

解説記事

保全の体系化について (第3回) — 保全最適化の考え方 —

設楽 親 Chikashi SHITARA
東京電力(株)

岩見 裕 Hiroshi IWAMI
普遍学国際研究所

熊野哲嗣 Tetsuji KUMANO
三菱重工業(株)

今野隆博 Takahiro KONNO
(株)日立製作所

1. はじめに

保全の体系化について、第1回では原子力発電所の保全活動の現状、第2回では、原子力発電所の保全技術について、紹介を行ってきた。

第3回では、これらの活動や保全技術を如何に組合せ最適化を図るかについて、基本的な考え方を紹介する。

原子力発電所の保全活動は、一般公衆および従事者の安全確保と原子炉施設の安全確保の観点から、原子炉施設に要求される機能を確保し、かつ維持することを目的としている。

この保全活動には、第1回でも紹介したように、プラント運転中に実施する定例的な点検・試験のほか、法令で義務づけられるプラントの停止を伴う年1回の定期検査、電力が自主的に行う電力自主点検があり、この間、膨大な作業が実施される。また、これらの保全活動は、必然的にかかる費用も膨大となる。

したがって、現実論としては、運転時、定期検査時を通して、バランスのよい保全活動を行い、総合的に(プラントライフを通じて)、“安全性・信頼性”と“経済性”の最適点を求めることが必要となってくる。⁽¹⁾

2. 保全の構図

現状の保全は、図-1に示す保全の構図の中で太い矢印に沿って立案され、実行されている。この図では、プラント全体を系統レベル、個々の機器レベルへと展開し、保全の行為としての単位は、機器のひとつひとつが対象となることを示している。⁽²⁾

個々の機器に対する保全の本質は、経年変化事象を的確に把握し、顕在化する前に必要な正措置を行うことにより、機器に要求される機能を維持することにある。

しかしながら、個々の機器ごとに保全の本質に従って保全計画を立案し、それを単に寄せ集めただけでは、プラント全体としての保全の最適化は図れない。

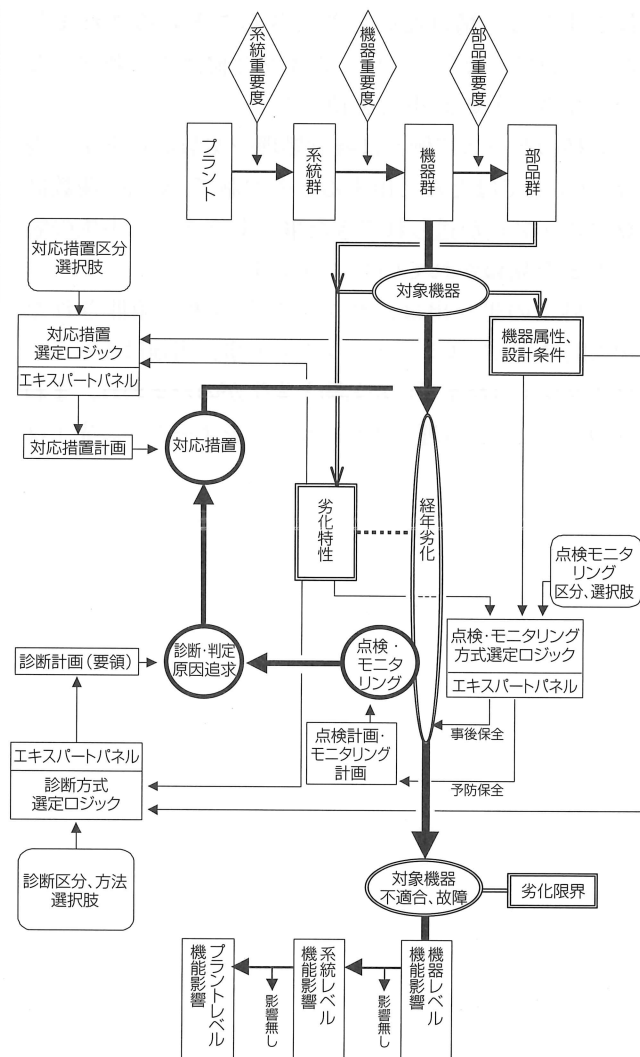


図-1 保全の構図

プラント全体として最適化を図るためには、最適化の達成目標に対する個々の機器の重要性を十分に考慮した上で、個々の機器の最適化を図り、最終的にこれらを統合することが必要となる。

