

添付書類二

高浜発電所 4 号炉

劣化状況評価書

令和 5 年 4 月

関西電力株式会社

目 次

1. はじめに	1
2. 高浜発電所4号炉の概要	5
2. 1 高浜発電所4号炉の設備概要	5
2. 2 高浜発電所4号炉の経緯	7
2. 3 技術基準規則への適合に向けた取組およびそのスケジュール	7
2. 4 高浜発電所4号炉の保全概要	11
2. 5 高浜発電所4号炉の特別点検の結果	21
3. 技術評価の実施体制	22
3. 1 評価の実施に係る組織	22
3. 2 評価の方法	22
3. 3 工程管理	22
3. 4 協力事業者の管理	23
3. 5 評価記録の管理	24
3. 6 評価に係る教育訓練	25
3. 7 評価年月日	25
3. 8 評価を実施した者の氏名	25
4. 技術評価方法	28
4. 1 技術評価対象機器	28
4. 2 技術評価手順	28
4. 3 耐震安全性評価	34
4. 4 耐津波安全性評価	35
4. 5 冷温停止状態維持時の技術評価	36
5. 技術評価結果	43
5. 1 運転を断続的に行うことを前提とした機器・構造物の 技術評価結果	43
5. 2 運転を断続的に行うことを前提とした 耐震安全性評価結果	45
5. 3 運転を断続的に行うことを前提とした 耐津波安全性評価結果	46
5. 4 冷温停止状態維持を前提とした機器・構造物の 技術評価結果	47
5. 5 冷温停止状態維持を前提とした耐震安全性評価結果	48
5. 6 冷温停止状態維持を前提とした耐津波安全性評価結果	49

5. 7	評価の結果に基づいた補修等の措置	49
6.	今後の高経年化対策	50
6. 1	施設管理方針（長期施設管理方針）の策定	50
6. 2	施設管理方針（長期施設管理方針）の実施	50
6. 3	技術開発課題	54
7.	劣化状況評価で追加する項目	55
8.	まとめ	56

1. はじめに

高浜発電所4号炉においては、2025年6月に運転開始後40年を迎えようとしている。

原子力発電所ではこれまでプラントの安全・安定運転を確保するために、「核原料物質、核燃料物質および原子炉の規制に関する法律」（以下、「原子炉等規制法」という。）に基づく定期事業者検査により、技術基準への適合を確認するとともに^{注)}、施設管理における機器・構造物の保全活動として、点検や予防保全活動等に取り組んでいる。加えて、最新の技術的知見の反映や国内外で経験された事故・故障の再発防止対策等についても、必要に応じ実施している。

また、一般的には、機器・材料は使用時間の経過とともに、経年劣化することが知られているが、運転年数の増加に従ってトラブルの発生件数が増加しているという傾向は認められておらず、現時点で高経年化による原子力発電所設備の信頼性が低下している状況にはない。

しかしながら、より長期の運転を仮定した場合、経年化に伴い進展する事象は、運転年数の長いものから顕在化してくることから、運転年数の長い原子力発電所に対して、高経年化の観点から技術的評価を行い、そこで得られた知見を保全に反映していくことは原子力発電所の安全・安定運転を継続していく上で重要である。

注：2020年3月31日以前は、原子炉等規制法に基づき、原子力規制委員会が施設定期検査を実施。また、2020年4月1日以降は、同法に基づき、原子力規制委員会が原子力規制検査を実施。

このような認識のもと、1996年4月に通商産業省（現：経済産業省）資源エネルギー庁は「高経年化に関する基本的な考え方」をとりまとめ、原子力発電所の高経年化対策の基本方針を示した。さらに、2003年9月および2005年12月に「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則」（以下、「実用炉規則」という。）を改正するとともに、原子力安全・保安院（現：原子力規制委員会。以下同じ）は「実用発電用原子炉施設における高経年化対策実施ガイドライン」および「実用発電用原子炉施設における高経年化対策標準審査要領（内規）」（以下、「高経年化対策実施ガイドライン等」という。）を発出し、原子炉の運転を開始後29年を経過する日までに、また、以降10年毎に、耐震安全性評価を含めた経年劣化に関する技術的な評価（以下、「高経年化技術評価」という。）を行い、これに基づき保全のために実

施すべき措置に関する10年間の計画を策定することを電気事業者に求めた。

その後、2008年8月に実用炉規則が改正され、高経年化対策を通常の保全の中に位置づけ一体化することで、原子力発電所の運転当初からの経年劣化管理を義務づけるとともに、「保全のために実施すべき措置に関する10年間の計画」を、新たに「保全のために実施すべき措置に関する方針」（以下、「長期施設管理方針」という。）として原子炉施設保安規定（以下、「保安規定」という。）に位置づけ、認可の対象とされた。また、実用炉規則の改正に伴い、原子力安全・保安院は高経年化対策実施ガイドライン等を改訂し、2008年10月に発出後、2010年4月および2011年5月に改正した。

また、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震とこれにより生じた津波に起因する東京電力福島第一原子力発電所で発生した事故に鑑み、2012年9月に原子力規制委員会設置法が施行され、原子力安全・保安院に代わる機関として、原子力規制委員会が環境省の外局として設立された。

さらに、2013年7月には、同法により、発電用原子炉の運転することができる期間について、最初に使用前検査に合格した日から起算して40年と規定され、当該期間満了に際しては、原子力規制委員会の認可を受けて、20年を超えない期間を限度として一回に限り延長できることとなった。

それらを踏まえ、原子力規制委員会は2013年6月に実用炉規則を改正するとともに、「実用発電用原子炉の運転期間延長認可申請に係る運用ガイド」（以下、「運転延長ガイド」という。）にて、運転期間延長認可申請書の記載内容等を定め、2013年11月に「実用発電用原子炉の運転の期間の延長の審査基準」（以下、「運転延長審査基準」という。）を制定し、運転の期間の延長の審査にあたって確認すべき事項を定めている。また、運転延長ガイドおよび運転延長審査基準については、2020年3月に最終改正している。

加えて、原子力規制委員会は、高経年化対策実施ガイドライン等に代わるものとして、2013年6月に「実用発電用原子炉施設における高経年化対策実施ガイド」、2013年7月に「実用発電用原子炉施設における高経年化対策審査ガイド」（以下、「高経年化対策実施ガイド等」という。）を制定し、2020年3月に最終改正している。

さらに、運転段階の原子力発電所の安全の確保・強化を図るため、原子力規制委員会は原子炉等規制法を改正し、2020年4月から原子力規制委員会が事業者の保安活動を常時チェックし、かつ、事業者が主体

的に安全確保の水準の維持・向上に取り組む仕組み（原子力規制検査）が施行された。

一方、日本原子力学会は2007年3月に「原子力発電所の高経年化対策実施基準：2007」を制定、「原子力発電所の高経年化対策実施基準：2008」（以下、「学会標準2008版」という。）として改定の上、2009年2月に発行、2010年4月にエンドースされた。その後、2016年3月に「原子力発電所の高経年化対策実施基準：2015」を発行し、2021年9月に「原子力発電所の高経年化対策実施基準：2021」を発行した。

さらに、原子力安全基盤機構（現：原子力規制委員会。以下同じ）は上記高経年化対策実施ガイド等および学会標準2008版に対応して、「高経年化技術評価審査マニュアル」を作成し、公表している。

本評価書は、運転開始後40年を迎える高浜発電所4号炉のプラントを構成する機器・構造物に対し、運転延長ガイド、高経年化対策実施ガイド等、学会標準2008版などに基づき、60年間の運転および冷温停止を仮定し、想定される経年劣化事象に関する技術評価を「延長しようとする期間における運転に伴い生ずる原子炉その他の設備の劣化の状況に関する技術的な評価」（以下、「劣化状況評価」という。）として実施するとともに、運転を開始した日から40年以降の20年間に、高経年化の観点から現状保全を充実する新たな保全項目等を抽出し、「延長しようとする期間における原子炉その他の設備に係る施設管理方針」（以下、「施設管理方針」という。）としてとりまとめたものである。

さらに、運転開始後30年目の高経年化技術評価の検証として、劣化傾向の評価、保全実績の評価および長期施設管理方針の有効性評価についてもとりまとめている。

なお、劣化状況評価の対象とする機器・構造物および評価手法は、40年目の高経年化技術評価におけるものと同様である。

この結果、現状保全の継続等により、今後、プラントを健全に維持することが可能であることを確認した。

また、抽出した施設管理方針については、長期施設管理方針として策定するとともに、保安規定に記載し、変更認可申請する。

今後は、認可された長期施設管理方針に基づき保全活動を実施していくとともに、実用炉規則第82条にて定める時期に高経年化技術評価の再評価等を実施していくことにより、機器・構造物を健全に維持・管理し

ていく。

なお、本評価書は各機器・構造物の劣化状況評価内容の概要等を示すものであり、各機器・構造物の詳細な劣化状況評価、耐震安全性評価、耐津波安全性評価および冷温停止状態が維持されることを前提とした評価結果については、別冊にまとめている。

また、特定重大事故等対処施設に属する機器・構造物の情報は機密情報のため、これらの評価結果は非公開情報として個別の別冊としてまとめている。

2. 高浜発電所4号炉の概要

2. 1 高浜発電所4号炉の設備概要

高浜発電所4号炉は、加圧水型の原子力発電所で燃料には低濃縮ウランを使用し、冷却材には軽水を使用している。

原子炉内で核分裂反応により発生した熱は、蒸気発生器内で1次冷却材から2次側の給水へ伝達され、蒸気を発生させる。また、熱交換を行った1次冷却材は1次冷却材ポンプにより再び原子炉へ戻される。

蒸気発生器で発生した蒸気は主蒸気管でタービン建屋に導かれタービンを駆動して発電し、その後復水器に流入して復水となり、復水ポンプ、低圧給水加熱器を通り給水ポンプにより高圧給水加熱器を経て再び蒸気発生器に戻される。

(1) 主要仕様

電気出力	約870MW
原子炉型式	加圧水型軽水炉
原子炉熱出力	約2660MW
燃料	低濃縮ウラン（燃料集合体157体）
減速材	軽水
タービン	横置串型4車室6分流排気再熱再生式

(2) 主要系統

主要系統を資料2-1に示す。

2. 2 高浜発電所4号炉の経緯

高浜発電所4号炉は、我が国29番目の商業用原子力発電所で、加圧水型原子力発電所（以下、「PWRプラント」という。）としては我が国14番目、当社では9番目のものである。

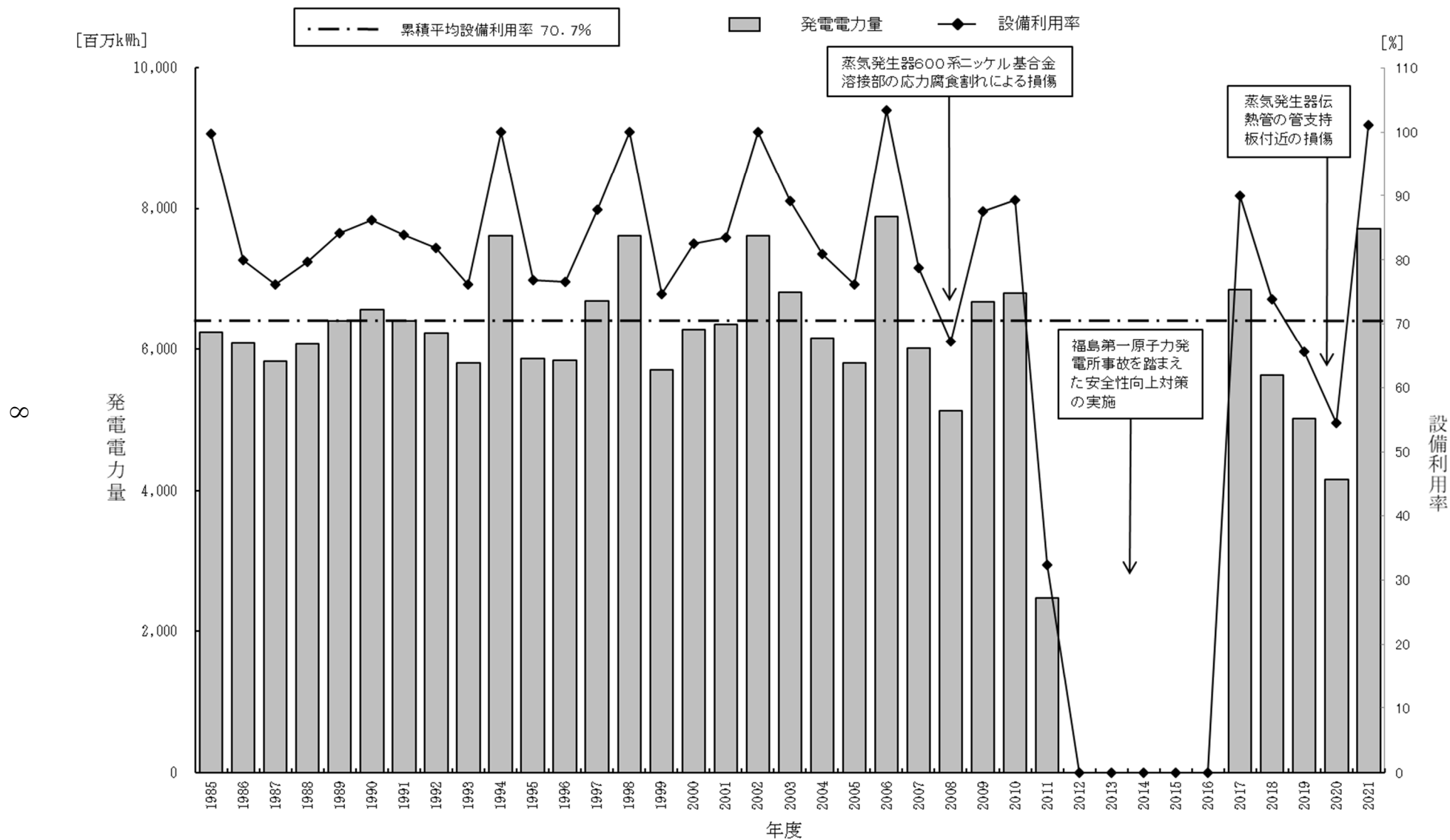
同炉は、1980年8月に原子炉設置許可を得て、通商産業大臣より電気工作物変更許可を取得した。同年12月に建設に着工し、1984年10月に初臨界、同年11月に送電系統に初並列した後、翌1985年6月に営業運転を開始した。

