



入門講座

リスクベース工学入門-1

リスクベース工学入門 (総論)

Introduction of Risk-Based Engineering

小林英男
Hideo Kobayashi

横浜国立大学
安心・安全の科学研究教育センター 教授

1 リスクの本質と リスクマネジメント

我が国では、リスク (risk) という言葉が汎用されているが、本質は理解されていない¹⁾。一般社会でのリスクの出発点は、経済である。リスクには、利益と不利益が含まれる。株の売買に代表されるように、儲けと損がリスクである。儲けと損を扱う経済学 (または経営学) が、いち早く儲けるための数学的手法としてリスクの概念を導入し、リスクマネジメント (risk management、リスクの経済学、不確実性の経済学) を体系化し、企業経営などに適用してきた。本来のリスクは、企業における開発、生産、販売、投資、保険などの経営の意思決定に関わる利益と不利益を包含するリスクであって、行為の結果としての成功と失敗のリスクにほかならない。

リスクの概念を図1の左側に示す²⁾。安全と危険は決定論的基準で白と黒に割り切れるものではなく、全体がリスクであり、リスクの低い側により安全が、リスクの高い側により

危険が位置する。両者の境界は、確率論的基準の適用によって定まる許容値または目標値であり、この設定がリスクマネジメントの目的となる。

人間の行為の結果は、安全と危険の枠組みよりもさらに大きく、成功と失敗が両極に位置する。図1の右側に示すように、安全を成功に、危険を失敗に置き換えれば、成功と失敗も全体をリスクとして捉えることができる。

我が国では、リスクに危機という訳語を適用するが、危機という訳語に相当するのはクライシス (crisis) である。本来のリスクは成功追求型の正負のリスクで、クライシス (危機) は失敗防御型の負のリスクと理解し、両者を使い分ける必要がある。リスクの本質は、未来を運命 (神のお告げ) として受け入れるのではなく、チャンスとして捉え、現在の統制下に置くこと (神への挑戦) にある。リスクを冒せば儲かるかもしれないという当たり前の話である。

産業革命以来の社会は、富を配分する社会 (産業社会) に変革し、技術社会はその中核にあった。現在、環境破壊、公害、災害、事故などの問題が一挙に顕在化し、産業社会はリスク (利益のみならず不利益も) を配分し、受容する社会 (リスク社会) に変わりつつある。リスクの供給元が技術社会とみなされている。一般社会が技術社会に抱く不信感を払拭するためには、技術社会がリスクを正しく認識し、一般社会の要求に応じてリスク情報を適確に発信する必要がある。これをリスクコミュニケーションという。

2 リスクベース工学の必要性

上記の社会的要請に加えて、工学自身の合理性の追求の観点から、経済学がリスクマネジメントに変革したように、工学はリスクベース工学 (risk-based engineering) に変身すべきである。リスクベース工学というネーミングが提唱されている³⁾。

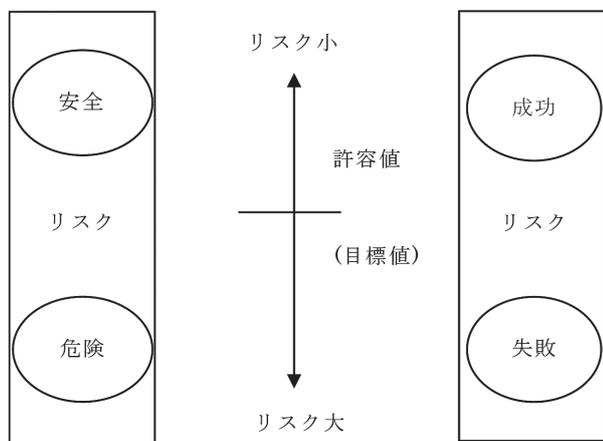


図1 リスクの概念

ものづくりを目指す工学の3本柱である設計、製造とメンテナンスに対して、信頼性と安全性の確保は社会的に至上命令である。安全に絶対はなく、安全と危険の境界は不明瞭である。信頼性の指標は、故障確率（または破壊確率）である。リスクベース工学では、信頼性をリスクに置き換える。

