

AMP323 使用済燃料乾式貯蔵コンクリート構造（2023 年版）

プログラムの概要

この経年劣化管理プログラムは、原子炉プラント (NPPs) の使用済燃料乾式貯蔵コンクリート構造物に関連する構造物について、運転中に意図した機能が失われないことを保証するための供用期間中検査のガイダンスを提供するものである。

これらの構造物の当初の設計寿命は、通常 30 ～ 50 年である。しかし、設計寿命を超えて構造物を使用し続けることで、経済的・環境的な利点が認識されるようになった。そこで、構造物の継続的な健全性を保証し、将来の性能を予測できるようにするためのデータを取得し、その傾向を把握するために、これらの構造物に対して経年劣化管理プログラム (AMP) が作成され、実施された。

鉄筋コンクリートは、好ましい環境条件下では耐久性のある材料と考えられている。しかし、廃棄物貯蔵構造物のコンクリートは、暴露環境から生じるよく知られた経年劣化メカニズム (ARDM) に加え、貯蔵された廃棄物によって誘発される劣化メカニズム (高温や温度勾配、放射線照射など) を受ける可能性があることが認識されている。また、コンクリートは放射線を遮蔽し、放射性廃棄物のバリアの一つとして機能するため、その耐久性要件は従来の構造物よりも高いことが認識されている。放射性廃棄物貯蔵用コンクリート構造物の経年劣化は、放置すれば、設計に盛り込まれた健全性と機能性のマージンを減少させる可能性がある。

経年劣化管理は、AMP318 に準拠した効果的な経年劣化管理ツールである定期的な目視検査によって実施される。目視検査は、原位置構造物の非破壊検査 (NDT) やサンプルの実験室試験・分析によって補完される。放射線遮蔽の有効性を監視するため、必要に応じて放射線調査も実施される。地下水の化学組成分析を含む試験も、AMP318 及び AMP307 で扱われているのと同様の手順を用いて実施される。地盤の動きと沈下も、AMP317 に準拠してモニタリングされる。すべての活動は、適切な資格を持ち、経験を積んだ担当者によって実施される。劣化が発見された場合は、大規模な補修を必要とするような欠陥となることを防ぐために、メンテナンス活動を実施することもある。

地上のコンクリート構造物には、定期的な検査にアクセスしやすいという利点がある。しかし、コンクリート壁の厚さが大きい、鉄筋の配置が密集しているなどの要因により、非破壊検査技術を選択する上で課題がある。

このような制約を克服するため、目視や非破壊の他、回収したサンプルの実験室分析など、様々な手法が互いに補完し合い、信頼性の高いデータを提供するために用いられている。非破壊技術の主な原理には、衝撃エコー検査、地中レーダー (GPR)、衝撃ハンマー、及び半破壊のハーフセル電位検査が含まれる。

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：

本経年劣化管理プログラムは、中間使用済燃料乾式貯蔵コンクリート構造物(地上)に適用される。本 AMP は、AMP166 で検討されているスチールバスケット、鑄込み品目、キャニスター、可動部品は考慮しない。

本 AMP の目的は、核廃棄物貯蔵コンクリート構造物の経年劣化プロセスを理解し、監視することであり、劣化状態が意図された機能の喪失を引き起こす前に、経年劣化の影響を制御し、緩和することを可能にする原子力規格の要件を満たすことである。

コンクリート構造物についてモニタリングされる様々なパラメータ[1,2]を以下に要約する。

- 亀裂(範囲と大きさ)
- 材料損失(剥落や層間剥離の大きさ、形状、深さ)
- 有害物質の浸入(コンクリート中の塩化物含有量、硫酸塩攻撃など)
- 水酸化カルシウムの溶出によるコンクリート pH の低下
- コンクリートの炭酸化
- 鉄筋の腐食
- 周期的荷重、振動、熱サイクルによる疲労
- コンクリートの照射
- プレストレス力の喪失
- 放射線量率
- 熱と圧力の過渡現象
- ホウ素の枯渇
- クリープ
- エロージョン
- 水の pH、水中の塩化物及び硫酸塩の濃度
- 放射線調査については、ガンマ線量率と中性子フラックスのモニタリング

