

## 福島第一原子力発電所廃炉検討委員会セッション

## 廃炉作業 10 年 福島第一の廃炉の今 課題はなにか

Decade of Fukushima Daiichi NPS decommissioning. What are the challenges of the future?

## (3) 廃炉技術の研究開発の進捗：成果と課題

## (3) The Progress of R&amp;D for Decommissioning Technologies: Achievements and Challenges

\*野田 耕一<sup>1</sup><sup>1</sup>日本原子力研究開発機構

東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所(以下、1F)の事故から10年が経過した。1Fの廃炉は世界がまだ経験したことがない困難な取組みであり、当初から廃炉作業とともに各種研究開発、技術開発が必要であるとされ、実際に、国を始め各機関においてそのための取組みも行われてきた。これまでの1F廃炉技術の研究開発の取組みと主な成果を踏まえ、研究開発の進捗と廃炉への貢献について概説するとともに、今後取り組むべき課題について紹介する。

## 1. 研究開発の体制とこれまでの取組み

## 1-1. 研究開発体制の整備

1F廃炉に関する取組みについては、2011年12月に「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」(以下、「中長期ロードマップ」)が政府の「原子力災害対策本部 政府・東京電力中長期対策会議」において決定され、以降、継続的な見直しが行われつつ、この「中長期ロードマップ」に基づき進められている。現在は、2019年12月に政府の「廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議」で決定された第5回改訂版に基づき廃炉が進められている。1Fの廃止措置の主な作業は、汚染水対策、使用済み燃料プールからの燃料取り出し、燃料デブリの取り出し、原子炉施設の解体、放射性廃棄物の処理・処分であり、それぞれに研究開発が必要な技術課題が多数存在する。「中長期ロードマップ」の決定と同時に、これらの技術課題に必要な研究開発をまとめた「研究開発計画」も決定されており、当初から、廃止措置に合わせて研究開発を進めていくこととされていた。

2013年3月には、遠隔操作機器・装置等の開発実証施設(モックアップ施設)及び放射性物質の分析・研究施設の整備を行うことが政府の「東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議」で決定された。これらの施設は、日本原子力研究開発機構(以下JAEA)を中心として、政府機関、産業界の協力の下、整備することとなった。この決定に基づき、JAEAは楢葉遠隔技術開発センター(モックアップ試験施設;2016年4月運用開始)(通称「NARREC」)及び、現在建設中の大熊分析・研究センター(放射性物質分析・研究施設;2018年3月施設管理棟運用開始)を整備している。

また、2013年8月には、1Fの廃炉に必要な技術開発を直接的に担うメーカーや研究機関からなる技術研究組合国際廃炉研究開発機構(以下、IRID)が設立された。IRIDには、プラントメーカー(日立GEニュークリア・エナジー、東芝エネルギーシステムズ、三菱重工業、アトックス)、電力会社(東京電力、中部電力、他)、国立研究開発法人(JAEA、産業総合研究所)が参画し、格納容器内部調査用のロボット開発、デブリ取り出しマニピュレータ開発、廃棄物の分析・評価、廃棄体化技術開発等、数多くの1Fの廃炉に直結する技術開発に取り組んできているところである。

こうした体制整備と合わせて、経済産業省は、1F廃炉の現場で使われる技術の研究開発を行うため、廃炉・汚染水対策事業を2013年度から開始した。

## 1-2. 基礎・基盤研究体制の整備

一方、1Fの廃炉は極めて技術的難易度の高い試みであり、国内外の英知を結集し、産学官一体となって、先端技術開発と人材育成に関する取組みを推進する必要性も指摘された。これを踏まえ、2014年6月に文部科学省が「東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等研究開発の加速プラン」(以下、「加速プラン」)を策定した。

本プランを踏まえて、JAEAは2015年4月に廃炉国際共同研究センター（2020年4月に福島環境安全センターと統合して、廃炉環境国際共同研究センターに改組）（以下、CLADS）を組織し、IRID組合員としての技術開発のみならず、大学や国内外の機関と連携しつつ廃炉に必要な基礎・基盤研究として、「燃料デブリの性状把握」、「炉内状況の解明」、「放射性廃棄物の処理・処分」、「遠隔技術開発」を進めている。

