

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：機器の部位の劣化状態の分析に基づく機器故障率評価－

A Study for the Reliability Evaluation Method for the Maintenance Plan Using the Risk Information II
－ Part1 : 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研究科	関村 直人	Naoto SEKIMURA	Member
東京大学大学院工学研究科	藤田 智	Satoshi FUJITA	Student 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	大家 慶	Kei OHYA	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

原子力発電所の安全性・信頼性の更なる向上を期して新たに導入された検査制度のもと、時間基準保全から、設備診断技術などを使用した状態基準保全に保全計画をシフトすることになるが、その保全計画の有効性を評価するのに、リスク情報を活用した保全計画の定量的な信頼性評価手法について検討した。

これまで、「リスク情報を活用した保全計画信頼性評価手法の検討Ⅰ」(以下、「これまでの検討」という) [4] では、保全計画変更時に、設備診断技術など状態監視 (CM : Condition Monitoring) の拡充や機器の点検周期の見直しなどが保全計画に影響する度合い (見直し前後の保全計画の信頼性) を定量的に評価する手法を開発した。この手法は、保全計画変更前後の機器故障率の変化割合と、点検周期の変化割合の積で表される機器のアンペアラビリティ (UA) の変化割合、及びプラントレベルでのリスクに与える影響度により、保全計画変更の有効性を検討するものであった。

また、“機器故障率の変化割合”を評価するために、機器の部位に着目して、“前兆事象発生率の変化割合”(前

兆事象：機器が故障により機能喪失状態になる前に部位の劣化状態が検知された劣化事象)を用いて、設備診断技術として代表的な振動診断を導入する前後について評価を行ってきた。

これまでの検討での手法を保全計画信頼性評価に実際に適用していく上においては、Fig.1に示す様に、以下の課題を挙げており、それぞれの課題解決に向けた種々の検討・研究を現在実施しているところである。

- ・ 劣化モード、設備診断技術の検出感度などに応じた【前兆事象の検知性】の体系的整理と設定の詳細化の検討・研究
- ・ 【劣化状態から機器の機能喪失状態への進展】の設定の詳細化の検討
- ・ 【保全計画の信頼性を評価する基準 (クライテリア)】の検討

このうち、本稿では、保全計画信頼性評価手法の高度化の観点より、【劣化状態から機器の機能喪失状態への進展】の設定の詳細化の検討を行った。

部位毎において、前兆事象として検知されない潜在的な劣化事象 (以下、「非検知事象」という) によ

る劣化状態が進展して、部位の機能が喪失し、さらに、機器の機能が喪失に至るプロセスを検討し、このプロセス中で、前兆事象の検知確率、非検知事象の部位の機能喪失への遷移確率、機器故障率におけ

