



研究開発段階発電用原子炉の特徴を考慮した 保守管理の提案

Proposal of Maintenance Management of Nuclear Power Plants at R&D Stage
by Taking Account of Their Features

日本原子力研究開発機構	高屋 茂	Shigeru TAKAYA	Member
日本原子力研究開発機構	近澤 佳隆	Yoshitaka CHIKAZAWA	Member
日本原子力研究開発機構	林田 貴一	Kiichi HAYASHIDA	Member
日本原子力研究開発機構	田川 明広	Akihiro TAGAWA	Member
日本原子力研究開発機構	久保 重信	Shigenobu KUBO	
日本原子力研究開発機構	山下 厚	Atsushi YAMASHITA	

A maintenance management suitable to nuclear power plants (NPP) at R&D stage was discussed. Objectives of maintenance management of NPP at R&D stage was first clarified. Next, applicability of codes for maintenance management of commercial NPP to NPP at R&D stage was discussed. Then, requirements and consideration for maintenance management of NPP at R&D stage was proposed. Finally, an example that the proposal was applied to setting maintenance program of sodium-cooled fast reactor was presented.

Keywords: Maintenance Program, Maintenance Classification, Sodium-Cooled Fast Reactor

1. 諸言

原子力発電所の保守管理に関しては、総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会「検査の在り方に関する検討会」での議論[1]等を踏まえて、基本要件が日本電気協会で「原子力発電所の保守管理規程 (JEAC4209)」[2]として規格化されており、更に内容の理解促進を図るために「原子力発電所の保守管理指針 (JEAG4210)」[3]が発行されている。JEAC4209 の 2007 年版[4] (以下、「JEAC4209-2007」という。) は、規制当局からエンドースされ[5]、現場での保全活動だけでなく、定期事業者検査や定期安全管理審査等の拠り所としても活用されている。但し、「検査の在り方に関する検討会」や日本電気協会における議論の対象は、これまでに長年の運転経験を有する軽水炉 (現状で唯一の実用発電用原子炉 (以下、「実用炉」という。)) であり、運転経験が限られる研究開発段階発電用原子炉 (以下、「研開炉」という。) に適用するには十分な注意が必要である。

研開炉には、実用炉と比較して、運転経験の他にも、期待されている役割の違い等の相違点があるが、これまで、研開炉の保守管理を行う上で考慮すべき特徴が何であり、その特徴を研開炉の保守管理にどのように反映すべきなのかについて、十分な検討が行われていなかった。

そこで、本研究では、保守管理において考慮すべき研開炉の特徴を明確にし、その特徴を考慮して、JEAC4209-2007 の研開炉への適用性を分析することとした。さらに分析結果に基づき、研開炉の特徴を考慮した保守管理を提案した。

2. 分析手順

まず、保守管理で考慮すべき研開炉の特徴について整理する。現在、国内に存在する研開炉は、高速増殖原型炉「もんじゅ」のみであるが、ここでは、特定の炉や炉型に限定せず、研開炉一般の特徴について議論する。

次に、保守管理の目的について明確化する。例えば、JEAC4209-2007 では、原子炉施設の安全性に加えて、電力の供給信頼性も重要視されている。研開炉の保守管理にとっても、原子炉施設の安全性の確保が最重要であることに変わりはないと考えられるが、その他に追加すべき目的がないか、研開炉の特徴に基づき検討する。

連絡先: 高屋 茂、〒311-1393 大洗町成田町 4002 番地、
日本原子力研究開発機構 高速炉研究開発部門
E-mail: takaya.shigeru@jaea.go.jp

続いて、研開炉の保守管理の目的と研開炉の特徴に基づき、JEAC4209-2007の研開炉への適用性について分析する。ここで、JEAC4209-2007に着目した理由は、原子炉施設の安全性を最優先とする姿勢や品質管理の考え方については、研開炉にも適用可能な部分が多いと考えられることである。なお、現時点におけるJEAC4209及びJEAG4210の最新版は2014年版であり、2007年版と比較して、新規基準等の改定や高経年化技術評価等の他の保全活動との連携、また保全活動指標の更なる活用や状態監視の更なる活用を反映して、要求事項の再整理や解説の追加が行われている。しかしながら、全体としては技術的な要求に大きな違いがないと判断し、また規制当局による2014年版のエンドースが未実施であることも考慮して2007年版を検討のベースとすることとした。

