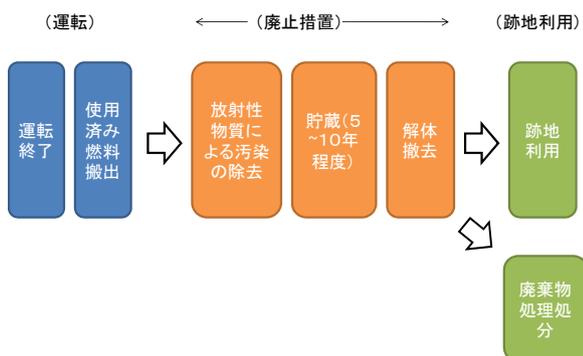


7-3 廃止措置

1. はじめに

廃止措置(decommissioning)とは、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」(以下「炉規法」)の規制の下で運転をしていた原子炉や燃料サイクル施設等の原子力施設が、その運転を永久に停止し機能を停止させ、安全な状態に置かれるための措置であり、原子炉については廃炉措置とも呼ばれる。この措置には施設の解体、保有する核燃料物質の譲渡、核燃料物質による汚染の除去、核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の廃棄およびその他の措置が含まれる。したがって、原子力発電所の廃止措置では、第1図に例示した一連の流れで措置を進め、最終的には炉規法の規制の終了に必要なレベル(=以後の規制が不要なレベル)まで、発電所内に残っている放射性物質を減少させ、周辺公衆への放射線被ばくのリスクを安全で合理的なレベルまで減少させる。



第1図 廃止措置の標準工程 (資源エネルギー庁提示)

資源エネルギー庁の1985年の試算では、上図の標準工程に基づいて廃止措置を行った場合、原子炉1基当たり300億円程度の費用がかかると見積もられた。さらに2007年の総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力発電投資環境整備小委員会で示された電気事業連合会の試算では、110万kWe級の原子力発電所の解体費用としてBWRでは565億円(施設解体費404億円、廃棄物処理費161億円)、PWRでは544億円(施設解体費376億円、廃棄物処理費168億円)と見積もられた。電気事業者はこれに備え、1989年に原子力発電施設解体引当金制度を整備し、費用の積み立てを行っている。第1図の資源エネルギー庁提示の標準工程では、110万kWe級原子力発電所に対し、5から10年の放射能の減衰を待つための貯蔵期間を持ち、その後3から4年をかけて発電所を解体撤去する、全体で8から15年程度の廃止措置期間を想定している。これに対

し、日本原子力発電東海発電所の廃止措置計画では20年程度の工程が計画され¹⁾、中部電力浜岡原子力発電所1、2号機の廃止措置計画では約30年程度の工程が計画されている²⁾。このように実際の廃止措置期間はより長期におよぶ傾向がある。

事業者が原子力施設の廃止措置を行う際は、炉規法に基づき、監督する規制行政庁に解体方法、核燃料物質による汚染の除去、汚染物の廃棄といった廃止措置の工程を記述した「廃止措置計画」を提出し、計画の認可を受ける必要がある。また、この計画書には作業員等の放射線被ばくの管理、想定される事故が生じたときの影響の評価、核燃料物質による汚染の分布評価といった、廃止措置中の安全確保のための方策に関する説明書の添付が求められている。

2. 廃止措置技術

2.1 除染技術

原子力発電所の廃止措置時には、作業員の被ばく低減や放射性廃棄物発生量の低減を目的として、大規模な除染作業が行われる。除染対象物は材質、形状、汚染形態が様々であるため、用いられる除染技術も非常に多種である。代表的な除染技術の例を第1表に示す。実際の作業ではこれらの方法を組み合わせて用いる場合もある。除染を行う場合は対象物の特性や費用対効果を評価し、最適な方法を選択して実施する。この除染作業は適用時期によって、解体作業を開始する前に行う「系統除染」と、解体作業後に実施する「解体後除染」に分類される。

系統除染は原子炉冷却系ループ等の配管内部に酸化剤や還元剤を含む除染溶液を通し、管内面に付着した汚染物質を除去する技術であり、原子力発電所の供用中にも用いられる技術である。これにより、配管近傍の線量を低減させ、作業員の被ばく低減を図ることができる。施設運転中の除染では機器性能を維持しなくてはならないため、化学的に強力な除染剤の使用は制限されるが、廃止措置の際はそれらを考慮する必要が無いため、母材表面を溶解するような強力な除染剤を効果的に使用できる。しかし、除染剤や除染溶液の使用は大量の二次廃棄物や廃液を生み出す恐れもあるため、これについても実施の是非を含め、最適な使用法を計画する必要がある。

