添付資料-3 評価限界温度における FEM 評価結果について

2021 年 11 月 8 日 石油連盟 石油化学工業協会

第六回分科会に先駆けて実施された事前打ち合わせに基づき、WES2820(以下 API 法)の合格条件で最も厳しい評価限界温度(343℃)で且つ減肉寸法条件にて、公に認められている ASME Sec VIII Div.2 規格に基づき FEM 検証評価を実施しましたので、その結果を報告します。

1. 結論

API 法は規定上限 343℃にて使用しても強度上の問題は生じない。

2. 検討対象とした減肉条件と評価基準/手法

pM 法側から提示された過去の資料 51 に示されている減肉形状(当時は降伏強さでの弾完全塑性評価でしか無かったもの)で評価を実施した。

- ✓ 減肉形状; Fig. 2 に示す通り pM 法側から温度 200°Cにおいて「p-M 法の定義の全断面降伏をするので問題である」と p-M 法論者側から指摘された減肉形状(資料 51 の減肉形状)
- ✓ 評価温度;343°C(API 法の適用上限温度)
- ✓ 評価材料;SB410(ガス工作物技術基準の解釈例;SB410=SA-515 Gr. 60 相当)
- ✓ 評価基準; ASME Sec VIII Div. 2 Part5 弾塑性評価法
- ✓ 評価裕度;4.1.1 に示す通り約二倍の裕度を持った保守側の FEM 解析規格

3. 評価結果概要

ASME Sec VIII Div.2 Part5 Elastic-Plastic Analysis (弾塑性評価)に従い次の各項目の評価を実施、結果問題なし。

Table 1 FEM 評価結果概要

項目	評価内容	結果	
5.2項	Protection Against Plastic Collapse	応力の cut off(指定された塑性崩壊	
	塑性崩壊の有無確認	限界)に達することなく収束。合格。	
5.3項	PROTECTION AGAINST LOCAL FAILURE	最大歪が許容値以内。合格	
	局部破壊の有無確認		
5.4項	PROTECTION AGAINST COLLAPSE FROM	今回の議論の対象外。実施せず。	
	BUCKLING		
	荷重に対する座屈評価		
5.5項	PROTECTION AGAINST FAILURE FROM	5.3項に合格しており且つ、API法の	
	CYCLIC LOADING	規定上限繰り返し数は 150 回であり、	
	繰り返し荷重に対する評価	評価必要スクリーニングクライテリ	
		ア 350 回以下である。合格。	

4. 評価詳細

4.1. 真応力-真ひずみ曲線

ASME Sec VIII Div.2 Annex 3D 規定手順に従い真応力-真歪曲線を作成した。

Table 2 設定パラメーター

項目	設定パラメーター	備考
材料	SA-515 Gr. 60	ガス工作物技術基準の解釈例では SB410 は SA-515
	(SB410 相当)	Gr. 60 相当。
温度	343°C	API 法の適用上限温度 343℃を採用
		(資料 51 は 200℃に対し厳しめとした)
設定内圧	3MPa	API法の合格値は2MPa。従ってDiv.2 評価Table5.4
	(2MPaの1.5倍)	規定に従い作用荷重は1.5倍として評価。
引張強さ; σuts	414MPa	ASME Sec II DのSA-515 Gr. 60 材データ
降伏強さ;σy	163MPa	(SB410 相当。引張強さの高温域データが JIS では
縦弾性係数;E	180GPa	そろわないため)
ポアソン比	0. 3	

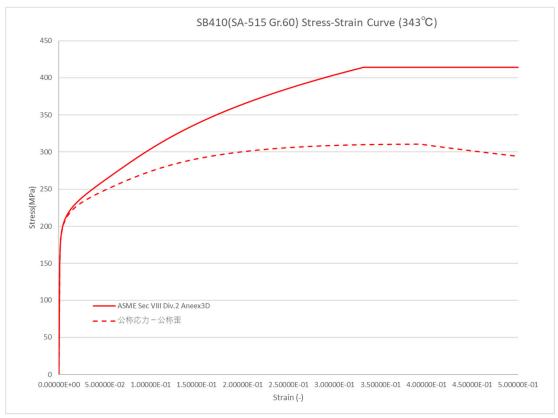


Fig. 1 真応力-真歪曲線 (ASME Sec VIII Div. 2 Annex 3D 規定準拠し作成)

