EPRI | ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE

Reliability and Risk Significance: For Maintenance and Reliability Professionals at Nuclear Power Plants

Japanese Translation

2012 TECHNICAL REPORT

信頼性及びリスク重要度

原子力発電所の保全及び信頼性の専門家向け

1025788

2002 年 8 月 最終レポート

EPRI プロジェクトマネージャー
M. Bridges

EPRI • 3412 Hillview Avenue, Palo Alto, California 94304 • PO Box 10412, Palo Alto, California 94303 • USA
800.313.3774 • 650.855.2121 • askepri@epri.com • www.epri.com

保証に関する免責条項及び責任の制限

本図書は、ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI)がスポンサー又は共同スポンサーとなり実施された取組みの報告として下記の組織によって作成された。EPRI、いかなる EPRI メンバー、いかなる共同スポンサー、下記組織、又これらのいかなる代理人も、

(A)(I)本図書で開示されている、特定の目的に対する商品性及び適合性を含めた、いかなる情報、装置、方法、プロセス又は同様のアイテムを利用すること、又(II)これらの利用により、いかなる者の知的所有権を含む、私的所有権が侵害又は干渉されないこと、又(III)本文書が特定の利用者の目的に適合していることに関して、明示的であるか黙示的であるかにかかわらず、いかなる保証も、表明もしない。

(B)本図書の選択又は使用、又は本図書で明らかにされている、いかなる情報、装置、方法、プロセス又は同様のアイテムに起因した、(たとえ EPRI 又は EPRI 代表者が損害の可能性について知らせを受けていた場合においても、その結果としての損害を含めた)いかなる損害に対する責任、又はその他のいかなる責任も負わない。

本図書を作成した組織

EPRI

注文情報

本レポートのコピーの依頼は、EPRI Orders and Conferences, 1355 Willow Way, Suite 278, Concord, CA 94520 か, 電話の場合、(800) 313-3774 のあと「2」か内線 x5379、(925) 609-9169、FAX の場合は(925) 609-1310 まで直接連絡されたい。

Electric Power Research Institute and EPRI are registered service marks of the Electric Power Research Institute, Inc. EPRI.ELECTRIFY THE WORLD is a service mark of the Electric Power Research Institute, Inc.

Copyright © 2002 Electric Power Research Institute, Inc. All rights reserved.

特記

本レポートは、以下の組織により作成された。

Applied Resource Management
313 Nobles Lane
Corrales, New Mexico 87048

主管研究員
D. H. Worledge

このレポートは、EPRI がスポンサーとなった研究について記述している。

このレポートは企業図書であり、引用する場合は以下のようにすること。

信頼性及びリスク重要度：原子力発電所の保全及び信頼性の専門家向け EPRI, Palo Alto, CA: 2002. 1025788

レポート概要

本レポートでは、商用原子力発電所における機器の信頼性とアベイラビリティの関連、及び確率的安全評価（PSA）により定量評価されるリスク重要度について説明している。本レポートでは、リスク重要度として最も一般的な 2 つの指標、及びプラントの意思決定者にリスク情報を提供する同指標の使用方法を範囲として取扱う。さらに、予防保全（PM）を実施する際の信頼性とアベイラビリティのバランスの達成のガイダンス、及び PSA で使用されている安全パラメータとの整合性を確実に保ちつつ、機器のパフォーマンスクライテリアを設定するガイダンスも提供する。特に、本レポートではこれらのトピックと、原子力発電所における PM プログラムを管理し実施する技術者の決定とを関連付けている。本レポートは、リスク重要度、パフォーマンスクライテリア、及びバランスの概念を理解し、適用の機会を模索している、保全の専門家向けである。

背景

運転中の原子力発電所のリスク抑制における PM の役割は、1975 年に発行された産業界の最初の PSA、NUREG-75/014「原子炉の安全に関する研究（Reactor Safety and Study)」において認識され、定量化された。炉心損傷のリスクへの寄与に関する定量的な見方を提供するための PSA 解析がさらに成功したことにより、NRC（原子力規制委員会）はリスク情報をさらに活用した規制を支持するようになった。これらの規制項目の革新の 1 つとして挙げられるのが、保守規則（10CFR50.65）である。この規則では、今まで PSA の専門家のみによく知られていた定量的なリスク概念に基づいた決定を保全技術者に要求している。この他の新しい概念は、規制プロセスに最近導入された。例としては、改善された PM により達成される信頼性と、PM の実施により発生する機器の非アベイラビリティとのバランスが挙げられる。短期間にわたる機器の信頼性及びアベイラビリティの監視方法を提供することが大きな課題となっている。

これらの需要は、産業界が経済性及び安全性を考慮しながら、信頼性重視保全などを通して PM を依然として改善している最中に発生したものである。さらに、産業界は EPRI 予防保全情報レポジトリなどの、PM 経験のデータベースを開発中である。これは、メーカーの推奨事項から受け継いだ既存のプログラムよりもさらに進んだ PM プログラムの技術ベースを提供するものである。PM に関する決定は技術的に複雑ではあるが、10 年前よりも解析方法に対してよりオープンである。

目的

- 信頼性、アベイラビリティ、及びリスク間の関連についての見識を提供すること
- それらの見識を使用する方法を説明すること
- 保全の決定に見識を適用する方法を示すこと

- 整合性の取れた論理的枠組みで見識を導き出し、PSA の分野の技術者にも全体的な理解が得られるようにすること

アプローチ

リスク重要度に関する基礎的資料の最初のバージョンは、EPRI TR-106280「EPRI 保守規則プロジェクトからの見識（Insights From EPRI Maintenance Rule Projects）」の一部として発行された。これは、一般的に使用されているリスク重要度のパラメータの意味に関して当時沸き起こった議論に解釈を与えるためのものであった。バランスの概念に関する検討では、PSA モデルにおける 1 つの基事象又は 1 つの機器に焦点を絞っている。リスクモデルには、リスク重要度及びその使用に関する結論を導くために線形形式が使用されている。

系統、構造物、及び機器（SSC）のパフォーマンスクライテリア設定に関する資料が、EPRI Technical Bulletin 96-11-01 及び 97-3-01 として発行された。これらの Technical Bulletin は、EPRI 保守規則ユーザーズグループのメンバーが、監視結果に対して PSA の値の妥当性を証明する必要性なしに、設定された PSA パラメータに従って機器の信頼性及びアベイラビリティを監視するのに役立った。

信頼性及びアベイラビリティのバランスに関する資料のほとんどは、保全コストを安全性のメリットに関連付ける取組みから発生したものであった。バランスにおいて重要なことは、プラント技術者が PM 活動を選択する際に信頼性の最適化を強いられることなく適切な判断が出来るように、安全の総合的向上の観点から信頼性とアベイラビリティとを関連付けることである。

結果

レポートは、後続のセクションで（技術ベースとともに）示される結果の要約から始まる。セクション 1 の見識には、最小限の内容でも参照することが出来る結果のみが含まれている。以降のセクションでは、リスク重要度とその適用、信頼性とアベイラビリティのバランス、及び SSC のパフォーマンスクライテリアの設定について記述している。リスク重要度の見識の適用では、一般的に使用されている 2 つのリスク重要度のパラメータについて、関連付けた解釈を使用することに焦点を当てる。バランスに関するセクションでは、PM を実施することで発生した現状の非アベイラビリティが、達成された信頼性とバランスが取れているかを決定するためのテストを提案している。しかしながら、状況を改善する可能性のある PM の変更に関する具体的な考察なしにテストを実施することは出来ない。パフォーマンスクライテリアに関するセクションでは、瞬時の故障、故障率のシナリオ、及びこれら 2 つを組み合わせた運転と待機の切換え運転が出来る機器を考慮する。

本情報は、保全の専門家が、急速に進展している規制及び経済環境において信頼性のある決定をするために、これら概念に関する作業上の知識を育成するのに役立つだろう。PSA の分野における電力会社の新規技術者にとって、同じ範囲でかつ充実した内容が 1 箇所にまとめられた参照図書を他で見つけることは不可能だろう。さらに、結果の一部は新しい見識である。

EPRI の展望

EPRI は、長い間リスク及び PM の分野に係わっており、リスクのパラメータを適切に適用することは PM 戦略の優れた開発にとって重要であると考えている。本レポートは、リスクのパラメータを適切に適用する方法についての見識を示し、その説明をするものである。

キーワード
リスク重要度
予防保全
保全の最適化
機器の信頼性
機器のアベイラビリティ

要約

本レポートは、商用原子力発電所において保全を計画及び実施するためにリスク重要度パラメータやその他のリスク概念を使用することの技術ベースを提供するものである。特に、信頼性及びアベイラビリティの向上に対するこれらリスク重要度の指標の適用、新しいプラントプログラムの導入、信頼性及びアベイラビリティのバランス、及び保守規則 10CFR50.65 に従った系統、構造物、及び機器のクライテリア設定に関するいくつかの見識が追加されている。レポートでは、保全及び機器のパフォーマンスを向上させるために、保全の専門家がこれらの見識を適用出来るようになることが意図されている。整合性の取れた論理的枠組みで結果や見識が導き出されており、確率的安全評価（PSA)の分野の技術者にとっても役立つものであるだろう。商用原子力発電所におけるリスク情報を活用した規制の拡大に従い、本レポートが標準的な参考図書となることが意図されている。

目次

1 主要な結果とその適用 1-1
1.1 はじめに 1-1
1.2 リスク重要度に関する見識 1-1
1.3 リスク重要度の適用 1-6
1.3.1 FV の使用 1-6
1.3.2 RAW の使用 1-6
1.3.3 FV と RAW の相関の使用 1-7
1.4 信頼性とアベイラビリティとのバランスに関する見識 1-10
1.4.1 バランステスト 1-11
1.4.2 バランステストの適用 1-12
1.5 パフォーマンスクライテリアの設定 1-15
1.5.1 瞬時の故障 1-15
1.5.2 時間故障率 1-15
1.5.3 迅速な起動要求を持ち、運転と待機が切り替わる場合 1-16

2 リスク重要度の意味と使用 2-1
2.1 はじめに 2-1
2.2 炉心損傷頻度 2-1
2.3 ファッセルベズレイ（Fussell-Veseley） 2-4
2.3.1 定義 2-4
2.3.2 バーンバウム重要度 2-5
2.3.3 FV と信頼性 2-5
2.3.4 故障の平均的影響としての FV 2-6
2.3.5 ベースライン CDF への寄与としての FV 2-7
2.3.6 CDF へのパフォーマンス変化の影響 2-7
2.3.7 FV のリスク低減価値（RRW）との関係 2-8

2.3.8 FV の適用 2-9
2.4 リスク増加価値（RAW） 2-10
2.4.1 定義 2-10
2.4.2 パフォーマンスから独立している RAW 2-11
2.4.3 RAW と FV のスケールの違い 2-11
2.4.4 RAW と P の誤った関係 2-11
2.4.5 RAW と信頼性 2-12
2.4.6 RAW の適用 2-12
2.5 プログラムへの FV 及び RAW の適用 2-13
2.5.1 FV と RAW の相関 2-13
2.5.2 機器の RAW がリスク重要度高、FV がリスク重要度低の場合 2-15
2.5.3 機器の FV がリスク重要度高、RAW がリスク重要度低の場合 2-16
2.5.4 機器の FV、RAW の両方がリスク重要度高の場合 2-16
2.5.5 機器の FV、RAW の両方がリスク重要度低の場合 2-17
2.5.6 象限図 2-18
2.5.7 PM の目的と象限図 2-19
2.5.8 象限図の中のポイントの動き 2-20
2.6 その他の適用上の課題 2-21
2.6.1 FV 及び RAW に対する事故シーケンスの切捨ての影響 2-21
2.6.2 a 及び b の値 2-22
2.7 単一の機器の複数の基事象 2-23
2.8 機器とスーパーコンポーネントの間の関係 2-25
2.9 2 個以上の SSC の FV 2-28
2.10 2 個以上の SSC の RAW 2-29

3 信頼性とアベイラビリティとのバランス 3-1
3.1 はじめに 3-1
3.2 正式な枠組み 3-2
3.3 バランスのクライテリア 3-4
3.4 その他の基事象の取込み 3-10
3.5 リスク重要度の適用の取り込み 3-11
3.6 バランスとスーパーコンポーネント 3-13

3.7 要約 3-15

4 信頼性の監視—瞬時の故障 4-1

4.1 はじめに 4-1

4.2 PSA との関連 4-1

4.3 デマンドへの対応失敗の推定 4-2

4.4 予想される失敗回数 4-5

4.5 故障のパフォーマンスクライテリア 4-7

4.6 要約 4-8

5 信頼性の監視—故障率が伴う場合 5-1

5.1 はじめに 5-1

5.2 PSA との関連 5-1

5.3 一定の故障率が与えられる場合の予想される故障回数 5-2

5.4 故障率に応じたパフォーマンスクライテリア 5-3

5.5 特定の故障回数が出現する確率に関するデータ 5-5

5.6 切り替えにより、連続運転しているトレインの待機の解釈 5-6

5.7 待機時故障と運転継続失敗のクライテリアを組み合わせてよい理由 5-9

5.8 待機時故障率のパフォーマンスクライテリア 5-10

5.9 要約 5-12

6 参考文献 6-1

本文中での参考文献 6-1

その他の参考文献 6-1

図のリスト

図 2-1 基事象の確率に対する CDF 2-3
図 2-2 （線形スケールと）定数 P の直線を示している RAW と FV の象限図 2-19
図 2-3 機器全体（すべての故障モード）の FV と RAW 値による PM の目的のまとめ 2-20
図 3-1 合計 PM 数の関数としての非信頼性 3-3
図 3-2 運転中の PM の関数としての非アベイラビリティ 3-4
図 3-3 合計 PM 時間数の関数としての非アベイラビリティ 3-4
図 3-4 運転中の PM 数の関数としての非信頼性 3-5
図 3-5 運転中の PM の関数としての P_{Sum} 3-6
図 3-6 P_{Sum} 及び P_r 上のそれぞれの勾配 3-7
図 3-7 CDF 及び $\Sigma_i a_{ri}P_{ri}$ 上のそれぞれの勾配 3-12
図 4-1 (P + 2s)/P の比 4-3
図 4-2 U80%/P と U90%/P の比 4-4
図 4-3 (P + 2s)/P の比 4-5
図 4-4 U80%/P と U90%/P の比 4-5
図 5-1 1 回及び 2 回の故障の確率 5-7
図 5-2 0 回の故障の確率 5-7

EPRI にライセンスされた資料

表のリスト

表 2-1 FV と RAW 間の相関に関する条件式 2-14
表 4-1 10 回のテストデマンドへの 1 から 5 回の対応失敗に対する標準偏差及び信頼度限界 4-3
表 4-2 20 回のテストデマンドへの 1 から 5 回の対応失敗に対する標準偏差及び信頼度限界 4-4
表 4-3 0 回の失敗が出現する確率 4-6
表 4-4 1 回の失敗が出現する確率 4-6
表 4-5 2 回の失敗が出現する確率 4-7
表 5-1 異なる故障回数に対する出現確率（%） 5-3
表 5-2 r = 0、1、2 回の故障の割合としての P(r)値 5-5

1
主要な結果とその適用

1.1 はじめに

本レポートでは、原子力発電所の信頼性、アベイラビリティ、リスク重要度、及び予防保全（PM）の関連について説明している。

信頼性とリスクに関する一般的な理解は、確率的安全評価（PSA）の専門的な分野では長らく存在しているが、保全の専門家にはよく知られたものではない。とはいえ、本レポートは PSA の分野においても役立つものである。なぜならば、PSA の分野の新規技術者は、同じ範囲でかつ充実した内容が 1 箇所にまとめられた参照図書を他で見つけることが出来ないからである。さらに、いくつかの結果は新しいものであるか、新しい見識を示している。

本セクションでは、リスク重要度、信頼性とアベイラビリティのバランス、及び信頼性に関するパフォーマンスクライテリア設定に関する重要な結果を要約している。（詳細は後ろのセクションで示されている。）これらの結果の使用について記述し、例を挙げている。セクション 2 から 5 では、結果の技術ベースを示している。さらにセクション 2 では、2 つの一般的なリスク重要度の指標を調べる枠組みを提供している。本資料の多くは、初期のバージョンである EPRI TR-106280「EPRI 保守規則プロジェクトからの見識（Insights From EPRI Maintenance Projects）」[1]の一部として 1996 年に発行されたものである。

セクション 3 は、信頼性とアベイラビリティのバランスについて説明している。セクション 4、5 にある、系統、構造物、及び機器（SSC）に対するパフォーマンスクライテリアの設定に関する資料は、EPRI Technical Bulletin 96-11-01 [2]及び 97-3-01 [3] として発行された。

1.2 リスク重要度に関する見識

1 つの基事象の確率とは、将来の任意の時点で 1 つの機器の機能が必要とされる時に、その機能の提供が失敗する確率を示す。以下は、典型的な基事象の確率である。

- 瞬時の故障：デマンドへの対応失敗、閉失敗、開失敗の確率のようなもの。この基事象の確率は、デマンドへの対応失敗の例のような単純な確率を言う。
- 待機時の故障：待機時の故障の結果、機器が機能要求される時に既に故障しているもの。この基事象の確率は、$\lambda\tau/2$ であり、λ は待機時故障率で、τ はサーベイランステストとサーベイランステスト間の時間である。

主要な結果とその適用

- 要求されるミッション時間内での運転継続失敗：基事象の確率は λT であり、λ は運転継続失敗率で、T はミッション時間である。
- 当該機器が PM 中又は修理中であるゆえに、アベイラブルでない状態。基事象の確率は、非アベイラビリティであり、機能がアベイラブルでない時間を機能が要求される時間で割ったものと定義される。
- 起因事象：その基事象の確率が、外部又は内部事象の 1 年当たりの発生頻度であるもの。この事象には、竜巻、洪水、予期される過渡事象等がある。頻度は、1 年当たり 1 を超えるかもしれないので、これは確率ではない。
- 共通原因故障事象：基事象の確率が、複数の機器の基事象が関連し、同時に、故障又はアベイラブルでない状態となる確率であるもの。リスク重要度の指標は、共通原因事象についても、その他の基事象と同じ意味を持つ。

ファッセルベズレイ（Fussell-Vesely[FV]）リスク重要度指標は、当該の基事象の確率が 2 倍になった時の、炉心損傷頻度（CDF）の増加の割合に等しい。

- 信頼性又はアベイラビリティは時間とともに劣化して、基事象の確率が増加することがあり得る。基事象の確率がベースライン PSA 値の 2 倍になったら、CDF は、その事象の FV の割合だけ増加する。例えば、デマンドへの対応失敗の確率（つまり、基事象の確率）は、PSA において 3×10^{-4} であり、FV の値は 0.003、CDF は 5×10^{-5} であったとする。デマンドへの対応失敗の確率が 6×10^{-4}（元の 2 倍）に変化すると、CDF は 0.003×5.10^{-5} だけ増加し、5.015×10^{-5} となる。
- この FV 指標を、全体としてのパフォーマンス変化に対する CDF の反応の計測に使用する。FV 値は、1 つの基事象における変化について、変化量の大きさによらず正確である。基事象の確率が、元の量だけ増加すると（前出の例では、6×10^{-4} に増加、その後 9×10^{-4} など）、CDF は FV が示す割合だけ増加することとなる。

1 つの基事象における一般的な変化の割合 ΔP/P の CDF の変化への影響は、ΔCDF/CDF = FV × ΔP/P となる。

- 上記の式は、CDF の変化（%）= FV × P の変化（%）に同じである。
- 上記では、ΔP/P = P/P = 1 となるように、基事象の確率を 2 倍にした例である（つまり、2 倍の法則）。これにより、上記の式が ΔCDF = FV × CDF となる。
- この関連性を、あらゆる大きさのパフォーマンスの一般的変化に対する CDF の反応の計測に使用する。
- 電動機発電機（MG）セットの「10 時間の運転継続失敗」事象の確率が、PM が改善されて 9×10^{-4} から 2×10^{-4} に減少する場合、この場合の変化の割合 ΔP/P は、-7/9 となる。ベースラインの PSA において、この信頼性に関する事象の FV の値が 0.01 であったとすると、CDF の変化の割合 ΔCDF/CDF は、$-0.01 \times 7/9 = -0.0078$ で、CDF が 0.78%減少することとなる。

基事象の FV がリスク重要度高である場合でも、そのパフォーマンスが必ずしも悪いわけではない。この結論を出す前には、追加情報が必要である。

パフォーマンスが変化する時、FV は比例して変化し、$FV_{new}/FV_{baseline} = P_{new}/P_{baseline}$ となる。

- 前例では、PM が改善されて、基事象の確率が 9×10^{-4} から 2×10^{-4} に減少した。よって、$P_{new}/P_{baseline}$ は、2/9 であった。$FV_{new}/FV_{baseline}$ も 2/9 となり、当初の FV は 0.01（リスク高）が、$0.01 \times 2/9 = 0.0022$ に変更となる。この数字は、0.005 の閾値と比べるとリスク重要度は高くない。
- パフォーマンスに影響を及ぼす可能性のあるプラントプログラムを追加、削除、変更すべきかを決定するために、FV によって機器や基事象をランク付けする時、FV そのものがパフォーマンスに直接比例して変化することに気をつけるべきである。プログラムを減らす場合、リスク重要度の閾値までに十分なマージンが必要である。上記の例の場合、最終状態の FV = 0.0022 が初期状態であったとしたら、それだけで FV を悪化させリスク高とする可能性のある PM プログラムやその他のプログラムを緩和させることの妥当性を示していると仮定することは間違いだっただろう。

又、FV は、「基事象が起きてしまった時の CDF の増加の割合に、同事象の発生確率を掛けたものである」と言える。

- この定義をリスク増加価値（RAW）と比較すること。RAW は、基事象が起きた場合の CDF の値であり、基事象が発生する確率は関係しない。
- ある特定の機器は、故障又は供用除外状態になる時、CDF に大きな影響を及ぼす。CDF が 30 倍増加すると仮定する。すなわち RAW は 30 である。又、FV を 0.003 とする。（この場合のように）FV が小さく、RAW が大きい場合、平均的なパフォーマンスは良い。基本設計、保全、及び品質保証（QA）などの要素のおかげで、故障や停止（RAW が大きい）におけるその CDF の大きな増加は、平均的に CDF に重大な影響を及ぼさないことが理解されている。
- 故障又は非アベイラビリティ事象の確率が低いことが、FV が 10^{-7} から 10^{-1} の範囲で、RAW が 1 から 100 以上である理由である。
- FV は、長時間にわたる機器の平均的パフォーマンスに関わる決定に関連して常に使用する。なぜならば、FV は機器が大抵の場合機能を発揮している状況を自動的に反映しているからである。又、FV は機器が機能を発揮しない時のリスク増加も反映している。

リスク低減価値（RRW）と FV は両方とも同じ概念のため、いかなる決定においても両方を考慮する意味はない。

- リスク重要度を計測するために、RRW と FV を一緒に使用しないこと。

RAW は、機器が故障している、又は供用除外状態の間の、炉心損傷が発生する瞬時の率（CDF）の増加倍率を示す係数である。

- 機器が故障している、又は供用除外状態の間、新しい一時的な CDF の値は $CDF = RAW \times CDF_{Baseline}$ となる。
- 機器が供用状態に戻るとすぐに、CDF はベースライン値に戻る。例えば、PM による非アベイラビリティの基事象は、RAW = 2 で、ちょうど RAW のリスク重要度の閾値と考える。機器が供用除外状態にある間の一時的な CDF は、ゆえにベースライン値の 2 倍になる。当該の機器の供用停止は一時的に、元の全 CDF に対して同じ割合（2）だけ、炉心損傷事象の発生率を増加させる。

主要な結果とその適用

RAW は、当該事象の結果を、炉心損傷に関わる瞬時の率で計測する指標である。RAW は、事象の継続期間のみに関連し、どれくらいの確率で事象が発生しそうか、どれだけ継続するかについては含まず、又何ら関連がない。

- 産業界の一部の参照図書で誤って示されているような、機器の供用除外状態を 1 年間にするというような言及やそれとなく暗示された要求事項はない。
- ある機器が供用除外状態にある時、同機器は CDF に悪影響を及ぼすので、PM 実施による非アベイラビリティの事象で、RAW が大きく、FV が小さい場合がある。しかしながら、平均的には、機器が頻繁に又は長期間供用除外状態にあることはない。
- 供用除外状態が著しく CDF を増加させることはないので、PM 実施による非アベイラビリティの事象で、RAW が小さく、FV が大きい場合がある。しかしながら、これらの例の多くは、長期間をかけて発生するか、平均的には長い間続くものである。
- 大きい RAW 値は、機器の平均的なパフォーマンスについて何も示していない。
- 大きい RAW 値は、機器の故障を防ぐために、及び/又は供用除外状態時間を制限するため、多大なリソースをつぎ込みたい、とあなたが思っているはずであることを示している。一方大きい RAW 値は、これらのリソースが既に成功裏につぎ込まれたか、機器を供用状態から取除くことを多少頻繁にすべきかは示していない。
- 大きい RAW 値は、当該機器の機能が重要であり、供用除外状態であることのリスクの影響結果が大きいことを示している。機能の重要性には、機器をサポートするためにアベイラブルであるべき深層防護の観点とともに、機器の機能の必要頻度（安全機能への要求頻度、つまり起因事象の頻度）も含まれる。

RAW は、ほぼ完全に機器のパフォーマンスから独立している。

- （例えば、信頼性又はアベイラビリティを向上させて）機器のパフォーマンスを変えても、RAW 値は変わらない。
- 機器の RAW が元々リスク重要度高でない場合、その機器の信頼性又はアベイラビリティが劣化しても、同機器の RAW がリスク重要度高となることは決してない。

RAW は、プラント内、系統内の機器の構成、及び他の機器の信頼性及びアベイラビリティのパフォーマンスに依存する。

- 機能の冗長性のレベルが高く、信頼性がある（つまり、深層防護が効果的であり、安全機能への要求のレベルが低い）場合、RAW は低い値になる。
- 機能の冗長性のレベルが高くない（つまり、深層防護が効果的でなく、安全機能への要求のレベルが高い）場合、RAW は高い値になる。

切捨て処理による FV 値の不確実性は、$\Delta FV < \varepsilon/CDF$ に限定され、保守的でない。これは潜在的な問題である。この数式において、ε は CDF の切捨てされた値と切捨てされていない値の差である。切捨てされていない値の方が大きい。

- FV 閾値に近い FV 値を十分に正確にするために、CDF は、FV の閾値よりもはるかに良い値に収束することを確実にする必要がある（FV の閾値は通常は 0.5%で ε/CDF が << 0.5%にならなければならない）。

切捨て処理による RAW 値の不確実性は、$\Delta RAW < (1/P) \cdot \varepsilon/CDF$ に限定され、これも又保守的でない。ε は CDF の切捨てされた値と切捨てされていない値の差である。P は、基事象の発生確率である。

- ε/CDF ~ 0.001 である時でさえ、RAW 値は、発生確率が 0.001 よりも低い基事象に対して十分に正確ではない。
- ここでの懸念は、RAW に対する切捨て処理の影響は、FV に対する切捨て処理の影響よりも大きいということである。
- あなたの PSA において、切捨て処理の結果としての ε/CDF の値を見つけてみてほしい。その値を、非常に信頼性が高いか又はアベイラビリティが高い機器に対する RAW 値を信頼すべきでない場合を理解するために使用する。ε は合計の CDF のパラメータ収束値であり、よく言われる事故シーケンスごとの収束限界ではないことに気づいてほしい。
- RAW > 2 であるすべての機器を特定するために、切捨てレベルを十分に低い値に設定することを考慮する。

CDF に対する異なる基事象の全体的な平均的影響を表すために、これらの基事象の FV 値を合算することが出来る。

- 追加されたすべての基事象が同じ機器に関するものである場合、合計は完全に正しい。
- 合計は、異なる機器に関する基事象に関しては保守的な上限となる。

異なる機器に関する基事象の RAW 値は、同時に複数の機器を供用除外状態にする影響を表すために合算することは出来ない。しかしながら、事故シーケンスエディタにより、同時に複数の機器を供用除外状態にする影響を計算するために、ベースラインの事故シーケンスの確率及び基事象の確率を合算することが出来る。

- これにより、PSA の専門家でない人も、PSA を再度解析することなく、緊急作業に対してすばやく回答を提供することが出来る。
- このような手順では、ベースラインモデルに変更が必要となる緩和措置は考慮されていない。

1.3 リスク重要度の適用

1.3.1 FV の使用

CDF への平均的な寄与に関係する時はいつでも、FV を使用する。

- FV は、CDF に対する故障及び非アベイラビリティの平均的な影響を示しているので、FV は、CDF への平均的な寄与に基づいて機器を正しく評価し、ランク付けする。FV では、故障の結果をその故障が発生する可能性で重み付けし、又、停止の結果を停止の頻度及び期間で重み付けする。しかしながら、FV は、その他多くの機器のパフォーマンスにも依存するため、FV だけでは当該機器の信頼性又はアベイラビリティのパフォーマンスをランク付けするために使用することは出来ない。

FV は、以下を実施するための唯一のリスク重要度指標であると考えられる。

- CDF に対する基事象の確率の変化の影響を計算すること
- CDF に対する寄与の割合により、事象を計測及びランク付けすること
- 事象が及ぼす長期間にわたる CDF への平均的な影響により、事象を計測及びランク付けすること

FV は、一般的に以下を実施するために便利なリスク重要度指標である。

- 多くの機器に適用されている、PM、供用期間中テスト、又は QA などのパフォーマンスを変更するすべてのプラントプログラムの全体的な有効性、進捗、及び傾向を計測及びランク付けすること