る部位の機能喪失が占める割合を、それぞれ変数として定義し、保全計画信頼性評価手法として機器故障率の変化割合を定式化することを検討した。

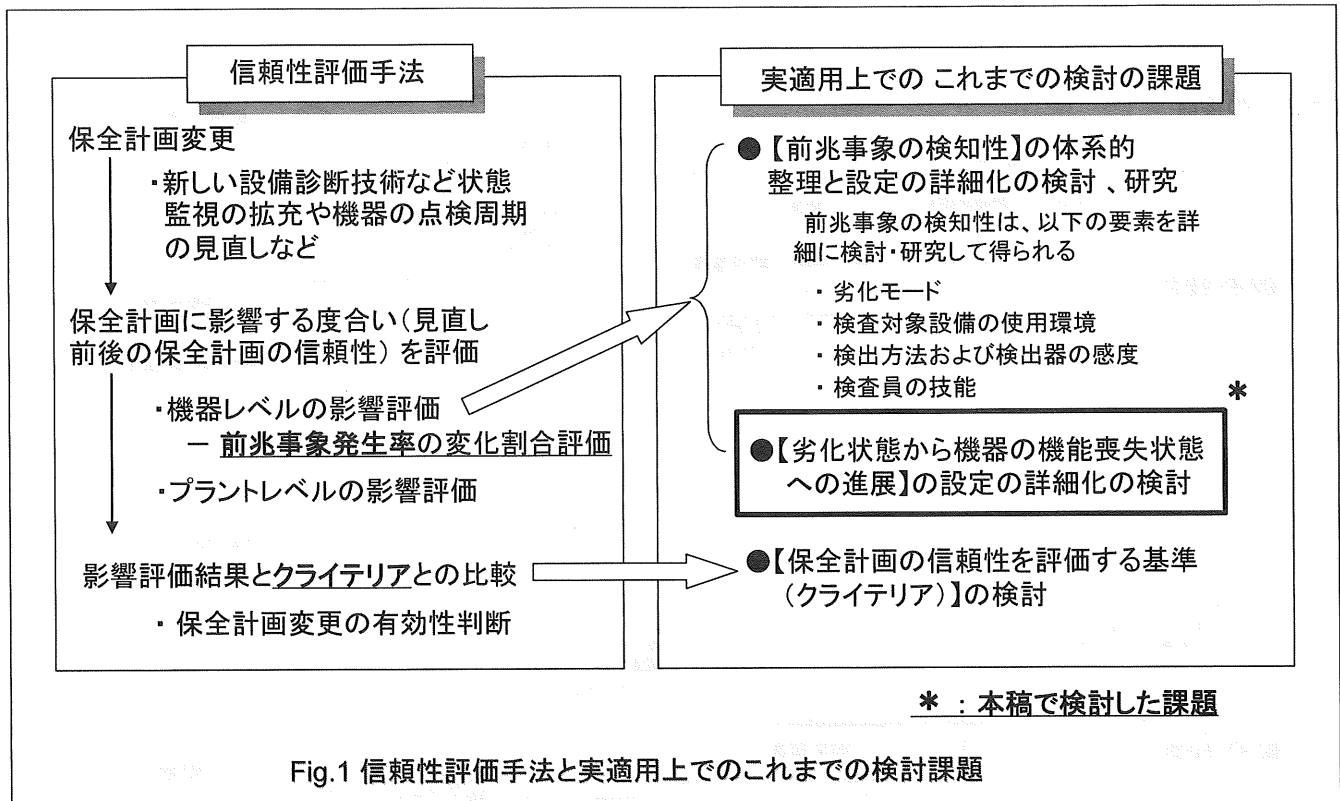


Fig.1 信頼性評価手法と実適用上でのこれまでの検討課題

2. 信頼性評価手法高度化の方向性

これまでの検討において、保全計画を変更する場合における機器の UA インデックスを、保全計画変更前後での機器故障率の変化割合【 $\lambda a / \lambda b$ 】と、機能確認試験間隔の変化割合【 $t a / t b$ 】の積で定義した。

$$\begin{aligned} \text{機器の UA インデックス (UAI)} \\ &= (\lambda a \times t a) / (\lambda b \times t b) - 1 \\ &\doteq (P a \times t a) / (P b \times t b) - 1 \end{aligned}$$

- t b : 機器の現行保全計画における機能確認試験間隔
- t a : 機器の新保全計画における機能確認試験間隔
- λb : 現行保全計画における機器の（分解点検間隔期間平均の）機器故障率
- λa : 新保全計画で状態監視が拡充された時の機器の（分解点検間隔平均の）機器故障率

- P b : 現行保全計画における機器の（分解点検間隔平均の）前兆事象発生率
- P a : P b の内で、新保全計画下で新たに拡充された設備診断技術によって、補修すべき劣化状態に至る前に検知される分を除いた後の機器の（分解点検間隔平均の）前兆事象発生率《推定値》

