

信頼性設計の導入に向けて

Working Toward Introducing Reliability Design

酒 井 信 介*

Shinsuke Sakai

1. 緒言

筆者のこれまでの主たる活動は、压力容器、配管と関連する分野が多く、自動車分野との接点はそれほど多くはなかった。この度、自動車の車載型水素タンクにかかわるNEDOプロジェクト⁽¹⁾に参画し、活動内容にふれることとなった。これまであまり体験することの少なかった分野の活動に接した結果として課題や問題点を感じることがあった。我が国のこの分野の発展を考えると、信頼性設計の取り扱いを避けて通れないと感じるので、本稿に概要をとりまとめることとした。

表題に掲げる「信頼性設計」こそが、キーワードである。これまでは、水素タンクの設計を信頼性設計の観点からとらえることは、多くはなかったものと推測するが、ドイツのBAMに所属するG.W.Mair氏は、まさに水素タンクなどの圧力タンクについて「信頼性設計」の考え方を導入することの重要性を訴えている⁽²⁾。

これまで、機械分野では、規格上の安全は、安全率によって担保されることが多かった。機械工学分野では、基幹となる学問分野である「材料力学」の講義において、安全率を学ぶ機会がある。筆者が学んだ当時の材料力学の教科書⁽³⁾に書かれていた安全率の定義は、許容応力 = 材料強度 / 安全率、というもので、当時は、安全率は経験的に定めるものと教わった。このような考え方に基づく安全率のことを経験的安全率あるいは、決定論的安全率と呼ぶ。今日の機械分野での規格上に掲載されている安全率は、全てが経験的に定められたものというわけではないであろうが、基本的な考え方は、当時とそれほど大きく変わっているわけではないと感じられる。安全率を用いた設計は、極めて単純であり、設計者にとっても、規制する側にとっても便利な方法であると言える。

機械構造物の損傷による被害がさして大きくない場合には、このような単純な決定論的安全率を用いて、安全管理をすることは合理的であると考えられる。一方で、近年、機械製品の性能の向上が求められるようになるにつれて、このような決定論的安全率のみで安全管理をすることには、限界がある。例えば、性能の向上を求めると、一方で万が一の事故の際の被害が甚大になる場合がある。この場合

には、合理的設計のためには、リスクベース設計、あるいは信頼性設計という考え方が重要になってくる。

本稿では、信頼性工学に馴染みのない読者にも理解できるよう入門的な内容から、関連規格の動向、適用事例、現状の課題などについて概説する。なお、安全率に対応する英語はSafety Factorであるので、正しくは安全係数と呼ぶべきものであるが、安全率の用語も広く浸透していることから、本稿では両者を区別することなく使用することとする。

2. 許容値方式の課題

筆者が学生時代に、材料力学の講義で学んだ許容応力の定義は次のように与えられていた⁽³⁾。

$$\text{許容応力} = \frac{\text{基準強さ}}{\text{安全率}} \quad (1)$$

力学的評価で、応力評価を行い、最大応力が許容応力を超過しないことを確認することにより、安全確認を行う。それでは、安全率をどのように決定するかというと、過去の経験に基づく、と書かれている。このような、安全設計の考え方は極めて単純であり、また規制する側の安全確認も容易であることは利点であると言える。単純な機械構造物であれば、設計のために多くの労力を割くことは、実際的ではなく、この程度の設計法式を採用することの合理性は存在すると考えられる。

ところが、経験的に決定する安全率は、根拠が明確でない分、さまざまな欠点が露呈することもある。いくつかの代表例を挙げてみる。

1. どの損傷モードに対して設計しているのか明確でないで、どの程度安全裕度があるのかを明示できない。
2. 安全裕度の合理化を目指しても、根拠と連動した説明が困難である。
3. 設計者がよりよい設計をしようとしても、安全率の根拠が不明確であるとインセンティブがわからない。
4. 安全率によって、安全性の説明をする方式では、安全率を過大にとりがちになる。ひとたび、安全率を決定してしまうと、それを下げることは容易なことではない。

*横浜国立大学 客員教授, 博士 (工学)

表 1 Sec.VIII 安全率低減の歴史的経緯

Year	Details
1915	Code for power boiler, 1st ed.
1925	Sec. VIII, 1925 ed. Tensile strength safety factor set to 5.
1942/43	Safety factor reduced from 5 to 4 based on national request to secure strategic supplies (materials).
1998	Increase in requests to reduce the safety factor from 4 to 3.5, based on enhanced material performance and enhancement of standard specifics over past 50 years.

特に、燃料電池車に水素タンクを車載するような場合には、高度の安全性が要求されるので、このような問題がより顕著になることが考えられる。今日でも、材料力学での安全率は、ほぼ同様の内容で教育が行われているものと思われる。また、我が国の安全規格の基本は、経験的安全率が主流になっているものと思われる。多くの機械構造物は、このような許容値方式に基づく方式でよいとしても、今後、機械製品の極限の性能を引き出せるようにするためには、合理的な安全裕度の適正化を避けて通ることはできない。この場合には、経験的安全率ではなく信頼性設計の導入が極めて重要になってくる。

筆者が、これまでかかわりの深かった压力容器・配管の分野での、安全率の数値の歴史的経緯を見ると、安全率の一側面が理解できる。我が国の压力容器の設計規格は、米国機械学会 (ASME) の規格、Boiler and Pressure Vessel Code が参照されている。特に压力容器の設計規格は Section VIII の中で規定されているが、1998 年ごろ、材料の引張強度の安全率を 4 から 3.5 に低減するという劇的変更が行われた。その根拠をまとめた文献⁽⁴⁾を見ると、安全率の特性の一断面を垣間見ることができる。表 1 に、文献に基づき安全率低減の歴史的経緯をまとめてみた。

1915 年当時、米国ではボイラが広く普及していて活用されていた。今日では、大きなボイラ事故の情報を耳にすることはほとんどないが、当時の米国では毎日のように死傷者を伴う事故が発生していた。当時、設計規格による標準化が整備されておらず、事態の改善のために、設計規格の標準化の必要性が認識された。これが、契機となって、ASME 規格の初版が発行された。1925 年には、ボイラを含む压力容器の規格である Sec. VIII が発行されたが、当時の压力容器の引張強度の安全率は 5 に設定されたようである。この数値は、明確な根拠に基づくものではなく、経験や周辺の意見に基づいて設定したものと推測される。ボイラ規格の標準化により、ボイラ事故数は減少し、その後も規格の改訂が進められたことによって、設計時の課題に起因する大きなボイラ事故はほぼ回避できるようになった。しかし、安全率の数値については、変更されることなく使い続けられた。最初に、この数値の低減が行われたのは、1942/43 年当時の第二次世界大戦の最中であった。これは、工学上の理由からではなく、戦略物資の調達という