4.1.1. 全体的な評価裕度について

真応力真歪曲線は Annex 3D 規定に従い公称応力ベースの引張強さ (安全側)で cut off を設定している。このため公称応力-公称歪曲線とすると Fig. 1 の赤点線のようになり、評価曲線としては引張強さ σ uts が 310MPa となる。一方、実際の真応力ベースの引張強さは 414MPa であり、材料の強度を 75% (=310Mpa/414MPa) 程度に低下させていることとなる。

評価時の圧力荷重は 1.5 倍にしていることから、評価としては約二倍 (=1.5/0.75) の安全 裕度を確保した解析になる。

4.2. FEM モデル

FEM モデルは Fig. 2 の通り。設定内圧は Table 2 の通り圧力荷重を 1.5 倍とした 3MPa。

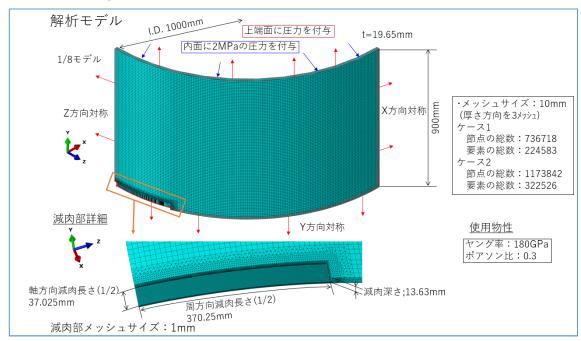


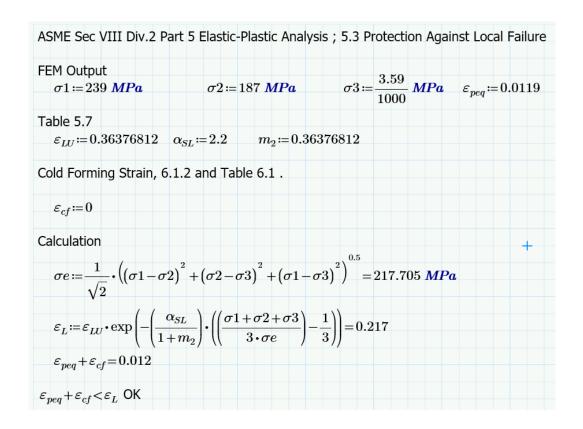
Fig. 2 FEM モデル

4.3. Protection Against Plastic Collapse(塑性崩壊評価)

API 法合格圧の 1.5 倍である 3MPa において、真応力-真歪曲線で設定した cut off 値に到達せず、解析が収束したので、Div.2 para 5.2 規定に従い Plastic Collapse (塑性崩壊)は問題ない。

4.4. PROTECTION AGAINST LOCAL FAILURE(局部破壊評価)

ASME Sec VIII Div. 2 5.3 に従い Limiting Triaxial Strain ε_L =0.217 に対し発生する 歪の合計値が ε_{peq} + ε_{cf} =0.012 であり合格。



4.5. PROTECTION AGAINST FAILURE FROM CYCLIC LOADING(疲労評価)

ASME Sec VIII Div. 2 para5.5.2.3 Screening method A 及び Table 5.9 より繰り返し数 350 回までは免除。API 法は繰り返し数 150 回以下と規定されており合格。

5. その他確認及び検証

5.1. 崩壊圧の検証

5.1.1. ASME Sec VIII Div.2 Annex 3D 規定の崩壊予測圧の保守性検証

流動応力基準の弾完全塑性体で FEM を実施すると概ね実崩壊圧と合致することが知られている。そこで流動応力基準の弾完全塑性体モデルと ASME Sec VIII Div. 2 Annex 3D 規定の応力-歪曲線モデルの崩壊圧比較を実施した。

- ✓ ASME Sec VIII Div. 2 Annex 3D ベース(設計基準であり保守側評価);4.53MPa
- ✓ 流動応力基準弾完全塑性体モデル(実実験と概ね一致するもの);5.39MPa ASME Sec VIII Div.2による塑性崩壊評価は≒20%程度保守側の解を与えている。

