

JSM-MSP-001

原子力発電所の保全活動を適正化 するために必要な基本的事項と その解説

2020 年 6 月

(一社)日本保全学会
保全標準化推進検討会

本報告書は、(一社)日本保全学会 保全標準化
推 進 検 討 会 (Maintenance Standardization
Promotion Committee) が2年半に亘る調査・検討
を踏まえてその成果を取りまとめたものです。

目 次

1. はじめに	1
2. 保全の概要	2
2.1 産業プラントの生涯	2
2.2 保全の歴史的変遷	5
2.3 保全活動の概要	6
3. 保全の目的	9
4. 保全の構造	10
5. 保全最適化の方法	14
5.1 保全最適化の概要	14
5.2 保全計画の最適化	18
5.3 保全実施計画の最適化	24
5.4 保全の有効性評価	26
6. 保全作業管理	27
6.1 保全現場の概要	27
6.2 保全技術者の心得	29
6.3 保全作業管理のポイント	33
7. おわりに	34
参考文献	38
保全標準化推進検討会委員名簿	39
添付資料	42
A. 原子力安全と保全の関係	43
B. 保全の歴史的変遷	45
C. 保全重要度について	60
D. 時間基準保全（TBM）について	64
E. 状態基準保全（CBM）について	71
F. 事後保全（BDM）について	76
G. 保全テンプレートについて	78
H. 保全作業管理について	89
I. 保全内容の変更をバックアップする数理保全について	113

1. はじめに

「保全」という用語がありますが、本書で使用する「保全」とは、一言で言えば「機器が故障しないように計画的に手を加えて正常な状態に保つこと」です。我国では「保守」という用語も用いられますが、保守には「旧来の風習や伝統、考え方などを重んじて守っていかうとすること」という意味もあり、この意味のイメージが強くありますので、ここでは「保全」という用語を用いることとします。

保全と言っても保全の対象である機器を正常な状態に保つためにはいろいろな活動を実施する必要があります。まず、機器の現状を把握するための検査あるいはモニタリング（以下、これらを総称して検査という。）を実施する必要があります。その検査の結果を用いて機器の現状がどのような状態にあるか、その後の運転で経年劣化がどのように進展する可能性があるかを予測評価し、その評価結果を踏まえていつ頃再検査あるいは部品の取替や補修等を実施するかを決定する必要があります。そして、その決定された時期に実際に再検査あるいは部品の取替や補修等を実施する必要があります。これが保全活動の基本である「検査」「評価」、そして取替、補修等の「是正¹」の3つの活動です。

本書で述べる保全の対象は、家庭にある電気製品などの小さなシステムではありません。多種多様で、しかも膨大な数の機器から成る大規模複雑システムを想定しています。なぜそのようなシステムを想定するかですが、それには理由があります。それは下記の2つの理由があります。すなわち、

- ①この世の中にある産業プラント、すなわちエネルギー（電気、ガス、上水など）や石油化学製品（ガソリン、プラスチックなど）、食品、医薬品あるいは鉄鋼などを製造するプラントなどの産業プラントが、皆、多種多様で膨大な数の機器から成る大規模複雑システムであること
- ②また、このような大規模複雑システムは、その保全を実施する上で膨大な数の作業員や作業量を必要とするがゆえに少しの無駄が大きな無駄につながるため、効率的・効果的なやり方が必要であり、そのためには小さなシステムの保全とは全く異なる特別な考え方と方法を用いる必要があること

があるからです。その詳細については、以下の章で原子力発電所を例にとって順次述べていきますので、楽しみにしてください。

さて、産業プラントの保全は、設計、製造、据付、試運転を経て供用開始後に行われる重要なプラント保安活動の1つです。その活動には多数のエンジニアや作業員、資機材等を要し、数十年にも及ぶプラント供用期間の間、常に活動を継続する必要があるため、保全費用を総計するとプラントの建設費を上回るような費用を要することもまれではありません。したがって、その成否によってプラントの安全性はもちろんのこと、稼働率や製品単価にも大きな影響を与え、社会への貢献度、価値が大幅に変わり得ます。

¹ 本書でいう「是正」とは、経年劣化した機器あるいは部位を修復するための措置であり、単に補修を意味するだけでなく、取替、改造（改良、改善）、劣化緩和などを含む広い概念を意味しています。

保全は、その対象である機械系（ここでは、機械、電気、制御・計測、土木建築の各設備を総称して「機械系」と呼びます。）で起こる自然現象（経年劣化）の特性を適切に考慮するだけでは必要十分ではなく、経年劣化を修復するために保全作業を実施する人間系（ここでは、作業要領書に定められた手順と方法に従って保全作業を現場で実施する作業班を、機械系に対して「人間系」と呼びます。）の特性を適切に考慮した保全を行うことも極めて重要です。ここでは、保全現場は機械系と人間系から成っていることを想定して保全について述べることにします。

本書は保全技術者、保全研究者あるいは保全の専門家を志す若手の技術者、研究者の入門書となることを意図して作成しました。また、保全の専門家が時に保全の基本に立ち戻って考える必要が生じた際の参考となるような書、あるいは保全以外の技術者、研究者が保全の本質と基本を知る上で参考となるような書をイメージして執筆しました。読者の皆様から建設的なご意見をいただければ幸いです。

2. 保全活動の概要

2.1 産業プラントの生涯（立地選定、設計、建設、運転、保全、廃止措置の関係）

原子力発電所のような産業プラントは、まず、どこに建設するか、その立地選定から始まり、最終的にその使命を終えて解体・撤去される廃止措置までの長い生涯を辿ります（図1）。このような産業プラントの生涯を「揺りかご」から「墓場」までという人間の生涯によく譬えられ、表面的に類似している点も見受けられますが、両者は本質的に異なります。具体的には、保全対象である機械系の材料と肉体（人間には感情/意思等があります。）、それぞれに発生する経年劣化（人間は加齢と病気があります。病気は経年劣化でしょうか？）、検査に対する両者の考え方²、安全性と経済性に対する両者の考え方などがあり、両者の違いをあげれば切りがありません。

数百年前に作られた刀剣（鉄）であつても手入れをずっと続けてきたものは、今まさにできあがったもののようピカピカである一方、手入れされずに放置され、どこかから出土したものはボロボロに錆びていることなども金属と肉体の違いをよく表しています。良い環境で使用し手入れ（保全）を適切に実施すれば、腐食の進行を抑制でき、数百年もの間、健全状態を保てるのが金属の特徴です。我々が保全対象とする構造物や機器の大部分は金属でできています。私たちはこのことをよく理解した上で保全に取り組む必要があります。

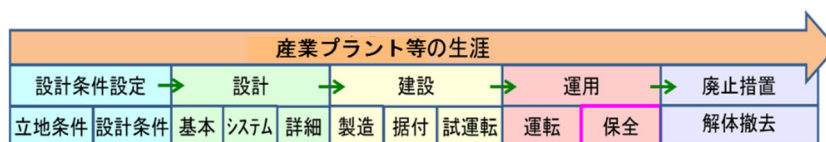


図1 産業プラントの生涯

² 医療では「健診」と「検診」の2つがあります。健診（健康診断）は健康かどうか調べ、病気の危険因子を早く見つけることがその目的で、一次予防のための検査と言われています。検診は「がん検診」などのように特定の病気を早期に発見して早期に治療するためのもので、二次予防の検査と言われています。

産業プラントの生涯のうち、最初の立地選定はその後の設計、建設、運転、保全に大きな影響を与えます。立地場所によっては地震や津波、気象条件などの諸条件が異なりますので、それらの条件を考慮した設計が必要になります。立地条件はプラントの性能・機能や構造、寸法、強度の他、材料選定などの設計に大きな影響を与え、その設計を満足するように建設し、運転及び保全を実施しなければなりません。そして、産業プラントを解体・撤去する廃止措置もその物量や材質などのゆえに上流側の影響を受けることになります。このように、産業プラントの立地選定はその後の活動（設計から廃止措置まで）に大きな影響を与えることになります。言い換えれば、立地選定以降、産業プラントの主要ステップである設計、建設、運用（運転、保全）、廃止措置は上流側のステップの影響を強く受け、安全性と経済性を確保する上でいずれに問題があっても安全性と経済性は確保できないということを意味しています。

ここで原子力発電所の設計・建設と保全の関係をj知るために、設計・建設段階と維持管理段階(供用期間中)における活動内容や実施体制、責任主体などについて説明します(図2)。

図 2 設計・建設と保全の関係

満足する原子力発電所を実現するための設計・建設を行うのは電力会社から受注したプラントメーカーです。プラントメーカーは電力会社が行うプラント運用（運転と保全）を想定し、所定の安全性と経済性を確保できるように原子力発電所の設計・建設（試運転を含む。）を行います。したがって、設計・建設段階では、責任主体はすべてプラントメーカーにあり、工場及び現場の設備が設計通りに製造・製作、施工・据付されていることを確認する電力会社は「従」の立場にあります。この段階での設備はすべてプラントメーカーの財産です。この関係は試運転が終了するまで継続されます。試運転が終了すると、発電所設備が電力会社へ移管され、商業運転が開始されます。供用期間の始まりです。この時点をもって発電所設備は電力会社の財産となり、責任主体は電力会社に移ります。

供用期間中においては、原子力発電所の運転はもちろんのこと、設備の保全も電力会社の責任の下に行われます。保全には大別して定例的に繰り返し行う日常点検/定期点検や小規模な修繕工事等の「定例保全」と大規模な改造工事や修繕工事を必要時に行う「建設工事的保全」の2つがあります。この2つの保全工事の内容については、後段でさらに概説します。

以上、述べましたように、試運転が終了した時点（原子力発電所の供用が開始された時点）で責任主体がプラントメーカーから電力会社へ移ります。原子力発電所の供用期間中における一義的責任は電力会社（電気事業者）にある³と言われる所以です。ただし、上で述べたように、原子力発電所の建設経緯からプラントメーカーにもそれ相応の大きな責任があるがお分かりいただけることと思います。

ここで注意しなければならないことがあります。それは、保全を実施する場合、その対象機器のそれまでの運転と保全に関する情報だけでなく、当該機器とそれが属する系統の設計情報と建設（製作・据付）に関する情報を十分理解した上で実施する必要があるということです。特に系統あるいは機器を改造しようとする場合（設計を変更しようとする場合）、建設時まで遡って安全設計や構造設計等の条件の他、製作・据付記録等を確認し検討することが重要で、これを怠ると重大な故障や安全問題を引き起こすことにつながるかもしれません。このように、保全は単に現場の保全活動を実施するだけでなく、科学・工学等に裏付けられた理論や設計の重要事項を知った上で、ハードウェアの製作・据付に関する技術も理解している必要があります、幅広く高度な知識を求められる技術分野です。また、数多くの保全作業員の特性と能力を活かせるように創意工夫し、効率的・効果的に保全作業を計画・実施することで目の前の産業プラントを大きく変えることのできる技術分野です。読者の皆さんは本書を通読することにより、保全が皆さんの興味や期待に十分応えられる魅力的で深みのある内容を含んだ技術分野であることを知るようになるでしょう。

³ 国際原子力機関 IAEA が制定した安全基準体系の頂点に「安全原則（No. SF-1）」があり、その10項目の原則の第一番目に「原則1 安全のための一義的な責任は、放射線リスクを生じる施設と活動に責任を負う個人または組織が負わなければならない。」とあります。我が国の原子力規制当局である原子力委員会は、電気事業者を含む原子力事業者は、自分の持つ施設と活動に一義的責任があることを前提に原子力規制を実施しています。

2.2 保全の歴史的変遷

保全には長い歴史があります。これもご多分に漏れず、米国における保全の歴史をみると、その全貌がよくわかります。米国産業界では、1930 年代以降、保全の管理手法が目覚しく変わりました。その保全の進化は 3 つの世代を通して辿ることができます。これまで第一世代、第二世代と進化し、第三世代である現在においては、信頼性重視保全(RCM: Reliability Centered Maintenance)^[1]がその主流の保全管理手法となっています。その詳細を添付資料 B に示します。

大雑把に述べますと、当初は機器が故障してから保全を実施する事後保全 (BDM: Break-down Maintenance) であったものが、予め故障時期を予測して故障発生前に何らかの必要な対策を取る予防保全 (PM: Preventive Maintenance) が取り入れられるようになりました。いつ故障するか分からないようでは、予定していた製品の出荷に影響を与えますし、経済性の確保が難しくなります。このような状況から時代の要請もあって、より高いプラント稼働率と信頼性、より高い安全性、より良い品質、そして環境への悪影響がないこと、より長いプラント寿命、より高いコスト効率を求めて、保全の方法/方式は目覚しく改善されました。また、何のために保全を実施するか、その保全の目的を明確にし、そのために個々の機器の保全をどのような内容のものにするかを、故障モード影響解析 (FMEA: Failure Mode and Effects Analysis) や故障モード・影響・重要度解析 (FMECA: Failure Mode, Effects and Criticality Analysis)、確率論的リスク評価解析 (PRA: Probabilistic Risk Analysis) などを用いて検討する RCM が取り入れられるようになり、さらに RCM の検討を効率化、簡便化するために保全技術者の知見を多用して検討する実務的な手法として予防保全最適化手法 (PMO: Preventive Maintenance Optimization)^[2]が取り入れられるようになり、現在に至っています。

我国には民間規格で電気技術規格 JEAC4209「原子力発電所の保守管理規程」^{[3][4]}があり、原子力発電所の保全に適用されています。この規程に示されている保全活動の流れを図 3 に示しますが、この規程も RCM や PMO の考え方が取り入れられていると言われています。

RCM あるいは PMO は、多数の機器から成る系統あるいはプラントがあるとき、その系統あるいはプラントの信頼性を最大限に高めるように個々の機器の保全計画を立案・実施し系統あるいはプラントの信頼性を最

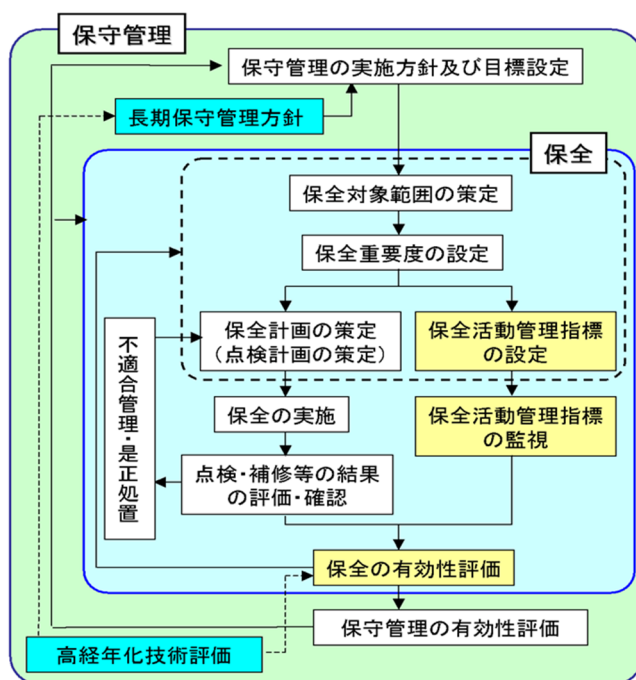


図 3 保全活動の流れ

大限に高めようとする手法であって、個々の機器の信頼性をそれぞれ最大限に高めるように保全計画を立案・実施しその結果として系統あるいはプラントの信頼性を最大限に高めようとする手法ではありません。つまり、個々の機器すべてに対して信頼性を向上させ、その結果で系統あるいはプラントの信頼性を最大限に高めようすると、多大な保全リソースを必要とし効率的でないので、初めから最終目的である系統あるいはプラントの信頼性を最大限に高めるように、影響の大きい機器に重点的に保全リソースを投入しようと考えたわけです。このように、初めから保全の目的を系統あるいはプラントの信頼性の最大化とし、それを効率的・効果的に達成できるように個々の機器の保全内容を決めるという考え方を取ることで、そのような意味で「信頼性重視保全」と呼ばれるようになりました。ここで重要なことは、その考え方が何のために保全を実施するのかという保全の目的と深く関わっていることです。保全の目的は単に対象機器の信頼性を確保することや向上させることではありません。また、系統あるいはプラントの信頼性を確保することや向上させることでもありません。これについては、3章「保全の目的」において後述しますが、産業プラントの保全の目的は、機器や系統あるいはプラントの信頼性を確保したり向上させたりするためではありません。真の目的はその先にあるのです。

保全の歴史を振り返ってみますと、機器に発生する経年劣化の進展や故障の発生を予測し、プラントの安全性と経済性が阻害されないように保全を実施していく、そのために必要な保全の考え方や方法、各種技術を開発し、実機適用して改良を重ねてきた歴史と見ることができます。そして、ここが重要な点ですが、如何に少ないリソース（ヒト、モノ、カネ等）で目的を達成するか、如何に実施しなければならない保全を厳選しその保全を必要最小限の労力と時間で実施するか、あるいは如何に無駄を排除するか。保全はそれらを追求してきた歴史と見ることができます。このようなアプローチは今後もずっと継続されることになります。なぜならそれが保全の本質だからです。

2.3 保全活動の概要

原子力発電所の供用が開始されると、運転はもとより、保全も開始されます。保全活動はプラントに発生する経年劣化や故障により、予期しないプラントの機能が低下し、安全性や経済性が許容できないほど低下することを防止するために実施されます。そして、その活動はプラントの運転中、停止中を問わず、可能であればいつでも実施されます。

原子力発電所は、一定期間運転された後、燃料交換や保全を実施するために停止され、この運転と停止が繰り返されることにより、長期間運営されることになります。保全活動は、プラントの運転中、停止中のいずれにおいても実施されます。

通常、プラントを停止しなければ実施できない保全作業が停止中に行なわれ、その他は運転中に行われます。これはできるだけ停止中の保全作業量を少なくして停止期間を短くすることにより、プラント稼働率（生産性）を向上させ、結果として経済性を向上させようとする意図からなされるものです。しかし、現実にはプラント停止中に保全作業が集中しがちで

あり、我国の原子力発電所では年間作業量の 7～8 割が停止中に実施されていると言われていいます。プラント停止期間は通常 2 ヶ月程度ですので、たいへん多くの作業員が一時的に集中することになります。このような状況は作業員の確保を困難にし、作業員の出入りも多くなることから経済効率はよくありません。年間を通じて保全作業量の増減をできるだけ少なくすることは経済効率を高める上でたいへん重要です。したがって、プラント運転中と停止中の保全作業量をどうバランスさせるかは保全に関する重要な検討事項の 1 つとなります。

年間を通じた保全作業量の増減をできるだけ少なくする方法、すなわち平準化する方法は、これまでの長い経験から、ほぼ下記の事項に収斂してきました。これを図示すると、図 4 のようになります。

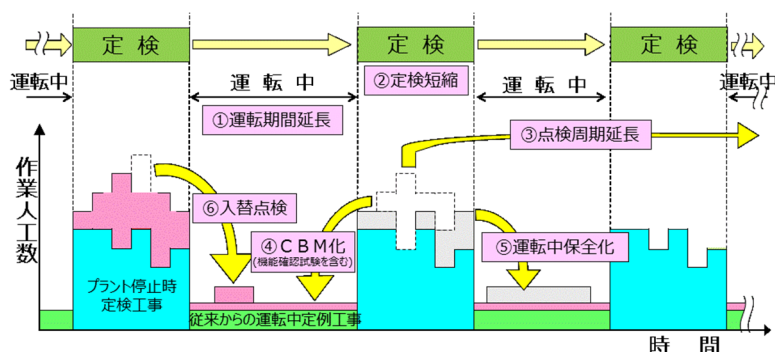


図 4 保全作業量の平準化の方法

- ① 運転サイクル期間延長（運転期間を従来の 13 ヶ月から 18 ヶ月/24 ヶ月へ延長）
- ② プラントを停止して実施する定期検査期間の短縮（定検短縮）
- ③ 頻繁な分解点検によるすり壊しを防止するための機器の分解点検周期の延長
- ④ 機器の分解点検を中心とした保全から TBM⁴、CBM⁵、BDM⁶のベストミックスを追求した保全への変更（特に CBM の導入）（図 5）
- ⑤ プラント定検中の保全と運転中の保全を比較した場合、プラント運転中の方が高リスクあるいは同等である機器を運転中保全の対象へ変更
- ⑥ プラント定検中に分解点検を行っていた機器を整備済みの予備品と入れ替え、取り外した機器をプラント運転中に分解点検する方法へ変更（入替点検）

これら 6 つの方策を可能な限り追求すれば、年間を通じた保全作業量が平準化され、経済合理性が高くなります。これが後述します保全最適化あるいは予防保全最適化につながります。

保全には大別して定例的に繰り返し行う日常点検/定期点検や小規模な修繕工事等の「定例保全」と大規模な改造工事や修繕工事を必要時に行う「建設工事的保全」の 2 つがあることを 2.1 節で述べました。

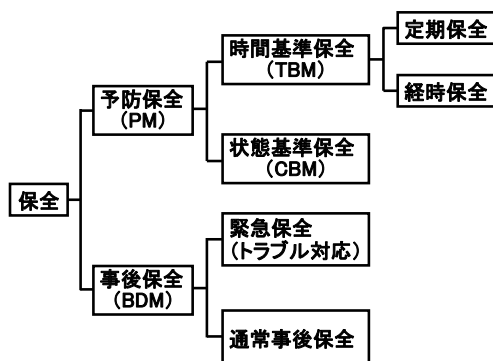


図 5 保全方式の体系

⁴ 時間基準保全（TBM: Time-based Maintenance）（詳細は添付資料 D 参照）

⁵ 状態基準保全（CBM: Condition-based Maintenance）（詳細は添付資料 E 参照）

⁶ 事後保全（BDM: Break-down Maintenance）（詳細は添付資料 F 参照）

定例的に行う保全の実施体制を図 6 に示します。この図の横軸はいろいろな系統の設備・機器を意味し、縦軸はその保全実施体制を示しています。定例保全は、通常、電力会社が関係会社（電力系工事会社）に発注し、その傘下で大手の工事会社や中小の工事会社が実際の現場工事を実施します。設備・機器によっては、外注せずに電力会社の社員が直接、現場工事を実施することもあります（このことを電力会社による直営と呼んでいます。）また、炉内構造物の点検などの安全上重要な機器に対して行われる特殊な定例保全は、電力会社がプラントメーカーに発注して実施されます。

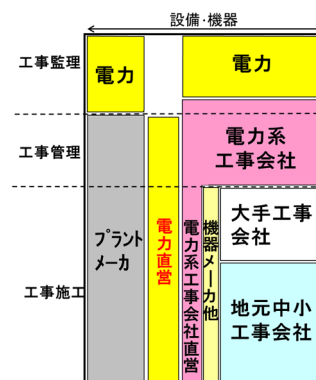


図 6 保全実施体制の構造

ここでなぜこのような複雑な工事の実施体制となっているのかという疑問を持たれる方がいるかもしれません。これは原子力産業界に限らず、その他一般産業界でも同様の実施体制が取られていますので、日本社会の文化、歴史、慣行等に拠るものと考えられますが、経済合理性を追求した結果と言うこともできます。例えば、電力会社の社員が定例保全工事の計画立案から現場工事までの全てを実施するとした場合、電力会社は多数の社員を雇用することになり、作業員単価の違いから何倍もの費用が必要となります。なお、欧米の原子力発電所では定例保全工事の大部分は電力会社の社員によって実施されています。欧米では、エンジニアとして雇用されるか、現場作業員として雇用されるかによって雇用条件が異なり、給与が異なります。したがって、電力会社が作業員を社員として雇用することが可能です。我国の電力会社では、欧米とは異なり、給与体系は1つであり、職種で異なることはありません。このように、保全実施体制は経済合理性を追求した結果と見ることもできます。保全は、実施する保全工事の厳選、保全タスクと方法の合理化、作業パフォーマンスの向上等により、常に経済合理性を追求し続ける活動ですので、保全実施体制を経済合理性の観点から追求することは当然であると言えます。一方、我国の保全実施体制には問題もあります。それは、1つの工事を実施するときに複数の会社があたかも1つの組織のごとく一致協力して実施しなければなりませんので、現場情報のタイムリーな報告や指示命令の迅速・明確な伝達、情報共有などに十分な注意を払う必要があるということです。ここには IT 技術を活用することが必須となります。

次に、大規模な改造工事や修繕工事等の「建設工事的保全」ですが、これも前述のように電力会社の責任で実施されます。この大規模工事は、工事の内容がオリジナル設計に関わることが考えられますので、通常は電力会社がプラントメーカーに発注して実施されます。供用開始以来、プラントの安全確保に対して一義的責任を持ち、設備・機器の状態を最もよく把握している電力会社がプロジェクトとして工事計画（実施内容、実施時期、工事期間、費用など）を立案・決定し、詳細設計とそれに基づく現場工事をプラントメーカーに発注して実施されます。これは欧米の原子力発電所でも同様です。

3. 保全の目的

これまで保全の目的は、RCM の考え方にしたがって個々の機器の信頼性を向上させた結果として系統あるいはプラントの信頼性を向上させることであるかのように説明して来ましたが、そうでしょうか？保全は機器や系統、プラントの信頼性を向上させることが目的でしょうか？以下に保全の目的は単なる機器や系統、プラントの信頼性を向上させることではないことをお話しします。真の目的はその先にあるのです。

原子力発電所のような産業プラントは、安全性を確保しないと社会の中に長く存続できません。これは立地点の周辺にお住まいの方々を含む一般社会の人々の健康や財産、環境を毀損して存続できるはずがありませんので、これは自明です。我国の原子炉等規制法でも法に違反した場合は原子炉施設の使用の停止を含む各種の強制措置や罰則を定めています⁷。一方、経済性を確保しないと、これも社会の中で存続できません。原子力発電所で働く人たちは、社会からの需要に基づき発電を行い、電力を供給して代価を得、生活しています。一定の利益が得られなければ給料が得られず、だれも働く人がいなくなります。保全活動に要する費用だけで発電単価が決まる訳ではありませんが、保全活動に要する費用は発電単価に大きな影響を与えます。

以上より保全の最終目的は、保全活動を通じて原子力発電所の安全性を確保・向上させることと同時に経済性を確保・向上させることにあるのです。ただし、この安全性と経済性の関係は単純ではありません。通常、利益をもたらさねば存続できない産業プラントは、安全性を確保するための活動と経済性を確保するための活動を並行して実施しています。そして、その結果として利益を産み出し、それを原資にして安全性を維持・向上させるための対策や経済性を維持・向上させる対策を実施することになります（図 7）。

このように、安全性を維持・向上させるための対策を実施するには、経済性を上げ、利潤を上げてその原資を確保しなければなりません。よく安全性向上対策のみを主張し経済性向上の追求を悪いことのように言う人がいます。これは明らかな間違いです。必要な安全対策に投資しなければならない原資を無闇にカットすることは

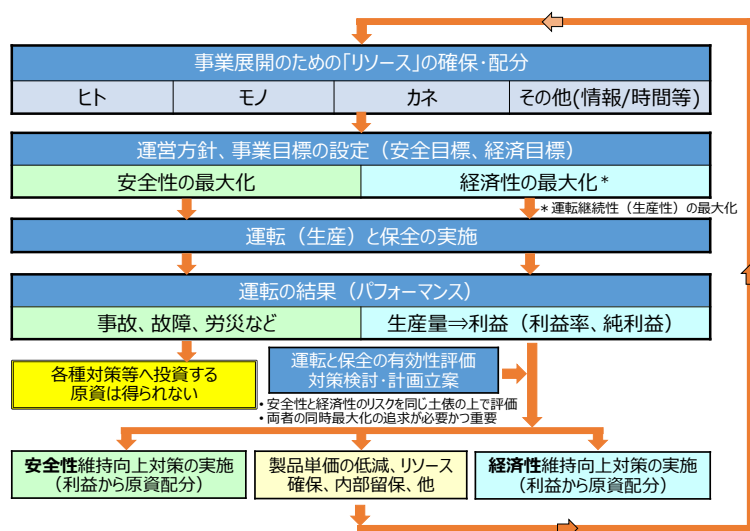


図 7 産業プラントの安全性と経済性の関係

⁷ 例えば、第四十三条の三の二十三に次のように規定しています。「原子力規制委員会は、・・・その発電用原子炉設置者に対し、当該発電用原子炉施設の使用の停止、改造、修理又は移転、発電用原子炉の運転の方法の指定その他保安のために必要な措置を命ずることができる。」

決してやってはいけないことですが、経済性を向上させることは十分な安全対策を実施するために必要不可欠です。

ここでなぜ経済性を追求する必要があるのか、もう一度考えて見たいと思います。

経済性を追求する必要がある理由は、保全の対象である原子力発電所の安全性を維持・向上させるにはそのための対策を常に行っていく必要があり、それを行うには経済性を追求した結果得られる利益から原資を充当する以外ないからです。これについては前述した通りです。これに加えてもう一つ経済性を追求する必要がある理由があります。それは原子力発電所の保全に充てるリソースは「有限」だからです。有限なリソースの下では、どのようにリソースを配分するかという問題になります。そのようなとき、保全目的を達成する上で重要な活動にリソースを重点投入し、重要度の低い活動から適切な範囲でリソースを撤収する。並行して全保全活動の無駄をできるだけ排除する。このようにして浮いたリソースを重要度の高い活動に振り向ける。これらを継続的に実施すれば安全性と経済性は徐々に向上していくことになります。このようなやり方は、十分なリソースがある場合でも常に実施されるべきことです。

安全性と経済性の間には、上で述べたような関係があります。この関係を理解すれば、保全活動において経済性を適切に追求することは必要かつ重要であり、それを否定することは安全性の低下につながりかねないということが理解できると思います。

なお、5.1 節で述べますように、産業プラントの安全性と経済性の間にはトレードオフの関係⁸があると言われています。特定の条件下で両者の間にそのような関係が存在することは否めませんが、だからといって両者を同時に許容できるレベルに維持することができないということではありません。安全性を十分に確保した上で経済性を確保することは可能です。現に米国の原子力発電所は実績的に両者とも許容できるレベルを達成し維持されており、安全性と経済性は両立すると考えられています^[5]。

4. 保全の構造

保全の構造などと言いますと、堅苦しい感じがしますが、保全の現場を俯瞰して見ると、どのような構成要素で成り立っており、それら構成要素の間関係はどのようなになっているか、各構成要素はどのような特性を持っているか等を整理してみようということです。

まず、保全を考えるとときに重要なことは、保全をどのように捉えるか、その基本的な考え方を明確にすることです。それは下記のようなことです。

- ・ 保全対象である機器に経年劣化が発生しその進展に伴い機器の性能/機能が低下し最終的には機能喪失（故障）する。
- ・ この機能喪失を回避するため、あらかじめ検査及び評価を行い、その発生時期を予測して事前に経年劣化を修復する行為（是正）を実施する。

⁸ トレードオフの関係とは、一方を追求するともう一方を犠牲にしなければならないという二律背反する関係のこと。

- ・上記の検査及び是正という保全行為は、保全作業員で構成される保全実行部隊が保全作業要領書に従って必要な資機材を使用して行われる。このとき、保全実行部隊、保全作業要領書及び使用資機材の質の良否で保全実施後の機器の健全状態が決まり、良好となったり不良となったりする。

以上を図示すると、図 8 のようになります。これは保全を考える上で基盤となる重要な保全の捉え方ですので反芻し十分に理解する必要があります。

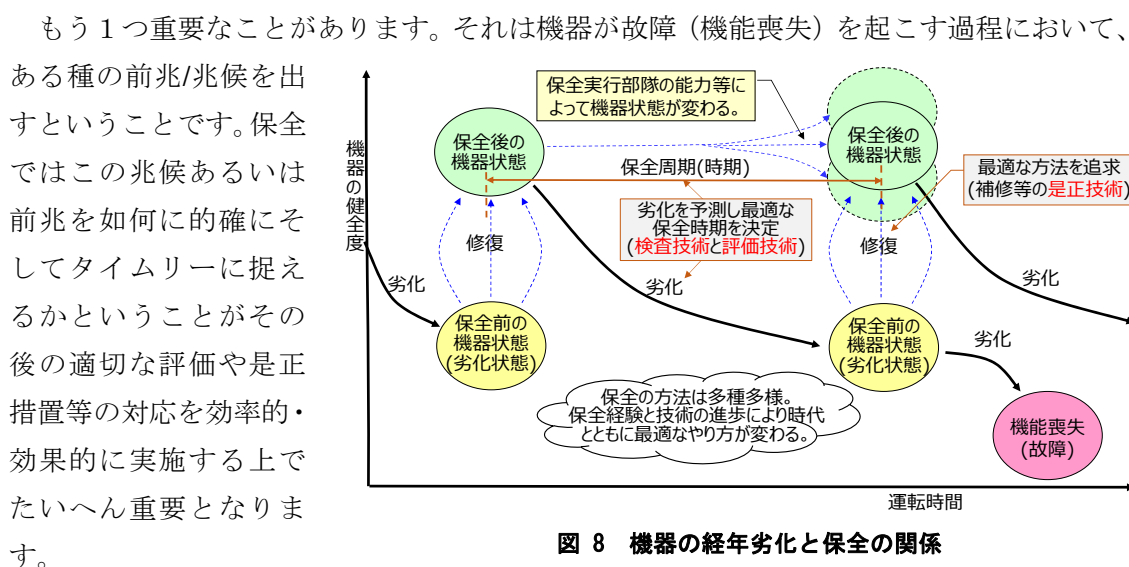


図 9 は機器が故障/破壊に至るその最終段階において何が起こるかを説明しています。故障の芽が発生し、それが検知できるようになる点（P 点）まで悪化し、そして検知できずに是正措置も取られなかったら、機能喪失する点（F 点）に到達するまで、加速度的に状態が悪化することを示しています。保全ではこの曲線を P-F 曲線と呼んでいます。

例えば、この図を説明する 1 つの例として機器に疲労割れや応力腐食割れ、減肉等の経年劣化が発生・進展し、それに伴って構造強度という機能が徐々に低下し最終的に機能喪失（破壊または漏えい）するという現象が挙げられます。この場合、割れや減肉の発生・進展が機能喪失に至るまでの兆候ということになります。同様に回転機器の振動が増大し機能喪失（故障、停止）する例でもこの図を説明できます。この場合、回転機の軸受に経年劣化が発生・進展し振動が通常状態から徐々に大きくなり、それに伴って出力あるいは送水という機能が徐々に低下し最終的に軸受が焼き付いて機能喪失（停止）するというシナリオです。この例では振動の増加が機能喪失の兆候となります。

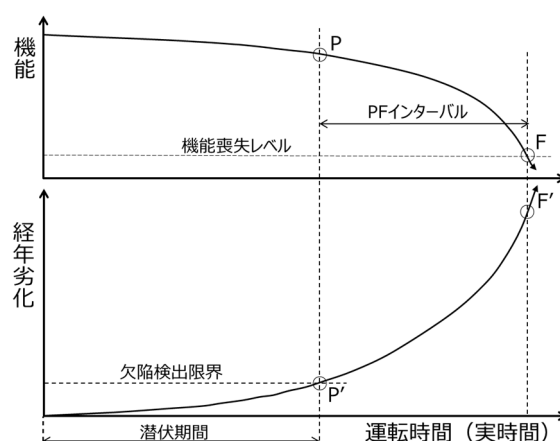


図 9 経年劣化と機能低下の関係（P-F 曲線）

一般に機器はそれまでの運転時間の長さと故障率（故障の起こりやすさ）との間にはあまり関連がないと言われていますが（添付資料 B）、それでも故障が発生する場合は、そのほとんどが故障を起こす過程にあるか、あるいは正に故障が起きようとしている、その前兆/兆候が発信されます。もし故障の最終段階にあるという証拠が事前に発見できるなら、それが完全に壊れてしまう前に破壊を避けるための措置を講じることができるかもしれません。これができれば保全活動において大きなメリットとなります。したがって、保全では図 9 の P 点と F 点を知り、F 点を予測しながら経年劣化あるいは機能低下の進展を確認しつつ点検時期あるいは点検周期を決めていくことがたいへん重要です。

一方、保全現場には保全対象である産業プラント（ここでは原子力発電所）があります。これは膨大な数の機器、それも機械、電気、制御、土木建築の各種機器から構成されています。ここではこれを総称して「機械系」と呼びます。そして、それを保全しようとしている保全実行部隊がいます。これは単なる保全作業グループではなく、適切な要領書に基づき適切な資機材を用いて保全を実施する能力（保全遂行能力）を備えた部隊です。ここではこれを総称して「人間系」と呼びます。これが保全現場の 2 つの主要な構成要素です。そして、この 2 つの構成要素の間で保全活動 PDCA が展開されると考えられます。

保全活動を実施するには保全計画と保全実施計画を立案することが必要であることを前章で述べました。保全計画を立案するに当たっては、まず膨大な数の機器から成るプラントのシステム構成を知り、保全対象機器の故障がプラントの安全性あるいは運転継続性にどの程度影響を与えるかその影響度（重要度）を考慮した上で、対象機器の設計と発生する経年劣化の特性を把握して適切な保全計画を立案する必要があります。保全実施計画を立案するに当たっては、保全作業のパフォーマンス（保全遂行能力）を決定する主要因子（保全作業要領書、保全実行部隊、使用資機材）⁹を適切に考慮して保全実施計画を立案する必要があります。

上記の保全計画と保全遂行能力が適切なものであれば、保全対象機器の保全後の状態は良好なものになるはずです。適切でなければ運転中に故障したり性能が低下したりします。このように保全計画と保全遂行能力で機器の健全度合い（保全水準）が決まり、その結果として保全の目的である安全性と経済性が決まると考えられます。保全計画と保全遂行能力については、後段でさらに詳細を検討します。

上記をまとめて図示しますと、図 10 のようになります¹⁰。

このように保全の構造を追求し、保全の主要構成要素とその要素間の関係を明確にすることは、最終的な目的である安全性や経済性をどうすれば確保できるか、その保全のメカニ

⁹ 例えば、機器の検査を実施するとき、検査要領書、検査員、検査装置の 3 つの要素の組合せでその検査性能（検査能力）が検証されます。PD 制度（パフォーマンス実証制度）です。このように検査のパフォーマンスはこれら三者の組合せで決まると考えられています。保全作業も同じで、保全作業要領書、保全作業員（保全実行部隊）、使用資機材の三者の組合せでそのパフォーマンス（作業の迅速性と確実性）が決まると考えられます。

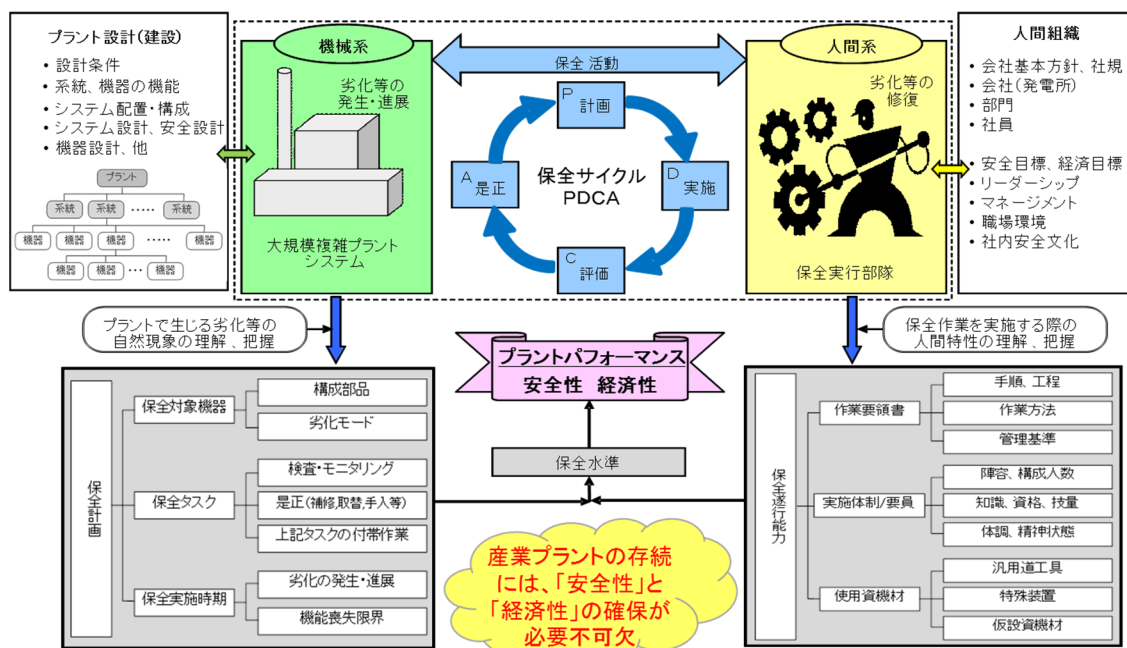


図 10 保全の構造(保全の主要構成要素間の関係)

ズムを理解する上でたいへん重要です。なぜなら、闇雲に保全対象や保全方法を変えても効率的・効果的に目的は達成できないからです。それが完成すればどこに弱点がありどこをどのように強化すれば安全性と経済性を効率的・効果的に向上させることができるか、精確に予測できる道を切り開けるからです。保全の定量化による最適化の道です。ただし、それには大きな課題があることも確かです。機械系に生じる経年劣化という自然現象は科学的、工学的な定量化手法が比較的整備されていますので、これらを用いてプラントの安全性/経済性と保全計画の関係を定量化することは可能と思われますが、現状では十分でなく、さらに発展させる必要があります。問題はプラントの安全性/経済性と人間系に関わる保全遂行能力との関係です。これを定量化する手法が十分に整備されていません。人間系は作業員等の使命感ややる気、体調、精神状態、作業環境、作業の習熟度などでパフォーマンス（作業の確実性と迅速性¹⁰⁾）が大きく変わり、結果として保全作業の品質、保全後の機器信頼性に大きなバラツキを与える可能性がありますので、定量化が難しい面があります。しかし、問題の本質を的確に見極め、大胆な仮定を導入する等により、定量化することは不可能ではないと思われます。例えば、保全作業の標準化やトレーニングなどにより、バラツキを最小限に留め、確率論的な定量評価を可能にする等の方法が考えられます。

以上に述べたことをまとめると、次のようになります。

¹⁰⁾ 保全作業は一見相反するように見える確実性と迅速性という2つの特性を求められますが、必ずしもそうではありません。前者の確実性は機器の信頼性に影響を与え、最終的にはプラントの安全性と生産性（運転継続性）に影響します。後者の迅速性は作業工程の長さに影響を与え、最終的にプラントの安全性と経済性に影響します。オヤと思われる方がいたかもしれません。迅速性は経済性に影響するだけではないかと。しかし、運転中保全などのように、確実性だけでなく、迅速・短時間で実施することにより安全リスクの総和（時間積分）を最小限にすることによって安全性を高めることも求められます。

保全対象機器を絞り込み、無駄な保全タスクを排除して適切な周期で実施すること、すなわち適切な保全計画を立案することによって実施しなければならない保全の作業量を最小限化することは、有限なリソースの下で効率的・効果的な保全を実施する上でたいへん重要です。しかし、これだけでは十分ではありません。なぜなら、たとえそのような効率的・効果的な保全計画に基づいていても、どのように現場作業を実施するかを規定する保全実施計画に無駄が多く、さらに実際に現場で行われる保全作業がだらだらと無駄の多い状況で実施されれば、適切な保全計画が台無しになることもあり得るからです。それは原子力発電所のような大規模複雑システムにおける現場の保全が下記のような特徴を持っているからです。

- ・ 原子力発電所の現場における保全作業量は膨大であり、多数の保全作業員や資機材が長期間に亘って必要であること
- ・ いつでも正確に繰り返し実行できる機械と異なり、使命感ややる気、体調、精神状態、作業環境、作業の習熟度などで保全作業員のパフォーマンス（作業の確実性と迅速性）は大きく変わること

したがって、個々の保全作業現場において機器の重要度に見合った適切な保全遂行能力（パフォーマンス）を配置し、無駄を徹底して排除して現場作業を実施すると、それがすべての保全作業にわたって実施されると、その効果はたいへん大きく、安全性と経済性の向上に大きく貢献する可能性があるということです。現場の保全の重要性がよく理解できると思います。

5. 保全最適化の方法

5.1 保全最適化の概要

さて、ここで保全最適化とは何かを考えてみたいと思います。保全最適化とは何を最適化するのでしょう？

ここで早速、保全の目的が出てきます。保全目的（目標）を達せられない保全では最適とは言えません。それでは保全目的（目標）を達成するだけでよいのでしょうか？それだけでは最適とは言えません。保全最適化とは保全目的（目標）を達成し、さらに最も良い成果を挙げられる保全を実施することでなければ最適とは言えません。

一般に産業プラントを運営しようとするとき、3章の保全目的のところで述べたように安全性を確保しつつ、経済性も確保しなければ社会の中に存続できません。それではここでいう安全性とは具体的に何でしょうか？経済性とは何でしょうか？

産業プラントは、通常、安全性に関連する SSC¹¹と生産継続性（原子力発電所の場合、発電継続性）に関連する SSC、それに両者に関連する SSC の3つがあります。安全性に関連する SSC は、安全性をできるだけ高くするための設備ですので、保全によって健全性を維持し安全性をできるだけ高めようと努めますが、その一方で保全費用がかかり経済性を低

¹¹ Structures, Systems and Components（産業プラントを構成する構造物、システム及び機器のこと）

下させる可能性がありますので、保全費用をできるだけ低減しようと努めます。同様に、生産継続性に関連する SSC は、稼働率をできるだけ高く維持し経済性を高くするための設備ですので、保全によって健全性を維持し稼働率を高めて経済性をできるだけ上げようと努めますが、その一方で保全費用がかかり経済性を低下させる可能性がありますので、できるだけ保全費用を低減しようと努めます。これらの関係を図示しますと、図 11 のようになります。

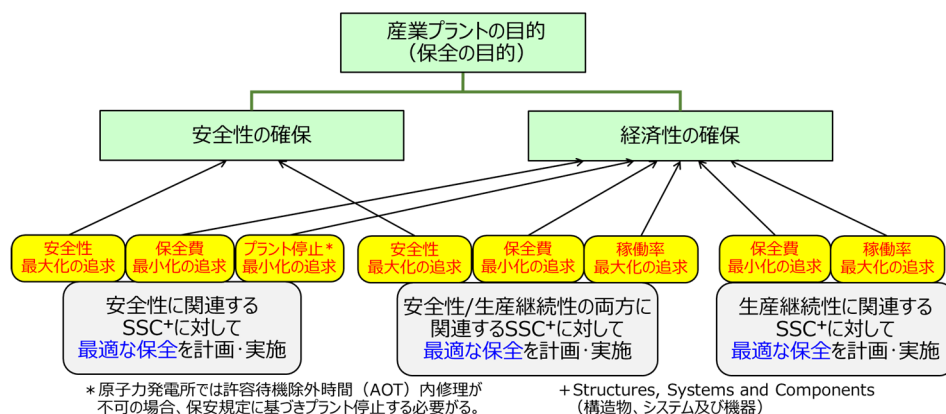


図 11 産業プラントの設備と安全性/経済性の関係

ここで勘のよい人は経済性といっても下記の 2 つがあること気付くかもしれません。

① 適切な保全計画の立案による経済性の向上

予防保全が必要な保全対象機器のうち、プラントの安全性と経済性に与える影響の小さい機器は除外し (対象機器の絞込み)、それ以外の機器に対して技術的に適切な保全計画 (保全対象機器、保全タスク、実施時期) を立案・実施する。その結果としてプラントの稼働率を向上させて製品 (原子力発電所の場合、電気) をより多く生産することにより、経済性を向上させる。これが 1 つ考えられます。(対象機器の絞込みや適切な保全計画立案の具体的な方法については、5 章で述べます。)

