

リスクベースメンテナンスによる 保全計画の合理化

酒井 信介

我が国では、プラントを始めとする機械設備のメンテナンスの方式として、検査間隔や検査方式を固定して実施する、いわゆる時間計画保全が採用されることが多い。このような決定論的手法は我が国の国民性から見て、その特性を活かすことができる方法と考えられる。ところが、この方法をさらに推し進めることには限界があり、この解決法として近年、コストと安全性の両者を加味して判断するリスクベースメンテナンスへの期待が高まっている。本稿では、リスクベースメンテナンスの導入状況、特に関連規格の開発状況を紹介するとともに、その基本概念や、具体的評価手順について概説する。

キーワード：リスクアセスメント、メンテナンス、リスクベース工学

1. リスクベースメンテナンスの背景

設備機器の保全は、機器の故障が発生する都度行うのでは、安全性、信頼性の観点から望ましくないばかりではなく、大きな事故と結びつく場合にはトータルコストの面でも思わぬ被害が発生することがある。このような方式を事後保全と呼ぶのに対して、故障の発生を何らかの手段で予測し、故障の発生を未然に防ぐことを目的とする方式を予防保全と呼ぶ。機械設備の設備機器では、多くの場合予防保全が採用されているものと考えられる。予防保全で多く採用されている方式では、確定的な機器の検査間隔ごとに定期検査が実施される。このような方式を時間計画保全と呼ぶ。確定的であるのは、検査間隔のみではなく、検査対象とする設備機器、特定の設備機器に対する検査範囲、使用する検査装置なども固定的であることが多く、基準や検査マニュアルの規程に従って実施される。このようにメンテナンスにかかわる多くの要素を固定的に取り扱う方式を決定論的方法と呼ぶ。これに対して、設備機器の運転中においても、機器の状態を何らかの測定手段で把握し、監視するという考え方もある。この場合、運転中の異常を検知できるために、時間計画保全よりも、より迅速に対応することが可能となる。このような保全方式を状態監視保全と呼ぶ。故障の未然防止という観点からは、状態監視保全は有効であるが、状態監視をするための装置の開発、その測定装置の出

力からの異常の検知の合理的判断基準を策定することが課題である。

我が国の保全方式は、基本的に決定論的方法が採用されているといえるが、近年、この方式のみに依存することに対する問題点が浮かび上がりつつある。



図1 安全と危険に関する考え方の相違

図1は、安全概念の日本と欧米の対比としてよく用いられる図である。つまり、日本流の決定論的方法では安全と危険は二者択一であり、その境界は明確な許容値で示される。その値以下であれば安全であるが、その値を一步でも越えたとたん危険な領域に突入する、とする考え方である。欧米流の考え方は、明らかな安全と、明らかな危険領域の間には多くのグレーゾーンが存在し、この領域では明確に安全とも危険とも判断せず、その危険の程度を把握して少しでも安全な方向に改善するよう努力する、とする考え方である。欧米流の考え方の代表的なものはリスク概念の適用で

さかい のぶすけ
東京大学工学系研究科機械工学専攻
〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

あろう。我が国においても近年、リスク概念を導入した安全評価の考え方は浸透しつつあり、このようなことは理解している、と主張する人も多いかもしれない。しかし、概念としては理解していたとしても、結果としては旧来の日本流の安全概念は変わっていないというのが現実ではないだろうか。

図1の日本流の考え方は、単純で理解しやすく、一般の人にも受け入れられやすいものと考えられる。しかし、この考え方には大きな事故に結びつく潜在的な危険性が存在するのである。それではいったい何が問題なのであろうか。事業者が規制当局、あるいは社会に対して説明するとき、「安全」か「危険」かの二者択一しかないのであれば、かならず「安全」と説明するであろう。「安全」というスタンプが押されれば、説明する側もされる側も安心することとなろう。しかし、このような構図では、その状態からさらに安全に対する改善をしようとするインセンティブは働きにくい。一方、欧米流の考え方では、多くの設備機器が安全・危険の中間のグレーゾーンに含まれる。日本流の基準の安全領域に入っている、グレーゾーンに含まれることが多くなる。グレーゾーンにある限りは、安全側にシフトするよう努力することが求められる。日本流の考え方は、許容値を厳しく設定することによって、安全を高めようとするのに対して、欧米流では多くの範囲に対して危険性を判断し、危険性を下げる努力をするという形となって出てくるのではないだろうか。その結果、日本流では、許容値を設定した項目に対しては、厳格な安全が確保される一方で、万が一見落としがあると、それを再び安全評価の組上に載せにくく、極めて危険な状況にさらされる、という構図が浮かび上がる。