さらに、分析結果をまとめ、研開炉の特徴を考慮した保守管理の考え方を提案する。

最後に、提案した研開炉の保守管理の考え方を、ナトリウム冷却高速炉の原子炉冷却材バウンダリの保全計画の策定に適用した事例を、理解促進の一助として示す。

3. 保守管理において考慮すべき研開炉の特徴

法令上、研開炉の一般的な定義はなく、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律施行令」において、高速増殖炉と重水減速沸騰軽水冷却型原子炉が、具体的に指定されているのみである[6]。ここでは、より一般的な議論を行うために、研開炉を、「新しい型式の発電用原子炉であり、実用化を目指した研究開発段階のもの」として定義する。

まずその定義から、研開炉は既存実用炉とは異なる新しい型式の原子炉であり、従って保守管理において考慮すべき研開炉の第一の特徴として、「既存の実用炉とは基本的なプラント仕様が異なっていること」を挙げることができる。さらに、この特徴から次の二つの特徴が導かれる (Fig. 1)。一つ目は、プラント仕様が新しいことに起因して運転経験が限られることから、「保全対象や保全技術自体が研究開発対象であること」である。二つ目は、限られた運転経験を補うために、通常、「設計段階において裕度が考慮されること」である。

例えば、「もんじゅ」の場合、既存実用炉である軽水炉と比較して、原子炉冷却材にナトリウムを使用していること、そのため高温低圧系であることが代表的な相違点として挙げられる。低圧系であることから、バウンダリが破損した場合にもガードベッセル等の外容器で液位を

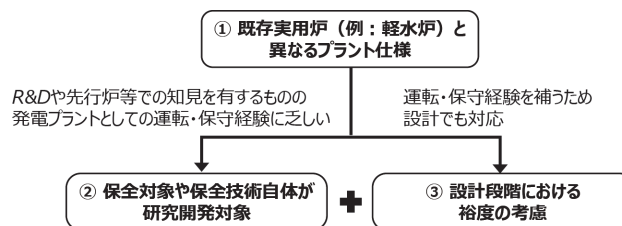


Fig. 1 Features to be considered for maintenance management of nuclear power plants at R&D stage

確保することにより炉心冷却が可能であるが、その一方で検査・点検の際のアクセス性が低下するという課題がある。またクリープ温度域で使用されることから、クリープ損傷やクリープ疲労損傷への対応が必要となる。ナトリウムは構造材料との共存性が高く腐食がほとんど無視できる一方、化学的に活性であることも注意すべき点である。ここに挙げた個別の内容は、研開炉の特徴でなく、ナトリウム冷却高速炉の特徴として整理されるべきものであるが、このような「既存実用炉と異なるプラント仕様を有すること」を考慮して、プラント仕様に適した保守管理を新たに実施していかなければならないことは、研開炉に共通するものである。

二つ目の特徴として挙げた「保全対象や保全技術自体が研究開発対象であること」に関しては、研開炉には、実用化に向けて基盤データを取得していくことや実用炉に要求される各種技術を確立していくという使命が存在することから、保全対象や保全技術自体が研究開発対象であることは半ば自明である。

最後に挙げた「設計段階において裕度が考慮されていること」については、例えば、「もんじゅ」の場合、原子炉容器を縦溶接継手の無いリング鍛造材を用いて製作するとともに、周方向溶接継手についても熱過渡応力が大きい液面近傍や、炉心近傍の高照射領域から遠ざけることにより原子炉容器の信頼性の向上を図る等の考慮を実施している[7]。また、接触型やガスサンプリング型等動作原理の異なる複数のナトリウム漏えい検出器や液位計等その他のナトリウム漏えい確認が可能な設備が設置されており[8]、万一の漏えいも、速やかに、かつ確実に検出できるように備えられている。研開炉においては、例え研究開発段階の保全技術を適用する場合においても、このような設計上の裕度も考慮して、原子力施設の安全性が総合的に確保されることを確認することが重要である。

4. 研開炉の保守管理の目的

研開炉の保守管理を検討する上で考慮すべき研開炉の特徴として、「既存実用炉と異なるプラント仕様を有すること」、「保全対象や保全技術自体が研究開発対象であること」、「設計段階において裕度が考慮されていること」の三点を挙げた。実用化に向けては、運転経験を通じて、研究開発対象である保全対象や保全技術に関する知見を拡充し、保全を高度化していく一方で、設計・設備に関する過度な保守性を取り除き、設計と保全のバランスを向上させていくことが重要である。従って、研開炉の保守管理においては、原子炉施設の安全性確保を最優先とした上で、上記の三つの特徴を考慮してプラント仕様(炉型)に適した保守管理体系を構築していく必要がある。

