

原子力発電所の長期運転（高経年化対策）への取り組みについて

The Activities for Long Term Operation of Nuclear Power Plants

関西電力株式会社 南 安彦 Yasuhiko MINAMI Member

Abstract

The integrity of many SSEs of nuclear power plant has been maintained by various and continuous maintenance activities (replacement of components, preventive countermeasures for aging issues, etc.) so far. And the utilities have been implemented technical ageing evaluation for SSEs and established the long term maintenance policy for aging management. In this paper, the activities for long term operation and extension of operation period beyond 40 years that have been implemented by the utilities are described including some example of measures for ageing management in actual plants (Takahama unit 1/2, Mihama unit 3).

Keywords: Plant life management, Long term operation, Plant life extension, Aging evaluation.

1. はじめに

原子力発電所の機器・構築物については、建設時から相当長期間の運転が可能となるよう材料・構造強度等に余裕をもった設計が行われており、プラント供用段階では、保全計画に基づいて点検や評価、必要な補修などの保守管理活動が計画的かつ継続的に実施され、健全性の維持向上がはかられている。さらに、安全上重要な機器などにおける経年劣化事象に対しては、国の高経年化対策制度に基づき、60年の運転期間を想定した経年劣化に対する技術評価を行って、機器等の健全性の確認を行うとともに、必要な長期保守管理方針を策定することを行ってきた。

本稿では、2016年に40年を超える運転期間延長の認可を得た関西電力の高浜発電所1、2号機、美浜3号機の対応を具体例に、長期運転のために実施してきた取り組みについてまとめる。具体的には、これまで実施してきた大型機器の取替えや予防保全対策などの取り組み、新規基準への適合のための安全性向上対策や最新技術適用への実施中の取り組み、さらには、運転期間延長認可申請にあたり実施した原子炉容器などに対する特別点検と60年の運転期間を想定した機器・構築物に対する劣化状況評価（高経年化技術評価）の概要について述べる。

また、福島第一原子力発電所事故後に長期間プラントの運転を停止していることによる劣化評価への影響、今後の長期運転への課題等について述べる。

2. これまでの高経年化対策

原子力発電所では、巡視点検や状態監視技術を用いた診断、ポンプなどの定期的な起動試験など、日々の点検活動により機器・構築物の異常の早期発見に努めるとともに、保全計画に基づいて、定期事業者検査時などでの詳細な非破壊検査や機器を分解しての部品レベルの点検、必要な補修等の保守管理活動を品質保証体制の下で計画的かつ継続的に実施することにより、設備の信頼性の維持向上に努めている。

これらの活動の中では、国内外の原子力発電所で発生したトラブル事例からの知見や、長期運転を想定した技術評価等に基づいて、機器の故障や機能への影響が生じる前に計画的に設備の取替えや予防保全対策も行っている。長期の運転を想定して高浜1、2号機では、これまでに蒸気発生器や原子炉容器上蓋、燃料取替用水タンク、タービン、発電機や熱交換器等の大型機器や多くの配管等の取替えを実施してきており、さらには600系ニッケル基合金部の応力腐食割れ対策として、原子炉容器等の管台溶接部へのウォータージェットピーニングによる応力改善や690系ニッケル基合金溶接などの予防保全対策を実施してきている。

