

リスク情報を活用した保全計画信頼性評価手法の検討Ⅱ

—その2：機器の部位の劣化状態の分析に基づく機器故障率評価の適用例—

A Study for the Reliability Evaluation Method for the Maintenance Plan Using the Risk Information II
 — Part 2: An application example of the evaluation method of failure rate
 based on degraded state analysis of component part —

関西電力株式会社	千種 直樹	Naoki CHIGUSA	Member
関西電力株式会社	成宮 祥介	Yoshiyuki NARUMIYA	Member
関西電力株式会社	出野 利文	Toshifumi IDENO	Member
東京大学大学院工学系研究科	関村 直人	Naoto SEKIMURA	Member
東京大学大学院工学系研究科	藤田 智	Satoshi FUJITA	Student Member
株式会社東芝	清水 俊一	Shunichi SHIMIZU	Member
株式会社原子力エンジニアリング	倉本 孝弘	Takahiro KURAMOTO	Member
株式会社原子力エンジニアリング	東山 太一	Taichi HIGASHIYAMA	Member

This paper discusses an improvement of the quantitative method to evaluate the reliability for the maintenance plan with respect to the risk impact both for CDF (Core Damage Frequency) and Plant Trip Frequency. The quantitative approach includes the considerations for the effect of the Condition Based Maintenance (CBM) changing in addition to the Time Based Maintenance (TBM), and the reliability for the maintenance plan is evaluated using component failure rate which is presumed from experimental maintenance information. In this paper, the improved method to evaluate the reliability for the maintenance plan using the risk information is described. An application example is also described.

Keywords: Maintenance, Time Based Maintenance (TBM), Condition Based Maintenance (CBM), Condition Monitoring (CM), Degraded State, Unavailability, Failure Rate

1. 緒言

「リスク情報を活用した保全計画信頼性評価手法の検討Ⅱ（その1）」（以下、「その1）」と言う）においては、【劣化状態から機器の機能喪失状態への進展】の設定の詳細化として、健全状態から劣化状態、機能喪失状態に進展するプロセスの検討を行い、保全計画信頼性評価手法における機器故障率の変化割合の定式化を行った。

機器故障率の変化割合の実際的な評価においては、劣化事象発生率や点検モードの検知確率等、各種パラメータへの数値設定が必要であるが、実績データから数値設定を行うことは簡単ではない。

そこで本稿では、各評価パラメータに対して基準を設け、その基準に応じた相対値を適用して、機器故障率の変化割合の評価の試行を行った。機器故障率の変化割合の評価の試行には、実プラントで運用されており、劣化事象毎に点検タスクと保全周期が取り纏められた関西電力の「保全指針」を利用した。

2. 機器故障率の変化割合の体系的評価方法の検討

（その1）では、保全計画変更前後の機器故障率の変化割合は、③式で表されることを示した。

$$\lambda a / \lambda b = \frac{\sum_i^I \sum_j^{J_i} \left\{ \begin{array}{l} \lambda'_{ij} \times (1-\alpha_{o,ij}) \times (1-\alpha_{g,ij}) \times (1-\alpha_{k,ij}) \times (1-\alpha_{s,ij}) \\ \times (1-\alpha_{f,ij}) \times (1-\gamma_{ij}) \times IMP_i \end{array} \right\}}{\sum_i^I \sum_j^{J_i} \left\{ \begin{array}{l} \lambda'_{ij} \times (1-\alpha_{o,ij}) \times (1-\alpha_{g,ij}) \times (1-\alpha_{k,ij}) \\ \times (1-\alpha_{f,ij}) \times (1-\gamma_{ij}) \times IMP_i \end{array} \right\}} \quad \dots \text{③式}$$

機器故障率の変化割合の評価の試行を行うため、以下の検討を行った。

- ・ 機器故障率の変化割合の評価式の簡略化
- ・ 評価パラメータの設定基準検討

連絡先: 倉本孝弘、〒550-0001 大阪府大阪市西区土佐堀 1-3-7
 肥後橋ソズビル12階、(株)原子力エンジニアリング 解析サービス部、
 電話: 06-6446-9361、e-mail: tkuramoto@neltcd.co.jp

2.1 機器故障率の変化割合の評価式の簡略化

保全計画変更による状態監視の拡充(振動診断の導入)の影響に注目して評価を行うため、以下に示す仮定を導入して、③式の簡略化を行った。

- CM4 以外の【運転パラメータ監視 (CM1)】【巡回点検 (CM2)】【機能確認試験 (CM3)】【分解点検 (CM5)】の検知確率が劣化事象毎で変化せず一様であるという仮定

