



リスク情報を活用した保全計画信頼性評価手法の検討

A Study on the Reliability Evaluation Method for Maintenance Planning Using Risk Information

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
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
株式会社原子力エンジニアリング [®]	倉本 孝弘	Takahiro KURAMOTO	Member

Abstract: This paper discusses a development of the quantitative method to evaluate the reliability for the maintenance plan with respect to the risk impact both for 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 the actual plant-specific maintenance information collected in the plant. In this paper, the developed method to evaluate the reliability for the maintenance plan using the risk information is described. And, the tested evaluation to confirm the effectiveness of this quantitative method is also described. And Furthermore, the necessary condition for the plant-specific maintenance information to use this quantitative method is described.

Keywords: Maintenance Information, Maintenance Database, Time Based Maintenance (TBM), Condition Based Maintenance (CBM), PSA, Unavailability, Failure Rate, Precursor, Core Damage, Plant Trip

1. 緒言

時間基準保全 (TBM : Time Based Maintenance) が大部分を占める現行保全計画に代えて、TBM と状態基準保全 (CBM : Condition Based Maintenance) を組み合わせ、CBM の活用 の効果を考慮に入れて TBM の間隔を合理化する様な、新保全計画の適用性を検討するに際しては、対象となる機器において、リスク情報^{注)}を活用した定量的な信頼性評価手法を適用することが考えられる。ここで、TBM には、機器の分解点検及び機能確認試験を考 える。

保全計画検討において、CBM の効果による機器故障率の変化を考慮することなく、TBM 間隔変更の影響のみを考慮した機器の信頼性評価及びプラントレベルのリスク評価 (炉心損傷評価等) を行うとするのであれば、TBM 間隔延長を伴う保全計画変更に対しては、機器のアンアベイラビリティ、プラントレベルのリスクとも、基本的には増加側の考慮しか行えない。これに対して、TBM 間隔延長のリスク影響に加えて、CBM の導入 (強化) によるリスク減少につながる影響も考慮に入れた検討をする事は重要である。

保全計画の対象となる機器は、“異常の影響緩和の機

能”を有する Mitigation System (MS) のみならず、“異常の発生防止の機能”を有する Prevention System (PS) も含まれるため、今回の定量的な信頼性評価においては、用いるリスク情報として、炉心損傷に係る設備をモデル化した Probabilistic Safety Assessment (PSA) から得られる炉心損傷頻度に加えて、プラントトリップ頻度も取り入れる必要がある。^[1]

また従来の PSA 手法は、プラントの相対的な安全性確認とリスクプロファイルの把握の目的には、十分な情報を提供できるものではあるが、保全計画検討への従来の PSA 手法のそのままの適用には前記の様な問題点があり、今回の評価においては、故障率データのより詳細な分析や、対象機器範囲の拡大などといった更に拡張した手法を考慮していく必要がある。

本検討においては、TBM と CBM を組み合わせた保全計画の検討において、対象機器の当該プラントの保全情報により、CBM の有効性も考慮に入れてリスクへの影響評価を行う保全計画の定量的な信頼性評価手法を開発した。

本稿では、開発したリスク情報を活用した保全計画の信頼性評価手法を説明し、且つ、この信頼性評価手法の有効性確認のために実施したサンプルデータを使

用した試評価結果を示す。また併せて、この信頼性評価手法において使用する保全情報データベースに対する要件についても説明する。

③「リスク情報」とは、PSAの結果及びその過程から得られる情報を言う。またリスクとは、「望ましくない事態（例えば、炉心損傷など）に至ることを想定した場合にその事態に至る可能性又は頻度」を言い、本論文では、炉心損傷もしくはプラントトリップに至る可能性又は頻度を考慮する。

2. 信頼性評価手法の概要

(1) 基本的考え方

まず、TBM（分解点検・機能確認試験）及びCBMの導入（強化）を考慮に入れた保全計画の検討における機器のアンアベイラビリティの関係に関して、現行保全計画と新たに設定する保全計画（新保全計画）で比較する場合において、基本的な考え方を Fig 1 に示す。ここでのCBMの導入（強化）とは、機器の劣化状態の速やかな把握の観点で、CBMを新規に導入する、或いは、現行保全計画では燃料取替定検中にしか実施していなかったCBMを、プラント運転中に毎月1回ずつ定期的に行う機能確認試験のタイミングで実施し頻度を増加させる、といった様な措置の事である。これにより、機器の前兆事象に関して、現行では基本的には分解点検時のみで把握していたところを、頻度を増加させるCBM実施タイミング毎で把握する事とな

り、この把握に基づき前兆事象が発現した場合の適切な処置が講じられるのであれば、その結果期間全体の故障率は低減できることが期待できる。

機器の平均アンアベイラビリティは、平均機器故障率（一般には、分解点検間隔 T 及び CBM の影響を受ける）を λ 、機器の機能確認試験の時間間隔を t とすると、近似的に $1/2 \lambda t$ と評価できる。この近似は、時間 T にわたる λ の変化が相対的に小さい場合に成立するため、この近似の成立性のためにはこの前提条件が満たされている事を確認する必要があり、今回の評価ではこの確認に対してワイブル解析の利用を行った。一方で、CBMの導入（強化）が λ に与える影響の評価は次に述べる手順を導入する事で実現した。