FV は、以下のために使用すべきでない。

- 機器の平均的な信頼性又はアベイラビリティをランク付けすること
- 特定の故障事象又は供用除外状態がリスクに対して個別に重要であると判断すること
- ある 1 つの故障又は供用除外状態を緩和するために措置を取るべきかを判断すること
- ある 1 つの故障又は供用除外状態を緩和するためにどのような措置を取るべきかを判断すること
- ある 1 つの供用除外状態の期間を制限すべきか、及びどのくらいの期間に制限すべきかを判断すること

1.3.2 RAW の使用

機器が供用除外状態又は故障状態にある間、CDF が影響を受ける時はいつでも RAW 値を使用することが極めて重要である。

- CDF の新しい値は、特定の期間、機器の停止のために RAW × CDF と等しくなり、このより大きい値は許容されない場合もあり得る。RAW は簡単に変更出来ないため、新しい CDF が高すぎ

る期間は短縮すべきである。これにより、新しい CDF は低くならないが、プラントがその CDF に曝されている時間を制限する。

RAW の使用は、信頼性及びアベイラビリティに影響を与える可能性のあるプラントプログラムを、機器に適用すべきかを定性的に判断する場合に必要となる。

- 信頼性重視保全（RCM）では、機器の故障が極端に重要でない限り、故障が発生するのを防ぐために PM のリソースを費やす価値はないとアドバイスしている。RAW は、少なくとも安全の観点から、故障が重要かどうかをみる大事な指標である。
- しかしながら、RAW は機器が故障する頻度又は機器の供用除外状態の期間については何も示していない。それゆえ、RAW は機器の実際の定量的な信頼性又はアベイラビリティのパフォーマンスを評価又はランク付けする上では価値がない。RAW は、プログラムに対する機器の反応には対応しておらず、プログラムの推定される必要性にのみ対応している。
- QA プログラム又は供用期間中テストプログラムを適用すべきかについても同じ考慮事項が適用されるべきである。なぜならば、これらのプログラムは故障を防ぎ、非アベイラビリティを制限しようとするのが目的であるので、最初に答えるべきは、このような事象が発生するのを防ぐことがどれだけ重要かという問いである。RAW は、これらのプログラムを適用すべきかを判断するための機器のランク付けに使用すべきである。
- これらのプログラムや特性が長期間にわたり平均的なリスクに対してどのくらい定量的な影響を及ぼすか、あるいは及ぼしてきたかという問いには、FV を使用し、基事象自体の値を比較することにより評価をすべきである。

1.3.3 FV と RAW の相関の使用

機器の基事象に対する FV と RAW の値が相関した情報であると考えると、さらに多くの見識を得ることが出来る。リスク重要度の意味を間違って解釈するのを防ぐためにこれらの相関を考慮することは重要である。以下は、考えられる 4 つのケースである。

1. RAW がリスク重要度高、FV がリスク重要度低の場合
2. FV がリスク重要度高、RAW がリスク重要度低の場合
3. FV、RAW の両方でリスク重要度高の場合
4. FV、RAW の両方でリスク重要度低の場合

注記：以下の文について、「FV の閾値までのマージン」は以下に基づいて判断すべきである。

- どの程度保守的にしたいかという根拠
- 現状の FV 閾値に組み込まれている保守性の程度
- 基事象の確率における不確実性の影響（通常、少なくとも 3 倍）

主要な結果とその適用

- リスク重要度パラメータそのものにおける結果としての不確実性

注記：FV の使用に関する以下の文において、最後に改訂した PSA のデータと現在の機器のパフォーマンスとの間の時間差の影響を考慮に入れるべきである。

1. RAW がリスク重要度高、FV がリスク重要度低の場合

- 機器が故障している、又はアベイラブルでない時リスクの増加が大きい。ゆえに、原則として、平均的なリスクを管理するために、信頼性及びアベイラビリティを管理するプラントプログラムを有することは重要である。これらのプログラムは、既に実施されているかもしれないし、効果的であるかもしれないしあるいは効果的でないかもしれない。
- 個々の機器が供用状態から外される場合の期間は限定される必要があるかもしれない。これは、平均的なリスクではなく個別の事象における追加リスクを抑制するためである。
- この機器は、CDF に対して大きなリスクの寄与をしていない。従って、個々の機器の停止の及ぼす影響は大きいので、既存のプログラムにおいて、効果的に信頼性/アベイラビリティを管理しなければならない。この結果、高い RAW 値であるからと言って、追加のプログラムの必要性を強く推進すべきでない。
- 基事象の確率は、FV の閾値（通常 0.005 に設定）よりも低くなければならない。このことは、多くの基事象が優れたパフォーマンスを示しており（例えば、35 時間未満の非アベイラビリティ）、パフォーマンス向上の明らかな必要性はない。しかしながら、この状況は、この一般的な値よりもずっと信頼性があるべきである機器のパフォーマンスの劣化に対する弁解として使用すべきでない。後述の PM の目的に関するコメントを参照のこと。
- RAW が非常に大きな値でも、FV がリスク重要度の閾値に対して十分なマージンが確保されている限り、パフォーマンスの低下によりこの状況は変わらない。ゆえに、FV のマージンを十分に確保しなければならない。FV のマージンが十分ないと、既存のプログラムにおいてマージンを増やして強化するか、パフォーマンスクライテリアを厳しくして、マージンを確保する必要性がある場合があるが、どちらも信頼性とアベイラビリティのバランスを取る要求事項に対しては難しいかもしれない。
- 追加のプログラムは、パフォーマンスの劣化に対する FV のマージンを増やす必要性がある場合にのみ妥当性を示すことが出来るだろう。機器は、FV では既にリスク重要度高ではなく、パフォーマンスも良いので、この場合は妥当性を示すのは難しい。さらに、プログラムが他の個別の機器に対してでない限り、そのようなプログラムでは、RAW 値は低くならないだろう。もし、低くなる場合は、そのプログラムにより FV のマージンも増加するだろう。
- PM の観点からは、この故障モードは「クリティカル（非常に重要）」であり、それらが発生した場合の影響がそれぞれ重大であることから、予想出来るすべての故障を予防しようとすることが重要である。従って、この機器に対する包括的な PM プログラムを採用すべきである。信頼性/アベイラビリティが良いかもしれないという事実は、「クリティカル（非常に重要）」の選択あるいは PM の目的の変更に影響を及ぼさない。

2. FV がリスク重要度高、RAW がリスク重要度低の場合

- 基事象発生によるリスク の上昇は高くなく、個々の故障を防止するという高い必要性に基づいた追加プログラムの妥当性が認められることは困難である。
- 基事象の確率は、FV の閾値（通常 0.005 に設定）よりも大きく、0.005 よりずっと大きい場合がある。このことから多くの機器の悪いパフォーマンスに対して無関心になる可能性がある。
- 平均的には、この機器は CDF に対して大きなリスクの寄与をしている。
- FV 値が著しく増加することは許容されてはならないので、信頼性又はアベイラビリティのパフォーマンスの劣化を予防すべきである。平均的なパフォーマンスが FV 値を増大させる。
- パフォーマンスの向上は、FV 値又は事後保全のコストが非常に高い場合にのみ必要とされるであろう。パフォーマンス向上の必要性があり、既存のプログラムで達成できない場合は、機器の平均的なパフォーマンスを向上させることを目的とした新しいプログラムの妥当性が示されるかもしれない。
- PM の観点からは、故障モードは「ノンクリティカル（非常には重要でない）」。（個々の故障を防ぐために包括的なレベルの PM の必要性がないとは言え）信頼性が乏しい場合があり、信頼性が乏しいと FV 値を増大させるので、信頼性を管理する必要がある。最も可能性の高い故障を防ぐために簡単な PM を使用する。より効果的な PM が、安全関連の機器に必要であるか、FV が大きすぎる場合又は事後保全のコストが高すぎる場合には信頼性を向上させるために必要であるかもしれない。

3. FV、RAW の両方がリスク重要度高の場合

- 機器が故障している、又はアベイラブルでない時リスクの増加が大きい。ゆえに、原則として、信頼性及びアベイラビリティを管理するプラントプログラムを有することは重要である。これらのプログラムは、既に実施されているかもしれないし、効果的であるかもしれないしあるいは効果的でないかもしれない。
- 個別の事象における追加リスクを抑制するために、個々の機器が供用状態から外される場合の期間は限定される必要があるかもしれない。
- 平均的には、この機器は CDF に対して大きなリスクの寄与をしている。
- FV 値が著しく増加することは許容されてはならないので、信頼性又はアベイラビリティのパフォーマンスの劣化を予防すべきである。平均的なパフォーマンスが FV 値を増大させることがある。
- 既存のプラントプログラムを改善する必要があるか、新しいプログラムが必要かもしれない。
- この場合においては、FV 及び RAW 値からパフォーマンスを判断することは出来ない。同様の機器についての産業界又はプラントの経験に基づいて、パフォーマンスが妥当かどうかの評価を実施する。
- 悪いパフォーマンスは、既存のプログラムを使用して向上出来るかもしれない。

- パフォーマンスが良いとされた場合には、既存のプログラムがその他の機器の信頼性及びアベイラビリティを適切に管理していない。その場合、新しいプログラムが必要かもしれないが、当該機器を対象にしたものであるべきでない。
- PM の観点からは、この故障モードは「クリティカル（非常に重要）」であり、予想出来るすべての故障を予防しようとすることが重要である。というのは、それらが発生した場合の影響がそれぞれ重大であるからである。従って、この機器に対する包括的な PM プログラムを採用すべきである。信頼性/アベイラビリティが良いか悪いかもしれないという事実は、「クリティカル（非常に重要）」の選択に影響を及ぼさない。

4. FV、RAW の両方がリスク重要度低の場合

- 基事象発生によるリスクの上昇は高くなく、それゆえ個々の故障防止の必要性に基づき追加プログラムの妥当性が認められることは困難である。
- この機器は CDF に大きく寄与していない。平均的なパフォーマンスは良いかもしれないし悪いかもしれないが、向上させる安全上のインセンティブはない。
- FV のリスク重要度の閾値に対する既存のマージンが十分確保されている場合、パフォーマンスの低下は問題とはならない。従って、FV のマージンを十分確保しなければならない。FV のマージンが十分でない場合、この機器あるいは他の機器のパフォーマンスを向上させるために既存プログラムを強化する必要があるかもしれない。
- PM の観点からは、この故障モードは、PM を実施する経済的な理由があるという場合を除いて、あるいは同故障モードが安全系統のトレインを機能喪失させるか、SSC が安全関連である場合を除いて、「run-to-failure (RTF：故障まで運転）」である可能性がある。この場合、FV マージンを監視する寛容なパフォーマンスクライテリアを設定し、ノンクリティカル（つまり簡単な）レベルの PM を使用する。良い又は悪い信頼性/アベイラビリティは、例えば、その他の機器に対する二次的な損傷又は事後保全コストが高くなる可能性など、PM を実施する経済的な理由が存在する場合を除いて、RTF の選択に影響を及ぼすべきではない。

1.4 信頼性とアベイラビリティとのバランスに関する見識

最も重要な説明は、テストの形でバランスを判定する式についてである。テストの目的は、SSC に対する PM を実施するために現在費やしている非アベイラビリティ状態を、現状の信頼性のパフォーマンスとの関係で評価することである。PM による非アベイラビリティとは、SSC の機能が要求されている間、つまり運転中の PM による非アベイラビリティである。これは非信頼性と 1 年当たりのアベイラブルでない時間との比較をするものである。しかしながら、テストは、バランスを変更する実際の活動の適用の検討以外の場で比較しようとするものではない。テストは PM において実現可能な変更（信頼性に影響を及ぼすもの）が提案された時にのみ適用出来る。

本セクションでは、PM による非アベイラビリティが増加することにより信頼性が向上する可能性のあるケースを紹介している。PM が増加するにつれて信頼性が劣化する、過剰な保全実施のケースは、後のセクションで取上げる。

1.4.1 バランステスト

テストは、信頼性を向上させるが非アベイラビリティも増加させる、提案された PM の変更に対して直接適用されるものである。

以下の時、現状のバランスは適切でない。

$$\text{PM による追加のアベイラブルでない時間} \; < \; 3500 \times \left| \text{信頼性の変化} \right|$$

あるいは、以下の場合適切でない。

$$3500 \times \left| \text{信頼性の変化} \right| > \text{PM による追加のアベイラブルでない時間}$$

- 上記テストを通過した場合、現状のアベイラビリティ及び信頼性は十分よくバランスしておらず、提案された変更は状況を改善することとなる。
- バランスの観点からすると、テストを通過した場合は、提案された変更を実施するため、PM を変更する価値がある。
- テストが不合格であった場合、提案された変更はバランスを向上させる効果的な方法ではない。最初の状況で既に十分にバランスが取れているか、バランスを向上させるより良いオプションが存在しているはずだからである。従って、バランスの観点からは変更の妥当性が示されていない。

「アベイラブルでない時間」とは、プラントが運転中に SSC に対して PM を実施するために費やされる時間を指す。ここで、SSC は供用状態から除外され規定の機能の提供が出来ない状態となっていると仮定している。

- PM による非アベイラビリティは H_{PM}/H_{Req} で定義される。ここで H_{PM} はプラントが運転中の PM に費やされる時間数で、H_{Req} は SSC の機能が必要とされる時間数である。
- H_{Req} は通常 1 年当たり 7000 時間である。これは 1 つの待機している安全に係わる SSC で稼働率 80%と仮定した値。バランステストでは H_{Req} としてこの値を仮定し、3500 の係数は 7000/2 から来ている。（係数 2 の根拠はセクション 3 で説明する。）

「信頼性」とは、（起動失敗、閉失敗のような）単一の信頼性故障モードが、SSC がランダムに発生するデマンドに対して機能を提供することを、阻む確率を指す。

- デマンドに対しての起動失敗とか閉失敗については、瞬時のもので、単純なデマンドに対する失敗確率を、そのまま使用すべきである。
- （24 時間の運転継続失敗など）信頼性に期間が関連する場合、故障率とミッション時間の積を確率として使用すべきである。例えば、（時間当たりの故障率）×（時間数）などの、整合性のある単位を使用すること。
- これらの確率は、単純に PSA に使用されている基事象の確率である。
- 1 つの故障モードのみが存在する場合、当該の単一モードについて計算のこと。

主要な結果とその適用

- 提案されている 1 つの PM により、当該機器に対して 2 つ以上の故障モードが改善される場合、個々の信頼性モードからの基事象について合算すること。
- 提案された 1 つの PM 変更による、各信頼性への寄与はすべて同じ比例関係で改善すると仮定することは通常妥当である。

非アベイラビリティにではなく、信頼性故障モードの和の中に、隠れた故障の寄与（$\lambda\tau/2$）を含めること。

- この項は、待機非信頼性に比例する部分であり、瞬時の故障確率を使用する代わりである。従って、この項は非アベイラビリティと考えられがちであるが、他の信頼性故障モードと合算されなければならない。

修理時間の結果としての非アベイラビリティの寄与は、真の非アベイラビリティである。しかしながら、これも又、他の信頼性故障モードに追加しなければならない。

- この理由は、修理による非アベイラビリティは、信頼性を変更するために実施したことではなく、単純に非信頼性の結果であるからである。
- 修理による非アベイラビリティは H_{repair}/H_{Req} で定義される。ここで H_{repair} は、プラント運転中に修理に費やされる時間数である。
- PSA では通常、修理時間の基事象を明示的には含めていない。PM による非アベイラビリティに修理時間が含まれている場合は、機能故障に対する真の修理時間は、PSA に少ししか寄与しないため、通常分離する意味はない。

リスク重要性を明示的にバランステストの中に取り込むには、テストの式の信頼性の側の各寄与に対する変更に以下の係数を掛ける: $(RAW_{rel} - 1)/(RAW_a - 1)$ 。

- ここで RAW_{rel} は信頼性故障モードの RAW 値、RAW_a は PM による非アベイラビリティの RAW 値である。

信頼性の向上は、提案された PM の変更により排除されることが期待されている、過去の期間にわたるいくらかの特定の故障を考慮することで推定出来る。

- 保守規則の a(1)条項下で管理されている SSC の状況を考えると、故障が通常少数存在しており、追加の PM が実施された場合、再発を防止出来るということが主張されているからである。

1.4.2 バランステストの適用

以下では、バランスクライテリアの使用方法についての一例を示し、PM の変更による信頼性への影響を評価するためのガイダンスを提供している。

- 同じ一般クラスの 10 台の 480V の待機状態の電動機のうち 2 台を考える。各電動機はプラントで同様に適用されている。これら 2 台の電動機は保守規則 10CFR50.65 の a(1)の下で管理されている。というのは、この 2 台は過去 2 年間に 2 回の起動失敗を経験しているからである。

- プラントは運転開始後 24 年経っている。それぞれの電動機は毎年 6 回テストされている（4 回のサーベイランス試験及び 2 回の運転試験）。過去には何らの失敗もなかった。
- 3 ヶ月に 1 回の追加の状態監視により、将来同様の故障が起きる可能性を効果的に排除出来ることが提案されたが、タスクは機器の供用中に実施することは出来ず、タスクが実施されるたびに 2 時間の非アベイラビリティが必要となる。

まず、信頼性の変化は、過去の $10 \times 24 \times 6$ 回の起動の試みにおいて発生した単一故障モードの 2 つの故障を排除することと仮定する。

- 起動失敗の確率における変化は、$-2/(10 \times 24 \times 6) = -0.0014$。この値は各電動機に適用される。
- 各電動機のアベイラブルでない時間の変化は、1 年当たり 8 時間の増加となる。信頼性の変化の絶対値を使用すると、テストは以下のようになる。

次の時、現状のバランスは適切でない: $8 < 0.0014 \times 3500$

- 右辺の値は 4.9 となり、テストの式を満足しない。従って、現状のアベイラビリティ及び信頼性は、既に十分バランスが取れており、提案された変更は状況を改善しないか、バランスしていないが、提案された変更は、状況を改善する最も効果的な方法ではない。提案された変更は、バランスのみに基づいて実施されるべきでない。

信頼性の変化を推定する代替のアプローチとしては、プラントでの故障経験と排除する 2 回の故障（PM で改善される分）とを比較してさらに一般的な故障率をもとに比例倍する方法がある。

- 同一の電動機のグループが過去 24 年間に 12 例の故障を起こし、最近の 2 例がその中に含まれると仮定する。さらに今までの起動失敗の確率は試みごとに 0.005 と別に与えられていると仮定する。
- 起動失敗の確率に関する変化は、現状の値の 2/12 の割合で、$2 \times 0.005/12 = 0.00083$ と推定出来る。
- テストは以下のようになる。

次の時、現状のバランスは適切でない: $8 < 0.00083 \times 3500$

- 右辺の値は 2.9 となり、再度テストの式を満足しない（マージンはいくらか大きくなった）。バランスのみを考慮した場合、依然として変更は出来ない。
- 2 つの結果が違う場合、どちらのアプローチを選択すべきだろうか。最初のアプローチは、既存の信頼性に言及せず、より限定された統計ベースを使用するため、おそらくより大きな誤差が出る。2 つ目のアプローチは、明示的に既存の信頼性及び故障総数の知識を使用している。
- 2 つの結果は約 2 倍の違いがある。バランスのクライテリアは、明らかにこのレベル又はそれ以上で示される統計上の不確実性を克服することは出来ない。
- PSA の定量化に責任のあるプラントの技術者は、プラントの PSA プラクティスと一貫性のあるさまざまな方法で ΔP_r を推定することが出来るだろう。

主要な結果とその適用

リスク重要度及びその他の基事象を考慮するとどのような効果があるか。

- 既に含まれている非アベイラビリティの基事象及び起動失敗の基事象は、ほとんどの場合同じ RAW 値となるだろう。これらの事象のみが考慮すべき事象である場合、$(RAW_{fail\ to\ start} - 1)$が$(RAW_{PM} - 1)$を消去し、結果は変わらない。
- しかし、電動機には「24 時間の運転継続失敗」の基事象が存在し、長期炉心冷却において重要な役割があると仮定する。$RAW_{24} = 6.8$と仮定し、一方でその他の 2 つの RAW 値がそれぞれ 2.1 であると仮定する。
- さらに、運転継続失敗事象も（最も可能性が高いことから）、起動失敗事象と同じ程度に改善された PM の影響を受けると仮定する。
- 運転継続失敗事象の初期値が 0.002 の場合、その変化は（2 つ目の方法を使用して）$0.002 \times 2/12$ となり、テストは以下のようになる。

  以下の時、現状はバランスしていない:

  $$8 < ((2.1 - 1)/(2.1 - 1) \times 8.3 \times 10^{-4} + (6.8 - 1)/(2.1 - 1) \times 3.3 \times 10^{-4}) \times 3500$$

- 右辺の値は 9.0 となる。起動失敗の確率の変化を推定するのに最初の方法を使用した場合、値はより大きくなるだろう。今度は（マージンは大きくないが）テストの式を満足し、信頼性を向上させる変更の妥当性を示している。
- この結果から、CDF の変化の影響を十分に考慮すると、追加のリスク重要度高である運転継続失敗モードは、以前は妥当性が明確に示されていなかった提案された変化の妥当性をかろうじて示すことが分かる。より完全なテストでは、このケースにおいては大きなアベイラビリティの代償を払う必要があっても、信頼性においてはそれ以上の安全上の割り増しを設けることが確認されている。
- 運転継続失敗モードを含めても、リスク重要度が高いことを考慮しなかったならば、提案された変化の妥当性を示さなかっただろう。

1.5 パフォーマンスクライテリアの設定

通常、単一の SSC の信頼性を、1 運転サイクルの期間で監視することは不可能である。というのは故障率の正確な推定を提供するには、故障回数が少なすぎるからである。

- このことは、実際の機器の 1 運転サイクルにおける単一 SSC の故障確率又は故障率を、PSA で用いている値と比較するために、計測することは不可能であることを意味している。

この代わりに、最大の故障許容数を設定し、その故障回数が出現する確率をだいたい 1%から 10%のレンジとなるように、さらに追加の 1 回の失敗が出現する確率をずっと低くなるようにする。

- パフォーマンスクライテリアの多くがこのように設定されても、基礎となる故障率が顕著に増加していない時、予想される故障の偶然の発生間隔が短いことによる誤ったアラームは、ほぼ確実になくなるであろう。
- 誤ったアラームの許容範囲の%がより大きいと、保全の改善のプロセスを混乱させることとなる。一方で、誤ったアラームの許容範囲がより少ないとプロセスの管理が適切に行われない。

1.5.1 瞬時の故障

瞬時の故障とは、PSA にモデル化してある故障で起動失敗、開失敗、閉失敗等のことである。これらの確率は、直接、それぞれの事象の基事象の確率に同じである。

- 瞬時の故障は突然の故障経験であり、デマンドに対してのみ失敗が発生することから、デマンド数に比例する。さらに、瞬時の故障は時間経過とともに一定の比率で故障が増加する故障プロセスとはならない。
- デマンド n 回への対応失敗 r 回の確率 $Prob_n(r)$は、二項分布を持つ。ここで P は PSA において基事象の確率として使用されている故障確率に等しく、$n! = n(n-1)(n-2)(n-3)\cdots\times 2\times 1$ とする時、以下となる。

$$Prob_n(r) = P^r \cdot (1-P)^{(n-r)} \cdot n! / (r!(n-r)!)$$

- 0 回の失敗の確率は、$Prob_n(0) = (1-P)^n$、
- 1 回の失敗の確率は、$Prob_n(1) = nP(1-P)^{(n-1)}$、
- 2 回の失敗の確率は、$Prob_n(2) = (n(n-1)/2) \cdot P^2 \cdot (1-P)^{(n-2)}$、などとなる。

1.5.2 時間故障率

これらは、運転継続失敗率を使用した運転継続の失敗であるが、待機時故障率を使用した待機時の故障のこともある。これらのプロセスは、PSA 中の基事象確率（故障率に比例）に、ミッション時間を掛けたものである。

主要な結果とその適用

- 時間故障率とは、一定の単位時間当たりの率で発生する故障のことを言う。ミッション時間 T に比例して故障を発生させる。故障回数は、デマンド数に依存しない。

継続的に運転している機器のミッション時間 T は、継続運転に必要な時間に等しい。

- 時間 T における r 回の故障確率 $Prob_T(r)$は、ポアッソン分布で与えられる。ここで λ は故障率に等しく、r! = r(r − 1)(r − 2)(r − 3)⋯ × 2 × 1 とする時、以下となる。

$$Prob_T(r) = e^{-\lambda T} \times (\lambda T)^r / r!$$

- $Prob_T(0) = e^{-\lambda T}$
- $Prob_T(1) = \lambda T e^{-\lambda T}$
- $Prob_T(2) = (\lambda T)^2 e^{-\lambda T} / 2$
- $Prob_T(3) = (\lambda T)^3 e^{-\lambda T} / 6$、などとなる。

- T は SSC の機能が要求される時間である。基本的に、継続的に運転している SSC では保守規則の運転サイクルの期間を言う。部分的にしか運転していない SSC の場合は運転サイクル時間の一部である。

待機時故障率でモデル化されている待機機器も同じ数式を使用し、ミッション時間は保守規則の監視期間に等しい。

- このミッション時間は、λτ/2 として基事象の確率を定量化する PSA で使用されている、テストとテストの間の時間 τ と大きく異なる。

1.5.3 迅速な起動要求を持ち、運転と待機が切り替わる場合

起動失敗と運転継続失敗を組み合わせて、単一のパフォーマンスクライテリアにする。

- 組み合わせた予想故障回数は、待機期間中に予想される回数と運転期間中に予想される回数を合わせた数である。
- 待機期間中に予想される故障回数は、待機時故障率に待機期間を掛けたもの、あるいはその期間におけるデマンド回数にデマンドへの対応失敗確率を掛けたものである。
- 運転期間中の予想故障回数は、運転継続失敗率に運転期間を掛けたものである。
- 前記のポアッソン分布の数式の λT にこの合計の予想故障回数を使用する。

2
リスク重要度の意味と使用

2.1 はじめに

リスク重要度の意味と使用に関する業務上の知識は、原子力発電所の幅広い技術者にとって重要になってきている。産業界と NRC は現在、規制を合理化し、プラントリソースをより効果的に管理するために、いくつかのイニシアティブでリスク重要度の概念を使用している。これらの適用により、プラント技術者及び規制当局にはリスク重要度についてかなりの理解が必要とされるだろう。

本セクションでは、保全上の規制として使用している 2 つの最も一般的なリスク重要度の概念の包括的な説明を提供する。EPRI TR-105396 [4]における NRC のコメントでは、リスク重要度指標とその適用についてのさらなる説明及び議論の必要性が指摘されている。

産業界で使用されているリスク重要度指標は、お互いに関連し、CDF にも直接関連している。この関連について理解するために、簡単な形式が導入された。それは、CDF が関連する個々の基事象の確率に対し線形の関数を持つことに起因している。

2.2 炉心損傷頻度

PSA への基本的な情報は、ポンプの起動失敗、ディーゼル発電機の仮定されたミッション時間に対する運転継続失敗（例えば、1 又は 5 日）、電気ブレーカーの閉失敗、及び弁の位置変更失敗などのような、ある種の事象の失敗の確率であることから、「基事象」と呼ばれる。さらに、機器がさまざまな理由により、アベイラブルでない（運転出来ない）確率のこともある。失敗の確率、非アベイラビリティ、及び非信頼性の間の区別は、基事象がこれらの特性のいずれかあるいはすべてを含むことが出来、さらにリスク重要度の説明は、これらの区別なしに適用することが出来ることから、本セクションの大部分では省略されている。基事象間の区別が必要な場合は、「信頼性の基事象」又は「アベイラビリティの基事象」と呼ばれる。従って本セクションでは、「基事象」という語は一般的に非信頼性又は非アベイラビリティを表すために使用する。

PSA の定量化コンピュータコードは、炉心損傷に至る基事象の組み合わせを見つける。それぞれの組み合わせは、（例えば、特定のタンク、ポンプ、及び熱交換器の同時故障など）炉心損傷が発生する 1 つのパスを示している。炉心損傷に至る機器の基事象の組み合わせを「事故シーケンス」と呼ぶ。PSA コンピュータコードにより、何千もの事故シーケンスが発見される。

CDF を決定するために、モデルにおいて個別の事故シーケンスの確率を合算する。

CDF = シーケンス 1 の確率 + シーケンス 2 の確率 + シーケンス 3 の確率 + …

どのシーケンスも炉心損傷に至る可能性のある個々の機器の事象の同時発生から構成されるため、シーケンスの確率は、基事象の確率の積として求められる。典型的なシーケンスは、LOSP × DGA.M × DGB.FR（つまり、外部電源喪失にディーゼル発電機 A の保全中であることと、ディーゼル発電機 B の運転継続失敗の重量）かもしれない。あるいは、別のシーケンスでは PUMPH1.FS × CHKVLVF7.FC を含むかもしれない（つまり、ポンプ H1 の起動失敗と、逆止弁 F7 の閉失敗の重量）。基事象 x における基事象の確率を、P_x あるいはもっとシンプルに P とする。

通常、何千もの事故シーケンスが CDF に寄与するが、それらには数百の機器のみが現れる。同じ機器は異なる組み合わせで再度現れる。シーケンスの確率は、1 よりはるかに小さい個々の基事象の確率の積であるため、積の値はすぐに非常に小さくなる。従って、約 2 から 5 つの機器を含むシーケンスのみが、計算に留めておくことが出来る、十分に大きい確率を持つ。

1 つの機器が 1 つのシーケンスに現れる時、（同様のタイプ 1 つだけではなく）同じ機器が、何十、何百もの他の事故シーケンスに再び現れる可能性がある。従って、1 つずつシーケンスを見るだけでは、機器の役割についての全体は理解出来ない。特定の機器の役割を計測するには、その機器が現れるすべてのシーケンスをレビューすることになる。