また、高浜発電所4号炉では、原子力発電設備の有効利用によりCO₂排出量を削減でき、地球温暖化の防止にも貢献することができる定格熱出力一定運転実施に向け、2001年12月の経済産業省通達「定格熱出力一定運転を実施する原子力発電設備に関する保安上の取扱いについて」の手続きに基づき、設備の健全性評価、運転管理方法の改善へ向けた諸対策を実施し、2003年6月から定格熱出力一定運転を開始している。

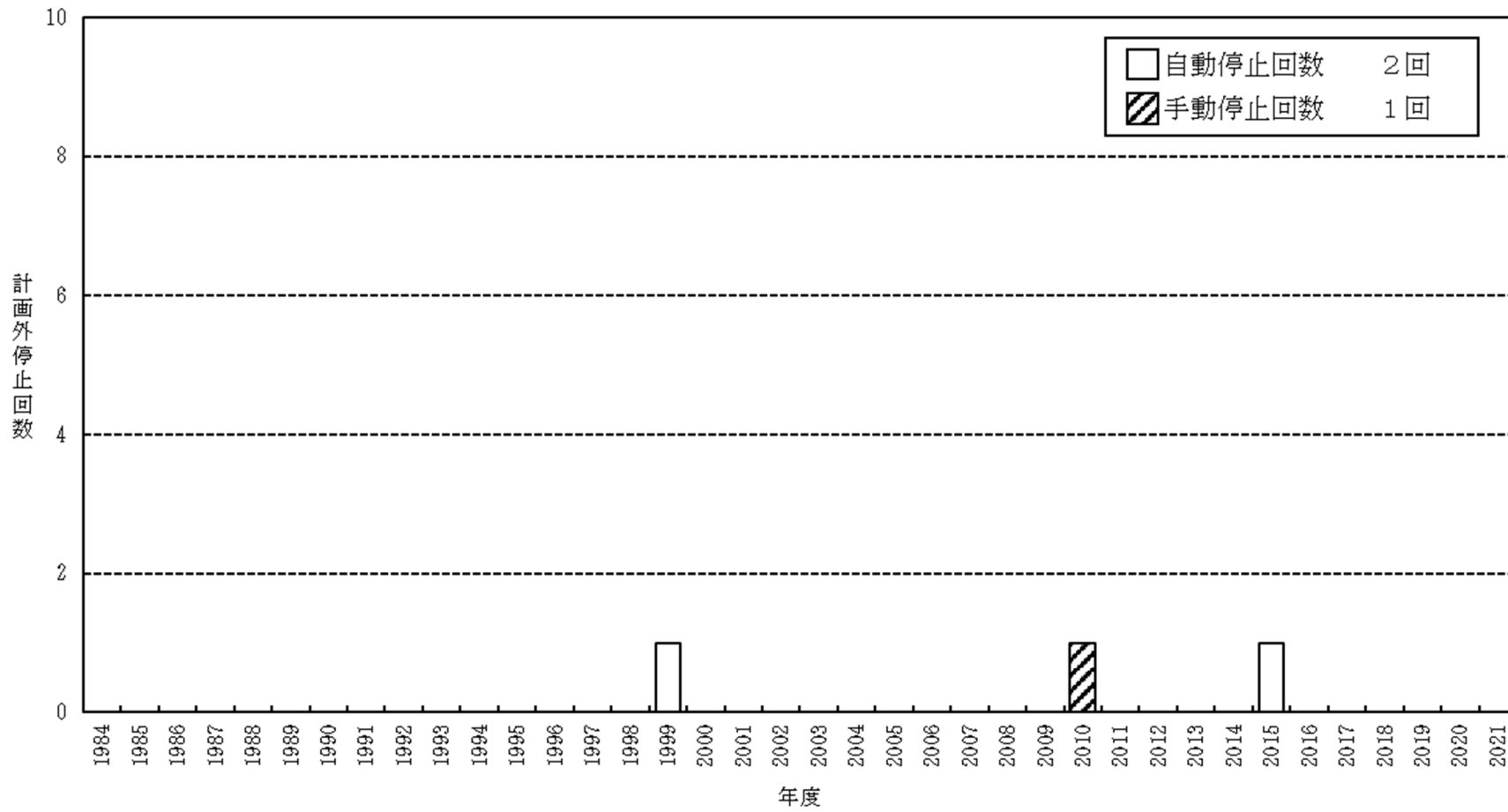
発電電力量・設備利用率の年度推移を資料2-2、計画外停止回数の年度推移を資料2-3、事故・故障等一覧を資料2-4に示す。過去約40年間を遡った時点までの計画外停止（手動停止および自動停止）件数の推移を見ると、供用期間の長期化に伴い、計画外停止件数が増加する明確な傾向は認められない。

2. 3 技術基準規則への適合に向けた取組およびそのスケジュール

本評価書は、令和2年10月16日付け関原発第345号をもって申請し、令和3年2月8日付け原規規発第2102084号にて認可を受けた設計及び工事計画認可申請書までに追加された機器・構造物についても、評価対象機器として抽出している。



資料 2 - 2 高浜発電所 4 号炉 発電電力量・設備利用率の年度推移



資料 2 - 3 高浜発電所 4号炉 計画外停止回数の年度推移

資料 2 - 4 高浜発電所 4 号炉 事故・故障等一覧

No.	年度	事象
1	1988	燃料集合体の漏えいについて
2	1989	蒸気発生器伝熱管の損傷について
3		1 次冷却材ポンプ変流翼取付ボルトの損傷について
4	1995	燃料検査中における燃料集合体の変形等について
5	1999	蒸気発生器伝熱管の損傷について
6		炉内中性子束監視装置高圧シール継手部からのわずかなほう酸の析出について
7	2000	蒸気発生器伝熱管の損傷について
8	2001	蒸気発生器伝熱管の損傷について
9	2003	蒸気発生器伝熱管の損傷について
10	2004	蒸気発生器伝熱管の損傷について
11	2008	蒸気発生器伝熱管の渦流探傷検査における有意な信号指示の確認について
12		A、B、C - 蒸気発生器入口管台溶接部での傷の確認について
13	2009	蒸気発生器伝熱管の渦流探傷検査結果について
14	2011	蒸気発生器伝熱管の渦流探傷検査結果について
15	2015	発電機自動停止に伴う原子炉自動停止について
16	2018	蒸気発生器伝熱管の損傷について
17	2019	蒸気発生器伝熱管の損傷について
18	2020	蒸気発生器伝熱管の損傷について
19	2022	蒸気発生器伝熱管の損傷について
20	2022	P R 中性子束急減による原子炉自動停止について

2. 4 高浜発電所4号炉の保全概要

高浜発電所4号炉での日常的な施設管理において時間経過に伴う特性変化に対応した劣化管理が的確に行われている経年劣化事象（以下、「日常劣化管理事象」という。）の劣化管理の考え方を以下に記す。

原子力発電所に対する保全では、系統・機器・構造物の経年劣化が徐々に進行して最終的に故障に至ることのないよう、定期的な検査や点検等により経年劣化の兆候を早期に検知し、必要な処置を行い、事故・故障を未然に防止している。

当社は、運転監視、巡視点検、定期的な検査および点検により設備の健全性を確認し、経年劣化等の兆候が認められた場合には詳細な調査および評価を行い、補修、取替等の保全を実施している。特に長期の使用によって発生する経年劣化事象については、点検により経年的な劣化の傾向を把握し、故障に至る前に計画的な保全を実施している。

また、原子炉等規制法に基づき定期事業者検査を実施し、技術上の基準に適合していることを確認している。

さらに、保安規定において、定期事業者検査等の対象機器に対する作業項目のうち、定期点検工事または定期修繕工事にて実施する分解点検、開放点検等の機能回復を図るものについて、点検・補修等の結果の確認・評価について規定している。

具体的には、実用炉規則第81条に掲げる施設管理に係る要求事項を満たすよう、「日本電気協会 原子力発電所の保守管理規程（JEAC4209-2007）」に基づき、社内標準類を策定して施設管理を実施している。

まず初めに、社長は原子炉施設の安全確保を最優先として、施設管理の継続的な改善を図るため、施設管理の現状等を踏まえて施設管理の実施方針を定める。同方針は、施設管理の有効性評価の結果および施設管理を行う観点から特別な状態を踏まえて見直されるとともに、高経年化技術評価の結果として長期施設管理方針を策定または変更した場合には、長期施設管理方針に従い保全を実施することを同方針に反映している。

また、施設管理の実施方針に基づき、原子力事業本部長、高浜発電所長は、原子力事業本部、高浜発電所の各々の業務に関する施設管理目標を設定し、施設管理の有効性評価の結果を踏まえて同目標の見直しを実施している。

この施設管理目標を達成するため、原子力発電所では、資料2-5

に示すような考え方にに基づき、保全活動を行っている。

高浜発電所では、原子炉施設の中から各号炉毎に保全を行うべき対象範囲として機器・構造物を選定し、この保全対象範囲について系統毎の範囲と機能を明確にした上で、「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」（平成2年8月30日原子力安全委員会決定）（以下、「重要度分類指針」という。）の重要度とPRA（確率論的リスク評価）から得られるリスク情報を考慮するとともに重大事故等対処設備または多様性拡張設備への該当の有無を考慮して保全重要度を設定する。（なお、設計および工事に用いる重要度を設備重要度と言い、保全重要度とあわせて施設管理の重要度と言う。）

また、保全の有効性を監視し、合理的、客観性をもって評価するために、施設管理の重要度を踏まえてプラントレベルおよび系統レベルの保全活動管理指標を設定している。

そして、保全対象範囲に対し、保全重要度を勘案して次の事項を考慮して保全計画を策定している。

- a. 運転実績、事故および故障事例などの運転経験
- b. 使用環境および設置環境
- c. 劣化、故障モード
- d. 機器の構造等の設計的知見（設計基準文書の設計要件含む）
- e. 科学的知見（各種技術情報）

さらに、予め保全方式（時間基準保全、状態基準保全、事後保全）を選定し、「点検方法」、その「実施頻度」および「実施時期」を定めた点検計画を策定している。なお、この保全方式は、劣化事象・偶発事象を勘案し、保全重要度を踏まえた上で保全実績、劣化、故障モード等を考慮し、効果的な保全方式を選定している。

上記のうち「点検方法」について、個別機器の保全内容はそれぞれ個々に検討している。具体的には、劣化メカニズム整理表^{注1)}やこれまでの施設管理の結果から得られた機器の部位別に想定される劣化事象に着目した保全項目の検討を行い、検討結果に基づく保全内容を担保するために必要な作業、検査項目等を選定している。

注1：過去に国内で実施してきた高経年化技術評価の結果をもとに、原子炉施設の保全を最適化するための情報として、劣化メカニズム（機器機能、部位、劣化事象・因子、保全項目（検知方法）等）を一覧表にまとめたもの。

同様に「実施頻度」についても、過去の点検実績等を参考にしながら

ら機器・構築物に応じて適切に選定し、その決定根拠を整理している。また、「実施時期」については、保全指針等で定める機器・構造物の点検方法および実施頻度に基づき、点検の実施時期を「点検計画表」として定めている。

補修、取替および改造を実施する場合は、予めその方法および実施時期を定めた計画を策定している。具体的には、信頼性向上、経年劣化の観点から長期的に取り組む工事について、実施内容と実施時期を明確にする長期工事計画等の策定、長期工事計画等を基に、運転、補修実績ならびに工事の重要度・緊急度・経済性を勘案のうえ年度工事計画等を策定している。

以上のとおり、予め定められた保全計画に従い、「工事計画」、「設計管理」、「調達管理」、「作業管理」の各プロセスにより点検・補修等の保全を実施し、記録している。

当社は、運転監視、巡視点検、定期的な検査および点検により設備の健全性を確認し、経年劣化等の兆候が認められた場合には詳細な調査および評価を行い、補修、取替等の保全を実施している。特に長期の使用によって発生する経年劣化事象については、点検により経年的な劣化の傾向を把握し、故障に至る前に計画的な保全を実施することで機能回復を行い、長期的な健全性・信頼性を確保している。

そのために、劣化傾向監視による管理として状態基準保全、点検および取替結果の評価のための点検手入れ前データ（As-Foundデータ）を活用している。

一方、当社の原子力発電所で発生した事故・故障については、速やかに原因究明および再発防止対策を実施するとともに国内外他社で発生した事故・故障の対策についても未然防止処置を行い、設備の改善、運転・保守運用等の改善を行うことにより発電所のより一層の安全・安定運転に努めている。

(1) 運転監視、巡視点検

運転状態を各種指示計、記録計、計算機出力等により常時運転員が監視するとともに、原子力発電所の多種多様な設備について運転員および保修員が計画的に巡視点検を行い、機器等の健全性確認、経年劣化等の兆候の早期発見に努めている。