機器等を撤去した後に、付着した放射性物質を除去し、放射性廃棄物としての区分を下げるために行う除染行為が解体後除染であり、第1表に示した物理的除染や化学的除染、電気化学的除染や熱的除染などが用いられる。後述するように廃止措置によって発生する放射性廃棄物は

第1表 代表的な除染技術 (文献3) より抜粋)

対象物	分類	原理	除染技術
金属機器・構造物	物理的方法	機械的方法	ブラシ研磨、研削、ふき取り
		ジェット法	スチーム、高圧
		振動法	超音波、振動機
		レーザ法	YAG、エキシマ
	化学的方法	浸漬法	酸、アルカリ、酸化剤、還元剤
		フォーム法	キレート剤、界面活性剤
		ゲル化剤法	ゲル化剤+酸
	ペースト法	除染剤+充填剤+キャリア	
コンクリート表面	切削法	機械的方法	ミーリングカッタ、グラインダー
		切削法	ウォータージェット、ブラスト
	破砕法	打撃破砕法	スキャブリング、ブレーカ
		割裂法	スポーラ
		熱的方法	レーザ、マイクロ波
		化学的方法	化学溶解、電気化学法、生化学的方法

その放射能レベルに応じてレベル1(L1)、レベル2(L2)、レベル3(L3)と分類されるが、除染によってコンクリートピット処分相当のL2分類の廃棄物をトレンチ処分相当のL3分類に下げることができれば大幅な処分コストの削減につながるため、除染コストと比較して実施の是非が判断される。

2.2 解体技術

原子力発電所の解体作業では、原子炉周辺に多数存在する、放射性物質により汚染された、あるいは中性子線等により放射化された機器・構造物も解体対象となる。これらは汚染や放射化の程度によっては放射線量が極めて高くなり、容易に人が近づくことが出来ない場合もある。放射化によって生成された放射性核種のうち、半減期の短い核種は運転終了後短時間で減衰するため、解体までに十分な貯蔵(冷却)期間を設ければ、解体作業に関わる作業員の被ばく線量や放射性廃棄物の発生量を低減することができる。貯蔵期間を経ても放射線量が高い場合は遮蔽材を用いて放射線量を低減させるか、産業用ロボットやマニピュレータなどの遠隔装置を用いて人が近づかずに遠隔作業を行うこととなる。近年はこのような環境でも作業を進めるために、自由度が高く非常に細かい作業が可能なマスタースレーブ型マニピュレータや

小型の放射線検出器を内蔵し、自走しながら配管内部の汚染分布を測定するロボットなどの実用や開発が進んでいる。第2表に原子力発電所の解体に用いられる代表的な技術を示す。金属製の機器や構造物を切断する際は主にプラズマアークやレーザを用いた熱的切断工法が用いられ、金属およびコンクリート双方を対象とする際は機械的切断工法がよく用いられる。この他、爆破や破砕などの工法も用いられる。原子力発電所の解体作業では一般の解体作業と同様の作業員の安全確保に加え、放射線防護や放射能汚染に対する対策も必要となるため、放射性物質の拡散防止や作業員の防護具を着用するなどの安全対策を行い、作業が進められる。

第2表 代表的な解体技術 (文献3) より抜粋)

対象物	分類	原理	解体技術
金属機器・構造物	熱的切断法	レーザ法	CO ₂ レーザ、YAGレーザ
		電気的方法	プラズマアーク、酸素アーク、アークソー、ウォータージェット
		酸化反応熱的方法	酸素ガソリントーチ、テルミット法
		放電法	放電加工
	機械的切断法	研削法	アブレイシブウォータージェット
		物理的方法	ニブラ、せん断機、フライス、ハンドソー、チェーンソー、ダイヤモンドワイヤソー
		爆破法	成型爆薬
コンクリート構造物	切削法	機械的方法	ダイヤモンドワイヤソー、コアボーリング
		切削法	アブレーションウォータージェット、成型爆薬
	破砕法	打撃法	鋼球、ブレーカ
		圧力法	圧砕機、ジャッキ
	熱的方法	火炎切断、テルミット法、電磁誘導、直接通電	