(CM1、CM2、CM3、CM5 のそれぞれの検知確率 $\alpha_{o,ij}$ 、 $\alpha_{g,ij}$ 、 $\alpha_{k,ij}$ 、 $\alpha_{f,ij}$ は、部位 i 劣化事象 j に依存しない形 α_o 、 α_g 、 α_k 、 α_f で表される。)

また、全部位の劣化事象発生率を λ' とする場合、 R_{ij} が λ' に対する部位 i 劣化事象 j の劣化事象発生率 λ'_{ij} の占有割合とすると、④式の関係が成り立つ。

$$\lambda'_{ij} = \lambda' \times R_{ij} \quad \dots \text{④式}$$

上記の仮定および④式を③式に適用することにより、検知確率の評価パラメータ α_o 、 α_g 、 α_k 、 α_f および λ' は分母・分子で相殺され、最終的に以下に示す⑤式が導かれる。

$\lambda a / \lambda b$

$$\begin{aligned} & \lambda \cdot \sum_i^I \sum_j^{J_i} \left\{ \begin{array}{l} R_{ij} \times (1-\alpha_{o,ij}) \times (1-\alpha_{g,ij}) \times (1-\alpha_{k,ij}) \times (1-\alpha_{s,ij}) \\ \times (1-\alpha_{f,ij}) \times (1-\gamma_{ij}) \times IMP_i \end{array} \right\} \\ = & \frac{\lambda \cdot \sum_i^I \sum_j^{J_i} \left\{ \begin{array}{l} R_{ij} \times (1-\alpha_{o,ij}) \times (1-\alpha_{g,ij}) \times (1-\alpha_{k,ij}) \\ \times (1-\alpha_{f,ij}) \times (1-\gamma_{ij}) \times IMP_i \end{array} \right\}}{\lambda \cdot \sum_i^I \sum_j^{J_i} \left\{ \begin{array}{l} R_{ij} \times (1-\alpha_o) \times (1-\alpha_g) \times (1-\alpha_k) \times (1-\alpha_{s,ij}) \\ \times (1-\alpha_f) \times (1-\gamma_{ij}) \times IMP_i \end{array} \right\}} \\ = & \frac{\lambda \cdot \sum_i^I \sum_j^{J_i} \left\{ \begin{array}{l} R_{ij} \times (1-\alpha_o) \times (1-\alpha_g) \times (1-\alpha_k) \times (1-\alpha_{s,ij}) \\ \times (1-\alpha_f) \times (1-\gamma_{ij}) \times IMP_i \end{array} \right\}}{\lambda \cdot \sum_i^I \sum_j^{J_i} \left\{ \begin{array}{l} R_{ij} \times (1-\alpha_o) \times (1-\alpha_g) \times (1-\alpha_k) \\ \times (1-\alpha_f) \times (1-\gamma_{ij}) \times IMP_i \end{array} \right\}} \\ = & \frac{\left\{ \frac{\lambda' \times (1-\alpha_o) \times (1-\alpha_g)}{(1-\alpha_k) \times (1-\alpha_f)} \right\} \sum_i^I \sum_j^{J_i} \left\{ \begin{array}{l} R_{ij} \times (1-\alpha_{s,ij}) \times (1-\gamma_{ij}) \times \\ IMP_i \end{array} \right\}}{\left\{ \frac{\lambda' \times (1-\alpha_o) \times (1-\alpha_g)}{(1-\alpha_k) \times (1-\alpha_f)} \right\} \sum_i^I \sum_j^{J_i} \left\{ \begin{array}{l} R_{ij} \times (1-\gamma_{ij}) \times IMP_i \end{array} \right\}} \\ = & \frac{\sum_i^I \sum_j^{J_i} \left\{ \begin{array}{l} R_{ij} \times (1-\alpha_{s,ij}) \times (1-\gamma_{ij}) \times IMP_i \end{array} \right\}}{\sum_i^I \sum_j^{J_i} \left\{ \begin{array}{l} R_{ij} \times (1-\gamma_{ij}) \times IMP_i \end{array} \right\}} \quad \dots \text{⑤式} \end{aligned}$$

2.2 評価パラメータの設定基準の検討

⑤式の評価を行うため、 R_{ij} 、 γ_{ij} 、 IMP_i 、 $\alpha_{s,ij}$ の評価パラメータに対して数値を設定する必要はあるが、

実績データより絶対値を与えることは簡単ではない。ここで、⑤式の分母と分子は同じ形で展開されていることに注目すると、評価パラメータに対して絶対値を設定せず、相対値を与えることでも評価が可能となる。

そこで、各評価パラメータに設定する相対値を与えるべく、以下の Table 1 ~ Table 4 に示す設定基準(大・中・小といった定性的・相対的なスコアリング基準)を検討した。この設定基準は、数名の専門家が集まり議論を行い、設定を実施した。