3. 保全の最適化

3-1) 最適化目標の設定

保全体系化の目的は、先に述べたように“安全性・

信頼性”と“経済性”の最適点で保全活動を行うことである。

したがって、体系化にあたっての第1ステップは、何に対して最適点を求めるかをより具体的に設定することから始まる。

理解しやすく一般的なものは、“安全性・信頼性”を維持したうえで、“経済性”も追求する「稼働率の向上」という目標であろう。次に、これを達成するためには何が必要かを考える。プラントレベルで考えれば、「長期サイクル運転」、「定期検査期間の短縮」、「計画外停止の最小化」がこれにあたる。さらにこれらの内、「計画外停止の最小化」という項目を例にとると「スクラム頻度の低減」、「手動停止の低減」などに細分化できる。ここまで達成目標が具体化すると、保全の対象を考えやすくなる。このように、第1ステップとしての目標の設定作業は、それぞれの項目毎に保全の対象系統・機器が抽出可能となるまで具体化していくことが重要である。

ここでは、第一段階の目標を「大目標」、具体化した最終段階を「個別目的」、この中間段階を「中レベル目標」と呼ぶことにする。(図-2 参照)

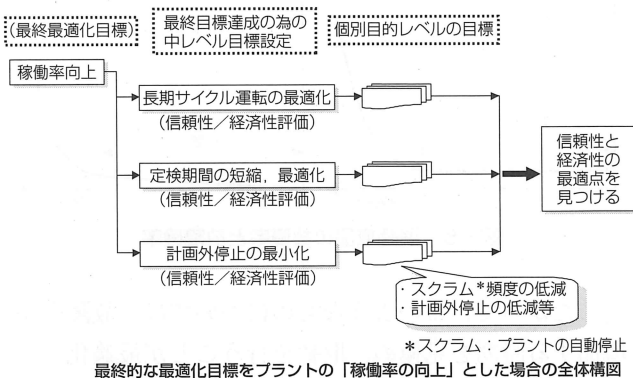


図-2 最適化目標の設定

3-2) 機器等の重要度分類

第2ステップは、「個別目的」を達成するために保全の対象とすべき具体的な機器の抽出作業となる。対象となる機器の抽出は、設計図書等に基づき実施し、その後「個別目的」への係わりの大小によって、「保全上の重要度」を定めることになる。この手法としては、詳細には、リスク評価による分類、簡易的には、エキスパートパネルによる手法などが挙げられる。これらの手法により、「保全上の重要度」を定め、これに基づ

き具体的な保全の方法を検討していくこととなる。

基本的な方針は、

- 1) 重要度が低く、「事後保全」が選択可能な機器は「事後保全」とする。
- 2) 上記以外のものについては、基本的に「時間基準保全」か「状態基準保全」かの選択となる。ここで、その選択は、状態監視装置等に係わる費用等の経済性の観点も考慮する。
 - a. 状態監視が可能な機器で、経済的にも見合う場合は「状態基準保全」への移行を考慮する
 - b. 「状態基準保全」が困難な機器、または「状態基準保全」が経済的に見合わない場合は、「時間基準保全」を選択する。またあわせて「点検周期」の最適化を検討する。

となる。

このステップにより、「個別目的」に対して、「事後保全」(いいかえれば対象外の機器と同等の扱い)か、それ以外(保全方法の検討が必要な機器)であるかを定めることとなる。

3-3) 保全方法の抽出

第3ステップは、個々の機器に対する保全方法の検討である。重要度が高く、「事後保全」が選択できない機器については、機器に求められる機能(例えば、ポンプで言えば、送水機能、耐圧機能等)を整理し、それら機能を達成するために必要な機器構成部品を抽出展開(部品の機能別展開)した後、構成部品に生じる可能性のある経年変化事象に対応した選択可能な保全方法を検討する。