国家の要請に基づくものであった。この結果、安全率が 5 から 4 へと低減されたが、これに伴い、压力容器の板厚を薄くできるので、その分戦略物資として活用できるようになった。つまり、工学とは全く無関係の、国家要請に伴う圧力によって低減されたのであり、安全率の数値がいかにあいまいなものであるかを物語っている。しかし、安全率を 4 に低減したからといって、それに伴うボイラ事故が増加することもなく、その後 50 年近く変更されることなくあった。しかし、材料の性能も向上し、技術管理のレベルが向上して規格に反映されれば、設計規格と関係する事故が発生することもなくなるので、産業界からさらなる安全率低減の要望が出されるようになったのであろう。1998 年に WRC から発行された技術レポート⁽⁴⁾を根拠にして、安全率が 4 から 3.5 に低減されたのである。このレポートには、技術管理のレベルの向上をつぶさに検証するとともに、材料性能の向上についても検証されているが、安全率の数値を 3.5 とした根拠については、明確には示されていないように見える。このように経験に基づいて安全率を適正化することは、一般には機械製品でも適用されていることであり、機械分野では広く浸透している概念であるといえる。

経験的安全率に基づく許容値方式については、それ自体に問題があるわけではない。適用する課題に対応して、適切に利用することが重要なのであって、その利用法が適切でなければ、問題点として露呈することとなる。実際、これまで経験的安全率に基づく設計規格で製作された機械製品の多くはさしたる問題は無かったものと考えられる。通常の利用の範囲の設計に対してまで、労力をかけて厳格な設計をすることは明らかに非効率であり、この場合には許容値方式の適用は適切であるといえる。しかし、機械製品の性能を引き出すために極限の条件で運用したいとか、事故時の重大性に鑑みて、大きな信頼性を確保する必要がある場合に、経験的安全率で対応する場合には困難が伴う。機械製品の性能を発揮するための限界状態を明確にし、使用条件と限界状態の距離、つまり安全裕度を管理対象とした上で、設計することが望まれる。これがまさに信頼性設計の概念である。許容値方式と、信頼性設計を適用対象に応じて適切に使い分けることが重要である。

3. 信頼性設計とは

3.1. 信頼性設計の概念

車載型の水素タンクの確率論的取り扱いの動向を知る上で、参照した G.W.Mair 氏の書籍⁽²⁾の冒頭にロシアの劇作家チェホフ (1860-1904) の言葉が引用されている。

There is no certainty(safety),
only different degrees of uncertainty(danger).
Anton Pawlowitsch Tscechow (1860-1904)

これは、書籍の本質を象徴する言葉であるとともに、信頼性設計の本質を端的に表現している。私流に意識すると「(許容値方式でいうところの)安全などというものは存在せず、存在するのは危険の程度の相違のみである」とでもなるであろうか。この危険の程度を評価する手法が信頼性工学であり、その結果に応じて設計する方式が信頼性設計である。

チェホフの言葉をより、工学的な概念図で示したものが図1である。上半分に示すのが、従来の機械工学分野で広く用いられてきた許容値方式、もしくは決定論的方式である。この方法では、経験的安全率に基づいて許容値を設定し、応力が許容値を少しでも上回れば、危険、少しでも下回れば安全と判断する。つまり、判断は二者択一である。一方、信頼性設計で用いられる確率論的方式の概念図を下半分に示す。安全と危険の間には、広いグレーゾーンが存在する。従って、二者択一の判断ではない。このグレーゾーンこそが、チェホフの言葉の「危険の程度の相違」で表現される領域である。この領域にあるときには、安全とも危険とも判断せず、評価に基づいて意思決定が行われる。もし、危険な領域に接近していれば、少しでも安全領域にシフトするように努力する必要があるものの、その努力を行った上での使用が認められる。従って、許容値方式との比較で明らかとなり、評価を行うという前提のもとに、利用可能範囲が広がることになる。評価の代表例が信頼性評価、リスク評価である。信頼性評価に基づく設計のとき、信頼性設計 (Reliability based design)、リスク評価に基づく設計のときリスクベース設計 (Risk based design) と呼ばれる。

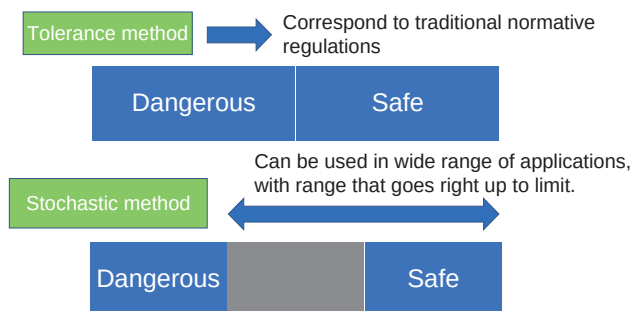


図1 確率論的設計法と許容能力方式の違い

図1に対応する、リスクベース工学での意思決定の概念図を図2に示す。中央に示す逆三角形の、水平方向の長さが評価されるリスクの大きさを示す。つまり、最上端は、リスクがもっとも大きいことを示し、逆に最下端はリスクゼロであることを示す。リスク方式と許容値方式の対比が明瞭になるよう、三角形の左側にリスク方式、右側に許容値方式の取り扱いを示す。リスク方式の場合、意思決定の判断は、黒線で分割された三領域に分けて考える。一番上の領域は、リスク値が過大で、受入れ不可能な領域であり、逆に一番下の領域は、リスク値は十分に小さく、広く受入れ可能な領域である。その中間にある領域では、我慢できる領域であり、受入れ可能であるが、この領域にある限りは、リスクを下げる努力をする必要がある。三領域の分割するリスクの値は、評価対象とする機器や使用環境に応じて適宜設定される。このような考え方を As Low As Reasonably Practicable (ALARP) と呼ばれ、英国安全衛生庁 (HSE-Health and safety executive) が提唱した考え方である。この考え方は、リスクベース工学の意思決定法として広く使われる概念である。この中間の領域は、図1下段のグレーゾーンと対応しており、ALARP 領域と呼ばれることもある。大半の機器はリスクを保有しているという認識のもと、ALARP 領域に含まれる機器は、常にリスクを下げる努力をすることが求められる。ISO Guide 73 の定義では、ALARP 領域より下の領域が安全な領域と判断される。一方、右側の許容値方式の場合、ある特定の許容値を境にして、安全か危険かの判断が二者択一で行われる。この場合、リスク方式と比較して、安全として取り扱われる領域は狭くなるが、これと付随してさまざまな問題が発生する。まず、「安全」と判断されると、自然の心理としてその結果に対して、さらに安全側にシフトさせようとする意識は希薄になるであろう。場合によっては、全くその努力をしないかもしれない。一方、リスク方式では、ALARP 領域に入っている限りは、リスクを下げる努力が求められる。次に、許容値方式では、「危険」と判断された

