

## 特集

## 福島原発事故とその教訓

### 第4回 除染と廃炉

早川 光俊 (CASA 専務理事)

福島原発事故から3年が経とうとしています。しかし、今も14万人が避難生活を送っており、汚染水問題も深刻化する一方で、事故の収束の目処はまったくたっていません。

除染も進んでおらず、今後は炉心溶融(メルトダウン)や水素爆発を起こした1～4号機、さらに昨年12月に廃炉がきまった5、6号機の廃炉という問題が残されています。

今回の特集では、除染と廃炉について考えてみたいと思います。

#### 【除染】

##### 除染計画と実施状況

除染は、建物、道路や農地など放射性物質を取り除くための作業です。

2011年8月に、放射性汚染による人の健康又は生活環境への影響を速やかに低減することを目的とする放射性物質汚染対処特措法(以下、「特措法」という)が成立し、同年11月には基本方針が閣議決定されました。

基本方針は、①現在の年間追加被ばく線量が20ミリシーベルト以上の地域を段階的かつ迅速に縮小することを目指し、②現在20ミリシーベルト未満の地域では、長期的に年間1ミリシーベルト以下になることを目指すとしています。また平成25年8月末までに、一般の人の年間追加被ばく線量をその2年前とくらべて約50%減少させ、学校や公園など子どもの生活環境を優先的に除染することによって、子どもの年間追加被ばく線量を約60%減少させるとしています。

特措法では、国が除染を実施する「除染特別地域」と、市町村が中心となって除染を進める「汚染状況重点調査地域」が指定されます。除染特別地域は、帰宅困難区域、居住制限区域、避難指示解除準備区域に分けられています。汚染状況重点調査地域は、指定された市町村が、年間の追加被ばく線量が1ミリシーベルト以上となる区域について、除染実施計画を定め、除

染を実施する区域を決定することになっています。除染特別地域には福島県の11市町村、汚染状況重点調査地域には福島県の40市町村と宮城、茨城、千葉県など7県の60市町村が指定されています。

除染費用は国が負担することになっており、除染関連費用は、2011～13年度補正予算で約1兆6000億円が計上され、2014年度予算でも約5000億円が計上されています。これを合わせると、除染関連費用は2兆円を超えることに



図1 除染特別地域と汚染状況重点調査地域

注 福島原発周辺の色濃い部分が除染特別地域、岩手県、福島県、群馬県、栃木県、茨城県、千葉県に広がっている色の薄い部分が汚染状況重点調査地域

なります。

しかし、除染作業は、仮置き場の同意・設置の遅れと、作業員不足などにより進んでおらず、2013年末までの除染の実施率は、住宅35.4%、公共施設72.6%、道路26.7%、農地81%、生活圏森林12.7%に止まっています。

### 除染方法

放射線量を低減させるためには、取り除く(除去)、さえぎる(遮へい)、遠ざける、の3つの方法があります。

住宅の除染については、屋根は布で拭き取り、雨どいは堆積物を取り除いて水で流し、庭や植え込みの下の土は約1cm削りとり、庭木は深く刈り込むなどとされています。削った土などは、仮置き場や除染場所で一時的に保管した後、中間貯蔵施設に運び、保管するとされています\*1。

道路の除染については、舗装道路の場合は、堆積物の除去、ブラシ洗浄、高圧水洗浄など、未舗装道路については、重機等を用いた上下層の土の入れ替え(天地返し)や表土の削り取り、あるいは土地表面の被覆などが推奨されています\*2。

農地の除染については、表土削り取り、表面から15cm程度とその下の15cm程度を入れ替える反転耕、通常より5cm以上深く耕す深耕などが行われています。

森林の除染については、「家のそばの森林」を優先的に除染するとし、日常的に人が立ち入るキャンプ場やきのこ栽培の「ほだ場」などは、再開が見込まれる場合には除染対象とするとされています。除染方法は、落ち葉や落ちた枝を取り除くだけで、これで除染の効果が得られない場合は、林縁から5mを目安に、追加的に土壌表面に残った落ち葉や枝の除去を行うとされています。

