

プログラムの概要

この経年劣化管理プログラム (AMP) は、運転中に意図した機能損失がないことを確実にするために、原子力施設の免震システムに関するプラント特有の経年劣化管理プログラムを開発するためのガイダンスを提供する。免震システムは、建屋免震と機器免震に大別される。

経年劣化の対象として、エラストマー材料の特性変化も含める。

本 AMP は代表的なサンプルに対する機械的試験と、適切な資格を持ち経験を積んだ担当者による目視検査で構成される。試験サンプルは、軸受原位置と同じ材料で作られ、軸受原位置と同じ経年劣化条件に曝されるよう、できるだけ近い場所に設置される。静的試験と動的試験の両方が実施され、地震発生時及び発生後に、安全上重要なすべての構造物や設備が本来の機能を果たすように、振動地盤の動きを制限する軸受能力を評価する。耐震軸受の劣化を検出するための目視検査も実施する。

評価と技術的根拠

1. 経年劣化の理解に基づく経年劣化管理プログラムの範囲：

プログラムの適用範囲には、原子力アイランド構造物の免震システム、地震後の活動を実施するための免震管理棟、機器支持部の免震システムが含まれる。この AMP の対象には 3 種類の免震装置が含まれる。低減衰ゴム (LDR) 軸受、鉛ゴム (LR) 軸受、球面すべり摩擦振り子軸受である。免震システムに関連する構造部材は本 AMP の対象外であり、AMP306 に準拠して検査される。

2. 経年劣化を最小限に抑え、管理するための予防措置：

免震モニタリングプログラムは状態監視プログラムである。しかし、予防措置は(もしあれば)免震システムの製造過程で提供される。いくつかの設計では、酸化やオゾンによる劣化の影響を抑えるために、支承ペダスタルの周囲や、ペダスタル上部と上部ラフトとの間の領域を覆う保護スクリーンが設置されている。下部ラフトと上部ラフトの間には、点検保守や必要に応じて交換をするために軸受にアクセスできる十分なスペース (すなわち耐震保管庫) が設けられている。このように、予防措置には、経年劣化につながる可能性のある不利な環境条件に軸受が曝される状況を制限することも含まれている。

3. 経年劣化の検出：

供用期間中の検査(目視検査、試験、モニタリングを含む)と監視は、経年劣化を検知するために不可欠な要素である。耐震軸受の主な検査方法は目視検査であり、代表的なサンプル(存在する場合)の機械的試験によって補完される。いくつかの加盟国では、設置された軸受のネオプレン材料から試験サンプルを小径コアの形で抽出し、化学分析と機械的試験が行われている。

耐震軸受に対しては、亀裂、材料損失、硬化に関するモニタリングが行われている。耐震軸受はまた、湿度、照射硬化、持続的な振動負荷、限界外温度による免震機能の低下や喪失に関しても検査される。さらに、建設中に実際の支承のすぐ近くに置かれた耐震軸受の試験サンプルを用いて、せん断弾性率と材料減衰の試験も実施される。

モニタリングされるパラメータは、関連する国内の民間規格、基準(例えば参考文献[1-2])をベースにし、特にプラント設計限界で想定される経年劣化の進展に基づいたものである。免震システムの具体的な設計にも依存するが、モニタリングされるパラメータの典型的なものとしては、静的せん断弾性率、動的せん断弾性率、静的摩擦、動的摩擦、ショア硬度、歪み、破断強度(エラストマー)、破断時伸び(エラストマー)、圧縮荷重後の

残留変形、水平剛性 (静的)、垂直剛性 (静的)、水平剛性 (動的)、垂直剛性 (動的)、水平周波数、垂直周波数、エラストマーの補強鋼板からの剥離、腐食などである。

せん断弾性率は、許認可基準で設定された間隔で、サンプル軸受に対してせん断弾性率試験を実施し測定される。定期試験の頻度は、さまざまな試験結果によって異なる。一般的に、硬化が進展している場合は頻度が高くなるが (例えば 10 年)、軟化が発生している場合にはより高頻度で実施される。