CDF は、どの基事象に対しても線形関数となる。特定の事象は決して個々のシーケンスに 1 度以上現れないので、CDF には P_x^2 又は P_x^3 を含むシーケンスはない。より明確に示すと、ある特定の機器の基事象に焦点を当て、その機器が現れるすべてのシーケンスをグループ化することは有益である。そうすると、CDF は例えば PUMPH1.FS などを含むシーケンスの和とそれを含まないシーケンスの和を合わせたものとなる。それ以外の確率はない。例えば、以下と仮定する。

$$\begin{aligned}CDF = {} & PUMPH1.FS * MOVA1.FO + PUMPH1.FS * MOVA2.FO + \\ & PUMPH1.FS * HTXCHGRB + DGA.FS * DGC.UNAV + DGA.FS * DGD.UNAV + \ldots\end{aligned}$$

ここでは、最初の 3 つのシーケンスはその他の事象とともに PUMPH1.FS を含むが、その他のシーケンスは PUMPH1.FS を含まない。以下のようになるように、PUMPH1.FS の因数で括る。

$$CDF = a.\ PUMPH1.FS + b$$

パラメータ「a」は、PUMPH1.FS を含むすべてのシーケンスの和であるが、式において PUMPH1.FS を括り出した係数、つまり MOVA1.FO + MOVA2.FO + HTXCHGRB である。パラメータ「b」は残りすべてのシーケンスの和である（全く PUMPH1.FS を含まないもの、つまり DGA.FS * DGC.UNAV + DGA.FS * DGD.UNAV +…）。前出の例で異なる基事象に焦点を当てると、「a」と「b」のそれぞれの値は変わってくる。例えば、「ディーゼル発電機 A の起動失敗」に焦点を当てると、DGA.FS を含むすべてのシーケンスを集めることになる。

$$CDF = a'.DGA.FS + b'$$

a' = DGC.UNAV + DGD.UNAV +…となり、b'は PUMPH1.FS ＊ MOVA1.FO のような項の和である。

ある機器の基事象のベースライン値を P_0 で示すと、CDF のベースライン値は $CDF_0 = a.P_0 + b$ で求められ、ここで「a」と「b」はその基事象固有のものである。いかなる基事象についても、CDF は常にこのコンパクトな式で表すことが出来る。すべての PSA モデルについて、この式は正しい[1]。この単純な線形の形は基本的にすべての適用の PSA において完全な精度で使用することが出来る。

P に対する CDF のグラフは、傾き「a」及び CDF 軸上の切片「b」の直線となる。CDF の特定のベースライン値 CDF_0 は、P のベースライン値として採用された、特定の値 P_0 に依存する。

$$CDF = aP + b \qquad \textbf{式2-1}$$

式 2-1 及び図 2-1 は、基事象の確率が 0 である時、CDF は「b」に等しくなる（当該機器に関係ないシーケンスの和）ことを示している。基事象の確率が 0 からベースライン値 P_0 に増加する時、CDF は aP_0 だけ増加してベースライン値である $aP_0 + b$ となる。基事象の確率がベースライン値 P_0 からその 2 倍の値（つまり、$2P_0$）に増加する時、CDF はさらに aP_0 の分だけ増加する。CDF の全体の変化量は、P が 0 から 1 に変化する時、「a」となり、P が 1 の場合の CDF の値は、a + b である。

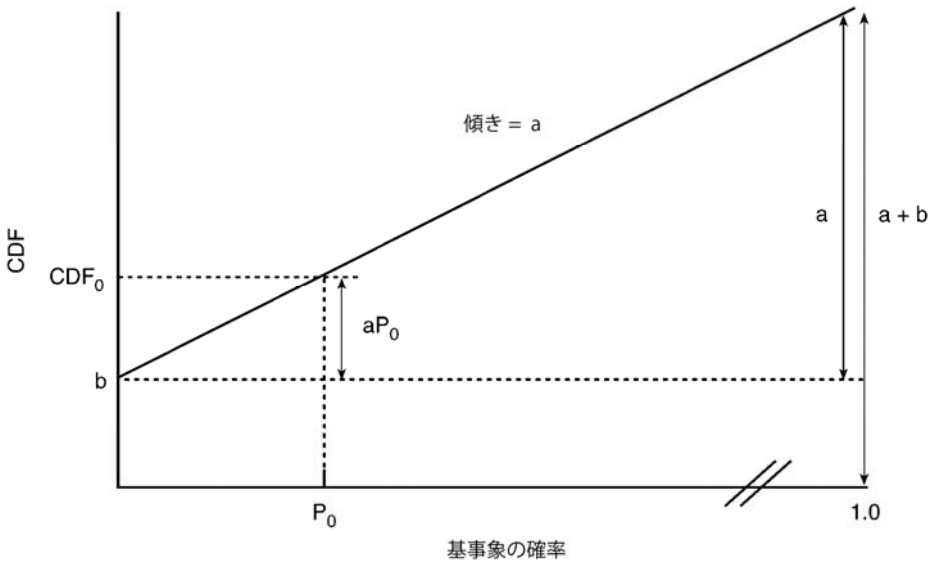

図 2-1
基事象の確率に対する CDF

[1] 稀に P^2 や P^3 の項を伴う、共通原因故障を定量化するための二項モデルが使用される PSA がある。この場合、線形の形は共通原因故障と分かっている特定の基事象に対しては妥当ではないが、モデルにおける他のすべての事象に対して正確である。

基事象の確率は、通常 P の実際的な値から 1 まで数桁変化するので、図 2-1 で示すグラフはログスケールでプロットされる可能性が高いことに注意すること。基事象の確率を示す曲線は線形でなくなり、右上がりの曲線になる。この曲線は、ログプロットが作り出したものであり、非線形が関係していることを意味するものはない。

リスク重要度のパラメータを検討する前に、1 つの SSC に対し、2 つ以上の基事象があることに注意すべきである。しかしながら、以降のセクションの 1 つの機器に対するリスク重要度の説明はこの複雑性に影響を受けない。なぜならば、1 つの機器に属する複数の基事象は同じ事故シーケンスに一緒に現れることは不可能であるからである（これらは相互排反する）。この状況は、単一の機器に対する複数の基事象を取上げる、セクション 2.7 でより詳しく検証する。本セクションでは、個別の機器間についてよりも、個別の基事象間の関連について示す。

2.3 ファッセルベズレイ（Fussell-Veseley）

2.3.1 定義

1 つの基事象に対する FV パラメータは、当該基事象が決して起きないとした時の CDF の減少の割合で定義される。すなわち、機器は当該の基事象に対して、完全に信頼性があり、決して故障したり供用から外れたりしない時のことを言う。これを数値で決定するために、基事象の確率はその他の考慮事項から切り離して 0 に設定される。この時、CDF は「b」に等しくなり、aP の分だけ減少する。FV は、aP/CDF に等しく、ベースライン CDF の比として表される。

$$FV = aP / CDF \qquad \text{式2-2}$$

この定義の概念上の問題は、P = 0 の機器は観察可能、又は実際に起きる可能性のある状況ではないということである。確かに、誰も完全に信頼性のある機器（原理的に完璧なもの）を設計、又は運転したことはない。ある機器は長期間にわたり、実際のところ故障が発生しないかもしれないが、これは経験的な結果であり最初から保証出来るものでない。従ってこの定義は、（確かに数学的には便利であるが）いくらかのあいまいさを伴う。

幸い、より実際的な解釈としては図 2-1 で示されている線形プロットについて言及するだけで良い。先に述べたように、今 CDF を aP だけ減少するのではなく増加させることを考えると、CDF での変化量 aP は、基事象の確率を P から 2P に増加させる時の CDF の変化分に同じである。機器の非信頼性又は非アベイラビリティが以前よりも大きくなることは珍しいことではない。P が 2P になると、機器はどの時間間隔においても 2 倍の故障を経験するか、以前よりも（平均で）半分の時間の運転で故障する。あるいは、基事象が非アベイラビリティについての場合、機器は 2 倍の長さの期間供用除外状態となる。これは、直感的に意味を理解することが出来るので便利な定義であり、一般的な経験の一部である。

FV は、当該の基事象の確率が 2 倍になった時の、CDF の増加の割合に等しい。

従って、機器のパフォーマンスが 2 倍劣化する時、FV を 1%とすると CDF は 1%増加する。ほとんどの機器にとって、FV 値は数パーセント以下であるが、リスク重要度が非常に高い機器はもっと大きな FV 値となる可能性がある。（例えば、一部の 1 系統のトレインのみを持つ BWR HPCI 系統の場合では、FV 値が約 20%となる。）これは、与えられた一定の期間において SSC のベースライン故障値で予期された値の 2 倍の数の故障を起こすことが分かった時に、CDF が 20%増加したことを意味する。

2.3.2 バーンバウム重要度

係数「a」はどのように解釈したら良いか。セクション 2.2 では、「a」は当該事象に係わるすべての事故シーケンスの確率の和であって、基事象の確率 P で括り出した係数であると示された。足し算の式の中に残る各シーケンスの部分は、炉心損傷を発生させるために対象事象の故障とともに発生する必要のあるその他の故障である。つまり、「a」は当該の基事象に対する深層防護の有効性の総合的指標である。a が大きな値をとる時、深層防護の要素が大きな故障確率を持ち、有効性がさほど高くないことを意味する。a が小さな値をとる時、深層防護の要素が小さな故障確率を持ち、効果的となること、つまり、機能の冗長性のレベルが高いということを意味する。この説明が完了するには、後 1 つ説明が必要である。

典型的な事故シーケンスには、起因故障、又は外部起因事象が含まれる。機器の故障が起因事象でない場合、「a」はこれらのシーケンスに関連する起因事象の程度を示した要素を含む。
結果として、

> 「a」は、当該機器の基事象が対応すべきプラント全体に対しての統合的な機能発揮の要求を示す値であり、これには起因事象の強さ、及び深層防護の要素の程度を含む。

パラメータ「a」は、CDF と基事象の確率の直線の傾きに対応している。P の変化に対する CDF の変化の感度を示す。比 a/CDF は、「バーンバウム重要度指標」として知られている。

2.3.3 FV と信頼性

FV は、2 つの量「a」と P の積に比例するため、2 つの機器は同じ FV 値でありながら、全く異なる基事象の確率を持つ可能性がある。P が大きいと、「a」の値はより小さくなる。このため、FV によるリスク重要度は、悪いパフォーマンスだけでは特定することが出来ない。

信頼性又はアベイラビリティの高い機器（つまり、基事象の確率が低い機器）は、かなり効果的な深層防護を備えている場合で、非常に高い起因事象頻度に直面しない場合、FV 値が小さくなる。これらの条件を満足しない場合、信頼性が非常に高い機器でもリスク重要度高となる可能性がある。

信頼性又はアベイラビリティの低い機器（つまり、基事象の確率が高い機器）でも、かなり効果的な深層防護を備え、非常に高い起因事象頻度に過度に直面しない場合、FV 値が小さくなるかもしれない。これらの条件を満足しない場合、信頼性が非常に高い機器でもリスク重要度高となる可能性がある。

FV 値が大きいか小さいかは、一般的に 0.005 とされる産業界の標準的な閾値と比較して判断する。閾値よりも高い値は、リスク重要度が高であると言う。

リスク重要度が高である FV 値を持つからと言って、必ずしもその機器がパフォーマンス向上の対象となるわけではない。なぜなら、FV は「a」と同時に P にも依存するからである。改善が必要な場合、SSC のパフォーマンスが既に満足出来るものであれば、機能発揮への要求数を減らすため又は防護を追加するための設計構成の変更（つまり、「a」の変更）を、より効果的でより簡単に達成出来ることがある。にもかかわらず、

SSC のパフォーマンス向上により、常に FV 値は比例して減少し、同時に CDF が減少する。

FV が最初十分に小さい場合、CDF に大きな影響を与えずに、さらに SSC がリスク重要度高になる前に、SSC のパフォーマンスが大きく劣化する可能性がある。信頼性又はアベイラビリティに影響を与える可能性のある現状のプログラムの中止又は縮小の妥当性を示すために小さい FV 値を使用する際には注意が必要である。閾値に対するマージンが十分ある場合を除いて、プログラムの変更により FV が増加しリスク重要度高になることがある。

2.3.4 故障の平均的影響としての FV

基本的事象の確率がベースライン値から 1 まで変化する時、図 2-1 では、CDF が(a-aP)だけ変化することを示している。P は、すべての機器の基事象について、1 に比べ小さな数字であることから、値「a」（a-aP というよりも a)は、CDF に対する機器の故障あるいは供用除外の影響を近似的に示していると言える。このように、機器の基事象について、

$$FV = a / CDF \cdot P$$

又は、

FV は、基事象が起きてしまった時の CDF の増加の割合に、同事象の確率を掛けたものである。FV は、故障の結果の影響と故障の確率の両方を考慮している。

この定義は、FV パラメータの正しい使用方法を理解する上で非常に重要である。右辺で、機器の故障の結果又は供用除外とされることの結果としての影響が、事象の確率により低減されている。その量はその確率で重み付けされているということで、平均としての性格が示されている。従って、基事象の FV は、CDF に対する故障又は供用除外の事象の平均的な影響結果、すなわち、基事象は時々しか発生しないことを考慮した影響結果に等しい。

このことは、後に RAW の意味と対比される。RAW は、事象の結果のみを表しており、事象の継続期間に限られ、さらに事象発生の確率は考慮しない。

2.3.5 ベースライン CDF への寄与としての FV

FV は、又、ベースライン CDF（CDF_0）（図 2-1 参照）に対する基事象の寄与の割合を示している。「b」は機器の故障確率が 0 であるとした時の CDF の値である。実際の故障確率は 0 ではないことから、これにさらに aP_0 だけ足した値が実際のベースラインの CDF_0 となる。通常、FV は小さな数であることから、ベースライン CDF への 1 つの基事象の寄与は、ほとんどいつも小さなものである。

個々の基事象の確率が CDF に大きな影響を及ぼすのは、通常 1 ないし 2 桁増加した場合である。このことは、式 2-2 の定義における分母が、パフォーマンスの変化（すなわち P の変化）に対し、大きな変化をするようなことはなく、上述のように FV はほとんど正確に P に比例することを意味している。FV が P に正確に比例するという仮定は、実際のところ保守的である。というのは、P が増加するにつれて、最終的な線形からの逸脱は、線形のケースより小さい FV の増加量となるからである。

2.3.6 CDF へのパフォーマンス変化の影響

CDF は P に対して線形となるため、新たな P の値での CDF 値を計算することは容易である（つまり、機器のパフォーマンスが変化する場合である）。これは次のようないくつかのシナリオにおいて便利である。1) PSA のデータベースの変更による CDF への影響をチェックする時、2) CDF に対する機器の計測されたパフォーマンスの影響をベースライン PSA と比較する時、及び 3) パフォーマンスクライテリアとベースライン CDF の適合性をチェックする時。式 2-3 では、ΔCDF と ΔP は、新しい値から古い値を引いたものであり（つまり $\Delta P = P_{new} - P_{old}$）、P、FV、CDF は古い値である。古い値は通常ベースライン値である。

$$\Delta CDF / CDF = FV \cdot \Delta P / P \qquad \text{式2-3}$$

又は、 CDF の変化（%）= FV × P の変化（%）

この式は、CDF は P が 0 から 1 のレンジ全体において正確に線形になるため、小さい変化又は大きな変化に対して正確である。この式の実際的な価値は、機器のパフォーマンスの変化の影響について知りたい時に毎回 PSA コードを実施しなくても良いということである。

FV はさらに、すべての基事象において同時に発生する CDF の小さな変化の影響を推定するのに使用しても良い。この推定は、すべての基事象に対して同時に発生する一般的な劣化又は向上の安全重要度を示している。CDF はそれぞれ P_i で示されるすべての基事象の関数のため、どの事象のどんな小さな変化も以下のように CDF の変化に関連している。

$$\Delta CDF = dCDF / dP_i \cdot \Delta P_i + dCDF / dP_j \cdot \Delta P_j + \ldots \text{(シーケンスでなく)すべての基事象}$$
$$= a_i \cdot \Delta Pi + a_j \cdot \Delta P_j + \ldots$$

すべての基事象の変化の割合を各基事象の確率に単純に比例するようにすべて同じに設定すると、つまり $\Delta P_i = gP_i$ で g が 20%未満の比とすると、

$$\Delta CDF / CDF = a_i \cdot gP_i / CDF + a_j \cdot gP_j / CDF + \ldots \text{すべての基事象}$$
$$= g\left(FV_i + FV_j + \ldots\right) \qquad \text{式2-4}$$

g の分だけパフォーマンスが一般的に向上又は劣化した時、すべての基事象におけるすべての FV 値の和に比 g を掛けると CDF の変化率が求められる。論理的には[2]、すべての基事象の FV 値の合計は、どの PSA においても、それぞれの PSA に応じて 2 から 5 のレンジ内であるべきである。この結果は、すべての基事象が同時に 10%一般的に向上又は劣化すると、CDF が約 20 から 50%変化することを意味する。20%を超える変化に対してこの法則を適用しないこと。

この結果は、変化（g）が適度に小さい場合、当てはまる。この結果は、FV 値のすべてが小さいこと又は切捨ての仮定に依存しない。この結果は、どのプラントの CDF もすべての基事象の確率に対する小から中規模の同時的な変化にわずかに感度があるということを示している。

すべての基事象の確率におけるあらゆる程度の変化が CDF に及ぼす影響を正確に計算するための代替アプローチについては、式 2-58 も参照のこと。

2.3.7 FV のリスク低減価値（RRW）との関係

RRW は FV パラメータと同じ概念を計測するが、違う形で表現するものである。RRW も、基事象が発生しない時の CDF の変化であるが、CDF の割合ではなく CDF が変化する倍率（>1）として表される。

$$RRW = CDF / CDF\left(P = 0 \text{のとき}\right)$$
$$= 1/\left(1 - FV\right) \qquad \text{式2-5}$$

FV が<0.1 の時はいつでも（これはほとんどの機器について当てはまるが）、RRW は 1 + FV により、近似される。FV の 1%は、RRW の 1.01 に等しい。このように定義すると、すべての RRW 値は>1.0 となる。いくつかの電力会社では、RRW を上記の定義の逆数としているところもある。この場合、すべての RRW 値は 1 未満となり、1%である FV は 0.99 の RRW と等しくなる。

FV の大きさに係わらず、いかなる決定プロセスにおいても FV に加えて RRW を考慮する意味はない。両者は同じ概念を示すものである。

[2] これは次数 n の各事故シーケンスはすべての基事象における FV の和において n 回寄与し、ほとんどの PSA の CDF の大部分は、第 3、第 4、又は第 5 次数のシーケンスから生じることの結果である。例えば、CDF が第 4 次数のシーケンスのみで構成されているとしたら、$\sum_{\text{all basic events}} FV_j = 4 \times CDF$ となる。

2.3.8 FV の適用

FV は、CDF に対する故障及び非アベイラビリティの平均的な影響を示しているので、FV は長期間にわたる CDF への平均的な寄与に基づいて機器を正しく評価し、ランク付けする。これは、FV が故障あるいは供用除外状態の機器が及ぼす CDF への影響を含むためであり、又これには発生する故障又は供用除外状態の確率での重み付けが考慮されているからである。さらに FV は停止の結果を、停止の頻度及び期間で重み付けする。

FV を使用するのは、特定の機器故障例又は非アベイラビリティのエピソード例に対しての検討の場合ではなく、問題のない運転の代表的な期間や代表的な故障及び保全や修理に関する停止をいくつか含めた、長期間にわたる平均的なパフォーマンスに焦点を当てた検討の場合である。FV は、重要な安全機能の達成要求及び深層防護を組み合わせ、平均的なリスクの観点から機器のパフォーマンスの重要性を示す唯一の指標である。機器単独でパフォーマンスをランク付けするためでなく、このような文脈で全体的なパフォーマンス計測が関係する場合はいつでも FV を使用すること。

FV は、以下を実施するための唯一のリスク重要度指標であると考えられる。

- CDF に対する基事象の確率の変化の影響を計算すること
- CDF に対する寄与の割合により、事象を計測及びランク付けすること
- 事象が及ぼす長期間にわたる CDF への平均的な影響により、事象を計測及びランク付けすること

FV は、一般的に以下を実施するために便利なリスク重要度指標である。

- 多くの機器に適用されている、PM、供用期間中テスト、又は QA などのパフォーマンスを変更するすべてのプラントプログラムの全体的な有効性、進捗、及び傾向を計測及びランク付けすること

FV は、以下のために使用すべきでない。

- 機器の平均的な信頼性又はアベイラビリティをランク付けすること
- 特定の故障事象又は供用除外状態がリスクに対して個別に重要であると判断すること
- ある 1 つの故障又は供用除外状態を緩和するために措置を取るべきかを判断すること
- ある 1 つの故障又は供用除外状態を緩和するためにどのような措置を取るべきかを判断すること
- ある 1 つの供用除外状態の期間を制限すべきか、及びどのくらいの期間に制限すべきかを判断すること

FV の適用については、セクション 2.5 及び 2.5.1 でさらに記述する。

2.4 リスク増加価値（RAW）

2.4.1 定義

RAW はリスク重要度の 2 番目の指標である。標準的な定義は以下である。RAW は、基事象が確実に発生した時の CDF の増加倍率である。これは、基事象の確率を 1 に設定し、新しい CDF を計算することを意味している。基事象が機器の非アベイラビリティを指す場合、機器は供用除外状態である。基事象が機器の非信頼性を指す場合、機器はそのモードで故障していることが分かっている。信頼性の基事象に関する RAW の意味のさらなる議論は、セクション 2.7「単一の機器の複数の基事象」で取上げる。

SSC がどのように機能を果たすことを失敗するかにかかわらず、RAW は P = 1 の条件が適用される間の CDF の変化を計測する。結果として実際、RAW はある種の非アベイラビリティを示す。RAW はしばしば SSC が PM により供用除外状態である期間に関連付けたものとして示されるが、1) 故障は発見されないが機器は故障した状態となっている隠れた非アベイラビリティ、又は 2) 機器が修理されている間の非アベイラビリティにも適用することが出来る。基事象が瞬時の信頼性事象である場合（起動失敗など）、P = 1 の条件は、機器が修理されるまでの機器のアベイラブルでない状態に等しい。RAW の定義には FV に存在していたような概念的な問題はない。完全に信頼性のある機器を想像することは出来なかったが、ある期間において完全にアベイラブルでない機器を想像することは簡単である。

CDF は 1 年当たりの事象頻度であるため、CDF はただ単に、炉心損傷事象が発生すると予想される期間における瞬時の率である。

> RAW は、機器が故障している、又は供用除外状態の間の、瞬時の CDF の増加倍率を示す係数である。
>
> 機器が故障している、又は供用除外状態の間、新しい CDF の値は $CDF = RAW \times CDF_{Baseline}$ となる。

機器が供用状態に戻ると、CDF はベースライン値に戻る。RAW は、FV で発見されたように代替となる同等の解釈はない。RAW は、FV のような、機器が機能を果たすのに成功及び失敗する期間を考慮した、機器の時間平均を示す特性は表現していない。

これに対し、RAW の意味及び適用性は、条件 P = 1 の場合に限定され、ゆえに機器が機能を果たすことを出来ない期間に限定される。このポイントは、RAW パラメータの有効な適用を理解する上で非常に重要である。RAW は、故障又は供用除外状態の機器の重要性を示すものである。RAW は、その状態が発生する可能性や P = 1 が継続する期間を考慮していない。

同じ解釈は、共通原因故障の基事象に対する RAW にも適用される。

2.4.2 パフォーマンスから独立している RAW

図 2-1 で示すように、又式 2-1 に P = 1 を代入すると以下のようになる。

$$\begin{aligned} RAW &= (a + b)/CDF \\ &= (a + b)/(aP + b) \end{aligned}$$ 式2-6

FV の定義における分母について述べたように、RAW 値は、P の値に対して感度はない。これは、aP が CDF に対して小さい割合のためである（つまり、FV は通常小さい数字である）。実際、基事象の確率の値の非常に大きな変化に係わらず、RAW はほとんど一定である。

従って、信頼性又はアベイラビリティの向上により、基事象の確率を改善することは、RAW 値に対しては影響を及ぼさない。パフォーマンスの劣化も、P が数桁劣化するまでは影響を及ぼさない。そのような場合でも、分母が最終的に増加することになるので、実際のところ劣化していくパフォーマンスは RAW 値を低下させる。

RAW が SSC のパフォーマンスに対して感度がないことは、SSC の平均的なパフォーマンスの変化によっても RAW が変わらないという数値的な証拠で示される。信頼性及びアベイラビリティは、非常に広いレンジの値を取ることが出来るが、RAW はそれらの値の影響について何も示さない。従って、平均的なパフォーマンスを基に SSC の優先順位を付ける際に、RAW を考慮する必要はない。さらに、RAW を含めることは、平均的なリスクに対する SSC の重要度について誤った優先順位及び結論をもたらす可能性がある。

機器の RAW が元々リスク重要度高でない場合、機器のパフォーマンス劣化により同機器の RAW がリスク重要度高になることは決してない。

2.4.3 RAW と FV のスケールの違い

RAW のスケールは、FV のスケールとかなり異なる。図 2-1 では、RAW は a+b に比例することが示されている（つまり、P が 1 になるにつれて変化する CDF[ほぼ a]に、ベースライン CDF の値[基本的に「b」に等しい]を加えたものである）。これは機器故障率を足し算する効果を超え（これにはもともとの CDF も含まれる）、さらに FV での場合のように故障の確率による緩和効果を持つ乗算もない。従って、同等の重要度の RAW 値は、約 2、3 桁 FV 値よりも大きい（つまり、0.005 に対して 2）。

2.4.4 RAW と P の誤った関係

P の値がより小さい、信頼性のある基事象は、基事象の確率が 1（基本的に、1/P の比の増加）に増加する時、CDF が増加する可能性がより高くなることを指摘する人もいる。従って、これらの機器はより大きな RAW 値となる可能性があるのではないか、と。最初の P 値が小さいことは、CDF に大きな影響を及ぼすということを意味する。しかし、大きく増加するのは、小さい項 aP（P がより小さいと、もともと小さい）のみであり、a+b の値ではない。

しかしながら機器の基事象の RAW 値は P に感度がないことが分かっているので、前記のような相関は誤りであり、RAW と「a」との間の相関でなければならない。この理由は、もしこのような相関が存在する場合、深層防護及び安全機能への要求に対する設計者の認識によるものと予想出来る。機器の信頼性がより低い（大きな P）時、設計者はより効果的な深層防護（より小さい「a」）で埋め合わせ、又その逆も同じである。aP よりもずっと大きい「b」を加えることにより、さらに相関が弱くなる。実際、PSA データの綿密な調査からこのような弱い相関しかないことが分かっている（FV と RAW の相関については、2.5 を参照のこと）。

2.4.5 RAW と信頼性

P が RAW に影響を及ぼさないとすると、RAW の大小は何によって決まるのか。基本定義である RAW = (a + b) / (aP + b) では、「a」が著しく「b」よりも小さい場合、RAW は非常に 1 に近くなる。「a」が「b」に等しい場合、RAW は基本的に 2 となる。「a」が「b」よりもずっと大きいと、RAW は約 a/b と等しくなり、大きな値になる。これは、RAW が「a」と「b」の相対値に決定的に依存することを意味している。大きい（又は小さい）「a」とは、「a」が「b」に対して大きい（又は小さい）ということである。別の言葉でいうと、CDF に関連して a が大きい（又は小さい）ということである。「a」の値は、基事象に対する機能発揮要求及び深層防護の失敗の組み合わせが、他のすべてのシーケンスよりも CDF への寄与を大きく超過する時のみ、大きくなる。RAW は、機能発揮の要求と深層防護の組み合わせがちょうど他のすべてのシーケンスの寄与と等しくなる時、一般的に使用されている閾値 2 の近辺となる。従って、RAW はプラント設計及び個別の構成の詳細に強く依存するが、当該機器の信頼性又は非アベイラビリティには依存しない。

「a」が大きい場合（つまり RAW が大きい場合）、当該機器そのものは、有効な深層防護が弱いか、安全機能発揮の要求が非常に強いため、重要な防護に役立つ要素である。このパラメータ「a」の深層防護と安全機能発揮の要求の頻度の組み合わせは、機器の機能の重要性とを示すものとしての RAW の意味の重要性を示している。RAW には、供用除外状態のリスクの結果だけでなく、機器の防護機能としての必要性の頻度のリスクの結果も含まれている。これを、機器の機能の重要性（「a」）及び（防護）機能を提供することが出来る確率（P）に比例する FV の意味と比較すること。

2.4.6 RAW の適用

機器の供用除外状態又は故障状態にある間の瞬時のリスクが重要である時、RAW 値を使用しなければならない。瞬時の CDF の新しい値は、RAW × CDF であり、供用除外状態の継続期間は関係しない。今まで見てきたように、RAW により一時的な CDF が大きくなりすぎる場合、機器の信頼性又は非アベイラビリティを向上させることにより RAW を減らすことは出来ない。それよりも、「a」を小さくするためには、構成変更が必要となる。通常問題となるのは、RAW が（大きい）値を取るとすると、特定の期間、機器の停止した結果としての CDF の新しい値が、許容されない場合もあり得る。この問題に対応するために、CDF が高すぎる期間を短くする。明らかに、新しいリスクが適用される時間及びリスクそのものを含む何らかの定量的パラメータが必要である。

