線量低減・除染に関する研究の現状と課題

国際廃炉研究開発機構 行則 茂, 木下 博文, 姉川 弘明

福島第一原子力発電所1号機、2号機及び3号機の燃料デブリの取り出しに向けて、原子炉格納容器(PCV)漏えい箇所調査や補修作業等が計画されており、これらの作業を効率よく実施するためには、作業エリアおよびアクセス通路の線量低減が必要である。作業エリアの線量低減策としては、除染、遮へい、線源撤去等の方法があり、作業エリアの状況に適した方法の選定が必要であるとともに、遠隔での作業が望まれる。作業エリアの線量低減に向けては、種々の課題があり、経済産業省の補助事業「原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発」、「総合的線量低減計画の策定」において、汚染状況の調査、遠隔除染装置の開発、線量低減計画の策定等を実施している。本稿では、これらの活動状況を紹介するとともに、活動を通して得られた課題と今後の対応について紹介する。

1. 原子炉建屋の線量低減の課題と対策

福島第一原子力発電所1～3号機の原子炉建屋内部では、依然として雰囲気線量率の高い状態が続いており、この線量率低減は、燃料デブリ取り出しに向けた一連の作業における作業員の被ばく線量を低減するために必要である。対象は、特に燃料デブリ取り出し作業に関連するエリアである。中長期ロードマップに示された2020年度上半期に燃料デブリを取り出すことを目指して、今後原子炉格納容器(以下、PCV)漏えい箇所の調査、補修・止水、内部調査を実施する必要がある。これら作業を成立させるためには、PCVの漏えい箇所調査、補修等の作業エリアとなる原子炉建屋(以下、R/B)1階から4階、燃料取り出し機器の復旧や交換作業の作業エリアとなる原子炉建屋オペレーションフロア(以下、オペフロ)の線量を低減させることが必要である。目標線量率は、作業員の1回の作業時間が適切となるよう、オペフロでは毎時1mSv以下、R/B1～4階のアクセス通路では毎時5mSv以下、作業エリアでは毎時3mSv以下としている。雰囲気線量率の低減は、除染だけでなく、遮へい、線源の撤去を含めて、プラント状況に応じて総合的かつ適切な組み合わせによって達成する。

第1図に具体的な雰囲気線量率低減の課題と対策について示す。建屋全体では、遠隔作業装置の開発、除染方法選定のための汚染状態の把握、個別の遮へい装置の開発、内包汚染物質撤去のための工法確立と装置開発等が、また、上部階の除染については、遠隔除染装置の昇

第1図 福島第一1～3号機の雰囲気線量率低減の課題と対策
降、1階高所除染では線源の特定や高所に届く除染装置の開発等が課題であり、新たな対策が必要となっている。

2. 建屋内の汚染形態と汚染状況の調査結果

(1) 建屋内の汚染形態

除染技術の検討にあたりR/Bの汚染形態を事故経緯から推定した。1～3号機では、地震に伴う津波の影響により電源と炉心冷却機能が喪失し、原子炉压力容器(以下、RPV)、PCV内の温度・圧力が上昇したことにより、圧力的に脆弱な部位から蒸気や水素が漏えいして建屋内に拡散した。この蒸気に汚染が随伴したと想定されている。また、1、3号機では、水素爆発が発生しR/B上部が破損したため、放射性物質を含むコンクリート粉が建屋内に堆積していると考えられる。さらに、各号機ともにR/B、タービン建屋(以下、T/B)の地下には汚染水が滞留している。これらの状況から、「遊離汚染」、「汚染蒸気ばく露による固着・浸透汚染」、「滞留水浸漬による固着・浸漬汚染」の3種類(第2図)が主要な汚染モードとなり、これにコンクリート表面のエポキシ塗装「あり」、「なし」の2パターンを考慮した計6つの汚染形

The Current Status of and Research and Development Issues in Respect of Decontamination of the Interior of Reactor Buildings: Shigeru YUKINORI, Hirofumi KINOSHITA, Hiroaki ANEKAWA.