② 無駄のない保全実施計画の立案による経済性向上

上記の保全計画で実施しなければならない保全作業が明確になりますが、次にこれを現場で具体的にどのように実施するか、すなわち現場での保全作業の実施体制・要員や実施手順・方法、使用資機材、作業管理方法、スケジュールなどを定めないと現場作業は実施できません。それを定めたものが保全実施計画あるいは保全作業要領書です。いつ、だれが、どのように、という 5W1H を規定しますので、これによって現場作業のパフォーマンス (保全作業効率) が決まることになります。このパフォーマンスによって費用 (経済性) が大きく異なることは容易に想像できることと思います。例えば、現場の段取りが悪かったり、不必要な作業を実施したり、迅速・確実な作業ができない作業員を採用したりすると無駄が生じます。あるいは重要度が低い機器であるにもかかわらず不適合が発見されたときに必要以上の原因究明調査や水平展開を実施したりすることも無駄の中に含まれます。膨大な保全作業が実施する必要のある原子力発電所ではこのような

無駄が「塵も積もれば山」となって多大な時間と労力の無駄使い、お金の無駄使いとなります。

上記①と②は、安全性に係わる機器の保全、運転継続性に係わる機器の保全のいずれに対しても言えることです。要は安全性/運転継続性に関する機器の重要度に応じて適切な計画を立案・実施する、そこに重要度に見合ったリソースを投入すること。そして、現場で保全作業を実施する際は、徹底して無駄のないように作業や管理を実施するということです。

一般に産業プラントの系統・機器に対して保全を過剰な状態から過少な状態へ変更していくと、安全リスクは上昇する（安全性は低下する）と考えられます。この保全と安全性の関係を安全性関数 S とします。同様に保全を過剰な状態から過少な状態へ変更していくと、経済リスク（コスト）は低下する（経済性は上昇する）と考えられます。この保全と経済性の関係を経済性関数 E とします。これら安全リスクと経済リスクをコストという同一尺度で表すことができると仮定すると、これら 2 つのリスクを合計したリスクを考え、この合計リスクを保全関数 M とすれば、これが最小値を持つような保全を追求することが保全最適化であるということが可能であると思われます（図 12）^[6]。この図が示すように、安全性と経済性の間にはトレードオフの関係があると言われており、この考え方は米国の連邦航空局（FAA:

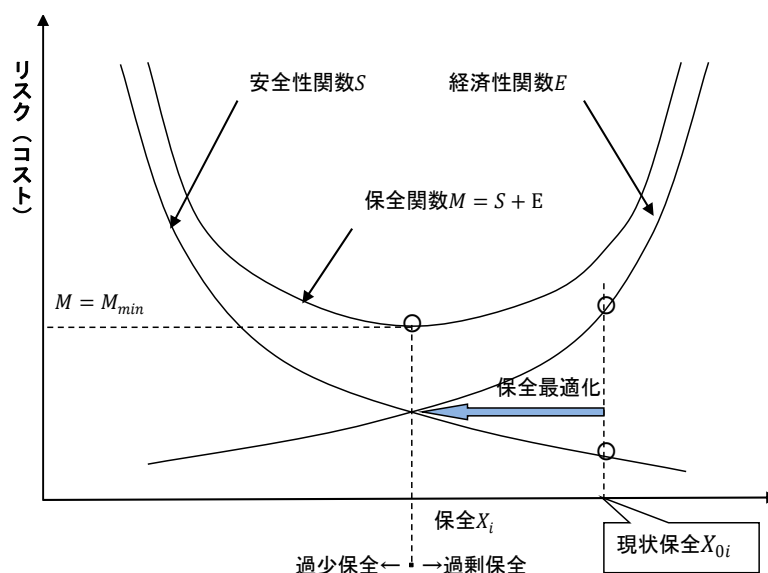


図 12 保全活動とリスク(コスト)の関係

Federal Aviation Administration)¹²が発行しているハンドブックの中にも見られます^[7]。

例えば、現状の保全 X_{0i} が過剰であったとしますと、保全関数 M が最小値を取るような保全を追求するのです。しかし、このように話は単純ではありません。保全と安全性の関係を定量化しなければなりません。保全と経済性を定量化しなければなりません。保全の結果、どの系統・機器がどの程度の頻度で故障し安全性にどの程度影響を与えるか、またそのときの復旧費用や復旧期間（プラント停止期間）はどの程度かかるかなど、経済性にどの程度影響を与えるかを明確にする必要があります。図 12 のように単純な関数で表せないかもしれません。特に原子力発電所は、経済性を上げようとして保全費用を過度に低下させると、故障や事故が発生するかもしれません。その場合、その修復にどの程度のコストがかかるか見積もるのが極めて困難です。したがって、このような場合は安全性と経済性の尺度を同一の

¹² 米国運輸省の下部機関で、航空輸送の安全維持を担当する部局である。

ものとできず、2つの尺度でそれぞれ別々に評価できるようにするというアイデアがあります。安全性、経済性のそれぞれに対してその時点で最適と思われる目標を設定しその目標を達成できるような保全の計画を立案・実行するのです。あるいは、まず安全性に対する目標を達成できるような保全を計画し、その上で経済性に対する目標も達成できるような保全を計画するのです。図12のような数学的な最適解としての定義ではありませんが、現実的なアプローチとしてこの考え方を保全最適化と呼んでもよいのではないのでしょうか。この考え方は前述の図3に示した民間規格 JEAC4209 にも取り入れられていると思われます。図中の「保守管理の実施方針及び目標設定」の「目標設定」がこれに当たると考えられます。図3を少し簡略化したものを図13に示しますが、この図からわかりますように、現実の保全活動はまず初めに保全の目的である安全性と経済性の目標値を設定し、それらを達成できるように下流側で計画・実施する活動であると考えられます。

さて、ここで述べている安全とは、国民の生命、健康及び財産を守ることであり、もちろん職員や作業員の安全も含まれます。しかし、このような安全をどのような指標で表し客観的に評価できるようにするかが問題です。安全性を具体的に評価できる指標はその対象が原子力発電所であるか化学プラントであるかによって大きく異なります。事故が起きたときに発生する事象が全く異なるのでそれは当然のことです。したがって、逆に全く異なる事故事象が対象プラントの安全性に関する

特徴を示していると考えることができます。それが当該プラントの安全性を評価するのに最もふさわしい指標になると考えられます。このように考えますと、原子力発電所の場合は「炉心損傷」という事象が浮かび上がってきます。炉心損傷というのは原子炉を持つプラント特有の事故事象ですので、その発生頻度、すなわち炉心損傷頻度で表すのが最もふさわしいということになります。

経済性についてはどうでしょうか？経済性を高く維持するには、過不足や無駄のない保全を計画・実施し、事故・故障・トラブルの類を発生させずにできるだけ長く運転（生産）を継続する必要があります。要するに、必要最小限の保全活動でできるだけ多くの製品を生産すれば経済性が高くなるということです。これを表わす最もふさわしい指標は製品単価（＝保全費用／生産高）であると考えられます^[8]。原子力発電所の場合は発電単価（円/kW）です¹³。過剰な保全を実施すると、事故・故障・トラブルの発生頻度は変わらないとしても保全費用がかさみ、発電単価は上昇してしまいます。逆に必要な保全を実施しないと（過少保全）、

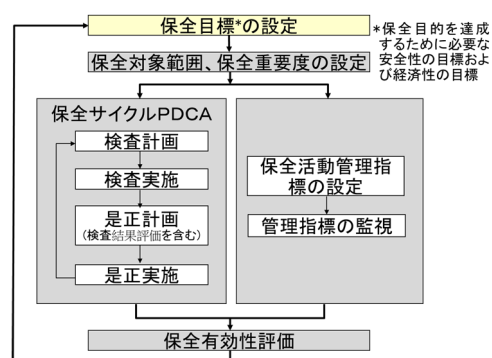


図 13 簡略化した保全活動の流れ

¹³ ここでは「保全」について議論していますので、他の経済性に影響を与える燃料費や運転費などは除外し、保全費用のみ切り出した製品単価（＝保全費用／製品）で考えます。原子力発電所の場合は保全費発電単価（＝保全費用／kW）です。

事故・故障・トラブルの発生頻度が上昇し、その結果、稼働率の低下による生産高（総発電電力量）の低下を招き、発電単価を上昇させてしまいます。この場合、計画段階では保全費用が下がりますが、結局、運転段階に入って事故・故障・トラブルの発生頻度が上昇し、それを復旧するための保全費用が上昇することになってしまいます。

この 5.1 節の最後に 1 つ述べておきたいことがあります。それは保全における労働安全の確保についてです。この項では産業プラントが社会に存続する必須条件の 1 つとして「プラント」の安全性を挙げ、これについて述べてきましたが、保全最適化や現場の保全を考えるときに忘れてはならない保全の大前提が現場における労働安全の確保です。現場で働く保全関係者の安全を確保することを前提に保全最適化を追求する必要性があり、これは常に考えに入れておかなければならないことです。ここにそれを強調しておきたいと思います。

5.2 保全計画の最適化

前述の図 13 に示しましたように、現実的な保全最適化のアプローチとして、まずプラントの安全性と経済性に対する目標を設定します。この目標は保全計画を立案する時点で最適と思われる目標値であり、具体的な数値目標であることが望まれます。そうでなければ、単なる絵に描いた餅になってしまいます。また、目標設定後の具体的な保全計画や保全有効性評価を客観的に実施することが難しくなります。

保全活動は、まず経年劣化が予測される箇所を中心に検査を実施する計画を立案し（P：Plan）、それを実行（D：Do）、得られた検査データを評価して（C：Check）、必要に応じて補修等の是正を行う（A：Act）、いわゆる、保全活動の PDCA で成り立っています（図 14）。実際の現場で実施される保全は、対象機器には経年劣化が予測される部位が複数あり、その経年劣化事象も様々である場合が多く、当該機器に対して検査と是正が同時期に実施される場合がほとんどです。したがって、あたかも保全計画を立案しそれを実行するという繰り返しのようには見えますが、本質的に保全活動は図 15 に示すように PDCA が繰り返されます。

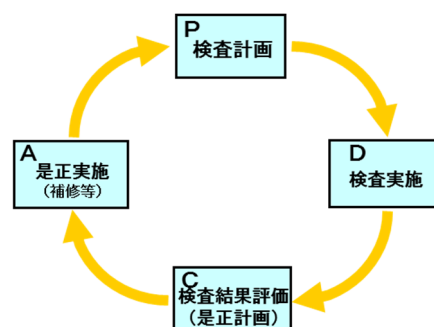


図 14 保全活動 PDCA

保全活動 PDCA を実施していく上で不可欠な技術が 3 つあります。それは検査を実施するために必要な検査技術（モニタリング技術を含む。）、経年劣化の発生・進展予測を実施し、次の検査時期や是正が必要な時期を評価するための評価技術、そして経年劣化を修復するために必要な是正技術の 3 つの技術です。これら 3 つの技術をここでは「保全 3 技術」と呼びます。これら保全 3 技術はいろいろな状況に柔軟に対応できるように何種類もの技術が体系的に整備されていることが望まれます（図 16）。と言いますのは、機器の保全重要度や機種、劣化状況などに条件に合った検査技術や是正技術が開発され利用可能な状況にあれば、それらの技術を使って臨機応変に対応することができます。また、プラントには運転

計画や定検計画があって、できるだけそれらの計画を遅延させたくない場合などがあります。このような時には多少精度の悪い検査技術や効果の低い是正技術であってもその後の運転期間を短期間に限定して当該機器の健全性を証明した上でそのような技術を一時的に適用し、例えば 1～2 年後に十分な時間を取って必要な検査や是正を再度実施するということが考えられます。このようなことが可能であればたいへん好都合です。

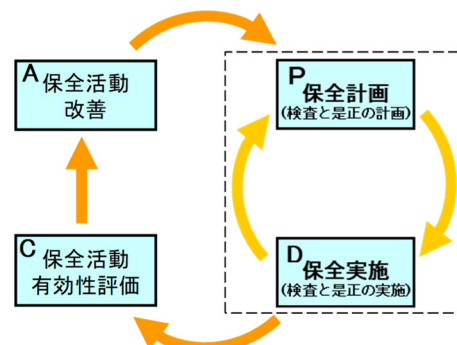


図 15 保全改善 PDCA

技術は日進月歩です。上記のような対応が臨機応変にとれるように今後も保全 3 技術のそれぞれを体系的に整備していくことは保全最適化につながるたいへん重要な活動です。

一方、保全活動 PDCA が有効に機能しているかを評価するため、保全の目的である安全性や経済性、さらにはそれらに関連し定量的にカウントできるパラメータを管理指標に設定し、それらと運転実績や保全実績を比較することによって必要に応じて現場の保全活動を改善する活動がなされます。また、現場における保全活動の管理（原子力安全リスク管理、品質管理、労働安全管理、放射線管理、異物混入防止管理など）が有効であるか評価し、必要に応じて現場の保全活動を改善する活動がなされます。それだけでは成りません。保全活動全般を俯瞰的に見て人材やインフラ、予算などのリソースの配分が適切であるか等を評価し、必要に応じて見直す活動がなされま

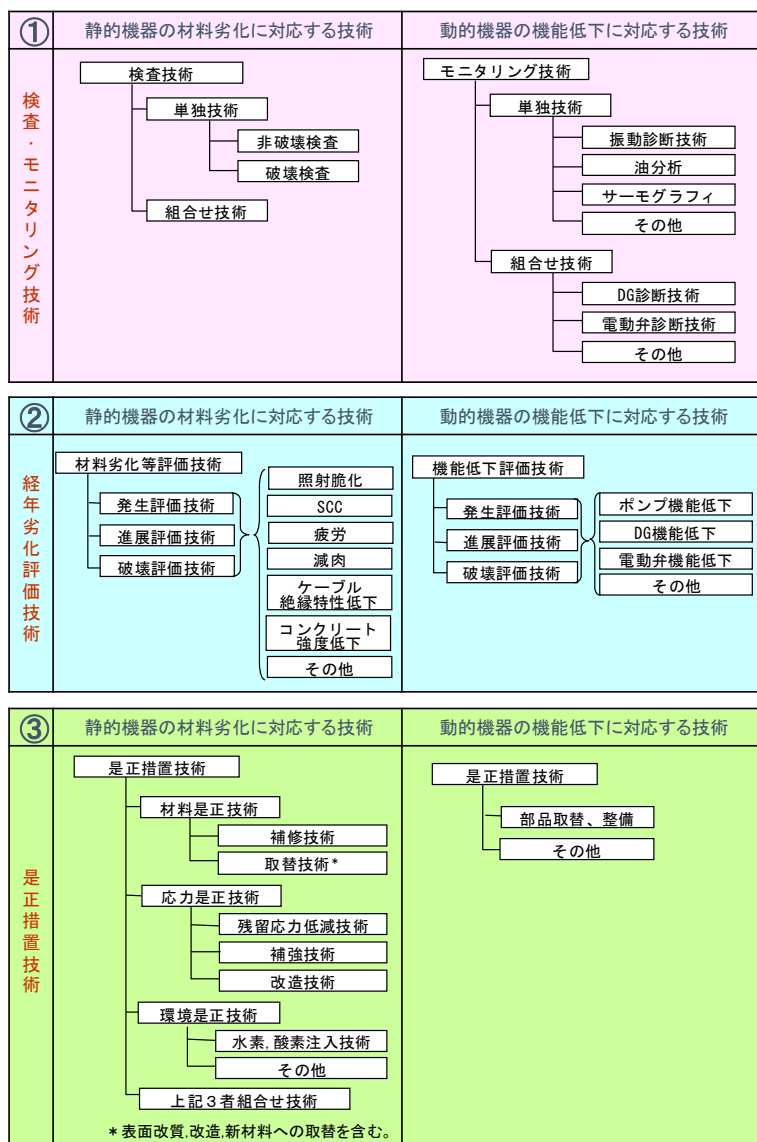


図 16 保全 3 技術の体系

す。これらを含む保全の有効性評価が継続的に行われ、保全活動全般が改善されます（図 15）。これについては、5.4 節で改めて詳細を述べます。

PDCA のうち、D と A すなわち検査と是正は物理的な現場作業を伴いますので、一定の条件（プラント安全条件、労働安全条件等）が確保されないと実施することができません。通常、プラント停止中は保全対象の機器が停止しており、そのままの状態で行うことができる場合が多いが、安全な作業環境条件を確実に確保するため、当該機器を電氣的・機械的に隔離¹⁴し、検査や是正のための分解点検等を実施することは可能です。しかし、プラント停止中であっても対象機器の運転が必要な場合がありますので、そのような場合は実施できません。しかし、多重化された機器ならば待機号機を使用したり、仮設の機器で代替したりすれば可能になる場合があります。

プラント運転中は、通常、保全対象の機器が稼動している場合が多いので、実施できる保全は実施可能な検査（例えば、振動測定による機器診断等）や是正（例えば、補修塗装等）に限定されます。しかし、保全対象機器が多重化された機器で待機号機があり、かつプラント運転中に機械的・電氣的に隔離でき、安全な作業環境も確保できれば分解点検等の保全を実施することは可能です。このようにプラント運転中に実施する保全を「運転中保全(OLM: On-Line Maintenance)」と呼んでいます。

さて、信頼性重視保全ですが、この保全の考え方は前述のように個々の機器ではなく、それら機器が属する系統あるいはプラントというレベルの信頼性を頂点におき、その信頼性を管理指標にして法律的・効果的な保全計画を立案しようとするものです。原子力発電所を構成する機器は膨大な数に上り、そのそれぞれが固有の特徴や特性を備えています。系統あるいはプラントの信頼性に与える影響は個々の機器で大きく異なります。非常に大きな影響を与えるものからほとんど影響を与えないものまであります。また、電気、制御、機械、土木建築などの違いはもちろんのこと、例えば電気品の中でもモータや遮断器など多くの機種があり、それぞれ特性が異なり、保全の方法が異なります。その結果、個々の機器の信頼性も異なります。これら全てを勘案してどのような保全を個々の機器に対して実施すれば効率的・効果的であるかを明確にし、最も系統あるいはプラントの信頼性が高くなるように保全計画を立案します。これが信頼性重視保全です。

前述のように、信頼性重視保全を用いて保全計画を実務的に立案する方法に予防保全最適化検討手法（PMO: Preventive Maintenance Optimization）があります。この手法の具体的な検討手順はいろいろと提案されていますが、ここでは標準的な手順を図 17 に示します。この図におけるポイントは、④故障モード/影響/重要度分析と⑤保全タスク分析です。

④では、システムの構成要素である個々の機器に起こり得る故障モードを予測し、考えられる原因や影響を事前に解析・評価することにより、どの機器がどの程度、システムの信頼

¹⁴ 保全対象機器を系統から電氣的・機械的に切り離して保全作業のため、内部流体を抜いたり、分解したりできるようにすること。機械的隔離とは、例えばポンプなどの前後弁を閉止し水抜きをすることにより、当該ポンプを分解点検できるような状態にすること。電氣的隔離とは、例えばモータに供給される電源の遮断器を「開」とし、当該モータを分解点検できるような状態にすること。

性に影響を与えるか、その影響を勘案してどのような保全を当該機器に対して行うかを検討します。この検討は通常、「フォールトツリー(故障の木)」解析(FTA: Fault Tree Analysis)と「イベントツリー(事象の木)」解析(ETA: Event Tree Analysis)を組み合わせ体系的に実施した結果を踏まえて行いますが、これにより個々の機器のどのような故障がどの程度の大きさで系統あるいはプラントの信頼性に影響を与えるか、すなわち個々の機器の保全重要度の概念に導くことになりますので、保全を効率的・効果的に行う上でたいへん重要です。この保全重要度の考え方については、その詳細を添付資料 C で述べます。

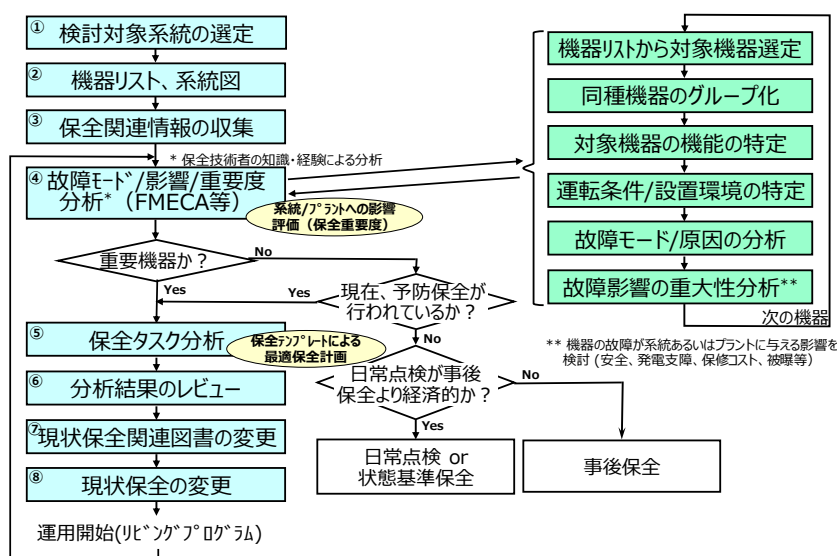


図 17 予防保全最適化(PMO)の検討手順

原子力発電所の安全リスクを評価するときこの検討をよく行います。それがいわゆる確率論的リスク評価(PRA: Probabilistic Risk Assessment)です。このPRAは多数の系統・機器を対象に上記のFTAやETAをリスク評価技術者と保全技術者が協同して行い、解析モデルを作成した上でコンピュータを用いて解析しますので、多大な労力や時間、費用がかかります。米国ではこのような膨大なリソースを要するPRAの代わりに十分な知識と経験を持つ保全技術者が頭の中で検討できるように標準化した方法を開発しました。それが前述のPMOです。この方法は図17の④と⑤を保全技術者が頭の中で実施できるように標準化したものですが、PRAによる結果と比較し、両者に大きな差がないことが確認されました。これにより、以後は保全技術者による保全計画の立案が主流となり、本検討は大いに省力化され、現在に至っています。

次に⑤です。ここでは④の検討で重要機器と認定された機器に対しどのような保全を行うかその保全タスク(検査と是正)とその実施時期(周期)を決定するステップです。このとき、機種毎に保全タスク等が標準化された保全テンプレートを参照しながら保全対象機器の保全計画を立案するステップです。例としてポンプの標準的な保全テンプレートを表1に示します。

表 1 保全テンプレートの例（常時運転、過酷環境、重要度高の例）

機器：〇〇ポンプ 運転条件：常時/間歇/待機 環境：過酷/非苛酷 重要度：高/低			
保全タスク	内容	頻度	技術的根拠
TBM	ポンプのアンカップリング、清掃、検査、グリス及びカップリング外部全体の目視検査 劣化および状態監視で劣化傾向のあったものの是正	2定検	内容は、メーカー推奨を踏まえた産業界の標準テンプレートに基づき決定。自社経験で一部修正。 頻度は、自社および産業界の経験、およびこのポンプの使用率に基づき決定。
	故障モード 機能低下 漏えい 出力低下 運転不能	故障原因 部品故障 ハウジング/ボディ/チューブのクラック、ガスケット/O-リングの故障、潤滑油系/給油系漏れ、メカニカルシール故障、パッキング劣化、部品故障 内部摩擦、部品故障	
CBM	既定の標準測定点の振動データの収集と分析	1回/3月	振動データの収集と傾向調査は、結線の緩み、軸合わせ不良、潤滑油不足、過剰磨耗等による機器/部品故障の検知が可能。軸受け、シール、軸合わせ状態の潜在的劣化を検知する方法として産業界が推奨。
	故障モード 機能低下 出力低下 運転不能	故障原因 部品故障 内部摩擦、部品故障 軸受け固着、駆動装置故障、インペラー固着、ステム/シャフト損傷	
BDM			
試験 (IST)	ポンプの運転範囲にわたる全重要運転パラメータ傾向監視のための定期的なポンプ性能試験。	2定検	産業界の経験が重要ポンプの運転状況と性能監視に効果的な活動であると証明。周期的性能試験で機器性能劣化を特定できる様々な性能パラメータの傾向調査が可能。潜在的な故障の推定が可能。
	故障モード 機能低下 漏えい 出力低下 運転不能	故障原因 部品故障 ハウジング/ボディ/チューブのクラック、ガスケット/O-リングの故障、潤滑油系/給油系漏れ、メカニカルシール故障、パッキング劣化、部品故障、内部摩擦、部品故障 軸受け固着、駆動装置故障、インペラー固着、ステム/シャフト損傷	

この表にありますように、保全タスクは通常 TBM、CBM、BDM、試験¹⁵の 4 項目から成り、これを定型としています。一般に保全タスクの内容はこれら 4 つの保全方式のベストミックスとなっていますが、機種によっていずれかの保全方式が主体となっていたり、実施しない保全方式もあったりする場合もあります。それは標準的な保全タスクが保全方式の特徴（表 2）や適用可能な実証された技術の有無等を勘案して決められているためです。

その他、保全テンプレートには保全タスクの実施頻度（周期）、そしてたいへん重要な情報として保全タスクとその頻度をなぜそのように設定したかその技術的根拠（運転経験や保全経験あるいは国内外の最新知見など）が明示されています。また、当該機種に発生する経年劣化が高じたときに現れる故障モードや故障原因が明記されていま

表 2 保全方式とその特徴

保全方式	特徴
TBM	機器を分解して懸念される各部を直接確認できるので、検査結果が信頼できる。反面、他の方式と比較して多くの時間と労力がかかる。また、弄り壊しにつながることもある。
CBM	機器を分解せずに運転中に外部から診断技術を用いて懸念される経年劣化の状態を検知できるので、比較的長時間と労力を要しない。ただし、異常徴候ができれば分解点検が必要となる。また、適用できる診断技術が必ずしも多くないので、適用できる機器の部位と経年劣化が限定される。
BDM	故障や問題が発生してから対応するので、保全コストを最小限とすることができる。逆に事後保全とした方が保全コストがかからない機器に適用される。適用できる機器が限定される。
試験	最も簡易な方法で機器の機能が確認できる。逆に試験で機能を確認すればよい機器に適用される。

¹⁵「試験」を保全タスクの 1 つとして位置付けることに抵抗を持たれる人がいるかもしれません。しかし、試験時の機能状態の他、音や煙、匂いなどの五感による検査で機器状態をある程度知ることが可能です。振動診断や油分析を実施して機器の状態を把握する CBM と形態は異なりますが、同様の検査と見ることができます。ここでいう「試験」は機器の状態を知るため、訓練された保全員が実施し評価することを指しています。目的はあくまでも機器の状態を知るためのものです。定期試験などで運転員が対象機器の機能の有無を確認するものとは本質的に異なります。試験によって確認できることの限界を知り、対象機器のプラント内の役割や使命、重要度などを勘案して適切に適用する必要があります。

す。

この保全テンプレートで重要なことは技術的根拠、すなわち保全タスクとその頻度を設定した理由が示されていることです。自分たちが長年実施してきた保全のノウハウが技術的根拠に集約されることは説明を要さないと思います。メーカー推奨や以前から実施してきたからといった理由では進歩がありません。その会社の姿勢や技術力が疑われます。

一方、なぜ保全テンプレートを策定する必要があるのかという疑問を持った人がいると思います。保全技術者が担当する機器の1つひとつに対して保全計画を立案すればよいと思われるかもしれませんが、それでは効率が悪く、短時間で計画を立案できません。また、保全技術者の力量で保全計画の内容に良否や優劣のバラツキが生じます。これらを回避するために保全テンプレートは策定されます。したがって、保全テンプレートは保全計画の立案作業の効率や信頼性を損なわないように配慮して策定・維持・改訂していく必要があります。保全テンプレートの役割や使い方の詳細については、添付資料 G に示します。

保全テンプレートはいったん制定されたら未来永劫変更しないというものではありません。保全経験を重ね最新知見を学んで随時見直していくことが重要です。また、自分たちの保全だけに閉じこもらず、積極的に外部の組織から保全を学ぶことも重要です。

以上、保全計画（保全対象機器、保全タスク、保全時期）の最適化方法について述べてきましたが、その具体的方法である PMO は、図 17 に示しましたように、リビングプログラム（継続的に改善/改訂され続けるプログラム）であり、最新知見によって常に見直されていくべきプログラムです。また、この手法に従って個々の機器の保全が最適化されたとしても系統全体あるいはプラント全体としては最適でないかもしれません。例えば、ある1つの機器が評価の結果、3年後に分解点検すべきであるとの結果が出たとします。しかし、当該機器がプラント停止しないと分解点検できない機器である場合、その時期に必ずしもプラントを停止して行う定期検査が予定されていないことも考えられます。そのような場合、当該機器のためにプラントの定期検査時期をずらすことはせず、当該機器の分解点検時期をずらすのが通常です。なぜなら定期検査の時期は、別のもっと大きな理由、例えば重要機器の法定検査や燃料交換など、プラント全体の安全性と経済性の観点からその時期に実施することが決まっているからです。このように、個々の機器の「部分最適」は必ずしもプラント全体の「全体最適」ではないのです。保全計画を検討するときは個々の機器の保全最適化を検討した上で、保全計画全体の最適化も考える必要があります。前述の図 4 で述べたように、年間を通じた保全作業量が平準化されるように保全を計画すること、これも全体最適化のための方法の1つです。

なお、保全の最適化を考えると、前述のような考え方にに基づき計画した保全を実際に現場でどのように実施するか、如何に無駄なく実施するかが最も重要であるといっても過言ではありません。このような観点から次の 5.3 節及び第 6 章で保全現場における重要ポイントについて解説します。

5.3 保全実施計画の最適化

前術の 5.2 節では、保全計画（保全対象機器、保全タスク、保全時期）を立案する上での最適化方法について述べました。保全計画の立案は、保全活動を開始するに当たって最初に設定した保全目標を達成するための、たいへん重要なステップです。これによって重点的に保全を行う対象機器を絞り込み、経年劣化を考慮した適切な保全タスクを定め、早過ぎも遅過ぎもしない適切な保全時期を決めるのですから、たいへん重要なステップです。しかし、それだけでは保全目標を達成できません。実際にどのような保全を現場で実施するかによって保全後の機器の状態はいか様にも変わってしまうからです。また、前述のように原子力発電所の保全作業は膨大ですので、個々の機器の保全作業に無駄があると全体ではたいへん大きな無駄につながります。このような意味で保全実施計画の立案もたいへん重要なステップになります。

保全実施計画は、前項で述べた保全計画に基づき、現場で保全活動をどのように実施するかを定める計画です。すなわち、だれが、いつ、どこで、何を、なぜ、どのように実施するか、いわゆる 5W1H を明確にする計画です。この計画を立案するとき、保全対象機器がどのような現場にあるか、その機器に対してどのような保全遂行能力を持った人間系で保全作業に当たるか、そしてどのような作業環境であるかを想定する必要があります（図 18）。そして、保全実施計画を立案するときの重要ポイントは、何といたっても保全作業に求められる究極の二大特性である確実性と迅速性（効率性）を引き出せるように内容を定めることです。

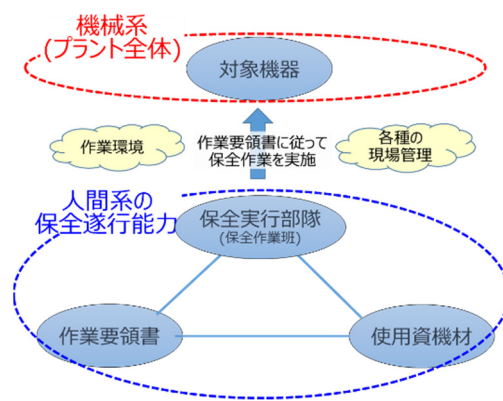


図 18 保全現場の主要な構成要素

図 18 に示しましたように、保全の現場には保全の対象機器とその経年劣化を修復しようとする保全実行部隊が存在します。その保全実行部隊は、作業要領書にしたがって資機材を使用しながら保全作業を進めます。保全作業は時間軸に沿って確実にしかも迅速に進むように配慮され、それが適切な作業ステップと各ステップにおける作業方法を決めることになります。この作業ステップと作業方法はたいへん重要です。なぜならこれらによって必要な作業員の能力と数、使用資機材の種類と数量、そしてそれらの結果として作業工程（作業期間）を決めることになり、その結果として対象機器の保全後の状態（機器の信頼性）と保全費用（経済性）に大きく影響することになるからです。逆に作業工程が先に与えられ、その工程と保全作業の品質を守れるように必要な保全作業員の能力と数、作業要領書、資機材を調達することもあります。保全作業の確実性と迅速性（効率性）の観点から保全作業員、作業要領書、使用資機材の 3 要素はいずれもたいへん重要ですが、この他に保全作業のパフォーマンスに大きな影響を与える因子として作業現場の環境（放射線量率、温湿度、スベ

ース、高所、照明など）と各種の現場管理（原子炉安全を守るための安全リスク管理¹⁶、品質管理、労働安全管理、放射線管理、異物混入防止管理、工程管理など）があります。作業環境を適切に整備すること、各種管理を無駄なく適切に行うことも保全作業を確実に迅速に行う上でたいへん重要です。

さて、理想的な保全作業要領書に従って理想的な保全作業能力を持った保全作業班が極めて効率的な作業を可能にする資機材（溶接機等の特殊施工装置、特殊冶工具、揚重設備等）を使用して保全作業を実施していることを想像してみましょう。このような条件が揃ったら保全作業の品質は最高レベルとなり、プラントの安全性は最高度に高めることができます。また、経済的には、少ない要員数の保全作業班で短時間に保全作業を完了することができますようになり、結果として総作業人工数と作業工程を最小限にすることが可能になります。使用資機材の損料あるいはリース代も最小限にすることができます。しかし、リソースは有限です。保全作業能力の高い保全作業員は通常、時間単価が高く定められています。使用する資機材も高価なものから安価なものまであります。保全作業の手順や方法は同じでも保全対象機器によっては現場作業において注意する点や品質管理の仕方が異なります。このように、保全実行部隊、使用資機材、保全作業要領書の組合せで決まる保全作業のパフォーマンス（保全遂行能力）を保全対象機器の保全重要度に応じて適切に個々の保全対象機器に割り当てることが重要です。これが保全実施計画の最適化の1つの観点です。

保全作業を確実にしかも迅速に実施できるようにするにはどうしたら良いでしょうか？それは上記の通り、保全作業のパフォーマンス（保全遂行能力）を決める3つの要素、すなわち保全実行部隊、使用資機材、保全作業要領書のそれぞれを改善しその上でこれら3つの組合せでトレーニングを重ねパフォーマンスを向上させればよいと考えられます。このとき、従来のような保全実行部隊の技量を向上させるための研修やトレーニングだけでは十分ではありません。国内外のトップクラスのパフォーマンスを誇る保全遂行能力を持つ組織を見つけ出し、保全作業のパフォーマンス（保全遂行能力）を決める3つの要素の観点から比較してそのギャップを確認し改善する「ベンチマーキング活動」や保全現場の専門家間の詳細な情報交換ができるコミュニティを確立し、生きた情報を交換して自らの保全作業を改善していく等の取組みが必要です。

保全のベンチマーキング活動とは、最も手強い競争相手/産業界のリーダーである企業の製品、サービス及び業務実績を調査し、自社のものと比較することにより業務等を継続して改善していく活動のことです（図19）。この活動は確実に成果を出すため、対象を特定の機器や特定の活動に絞って実施することが多いですが、そのような場合でも得られた成果で特定の保全遂行能力を改善し十分に自分のものにした上で他の機器や活動へ水平展開すれば効率的に保全を改善することができます（図20）。得られた成果は随時、保全テンプレートへ取り入れ、その結果として保全計画を改良することも可能です。また、国内外の他プラ

¹⁶ 系統・機器のアイソレーションの実施・解除とそのタイミング等を含むシステム構成管理（Configuration Management）や運転中保全における緊急時対応計画と管理など。

ネットあるいは他産業等との情報交換も重要で
す。それも単なる会合
ではなく、機種毎の保
全の専門家が横の連絡
を自由に取れるネット
ワークの構築による情
報交換です。例えば、米
国では原子力発電所の
圧縮空気系を担当する
者同士でインターネット
を利用した情報交換
コミュニティを設立・
運営し、悩みや改善策

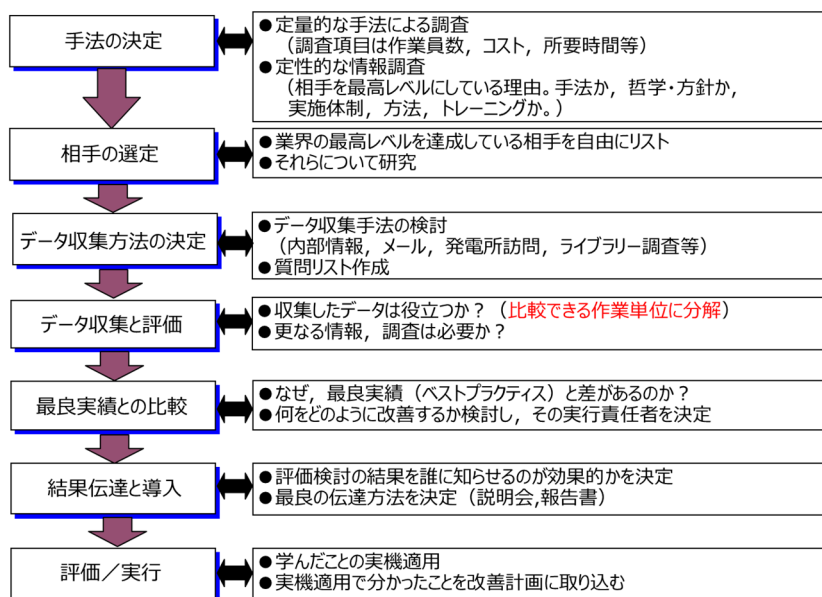


図 19 ベンチマーキング活動の具体的方法

等に関する情報交換を随時行っています^[9]。

個々の保全対象機器の保全作業はいつでも実施できるというわけではありません。定期検査中であれば、原子炉安全を確保するためにいろいろな作業制限が課せられます。電源や水、圧縮空気などが供給停止される時期もあります。作業現場では隣接していくつもの別の保全作業を同時並行で実施することは情報管理や品質管理などの観点から禁じられています。このような制約条件をクリアして最短の作業工程を追求することは経済性の観点から必要です。しかし、ここでも部分最適であっても全体最適でない場合がありますので、個々の保全作業の実施計画を立案した後、他の保全作業との全体調整を実施し、最適な工程を策定する必要があります。これも保全実施計画の最適化の1つの観点です。

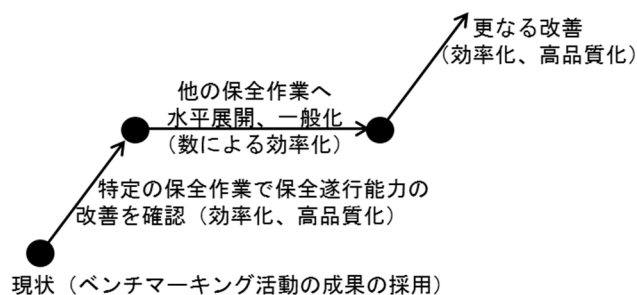


図 20 ベンチマーキング活動による成果の効率的な活用方法

我国の保全現場では実績主義が横行し、現場の保全を改善する気運が希薄です。すでに述べましたように、原子力発電所の保全作業量は膨大であり、個々の保全作業のわずかな無駄が総計すると大きな無駄につながります。是非、この部分の改善にチャレンジしていただきたいと思います。

5.4 保全の有効性評価

現在実施している保全活動や保安全管理が有効に機能しているかを確認することはたいへ

ん重要です。もしそれが機能しているのではなく、たまたま結果として良い運転実績につながっているだけで、いつそれが瓦解するか分からない状態であるにもかかわらず、現状に自己満足しているだけかもしれません。あるいはたいへん無駄の多い保全を実施しているにもかかわらず、現状を是認しているだけかもしれません。有限なリソースの下で効率的・効果的な保全を実施するにはこの視点は欠かせません。

それではどうすれば保全の有効性を評価できるのでしょうか？

現場の保全活動は、前述のように保全目的（プラントの安全性と経済性を一定以上に確保すること）を達成できると考えられる保全計画と保全実施計画を立案し、それらに基づき実施されます。そしてその結果が運転実績や保全実績として現れます。したがって、保全目的を達成するために設定した保全目標（安全目標と経済目標）に直接あるいは間接的に関連する指標（それも客観的評価を可能にするためカウントできる指標）を設定し、保全活動の結果である運転実績や保全実績と比較してそのギャップを評価できるようにすることが重要です。具体的には、保全対象機器の安全機能の喪失頻度などで安全性を、生産機能の喪失頻度（稼働率）などで経済性を評価することが考えられます。経済性評価には、当該機器の保全作業に当たった作業班のパフォーマンス（作業の正確性、迅速性）や人件費（単価×職種毎の人数×所要日数）なども含める必要があります¹⁷。

上で述べたのは、保全計画と保全実施計画の妥当性を含めた現場における保全活動全般の有効性評価ですが、この他に保全活動 PDCA の各ステップにおける内容と方法、現場での保全作業と同時に行われる各種現場管理の有効性や作業環境整備の有効性（妥当性）¹⁷も評価する必要があります。これらについては、カウントできる指標を設定し、客観的に評価するのはむずかしいですが、国内外の他プラントや他産業と比較することや前述のベンチマーキング活動などによってできるだけ客観的な評価ができるようにすることが重要です。

国内外の保全に関する最新知見を広く学び、それらの情報を踏まえて自分たちの保全活動や考え方を見直し、必要に応じてそれらを反映することも重要です。我々は自分の関係している範囲やグループに閉じこもりがちです。この悪弊を打破するためにも常に外へ向ける目を忘れてはいけません。このような最新知見との比較・検証も保全の有効性評価活動の一部と考えられます。

6. 保全作業管理

6.1 保全現場の概要

改めて保全の現場を思い出してみると、現場には保全対象である機械系（プラント）があり、それに対して保全作業を実施する人間系（保全実行部隊、作業要領書、使用資機材からなる保全遂行能力を持った人間系）が存在します。そしてその保全遂行能力に大きな影響を与える「作業環境」と「作業管理」があります。図 18 に示したとおりです。

¹⁷ 各種現場管理の内容と方法や要員数に過不足がないか、作業環境の整備内容と方法に過不足がないかの評価です。

現場における保全作業のパフォーマンスを向上させ、確実にしかも迅速に保全作業をできるようにするには、下記に気をつける必要があります。

- ・ 十分な技量を持った能力の高い保全実行部隊（保全作業員）を配置すること
- ・ 保全作業を確実にしかも迅速に実施できる資機材を調達すること
- ・ 作業の実施しやすい環境を整備すること
- ・ 各種の現場管理（原子炉安全を守るための安全リスク管理、品質管理、労働安全管理、放射線管理、異物混入防止管理、工程管理など）を適切に実施できる要員を配置すること
- ・ 上記を前提に効率的な保全作業が実現できる作業ステップと各ステップにおける作業方法を、またその作業を確実にしかも迅速に実施できるように各種の現場管理の方法を記載した保全作業要領書を整備すること

保全活動全般に関わる組織と運営は図 21 に示すようになされています^[10]。すなわち、社内のリーダーはトップマネジメントが示した目標（例えば、発電所の安全性と経済性の目標）を具体的な目標に落とし込み、それを傘下の構成員に説得力のある説明を行うとともにそれに向かって実行できる条件

件を確保しなければなりません。リーダーが設定した具体的な目標に向かって実務を円滑に進めるように調整し、それを傘下の構成員に説得力のある説明を行うとともに実務を実行できる条件を確保するのがマネージャの役割です。マネージャの傘下で保安活動の実務を担う数多くの実務遂行者は自分の役割を認識し決められたことを決められた通り迅速・着実に遂行することが重要です。

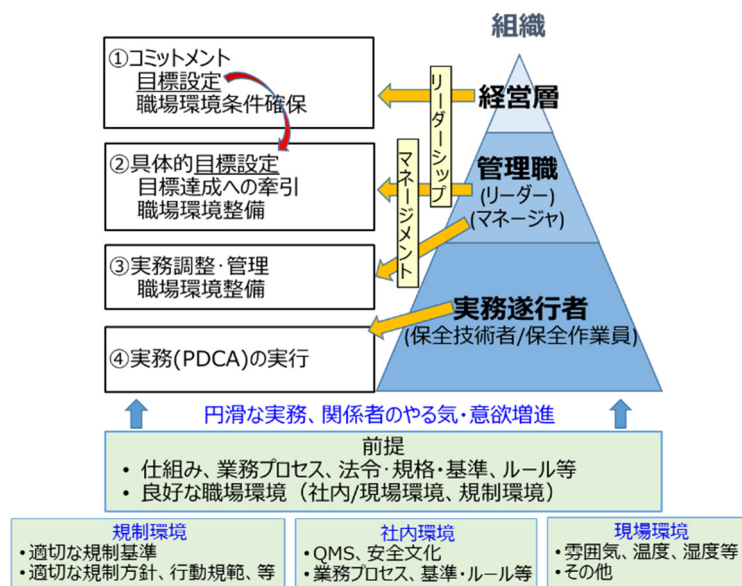


図 21 組織、構成員と役割、職場環境の関係

保全活動もこのような組織運営の中で実施されますが、ここで強調しておきたいのは職場環境です。一般に職場環境は、社内環境はもとより、規制環境にも大きく影響されます。それらが適切でないと実務が円滑に進まず阻害されることがあります。保全の場合はさらに現場環境（作業環境）にも大きく影響されます。原子力発電所の保全活動は多数の人によって実施されます。これら保全関係者に意欲、やる気を起こさせたら、そのパフォーマンスは向上し発電所の安全性と生産性は格段に向上します。このことを忘れずに社内環境、規制環境、現場環境を常に改善する努力が必要です。

6.2 保全技術者の心得

(1) 自分の担当する系統・機器に自信を持てるようにすること

自分の担当する系統・機器に自信を持てるようにするにはどうしたらよいでしょうか？
自分の担当する系統・機器の現状を把握し、今後の供用に向け、系統・機器を十分に保全管理できていることを自信を持って言えるようにするにはどうしたらよいでしょうか？

そのためには、これまで述べてきた機械系と人間系をよく知ることが必須です。

① 保全の機械系を十分に把握すること

まずは機械系です。機械系については下記を実施することが求められます。

(a) 原子力発電所を構成する主要設備¹⁸に対する「基本設計要求や規制要求を記載した図書¹⁹」とそれらの要求を満足するように作成されているはずの「実際のハードウェアの機能・仕様等を記載した図書²⁰」との間に整合が取れていることを確認する。

(b) 「実際のハードウェアの機能・仕様等を記載した図書」に従って製作されているはずの「実際に現場に設置されてハードウェアの状態²¹」との間に整合が取れていることを確認する。

(c) 「実際に現場に設置されているハードウェアの状態」と「基本設計要求や規制要求を記載した図書」との間に整合が取れていることを確認する。

上記(a)～(c)の間の関係を図 22 に示します。

保全技術者として、プラントのいずれかの系統・機器を担当することになったら、担当する系統・機器について上記(a)～(c)を実施することが最初に求められます。これが「コンフィグレーション管理」あるいは「システム構成管理」と呼ばれる活動で、米国の原子力発電所でもたいへん重要視されています。

