

## 保全の体系化について（第4回） — 最適化プロセスにおける定量化手法 —

今野隆博 Takahiro KONNO  
株式会社日立製作所

笠井雅夫 Masao KASAI  
秋田県立大学

清水俊一 Toshikazu SHIMIZU  
株式会社東芝

### 1. はじめに

保全の体系化について、第1回では原子力発電所の保全活動の現状、第2回では、原子力発電所の保全技術、第3回では保全最適化の考え方について、紹介を行った。

第4回は、保全最適化するためのプロセスを定量的にかつ数理的に評価する手法について紹介する。

なお、本第4回は、比較的難解な数式が、いくつか登場するが、数式そのものが重要なわけではなく、数式のもつ意味に着目して頂きたい。

### 2. 最適化手順における評価方法

プラントや取得価格の高い機器では、システムが故障を起こしても、その原因は部分的な故障に過ぎず、修理あるいは交換等の保全によりシステムの機能を回復することができる。言い換えれば、保全活動が初めてプラントの信頼性が設計通りに維持される。信頼性向上の目的が稼働率を高めることで有れば、整備過剰は保全コストを増加させるばかりか、信頼性を低下させている事と等価である。場合によってはヒューマン・エラーによる信頼性の低下をもたらす。このため、ここでは、保全活動に対し数理的な面からのアプローチを試みる。

#### 2-1) 重要度評価手法

プラントの安全性／信頼性を落とさず、保全コストを低減するには、定期点検時に全ての機器について点検・補修するのではなく、安全性や信頼性への影響の小さな機器についてはTBMにこだわることなく、CBMあるいはBDMへの移行を考えるのが順当な考えである。従って、機器の重要度を定量的に評価する事がキーポイントの1つとなる。こうした重要度評価に基づく保全計画の立案方法には、RCM (Reliability Centered Maintenance) やPSA (Probabilistic Safety Assessment) 手法等があり、既に米国を初めとする

諸外国において取り入れられ始めている。PSAは確立論的安全評価と呼ばれているもので、米国では1960年代頃から開発が進められ、1974年に公表された原子炉安全研究において、その骨格が確立された。保全へのPSA手法の応用は、初め原子力プラントの安全設備のサーベイランス試験の適正化や供用期間中試験の合理化等に使われたが、一般機器への展開も期待されている。しかし、日本においては確立論的な議論に馴染みが無い事、信頼性に関わる機器の故障率の正確なデータが少ない事等により、こういった手法を保全計画立案にそのまま利用できる状況には必ずしも無い。

#### 2-2) 保全方式決定手法

保全方式決定ロジックには、機器に関する種々の評価項目について定量的に採点し、それらを基に算出した総合点を、定められた基準値と比較する操作が伴ってくる。ここで、①種々の評価項目の重要性の違いをどう定量化するか、②各評価項目における評価点をどう定量化するか、等の問題が生じてくる。

具体的に説明すると、例えば、「技術評価」として(1)機器重要度、(2)故障の可能性、(3)故障の影響、(4)検知の容易性、等の評価項目が、また、「他の因子」としては、(a)工事の経済性、(b)許認可、国による検査の必要性、(c)環境への影響、等の評価項目が考えられる。(1)～(4)、(a)～(c)等の各評価項目が同じように重要なか述べた①である。また、例えば「故障検知の容易性」といった評価項目を考えた場合、故障検知について「困難」、「普通」、「容易」に分類した場合、各分類について配点をどう合理的に設定するか、が②である。こうした数値は専門家により決められる事となるが、外から見た時の説得性、後継者への技術伝承等の事を考えると、より客観的かつ体系的に決められる方法を用いる事が望ましい。

以上の事を踏まえ、ここでは、こうした定量的に評価できるシステム工学的な方法について紹介する。

2-1-1) 評価項目の数量化手法

上の課題に答え得る方法として、意志決定手法やシステム評価方法がある、AHP (Analytic Hierarchy Process) で使われている重み付けについて説明するとともに、ガットマン法についても概説する。

(1) AHP (Analytic Hierarchy Process)