まず、状態監視技術によるトラブル検知の有効性が機器部位と故障様態毎に著しく異なる実態を忠実にモデル化し、以てCBMが λ に与える影響を適切に評価するため、ひとつの機器の故障率 λ を機器の構成部位（ここでは7つの部位を考える）と故障様態毎の故障率 λ_i の合計であるとしてとらえた。その上で、CBMが有効と考えられる部位・故障様態に対しては状態監視技術によるトラブル検知率を考慮して、当該 λ_i の減少率を見積もる事によって、 λ_i の総和たる λ がCBM導入（強化）によって減少する程度を間接的に評価できるようにした。

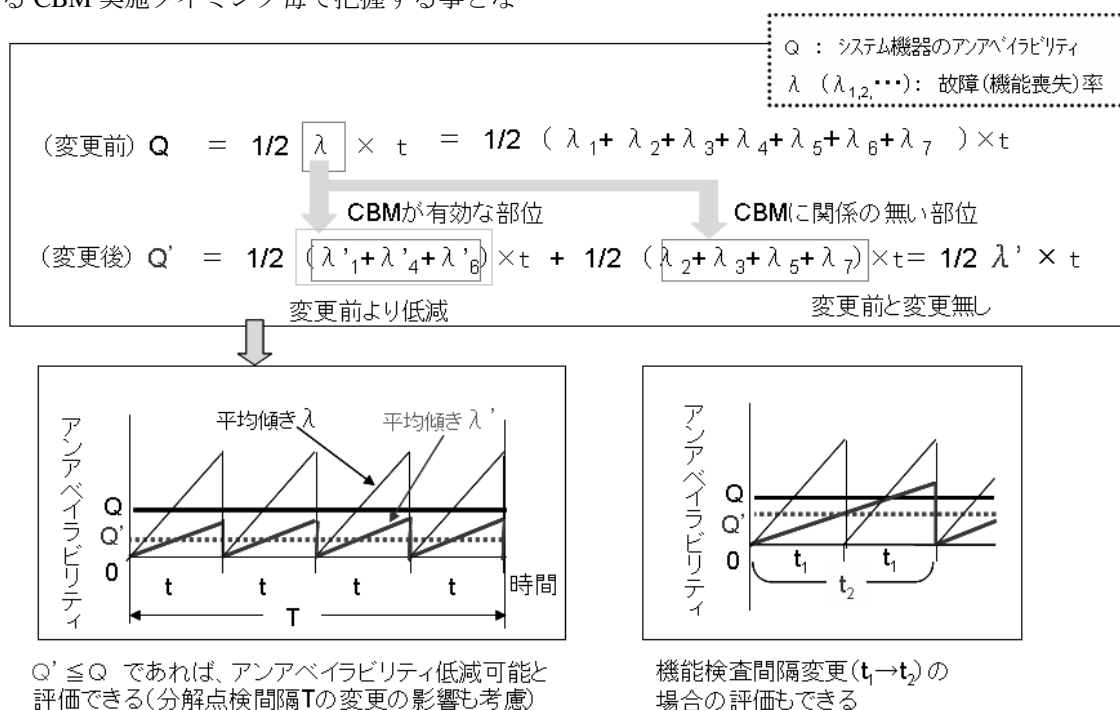


Fig 1 TBM・CBMを考慮に入れた機器のアンアベイラビリティの考え方(例)

また、機能確認試験間隔を t_1 (現行保全計画) から t_2 (新保全計画) へと変更する場合においては、機器の期間平均のアンアベイラビリティは、 $Q=1/2 \lambda t_1$ (現行保全計画) から $Q'=1/2 \lambda t_2$ (新保全計画) に移行するものと評価され、これにより、機能確認試験間隔も考慮に入れたアンアベイラビリティの変動を評価する事ができる。

本評価手法においては、Fig 2 に示す通り、機器状態を健全状態 (=O)、前兆事象発現 (=S)、機能喪失 (=F) の推移モデルでとらえて、機能喪失率は前兆事象発生率に直線的に比例するという前提の基で、相当数の件数が把握できる前兆事象情報を使用した定量的な評価方法を考える事とした。ここで、前兆事象状態はその発現が確認できれば健全状態に復帰させ得るが、CBM 導入 (強化) により、その復帰可能性は高める事が可能であり、その影響度を考慮に入れる事となる。

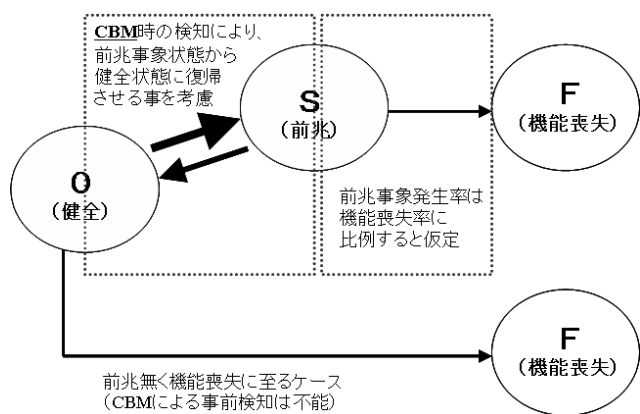


Fig 2 健全状態→前兆事象発現→機能喪失の推移モデル

以上の考え方を体系的にまとめ、CBMの有効性も考慮に入れたリスクへの影響評価を行う保全計画の定量的な信頼性評価手法を開発した。具体的には、「分解点検間隔の延長+CBMの導入(強化)」や「プラントの停止間隔延長による機能確認試験間隔の延長+CBMの導入(強化)」といったTBMとCBMを組み合わせた新保全計画の検討において、リファレンスとなる現行保全計画から新保全計画への変更がリスクに与える影響を、機器レベル及びプラントレベルの2ステップで、定量的判断が容易となるインデックス化した形式でリスク情報として提示する事となる。

