



設計・建設、材料及び溶接に係る日本機械学会の 規格の技術評価に関する第2回検討チーム会合に おける日本機械学会への説明依頼事項への回答

設計・建設規格分

2023年4月10日

(一社)日本機械学会 発電用設備規格委員会
原子力専門委員会 設計・建設分科会

(1) 他規格等の要求事項を取り込む際の考え方

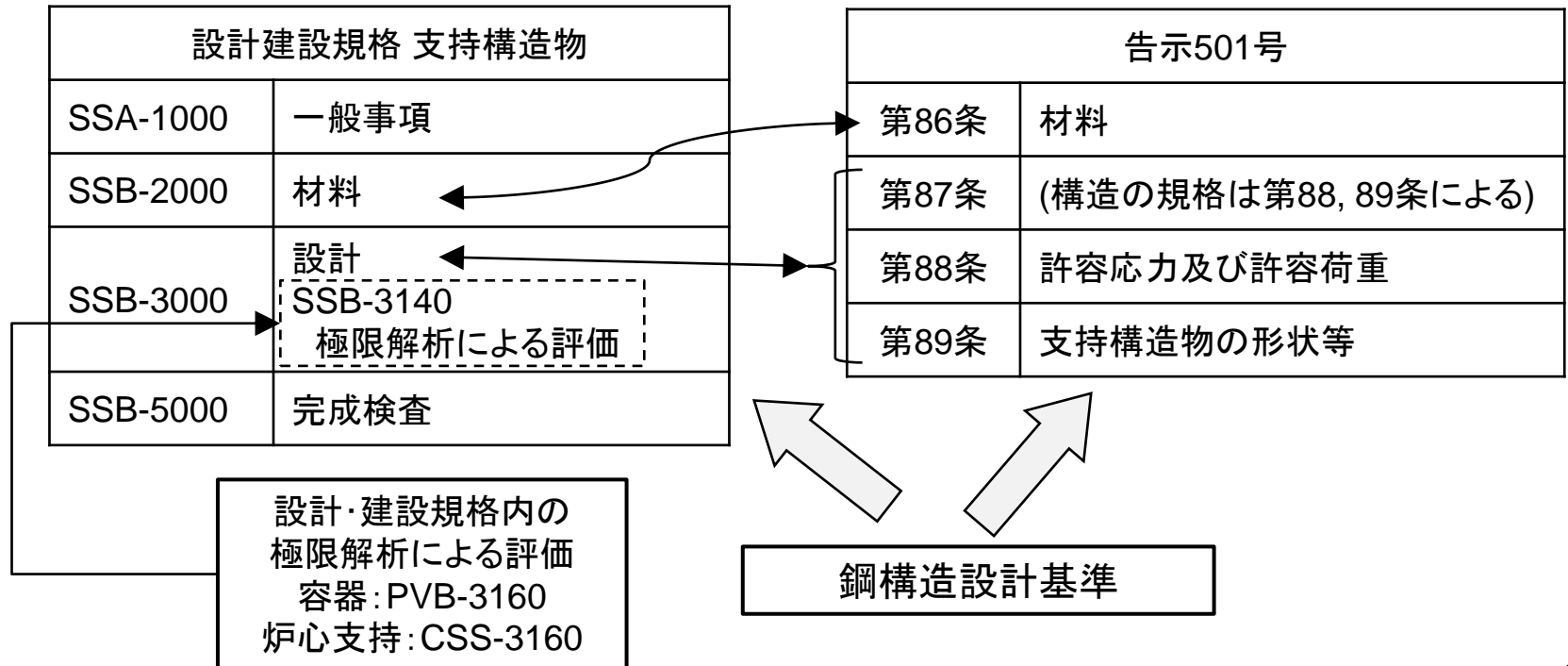
設計・建設規格は、鋼構造設計基準、ASME Sec. III を取り込んだ、告示501号の規定を残しているという説明がありました。例えば、ASME Sec. IIIでは材料、設計、溶接の方法、検査が規定され、品質管理がトータルで行われるようになっていきます。どのような考え方で他の規格等を取り込んでいるのか、フローチャートで示して下さい。

[回答]

(次葉以降に回答)

(1) 他規格等の要求事項を取り込む際の考え方

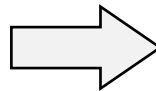
- 支持構造物は、現地での施工、据え付けがあるので、設計・建設規格の支持構造物の規定としては、鋼構造設計規準(日本建築学会)を取り込んでいます。クラス1支持構造物の場合、以下の構成となっており、告示501号も支持構造物は鋼構造設計規準を取り込んでおり、同等の規定となっています。
- 極限解析による評価は、設計・建設規格のクラス1容器(PVB-3160)及び炉心支持構造物(CSS-3160)の規定を参考に、支持構造物の許容値体系を用いてクラス1支持構造物に追加しました。



(1) 他規格等の要求事項を取り込む際の考え方

- ASME Section III NF (支持構造物)は、AISC (米国鉄鋼協会)の規格を参照にしています。
- 米国でも、建築構造物に用いられているAISCをASME Section IIIの支持構造物(NF)に取り込んでおり、日本で日本建築学会の鋼構造設計規準を設計・建設規格及び告示501号に取り込んでいるのと同様です。

AISC
(American Institute of
Steel Construction)



ASME Section III, NF (支持構造物)	
NF-1000	一般事項
NF-2000	材料
NF-3000	設計
NF-4000	製造
NF-5000	検査

(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

(a) クラス1支持構造物には様々な構造・形状があり、どのような支持構造物を対象に適用性を確認したのかを質問したところ、構造・形状に依存するものではないとの説明がありました。ASME Section III のNF-3340 Limit Analysis for Class 1には具体的な構造・形状の例が示され、適用できる範囲がしめされています。「極限解析による評価」が構造・形状に依存するものではないとする技術的根拠を説明してください。

[回答]

- 極限解析は、弾完全塑性体を仮定して崩壊荷重を求める構造解析の一つの手法です。今回追加した規定では、クラス 1 容器及び炉心支持構造物と同様に、2倍勾配法により崩壊荷重を算出する手法として取込んでいます。これは、原理的に適用性が構造・形状に依存するものではありません。
- ここで、SSB-3140 極限解析による評価は、SSB-3121 一次応力に対する許容応力の代替であり、SSB-3200 許容荷重を適用する場合は対象外となります。例えばSSB-3200 を採用するSSB-3350のハンガーロッド又はばねを用いる支持構造物には適用できません。
- ASME Section III NF-3340で示されているのは、適用できる範囲というよりも一般的な構造物の例であると考えます。

