

AMP 114 流れ加速型腐食及びエロージョン(2021 年版)

プログラムの概要

このプログラムの目的は、流れ加速型腐食 (FAC) 及びエロージョンによる肉厚減少リスク、パイプ破裂のリスクを適切に管理することである。本 AMP は、単相及び二相の高エネルギー流体を含むすべてのラインの構造健全性が維持されることを保証する。

FAC は、水質、流体力学、材料組成、部品の種類といった複数のパラメータに依存する複雑な現象である。FAC には、全面腐食の電気化学的側面に加え、質量移行及び運動量移行の影響が関与している。FAC は、金属表面から保護性酸化皮膜が継続的に除去されるという特徴があり、その酸化皮膜は、目に見えない薄い不動態皮膜から、目に見える厚い腐食生成物皮膜まで様々である。全面腐食の典型的な反応では、時間の経過とともに徐々に厚くなる保護性酸化皮膜が形成される[5]。保護皮膜が厚くなると、反応物質は増大する皮膜の厚みをすべて通過しなければならないため、溶液／酸化皮膜または酸化皮膜／金属の界面におけるその後の腐食反応がより困難になる。

FAC は、化学パラメータ (pH、溶存酸素濃度、第一 Fe イオン濃度、二次水処理)、流体力学的パラメータ (流速、壁面の粗さ、形状)、温度、及び冶金学的パラメータ (主に Cr、また Mo、V、Cu が有用) の影響を受ける。

この状況における腐食速度の動力学は、一般的に放物線則に従う。(すなわち、肉厚の変化は時間の平方根 ($\sqrt{t}$) に比例する。) FAC の場合、酸化物の定常流に伴う質量移行による除去／溶解のため、限られた薄い保護皮膜が形成される。その結果、肉厚の変化は時間に比例する線形腐食動力学となる。保護皮膜が除去された領域では局部腐食が発生する。この腐食は、溶液に研磨作用のある固形粒子が含まれている場合、さらに加速される可能性がある。

このプログラムには、(a) 重要箇所を特定するための分析、(b) これらの箇所の減肉度合を判定するための限定的な基本検査、(c) 予測の確認または必要に応じた補修または部品交換のための追跡検査、が含まれる。FAC の経年劣化管理及び検査に関する追加の必須要件は、該当する国家の規制及び規格要件によって規定される場合がある [6-13]。

適切な考慮のもと、このプログラムは、各種のエロージョンメカニズムの原因を排除する代わりに定期的なモニタリングが用いられる状況において、FAC 以外のメカニズムによる肉厚減少も管理することができる。

評価と技術的根拠

1. 経年劣化の理解に基づく劣化管理プログラムの範囲:

FAC 経年劣化管理プログラムの範囲には、高エネルギー流体 (二相流及び単相流) を含むすべての炭素鋼配管の腐食による構造健全性が維持されることを保証するための手順または管理統制が含まれる。また、これらの高エネルギーシステムやその他部品 (給水加熱器シェルなど) の圧力を保持する弁本体も対象となる。また、このプログラムには、キャビテーション、フラッシング、液滴衝突、固形粒子衝突などのさまざまな水システムにおけるエロージョンメカニズムによる肉厚減少が発生しうる部品も含まれる。

2. 経年劣化を最小限に抑え、管理するための予防措置:

FACとエロージョンメカニズムを低減するための効果的な予防措置には、pH(高いpH値)と溶存酸素濃度を制御するための水質の徹底したモニタリング[15-16]、乱流と衝突効果によるバルク流速の影響を低減するための配管構成と流体力学的条件の設計、FACに耐性のある材料の選択(例えば、Cr含有量が高いもの、一部の加盟国では、Cr含有量が0.15%を超える材料が使用されている。)などがある。

3. 経年劣化の影響の検出:

FACによる主な経年劣化の影響は、配管及び部品の肉厚減少である。経年劣化管理プログラムでは、肉厚を測定することで、肉厚減少による材料損失が配管及び部品の意図された機能に及ぼす影響を監視する。影響を受けた表面の目視検査(VT)は、実用的にFACが発生している場所を特定するのに有効な手段である。超音波及びX線検査技術は、肉厚減少の検出と定量化に使用される。このプログラムには、運転状況や特別な考慮事項によって示される影響を受けやすい箇所の特定も含まれる。民間ガイドラインに準拠して、最も影響を受けやすい箇所を基に、代表的な部品のサンプルが選定され、肉厚測定の頻度も決定される。これにより、部品健全性が損なわれる前に劣化を特定し、緩和することが可能になる。検査の範囲とスケジュールにより、意図された機能が損なわれる前、または規定の許容限界を超える前に、肉厚の減少を確実に検出することができる。電力中央研究所が策定したNSAC-202L-R4などの民間規格及びガイドラインでは、(a) 重要箇所を特定するための分析の実施、(b) 限定的な基準検査の実施によるこれらの箇所における減肉の程度を特定、(c) 予測の確認のための追跡検査の実施、または必要に応じた部品の修理または交換、といった推奨アプローチが提示されている。

エロージョンメカニズムについては、プラント特有の経験及び業界の運転経験に対応する是正措置の状況評価に基づいて、影響を受けやすい箇所を特定する。EPRIは、潜在的な損傷箇所を特定するためのガイドラインを提供している[18]。

4. 経年劣化の影響のモニタリングと傾向分析:

FACは複雑な現象であるため、影響を受けやすい箇所と金属損失の速度を正確に、かつ保守的に予測・監視し、肉厚が許容最小値を下回らないようにする必要がある。

- 予測コンピューターコード、例えば CHECWORKS [19,20]、COMSY [21,22]、BRT CICERO [23]、ToSPACE [24]、RAMECなどは、プラント特有のデータに基づいてFACの影響を受けやすいシステムにおける部品劣化を予測するために使用することができる。ただし、材料、流体力学、形状、運転条件(pH、温度、圧力など)などのプラント特有のデータがすべて十分に正確に把握されていることが条件となる。このコンピューターコードは、多数のプラントから得られたデータを使用して検証及び基準化されていると考えられている。このような予測コードの結果に基づいて策定された検査スケジュールは、検査と検査の間の構造健全性が維持されるという妥当な保証を提供する。運転経験からのフィードバックは、コンピューターコードの継続的な検証に使用される。
- 運転条件が不明確である、または形状がモデル化できないなどの理由で予測計算が不可能なFAC感受性配管、弁本体、その他の部品については、運転経験、リスク分析、または技術的判断に基づいて検査対象の部品が選択される。少なくとも1回は検査済みの部品については、傾向分析により劣化の予測可能性が得られる。すなわち、観察された肉厚減少に基づいて次の検査日が決定される。

- プログラムには、監視頻度を調整し、補修または交換のスケジュールを立てるために、部品の残りの耐用年数を予測するための肉厚測定値の傾向分析が含まれている。検査結果は、状態評価の範囲における仮定が依然として有効であるかどうかを判断するために評価される。

いずれの場合も、肉厚減少の範囲が適切に判断されて意図した機能が損なわれないことが保証され、是正措置が明確化されるように、追加検査が必要かどうかを判断するために検査結果が評価される。

出力向上が実施された後、または流体力学的条件や運転条件に影響を与える可能性のあるその他の変更が行われた後には、肉厚減少率の予測値が変更される可能性がある。肉厚減少率は、出力向上条件またはその他の新たな条件に準拠して、予測用コンピューターコードで更新される。その後の現場測定値は、予測された肉厚減少率の較正または基準化するために使用される。

5. 経年劣化の影響の緩和:

実際的な場合、FAC 及びエロージョンに対する効果的な緩和方法及び技術には、以下が含まれる。

- a) 水質の pH 及び溶存酸素濃度を制御する (ただし、これは常に有効であるとは限らず、肉厚減少率を低減する目的で pH を変化させると、部品の他の性能に影響を与える可能性がある)。
- b) 影響を受けた配管及び部品を修理または交換する。交換用鋼材の最低 Cr 含有量を増加させるなど、FAC により耐性のある材料を使用する。
- c) 構造または部品の経年劣化を制御するために、運転パラメータまたは部品の設計を変更する。

6. 許容基準:

検査結果は、予測コンピューターコードまたは傾向分析 (本 AMP の 4 節を参照) に入力され、運転サイクル数または部品が最小許容肉厚に達するまでの残存時間を算出する。計算により、次の定期検査前に部位が最小許容肉厚に達することが示された場合、部品は修理、交換、または再評価される[25]。

7. 是正措置:

運転前に、許容基準を満たさない部品は再評価、修理、または交換される。長期的な是正措置には、運転パラメータの調整や FAC に耐性のある材料の選択 (5 節を参照) が含まれる可能性がある。

しかし、摩耗のメカニズムが特定されていない場合、FAC 耐性材料はすべてのエロージョンメカニズムに耐性があるわけではないため、交換された部品は検査プログラムとして残される。さらに、炭素鋼配管部品が FAC 耐性材料に交換された場合、直下流の感受性の高い部品は、「入口効果」による摩耗の増加を特定するために監視される。

エロージョンメカニズムについては、原因を排除するための長期的な是正措置として、運転パ

ラメータの調整や、場合によっては部品の幾何学的設計の変更が含まれる可能性があるが、これらの是正措置の有効性は検証される。エロージョンメカニズムに対して完全に耐性のある材料は存在しないため、代替材料に置き換えられた部品については、定期的なモニタリング活動を継続する。

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:

本 AMP は、業界全体の一般的な経験に対応している。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認するために、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と研究開発 (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、プラント AMP を修正するか、経年劣化管理の継続の有効性を確保するための追加措置 (例えば、新しいプラント特有 AMP を開発する) をとる。

減肉による配管破断は単相系 (給水系及び復水系) で発生している。減肉の問題は、抽気蒸気系統の二相配管、気水分離再熱器及び給水加熱器ドレン、CANDU/PHWR 出口フィーダーでも発生している。

インドでは、1998 年に初めて、Rajasthan 2 号機 (RAPS-2) で、原子炉のフル稼働 15 年後に給水エルボの肉厚減少が観察された。これは主に、Grayloc 継手以降の出口給水エルボの外側に観察された。肉厚減少は局所的であり、FAC によるものとされた。その後、多くの原子炉で肉厚減少が観察された。減肉の原因は研究者らによって FAC によるものとされた (AMP140 を参照)。

観察された肉厚減少は、FAC、エロージョン (固形粒子衝突、液滴衝突、フラッシング、キャビテーション)、またはより一般的ではないが、複数のメカニズムの組み合わせによるものと考えられる[26]。劣化メカニズムは特定され、特定の損傷に起因するものとされ、AMP のフィードバックの一部として評価される。特に、経年劣化 (肉厚減少) が複数の劣化メカニズム (FAC、エロージョンなど) によって引き起こされる可能性がある場合、運転経験の誤用を防ぐために評価が行われる。

FAC 及びエロージョンに対する経年劣化管理プログラムには、運転経験を適時にフィードバックする仕組みが含まれ、このプログラムにおいて運転経験が考慮されていることを示す客観的な証拠が提供される。運転経験から、FAC 及びエロージョンに対する経年劣化管理が適切に実施された場合、高エネルギーの炭素鋼配管及び部品における FAC 及びエロージョンの管理に効果的であることが示されている[27]。

運転経験の交換は、AMP の重要な一部であり、EPRI が主催する CHUG (CHECWORKS USERS GROUP) や、Framatome が主催する COMSY USERS GROUP などの運転経験交換フォーラムへの参加を通じて実現できる。

予測コード (CHECWORKS - EPRI [20]、BRT Cicero - EdF [23]) の改良や FAC 及びエロージョン管理の特定の側面への対応を目的とした複数の研究開発活動が実施されている。