そこで、プラント仕様に適した保守管理体系の構築を、研開炉の保守管理の目的に追加すべきかについて考察する。この際、保守管理の対象である当該炉と、後継炉に分けて考える必要がある。まず当該炉にとっては、プラント仕様に適した保守管理体系の構築は、保全の高度化による当該炉の安全性向上活動の一環と考えられる。したがって、当該炉にとっては、プラント仕様に適した保守管理体系の構築は、既に研開炉の保守管理の目的として定めた「原子炉施設の安全性確保」に含まれており、特筆する必要はない。また、実用化の観点からは、当該炉の保全で得られた知見を、後継炉の設計や保全計画の検討に具体的に反映していくことも重要である。しかしながら、これらの内容は保守管理の対象外である後継炉開発の中で実施すべきものである。以上のことから、研開炉の保守管理の目的にプラント仕様に適した保守管理体系の構築を追加する必要はないと判断した。

なお、JEAC4209-2007では、電力の供給信頼性の確保も保守管理の目的として挙げられているが、実用化に向けた研究開発中である研開炉の保守管理の目的に、実用炉の要件と考えられる電力の供給信頼性の確保を追加することは、人的・経済的資源の配分に対して不必要な制限を課すこととなり、結果として安全上重要な系統・機器の保全に供される資源を低下させることにもつながりかねない。また、研開炉の保守管理の目的に電力の供給信頼性の確保を含めないとしても、当然、原子力施設の安全性確保のために必要な保全は適用されることから、原子力施設の安全確保の観点で問題はない。したがって、研開炉の保守管理の目的に、電力の供給信頼性の確保は含めないこととした。

以上より、研開炉の保守管理の目的は、研開炉の三つの特徴を考慮して、原子炉施設の安全性を確保することである。保全対象や保全技術自体が研究開発対象の場合、設計段階における裕度も考慮して、総合的に原子炉施設の安全性が確保されていることを確認する必要がある。また、研開炉の役割である実用炉開発に資する基盤データ取得の観点から、実用化の課題を認識した上で、保全技術を継続的に高度化するとともに、研開炉自身の安全性向上につなげていくことが重要である。

5. 研開炉への JEAC4209-2007 適用性分析

5.1 一般事項

まず、目的(MC-1)、適用範囲(MC-2)及び保守管理(MC-4)について検討する。用語の定義(MC-3)については、ここでは省略する。なお、カッコ内の英数字は、JEAC4209-2007の条項番号である。

目的(MC-1)については、前述の通り、JEAC4209-2007では、原子炉施設の安全性確保と電力の供給信頼性確保のために供用期間中に実施すべき保守管理の基本要件を定めるとあるが、研開炉においては、保守管理の目的が研開炉の三つの特徴を考慮して、原子炉施設の安全性を確保することであることに変更する必要がある。

適用範囲(MC-2)については、JEAC4209-2007では、原子炉施設の供用期間中に事業者が行う保守管理に適用すること、原子燃料が初装荷された後の起動試験段階においても準用できることの記載があるが、これについては研開炉においても同様である。

保守管理(MC-4)においては、MC-5からMC-16の規定に基づき保守管理を実施することが要求されている。概略の実施フローをFig.2に示す。機器レベルの保全(図中、二点鎖線で囲む項目)、プラントレベルでの保全(同、一点鎖線で囲む項目)、さらに保守管理(同、破線で囲む項目)の合計三階層でPDCAサイクルが設けられており、このような考え方は研開炉にも適用できる。より詳細に確認すると、例えば、研開炉においては、一般にまだ設備が標準化されておらず研究開発段階であることから、保全の改善対策として取替や改造工事が選択される場合が多々あると想定されるが、これらについては、MC-11で既に規定されている。また、運転経験が限定されることから、特に研開炉特有の機器に対して保全内容の合理化を実施していくことが重要であるが、保全の合理化(点検間隔の延長や時間基準保全から状態基準保全への移行等)については、MC-15で既に規定されている。このよ