(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

[参考] SSB-3121、SSB-3200、SSB-3350 抜粋

SSB-3121 一次応力に対する許容応力
SSB-3121.1 供用状態 A 及び B での許容応力
SSB-3121.2 供用状態 C での許容応力
SSB-3121.3 供用状態 D での許容応力

SSB-3200 許容荷重
SSB-3210 許容荷重

材料の許容荷重に関する次のSSB-3220からSSB-3240を満足する場合は、SSB-3100の材料の許容応力の規定に代えることが出来る。・・・

荷重試験における供試体の個数は、同一の材質及び形状を有する支持構造物ごとに3個とし、供試体によって得られた値のうち最小の値を用いてSSB-3220からSSB-3240により許容荷重を計算する。・・・

SSB-3220 供用状態 A 及び B での許容荷重
SSB-3230 供用状態 C での許容荷重
SSB-3240 供用状態 D での許容荷重

SSB-3350 ハンガーロッド又はばねを用いる支持構造物
SSB-3351 ハンガーロッド

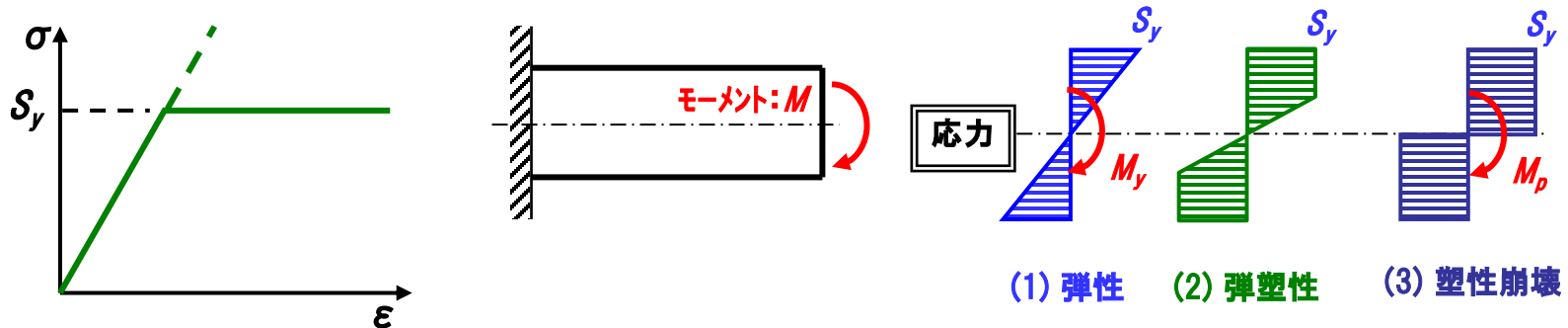
ハンガーロッドの径は、外径が50 mm未満の管を支持する場合は10 mm以上、外径が50 mm以上の管を支持する場合は、12 mm以上でなければならない。

SSB-3352 ばねを用いる支持構造物

ばねを用いる支持構造物は、ばねが破損した場合に支持構造物の支持能力が完全に失われる構造であってはならない。

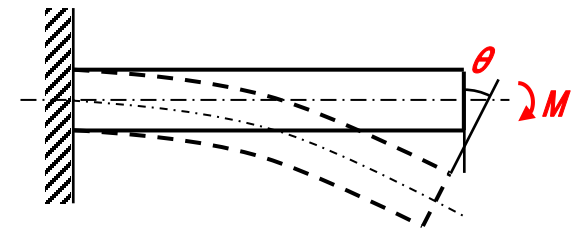
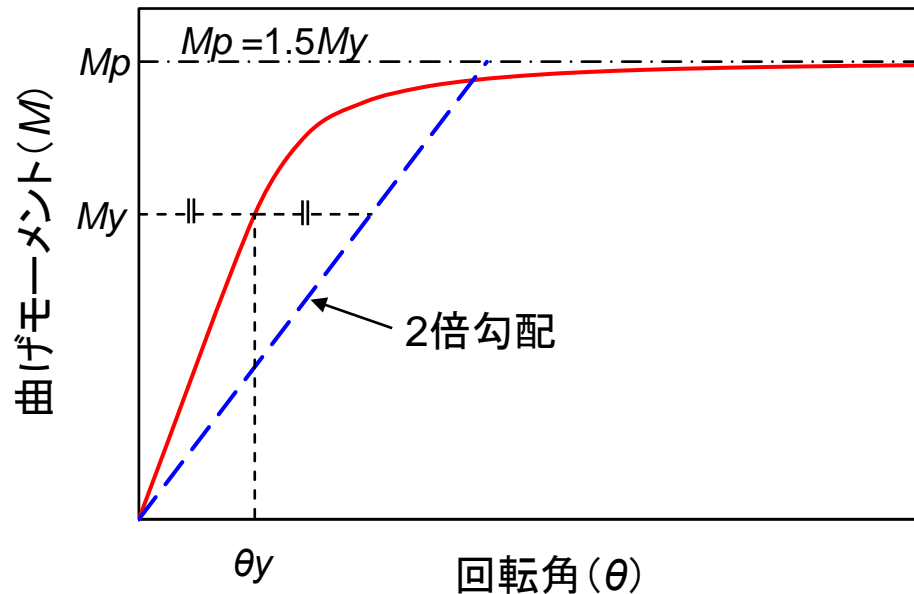
(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

- 以下に簡単な梁に対する曲げの例を示します。
- 弾完全塑性体とした場合、表面が降伏点に達するときのモーメント (M_y) に対して、全断面が降伏し、塑性崩壊するときのモーメント (M_p) は、矩形梁の場合は M_y の 1.5 倍になります。
- この係数は形状係数と呼ばれ、設計・建設規格の一次膜+曲げ応力の許容値に採用しているもので、極限解析の場合は、構造を限定せず、計算結果として自動的に考慮されるものです。



(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

- この梁の崩壊を回転角で整理すると、塑性崩壊モーメント M_p は許容応力ベースの規定では $1.5M_y$ まで許容されることに対して、2倍勾配法では保守側に評価されます。
- 現行の許容値体系の中で直接的に弾完全塑性体を用いた弾塑性解析で評価する手法なので、構造を限定せず、一般的な方法として採用可能と考えます。



