

AMP165 必須冷却装置 (2023 年版)

プログラムの概要

必須冷却装置は、NPP で安全関連の暖房、換気、空調システム (HVAC システム) に冷水を供給するために使用される安全関連機器である。安全関連の HVAC システムには、制御室の換気・空調システム、安全噴射システム、格納容器スプレーシステム、残留熱除去システム、非常用ディーゼル発電機建屋、格納容器空気冷却器、補助給水システム、部品冷却水システム、非常用空気圧縮機、補助建屋 HVAC、必須電気機器室などが含まれる。これらの必須冷却装置は非常用電源から電力が供給される[1]。

必須冷却装置は通常運転時だけでなく、事故の影響を緩和し、事故時においてもプラントの安全な停止を可能にする必要とされることがある。冷却装置が事故の影響を緩和し、事故中及び事故後のプラントの安全な停止のために必要な場合、それは安全関連に分類される[1]。冷却装置は、HVAC システムの最も重要な部品である。安全関連の HVAC システムは、高い信頼性で維持されなければならない。

必須冷却装置の主な部品は以下の通りである。

- ・ 圧縮機
- ・ 往復動
- ・ 遠心式
- ・ 軌道スクロール
- ・ 回転スクリュー
- ・ コンデンサー
- ・ 計量／膨張装置
- ・ 蒸発器
- ・ 熱交換器
- ・ 接続配管 (フィルター、ストレーナーを含む)

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：

本プログラムは、NPP で使用される遠心式必須冷却装置の機械部品の経年劣化管理に適用される。必須冷却装置の電気、及び電子装置の経年劣化管理は、AMP212、AMP215、AMP217、AMP218 及び TLAA201 で対処される。

遠心式冷却装置のさまざまな部品に対する構造材料の劣化メカニズム、及びそれらの経年劣化は、以下のとおりである[1,2,3,4]。

圧縮機：

圧縮機は、冷媒をシステム内で循環させ、蒸発器から低圧 (LP) ガス冷媒を取り出し、凝縮器に送る前に圧縮する。

圧縮機の構造材料には、駆動シャフトに高強度低合金鋼、インペラーに高強度 Al または鋳鋼、ケーシングに炭素鋼、ラビリンスシールにエラストマーまたは非鉄金属、軸受に Cu 合金 (ブロンズまたは Babbitt メタル) などがある。

圧縮機の駆動シャフトとインペラーの潜在的な経年劣化の影響と劣化メカニズムには、疲労による亀裂が含まれる。圧縮機のケーシングに起こりうる経年劣化の影響と劣化メカニズムは、腐食またはエロージョンによる材料損失である (AMP128 も参照)。シールとガスケットに起こりうる潜在的な経年劣化の影響と劣化メカニズムは、硬化によるシール機能の喪失であり、オイル漏えい、オイルレベルの低下、冷媒レベルの異常を引き起こす可能性がある。軸受の不具合は、圧縮機の軸受の潜在的な経年劣化であり、過度の振動により油圧が低下し、偽装トリップが発生する (AMP224 も参照)。過度の振動は、圧縮機に接続されている配管やホースに振動疲労を引き起こす可能性もある。

コンデンサー：

コンデンサーは、ヒートシンクに熱を伝える。圧縮機から高温高圧 (HP) ガスを受け取り、それを冷却して飽和または亜冷却 HP 液体を計量／膨張装置に供給する。水冷式コンデンサーの場合、熱はコンデンサーから水に移動し、水によって冷却塔、湖、川、海などの許容可能なヒートシンクに運ばれる。空冷式コンデンサーは通常、フィンで覆われた多数の管で構成されている。コンデンサー管は、コンデンサー水が腐食する可能性があるため、通常は Cu-Ni 製である。コンデンサーの潜在的な劣化メカニズムは、コンデンサー管水側の汚損であり、これは熱伝達能力低下と差圧上昇の経年劣化につながる (AMP155 も参照)。コンデンサーの他の部品 (シェル、管シートなど) は低合金鋼製である。これらの部品の潜在的な劣化メカニズムは、腐食による材料損失であり、その結果、閉鎖ループ冷却水の漏えいと熱伝達能力低下が生じる可能性がある (AMP103 及び AMP124 も参照)。