CDF（供用除外状態の機器によりリスクが増加された場合 RAW × CDF）は 1 年当たりの炉心損傷確率、又は 1 年当たりの炉心損傷事象の予想数であるため、T 年間の任意の間隔における累積リスクは CDF × T（又は、リスクが増加された場合：RAW × CDF × T）に等しくなる。これを EPRI TR-105396 [4]では炉心損傷確率（CDP）と呼んでいる。従って CDP は無次元量である。実際の適用では通常期間 T を考慮するが、この値は 1 年よりもずっと短いため、T は 1 年に対する比として表される。

CDP は、特定の期間 T において、機器が供用除外状態にある間の累積リスク又は炉心損傷の確率である。CDP が許容するには大きすぎる場合、機器が供用除外状態である期間を短くし、CDP を減らさなければならない。RAW は、停止又はその他の非アベイラビリティ期間によるリスクへの寄与の程度に焦点を当てるために使用される。停止の発生は稀であるため、（平均的なリスクへの影響が非常に大きくなくても）これらの寄与は、非常に大きくなる可能性がある。RAW を主に適用するのは、平均的に不十分な信頼性又はアベイラビリティに基づいた機器の特定、定量化、又はランク付けのためではなく、供用から除外されている機器のリスクに関する決定においてである。

RAW の使用は、機器に対して（PM など）特別なプログラムを適用すべきかを判断する際にも適切である。常識や信頼性重視保全（RCM）では、機器の故障が極端に重要でない限り、故障が発生するのを防ぐために保全リソースを費やす価値はないとアドバイスしている。RAW は、少なくとも安全の観点から、故障が重要かどうかを正確に示すものである。しかしながら、RAW は機器が故障する頻度又は機器の供用除外状態の頻度及び期間については何も示していない。それゆえ、機器の信頼性又はアベイラビリティのパフォーマンスを評価又はランク付けする上では RAW だけでは意味がない。言い換えると、RAW はプログラムに対する機器の反応には対応しておらず、プログラムの推定される必要性にのみ対応している。

QA プログラムを使用すべきか又は供用期間中テストプログラムを適用すべきかについても同様の考慮事項が適用される。これらのプログラムの目的が故障を防ぎ、非アベイラビリティを制限することであるとすると、最初に答えるべきは、このような事象が発生するのを防ぐことがどれだけ重要かという定性的な課題である。RAW は、これらのプログラムを適用すべきかを考慮するための機器のランク付けに使用すべきである。

これらのプログラムや特性が平均的なリスク（CDF）に対してどのくらい定量的な影響を及ぼすか、あるいは及ぼしてきたかという質問は、FV を使用し、基事象自体の値を比較することにより計算しなければならない。

2.5 プログラムへの FV 及び RAW の適用

2.5.1 FV と RAW の相関

セクション 2.3.8 及び 2.4.6 では、FV 及び RAW それぞれの適用に関する情報を示し、意思決定におけるこれらのパラメータの基本的な使用についての重要性を強調した。FV と RAW の値が 1 つの機器の基事象に対して 2 つの相関した情報を表していることを考慮すると、さらに多くの見識を得ること

が出来る。新しいプラントプログラムの適用又は既存プログラムの変更又は維持をするかどうかを決定する時に、これらリスク重要度パラメータの相関を考慮しなければならない。

ある程度正確にこのトピックを取扱うために、リスク重要度の 2 つの閾値を基本形式に導入しなければならない。リスク重要度の閾値を、RAW については「n」、FV については「α」で表す。慣習として n = 2、α = 0.005 を使用している。これらの値はある程度任意に定めたものである。次の表で示した関連において、パラメータ「a」が出現するところは、実際は a/(1-a)の代替であるが、1 と比べて「a」が小さいので良い近似値となる。

「a」及び「b」を使用した式で P を得るために、FV と RAW に関する基本的な式 2-2 及び 2-6 から逆算し、「α」と「n」の制限を代入することにより、表 2-1 で示されている条件式が導き出される。[3]

表2-1
FV と RAW 間の相関に関する条件式

RAW のみがリスク重要度高の場合	**FV と RAW 両方がリスク重要度高の場合**
$P < \alpha b/a$ 及び $a/b > n - 1$	$P > \alpha b/a$ 及び $a/b > n - 1$
全くリスク重要度高でない場合	**FV のみがリスク重要高の場合**
$P < \alpha b/a$ 及び $a/b < n - 1$	$P > \alpha b/a$ 及び $a/b < n - 1$

これらの条件式から得られた以下の見識を使用する場合、相関には個々の基事象の確率が関係することに注意する。当該の基事象には PM 実施による非アベイラビリティ、起動失敗、運転継続失敗、又は開失敗などの状態、又はこれらを合わせたものからなる場合がある。当該機器に対する非アベイラビリティ及び非信頼性の各基事象と、それらのリスク重要度パラメータをすべて考慮した時のみ、それぞれ及び機器全体の優先順位の全体像が明らかになる。単一の機器に対する複数の基事象についての情報は、セクション 2.7 及びセクション 3 に示されている。

セクション 2.5.2 では、FV の閾値に対するマージンを、どれくらい保守的にしたいかや、現状の FV 閾値に組込まれている保守性の程度、基事象値における不確実性の影響（通常、少なくとも 3 倍）、及びリスク重要度パラメータそのものにおける結果としての不確実性に基づいて判断しなければならない。

FV の使用に関する以下の文において、最後に改訂した PSA のデータと現在の機器のパフォーマンスとの間の時間差の影響も考慮に入れるべきである。

[3] 保守規則では重要ではないが、複雑な問題が存在する。RAW 及び FV がリスク重要度高の場合、非常に大きい P 値（$P > X = [a - b(n - 1)]/na \sim 1/n$）は、RAW 値を抑制し、FV のみ重要となる。これは、通常の値である n = 2 において、特定の運転上の復旧措置に対しておそらくほとんど発生しないが、n がより大きな値に設定されていると（20 から 200 など）、これはおそらく系統レベルの事象と考えられるが、この閾値は $P > 5.10^{-3}$ に到達する可能性がある。RAW は感度を示さないとされている係数ではあるが、増加する P に対して最終的には減少する。しかし、RAW の重要度が喪失する P の値は通常大きすぎて実際はありえない。

2.5.2 機器の RAW がリスク重要度高、FV がリスク重要度低の場合

RAW がリスク重要度高であることから、機器が故障している、又は機器がアベイラブルでない時リスクの増加が大きいことを意味する。ゆえに、原則として、平均的なリスクを管理するために、信頼性及びアベイラビリティを管理するプラントプログラムを有することは重要である。RAW はパフォーマンスには関係しないため、優れたプログラムは、既に実施されているかもしれないし、効果的であるかもしれないしあるいは効果的でないかもしれない。

高い RAW 値は、又、特殊なケースとして、個々の機器が供用状態から外される場合の期間を限定する必要があるかもしれないことを意味する。これは、平均的なリスクを抑制するためではなく個別の事象における追加リスクを抑制するためである。

FV は閾値を超えていないので、この機器の平均的なパフォーマンスは CDF に大きく寄与していない。従って、個々の機器の停止の及ぼす影響は大きいので、既存プログラムにおいて効果的に信頼性/アベイラビリティ及び平均的なリスクを管理しなければならない。この結果、高い RAW 値であるからと言って、追加のプログラムの必要性を強く推進すべきでない。

さらに基事象の確率は、FV 閾値を n-1 で割った値よりも小さくなければならず、これは通常値を使用した時の $P<0.005$ であることを意味している。このことは、多くの基事象が優れたパフォーマンスを示しており（例えば、35 時間未満の非アベイラビリティ又は 200 回のデマンドごとに 1 回未満の故障）、パフォーマンス向上の明らかな必要性はない。しかしながら、この状況は、この一般的な値よりもずっと信頼性があるべきである機器のパフォーマンスの劣化に対する弁解として使用すべきでない。

RAW が大きな値でも、FV がリスク重要度の既存の閾値に対して十分なマージンが確保されている限り、パフォーマンスの低下によりこの状況は変わらないので、FV のマージンが確かに十分あることを確実にすることは重要である。FV のマージンが十分ないと、既存のプログラムにおいてマージンを増やして強化するか、パフォーマンスクライテリアを厳しくして、マージンを確保する必要性がある場合がある。これらのオプションは、バランスの要求事項に対しては難しいかもしれない。というのは、パフォーマンスは既に良い状態であるからである。

追加のプログラムは、パフォーマンスの劣化に対する FV のマージンを増やす必要性がある場合にのみ妥当性を示すことが出来るだろう。しかしながら機器は、FV では既にリスク重要度高ではなく、パフォーマンスも良いので、この場合は妥当性を示すのは難しい。

機器のパフォーマンスを向上させるプラントプログラムは、RAW 値を低下させない。従って、プログラムが成功していても機器は依然として RAW がリスク重要度高であり、FV がリスク重要度低である。新しいプラントプログラムの妥当性を示すために、RAW を無計画に使用することは、コスト上昇にもかかわらず大きな安全上の向上は得られない可能性がある。RAW を低下させるためには、プラントプログラムを他の機器に対し実施しなければならない。

PM の観点からは、この故障モードは「クリティカル（非常に重要）」であり、それらが発生した場合の影響がそれぞれ重大であることから、予想出来るすべての故障を予防しようとすることが重要である。従っ

て、この機器に対する包括的な PM プログラムを採用すべきである。信頼性/アベイラビリティが良いかもしれないという事実は、「クリティカル（非常に重要）」の選択あるいは PM の目的の変更に影響を及ぼさない。

2.5.3 機器の FV がリスク重要度高、RAW がリスク重要度低の場合

RAW 値が閾値以下であるため、基事象発生によるリスク の上昇は高くなく、個々の故障を防止するという高い必要性に基づいた追加プログラムの妥当性が認められることは困難である。

この FV と RAW の組み合わせでは、P は FV 閾値を n-1 で割った値よりも大きくならなければならない。通常の閾値では、P は 0.005 よりも大きくなければならず、0.005 よりずっと大きい値の場合もある。このことから多くの機器の悪いパフォーマンスに対して無関心になる可能性がある。さらに、FV は閾値を越えているので、この機器は CDF に対しては引続き大きな平均的リスクの寄与をしている。

少なくとも、FV 値が著しく増加することは許容されてはならないので、信頼性又はアベイラビリティのパフォーマンスの劣化を予防すべきである。平均的なパフォーマンスは、（FV が aP の積に比例するため）既に FV 値を増大させており、又 RAW が閾値を下回っているので、「a」パラメータそのものは大きくないことが分かっている。

パフォーマンスの向上は、FV 値又は事後保全のコストが非常に高い場合にのみ必要とされるであろう。パフォーマンス向上の必要性があり、既存のプログラムで達成できない場合は、機器の信頼性及び/又はアベイラビリティを改善させることを目的とした新しいプログラムの妥当性が示されるかもしれない。

PM の観点からは、故障モードは「ノンクリティカル（非常には重要でない）」。（個々の故障を防ぐために包括的なレベルの PM の必要性がないとは言え）信頼性が乏しい場合があり、信頼性が乏しいと FV 値を増大させるので、信頼性を管理する必要がある。最も可能性の高い故障を防ぐために簡単な PM を採用すべきである。ほとんどの故障に対応するより効果的な PM が、安全関連の機器に必要であるか、FV が大きすぎる場合又は事後保全のコストが高すぎる場合には信頼性を向上させるために必要であるかもしれない。

2.5.4 機器の FV、RAW の両方がリスク重要度高の場合

高い RAW 値とは、機器が故障している、又はアベイラブルでない時リスクの増加が大きいことを意味する。ゆえに、原則として、信頼性及びアベイラビリティを管理するプラントプログラムを有することは重要である。しかし RAW は信頼性及びアベイラビリティには関係しないため、これらのプログラムは、既に実施されているかもしれないし、効果的であるかもしれないしあるいは効果的でないかもしれない。

高い RAW 値は、個別の事象における追加リスクの抑制をするために、個々の機器が供用状態から外される場合の期間を限定する必要があるかもしれないことを意味する。

高い FV 値は、この機器が CDF に対して大きな平均的リスクの寄与をしていることを意味している。この FV/RAW の組み合わせでは P の値について範囲の制限はないので、平均的なパフォーマンスは FV 値を増大させる場合もあるがさせない場合もある。従って、特にパフォーマンスを見ることなしに、既存のプログラムが効果的かどうかは分からない。

FV 値が著しく増加することは許容されてはならないので、信頼性又はアベイラビリティのパフォーマンスの劣化を予防することは重要である。パフォーマンスそのものが最初に FV を高くしていることとは関係なしに、P の値の劣化は、常に FV 値を増加させる。

同様の機器についての産業界又はプラントの経験に基づいて、パフォーマンスが妥当かどうかの評価を実施すること。悪いパフォーマンスは、既存のプログラムを使用して向上出来るかもしれない。しかしながら、パフォーマンスが既に良い場合、「a」パラメータが大きいことから、既存のプラントプログラムで当該機器のパフォーマンスを適切に管理しているが、他の機器の信頼性及びアベイラビリティを適切に管理していないかもしれない。新しいプログラムが必要かもしれないが、当該機器を対象にしたものであるべきでない。

PM の観点からは、この故障モードは「クリティカル（非常に重要）」であり、予想出来るすべての故障を予防しようとすることが重要である。というのは、それらが発生した場合の影響がそれぞれ重大であるからである。従って、この機器に対する包括的な PM プログラムを採用すべきである。信頼性/アベイラビリティが良いかもしれないし悪いかもしれないという事実は、「クリティカル（非常に重要）」の選択に影響を及ぼさない。

2.5.5 機器の FV、RAW の両方がリスク重要度低の場合

低い RAW 値は、基事象発生によるリスクの上昇は高くなく、それゆえ個々の故障防止の大きな必要性に基づき追加プログラムの妥当性が認められることは困難であることを意味している。

低い FV 値は、この機器が CDF に対して大きく寄与していないことを意味している。この FV と RAW 値の組み合わせは、平均的なパフォーマンスに制限を設けない（パフォーマンスは良い場合も悪い場合もある）。低い FV 値は、パフォーマンスが悪くても、パフォーマンスを向上させる安全上のインセンティブはないことを示している。

パフォーマンスの劣化は、FV 値を増加させるけれども、FV のリスク重要度の閾値に対する既存のマージンが十分確保されている場合、問題とはならない。従って、FV のマージンを十分確保しなければならない。FV のマージンが十分でない場合、この機器あるいは他の機器のパフォーマンスを向上させるために既存プログラムを強化する必要があるかもしれない。

PM の観点からは、この故障モードは、PM を実施する経済的な理由があるという場合を除いて、あるいは同故障モードが安全系統のトレインを機能喪失させるか、SSC が安全関連である場合を除いて、「run-to-failure (RTF : 故障まで運転）」である可能性がある。この場合、FV マージンを監視する寛容なパフォーマンスクライテリアを設定し、ノンクリティカル（つまり簡単な）レベルの PM を使用する。良い

又は悪い信頼性/アベイラビリティは、例えば、その他の機器に対する二次的な損傷又は事後保全コストが高くなる可能性など、PM を実施する経済的な理由が存在する場合を除いて、RTF の選択に影響を及ぼすべきではない。

2.5.6 象限図

FV を X 軸、RAW を Y 軸に取った図は、FV と RAW 値における基事象の分布を示し、各基事象がこの 2 つの値のペアを持つことから、PSA モデルにおける基事象の散布図を表示している。これは「象限図」として知られている。1 つの線は RAW の閾値 $n = 2$ を示し、もう 1 つの線は FV の閾値 $\alpha = 0.005$ を示し、グラフを 4 つの象限に分けている。実際には、これらの図の用途は限られているが、基事象の興味深い集まりを明らかにし、ユーザーに対して閾値に近い事象の密度についての情報を提供する。これは新しいプログラムの潜在的な範囲を考慮する場合に便利である。

しかしながら、象限図は基事象の確率の値は示さない。実際のところ、これらの値は、著しく異なる基事象の確率を持つ事象が多く隣接している分布が図に示されている。一定の基事象の確率を持つポイントの曲線を図に描くことでこの制限を打開することが出来る。「a」と「b」の値を RAW 及び FV の定義式から消去し、以下の式を導くことが出来る。

$$RAW = FV\,(1 - P)/P + 1 \qquad \textbf{式2-7}$$

これは、RAW を、定数 P を持つ（つまり、「a」が変化すると）FV の関数であると見ることが出来ることを意味している。FV の関数としての RAW は、従って傾き$(1 - P)/P$ の直線となり、$RAW = 1$、$FV = 0$ のポイントを通る。このポイントは、RAW も FV もこれより低い値を取ることが出来ないので、象限図の左下の角にある。

図 2-2 は、線形スケールを使用した、このタイプの象限プロットを示している。対数スケールが使用されている場合、定数 P の曲線は右上がりとなる。定数 P の線はしばしば象限図のデータポイントの密度を見ることにより、識別することが出来る。P の値は、しばしば 1.10^{-x}、3.10^{-x}、又は 5.10^{-x} に丸められているので、非常に多くの基事象が同じ値 P を共有し、そのような線に現れる。象限図における FV/RAW の傾きは、明らかに任意である。

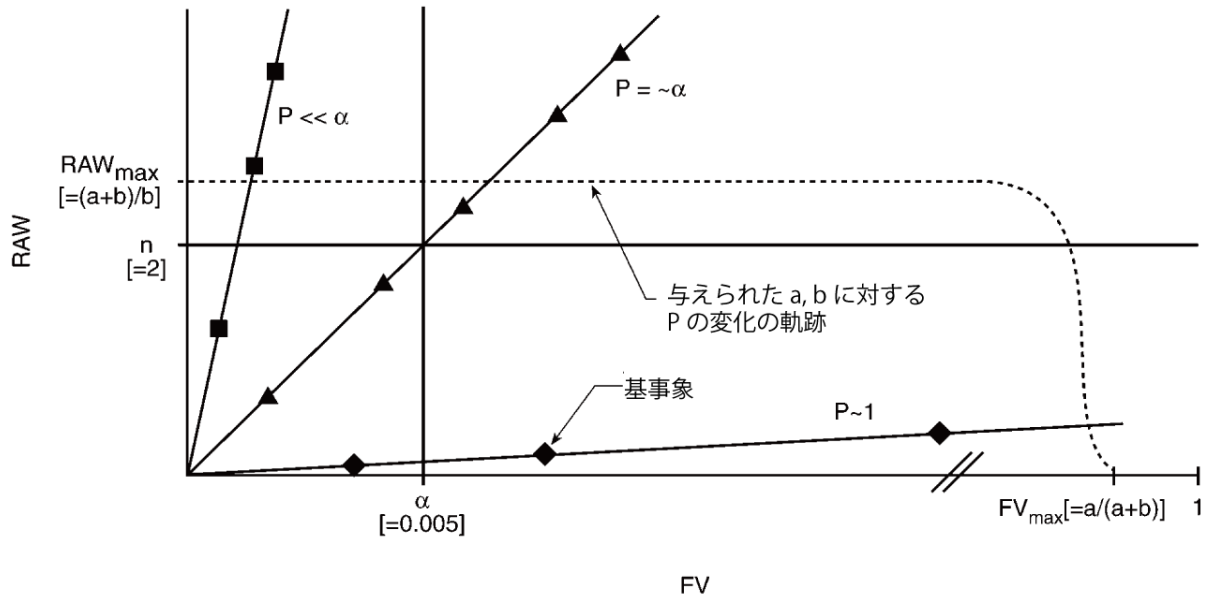

図2-2
（線形スケールと）定数 P の直線を示している RAW と FV の象限図

2.5.7 PM の目的と象限図

セクション 2.5.2 から 2.5.5 に記述した個々の基事象に対する概念に続いて、PM タスクの目的をまとめた象限図を図 2-3 に示す。PM は機器単位でその機器の全体に対し実施されているので、使用する FV は当該機器の全体に対するものであって、当該機器に係わるすべての信頼性に係わるすべての基事象の FV 値を足して得られた値であるべきである。セクション 2.7 で記述する RAW の値を選択すること（通常、すべての基事象から最も大きい RAW を選択する）。

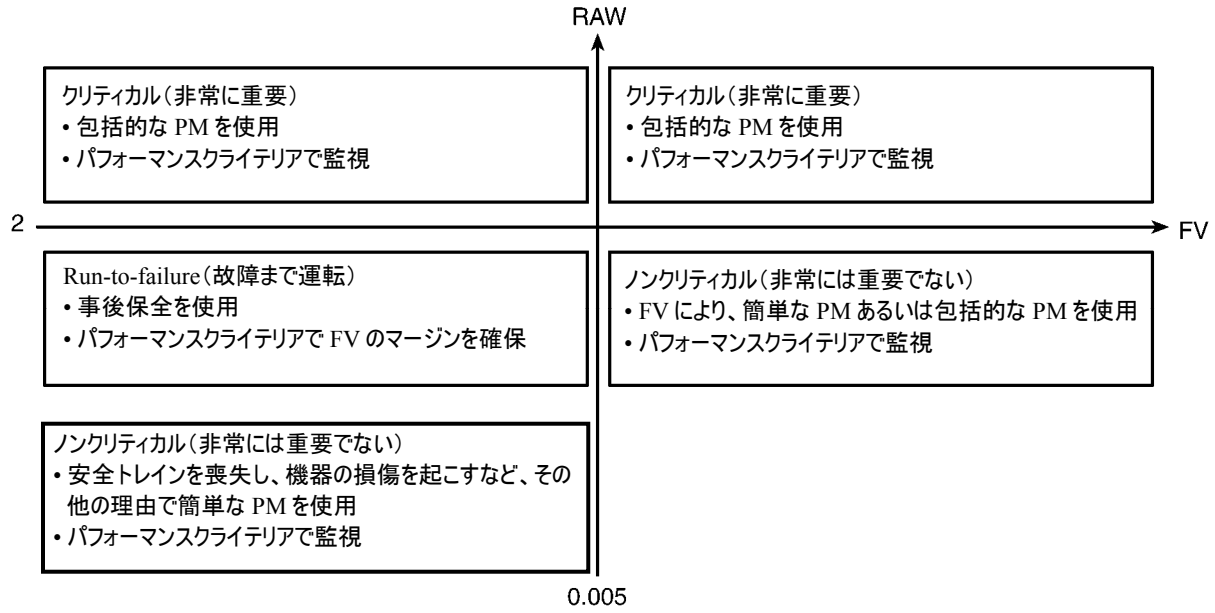

図2-3
機器全体（すべての故障モード）の FV と RAW 値による PM の目的のまとめ

2.5.8 象限図の中のポイントの動き

図 2-2 では、パフォーマンスの悪い基事象は（P が 1 に近い線）RAW の値が小さく、図の下方に表れることを示している。本基事象は、パフォーマンスを全く変えずにこの直線上において象限図のほぼ全域を移動することが出来る。FV が変化しても「a」が変化するからである。P が「α（通常 0.005）」と等しい時、定数 P の線は図の中央にある FV = α、RAW = n の点を通過する。P が小さい時、定数 P の線は RAW 軸の近くを通る。

P が変化する時、小さい FV 値に対して RAW はほぼ一定であることが分かっている。簡単に以下のように示すことが出来る。

$$\mathrm{RAW} = (1 - \mathrm{FV})((a + b)/b) \qquad \textbf{式2-8}$$

与えられた「a」と「b」について、RAW が取ることが出来る最も大きい値（a、b、P）は P = 0 で、$\mathrm{RAW}_{max}(a,b) = (a + b)/b$ の時である。従って式 2-8 は以下のように書き直すことが出来る。

$$(\mathrm{RAW}_{max} - \mathrm{RAW})/\mathrm{RAW}_{max} = \mathrm{FV} \qquad \textbf{式2-9}$$

式 2-8 と 2-9 において、a、b、P、そして CDF は、CDF = aP + b の下で、どのような値も取ることが出来る。図 2-1 の点線は、「a」と「b」を一定した時の P の変化における式 2-8 の影響を示す。曲線は、P の 0 から 1 への変化における対応する RAW と FV を結びつけるものである。FV が非常に大きくない限り、曲線の水平部分のみが重要である。式 2-9 は、FV が 0.1 の大きさで、RAW が 10%しか減少しないことを示している。

2.6 その他の適用上の課題

2.6.1 FV 及び RAW に対する事故シーケンスの切捨ての影響

PSA ソフトウェアは、ユーザーの定義した制限値以下の確率を持つシーケンスを切り捨てることにより、追跡可能な制限数内に、追跡すべきシーケンスを確保するようにしている。ここでの切捨ての確率には、各シーケンスについて通常 1 年当たり約 10^{-8} から 10^{-11} の確率として設定される。PSA に使用される切り捨て値は、保守規則のために使用する上でも妥当なものであるべきである。しかしながら、使用する切り捨て値にかかわらず、消去されたシーケンスの中には、必要な RAW 又は FV 値を含むもののある可能性がある。これらのシーケンス（及び他のシーケンス）を消去することで、CDF が ε を超えて減少することはない。ここで ε は（推定）収束誤差として用いられている。このことから、連続して低いシーケンスの切り捨て値が用いられても、CDF の増加量が ε（例えば、CDF の~1%）よりも大きくなることはない。

そのような事象が基事象 x により代表されるとする。基事象 x が出現したシーケンスを切り捨てないと、以下のようになっただろう。

$$CDF' = aP_x + a'P_x + b + b'$$

一方、切り捨て後では

$$CDF = aP_x + b$$

「a'」、「b'」は、基事象 x の切捨てられる値である。「$a'P_x+b'$」の式は切捨てられたシーケンスを示している。最初に分かることは、

$$FV' = \left(aP_x + a'P_x\right) / CDF'$$

a'Px が ε よりも小さくなければいけないことを用いて

$$FV' - FV < \varepsilon / CDF \qquad \textbf{式2-10}$$

FV の誤差は、切り捨て限界値 ε が非常に小さくない場合は、いくらの値にもなり得る。しかしながら、ほとんどの場合、x を含む切り捨てられるシーケンスは、全体で切り捨てられる全体のシーケンスに比べほんの一部である（すなわち $a'Px << \varepsilon$）。すると、その場合の切り捨てがリスク重要度に影響する可能性は、ε が CDF の 1%で FV の閾値が 0.5%としても、ほとんどないと考えられる。しかしながら、この値と仮定からかなり外れる場合（すなわち、ε がより大きいか α がより小さい場合）、切り捨てによる FV のリスク重要性への影響の不確実性が問題となる。ε が非常に小さく設定されていない場合、Px を含む切り捨てられたシーケンスの確率の和が本当に ε の値に対して小さな割合であることを確実にするために事故シーケンスのすべてを検証していくことが、切り捨てを伴った FV 値が安定したものにする唯一の方法である。

RAW に対しても、切捨てられていない RAW'は、(a + b + a' + b') /CDF'に等しいので、同様である。a'Px と b'のそれぞれ（機器に関する事象、すなわち Px<<1）では誤差が ε よりも小さいであろうという事実のみを用いて、以下が導かれる。

$$RAW' - RAW > (\varepsilon / CDF)(1 / P_x) \qquad \textbf{式2-11}$$

もしも ε/CDF が 1%であるとして Px~0.01 であるとしたら、RAW は 1 だけ変化することとなる。すると、切り捨てにより、機器のリスク重要度のステータスは変化するかもしれない。この式の形は、予想される通り、追加の係数の 1/Px がかかっている以外は FV についてのものと同じである。しかしながら、さきほどと同様、Px を含む切り捨てられたシーケンスの確率の和が ε の値のほんの一部に過ぎないことを、以下のように事故シーケンス全体に対して調べて確証することで、状況は改善する。

$$RAW' - RAW << (\varepsilon / CDF)(1 / P_x)$$

ε が非常に小さく設定されない限り、この方法が、切り捨てを行っている状態で RAW 値を安定したものであるとする唯一の方法である。

この解析は、ε が有用な切り捨てのパラメータであり、おそらく、（文献においてより頻繁に使用されている）事故シーケンスの切り捨て限界と同様に重要であることを証明している。

PM の適用において、包括的な切り捨て方法を提供するためには、同切り捨て値を十分低い値として、RAW>2 を持つすべての重要な機器を特定するように考慮すべきである。

2.6.2 a 及び b の値

計算のために、「a」と「b」の値は、どの基事象についてもそれぞれの CDF、FV、及び P を知っていれば簡単に求めることが出来る。

$$a = FV \cdot CDF / P \qquad \textbf{式2-12}$$

$$b = (1 - FV) \cdot CDF \qquad \textbf{式2-13}$$

又は、

$$a = (RAW - 1) \cdot CDF / (1 - P) \qquad \textbf{式2-14}$$

$$b = (1 - P \cdot RAW) \cdot CDF / (1 - P) \qquad \textbf{式2-15}$$

あるいは、以下の場合もある。

$$a = FV \cdot CDF / P \qquad \textbf{式2-16}$$

$$b = RAW \cdot CDF - FV / P \qquad \textbf{式2-17}$$

2.7 単一の機器の複数の基事象

1 つの機器は、故障の仕方についての異なるモードを示す、数個の基事象を持つことがある。（ここで故障の例としては、起動失敗、10 時間の運転継続失敗、開失敗、閉失敗、熱除去失敗、制御故障、トリップ失敗がある。）これらの事象は、「信頼性の基事象」と呼ばれる。非アベイラビリティは、しばしば、1 つの基事象として代表されるが、同様に非アベイラビリティの具体的な原因により分類出来る。例えば、修理時間、テスト及び PM の実施時間、及び発見されずに故障した間に発生する非アベイラビリティなどである。$\lambda\tau/2$ の（信頼性を持つ）基事象であり、待機安全系の SSC に共通のものである。後者は、「隠れた非アベイラビリティ」と呼ばれる。これは、起動失敗の確率が基事象として使用される時には、明示的に含まれていない。前のセクションでは、アベイラビリティ及び信頼性の事象について、これまで記述された両者の関連性は事象の独特の特性によらないとして来たので、区別出来ない基事象として取扱った。

