

解説記事

保全活動の最適化と保全工学（1）

青木 孝行 Takayuki AOKI
日本原子力発電株式会社

三牧 英仁 Hidehito MIMAKI
三菱重工業株式会社

織田 満之 Mitsuyuki ODA
原電事業株式会社

1. はじめに

保全は、経年劣化が進行する機械、電気、制御などの機器から成る、いわゆる「機械系（ハードウェア）」と、その保全に直接または間接的に関与する「人間系（ソフトウェア）」の2つの要素から構成されている。（図-1）つまり、保全には、自然科学的手法で記述し取扱うことのできる「機械系」の世界と、保全に直接係る人々、保全を取り巻く人々など多くの人間が関与するので、人間の心の動きや思考、あるいは人間の社会的行動などが関係する、いわゆる「人間系」の世界がある。これら機械系の世界と人間系の世界はそれぞれ自然科学と人文・社会科学を基礎とした学術を活用すれば、合理的に論じることができると考えられる。そこで、本特集における検討の中で、既存の学術体系から保全の世界における学術体系を類推したところ、自然科学および人文・社会科学に対応する「保全の世界」の学術として「保全科学」が、そしてその「保全科学」を基礎とした「保全工学」および「保全社会学」が、他分野の工学や人文・社会科学との接点を有しつつ存在し、これらを基盤として保全の体系化および保全学の構築が可能であるとの見通しを得た^{[1][2]}。ここで言う「保全工学」は、保全の「機械系」の世界における最適解を導出するための学術であり、「保全社会学」は、保全の人間系を取扱うための学術である。

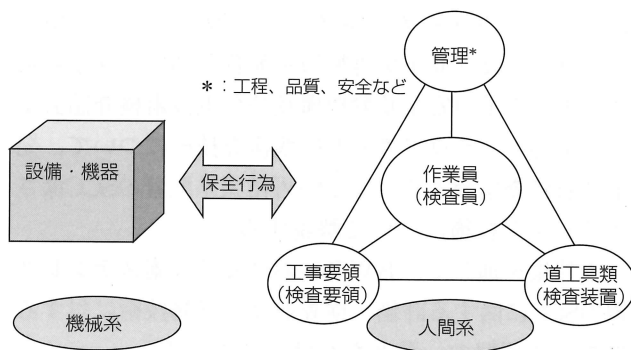


図-1 保全における機械系と人間系

本特集では、これまで保全に対する体系的取り組みの必要性、保全の課題や論点などについて、また「保全学」や「保全科学」、そして「保全工学」などがどのような形式、体系および構造を有するものであるか、既存学術との類似性などに着目して論じてきた。今回はこれまでの検討を踏まえ、保全活動の最適化とそれを可能にする「保全工学」について論じることとしたい。

2. 一般社会と保全

産業は一般社会のニーズに基づき生産物（製品）を社会に提供する。その一方で、産業活動によって事故・故障などが発生するとそれが一般社会へ悪影響を与える可能性がある。このため、一般社会は産業に安全と安心を求め、産業は一般社会へ安全と安心を提供するため事故・故障の発生防止活動を行うとともに、その活動の一般社会への理解活動を行っている。（図-2）事故・故障を防止するための活動には、色々な活動があると考えられるが、その中で重要な位置を占めるのが設備の保全活動である。なぜなら、この世に存在する産業設備等の人工構造物は供用時間の経過とともに劣化が進行するので、設備の機能や安全性を維持するには事故・故障の主原因である経年劣化の管理、すなわち「保全」が不可欠であるからである。

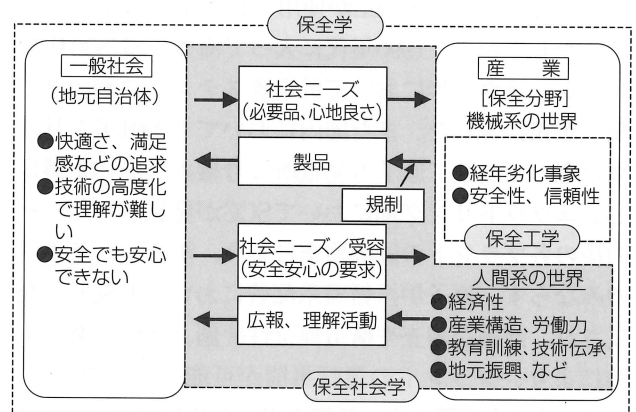


図-2 一般社会と産業の関係

以上のように、一般社会と保全の両者は互いに密接な係わりを持っているのである。このため、一般社会と産業の関係を明確にし両者間の問題を解決する手法あるいは方法（たとえば、保全工学に基づく科学的、工学的合理性に対する一般社会の正確な理解を促進する方法、社会からの要求の非合理性を最小限とする方法など）を提供してくれる学術、すなわち保全社会学が必要となる。しかしながら、保全計画を立案する場合は、通常、一般社会との関係をひとまず置いておき、保全工学を用いて技術的最適解を導出することから検討をはじめめる。保全工学は、このニーズに応えられる内容を具備している必要があり、科学的、工学的合理性を有するものである必要がある。