リスクマトリックスを図2に示す。リスクの指標は、故障確率とその影響度の組合せとなる。故障確率は純粋に工学の問題であるが、影響度は社会と経済にも関連する問題となる。図では一例として、故障確率と影響度をそれぞれ3つのレベルに分類し、その組合せとしてリスクをA、B、Cの3つにランク付けしている。故障確率が高で影響度が小の場合のリスクと、故障確率が低で影響度が大きい場合のリスクは、いずれもBランクと判定される。工学では、リスクマトリックスのランク付けの結果を、指標として使用する。設計の場合には、ランク付けの結果に従い安全係数を決定する。検査の場合には、ランク付けの結果に従い検査頻度を決定する。これがリスクベース工学の実行にほかならない。

すなわち、工学におけるリスクは、従来の信頼性と安全性に加えて、社会性と経済性をも包含した合理的な概念である。今後は、工学の3本柱に対して、信頼性に代わって、リスクベースが適用されることになる。すなわち、リスクベース設計 (risk-based design)、リスクベース製造 (risk-based manufacturing) とリスクベースメンテナンス (risk-based maintenance) である。リスクベースメンテナンスには、リスクベース検査 (risk-based inspection) が含まれる。最近では、リスクベース (risk-based) に代わって、リスクインフォーム (risk-informed) も使用されているが、意味は同じである。

		影響度 →		
		大	中	小
故障確率 ↓	高	A	A	B
	中	A	B	C
	低	B	C	C

ランク A(高リスク)：安全係数高、検査頻度高
 ランク B(中リスク)：安全係数中、検査頻度中
 ランク C(低リスク)：安全係数低、検査頻度低

図2 リスクマトリックス

リスクベース工学は体系化されていない。欧米では、リスクベース設計とリスクベースメンテナンスが定着しつつあるが、リスクベース製造の術語はない。本稿は将来的なリスクベース工学の構築を目指して、以下の2つを目的とした。

○一般技術者へのアピール

リスクの概念の必要性と合理性の理解

○若手技術者へのアピール

リスクベース工学の構築と実践

以下では、リスクベース設計、リスクベース製造とリスクベースメンテナンスを具体的に取り上げ、リスクベース工学の必要性を簡単に述べる。

(1) リスクベース設計

信頼性設計では、信頼度（または故障確率）が設計の指標となる。並列システムの信頼度は部品数の増大に伴い向上するが、信頼度1に漸近するのみで、信頼度1とはならない。信頼度1への追求は、絶対安全の追求にほかならず、軽量化と経済性を阻害する。リスクベース設計では、設計の指標をリスクに置き換えることによって、信頼度に適切な打切りが設定できる。

信頼性設計では、安全係数は信頼度で一義的に決まる。リスクベース設計では、より合理的な安全係数の設定が可能となる。

(2) リスクベース製造

製品が市場に出荷された後の品質を製造の段階で保証するために、品質管理と品質保証を行う。製造の段階における製品の信頼度は、具体的に安定度、不良度、不良率などで表示できる。この信頼度に影響度を考慮し、リスクに置き換えて品質管理と品質保証を行うのが、リスクベース製造である。

(3) リスクベースメンテナンス

メンテナンスの3本柱は、検査、評価と補修・取替えである。したがって、3本柱はそれぞれリスクベース検査、リスクベース評価とリスクベース補修・取替えとなる。

リスクベース検査は、米国機械学会 (ASME)、米国石油協会 (API) などで規格が制定され、実行に移されている。リスクベース検査の最終目的は、リスク目標値に合致する検査プログラムの選定である。

