

企画セッション | 委員会セッション：福島第一原子力発電所廃炉検討委員会

■ 2022年9月9日(金) 13:00 ~ 14:30 | 会場 E1棟1F 10番教室

[3A_PL] 福島第一原子力発電所廃炉の現状と技術戦略

座長：関村 直人 (東大)

[3A_PL01] 福島第一原子力発電所廃炉作業の現状

*石川 真澄¹ (1. 東電HD)

[3A_PL02] 福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン

*中村 紀吉¹ (1. 原賠機構)

[3A_PL03] 福島第一原子力発電所における放射能汚染分布の測定技術

*佐藤 優樹¹ (1. JAEA)

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、進めているか述べてみたい。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 年間を新たに 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の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 箇所の対策を終了した。

(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、瓦礫が山のようにうず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 楢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

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

(2) 福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン

(2) Technical Strategic Plan for Decommissioning of the Fukushima Daiichi NPS

*中村 紀吉¹¹原子力損害賠償・廃炉等支援機構 (NDF)

1. 緒言

原子力損害賠償・廃炉等支援機構 (NDF) は、政府が策定する「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」(中長期ロードマップ)に確固とした技術的根拠を与え、その円滑・着実な実行や改訂の検討に資すること及び原子力規制委員会が策定する「東京電力福島第一原子力発電所の中期的リスクの低減目標マップ」の目標達成に資すること、並びに廃炉等積立金の取戻しに関する計画作成方針に根拠を与えることを目的として、「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」(技術戦略プラン)を毎年取りまとめている。現在作成中の技術戦略プラン 2022 では、2号機の試験的取り出し及び原子炉格納容器(PCV)内部調査に向けた取組状況、取り出し規模の更なる拡大に向けた工法の検討状況、ALPS 処理水の海洋放出に向けた取組状況、燃料デブリに係る分析戦略等の特徴的に記載している。本稿では、これらを中心に廃炉の技術戦略、廃炉の推進に向けた分析戦略等について紹介する。

2. 福島第一原子力発電所の廃炉のリスク低減及び安全確保の考え方

2.1 福島第一原子力発電所廃炉の基本方針

福島第一原子力発電所の廃炉においては「事故により発生した通常の原子力発電所にはない放射性物質に起因するリスクを、継続的、かつ速やかに下げることを基本方針とする。また、廃炉を進める上で、廃炉作業の安全確保は、安全上の特徴に基づき、リスクのバランスを長期的視点で俯瞰した対応が必要であり、柔軟なリスク低減戦略を検討することが重要である。

2.2 放射性物質に起因するリスク低減の考え方

リスク低減対策としては、「潜在的影響度」を低減させる方法と、「管理重要度」を低減させる方法がある。様々なリスク低減対策のうち、一般に工学的に実現しやすいものは、「管理重要度」の低減である。したがって、福島第一原子力発電所の廃炉は、まずはリスク源をより健全な施設においてより安定的に管理することで管理重要度を下げる取組であり、図1の「十分に安定管理されている領域」(水色の領域)に持ち込むことを当面の目標としている。本目標に対する技術戦略プラン 2021 からの作業進捗としては、フランジ型タンク底部の残水(濃縮塩水)の処理の進捗、ALPS スラリーが保管されている HIC の一部についてβ線照射の影響を踏まえ移替が必要となったことなどを反映している。

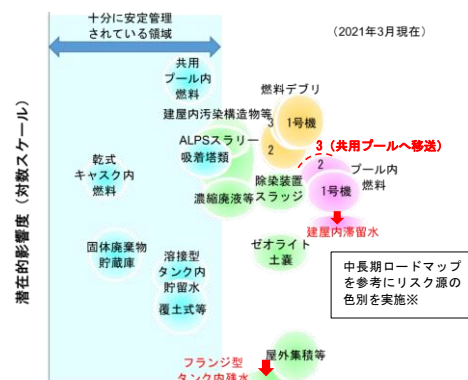


図1 リスクレベルの例 (2021年の例)

2.3 廃炉作業を進める上での安全確保の考え方

事故炉である福島第一原子力発電所の現場状況には大きな不確かさが存在することから、燃料デブリ取り出し等の大掛かりな作業について、既存の知見のみに基づいて作業全体を設計しようとすると、極めて大きな安全余裕や幅広い技術選択肢の想定が必要となる。このため、対応期間の長大化や手戻りのリスクが避けられず、その結果、廃炉全体の遅れ、廃炉費用の高騰、作業員被ばくの増加等を招き、全体プロジェクトの成立性や予見性を低下させる可能性が大きくなる。一方で、現状既に放射線レベルが高い環境下にあること、閉じ込め障壁等の更なる劣化、今後の大きな自然事象（地震や津波等）の発生の可能性等を考慮すると、リスク状態の改善と不確かさ縮小は早急に行うことが求められる。このため、作業をいくつかの段階に分けた上で、実質的な安全の確保を保証できる「最初の段階の作業」に取り組み、そこで得られた情報を次の段階に展開するという「逐次型の取組」が重要となる。