また、本プランに基づき文部科学省では、2015年度から「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」（以下、「英知事業」）を開始した。本事業では、国内外の英知を結集し、国内の原子力分野のみならず様々な分野の知見や経験を、機関や分野の壁を越え、国際共同研究も含めて緊密に融合・連携させることにより、原子力の課題解決に資する基礎的・基盤的研究や産学が連携した人材育成の取り組みが推進されてきた。2018年度の新規採択課題から「英知事業」の実施主体を文部科学省からJAEAに移行させ、JAEAとアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築することとなった。

### 1-3. 現在の研究開発体制

1F廃炉は「中長期ロードマップ」でも30～40年と長期にわたるプロジェクトとされており、研究開発についても、「中長期ロードマップ」に基づき戦略的に進めていく必要がある。そのため、原子力損害賠償・廃炉等支援機構（以下、NDF）が2014年8月に改組・設立され、中長期的な視点から廃炉を適正かつ着実に進めるための技術的な検討を行うこととされた。これを踏まえ、NDFは毎年度「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炉のための技術戦略プラン」を策定し、公表している。この中で研究開発の体制について、研究拠点整備も含め下記のように述べている。現在は、研究開発はこの体制で進められてきている。

- ▶ 国内外の大学やJAEA等の研究機関による基礎・基盤研究や応用研究、並びにIRID、海外企業、東京電力等による実用化研究、現場実証が、産学官の多様な主体により実施。
- ▶ これらの研究開発を推進するため、政府は、応用研究、実用化研究及び現場実証のうち難度の高いものは「廃炉・汚染水対策事業」により、基礎・基盤研究に係るものは「英知事業」により支援しており、東京電力においても現場適用に直結した研究開発に取り組む。
- ▶ NDFにおいて、関係機関をメンバーとして研究開発のニーズとシーズの情報共有、廃炉作業のニーズを踏まえた研究開発の調整、研究開発・人材育成に係る協力促進等の諸課題について検討する「廃炉研究開発連携会議」を設置。
- ▶ 研究開発を進めるに当たっては、JAEAの櫛葉遠隔技術開発センター、大熊分析・研究センター、廃炉環境国際共同研究センターも活用し、国際的な視点を含めた廃炉研究開発拠点を整備していくことが重要。

### 1-4. JAEAにおける研究開発の取組み

JAEAは、前述したように、「加速プラン」に基づき、大学や国内外の機関と連携し、世界の英知を結集して、1Fの廃炉に向けた研究開発と人材育成に関する取り組みを推進している。その研究開発拠点として2017年4月には福島県富岡町に、国際共同研究棟の運用を開始した。CLADSは、NARREC、大熊分析・研究センターや茨城地区にあるJAEAの各施設、さらには国や福島県、東京電力、国際機関、国内外の大学、研究機関、企業との研究連携を進めている。

国内外の英知を結集する場として、定期的に「福島リサーチカンファレンス（FRC）」を開催し、国内外の研究者との交流や情報共有等を行っている。国内外の廃炉研究の強化を図るために海外からの研究者を招聘するとともに、OECD/NEAや海外の研究機関との国際協力等を実施し、廃炉に必要な研究分野について、外部の研究者や専門家を交えたワーキンググループ等の活動を行っている。

また、CLADS及び「英知事業」における「廃止措置等基盤研究・人材育成プログラム」採択事業者の共同運営による廃炉に向けた基礎・基盤研究の推進協議体として、「廃炉基盤研究プラットフォーム」を整備し、多様な分野の研究者個人の独自性やアイデアを尊重しつつ、NDFが示した戦略的かつ優先的に取り組むべき6つの重要研究開発課題（ $\alpha$ ダスト等飛散微粒子挙動や燃料デブリ経年変化プロセスの解明等）について検討を深めてきている。さらに、東京電力が直面する廃炉現場における課題や研究ニーズの把握、研究の進め方等の議論を踏まえ、汚染水対策から廃棄物の処理・処分まで含めた廃炉全体を俯瞰し、研究開発のニーズとシーズを整理した「基礎・基盤研究の全体マップ」を公表し、更新を行っている。

