

福島第一原子力発電所廃炉検討委員会セッション

福島第一原子力発電所廃炉の現状と技術戦略

Present status and the technological strategy of Fukushima Daiichi NPS decommissioning

(1) 福島第一原子力発電所廃炉作業の現状

(1) Present status of Fukushima Daiichi NPS decommissioning

*石川 真澄¹¹東京電力 HD

1. はじめに

本講演では、事故後 10 年が経過した福島第一原子力発電所における廃炉・汚染水・処理水対策の現状と今後の課題について説明する。

まず廃炉をどのような全体計画の下、進めているか述べたい。東京電力は、国により 2011 年 12 月に取り纏められた「東京電力(株)福島第一原子力発電所 1~4 号機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」)に基づき廃炉作業を進めている。このロードマップにおける第 1 期とは、使用済燃料の取り出しを開始するまでの期間、第 2 期とは、溶け落ちた燃料デブリの取り出しを開始するまでの期間と定義されている。最後の第 3 期は、廃炉が完了するまでの長い期間になるが、2019 年 12 月に改訂された中長期ロードマップで、第 3 期の最初の 10 年を新たに 3-1 期と位置づけた。この期間は、より本格的な廃炉作業、つまりデブリ取り出し作業を着実に実施するために、燃料の取り出し、汚染水対策など複数の工程を計画的に進める時期と定義している。また、それぞれの分野における主なマイルストーンも定めている。

これを踏まえ、当社は 2020 年 3 月に、これらのマイルストーン及び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の主要なプロセスを作り「廃炉中長期実行プラン 2020」として公表した。その後、毎年改訂を行っている。

「廃炉中長期実行プラン」により当社は今後の廃炉作業を、将来を見据えながらより計画的に進めることが可能となる。一方、地域の方々から見ると、今後の廃炉作業を具体的に把握し、廃炉事業に参入する際の検討を行うことができる。福島第一の廃炉を通じて福島復興にいかに関与できるかが鍵であり、「復興と廃炉の両立」の大原則の下、東京電力は、引き続き廃炉・汚染水・処理水対策に責任を持って取り組んでいく。

2. 汚染水・処理水対策

汚染水は、原子炉内に注入された冷却水が燃料デブリに触れることで発生する。そして、この汚染水と建屋内に流入する地下水と雨水が混ざり合うことで、新たな汚染水が発生し続けている。これら汚染水は、多核種除去設備等により、建屋内滞留水中に多く含まれていると評価された 62 種類の核種(トリチウムを除く)を除去してタンクに貯蔵している。今後、燃料デブリ等の保管場所等を考えると、発電所の敷地を有効に活用していく必要があることから、下記に示す汚染水対策と ALPS 処理水対策が主な課題となっている。

2.1 汚染水対策

当社は、①汚染源を取り除く、②汚染源に水を近づけない、③汚染水を漏らさない、の 3 つの基本方針に基づき重層的に対策を進めてきた。

これらの対策は既に成果を上げつつあり、現在は、②の主要対策である地下水や雨水の原子炉建屋等への流入抑制を更に徹底すること、原子炉建屋等に残っている汚染水の除去(建屋滞留水の処理)および外部流出リスクの更なる低減などに取り組んでいる。

2.1.1 汚染水発生量の低減

フェーシング、サブドレン、陸側遮水壁(凍土壁)など、地下水の流入を抑制するための従来からの対策に加えて、2020 年以降は、建屋屋根の損傷部(3 号機タービン建屋等)への雨水カバーの設置、1~4 号機建屋周辺のフェーシング(陸側遮水壁内側進捗約 30%:2021 年度末)を行っている。これらの重層的な対策により、

1日当たり汚染水発生量は対策前の約540m³/日（2014年5月）に対し、2021年度においては約130m³/日まで低減している。

今後は1号機原子炉建屋の大型カバー設置、1～4号機建屋周辺のフェーシングを進め、サブドレンによる地下水位の低下や陸側遮水壁の確実な運用等を継続して、2025年内に平均100m³/日の達成を目指す。