1 つの機器の基事象のセットに対し、P を関数とする CDF の式の拡張形式として以下のように書くことが出来る。

$$CDF = \sum_i a_{ri} P_{ri} + \sum_i a_{ai} P_{ai} + b \qquad \textbf{式2-18}$$

ここで、下付き文字「r」は、信頼性の事象を表し、下付き文字「a」はアベイラビリティ事象を表している。最初の和の項は、共通原因故障を含む機器の信頼性事象を網羅し、2 つ目の和の項は機器のアベイラビリティの事象を網羅している。「b」の値は、当該機器の基事象を含まないすべてのシーケンスの確率の和である。いかなるシーケンスも機器が同時に 2 つの方法で故障するとか、同時にアベイラブルでなくなり故障するということは論理的にはないので、同じ機器に対する 2 つ以上の基事象を含む項はない。つまり、機器の基事象のセットは相互排反する。このことは、同時にある機器の単一故障の基事象と共通原因故障の基事象との両方を含む事故シーケンスはあるはずがないことから、共通原因故障の基事象にも当てはまる。これにより、当該機器が機能を果たすことが出来ない確率の合計は以下のように定義出来る。

$$P_T = \sum_i P_i \qquad \textbf{式2-19}$$

式 2-18 及び式 2-19 の和の項の中に共通原因故障を含める代わりとしては、共通原因グループを構成する機器の共通原因基事象を別のスーパーコンポーネントの基事象として扱うことである。スーパーコンポーネントは、関係機器の特定の共通原因の組み合わせが失敗した時に故障する。

信頼性とアベイラビリティを区別する必要がない時、

$$CDF = \sum_i a_i P_i + b \qquad \textbf{式2-20}$$

FV と RAW の基本定義はこの結果、すぐに以下のようになる。

$$FV_i = a_i P_i / CDF、及び RAW_i = (a_i + b_i)/CDF \qquad \textbf{式2-21}$$

信頼性の基事象の RAW は、機器が故障した時と同じ構成においてアベイラブルでなくなる場合、非アベイラビリティの事象の RAW と同じになる。この結果、故障が発生した時隠れていた信頼性の故障モードの RAW 値は有効であり、リスク重要度が適用される機器の大半は、このような機器である。急に発生する故障モードは、PSA コードで計算された RAW 値を持つが、SSC の保全のための構成においては、保全による非アベイラビリティの RAW で表した方がよいことがある。

基事象の相互排反のさらなる結果としては、FV の合計（つまり FV_T）は、機器全体に定義することが出来る。

$$FV_T = \sum_i FV_i \qquad \textbf{式2-22}$$

必要な場合は、FV_T は信頼性の部分とアベイラビリティの部分に分けることが出来る。

$$FV_T = FV_R + FV_A$$

ここで、

$$FV_R = \sum_i a_{ri} P_{ri} / CDF \quad \text{及び}$$
$$FV_A = \sum_i a_{ai} P_{ai} / CDF$$

FV_X の総計値は、1 つの基事象の統計値と相似した意味を持つ。相似性により、バーンバウムパラメータの合計 a_T も $\{P_i\}$ のセットの関数として示すことが出来る。

$$a_T = \sum_i a_i P_i / \sum_i P_i = CDF \cdot FV_T / P_T \qquad \textbf{式2-23}$$

通常、RAW は特定の種類の停止のリスクのみを表しているので、基事象の RAW 値は（組み合わせではなく）一度に 1 つとしなければならないと考えられている。1 つの機器の複数の基事象に対する RAW 値の最大値を使用中の機器が故障した時のリスクに関する保守的な表現とすることは稀ではない。このアプローチに従うと、故障状態を最も良く表す、基事象の RAW を選択することを考慮するのが望ましいと思われる。しかしながら、機器全体の有効な RAW は、以下のように定義出来る。

$$RAW_T = (a_T + b)/CDF = \left(\left[\sum_i a_i P_i / \sum_i P_i\right] + b\right)/CDF \qquad \textbf{式2-24}$$

あるいは、より高い精度（つまり、$P_i << 1$ 及び $\sum_i P_i << 1$）にすると、

$$RAW_T - 1 = \left(1/\sum_i P_i\right)\sum_i FV_i = \left(1/\sum_i P_i\right)\sum_i (RAW_i - 1)\cdot P_i \qquad \textbf{式2-25}$$

これは、機器全体をランク付けする時に適した RAW の選択である。これは特に、しばしば共通原因故障の基事象を伴う高い RAW 値を過度に重要視するのを防ぐことが出来るからである。このように P_i 値を通して RAW_T に機器のパフォーマンスの要素を導入すると、ペナルティの要素となる。しかしな

がら、これらの P_i 値は RAW_T へのつながりは弱い。さらに、P_i の値に関係なく、すべての RAW が同じである時 $RAW_T = RAW_i$ である。

このように定義された RAW_T にはいくつかの長所があるが、共通原因事象に対する高い RAW 値をこのアプローチを採用する理由とすべきでない。機器を表す RAW 値に、共通原因の基事象を除いた、RAW の最大値を選択してもよいことには、2 つの理由がある。1 つ目は、リスク重要度は共通原因事象にとっては重要でないトピックである。これらの事象は既に重要であると分かっているので、共通原因事象に対して考えられるすべての防護措置を取る動機付けはリスク重要度に関するいかなる考慮よりも優先される。2 つ目に、最も大きい RAW 値を持つために最も重要な事象として共通原因の基事象を選択することは、実際はより多く発生する 1 つのポイントでの故障の重要性を隠すことになる。従ってこの作業の推奨事項としては、共通原因事象を除いて RAW の最大値の方法を使用する（ただし、共通原因事象を同じく重要な事象として取扱うが別のグループとする）又は、RAW_T の定義を採用するかである。課題が最も重要な基事象を特定している場合は、最初のアプローチが要求される。

2.8 機器とスーパーコンポーネントの間の関係

複数の機器が、PSA のモデリングを単純化するためにスーパーコンポーネントのバウンダリに含まれている時、個々の機器についての決定をする前に個々の機器のリスク重要度パラメータをスーパーコンポーネントの結果から抽出する必要がある場合がある。

スーパーコンポーネントは、PSA の他の基事象に対して内部の相互関係がない、1 つの論理ブロックとして特性化出来る複数の個別機器による構成要素である。これにより、CDF は、$CDF = A_S P_S + B$ である。

このような一般的なスーパーコンポーネントの故障確率 P_S は、依然として構成内の個々の機器の基事象の線形関数となる。しかし、その特別な論理構成により、P_S によるリスク重要度が分かっていても個々の機器のリスク重要度要素を抽出出来る一般的な公式がない。それでも、スーパーコンポーネントの論理構造が与えられている時、個々の機器のリスク重要度要素を簡単に抽出出来る。

幸い、ほとんどのスーパーコンポーネントは単純な論理構成で、一般的に表すことが出来る。これらのスーパーコンポーネントは、成功と失敗の組み合わせの観点からの論理的なつながりからなる。すべての機器は、このタイプのスーパーコンポーネントの成功を確実にするためには正しく機能しなければならず、機器のどれかが故障すると、スーパーコンポーネントの故障が発生する。このようなつながりには、機器の内部の冗長性はなく、計装ループ、又は吸込み弁、ポンプ、ドライバー及び補助装置、逆止弁、及び排出ポンプなどの典型的な機器の「トレイン」の場合がある。このような配置では、スーパーコンポーネントの故障確率は、構成機器のより複雑な機能でなく、構成機器の故障確率の単純な和に等しい。直ちに得られるメリットしては、機器の基事象のサブグループをスーパーコンポーネントの非信頼性の基事象とともに特定出来、残りをスーパーコンポーネントの非アベイラビリティの基事象で特定出来る。スーパーコンポーネントの非信頼性の基事象確率を P_R で表し、構成機器の非信頼性の基事象確率を P_{ri} とする。すると、

$$P_R = \sum_i P_{ri} \quad \text{式2-26}$$

和は、1)すべての関連する基事象、つまり P_R に論理的に寄与する可能性のあるものを取り入れ、2)隠れた故障及び修理による非アベイラビリティを含む。

スーパーコンポーネントの PM による非アベイラビリティ事象 P_A は、PM の非アベイラビリティの寄与要素のみからなる。

$$P_A = \sum_j P_{aj} \quad \text{式2-27}$$

ここで、「j」はすべての構成機器を含む。スーパーコンポーネントにおいて、これらすべての事象は補助的に重み付けをせずに単純に加算されていることに注目すること。

式 2-26 及び 2-27 は、構成する非信頼性及び非アベイラビリティを用い、最も一般的なタイプのスーパーコンポーネントの非信頼性及び PM による非アベイラビリティを定義している。前記の、より複雑なスーパーコンポーネントでは、交差項が特性を結びつけるのでこのような方法で信頼性とアベイラビリティの基事象を分けることが出来ない。従って、より複雑なタイプのスーパーコンポーネントの信頼性及びアベイラビリティのバランスは、個々の機器のバランスを通してのみ対処することが出来る。

スーパーコンポーネントの基事象に対し、式 2-19 で示した一般的な方法で CDF を計算する。ここでも、スーパーコンポーネントに対して大文字及び下付き文字を使用し、構成する機器に小文字を使用する。A_X は、バーンバウム重み係数である。B は、当該スーパーコンポーネントが現れないすべての事故シーケンスの確率の和を表す。

$$CDF = A_R P_R + A_A P_A + B \quad \text{式2-28}$$

これらの定義は、結果として $P_R P_A$ を含む交差項がないスーパーコンポーネントの基事象の相互排反を保つ。

P_{ri} と P_a を使用して直接構成された CDF は、以下のようになる。

$$CDF = \sum_i a_{ri} P_{ri} + \sum_j a_{aj} P_{aj} + B \quad \text{式2-29}$$

ここで再び、寄与する可能性のあるこれらの機器の基事象の 2 つ以上の論理的な組み合わせがないため、$a_{riaj} P_{ri} P_{aj}$ のような項はない。

式 2-28 及び式 2-29 の比較から、

$$A_R P_R = \sum_i a_{ri} P_{ri} \quad \text{式2-30}$$

しかしながら、式 2-26 では、$P_R = \sum_i P_{ri}$ と示されていたので、

$$A_R P_R\ R = A_R \sum_i P_{ri} = \sum_i A_R P_{ri} \quad \textbf{式2-31}$$

従って、

$$A_R = a_{ri} \quad \textbf{式2-32}$$

そして、スーパーコンポーネントにおいてすべての構成の機器の信頼性事象は同じ重みであるので、a_{ri} はすべて等しい。同様に、

$$A_A = a_{aj} \quad \textbf{式2-33}$$

FV_R 係数は以下のように定義される。

$$FV_R = A_R \cdot P_R / CDF \quad \textbf{式2-34}$$

そこで、

$$A_R = CDF \cdot FV_R / P_R \quad \textbf{式2-35}$$

個々の機器の基事象の FV_{ri} 係数は、以下のように定義される。

$$FV_{ri} = a_{ri} \cdot P_{ri} / CDF \quad \textbf{式2-36}$$

従って、

$$FV_{ri} = A_R \cdot P_{ri} / CDF \quad \textbf{式2-37}$$

式 2-35 を使用して、

$$FV_{ri} = FV_R \cdot P_{ri} / P_R \quad \textbf{式2-38}$$

式 2-38 では、スーパーコンポーネントの FV_R 係数を用い、構成機器 FV_r 係数を定義している。

PM による非アベイラビリティの FV 係数についても同じことが言える。

$$FV_{aj} = FV_A \cdot P_{aj} / P_A \quad \textbf{式2-39}$$

RAW 係数は以下のように定義される。

$$RAW_{rk} = \left(a_{rk} + \sum_{i \neq k} a_{ri} P_{ri} + \sum_j a_{aj} P_{aj} + B\right) / CDF \quad \textbf{式2-40}$$

及び

$$RAW_R = (A_A + A_A P_A + B)/CDF \quad \text{式2-41}$$

式 2-31、2-32、及び 2-33 を使用して、式 2-40 を以下のように書き換えることが出来る。

$$RAW_{rk} = (A_R + [A_R P_R - a_{rk} P_{rk}] + A_A P_A + B)/CDF \quad \text{式2-42}$$

式 2-41 を使用して、

$$RAW_{rk} = RAW_R + (A_R P_R - a_{rk} P_{rk})/CDF \quad \text{式2-43}$$

FV の定義及び式 2-34 と 2-36 を使用して、

$$RAW_{rk} = RAW_R + FV_R - FV_{rk} \quad \text{式2-44}$$

そして FV_R を用いた FV_{rk} の式 2-38 を使用して、

$$RAW_{rk} = RAW_R + FV_R - FV_R \cdot P_{rk}/P_R \quad \text{式2-45}$$

そこで、

$$RAW_{rk} = RAW_R + FV_R (1 - P_{rk}/P_R) \quad \text{式2-46}$$

RAW_{ak} に対しても同じように導くことが出来る。

$$RAW_{ak} = RAW_A + FV_A (1 - P_{ak}/P_A) \quad \text{式2-47}$$

構成機器について必要なパラメータの値は、P_R、P_A、FV_R、FV_A、RAW_R、及び RAW_A であるスーパーコンポーネントに対する PSA の入力出力から得ることが出来る。すべての P_{ri} 及び P_{aj} も、スーパーコンポーネントのために P_R 及び P_A を元々取得するために使用したので、必要であるが、分かっていることに注意すること（式 2-26 及び式 2-27 を参照のこと）。

2.9 2 個以上の SSC の FV

複数の機器が係わる時には、式 2-19 のような単純な形式は存在しない。これは、一般的に $a_{ij}P_iP_j$ のような交差項が存在し、1 つの機器の基事象(i)が他の機器の基事象(j)と組み合わされるからである。しかしながら、いかなる基事象数においても FV の組み合わせ値に対して、交差項があっても便利な保守的限界値が存在する。2 つの機器で、各機器に 1 つの基事象を考慮する。これにより、CDF は以下のように拡張出来る。

$$CDF = a_1P_1 + a_2P_2 + a_{12}P_1P_2 + b \quad \text{式2-48}$$

$$FV_1 = \left(a_1P_1 + a_{12}P_1P_2\right)/\mathrm{CDF} \qquad \text{式2-49}$$

$$FV_2 = \left(a_2P_2 + a_{12}P_1P_2\right)/\mathrm{CDF} \qquad \text{式2-50}$$

1 つの機器の定義との相似性から、2 つの機器を組み合わせた FV の値（$= FV_{12}$）を定義すると、

$$FV_{12} = \left(a_1P_1 + a_2P_2 + a_{12}P_1P_2\right)/\mathrm{CDF} \qquad \text{式2-51}$$

機器の FV 値の単純な和は、交差項に係わる追加の寄与と同じになることに気づくだろう。

$$FV_1 + FV_2 = \left(a_1P_1 + a_2P_2 + 2a_{12}P_1P_2\right)/\mathrm{CDF} \qquad \text{式2-52}$$

結果として、

$$FV_1 + FV_2 > FV_{12} \qquad \text{式2-53}$$

以下に結果が一般化される。

$$\sum_i FV_1 > \text{真値の } FV_{ijk\ldots} \qquad \text{式2-54}$$

下限（$FV_{ijk...} > FV_i, FV_{j...}$の最大値）は、特に便利ではない。

2.10　2 個以上の SSC の RAW

2 つの SSC が同時に供用除外状態である場合、CDF への組み合わさった影響は、個々の影響の和よりも大きくなることがある。これは、2 つの SSC が同じシーケンスに存在することがあり、これらのシーケンスからのリスクの寄与が倍増するためである。

式 2-48 から、

$$RAW_{12} = \left(a_1 + a_2 + a_{12} + b\right)/\mathrm{CDF} \qquad \text{式2-55}$$

残念ながら、交差項 a_{12} の影響を推定する方法はなく、導かれる包絡値も便利なほど十分に厳しくない。この状況は、供用除外状態の複数の機器のリスク増加を計算するための、即応リスクモデルの普及につながった。

しかしもう 1 つの実用的な解決策としては、正確な結果を提供し、PSA モデルの再実施を必要としないことが挙げられる。ベースライン PSA の結果からのすべての事故シーケンスがリスト化されていたら、データベースのフィルターで当該事象を含むシーケンス、つまり P_1 を含むが、P_2 を含まない（合計 S_1 になる）もの、P_2 を含むが P_1 を含まない（合計 S_2 になる）もの、P_1 及び P_2 両方を含む（合計 S_{12} になる）、及び両方とも含まない（合計「b」になる）ものを見つけることが出来るだろう。すると、必要な RAW 値は、

$$RAW_{12} = \left(S_1 / P_1 + S_2 / P_2 + S_{12} / P_1 P_2 + b\right) / CDF \qquad \textbf{式2-56}$$

この計算は、正確で、（ここで示されている 2 個だけでなく）供用除外状態のどんな機器数にも一般化出来、実施するのに簡単であり、ソフトウェアに埋め込むことも出来る。完全なインデックスを作成し、機器名とその基事象表示と基事象値をリンクすると、PSA の専門家でない人も数秒で計算をすることが出来るだろう。これにより PSA 技術者からのすばやい回答の必要性を回避出来る。しかしながら、この計算では、緩和措置の影響を含めるように拡張することは出来ないであろう。というのは PSA モデルに変更が必要となるからである。

事故シーケンスエディタを使用すると、CDF を、2 つの基事象に関係する CDF ($=CDF_2$) , 3 つの基事象に関係する CDF ($=CDF_3$)に係わる事故シーケンスの和に分解してそれぞれ求めることが可能となる。

$$CDF = CDF_2 + CDF_3 + CDF_4 + CDF_5 + \ldots \qquad \textbf{式2-57}$$

すべての基事象の確率が 3 倍、5 倍、又は 10 倍など、同じ量増加する時の CDF への影響の計算は簡単な作業である。この係数を g とすると、

$$CDF(g) = g^2 CDF_2 + g^3 CDF_3 + g^4 CDF_4 + g^5 CDF_5 + \ldots \qquad \textbf{式2-58}$$

この結果は、P から gP への全体的な変化のいかなる程度に対しても正確であり、PSA の再計算の必要がなくなる。

3
信頼性とアベイラビリティとのバランス

3.1 はじめに

米国の原子力発電所に対する保守規則 10CFR50.65 では、米国電力に対し、リスク重要度の高い SSC に対してアベイラビリティと信頼性のバランスを確保することを要求している。NRC のスタッフは、一部で、電力会社が PM のために機器を供用状態から除外することにより、保全の実施により得られる安全上のメリットに比べて、安全機能を果たすことが出来なくなる期間が長くなることを懸念している。

SSC が PM 中に蓄積する可能性のあるアベイラブルでない時間の一部は、より効果的な手順を採用することにより避けることが出来るかもしれない。さらに可能性としては、運転中に実施している PM の一部をプラントが停止している時に実施するように移すか、他の機器が供用除外状態にある時に PM の一部を実施し、効果的に非アベイラビリティを「シャドーイングする（追加で発生させないようにする）」ことが挙げられる。本レポートの著者は、既に、これらの可能性は出来る限り探求されたと仮定している。残るのは、本セクションの主な目的である、簡単な解決策を得ることが出来ない状況の核心の部分の回答を求めていくことである。

本セクションの目的は、アベイラビリティと信頼性がバランスしているかどうかのパフォーマンスクライテリアを決定する方法を提案することではない。それらのパフォーマンスクライテリアは、不確実性を伴ったものではあるが、アベイラビリティと信頼性が期待とあまり違いがないという確証を与えるため、監視メカニズムの一環として既に設定されている。バランスについての問題は、信頼性及びアベイラビリティについての基本をなす仮定及び監視結果に適用されるべきである。

そのようなバランスが達成されているかどうかを判断する普遍的に認められた方法は現在のところ存在しない。さらに、この問題に関わる検討は、PM とリスクに関連してほとんどない状況である。本セクションの目的は、保全、信頼性、及び安全管理に係わる一般的な観点に基づいた、保守規則におけるバランスについての技術的に正しいクライテリアを提供することである。

セクション 1.4.1 では、バランスクライテリアを最も簡単な形式で提供している。セクション 1.4.2 では、クライテリアを適用するいくつかの方法を示すため、簡単な例を用いている。

クライテリアの技術ベースがセクション 3.2 から 3.6 に記述されている。セクション 3.2 では、運転中、定検中の両方での PM による非アベイラビリティが一般的に信頼性に関連付け出来るという正式な背景を提供する。セクション 3.3 では、これらの関連を利用して、1 つの SSC のアベイラビリティと信頼性のバランスクライテリアを導出する。セクション 3.4 では、そのクライテリアを、SSC の隠れた非アベイラビリティ（$\lambda\tau/2$）、修理の非アベイラビリティ、及び複数の信頼性に関わる故障モード（例えば、起動失敗及

び運転継続失敗）に拡張する。セクション 3.5 では、同クライテリアを、リスク重要度に拡張する。すなわち CDF に対する信頼性と非アベイラビリティの影響のバランスに拡張する。これは単なる SSC の信頼性と非アベイラビリティとのバランスではないものである。1 つ以上の SSC の基事象が、他の基事象のリスク重要度とは異なるレベルのリスク重要度を持つ基事象であるケースについても対応する。セクション 3.6 では、スーパーコンポーネントのバランスについて対応する。

3.2 正式な枠組み

単一の故障モードを持つ SSC（例えば、起動失敗）に制限した場合を考える。ここで非信頼性を P_r とする。さらに、PM のみによる非アベイラビリティを考え、P_a で表す。P_r と P_a は、PSA でもよく見られる基事象の確率で、SSC の機能が要求される任意の時点において、SSC がそれぞれ故障し、アベイラブルでなくなる確率を表している。

信頼性の基事象の確率 P_r は、SSC に対して実施されている PM に依存する。バランスの問題は、PM による結果、及び必要な PM の一部が運転中に実施されている事実の結果である。不十分な保全が実施されていると、故障の確率が高くなり、正しい保全を正しい時期に実施すると信頼性が向上し、適切な保全プログラムにより達成することが出来る最大の信頼性レベル（非信頼性が最も低いレベル）が存在する、と考えるのはもっともである。この最大の信頼性のレベルの存在は、ゆるぎない仮定である。適切な PM であっても、その量を増やすことによる信頼性の向上量は、逓減を示し、ある時点はゼロになるはずである。

この最大の信頼性を得るために必要である保全量を超えて保全を増やすと、そうしなければ発生しなかった故障原因が発生し、故障の確率の増加につながる。これは、内部点検、機器の取替え、及び分解点検などのタスクに係わる介入型の PM が多すぎることにより、起こることがある。完全性のため、以下の検討では最適点を越えて過度の PM が適用されると、信頼性が劣化することを仮定するが、これは必須の仮定ではない。

P_a は以下のように通常の方法で定義される。

$$P_a = H_{PMon} / H_{Req} \qquad \textbf{式3-1}$$

$$= H_{PMon} \cdot \gamma \qquad \textbf{式3-2}$$

ここで、H_{PMon} は SSC に対して実施する PM にかかる時間数である。この間 SSC の機能がアベイラブルでない状態で、その中で SSC の機能が通常必要とされている。安全機能を提供するほとんどの SSC（バランスの問題の主な対象であるが）について、この時間はプラントが運転中である時はいつでも対象になると考えられる。同様の定義は、停止中に要求される系統にも当てはまる。H_{Req} は、SSC の機能が通常必要とされる時間数であり、1 年当たり 7000 時間で 80%のプラント稼働率とした時の値である。逆数の $1/H_{Req}$ は $1.43 \times 10^{-4} (= \gamma)$ であるが、この値の表す意味から重要なパラメータである。このパラメータは、これから検討する変化の尺度を設定するものである。これはよく出てくるので、このパラメータは参照の容易さのため、γ（ガンマ）と呼ばれている。

時間数は、以下により、さらに関連付けされる。

$$H_{PMtot} = H_{PMon} + H_{PMoff} \quad \text{式3-3}$$

ここで H_{PMoff} は、プラントが停止中に SSC に対して PM の実施にかかった時間数で、H_{PMtot} は SSC に対して実施した PM の全時間数である。

非信頼性は、費やされた PM の全時間数に依存することが分かっている。P_r の依存性を表す最も簡単な方法は、H_{PMtot} を独立した変数（つまり、X 軸）として扱う図 3-1 の曲線である。

バランスクライテリアの作成は、曲線に最低点があること以外は、曲線の詳細な関数形式には依存しない。最低点は、設計変更を考慮せずに PM の実施を通して達成できる最大の信頼性を示している。

与えられた PM プログラムは多分、図 3-1 の曲線（最適曲線）よりも上の領域（影の付けた部分）で運用されているであろう。これは、保全が効率的ではないからとか、タスクが大したメリットを提供しないとか、他のタスクで冗長な保護をしている場合などの単純な理由である。とはいえ、原子力発電所においてリスク重要度高で待機している安全系の SSC に対して、実施されている PM タスクは適切であり、PM が産業界のグッドプラクティスにより実施され、作業員の技能も妥当であると仮定する。

バランスクライテリアが常に曲線上にあるとするクライテリアとするとしたら、その有用性が限定されるであろうが、そのような厳しいクライテリアは不要である。大抵の PM プログラムは、図 3-1 の影の領域で運用され、最適曲線を下側の限界とする。さらに、実際のバランスクライテリアの適用は、X 軸と Y 軸に沿った実際的な（何回かの）ステップで実施される。すなわち、実際に実行出来る変更に関して、影の領域又は曲線上の 2 点間の関係に対してバランスクライテリアが適用される。クライテリアを作るにあたり、あたかも、最適曲線上にあるかのように進める。同クライテリアは、その後、影の領域にも適用できる。

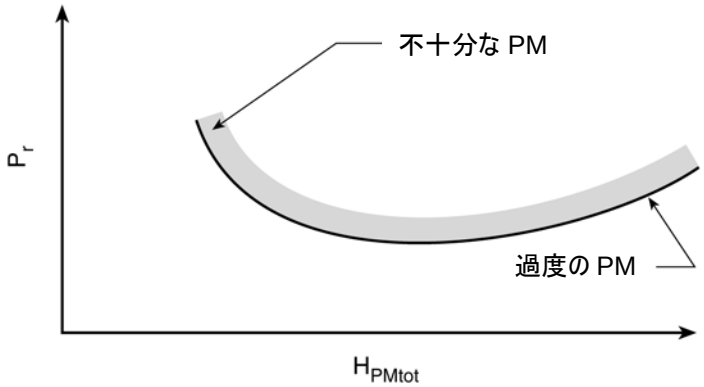

図3-1
合計 PM 数の関数としての非信頼性

図 3-2 では、式 3-2 から与えられた H_{PMon} の関数としての P_a を示している。H_{PMon} については、実施された追加の PM が運転中あるいは停止中の区別をしておらず、P_a は傾き γ を持つ原点から延びる直線である。しかしながら、P_a は、図 3-3 で示されているように H_{PMtot} の関数として表されると、同直線は H_{PMoff} だけ右にシフトする。

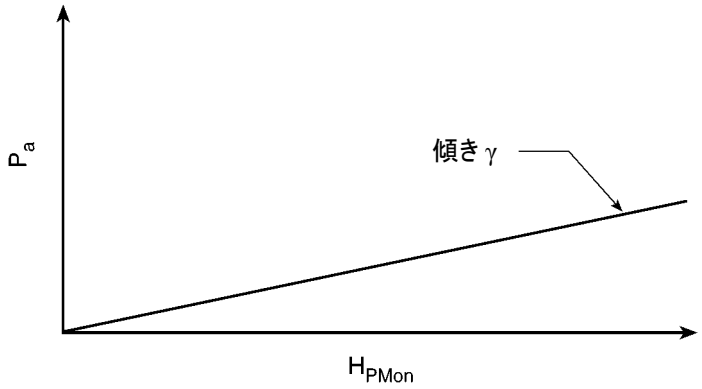

図3-2
運転中の PM の関数としての非アベイラビリティ

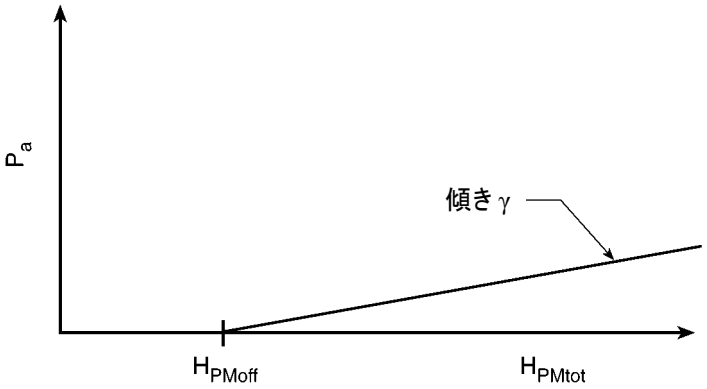

図3-3
合計 PM 時間数の関数としての非アベイラビリティ

このように、H_{PMtot} の関数として表すと、P_a は H_{PMoff} にも依存する。H_{PMon} が独立変数として使用される場合（それが望ましいが）、信頼性と安全性への影響を考慮する時、H_{PMoff} が一定であることを仮定しなければならない。

3.3 バランスのクライテリア

ここでの「バランス」とは、運転中の PM の経済的な影響と安全性への影響との交換を意図したものではない。そうではなく、バランスは達成された信頼性による安全性への影響と、その信頼性を達成するために発生した非アベイラビリティによる安全性への影響とを交換するものである。しかしながら、どれだけの PM が運転中に実施出来るかという質問とは別に、異なる機器タイプではその機器の特性に応じて信頼性のレベルに達するために全く異なる PM の合計数が必要となる。明らかに、機器タイプによ