(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

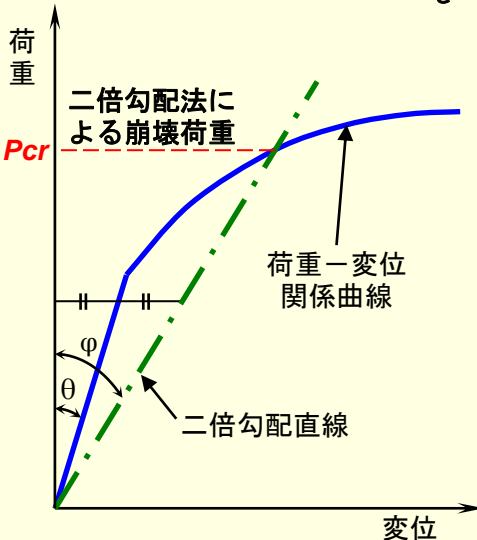
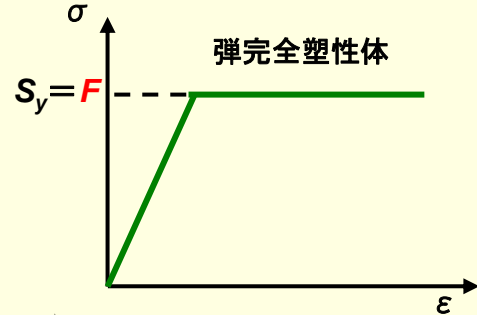
(b) 許容応力の考え方は、ASME Sec. IIIと鋼構造設計基準を取り入れたとありますが、何をどのように取り入れたのか、また、その技術的妥当性を示して下さい。例えば、鋼構造設計基準では、材料として建築構造用圧延鋼材や一般構造用圧延鋼材等が対象でステンレス鋼は対象となっていません。

[回答]

- 設計・建設規格(クラス 1 支持構造物)では、ASME Sec.IIIの供用状態A, B, C, Dの区分に、鋼構造設計規準の許容応力設計の長期(常時)及び短期(地震、暴風、積雪)の区分の考え方を取り入れました。一次応力については、供用状態A及びBを長期、供用状態C及びDを短期とし、鋼構造設計基準の考え方に合わせて短期の一次応力に対する許容応力は長期の1.5倍としました。
- ここで基準値Fは、終局体力を構造物の安全性の基礎とする場合、鋼材の降伏点のみに基づいて許容応力を定めたのでは高降伏点のものほど安全率が小さくなることから、鋼材の降伏点 S_y と引張強さの70%($0.7S_u$)のうち小さい方の値としました。
- ただし、供用状態Dは、ASME Sec.IIIの考え方にに基づき、事故時の衝撃荷重が主でひずみ速度が大であること及び通常材料の実降伏点は設計値に対し余裕があることを考慮し、許容応力における S_y を $1.2S_y$ に読み替えることとしました。
- 供用状態の考え方から、これらの許容応力の取り扱いは妥当と考えています。
- 極限解析の規定での降伏点、許容荷重の係数については、許容応力設計のF値、許容応力に対する係数と同じ値としています。
- 以下に極限解析と許容応力設計の手法及び基準値・係数の比較を示します。

(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

極限解析による評価



応力-ひずみ関係の設定
・降伏点の設定

荷重-変位関係の算出
・塑性解析

崩壊荷重(下限)の算出
・2倍勾配法

許容限界荷重
・崩壊荷重 × 供用状態毎の係数

許容限界荷重 ≥ 作用荷重

許容応力法による評価

各供用状態、応力状態に対する許容応力の算出

作用荷重各部の応力
・解析 手計算など

許容応力 ≥ 発生応力

同じF値*

同じ係数

同じ荷重

(*) F値の定義は次葉

(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

(注) F値の定義：SSB-3121. 1 供用状態A及びBでの許容応力

F : 次のa.又はb.に定める値

a. 溶接部であって溶接規格N-1100の規定に準じてそれぞれ放射線透過試験、超音波探傷試験、磁粉探傷試験又は浸透探傷試験を行った場合に合格する部分、又は溶接部以外の部分については、次の値

(a) 使用温度が40°Cを超えるオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については、次のうちいずれか小さい方の値

- $1.35 S_y$
- $0.7 S_u$
- $S_y(RT)$

S_y : 材料規格 Part 3 第1章 表6に規定する材料の設計降伏点 (MPa)

S_u : 材料規格 Part 3 第1章 表7に規定する材料の設計引張強さ (MPa)

$S_y(RT)$: 材料規格 Part 3 第1章 表6に規定する材料の40°Cにおける設計降伏点 (MPa)

(b) 上記の(a)以外のものについては、次のうち小さい方の値

- S_y
- $0.7 S_u$

S_y, S_u : (a)に定めるところによる。

b. 溶接部であってa.に掲げる部分以外の部分については、a.に定める値の0.45倍の値

(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

- 支持構造物の許容応力と極限解析による許容値体系の比較を以下に示します。
- 許容応力設計の基準値と極限解析での降伏点を整合させています。ここで、供用状態DにおけるF値はその S_y を $1.2S_y$ に読み替えるので、極限解析の降伏点と同等になります。
- ステンレス鋼については、炭素鋼の S_m は $(2/3)S_y$ 、ステンレス鋼は $0.9S_y$ としていることに準じて、炭素鋼のF値が S_y なので、ステンレス鋼は $S_y / (2/3) \times 0.9 = 1.35S_y$ としました。(次葉参照)

	許容応力		極限解析による評価	
	基準値	許容応力の係数	弾完全塑性体の降伏点	許容限界荷重の係数
供用状態A,B	F	$1/1.5=2/3$	F	$2/3$
供用状態C	F	1.0	F	1.0
供用状態D	F*	1.0	$\text{Min}(1.2F, 0.7S_u)^{**}$	1.0

*: Fを設定する S_y は $1.2S_y$ に読み替える (40°Cを超えるオーステナイトステンレス鋼及び高ニッケル鋼の $1.35S_y$ は1.2倍しない)

** : Fを設定する40 °Cを超えるオーステナイトステンレス鋼及び高ニッケル鋼の $1.35S_y$ は1.2倍しない

(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

(解説 SSB-3121.1) 供用状態 A 及び B での許容応力

SSB-3121.1(1)は、供用状態 A 及び B における一次引張応力に対する許容応力について定めたものである。

SSB-3121.1(1)において、オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金の場合に40°Cを超える運転温度で F 値をかえる理由は、次のとおりである。