具体的には、

- 1) 部品ごとに機器の機能の整理(部品の重要度)
- 2) 部品ごとの劣化モードの分析・評価
- 3) 劣化モードに応じた保全方法の抽出
- 4) 消耗品等の取替必要部品の抽出

といった項目について検討する。

このステップにおいては、機器の機能維持の観点から、部品の種類(消耗品等か否か)および重要度と選択可能な保全方法が部品ごとに抽出される。

3-4) 保全方法の最適化検討

第4ステップは、第3ステップの検討に基づく「個別目的」に応じた保全方法の検討である。すなわち、このステップで「個別目的」を達成するために、選択

可能な保全方法から最適なものを選定（最適化）することとなる。

機器の構成部品は、設計・製作段階から定期取替を必要（前提）とするもの（消耗部品）とそれ以外のもの（耐久部品）があることから、保全に際してもこのような構成部品の特徴を考えて、最適化していくことが基本となる。

一方、原子力発電所の機器等、高い「信頼性」が要求されるものについては、十分な実績があり、確認された技術を採用するとともに、初期故障については、他の機器や部位への水平展開を図り、再発防止に努めてきている。このことから、高い「信頼性」が要求される機器の故障率は、現実的には時間軸に対して、

「当初安定し、その後増加」

→ 定期取替が必要なもの（消耗部品）

「当初からほぼ一定」

→ 定期取替を必要としないもの（耐久部品）
と対応させて考えることができる。

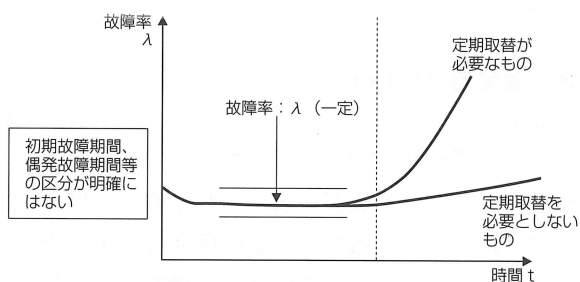


図-3 故障率と時間の関係

故障率 $\lambda(t)$ をもとに故障確率 $P(t)$ は、時間 t の積分値として与えられることになるが、図-3に示す $\lambda(t)$ がほぼ一定値の間での使用が主体であれば、 $P(t)$ は時間とともにほぼ一定の勾配で増加していくことになる。

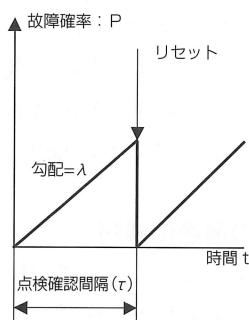


図-4 故障確率と点検

ここで、一定期間 τ の間隔で機器の点検、健全性確認等を実施すると、（単純化して考えれば）確認後の故障確率は一旦リセットされ、その後は前と同じ傾向で増加することとなる。

したがって、対象とする機器の点検等をいつ実施する（点検周期）のが妥当かという判断は、どの程度の故障確率の増加までが許容できるかということに依存することになる。

これをもとに、「定期取替が必要なもの（消耗部品）」と「定期取替を必要としないもの（耐久部品）」について検討する。

3-4.1 定期取替が必要なもの（消耗部品）

一般的には、「定期取替が必要なもの」は、設計や実験等をもとに経年変化の許容値が定められているものであり、故障率 λ がほぼ一定の期間については、その値が非常に小さく、その間、故障確率 P の増加も非常に微々たるものであり、これが顕著化するのは、故障率 λ の増加に伴って、故障確率 P が急増していく段階である。

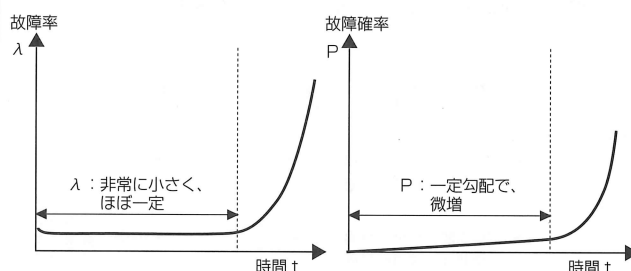


図-5 消耗無品の故障率と故障確率

したがって、このようなものについては、故障率が増加する時期を見極め、取替を行うことが最適化となる。わかりやすい表現をとれば、その部品の寿命を使いきるといことになる。

