

保全学の構築に向けて

The Future Activity for Construction of Maintenology

日本原子力発電株式会社	青木 孝行	Takayuki AOKI	Member
普遍学国際研究所	高瀬 健太郎	Kentaro TAKASE	Member
関西電力株式会社	千種 直樹	Naoki CHIGUSA	Member
関西電力株式会社	藤井 大士	Takeshi FUJII	Member

Abstract Maintenance is an activity to keep the functions of systems, structures and components against aging phenomena.

Maintenance has so far been carried out based on experience of the experts mainly engaged in the plant. However in order to make a suitable maintenance program, it is necessary to predict the future based on past knowledge and past research data. Then, it is necessary to regard maintenance as sciences and to systematize maintenance, that is, maintenology needs to be constructed. As the method of systematizing maintenance, study was carried out from the viewpoints of 3×3 matrices, a maintenance equation, such as unchangeable term and changeable term etc.

Keywords: maintenance, maintenology, 3×3 matrix, maintenance equation, unchangeable term, changeable term

E-mail: Takeshi FUJII;K439222@kepcoco.jp

1. はじめに

どのような機器も時間の経過とともに経年変化が進展する。しかし、その経年変化は、設計時の予測を上回って急激に進展することは少なく、徐々に進展することが多い。すなわち、多くの場合は、当初計画していた使用期間内に、経年変化が問題となることは稀である。しかし、稀ではあっても応力腐食割れ等の経年変化事象が顕在化することがあり、今後もその可能性は否定できない。

保全とは、経年変化の避けられない設備、機器等に対し、使用期間中に発生する経年変化に対応してその機能を維持するための行為である。

原子力発電所設備の機能を維持管理するためには、経年変化を適切に予測して最適な保全活動に結びつける必要があり、その予測性の精度向上が重要である。また、保全活動の最適化を見出すには保全を学術的観点から捉え、その構造を分析し、体系化することが必要である。

本稿では、保全学の構造、保全方程式、保全の実務、保全工学といった4つの側面に着目し、保全学構築に向けて取り組むべき方向性を提示する。

2. 保全学の構造^[1]

保全の基本原理に階層性という概念を当てはめることを検討すると、原子力プラントが電力を生産するまでにたどるプロセスは、設計、建設、運転管理の3つの部分からなり、それらが階層的な役割を果たしながら全体として電力の安定供給という機能を果たしているといえる。この階層性が存在し、階層原理が正常に機能すれば、設計、建設、運転管理の3つの行為が適切に機能し、その結果電力を正常に供給するという目的が達成される。

この階層構造は保全の体系化に必要な基本的特性であり、普遍的なこの視点に立って、保全の構造を分析しそこに階層性があるのかどうか、階層原理がどのように機能しているのかを調べることは、保全の体系化を図る上で有用である。保全の階層原理が時間と空間を体系的な拠りどころとしていることを示せば、普遍性が確固たるものになるので、体系化の普遍性につながっていく。

保全の目標は、「コストミニマム」と「信頼性マキシマム」であり、常にこれらの法則に従わなければならない。保全学の構造には、自然科学と

同じように 3 層の階層構造、「法則－理論－規格・基準」といった発展性、フラクタル構造性が潜んでおり、Fig.1 のようにまとめられる。

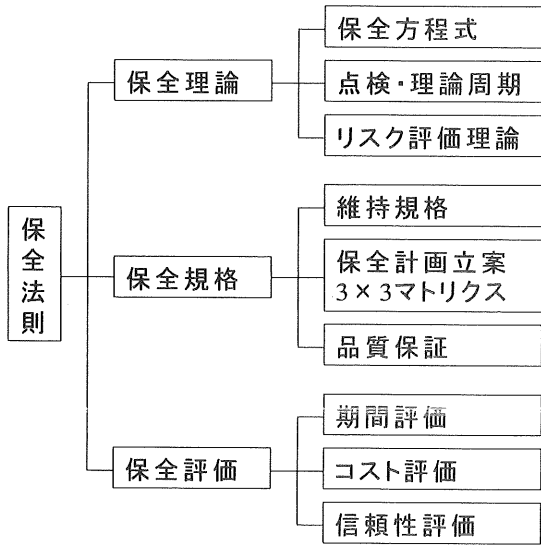


Fig.1 Structure of maintenology

この図における「保全方程式」から「信頼性評価」までの 9 項目が保全工学の実体を表現することになる。この 9 項目が保全ラング（保全制度）の骨格を現しており、保全パロール（保全行為）は「保全計画立案」で策定される。