3. 保全活動の内容と構造

保全活動は「計画」「実施」「評価」「対応措置」というサイクルを構成している。すなわち、保全とは、まず設備等の人工構造物が経年劣化することは避けられないとの基本認識に立ち設備機器に対し点検・検査などの保全を「計画」し、それを「実施」する、そして、その結果得られる設備機器の保全データ（点検結果など）を、設計データや運転データなども考慮して「評価（将来予測を含む）」し、その評価結果に応じて必要な「対応措置」^{注1)}を取ることである。

また、検査の結果何らかの異常や兆候が発見された場合、さらに事故・故障が発生した場合でも、同様に原因調査活動を「計画」し、それを「実施」する、そしてその実施時あるいはその後の運転保守で得られた保全情報を「評価」し、その評価結果に基づき必要な対策、すなわち「対応措置」を取る。このように、保全活動は、計画 (Plan)、実施 (Do)、評価 (Check)、対応措置 (Act) の、いわゆる保全サイクル (PDCA) を繰り返すことによって成立している。(図-3)

この保全サイクルPDCAをもう少し詳述すると、下記のようなになる。

①保全方針、目標の設定 (P)：保全（点検・検査）を行う場合、対象設備をどのような方針で保全するか、また保全の結果としてどの程度の運転成績（パフォーマンス）を期待するかなど、保全の方針、目標を設定する。

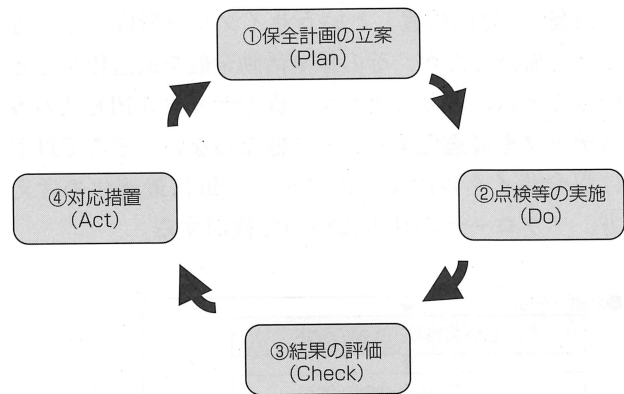


図-3 保全サイクルPDCA

- ②予防保全対象の選定 (P)：上記の方針、目標に基づき、予防保全を行う対象と事後保全とする対象を選別する。
- ③保全プログラムの策定 (P)：予防保全対象の機器をどのように保全するか、その保全内容、実施時期などを具体的に決める。この際、機器の重要度、要求される安全性/信頼性、経済性などを勘案する。
- ④検査等の保全の実施 (D)：保全プログラムに従って現場で保全作業（点検・検査、手入れなど）を実施する。
- ⑤検査結果等の評価 (C)：保全を実施した結果として得られる経年劣化に関するデータ（非破壊検査結果、寸法測定結果など）を評価し、経年劣化の進展予測を実施する。
- ⑥対応措置の要否判断 (C)：上記評価の結果に基づき対応措置の要否を判断する。
- ⑦対応措置の検討/実施 (A)：具体的な是正が必要と判断された場合は、その内容に応じてどのような方針で是正するか具体的に検討し実施する。この際、実施する措置（補修等）の効果度、必要な労力、機器停止期間など、経済性を勘案するのは勿論のこと、ライフサイクルやその後の運転計画なども考慮する。
- ⑧保管理の定期的見直し (A)：以上に示した一連の保全活動内容を常に改善するため、保全計画の見直しを行い、保全計画に反映する。