定期取替が必要なものは、多くの場合、設計や実験をもとに保守的に取替推奨時期が設定されるため、実際の使用条件下でのデータをもとに取替周期を見直すことが現実的な最適化検討である。

この具体的方法としては、データベースからの寿命予測や種々の状態監視が有力な候補となり得る。これらの手法は、使用経験や機器の状態を把握するものであることから、取替周期の延長という観点のみならず、設計や実験で模擬できなかった条件も補完して、取替周期の最適化を図るとい点でも有効なものとなる。

3-4.2 定期取替を必要としないもの（耐久部品）

「定期取替を必要としないもの（耐久部品）」は、設計で想定した使用条件では経年変化は問題とならないものである。したがって、このようなものについては、効率的に機器や構成部品を維持・管理することが保全方法の最適化につながる。

機器や構成部品を維持・管理するためには、機器や構成部品が設計想定どおりの機能を達成し、設計で想定した状態にあり、異常の発生による悪影響がないことを確認することが必要である。

ここで、“異常”という状態を考えると、構成部品でみると許容寸法を外れるなどの状態であり、機器で見ると機能劣化といった状態にあたる。さらにその機器の属する系統で考えれば、系統機能の部分喪失といった状態であり、プラント全体で考えれば、出力低下や安全性の低下といった状態にあたる。

すなわち、機器や構成部品を維持・管理するとは、必ずしも機器や構成部品レベルで考えなければならないものではなく、その機器の属する系統やプラントにおける重要度を考慮し、異常を早期に検知して、異常による悪影響およびその拡大防止を図ることであり、この防止方策としての“保全（方法／周期）”にかかるコストと“異常”による“機器単体→系統→プラントへの影響”とのバランスを最適化することが、この場合の保全方法の最適化と考えることができる。

具体的に保全方法の最適化を検討するためには、先に述べたように機器や構成部品が“設計想定どおりの機能を達成しているか”、“設計で想定した状態にあるか”ということ如何に確認するかが重要である。機器や構成部品からみれば、前者に起因するものは、“故障モードの想定が可能であるもの”、後者に起因するものは“故障モードの想定が困難なもの”ということができる。また、ランダムに発生する故障モードについても後者に含めて考えることができよう。

この両者に分類して考えると以下のようなになる。

a) 故障モードの想定が可能なもの

保全－ここでは点検方法と点検周期－は、設計で考慮した経年変化が進むことを想定し、機器の重要度に応じて、どのような段階の異常を検知すべきかを考慮して定めることができる。

この場合には、点検結果に応じて、その後の経年変化の可能性を低減（排除）することができる。

b) 故障モードの想定が困難なもの

この場合の保全は、どの時点で経年変化を想定するかということが困難であることから、機器の重要度に応じて、どのような方法および頻度で、異常の発生を検知するかが最適化のポイントである。

話を具体化するために、ポンプを例にあげると、異常の発生を検知するために取り得る方法としては以下のものが考えられる。

・分解点検

異常を初期段階（予兆段階）で検知可能である。ただし、発生時期が不確定なものに対しては、効率的な実施が困難である。

・状態監視

振動監視の場合、回転体の異常は比較的早めに検知可能で、連続的な監視や短周期での実施も可能である。日常点検時の異音確認なども簡易的手段として含まれる。ただし、すべての異常兆候を検知することはできない。

・性能試験（サーベイランス）

異常がある程度進展し、性能に影響がでた段階で検知が可能となる。連続的な監視や短周期での実施も可能である。

これらの方法に、ポンプの重要度と使用条件（運転状態）を考えあわせると、一案としては、次のような分類での対応がある。

○重要度が高く通常運転しているもの

異常の早期発見、異常の拡大防止のため連続的な監視が望ましい。

→ 状態監視 + (定期取替（消耗品）等に伴う) 分解点検

○重要度が高く通常待機状態のもの

通常待機状態のため異常の拡大のリスクは小さい。運転要求時の異常による運転不能を防止することが重要である。

→ 定期的なサーベイランスによる運転性能確認

○重要度の低いもの（高くないもの）

異常発生によるリスクは小さいことから、異常の拡大防止のための点検は重要ではない。

→ 定期取替（消耗品）の実施

これをもう少し概念的に言えば、

影響：小 ← 機器 - 系統 - プラント → 大



点検：低 ← 異常の検知・拡大防止のレベル → 高
(方法/頻度)