現在の「英知事業」の公募に当たっては、NDFが示した6つの重要研究開発課題も含め、「基礎・基盤研究の全体マップ」を研究ニーズとして活用している。

## 2. 研究開発成果

### 2-1. 1F 廃炉のための実用化研究（遠隔技術開発の例）

1F 廃炉の現場で使われる技術の実用化研究は、経済産業省で予算化された「廃炉・汚染水対策事業」において実施されている。その実施者は多岐にわたるが、多くの事業が IRID において取り組まれてきた。IRID における研究開発は、①燃料デブリ取り出しに係る研究開発、②放射性廃棄物の処理・処分に係る研究開発が中心であり、①では、格納容器内部調査技術開発、デブリ取り出し装置の開発、事故進展解析、ミュオンを用いたデブリ検知技術開発などが行われた。特に、ロボット等の遠隔技術開発では、格納容器内部の画像やデータが入手されるなど様々な成果が出ている。

PCV 内の状況は各号機毎に異なることから、各号機の状況・調査内容に即した内部調査用ロボットが開発されてきた。

1号機の PCV 内は、水位が高い状態にあることから水中での調査機能が求められる。2017年には、形状変化型ロボット「PMORPH」による調査が行われ、ペDESTAL外底面に堆積物が確認された。今後の調査では、「潜水機能付ボート型アクセス・調査装置」を用いて、堆積物の下に何があるかの解明が期待されている。

2号機の PCV 内は1号機と異なり、気中での調査となる。2017年、2018年に開発された「クローラ型遠隔調査ロボット」や「釣りざお型調査装置」による調査結果により、圧力容器(RPV)ペDESTALの内側の画像情報が取得され、堆積物の接触調査も行われた。今後、「アーム型アクセス装置」による調査が計画されている。

3号機の PCV 内は水位が高いことから、水中遊泳型ロボット「ミニ-マンボウ」が開発された。2017年に実施された調査から、ペDESTAL下部に溶融物が固化したと思われるものやグレーチング等の複数の落下物、堆積物他が確認された。

燃料デブリ取り出しについては、「廃炉・汚染水対策事業」において、各技術シナリオの比較検討が行われ、気中横取り出しに軸足を置くとの NDF の提言、ひいては、「中長期ロードマップ」の改定に反映された。今後は、IRID で開発中の「アーム型アクセス装置」を用いて、2号機の内部調査、最初の試験的取り出しを行い、その後段階的に取り出し量を増やしていく予定である。さらに取り出し量を拡大するために、大型の装置を組み合わせた「アクセスレール・ロボットアーム組み合わせ工法」、「アクセストンネル工法」及び「搬送台車利用工法」を開発中である。

現在開発中の各ロボットや装置は、開発後にモックアップ試験等を実施し、性能を検証するとともに、捜査員の訓練等も実施する予定である。

### 2-2. JAEA における基礎・基盤研究開発の例（JAEA-Review-2020-023）

事故炉の廃炉技術の研究開発は、科学技術の最前線に位置している。例えば、炉内状況の把握には、わずかな量のサンプルから高度な分析技術を用いて最大限の情報を引き出すことが必要であり、また、耐放射線性の機器による遠隔での計測技術が不可欠である。このような技術課題への取組みとして、JAEA では 1-4 で述べた基礎・基盤研究開発を進めてきている。

「炉内状況の解明」では、原子炉圧力容器破損モード解析を行い、号機ごとの燃料デブリのペDESTALへの移行挙動の特徴をとりまとめるとともに、制御棒ブレード破損試験装置（LEISAN）等を用いて、金属系デブリ形成メカニズムと特性に係る試験データを取得し、炉内状況推定図を整備し、提供した。

「燃料デブリの性状把握」では、模擬燃料デブリを用いて、ウラン-ジルコニウム混合酸化物の機械的性質評価や、炭化ホウ素と燃料、被覆管との反応生成物の評価、Pu 含有模擬燃料デブリの融点測定等を実験室規模で試験するとともに、JAEAの原子力科学研究所で保管されていたTMI-2の燃料デブリサンプルについて、改めて性状評価を行い、1Fの燃料デブリの性状推定を進めた。また、燃料デブリ取り出し、処理・処分、事故原因の究明等における課題、その課題を解決するための燃料デブリの分析条件について検討し、JAEAの報告書（JAEA-Review-2020-004）として公開した。公開にあたっては、外部有識者を含むタスクチ

ームにおいてレビューを受けた。

「放射性廃棄物の処理・処分」では、2-1のIRID事業②の一環として、瓦礫類や汚染水処理二次廃棄物中の放射性物質の分析を進め、得られたデータをデータベースとして公開した。このデータベースは、国際学会及び国内学会にてレビューを実施し、固体廃棄物の取扱い・管理の安全性の向上及び廃炉作業の効率化の検討に貢献している。

