

AMP 311 格納容器モニタリングシステム(2018 年版)

プログラムの概要

IAEA Safety Guide for Ageing Management for Nuclear Power Plants[1]は、「プラントの安全性を維持するためには、SSC の経年劣化の影響を検出し、それに伴う安全マージンの減少に対処し、健全性や機能性の喪失が発生する前に是正措置を講じることが非常に重要である」と指摘している。同文書では、経年劣化の影響に適切に対処する上で、「構造物の経年劣化を理解する」ことが必要とも説明している。

この経年劣化管理プログラムでは、グラウト付きテンドンでプレストレスをかけ、RG 1.90[2]のオプション「A」の考え方に準拠して定期的に健全性を検査する格納容器の経年劣化に対処するために必要と判断される装置の供用期間中検査に関するガイダンスを提供している。

フランスなどいくつかの加盟国では、グラウトプレストレスシステムを備えたコンクリート格納容器の実際の状態は、恒久的なモニタリングシステムでモニタリング・傾向分析され、これによりモニタリングシステム自体の性能が評価されている。このようなモニタリングシステムは、技術的概念からも「格納容器の一部」とみなすことができる。この最後に記述した理由から、本 AMP はモニタリングシステムそのものを扱うものであり、AMP302 が適用されるコンクリート構造物自体に適用できるものではない。

標準的なモニタリングシステムには、以下のようなものがある：

- 振動ワイヤーひずみゲージや温度計のような組込み機器（熱電対、抵抗プローブなど）。これらのセンサーは、運転中のアクセスが不可能である。
- 接合部ボックス、電気キャビネット、伝送ケーブル
- 振り子式またはインバー式ワイヤー伸び計、リニア可変差動トランス (LVDT) などの表面センサー
- オンラインモニタリングシステムを使用する場合は、測定値が分析のために保存されたデータベースとリンクされたデータロガー
- ロードセルやダイナモメーターなどのプレストレステンドンセンサー

各システムは、環境条件や運転条件によって異なった経年劣化メカニズムを受ける。アクセス可能なシステムは標準的でごく一般的な手順に準拠して保守することができるが、組み込みセンサーについては、建設後の予防措置も可能な検査も存在せず、是正措置のみで対処する。このような組み込みデバイスの場合、経年劣化管理アプローチは、実際の稼働率のフォローアップに基づいており、デバイス数が最小になった場合はセンサーの追加が必要となってくる[2]。組み込み温度プローブの故障は、建物内外の環境温度測定によって補完できる。組み込み伸び計は、参考文献[3]で紹介されている LVDT 搭載システムのような表面伸び計で代替できる。

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：

本 AMP は、モニタリングシステム自体の経年劣化管理を扱うものであり、AMP302 が適用される格納容器構造物を扱うものではない。このモニタリングシステムについては、参考文献[4]、又は参考文献[5]の第 8 章に記載されている。

例えば、フランスでは、モニタリングシステム全体 (実際には最小限のセットで、参考文献[3,5]に記載されている「Optimum Surveillance System」の略で「OSS」とも呼ばれる) の一部を縮小したものが、モニタリングシステムが機能するために必要であると考えられている。しかし、この AMP は、いわゆる OSS だけを対象としているのではなく、より広範な情報源からの恩恵を得るために、その時点で機能しているすべての部位を対象としている。最小限セットは、是正措置を開始するための基準として使用される。

フランスでの経験に基づくこの AMP の適用範囲には、以下の種類のモニタリング機器が含まれる。

- 円筒形の壁とドームに埋め込まれた振動ワイヤーひずみゲージ (VWSG) (コンクリートのひずみを測定する)
- 温度に伴う体積ひずみを評価し、長期的なひずみ傾向分析のため測定値を調整するための温度計
- 水平 (あるいは鉛直) 変位モニタリング用の振り子
- 機器ハッチと開口部の半径方向と円周方向の変位を測定するための線形可変差動変圧器 (LVDT)
- 格納容器高さ変動モニタリング用のインバー式ワイヤー伸び計
- プレストレストendonセンサーは、主にワックスで保護された非接触テンドンのプレストレス力の変化を測定するために使用される。

2. 経年劣化を最小限に抑え、管理するための予防措置:

- 振動ワイヤーひずみゲージ (VWSG) の予防措置: 運転中に VWSG の経年劣化を最小限に抑え、抑制するための予防措置はない。ただし、建設中は、鉄筋の取り扱いやコンクリートの打設からゲージとその接続システムを保護するために、適切な保護措置を講じることはある。
- コンクリートのひずみおよび温度計測専用の電気システムの腐食を防止するための予防措置 (アクセス可能な装置: ケーブル、データロガー、接合部ボックス): これらの装置は電気信号の伝達に影響を与える腐食の可能性があるため、プラグ接続部と端子部に防錆スプレーを使用する (頻度 2 年)。
- 振り子とインバー式ワイヤー伸び計の腐食を防ぐための予防措置 (アクセス可能なシステム: ワイヤ、読み取り台、定着部、ワイヤーの振動を減衰させるためのタンク): 振り子システムについては、ワイヤーの振動低減のために設置されたタンクの腐食を防止するため、特別な注意が払われる。減衰液は、液面点検時など定期的に清掃する。
- 周波数測定装置の予防措置: 経年劣化メカニズムは酸化である。周波数測定器の保管状態をチェックする (乾燥状態)。

3. 経年劣化の検出:

VWSG における経年劣化の検出 (各国規制で定められた頻度): ゲージ自体の経年劣化は、振動ワイヤーの減磁、範囲外のひずみ測定によるワイヤーのたるみ、またはワイヤーやコイルの酸化によって引き起こされる可能性がある。そのため、その機能を果たす能力を確認した上で、グローバルな性能試験が実施される。

- すべてのゲージは定期的に試験され (周波数測定)、測定のチェックは専用手順に基づいて行われる。
- 1 つのコイルが故障した場合のリスクをカバーするために、2 つのコイルゲージを使用することができる。
- ゲージの応答をスクリーニングし、ノイズの多い信号から情報を取り出すために、特定の処理を使用することができる[6]。
- ゲージ (および温度計センサー) における経年劣化の検出も、結果分析に基づいている。従来の結果との比較で、得られた結果に「一貫性がない」と判断された場合、センサーは公式的に「使用不能」と決定づけられる。
- 各回の定期検査終了時に、すべてのゲージが「使用停止」または「使用可能」と決定づけられる (経年劣化を検出するために試験と分析の両方が実施される: 分析については 6 節と 8 節を参照)。

コンクリートひずみおよび温度測定専用の電気システム (ケーブル、接合部、ボックス、キャビネット、データロガー) における経年劣化の検出 (各国規制で定められた頻度)

- コンクリート内に設置されたモニタリングシステムの部品は、ポリマーの劣化、電氣的絶縁の損失、接点の酸化、または可動部の摩耗によって故障する可能性がある。そのため、その機能を果たす能力を確認するために、性能試験が実施される。
- 周波数測定装置は、比較ポイント (計量法) を用いて検証される。計量基準が満たされない場合は、校正が行われる (電気部品試験)。
- 振り子及びインバー式ワイヤーにおける経年劣化の検出 (各国規制で定められた頻度)
- 経年劣化のメカニズムは酸化である。
- 振り子及びインバー式ワイヤーの機能は、測定システムを清掃した後に確認する (上記の 2 節を参照)。ワイヤーは、いかなる材料によっても拘束されていないことが求められる。
- 腐食を検出するため、アクセス可能な場所で検査が行われる。

4. 経年劣化のモニタリングと傾向分析:

ゲージと温度センサーの場合、モニタリング測定結果は、センサー故障を検出するために分析される主要データである (6 節と 8 節を参照)。これらのデータは、電氣的な付加機器の問題を検出するためにも使用される。この機器のテスト機能も使用される。

5. 経年劣化の緩和:

主な緩和措置は、故障したと考えられる部位の交換である。振り子とインバー式ワイヤーについては、以前の測定精度を維持するために、交換後に校正が行われる。

ゲージの「交換」について、考慮すべき最初の緩和措置は、設計段階でのセンサーの冗長的な設置である。運転中の格納容器では、適格な表面センサーを追加設置することができる。

6. 許容基準:

すべての装置の許容基準:これらの基準は、装置タイプに基づく計量基準、又は 3 節で既に議論した基本的な基準である。

ゲージが故障した場合の交換のための許容基準:ゲージ故障時の交換のための許容基準は、要件 (例えば, OSS[3,5]) に準拠して最小の利用可能なセンサー数を確保することである。最小のセンサー数は、格納容器のタイプ (ライナーの有無) に応じて、プラントのプログラム文書で規定されている。一例として、フランスにおける、この「最小の運転モニタリング」システム規定の基本原則を以下に示す。