これら三者の整合を確認するのはそれ程、たやすいことではありません。「基本設計要求や規制要求等を記載した図書」といっても社内のどこにある、どの図書のことでしょうか？その図書の内容は確実に信頼できるもの²²でしょうか？また、それらの要求を満足しているはずの「実際のハードウェアの機能・仕様を記載した図書」は社内のどこにある、どの図書のことであり、その内容は本当に「基本設計要求や規制要求を記載した図書」に示されている要求を満足しているのでしょうか？さらに「実際に現場に設置されているハードウェアの

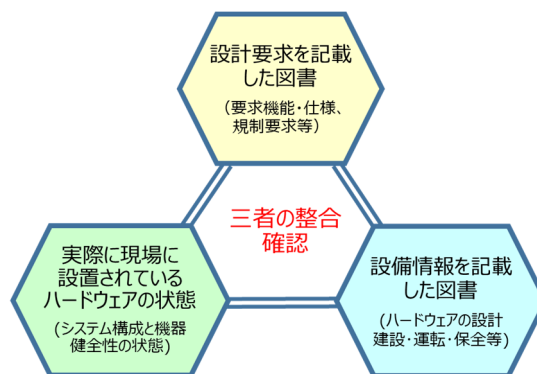


図 22 システム構成管理の基本

¹⁸ 主要な構造物、系統、機器（SSC: Structures, Systems and Components）のこと

¹⁹ 主要設備の機能要求書、設置許可申請書、安全解析書など、要求機能・仕様や安全解析に用いる重要な数値などを記載した図書

²⁰ 要求機能・仕様等を満たす主要機器の設計仕様書、工事計画認可申請書、基本図面集などの図書

²¹ システム構成と機器仕様（材料、形状・構造、寸法）、機器健全性の状態など

²² 確実に信頼できる図書とは、会社組織として内容が確認されたオリジナルの図書のことで、だれかがそれを書き直したり、作り直したりしたものではない図書のこと。

状態」は、実際に「基本設計要求や規制要求等を記載した図書」の要求を満足する状態にあるのでしょうか？

例えば、担当する系統の配管系の現物が「実際のハードウェアの機能・仕様等を記載した図書」と整合していること、すなわち上記(b)を確認するには、「実際のハードウェアの機能・仕様等を記載した図書」の一部であるアイソメ図と耐震計算書、それも確実に信頼できる内容が記載されているものを片手に、自分自身で配管系の端から端まで（アンカー一点からアンカー一点まで）現場で配管系をたどり、配管系の方向余弦や耐震サポート類の設置位置、種類と拘束方向などが図書と一致するか確認する必要があります。耐震解析書はコンピュータによる解析なので妥当性を確認できないという人がいますが、これは間違いです。配管系のアイソメ図を見れば、どの辺に高応力が発生するか応力分布の傾向はどのようになるか、おおよそ推定できます。このようにして定性的な耐震解析書の妥当性も確認できます。配管の寸法や材質も保温を剥がすことが可能な場合は目で見て概略寸法や炭素鋼かステンレス鋼かなど、おおよそのことは確認できます。配管系（サポート類を含む。）の一部改造や取替等を実施した場合はその竣工時に詳細な検査を実施します。このときも同様に信頼できる図書を片手に現場で実物を確認することは当該系統の担当として必要不可欠です。

上記(b)の整合を確認することの中に経年劣化の状態を確認することも含まれます。機器は供用時間の経過とともに変化していきますので、設計で要求されている条件を満たさなくなる可能性があります。したがって、これを確認することは、自信を持って機械系を管理する上で必要不可欠です。通常、系統・機器の経年劣化状況を把握する場合、その経年劣化の特性を十分考慮の上、比較的進展速度が速い箇所を優先して計画的に点検し、その結果を評価して点検していない箇所も含めた系統全体の健全性を確認します。点検箇所はこのように経年劣化の特性と比較的進展速度の速い箇所を予測して選定し、「点検プログラム（点検計画表）」を策定します。したがって、前述のようにアイソメ図や耐震計算書等の設計図書を片手に現場で機器の設置状況を確認する際、点検プログラムに選定されている点検箇所を現場で確認し、その箇所がなぜ選定されているのか、その技術的妥当性を自分の頭で考えてみるのが重要です。このとき、経年劣化のメカニズムから類似箇所がきちんと選定されているか、あるいは条件がより厳しい箇所がきちんと選定されているか等も考えることが重要です。そして点検周期の妥当性、前回点検はいつであり、そのときの経年劣化状況はどうであったかについてもチェックしてみる必要があります。

特定の系統・機器の担当になったら、一度は上記(a)の確認を実施することが重要です。そして、上記(b)と(c)の確認は点検を実施した都度、点検結果が上流側の図書の要求を満足しているか確認することが重要です。

以上はプラントの安全性に関わる系統・機器を想定して述べてきましたが、これは生産性（運転継続性）に関わる系統・機器であっても同じことです。これらの系統・機器は保全の目的であるプラントの経済性に大きな影響を与えますし、そのプラントで働く人たちの労働安全を確保する観点からもたいへん重要です。

② 保全の人間系を十分に把握すること

保全の人間系とは保全遂行能力のことで、保全作業要領書、保全実行部隊、使用資機材の 3 要素から成ることを述べました。この 3 要素の組み合わせで保全作業の確実性と迅速性が決まる、すなわち保全作業の信頼性と経済性が決まるので、たいへん重要であり、これら 3 要素を常に改善する努力を継続し続けることの重要性を述べました。これは工事会社の努力が必要であることは言うまでもありませんが、現実には事業者あるいは元請工事会社がこの改善を牽引しないと、なかなか改善されません。この改善を促すには前述のベンチマーキング活動や機種毎の情報交換コミュニティを振興すること等の方策が必要です。

ここでは保全遂行能力のうちの保全実行部隊について述べたいと思います。保全作業員から成る保全実行部隊は研修やトレーニング、経験を積みれば保全作業のパフォーマンスが向上します。これは当然のことですが、さらに重要であるのは、保全実行部隊が人間の集団であることを認識し、下記を推進することが極めて重要です。

- ・ 管理部門を含む保全実行部隊と事業者との間で信頼関係、尊敬し合える関係を確立すること
- ・ そのために両者が現場保全技術に精通し、常に改善のための努力と話し合いを行うことにより切磋琢磨する関係を確立すること
- ・ 職場環境や規制環境を改善する努力を継続すること
- ・ やる気を失わせるような現場規制や管理を一掃し、改善努力を常に続けること
- ・ 作業現場の環境を働きやすい環境へ改善する努力を常に継続すること
- ・ 良好な保全作業を完遂した会社にはボーナスを支給するなどのインセンティブ制度を導入すること

これらを通じて保全実行部隊にやる気・意欲を持ってもらえれば、保全実行部隊は非常に高いパフォーマンスを発揮するようになるでしょう。そして、結果としてプラントの安全性、経済性が向上します。なぜなら保全活動は保全計画や保全実施計画を無駄なく合理的に策定する必要がありますが、多くの無駄や問題は膨大な保全作業を行う現場作業に潜在しているからです。しかし、一方で上記の信頼関係や尊敬し合える関係、あるいは切磋琢磨する関係を確立するのは容易ではありません。長く継続的な努力が必要です。

(2) 保全の原点は保全対象の経年劣化状況を十分把握すること

保全は検査、評価、補修等の是正の 3 つの活動から成り立っています。最初の検査は保全対象の機器の劣化状況を把握するためのもので、人為的な手が加えられていないそのままの状態でのデータ、いわゆる手入れ前検査データ（As-found データのこと）と言われるデータを採取する行為です。この手入れ前検査データは自然のままの状態をデータ化したものですので、信頼性が高く、実際の劣化傾向を把握したりそれに基づき劣化進展予測をしたりする極めて重要なデータです。しかし、手入れ前の機器状態をデータ化する際に注意が必要なことがあります。それは機器の内表面の荒れ状態や変色状況等はどうしてもデータ化する際に主観的になりやすく、そのために信頼性の高い劣化傾向の分析等ができなくなる

恐れがあることです。したがって、減肉や亀裂等の定量的に計測され、客観的な情報となるものとは異なり、写真撮影等によりできるだけ客観的な情報となるよう工夫が必要です。このようなデータとして採取された情報では伝わりにくい状況/情報が実際の機器や現場にはあるので、自ら現場に行ってこれを直接観察することは保全活動の中で極めて重要な行為の1つです。この直接観察はまさしく保全活動 PDCA の出発点、保全の原点です。このような重要な位置づけにあるものを当該系統・機器の担当者が直接観察しない訳にはいきません。もちろん与えられた条件（全体業務）の中で重要度の高いものから優先的に可能な範囲で実施することになりますが、最も優先度の高い業務の1つということができます。というのは、これを実施しないと、その後の経年劣化評価、それに基づく次回点検時期や補修等の是正を実施する時期などを自信をもって判断することができないからです。保全は常に責任を持った判断を求められます。自動的に物事が決っていくような仕事ではありません。

(3) プラント全体を俯瞰し、何が重要か、リスクはどこにあるかを考えること

原子力発電所のような大規模で複雑なシステムを保全する場合はプラント全体を俯瞰して考えることを忘れてはなりません。もしこれを忘れると、重要度の低いもの、特定の機器については最適であっても系統全体あるいはプラント全体としては最適でないものがあります。結果として効率的・効果的でない保全となり、労力と時間をかけた割には安全性と経済性を低下させてしまう可能性があります。これまで縷々述べてきましたように、保全の目的（安全性と経済性の確保・向上）を達成するために何が重要かを常に考える必要があります。

そのような俯瞰的視点を持つには、原子力発電所の設置（変更）許可申請書の添付書類八²³と十²⁴、確率論的リスク評価手法とそれによる評価例などを勉強することが結局のところ近道です。これからの保全はプラントの安全性や安全重要度、経済性や経済重要度を理解しないと仕事にならない場面が多くなると思います。

(4) 常にどこに無駄があるかに注意すること

「無駄」とは何か？実施したことが有効でないこと、効果的でないことです。

原子力発電所の保安活動の中で保全活動ほど多数の人が関わり、現場で多くの機器や材料、資機材等を使って長時間作業し、結果として莫大な費用を費やす活動はありません。そこには多少の無駄は付き物ですが、それらを集計すると莫大な量の無駄になります。したがって、目の前のわずかな無駄であってもこれを改善しそれを他の保全活動にも展開すると全体として大きな改善につながることになるのです。要するに、改善の余地の多くは保全の現場にあるのです。

これまで我国の原子力発電所では安全上の重要度にしたがって系統・機器を分類し、その

²³ 発電用原子炉施設の安全設計に関する説明書

²⁴ 発電用原子炉施設に事故が発生した場合における当該事故に対処するために必要な施設及び体制の整備に関する説明書

重要度に応じた取り扱いや保安活動を実施してきました。関係者はそのようにしていると信じてやってきました。しかし、それは本当でしょうか？ただ単にそのように見えていただけではないでしょうか？

現場の実態を振り返ってみると、安全に関わるものであれば、ほぼ一律に安全性に関わるものとして手厚く対応してきたことはなかったでしょうか？何かあると、「保守的」という言葉を乱用し、「とりあえずやっておけば安全」と考えてそれ以上考えず、安易に妥協していたことはなかったでしょうか？そのとき、「それを実施することは安全上どの程度の効果あるいは影響があるのか？」「それを実施することの価値はどれくらいあるか？」を考えたでしょうか？既に決まっていることについても「それを実施する価値は安全上どれくらいあるのか？」「そこに無駄はないか？」と考え、改善しようとしたでしょうか？答えは「No」です。そのようにはしていませんでした。等級別扱い（グレーディッドアプローチ）という言葉は飛び交っていましたが、実態は名ばかりでした。これまでのやり方は、いわゆるメリハリのない対応だったのです。結果として真に重要なものが本当に重要なものとして扱われず、それほど重要でないものが重要なものとして扱われ、結果として業務量が大きく増大しました。そして、それを実行する関係者はオーバーワークとなり疲弊しました。このようなやり方は効率的・効果的なやり方ではなかったのです。

今後は安全に少しでも関わるものは、保守的に安全上重要なものと同じようにやっていく等の「安易な対応」は安全性を阻害する、安全性を低下させると考える必要があります。そのような無駄を許容することは安全性を阻害すると考える必要があります。むしろ安全重要度が低いもの、安全性に影響の少ないものに対しては、徹底して如何に省力化していくか、やめていくかを考え、それを実行していく必要があります。そして、真に重要なところに力を傾注する必要があります。そのような視点で自分の担当する系統・機器やそれに対する保安活動を見ていく必要があります。

(5) 常に科学的、経済的な原理/原則に立ち戻って考えること

保全 PDCA のそれぞれを考えると、それまでの国内外の運転実績や最新科学技術動向等を考慮しながら、常に科学的合理性と経済合理性を追求してすることは重要です。そして自分の担当する保全の妥当性を透明性のある形で示し、説明責任を果たせるようにすることが必要です。

6.3 保全作業管理のポイント

保全作業には、いろいろな作業があります。大別すると、経年劣化状況を確認するための検査・モニタリングを実施するために行う保全作業と経年劣化が顕在化しそれを是正するために実施する保全作業があります。さらにそれぞれに種々の目的を持った保全作業があります（図 23）。そして、それぞれの保全作業は、準備作業、本作業、後片付けから成っています。ここではこれら保全作業の管理を行う場合の注意すべき点について述べます。

保全作業の管理には下記の管理があります。

- ・ 作業プロセス管理/工程管理
- ・ 原子力安全リスク管理
- ・ 品質管理、異物混入防止管理
- ・ 一般労働安全管理
- ・ 放射線管理
- ・ 労務管理



図 23 保全作業の種類

これら各種の管理においても効率的・効果的であることが求められます。無駄があってはならないのです。しかし、上記管理の観点から重要なことはきちんと管理しなければなりません。それでは何が重要で、何が重要ではないのでしょうか？

例えば、保全の目的の1つはプラントの安全性でした。その観点から原子力安全リスクを管理するのは当然です。この場合、すでにこれまで述べてきたように、安全重要度クラス分類や確率論的リスク評価 PRA の評価結果を踏まえて安全性へ与える影響の大きい機器や保全活動に焦点を当てることは当然です。品質管理の観点からは、分解点検の場合、将来の経年劣化予測に大きな影響を与える機器開放時の状態、すなわち手入れ前検査 データを正確に取ることが重要ですので、ここが1つのポイントです。そして、機器復旧後の状態に影響する作業ステップはどのステップであるかを見極めることも重要ポイントです。分解工程は復旧後の機器状態に影響を与えません。ポイントは組立工程にあります。その組立工程のうち、どこに最大のポイントがあるのでしょうか？これは機種毎、個々の機器毎に異なります。ポイントを絞り込んでいき、効率的・効果的に管理できるようにする、そのことを常に考え改善していくことが当該機器の担当者にとってたいへん重要です。

その他の管理に当たっても同様です。その管理の目的は何か、その目的を達成するにはどこがポイントか、どの作業ステップにおけるどの作業がその目的達成に大きな影響を与えるかを考え、見極めていくことにより、管理のポイントが見えてきます。

保全作業には図 23 に示しましたように、いろいろな種類の作業がありますが、補修作業を取り上げて、その計画及び実施するうえで注意すべき点等について添付資料 H にまとめました。参考にしていただければ幸いです。

7. おわりに

原子力発電所の保全を例に取り、保全に関する基本的事項と重要ポイント等について述べてきました。我々の保全対象は原子力発電所です。原子力発電所は膨大な数の機器からなる大規模複雑システムである産業プラントであり、安全性と経済性を確保しないと社会の中で存続できない宿命を持っています。また、保全は経年劣化という自然現象が誘起する故障や機能低下/喪失が生じる機械系とそれに対処する人間系の両者に跨るたいへん複雑なシステムです。そのような大規模複雑システムに対して我々は有限なリソース（ヒト、モノ、

カネ、情報、時間など）で立ち向かっていかなければなりません。

我々人間はプログラム通りに決められたことをいつでも正確に繰り返し実行できる機械と異なり、集中力や緊張を長時間維持して正確に作業を実施することが苦手であったり、時間の経過とともに目標/目的を見失いがちであったりします。また、数多くの人が集まって1つの目標/目的のために意志統一して活動することが苦手です。環境が悪いとパフォーマンスが極端に低下する面もあります。このため、あらゆる分野、あらゆる局面で効率的・効果的な方法を採用していかなければ大規模複雑システムの経年劣化/機能低下にとっても太刀打ちできません。

原子力発電所における保全の効率的・効果的な方法とはどのような方法でしょうか？それはこれまで述べてきた考え方と方法を具体化し実行するしかありません。そしてそれらを継続的に改善していくしかありません。保全の目的（安全性と経済性の確保・向上）を明確にし、これを達成するための効率的・効果的な方法を常に追求することです。まず、安全性と経済性を確保するために実施する必要があることを絞り込むこと、絞り込んだ対象に対して実施する業務や作業の内容、方法、頻度（周期）などを徹底して重要度に見合ったものにする、その際無駄を徹底的に排除するために安易な妥協をしないこと、常に改善努力を怠らないことが必要です。例えば、安全に関連する機器であっても影響度の低いものは思い切って点検周期を延ばしたり、故障時に原因調査や水平展開をやめて修理復旧のみとしたりするなどしてリソースを温存し、そのリソースを重要度の高い機器や保安活動に振り向けることが必要です。いわゆる、メリハリの付いた対応が必要なのです。

我が国の原子力発電の歴史を振り返ってみますと、紆余曲折した長い道程があつて、ようやく米国 NRC の ROP 制度のような客観性が高く、真に原子力安全を重視した検査制度が導入されつつあります。これはまさにパラダイムシフトと言ってよい変革です。一方、目を転じると、世界的に地球環境保全や持続可能な開発目標（SDGs²⁵）の設定と達成が重要視されるようになってきました。このような時代には産業プラントの保全活動を通じた貢献が強く期待され、その重要性が格段に大きくなります。それゆえに保全の在り方や考え方などが深く追求され、その結果として保全マネジメント等が大きく変貌していくことが予想されます。あるいは変貌させていかざるを得ないような状況が到来することになると予測されます。そのようなとき、本書で述べた保全目的の明確化、その目的を達成するための具体的な目標の設定、そしてそれを達成するために必要な合理的な考え方や数々の効率的・効果的な方法の導入などが必要不可欠になるものと予測されます。

最後に今後を展望して原子力発電所の保全分野において力を入れていくべき事項とその方向性について以下に考えてみたいと思います。

(1) 経営層によるコミットメントとリーダーシップの強化

²⁵ SDGs とは「Sustainable Development Goals」のことで、「持続可能な開発目標」を意味します。持続可能で多様性と包摂性のある社会の実現のため、国連加盟 193 か国が参加して 2030 年を年限とする目標と具体的なターゲットが 2015 年に国際連合で定められました。

- ・地球環境保全や SDGs を意識した目標の設定（保全部門に対する定性的目標：安全性のレベルと経済性レベル）
- ・職場環境条件の確保（保全リソース（ヒト、モノ、カネ、情報、時間）の確保）
- (2) 管理職によるリーダーシップとマネジメントの強化
 - ・経営層の設定した目標の具体化（安全性と経済性に関する数値目標の設定）
 - ・目標達成への牽引（率先垂範による業務運営）
 - ・保全重要度（安全重要度と経済重要度）に見合った設備管理と現場保全活動を徹底するための保全マネジメントの強化（保全に関する安全マネジメントと経済マネジメント）
 - ・保全現場を重視した管理の重視と推進（パフォーマンスベース^[11]の現場保全作業管理）
- (3) 保全体制整備と構成要員の能力向上
 - ・保全技術者と保全作業者の真のプロフェッショナル化の推進
 - ・保全実施体制の整備（我国特有の重層構造の実施体制に伴う欠点を補う対策の実施）
 - ・保全ベンチマーキング活動（競争原理）の導入
- (4) 効率的・効果的な方法の積極導入
 - ・保全計画の立案方法（リスク情報の活用、保全重要度に見合った検査計画内容、是正計画内容と原因調査程度/水平展開範囲など）
 - ・保全実施計画の立案方法（保全重要度に見合った力量の保全作業班の配置と使用資機材の配備、パフォーマンスベースの管理など）
 - ・迅速・確実な保全情報の共有と報告・指示等の伝達を可能とする対策実施（CMMS/EAM²⁶の導入と適正運用）
- (5) 新技術の導入
 - ・保全の適正化と無駄の削減を可能とする保全 3 技術の体系的整備の推進（表 3）
 - ・新しい技術の導入（AI 技術、ビッグデータ解析技術など）

以上、原子力発電所における保全活動を適正化するために必要な基本的事項について述べてきました。最後まで読んでいただき、ありがとうございました。

最後になりましたが、読者の皆様にお願ひがあります。産業プラントの保全は未だ十分に体系化され定説化された技術分野であるとは言いがたいところがあります。しかしながら、本書は敢えてそれを顧みずに保全という技術分野の発展を願って執筆された経緯があります。したがって、本書は原子力発電所を念頭に置いて執筆された前例のない保全の解説書となっています。そこで、本書をより良いものにしていくため、是非、皆様の忌憚のないご意見をお寄せいただきたく、よろしくお願いいたします。

²⁶ CMMS: Computerized Maintenance Management System, EAM: Enterprise Asset Management System

表 3 ニーズの高い保全 3 技術

(a) 必要な検査技術

		所要時間	
		短時間で終了したい場合	時間的制約が比較的小さい場合
信頼性 (検出・サイン・故障予測)	高精度	◆ここに位置する技術のニーズが最も高い ◆ここに位置する技術は下記が求められる ・検出/サイン/見落し率、全ての観点から高精度 ・所要時間が短い^(注) ・所要時間との兼ね合いで多少コストが高くても止むを得ない ◆しかし、高精度を求めると、通常は時間を要するので、このような技術は少ない。	◆ここに位置する検査技術のニーズは高い ◆信頼性、所要時間、コストのバランスの良い技術が求められるが、多少コストが高くても許容される場合がある
	通常精度	◆兎に角、短期間のうちに検査して運転再開したい場合、ここに位置する技術が必要でニーズが高い ◆ここに位置する技術は下記が求められる ・一定の精度を備えている ・所要時間が短い^(注) ・所要時間との兼ね合いで多少コストが高くても止むを得ない	◆既存の技術は基本的にここに位置する ◆信頼性、所要時間、コストのバランスの良い技術が求められる ・できるだけ高い信頼性を期待できる技術 ・できるだけ所要時間の短い技術 ・できるだけ低コストの技術 ◆現在行われている研究開発はここに位置する技術の高精度化を狙ったものが多い
	比較的低精度	◆兎に角、短期間のうちに検査して運転再開したい場合にここに位置する技術が必要で、下記条件の技術のニーズもある ◆ここに位置する技術は下記が求められる ・適用対象の構造強度が高い場合、あまり精度は要求されない ・所要時間が短い^(注) ・所要時間との兼ね合いで多少コストが高くても止むを得ない	◆通常精度を有する検査技術が既に存在するので、これに該当する検査技術のニーズは高くない

(注) 準備、検査、後片付けの全時間
たとえば、一括広域探傷又は広域探傷技術+局部探傷技術の組合せで、検査時間が短く、付帯作業も短時間

(b) 必要な経年劣化評価技術

		所要時間	
		短時間で終了したい場合	時間的制約が比較的小さい場合
信頼性	高精度	◆ここに位置する技術のニーズが最も高い ◆ここに位置する技術は下記が求められる ・高予測精度 ・所要時間が短い^(*) ・所要時間との兼ね合いで多少コストが高くても止むを得ない	◆ここに位置する検査技術のニーズは高い ◆信頼性、所要時間、コストのバランスの良い技術が求められるが、多少コストが高くても許容される場合がある
	通常精度	◆兎に角、短期間のうちに検査して運転再開したい場合、ここに位置する技術が必要でニーズが高い ◆ここに位置する技術は下記が求められる ・一定の精度を備えている ・所要時間が短い^(*) ・所要時間との兼ね合いで多少コストが高くても止むを得ない	◆既存の技術は基本的にここに位置する ◆信頼性、所要時間、コストのバランスの良い技術が求められる ・できるだけ高い予測精度が期待できる技術 ・できるだけ所要時間の短い技術 ・できるだけ低コストの技術 ◆現在行われている研究開発はここに位置する技術の高精度化を狙ったものが多い
	比較的低精度	◆兎に角、短期間のうちに検査して運転再開したい場合にここに位置する技術が必要で、下記条件の技術のニーズもある ◆ここに位置する技術は下記が求められる ・保全対象である機器の健全性が保全 3 技術の総合力で確認できればよいので、必要以上の精度は必ずしも必要ない ・所要時間が短い^(*) ・所要時間との兼ね合いで多少コストが高くても止むを得ない	◆通常精度を有する検査技術が既に存在するので、これに該当する検査技術のニーズは高くない

* 条件設定、評価(解析)、結果まとめの全時間。必ずしもコンピュータ解析でなくてもよい。

(c) 必要な是正措置技術

		所要時間	
		短時間で終了したい場合	時間的制約が比較的小さい場合
信頼性 (耐久性)	長期対策	◆ここに位置する技術のニーズが最も高い ・長期の信頼性、高い対策効果 ・所要時間(準備、施工、後片付け)が短い ・所要時間との兼ね合いで多少コストが高くても止むを得ない ・修理後の検査性や低い検査負荷(時間、労力)が要求される ◆しかし、長期の信頼性を求めると、通常は時間を要する工法となるので、このような技術は少ない	◆既存の技術は基本的にここに位置する ◆信頼性/対策効果、所要時間(準備、施工、後片付け)、コスト、施工後のISI負担のバランスの良い技術が求められる ・できるだけ高い信頼性を期待できる技術 ・できるだけ所要時間の短い技術 ・できるだけ低コストの技術 ◆現在行われている研究開発はここに位置する技術の高度化(高信頼性、短い所要時間、低コスト、施工後の低ISI負担)を狙ったものが多い
	暫定対策	◆兎に角、短期間のうちに対策して運転再開したい場合にここに位置する技術が必要で、ニーズが非常に高い ◆ここに位置する技術は下記が求められる ・当面(2年程度)の耐久性は確実にある、しかし長期の信頼性は要求されない ・所要時間(準備、施工、後片付け)が短い ・所要時間との兼ね合いで多少コストが高くても止むを得ない ・修理後の検査性や低い検査負荷(時間、労力)は要求されない ◆既に火原協「暫定補修 3 工法」が開発されているが、現行ガイドラインの施工方法ではかなりの時間を要するので、改善が必要である	◆時間的制約が比較的小さい場合は、暫定対策を実施することは少ないので、これに該当する技術のニーズは高くない ◆時間の制約が無い場合であっても暫定対策を実施したい事情がある時は、左欄に位置する暫定工法を使用できる

参考文献

- [1] John Moubray, “Reliability-centered Maintenance”, Second Edition, Industrial Press Inc. (2000)
- [2] 牧信男, “原子力発電所設備信頼性管理システムに関する調査”, INSS journal 7, 2000
- [3] 日本電気協会, “原子力発電所の保守管理規程”, JEAC4209-2016
- [4] 日本電気協会, “原子力発電所の保守管理指針”, JEAG4210-2016
- [5] 青木孝行, 西本孝直, “原子力発電所の安全性確保とプラント稼働率向上の両立性に関する米国の考え方(3)”, 保全学, Vol. 10 No. 4 (2012)
- [6] 日本保全学会, “原子力保全ハンドブック”, I 編 原子力基本工学, 7 章 保全工学, 2019
- [7] US Federal Aviation Administration, “FAA System Safety Handbook”, Chapter 3: Principles of System Safety, December 30, 2000
(https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/risk_management/ss_handbook/)
- [8] 青木孝行, “大規模複雑プラントシステムにおける保全活動の有効性評価手法に関する研究”, 保全学, Vol.10, No.1 (2011)
- [9] 米国 圧縮空気系統に関する原子力ユーザーズグループ (CANUG : Compressed Air Nuclear Users Group) (<http://www.aovusersgroup.com/index.html>)
- [10] 青木孝行, “原子力発電所の安全性を向上させるための基本的な考え方に関する研究”, 保全学, Vol.19, No.1 (2020)
- [11] Frank Hawkins, John Johnson, “Performance-Based Inspections”, USNRC NUREG/CR-5151, June 1988

保全標準化推進検討会委員名簿（敬称略、順不同）

◆ 検討会委員

主査	青木 孝行	東北大学
副主査	小山 幸司	三菱重工業株式会社
幹事	堂崎 浩二	日本原子力発電株式会社
	山本 祥司	日本原子力発電株式会社
	行則 茂	東芝エネルギーシステムズ株式会社
	森山 泰之	中部電力株式会社
	徳永 克己	日本保全学会（特別顧問）
	成川 薫	東京エネシス
	日隈 幸治	東芝エネルギーシステムズ株式会社
	松岡 昭彦	海上技術安全研究所
	今野 隆博	日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社
	佐伯 綾一	電力中央研究所
	尾形 圭司	日本原燃株式会社
	和地 永嗣	三菱重工業株式会社
	富田 洋一郎	日本エヌ・ユー・エス株式会社
	伊藤 邦雄	日本エヌ・ユー・エス株式会社
	大城戸 忍	日立 GE ニュークリア・エナジー(株)
	小林 広幸	日本原子力発電株式会社
	西山 穂高	テックプロジェクトサービス株式会社
	高橋 研	テックプロジェクトサービス株式会社
	安東 潤一	九州電力株式会社
	宇治原 里志	日本アイビーエム株式会社
	西野 彰純	北陸発電工事株式会社
	仲井 悟	日本原子力研究開発機構
	高屋 茂	日本原子力研究開発機構
	望月 正人	大阪大学
	山崎 謙吾	電源開発株式会社
	田辺 匡亮	東京電力ホールディングス株式会社
	奈良林 直	北海道大学
	鈴木 直浩	中部電力株式会社
	松澤 寛	三菱重工業株式会社
	根岸 孝行	原電エンジニアリング株式会社
	山口 伸一	株式会社ジェイテック
	工藤 訓	株式会社ジェイテック

◆ 分解点検周期適正化検討 WG

座長	森山 泰之	中部電力株式会社
	行則 茂	東芝エネルギーシステムズ株式会社
	徳永 克己	日本保全学会（特別顧問）
	成川 薫	東京エネシス
	日隈 幸治	東芝エネルギーシステムズ株式会社
	松岡 昭彦	海上技術安全研究所
	今野 隆博	日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社
	和地 永嗣	三菱重工業株式会社
	大城戸 忍	日立 GE ニュークリア・エナジー(株)
	小林 広幸	日本原子力発電株式会社
	青木 孝行	東北大学

◆ 保全テンプレート検討 WG

座長	森山 泰之	中部電力株式会社
	行則 茂	東芝エネルギーシステムズ株式会社
	徳永 克己	日本保全学会（特別顧問）
	成川 薫	東京エネシス
	松岡 昭彦	海上技術安全研究所
	今野 隆博	日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社
	和地 永嗣	三菱重工業株式会社
	大城戸 忍	日立 GE ニュークリア・エナジー(株)
	小林 広幸	日本原子力発電株式会社
	富田 洋一郎	日本エヌ・ユー・エス株式会社
	伊藤 邦雄	日本エヌ・ユー・エス株式会社
	尾形 圭司	日本原燃株式会社
	山口 伸一	株式会社ジェイテック
	工藤 訓	株式会社ジェイテック
	四方山 敏彦	株式会社ジェイテック
	西山 穂高	テックプロジェクトサービス株式会社
	高橋 研	テックプロジェクトサービス株式会社
	青木 孝行	東北大学

◆ 保全作業管理検討 WG

座長	小山 幸司	三菱重工業株式会社
	堂崎 浩二	日本原子力発電株式会社
	行則 茂	東芝エネルギーシステムズ株式会社
	徳永 克己	日本保全学会（特別顧問）
	成川 薫	東京エネシス
	松岡 昭彦	海上技術安全研究所
	佐伯 綾一	電力中央研究所
	青木 孝行	東北大学

◆ 数理保全検討 WG

座長	堂崎 浩二	日本原子力発電株式会社
	高屋 茂	日本原子力研究開発機構

行則	茂	東芝エネルギーシステムズ株式会社
松岡	昭彦	海上技術安全研究所
青木	孝行	東北大学

添付資料

A. 原子力安全と保全の関係	43
B. 保全の歴史的変遷	45
C. 保全重要度について	60
D. 時間基準保全（TBM）について	64
E. 状態基準保全（CBM）について	71
F. 事後保全（BDM）について	76
G. 保全テンプレートについて	78
H. 保全作業管理のガイドライン	89
I. 保全内容の変更をバックアップする数理保全について	113

原子力安全と保全の関係

大規模複雑システムである原子力発電所の安全性は、予め安全性を確保できるように機能/性能を賦与された機械系と、その機械系の機能/性能を発揮させ、補完するために必要な保安活動、平時における保安活動²⁷と有事における保安活動（事故対応）を実施する人間系の両者が協調することによって確保されと考えられます（図 A-1）。両者のいずれか一方でも機能しなければ原子力安全は確保されません。

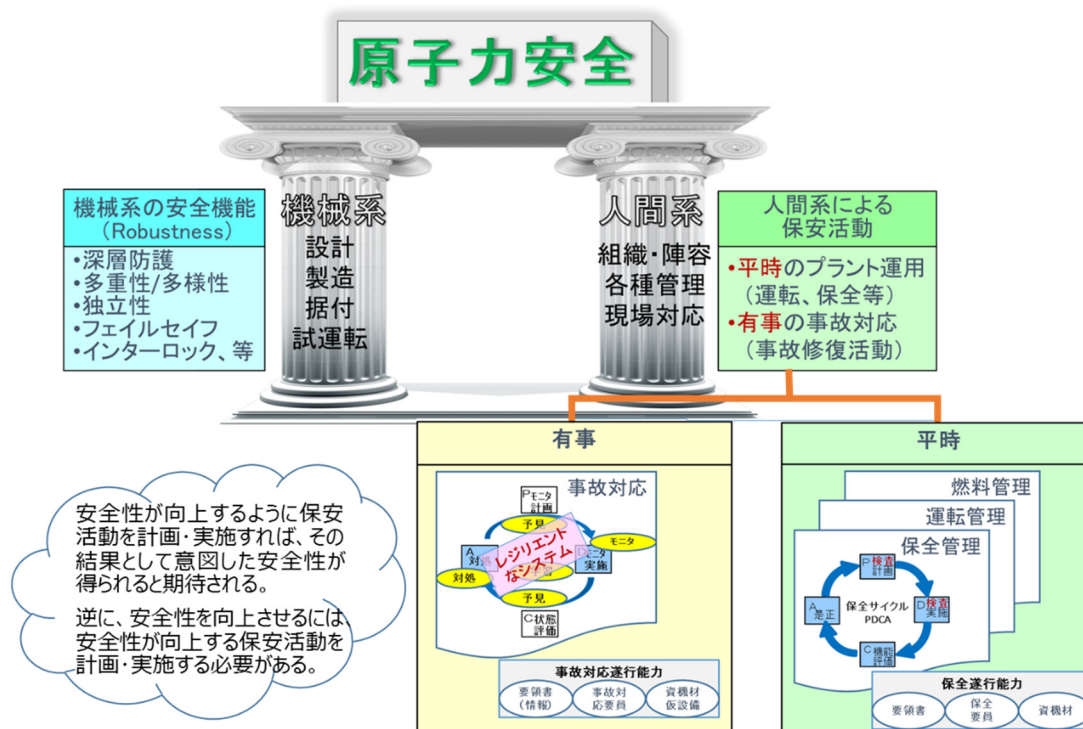


図 A-1 原子力安全と保安活動の関係

原子力発電所を設計する時点において地震・津波等の外部事象と経年劣化による機器の故障や機能低下等の内部事象を想定します。この想定範囲内であれば、本来賦与された原子力発電所の機能/性能が発揮され、安全性は確保されます。保安活動は保安活動の一部であり、それだけでは原子力安全を確保することはできませんが、想定範囲内の事象に対して原子力発電所の機器が機能するように維持する活動ですので、その役割はたいへん重要です。

²⁷ 保全活動ではありません。ここでは運転管理や燃料管理、放射線管理などを含む全ての重要な保安活動を指しています。

以上のように、原子力安全は機械系と人間系の組み合わせで確保されるのに対し、原子力発電所の安全性は機械系の設計（あるいは安全設計）と人間系による保全活動の組合せによって確保されるということが出来ます（図 A-2）。

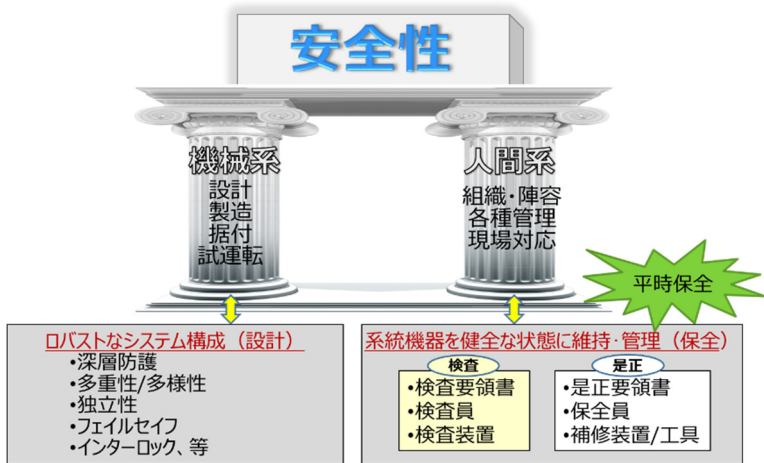


図 A-2 原子力発電所の安全性と保全の関係

保全管理手法の歴史的変遷と現状

1. 米国における産業プラントの保全管理手法に関する歴史的変遷

米国産業界では、1930 年代以降、保全の管理手法が目覚しく変わりました。米国の産業界における保全の進化は、3つの世代を通して辿ることができます^[1]（図 B-1）。以下にその詳細について述べます。

(1) 保全第一世代

第一世代は、第二次世界大戦までの時期をカバーしています。当時、産業界はそれほど高度に機械化されておらず、設備の停止時間（Downtime）や故障防止にそれほど関心がないう時代でした。ほとんどの装置はシンプルで、余裕のある設計がなされていたため、装置は信頼性が高く、修理が簡単でした。結果として簡単な清掃、手入れ、注油などのルーチン以上の組織的な保全を実施する必要がありませんでした。保全の技量に対するニーズも今日よりも低かったと思われます。

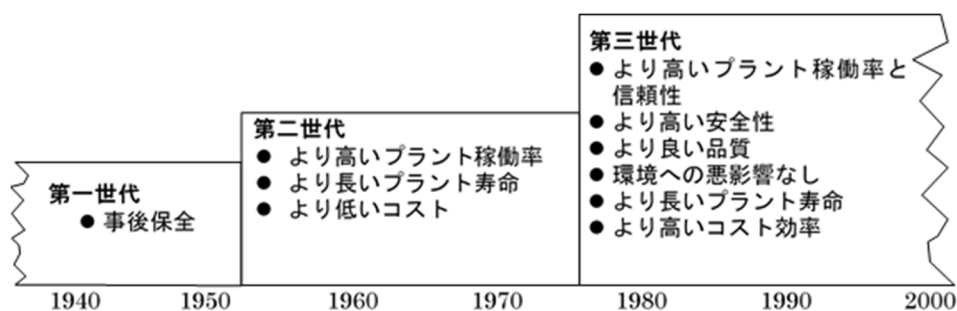


図 B-1 増大する保全への期待^[1]

(2) 保全第二世代

第二次世界大戦中に産業界の総人員が急激に減少する一方で、戦時の圧力は、あらゆる種類の製品に対する需要を増大させ、これが機械化を促進する方向となりました。1950 年代までにあらゆるタイプの機械が増加し、複雑化するとともに、産業界はそれら機械に依存するようになってきました。

この依存が深まると、設備の停止時間に関心が向くようになり、これが設備の故障を防止しようとする考え方、防止すべきとする考え方につながっていきました。その結果、予防保全（Preventive Maintenance）という概念が生まれ、1960 年代には、固定された一定の周期で機器の完全分解点検（Overhaul）が行われるようになりました。

保全コストが他の運用コストと比較して急激に増加するようになり、多数の機器の点検計画や保全コストを含む各種の運用コストを管理するための保全計画管理システムを成長させることにつながりました。このシステムは保全を管理下に置くことに大きく貢献し、現在では確立された保全管理手法の一部となっています。

このような動きの結果、資本コストの急激な増加を含めた固定資産の総資本量を考慮して、設備の寿命を最大限に延ばそうと、その方法を追求し始めるようになりました。

(3) 保全第三世代

1970年代中頃以来、産業界における変化のプロセスに大きな弾み(勢い)がつくようになりました。この変化には保全への新たな期待、新しい研究、新技術の3つあります。

① 保全への新たな期待

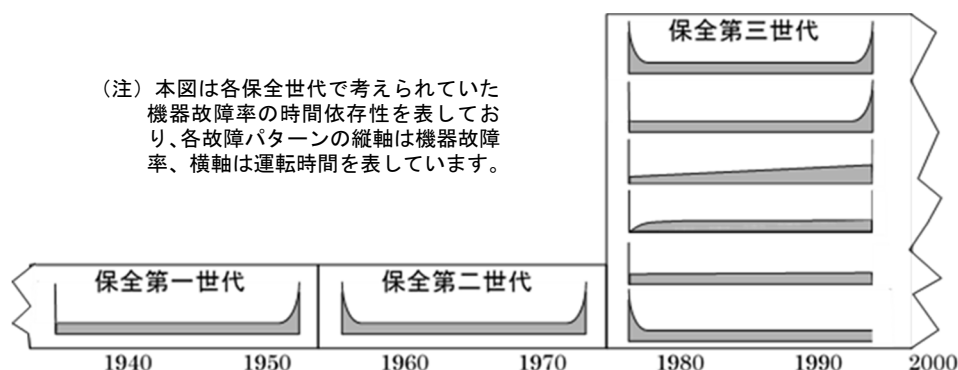
設備の停止時間(Downtime)は、設備の製造能力に影響を与えます。これにより、アウトプットを減少させ、運用コストを増大させるとともに、顧客サービスに影響を与えることになります。このため、停止時間の影響は問題視され、世界中が“just-in-time”システムの方へ動いています。この“just-in-time”システムでは、資材の供給連鎖全体に亘ってストックを少なくしようとするので、たとえ小さな故障であっても設備全体の運用に影響を与える可能性が大きくなるので、「信頼性」及び「稼働率」が多くの分野で重要な問題となっています。

また、産業プラントの故障が安全や環境に影響を与えることに関心が集まるようになりました。このため、安全や環境の分野で規格/基準が急速に策定され、発効されるようになったため、ますます故障の影響は増大することとなりました。現在では、この観点からも設備の故障は保全関係者にとって重大な問題となっています。

このように、設備への依存が大きくなるにつれて、同時にそれを運用し所有するためのコストも増加します。増加する投資に対して最大限の利益を得るには、設備を効率的に稼働させ続けなければなりません。このため、現在では産業プラントの運用コストのうち、保全コストの占める割合が多くなり、影響が非常に大きくなっています。

② 新しい研究

保全第一世代である初期においては、設備を構成する機器は、運転年数が増すに連れて故障しやすくなると考えられていました。保全第二世代になって、バスタブ曲線が認知され、初期故障が注目されるようになりました。しかしながら、保全第三世代における研究では、図B-2に示すように、航空機の調査等を通じて6つの故障パターンがあることがわかりました^[1]。また、保全が計画通り正確に実施されていたとしても、時間とともに劣化



図B-2 機器の故障パターンに対する認識の時代変遷^[1]

が進むことを想定して伝統的に実施していた保全タスクの多くが故障低減に対して必ずしも効果がなく、或るものは逆効果であることもわかりました。

③ 新技術

保全第三世代に入って、新しい保全概念や保全技術に発展があり、いろいろな分野で多くの管理手法や技術の発展があった（図 B-3）。それらを総括すると、次のように言うことが可能です。

- ハザードの検討、故障モード影響分析（FMEA：Failure Modes and Effects Analysis）、エキスパートシステムのような「判断支援ツール」
- 状態モニタリングのような「新しい保全技術」
- 信頼性や保守性に重点を置いた「設備設計」
- 参加意識、チームワーク、適応性への「組織的考え方の変化」

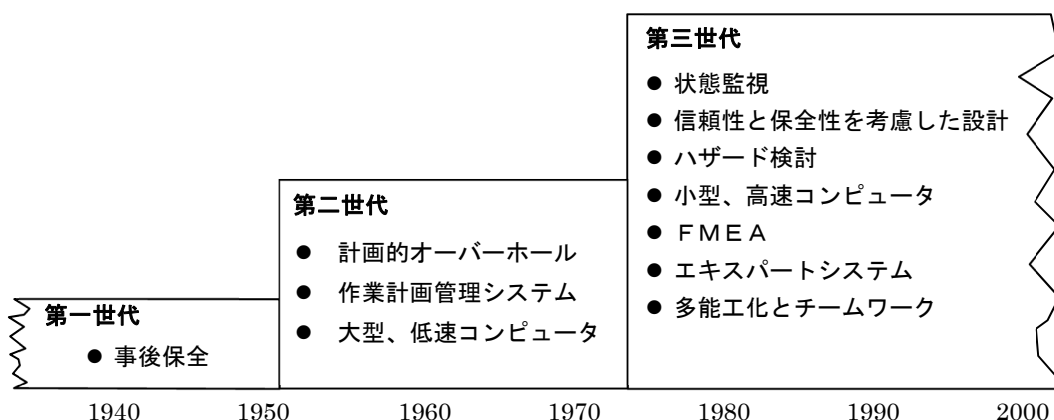


図 B-3 変遷する保全技術^[1]

(4) 信頼性重視保全の概要

保全が直面する問題は種々ありますが、その中で主要な問題は適切な保全方法を選定して実施しているか否か、すなわち保全計画の内容が適切か否か、ということです。保全作業を正しく実施しているか（doing the job right）ということは機器の健全性を維持向上させる上で重要ですが、それ以上に正しい保全作業を選定し実施しているか（doing the right job）ということが問題です。ここでいう“正しい保全”とは、図 B-4 に示す保全計画の主要因子が適切である保全のことです。

この問題への解決策として米国航空業界は信頼性重視保全（RCM：Reliability Centered Maintenance）として知られている総合的な判断プロセスを開発し、これが原子力発電所を含む米国主要産業プラントの保全に浸透しています。RCM は、検討対象の設備あるいはシステムについて次のような 7 つの問いに答える形で進められます。

- ① 現在の使用状況において検討対象の設備に求められる機能は何か？また、その機能に対する定量的なパフォーマンス基準は何か？

(ここで、設備に期待する機能及びその機能の発揮度を判定するための定量的基準を定義する。)

②対象機器の機能故障には、どのような機能故障があるか？

(ここで、故障状態は期待されるパフォーマンスの達成目標(基準)を満足できなくなるときに生じると考え、完全な機能故障、部分的な機能故障など、どのような機能故障があるか明確にする。)

③何が機器の機能故障を発生させているか？(機能故障を発生させる故障モードは何か？)

(ここで、故障の仕方、どう壊れるかを明確にし、故障状態を発生させそうな事象を定義する。)

④その機能故障の影響で何が起こるか？

(ここで、故障が発生したら何が起こるか(安全や環境への脅威となるか、生産あるいは運転に影響を与えるか、等)、その機能故障の影響を明確にする。)

⑤その機能故障の影響はどのように現れるか？

(ここで、機能故障を「隠れた影響」「安全環境上の影響」「設備運用への影響」「設備運用に係らない影響」の4つに分類し、故障の結末を体系的にレビューできるようにする。)

