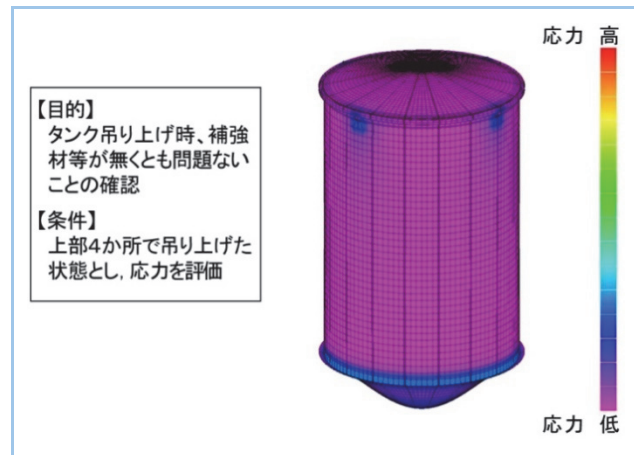


図5 吊り上げ時のタンク応力評価(例)

(c) 工場製作

大型タンクの製造に当たっては、当社大型工場のメリットを生かして大型の鋼板を用いた曲げ加工と溶接組み立てを採用し、短納期と高品質の両立を図った。溶接部については原子力製品に使用する溶接施工法と検査を適用した。また、一基ずつ製作時のデータを記録し、習熟効果適用分析へのフィードバックを行い製造プロセスの品質向上、効率化を図った。さらに、屋外ヤードにタンク製造ラインを作り納期短縮とコスト低減を実現した。

(d) 輸送・据付け

完成したタンクは、台船1隻当たり4～6基を載せ、最盛期には2往復/月のペースで輸送した。なお、発電所の港は他社製のタンクや大型の構造物の搬入で頻繁に利用されていたことから、近隣の港に待機場所を設け、短時間で接岸、水切りを行った。構内輸送は構内の道路を占有することから夜間を実施し、最大で2基/日のタンクの据付けを行い、192 基すべてを短期間・無事故で完遂した。



図6 汚染水タンク 工場製作～据付け

出典:東京電力ホールディングス

※1 (https://photo.tepco.co.jp/date/2014/201404-j/140417_01j.html)

※2 (https://photo.tepco.co.jp/date/2014/201404-j/140418_01j.html)

(3) 双腕型自走ロボット(MEISTeR*)

(a) 開発経緯

事故後の高線量雰囲気下の原子炉建屋内では、各種の廃炉作業に向けて被ばく低減の観点から以下の作業が求められた。

- ① 除染・吸引作業:建屋内での作業を長期的・継続的に実施していくために、作業エリアやアクセスエリアなどの空間線量率を低減するため、除染・吸引作業を行う。
- ② コア穴あけ・採取:建屋内の具体的線量低減方策検討のため、高線量エリアについて汚染性状(遊離性・固着性・浸透汚染の有無)の分析を行うため、コアサンプルを採取する。

- ③ ガレキ除去:建屋内の汚染物撤去の観点から、高線量エリアのガレキを除去・回収する。
いずれも高線量下での作業となるため、ロボット等遠隔装置が必要となった。そこで、“双腕型自走ロボット(MEISTeR)”による遠隔作業を行った。

(※MEISTeR: Maintenance Equipment Integrated System of Telecontrol Robot)

(b) 装置概要(図7)

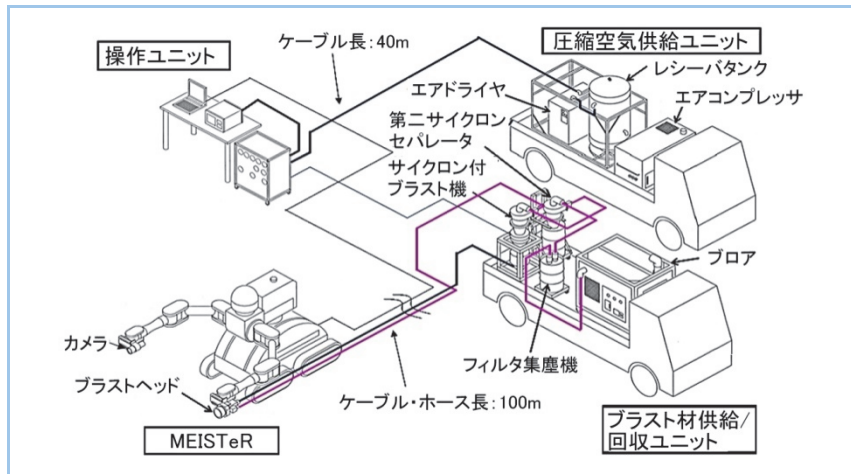


図7 全体システム概要及びロボット・ツール

出典:東京電力ホールディングス

(https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2014/images/handouts_140127_06-j.pdf)