(2) 適用フロー

本信頼性評価手法の適用フローを、Fig 3 に示す。

信頼性評価手法の保全計画変更時の適用フローは、Step 1、Step2に分かれた、機器レベルのインデックス(UAインデックス:UAI)及びプラントレベルのインデックス(炉心損傷頻度インデックス:CDFI、プラントトリップ頻度インデックス:TRFI)、それぞれにより評価される。

現行保全計画から新保全計画への変更においては、機器の分解点検間隔や機能確認試験間隔の延長等の組み合わせが検討される事となるが、本信頼性評価手法は、その任意の組み合わせによる新保全計画の適用性を、現行保全計画をリファレンスとしたリスクへの影響度の正負や高低で判断する手法である。

①機器レベルでの適用性判断

“ $UAI \leq 0$ ”が確認できる場合には、保全計画変更の適用は有効と評価される。ただし、機器レベルの評価のみで、保全計画変更適用が有効と確認された場合でも、機器間の適用性の程度の絶対的な比較を実施する場合には、プラントレベルの評価を実施する事は有効である。

機器レベルの評価において、“ $UAI > 0$ ”の場合には、保全計画変更により信頼性低下の可能性があり、更にプラントレベルでのリスクに与える影響度評価を実施する必要がある。

②プラントレベルでの適用性判断

CDFIもしくはTRFIで算出されるインデックスが、クライテリア以下の場合には、保全計画変更は有効と判断でき、クライテリアを越える場合には、保全計画変更は無効と判断される事となる。

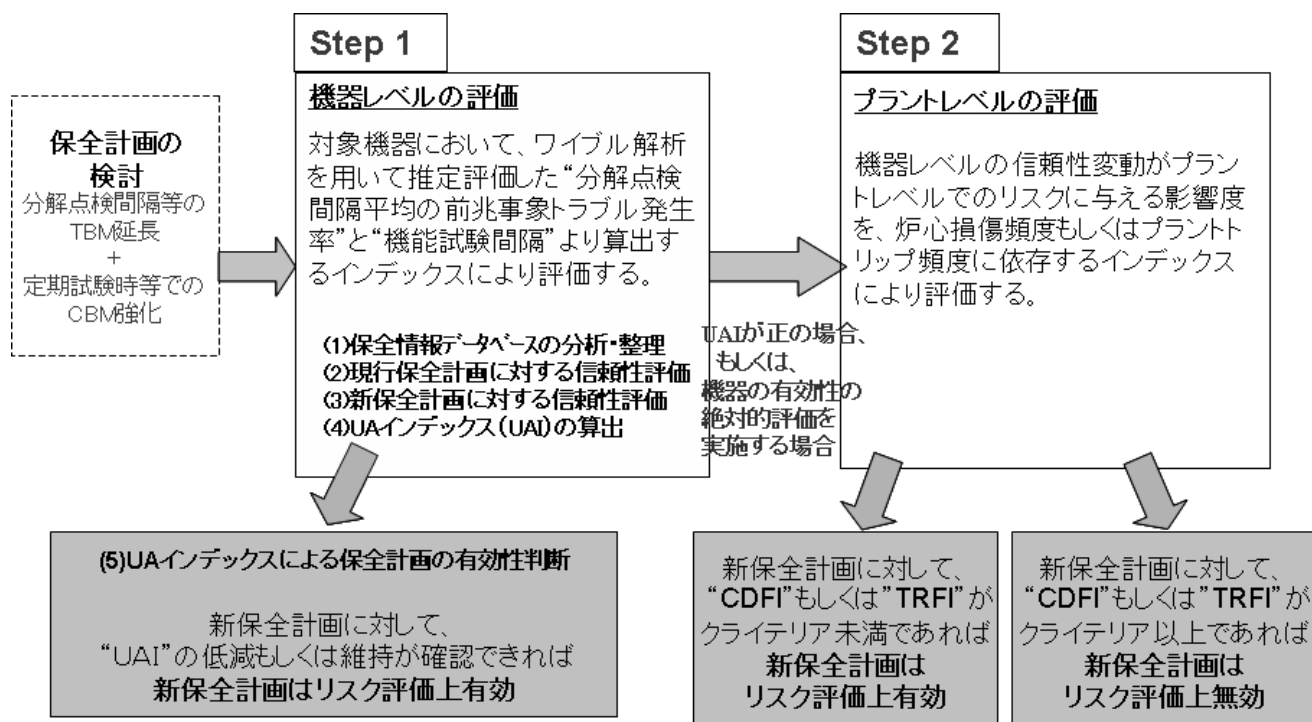


Fig 3 保全計画の定量的な信頼性評価手法の適用フロー

3. 信頼性評価手法の詳細

3.1 機器レベルの評価

保全計画の信頼性評価は、まず機器レベルでのリスク情報として、機器単位でのアンアベイラビリティに関するインデックスを算出する事により実施する。

ここでのインデックスは、現行保全計画での値を基準 (=1.0) とした場合の新保全計画での前兆事象発生率の相対比率が、当該機器の故障率（機能喪失確率）の相対比率に一致するとの仮定を置く事で、現行保全計画と新保全計画それぞれの場合での前兆事象発生率推定値と機能確認試験間隔の積に基づき算出する。

