



入門講座

鉄鋼の日本工業規格-13

圧力容器設計の基礎

Basic Course on Pressure Vessel Design

和田洋流

Yoru Wada

(株)日本製鋼所
室蘭研究所 信頼性評価グループ
主幹研究員

1 はじめに

圧力容器とは、大気圧を超える圧力を保有する容器、圧力を発生させる流体（気体、液体）を内蔵する容器、又は外圧を受ける容器のことである。圧力設備とは圧力容器と配管の総称であり、これらは化学工業、石油産業などに用いられる反応器、塔、熱交換器、貯槽にはじまり、家庭の重要なエネルギーである都市ガス導管、LPガス容器に至るまで、産業から家庭まで多くの種類が使用されている。圧力は単位面積 1m^2 あたりに作用する力（N）であり、質量 1kg の物体に作用して 1m/s^2 の加速度を生じさせる力が垂直にかつ均一に面積 1m^2 の面に生ずる圧力で、これは1パスカル（Pa）である。標準大気圧は 0.1013MPa であり、 1MPa は 1Pa の 10^6 倍の圧力である。

圧力容器は第一に破裂に対する危険性を排除しなければならない。1992年に起きた熱交換器の破裂事故では、圧力が 7MPa （大気圧の約70倍）程度で重さ約 2970kg の蓋が 100m も飛翔した¹⁾。海外の水晶オートクレーブの爆発事故では、圧力が 29000psig （約 200MPa 、大気圧の約2000倍）で重さ 8600 ポンド（ 3900kg ）の破片が 435 フィート（約 133m ）飛翔し、爆発にともなう鉄骨構造物の破片（重さ約 45kg ）が人にあたり、人災となった²⁾。このように万が一圧力容器が破裂した際の圧力の威力は恐ろしく、その被害は計り知れないものとなる。また、内部気体あるいは流体が毒性であるなど、漏洩した場合に危害がおよぶ可能性のある場合（危険漏洩）、き裂の貫通を防ぐなど漏洩しないような対策を講じなければならない。

圧力容器については、各国とも古くから特別の法令を定め、法令によって設計、製作、検査を規制し安全性を確保している。

2 ASME規格とJIS規格

本講座で解説する圧力容器規格（JIS圧力容器規格）は、歴史的に米国機械学会（The American Society of Mechanical

Engineers：ASME）のボイラ・圧力容器規格（Boiler and Pressure Vessel Code & Standards）をベースに制定されており、ASME規格について簡単に触れておく。

ASME規格 Sec.VIII：Pressure Vessels【圧力容器】

・Division 1（以下ASME Sec.VIII Div.1）

世界的にも最も広く利用されている火なし圧力容器規格であり、本解説の「JIS B 8265 圧力容器の構造-一般構造³⁾」（以下JIS B 8265）および「JIS B 8267 圧力容器の設計⁴⁾」（以下JIS B 8267）はこれをベースとしている。Division 1では、1950年代初頭の発行時は引張強さに対する安全係数（以下安全係数）が 5.0 であったが、1951年に 4.0 に低減されて、1999年には材料の改善や品質の安定化などの技術の進歩を反映し安全係数が 4.0 からさらに 3.5 に低減されている⁵⁻⁷⁾。

・Division 2：Alternative Rules【代替規則】（以下ASME Sec.VIII Div.2）

1968年にDivision 1に対する安全係数を 3.0 とする代替規則がDivision 2として発行された。先だって1963年に発行された原子力規格Section IIIの考え方が反映されており、疲労設計を考慮する内容となっている。Division 1と比較した場合、より高い設計応力強さが許容されているが、材料、設計及び非破壊検査に関する規則はより厳格なものとなっている。さらに2007年には安全係数を 3.0 から 2.4 にまで低減した大幅改正版;New Division 2が発行⁸⁾されている。「JIS B 8266 圧力容器の構造-特定規格⁹⁾」（以下JIS B 8266）は安全係数が 3.0 の旧Division 2¹⁰⁾に対応している。

3 法令による分類と圧力容器の構造と設計にかかわるJIS規格

我が国では、法令による技術基準と試験・検査制度が、使用目的に応じて施行され、これらは図1に示す高压ガス保安法、電気事業法、ガス事業法および労働安全衛生法に区分され、圧力容器関連4法という。4法では性能規定化がそれぞれ

れ図られた結果、省令・告示には圧力容器に要求される「性能」が規定されていて、これらの性能規定に対応する技術上の基準の具体的例示は、技術基準の解釈例、例示基準に規定されている。JIS B 8265はこれら4法における技術基準の整合化を図る目的で、各技術基準の共通事項(材料、設計、溶接、製作、試験、検査など)を一般事項として規定したものである。本体は1.適用範囲、2.引用規格、3.用語および定義、4.材料、5.設計、6.溶接、7.製作、8.試験および検査、9.安全装置、10.表示および適合性評価で構成され、AからSまで18の付属書に材料の許容応力や計算厚さの求め方、耐圧試験方法などが規定されている。JIS B 8267は、ASME Sec.VIII Div.1の改正で安全係数が4から3.5に変更されたことに対応して制定された。JIS B 8267本体の構成はJIS B 8265とほぼ同じである。JIS B 8266は任意規格であり、高度な解析による設計法の導入により、より低い安全係数の採用を可能とし、合理的な容器設計が可能となっている。ただしJIS B 8265、JIS B 8267およびJIS B 8266は図1に示すすべての圧力容器に対応しているわけではない。以下本講座ではこれらJIS圧力容器規格を中心に、高圧ガス保安法における圧力容器の具体例を挙げながら、強度設計の基本と材料選定について解説した。尚、圧力容器規格における溶接、製作、試験および検査の詳細については、別途テキスト11)、14)、17)などを参考にしていきたい。

(1) 高圧ガス保安法

以下に定義する「高圧ガス」を製造、販売、貯蔵、輸入、消費、廃棄および容器の製造と取扱いなどについて規制するとともに、高圧ガスの製造などの許可・届出などの義務を規定したものである。概括的には圧力が1MPa以上であれば高圧ガスである。

(圧縮ガス) 常用の温度または温度35℃において圧力が1MPa (ゲージ圧力) 以上となる圧縮ガス (圧縮アセチレンガスを除く)

