リスクベース工学の基礎

酒井 信 介

東京大学大学院工学系研究科

J. Japan Inst. Metals, Vol. 66, No. 12 (2002), pp. 1170-1176
Special Issue on Materials and Technologies for Risk Society
© 2002 The Japan Institute of Metals
Overview

Fundamentals in Risk-Based Engineering

Shinsuke Sakai

Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo 113-8656

Recently, risk-based engineering has become of major interest in the field of maintenance of mechanical structures. Actually, the technique has not been introduced into Japan rigorously. In this paper, the details that the risk-based engineering has become of major interest together with the background unique to Japan are described. This paper summarizes the fundamentals of risk-based engineering and will help the person who begins learning this field.

(Received July 2, 2002; Accepted August 13, 2002)

Keywords: risk-based engineering, fault-tree analysis, event-tree analysis, decision-making, risk-based inspection, risk management

1. 緒 言

リスク評価という手法は、工学分野のみではなく金融分野を始めとして多くの分野で用いられるが、リスクの定義は分野によって異なっていることがある。もともと、リスクという言葉は日常的に使用される頻度が高く、それだけに人による解釈がまちまちであるように見受けられる。例えば「低気圧が近づいているので、明日は降雨のリスクが高い」という場合には、リスクを発生確率の意味で用いている。一方、「外出する際に、大金を持ち歩くのはリスクが大きい」という表現では、危険性という意味で用いられている。工学としてのリスク評価を行う場合に、これらの日常的に受け止めている感じ方をそのまま持ち込むと、混乱を招く可能性がある。工学で用いられるリスクは、実はこの2つの定義の両者を考慮した上で、その積「損傷の発生確率×被害」として定義される。ここでは工学を対象とするリスク評価を行う場合の基礎的事項を要約する。ただし、紙面も限られていることから式などは極力避けることとし、これからリスク工学を学ぶ人にとっても、理解が容易となるよう心がけたい。

2. 何故今、リスク評価なのか

工学における安全性を学問的に取り扱う分野としては信頼性工学がまず思い浮かぶ。信頼性工学は、発展の歴史も古く学問としても十分に成熟しつつあるように思われるが、何故今、信頼性工学というよりはリスク評価が注目を集めるようになってきたのであろうか。信頼性工学では破損確率、信頼性指標などを安全性を表現する指標として用いる。例えば、

破損確率による表現の場合、「機器の年間当たり破損する確率は 10^{-4} 以下」というような形で提示される。このように、破損確率を十分に小さな数値として提示できれば、信頼性について説得力を持つとも考えられるが、これだけでは次のような問題点を生ずることが考えられる。

まず、破損確率によって安全性を説明しようとするれば、この値をより小さくすることに最大の努力を払われることになるが、この数値をどこまで小さくすればよいかということについては、目安があるわけではない。この値を小さくすることが可能であったとしても、莫大なコストを必要とするようでは、運用上困難が伴うことになる。

次に、破損確率の評価では、破損が“発生”することに関する評価は行うが“発生したら何が起きるか”ということに関しては、何も言及していない。例えば二種類の機器の安全性を評価する際に、一方は破損確率は極めて低いものの万が一破損すると人命にかかわるような重大事故に結びつくのに対して、他方は破損確率は低くはないもののたとえ破損が起きたとしても軽微な影響しかないものとしたとき、安全性の観点から見たとき破損確率のみに着目することが妥当でないことは明らかである。つまり、後者のように破損時に大きな影響の出ないものについては、そこそこに破損確率を低くできれば安全性の観点から問題ないと考えてもよいはずである。安全性の観点からは、“破損が起きる頻度”もさることながら、最終的に重要なのは破損が起きたときの被害の期待値を小さくすることである。この意味で、リスクの定義として「損傷の発生確率×被害」を用いることが、安全性の指標としては妥当であると考えられるのである。