### 除染の課題

除染には様々な問題が指摘されています。

住宅などで、高圧水による除染をおこなっても、1週間たつとまた元に戻ってしまう例もあり、風などで土に付着したセシウムが飛来して、また汚染してしまうのではないかと考えられています。

農地なども一番よいのは、汚染された表土を剥いでしまうことですが、表土を剥ぐと、農業生産にとってもっとも重要な土壌が剥がれてしまい土地の地力が減少することが指摘されています。また、大量の汚染土が発生します。福島県の水稲農家の平均的な水田面積である約1ヘクタール(1万㎡)の農地で、厚さ5cmの表土を除去すれば、汚染土は500トンにのぼるといわれます。10トントラック50台分です。広大な仮置き場がなければ、農地の表土除去は事実上不可能です。反転耕や深耕などは、汚染土を農地の下に埋め込むか、かき混ぜて汚染濃度を下げるだけなので、放射性物質はその場所に止まることになります。

福島県は果樹の生産が盛んで、もも、なし、リンゴ、柿などが有名です。これらの果樹の中でも、柿が特に放射性物質に汚染されやすいとのことで、柿の木の樹皮を剥ぐ除染が行われているようですが、剥いだ樹皮は仮置き場がないこともあり、そのままその場に放置されている



農地にビニールシートをかぶせて仮置きされる除染汚染土

(写真提供：福島農民連産直農業協同組合)

\*1 環境省のパンフレット「除染はどのようにするのですか？」(2012年10月)

\*2 環境省「除染の措置に関するガイドライン」2013年5月第2版/12月追補

とのことです。

放射性物質は、除染しても無くならず、その場所を変えるだけです。「除染」は「移染」だとも言われます。しかし、住宅や学校、道路、公園、公共施設などの除染は、人が住み続けるためには必要なことです。安全な仮置き場や中間貯蔵施設の確保が緊急の課題になっています。

また、手抜き除染が蔓延しており、2013年1月4日の朝日新聞は、落ち葉などは袋等の容器に入れるなどし、飛散防止のために必要な措置をして、仮置き場や除染場所に一時保管するとされているにもかかわらず、ゼネコンが受注した除染事業で、作業員が落ち葉を何度も足で蹴り出し、川へ流している写真を掲載しました。

除染作業には膨大な資金が投入されていますが、ゼネコンがこれを独占していると指摘されています。2013年7月26日付けの東京新聞は、1件数百億円の国直轄の除染事業を、ゼネコンがほぼ無競争で次々と受注しており、予定価格に対する落札額の割合(落札率)も、95～99%であると報道し、談合の可能性を指摘しました。

## 【廃炉】

### 廃炉とは

廃炉とは、必要なくなった炉を停止させて、炉とそれに関連する設備を解体することです。廃炉作業は、まず核燃料を搬出して、設備や配管を除染し、施設の放射能が減るまで安全に管理し、その後に、周辺設備、原子炉、建屋の順で解体が進められます。

日本の商用原発で廃炉作業が実施されているのは、日本原電東海原発1号機(出力16.6万キロワット、炭酸ガス冷却炉)と中部電力浜岡原発1号機(54万キロワット、沸騰水型)、同原発2号機(84万キロワット、同)の3基です。

## 廃炉の中長期ロードマップ

2013年6月27日、東京電力(株)福島原発の1～4号機の廃炉に向けた中長期ロードマップが発表されました。

このロードマップは、1～4号機の各号機毎の状況を踏まえたスケジュールを検討したとされ、核燃料や燃料デブリ\*3の取り出しにつき、現場状況に応じて柔軟に対応できるように複数のプランを準備したとされています。

具体的には、建屋が水素爆発している1号機と3号機については、燃料取扱装置(天井クレーン、燃料取扱機)や燃料デブリを取り出すための設備などの設置を、建物の状況に応じて判断し、それに従って、燃料取り出し開始や燃料デブリ取り出しの開始時期を個別に検討するとしています。