3. 福島第一原子力発電所の廃炉に向けた技術戦略

3.1 燃料デブリ取り出し

燃料デブリ取り出しについては以下の目標を達成すべく取組を進めている。

- (1) 周到的な準備をした上で燃料デブリを安全に回収し、これを十分に管理された安定保管の状態に持ち込む。
- (2) 2号機の試験的取り出しについては、2021年内の取り出し開始としていたものの、新型コロナウイルス感染拡大の影響により工程が遅れているが、工程遅延を1年程度に留めることを目標に作業を進める。段階的な取り出し規模の拡大等の一連の作業を進め、その後の取り出し規模の更なる拡大に向けて必要な情報・経験を得る。
- (3) 取り出し規模の更なる拡大については、初号機の燃料デブリ取り出し、内部調査、研究開発、現場環境整備等を見極めつつ、収納・移送・保管方法を含め、その方法の検討を進める。

2号機における試験的取り出し及びPCV内部調査では、X-6ペネトレーション（X-6ペネ）のフランジを開放することにより、従来よりも大きな開口を利用してロボットアームを出し入れし、PCV内の燃料デブリを外へ取り出すことを行う。この作業では、従来の閉じ込め障壁の位置がX-6ペネの閉止フランジ部であったものから、X-6ペネ開放作業時に設置する隔離部屋（図2）や新たに設置するエンクロージャに拡張することになる（図3）。これは、規模は小さいながらも、PCVに新たな開口を設けて、PCV外側に閉じ込め障壁を拡張するという今後の取り出し作業の基本的な現場構成の形であり、新たな段階に入る取組である。

不確かな現場への適用に向けて、様々な状態での機能を検証すること、及び万一の際に装置を確実に救出できることが重要である。そのため、必要な準備を整えること、現場を模擬したモックアップ試験等を行うことにより、時間をかけてでも要求機能を満足していることを確実に確認すること、新たに抽出されたりリスクを確実に潰していくことが必要である。また、必要な場合には、それを繰り返し行っていくことも求められる。

取り出し規模の更なる拡大においては、取り出し工法に係る概念検討を、3号機を先行して実施中であり、燃料デブリ取り出しシナリオを検討するとともに工法の検討を進めている。この中で、2021年度末に有望な工法の候補を絞り込んできたが、各工法ともに、難度の高い課題・リスクが数多く抽出されたことから、

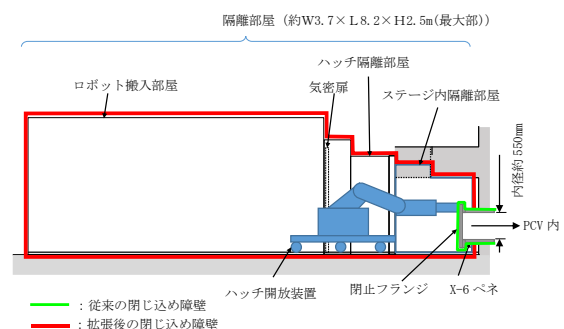


図2 X-6ペネ解放作業時の閉じ込め障壁概略図

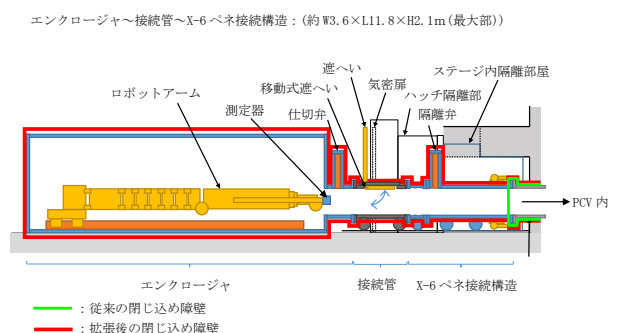


図3 試験的取り出し及びPCV内部調査時の閉じ込め障壁概略図

2022 年度以降は、これらの課題・リスクの対応策に対する現場適用性、技術成立性の確認を行っていく。これらを確認した結果、予め定めた判断基準を満足できない場合等も考えられるため、その他の工法の検討も考慮しておく必要がある。

3.2 廃棄物対策

廃棄物対策については以下の目標を達成すべく取組を進めている。

- (1) 当面 10 年間程度に発生する固体廃棄物の物量予測を定期的に見直ししながら、発生抑制と減容、モニタリングをはじめ、適正な保管管理計画の策定・更新とその遂行を進める。
- (2) 2021 年度に示した処理・処分方策とその安全性に関する技術的見通しを踏まえ、固体廃棄物の特徴に応じた廃棄物ストリームの構築のため、性状把握を進めつつ、処理・処分方策の選択肢の創出とその比較・評価を行い、固体廃棄物の具体的管理について全体として適切な対処方策の提示に向けた検討を進める。