(圧縮アセチレンガス) 常用の温度または温度15℃において圧力が0.2MPa 以上となる圧縮アセチレンガス

(液化ガス) 常用の温度または温度35℃以下において圧力が0.2MPa 以上となる液化ガス

(政令指定ガス) 液化ガスの定義に該当するガスを除くほか、温度35℃において圧力0Paを超える液化ガスのうち、液化シアン化水素、液化プロピルメチル又はその他の液化ガスであって政令で定めるもの(液化酸化エチレン)。

高圧ガス保安法における圧力容器は、特定設備の圧力容器と容器保安規則の容器(以下容器則容器)とがある。表1には容器則容器と特定設備の圧力容器の違いと種類を示したが、前者は地盤面に対して移動することができない容器であって、後者は地盤面に対して移動可能な容器である。特定設備の圧力容器では、特定設備検査規則(以下特定則)の適用を受け、設計ごとに構造、寸法、使用条件等が異なり、製造の工程毎(設計、材料、加工、溶接、構造)の検査(特定設備検査)を受けなければならない。特定則では、2001年12月にJIS B 8265と整合した例示基準¹²⁾が制定され、2003年4月にJIS B 8267に先行して安全係数3.5の圧力容器を第2種特定設備として、例示基準が制定された。一方容器保安規則(以下容器則)の容器は同じ型式の容器を大量生産することが想定されており、容器則の例示基準¹³⁾においては、製造時に設計の検査に加え、同一の型式から採取した複数の容器について設計確認試験、組立試験が要求されている。

なお、高圧ガス保安法以外の各法に関しても下記の技術基準についてそれぞれJIS B 8265と整合したものとなっている。詳細については14)の書籍等を参考にするとよい。

- ・労働安全衛生法：ボイラー構造規格、圧力容器構造にかか
る技術基準
- ・ガス事業法：ガスを供給する事業におけるガス発生設備な
どの圧力容器にかかる技術上の基準
- ・電気事業法：発電用火力設備に用いる圧力容器の技術基準

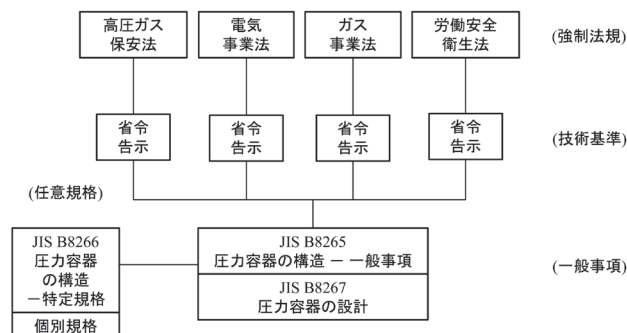


図1 強制法規(圧力容器関連4法)における技術基準とJIS(一般事項、任意規格)¹¹⁾

表1 高圧ガス保安法省令における特定設備の圧力容器と容器則容器

法令上の区分	使用形態
特定設備検査規則 特定設備の圧力容器 ^{注1)}	高圧ガスの製造・貯蔵設備に用いる圧力容器であって、災害防止のために設計・製造段階および製造後の検査が特に必要なものとして省令で定められた設備(地盤面に対して移動することができない)。 例: 化学プラントなどの貯槽、塔、反応器、熱交換器、蒸発器などの圧力容器など
容器保安規則 容器	高圧ガスを内蔵した状態で地盤面に対して移動可能 例: 可搬小型容器、LPガスローリーなど

注1: $P(\text{設計圧力: MPa}) \times V(\text{内容積: m}^3) \leq 0.004$ の容器、 $P < 30$ かつ $V \leq 0.001$ の圧力容器は特定設備から除外される。このほかにも特定設備から除外される容器の規定あり。

4 強度設計の基本

圧力容器の強度設計の考え方は、表2に示すように、公式による設計、解析による設計法に大別される。

圧力容器の過大な塑性変形を防止するために降伏点を基準とした安全係数 f_y を、破壊圧に対しては引張強さを基準とした安全係数 f_u （以下、引張強さを基準とした安全係数を単に安全係数と呼ぶこととする）がそれぞれ同表のごとく設定され、許容応力は以下によって与えられる。

$$\sigma_a \text{ 又は } S_m = \min. \left[\frac{\sigma_Y}{f_y}, \frac{\sigma_B}{f_u} \right] \dots\dots\dots (1)$$

σ_B : 引張強さ
 σ_Y : 降伏点

より正確には、設計温度が常温以上の高温であれば、常温および高温の σ_Y 、 σ_B のそれぞれ4つの場合を比較して最小値を許容応力として、圧力容器規格の許容応力表に示されている。一方、表3には各規格の適用範囲を示す。圧力容器の強度設計では、一般に圧力が低い場合には公式による設計を採用し、圧力が高い場合は解析による設計を採用する。

設計温度がクリープ領域の場合については、JIS B 8265お

表2 圧力容器設計規格における許容応力と安全係数

強度設計法	許容応力	降伏点に関する安全係数 f_y	引張強さに関する安全係数 f_u	規格の種類
公式による設計	許容引張応力 σ_a	1.5 ^注	4	JIS B 8265
		1.5 ^注	3.5	JIS B 8267
解析による設計	設計応力強さ S_m	1.5 ^注	3	JIS B 8266

注) オーステナイトステンレス鋼については $f_y=1.11$

よびJIS B 8267において、10⁵時間クリープ強度に基づいて許容応力が設定されている。JIS B 8266ではクリープ領域は対象外となっている。クリープを考慮した解析による設計法は、最近、海外のASME Sec.VIII Div.2（圧力容器 代替規則）規格のコードケース（Case 2605-1）に一部導入されつつあり、ここでは、非弾性ひずみおよびクリープ損傷の制限、クリープの影響による繰返し軟化を伴った疲労評価が可能となっている¹⁵⁾。