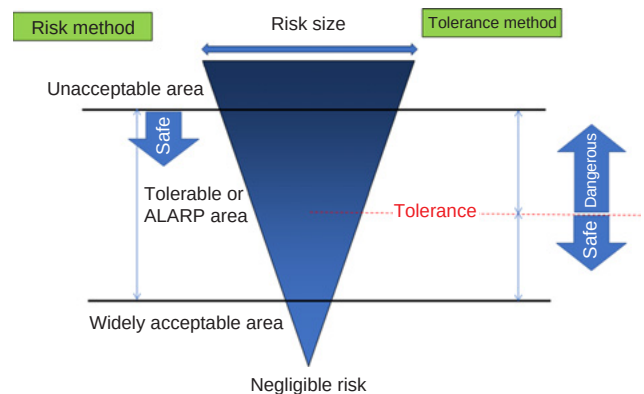


図2 リスクベース工学の意思決定の考え方

場合には、どのような努力をしても、一切受け入れられることはない。リスク方式では、ALARP 領域に入っているのであれば、リスクを下げることによって受け入れられるのである。つまり、設計者の努力が報われるのである。ただし、リスク方式の場合には許容値方式と比較して、意思決定にあたってリスク評価が求められ、多大な手間と労力が必要とすることは間違いない。

信頼性設計の概念を示すために、設計変数が強度 (R) と荷重 (S) しか存在しない、単純な RS モデルを用いて説明する。 R と S がばらつきを持つとすると、 RS 平面上で、確率密度関数の等高線は、図 3 のように同心楕円状となるであろう。確率密度関数の頂点の位置は、二つの確率変数の平均値に対応する。信頼性設計で重要なことは、安全を白か黒かの二者択一で判断するのではなく、どの程度安全に余裕があるかを定量的に示すことである。そのためには、図 3 の上に、破損領域を明示し、 RS の分布状況との相対関係を調べる必要がある。このため、限界状態関数 $g(R, S)$ を定義する。この関数が負となる領域が、破損、正となる領域が非破損であることを示す。0 となる境界線のことを限界状態曲面と呼ぶ。つまり、式 (2) で定義される。

$$g(R, S) = R - S \quad (2)$$

図中のウズミで示す部分が破損領域で、破損の境界線である限界状態曲面と R と S の平均値の位置がどの程度離れているかということを調べれば、破損の起きやすさが分かる。限界状態関数と、各設計変数の統計的性質から、安全裕度を定量的に導き出す手法として、先進一次近似二次モーメント法 (Advanced First Order Second Moment Method, AFOSM) がある。

このように限界状態関数に基づいて、信頼性評価を行う手法のことを限界状態関数法と呼ぶが、この手法の意義について簡単に示しておきたい。図 3 のように、設計変数が強度 (R) と荷重 (S) しか存在しない場合には、扱いは単純であるが、より高度の設計を目指すとき、これだけでは

十分に対応できない。まず第一の課題として、対象とする設計変数が、強度と荷重以外に、さまざまなものが含まれる可能性があることである。例えば、寸法、表面粗さ、減肉速度、内圧、重量、応力、変位などである。この場合、多変数に対する、一般的な信頼性評価手法が必要となる。第二の課題として、限界状態の定義は、評価者の関心に応じて、様々なものが存在し得るということである。図 3 の場合は、破損の物理的限界を限界状態と定義しているが、これ以外にも、評価者によっては規格制限値に対する裕度に関心があるかもしれない。また、複数の破損モードが存在する場合には、各破損モードごとに限界状態を設定する必要があるがでてくる。限界状態関数法は、これらの課題に対して、柔軟に対応できる手法となっている。限界状態関数法では、限界状態関数 $g()$ を次のように定義する。

$$\begin{aligned} Z_i = g_i(X_1, X_2, \dots, X_n) > 0 &\Rightarrow \text{破損モード } i \text{ が生じしない} \\ &\leq 0 \Rightarrow \text{破損モード } i \text{ が生じする} \end{aligned} \quad (3)$$

設計変数 $X_1, X_2, \dots, X_n$ の数に制限はなく、また破損モード i は、設計者の関心に対応して定義すればよい。以下に限界状態関数の設定例を示す。

$$\text{最大応力に関心があるとき: } g = \sigma_{\text{limit}} - \sigma_{\text{max}}$$

$$\text{最大変位に関心があるとき: } g = \delta_{\text{limit}} - \delta_{\text{max}}$$

$$\text{規格限界圧力に関心があるとき: } g = p_{\text{code}} - p_{\text{working}} \quad (4)$$

このように、限界状態関数法は、汎用性のある効率的な信頼性評価手法であるが、その取り扱い手法は複雑で、一般の設計者には難解であることが課題である。例えば、図 3 のように設計変数が二変数であれば、二次元空間上に描画でき、直観的に理解し易いが、これが三変数になると図 4 のように、三次元空間となり、限界状態曲面も関数形が複雑であれば、複雑に湾曲した曲面となるので、直観的にも理解しにくくなる。さらに設計変数が増えれば、多次元空間上での扱いとなって、さらに複雑になってしまう。