目視検査の頻度は、免震システムの安全上の重要性和その状態によって異なる。一般的に、目視検査は特定の間隔 (例えば、構造物モニタリング[3]と整合させるために 5 年毎) で、軸受原位置で一定の割合で実施される。目視検査は、エラストマーの亀裂など、酸化やその他の表面劣化メカニズムの視覚的影響を判断するために実施される。目視検査の範囲には、上部ラフトと下部ラフトの間の空間 (すなわち耐震保管庫) の一般的な検査も含まれる。これは、耐震軸受の健全性と長期性能に悪影響を及ぼす可能性のある環境条件の発生を検出するために行われる。洪水や火災のような例外的な事象については、その重要性や種類に応じて (目視以上の) 特別な検査が必要となる場合もある。巡回検査 (定量化された基準なし) は、現状では検出されない漏水/シーリングのような例外的な事象を検出するため、すべての軸受について 5 年毎に実施される。

摺動面 (もしあれば) は、摩耗や腐食、破片や汚れによる著しい材料損失がないか検査される。

4. 経年劣化のモニタリングと傾向分析：

経年劣化管理プログラムは、以下の要素から構成される。

- 目視検査：目視検査は免震システムの状態を点検することによって実施される。これらの検査は、軸受原位置の状態を把握し、その状態の劣化を検知することを目的としている。この検査は、原位置の軸受の状態を把握し、またその劣化を検出することを目的としている。補完のため、選択された軸受の歪みとショア硬度の測定も実施される。
- せん断弾性率試験：免震システムの試験は定期的に行われ、エラストマー材料の静的及び動的せん断弾性率を測定し、これらの値が運転期間を通じて設計基準内にあるかどうか判断される。これらのサンプルは、軸受原位置と同じ条件で耐震保管庫に保管される。得られた試験結果は傾向分析され、外挿のため用いられる。外挿により得られた値は、許認可基準文書に記載された設計値と比較される。
- 下部ラフト検査：耐震ペデスタルを支持する下部ラフトの定期的な目視検査は、ラフトが健全であること、及び耐震保管庫への漏水が AMP306 に準拠して要求されている許容範囲内であることを確認するために実施される。
- 重大自然現象後の検査：竜巻、洪水、地震、ハリケーン、局地的な激しい降雨など重大な自然現象の発生後、影響を受けた耐震軸受、下部ラフト、擁壁、及び上部ラフトの特別検査が実施される。

5. 経年劣化の緩和：

本 AMP は状態監視プログラムであり、経年劣化の影響を緩和するための一般的な推奨も特定の推奨も含んでいない。しかし、観察または検出された劣化の進行が許容基準を超える場合、詳細なモニタリングと傾向分析、及び劣化の根本原因を緩和するため、あるいは機能への影響を評価するための構造解析に基づき、プラント特有の対策を講じることもある。一例として、免震特性の変化が設計範囲を超えた場合、システムを再評価し、十分な安全裕度が実証できない場合は、免震構造を (可能であれば) 交換することもあり得る。

6. 許容基準：

経年劣化管理プログラムでは、意図した機能が失われる前に是正措置の必要性が特定されるように、免震システム用に選択された許容基準に基づいて、資格を有する技術者により検査結果を評価することが求められている。この基準は、各国の民間規格や基準、設計基盤の規格や基準に準拠し、該当する場合には、業界やプラン

トの運転経験を考慮して導き出される。例えば、いくつかの加盟国の慣行では、免震システムの機械的特性(すなわち、力 - 変位の関係)は、原子炉プラント寿命の間、解析と設計に使用された値から(95%の信頼性で)最尤推定値から $\pm 20\%$ 以上変化してはならないと推奨している[11]。