4.1 公式による設計（Design by Rules, DBR）

公式による設計では、「簡便さ」を最大の狙いとするために、最大主応力が許容値内におさまるように厚さを決定するだけである。不連続部の影響、各種外荷重条件、雰囲気条件、材料欠陥などは解析することなく、形状や条件を規定することにより、これらを大きい安全係数の中に含めて、安全性を確保する。JIS B 8265では、安全係数4によって設定された許容引張応力 σ_a が付属書の許容応力表に、JIS B 8267では安全係数3.5の許容応力表を参照し、圧力容器の計算厚さを求める。なお、高圧ガス保安法における特定設備検査規則では、設計圧力が20MPa以下の第2種特定設備について安全係数3.5の適用を認めている。また、容器則容器の一般継ぎ目なし容器（鋼製）の場合では、公式による設計法を採用しているが、本容器の例示基準¹³⁾では、前述したとおり複数の容器についての設計確認試験、組試験による実際の容器の性能確認試験などが要求されており、性能規格（Performance Based Standards）」（使用方法、使用環境、使用条件等が明確で達成目標と目的を満たしていることを証明する設計法）と公式による設計を組み合わせた内容となっている。このため、安全係数も約2.7（焼入れ焼戻し処理した引張強度が785MPaのクロムモリブデン鋼の場合）と薄肉に製作できるようになっている。JIS圧力容器規格では、容器則容器における「一般継ぎ目なし容器」の例示基準¹³⁾を包含する「JIS B 8241 継ぎ目なし鋼製高圧ガス容器」¹⁶⁾が別途制定されており、本容器はJIS B 8265およびJIS B 8267の適用範囲に含まれない。

表3 圧力容器の構造規格における適用範囲

強度設計法	規格の種類	許容応力の設定基準	設計圧力
公式による設計	JIS B 8265	1) 設計温度がクリープ領域未満の場合 表2の通り	30MPa 未満
	JIS B 8267	2) 設計温度がクリープ領域の場合 次の時間依存特性（クリープ強度）の最小値 i) クリープ速度0.01%/1,000hrを生じる応力の平均値 ii) 100,000hrで破断を生じる応力の平均値の67% iii) 100,000hrで破断を生じる応力の最小値の80%	
解析による設計	JIS B 8266	設計温度がクリープ領域未満のみ 表2の通り	100MPa 未満

以下には公式の一例として円筒胴の板厚計算式を示す。

薄肉円筒の場合

図2における円筒形圧力容器（内径 D_i 、外径 D_o 、厚さ t ）において、薄肉円筒の場合は板厚にわたる応力の変化が小さいので、周方向応力 σ_θ を断面の平均応力 σ_m とみなし、内圧を p として σ_m とのつりあい式をBB断面でつくれば、

$$2t\sigma_m = D_i p \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma_m = \frac{D_i p}{2t} \quad \dots\dots\dots (3)$$

公式による設計では、最大主応力説を採用しており、設計に用いる許容引張応力 σ_a は表2に示す安全係数により設定されている。 σ_a を板厚平均値 σ_m あるいは内壁に生ずる最大値を基準にとるかは、設計の考え方によるが、 D_i の代わりにみかけ上、 $D_i + 2\beta t$ の形にすると(4)式のごとくとなる。

$$\sigma_a = \frac{(D_i + 2\beta t)p}{2t} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$\beta = 0$ は内径、 $\beta = 0.5$ が平均径、 $\beta = 1$ が外径をそれぞれ基準として採用する場合となる。薄肉円筒の式の適用限界を $t/D_i = 1/4$ までとして、 $t/D_i = 1/4$ の境界において、(4)式の薄肉式と(6)式の厚肉式が等しくなるように β を求めると $\beta = 0.6$ となり、薄肉円筒の式の適用限界： $t/D_i \leq 1/4$ の条件は $p \leq 0.385 \sigma_a$ と読み替えることも出来る。また、溶接継手の場合は、許容引張応力 σ_a に溶接継手効率 η （溶接継手のタイプなどにより別途規格で決められた値）を掛けた $\sigma_a \eta$ を用いる。これを(4)式に代入して、薄肉円筒胴における計算厚さ t を求める公式は以下となる¹⁷⁾。

$$t = \frac{p D_i}{2\sigma_a \eta - 1.2p} \quad (t/D_i \leq 1/4) \quad \dots\dots\dots (5)$$

厚肉円筒の場合

導出過程は省略したが、厚壁内の体積素片における応力のつり合いの式から下式が導出される¹⁷⁾。

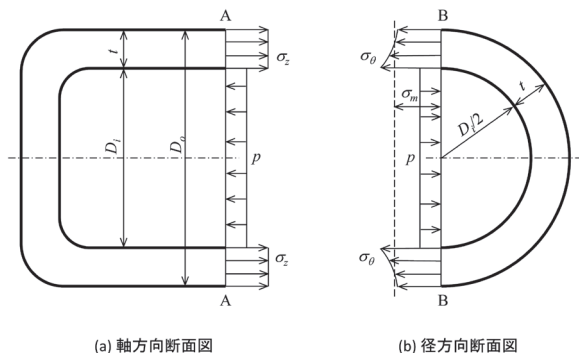


図2 円筒形圧力容器

$$t = \frac{D_i}{2} (\sqrt{Z} - 1), \quad z = \frac{\sigma_a \eta + p}{\sigma_a \eta - p} \quad (t/D_i > 1/4) \quad \dots\dots\dots (6)$$

4.2 解析による設計 (Design by Analysis, DBA)

解析による設計法では、図3に示す様に予想される破損様式に対応して、一次応力、二次応力およびピーク応力まで詳細に解析し、適切な許容限界を設けて公式による設計よりも高い許容応力を採用可能とする。

(1) 塑性崩壊の防止

～一次応力強さ（一次一般膜応力強さ P_m ）の制限～

塑性崩壊とは、構造壁全体が降伏し、使用に耐えることができないほどの過度の塑性変形を生ずる現象である。今、重量 F を吊り下げている断面積 A の棒を考えると、この棒には引張応力 $\sigma = F/A$ が生じる。 σ は外荷重との単純なつりあいを満足するために必要な荷重制御型の応力であり、これを一次応力といい、断面内で応力の再配分が期待されない応力を膜応力という。また、棒は構造不連続のない部位（一般部）なのでこの応力を一次一般膜応力と呼ぶ。棒の過大な塑性変形を防止するうえでは、 σ が材料の降伏点を超えない様に適切な安全係数を設定することになる。一方、薄肉円筒胴の応力状態について考えると、周方向応力 σ_θ は(3)式に示したとおりである。軸方向応力 σ_z は図2において σ_z と内圧 p のつり合いをAA断面で考えれば、 σ_z の作用面積は薄肉である点を考慮して $\pi D_i t$ で近似され、 p の作用面積は $\pi D_i^2/4$ となり(10)式の様になる。また半径方向応力 σ_r は板厚平均値である $-p/2$ になり、(11)式の様になる。

$$\sigma_\theta = \frac{D_i p}{2t}, \quad \sigma_z = \frac{D_i p}{4t}, \quad \sigma_r = -\frac{p}{2} \quad \dots\dots\dots (9) \quad (10) \quad (11)$$