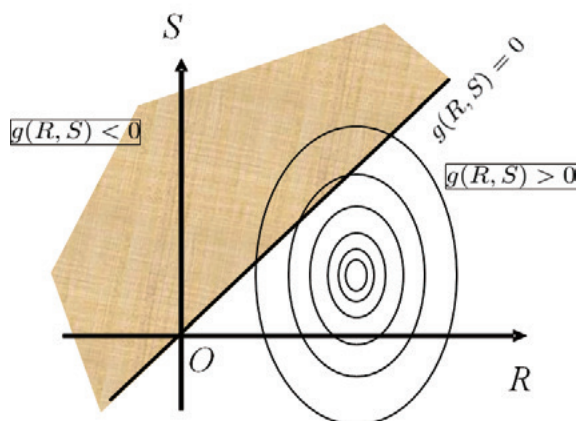


図 3 信頼性設計概念説明図

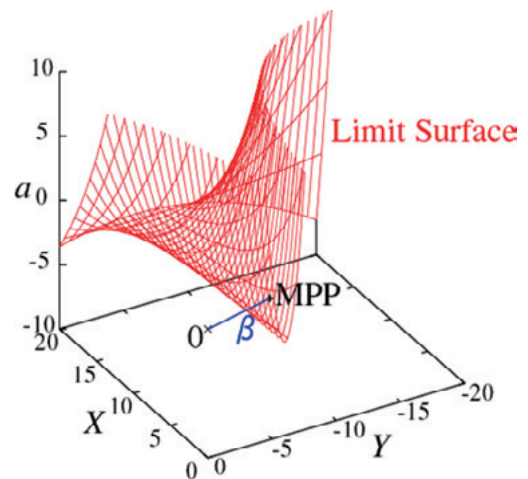


図 4 確率変数が 3 の場合の限界状態曲面

表2 複雑な部分安全係数表の例

Probability of failure	$a_0 < X_1 < a_1, b_0 < X_2 \leq b_1$				$c_0 < X_4 < c_1, d_0 < X_7 \leq d_1$			
	α_1	α_2	...	α_n	α_1	α_2	...	α_n
$P_f = 10^{-2}$ ($\beta = 2.0$)	1.1	2.5	...	3.8	1.3	1.1	...	1
$P_f = 10^{-3}$ ($\beta = 3.09$)	1.4	2.3	...	3.4	1.5	1.2	...	1
$P_f = 10^{-6}$ ($\beta = 4.75$)	1.6	2.1	...	3.2	1.9	1.3	...	1

しかし、このような信頼性評価の厳密な取り扱いは、研究者レベルでは必要かもしれないが、設計者や規格利用者では必ずしも、その技術を習得しておくことが求められるものでもない。例えば、信頼性設計を規格に落とし込むための方法として部分安全係数法 (Partial Safety Factor Method) があるが、この方法は、信頼性理論に基づいて予め用意しておいた部分安全係数表を用いて、電卓程度の簡易評価で信頼性設計を実現する方法である。この詳細は次章で述べる。従って、産業界で信頼性設計を実践するためには、信頼性理論について全て習熟しておくことが求められるものではないが、その基礎理論を学習することを希望するケースもあると思うので、参考図書を文献に挙げておく⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

3.2. 部分安全係数法とは

最先端の信頼性工学は、式(3)に示す限界状態関数を定義した上で、厳密な評価が行われるが、設計者が、設計の度に、プログラミングしてこの評価を行うためには、専門知識を要するとともに、多くの労力と時間が必要になる。これを解決するために、規格上に部分安全係数表を掲示し、電卓程度の簡単な評価で、簡易の信頼性設計を実現することが行われる。その概念的な取り扱いを以下に述べる。

$X_1, X_2, \dots, X_n$ が確率変数であると、式(3)で評価される変数 Z もまた確率変数となる。いま、 Z の確率密度関数が図5のように示されるとすると、 $Z = 0$ が限界状態であり、 $Z < 0$ の領域が破損領域なので、図中ウスズミ部の面積が破損確率 P_f となる。 P_f を用いて、各種定量評価を行ってもよいが、一般には、 10^{-6} などの極端に小さな数値である。そこで、信頼性指標 β がよく用いられる。図5で Z の平均値 μ_Z と、限界状態 $Z = 0$ がどの程度離れているか、ということが安全裕度の指標となる。この距離を Z の標準偏差 σ_Z で除して、基準化した値を信頼性指標と呼ぶ。信頼性指標の記号としては β が用いられることが多い。設計変数の確率変数が正規分布のとき、 Z の分布も正規分布に近くなることが多く、 P_f と β の間には次の近似関係が成立し、一対一の対応関係にある。

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (5)$$

ここで、 $\Phi()$ は標準正規累積分布関数である。例えば、

建築分野では、目標とする信頼性 (目標信頼性) として、 $\beta = 2, 3$ などの数値を設定し、それに対応する部分安全係数表が規格上に提供される。例えば、目標信頼性 β_0 について、 $X_1, X_2, \dots, X_n$ に対する部分安全係数 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ が予め、信頼性の専門家によって準備されているとすると、設計者が設定した設計値 $x_1, x_2, \dots, x_n$ が目標信頼性 β を満足する否かのチェックは次のように行う。

$$\begin{aligned} g(\alpha_1 x_1, \alpha_2 x_2, \dots, \alpha_n x_n) > 0 &\Rightarrow \text{目標信頼性 } \beta \text{ を満足} \\ g(\alpha_1 x_1, \alpha_2 x_2, \dots, \alpha_n x_n) \leq 0 &\Rightarrow \text{目標信頼性 } \beta \text{ を満足しない} \end{aligned} \quad (6)$$

この程度の評価であれば、信頼性工学に精通していない設計者であっても、電卓程度の処置で対応可能である。

ただし、部分安全係数表を利用する際には注意点がある。厳密な信頼性評価と比較して、概算による近似で信頼性設計を行う場合には、平易で便利な方法であるが、その実用上での使いやすさにも配慮が必要である。いま、 n 個の設計変数があるときに、表2のような部分安全係数表が与えられた場合を想像してみよう。

最左欄に示す、目標信頼性に応じて、対応する部分安全係数 $\alpha_1 \sim \alpha_n$ の数値を拾ってくることになる。ところが、限界状態関数が非線形で複雑な関数の場合、部分安全係数値も適用する領域に応じて、敏感に変化する場合がある。部分安全係数法的前提条件として、ほぼ部分安全係数