中長期ロードマップにおいて、第 3 期には、固体廃棄物の性状分析等を進め、廃棄体の仕様や製造方法を確定するとされているため、第 3-①期では、固体廃棄物の具体的管理に関する全体としての適切な対処方策の提示に向けた検討を進める。具体的には、分析データの蓄積と統計論的方法の適用により評価された性状データを反映した現実的インベントリ設定を基に、安全確保を前提とした廃棄物ストリーム毎の処理・処分方策の最適化・合理化の試行例を積み重ね、廃棄物ストリーム毎の最適化の知見を幅広く得るとともに、全ての廃棄物ストリームを束ねた全体像の最適化・合理化に向けた方策の具体化に向けた検討を進め、その考え方を明らかにする。

これらの検討の際には、最新知見を反映すること及び利用可能な最良の技術 (Best Available Techniques) の概念を適用することにより、利用実績や経済的実現性をも考慮して、最適な方策を柔軟に検討することが重要である。検討が進み、廃棄物の全体像に対する処理・処分方策を固めていくに当たっては、地元・社会と問題意識を共通理解にするなど、最適化に向けた検討の過程を共有することが重要である。

3.3 汚染水・処理水対策

汚染水・処理水対策については以下の目標を達成すべく取組を進めている。

- (1) 汚染水問題に関する 3 つの基本方針（汚染源を「取り除く」、汚染源に水を「近づけない」、汚染水を「漏らさない」）の下、構築された水位管理システム運用を継続しつつ、2025 年内に汚染水発生量を 100m³/日以下に抑制するとともに、2022 年度～2024 年度には原子炉建屋滞留水を 2020 年末の半分程度に低減する。また、汚染水対策の安定的な運用に向け、津波や豪雨等の大規模自然災害リスクに備えた対策を計画的に実施する。
- (2) 今後本格化する燃料デブリ取り出し等の廃炉工程との関係を整理するとともに、中長期を見据えた汚染水対策の在り方についての検討を進める。
- (3) 現在タンク保管中の ALPS 処理水について、2023 年春頃の放出に向けた対応を進める。

燃料デブリ取り出し等の廃炉工程を見据えた汚染水対策の課題としては、燃料デブリ取り出しに向けた水処理設備の検討においては、既存の建屋滞留水の処理設備（SARRY、ALPS 等）とどのように機能分担して適正な構成にしていくかの全体像の検討が重要である。同時に、既存の水処理設備のリプレースを計画的に進めることも求められる。こうした検討を行うためには、燃料デブリ取り出し時の水処理設備への要求仕様や基本設計をできるだけ早い段階で実施していく必要がある。

ALPS 処理水の海洋放出に向けた今後の取組としては、設備の運用に向けた教育・訓練等の準備を確実にしていく必要がある。さらに、東京電力は、処理水放出後の敷地活用の迅速かつ確実な実施に向け、敷地利用計画に応じたタンク内処理水の放出計画を適宜策定するとともに、状況に応じて計画を適切に見直していくことが必要である。NDF は、東京電力が進める設備の構築や運用開始の準備などに対し技術的・専門的な支援を行うとともに、諸外国の関係機関との会合、国際会議等を通じて、正確かつ受け手の関心に応じた情報発信や理解促進を進めていく。

3.4 使用済燃料プールからの燃料取り出し

使用済燃料プールからの燃料取り出しについては以下の目標を達成すべく取組を進めている。

- (1) 第3-①期において、1～6号機の全てで使用済燃料プールからの燃料取り出しの完了を目指す。
- (2) 周辺地域で住民の帰還と復興が徐々に進む中、放射性物質の飛散防止をはじめとしたリスク評価・安全確保を確実にいき、1号機は2027～2028年度、2号機は2024～2026年度にプール内燃料取り出しを開始する。
- (3) 事故の影響を受けた1～4号機の燃料については、使用済燃料プールから取り出した後に共用プール等に移送して適切に保管することにより、安定管理状態とする。なお、共用プールの容量確保に向け、共用プールに保管されている燃料を乾式キャスク仮保管設備へ移送・保管する。
- (4) 取り出した燃料の長期的な健全性の評価及び処理に向けた検討を行い、将来の処理・保管方法を決定する。

1号機については、オペレーティングフロア上に落下している天井クレーン（落下防止の支保を設置済み）の撤去、不安定な状態で残置しているウェルプラグへの対応、また事故前からプール内に保管されている被覆管の破損した燃料67体の取り出しが大きな課題である。また2号機では、これまで国内原子力施設では経験のないブーム型クレーン式の燃料取扱設備を用いて、遠隔操作によりプール内燃料取り出しを行う計画であり、新たな設備を安全かつ確実に設置すること、事前のモックアップ試験等により事前に設備の操作・機能性を十分に習熟することが重要である。これらに向けては、各作業に伴う安全性を評価し、必要十分な安全の確保を確認した上で、技術的な確実性、合理性、作業工程に関わる迅速性、現場適用性、プロジェクト上のリスク等を総合的に考慮して対応を行うことが基本であり、それらを着実に進める必要がある。