S_y (材料規格 Part 3 第1章 表6に定める設計降伏点) 又は $0.7S_u$ (材料規格 Part 3 第1章 表7に定める設計引張強さ) のどちらか小さい方を採用するという規定は、鋼構造設計規準に基づく考え方であり、その鋼構造設計規準は、炭素鋼のみを想定して作成されている。したがって、オーステナイト系ステンレス鋼等については、ひずみ硬化の大きい材料の特性を考慮して、これらの材料が常温以外で用いられる場合は、 F 値の規定をかえたものである。

すなわち、ASME B&PV Code Section IIIでは、

$$S_m = \frac{2}{3} S_y \quad (\text{解説 SSB-4})$$

(炭素鋼に対して) 、

$$S_m = 0.9 S_y \quad (\text{解説 SSB-5})$$

(オーステナイト系ステンレス鋼等の常温以外に対して)

としているのに準じて

$$F = S_y \quad (\text{解説 SSB-6})$$

(炭素鋼に対して) 、

$$F = 1.35 S_y \quad (\text{解説 SSB-7})$$

(オーステナイト系ステンレス鋼等の40°Cを超えるものに対して)

とした。

(2) クラス1支持構造物の極限解析による評価

(c) 制限値の考え方をクラス1容器及び炉心支持構造と比較して、その技術的妥当性を示してください(表1参照)。

表1 極限解析に基づく一次応力評価の比較

クラス1容器	炉心支持構造物	クラス1支持構造物
<p>PVB-3160 極限解析に基づく一次応力評価 各供用状態における荷重が次の(1)から(4)の規定を満足する場合は、PVB-3111 の規定を満足しなくてもよい。</p> <p>(1) 設計条件における荷重:Pc $Pc \leq 2/3 P_{cr}$ (PVB-64) Pcr: 材料の降伏点を最高使用温度における1.5 Smの弾完全塑性体として極限解析によって求めた崩壊荷重の下限(荷重とそれによる変位量の関係直線又は関係曲線と荷重軸に対し弾性範囲の関係直線の勾配の2 倍の勾配を有する直線が交わる点に対応する荷重とする。以下PVB-3160において同じ)</p> <p>(2) 供用状態Cにおける荷重:Pc $Pc \leq 0.8 P_{cr}$ (PVB-65) Pcr: 材料の降伏点を1.5 Smの弾完全塑性体として極限解析によって求めた崩壊荷重の下限</p> <p>(3) 供用状態Dにおける荷重:Pc $Pc \leq 0.9 P_{cr}$ (PVB-66) Pcr: 材料の降伏点をMIN [2.3 Sm, 0.7 Su]の弾完全塑性体として極限解析によって求めた崩壊荷重の下限</p> <p>(4) 試験状態における荷重:Pc $Pc \leq 0.8 P_{cr}$ (PVB-67) Pcr: 材料の降伏点を試験温度におけるSy の弾完全塑性体として極限解析によって求めた崩壊荷重の下限</p>	<p>CSS-3160 極限解析による評価 各供用状態における荷重が次の(1)から(3)の規定を満足する場合は、CSS-3111 の規定を満足しなくてもよい。</p> <p>(1) 設計条件における荷重:Pc $Pc \leq 2/3 P_{cr}$ (CSS-38) Pcr: 材料の降伏点を最高使用温度における1.5 Smの弾完全塑性体として極限解析により求めた崩壊荷重の下限(荷重とそれによる変位量の関係直線又は関係曲線と荷重軸に対し弾性範囲の関係直線の勾配の2 倍の勾配を有する直線が交わる点に対応する荷重とする。以下CSS-3160において同じ)</p> <p>(2) 供用状態Cにおける荷重:Pc $Pc \leq P_{cr}$ (CSS-39) Pcr: 材料の降伏点を1.5 Smの弾完全塑性体として極限解析により求めた崩壊荷重の下限</p> <p>(3) 供用状態Dにおける荷重:Pc $Pc \leq 0.9 P_{cr}$ (CSS-40) Pcr: 材料の降伏点をMIN [2.3 Sm, 0.7 Su]の弾完全塑性体として極限解析により求めた崩壊荷重の下限</p>	<p>SSB-3140 極限解析による評価 各供用状態において次の(1)から(3)の規定を満足する場合は、SSB-3121 の規定を満足しなくてもよい。ただし、座屈が懸念される場合には、別途、座屈の評価を実施すること。</p> <p>(1) 供用状態A及びBにおける荷重:Pc $Pc \leq 2/3 P_{cr}$ (SSB-1.33) Pcr: 材料の降伏点を最高使用温度におけるSSB-3121.1(1)に示すF 値の弾完全塑性体として極限解析により求めた崩壊荷重の下限(荷重とそれによる変位量の関係直線又は関係曲線と荷重軸に対し弾性範囲の関係直線の勾配の2 倍の勾配を有する直線が交わる点に対応する荷重とする。以下本項において同じ)</p> <p>(2) 供用状態Cにおける荷重:Pc $Pc \leq P_{cr}$ (SSB-1.34) Pcr: 材料の降伏点をF 値の弾完全塑性体として極限解析により求めた崩壊荷重の下限</p> <p>(3) 供用状態Dにおける荷重:Pc $Pc \leq P_{cr}$ (SSB-1.35) Pcr: 材料の降伏点をMIN [1.2F, 0.7Su]の弾完全塑性体として極限解析により求めた崩壊荷重の下限。ただし、1.2F の計算で、オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金であって使用温度が40°Cを超える材料の規定値のうち、1.35Sy(使用温度)に対しては1.2 を乗じないこと。</p>

(2) クラス1支持構造物の極限解析による評価

- 1) クラス1容器、炉心支持構造物の供用状態A,B,Cの制限値 P_{cr} は、材料の降伏点を最高使用温度における $1.5S_m$ の弾完全塑性体として極限解析により求めた崩壊荷重の下限とされていますが、クラス1支持構造物の制限値 P_{cr} は、材料の降伏点を最高使用温度におけるSSB-3121.1(1)に示すF値の弾完全塑性体として極限解析により求めた崩壊荷重の下限とされています。クラス1支持構造物の制限値 P_{cr} をどのように定めたのか、及びその技術的妥当性を示してください。

[回答]