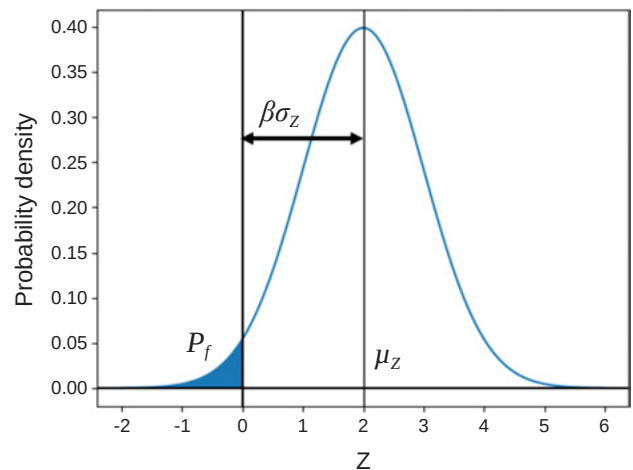


図5 信頼性指標の概念

表3 部分安全係数表開発のための役割分担

Person in charge	Role	Description
Researcher	Develops physical models for target concerns and derives limit state function.	Advanced comprehension of limit state design methods is required.
Standards developer	Creates new partial safety factor tables for target concerns.	Comprehension of limit state design methods is required.
Standards user	Appropriate comprehension of partial safety factor tables is required.	Comprehension of details of limit state design method is not necessarily required, but being able to correctly understand how to read and evaluate table is required.

値が一定となる領域の範囲で適用することが挙げられる。従って、ほぼ一定とみなせる領域を調査し、表2の最上列に示すように、特定された領域ごとに部分安全係数を設定する必要がでてくる。しかも、目標信頼性の都度この値を求める必要があるため、全てに対応する部分安全係数表は複雑になることが考えられる。これでは、実用性の観点からは、改善が求められる。これに対する解決策として、各確率変数の破損確率に対する感度を求めることが有効である。詳細は文献⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾に譲るが、限界状態関数法では、この感度を容易に求めることができる。感度分析により、実際に対象とするべき確率変数を絞り込むことができる。例えば、配管局部減肉の信頼性評価のための部分安全係数表の作成が行われている⁽⁸⁾が、限界状態関数の確率変数9に対して、破損確率に対する感度をもつ変数が3に絞り込まれている。この場合、部分安全係数表は、3つの確率変数に対して作成すればよいので、簡素化され、実用上の利便性もよい。

3.3. 信頼性設計促進のための産学の役割分担

信頼性設計で用いられる限界状態設計法を使いこなすためには、高度の専門知識が要求される。従って、純粋な規格ユーザにとっては、設計のたびごとに、限界状態設計法を用いた評価をすることは現実的ではない。そこで、規格上に掲載する手段として部分安全係数法があるが、問題は部分安全係数表を開発するプロセスである。ここに、信頼性研究者、規格開発者、規格利用者の連携が重要と考える。表3に、その役割分担の例を示す。このうち、研究者の部分を大学、研究機関が、規格開発の部分を産学共同で分担し、その結果得られる成果物である部分安全係数表を規格利用者である産業界が活用するなどの役割分担が考えられる。

4. 安全率緩和の例

2章でも述べた通り、規格に掲載されている安全率は、さまざまな要因で修正されてきた。その背景にあることとして、必ずしも科学的根拠に基づくものばかりではないが、社会的要請が一つの要因であったものと考えられる。我が国においても、これまでいくつかの産業分野では、安

全率の適正化が行われている。今後の安全率適正化の検討に資するよう、二つの事例について紹介することとする。

4.1. 圧力機器への維持規格の導入

機械製品の設計段階においては、設計規格上に記載されている安全率を考慮して設計が行われる。原子力分野や、化学、石油精製業界に代表されるプラント内の圧力機器では、設計規格に基づいて設計・製造された装置が、供用段階に入ると、そのメンテナンスのための規格が設計規格とは別に存在し、維持規格と呼ばれる。日本機械学会が発行する原子力分野の規格⁽⁹⁾、日本高圧力技術協会が発行する圧力機器に関係する規格⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾は代表的なものである。2000年に、原子力分野において初めて維持規格が制定された⁽¹²⁾が、それ以前には維持規格の運用規格は存在せず、わが国の安全規制の考え方は設計段階、つまり設計規格に長い間、重きが置かれてきた。設計規格によって、維持の段階の安全を確保する場合には、「製作時の状態が供用段階においても設置時の状態が維持される」ことが要求される。しかし、機械設備は、時間の経過とともに必ず劣化が進行する。ここに安全保守の実践と、法遵守の精神との間にギャップを生ずることとなり、安全保守の実践のつもりが、法に反するというような矛盾が露見されるようになってきた。特に、設計段階では安全率の観点から見たとき、全ての設計情報が集まっているわけではないので、予測行為に基づいて設計することになり、安全裕度を確保するために安全率を大きめにとることもやむを得ない。しかし、供用段階では、機械製品の運用による実データが集積され、設計時に予測していたデータも、実際に確認することが可能となる。従って、設計段階で安全率を過剰に設定していたとしても、供用段階では必ずしもそれと同一の安全率で運用する必要はない。このように、設計段階と供用段階とではどちらにも安全率の概念は存在するが、両者の数値は同一にする必要はないという考え方が定着している。この区別が明確になるよう、米国機械学会 ASME の原子力規格では、設計規格の段階では、安全率に対応する用語として設計係数 (Design Factor) が用いられ、供用段階では構造係数 (Structural Factor) を用いて区別している。

ASME に維持規格が制定されてから、我が国の原子力分野に維持規格が制定されるまで 30 年もの月日が流れていた。

維持規格の導入によって安全率が緩和されるといっても、そのための重要な要素が 3 つ存在する。その三本柱が「検査」、「評価」、「補修・取替」である。維持規格導入前にも、定期検査の際に検査は行われていたものの、評価という行為が欠落していた。欠陥などの損傷が検出されたときに、その損傷の有害性を力学的検討などにより評価するのである。評価の結果、健全性が確認された場合には、欠陥を残したまま運転を継続することも許容される。「評価」規定に関する規格が 2000 年に、「検査」規定が 2002 年に、「補修・取替」規定が 2004 年に発行されている。