4. 廃炉の推進に向けた分析戦略

燃料デブリの分析結果は、取り出し工法、保管・管理、処理の必要性、事故原因の究明等の多くの反映先があり、その関係は廃炉の進捗とともに変化していくことになる。分析結果は廃炉を円滑に進めるための検討における不確かさの幅を小さくするための重要な判断材料の1つとなる。

燃料デブリに係るサンプル分析については、燃料デブリは不均質性を持つために採取された部位に応じて分析値に幅がある上、十分な量を分析できる状況ではなく、評価における不確かさに幅が生じることになる。このため、分析品質の向上やサンプル量の改善に制限がある中で、良好な分析結果を増やすためには、従来のホットラボでのサンプル分析での数量の増加に注力するだけでなく、他の分析・計測の手法の多様化・拡充を行い、分析結果の用途に応じて相互に補完することを検討し、総合的な評価をすることが有効である。この燃料デブリに係るサンプル分析の結果を補完する分析・計測の手法の1つとして、サンプルを破壊せずに核燃料の量等を評価する手法（非破壊計測）がある。非破壊計測では計測項目が少ないものの、サンプル分析よりも計測時間は短く、1回の計測につき多くの量が計測でき、分析施設内でのサンプル分析に加え、特定の項目に対して実施できれば、分析数の少なさを補うとともに、燃料デブリ中の核燃料の量を迅速に把握することができ、未臨界状態を維持したまま、次の工程へと移行することが可能となる。

5. 研究開発への取組

福島第一原子力発電所の廃炉を安全、確実、合理的、迅速及び現場指向の視点で推進していくためには、研究開発が必要となる困難な技術課題が多数存在する。燃料デブリの試験的取り出しが開始されようとしている現在、段階的な取り出し規模の拡大、取り出し規模の更なる拡大に向け、現場での適用を見据えた研究開発を加速する必要がある。政府は、廃炉に向けた応用研究、実用化研究のうち技術的難易度の高い課題の課題解決を目指すため「廃炉・汚染水・処理水対策事業」により、国内外の大学、研究機関等の基礎的・基盤的研究及び人材育成の取組を推進するため「英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業」により各機関が行う研究開発を支援している。

廃炉・汚染水・処理水対策事業において幅広い視点から研究開発課題を検討すること及び現場適用性の観

点から事業の評価を行い研究開発内容に反映していくことは引き続き重要であるため、NDF は東京電力等と協力して研究開発の企画提案や事業品質確保の取組に係る機能をより一層強化して再構築する計画である。また、東京電力は、基礎基盤研究から実用化研究に至る全ての研究開発に対してそれぞれの意義、役割を十分認識した上で各研究開発に適切に関与しつつ、廃炉技術開発センターによる技術開発マネジメントの下、自主技術開発も含めた廃炉研究により一層積極的に取り組んでいく必要がある。その際、2022 年 10 月に設立予定の燃料デブリ取出しエンジニアリング会社（仮称）の活用を図っていく必要がある。

6. 技術戦略を支える取組

6.1 プロジェクト管理の一層の強化

発電所の建設のように技術が成熟し要求性能が明確なプロジェクトでは、初期の段階で発注者の要求事項を受注者に明確に伝えることが、プロジェクト遂行を円滑に進める上で有効である。一方、燃料デブリ取り出しのような未経験のプロジェクトでは、廃炉の事業執行者である東京電力からの目標設定・要求仕様がエンジニアリング着手時点では必ずしも明確にならず、性能要求設定等も試行錯誤的なものにならざるを得ない。したがって、「最初の段階の作業」に取り組み、そこで得られた情報を次の段階に展開するという「逐次型の取組」に加えて、ある結果を基に次の結果を求め、これを繰り返すことによって次第にエンジニアリングの完成度を高めていく取組が必要となる。このため、東京電力は事業執行者として「エンジニアリング上の判断を行い、その結果に対して責任を持つこと」が強く求められることとなり、東京電力がオーナーとして主体的に行うオーナーズ・エンジニアリング能力を向上させていく必要がある。