評価は一般に、軸受原位置の目視検査や、原位置と同じ条件下で保管されたサンプルに対する様々な所定の試験を実施することで達成される。推奨される評価方法と許容基準の例として、参考文献[4]などがある。免震建物の維持管理方法及び管理値については、「免震建物の維持管理基準、日本免震構造協会(2007)」[5]が参照できる。

目視検査については、亀裂、変色、漏えい等による劣化がないことを結論付ける適格な工学的評価に基づいて許容基準が設定される。サンプル試験については、許容基準は設計段階で用いた限界値に基づいて決定される。試験結果は、設計基準で用いた限界値と比較される。

条件が許容基準を満たさず劣化の可能性がある場合、更なる評価のためプラント是正措置プログラムが検討される。

7. 是正措置：

確立された基準を満たさない検査結果が得られた場合には、評価が行われる。評価により修理または交換の必要性が明らかな場合、是正措置が実施される。この措置には、劣化の根本原因を軽減するための対策なども含まれる。同措置に関してプラント特有の要求事項がない場合、参考文献[6]の要求事項を用いて是正措置を実施することも可能である。

8. 運転経験のフィードバック及び研究開発結果のフィードバック：

この AMP は、業界全体の一般的な経験に対応する。関連するプラント特有の運転経験は、AMP がプラントに適切であることを確証するため、プラント AMP の開発において考慮される。プラント及び業界全体の運転経験及び研究開発(R&D)の結果を定期的に評価するフィードバックプロセスを実施し、必要に応じて、プラント AMP を修正する、又は経年劣化管理の継続的な有効性を確保するための追加措置(例えば、プラント特有 AMP を新たに開発する)をとる。

外部の運転経験の適切な情報源としては、参考文献[7]に加えて、CHECWORKS ユーザーグループ(CHUG)、オーナーグループ、OECD-NEA、WANO、INPO、IAEA 及び NRC のジェネリックコミュニケーションがある。

免震に関する運転経験は、日本の福島第一原子力発電所と第二原子力発電所、フランスの Cruas 原子炉プラント、南アフリカの Koeberg 原子炉プラント、英国の先進ガス冷却炉(AGR)フリート、Hinkley ポイントに建設中の EPR2 基から得ることもできる。

柏崎刈羽原子力発電所(KKNPP)が直面した2007年の新潟県中越沖地震に対応して、日本の電力会社は緊急時運転用建屋の免震化を決定した。その結果、現在では日本の原子炉プラントの敷地内に免震緊急時対応センターが建設されている。2011年3月に東北地方太平洋沖地震が発生した後、福島第一原子力発電所と第二原子力発電所では、免震重要棟内に設置された緊急対策本部が中心となって対応にあたった。免震建屋は、その後多数回にわたって発生した余震の脅威から職員を守る上でも効果的であった[10]。

フランスでは、代表的なサンプルが不足していたため、新しいサンプルを製造することとなった。そこで、新しいサンプルの状態が軸受原位置を代表するものであることを確認するため、加熱によって劣化加速が実施された。すべての試験結果は、硬化によるせん断弾性率の増加を示したが、この軸受の硬化がプラントの安全性に及ぼす潜在的な影響(システムのグローバル周波数の増加)のため、事業者は、福島第一原子力発電所事故後の再評価に基づく要件を含む耐震要求を満足するのに十分なマージンが残っていることを確認した。Cruas 原子炉プラントでは洪水が発生し、耐震保管庫の軸受サンプル材が影響を受けたが、軸受自体は影響を受けなかった。その後の検査で、水との接触による腐食の発生が確認された。この経験は、軸受サンプル材の保管要件の改善につながった。

南アフリカでは、建設当初に製造されたサンプルのせん断弾性率試験を長年にわたって実施した結果、硬化後に軟化が発生することが明らかとなった。この軟化現象は、ポリマー材料の分子レベルで起こる様々な重合反応が抑制されたことで発生した可能性もある[8]。