これまでの検討における前兆事象発生率及び機器故障率の変化割合の評価方法につき、以下に説明を行う。

まず、劣化状態となる劣化事象として前兆事象及び非検知事象を考え、この内の非検知事象による劣化状態はすべて機器の機能喪失状態（機器故障）に進展すると仮定した。

保全計画変更前後の機器故障率の変化割合【 $\lambda a / \lambda b$ 】が、前兆事象発生率の変化割合【 $P a / P b$ 】及び非検知事象発生率の変化割合のいずれとも一致するという仮定を置いている。この仮定のもと、前兆事象発生率の変化割

合 $[\lambda a/\lambda b]$ により機器故障率の変化割合 $[\lambda a/\lambda b]$ が推定評価される。

これに対して今回の検討では、Fig.1 に挙げたこれまでの検討の課題の内、保全計画信頼性評価手法の高度化として、【劣化状態から機器の機能喪失状態への進展】の設

定の詳細化に取り組み、機器故障率の変化割合 $[\lambda a/\lambda b]$ を算出する方法を検討した。Fig.2 に示すように、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について、これまでの検討と今回の検討を比較する。

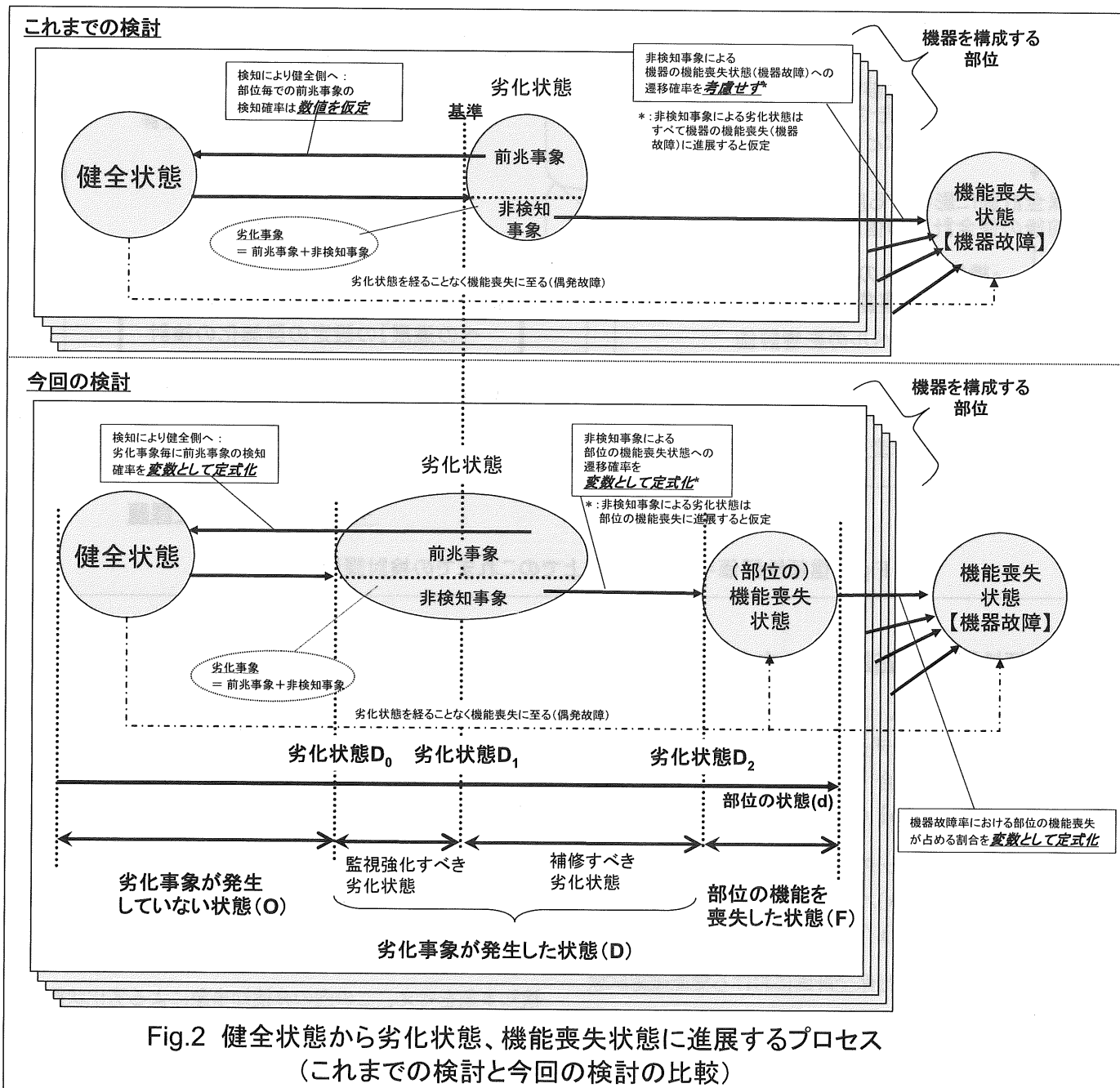


Fig.2 健全状態から劣化状態、機能喪失状態に進展するプロセス (これまでの検討と今回の検討の比較)

3. 機器故障率変化割合評価方法の検討

今回の検討では、これまでの検討における考え方をさらに発展させ、劣化状態から機器の機能喪失状態へのプロセスにおいて、以下に示す前兆事象の検知確率、非検知事象による部位の機能喪失への遷移確率、機器故障率における部位の機能喪失が占める割合を考慮して、劣化事象発生率(λ')から機器故障率(λ)を求め、さらに、状態監視の拡充前後の機器故障率の変化割合の評価方法を検討した。

①劣化状態 【劣化事象発生率 λ' 】

- ・ 前兆事象の検知確率
- ・ 非検知事象の部位の機能喪失への遷移確率

