05 バックエンド対策
05-02 原子力施設の廃止措置
05-02-03 発電炉の廃止措置
05-02-03-06 米国における発電炉廃炉計画

＜概要＞

米国では、2013年10月時点で、100基の原子力発電所が平均稼働率約90%で稼働している。米国の原子力法では、原子力発電所の運転認可期間は40年とされていたが、1995年の原子力法の改正により運転認可期間を60年に延長することが可能となり、多くのプラントで運転期間を延長した。それでも10年後、15基の商業炉が運転期間50年を超える状況になり、これから本格的な廃止措置時代の到来が想定されている。このため新たな建設計画8基が申請済みであり、そのうち2基の建設を、34年ぶりに2013年3月に着手している。

一方、運転停止した発電用原子炉は、2013年10月までに、パイロットプラントを含め33基であり、そのうち13基の解体が完了している。

1990年代に8基（コネチカットヤンキー、トロージャン、ヤンキーロー、メインヤンキー、サンオノフレ1号機、ビックロックポイント、ザイオン1号機及び2号機）が永久停止を決定したが、このうち6基については即時解体を選択して既に施設解体を終了し、サンオノフレ1号機を除き規制解除後にサイト解放を行い、跡地の緑地化が図られている。また、安全貯蔵を選択したザイオン1号機及び2号機は、2010年に早期解体に変更し、2020年までにサイト解放を完了させる計画である。このように米国では「廃炉計画の策定は早いほどよい」、「次世代にできるだけ課題を先送りしない」、「プラント経験者の活用が有効」などの考え方から早期解体撤去の傾向にある。

＜更新年月＞

2014年02月

＜本文＞

１．概況

米国の原子力法では、これまで原子力発電所の運転認可期間が40年とされていたが、1995年の原子力法の改正により運転認可期間を60年に延長することが可能となり、2013年10月時点で、100基が稼働している。このため多くの優良プラントでは、出力増強や運転認可更新の計画が進められている。また1985年以来建設を中断していたWatts Bar 2が、2007年10月から建設を再開している。さらに、新たに8基の建設計画が申請、契約、発注済みであり、2013年3月にそのうち2基の建設に着手した。発電炉の建設着手は34年ぶりである。さらに、同年10月に2基の建設が開始された。

一方、米国で運転を停止した発電炉は、2013年10月までに33基である。この中には、シェールオイルの開発等により経済性を理由に最近閉鎖した2基が含まれている。33基のうち、14基が解体を完了し、5基が解体中、7基が安全貯蔵中又は安全貯蔵準備中、3基が遮蔽隔離、残る4基は措置が未定である。

1990年代に停止した8基は、蒸気発生器などの大型機器の補修または交換などが必要となり、結果として自由経済市場での競争力がなくなったため、閉鎖された。このうちの6基は、即時解体を選択し、解体撤去を完了している。この即時解体方式では、除染効果に優れた酸化還元法であるCORD法、DFD法などと呼ばれる系統除染により冷却系の線量レベルを下げて配管機器の撤去を容易にし、また原子炉一括撤去・処分方法の採用により工期短縮、コスト低減など図っている。

表１に閉鎖した原子力発電所と廃止措置の状況を示す。

２．米国の廃止措置規制

米国における原子炉の廃止措置（Decommissioning）は、連邦規則（10CFR20 1003）によると、施設又はサイトを安全に使用状態から解放し、（1）無制限利用への財産の解放と認可の終了、（2）制限条件を課した状態での財産の解放と認可の終了を許すことができるレベルまで残留放射能を下げることを意味する。原子炉の廃止措置は認可を取得した事業者により、米国原子力規制委員会（NRC）の規制の下で行われる。廃止措置の方法は即時解体（DECON）、安全貯蔵（SAFSTOR）、遮蔽隔離（ENTOMB）の3つの方式の中から選択することになっている。図１に原子炉施設の廃止措置手続きのフローを、表２に原子炉施設の規制概要を示す。なお、原子炉の運転停止後、60年以内に廃止措置の完了が義務付けられている。