ここでの前兆事象発生率推定値の評価は、保全情報データベースを用いたワイブル解析により実施する。本解析では、標準的なワイブル解析手順に沿って、機器の前兆事象発生時刻 t の確率密度分布を、形状パラメータ m 及び尺度パラメータ η を用いて

$$(m/\eta^m)t^{m-1}\exp(-(t/\eta)^m) \quad (3-1)$$

と表せると仮定し、 m 及び η に対して統計的推定を行うこととした。

ワイブル解析の利用は、前兆事象発生時の時間依存性を簡易に扱う事ができる関数により、後述する機器レベルでのインデックス算出の数値データを提供する点

に加え、評価の結果得られる形状パラメータから前兆事象発生時の時間傾向を把握する等による、保全情報を用いてCBM適用有効性を判断する点でも重要である。以降で、その評価手順を説明する。

(1) 保全情報データベースの分析・整理

原子力発電所（関西電力）においては、保全活動記録として、機器のトラブル情報や点検・手入れ情報を含む保全情報データベースが存在する。本データベースには、トラブル内容の軽重は多様にわたるが、機能喪失事象もしくは保全により予防可能な機器故障（MPFF）事象の前段階である軽微な異常を含む前兆事象についても、トラブルレコード毎に以下に示す情報列に従うデータを含めて、定量的評価ができる程度の件数が記録されている。

- ・対象機器名称
 （トラブル部位の情報列の設定はない）
- ・レコード登録年月日
 （トラブル発生年月日の情報列も設定されているが全てのレコードで入力されていない）
- ・トラブル内容の記述及び処置の記述

今回の評価においては、この前兆事象レコードを、

保全の実態をより表現する定量評価向けの情報として活用する。

Fig 4 に、保全情報データベースの分析・整理方法を示す。

①前兆事象レコードのスクリーニング

保全情報データベースにおける、過去のトラブルレコードを分析して、機器故障に至る可能性のある前兆事象の発生件数及びその発生日時等のデータを整理する。ここで、機器故障に至る可能性のある前兆事象のスクリーニングについては、トラブル内容の記述等での定性的判断により行い、単なる点検や部品交換は含めず、何らかの故障、機能低下が認められるレコードを対象内に含め、また、予防保全や他トラブルの水平展開に関するレコードも対象内に含める事を基本とした整理を行う。

②前兆事象発生機器部位の仕分け

後のステップで必要となる、CBM 実施が前兆事象低減に有効か否か、即ち CBM を導入（強化）する事で該当の前兆事象を検知できるかの観点に立ち、トラブルを発生部位により仕分ける。例えば、電動ポンプを対象機器に考えた場合、機器の構成要素から、“メカシール”、“キー”、“インペラ”、“軸受”、“ウェアリング”、“モーター”、“ケーシング”といった7種類のポンプ部位に分類できる。

CBM による前兆事象低減についての正確な定量的判断は困難な問題であるが、上記の7種類のポンプ部位の中で、Table 1 に示す部位においては、実効的なCBM 技術が確立しており、異常が検知可能であると考え得るポンプ部位における前兆事象に対してのみ、CBM 実施がその低減に有効であるものとする事ができる。

③ワイブル解析用の曝露時間・打ち切り時間の設定

前兆事象の発生日時と運転・保守履歴より、当該機器における直近の分解点検日時もしくは機器取替日時を起点とする曝露時間を設定し、また、分解点検・機器取替に挟まれる期間に前兆事象が無い場合には、打ち切り時間を設定する。

ここで、曝露時間及び打ち切り時間の設定において、分解点検・機器取替を起点とする事は、以下の考えによるものである。

—分解点検・機器取替によって、機器は必ず一定の状態に戻されると見なせる。

—機能確認試験で正常な動作が確認された場合は、アンアベイラビリティは0に戻されるが、機器内部の状態に手を加えるわけではないので、曝露時間・打ち切り時間のリセットは行わない。