以上に述べた保全の流れを図示すると、図-4に示すようになる。本節では保全活動が「計画」「実施」

注1：点検・検査等の結果の評価を踏まえて、対象機器をどのように措置するか（運転継続するか、是正措置を施すかなど）を検討、決定し実行する行為。

「評価」「対応措置」というサイクルを形成していることを確認したが、その保全活動全般を最適化するという事は、取りも直さず、保全サイクルPDCAの各ステップを最適化することに他ならない。そこで以下に保全サイクルPDCAのステップ毎に最適化の考え方、アプローチの仕方について検討する。

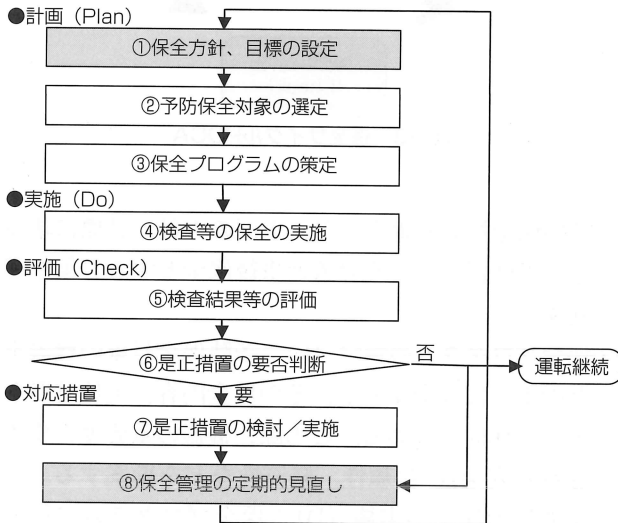


図-4 保全の流れ

4. 保全最適化の考え方とそのアプローチ

一般に産業設備は、製品を製造するために「運転」を行う一方で、経年劣化に対応するため定期的に設備の点検、整備を行う。このように、「運転」と「定期検査」を繰り返している。つまり、設備の健全性を確認したり診断したりする目的で、設備の運転中、停止中を問わず保全活動（点検・検査）を行っているのである。たとえば、運転中には稼働中の機器の振動診断を実施したり、停止中には機器を分解して経年劣化状況を把握し必要に応じ修理したりする。これで得られた経年劣化データをその後の保全活動（点検・検査）に反映する。また、運転中に劣化兆候や事故・故障が発生した場合は原因を究明し、その結果に基づき対策を講じるとともに、その時に得られた知見をその後の保全活動（点検・検査）に反映する。これら現場における実際の保全作業は、前述の保全サイクルのうち、「実施 (Do)」と「対応措置 (Act)」に対応している。

保全サイクルPDCAのうち、点検・検査等の「実施」は現場の実作業を伴い、「対応措置」も補修・取替

等の是正措置が必要な場合は現場の実作業を伴う。まず「実施」段階における保全活動を更に詳細に分析してみると、現場作業を遂行するには、現場作業そのものを「計画」し、「実施」し、その結果を「評価」し、必要に応じて手直しなどの「措置」を講じるという、もう1つの保全サブサイクルpdcaが形成されていることに気づく。同様に、「対応措置」段階についても、保全結果を評価した結果に基づき、そのまま運転を継続するのか、何らかの是正措置を講じるのか、などについて検討する他、是正措置が必要な場合はどのような手法あるいは工法を採用するのか、その具体的実施内容を「計画」し、「実施」し、その結果を「評価」し、必要に応じて実施結果の手直しなどの「措置」を講じるという、やはり現場作業の保全サブサイクルpdcaが存在する。(図-5) 一方、保全サイクルPDCAのうち、「計画」および「評価」の各ステップは一般には現場の実作業を伴わず、保全工学等の学術などを活用して検討する観念上の世界であるので、前述の「実施」や「対応措置」と性質がいささか異なる。

ところで、保全の最適化には、「技術的な意味の最適化」と「経済的な意味の最適化」の2つがあると考えられる。前者は、保全工学などの学術に基づいて導出された合理性のある技術的最適解のことであり、この技術的最適解を求めることそのものが一つの保全最適化であると考えられる。たとえば、経年劣化の進行する、ある設備を検査する場合、当該設備の「機能」「経年劣化の進行」および「検査 (検査時期)」という三者の間には、一定の関係がある。すなわち、経年劣化の進展を予測し、設備の機能が常に維持され、機能喪失に至ることがないように、最も適切な検査時期を特定するためにこれら三者の関係を利用するのである^[3]。(図-6)