5.1.2. ASME Sec VIII Div.2 Annex 3D 規定保守側の崩壊評価と API 法の比較検証

Fig. 1 に示す保守側の公称応力-公称ひずみ曲線ベースで API 法を計算し、FEM 結果と比較すると次の通りとなる。

- ✓ FEMによる崩壊圧; 4.53MPa (Sec VIII Div.2 Annex 3D ベースで 25%保守側の値)
- ✓ API 法による崩壊予測圧;4.0MPa

λ=0.48、Mt=1.052、Ms=1.111、健全容器崩壊予測圧=4.59MPa減肉容器崩予測壊圧=4.59MPax0.9=4.13MPa

API 法は FEM の結果に対して安全側の評価となる。

5.2. 「全断面降伏」に対する確認

別途添付資料-4 で解説した通り、公に広く認識されている「全断面降伏」とは「流動応力」基準である。一方、根拠は不明であるが p-M-法は「p-M 法独自の定義による全断面降伏」を降伏強さ基準で考えている。「p-M 法独自の定義による全断面降伏」の論拠は未だ不明であり石油連盟/る石油化学工業協会としてはこの基準に同意はしないが、これら二つに対して API 法が合格と判断する最高許容内圧 2MPa にてどうなるか参考までに検証した。

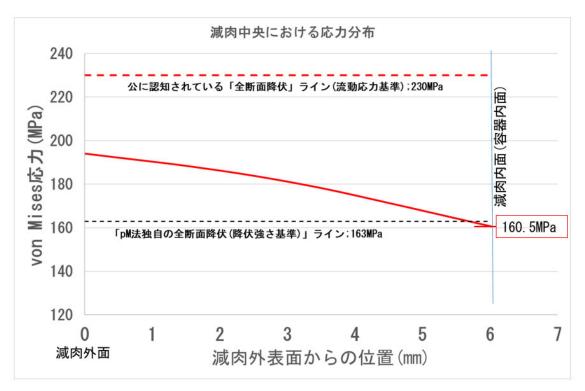


Fig. 3 減肉部中央(最大応力箇所ライン)での肉厚方向応力分布

結果、理論通り当該断面は公に認知されている流動応力基準の「全断面降伏」をしていないことが確認できる。これは別途説明した「全断面降伏」が代表応力に対する流動応力到達時のことであるとする理屈通りである。

また、「p-M 法独自の定義による全断面降伏」は、このモデルの場合は 163MPa ラインとなり、この値が FEM モデルにおいて全肉厚を通して発生することを指しているとのことである。ASME Sec VIII Div.2 に従った FEM データは減肉内面側で 160.5MPa となり、肉厚断面を通して降伏強さを超える「p-M 法独自の定義による全断面降伏」は生じていない。

5.3. Lmsd の検証

崩壊時及び供用時の内圧において、それぞれ断面の応力値と径方向変位量を軸方向に沿って計算し Lmsd の考え方を検証した。結果、本モデルは円筒端部をフリーとしているため、無限遠方まで収束しない傾向が出ているが、Lmsd の地点で概ね収束している。