- ① 除染・吸引:除染は、研削材を除染対象に噴射し、表面を研削する方法を採用した。研削材はスチールグリッド(特殊鋼製の鋭いエッジを持った角形粒子)を用い、回収しセパレータで汚染物質と分離した後に再利用するものとした。吸引は、粉塵及び、1cm 程度の小石・砂利等の回収が可能である。
- ② コア穴あけ・採取:左側のアームには、コア穴あけ用のドリル、もう一方のアームには、コアを引き抜くハンドを搭載し、コアボーリングを可能としている。
- ③ ガレキ除去:双腕のアームには、金ブラシやヘラ、塵取り等を搭載し、ガレキ等を拾い収納容器へ入れるようにした。

(c) 工事実績

- ① 除染・吸引:1号機除染作業により、遠隔での走行性、視認性及び除染動作が問題なく実施できることを確認し、適用の目途を得た。吸引除染では粉塵及び1cm 程度の小石を回収し、除染係数(DF 値※)6.6 以上を得た。ブラスト除染では、実機での DF 値は確認できなかったが、除染により塗装を剥離できたことを確認した(図8)。(なお、模擬セシウムを用いた固着性汚染に対し 90%~98%の除去率を示したことを別途確認した。)

(※DF 値:Decontamination Factor の略。除染作業の前後の放射能のレベルまたは濃度の比)

- ② コア穴あけ・採取:2号機のオペフロでの使用実績では、走行する足場が悪く段差もあったが、問題なく走行し全てのコア穴あけ・採取(4か所)を行うことができた(図9)。
- ③ ガレキ除去:3号機南西付近に適用し、対象とするガレキを回収することができた。



図8 除染状況(1号機 南西付近)

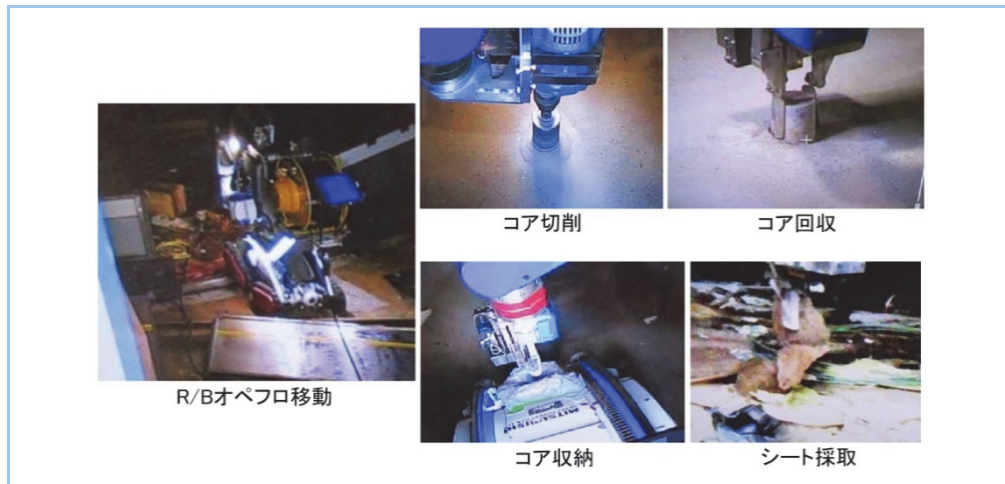


図9 コア採取状況(2号機オペフロ)

出典: 東京電力ホールディングス

(https://www.tepco.co.jp/decommission/information/committee/roadmap_progress/pdf/2014/d140327_06-j.pdf)

(d) MEISTeR II の開発

上記の実績を受け、MEISTeR をベースに狭隘な環境でも自走でき、様々な作業に対応可能な MEISTeR II を開発し、実機適用性を確認した⁽³⁾。主な改良点は、①狭隘部の通過性能の向上、②マニピュレータ取扱い重量向上である(図 10)。