また、保全の三本柱と言われる「検査」「評価」および「補修」の間にも一定の関係がある。すなわち、これら3つの技術を用いて、ある機器の機能を維持しようとする場合、それぞれの技術に対して闇雲に高度のレベルを要求するのではなく、三者間のバランスで対処できる場合が多い。たとえば、「検査」の精度が十分でない場合は「評価」に保守性を持たせ、「評価」の精度が十分でない場合は「検査」の精度を上げたり、「補修」を実施することによって機器の機能を回復させたりして、全体として機器の機能を確保、確認する。(図-7) 要するに、技術の現状が必ずしも

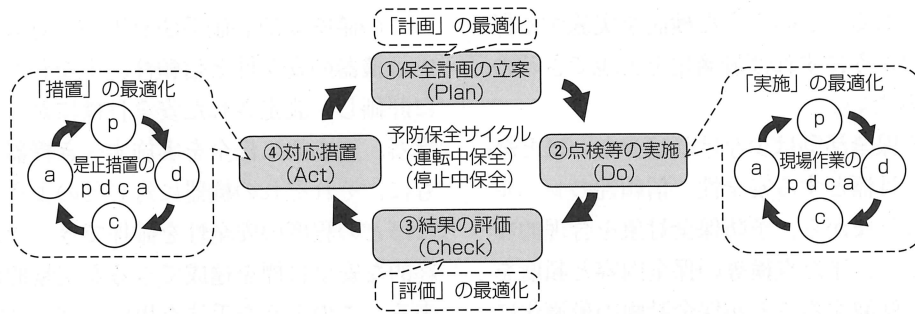


図-5 保全サイクルの各ステップにおける最適化

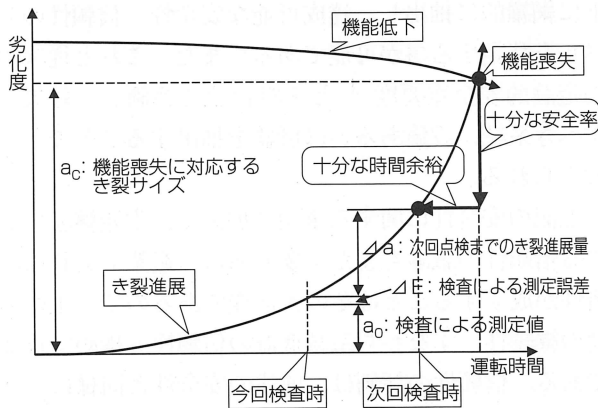


図-6 機器の機能、経年劣化の速度および検査精度の関係

十分でない場合、開発資金の投入によって新たに技術開発する方法も考えられるが、技術の現状や経済性を考慮して他の技術でそれを補完することも可能であるということである。これは「現状の技術」という限られた条件下で技術的な最適解を求める一つの方法であると考えられる。

次に後者の「経済的な意味の最適化」は、設備の安全性・信頼性とライフサイクルの視点を含めた経済性

のバランス、すなわち経済的観点からの最適解のことである。たとえば、設備の安全性・信頼性を向上させるために手厚く保全すると、経済性が成立せず、逆に必要な保全を実施しないと、安全性・信頼性が低下し、許容できなくなるばかりでなく、経済性も損なわれる。両者のバランス、すなわち最適点が存在するのである。これを追求するのも保全最適化の一つである。