4.2. 移動式クレーン構造規格への限界状態設計法の導入

2007 年のころ、筆者がクレーン協会からの要請を受け、移動式クレーン構造規格への限界状態設計法の導入に関

する仕事にかかわった。移動式クレーンは図 6 に示す通り、その軽量化による長尺化が性能向上のポイントである。本来、高張力鋼の開発技術が高い我が国は、軽量化の観点からは有利であるはずであるが、実際には我が国のメーカは国際競争上、不利な立場に立たせられていた。その理由は、当時は我が国では移動式クレーン構造規格上、許容応力設計法しか認められていなかったのに対して、欧州では ISO 規格^{(13) (14)}において許容応力設計法、限界状態設計法のいずれかを選択できるようになっていたからである。移動式クレーンの長尺化を実現しようとする、座屈の危険性が増し、曲げ変形もより大きなものとなる。従って、より限界状態を意識した上で長尺化を実現することが重要になってくる。弾性設計をベースとする許容応力設計法では、限界状態に対する対応には限界があるので、我が国の移動式クレーンメーカは国際競争力の上において極めて不利な立場におかれていた。そこで、我が国の構



図 6 移動式クレーンの例（写真提供：コベルコ建機株式会社）

表4 JIS B 9955 の章立て

Chapter 1	Scope of application
Chapter 2	Terms and definitions
Chapter 3	Symbols
Chapter 4	Requirements and concepts
Chapter 5	Principles of limit state design
Chapter 6	Basic variables
Chapter 7	Analysis models
Chapter 8	Principles of design based on probability
Chapter 9	Design through partial factor method
Chapter 10	Evaluation of mechanical products during in-service period

造規格においても限界状態設計法を取り入れることが与えられた宿題であった。

我が国では馴染みのない限界状態設計法の導入に対する理解を得ることは、容易なことではなく多くの時間と労力を費やしても成果は得られなかった。そこで、ISO 規格の規格体系を調査すると、移動式クレーンの規格⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾のベースとなる規格として、信頼性の一般原則に関する規格⁽¹⁵⁾が存在することが判明した。一方、我が国の状況はこれに相当する JIS 規格が存在していなかった。これに対応する JIS 規格が開発されれば、これをベースとして産業界ごとに限界状態関数法を適用した規格が開発され、普及が加速することが期待された。そこで、関係する産業分野と学識者に働きかけを行い、JIS 規格開発のための活動が日本機械学会の研究会・分科会活動として実施された。最終的には、日本高圧力技術協会が開発団体となって、JIS B9955:2017 が発行された⁽¹⁶⁾。表4に、JIS 規格の章立てを示す。この第5章に示すように限界状態設計法を基本的な考え方としており、第9章に示すとおり部分安全係数法の適用を想定している。2018年には、移動式クレーン構造規格が改正され、「許容応力設計法」、「限界状態設計法」のいずれかのうち、クレーンの用途等に応じて適切なものを設計者が選択可能となった。限界状態をより強く意識した上で、機械製品の性能を引き出したいときには、既存の「許容応力設計法」では、安全率の観点から実現できないことがある。移動式クレーンの構造規格については、「限界状態設計法」の導入によって解決した事例と言えるであろう。

5. 確率論的取り扱いの重要性

筆者は、これまで多くの分野で規格開発活動に参加してきたが、全体的な印象として感じるのは、確率論的取り扱いが行われているのは、ごく一部で大半は決定論的取り扱いが中心であるということである。今後、機械製品をより限界状態に近い状態で性能を引き出すことが重要になるこ

とを考えると、確率論的取り扱いの導入は避けて通れないのではないであろうか。自動車分野でいうと、燃料電池車に高圧水素タンクを車載することを考えるとき、該当するケースであると考えられる。これまでの体験から気になったものの二点を紹介したい。

まず一点目は原子力に関係する分野での経験である。日本国内でのみ見ているとき、我が国がこの分野でどのような立ち位置にいるのか見えにくいのが、筆者が原子力に関する国際ワークショップに参加した際に、その問題点を強く感じた経験がある。それは、福島第一原子力発電所の事故を受けて、米国機械学会 (ASME) が主催したワークショップ「新たな原子力概念の構築を目指して」(ワシントン DC, 2012 年 12 月 4~5 日)に参加したときのことであった。このワークショップの詳細は、文献⁽¹⁷⁾に譲るが、全世界の原子力コミュニティの指導的立場にある人達に、ASME が発行したレポート「新たな原子力概念の構築を目指して」に関する議論を行うことにあった。このレポートの中では、今後の原子力の方向性として All Risk Approach という新たな方向性が示され、参加した筆者に対して、セッションの司会者である Kenneth R. Balkey 氏から我が国の状況報告、見解が求められた。我が国では、Risk approach どころか確率論的扱いもほとんど行われておらず、遅々として進んでいない状況を説明した。これに対して Balkey 氏の反応は「やはりそうですか。日本という国の考え方はそんなですね。」と言わんばかりの発言があったことを記憶している。このとき、我が国は海外からはこのような眼で見られているということを痛いほど思い知った。このレポートの今後の我が国の原子力分野に対する重要性に鑑み、有志による翻訳作業に加わり、最終成果物は日本機械学会 HP から公開されている⁽¹⁸⁾。しかし、その後の様子を見ると、必ずしも十分に活用されているようには見えず、気がかりではある。今後、機械製品の限界状態を意識して性能を引き出すことを考えるとき、リスクベース工学的思考、確率論的思考は極めて重要であると考え。

第二の例として、統計量の小標本を扱うときの、不確定性に対する取り扱いである。この場合、確率変数の母集団の統計的性質に加えて、confidence level と呼ばれる不確定性に対する取り扱いが必要になる。この用語は、JIS 規格の信頼性用語などでは「信頼水準」という訳語となっているが、筆者の私見では、この訳語は適切ではない。reliability を「信頼性」という訳語とするとき、confidence level を「信頼水準」としてしまうと、reliability と混同してしまう恐れがある。しかし、両者の概念はかなり異なるものである。このような状況を反映したものであるのか、confidence level について規格上の取り扱いがされていなかったり、誤った取り扱いがされていたりすることがある。統計学を熟知している人にとっては当たり前のことでも、工学関係者にとっては馴染みのない考え方であり、今一度教育方法