図 10 MEISTeR II

2.3 燃料デブリ取り出しに向けた技術開発

(1) 燃料デブリ取り出し用ロボットアーム

(a) 概要

図 11 にロボットアームを含む大規模燃料デブリ取り出しシステムの全体概要を示す。燃料デブリの削り出し、破碎等を効率的に行い、また、多種多様な加工装置(先端ツール)を高精度でアクセスさせるため、油圧駆動、高位置決め精度を有する6軸ロボットアームを開発した。

(b) 装置概要

ロボットアームはペDESTAL 内で作業するため、制御棒駆動装置(CRD: Control Rod Drive) 交換用開口を通過後、任意の姿勢変更を行なう。また、ロボットアームが故障し動けなくなると、燃料デブリ取り出し作業が継続できなくなるだけでなく、アーム自体の搬出も難しくなる。そこで、高い信頼性と非常時の脱出が必要となる。試作したロボットアームの構成と仕様を図 12、表 2 に示すとともに、以下に詳述する。

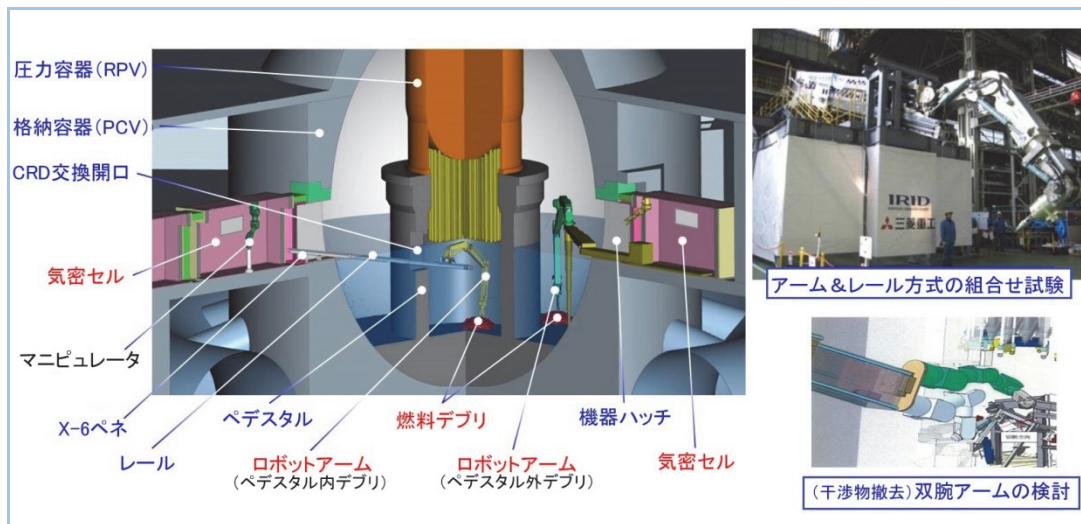


図 11 大規模燃料デブリ取り出しシステム概要

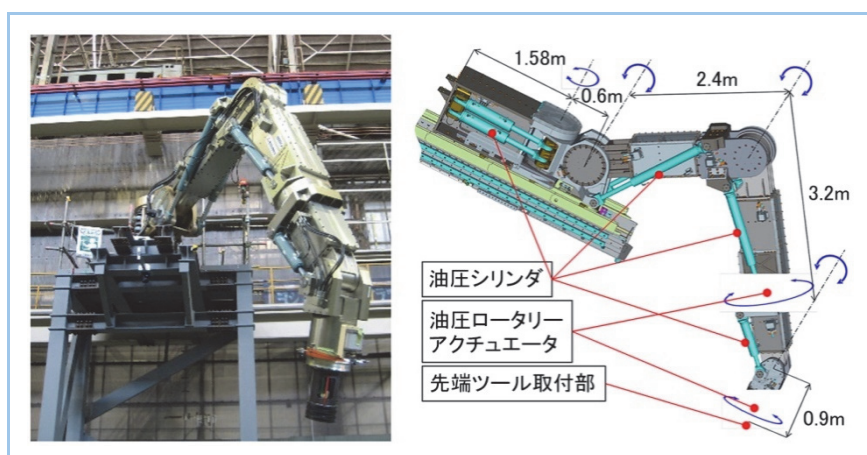


図 12 ロボットアーム試作機・構成

表2 ロボットアーム試作機・仕様

構造	軸構成: 6軸 (根本から①旋回-②肩起伏-③肘起伏-④手首回転-⑤手首曲げ-⑥手先回転) 寸法: 幅 700×アーム長 7100 (全長 8680)×高さ 920mm ※ベDESTAL底面下 1.5m の範囲までアクセス可能 ※CRD交換用開口を通過しベDESTAL内へアクセス可能 ※ケーブルや油圧ホースを装置内に収納しコンパクトかつ外界障害物との干渉を防止
最大手先力	下向き2ton の押し付け ※油圧シリンダ×4軸 油圧ロータリーアクチュエータ×2軸
質量	約 3.5ton
位置決め精度	アーム先端位置決め精度 ±5mm
非常脱出機構	油圧回路の冗長性による ※油圧シリンダ, 圧油供給ラインの冗長化 ※各軸1本の油圧シリンダのみで搬出姿勢へ変更可能な出力設計

① 故障してもベDESTAL内から脱出できる非常脱出機構

ロボットアームが、CRD 交換用開口を通過できる姿勢にまで復帰させるため、各軸に、ロボットアームの自重を動かせる出力の油圧シリンダをそれぞれ2本装備し、片側のシリンダ系統に故障が生じて、もう一方のシリンダで各軸の姿勢制御を可能にした。

② コンパクトな外形寸法