うに、実施フローのレベルでは研開炉の特徴を考慮して変更すべき点は特にない。

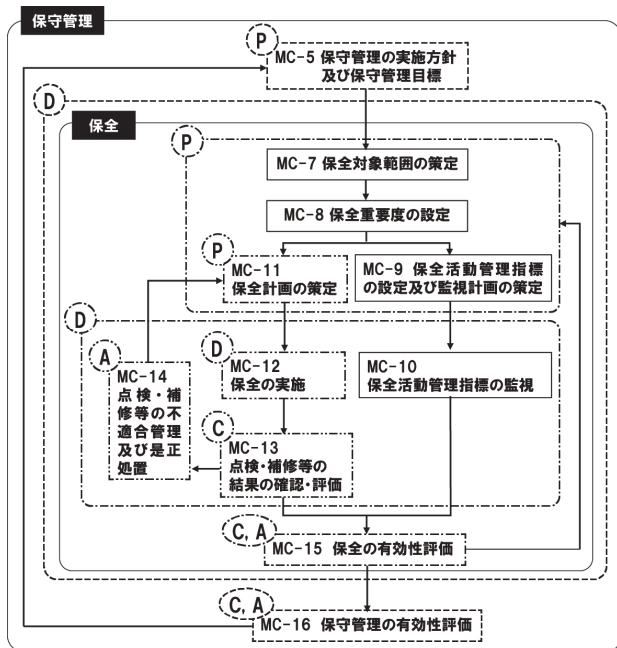


Fig. 2 Flow of maintenance management

5.2 保守管理の基本的要求事項

次に、保守管理の基本的要求事項について検討する。

JEAC4209-2007 では、保守管理の実施方針及び保守管理目標 (MC-5) において、原子炉施設の安全性確保を最優先として、保守管理の現状や経営的課題等を考慮して、保守管理に関する実施方針を定めるとともに、具体的な目標を設定することを要求している。研開炉においても、原子炉施設の安全性確保を最優先とすることは同じであるが、実施方針を定める際の考慮事項として、研開炉の特徴を考慮する必要がある。具体的には、研開炉の役割である実用炉開発に資する基盤データ取得の観点から実用化に向けた課題を認識した上で、運転経験の蓄積と関連研究開発により保全技術の高度化と保全実施内容の継続的な改善を行い、さらにその成果を研開炉自身の安全性の向上に役立てていくことが重要である。

保全プログラムの策定 (MC-6) では、原子炉施設の安全性と電力の供給信頼性の確保のために、保全プログラムを策定することが要求されているが、研開炉の保守管理の目的に関する検討の結果を反映して、電力の供給信頼性確保は研開炉では必要ない。

保守管理の有効性評価 (MC-16) では、定期的に保守管理の有効性を評価し、保守管理が有効に機能していることを確認するとともに継続的な改善につなげることが要求されている。本要求は、研開炉にも適用可能であ

ると考えられるが、具体的な評価において、研開炉に特徴的なものは、MC-5 の保守管理の実施方針の考慮事項として追加した実用化の観点からの有効性評価である。特に実用化の観点から重要性が高い保全実施項目については得られた知見を整理し、課題を抽出することが必要である。安全性確保に関する設計への依存度が比較的高い研開炉においては、課題への対応のために、構造設計や設備設計、安全設計等に関する検討が必要となる場合があることから、保守管理の適用範囲にとらわれることなくそれら関連活動への影響についても評価することが重要である。

5.3 保全プログラムの具備すべき要件

最後に、保守管理の核となる保全プログラムに関する要求事項について検討する。

保全対象範囲の策定 (MC-7) では、保全を行うべき対象範囲が列挙されている。適用される法令等の違いを考慮する必要があるが、基本的に安全上重要な設備が選択されており、研開炉の保守管理の目的から、研開炉への適用に問題ないと考えられる。

保全重要度の設定 (MC-8) では、保全重要度を、重要度分類指針に基づく安全上の重要度とリスク情報に基づき設定することを要求している。ここで、保全重要度は、後述の保全方式 (予防保全/事後保全) の選定やシステムレベルの保全管理指標の設定の必要性の判断の根拠等に用いられる保全プログラムにおいて大変重要なパラメータである。研開炉の保守管理の目的から、安全上の重要度に基づき保全重要度を設定することは、研開炉でも同様である。一方で、研開炉の特徴として、運転経験が少なく保全対象が研究開発対象であることが挙げられるが、そのような状況では、利用可能なリスク情報は限られると想定される。このため、実用炉と同様のリスク情報の活用を要求することはできない。しかしながらそのような状況であっても、リスク評価のモデル等を積極的に活用して、炉心損傷や格納容器機能喪失を防止するために有用なアクシデントマネジメント設備を抽出し、当該システム・機器の保全重要度を上げる等の取組を行うことは重要である。なお JEAC4209-2007 では、事業者の判断で電力の供給信頼性や運転経験等を追加考慮することも認めているが、研開炉においては、保守管理の目的から、これまでと同様に電力の供給信頼性を考慮する必要はない。

保全活動管理指標の設定及び監視計画の策定 (MC-9) 及び保全活動管理指標の監視 (MC-10) では、保全の有

効性を監視、評価するために、プラントレベル及び系統レベルの保全活動管理指標を設定し、その監視計画を定め、監視を行うことを要求している。これらの要求は、保全活動の客観的な評価を可能にするための重要な要求であり、研開炉にも適用すべきものである。なお、JEAG4210では、保全活動管理指標の目標値の設定に関して、プラントレベルの保全活動管理指標の候補である計画外自動スクラム回数等に関して国内プラントの実績や、系統レベルの保全活動監視指標に関してリスク情報との関連について詳述されているが、前述の通り、研開炉では、利用可能な実績やリスク情報に限りがあるため、保全重要度等を勘案して、工学的判断により目標値を設定することになると考えられる。実用炉のように他プラントとの比較・評価に用いるというよりも、研開炉自身の保全技術の向上を測る定量的な指標として活用することが重要である。