Table 1 占有割合 R_{ij} の設定基準

R_{ij} : 全部位の劣化事象発生率 λ' に対する、部位 i 劣化事象 j の劣化事象発生率 λ'_{ij} の占有割合	
大	劣化事象発生率は比較的高い
中	発生するが、(高/低) どちらとも言えない
小	劣化事象発生率は比較的低い
スコアリング基準: 摩耗、剥離、面荒れ、エロージョン、ピッチング等、分解点検時に確認された経験があると判断される劣化事象は基本的に『中』、その他は『小』とする。	

Table 2 非遷移確率 γ_{ij} の設定基準

γ_{ij} : 機器の部位 i 劣化事象 j による劣化状態から部位の機能喪失状態への非遷移確率	
大	部位の機能喪失状態まで進展する確率は低い(偶発・突発的)
中	進展するが、(高/低) どちらとも言えない
小	部位の機能喪失状態まで進展する確率は高い
スコアリング基準: 取替、寸法計測(トレンド管理)の点検内容が適用される劣化事象は、基本的に『中』とする。その他の劣化事象は基本的に『大』とする。ただし、劣化事象が破損の場合のみ『小』とする。	

Table 3 機器故障率における部位の機能喪失が占める割合 IMP_i の設定基準

IMP_i : 機器故障率における部位 i の機能喪失が占める割合	
大	当該部位の機能喪失が機器故障率に占める割合は高い(重要な劣化・故障モード)
中	占める割合は(高/低) どちらとも言えない
小	当該部位の機能喪失が機器故障率に占める割合は低い
スコアリング基準: 部位や構造から、機器故障率に対し当該部位の機能喪失が占める割合が高いと判断した劣化事象は『大』とする。機器故障率に占める割合がないと判断した劣化事象は『小』とする。	

Table 4 検知確率 $\alpha_{s,ij}$ の設定基準

$\alpha_{s,ij}$: 【振動診断 (CM4)】に基づく機器の部位 i 劣化事象 j による劣化状態の検知確率	
大	振動診断による劣化状態の検知確率が高い
中	振動診断による劣化状態の検知確率が高い、あるいは、低い以外の状態。
小	振動診断による劣化状態の検知確率は低い
—	振動診断による劣化状態の検知確率は不可能
スコアリング基準：経験上、振動事象として出現し易いと判断される劣化事象は『大』とする。経験上、振動事象に出現し難いと判断される劣化事象は『小』、その他は『中』とする。	

3. 機器故障率の変化割合の評価の試行

3.1 ポンプを対象とした評価の試行

劣化事象毎に点検タスクと保全周期が取り纏められた関西電力の「保全指針」を利用して、2.2 の設定基準に基づき、充てん/高圧注入ポンプ (CH/SIP) の機器故障率の変化割合の評価の試行を行った。Table5 に評価パラメータの相対値の設定例を示す。

以下に、評価パラメータの相対値の設定プロセスを示す。

- ① CH/SIP の 47 部位 ($I=47$)・53 タスク ($J_i=53$) に対して、Table 1 ~ Table 4 の設定基準に基づき、 R_{ij} 、 γ_{ij} 、 IMP_i 、 $\alpha_{s,ij}$ の相対値を設定。(例：『大=0.7』『中=0.5』『小=0.3』)
- ② γ_{ij} 、 $\alpha_{s,ij}$ に関しては、各タスクに対して、設定する相対値をそのまま適用。
- ③ R_{ij} 、 IMP_i に関しては、タスク全体の相対値合計を「1」とした相対値の割合を、各タスクに適用。

『大』、『中』、『小』に与える相対値には、ベースケースの評価として適切になるよう、中間的な数値と考えられる『0.7』、『0.5』、『0.3』を適用した。その結果、機器故障率は約 43%低減する結果が得られた。(【 $\lambda a/\lambda b$ 】=0.571)

また今回の試行は、各評価パラメータに対して、技術的判断に基づく大まかな相対値を与えたものであり、今後詳細な検討の余地がある。

今回の試行においては、特に、機器故障率における部位の機能喪失が占める割合 IMP_i について、以下に示す問題点が挙げられる。

- ・劣化事象は、機器の機能喪失の主要因となり得るポンプ主軸の機能喪失を引き起こす「疲労き裂」や「摩耗」から、機器の機能喪失の要因とはなり得ない可視窓の「汚れ」まで存在し、機器の機能喪失への影響度は幅が広い。
- ・しかし、今回の試行では、各劣化事象の IMP_i に、『大』、『中』、『小』の相対値を適用した結果、それぞれ、『2.6%』、『1.9%』、『1.1%』の割合が与えられた。
- ・機器の機能喪失の主要因となるものと、そうではない劣化事象の IMP_i には、より幅の広い相対値の設定が必要であるが、今回の試行では、その差が狭くなっている。