冷媒流量計／膨張装置：

流量計／膨張装置は、液体冷媒を低圧に膨張させるのに必要な圧力降下を提供し、冷媒温度を下げて冷却を行う。流量計／膨張装置には、キャピラリー管、オリフィス、自動膨張弁 (AEV)、サーモスタット式膨張弁 (TXV)、高側または低側浮動弁などがある。

一般的にステンレス鋼や Cu 合金が構造材料として使用される。冷媒計量装置の潜在的な劣化メカニズム及び経年劣化は、腐食や摩耗に起因する汚損による流動抵抗の増加であり、これにより高いヘッド圧、低い吸引圧、冷却能力の低下を招く。シールとガスケットに起こりうる経年劣化には、硬化によるシール機能の喪失があり、冷媒とオイルの漏えいにつながる可能性がある (AMP134 も参照)。

蒸発器：

蒸発器は、冷却される媒体から熱を吸収し、冷媒液体の状態を変化させる。蒸発器の構造材料には、シェルとウォーターボックス用の炭素鋼、分離プレート用の鋼板、継目なし Cu 管、管シート用の Cu/Ni 合金シートで被覆された炭素鋼、管支持シート用の鋼板などがある。

蒸発器管に起こりうる経年劣化は、疲労による亀裂である。管以外の蒸発器部品の潜在的な経年劣化の影響及び劣化メカニズムは、腐食による材料損失である (AMP103 及び AMP135 も参照)。

制御スイッチ：

制御スイッチには、圧力制御スイッチ、温度制御スイッチ、流体流量検出スイッチ、差動制御スイッチ、浮動スイッチが含まれる。制御スイッチ及びセンサーの経年劣化管理は、AMP217、AMP218 及び TLAA201 で扱われている。

制御弁：

制御弁は、システム負荷に応じて、システム要件を満たすようにプロセス流量を開始、停止、指示、調節するために使用される。制御弁には、蒸発器圧力調整器、コンデンサー圧力調整器、電磁弁、凝縮水調整器、逆止弁などがある。構造材料として一般的にステンレス鋼が使用される。潜在的な劣化メカニズムには腐食が含まれ、腐食によって材料損失が発生し、疲労亀裂の起点となる (AMP143 も参照)。

配管、継手：

配管及び継手の構造材料としては、ステンレス鋼及び炭素鋼があり、冷媒ラインでは、Cu または Cu-10%Ni 管が用いられる。

管、継手、冷媒ラインの潜在的な経年劣化は、振動による累積疲労損傷であり、これは配管と継手の亀裂として経年劣化を引き起こし、容量と圧力の低下につながる (AMP134 も参照)。

飽和または亜冷却 HP 液を移送する蒸発器に接続された配管は、絶縁下で腐食が発生する可能性がある[5]。これは、この AMP または AMP134 のいずれかで管理される。

フィルター、ストレーナ：

フィルタとストレーナの潜在的な経年劣化は、摩耗と腐食による流路抵抗の増大であり、これはヘッド圧の上昇、吸引圧の低下、冷却能力の低下につながる。関連する経年劣化は、腐食と摩耗による材料損失である。

2. 経年劣化を最小限に抑え、制御するための予防措置：

このプログラムには、劣化に対処するための予防措置が含まれる。予防措置には、オーバーホール、冷媒分析、グリコール分析、オイル分析、振動、I&C 計装の較正、冷却装置管の洗浄、水質管理、システムからの湿気排除、接点と端子の締め具合の検査、運転圧力と温度、電流と電圧の記録、オイルフィルターの交換、分析によって必要とされ他場合のオイル交換、軸受の潤滑、機械の運転チェックと試運転データとの比較が含まれる[1,3,4,6]。