2.1.2 津波リスクへの対応

(1) 建屋内滞留水の除去

放射性物質の濃度が高い汚染水は原子炉建屋、タービン建屋、廃棄物処理建屋等に滞留しているが、津波発生時等の漏えいリスクを念頭にその除去を進めてきた。2017年3月には1号機のタービン建屋の滞留水を除去することに成功した。その後も作業を継続し、1～4号機のタービン建屋、廃棄物処理建屋、4号機原子炉建屋について建屋内滞留水の水位を低下させ、中長期ロードマップに掲げられた滞留水処理の目標を達成したことを2020年12月に確認した。

一方、プロセス主建屋、高温焼却炉建屋では、事故直後に地下階に設置されたゼオライト土嚢等が高い放射能を有していることが確認されており、滞留水による遮蔽がなくなると屋内が高線量化する等のリスクがあるため、何らかの対応が必要である。極めて高い表面線量を持つ物体を扱う必要があることを考慮して、国内外の知見・実績をベースに検討した結果、滞留水がある状態においてゼオライト土嚢等を水中回収し、脱水、保管容器に充填する工法をメイン・シナリオにして検討を進めることにした。

なお、原子炉建屋内の滞留水は、2022～2024年度の間には2020年末比の半分程度に低減する予定であり、現在、2号機については低減目標水位に到達し、1、3号機の処理を順次進めているところである。また、滞留水中にはα核種の存在が確認されており、これが今後の滞留水処理の支障とならないよう、慎重な処理を進めるとともに、今後の燃料デブリに係る作業によるα核種濃度の変化を踏まえて処理設備の改造を進める予定である。

(2) 建屋開口部の閉止

東北地方太平洋地震による津波（3.11級津波）と同規模の津波に対し、建屋滞留水が流出することや津波の水が建屋へ流入し、汚染水が増えることを防止するために開口部の閉止をする等の対策を進めてきた。2018年度に1～3号機タービン建屋、プロセス主建屋、高温焼却炉建屋の階段や吹き抜けなどの床面や壁面の開口部の閉止工事を、2019年度に2、3号機原子炉建屋の外部ハッチ等の閉止工事を、2020年度に2021年以降も滞留水が残る1～3号機原子炉建屋の扉の閉止工事を完了した。滞留水処理が2020年に完了したその他の建屋についても2022年1月に作業が完了し、全127箇所対策を終了した。

(3) 防潮堤の延長

2017年12月の国の地震調査研究推進本部の評価によれば、千島海溝沿いの地震による津波は、3.11級津波に比べ継続時間・最高水位（福島第一では海水面からの高さが10m程度）とも小さくなると予想されているものの、切迫性が高いとされている。そのため、津波による重要設備の被害軽減も視野に、既に設置されているアウターライズ津波対策で設置した防潮堤を北側に延長し、海水面からの高さ11m、長さ600mの防潮堤が2020年9月に完成した。

また、2020年4月には、内閣府から新たに「日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震モデル」が公表された。その影響の評価を2020年度に実施し、その結果を踏まえ千島海溝津波防潮堤を補強するとともに、日本海溝津波防潮堤を新設する方針とした。日本海溝津波防潮堤は2021年6月に着手し、2023年度末の完成を目標に、海水面からの高さ約13～16m、長さ約1,000mの防潮堤の建設を進めている。

2.2 ALPS 処理水対策

ALPS 処理水の処分については、2021年4月に開催された廃炉・汚染水・処理水対策関係閣僚等会議において、安全性を確保した上で海洋放出するとの政府の基本方針が決定された。当社は、この基本方針を着実に履行するための対応を取りまとめた。

(1) 海洋放出設備の設置に向けた取組

2021年8月に当社が公表した検討状況を反映したALPS 処理水海洋放出設備の実施計画変更認可申請を同年12月に行い、以降、公開の審査会合においては、原子炉等規制法に基づく審査に加え、2021年11月に当