高浜 1, 2号機で実施した代表的な大型機器取替例を
図 1 に、600 系ニッケル基合金部位への予防保全対策の実
施例を図 2 に示す。

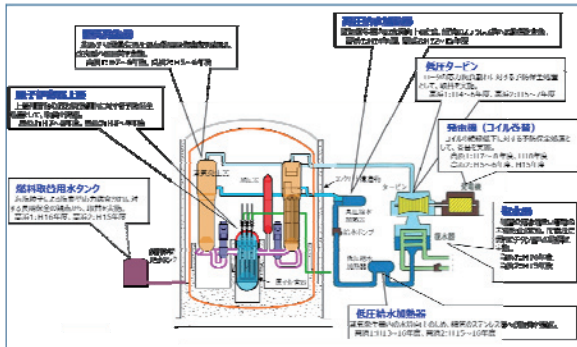


図 1 大型機器の取替（高浜 1, 2号機の例）

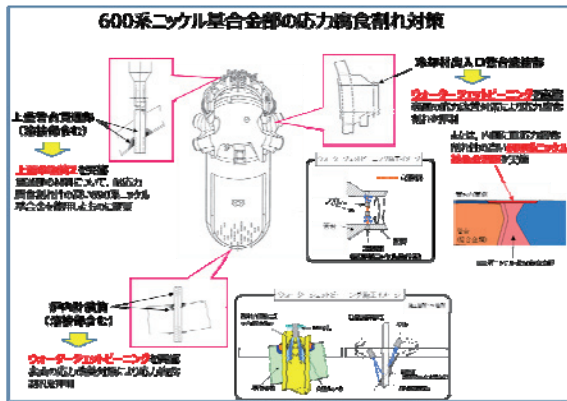


図 2 予防保全対策の実施（高浜 1, 2号機の例）

原子力発電所の高経年化対策については、「実用発電用
原子炉の設置、運転等に関する規則」に基づく高経年化
対策制度が整備されており、運転年数が 30 年を迎える時
点から 10 年ごとに、安全機能を有する設備に対し高経年
化技術評価を実施し、評価結果に基づいて必要な長期保
守管理方針を策定（これを保安規定に反映）、実施管理す
るようになってきた。

図 3 に高経年化技術評価の流れを示す。安全機能を有
する設備を対象に、各設備を部品レベルまで展開、使用
材料や環境条件などから想定される経年劣化事象を抽出
整理して、60 年運転を想定した劣化に対する技術評価を
実施する。この中では、現状の保全方法の妥当性につい
ての評価、劣化状態を想定した耐震安全性評価、耐津波
安全性評価、さらには、重大事故等時の条件等を考慮し
た必要な評価も実施して、設備の健全性が維持確保さ
れることを確認している。

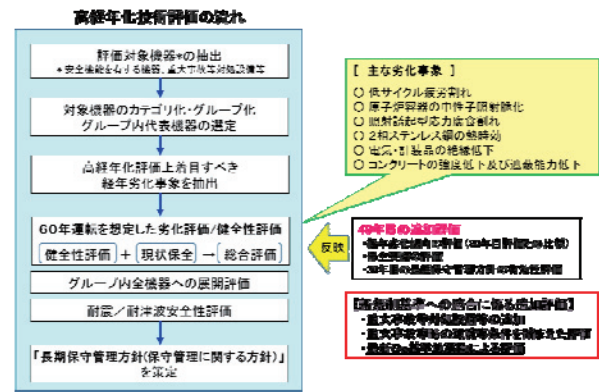


図 3 高経年化技術評価の流れ

この高経年化技術評価は、日本原子力学会「原子力発
電所の高経年化対策実施基準」と同基準附属書“経年劣
化メカニズムまとめ表”に基づいて実施するとともに、
国内のトラブル情報や保全品質情報、規格基準、米国 N
R C 文書などの最新知見の反映が図られている。

なお、日本原子力学会「原子力発電所の高経年化対策
実施基準」附属書“経年劣化メカニズム表”は、国内各
プラントの最新の高経年化技術評価書における知見や、
国際原子力機関（IAEA）が海外の経年劣化に関する知見
を集約している I-GALL（International Generic Ageing
Lessons Learned）レポートなどの最新知見の反映を継続的
に実施し改定が図られている。

3. 運転期間延長への対応

3.1 特別点検と劣化状況評価

高浜 1, 2号機、美浜 3号機は、40 年を超える運転期
間延長認可申請を行って、2016 年にそれぞれ原子力規制
委員会から認可を得ている。運転期間の延長認可申請に
当たっては、原子炉容器等に対する特別点検を実施し、
異常のないことを確認するとともに、それらの結果を考
慮して安全上重要な機器・構築物に対する 60 年の運転期
間を想定した劣化状況評価（高経年化技術評価）を実施
し、設備の健全性が維持確保できることを確認した。^{*1,*2}