6.2 国際連携の強化

難度の高い工学的課題を扱う福島第一原子力発電所の廃炉を着実に進めるためには、リスク低減戦略として、先行する廃止措置活動等の事例から教訓を学び、廃炉に活かしていくことや世界最高水準の技術や人材を活用すること、すなわち世界の英知の結集と活用が重要である。また、世界の英知を結集するためには、廃炉に対する国際社会の継続的な理解・関心や協力関係を維持・発展させていくことが重要である。そのため、廃炉の進捗等の正確な情報を発信し、国際社会からの信頼を得ることや、福島第一原子力発電所の事故及び廃炉で得られた知見等を積極的かつ戦略的に還元し、国際社会に開かれた互恵的な廃炉を進めることが必要となる。特に、信頼関係の構築については、専門家だけでなく非専門家にも分かりやすい情報発信、国ごとの情報量の開きに配慮した情報発信等が必要である。

6.3 地域共生

東京電力は、2020 年 3 月末に策定した「復興と廃炉の両立に向けた福島の方々へのお約束」に基づき、廃炉産業集積に向けた取組を大きく「①地元企業の参画拡大」「②地元企業のステップアップサポート」「③地元での新規産業創出」の 3 つに整理し、段階的に着手している。既に着手した①、②の取組に加え、「③地元での新規産業創出」の取組として 2022 年 4 月に新たに公表した 2020 年代に複数の新たな施設を設置・運用、及びパートナー企業と共同企業の設立については、比較的大規模な投資であり浜通り地域への大きな経済効果が見込まれることから、着実に取組の推進・強化を行っていく必要がある。一方、特に高機能製品の製造については高度な技術を要することから、地元企業の技術力の向上を図るなど、地元企業の積極的な参画に繋げられるかが課題となるため、新たな廃炉関連施設の立地場所や規模、建設・運用までのスケジュールなど諸々の検討状況について、地元の自治体、商工団体及び関係機関に丁寧に説明し、理解・協力を得ながら取組を進めていくことが重要である。

¹Noriyoshi Nakamura¹

¹Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation

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

(3) 福島第一原子力発電所における放射能汚染分布の測定技術

(3) Measurement technology for radioactivity distribution in the Fukushima Daiichi NPS

*佐藤 優樹¹¹原子力機構

1. 緒言

2011年3月11日に発生した東日本大震災に端を発する東京電力ホールディングス株式会社(東京電力HD)福島第一原子力発電所(1F)の事故から、11年の月日が流れた。1Fではこれまでに、除染や地面の舗装等の実施により、一般服と防塵マスクで作業可能なエリアが敷地面積の大半を占めるようになった。しかし一方で、原子炉建屋内部のように高線量率環境かつ詳細な放射性物質の分布が明らかとなっていないエリアが存在しており、除染や作業の計画立案を実施するためには、迅速かつ簡便に放射性物質の分布を把握するための技術開発が求められている。本講演では、主として作業環境の線量率を上昇させている放射性セシウムの分布を把握するための装置・手法について、原子力機構が進める技術開発を中心に紹介する。

2. ガンマ線イメージャを用いた放射性物質の可視化

2-1. 背景

1F事故後、放射性物質の分布を測定するための装置であるガンマ線イメージャの開発が、複数の機関で実施された。これを受けて、サーベイメータを用いた空間線量率の“点”での測定に加えて、1Fにおける放射性物質の“面”的な測定が実施されるようになった。ガンマ線イメージャにはいくつかの種類が存在し、①ピンホールを設けた遮蔽体で位置敏感型ガンマ線センサを覆い、センサ内のガンマ線検出位置とピンホールの位置関係から放射線源の存在する方向を推定するピンホールカメラ方式、②ガンマ線が物質と衝突することにより引き起こすコンプトン散乱の式を解くことにより、ガンマ線の飛来方向を推定して放射線源の位置を推定するコンプトンカメラ方式、③位置敏感型ガンマ線センサ前方に特殊なパターンに沿って開口部が設けられた遮蔽体(符号化開口マスク)を設置し、ガンマ線入射に対してセンサ面に投影される影の形状から、放射線源の位置を解析的に推定する符号化開口方式、が挙げられる。

例えば、㈱日立製作所製のピンホールカメラは、1号機原子炉建屋内のペネトレーションホール付近においてホットスポット(局所的に放射性物質が集積している箇所)の可視化に成功している[1]。加えて、類似のピンホールカメラは1/2号機間の排気筒下部付近ならびに2号機オペレーションフロアの測定にも利用されている[2,3]。一方で、全方位に感度を有するコンプトンカメラを用いた試験も1F構内の屋外環境で実施されており、ホットスポットを可視化した報告例がある[4]。併せて原子力機構においても、後述するようにコンプトンカメラを基盤とした放射性物質可視化技術を開発している。また、符号化開口方式を用いた測定結果についても、東京電力によって報告がなされている[5]。