1号機と2号機の最速プランでは、燃料取り出しは2017年下半年、燃料デブリの取り出しは2020年度上半期とされ、3号機の最速プランでは燃料取り出しは2015年下半年、燃料デブリの取り出しは2021年度下半期とされています。4号機については、使用済み燃料プールの燃料の取り出しを昨年11月から開始し、1年で終了する計画になっています。福島原発1～4号機すべての廃炉措置の終了は30～40年後とされています。

## 廃炉の事例

日本で廃炉作業が進められているのは、東海原発1号機(出力23.5万キロワットの黒鉛減速ガス冷却炉。いわゆるコルダーホール型)です。東海原発1号機は1998年に運転を終了した後、2001年度までに燃料が搬出され、2001年度から原子炉以外のタービン建屋などの機器の撤去を始め、2020年までの23年間で廃炉作業を終えるとされていました。しかし、2013年12月、日本原電は作業終了時期の5年延長を発表しま

\*3 炉心溶融によって、原子炉圧力容器から格納容器の床へ溶け落ちた燃料の残骸。

した。延長の理由については、作業員の被ばくを抑えるために使う遠隔操作ロボットの準備が遅れたためであるとされていますが、火災や汚染水漏れなどのトラブルが続発していることや、何よりも原子炉解体で排出される放射性廃棄物の行方が決まっていなかったことだと報道されています。

世界で最も廃炉作業が進む原発の一つ、英ウェールズ地方のトロースフィニッド原発（出力23.5万キロワットの黒鉛減速ガス冷却炉2基）は、東海原発と同じ黒鉛減速ガス冷却炉ですが、廃炉までに90年かかるとされています。トロースフィニッド原発は1991年に停止し、使用済み核燃料は1995年に取り出されましたが、圧力容器周辺や中間貯蔵施設内の放射線量が依然高く、このため2026年まで作業していったん作業を停止し、放射線量が下がるのを待って2073年に廃棄物の最終処分など廃炉作業の最終段階に着手し、施設を完全に解体し終えるまでに90年の歳月を要するとされています。トロースフィニッド原発と同じ黒鉛減速ガス冷却炉である東海原発が、28年で廃炉作業が終了するとするのは、あまりに楽観的に過ぎるように思います。

### スリーマイル島原発2号機の経験

東海原発1号機やトロースフィニッド原発は、炉心溶融事故などは起こしておらず、通常の運転を終えた原発の廃炉です。

しかし、福島原発事故では1～3号機は炉心が溶融しており、1、3、4号機は水素爆発により原子炉や建屋が大きく損傷し、建屋が放射性物質で高濃度に汚染されています。過酷事故を起こした原発は、1979年のアメリカのスリーマイル島原発2号機（出力96万キロワット、加圧水型軽水炉）と1986年のチェルノブイリ原発4号炉（出力100万kW、黒鉛減速沸騰軽水圧力管型原子炉）です。チェルノブイリ原発

4号炉は、事故後、大量の生コンを原子炉建屋に流し込んで全体を固める「石棺」という方法で、放射性物質を閉じ込めました。溶けた燃料デブリは原子炉の炉心近くにそのまま残っており、近づけば即死するほど放射線量が高い状況が続いています。いずれはデブリを取り出さなくてはいけません、事故から27年を経てもその工程は決まっていません。

福島原発の廃炉の参考になるのは、スリーマイル原発2号機の廃炉作業です。1979年3月28日、運転開始からわずか3ヶ月のアメリカのスリーマイル島原発2号機が炉心溶融事故を起こしました。事故は二次冷却水を循環させていた給水ポンプ2台が止まったことから始まったと言われています。二次冷却水の循環が止まったため、自動的に制御棒が挿入され、原子炉は緊急停止し、逃し弁も作動しました。通常は、逃し弁を開いて圧力が下がると、逃し弁は自動的に閉じるようになっていましたが、逃し弁が閉じずに水蒸気が放出しっぱなしになり、大量の一次冷却水が水蒸気として失われることになりました。緊急炉心冷却装置が作動し注水を始めましたが、水位計が故障し、水位が高位を示していたため、運転員は2台の高圧注水系の1台を停止し、もう1台の注水量を絞ってしまいました。そのため、炉心の水位が低下し、核燃料がむき出しになり、炉心溶融を起こしてしまったのです。事故が収束に向かったのは事故から約16時間後だったとされています。水素爆発も起こりましたが、格納容器が維持されたため、放出された放射性物質は格納容器内に止まり、外部への放射性物質の放出は少なく、周辺80キロメートルの住民216万人の被曝量は平均1ミリシーベルトであったとされています。

