

## 諸外国の原子力施設の廃止措置および関連する放射性廃棄物管理の動向

榎戸裕二\*1

わが国では 2015 年 4 月末に新たに 5 基の原子力発電所（以下、「原発」）が営業運転を止め、廃止措置（以下、「廃炉」）プロセスに移行した。今日全世界では使命を終えた原発は 160 基に及ぶ勢いで増加している。また、今後も増え続ける。廃炉は同時にそれまで内蔵されていた放射性物質を放射性廃棄物として取り出すことでもあり、その取扱い、処理、最終的に埋設処分までの技術的課題が大きいとされる。本報告では、廃炉と放射性廃棄物との関連、課題、処分場問題にどう対応しているのか主に諸外国の動向について述べていく。

**Keywords: 廃止措置（廃炉）、放射性廃棄物管理**

本講演再録では、実際に講演時に用いた図を引用しております。下記リンクより講演時の PPT ファイルをご覧ください。本講演再録では、実際に講演時に用いた図を引用しております。下記リンクより講演時の PPT ファイルをご覧ください。文章中の図番号は PPT のページ数に対応しています。

### 1 廃炉の動向

現在、世界では約 160 基の原発がいわゆる恒久運転停止し、そのうち 21 基で廃止措置が完了した。米国が最も多く 16 基となっているが、他の国ではドイツと日本だけであり、廃止措置の完了が簡単には進まない現れといえる（図 5）。今後の廃炉の予測では、図 2 に記すように運転期間 40 年を超える原発が間もなく増加し始める。図 4 は同様な日本の状況を示す。

### 2 廃炉方法の選択と理由

原発の廃止措置完了実績が米国以外ではきわめて乏しい裏には、技術的、経済的、人的な要因が大きい。図 8 は廃炉の 3 つの戦略（選択肢）を示す。「即時解体」は施設とサイトを更地化するもので、これまでの実績では廃止措置期間は 8 年～20 年とされる。これが国際機関等から推奨される方式である。「安全貯蔵」は主に Co-60 や Cs-137 等の短半減期核種が減衰するのを待って（30 年～80 年）、その後、解体を行う。「遮へい隔離」は、現在では米国の DOE のみ許可されている ISD（In situ Decommissioning：その場廃炉、従来は遮蔽隔離）と呼ばれるもので、施設をモルタルで固めて封鎖するもので、将来的にも解体せず、云わば「処分場」となる。即時解体、安全貯蔵および ISD の事例を図 9、図 12、図 15 に示し、日本の標準的な戦略を図 19 に示す。基本的には安全貯蔵期間を組み入れた即時解体方式といえる。

### 3 原発の解体と放射性廃棄物の発生

標準的な 100 万 kW 級原発では約 50 万トンの物量があるが、放射性廃棄物として処分するのは 1～2% とされる。施設特性調査から中部電力浜岡発電所では放射性廃棄物とされていた廃棄物を規制解除する（クリアランス）予定のものが物量の 17% に及ぶとし、再利用を含め放射性廃棄物の極小化を目指している（図 40）。図 39 は典型的な BWR 炉の原子炉島瞰図であるが、どの場所からどのレベルの廃棄

物が発生するかを示す。L1 は主に放射化された比較的高いレベル、L2 は高い濃度で汚染されたもの、L3 は低い濃度で汚染された廃棄物として区分している。図 38 は、日本の放射性廃棄物区分表で、発電所から発生するのは L1、L2 および L3 の各廃棄物である。なお、これらの廃棄物の最終処分の概念を図 41 に示す。

### 4 廃炉の技術

原発の廃炉を進めるためには、廃止措置計画書を国に提出し認可を受けなければならない。事業者は当該原発の解体工事計画、廃棄物処理処分計画、クリアランス計画等、廃炉の安全評価を行い、資金計画等の裏付けを持って申請する。事業者は先ず施設の汚染、放射能分布等を十分調べる必要があるが、多くの国では、原発の廃炉に先立ち、運転段階から廃止措置計画書（予備）の策定と数年毎の更新が基金と共に義務づけられている。