内圧 p が容器の変形と無関係に加圧機構によって一定に保たれている場合は、これらの応力は一次応力である。またここ

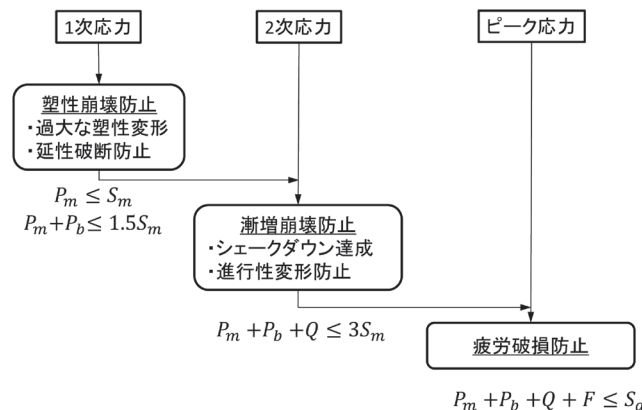


図3 弾塑性材料（クリープ温度未満）における許容応力基準の体系¹⁸⁾

では、薄肉円筒であることから断面にわたる応力変化が小さく一定（膜応力）とみなせるために、一次一般膜応力に分類される。

次に、このような多軸応力をどのように制限するかということを検討するために、解析による設計では（1）最大せん断応力説（Trescaの理論）および（2）せん断ひずみエネルギー説（von Misesの理論）が採られている。最大せん断応力説によれば、部材の降伏は任意の点の最大せん断応力が単純引張試験における降伏点における最大せん断応力に等しくなったときに生ずる。任意の点の3つの主応力 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ とすると、最大せん断応力説における部材の降伏条件は式（12）で与えられる。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_Y \dots\dots\dots (12)$$

そこで、任意の点において次式の S_{ij} を計算し、その絶対値が最大のものを応力強さ（stress intensity）と定義し（ S と略記）これを設計計算上の基準としている。

$$S_{ij} = \sigma_i - \sigma_j \dots\dots\dots (13)$$

薄肉円筒胴における3つの主応力はその大きさ順に $\sigma_1 = \sigma_\theta$, $\sigma_2 = \sigma_z$, $\sigma_3 = \sigma_r$ となるので応力強さ S は $(\sigma_1 - \sigma_3)$ となり、（9）～（11）式により以下の様になる。

$$S = \frac{D_i p}{2t} + \frac{p}{2} \dots\dots\dots (14)$$

S の許容上限値を設計応力強さと定義し（ S_m と略記）ており、 S_m の上限値は表3に示したとおりである。この場合（14）式で求めた S は一次一般膜応力強さ P_m に分類され、図3に示した一次応力強さの制限 $P_m \leq S_m$ であるための薄肉円筒胴計算厚さは（15）式のようになる。

$$t = \frac{0.5pD_i}{S_m - 0.5p} \dots\dots\dots (15)$$

なお、公式による設計、解析による設計にかかわらず、計算厚さ t に「腐れ代」（後の表4参照）を加えた「呼び厚さ」を実際の圧力容器の厚さとするよう圧力容器規格において要求されている。

（2）塑性崩壊の防止～（一次一般膜応力強さ+一次曲げ応力強さ： $P_m + P_b$ ）の制限～

厚肉円筒の内圧による断面応力分布など、構造物の厚さ断面にわたる実際の応力分布は非線形分布となっている（たとえば図2のBB断面）。この分布を①膜応力（断面平均応力）と②曲げ応力（曲げモーメントと等価な線形曲げ応力）と③ピーク応力（非線形応力分布から①、②を差し引いた非線形な応力）により分類する。一次曲げ応力強さを P_b とした場合、

膜応力と曲げ応力で構造物全体が塑性崩壊しないように一次一般膜応力強さと一次曲げ応力強さの和： $P_m + P_b$ を $1.5S_m$ に制限している。

（3）漸増崩壊の防止（一次応力強さ+二次応力強さ： $P_m + P_b + Q$ ）の制限

構造不連続部において、各部相互間に生ずべき変形の不連続性をなくして一体に接続することから生じる応力（鏡板やフランジとの結合部に生じる曲げ応力、管台や開口部近傍に生じる曲げ応力など）や熱荷重の自己拘束により生じる変位制御型の応力強さを二次応力強さ（ Q ）という。この様な変位制御型の荷重が構造不連続点に繰り返し作用した場合、最初の荷重で降伏が生じてしまっても2回目以降のサイクルで塑性変形の繰り返しが生じない様にするために、一次応力強さと二次応力強さの和 $= P_m + P_b + Q$ を $2\sigma_Y$ 以内に制限する。一方、 $S_m = 1/1.5 \sigma_Y$ より、 $(P_m + P_b + Q)$ の制限値は $2 \times (1.5S_m) = 3S_m$ になる。

（4）疲労破損の防止（一次応力強さ+二次応力強さ+ピーク応力強さ： $P_m + P_b + Q + F$ ）の制限

一次応力強さ+二次応力強さに局部的構造不連続部における応力集中などによる局部的な応力強さ=ピーク応力強さ（ F ）を加えた $(P_m + P_b + Q + F)$ を疲労の許容応力振幅： S_a 以下に制限する。 S_a は完全両振りひずみ制御型低サイクル疲労試験によって得られる疲労設計曲線にもとづき評価される。疲労設計曲線では、図4に示す様に実用上の便宜からひずみ振幅にヤング率をかけた仮想弾性応力振幅として示し、小型試験片による多数のデータに対し、平均応力の影響を考慮して修正したうえ、試験片のサイズ効果やばらつきなどを考慮して、寿命の20倍、応力の2倍の安全率をとって、安全側に引きなおした線図としている。

