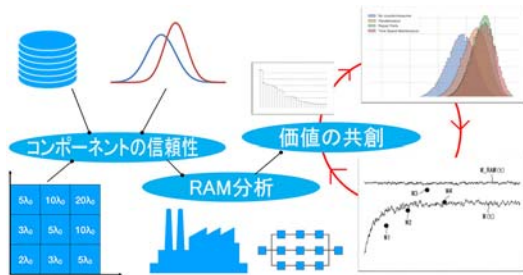


プラント稼働率・経済性向上のための 知識ベース RAM 分析の実機展開

Implementation of Knowledge-based RAM Analysis for Improvement of Plant Availability and Economic Efficiency



松本 俊作*¹
Shunsaku Matsumoto

藤原 直子*²
Naoko Fujiwara

中馬 康晴*³
Yasuharu Chuman

製品の信頼性、稼働率、保全性、経済性を効率的に高めるための製品・サービス開発戦略を
実行する手法として、RAM (Reliability, Availability, Maintainability) 分析が存在する。著者らは、
三菱重工グループが扱う多品種の製品に対して、設計・サービス・研究部門の専門家らと、RAM
分析を活用しながら、製品の稼働率や経済性を高めるための課題解決に取り組んできた。また、
RAM 分析の実機展開と並行して、その適用範囲を拡大するために、独自のリスク評価フレームワ
ークを含む新技術開発を進めている。本報では、RAM 分析の概要、独自のリスク評価フレームワ
ーク、及び、RAM 分析の適用事例について説明する。

1. はじめに

製品の信頼性、稼働率、保全性、経済性を効率的に高めるためには、まず、システム全体の稼
働率や弱点機器を明確にし、目標稼働率に対する現状評価を踏まえて、高リスク機器から順番
に必要な設計・サービスによる対策を提供していくことが必要である。このような製品・サービス開
発戦略を実行する手法論として、RAM (Reliability, Availability, Maintainability) 分析が存在す
る。

これまでも三菱重工グループが扱う多品種の製品に対して、設計、サービス、研究部門の専
門家とともに、RAM 分析を活用しながら稼働率向上に向けた課題解決に取り組んできた。

しかしながら、世間一般で実施されている統計的故障率データのみを用いる一般的な RAM 分
析では、統計的故障率データが存在しない新製品や、稼働実績が少ない製品に対して、実態に
即した故障率や稼働率を予測できない課題があった。本報では、製品の稼働率や経済性を最大
化し、技術リスクを最小化する RAM 分析の概要、課題解決のため開発した独自のリスク評価フレ
ームワーク、及び RAM 分析の適用事例について説明する。

2. RAM 分析とは

RAM 分析とは、評価対象設備の図面 (Piping & Instrumentation Diagram 等) を元に、システム
構成機器の待機系統、部分負荷運転等の各種冗長性を考慮して構築した信頼性ブロック
図 (Reliability Block Diagram) と、各構成機器 (ブロック) 固有の故障率、故障時の復旧時間、事
後保全費用に関する確率モデルと確率パラメータを用いた、システム稼働シミュレーションであ
る。図1に RAM 分析の入出力例を示す。

RAM 分析では、任意の評価期間における、製品のシステム信頼度、稼働率、保全費用の確率
分布に加え、システム構成機器が保有するリスク (全体稼働率への影響度、予防保全費用、事後

*1 総合研究所強度・構造研究部 技術士 (機械部門)

*2 総合研究所強度・構造研究部

*3 総合研究所強度・構造研究部 部長 技術士 (機械部門)

保全費用)を、全機器横並びで同時に評価する。これにより、担当課、部門、ドメイン等の組織の垣根を超え、製品の目標稼働率達成に向けて、高リスク機器から順番に対策を検討していくことが可能となり、設計・サービスに関する経営資源の最適配分が実現される。

RAM 分析には、多くの入力データが必要だが、その要諦は故障率データであり、その予想精度が、製品の稼働率予測と弱点機器の同定に大きな影響を与える。故障率予測モデルは、(1)故障データドリブンモデル、(2)故障物理モデル、そして今回新たに開発した、(3)専門家知見による故障率修正モデルに大別される。以下にこれらのモデルを用いた RAM 分析の特徴を説明する。