(2) 定期的な検査

プラントの運転中を主体に待機設備の作動確認等の定期的な検査を行い、設備の健全性確認および経年劣化等の兆候の早期発見

に努め、事故・故障の未然防止を図っている。定期的な検査のうち、工学的安全施設等の安全上重要な設備の定期的な検査の内容を保安規定に定め、これに基づく運用を行っている。

(3) 点検

原子炉等規制法に基づき実施する定期事業者検査に合わせ、定期的にプラントを停止し、高浜発電所保守業務所則指針に基づき制定した保全指針等に基づき点検を実施し、設備の機能維持および経年劣化等の兆候の早期発見に努め、事故・故障の未然防止を図るとともに、環境の維持、災害の未然防止を図っている。また、プラントを停止せずに点検を実施できる設備については、同様の点検をプラント運転中に実施している。点検の結果は記録としてまとめ、設備の経年的な傾向を管理し、以後の点検計画に反映している。

(4) 作業管理体制および業務

検査および点検については、当社が計画、作業管理を行い、分解点検等の実作業は協力事業者が実施している。

分解点検等にあたっては、協力事業者の行う作業および品質の管理を行っている。

(5) 予防保全

プラントの運転監視、巡視点検、定期的な検査および点検により、設備に機能低下や経年劣化等の兆候が認められた場合には、予防保全の考え方にに基づき、故障に至る前に補修、取替を行い、事故・故障の未然防止を図っている。

(6) トラブルの処理および再発防止

発生したトラブルについては、不適合管理・是正処置として速やかに原因究明および対策の検討、評価を行い、的確な復旧により設備の機能の回復を図るとともに再発防止対策を実施している。また、国内外他社の同種設備で発生したトラブルについても未然防止処置を実施し、事故・故障の未然防止を図っている。

(7) 改善活動

より一層の安全性、信頼性を確保するため、現行の保全活動のレベルを向上することが重要であるとの観点から、改善活動として、保全データの推移および経年劣化の長期的な傾向監視の実績、高経年化技術評価結果、他プラントのトラブルおよび経年劣化傾

向に係るデータ等に基づいて保全の有効性評価（資料2-6）を実施することとしており、その結果と施設管理目標の達成度から定期的に施設管理の有効性評価を実施し、施設管理が有効に機能していることを確認するとともに、継続的な改善に取り組んでいる。

以上のような日常的な保全の有効性評価の手法として、プラントレベルおよび系統レベルの保全活動管理指標を設定し、監視しており、至近（2020.7.15～2022.3.10）における実績は下記の通りである。

a. プラントレベルの保全活動管理指標

プラント全体の保全の有効性が確保されていることを監視する観点から、プラントレベルの保全活動管理指標として設定した「7000 臨界時間あたりの計画外原子炉自動・手動スクラム回数」、「7000 臨界時間あたりの計画外出力変動回数」および「工学的安全施設の計画外作動回数」について、全て実績値が目標値を満足していることから、保全は有効に機能していると評価した。

b. 系統レベルの保全活動管理指標

より直接的に原子炉施設の安全性と保全活動とを関連付け監視する観点から、系統レベルの保全活動管理指標として、保全重要度の高い系統^{注2)}のうち、重要度分類指針クラス1、クラス2およびリスク重要度の高い系統機能ならびに重大事故等対処設備に対して「予防可能故障（MPFF^{注3)}）回数」および「非待機（UA）時間^{注4)}」を設定した。評価期間中、全ての指標で目標値を満足していることから、保全は有効に機能していると評価した。

注2：原子炉施設の安全性を確保するため重要度分類指針の重要度に基づき、PRA（確率論的リスク評価）から得られるリスク情報を考慮して設定する。

注3：MPFF（Maintenance Preventable Function Failure）。系統もしくはトレイン（冗長化されている系統において、その冗長性の1単位を構成する一連の機器群）に要求される機能の喪失を引き起こすような機器の故障のうち、適切な保全が行われていれば予防できていた可能性のある故障。

注4：UA時間(Unavailability Hours)。当該系統もしくはトレイ

ンに要求される機能が必要とされる期間内において、理由によらずその機能を喪失した状態になっている時間。

これらの保全活動については、原子力発電所における機器の劣化兆候の把握および点検の最適化に繋がるとともに、常にP D C Aを廻して改善が図られ、高経年プラントに対する的確な劣化管理に資するものであり、今後も日常点検を継続することで健全性を維持することが可能であると考えている。

また、高浜発電所4号炉において、発電所の安全性・信頼性を向上させるために実施した主な改善工事としては、次のものがある。

「腐食」

- ・ 2次系配管取替工事

計画的に超音波による肉厚測定を行い、余寿命評価を実施し、必要に応じて配管取替を実施している。

「疲労」

- ・ 余熱除去系統配管取替工事

国内PWRプラントにおける高サイクル熱疲労割れ事象（温度揺らぎによる疲労）を踏まえ、予防保全の観点から、第18回定期検査時（2008年度）に、余熱除去冷却器バイパスライン合流部について熱疲労を抑制するため、配管工事ルートを変更する工事を実施した。

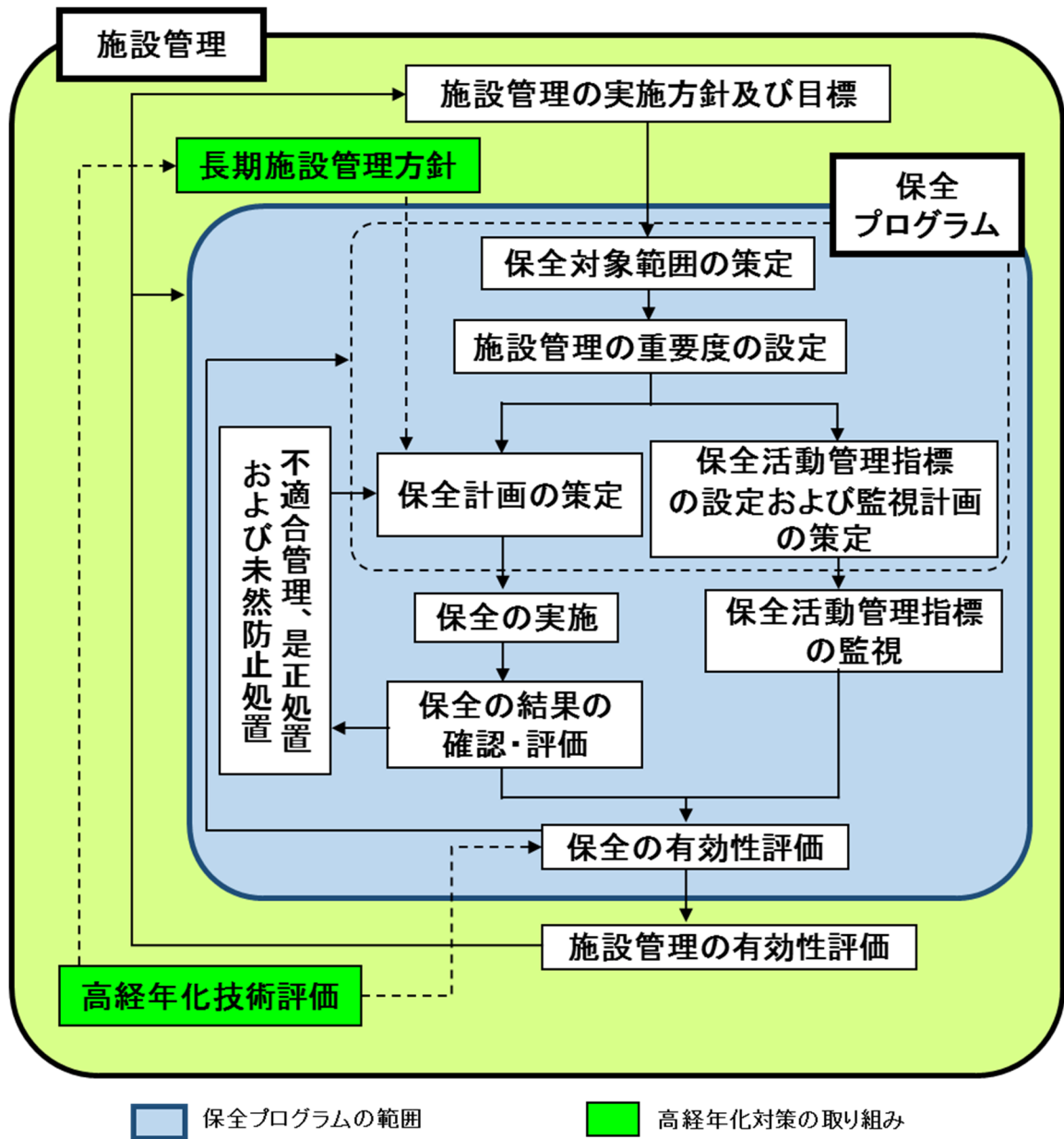
- ・ 安全注入系統補助注入ライン隔離弁追設置工事

国内PWRプラントにおける高サイクル熱疲労割れ事象（温度揺らぎによる疲労）を踏まえ、予防保全の観点から、第19回定期検査時（2009～2010年度）に安全注入系統の補助注入ラインに弁を追加し、シートリークのリスク低減を図った。

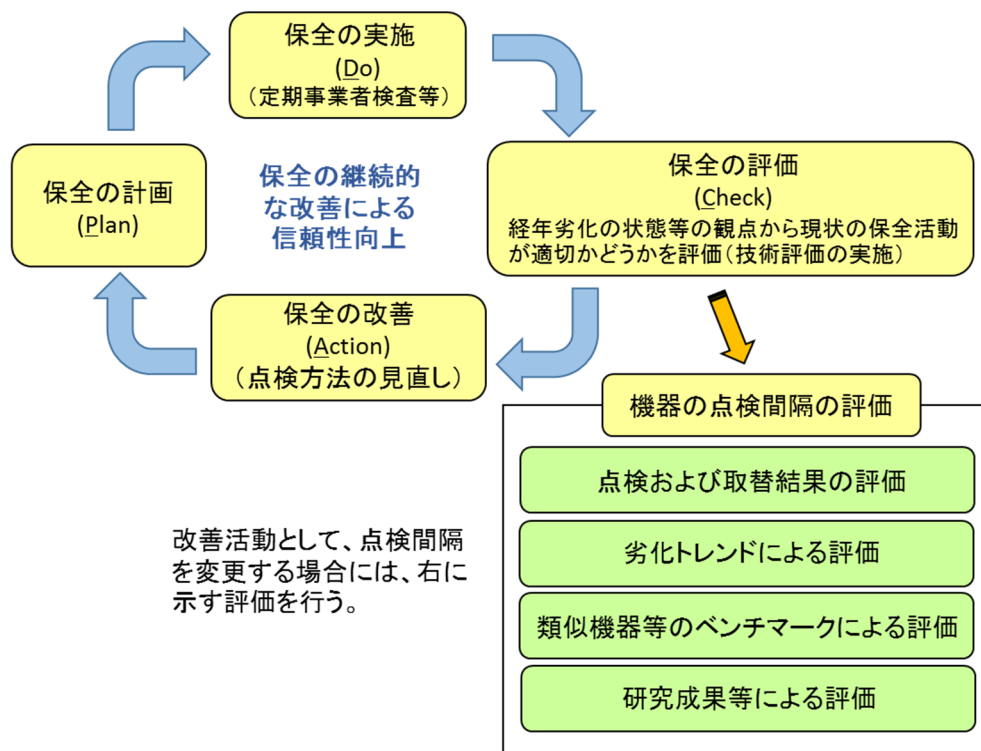
「応力腐食割れ」

- 蒸気発生器伝熱管予防保全対策（高温側拡管部残留応力除去工事）
高浜発電所3、4号炉で発生した蒸気発生器伝熱管での損傷事象に鑑み、損傷要因の一つとなっている引張残留応力を低減するため、第13回定期検査時（2001年度）に製作時の伝熱管内面における引張残留応力をショットピーニングにより除去し、耐応力腐食割れ性の向上を図った。
- 原子炉容器炉内計装筒等の予防保全工事
国内外PWRプラントにおける応力腐食割れ事象を踏まえ、予防保全として、溶接部表面の残留応力を低減させるため、600系ニッケル基合金が使用されている、蒸気発生器出口管台について、第18回定期検査時（2008年度）にウォータージェットピーニング（応力緩和）を、また、炉内計装筒については第19回定期検査時（2009～2010年度）にショットピーニング（応力緩和）をそれぞれ実施した。
- 600系ニッケル基合金溶接部取替工事
国内外PWRプラントにおける応力腐食割れ事象を踏まえ、予防保全として、第19回定期検査時（2009～2010年度）に、加圧器サージ管台、加圧器安全弁管台、加圧器逃がし弁管台および加圧器スプレイライン管台について、600系ニッケル基合金で溶接された管台から、より耐食性に優れた690系ニッケル基合金で溶接された管台への取替を実施した。また、第20回定期検査時（2011～2017年度）に、原子炉容器冷却材出入口管台について、600系ニッケル基合金の溶接部内面全周を研削した後、より耐食性に優れた690系ニッケル基合金で溶接を行った。
- 原子炉容器上部蓋取替工事
大飯発電所3号炉原子炉容器上部蓋制御棒駆動装置取付管台等からの漏えい事象を踏まえ、第17回定期検査時（2007年度）に、長期的な設備信頼性を確保する観点から、管台および溶接材料を600系ニッケル基合金から耐応力腐食割れ性を向上させた690系ニッケル基合金に改良した原子炉容器上部蓋への取替を実施した。