大きな事故を防止するという観点から、旧来の日本流のやり方は限界があり、欧米流に移行することが必要であろう。そのためには、荷重や強度などの安全評価にかかわる諸量を確定値で考えるのではなく、不確定性のあるものにとらえて、危険性の程度を何らかの尺度で判断し、意思決定に結びつけていくプロセスが必要になる。その指標として効果が期待される量がリスクである。リスクは、事故の起きる発生確率と、その事故が起きた場合の影響度の積として定義される。リスクを指標としたうえで、メンテナンスの合理的判断を行う手法をリスクベースメンテナンス(RBM)と呼ぶ。

このような、安全面でのメンテナンスの合理化に加えて、メンテナンスコストにかかわる合理化という問

題も無視できない。つまり、我が国の産業においては、長期化している不況の中で、プラント設備の新設は頭打ちの状態となり、老朽化設備の多くがさまざまな延命策によって今日も現役に稼動して、生産を支えている。それにもかかわらず、国際競争力が急速に失われてきているという現実があり、あらゆる経費の削減なくしては産業基盤の存続が困難な状況となっている[1]。特に、生産活動に直結しない設備メンテナンスの経費は、厳しい削減の対象とされている。老朽化設備の寿命延伸には適切なメンテナンスの実行が不可欠である。一方、設備の長期連続運転は生産効率を上昇させるだけでなく、メンテナンスの経費削減をもたらす。したがって、メンテナンスのあり方には必然的に科学的合理性と経済性の両方が求められる。さらに、メンテナンスの科学的合理性と経済性は、産業の安全確保に対する社会的責任を果たすものでなければならない。この観点からもRBMは重要な役割を果たすことが期待される。

2. リスクベースメンテナンスの動向

産業界におけるRBM活動の促進のためには、RBMに関係する規格の動向が大きく関係してくる。まず、世界的にリスクベース検査(RBI)の規格として参照されているのが、米国石油協会(API)のRP-580(2009)[2]およびRP-581(2008)[3]である。なお、RBIという用語は、RBMと類似しているが、特に検査に重点が置かれる場合に使われる。なお、原子力の分野では類似の用語としてRII(Risk Informed Inspection)が用いられるが、米国NRCではRisk BasedとRisk Informedの用語は明確に区別しているので注意が必要である。本稿はあくまで、Risk Basedにかかわる技術の紹介である。欧州では、2001~2004年の間に実施されたRBMに係る活動プラットフォームであるRIMAP(Risk Based Inspection and Maintenance Procedure)の成果をベースとして、EN規格化[4]が進められている。韓国では、ガス安全公社が高圧ガス総合告示においてRBIを含む規格を発行しており[5]、またKEPRI(韓国電力中央研究所)が電力設備に関するRBI構築と法規化[6]を実施している。中国においても、RBIを含む中国国家規格SY/T6653[7]が発行されている。

一方、我が国では多くの企業でRBMの重要性は認識されているものの、規格・基準がなければ、運用の開始を躊躇するところも多いものと推測される。このような事情に鑑み、非原子力分野の圧力設備について、RBM

の国内外の技術を調査し、我が国で共通して適用できる民間基準を作成することを目標に日本高圧力技術協会(HPI)において平成13年度より規格策定のための活動が開始された。平成22年度には、HPIS Z 106:2010「リスクベースメンテナンス」[8]がRBMの基本的考え方を示す規格として発行された。さらにこれを補強するためのハンドブックとしてHPIS Z 107-1TR～4TR[9]が平成23年度までに発行済である。

3. リスクベースメンテナンスの概念

保全計画において決断が求められることとして、検査対象箇所を選定や、検査部位の検査周期、採用する非破壊検査法などが挙げられる。リスク保全技術においては、優先順位を明確にするための指標としてリスクを採用する。リスクは検査対象部位に破損が発生する確率と、もし破損が発生した場合に周辺に及ぼす影響度の積として与えられる。つまり、リスクは影響度の期待値を意味している。システム全体の機器が保有しているリスクの分布を概念的に表したものが図2である。

横軸のA～Sはシステム内の機器を、縦軸は各機器が保有する相対リスクを示す。システム全体のトータルのリスクのうちの80%は、実はシステム全体の中のわずか20%の機器に集中していることを示している。もしそうであればすべての機器に同じ優先順位で検査を実施することは明らかに不合理であり、確実に20%の機器を特定したうえで、検査プログラムの優先順位を高めることが重要である。これが、リスク保全技術の基本的考え方である。このような考え方を80-20の経験則(パレト則)と呼ぶ。特に検査の視点に重点を置くときにはリスクベース検査(RBI)と呼ぶ。最終的

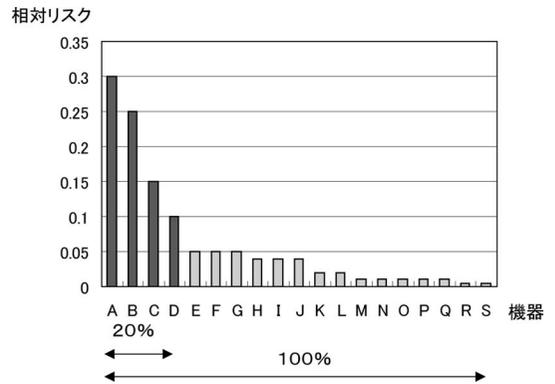


図2 システム内のリスクの分布の概念図

な意思決定にあたっては、コストなども加味したうえで、リスク緩和のための決断が行われるが、この段階まで含めるときにはリスクベースメンテナンス(RBM)と呼ぶ。しかし、これらの区別は必ずしも明確ではなく、RBI/RBMなどと記述されることもある。本稿においては、RBMで表現することとする。図3にRBMの一般の手順を示す。まず、評価のために必要となるデータおよび情報の収集を行う。これに基づき、対象部位ごとにリスク評価を実施する。リスクは破損の影響度と発生確率の積として評価する。リスク評価の結果に基づいて、検査に対する優先順位の決定を行う。これに基づき、検査プログラムの作成を行う。その結果、リスク値がどのように緩和されるかを示し、提案を行う。提案に対して、現行法規などと照らし合わせて再評価し、問題があれば最初に戻って作業を繰り返す。

工学におけるリスクは、「故障確率×影響度」で定義されるが、予備的解析の段階ではこれらのデータを完全に収集することは困難であるので、まずは主観に基

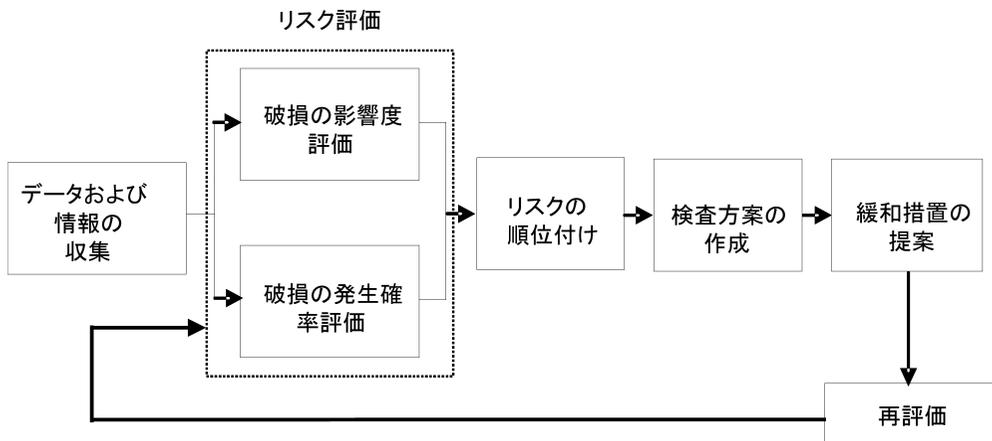


図3 RBMの一般の手順[8]

頻度	影響度		
	低	中	高
高			
中			
低			



図4 リスクマトリックスの例

づいていくつかの階層レベルに分類する。例えば、図4に典型的なリスク表示図を示す。ここでは、故障頻度と影響度を各々三段階ずつに分類しているが、分類数については必要に応じて適宜決定すればよい。このようにして構成した二つの軸から表現したマトリックスのことをリスクマトリックスと呼ぶことがある。両者のレベルの程度に応じてリスクを分類し、本図においてはリスクの大きさを濃淡の濃さで表現している。例えば、高リスクと判定された機器を中リスクに移動するよう、点検政策を考えたり、あるいは低リスクと判定された機器は点検政策の見直しにより中リスクとなるようにするなどの検討を加えることができる。このように、主観に基づいてリスクのランクづけを行う解析手法を定性的リスクアセスメントと呼ぶ。定性的リスクアセスメントは、複数の検討対象の相対的な比較に用いられ、評価されるリスクは絶対的尺度を示すものではない。したがって、より厳密なリスク評価を行うためには定量的リスク評価を行う。一般にプラントにおいては、対象とする検査機器の数は膨大となるので、いきなりすべての機器について詳細な解析を実施するわけにはいかない。そこで、必ずスクリーニングのプロセスが必要になる。定性評価はスクリーニングのプロセスとして位置づけられる。これ以外に、定量的リスクアセスメント、半定量的リスクアセスメントの段階があるが、これらの詳細については後述する。

4. 具体的手順

HPIS Z 106[8]とZ 107TR[9]を参照しながら、RBMの具体的手順を要約する。この規格の適用範囲は、「耐圧部を含む産業用設備」であるが、破損と影響度の定義を適用対象により適宜変更することにより、リスクベースメンテナンスは種々の産業に適用可能である。

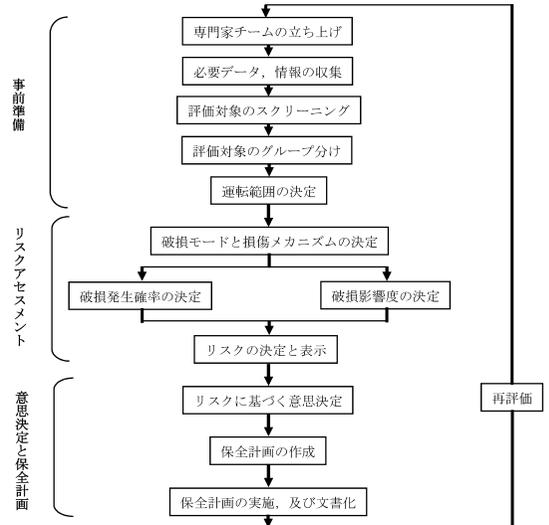


図5 リスクベースメンテナンスの実施手順 [8]

HPIS Z 106には、リスクベースメンテナンスを実施する手順が図5のように示されている。このフローは図3をより、詳細化、具体化したものである。以下に各段階の概要を述べる。RBMは以下の4段階に分けて実施する。

a) リスクベースメンテナンスの準備

リスクベースメンテナンスを始めるにあたり確認しておかなければならない事項、必要データ、情報の収集について述べられている。評価対象が必要とするデータ量や情報のレベルと詳しさは、保全計画の範囲、計画が処理する問題や、その実施レベルに依存することが示されている。

b) リスクアセスメントの実施

評価対象の破損の原因となる各種機械的損傷の同定、その結果発生する破損モード、その起こりやすさ、その影響度、結果として定義されるリスク評価の基本的的方法論について述べられている。すなわち、破損発生確率の評価、破損影響度の推定、リスクの決定作業に関する作業に相当する。これはリスクマネジメント計画の作成や実行につながることになる。

c) 意思決定と保全計画

リスクに基づいた保全の基本的考えについて述べられている。その中には検査計画以外のリスク低減方法、リスクベースメンテナンス評価の見直しと更新についても検討することが述べられている。

d) 再評価と文書化

リスクベースメンテナンスの適用期間を明確に定め、期間が経過した、あるいは使用条件、破損の原因とな

る損傷状態などに変更があった場合に実施される再評価について述べられている。また、リスクベースメンテナンス評価にあたり収集されたデータおよび情報、また得られた結果について、最低限記録、保管される事がらについても示されている。

5. リスク評価手順

RBM は前節に記載した手順で進められるが、この中でも特に重要であるのが、リスク評価のプロセスである。リスクの計算は、破損確率と影響度の積で与えられるが、ここでは、HPIS の場合を例にとって、リスク評価方法について概説する。

5.1 RBM の評価レベル

一般にプラントなどの機械構造物の部品点数は膨大となるので、いきなりすべての機器に対して詳細な解析をすることは効率的であるとは言えない。まずは、ごく大雑把な評価によりスクリーニングを行うプロセスが必要である。この段階では、エンジニアリング判断と、経験に基づき簡単な質問に答える形で点数づけが行われ、破損確率、影響度の両者について高、中、低というような簡単なカテゴリーに分類したうえで、評価が行われる。このような評価レベルを定性的リスクアセスメントと呼ぶ。この評価で、優先順位が高く判断されたものについて、次の評価レベルに進むことになる。最終的に図4に示したリスクマトリックス上にプロットしたうえでスクリーニングを行う。

次に、設備設計、運転条件、運転履歴、構成部材の信頼性、作業員の行動、事故時の環境や健康への影響などの評価を定量的に評価する段階が定量的リスクアセスメントである。定量的な評価であるので、数値データを確実に入手することが重要であるが、対象機器が膨大であるときには、多くの労力を要する。そのため、定性的リスクアセスメントにおいて、低リスクの機器をスクリーニングで除いておくことが、効率の面では極めて重要である。定量的リスクアセスメントは、多くの労力を要する反面、その評価結果の説明性は高くなる。特に、破損影響度による安全の喪失の程度、設備損失あるいは営業上の損失の程度が甚大であるときには、定量的リスクアセスメントが望まれる。

最後に定性的リスクアセスメントと定量的リスクアセスメントの両者の中間段階に位置するのが半定量的リスクアセスメントがある。このレベルでは、破損確率と影響度について、必ずしも直接的な物理量の評価を求めない。例えば、破損確率の評価としてそれに代わる経験やエンジニアリング的な判断があるのであれば、

代替することが可能である。影響度についても、直接的に影響を与える物理量でなくとも、それと密接な関係のある量で代替することもできる。通常、このレベルの解析方法は、完全に定量的なレベルほど厳密ではないが、厳密でない分、経験に基づく判断の余地があり、多くの対象物に対する評価が可能となる。このため、プラントなどのRBMでは、このレベルの評価が多く用いられる。HPIS Z 107TRにおける評価は、基本的にこの評価レベルを採用している。以下、半定量的リスクアセスメントにおける、破損確率と影響度の評価手順を示す。図6には、HPIS規格におけるRBM評価手順を示す。

5.2 破損確率評価

図6に示されるように、破損の起きやすさを破損確率という物理量で直接評価するのではなく、5段階の破損確率ランクのいずれに属するかを判断している。破損確率ランクは、規格開発の中で新たに定義した破損確率係数 (Failure Probability Index, FPI) の評価値を表1によって換算することにより行われる [9]。

表1 FPI と破損確率ランクとの対応 [9]

破損確率ランク	FPI
1	≤ 2
2	$2 < \text{FPI} \leq 20$
3	$20 < \text{FPI} \leq 100$
4	$100 < \text{FPI} \leq 1000$
5	$1000 <$

FPI は、直接的に破損確率のような物理量を示すものではないが、検査対象の機器に関して、破損の起きやすさに比例する量と考えればよい。つまり、機器の破損の起きやすさは、機器が保有する損傷の程度に応じて決まる破損確率と関係づけられることは明らかである。以下では、破損確率に対応する量として、損傷係数という基準化した量を用いている。しかし、機器の破損の起きやすさは、同じ破損確率であったとしても、管理方式がずさんであると、増大することは明らかであろう。さらに、同じ損傷の程度であったとしても、機器の周辺の環境の状態などによっても破損の起きやすさは影響を受ける。したがって、対象とする機器に固有の状況も反映する必要がある。これらのすべての要因を加味したうえで、破損の起きやすさを数値として表現したものがFPIである。以下に、より詳しく述べる。

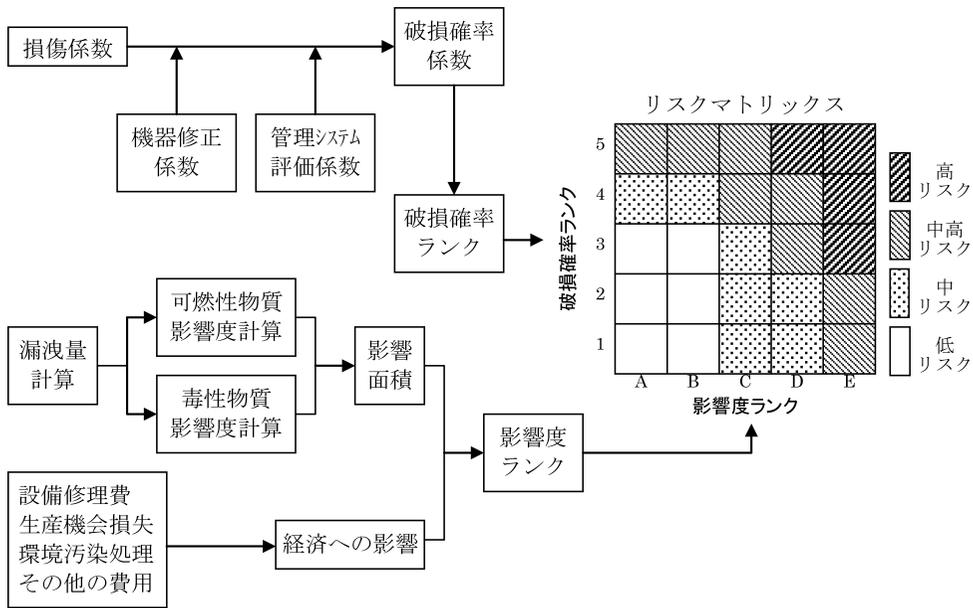


図6 HPIS規格におけるRBM評価の手順 [9]

FPIの数値は下式により計算する。

$$\text{FPI} = \text{損傷係数} \times \text{機器修正係数} \times \text{管理システム評価係数} \quad (1)$$

ここで、損傷係数とは、評価対象とする設備に使用されている材料と使用環境から、損傷モードを抽出したうえで、使用年数と採用する検査方法、検査回数に基づいて評価される損傷の程度を示す数値である。基本的考え方は、損傷速度から使用年数後の損傷の程度を予測することに基づく。ただし、検査方法に依存してその測定精度は異なるので、その影響をも加味する。損傷モードごとの損傷速度は、HPIS Z 107 2TR~4TRに与えられている。損傷係数は1~5000までの数値で与えられるものであるが、あくまで同一の使用材料、使用環境のもとでの数値である。利用者が実際に特定の機器に適用するにあたっては、どうしてもその機器に特有の条件が発生し、損傷係数の数値がそのままではまらないことが多い。このような評価対象の機器の固有の条件を反映するために、機器修正係数を定義し、乗算の形で修正することとしている。例えば、プラントの立地条件として海岸付近に立地しているときには、係数に2点加算する、活断層が近くにあるときには4点加算するなどの補正を行う。また、対象とする機器の複雑度に応じて係数の加算、減算を行い、設計規格のフォローの程度、使用年数、安全装置の設置

状況、過去の運転安定性などに応じた修正が行われる。

次に、プラントの管理状況に応じた修正が行われる。このために、管理システム評価係数の評価を行う。この係数は、プラントの運転管理、保全活動、オペレーター訓練、情報伝達、技術伝承の可否を評価し、プラントの機器の破損や事故を未然に防げる状態にあるかどうかを評価したうえで係数を決定する。

最終的に、損傷係数に機器修正係数、管理システム評価係数を乗じて、破損の起きやすさの指標FPIを計算する。このように、半定量評価では厳密に破損確率を評価するわけではないが、エンジニアリング判断を交えて、実態の破損の起きやすさを簡便に評価できる利点がある。

5.3 影響度評価

影響度の尺度の代表的なものは健康(H)、安全(S)、環境(E)があり、略してHSEという用語が用いられる。HPISでは、簡略化のために、影響面積と経済への影響の2種類のみを考慮している。利用者は、評価の目的に応じていずれかを選択すればよい。この影響度については、適用する産業分野ごとに異なるため、利用者が適切な指標を考案してよい。例えば、故障時の修理に要する期間が保全コストと直結するような場合には、故障時の修理日数などを指標としてもよいであろう。

HPISの場合には、対象がプラントであるので、影響面積としては内容物の最大保有量から、可燃性物質

と毒性物質に応じた影響面積の簡便評価法を提供している。また、経済の影響については、破損設備の修理費、停機による生産機会の損失、関係機関への届け出、環境汚染の処理費などを考慮して決定する。影響度ランクについても、破損確率ランクと同様に5段階のランクづけが行われる。影響度については、たとえ同じ影響面積や経済面積であっても、その地域特性や企業の規模により被害の程度は異なる。したがって、金銭に換算して影響度を評価する場合には、このようなことにも配慮が必要である。

6. まとめ

リスクベースメンテナンスについて、我が国の動向と、その基本的な考え方を概説した。本来、決められたことを決められた手順で厳格に実施していくという決定論的な考え方は、我が国の得意とする流儀であり、世界に類をみないほど整然と行われてきたと考えられる。ところが、このような長所は、逆に効率化のために大きな足かせとなるばかりではなく、想定外の事象に対する柔軟な対応を困難として、結果として大きな事故と結びつく可能性があることは東日本大震災時の想定外の機械設備の事故を見ても明らかであろう。今後、我が国のメンテナンスの方向性としてリスクベースメンテナンスの導入は避けて通れないと考える。規

制側、事業者側ともにRBMの概念を正しく理解したうえで、我が国においてその導入が加速することを願ってやまない。本稿が、理解を進めるために少しでも寄与できたなら、望外の喜びである。

参考文献

- [1] 小林英男, 「リスクベース工学の提案」, 日本機械学会誌 Vol. 106, No. 1020, pp. 846-848, 2003.
- [2] API Publication 580 Risk-Based Inspection Base Resource Document, 2009.
- [3] API Publication 581 Risk-Based Inspection Base Resource Document, 2008.
- [4] Steinbeis Advanced Risk Technologies; “Upgrading of the CWA 15740:2008 towards the European Norm (EN),” Kick-off meeting of potential stakeholders, March 29, 2012.
- [5] Song-Chun Choi, “Development of LNG-RBI Technology and Introduction of LNG-RBI Program” Technical Seminar for Risk Assessment of LNG Plant, Yeosu, Korea, March 22, 2012.
- [6] Bum-Shin Kim, “Current Status of RBM Application in Korean Fossil Power Industry,” 5th International Workshop on Risk-Based Engineering (RBE-5), Beijing, China, Nov. 16-18, 2010.
- [7] Shan-Tung Tu, Risk Assessment Practices in China, 4th International Workshop on Risk-Based Engineering, Tokyo, Nov. 2008.
- [8] HPIS Z 106: 「リスクベースメンテナンス」, 日本高圧力技術協会, 2010.
- [9] HPIS Z 107-ITR~4TR: 「リスクベースメンテナンスハンドブック」, 日本高圧力技術協会, 2010, 2011.