ここで、保全活動の実施サイクルは、時系列的に「計画－実行－評価」の 3 つの基本要素に分割され、空間的には「対象－分析（関係）－基準（抽象）」の 3 つの要素で表される。これらは、時間軸、空間軸に沿って Table 1 のように表すことができ、この 3×3 の要素でできたマトリ

Table 1 Languge of maintenance

		→ 時間		
		計画	実行	評価
↓ 深さ	対象	保全対象の明確化 保全対象の選択 例：原子力プラント システム（システム） 機器 部品 末端部品	保全の行為の対象の明確化 保全対象の選択 例：点検 監視 予防保全 補修 取替	保全対象に保全行為を行った結果 例：点検の結果 監視の結果 なにがわかるか 保全の結果、対象物はどうなる 補修、取替の結果 どうなる
	分析（関係）	システム、機器、部品間での機能相関の明確化 例：機能展開 健全性展開 それぞれの相関	保全行為の関係を明確にする 例：点検項目間 点検、監視、保全 補修、交換の関連	結果の関係を明確化 例：点検、監視結果と 保全、補修、交換の 関係
	基準（抽象）	機能の判断基準の設定 例：機能仕様 規格、基準	各行為の判断基準 例：検査基準など	維持基準、規格などと比較して結果はどうなるか 必要とする基準を満足している 例：機能、健全性展開を再度組み立てて全体としての判定基準に対する評価を行う

クス²⁾によって保全活動の体系化の一部を構成することができる。

3. 保全方程式³⁾

先に述べたように、保全は「コストミニマム」と「信頼性マキシマム」という法則に支配されている。両者は対立関係にあることが多いが、「信頼性」は日本の原子力の場合には他産業に比べて深刻な意味を込めて用いられることが多く、コスト低減を実現する方策があっても信頼性をいくらでも損なう場合には（信頼性の低下は無視できる程度であっても）社会的には受け入れられないことが多い。したがって、実際には「信頼性は現状維持」の下で「コストミニマム」の方法を検討することになる。

ここで、階層性を持った保全の定式化「保全方程式」を検討してみる。

方程式で扱おうとするプラントがあり、それに対する保全方式を方程式に代入すると保全にかかる費用が決定されるという構図では、時間と空間をパラメータとした以下の式で表すことができる。

$$\text{保全コスト} = \int_{\Omega, T} F[\text{保全方式}] dVdt \quad (1)$$

ここで、 F は保全方式から保全コスト密度を与える汎関数であり、 dV 及び dt はプラント空間と時間に対する微小要素である。また、積分領域はプラント空間 Ω 及びそのプラントライフ T 全体の直積空間として表現されるものとする。

具体的な例として、ある原子力プラントの原子炉建屋内の主要設備を対象としてみる。時間については、建設から廃炉までの期間を解析することが考えられ、また、空間については、この連続領域を構成する小領域に分割される。この時、どのレベルまで分解する必要があるかは解析者の意図に委ねられる。

3.1 保全学の特徴「実時間」と「現状知見」

保全学が物理学や数学といった学問分野と異なる点は、それが実時間を扱っているとうことである。例えば、原子力プラントに係わる保全活動は今現在も実施されており、電力の安定供給を保

証するという重要な役割を担っている。保全学がそういった現実の絶え間ない活動を対象としているということを考えるとき、ここでいう実時間とは正にその流れを寸分も止めることができないという特性をもつ現実の時間であることがわかる。