という対応で点検方法および周期を選択して実施することとなる。

3-4.3 保全計画の立案

3.41項および3.42項の検討をもとに、保全の最適化にあたっては、空間軸（対象範囲（機器、部品）、点検内容）および時間軸（状態監視頻度、定期取替時期、経年変化の確認時期）を考慮して、表-1のように保全計画を最も合理的にとりまとめることが必要となる。

もちろん、この表の時間軸（列数）は固定されるものではなく、取替周期の異なる部品が混在して増えることもあれば、静的機器の場合などは経年点検のみが主体となり、減ることもあり得る。

3-5) 個別目的を統合する最適化検討

第5ステップは、第4ステップまでに行った「個別目的」ごとの最適化を統合することである。

A、B、Cという3つの「個別目的」（「中レベル目標」も同様）があった場合に、それぞれに保全方法が最適化された機器の集合が存在する。（図-6参照）この集合は、部分的に重なりを生じ、この重なりに位置する機器の保全方法をどのように決定するかということが、「個別目的」ごとの最適化を統合するということである。

この手法としては、「個別目的」に優先順位をつけ

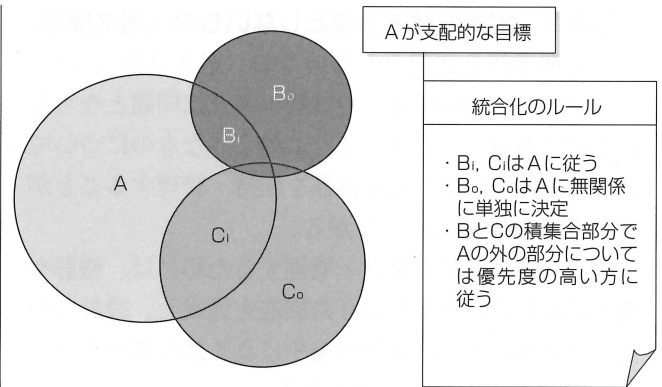


図-6 統合化の基本的考え方

て考えることがやさしい。すなわち「大目標」に対して、「中レベル目標」、「個別目的」の中で、何が支配的か（優先度の高い達成目標は何か）を考える。これは、第1ステップの目標設定で、「個別目的」に展開した段階で、実施してもよいものである。ここで重要なのは、「個別目的」の優先度について思考し、判断を行うことである。

優先度がつけられれば、基本的には、

- 1) Aの優先度が最上位の（Aが支配的な）目標とした場合には、図中のB_i（AとBの積集合）、C_i（AとCの積集合）はAに従う
- 2) BとCの積集合部分については、優先度の高い方に従う