保全計画の策定 (MC-11) では、先に設定した保全重要度に基づき、保全の有効性評価の結果を踏まえながら、保全計画 (「点検計画」、「補修、取替え及び改造計画」及び「特別な保全計画」) を策定することを要求している。また、必要に応じて、運転経験、使用・運転環境、劣化・故障モード、設計的知見、及び科学的知見を考慮することとなっている。JEAG4210では、高経年化技術評価の知見を取り入れ、機種ごとに各部位に発生する劣化事象とその検知方法を整理した「劣化メカニズム整理表」の例が紹介されているが、現在の軽水炉の保全計画の策定において、この「劣化メカニズム整理表」が実務的な中心になっていると考えられる。参考として、軽水炉において、「劣化メカニズム整理表」がまとめられた段階を整理すると以下ようになる。

Step 1: 高経年化技術評価の実施。

Step 2: 国内 14 基の高経年化技術評価の結果から、機種ごとに各部位に発生する劣化事象を「経年劣化メカニズムまとめ表」として整理し、標準化[9]。

Step 3: 各電力の保全経験をもとに、「経年劣化メカニズムまとめ表」に保全項目 (検知方法等) を追加し、国内の電力会社共通の表として「劣化メカニズム整理表」を整備するとともに、運転経験を反映して、定期的に更新。

研開炉は、運転経験が限られ保全対象や保全技術自体が研究開発対象であるという特徴から、特に研開炉特有の機器に対しては、現在の軽水炉で活用されている「劣化メカニズム整理表」に相当するものの存在を仮定した

保全計画の設定の要求は現実的ではない。研開炉では、まずは、実験炉等の先行炉や海外炉の運転経験、設計的知見及び科学的知見から考慮すべき劣化事象を抽出し、代表部位での実データ取得による設計的知見の確認等を行いながら、運転経験を継続的に反映して経年劣化事象に関する知見を拡充していくことが重要である (Fig. 3)。また、その際、同じく研開炉の特徴である設計で考慮された裕度や、設備追加等による安全性向上策を踏まえて、総合的な安全性が確保されていることを確認することも重要である。

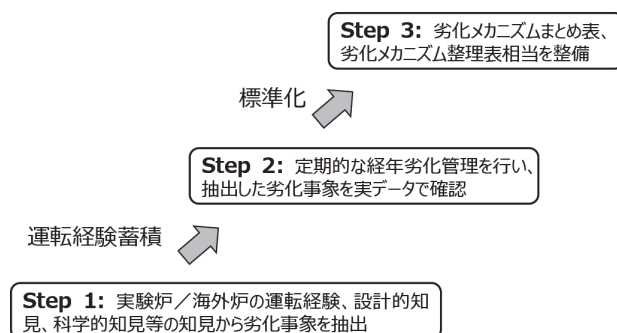


Fig. 3 Steps for knowledge expansion of aging degradation

保全の実施 (MC-12)、点検・補修等の結果の確認・評価 (MC-13) 及び点検・補修等の不適合管理及び是正処置 (MC-14) では、MC-11 で策定した保全計画に従い、保全を実施し、その結果を確認・評価し、問題があれば対応することを求めている。研開炉としての特徴は、既に保全計画に反映されているため、これらの条項については、研開炉にも変更せずに適用可能である。

保全の有効性評価 (MC-15) では、保全活動から得られた情報等から、保全の有効性を評価し、保全が有効に機能していることを確認するとともに、継続的な改善につなげることが要求されている。本要求についても、研開炉に適用可能である。保全対象や保全技術自体が研究開発対象であるという特徴を有し、実用化に向けて保全の高度化が重要である研開炉においては、想定する劣化メカニズムの検証や、より精度や信頼性が高く効率の良い保全技術の採用等、検討すべき内容は多岐にわたると想定されるが、実用炉にも増して、保全の改善の重要性を認識し、有効性評価を実施することが必要である。