未来の予測は、過去の経験と実績を基になされるため、「保全方式」から期待値としての保全コストを算出するためには、「保方程式」という時間に普遍的な入れ物に、その時点での知見、すなわち「現状知見」を代入する必要があることが分かる。このことから上記方程式案を、次のように改める。

$$\text{保全コスト} = \int_{\Omega_T} F[\text{保全方式}; \text{現状知見}] dVdt \quad (2)$$

現状知見には機器の故障モードや故障率、選定した保全方式に対する過去の実績といったものから検査方法の精度や構造物の材料の種類、製造コストといったものまで含まれる。

保全計画立案において未来を予測するとき、いつでも現状知見の精度がその限界を規定する。そういった限界があるにも係わらず、実時間が刻々と流れていってしまう現実の世界に生きる我々は保全活動計画をその時点での未来予測に基づいて策定しなければならない。

この現実社会、実時間との非常な密接性が保全学の最も特徴的な部分と考えられる。

3.2 境界条件

保方程式には境界条件が存在し、その境界条件を満足しつつ、保全コストの最小化を試みるのが保全の最適化である。境界条件の典型的なものとしては、稼働率や炉心損傷頻度といった指標を現状維持するといった条件が考えられる。

3.3 保全計画と保方程式

実際にプラントの保全を定量的に扱うことができたとしてもその入力パラメータは膨大なものになる。それを取り得る全ての値についてコスト計算を行い、その結果を比較して最適な保全を探することは現実的ではない。そこで、現状行われている保全方式をベースに、いくつかの保全パラメータを変化させてみて、それが保全全体に及ぼ

す影響を評価することを考える。その上で、その新しい保全方式が合理的であれば、それを実際に実施してみてその結果を見てから、次の合理化を模索するのが現実的である。その絶え間ない改善の繰返しこそが保全最適化への確実なステップである。

Fig.2 は保全計画と保方程式の関係を表したものである。保方程式自体は時間の流れに不変な概念であり、保全計画から保全に係る費用の期待値や稼働率等の信頼性指標を算出するためには、機器の故障モードや故障率といった「現状知見」が必要である。「現状知見」に基づいて仮想的に時間を経過させ、未来の予測を行い、その保全計画の良否を判断する。前述のように保全計画の改善を試みる際には境界条件を考慮する。

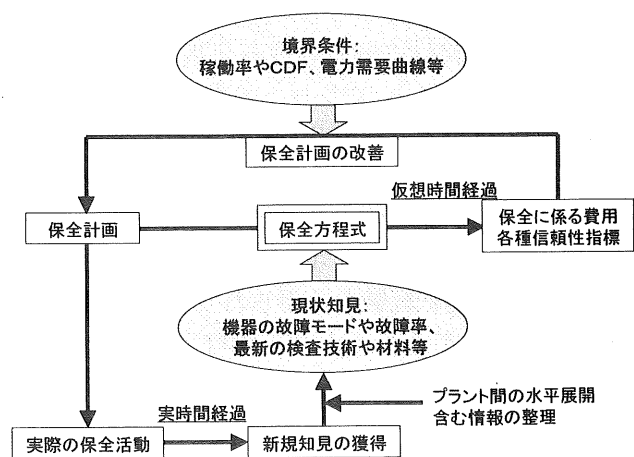


Fig.2 Maintenance program and maintenance equation

3.4 現状知見の更新と保全計画の修正

ある時点の「保全計画」はその時点での「現状知見」下でベストと判断されたものであって、あくまで暫定的なものである。

プラント運転のある時点で、ある種のトラブルが発生するとその対策がとられ、それ以降の保全計画にはそのトラブル防止に関する知見が反映される。すなわち「保方程式」に代入する「現状知見」の更新である。このように保全学は実時間と結びついているために、ある時点で保方程式を用いて立案した保全計画は、その後も適宜修正を行う必要がある。(Fig.3)。

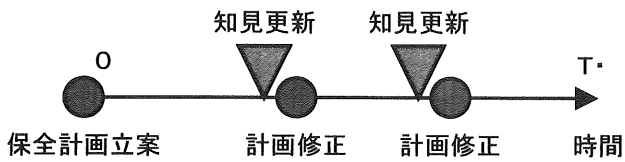


Fig.3 Planning and modification of maintenance program

4. 保全の実務^[4]