⑥機能故障を予知あるいは予防するために何ができるか？

⑦適切な積極的措置が見つからない場合、何をなすべきか？

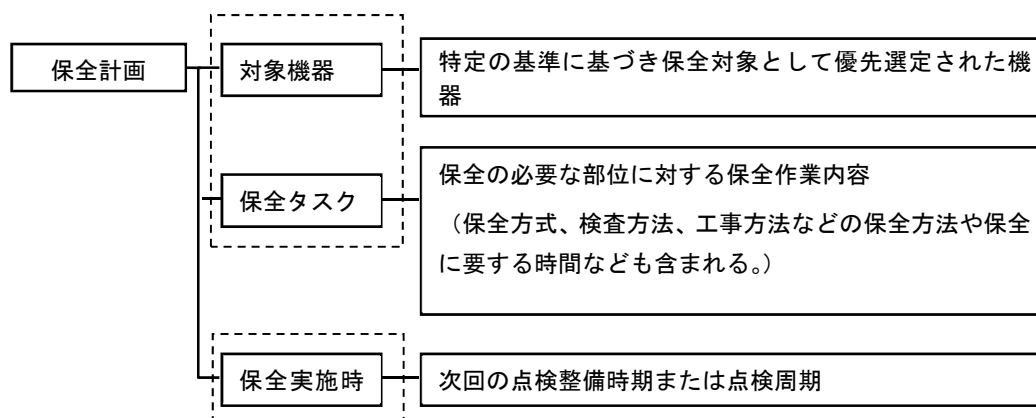


図 B-4 保全計画の主要因子

これら7つの問いからわかるように、RCMは、機能故障やその影響、機能故障を予知・予防する方法(状態監視技術など対象機器に適した方法)などを検討、評価して、保全技術者が保全計画を立案する作業をガイドする管理手法と考えることができます。上記のRCMプロセスにおける①～④は、1940年代に米国陸軍で導入されたのを皮切りに、その後、宇宙航空開発や自動車業界などで導入され、一般化した故障モード影響評価解析

FMEA^[2]です。上記⑤のステップでは、原子力産業界及び他産業において構造部材に発生する応力腐食割れや疲労などの経年劣化モードを決定論的手法で定量的に予測する手法^[3]やポンプなどの動的機器を中心に確率論的手法で故障が発生する可能性が高まる時期を定量的に予測する手法^[4]などが適用されるようになっていきます。また、機器の運転状態をモニタリングし、得られたデータを活用して故障時期をできるだけ正確に予測するとともに、次の保全時期を決定する状態基準保全あるいは予知保全が盛んに適用されるようになっていきます。

(5) 米国原子力発電所の保全

米国では、1980年代にEPRIのパイロットスタディと大規模実証プロジェクトが行われ、その結果を踏まえて原子力発電所の保全にもRCMが導入されるようになりました^[5]。しかし、その検討方法は当初RCMの検討ステップ「④その機能故障の影響で何が起こるか？」において、通常であれば保全技術者が1つずつFMEAを実施するところ、原子力発電所の場合、システム構成が極めて複雑であるためその部分にコンピュータを用いた確率論的リスク評価手法（PRA：Probabilistic Risk Assessment）を適用し、機器故障がプラントの「安全性」、すなわち炉心損傷頻度や格納容器損傷頻度にどのような影響を与えるか、定量的に評価する方法でしたので、多大な労力と時間、したがって莫大な費用がかかるため効率的でないとの批判がなされるようになりました。このため、簡易的なRCMが提案・実施されるようになりました。この簡易的なRCMは、PRAによる解析の代わりにベテランの保全技術者が頭の中で検討するというものですが、両者の間に大差ないということが分かり、その後はこの方法が主流となって現在に至っています。米国では、この保全技術者による検討を予防保全最適化検討（PMO：Preventive Maintenance Optimization）と呼んでいます。

米国原子力規制委員会（NRC：Nuclear Regulatory Commission）は、リスク情報を活用した規制（Risk-informed Regulation）とパフォーマンスを重視した規制検査（Performance-based Inspection）を実施しており、これらは保全分野にも適用されています。客観性の高い科学的あるいは定量的な観点からプラントシステムの保全を考えると、極めて重要な考え方がこのNRCの規制に含まれていますので、その主要なものを以下に列記します。

①個別プラントの許認可ベースの変更をリスク情報に基づき判断する場合の確率論的リスク評価手法PRAの活用

NRCは、リスク情報に基づく許認可ベースを変更する際にその変更の影響をリスク情報を活用して工学的に評価する方法、すなわちPRAを取り入れています^[6]。これは、許認可ベースの変更を行う場合、深層防護を維持し、安全リスクの過大な増加をもたらさないように要件を課すだけでなく、変更後の影響を適切にモニターすること等も要求しています。具体的には、機器の安全リスク上の重要度に応じて定期試験（サーベランステスト）

の頻度や内容を変更する場合の方法を規定したもの^[7]や配管の安全リスク上の重要度に応じて検査の頻度や内容を変更する場合の方法を規定したもの^[8]があります。

②原子炉監視プロセス（ROP：Reactor Oversight Process）

NRC はそれまでに原子力発電所に対して行われていた種々の規制活動を体系的に見直し、統合する形で ROP を導入しました。これは安全上重要な問題に規制のリソースを集中するとともに、比較的重要度の低い問題には規制を軽減するため、リスクの概念を規制に取り入れたものです。

ROP は「検査プログラム」「検査結果の重要度決定プロセス」「パフォーマンス指標プログラム」及びこれらの結果に基づく「規制対応」から成っています（図 B-5）。

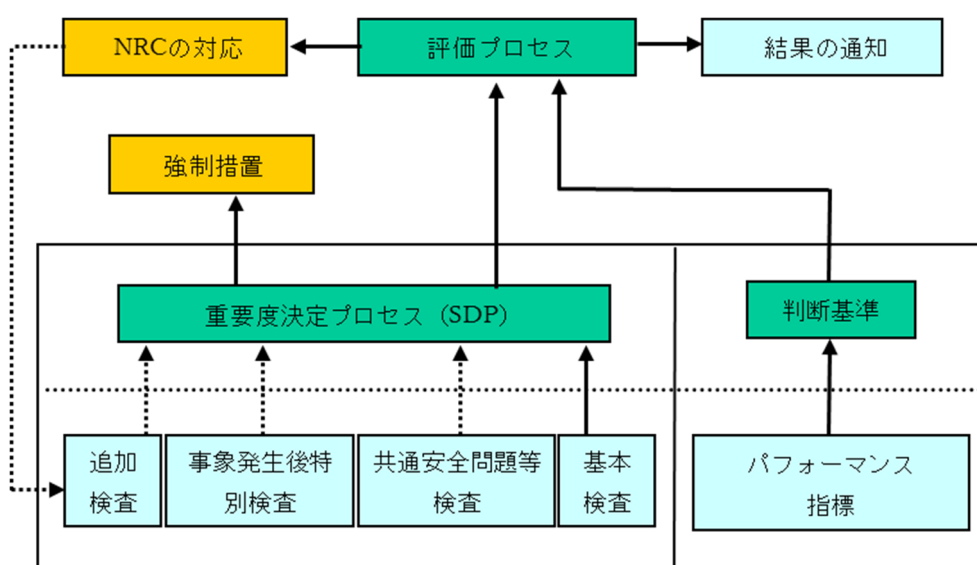


図 B-5 原子炉監視プロセス（ROP）の全体構成^[9]

また、その枠組みは下記の3つの階層から形成されています（図 B-6）。

第1の階層：安全性に係る NRC の役割（公衆の健康と安全の確保）

第2の階層：戦略的重点領域（原子力安全、放射線安全、安全保障）

第3の階層：基礎となる7分野（起因事象、緩和系、バリア健全性及び緊急時計画、公衆及び職業被ばく、核物質防護）

このように、NRC は公衆の健康と安全を防護するという規制目的を達成するため、原子力発電所における活動に対し着目すべき7つの分野について検査プログラムとパフォーマンス指標プログラムを設定し、検査結果の重要度評価及びパフォーマンス評価の結果を総合して規制対応を決定しています。

ここで、7分野のうち保全に係るものは、(i) 起因事象、(ii) 緩和系、(iii) バリア健全性の3つですが、それぞれに下記の PI（パフォーマンス指標）^{[10][11]}とその目標値を設定し、現在実施している保全の有効性をチェックするため検査（基本検査、追加検査、特別検査及び検査官による日常監視^{[9][12]-[20]}）を実施し、そこで確認された事象や問題を重要度決

定プロセス（SDP：Significance Determination Process）^[21]に載せてその重要性を判断し、規制対応を決定するという手法を採用しています。この手法は次項に示す保守規則（米国連邦規制 10CFR50.65）にも取り入れられており、実施している保全の有効性を評価する手法として重要な位置を占めています。

- | | | |
|--|--|--|
| (i) 起因事象 | (ii) 緩和系 | (iii) バリア健全性 |
| <ul style="list-style-type: none"> * 計画外スクラム回数 * 計画外出力変動回数 | <ul style="list-style-type: none"> * 安全系のアンアベイラビリティ * 安全系の故障回数 | <ul style="list-style-type: none"> * 燃料被覆管 * 原子炉冷却材系 |

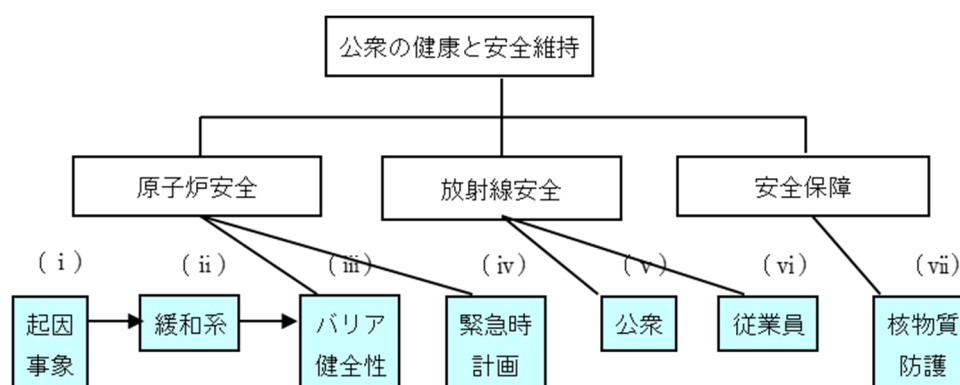


図 B-6 ROP で着目する 7 つの分野（コーナーストーン）^[9]

②保守規則（米国連邦規制 10CFR50.65）

米国の原子力発電所は、上記の ROP の下、米国連邦規制 10CFR50.65「原子力発電所の保守の有効性を監視するための要件」（いわゆる保守規則（Maintenance Rule）^[22]）に従って保全を実施しています。この保守規則の概要を表 B-1 に、またそれに対する産業界側のガイドライン^[23]の概要を図 B-7 に示します。

米国では、原子力発電所の安全性に関する取組みは NRC の安全規制に従ったものとなっていますが、これに加えて、近年、原子力発電所の経済性に関する取組みも積極的に行われるようになっていきます。その一つが原子力発電所の発電支障につながるイベントツリー(Event Tree)、フォールトツリー(Fault Tree)を明確にし、発電支障が生じる確率を計算する PRA 手法 (GRA: Generation Risk Assessment) の開発、検討であり、いくつかの報告書が一部公開されている^{[24][25][26]}。

また、米国以外では、国際原子力機関

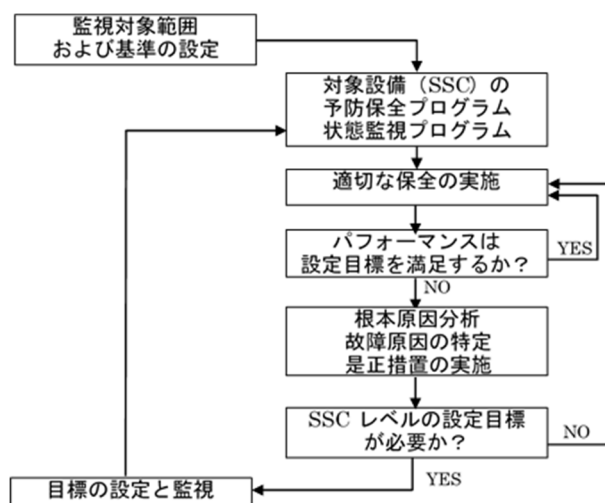


図 B-7 保全活動の有効性監視

(IAEA : International Atomic Energy Agency) が「原子力発電所の保全プログラムを最適化するためのガイドライン」^[27] を発行し、その中で安全リスク重要度、規制要求、信頼性/稼働率、保全目標、総費用の 5 つを上げ、それらに対する目標を設定して保全を最適化する方法を提案しています。これを見ると、従来の安全性に関する事項だけでなく、保全コストの低減、稼働率の向上といった経済性も含めている点が注目されます。

表 B- 1 保守規則 (10CFR50.65) の要求概要

条項番号	規定概要
(a) (1)	対象設備の決定 * (b) 項で定義される構築物、系統および機器 (SSC) の機能が設定目標を満足しているか示すため、SSC のパフォーマンスあるいは状態を監視すること。 * SSC のパフォーマンスあるいは状態が設定目標を満足していない場合は適切な事後措置をとること。
(2)	監視の免除 * SSC のパフォーマンスあるいは状態が適切な予防保全で効果的に管理され、所定の機能を果たすことが実証されている SSC は監視を要求されない。
(3)	保全活動の評価頻度 * 少なくとも燃料交換サイクル毎に SSC のパフォーマンスや状態の監視活動、関連の設定目標および予防保全活動の評価を行うこと。評価周期は 24 ヶ月を超えないこと。
(4)	事前のリスク評価と管理 * 保全活動 (定期試験、保全後の試験、事後保全、予防保全等) を実行する前に、保全作業を実施することにより増加する可能性のあるリスク増分を評価し、管理すること。
(b)	監視対象設備 (SSC)
(1)	* 設計基準事象時に機能を保持する必要がある安全関連 SSC
(2)	* 緊急時運転手順等に係る非安全関連 SSC

2. 我国における産業プラントの保安全管理の現状

(1) 各産業分野における設備保安全管理の動向

① 航空^[2] ^[28]

RCM を高度化した航空機整備プログラムの策定方法 MSG (Maintenance Steering Group)-3 (米国連邦航空局、製造会社、航空会社が協力して制定) を適用して航空機の整備を実施しています。MSG に規定された整備の目的は下記の通りであり、実際の整備はこれに準拠して行われています。

- * 機材の安全性と信頼性を一定水準以上に保証
- * 安全性、信頼性が低下した場合、元に修復
- * 上記目標を最小の総費用で達成

この内容は、航空機というシステムの安全性と経済性に対する原則であり、保全が満たさなければならない、保全に対する重要な考え方を示していると考えられます。

航空機の保全は、定例作業 (信頼性の維持)、修理作業 (信頼性の回復)、改修作業 (信頼性の向上) の 3 つから構成されており、下記が実施されます。

- * 出発前点検

- * 諸系統の作動試験、潤滑
- * 諸系統の機能試験/機体構造外部検査
- * 機体構造内部検査/外装塗装/修理/改修

また、最近の航空機の整備では、構成部品や装備品個々の重要性、信頼度、構造などに
 応じて、表 B-2 に示します「ハードタイム」、「オン・コンディション」、「コンディ
 ション・モニタリング」の 3 つの整備方式のいずれかが、あるいはそれらが組み合わさ
 れて適用されています。最近は「オン・コンディション」と「コンディション・モニタ
 リング」による整備、すなわち状態基準保全 (CBM) による整備が中心になっています。
 検査・モニタリング技術としては、エンジン異常診断等の状態監視技術や非破壊検査等
 が適用されています。

表 B-2 航空機の整備方式

整備方式	説明	適用機器
ハードタイム (HT : Hard Time)	一定の時間を定めて、定期的に分解手入 れや部品等の交換を実施する時間基準の 整備方式。	この方式が有効と分かっている部品や 装備品などに適用される。
オン・コンディション (OC : On-Condition)	定期的に点検、試験を行って状態を確認 し、必要に応じて部品交換、あるいは修 理などの適切な処置をとる整備方式。	状態の良否を判定することが適当な、 機体構造、諸系統及び装備品に適用。
コンディション・モニタリング (CM: Condition Monitoring)	定期的な検査や手入をせずに、発生す る機能異常情報を分析評価し、随時的確 な処置を取る方式。	故障を起こしても安全性に直接問題の ない一般の部品や装備品に適用。

② 鉄鋼^[24]

RCM が適用されている。ライフサイクルコストや環境を考慮した保全計画を立案し、
 保全がなされています。基本的に状態基準保全 (CBM) が採用されており、振動診断等
 の状態監視技術や非破壊検査技術が適用されています。

③ 化学産業^{[24] [29]}

RCM を試行している。長期運転を想定し保全の最適化を考慮したプラントライフマ
 ネージメントを追求しています。基本的に状態基準保全(CBM)が採用されており、振動
 診断等の状態監視技術や非破壊検査技術が適用されています。

設備は、想定された使用条件に対し大きい安全尤度を持って設計されていますが、供
 用開始後の過渡状態や局所的な状態は想定を超えるものがあることが認識されていま
 す。これに対し、設計時の前提とは異なる前提で設備の維持基準が精力的に制定されて
 います。また、米国等で既に長い歴史のあるリスク基準保全 (RBM : Risk-based
 maintenance) の導入を志向しており、ASME (米国機械学会) や API (米国石油協会)
 の規格を参考に、独自の経験やデータベースを用いた手法でリスク評価を行っています。

④ 火力^[24]

RCM を志向しています。機器の分解点検を主体とした時間基準保全を実施していま
 すが、ライフサイクルコストを考慮し、状態基準保全 (CBM) の導入等による保全の高
 度化を図ろうとしています。CBM が採用されている機器には、絶縁劣化診断や潤滑油劣

化診断、軸受劣化診断などが適用されています。

(2) 我国の原子力発電所における保全の歴史と最近の動向

① 我国の原子力発電所における定期検査の変遷と保全計画の実態

我国の原子力発電所の保全は、プラントを停止して実施する定期検査を中心に実施されてきた歴史があります。我国で初めての商業用原子力発電所である東海発電所（GCR）は、1961年から電気事業法に基づく使用前検査が実施されましたが、当時は輸入先の技術仕様や関係規格、国内の火力技術基準、メーカー基準などを参考に個別機器の検査要領書を作成して実施されました。運転開始後の定期検査においては、使用前検査と同様に、火力発電所の定期検査や技術基準などを参考にして設備毎に定期検査に必要な検査項目（機器の分解検査及び検討の機能検査）が設定されました。その後、引き続いて運転を開始した軽水炉の敦賀発電所 1 号機（BWR）と美浜発電所 1 号機（PWR）の定期検査では、各電力会社の社内検査を含む定期検査要領書に基づき、重要検査項目である 10 項目程度の検査が国の規制当局によってなされました。その後はプラント数の増加に伴う検査経験を踏まえて、定期検査が整備拡充されるとともに、検査要領の標準化がなされ、1975 年には規制当局の立会項目が 20 項目程度となりました。その後は原子力発電所の初期トラブルの相次ぐ発生や 1979 年 3 月に発生した米国 TMI 事故の教訓を踏まえ、定期検査が充実強化されました。この時点で国の規制当局による定期検査項目は 80 項目程度となりました。その後も 1981 年の標準定期検査要領書導入、変遷があり、定期検査項目は 90 項目程度となり、1986 年には第三者検査機関の活用や品質保証活動の活用による電気事業者の自主検査範囲拡大により、70 項目程度となりました。1993 年に標準的検査要領書の改訂がありましたが、検査項目は 70 項目程度のままでした^[30]。

これらの規制当局による検査は、電気事業者が自主的に実施していた数多くの点検も含め、定期的に機器を分解し各部の健全性を確認して復旧する、いわゆる分解点検を主体とする保全であり、したがって、機器に異常が発見されなければ、従来の保全を踏襲し、それを繰り返すやり方を実施していました。機器に異常が発見されたり、国内外の他のプラントで故障・トラブルが発生したりすると、その経験を踏まえて機器の改造や分解点検内容の充実、あるいは点検周期の短縮などで対応していました。このように、従来の保全は、運転経験を踏まえた経験的な保全であり、機器の経年劣化状態や運転状態、それらのトレンドなどを分析評価した上でその結果に基づき機器の状態を予測し、その後の保全内容や保全実施時期を決定するというやり方は採用して来ませんでした。また、点検・検査や補修・取替等の保全活動は、ほぼ全てがプラント定検時、すなわちプラントを停止して燃料交換などを実施する時期に合わせて実施しており、プラント運転中に保全を実施することは廃棄物処理系などのプラント本体と独立している設備を除いてほとんど実施されて来なかったことは特筆すべき事実です。

このような流れが一変したのが、2003 年の電気事業法改正で導入された「定期事業者検査制度」です。このときから、原子炉等規制法に基づく保全検査及び電気事業法に基

づく定期検査と定期安全管理審査の 3 つの検査手法が規制当局により実施されるようになり^{[31][32]}、規制当局は電気事業者が行う活動の実施体制や実施プロセス、検査などが適切に行われているかを審査することとなりました。また、2008 年から実施された「新たな検査制度」、すなわち、プラント毎の特性を踏まえた保全プログラムに基づく保全活動に対する検査制度、安全確保上重要な行為に着目したプラントの運転中、停止中を問わずに検査を実施する制度、事故・トラブルの根本原因分析に基づく不適合是正の徹底を事業者に促す制度が導入され、流れが大きく変わりました^[33]。従来の制度では、電気事業者の自主点検は、その位置付け、点検結果の国への報告の要否について法令上に明確に定められておらず、電気事業者の自主的な判断に委ねられていましたが、「定期事業者検査制度」では、電気事業者は原子力発電所の設備を定期的に検査し、予め定めた検査項目について国の技術基準に適合しているかどうかを確認するとともに、その結果を記録・保存するよう義務付けられ、「新たな検査制度」では、安全性・信頼性を重視し、技術的妥当性や根拠を明確にして保全活動を行うことが必要となりました。しかしながら、この試みは、品質保証システム（QMS : Quality Management System）の名の下に保全に文書の完璧性等を追求するあまり、本来の安全性向上につながるリスク情報の活用やそれに基づく安全重要度評価等の等級別アプローチ（Graded Approach）が疎かとなり、失敗に終わりました。

2011 年 3 月 11 日に発生した福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえ、現在は米国 NRC の ROP 制度を参考とした改革が進められています。

② 我国の原子力発電所の保安全管理に関する最近の動向

近代産業の初期に発生したボイラーや圧力容器の損壊事故の経験から、我国においては耐圧機器の点検要求が法令規制の起点となり、設備を停止して行う耐圧部材の定期的な分解点検が重視されてきた経緯があります。タービンなどの動的機器についても、当時の経験から定期的な分解点検の慣習が続いてきました。その後、多くの運転経験や研究等から得られた教訓や新知見を踏まえて保全活動の内容が改善され、体系的に整備されてきています（図 B-8）。特に、定期安全レビュー（PSR : Periodic Safety Review）と高経年化対策検討（PLM : Plant Life Management）は、体系化された保全活動の中の改善活動に位置付けられ、重要な位置を占めるようになりました。

その後、さらに検査のあり方を再検討する動きが活発になり、この中で保安全管理の考え方が大きく変わりつつあります。その主要なポイントは、下記の通りです。

- a) プラントの長期安全運転のためには、適切な点検、補修、取替等の保安全管理を、別途、実施されている高経年化対策と連動して充実したものにする必要がある。
- b) 適切な保全を実施するためには、科学的知見を踏まえて機器の劣化状態を把握し、その進展や寿命を予測して、適切な時期に点検、補修等を行う状態基準保全(CBM)を始めとした新しい監視・評価技術の導入が有効である。

- c) プラント毎の特性を踏まえた保全活動を充実したものにするには、プラントの運転中と停止中を通じて、より適切な時期に保全活動を実施することが必要である。

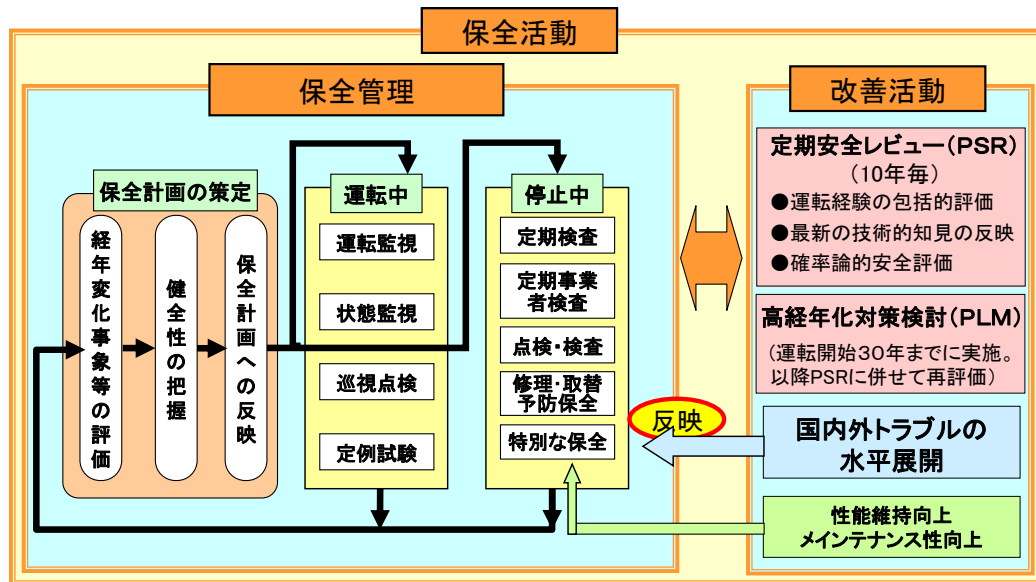


図 B-8 保安全管理とその改善活動

このような中、(社)日本電気協会の「原子力発電所の保守管理規程 (JEAC 4209-2007) [34]」と「原子力発電所の保守管理指針 (JEAG 4210-2007) [35]」が策定されました。我国の原子力発電所はこれらの規格に基づき保安全管理がなされています。図 B-9 に保守管理規程 JEAC4209 が規定する保全活動の流れを示します。

保守管理規程 JEAC4209 は、原子力発電所における保全活動の主要部分を規定するものであり、その詳細を規定するものではありません。したがって、本規程の中には保全計画の策定方法などの具体的事項は規定されていませんが、我国の原子力発電所が図中の「保全計画の策定」において具体的な保全計画を策定するに当たっては、他産業あるいは米国の原子力発電所と同様、RCMを導入する動きが活発になっています。また、前述の米国 NRC の ROP や保守規則と同様に、PI (パフォーマンス指標) を設定し、それらを監視することで保全活動の有効性を評価し、その結果を保全活動に反映し、保全を継続的に改善する活動が組み込まれていますが、確率論的評価手法に基づくリスク評価などの定量的評価手法を保全全般に亘って適用しようとする動きは活発とは言えません。

前述のように、福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえ、原子力規制当局は米国 NRC の ROP 制度を参考に我国における原子力発電所の検査制度を見直すため、2018 年 10 月から試運用が実施され、その結果を踏まえて 2020 年 4 月に新たな検査制度が施行されました。

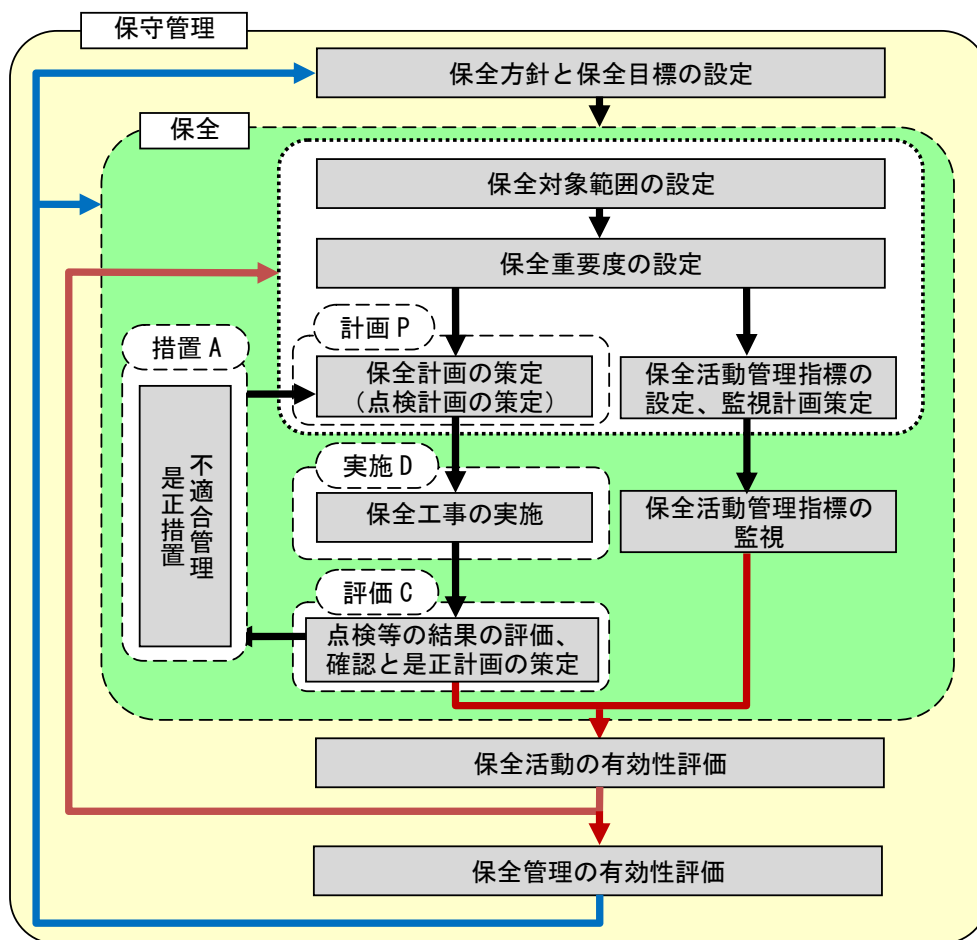


図 B-9 保全活動の流れと保全サイクル PDCA

3. まとめ

産業プラントの保安全管理手法に関する歴史的変遷や各種の産業分野における保安全管理の現状、国内外における原子力発電分野における保安全管理の現状、さらには大規模複雑プラントシステムである原子力発電所の保全活動の各段階における問題点と課題を、保全体系化と保全最適化の観点から概観しました。この結果からわかりますように、我国の原子力発電所の保安全は、米国の原子力発電所や他産業と比較して決して進んでいるとは言えない状況にあります。今後、英知を結集して早期に改善していく必要があります。

参考文献

- [1] John Moubray, “Reliability-centered Maintenance”, Second Edition, Industrial Press Inc. (2000), pp.1-20
- [2] 福井泰好, “信頼性工学”, 森北出版株式会社(1996), pp.110-112
- [3] (社)日本機械学会, “JSME S NA1-2008 発電用原子力設備規格 維持規格”(2008 年版)
- [4] 市川昌弘, “信頼性工学”, 裳華房, 第 8 版(2006), pp.1-56
- [5] 辻蔵米蔵, 中村隆夫, 松枝啓之, 正森滋郎, “原子力発電所と各種産業における保全の実

- 状”，日本 AEM 学会誌，Vol.8，No.2（2000），pp.159-172
- [6] NRC, “An approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decisions on Plant-Specific Changes to the Licensing Basis”, Regulatory Guide 1.174, Revision 1 (2002-11)
 - [7] NRC, “An Approach for Plant-Specific Risk-Informed Decisionmaking: Inservice Testing”, Regulatory Guide 1.175 (1998-08)
 - [8] NRC, “An Approach for Plant-Specific Risk-Informed Decisionmaking for Inservice Inspection of Piping”, Regulatory Guide 1.178 Revision 1 (2003-09)
 - [9] NRC, “Operating Reactor Assessment Program” , Inspection Manual Chapter 0305 (2004-01)
 - [10] NRC, “Performance Indicator Program”, Inspection Manual Chapter 0608 (2002-04)
 - [11] NEI, “Regulatory Assessment Performance Indicator Guidelines” , NEI 99-02 (2001-11)
 - [12] NRC, “Light Water Reactor Inspection Program — Operation Phase”, Inspection Manual Chapter 2515 (2003-01)
 - [13] NRC, “Risk-informed Baseline Inspection Program” , Inspection Manual Chapter 2515, Appendix A (2002-01)
 - [14] NRC, “Supplemental Inspection Program” , Inspection Manual Chapter 2515, Appendix B (2002-01)
 - [15] NRC, “Special Infrequently Performed Inspection Program”, Inspection Manual Chapter 2515, Appendix C (2003-02)
 - [16] NRC, “Special Inspection”, Inspection Procedure 93812 (2003-07)
 - [17] NRC, “Augmented Inspection Team”, Inspection Procedure 93800 (2000-10)
 - [18] NRC, “NRC Incident Investigation Program”, Management Directive 8.3 (2001-03)
 - [19] NRC, “Incident Inspection Manual”, NUREG-1303 Rev.2, (1992-09)
 - [20] NRC, “Plant Status” , Inspection Manual Chapter 2515 Appendix D (2003-07)
 - [21] NRC, “Significance Determination Process” , Inspection Manual Chapter 0609 (2003-03)
 - [22] “10CFR Part 50: Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants; Final Rule”, 64FR38551 (1999-07)
 - [23] NEI, “Industry Guideline for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plant”, NUMARC 93-01 Rev3 (2000-07)
 - [24] EPRI, “Generation Risk Assessment (GRA) Plant Implementation Guide” (2004-12)
 - [25] EPRI, “Introduction to Simplified Generation Risk Assessment Modeling” (2004-01)
 - [26] EPRI, “Generation Risk Assessment (GRA) at Cooper Nuclear Station” (2005-12)

- [27] IAEA, “Guidance for optimizing nuclear power plant maintenance programmes”, IAEA-TECDOC-1383 (2003-12)
- [28] (独) 原子力安全基盤機構, 第13回検査の在り方に関する検討会“米国等の保守管理活動に関する状況” (2005-12)
(<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g51228b04j.pdf>)
- [29] 石丸裕, “化学プラントにおけるリスク認識と取り組み”, NPO法人日本保全学会 第8回保全セミナー, (2009-10), pp.35-56
- [30] (社)日本機械学会, “RC158軽水炉原子力発電所保全研究分科会 研究報告書” (2000-3), pp.C-2-13-C-2-17
- [31] 原子力安全・保安院, “検査制度見直しの方向性(案)－検査の在り方に関する検討会中間とりまとめ－” (2002-06)
- [32] 根井寿規, “新しい検査制度に向けた国の取組み”, 日本保全学会 第2回保全セミナー 資料 (2006-11), pp.1-16
- [33] 根井寿規, “新検査制度の概要について”, NPO法人日本保全学会 第3回保全セミナー 資料 (2007-11), pp.1-15
- [34] (社)日本電気協会, “原子力発電所の保守管理規程 (JEAC4209-2007)” (2007)
- [35] (社)日本電気協会, “原子力発電所の保守管理指針 (JEAG4210-2007)” (2007)

保全重要度について

我国の原子力界では、重要性とか重要度というと、原子力安全上の重要性であったり原子力安全上の重要度であったりすることに特化しています。原子力安全に関することしか考えていないのです。もちろん原子力安全は最重要事項です。しかし、保全の立場から重要性や重要度を考える場合、それだけで良いのでしょうか？

保全の目的は、本文で再三、述べましたように、プラントの安全性と経済性の確保・向上です。安全性、経済性のいずれも欠かすことのできない目的であり、達成しなければならない目的です。なぜならその両者が確保されないと、原子力発電所はこの社会に存続できないからです。また、経済性をおろそかにすると、原子力安全上の課題や新たに発生する問題に対する安全対策を実施するための原資を十分に確保・供給できなくなり、結果として安全性を低下させることになり兼ねないからです。

以上より、保全の観点からの機器の重要度と保全活動の重要度は安全性だけでなく経済性も考慮した重要度でなければなりません。この両方の重要度を加味した重要度が「保全重要度」と呼ぶにふさわしいものです。安全重要度をそのまま保全重要度と読み替えるような従来の考え方は捨て去るべきです。

安全上の重要度、すなわち安全重要度は我国の原子力界でこれまで十分に議論してきたように決定論的安全重要度（安全クラス分類）と確率論的安全重要度（PRAに基づくFV値及びRAW）を勘案して決定すれば良いと考えられます。もう一方の経済上の重要度、すなわち経済重要度はどのように考えたらよいのでしょうか？

経済重要度を考えるとき、保全対象機器に対して経済的に大きな影響を与える要因としては下記が考えられます。

- ・ 対象機器が故障したとき、その復旧に要する費用
（機器・部品購入費、工事費等）
- ・ 対象機器が故障したとき、その復旧に要する時間
（原因調査の立案と実施、対策及び水平展開の立案と実施、機器・部品の新規調達等のために必要となるプラント停止の期間に対応する発電損失）
- ・ 規制当局への説明とライセンシング、ステークホルダーへの説明に要する時間
（故障原因と対策についての規制当局/自治体等への説明、対策工事の許認可手続（必要な場合）等によって延長されるプラント停止の期間

このような経済的なインパクトは、原子力安全に関わる機器だけでなく、生産（運転継続）に関わる機器についても考える必要があります。全ての機器に対して安全重要度と経済重要度を考慮して保全重要度を決定する必要があるということです。例えば、安全重要度が低い機器であっても経済重要度が高ければ、その機器はリソースを重点投入すべき対象となります。この考え方のイメージを図 C-1 に示す。

安全重要度だけでなく、経済重要度についても確率論的リスク評価手法（PRA）を用いれば個々の機器の重要度を定量的に評価できます。このような試みがすでに米国の原子力発電所等で行われています[C-1][C-2][C-3]。ただし、PRAによる経済重要度の解析評価は、生産支障（運転継続支障）に至るシナリオの数が安全支障（炉心損傷）に至るシナリオのそれよりも格段に多く、多大の労力と費用を要するので、あまり広く普及してはいません。そこで、簡易的な経済重要度の評価方法が提案されています[C-4][C-5][C-6]。

高↑ 安全重要度 ↓低	保全重要度 高	保全重要度 高	保全重要度 高
	保全重要度 中	保全重要度 中	保全重要度 高
	保全重要度 低	保全重要度 中	保全重要度 高
	低←	経済重要度	→高

図 C-1 保全重要度の定義（例）

このようにして予防保全対象の機器の保全重要度が決まったらその機器に対する保全活動 PDCA はその重要度に応じて保全のリソースを配分することになります。重要度の等級別扱い（グレーディッドアプローチ）を徹底し、メリハリのついた対応が求められます。例えば、安全重要度にしる、経済重要度にしる、重要度評価の結果は機器によって 1,000 倍、10,000 倍、あるいはそれ以上違うこともあります。重要度の低い機器にリソースを重点投入していたらたいへん効率の悪い保全活動になってしまいます。このことは保全活動を計画・実施する上で極めて重要であり、常に思い起こす必要があります。

図 C-2 を見てください。この図の上下2つの平面は原子力発電所を構成する多くの系統・機器を1つの平面で表わし、これを空間軸に、そして各種の系統・機器に対する保安活動（運転、保全を含むすべての保安活動）が実行される流れを上下方向に取り、これを時間軸にして表したものです。上下2つの平面を構成している小区画はその1つひとつが系統を意味し、各区画の中の平面はその系統を構成している多数の機器を意味しています。

この図において上の平面は、保安活動の計画段階におけるプラントの系統・機器を表しています。計画段階では原子力発電所全体を俯瞰し、どの系統・機器や操作等が安全上重要か、どの系統・機器や操作等が経済上重要かを評価し認識した上で系統・機器の重要度に応じてリソースを傾斜配分した保全計画を立案することが極めて

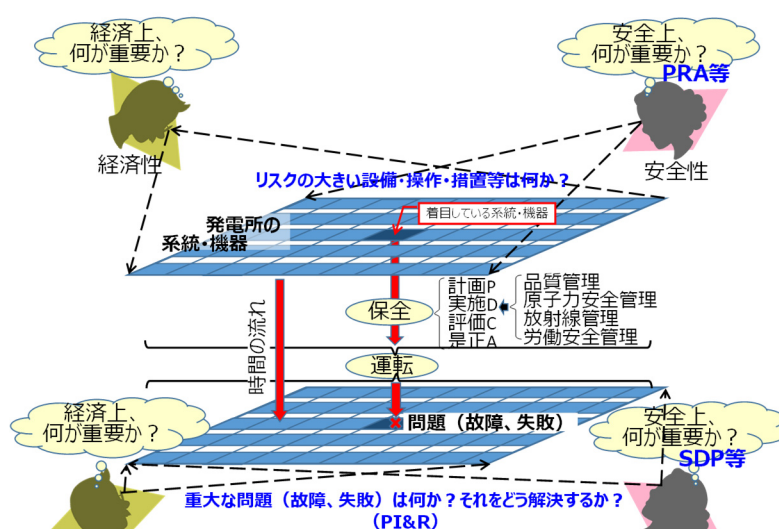


図 C-2 大規模なプラントを俯瞰的に見ることの重要性

て重要ですが、それを保全重要度が教えてくれるのです。通常、原子力発電所の保安活動は膨大なリソースを必要としており、重要度の高い系統・機器や操作等を知りそれらにリソースを重点投入する等の効率的・効果的な方法を適用しないと、有限なリソースの下では安全性が損なわれる可能性があります。一方で重要度の低いものに対してはどこまでリソースを節約できるかを見極め、節約できたリソースを重要度の高いものへ振り向けることが重要です。また、経済性の観点から計画外停止を低減し稼働率を向上させるため、同様の考え方でリソースを投入し、無駄を極力排除してリソースを確保することも重要です。

一方、同図において時間が上から下へ経過します。時間軸に沿って保全活動が進み、その途中で検討内容にミスや問題が生じたり、現場操作や運転中機器に失敗や故障等の問題が発生したりする場合がありますが、このような保全活動の結果として何らかの問題が発見された時点における系統・機器を下の平面で表しています。各種の系統・機器で生じる事象は一時期に集中して発生するものではなく、いろいろな時点で生じ得ますが、ここでは象徴的に問題が発見された時点における系統・機器として下の平面で表現しました。ある時点で問題が生じるということは、問題が発生するまでの保全活動に何らかの問題があったため発生したのですが、これらについてもリソースを無駄使いしないように効率的・効果的に対応することが重要です。そのためには、発生した個々の問題に対してその重要度を評価しその重要度に応じてリソースを傾斜配分し事後対応や将来計画への反映に当たることが重要です。ここでも保全重要度の考え方が重要になります。

このように、保全活動の計画段階で重要系統・機器を絞り込み、重要度に見合ったリソースを投入する保全活動計画を立案すること、また実施段階で保全活動の結果生じた問題や生じる可能性のある問題に対してもその重要度に応じて無駄のないリソースで対応することは、効率的・効果的に安全性を向上させる上で極めて重要です。

なお、保全重要度に関わらず保全活動 PDCA のどの段階における如何なる活動においても無駄のない計画、無駄のない作業を実施とすることは、安全性及び経済性を向上させる上でたいへん重要です。

参考文献

- [C-1] EPRI, "Integration of Degradation Predictions into Generation Risk Assessments - Methodology and Pilot Application at Darlington Nuclear Station-", No. 1021084, Final Report, May 2010
- [C-2] EPRI, "Case Study: A Comparison of Generation Risk Assessment and Failure Modes and Effects Analysis Methodologies at TEPCO's Nuclear Power Plants", No. 1016461, Technical Update, June 2008
- [C-3] Jyrkama, et.al., "Integration of Degradation Models into Generation Risk Assessment: Challenges and Modeling Approaches", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME, Oct. 2010

- [C-4] 日本保全学会, “原子力保全ハンドブック”、I 編 原子力基本工学, 7 章 保全工学【付録 1】 , 2019
- [C-5] 青木孝行, “大規模複雑プラントシステムの保全重要度の定量評価手法に関する研究”, 保全学, Vol. 9, No. 3, (2010), 25-30
- [C-6] 青木孝行, 児玉典子, 高木敏行, “原子力発電所を構成する機器の簡易的な経済保全重要度評価方法に関する研究”, 保全学, Vol. 13, No. 1, (2014), 97-105

時間基準保全（TBM）について

1. はじめに

プラントを構成する個々の機器には、それぞれ特有の経年劣化が特定の部位に発生・進展します。ポンプの例を表 D-1 に示します。この表からわかるように、各部位に発生する経年劣化はそれが発生・進展すると特有の症状が現れます。そして、その症状は特定の技術で検知することができます。ここに示されている経年劣化のうち、あるものは当該機器を分解しなくても検知あるいは進展の程度を計測でき、あるものは当該機器を分解しないと検知あるいは計測できないものがあります。

表 D-1 機器の各部位に発生する経年劣化、その顕在化する症状
及びその症状を検知できる技術の関係（ポンプの例）

ポンプの各種機能		部品	異常/劣化の種類	顕在化する症状 (異常兆候)	異常兆候を検知できる既存技術
QH性能	エネルギー伝達	主軸	アンバランス 芯ずれ き裂/破断	振動の異常	振動診断技術
		軸継手	アンバランス 芯ずれ	振動の異常	振動診断技術
	エネルギー変換	羽根車(インペラ)	アンバランス、ケーシング接触 機械的ゆりみ 腐食/浸食	振動の異常 QH低下	振動診断技術 機能試験
		ケーシングリング	浸食による減肉	QH低下	機能試験
	軸支持	軸受	内輪/外輪/回転体の疲 潤滑不良	振動の異常 油の劣化/異物	振動診断技術 油分析
		軸受箱	ボルト締付ゆりみ	振動の異常	振動診断技術
圧力障壁	耐圧	ケーシング	内面の腐食/浸食	減肉/損傷	分解点検時の目視 検査
		ケーシングボルト	腐食	漏えい(フランジ部) 減肉/破損	分解点検時の目視 検査又はUT 検査
	シール	ガスケット・パッキン	へたり	漏えい(フランジ部)	なし(定期取替)
		メカニカルシール グラッドシール	劣化、へたり	漏えい率増加	漏えい率計測技術 又は目視検査
機器支持	支持	支持脚/台板	腐食	減肉 振動の異常	目視検査
		基礎ボルト	腐食	減肉 振動の異常	目視検査

例えば、ポンプ・ケーシングの内面に生じる腐食減肉は、当該機器を分解点検し、内面を直接観察し計測しないと、その程度を十分には把握できません。このような機器の経年劣化は、一定の時期にポンプを分解点検し、その結果を踏まえてその後の進展を予測し、適切な次回分解点検時期を決定することになります。このような活動を繰り返し実施する保全方式をここでは時間基準保全（TBM）と呼ぶこととします。

以下に TBM の特徴や分解点検時期の変更方法等について述べます。

2. 時間基準保全（TBM）とは？

機器の内部構造物や内部部品に劣化が予測され、その劣化の状況を確認するために機器を分解しないと確認できない場合、分解点検という方法が取られます。機器を分解した際に

消耗品を取り替えたり必要に応じて劣化部位を修理したりすることがあります。場合によっては機器全体を取り替えることがあります。この保全方法（分解点検）はたいへん重要な予防保全方法の1つであり、**TBM**と呼ばれています。

分解点検は機器細部まで手入れを行き届かせることができる一方、分解による内部構造物の「アタリ」の変化、異物混入、ヒューマンエラー発生率の上昇、放射性廃棄物の増加、分解によって損耗する部品の発生等の問題の他、一般に最も労力と時間を要する保全方式である等のデメリットも多くあることを認識して保全計画を策定することが重要です。