RBI(Risk Based Inspection)あるいは RII(Risk Informed Inspection)に代表されるように、欧米では比較的早い時期

からリスクという概念が工学上の構造物のメンテナンスに導入され、活用されてきている。この考え方が登場した当初は“risk-based”という用語が用いられたが、最近では米国 NRC (Nuclear Regulatory Commission) が“risk-informed”の用語を冠するようになってから RII という呼称が正式になっている。しかし、わが国についてみると、試行的に試みた例はあるにしても、本格的な導入にはいたっていないように思われる。それでは機械構造物の維持管理の考え方の中に、このような概念が全くなかったかといえ、必ずしもそうともいえないように思われる。例えば、機械システムの検査政策の策定にあたり、機器類を重要度に応じて分類分けし、重要度の高い機器に対して重点的に検査を実施するということが多く行われている。重要度の高い機器は、事故時の被害が大きいものと評価しているものであるから、リスク的な考え方に基づいて検査政策を決定しているとも見られる。ところが、このような検査政策の策定は、機械システムの供用前に行われるので、破損確率のようなデータが未だ存在しておらず、安全側の設定とするため、どうしても過大な検査政策を策定しがちである。一度、機械システムの供用を開始すると、重要度の高い機器に対する重点的な検査のもとではほとんど、損傷が検出されないのに対して、重要度が低いとみなしてきた機器に予想以上の損傷が発生する、などの状況が損傷データの蓄積とともに明らかになってくる。損傷データに基づいて、検査政策の見直しが行われれば合理的であるが、供用前に策定されていた検査政策の変更を、社会に対して説得力をもって実施することには困難が多い。このような検査政策の見直しを、リスクという客観的な指標を用いて行おうとするものが、上述の RBI, RII であり欧米においては広く受け入れられている考え方である。例えば、米国において API (米国石油学会)^{1,2)} や ASME (米国機学会)³⁾ において、このような概念が規格の中に導入されつつある。メンテナンスの合理化を行うためには、社会に広く認知された方法が必要であり、ここで期待されるのがリスクに基づく考え方である。国際的な価格競争の観点からも、メンテナンスの合理化は重要な要素であり、リスクに基づく手法の本格的な導入が待たれるところである。

それでは、「損傷の発生確率×被害」という比較的単純と思われるリスク概念の導入がなぜわが国においては、なかなか定着しないのであろうか。被害の評価を行うに当たっては、後述するように、まずはリスク源を特定して、機器の損傷があったときにどのような被害、あるいは影響があるかを明確にする。ところが、わが国には、事前に被害が特定できる場合には、その防護策をとることにより被害を防ぐことを求める風土がある。つまり、被害が特定できていながら放置することは責任問題と考えるきらいがある。従って、積極的に被害を特定した上で、リスク評価を行い公開するという考え方は馴染まないのではないであろうか。例えば、わが国の安全規格の多くは、検査時に欠陥が発見された場合には、修理あるいは交換することが求められ、検査後に欠陥が残るようなことは原則としては許容していない。このような考え方にたつと、たとえ微小な欠陥で、安全上十分に裕度があることが明らかであったとしても、全てについて修理・補修が求

められることになり、コスト上無駄が多くなることは明らかである。他の例として、確率論を導入してリスク評価を行う学問体系を欧米では PRA (Probabilistic Risk Assessment) と呼ばれるのに対して、わが国では PSA (Probabilistic Safety Assessment) という用語が好んで用いられる。リスクという用語を、悪いもののイメージと結びつけていることに起因しているものと思われる。

日常的に発生している事故例を見るまでもなく、絶対の安全ということは所詮不可能なことであるのであり、そうであればどの程度安全であるのかを客観的な指標で積極的に示したほうが、はるかに合理的であり説得力ももつ。今後、リスクマネジメントを通じて検査政策を策定していくにあたっては、リスク工学の位置付けが、ますます重要になるものと考えられる。