予防保全技術の例と、それらがカバーする経年劣化の影響は、参考文献[1]に記載されている。

- オーバーホールは、ガスケットの不具合、軸受の摩耗、カップリングの摩耗、シャフトシールの不具合、シャフトの亀裂、弁の摩耗、取り付けボルトの緩み、往復圧縮機フレームの亀裂などに対処する。
- 冷媒分析は、水分、酸、油分の有無について実施される。この作業は、遠心式圧縮機の油分

戻りシステムの不具合につながる状態、すなわちパイプの詰まり、不適切なシステム差圧、その他の部品の不具合を検出するために重要である。冷媒分析は、ガスケットの不具合、非凝縮性ガスの過剰または効果的でない洗浄、冷媒計量装置の詰まりにも対応する。

- グリコール分析は、グリコール冷却液が使用されている場合にのみ適用され、液の漏えいにより起因する液組成の変化に対応する。この流体の漏えいが確認されない場合、コンデンサー熱交換器のグリコール汚損が発生する。
- オイル分析は、コンプレッサーの種類に関係なくコンプレッサーオイルに対して実施され、オイルの劣化、微粒子の存在、水分含有量、酸含有量を測定する。オイル分析により、あらゆるタイプのコンプレッサーで、不正確なオイルや劣化したオイル、摩耗した軸受からの摩耗粉が検出される。シャフトの傷やジャーナルの摩耗も検出されることがあり、これは機械的な応力を受ける往復圧縮機で発生する可能性が高い。
- 振動モニタリング解析は、あらゆるタイプの圧縮機の軸受とカップリングの摩耗とミスアライメントの検出、及び往復圧縮機の摩耗した滑車、ベルト、シーブ、取り付けボルトの緩みやフレーム亀裂の検出に重点を置いている。遠心式圧縮機の摩耗したギアや、回転ねじ式圧縮機の摩耗したねじ要素も検出できる。
- 外部目視検査は、水、オイル、または冷媒の漏えいの検出、システムの低温部における断熱材の劣化、及び局所領域の温度と圧力の形でシステム容量と制御を含む運転パラメータの検証に重点を置いている。重要なパラメータは、コンデンサーの水側の圧力と流量、TCV の位置、冷媒温度であり、これらはすべてコンデンサー管の水側汚損を検出する上で役立つ。外部漏えいは、シャフトシール、ガスケット、空圧制御装置管及び継手、冷媒作動制御弁の不具合による可能性が高い。熱交換器の汚損、不適切な水側流量、熱伝達能力の低下を防ぐため、水質が管理され、管洗浄が定期的に行われる (AMP102 及び AMP134 も参照)。
- 水質管理及び管洗浄は、熱交換器の汚損、不適切な水側流量、熱伝達能力の低下を防ぐことに重点を置いている (AMP102、AMP103、AMP155 も参照)。

3. 経年劣化の検出:

経年劣化の検出は、構造及び部品の意図された機能が失われる前に行うことを意図している。

必須冷却装置の経年劣化は、以下の手段により検出される[1,2]。

- プラント手順書に定められた頻度で定期的実施される外部目視検査は、偽装トリップ、部品の損傷、システムの漏えい、潤滑不足、コンデンサーの差圧上昇、フィルターのヘッド圧の高低、塗装の劣化、錆や腐食、基礎の亀裂、高い騒音レベルなどの異常を早期に発見するための手段である (AMP102 と AMP134 も参照)。
- 内部目視検査は、冷却能力の低下、インペラーの摩耗やエロージョンによる圧縮機のシャフトの損傷、圧力逃し弁のバネの不具合、腐食による弁の詰まり、管シートやヘッドのエロージョン、水側腐食やエロージョンによる伝熱能力の低下や冷媒損失などの異常を検出するために実施される (AMP117 及び AMP135 も参照)。
- コンデンサー管の渦電流試験 (ET) は、管壁の減肉、管シートとバッフルの損傷及び摩耗を検