また、曝露時間及び打ち切り時間は、常時運転機器に対しては運転時間を、待機機器に対しては運転時間に待機時間を加えた時間を設定する。

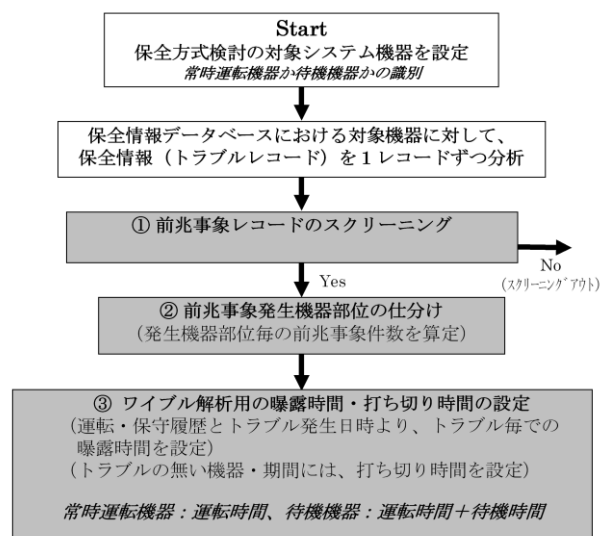


Fig 4 保全情報データベースの分析・整理方法

Table 1 CBM 技術と異常検知可能なポンプ部位の例

CBM 技術	ポンプ部位
振動分析	メカシール
	モーター
油分析	軸受

(2) 現行保全計画に対する信頼性評価

(1)の保全情報の分析・整理結果のデータに基づき、ワイブル解析を用いて、現行保全計画に対して、運転・待機時間の関数としての前兆事象発生率 $P_b(t)$ の推定評価を実施する。更に、ワイブル解析による前兆事象発生率 $P_b(t)$ を現行保全計画における分解点検間隔 T_b 期間で時間積分して前兆事象発生件数推定値を算出し、それを分解点検間隔 T_b で除す事により、期間平均の前兆事象発生率 P_b を算出する。

- ・ 現行保全計画での期間平均の前兆事象発生率
(ワイブル解析適用)

$$P_b = \left(\frac{1}{T_b} \right) \int_0^{T_b} P_b(t) dt \quad (3-2)$$

ここで、保全情報は存在するものの、得られる曝露時間が1年以上といった長時間間隔の機能確認試験から推定されたものとなる場合では、適切なワイブル解析が実施できない場合もあり、その場合で、トラブル発生に明確な時間依存性が見られないと判断できる際には、当該機器の前兆事象発生率は完全にランダム発生であると仮定した評価を行う事が可能である。この場合の評価方法としては、以下の通り、暴露時間と打ち切り時間(ET)の総和と前兆事象トラブル総件数(N_b)より、算出する。

- ・ 現行保全計画での期間平均の前兆事象発生率
(完全ランダム前兆事象発生仮定適用)

$$P_b = \frac{N_b}{\sum ET} \quad (3-3)$$

得られる暴露時間が短時間で適切なワイブル解析が実施できる場合においても、現行保全計画でのワイブル解析の結果、ワイブル形状パラメータ(m)がほぼ1となるランダム故障様相を示す場合においては、「完全ランダム前兆事象発生仮定」での評価方法を適用する事は可能であるものと考えられる。

(3) 新保全計画に対する信頼性評価

(2)の信頼性評価を受けて、前兆事象発生機器部位に応じてCBM導入(強化)による前兆事象低減効果(検知可能性)を設定し、新保全計画に対して、運転・待機時間の関数としての前兆事象発生率 $P_a(t)$ の推定評価を実施する。更に、ワイブル解析による前兆事象発生率 $P_a(t)$ を新保全計画における分解点検間隔 T_a 期間で時間積分して前兆事象発生件数推定値を算出し、それを分解点検間隔 T_a で除す事により、期間平均の前兆事象発生率 P_a を算出する。

- ・ 新保全計画での期間平均の前兆事象発生率
(ワイブル解析適用)

$$P_a = \left(\frac{1}{T_a} \right) \int_0^{T_a} P_a(t) dt \quad (3-4)$$

ここで、CBM実施による検知率(=DS)を考慮に入れた新保全計画後の厳密なワイブル解析の実施は複雑な解析問題であるが、様々な検討の結果、今回の手法

では、以下に示す件数増倍法でのワイブル解析方法を採用した。

- 1-DS = m/n とできる自然数 m, n を設定する
(例: DS=0.5 の場合、 $m=1, n=2$)。
- CBM実施による検知の対象とならないトラブルに対しては故障件数・標本数とも、仮想的に n 倍にする。
- CBM実施による検知の対象となるトラブルに対しては仮想的に故障件数を m 倍・標本数は n 倍にする(故障件数の増分を越える標本数増分に対しては故障ではなく成功打ち切りを与える)。
- 以上の故障件数・標本数に基づき、ワイブル解析を実施する。

また、(2)で「完全ランダム前兆事象発生仮定適用」での評価を実施した場合は、CBM実施による検知率(=DS)を考慮に入れた前兆事象トラブルの低減度合いを検討し、総件数(N_a)を推定し、以下の通り、暴露時間と打ち切り時間(ET)の総和と前兆事象トラブル総件数(N_a)より、算出する。

- ・ 新保全計画での期間平均の前兆事象発生率
(完全ランダム前兆事象発生仮定適用)

$$P_a = \frac{N_a}{\sum ET} \quad (3-5)$$

(4) UA インデックスの算出

(2)及び(3)の評価に基づき、現行保全計画、新保全計画、それぞれでの期間平均の前兆事象発生率が評価された。ここで、当該機器における保全計画変更前後での機能喪失確率の相対比率が、ここでの前兆事象発生率の相対比率に一致するとの仮定を取ると、前兆事象発生率推定値 P_b と P_a それぞれに、当該機器の機能確認試験間隔 t_b (現行保全計画)と t_a (新保全計画)を乗じて、保全計画変更前後での比をとる事により、当該機器の機能喪失確率、すなわちアンアベイラビリティの変化を表現する定式化が行える。