特別点検は、原子炉容器、原子炉格納容器及びコンク
リート構築物を対象に実施している。例えば、原子炉容
器では、中性子照射脆化の想定される炉心領域部につい
て、運転開始以降初めて全域（母材及び溶接部）に対す
る超音波探傷検査を原子炉容器内面から実施し、割れ等
の欠陥のないことを確認した。（図 4）

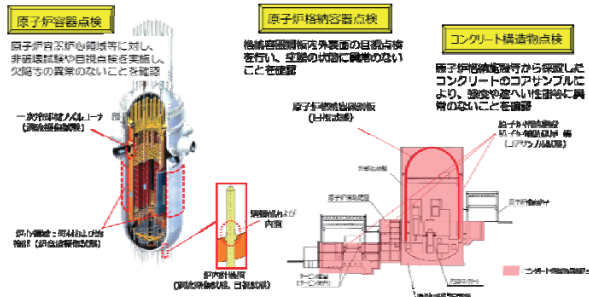


図4 特別点検の実施概要（PWRの例）

劣化状況評価では、原子炉容器における中性子照射脆化、低サイクル疲労割れ、炉内構造物に対する照射誘起型応力腐食割れ、2相ステンレス鋼の熱時効、電気計装設備の絶縁低下、コンクリート構造物の強度等の低下などの主要な劣化事象に対する60年の運転を想定した経年劣化程度の評価、経年劣化に対する健全性評価を行って、現状の保全活動の適切性評価も含めて機器・構築物の健全性が維持・確保されることを確認している。表1に主要な劣化事象に対する技術評価の概要を示す。

表1 主要な劣化事象に対する技術評価（高浜1，2号機の例）

評価する劣化事象	主な技術評価内容
低サイクル疲労	評価対象について、経験した起動・停止等の突発循環回数に今後60年までの運転を想定し保守的に設定した運転回数を加えて、疲労評価を実施。疲労累積係数が1を下回ることを確認。
中性子照射脆化	加圧蒸気発生器に対する評価として、原子炉格納容器材料の60年運転時点の破壊靱性予測値が、想定する欠陥に対する事故時（重大事故時を含む）の応力拡大係数を上回ることを確認。
照射誘起型応力腐食割れ（IASCC）	炉内構造物のバンプフォーマポルト等に対し、材料、温度、応力条件からIASCC発生に対する評価を実施。60年時点の照射量と応力状態からバンプフォーマポルト発生への予測評価を行う。
2相ステンレス鋼の熱時効	運転時の想定されるステンレス鋼焼鈍履歴等について、延性き裂進展抵抗と想定欠陥に作用する応力増大率より、健全性評価（き裂安定性評価）を行う。
電気・計装設備の絶縁低下	設計想定事故時条件下で安全機能維持要求のあるケーブル等電気・計装品について、環境安定試験データ等から長期使用後の事故時条件下での健全性評価を行う。
コンクリートの強度低下等	コンクリート構造物について、評価部位の熱、放射線照射、中性化、塩分浸透等による強度低下がないこと、耐震能力低下がないこと等を評価により確認。
耐震安全性評価 耐海洋安全性評価	経年劣化を考慮した機器・構築物について地震時（及び津波発生時）の発生応力等を評価し、評価基準を満足することを確認。

例えば、クラス1機器に対する疲労評価では、60年までの運転に対し十分保守的な起動停止操作などの過渡回数を設定した疲労強度評価を行って、疲労累積係数が60年の運転想定に対しても十分に小さいことを確認している。原子炉容器の中性子照射脆化に対しては、実機原子炉容器内に設置している原子炉容器と同じ材料の試験片を計画的に取り出して監視試験を実施することにより脆化の状況の確認や、関連温度の予測評価を行うとともに、それらの結果を考慮した60年での破壊靱性曲線を適用した破壊力学的な健全性評価（原子炉容器内面側に欠陥が

存在することを仮定した加圧熱衝撃事象に対する評価）を行って、裕度をもって構造健全性が確保されることを確認している。表2に劣化状況評価の結果に基づき策定した長期保守管理方針の一例を示す。