6. 研開炉の特徴を考慮した保守管理

5章で検討した JEAC4209-2007 の研開炉の保守管理への適用性分析結果に基づき、研開炉の特徴を考慮した保守管理を Table 1 に提案する。

Table 1 Proposal of maintenance management of nuclear power plants at R&D stage

番号	項目	研開炉の特徴を考慮した変更点及び考慮事項
MC-1	目的	<ul style="list-style-type: none"> ● 研開炉の特徴を踏まえた保守管理を実施する必要があることを明確化 ● 「電力の供給信頼性の確保」を削除。
MC-2	適用範囲	<ul style="list-style-type: none"> ● 変更なし
MC-4	保守管理	<ul style="list-style-type: none"> ● 変更なし
MC-5	保守管理の実施方針及び保守管理目標	<ul style="list-style-type: none"> ● 保守管理の実施方針を定める際の考慮事項として、実用化に向けた課題を追加
MC-6	保全プログラムの策定	<ul style="list-style-type: none"> ● 保全プログラムの目的から、「電力の供給信頼性の確保」を削除
MC-7	保全対象範囲の策定	<ul style="list-style-type: none"> ● 変更なし (適宜、適用される法令に応じた修正は必要)
MC-8	保全重要度の設定	<ul style="list-style-type: none"> ● 安全上の重要度に基づき設定することを明確化 ● 実用炉に比べて制限があると予想されるものの、リスクに関する情報を積極的に活用することを要求 ● 「供給信頼性」の考慮を削除
MC-9	保全活動管理指標の設定及び監視計画の策定	<ul style="list-style-type: none"> ● 変更なし
MC-10	保全活動管理指標の監視	<ul style="list-style-type: none"> ● 変更なし
MC-11	保全計画の策定	<ul style="list-style-type: none"> ● 設計的知見や科学的知見等に重点を置いた保全計画の策定 ● 設計・設備の裕度を考慮し、総合的な安全性が確保されることを確認 ● 保全計画の妥当性確認のため、知見の確認用データを取得 ● 安全裕度向上の観点から、健全性維持確認のために監視等を積極的に実施 ● 経年劣化に関する情報の将来的な標準化を目指した知見の拡充
MC-12	保全の実施	<ul style="list-style-type: none"> ● 変更なし
MC-13	点検・補修等の結果の確認・評価	<ul style="list-style-type: none"> ● 変更なし
MC-14	点検・補修等の不適合管理及び是正処理	<ul style="list-style-type: none"> ● 変更なし
MC-15	保全の有効性評価	<ul style="list-style-type: none"> ● 変更なし
MC-16	保守管理の有効性評価	<ul style="list-style-type: none"> ● 保守管理の適用範囲に限らず、構造設計や安全設計等の関連活動への影響についても評価することの重要性を注記

7. 適用事例

提案した研開炉の保守管理の考え方にに基づき、ナトリウム冷却高速炉の特有な機器である原子炉冷却材バウンダリの保全計画（点検計画）を検討した例を示す。

研開炉の保全計画の策定に当たっては、実験炉等の先行炉や海外炉の運転経験、設計的知見及び科学的知見から考慮すべき劣化事象を抽出する必要がある。ナトリウム冷却高速炉の原子炉冷却材バウンダリについては、以下のような知見がある。

まず、構造材料とナトリウムの共存性に関しては、充実した知見が存在する[10]。一般に液体金属中に固体材料を浸すと成分元素が溶出する。系内に温度差がない場合、溶解度に達すればそれ以上溶出することはないが、温度差がある場合、高温部分で溶出した元素が、流動により

輸送され低温部で過飽和となって析出するため（質量移行）、高温部分での溶出が継続する。原子炉冷却材バウンダリでは当然、系内に温度差があるため、質量移行現象に注目する必要がある。また、ナトリウム中は還元雰囲気のため、水環境のような材料の直接的な酸化（腐食）はないが、溶出元素が、ナトリウム及び溶存酸素と複合酸化物を形成することから、溶存酸素濃度の上昇とともに見掛けの溶解度が増加する。以上のように、ナトリウム環境においては、水環境のような材料の酸化物形成、成長と剥離の繰り返しによる減肉の進行は発生し難く、系内の温度分布による質量移行と溶存酸素による挙動の加速が主要な腐食進行因子となる。こうした知見に基づき、高速炉用設計・建設規格[11]では、液体ナトリウム接液面のくされ代の評価式を規定している。例として、温度 500℃、酸素濃度 5 ppm、30 年間の SUS304 のくされ代

を評価すると約 0.03 mm であり、ごくわずかであることがわかる。

エロージョンについては、材料とナトリウムの高い共存性を考慮して、純粋な機械的浸食の可能性に注意する必要があるが、これまでの実験結果からはエロージョン発生の可能性は極めて小さい[12,13]。実際に「常陽」の改造工事 (Mk-III 工事) のために切り出された配管 (高温流動ナトリウム (約 5.2m/s) に 5 万時間以上接触) を観察しても、エルボ部でも浸食は観察されていない[14]。