我国における従前の原子力発電所における保全は、この分解点検をベースとした時間基準保全の方式を主に採用してきましたが、その点検周期の設定が過度に保守的な場合も多く、劣化がそれほど進んでいない状態においても分解点検を実施して各部を損耗させるなど、分解点検による「いじり壊し」によって故障や問題を発生させていた面もあり、効率的でない保全方法でした。

分解点検の目的は二つの側面があります。一つは機器の機能/性能の回復（維持）です。もう一つは想定される劣化の進行状態を把握することです。

分解点検の周期は、劣化の傾向に応じて設定をする必要があります、この傾向は一般的な知見（設計想定、業界データ等）を用いておおよその劣化は推定可能です。しかし、実際の機器環境、機器の「クセ」などの違いによって個々の機器の劣化の進行状況が左右される場合があります。このため、分解点検のために機器を開放した直後の無垢な劣化状態（**As-found** 状態）のチェックを行うことで、当該機器の状況を把握し、それをベースに最適な分解点検周期を定める必要があります。また、この手入れ前検査データ（**As-found** データ）の蓄積が一般的な知見としての点検周期の精度を向上させることになります。

3. 分解点検周期の適正化

(1) 分解点検周期の適正化の方法

分解点検周期の適正化のためには、周期を変更する技術的根拠が不可欠ですが、その根拠を明確にする方法として以下に示す方法が考えられます。

① 最新知見に基づく分解点検周期の適正化

最新知見とは、一般的な科学的知見、これまで国内外で発生した故障や不適合、さらにはこれまでの分解点検実績等のことです。これらの最新知見に基づき、劣化が想定される機器の部位/部品を特定し劣化進行速度を予測して分解点検周期を決める方法です。現時点で国内原子力発電所にて一般的に行われている故障時期の予測方法です。日本原子力学会が発行している機種毎の「経年劣化メカニズムまとめ表^{①②}」や高経年化技術評価を取り入れて機種毎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」を参考にするとよいでしょう。

② 状態監視による故障時期の予測

機器の運転状態あるいは劣化状態を検知できる装置（例えば、振動診断ツール等）や人間の知覚により把握しそのトレンドを評価することによってその後の劣化進展を予測するとともに故障発生時期を推定する方法です。具体的には回転機器に対する軸振動、潤滑油分析等を利用した分解点検時期の予測・決定がこれに当たります。

(2) 分解点検周期の変更に必要なインプット情報

最適な周期を設定するための評価に際して以下のインプット情報が必要です。

① 手入れ前検査データ（As-found データ）

手入れ前検査データは人為的な手が加えられる前の状態のデータのことです。それゆえに対象機器の実際の劣化傾向を把握できることから、信頼性の高いインプット情報です。劣化は運転時における負荷条件、運転時間、起動停止頻度、周辺環境等の影響を受けますが、同じ環境下と思われる2つの機器であっても劣化の程度が異なる場合があります。これは認識していない負荷条件や環境条件の相違（空気中の塩分濃度差等）、製作誤差などの認識できるレベル以下の違い（加工誤差による応力集中の違い等）があること等により、このような差が発生し得るものと考えられます。

一般的な劣化傾向データと手入れ前検査データにより、機器それぞれの「個性」に対応した確度が高い劣化予測をすることができます。このため、分解点検時の手入れ前検査データの採取は保全活動の中で最も重要な活動の1つであることを意識すべきです。

手入れ前検査データの採取箇所の選定やデータ採取方法、記録の取り方等が重要となります。採取されたデータは対象部品の「劣化なし」「想定される劣化」「想定以上の劣化」「機能喪失」の分類などで整理します。「劣化なし」「想定される劣化」については分解点検周期の延長が考慮できる劣化の程度です。劣化の程度が想定通りであれば、機能喪失までの期間想定が確からしいことを意味します。

② 外部情報に基づく分解点検周期の適正化

自社プラントの情報以外の外部情報として下記を活用して分解点検周期の適正化を行うことが考えられます。

- ・国内外の原子力発電所における故障・トラブル情報
- ・原子力産業界/規制等でまとめられている不適合データ
- ・他産業における類似機器の運転保守経験
- ・研究論文、学会などで発表された新たな研究データ

③ 十分なインプット情報がない初期における分解点検周期の設定

新型式設備採用、新規材料採用などにより、これまでの知見が十分でない場合もあります。このような場合の周期設定は設計に基づいた周期設定を基本としながら、機器の劣化進行を確認していく（状態監視、手入れ前検査データ収集）手法をとることが賢明です。また、機器メーカーから設計上の推奨点検周期が示されることが多いため、これを元に自プラントの特性（設計条件としている使用頻度、環境との違い）を加味して適正化を図るこ

とも考えられます。

4. 分解点検周期の具体的変更方法

分解点検周期を変更するには、担当者が前項で述べたインプット情報をしっかり整理・分析したうえで周期を変更できるとする技術的根拠を明確にする必要があります。しかし、それだけでは変更できません。周期の変更は新しい領域へ足を踏み出す場合が多いので、このようなときは技術的根拠を踏まえて変更を保全部門の責任者が決断する必要があります。ここで重要なことは、責任者が「自信をもって」決断できるか否かということです。このインプット情報をきちんと整理・分析し技術的根拠を明確にしたとしても、これらの情報そのものに担当者が自信を持っているか否かということです。担当者が自信を持っていないような内容では責任者が自信を持てるはずがありません。担当者が自信を持つには、担当する機器に精通しており、機器の状態を現場で直接確認していること（As-found 状態を直接見ていること）、そのトレンドを整理し分析・評価していることが必要であり、さらに社内外から信頼できる情報を収集し分析していることなども必要です。担当者の自信は責任者の決断につながることであります。他人任せでは重大な問題に対して決断はできないということです。

ここに保全活動を実施する事業者にとっての重要かつ大きな問題があります。それは分解点検等の工事を「外注」するか、「直営」で実施するかという問題です²⁸。自信をもって保全の改善を決断するには、ある程度、直営経験が必要です。

また、周期の延長という新しい領域に足を踏み出す場合、下記のような慎重な取り組みを行うことによって担当者及び責任者が決断しやすくするという必要もあります。

- (1) 類似した機器が複数ある場合、プラントの安全性や経済性へ与える影響の小さい機器（重要度の低い機器）から始める。
- (2) 周期を延長する機器の台数は少数から始め、徐々に拡大する。
- (3) 延長期間は一気に大幅に延長せず、少しずつ確認しながら延長する。
- (4) 周期を延長した初期は運転中のモニタリングやパトロールを強化する。
- (5) 異常発生時の対処方法を予め検討しておく。

機器の分解点検周期を変更するような場面では、対象機器の機種や設計、運転保守履歴等によってその状況が異なることが想定されます。そのような状況を考えると、どのような条件が揃ったら周期の変更を考えるべきか、あるいは変更できるかを一律に決めることは困難です。しかしながら、分解点検周期を変更するにあたって参考となる考え方を図 D-1 に

²⁸ 通常、経済合理性を追求すると「外注」を選択するケースが多くなる。しかし、一方で自信をもって保全を改善していくには、直営による工事の経験を通じて機器の状態を精確に把握しそれを評価できる能力や技術を内在化することが望まれる。世界に冠たるトヨタ自動車は「自分で製作できないものは外注しない。」との方針で実施してきたとのことである。全ての機器に対して直営で分解点検工事を実施する必要はないであろうが、対象機器の種類・数、必要な人材の数などを勘案して適切な直営がなされることが望まれる。

まとめました。これは米国 EPRI の文献^[D-1]を参考に検討・作成したものです。この考え方は下記の 3 つの状況を想定して策定されています。

- ① 許容できる機器状態
- ② 許容できるぎりぎりの機器状態
- ③ 許容できない機器状態

5. その他

前項までは分解点検を今後も継続することを前提として述べてきましたが、今後とも分解点検という保全方法を継続していくべきか、本当に分解点検という手段が適切であるかという疑問を常に持ちながら今後の保全最適化を考える必要があります。そのような意味で下記について検討することは重要です。

(1) 適切な保全方法の追求

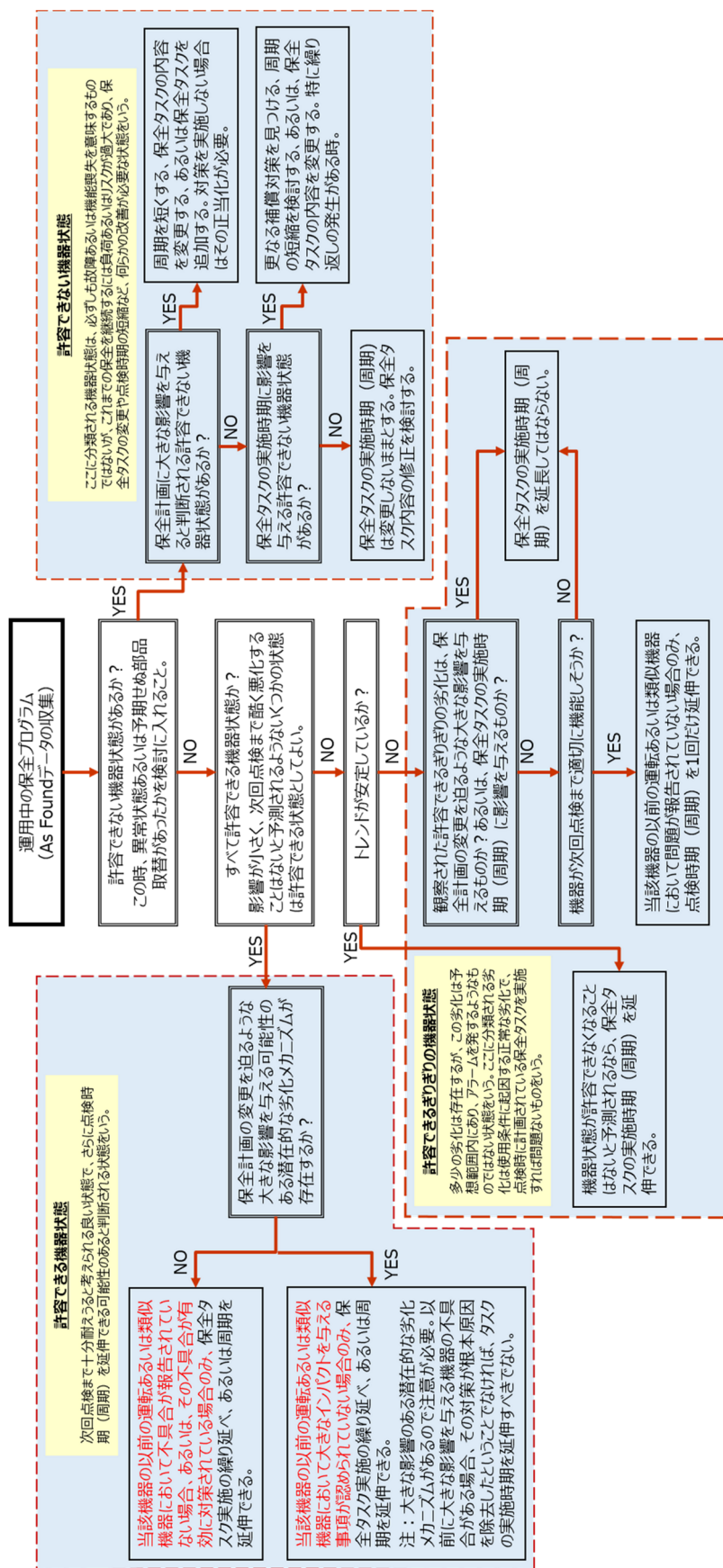
保全の方法は分解点検というやり方だけではありません。他に状態監視（ウォークダウンを含む）、潤滑油交換等いくつか方法があります。これらの一つ選定することだけでなく、組み合わせることで機器の健全性を維持することが効率的な保全のために必要なことです。

(2) 分解点検と機器取替

機器を構成している主要部分が劣化しつつあり、消耗品や簡単な部品交換だけでは保全が難しくなりつつあるような場合、劣化部分の手当てを行い従来通り分解点検を実施していくか、改造・大修理・全体取替等の対策を実施するか、いずれかの選択に迫られることがあります。分解点検を選定して一時的なコスト削減を図ったとしても、その後の保全コストが多くかかってしまうこともあるからです。このような場合は、下記の点を考慮してどちらかを選定することになります。

- ・プラントの運転継続が今後も見込まれるか（運転認可等）
- ・「今後も従来保全を継続する費用」と「改造等の対策費用＋その後の新保全を継続する費用」の比較
- ・改造・大修理・取替等の対策に対する規制手続の要否、手続期間、コスト
- ・部品生産の継続が見込まれるか
- ・汎用品などで交換容易か
- ・メーカーの保全対応期限

いずれにしても、これまでの保全を継続するか、あるいは改造・大修理・取替等を実施しその後は新たな保全を実施していくか、どちらが安全性と経済性の観点から合理的であるか検討することは保全活動における最重要事項の 1 つであり、常に考える必要のある事項です。



参考文献

- [D-1] EPRI, “Guideline for As-Found Reporting A Process for a Living Preventive Maintenance Program”, 1002935, Final Report, November 2003
- [D-2] 日本原子力学会, “原子力発電所の高経年化対策実施基準”, 2013 暫定版：経年劣化メカニズムまとめ表（追補 4）

状態基準保全（CBM）について

1. はじめに

プラントを構成する個々の機器には、それぞれ特有の経年劣化が特定の部位に発生・進展します。ポンプの例を表 E-1 に示します。この表からわかるように、各部位に発生する経年劣化はそれが発生・進展すると特有の症状が現れます。そして、その症状は特定の技術で検知することができます。ここに示されている経年劣化のうち、あるものは当該機器を分解しないと検知あるいは計測できないもの、あるものは当該機器を分解しなくても検知あるいは進展の程度を計測できるものがあります。

表 E-1 機器の各部位に発生する経年劣化、その顕在化する症状
及びその症状を検知できる技術の関係（ポンプの例）

ポンプの各種機能		部品	異常/劣化の種類	顕在化する症状 (異常兆候)	異常兆候を検知できる既存技術
QH性能	エネルギー伝達	主軸	アンバランス 芯ずれ き裂/破断	振動の異常	振動診断技術
		軸継手	アンバランス 芯ずれ	振動の異常	振動診断技術
	エネルギー変換	羽根車(インペラ)	アンバランス、ケーシング接触 機械的ゆるみ 腐食/浸食	振動の異常 QH低下	振動診断技術 機能試験
		ケーシングリング	浸食による減肉	QH低下	機能試験
	軸支持	軸受	内輪/外輪/回転体の疵 潤滑不良	振動の異常 油の劣化/異物	振動診断技術 油分析
		軸受箱	ボルト締付ゆるみ	振動の異常	振動診断技術
圧力障壁	耐圧	ケーシング	内面の腐食/浸食	減肉/損傷	分解点検時の目視 検査
		ケーシングボルト	腐食	漏えい(フランジ部) 減肉/破損	分解点検時の目視 検査又はUT 検査
	シール	ガスケット・パッキン	へたり	漏えい(フランジ部)	なし(定期取替)
		メカニカルシール グラントシール	劣化、へたり	漏えい率増加	漏えい率計測技術 又は目視検査
機器支持	支持	支持脚/台板	腐食	減肉 振動の異常	目視検査
		基礎ボルト	腐食	減肉 振動の異常	目視検査

例えば、ポンプ・ケーシングの内面に生じる腐食減肉は、当該機器を分解点検し、内面を直接観察し計測しないと、その程度を把握できません。一方で主軸のアンバランスや軸受の内輪/外輪の疵は当該機器を分解しなくても振動診断技術でそれらを検知することが可能です。そして、ポンプ運転中に振動を計測・分析しその原因を特定できるだけでなく、その状況によってはその後どの程度の期間、運転することが可能か推定すること、また必要に応じて予め修理のための準備を実施することが可能です。このような保全活動をここでは状態計画保全（CBM）と呼ぶこととします。

以下に CBM の特徴や実施方法等について述べます。

2. 状態基準保全（CBM）とは？

機器の内部構造物や内部部品に劣化が予測され、その劣化の状況を確認するために機器を分解せずに外部から検査あるいはモニタリングできる技術がある場合、分解点検（TBM）という方法を取らず、当該機器の運転中にその検査・モニタリング技術で定期的に劣化状況を把握・分析しそのトレンドを評価して機器の健全状態を確認する方法があります。この保全方法は TBM と同様、たいへん重要な予防保全方法の 1 つであり、CBM と呼ばれています。

CBM は下記の 3 条件が揃ったときに成立します。

- (1) 機器内部に発生・進展する経年劣化に特有の信号（例えば、振動）が運転中あるいは定期試験中等において確実に発信されること
- (2) 上記の信号を外部から捉え、それを分析・評価することによって原因を特定できる技術が存在し、しかもその技術が信頼できる技術であること
- (3) 他の保全方法（TBM あるいは機器の全体取替等）よりも経済合理性があること²⁹（安価であること）

上記(1)は、例えば回転機の振動の場合、回転体のアンバランスやアラインメントのズレ、軸受の内輪疵や外輪疵、主軸のクラックなどの発生・進展に特有の振幅や振動数、位相、振動波形などのパラメータ変化、すなわち特有の信号を発することを要求しています。これが CBM を成立させる第一の条件です。次に上記(2)はその信号を一定の信頼性をもって検知できる技術、それも対象機器を分解せずに機器の外側から検知できる技術がすでに開発されており、実機に適用できる状況になっていることを要求しています。これが CBM 成立の第二の条件です。最後に上記(3)は他の予防保全方法（TBM）と比較して経済合理性を有していることを要求しています。これが CBM 成立の第三の条件です。

CBM は機器を分解しないで実施する予防保全方法の 1 つであるということから、この保全方式を採用することはいつまでもずっと機器の分解を実施しないことを意味すると勝手に勘違いしている人がいます。当然のことですが、CBM 対象機器であっても異常兆候が発生したり、明確な異常が起こったりしたら、モニタリングを継続しながら異常のトレンドを分析・評価し停止時期の検討と修理のための準備を行った後、適切な時期に実際に機器を停止し、機器を分解・修理するのが通常です。このように、CBM といっても機器の分解や修理をいつまでも実施しないわけではありません。次の分解点検時期を決めずに機器の運転状況を監視しながら異常兆候が検知されるまで、あるいは異常が発生し停止が必要と判断されるまで運転を継続します、CBM とはそのような保全方式と考えるべきです。

CBM は TBM よりも信頼性が低いと誤解している人がいます。また両者の間で TBM の方が優れており、CBM は劣っていると考えている人がいます。これは明らかに間違いであ

²⁹ 通常、CBM は一定の信頼性を確保でき、かつ経済合理性のある場合に採用されるが、TBM や機器の全体取替等の保全方法と総合的に比較して CBM が最適である機器が存在するかもしれない。要は従来の保全方式に対する思い込みを排除し、安全性と経済性の観点から冷静に分析・評価し、総合的な判断を実施することが肝要である。

る。どちらが信頼性が高いとか、どちらが優れているとかは一概には言えません。要はどのような保全方式であっても実証された技術であってその信頼性が許容できるか否か、また保全対象機器にとってどの保全方式の方が信頼性と経済性の観点から適しているか、ということであります。

TBM（分解点検）の信頼性は、本文の4章で述べたように、保全対象機器に割り当てられた保全遂行能力の3要素（保全作業要領書、保全実行部隊、使用資機材）の組合せで決まります。CBMも同様に、CBM要領書、CBMスタッフ、状態モニタリング技術の3要素の組合せで決まります（図E-1）。TBMもCBMもこれら3要素の組合せで信頼性が決まるので、

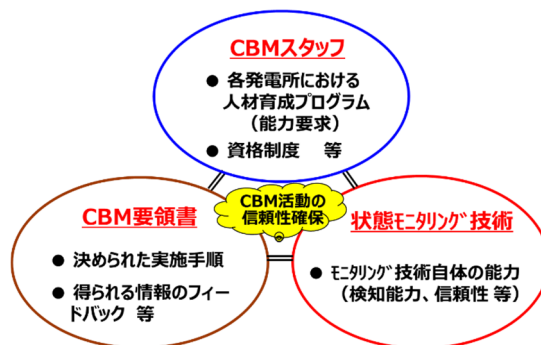


図 E-1 CBM の信頼性を決定する3要素

実際にどの要領書を用い、どの作業班を配置し、どのような使用資機材を用いるか、具体的に条件が設定されないと、どちらが優れているか、あるいはどちらが信頼できるかは一概には言えません。TBMであっても保全実行部隊の技量が低ければ、あるいは保全作業要領書や使用資機材が効率的・効果的なものでなければ信頼性は低下するのです。また、どちらが信頼性が高いかということよりは、信頼性が比較的低くてもそれを許容できるか否か、すなわち保全目的の達成に大きな影響があるか否かが重要であり、信頼性が多少低くてもそれだけで問題となるわけではありません。どちらの保全方式を採用するかについては、信頼性において許容できるのであれば経済性の高い保全方式を採用することになります。

3. 状態基準保全（CBM）の実施方法

CBMの実施手順を図E-2に示します。ここで注意が必要なステップは下記の4つのステップです。

③適切なモニタリング技術の
特定

④許容基準の設定

⑥状態モニタリング技術でデ
ータ採取

⑧コスト評価

上記③のモニタリング技術については、これまでに開発・実証された技術が数多くあります（表E-2）。これらのうち、どれを用いるかは各原子力発電所の保全担当者や保全責任

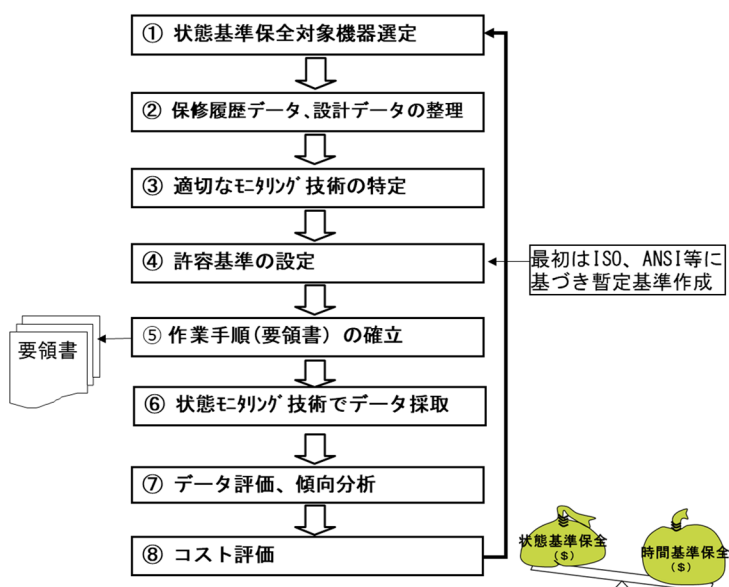


図 E-2 状態基準保全の実施手順

者の考えに依りますが、一般に下記のことが言えます。

- ・ 多数の技術を使うと、データ採取に時間を要するだけでなく、データ量が膨大となり、データの分析・評価に長時間を要することになる。
- ・ 複数のモニタリング技術を同一機器に適用すると、同一の結果を示さない場合があり、判断に困る。
- ・ 多数のモニタリング技術を採用すると、多額の設備投資が必要となり、人件費も増大するので、コスト効率を勘案した採用を実施する必要がある。

表 E-2 実証されたモニタリング技術

- 振動分析
- 油分析
- サーモグラフィ
- 音響（バルブリーク）
- 電動弁診断装置
- 非常用DG診断装置
- 衝撃パルス試験（ころがり軸受）
- Bore Scope検査（原動機内部）
- On-line腐食モニタリング
- 溶存ガス分析（変圧器絶縁オイル）
- その他

以上の3点を勘案して「振動分析」「潤滑油分析」「サーモグラフィによる温度測定分析」の3つを基本として採用している原子力発電所が米国には数多くあります。その他、電動弁や非常用ディーゼル発電機の診断システムも数多くの発電所が適用しています。

上記④の許容値の管理において陥りやすい問題は、例えばCBMを初めて開始する時点において回転機の振動の許容基準を設定しようとするときに発生します。振動がどこまで増大しても許容できるかという問題に拘泥してしまい、いつまでもCBMの実施に踏み出せない場合があります。そのような

場合を回避するために、最初はISOやANSIの基準を参考に設定し、まず始めてみるのが重要です。徐々に経験を積んだら許容値を見直し適正化する、あるいはISOやANSIの基準のような絶対値を用いて管理する絶対値管理を、通常値との比較で管理する相対値管理へ変更することも考えられます

(図 E-3)。

上記⑥の「データ採取」においては、この作業を「外注」するか、「直営」で実施するかという問題に直面します³⁰。この問題は保全活動を計画、実施する際によく直面する問題です。添付資料D「時間基準保全（TBM）について」の4項においても分解点検を「外注」で実施するか、「直営」で実施するか、について述べました。自信をもって保全を計画・実施しその改善を決断するには、ある程度の直営経験も必要です。

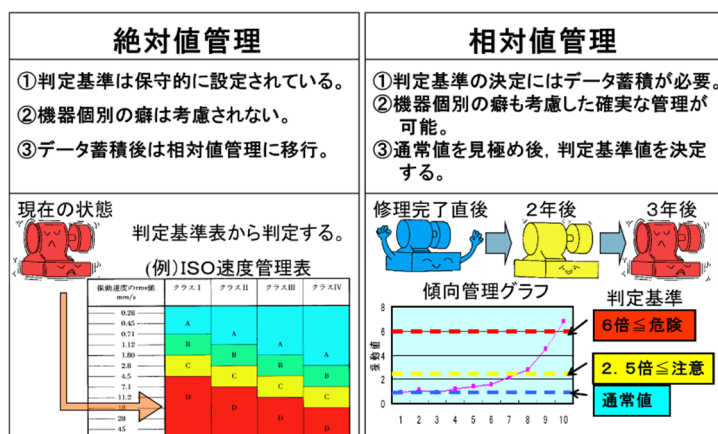


図 E-3 回転機器の振動管理方法（絶対値管理と相対値管理）

³⁰ 通常、経済合理性を追求すると「外注」を選択するケースが多くなる。しかし、一方で自信をもって保全を改善していくには、直営による工事の経験を通じて機器の状態を正確に把握しそれを評価できる能力や技術を内在化することが望まれる。世界に冠たるトヨタ自動車は「自分で製作できないものは外注しない。」との方針で実施してきたとのことである。対象機器の種類・数、必要な人材の数などを勘案して適切な直営がなされることが望まれる。

上記⑧「コスト評価」は、一見、簡単そうに見えますが、なかなか簡単ではありません。TBM から CBM への移行を検討するとき、技術的評価に問題はないとしても経済合理性を評価する際に TBM と CBM の両者の費用を積み上げその結果を比較・評価する必要があります。計画の立案から実施、評価まで一連の業務を想定し、1 つひとつ費用を積み上げる必要があります。現場の作業ステップに沿って要員数や所要時間、使用資機材など、詳細を見積もるためのデータ蓄積と経験が必要となります。また、TBM を実施していた時の機器故障率と CBM 移行後の機器故障率をどのように見積もるかによって移行前後の経済的評価は大きく変わる可能性があります。

4. その他

繰り返しになりますが、前述の 2 項で述べたように、CBM は下記の 3 条件が揃ったときに成立します。

- (1) 機器内部に発生・進展する経年劣化に特有の信号（例えば、振動）が運転中あるいは定期試験中等において確実に発信されること
- (2) 上記の信号を外部から捉え、それを分析・評価することによって原因を特定できる技術が存在し、しかもその技術が信頼できる技術であること
- (3) 他の保全方法（TBM あるいは機器の全体取替等）よりも経済合理性があること（安価であること）

ここで、上記(1)(2)は、採用するモニタリング技術がどのような機器のどの部位における経年劣化を検知できるかということであり、これができない場合は、他の保全方式（例えば、TBM）を採用せざるを得ないということを意味しています（図 E-4）。

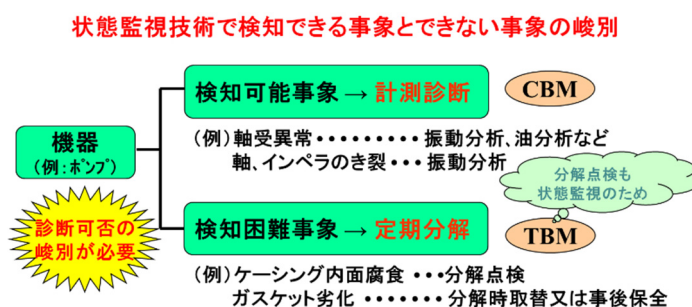


図 E-4 状態基準保全の適用可能範囲

このように、CBM の限界を知り、上記条件の範囲内で適切に運用すれば CBM のメリットを十分に活かすことが可能です。この点は注意が必要です。

事後保全（BDM）について

1. はじめに

保全活動は、通常、機器をどのように検査するか計画し（P）、その計画に基づき検査を実行し（D）、その検査結果を評価して必要に応じて補修等の是正計画を立案し（C）、そしてその計画に基づいて是正を実施する（A）という、いわゆる保全活動の PDCA を形成しています。

事後保全とは、文字通り、機器が故障したり機能や性能に異常が発見されたりした後、修理あるいは取替等によって修復する行為です。上記の保全活動 PDCA でいえば A の部分のみを実施しようとする保全方法です。なぜこのように保全活動の内容を縮小するかといえばそれは故障した後、修復しても、すなわち保全活動 PDCA のうちの A のみ実施していても保全目的（プラントの安全性と経済性の確保）を達成できるからです。また、予防保全のための予算や労力等を考えると事後保全の方が有利であるからです。言い換えると、保全目的（目標）の達成に大きく影響するような機器、あるいは予防保全の方が有利な機器には事後保全は適用できないということになります。

2. 事後保全（BDM）とは？

事後保全とは、機器が故障したり、機能や性能に異常が発生したりしたときになって初めて修理などの処置を施す方法です。したがって、通常はプラントの安全性と経済性（生産性）に関わる機器には採用しない保全方法です。このような保全方法は予防保全に対して事後保全（BDM）と呼ばれています。

BDM は下記の 2 条件が揃ったときに成立します。

- (1) 対象機器に故障や異常が発生してもプラントの安全性と経済性に負の大きな影響を与えないこと
- (2) 予防保全（TBM または CBM）よりも経済合理性が高いこと（保全関係者の労力等を含めて安価であること）

上記(1)の安全性と経済性への影響度（重要度）を判断する際にメリハリの付いた判断を実施することが重要です。我国の原子力界では「保守的」という便利な言葉を用いて安全上それ程重要でない機器や活動であっても安全に関係しているというだけで必要以上に安全上重要なものとして取り扱う傾向がありました。このような安易はやり方は一見安全を重視しているように見えますが、実は重要でないところに労力や時間を投入し体力を消耗させてしまうという弊害があり、全体として安全性を低下させかねないやり方でありました。このような安易な妥協は、言わば「無駄」であり、経済性を悪化させるだけでなく、安全上の課題や新たに発生する問題に対する安全対策を実施するための原資を十分に供給できず、結果として安全性の低下をまねく可能性があります。

安全性に関わる機器であっても、また経済性に関わる機器であってもその故障影響が大きい機器は事後保全対象の候補です。事後保全あるいは予防保全のいずれとするかについては、両者を総合的に比較・評価した上でどちらを採用するか判断する必要があります。

BDM は下記の 2 つの点に注意が必要です。

- ・ 故障が発生してしまったり、異常がはっきりした形で現れるまで使用していたりすると大きな損傷をまねき、復旧に時間がかかったり修繕費が高くなったりすることがある。
- ・ 機器が故障するまでには機能/性能がかなり落ちていることが多く、このような状態で使用していると性能が発揮されず運転費の増大につながる場合がある。

このように、事後保全で行うことは機能/性能を保つことが十分にできず、故障した場合の復旧に時間がかかるなどの弊害もあります。しかし、プラントの機能/性能に大きな影響がないものや損傷の拡大する心配がないもの、あるいはすぐに処理すれば済むものなどは予防保全のための予算や労力等を考えると事後保全の方が有利な場合があります。このような場合に BDM を採用することとなります。

一方、プラントを構成する多数の機器はどれも不要なものではなく、何らかの役割を持っており機能を果たしています。したがって、これら機器のうち特定の機器が事後保全対象であっても保全対象であることに変わりはありません。保全活動 PDCA のうち PDC へ注力すること（リソースを投入すること）はしませんが、当該機器を完全に放置するわけではありません。投入するリソースを最小限とするものの、できるだけ故障等によるダメージを少なくし、保全活動 PDCA のうちの A に労力ができるだけ掛からないように早期発見を可能とする工夫を実施する等の配慮は必要です。具体的には、産業プラントで行っている「保全パトロール」です。保全パトロールは予防保全活動の一環として行うものですが、事後保全対象の機器の状態をついでにチェックすることは可能であり容易でもあります。異常を早期に発見してその後の修復作業をできるだけセーブできるようにすることは意味のあることです。

3. その他

米国では、保全パトロールを行うグループに軽微な修理を行う機能を持たせて事後保全を効率的に実施している例があります。このグループは保修分野の人材と発電分野の人材の混合チームであり、発電直との連携も効率的に行えるようにして、微少漏洩等の軽微な修理を効率的に行って成果を挙げています³¹。

³¹ このグループは、FIN チームとよばれていた。“Fix it now” Team、「すぐやる」チームということである。

保全テンプレートについて

1. はじめに

保全技術者はそれまでの運転保守経験を踏まえて、予防保全対象の機器に対する保全を最適化すべく常に見直しを行っています。そのやり方の1つが本文の5.2節で述べた予防保全最適化検討（PMO）です。この検討プロセスを図 G-1 に再掲しますが、この図の⑤保全タスク分析において保全技術者は「保全テンプレート」を下敷きにして個々の保全対象機器の特徴を考慮しながら保全計画を適切かつ迅速に立案します。したがって、保全テンプレートは最新知見や運転保守経験を踏まえて、その評価結果やノーハウを反映して適切となるよう常に見直されなければなりません。

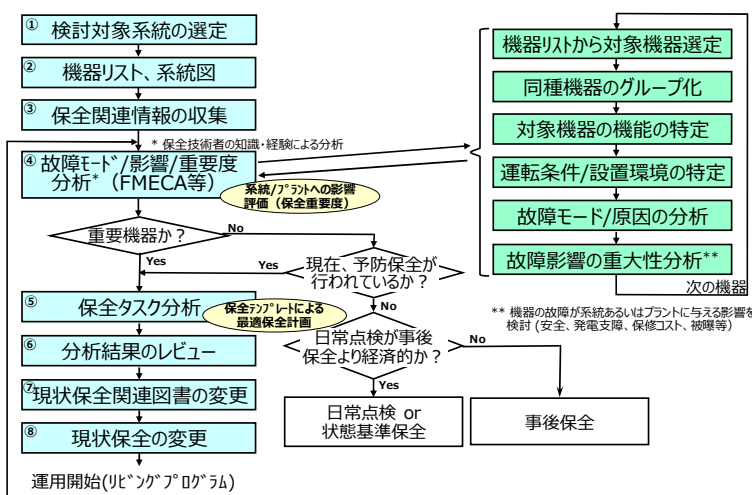


図 G-1 予防保全最適化(PMO)の検討手順

ここで最適とは、保全目的（プラント全体の安全性と経済性の同時最大化の追求）を達成する上で最も適切な内容であることを意味しています。

2. 保全テンプレートの概要

テンプレートという言葉は「ひな形」「型板」「鋳型」「倣い板」を意味する英語です。保全テンプレートとは、その言葉の通り、その時点で最適と考えられる保全計画の標準メニュー（保全対象機器、保全タスク、実施時期）が技術的根拠とともに記載されたもので、まさに保全計画のひな形をです。このひな形を見ながら個々の機器の保全計画を策定することになります。

この保全テンプレートは、劣化メカニズムが同じ（類似）の機器でグループ化され、そのグループ毎に標準の保全タスク、実施時期（周期）を定めたものです。ポンプ・電動機の種類例を表 G-1 に示します。

個々の保全テンプレートには、一般メニューとして TBM、CBM、BDM、試験の 4 つの保全方式が設定されており、それぞれの保全方式に対して実施すべき保全タスクとその実施時期、そしてなぜその保全タスクを実施する必要があるか、またなぜその時期に実施する必要があるのか、といった技術的根拠が明示されています（表 G-2）。なお、保全タスクと実施頻度は運転条件や各プラントにおける対象機器の保全重要度毎に定められているのが

通常です。

以下に保全テンプレートを使って特定の機器の保全計画を立案する手順を示します(図 G-2)。

- ①保全対象に対しその種類や保全重要度から保全タスクを抜出する。
- ②通常は保全テンプレートの内容をそのまま採用するが、特に保全対象の固有の問題や劣化状況があれば、それらを考慮して保全テンプレートの指定とは異なる保全内容を設定することを検討する(カスタマイズ)。(頻度の変更、状態監視の追加など)
- ③保全テンプレートから抽出した保全内容を保全計画としてまとめる。特別な措置として保全テンプレートの指定内容をカスタマイズした事項も保全計画の中に反映する。
- ④保全計画に従って保全を実施する。
- ⑤保全実績の評価や保全有効性評価の結果などから必要に応じて保全テンプレートの指定内容(保全タスク実施頻度など)の見直しを検討する。
- ⑥見直した結果を保全テンプレートに反映する。

表 G-1 ポンプ・電動機の種類例

ポンプ	横型渦巻	保全テンプレート(横型渦巻)
	縦型渦巻	保全テンプレート(縦型渦巻)
	往復動	保全テンプレート(往復動)
	ギア型	保全テンプレート(ギア型)
電動機	密閉横型	保全テンプレート(密閉横型)
	密閉縦型	保全テンプレート(密閉縦型)
	開放横型	保全テンプレート(開放横型)
	開放縦型	保全テンプレート(開放縦型)

表 G-2 保全テンプレートの記載内容

保全方式	点検種別	タスク内容	技術根拠
TBM	本格点検	標準的な点検内容 点検頻度	①劣化メカニズム ②頻度設定の根拠 等
	簡易点検	標準的な点検内容 点検頻度	
CBM	状態監視	標準的な点検内容 点検頻度	①BDM とする根拠(経済合理性等)
BDM	—	修理又は取替 故障発見後に実施	
試験	—	試験運転時の機能確認	①劣化メカニズム ②頻度設定の根拠 等

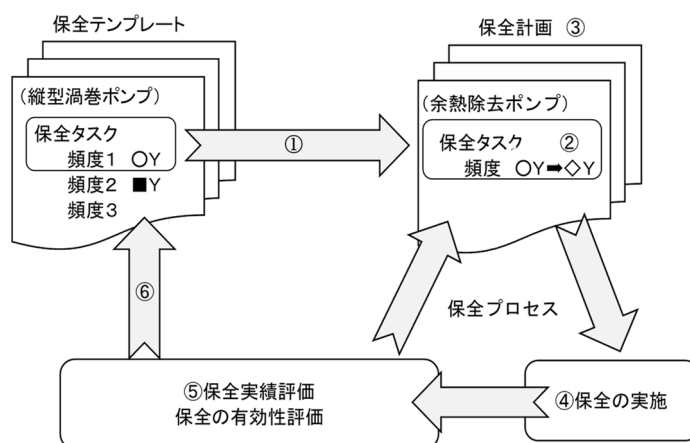


図 G-2 保全テンプレートの使い方

3. 保全テンプレートの目的、役割

保全テンプレートは、予防保全対象機器の 1 つひとつに対して最も適切と考えられる標

準メニューを保全技術者（保全計画の立案者）に提示することにより、下記を可能にしてくれます。

- ・ その時点で最適な保全計画の立案
- ・ 担当する保全技術者に依存せず、ばらつきの少ない保全計画の立案
- ・ 保全計画の迅速な立案（有限なリソースの下では重要業務への注力のため、常に業務の効率化が求められる。）

また、予防保全対象機器の最も適切と考えられる保全メニュー（保全タスクと保全実施時期）とその技術的根拠が記載されるため、下記を可能にしてくれます。

- ・ 組織内の情報共有
- ・ 人材育成
- ・ 技術伝承に活用できるツール

保全テンプレートはいったん作成されたら変更できないものではなく、最新の研究成果や知見の他、自他プラントあるいは他産業の運転保守経験やノーハウを随時取り入れてその内容が見直され高度化されるものです。したがって、保全テンプレートに記載されていることは、その保全組織の実力やレベルを測るバロメータとなるとも言えるものです。

4. 保全テンプレートの内容

保全テンプレートは、前述のように、機器のグループ毎にまとめられており、1つのテンプレートには保全タスク（TBM、CBM、BDM、試験）、保全実施時期（点検周期）が記載されています。また、機器のグループ毎に保全タスクとその実施時期が規定されています。以下に機器のグループ化、保全タスク、保全実施時期について説明します。

(1) 機器のグループ化

劣化の程度は材料、使用頻度、環境が主なパラメータとなり変化します。また、機器により構成部品が異なることを踏まえ、機種毎によるグループ化で保全方法の一般化が可能となります。したがって、保全テンプレートではこのようなグループ化がなされています。

(2) 保全タスク

機器には、その機器特有の経年劣化が発生する部位と劣化モードがあるので、機器の健全状態を診断するには、その経年劣化が生じる部位における劣化の進展を適切に検知・評価できる方法を採用する必要があります。そのような方法は通常複数ありますので、その中で経済合理性のある方法が採用されます。したがって、採用する保全方式は、TBM、CBM、BDM、試験の4つのうち、どれが保全対象機器に適した保全方式であるか、あるいはどれが保全対象機器のどの部位の劣化を検知するのに適した保全方式であるか、ということであり、1つの機器に対して複数の保全方式が採用されることもあります。また、保全テンプレートは必ずしも常に4つの保全方式がすべて採用されるわけではありません。例えば、機器によっては、CBMのみを採用して保全を計画・実施する場合もあり得ます。このような場合は、CBMの欄にのみ、保全タスクと点検頻度（保全実施時期）が記載されることになり、他の保全方

式の欄は空欄（実施事項なし）となります。

一般に、機器には経年劣化が発生する部位は複数あり、そのそれぞれで最適な保全方式があり得ます。したがって、1つの機器に対する保全方式は1つということではなく、一般に複数あることになります。このため、1つの機器の保全テンプレートにはこれらの保全方式のベストミックスが記載されることになります。このように4つの保全方式の間には優劣がなく、どの保全方式、どの劣化検知技術がその時点で最良か、あるいは最適なということでは保全テンプレートは策定されています。

TBMのやり過ぎが高じると弄り壊しや保全作業に伴うエラーでトラブルが生じる等の問題があり、TBMは必ずしも最も信頼性が高いというわけではありません。機器／部品の特性／特徴や適用できる技術の習熟度などによりCBMを導入した方が信頼性が高くなる場合があります。保全方式には優劣はなく、適用する技術の有無、その技術の成熟度／信頼度、機器の重要度などを勘案して当該機器に最もフィットした保全方式あるいは保全技術を選定すべきです。この意味で保全テンプレートには、TBMのほか、CBM、BDM、試験という全4つの保全方式が標準的に記載されています。

「分解点検が最も信頼できる保全方式だ。」などと妄想を持たないようにする必要があります。技術は日進月歩であり、保全対象機器の各部位における劣化を検知できる技術は時代とともに新しいものが開発され、それがその時点で信頼性と経済性の観点から最も適していると考えられる劣化検知方法となっていくます。したがって、保全テンプレートはその最新技術動向によって常に変わって行くものであることを認識しておく必要があります。

(3) 保全実施時期（点検周期）

保全実施時期（点検周期）は、製造メーカ推奨や運転保守経験なども踏まえて最も適切と考えられる周期がその技術的根拠とともに定められています。この周期は各々の点検種別毎に設定されます。

表 G-3 保全実施時期設定のグループ化と頻度の設定

保全タスクと点検周期の設定において考慮する項目は、当該機器の重要度、運転頻度、環境の3つです。これらの組み合わせを考慮してタスクと頻度をそれぞれ設定します（表 G-3）。

	重要度高		重要度低	
	環境過酷 頻度①	環境マイルド 頻度②	環境過酷 頻度⑤	環境マイルド 頻度⑥
常時運転				
通常待機	環境過酷 頻度③	環境マイルド 頻度④	環境過酷 頻度⑦	環境マイルド 頻度⑧