「遠隔技術開発」では、コンプトンカメラを用いて、1Fサイト内に飛散・沈着した放射性物質を3次元的に可視化するための放射線イメージングシステムを開発し、1Fサイト内作業現場の汚染箇所を遠隔で検知し3次元的に可視化した。さらなる1F現場への適用に向けてレーザー光を活用した燃料デブリ等の遠隔その場スクリーニング分析技術を開発した。また、プラスチックシンチレーションファイバー（PSF）を用いた $\beta$ 線弁別放射線モニターを開発し、すでに1Fサイトで設置、運用されている。

### 2-3. 「英知事業」での取り組みについて

2015年度から開始された「英知事業」では、具体的には、「戦略的原子力共同研究プログラム」、「廃炉加速化研究プログラム」及び「廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」が推進されてきた。主に、大学等のアカデミアを中心に事業が実施されてきている。

「戦略的原子力共同研究プログラム」では、原子力利用の安全性向上、放射線影響などの基礎・基盤研究に係る20課題が採択された。「廃炉加速化研究プログラム」では、燃料デブリ取出しや廃棄物を含めた環境対策に関する研究として22課題が採択された。

また、「廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」では7課題が採択され、「遠隔操作技術及び核種分析技術を基盤とする俯瞰的廃止措置人材育成（東京大学）」、「廃止措置のための格納容器・建屋等信頼性維持と廃棄物処理・処分に係る基盤研究および中核人材育成プログラム（東北大学）」などが実施された。

その後、「英知事業」実施体制が見直され、2018年度の新規採択課題からその実施主体が原子力機構に移行された。これにより、原子力機構とアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築するとともに、事業全体の管理を行うPD(Project Director)に山名NDF理事長が着任し、ステアリングコミティに廃炉関係者が参加するなど、1F廃炉と「英知事業」との連携がより強化されることとなった。従来のプログラムは、「共通基盤型原子力研究プログラム」、「課題解決型廃炉研究プログラム」、「研究人材育成型廃炉研究プログラム」及び「国際協力型廃炉研究プログラム」の4つに再編され、2018年度からこれまでに計48課題が採択され、現在、いずれも実施中である。

## 3. 研究開発体制の強化と今後の課題への取り組み

### 3-1. 研究開発体制の強化

1F事故から2021年3月で10年が経過し、これまでの間、廃炉のための様々な対応等が行われてきたが、「野戦病院」とも称された1F現場の状況はかなり安定してきたといえる。一方、今後は、燃料デブリの取り出し、廃棄物の処理・処分など、より難易度の高い課題に取り組んでいく必要がある。また、集中ラド建屋での高線量のゼオライト対応など、新たな課題も出てきている。このため、中長期的な戦略に基づき、関係者がより連携して取り組んでいく必要がある。

東京電力においても、プロジェクト管理体制を構築し、研究開発も含めた事業管理体制の強化を図ったところである。

このことから、「廃炉・汚染水対策事業」は、東京電力によるニーズや現場適用を見据えた研究開発との連携をより強化する必要があり、2020年度からNDFが「廃炉・汚染水対策事業」の事務局に参画することにより、プロジェクトの企画立案及び進捗管理の両方の機能を強化する体制に移行した。併せて、東京電力は、研究実施主体と共同での交付申請を行う等、現場適用者としての研究開発への関与が明確になった。NDFは、東京電力と情報交換や意見交換によるコミュニケーション強化を行いつつ、ともに現場のニーズや適用性を考慮した案件を企画するとともに、研究開発の目的や成果の達成目標時期に合致した開発となるよう、研究開発の進捗状況を管理していくこととしている。

### 3-2. 今後の研究開発体制

「中長期ロードマップ」では、2019年12月の改訂において、初号機（2号機）から試験的取り出しに着

手し、段階的に取り出し規模を拡大することが示され、燃料デブリ取り出し開始から 2031 年末までの期間を「第3-①期」と定めた。特に、燃料デブリ取り出しは、その準備から取り出し、搬出・処理・保管等の作業を、現場における他の作業等と並行して進めることから、全体最適化を目指した総合的な計画とするとしつつも、取り出しを進めながら徐々に得られる新たな情報・知見や経験を踏まえ、不断の見直しを行うといった工程管理の重要性が示された。また、廃棄物対策については、2017年9月に決定した「基本的考え方」に基づき、固体廃棄物の分析による性状把握等を進めることが示された。