また、クリープ温度域で使用され、主たる荷重が熱過渡に伴う変位制御型であることから、クリープ疲労損傷による亀裂の発生・進展が懸念される。しかしながら、クリープ疲労損傷については、研開炉の特徴として、評価法に大きな裕度 (約 100 倍) が考慮されている[15, 16]。

運転経験の観点からは、国内実験炉の運転経験は良好であるものの、海外炉においていくつかの不具合が報告されている。設計・製作時の不良を別とした主な不具合の原因は、上記の科学的知見の前提であるナトリウム純度や熱過渡の管理が不適切であったことである。

以上より、現状知見において、質量移行による減肉とクリープ疲労損傷による亀裂が、ナトリウム冷却高速炉の原子炉冷却材バウンダリの劣化事象として懸念されるが、いずれも設計において対応がなされており、ナトリウム純度の管理や熱過渡の管理を適切に実施すれば、これらの劣化事象が顕在化することはないと考えられる。

次に、研開炉の特徴である設計で考慮された裕度や、設備追加等による安全性向上策を踏まえて、総合的な安全性が確保されていることを確認する。

質量移行やクリープ疲労損傷に関する設計での考慮は既に述べた通りである。追加設備については、例えば、ガードベッセルや漏えい検知設備が挙げられる。万が一の原子炉冷却材漏えいの場合にも、低圧系であることから、ガードベッセルで液位を確保することにより、原子炉施設の安全性は確保される。また、ナトリウムの特徴として電気伝導度や化学的活性が高いことから、微小な漏えいであっても接触型やガスサンプリング型検出器により検出が可能であり[8]、常時、バウンダリが維持されていることが確認できるとともに、万が一の漏えいの際にも、漏えいが炉心の冷却に影響を与える以前の段階で検出することが可能である。仮に貫通亀裂が発生しても低圧系であり瞬時破断に至らないこと、亀裂を進展させる主要な荷重がプラントの起動停止に伴い発生する熱荷重であり実時間における亀裂の進展速度は極めて緩慢で

あることも、ナトリウム冷却高速炉の安全裕度向上策として、連続漏えい監視が効果的である根拠となる。なお、仮にナトリウムが漏えいした場合、保温材等が変色することから、原子炉停止中の目視により、漏えいの有無を確認することも可能であり、適宜、連続漏えい監視と漏えい痕目視を組み合わせることも有効である。

以上の検討結果に基づき、ナトリウム冷却高速炉の原子炉冷却材バウンダリに対する保全計画を策定する。

(1) 保全重要度の設定

研開炉では、原則、安全上の重要度から保全の重要度が設定されるが、原子炉冷却材バウンダリであることから、安全上の重要度は高く、従って保全重要度も高い。

(2) 劣化事象の抽出

保全重要度が高いことから、供用期間中、要求機能 (バウンダリ機能) が維持される必要がある。点検項目の設定のために必要な情報として、考慮すべき劣化事象を抽出しなければならないが、研開炉においては、実験炉等の先行炉や海外炉の運転経験、設計的知見及び科学的知見に基づき抽出する。上述の通り、現状知見では質量移行とクリープ疲労損傷が懸念されるが、設計対応されており、ナトリウム純度や熱過渡の適切な運転管理を前提とした場合、劣化は無視できる。

(3) 点検項目の設定

現状知見において顕在化が懸念される劣化事象はないが、研開炉の保守管理においては、以下の二点を追加考慮する。まず、実データの取得により、劣化メカニズム抽出の前提条件や設計的知見の妥当性の確認を実施し、経年劣化事象に関する知見を拡充する。また、安全裕度向上の観点から対象機器が健全であることの確認を実施する。

一点目の観点からは、劣化事象抽出の前提となっている熱過渡及びナトリウム純度管理が適切に実施されているか確認する。また、設計手法の実証データ取得のために、体積検査及び肉厚検査を実施する。なお、検査の実施部位及び頻度に関しては、設計手法の実証の観点から有意なデータが取得できるように設定する。二つ目の観点からは、連続漏えい監視に適宜、漏えい痕の確認を組み合わせることにより、バウンダリが健全であることを確認する。

以上をまとめた結果を Fig. 4 に示す。熱過渡・純度管理、連続漏えい監視 (+漏えい痕確認) 及び体積・肉厚検査の全体で、原子炉冷却材バウンダリの保全を構成する。データ蓄積による設計手法の実証等により、研開炉の信