2. 経年劣化を最小限に抑え、制御するための予防措置：

これは状態監視プログラムである。このプログラムには予防措置も含まれる。経年劣化を防止するために、以下のような対策が考えられる：

- 鉄筋の腐食防止
- 水の浸入を防ぐシーリング材
- 腐食やコンクリート老朽化を防ぐための塗装
- 鉄筋や他の鋼製部品の腐食を防止するためのカソード保護システム[3,4]

経年劣化を防止する方法と実践には、適切な材料と運転条件の選定が含まれる。

3. 経年劣化の検出：

使用済燃料コンクリート構造物の経年劣化の影響には、強度低下、材料損失、接着力低下、亀裂、材料特性の変化、膨張、剥離が含まれる。

本 AMP は、使用済燃料コンクリート構造物の検査がこの種の施設の調査、設計、建設、運転に携わる有資格者の指示の下で実施されることを規定している。目視検査は、主に使用済燃料コンクリート構造物の劣化を検知するために使用される。ACI 規格 201.1R-08[5] は、目視検査の実施を指導するための一例である。

目視検査で放射線遮蔽の有効性が十分に確認できない場合、放射線調査が実施されることもある。場合によっては、使用済燃料コンクリート構造物の挙動を測定するための機器 (例えばひずみゲージ) が設置されている。設置された計器の利用可能な記録と測定値は、劣化を示す可能性のある異常な性能または兆候を検知するためにレビューされなければならない。

米国では、地下水化学モニタリングプログラムが、埋設鋼材の腐食や化学的攻撃 (塩化物や硫酸塩による劣化) などの地下経年劣化メカニズムにつながる条件を特定するために利用されている。

地上のコンクリート構造物には、定期的な検査にアクセスしやすいという利点がある。しかし、コンクリート壁が厚い、鉄筋の配置が密集しているなどの要因により、非破壊検査技術の選択に課題も残る。

このような制約を克服するために、目視検査や非破壊検査、回収サンプルの実験室分析など、様々な手法が互いに補完し合いながら、信頼性の高いデータを提供するために用いられている。一般的な非破壊技術として、超音波パルス法、GPR 法、衝撃ハンマー法、及び半破壊のハーフセル電位検査[6]がある。

超音波パルス法

小さな鋼球をコンクリート表面に叩きつけて生じる機械的衝撃によって発生する応力 (音) 波を利用する方法である。これにより低周波の応力波が発生し、内部の欠陥や埋め込み部品 (鉄筋など) の外表面で反射される。波のパターンは部品の形状によって異なる。きずや埋め込み材料が存在する場合、それらは特徴的なパターンを乱し、潜在的な欠陥の存在と位置に関する定性的及び定量的な情報を提供する。

応力波の伝播速度を評価することで、部品の厚さを決定することができる。これは材料の性質に依存する。例えば、強度の高いコンクリートを通過する速度は、強度の低いコンクリートを通過する速度よりも速くなる。微細な亀裂がある場合は、速度が大幅に低下する。

地中レーダー

GP 法は、もともと地質学的特徴をマッピングするために開発された。現在ではコンクリートに対する使用も増えており、コンクリート中の埋設物やある種のコンクリート欠陥の特性を把握するための独自の非侵襲的・非破壊的手段を提供している。GPR システムは、

電磁信号を発生し、周囲の材料との電磁場の相互作用を検出する。アンテナ (送信機と受信機で構成され、これらは小さな一定の距離を保って設置される) を利用して、コンクリートに電磁波を送る。アンテナは検査対象のコンクリート表面上を移動する。送信機はエネルギー・パルス・ビームをコンクリートに送り、受信機は電気特性の異なる材料間の界面から反射されたエネルギーを収集する。反射されたエネルギーはレーダーグラムに「パターン」として記録され、リアルタイムで表示される。