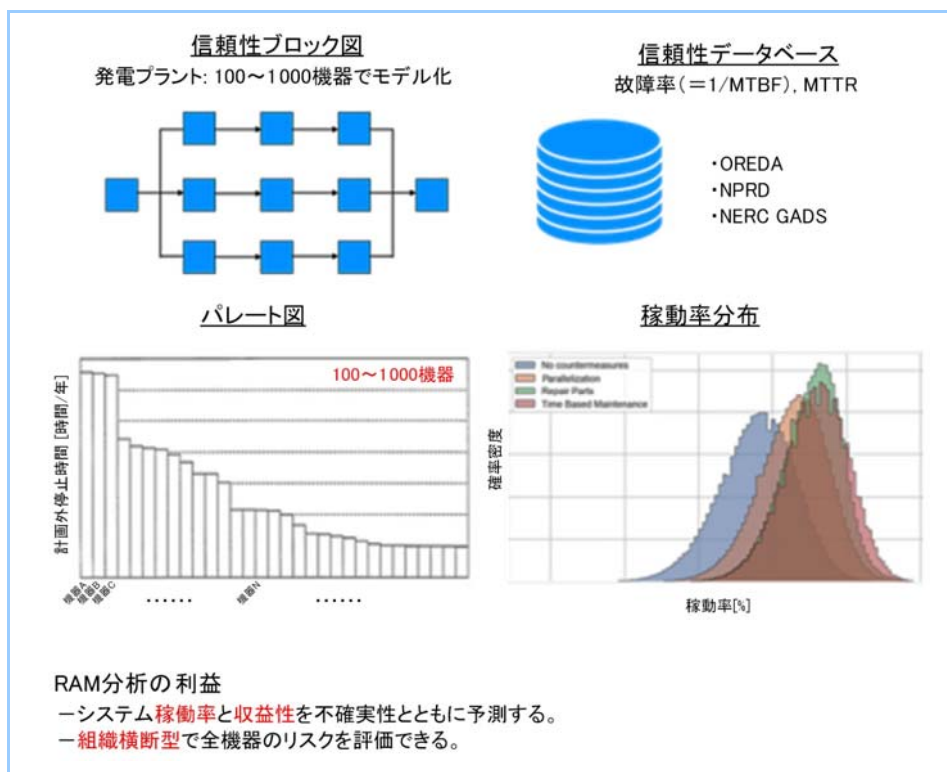


図1 RAM 分析の入出力

2.1 故障データドリブンモデルを用いた RAM 分析

バルブやポンプ等の機械要素は、類似仕様の機器が多くの製品で使用されているため、故障データを用いた故障確率の統計処理が比較的容易である。汎用的な機械要素については、世界中で運転実績と故障実績の蓄積が進み、その一部は故障率データベースとして公開されている。多くの公開故障率データベースでは、機器の統計的故障率を数表として与えているため、評価対象システムの信頼性ブロック図を作成すれば、比較的短時間で RAM 分析を実行できる利点があり、一般的に RAM 分析という場合、このモデルを用いた分析を指す。

公開故障率データは、実際の運転時間と故障実績を統計処理した結果であるため、機器の故障発生頻度を平均的に捉えている。その一方で、実際の機器は、産業分野、製造メーカ、使用する国やオペレータによって、設計安全係数、製造品質、保全・運転条件、使用環境等の諸条件が異なるため、故障率には条件に応じた差異がある。実際の製品に RAM 分析を適用する際に、公開故障率データベースを用いた場合、予測されるシステム稼働率や弱点機器が、設計者や専門家の感覚や実機の故障傾向と乖離を生じることが多い。また、公開故障率データベースでは、機器の故障時間間隔は指数分布(偶発故障)に従うことを前提としており、時系列的な故障率変化は評価できない。

一方、製造メーカやオペレータは、評価対象の運転データと時系列的な故障/生存データを長年にわたって蓄積しているため、初期故障、偶発故障、経年劣化のような故障パターンの分析を含め、製品の実態により即した故障率評価と対策の具体化が可能となる。

2.2 故障物理モデルを用いた RAM 分析

大型構造物や特殊仕様の機器のように、運転実績や故障実績が少ない機器に関しては、統計的故障率は算出できない。その際は、機器の故障物理モデルとその入力変数の不確実性の進展評価により、寿命の確率分布や故障確率を算出する。

本評価では、製品の設計知見に加え、多品種製品の荷重・環境条件、製造方法に対応する解析手法、構造物・要素試験ノウハウとデータ、オンライン、オフラインでの実機計測技術、実機計測データを利用した応答・損傷予測手法など多様な手法とデータが活用される。図2に故障物理モデルを用いた RAM 分析の概念図を示す。各機器の限界状態の評価では、機器の荷重-応答-強度に影響する偶然的な不確実性と認識論的不確実性が統合評価され、時系列的な破損確率(寿命分布)が算出される。

本評価で算出した機器寿命の確率分布は、故障率と同様、RAM 分析の入力データとなる。また、特に経年劣化に関しては、機器の寿命分布、破損確率を定量化することで、信頼度やリスク(=破損確率×影響度)を基準にした設計(RBDO:Reliability Based Design Optimization 等)やサービスの意思決定支援(RBM:Risk Based Maintenance 等)が可能となる

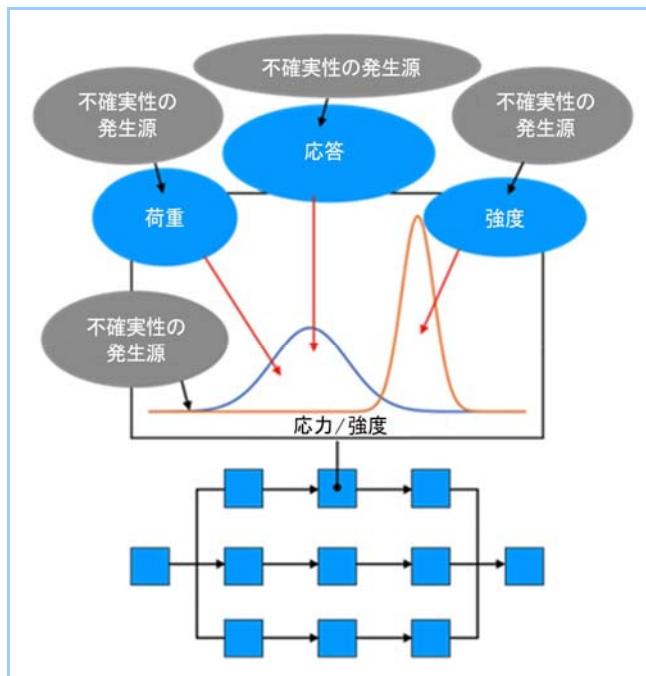


図2 RAM 分析における故障物理の考慮

2.3 知識ベース RAM 分析

2.3.1 開発手法の概要

新設計・新構造を採用した新製品には、統計的故障率データは存在せず、また、成熟製品に比べて故障メカニズムや損傷進展速度の予測の不確実性が大きい。このような状況では、定量的データのみでなく、設計者や専門家による定性的なリスク評価が重要な情報源となる。しかし、設計者や専門家が過去に経験した不具合やその原因分析の知見は、各人の記憶と主観による部分も大きく、個人差が大きい可能性が高い。

そこで、FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)やDRBFM(Design Review Based on Failure Mode)などの、既存のトラブル未然防止のフレームワークを拡張し、初期故障、偶発故障、経年劣化と故障パターンを分けて製品リスクを評価するRAM分析向けFMEAフレームワークを新たに構築した。図3にRAM分析向けFMEAシートの一部を示す。

本フレームワークでは、まず各構成機器を部位と主要故障モードに分解する(手順 1)。そして、各故障モードに関して、構造・材料・環境・運用方法等の観点で故障リスクを増加させうる新規性や特殊性の有無を評価する(手順 2)。次に、各部位・故障モードごとに初期故障、偶発故

障, 経年劣化の3つの故障パターンを評価し(手順 3), 故障発生時のシステムへの影響度として, 故障時の平均復旧時間(MTTR: Mean Time To Repair)や故障時のシステム運転可能出力等を評価する(手順 4)。

さらに, 本手法の最大の特徴として, 新規性の高い機器に対して, 設計者と専門家が, 初期故障, 偶発故障, 経年劣化に対応する影響因子のレベルを評価し, そのレベルに応じた確率パラメータ(以下, 単にリスクマトリクス中の数値と呼ぶ)をリスクマトリクス形式で与え, 故障率を再評価する(手順 5)。本評価の詳細は後ほど, “故障リスクマトリクスによる故障率予測”で説明する。

そして, 故障時に必要になる予備品とその保有状況, 納期等の情報を抽出する(手順 6)。最後に, 最新の設計進捗や設計・研究開発の成果を踏まえ, 各故障モードの残存リスクを評価する(手順 7)。

RAM 分析向け FMEA シートを用いて, 設計者や専門家が持つ知識を透明性と一貫性を担保しながら定量化し, RAM 分析に反映する本プロセスを, 知識ベース RAM 分析と名付けた。特に新製品では, 知識ベース RAM 分析で予測される稼働率予測や高リスク機器のパレート図は, 通常の RAM 分析に比べて, 実機の実態や設計者や専門家の感覚に近いことが確認できている。

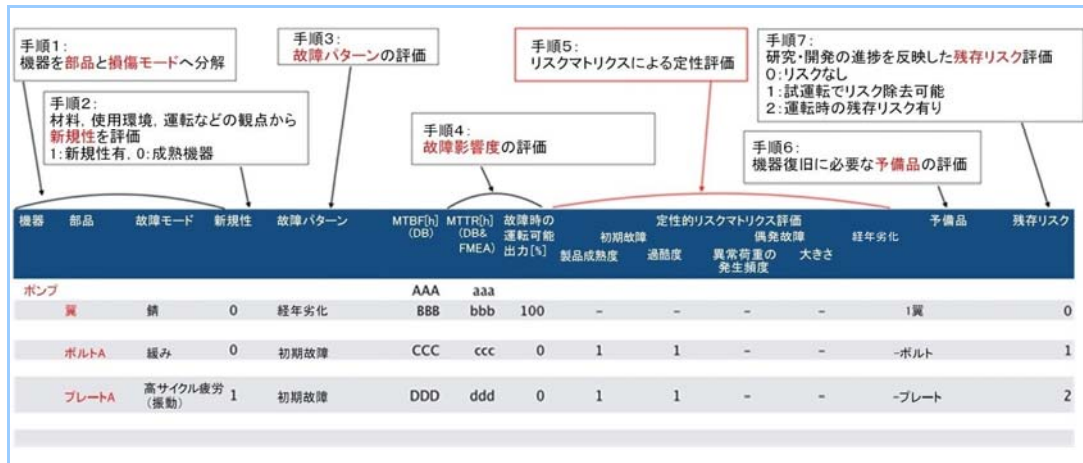


図3 RAM 分析向け FMEA シートによるリスク評価

2.3.2 リスクマトリクスによる故障率予測

(a) 初期故障

初期故障は, 設計不良(材料選定ミス, 応答予測ミスなど)や製造不良(材料欠陥, 熱処理ミスなど), 運用方法の不具合など, 経験不足と負荷の過酷さが重畳して発生することが多い。したがって, 図4に示すように, 製品の成熟度と過酷度(荷重, 温度, 環境等)をそれぞれ3水準で分類し, 初期故障の発生確率を評価した。

製品成熟度は, (L1) 量産品で実績がある, (L2) 非量産品だが実績がある, (L3) 非量産品で実績がない, で分類し, 過酷度は, 荷重で例示すると, (L1) 荷重が小さい, (L2) 中程度, (L3) 大きい, で分類した。リスクマトリクス中の数値は, Weibull 分布の形状パラメータ(< 1.0)で, 評価レベルが大きいほど形状パラメータが小さくなり, 初期故障の発生確率を高く評価する。

(b) 偶発故障

偶発故障は, システムへのランダムなストレスや過酷な操作で発生することが多いため, 図5に示すように, 設計者や専門家の想定する異常荷重の発生頻度と大きさをそれぞれ3水準で評価し, 偶発故障の発生確率を評価した。

異常荷重の発生頻度は, (L1) 1回/20年, (L2) 1回/年, (L3) 1回/月で分類し, 大きさは, (L1) 影響なし, (L2) 数回繰り返すとシステム停止, (L3) 1回発生するとシステム停止で分類した。リスクマトリクスの数値は, 類似した成熟製品の統計的故障率に対する発生頻度の重み係数で, 評価レベルが大きいほど重み係数が増加し, 偶発故障の発生確率を高く評価する。

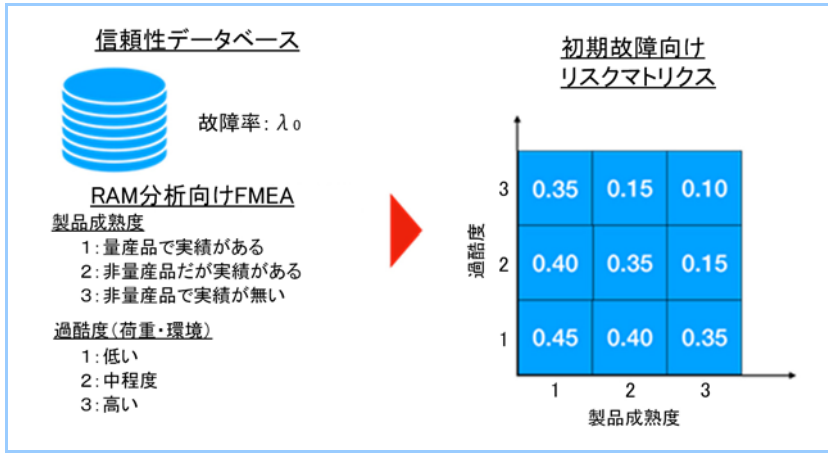


図4 リスクマトリクスを用いた初期故障リスク評価(図中の数字は仮値)

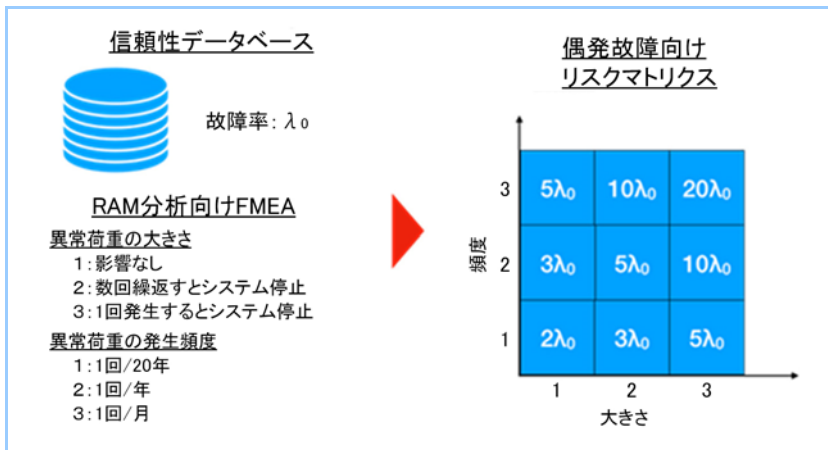


図5 リスクマトリクスを用いた偶発故障リスク評価(図中の数字は仮値)

(c) 経年劣化

経年劣化(疲労, クリープ, 機械的摩耗, 腐食など)は, 初期故障や偶発故障と比べて緩やかに損傷が進行するため, 損傷速度の予測値を元に時間基準保全や状態監視保全などの予防保全で故障を防止する。

そこで, 経年劣化の評価は, 図6に示すように損傷速度予測値と実際の損傷速度の差と, その要因分析に確信度を合わせて, (L1) 損傷速度は予測通り, (L2) 損傷速度は予測よりも早い原因が明確, (L3) 損傷速度が予測よりも早く, かつ, 原因が不明確の3段階で分類した。

経年劣化は, 製品との類似度が高い実証設備等の検査・計測データが存在する場合のみ評価する。リスクマトリクス中の数値は損傷速度の変動係数で, 評価レベルが高いほど変動係数が大きくなり, 損傷速度の不確実性が大きくなる。

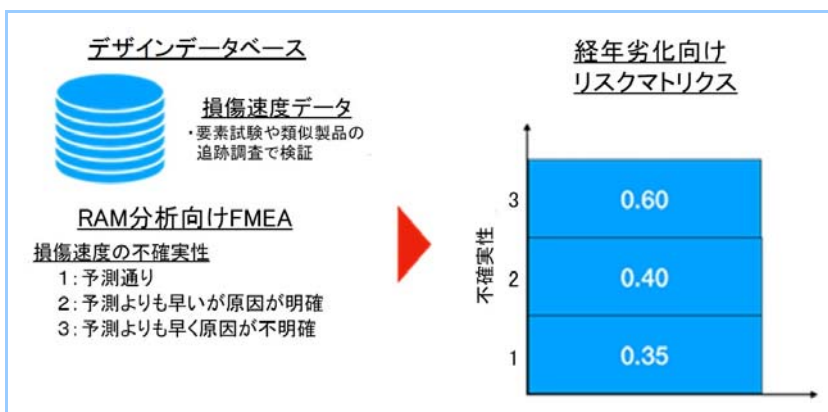


図6 リスクマトリクスを用いた経年劣化リスク評価(図中の数字は仮値)

2.3.3 リスクマトリクスのパラメータ設定

リスクマトリクス中の数値の設定方法として、(1)成績重み付け評価法と、(2)システム信頼度キャリブレーション法を用いた⁽¹⁾。成績重み付け評価では、各専門家によるリスクマトリクス中の数値評価を、個人の故障率予測精度に応じて重付け評価する。一方、システム信頼度キャリブレーション法では、**図7**に示すように、RAM 分析で算出するシステム信頼度予測分布の中央傾向(平均, 中央値, 最頻値等)が、信頼度代表値に一致するよう数値を調整する。いずれの手法も、個別機器の故障率の予測精度と同様に、関係者間の合理的な合意形成を行うことを目的としている。

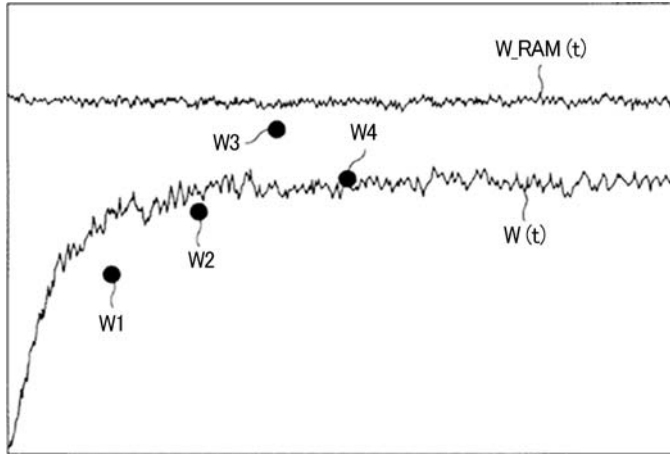


図7 実機稼働率データを用いたリスクマトリクス合わせこみ

3. 稼働率向上、サービス投資最適化のための対策策定

大型の製品・機械システムの多くは、多様・多点数の機器を含むため、設計・サービス担当課も多岐に渡っている。そのため、システム全体最適化のための意思決定は、人間系での調整部分が多く、工数増、検討期間長の原因となっている。そこで、RAM 分析を活用した設計・サービスの意思決定の検討例について説明する。

3.1 事後保全費用と予防保全費用のバランス可視化

RAM 分析で算出されるシステム構成機器の事後保全費用の統計的代表的値(期待値, パーセントイル等)と、フィールドデータや保全計画データを収集・分析して得られる予防保全費用(機器の検査, 補修, 交換費用)を、それぞれ、縦軸, 横軸にとってプロットすることで、システム構成機器の予防保全費用, 事後保全費用のバランスが相対化・可視化される。**図8**に事後保全費用の期待値と予防保全費用のバランス可視化例を示す。

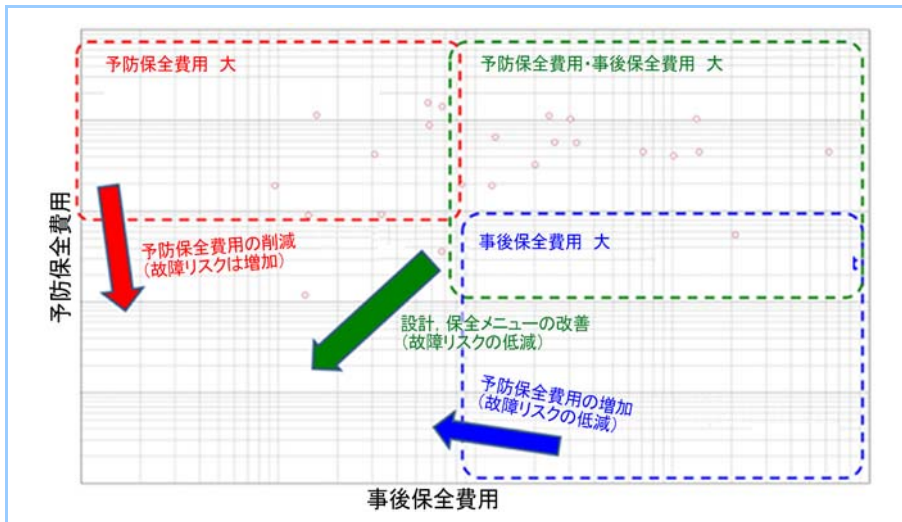


図8 予防保全費用と事後保全費用とバランス可視化

これにより、構成機器は、(1)予防保全費用が事後保全費用に比べて相対的に多い過剰保全の傾向がある機器、(2)事後保全費用が予防保全費用に比べて相対的に多い過少保全の傾向がある機器、(3)事後保全、予防保全費用どちらも相対的に多く、設計や運転プロセス、サービスなど包括的な改善を検討すべき機器、(4)保全費用が相対的に低い機器、の大きく4象限に分類され、それぞれの視点で具体的対策の検討に移ることができる。

3.2 稼働率向上、保全費用削減に向けた技術開発・保全メニュー戦略策定

稼働率向上、事後保全費用削減に向けた議論では、各機器の稼働率への影響度、事後保全費用などのパレート図を利用し、予算制約や対策効果を見ながら、目標稼働率、目標事後保全費用などを到達するまで、リスク上位機器から対策を検討していく。

高リスク機器への具体的対策検討に当たっては、現状のRAM分析の入力値(統計的故障率、故障確率、平均復旧時間)とともに、RAM分析で算出されたシステム影響度(評価機器の故障によって生じたシステム停止時間の年間期待値等)と必要な具体的対策案、現状の設計・サービス・研究部門の取組み状況などを併記する(表1)。これにより設計・研究所・サービス部門など、所属横断型の専門家間で、より本質的な技術討議と対策検討が可能となる。

表1 RAM分析で抽出された高リスク機器とその対策状況

リスク順位	機器	主要な故障モード	MTBF [h]	MTTR [h]	年間計画停止時間期待値 [h/Y]	対策・研究開発状況
1	過熱器管	減肉 リーク 腐食 クリープ	AAAAA	aaa	X	新材料の適用 予備品保有
2	スートプロア	リーク 腐食 デマンド故障	BBBBB	bbb	Y	構造解析に基づく新設計の採用
3	耐火材レンガ	脱落 膨張	CCCCC	ccc	Z	構造解析に基づく新設計の採用
:	:	:	:	:	:	:

4. まとめ

これまでに、三菱重工グループが扱う多品種の製品に対して、設計、サービス、研究部門の専門家とともに、RAM分析と稼働率向上に向けた課題解決に取り組んできた。

RAM分析では、製品の稼働率や全機器横通しでの個別機器のリスクが同時に評価される。このような製品全体のリスク評価技術と個別機器の技術や知識を融合させることで、多製品の稼働率向上と技術リスクの最小化を図っている。

さらに、新製品の稼働率向上と技術リスク低減などの企業が直面する課題に対し、従来のRAM分析を拡張した独自のリスク評価フレームワークを開発するなど、技術の適用範囲を広げ、その実行手順を示した。

今後、製品のライフサイクルに渡って、実機計測データや技術開発で得られる技術や知識をRAM分析へ反映し、稼働率や弱点機器を継続的に見直し、対策の更新や新しいソリューションを提案しながら、お客様の課題を解決していく。

参考文献

- (1) 松本俊作ほか, RAM分析を活用した技術リスクマネジメントと稼働率向上ソリューション, 構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム JCOSSAR 2019, (2019) p. 366-371