3. 廃止措置に伴い発生する廃棄物

原子力発電所の廃止措置では、解体作業に伴い、大量かつ種々の放射性廃棄物ならびに非放射性的産業廃棄物が発生する。この中には前述した除染作業に伴い発生する二次廃棄物も含まれる。原子力発電所の廃止措置により発生する放射性廃棄物は全て低レベル放射性廃棄物であり、これらは含有される放射性物質の濃度の違いから、レベル1廃棄物(放射性物質濃度の比較的高いもの=L1)、レベル2廃棄物(放射性物質濃度の比較的低いもの=L2)、レベル3廃棄物(放射性物質濃度の極めて低いもの

の=L3)に分類される。各放射性廃棄物は性状および放射性物質濃度に応じて減容された後、性状に応じて容器に固形化または封入され、最終的には埋設処分される。原子炉内から発生する放射性物質濃度の高いL1廃棄物は地下50m～100m程度の人工構築物の中に埋設する余裕深度処分が行われることが想定されている。比較的放射性物質濃度の低いL2廃棄物は、地下10m程度の人工構築物(コンクリートピット)の中に埋設し、放射性物質濃度の極めて低いL3廃棄物はトレンチ(溝)を掘った地下に直接埋設することが計画されている。

また、廃止措置に伴い発生する廃材のうち、放射性物質の放射能濃度が極めて低く、人への影響が無視できる「放射性物質として扱う必要のないもの」は「クリアランス制度対象物」として放射性物質としては扱わず、リサイクル資源として再利用や一般の廃棄物として取り扱われる。実際の原子力発電所の廃止措置に伴う廃棄物の見込みの発生量を、上記の廃棄物4分類に放射性廃棄物ではない廃棄物を加え第3表に示した。表中の東海発電所の原子炉は国内唯一の炭酸ガス冷却型炉(GCR)であり、廃止措置に伴い発生する廃棄物量の約70%が非放射性的の廃棄物である。また、一般的なBWR型軽水炉である中部電力浜岡発電所の廃止措置では、廃棄物量のうち約90%が非放射性的の廃棄物、約5%がクリアランス対象物となり、放射性廃棄物となるのは廃棄物量全体の5%以下となる予定である。中でも余裕深度処分が必要となるL1廃棄物は1機当たり約100トンと、廃棄物全体の0.5%以下の限られた発生量となる見込みである。

第3表 原子力発電所廃止措置に伴い発生する廃棄物の見込み発生量 (単位:トン)

区分		日本原電 東海発電 所 ¹⁾	中部電力浜岡発電 所 (BWR) ⁴⁾	
			1号機	2号機
低レベル放 射性廃棄物	L1	1,530	100	100
	L2	8,870	1,000	1,200
	L3	13,080	6,300	7,900
クリアランス対象物		40,160	11,200	13,400
非放射性的廃棄物		128,700	192,700	249,500

廃止措置に伴い発生する廃材を「クリアランス制度対象物」と見なすか否かの基準となる「クリアランスレベル」は、廃材である金属やコンクリートがどのように再利用または廃棄物として埋め立てられたとしても、人体への影響は無視できると国際的に認められている、1年間あたり10マイクロシーベルトを超えないよう、評価対象の放射性核種ごとに濃度が算出されている。この放射性核種濃度の算出のためには、評価対象物を再利用または処分した場合の作業員や周辺住民が被ばくする可能性

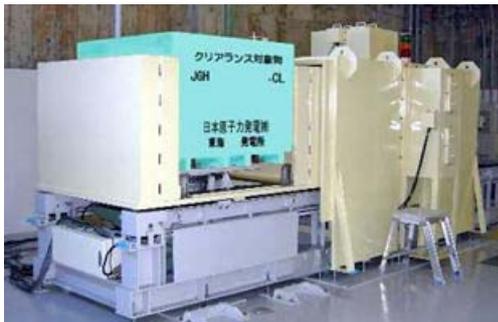
(シナリオ)を複数考慮して、それぞれのシナリオに沿った被ばく線量を算出するための評価モデルを構築する。そして、評価パラメータを設定し、線量基準値(=1年間あたり10マイクロシーベルト)に相当する評価核種の濃度を算出する。その後、想定されるシナリオのうち最も厳しい条件を選出し、クリアランスレベルを決定する。ここで、「最も厳しい条件」とは対象物が含まれている放射性核種の濃度が最も低濃度で、人が被ばくする線量が基準値に達する条件である。クリアランスレベルの算出方法の詳細は参考文献3)の第4章に紹介されている。わが国では発電用原子炉に対しては、経済産業省令で33核種のクリアランスレベルを規定している。このクリアランスレベルの一部を抜粋して第4表に例示する。表中には文部科学省令で定められた、試験研究炉、核燃料使用施設およびウラン取扱施設に対するクリアランスレベルも併せて示した。