以上に述べた点を踏まえ、以下に予防保全と事後保全のそれぞれについて、保全最適化の考え方とアプローチの仕方について具体的に論じる。

4-1) 予防保全の最適化

以下に予防保全サイクルのPDCAに沿って各ステップにおける最適化の考え方、アプローチの仕方について述べる。

4-1-1) 「保全計画」段階の最適化

保全を計画するということは、一般に予防保全を実施するということであるが、具体的には経年劣化を想定して設備機器の分解点検や運転中モニタリングなど

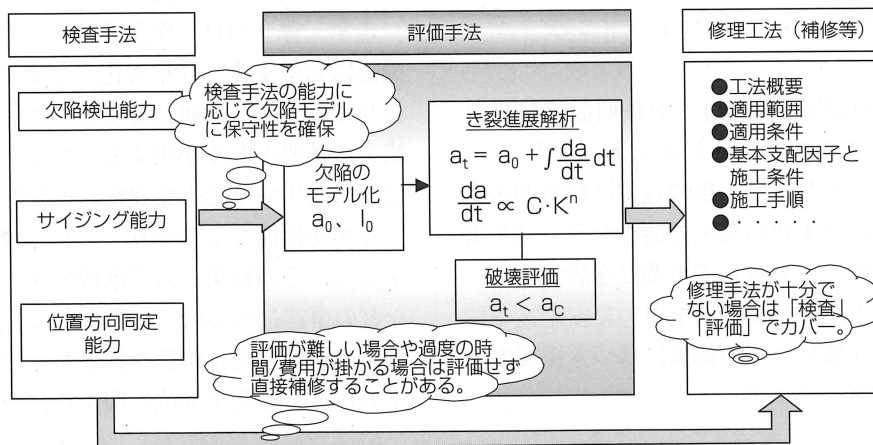


図-7 検査、評価、補修の補完関係

を計画することである。このような検討を実施する保全計画とは、どのようにすれば最適化を実現できるのか以下に考えてみたい。

一般に点検等の保全活動は少なければ少ないほど経済的であるので、目標とする安全性／信頼性のレベルを一定以上に維持しながら、予防保全対象を合理的な範囲に縮小すること、また点検等の保全内容と頻度を合理的なレベルに低減することが保全計画の最適化につながる。逆に、目標とする安全性／信頼性のレベルに到達していない場合は予防保全対象を適切な範囲に拡大し、保全内容と頻度を適切なレベルに増加させることが保全計画の最適化となる。このような観点から保全計画の検討ステップに沿って最適化を実現するための具体的方法について述べる。

(1) 予防保全対象の選定

予防保全では予め保全対象を特定しその対象に対して計画的に保全を実施するが、保全対象を選定する観点としては「安全上重要な機器」に加え、「生産活動継続上重要な機器」があり、これらの機器の抽出は一定の考え方にに基づき体系的かつ網羅的である必要がある。従って、保全を最適化するには、まず予防保全対象を適切に選定することが必要である。

予防保全対象を選定する具体的方法としては、下記が考えられる。

①下記を勘案して、目標とする安全性と信頼性のレベルを設定し、それらを達成する上で影響の大きい機器を一義的に抽出する。

●当該設備の保全方針

想定運転年数（プラントライフ）、機器毎の保全重要度^{注2}、設備管理基準、点検周期基準、保全に関する指標（パフォーマンスインディケータ）など

●当該設備の中長期運転計画、中長期設備修繕計画、ライフサイクルマネジメント、など

②抽出の具体的方法としては、現時点では技術的決定論に基づいて「経年劣化の発生可能性」と「経年劣化発生時の影響度」を考慮して重要度を設定しているが、今後は確率論的評価手法を用いて安全性や信頼性を定量的に評価し、その結果に基づき重要度を決定する手法が考えられる。

この確率論的評価手法を用いて対象系統、設備あるいは機器の安全性と信頼性、すなわちリスクを定量的に評価し、設定された安全目標に対して影響の大きい機器、重点的に保全を実施すべき機器を特定するとともに、それぞれの機器に対しどのような保全を実施すればどの程度の安全性を確保でき、その結果として最終的な安全目標を達成できるか定量的に知ることが出来る。このような手法を用いれば、「安全上重要な機器」と「生産活動継続上重要な機器」を一定の基準の下に網羅的に抽出し、達成可能な安全性／信頼性のレベルを特定する事が可能である。また、これと従来の決定論的安全重要度^[4]とを組合せて評価し、対象とすべき系統、設備あるいは機器を抽出することなども考えられる。

上記の安全性に関する議論に加えて、生産継続に対する信頼性の議論もまた重要である。産業であれば経済性が成立することはその大前提であるので、生産活動の継続性、すなわち系統機器の信頼性も極めて重要である。信頼性の評価は、前述の安全性と同様に考えることが出来る。

今後、以上のような検討、評価を合理的に具体化できる「重要度評価工学」や「安心社会学」などの学術の確立および規格基準の制定が期待される。

(2) 保全プログラムの策定

前項で予防保全対象が選定されたら、次にその対象に対する保全プログラムを合理的かつ具体的に策定する必要がある。保全プログラムの要素は「保全対象」「保全項目（保全メニュー）」「保全方法」「保全時期」の4つであるので、「保全対象」以外の3つの要素を具体的に決める必要がある。（図-8）

まず、保全項目（保全メニュー）であるが、これは機器に発生する「経年劣化」とその「発生部位」の組合せであり、この組合せでどのような保全の内容を実施する必要があるか決まる。たとえば、静的機器の溶接部に発生する応力腐食割れや動的機器の軸受に発生する軸受損傷などであり、これら経年劣化が発生進行すると、その結果として漏洩の発生や機器の故障停止などの事態に至るので、計画的に点検・検査したり補修・取替等の是正措置を講じたりする必要がある。経年劣化とその発生部位に関する技術的知見や経験は産