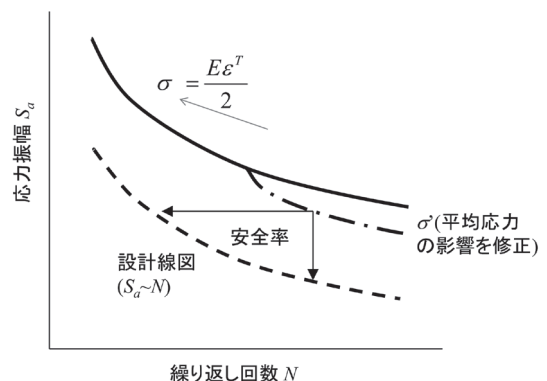


図4 設計疲労線図（ S_a - N 線図）¹¹⁾

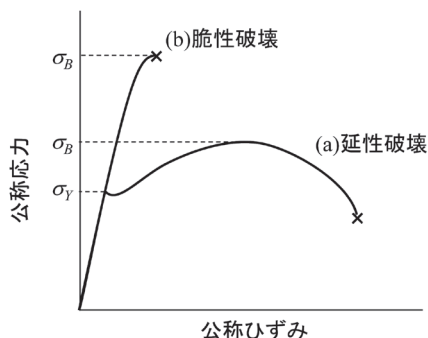


図5 材料の引張試験によって得られる応力-ひずみ関係¹¹⁾

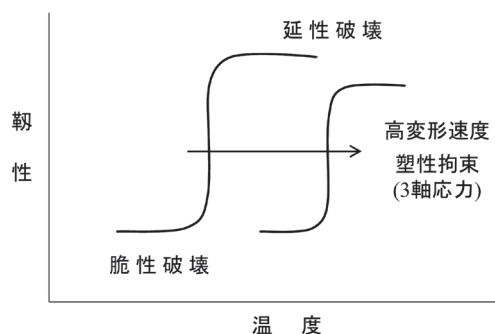


図6 鋼の延性-脆性遷移と支配因子¹¹⁾

5 材料選定の基本

圧力容器に求められる性能とは、①耐圧性能、②気密性能、③耐久性能である。①耐圧性能に対しては、材料の強度（引張強さと降伏点）および脆性破壊を回避するための韌性が必要な特性となる。②の気密性能に対してはガスケット、継ぎ手、バルブの材質選定が重要である。③の耐久性能は、材料に発生する経年劣化と損傷に対して抵抗する能力であり、経年劣化は焼戻し脆化など高温使用中に強度や韌性などの材料特性が低下する現象である。一方、損傷には疲労、クリープ、腐食、磨耗、エロージョン/コロージョンなどがある。このように圧力容器の材料は(1)強度、(2)韌性、(3)耐久性の3つの特性を基準として選定する。

(1) 強度と延性

設計のところで述べたように圧力容器の強度設計の基準は降伏点と引張強さである。図5には脆性材料と延性材料の引張試験線図における応力-ひずみ線図を模式的に比較してある。

図5の延性材の引張試験においては、降伏点を越した後、加工硬化によって荷重が伸びとともに増加している。そして最大荷重点に達した後ネッキングが生じて伸びが急増し、破壊に至る。圧力容器の塑性変形の場合にも、この様な延性材であれば加工硬化による荷重負担の増加分が直径の増加および厚さの減少分よりも大なる間は力学的に安定なつり合い状態を保ち続け、圧力がある限界値を超すと引張破壊の場合と同様に不安定現象を生じ、ネッキング（あるいはバルジング）を起こして破壊に至るものと考えられる。したがって、圧力容器の延性破壊においては材料の加工硬化を示す応力ひずみの関係から破壊圧を求めることができるが、実用的な設計基準式には、その簡便性から降伏点と引張強さのみを用いている。脆性破壊を回避するには、図5中の様な脆性材は採用すべきではないが、設計者は強度設計の基準値となる降伏点と引張強さを数字でチェックするだけでなく、選定すべき材料の引張試験によって得られる引張試験線図および試験片の

延性（伸び、絞り）が十分かどうかを確認しておくことが材料選定の第一段階で重要であるといえる。

(2) 韌性

材料にき裂がある場合に、ある荷重を超えると荷重増加をともなうことなく破壊が急速に進行する。この際に材料が示す抵抗を破壊韌性という。材料の破壊韌性をシャルピー衝撃試験による吸収エネルギーで代用し、吸収エネルギーに代表される特性を韌性（あるいは切り欠き韌性）という¹⁹⁾。低合金鋼などのフェライト鋼は図6に示す様に温度が高いと韌性が高く延性破壊するが、温度が低くなると韌性が低下し、脆性破壊を示すようになる。これを延性-脆性遷移という。材料は延性破壊する材料（延性材料）、脆性破壊する材料（脆性材料）、延性-脆性遷移を示す3タイプに分けられる。

①延性破壊する材料（延性材料）

- ・面心立方格子/オーステナイト鋼、アルミニウム合金、ニッケル合金など

②延性-脆性遷移を示す材料

- ・体心立方格子、稠密六方格子/フェライト鋼、マルテンサイト鋼、チタン合金など

③脆性破壊する材料（脆性材料）

- ・高炭素鋼、鋳鉄、ガラス、セラミックスなど

圧力容器の脆性破壊の防止、あるいは潜在的な欠陥を起点とする延性破壊の防止は、下記の観点から防止するように規定されている。

- ・材料中にサイズの大きい非金属介在物など、有害な欠陥が含まれていないこと
- ・延性材料の使用
- ・延性-脆性遷移を示す材料にあっては、最低使用温度を遷移温度以上に制限
- ・あるいは遷移温度以上となる（＝脆性破壊を回避する）吸収エネルギーの要求