表5 MIL規格軍用機の許容値の例

	Reliability	Confidence level
A-basis	99%	95%
B-basis	90%	95%

も含めて見直す必要があると感じている。例えば、引張強さの許容応力値を、信頼度と関連付けて決定する場合について考える。もし、引張強さが正規分布で、その母数である平均値、標準偏差が分かっているのであれば、その確率密度関数は図7のように、描画できるのである。この場合、信頼度 R となるように、許容応力を決定したければ、図のA点の位置の応力値 S_A として決定することができる。ここで、引張強さが S_A 以下となる確率が $1 - R$ となる位置としてA点を決定する。 $1 - R$ の値は、図のウズミ部分の面積であり、許容値を S_A に設定したときの、破損確率に他ならない。しかし、材料強度の統計的性質を調べるためには、有限個のサンプル数 n のもとに、評価しなければならない。この場合、母集団の評価に不確実性が伴うことになる。例えば、正規分布の母数である平均値、標準偏差はサンプル数 n が小さいと大きな不確実性をもつことになる。その不確実性は n に依存することになる。この不確実性を考慮に入れたうえで、許容値を決定するためには信頼水準の値を与える必要がある。規格に採用されている代表例として、米国 MIL 規格の許容値の例を表5に示す。なお、信頼水準の取り扱いに関する技術的詳細は解説記事に譲る⁽¹⁹⁾。水素タンクの安全規格を考える際にも、破裂試験のためのサンプル数を確保することが困難と思われるので、小標本に伴う不確実性の問題が発生する。G.W.Mair氏は、この問題に信頼水準を導入して管理する方法を提案している⁽²⁾が、その内容は次章で紹介する。

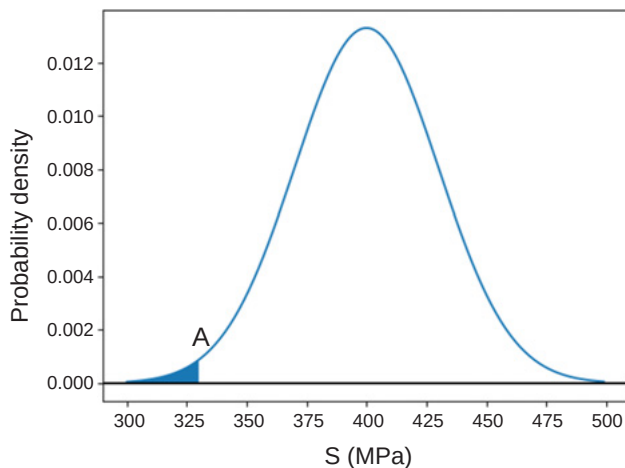


図7 引張強さの確率密度関数

6. 安全裕度適正化の考え方

燃料電池自動車用水素貯蔵タンクは高圧での使用となることから、高度の安全性が要求される。とはいえ、過度の安全裕度は避けたいので、適正化が求められる。水素タンクは、コストの関係から安全規格上での破裂試験には、多くのサンプル試験を設定することができない。従って、前章で述べた小標本の不確実性の取り扱いが求められる。高度の安全性が求められることから、出発点としては高い安全率の設定のもとに、設計・製造した製品から始めることになるのは自然の流れである。このような状況で、安全率の適正化を考える場合に、BAMのG.W.Mair氏の考え方⁽²⁾が参考になるので簡単に紹介する。まず、サンプル数を確保できないことに対する対策としてモンテカルロシミュレーションの適用を提案している。モンテカルロシミュレーションとは、特定の確率変数の値を乱数を用いて発生し、その発生値を用いて評価対象に適用し、現象に対する考察を行うことを言う。原理は極めて単純であり、手持ちのPCでも十分に評価可能であるので、破裂試験を補う方法としては有効な手段であるといえる。例えば、図8は、ISO11119-3の規格⁽²⁰⁾での破裂試験に対する合否判定をモンテカルロシミュレーションで評価した結果である。横軸は、標準偏差、縦軸は平均値であるが、いずれもサービス圧力の最大値 (MSP) で基準化している。3個の試験体の全てが、許容値2.5を超えたときに、合格、一つでも下回ると不合格と判定する。1回に3個の試験体に対する合否判定試験を行い、10万回の試験に対する結果を示している。黄色の値が、母集団の値であるが、3個ごとの組の平均値、標準偏差はこのように大きなばらつきを持つ。また、赤色の点が不合格を、黒色の点が合格の結果を示している。この場合、59%が合格となることを示す。合格となる割合のことを Acceptance Ratio (AR) と呼んでいる。タンクの安全裕度が過剰である場合には、単に100%の合格という結

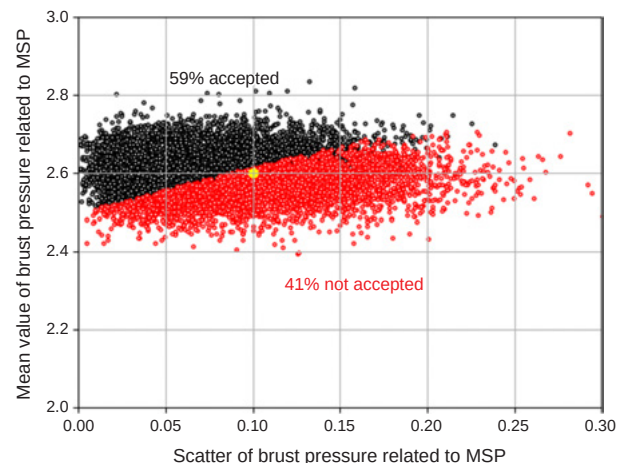


図8 規格合否のモンテカルロ法による評価

果しか得られず、安全裕度がどの程度の量であるかが見えない。このような AR という指標の導入は、安全裕度の見える化に役に立つものと考えられる。圧力タンクの破裂強度の平均値、標準偏差を安全裕度の観点から適正化するには、母集団のさまざまな平均値、標準偏差の組み合わせに対する AR 値の等高線が有用である。このようにして描かれた図の例を図 9 に示す。

G.W.Mair 氏はこの図を ISOASFALIA と呼んでいる。赤線が ISOASFALIA であり、線上の数値が AR 値である。また、この図の上には、信頼度 $1-10^{-6}$ の限界線も黒線で示す。この図を用いることにより、目標とする信頼性と、小標本の不確定性をも考慮した上での安全裕度の考察が可能となる。

例えば、図 9 に、安全率適正化の考え方を概念的に示す。AR 値を考慮して、破線領域を適正化範囲として設定し、その中でも A 点を目標値と決定したとする。一方、現状値が B 点であったとすると、B 点から A 点へのシフトを行うことが適正化プロセスということになる。過剰な安全裕度の点 B から裕度を軽減して A 点に移行するには、多大な労力と時間を要することも考えられる。このような場合には、C 点のような、安全裕度の小さな点を出発点とし、A 点に近づける方が近道であるかもしれない。このように、安全裕度を、種々の統計量を見る化した上で、検討できるのは、有効な手段であると考えられる。

