

分析論文

保全学の構築に向けて(2) - 保全理論について -

普遍学国際研究所・高瀬健太郎
Kentaro TAKASE

慶應義塾大学・宮 健三
Kenzo MIYA

関西電力株式会社・千種 直樹
Naoki CHIGUSA

日本原子力発電株式会社・青木 孝行
Takayuki AOKI

1. はじめに

原子力発電に関わらず、プラントの保全は設計・運転・管理に携わるエキスパートによってその内容が立案され実施されている。計画立案の際に最も有効な情報は実はエキスパートの業務経験に基づく知識であり、過去のトラブル等の運転実績である。

特に原子力の場合、他の産業に比べて日が浅いことから、現場の人たちの試行錯誤によって保全計画の改善がなされてきた側面が強い。しかしながら、運転経験の蓄積にともない従来の経験に基づく保全から理論に基づいた保全へと移行する機運が高まってきた。保全の体系化とはこの一連の流れにおいて理論構築の枠組みを与えることに他ならない。体系化とは比喩的にいえば、複雑な全体を構成している抽象的な要素を抽出し、次いで各要素間の関係を見出し、その関係をもとに複雑な全体の挙動を予測する理論を構築することであろう。その理論が、各要素に関わる変数と、それら要素から構成される複雑な全体とを関連付ける方程式として表現できるとすればそれは保全方程式と呼んでよいであろう。

2. 保全方程式

2-1) 構図

第一回で議論したように保全を支配する原理を言葉で表すとすれば「コストミニマム」「信頼性マキシマム」であろう。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られ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ばくかでも損なう場合には(信頼性の低下は無視できる場合であっても)社会的に受け入れられない。従って実際には「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。ところでこの場合「信頼性維持」とは何を表すのか? 「稼働率維持」であればプラント運転時のプラント停止にいたる故障確率と、停止から再稼働までにかかる時間が関係するから後者を短縮できれば多少前者が増えても稼働率は保証される。あるいは、「炉心損傷に到る確率を増加させないこと」であれば、その確率に大きく関わるという意味での「重要な機器」に対して現状よりも十分な保全を実施でき、その故障確率を大幅に低減できるならば、「重要度の低い機器」に対しては代わりに保全のコストダウンが検討可能となる。

このようにみれば「信頼性」の定義は保全方程式の「境界条件」の一部を与えると見ることができる。まず「保全方程式」があってそこに「境界条件」を与えると、保全を最適化する解が決定されるという構図である。境界条件については後で議論する。

2-2) 保全方程式の定式化

2-2-1) 形式(案)

さて、ある現実的な問題を定式化するには、しばしばどこかで大鉈を振るう必要があることを銘記しておいて、「保全方程式」なるものの形を検討してみる。まず、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単純だが実際の構図を採用してみると、

$$\text{保全コスト} = \int_{\Omega \otimes T} F[\text{保全方式}] dVdt \quad ?$$

と表現できるだろうか。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り、その積分領域はプラント空間 Ω 及びそのプラントライフ T_L 全体の直積空間として表現されるものとする。具体的な例としては、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、建設から廃炉までの期間を解析することが考えられる。

ここで積分領域としてプラント空間を定義したが、この連続領域はそれを構成する小領域に分割される。すなわち、系統、機器や部品等である。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ている。ある系統を解析しようとすればそれを機器レベルにまで展開し、特に故障が重要な問題となる機器はさらに部品レベルにまで展開されるだろう。逆に電子機器については、それを分解し故障箇所を発見するよりも丸ごと取替えてしまった方がコストが安い場合が想定され、部品レベルにまで展開する必要はないことになる。それら小領域の集合がプラント全体を構成する訳だが、ある部分に関わる保全費用が定数と見なせる場合には、その部分についてはその後の解析領域から除外できる。

2-2-2) 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いうことである。例えば、原子力プラントに関わる保全活動はこうしている今も実施されており、電力の安定供給を保证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、ここでのいう実時間とは正にその流れを寸分も止めることの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。