- 原子炉冷却系統設備小口径配管取替工事
国内外PWRプラントにおける応力腐食割れ事象を踏まえ、1次冷却材の流れがない配管（高温環境で溶存酸素濃度が高い）の溶接部について、予防保全として、計画的に対策工事を実施している。
- 低圧タービンロータ取替工事
国外で発生した低圧タービン円板での応力腐食割れ事象を踏まえ、予防保全として、第19回定期検査時（2009～2010年度）に、低圧タービン3基について、円板と軸を一体成型にした全一体ロータ構造の採用や材料の強度変更等を行ったものへの取替を実施した。
- 1次系強加工曲げ配管取替工事
国外BWRプラントにおいて、芯金を使用して曲げ加工した配管の内面で応力腐食割れが発生した事象を踏まえ、予防保全として、第17回～第20回定期検査時（2007～2017年度）に、1次冷却材系統につながる曲げ配管のうち、芯金を使用して曲げ加工したものを、芯金を使用せずに曲げ加工した配管等への取替を実施した。



資料 2 - 5 原子力発電所の保全活動の概要



資料 2 - 6 保全の有効性評価

2. 5 高浜発電所4号炉の特別点検の結果

高浜発電所4号炉の特別点検の結果の概要は資料2-7のとおりである。

資料2-7 特別点検の結果概要

実用発電用原子炉の運転期間延長認可申請に係る 運用ガイドの要求				高浜4号炉 特別点検結果概要
対象の機器・構造物	対象の部位	着目する劣化事象	点検方法/点検項目	
原子炉容器	原子炉容器母材及び溶接部 (炉心領域の100%)	中性子照射脆化	○超音波探傷試験(以下「UT」という。)による欠陥の有無の確認	炉心領域の100%に対するUTにより、中性子照射脆化の観点から特に重要となる内表面近傍の欠陥が無いことを確認した。
	一次冷却材ノズルコーナー部 (クラッドの状態を確認)	疲労	○浸透探傷試験又は渦流探傷試験(以下「ECT」という。)による欠陥の有無の確認	一次冷却材ノズルコーナー部のクラッドに対するECTにより、疲労き裂が無いことを確認した。
	炉内計装筒(BMI)(全数)	応力腐食割れ	○目視試験(MVT-1)による炉内側からの溶接部の欠陥の有無の確認及びECTによるBMI内面の溶接熱影響部の欠陥の有無の確認	炉内計装筒の全数に対する溶接部の炉内側からの目視試験(MVT-1)およびBMI内面の溶接熱影響部のECTにより、応力腐食割れが無いことを確認した。
原子炉格納容器	原子炉格納容器鋼板 (接近できる点検可能範囲の全て)	腐食	○目視試験(VT-4)による塗膜状態の確認	原子炉格納容器鋼板塗膜に対する目視試験(VT-4)により、構造健全性または気密性に影響を与える塗膜の劣化や腐食が無いことを確認した。
コンクリート構造物※	コンクリート	強度低下及び遮蔽能力低下	○採取したコアサンプル等による強度、遮蔽能力、中性化、塩分浸透及びアルカリ骨材反応の確認	採取したコアサンプルにより、コンクリートの強度低下および遮蔽能力低下に対する健全性に影響を与える劣化が無いことを確認した。

※：安全機能を有するコンクリート構造物並びに安全機能を有する系統及び機器を支持するコンクリート構造物並びに常設重大事故等対処設備に属するコンクリート構造物及び常設重大事故等対処設備に属する機器を支持するコンクリート構造物

3. 技術評価の実施体制

高経年化技術評価の実施は「高浜発電所原子炉施設保安規定」（以下、「保安規定」という。）第120条の6に規定している。実施にあたって、保安規定に基づく品質マネジメントシステム計画に従い、実施体制を構築し、実施手順を確立した。

3. 1 評価の実施に係る組織

保安規定に基づく品質マネジメントシステム計画に従い、社内標準「安全管理業務要綱」を定め、これに従い策定した「高経年化技術評価の実施計画」により評価の実施体制を構築している。

技術評価等にあたる体制を資料3-1に示す。保全計画グループは、高経年化対策に関する実施計画、実施手順の策定、運転経験、最新知見の調査・分析等を行い、評価書作成（コンクリート構造物および鉄骨構造物を除く）およびとりまとめ等の全体調整を行った。

土木建築設備グループは、コンクリート構造物および鉄骨構造物の技術評価を行い、評価書を作成した。

また、評価書作成助勢として、高浜発電所およびその他の関係箇所と協力して、技術評価および施設管理方針（長期施設管理方針）の策定を実施した。

3. 2 評価の方法

「安全管理業務要綱」に従い、運転延長ガイド、高経年化対策実施ガイド等および学会標準2008版などに準拠して策定した「高経年化対策実施手順書」により実施手順を確立し、これに基づき劣化状況評価を実施した。

評価方法の詳細については、4. 技術評価方法にまとめている。

3. 3 工程管理

実用炉規則および運転延長ガイド等に基づき、運転開始後40年の期間を満了する日から起算して1年前の日までに保安規定変更認可申請等を行うべく工程管理を実施した。

具体的には、資料3-2に示すように、2021年5月19日に実施計画を策定し、2015年6月22日に策定済みの実施手順書（2020年7月14日および2021年5月19日に一部改正）に基づき、技術評価の実施を開始した。2022年9月29日に高浜発

電所の評価書確認を完了し、2022年11月25日にグループ内での評価者以外による技術的な妥当性確認を完了した。

なお、2022年12月21日に、社内の原子力発電安全委員会において本評価書の審議を実施し確認され、2022年12月21日に原子力発電部門統括（原子力発電）が承認した。

その後、運転期間延長認可および保安規定変更認可の申請予定日を変更したことから、国内外の新たな運転経験等の調査期間を「2022年5月まで」から「2022年12月まで」に変更し、2023年3月16日に変更箇所についての妥当性確認を完了し、2023年3月28日に原子力発電部門統括（原子力発電）が再度承認した。

3.4 協力事業者の管理

社内標準に定められる調達管理において、品質保証計画書の要求と当社による審査を経て、株式会社原子力エンジニアリングには、技術評価対象機器リストの整備および国内外運転経験等の整理等を委託し、三菱重工業株式会社および三菱電機株式会社には、技術評価対象機器について長期健全性評価等の業務委託を実施した。

3. 5 評価記録の管理

管理すべき文書・記録の名称、審査者、承認者、保有責任者および保有期間は、社内標準で定めている。高経年化技術評価に係る記録の主なものは以下の通りである。

名称	区別		審査者	承認者	保有責任者	保有期間
	内部文書	記録				
高経年化技術評価の実施計画	○	○	保全計画グループチーフマネジャー	原子力発電部門統括（原子力発電）	保全計画グループチーフマネジャー	永年
高経年化技術評価書	—	○	—	原子力発電部門統括（原子力発電）	保全計画グループチーフマネジャー	永年
高経年化技術評価書妥当性確認チェックシート	—	○	—	評価担当グループチーフマネジャー・部長	評価担当グループチーフマネジャー・部長	10年

3. 6 評価に係る教育訓練

社内標準に基づき、技術評価を実施する力量を設定し、力量管理を実施するとともに、育成計画を定めて技術評価書作成時のOJT等により資質向上を図っている。

3. 7 評価年月日

2023年3月24日

3. 8 評価を実施した者の氏名

原子力事業本部 原子力発電部門

保全計画グループチーフマネジャー

棚橋 晶

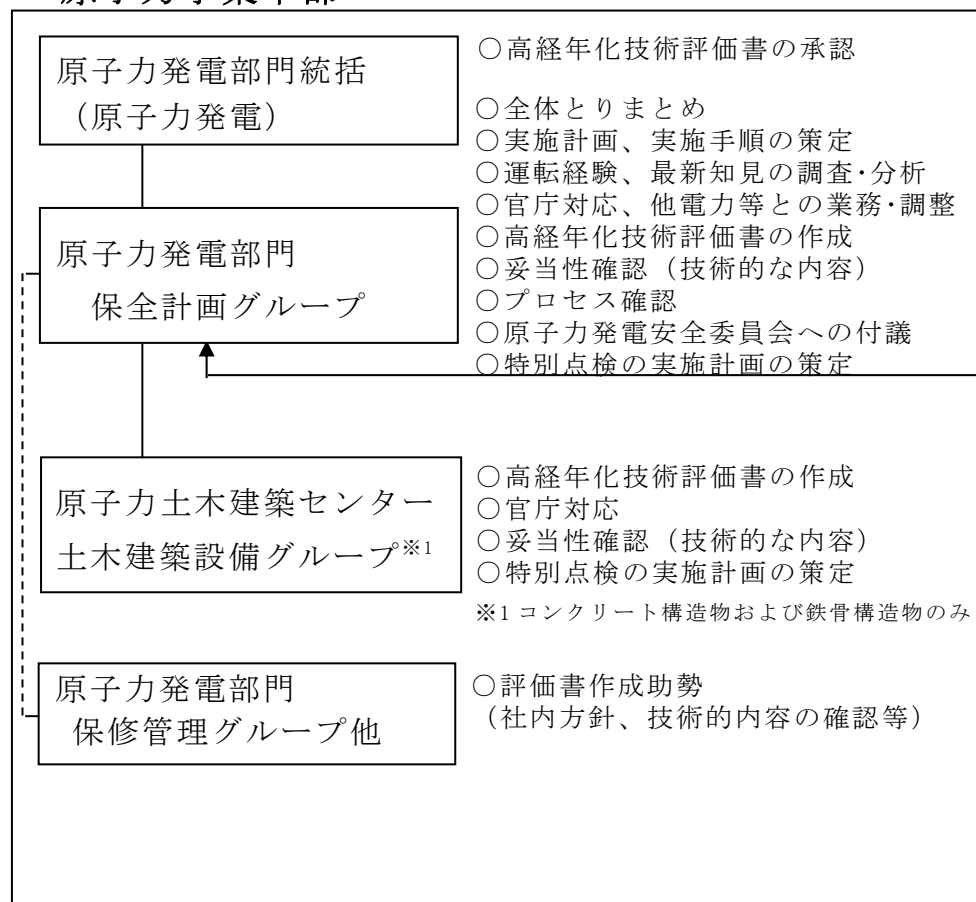
原子力事業本部 原子力土木建築センター

土木建築設備グループ部長

秋田 昇道

高浜発電所 4号炉 高経年化対策実施体制表

原子力事業本部

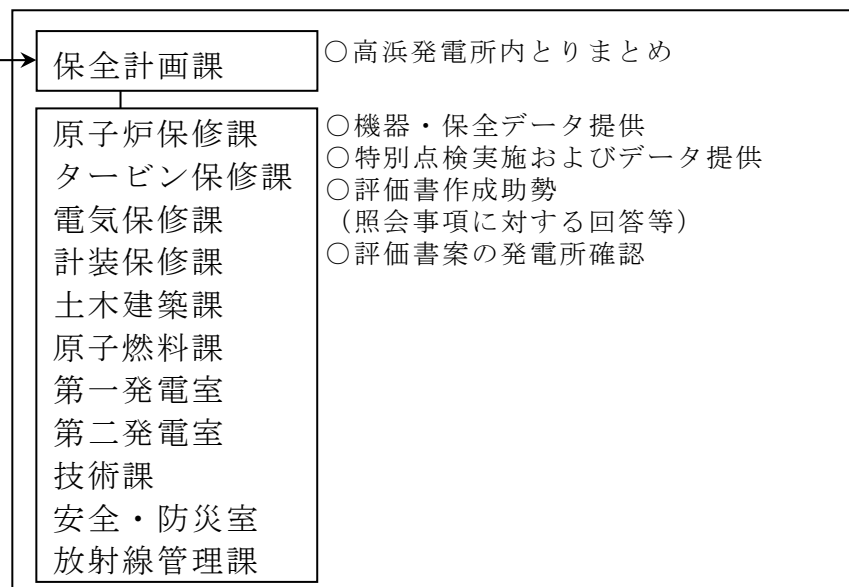


原子力発電安全委員会

原子力安全・技術部門統括^{※2}を委員長とし、各発電所長、各発電所原子炉主任技術者、各チーフマネージャー以上の職位から構成され原子炉施設保安規定の変更等を審議し確認する。

※2 組織改正前は「原子力安全部門統括」

高浜発電所



注) 必要により評価書作成助勢等の外部委託を実施するものとする。

「長期施設管理方針に基づく施設管理の実施」および「長期施設管理方針の維持」の管理は、発電所にて実施する。

資料 3 - 1 評価の実施に係る組織

年月 項目	2021			2022												2023					
	5	..	12	1	..	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	..	12	
実施計画・手順書作成	▼																				
評価書作成																					
発電所確認																					
妥当性確認																					
プロセス確認														▼							
原子力発電安全委員会 (審議)														▼							
保安規定変更認可申請																					▼
運転期間延長認可申請																					▼

資料 3 - 2 実施工程

4. 技術評価方法

4. 1 技術評価対象機器

本検討では、高経年化対策実施ガイド等に従い、高浜発電所4号炉の安全上重要な機器等（実用炉規則第82条第1項で定める機器・構造物）を技術評価対象機器とした。なお、高浜1、2、3、4号炉で共用する機器・構造物および高浜3、4号炉で共用する機器・構造物についても本評価書の評価対象としている。

具体的には、重要度分類指針において定義されるクラス1、2および3の機能を有する機器・構造物（実用炉規則別表第二において規定される浸水防護施設に属する機器・構造物を含む。）ならびに「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成25年原子力規制委員会規則第5号）第43条第2項に規定される常設重大事故等対処設備」（以下、「常設重大事故等対処設備」という。）に属する機器・構造物とし、原子力保全総合システム、系統図等を基に抽出した。