原子力発電システムは、最高水準の安全性・信頼性を確保すべく、計画、設計、製作、据付、試験・検査等の建設の各ステップにおいて、技術基準、各種規格基準類に基づく厳格なチェックが行われていて、十分な裕度、マージンが取られている。

4.1 機能回復と保全

信頼性と経済性の同時達成を目指すためには、経年変化に対応してプラントを設計時点の状態に戻すのではなく、機器や材料の経年による変化を適切に予測し、この予測に基づいて設計時に確保したマージンを管理することが有効である（コストミニマム、信頼性マキシマム）。

すなわち、運転経験から得られた知見を設計時の予測に照らすことにより予測性の精度を向上させることが有効である。

これを踏まえ、実際のプラントでは、設計時の裕度、マージンを考慮し、機器に想定される経年変化、損耗を適切に予測して、要求される機能の達成の可否という観点から保全計画のレビューとレビュー結果に基づく保全を実施している。

4.2 プラントライフマネジメントと維持基準

経年プラントの保全計画のレビューにおいては、実際に経年変化事象が顕在化していないため、事象の発生可能性に対する評価が主となり、経年変化事象が顕在化した後の保全には十分に言及されていない。しかしながら、事象が顕在化した場合には、保全計画は維持基準に基づく評価結果を踏まえて見直されることになる。

すなわち、経年変化事象に対する体系的な発生可能性評価と維持基準に基づく「検査」「評価」「補修」の組合せにより、プラントライフマネジメントとして保全計画が完結すること、これがプラントシステムの保全最適化のアプローチとい

える。

4.3 保全計画の構造的分析と保全体系化の必要性

対象とするプラントシステムの保全計画は極めて多岐にわたり複雑なものであるため、これを分析する手がかりとして、現状の保全を不変的なもの（常項）と変化するもの（変項）に分けて考察する。