リスクベース評価は検査結果の判定で、従来の破壊力学に信頼度を導入した確率論的破壊力学の適用と影響度の考慮にほかならない。

補修・取替えによって新品の状態に回復することはなく、必ずリスクを伴う。リスクベース補修・取替えの目的は、評価と補修・取替えに要するコストを含めたリスクの総合的な評価と、補修・取替えプログラムの選定である。

3 リスクベース設計

(1) リスクベース設計

リスクベース設計という用語は必ずしも厳密な定義があるわけではなく、リスクベース工学を適用した設計のことを言う⁴⁾。簡単に言えば、設計対象とする機器のリスクに関するデータ(または情報)があれば、リスクを指標として機器全体の強度を含めた機能の許容値(または目標値)を設定し、それを構成部品または要因に均等配分すれば、合理的な設計を追求できるということである。

すなわち、リスクベース設計は基本的に信頼性設計のベースの上であり、設計の指標を信頼度(または故障確率)からリスク(故障確率と影響度の組合せ)に置き換えたものにすぎない。ただし、リスク情報は必ずしも十分に蓄積されていないし、むしろ機器の使用経験によって獲得されるものである。したがって、設計の指標となるリスクは必ずしも定量的ではなく、リスクベース設計はリスクベースメンテナンスとも深い係わり合いをもつ。これが冒頭のリスクベース工学を適用した設計の意味するところである。

設計の目的である機能のうちでは強度が普遍的に重要であり、強度に関するリスクまたは信頼度は安全係数に反映される。本稿では、安全係数に限定して、リスクベース設計の基本的な考え方と最近のトピックスを解説する。

(2) 安全係数とリスクベース設計

安全係数(safety factor)は安全率とも言う。あえて安全係数と言うのには理由がある。最近、米国機械学会(ASME)ボイラーと圧力容器規格では、原子力発電所用機器の設計規格(Sec. III)⁵⁾の安全係数を設計係数(design factor)に、メンテナンス規格(Sec.XI)⁶⁾の安全係数を構造係数(structural factor)に名称変更した。すなわち、安全係数は設計ばかりでなくメンテナンスにもあり、両者で目的と数値は異なり、これを混同してはならないのである。また、設計率と構造率では様にならない。

基準強度 σ_c を確定値とする場合、次式の安全係数 S を定義して許容応力 σ を制限する。

$$\sigma = \sigma_c / S \dots\dots\dots (1)$$

従来、安全係数は経験的に定められてきたが、定量性はさておき、定性的には信頼性設計とリスクベース設計の考え方と矛盾するものではない。

信頼性設計では、信頼度(または破壊確率)を指標として、安全係数を設定する。すなわち、荷重(または応力)と基準強度の確率分布が与えられれば、破壊確率は一義的に定まる。そして、破壊確率を指定すれば、基準強度の中央値

$\bar{\sigma}_c$ (平均強度)と応力の中央値 $\bar{\sigma}$ (平均応力、許容応力)の比として、安全係数が一義的に定まる。

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_c / S \dots\dots\dots (2)$$

当然、破壊確率を低く指定すれば、安全係数は大きく設定されることになる。

信頼性設計の指標は信頼度であり、影響度は考慮されていない。しかし、機器には潜在的な危険性(ハザード、hazard)がある。わかりやすい機器のハザードの例が高圧、高温、高速である。圧力容器の場合、高圧による破裂危険性に加えて、内蔵する流体の種類によって爆発危険性、火災危険性、中毒危険性などのハザードがある。欧州連合(EU)規格の圧力設備指令書(PED、Pressure Equipment Directive)⁷⁾では、圧力容器を容器等級(危険、非危険)、PV(圧力×容積)値、容器型式によって4つのリスクカテゴリーに分類し、安全性の確保を要求している、ただし、PEDは性能規格であり、安全係数はCEN/TC54などの欧州標準委員会の技術規格に従うことになる。これはリスクベース工学における機器の重要度分類と同じであり、影響度の考慮にほかならない。では、圧力が高い(影響度が大きい)ほど安全係数を大きく設定するかというと、そうではない。まず、基本的な設計の考え方が異なるのである。