スリーマイル島原発事故の廃炉作業は、1980年から除染作業に入りましたが、原子炉からの燃料の取り出し作業は1985年～90年までの5

年かかっています。原子炉の除染ができたのは93年で、13年かかっています。事故があった2号機とは別に1号機は現在も稼働しているため、2号機を解体して廃炉にするのは、1号機の廃炉と同時にすることになっており、2号機は現在も監視体制のもと、そのままの状態で置かれています。

### 著しく困難な福島原発の廃炉作業

福島原発の廃炉作業は、スリーマイル島原発の廃炉作業より、はるかに困難な作業と、長い時間、莫大な費用がかかることは明らかです。

スリーマイル島原発事故は、炉心溶融を起こしたのは1基であり、溶融した核燃料は45% (62トン)で、そのうち20トンほどの融解炉心物質が原子炉の格納容器の下部に落下したとされています。水素爆発も起こりましたが、压力容器底部の破壊は免れ、格納容器も健全でした。格納容器内には数百万キュリーの放射性物質が放出されたと推定されていますが、それらは格納容器内に止まり、外部に出たのはごくわずかでした。

福島原発事故では、1～3号機の压力容器が破壊され、核燃料のほとんどが溶融し、格納容器の底部に落下していると考えられており、格納容器も壊れて溶融核燃料などが格納容器から漏れていると考えられています。また水素爆発により、建屋自体も破壊され、高濃度に汚染されています。福島原発事故では、1～3号機に装荷されていた核燃料集合体は、表1のとおり合計で393.5トンもあり、これがほとんどすべて溶融して、格納容器の下部から、もっと下まで落下している可能性が極めて高いのです。その量は、スリーマイル島原発事故の6.3倍で、いかに困難な作業が待ち構えているかは想像を絶するものがあります。

表1 福島第1原発1～4号機の設備概要と事故時の装荷燃料

	1号機	2号機	3号機	4号機
原子炉形式	沸騰水型軽水炉 (BWR)			
電気出力(万 kW)	46	78.4	78.4	78.4
压力容器(内径×全高)(m)	約4.8×約20		約5.6×約22	
格納容器形式	マーク I			
燃料集合体全長(m)	約4.35	約4.47		
燃料集合体数(本)	400	548	0	
使用済燃料数(本)	292	587	514	1155
新燃料	100	28	52	180
燃料装荷量(t)	100	146.75	146.75	0

注 BWR用燃料集合体1体の重量は約250kg程度とされる。

また、スリーマイル島原発事故では、水位が炉心下部の支持構造物の上約2フィート(約61cm)以下には下がらなかったため、水が残っていた範囲では燃料集合体構成部分が支持構造物に溶融していなかった(核燃料が支持構造物に固着していなかった)ので、損傷燃料集合体は比較的容易に取り出し可能だったとされています。それでも、溶融した炉心物質が压力容器の通常の炉心領域の外周に流れ出していて、支持構造物の大部分を解体しなければなりません\*4。

福島原発1～3号機では、核燃料はほとんどが溶融し、压力容器底部から格納容器を貫いて、建屋の床に解け落ちていると考えられています。また、スリーマイル島原発は加圧水型軽水炉で核反応を停止させる制御棒は上から挿入される構造ですが、福島原発の1～3号機は沸騰水型軽水炉で制御棒は下から挿入される構造になっています。沸騰水型軽水炉は、加圧水型軽水炉に比べて、压力容器などの下部の構造がより複雑になっています。このことが、燃料デブリの取り出し作業を著しく困難にすると考えられます。