社が公表した「ALPS 処理水の海洋放出に係る放射線影響評価報告書（設計段階）」の確認も含む国の基本方針を踏まえた対応についても確認が行われた。原子力規制委員会は実施計画の審査書案についてパブリック・コメントを実施し、2022年7月に実施計画の変更が認可された。

また、実施計画変更認可に向けた手続きと並行して、設備設置に向けた海底の地質調査（2021年11月～12月）や環境整備（陸上側：2021年12月開始、海上側：2022年4月開始）を進めている。

(2) 海域モニタリング強化

ALPS 処理水の拡散の状況を海洋拡散シミュレーションにより評価した結果、現状よりもトリチウム濃度が高くなると評価された発電所近傍を中心に福島県沖の海域について、拡散状況を確認するためトリチウム測定を強化する海域モニタリングを検討し、その検討結果について2021年8月に公表している。政府の総合モニタリング計画の改定状況を踏まえつつ、その検討結果（測定点・測定対象・測定頻度を増加）に検出下限値を設定した海域モニタリング計画を策定した。同計画に基づき、2022年4月から新たな測定点の試料採取を開始し、トリチウムを中心とした海水の放射性物質濃度や海洋生物の状況を放出開始前から継続して確認している。なお、当社の海域モニタリングの検討状況、海域モニタリング計画については、ALPS 処理水の海洋放出に伴い強化された政府の総合モニタリング計画にも取り込まれている。

(3) トリチウム分離技術に関する調査

環境中に放出するトリチウムの量を減らすため、2021年5月から、第三者機関を交えた新たなスキームを通じ、国内外を対象としたトリチウム分離技術に関する調査や提案に関する受付を開始した。提案のあった技術については、第三者機関において技術内容の確認・評価を行ったものを当社が確認し、現実的に実用可能な技術が確認出来た場合には、具体的な設計の検討や技術の実証試験などを行い、技術の確立を目指していく。

(4) 海洋生物の飼育試験

ALPS 処理水の海洋放出に係る理解の醸成、風評影響の抑制につなげていくことを目的に、海洋生物類の飼育試験を実施する予定である。飼育試験の実施に先立ち、2022年3月から、発電所敷地内で飼育ノウハウの習得や設備設計の確認等を目的とした、発電所周辺の通常の海水での飼育練習を開始し、同年7月から、飼育試験の本番環境を模擬した水槽によるヒラメ、アワビの飼育練習を開始している。今後は海藻類の飼育も実施予定である。

3. 使用済燃料プールからの燃料取り出し

福島第一 1～3号機における使用済燃料プールからの燃料の取り出しは、オペレーティングフロア（以下、「オペフロ」）における①瓦礫撤去（水素爆発のなかった2号機を除く）、②除染・遮へい、③燃料取扱設備の設置、④燃料取り出し、⑤構内の共用プール等での保管の順に実施している。燃料の溶融を起こした1～3号機のオペフロはいずれも線量が高く、作業員の被ばくには特に留意する必要があることから、これらの作業は殆どを遠隔操作で実施する。

震災直後、福島第一で最もリスクが高いと言われた4号機の燃料取り出しは、2013年11月に開始し、2014年12月に完了した。3号機の燃料取り出しは2019年4月に開始し、2021年2月に完了した。

今後、1号機の燃料取り出しは2027年度～2028年度に開始、2号機の燃料取り出しは2024年度～2026年度に開始、5,6号機の燃料取り出しは1,2号機の燃料取り出し作業に影響を与えない範囲で実施することで、2031年内の全号機完了を目指す。

3.1 1号機の取り出し準備状況

1号機は、オペフロ北側の瓦礫撤去に2018年1月に着手し既に完了している。一方、使用済燃料プールのある南側では、燃料交換機、天井クレーン、更に崩落屋根の鉄骨やスラブというように、瓦礫が山のように高く積み重なって使用済燃料プールを覆っている。ダスト飛散対策の信頼性向上等の観点から、南側の瓦礫撤去の前に原子炉建屋を覆う大型カバーを先行設置し、カバー内で瓦礫撤去や準備作業、燃料取り出しまでを実施する工法で進めることとしている。