保全方式が決定されると、例えば機器の点検周期を決めると、その長短に応じて機器の故障確率が変化する。故障した場合に余計にコストがかかるのであれば、上式左辺の保全コストを与えるためには、機器の故障といった未来の事象を取り扱う必要がある。未来の予測はいつでも、過去の経験と実績をもとになされることを思い出せば、「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、「保全方程式」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。

$$\text{保全コスト} = \int_{\Omega \otimes T_E} F[\text{保全方式}; \text{現状知見}] dV dt$$

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いうとき、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関わらず、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するしかない。近い将来の計画を立案する必要があるのに、遠い将来に行われるであろうさらなる知見の更新、情報の充実を待っているわけにはいかないのである。この現実社会との、実時間との非常な密接性が保全学の最も特徴的な部分ではないだろうか。

また、冒頭で述べたような信頼性指標も（それをどう定義するのかを決定したとして）上記 F と同様の汎関数 G を用いて次のように表せると考えられる。

$$\text{信頼性指標} = \int_{\Omega \otimes T_E} G[\text{保全方式}; \text{現状知見}] dV dt$$

ここで時間に関わる積分領域は、信頼性指標を評価するのに必要な期間 T_E とした。当然ながら信頼性指標の評価も現状知見の範囲で行うしかない。ここで関連する現状知見としては、機器の故障モードや故障率、あるいはプラント停止から復旧に要する期間（これには社会的要因も加わる。）などが挙げられる。

2-3) 境界条件について

さて、信頼性が評価できるとすると、それをもとに境界条件が設定される。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。ところで、その境界条件とは何か？ 典型的なものとしては、稼働率や炉心損傷頻度（CDF：Core Damage Frequency）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。その他のものとして、例えば事業者が実施する保全に関してはいくつかの法的枠組があって、当然それを遵守するものでなければならない（規制）。また、夏季には電力消費量が大きくなることから予想されることから、安定供給という観点から、ピーク時にプラントを長期停止させる行為は避けたい（電力需要予測曲線）。また、社会の動向が電力会社の活動を規定することもしばしばである（社会のトレンド）。このように考えると、信頼性指標はつねに複数あり、あるいはそれら複数を統合化したものを一つの信頼性指標として定義するかのどちらかであろう。

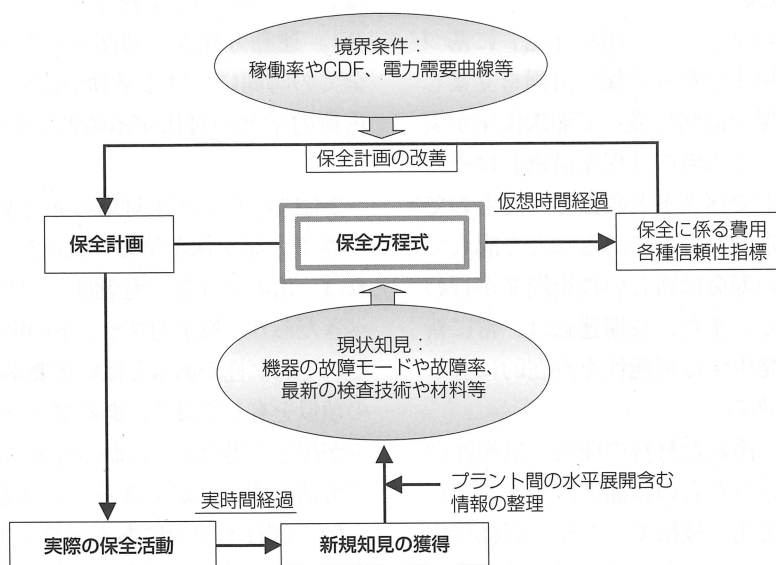


図-1 保全計画と保全方程式

例えば信頼性指標にプラント停止確率と炉心損傷頻度の2つを同時に用いる例として、プラント停止確率には停止時の発電損失を考慮して保全費用とのバランス、即ちトレードオフを考慮しつつ、同時に炉心損傷頻度に関しては、その最高値がはじめに設定したある値を超えないようにするといったことが考えられる。

2-4) 保全計画と保全方程式

2-4-1) 保全の最適化について

境界条件の下で保全コストの最小化を試みるのが保全の最適化であるとしたが、実際にプラントの保全を定量的に（あるいは半定量的に）扱うことができる」とすると、その入力パラメータが膨大なものになることは容易に想像される。その膨大な保全パラメータを、その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という意味での最適化はもはや現実的ではない。