重要度：機器の劣化・損傷が発生したときの影響の大きさ
頻度/環境：劣化の進行に影響を与える。

以上を踏まえて、保全テンプレートの具体的な例を表 G-4～表 G-5、図 G-3～図 G-4 に示します。

表 G-4 横型ポンプ本体の保全テンプレート（例）

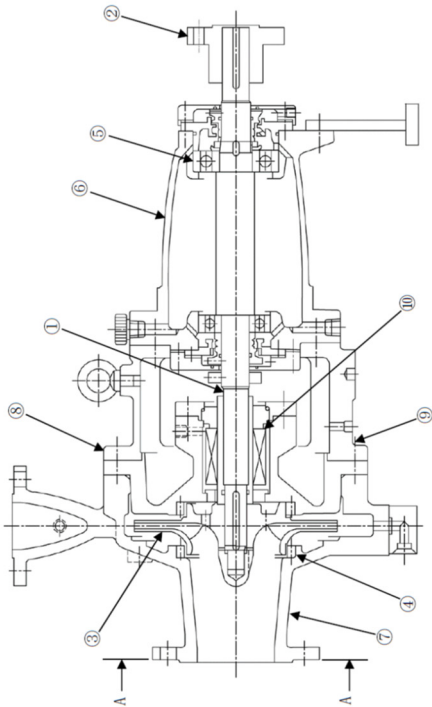
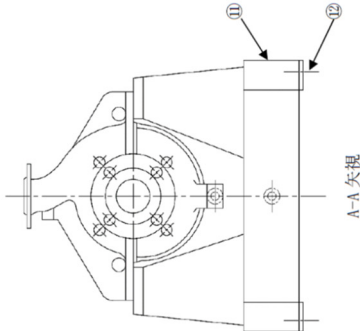
保全方式	点検種別	タスク内容	技術的根拠	備考
TBM	本格点検	<内容> ① 本体全分解点検（MOP, AOP 含む） ② 各部品分解清掃 ③ 計測、検査 ④ 定期取替品・消耗品取替 ⑤ 分解後の試運転（振動測定、漏れ、ポンプ性能等）	● メーカー推奨及びこれまでの良好な運転保守経験に基づき決定。 ● 次の劣化事象を確認するためにタスク実施 摩耗：軸受と主軸の接触面、軸継手、羽根車とケーシングリングとの摺動部 腐食：キャビテーションによる羽根車表面、ケーシング、軸受箱外面、取付ボルト、ベース 割れ：主軸の応力集中部（繰り返し応力による高サイクル疲労割れ）、取付ボルト、ステンレス材の主軸、ケーシング（塩素イオン等による応力腐食割れ） 性能劣化：軸受、ガスケット、Oリング、メカニカルシール、グランドパッキン 蓄積汚れ、部品緩み	● 米国では簡易点検と CBM 主体で実施されており、本格点検は計画されない。診断結果による必要が生じてから実施される。 ● 米国では回転機はカップリングを外し、センタリングすることを基本としている。
		<頻度> 重要度 A a:2 年, b:実施せず 重要度 B a:4 年, b:実施せず 重要度 C 実施せず 重要度 D 実施せず	● 機器の重要度、運転条件（運転頻度）、環境条件、およびこれまでの保全実績等を考慮し、個別に設定する。	
	簡易点検	<内容> ① アンカップリング（センタリング） ② 清掃、検査 ③ グリスアップ及びカップリング点検 ④ 外観目視検査 ⑤ 劣化状態監視で劣化傾向のあったものは正	● これまでの良好な運転保守経験に基づき決定。 ● これまでの運転経験を分析した結果、回転機器の異常は必ずれに起因するものが多いことが分かったので実施 ● 次の劣化事象を確認するためにタスク実施 腐食：ケーシング、軸受箱外面、取付ボルト、ベース 割れ：ステンレス材のケーシング（塩素イオン等による応力腐食割れ）、 蓄積汚れ、部品緩み	
		<頻度> 重要度 A a:2 年, b:実施せず 重要度 B a:4 年, b:実施せず 重要度 C 実施せず 重要度 D 実施せず	● メーカー推奨のカップリンググリス寿命、自社及び産業界の経験、及びこのポンプの使用率に基づく	
	一般点検	<内容> ① 外観目視検査 ② 清掃 ③ オイル交換（過去のオイル分析 結果より必要時） ④ オイルフィルタ清掃／取替	● これまでの良好な運転保守経験に基づき決定。 ● 次の劣化事象を確認するためにタスク実施 腐食：ケーシング、軸受箱外面、取付ボルト、ベース 割れ：ステンレス材のケーシング（塩素イオン等による応力腐食割れ） 蓄積汚れ、部品緩み	
		<頻度> 重要度 A a:1 年, b:1 年 重要度 B a:2 年, b:2 年 重要度 C 4 年 重要度 D 実施せず <頻度> 1 ヶ月～3 ヶ月	● このポンプの供用状態と高負荷サイクル、保全履歴の検討、産業界の経験に基づき決定。 ● 自社及び産業界の経験から決定。	
CBM	設備診断	<油分析> ① 軸受け潤滑材状態監視のための潤滑油サンプル収集と分析（鉄分濃度測定法、SOAP、フェログラフィ）。 ② 潤滑油液位異常や漏れの確認と是正及びメカニカルシール劣化の確認	● 潤滑油分析（フェログラフィを含む）は加熱や異常／増加摩耗、あるいは軸受け固着に至る可能性のある潤滑油中不純物蓄積を監視する、有効で信頼性の高いモニタリング方法。フェログラフィで、不均等、異常、過剰又は早期摩耗を起こしている部品（軸受け、ケーシング、ギアなど）の迅速な発見が可能。	
		<振動診断> ① 設備稼働中にリアルタイムで診断可能 ② ポンプのアンバランス、ミスアライメント、軸受不良、ギヤ不良、機械的緩み等の診断	振動診断は、回転体に異常が発生すると一般的に振動が増大するため、それら振動の周波数、振幅、位相差をセンサで測定し、解析したうえで、異常発生原因を特定可能	
		<頻度> 重要度 A a:1 カ月, b:1 カ月 重要度 B a:3 カ月, b:3 カ月 重要度 C 3 カ月 重要度 D 実施せず	自社及び産業界の経験から決定。	
		<赤外線サーモグラフィ> ① 赤外線サーモグラフィを用いて保全対象機器の画像を取得 ② 画像から得られた情報から異常な局部加熱や過去データと有意な温度差がないことを確認	米国の原子力発電所では、赤外線サーモグラフィを用いた機器の状態監視保全技術が事故未然防止として効果を上げ定着してきている。赤外線サーモグラフィの使用により、機器の異常兆候や劣化の傾向を早期に見つけ、故障の未然防止を図ることが可能。	
IST	試験による診断	① ポンプの運転範囲にわたる全重要運転パラメータ傾向監視のための定期的なポンプ性能試験 ② 適用可能な診断技術（AE 法等）の適用	① 産業界の経験が重要ポンプの運転状況と性能監視に効果的な活動であると証明。 ② 周期的性能試験で機器性能劣化を特定できる様な性能パラメータの傾向調査が可能。 ③ 潜在的な故障の推定が可能。	機能試験、定期試験、トラブル発生後の復旧時等において機器の健全状態を確認する重要な手段である。
BDM	巡視点検	事後保全であっても保全対象である事を忘れてはならない		
		<保全パトロール> 異常有無チェック等	保全員のパトロールは、主に目視による油、水の漏えいの有無、異音がないか、通常温度と異なっていないか、通常圧力と異なっていないかを確認することに付加し、ボルトや部品の緩み、欠落、破損の確認、土台の損傷、欠落、アースストラップ、カップリングガードの健全性確認等を行う。また、変色・発錆・腐食に対するタッチアップ塗装、ボルト締付部の増締め、清掃を行う。	
		<頻度> 必要に応じて実施	自社及び産業界の経験、使用率に基づく。	

注) <頻度>の a, b は、以下のとおり。

a：保全リソースを重点投入しないと、故障発生時に安全性に大きな影響を及ぼす系統・機器

b：保全リソースを重点投入しなくても、故障発生時に安全性に大きな影響を及ぼさない系統、機器

No.	部 位
①	主軸
②	軸継手
③	羽根車
④	ケーシングリング
⑤	軸受 (転がり)
⑥	軸受箱
⑦	ケーシング
⑧	ケーシングカバー
⑨	取付ボルト
⑩	メカニカルシール
⑪	ベース
⑫	基礎ボルト



No.	機能達成に必要な項目	部位	材料	経年劣化事象
1	ポンプ容量と揚程の確保	主軸	炭素鋼	摩耗
2				腐食 (全面腐食)
3				疲労割れ (高サイクル疲労割れ)
27				疲労割れ (フレットイング疲労割れ)
4		軸継手	炭素鋼	(想定されず)
5			鋼鉄	腐食 (全面腐食)
6		羽根車	炭素銅鋳鋼	摩耗
7			炭素銅鋳鋼	腐食 (全面腐食)
8				摩耗
9			青銅鋳物	キャビテーション
10	ケーシング容量と揚程の確保	羽根車リング	青銅鋳物	摩耗
11			—	キャビテーション (消耗品・定期取替品)
12		ケーシングリング	青銅鋳物	摩耗
13			—	腐食 (全面腐食)
14			—	腐食 (消耗品・定期取替品)
15			—	腐食 (全面腐食)
16		軸受箱	鋼鉄	腐食 (全面腐食)
17		軸受 (転がり)	鋼鉄、ホワイトメタル	腐食 (消耗品・定期取替品)
18		軸受 (すべり)	—	摩耗
19		軸受	—	はく離
20	ハウジングの維持	ケーシング	鋼鉄	(消耗品・定期取替品)
21		ケーシングカバー	鋼鉄	腐食 (全面腐食)
22		取付ボルト	—	腐食 (全面腐食)
23		ガスケット	炭素鋼	腐食 (全面腐食)
24		Oリング	—	腐食 (全面腐食)
25		メカニカルシール	—	腐食 (消耗品・定期取替品)
26		グラインドパッキン	—	(消耗品・定期取替品)
27		ベース	炭素鋼	腐食 (全面腐食)
28		ベース	炭素鋼	腐食 (全面腐食)
29		ベース	炭素鋼	腐食 (全面腐食)
30		ベース	炭素鋼	腐食 (全面腐食)

横型ポンプ劣化メカニズム例

図 6-3 横型ポンプ本体構造と各部の劣化メカニズム (例)

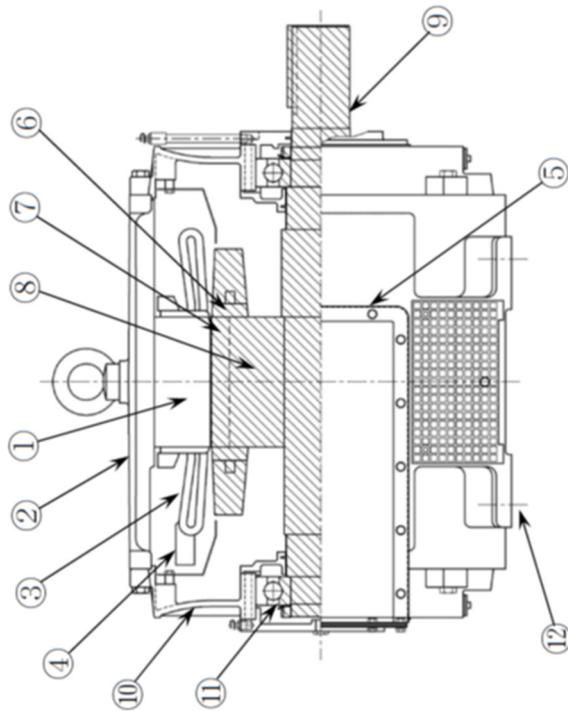
横型ポンプ本体構造例

表 G-5 ポンプ電動機の保全テンプレート（例）

保全方式	点検種別	タスク内容	技術的根拠	備考
TBM	停止時点検	<内容> ① 軸受：油量確認、軸絶縁抵抗測定 ② 固定子・回転子：絶縁抵抗測定、絶縁試験、内部目視点検、固定子ギャップ測定 ③ ブラシ：目視点検、接触圧力測定、寸法測定 ④ スリップリング：目視点検 ⑤ 締付ボルトゆるみ確認、ケーブル目視	● メーカー推奨及びこれまでの良好な運転保守経験に基づき決定。 ● 次の劣化事象を確認するためにタスク実施 摩耗：軸受と主軸の接触面 腐食：固定子コア・回転子コア、鋳鉄製フレーム・エンドブラケット、端子箱、カバー（長期使用による水分・腐食性物質（酸など）の混入、空気中の水分結露からの全面腐食） 割れ：回転子棒・回転子エンドリング（モータ起動時に発生する電磁力等により繰返し応力を受けると疲労割れ）、主軸応力集中部（ポンプ運転時の繰返し応力発生による高サイクル疲労割れ） 性能劣化：軸受 絶縁特性低下：固定子コイル・口出線・接続部品（振動等による機械的劣化、熱分解による熱的劣化、絶縁物内空隙での放電等による電氣的劣化、埃等の異物付着による環境的劣化により経年的に劣化が進行し、絶縁物の外表面、内部から絶縁特性低下） 緩み：締付ボルト	
		<頻度> 重要度 A a:2 年, b:実施せず 重要度 B a:4 年, b:実施せず 重要度 C 実施せず 重要度 D 実施せず	● メーカー推奨及びこれまでの良好な運転保守経験に基づき決定。	
	本格点検	<内容> ① 機器分解点検（内部異物確認、コイルの健全性） ② 各部点検手入れ、寸法計測 ③ 浸透探傷試験 ④ 軸受交換 ⑤ 巻線抵抗測定 ⑥ 絶縁抵抗測定 ⑦ 試運転	● メーカー推奨及びこれまでの良好な運転保守経験に基づき決定。 摩耗：軸受と主軸の接触面 腐食：固定子コア・回転子コア、鋳鉄製フレーム・エンドブラケット、端子箱、カバー（長期使用による水分・腐食性物質（酸など）の混入、空気中の水分結露からの全面腐食） 割れ：回転子棒・回転子エンドリング（モータ起動時に発生する電磁力等により繰返し応力を受けると疲労割れ）、主軸応力集中部（ポンプ運転時の繰返し応力発生による高サイクル疲労割れ） 性能劣化：軸受 絶縁特性低下：固定子コイル・口出線・接続部品（振動等による機械的劣化、熱分解による熱的劣化、絶縁物内空隙での放電等による電氣的劣化、埃等の異物付着による環境的劣化により経年的に劣化が進行し、絶縁物の外表面、内部から絶縁特性低下） 緩み：締付ボルト	
		<頻度> 重要度 A a:2 年, b:実施せず 重要度 B a:4 年, b:実施せず 重要度 C 実施せず 重要度 D 実施せず	ポンプ本体の本格点検周期と同じにするか、その周期の2倍、3倍等の周期にあわせて実施することが効率的である。	
CBM	日常点検／設備診断	<内容> ① 異常音の有無 ② 温度測定 ③ 振動診断 ④ 音響診断（AE :Acoustic Emission） ⑤ 潤滑油分析	● メーカー推奨及びこれまでの良好な運転保守経験に基づき決定。 ● 次の劣化事象を確認するためにタスク実施 摩耗：軸受と主軸の接触面 腐食：固定子コア・回転子コア、鋳鉄製フレーム・エンドブラケット、端子箱、カバー（長期使用による水分・腐食性物質（酸など）の混入、空気中の水分結露からの全面腐食） 割れ：回転子棒・回転子エンドリング（モータ起動時に発生する電磁力等により繰返し応力を受けると疲労割れ）、主軸応力集中部（ポンプ運転時の繰返し応力発生による高サイクル疲労割れ） 性能劣化：軸受 緩み：締付ボルト	
		<頻度> 重要度 A a:1 カ月, b:1 カ月 重要度 B a:3 カ月, b:3 カ月 重要度 C 3 カ月 重要度 D 実施せず	● メーカー推奨及びこれまでの良好な運転保守経験に基づき決定。	
BDM	なし （事後に故障を発見し対応）	事後保全であっても保全対象である事を忘れてはならない		
	巡視点検	<保全バトロール> 異常有無チェック等	保全員のバトロールは、異音がないか、通常温度と異なっていないか、通常圧力と異なっていないかを確認することに付加し、ボルトや部品の緩み、欠落、破損の確認、土台の損傷、欠落、アーストラップの健全性確認等を行う。また、変色・発錆・腐食に対するタッチアップ塗装、ボルト締付部の増締め、グリスアップ、清掃を行う。	
		<頻度> 必要に応じて実施		

注）<頻度>の a, b は、以下のとおり。

a：保全リソースを重点投入しないと、故障発生時に安全性に大きな影響を及ぼす系統・機器
 b：保全リソースを重点投入しなくても、故障発生時に安全性に大きな影響を及ぼさない系統、機器



注：回転部を斜線で示す

No.	部 位	No.	部 位
①	固定子コア	⑦	回転子棒
②	フレーム	⑧	回転子コア
③	固定子コイル	⑨	主軸
④	口出線・接続部品	⑩	エンドブラケット
⑤	端子箱	⑪	軸受（転がり）
⑥	回転子エンドリング	⑫	取付ボルト

ポンプ電動機構造例

図 G-4 ポンプ電動機構造と各部の劣化メカニズム（例）

No.	機能達成に必要な項目	部 位	材 料	経年劣化事象
1	機能達成に必要な項目	主軸	炭素鋼	摩耗
2				疲労割れ（高サイクル疲労割れ）
3		固定子コア	ケイ素鋼板	腐食（全面腐食）
4			電磁鋼	腐食（全面腐食）
5		固定子コイル	銅、絶縁物	絶縁特性低下
6		口出線・接続部品	銅、絶縁物	絶縁特性低下
7		フレーム	炭素鋼	腐食（全面腐食）
8		端子箱	炭素鋼	腐食（全面腐食）
9		回転子棒・回転子エンドリング	銅	疲労割れ
10		回転子コア	ケイ素鋼板	疲労割れ
11			電磁鋼	腐食（全面腐食）
12		軸受	—	（消耗品・定期取替品）
13		エンドブラケット	炭素鋼	腐食（全面腐食）
14		屋外カバー	炭素鋼	腐食（全面腐食）
19		空気冷却管	炭素鋼	腐食（全面腐食）
15			銅合金	腐食（全面腐食）
16		伝熱管・胴（油冷却器）	銅合金、炭素鋼	腐食（全面腐食）
21			白銅、ステンレス鋼	腐食（流れ加速型腐食）
22				異物付着
20		空気冷却器	炭素鋼	腐食（全面腐食）
17		取付ボルト	炭素鋼	腐食（全面腐食）

ポンプ電動劣化メカニズム例

5. 保全テンプレートの改良の仕方

保全の目的である「プラントの安全性と経済性の確保」のためには、保全活動に停滞は許されません。常に保全目的（目標）の達成のために改善・改良を継続していく必要があります。保全テンプレートもいったん作成されたら変更できないものではなく、自他プラントや他産業の運転保守経験やノーハウを随時取り入れて、その内容が見直され、高度化されなければなりません。

本文の 5.3 節で述べたように、保全を改善し最適化していく現実的な方法としては、下記が考えられます。

- 自プラントの運転保守経験の反映
- 他の優良プラントとの比較検証（ベンチマーキング活動）
- 機種毎の専門情報交換コミュニティとの情報交換

保全テンプレートも同様で、その内容を改善・改良していくには、少なくとも上記の方法を随時取り入れ、それらの情報を活用して積極的にテンプレートの改良に取り組む必要があります（図 G-5）。

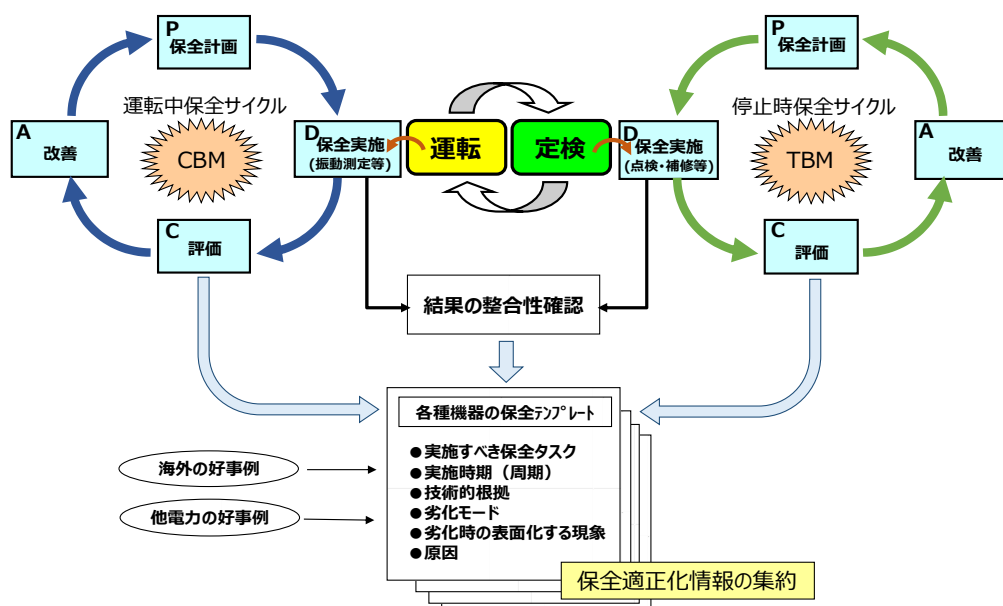


図 G-5 保全テンプレートの改良方法

6. その他

以下に保全テンプレートを使用するにあたって注意すべき点について述べます。

- (1) 保全テンプレートは、個々の機器の保全計画を立案する際に参考にする標準的な保全計画案を提示しているものであり、その内容を適用対象機器すべてに一律にそのまま適用することを意図したものではありません。当然、保全テンプレートの内容を参考にしながら、保全技術者が個々の機器の特徴（クセ）を勘案して最終的に保全計画の内容を決定する必要があります（表 G-6）。

- (2) TBM には、オーバーホールを行う本格点検と外観点検や小さな補修を中心とした一般点検のほか、両者の中間に当たる簡易点検があります。簡易点検は、例えば米国では、回転機器の場合、主軸の芯ずれを起因としたトラブルが比較的多いことから駆動

表 G-6 保全テンプレートを利用したカスタマイズ例

	保全テンプレート			保全計画	
	タスク	頻度		タスク	頻度
本格点検	全分解 清掃 各計測 非破壊試験	①2Y ②6Y ③10Y	→	全分解 清掃 各計測 非破壊試験	②6Y (重要で環境がマイルド) を選定
簡易点検	外観点検 潤滑油交換	①1Y ②3Y ③ー		実施せず	実施せず
設備診断	振動診断 潤滑油分析	6M		振動診断 潤滑油分析	3M (簡易点検の代わりに頻度増)

*①重要・過酷、②重要・マイルド、③その他

機と被動機のカップリングを外し、センタリングを実施する簡易点検を導入し、本格点検周期を延長している例があります。このように、TBM は本格点検と思込むことは保全最適化の大きな阻害要因です。

- (3) CBM には、多くの状態診断技術が採用されています。その有効性が実証され、産業界で多用されている技術に振動分析、潤滑油分析、サーモグラフィによる温度監視があります。その他、多くの診断技術が実機適用されています。特殊な診断技術ではディーゼル機関の診断技術などがあります。CBM は通常 TBM よりも安価であるので、CBM を採用する場合、状態監視技術が信頼できるかという一点に選択の可否が掛かっていると言えます。
- (4) CBM は分解点検を実施しない保全方式であると大きな誤解している人が比較的多くいます。CBM は分解点検を実施しないのではなく、兆候が出てくるまで分解点検を実施しないということであり、異常兆候が現れたり故障したりすることが明確になったら分解点検は実施せざるを得ません。したがって、CBM は分解点検時期をあらかじめ定めるのではなく、柔軟に設定するための手段（あるいは分解点検時期の延長につなげることを可能にする手段）であると考えられます。
- (5) BDM は文字通り故障後に実施する保全です。これは重要機器が予想外に故障し緊急で実施する緊急事後保全を除き、故障が生じ、それを発見した後、復旧することを意味しています。したがって、安全性に関連せず、経済的にも問題ない機器が対象となります。とはいえ、BDM 対象機器であっても保全管理の視野から除外してよいわけではありません。また、機器が故障し壊れた後、修理するよりも異常状態で発見した方が復旧が容易である場合があるので、通常実施する保全パトロール重要機器をチェックするついでに、あるいは負担のない範囲で BDM 対象機器の様子をチェックすることを考えてもよいと思います。そうすれば他機器、環境への影響も最小限とすることもできます。
- (6) 試験には、定期試験（原子炉施設保安規定に基づく非常用機器のサーベイランステスト）、機能試験（分解点検後あるいはトラブル復旧後の単体試験を終了した後に行う系統試験）、健全性確認試験（待機機器等の健全性確認試験）があります。試験は保全方

式の1つにカウントされないことがあります。機器の健全性を管理する専門家である保全技術者が確認すれば一定の精度で健全性を確認できますので、保全方式の1つとして確保すべきです。特に、SA 機器³²や FLEX 機器³³などは、その使用確率などを勘案すると、試験による機能確認でも十分に保全としての役割を果たせるものと考えられます。

³² シビアアクシデント対策用機器

³³ 事故時に利用できる可搬型機器

補修作業管理のためのガイドライン
(適切な補修作業を実施するためのガイドライン)

目 次

1. 概要
 2. 保全の基本事項
 - 2.1 保全活動に投じる資源
 - 2.2 保全の目的
 - 2.3 保全品質を決定する要素
 3. 補修管理の基本事項
 - 3.1 補修の目的
 - 3.2 補修計画の前提
 - 3.3 適用図書等
 - 3.4 適用規格・基準
 4. 補修作業前の確認事項
 - 4.1 補修対象
 - 4.2 補修の方法
 - 4.3 補修実施時期
 5. 補修作業の実施計画の立案（補修作業要領書の作成）
 - 5.1 補修作業計画
 - 5.2 補修作業工程
 - 5.3 補修要員配置計画
 - 5.4 補修資機材調達計画
 - 5.5 適切な補修作業環境の整備
 - 5.6 適切なデータ取得計画
 - 5.7 その他の管理計画
 6. 補修作業の実施
 - 6.1 作業環境整備
 - 6.2 補修前検査
 - 6.3 補修作業
 - 6.4 補修後検査
 - 6.5 補修後の確認
 - 6.6 後片付け
 7. 補修後の措置
 - 7.1 保全計画への反映
 - 7.2 補修記録及び図書の作成並びに保管
- 別紙 1 保全活動における是正措置の区分（本ガイドラインでの考え方）
- 別紙 2 用語集

1. 概要

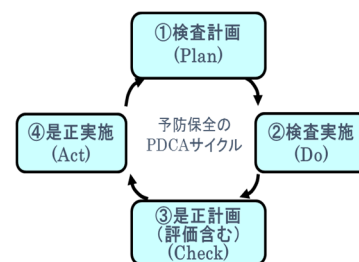
本ガイドラインは、原子力発電所の現場で行われる保全作業の1つである補修作業に着目し、現場で適切な補修作業を実施するために心得ておかねばならない事項についてその趣旨や背景・理由などを含めて解説し、補修作業管理のためのガイドラインとなるよう具体的にまとめたものである。

なお、本ガイドラインで対象とする「補修」は、機器の機能・性能が経年劣化等により低下した部分を修復するものであり、当該機器を含む系統の安全性に影響を及ぼすような基本的特性を変化させる改造には当たらない範囲のものを想定している（別紙1参照）。原子力発電所における保全現場では、本ガイドラインで解説する「補修（Repair）」の他、「取替（Replacement）」、「改造（Modification）」、「劣化緩和（Mitigation）」などの是正作業はもとより、「検査（Inspection）」も実施される。これらの保全作業に対するガイドラインについては、今後、別途検討する予定である。

また、我が国の保全実施体制は、伝統的に電気事業者とその協力会社との間の契約を通じて重層の請負構造となっており、実作業は協力会社が実施することが多いが、補修作業の主体者は、言うまでもなく、補修という保全作業の全体を管理する電気事業者（補修担当部門）であり、補修作業に関連して発生する問題に対する全責任がある。しかしながら、原子力発電所の保全は電気事業者と協力会社が一体となって1つの保全組織として機能することを求められているので、協力会社においても受注した分担業務に対する責任はもとより、関連する設備や業務についても理解し全体としてうまく機能するよう努める必要がある。そのためには電気事業者が原子力安全に関する主体者としての責任を全うできるように協力会社も相互のコミュニケーションや適時的確な情報伝達などに努力しなければならない。以下では、特に指定しない限り、このような理解の下で本ガイドラインについて述べることにする。

2. 保全の基本事項

補修作業は保全活動の一部となる是正措置のうち機器の原子力安全に影響を及ぼす基本性能を変えずに修復する手段である。保全活動のPDCAサイクルにおいて、是正措置は検査計画の立案（P）から検査の実施（D）、検査結果の評価を踏まえた是正計画の立案（C）へと活動が進んだ後、実行（A）されるものであり（図H-1）、その結果が新たな検査計画へのフィードバックを行うことから保全活動において重要なものとなる。また、機器を直接取り扱う活動であることから、現場作業を開始するに当たって事前に、次に記述する保全の基本事項を理解しておくことが重要である。



図H-1 保全PDCAサイクル

2.1 保全活動に投じる資源

まず保全活動を開始するに当たって、ヒト、モノ、カネ、情報／時間等の資源を必要かつ十

分に確保できるか確認しておくことは重要である。なぜなら、言うまでもないことであるが、実施しようとしている保全活動に配備できる人材や使用する資機材、それらを調達する資金、そして保全活動を計画するに当たって必要となる情報、時間等の資源が十分でないと、適切な保全計画を立案・実施することができないからである。

実施年度や定検及び機器を特定するといった限定的な視野で保全活動に投じる資源を考慮するのではなく、電気事業者の長期的な経営戦略や運転計画、設備修繕計画など、全体を俯瞰的な視野で見渡し、資源の適正な配分がなされるように計画することが重要である。

2.2 保全の目的

保全は、プラントの安全性と経済性³⁴を同時に維持・向上させようとする行為であるので、その目的は安全性の確保を前提とした経済性の確保・向上であると言える。経済性が確保・向上されればその結果生じた資源（経済的及び人的）を安全性の向上に向けることができ、経済性の確保は安全性の維持・向上にも大きく寄与するといえる。また、経済性の確保・向上のためには保全活動における不必要な無駄を極力省く努力を行うことが前提である。したがって、無駄な保全の計画・実施、無駄な要員や資機材の調達などの不必要な投資を避け、保全遂行能力³⁵を最大に高め、その能力を有する保全実施部隊をプラントの安全性及び経済性に与える影響の大きい（保全重要度の高い）SSC³⁶に優先的に配置すれば、保全の目的を効率的・効果的に達成でき、結果として社会貢献につなげることが可能になる。

ここで、保全の観点から重要な SSC を特定する指標である「保全重要度」について言及するとき、保全の目的（安全性と経済性の確保）を常に意識することが求められることは言うまでもない。そのため、必ずしも SSC の安全性の観点だけではなく、経済的な面も十分に考慮することが必要である。安全重要度と同様に、例えば、ある特定の SSC の保全を行うために必要なプラントの停止期間や保全費用を考慮して経済重要度を定義し、それを指標とすることでプラントの経済性へ与える影響度を考慮して保全計画を立案できると考えられる。保全重要度はこの経済重要度と安全重要度から定義することができよう³⁷。

電気事業者は、保全重要度、すなわち資源を投入する優先度を考慮する場合、単に SSC の安全性（安全系 SSC の故障率低減等）に留まることなく、常に効率的・合理的な手法への改善、保全に係る活動（人が行う計画、作業のエラー防止を含む）の効率向上等の経済性を向上させる努力を継続的に行う必要がある。

2.3 保全品質を決定する要素

³⁴ プラントのレベルでは、運転継続性あるいは稼働率などを意味するが、保全分野においては必要かつ適切な保全を経済的だけでなく時間的にも無駄なく実施することを意味する。

³⁵ 保全を確実かつ迅速に、すなわち安全かつ効率的に実施できる能力のことをここでは保全遂行能力という。

³⁶ SSC: Structures, Systems and Components （“構造物、システム及び機器” のことで、プラントを構成する機械、電気、計測・制御、土木・建築の各設備から成る全てのハードウェアを指す。）

³⁷ この「保全重要度」の具体的な決定方法については「原子力保全ガイドブック（日本保全学会）」第7章「保全工学」を参照するとよい。

保全を実施した後の SSC の健全状態（以下、これを保全品質という。）は何によって決まるであろうか。保全要員の技量がよいと保全を実施した後の SSC の状態はよい状態に収まる可能性が高い。しかし、保全品質を決定するのは、この保全要員の技量だけではなく、他の多くの要素も関わっている。以下にこのことについて述べる。

(1) 保全計画

保全計画は、検査計画と是正計画から成っており（図 H-2）、どの機器を保全対象とするか、どのような方法（検査方法、是正方法）を用いるか、そして、それをいつ実施するか、を定めるものである。したがって、機器の集合体であるプラントの健全性を維持・向上させ、安全性と経済性を確保するには、この計画が適切であり、効率的・効果的であることが必要不可欠である。

ただし、これだけでは機器の状態、プラントの状態を良好に維持することはできない。この保全計画に従って現場作業を高品質に保ちながら適切に実施しなければ、機器の健全状態が得られないのは明白である。現場作業を高品質に保つ方法については、次項で述べる。なお、保

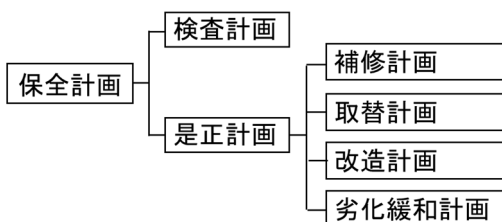


図 H-2 保全計画の構成要素

全計画の立案に当たっては、保全の目的（プラントの安全性と経済性の確保）に大きな影響を与える機器を優先すること、すなわちプラントの設計と経年劣化／故障特性を適切に考慮することが必要である。

(2) 保全を実施する組織

品質の高い現場作業を実施するためには、しっかりした組織が適切に構築されている必要がある（図 H-3）。

そのためには、業務を行う上での仕組みや業務プロセス、法令等を含む社会規程等が適切に整備されていること、その上で組織としての目標や方針、組織と構成員の役割分担、業務への取組み姿勢、使命感などが適切に設定されていることが重要である。

トップマネジメントは明確な保全業務の目標設定を行うとともに職場環境条件を確保するためのコミットメントを明確にし、これを組織全

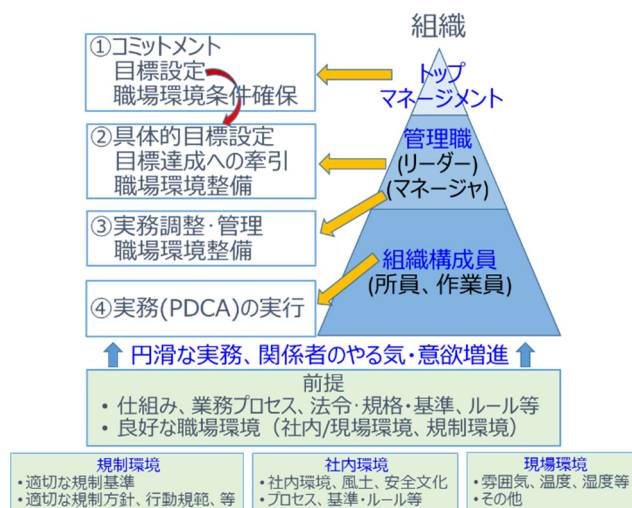


図 H-3 保全の組織と環境

体に伝える。それを受けて管理職であるリーダーはトップマネジメントにより明確にされた目標を達成するために業務に関する具体的目標を設定し、その達成のために組織を牽

引するとともに職場環境の整備を行う。さらにマネージャは現場の所員、作業員等が作業を遂行しやすいように、作業の調整及び管理を行うとともに現場における作業環境を整える。組織構成員は単に技術力だけでなく、組織が効率よく作業するように配慮する能力も必要となる。

このような組織が構築されれば、品質の高い保全が実現される可能性が格段に高くなる。

(3) 保全の環境

保全現場のパフォーマンスが十分に発揮されるには前項の「組織」に加え「環境」が適切に確保されることが前提となる（図 H-3）。

保全の組織がいくらレベルの高い保全現場のパフォーマンスを有していても、保全現場の環境（雰囲気（空気中、ガス中、水中）、温度、湿度、照度、騒音など）が保全要員にとって快適でないと、そのパフォーマンスは低下する。このため、保全要員など保全関係者の力を発揮させるためには作業環境の充実と一定以上の条件の確保が欠かせない。

また、保全現場の物理的な作業環境以外の要素として保全要員の精神状態、健康状態の維持も重要である。このためには、経営方針、安全文化、社内風土・慣習等の社内環境を組織が充実させることの他、原子力規制に直接携わる組織のみならず関係組織が規制当局の作り出す規制環境を良好に保つこと（透明性や客観性、合理性などを確保すること）が重要である。これらが保全関係者に満足感や納得感をもたらすものであれば、保全関係者のやる気や意欲を向上させ、保全遂行能力を向上させることにつながる。

(4) 保全現場の三要素

保全品質は、保全作業の直接的な実施者である保全要員の技量のみで決定されるものではない。どのような手順に従ってどのような点に注意を払い、現場作業を進めるか等を定めた保全作業要領書と使用する資機材（特に特殊工具を含む道工具類や揚重設備等の各種装置など）にも保全品質は大きな影響を受ける。例えば、保全活動の1つである検査の場合、検査作業要領書、検査要員及び検査用資機材（検査装置）の三要素の組合せで検査の性能（傷の検出限界、サイジング精度、見落とし率 POD（信頼性）など）が決まることは周知のとおりである。これと同様に、補修を実施する場合も補修作業要領書、補修要員及び補修用資機材の三要素の組合せで補修の性能（品質）が決まると考えられるので、これら三要素の組合せで補修工法の性能が事前に確認されていることが重要である。このように、検査や補修等を含む保全作業の保全品質を決定する要素は、単に保全要員だけではなく、保全作業要領書と使用資機材を含めた三要素の組合せであると言える。ここで重要なことは、実際の現場ではこれらの三要素の組合せで保全が行われるため、これらの組合せでどのような性能が発揮されるかを事前に確認しておくことが重要である。三要素のそれぞれがいくら高いレベルのものであってもその組合せで発揮される性能が悪ければ意味がないのである。

以上述べたように、検査作業及び補修等の是正措置作業等、各種の保全作業に対し、常日頃より①保全作業要領書、②保全要員及び③使用資機材の保全三要素をそれぞれ維持・向上

させるだけでなく、これら三要素の組合せで保全作業を遂行する能力を維持・向上させることが重要である。この能力を維持・向上させれば、保全が行われた後の機器の集合体であるプラントの健全状態は、徐々に改善されることになる。なお、ここで保全品質を決定するこれら保全現場の三要素、すなわち①保全作業要領書、②保全要員及び③使用資機材の組合せを、保全品質のレベルを決める能力と考えることができることから、「保全遂行能力（図 H-4）」と呼ぶこととし、この用語を用いて以下の説明を行うこととする。

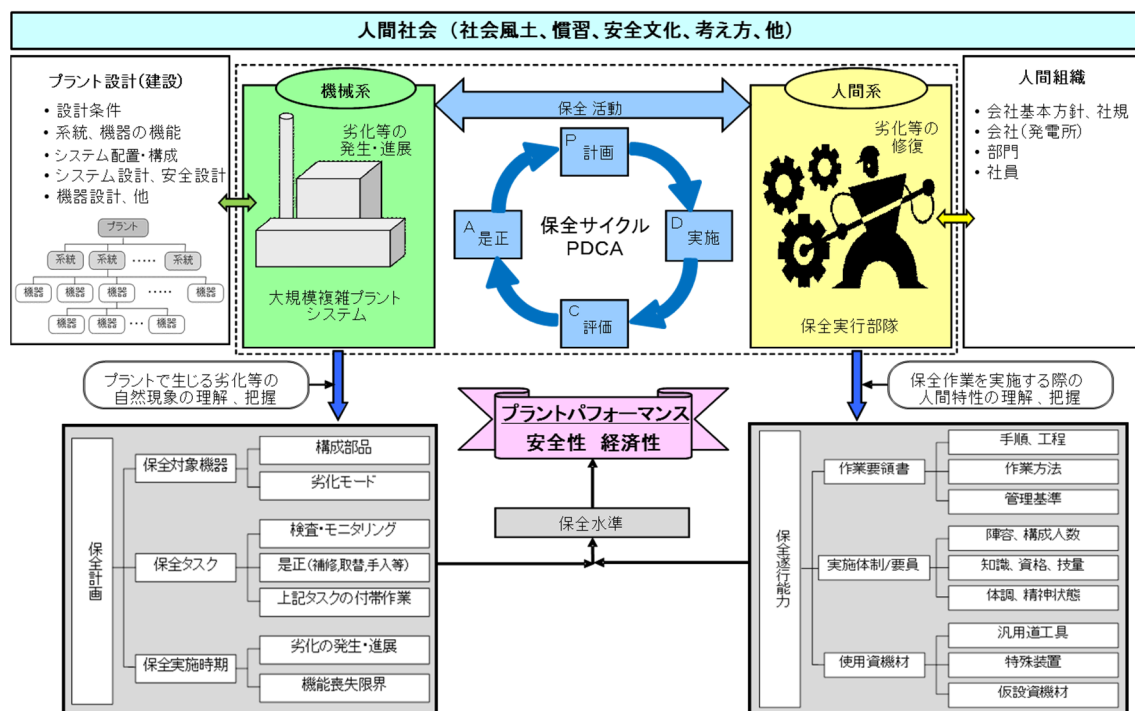


図 H-4 保全の構造と特性

3. 補修管理の基本事項

補修を行うにあたって、現場の作業管理の観点で実施組織として前もって明確にしておく必要がある事項を以下に記載する。

保全活動の重要な活動の一部となる是正措置は機器を直接取り扱う活動であり、そのうち補修作業は機器の原子力安全に影響を及ぼす基本性能を変えずに経年劣化等で低下した部分を修復する手段である。その補修作業を実施するに当たっては、組織的（検査部門、保全部門、発電部門等との関連）、時間的（設計、製造（据付）から過去の点検、補修などとの関連）及び空間的（物理的な配置、系統的な取合い等との関連）な事項の詳細を具体的に特定することが求められる。以下にこれらについて述べる。

3.1 補修の目的

補修とは、最新知見と最新技術を活用して経年劣化等により機器の機能・性能が低下した部分を基準等で求められる運転継続に最低限必要な水準以上に修復する手段（図 H-5）で

あり、補修対象の機器及び当該機器を含む系統の基本特性（力学特性、振動特性、内部流体の流動特性等）を変更しない範囲のものをいう（別紙1参照）。したがって、施工対象の基本特性を変更するような「改造」に当たるものは、その手法が補修を想起させるような外観や構造であっても、それは本ガイドラインでいう「補修」の範囲を逸脱したものである。

上記の理解に基づき、実施しようとする補修は、例えば、ひび割れによって低下した構造強度を修復するものか、低下した水密機能を修復するものなのか、事前にその目的を実施組織として明確にし、その目的を達成するために必要な補修工法の選定、作業計画の立案、設計及び現場のプロセス管理などを適切に行うことが重要である。

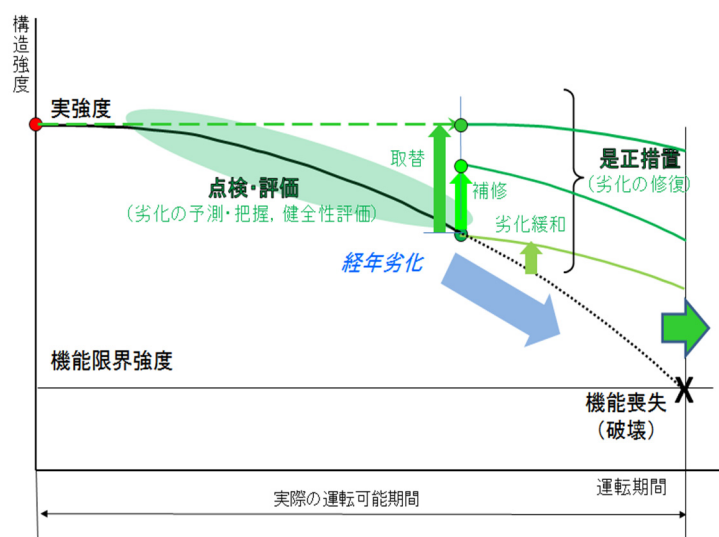


図 H- 5 「補修」の概念

3.2 補修計画の前提

補修を計画するにあたって、制約になりうるものとして考慮すべき前提事項を以下に記載する。特に実施対象部分を中心とした組織的、時間的、空間的に周辺部分も含めた補修作業の全体を認識したうえで、補修対象である当該部分に着目することが重要である。

3.2.1 責任範囲

- (1) 当該補修に関する計画、補修部の設計、検査、施工等の活動の分担（社内及び社外組織との分担）を明確にする。
- (2) 補修部については既設機器及び系統との取合い部分を明確にし、対象外となる部分との関連も把握する。この場合、当該部の補修に伴う周辺部分への影響の有無、もし影響がある場合はその内容及び確認方法なども明確にする。
- (3) 当該補修の責任範囲内の事項及び責任範囲外の事項を明確にする。責任範囲外の事項を明確にすることで活動分担の相手方との間で責任の「抜け」がないことが確認できる。

3.2.2 当該補修の達成目標と補修工法の選択

発電所に設置された機器に対する補修は、建設時（工場で行われる製造時及び発電所への据付時）と異なる環境及び条件のもとで行われるのが通常である。したがって、これを考慮して補修の目標を明確にすることが重要である。

- (1) 対象となる機器に対して当該補修作業を通じて付与すべき機能（劣化回復するものも含む）及びその性能レベルを明確にする。そのためには関連する構成図書（適切な構成管理（コンフィグレーション管理）された当該機器に関する図書（3.3.1 項））を参照し、

当該系統及び機器に対する設計要求としての機能・性能、製造・据付時の機能・性能及び現状の機能・性能等のデータから劣化傾向を把握し、これらの間に相違がある場合はその理由を明らかにし、要求機能を満足する様に補修作業を行うことが重要である。

- (2) また、当該機器に付与すべき機能及びその性能レベル及び「保全重要度」に応じて当該補修を具体的に展開するための補修工法を複数の工法から選択する（4.2.1 項参照）。適切な補修工法とその工法に応じた保全遂行能力が実際の保全現場での原子力安全の水準と保全品質の水準を形成する大きな役割を持つとの認識が重要である。
- (3) さらに、当該補修を実施する時期及び工期を明確にする。

3.2.3 予算

- (1) 中長期設備修繕計画及び当該年度予算との整合を確認の上、当該補修に必要な予算を明確にする。

3.3 適用図書等

3.3.1 構成管理図書

原子力発電所の安全を確保する上でシステム構成管理（コンフィグレーション管理）は極めて重要な活動である。なぜならこの管理は下記①～③の三者間に整合性があることを確認し、それを維持・管理する活動であるからである（図 H-6）。したがって、これら①～③の図書は常に最新の情報が記述されていなければならない。

(1) 設計要件

安全性を確保するために必要な要求事項を明確に記載した図書（規制文書、規格・基準、要求仕様等）

(2) 設備構成情報

上記①の要求を満たす機器の仕様等を明確にした図書（設計、試験・検査、運転・保全情報 等）

(3) 物理構成

実際に現場にあるハードウェアのシステム構成及び機器そのもの並びにその劣化及び健全性の状態を示す図書又は情報

補修を実施する場合は、電気事業者が構成管理のために作成した構成管理図書を用いて事前確認する必要がある。特に、機器の補修を実施する場合は、通常、当該機器を系統から機械的、電氣的に隔離（アイソレーション）、すなわちプラント運転時のシステム構成と異なる構成に変更して行うことになる。そのため、事前に所定の手続きに従って関係者と調整の

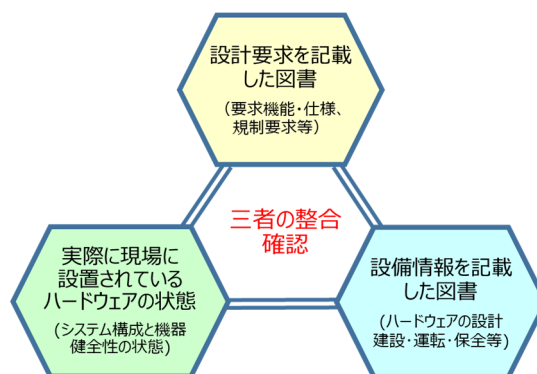


図 H-6 システム構成管理の基本

上、本来のシステム構成を変更し、それを管理することが重要である。

3.3.2 過去の保全に関する履歴

過去の補修履歴（記録を含む）が補修対象機器の現在の物理構成と合致していることを確認する。

3.4 適用規格・基準

3.4.1 適用規格・基準及び年版

- (1) 関連する構成図書に従って、当該補修に適用する規格・基準及び年版を明確にする。建設時のものと異なる可能性もあるので、要求レベルの変化に注意する必要がある。
- (2) 建設時のものと異なる場合は、その適用に関する取扱いを明確にする。特に、周辺部分への適用規格・基準が当該部のものと異なる場合は、周辺部分への影響に注意する必要がある。

3.4.2 準用する規格・基準と年版

- (1) 当該部の補修に対して直接適用する規格・基準ではないが、それを準用する場合がある。
関連する構成図書に従って準用する規格・基準及び年版を明確にし、その解釈（程度、方法等）を確認することが重要である。

4. 補修作業前の確認事項

現場で補修を実施するにあたって、事前に確認する必要のある事項を以下に記載する。特に3章の前提が整っていることを現場で自ら確認することが重要である。

4.1 補修対象

4.1.1 補修対象の機器及び系統

補修活動の前提条件として、以下の事項を把握し、補修対象の機器がどのようなものであるかを確認する。特に、補修対象の機器が、建設・据付け時からどのように異なっており、補修作業に対してどのように影響するかを認識する。

(1) 対象部位の特定

対象部位を特定する。事前に関係者に確認したり、必要に応じて関係者とともに現場確認を行ったりすることにより、間違いなく対象部位を特定する方法を確認することが重要である。

(2) 設備区分

補修対象機器の重要度分類、機器クラス等の設備区分を特定する。

(3) 既設の系統・機器との境界

補修対象機器と隣接する他機器との境界、及び補修対象機器が属する系統と隣接する他系統との境界を特定するとともに、プラントシステム全体の中で当該機器がなぜこの仕様となっているかを把握する。