３．代表的な原子力発電所の廃止措置

米国の代表的な原子力発電所の廃止措置について以下に述べる（表３参照）。

（1）ヤンキーロー（Yankee Rowe：PWR、出力18.5万kWe、運転期間1961-1992年）

1993年に解体を開始し、炉内構造物、4基の蒸気発生器が撤去された。原子炉圧力容器は、1996年11月に切断しない方法で撤去され、輸送兼処分キャスクに入れ、その内部にコンクリートを詰め、そのまま1997年5月にバーンウェル低レベル廃棄物処分場に輸送・処分された。プールに保管されていた533体の使用済燃料は、サイト内の独立使用済燃料貯蔵施設（ISFSI）への移動を2003年6月に完了し、DOEに引き渡すまで長期保管されている。認可終了計画を2003年11月にNRCに提出し、最後の残存作業として、建屋の解体、最終サーベイ活動、サイト修復が2005年半ばまでに完了、2007年にサイトを解放した。なお、全廃止措置費用は解体撤去費、人件費、廃棄物処分費、使用済燃料長期保管費を含め1995年ドル換算で306百万ドルと評価されている。

（2）コネチカット・ヤンキー（Connecticut Yankee：PWR、出力60万kWe、運転期間1968-1996年）

廃止措置方式として即時解体が選択され、1997年に開始。1998年には一次系の系統除染をCORD法（過マンガン酸、還元剤にシュウ酸を用いる酸化還元除染法の一つ）で行った。4基の蒸気発生器は、2000年に一括撤去され、炉内構造物をウォータジェット工法で切断撤去した。原子炉容器（800トン）は、一括撤去・輸送し、2004年1月に処分した。最終サーベイ後、2007年夏にサイトが解放された。

（3）メインヤンキー（Maine Yankee：PWR、出力90万kWe、運転期間1972-1997年）

廃止措置方式として即時解体が選択され、1997年に開始。1999年には一次系の系統除染をDFD法（過マンガン酸カリウムとシュウ酸溶液を交互に使う酸化還元除染法にフッ化ホウ素酸を添加して、固着性酸化物を除去すると共に母材自体を溶出させる方法）で行った。3基の蒸気発生器は、2000年に一括撤去された。また、原子炉圧力容器は、一括撤去後、処分容器にパッケージ化（1175トン）して輸送し、2003年7月に処分した。原子炉格納容器建屋等は、2004年9月までに解体された（図２参照）。2005年廃止措置完了、更地化されている。解体コストを廃棄物処理・処分費も含め約4億ドル（約400億円）で達成した。

（4）ビッグロックポイント（Big Rock Point：BWR、出力7.5万kWe、運転期間1963-1997年）

ビッグロックは、1996年にヤンキーロー発電所が樹立した米国における最長運転記録を更新し、1998年8月に35年間の営業運転実績を残して永久停止された発電所である。廃止措置には即時解体方式が選択され、1997年に開始。1998年には一次系の系統除染がDFD法で行われた。炉内構造物及び冷却系の撤去は2002年までに行われ、原子炉圧力容器は一括撤去後、バーンウェル処分場へ輸送された。約90トンの蒸気ドラムは、2003年11月にユタ州のエンバイロケア処分場に運ばれた。廃止措置は2006年末に終了し、サイトが解放された。廃止措置コストは、使用済燃料貯蔵を含め、1997年に350.7百万ドルと評価している。

（5）サンオノフレ1号機（San Onofre-1：PWR、出力45.6万kWe、運転期間1968-1992年）

南カリフォルニア・エジソン（SCE）社は、サンオノフレ発電所1号機について、当初、2013年まで安全貯蔵する予定であった。この方針は、運転中の2号機及び3号機のデコミッショニング時期と合わせることで規模を大きくして、経済性が向上することを重視していた。しかし、解体に必要な知識と従業員を確保するため、解体を早めることが決定された。原子炉施設の解体は、2008年までに完了した。廃止措置総費用は、460百万ドルと評価されている。解体廃棄物は、処分費用を1998年の160万ドルから200百万ドルに増加して、約20年間サイト内に保管される。

