TBM と CBM を併用した保全方式における TBM 実施間隔最適化モデルの開発

凌 元錦^{1,*}, 真木 紘一¹, 遊佐 訓孝¹, 宮 健三¹

Development of the Optimization Model for TBM Time Intervals
in Maintenance Methods Combined TBM and CBM

Yuanjin LING^{1,*}, Koichi MAKI¹, Noritaka YUSA¹ and Kenzo MIYA¹

¹ I I U, Corporation, Imon Ikenohata Bldg. 7F, 2-7-17 Ikenohata, Taito-ku, Tokyo 110-0008, Japan

(Received August 15, 2006 and accepted in revised form May 23, 2007)**

A reduction of the maintenance cost and an improvement of utilization in facilities have been performed by introducing Condition-Based Maintenance (CBM) to nuclear power plants since the 1980s in USA. In Japan, also, maintenance methods combined with TBM (Time-Based Maintenance) and CBM have a tendency to be applied. In the present work, an estimation and optimization model for extending TBM time interval is developed considering spurious diagnosis of measuring devices in the maintenance method combined with TBM and CBM. Using the present model, the life time of applied measuring devices can be estimated in order to prolong the time interval of TBM execution and satisfy the required one. Moreover, TBM time interval can be given for minimizing the maintenance cost under the condition of the target safety. From a sensitivity analysis of the parameters including the present model, it is clarified that leaving the facilities in an abnormal state has the largest effect on the cost of damage for the maintenance.

KEYWORDS: *TBM time interval, maintenance method, combined TBM and CBM, spurious diagnosis, life time of measuring devices, minimizing maintenance cost, state transition model*

I. はじめに

米国の原子力発電所では、1980年代より状態監視保全 (CBM : Condition-Based Maintenance) の導入により、保全の合理化や設備利用率の向上が実現されてきた。しかし、日本の原子力発電所では CBM の導入が遅れており、主に時間計画保全 (TBM : Time-Based Maintenance) が適用されているのが現状である。現在、日本でも電気事業者による保全活動と規制当局による検査の在り方が精力的に検討されてきており、現状の TBM に CBM を併用する保全方式へ移行することにより現状の安全性を維持しつつ定期点検間隔を延長しようとしている¹⁾。

状態監視保全 (CBM) とは、診断装置により対象機器の状態を監視し、「異常」と診断された場合に保全を行うことである。機器の異常については、「要求された機能を損なわないある程度の劣化」や「要求された機能を損なう劣

化 (機能故障)」など様々な判断基準が考えられる。本論文では、機器の劣化発生から機能故障までのすべての状態を異常、異常でない状態を正常と呼ぶ。

これまで、最適保全方策の決定問題に関する研究は数多くなされており、様々なモデルが考察されている。例えば、POMDP (Partially Observable Markov Decision Processes : 部分的に観測可能なマルコフ決定過程) モデルをもとに、「異常」と診断された機器を新品に交換するという保全方策の最適化について議論されている²⁾。また、機器の劣化の程度を考慮し、それに応じて異なる保全行為 (継続運用、部分修理、新品交換) を行う場合のマルコフ的劣化モデルが提案されている³⁾。さらに、機器の劣化の状態が必ずしも正確に判明できるとは限らないことを想定し、これに伴う保全効果の曖昧さを考慮した最適な保全方式が検討されている⁴⁾。しかし、これまでの研究では、CBM のみの保全方式が考慮されており、CBM と TBM を併用する保全方式の最適化については議論されていない。

ところで、診断装置には、ノイズや長期使用によるセンサ感度の低下などに起因する誤診断の可能性がある。誤診断は、安全側誤診断と危険側誤診断の2つのタイプに分

¹ ㈱ I I U

* Corresponding author, E-mail: ling@iiu.co.jp

**本論文は、「研究論文」として受理・審査された。

類することができる。安全側誤診断は、機器が正常であるにも拘わらず、診断装置が「異常」と診断する場合で、危険側誤診断は、機器が異常であるが、診断装置が「正常」と診断する場合である。安全側誤診断が起これと、機器の状態を確認するために点検を行い、不必要な点検コストが発生する。一方、危険側誤診断が起これと、機器が異常であるにも関わらず、発見できずにそのまま放置され、機器によっては重大な事故まで発展する恐れがある。そこで、複数の診断センサを用い、各センサからの情報を統合的に判断することにより誤診断を減らす試みがなされてきた^{5~7)}。例えば、 n 個のセンサからなる安全監視システムについて、センサの誤作動と不作動により生じる損害額の期待値を評価指標とし、この損害額の期待値を最小とするセンサの最適論理構成は k -out-of- n (n 個センサのうち k 個以上のセンサが監視対象を異常と判断すれば、監視対象が異常であると判定する) システムであることが証明され、最適な k の計算式が導出されている⁴⁾。また、可変しきい値をもつ k -out-of- n 診断システムについて、各診断センサの最適なしきい値はすべて等しい値に設定すべきことが示されている⁵⁾。

実際の状態監視においては様々な不確実性や診断技術的な限界が存在するので、診断装置の誤診断を完全になくすることが困難である。そこで、TBM と CBM を併用することにより、診断装置の誤診断により放置された異常を TBM により発見することができると考えられる。しかし、TBM と CBM を併用する保全方式を考慮する場合、TBM の実施間隔をどう決めるかが問題となる。これまで、この問題についてはいまだ十分に議論されていない。

本研究では、TBM と CBM を併用する保全方式において、状態遷移モデルを用いて、診断装置の誤診断を考慮した TBM の実施間隔の評価および最適化のためのモデルを開発する。本モデルにより、現状の安全性を維持しながら CBM の導入による TBM の実施間隔の延長、また、要求される TBM の実施間隔を達成するために使用すべき診断装置の寿命を評価できる。さらに、機器の異常が放置されることにより生じる損害額期待値、および CBM と TBM

を実施するための保全コスト期待値の和を総コスト期待値として定義し、安全性目標値を制約条件として単位時間当たりの総コスト期待値を最小にする最適な TBM 実施間隔の存在条件および最適な TBM 実施間隔の計算式を導出する。これを用いて原子炉の典型的な機器を対象に適用した場合の計算例を示す。

II 章でモデルの前提条件、III 章で TBM の実施間隔、および使用すべき診断装置の寿命を評価し、IV 章で最適な TBM 実施間隔の存在条件および計算式の導出、V 章で最適な TBM 実施間隔に対する感度解析を行う。

II. モデルの前提条件

診断装置の誤診断については、一時的なものと永続的なものの 2 種類が考えられる。前者はノイズの存在などによるもので、原因が消滅すれば自然に正常な状態に戻る。後者は、診断装置の長期使用によるセンサ感度の低下や保守・校正不備などによって発生し、ある時点から誤診断が発生すると、その後誤診断を起こし続ける。以下の議論では、後者の誤診断のみを考えることとする。また、CBM において、機器の運用中に常に診断を行う常時診断と、所定の時間に達したときに行う定期診断があると考え、ここでは、機器に対して常時診断が行われることとする。さらに、機器と診断装置からなる 1 つのシステム(以下、システムと呼ぶ)を考察の対象とする。このとき、TBM と CBM を併用する場合のシステムの振る舞いは次のようになる。

TBM の計画時期に到達すると TBM が実施される。一方、TBM の計画時期到達前に、対象機器が「異常」と診断された場合には緊急保全が行われる。この場合、機器の状態には、「正常」、「異常」の 2 つの状態(A_1, A_2)がある。また、診断装置には、機器を「正常と診断する」、「異常と診断する」の 2 つの状態(B_1, B_2)がある。機器の状態と診断装置の状態の組み合わせによって、システムは **Table 1** に示すように 4 つの状態(S_0, S_1, S_2, S_3)に分類される。各状態の遷移を **Fig. 1** に示す。ここで、 $t_i, S_i (i=0, 1, 2, 3)$ はシステムが時刻 t_i のときの状態 S_i にあること

Table 1 Combinations of machines and measuring device states

	B_1 The case of the measuring device diagnosing the machines as “normal”	B_2 The case of the measuring device diagnosing the machine as “abnormal”
A_1 The machine's performance is normal.	S_0 : Correct diagnosis case. The machine is performing normally and the measuring device diagnoses the machine as “normal”.	S_2 : Safe-failure case. Although the machine is performing normally, the measuring device diagnoses it as “abnormal”.
A_2 The machine's performance is abnormal.	S_3 : Dangerous Failure Case. Although the machine is performing abnormally, the measuring device diagnoses it as “normal”.	S_1 : Correct diagnosis case. The machine is performing abnormally and the measuring device diagnoses the machine as “abnormal”.

Fig. 1 State transition model of system

を意味する。

Figure 1 の状態 S_0 では、機器が正常で、診断装置が機器を「正常」と正しく診断する。この状態で、TBM の計画時期に到達すると保全が行われて状態 S_0 に戻る。状態 S_1 は機器が異常で、診断装置が機器を「異常」と正しく診断したので、直ちに緊急保全(機器の修復および診断装置の点検)が行われて状態 S_0 に戻る。状態 S_2 は機器が正常であるが、診断装置に「異常」と誤診断されたので、同様に緊急保全(機器の点検および診断装置の修復)が行われて状態 S_0 に戻る。状態 S_3 の場合、機器が異常であるが、診断装置の機能喪失によって機器を「正常」と誤診断したので、機器の異常および診断装置の機能喪失はそのまま放置され、重大な故障となる。このとき、機器と診断装置が修復できず状態 S_3 に留まる。

III. TBM 実施間隔の評価

1. モデルの説明

前述のように、危険側誤診断が起これば、機器が異常であるにも拘わらず、発見できずにそのまま放置され、機器によっては重大な事故まで発展する惧れがある。放置された時間が小さいほど、機器の異常が事故まで発展する可能性が小さく、安全性が高くなると考えられる。そこで、安全性の評価指標として、機器の異常発生後次回の TBM の実施まで放置される平均時間(以下、放置時間期待値と呼ぶ)を用いることとする。ここで、保全コストを制約条件として考慮せず、例えば現状と同等の安全性レベル(日本の原子力発電所の現状では、CBM が導入されていないので、CBM が実施されない場合の放置時間期待値を現状の安全性の指標とする)を維持する場合を想定して、CBM の導入による TBM の実施間隔の延長、および要求される TBM の実施間隔を達成するために使用すべき診断装置の寿命を評価する。

ここで、TBM の実施間隔を T とする。TBM および緊急保全に要する時間は TBM の実施間隔より十分に小さく

Fig. 2 Markov model for deriving the function of $f_i(t)$

無視できると仮定する。また、時間計画保全(TBM)または緊急保全の実施によりシステムは新品同様な状態に戻ると仮定する。このとき、Fig. 1 に示すように、システムは時刻 $t=0$ で状態 S_0 から運用開始し、時間 $t(0 \leq t \leq T)$ まで経過したとき、状態 $S_i(i=1, 2, 3)$ への遷移の期待回数(時刻 t_i まで、状態 S_0 から状態 S_i に遷移する回数の期待値) $W_i(t)$ について、次式が成立^{8,9)}。

$$w_i(t) = f_i(t) + \int_0^t f_i(t-x) \{w_1(x) + w_2(x)\} dx \quad (1)$$

$$W_i(t) = \int_0^t w_i(x) dx \quad (2)$$

ここで、 $f_i(t)$ ($i=1, 2, 3$) は、システムが $t=0$ (運用開始) から、初めて状態 S_i (Fig. 1 の状態 S_i , $i=1, 2, 3$) に遷移するまでの時間分布の密度関数である。また、

$$w_i(t) = \frac{dW_i(t)}{dt} \quad (3)$$

である。

機器の故障パターンからみれば、年齢と関連なくランダムな故障が全体の 77~92% を占めることが報告されている¹⁰⁾。したがって、以下の議論において、機器の異常および診断装置の誤診断がランダムに発生することとする。ここで、機器の異常について、要求された機能を損なわないある程度の劣化を想定し、機能が喪失した故障と区別するために、JIS(日本工業規格)の「故障率」の定義を参考に、機器の異常率は、ある時間 t まで正常であった機器が、引き続き単位期間内に異常を起こす確率と定義し、機器の異常率を λ とする。また、診断装置の誤診断に危険側誤診断と安全側誤診断があり、その中に危険側誤診断の割合が δ 、安全側誤診断の割合が $(1-\delta)$ を占めるものとする。このとき、診断装置の誤診断故障率を μ 、安全側誤診断故障率を λ_S 、危険側誤診断故障率 λ_D すると、

$$\begin{cases} \lambda_S = (1-\delta)\mu \\ \lambda_D = \delta\mu \end{cases} \quad (4)$$

となる。

システムが $t=0$ から、初めて状態 S_i (Fig. 1 の状態 S_i , $i=1, 2, 3$) に遷移するまでの時間分布の密度関数 $f_i(t)$ について、Fig. 2 に示したマルコフモデルを用いて次のように求める。

ここで、状態 S_4 は、機器が正常で、診断装置の機能が喪失した(診断不能)状態とし、時刻 t まで Fig. 2 の各状態 S_i ($i=0, 1, 2, 3, 4$) にある確率を $P_i(t)$ とすると、次のような微分方程式が成立つ。

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -(\lambda + \lambda_S + \lambda_D)P_0(t) \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda P_0(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_S P_0(t) \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = -\lambda P_4(t) + \lambda_D P_0(t) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda P_4(t) \end{cases} \quad (5)$$

システムの初期状態が S_0 にあるので、 $P_0(0)=1$, $P_i(0)=0$ ($i=1, 2, 3, 4$) となる。(5)式において、 λ , λ_S , λ_D が時間によらず一定とすれば、

$$f_1(t) = \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda e^{-(\lambda+\mu)t} \quad (6)$$

$$f_2(t) = \frac{dP_2(t)}{dt} = (1-\delta)\mu e^{-(\lambda+\mu)t} \quad (7)$$

$$f_3(t) = \frac{dP_3(t)}{dt} = \delta\lambda(e^{-\lambda t} - e^{-(\lambda+\mu)t}) \quad (8)$$

が得られる。ただし、 $\mu = \lambda_S + \lambda_D$, $\lambda_S = (1-\delta)\mu$, $\lambda_D = \delta\mu$ である。

したがって、 $W_i(t)$ について、(1)～(8)式より次の解が得られる。

$$W_1(t) = \frac{\lambda}{\delta\mu} (1 - e^{-\delta\mu t}) \quad (9)$$

$$W_2(t) = \frac{1-\delta}{\delta} (1 - e^{-\delta\mu t}) \quad (10)$$

$$W_3(t) = \begin{cases} \frac{\delta\mu}{\delta\mu-\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) - \frac{\lambda}{\delta\mu-\lambda} (1 - e^{-\delta\mu t}), & \lambda \neq \delta\mu \text{ のとき} \\ 1 - (1+\lambda t)e^{-\lambda t}, & \lambda = \delta\mu \text{ のとき} \end{cases} \quad (11)$$

状態 S_3 は、診断装置の危険側誤診断が起こった状態で機器の異常が発生し、しかも次回の TBM の実施までそのまま放置される状態である。システムが状態 S_3 に遷移した後、その状態に留まるので、 $W_3(t)$ は状態 S_3 への遷移(異常状態の放置)が発生するまでの時間分布関数となる。

時刻 t ($0 \leq t \leq T$) で機器の異常が発生すると、次回の TBM 実施までその異常が放置される時間の長さは $(T-t)$ となる。したがって、 $W_3(t)$ の密度関数を $w_3(t)$, 異常発生から次回の TBM の実施までの放置時間期待値を DT とすると、

$$\begin{aligned} DT &= \int_0^T (T-t)w_3(t)dt = \int_0^T (T-t)dW_3(t) \\ &= [(T-t)W_3(t)]_0^T + \int_0^T W_3(t)dt \\ &= \int_0^T W_3(t)dt \end{aligned} \quad (12)$$

が得られる。

(11)式を(12)式に代入し積分すれば、 DT が求められるが、ここで、実際の適用の範囲で近似計算により放置時間期待値について考察する。そのために、(11)式の指数の項 $e^{-\delta\mu t}$, $e^{-\lambda t}$, をテーラー展開する。このとき、原子炉主要機器の故障率¹¹⁾および実際の定期点検間隔(日本では $T=13$ ヶ月¹²⁾, 米国では $T=18$ or 24 ヶ月)を参考にすれば、 $\delta\mu t$ と λt の 3 次以上の項の値は 1 より十分に小さいと考えられるので、実用上で 2 次項まで取れば

$$W_3(t) \cong \frac{1}{2} \lambda \mu \delta t^2 \quad (13)$$

となる。

(13)式を(12)式に代入し積分すると、放置時間期待値は次式で近似することができる。

$$DT \cong \frac{1}{6} \lambda \mu \delta T^3 \quad (14)$$

一方、CBM が導入されない場合、TBM の計画時期に到達する前に異常が起きるとそのまま放置されて TBM の計画時期に到達したときに保全が行われる前提で、放置時間期待値は次のように求められる。

前述のように、機器の異常がランダムに発生し、その異常発生率 λ が時間によらず一定と仮定すれば、異常発生までの時間分布が指数分布となり、その分布関数 $F(t)$ は次式で与えられる。

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \cong \lambda t \left(1 - \frac{1}{2} \lambda t\right) \quad (15)$$

ここで、CBM が導入されない場合の TBM の実施間隔を T_0 , 放置時間期待値を DT_0 で表すと、

$$DT_0 = \int_0^{T_0} (T_0-t)dF(t) \cong \frac{1}{2} \lambda T_0^2 \left(1 - \frac{1}{3} \lambda T_0\right) \quad (16)$$

となる。

ところで、すでに述べたように、日本の原子力発電所では、CBM が導入されていないのが現状である。そこで、現状安全性の評価指標の基準値として CBM が導入されない場合の放置時間期待値 DT_0 を用いることとする。このとき、保全コストを制約条件に入れずに現状と同等の安全性を維持するためには、 $DT=DT_0$ が成立しなければならない。したがって、(14), (16)式より、

$$\frac{1}{6} \lambda \mu \delta T^3 = \frac{1}{2} \lambda T_0^2 \left(1 - \frac{1}{3} \lambda T_0\right)^3 \quad (17)$$

$$T = \sqrt[3]{\frac{T_0^2}{\delta\mu} (3 - \lambda T_0)} \quad (18)$$

が得られる。

よって、現状と同等の安全性を維持する条件で、CBMの導入によるTBMの実施間隔の延長量 ΔT は、次式で求められる。

$$\Delta T = T - T_0 = T_0 \left(\sqrt[3]{\frac{1}{\delta\mu} \left(\frac{3}{T_0} - \lambda \right)} - 1 \right) \quad (19)$$

また、診断装置の平均寿命 $\bar{T}_L$ は、 $\bar{T}_L = 1/\mu$ と表されるので、(19)式より、

$$\bar{T}_L = \frac{\delta(\Delta T + T_0)^3}{T_0^2(3 - \lambda T_0)} \quad (20)$$

が得られる。

したがって、保全コストを制約条件として考慮せず、現状と同等の安全性を維持する場合には、次の結論が得られる。

(1) CBM導入により、TBMの実施間隔が延長できる。このとき、TBM実施間隔 T は(18)式により求められ、TBM実施間隔の延長量 ΔT は(19)式で与えられる。

(2) 一方、TBM実施間隔を δT だけ延ばすためには、(20)式で与えられる $\bar{T}_L$ の寿命をもつ診断装置を使用すべきである。

2. TBM実施間隔の評価例

原子炉の電動ポンプを例に、CBMの導入によりTBMの実施間隔がどの程度延長できるか、また、TBMの実施間隔を ΔT 延ばすためには、診断装置の平均寿命がどの程度必要なのかを計算する。

ここで、各パラメータの設定について、電動ポンプの異常率に関するデータがないので故障率を参考に $\lambda = 1.3 \times 10^{-5}/\text{h}^{11)}$ と設定する。診断装置については、温度検出器の不作動故障率の値を参考に $\mu = 1.4 \times 10^{-6}/\text{h}^{11)}$ 、危険側誤診断故障率の割合 $\delta = 0.5$ とする。また、CBMが導入されない場合のTBM実施間隔 T_0 について、日本の原子力発電所における定期検査が13ヵ月ごとに実施されている¹²⁾ことを考慮して、 $T_0 = 1$ 年とする。

このとき、(18)、(19)式より、 $T = 7.8$ 年、 $\Delta T = 6.8$ 年となる。すなわち、保全コストを制約条件として考慮せず、現状と同等の安全性を維持するとした場合、CBM導入後のTBM実施間隔は7.8年となり、CBM導入前の1年に対し6.8年延長できる。この例の場合、CBM導入の効果が大きいといえる。

一方、TBM実施間隔を現状の $T_0 = 1$ 年から1年延ばす($\Delta T = 1$ 年)ためには、診断装置の平均寿命は、(20)式より、 $\bar{T}_L = 1.4$ 年が必要となる。対応する誤診断故障率 $\mu = 8.2 \times 10^{-5}/\text{h}$ である。

IV. TBM実施間隔の最適化

1. モデルの説明

すでに述べたように、診断装置の危険側誤診断により放置された異常を発見するためには、TBMを実施することが必要となる。TBMの実施間隔が大きいほど、保全コス

トが小さくなるが、機器の異常が放置される時間が大きくなる。機器の異常が長時間放置される場合、機器によって重大な事故まで発展する可能性が大きくなり、リスクが大きくなる。そこで、安全性と経済性(保全コスト)のバランスを考慮した最適なTBM実施間隔を決定することが必要となる。

ここで、安全性目標値の制約条件として、許容可能な、異常状態の放置時間期待値(以下、放置時間許容値と呼ぶ)をあらかじめ設定する。このとき、放置時間許容値を DT_a として DT_a を超えないようにTBMの実施間隔 T を求めると、(14)式より、

$$T \leq \sqrt[3]{\frac{6DT_a}{\lambda\mu\delta}} \quad (21)$$

となる。

また、機器の異常が放置されることにより生じる損害額の期待値と保全コストの期待値の和を総コスト期待値 $C(t)$ とし、その内訳は次の4種類からなると考えられる。

(1) 1回のTBM実施に要する保全コスト期待値 C_0

(2) CBMにより機器の異常が発見されたとき、修理を行うための保全コスト期待値 $C_1(t)$ 。

$$C_1(t) = k_1 W_1(t) \quad (22)$$

ただし、 k_1 は、Fig. 1の状態 S_1 に対応し、1回の修理に要するコストである。

(3) 機器は正常であるが、安全側誤診断により緊急点検を行うための保全コスト期待値 $C_2(t)$ 。

$$C_2(t) = k_2 W_2(t) \quad (23)$$

ただし、 k_2 は、Fig. 1の状態 S_2 に対応し、1回の点検に要するコストである。

(4) 危険側誤診断により異常が放置される場合に生じる損害額期待値 $C_3(t)$ 。

$$C_3(t) = k_3 W_3(t) \quad (24)$$

ただし、 k_3 は、Fig. 1の状態 S_3 に対応し、1回の損害の大きさである。

したがって、総コスト期待値 $C(t)$ は次式のように定義される。

$$C(t) = C_0 + \sum_{i=1}^3 C_i(t) \quad (25)$$

期間 $[0, T]$ において単位時間当たりの総コスト期待値を $L(T)$ とすると、

$$L(T) = \frac{C(T)}{T} = \frac{C_0 + \sum_{i=1}^3 C_i(T)}{T} = \frac{C_0 + \sum_{i=1}^3 k_i W_i(t)}{T} \quad (26)$$

が得られる。

したがって、安全性目標値を制約条件として、 $L(T)$ を最小にする最適なTBM実施間隔を決定する問題は、次のように定式化される。

$$\begin{cases} \min L(T) = \min \frac{C_0 + \sum_{i=1}^3 k_i W_i(T)}{T} \\ \text{subject to } T \leq \sqrt[3]{\frac{6DT_a}{\lambda\mu\delta}} \end{cases} \quad (27)$$

次に、実際の適用の範囲で近似計算により最適な TBM 実施間隔の存在条件について考察し、この最適な TBM 実施間隔の解析解を導出する。

このとき、(9)式、(10)式は次式で近似することができる。

$$W_1(t) = \lambda t \left(1 - \frac{\delta\mu t}{2}\right) \quad (28)$$

$$W_2(t) = (1-\delta)\mu t \left(1 - \frac{\delta\mu t}{2}\right) \quad (29)$$

よって、単位時間当たりの総コスト期待値 $L(T)$ は次式で近似することができる。

$$L(T) = \frac{C_0}{T} + k_1 \lambda \left(1 - \frac{\delta\mu T}{2}\right) + k_2 (1-\delta)\mu \left(1 - \frac{\delta\mu T}{2}\right) + \frac{1}{2} k_3 \lambda \mu \delta T \quad (30)$$

最適な TBM 実施間隔を求めるために、(30)式を T で偏微分すると、

$$\frac{\partial L(T)}{\partial T} = -\frac{C_0}{T^2} - \frac{\delta\mu}{2} (k_1 \lambda + k_2 (1-\delta)\mu - k_3 \lambda) \quad (31)$$

が得られる。極値を求めるために、 $\partial L(T)/\partial T = 0$ とすると、

$$T = \sqrt[3]{\frac{2C_0}{\lambda\mu\delta \left(k_3 - k_1 - \frac{(1-\delta)\mu}{\lambda} k_2\right)}} \quad (32)$$

が得られる。

(32)式より、 T の極値が存在する条件は次のようになる。

$$k_3 > k_1 + \frac{(1-\delta)\mu}{\lambda} k_2 \quad (33)$$

ここで、 k_1 は異常な機器に対して修理を行うためのコスト(1回)、 k_2 は正常な機器に対して点検を行うためのコスト(1回)、 k_3 は機器の異常が放置され事故により生じる損害の大きさ(1回)である。 k_1, k_2, k_3 の大きさについて、一般的に、事故により生じる損害額が、その他に比べ最も大きい場合を想定して、 $k_3 \gg k_1 > k_2$ と仮定する。また、診断装置の誤診断故障率 μ の値は文献¹¹⁾の温度検出器、警報設定器や演算器などの故障率を参考に、機器の異常発生率 λ は電動ポンプや電動弁の故障率を参考にすれば、 $(1-\delta)\mu/\lambda < 1$ と考えられるので、実際の適用範囲で(33)式が成り立つ。

また、(31)式より、

$$\frac{\partial^2 L(T)}{\partial T^2} = \frac{2C_0}{T^3} > 0 \quad (34)$$

が成り立つので、 T の極値は最小値となる。したがっ

て、実際の適用範囲で最小の TBM 実施間隔が存在し、その TBM 実施間隔を T^* として次式で与えられる。

$$T^* = \min(T_1^*, T_2^*) \quad (35)$$

ただし、

$$\begin{cases} T_1^* = \sqrt[3]{\frac{2C_0}{\lambda\mu\delta \left(k_3 - k_1 - \frac{(1-\delta)\mu}{\lambda} k_2\right)}} \\ T_2^* = \sqrt[3]{\frac{6DT_a}{\lambda\mu\delta}} \end{cases} \quad (36)$$

である。

T_1^* は、CBM と TBM を併用し、安全性の制約条件がない場合の最小の TBM 実施間隔、 T_2^* は CBM が導入されない場合の放置時間期待値である。(35)式は T^* が T_1^* と T_2^* のどちらかの小さい値を取ることを意味する。

2. TBM 実施間隔の最適化の評価例

電動ポンプを例に現状の安全性を維持しつつ、最適な TBM 実施間隔を計算する。

ここで、各パラメータの値の設定について次のように考える。

前述のように、 k_1 は異常な機器に対する修理に要するコスト、 k_2 は正常な機器に対する点検に要するコスト、 k_3 は機器の異常が放置され事故により生じる損害の大きさである。 k_1, k_2, k_3 の値は不確かさがあり、実際の保全行為や事故の大きさによって異なる。ここでは、1回の修理コスト $k_1 = 1$ 千万円、1回の点検費用 $k_2 = 100$ 万円、1回の事故による損害額 $k_3 = 10$ 億円の場合を考え、 k_1, k_2, k_3 に無次元の値を与えて、 $k_2 = 10$ とし、 $k_1 = 100, k_3 = 10,000$ と設定する。 C_0 は1回の TBM の実施(点検や修理・交換など)に要する保全コストなので、 $C_0 = k_1 = 100$ とする。その他、TBM 実施間隔の評価例 1 と同様に、 $\lambda = 1.3 \times 10^{-5}/\text{h}$ 、 $\mu = 1.4 \times 10^{-6}/\text{h}$ 、 $\delta = 0.5$ 、現状の CBM が導入されない場合の TBM の実施間隔 $T_0 = 1$ 年とする。

このとき、(16)式より、CBM が導入されない場合の放置時間期待値は $DT_0 = 480$ h となる。前述のように、機器の異常が放置される時間が長いほど事故まで発展する可能性が大きく、リスクが大きくなる。そこで、放置時間期待値を安全性の評価指標とし、現状の安全性を維持するために、CBM が導入されない場合の放置時間期待値 DT_0 を許容可能な放置時間期待値 DT_a とする。

したがって、(35)式より、 $T_1^* = 5.4$ 年、 $T_2^* = 7.8$ 年、 $T^* = \min(T_1^*, T_2^*) = 5.4$ 年となる。

この例の場合では、現状の安全性を損なわないという条件で、単位時間当たりの総コスト期待値を最小にする最適な TBM 実施間隔が $T_1^* = 5.4$ 年となり、現状の $T_0 = 1$ 年から 4.4 年だけ延長できる。すなわち、CBM の導入により、現状の安全性を維持しつつ、TBM 実施間隔の延長および保全コストの削減が可能である。

V. 最適な TBM 実施間隔に対する感度解析

次に、最適な TBM 実施間隔に対する各パラメータの変化の影響を考察するために、変動係数を用いて感度解析を行う。変動係数は標準偏差と平均値との比率である。 n 個の確率変数 x_1, x_2, A, x_n の関数 $y=g(x_1, x_2, A, x_n)$ の変動係数 η_y は、一次近似法により次式で与えられる¹⁴⁾。

$$\eta_y = \frac{g(\mu_{x1}, \mu_{x2}, A, \mu_{xn})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{xi}^2}} \quad (37)$$

ここで、 $\mu_{xi} (i=1 \sim n)$ は x_i の平均値、 σ_{xi} は x_i の標準偏差、 $\bar{x} = (\mu_{x1}, \mu_{x2}, A, \mu_{xn})$ である。

(37) 式より、 $T^* = T_1^*$ の場合、最適な TBM 実施間隔 T^* の変動係数 η_T は次式で与えられる。

$$\eta_T \cong \frac{1}{2} [(\xi_{c0}\eta_{c0})^2 + (\xi_{k1}\eta_{k1})^2 + (\xi_{k2}\eta_{k2})^2 + (\xi_{k3}\eta_{k3})^2 + (\xi_{\lambda}\eta_{\lambda})^2 + (\xi_{\mu}\eta_{\mu})^2 + (\xi_{\delta}\eta_{\delta})^2]^{1/2} \quad (38)$$

ここで、

$$\xi_{c0} = 1 \quad (39)$$

$$\xi_{k1} = \frac{k_1\lambda}{(k_3 - k_1)\lambda - k_2(1 - \delta)\mu} \quad (40)$$

$$\xi_{k2} = \frac{k_2(1 - \delta)\mu}{(k_3 - k_1)\lambda - k_2(1 - \delta)\mu} \quad (41)$$

$$\xi_{k3} = \frac{k_3\lambda}{(k_3 - k_1)\lambda - k_2(1 - \delta)\mu} \quad (42)$$

$$\xi_{\lambda} = \frac{(k_3 - k_1)\lambda}{(k_3 - k_1)\lambda - k_2(1 - \delta)\mu} \quad (43)$$

$$\xi_{\mu} = \frac{(k_3 - k_1)\lambda - 2k_2(1 - \delta)\mu}{(k_3 - k_1)\lambda - k_2(1 - \delta)\mu} \quad (44)$$

$$\xi_{\delta} = \frac{(k_3 - k_1)\lambda - k_2(1 - 2\delta)\mu}{(k_3 - k_1)\lambda - k_2(1 - \delta)\mu} \quad (45)$$

η_x はパラメータ x の変動係数である。

ところで、原子炉主要機器の故障率¹¹⁾および $k_3 \gg k_1 > k_2$ を考慮すれば、実際の適用の範囲で、

$$\begin{aligned} k_3\lambda &> (k_3 - k_1)\lambda > (k_3 - k_1)\lambda - k_2(1 - 2\delta)\mu > (k_3 - k_1) \\ &\times \lambda - k_2(1 - \delta)\mu > (k_3 - k_1)\lambda - 2k_2(1 - \delta)\mu \\ &\times \mu > k_1\lambda > k_2(1 - \delta)\mu \end{aligned} \quad (46)$$

が成立するので、

$$\xi_{k3} > \xi_{\lambda} > \xi_{\delta} > \xi_{c0} > \xi_{\mu} > \xi_{k1} > \xi_{k2} \quad (47)$$

が成り立つ。したがって、各パラメータの変化による最適な TBM 実施間隔への影響の大きさについて、(38) 式より、 $k_2 \rightarrow k_1 \rightarrow \mu \rightarrow C_0 \rightarrow \delta \rightarrow \lambda \rightarrow k_3$ の順に大きくなる。特に、機器の異常が放置されることにより生じる損害の大きさは最適な TBM 実施間隔に大きく影響することがわかる。

VI. 結 言

本研究は、TBM と CBM を併用する保全方式において、状態遷移モデルを用いて、診断装置の誤診断を考慮した TBM の実施間隔の評価および最適化のためのモデルを

開発した。

本モデルの適用により、次の結論を得た。

(1) 保全コストを制約条件に入れずに現状と同等の安全性を維持すると想定した場合の、CBM の導入による TBM の実施間隔の延長、および要求される TBM の実施間隔を達成するために使用すべき診断装置の寿命を評価した。原子炉における電動ポンプに適用し、故障率のデータを用いて異常率 $\lambda = 1.3 \times 10^{-5}/h^{11)}$ と設定し、診断装置の不作動故障率 $\mu = 1.4 \times 10^{-6}/h^{11)}$ 、危険側誤診断故障率の割合 $\delta = 0.5$ として計算した結果、次のことがわかった。

(a) 現状の安全性を損なわないという条件で、CBM 導入後の TBM の実施間隔は、CBM 導入前の 1 年から 6.8 年だけ延長できる。

(b) TBM の実施間隔を現状の 1 年より 1 年間延ばすためには、平均寿命 1.4 年の診断装置を使用すべきである。

(2) 保全コストと安全性をともに考慮した場合、最適な TBM 実施間隔が存在することを示した。さらに、(1) と同様な電動ポンプを対象にテスト計算を行った結果、CBM の導入により、現状と同等の安全性を維持しながら、TBM 実施間隔の延長および保全コストの削減が可能であることがわかった。

(3) 各パラメータの感度解析により、異常状態の放置により生じる損害の大きさは最適な TBM 実施間隔に大きく影響することが示された。

本研究では、機器の異常がランダムに発生し、保全の失敗を考慮せず、保全により新品同様な状態に回復するなどの条件の下で、CBM の導入により TBM の実施間隔が延長できることを示し、その延長量を評価した。また、安全性と経済性 (保全コスト) のバランスを考慮した最適な TBM 実施間隔の近似式を導出し、感度解析を行った。今後の課題としては、時間経過による機器の劣化度合の増加、不適切な保全による故障増大などの考慮、および、より現実なパラメータの値を用いた評価などが考えられる。

— 参考文献 —

- 1) 日本原子力安全・保安院, 保安活動検査, 保守管理検査両 WG における検討結果, (2006). <http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g60619c02j.pdf>
- 2) M. Ohnishi, H. Kawai, H. Mine, "An optimal inspection and replacement policy under incomplete state information," *Eur. J. Operational Res.*, **27**[1], 117 (1986).
- 3) 田村信幸, 宮村鉄夫, "改良保全と不完全修理を考慮したマルコフの劣化モデル," 電子情報通信学会論文誌 (A), **J84-A**[2], 197 (2001).
- 4) 前原洋樹, 鈴木和幸, "不確実な修理を考慮した状態監視保全における最適保全方策," 日本信頼性学会誌「信頼性」, **27**[3], 219 (2005).
- 5) 幸田武久, 井上紘一, 熊本博光, 他, "二つの故障モードをもつ安全監視システムの最適論理構造," 計測自動制御学会論文集, **17**[9], 908 (1981).
- 6) 立川 寛, 鈴木和幸, "可変しきい値をもつ k-out-of-n モニタ

- リングシステムの最適性,” 日本信頼性学会誌「信頼性」, **20**[3], 158 (1998).
- 7) M. J. Phillips, “k-out-of-n: G System Are Preferable,” *IEEE Trans. Reliab.*, **29**[2], 166 (1980).
- 8) 凌 元錦, 鈴木和彦, 幸田武久, “自己診断機能を持つ安全保護系の数理モデル,” 計測自動制御学会論文集, **41**[3], 259 (2005).
- 9) H. Kumamoto, E. J. Henley, K. Inoue, “Computer aided protective system hazard analysis,” *Comput. Chem. Eng.*, **5**[2], 93 (1981).
- 10) A. M. Smith, G. R. Hinchcliffe, *RCM: Gateway to World Class Maintenance*, Butterworth-Heinemann, **60** (2003).
- 11) 桐本順広, 松崎章弘, 佐々木 亨, 原子力発電所に関する確率論的安全評価用の機器故障率の算出, 電力中央研究所原子力情報センター(2001). <http://www.nucia.jp/NRIA/REPORT/P00001/body5.html>
- 12) 電気事業法施行規則(平成18年3月31日経済産業省令第二八号). <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H07/H07F03801000077.html>
- 13) 日本原子力安全・保安院, 関西電力株式会社美浜発電所3号機二次系配管破損事故について(最終報告書)(2005). <http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g50330c01j.pdf>
- 14) 市川昌弘, 信頼性工学, 裳華房, **17** (1996).
-