- 新たな故障が発生した場合に測定の継続性を保証できるよう、最低限の冗長性が確保される (8 節に記載されているように、測定されたひずみの値が有効でない場合、センサーは故障したとみなされる)。
- OSS センサーの位置は、結果を解釈し理論値と比較できるように、標準的な場所に設置されている。
- 垂直壁、ドーム、ガセットはモニタリングされている。

7. 是正措置:

是正措置は、現在のモニタリングシステムが故障したと考えられる場合に、新しいモニタリングシステム部位を設置することである。新しい部位は、要求される精度と運転条件を考慮して適格なものを設置する。利用可能なセンサーが専用文書に規定された条件を満たすのに十分でない場合には、この交換は必須である。

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 がプラントにとって適切であることを確証するために、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、研究開発 (R&D) 結果を定期的に評価するための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 を修正するか、又は経年劣化管理の継続的有効性を確保するための追加措置 (例えば、新たなプラント特有 AMP の開発) 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[5,7]のような原子炉プラントにおけるコンクリート構造物の経年劣化管理がある。

フランスの運転経験から、2 種類のレポートを用いることが適切であると考えられる。すなわち 1 つ目は、モニタリングシステム (ひずみセンサー) からの測定データを把握するものである。2 つ目 (後ほど記載される) には、データ解析と格納容器の構造能力と健全性に関する結論が含まれている。センサー不足を含むデータの整合性にも言及している。整合ある議論は、利用可能な記録データおよび物理的挙動 (不連続性または勾配変化については明確に説明され文書化されている) に基づいている。

コンクリートに埋め込まれた VWSG の長期ドリフトの可能性 (10 年の運転期間を超える) に関する評価は、参考文献[8]に示されている。

フランスでは、ひずみまたは変位をモニタリングするための最小数の測定点が要求されている。これらのセンサーは、最適監視システム (Optimum Surveillance System:OSS) の一部と見なされている。故障時には、OSS に属するセンサーが交換される。センサーが振り子やインバー式ワイヤーひずみ計であれば、類似装置で簡単に交換できる。しかし、組み込まれた VWSG が故障した場合は、専用の表面ひずみゲージが代わりに設置され、VWSG と一致した測定値を提供することができる (時間的な連続性が達成される)[5]。

定期的なメンテナンスにより、振り子やインバー式ワイヤーの予期せぬ故障を抑えることが可能である。VWSG の場合、フランスの NPP における現在の故障率は年間約 1% である (約 3000 個のセンサーを対象としたものである)。初期故障 (初年度中) を考慮すると、故障率は 2%/年に増加する。新規設置の場合、故障率はより低いレベルにある。これはセンサーの製造技術の向上と、センサーの取り付け方法の改善のためと考えられる。しかしながら、全体として、フランスの格納容器に設置された VWSG の約 3 分の 1 は、もはや機能していない (フランス PWR の平均年齢: 約 35 年)。

将来起こりうるセンサーの故障を軽減するため、EDF は、規制要件ではないにもかかわらず、フランスのすべての格納容器に表面ひずみゲージを設置することを決定した。表面ゲージの OPEX (信頼性、計測性能) は満足のいくものであると考えられている。表面計で測定されたコンクリートのクリープの大きさと速度は、VWSG の記録と一致している。定期安全レビューの結果、いくつかのセンサーが最小限のセット数を満たすために交換された。しかし、この AMP を使用することで、測定の継続性が確保されている。センサーの故障原因は依然として不明であり、センサーの寿命は時間とともにランダムな分布法則に従うようであるが、平均故障率は年間約 2% である。フランスのすべてのコンクリート格納容器に約 3000 個のセンサーが埋め込まれているが、故障率は時間とともにほぼ一定である。

EDF の温度とひずみのモニタリング用光ファイバーセンサー (分散型ブリルアンおよびラマン技術) OPEX: 200 メートルの光ファイバーセンサーが EPR Flamanville 3 格納容器内に設置された。設置段階では成功と考えられてきた。現在の課題は、主にデータ処理と VWSG との比較で、光ファイバーがモニタリングシステムとして適していることを確認することである。VERCORS のモックアップには、2km 長の同じ光ファイバーが埋め込まれているが、故障率はまずまずである (故障率約 30%)。数年間の運用の後、この光ファイバーシステムによって提供された測定値が、科学者グループらと共有されている[9,10]。