ロボットアームをベDESTAL内へ搬入するには、ベDESTAL部の幅 750mm の CRD 交換用開口を通過する必要がある。また、各種燃料デブリ加工方法に応じた先端ツールのユーティリティケーブルやホース類をアーム外側の構造と干渉させないようにする必要もある。そのため、ケーブル、油圧ホース、油圧機器をロボットアーム内に収納して外形寸法を幅 700mm×高 920mm に抑えた。

③ 広範囲にわたるアクセス性と高い位置決め精度

燃料デブリがあると想定されるペDESTAL底面及び燃料デブリ溶け込み量 1.5mを考慮し、ペDESTAL底面下 1.5mまでアクセスできるようアーム長を 7.1mとした。

また、分布、性状及び加工方法が不確定な燃料デブリに対し、多種多様な加工装置(先端ツール)を任意の姿勢でアクセスできるよう、6軸アーム方式を採用した。運転操作性向上を目指し、高い位置決め精度実現のため、関節角度を精度よく検出する目的で、角度センサとして耐放射線性の高いレゾルバを複速で用いた。関節角度情報と、各軸の油圧シリンダと油圧ロータリアクチュエータの油圧情報を適切に処理する制御手法を開発し、アーム先端の位置決め精度 $\pm 5\text{mm}$ 以下を実現した。

④ 大きな加工反力に耐えうる高出力、高強度構造

ボーリング等の機械的工法で燃料デブリを加工する場合に想定される大きな反力(最大2tonと想定)を抑制しつつ、コンパクトな外形寸法を実現するため、アクチュエータとして小型高出力が期待できる油圧駆動を採用した。

(2) 燃料デブリの分析並びに分析施設の整備

(a) 位置付け、目的

福島第一原子力発電所の事故で熔融した核燃料は、周囲の構造物を巻き込みながら燃料デブリとして様々な形態で炉心内外に存在していると考えられる。取り出された燃料デブリは容器に収納後、遮へい機能を備えた建屋等に移送され、安全に閉じ込め、保管される計画である。燃料デブリ取り出しを含むこの一連の操作を安全かつ合理的に行うには、取扱い対象である燃料デブリの物理的、化学的、核的な性状を把握することが必要であり、そのためには燃料デブリの分析が重要となる。更に、将来の燃料デブリの処理処分の検討においても安全評価に影響を与える可能性がある放射性核種の分析データが重要であり、そのための将来計画への対応が必要となる。

(b) 燃料デブリの分析施設の整備

燃料デブリの分析施設は、福島第一原子力発電所の敷地内に日本原子力研究開発機構を事業主体として整備が行われており、当社は、関連会社であるニュークリア・デベロップメント(株)が茨城県東海村に所有するホットラボにおける核燃料物質や放射性物質の豊富な分析経験、六ヶ所再処理工場などに放射性物質の分析設備を納入した実績をもとに、設計から製作・据付け、検証に至る一貫した取組みによる質の高い分析設備の供給を目指して以下が可能な体制を整え、必要な対応を図っている。