保全計画変更に伴う機器のアンアベイラビリティ変化の指標(UAインデックス)は、保全計画変更前後の変化率を基に、数値の正負を明確にすることを考えて、以下の通り評価する。

- ・ UAインデックス

$$UAI = (P_a \times t_a) / (P_b \times t_b) - 1 \quad (3-6)$$

この UA インデックス UAI は、TBM 計画変更における 2 つの要素である分解点検間隔 (T_b , T_a) 及び機能試験間隔 (t_a , t_b) の影響を併せて表現でき、CBM の効果も考慮可能なインデックスである。

(5) UA インデックスによる保全計画の適用性の判断

機器レベルでの信頼性評価の結果、(4) に示す UA インデックス UAI を用いて、保全計画変更の適用性は、以下の様に評価できる。

$$UAI \leq 0 :$$

保全計画変更により信頼性向上もしくは維持が期待できる

$$UAI > 0 :$$

保全計画変更により信頼性低下の可能性がある

3.2 プラントレベルの評価

3.1 の UA インデックスを基に、プラントレベルでのリスクに与える影響度を、炉心損傷頻度もしくはプラントトリップ頻度に依存するインデックスにより、以下の通り評価する。本インデックスの設定においては、米国 NRC (Nuclear Regulatory Commission) の Mitigation System Performance Indicator (MSPI) の考え方を参考にした。^[2]

・炉心損傷頻度インデックス :

$$CDFI = CDF_c \times FV_c \times UAI \quad (3-7)$$

・トリップ頻度インデックス :

$$TRFI = TRF_t \times FV_t \times UAI \quad (3-8)$$

ここで、

CDF_c : 炉心損傷 PSA モデルでの全 CDF 値

FV_c : 炉心損傷 PSA モデルでの全 CDF に対する当該システム機器の FV(Fussell-Vesely) 値

TRF_t : 出力損失 PSA モデルでの全トリップ頻度値

FV_t : 出力損失 PSA モデルでの全トリップ頻度に対する当該システム機器の FV 値

ここで、保全計画変更の対象となる機器は、“異常の影響緩和の機能”を有する MS に限らず、“異常の発生防止の機能”を有する PS も含める事になるため、プラントレベルのリスク尺度としては、炉心損傷頻度に加えプラントトリップ頻度も考慮に入れる。

4. 試評価の実施

PWR プラントにおける代表 MS 機器を対象として、3 で示した信頼性評価手法の一連の評価手順により、具体的データを使用した試評価を実施した。

ここでの試評価としては、新たに設定する保全計画(新保全計画)の検討として、現行保全計画より、TBM の要素である分解点検間隔、機能確認試験間隔をそれぞれを独立で延長させる以下の 2 ケースにより実施した。

- ・分解点検間隔を延長するケース
- ・機能確認試験間隔を延長するケース

この結果、今回の評価手順により、保全計画検討の際のリスク影響につき、有効な定量評価を行う事が可能であるとの見通しを得る事ができた。

(1) 対象機器の選定

機器タイプの違いを考慮に入れて、その時間データの扱い、機器運転タイプの異なる、下記の 4 つの安全系機器を対象に選定した。

<分解点検間隔を延長するケース>

- ・ 充てん高圧注入ポンプ
(常時運転：機能確認試験間隔 1 ヶ月)
- ・ 電動補助給水ポンプ
(待機：機能確認試験間隔 1 ヶ月)

<機能確認試験間隔を延長するケース>

- ・ 加圧器逃がし弁 (空気作動弁)
(待機：機能確認試験間隔 1 年)
- ・ 加圧器逃がし弁入口止弁 (電動弁)
(待機：機能確認試験間隔 1 年)

(2) 対象機器の保全情報の分析・整理

対象機器での保全情報データベースを分析・整理する事により、機能喪失に至る可能性のある前兆事象件数のカウント、前兆事象発生部位の仕分け、曝露時間・打ち切り時間の設定、といった情報の整理を実施した。

以降の定量評価を行うための情報の整理として、抽出された前兆事象毎で運転時間及び待機時間から得られる曝露時間を、また、分解点検に挟まれる期間においてトラブルの無い場合には運転時間及び待機時間から得られる打ち切り時間を、時間データと設定した。

時間データの設定においては、常時運転機器では運転時間を、待機機器では運転及び待機の合計時間を割り当てた。

充てん高圧注入ポンプにおける、情報整理の結果である定量評価のためのデータセットの例を、Table 2 に示す。

**Table 2 定量評価のためのデータセットの例
(充てん高圧注入ポンプ)**

成功打ち切り or 前兆事象(発生部位)	CBM の 有効性	成功打ち切り時間 or 曝露時間
成功打ち切り	—	1422 時間
メカシール部トラブル	有効	2621 時間
成功打ち切り	—	5223 時間
主軸部トラブル	有効	441 時間
メカシール部トラブル	有効	1657 時間
⋮		

(3) 機器レベルの評価

今回の試評価においては、以下の仮定の下で、各機器に対する機器レベルの評価を実施した。

試評価の仮定

(分解点検間隔を延長するケース)