②部位の機能喪失状態 【部位機能喪失率 λ'' 】

- ・ 機器故障率における部位の機能喪失が占める割合

③機器の機能喪失状態 【機器故障率 λ 】

ここで、 λ' 、 λ'' 、 λ を以下に定義する。

劣化事象発生率 (λ')

: (分解点検間隔平均の) 健全状態から進展して劣化状態にある割合 (劣化事象の発生率)

部位機能喪失率 (λ'')

: (分解点検間隔平均の) 非検知事象による劣化状態が進展して部位の機能喪失状態にある割合

機器故障率 (λ)

: (分解点検間隔平均の) 機器の有する機能が喪失状態にある割合

3.1 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

機器故障率は部位機能喪失率に依存し、部位機能喪失率は劣化事象発生率に依存する。まずは、劣化状態と部位の機能喪失状態の関係を整理する。

Fig.2 に示す $d < D_0$ 、 $D_0 \leq d < D_1$ 、 $D_1 \leq d < D_2$ 、 $D_2 \leq d$ の状態を以下に説明する。

<健全な状態 (O) : ($d < D_0$) >

- ・ 劣化事象が発生していない状態

<劣化事象が発生した状態 (D) : ($D_0 \leq d < D_2$) >

a). 監視強化すべき劣化状態 ($D_0 \leq d < D_1$)

- ・ 補修すべき状態でないものの、監視強化を図るべき状態

b). 補修すべき劣化状態 ($D_1 \leq d < D_2$)

- ・ 部位の機能喪失 (D_2 に到達する) 前に、補修すべき状態

<部位の機能を喪失した状態 (F) : ($D_2 \leq d$) >

- ・ 非検知事象による劣化状態から進展し、部位の機能を喪失した状態

3.2 劣化状態から機能喪失状態への進展

3.1 で定義した劣化状態に基づき、分解点検間隔中に、部位の状態が D_0 から D_2 へ進展するプロセスを検討し、Fig.3 にまとめた。

1. $D_0 \leq d < D_1$ の劣化状態の検知 :