尚、圧力容器規格で要求される吸収エネルギーの最小値は、引張強さ 520N/mm²以下の鋼材で20J、引張強さ 520N/mm²

表4 腐食損傷の代表事例^{11,14,17)}など

腐食機構	関連材料と発生条件		対 策
全面腐食	湿食 炭素鋼、低合金鋼の海水、淡水、酸などの環境		・「腐れ代」の確保:たとえば炭素鋼、低合金鋼の圧縮空気、水蒸気、水の压力容器。適切な腐れ代の確保が压力容器規格により要求 ・被覆防食:ステンレス鋼などの合わせ板(クラッド)による被覆、亜鉛めっきなどの塗装防食 ・電気防食 ・腐食環境制御による防食
	乾食	(1) 高温酸化(鋼全般、加熱炉などの高温雰囲気)	Cr(～30%), Al(～10%), Si(0.5～3.5%)などの添加
		(2) 硫黄分を含むガスによる腐食 鋼全般、H ₂ Sを含む高温ガス(250-500℃)の場合、250-500℃の高温下でFe+H ₂ S→FeS+H ₂ 反応が生じ硫化物を生成	Cr, Alの添加。5Cr-0.5Mo鋼,9Cr-1Mo鋼は強いが、水素が共存するとFeS層が水素の還元作用で多孔質となり腐食が増大する。この場合、9Cr-1Mo鋼は有効でなくステンレス鋼が有効。
		(3) COを含む高温ガスによる腐食 (a) 浸炭:鋼全般,CO(700℃が最大)や炭化水素(温度が高いほど大)を含む高温ガス (b) カルボニル腐食:COを含む高温ガス。 Fe、Niなど鉄族の金属がCOと反応、カルボニル化合物を生成して腐食	(a) 耐浸炭材料では25Cr-20Ni-Fe(HK40)鋼など高Cr高Ni合金が用いられているが完全ではない (b) 150℃以上では銅、銅合金ライニングが有効
		(4) CO ₂ による腐食(高温で酸化、低温でも水分があると炭酸を生じて鋼に激しい腐食を生じる)	コーティング、インヒビターを用いる。 120℃を超えるような高温下ではCrの添加が有効
		(5) 窒化(一般に400℃以上の温度で鋼に侵入窒化しき裂が生じる、アンモニアは高温で強い窒化性)	Niは対窒化性を増すのでオーステナイトステンレス鋼やNi-Cr合金の使用
		(6) パナジウム腐食(鋼全般、Vを含む重油の燃焼ガス環境で酸化被覆が溶けて酸化が加速)	Cr,Al,Siの添加は有効だがあまり満足な材料はない。
		(7) アルカリ硫酸塩腐食 燃焼中不純物にNa ₂ SO ₄ が付着していると硫化。	多量のCrを含む高合金材料の使用
	局部腐食		・ステンレス鋼の孔食では、塩素イオン濃度、温度、溶存酸素濃度を下げる。pHを下げる。Cr,Mo量の多いステンレス鋼の採用。・隙間腐食は、ボルト締結部やパッキング間などで隙間部をつくらない。・異種金属腐食は、異種金属同士を絶縁する、電位の差の小さい金属の組み合わせを選ぶ。
応力腐食割れ	・炭素鋼のNaNO ₃ 溶液、高温高濃度NaOH溶液 ・高張力鋼のH ₂ S水溶液 ・オーステナイトステンレス鋼の応力下での塩化物水溶液、ボリテオン酸水溶液、高温水環境		・引張応力の低減 ・割れに強い材料への変更、・環境の制御、・インヒビターの添加、・電気防食の適用
	水素助長割れ	・各種金属材料を室温高圧水素ガス環境中で塑性変形させると生ずる割れ(水素環境脆性) ・高温高圧水素ガス環境に晒された場合、あるいはメッキ工程などで各種金属材料内部に水素が吸蔵した状態で、応力を負荷すると生ずる割れ(内部可逆水素脆性)	低合金鋼は強度が高くなりすぎない様に調節 オーステナイト相が安定なステンレス鋼の採用 材料を加熱し脱水素を行う 低合金鋼は強度が高くなりすぎない様に調節 水素をトラップするVやTi,Nb元素などの添加

を超える場合は27Jと規定されている。

(3) 耐久性 (損傷と経年劣化)

・ 損傷

材料の損傷にはクリープ損傷、疲労損傷、腐食損傷などがあるが、このうち腐食損傷の代表事例と対策を表4に示す。全面腐食とは材料の表面がほぼ均一にわたって腐食する現象である。このうち湿食は水などの液体が関与する電気化学的反応であり、電位やpHが大きい影響因子となる。これに対し、乾食は高温ガスなどの乾燥ガス環境による腐食である。対策としてはステンレス鋼の合わせ板などクラッド鋼を用いることなどに加え、压力容器規格では、こうした腐食に対しては強度上必要な設計厚さに、使用期間中あらかじめ失われることが想定される厚さ:「腐れ代」を確保することが要求されている。

また、ステンレス鋼は耐食用途に使用されるが、塩化物イオンによって表面の不動態被膜が局部的に破壊され、他の部分に比較して局部的にある部分がピット状に腐食する「孔食」を生ずるため、注意が必要である。応力腐食割れは材料-環境-引張応力の3つの因子がそろって生じる割れであり、このうち1つでも取り除いてやれば発生は抑えられる。水素脆性は広義には応力腐食割れと定義されるが、現象論的には金属材料表面が室温高圧水素ガスに接した場合(例:水素ステーション用の蓄圧器など)に生ずる「水素環境脆性」²⁰⁾と金属材料内部に水素を吸蔵した水素(例:高温高圧水素で運転される石油精製リアクターなど)によって生ずる「内部可逆水素脆性」²¹⁾に区別され、各々の防止対策、材料選定指針も異なる。

・ 経年劣化

材料の劣化は、材料が設備の使用環境にさらされることにより、経時的に材料内あるいは界面で生じる微視的变化であ

る。例えば、金属が長期間高温下に晒されると炭化物の粗大化などミクロ的な組織変化により延性や強度などの材料特性が低下する。表5に経年劣化の代表事例と対策を示す。焼戻し脆化では、低合金鋼中のP,As,Sb,Snなどの不純物元素が高温での使用中に結晶粒界に偏析し、靱性が低下する。Si,Mnは脆化を促進する。これまでに古い(鋼中不純物濃度が高い)石油精製用リアクター用2.25Cr-1Mo鋼で焼戻し脆化が問題となっていたが、最近製造された鋼では製鋼・精錬時に不純物を抑制し、焼戻し脆化感受性を低減化する対策がとられている。一方で、Niを添加したASME規格のSA723鋼(NiCrMoV鋼)は焼き入れ性に優れた高強度鋼として超高压用容器用材料などに適用されているが、本鋼は2.25Cr-1Mo鋼と比較すると焼戻し脆化感受性が高い²²⁾ので、鋼中不純物の管理と使用中の熱扱いや熱処理においては注意が必要である。水素侵食では炭素鋼や低合金鋼において高温高压水素中で侵入した水素が鋼中の炭素と反応しメタンとなりその圧力で微小なボイドを生成する。水素侵食有無の判定は、温度や水素分圧などの運転条件からAPI RP941のネルソン線図²³⁾などを用いて行う。クリープ脆化は、1.25Cr-0.5Mo鋼溶接熱影響部などにおいてCuやSb,Snなどの不純物の影響によりクリープ破断延性が低下するものであり、石油精製用高温压力容器のノズル取付け部など応力集中を伴う溶接熱影響部でクリープ脆化に起因した割れが発見されることがある。このため、溶接部の形状、溶接材と母材の不純物管理には配慮が必要である。ステンレス鋼においても高温下での組織変化により σ 相脆化などの経年劣化を生じ、水素環境など腐食環境下での延性低下、割れ発生を助長する。