（6）サンオノフレ2号機及び3号機（PWR、出力117.7万kWe/基）

SCE社は、今後、約30年間運転する予定で蒸気発生器を取り替えて運転を開始したが、蒸気発生器の伝熱管に損傷が見つかり、2013年6月、補修等方策を検討したが、安全審査に時間がかかり採算が合わない可能性があること、地元住民の同意が得られないことなどの理由により廃炉にすることを決定した。

（7）ザイオン1号機及び2号機（PWR、出力108.5万kWe、運転期間:1号機 1973.12-1998年、2号機 1974.09-1998年）

ザイオン発電所の1号機及び2号機は、蒸気発生器の故障から取り替えるかどうか検討した結果、経済性の観点から1998年に廃炉とすることが決定された。当初、安全貯蔵を選択したが、2010年に早期の解体撤去に変更して、現在、解体中であり、2020年までに施設の解体撤去と環境修復を終える計画である。炉内構造物の解体には、ミーリング、ドリル及びソーなどを用いる機械的な切断工法を採用した。また、原子炉圧力容器の解体には、ドイツのスターデの経験に基づき熱的切断方法を採用する計画である。2基の廃止措置コストは、2010年9月評価で900百万ドルである。
（前回更新：2008年12月）

＜関連タイトル＞

廃止方法 (05-02-01-03)
解体関連除染技術 (05-02-02-04)
海外主要国における発電炉の廃止措置の実績 (05-02-03-01)
エルクリバー（米国）の解体撤去 (05-02-03-07)
シッピングポート（米国）の解体撤去 (05-02-03-08)
トロージャン原子炉の廃止措置 (05-02-03-16)
米国EBWRの解体 (05-02-04-06)
原子力発電所の寿命延長（NRCの運転認可更新規則） (14-04-01-17)

＜参考文献＞

（1）通商産業省資源エネルギー庁公益事業部原子力発電課編、電力新報社発行：原子力発電便覧’99年版、1999年10月、p.778-779
（2）（社）日本原子力学会：日本原子力学会誌、Vol.46、No.11、9-10（2004）
（3）経済産業省：海外の廃止措置規制制度について
（4）原子力安全規制委員会（NRC）：http://www.nrc.gov/info-finder/decommissioning/
（5）(一社)日本電気協会新聞部：原子力ポケットブック2013年版、2013年10月、p.287-291
（6）Eric Howes, Safe at Last, Radwaste Solution（Sep./Oct.2003），p.38-40
（7）Maine Yankee, Decommissioning Project Nears Completion：
http://www.maineyankee.com/public/
（8）ANS NEWSLETTER，Decontamination Decommissioning and Reutilization Division，Oct.2000，May/Oct.2001，May/Oct.2002，May/Oct.2003，May/Oct.2004，May2005：
http://ddrd.ans.org
（9）（社）日本原子力学会：日本原子力学会誌、Vol.46、No.11、9−10（2004）
（10）Tim Petrosky：The Big Rock Vessel Goes to Barnwell，Radwaste Solutions，（Jan./Feb. 2004），p.15-19
（11）U.S. NRC ‘Status of the Decommissioning Program 2012 Annual Report’.
（12）日本原子力産業協会：世界の原子力発電開発の動向 2013年版（2013年5月発行）
（13）Holger Spann “Reactor Vessel and Reactor Vessel Internals Segmentation at Zion Nuclear Power Station” KONTEC 2013.