- ① 安全設計:核燃料を含む高放射性物質と想定され、同時に性状が不明な燃料デブリを取扱う上で必要な臨界安全や被ばく防止(遮へい確保)等の安全設計を実施する。
- ② 閉じ込め機器設計:形状、組織、密度、硬度等の物理的・機械的性状、U, Pu, 有機物等成分の化学的性状、 α , β , γ , 中性子線等の放射線特性など、様々な分析要求に応えるための分析装置の構成、ならびに高線量放射線下でも操作可能とする鉄セルや放射性物質の汚染拡大防止のためのグローブボックス、フード等の計画を行う。
- ③ 分析装置の鉄セル内設置対応改造:個々の専門メーカーから供給される分析装置を鉄セルやグローブボックス等に設置するための保守性の向上や放射性廃棄物低減を目的とした改造を実施する。分析装置と鉄セル等の双方の要求を高度にすり合わせるアレンジメントを行う。 13 に改造のイメージを示す。
- ④ 将来計画:現時点で要求内容の不明な分析や研究項目が将来生じた場合への予備的措置を計画する。
- ⑤ 製作・据付け:高放射線を遮へいするための重量物である鉄セルに対する高精度での製作、据付けを行う。
- ⑥ 検証試験:鉄セルに設置される分析装置に対する遠隔操作による運転性や保守性の

検証を行う。図 14 に検証設備を示す。

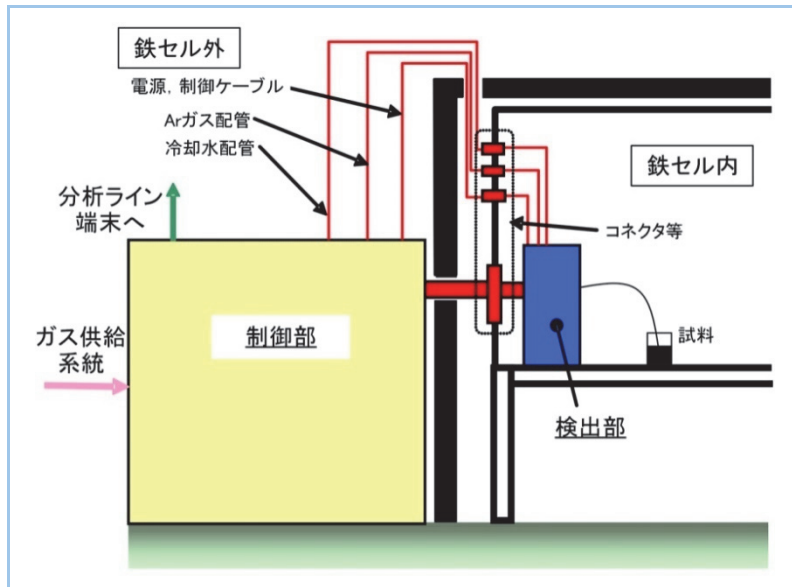


図 13 分析装置の鉄セル内設置における改造のイメージ



図 14 分析装置類の遠隔操作性の検証設備

3. 今後の本格的デブリ取り出しに向けて

東京電力ホールディングス(株)は、今後の燃料デブリ取り出しに向けて、政府中長期ロードマップ⁽²⁾や原子力損害賠償・廃炉等支援機構(NDF: Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation)技術戦略プラン⁽⁴⁾に基づき、廃炉中長期実行プラン2020⁽⁵⁾を策定、中長期ロードマップのマイルストーンである“初号機の燃料デブリ取り出し開始(2021年内)”を実現し“段階的な取り出し規模の拡大”に向けた具体的な作業プロセスを示している。当社は、それに向けて、2号機での“原子炉格納容器(PCV: Primary Containment Vessel)内部詳細調査装置”の開発、“試験的燃料デブリ取り出し”、“段階的な取り出し規模の拡大”及び1, 3号機の“取り出し規模の更なる拡大”に向けた装置開発に取り組んでいる。それらの概要を以下に示す。

3.1 “初号機の燃料デブリ取り出し開始(2021年内)”に向けた取組み

2号機に投入される予定であるPCV内部詳細調査装置とは、内部構造の状態(形状、寸法)、燃料デブリ分布、 γ 線量分布等の情報を取得するための装置である⁽⁶⁾。また、その装置を活用し、内部詳細調査後に調査用アームの先端ツールを取り出し用のツールに交換することにより、試験的な燃料デブリ取り出しを行うことを計画中である。図 15 に調査装置外観及び燃料デブリ取り出し装置を示す。