衝撃ハンマー法

衝撃ハンマー法の原理は、弾性質量の反発が質量を衝突させる表面の硬さに依存するというものである。コンクリートの抵抗が大きいほど、はね返った衝撃は大きくなる。これは、コンクリート被覆の相対的な品質を比較できる簡単な実地試験である。

ハーフセル電位検査

ハーフセル電位検査は、コンクリート中の鉄筋腐食の確率を推定できる、非常に広く使用されている技術である。腐食が進行すると、ある部分は不動態化して陽極となり、他の部分は不動態のままなので陰極となる。ハーフセル電位検査の目的は、安定したセルを基準としてコンクリート表面の異なる電位の領域を測定し、アノードとカソードの領域を特定してマッピングすることである。一般に、 Cu/CuSO_4 セルが標準参照セルとして使用される。計算された電位と腐食確率には関係がある。この検査では、構造物内部の鉄筋に接続する必要がある。

4. 経年劣化のモニタリングと傾向分析：

使用済燃料コンクリート構造物は、測定されたパラメータと定期的な検査によってモニタリングされる。活性的な亀裂の成長、腐食の程度、放射線量率の増加、地下水化学レベル (pH、塩化物、硫酸塩) の変化など、事前の検査で著しい劣化が見られた箇所の変化は、その変化が起これなくなったことが明らかになるまで、あるいは国の規制に準拠して是正措置が実施されるまで、傾向分析される。

これには、運転経験 (OPEX) と研究開発 (R&D) の結果を考慮したモニタリング手法の評価が含まれ、特定と文書化が行われる。

- 経年劣化を検出、監視、傾向分析するための機能パラメータと状態指標
- これらのパラメータや指標を十分な感度、信頼性、精度で測定するための既存のモニタリング技術の能力と実用性の評価
- 著しい劣化を認識し、将来の性能を予測するためのデータ評価技術
- コンクリート構造物の遮蔽機能が維持されていることを確認するための放射線調査

5. 経年劣化の緩和：

この AMP は状態監視プログラムである。緩和戦略は、経年劣化の影響を最小化すること、及び構造物や部品が曝されるパラメータを許容範囲内で監視・管理することを目的とすべ

きである。多くの化学的及び物理的な経年劣化メカニズムには水が必要であるため、構造物／部品から防水又は水を迂回させることは、最も効果的な緩和戦略の一つと考えられる。

劣化が発見されたら、その劣化が大規模な補修を必要とするような欠陥になるのを防ぐために、保全活動(例えば、エポキシ注入、ルーティングとシーリング、亀裂の縫合)を実施することができる。

6. 許容基準：

ACI、CEN、CSA などいくつかの国や組織が、コンクリート構造物の評価基準を策定している。プラントプログラムでは、具体的な許容基準を定めている。

構造物モニタリングプログラムでは、意図された機能が失われる前に是正措置が特定され、確実に実施するために、各構造物／経年劣化の影響について選択された許容基準に基づいて、資格を有する技術担当者が検査結果を評価することを求めている。

この基準は、各国の民間規格・基準及び慣行、並びに業界及びプラントの運転経験を考慮し、該当する設計規格・基準に準拠して導き出される。一般に、許容基準を評価するためには、設計データがある場合には構造技術者がそれを精査し判断する必要がある。例えば、ACI349.3R-18[7]の第5章に規定されている「評価基準」は、観察された経年劣化の影響の妥当性を判断するための許容基準(定量的基準を含む)を提供し、更なる評価のための基準を規定している。欧州規格 EN 1504-9[8]は、許容基準が含まれない場合に必要となる状態評価の例である。

放射線調査の基準は、使用済燃料貯蔵施設の直接放射線に関する規制要件への準拠を保証するために設定されている。

米国では、地下水化学プログラムの許容基準は、ASME Code Section XI, Subsection IWL に準じたものであり、これによると、攻撃的な地下水環境は pH < 5.5、塩化物 > 500 ppm、硫酸塩 > 1500 ppm と決められている[9]。

7. 是正措置：

本 AMP は、通常的设计状態から著しい変化が生じたことを検査結果が示した場合、その状態を評価することを推奨している。これには、異常状態の原因の技術的評価、構造物の挙動や動きの評価、改善策や緩和策の推奨が含まれる。