また、汚染水も廃炉作業を困難にします。ス

\*4 「TMI-2の事故調査・復旧に関する成果と教訓—ニュークリア・テクノロジー誌TMI特集号の紹介—」、日本原子力研究所(1993年6月)。

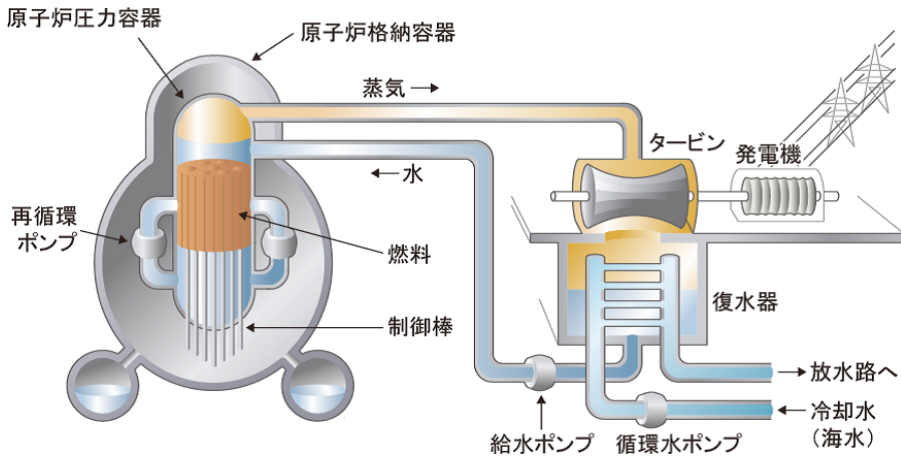


図2 福島原発の沸騰水型軽水炉プラントの概要

出典 東電「福島原子力事故調査報告書」より

リーマイル島原発では、1万 $\text{m}^3$ 以上の汚染水が発生しましたが、浄化処理の後、最終的に蒸発させたとされています。福島原発の汚染水は1万 $\text{m}^3$ を超える汚染水が原子炉建屋やタービン建屋の地下のトレンチなどに溜まっていて、貯蔵タンクにも37万 $\text{m}^3$ が貯蔵され、さらに毎日300 $\text{m}^3$ の汚染水が増え続けています\*5。リーマイル島原発とは比較にならないくらい汚染水問題は深刻で、廃炉作業の大きな支障になることは明らかです。また、溶融した核燃料の取り出しは、安全のためにも格納容器に水を張った状態で行うことが必要で、格納容器下部の破損箇所の補修が必要です。そのためには破損箇所を特定する必要がありますが、破損箇所はまったくわかっていません。

### 廃炉費用

廃炉費用についても、東電は1～4号機の廃炉費用として、約2兆円を確保するとしていますが、福島原発事故の廃炉費用が、この程度で済むとは到底考えられません。

リーマイル原発1基の廃炉費用は、燃料の取り出しまでだけで9万7300万ドル(9730億円)かかったとされています。トローズフィニッド

原発の廃炉費用も、これまでで約6億ポンド(約900億円)かかったとされています。

そもそも経産省などの廃炉費用の試算は、イギリスなどに比べて低すぎると言われています。経産省の試算は、54基の段階で廃炉費用は約3兆円ほどでしたが、イギリスで廃止が決まっている29基の原子炉の廃炉費用は8兆8500円とされています。経産省は1基の原発の廃炉費用を約555億円としているのに対し、イギリスでは1基3051億円です。

廃炉費用についても、経産省の試算は、あまりに楽観的です。

### 将来世代への責務

福島原発事故の収束を、今の日本に生きている人々が見ることは不可能だと言われます。おそらく、廃炉作業の終了までに100年を超える時間がかかるでしょう。また、廃炉などの膨大な費用負担を将来世代に残すことになります。

そして、その後も、数百年、数千年にわたる放射性廃棄物の保管・管理が必要となります。

せめて、原発に頼らない社会への道筋を明らかにすることが、現代世代の将来世代への最低限の責務ではないでしょうか。

\*5 詳しくはレター82号特集第3回「汚染水の漏えい」を参照してください。