廃炉は基本的に廃止措置計画書およびその変更計画書をベースとして、規制当局の確認を得て進められる。図 26 に現在進められている日本原電敦賀 1 号機（BWR）の申請内容の例を示す。

廃炉の準備として使用済燃料の撤去が済んでいること、系統除染後のプラントの放射能状況評価が済んでいること等が挙げられる。浜岡発電所で実施された廃炉の第一段階で実施された解体工事準備期間（2009 年～2014 年）の内容を示す（図 20）。

廃炉の基本的な解体手順は、施設の周辺から中心部へ（図 24）、低放射能領域から高放射能領域へ、原子炉建屋内は解体作業だけとし、除染と二次的解体処理は別施設というのがこれまでの Lesson Learned（教訓）と言われる。

わが国の原発解体では、JPDR 以外に解体実績がないため、幾つかの懸念がある。しかし、すでに米国を中心に遠隔、自動化等の技術導入も含め多くの実績がある。この事例を以下に概観する。

原子炉からの放射線量は即時解体する場合は少なくとも Sv（オーダ）/h 程度はある。したがって、どの国も遠隔・自動化での解体撤去方法の R&D を行ってきた。また、とくに最近の技術は水中での解体を志向する方向である。JPDR においてもこの点の R&D が行われ実用化された。図 27 は JPDR の炉内構造物解体撤去に使用されたマスト型装置に搭載された水中プラズマアーク切断システムを示す。図 28 は水中炉内構造物解体撤去の事例をドイツ・ヴェルガ

The present status of decommissioning of overseas nuclear installations and the relevant waste management by Yuji ENOKIDO (y-enokido@randec.or.jp)

\*1 公益財団法人 原子力バックエンド推進センター

Radwaste and Decommissioning Center (RANDEC)

〒105-0001 東京都港区虎ノ門 1-7-6 升本ビル 3 階

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第 31 回夏期セミナーにおける講演内容に加筆したものである。

ッセン発電所の解体例で示す。

次に原子炉圧力容器の切断解体手法について述べる。原子炉圧力容器の解体撤去法としては、英国の WAGR 炉やベルギーの BR-3 炉等の研究開発を経て実現した気中で切断解体する方法が採用されたが、米国では工期短縮のため原子炉容器を一括で撤去し、処分場で処分する方法が実現した。しかも、被ばく線量を抑えるために廃棄物を容器内でセメント固化した状態で輸送するものであった。一方、遠隔技術や解体技術の向上に伴い再び切断解体方法、とくに、水中切断法により、両者の実用性はほぼ同一レベルとされている。図 18 に圧力容器を切断する方法、図 19 に一括撤去法の例を示す。図 20 に金属構造物の解体・切断の技術、図 21 にコンクリートの解体技術を一覧表で示す。

## 5 主要国の低レベル廃棄物管理方策と特徴

IAEA は廃棄物区分体系の適用例を示し、各国が安全基準を定める場合の考え方を示した（図 43 および図 44）。廃棄物は長半減期（31 年以上）と短半減期に区分されている。レベル的には深地中処分が対象となる高レベル廃棄物（ガラス固化体や再処理の高レベル廃液等）と規制解除できるクリアランスレベルとの間に中レベルと低レベルがある。中および低レベルの相違は数百年程度の後でも規制解除できるまでに放射能が減少しない廃棄物や遠隔取扱いが必要で通常遮蔽容器に入れて取り扱うもの（中レベル：地層処分対象）とそれ以下（浅地中処分）のものとされる。廃炉で発生する廃棄物はおおむね低レベルである。しかし、廃炉の特徴は放射能レベルがきわめて低く、コンクリート構造で厳格な管理を必要とする低レベル処分場に処分する必要のない極低レベル廃棄物が大半である。これらは合理的な方法（例、産廃処分場）で処分できるとしている。以下、各国が廃炉で発生する廃棄物をどのように管理しているか、課題は何かについて紹介する。