これらの撤去に際して、鉄骨やスラブ等が使用済燃料プールへ落下するリスクを可能な限り低減するため、

2020年3月以降、瓦礫落下防止・緩和対策として使用済燃料プールのゲートへのカバー設置、使用済燃料プール上への養生設置、燃料交換機・天井クレーンを下部から支える支保材の設置を順次実施し、2020年11月に完了した。また、大型カバーの設置に向けて、干渉物となる原子炉建屋カバーの残置部の撤去を今年の6月に完了している。

3.2.2 号機の取り出し準備状況

2号機は、他号機と異なり原子炉建屋が爆発を免れたが、建屋内部の線量が非常に高い状況となっていたため、建屋上部を解体して新たな設備を設置することが必要と判断していた。

2018年7月から遠隔ロボットを用いた作業・調査を開始し、その後、線量が大きく低減している傾向が確認され、遮へい等を適切に実施することによりオペフロ内でも限定的な作業であれば実施できる見通しが得られたことから、建屋上部を全面解体せず原子炉建屋南面に開口部を設けてアクセスする工法に変更した。本工法は、建屋解体時のダスト飛散対策の信頼性や被ばくの低減、雨水の建屋流入抑制、工事ヤード調整の観点などで優位性がある。

2020年6月に使用済燃料プール内の燃料等の状態を確認し、直近では、構台設置に向けた準備工事を実施している。

3.3.3 号機の状況

3号機では、使用済制御棒等の高線量機器の取り出しに向け、機器の状態確認等のプール内調査を実施し、2021年10月に完了し、2022年下期からの高線量機器取り出しの準備を進めている。

4. 燃料デブリ取り出しに向けて

福島第一1～3号機における燃料デブリの取り出しは、これまでに経験したことのない取り組みとなる。取り出し作業は、①原子炉格納容器内部調査、②燃料デブリ取り出し、③保管というステップで進めていくが、極めて高線量の環境下での作業となるため、ほとんどの作業を遠隔で実施することになる。

4.1 格納容器内部調査と燃料デブリ分布状況の推定

取出し方法を決定し具体的な取出し機器の開発を進めるためには、まずその位置や性状を把握する必要がある。これまでに格納容器内部の状況をロボット等の遠隔操作機器、ミュオン透過法などにより調査している。燃料デブリの分布の状況は、以上のような調査の結果や事故進展解析結果等から、現時点で下記のとおり推定している。

1号機：燃料デブリの大部分が格納容器底部に存在

2号機：圧力容器底部に多くが残存し格納容器底部にも一定の量が存在

3号機：1号機と2号機の間

4.2.1 号機内部調査の状況

次期調査として1号機については、2022年2月から6月にかけて、用途が異なる6種類の潜水機能付ボート型の調査装置（水中ROV）にて、ガイドリングの取り付け、ペDESTAL外周の目視調査、堆積物の厚さ測定等を実施している。目視調査では、既設構造物の状態や、堆積物の広がり状況等を確認することができた。また、ペDESTAL（台座）基礎部外側の調査を行ったところ、ペDESTAL開口部壁面の一部において、コンクリートの内側にあった鉄筋、インナースカートが露出していることを確認した。

今後の内部調査を継続し、知見の拡充・評価を実施していくが、現時点の情報等を基にペDESTALの損傷に伴うプラントへの影響を考察した結果、支持している原子炉圧力容器について、水平方向は支持する構造物（スタビライザ等）があり、鉛直方向は燃料等の流出で重量が減少していること等から、大規模な損壊等に至る可能性は低いと想定している。

また、仮に損壊等に至った場合においても、燃料デブリの冷却、ダストの飛散、臨界の影響について考察した結果、周辺の公衆に対し著しい放射線被ばくのリスクを与えることはないと考えているが、更なる対応についても検討していく。