出するために実施される (AMP102 も参照)。

- 振動モニタリングは、コンプレッサーのトリップとカップリングの摩耗を避ける目的で、コンプレッサーの過度の振動レベル、コンプレッサーシャフトの損傷、軸受の過度の振動を検出するために実施される。
- オイルレベルの高低、冷媒の漏えい、全面腐食を確認するため、運転員による巡回が行われる。
- システム性能試験は、不適切な運転、偽装トリップ、始動不良などの経年劣化の影響を検出するために行われる。システム性能試験は、凝縮器と蒸発器の水側汚損による熱伝達能力の低下も検出する。

4. 経年劣化の傾向の監視と分析:

プログラムの検査で得られたデータを監視、記録、評価、傾向分析する方法は、必要に応じて是正措置を適時的に実施できるように、有害な経年劣化の傾向を特定するために提供されなければならない。性能試験、機能試験及び状態監視が、モニタリング手段である。

機器の故障、予防保全及び是正保全に関する最低 5 年間のデータは、経年劣化の主な影響を特定し、本プログラムに焦点を当てるため、分析及び傾向把握に用いることができる[1]。

5. 経年劣化の影響の緩和:

水質管理プログラム、コンデンサーと蒸発器の管の栓、過度の振動を避けるための措置、適切な潤滑は、経年劣化の影響を緩和する効果的な手段である[4]。

6. 許容基準:

この AMP に含まれる検査に関連する主な許容基準は、関連する管理統制要件 (適用される規格・基準など)、設計者及び製造者の文書、あるいはプラントのガイダンス文書[1,2]に準拠する。

典型的な許容基準には、管壁の減肉率、蒸発器圧力、コンデンサー圧力、コンプレッサー油圧、除去圧力、潤滑油温度、冷却水入口温度、冷却水出口温度、冷却水流量、冷却装置出口温度、冷却装置入口温度、冷却装置水ポンプ出口流量、冷却装置水ポンプ入口圧力、冷却装置水出口圧力、冷媒レベル、軸受温度などの様々なパラメータに関する現行データと設計データの検証が含まれる。

さらに、すべての意図された気密性接合部と圧力バウンダリでは、油や冷媒の漏えい、ねじ継手からの漏えい、ガスケットの漏えい、フランジ、モーター接続部からの漏えい、コンデンサー管での漏えいを含め、漏えいがあるてはならない。

7. 是正措置:

検査結果は、承認された使用適合性ガイドライン[1]に準拠して評価され、是正措置の必要性が

判断される。必要な場合、是正措置計画[1] が策定・実施される。

典型的な是正措置には、管の洗浄または管への栓、冷媒の交換、フィルタの交換、インペラの修理／交換、シャフトのアライメント、軸受の交換、漏えいの修正またはシールの交換、オイルレベルの維持、漏えい修理のためのフランジの締め付けなどが含まれる。是正措置の目的は、劣化した場所を機能的な状態に回復させ、実用的な範囲で劣化の再発を防止することである。

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 は業界全体における一般的な経験を対象としている。プラント特有の関連運転経験は、プラント AMP がプラントに適切であることを確実にするために、プラント AMP の策定において考慮される。プラントはフィードバックプロセスを実施し、プラント及び業界全体の運転経験と研究開発 (R&D) 結果を定期的に評価し、必要に応じてプラント AMP を修正するか、または追加の措置 (例えば、新たなプラント特有の AMP を策定する) を講じ、経年劣化管理の継続的な有効性を確保する。