基本的な設計の考え方は、公式による設計(design by rule)と解析による設計(design by analysis)に大別できる。そして、圧力が低い場合には公式による設計を採用し、圧力が高い場合には解析による設計を採用する。公式による設計では、構造と応力の計算式が経験的に与えられている。そして、起こり得るすべての破壊モードを想定せずに、塑性崩壊で代表させて大きい安全係数を設定し、他の破壊モードに対する安全性を確保する。塑性崩壊とは、部材の断面全体が塑性変形に至り、負荷の増大なしで変形が進行する状態を言う。基準強度は塑性崩壊を対象としているが、大きい安全係数の設定によって、基本的には弾性設計となる。一方、解析による設計では、起こり得るすべての破壊モードを想定し、詳細応力解析を実施して、応力制限と温度制限を行う。結果として、安全係数を小さく設定できる。塑性崩壊を対象とする場合には、塑性設計(または限界荷重設計)となる。また、設計に自由度があり、合理性を追求できる。なお、公式による設計と解析による設計では、基本的な設計の考え方のみならず、材料、製造、検査に関する要求も異なる。

解析による設計では、さらに機器の状態分類を導入する。機器の運転状態によって、荷重の大きさと発生頻度は異なる。発生頻度が高い状態ほど、荷重が低くても安全係数は大きく設定する。複数の状態分類の結果を総合して、設計が完

了する。すなわち、解析による設計では、多種多様な安全係数がある。

リスクベース設計の適用に際しては、まず現行の公式による設計と解析による設計という区別の妥当性を、リスクの観点から検証する必要があるが、それはさておく。リスクベース設計の主たる対象を、解析による設計と限定する。解析による設計での等級分類と状態分類に信頼度と影響度を導入し、リスクを指標として多種多様な安全係数を合理的に設定することが、リスクベース設計の目的となる。

上述した公式による設計と解析による設計という基本的な設計の考え方は、ASME ボイラーと圧力容器規格の一般圧力容器規格 (Sec.ⅧのDiv.1とDiv.2)⁸⁾ で体系化されてきた。我が国では、JIS 圧力容器規格の B8265⁹⁾ と B8266¹⁰⁾ がこれに対応する。一方、土木・建築分野では、信頼性設計をベースとして、従来の許容応力度設計に対して、荷重・耐力係数設計 (LRFD: Load and Resistance Factor Design) が導入され^{11,12)}、すでに活用されている。荷重・耐力係数設計は限界状態設計とも言う。大まかに言えば、許容応力度設計が公式による設計に、荷重・耐力係数設計が解析による設計に対応する。安全係数に関しては、荷重・耐力係数設計では、部分安全係数 (partial safety factor) を初期から採用していることに、大きな特徴がある。しかし、現行の ASME ボイラーと圧力容器規格と米国石油協会 (API) 規格でも、メンテナンス規格 (Sec.XI⁶⁾ と RP579¹³⁾ は部分安全係数の採用に至っている。

部分安全係数は、従来の安全係数を荷重 (応力)、基準強度、社会に分離し、合理的な設定を可能としたもので、特に指標としてのリスクの導入が容易である。すなわち式 (2) を次式のように書き直す。

$$S_1 \bar{\sigma} = (\bar{\sigma}_c / S_2) / S_3 \dots\dots\dots (3)$$

$$S = S_1 S_2 S_3 = \bar{\sigma}_c / \bar{\sigma} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 S_1 は荷重の安全係数 (割増し係数)、 S_2 は基準強度の安全係数 (割引き係数)、 S_3 は社会的影響の安全係数 (割引き係数) である。

4 リスクベースメンテナンス

(1) メンテナンスとメンテナンス規格

ものづくりを目指す工学の3本柱は設計、製造とメンテナンス (maintenance) で、メンテナンスは維持、保守、保全などと和訳されている。規格名称で言うと、最近では英語の Maintenance Code 自身が使われなくなり、Fitness-For-