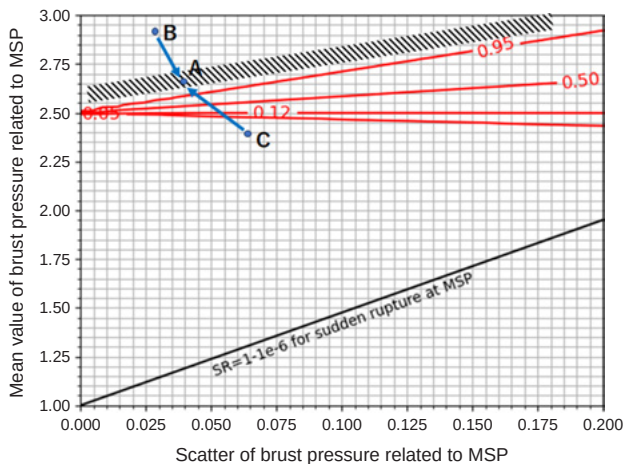


図 9 ISOASFALIA の適用例

7. 信頼性設計導入のための課題

最後に、産業界に新たに信頼性設計を導入するための課題について、経験に基づき私見を述べたい。図 10 に示すように、三つの大きな課題があると考えている。まずは、言うまでもなく規格・基準の策定である。公的に認知され、また国際調和も考慮に入れたうえで、策定されなければならない。確率論的取り扱いの観点から見たとき、現状ではまだま

だ不十分であると感じることが多い。次に重要となるのが、各種統計的考察を行うために必要となるデータベースの開発である。データベースは、特定の企業内の機密事項とするのではなく、パブリックベースで開発することが、産業界の発展にとって重要であると考えている。この点、我が国ではどうしても特定の企業内での利用に留まることが多く、改善の望まれるところである。最後に、この分野に携わる人材の育成である。有効な手段として考えられるのが、資格認証制度の導入である。例えば、プラントの保全に携わる人材の育成を目的として、日本高圧力技術協会では、「設備等のリスクマネジメント技術者認証」制度を運用しているが、この制度の開始とともに、リスクマネジメント技術者が飛躍的に増加している。また、専門知識を有する大学と産業界との連携も有効な手段である。いずれにせよ、産業界が主体となって、進めることが極めて重要であると考えている。

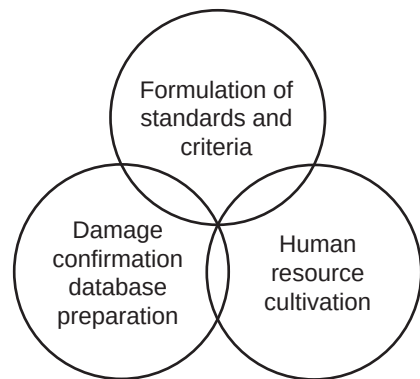


図 10 信頼性設計導入のための重要要素

8. まとめ

車載用の水素タンクを題材にして、今後導入することが重要と考えられる信頼性設計の考え方を示した。特に、異分野に所属する者の視点で印象を要約した。これまでの、経験に基づき信頼性設計の事例、我が国固有の課題についても言及した。今後、機械製品の性能を引き出すためにも、限界状態をより明確にした上で、信頼性設計の導入が極めて重要になると考えられる。特に、安全率の適正化を考える上では、避けて通ることができない。最後に、産業分野に信頼性設計を導入するための課題を私見ではあるが要約した。参考にいただけると幸いです。

謝辞

この成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP20003) の結果得られたものです。また関連資料のご提供をいただいた株式会社ベストマテリア、木原重光氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] NEDO 燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業, https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100182.html, (2023/6/29)
- [2] G.W.Mair, 'Safety Assessment of Composite Cylinders for Gas Storage by Statistical Methods', Springer International Publishing AG 2017, DOI 10.1007/978-3-319-49710-5.
- [3] 鶴戸口, 川田, 倉西共著「材料力学」, 裳華房 (1973).
- [4] Evaluation of Design Margins for Section VIII, Div. 1 and 2 of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code, WRC Bulletin 435, September (1998).
- [5] Achintya Haldar and Sankaran Mahadevan, 'Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design', John Wiley & Sons(2000), ISBN:0-471-33119-8.
- [6] Thomas A. Cruse, 'Reliability-Based Mechanical Design', MARCEL DEKKER, INC.(1997), ISBN:0-8247-9793-0.
- [7] Isaac Elishakoff, 'Safety Factors and Reliability: Friends or Foes?', Kluwer Academic Publishers(2004), ISBN:1-4020-1779-0.
- [8] 酒井信介, 岩崎篤, 佐々木哲也, 宮崎信弥, 石崎陽一, 戒田拓洋, "局部減肉信頼性管理のための部分安全係数表の作成", 圧力技術 57 巻 2 号, pp.66-72(2019).
- [9] 日本機械学会, 発電用原子力設備規格・維持規格 JSME SNA1-2020(2020).
- [10] 日本高圧力技術協会, 圧力機器のき裂状欠陥評価方法—第 1 段階評価、Z 101-1:2008(2008).
- [11] 日本高圧力技術協会, 圧力機器のき裂状欠陥評価方法—第 2 段階評価、Z 101-2:2011(2011).
- [12] 鹿島光一, "原子力維持規格の概要", 保全学, Vol.4, No.3, pp.11-16(2005).
- [13] ISO 8686-1 Cranes-Design principles for loads and load combinations:Part1 General(1989).
- [14] ISO 8686-2 Cranes-Design principles for loads and load combinations:Part2 Mobile cranes(2004).
- [15] ISO2394 General principles on reliability for structures, Third edition(1998).
- [16] JIS B 9955:2017, "機械製品の信頼性に関する一般原則"(2017).
- [17] 酒井信介, 「新たな原子力概念の構築を目指して」 ASME ワークショップ参加報告, 日本機械学会誌, 116(1131)123(2013).
- [18] https://www.jsme.or.jp/shinsai3.11/ASME%20Presidential%20Report%20full_032.pdf
- [19] 酒井信介, "許容応力の確率論的決定法", 圧力技術 60 巻 1 号, pp.18-23(2022).
- [20] ISO 11119-3, Gas cylinders-refillable composite gas cylinders and tubes. Part 3:fully wrapped fibre reinforced composite gas cylinders and tubes up to 450L with non-load-sharing metallic or nonmetallic liners. ISO, Geneva, CH(2013).

■著 者■



酒井 信 介