なお、供用に伴う消耗が予め想定される部品であって設計時に取替を前提とするものまたは機器分解点検等に伴い必然的に交換されるものは消耗品として対象から除外する。また、設計時に耐用期間内に計画的に取替えることを前提とする機器であり、取替基準が保全指針、業務決定文書または原子力発電所保守業務要綱指針により定められているものについても定期取替品として対象から除外する。

4. 2 技術評価手順

4. 2. 1 機器のグループ化および代表機器の選定

評価にあたっては、ポンプ、熱交換器、ポンプモータ、容器、配管、弁、炉内構造物、ケーブル、電気設備、タービン設備、コンクリート構造物および鉄骨構造物、計測制御設備、空調設備、機械設備、電源設備に分類（カテゴリ化）し機種毎に評価した。

選定された評価対象機器について合理的に評価するため、構造（型式等）、使用環境（内部流体等）、材料等により、学会標準2008版附属書A（規定）等に基づき、「経年劣化メカニズムまとめ表^{注1}」を参考に、対象機器を分類しグループ化を行った。

次に、グループ化した対象機器から重要度、使用条件、運転状態等により各グループの代表機器（以下、「代表機器」という。）を選定し、代表機器で評価した結果をグループ内の全機器に水平展開

するという手法で全ての機器について評価を実施した。ただし、代表機器の評価結果をそのまま水平展開できない経年劣化事象については個別に評価を実施した。

注：「経年劣化メカニズムまとめ表」はこれまでの高経年化技術評価の知見を包括的にまとめ、高経年化技術評価対象機器個別の条件（型式、使用環境、材料等）を考慮し、安全機能達成のために要求される機能の維持に必要な部位に展開した上で、その部位と経年劣化事象の組み合わせを整理した表であることから、「経年劣化メカニズムまとめ表」を活用することで、これまでに確認されている使用材料および環境に応じ発生しているかまたは発生が否定できない経年劣化事象を抜け落ちなく抽出することができる。

なお、2.4に示す「劣化メカニズム整理表」は「経年劣化メカニズムまとめ表」に保全を最適化するために施設管理に活用する情報を集約してまとめたものであり、施設管理の結果により充実していくものである。この「劣化メカニズム整理表」に反映される施設管理の結果による情報は必要に応じて「経年劣化メカニズムまとめ表」にフィードバックされる。

4. 2. 2 国内外の新たな運転経験および最新知見の反映

高浜発電所4号炉の高経年化対策を検討するにあたり、美浜発電所1、2、3号炉、高浜発電所1～4号炉および大飯発電所1～4号炉を含む先行号炉の30年目の技術評価書、美浜発電所1、2、3号炉の40年目の技術評価書および高浜発電所1、2号炉の40年目の技術評価書を参考にするとともに、それ以降2021年7月～2022年12月の国内外の運転経験について事象・原因を調査し、高経年化への影響を判断して反映を実施する。

なお、その期間以外においても、高経年化技術評価上特に重要な知見、運転経験が得られた場合には、反映を実施する。

国内の運転経験としては、法律対象のトラブルに加え、法令の定めでは国への報告は必要ないが、電力自主で公開している軽微な情報も含んでいる。具体的には、原子力安全推進協会が運営している原子力施設情報公開ライブラリーにおいて公開されている「トラブル情報」、「保全品質情報」を対象とした。

また、海外の運転経験としては、米国原子力規制委員会（NRC； Nuclear Regulatory Commission）のBulletin（通達）、Generic

LetterおよびInformation Noticeを含む。

高浜発電所4号炉の高経年化対策の検討で、新たに考慮した主な運転経験はなかった。

その他、日本機械学会、日本電気協会、日本原子力学会の標準類および原子力規制委員会により公開されている安全研究の情報等があるが、それらのうち新たに考慮した主なものを以下に示す。

- ① 日本原子力学会 原子力発電所の高経年化対策実施基準：2021（AESJ-SC-P005:2021）および追補1

4. 2. 3 経年劣化事象の抽出

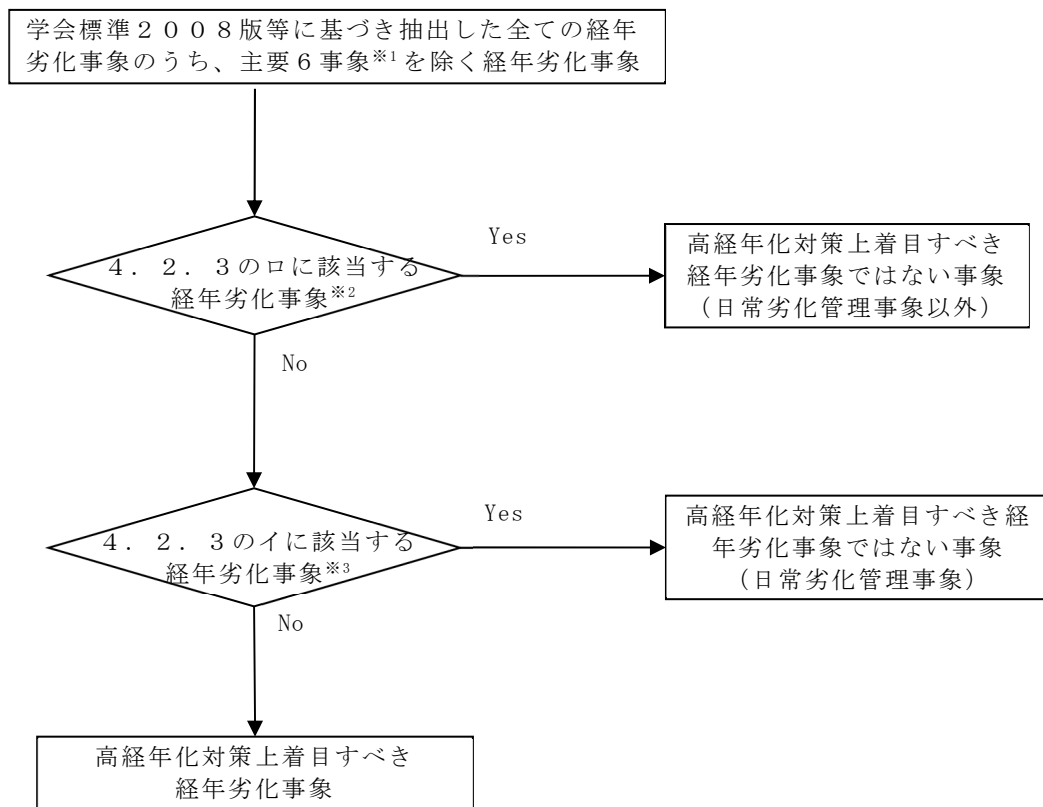
高経年化技術評価を行うにあたっては、選定された評価対象機器の使用条件（型式、材料、環境条件等）を考慮し、学会標準2008版附属書A（規定）等に基づき、「経年劣化メカニズムまとめ表」を参考に、経年劣化事象と部位の組み合わせを抽出した。

なお、抽出された経年劣化事象と部位の組み合わせのうち、下記の「イ」または「ロ」に該当する場合は、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象として除外した（資料4-1）。

このうち、下記分類の「イ」に該当する経年劣化事象は、「主要6事象^{注)}」のいずれにも該当しないものであって、2.4で記載した日常的な施設管理において時間経過に伴う特性変化に対応した劣化管理を的確に行うことによって健全性を担保しているものである。結果としてこれらが日常劣化管理事象となる。

注：原子力規制委員会の「実用発電用原子炉施設における高経年化対策実施ガイド」に示された「低サイクル疲労」、「中性子照射脆化」、「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・計装品の絶縁低下」および「コンクリートの強度低下および遮蔽能力低下」

- イ 想定した劣化傾向と実際の劣化傾向の乖離が考えがたい経年劣化事象であって、想定した劣化傾向等に基づき適切な保全活動を行っているもの。
- ロ 現在までの運転経験や使用条件から得られた材料試験データとの比較等により、今後も経年劣化の進展が考えられない、または進展傾向が極めて小さいと考えられる経年劣化事象。



※1：高経年化対策上着目すべき経年劣化事象に限る。

※2：保全活動によりその傾向が維持できていることを確認している経年劣化事象は「No」に進む。

※3：ロに該当するが保全活動によりその傾向が維持できているものを含む。

資料4-1 経年劣化事象の分類

4. 2. 4 経年劣化事象に対する技術評価

4. 2. 1 で選定された代表機器について、4. 2. 3 で抽出した高経年化対策上着目すべき経年劣化事象と部位の組み合わせに対する技術評価を下記の健全性評価、現状保全、総合評価、高経年化への対応の順で実施した。

なお、特別点検を実施した機器は、特別点検結果を踏まえた評価を実施する。

a. 健全性評価

機器毎に抽出した部位と経年劣化事象の組み合わせ毎に60年間使用することを仮定して、傾向管理データによる評価および解析等の定量評価、過去の保全実績、一般産業で得られている知見等により健全性の評価を実施する。また、工事計画を踏まえた健全性評価を実施する。

b. 現状保全

評価対象部位に実施している点検内容、関連する機能試験内容、補修・取替等の現状保全の内容について整理する。

c. 総合評価

上記 a、b をあわせて現状保全内容の妥当性等を評価する。具体的には、健全性評価結果と整合の取れた点検等が、現状の発電所における保全活動で実施されているか。また、点検手法は当該の経年劣化事象の検知が可能か等を評価する。

d. 高経年化への対応

60年間の使用を考慮した場合、現状保全の継続が必要となる項目、今後新たに必要となる点検・検査項目、技術開発課題等を抽出する。

4. 3 耐震安全性評価

4. 2. 3で抽出した経年劣化事象およびその保全対策を考慮した上で機器毎に耐震安全性評価を実施する。

4. 3. 1 耐震安全性評価対象機器

技術評価対象機器と同じとした。

4. 3. 2 耐震安全性評価手順

a. 耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象の抽出

4. 2. 3で抽出した安全上重要な機器等に想定される高経年化対策上着目すべき経年劣化事象および日常劣化管理事象を対象として、これらの事象が顕在化した場合、代表機器の振動応答特性または、構造・強度上、影響が「有意」であるか「軽微もしくは無視」できるかを検討し、「有意」なものを耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象とした。

b. 耐震安全性評価

前項で抽出した経年劣化事象毎に、耐震安全性評価を実施した。評価の基本となる項目は、大別すると以下のとおり分類される。

- ① 機器の耐震クラス
- ② 機器に作用する地震力の算定
- ③ 60年の使用を仮定した経年劣化事象のモデル化
- ④ 振動特性解析（地震応答解析）
- ⑤ 地震荷重と内圧等他の荷重との組合せ
- ⑥ 許容限界との比較

これらの項目のうち、④および⑥については経年劣化の影響を考慮して評価を実施した。また、評価に際しては、「日本電気協会 原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601-1987）」等に準じて実施した。

c. 保全対策へ反映すべき項目の抽出

以上の検討結果を基に、耐震安全性の観点から高経年化対策に反映すべき項目について検討した。

4. 4 耐津波安全性評価

4. 2. 3で抽出した経年劣化事象およびその保全対策を考慮した上で耐津波安全性評価を実施する。

4. 4. 1 耐津波安全性評価対象機器

評価対象機器は、「技術評価」における評価対象機器のうち、津波の影響を受ける浸水防護施設を耐津波安全性評価の対象とした。

4. 4. 2 耐津波安全性評価手順

a. 耐津波安全上考慮する必要のある経年劣化事象の抽出

耐津波安全性評価対象機器に対して4. 2. 3で抽出した高経年化対策上着目すべき経年劣化事象および日常劣化管理事象について、これらの事象が顕在化した場合、構造・強度上および止水性上への影響が「有意」であるか「軽微もしくは無視」できるかを検討し、「有意」なものを耐津波安全上考慮する必要のある経年劣化事象とした。

b. 耐津波安全性評価

前項で整理される、耐津波安全性評価上考慮する必要のある経年劣化事象が想定される設備に対し、耐津波安全性に関する評価を実施した。

c. 保全対策へ反映すべき項目の抽出

以上の検討結果を基に、耐津波安全性の観点から高経年化対策に反映すべき項目について検討した。

4. 1～4. 4までの検討における評価フローを、資料4-2および資料4-3に示す。

4. 5 冷温停止状態維持時の技術評価

冷温停止状態維持時の技術評価フローを資料4-4に、冷温停止状態維持に必要な設備抽出フローを資料4-5に示す。抽出された冷温停止状態維持に必要な設備に対して、断続的運転を前提とした場合に想定される高経年化対策上着目すべき経年劣化事象に対して冷温停止状態の維持を前提とした場合における劣化の発生・進展に関する整理を実施し、その結果を基に冷温停止状態を前提とした評価（以下、「冷温停止を踏まえた再評価」という。）を以下の手順で実施した。