- ・新保全計画での分解点検間隔は、現行保全計画の 2 倍と仮定した。
 - －充てん高圧注入ポンプ 6 年→12 年
 - －電動補助給水ポンプ 4 年→8 年
- ・機能試験間隔については、1 年（1 定検毎）で変更なし。
- ・新保全計画における CBM 強化の有効性が期待できる前兆事象に対して、その検知成功確率は一律 0.5 と仮定した。（すなわち、該当前兆事象の半分はその時点で検知され、機能喪失に至らない様に処置されると、仮定した。）

(機能確認試験間隔を延長するケース)

- ・新保全計画での機能試験間隔は、現行保全計画の 1.5 倍と仮定した。
 - －加圧器逃がし弁（空気作動弁）、加圧器逃がし弁入口止弁（電動弁）共 1 年→1.5 年
- ・分解点検間隔については、変更なし。
 - －加圧器逃がし弁（空気作動弁） 2 年
 - －加圧器逃がし弁入口止弁（電動弁） 10 年
- ・新保全計画における CBM 強化の有効性が期待できる前兆事象に対して、その検知成功確率は一律

0.5 と仮定した。（同上の仮定）

機器レベルの試評価結果を、各機器において、Table 3～Table 6 に示す。

分解点検間隔を延長するケースでは、充てん高圧注入ポンプ、電動補助給水ポンプ、いずれにおいても、UA インデックスは負値となる。これは、新保全計画では、現行保全計画に比べて、前兆事象発生率を低減する事が可能で、すなわち、当該機器の機能喪失確率を低減することができるため、新保全計画において、信頼性向上が期待できる事を示している。

機能確認試験間隔を延長するケースにおいても、加圧器逃がし弁（空気作動弁）、加圧器逃がし弁入口止弁（電動弁）、いずれにおいても、UA インデックスは負値となり、新保全計画において、信頼性向上が期待できると評価される。

なお機能確認試験間隔延長の検討においては、UA インデックスを正にしないという制約だけで考えて、許容できる機能確認試験間隔の延長分も評価でき、本評価手法は、機能確認試験間隔の最適化に対して、リスク面からの情報も提供可能である。

**Table 3 充てん高圧注入ポンプ 機器レベルの評価結果
(分解点検間隔を延長するケース)**

	ワイブルパラメータ		MTTF 前兆事象発生までの平均時間 (h)	分解点検間隔平均の前兆事象発生率 (／年)
	m 形状パラメータ	α 尺度パラメータ		
現行計画	0.965	2.04 × 10 ⁻⁴	6749	1.219
新計画	0.965	1.02 × 10 ⁻⁴	13838	0.597

$$UAI = (0.597*1)/(1.219*1) - 1 = -0.49$$

**Table 4 電動補助給水ポンプ 機器レベルの評価結果
(分解点検間隔を延長するケース)**

	ワイブルパラメータ		MTTF 前兆事象発生までの平均時間 (h)	分解点検間隔平均の前兆事象発生率 (／年)
	m 形状パラメータ	α 尺度パラメータ		
現行計画	0.982	2.20 × 10 ⁻⁵	55502	0.160
新計画	0.879	4.02 × 10 ⁻⁵	107227	0.0890

$$UAI = (0.0890*1)/(0.160*1) - 1 = -0.44$$

**Table 5 加圧器逃がし弁（空気作動弁）
機器レベルの評価結果
（機能確認試験間隔を延長するケース）**

	分解点検間隔平均の 前兆事象発生率 (/年)
現行計画	0.780
新計画	0.390

$$UAI = (0.390 \times 1.5) / (0.780 \times 1) - 1 = -0.25$$

**Table 6 加圧器逃がし弁入口止弁（電動弁）
機器レベルの評価結果
（機能確認試験間隔を延長するケース）**

	分解点検間隔平均の 前兆事象発生率 (/年)
現行計画	3.74
新計画	1.87

$$UAI = (1.87 \times 1.5) / (3.74 \times 1) - 1 = -0.25$$

（４）プラントレベルの評価

（３）の結果を使用して、プラントレベルの評価についても実施した。

（分解点検間隔を延長するケース）

- ・ 充てん高圧注入ポンプ：

$$CDFI = -7.1 \times 10^{-12}$$

- ・ 補助給水ポンプ：

$$CDFI = -1.4 \times 10^{-13}$$

（機能確認試験間隔を延長するケース）

- ・ 加圧器逃がし弁（空気作動弁）：

$$CDFI = -8.2 \times 10^{-12}$$

- ・ 加圧器逃がし弁入口止弁（電動弁）：

$$CDFI = -1.8 \times 10^{-14}$$

今回の試評価では、分解点検間隔を延長するケース、機能確認試験間隔を延長するケースの、いずれの機器においても、プラントレベルのインデックスは負値となり、クライテリアを保守的に0に設定するとしても、これらの保全計画変更はリスク上は問題なく有効と判断できることとなる。