表1　米国における閉鎖した原子力発電所の概要

名称	炉型	出力（万kWグロス）	運転期間	廃止措置方式	停止理由	現　状
ビッグロックポイント	BWR	7.5	1963.03-1997.08	即時解体撤去	経済性	解体完了(2007年1月サイト解放)
カロライナス CVTR	HWLWR	1.9	1963.12-1967.01	安全貯蔵-解体撤去	使命達成	解体完了(2009)
ドレスデン 1	BWR	21	1960.07-1984.08	〃	経済性	安全貯蔵中
EBR-Ⅱ(DOE施設)	LMFBR	2	1965　-1994.09	〃	開発中止	〃
エルクリバー	BWR	2.3	1964.07-1968.02	〃	使命達成	解体完了(1974)
エンリコ・フェルミ1	LMFBR	6.5	1966.08-1972.11	〃	経済性	解体中
フォート・セントブ・ブレイン	HTGR	34.2	1979.07-1989.08	即時解体撤去	経済性	解体完了(08/1997)ガスタービン発電所へ転換
ハダムネック (コネチカットヤンキー)	PWR	60	1968.01-1996.12	〃	〃	解体完了(2007年夏サイト解放)
ハーラム	SGR	8.2	1963.11-1964.09	永久埋設	使命達成	埋設管理中
フンボルト・ベイ	BWR	7.5	1963.08-1976.07	安全貯蔵-解体撤去	経済性	解体中
インデアン・ポイント 1	PWR	28.5	1962.10-1974.10	〃	安全性	安全貯蔵中
ラクロス	BWR	5.5	1969.11-1987.04	〃	経済性	解体中
メインヤンキー	PWR	90	1972.12-1997.08	即時解体撤去	〃	解体完了(2005) 更地化
ミルストン-1	BWR	68.9	1971.03-1998.07	安全貯蔵-解体撤去	〃	安全貯蔵中
ハンフォードN炉(DOE施設)	RBKM	86	1966.04-1988.02	〃	安全性	安全貯蔵中(原子炉本体のみ)
パスフィンダー	BWR	6.2	1966.03-1967.10	即時解体撤去	事故	解体完了(1992) 火力発電所へ転換, 残存放射能除去後サイト解放(2007)
ピーチボトム 1	HTGR	4.2	1967.06-1974.11	安全貯蔵-解体撤去	経済性	安全貯蔵中
ビッカー	OMR	1.2	1963.11-1966.01	遮蔽隔離	使命達成	遮蔽隔離中
プレルトリコ・ボーナス	BWR	1.7	1964.08-1968.06	〃	〃	〃
ランチョセコ1	PWR	96.6	1975.04-1989.06	安全貯蔵-解体撤去	住民投票	解体完了(2009年9月サイト解放)
サクストン	PWR	2.3	1962-1972	〃	使命達成	解体完了(11/2005)
サン オノフレ-1	PWR	45.6	1968.01-1992.12	〃	経済性	解体完了(2008)、(ただし、放射性廃棄物が保管中であり、認可終了申請が未提出)
シッピングポート(DOE施設)	PWR LWBR*	10.0 5.2	1957.12- 1977.12-1982.10	即時解体撤去	使命達成	解体完了(12/1989) *改造炉心
ショーウハム	BWR	84	1986.08-1989.06	〃	政治取引	解体完了(1994)
スリーマイルアイランド 2 (TMI-2)	PWR	95.9	1978.12-1979.03	安全貯蔵-解体撤去	事故	1993年から監視・安全貯蔵中。 解体開始事故は、1号機の運転期間が20年延期が認可され、2014年解体開始を1号機の解体時期と合わせ2034年解体開始予定。
トロージャン	PWR	117.8	1976.05-1993.01	即時解体撤去	経済性	規制部分解体完了(2005) 規制解除後の建屋等解体完了(2008)
ヤンキーロー	PWR	18.5	1961.07-1992.02	〃	〃	解体完了(2007年夏サイト解放)
ザイオン-1	PWR	108.5	1973.12-1998.01	安全貯蔵-解体撤去	〃	解体中(安全貯蔵期間短縮、2010年解体開始、 2020年完了予定)
ザイオン-2	PWR	108.5	1974.09-1998.01	〃	〃	
クリスタルリバー3	PWR	88.5	1997.03-2013.01	〃	〃	格納容器欠陥の補修を経済性の観点から断念。
キウォーニ-1	PWR	59.0	1974.06-2013.05	〃	〃	2030年までの20年間の運転延長が認めれれたが、 経済性の観点から廃炉決定。
サンオノフレ-2	PWR	112.7	1983.08-2012.01	未定	経済性等	2号及び3号機は、交換した蒸気発生器の伝熱管に損傷が見つかり、補修等検討されたが経済性、地元住民の反対等により再稼働を断念、2013年6月、廃炉を決定。永久停止後、2年以内に本格的な廃止措置計画提出の予定。
サンオノフレ-3	PWR	112.7	1984.04-2012.01	未定	経済性等	