4. 5. 1 代表機器の選定

冷温停止状態維持に必要な設備を考慮して、断続的運転を前提とした技術評価における代表機器を本検討の代表機器として選定した。

4. 5. 2 冷温停止を踏まえた再評価を行う経年劣化事象の抽出

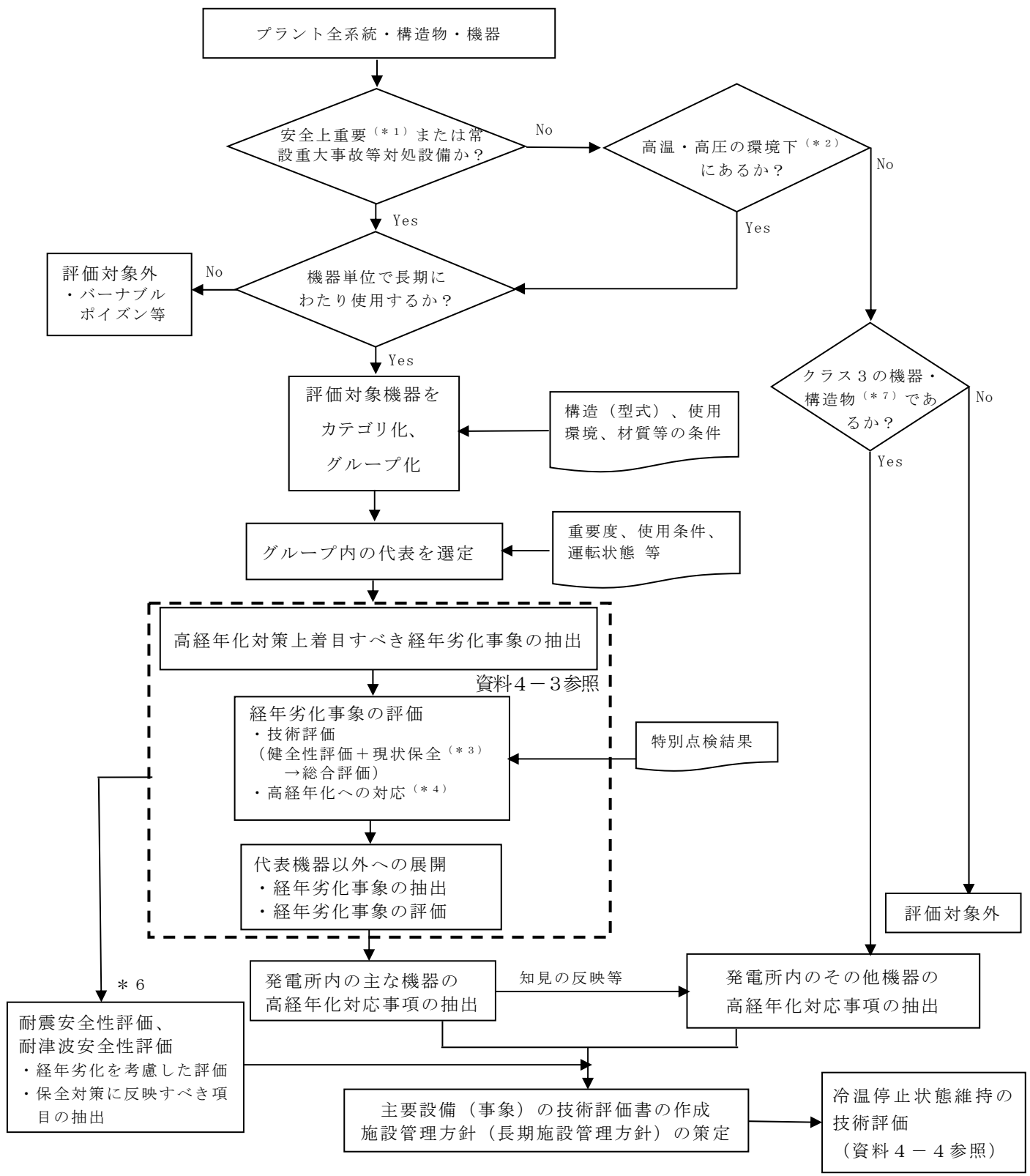
断続的運転を前提とした場合に想定される高経年化対策上着目すべき経年劣化事象^{注)}に対して、冷温停止状態の維持を前提とした場合における劣化の発生・進展に関する整理を実施し、冷温停止状態の維持を前提とした場合において、発生・進展が断続的運転を前提とした場合より厳しくなることが想定される経年劣化事象を抽出した。その結果、より厳しくなることが想定される経年劣化事象が抽出された場合には、冷温停止を踏まえた再評価を実施した。なお、保全対策に反映すべき項目があるかもあわせて検討した。

4. 5. 3 評価対象機器全体への展開

代表機器の評価結果を踏まえ、冷温停止状態の維持を前提とした場合において、発生・進展が断続的運転を前提とした場合より厳しくなることが想定される経年劣化事象を抽出した。その結果、より厳しくなることが想定される経年劣化事象が抽出された場合には、冷温停止を踏まえた再評価を実施した。なお、保全対策に反映すべき項目があるかもあわせて検討した。

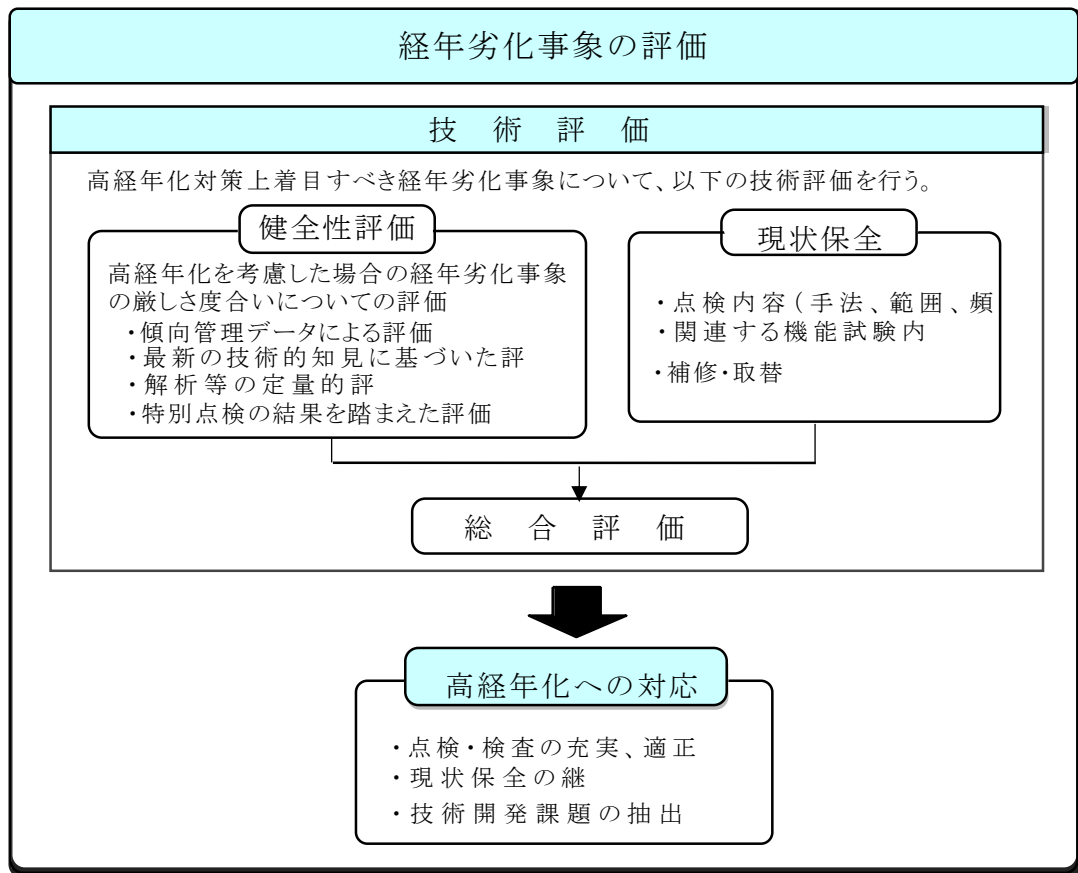
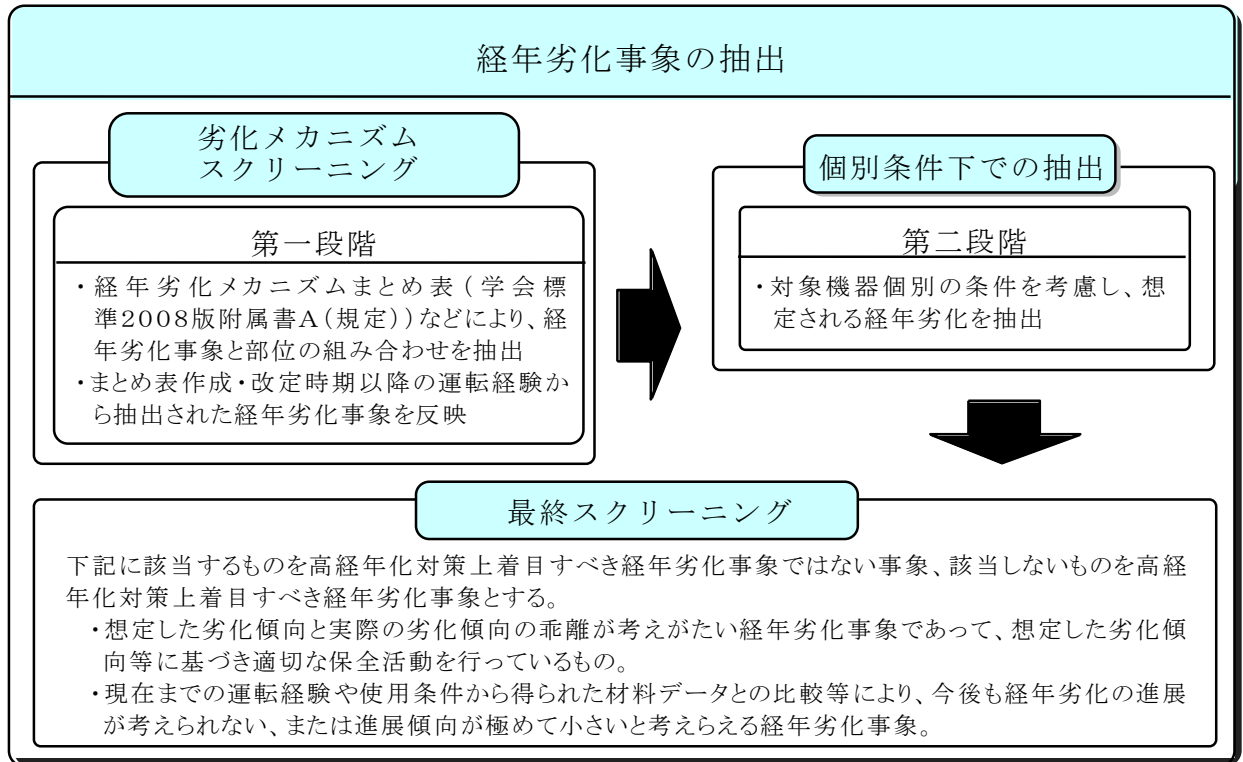
注：運転を断続的に行うことを前提とした評価における高経年化対策上着目すべき経年劣化事象以外の事象が、冷温停止状態が維持されることを前提とした評価において着目すべき経年劣化事象となる場合はそれらもあわせて抽出した。なお、プラント通

常運転時に要求のある機能に対する経年劣化事象であるが、冷温停止状態維持を前提とした場合に要求がなくなるものは対象外とした。（資料4－6参照）

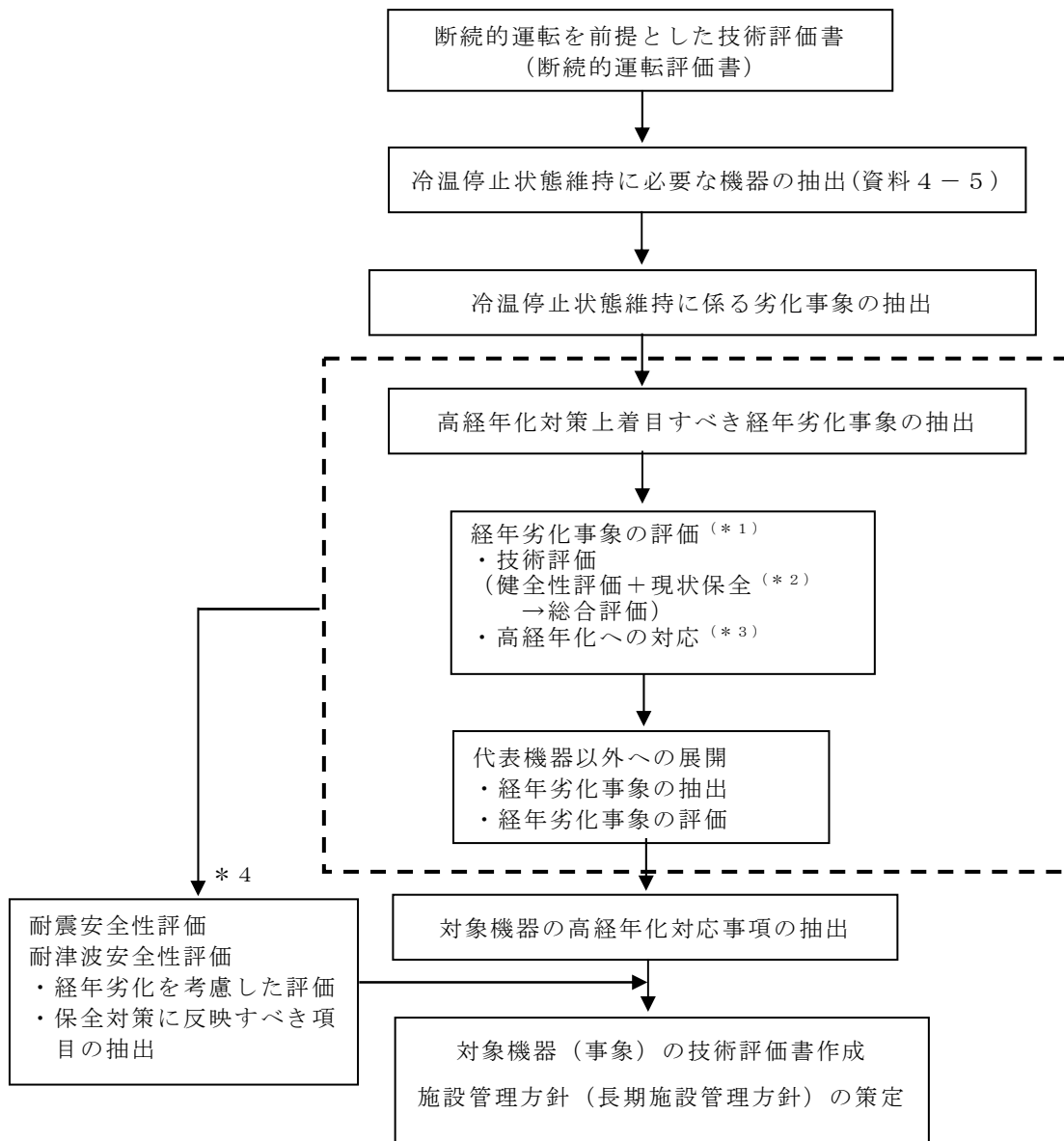


- * 1 : 重要度クラス 1、2 (*5) (耐津波安全性評価が必要な浸水防護施設に属する機器および構造物を含む。)
- * 2 : 重要度クラス 3 のうち、最高使用温度が 95℃ を超え、または最高使用圧力が 1900kPa を超える環境 (原子炉格納容器外にあるものに限る)
- * 3 : 系統レベルの機能確認を含む。
- * 4 : 高経年化対応としての保全のあり方を論じ、高経年化に関係のない一般的な保全は切り離す。
- * 5 : 重要度分類指針の重要度分類
- * 6 : 経年劣化の発生・進展が否定できず、耐震安全性・耐津波安全性に影響を及ぼす可能性のある事象
- * 7 : 浸水防護施設に属する機器および構造物を含む。