今回の試評価においては、プラントレベルのインデックスは負値であったが、このインデックスが正值であったとしても直ちにその保全計画が無効とはならな

いものと考えられる。すなわち、リスク上の増分が許容できる程度に小さいと判断できる正值のクライテリアを設定していく運用も検討していく必要があるものと考えられる。

また、このプラントレベルのインデックス評価の有効な点としては、機器間の重要度の絶対的な比較に使用できる事であり、たとえば、分解点検間隔を延長するケースでは充てん高圧注入ポンプの方が、また、機能確認試験間隔を延長するケースでは加圧器逃がし弁（空気作動弁）の方が、保全計画変更による信頼性向上程度が大きいとの判断情報を与えてくれる。更に、保全計画変更の内容が、複数の機器にわたる場合でも、それら全体を統合した評価を行う事が可能である。

5. 保全情報データベースに対する要件整理

ここでは、本評価手法に使用する保全情報データベースに対する要件を、整理して示す。

4の試評価において、3に示す保全情報データベースより前兆事象に関するデータを収集して使用したが、ここでのデータベースに含まれる情報は、定量評価に対して完全なものではなく、「技術分野におけるリスクアセスメント」^[3]での「4.3 故障データの情報源」において指摘されている様な、以下の問題点に起因する情報の不確かさが含まれており、定量評価の精度向上のためには、これらのデータ情報の精緻化が必要となるものと考えられる。

- ① データ報告が標準化されていないこと
- ② 問われている項目に対する記述不足
- ③ データのフィードバックに多くの時間を要すること
- ④ 多数の部品の補修時間情報の正確さが欠けていること
- ⑤ 報告書において、用語の定義に矛盾があつてあまいであること
- ⑥ 故障の原因を特定するのが困難な場合があること
- ⑦ データが国の秘密事項であつたり会社の所有するものであつて、非公開に属する場合があること
- ⑧ 部品の故障と使用環境との関係の情報が欠落している場合のあること

この内、本評価手法における定量評価の精度に特に影響を与える要素は、“④補修時間情報の正確さ”、“⑥故障の原因に関する情報の明かさ”であるものと考え

られる。これらに関連しては、対象機器の保全情報データベースにおいて、最低限以下の情報が整理されている必要があり、これらの情報記載の標準化・精緻化を図っていかねばならない。

- ・前兆事象の発生日時

(機器待機中でのトラブル等、トラブルの実際の発生日時には潜在的に不確実さがあり、それらを検討・分析できる様な情報(トラブル内容の記述)を、データベースに付加させる必要がある)

- ・前兆事象の詳細な内容の記述

(トラブル部位の明示、或いは、それが明らかとなる程度のトラブルの記述が必要である)

- ・運転・待機(機能確認試験を含む)の開始・終了日時

- ・保守(分解点検を含む)の実施日時

更に、本評価での曝露時間・打ち切り時間の算出の効率的な実施の観点から、一般的には、別々にデータベースを構成している事が多い、トラブル情報データと運転・保守履歴データのリンケージを取り、同一データベース上に入力させる工夫を施していく事を検討する必要がある。

6. 結言

- 1) TBM と CBM を組み合わせた保全計画変更の検討において、対象機器の当該プラントでの保全情報により、CBM の有効性も考慮に入れてリスクへの影響評価を行う保全計画の定量的な信頼性評価手法を開発した。
- 2) ここでの定量的評価手法としては、新保全計画において現行保全計画から変更対象となる機器に対して、機器レベルの評価、プラントレベルの評価を実施するものであり、変更のリスクへの影響度をインデックス化して評価する事が可能となる。
- 3) ここでの定量的評価手法を用いて、PWR プラントにおける代表機器を対象として、具体的データを使用した試評価を実施した。ここで、本評価手法に使用する保全情報データベースに対する要件につい

での整理も実施した。

- 4) この結果、開発した信頼性評価手法の一連の手順により、TBM と CBM を組み合わせた保全計画の検討に対し、有効な定量評価を行う事が可能であるとの見通しを得る事ができた。
- 5) 今後は、PS 機器も含めて評価対象の拡充を行っていく必要がある。また、評価対象の拡充と合わせて保全情報データベースの分析・整理を進めていく事により、保全計画の信頼性向上への寄与が高い前兆事象の把握や、それに対応する CBM 技術改良が進展する事も期待される。
- 6) 本評価手法開発により、一連の手順を完成できたものと考えているが、以下の様な問題点・課題は残っており、今後とも引き続き検討を行う必要がある。
 - ・部品および事象の様態に応じた2次元的な分類を含めた、前兆事象情報の体系的整理、抽出基準の明確化の検討
 - ・国内外における前兆事象評価手法に係る研究状況の調査・反映等による、前兆事象発生確率と機能喪失確率との関連性の詳細検討
 - ・評価インデックスの絶対値基準の設定等のクライテリア設定に関する検討
 - ・CBM 強化による前兆事象の検知性の詳細検討
 - ・保全情報データベースの一層の整備
 - ・評価の実用化のための具体的運用方法の検討

7. 参考文献

- [1] 倉本他、日本原子力学会 2000 年春の大会 N18 「トリップ・出力低下に対する BOP システム・機器の重要度評価手法の検討」
- [2] Independent Verification of the Mitigating Systems Performance Index (MSPI) Results for the Pilot Plants Final Report: NUREG-1816
- [3] M. G. Stewart et al. 著、酒井 信介 監訳、技術分野におけるリスクアセスメント、森北出版、2003
(平成 20 年 8 月 11 日)