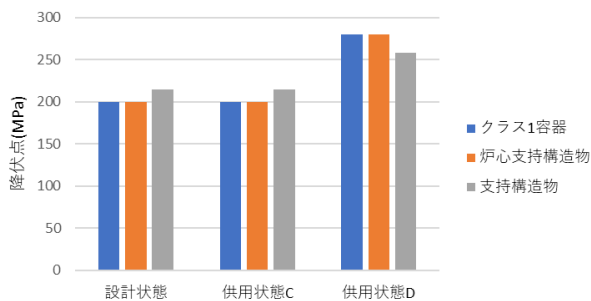
- 支持構造物の許容応力設計では、F値を降伏点相当の値として採用しています。クラス1容器及び炉心支持構造物は、 S_m は $(2/3)S_y$ と $(1/3)S_u$ の小さい方なので、 $1.5S_m$ が降伏点相当になることから、降伏点相当して $1.5S_m$ を採用しています。したがって、考え方はクラス1容器、炉心支持構造物と同じです。
- 代表的な材料について各機器での降伏点の比較を示します。上記の通り、許容応力の考え方は同等としており、整理した結果も各機器で概ね同等となっています（供用状態Dでは支持構造物の方が低め）。

(2) クラス1支持構造物の極限解析による評価

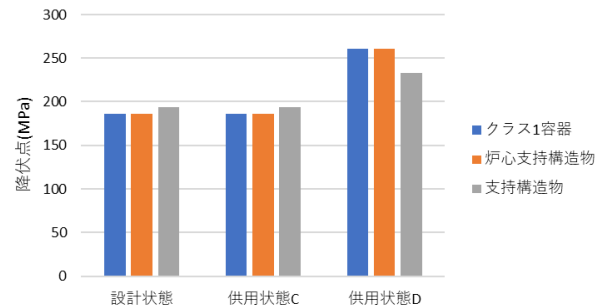
- 極限解析使用する降伏点の比較

炭素鋼			単位：MPa		
			SM400C Sy=215MPa (常温)	SM400C Sy=215MPa (100°C)	SM400C Sy=215MPa (200°C)
ベース	Sy		215	194	170
	Su		400	373	373
		降伏点			
設計状態	クラス1容器	$1.5S_m = \text{Min}(S_y, 1/2S_u)$	200	186.5	170
	炉心支持構造物	$1.5S_m = \text{Min}(S_y, 1/2S_u)$	200	186.5	170
	支持構造物	$F = \text{Min}(S_y, 0.7S_u)$	215	194	170
供用状態C	クラス1容器	$1.5S_m = \text{Min}(S_y, 1/2S_u)$	200	186.5	170
	炉心支持構造物	$1.5S_m = \text{Min}(S_y, 1/2S_u)$	200	186.5	170
	支持構造物	$F = \text{Min}(S_y, 0.7S_u)$	215	194	170
供用状態D	クラス1容器	$\text{Min}(2.3S_m, 0.7S_u) = \text{Min}(1.53S_y, 0.7S_u)$	280	261.1	260.6
	炉心支持構造物	$\text{Min}(2.3S_m, 0.7S_u) = \text{Min}(1.53S_y, 0.7S_u)$	280	261.1	260.6
	支持構造物	$\text{Min}(1.2F, 0.7S_u) = \text{Min}(1.2S_y, 0.7S_u) = F^*$	258	232.8	204

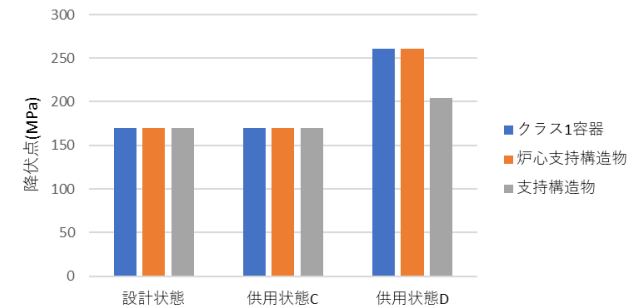
SM400C(Sy=215MPa) at 常温



SM400C(Sy=215MPa) at 100°C



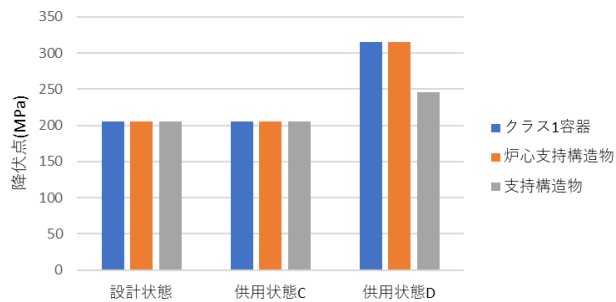
SM400C(Sy=215MPa) at 200°C



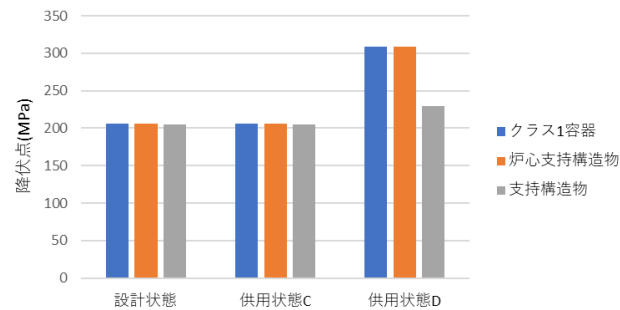
(2) クラス1支持構造物の極限解析による評価

ステンレス鋼			単位：MPa		
			SUS304 (G4304) (常温)	SUS304 (G4304) (100°C)	SUS304 (G4304) (200°C)
ベース	Sm		137	137	129
	Sy(RT)		205	205	205
	Sy		205	170	144
	Su		527	441	402
			降伏点		
設計状態	クラス1容器	1.5Sm	205.5	205.5	193.5
	炉心支持構造物	1.5Sm	205.5	205.5	193.5
	支持構造物	$F = \text{Min}(1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT))$	205	205	194.4
供用状態C	クラス1容器	1.5Sm	205.5	205.5	193.5
	炉心支持構造物	1.5Sm	205.5	205.5	193.5
	支持構造物	$F = \text{Min}(1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT))$	205	205	194.4
供用状態D	クラス1容器	$\text{Min}(2.3S_m, 0.7S_u)$	315.1	308.7	281.4
	炉心支持構造物	$\text{Min}(2.3S_m, 0.7S_u)$	315.1	308.7	281.4
	支持構造物	$F^* = \text{Min}(1.2F, 0.7S_u) = \text{Min}(1.35S_y, 0.7S_u, 1.2S_y(RT)) = F^*$	246	229.5	194.4