資料 4 - 2 技術評価フロー

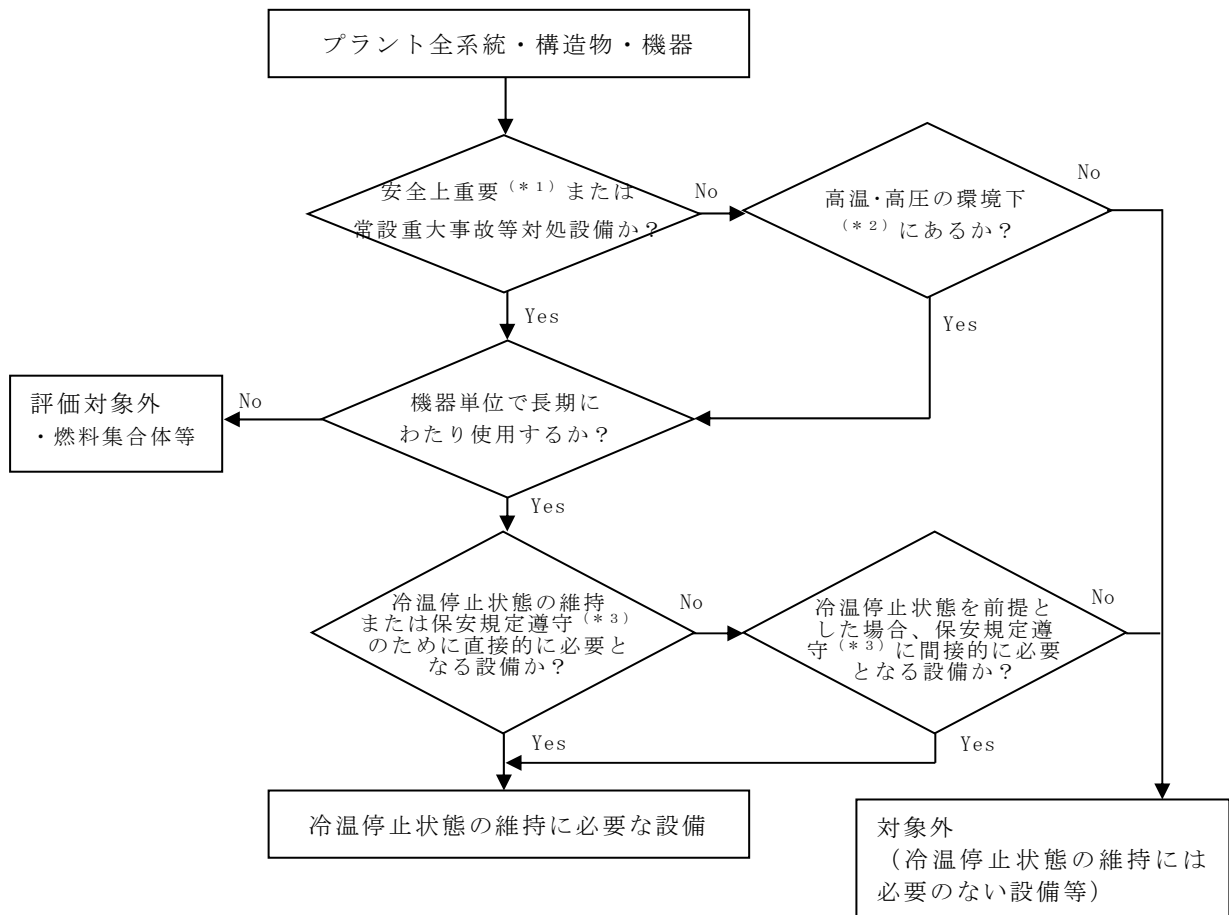


資料4-3 経年劣化事象の抽出および技術評価フロー



- * 1 : 断続的運転評価の代表機器として評価されている機器に関しては、冷温停止状態維持に必要な機器として抽出されてなくても、次頁のフローにより抽出された機器の代表機器として評価を記載することとする。
- * 2 : 系統レベルの機能確認を含む。
- * 3 : 高経年化対応としての保全のあり方を論じ、高経年化に関係のない一般的な保全は切り離す。
- * 4 : 経年劣化の発生・進展が否定できず、耐震安全性・耐津波安全性に影響を及ぼす可能性のある事象

資料4-4 冷温停止状態維持時の技術評価フロー



- * 1 : 重要度クラス 1、2 (* 4) (耐津波安全性評価が必要な浸水防護施設に属する機器および構造物を含む。)
- * 2 : 重要度クラス 3 のうち、最高使用温度が 95℃ を超え、または最高使用圧力が 1900kPa を超える環境 (原子炉格納容器外に限る)
- * 3 : 保安規定で定義されている原子炉の運転モード 5、モード 6 および運転モードに関係なく要求される機能を対象とする。
- * 4 : 重要度分類指針の重要度分類

資料 4 - 5 冷温停止状態維持に必要な設備抽出フロー

資料 4 - 6 冷温停止状態維持に必要とならない機能の例

機種	機能	想定不要の理由
炉内構造物	制御棒クラス タ案内構造信 頼性の維持	制御棒クラスタは燃料集合体内に挿入された状 態で冷温停止状態維持されているため。
	中性子遮蔽構 造信頼性の維 持	冷温停止状態では燃料からの中性子照射はない ため。
1次冷却材 ポンプ	ポンプの容量 -揚程確保	冷温停止状態ではバウンダリの維持機能のみが 要求されるため。
	作動信頼性の 維持	
加圧器ヒー タ	昇温・昇圧制 御	冷温停止状態の維持において、加圧器ヒータに よる昇温・昇圧が必要ないため。
制御棒駆動 装置	制御棒作動信 頼性の維持	制御棒クラスタは燃料集合体内に挿入された状 態で冷温停止状態維持されており、バウンダリ の維持機能のみが要求されるため。

5. 技術評価結果

本章では、資料4-2および資料4-4で抽出した機器・構造物に係る技術評価結果、耐震安全性評価結果および耐津波安全性評価結果の概要を記載している。

各機器の詳細な評価結果については、それぞれ別冊にまとめている。

5. 1 運転を断続的に行うことを前提とした機器・構造物の技術評価結果

運転を断続的に行うことを前提とした機器・構造物の詳細な技術評価については、別冊にまとめているが、大部分の機器・構造物については、現状保全を継続していくことにより、長期間の運転を仮定しても、プラントを健全に維持することは可能との評価結果が得られた。

なお、高経年化に関する技術評価結果から、現状保全に追加すべき項目として抽出された評価結果の概要について以下に示す。

5. 1. 1 容器等*

原子炉容器冷却材出入口管台等の疲労割れについては、疲労割れ評価の結果、疲労累積係数は許容値に対して余裕のある結果が得られた。高経年化技術評価に合わせて、実績過渡回数に基づく評価を実施することとしているが、疲労割れ評価結果は実績過渡回数に依存するため、継続的に実績過渡回数を把握する必要があることから、疲労割れ評価における実績過渡回数の確認を継続的に実施し、運転開始後60年時点の推定過渡回数を上回らないことを確認する。

*：疲労累積係数による低サイクル疲労の評価を実施した全ての機器

5. 1. 2 容器

原子炉容器胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化については、破壊力学的手法を用いて、運転開始後60年間の中性子照射を考慮し、初期亀裂を想定して評価を行っても脆性破壊は起こらないことを確認した。また、原子炉容器に対しては定期的に超音波探傷検査を実施し、有意な欠陥の無いことを確認している。また、監視試験片による試験で将来の破壊靱性の変化の傾向を把握している。

胴部材料の機械的性質の予測は監視試験により把握可能であり、有意な欠陥のないことも超音波探傷検査により確認しているが、今後、「日本電気協会 原子炉構造材の監視試験方法」（以下、「JEAC4201」という。）に基づき計画的に監視試験を実施して健全性評価の妥当性を確認するとともに、定期的に超音波探傷検査を実施していく。また、監視試験結果から、「日本電気協会 原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法」（以下、「JEAC4206」という。）に基づき、運転管理上の制限として加熱・冷却運転時に許容しうる温度・圧力の範囲（加熱冷却時制限曲線）および耐圧漏えい試験温度を設けて運用していく。さらに、今後の原子炉の運転サイクル・照射量を勘案して第6回監視試験の実施計画を策定する。

5. 1. 3 配管

ステンレス鋼配管溶接部の施工条件に起因する内面からの粒界割れについては、2020年8月に大飯3号炉で加圧器スプレイ配管の1次冷却材管管台との溶接部近傍内面の亀裂が確認されているが、当該事象の調査結果および国内外のPWRプラントにおいて類似の事例が確認されていないことから特異な事象と判断している。

なお、大飯3号炉で発生した事象は特異であるが、メカニズムが全て明らかになっていないことから、高浜4号炉で類似性の高い箇所に対しては第26回定期検査までの間、毎回検査を実施することとしている。また、第27回定期検査以降については、今後の知見拡充結果を踏まえて、対象および頻度を検討し、供用期間中検査計画に反映を行う。

5. 1. 4 熱交換器

蒸気発生器伝熱管の損傷については、現状、渦流探傷検査による健全性の確認や、スラッジランシングを実施し、管板上のスラッジ除去を行っているが、伝熱管材料が600系ニッケル基合金であり、管板拡管部の応力腐食割れ等の発生が否定できないことから、最新設計を反映した蒸気発生器への取替計画を策定しており、計画に基づき取替を実施する。

5. 2 運転を断続的に行うことを前提とした耐震安全性評価結果

運転を断続的に行うことを前提とした耐震安全性評価にあたっては、5. 1における技術評価結果を取り入れ、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象および日常劣化管理事象を対象として耐震安全性を評価した。

対象とした経年劣化事象について、これらの事象が顕在化した場合、代表機器の振動応答特性または構造・強度上、影響が「有意」であるか「軽微もしくは無視」できるかを検討し、耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象の抽出を行い、抽出された経年劣化事象毎に、耐震安全性に関する詳細評価を実施した結果、現状保全に追加すべき項目や評価項目は抽出されなかった。

5. 3 運転を断続的に行うことを前提とした耐津波安全性評価結果

運転を断続的に行うことを前提とした耐津波安全性評価にあたっては、5. 1における技術評価結果を取り入れ、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象および日常劣化管理事象を対象として耐津波安全性を評価した。

対象とした経年劣化事象について、これらの事象が顕在化した場合、構造・強度上および止水性上への影響が「有意」であるか「軽微もしくは無視」できるかを検討し、耐津波安全上考慮する必要がある経年劣化事象の抽出を行い、抽出された経年劣化事象毎に、耐津波安全性に関する詳細評価を実施した。

その結果、耐津波安全上考慮する必要がある経年劣化事象は抽出されなかった。

5. 4 冷温停止状態維持を前提とした機器・構造物の技術評価結果

本節においては、冷温停止状態維持を前提とした機器・構造物の技術評価結果についてまとめた。

冷温停止状態を前提とした場合に、断続的運転を前提とした場合と比べ運転条件や環境が厳しくなる恐れがある機器と経年劣化事象の組み合わせを抽出し、経年劣化事象毎にまとめたものを以下に示す。

- a. 余熱除去ポンプモータ固定子コイル等の絶縁低下
- b. 充てん／高圧注入ポンプ主軸のフレット疲労割れ
- c. 中間開度で使用する制御弁の弁体、弁座等の腐食（エロージョン）

これらの経年劣化事象について評価した結果、現状保全に新たに加えるべき項目はなかった。

5. 5 冷温停止状態維持を前提とした耐震安全性評価結果

冷温停止状態維持を前提とした耐震安全性評価にあたっては、5. 2における耐震安全性評価結果および5. 4における技術評価結果を取り入れることとし、耐震安全性を評価した。