英国では、先進ガス冷却炉 (AGR) のコンクリート格納容器 (プレストレスコンクリート圧力容器 - PCPV) は、ネオプレンまたはゴム製の軸受パッド層によって主基盤から隔離されている。PCPV の軸受が設置される場所の運転条件により、一般的に乾燥した受動的な環境、すなわち紫外線、湿潤、大気条件、または著しい照射に曝されない環境であることがわかっている。従って、これまでの英国の運転経験から、PCPV の軸受は経年劣化の高リスクに曝されないことが確認されている[9]。目視可能な PCPV 軸受パッドの代表的なサンプルが、英国の AGR フリート全体で検査された。対象を AGR に限定した監視試験により、軸受構成材料の長期的な性能は概ね良好に保たれることが確認された。古い AGR プラントの 1 つで、ネオプレン材料から数本の原位置サンプルが小径コアの形状で採取され、それらに対して化学分析と機械的試験が実施された。この結果、英国の AGR フリート全体を通じて、軸受の機械的硬度特性や材料組成に、顕著な変化は見られないことがわかった[9]。

英国の Hinkley ポイントで現在建設中の 2 基の EPR ユニットの二次格納容器囲い建屋 (Secondary Containment Enclosure Building : SCEB)、すなわち一次格納容器ドームの周囲に二次格納容器を設置する構造を備えている。Sizewell B の SCEB は、機械加工された鋼部品とエラストマー製ディスクから成る 85 個のポットまたは球状軸受で支えられている。軸受は受動的で永久的な部品であり、交換は困難である。軸受は、地震時の二次ドームの動的応答を補正する役割を果たし、SCEB に適用されるすべての荷重に対応するように設計されている。軸受は、一般的に乾燥した受動的な環境、すなわち、紫外線、湿潤、大気条件、著しい照射、潤滑液に接する環境に曝されない。軸受の検査は、SCEB の検査プログラムの一環として、軸受原位置に限って 5 年毎の定期的な目視検査が行われる。しかし、軸受外側を容易に観察することができず、また軸受はアクセスが困難な場所にあることが多いため、目視検査にも限界がある。現場で同等の環境で保管されているサンプルを対象とした機械的試験は実施されていない。

この AMP に関連する国際及び国内の研究開発活動は、参考文献[11]でまとめられている。閲覧可能なすべての研究開発情報は、本 AMP の改訂時に検討を行った

9. 品質管理：

管理統制、品質保証手順、レビュー及び承認プロセスは、各国の規制要件 (参考文献 [4,8]など) に準拠して実施されている。

References

- [1] NF EN 15129 Anti-seismic devices, January 2010
- [2] RCC-CW Rules for Design and Construction of PWR Nuclear Civil Works, Edition 2017
- [3] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI349-3R-02, United States, 2018
- [4] AFCEN PTAN French Experience and Practice of Seismically Isolated Nuclear Facilities, France 2015
- [5] JAPAN SOCIETY OF SEISMIC ISOLATION, Maintenance Standard for Seismically Isolated Buildings, Japan, 2007
- [6] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 10 CFR Part 50, Appendix B, Quality Assurance Criteria for Nuclear Power Plants and Fuel Reprocessing Plants, National Archives and Records Administration, USNRC, Latest Edition.
- [7] IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.5, “Ageing Management of Concrete Structures in Nuclear Power Plants” Vienna, Austria, 2016.
- [8] National Nuclear Regulator (2008), Quality and Safety Management Requirements for Nuclear Installations. RD-0034, Rev 0. Centurion

- [9] ENSREG Topical Peer Review of Ageing Management, “UK National Assessment Report”, EU, 2017.
- [10] Japan Nuclear Energy Safety Organization (JNES). (2014). "Proposal of technical review guidelines for structures with seismic isolation." JNES-RC-2013-1002, Tokyo, Japan.
- [11] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (USNRC). (2019). “Technical Considerations for Seismic Isolation of Nuclear Facilities”, NUREG/CR-7253, Washington, DC. (ML19050A422).