最適化は究極の目標ではある。しかし、現実の保全を考えると、保全方式の短期間での大幅な変更は、保全実施体制も含めて現場の混乱を引き起こしかねない。実際には、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が考えられる。そうして、その新しい保全方式が合理的であるとなれば、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ろう。その絶え間ない改善の繰り返しこそが保全最適化への確実なステップであろう。

図-1は保全計画と保全方程式の関係を表したものである。前述のように保全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。そして保全計画の改善を試みる際には境界条件が考慮される。すなわち「頂上事象の発生確率はどこまで許容されるのか？」や「稼働率は合理的な範囲で確保できているか？」等である。

保全計画がある程度まで改善されて、それに基づいて実際の保全活動が実施される場合を考える。プラント運転に伴って過去に例の無いトラブルが発生した場合、そのトラブルの分析を通して現状知見が強化される。もしくは機器の故障がないこと等で故障率の見直しが実施される。新しい知見に基づいてそれまでの保全計画は見直され、同じ保全計画に対しても以前とは異なった評価が下される。このようにして、未来の予測と過去の運転経験はお互いに関連し合っている。

以降、この現状知見の更新と保全計画の修正について分析してみる。

2-4-2) 保全計画と「現状知見」

2.4.2.1) 現状知見の更新

ある時点においてその時点での「現状知見」に基づいて、プラント寿命末期までをみた保全計画を立案したとする。そしてその保全計画に従って順次保全が実施されていったとする。この時の「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、あくまでも暫定的なものであることを忘れてはならない。プラントの寿命は新しい技術開発が行われることが可能な程長く、また、長期運転は、常に新しい種類のトラブルが発生する可能性を潜在的に有していると考えるべきである。

新規補修技術の開発、優れた材料の開発、信頼性向上のための設計変更といったものに加え、今まで知られていなかった機器の劣化・破損モードや、高経年化にともなう老朽化の程度などに関する新規知見がそれまでの「現状知見」を修正し、補強する。

特に機器の故障率に関しては、原子力レベルの機器が非常に高い品質を要求されていることに加えて非常に保守的に取替えてしまう結果として、ほとんど故障のデータが無く推定が困難である。これに対してはどこかで故障するまで使用してみてデータをとってみるとか、安全側に評価しておくとか、あるいは「故障が無い」という実績をもとにして故障率推定値を更新していく等の手法の開発が考えられる。

2.4.2.2) 現状知見の更新と保全計画の修正

プラント設計時にその当時の「現状知見」を基に「保全方程式」によって保全計画を立案し、その後実施したとする。そしてプラント運転のある時点で、ある種のトラブルが発生したとしてそれに対する対策がとられたとする。そうすると、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。即ち「保全方程式」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、ある時点で保全方程式を用いて立案した保全計画は、その後も度々修正を受けることになる（図-2）。運動方程式に初期条件を入力すれば、その後の全ての時間における挙動が決定されるという決定論的古典力学との対比が示唆的であろう。

2.4.2.3) トラブル対応の水平展開

さて上記が保全学の「実時間」に関する特徴だとすれば、次のような「実空間」に関する側面も強調されるべきだろう。原子力プラントの場合、個々のプラントはそれぞれ個性があるとはいえ要素的にみればやはり多くの類似を有しており、あるプラントで何がしかのトラブルが起きた場合、そこから得られた教訓は他のプラントでも活かすことができるというものである。

例えば日本国内にあるプラントについてそれらの保全に関する費用の総和は単純に考えた場合次のように表せる。

複数プラントの保全コスト＝

$$\sum_i \int_{\Omega_i \otimes T_{Li}} F[\text{保全方式}_i; \text{現状知見}_i] dVdt$$

ここでは i 各プラントをわたる。ここで現状知見 i は図-2のように各プラントの運転実績に応じてそれぞれ随時更新されていく。ところで、日本国内のプラントに関する情報を交換し、共有することになると個別の「現状知見 i 」は「共有化現状知見」という共通項に置き換えられる。これがすなわち水平展開である。

複数プラントの保全コスト＝

$$\sum_i \int_{\Omega_i \otimes T_{Li}} F_i[\text{保全方式}_i; \text{共有化現状知見}] dVdt$$