(4) 設計規格における材料の規定

JIS B 8265とJIS B 8267においては規格本体「4 材料」で使用できる規格材料とその許容応力が規定されており、以下の構成となっている。

4.1 一般、4.2 鉄鋼材料、4.3 材料の許容応力、4.4 材料の諸特性のうち、4.2では鉄鋼材料の使用制限を規定している。付属書Bでは、規格材料の許容応力表を表B.1：鉄鋼材料(JIS規格材料)、表B.2：鉄鋼材料(ISO規格や外国規格材料)、表B.3：非鉄金属材料(JIS規格材料)および表B.4：ボルト材料(JIS規格材料)によって規定している。この表では、各温度における許容引張応力が前述4章で述べた安全係数の考え方にもとづいて規定されている。低温側の許容引張り応力は $\sim 40^{\circ}\text{C}$ として示されているが、低温使用限界は、具体的に規定されていない。理由は強制法規における技術基準の使用限界が異なり、統一できていないからであって、低温使用限界については適用される各々の強制法規にしたがうことになっている。

JIS B 8266では、上記とほぼ同じ構成ではあるが、材料規定については、材料の疲労特性、非破壊試験、衝撃試験による最低設計金属温度など詳細規定が追加されている。表6～表8には鋼種別、用途別の材料の記号と種類の代表例を示す。P番号とは溶接やろう付けにおける溶接施工試験数を減らすために母材の化学成分、溶接性、機械的性質の類似性から割り当てられた番号である。JIS B 8267付属書AでASME規格のSec.II：MATERIAL(材料) PartD(特性)で定めるP番号に対応する鋼材について規定しており、炭素鋼はP番号が1、低合金鋼はP番号が3、4および5、高合金鋼はP番号が6、7、8A、8B、9A、9B、11Aなどとなっている。

表5 経年劣化の代表事例^{11,14,17)} など

劣化の種類	関連材料と発生条件	対 策
焼戻し脆化	Ni-Cr-Mo-V鋼、2.25Cr-1Mo鋼などの低合金鋼を $350^{\circ}\text{C}\sim 550^{\circ}\text{C}$ の温度域で保持あるいは除冷したときに鋼材のじん性が劣化する	鋼中不純物元素P,Snの低減化 促進元素Si,Mn量の制御
水素侵食	炭素鋼、低合金鋼の高温高压水素環境	・水素分圧、温度、運転時間パラメータ(ネルソン線図)による水素侵食判定
クリープ脆化	C-0.5Mo,1Cr-Mo,1.25Cr-1Mo鋼の溶接熱影響部で 500°C を超える運転環境に晒されると延性が低下する	・形状不連続部、溶接部における応力集中の緩和 ・クリープ延性の大きい2.25Cr-1Mo鋼の採用 ・クリープ脆化元素Sb,Sn,Cu,Pなどの抑制
黒鉛化	炭素鋼、0.5Mo鋼が $430\sim 590^{\circ}\text{C}$ で長時間加熱されると強度低下する	1%Cr以上では発生しない。炭素鋼および0.5Mo鋼の 430°C 以上の長時間使用を避ける
σ 相脆化	オーステナイト系ステンレス鋼に含まれる δ フェライトが 700°C 付近で長時間加熱されると σ 相に変化し、延性が著しく低下する。2相ステンレス鋼、フェライト系ステンレス鋼でも生じる	例えばオーステナイト系SUS347溶接部の場合、 ・溶接後熱処理(PWHT)温度が上昇しすぎない様にする ・Si含有量を低減させる
475°C 脆化	フェライト系、マルテンサイト系、2相系ステンレス鋼が $370^{\circ}\text{C}\sim 540^{\circ}\text{C}$ に長時間保持されると脆化する	600°C 以上で加熱すると回復する

※水素侵食は乾食に分類されるが、表5の経年劣化の方に含めた。

6 圧力容器の維持基準、規格

圧力容器規格では製造時に有害な欠陥がないことを確認するために、検査の実施が要求されているが、製造後の供用中においても検査を行い、常に技術上の基準を満たしているかを確認するために、たとえば高圧ガス保安法では高圧ガス設備に対しては一般高圧ガス保安規則において「保安検査基準」を、容器の場合は容器則で規定されており、具体的な検査方法が告示により示されている。しかし、これらは材料の

損傷や経年劣化などで供用中に生じた欠陥の存在を前提としていない。そこで特に古い設備、過酷な条件下で使用される圧力容器などでは、供用中に生じた欠陥を定量的に評価して、合理的に設備保全、維持管理をおこなうための「維持規格」の整備が必要である。発電用原子力設備の場合、「日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格」²⁴⁾が制定され、電気事業法における健全性評価の審査基準に採用されている。一般産業設備の圧力容器の維持規格策定においては、最近、高圧ガス保安法に基づいて作成された石油精製プラン

表6 常温～高温強度確保の低合金鋼の代表例

鋼種	成分	P- No.	種類の記号	種類	名称
炭素鋼	C	1 1	SS330 SM400A	JIS G 3101 JIS G 3106	一般構造用圧延鋼材 溶接構造用圧延鋼材
	C-Si	1	SB410	JIS G 3103	ボイラ及び圧力容器用炭素鋼及びモリブデン鋼鋼板
	C-Mn-Si	1 1 1	SM400B,C SPV315,355 SGV410,450	JIS G 3106 JIS G 3115 JIS G 3118	溶接構造用圧延鋼材 圧力容器用鋼板 中・常温圧力容器用炭素鋼鋼板
耐熱低 合金鋼	C-0.5Mo	3	SB450M	JIS G 3103	ボイラ及び圧力容器用炭素鋼及びモリブデン鋼鋼板
	Mn-Mo-Ni	3 3	SBV2,3 SQV2A,2B,3A,3B*	JIS G 3119 JIS G 3120*	ボイラ及び圧力容器用(調質型*)マンガンモリブデン鋼及びマンガンモリブデンニッケル鋼鋼板
	1Cr-0.5Mo	4	SCMV2,3	JIS G 4109	ボイラ及び圧力容器用クロムモリブデン鋼鋼板
	2.25Cr-1Mo	5	SFVAF22A	JIS G 3203	高温圧力容器用合金鋼(高強度クロムモリブデン鋼**)鍛鋼品
	2.25Cr-1Mo-1/4V	5	SFVCMF22V**	JIS G 3206**	
	3Cr-1Mo-1/4V	5	SFVCMF3V**		
	9Cr-1Mo	5	SFVA9	JIS G 3203	