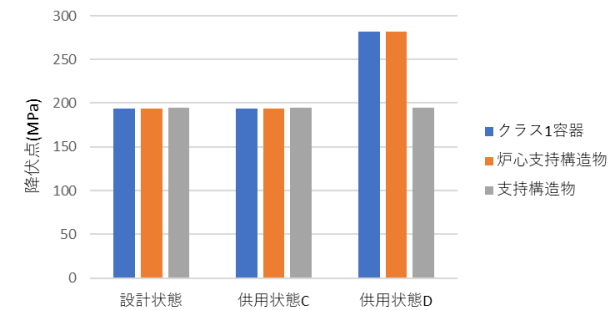
SUS304 at 常温



SUS304 at 100°C



SUS304 at 200°C



(2) クラス1支持構造物の極限解析による評価

2) クラス1容器、炉心支持構造物の供用状態Dの制限値 P_{cr} は、材料の降伏点を $\text{MIN}[2.3S_m, 0.7S_u]$ の弾完全塑性体として極限解析によって求めた崩壊荷重の下限とされていますが、クラス1支持構造物の制限値 P_{cr} は、材料の降伏点を $\text{MIN}[1.2F, 0.7S_u]$ の弾完全塑性体として極限解析により求めた崩壊荷重の下限とされています。クラス1支持構造物の制限値 P_{cr} をどのように定めたのか、及びその技術的妥当性を示してください。

[回答]

- 許容応力設計法での供用状態Dの F 値を、極限解析での供用状態Dの降伏点としています。許容応力設計法と極限解析で表記は異なりますが、(2)(b)及び(2)(c)1)の回答に示した通り、両者で同等の評価結果になります。
- $1.2F$ 自体は $2.3S_m$ よりもかなり小さく、容器の場合に比較して大きな保守性を持つ値になっています。

(2) クラス1支持構造物の極限解析による評価

3) クラス1容器、炉心支持構造物の供用状態Dにおける荷重 P_c は、 $0.9P_{cr}$ 以下とされていますが、クラス1支持構造物の荷重 P_c は P_{cr} 以下とされており、クラス1容器、炉心支持構造物より高くなっています。供用状態Dにおける荷重 P_c をどのようにして決めたのか、考え方を説明して下さい。

[回答]

- クラス1支持構造物では、許容荷重の算出で P_{cr} に乗じる係数は、許容応力設計で許容応力に乗じる係数と同じ(つまり1.0)にしました。
- クラス1容器、炉心支持構造物では、供用状態Dでの降伏点が支持構造物より大きく設定されています。最終的な許容荷重に比例する(降伏点×係数)の値を代表的な材料について次葉に示します。
- 機器毎で規定に違いがありますが、支持構造物に対する値は同等または小さめになっています。

(2) クラス1支持構造物の極限解析による評価

支持構造物 供用状態D 許容荷重の係数・降伏点の比較

	係数	SM400C 常温		SM400C at 100°C		SM400C at 200°C	
		降伏点*	係数×降伏点	降伏点*	係数×降伏点	降伏点*	係数×降伏点
クラス1容器	0.9	280.0	252.0	261.1	234.9	260.6	234.5
炉心支持構造物	0.9	280.0	252.0	261.1	234.9	260.6	234.5
支持構造物	1.0	258.0	258.0	232.8	232.8	204.0	204.0

	係数	SUS304 常温		SUS304 at 100°C		SUS304 at 200°C	
		降伏点*	係数×降伏点	降伏点*	係数×降伏点	降伏点*	係数×降伏点
クラス1容器	0.9	315.1	283.5	308.7	277.8	281.4	253.2
炉心支持構造物	0.9	315.1	283.5	308.7	277.8	281.4	253.2
支持構造物	1.0	246.0	246.0	229.5	229.5	194.4	194.4

*: 弾完全塑性体の降伏点

(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

(d) 2 倍勾配法で算出した崩壊荷重の下限値は、ほぼ降伏荷重相当であるため、極限解析を適用する場合と適用しない場合でこの方法(耐震解析の方法)に違いはないとのことですが、これはいずれの場合でも「極限解析を用いた場合でも弾性限度に収まる」という説明と理解してよいでしょうか。よい場合、弾性限度に収まるという根拠を、図等を用いて説明してください。

[回答]

- 荷重の算定と許容値の設定が独立しており、それぞれを保守的に設定しています。次葉以降に具体的に説明します。

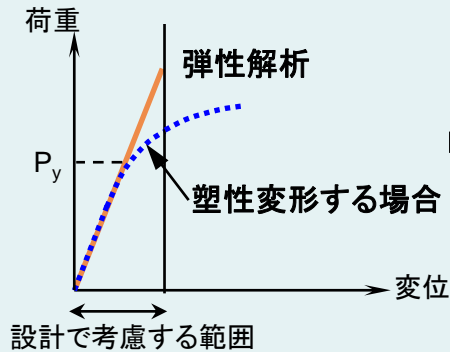
(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