(2014年5月26日受理)

飛散した汚染の降り積もり (遊離)	汚染蒸気に基づく露 (固着・浸透)	滞留水に浸漬 (固着・浸透)
エポキシ塗装されているコンクリート床面に、コンクリート破砕層が降り積もり	エポキシ塗装されているコンクリート床面が、汚染蒸気や凝縮水に接触しその後乾燥	エポキシ塗装されているコンクリート床面に、滞留水が接触しその後乾燥

3種類の汚染に対し、建屋コンクリートの状態(エポキシ塗装、無垢)により6種類の汚染状態で検討

第2図 原子炉建屋内の汚染の種類

態が想定される。

(2) 建屋内の汚染状況

2012年の汚染状況調査結果を以下に示す。

①原子炉建屋1階の線量率調査結果(床上150cmの例)

- ・1号機 3.2～8.9mSv/h(南側通路を除く)
- ・2号機 6.8～30.3mSv/h
- ・3号機 15.8～124.7mSv/h

②原子炉建屋1階の主なホットスポット

- ・格納容器貫通部
- ・制御棒駆動機構水圧制御ユニット(HCU)下部
- ・3号機機器ハッチのレール部

③汚染状況調査結果(主要核種)

- ・ ^{137}Cs : 約60%
- ・ ^{134}Cs : 約40%
- ・ $^{110\text{m}}\text{Ag}$: 極微量
- ・ ^{125}Sb : 極微量

(α 核種は検出されなかった)

④汚染状況調査結果(エポキシ塗装面の浸透汚染)

- ・エポキシ塗装内部への汚染浸透なし
- ・コンクリート内部への汚染浸透なし

なお、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{125}Sb は核分裂生成物起源、 ^{125}Sb はジルカロイ中の不純物(Sn)の放射化、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ はパッキン材等に含まれる銀の放射化などにも由来する可能性が考えられる。

雰囲気線量率に対する特定部位の寄与割合については、実測した床上5cm、150cmの線量率測定結果およびセシウムの γ スペクトル測定結果から評価した。その結果、床面からの寄与は20%程度、壁・天井やホットスポットからの寄与は10%程度であるが、その他の寄与が70%程度と大きい。第3図に、2号機R/B1階の作業エリアにおける線源の寄与割合の評価結果を示す。◇で示した「その他寄与」が相対的に高く、これらについては、高所エリアの配管やダクト、ケーブルトレイ等の機器表面の付着放射性物質、ダクトや盤の上部に堆積したほこり等に蓄積した放射性物質、または配管、ダクト内部に存在する放射性物質からの寄与などが主要な線源として想定される(第4図)。

3. 除染装置の開発

(1) 要素技術の選定

プラントの汚染状況の推定結果を踏まえて除染要素技術の選定を行った(第5図)。左下の図が想定汚染の模式図である。右側には、技術カタログに掲載された主要

第3図 2号機1階の作業エリアにおける線源の寄与割合
平成24年度の経済産業省補助金事業
「総合的線量低減計画の策定」
(補助事業者: アトックス)

第4図 線源率分布モデル(模式図)
平成24年度の経済産業省補助金事業
「総合的線量低減計画の策定」
(補助事業者: アトックス)

※()内は点数付けの評価結果

第5図 除染技術の選定

な除染要素技術を示す。これらは、国内外への公募の結果集まった除染技術であり、どのような汚染に有効かという視点で分類した。抽出された技術について、遠隔機器への搭載性や狭隙部への適用性といった観点で関係者による評価を行い、まず、低所での除染方法を確認し、各汚染形態に対して適用可能と考えられる除染技術に分

類している。この検討結果から、「超高压水除染法」、「ドライアイスプラスト除染法」、「吸引・プラスト除染法」を選定し、装置を開発することを決定した。高所の寄与が大きいとはいっても低所(床)も20%は寄与しており、高所の除染や遮へいを施すにしても足場となる床面(低所)の除染は汚染拡大防止の観点から重要である。

(2) 除染装置の開発

いずれの装置も平成23年度の経済産業省補助事業により開発を開始し、福島第二原子力発電所において遠隔除染装置としての走行性能、遠隔操作性等について確認、良好な結果が得られている。平成25年度は装置を改良して福島第一原子力発電所での実証試験を目指している。

第6図は、日立GEが開発している高压水除染装置である。水を高压で除染対象面に噴射することにより表面を機械的に除染し、圧力を高めることでコンクリート面をはつことも可能である。第7図は、東芝が開発しているドライアイスプラスト除染装置である。ドライアイスのパウダーを除染対象面に噴射し、表面を機械的に除染する。特長として、ドライアイスは昇華するので2次廃棄物が少なく、母材を傷めにくい。第8図は、三菱重工業が開発している吸引・プラスト除染装置である。研削材を噴射して表面を研削する。研削材はスチールグリッド(特殊鋼製の多角形粒子)であり、噴射後に回収して汚染と分離した後に再利用する。この装置は単独吸引モードで1cm程度の小さい瓦れきの回収も可能である。