第4表 クリアランスレベル(抜粋) Bq/g

核種	経済産業省令 (発電用原子 炉)	文部科学省令		
		研究炉	核燃料 施設	ウラン 取扱施 設
H-3	100	100	1100	-
C-14	1	1	1	-
Co-60	0.1	0.1	0.1	-
Sr-90	1	1	1	-
Tc-99	1	1	-	-
I-129	0.01	0.01	-	-
Cs-134	0.1	0.1	0.1	-
Cs-137	0.1	0.1	0.1	-
Eu-152	0.1	0.1	-	-
U-232	-	-	-	0.1
U-235	-	-	-	1
U-236	-	-	-	10
U-238	-	-	-	1
Pu-239	0.1	0.1	0.1	-
Am-241	0.1	0.1	0.1	-

廃止措置に伴い発生した廃材を「クリアランス対象物」とするためには、先ず、事業者は対象物の放射性核種濃度の測定及び評価方法を策定し、規制当局による認可を受ける。次に、認可を受けた方法により対象物の測定・評価を行い、含有される放射性核種が第4表に示したようなクリアランスレベルを下回っていることを確認する。この後、規制当局は事業者が行った測定・評価が適正に行われたかについて確認を行い、その後、確認証を交付する。この確認証の交付をもって対象物は「放射性物質として扱う必要のないもの」となる。

我が国におけるクリアランス作業の実施例としては日本原電の東海発電所の廃止措置や日本原子力研究所（現：日本原子力研究開発機構）のJRR-3の改造工事に伴って発生した廃材への適用が挙げられる。東海発電所では、廃止措置で発生した約2000トンの金属くずを対象としたクリアランスの認可申請を2006年6月に行い、同年9月に経済産業大臣より放射性核種濃度の測定および評価方法について認可を受けた。日本原電はこの方法に従いクリアランス測定を実施し、クリアランスレベルを満足していることを確認した。この際に用いられた専用の測定装置の写真を第2図に示す。



第2図 東海発電所で使用されたクリアランス制度対象物用の放射性核種濃度測定装置¹⁾

日本原電は測定を終了した対象物の一部について測定及び評価の確認申請を規制当局に行った。これに対して原子力安全・保安院はクリアランス作業が認可を受けた方法で行われたことの確認を行い、これを受けて経済産業大臣は日本原電に対して確認証を交付した。その後、クリアランス対象物は鋳造メーカーで加工され、ベンチ、ブロック、遮蔽体等の一般製品となり搬出され再利用されている。これが我が国初のクリアランス制度対象物の発電所外への搬出となった。現在までに東海発電所からは累計で約170トンの対象物が搬出されている。第3図に東海発電所から搬出されたクリアランス対象物を原料として用いて製作された製品の写真を示す。



第3図 東海発電所から搬出されたクリアランス制度対象物を再利用した製品¹⁾

4. 廃止措置の今後

我が国の大型原子炉の主役である商業発電用軽水炉の廃止措置は中部電力浜岡1、2号機で始まったばかりである。さらに2011年3月に発生した東京電力福島第一原子力発電所の事故により、同発電所の1、2、3および4号機の廃止措置に向けた取り組みが既に始まっている。また、運転開始後30年を経過した初期の軽水炉については2020～2030年にかけてその多くが廃止措置に入るものとみられ、今後、次々と廃止措置が始まると見られる。これを円滑に実施していくには、関連する基準や指針等の一層の整備や、解体・除染技術の一層の高度化や効率化、さらには社会全体へ廃止措置の必要性や進め方、安全性といった情報を十分な透明性を持って発信し理解を得ていく事が求められる。一方、廃止措置に伴い必ず発生する各種の放射性廃棄物の処理・処分環境のハードおよびソフト面での整備も同時に進める必要がある。さらにクリアランスの考え方と対象物の再利用を社会に受け入れてもらうための施策も必要になるとみられる。

参考文献

- 1) 日本原子力発電ホームページ「東海発電所の廃止措置」.
- 2) 中部電力ホームページ「浜岡原子力発電所1、2号機の廃止措置計画について」.
- 3) 放射性廃棄物の工学、長崎晋也 他、第一版、オーム社、(2011)
- 4) 原子力安全・保安院放射性廃棄物規制課「浜岡原子力発電所1号原子炉及び2号原子炉廃止措置計画認可申請書の概要」、(2009)

東北大学 桐島 陽
(2013年4月30日)