注2：機器の安全重要度、運転継続への影響度、故障時の復旧工事容易性、必要な復旧工事期間などに依る。

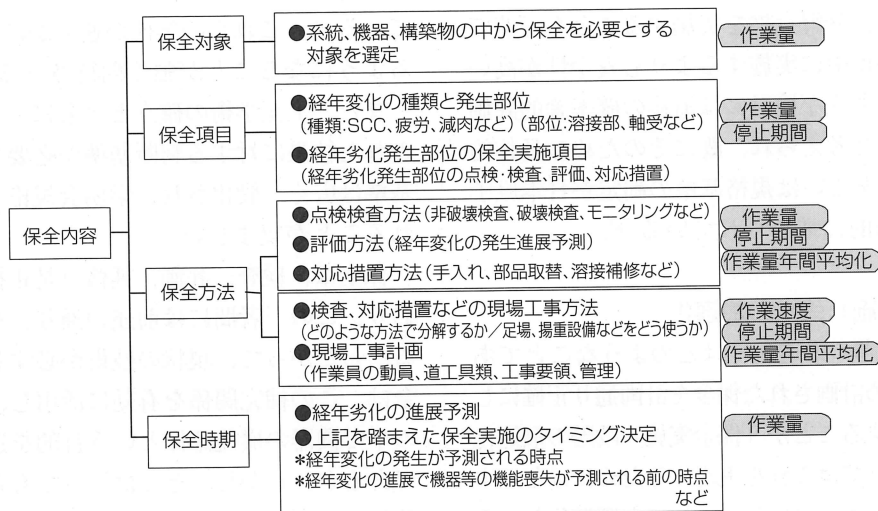


図-8 保全内容の主要な要素

業界に蓄積されており、たとえば、原子力発電所の場合は「高経年化対策検討」^[5]などの検討活動により既に整理されている。

次の保全方法については、経年劣化予測に基づく技術的検討、すなわち保全工学を用いて科学的技術的に検討できる部分（検査方法、補修方法など）と、保全現場においてどのような手順や要領で、如何に効率的に実施するかを検討する部分の2つがある。（図-9）前者は「経年劣化の種類」とその「発生部位」を考慮して保全工学を適用し、効率的効果的な保全方法を選定する検討である。たとえば検査の場合、各種の検査方法（検査手法、検査手順・要領など）の中から最適な検査方法を選定するには、「検査システム工学」などの学術を確立する必要がある。このような学術を確立するための要素技術は既にこの世の中に存在していると考えられるが、未だ十分に保全工学として体系化されていないのが現状である。後者は現場作業を計画通り正確に、また効率的に進めるための保全方法を選定する検討である。この検討を合理的に行うには、たとえば産業界の知見を結集してその時点の最善と考えられる機種毎の保全方法を標準化することなどが考えられる。米国原子力界ではこのような標準化が既に米国EPRIの保全テンプレート^[6]やASMEの運転保守コード^[7]として結実している。

最後に保全時期であるが、これには、分解点検を定期的実施するような場合の保全時期（あるいは頻度）と、計画された保全を対象プラントあるいは設備の運転中に実施するのか、または停止中に実施するの

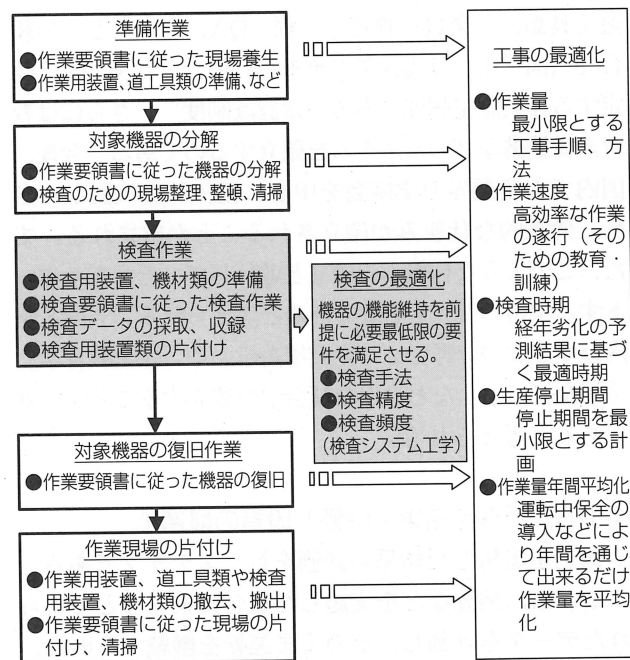


図-9 保全方法の最適化

かといった保全時期の2つの意味合いがある。前者は経年劣化の予測をベースとした保全工学を適用し、保全時期（あるいは頻度）を合理的に決定する検討であり、たとえば前述の「検査システム工学」で最適な検査時期（あるいは頻度）を選定する方法が既に論じられている^[3]。後者は対象プラントあるいは設備が運転中のときに保全を実施した方がよいか、停止中に保全を実施した方がよいか（あるいは停止中でないか）を安全性および経済性の観点から決定するための検討である。運転中といえども保全対象の機