現在、天井・高所壁などの高所、及び上部階用の遠隔

除染装置の開発に着手している。天井、高所壁などの1階高所での遠隔除染装置では、①遊離性、固着性、浸透汚染等多様に混在する汚染形態への対応、②複雑な形状に付着した汚染の除去、高所コンクリートの浸透汚染対応等異なる機能の装置開発、③装置の最大到達高さは床上約8m、複雑形状でも効率的に除染可能であり、2次廃棄物の回収を最大限実施可能といった点が開発の狙いである。

2階以上の上部階用遠隔除染装置では、①昇降装置で2階以上の上部階に移送される小型除染システム、または、分割昇降とする場合には上部階で遠隔接続が可能、②作業台車、搬送台車、支援台車、中継台車を共通化、③電気、水等のユーティリティや通信が2階以上へ供給可能といった点が開発の狙いとなる。

4. 総合的に線量を低減するための作業計画

(1) 除染による線量低減効果の予測

建屋内の線量低減においては、号機毎の状況に応じて総合的かつ適切な線量低減計画を確立することが必要である。以下に平成24年度経済産業省補助事業「総合的線量低減計画の策定」において(株)アトックスが実施した研究開発について紹介する。

第9図に、線量低減方法の組合せによる評価の例を示す。対策1～4を段階的に実施することにより2号機では、建屋内線量率が毎時20mSv以上を示す濃い灰色から毎時20mSv未満を示す薄い灰色に変化する。対策4である高所機器の一部撤去により、ほぼ全域が毎時3mSv以下を示す無色に変化する。3号機では、現状の線量率は2号機より高いため、さらなる撤去や遮へいが必要となる。

(2) 遠隔での遮へい設置の検討

総合的な線量低減対策の一つである遠隔での遮へい設置の考え方について示す。1～3号機1階のホットスポットをガンマカメラの映像から104箇所を抽出し、線源強度を考慮してそのうち60箇所が「遮へいが必要な箇所」と判断した。遮へいが必要な箇所について、ガンマカメラの映像等に基づいて場所と分布を分類し(第10図)、分類毎に「遮へい構造」、「遮へい体の種類」、「遮へい体設置工法」等の遠隔遮へい方法を検討した。一例として、第11図に高所で鉛直または水平に分布したホットスポットに対する「パンタグラフ型」の遮へい設置工法の例を示す。遮へい体をパンタグラフで持ち上げ、設置後、遮へい体に充填材を加える。この工法では通路部に設置した場合、作業員や他の遠隔ロボットの動線を遮る可能性があり、適切な配置が必要となる。

(3) 汚染源の撤去に関する検討

汚染源の撤去については、まず遠隔除染装置を用いた除染作業に影響のある干渉物の撤去計画を策定し、一部現地作業を実施している。現在実施されている現地作業

第6図 高压水除染装置

第7図 ドライアイスプラスト除染装置

第8図 吸引・プラスト除染装置

第9図 線量低減方法の組み合わせによる評価

平成24年度経済産業省補助事業「総合的線量低減計画の策定」(補助事業者:アトックス)

第10図 遮へいが必要な場所と分布の分類の例

第11図 遮へい体設置工法(案)

は、1, 3号機 R/B 1 階通路部の除染作業に障害となる干渉物を小型重機 ASTACO-SORA により撤去することである。さらに、作業エリアの線量低減の視点で、直接ホットスポットとなる系統・機器、例えば空調ダクトや不活性ガス系 (AC 系) の配管等の撤去を進めることが効果的であると考えており、干渉物撤去に適用可能な技術を整理した。

5. おわりに

今後、1 階高所エリアについては線源を特定し、雰囲気線量率増加に影響する高所機器を特定し、適切な線量低減対策を検討する。この結果を受けて平成 26 年度内に除染装置の工場モックアップ試験を完了する予定である。また、2 階以上の上部階の除染については、平成 25 年度に基本設計を実施し、平成 26 年度に製作を予定している。

平成 26 年度には、滞留水のある地下階等への線量低減対策として、長時間にわたる浸透汚染箇所の除染方策の検討及びドライアップ時のダスト飛散対策の立案を新

たに開始する予定である。IRID は、これらの研究開発を確実に進め、中長期ロードマップの遂行のため遠隔除染装置の開発を始めとする建屋内の「線量低減や除染」に係る研究開発を推進してゆく所存である。

著者紹介

行則 茂 (ゆきのり・しげる)

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構
(専門分野/関心分野) 原子力機器設計/廃炉技術一般

木下 博文 (きのした・ひろふみ)

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構
(専門分野/関心分野) 原子炉機器設計/廃炉技術一般

姉川 弘明 (あねかわ・ひろあき)

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構
(専門分野/関心分野) 再処理プロセス設計/廃炉技術一般