保全計画の中で、点検もしくは検査、点検結果の評価、運転継続もしくは補修・取替の3項目は、順序と内容を変更することができず、すなわち常項といえる。

したがって、保全計画はこの不変的な常項の周りに変項により様々なバリエーションを持つ世界と表現することができる。

具体的に維持規格^{[5][6]}を保全計画の例として常項、変項に分けて分析する。Fig.4 に示すように

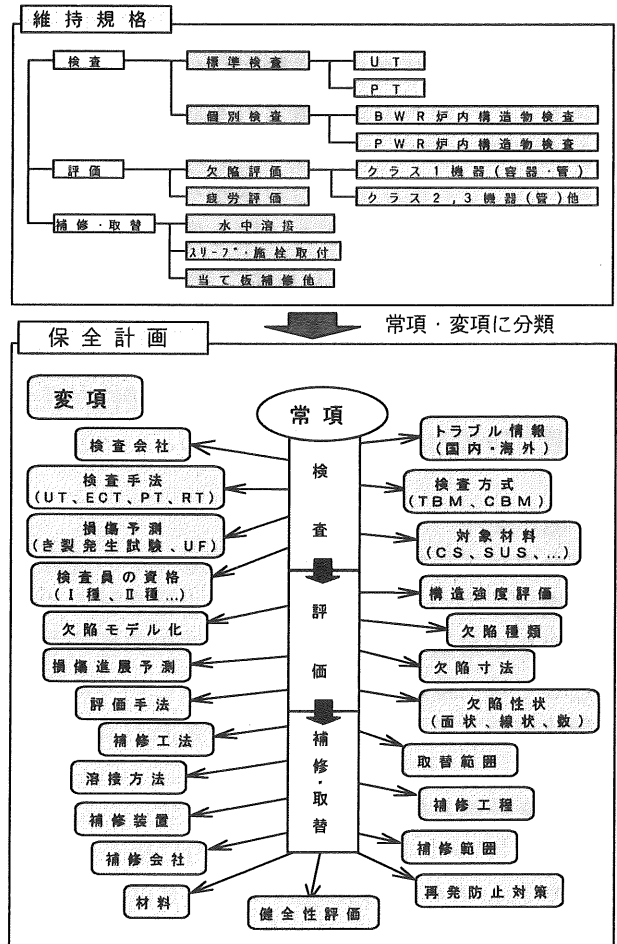


Fig.4 Unchangeable term and changeable term of maintenance program

保全計画を常項、変項に分類することで、検査、評価、補修・取替のそれぞれの分野において何

をどのように開発、整備する必要があるかが見えてくる。

保全を体系的に進めていくには、体系化の骨格となる理念的なものだけではなく、豊富な実例と広い分野の工学現象が伴っていないと想像できない。

以上をまとめると、今後の保全の実務の概念はおおよそ Fig.5 のように表現される。

変項の各分野の研究、整理が保全を高度化させていく上での課題である。

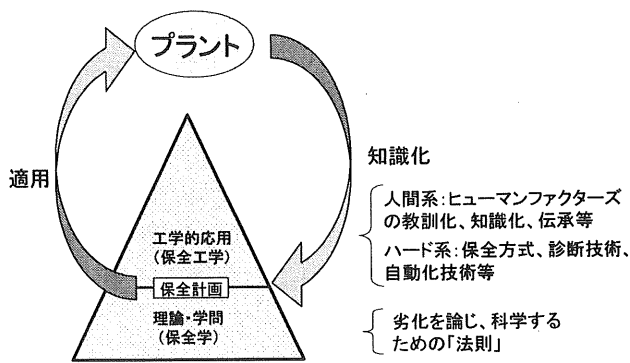


Fig.5 Future's maintenance

5. 保全工学¹⁷⁾

保全学は、①社会のニーズにしたがって、②使用する人口物(設備機器)の信頼性を最大限にし、③コストを最小限にするための手段を提供する保全科学と、それを基礎としてその上に構築され、対象とする系が実時間の進行とともにどのように変化するかを予測、評価し、実施を予定している保全の内容を最適化する学術である保全工学を包含しているが (Fig.6)¹⁸⁾、ここでは保全を学術的に取り扱う切り口として保全工学を考える。

各機器の保全では、想定される経年変化事象について、その発生・進展を抑制し、または、発生・進展を監視して必要に応じて補修、取替等を実施する。この時、保全を考える上で重要なポイントは、当該機器の機能が維持されていれば、それを前提に経年変化の進展を一定の範囲で許容することが可能であるということである。この許容には限界があり、保全工学はその限界を規定する重要な役割を担っている。

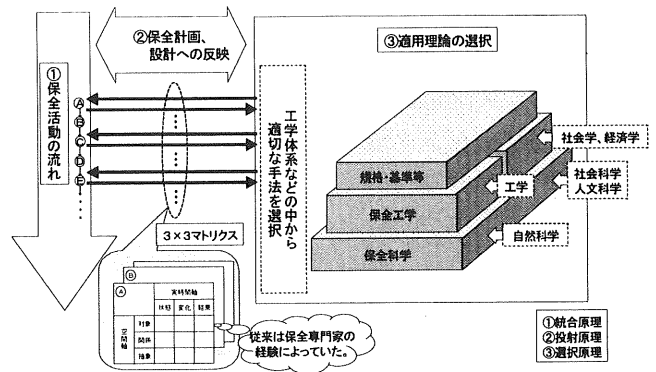


Fig.6 Scope of maintenology

保全計画には、「検査→評価→補修・取替」という常項が存在することは先にも述べたが、この中の検査に焦点を当てて考える。

検査実施の目的には、検査時点での機器の健全性を確認することのみならず、経年変化の予測手法の精度、妥当性を確認することが挙げられる。前者が重要であることは言うまでもないが、後者は、その後の保全の内容、時期を決定するという重大な技術的役割を担っている。

この検査について合理的な決定を行うために、検査対象、内容、方法、時期の観点からその決定方法について検討する。

5.1 検査対象

検査対象は、各機器の経年変化の発生可能性、頻度及び経年変化による故障が発生した場合の影響度を勘案して決定することが合理的である。例えば、故障しても安全性の問題がないか、あるいは影響が小さい場合は、経済性の観点から検査の内容や頻度を決定することが合理的であり、場合によっては検査を実施せず機器が故障した後に事後保全として補修することも考えられる。これはリスク情報に基づく検査の考え方であり、対象機器の選定として有効である。