器を隔離できれば、分解点検を実施することも可能であり、この方が停止中に実施するよりも安全性が高い場合がある。このような検討には前述の確率論的評価手法が必要になると考えられ、既にそのための具体的な標準手法の確立あるいは規格基準の制定が日本原子力学会などで精力的に進められている^[8]。

4-1-2) 「保全実施」段階の最適化

「保全実施」段階の最適化とはどのようなことであろうか。それは予め計画された保全を計画通り正確にしかも効率的に実施することが「保全実施」段階の最適化に他ならない。それではこれを実現するためにはどうすれば良いのであろうか。やはり、ここでも標準化という手法が有効ではないかと思われる。たとえば、機種毎に標準的な作業要領書の開発や、作業要領書、使用装置・道工具類、作業員、管理（工程、QA、安全など）の組合せ（図-1）で実作業のデモを行い、それを評価、認定する作業認定制度（あるいは認証制度）、さらには教育訓練機構などのシステムを確立するのである。今後、国内でも産業界や学協会を中心に積極的な検討がなされ、効果的な仕組みが確立されることが望まれる。また、このような仕組みの確立と並行して、それをサポートする学術の確立も必要であると考えられる。人間系を内包するこの分野では「産業構造学」や「保全教育学」「保全経済学」などの保全社会学を確立することが有効であると考えられる。

4-1-3) 「保全結果の評価」段階の最適化

保全を実施した結果の評価を行うステップである。ここでは、検査などを実施した場合は検査などで得られたデータを評価し、そのまま運転を継続するのか、何らかの是正措置を講じる必要があるのか、などについて判断する。この評価活動を最適化するという事は、取りも直さず、保全工学に基づき科学的合理性をもって保全結果を評価し、一定の安全性を確保することを前提として是正措置の要否を正確に判断することに他ならない。従って、今後は保全工学を体系的に整備し、各種のニーズに応えられるようにする必要がある。これまでの検討で、保全工学を構成するであろうと考えられる「劣化メカニズム分析工学」「劣化進展予測工学」「仮想システム工学」「安全裕度工学（規格工学）」「検査システム工学」「欠陥評価工学（破壊力学）」などの学術を確立することの必要性が論じられ

ている^[2]。これらの学術が速やかに体系的に確立されるようになることが強く期待される。

また、上記学術の確立とともに、それら学術で評価された結果に対する判断基準が必要である。この判断基準は広く一般化され、学協会規格などとして制定されることが望ましい。

保全は、検査、評価、補修（是正措置）から成っており、この三者間には前述の通り、補完関係が存在する。したがって、現状の技術が必ずしも十分でない場合は、この補完関係を有効に活用し、全体のバランスの中で機器の機能確保という目的を達成すればよいのであるが、しかし、そうは言っても各技術が高度に成熟していることは望ましいことである。今後は上記学術を活用し、常に評価技術の高度化に取り組むことも必要である。

4-1-4) 「対応措置」段階の最適化

対応措置とは、前述のように保全結果を評価し、そのまま運転を継続するのか、何らかの是正措置を講じるのかなど、どのように対応するか判断した結果に基づき、措置を実施することである。是正措置を講じる必要があると判断された場合はどのような手法あるいは工法を採用するのかについて検討するとともに、その是正措置を具体的に「計画」し、「実施」し、そしてその結果を「評価」し、評価結果によっては必要に応じて実施結果の手直しなどの「フィードバック措置」を講じる。この活動が適切に行われないと、その後の運転中に事故・故障などの不適合が発生する可能性が高くなるので、安全性と経済性の観点から極めて重要な活動であると言える。

この活動を最適化するには、是正措置が必要と判断された場合、どのような最適な措置を選定するか、その選定方法と判断基準を明確にすることが必要である。その一方で選定された是正措置の現場作業を効率的、効果的に実施することも「対応措置」の最適化の一つである。このため、現場作業の保全サブサイクルpdcaを最適化することが必要となるのである。