表2 長期保守管理方針（高浜1，2号機の例）

No.	高経年化対策に基づく長期保守管理方針	実施時期 ^{※1}
1	原子炉格納容器（炉心格納筒）の中性子照射脆化について、今後の原子炉の運転期間・照射量を勘案して適切な時期に第5回監視試験を実施する。	中長期
2	配管の腐食（受熱加速型腐食）については、肉厚測定による実測データに基づき耐震安全性評価を実施した耐震配管については、耐震性が確保できる向きに対策する一方で、サポート等の取替対策を行い、これを反映した耐震安全性評価を実施する。	短期
3	低圧ケーブルの絶縁低下については、ACAガイド*に基いた長期健全性評価結果から評価期間に至るまでに取替を実施する。 *：原子力安全基準機構「原子力発電所のケーブル経年劣化評価ガイド JNEB-RE-2019-2019」	1号：中長期 2号：短期
4	疲労評価における評価対象回数の設定を機能的に最適化し、運転期間中の発生応力等を評価し、評価基準を満足することを確認する。	長期

※1：起立日からの6年間を「短期」、10年間を「中長期」、20年間を「長期」とする。

これらの特別点検の実施方法と点検結果、劣化技術評価の評価方法と評価結果については、国内の学協会などで確立された規格基準に基づき実施している。原子力規制委員会では、これらの特別点検実施結果、劣化状況評価結果、延長しようとする期間に対する保守管理方針を含む運転期間延長認可申請書に対する審査を行い、定められた審査基準への適合性を確認して運転期間延長の認可を行っている。

さらに、関西電力では、事業者として実施した検査や劣化技術評価の内容について、国内外の第三者機関による客観的観点からの技術レビューを受けて、あらためて劣化評価方法や検査手法の適切性について確認することを行っている。例えば、高浜1，2号機の主要劣化事象に対する技術評価方法等について、米国のEPRI (Electric Power Research Institute)からの技術レビューを受けており、米国の運転ライセンス更新などで適用されている手法等に照らした確認により、米国の評価の考え方と概ね同様であり、プラントの長期の安全性、設備の健全性確保の観点から、評価方法の適切性が確認されている。*3

3.2 長期停止期間の劣化評価への影響について

国内の原子力発電プラントは、福島第一原子力発電所事故後、運転を停止している期間が長期間に及んでおり、現在もなお多くのプラントが新規規制基準への適合に係る審査などにより運転再開ができていない状況にあるが、原子力発電所では、長期の運転停止期間中においても、必要な点検や試験など、機器・構築物の保守管理活動を

継続して実施している。

機器・構築物に想定される経年劣化事象の長期プラント停止期間中の劣化影響については、多くの場合、プラントの運転に伴う中性子照射環境や、高温・高圧力の状態にないことなどから、劣化の進展影響がないか、プラントの運転に伴う劣化影響に対して非常に小さな影響しかないと評価している。

具体的には、主要な劣化事象である、原子炉容器の中性子照射脆化や低サイクル疲労、2相ステンレス鋼の熱時効、炉内構造物の照射誘起型応力腐食割れに関しては、プラントの長期停止中には、運転中のような中性子照射環境にはなく、起動・停止等の運転操作にともなう応力の繰返しによる疲労等への影響がないことから、劣化事象進展への影響はほとんどないと考えられる。

一方、プラントの長期停止期間中においても、経年劣化の可能性、あるいはその進行が考えられるものに、電気ケーブルの絶縁性能低下や、コンクリート構造物への中性化・塩分浸透がある。電気ケーブルは、もともと経時的に必要なものは取替える設備であるが、通常運転中に劣化影響のある原子炉格納容器内のケーブルでは、プラント停止中の放射線照射影響は非常に小さく、環境温度も非常に低いことから絶縁性能低下への影響程度は非常に軽微であると評価している。また、コンクリート構造物の中性化や塩分浸透の影響は、非常に緩やかなものであり、高浜1、2号機などの60年運転想定での影響評価においても健全性に対する十分な裕度を有していること、中性化や塩分浸透がコンクリート強度に影響を及ぼすのは、それらの影響が鉄筋に到達し、鉄筋が腐食することにより生じ始めるものであるため、例えば10年のプラントの停止期間中の中性化や塩分浸透の進展がコンクリート構造物の健全性に及ぼす影響は非常に軽微なものと考えられる。