Service Code と Post Construction Code がむしろ一般的となりつつある。FFS と PC の適切な和訳がないので、ここではメンテナンスを使用する。

設計・製造規格の必要性和重要性は自明の理であり、議論の余地はない。しかし、設計は使用経験と加速試験のデータに基づく予測行為であり、予測 (外挿) には限度がある。また、設計・製造の過程では、人の失敗行為などの技術の落度が生ずる。そして、予測の限度と技術の落度によって、機能不全と材料の損傷に至る。これを救済するのがメンテナンスである。メンテナンスでは設計・製造規格の予測結果を、使用の途中で実際に確認する。予測どおりでない場合、予測の限度と技術の落度の原因を究明し、予測の修正を図る。これは使用の途中における設計・製造の見直し・やり直しにほかならない。そして、メンテナンスの情報は設計・製造へフィードバックされる。メンテナンスを確実に実行するために、メンテナンス規格が必要である。

すなわち、設計・製造規格とメンテナンス規格はそもそもが相互に補完し合う一対の規格であって、ものづくりにおいて両者ともに欠くことはできない。しかるに我が国では現行法令の技術基準 (設計・製造規格) において、「機器は製造時の性能が維持されなければならない」として、メンテナンスを位置付けてきた。しかし、実際には、機器は徐々に性能劣化して機能不全と材料損傷に至り、必ずいつかは寿命が尽きるのである。使用可能な性能劣化と寿命を適確に判定する基準が必要で、これを具体的に示すのがメンテナンス規格の目的である。我が国でも原子力発電所における応力腐食割れのトラブル隠しなどの教訓を踏まえ、原子力発電所用機器のメンテナンスに日本機械学会 (JSME) の維持規格 (SNA1-2000)¹⁴⁾ が正式採用されることになった。現在、全産業分野でメンテナンス規格の制定が進行中である。

代表的なメンテナンス規格として、ASME ボイラーと圧力容器規格の原子力発電所用機器の供用期間中検査規格 (Sec. XI⁶⁾ と API の石油精製・石油化学用機器の FFS 規格 (RP579)¹³⁾ がある。JSME の維持規格は ASME の Sec.XI をベースにしている。

上記のメンテナンス規格は性能劣化として材料の損傷 (割れと劣化) を取り上げ、供用期間中検査で割れと劣化を非破壊的に検出し、使用に耐えるか否かを評価し、さらに使用に耐えない場合の補修・取替えを規定するもので、以下の3つの基準で構成されている。

- 非破壊検査基準
- 割れ・劣化評価基準
- 補修・取替え基準

(2) リスクベースメンテナンス

欧米では、メンテナンス規格の制定と実行の結果、規格によるメンテナンス計画(メンテナンスプログラム)の画一的な規定が、合理性を損うことに気付いた。具体的な例としては、規格の検査対象部位と実際の材料の損傷部位の間に相関がなく、頻度の高い検査をしている部位では何も起きず、検査をしない部位で損傷が起きているのである。検査をしない部位で損傷が起きた場合、その部位を規格の検査対象部位に追加するという検査強化が繰返されてきた。しかし、この行き着く先は全部位の全範囲を高頻度で検査するという論外の話しかない。そこで、限られた資源と時間の制約のもとで、合理的なメンテナンス計画の策定が課題となった。その結果がリスクを指標とするリスクベースメンテナンス(RBM、Risk-Based Maintenance)の開発であり、RBMの目的は合理的なメンテナンス計画の策定にほかならない。

この背景には、欧米の企業はリスクマネジメントが機能していること、メンテナンス計画と実行は自社ではなく、専門のコンサルティング会社と工業者に発注すること、RBMの実行で保険料が低減されることなどがある。