東京電力は、「中長期ロードマップ」や原子力規制委員会のリスクマップに掲げられた目標を達成するため、廃炉全体の主要な作業プロセスを示す「廃炉中長期実行プラン」を作成した。本プランでは、例えば燃料デブリ取り出しでは、初号機の燃料デブリ取り出し開始の実現のための工程、段階的な取り出し規模の拡大(2号機)、燃料デブリの処理・処分方法の決定に向けた取り組み、取り出し規模の更なる拡大(1と3号機)に向けた取り組み方針が示されている。廃棄物対策では、今後の廃炉作業の進捗状況等を踏まえつつ、現在整備を進めている放射性物質分析・研究施設を活用し、固体廃棄物の処理・処分等の検討に必要な性状把握を進めることとしている。

さらに NDF と東京電力は、「中長期ロードマップ」と「廃炉中長期実行プラン」を踏まえ、燃料デブリの取り出し規模の更なる拡大の達成に向け必要な研究開発の抽出とその実施を適切に管理するため、研究開発の今後約 10 年間の研究開発の全体を俯瞰した「研究開発中長期計画」を示した。ここでは、燃料デブリ取り出しにおける各段階で現在想定される研究開発項目及び内容を東京電力の「廃炉中長期実行プラン」と紐づけた形で明らかにした。具体的には、燃料デブリの取り出し規模の更なる拡大に向けた技術課題として、燃料デブリの取り出し方法の開発、臨界管理技術等の安全システムの開発、デブリ飛散率や被ばく評価に係る安全評価技術の開発を挙げている。また、廃棄物対策のための技術課題として、固体廃棄物の性状把握の効率化、処理・処分概念の構築と安全評価手法の開発、保管・管理方法の検討・評価を挙げている。

「研究開発中長期計画」の実行及び更新に関しては、「英知事業」との連携を図っていくこととされ、「廃炉・汚染水対策事業」と「英知事業」との連携の強化も期待される。

一方、JAEA においても、東京電力が直面する廃炉現場における課題や研究ニーズの把握、研究の進め方等の議論を踏まえ、汚染水対策から廃棄物の処理・処分まで含めた廃炉全体を俯瞰し、研究開発のニーズとシーズを整理した「基礎・基盤研究の全体マップ」を公表し、更新を行っている。「英知事業」の実施に当たっては、当該「基礎・基盤研究の全体マップ」をベースとしており、「研究開発中長期計画」とも連携を図り、1F 廃炉の中長期的な技術的ニーズや工程に即した研究開発が適切に実施されることが期待される。

### 3-3. 今後の課題

今まで俯瞰してきたように、2011年12月の最初の中長期ロードマップの策定の時から、1F 廃炉のための研究開発の体制整備が進められ、様々な関係機関が実施し様々な成果を上げてきている。1F 廃炉に直接適用することを目的とした「廃炉・汚染水対策事業」と、計測や分析といった基礎・基盤的な研究を目的とした「英知事業」の両方が車の両輪となり、国内メーカーだけでなく、大学や海外の研究機関との連携など、国内外の英知を結集して対応してきている。

しかしながら、今後は、デブリの取り出し、その分析、その結果を活用した炉内状況把握、事故進展の解明、瓦礫や水処理 2 次廃棄物などを含む放射性廃棄物の処理・処分など、より難易度の高い技術的課題への取り組みが必要となってくる。また、実施主体についても、海外の研究機関との連携がより必要になるとともに、福島県地元企業の活用も求められており、より多様なプレーヤーが参加することが想定される。このためにも、今後は、国、NDF、東京電力、JAEA がより緊密に連携し、中長期的な計画、目標をもとに、基礎・基盤研究から現場実装まで、適切に資源配分を行いながら技術をつなげていくことが求められる。

なお、本講演資料は、セッション開始前に以下 URL に掲載予定である。

原子力学会廃炉委員会 HP [https://www.aesj.net/aesj\\_fukushima/fukushima-decommissioning](https://www.aesj.net/aesj_fukushima/fukushima-decommissioning)

\*Koichi Noda<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Japan Atomic Energy Agency