

# 保全に関する定量的解析手法に関する研究

Study on the quantitative analysis approach for maintenance

中部電力株式会社  
中部電力株式会社

肥田 茂 Shigeru HIDA Member  
清水 高 Takashi SHMIZU Member

This study is examination of the quantitative valuation method of maintenance activities of a nuclear power plant. Therefore, the concept of the maintenance equation that examination was advanced in the Japan Society of Maintenance or the Japan Society of Mechanical Engineers (JSME) was arranged. Basic examination for a maintenance equation to formulize the above-mentioned examination to reference was carried out.

**Keywords:** Nuclear Power Plant, Maintenance, Maintenance Equation

## 1. 緒言

現状、原子力発電所の保全は主に設計・運転・保守に関わるエキスパートによって立案・実施されているが、これら保全の体系を定量的に評価することができれば、より効果的に保全活動を最適化することが可能となると考えられる。

このため、現在、保全学会あるいは機械学会の場において検討が進められている保全方程式の概念を整理するとともに、保全方程式の定式化に向けた検討を実施した。

狙いは、保全方程式の構築であるが、この課題が困難な点は適切なモデルの構築にある。保全の全体像は極めて複雑であり、数理的手法をそこに持ち込むには、適切な問題の定式化が不可欠である。この課題を克服するには、小規模のモデルからスタートするしかない。

本研究では、簡単なモデルとして劣化状態を導入できる3状態モデルを考えた。検討を進めた結果、部分点検の効果や劣化の程度等を定量的に評価できる可能性を確認することができた。

## 2. 保全方程式の基本概念

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。保全方程式自体は時間の流れに不变な概念であり、具体的な保全計画から、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。

---

連絡先：清水 高、〒461-8680 名古屋市東区東新町1  
中部電力(株) 原子力部 長期保全G、電話 052-951-8211  
E-mail: Shimizu.Takashi@chuden.co.jp

る。現状知見に基づいて仮想的に時間を経過させ、未來の予測を行い、その保全計画の良否を判断する。また、保全計画の改善を試みる際には境界条件を考慮する。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、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。あるい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、未來の予測と過去の運転経験はお互いに関連し合っている。

保全計画の立案や評価が、保全方程式のような客観的で普遍的な概念に基づいてなされるならば、その正当性や問題点について多くの人々で共通の土台で議論できるようになり、人々の安心確保に貢献できる可能性もある。

保全方程式の一つの例としては、プラントのライフサイクルを通してのコスト等の評価が挙げられ、そこでは定期検査における作業工程にかかるコスト、作業期間中プラントが停止することによる発電損失、定期検査実施時およびプラント運転時におけるトラブルの発生確率や、トラブル発生時の対応費用等が考慮されることになる。

こういった非常に単純な定式化においても各項目の実際の数値を求めるのは容易ではなく、それぞれについてデータ収集・分析が必須であり、場合によっては

エキスパートパネル等で評価することが必要であると考えられる。

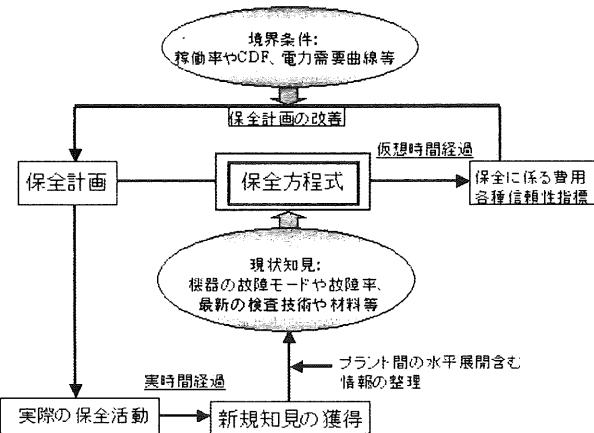


図-1 保全計画と保全方程式の関係

### 3. 3状態モデルによる検討

#### 3.1 3状態モデル

一般的に故障率とは、正常な状態にある機器が、単位時間当たりに故障状態になる割合を指す。つまり、機器に「正常状態」「故障状態」の2つの状態を想定している。

本検討ではこの2状態系では無く、次のような3状態について検討を行うこととする。

状態 a (正常状態)：機器が正常な状態

状態 b (劣化状態)：機器に部分的な劣化が認められるが使用可能な状態

状態 c (故障状態)：機器が機能を喪失し、故障していると見なされる状態

#### 3.2 3状態モデルに関する定式化

ある時刻  $t$  における各状態の存在比率を考え、状態 a、状態 b、状態 c のそれぞれの比率を  $P_a(t)$ 、 $P_b(t)$ 、 $P_c(t)$  と表す。ここで  $P_a(t) + P_b(t) + P_c(t) = 1$  が  $t$  に拠らず成立している。また、単位時間当たりの状態間遷移率について次の3つを考える。