この問題の解決のため、今後、部位毎の評価パラメータに設定するより詳細な相対値の検討、及び、蓄積する保全実績データ (不適合データ、点検記録、As Found データ等) の利用を考えていく必要がある。

3.2 評価パラメータに設定する相対値の感度解析

3.1 の結果を基に、各評価パラメータに設定する『大』、『中』、『小』の相対値を変更して、機器故障率の変化割合【 $\lambda a/\lambda b$ 】の感度解析を実施した。その結果を、Table 6 に示す。

この感度解析の結果より、相対値の与え方により、機器故障率の変化割合が大きく変動することが分かる。特に、各評価パラメータの値が大きくなるほど、【 $\lambda a/\lambda b$ 】が小さくなることがわかる。

Table 5 評価パラメータの相対値の設定例 (充てん/高圧注入ポンプ)

No	機器名称	点検モード	部位 i	部位の劣化事象 j	部位	劣化事象	点検内容	点検周期	占有割合 R_{ij}	非遷移確率 γ_{ij}	機器故障率における部位の機能喪失が占める割合 IMP_i	検知確率 $\alpha_{s,ij}$
1	A充てん/高圧注入ポンプ	TBM	1	1	カップリングキー	変形	1. VT 2. PT 3. 寸法計測 (1, 2)に関しては定事検対象)	B	小	大	大	小
2	A充てん/高圧注入ポンプ	TBM	2	1	メカスリーブキー	変形	PT/VT	B	小	大	大	小
3	A充てん/高圧注入ポンプ	TBM	3	1	主軸/カップリングはめあい部	摩耗	寸法計測	B	中	中	大	中

Table 6 CH/SIP の振動診断導入による
機器故障率の変化割合の感度解析結果

評価パラメータに 設定する相対値 (大、中、小の相対値)			機器故障率 の変化割合 【 $\lambda a/\lambda b$ 】
小	中	大	
0.1	0.1	0.1	0.95
0.3	0.3	0.3	0.85
0.5	0.5	0.5	0.75
0.7	0.7	0.7	0.65
0.9	0.9	0.9	0.55
0.1	0.5	0.7	0.45
0.1	0.5	0.9	0.31
0.3	0.5	0.7	0.57
0.3	0.5	0.9	0.45

4. 結言

- 1) (その1) で定式化した機器故障率の変化割合の評価を試行した。試行に際しては、実プラントで運用されている「保全指針」を利用して、各評価パラメータに対して基準を設け、その基準に応じた相対値を設定して試行した。
- 2) 今回の機器故障率の変化割合の評価の試行では、式の簡略化により振動診断のみの影響を扱うこととした。今後は、他の設備診断技術の影響についても考慮する必要がある。
- 3) 今回の検討での評価パラメータに設定した相対値と、(将来的に)実績データから求められる相対値には、大きな差があると考えられる。
今後、部位毎の評価パラメータに設定するより詳細な相対値の検討、及び、蓄積する保全実績データ(不適合データ、点検記録、As Found データ等)の利用を考え、評価精度の向上を図る必要がある。
- 4) 感度解析の結果より、評価パラメータに設定する相対値により、機器故障率の変化割合が大きく変動し、設定する相対値の重要性が確認できた。また、評価パラメータに設定する相対値に大きな数値を与えるほど、機器故障率の低減効果は大きくなることがわかった。

5. 今後の取り組み

今後の取り組みとして、以下の検討を実施していく必要がある。

<評価パラメータに設定する相対値>

- ・ 部位毎の評価パラメータに設定する相対値の詳細検討(静的部位と動的部位、電気系部位と機械系部位といった部位の劣化事象毎で設定する、或いは、 R_{ij} 、 γ_{ij} 、 IMP_i 、 $\alpha_{s,j}$ といったパラメータ毎に設定する。)
- ・ 蓄積する保全実績データ(不適合データ、点検記録、As Found データ等)の評価パラメータに設定する相対値への利用検討。

<機器故障率の変化割合の評価手法>

今回の評価では、【振動診断(CM4)】のみの検知確率を考慮するため簡略化を行った。実際の保全活動を鑑みた場合、今後、以下の検討が必要となる。

- ・ 全ての状態監視の点検モードに基づく部位・劣化事象の検知確率を考慮する。
- ・ 部位・劣化事象に対する状態監視の点検モード間の検知確率の関係(重複等)を整理する。