5.2 検査内容

検査内容の決定方法としては、高経年化に関する基本的な考え方¹⁹⁾の手法に則ることが有効である。各機器について、部位と想定される経年変化事象の組合せに関する健全性評価を行い、その機器に対して必要な検査内容を抽出することにより、不必要な検査を合理的に排除することが可能である。

5.3 検査方法

検査手法に要求される性能/能力には、欠陥検出能力、欠陥位置同定能力、欠陥方向特定能力及び欠陥サイジング能力が挙げられる。ここで、要求される精度は、例えば、欠陥の長さ情報のみあればよい場合や、特定の範囲のみ健全性を確認すればよい場合等、検査対象である機器の設計や強度、経年変化の進展条件によって異なる。検査手法に対する要求性能は、機器の維持機能に対する設計余裕の程度と経年変化の進展速度に関連しており、それらのバランスで決定することが合理的である。

5.4 検査時期

経年変件事象の顕在化時期と機器の機能喪失時期が予測できる場合は、例えば、経年変件事象が顕在化すると予測される時期に初回検査を実施すれば、機能喪失に対して余裕があり、経年変化の予測精度あるいは保守性を確認することができる。

経年変化の予測手法が十分に確立されていない場合は、設計上の余裕が十分にあり、経年変化が大きく進展しないうちに、実機データを着実に採取、蓄積し、それらのデータのトレンドに基づき経年変化の将来予測をする方法、経年変化対策材等を採用した場合は、研究データや従来材の検査頻度を参考に、運転経験を踏まえ徐々に延長していく方法等のアプローチが考えられる。

これらについては、今後、論理体系の構築が必要であり、検査工学の課題である。

以上のように、保全学を保全工学や検査システム工学に掘り下げ、これを足がかりに保全学全体の体系化を検討することも有効である。

6. まとめ

保全を体系化し、関連学術との連携を深めることはこれまでも重要課題として認識されてきた。それにも係わらず、本質的なところは未だ解決されていない。

保全方程式を用いた保全理論の分析においては、各要素理論の充実を始めとし、対外的説明性をもった信頼性の定義と境界条件の検討が必要

である。また、故障率等推定のためのデータ取得やベイズ統計採用等のデータ分析手法の検討も課題である。

さらに国内外を問わずに、プラントの横どおしを効率良く行うためのデータ収集、分析・知見の共有化体制の充実も必要である。

保全に関する問題は閉じておらず、空間的にいえば重要な機器について重点的に管理すること等によって安全性を向上させることが可能であること、時間的にいえば絶え間なく情報を収集・分析して更新していく必要があることを認識する必要がある。

保全のような科学的な定量性だけでは十分に記述できない分野の体系化は新しい視点が必要である。保全の体系化には数学のように全てを定量的に把握するといった側面は少ないので、言語のように定性的であっても豊かな創造ができればよい、という視点に立つことも重要である。

参考文献

- [1] 宮健三 他、保全学の構築に向けて(1)、日本 AEM 学会「フォーラム保全学」、Vol.1, No.4, 2003, pp.71-75.
- [2] 宮健三、織田満之、保全の体系化に関する一考察、日本 AEM 学会誌、Vol.8, No.2, 2000, pp.148-158.
- [3] 高瀬健太郎 他、保全学の構築に向けて(2)－保全理論について－、日本保全学会誌「保全学」、Vol.2, No.1, 2003, pp.63-68.
- [4] 千種直樹 他、保全学の構築に向けて(3)－実務からみた保全学のテーマ－、日本保全学会誌「保全学」、Vol.2, No.2, 2003, pp.56-61.
- [5] 日本機械学会、発電用設備規格委員会ホームページ (<http://www.isme.or.jp/std/pgc/>)
- [6] 日本機械学会、発電用原子力設備規格 維持規格 (2002 年改訂版)
- [7] 青木孝行 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, pp.57-69.
- [8] 青木孝行、正森滋郎、保全学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, pp.3-9.
- [9] 資源エネルギー庁、高経年化に関する基本的な考え方、1996.