$\lambda_{a \rightarrow b}$  : 状態 a から状態 b への遷移率、正常な状態から劣化状態への遷移に対応。

$\lambda_{b \rightarrow c}$  : 状態 b から状態 c への遷移率、劣化状態から故障状態への遷移に対応。

$\lambda_{a \rightarrow c}$  : 状態 a から状態 c への遷移率、正常な状態から劣化状態を経ずに故障状態に遷移する場合に対応。

ここで遷移率の定義より次式が成立する。

$$\begin{aligned} \frac{dP_a}{dt}(t) &= -(\lambda_{a \rightarrow b} + \lambda_{a \rightarrow c})P_a(t) \\ \frac{dP_b}{dt}(t) &= \lambda_{a \rightarrow b}P_a(t) - \lambda_{b \rightarrow c}P_b(t) \\ \frac{dP_c}{dt}(t) &= \lambda_{a \rightarrow c}P_a(t) + \lambda_{b \rightarrow c}P_b(t) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで各遷移率が時間に拠らず一定としていることから、 $\lambda_{a \rightarrow c}$  は、新品に取替ても低減することができない偶発故障に対応していると考えることができる。一方、状態 b を経て状態 c に至る過程は状態 b が発見された場合に、そこで何らかの対策をとって状態 c に至るのを予防できると言う意味で偶発的ではない。本議論では、機器の保全については、定期検査で実施する場合についてのみ考える。定期検査時に実施可能な点検方式として次の2つをモデル化して考える。

- 簡易点検：機器が状態 c にある場合のみ、異常を検知できるものとする。状態 a と状態 b について区別できないので劣化状態は放置される。状態 c であることを発見した場合には、補修を実施、状態 a に復帰させることとする。

- 本格点検：機器が状態 b にあるときでも異常を検知できる。状態 b、もしくは状態 c にあることを発見した場合には、部分点検と同様、補修を実施、状態 a に復帰させることとする。

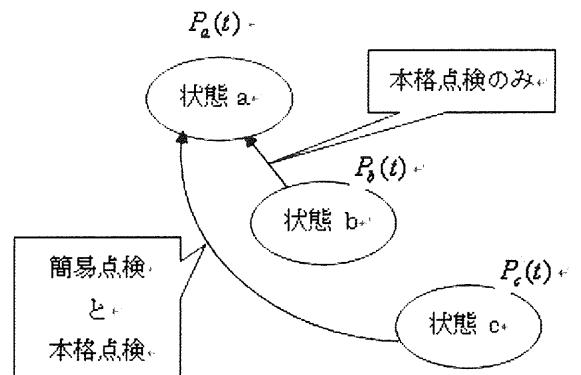


図-2 簡易点検と本格点検

今、定期検査実施直前の時刻を  $t_0$  、定期検査実施直後の時刻を  $t_0 + t_M$  で表すと、簡易点検と本格点検の実施は状態 a、状態 b、状態 c のそれぞれの比率を用いて次のように表現できる。

#### ○簡易点検

$$\begin{aligned} P_a(t_0 + t_M) &= P_a(t_0) + P_c(t_0) \\ P_b(t_0 + t_M) &= P_b(t_0) \\ P_c(t_0 + t_M) &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

#### ○本格点検

$$\begin{aligned} P_a(t_0 + t_M) &= 1 \\ P_b(t_0 + t_M) &= 0 \\ P_c(t_0 + t_M) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

式(1)～式(3)を用いることで定期検査モデルに基づいた保全効果についてのシミュレーションをすることができる。

### 3.3 3状態モデルを用いた計算例

#### 1) 計算における共通条件

計算における共通条件を以下に示す

- 基本的に機器の健全性は点検を実施しない限り分からぬものとする。
- 13ヶ月運転した後、1ヶ月の定期検査を実施する14ヶ月で1つのサイクルとする。
- 各定期検査では、必ず簡易点検と本格点検のいずれかを実施する。本格点検の実施頻度を N サイクルに一回と表す。簡易点検では正常状態と劣化状態の区別がつけられないので、劣化状態は次のサイクルに持ち越される。
- 機器の状態遷移率として、次の値を用いる。別の遷移率を用いる場合はその都度記述する。

$$\lambda_{a \rightarrow b} = 1E-4/\text{月}$$

$$\lambda_{b \rightarrow c} = 1E-2/\text{月}$$

$$\lambda_{a \rightarrow c} = 1E-8/\text{月}$$

- 保全コストについては、簡易点検にかかるコストを 1 、本格点検にかかるコストを 10 とする。別の値を用いる場合はその都度記述する。
- リスク算出のために、「機器の故障放置に伴う単位時間当たりのリスク」を 2,000 (/月) とする。

#### 2) 計算例

##### N定期検査毎に1回本格点検を実施する場合

本格点検を実施する場合、本格点検の実施頻度Nを変更することで保全コストやリスクが変化する。ここで、Nの最適化の視点から、最適化目標を設定する。

代表的な最適化目標として、以下を考える。

[最適化目標-1]：機器の故障確率を 5E-4 以下に抑えつつ、保全コストを最小化する。

N=4とした場合、図-3から機器の故障確率は、5E-4 以下に抑えられていることが分かる。一方、図-4から、保全コストが大きくなっていることが分かる。

さらに本格点検の頻度を上げてN=2とした場合の計算結果を図-4～6に示す。図-4では、機器の故障確率の最大値は 2.3E-4 と N=4 の計算結果に比べ、さらに小さく抑えられているが、逆に保全コストは非常に大きくなってしまい、保全コストとリスクの総和は結局、N=4 の計算結果の方が小さい。