この AMP が作成された時点では、プラント特有の経年劣化管理プログラムの実施に関する関連する運転経験は確認されていない。しかし、NUREG/CR-6043 “Ageing Assessment of essential HVAC chillers used in Nuclear Power Plants” [2]は、NPP で使用される必須冷却装置の運転経験を要約しており、この報告書の情報は、本プログラムの要素の解釈に使用された。報告書によると、必須冷却装置の支配的な経年劣化の影響と劣化メカニズムは、過度の振動 (不釣り合いやミスアライメントによる)、過度の熱、過度の圧力、汚れと汚染、非凝縮性ガス (空気など)、腐食、管の凍結、鉱物汚染、生物学的攻撃と成長、流れの浸食、外部環境 (温度、湿度、ヒュームなど)、特に損傷したフランジ、接合部、摩擦と摩耗、熱サイクル、ミスアライメント、起動トルク、頻繁な起動／停止であった。最もよく故障する部品は、圧力スイッチ、温度スイッチ、リレー、フロースイッチ、ガスケット、O リングなどである。故障が少ない部品には、軸受、管、ガイドベーン、オイルリリーフ弁、オイルポンプ、シール、膨張装置、浮動弁、除去ユニット、モーター制御センター、モーターなどがある。故障数の減少に大きく貢献したモニタリングと保全の手順は、以下の通りである。

- コンデンサーと蒸発器に供給される水質の管理
- 潤滑油の化学的性質が適切であることを確認する定期的な分析 (AMP136 も参照)
- 潤滑油の分析結果に基づき、冷媒の化学的性質／必要性を適切に確認する定期的な分析
- 腐食監視のための管に対する渦電流 (ET) の実施
- 定期的な管の検査、必要に応じてスケジュール通りの清掃
- 同じ装置を使った定期的な振動分析
- 赤外線温度感知装置による電気部品のヒートスキャン
- 毎日の目視検査とゲージ読み取り値の記録
- 日々の測定値読み取りとチャートの傾向分析
- 製造者の指示に従った定期的な保全

- 信頼性を確保するため、年に一度の部品点検とテスト
- 定期的 (3 年から 10 年) なすべての消耗部品に対するオーバーホール・点検

この IGALL AMP に基づくプラント特有 AMP を実施、見直し、使用する際には、この運転経験を考慮すべきである。

業界全体の運転経験[1,2]の見直しと評価により、経年劣化の影響を特定する検査技術、予防措置、経年劣化の影響緩和は、経年劣化の影響を管理する上で一般的に有効であることが示されている。

この AMP が作成された時点では、関連する研究開発は特定されていない。

9. 品質管理:

SSG-48 に沿って[7]、IGALL Safety Report Section 4.9 では、(a) 管理統制、(b) 安全分析報告書の補足、(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[8]。さらなるガイダンスは、SSG61[9]の Paras 3.13.16 - 3.13.17 の安全解析報告書の補足、GS-G3.1 の確認プロセス (予防措置については Paras 6.76-6.77、是正措置については Paras 6.66-6.75) にあり[10]、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[11]。

本 AMP の定性的パフォーマンス指標の例は以下の通りである:

AMP の妥当性

定義:プラントの運転経験により AMP の修正が必要であった場合 (すなわち、AMP が適切であった、またはその目的を適切に満たしていた場合)、この指標は 1 となり、そうでない場合は 0 となる。

説明:劣化の進行が最小化されず、許容できない限界に近づいている、あるいは技術的な理由 (ISI が適切でない、保全の戦略／ツールの変更、モニタリング装置や頻度の変更など) により、AMP を修正／改訂する必要があった。

- AMP 改訂の理由が、公式／定期的なレビューのみ、あるいは管理上の変更を反映するためのみならば、この指標は「緑色」である。
- 新たな情報または追加情報により AMP が改訂された場合、この指標は「黄色」である。
- 許容基準の超過、または適用範囲の SSC における機能喪失により AMP が改訂された場合、この指標は「赤色」である。

AMP 活動の実施

定義:AMP で予定された活動が完了していない場合、この指標は 1 となり、そうでない場合は 0 となる。

説明:この指標は、予防措置、緩和措置、ISI、保全、モニタリングまたは是正措置が予定通り実施されなかったかどうかを検出する。

データ管理

定義:AMP で示された測定・監視されたパラメータを分析し、その分析が (おそらく不適合報告書と比較して) 有用または説得力のある情報を与えなかった場合、AMP または AMR を分析しなければならない。真であれば、この指標は 1 であり、そうでなければ 0 である。