ここで F_i の添え字は現状知見 i の内プラント i 固有の情報（設計や材料等）を F に含ませたものである。各プラント個別で「現状知見」を更新している場合に比べ、一つのプラントで生じたのと同様のトラブルの

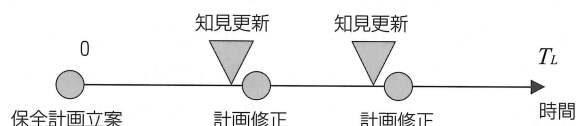


図-2 保全計画の立案と修正

技術開発やトラブル経験によって、保全計画が依って立つ「現状知見」が更新されていく。

発生防止が他のプラントでも図られ、またトラブル情報の蓄積の速度が向上されることが水平展開が保全の最適化に寄与していることが分かる。ここで「共有化現状知見」は「現状知見_i」の和集合以上のものに昇華されることが期待できよう。

共有化現状知見 \supset 現状知見_i

従ってトラブル情報に基づいた知見更新の影響は、図-3に示すように時間的にも空間的にも伝播してゆく。

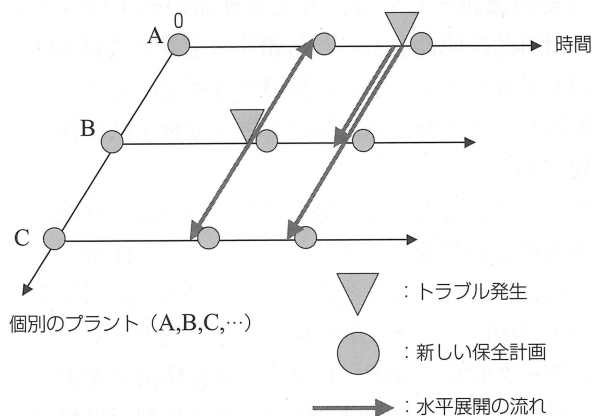


図-3 トラブルに関する情報の水平展開

3. 点検周期理論を用いた簡単な例

今、一つの機器 a に関する保全費用について考察する。

ここで機器 a は以下の特性をもつものとする。

- ・劣化は無視できるものとする（故障率一定）
- ・故障した場合でも検査が実施されるまでは故障は発見されない。

また次のような保全方式を採用したとする。

- ・定期検査（運転時間 T_M 経過毎に実施）N 回につき一回だけ検査を行う。
- ・定期検査時に故障が発見された場合、その定期検査中に取替実施。

その他入力パラメータは次の通り。

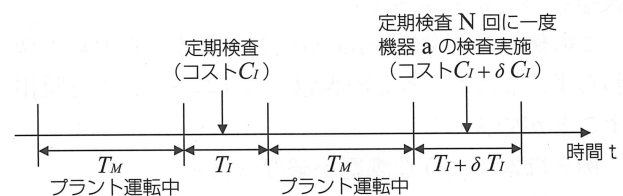
- ・故障率： λ
- ・機器 a の検査実施にかかる定期検査期間の増加：

δT_i

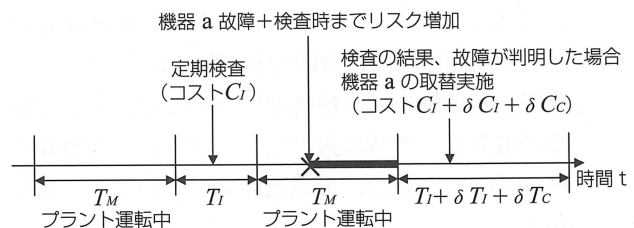
- ・検査時故障が見つかった場合の機器 a 取替にともなう定期検査期間の増加： δT_i
 - ・検査に伴う費用： δC_i
 - ・取替コスト： δC_c
 - ・発電損失を考える際の単位時間当たりの損失額： G
- また実際の複雑な系に適用された場合に算出される、機器の故障が頂上事象（コスト C_T ）に与える影響を表す機器 a の Birnbaum（単位時間当たりの頂上事象の発生確率と機器 a の故障確率の比）を I_B とする。

ここで $N = 2$ （つまり定期検査 2 回に一度機器 a に関して検査を行う。）の場合の保全様式の模式図を示す。定期検査期間中は機器の運転は停止されるものと考え、頂上事象の発生確率は 0 とした。