- 耐震評価の概要を以下に示します。

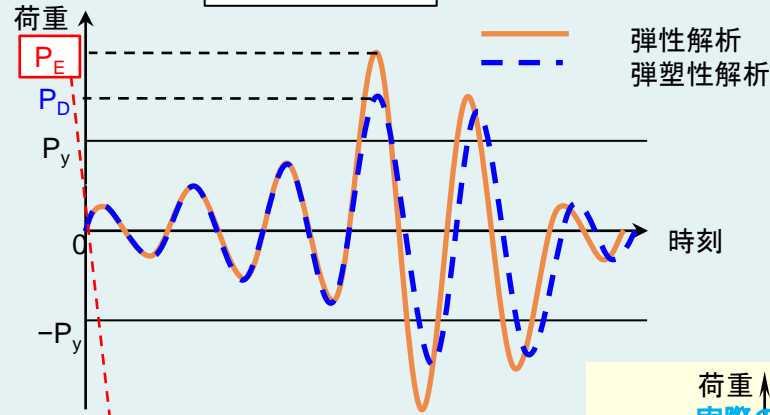
地震応答解析(弾性)による発生荷重評価

許容応力法・極限解析で共通

支持構造物の荷重-変位曲線



地震応答解析



P_E : 弾性解析による最大荷重
 P_D : 弾塑性解析による最大荷重
 P_y : 弾性限界荷重

極限解析(弾完全塑性体)による許容荷重

実際の応力-ひずみ関係による崩壊荷重

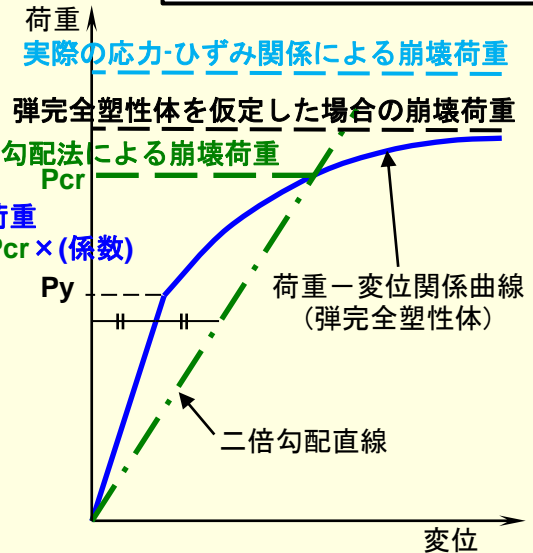
弾完全塑性体を仮定した場合の崩壊荷重

二倍勾配法による崩壊荷重

許容荷重 $P_u = P_{cr} \times (\text{係数})$

荷重-変位関係曲線 (弾完全塑性体)

二倍勾配直線



設計建設規格による強度評価

許容応力設計

弾性応答 P_E に対して各部の応力 σ が許容応力 f 以下

$$\sigma \leq f$$

または

極限解析

弾性応答 P_E が崩壊荷重 P_{cr} に係数をかけた許容荷重 P_u 以下

$$P_E \leq P_u$$

(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

- 多数の機器や部材を含んだシステムを対象とする耐震解析では弾性特性を仮定し、一部の応力が降伏応力を越えたとしても解析の中で塑性変形を考慮することはしません。
- 一方、極限解析は個別の部材に対して部材が耐えられる実荷重を加工硬化を無視し、保守的に評価する手法です。
- 現行の許容応力の範囲内では、実際のシステムの一部の部材で塑性変形が生じても、若干変形は大きくなるものの、応力及び荷重は弾性と仮定した場合より下がる方向であり、実際に部材が受ける荷重や応力は耐震解析で求めたものよりも小さくなると考えられます。
- 以上より、弾性解析による耐震解析で得られた応力あるいは荷重を用いて塑性崩壊に対する健全性を評価することは保守的であると考えられます。
- 極限解析により得られる許容荷重は、現行の許容応力が発生した場合に生じる荷重と等価であり、上記の弾性解析に基づく耐震解析での評価体系に影響を与えるものではありません。

(3) クラス 1 支持構造物に対する曲げ座屈評価式の見直し

(a) 曲げ座屈評価における許容応力 F (SSB-3121.1) は、 40°C を超えるオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金以外について、鋼構造設計規準の許容応力を取り込んでいます。その考え方と技術的根拠について説明してください。特に、座屈式の適用範囲(構造・形状制限、ステンレス鋼等への適用拡大)、 $1.35S_y$ (40 度以上)、 $0.7S_u$ 等とした妥当性について説明してください。

[回答]

- 曲げに対する許容応力の見直しに対する質問として回答します。
- 今回の曲げ応力に対する許容応力の規定の改定は、鋼構造設計規準(現鋼構造許容応力度設計規準)に従い、本来の横座屈耐力式を基本としたものです。材質にかかわらず2軸対称断面に対して一般(中空矩形断面を除く)に適用できます。

(3) クラス 1 支持構造物に対する曲げ座屈評価式の見直し

- 許容曲げ応力 f_b について以下に説明します。
- 座屈モーメントが高い範囲 ($\lambda_b \leq p\lambda_b$) では、 f_b は部材形状が決まれば F 値に支配されます。

$$f_b = F/\nu, \nu = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda_b}{e\lambda_b} \right)^2, e\lambda_b (\text{弾性限界細長比}) = \frac{1}{\sqrt{0.6}}$$

$$\lambda_b (\text{曲げ材の細長比}) = \sqrt{(\text{降伏モーメント } M_y = F \cdot Z) / (\text{弾性横座屈モーメント } M_e)}$$

$$M_e = C \sqrt{\frac{\pi^4 E I_y \cdot E I_w}{\ell_b^4} + \frac{\pi^2 E I_y \cdot G J}{\ell_b^2}}, C = 1.75 + 1.05 \left(\frac{M_2}{M_1} \right) + 0.3 \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^2$$

$$p\lambda_b (\text{塑性限界細長比}) = 0.6 + 0.3(M_2/M_1)$$

[M_1, M_2 : 座屈区間端部での大きい方、小さい方の強軸まわりの曲げモーメント]

- 座屈モーメントが低い範囲 ($e\lambda_b < \lambda_b$) では、 f_b は次式となり、展開すると F 値には無関係で、縦弾性係数 E と部材形状で決定する式になります。

$$f_b = \frac{1}{\lambda_b^2} \frac{F}{2.17} = \frac{1}{F \cdot Z / M_e} \frac{F}{2.17} = \frac{M_e}{2.17 Z}$$

- 非線形座屈が起こる中間長さ ($p\lambda_b < \lambda_b \leq e\lambda_b$) では、両側を滑らかに結ぶ式としています。

(3) クラス 1 支持構造物に対する曲げ座屈評価式の見直し

- ・ ステンレス鋼を座屈モーメントが高い範囲に適用する場合は、F値で支配される範囲であり、(2)(b)に記載のステンレス鋼のF値の設定の考え方及び塑性変形特性によって支配されることから、F値を適用することは妥当と考えます。
- ・ ステンレス鋼を座屈モーメントが低い範囲に適用する場合は、材質の違いによる要素は縦弾性係数だけであり、ステンレス鋼の縦弾性係数を使用することで妥当であると考えます。
- ・ 中間の非弾性座屈の起こる範囲では、両側を滑らかに結んでいるため、同様に妥当と考えます。
- ・ 鋼構造設計規準(2005) 図5.1.5、図5.1.6に示されている通り、安全率(ν)を乗じる前でも、材質の影響が大きいと考えられる実験値を保守側に評価しており、材質の影響が小さいと考えられる解析値は安全率(ν)を乗じることで保守側に評価されていることから、鋼構造設計規準の評価式をステンレス鋼に適用することは妥当と考えます。

(3) クラス 1 支持構造物に対する曲げ座屈評価式の見直し

(b) 鋼構造設計規準1973年版では、疲労の繰返し数と応力比から定められる疲れ係数 γ を応力幅振幅の上下限での絶対値が大きいほうの値に乗じた値が長期許容応力以下とするものとしていました。実際の構造物において許容応力度以下の応力で疲労損傷が生じた事例や、変動応力に対する疲労の検討ができないことなどの問題点が存在していたことから、鋼構造設計規準2005年版では疲労設計が規定されていると理解しています。設計・建設規格のクラス 1 支持構造物の規定に疲労に対する規定を盛り込んでいない理由を説明して下さい。