頼性がより向上すると期待される。

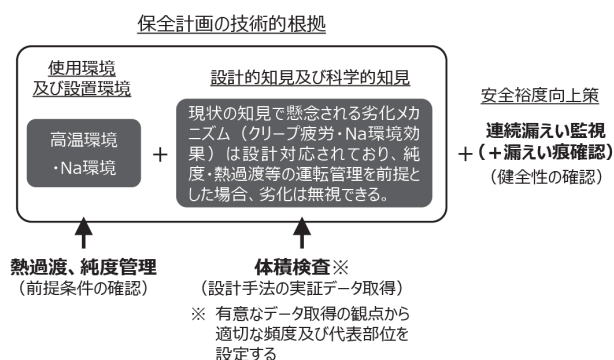


Fig. 4 An example of maintenance program of reactor coolant boundaries of sodium-cooled fast reactors

8. 結言

研開炉の特徴を考慮した保守管理の考え方について検討した。まず研開炉の保守管理の目的を、以下の特徴を踏まえ、原子炉施設の安全性を確保することとした。

- 1) 既存実用炉と異なるプラント仕様を有すること。
- 2) 保全対象や保全技術自体が研究開発対象であること。
- 3) 設計段階において裕度が考慮されていること。

次に、上記の目的等に照らして、JEAC4209-2007 の研開炉への適用性を分析し、研開炉での要求事項や考慮事項を提案としてまとめた。

さらに、提案した考え方の適用事例として、ナトリウム冷却高速炉の原子炉冷却材バウンダリの保全計画を検討した。考慮すべき劣化メカニズムはないが、実機における知見収集の観点からナトリウム純度等の管理を行うこと、安全裕度向上の観点から連続漏えい監視等を実施すること、設計手法の実証の目的で代表部位に対し体積検査及び肉厚検査を実施することが特徴的である。

本提案に基づく保守管理により、研開炉の安全性の確保と保全の高度化が実現されると考える。

謝辞

山口彰教授 (東大院)、出町和之准教授 (東大院)、鈴木直浩氏 (中部電力 (株))、西村貢氏 (東京電力 (株))、横田昌樹氏 (関西電力 (株))、小林則宏氏 (中国電力 (株))、笠毛誉士氏 (九州電力 (株)) には、貴重なご意見を頂きましたことを感謝いたします。

参考文献

[1] 例えば、原子力安全・保安院：“原子力発電施設に対する検査制度の改善について”，検査の在り方に関する

検討会第 20 回配布資料 (2006)。

[2] 日本電気協会：“原子力発電所の保守管理規程”，JEAC4209-2014 (2014)。

[3] 日本電気協会：“原子力発電所の保守管理指針”，JEAG4210-2014(2014)。

[4] 日本電気協会：“原子力発電所の保守管理規程”，JEAC4209-2007(2007)。

[5] 原子力安全・保安院：“実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第 11 条第 1 項及び研究開発段階にある発電の用に供する原子炉の設置、運転等に関する規則第 30 条第 1 項に掲げる保守管理について (内規)”，平成 20・12・22 原院第 3 号 (2008)。

[6] “核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律施行令 (昭和 32 年 11 月 21 日政令第 324 号)”，(2016)。

[7] T. Takahashi et al.：“Construction of the MONJU Prototype Fast Breeder Reactor”，Nuclear Technology, Vol. 89, pp. 162-176 (1990)。

[8] 原子力百科事典 ATOMICA：“ナトリウムの安全性 (1 次系ナトリウム)” (2010)。
http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=03-01-03-04

[9] 日本原子力学会：“原子力発電所の高経年化対策実施基準：2008”，AESJ-SC-P005 (2008)。

[10] 核燃料サイクル開発機構 ナトリウム教育委員会：“ナトリウム技術読本”，JNC TN9410 2005-011 (2005)。

[11] 日本機械学会：“発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2014 年追補) 第 II 編 高速炉規格”，JSME S NC2-2014 (2014)。

[12] F.R. Standley：“FFTF Sodium Erosion Tests T-1-B and T-1-D”，HEDL TME71-99 (1971)。

[13] 動力炉・核燃料開発事業団：動力炉技報 No.42、PNC TN134-82-02 (1982)。

[14] 磯崎和則ら：“高速実験炉「常陽」の定期的な評価—高経年化に関する評価”、JNC TN9440 2005-003 (2005)。

[15] K. Watashi et al.：“Creep-Fatigue Test of Thick-Walled Vessel Under Thermal Transient Loadings”，Transactions of the 9th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol. L, pp.207-212 (1987)。

[16] K. Watashi et al.：“Creep-Fatigue Strength Evaluation of Thick-Walled Vessel Under Thermal Transient Loadings”，Ibid., pp.93-98。

(平成 28 年 3 月 16 日)