図 15 PCV 内部詳細調査装置外観及び試験的燃料デブリ取り出し装置

3.2 “段階的な取り出し規模の拡大(2号機)”に向けた取組み

段階的に規模を拡大した取り出しに向けて、PCV 内部詳細調査用アームの短尺化、剛性アップの改良を施し、ペイロード(負荷容量)を10kgから20kgに向上したアーム及び先端ツールを開発中である⁽⁶⁾⁽⁷⁾。図 16 に取り出しアーム及び先端ツールの概念を示す。

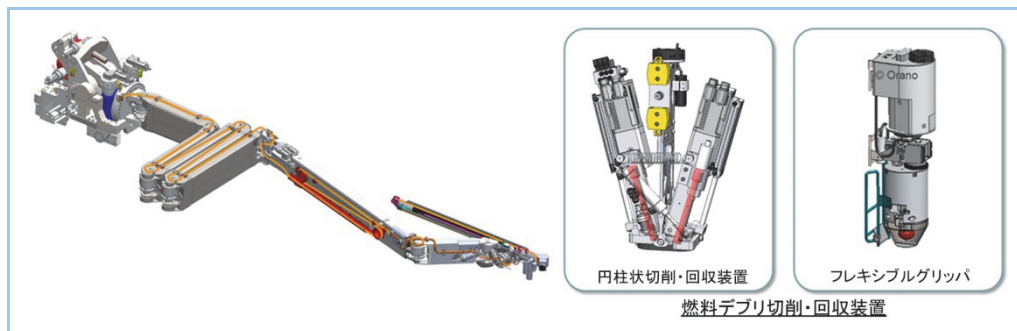


図 16 段階的に規模を拡大した取り出し用アーム及び先端ツール概念

3.3 “取り出し規模の更なる拡大(1, 3号機)”に向けた取組み

当社は、大規模な燃料デブリ取り出し工法に関する技術開発の当初より、燃料デブリへの最短距離でのアクセスが可能な CRD 交換用開口を活用した気中-横アクセス工法を考案し、補助事業による技術開発を実施(図11)してきた。また、継続して安全設計、安全システム、セル構造、アクセス装置(前章にて紹介)等の燃料デブリ取り出し全般にかかわる種々の技術開発に取り組んでいる⁽⁸⁾⁽⁹⁾等。今後は、先行する2号機の燃料デブリ取り出しから得られる種々の知見に基づき、本工法の更なる高度化を図る予定である。

4. まとめ

当社は、福島第一原子力発電所の早期収束安定化を日本の原子力事業の重要課題と認識し、事故の初期段階より、原子力分野のこれまでの経験を活かしながら、社内他部門の総合技術力及び国内外他社との積極的な連携により、多様な支援を行ってきた。本報では、これまでの取り組みを技術的側面から紹介した。今後は、これまで経験したことのない未知なる領域で、難易度の高い燃料デブリ取り出し作業が計画されており、これまで進めてきた関連技術開発のさらなる高度化、詳細化を行いながら、引き続き、全力で取り組む所存である。

なお、本内容の一部は、経済産業省 廃炉・汚染水対策事業費補助金により、技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID: International Research Institute for Nuclear Decommissioning) の組合員として、当社が開発して得られた成果である。

参考文献

- (1) 2011/4/27 三菱重工ニュースリリース
- (2) 廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議“東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ”令和元年12月27日
- (3) 三菱重工製品情報 <https://www.mhi.com/jp/products/energy/meister2.html>
- (4) “東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラ

- ン 2019) (2019 年9月9日原子力損害賠償・廃炉等支援機構公表)
- (5) 2020 年3月 27 日 “廃炉中長期実行プラン” 東京電力ホールディングス株式会社
 - (6) 平成 28 年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金“原子炉格納容器内部詳細調査技術の開発”平成 30 年度分 成果報告 令和元年7月 技術研究組合国際廃炉研究開発機構
 - (7) 平成 28 年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金 “燃料デブリ・炉内構造物の取り出しに向けたサンプリング技術の開発” 平成 30 年度実施分最終報告 令和元年7月 技術研究組合国際廃炉研究開発機構
 - (8) 平成 26 年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金 燃料デブリ・炉内構造物取り出し工法・システムの高度化事業 平成 28 年度最終報告書 平成 29 年3月 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID)
 - (9) 平成 26 年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金 燃料デブリ・炉内構造物取り出しの基盤技術開発事業 平成 28 年度最終報告書 平成 29 年3月 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID)