

状態遷移モデルを用いて誤診断を考慮した CBM と TBM のベストミックスの検討

Study on Best-Mix of CBM and TBM Considering
Effect of Spurious Diagnostics Using State Transition Model

(株) I I U 凌 元錦 Yuanjin LING
高瀬 健太郎 Kentaro TAKASE Member
真木 紘一 Koichi MAKI Member

In the present study, effect of spurious diagnostics to improvement of safety, and possibility of extension in the interval of TBM (Time-Based Maintenance) by introducing CBM (Condition-Based Maintenance) and necessity of TBM were investigated. From these investigations, improvement of safety and reduction of maintenance cost can be seen.

Keywords: State Transition Model, Spurious Diagnostic, TBM, CBM, Best-Mix

1. 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。近年、日本の原子力発電所においても、従来の時間基準保全 (TBM : Time-Based Maintenance) から CBM へ移行しようとしている。

状態監視保全 (CBM) は、診断装置により対象機器の状態を監視し、機器の状態が所定の基準にまで劣化した場合に保全を行うことである[1]。ここでの「所定の基準」として「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 (故障)」など様々の判断基準が考えられる。以下の議論で機器の劣化状態が「所定の基準」を超えた場合を「異常」、超えない場合を「正常」と呼ぶ。

ところが、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と考えられる。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かかわらず、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。安全側誤診断は不必要な

保全を招き、保全コストの増加につながる。一方、危険側誤診断では、機器が「異常」であるにもかかわらず、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おそれがある。したがって、CBM 導入の効果を評価するために、診断装置の誤診断を考慮する必要がある。

また、診断装置の誤診断について、ノイズのような原因で一時的に誤診断が起こる場合がある。ノイズが消滅すると、自然に正常な状態に戻る。一方、診断装置の長期使用によるセンサ感度の低下や保守・校正不備などにより、ある時点から誤診断が発生する場合には、その後誤診断を起こしつづける場合も考えられる。本研究では、後者の誤診断のみを考えることとする。

本研究では、診断装置の誤診断を考慮し、CBM の導入によって安全性が向上するかどうかを定量的に評価する。評価基準として機器が異常であるにも関わらず、発見されず、そのまま放置される平均時間 (以下、放置期待時間と呼ぶ) を考察することにより、CBM 導入の効果を明らかにする。また、安全性と経済性をともに考慮した CBM と TBM のベストミックスについても検討する。

2. モデル化

ここで、TBM と CBM を併用した場合を考え、機器に対して常時診断が行われることとする。また、機器と診断装置からなる1つのシステム (以下、システム

連絡先: 凌 元錦、〒110-0008 東京都台東区池之端
2-7-17 井門池之端ビル 7F、株式会社 I I U
電話: 03-5814-5350、e-mail: ling@iiu.ac.jp

と呼ぶ)を考察の対象とする。このとき、TBMとCBMをとともに考慮するときのシステムの振る舞いはつぎのようになる。

TBMの実施時期に到達した際にTBMが行われる。一方、TBMの実施時期到達前に、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(A₁、A₂)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(B₁、B₂)がある。機器の状態と診断装置の状態の組合せによって、システムは表1に示すように4つの状態(S、S₁、S₂、S₃)に分類される。各状態の遷移を図1に示す。

表1 機器の状態と診断装置の状態との組合せ

	B ₁ 診断装置が機器を「正常」と診断する	B ₂ 診断装置が機器を「異常」と診断する
A ₁ 機器が「正常」である	S: 正しい診断 機器が「正常」であり、診断装置が機器を「正常」と診断する	S ₂ : 安全側誤診断 機器が「正常」であるが、診断装置が機器を異常と診断する
A ₂ 機器が「異常」である	S ₃ : 危険側誤診断 機器が「異常」であるが、診断装置が機器を「正常」と診断する	S ₁ : 正しい診断 機器が「異常」であり、診断装置が機器を「異常」と診断する

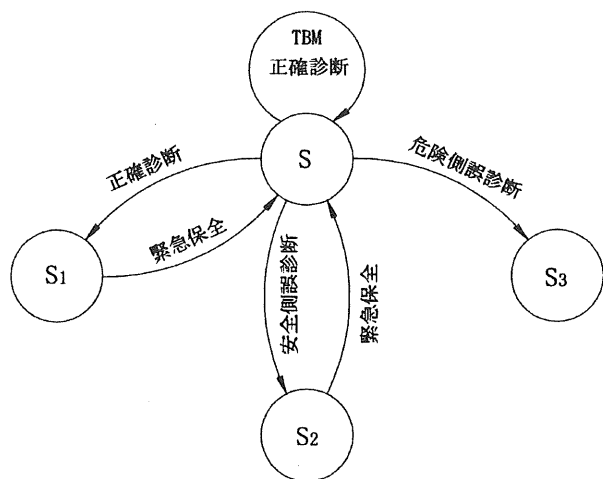


図1 状態遷移モデル

図1の状態Sでは、機器が「正常」状態で、診断装

置が「正常」と正しく診断する。この状態で、TBMの実施時期に到達すると保全が行われて状態Sに戻る。状態S₁は機器が「異常」と正しく診断された場合で、直ちに緊急保全が行われて状態Sに戻る。状態S₂は機器が「正常」であるが、診断装置が「異常」と誤診断した場合で、同様に緊急保全が行われて状態Sに戻る。状態S₃では、機器が「異常」であるが、診断装置が「正常」と誤診断するので「異常」はそのまま放置される。

3. CBMの有効性評価

ここで、TBMの実施周期(以下、TBM周期と呼ぶ)をTとする。機器の「異常」発生と診断装置の誤診断は統計的に独立であり、緊急保全またはTBM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、システムは各TBM周期Tの間で同様な状態を繰り返すので、以下は[0, T]の間で議論を行う。図1に示すように、システムは時刻t=0で状態Sから運用開始し、時刻t(0 ≤ t ≤ 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W_i(t)について、次式が成立つ[2]。

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

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

ここで、f_i(t)(i=1, 2, 3)は時刻tで始めて状態S_iに遷移する確率の密度関数である。また、w_i(t)=dW_i(t)/dt(i=1, 2, 3)。状態S₃は機器の「異常」がそのまま放置される状態であり、S₃に遷移した後、その状態に留まるので、W₃(t)は機器の「異常」が放置される確率(以下、異常放置確率と呼ぶ)となる。

ここで、CBMがない場合に、時刻tにおいて機器が「異常」となる確率をF(t)とし、F(t)は指数分布(F(t)=1-e^{-λt}, λは一定)に従うこととする。また、診断装置の安全側誤診断率λ_S(診断装置は、ある時刻tまで正しく診断できるが、引き続き単位期間内に安全側誤診断を起こす確率)、危険側誤診断率λ_D(診断装置は、ある時刻tまで正しく診断できるが、引き続き単位期間内に危険側誤診断を起こす確率)も時間によらず一定とする。このとき、時刻tで始めて状態S_i(i=1, 2, 3)に遷移する確率の密度関数f_i(t)はそれぞれ次式(3)~(5)で与えられる。

$$f_1(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (3)$$

$$f_2(t) = \lambda_s e^{-\lambda_s t} \quad (4)$$

$$f_3(t) = \frac{\lambda \lambda_D}{\lambda_s + \lambda_D} (e^{-\lambda t} - e^{-\lambda_D t}) \quad (5)$$

ただし、 $\chi = \lambda + \lambda_s + \lambda_D$ である。

また、 $W_i(t)$ について、式 (3) ~ (5) と式 (1) ~ (2) より次の解が得られる。

$$W_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda_D} (1 - e^{-\lambda_D t}) \quad (6)$$

$$W_2(t) = \frac{\lambda_s}{\lambda_D} (1 - e^{-\lambda_D t}) \quad (7)$$

$$W_3(t) = \begin{cases} \frac{\lambda_D}{\lambda_D - \lambda} (1 - e^{-\lambda t}) - \frac{\lambda}{\lambda_D - \lambda} (1 - e^{-\lambda_D t}), & \lambda_D \neq \lambda \text{ のとき} \\ 1 - (1 + \lambda t) e^{-\lambda t}, & \lambda_D = \lambda \text{ のとき} \end{cases} \quad (8)$$

式 (8) において、 $\lambda_D \rightarrow \infty$ のとき、 $W_3(t) = 1 - e^{-\lambda t} = F(t)$ 、CBM がない場合の異常放置確率となる。

TBM 周期を T とし、CBM がある場合、 $[0, T]$ の間の機器の「異常」が放置される放置期待時間を DT_1 とすると、

$$DT_1 = \int_0^T W_3(t) dt = T - \frac{\lambda + \lambda_D}{\lambda \lambda_D} + \frac{\lambda_D}{\lambda(\lambda_D - \lambda)} e^{-\lambda T} - \frac{\lambda}{\lambda_D(\lambda_D - \lambda)} e^{-\lambda_D T} \quad (9)$$

が得られる。

放置期待時間が小さいほど、機器の「異常」が故障まで発展する可能性が小さくなるので、プラントの安全性が高くなると考えられる。ここで、放置期待時間を用いて CBM の導入によって安全性が向上できることを示す。

CBM がない場合、機器の「異常」が起これば、そのまま放置されるので、 $[0, T]$ の間の放置期待時間 DT_2 は次式で表される。

$$DT_2 = \int_0^T F(t) dt = T - \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda T}) \quad (10)$$

ところが、式 (8) より、 $W_3(t) \leq 1 - e^{-\lambda t} = F(t)$ が成立

つことを容易に確認できるので、式 (9)、(10) より $DT_1 \leq DT_2$ が成立つ。つまり、CBM 導入後の放置期待時間は CBM 導入前より小さくなる。したがって、CBM の導入によって安全性が向上することがわかる。

次に、数値計算例を用いて危険側誤診断率 λ_D が CBM の効果に与える影響、CBM の導入によって安全性がどれほど向上できるか、CBM の導入によって TBM 周期はどれほど延長できるか、または TBM が必要であるかどうかについて考察する。ここで、各パラメータは次の値をとることとする。

$$\lambda = 1.0 \times 10^{-5} / \text{月}, \quad \lambda_s = 1.0 \times 10^{-5} / \text{月},$$

$$\lambda_D = 1.0 \times 10^{-2}, 5.0 \times 10^{-3}, 1.0 \times 10^{-3} / \text{月}$$

このとき、CBM がある場合の放置期待時間 DT_1 、及び CBM がない場合の放置期待時間 DT_2 の TBM 周期 T の依存性を図 2 に示す。図 2 より、放置期待時間 $DT=5$ 日を許容可能な上限値 (管理基準値) とする場合、CBM がなければ許容される TBM 周期の上限 $T_2=36.9$ ヶ月となる。一方、同じ管理基準値 $DT=5$ 日のとき、CBM がある場合の各危険側誤診断率 λ_D に対応する許容可能な TBM 周期の上限値 T_1 の値、および CBM の導入による TBM 周期の延長可能時間 $\Delta T=T_1-T_2$ の値を表 2 に示す。

これらの結果から、以下の知見が得られる。

- 図 2 より、診断装置の危険側誤診断率 λ_D が CBM の効果に与える影響は大きい。 λ_D が小さいほど、対応する放置期待時間が小さくなり、CBM の効果は大きくなる。
- 式 (8)、(9) より、異常放置確率または放置期待時間が安全側誤診断率 λ_s に依存しないことがわかる。これは、前述では機器の「異常」が偶発であると仮定したので、TBM が来る前に安全側誤診断により余計な予防保全を実施することはほとんど効果がないことを意味している。
- 放置期待時間により管理基準値を定める場合、表 2 に示すように、CBM の導入により TBM 周期を延長できることがわかる。
- 診断装置の危険側誤診断率 λ_D が小さいほど TBM 周期を長くできる。 λ_D は診断装置の診断精度に依存するので、診断精度が十分に高い場合、TBM が不要になる可能性がある。

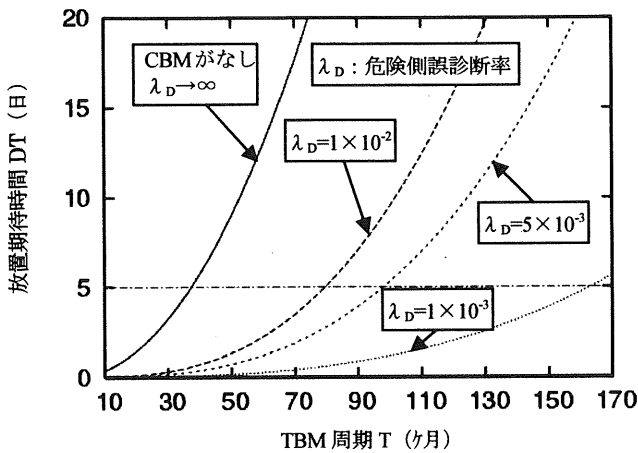


図2 放置期待時間と TBM 周期の関係

表2 CBM の導入効果の評価結果

λ_D (10^{-3} /月)	10	5	1
T_1 (ヶ月)	79.1	97.2	162.5
ΔT (ヶ月) ($T_1 - T_2$)	42.2	60.3	125.6