新しいセンサーの検証 (ひずみと温度) に特化した研究開発プログラムが EDF によって開始され、新しいデザインの表面センサーがコンクリート格納容器の外面に設置される資格を得た。さらに、OSS に含まれている埋め込みセンサーの不具合を想定して、すべての格納容器壁にこれらの表面センサーを取り付けることが決定された。この利点は、かなり長い期間にわたって表面センサーの測定値と埋め込み型 VWSG の測定値を比較できることである。そして、VWSG が機能しなくなれば、表面伸び計の信頼性が高まる。OSS 装置の性能と測定品質は、運転終了まで保証される。

チェコ共和国の Temelin 原子炉プラントには、モニタリングシステムを装備したプレストレストコンクリート製格納容器が 2 基ある。コンクリートに埋め込まれたロシア製モニタリングシステム (NDS) センサーのいくつかは、機能していなかったり、不安定であったり、測定データが範囲外であったりする。しかし、モニタリングシステムは最低限の機能要件を満たし、十分なデータを提供している。NDS のセンサーは交換できないが、ÚJV Řež, a. s. はコンクリート表面に測定

システムを設置してこれを補うプロジェクトに取り組んでいる。このプロジェクトの一環として、新しい光ファイバーセンサーが設置され試験された。この結果、光ファイバーセンサーは将来の格納容器のモニタリングシステムに使用される予定である。

モニタリング装置は使用中に故障することがあり、可能な限り交換される。沿岸の環境が非常に厳しい地域では、インバー式ワイヤーの劣化が加速され、3~5 年ごとに交換が必要になることもある。EPRI と ESKOM は、インバー式ワイヤーを交換するために、ロングゲージの光ファイバーセンサーに基づくシステムを設置した。このセンサーは ILRT テストで試験され、その結果既存インバー式ワイヤーと非常に良い相関を示すことが明らかとなった[11]。

9. 品質管理:

サイトの品質保証手順、レビューと承認プロセス、および管理統制は、各国の規制要件 (例: 10 CFR Part 50、Appendix B[12]) に準拠して実施されている。

References:

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Ageing Management for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-2.10, IAEA, Vienna, 2003.
- [2] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, In-service Inspection of Prestressed Concrete, NRC Regulatory Guide 1.90, USNRC, 2012.
- [3] SIMON A., OUKHEMANOU E. and COURTOIS A. Structural monitoring of prestressed concrete containments of nuclear power plants for ageing management, TINCE conference, Paris, France, 2013.
- [4] RCC-CW Rules for Design and Construction of PWR Nuclear Civil Works AFCEN; 2017 Edition.
- [5] OECD/NEA, “Bonded or Unbonded Technologies for Nuclear Reactor Prestressed Concrete Containments”, NEA/CSNI/R, 2015.
- [6] SIMON A. and COURTOIS A., Structural monitoring of prestressed concrete containments of nuclear power plants for ageing management, SmiRT 21 conference, New Dehli, India, 2011.
- [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Ageing Management of Concrete Structures in Nuclear Power Plants (IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.5), 2016.
- [8] SIMON A., COURTOIS A., CLAUZON T., COUSTABEAU E. and VINIT S, Long Term measurement of strain in concrete: durability and accuracy of embedded vibrating wire strain gages, SMAR conference, Antalya, Turkey, 2015.
- [9] MARTINOT F. MARTIN G. HENAULT J.-M., GAUTIER M., THUAULT C., BECK Y.L and COURTOIS A., Optical Sensors in Concrete of the EPR Flamanville 3 Containment Building, TINCE conference, Paris, France, 2014.
- [10] OUKHEMANOU E., DESFORGES S., BUCHOUD E., MICHEL-PONNELLE S. and COURTOIS A., VerCoRs Mock-Up: Comprehensive Monitoring System for Reduced Scale Containment Model, TINCE conference, Paris, France, 2016.

- [11] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Program on Technology Innovation: Retrofitted Sensors for Nuclear Containment Structures. EPRI, Palo Alto, CA: 2016. 3002007819.
- [12] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 10 CFR Part 50, Appendix B, Quality Assurance Criteria for Nuclear Power Plants, Office of the Federal Register, National Archives and Records Administration, USNRC, Latest Edition.