以上の結果から、機器の故障確率の上限値を超えない範囲で、できるだけ上限値に近づくまで本格点検を実施しないことが、この場合の最適化となり、特に[最適化目標-1]について言えば、N=4 とすることが最適な保全方式であるという計算結果となる。

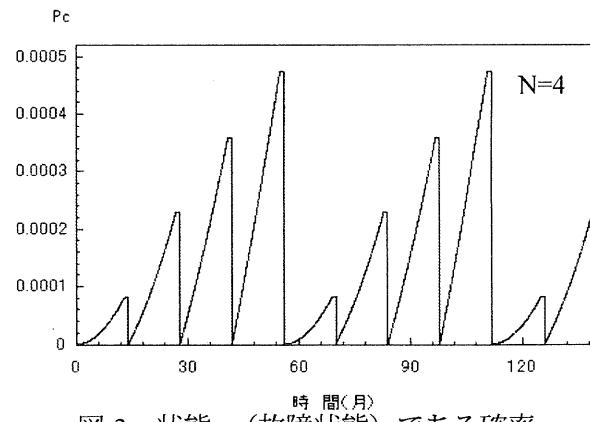


図-3 状態 c (故障状態) である確率

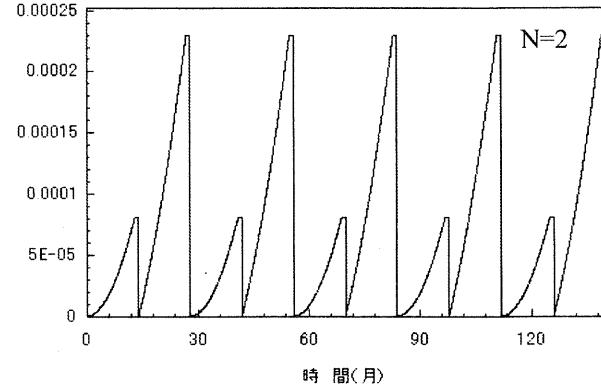
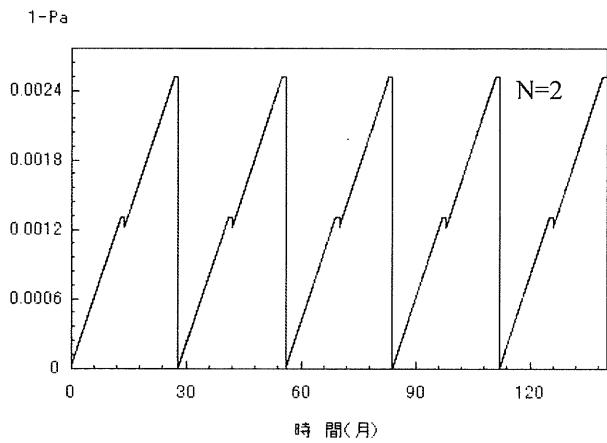


図-4 状態 c (故障状態) である確率



### 謝辞

本研究に協力頂いた、日本保全学会の研究分科会及びNPO「日本の将来を考える」のワーキンググループ委員各位に心から感謝します。

図-5 状態 a (正常状態) でない確率

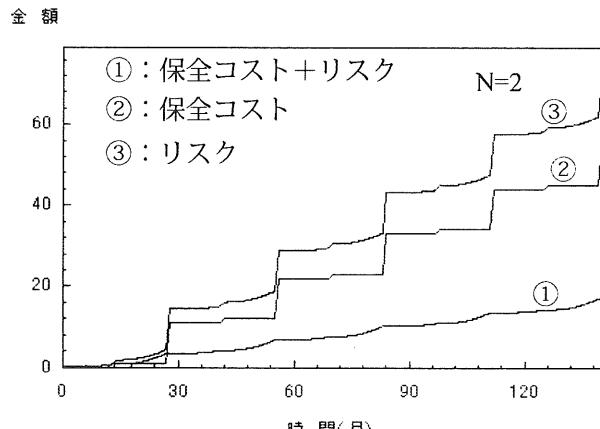


図-6 保全コスト及びリスク

### 3. 結言

- 1) 3状態モデルを用いることで、点検手法の最適な組み合わせについて、簡単ではあるが検討することができた。
- 2) 正常／故障の単純な2状態系では考慮されない、機器の劣化発見等の点検結果に関するデータを、信頼性解析に有効活用できる可能性を確認できた。
- 3) 劣化のイニシャライズについては偶発的で予想困難だが、状態監視技術を用いて劣化の進展をモニタリングできるような機器については、「正常状態」、「劣化開始後の状態」、「機能喪失状態」等に分類することで、CBM適用に関する議論ができる可能性を確認できた。