λ_D : 危険側誤診断率

T_1 : CBM がある場合の TBM 周期の上限

ΔT : CBM 導入による TBM 周期の延長可能時間

T_2 : TBM が無い場合の TBM 周期の上限

$T_2 = 36.9$ (ヶ月)

4. CBM と TBM のベストミックス

前述のように、CBM を導入する場合、診断装置の診断精度が十分に高い場合、TBM は不要となる。しかし、実際には、診断装置の誤診断は完全には避けられない。危険側誤診断が起こると、機器が「異常」であるにもかかわらず、そのまま放置され、故障まで発展した場合、機器によっては重大な事故が起こるおそれがあり、安全性の低下につながる。放置された「異常」を発見するために、TBM を実施することが必要となる。一方、安全側誤診断が起こると、緊急保全のために、正常運転中の機器が停止され、プラント操業の混乱や不必要な保全コストを招き、経済性が低下する。そこで、安全性と経済性のバランスをとるために、最適な TBM 周期を決定することが必要となる。

ここで、TBM と CBM をともに考慮した場合の期待

コスト $C(t)$ の内訳は次の 4 種類からなると考えられる。

- ・ 1 回の TBM にかかる保全コスト C_0
- ・ 機器の故障で正しい診断による緊急保全 (図 1 の状態 S_1) にかかる期待保全コスト $C_1(t)$
- ・ 診断装置の安全側誤診断による緊急保全 (図 1 の状態 S_2) にかかる期待保全コスト $C_2(t)$
- ・ 診断装置の危険側誤診断により「異常」が放置される場合 (図 1 の状態 S_3) に生じる期待損失コスト $C_3(t)$

また、図 1 の状態 S_1 に対応する 1 回の保全コストを k_1 、状態 S_2 に対応する 1 回の保全コストを k_2 、状態 S_3 が発生する場合の損失を k_3 とすると、 $C_1(t) = k_1 W_1(t)$ 、 $C_2(t) = k_2 W_2(t)$ 、 $C_3(t) = k_3 W_3(t)$ となる。ここで、 $W_1(t)$ 、 $W_2(t)$ 、 $W_3(t)$ は式 (6) ~ (8) で与えられる。期待コスト $C(t)$ は次式のようになる。

$$C(t) = C_0 + C_1(t) + C_2(t) + C_3(t) \quad (11)$$

TBM 周期を T 、単位時間当たりの期待コストを $L(T)$ とすると、

$$\begin{aligned} L(T) &= \frac{C(T)}{T} \\ &= \frac{C_0 + C_1(T) + C_2(T) + C_3(T)}{T} \\ &= \frac{C_0 + k_1 W_1(T) + k_2 W_2(T) + k_3 W_3(T)}{T} \end{aligned} \quad (12)$$

が得られる。

CBM と TBM のベストミックスは、単位時間当たりの期待コスト $L(T)$ を最小にする最適な TBM 周期 T (以下、 T^* と記す) を決定することであり、次のように表される。

$$\min_{T>0} L(T) = \min_{T>0} \frac{C_0 + k_1 W_1(T) + k_2 W_2(T) + k_3 W_3(T)}{T} \quad (13)$$

次に、診断装置の誤診断率 λ_D 、 λ_S は最適な TBM 周期にどのような影響を与えるかについて数値例を用いて考察する。ここで、各パラメータは次の値をとることとする。

$$\lambda = 1.0 \times 10^{-5} / \text{月}, C_0 = 1000, k_1 = 100.0, k_2 = 10.0,$$

$$k_3 = 5.0 \times 10^6$$

このとき、 λ_D 、 λ_S を $1.0 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-4}$ (月) の間で変化させるときに、それぞれに対応する単位時間