下記の出典等をもとに作成した

[出典]原子力ポケットブック2013、日本電気協会新聞部 2013年10月、P.287-291

表2　米国の原子炉施設廃止措置関連法規

実施責任	事業者（認可取得者）
規制当局	原子力安全規制委員会（NRC） 使用済燃料が使用済燃料プールから撤去されるまでは原子炉規制局(NRR)、以降は核物質安全保障局(NMSS)
解体方式	標準シナリオなし(60年以内に完了することを条件に設置者が選択する） -即時解体(DECON)、安全貯蔵(SASTOR)、遮蔽隔離(ENTOMB)のオプション
解体に係る許認可の種類（着手時のもの）	-主な廃止措置活動に先立ち、恒久停止証明書、燃料恒久取出証明書及び停止後廃止措置活動報告書(PSDAR)の提出等が必要 -燃料取出後技術仕様(DTS)はNRCの承認が必要 -その他各種プログラム/プランの改訂が必要
関連法令	- B55連邦規則(10CFR)の中で規制(廃止措置手続きは10CFR50.82） - 認可終了のための放射能基準（10CFR20　Subpart E（1997） -Regulatory GuideやNUREG文書に詳細を規定
廃止措置実施に対する法的強制力	10CFR50.82への違反は犯罪制裁対象
廃止措置ガイダンス	・RG.1.86(原子炉運転認可終了） ・RG1.184（発電炉の廃止措置） ・RG1.179（LTPの様式と内容） ・RG1.185（PSDARの様式と内容） ・NUREG-1700（LTP審査用SRP） ・NUREG-0586（廃止措置に対する最終総合環境影響報告）、 ・NUREG-1575（MARSSIM: 多省庁共用放射能サーベイ及びサイト調査マニュアル） ・NUREG-1757, Vol.1,2,3（NMSS統合廃止措置ガイダンス：特性付け、放射線サーベイおよび放射能基準　の決定） ・RG.1.191（廃止措置中及び恒久停止原子力発電所の火災防護プログラム
廃止措置中の安全規制と放射線防護規制の考え方	-原子力安全に関する一般規則が廃止措置の状態に応じて見直し適用される。 -認可修正申請事項(50.90)：技術仕様(TS)の変更等 -適用免除条項(50.12)：NRC規則の特定条項の適用免除 -改造・変更条項(50.59)：事前承認の有/無の改造 放射線防護は運転中と同じ。被ばく限度も同じ。基本原則はALARA。
廃止措置中の規制当局による検査	-廃止措置検査マニュアル（IMC2561）と各種検査手順書からなる。 -IMC2561では次のカテゴリーに分けて検査頻度及び内容を規定 ・活発な廃止措置活動（解体、除染、解放等） ・不活発な廃止措置活動（安全貯蔵等） -検査はコア検査と任意検査からなる。 ・単一ユニットの場合、常駐検査官2名のうちの1人は、安全停止状態が確立された時点でサイトを去る。残りの者は前もって定められた期間、サイトに残る。 ・場合によっては、資格認定された廃止措置検査官が1名任命される。そのほとんどをサイトでの監視・検査に費やす。
維持管理に関する規制	-主要な廃止措置活動前に許認可文書の見直し ・最終安全解析書(FSAR)の24ヶ月毎の見直し ・DTSの承認申請 -廃止措置の変更管理は50.59の条項に基づいて実施されるが、この実施状況を検査手順書「恒久停止した原子炉での安全審査、設計変更及び改造」にて検査する。 - 提案している変更、試験又は実験がその認可に組み込まれている燃料取出後技術仕様(DTS)の変更を伴ったり、未審査の安全問題を伴わないならば、認可保持者は、NRCの事前承認なしで変更を行って良い。

下記の出典等をもとに作成した

[出所]経済産業省：海外の廃止措置規制制度について、
http://www.meti.go.jp/committee/downloadfiles/g41007a370j.pdf、2/5
[出典]原子力ポケットブック2013、日本電気協会新聞部 2013年10月、P.296-297

表3　米国の代表的な原子炉廃止実績

原子炉施設名		シッピングポートⅡ	フォートセントブレイン(原型炉)	ヤンキーロー	トロージャン	メインヤンキー	ザイオン(2基)
所在地		SHIPPINGPORT, PA	PLATTEVILLE, CO	ROWE, MA	RAINIER, OR	MYAPC	ZionSolution
炉型		LWBR	HTGR	PWR	PWR	PWR	PWR
出力(万kW)		5.2	34.2	18.5	117.8	90	108.5×2
運転期間		1957-1982	1979-1989	1961-1992	1976-1993	1972-1997	1号機:1993-1998 2号機:1974-1998
解体方式		即時解体撤去	即時解体撤去	即時解体撤去	即時解体撤去	即時解体撤去	安全貯蔵(初期計画) 本格解体に変更(2010年)
解体状況		1985年　解体開始 1989年　サイト解放	1992年　解体開始 1997年　終了	1993年　解体開始 炉内構造物、SG、 加圧器撤去・搬出完了 1996年　圧力容器撤去完了 1997年　圧力容器搬出 2007年夏　サイト解放	1994年　解体開始 1994-1995年 SG、加圧器撤去完了 1997年圧力容器撤去完了 2005年建屋を含め規制解除	1998 年解体開始 1998年2月～3月: (DFD法による系統除染) 2003年　圧力容器撤去完了 2005年　サイト解放	2010年本格解体開始 2012年から炉内構造物解体 2015年圧力容器解体予定 2020年サイト更地化を目標
解体工程	炉内構造物	圧力容器と炉内構造物を	プラズマアーク (水中切断)	プラズマアーク (水中切断)	圧力容器と炉内構造物を一体のまま撤去	炉心部の炉内構造物を研磨剤入 水ジェットを用い解体し、使用済燃料と同様に保管	機械的切断(回転ソー、レビシレソー、ミーリング)
	原子炉圧力容器	一体のまま撤去	ダイヤモンドワイヤーソー	圧力容器を一体撤去 (キャスク内に収納)	(圧力容器の外側に遮蔽板取付)	圧力容器と炉内構造物の2/3を一体撤去(キャスク内に収納)	熱的切断で解体を計画中 (酸素・プロパンガス)
	生体遮へい壁	ダイヤモンドブレードカッター		ハンドブレーカー	ダイヤモンドブレードカッター等		
解体廃棄物	処分	ハンフォード処分場	リッチランド処分場	バーンウェル処分場 クライブ処分場	ハンフォード処分場	バーンウェル処分場	
	再利用	建屋廃材は埋戻材に利用	建屋はガスタービン	建屋廃材は埋戻材に利用			
関連ATOMICAタイトル		シッピングポート(米)の解体撤去 <05-02-03-08>			トロージャン(米)の解体撤去<05-02-03-16>		

炉型略語の説明

略　語	正　式　名　称	略　語	正　式　名　称
BWR	沸騰水型原子炉	HTGR	高温ガス冷却炉
PWR	加圧水型原子炉	HWR	重水炉
FBR	高速増殖炉	OMR	有機材減速型炉
LWBR	軽水冷却増殖炉	SGR	ナトリウム冷却黒鉛減速炉
LWGR	黒鉛減速軽水冷却炉		

下記の出典等をもとに作成した

[出典]・通商産業省資源エネルギー庁公益事業部原子力発電課編、電力新報社発行:原子力発電便覧'99年版、1999年10月、p.779
・日本電気協会新聞部:原子力ポケットブック2013年版、2013年5月、p.291等

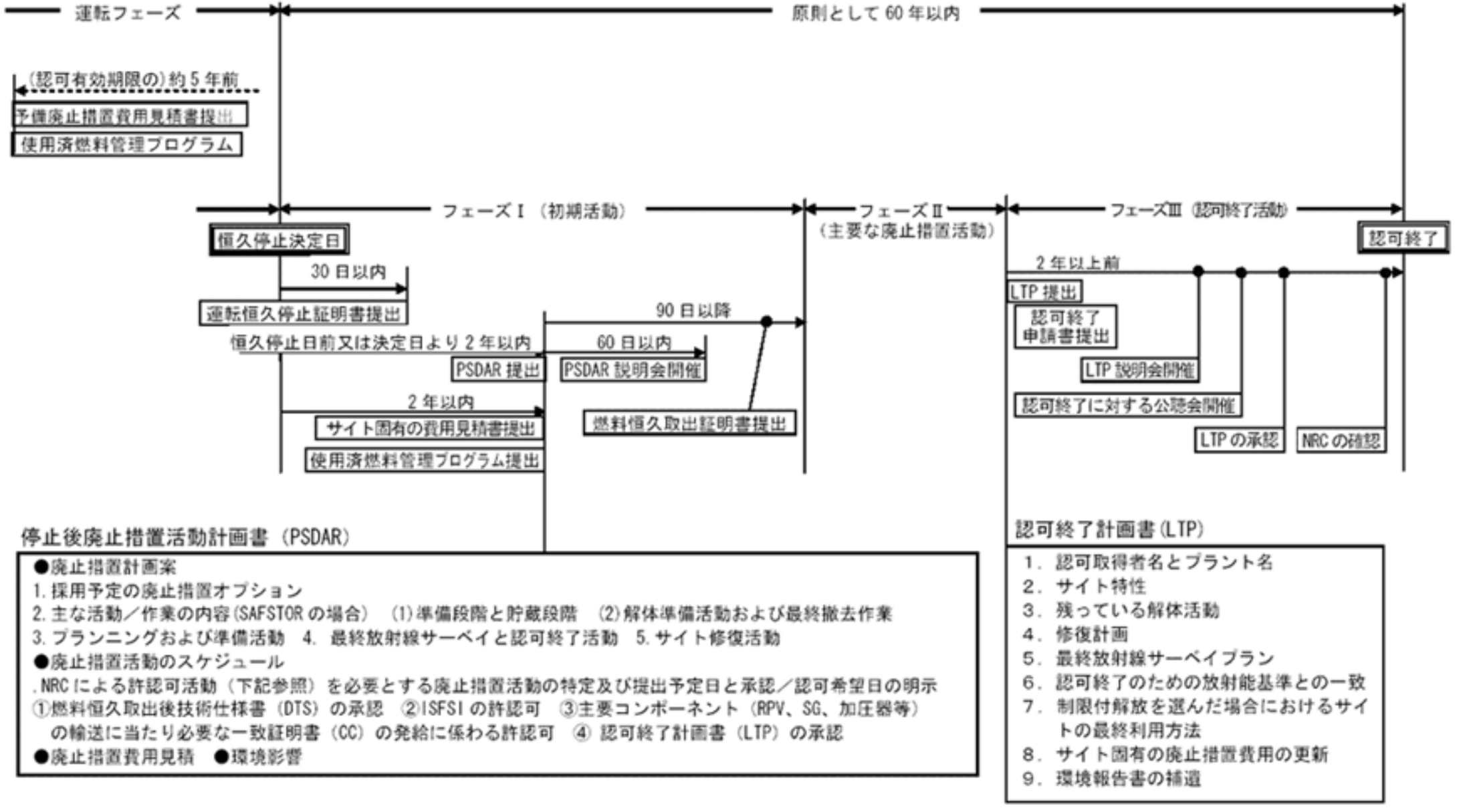

図1　米国の原子炉施設廃止措置手続きのフロー

[出所]経済産業省：海外の廃止措置規制制度について、
http://www.meti.go.jp/committee/downloadfiles/g41007a370j.pdf、3/5

解体前の外観
（内面鋼板ライニング、鉄筋コンクリート製）

柱部分に穿孔
火薬装着

爆破中

爆破解体後

図2　メインヤンキー炉の原子炉格納容器建屋の解体

[出典]ANS NEWSLETTER(May＆Oct.2004)