RBMの構成は、メンテナンス規格の構成と同様に、リスクベース検査、リスクベース評価とリスクベース補修・取替えになる。

(3) リスクベース検査

リスクベース検査(RBI、Risk-Based Inspection)はリスクインフォーム検査(RII、Risk-Informed Inspection)とも言う。原子力発電所用機器は供用期間中検査(ISI、In-Service-Inspection)を定期的に行う。ASMEのISI規格(Sec.XI)⁶⁾は検査、評価と補修・取替えを規定しており、世界各国はこれを準用している。

しかし、運転実績調査の結果、規格の検査対象部位と実際の材料の損傷部位の間に相関がないことが判明した。これを受けて、ASMEは検査の合理化を図るために、RBIを導入し、ISI規格(Sec.XI)本体の代替えとしてコードケースN-560、N-577とN-578を制定した。これらのコードケースはすでに適用されており、さらに3つのコードケースを統合して本体のAppendixとする作業が進行中である。APIでもFFS規格(RP579)¹³⁾に加えて、RBI規格(RP580とPub581)^{15,16)}を制定し、世界各国で使用されている。

RBIのプロセスを図3に示す。プロセスはシステム/機器の重要度分類からスタートする。RBIでは、確率モデルがすべてではなく、確定モデルと専門家グループの意見も重要視される。また、最終目的はリスク目標値に合致する検査計画(検査プログラム)の選定である。検査計画には検査対象機器と部位、複数同型機器の検査抜取り率、検査種類、検査範囲(%、表面と体積)、検査頻度、検査方法(目視、浸透、

磁粉、放射線、超音波、電磁誘導など)、検査の信頼度(検査員の技量を含む)などが含まれる。

検査種類と検査範囲を例にとる。検査種類は定期検査(開放検査)と運転中検査(ヘルスマonitoring)に大別できる。また、検査範囲が100%でない検査の場合、同じ箇所を毎回検査する定点検査と検査箇所を毎回変える選点検査(我が国で言うランダム検査)がある。どちらを選定したらリスクがより軽減できるかを定量的に判定する。

原子力発電所と化学工場における代表的なリスクとして、漏洩確率と影響度の組合せが挙げられる。漏洩の原因が例えば応力腐食割れと特定できれば、応力腐食割れの発生確率と非破壊検査の検出確率から漏洩確率が算出できる。定期検査で応力腐食割れの検出と補修を繰返すとすれば、漏洩確率の経年変化が予測できる。リスクの目標値を達成するためには検査頻度、検査方法、検査の信頼度などの対処があり、有効性と経済性を定量的に判断して検査計画を策定する。

(4) リスクベース評価

非破壊検査で検出した損傷を対象として、確率論的破壊力学の手法を用いて解析的に余寿命を予測する。これがリスクベース評価である。

損傷が割れと劣化の場合を示す。供用期間中の定常負荷に対してき裂進展解析を行い、き裂寸法の時間的変化を予測する。一方、供用期間中の最大負荷に対して劣化を考慮した破壊解析を行い、限界き裂寸法を予測する。予測き裂寸法が限界き裂寸法以下となる時間が、保証された余寿命となる。き裂寸法と劣化(限界き裂寸法)の頻度分布は時間に伴い変化し、破壊確率を指定すれば余寿命が定まる。次回のISIまたは供用期間末期までの余寿命が保証された検出欠陥(割れ)は、許容欠陥となる。