$D_0 \leq d < D_1$ の劣化状態の検知確率 (分解点検間隔平均の検知率と分解点検間隔の積) を α とする。

2. $D_1 \leq d < D_2$ の劣化状態の検知 :

$D_1 \leq d < D_2$ の劣化状態の検知確率 (分解点検間隔平均の検知率と分解点検間隔の積) を β 、 β' とする。

β : 1.の検知に成功した上で、2.の検知にも成功する確率

β' : 1.の検知に失敗した上で、2.の検知には成功する確率

3. $D_2 \leq d$ の部位の機能喪失状態に進展しない :

劣化状態の部位の機能喪失状態への非遷移確率 (分解点検間隔平均の非遷移率と分解点検間隔の積) を γ 、 γ' とする。

γ : 2.の検知に成功した上で、部位の機能喪失状態に進展しない確率 (補修されるか、あるいは、補修されないが劣化状態の進展が遅く部位の機能喪失に至らない)

γ' : 2.の検知に失敗した上で、部位の機能喪失状態に進展しない確率

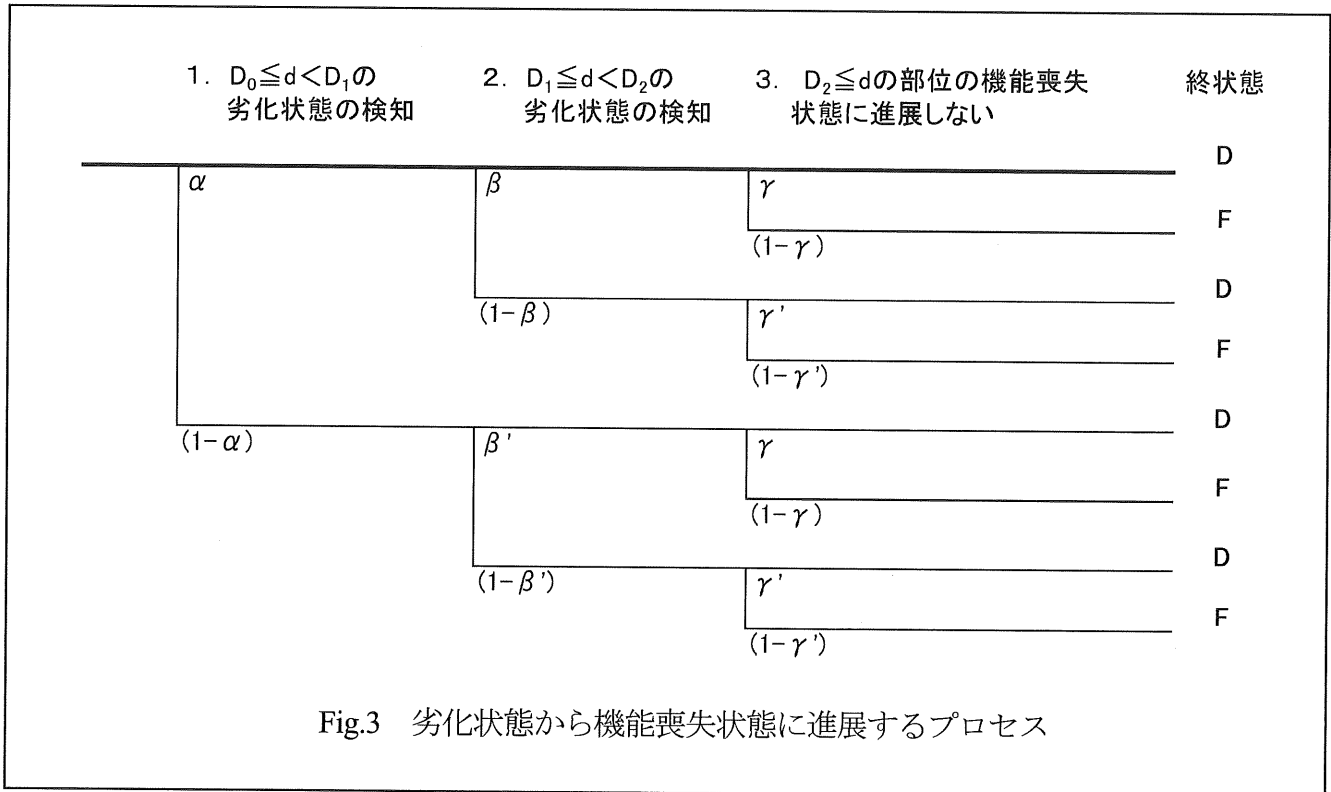


Fig.3 の終状態は、1～3 の各プロセスの組み合わせで決まる。しかし、複数の条件で個々の確率の設定について詳細に検討の余地はあるが、現段階における実際的な検討の観点から、実態を比較的良好に表現するであろう以下の仮定を導入して、終状態に進展するプロセスの簡略化を行った。それを Fig.4 に示す。

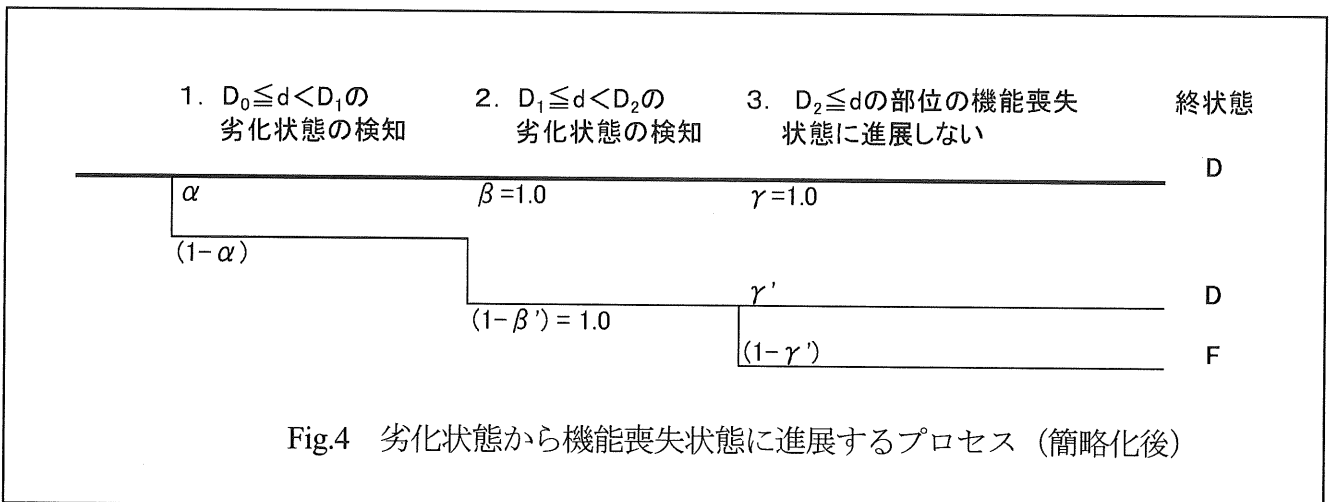
$\beta=1.0$: 1.の検知 ($D_0 \leq d < D_1$ の劣化状態の検知) に成功していれば、2.の検知 ($D_1 \leq d < D_2$ の劣化状態の検知) にも成功すると仮定

$(1-\beta')=1.0$: 1.の検知 ($D_0 \leq d < D_1$ の劣化状態の検知) に失敗している場合には、2.の検知 ($D_1 \leq d < D_2$ の劣化状態の検知) にも失敗すると仮定