なお、上述の測定で得られた結果は、2次元的に放射性物質の分布を可視化したものであった。この理由として、ガンマ線イメージャはガンマ線の飛来方向を推定する装置であるが、同じ角度方向においてそのガンマ線が近くから飛来したのか、もしくは遠くから飛来したのかを判別することができず、線源位置の奥行き情報を得られないためである。しかしながら1Fサイト内は放射性物質が多数の機器や配管、施設、瓦礫といった様々な物体に付着しており、放射線源が3次元的に広がっていることは明らかである。このような環境では、2次元的なイメージしか測定できない従来の定点観測による測定では、放射線源の位置を3次元的に特定し、その形状を正確に把握することは難しい。さらに定点観測では、ガンマ線イメージャと測定対象

の間に遮蔽物が存在する場合、ホットスポットを可視化できずに見落としてしまう可能性がある。このため、複数の視点から作業エリア全域を測定し、ホットスポットを含む放射性物質の分布を3次的に把握することが望ましい。

このような背景を踏まえて著者らは、ガンマ線イメージャの一種であるコンプトンカメラで取得した放射性物質イメージに、作業環境の3次元モデルデータを統合することにより、放射性物質分布を表示した3次元マップを生成する統合型放射線イメージングシステム iRIS (integrated Radiation Imaging System) を開発した。

2-2. 統合型放射線イメージングシステム iRIS の開発と実証試験結果

原子炉建屋を含む 1F 構内に沈着する放射性物質の分布を3次的に可視化するために、iRIS では放射性物質の分布を2次的に可視化するコンプトンカメライメージングに、レーザスキャナ(3D-LiDAR)や写真立体復元を基盤とした3次元環境モデリングを統合した。

図1は、1Fにおける実証試験で用いたセットアップおよび測定原理を示した概略図である[6]。コンプトンカメラに、レーザ測域センサを基盤とした SLAM (Simultaneous Localization and Mapping、自己位置推定と環境地図作成を同時実行) デバイス (米国 KAARTA 社、Stencil2) およびその場の空間線量率を測定するサーベイメータ (株式会社千代田テクノ、PRD-ERJ) を組み合わせた。このセットアップを携帯した作業者もしくは搭載したロボットが現場を移動しながら全域をスキャンすることにより、放射性物質分布を3次的に可視化したマップを生成するものである。

ここで、作業者が携帯する、もしくはロボットに搭載するという観点から、各種のセンサは小型かつ軽量であることが望ましい。コンプトンカメラについては、浜松ホトニクス(株)と早稲田大学が共同開発した小型軽量コンプトンカメラをベースとして、ガンマ線センサの体積を減らすとともに小型の遮蔽体をセンサ周囲に設けた装置を用いた[7, 8]。ガンマ線センサは図2に示すように、1.5 mm 角の 15×15 ピクセルの Ce:GAGG シンチレータとマルチピクセル光子計測デバイス (浜松ホトニクス(株)、MPPC) を組み合わせたものが2層構造 (散乱体と吸収体) となっており、放射性セシウムからのガンマ線が散乱体と吸収体の各々で相互作用した位置と、付与したエネルギーからガンマ線の飛来方向を推定するものである [9]。



図1. 統合型放射線イメージングシステム iRIS の概略図。コンプトンカメラと3次元測域センサ (SLAM 機器) およびサーベイメータを組み合わせた。オペレータが携帯もしくはロボットに搭載したシステムを用いて作業現場をスキャンし、ホットスポットや移動ルート上の線量率を可視化した3次元マップ生成のためのデータを取得する (令和3年度 福島研究開発部門 成果報告会資料より転載[6])。

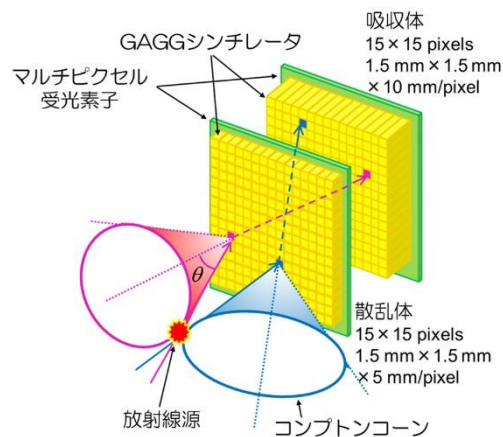


図2. コンプトンカメラの模式図。ガンマ線が散乱体と吸収体の各々で相互作用した位置と、付与したエネルギーからガンマ線の散乱角 (θ) を計算する。次に、この角度を元とした仮想的なコーン (コンプトンコーン) をカメラ前方に描画することにより、コーンの交点に放射性物質を見出す。(日本原子力研究開発機構プレス発表資料 (令和3年5月14日) より転載[9])。