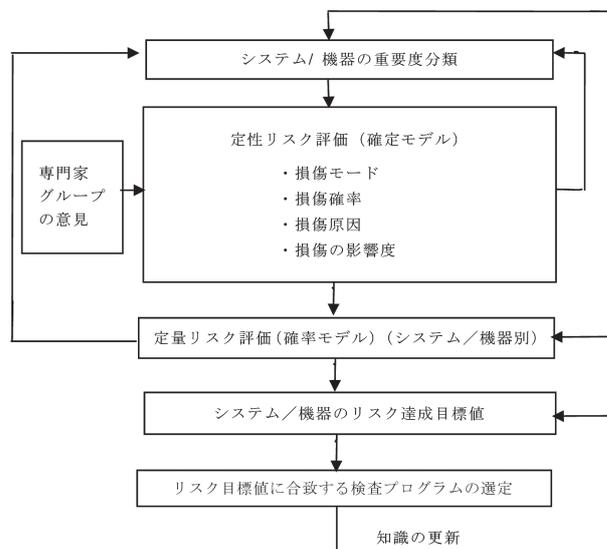


図3 リスクベース検査のプロセス

リスクベース評価には、影響度と経済性の解析も導入できる。

(5) リスクベース補修・取替え

従来どおり、割れは許容せずに、補修または取替えて完全になくした方がより安全だという議論がある。一般的な補修は割れを削除し、その跡を溶接補修する。数が多く複雑形状の割れを完全に削除することは難しい。多くの場合、割れは溶接部に生ずる。溶接補修によって溶接の熱影響が繰返され、材料は著しく劣化する。補修部を起点として起きた損傷の事例は数多い。また、新しく取替えた部材と古い部材の接合は異種材料の接合同じで、材料特性のミスマッチングが損傷の原因となる。

最も重要なリスクの算定は、コストを含めた評価で割れを許容するか、または補修・取替えかの選択である。リスクベース補修・取替えの目的は、これらのリスクの総合的評価と、補修・取替え計画(補修・取替えプログラム)の選定である。

(6) 我が国でのRBMとRBIの適用

リスクベースメンテナンスは産業界において個々に適用されているが、我が国としての規格はない。日本高圧力技術協会に2001年からRBM専門研究委員会(委員長 酒井信介 東京大学教授)が設置され、非原子力分野の圧力設備を対象としてRBI規格制定に向けた活動を継続している。一方、JSMEでは、原子力発電所用機器の維持規格の正式採用に伴う要望に応じて、RBI規格制定の作業会を設置している。我が国での適用は着実に進行している。最後に、我が国での著書を参考に紹介しておく¹⁷⁾。

参考文献

- 1) 小林英男：リスクベースの工学/技術，材料科学，37 (2000) 4, 171-177.
- 2) 小林英男：失敗とリスクマネジメント，日本機械学会誌，103 (2000) 980, 449-451.
- 3) 小林英男：リスクベース工学の提案，日本機械学会誌，106 (2003) 1020, 846-848.
- 4) 酒井信介，小林英男：リスクベース設計，日本機械学会誌，106 (2003) 1020, 853-856.
- 5) ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Sec. III, Construction of Nuclear Power Plant Components, (2001)
- 6) ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Sec. XI, Rules for In-service Inspection of Nuclear Power Plant Components, (2001)
- 7) Pressure Equipment Directive, OJ-L181, (1997)
- 8) ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Sec. VIII, Construction of Pressure Vessel, Div.1 and Div.2, (2001)
- 9) JIS B 8265, 圧力容器の構造—一般事項，日本規格協会，(2003)
- 10) JIS B 8266, 圧力容器の構造—特定規格，日本規格協会，(2003)
- 11) 建築物の限界状態設計指針，日本建築学会，(2003)
- 12) 高田毅士，高橋徹：荷重・耐力係数設計法，建築雑誌，114 (1999) 1142, 100-103.
- 13) API Standard 579-1/ASME FFS-1, Fitness-For-Service, (2007)
- 14) 発電用原子力設備規格 維持規格，JSME S NA1 - 2000, 日本機械学会，(2000)
- 15) API RP580, Risk-Based Inspection, (2002)
- 16) API Publication 581, Risk-Based Inspection Base Resource Document, (2000)
- 17) 木原重光，富士彰夫：リスク評価によるメンテナンス RBI/RBM入門，日本プラントメンテナンス協会，(2002)

(2008年10月2日受付)