

リスクベースインスペクション(RBI)と リスクベースメンテナンス(RBM)

田村 兼吉

Risk-Based Inspection and Risk-Based Maintenance

by

Kenkichi TAMURA

1. はじめに

メンテナンスを効率的に行うには、種々の劣化・故障モードに対して人・物・金といった資源を適切に配分することが求められるが、対象とするシステムが大規模で複雑になると、考慮すべき劣化・故障モードが非常に多数に及び、これら全ての重要度と、それに対するメンテナンスの効果を的確に評価することが難しくなる。これに対応する手法として、近年リスクベースメンテナンス(RBM)が注目されており、石油精製・石油化学を中心として、欧米において開発・応用が進められている。RBMでは、劣化・故障モードの重要度を損傷事例や寿命評価理論を基にして、リスク(=発生確率×影響の大きさ)という一元的な尺度で定義するとともに、メンテナンス効果についてもリスクの低減量として定量的に評価する。このため、客観的な評価により、メンテナンスが最適化され、コストの軽減、システム稼働率の向上につながるものと期待されている。RBMはもともと原子力施設のメンテナンス計画手法として開発され、当初は、検査周期を決定するための手法という意味でリスクベースインスペクション(RBI)と呼ばれたが、近年、応用範囲が広がるにつれ、メンテナンス計画全般に対する手法としてRBMと呼ばれることが多くなっている。したがって、ここでは両者を同義として解説することとする。

2. メンテナンス手法の歴史

かつて、メンテナンスは事後保全、つまり故障したものを修復する作業と考えられてきたが、1950年代以降の信頼性工学の発達とともに予防保全の概念が出現した。最初の予防保全は、バスタブ曲線の概念に基づいて一定期間使用したところでオーバーホールや部品交換を行って故障を未然に防ごうとする時間基準保全(TBM: Time Based Maintenance)の手法である。しかし、劣化の進行度合いは使用環境や頻度に大きく依存するため、一定期間での交換が効率的でない場合も多く、また、故障率がバスタブ曲線を描く機器は必ずしも多くない事が解ってきた。さらに作業ミス等により、オーバーホール直後の故障が多いことも問題となった。

このため、1970年ごろから、アポロ計画で開発された機械故障診断技術を応用した状態基準保全(CBM: Condition Based Maintenance)の考え方が普及してきた。CBMは、設備診断技術を用いて状態を監視し、故障しそうな要素から交換していく手法である。CBMはTBMより進んだメンテナンス方法ではあるが、状態をいちいち診断していくより、TBMによって適当な時期に交換してしまう方が経済的な要素や、そもそも事後保全で十分な要素

も存在する。

そこで、1980年代後半になると、設備を構成する要素ごとに、メンテナンスで達成したい機能レベルと、かけられるコストの関係から適切な保全方式を合理的に選択すべきであるという最適保全の考え方が出現した。航空機のメンテナンスに適用されたRCM(Reliability Centered Maintenance)は、その代表手法である。RCMでは、まずFMEAに基づいて影響度評価を行い、故障モードを5つのカテゴリーに分類する。次にカテゴリーごとに選定のロジックを変えながら、具体的なメンテナンス作業の種類を決定する。こうした2段階のメンテナンス計画手法であるRCMは、損傷が起きることが許されない航空機のメンテナンスに向いているが、それ以外の産業にも多大な影響を与えた。ただ、影響度のカテゴリー分けが定性的な判断による比較的大雑把なものであり、考慮すべき故障モードが多数となる大規模で複雑なシステムで使用するためには、故障モードの重要度とメンテナンスの効果を定量的に評価し、優先度をつけていくことが難しいこと等、欠点も指摘されてきた。

3. RBI/RBM の概要

3. 1 API による RBI/RBM 関係の規格体系

RBM/RBIの特徴は、劣化・故障モードの重要度をリスク（＝発生確率×影響の大きさ）という一元的な尺度で定量的に定義し、メンテナンスの効果についてもリスクの低減量として評価することである。その概要として、最も有名な米国石油学会(API)のガイドラインを基に説明することとする。

APIでは1993年にスポンサーを得てRBIの検討を開始し、2000年にはその結果としてRBIガイドラインのリソースであるAPI 581⁹⁾ (Risk Based Inspection Base Resource Document)を、2002年にはRBIの指針であるAPI RP580⁸⁾ (Recommended Practice)を発行している。

APIでは過去の石油・石油化学工業での事故分析から、重大事故の大半が圧力機器の機械的損傷によって起きているとして、評価対象を「耐圧部の機械的損傷による漏れ」に絞っている。このため、非耐圧部、電気設備、機械設備等は対象外であり、損傷原因としても誤動作や設計ミスは評価に含まない。

APIのRBIガイドラインの特徴は、検査計画、検査の実施、結果の評価、順位付け、リスクの低減といった一連の手順が、RBI以外の複数の既存の規格とともにループを形作っていることにある。図-1はAPI 581と各規格との関係で、矢印は検査の手順ループを示している。API 750/510/570/653といった規格が検査手法を規定しており、MPCはMaterial Properties Councilの規格である。

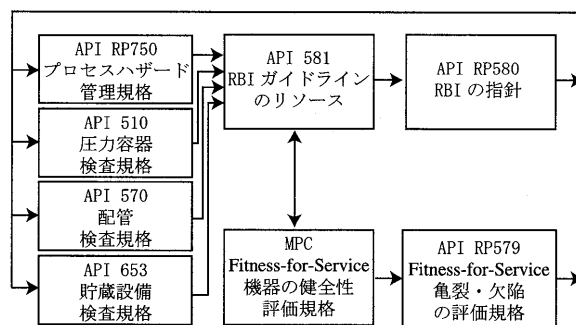


図-1 既存の各規格との関係

なお、図-1中のAPI RP579は損傷に対する機器部材の健全性を定量的に評価するための規格で、内容も脆性破壊、腐食、孔食、亀裂状欠陥、クリープ等と多岐にわたっている。したがって、直接RBI/RBMの評価に用いる訳ではないが、今後の運転・補修・更新計画の決定に非常に有用である。

3. 2 API RP580 と API 581

API RP580とAPI 581を比較すると、API RP580は、指針であって、具体的な作業手順は自ら開発する必要があるのに対して、API 581は石油・化学プラントの機器、配管耐圧部等を評価するためのRBI/RBM ガイドラインのリソースとして開発されたもので、具体的なリスク評価手法が示されており、エンジニアにとっても使いやすい形式となっている。また、API 581は理論的な厳密さより実用上の利便さを考慮して、最初に定性的RBIにより大雑把な順位付けを実施した後、リスクの大きい部位について定量的RBIを実施するという2段階の手順を踏む。

3. 2. 1 API 581 における定性的 RBI

API 581にはAppendixに解析のためのワークブックがついており、図-2に示す様にこれにしたがっていけば評価を行うことが可能となっている。

発生可能性(Likelihood)解析については、Equipment Factor（設備の総量）、Damage Factor（劣化・損傷機構）、Inspection Factor（検査の有効性）、Condition Factor（現在の設備の維持管理状態）、Process Factor（操業状況等）、Mechanical Design Factor（設計上の安全規格対応状況）の6種類のFactor因子が用意されている。各Factor因子において、状態に照らして点数を選択していくと、最終的に重み付けされた点数の合計から発生可能性を1～5の5段階のランクに分けることができる。

次に影響度(Consequence)解析であるが、API 581では火災・爆発リスクと有毒性リスクの2つのハザードを考慮して、損害影響度と健康影響度の2つの影響度評価を用意している。対象とする化学物質

毎に、どちらか一方を選択することになる。損害影響度を選択した場合、Chemical Factor(着火性・反応性)、Quantity Factor(漏洩想定量)、State Factor(気化性)、Auto-Ignition Factor(自己発火性)、Pressure Factor(漏洩速度)、Credit Factor(防災設備の状態)、Damage Potential Factor(火災・爆発のポテンシャル)の7種類の因子が用意されている。健康影響度を選択した場合、Toxic Quantity Factor(総量と毒性)、Dispersibility Factor(消散性)、Credit Factor(防災設備の状態)、Population Factor(被曝人口)の4種類の因子である。発生可能性と同様、点数を選択していくと、影響度をa~eの5段階のランクに分けることができる。

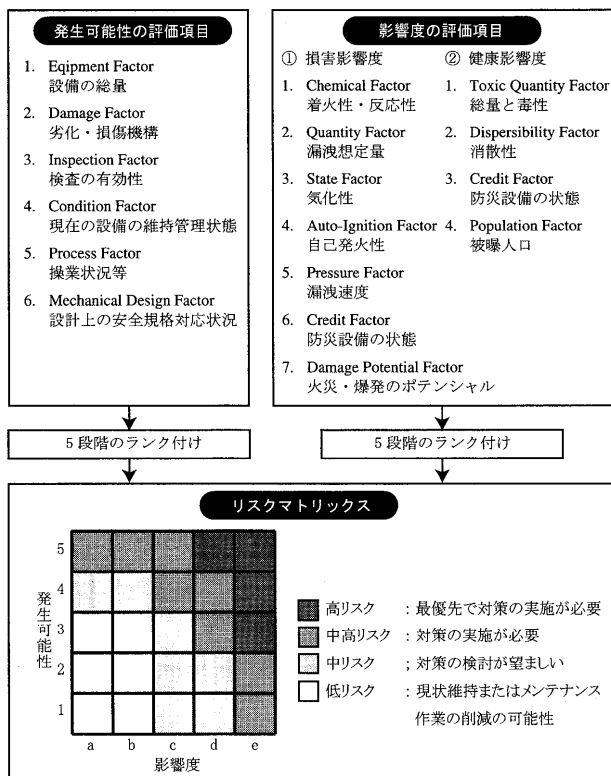


図-2 定性的RBIにおける評価項目

こうして出てきた結果を、発生可能性を縦軸、影響度を横軸として図中の5×5のリスクマトリックス上にプロットする。リスクマトリックスは色分けの様に、予めリスクの程度により高リスク、中高リスク、中リスク、低リスクの4段階に分類されており、リスクの大きさが決定される。

3. 2. 2 API 581における定量的RBI

先にも述べた様に、API 581の評価対象は「耐圧部の機械的損傷による漏れ」ということから、定量的RBIでは「穴があいて化学物質がそこから漏れて拡散する」というシナリオを元に構築されている。

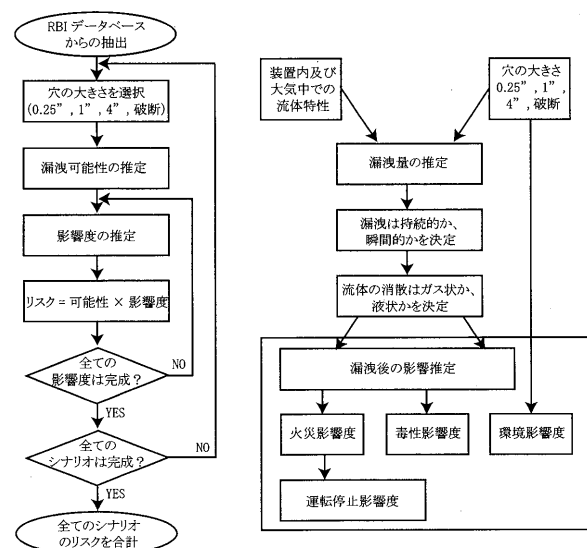


図-3 定量的RBIの手順と影響度計算手順

図-3左に定量的RBIの手順の概要を、図-3右に影響度計算のための手順の概要を示す。発生可能性解析については、一般的な工業界における過去の損傷事例を基にして作られたユニット毎の一般的な破壊確率($Frequency_{generic}$)をベースとして、これに2種類の因子、機器修正因子(F_E)と管理システム影響因子(F_M)をかけ合わせることで次式の様に装置独自の破壊の起こりやすさ($Frequency_{adjusted}$)を算出する。各修正因子の求め方は設問が用意されており、その設問に答えることで最終的な影響度が決定される。

$$Frequency_{adjusted} = Frequency_{generic} \times F_E \times F_M$$

このため、API 581には一般的な破壊確率として、損傷により開く穴の大きさを基準として、0.25インチ、1インチ、4インチ及び崩壊の4つのレベルでの機器毎の発生確率データを示してある。

一方、影響度は内部流体流出に関する被害の大きさと定義されており、流出速度や流出量を計算し、その事故結果を4種類のモデル(火災・爆発、毒性、環境汚染、事業中断)に対して評価する。これもステップ毎に設問が用意されており、その設問に回答することで被害の大きさを算出できるようにしている。

3. 3 API 以外の主要な RBI/RBM ガイドライン

3. 3. 1 ASME のガイドライン

米国機械学会(ASME)では1980年後半からリスク評価の重要性が議論され、米国石油学会及び電力研究所(EPRI)と協調して1991年にRBI/RBMのガイドラインを発表した。これは、原子力発電所の安全性評価のために確率的安全性評価(PSA: Probabilistic Safety Assessment)が開発・利用されて

きたことがその背景にある。ガイドラインとしては「一般的な考え方」「軽水炉への適用」「火力発電設備への適用」の3巻が発行されており、これによってRBI手法の基礎が構築されたことになる。

ASMEのガイドラインは実用的なツールというよりは、学術的な傾向が強く、汎用化に向けた定性的及び定量的なRBI評価手法を述べている。定性的評価手法では、検査のためのシステム、構成部材、要素の優先度を付けるために専門家の判断と経験を必要としている。HAZID会議等、多数の専門家が集まって協議してリスクを策定するという手法は定性的評価をより精度よく行う上で必要なことである。また実際の定量的評価では、故障モードをある程度限定した上で、評価基準を定め、必要なデータを揃えていく必要がある。ガイドラインでは劣化モードとして構造物のき裂を想定し、破壊力学に基づいて次回検査時のき裂進展を予測し、破壊確率が一定レベル以下になるよう、検査計画を立案するというのが基本的な枠組みとなっている。しかしながら、様々な方法論についての記述があるものの、これのみでRBI/RBMを実施することは難しい。

3. 3. 2 RIMAPのガイドライン

欧州においても1990年代後半からRBIについてガイドラインを作成することを目的として、欧州プロジェクトのRIMAP (Risk Based Inspection and Maintenance Procedure for European Industries)が立ち上がった。ただし、RIMAPではガイドラインだけではなく利用できるような方法、ツール、規格や基準なども取り込もうとして開発されており、欧州における汎用リスク規格として構築されている。EUの多くの国では、プラントや大型生産設備の建造にあたってはRIMAPに準じたリスク管理が求められている。

3. 4 RBI/RBM ソフトウェア

実際に RBI/RBM を実施しようとした場合、API 581 のマニュアル形式のままでは使いにくい、多くの場合、RBI/RBM ソフトウェアを利用する事となる。ここでは、主要な RBI/RBM ソフトウェアを紹介しておく。

3. 4. 1 ORBIT

DNV(DET NORSKE VERITAS)では、API 581をベースとした定量的RBIソフトウェアORBITを開発しており、陸上設備を対象としたORBIT Onshore、海洋掘削と海洋石油生産を対象としたORBIT Topside、パイプラインを対象としたORBIT Pipeline、海上設備を対象としたORBIT Offshore等のORBITファミリーが存在する。ORBIT Onshoreでは、内部に1700種類の化学物質の特性データベースを持ち、入力Excelを利用し

て容易である。また、検査データベースシステムであるORBIT+と統合して使用することも可能である。

3. 4. 2 RISKWISE™

英国溶接研究所(TWI)では、石油・ガス・化学工場や発電所に適用可能なAPI RP580に基づいたRBI/RBMソフトウェアRISKWISE™を開発している。このソフトウェアも、製造工場、備蓄タンク、パイプライン、ボイラ、蒸気タービン、ガスタービン等、用途に対応した種々のものが存在する。例えば、備蓄タンク用では、破壊の起こりやすさとして7つの因子を、被害大きさに関しては6つの因子(CF: Consequence of Failure)を用意し、設問に答えてリスク評価を行う。リスク評価には5×5のリスクマトリックスを用いている。

3. 4. 3 RBMS

英国 AEA Technology社(旧英国原子力公社)は、ボイラ、LNG、セメントプラント、パイプライン等、設備ごとを対象としたソフトウェアRBMSを開発し、実機に適用をしている。RBMSは、リスクの定義などの考え方が API、ASMEガイドラインと同じだが、自社で持っている膨大な損傷データや公表されているデータをもとに、エンジニアの立場に立ち、実用的で使いやすいリスク算定方法を独自に考案している。リスク評価には4×4のリスクマトリックスを用いる。各マトリックスにリスクカテゴリーが決められており、リスクの高い部材については検査・メンテナンスの改善方法を提案し、その効果を再度上記と同じ方法で評価しリスクが低減することを確認して検査計画を立案する。

4. RBM適用例の現状

RBI/RBMは古くから火力発電用ボイラへの適用が数多く報告されている。最近、フィンランドの火力発電ボイラと主蒸気管ラインで適用された事例では、材料や検査については定量的なばらつきデータを用いているが、発生可能性は定性的評価で行っている。影響度は、技術面、経済面、環境面等で評価し、リスクマトリックスを用いてリスクを表示し、リスクレベルにより、検査内容や運用計画を検討している。

国内でのRBI/RBMの適用では、IHIが事業用火力発電用ボイラ及び自家発電用ボイラに対し、AEA Technology社のRBMSを使用して行った事例がある。ここではリスクマトリックスを用い、質問に

答える形式で、破損の起こりやすさと被害の大きさを定性的に評価する。寿命評価などについては実験データ、稼働条件データ等を用いて定量的に評価した結果をもとに、エキスパートの意見も交えて評価を実施している。したがって、半定量的RBI/RBM手法と考えるのが適当である。

一方、東芝が蒸気タービンについてRBI/RBM手法を適用した事例では、定量的リスク評価手法として確率論的リスク評価を適用している。確率論的リスク評価手法では、故障履歴データから故障展開のシナリオをイベントツリーで表し、各事象の生起確率とコストで表す。影響度との積をイベントツリーに沿って合計したものをリスクとして考える。各事象の生起確率を求めるに際し、フィールドデータをベースにしているが、機器が異なると故障率が異なること、サンプル数が少ない部分では的確な評価が行えないといった欠点がある。またここではイベントツリーの作成が重要となるが、故障が起こったときの多機器へ波及する影響が詳細には記載されていない。定量的リスク評価とするにはデータが不十分であると考えられる。

5. おわりに

近年、ライフサイクルを考慮したメンテナンスの重要性が叫ばれているが、RBI/RBM手法はRCMと並んで代表的なメンテナンス計画手法と考えられている。

RBI/RBM適用事例の多くで稼働率の向上やメンテナンスコストの削減が行われたと報告されており、RBI/RBMの効果を認める認識が定着しつつある。ただし、RBI/RBMは、これまで発電用ボイラ・タービン、石油化学プラント等、特定の設備・機器のみを対象に個別に開発され、これ以外の新たな分野への適用には多大な努力を必要とした。今後の普及にはRBI/RBMの汎用化が鍵を握っていると考えられる。

参考文献

- 1) 高田祥三:「ライフサイクル・メンテナンス」、JIPM ソリューション (2006)
- 2) 木原重光・富士彰夫:「RBI/RBM 入門」、JIPM ソリューション (2002)
- 3) American Petroleum Institute, “API Recommended Practice 580 1st Edition” (2002).
- 4) American Petroleum Institute, “API Recommended Practice 581 3rd Edition” (2003)
- 5) (財)機会システム振興協会:「機械システムメンテナンス最適化のための RBM 手法開発に関するフィージビリティ報告書」(2004)