(4)設計条件

上記 3.3 の適用図書等により、補修対象の機器の設計（原子炉安全上の役割とそれを達成するためにどのような機能・性能を付与されているか）及びその建設時からの変更（改造又は設計条件の変更）を理解し、補修作業が原子炉安全にどのようにかわるかを理解する。この場合、補修時の現場の環境や作業条件（スペース、位置、向き、アクセス性、放射線量率、温湿度等）に、どのような制約があるかを確認することが重要である。

(5)機能・性能

上記 3.3 の適用図書等により、補修対象の機器に必要な性能（ポンプの吐出性能等）を理解し、当該機器がなぜこの性能が要求されるのか、また、建設当初はどのように検査され、その性能が確認されたかについても把握する。また、運開以降今までの保全はどのように行われ、その結果、必要な性能が保持されているかを把握するとともに、性能劣化状態（劣化事象及びその程度）を定量的に把握するとともに、当初予測した劣化進展と現在の劣化状態との差異を把握する。さらに補修対象の機器の現状性能が隣接する他系統との間でバランスが保たれているかを確認する。

(6)材料、構造、表面状態等

上記 3.3 の適用図書等により、補修対象の機器の材料、構造、表面状態等を理解し、当該の機器がなぜこの材料及び構造となっているか、また、製造時はどのように製作され、検査されたかについても把握する。また、運開後今までの保全はどのように行われ、その結果、材料、構造、表面状態等がどのような状態になっているかを把握する。さらに劣化状態（劣化事象及びその程度）を定量的に把握するとともに、当初予測した劣化進展と現在の劣化状態との差異を把握する。なお、劣化状態には機器表面の外観上の劣化、材料特性の劣化及び亀裂、減肉、摩耗、腐食等の構造的劣化を含む。

4.1.2 環境条件

4.1.1 項同様、補修作業の前提条件として、以下の事項について把握し、上記 3 章の適用図書と併せて、補修対象の機器が置かれた条件を理解し、補修作業における制約を理解する。ここでは当該機器のおかれた環境条件が、建設時の製造及び据付け作業における現場の環境などの条件と大きく異なることを認識する。

(1)設置位置

対象部位の設置位置を把握し、適用図書と当該機器の設置位置が合っていることを確認する。

(2)周辺の空間制限

補修対象の機器の補修にあたって、補修の方法を選択する際に対象部位への接近性等の物理的空間が正確に把握されていない場合、補修作業員の作業場所への接近、補修機材の搬出入、取り付け及び作動確認等への障害が生じ、計画通りの補修品質が確保されず、また時間制限内で作業を完了することができない可能性が生じる。そのため、対象部位の高さ、周辺の保温の設置状況、支持構造物等の取り付け状況等の空間的状态について適用図書と当該

の機器の状態が合っていることを現場で確認するとともに、狭い箇所、干渉物がないかなどの空間的制限を把握する。

(3) 作業空間の環境

(気中)

補修対象の機器の補修にあたって、対象部位付近の環境が正確に把握されていない場合、換気・空調、放射線防護対策、防火対策等が不十分であると酸欠、被ばく、火災発生等により補修作業員の活動、補修機材の作動等への障害が生じ、計画通りの補修品質が確保されないことになる。そのため、温度、湿度、放射線（空中及び表面）、ダスト、気質・ガス（作業に影響する成分かどうか、発生の可能性の有無の確認を含む）、作業場所（閉所かどうか等）等を確認する。

(水中)

温度、圧力（水深）、放射線（水中及び表面）、水質（成分）、透明度、流速等を確認する。

(4) 対象部位の隔離方法

適用図書並びに上記(1)及び(2)に基づいて対象部位に対して必要となる隔離方法を確認するとともに、作業中にわたって隔離されることを確認する。

4.2 補修の方法

4.2.1 補修工法の選定

(1) 補修工法の選定にあたって考慮すべき事項

4.1 項の補修対象とその設置された環境を把握したうえで、目的達成のために採りうる工法のうち次の事項を考慮して最適な補修工法を選定する必要がある。

適用範囲：その工法の適用範囲について、補修対象と補修の条件への適合性を確認する。

有効性：現場に適用する保全遂行能力（補修作業要領書、補修作業要員、補修装置等の使用資機材）と同じ保全遂行能力を適用して目標とする機能・性能が確実に達成されることを事前に確認する。

信頼性：補修を支配する要因（パラメータ）に関するブレ、あるいは外乱に対する脆弱性を確認する。

耐久性（効果の持続性）：補修工法の耐久性は、当該部の補修後の検査計画（検査方法、頻度）に大きな影響を与えるため、事前に耐久性（持続性）を確認する。

実績：その工法がすでに同様の部位に対して、また同様の環境において適用され、有効性の実証されていることを確認する。

上記の有効性、信頼性、耐久性及び実績を踏まえ、適用する工法に応じて必要な特性を明確にし、これらの特性の変化をデータとして取得し傾向を把握する手段を講ずるのが望ましい。

また、選定する補修工法によって施工環境条件や工期等が異なり、その結果、補修を実施する時期が変わるため、以下の事項についても十分考慮する必要がある。

検査・評価の保守性及び不確定性：検査時点での経年劣化が運転再開後の時間経過とともに

に、どのように進展するかを予測評価する精度は、検査技術の精度と評価技術の精度の組合せで決まる。したがって、両技術の組合せの精度があまり良くない場合は、十分な余裕を確保して補修時期を決定する必要がある。十分な精度がある場合は過大な保守性を確保することにならないように注意する必要がある。このように、補修時期を決定するに当たっては、適切な保守性を確保するため、検査・評価の保守性及び不確定性を確認しておく必要がある。

補修に要する時間：当該部位に適用する場合の準備・作業・後処理の時間（短期間での補修か／時間的制約が比較的少ない補修か）を考慮する。

損傷（漏えい）の程度：補修の範囲の特定や補修の保守性を見込むために損傷の程度及びその進行の程度を把握する。

プラントに求められるパフォーマンス：電力供給が逼迫している場合等、短期間で復旧が必要な場合など、補修を実施する際のプラントの状態（運転中、定検中、発電量に対する達成目標等）を考慮し適切な対応となるよう配慮する。

(2) 採用する補修工法の効果の事前確認

補修工法がどのような機器（重要度、材質、構造等）の、どのような条件範囲（圧力、温度等）に対して適用できるか、またその効果（対策性、持続性等）はどの程度得られるのか、モックアップ試験、確証試験等を事前に行い、確認する必要がある。モックアップ試験、確証試験等を行う場合は、試験の事前に補修前検査（6.2 節）を実施することもある。また、実績や施工の信頼性（バラツキ）等を確認する必要がある。

補修工法は、既存のものに満足することなく、有効性や信頼性、効率性の更なる向上を目指して改善するとともに、現場での作業効率を向上させ、確実かつ迅速な作業の実現を図るため、現場作業方法の改善を検討する姿勢が必要である。

(3) 補修後の隣接する他機器や系統への影響の事前確認

採用した補修工法により対象とする機器の構造や性能が変わる場合、隣接する他機器あるいは系統への影響を確認する必要がある。また、工法によっては、適用する際の振動など、工法自体が隣接する他の機器及び系統への影響を及ぼすこともあるので注意する姿勢が必要である。

4.2.2 適切な補修遂行能力の配備

認識された対象となる機器の機能・性能、材料、表面状態等の現状（4.1.1 項）及び当該機器がおかれた干渉物、狭あい性等の空間制限や作業空間の環境の現状（4.1.2 項）及びこれらも考慮して選択された補修工法（4.1.2 項）とともに、次の 3 要素から成る「補修遂行能力」が補修後の当該部の品質を決定する（図 H-7）。したがって、補修対象の重要度に応じて適切な補修を実行できる補修遂行能力を事前に確認のうえ配備（必要あれば強化）し、現場作業に当たる必要がある。

(1) 補修作業要領書

補修作業要領書は、補修の現場にある対象機器と一定の補修遂行能力（補修作業要領書、補修作業要員、使用資機材）を持った補修実行部隊が、現場作業環境の中、補修作業を時間軸に沿って進め、完了させるという補修作業のシミュレーションを要領書の中に展開したものと考えることができる。いわゆる仮想現実を要領書の中に作り上げることを意味する。このシミュレーションを念入りに行い、確実かつ迅速に（あるいは効果的かつ効率的に）補修作業を実施できるように要領書の中に書き込むことが最重要課題である。また、補修作業の手順や方法、使用資機材などは、自社はもちろんのこと、他社や他プラント、他産業においても時代とともに新しい考え方や技術が導入され、改善される。補修作業要員も世代交代などで常に変動している。したがって、それらの動向を常に反映し要領書を見直す努力が必要である。

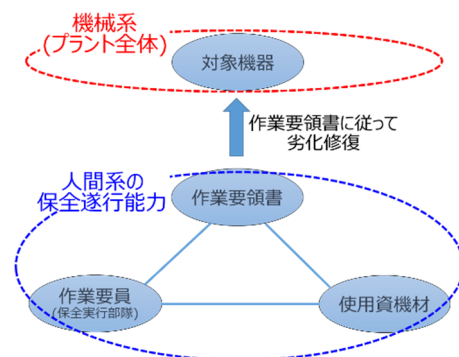


図 H-7 作業現場を構成する主要要素

このような考え方にに基づき、これを補修作業に展開する場合、保全重要度に応じ、補修対象に関する条件（3章及び4.1節）のもとで最高の補修品質が得られるように補修作業要領書を策定する。この場合当該補修の重要度に応じて、検証程度も考慮して適切な工法を選定（4.2.1項）することが重要である。

（2）補修作業の実施体制（補修作業要員）

作業要員の能力（技量や知識、経験等）によって得られる保全品質や作業効率は格段に異なることは周知の事実である。複数の作業員が集まって構成された作業班の能力は構成員の間の相性等によっても大きく異なる場合がある。また、人事異動等によって構成員が変わり、作業班全体の能力が変動することもあり得る。これらを常に意識した管理が求められる。

保全重要度に見合った保守遂行能力を有する作業班が配備されていることを確認する。当該補修に求められる技量レベルの認定条件も考慮して適切な作業員で班を構成することが重要である。なお、技量の認定を考慮する場合には公的資格を優先させ、公的資格がない場合は社内資格を考慮するとよい。

（3）補修作業に用いる資機材

補修作業に用いる特殊な補修装置の他、使用する揚重設備等の諸設備（ユーティリティ）や一般道工具類などによって作業のパフォーマンス（確実性と迅速性、あるいは得られる保全品質と効率性）が大きく変わる。このことを常に意識した管理が求められる。

保全重要度に見合った資機材が準備されていることを確認する。当該補修に求められる性能レベルの認定条件も考慮して適切な資機材を適用することが重要である。

4.3 補修実施時期

検査時点での経年劣化が運転再開後の時間経過とともに、どのように進展するかを予測

評価する精度は、検査技術の精度と評価技術の精度の組合せで決まる。したがって、両技術の組合せの精度があまり良くない場合は、十分な余裕を確保して補修時期を決定する必要がある。十分な精度がある場合は過大な保守性を確保することにならないように注意する必要がある。このように、補修時期を決定するに当たっては、適切な保守性を確保するため、検査・評価の保守性及び不確定性を確認しておく必要がある。なお、実際に補修を実施する段階で検査技術と評価技術の精度を検証できるデータを実機から採取できる場合は、できるだけデータを採取し両技術の精度を評価するとともに、両技術を改良することが望ましい。

5. 補修作業の実施計画の立案（補修作業要領書の作成）

保全計画を現場で実施する段階では、事前に (i) どのような手順と方法で作業を行い、どのようなプロセス管理（作業手順・方法の管理だけでなく、QA/QC 等の各種管理³⁸を含む。）を行うのか、(ii) そのような手順と方法で補修をいつ、どの程度の期間を費やして実施するのか（すなわち、作業工程をどのようにするのか）、(iii) その工程に合わせて作業要員と使用資機材をどの程度調達するか、(iv) 作業効率に大きな影響を及ぼす環境、働きやすい環境を整備するための手段も明確にする等、いわゆる作業要領書（ここでは補修作業要領書）を作成する必要がある。

これら(i)～(iv)は全て最終的な保全費用に直接跳ね返ってくる内容であるので、調達する保全リソース（保全要員、使用資機材）を勘案し、それぞれの内容を調整することによって保全費用が最小となるように計画する（図 H-8）。ただし、通常は最初に(ii)の実施時期と期間が与えられ、これに合わせて(i)保全手順・方法、(iii)保全体制（保全要員）と使用資機材を調達し、保全費用が最小となるように計画することになる。保全の目的

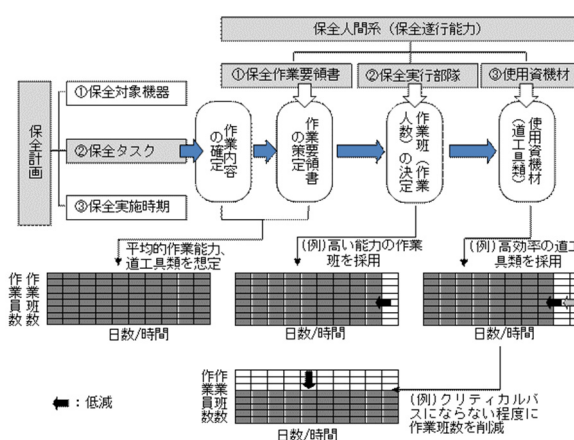


図 H-8 保全作業コスト低減の考え方

は、安全性と経済性の確保、すなわち確実（安全性確保）かつ迅速（効率性確保）に保全を行うことである。上記の(i)～(iv)を明確にした後、すべての費用を積算し予算内に入ること、あるいは予算内に入るよう計画できていることを確認する必要がある。

当該補修作業要領書は、第 3 章及び第 4 章の内容に沿って、当該補修に適切なグレード（程度／重要度）の補修が適切なコストで行えるよう効率性を考慮しながら、次に示す事項を調整し策定する必要がある。また、前提として 4.1 及び 4.2 節の内容（補修対象及び補修

³⁸ 品質保証/品質管理（Quality Assurance/Quality Control）、放射線管理（Health Physics）、労働安全衛生管理（Occupational Health and Safety Risk Management）、異物混入管理など

の方法)が確認されていることが必要である。

5.1 補修作業計画

発電所の設備修繕計画に合致した補修を実施するにあたっては確実・迅速な補修が行えるよう次のような作業計画を策定することが重要である。

5.1.1 補修方法の選定

採用した補修方法が当該部位の補修目的に応じた内容となるよう計画する。特に補修を行う前提となった検査・評価の信頼性、システムが置かれた状態(定検中、運転中、トラブルによる停止)、補修に与えられた時間的余裕、補修方法の信頼性、時間的有効性(比較的長期間にわたり追加の是正措置が不要な補修か、暫定的な補修)等を考慮して計画することが重要である。また、補修後の保全(検査方法、頻度など)に対する負荷は補修前よりも省力化されるかについても考慮が必要である。

さらに、補修のリスクを低減のための配慮が必要であり、計画(施工パラメータの計画範囲も含む)からの逸脱があった場合の措置も考慮しておくとともに、経験の少ない補修作業を行うなどの場合、必要に応じて確性試験³⁹の実施及びモックアップを用いたトレーニングを作業計画に含め、リスクの低減をはかることも重要である。

5.1.2 試験検査計画の立案

補修前には、建設段階からそれまでに実施した保全活動(検査、補修等)の結果を把握した上で、実際に対象機器の状態(経年劣化状態や補修対象部位の表面状態など)を確認するため、事前に検査を実施する必要がある。この検査は計画した補修作業が計画通りに実施できるかを確認するうえで重要である。

また、補修後の検査は当該補修部の品質を定義し、次回以降の保守作業へのインプットとなる観点で重要である。特に補修後の検査結果は補修後の保全計画(特に検査計画)へ反映するとの認識が必要である。また、当該部位の物理構成に変化を与える可能性があるとの認識が必要であり、物理構成に変化を与えるかどうか補修後検査を行い、必要な場合には補修後の検査を供用前検査と位置づけ、記録等構成管理図書に反映する必要がある。

試験検査計画を策定する場合は、次の項目に関して必要な要件を明確にする必要がある。

(1) 試験方法

(試験方法に関する要件の例)

- ・適用する試験の種類(VT、PT/MT、RT/UT等)
- ・試験範囲(対象部位の母材、開先部等の試験範囲を含む)
- ・試験時期

(2) 試験手順

³⁹ 我国の原子力界では、1974年から45年以上の長きにわたって(一財)発電設備技術検査協会によって「確性試験」が実施されてきた。この試験は原子力発電所の規制対象設備へ適用する新技術等が技術基準に適合するか技術的に判断するために重要な役割を果たしてきた。

(確認事項を含む試験手順に関する要件の例)

- ・適用する試験の実施順序
- ・試験実施前の確認内容

(3) 試験及び試験員

(試験及び試験員に関する要件の例)

- ・必要とする公的資格又は社内資格とそのレベル
- ・必要であれば、これら要員の認証に関する要件

(4) 耐圧試験

(耐圧試験に関する要件の例)

- ・適用する試験の種類（耐圧試験、漏えい確認試験等）
- ・漏洩等の確認方法

(5) 機能確認試験

(機能確認試験に関する要件の例)

- ・適用する試験の種類
- ・機能の確認方法

(6) 試験結果の評価

(試験結果の評価に関する要件の例)

- ・試験項目に関する評価の方法
- ・合格（判定）基準
- ・試験の結果、基準に適合しない場合には作業計画を見直すといった必要となる可能性のある措置及びその判断方法

(7) 補修後検査の結果、必要となる可能性のある措置及びその評価方法

(可能性のある措置の例)

- ・手直し溶接
- ・再溶接
- ・点検時期の変更等保全計画の見直し

5.2 補修作業工程

5.1 節で述べた補修作業計画の概要が明確になったら、おおよその作業工程を暫定的に決めることが重要である。これを決めないと、次に述べる 5.3 節～5.6 節の内容の検討を開始し詰めていくことが難しい。なぜなら、5.3 節～5.6 節の内容は、作業工程に合わせ、それを満足するような内容に詰めていくのが効率的だからである。例えば、作業工程が成立するように実施体制（職種、要員数、作業班数、管理体制等）や使用資機材を確保しその時期に合わせて現場配備できるように調達する。これらの検討の概略が決まった段階で、最初に戻って作業工程を必要に応じて微調整し、最終決定する。このように作業工程を決定することは、実施計画の主要事項に大きな影響を与え、保全費用に直接影響する決定的な因子であると言っても過言ではない。

補修作業は計画的に補修を実施する場合とトラブル対応として緊急実施する場合で工程を立案する考え方が異なる。計画的に補修を実施する場合は、通常、実施時期と工事期間が予め与えられ、その条件内で最適な工程（確実に補修ができ、低コストの工程）を立案するという手順となる。緊急実施する場合は、通常、発見と同時にすぐに補修を実施するための検討を開始しできるだけ短期間で補修を完了するように工程を立案するという手順となる。工程優先の検討である。したがって、この場合、コストは補修作業が目標の工程範囲内に入るようにした結果として決まるが、できるだけ低減努力をすることは言うまでもない。

5.3 補修要員配置計画

補修対象機器の保全重要度に見合った保全遂行能力（補修作業要領書、補修要員、補修装置等の使用資機材）を調達し配備する計画を立案する。このとき、特に補修後の機器の状態（保全品質）に直接影響する補修の本作業に対しては、補修作業要領書、補修要員、補修装置等の使用資機材という三者の組合せで事前にトレーニング等により保全遂行能力が確認され、評価された要員を配備することが重要である。補修の付帯作業については、二次的な問題である。

5.4 補修資機材調達計画

補修対象機器の保全重要度に見合った資機材を調達し配備する計画を立案する。このとき、特に補修後の機器状態（保全品質）に直接影響する補修装置（溶接機等の特殊装置）は、補修作業要領書、補修要員、補修装置等の使用資機材という三者の組合せで事前にトレーニング等により保全遂行能力が確認され、評価された資機材を配備することが重要である。その他の一般工具や仮設資機材等については、二次的な問題である。

5.5 適切な補修作業環境の整備

補修作業の現場環境を良好に保つことは、補修後の機器状態（保全品質）だけでなく、作業効率も向上させ、結果として保全費用を抑制することにつながる可能性がある。このため、下記を適切に整備することが重要である。炉安全、経年劣化の観点からやむを得ない場合は水中補修作業となるが、この場合でも対象部の品質を維持するために水中補修作業の環境に留意する必要がある。

(1) 物理的作業環境の整備

- ① スペース確保（狭隘部対策）
- ② 足場
- ③ 温湿度
- ④ 照明管理
- ⑤ 高所対策
- ⑥ 酸欠対策
- ⑦ 火災対策（溶接、可燃物）
- ⑧ 異物混入防止対策

⑨ 水中環境整備（水質及び透明度の確保等）

⑩ その他

(2) 放射線環境の整備

① 外部被ばく対策（除染、遮へい、離隔距離制限等による放射線量率低減）

② 内部被ばく対策（マスク（要否・種類）等による放射性ダスト発生・抑制）

5.6 適切なデータ取得計画

補修作業を実施する前後で各種のデータを取得することが重要である。データは NDE 等の試験の判定結果としての合否だけでなく、むしろ定量的なデータ（対象によっては映像データも含む）が重要である。補修対象部位についての NDE など材料、構造、表面状態等に関する定量データ及びポンプ吐出特性など機能・性能に関する定量データの取得が重要である。また、補修工法については、溶接施工法の確認事項としてコントロールすべきパラメータなど、補修工法の性能を支配するパラメータに関する定量データである。これらのデータは対象部位の性能（劣化を含む）の変化を補修後も経年的に把握し、例えばデータを利用したリスク評価等を通じて、保全計画にフィードバックしていくうえで重要である。さらに、将来 AI 等の技術進捗に伴い、高度な保全を行っていく際にもこれらのデータは必須となるとの意識が重要である。

5.7 その他の管理計画

補修作業計画に沿った次の計画書又は要領書が策定されていることを確認すること。

(1) QA/QC 管理

(2) 異物混入防止管理

(3) 労働安全管理

(4) 放射線管理

(5) その他

6. 補修作業の実施

前 5 章の計画に従って現場で補修作業を実施する段階である。以下に具体的な補修作業の 1 つひとつについて述べる。

現場で補修作業を開始する前に対象機器が電氣的、機械的に当該系統から切り離されていること、すなわち遮断器を「断」とすること等によって電氣的に、前後弁を「閉」とすること等によって機械的に隔離されていることの確認が重要である。この行為は通常「アイソレーション（隔離）」と呼ばれ、これを怠ると、作業員の命が奪われる結果につながるがあるので、厳重な注意が必要である。

また、補修作業のすべてのプロセスを通じて、識別管理等により追跡可能性（トレーサビリティ）が確立されていることが重要である。補修作業に使用する計測機器については計測管理が行われていることが必要である。

なお、本章では溶接による補修の場合を記載し、必要に応じて溶接以外の補修の場合を追記する。

6.1 作業環境整備

作業に必要なスペースを確保し、他工事と混在しないように区分を明確にするために作業エリアを設定するとともに、当該エリアの養生を実施する。このとき、5.5 節で述べた観点から作業環境を整備することが、作業を確実かつ迅速効率的に実施する上で重要であり、必要不可欠であり、5.5 節に示された項目が整備されていることを作業前に確認する必要がある。

6.2 補修前検査

作業にあたっては、5.1 節の試験検査計画に沿って試験検査を確実に実施することが必要である。試験の結果、合格基準に適合しない等何らかの措置が必要になった場合、後段の 6.3 補修作業への影響の有無も考慮し、必要に応じて補修作業計画に遡ることもあるとの認識が必要である。

6.3 補修作業

補修溶接作業は、補修後の当該部位の目標とする品質を作りこみ、確保するために重要な作業である。作業にあたっては、5.1 節の補修作業計画に沿って確実に実施することが必要である。特に溶接補修の場合、溶接施工法で認められている確認項目の幅と実施工条件との関係を意識して溶接を実施し、確認項目範囲の逸脱等必要あれば実施工段階の途中で（試験等により）確認するなどの考慮が必要である。さらに補修作業計画からの逸脱が生じた場合の措置（計画の変更を含む）についてもあらかじめ確立しておき、作業に伴うリスクの低減をはかることが必要である。

6.3.1 資材の準備等

以下の準備をする（以下に限定しない）。

- (1) 資材（補修用材料、溶接材料及び副資材）
- (2) 機材（溶接機）
- (3) 関連設備準備（仮設空調設備、仮設電源、照明、工事用空気、工事用水）

6.3.2 溶接

次の事項を管理しつつ対象部位の溶接を実施する。

- (1) 適用規格・基準
- (2) 施工法確認試験（施工法確認試験で特定した施工条件）
- (3) 溶接材料
- (4) 溶接装置
- (5) 溶接士技能確認
- (6) 実機施工前確認試験
- (7) 実機施工管理（開先加工、溶接施工、溶接後熱処理（必要あれば）、溶接後溶接部手入

れ等)

(8) 溶接記録

6.4 補修後検査

作業にあたっては、5.1 章の試験検査計画に沿って確実に実施することが必要である。試験の結果、手直し溶接又は再溶接の実施等何らかの措置が必要になった場合、後段の 6.3 補修作業への影響の有無も考慮し、必要に応じて補修計画に遡ることもあるとの認識が必要である。また、補修後検査の結果、点検時期が計画より短くなる等、規格・基準要求及び保全計画に合致しない結果となった場合、その後の措置（原因分析、機器仕様、保全計画等への反映など）を明確にし、必要な図書に反映する必要がある（7 章参照）。

6.5 補修後の確認

補修後、現場で次に示す事項を確認したうえで補修を完了することが重要である。

(1) 計画通りに作業が実施できたかの確認

実補修作業での管理状況（6.3.2 項）を照合し、補修作業が作業計画通りに実施されたことを確認するとともに、補修後検査結果が検査要求を満足しているかの判定を行う。検査結果が検査要求を満足しなかった場合又は補修作業が作業計画通りに行われなかった場合には、これらのギャップが生じた原因を検討し、その後の措置（再補修、その後の補修作業計画へのフィードバック、将来の保全計画へのフィードバック等）のための情報として活用することが重要である。さらに補修作業が作業計画通りに行われ、検査結果が検査要求を満足した場合でも将来の補修計画又は保全計画の改善となる要素がないか検討することが望ましい。

(2) 当該部位のデータ取得の確認

5.6 節で計画したデータが適切に取得されているか確認する。対象部位の特性データ（映像データを含む定量データ）が適切に取得されていない場合は、将来の劣化傾向等の特性変化の把握の精度が悪くなる等将来の保全計画への悪影響が生じることから、これらのデータの取得は重要である。また、補修工法パラメータに関する定量データが得られない場合は補修工法の性能向上、効率化等補修工法改善への障害となるとの認識が必要である。さらに、将来これらのデータベースの拡充により対象部位の目標とする性能、特性に合わせて工法パラメータを制御できる可能性もあるとの認識も重要になってくる。

(3) アイソレーション（隔離）の解除の確認

当該補修部位に対するシステム、系統からのアイソレーションを解除し、当該機器及び属する系統を確立し、後段の定検等停止時作業への支障がないようにする必要がある。さらに復旧した後は補修対象部の補修中の現場の環境には戻れないため、再補修や追加補修はできないことを認識しておくことが重要である。この観点からアイソレーションの解除の確認を確実に行うことが重要である。

(4) 物理構成への影響の確認

6.2～6.4 節の補修作業の結果、当該システム又は機器（ハードウェアそのもの、物理構成）に影響を及ぼす事柄が生じているかを確認する必要がある。この物理構成を含む構成管理が的確に行われていることで、今後の保全計画は適切に策定されるため、補修作業の物理構成への影響の確認は重要である。物理構成への影響は 6.2～6.4 節の補修作業プロセスを通じて得られた追跡可能な記録等により行われることを認識する必要がある。

(5) 復旧までの残作業の確認

動的機器などは系統が確立したのちに性能確認などの作業があること念頭に置いておく必要がある。補修作業の結果がシステムの運転により初めて適切であったかの評価が得られる場合もあるため、補修作業が後段の作業にどのような影響を及ぼす可能性があるかを認識し、後段の作業への影響がないようにする注意が重要である。

6.6 後片付け

補修作業が完了し、補修後の確認が終わったら後片付けを実施する。当該機器の機能が復旧した後で、治具の取り外しや、補修作業に伴って付随的に行った作業をもとの状態に戻す必要がある。不適切な後片付けが当該の機器又はシステムの適切な運転あるいは物理構成への影響を及ぼす可能性があることを認識することが重要である。また、使用した工具などの復旧も異物混入防止管理の観点で自己の責任として確実に行う意識が重要である。

7. 補修後の措置

7.1 保全計画への反映

7.1.1 検査計画への反映

補修の結果、次回以降の検査に影響する事項を検査計画に反映する。

（例）

- ・ 検査時期
- ・ 検査範囲
- ・ 検査程度

7.1.2 補修計画への反映

補修の結果、次回以降の補修に影響する事項を補修計画に反映する。

（例）

- ・ 補修設計
- ・ 補修方法

7.1.3 保全活動のために引継ぐ情報

補修の結果、特に暫定措置などを選択した場合、後段の保全活動のために引き継ぐ情報を明確にし、長期保全計画等の適切な図書に反映する。

7.2 補修記録及び図書の作成並びに保管

7.2.1 施工報告書・記録

補修の結果をまとめた施工報告書を作成し保管する。ここには補修の施工記録も含む。当初計画された施工からどの程度変更になったか、またその原因を定量的なデータ（画像データを含む）として記録に残すことが今後の補修作業に対して重要である。

7.2.2 構成図書への反映

補修の結果、必要となる事項をシステム構成（コンフィグレーション管理）に従って構成図書に反映する。構成図書は経年的なトレンド傾向が把握できるよう定量的なデータを含める必要がある。

以上

保全活動における是正措置の区分（本ガイドラインでの考え方）

原子力発電所を構成する SSC に是正措置を加える場合、その方法によって「補修」、「取替」、「改造」、「劣化緩和」に区分されるが、本ガイドラインでは原子力安全への本質的な影響という純粋に技術的観点から、これらを下記のように定義する。ここで、「原子力安全への本質的な影響」とは、・・・（その是正措置を行った結果、対象部位（機器）の機能喪失がレベルⅢ以上の事象に直接関係するような事象を引き起こす可能性が考えられることになること？）

現状の規制では、原子力安全への影響を及ぼすような SSC の基本特性（機能・性能）の変更の有無にかかわらず、審査対象図書の記載内容などの認可の前提となる事項からの変更があるものは、形式的なものであっても一律規制当局による審査の対象になる。しかしここでは、原子力安全に関しては電気事業者が一義的責任を有するとの前提のもとに、規制当局が主体的に行う安全審査では原子力安全の観点でより重要な事項に規制資源の有効活用を図るべきであり、これは本来の原子力安全重視の精神に沿うものとする。したがって原子力安全に本質的に影響を与えるようなものでない事項は、安全審査段階まで遡って評価をし直す必要がなく、システム構成（コンフィグレーション）管理を確実に行う前提のもとに、電気事業者の責任で材料、構造等のチェックを実施し、都度の許認可を省き、電気事業者の責任で材料、構造等のチェックを実施すればよいとの考えで区分し定義する。

このため、現状の法的手続きや日本機械学会の「維持規格」における定義とは異なる。例えば 304 系オーステナイト系ステンレス鋼管を同種となる 316L 系のものに変えるような材料記号が変わる変更であってもその強度の変更が原子力安全に本質的に影響を与えるような（例えば材料変更で強度の低下が大きくなる、配管ルート変更で耐震性が大きく低下する等により、配管の損傷に対する許容基準に大きく近づくような）ものでない場合は、ここでは「取替」として安全審査段階まで遡って評価をし直す必要がなく、電気事業者の責任で材料、構造等のチェックを実施すればよいとの考えである。

- ① 補修：SSC の機能・性能が経年劣化等により低下した部分を修復する手段。＜原子力安全に影響を及ぼす基本特性（例えば機器の構造強度特性や内部流体の流動特性）が変化するものは除く＞。

解説：

機能・性能という機器の基本特性を変更するものではないので、安全審査段階まで遡って評価する必要がない作業であり、電気事業者が単に材料、構造、施工等をチェックすればよいと考えるものである。

- ② 取替：同等の機能・性能を有する SSC に入れ替える手段。＜原子力安全に影響を及ぼす機器の構造強度特性が変化するものは除く＞。

解説：

原子力安全に影響を及ぼすような機能・性能を変更して SSC を入れ替える場合は、ここでは「取替」には該当せず「改造」と考える。取り替える SSC の構造強度特性が従来のものから変化し、これが原子力安全に影響を及ぼすような機能・性能の変更となる場合には、単なる取替ではなく原子力安全の観点からはここでいう「改造」として、本質的に安全審査段階まで遡って評価すべきものである。

一方、原子力安全に関しては電気事業者が一義的責任を有するとの前提のもとに、安全審査では原子力安全により重要な事項にリソースをかけるべきとの考えである。

- ③ 改造：SSC の全て又は一部を入れ替え、当該 SSC の機能・性能が変わる手段。＜原子力安全に影響を及ぼす基本特性（例えば機器の構造強度特性や内部流体の流動特性）が大幅に変化するものが該当する。＞

解説：

原子力安全に影響を及ぼす対象 SSC あるいは系統の基本特性が大幅に変わる変更は、それまでの設計に関する安全審査ではカバーされていないと考えられるため、安全審査段階まで遡って必要なプロセスを踏んで、原子力安全への影響をチェックする必要があるとの考えである。

- ④ 劣化緩和：機器・部品の材料・構造を変えずに経年劣化因子を排除あるいは弱める目的で実施される手段。＜例えば応力腐食割れ感受性の緩和のための水質の改善、残留応力の低減措置などが該当する。＞

解説：

これに区分されるものは、対象 SSC の基本特性に影響を与えるものではないため、設置許可審査や工事計画審査段階まで遡って評価をし直す必要がなく、電気事業者の責任で施工の技術的妥当性のチェックを実施すればよいとの考えである。

以上

保全内容の変更判断をバックアップする数理保全について

1. はじめに

産業プラントで実施されている保全活動を改善し最適化しようとする場合は、保全対象である機器の保全計画を変更する必要がある。具体的には下記を変更することである。

①保全タスク（検査、補修、消耗品取替等）を変更し、その結果、故障率を低減する。

可能な場合は、同時に従来からの保全実施時期を延伸する。

②保全タスクは変更せず、従来からの保全実施時期を延伸する。

現状の保全計画を変更しようとする場合、それまでの検査データや是正データ等の運転保守実績を踏まえて保全技術者及び保全責任者がその保全計画の変更を実施するか否か判断する必要がある。それまでの運転保守実績がいくら良くてもそれだけで保全計画が自動的に変更、改善されることはなく、保全技術者及び保全責任者の判断が必須なのである。しかし、一方で保全を変更しようとするとき、保全技術者及び保全責任者が直面するのは初めて新しい領域へ踏み出す第一歩、チャレンジである。それまでのやり方を変更し、上記のような保全タスクや保全時期を変更し新しい領域へ踏み出すのである。この判断は容易でない。

一般に保全計画を変更するに当っては、保全技術者の経験と勘に頼っている部分が多いと言われている。しかし、保全内容の変更に当り、それまでの保全データを数理的に分析・評価し（数理モデル）、変更の判断をする際の参考情報として活用することは、保全の標準化に資する上で有効である。ここでは、このような保全内容の変更判断をバックアップする数理保全について解説する。

2. 保全活動に数理モデルを活用する目的

保全はこれまで経験に基づき実施してきた。その延長で保全を適正化していくことは重要であるが、極力主観を排し客観的な指標に基づき評価し、保全の変更の是非を判断することも今後重要となる。このため数理モデルの保全活動への活用に着目する。

点検間隔延伸、頻度緩和等の検討に当って確信をもって判断するために数理モデルを使用することが有効であると考えられる。特に安全重要度の高い構築物、系統、機器の保全活動簡素化への数理モデル適用には慎重な対応が必要となるものの、適用を継続し実績を積み上げることで適用範囲は次第に拡大することができる。

数理モデルには前提条件の不確定性による適用限界があることを認識し、評価結果に盲従しないことが重要である。同時に、評価結果に悲観する必要もなく、参考情報として適切に活用することが肝要である。これらを踏まえて、ここでは数理モデル活用の事例を示し、事業者の保全活動をバックアップしたい（例：JANSI データ分析の参考情報としても活用可能とする等）。また、現場レベルでの経験に基づく保全活動の支援、特に電力若手やこれ

から事業者として活躍する方々のガイドとして活用できるようにしたい。数理モデルの説明は難しくなりがちであるが、ここでは厳密性よりも分かりやすさを優先することとする。これにより事業者が数理モデル適用に自信を持ち、自主的かつ信頼性と経済性のバランスの取れた保全活動を更に推進することができるようになることを期待する。

3. 保全データを分析・評価する際に活用できる数学的手法と適用事例等

保全活動において数理モデルを活用した例を調査した結果、下記に関する情報が得られた。これらをまとめて表 I-1 に示す。

(1) 保全実施時期・内容変更判断の支援

- ① 少ない実績データに基づく適切な保全時期の変更の方向性を明示した例（一般論）
- ② 劣化の見逃しリスクだけでなく、誤診断による不要な設備の更新リスクも考慮した診断技術の有効性評価手法を提案
- ③ 情報量が乏しい初期段階において、専門技術者の経験や実績等の主観データを用いることにより統計的劣化予測診断手法を適用するための方法を提案した例
- ④ 補修前後の点検データから補修効果の事後評価を実施した例（高速道路の橋梁 RC 床版目視点検データの評価）

(2) 現状保全の妥当性検証

- ① 保全対象機器の損傷モードに係る影響因子のばらつきを考慮して、設計係数の適正化を実施した例
- ② 機器の末点検範囲における損傷の程度を既点検範囲における損傷割合を基に推定した例

(3) 裕度の適正化

- ① 荷重・強度係数法（LRFD）を用いて構造物の健全性に関する裕度を適正化した例

4. 各数理モデルの特徴と活用状況

ここでは表 I-1 に示した数理モデルのうち、ベイズ統計、標本統計、モンテカルロ法及び荷重・強度係数設計法（LRFD 法）を取り上げ、その特徴と活用例について述べる。

4.1 ベイズ統計の特徴と活用例

統計には確率を頻度の極限として捉える頻度論的統計（標本統計）の他に、確率を確信の度合として捉えるベイズ統計がある。標本が必須で大量のデータがある方が有利である前者に比べて、標本が必須でなく、少ないデータでも推定・更新が可能なベイズ統計は、部品の交換頻度の推定や、信頼度要求に基づく検査計画の立案、検査間隔の合理化等、保全の分野における各種の応用が考えられる。

ベイズ統計は、確率分布の母数（パラメータ）に対して、条件付確率を計算するベイズの定理をあてはめたものである（ベイズ推定）。パラメータに対し仮定した事前分布に、観測に基づくデータである尤度を乗じることで事後分布を得、これを繰り返すことで多数の標本

表 I-1 保全における数理モデルの活用例

数理手法の目的	内容		使用する数理モデル	保全高度化への適用	適用できる系統・機器	実機適用例	適用条件・適用限界	発展可能性
保全実施時期・内容変更 判断の支援	少ない実績データに基づく適切な保全時期の変更 の方向性を明示した例（一般論）		ベイズ統計	点検周期伸延 故障発生 の低減 保全内容の変更	動的機器一般（DG、電動ポンプ、電動 弁、モータ、A0弁等）	経年劣化情報や誤信号の発生 確率を加味することにより、 診断精度の向上を目指す。	・実機の故障に関してその様態、 頻度を分析するとともに、他産業 の事例や研究成果を導入し、ベ イズ統計等の統計的手法を用いて、 保全の有効性評価に反映すること が望ましい。その結果を、故障低 減、点検周期伸延につなげる。	信頼性・経済性の両立を目指す保 全重要度分類への発展の可能性が ある。
		劣化の見逃しリスクだけでなく、誤診断 による不要な設備の更新リスクも考慮し た診断技術の有効性評価手法を提案した 例	ベイズ統計	診断技術の有効性評価	一般	—	サンプルデータを用いた手法の説 明のみされており、実データを用 いた検証が必要	誤診断による不要な設備更新の低 減による保全コストの合理化が期 待される。
		情報量が乏しい初期段階において、専門 技術者の経験や実績等の主観データを用 いることにより統計的劣化予測診断手法 を適用するための方法を提案した例	ベイズ統計	初期に蓄積情報量が不足する場合における統 計的手法の活用による検査の合理化方法	一般	—	サンプルデータを用いた手法の説 明のみされており、実データを用 いた検証が必要	これまでの知見や限られた点検結 果を有効活用して点検間隔の合理 化につなげられる可能性がある。
		補修前後の点検データから補修効果の事 後評価を実施した例 （高速道路の橋梁RC床版目視点検デー タの評価）	マルコフ連鎖モンテカルロ法 による階層ベイズ推計法	・複数の補修工法が適用できる場合の経済性 を含めた適切な工法の選定 ・複数の劣化モードと荷重条件を有する消耗 部品の点検周期の最適化	・土木建築構造物、屋外設置機器の基礎 ・複数の劣化モードと荷重条件を有する 消耗部品	土木分野での検討であり、原 子力発電所での検討無し	・土木部門でも検討段階と想定さ れる。検証要。 ・補修工法毎の補修後点検デー タの蓄積 ・劣化モードと運転条件・荷重条 件ごとの劣化速度データの蓄積	原子力発電所においても、補修・ 予防保全後の検査の考え方を検討 中であり、リスクの考慮という観 点で参考になると考えられる。
現状保全の妥当性検証 の簡素化	保全対象機器の損傷モードに係る影響因子のばら つきを考慮して、設計係数の適正化を実施した例		モンテカルロ法 （実験計画法含）	保全適用への検証簡素化 設計裕度の点検周期延伸等への振り分け	炉内構造物（実績あり） 容器、配管等（一般化可能）	炉心シュラウドの欠陥評価に おける安全係数を適正化し炉 内構造物等点検評価ガイドラ インに反映した	モンテカルロ法によるばらつきの 評価を構造モデル試験により検証 した	—
	機器の未点検範囲における損傷の程度を既点検範 囲における損傷割合を基に推定した例		故障率（二項分布）、 仮説検定	保全適用への検証簡素化 欠陥評価の適正化による点検周期延伸等	炉内構造物（実績あり）	炉心シュラウドの欠陥評価に おける未点検範囲の欠陥存在 割合の規定を適正化し炉内構 造物等点検評価ガイドライン に反映した	提案方法を実機点検結果に基づき 妥当性を検証した	—
裕度の適正化	荷重・強度係数法（LRFD）を用いて構造物の健全 性に関する裕度を適正化した例		信頼性工学 （限界状態関数による破損確 率の評価 等）	信頼性工学に基づき定義される荷重・強度安 全係数を規格に用いることで、設計・維持に おいて構造物の健全性に関する裕度を適正に 設定することができる。	原子力発電所設備の静的機器一般	建築分野での指針化 石油分野での規格の技術的背 景 圧力容器、配管の供用中検査 結果を受けた欠陥評価	建築分野では1998年の建築基準法 の性能規定化に向け建築学会が建 築物の限界状態設計指針を刊行し た。 米国石油協会規格API579 では維持 規格による減肉管理が行われてお り、LRFDは規格の技術的背景とし て役立っている。 供用期間中検査結果を受けた欠陥 評価にLRFDの手法を適用した評価 例がある。	LRFDは一種の設計裕度の全体管理 と裕度配分を実現化できる手法で あり、これを一般化することで、 いわゆるシステム化規格概念に基 づく規格の実用化が期待される。

を有する場合の最尤推定の結果に近づけることができる（ベイズ更新）。なお、ベイズ推定、ベイズ更新についてやさしく解説した資料を末尾に別紙 I-1 として示した。

ベイズ統計の活用例としては、以下のようなものが挙げられる。

(1) 消耗品の交換頻度の予測

事後保全を取り入れている消耗品の交換頻度をベイズ推定し、予備品の個数の合理化することを目的とし、単位時間当たりの消耗品の破損頻度は時間に依らず一定と仮定し、破損頻度のカタログ値を出発点としてベイズ更新により破損頻度を推定する。この際、事前分布として尤度に用いるポアソン分布に対する共役事前分布であるガンマ分布を用いると、事後分布も同じガンマ分布で表され計算が簡単になる。この結果、図 I-1 に示す通り、既存の知見である破損頻度のカタログ値を活用しつつ、破損頻度の推定値はベイズ更新を重ねるごとに標準偏差が小さくなり、最尤推定の結果に近づいていくことがわかる。これにより、消耗品の交換頻度を合理的に行うことが可能である。

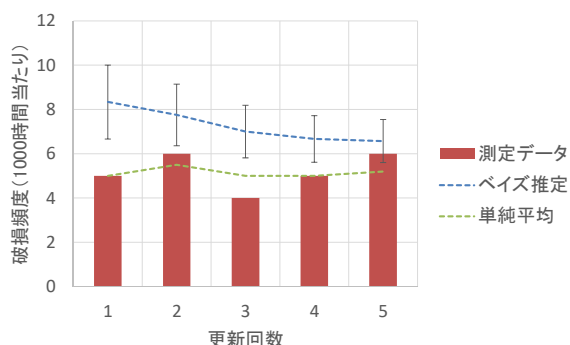


図 I-1 ベイズ更新による消耗品破損頻度の計算例

(2) 輸送機与圧胴体の検査計画の検討

板垣^[4]は、輸送機の与圧胴体を対象に、ベイズ推定に基づく検査計画を検討した。具体的には、損傷許容・フェールセーフ設計を適用したアルミ合金製の外板と複数フレームから成るリベット継手構造を対象とし、設計経験に基づき作成した真実モデルを用いて、ベイズ推定の有効性を検証した。真実モデルは、疲労亀裂発生が 2 母数ワイブル分布に従うと仮定し、Paris 則に基づく疲労亀裂進展評価と破壊評価を実施し、作成した。

この真実モデルに対するベイズ推定モデルを構成するため、発見可能な疲労亀裂発生を 2 母数ワイブル分布に従うと仮定し、Paris 則に準じ検査データをパラメータとした疲労亀裂進展評価式を仮定して疲労き裂発生前後の破損率、信頼度を計算した。

この信頼性解析結果に基づき、ベイズ推定により要求信頼度を維持できる検査スケジュールが作成可能であることを示した。

(3) 配管減肉に関する破損確率評価手法の開発

岡島^[4]は、ベイズ推定に基づく配管減肉に関する破損確率評価手法の開発を行った。

残存肉厚は、初期肉厚から減肉量を引いたものであり減肉量は減肉速度と供用期間の積で表される。ここで初期肉厚、減肉速度の確定値は不明だが公称肉厚と公差、類似現象からの推定等、限られた情報が存在する。このため、主観的な確率分布（事前分布）を与えてベイズ推定を行った。二変量正規分布を考慮した事前分布を設定し、検査を実施し、ベイズ推定により事後分布を算出する手順に基づき、検査頻度に応じた検査間隔の合理化が可能になるとした。

4.2 標本統計の特徴と活用例

標本統計では確率を頻度の極限として捉えるため標本が必須であり、データが多いほど高い精度が得られるが、データが少ない場合は不確定性が大きく注意が必要である。

筆者の一部は、標本統計の考え方にに基づき、炉心シュラウドの欠陥評価における未点検範囲の欠陥存在割合の規定を適正化し、JANSI 炉内構造物等点検評価ガイドライン（以下、炉内 GL という）に反映した^[3]。