表7 各種ステンレス鋼の代表例

鋼種	成分	P-No.	種類の記号	種類	名称
マルテンサイト系	13Cr	6	SUSF410A,B	JIS G 3214	圧力容器用ステンレス鋼鍛鋼品
フェライト系	12Cr-Al 17Cr	7 7	SUS405 SUS430	JIS G 4303 JIS G 4304 JIS G 4305	・ステンレス鋼棒 ・熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯 ・冷間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯
オーステナイト系	18Cr-8Ni 16Cr-12Ni-2Mo	8A	SUSF304 SUSF316	JIS G 3214	圧力容器用ステンレス鋼鍛鋼品
2相系	23Cr-5.5Ni-3Mo-N 極低C 25Cr-6.5Ni-3Mo-N 極低C	8B	SUS329J3L SUS329J4L	JIS G 4303 JIS G 4304 JIS G 4305	・ステンレス鋼棒 ・熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯 ・冷間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯

表8 低温靱性確保の炭素鋼、ニッケル鋼の代表例

鋼種	成分	P-No.	種類の記号	種類	名称
炭素鋼	C-Mn-Si	1	SLA325A,B SFL1	JIS G 3126 JIS G 3205	低温圧力容器用炭素鋼鋼板 低温圧力容器用鍛鋼品
低温用ニッケル鋼	2.25Ni 3.5Ni	9A 9B	SLN2N255 SLN3N255	JIS G 3127	低温圧力容器用ニッケル鋼鋼板
	9Ni	11A	SL9N520		

ト、石油化学プラントを対象とした「高圧ガス設備の供用適正評価に基づく耐圧性能及び強度に係る次回検査時期設定基準 KHK/PAJ/JPCA S 0851 (2014)」²⁵⁾ が制定されており、減肉およびクリープ損傷、水素侵食、き裂状欠陥の供用適性 (Fitness-for-Service, FFS) を含む内容となっている。

7 おわりに

本解説は主にテキスト 11) を参考に著者が解説を加えたものであり、さらに勉強したい人はこのほかに文献 14)、17)、18)、19) をお勧めする。尚、規格や例示基準などは頻繁に改訂されるので最新のものを改めて参照いただきたい。

謝辞

本解説を完成させるにあたり、ご指導くださいました東京電機大学 辻 裕一教授に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 小林英男, 吉岡照夫, 竹花立美: BLC型熱交換器の発災事故解析, 日本機械学会論文集 (A編), 60 (1994) 570, 527.
- 2) <http://www.csb.gov/ndk-crystal-inc-explosion-with-offsite-fatality/>
- 3) JIS 圧力容器の構造-一般事項 JIS B 8265 : 2010, 日本規格協会, (2010)
- 4) JIS 圧力容器の設計 JIS B 8267 : 2015, 日本規格協会, (2008)
- 5) The American Society for Mechanical Engineers : ASME Section VIII Division 1 : 1998 ボイラ及び圧力容器規格-圧力容器, (1998)
- 6) The American Society for Mechanical Engineers : ASME Section VIII Division 1 : 2004 ボイラ及び圧力容器規格-圧力容器, (2004)
- 7) ASMEの基準・認証ガイドブック, 日本規格協会, (2004), 150.
- 8) The American Society for Mechanical Engineers : ASME Section VIII Division 2 : 2007 ボイラ及び圧力容器規格-圧力容器代替規則, (2007)
- 9) JIS 圧力容器の構造-特定規格 JIS B 8266 : 2003, 日本規格協会, (2003)
- 10) The American Society for Mechanical Engineers : ASME Section VIII Division 2 : 2004 ボイラ及び圧力容器規格-圧力容器代替規則, (2004)
- 11) 圧力設備診断技術者 レベル1講習テキスト (改訂7版), 日本高圧力技術協会, (2014)
- 12) 特定設備検査規則関係例示基準集 第3次改訂版, 高圧ガス保安協会, (2014)
- 13) 容器保安規則関係例示基準集 第2次改訂版, 高圧ガス保安協会, (2015)
- 14) 小林英男: 圧力容器の構造と設計 JIS B8265及びJIS B 8267, 日本規格協会, (2011)
- 15) The American Society for Mechanical Engineers : ASME Boiler & Pressure Vessel Code 2015Edition, Case 2605-1 Fatigue Evaluation for SA-182 F22V, SA-336 F22V, SA-541 22V, SA-542 Type D, Class 4a, and SA-832 Grade 22V at Temperatures Greater Than 371°C (700°F) and Less Than or Equal to 454°C (850°F), (2015)
- 16) JIS 継目なし鋼製高圧ガス容器 JIS B 8241 : 1989, 日本規格協会, (1989)
- 17) 甲種化学・機械講習テキスト 高圧ガス保安技術 新版, 高圧ガス保安協会, (1998), 123.
- 18) 朝田泰英, 川原正言, 大滝英征, 増淵興二, 大野啓充, 小谷純久, 岡林邦夫, 平川賢爾, 川島靖司, 矢川元基: 総合材料強度学講座 機械構造強度学, オーム社, (1984), 17.
- 19) 小林英男: 破壊力学, 共立出版, (2009), 33.
- 20) 大西敬三, 千葉隆一, 手代木邦雄, 加賀寿: 日本金属学会誌, 40 (1976) 6, 650.
- 21) 和田 洋流, 田中 泰彦, 岩館 忠雄, 大見 敏仁, 横堀 壽光: 日本金属学会誌, 71 (2007) 9, 772.
- 22) 渡辺十郎, 村上賀国: 石油学会誌, 18 (1975) 9, 210.
- 23) American Petroleum Institute : API RP 941, Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants, 7th Edition, American Petroleum Institute, (2008)
- 24) 発電用原子力設備規格 維持規格 (2012年版), JSME S NA1-2012, 日本機械学会, (2012)
- 25) KHK/PAJ/JPCA S 高圧ガス設備の供用適性評価に基づく耐圧性能及び強度に係る次回検査時期設定基準 KHK/PAJ/JPCA S0851, 高圧ガス保安協会, 石油連盟, 石油化学工業協会, (2014)

(2016年2月1日受付)