具体的には、5. 4で抽出した断続的運転を前提とした場合と比べ運転条件や環境が厳しくなる恐れがある経年劣化事象について、これらの事象が顕在化した場合、代表機器の振動応答特性または構造・強度上、影響が「有意」であるか「軽微もしくは無視」できるかを検討し、耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象の抽出を行い、抽出された経年劣化事象毎に、耐震安全性に関する詳細評価を実施した。

その結果、5. 2における耐震安全性評価結果に加え、耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象は抽出されなかった。

5. 6 冷温停止状態維持を前提とした耐津波安全性評価結果

冷温停止状態維持を前提とした耐津波安全性評価にあたっては、5. 3における耐津波安全性評価結果および5. 4における技術評価結果を取り入れることとし、耐津波安全性を評価した。

具体的には、5. 4で抽出した断続的運転を前提とした場合と比べ運転条件や環境が厳しくなる恐れがある経年劣化事象について、これらの事象が顕在化した場合、構造・強度上および止水性上への影響が「有意」であるか「軽微もしくは無視」できるかを検討し、耐津波安全上考慮する必要がある経年劣化事象の抽出を行い、抽出された経年劣化事象毎に、耐津波安全性に関する詳細評価を実施した。

その結果、5. 3における耐津波安全性評価に加え、耐津波安全上考慮する必要がある経年劣化事象は抽出されなかった。

5. 7 評価の結果に基づいた補修等の措置

本技術評価を提出する以前に健全性評価結果に基づき実施した補修等はない。

6. 今後の高経年化対策

高経年化に関する技術評価結果により、今後の高経年化対策として充実にすべき課題等を抽出した。

6. 1 施設管理方針（長期施設管理方針）の策定

(1) 総合評価結果

高経年化に関する技術評価結果から、現状保全に追加すべき項目が抽出された。60年間の運転および冷温停止を仮定しても現状保全を継続するとともに、一部の機器・構造物において追加保全策を講じることで、プラント全体の機器・構造物の長期健全性が確保されることを確認した。

(2) 現状保全に追加すべき項目

総合評価結果を基に、高経年化対策上現状保全項目に追加すべき新たな保全策について具体的な実施内容、実施方法および実施時期を施設管理方針（長期施設管理方針）として策定した。（資料6-1 高浜発電所4号炉 劣化状況評価に基づく施設管理方針（長期施設管理方針））

なお、疲労割れ評価における運転開始後60年時点の推定過渡回数の確認については機器によらないため、まとめて施設管理方針（長期施設管理方針）とした。

6. 2 施設管理方針（長期施設管理方針）の実施

現状保全に追加すべき項目で抽出された施設管理方針（長期施設管理方針）については、今後、高浜発電所4号炉の具体的な保全計画に反映し、運転開始後40年を迎える2025年6月5日を始期とした20年間の適用期間で計画的に実施していくこととしている。

施設管理方針（長期施設管理方針）の実施にあたっては、これらの新たな保全項目を直ちに実施しなければならないものでないことから、実施時期を下記のとおり3つに大別する。

a. 短期（2025年6月5日からの5年間）

- ・健全性評価結果から実機プラントデータでの確認・評価が早急に必要なもの
- ・5年以内に実施計画のあるもの（取替等）等

- b. 中長期（2025年6月5日からの10年間）
 - ・健全性評価において長期にわたる健全性は確保できると評価されるが、定期的（約10年毎）に評価条件の妥当性の確認が必要であるもの等

- c. 長期（2025年6月5日からの20年間）
 - ・健全性評価において長期にわたる健全性は確保できると評価されるが、更なる信頼性向上のための取り組みが必要であるもの等

策定した施設管理方針（長期施設管理方針）については、具体的な保全計画に反映され、施設管理方針（長期施設管理方針）に基づく保全の実績は、高経年化技術評価結果と同様に保全の有効性評価のインプットに位置づけられ、保全の有効性評価を通じて更なる保全計画の改善に活用していくことになる。

資料6-1 高浜発電所4号炉 劣化状況評価に基づく施設管理方針（長期施設管理方針）（1/2）

機種名	機器名	経年劣化事象	健全性評価結果	現状保全	総合評価	施設管理方針 （長期施設管理方針）		
						No.	施設管理の項目	実施時期
容器	原子炉容器	胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化	監視試験結果（関連温度実測値）はJEAC4201の国内脆化予測法による予測の範囲内であった。関連温度の上昇については、JEAC4206に定められた加圧熱衝撃（PTS）評価手法に基づき評価した結果、初期亀裂を想定しても、運転開始後60年時点において、脆性破壊に対する抵抗値（材料自身の持つねばり強さ）を示す K_{IC} 曲線は、負荷状態を応力拡大係数 K_I （脆性破壊を起こそうとする値）で示すPTS状態遷移曲線を上回っていることから、脆性破壊は起こらないと評価される。また、上部棚吸収エネルギーの低下については、予測式（国内USE予測式）を用いて評価した結果、運転開始後60年時点において、JEAC4206の要求を満足しており、十分な上部棚吸収エネルギーがある。	原子炉容器に対しては、定期的に超音波探傷検査を実施し、有意な欠陥のないことを確認している。胴部（炉心領域部）材料の中性子照射による機械的性質の変化については、JEAC4201に基づいて、計画的に監視試験を実施し、将来の破壊靱性の変化の傾向を把握している。運転期間延長認可申請に際して実施した特別点検において、原子炉容器炉心領域部の母材および溶接部に対して超音波探傷検査を実施した結果、中性子照射脆化による脆性破壊の起点となるような欠陥は認められなかった。	胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化が機器の健全性に影響を与える可能性はないと考える。ただし、胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化に対しては、今後も計画的に監視試験を実施して健全性評価の妥当性を確認する必要がある。胴部（炉心領域部）材料の機械的性質の予測は監視試験により把握可能であり、また有意な欠陥のないことも超音波探傷検査により確認していることから、保全内容として適切である。	1	原子炉容器胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化については、今後の原子炉の運転サイクル・照射量を勘案して第6回監視試験の実施計画を策定する。	中長期
容器等※	原子炉容器等※	疲労割れ	運転実績に基づき設定した運転開始後60年時点における推定過渡回数を用いて疲労累積係数による評価を実施した結果、許容値に対し余裕のある結果が得られている。	高経年化技術評価に合わせて、実績過渡回数に基づく評価を実施することとしている。	疲労割れ評価結果は実績過渡回数に依存するため、継続的に実績過渡回数を把握する必要がある。	2	原子炉容器等の疲労割れについては、実績過渡回数の確認を継続的に実施し、運転開始後60年時点の推定過渡回数を上回らないことを確認する。	長期

※：疲労累積係数による低サイクル疲労の評価を実施した全ての機器。

短期：2025年6月5日からの5年間、中長期：2025年6月5日からの10年間、長期：2025年6月5日からの20年間

資料6-1 高浜発電所4号炉 劣化状況評価に基づく施設管理方針（長期施設管理方針）（2/2）

機種名	機器名	経年劣化事象	健全性評価結果	現状保全	総合評価	施設管理方針 （長期施設管理方針）		
						No.	施設管理の項目	実施時期
配管	ステンレス鋼配管	溶接部の施工条件に起因する内面からの粒界割れ	2020年8月、大飯3号炉において、加圧器スプレ配管の1次冷却材管管台との溶接部近傍内面に亀裂が確認されている。調査の結果、「過大な溶接入熱」と「形状による影響」が重畳したことで表層近傍において特異な硬化が生じ、この特異な硬化が亀裂の発生に寄与したと推定された。亀裂は溶接熱影響部で粒界に沿って進展しており、粒界型応力腐食割れで進展したものと判断している。国内外のPWRプラントにおいて類似の事例は確認されておらず、当社の原子力プラントにおいて同様の事象発生の可能性があるとして推定された部位全てに対し追加検査が行われたが、亀裂は認められていない。これらの状況から、亀裂の発生は「過大な溶接入熱」と「形状による影響」が重畳した特異な事象と判断される。	大飯3号炉で発生した事象は特異であるが、メカニズムが全て明らかになっていないことから、高浜4号炉で類似性の高い箇所に対しては第26回定期検査までの間、毎回検査を実施することとしている。また、第27回定期検査以降については、今後の知見拡充結果を踏まえて、対象および頻度を検討し、供用期間中検査計画に反映を行うこととしている。	当該部の亀裂は特異な事象と判断され、今後も機能の維持は可能であることから、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない。 なお、今後の知見拡充結果を踏まえた対応を明確にしておく観点から、第27回定期検査以降の検査計画の検討については、追加保全策として取り扱う。	3	ステンレス鋼配管溶接部の施工条件に起因する内面からの粒界割れについて、2020年8月に確認された「大飯発電所3号炉加圧器スプレ配管溶接部における有意な指示」を踏まえて実施する知見拡充結果に基づき、第26保全サイクルまで継続して実施する類似性の高い箇所に対する検査の結果も踏まえて、第27保全サイクル以降の検査対象および頻度を検討し、供用期間中検査計画に反映を行う。	中長期
熱交換器	蒸気発生器	伝熱管の損傷	管板拡管部および拡管境界部応力腐食割れ等については、ショットピーニング（応力緩和）施工等を講じることで有意な亀裂の発生は著しく低下している。万一有意な亀裂が生じた場合、検出限界の大きさの亀裂が構造上許容される亀裂深さに達するまでの時間を評価し、適切な間隔で点検を実施することにより健全性を確保できると考える。	蒸気発生器伝熱管に対しては、開放点検時に全数渦流探傷検査を実施し、健全性を維持している。また、定期的にスラッジランシングを実施し、管板上のスラッジ除去を実施している。	今後も機能の維持は可能であることから、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない。 なお、蒸気発生器については、伝熱管材料が600系ニッケル基金合金であり、管板拡管部の応力腐食割れ等の発生が否定できないことから、最新設計を反映した蒸気発生器への取替計画を策定しており、計画に基づき取替を実施する。	4	蒸気発生器については、取替計画に基づき取替を実施する。	中長期

短期：2025年6月5日からの5年間、中長期：2025年6月5日からの10年間、長期：2025年6月5日からの20年間

6. 3 技術開発課題

高経年化に関する技術評価においては、現在までの知見と実績を基に評価したものであるが、点検や検査技術の高度化、ならびに更なる知見の蓄積に努める観点から、今後さらに技術開発課題に取り組んでいく必要がある。2020年8月に確認された「大飯発電所3号炉 加圧器スプレイ配管溶接部における有意な指示」を踏まえたステンレス鋼配管溶接部の粒界割れに対する知見拡充をはじめ、今後も、電力研究や国の研究プロジェクトの成果等を活用し、必要なものは保全計画に反映することとしている。

なお、2014年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画」において示された方針を具体化するために必要な措置のあり方が、総合資源エネルギー調査会原子力小委員会において検討され、原子力小委員会から要請を受けた自主的安全性向上・技術・人材ワーキンググループは2015年6月に、軽水炉の安全技術・人材の維持発展に重きを置き、国、事業者、メーカー、研究機関、学会等関係者間の役割が明確化された軽水炉安全技術・人材に関するロードマップを策定した。同ロードマップでは、高経年化技術評価によって抽出された技術開発課題も検討対象とされており、これらの技術開発課題への取り組みを実施していく。

7. 劣化状況評価で追加する項目

運転開始後40年目に実施する劣化状況評価では、高経年化対策実施ガイド等により30年時点で実施した高経年化技術評価をその後の運転経験、安全基盤研究成果等技術的知見をもって検証するとともに、長期施設管理方針の意図した効果が現実に得られているか等の有効性評価を行い、これらの結果を適切に反映することとしており、「高経年化技術評価審査マニュアル」において以下の3項目を追加評価項目としている。

- ①経年劣化傾向の評価
- ②保全実績の評価
- ③長期施設管理方針の有効性評価

経年劣化傾向については、40年目の評価は30年目の評価から大きく予測が変わるものではないことが確認できた。保全実績の評価については、40年目の評価から抽出された課題はあったものの、現状保全の継続による健全性維持の観点から課題は無いことを確認した。さらに、30年目の高経年化技術評価に基づき策定した長期施設管理方針が有効であり、必要に応じて現状保全に反映されていると確認した。

以上については、評価結果を「劣化状況評価で追加する評価に係る技術評価書」にまとめる。

8. まとめ

(1) 総合評価

運転開始以来、40年を経過する高浜発電所4号炉のプラントを構成する機器・構造物について、高経年化対策に関する評価を実施した結果、大部分の機器・構造物については、現状保全を継続していくことにより、長期間の運転および冷温停止を仮定しても、プラントを健全に維持することは可能であるとの見通しを得た。

(2) 今後の取組み

今回実施した高経年化技術評価は、現在の最新知見に基づき実施したものであるが、今後以下に示すような運転経験や最新知見等を踏まえ、適切な時期に高経年化技術評価として再評価および変更を実施していく。

- ・材料劣化に係る安全基盤研究の成果
- ・これまで想定していなかった部位等における経年劣化事象が原因と考えられる国内外の事故・トラブル
- ・関係法令の制定および改廃
- ・原子力規制委員会からの指示
- ・材料劣化に係る規格・基準類の制定および改廃
- ・発電用原子炉の運転期間の変更
- ・発電用原子炉の定格熱出力の変更
- ・発電用原子炉の設備利用率（実績）から算出した原子炉容器の中性子照射量
- ・点検・補修・取替の実績

当社は、高経年化対策に関するこれらの活動を通じて、今後とも原子力プラントの安全・安定運転に努めるとともに、安全性・信頼性のなお一層の向上に取り組んでいく所存である。

以上