維持規格、炉内 GL では検査していない範囲（以下、未点検範囲）には貫通欠陥を想定することとしている。この方法は未点検範囲が比較的多い場合には過度に保守的となるため、図 I-2 に示すとおり、点検範囲と同じ欠陥割合と仮定するケース 1 と、図 I-3 に考え方を示す標本統計の手法のケース 2 を考慮し未点検範囲に対する欠陥想定手法を検討した。図 I-2 で c は点検範囲に見つかった応力腐食割れ（SCC）の割合を、 f は全点検対象範囲における SCC 割合を表す。ケース 2 の推定方法に基づき炉内 GL における未点検範囲の欠陥割合想定法を図 I-4 の折線のとおりに設定し、その妥当性を図 I-5 に示すとおり実機データとの対比により検証した。

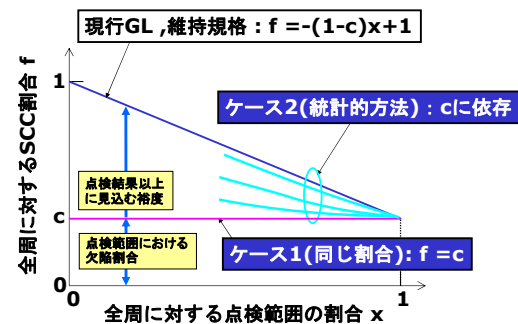


図 I-2 推定手法ごとの SCC 割合

図 I-5 は実機炉心シュラウドの点検実績のうち点検割合が 100%で、亀裂が全周に分布していたものについて、点検を 0° 、 90° 、 180° 、 270° の位置から開始して時計回りに点検を行ったと仮定した場合の各ケースの点検欠陥比率の推移を示したものである。点検割合が 50%を超えると想定欠陥比率は点検開始点によらずほぼ一定だが、点検割合が 30%以下では想定欠陥比率はばらつきが大きい。総じて、従来想定に比べ提案法の方がより現実的な想定欠陥割合の値を示すことを確認し、提案法を炉内 GL に反映することができた。

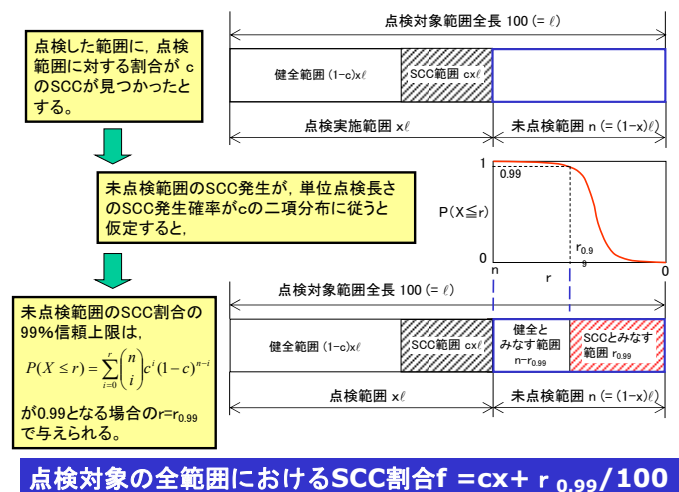


図 I-3 ケース 2 の推定方法

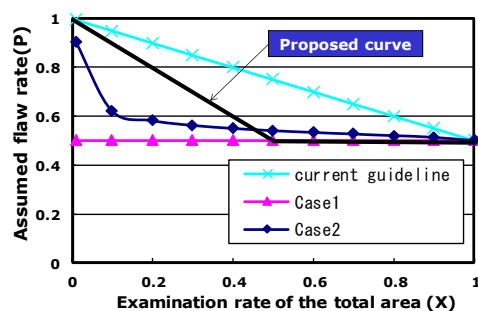


図 I-4 ケース 2 の方法に基づく規格化の検討

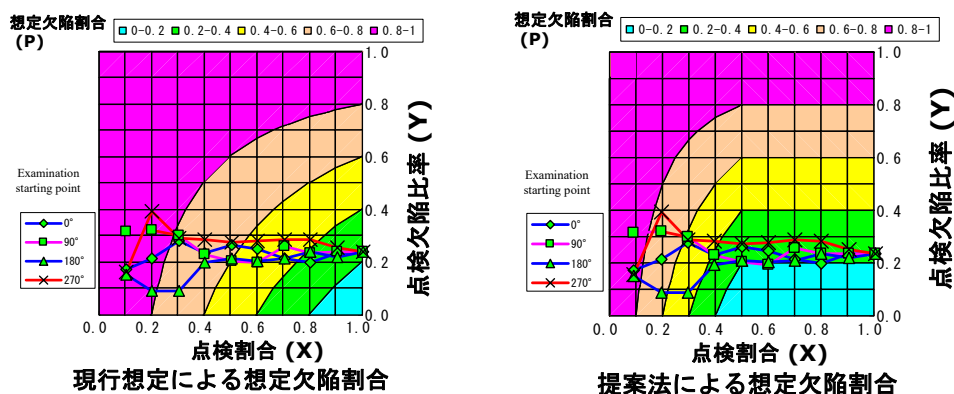


図 I-5 実機データとの比較による検証

4.3 モンテカルロ法の特徴と活用例

モンテカルロ法は乱数を発生させて行う数値計算であり、解析的に解くことが困難な問題を単純に扱うことができるが、十分な精度を得るためには膨大な計算を必要とする。維持規格の炉心シュラウド、シュラウドサポートに対する欠陥評価法では二倍勾配法を採用しており、亀裂のない場合に対する設計・建設規格の方法と同一でありながら供用状態 D（事故状態）における安全係数は設計・建設規格では 1.11 (1/0.9)，維持規格では 1.5 と維持規格の方が大きい。これでは、建設時には成立した構造が

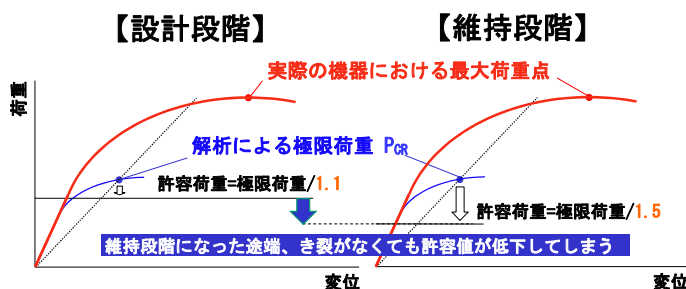


図 I-6 設計と維持の規格における安全係数のずれ

供用開始したとたんにな成立となる可能性がある (図 I-6)。

設計・建設規格、維持規格ともに、損傷モードとして座屈または塑性崩壊を想定し、同じ二倍勾配法を適用していることから、亀裂が大きくなれば残りリガメントの面積が減少し耐力は自然に低下するので、設計・建設と維持で安全係数を変える必要はないと考えられる (図 I-7) [4]。

この考えを検証するため、筆者の一部は、まず、き裂を有する炉心シュラウドを模擬した全周切欠き付円筒試験体を同寸法で複数（4 体）製作し、単調負荷による破壊試験を行い、ばらつきを把握した（図 I-8）[5]。

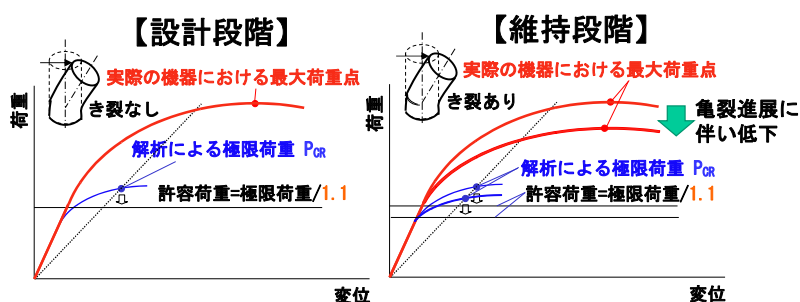


図 I-7 設計と維持での安全係数のあるべき姿

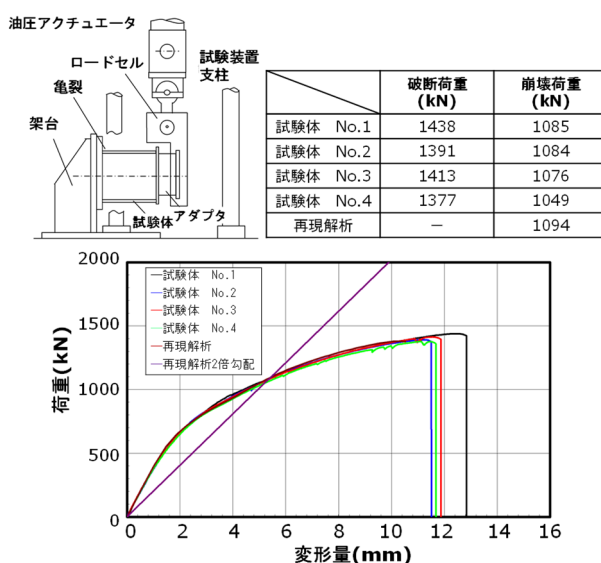


図 I-8 同寸法複数試験体によるばらつきの把握

その上で、現行評価法の有する安全裕度を定量的に把握（図 I-9）するとともに、崩壊荷重に影響を与える因子のばらつきを考慮したモンテカルロ法を活用した検討を行った。図 I-10 は、ばらつきを考慮した炉心シュラウドに対する安全係数の合理化検討の流れを示したものである。図中に記載の多数回の FEM 解析を「実験」と見なして実験計画法を適用し推定式を作成した。

さらに、すべての諸元サンプルに対して FEM 解析（有限要素法解析）を適用すると計算回数が膨大になるため、図 I-11 に示すとおり、品質工学の分野で用いられる実験計画法及び応答曲面法をモンテカルロ法に組み合わせた統計

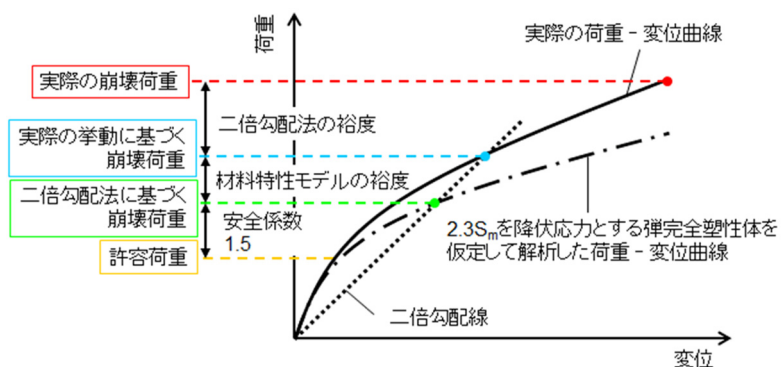


図 I-9 現行評価法の安全裕度

的構造信頼性評価法を開発した^[6]。

図 I-12 に示すとおり、相関関数を用いたシュラウド模擬試験体の諸元をインプットとしたモンテカルロ計算結果とシュラウド模擬試験結果を比較し評価法の妥当性を検証した。この提案は炉内 GL に反映することができた。

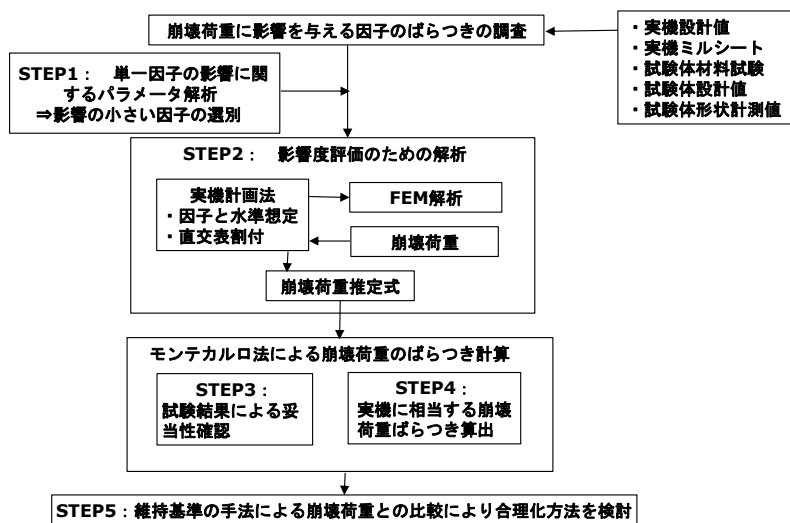


図 I-10 ばらつきを考慮した安全係数の検討フロー

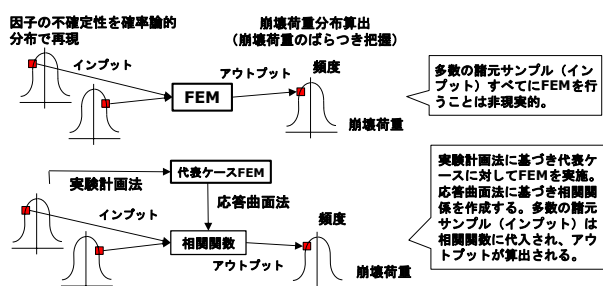


図 I-11 統計的構造信頼性評価法の概念

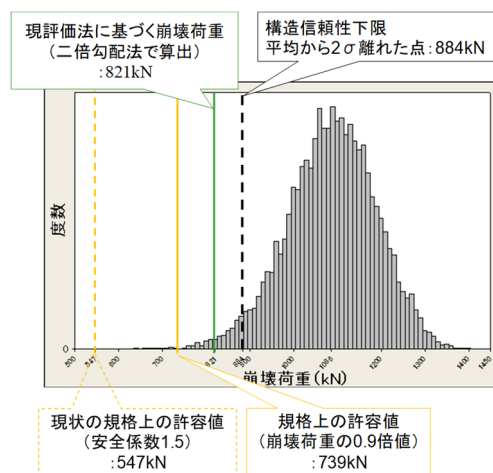


図 I-12 モンテカルロ計算結果による妥当性検証

4.4 LRFD 法の特徴と活用例

荷重・強度係数設計法（LRFD 法）では、信頼性工学に基づき定義される荷重・強度安全係数を規格に用いることで、設計・維持において構造物の健全性に関する裕度を適正に設定することができる。すなわち、限界状態関数による破損確率の評価と結び付けられた信頼性指標を用いて荷重、強度それぞれのばらつきを考慮して、要求信頼度を満足する設計係数を付与することができる。

建築分野では、1998 年の建築基準法の性能規定化に向け、建築学会が建築物の限界状態設計指針を刊行した。

機械製品については、米国石油協会規格 API579 では維持規格による減肉管理が行われており、LRFD は規格の技術的背景として役立っている。また、非原子力分野ではあるが、

圧力容器及び配管の供用期間中検査結果を受けた欠陥評価に LRFD の手法を適用した評価例がある。近年、LRFD 法は一般機械製品を対象に JIS 規格化された^[7]ほか、日本機械学会基準としても刊行されている^[8]。

将来は原子力発電所設備の静的機器一般への適用が考えられる。また、LRFD は一種の設計裕度の全体管理と裕度配分を実現化できる手法であり、これを一般化することで、いわゆるシステム化規格概念^[9]に基づく規格の実用化が期待される。

5. まとめ

機械系と人間系からなる保全の構造の中における様々な活動のひとつとして、保全の判断をバックアップするための数理的手法（数理モデル）の活用に関する意義をまとめるとともに数理モデルの適用状況を調査している。具体的な適用例としては、ベイズ統計、標本統計、モンテカルロ法及び LRFD 法を挙げ、それぞれの特徴と適用例をまとめた。主に若手の保全関係者には、これらを参考に、自主的かつ信頼性と経済性のバランスの取れた保全活動を展開するための道具として、数理モデルの積極的な活用を期待したい。

参考文献

- [1] 板垣ら、ベイズアン信頼性解析を適用した非定期構造検査に関する研究、平成 8 年 5 月、日本造船学会春季講演会
- [2] 岡島、ベイズ推定手法に基づく機器破損率簡易評価手法に関する研究、平成 19 年 12 月、東京大学博士論文
- [3] 堂崎ら、円筒形炉内構造物の欠陥評価における未点検範囲に対する欠陥想定手法の検討、日本機械学会 M&M 2007
- [4] 堂崎、軽水炉における炉心シュラウド破壊評価に対する信頼性評価検討事例、日本機械学会 2017 年度年次大会講演論文集 No.17-1
- [5] Mitsuhashi, T., et al., “Development of Rational Integrity Evaluation Method for Core Shroud with Cracks (1. Fracture Testing of Small Scale Mock-ups)” , M&M2013-OS1412
- [6] Ebato, S., et al., “Development of Rational Evaluation Method for Core Shroud with Cracks (2. Development of Statistical Structural Reliability Evaluation Method Combined with DOE and Monte Carlo Method)”, M&M2013-OS1413
- [7] JIS B9955 (2017)「機械製品の信頼性に関する一般原則」
- [8] 日本機械学会基準 S018「部分安全係数法を用いた機械製品の信頼性評価に関する指針」
- [9] Asayama, T. et al., “Implementation of Reliability Evaluation into JSME Fast Reactor Codes (1) Current Status and Path Forward”, ICONE24-60936.

ベイズ推定について

1. 確率と統計

「確率」とは、できごと（事象）が起きる割合を数字で示したものです。ある事象が起きる確からしさの程度です。例えば、サイコロを投げたとき、ある目が出る確率を計算しますが、これが確率計算です。サイコロは6面体ですので、各面が出る確率が同じと仮定すればサイコロのある目が出る確率は $1/6$ となります。確率の他の例としては、宝くじが当たる確率やジャンケンに勝つ確率などがあります。

「統計」とは、 $1/6$ の確率でそれぞれの目が出るはずのサイコロを投げた結果からサイコロが等しく $1/6$ と出るか、あるいは偏心していて $1/6$ の確率とならないか（イカサマ賭博で使われているようなサイコロか）を確認する場合のように、実際に得られたデータから現象の分析を行うことです。表の出る確率 $1/2$ のはずのコインを何度も投げて、得られたデータにより、コインの歪みの有無を判定することも可能です。他には、保険の掛け金の設定やコンビニなどの販売額の予測などの例があります。

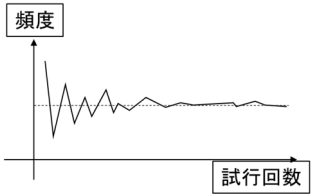
以上のように、統計は確率論をもとにして計算しますので、統計学は確率論を活用してデータ分析する学術といえることができます。このような確率と統計の関係を図示すると、別図 I-1 のようになります。



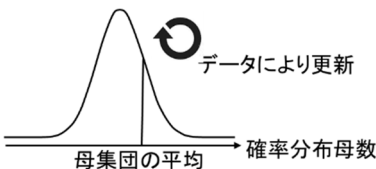
別図 I-1 確率と統計の関係

統計には2つの立場があります。1つは頻度論的統計（標本統計）（別図 I-2）、もう1つがベイズ統計（別図 I-3）です。前者は確率を頻度の極限として捉え、極値を求める手法です。

この分析には標本（データ）が必要です。データ数が多いほど精度の高い推計が可能となりますので有利です。



別図 I-2 頻度論的統計（標本統計）



別図 I-3 ベイズ統計

一方、ベイズ統計は確

率を「確信の度合い」として捉えます。標本（データ）は必ずしも必要はありません。データがなくても、または少ないデータでも推定が可能であり、データが蓄積されるたびに推定を更新できるので、徐々に精度の高い推定となります。なお、本別紙の末尾に「モンティホール問題から見たベイズの定理」を掲載します。これを見るとなぜベイズ統計が確率を確信の度合いとして捉えているかがわかります。

以上を頻度論的統計とベイズ統計の違いをまとめて別表 I-1 に示します。

別表 I-1 頻度論的統計とベイズ統計の違い

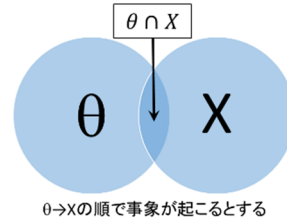
	頻度論的統計	ベイズ統計
確率の定義	頻度の極限	確信の度合
母集団の確率分布	確定的	確率変数
データ	確率変数	確定的

2. ベイズの定理

事象 θ と事象 X があり、事象 θ が起こった後、事象 X が起こる、すなわち $\theta \rightarrow X$ の順で事象が起こったとします。このとき、事象 θ であって事象 X である確率 $P(\theta \cap X)$ は下記で表されます（別図 I-4）。

$$P(\theta \cap X) = P(\theta) \times P(X|\theta) \quad (\text{I-1})$$

ここで $P(\theta)$ は事象 θ が発生する確率を、 $P(X|\theta)$ は事象 θ が起きた後で事象 X が発生する確率（すなわち事象 θ という条件下で事象 X が発生する確率）を表しています。



別図 I-4 事前事象 θ と事後事象 X の関係

次に上記で考えた事象の逆行、すなわち事象 X が起きた後で事象 θ が発生する事象を考えます。これは上記の逆ですから下記のように表すことができます。

$$P(X \cap \theta) = P(X) \times P(\theta|X) \quad (\text{I-2})$$

ここで $P(X)$ は事象 X が発生する確率を、 $P(\theta|X)$ は事象 X が起きた後で事象 θ が発生する確率（すなわち事象 X という条件下で事象 θ が発生する確率）を表しています。

ベイズの定理とは、上記の時間順行事象と時間逆行事象の発生確率が等しいと考えることです。すなわち、事象 $\theta \rightarrow$ 事象 X の順で起こるとすると、事象 X が起きたときに事象 θ であった確率 $P(\theta|X)$ は時間を逆行させて考える必要があります。この時間逆行事象は直感が働きにくく考えにくいですが、両者を等値することにより、時間順行事象の確率から時間逆行事象の確率を計算で求められるのがベイズの定理の利点です。これを数式で書くと下記のようになります。すなわち、式 (I-1) と式 (I-2) の右边を等値すると下記のようになります。

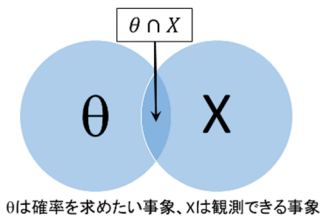
$$P(\theta) \times P(X|\theta) = P(X) \times P(\theta|X) \quad (\text{I-3})$$

これより下式が得られます。

$$P(\theta|X) = P(\theta) \times \frac{P(X|\theta)}{P(X)} \quad (\text{I-4})$$

時間逆行 すべて時間順行

この式の右边は、時間順行事象の発生確率 $P(X|\theta)$ と、事象 θ 及び事象 X の発生確率ですので、すべて時間順行事象で考えた確率です。式 (I-4) はこれから時間順行事象で得られた情報から時間逆行事象の確率を推定できることを示しています。我々が元々その発生確率を求めたいと思っている事象を事象 θ 、実際に目の前で発生して観測できる事象を事象 X と考えると、式 (I-4) は観測データ（事象 X ）から我々が求めたいと思っていた事象（事象 θ ）の確率（ $P(\theta|X)$ ）を求めることができることを示しています（別図 I-5）。



別図 I-5 確率を求めたい事象 θ と観測事象 X の関係

ここで我々が対象としている保全について考えたいと思います。

我々がこれまで保全活動を通じて蓄積してきた保全データがあります。これらのデータが包含している経年劣化事象による症状（故障、異常、異常兆候など）がどのような確率で発生するか。これを我々は知りたいわけですが、これが上記の事象 θ に対応します。そして定検時に得られる新しい保全データが事象 X に対応します。これを頭に入れて式 (I-4) をながめると、別図 I-6 に示すように理解できます。

例えば、経年劣化が高じたときにどのような確率でどのような症状（故障、異常、異常兆候など）が出るか、我々はそれを知りたいわけですが、従前に所有していた保全データ $P(\theta)$ が事前確率に相

$$\text{事後確率} \quad P(\theta|X) = \text{事前確率} \quad P(\theta) \times \frac{P(X|\theta)}{P(X)} \quad \text{ベイズ更新}$$

別図 I-6 ベイズ更新における事前確率と事後確率の関係

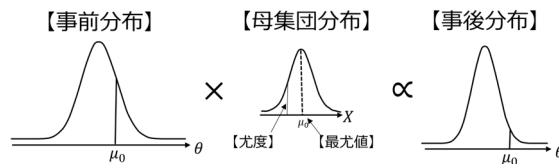
当し、これに新たに得られた保全データ（観測データ） $P(X)$ に基づき求めた $P(X|\theta)/P(X)$ を修正係数として乗じることによって、更新後の新しい事後確率 $P(\theta|X)$ を求めることができます。この新しい事後確率によって適切な保全計画を立案することになります。このように、ベイズの定理（式 (I-4)）は新しい保全データの蓄積を有効に活用し、より良い保全計画となるように経年劣化の発生確率を予測してくれます。また、新たなデータ取り入れることによって新たな確率予測する方法（ベイズ更新）は、すでに所有している保全データ（経年劣化データ）の多寡に依存しませんので、たとえ所有データが少なくてもその限定された条件において注目している経年劣化事象の発生確率を予測してくれます。

ここでベイズの定理のイメージについて考えたいと思います。ここで $\pi(\theta)$ は事前分布、 $f(X|\theta)$ は尤度関数である母集団分布、 $\pi(\theta|X)$ は事後分布とするとベイズの定理は下式で表されます。

$$\pi(\theta) \times f(X|\theta) \propto \pi(\theta|X) \quad (\text{I-5})$$

式 (I-5) は現時点で所有しているデータに基づくパラメータ θ の事前分布 $\pi(\theta)$ があり、新たに得られた観測データが本来持っているであろう母集団分布 $f(X|\theta)$ を乗じることによって新たなパラメータ θ の事後分布を得る

ということを表していると理解できます。これを図に表わしますと別図 I-7 のようになります。この図ではパラメータ θ と X がとびとびの値をとる離散型ではなく、連続的な値をとる連続型である場合を考えています。



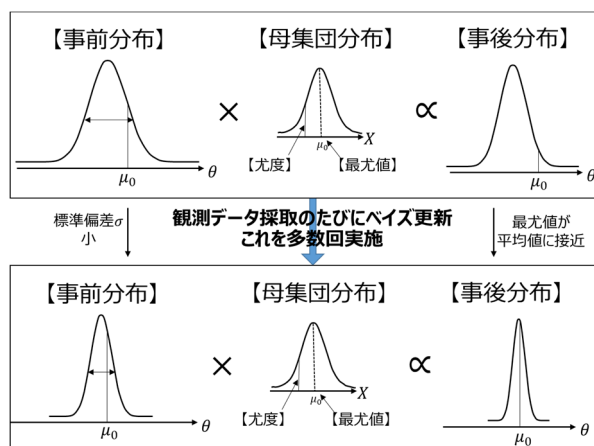
別図 I-7 ベイズの定理のイメージ
(パラメータが連続型の場合)

新しい観測データを毎年採取し上記のベイズの定理でパラメータの予測分布を更新することを考えます。これをベイズ更新と言います。新たな観測データが得られたときに事前分布から事後分布を導出する。そして事後分布の最尤値を推定する。この操作を多数回繰り返したとします。一般的には徐々に精度の高い推定が可能になると考えられます。具体

的には事後分布の標準偏差 σ （分散 σ^2 ）が小さくなり、最尤推定値が平均値 μ_0 に以下づいていくことになります（別図 I-8）。

我々はいつも種々の機器に発生するいろいろな経年劣化事象を相手にしていますが、長年の保全活動を通じて得られ蓄積された保全データ、特にこの経年劣化事象に関連した実績データを十分活用していると言えるのでしょうか？大抵は分解点検して異常がないから「従来通りの保全計画を今後も踏襲しよう。」と考えそのままにしているのではないのでしょうか？

上で述べたことは、ベイズの定理が保全対象機器に発生する経年劣化事象に対してどのように対応していけばよいかを提示してくれることを示しているのです。従来の保全計画を踏襲するだけでなく、このような数理的な分析評価結果も踏まえて、より良い保全計画を求めて現状を改善していくことは重要です。



別図 I-8 ベイズ更新による推定値の精度向上

3. ベイズ推定の例

ベイズの定理やそれを使った推定について具体的な例を見ながらさらに理解を深めたいと思います。

(1) 最尤推定とベイズ推定の違い

表の出る確率 p のコインを n 回投げ、 k 回表が出た場合を考えます。

① 最尤推定により p を推定しますと下記ようになります。

下式を最大にする p が最尤推定値

$$f(k) = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k} \quad (\text{I-6})$$

式 I-6 の両辺の対数を取って p で微分し 0 と置き、 p について解くと、 $p=k/n$ を得ます。 n が小さい場合、 k/n のばらつきが大きく不適切な推定となる恐れがあります。

② ベイズ推定により p を推定

事前分布を下記のように仮定します。

$$f(k) = C p^N (1-p)^N \quad (\text{I-7})$$

ここで、 N は仮想的に考えた試行回数を表します。

式 I-7 に下記の尤度 $p^k (1-p)^{n-k}$ を乗じて下記の事後分布を得ます。

$$f(k) = C p^{N+k} (1-p)^{N+n-k} \quad (\text{I-8})$$

ここで、 n は実際に行った試行の回数で、 k はそのうち表が出た回数を表します。

式 I-8 の事後分布に対して上述の最尤推定と同じことをすると、 $p = \frac{N+k}{2N+n}$ を得ます。 N

を十分に大きく取れば、 n が小さい場合でも p は $1/2$ に近くなり妥当であると考えられます。

以上より、ベイズ推定とは「仮想的に大量のデータを追加した最尤推定法」であると考えられます。

(2) 消耗品の交換頻度のベイズ推定

【目的】

事後保全を取り入れている消耗品の交換頻度をベイズ推定し、予備品の個数の合理化することとします。

【仮定】

単位時間（1000 時間）あたりの破損頻度 λ は時間に依らず一定とします。

【評価条件】

- ① λ のカタログ値は、10 回/1000 時間とします。
- ② 下表に示す 1000 時間毎の交換回数（破損回数） x の集計結果に基づき、 λ のベイズ更新を行います。

別表 I-2 1000 時間毎の交換回数（破損回数）

	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回
破損回数 x	5	6	4	5	6

【事前分布】

事前分布 $\pi_{pri}(\lambda|\alpha, \beta)$ として式 I-9 で表わされるガンマ分布 G を採用します。なお、ガンマ分布は次に尤度に用いるポアソン分布に関する共役事前分布です。

$$\pi_{pri}(\lambda) = G(\lambda|\alpha, \beta) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \lambda^{\alpha-1} e^{-\beta\lambda} \quad (I-9)$$

ガンマ分布の平均 $E(\lambda)$ 及び分散 $V(\lambda)$ は、式 I-10 で求められます。 α 、 β の初期値は、平均値がカタログ値の 10 となるように定めます。ここでは、 $\alpha = 20$ 、 $\beta = 2$ としました。初期値の確信の度合いが高い場合には、分散が小さくなるように、逆に低い場合には、分散が大きくなるように適宜設定します。

$$E(\lambda) = \frac{\alpha}{\beta}, \quad V(\lambda) = \frac{\alpha}{\beta^2} \quad (I-10)$$

【尤度】

破損頻度が時刻に依らないとの仮定に基づき、式 I-11 のポアソン分布を採用します。

$$f(x|\lambda) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^x}{x!} \quad (I-11)$$

【事後分布】

ガンマ分布は、尤度に用いたポアソン分布に関する共役事前分布であるため、事後分布も式 I-12 のようにガンマ分布となり解析的に求めることが可能です。

$$\pi_{post}(\lambda|x) = \frac{\pi_{pri}(\lambda)f(x|\lambda)}{\int_0^\infty \pi_{pri}(\lambda)f(x|\lambda)d\lambda} = \frac{\frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)}\lambda^{\alpha-1}e^{-\beta\lambda}e^{-\lambda\frac{x}{\beta}}}{\int_0^\infty \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)}\lambda^{\alpha-1}e^{-\beta\lambda}e^{-\lambda\frac{x}{\beta}}d\lambda} = \frac{\lambda^{(\alpha+x)-1}e^{-(\beta+1)\lambda}}{\int_0^\infty \lambda^{(\alpha+x)-1}e^{-(\beta+1)\lambda}d\lambda} = G(\lambda|\alpha+x, \beta+1)$$

(I-12)

【ベイズ更新結果】

図 I-9 に示す結果となりました。この結果から下記のことが言えます。

- ① 既存の知見（カタログデータ）を活用しつつ、交換頻度の予測を合理化することが可能です。
- ② 回数を重ねるごとに、確信の度合いが強くなります（標準偏差が小さくなります）。また、単純平均（最尤推定）の結果に近づいて行きます。

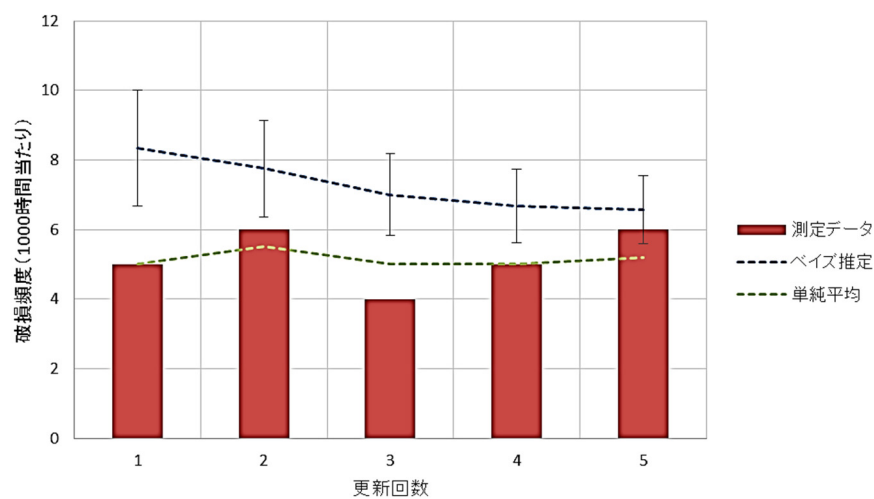


図 I-9 消耗品の交換頻度のベイズ推定結果

(3) 保全への適用検討例(1)：航空機分野

航空機分野では下記のような例があります。

- ① 輸送機の与圧胴体を対象に、ベイズ推定に基づく検査計画を検討
- ② 損傷許容・フェールセーフ設計を適用
 - ・アルミ合金製の外板と複数フレームから成るリベット継手構造
- ③ 設計経験に基づき、ベイズ推定検証用の真実モデルを作成
 - ・疲労亀裂発生は 2 母数ワイブル分布に従うと仮定
 - ・Paris 則に基づく疲労亀裂進展評価と破壊評価を実施
- ④ 真実モデルに対するベイズ推定モデルを構成
 - ・発見可能な疲労亀裂発生を 2 母数ワイブル分布に従うと仮定
 - ・Paris 則に準じ検査データをパラメータとした疲労亀裂進展評価式を仮定
 - ・疲労き裂発生前後の破損率、信頼度を計算

これらは信頼性解析を実施し要求信頼度を維持できる検査スケジュールを作成している例であると考えられます。

(4) 保全への適用検討例(2)：原子力分野

原子力分野では下記のような例があります。

① ベイズ推定に基づく配管減肉に関する破損確率評価

- ・ (残存肉厚) = (初期肉厚) - (減肉速度) × (共用機組)
- ・ 初期肉厚、減肉速度の確定値は不明だが、公称肉厚と公差、類似現象からの推定等、限られた情報が存在する。→主観的な確率分布（事前分布）を与えてベイズの定理により推定を行う（ベイズ推定）
- ・ 事前分布設定（二変量正規分布を考慮）→検査の実施→ベイズ推定により事後分布算出

この例は最尤推定により検査頻度に応じた検査間隔の合理化が可能であることを示していると考えられます。

4. その他

(1) ベイズ統計におけるベイズの定理の表現

ベイズ推定 $P(\theta|X) = P(\theta) \times (P(X|\theta))/P(X)$ において、 θ を確率分布の母数（パラメータ）と考え、かつ複数あるとすると、式 I-13 のように書くことができます。

$$P(\theta_i|X) = P(\theta_i) \times \frac{P(X|\theta_i)}{\sum_{i=1}^n P(X|\theta_i)P(\theta_i)} \quad (\text{I-13})$$

事後確率 $P(\theta_i|X)$ は、事前確率 $P(\theta_i)$ と尤度 $P(X|\theta_i)$ の周辺尤度 $\sum_{i=1}^n P(X|\theta_i)P(\theta_i)$ の積で表されます。

さらに、パラメータが連続的に存在する場合は式 I-14 のようになります。

$$\pi(\theta|X) = \pi(\theta) \times \frac{f(X|\theta)}{\int_{\theta} f(X|\theta)\pi(\theta)d\theta} \quad (\text{I-14})$$

事後分布 $\pi(\theta|X)$ は、事前分布 $\pi(\theta)$ と尤度 $f(X|\theta)$ の周辺尤度 $\int_{\theta} f(X|\theta)\pi(\theta)d\theta$ の積で表されます。

(2) 共役事前分布

ベイズ統計で事前分布に尤度を乗じても別の関数形でなく、同型の関数形の事後分布を得る、そのような事前分布があります。これを「共役事前分布」といいます。これを用いると計算が簡単になりますので、とても便利です。母数が規定する種々の確率分布に対し下表のような共役事前分布が知られています。

別表 I-3 共役事前分布の例

共役事前分布	母数が規定する確率分布	事後分布
ベータ分布	ベルヌーイ分布	ベータ分布
ベータ分布	二項分布	ベータ分布
正規分布	正規分布(分散既知)	正規分布
逆ガンマ分布	正規分布(分散未知)	逆ガンマ分布
ガンマ分布	ポアソン分布	ガンマ分布
ディリクレ分布	多項分布	ディリクレ分布

(3) モンティ・ホール問題から見たベイズの定理

モンティ・ホール問題 から見たベイズの定理

1

モンティ・ホール問題とは



- ▶ モンティ・ホール問題（Monty Hall problem）とは、確率論の問題で、ベイズの定理における事後確率、あるいは主観確率の例題の一つとなっている。
- ▶ モンティ・ホールが司会者を務めるアメリカのゲームショー番組、「Let's make a deal（英語版）」の中で行われたゲームに関する論争に由来する。
- ▶ 一種の心理トリックになっており、確率論から導かれる結果を説明されても、なお納得しない者が少なくないことから、ジレンマあるいはパラドックスとも称される。
- ▶ 「直感で正しいと思える解答と、論理的に正しい解答が異なる問題」の適例とされる。

出典: フリー百科事典『ウィキペディア（Wikipedia）』 2

モンティ・ホール問題のルール

1. ドアが3つある
2. その中に「**当たりが1つ**」「**ハズレが2つ**」ある
3. あなたは、ドアをひとつ選べる
4. あなたが選んでいないドアを司会者が開く
5. 開かれたドアは、必ず「ハズレ」
6. あなたは、ドアを選び直す権利がある
7. ドアを選び直さない権利もある

問い・・・あなたはドアを選び直しますか？

**選び直す、選び直さない、
どちらが勝率が上がると思いますか？**



それぞれの考え（気持ち）

▶ **選び直さない派（主観的な考え）**

- ▶ 残った2つのドア、どちらを選んでも確率は同じ1/2のため、直感を信じる
- ▶ もし、ここで選び直して「ハズレ」たら一生後悔が残る

▶ **選び直す派（客観的な考え）**

- ▶ 選びなおした方が勝率が上がる
- ▶ 司会者がドアを開けた時点で、確率が変動する



(回答) 選び直さない派の勝敗は3勝6敗

- ▶ 宝箱のあるドアが、当りのドア
- ▶ 指を立てた人がいるドアが、最後に選んだドア
- ▶ この人は、ドアを選びなおさない
- ▶ どのドアであっても、移動しない
- ▶ つまり、直感を信じる人

結果的に、勝率が33%になる。



5

(回答) 選び直す派の勝敗は6勝3敗

- ▶ 宝箱があるドアが、当りのドア
- ▶ 指を立てた人がいるドアが、最後に選んだドア
- ▶ この人は、常にドアを選び直す。矢印が、選び直したルート
- ▶ どのドアであっても、常に移動
- ▶ つまり、論理を信じる人

結果的に、勝率が66%になる。

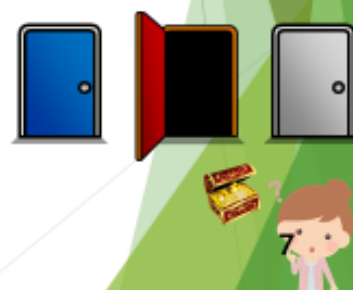


6

ベイズの定理を使った勝敗の証明

目 次

- ▶ 例題
- ▶ 最初にドア①を選択。モンティがドア②を開ける確率
- ▶ 最初にドア①を選択。ドア②が開いた後に、ドア①に宝箱がある確率
- ▶ 最初にドア①を選択。ドア②が開いた後に、ドア③に宝箱がある確率
- ▶ その他例題
- ▶ まとめ



例題

- ▶ 最初にドア①を選択
- ▶ モンティによってドア②が解放され、空だということが判明した場合に、ドア①を選ぶか、ドア③を選ぶか

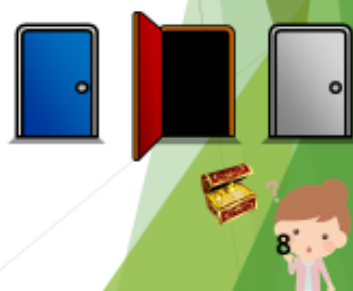
- ▶ 求める確率は以下の2ケース

ケース1

- ▶ ドア②が開いた後に、ドア①に宝箱がある確率

ケース2

- ▶ ドア②が開いた後に、ドア③に宝箱がある確率



最初にドア①を選択。 モンティがドア②を開ける確率

ドア① ドア② ドア③



▶ ドア① に宝箱がある場合

- ▶ モンティは、ドア② と ドア③ のどちらかを開けることができる。
- ▶ つまり、ドア② を開ける確率は $1/2$ となる。
- ▶ 従って、ドア① に宝箱があつて、ドア②を開ける確率は・・・
- ▶ $1/2 \times 1/3 = 1/6$

ドア①に宝箱がある確率

ドア① ドア② ドア③



▶ ドア② に宝箱がある場合

- ▶ モンティは、ドア②を開けられない。
- ▶ つまり、ドア②を開ける確率は0となる。
- ▶ 従って、ドア②に宝箱があつて、ドア②を開ける確率は・・・
- ▶ $0 \times 1/3 = 0$

ドア②に宝箱がある確率

ドア① ドア② ドア③



▶ ドア③ に宝箱がある場合

- ▶ モンティは、ドア②しか開けることができない。
- ▶ つまり、ドア②を開ける確率は100%で $1/1$ となる。
- ▶ 従って、ドア③に宝箱があつて、ドア②を開ける確率は・・・
- ▶ $1/1 \times 1/3 = 1/3$

ドア③に宝箱がある確率

最初にドア①を選択。ドア②が開いた後に、 ドア①に宝箱がある確率

- ▶ $P(B|A)$: ドア②が開いた後に、ドア①に宝箱がある確率 (条件付き確率、事後確率)
- ▶ $P(A)$: ドア②を開く確率
- ▶ $P(B)$: ドア①に宝箱がある確率 (事前確率)
- ▶ $P(A|B)$: ドア①に宝箱がある場合に、ドア②を開く確率 (条件付き確率、尤度)

- ▶ $P(A) = 1/6 + 0 + 1/3 = 1/2$
 - ▶ ドア①に宝箱がある場合、ドア②を開く確率は $1/6$ となる
 - ▶ ドア②に宝箱がある場合、ドア②を開けられないので 0 となる
 - ▶ ドア③に宝箱がある場合、ドア②を開く確率は $1/3$ となる (前ページ参照)

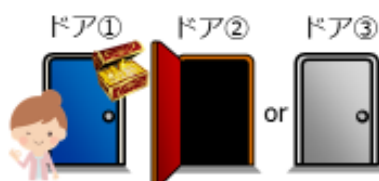
▶ $P(B) = 1/3$

▶ $P(A|B) = 1/2$

- ▶ 司会者はドア②かドア③を選択可能

(ベイズの定理)

- ▶ $P(B|A) = P(A|B) \times P(B) / P(A)$
- ▶ $P(B|A) = (1/2) \times (1/3) / (1/2) = 1/3$



司会者から与えられた最新情報 (尤度)

最初にドア①を選択。ドア②が開いた後に、ドア③に宝箱がある確率

- ▶ $P(B|A)$: ドア②が開いた後に、ドア③に宝箱がある確率 (条件付き確率、事後確率)
- ▶ $P(A)$: ドア②を開く確率
- ▶ $P(B)$: ドア③に宝箱がある確率 (事前確率)
- ▶ $P(A|B)$: ドア③に宝箱がある場合に、ドア②を開く確率 (条件付き確率、尤度)

▶ $P(A)=1/2$ (前と同じ)

▶ $P(B)=1/3$ (前と同じ)

▶ $P(A|B)=1/1$ (100%)

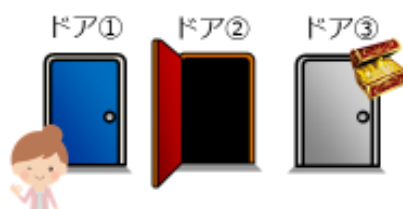
▶ 司会者はドア②のみ選択可能

(ベイズの定理)

▶ $P(B|A)=P(A|B) \times P(B)/P(A)$

▶ $P(B|A)=(1/1) \times (1/3)/(1/2) = 2/3$

司会者から与えられた最新情報 (尤度)



11

その他の例題

- ▶ モンティ・ホール問題 (100枚の場合) :
 1. 100枚のドアがある。一つは正解。残りは全部不正解。
 2. 挑戦者は100枚の中から一つ扉を選ぶ。
 3. 司会者は残り99枚の扉の中で不正解の扉を98枚選んで開く。
 4. 挑戦者は残り二つの扉の中から好きな方を選ぶ。このとき扉を選び直すべきか？ 選び直さないべきか？

※「司会者が挑戦者に情報を与えている」(尤度)というのがポイント！

確率=1%=1/100



確率=99%=99/100



12

まとめ

- ▶ **事前確率**に、**尤度**（観察された客観データ）を加味することで、より確からしい**事後確率**を求めることができる
 - ⇒ 事後確率 = 事前確率 × 尤度
 - ⇒ 事後確率分布 = 事前確率分布 × 尤度（次頁参照）
- ▶ これをベイズ更新といい
- ▶ この方法をベイズの定理という

ベイズの定理

$$P(B|A) = P(B) \times \frac{P(A|B)}{P(A)}$$

- ▶ P(A): A が起きる確率
- ▶ P(B): B が起きる確率（**事前確率**）
- ▶ P(A|B): B が起きた後で、A が起きる確率（条件付き確率、**尤度**）
- ▶ P(B|A): A が起きた後で、B が起きる確率（条件付き確率、**事後確率**）

13

ベイズの定理と機器故障率の関係

- ▶ 事前確率（＝従来の機器故障率）
 - ▶ 事前確率には、一般パラメータや個別プラントパラメータを使用する。
 - ▶ ここで、一般パラメータとは、「故障件数の不確実さを考慮した国内一般機器故障率の推定（1982年度～2010年度29カ年56基データ）」など
 - ▶ 個別プラントパラメータとは、個別プラントでの故障実績を反映した前回更新パラメータなど
- ▶ 尤度（＝個別プラント実績データ）
 - ▶ 尤度とは、ある期間に観測された個別プラントの故障実績
- ▶ 事後確率（＝最新の機器故障率）
 - ▶ 従来の機器故障率（事前確率）に、個別プラント実績データ（尤度）を加味することで、より確からしい個別プラントの最新の機器故障率（事後確率）が算出できる。

14

以上