1) 通常（機器が故障しなかった場合）



2) 機器が故障した場合



上記保全方式に対してシステムの単位時間当たりにかかる保全費用の期待値 \bar{C} は次のように表すことができる。

$$\bar{C} = \frac{NC_i + \delta C_i + \delta C_c(1 - b^N) + G(N T_i + \delta T_i + \delta T_c(1 - b^N)) + C_T I_B (N T_M - \frac{1}{\lambda}(1 - b^N))}{N(T_M + T_i) + \delta T_i + \delta T_c(1 - b^N)}$$

$$\approx \frac{NC_i + \delta C_i + \delta C_c N \lambda T_M + G(N T_i + \delta T_i + \delta T_c N \lambda T_M) + C_T I_B \frac{(N \lambda T_M)^2}{2}}{N(T_M + T_i) + \delta T_i + \delta T_c N \lambda T_M}$$

ただしここで $b = \exp(-\lambda T_M)$ であり、最後の式には通常 λT_M が非常に小さいことを用いている。ここでは特にシステムの寿命を設けなかったため、システムの単位時間当たりにかかる保全費用の期待値を扱った。

この例では信頼性指標を頂上事象の発生確率にとり、頂上事象発生時の影響度をかけてコストとして評価する方法を採用し、境界条件としての役割は保全にかかる費用との和を最小化すべしという形で与えている。すなわちリスク概念の採用である。

最適化問題は上式の N を変化させて保全費用の期待値 \bar{C} を最小化させるという形で定式化される。もし許されるならば、運転時間 T_M も最小化パラメータとして選ぶことができる。最適化された \bar{C} の値は各種入力パラメータの変化に伴い増減する。

現状知見は直接入力パラメータに反映され、例えば技術開発によって費用関係が安価になったり、故障率に関するデータが増えて精度が上がったりする等が現状知見の更新に相当する。

この例題は非常にprimitiveではあるが、それにも関わらず、ここから多くの課題とバリエーションを見出すことができる。

例えば次のような課題が挙げられる。

- ・ 定期検査にかかる時間は単純に各メニュー実施にかかる時間の和ではないために、定期検査メニューの変更にもなう定期検査にかかる期間の算出をどのようにするか？
- ・ リスク導入の際に頂上事象発生時の影響をコスト C_T とおいたが、 C_T を一体どのように評価するのか、その評価法に對外的説明性はあるか。
- ・ 実際の定期検査の実施時期については、例えば夏季の電力ピーク時は避けたい。そういった境界条件を考慮した場合、最適化問題はどのようになるか？
- ・ 何度も繰り返しになるが、故障率を評価するためのデータが少ない。故障率の算出方法とその妥当性を評価しなくてはならない。

問題のバリエーションについては

- ・ オンラインモニタリングの導入の検討
- ・ 検査手法を複数用意しておき、それぞれにコストと見落とし確率を設定する。
- ・ リスク評価を行う代わりに頂上事象発生確率に上限を設け、その範囲内で最適化を試みることにする。

- ・ ここでは故障率一定で劣化がないとしているが、劣化に伴う故障率変化を導入する。等々。

4. まとめ

本稿では保全学の構築に向けて、保全理論のイメージの提示及び「保全方程式」の概念の提案を行った。また、非常に単純な問題を分析することにより、そのイメージの具体化を試みた。

今後の課題としては、各要素理論の充実はもとより、對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。

更にいえば電力の自主努力による合理化を可能にする法的枠組の整備もプラント運転の「メタ保全」の課題として位置付けることができよう。水平展開に関していえば国内の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、また国外のプラントにおける保全の実施体制や思想について分析するという意味での地球レベルでの水平展開、拡大解釈すれば国民との情報共有化も水平展開といってよいだろうか。

いずれにしても保全に関する問題は閉じていないことを認識する必要がある。空間的にいえば機器の劣化の全てを予測し、検知することは難しく、しかし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努力が可能であること、時間的にいえばいつでも現状における知見は完全なものではないことを忘れずに、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等である。空間的・時間的に閉じたドーナツの上の問題であると錯覚したとき、トラブルの潜在的発生確率は上昇する。関係者各位の不断の努力が必要とされる所以である。

(平成15年 8月 25日)