るパラメータなしに、運転中に実施出来る PM 数に関する数式を導く単一の規則を導き出すことは出来ない。

にもかかわらず、PM の全時間数と運転中 PM 時間数の変化、及びその結果としての信頼性の変化に関する普遍的なバランスクライテリアが構築できるかもしれない。H_{PMon} が変化する時の非アベイラビリティの変化率は、つねに普遍的、常数であり、γ として知られている。結果は適用が簡単な普遍的規則である。その限界は、そしておそらくその長所は、現状の信頼度の程度と運転中の PM を変化させるのに必要な実際のステップを考えることなくバランスの検討は出来ないという点である。

このように進めるとして、仮のバランス規則は 2 つの特性を持つように思える。1) バランスルールは、PM の変化と信頼性の変化に関係する、及び 2) PM の変化が信頼性に影響を及ぼすとすると、実施されたすべての PM の変化は、停止中の PM でなく運転中の PM の変化量とする必要がある。(つまり、運転中の PM は停止時の PM とトレードオフされず、H_{PMoff} は一定のままである。)ルールとしては、運転中の PM の変化(つまり全 PM)がバランスの観点のみから適切かどうかを決定するものである。

図 3-4 は、H_{PMtot} の関数ではなく、H_{PMon} に対する P_r の関数従属性を再度示している。さらなる展開において、H_{PMon} は独立変数として維持される。図 3-4 は、図 3-2 と 3-3 の相似性により、単純に図 3-1 が H_{PMoff} だけ左に移動したものである。

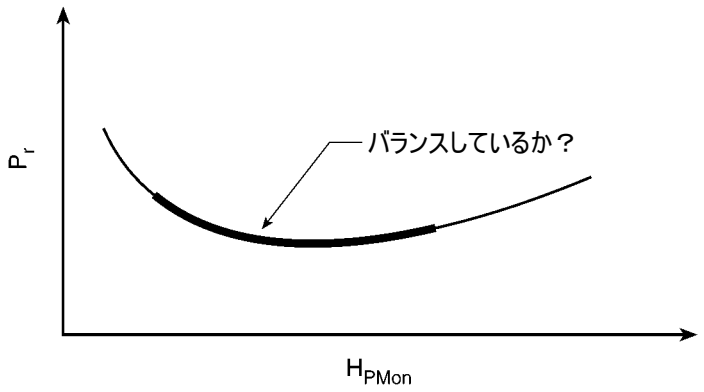

図3-4
運転中の PM 数の関数としての非信頼性

P_r 曲線の一部を、「バランスされた」部分(つまり、P_r の絶対値が PM による運転中の非アベイラビリティの量とバランスしているように見える部分)であると定義すると、結果としてこれはおそらく曲線上の最小点の近くの領域、すなわち図 3-4 の線上の太線の部分になる。最小点の周りの領域をバランスされた領域とすることで、アベイラビリティと信頼性をバランスさせることに自由裁量が取れるようになる。このことは、バランスを取ることが、最適な信頼性を持つこととは必ずしも同じではないという事実を強調している。

バランスした領域を決めるのに、最小点からどれくらい離れたところまでを含めるかが課題となる。実際の経験から、最適な信頼性へは通常ゆっくりと近づき、受け取る信頼性の増加量が低減していく代わ

りとしての PM の増加を通して達成されるので、上記の曲線の最小点の近くの領域はしばしば広く平坦な曲線となる。

バランスしている領域の範囲及び位置を検討するために、故障又はアベイラブルでないことにより SSC が機能を果たすことが出来ない確率は、2 つの事象の確率、P_aとP_rの和である。この和をP_{Sum}で表す。

$$P_{Sum} = P_r + P_a \qquad \text{式3-4}$$

H_{PMon}の関数としての数量の挙動を、図 3-5 で示している。P_{Sum}の曲線は、P_aを示している直線の上にあるP_rの曲線と考えることが出来る。H_{PMon}がどのような値でも、P_aの値は、X 軸からP_aの直線までの垂直線の長さで表し、P_rの値は直線から曲線までの垂直線の長さで表すことが出来る。しかしながらP_rに追加されるP_aの量は、H_{PMon}が大きくなると増加する。これにより、P_{Sum}の最小点はP_rの最小点よりもH_{PMon}のより低い値へ移動する。傾斜線は完全に決められているので、P_{Sum}曲線の不確実性はP_rに対する不確実性以上にはならない。

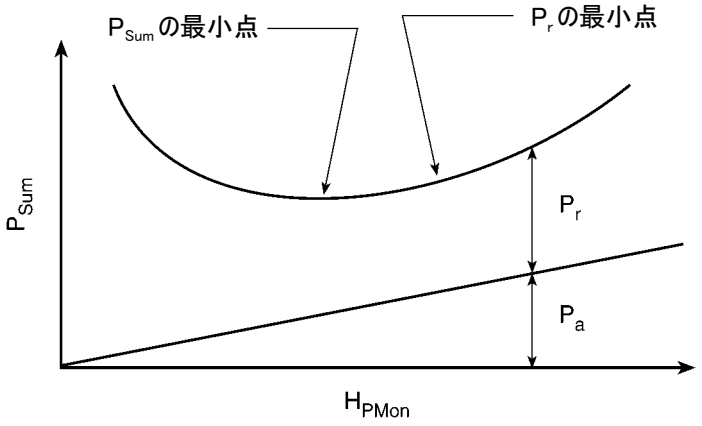

図3-5
運転中の PM の関数としての P_{Sum}

代数的に、

$$dP_{Sum} / dH_{PMon} = dp_a / dH_{PMon} + dP_r / dH_{PMon} \qquad \text{式3-5}$$

$$= \gamma + dP_r / dH_{PMon} \qquad \text{式3-6}$$

安全性は、P_{Sum}の最小点で最適化され、その時 $dP_{Sum}/dH_{PMon} = 0$ である。この点において、式 3-6 により（図 3-6 を参照）、

$$dP_r / dH_{PMon} = -\gamma \qquad \text{式3-7}$$

マイナスの傾きは、P_rは右下がりであることを意味している。言い換えると、より多くの PM を実施することで信頼性を向上出来る機会がまだ存在する時、SSC 機能の喪失の確率（つまりP_{Sum}）は最小化される（つまり、安全性が最大となる）ということである。

機能を果たしている SSC の最適な運転点は、信頼性の最適点よりも悪い信頼性の値となる。これは、P_{Sum}での最小点を越えて運転中の PM を増やすと、信頼性を向上出来るが、非アベイラビリティの 1 時間当たりの γ よりも小さな割合での増加となる。ここで、追加の非アベイラビリティのコストは γ の割合にいつも等しくなる。

さらに、P_rが最小である点（つまり、$dP_r/dH_{PMon} = 0$となるところ）では、図 3-6 では P_{Sum}の傾きが γ に等しくなることが示されている。

$$dP_{Sum} / dH_{PMon} = \gamma \qquad \textbf{式3-8}$$

これは、信頼性の最適点では、機能喪失に対する保護（つまり、安全性）が既に劣化していることを意味している。

曲線の詳細の形についてはほとんど分かっていないが、2 つの重要な結論が得られている。さらにキーポイントにおける曲線の傾きについては多くのことが分かっている。

$dP_{Sum} / dH_{PMon} = +\gamma$ のとき、 $dP_r / dH_{PMon} = 0$ **式3-9**

$dP_{Sum} / dH_{PMon} = 0$ のとき、 $dP_r / dH_{PMon} = -\gamma$ **式3-10**

及び$dP_{Sum} / dH_{Pmon} = -\gamma$ のとき、 $dP_r / dH_{PMon} = -2\gamma$ **式3-11**

これらの点は図 3-6 に示され、P_rの曲線が P_{Sum}との比較のために示されている。曲線の傾きは、角括弧[ ] で示されている。

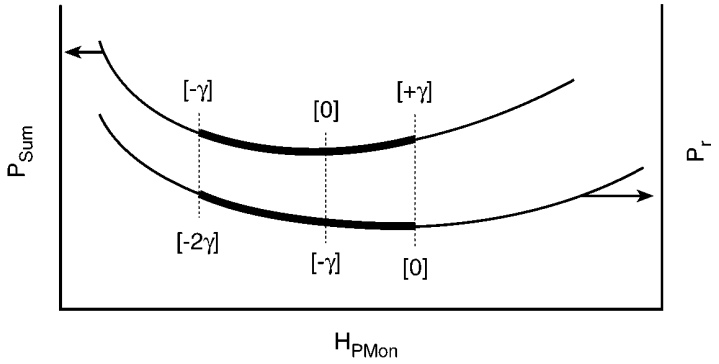

図3-6
P_{Sum}及び P_r上のそれぞれの勾配

図 3-6 で示されているように、式 3-9 で示される点（太線の右端の点）は、運転中保全の増加により、信頼性そのものが劣化し始めているために、この点より右側はバランスしているという主張が妥当ではないことを示している。過剰な保全を適切にバランスしているケースであると主張することは産業界の経済的利益とはならない。又、この点は、P_{Sum} の値が既に最小値を超えて、右側にさらに増加していくため、安全の観点からもバランスしていない。

式 3-11 で示される点（太線の左端の点）の意味は、これより左は、追加の運転中保全により、P_r と P_{Sum} の両方が改善（つまり低減）出来るため、バランスしているとする主張は妥当ではないということである。この点が、バランスした領域の端として一意的に決まるわけではないが、この点での P_{Sum} の変化率は反対側の最小点における P_{Sum} の変化率と等しくなっている。ここで、P_{Sum} の傾きにかなりの対称性が見受けられるが、この点以外の点を選択する余地もある。

PM プログラムが曲線のどこにあるかは誰も決して分からないが、H_{PMon} に対する信頼性の変化の定量化は可能である。太線が妥当なバランス領域の部分とすると、下側の曲線のこの部分で信頼性はいかなる変化に対しても、傾きがマイナスであり（$\Delta Pr/\Delta H_{PMon}$）、$-2\gamma$ よりも傾きが緩い。

提案された変更が -2γ よりもマイナスの傾きの大きい場合、プログラムがバランスした領域の左側の部分で傾きがより大きいところにあるか、グレイエリア（曲線の上側）にあるかを示す。プログラムが曲線上にある場合は、最低点よりも離れすぎているためにバランスしておらず、変更は信頼性を向上させる効果的な方法である。グレイエリアにある場合もプログラムはバランスしておらず、変更は直線に近づくための効果的な方法である。いずれの場合も、最初の状況では十分にバランスしておらず、新しい状況は、信頼性及びアベイラビリティのバランスの取れた変更を通して改善される。

提案された変更が -2γ よりもマイナスの傾きが緩い場合、プログラムは 1) 既に曲線の太線の部分にあり、十分にバランスしており、提案された信頼性におけるわずかな改善は、バランスのみの観点から有効ではないか、2) 曲線の上のグレイエリアにあり、この場合、提案された変更よりもよい、バランス改善オプション（つまり、傾きがより大きいもの）が存在する。

明らかになってきたバランスクライテリアは、いくつかの方法で表現することが出来る。最も簡単なアプローチは、マイナスで大きい傾きに対するテストであり、この傾きは最初の状態がバランスしていないと特定される。

バランスに関するステートメント：テストは、最初のアベイラビリティと信頼性が未だ十分よくバランスしていない時に成功するように作成された。最初の状態がよくバランスされていなかったことが確定された結果、提案された変更は、バランスのみに基づいて妥当であると示される。

テストを通過するということは、最初の状態では十分にバランスしていないということを意味する。従って、バランスの観点のみから変更の妥当性が示されたことになる。

テストが不合格であったということは、提案された変更はバランスを向上させる効果的な方法ではないということを意味する。それは、最初の状況で既に十分にバランスが取れているか、バランスを向上させるより良いオプションが存在しているはずだからである。さらに、テストが不合格であったということは、提案された変更はバランスのみの観点から妥当性が示されていないということを意味する。

A. 定量的なバランスクライテリアに関するステートメント

1)追加の運転中保全単位時間ごとに 2γ を超える率で信頼性を向上させるために、さらに運転中保全を実施するか、2) 運転中保全を減らす、ことにより信頼性をさらに向上出来る時、最初のアベイラビリティ及び信頼性はバランスしていない。

従って、現状は以下の時、バランスしていない。

$\Delta P_r / \Delta H_{PMon} > 0$ （過剰保全）

又は、 **式3-12**

$\Delta P_r / \Delta H_{PMon} < -2\gamma$ （非アベイラビリティのため、信頼性は十分にはよくない）

B. 最大に許容される非アベイラビリティに関するステートメント

結果として信頼性が向上する時、最初の状況が十分にバランスしていないことを確定する追加のアベイラブルでない時間数の最大値（$1/2\gamma = 3500$）は、式 3-13 により与えられる。

以下の時、現状はバランスしていない。

追加のアベイラブルでない時間 $<$ | 信頼性の変化 | $\times$ 3500 **式3-13**

C. 信頼性における最低限の改善に関するステートメント

最初の状況が十分にバランスされていないことを確定する信頼性の、最低限の改善は、アベイラブルでない時間の増加を伴う時、以下により与えられる。

以下の時、現状はバランスしていない。

| 信頼性の変化 y | $\times$ 3500 $>$ 追加のアベイラブルでない時間 **式3-14**

これら 3 つのケース（A、B、及び C）において、初期にバランスが取れていないということの証明により、変更の実施の妥当性が示される。

PM の変更による信頼性の変化率を推定することが出来ないとしたら、いずれのステートメント（A、B、又は C）も有用ではない。実際には、この推定を実現することは難しすぎることではない。これは、保守

規則の a(1)条項下で管理されている SSC の状況を考えると、故障が通常少数存在しており、追加の PM が実施された場合、再発を防止出来るということが主張されているからである。これは、信頼性の改善の推定の根拠となり得る。

γとともに現れる係数 2 は、P_{Sum}と P_rの間の正しい関係を取り扱った直接的な結果である。係数 2 は、PM による改善を、係数がなくΔP_rと ΔH_{PMon}の間で単純なトレードオフが管理される場合よりも、より少ない非アベイラビリティ時間で達成すべきことを要求する。

提案したクライテリアは、既存のパフォーマンスクライテリアに対し論理的制約を加えるものではない。提案したクライテリアは、それらのパフォーマンスクライテリアが既にバランスしたものかということを判断するためのクライテリアに対する簡単な方法としてテストを提供するものではない。事実、バランスついて言う時に、パフォーマンスクライテリアと関連付けることは適切ではないかもしれない。というのは、それらは、単に短期的手段として、基本的アベイラビリティと信頼性が範囲内に入っていることについて不確かな確認を提供するものであるからである。パフォーマンスクライテリアをバランスさせる具体的な試みは、しばしばパフォーマンスクライテリアで対応しようとして失敗するが、その代わりにここでは基礎的なアベイラビリティと信頼性に対応する。

ここで再び、提案されたバランスの規則にはアベイラビリティと信頼性の「許容出来る値」のセットは存在しないことを述べる。その代わり、信頼性に影響を及ぼす具体的に考えられる PM の変更に関連してのみバランスの確認が出来る。例えば、既に経験している特定の故障を防ぐための PM の特定の変更などのようなものがある。

3.4 その他の基事象の取込み

単純化のため、ここまで考慮してきた基事象は、PM の実施から発生する非アベイラビリティ P_aと、1 つの非信頼性の基事象（P_r）であった。実際には、次のような基事象：修理による非アベイラビリティ、故障が発見される前の隠れた故障による隠れた非アベイラビリティ、及びその他の運転継続失敗及び閉失敗のような基事象、も含まれることがある。

対象となる機器において、さまざまな信頼性に関わる故障モードは相互排反する：弁では開失敗と閉失敗が同時に起き得ない。電動機では、起動失敗と運転継続失敗が同時に起き得ない。この結果、信頼性に関わる基事象の確率の和は、安全に対する当該機器の信頼性全体の影響で表すことが出来る。このことは、リスク重要度をバランスのクライテリアに取り込む時に、より正確に示される。

これには修理時間に起因する非アベイラビリティが含まれるだろうか。修理時間は、通常 PSA では保全における合計の非アベイラビリティとして含まれているが、機器に信頼性があり、多くの PM が運転中に実施されている時には大した影響力を持たない。にもかかわらず、修理時間に起因する非アベイラビリティは、故障の結果発生するものであり、信頼性に影響を及ぼすように調整することは出来ない。従って、バランスクライテリアに修理による非アベイラビリティが含まれるとしたら、それは、信頼性の基事象に含めなくてはならず、PM の非アベイラビリティには含めてはならない。

隠れた非アベイラビリティはどうか。これは、多くの安全評価で起動失敗の確率の代わりに使用されている、λτ/2 の項である（機器が運転していない状態の間、待機している時に待機時故障率 λ で故障する可能性がある、という考えのもの）。この代替として、機能要求のある時に一定のデマンドへの対応失敗確率で失敗が発生することが考えられる。ここで複雑なのは、サーベイランステストとサーベイランステストの間の時間 τ は、λτ/2 の項により、機器の信頼性に影響するように調整出来る。このような調整により、サーベイランステストにおける故障率又は予想される故障回数が変わることはないが、PSA モデルにおける基事象の大きさが変わる。これは、待機ミッション時間における変更だからである。この結果、この項はバランスにとって通常非アベイラビリティへの寄与として見られるが、待機非信頼性に比例し、バランスの式の信頼性の側でその他の信頼性の基事象と合算されなければならない、ということである。

もし信頼性を、明白な信頼性の基事象の和に、修理時間の非アベイラビリティと隠れた故障の項を足したものとして考えると、同じバランスクライテリアのままとなる。この和を P_r の代わりに P_R で表す。

$$P_R = \sum_i P_{ri} + H_{repair} / H_{Req} + \lambda\tau / 2 \qquad \textbf{式3-15}$$

以前と同様、P_a は運転中の PM による非アベイラビリティを示している。

このバランスクライテリアは、関連する信頼性が推定出来る範囲において、P_r の代わりに P_R を使用することにより適用すべきである。改善された PM により、おそらく λ と H_{repair} が減少（改善）し、同時にすべての P_{ri} も改善する。これらの項の追加により、単一故障モードでの値を超えて P_R の傾きの数値が上昇する。従って、初期の状態でバランス状態であるとすることはより困難となる。

これらの項を追加しても、バランスの図は異なる故障モード（すなわちそれらの基事象の確率）を含めない限り不完全である。それらの故障モードは、安全全体に対して異なる程度で影響する。単純に（式 3-15 のように）それらを足し合わせて P_R とするだけだと、リスク重要度の違いを無視することとなる。より完全なバランスのクライテリアではバーンバウム係数を考慮すべきある。同係数は、CDF の解析においてそれぞれの基事象についての重み付けを提供する。

3.5 リスク重要度の適用の取り込み

より完全なバランスクライテリアとしての適切な安全上の指標は、PSA で解析された CDF である。1 つの特定の SSC に注目する時、式 2-18 のように CDF は常に以下のように表せる。

$$CDF = \sum_i a_{ri} P_{ri} + a_a P_a + b \qquad \textbf{式3-16}$$

これは、単純化された CDF= aP+b を拡張したものである。ここで P は基事象の当該確率、a は当該事象を含む事故シーケンスの確率の和に対して P で括った時の係数。b は、その他の事故シーケンスの確率の和である。式 3-16 では、さらに aP の項を式 3-15 で定義される、信頼性の基事象の完全なセット $\{P_{ri}\}$ を用いて拡張している。$\{P_{ri}\}$ には、隠れた故障と故障の修理の非アベイラビリティの項を含む。P_a は、以前定義したのと同様の、単一の非アベイラビリティの基事象に関する項である。

H_{PMon}が選択された機器のみに適用された保全時間を表している場合、a_{ri}、a_a、及び b は H_{PMon}から独立している（つまり、他の機器の非アベイラビリティと直接相関していない）。この場合、式 3-5 の相似型は、以下のようになる。

$$dCDF / dH_{PMon} = \sum_{i(\text{すべての信頼性モード})} a_{ri} dP_{ri} / dH_{PMon} + a_a \gamma \qquad \textbf{式3-17}$$

CDF と P_{ri} の H_{PMon} への依存性は、P_{Sum} と P_r との関係に相似している。結果を図 3-7 に示す。

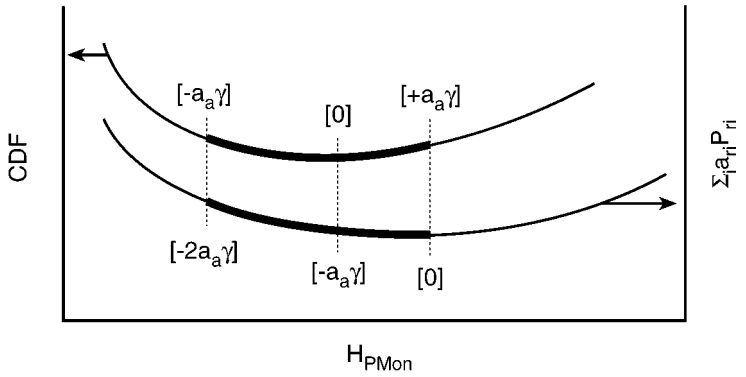

図3-7
CDF 及び $\Sigma_i a_{ri}P_{ri}$ 上のそれぞれの勾配

図 3-7 中に角括弧[ ] で示されている曲線の傾きは式 3-17 から導き出されたものである。バランスクライテリアの相似型である、式 3-12 は、以下のようになる。

次の時バランスしていない: $\sum_{i(\text{すべての信頼性モード})} a_{ri} \Delta P_{ri} / \Delta H_{PMon} < -a_a \, 2\gamma$、又は > 0 のとき

式3-18

バーンバウムパラメータ a_a 及び a_{ir} は、基本定義を使用して置き換えることが出来る。

$$CDF = a_x P_x + b' \qquad \textbf{式3-19}$$

ここで、b'は式 3-16 の b に、明示的に x に関係しないその他すべての $a_k P_k$ 項を加えたものに等しい。すると、

$$RAW_x = (a_x + b) / CDF \qquad \textbf{式3-20}$$

そこで、

$$a_x = CDF\,(RAW_x - 1)/(1 - P_x) \qquad \textbf{式3-21}$$

又は、機器の基事象に限りなく近似し、$P_x << 1$ となる。

$$a_x = CDF\,(RAW_x - 1) \qquad \textbf{式3-22}$$

バランスクライテリアは以下のようになる。

以下の時、現状はバランスしていない。

$$\sum_{i(\underline{すべて}の信頼性モード)} \frac{(RAW_{ri}-1)}{RAW_a-1}\cdot \Delta P_{ri}/\Delta H_{PMon} < -2\gamma; \text{又は} > 0 \text{のとき} \qquad \textbf{式3-23}$$

この式は、それぞれの故障モードが係数 $(RAW_{ri}-1)/(RAW_a-1)$ で重み付けされていることを除けば、式 3-12 に等しい。

つまり、

式 3-12 は、故障モード及び PM の非アベイラビリティの相対的リスク重要度を考慮しない、単一の信頼性の故障モードのバランステストを表していることを思い出してほしい。

次のとき、バランスしていない : $\Delta P_r/\Delta H_{PMon} < -2\gamma$; 又は > 0 のとき **式 3-12**

追加の信頼性の故障モードを考慮するために、相対的リスク重要度を考慮せずに単純に（修理の非アベイラビリティ及び隠れた故障の項を含め）それらを加える。テストは以下のようになる。

次のとき、バランスしていない : $\sum_{i(\underline{すべて}の信頼性モード)} \Delta P_{ri}/\Delta H_{PMon} < -2\gamma$; 又は > 0 のとき

式3-24

バランスに対応する最も完全な方法は、すべての故障モードを考慮し、相対的リスク重要度を含めることである。これにより、テストは以下のようになる。

次のとき、バランスしていない : $\sum_{i(\underline{すべて}の信頼性モード)} \frac{(RAW_{ri}-1)}{(RAW_a-1)}\cdot \Delta P_{ri}/\Delta H_{PMon} < -2\gamma$; 又は > 0 のとき

式 3-23

どのようなレベルでバランステストを適用するにせよ、決定には、発生する追加の非アベイラビリティに比べて十分に大きな信頼性の改善が単純に必要となる。

3.6 バランスとスーパーコンポーネント

複数の機器が、PSA のモデリングを単純化するためにスーパーコンポーネントのバウンダリに含まれている時、バランステストを採用する前にスーパーコンポーネントのパラメータから個々の機器についてのさまざまな重要パラメータを抽出する必要がある場合がある。これらのパラメータには、信頼性、アベイラビリティ、及び RAW リスク重要度パラメータが含まれる。セクション 2.8 にはこのトピックに関する詳細な情報が記されている。

原則として、信頼性とアベイラビリティの基事象が別々に特定出来る場合、バランステストはスーパーコンポーネントそのものに適用出来ることがある。これは必ずしもすべてのケースではないが、潜在的なPMの改善が幅広すぎて、バランステストが簡単に適用出来ないことがある。加えて、数個の機器で必要なバランスが取られるのではなく、単一機器のみが当該のリスクの焦点となる場合もある。PMが実施されるレベルにおけるすべてのタイプのスーパーコンポーネント、つまり個々の主要機器に、バランスの規則を適用するのがより良い。

最も一般的な種類のスーパーコンポーネントは、個々の機器のリスク重要度パラメータをスーパーコンポーネントのパラメータから一般的な方法で抽出することを可能にする構成となっている。これらのスーパーコンポーネントは、成功と失敗の組み合わせの観点からの論理的なつながりからなる。すべての機器は、このタイプのスーパーコンポーネントの成功を確実にするためには正しく機能しなければならず、機器のどれかが故障すると、スーパーコンポーネントの故障が発生する。このようなつながりには、機器の内部の冗長性はなく、計装ループ、又は吸込み弁、ポンプ、ドライバー及び補助装置、逆止弁、及び排出ポンプなどの典型的な機器の「トレイン」の場合がある。このような配置では、スーパーコンポーネントの故障確率は、構成機器のより複雑な機能でなく、構成機器の故障確率の単純な和に等しい。直ちに得られるメリットしては、機器の基事象のサブグループをスーパーコンポーネントの非信頼性の基事象とともに特定出来、残りをスーパーコンポーネントの非アベイラビリティの基事象で特定出来る。スーパーコンポーネントの非信頼性の基事象確率を P_R で表し、構成機器の非信頼性の基事象確率を P_{ri} とする。すると、

$$P_R = \sum_i P_{ri} \qquad \textbf{式3-25}$$

和には、1)すべての関連する基事象、つまり P_R に論理的に寄与する可能性のあるものを取り入れ、2) 隠れた故障及び修理による非アベイラビリティを含む。

スーパーコンポーネントの PM による非アベイラビリティ事象 P_A は、PM の非アベイラビリティの寄与事象のみからなる。

$$P_A = \sum_j P_{aj} \qquad \textbf{式3-26}$$

ここで、「j」はすべての構成機器を含む。スーパーコンポーネントにおいて、これらすべての事象は補助的に重み付けをせずに単純に加算されていることに注目すること。

式 3-25 及び式 3-26 は、構成する機器の非信頼性及び非アベイラビリティを用い、最も一般的なタイプのスーパーコンポーネントの非信頼性及び PM による非アベイラビリティを定義している。より複雑なスーパーコンポーネントでは、交差項が特性を結びつけるのでこのような方法で信頼性とアベイラビリティの基事象を分けることが出来ない。従って、より複雑なタイプのスーパーコンポーネントについてのバランスは、個々の機器のバランスを通してのみ対処することが出来る。

個々の機器の基事象 FV_{ri} 係数は、スーパーコンポーネントの FV_R 係数で表すことが出来る。

$$FV_{ri} = FV_R \; P_{ri} / P_R \qquad \textbf{式3-27}$$

PM による非アベイラビリティの FV 係数についても同じことが言える。

$$FV_{aj} = FV_A \ P_{aj} / P_A \qquad \textbf{式3-28}$$

RAW 係数は以下を使用して抽出出来る。

$$RAW_{rk} = RAW_R + FV_R - FV_{rk} \qquad \textbf{式3-29}$$

又は、

$$RAW_{rk} = RAW_R + FV_R \left(1 - P_{rk} / P_R\right) \qquad \textbf{式3-30}$$

RAW_{ak} に対しても同じように導くことが出来る。

$$RAW_{ak} = RAW_A + FV_A - FV_{ak} \qquad \textbf{式3-31}$$

$$RAW_{ak} = RAW_A + FV_A + FV_A \left(1 - P_{ak} / P_A\right) \qquad \textbf{式3-32}$$

構成機器についてのすべての必要なパラメータの値は、P_R、P_A、FV_R、FV_A、RAW_R、及び RAW_A であるスーパーコンポーネントに対する PSA の入出力から得ることが出来るので、こうしてバランスの規則はスーパーコンポーネントを構成する個々の機器に適用することが出来る。すべての P_{ri} 及び P_{aj} も、スーパーコンポーネントのために P_R 及び P_A を元々取得するために使用したので、必要であり、分かっていることに注意すること（式 3-25 及び式 3-26 を参照のこと）。

3.7 要約

バランスクライテリアは、信頼性にかかわらず、又当該機器が必要とする保全の非アベイラビリティが、その他の機器のタイプ又は同じタイプの機器と比べ大小かどうかにかかわらず、すべての機器のタイプに等しく適用することが出来る。クライテリアは、信頼性、アベイラビリティ、及び安全性の間の正しい関係に依存し、単純な信頼性とアベイラビリティのトレードオフに比べ、指定された非アベイラビリティの量に対応した信頼性の要求が 2 倍の保守性を持つ。又同クライテリアは、信頼性/アベイラビリティの値の異なるレンジ幅に対してバランスしているかの判断ができ、最適な信頼性の達成だけを目標としたものではない。クライテリアは、いかなる又はすべての機器の故障モードを簡単に包含し、すべての故障モードのリスク重要度の値の違いを考慮して拡張したものである。

しかしながら、バランスした領域の選定は多少任意性があり、PM の変更による信頼性向上のメリットはどのようなものかという決定は困難かもしれない。（セクション 1.4.2 で与えられる事例にあるように）はっきりしない場合には、EPRI の PMIR（予防保全情報レポジトリ）ウェブサイトのツールで、現状の PM プログラム、それに対して提案された変更、及び現状の信頼性を与えると、信頼性の潜在的変化についての予測が得られるようになっている。

これは、PM 変更の効果の推定が間違っているケースに対して、バランスルールは無防備であるため非常に重要なことである。例えば、1 つの機器において過剰な保全が実施され、信頼性が悪化している場合、このことを知らないユーザーは、追加の PM の実施と非アベイラビリティが発生しても信頼性が改善すると、誤って仮定するかもしれない。バランスのルールは、誤った仮定に基づいてその変更自身がテストを通過した場合、誤って変更を推奨するだろう。従って、この規則は既存の PM プログラムの長所や弱点を理解するという原子力発電所の設置者の責任を、なんら免除するものではない。事実、このルールはユーザーが PM プログラムの技術ベースを確立しており、提案された PM の変更により本当に信頼性が向上するということに確信を持っている場合にのみ、正しく使用することが出来るものである。

4
信頼性の監視—瞬時の故障

4.1 はじめに

大抵の原子力発電所では、保守規則 10CFR50.65 (a)(2)のパラグラフの下、信頼性が要求される SSC についての、機能故障又は保全により予防出来たであろう機能故障の数を監視することを選択している。最初の 5 つの保守規則のベースライン検査のうちの 4 つにおいて、(信頼性を監視する方法に関連した)10CFR50.65 に対する潜在的な違反が見つかった。検査では、運転サイクル当たりの故障について規定されたパフォーマンスクライテリアと IPE/PSA の仮定及びデータとの関連付けが不適切であることが見つかった。電力会社は、当初この不整合に対する解決には、故障のパフォーマンスクライテリアに照らし、各待機 SSC で経験したデマンド数を追跡し、さらにただ単に故障回数を監視するよりもデマンドへの対応失敗を監視する必要があるのではないかという懸念を表明した。

本セクションでは、デマンドの追跡及び監視結果による短期間の PSA の仮定の立証を必要としない、パフォーマンスクライテリアと PSA データとの定量的関係を構築することで、NRC の懸念に対応する 1 つの方法とその技術的ベースを説明している。この方法は、EPRI TR-106280 [1]及び EPRI Technical Bulletin 96-11-01 [2]に記載されているものである。

4.2 PSA との関連

以降のセクションで示すように、1 運転サイクルのみで経験する瞬時の故障回数及びデマンド数を監視することで、個々の SSC の信頼性を監視することは、技術的に不可能である。例外としては、1) 非常用ディーゼル発電機、これは毎月試験を実施するためで、又 2) 頻繁に試験又はデマンドをスケジュールしているその他の SSC、が挙げられる。不可能であるのは、このようなデータに基づいたデマンドへの対応失敗(又は閉失敗又は開失敗)の確率に関するどんな推定も、大きな不確実性を伴うからである。これらの不確実性は、デマンドへの対応失敗の確率が IPE/PSA で使用されている値と妥当な整合性があるかなど、有用な結論を妨げることになる。故障率の妥当な推定は、より多くのテストを含むように期間を長くするか、同じプラントのその他のトレイン、系統、又はユニットから他の同様の SSC のパフォーマンスデータを含めることのみにより可能となるかもしれない。このような推定は、PSA の目的としては妥当であったとしても、保守規則 10CFR50.65 には役に立たない。保守規則では、個々の SSC を単一の運転サイクルを通して監視することを求めている。

1996 年 10 月 22 日の NRC の原子炉規制局のディレクター代行の Frank J. Miraglia から NEI の上席副社長及び原子力責任者である Ralph E. Beedle に宛てた書簡では、信頼性のパフォーマンスクライテリアを確立するために必要とされる IPE/PSA の仮定との整合性は、ここに示す EPRI の推奨

する方法により、デマンドへの対応失敗の確率を直接監視することが不可能であっても、達成可能であるとしている。

Miraglia は、IPE/PSA のパフォーマンス又は状態を確認するために監視結果を使用することにより、IPE/PSA の仮定との明確な関連性が得られるかもしれない、とした。さらに、Miraglia は、NRC は同確認の証明のために特に高度の厳密な解析を期待しておらず、それよりも待機系統についてはデマンドについて、通常運転している系統については供用時間についての考察を伴った、合理的で適切なベースでよいとしている。

4.3 デマンドへの対応失敗の推定

「n」回のテストで「r」回の故障（失敗）をする場合、デマンドへの対応失敗の確率 P のベストエスティメイトは、P = r/n である。2 年間で、四半期に 1 回テストされる SSC は 8 回のテストのデマンドしか経験しない。テストの間の期間がより長くなると、テストの回数は減る。運転上の理由、テストのための SSC の準備、あるいは保全後の機能試験としての理由でさらに多くのテストが含まれることがある。結果として、四半期に 1 回テストされる SSC に対する正式なデマンド回数は、1 サイクルで約 20 を超えることはないと考えられる。10CFR50.65 でカバーされている一部の SSC は、四半期に 1 回よりも少ない頻度でテストされ、それらの信頼性は、4 回以下のテストに基づいて推定する必要があるかもしれない。

表 4-1 は、10 回のテストで 5 回までの失敗をする場合の SSC について、二項分布を使用した計算結果である。二項分布は、多くの IPE/PSA で仮定されているように、（例えば、コインを投げるなど）それぞれのデマンドに対して一定の失敗確率で発生するランダム故障を経験する機器の正しいモデルとして、普遍的に認められている。10 回のテストデマンドと 20 回のテストテストデマンドの結果には、2 つの図が含まれる。図 4-1 では、「ベストエスティメイト+2 倍の標準偏差」のベストエスティメイトに対する比を示している。図 4-2 では、ベストエスティメイトに対する 80%、90%の信頼度限界の比を示している。表 4-2 及び図 4-3、図 4-4 は、20 回のテストにおける同様の結果を示している。これらの比は、デマンドへの対応失敗の確率についてのそれぞれの項目に対する精度を示している、と言える。

表と図では 5 回までの失敗が示されているが、実際の原子力発電所の SSC の 1 年ないし 2 年の失敗回数は、ゼロに近いものである。予想される失敗回数は、デマンドへの対応失敗の確率（例えば、0.01）の IPE 値とデマンド回数の積である。この数は、典型的に約 0.1（～0.01 × 10）以下である。このことは、（経験に従い）具体的に 1 つの SSC について見ると、1 運転サイクルの失敗回数は、大抵の場合ゼロであり、時々1 回、又可能性としては 2 回起きることを意味している。2 回の失敗は、時々パフォーマンスクライテリアを超えたことにならずに合格とされることもあるが、ここでの焦点は 1 回の失敗結果である。

表4-1
10 回のテストデマンドへの 1 から 5 回の対応失敗に対する標準偏差及び信頼度限界

r	P = r/n	s	(P + s)/P	(P + 2s)/P	L 80%	U 80%	U80%/P	U80/L80	U90%	U90%/P
1	0.1	0.095	1.949	2.897	0.01	0.337	3.370	33.70	0.394	3.940
2	0.2	0.126	1.632	2.265	0.055	0.45	2.250	8.18	0.507	2.535
3	0.3	0.145	1.483	1.966	0.116	0.552	1.840	4.76	0.607	2.023
4	0.4	0.155	1.387	1.775	0.188	0.646	1.615	3.44	0.697	1.743
5	0.5	0.158	1.316	1.632	0.267	0.733	1.466	2.75	0.778	1.556

記号表: テスト回数 = n = 10
失敗回数 = r
デマンドへの対応失敗の確率の不偏推定値 = P = r/n
P の標準偏差 = s
P の下限 C%の信頼度限界 = LC%
P の上限 C%の信頼度限界 = UC%

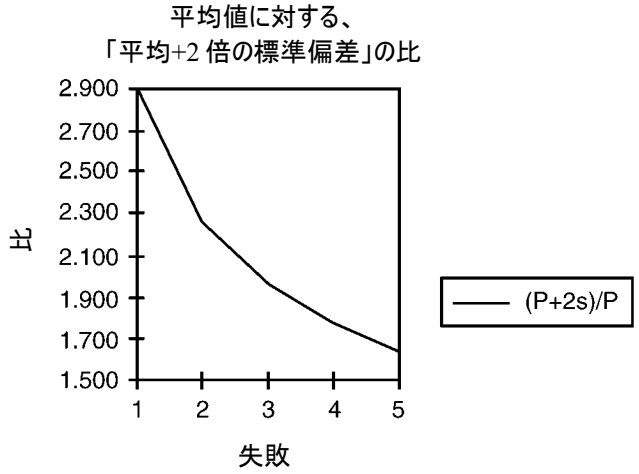

図4-1
(P + 2s)/P の比

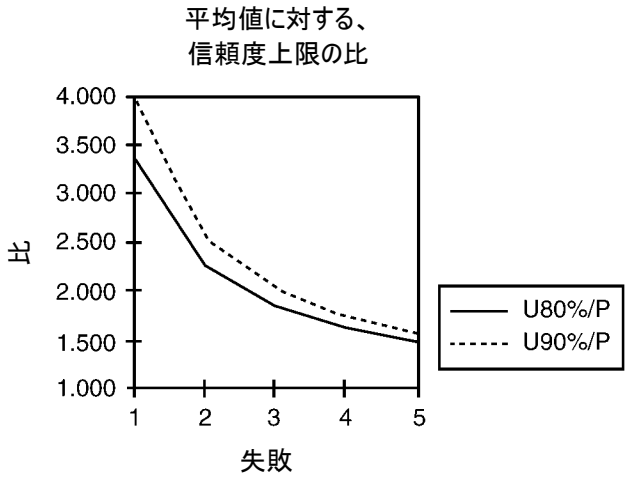

図4-2
U80%/P と U90%/P の比

0、1、2 回の失敗が起きた時、(「平均＋2 倍の標準偏差の限度」)と、(信頼度上限)との両方において、デマンドへの対応失敗の確率の推定をベストエスティメイトの 2 から 4 倍まで許すこととなる。80%の信頼度上限と 80%の信頼度下限の比で見られるように、ベストエスティメイトの下側にはさらにゆるい制限が適用され、1 回の失敗に対して 30 を超え、2 回の失敗でも 8 又は 9 となる。

この結果から、10 回又は 20 回のテストにおける、0、1、2 回の失敗の観察では、デマンドへの対応失敗確率値を制限する能力が劣り、合否判定としての有効性が非常に弱く、いかなる監視の計画においても使用可能なものと出来ない、ということが分かる。20 回を超えるテストデマンドに増えると精度は上がり、少なくとも 2 回の失敗の発生がデマンドへの対応失敗の確率の実際的な予測子となる。

表4-2
20 回のテストデマンドへの 1 から 5 回の対応失敗に対する標準偏差及び信頼度限界

r	P = r/n	s	(P + s)/P	(P + 2s)/P	L 80%	U 80%	U80%/P	U80/L80	U90%	U90%/P
1	0.05	0.049	1.975	2.949	0.006	0.182	1.820	30.33	0.215	2.150
2	0.1	0.067	1.671	2.342	0.027	0.245	1.225	9.07	0.283	1.415
3	0.15	0.080	1.532	2.065	0.056	0.304	1.013	5.43	0.344	1.147
4	0.2	0.089	1.447	1.894	0.09	0.361	0.903	4.01	0.401	1.003
5	0.25	0.097	1.387	1.775	0.127	0.415	0.830	3.27	0.456	0.912

記号表: テスト回数 = n = 20
失敗回数 = r
デマンドへの対応失敗の確率の不偏推定値 = P = r/n
P の標準偏差 = s
P の下限 C%の信頼度限界 = LC%
P の上限 C%の信頼度限界 = UC%

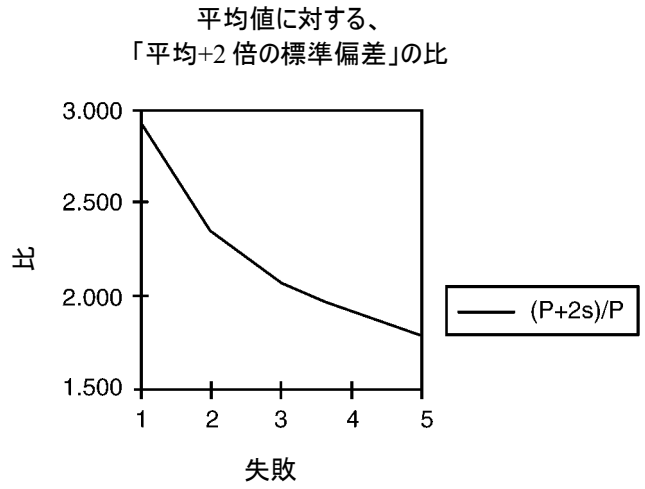

図4-3
(P + 2s)/P の比

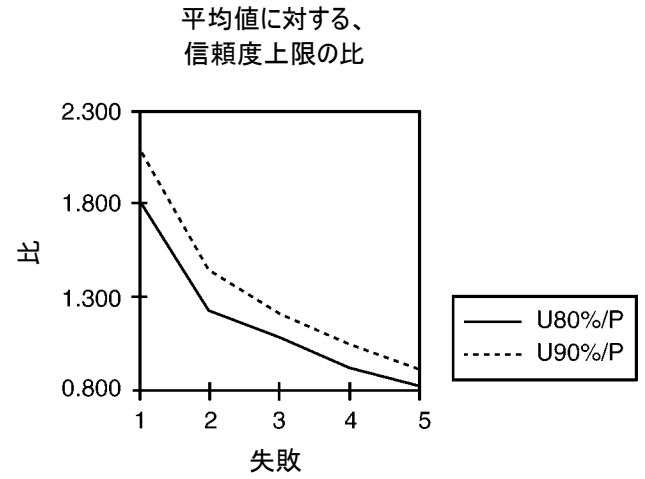

図4-4
U80%/P と U90%/P の比

結論としては、デマンドが追跡されたとしても、デマンドは保守規則の監視プロセスの中でデマンドへの対応失敗の確率に関する有用な推定を提供するために使用出来ないであろう、ということである。もちろん、規則の開始以来の全期間にわたるデータが 1 箇所に蓄積されている場合、何回かの運転サイクルが経過すると、どの SSC の精度も向上するだろう。しかしながら、この確率は全期間にわたる平均的なパフォーマンスの推定のみを提供するものであり、直近のサイクルのパフォーマンスを示すものではないだろう。

4.4 予想される失敗回数

しかしながら、純粋に定性的な予想は不要である。この理由としては、IPE/PSA 値との定量的な関係は、IPE/PSA 値が特定の失敗回数を出現させる確率に対してどのような意味を持つかということを

確認することにより（前述のようにその逆を質問するのではなく）、得られるからである。0、1、2 回以上の失敗の確率は、二項密度関数で簡単に計算出来る。デマンド n 回への対応失敗 r 回について、この関数は以下のようになる（P は $P_n(r)$とは異なることに注意すること）。

$$P_n(r) = P^r \cdot (1-P)^{(n-r)} \cdot n!/r!(n-r)!$$

よって、

$$P_n(0) = (1-P)^n$$

$$P_n(1) = nP(1-P)^{(n-1)}$$

$$P_n(2) = n(n-1)/2 \cdot P^2 \cdot (1-P)^{n-2}$$

ここで、P は PSA で使用されているデマンドへの対応失敗の確率である。

表4-3
0 回の失敗が出現する確率

テスト回数	0 回の失敗の確率	
	IPE/PSA の値が P=0.01 の時	IPE/PSA の値が P=0.001 の時
10	90.4%	99.0%
20	81.8%	98.0%

表4-4
1 回の失敗が出現する確率

テスト回数	1 回の失敗確率	
	IPE/PSA の値が P=0.01 の時	IPE/PSA の値が P=0.001 の時
10	9.1%	1.0%
20	16.5%	2.0%

表 4-3 では、それぞれの場合で最も起こり得る結果が 0 回の失敗であることを示し、表 4-4 では、1 回の失敗を観測する確率が 1%からほとんど 20%近くであることを示している。しかしながら、2 回の失敗を観測する可能性は、1 回の失敗を見つける可能性よりもずっと低い（表 4-5 を参照のこと）。

表4-5
2 回の失敗が出現する確率

テスト回数	2 回の失敗の確率	
	IPE/PSA の値が P=0.01 の時	IPE/PSA の値が P=0.001 の時
10	0.4%	0.0045%
20	1.6%	0.019%

結果から、当該のほとんどの場合において、1 回の失敗は、2 回の失敗よりも起きる確率が何倍も高いことが示された。

デマンドへの対応失敗の基本的な確率が 0.01 から 0.001 のレンジにある時でも、1 サイクルのみで SSC の 1 から 16%で 1 回の失敗が経験される。この場合の経験からデマンドへの対応失敗の確率に関するベストエスティメイトは、0.05 から 0.1 のレンジにあり、妥当な上限は 0.2 から 0.4 であることも見てきた。これは、これらの結果に基づいて P を推定しようとした監視プロセスは、20 から 400 倍不正確である可能性があることを意味している。これは、失敗やデマンドに基づいた信頼性の推定は、保全の有効性に対応する上でふさわしくないというさらなるエビデンスである。

4.5 故障のパフォーマンスクライテリア

この解析から、上記の考えられる PSA 入力値と多くの SSC が監視されているという条件において、1 回の失敗は簡単に起き得ることが示されたが、2 回の失敗は稀であるはずである。この結論は、テスト回数とデマンドへの対応失敗確率の IPE/PSA の値の幅広い範囲の値に適用される。これは、デマンドへの対応失敗確率が 0.1 に近づくにつれて（2 回の故障が顕著となるため）有効性を失う方向となり、一方 0.001 よりも小さくなっても（1 回の失敗が 1%より小さくなるため）同様のことが言える。しかしながら、依然として上述の結論は保守規則対象の SSC の大部分に対して、有効である。

この結論は「1 回は失敗が起きても良しとして、2 回の故障はクライテリアを満足しない」、もしくは、「2 回の故障までは起きても良しとして、3 回の故障はクライテリアを満足しない」とするパフォーマンスクライテリアのベースとなる。これらのクライテリアの詳細について、実際の IPE/PSA 値及び 1 運転サイクルで予想される正式なデマンド回数と常に照らし合わせて確認すべきである。これは、IPE/PSA の仮定との重要な関連性である。

しかしながら、これらの要求事項に従ってクライテリアが設定された場合、デマンド数の幅広い範囲に対して有効である（例えば、0 から 20 超）。20 を超えない限り、デマンド数を注意深く監視しても意味がない（最小数は、IPE/PSA 値に依存する。P = 0.001 の場合、最小値は、何百回のデマンド数となる。）前に示したとおり、デマンド数が少ない場合には、0、1、2 回の失敗のみが発生しそうな時は正確な数を活用することが出来ない。

4.6 要約

2 年という短い期間でほとんどの SSC の信頼性を監視することは不可能である。なぜならば、デマンドの正確な数が分かっていたとしても、0、1、又は 2 回の失敗の結果では、IPE/PSA 入力値と比較するためのデマンドへの対応失敗の確率についての意味のある範囲を得ることが出来ないからである。この結論は、ほとんどの場合、失敗回数が低い値であることに依存し、デマンド数が約 20 より低い場合はデマンド数に対する依存度は低い。この結論は、標準偏差又は信頼度限界が使用されたかどうか、又は仮定された信頼性に対しても感度がなく、従って、片側信頼度限界か両側信頼度限界が使用されているかということに対しても感度がない。

一方、IPE/PSA の入力値と正式なデマンドの予想数を用いて 0、1、2 回の失敗が出現する確率を計算することが出来る。IPE/PSA の入力値と整合性を持たせ、1 回又は（場合によっては）2 回の失敗が起きるかもしれないが、追加の故障の確率はずっと少ないということを認める故障クライテリアを選択すべきである。

PM が効果的に実施されていても、1 運転サイクル内で 1 回又は時々2 回の失敗がランダムに発生する可能性がある。これは、使用条件や劣化率に関する多くの要素は正確には分からないからである。しかしながら、追加の 1 回の失敗は、これらの失敗がランダム事象らしくなく、おそらく適切な原因解析と是正措置を必要とする悪いパフォーマンスへの傾向を表していることを示しているだろう。具体的な失敗回数が出現する確率が 5%から 10%のレンジになるように、さらに追加の 1 回の失敗が出現する確率がずっと低くなるように、パフォーマンスクライテリアを選択すべきである。

ほとんどの場合、これらの結果は幅広いデマンドに対して正しいので、推定されたデマンド数はこの計算を十分に満たすものである。デマンド数に関する詳細な知識から導き出すことは、保守規則の監視プロセスに対しては意味がない。

5
信頼性の監視—故障率が伴う場合

5.1 はじめに

セクション 4 では、SSC の瞬時の故障、特に待機している SSC の起動失敗の確率についての保守規則のパフォーマンスクライテリアを設定するガイダンスを示した。連続運転している SSC の継続運転失敗、及び 2 個以上の SSC が、ある期間において定期的に運転を切り替えるような場合、つまり起動失敗と継続運転失敗の場合の特性が混在した場合のガイダンスも必要である。本セクションでは、PSA の仮定とパフォーマンスクライテリアとの論理的で実用的な関連を提供するために、これら両方の課題について待機している SSC の時間経過とともに発生する故障の観点から対応する。

この方法は、EPRI TR-106280 [1]及び EPRI Technical Bulletin 97-3-01 [3]に記載されているものである。

5.2 PSA との関連

セクション 4 に示した情報から、典型的なケースの幅広いレンジにおいて、1 個又は数個の機器に対する少数回のテストデマンドのデータを用いて、原子力発電所で待機している機器についての意味のある起動失敗の確率を推定することは不可能であることが示された。

同様の結論は、機器データが 2 年間程度の短い期間の、1 個又は数個のものに限定されている時の、発電所で連続運転している機器の時間故障率の推定についても言える。典型的な故障率は、ポンプ、電動機、タービン、逆止弁、及び熱交換器のような機器について、0.01 から 0.5 回/年である。妥当な故障率の推定をするには、データサンプルとして数回の失敗を含む必要があり、これには通常、いくつかの平均故障間隔の数倍を要する。

これらの故障率でこの失敗回数を実現するためには、数年から数百年の運転時間を要する。系統のトレインが連続して運転している時でも、この運転時間は、2 年の運転サイクルで達することは出来ない。2 つの 100%のポンプ/電動機が交互に使用される場合（例えば、一度に 2 週間）、それぞれの合計運転時間は、2 年の運転サイクルで 1 年にしか満たない。

PSA 値との比較に故障率推定のための信頼度限界をいかに使用出来るかということを検討するために、セクション 4 に記述したのと同様の解析を実施することが可能である。このような解析では故障率が一定で、ある期間の故障回数はポアッソン分布に従うと仮定する。この場合、信頼度限界を推定するために二項分布より χ 二乗分布が使用される。これらは標準的な仮定であり、PSA のプラクティ

ス及び信頼性の理論と整合性の取れたものである。しかしながら、待機の場合のように、結果としては限界の幅が非常に大きくなりすぎてしまい、実用的なものはならない。これは、合計運転時間 T の期間で 0 回の故障の時の、片側の上限信頼度限界を求めることで証明出来る。このケースは、保守規則のケースに適用するのに意味があり、単純な閉形式解となる。

片側信頼度レベルが $100(1-\alpha)\%$での故障率（λ）の上限信頼度限界は、

$$\lambda_{upper} = -\left(\ln \alpha\right)/T$$

80%の信頼度（$\alpha = 0.2$）で、$\lambda_{upper} = 1.6 / T$となる。これは、T が 1 年の場合、1 年で故障が 0 回の時、80%の信頼度で故障率が 1 年当たり 1.6 回未満の故障であると主張することが出来る。同様の結果は、90%の信頼度では 1 年当たり 2.3 回の故障となる。

これは、2 年の運転サイクルで 2 つのポンプのそれぞれが交互に同じ時間運転する場合が考えられる。より妥当なデータサンプルに基づいた PSA の仮定は、前に述べたように、1 年当たり 0.01 から 0.5 のレンジ内であると考えられる。このような比較からは、監視する信頼性のレベルはあまり明らかにはならず、保全が効果的かを判断するには不十分である。

従って、本セクションでは、連続運転している機器の信頼性の傾向解析が不可能であることを実証することはしない。むしろ、PSA の仮定及び許容される誤ったアラームの程度に従ってパフォーマンスクライテリアを設定出来るように、1 運転サイクルにおける個々の故障回数を経験する確率計算が記述されている。この方法はセクション 4 の方法と相似性があるが、待機している機器よりも連続運転している機器に適切である統計的仮定を使用する。

5.3 一定の故障率が与えられる場合の予想される故障回数

連続的に運転している機器は、時間に対してランダムに故障を経験するが、それにもかかわらず機器には 1 年当たりの故障で表した、平均故障率λを与えることが出来る。これは、T 年間における予想される（つまり平均の）故障回数についての簡単な式がλTで表される。例えば、故障率が 1 年当たり 0.1 回の故障とすると、3 年では 0.3 回の故障と予想され（$= 0.1 \times 3$）、20 年では 2 回の故障が予想される。

T 年の運転時間において平均してλT回の故障が予想されるという事実にもかかわらず、実際の結果はこれより多いか少なくなる。これは、故障回数のランダムな性質のためである。ポアッソン確率密度により、平均してλT回の故障が予想される時、時間 T において r 回の故障が出現する確率 P(r)が与えられる。

$$P(r) = e^{-\lambda T} \cdot (\lambda T)^r / r!$$

よって、

$$P(0) = e^{-\lambda T}$$

$$P(1) = \lambda T e^{-\lambda T}$$

$$P(2) = (\lambda T)^2 e^{-\lambda T} / 2$$

$$P(3) = (\lambda T)^3 e^{-\lambda T} / 6$$、など。

ここで、1 回の故障が出現する確率は、$\lambda T e^{-\lambda T}$ であり、これは、$\lambda T \leq 0.1$ ではいつでも、λT で近似されることに注意すること。

5.4 故障率に応じたパフォーマンスクライテリア

ポアッソン関数は n と積λT のみに依存する。表 5-1 は、それぞれの故障回数を経験する確率と積λT の関係を示す。

表5-1
異なる故障回数に対する出現確率（%）

故障回数	積λT の値						
	0.001	0.005	0.01	0.05	0.1	0.5	1.3
0	99.9	99.5	99.0	95	90	61	27
1	0.10	0.50	0.99	4.8	9.0	30	35
2	$5.0\ 10^{-7}$	$1.2\ 10^{-3}$	$5.0\ 10^{-3}$	0.12	0.45	7.6	23
3	~0	$2.1\ 10^{-6}$	$1.7\ 10^{-5}$	$2.0\ 10^{-3}$	$1.5\ 10^{-2}$	1.3	10
≥4	~0	~0	~0	~0	$3.8\ 10^{-4}$	0.18	4.3

表は、λT が 0.01 以下の時、妥当に予想される唯一の結果は 0 回の故障であることを示している。$\lambda T = 0.05$ の時、1 回の故障が起きる可能性は~5%である。$\lambda T = 0.1$ では、1 回故障が起きる可能性は、9%となる。$\lambda T = 0.5$ では、2 回の故障が起きる可能性は~8%となる。$\lambda T = 1.3$ では、3 回の故障が起きる可能性は 10%である。妥当で許容されるべき誤ったアラーム率が 5-10%とすると、故障回数に関するパフォーマンスクライテリアは、λT が 0.01 以下の場合 1 回の故障も許容されない、λT が 0.05 から 0.1 の時は、1 回は許容されるが 2 回は許容されない、λT が 0.5 の時 2 回は許容されるが 3 回は許容されない、又λT が~1.3 の時は 3 回の故障が許容される、とすることが出来る。

個々のケースで適切なλT の値を決定するために、故障率は PSA で使用しているものと一致すべきである。これは、この作業が PSA の仮定と一貫性を保つことを意図しているからである。一般的に、PSA ではλの値を導き出すために供用されている期間中の故障事象のみを含めて来ており、これは保守規則への適用に対して適切なベースである。NUMARC 93-01 [5]で定義されているように、保全のパフォーマンスに故障が関連している場合は、故障率がヒューマンエラーによる事象を含むことを確認する必要があるだろう。この定義は、タグの取り付け、取外しや機器のアラインメントやリアラインメントと保全に対するすべての補助的な活動を含む。定検を計画するのに適切な時間がある場合、供用されている期間中の故障を防ぐために供用除外状態にして PM を実施することを、λの推定に追加したり、織り込んだりすべきでない。これらは故障ではなく、保全有効性を実証するための活動である。保全後試験における故障は、機器がまだ供用中になっていないので追加したり織り込んだりすべきでない。

保守規則のプラクティスと PSA との違いが発生するのは、保守規則においては保全で予防可能な故障のみを監視している時である。一方では、PSA はすべてのタイプの供用されている期間中の故障を含む傾向があるからである。後者の場合、PSA からの失敗率が保守規則における低減した故障率に一致するように調整をしなければならない。

T の適切な値は、交替するトレイン又は機器間で定期的に切り替えることにより起こる中断に係わらず、SSC の合計運転時間である。例えば、前に記述した、2 つの 100%のトレインを 2 週間ごとに切り替えて使用する場合では、各トレインの合計運転時間は、運転サイクルの半分である。切り替え期間が短いか長いか、又はその回数がどれだけあるかは、問題ではない。トレイン間で等しく運転時間が分配されていない場合は、各トレインに対して実際の合計運転時間に従って配分すべきである。同じ原理は、いくつトレインがあるかや、1 つ以上のトレインが運転しているか及び/又は同時に必要かということに係わらず、当てはまる。目的は、サクセスクライテリアが重要視される系統レベルのクライテリアを設けるために複雑なことをするのではなく、トレインレベルで各トレインに対するパフォーマンスクライテリアを設定することである。

このことに対する例外は、単一トレインに対し 0 回の故障のパフォーマンスクライテリアを回避するために、いくつかのトレインのパフォーマンスをまとめて示している時である。この場合、すべてのトレインのカレンダー上の期間 X にわたる機器の合計運転年数 T を一緒にしたものである。例えば、3 つのポンプのうち 2 つが常に運転しており、3 つ目は定期的に 3 つのポンプの間で切替えて使用している時、合計運転時間は、T = 2X 機器年数である。これは、切り替え期間 N に 2N のポンプの期間が含まれているから（2 つのポンプが常に運転しているから）である。ここで期間の長さは問題とならない。

λT の故障が予想されるにもかかわらず、λと T の値が決まれば、0、1、2、3 回の故障が出現する確率を計算することは容易である。表 5-1 及び図 5-1、図 5-2 では、λT の値が 0.001 から 0.5 の間の時の、0、1、2 回の故障を経験する確率を示している。各電力会社で、どの位の数の誤ったアラームが許容出来るかどうかを決めることが出来る。しかしながら、電力会社は注意深く決定し、10%を超えるレベルを許容すべきではない。これは、誤ったアラームの許容回数（false exceedance）を数回とするパフォーマンスクライテリアが既に十分存在するからである。このようなクライテリアを持つ SSC が 10 個のみの場合、10%のレベルでは平均して毎運転サイクルにおいて 1 回の誤ったアラームの回数を経験することを意味する。一般的に、どれが偶然の超過かを検知することは不可能で、そのような SSC に

ついては保守規則のパラグラフ(a) (1)で取扱われる可能性が高い。誤ったアラームの許容レベルを適切に考慮しないと保守規則の適用コストが増加し、保全の改善プロセスが混乱することとなる。

5.5 特定の故障回数が出現する確率に関するデータ

表 5-2 は、故障の発生率が 1 年当たり平均λであるプロセスで合計 T 機器年の期間監視する場合において、予想される（平均）故障回数がλT の時の 0、1、又は 2 回の故障が出現する確率 P(r)を示したものである。図 5-1 及び図 5-2 は同じデータをプロットしたものである。

表5-2
r = 0、1、2 回の故障の割合としての P(r)値

λT	確率（%）（r = 0 の時）	確率（%）（r = 1 の時）	確率（%）（r = 2 の時）
0.0010	99.9000	0.0999	0.0000
0.0015	99.8501	0.1498	0.0001
0.0020	99.8002	0.1996	0.0002
0.0025	99.7503	0.2494	0.0003
0.0030	99.7004	0.2991	0.0004
0.0035	99.6506	0.3488	0.0006
0.0040	99.6008	0.3984	0.0008
0.0045	99.5510	0.4480	0.0010
0.0050	99.5012	0.4975	0.0012
0.0055	99.4515	0.5470	0.0015
0.0060	99.4018	0.5964	0.0018
0.0065	99.3521	0.6458	0.0021
0.0070	99.3024	0.6951	0.0024
0.0080	99.2032	0.7936	0.0032
0.0090	99.1040	0.8919	0.0040
0.0100	99.0050	0.9900	0.0050
0.0125	98.7578	1.2345	0.0077
0.0150	98.5112	1.4777	0.0111
0.0175	98.2652	1.7196	0.0150
0.0200	98.0199	1.9604	0.0196
0.0225	97.7751	2.1999	0.0247
0.0250	97.5310	2.4383	0.0305
0.0300	97.0446	2.9113	0.0437
0.0350	96.5605	3.3796	0.0591
0.0400	96.0789	3.8432	0.0769
0.0450	95.5997	4.3020	0.0968
0.0500	95.1229	4.7561	0.1189
0.0550	94.6485	5.2057	0.1432
0.0600	94.1765	5.6506	0.1695

表-5-2（続き）
r = 0、1、2 回の故障の割合としての P(r)値

0.0650	93.7067	6.0909	0.1980
0.0700	93.2394	6.5268	0.2284
0.0800	92.3116	7.3849	0.2954
0.0900	91.3931	8.2254	0.3701
0.1000	90.4837	9.0484	0.4524
0.1250	88.2497	11.0312	0.6895
0.1500	86.0708	12.9106	0.9683
0.1750	83.9457	14.6905	1.2854
0.2000	81.8731	16.3746	1.6375
0.2250	79.8516	17.9666	2.0212
0.2500	77.8801	19.4700	2.4338
0.3000	74.0818	22.2245	3.3337
0.3500	70.4688	24.6641	4.3162
0.4000	67.0320	26.8128	5.3626
0.4500	63.7628	28.6933	6.4560
0.5000	60.6531	30.3265	7.5816

5.6 切り替えにより、連続運転しているトレインの待機の解釈

前出の切り替えで運転する多重トレインの例では（一部のトレインは、他のトレインが運転中の時は待機している状態）、待機中のトレインがデマンドに応じて起動する能力は重要だろう。この起動は運転している 1 つ又は複数のトレインの故障による過渡事象又は出力低減を回避するために、あるいは運転しているトレインの熱交換器の清掃などのような重要な PM の頻繁な実施のために行う場合である。

待機特性（機能の重要性、切り替えを遅らせる能力、及び冗長性のレベルに基づいた決定）についてパフォーマンスクライテリアが必要と考える電力会社は、セクション 4 で示した手順に従ってクライテリアを作成すべきである。

しかしながら、これは電力会社が 2 つのパフォーマンスクライテリア（このタイプの各 SSC に対する待機のためのクライテリアと連続運転のためのクライテリア）を作成及び監視するためにリソースを投入することを意味している。これには、値を組み合わせて単一のクライテリアを使用することが簡単かもしれない。個別のクライテリアを足すことで組み合わせたクライテリアが出来る。例えば、2 回以下の故障の待機クライテリアと 1 回以下の故障の運転クライテリアは、3 回以下の故障クライテリアとなる。こうすれば、故障がどのタイプかということを特定しなくてもよくなる。

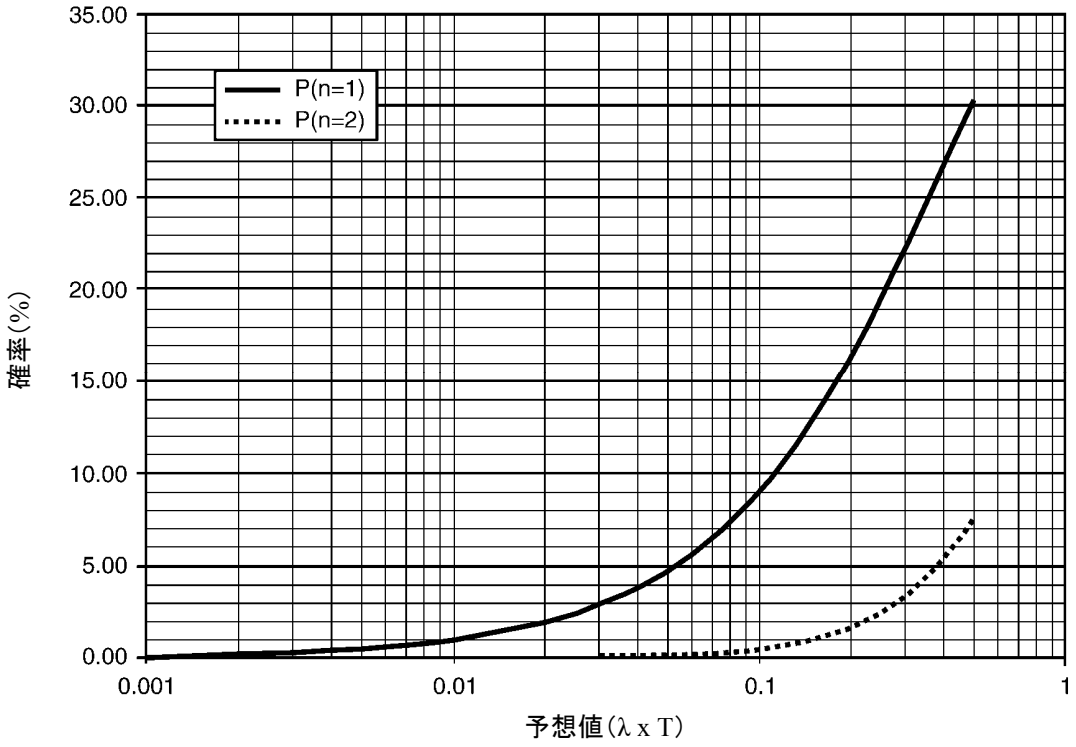

図5-1
1 回及び 2 回の故障の確率

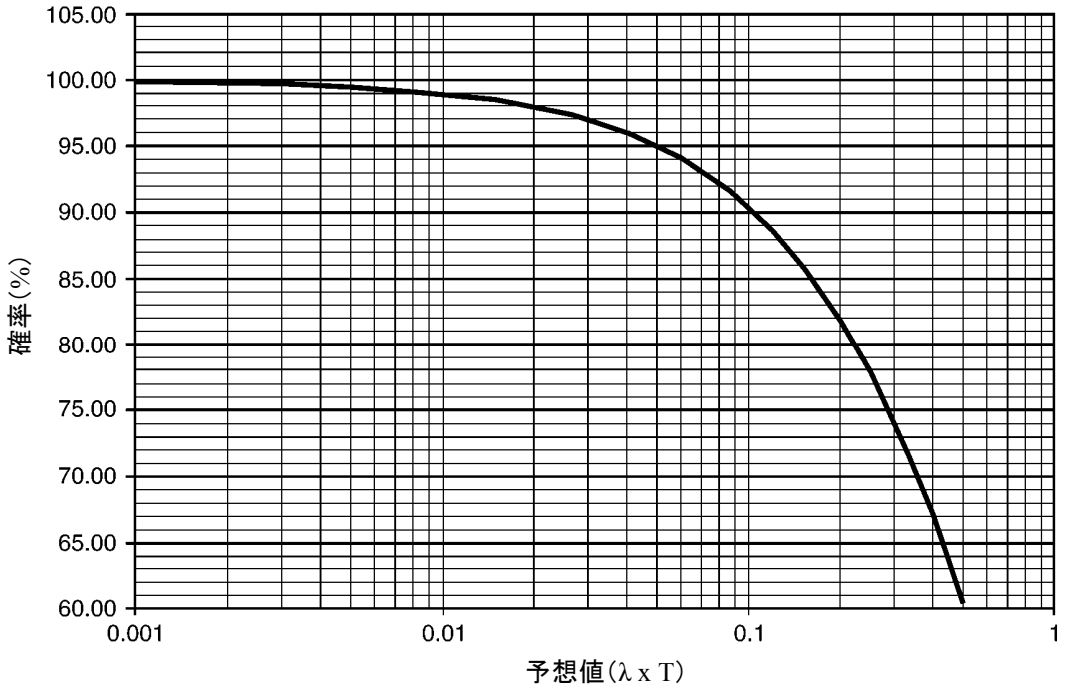

図5-2
0 回の故障の確率

この代案として、一般的により保守的な（厳しい）パフォーマンスクライテリアを以下の方法により導出することが出来るかもしれない。すなわち、待機状態の機器の寄与と運転状態の機器の寄与から、1 サイクル当たりの予想故障回数をそれぞれ求め合算し、合算した値を前述の手順のλT の値として用いる方法である。本プロセスでは、中間結果を合わせて、その後クライテリアを導出するために故障率のモデルを使用しているが、それにもかかわらず別々のクライテリアを足し算したものよりも良い結果となる。これは、包絡した予測は最後に 1 回だけ用いているからである。

この方法に対し、根本的に次の反対論が出てくる。全体のクライテリアは超過しないものの、その要素である 1 つのクライテリアが超過することがあり、これにより監視の目的を損ない、さらにクライテリアを組み合わせなければ失敗が検知出来たはずであるのに、タイムリーな検知が出来ずにあるいは全く検知が出来ずに効果的でない保全により、多くの故障が発生してしまう。待機時故障と運転継続失敗に明確な区別が可能で原因が異なる場合、組み合わせる方法は許容されない可能性がある。

しかしながら、切り替え運転をする機器において待機時故障と運転継続失敗は、単に同じ基本的なプロセスが 2 通りに表現されているだけであるという理由から、1 つにまとめられた故障に関するパフォーマンスクライテリアを採用することの妥当性を示すことは可能である。2 つのタイプの故障の取扱い（すなわち、待機時故障に関するデマンドへの対応失敗の一定の確率と、運転継続失敗としての一定の時間故障率）との違いを無視する妥当性は、次の 2 つの事実に基づいている。

1 つ目の事実は、待機時故障に関するデマンドへの対応失敗のモデルにおいて一定の確率を仮定することにより、待機している機器の故障として最も可能性の高い時間に関連する原因を無視し、デマンド対応が故障の原因であるものの重要性に重きを置いていることである。このアプローチは、PSA に関する多くの研究が行われた 1980 年代に広まり、適用の有効性よりも解析者にとっての利便性のために導入された。簡単な代替としては、待機時故障を、待機中に故障が長期間にわたり発生する故障率プロセスとしてモデル化することである。しかしながら、これはデマンド数が失敗回数に及ぼす（おそらく）妥当な影響を無視している。多くの PSA において、一部の待機している機器に対しては待機時故障率のモデルを使用し、その他の機器に対してはデマンドへの対応失敗の確率のモデルを使用することが広く行われているが、産業界はこれらの選択の適切性についてははっきり主張していない。信頼性に関する IEEE のデータでは、多くの場合同一機器に対して両方の故障データ形式を提供している。産業界は、どちらのアプローチも排除していない。これは、同じデータを与えられたとして、それぞれのアプローチは現実を近似し、通常約 2 倍以内で同じ結果が得られるためである。この不確実性の量は両モデルで分かっている。

2 つ目の事実は、待機状態と連続運転状態とを同じ期間で切り替えている機器で多くの機器の劣化が時間とともに発生すると認識されている場合、故障時期は運転時間と待機時間の両方により決まる。

セクション 5.7 では、（保守規則の監視のための）待機時の故障タイプと運転時の故障タイプを区別することが、単一の故障クライテリアにより 1 つの同じセットの中にまとめることを排除するほど十分に説得力のあるものではないという技術的な理由を提供する。全体のクライテリアを超えないものの 1 つの要素としての「別の」クライテリアを超えることに対して表明されるかもしれない懸念は、解析者が今まで複数の次善の故障モデル間で任意に選択してきたことの所産である。

5.7 待機時故障と運転継続失敗のクライテリアを組み合わせてよい理由

いくつかの場合において、1 つの SSC の故障には 2 つのタイプのパフォーマンスクライテリアが必要である、ということの根底には 2 種類の故障タイプの存在がある。連続運転している機器の故障を表すために時間故障率を使用することは、機器が、摩耗及び汚染の蓄積、材料特性（機械的及び電気的特性）の劣化、疲労き裂、腐食及び侵食、潤滑油の効果低減、ファスナーの緩み、フレーム・マウントやその他の部品の変形又は移動、及び一部の電気品のランダム故障の影響を受けるという知識により裏付けられている。これらの劣化経路は熱、湿気、放射線などの環境の影響を大きく受ける。損傷は通常、時間をかけて蓄積され故障点に近づいて行く。故障点に近づくと、（温度過渡事象又は突然の圧力パルスなどの）負荷が増加した時故障を突如として発生させる。これらのプロセスのすべての中心となるのが、時間の経過である。時間劣化率が非常に変化するか、ランダム事象が故障の原因となる時であっても、十分に数の多い機器及びプラントの適用においては、かなり一貫した平均故障発生率となる。故障発生の時間率モデルは、単に時間がより長くなると、間違いなく故障が多くなる。より時間が短くなると、損傷がそれほど蓄積されず、故障回数が低くなる。

待機している機器は、運転している機器と同じ原因で故障するが、通常より低い率で故障する。これは、摩耗が少なく、熱のレベル及び機械的な負荷が少なく、さらに待機しているローテーション機器は運転している時ほど（埃及び塩に晒されるなどの）環境の影響を受けないからである。従って、切り替えで運転をしている機器と経験する負荷はあまり変わらないが、待機している機器の時間故障率は、通常運転している機器よりも故障率が低いであろう。しかしながら、潤滑油の移動又は水平軸のたわみ及び曲がりなどの一部の影響は待機時においてより好ましくない方向となる。これらの影響により、その後の摩耗やその他の損傷が運転時間に比例して加速されるかテスト中又は起動又はサイクリングによるかは、機器による。しかしながらどちらの場合も、デマンドの悪影響が時間による影響に加わる。人による損傷又はミスアラインメント又は較正などのランダムな影響についても同じことが言える。これらの影響に他の影響に加わり、常に存在するものである。

少なくとも、ポンプ、電動機、開閉装置、逆止弁、調節弁、及び熱交換器などの待機機器の故障への影響の大部分は、長時間をかけて発生するプロセスに起因する。（例えば、圧力逃がし弁など）非常に特殊な状況のみにおいて、デマンドへの対応失敗がこの状況を変える追加要素となる。つまりこれにより、時間による影響を無視する代わりにデマンドへの対応失敗として取扱うことを正当化するためとすることが出来る。しかしながら、ほとんどの場合にはデマンドへの対応失敗と時間による影響の両方を考慮する必要があるだろう。

待機機器が一定の時間故障率よりもデマンドへの対応失敗の一定した確率を持つものとして対処すべきかの程度は、どちらの影響が優勢かという問題である。ある特定のタイプの待機機器については、2 つの別々の思考実験を実施することが有益である。最初の思考実験では、2 つの同一の機器が同じ合計デマンド回数を受けるが、異なる待機期間を持つとする。各機器で経験する故障はほとんど同じか。同じでなければ、どちらの故障が多いか。2 つ目の思考実験は、同じ 2 つの機器についてであるが、同じ期間において 1 つの機器が、もう 1 つの機器よりも多くのデマンド回数（テスト又は運転サイクル）を受ける。各機器で経験する故障はほとんど同じか。同じでなければ、どちらの故障が多いか。

運転及び待機の切り替え運転をしている発電所の機器（例えば、開閉装置、電動機、ポンプ、逆止弁、AOV などの調節弁、及び熱交換器）についての答えは、故障率モデル（デマンド回数により注目すべき変化はないが、待機時において故障が増加する）が好まれる可能性が高いか、決定するには状況が不確かすぎるか、難しすぎるということであった。劣化メカニズム及び EPRI PM ベースプロジェクトで直面した影響に関する簡単なサーベイが行われ、それにより PM プログラムの技術ベースが作成されているが、そのサーベイの結果では、デマンド数に関連した影響よりも、待機時間中に関連した電動機への劣化の影響が約 3 倍多かったという結論が得られた。

PSA でどちらのモデルが使用されたか、ということについては、ほとんど利便性の問題であった。これらのモデルを正しい割合で混合するデータや知識が今までなく、現在も存在しない。従って、現実にはどちらのモデルも十分ではないが、数字による結果を計算するためにこれらのモデルから選択する。よって、特に運転及び待機の切り替え運転をしている機器に関しては、待機時に起きる故障とデマンドへの対応失敗を区別する技術的可能性及び必要性については明らかに疑問が持たれている。これらの故障の区別は非常に難しく、詳細に識別することはほとんど不可能なため、必要な時のみ区別される。PSA ではこのような選択は必要であるが、実際の故障をカウントする時にはこれらを区別するとかえって不確実性が増加する。

ここで、待機及び運転を切り替えて運転している機器について、待機中に起きる故障と運転期間中に発生する故障の関連を考慮することが出来る。待機時故障は、ある一定の故障率を持つ、時間に依存して発生するプロセスに関連する多くの特性を持つ。さらにこれらの故障は、SSC が最終的に脆弱となり故障するランダム事象を除き、基本的に区別出来ない。なぜならば、故障に至る劣化メカニズムの進展は、待機時と運転時両方における発生事象により促進されるからである。結果的に、故障時期に関するこれら 2 つの原因要素は相互に密接に作用する。従って、これらの故障を 2 つのグループ（運転及び待機）に区別することは、ただ形式的なことで技術的妥当性に欠き、おそらく誤りだろう。

5.8 待機時故障率のパフォーマンスクライテリア

セクション 4 では、デマンドへの対応失敗の確率を使用した機器モデル、又はその他の瞬時の故障モードのパフォーマンスクライテリアを取上げた。セクション 5.3 から 5.5 では、連続運転の機器を取上げ、セクション 5.6 及び 5.7 では起動失敗と運転継続失敗の組み合わせを考慮した。本セクションでは、デマンドへの対応失敗の確率ではなく時間故障率を使用した、PSA でモデル化された待機機器に適用される故障率の方法を取上げる。

機器が待機中に時間とともに故障することが推定される時、PSA モデルでのアプローチではそのような事象による平均的な非アベイラビリティを推定するために待機時故障率を使用する。これは、最後に成功裏に実施されたテスト以来、故障により機器が分かっていない期間アベイラブルではなかったということに基づいている。このプロセスによる平均的な非アベイラビリティは、$\lambda\tau/2$ であり、ここで τ はテストとテストの間の時間である。PSA では、デマンドへの対応失敗の確率からなる基事象を使用する代わりに、この数量が基事象として含まれている。ほとんどの PSA では一部の待機機器に対してこのモデル

を含めているが、一部の PSA ではこのモデルを大部分に使用している。多くの PSA では大多数の待機機器に対してデマンドへの対応失敗の確率を使用している。

保守規則では、監視計画にこの非アベイラビリティ（$\lambda\tau/2$）を取込むことは不可能である。なぜならば、この値は観察出来るデータ値ではないからである。その代わり、この値は一定の平均値である。これらのケースに対する故障のパフォーマンスクライテリアの作成が望ましいとしたら、2 つのオプションが存在する。基本的に、デマンド数の推定とともに、λの値のベースとなる故障統計を使用し、デマンドへの対応失敗の確率に等しい値を計算することが出来る。手順では、その後セクション 4 で示した方法を使用してパフォーマンスクライテリアを作成する。しかしながら、ほとんどの場合、元の故障統計はすぐに利用可能ではないので、このアプローチは PSA で使用されているモデル化のアプローチから反れてしまう。

より簡単な方法は、連続運転の機器に関するセクション 5.3 から 5.5 で記述されたアプローチとともに、PSA からの待機時故障率の値λを、λT の関数として使用するものである。保守規則の全監視期間における待機時間を T と定義する。通常これは運転サイクルの期間である。（これは、PSA で使用されているサーベイランステスト期間 τ となんら関係はない。）λと T の値が決定したら、セクション 5.3 から 5.5 に含まれる式、表、図をすぐに適用出来る。

例えば、PSA では、サーベイランステストの間隔が 6 ヶ月（= 0.5 年）の電動機の待機時故障率を 1 年当たり$\lambda = 0.08$ 回の故障とし使用している。このことから、PSA は待機時の平均非アベイラビリティを $\lambda\tau/2 = 0.08 \times 0.5 \times 0.5 = 0.02$ と推定する。保守規則の監視では（電動機が 2 年の運転サイクル待機中と仮定し）、積λT は $0.08 \times 2 = 0.16$ となる。従って、1 サイクル当たり 0.16 回の故障を予想すべきである。表 5-1 及び図 5-2 は、この予想値において、1 回の故障が出現する確率は~13%であり、2 回の故障が出現する確率は~1%であることを示している。従って、運転期間当たり 1 回以下の故障を許容するパフォーマンスが、実用的なパフォーマンスクライテリアだろう。0 回の故障も、偶然の超過の観点から妥当な選択かもしれないが、傾向解析を可能にするために、補足的なパフォーマンスクライテリアが必要になるだろう。多くの場合、監視期間を 3 又は 4 年にすることが、0 回の故障のクライテリアを回避する実用的な方法かもしれない。

PSA の待機中の非アベイラビリティに、サーベイランステスト期間とその結果の平均非アベイラビリティを使用することは、保守規則の監視手順と合わないものであることに注意すること。さらに、サイクル中においてプラントが実際に運転している時間を考慮することは、機器は常に劣化しているという基本的な仮定から、重要ではない。さらに明らかに、少なくとも 2 つのデマンド（必ずしもテストデマンドではない）がサイクル中の機器に対して発生するという暗黙の前提もあり、そうでなければ 2 つの故障は発見されないだろう。これらのデマンドのうちの 1 つは、サイクルの終わった後に行われることがある。

5.9 要約

2 年という短い期間で連続運転している特定の SSC の信頼性を監視することは不可能である。しかしながら、0、1、2、3 回以上の故障が出現する可能性は、ポアッソン分布を使用して計算出来、それを用いてパフォーマンスクライテリアを選択することが出来る。このクライテリアは偶然超過する確率が許容出来る程度の小さな値になるもので、信頼性を PSA 値に等しくしたものである。セクション 5.3 から 5.5 に含まれている式、表、及び図により、最低限の計算でこのプロセスを実施することが出来るようになっている。

さらにセクション 4 の結果は、運転と待機の切り替え運転を行っている機器の待機時故障に対処するためのパフォーマンスクライテリアを提供するために使用することも可能である。しかしながら、これにより待機及び運転時間のクライテリアがそれぞれ出来ることになる。もし電力会社が、待機と運転時のクライテリアをそれぞれ作成し、監視することを望まない場合、待機及び運転時の故障を区別しない 2 つのクライテリアを組み合わせ合算することにより、単一の全体のクライテリアとすることも可能である（セクション 5.6 及び 5.7 を参照のこと）。

待機時故障率の監視は、セクション 5.8 で記述されているミッション時間の変更を行い、セクション 5.3 から 5.6 に含まれる式、表、図を使用して達成することが出来る。

6
参考文献

本文中での参考文献

1. *EPRI 保守規則プロジェクトからの見識（Insights From EPRI Maintenance Rule Project）EPRI, Palo Alto, CA: 1996. TR-106280.*

2. *保守規則のための信頼性監視（Monitoring Reliability for the Maintenance Rule）EPRI, Palo Alto, CA: 1996. 96-11-01.*

3. *保守規則のための信頼性監視―運転継続失敗（Monitoring Reliability for the Maintenance Rule—Failure to Run）EPRI, Palo Alto, CA: 1997. Technical Bulletin 97-3-01.*

4. *PSA 適用ガイド（PSA Applications Guide）EPRI, Palo Alto, CA: 1995. TR-105396.*

5. 「原子力発電所における保全の有効性監視に関する産業界ガイドライン（Industry Guidelines for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants)」 NUMARC 93-01, 1993

その他の参考文献

「リスク情報を活用し、パフォーマンスに基づいた規制、NRC 委員会方針及びガイド（Risk-Informed and Performance-Based Regulation, NRC Commission Policy and Guidance)」 NRC 白書 1999 年 3 月 16 日発行

I. B. Wall、J. J. Haugh、及び D. H. Worledge、「原子力発電所の安全性を管理するための最近の PA の適用（Recent Applications of PSA for Managing Nuclear Power Plant Safety）」 *Nuclear Science and Technology* での発表が受入れられた。

Export Control Restrictions

Access to and use of EPRI Intellectual Property is granted with the specific understanding and requirement that responsibility for ensuring full compliance with all applicable U.S. and foreign export laws and regulations is being undertaken by you and your company. This includes an obligation to ensure that any individual receiving access hereunder who is not a U.S. citizen or permanent U.S. resident is permitted access under applicable U.S. and foreign export laws and regulations. In the event you are uncertain whether you or your company may lawfully obtain access to this EPRI Intellectual Property, you acknowledge that it is your obligation to consult with your company's legal counsel to determine whether this access is lawful. Although EPRI may make available on a case-by-case basis an informal assessment of the applicable U.S. export classification for specific EPRI Intellectual Property, you and your company acknowledge that this assessment is solely for informational purposes and not for reliance purposes. You and your company acknowledge that it is still the obligation of you and your company to make your own assessment of the applicable U.S. export classification and ensure compliance accordingly. You and your company understand and acknowledge your obligations to make a prompt report to EPRI and the appropriate authorities regarding any access to or use of EPRI Intellectual Property hereunder that may be in violation of applicable U.S. or foreign export laws or regulations.

The Electric Power Research Institute Inc., (EPRI, www.epri.com) conducts research and development relating to the generation, delivery and use of electricity for the benefit of the public. An independent, nonprofit organization, EPRI brings together its scientists and engineers as well as experts from academia and industry to help address challenges in electricity, including reliability, efficiency, health, safety and the environment. EPRI also provides technology, policy and economic analyses to drive long-range research and development planning, and supports research in emerging technologies. EPRI's members represent more than 90 percent of the electricity generated and delivered in the United States, and international participation extends to 40 countries. EPRI's principal offices and laboratories are located in Palo Alto, Calif.; Charlotte, N.C.; Knoxville, Tenn.; and Lenox, Mass.

Together...Shaping the Future of Electricity

Program:
Nuclear Power

© 2012 Electric Power Research Institute (EPRI), Inc. All rights reserved. Electric Power Research Institute, EPRI, and TOGETHER...SHAPING THE FUTURE OF ELECTRICITY are registered service marks of the Electric Power Research Institute, Inc.

1025788

Electric Power Research Institute
3420 Hillview Avenue, Palo Alto, California 94304-1338 · PO Box 10412, Palo Alto, California 94303-0813 USA
800.313.3774 · 650.855.2121 · askepri@epri.com · www.epri.com