1) AHPの概要

ここでは、まず意志決定手法の1つであるAHPについて概説する。意志決定手法として必要な主なポイントは次のようにまとめられる。

- ①人間が持っている主観や勘を反映できること
- ②多くの評価項目を同時に考慮できること
- ③意志決定者が容易に使えること 等

問題の要素を、[最終目標]…[評価基準]…[代替案]の関係で捉え、階層構造を作り上げる。これを基に、最終目標からみた評価基準の重要さを求め、次に各評価基準から見た代替案の評価を行う。

以下、その手順を説明する。

(a) 問題の階層化 (階層図の作成)

例えば、ある機器に関する保全方法の評価を考えると、最終目的は、保全方法の合理化等という事が考えられよう。その下のレベルには、評価項目が来るが、例えば、安全性、運転性、経済性等が考えられる。ただ、これらの評価項目については、出来るだけ独立性の高いものを選択する事が望まれる。

それぞれの評価項目について、更に評価項目の階層を考えても良い。例えば、上に述べた評価項目を第3レベルとし、第2レベルに、規制当局、住民、電気料金等を設定する事も考えられる。

最下層には各代替案が来る。AHPの階層図の一般例を図-1に示す。各階層レベルの要素数は、 $7 \pm 2$  が最大許容数の目安と言われている。

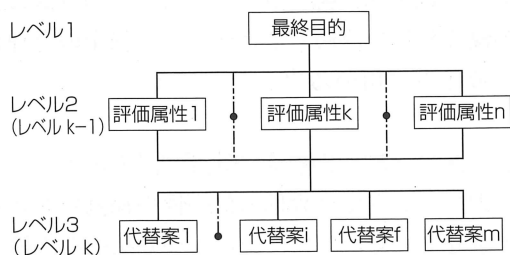


図-1 AHPの階層図

(b) 各要素の重要度の一対比較

階層レベルkのm個の要素が、その直下の階層レベル (k-1) の要素hに関係しているとする。ここで、階層レベルkの各要素について、要素hから見た重要度の差異を一対比較行列 (後述) を作成する。

(c) 一対比較の整合性チェックと重み付けの算定

一対比較行列の固有値を求める事により、重み付けを算出すると共に、一対比較の整合性をチェックする。これらは、一対比較行列の固有値問題を解くことにより求めることができる。重み付けは固有値ベクトルとして求まり、整合性チェックは固有値から判断される。

(d) 代替案の総合評価

階層図に基づいて、各階層レベルの各重要度を合成する。この重要度の合成手順を以下に示す。

- ①階層レベルkにおける各要素hの合成重要度を $v_h^{(k)}$ とする。最上位には、最終目的という1つの要素しかないので、 $v^{(1)} = 1$ と定める。
- ②階層レベル (k-1) の要素hから見た階層レベルkの要素Iの重要度を $w_{hi}^{(k)}$ とすると、要素Iの合成重要度 $v_i^{(k)}$ は、次式で算出される。

$$v_i^{(k)} = \sum_h v_h^{(k-1)} w_{hi}^{(k)}$$

総和は、階層レベル (k-1) の中で、要素iと結合している全ての要素hについて取る。

例えば、第2層の安全性、運転性、経済性の重み付けが0.5、0.3、0.2であり、ある機器に関する保全方式の「安全性、運転性、経済性」への影響が下記のように評価されたとする。

この場合、 $v_h^{(k-1)}$  は、 $v_1^{(k-1)} = 0.5$ 、 $v_2^{(k-1)} = 0.3$ 、 $v_3^{(k-1)} = 0.2$ となっている。