### 5.1 イギリス

イギリスはマグノックス炉を中心に現在までに 26 基が安全貯蔵方式の廃炉を準備しており、現段階でも大量の中・低レベル廃棄物が発生し保管されている。現在、低レベル廃棄物処分場は唯一 Drigg 処分場が利用できるが、それらをすべて収納できないし、またクリアランスレベルよりやや上のレベルについて Drigg を利用することは得策でないことから極低レベルは産廃処分できるようにした。また、積極的なクリアランス政策を採り再利用への道ができていく。地層処分相当の処分場計画の中断により中レベル廃棄物の処分が事実上できないため、サイト保管を余儀なくされている（図 48、図 50、図 51）。

### 5.2 ドイツ

ドイツの廃棄物区分は高レベルと低レベルの 2 種類と単純である。このうち、低レベルは発熱量が無視できるものとされ、現時点では Konrad 処分場で地下 800m 程度の深地中に処分される（2020 年頃）。ドイツもすでに 27 基の廃炉

を進めており、その他、研究炉、核燃料サイクルから発生する低レベルはすべて Konrad で処分するため、その運転開始後の受け入れ順序など周到な計画が現在練られている（図 45、図 46、図 47）。ドイツは廃炉の大半を占めるレベルの低い廃棄物は可能な限りクリアランス後再利用される。Konrad 処分場では TRU 核種も含め中低レベル廃棄物が処分される。

### 5.3 アメリカ

アメリカではこれまでに 35 基の原発が廃炉され約半数の廃炉が完了した。ここ数年で 5 基の新たな廃炉が始まったが、2010 年頃にはアメリカの利用できる低レベル廃棄物処分場は図 52 に示す上段 3 カ所しかなく、核種と種類および収容能力大きな制限があった。このため最近、図 54 に示すテキサス州の砂漠の中に低レベル廃棄物処分場（WCS）が運転開始され解体廃棄物も含め協定州の廃炉や民間の廃棄物だけでなく、連邦政府施設の廃棄物を受入れることが可能となった、図 55 に処分場の断面を示す。これにより今後かなりの期間にわたりアメリカの低レベル処分場の受入れは問題なく進められるものと思われる。

### 5.4 スウェーデン

国民投票で脱原発を決めたスウェーデンには 3 基の廃炉プラントと 10 基の運転プラントがある。既に、運転廃棄物は海底約 100m の地下に設置された SFR-1 低レベル処分場があるが、廃炉による解体廃棄物は増設する SFR-2 で処分するために現在計画中である。SFR-2 は全プラントの解体廃棄物を処分するために設計されたもので、廃炉は処分場の完成に合わせて開始される予定となっている。特筆することは、原子炉圧力容器は一括解体方式で行い、それを直接 SFR-2 で処分することである。また、SFR-1、-2 共に中低レベル廃棄物を受け入れる（図 58、図 59）。

表 A に各国の各レベルの廃棄物に対する処分方策をまとめる。国情に応じ種々の方策がとられていることが分かる。わが国の廃棄物処分方策が複雑なことが分かる。

## 6 クリアランスと再利用技術

原発等の廃止措置においては早期に材料のクリアランスおよび施設に対する規制解除を行うことが期待される。事業者の財政的負担（電力料金）や放射能に対する社会・環境上の懸念から規制解除はできる限り早期に完了できるシステムが必要である。規制解除は部材とサイトが放射能による障害がない放射能レベル以下であることを確認し、決定される。

廃止措置は基本的に負の遺産を可能な限り少なくすることが大前提となり、サイトの再利用は将来的利用を目的とした場合大きな利点をもたらす（海外の場合）。

クリアランスとサイト再利用（建物含む）には鋼材、コンクリート、設備・機器、敷地表面の除染、土壌のクリーンアップ等、除染技術と規制解除を判断できるほど微量の

放射能を測定できる技術の組み合わせで実施される。これまでの各国の実績でこれらの技術は確立されている。図 61 に鋼材の再利用例、図 62 に敷地・土壌の放射能濃度の測定状況を示す。