3. リスク評価のための予備知識

工学上のリスク評価では、確率論的な取り扱いがたびたび出てくるので、統計学の基礎知識は必要である。また、信頼性工学は随所で用いられ、その中でも破損確率の評価手法は原理や、解析技法について理解しておくことが必要である。破損事象の理解のためには、材料強度や破壊力学の知識が必要になる場合もあり、破損確率の評価のために荷重-強度モデル (Stress-Strength Model) が用いられる。Fig. 1 に荷重-強度モデルの概念を示す。つまり、荷重と強度のばらつきがいずれも図のように確率密度関数 (PDF) で与えられるとき、破損確率の評価は次の破損条件を満足する確率を評価することに他ならない。

$$\text{荷重} > \text{強度} \quad (1)$$

例えば、Fig. 1 の場合、荷重が $(x, x+dx)$ に存在する確率は、 $f_s(x)dx$ であるが、この場合の破損確率は強度がこれを下回る確率 $F_R(x)$ で与えられる。ここに、 $F_R(x)$ は強度 x_R の累積分布関数である。従って、この状態での破損確率は両者の積を取って以下のように与えられる。

$$F_R(x) \cdot f_s(x) dx \quad (2)$$

全体の破損確率 P_f は、式 (2) を全領域に渡って積分することによって求められる。これが荷重-強度モデルの基本的考え方である。

荷重-強度モデルの評価においては荷重と強度のいずれについても確率密度関数が厳密に求まっている必要があるが、このようなケースはまれであるので、破損確率の近似評価手

Fig. 1 Schematic drawing of stress-strength model.

Fig. 2 Schematic drawing of first order second moment.

段として、各変数の平均値 μ と標準偏差 σ 程度の情報から近似的評価を行う一次近似二次モーメント法(FOSM)がよく用いられる。簡単なケースとして確率変数が荷重 x_S と強度 x_R の2つしか存在しない場合を考える。式(1)の破損条件は

$$G(x_R, x_S) = x_R - x_S \leq 0 \quad (3)$$

と書ける。このとき、関数 $G(\cdots)$ を限界状態関数と呼ぶ。 $z = G(x_R, x_S)$ と置くと、 $G(\mathbf{x})$ が $\bar{\mathbf{x}} = (\mu_{x_R}, \mu_{x_S})$ の回りに Taylor 展開でき、かつ $\mathbf{x}$ が互いに独立であるとき、以下の近似評価が可能である。

$$\mu_z \cong G(\bar{\mathbf{x}}) \\ \sigma_z^2 \cong \left(\frac{\partial G}{\partial x_R} \right)_{\bar{\mathbf{x}}}^2 \sigma_{x_R}^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial x_S} \right)_{\bar{\mathbf{x}}}^2 \sigma_{x_S}^2 \quad (4)$$

$G(\cdots)$ によって変換された z はやはり、確率変数であるが、 z の平均値とばらつきは安全に直接かわる量となる。式(4)では、 z の平均値 μ_z と標準偏差 σ_z が、各設計変数の不確実性と関連付けて近似評価できることになるので、安全裕度の評価が可能である。下式で定義される信頼性指標を安全にかかわる指標として用いる。

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} \quad (5)$$

このように、式(5)に基づいて信頼性を評価する手法を一次近似二次モーメント法と呼ぶ。Fig. 2 の z の確率密度分布図から明らかな通り、 μ_z が破壊限界である $z=0$ から $\beta\sigma_z$ だけ離れていることを意味している。

この他、多くの乱数を発生して試行を繰り返すモンテカルロ法などのシミュレーション技法が用いられる。システムのモデル化にあたっては、フォールトツリーアナリシス(Fault Tree Analysis, FTA)、イベントツリーアナリシス(Event Tree Analysis, ETA)の理解が求められる。FTA, ETA の内容については、5.2 節で説明される。実際の評価にあたっては、損傷事例に関するデータベースの活用が不可欠であり、データベースとしてどのようなものが利用できるのかを把握しておくことが、極めて重要である。

4. リスク評価の手順

Fig. 3 にオーストラリア規格 AS/NZS 4369 に記載されている、リスク評価のための手順のフローチャートの例を示す。原理的には、リスク評価の手順はおおよそ共通している

Fig. 3 Procedure of risk analysis.