具体的な最適化の方法としては、安全性と経済性のバランスを考えることがあげられる。是正措置が必要な場合、その是正措置の効果と措置後の保全に要する費用のバランスの中で最適と考えられる是正措置方法を選定する方法が考えられる。（図-10）これを可能にするには、4-1-1節で述べた確率論的安全評価手法や経済性

を評価する手法が必要であり、その裏付けとなる「対応措置工学」や「予防工学」などの学術の確立も必要であると考えられる。また是正措置方法、すなわち各種の補修工法や予防保全工法の開発、是正措置施工後の経年劣化予測手法の開発、それらの規格化などが必要である。

是正措置の現場作業を最適化するには、4-1-2節で述べたように、各種工法毎に適用する作業要領書、使用する装置・道工具類、作業員、管理（工程、QA、安全など）の組合せで実作業を実施し、それを評価、認定するシステムや教育訓練機構などを確立する必要があると考えられる。これらを円滑に行うには「産業構造工学」や「保全教育学」「保全経済学」などの学術の確立が必要である。（次号につづく）

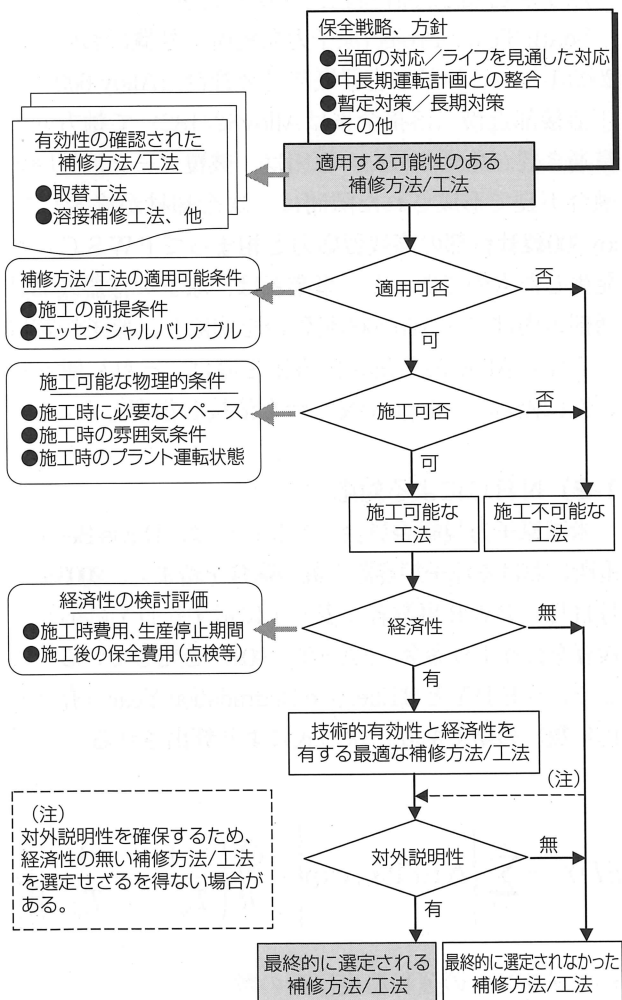


図-10 是正措置選定の考え方

参考文献

[1]青木、正森；「保全の構造と体系に関する検討」日本保全学会誌「保全学」Vol.2, No.2 (2004)
 [2]青木；「保全科学および保全工学の構造と体系」日本保全学会誌「保全学」Vol.3, No.1 (2004)
 [3]青木、他；「保全学の構築に向けて（4）—「保全工学」構築のアプローチ—」日本保全学会誌「保全学」Vol.3, No.1 (2004)
 [4]発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針（平成2年8月30日原子力安全委員会決定）
 [5]資源エネルギー庁；「高経年化に関する基本的考え方」（平成8年4月）URL：http://www.plec.jp/lineup/metijyouhou/line_up_meth08.php?npt=7000649
 [6]EPRI Report；Guidelines for Application of the EPRI Preventive Maintenance Basis (TR-112500, Feb 2000)
 [7]ASME O&M Code；OM-2001 Code for the Operation and Maintenance of Nuclear Power Plants
 [8]日本原子力学会 標準委員会 発電炉専門部会 確率論的安全評価（レベル1及びレベル2）分科会 (<http://www.soc.nii.ac.jp/aesj/sc/index/index.html>)

（平成16年5月12日）