9. 品質管理

サイト品質保証手順、レビュー及び承認プロセス、管理統制は、様々な国家の規制要件 (例えば、10 CFR 50、付録 B [28]) に準拠して実施される。

References

- [1] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Erosion/ Corrosion-Induced Pipe Wall Thinning in U.S. Nuclear Power Plants, NUREG-1344, USNRC, 1989
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: BWR pressure vessel internals, IAEA-TECDOC-1471, IAEA, Vienna 2005
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Generic safety issue for nuclear power plants with pressurized heavy water reactors and measure for their resolution, IAEA-TECDOC – 1554, IAEA, Vienna, 2007
- [4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nuclear power plant life management processes: Guidelines and practices for heavy water reactors, IAEA-TECDOC – 1503, IAEA, Vienna, 2006
- [5] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Flow-Accelerated Corrosion in Power Plants: Revision 2. EPRI, Palo Alto, CA: 2016. 3002008071
- [6] JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, JSME technical rules of the pipe-wall-thinning management for BWR, JSME S NH1-2006, JSME
- [7] JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, JSME technical rules of the pipe-wall-thinning management for PWR, JSME S NG1-2006, JSME
- [8] JAPAN NUCLEAR ENERGY SAFETY ORGANIZATION, Review Manual for Aging-Related Technical Evaluation Piping Wall Thinning, JNES-SS-0510, JNES
- [9] ATOMIC ENERGY REGULATORY BOARD, Life Management of Nuclear Power Plants, AERB Safety Guide, AERB/NPP/SG/O-14, AERB, India, 2005
- [10] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, Code Case N-480 on examination requirements for pipe wall thinning due to single phase erosion corrosion, ASME Section XI Div. 1, ASME, New York, NY
- [11] STATE OFFICE FOR NUCLEAR SAFETY OF CZECH REPUBLIC, Aging Management Programme FAC in nuclear power plants of WWER type, National safety guide BN-JB-5.6, January 2021.
- [12] Normative Technical Documentation of Association of Mechanical Engineers of Czech Republic for Design and Life Time Assessment of Components and Piping in WWER NPPs, Section IV, Annex XVII, 2020.
- [13] Korea Hydro & Nuclear Power, Wall Thinning Management Procedure for Carbon Steel Piping, STANDARD MAINTENANCE-9144, Revision 6, 2019
- [14] CHUG Position Paper No. 4: Recommendations for Inspecting Feedwater heater Shells, Revision 4, 2013, EPRI
- [15] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Data processing technologies and diagnostics for water chemistry and corrosion control in nuclear power plants (DAWAC), IAEA TECDOC-1505, IAEA, Vienna 2006
- [16] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Chemistry Programme for Water Cooled Nuclear Power Plants, Specific Safety Guide, IAEA SSG-13, IAEA, Vienna, 2011
- [17] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Recommendations for an Effective Flow Accelerated Corrosion Program (NSAC-202L-R4). EPRI, Palo Alto, CA: 2013.

3002000563

- [18] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Recommendations for an Effective Program Against Erosive Attack. EPRI, Palo Alto, CA: 2015. 3002005530
- [19] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, CHECWORKS™ Steam/Feedwater Application Guidelines for Plant Modelling and Evaluation of Component Inspection Data, Revision 1. EPRI, Palo Alto, CA: 2017. 3002010594
- [20] CHECWORKS™ Steam/Feedwater Application (SFA), Version 4.2, EPRI, Palo Alto, CA: 2017. 3002010583
- [21] A. Zander, The COMSY – code for the Detecting of Piping Degradation due to Flow-accelerated Corrosion, IAEA - Workshop on FAC and EAC; April 21- 23, 2009, Moscow
- [22] COMSY Condition Oriented ageing and plant life Monitoring System Manual, Version 1.07, August 2001, by Framatome ANP GmbH Dept. NT31
- [23] BRT-CICERO, Un logiciel pour maîtriser la corrosion-érosion, Manuel Utilisateur Indice B, Janvier 2000, Copyright EDF EQT 200
- [24] ToSPACE, Development of ToSPACE for Pipe Wall Thinning Management in Nuclear Power Plants, World Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.9, pp.1-15, 2019
- [25] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, Code Case N-597-2 Requirements for Analytical Evaluation of Pipe Wall Thinning, ASME Section XI, Division 1, ASME, New York, NY, November 18, 2003
- [26] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, NUREG–2191, Generic Aging Lessons Learned for Subsequent License Renewal (GALL-SLR) Report, Final Report, 2017
- [27] NEA/CSNI/R(2014)6, CODAP Topical Report Flow Accelerated Corrosion (FAC) of Carbon Steel and Low Alloy Steel Piping in Commercial Nuclear Power Plants, June 2014
- [28] 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