	安全性	運転性	経済性
保全方式1	0.2	0.4	0.2
保全方式2	0.7	0.4	0.1
保全方式3	0.1	0.2	0.7

上に示した行列の (i,j) 要素が $w_{ij}^{(k)}$ であり、これを一対比較行列という。

各保全方式の合成重要度は、下記のように算出される。

保全方式1 :  $0.5 \times 0.2 + 0.3 \times 0.4 + 0.2 \times 0.2 = 0.26$

保全方式2 :  $0.5 \times 0.7 + 0.3 \times 0.4 + 0.2 \times 0.1 = 0.49$

保全方式 3 :  $0.5 \times 0.1 + 0.3 \times 0.2 + 0.2 \times 0.7 = 0.25$

③①、②の操作を繰り返して、最下位の階層レベルに位置している各代替案の合成重要度を求める。

AHPでは、以上のようにして各代替案の合成重要度を求め、その値の大小により、代替案を総合的に評価する。

## (2) ガットマン法

評価項目のウェイトと各評価項目の分類区分に与える配点を決める方法に使えると考えられるもう1つの方法として、ガットマン法を紹介する。

3つの次元の中から2つを選び、残った1つについては全く考慮に入れずに、優劣表を作成する。こうした表は、この場合、3種類できる。その例を表-1に示す。

表1 機器重要度優劣表

保全重要度を無視	安高・信高	安高・信低	安低・信高	安低・信低
安高・信高	—	○	○	○
安高・信低	×	—	○	○
安低・信高	×	×	—	○
安低・信低	×	×	×	—

安高=5 安低=1 信高=4 信低=2

信頼性を無視	安高・信高	安高・信低	安低・信高	安低・信低
安高・信高	—	○	○	○
安高・信低	×	—	○	○
安低・信高	×	×	—	○
安低・信低	×	×	×	—

安高=5 安低=1 信高=4 信低=2

安全性を無視	安高・信高	安高・信低	安低・信高	安低・信低
安高・信高	—	○	○	○
安高・信低	×	—	○	○
安低・信高	×	×	—	○
安低・信低	×	×	×	—

安高=5 安低=1 信高=4 信低=2

表-1の最上の表について、手順を説明する。

保全重要度を無視して、安全性と信頼性の組合せについてのみ比較する。この組合せには、安高・信高、安高・信低、安低・信高、安低・信低の4種類ある。但し、ここで用いた略語は下記の意味である。

安高：高い安全性が必要

信高：高い信頼性が必要

安低：高い安全性が不要

信低：高い信頼性が不要

安全性・信頼性とも、「高」が「低」に優越するのは明らかだから、

安高・信高の方が 安高・信低 より

安高・信高の方が 安低・信高 より

安高・信高の方が 安低・信低 より

安高・信低の方が 安低・信低 より

安低・信高の方が 安低・信低 より

優越する事に異存はなからう。問題は、「安高・信低」と「安低・信高」とで、どちらが優越するかに絞られる。表-1では、「安高・信低」を優越するとした。こうして、表を横方向に移動しながら組み合わせ同士を比較し、優越する場合に「○」印を、優越される場合に「×」印を付ける。こうして優越表を作成した後に各クラス分類の点数を集計する。具体的には、例えば「安高」の点数は、「安高」を含む組の行の「○」印の総数を点数とする。

表-1の最上表では、「安高」の点数は5点、「信高」の点数は4点、「安低」の点数は1点、「信低」の点数は2点と計算される事が分かる。

表-1の3つの表より、各クラス分類の点数を合計すると、下記のようになる。

安高（高い安全性が必要）：10点

安低（高い安全性が不要）：2点

信高（高い信頼性が必要）：9点

信低（高い信頼性が不要）：3点

保高（保全重要度が高い）：8点

保低（保全重要度が低い）：4点

こうして、安全性については、「高」に10点、「低」に2点を、信頼性については、「高」に9点、「低」に3点、保全重要度については、「高」に8点、「低」に4点を配分することとなる。

安全性についてみると、「高」と「低」で $10 - 2 = 8$ 点、信頼性については、「高」と「低」で $9 - 3 = 6$ 点、また保全重要度については、「高」と「低」で $8 - 4 = 4$ 点の差が生じることとなる。このことは、安全性、信頼性、保全重要度に対して、 $8 : 6 : 4 = 4 : 3 : 2$ のウェイト付けをしたとも考えられる。

各機器が3次元のクラス分類の何処に分類されたかで、上の点数を基に総合点を算出し、この点数により一種の優先順位を決めることができ、保全の合理化を進めるガイドに用いる事もできよう。