典型的な是正措置には、以下のようなものがある。

- 様々な持続可能な技術によるコンクリート構造物及び鋼構造物の補強
- 沈下傾向が許容基準を超える値に至る場合の土壌注入

是正措置は、各国で適用されるコンセンサス・リハビリテーション・ガイドまたは規格(例：ACI、CEN、CSA)に合致したものでなければならない。

8. 運転経験のフィードバックと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 OPEX と研究開発の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な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 を開発する) をとる。

使用済燃料貯蔵構造物のコンクリートの経年劣化に影響するプロセスの理解、検出及び緩和を改善する必要がある。これらのプロセスは、コンクリートの経年劣化に関するほとんどの情報が入手可能な構造物では典型的でない応力因子及び期待寿命に曝される可能性がある。

外部での運転経験の適切な情報源は、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、IAEA 原子力シリーズ No. NP-T-3.5, 2016[10]である。

9. 品質管理：

SSG-48 [11]に沿って、IGALL 安全報告書[11]の 4.9 節は、(a) 管理統制、(b) 安全分析報告書の補完、(c) パフォーマンス指標、(d) 確認 (検証) プロセス、(e) データ収集と記録保持、これらの観点からこの属性に期待される内容に関する一般的な情報を提供している。また、SRS No.106 の第 2 章には経年劣化管理のためのデータ収集と記録保存に関するグッドプラクティスが記載されている[15]。

本 AMP に関する追加的な具体的情報はない。

References

- [1] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Managing Aging Processes in Storage (MAPS) Report, NUREG 2214, Washington, DC, 2019.
- [2] ELECTRONUCLEAR, Final Safety Analysis Report of the UAS, Brazil, 2021.
- [3] EUROPEAN STANDARD, Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures – Definitions, Requirements, Quality Control and Evaluation of Conformity – Part 2: Surface Protection Systems for Concrete, EN 1504-2:2004, Brussels, 2004.
- [4] EUROPEAN STANDARD, Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures – Definitions, Requirements, Quality Control and Evaluation of Conformity – Part 7: Reinforcement Corrosion Protection, EN 1504-7:2006, Brussels, 2006.
- [5] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Guide for Conducting a Visual Inspection of Concrete in Service, ACI Standard 201.1R-08, Farmington Hills, MI, 2008.
- [6] MILMAN, J., AZIZ, T., BISWAS, J. K., JANZEN, R. G., Integrity Evaluation of Concrete Radioactive Waste Storage Structures, NEA - Working Group on Integrity and Ageing of Components and Structures, 2008.

- [7] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Report on Evaluation and Repair of Existing Nuclear Safety-Related Concrete Structures, ACI 349.3R-18, Farmington Hills, MI, 2018.
- [8] EUROPEAN STANDARD, Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures – Definitions, Requirements, Quality Control and Evaluation of Conformity – Part 9: General Principles for the use of Products and Systems, EN 15049:2008, Brussels, 2008.
- [9] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, Chapter XI, ASME, New York, NY, 2019.
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Ageing Management of Concrete Structures in Nuclear Power Plants, IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.5, IAEA, Vienna, 2016.
- [11] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Ageing Management and Development of a Programme for Long Term Operations of Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-48, IAEA, Vienna, 2018.
- [12] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Ageing Management for Nuclear Power Plants: International Generic Ageing Lessons Learned (IGALL), IAEA Safety Reports Series No. 82 (Rev. 2), IAEA, Vienna, Preprint.
- [13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Format and Content of the Safety Analysis Report for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-61, IAEA, Vienna, 2021.
- [14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of the Management System for Facilities and Activities, IAEA Safety Standards Series No. GS-G-3.1, IAEA, Vienna, 2006.
- [15] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Ageing Management and Long Term Operation for Nuclear Power Plants: Data Management, Scope Setting, Plant Programmes and Documentation, IAEA Safety Reports Series No. 106, IAEA, Vienna, 2022.