説明: モニタリングと傾向分析の目的の一つは、適用された AMP が適切かどうかを確認することである。モニタリング結果が適切な情報を提供せず、AMP が適切かどうかを確認するために更なる措置を講じる必要がある場合、モニタリングを修正する必要がある可能性があり、このことは、この指標によって検出できる可能性がある。

製品群 AMP の使用

定義:製品群 AMP で管理されている部品の故障率。

説明:製品群 AMP の有効性、特に類似部品が多数管理されている場合、部品の故障率 (故障が経年劣化の影響による場合、あるいは部分的に経年劣化の影響である場合) を指標とすることができる。数年後、故障率の傾向分析から、AMP の有効性が変化しているかどうか (改善されているかどうか) を確認することができる。

経年劣化予測の適切性

定義:部品の経年劣化予測値と検出値の乖離。その差の絶対値と予測値の比。

説明:肉厚、きずの数 (または密度)、きずの成長、脆化、硬度、導電率、沈下、テンドン強度など、特定の劣化メカニズムの特性パラメータの予測値と測定値の比較。この指標の評価頻度は、パラメータの測定頻度 (保全中、ISI 中など) に合わせる必要がある。定量的性能指標の例としては、以下のようなものがある:

コンデンサー管及び蒸発器管の減肉

定義:許容される詰まり管数に対する、(実際の) 詰まり管数の割合。

説明:この指標は、腐食の進行が加速している場合、あるいは同程度の速度で進行している場合、または状況が改善されている場合などにおいて、プラントが許容基準からどの程度離れているか、また数年の傾向分析からどの程度離れているかを示すことができる。

冷却装置の冷却能力

定義:設計意図通りの冷却を提供する冷却装置の能力。

説明:この指標は、圧縮機、コンデンサー、蒸発器、流量計など、さまざまな機器の健全性を示す。

References

- [1] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Plant Support Engineering: Life Cycle Management Planning Sourcebooks - Chillers, 1015075, EPRI, Palo Alto, CA, December 2007.
- [2] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Aging Assessment of Essential HVAC Chillers used in Nuclear Power Plants, NUREG/CR-6043, PNL-8614 (Vol. 1), USNRC, Washington, DC (1993).
- [3] PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LABORATORY, Aging Assessment of Essential

- Chillers used in NPPs, PNL-8614, Vol. 2, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA (1996).
- [4] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Nuclear Power Plant Generic Ageing Lesson Learned (GALL), NUREG/CR-6490, Vol. 1, ANL-96/13, USNRC, Washington, DC (1996).
 - [5] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, License Renewal Interim Staff Guidance, LR-ISG-2012-02, Aging Management of Internal Surfaces, Fire Water Systems, Atmospheric Storage Tanks, and Corrosion under Insulation, USNRC, Washington, DC (2012).
 - [6] TRANE, Maintenance Manual for Centrifugal Chillers, CTV-SVD01A-EN, Trane, Ireland November 1999.
 - [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Ageing Management and Development of a Programme for Long Term Operation of Nuclear Power Plants, Specific Safety Guide, Safety Standards Series No. SSG-48, IAEA, Vienna (2018).
 - [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Ageing Management for Nuclear Power Plants: International Generic Ageing Lessons Learned (IGALL), Safety Reports Series No. 82 (Rev. 2), IAEA, Vienna. Preprint.
 - [9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Format and Content of the Safety Analysis Report for Nuclear Power Plants, SSG-61, IAEA, Vienna (2021).
 - [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of the Management System for Facilities and Activities, GS-G-3.1, IAEA, Vienna (2006).
 - [11] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Ageing Management and Long Term Operation of Nuclear Power Plants: Data Management, Scope Setting, Plant Programs and Documentation, Safety Report Series No. 106, IAEA, Vienna (2022)