## 2-1-2) 保全活動への意志決定手法の応用

原子力プラントでは設備の信頼性や稼働率をより一層向上させていくために、適切かつ効果的な点検・保守計画の策定が重要な問題となっている。具体的に

は、以下のような問題が掲げられる。

- (1) 新規の点検・保守技術の導入可否の判断
- (2) 点検・保守（検査、更新等）周期の決定
- (3) 点検・保守対象設備（部位）の優先順位の決定
- (4) 設備の重要度、故障影響度等の順位の決定
- (5) 設計改良、監視・診断の優先順位の決定

現在、これらの問題は専門技術者の集団的な合意形成に基づいた意志決定により解決されている。しかし、複雑な点検・保守状況と多様な価値観のために集団的な合意形成に至るまでに多大の労力と時間が必要であり、保全活動への意思決定技術の応用による効率化や意志決定の確実化等が望まれている。

### 3. 保全最適化における意志決定技術

#### 3-1) 意志決定技術の現状

意志決定問題に関しては、オペレーションズ・リサーチ（Operations Research：OROR）の技術分野において、構造解釈モデリング法（Interpretive Structural Modeling：ISM）法、階層化意志決定（Analytic Hierarchy Process：AHP）法、多属性効用分析法、等の手法が提案されている。また意思決定をより広い意味で捉えた場合、保全管理技術の分野においても、ロジック・ツリー技法と信頼性技法を組み合わせた、主に大規模プラント設備の保全活動に適用されている信頼性重視保全（Reliability Centered-Maintenance：RCM）や、故障樹木（Fault Tree：FT）と確率論的な技法を組み合わせた確率論的安全評価（Probabilistic Safety Assessment：PSA）等の技法も提唱されている。更に点検・保守データの統計分析による経年劣化評価に基づく技法も提唱されている。

これらの手法は種々の産業分野で広く応用されており、個々の問題解決に適した手法の改良や新しい手法の提案が現在も多く報告されている。これらの応用において、意思決定とは「目的を達成するための多様な方策（代替案）の中からどれを選択するかという問題」と定義されている。ところがこの選択は、定量的な判断基準だけでなく、個人の価値観に基づく曖昧な判断に基づいてなされる場合が多い。このため、意思決定に際しては、多様な価値観の矛盾をいかに処理し、総合的にバランスのとれた決定ができるかが重要な課題となる。

#### 3-2) 保全活動への意思決定技術の応用

一方、原子力プラントのように大規模プラントの点検・保守計画の策定のような意志決定問題では、膨大な情報と専門的な知識に基づいた複雑かつ曖昧性を含む判断の調整に加えて、規制部門、電力会社およびメーカー、あるいは発電部門、保修部門および技術部門といった立場による価値観の違いの調整を図る必要がある。このような特徴を踏まえて、保全活動（点検・保守計画の策定等）における意思決定技術の応用を検討する必要がある。

具体的には、以下の問題を解決することが重要となる。

- (1) 意志決定に必要な評価項目を明確にする方法
- (2) 各部門（部分集団）に属する専門技術者の意思を効率的に抽出する方法
- (3) 立場の異なる各部門（部分集団）の意志を定量化し、その特徴（構造）を可視化（モデル化）する方法
- (4) 各部門（部分集団）の合意形成に基づいて全集団の意思決定を支援する方法

このような問題に対して、従来の手法や技法の適用は一定の効果はあるものの、それぞれの手法の特徴により、単純に適用するだけでは十分な効果は得られないため、これらの手法の長所を相補的に組み合わせた手法等も報告されている。

### 4. おわりに

原子力プラントの保守計画の策定支援や多様な保全活動では、設計技術、設備の信頼性情報、点検技術、あるいは経済性やリスクに関する問題を意思決定の評価に取り入れ、最良の方針を決定していく必要がある。このためには、個別の問題に適した意志決定技術を適切に活用すると共に、保守管理技術や設備のLife Cycle Cost評価を含めた総合的な評価に基づいて、実効的な保守計画の策定等、保全活動への応用を図っていくことが今後ますます重要になっていくものと考えられる。

（平成15年 5月 26日）