ものと考えられる。

まず、①において解析を行う枠組みを明確にすることから始める。ここでは、リスク解析を行う範囲の明確化を行う。例えば、個人のレベルの評価であるのか、組織のレベルの評価であるのか、さらに広範囲に地域の評価であるのかなどを明確にする。もし、評価から除外する部分がある場合には、その理由を明確にしておかなければならない。また、この段階で、利害関係や解析の影響の及ぶ範囲も明確にしておくことが望ましい。最終的なアウトプットとして求められるものが、定性的なものであるのか定量的なものであるのかも明確にしておく。そのいずれかによってリスク評価で採用するアプローチが異なってくる。

②の段階では、評価対象とするシステムの明確化を行う。システムの特性を評価するためには、システムを適確にモデル化する必要がある。このモデル化の情報は、次のハザードのシナリオ解析においても活用される。

③においては、機器の損傷に伴ってどのような被害、もしくは影響度があるのかを明確にするための前段階として、まずは異常事態のときに何が起きるのかというシナリオを漏れなく抽出する。その際に、実際に観察された現象ではなく潜在的に生じ得る現象の予測が求められるために、注意深い検討が必要である。この段階がわが国においては、どちらかというと前向きに受け止められない傾向にあり、たとえシナリオ抽出を行っても、開示することがためらわれることが多いのではないであろうか。しかし、前述した通りリスク評価においては、まさにこの部分が重要なものであり、積極的に開示することをもって高い評価を与える社会的風土を形成することが極めて重要であると考えられる。

④においては、これまでの評価でハザードのシナリオに基づいて異常事態が発生した結果として、どのような被害、あるいは影響度があるかを特定する。被害を測る指標としては、リスク解析の目的や、解析者の関心などに依存して、決定される。極端な場合には、事故時の予測死者数のようなも

のも考えられるし、それ以外に、事故時の復旧コスト、被害の及ぶ面積の大きさ、喪失されるシステム機能の大きさ、などさまざまなものが考えられる。

⑤の段階では、異常事態が発生する確率、もしくは損傷確率の評価を行う。この評価においては、データの蓄積が重要であり、損傷事例データベースがあれば活用する。定量的リスク評価を行う場合、この部分がやはり一つのネックになる部分である。この背景には、リスク評価を意識した組織だったデータの蓄積が行われていないことが一因であるものと推察される。例えば、一般に事事故事例データベースというと、事故が起きたときのみのデータを記録することを考えるが、損傷確率の評価のためには、これのみでは情報不足であって、正常に動作した場合のデータもまた必要なのである。損傷データの記録がないということの説明としてよく聞かれることとして、「機器を破損するまで使うことはなく、その前に交換してしまう」ということがある。しかし、たとえこのような場合であっても、供用していた期間を情報として蓄えておくことによって、破損確率評価に活用することは可能なのである。一方で、たとえこのようなデータベースを企業が社内で持っていたとしても、なかなか外部には出てこないのが現状であろう。わが国に損傷データベースがない場合には、海外のデータが利用されることもある。

⑥においては、異常時にどのようなシナリオが展開していくかを明確にすることを行う。このために、後述する FTA や ETA などの論理解析が活用される。この際、想定されるシナリオが膨大である場合には、全てのシナリオに対してリスク評価することは時間と労力の観点から困難を伴うことも多い。この場合には、⑦の感度解析を活用する。つまり、入力変数の微小変化が結果に及ぼす影響の度合いを調査し、感度の大きな因子を重点的に解析することにより合理化される。また、このような変数は重要度が高い因子として抽出できるので、データ精度を高めるための目標データとしても特定することができる。

⑧のリスク評価においては、まずリスクの基準を明確にする。技術的側面からの明確化以外にも、文化的、社会的、人道的、法律的などさまざまな観点からの基準も考えられる。影響度と損傷確率の両者の評価結果を用いて、後述の定量的リスク評価、もしくは定性的リスク評価を行った上で、リスク基準との比較を行う。この結果に基づき⑨のリスクに対する処理を決定する。処理の方法としては 1. リスク回避、2. リスク低減、3. リスク移転、4. リスク許容などがある。リスク基準とリスク評価の結果の比較によって、その余裕の程度に応じて意思決定を行う。最終的な結果は、正確に文書化するとともに⑩に示すように第三者の専門家による厳正なレビューが望まれる。このレビューの結果、不適切と判断される部分があれば、①に戻ってリスク評価の精度を高める努力を行う。

次章において、リスク評価の技術的側面の中の主要な部分についてもう少し詳しく述べる。

5. システムの評価

5.1 リスク源の特定

リスク解析の手順として、リスク源の特定をすることがまず必要になるが、このためには評価対象のシステムについて熟知していなければならない。その際、これまでには経験のない事象から派生する事故シナリオについても、特定することが求められる。リスク源の特定のために用いられる技術を Table 1 に、その特徴とともにまとめて示す。このように、リスク源の特定を行う解析の段階や、求められる詳細さの程度、解析分野などに応じて適切な手法を選択する。

このうち代表的なものとして FMEA と HAZOP について概要を示す。

FMEA は航空、原子力、電子機器などの分野でよく用いられる方法で、破損モードごとにより詳細な情報をワークシートに書き込むことが行われる。ワークシートに書かれる情報としては、特定する機器、その機器の機能、破損モード、その破損の原因となる事項、その破損によって発生し得る影響、その破損を検知する方法、破損時に運転者のとるべきアクション、などである。FMEA では、可能な限り詳細に記述しておくことが重要である。従って、発生し得る影響などにおいて、あらゆる可能性を多方面から検討し、漏れなく記載しておくことが重要である。

HAZOP は、主に化学産業のプラントの災害や運転上の問題を特定するのに広く用いられている方法である。本手法は、FMEA を配管系プロセスユニットに特化して適用した方法であるとも考えることもできる。例えば、もし配管内流体の逆流が起きたらどのような事故が発生するか、化学的变化として何が起き得るか、装置のメンテナンス作業への影響など

Table 1 Methods for specifying risk sources.

Name	Characteristics
Preliminary hazard analysis (PHA)	It is used at the preliminary design stage before detailed analysis for identifying the major hazards. Guide lists of elements that are potentially hazardous and lists of potentially hazardous situations for specific systems are often introduced.
Failure modes and effect analysis (FMEA)	Each component in the system is systematically reviewed to identify their function, the failure modes of these components, the causes of the failure modes, the methods of detecting these failure modes and the effect of failure events. It is important that the identification of failure modes be as extensive as possible.
Failure mode, effect and criticality analysis (FMECA)	This is a logical extension of FMEA in which failure events are categorized according to the seriousness of their possible effect. Both the failure frequency and the failure effect are assessed subjectively to determine the criticality of each failure mode. It is assumed that there is independence between the components or subsystems, otherwise dependence will add significantly to the complexity of the analysis.
Hazard and operability studies (HAZOP)	This method is used widely in the chemical and in the process industries to identify hazards or operating problems in plants. It is an adaptation of the FMEA technique specifically for systems based on pipeline flows and process units. Results are usually summarized in tabular worksheet form.
Incident databanks	Incident information can be used to help identify potential major hazards in a system and their causes and their consequences. Databanks should be used for conducting PHA, FMEA, FMECA or HAZOP analyses.

が含まれる。ただし、ワークシート上に書き下す点においては FMEA と全く同じである。通常、ワークシート上には、以下のような項目について記載が行われる。各要素の項目名(配管、容器、リリースバルブなど)、異常値(加圧、低圧、作動流体の喪失など)、異常値となる原因(装置異常、運転ミスなど)、異常事態によって発生し得る影響(配管破損、逆流、漏れ、火災、爆発など)、異常事態のときにとるべきアクション、などについて記載が行われる。

5.2 システムの表現

5.1 で述べた各種手法により、リスク源の特定が行われるが、対象とするシステムによっては、リスク源となる損傷事象の評価に、より詳細な検討が求められることがある。例えば、原子力プラントや化学プラント装置では、事故の原因となる機器の損傷は、単独の事象としていきなり発生するのではなく、何らかの起因事象から事象の連鎖の結果として発現することが多い。このような場合に、システム事故の特性をより適切に表現するために、事象の過程の順序や組み合わせを図式表現することが行われる。図式表現のうち代表的なものはフォルトツリー(Fault Tree, FT)とイベントツリー(Event Tree, ET)である。解析まで含めて表現するときには、フォルトツリーアナリシス(FTA)、イベントツリーアナリシス(ETA)と呼ばれる。FTA と ETA は、完全に独立なものではなく補完的に用いられる。

Fig. 4 に典型的な、FT の例を示す。このように、FT では、最終的な事故事象を頂上事象として、この事象に関与し得る事象を後ろ向きに遡って特定していく。図中に表現されるように FT は原則的に AND や OR の論理ゲートから成るブール論理線図として表現される。この手順を進めていくと、やがてそれ以上に遡る必要のない基本事象へと到達する。このような事象を基本事象と呼び図中では○印で示している。長方形は複数の故障事象の組み合わせによって生じた故障事象を示す。FT の作成過程において、故障原因の究明が十分でない故障事象がたびたび現れるが、このような事象は図中のようにダイヤモンドの記号で示しておく。AND

Fig. 4 Example of fault tree.

ゲートは、このゲートを通過して破損が伝播するためには、このゲートに入力されている全ての機器が故障する必要があることを示し、並列システムを示している。このゲートでは、一つの機器だけが故障しても直ちに機器の損傷というわけではないので、ある程度の冗長性を有することになる。一方、OR ゲートは全ての機器が機能しなければシステム全体が正常に動作しないことを示し、直列システムであることを示している。ほとんどの工学システムは直列および並列システムの組み合わせで表現できる。フォルトツリーではなくて、信頼性のブロック図として表現する場合には、直列系、並列系の図示は Fig. 5 のようになる。フォルトツリーは破損時の論理関係を、信頼性ブロック図は成功時の論理関係を表現していることに注意が必要である。実際のシステムでは、ブロック図はさらに複雑なものとなるが、この場合には故障モードの特定にカットセットという考え方が用いられる。例えば、システムブロック図が Fig. 6 のように表現されるとき、複数の機器が同時に破損すると、直ちにシステム破損に結びつく組み合わせがある。このケースでは AB, DE, ACE および BCD が該当する。この組み合わせをカットセット、もしくは最小カットセットと呼び、頂上事象はこれらの最小カットセットのいずれかが生じたときに発生するものとして識別できる。このようにカットセットを見出すことにより、解析の手間を大幅に減ずることができる。FT は、予め検討すべき故障モードが限定されており、このモードの詳細解析をすることに関心がある場合に有用な解析手段である。

一方、ET の典型的な図式表現を Fig. 7 に示す。ET の場合には、FT とは逆に起因事象から出発して事象が伝播していく過程を時間経過に従って、追跡していく。解析は、最終

Fig. 5 Logic of fault tree.

Fig. 6 Reliability block diagram of complicated system.

Fig. 7 Example of event tree.

Fig. 8 Typical example of risk matrix.

的な故障事象が現れるまで続ける。従って、一つの ET から、非常に多くの故障事象が現れることになる。関心のある故障事象が限定されているときには、非常に多くの ET を描かなければならない場合もあり、必ずしも効率的であるとはいえない。このような場合には、むしろ FT を利用すべきであろう。ET の場合には、特定の故障モードが生起することによって、後続の生起事象がどのようなようになるか、という点に関心がある場合に有用なツールである。ET と FT は補完的な関係にあり、しばしば組み合わせて用いられる。例えば、FT にて、ある特定の故障モードについて詳細に分析した後に、この故障モードの発生によってどのような後続の事象が派生するかを知りたいければ、FT の頂上事象を ET の起因事象として解析すればよい。あるいは、ET の結果導かれる故障事象についてより詳細な解析をしたければ、ET の帰結として得られる事象を FT の頂上事象として解析すればよい。ET のばあい、あらゆる生起状態について解析しようとする分岐の数が増え、莫大にふくれ上がることがある。例えば Fig. 6 のシステムでは 5 つの機器で構成されるため、完全な FT を描くと $32 (= 2^5)$ 個のパスが存在することになる。FT の場合と同様に、ET の場合にも複雑なシステムについて最小カットセットを見出すことにより、解析を簡素化することができる。膨大なシステムになると最小カットセットの抽出は容易ではないが、自動的に評価する手法も提案されている。

5.3 定性的リスク解析と定量的リスク解析

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、まずは主観に基づいていくつかの階層レベルに分類する。例えば、Fig. 8 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

Table 2 Risk treatments after risk analysis.

Risk avoidance	This is not always a possible option. If the hazards or their probability of occurrence of both are particularly serious, this may be the only solution.
Risk reduction	The risk is reduced either by reducing the probability of occurrence of some events, or by reduction on the severity of the consequences.
Risk transfer	The financial risk is shared or completely transferred to other parties through insurance or other financial mechanisms. This is an available option where the primary consequences are financial.
Risk acceptance	Even when it exceeds the criteria, it may be taken only for a limited time until other measures can be taken.

クのランクづけを行う解析手法を定性的リスク解析と呼ぶ。定性的リスク評価は、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。従って、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。

定量的リスク評価では、故障確率と影響度を数値として求め、リスク値をその積として評価する。故障確率の評価にあたっては、FT、ET のいずれについても、各事象の生起確率を割り当てた上で、定量的に評価する。また、破損確率の評価にあたっては、信頼性工学の各種手法が活用され、二次モーメント法のような近似解析手法や、モンテカルロシミュレーションのような技法が活用される。モンテカルロ法の効率的解析のためには、重点サンプリング法のような方法も活用される。損傷データ数が非常に少ない場合には、稀少データの解析法であるベイズの定理の活用が有効である。これらの、詳細については信頼性工学のテキスト^{4,5)}を参照されたい。

6. リスク解析後の処理

リスク評価の終了後に、リスクの評価値と基準とを比較して、許容レベルを越えている場合には、何らかの意思決定が要求される。以下にその代表的な処理と、その概要を Table 2 に示す。

7. ま と め

ここでは、工学においてリスク評価が重視されるに至った背景と、わが国でなかなか導入が進まない背景、リスク工学の基礎事項について、概要をまとめた。定量評価のための数式処理などは適宜信頼性工学の専門書を参照していただきたい。今後、リスクベース工学を学ぼうとする方々の一助となれば幸いである。

文 献

- 1) Recommended Practice for Fitness-For-Service, API 579, API (2000).
- 2) Recommended Practice for Risk-Based Inspection, API 580, API (2001).
- 3) ASME Code Case N-578, "Risk-Informed Requirements for Class 1, 2, and 3 Piping, Method B, Section XI, Division 1" (1997).
- 4) H. Kobayashi: *Zairyokagaku*, **37**, No. 4 (2000) 171.
- 5) H. Okamura and H. Itagaki, *Statistical Treatment in Strength*, (Baifukan, 1979).