本システムでは、コンプトンカメラのガンマ線イメージング技術に SLAM 技術を組み合わせることにより、従来の定点観測とは異なり、移動しながら作業エリア全体をスキャンする測定が可能となった。具体的には、図 1 に示すように、SLAM により移動中の各時刻におけるコンプトンカメラの自己位置および姿勢の情報を逐一記録するとともに、これをコンプトンカメラのガンマ線検出時刻と同期することにより、移動中の各位置において、ガンマ線の飛来方向を推定することが可能となる。さらに、同じく SLAM で取得した作業環境の 3 次元モデルデータにホットスポットのイメージを投影することにより、その位置や形状を表示した 3 次元マップを生成するものである。なお、従来の定点観測において作業エリア全体を測定するためには、設置、測定、次の測定点への移動、を繰り返す必要があり、作業効率の低下が懸念された。また、ホットスポットの見落としを防止するためには、複数視点からの測定数を増やす必要があったが、本システムの開発によりこれらの課題を改善することができる。

図 3 は、1F1/2 号機間の排気筒付近で実施した実証試験の結果である[10]。上段の図は現場の写真であり、中段と下段は排気筒下部のホットスポット（汚染した配管）を赤色で可視化した 3 次元マップである。この測定において測定者は排気筒下部の高線量率箇所には進入しておらず、排気筒下部と比較して線量率の低い離れた通路を歩きながら、5 分未満の短い測定で取得したデータを用いて、ホットスポット位置を可視化した 3 次元マップを生成することに成功した[9]。併せて、測定者の移動軌跡上の空間線量率もマップにプロットした。

3. 今後の取り組みについて

現在、コンプトンカメラ、SLAM 機器ならびにサーベイメータをロボットに搭載して、原子炉建屋内部のより高線量率環境において、ホットスポットの位置を把握するための取り組みを進めている。また、

これまで放射性物質分布の可視化を中心に技術開発を進めてきたが、現在、その放射能を定量的に推定するための技術開発を進めている。例えば上述した 1/2 号機間の排気筒下部のホットスポットについて、定点観測で取得したイメージデータの強度および測定対象地点までの距離から放射能を算出するとともに、他グループの推定結果と矛盾しないことを確認している[2, 10]。放射能を定量的に評価することにより、ホットスポットが周辺環境の空間線量率をどの程度上昇させるかを議論することが可能になり、同時にそのホットスポットを除去することにより、周囲の空間線量率がどの程度低下するかを見込むことができるようになる。なお、ガンマ線イメージャで取得したデータを用いて周辺環境の放射能分布ならびに空間線量率を推定する技術として、英国 CREATEC 社の線量測定・解析システムである N-Visage が 1F で利用されており、このような技

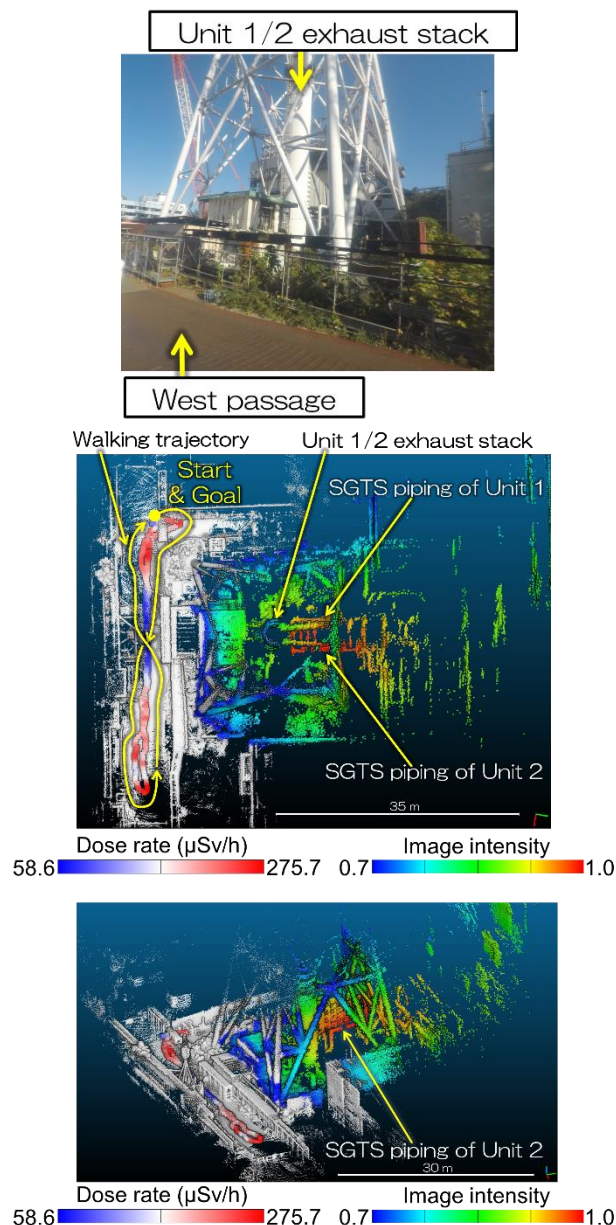


図 3. 上段：実証試験を実施した 1F1/2 号機の排気筒付近の様子。中段、下段は空間線量率とホットスポット（赤色）を可視化した 3 次元マップ。測定者の歩行ルート上の線量率と、コンプトンカメラで可視化したホットスポットをカラー表示した。中段と下段は同じマップについて、視点を変更したものである。（Y. Sato, Y. Terasaka, J Nucl Sci Technol. DOI: 10.1080/00223131.2021.2001391 より転載[10]）。