## 7 まとめ (図 63-65)

廃炉および関連する低レベル廃棄物の管理動向に関し、諸外国の実施経験から学んだ点のポイントについて以下にまとめる。

### (1) 諸外国の動向

廃炉の技術はすでに確立されており、解体廃棄物の処分方策もおおむねできている。将来の処分動向を予測して現状の処分方策の見直し・更新も着実に進められている。しかし、中レベル廃棄物（中深度地層処分相当）の処分場は高レベル処分場計画の一環として進められている国が多いが、立地が難航し、当面はサイト内保管を余儀なくされている。処分方策は政府の主導により国民的な合意形成と地域住民の参画を得て実現すべきものであるとの認識である。廃炉費用は欧米では一基当たり 10 億（ユーロ、ドル）を下らない。処分場負荷の軽減のためにクリアランス、再利用が廃炉の前提となり、その作業ルートは全般に確立されている。

### (2) わが国の動向と課題

恒久運転停止した原発は数の上では世界第 4 位の 16 基となっているが、商用炉では原子炉の解体作業にまでには至っておらず、日本の廃炉はまだ緒に就いたばかりである。各プラント共に現時点では最終状態に至るまでに 25 年程度の工程を計画している。今後、プラント運転と並行し廃炉が多く発電所で進められる状況においては、明らかに

運転中のプラント管理とは異なる状態に対応することになる。とくに、解体廃棄物の処理・処分を含め、廃炉の円滑な作業体制を事業者は責任を持って整備する必要があるが、これは事業者の能力を超える事業となる。規制者は一つの発電所でプラント運転と廃炉プロジェクトが同時進行する中で原子力施設の安全管理の具体的な要件を確認していくことが重要である。一方、国の総合的な政策、自治体は住民が参加して廃炉や廃棄物、とくにサイトの最終状態への関心表明のできる健全な住民の協力体制の整備のリーダーシップを発揮することが期待される。

わが国の廃炉時代に向けた最大の課題は、原子力負の遺産の縮減にむけた事業者の意図であり責任能力である。しかし、上述のようにプラントの新基準に基づく安全運転と廃炉プロジェクトを安全・円滑に同時に進めることは技術的能力の観点から経験のない点で無理があるようだ。廃炉事業が安定的に廃棄物処理処分も含め行われるまでは、国が主導的にプロジェクトを推進または、支援していくことも重要ではないだろうか。

最後に、JAEA（日本原子力機構）の負の遺産解消問題である。これまで、殆ど手つかずの状態であるこれまで基礎・研究開発に使われた施設の廃止措置に向け、原子力機構が技術的責任能力を維持していく必要があるが、その推進には行政の支援のもとで電力事業者、関係業界、規制者、一般国民、専門家からなる統合的な「計画策定会議」（環境省）などの設立が期待される。原子力利用を進めるためには、現在までの原子力負の遺産を縮減させる必要のあることを国が示すことが重要である。

表 A 各国の放射性廃棄物の放射能レベルと処分方法（高レベル除く）

	中レベル廃棄物	低レベル廃棄物	極低レベル廃棄物
IAEA (国際原子力機関)	中深度処分	浅地中ピット処分	極低レベル処分、産廃処分場
イギリス	地層処分	浅地中ピット処分	産廃処分、限定利用
ドイツ	地層処分（深地中）		産廃処分、限定利用、保管等
アメリカ	地層処分	浅地中ピット処分	同上
フランス	地層処分	浅地中ピット処分	極低レベル処分
スウェーデン	地層処分（中深度）		産廃処分場、施設内処分
韓国	地層処分（中深度）		不明（恐らく同上）
スロヴァキア	浅地中ピット処分		不明（恐らく同上）
日本	地層処分 余裕深度（50～100m）	浅地中ピット処分 （六ヶ所埋設センター） 浅地中ピット処分 （解体廃棄物）	極低レベル処分 施設内処分、保管等
		研究施設等廃棄物埋設処分場	

深地中（地下 300m より深い場所）、中深度（100～300m）、浅地中（10～30m）