$\gamma=1.0$: 2.の検知 ($D_1 \leq d < D_2$ の劣化状態の検知) に成功すれば、部位の機能が喪失する前に補修されると仮定

よって、Fig.4 から部位機能喪失率 λ'' は①式で定式化される。

$$\lambda'' = \lambda' (1-\alpha) \cdot (1-\gamma') \quad \dots \text{①式}$$



3.3 機器故障率の体系的評価

3.2で検討した部位機能喪失率をもとに、機器故障率を評価する手法を検討した。

機器故障率における部位の機能に喪失が占める割合を考慮すると、機器故障率は②式で定式化される。

$$\lambda = \sum_i^I \sum_j^{J_i} \left\{ \begin{array}{l} \lambda'_{ij} \times (1-\alpha_{oij}) \times (1-\alpha_{gij}) \times (1-\alpha_{kij}) \times (1-\alpha_{sij}) \\ \times (1-\alpha_{tj}) \times (1-\gamma_{ij}) \times \text{IMP}_i \end{array} \right\} \quad \dots \text{②式}$$

λ : (分解点検間隔平均の) 機器の有する機能が喪失状態にある割合 (機器故障率)

i : 部位

I : 機器を構成する部位の数

j : (部位に想定される) 劣化事象

J_i : 部位 i の劣化事象の数

λ'_{ij} : (分解点検間隔平均の) 機器の部位 i の劣化事象 j の発生率 (健全状態から進展して、劣化状態にある割合)

α_{oij} : 【運転パラメータ監視 (CM1)】に基づく機器の部位 i の劣化事象 j による劣化状態の検知確率

α_{gij} : 【巡回点検 (CM2)】に基づく機器の部位 i の劣化事象 j による劣化状態の検知確率

α_{kij} : 【機能確認 (CM3)】に基づく機器の部位 i の劣化事象 j による劣化状態の検知確率

α_{sij} : 【振動診断 (CM4)】に基づく機器の部位 i の劣化事象 j による劣化状態の検知確率

α_{tij} : 【分解点検 (CM5)】に基づく機器の部位 i の劣化事象 j による劣化状態の検知確率

γ_{ij} : 機器の部位 i の劣化事象 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

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

3.4 機器故障率の変化割合の体系的評価

振動診断が適用された時の機器の機器故障率を λa 、振動診断が適用される前の機器の機器故障率を λb とすると、UA インデックスの評価に用いる保全方式変更前後の機器故障率の変化割合【 $\lambda a / \lambda b$ 】は③式で定式化される。

$$\lambda a / \lambda b = \frac{\sum_i^I \sum_j^{J_i} \left\{ \begin{array}{l} \lambda'_{ij} \times (1-\alpha_{oij}) \times (1-\alpha_{gij}) \times (1-\alpha_{kij}) \times (1-\alpha_{sij}) \\ \times (1-\alpha_{tj}) \times (1-\gamma_{ij}) \times \text{IMP}_i \end{array} \right\}}{\sum_i^I \sum_j^{J_i} \left\{ \begin{array}{l} \lambda'_{ij} \times (1-\alpha_{oij}) \times (1-\alpha_{gij}) \times (1-\alpha_{kij}) \\ \times (1-\alpha_{tj}) \times (1-\gamma_{ij}) \times \text{IMP}_i \end{array} \right\}} \quad \dots \text{③式}$$

4. 結言

前回までの検討において課題として挙げていた【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。

以下に、今後の取り組みの方向性や検討課題を挙げる。

- 1) 今回の検討した機器故障率の変化割合をもとに、UA インデックスの評価、及び、プラントレベルの影響度評価を実施し、適用性を検討する必要がある。
- 2) 前回までの検討において挙げており、今回検討できていない課題である【前兆事象の検知性】の設定の詳細化の検討・研究、および、【保全計画の信頼性を評価する基準(クライテリア)】の検討を進めていく。

参考文献

- [1] 千種他、日本保全学会第4回学術講演会 S4-05 「リスク情報を活用した保全計画信頼性評価手法の検討—その1:手法の開発—」
- [2] 千種他、日本保全学会第4回学術講演会 S4-06 「リスク情報を活用した保全計画信頼性評価手法の検討—その2:ポンプを例とした手段有効性確認—」