術についても注視し、1F 廃炉に貢献しうる役立つ知見・技術を本システムに組み込んでいきたいと考えている[11]。

本システムを通して建屋内に存在する汚染箇所や線量率の分布を直感的に俯瞰できる3次元マップを作業者の皆様に提供するとともに、今後は可視化結果の定量評価手法も推し進めて1F 現場に有益な情報を提供したい。

なお本稿の記述は、著者らのこれまでの報告内容を含むものである[6, 9, 10, 12-14]。

4. 謝辞

3次元マップ生成用ソフトウェア COMRIS の開発において、(株)ヴィジブルインフォメーションセンターの根本誠氏、峯本浩二郎氏、黒澤直弘代表取締役様にご協力いただいた。併せて、コンプトンカメラの小型・軽量化に際し浜松ホトニクス(株)の中村重幸氏、平柳通人氏、早稲田大学の片岡淳教授ならびに岸本彩氏にご協力いただいた。1F における実証試験では東京電力 HD の佐藤航氏、大浦正利氏にご協力いただいた。最後に、iRIS の共同発案者である福島大学の鳥居建男教授ならびに多くの試験にご同行いただいた原子力機構の寺阪祐太氏に御礼申し上げる。

5. 引用文献

- [1] Okada K, Tadokoro T, Ueno Y, et al., Development of a gamma camera to image radiation fields. Prog Nucl Sci Tech. 4 (2014) pp. 14-17.
- [2] 平山 英夫, 林 克己, 岩永 宏平, その他 2 名, ピンホール型ガンマカメラによる ^{137}Cs 放射能の測定. 日本原子力学会和文論文誌. 19 (2020) pp. 152-162.
- [3] 原子力規制委員会, 第 11 回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会, 資料 3-1, 2 号機オペフロのガンマカメラによる測定結果について, 令和 2 年 3 月 27 日.
- [4] Katagiri H, Satoh W, Enomoto R, et al., Development of an all-sky gamma-ray Compton camera based on scintillators for high-dose environments. J Nucl Sci Technol. 55 (2018) pp. 1172-1179.
- [5] 原子力規制委員会, 第 90 回特定原子力施設監視・評価検討会, 資料 3, 2 号機シールドプラグ高濃度汚染への対応状況および今後の計画について [東京電力], 令和 3 年 4 月 19 日.
- [6] 佐藤優樹, 共通基盤技術の現場実装に係る研究開発, (国研) 日本原子力研究開発機構 令和 3 年度 福島研究開発部門 成果報告会資料, 令和 3 年 12 月 7 日.
- [7] 株式会社千代田テクノル, 放射線可視化カメラ「ガンマ キャッチャー」 <https://www.c-technol.co.jp/product/radiationvisualizationcamera/>
- [8] Kataoka J, Kishimoto A, Nishiyama T, et al., Handy Compton camera using 3D position-sensitive scintillators coupled with large-area monolithic MPPC arrays. Nucl Instrum Methods A. 732 (2013) pp. 403-407.
- [9] (国研) 日本原子力研究開発機構, 廃炉現場の汚染分布を 3 次元マップで“見える化” — 見えない汚染を仮想空間で把握し、作業員の被ばくを低減 —, 令和 3 年 5 月 14 日プレス発表.
- [10] Sato Y, and Terasaka Y, et al., Radiation imaging using an integrated Radiation Imaging System based on a compact Compton camera under unit 1/2 exhaust stack of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. J Nucl Sci Technol. 59 (2022) pp. 677-687.
- [11] 石川 晃大, 小林 峰人, 建屋内環境改善工事に向けた N-Visage システムによる線量評価技術の展開. アトックス技報. 10 (2018) pp. 18-21.
- [12] 佐藤優樹, 共通基盤技術の現場実装に係る研究開発 — 放射能汚染を見える化する新システム “iRIS”, 令和 4 年 1 月 21 日, (国研) 日本原子力研究開発機構 令和 3 年度 福島研究開発部門 成果報告会資料, Web にて公開.
- [13] 佐藤優樹, 統合型放射線イメージングシステムの開発, 日本工業出版, 検査技術, 2022 年 5 月号.

[14] 佐藤優樹, 統合型放射線イメージングシステム iRIS を用いた放射能汚染の3次元可視化, 日本アイソトープ協会, Isotope News, 2022年6月号.

*Yuki Sato¹

¹JAEA