3.3 安全性向上対策等への取り組みについて

運転期間延長認可申請の認可のためには、新規規制基準（技術基準）への適合が必要であり、そのための安全性向上対策等の工事計画の認可が求められている。このため、2016年に運転期間延長の認可を得た高浜1、2号機や美浜3号機では、今後の運転再開に向けて、自然災害や火災への防護対策、重大事故等への対処施設などの多くの安全性向上対策を実施しているところである。さらに、事業者の自主的な取り組みとして、中央制御盤を最新のデジタル方式のものに一式取り替える（図5）など、

安全性・信頼性向上のための施策についても実施中である。このように、各発電所では、40年を超える運転プラントに対しても必要な安全性向上対策や設備の改善・最新技術適用等に取り組んでいる。



図5 デジタル式中央制御盤（イメージ）

4. 長期運転に係る今後の取り組み

原子力発電所の長期運転には、長期保守管理方針を含む保守管理活動と高経年化対策の継続的かつ確実な実施、保全活動のPDCAにより継続的に安全性と信頼性の維持向上を図っていくことが重要である。

前述した高経年化技術評価では、安全上重要な機器・構築物等に想定される経年劣化事象について、60年の運転期間にも十分に設備の健全性が維持確保されることを確認しているが、今後も継続的に実機の状況を確認・評価し、機器等の取替を含む予防保全活動を計画的に実施していく必要がある。

海外では、既に90基を超えるプラントが40年を超えて高い設備利用率で運転されており、欧州、米国をはじめ各国では40年を超える長期運転への対応が進められている。IAEAでは、各国の長期運転を支援するためのガイドライン制定や、レビュー活動、世界各国の経年劣化等に関する知見を集約整備する活動を精力的に実施しており、我が国においても保守管理活動や研究活動、規格基準整備に活かしていこうとしている。

具体的には、IAEAが取り組んでいるI-GALLのWG活動では、国内の事業者も参加し貢献を続けており、今後の長期運転へのプロアクティブな取り組みのために重要なものとなっている。また、関西電力では、米国やフランスなどが主導する国際的な研究プロジェクトにも参加しているが、今後も海外関係機関と協調して経年劣化事象のさらなる解明や評価技術の高度化等に取り組んでいくことが有効と考える。さらに、機器材料等の経年劣化に関する知見（データ）拡充や実機の状況確認のために、

廃止措置プラントからの実機材料を活用した調査研究についても、有効なものを国内外関係機関で協調して実施していくことが必要と考える。

保守管理活動における今後の取り組み課題には、リスク情報やこれまでの保全データ、確率論的評価アプローチなどを活用した保全計画の最適化や高度化が必要と考えられ、経年劣化に対する安全裕度の評価の充実などについても、最新の知見を踏まえた確率論的な評価を適用し検討を進めていくことが有効なものとなると考える。

5. おわりに

原子力発電は、3E+Sの観点から今後の我が国のエネルギーミックスを支える重要なベースロード電源であり、運転開始40年の超える運転期間となるプラントも含めて安全性の確認されたものについて、有効に活用していくことが重要である。原子力発電所の設備（機器・構築物）の経年劣化に対しては、保守管理活動のPDCAを確実に実施継続すること、高経年化対策制度に基づく活動を継続することにより、60年を想定した運転期間にも十分に健全性の維持確保を図ることができると評価しているが、我が国の原子力発電所の長期運転の信頼性の維持向上を一層図っていくためには、今後も、海外の取り組みや国内外の最新の知見を踏まえながら、保全活動の改善に取り組んでいくことが重要である。

参考文献

- [1] 高浜発電所（1・2号発電用原子炉施設）の運転期間延長の認可申請書 添付書類（特別点検結果報告書、劣化状況評価書、保守管理に関する方針書）
- [2] 美浜発電所（3号発電用原子炉施設）の運転期間延長の認可申請書 添付書類（特別点検結果報告書、劣化状況評価書、保守管理に関する方針書）
- [3] EPRI, 2018 TECHNICAL REPORT, “Materials Reliability Program: EPRI Review of the Kansai Takahama Units 1 and 2 Aging Evaluations for Extending Operational Periods (MRP-429)”