というように考えることが可能となる。

3.1から3.5までに述べた保全の最適化検討の手順をフローとして示すと図-7のようになる。

表-1 保全計画

	通常の点検（性能試験等）	X年目の点検（定期取替等）	経年点検（詳細な点検）
対象		点検対象	
方法		範囲点検内容	
評価		判定基準	

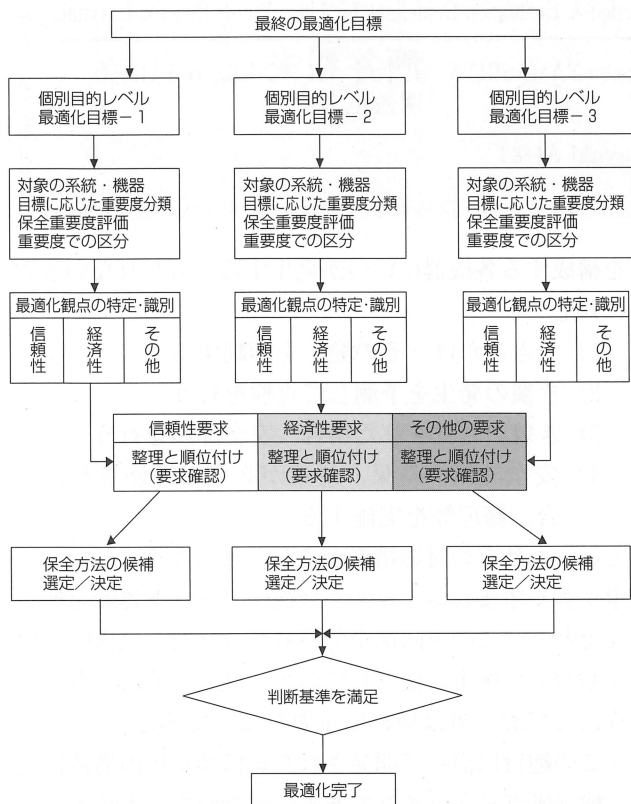


図-7 保全最適化の検討フロー

4. おわりに

これまで、原子力発電所機器の保全最適化について述べてきた。これを概念的に整理すると図-8のようになる。

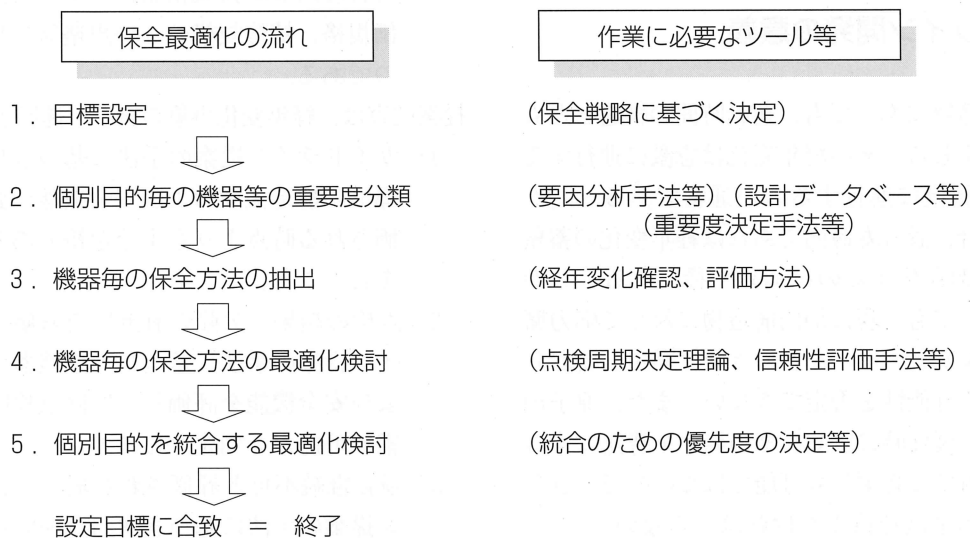


図-8 保全最適化の流れ (概念)

最適化の流れの中で、そのポイントを整理すると、

- ・ 保全最適化の目的は、保全の戦略目標に対して、如何に効率的かつ合理的な一連の保全活動（点検、評価、措置）をプラントライフを通して展開するかである。
- ・ 効率のかつ合理的に目標を達成するには、設備の「重要度」および求められる「信頼性」を把握し、保全方法を選択して計画を立てることが重要である。
- ・ 最適化プロセスにおいては、「目標」の設定（明確化）およびこれを達成するための「信頼性」尺度の設定をどう考えて行うかが重要である。ということができる。

これら最適化プロセスにおける各ポイントを抑え、一般化、普遍化していくことが保全体系化に繋がるものである。

第4回では、これら最適化プロセスにおける定量化手法について、その検討内容を紹介していくこととしたい。

参考文献

1. 織田満之：原子力プラントの保全と健全性モニタリング、(社)日本溶接協会原子力研究委員会第26回国内シンポジウム、平成12年6月
2. 宮健三、織田満之：保全の体系化に関する一考察、日本AEM学会誌 Volume 8 Number 2、平成12年6月