4.3 燃料デブリの取り出し計画

最新の中長期ロードマップでは、取り出しの初号機を「燃料デブリ取り出し作業における安全性、確実性、

迅速性、使用済燃料取り出し作業との干渉回避を含めた廃炉作業全体の最適化の観点から」2号機と決定した。取り出しは、英国で製造したロボットアームを用いてまず試験的な取り出しから開始し、その後取り出し方法の検証や確認を行った上で、同様な機構の装置を用い、段階的に取り出し規模を拡大する計画である。

試験的取り出しに用いる装置は、英国での動作確認後、2021年7月に日本に到着し、8月より国内工場（神戸）で性能確認試験及び操作訓練を行ってきた。同試験及び訓練が2022年1月に終了したことから輸送を行い、2月から JAEA 榎葉遠隔技術開発センターにおいて、実機を模擬した設備を用いた性能確認試験を開始した。現在、これまでの性能確認試験の中で抽出した改善点への対応について、まさに取り組んでいる。

また、現場の準備作業としては、本調査に必要な格納容器内へのアクセスルートの構築作業として、X-6 ペネトレーション（格納容器内への貫通孔）の開放作業を計画しており、開放に向けた隔離部屋設置作業に取り組んでいる。今後、X-6 ペネトレーションの開放、同ペネトレーション内の堆積物除去等を行っていく。

4.4 取り出し規模の更なる拡大

2号機における段階的な取り出し規模の拡大後、中長期的には1、3号機においても取り出しを開始し、取り出し規模を拡大していく予定である。

1号機、3号機における取り出しに当たっては、1・2号機排気筒残置部や3・4号機排気筒等の撤去を行い、デブリ取り出しに必要な設備の設置を行っていく。加えて、1、3号機は2号機と比較して作業現場の線量が高いことから、遠隔操作で汚染した配管の撤去や除染を行い、線量を低減することを検討している。また、これらと並行して取出設備・保管施設の設計、製作も順次進めていく。

5. 放射性固体廃棄物の管理

固体廃棄物については、「保管管理計画」において、向こう10年間に発生する物量の予測を行った上で、必要な減容処理施設や保管施設を導入する計画を立案している。ただし、発生する物量の予測は今後の廃炉作業等の進展状況等により変動するため、毎年、見直しを行い、計画を更新している。

事故以降に発生した固体廃棄物は、「瓦礫等」と、水処理に伴い発生する吸着塔等の「水処理二次廃棄物」に分類している。

「瓦礫等」は、線量率、部位、種類ごとに可能な限り分別し、エリアと保管形態を分けて一時保管しており、表面線量率が30mSv/h超の瓦礫類は固体廃棄物貯蔵庫、30mSv/h以下の瓦礫類は覆土式一時保管施設、屋外容器収納、屋外シート養生などの方法で保管している。今後はこれらを可能な限り減容した上で固体廃棄物貯蔵庫内への保管へ集約し、屋外の一時保管エリアを2028年度内に解消していくこととしている。

「水処理二次廃棄物」は、高線量かつ水分を含むため保管に注意を要するため、大きさや線量に応じて適切に遮へい・保管するとともに、巡視や遠隔監視等により漏洩や異常の有無を確認している。

廃棄物を減容する設備としては、使用済保護衣類の焼却・減容を行う既設の雑固体廃棄物焼却設備に加え、今後、敷地造成等で伐採した森林の焼却を行う増設雑固体廃棄物焼却設備、金属を切断、コンクリートを破碎して減容する減容処理設備を設置する。保管のための施設としては、既存の施設（1～9棟）に加え、増設固体廃棄物貯蔵庫第10～11棟、吸着塔類を保管する大型廃棄物保管庫の設置を行う計画である。

増設雑固体廃棄物焼却設備については2022年5月に竣工したものの、同年3月16日に発生した福島県沖地震の影響と推定される設備不具合により同年6月に焼却運転を停止して、現在修理方法の検討中である。吸着塔類等を保管する予定の大型廃棄物保管庫は2023年度運用開始を目指し工事を実施している。また、減容処理設備の基礎工事を2021年4月から開始している。

※当原稿は2022年7月時点のものである
以上

*Masumi Ishikawa¹

¹TEPCO HD