当たりの期待コスト $L(T)$ の TBM 周期の依存性を図 3、図 4 に示す。

図 3 より、 $L(T)$ を最小にする最適な TBM 周期 T^* が存在し、危険側誤診断率 λ_D の変化は T^* に与える影響が大きいことがわかる。各 λ_D に対応する T^* および T^* に対応する期待コスト $L(T^*)$ の値を表 3 に示す。表 3 より、 λ_D が小さいほど、 T^* は大きくなる。したがって、診断精度の向上により最適な TBM 周期を延長できることがわかる。

一方、図 4 より、安全側誤診断率 λ_S の変化は T^* にほとんど影響を与えない。これは、前述では、機器が「異常」となる確率 $F(t)$ は指数分布に従うこと（異常の発生が偶発である）と仮定したので、安全側誤診断により余計な予防保全を行っても異常放置確率 $W_3(t)$ が変わらないためである。

表 3 λ_D に対応する T^* の計算結果

λ_D (10^{-4} /月)	10	8	6	4	2
T^* (月)	64.6	72.1	83.0	101.4	142.8
$L(T^*)$ (/月)	3.13	2.80	2.43	1.99	1.41

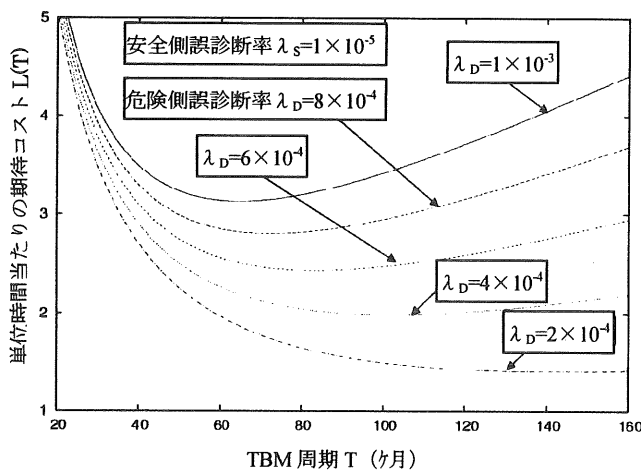


図 3 λ_D に対応する $L(T)$ と T との関係

5. 結言

本研究は、診断装置の誤診断を考慮し、状態遷移モデルを用いて、放置期待時間を安全性の評価基準とし

た場合の CBM の有効性を定量的に評価した。また、安全性と経済性を同時に考慮した CBM と TBM のベストミックスについても検討した。これにより、以下の知見を得た。

- 1) CBM がある場合の放置期待時間は CBM がない場合より小さくなり、CBM の導入によって安全性が向上することができる。
- 2) 診断装置の危険側誤診断率 λ_D が CBM 導入の効果に大きく影響する。 λ_D が小さいほど、CBM 導入の効果が大きくなることがわかった。
- 3) 診断装置の危険側誤診断率が十分に小さい（診断精度が十分に高い）場合、TBM が不要になる可能性がある。
- 4) 機器の「異常」が偶発である場合、TBM の実施時期到達前に安全側誤診断により余計な予防保全を実施することはほとんど効果がないことがわかった。
- 5) 診断精度の向上により最適な TBM 周期を延長できることがわかった。

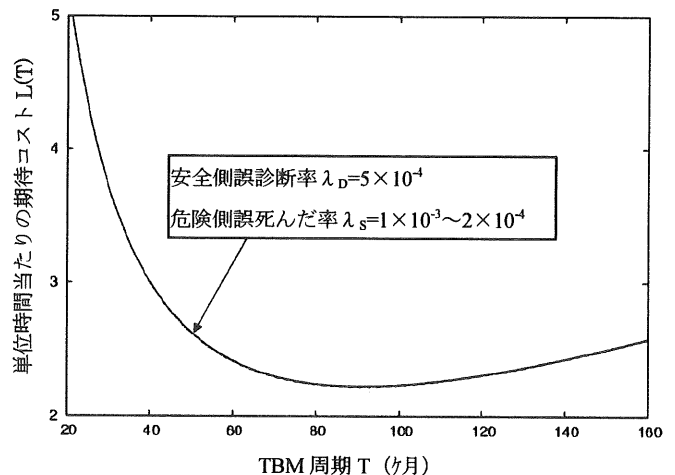


図 4 λ_S に対応する $L(T)$ と T との関係

参考文献

- [1] 小野寺勝重、“保全性設計技術”、日科技連、1995
- [2] 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、Vol. 41、No. 3、pp.259-267、2005