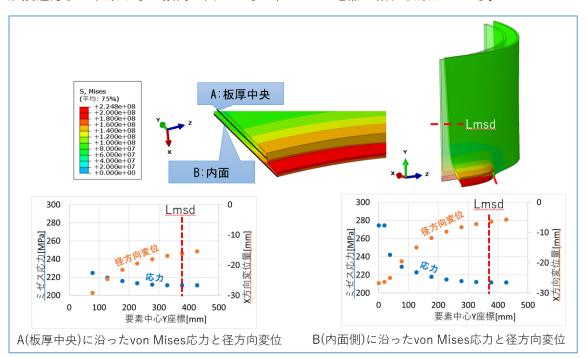


Fig. 4 崩壊時(4.53MPa)における軸方向応力分布と径方向変位

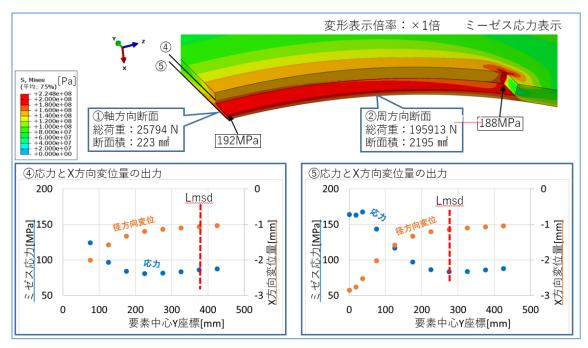


Fig. 5 供用時内圧(2MPa)における軸方向応力分布と径方向変位

5.4. 断面荷重の検証

API 法は検討対象断面内の代表応力(平均応力)を計算しているものである。これを FEM 結果にて検証した。結果は下記の通り API 法の Ms のモデルの導出の考え方と FEM により計算された減肉断面荷重は良く一致しており、また周方向断面に対しても API 法は保守側の解を与えている。

従って API 法のモデルは正しい理論の上に成り立っている。

断面部位		API 法解析解			
	Α;	В;	C;	D;	
	鉛直方向荷重	断面積	断面内平均応力	API 法による	
	(N)	(mm2)	(A/B, MPa)	代表応力(MPa)	
軸方向断面	25794	223	115MPa	114.4MPa	
(Fig. 5①)	25794	223	TIDMFA	114.4MPa	
周方向断面	195913	2195	89MPa	108. 2MPa	
(Fig. 52)	190910	2190	ู งอฟูเคล	TOO. ZIMFA	

6. 参考

API 法の本減肉形状に対する計算は次ページ以降に示す通り。

以上

343°Cケ−スモデルの計算 (SB410)	/ SΔ-516 Gr 6	50.)		
材料物性	/ JA 310 di.0	,0)		
$\sigma y \coloneqq 163 \; MPa \sigma uts \coloneqq 414$	MPa Sa:	= 103 MPa	$\sigma flow \coloneqq \frac{\sigma y + \sigma}{2}$	= 288.5 MPa
寸法形状				
$Ro := \frac{2000 + 19.65 \cdot 2}{2} mm$	$t \coloneqq 19.65$	mm	Ri := Ro - t = ?	mm
$a := 13.63 \ mm$ $c := \frac{74.0}{2}$	$\frac{15}{m}$ mm s	l = 740.05 r	$nm \qquad \alpha \coloneqq \frac{a}{t} = ?$	
Half Apex of Cone	$\alpha_{\theta} \coloneqq 0 deg$		※API579 Part9は 長さをcと記述。本	軸方向長さをs、周方向 計算とは表記記号が逆。
$D \coloneqq 2 \cdot Ri = \left(2 \cdot 10^3\right) mm$		ì		
最高許容圧力 $MAWP \coloneqq \frac{Sa \cdot}{Ri + 0}$	$\frac{t}{.6 \cdot t} = 2 MPc$	a 設計	·圧力:Pd Pd≔N	MAWP = 2 MPa
将来腐食代 FCA≔0 mm	$tc \coloneqq t - Fc$	CA = 19.65	mm = tmm := (t	$(-a) = 6.02 \ mm$
Weld Joint Eff. $EL\coloneqq 1$ $EC\coloneqq 1$	外部荷重等		$Mx \coloneqq 0 \ \mathbf{N} \cdot \mathbf{m}$ $V \coloneqq 0 \ \mathbf{N}$	$My \coloneqq 0 \ N \cdot m$
軸方向欠陥の評価				
$\lambda \coloneqq \frac{1.818 \cdot c}{\sqrt{Ri \cdot t}} = 0.48$	$Lmsd \coloneqq 1$	$.8 \cdot \sqrt{2 \cdot Ri \cdot}$	$t = 356.836 \ mm$	
$Mt \coloneqq \begin{pmatrix} 1.0010 - 0.014195 \ \lambda + 0.00030540 \cdot \lambda^5 + 2.9570 \\ + 7.1553 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda^8 - 1.560 \end{pmatrix}$	$0 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda^6 - 1$	$1.8462 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot \lambda^7 \downarrow$	=1.052
$Ce := 1$ $Ms_k := \frac{1 - Ce \cdot \alpha \cdot \left(\frac{1}{Mt}\right)}{1 - