プラントの損傷事例と対策

② 原子力発電所のプラントライフ マネジメント*

松 枝 啓 之**

Plant Life Management [PLM] for Nuclear Power Plants*

by Keiji MATSUEDA**

キーワード：原子力発電所，プラントライフマネジメント，高経年化，
長期健全性，長期保全計画，検査，補修，監視，評価

1. 原子力発電状況

我が国では、1970 年に最初の商業用軽水炉が発電を開始して以来、現在までに図 1 に示すような 51 プラントの軽水型原子力発電所（加圧水型，沸騰水型）を建設，運転してきている。

これらの発電所の総電気出力は、約 4500 万キロワッ

図 1 原子力発電所立地図（1998 年 1 月 1 日現在）
出所：原子力発電関係資料（資源エネルギー庁）

トで、我が国の総発電設備の約 2 割，総発電電力量の約 3 割以上を占めるに至り、電力供給の中核を担っている。

また、原子力発電所の設備利用率は、1970 年代には約 50% 程度であったが、図 2 に示すように最近では約 80% 程度となっている。更に、計画外停止率は、約 0.2 回/炉・年と諸外国と比較しても非常に低い値で推移している。

このような運転経験から、1970 年代初期に運転を開始したプラントが 25 年以上経過している現時点でも、運転年数が増加し、プラントが高経年化してきたことによるトラブルの増加は認められていない。しかし、一般的には、機器材料は高経年化により徐々にではあるが劣化が進行するものと考えられるため、運転年数の増加に伴うプラントの安全性・信頼性の確保は重要な課題のひとつとなってきている。

2. 規制と自主保安活動

我が国の原子力発電所は、「原子炉等規制法」並びに

図 2 炉型別設備利用率の推移
出所：平成 9 年版 原子力発電所運転管理年報

*原稿受付 平成 10 年 3 月 20 日

**正 員 関西電力㈱ Member, The Kansai Electric Power Co., Inc.

表1 定期安全レビュー (PSR) の概要

項 目	日 本	フランス	ドイツ
実施目的	・運転経験の包括的評価 ・最新の技術的知見の反映 ・確率論的安全評価	・プラントの現状評価 ・最新プラントとの比較	・プラントの安全状態の確認 ・プラントの運転状態の評価 ・確率論的安全評価 ・セーフガードの評価
規制の位置付け	・電力会社の自主保安活動として実施	・政令でPSRの実施を規定 規制当局に「いつでも安全レビューする」権限有り	・規制側ではPSRの実施を規定していない
実施間隔	・約10年	・一応10年	・10年
実施項目:IAEAガイドラインとの比較	・IAEAの項目をカバーしている	・IAEAの項目にはこだわっていない	・IAEAの項目にはこだわっていない

「電気事業法」により、設計・建設・運転の各段階で原子炉設置許可・工事計画認可・定期検査等の許認可規制並びに電気事業者の自主保安活動を基に、プラントの安全性・信頼性を確保している。

電気事業者における自主保安活動の例としては、表1に示すように、プラントの運転開始以降に蓄積された運転経験や最新の技術知見が適切に反映されているかを約10年毎に定期的に確認する「定期安全レビュー」の活動を実施している。

また、1970年代初期に運転を開始したプラントが25年以上経過している現在、長期的な観点から安全性・信頼性を確保しつつ、プラント全運転期間中の効率的な運転・保守を実施するための総合設備管理方策を確立する(プラントライフマネジメント)ための活動を進めている。

3. 事故・故障

現在までに発生した事故・故障は、表2、表3に示すように沸騰水型プラントでは、ステンレス配管の応力腐食割れや原子炉再循環ポンプの損傷、最近では原子炉炉内構造物(シュラウド)の応力腐食割れがあり、機器別では、配管・弁・ポンプで約4割程度を占めている。

また、加圧水型プラントでは、蒸気発生器伝熱管の種々の損傷や制御棒案内管支持ピン等の応力腐食割れ、最近では原子炉水位計ハウジングキャノピーシール部の割れがあり、機器別では、蒸気発生器で約5割、弁・配管・炉内構造物で約2割程度を占めている。

これらについては、都度、種々の検査・補修等の再発防止対策が実施されており、蒸気発生器については、最新設計の蒸気発生器に取り替えるという対策や炉内構造物(シュラウド)の取り替えも実施、計画されている。

最近発生した事故・故障の内、材料や溶接に関連するものを抽出すると図3から図5の通りで、応力腐食割れや疲労割れが損傷形態として確認されている。

図3は、1993年7月に高浜発電所1号機において、蒸気発生器の主蒸気配管に設置されている管台とベント管との溶接部に、振動による割れが発生・進展し、蒸気の漏洩に至ったものである。対策として、当該部の補修とベント管及びベント管サポートの形状を変更し、振動を低減させた。

図4は、1994年6月に福島第一原子力発電所2号機において、炉内構造物(シュラウド)の溶接部近傍に、製作時の溶接入熱による鋭敏化と残留応力の重畳による応力腐食割れが発生したものである。対策として、シュラウドの上部銅と中間銅を金具で固定するブラケット工法を適用した。

表2 トラブル発生機器の所属システム

出所：平成9年版 原子力発電所運転管理年報

分 類	BWR	PWR	GCR	小 計
原子炉本体設備	14	22	9	45
原子炉冷却系統設備	56	126	9	191
非常用炉心冷却設備	6	5	0	11
原子炉補助設備	11	9	0	20
計測制御系統設備	45	20	6	71
燃料取扱設備	0	1	4	5
廃棄設備	4	1	1	6
原子炉格納施設	1	1	0	2
蒸気タービン設備	41	17	7	65
復水・給水設備	27	11	1	39
電気設備	27	14	4	45
発電所共通設備	3	1	0	4
換気空調設備	3	0	0	3
補助ボイラ設備	4	0	0	4
その他	5	2	5	12
合 計	247	230	46	523

表3 トラブル発生機器

出所：平成9年版 原子力発電所運転管理年報

分 類	BWR	PWR	GCR	小 計
圧 力 容 器	9	1	0	10
燃 料 体	4	3	7	14
炉 内 構 造 物	0	14	2	16
蒸気発生器(パイプを含む)	3	105	6	114
ポ ン プ	32	8	1	41
モ ー タ	8	4	0	12
弁	39	25	6	70
配 管	46	20	2	68
熱 交 換 器	5	4	0	9
タ ー ビ ン	5	7	1	13
復 水 器	1	0	1	2
発 電 機	5	4	3	12
変 圧 器	3	3	0	6
遮 断 器	3	1	0	4
制 御 装 置	27	10	1	38
電 源 装 置	14	4	1	19
変 換 器	1	1	0	2
リ レ ー	1	1	1	3
検 出 器	12	2	0	14
ベネトレーション	0	1	0	1
記 録 計	2	1	0	3
そ の 他	21	9	9	39
機器被害なし	6	2	5	13
合 計	247	230	46	523

図5は、1995年10月に美浜発電所3号機において、原子炉水位計ハウジングのキャノピーシール溶接部に、製作時に残留した塩化物とプラント起動時の高酸素水質環境の重畳による割れが発生したものである。対策として、当該部を補修溶接するとともに、定期検査時に検査を実施することとした。

今後、プラントの高経年化に伴い、これらの損傷形態も含めて、潜在的な損傷の発生を未然に防止し、プラントの安全性・信頼性を確保するための総合設備管理方策を確立する（プラントライフマネジメント）ことが必要と考えられる。

4. プラントライフマネジメント

前述のように、現在までの事故・故障による対策は、都度、各々のプラントで実施してきている。また、現在まで発生していない潜在的な損傷についても、今後の運転経過とともに損傷が発生するかどうか、現在の保全計画で各機器の健全性が維持できるか、また、新たな保全

計画が必要かどうか、といった観点からプラントライフマネジメントの活動を実施してきている。

図5 関西電力美浜発電所3号機の手動停止の原因と対策について（プレス）

図3 関西電力美浜発電所1号機の手動停止の原因と対策について（プレス）

図6 美浜1号機 取替が容易でない機器・構築物

図4 東京電力福島第一原子力発電所2号機の定期検査中に発見されたトラブルの原因と対策について（プレス）

表 4 主要機器の長期健全性評価結果

機器・構造物	経年変化事象	健全性評価結果	高経年化への対応
原子炉容器	疲 労 (他機器も同様)	60年間の運転でも問題ない	今後、定期的な実過渡回数の確認が必要
	中性子照射脆化	60年間の運転でも問題ない	適切に監視試験片の取り出し、脆化の程度評価の妥当性を確認が必要
	インコネル600合金のSCC	海外でトラブル事例のある部位については、保全上の対応が必要	評価上厳しい上蓋貫通部に対する計画的な点検・検査の実施が必要
炉内構造物	ステンレス鋼のIASCC	海外でトラブル事例のある部位については、保全上の対応が必要	評価上厳しいバッフルフォーマボルトに対する計画的な点検・検査の実施が必要
1次冷却材管	熱時効	60年間の運転でも問題ない	機会をみて実機の熱時効程度の把握と評価手法の妥当性確認が望ましい
蒸気発生器	伝熱管損傷	インコネル600合金は、保全上の対応が必要 インコネル690合金は、検査の適正化が可能	今後も計画的に検査を実施していく必要がある
ケーブル	絶縁劣化	60年の通常運転とその後の設計想定事故後においても問題ない	絶縁抵抗測定等に加え、適切な頻度で実機環境の確認あるいは実機ケーブル取り出し試験等が必要
格納容器	腐 食	局部腐食を起こす可能性が考えられる部位については、保全上の対応が必要	局部腐食を起こす可能性が考えられる部位に対する定期的な点検・検査等の実施が必要
コンクリート	強度低下、 遮へい能力低下	60年間の運転でも問題ない	定期的な非破壊試験により経年変化傾向を把握するとともに、定期的な塗装・保守が必要

図 7 プラント全体の評価フロー

具体的には、運転年数の長い敦賀 1 号機（日本原子力発電）、美浜 1 号機（関西電力）及び福島第一 1 号機（東京電力）の 3 プラントを代表に、60 年の長期運転を想定して取り替えが困難な重要機器に対して健全性に関する技術評価を実施し、長期運転に対する見通しや高経年化対応上の留意点を検討した。この結果は、1996 年 4 月に通商産業省より「高経年化に関する基本的な考え方」として発表されている。現在、これを受けて、電気事業者側でプラント全体の機器に展開して検討を進めている。ここでは、美浜 1 号機を例に紹介する。

(1) 研究開発

高経年化を検討する上での研究開発については、国、電気事業者及びメーカーが協力し、1985 年頃より原子力発電所を構成する材料の経年劣化度の測定・予測技術、欠陥評価技術及び疲労・熱時効データ取得等のプロジェクトを実施してきており、今後も継続する予定である。

(2) 美浜 1 号機 取替困難な機器の評価

図 6 に示すように、美浜 1 号機の原子炉容器、原子炉格納容器等及び構造物（8 機器とコンクリート構造物）の様な取り替え困難な機器について、長期健全性並びに高経年化対応上の留意点を検討した。結果の概要を、表 4 に示すが、長期運転経過後も、適切な保全計画を実施していけば、プラントの安全性・信頼性は維持できることを確認した。

(3) 美浜 1 号機 プラント主要機器の評価

図 7 に示すように、(2) 項と同様の検討をプラント全体に展開し、対象とする機器、構造物を構成部品レベルまで分解し、現在の技術的知見で、材料・使用条件・トラブル事例等から想定される損傷発生の可能性評価及び検査、補修等の保全計画の妥当性について検討し、高経年化対応上の留意点を抽出する。さらに、この結果を踏まえ、必要な検査・補修・監視・評価技術の開発と長期保全計画を策定する予定である。

5. ま と め

これまでに取り替え困難な機器に対する安全性・信頼性の観点から、高経年化対応の検討を進め、60 年という長期間においてもプラントの運転が可能との見通しを得た。

さらに、現在この検討をプラント全体に展開し、検討を進めているが、今後、この結果に基づく長期保全計画を策定するとともに、経済的な観点から適正化を図り、最適な保全計画とする必要があると考えている。