[回答]

- 鋼構造設計規準の疲労に規定は、1973年版、2005年版とも規準に記載の通り、繰返し回数が 1×10^4 回を超える高サイクル疲労に対するものであり、クレーンの支持架構や機械の支持部などを対象としています。
- 実機では共振しないように機器は設置されており、振動による影響は軽微と考えられます。
- 支持構造物については、疲労に影響する熱伸び差などで生じる繰返し回数は限定的であることから、高サイクル疲労に対する規定は設けておりません。

(3) クラス 1 支持構造物に対する曲げ座屈評価式の見直し

- 一次応力と機器の熱膨張により生じる二次応力の合計の変動に対しては、SSB-3122に従って設計することを規定しており、基本的な考え方として、応力の変動に対して応力の変動範囲を弾性範囲($2S_y$)と制限しています。

SSB-3122 一次+二次応力に対する許容応力

SSB-3122.1 供用状態 A 及び B での許容応力

供用状態 A 及び B において生じる一次応力と二次応力（支持される機器の熱膨張により生じる応力に限る）を加えて求めた応力は、次の値を超えないこと。

(1) 引張応力及び圧縮応力

引張応力及び圧縮応力のサイクルにおける最大値と最小値との差（引張応力の符号は正とし、圧縮応力の符号は負として計算する）については、SSB-3121.1(1)に定める f_t の3倍の値

(2) せん断応力

せん断応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については、SSB-3121.1(2)に定める f_s の3倍の値（すみ肉溶接部については、SSB-3121.1(2)に定める f_s の1.5倍の値）

(3) 曲げ応力

曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については、SSB-3121.1(4)に定める f_b の3倍の値。ただし、SSB-3121.1(4) a.(b)及び(c)の場合においては、 f_b の1.5倍の値

(4) 支圧応力

支圧応力については、SSB-3121.1(5)に定める f_p の1.5倍の値

(5) 座屈応力

せん断座屈応力についてはSSB-3121.1(2)に定める f_s の1.5倍の値、圧縮座屈応力についてはSSB-3121.1(3)に定める f_c の1.5倍の値

(4) クラス2, 3 容器の上位クラス規定の適用

- (a) クラス2, 3 容器に上位クラスの規定を適用した場合の考え方について、製作及び検査も上位クラスの規定に従うのか、従う場合、上位クラスの規定を下位のクラスに適用するメリットは何か、従わない場合、その理由を説明して下さい。

[回答]

- クラス2, 3 容器に上位クラスの規定を適用した場合の考え方について、製作及び検査も上位クラスの規定に従うこととなります。
- 使用者に対して、当該機器の重要度を踏まえて上位のクラスの設計を採用することができる、Design by Ruleでは設計が困難な複雑な形状に対する設計が可能になる等の選択肢を増やすことができます。

(4) クラス2, 3 容器の上位クラス規定の適用

(b)「PVC-1220クラス2 容器の材料及び構造の特例」は、材料及び構造設計と溶接部の材料、製造及び検査はクラス1容器によることができ、その場合の溶接部の設計は、クラス2容器の規定に従うという説明がありました。また、この規定は告示501号を踏襲している旨の説明がありました。電気工作物の溶接の技術基準の解釈(以下「溶技解釈」という。)の第114条には、クラス1容器の材料及び構造の規格に適合するクラス2容器の溶接については、クラス1容器の溶接の規定によらなければならないと規定されています。

1) 告示501号のみを取り込んだ理由を説明してください。

[回答]

- 溶接に関するクラスも設計側と同じになると考えています。

(4) クラス 2, 3 容器の上位クラス規定の適用

2) 溶接規格に溶技解釈第114条に対応する規定がある場合には、その規定とPVC-1220の規定との関係について説明してください。

[回答]

- 溶接規格におけるクラスも設計・建設規格側で指定するクラスに従うことになるものと考えていますが、今後、明確になるように規格の改定を検討します。

(4) クラス 2, 3 容器の上位クラス規定の適用

3) ASME Sec. IIIではNCD-3200の規定を用いた場合、溶接設計の規定はどのように規定されているか説明して下さい。

[回答]

- ASME Sec. IIIでは、Class 2容器の設計としてNCD-3200も含め、3種の設計手法が規定されており、これらに対する溶接設計の関係は以下の通り。
 - ① NCD-3300による設計 (Class2容器としてDesign by Rule (Formula)による設計) →NCD-3350による溶接設計であり、継手はNCD-4240 (設計・建設規格のクラス 2 容器の継手形状相当)
 - ② NCD-3200による設計 (Class2容器としてDesign by Analysisによる設計) →NCD-3250による溶接設計であり、継手はNCD-4260 (基本的に突合せ完全溶込み溶接であり、クラス 1 容器相当)
 - ③ NCA-2134による設計 (Class1容器としてDesign by Analysisによる設計) →Class 1容器の溶接・継手設計
- これらの比較を次葉に示します。

(4) クラス 2, 3 容器の上位クラス規定の適用

- NCD-3300はSection VIII Div.1を、NCD-3200はSection VIII Div.2 Alternative Rules を取り込んだものであり、これらは検査等の要求も、例えばクラス 2 を対象とした場合、以下のように異なります。

	① NCD-3300 による設計	② NCD-3200 による設計	③ NCA-2134 による設計(Class 1)
許容応力体系	S		S_m
継手区分Aの 非破壊試験要求	RT (厚さ4.8mm以下は MT)	RT	RT 及び MT (or PT)
溶接後熱処理を 要しないものの条件	炭素鋼: $t \leq 38\text{mm}$ (余熱 100°C 以上)		炭素鋼: $t \leq 19\text{mm}$ (余熱 100°C 以上, $C \leq 0.25$)

JSME PVC-1220

JSME PVC-1210

- 設計・建設規格PVC-1220はASMEの②の規定を取り込んだものですが、設計・建設規格ではASME NCD-3200が要求する検査等の個別規定は取り込んでおらず、検査等はクラス 1 としています。このため溶接設計も実質的にはクラス 1 となります。
- 設計・建設規格では2014年追補にて③の規定を取り込みPVC-1210を規定しましたが、上記理由からPVC-1210とPVC-1220は実質的には同じ要求となっています。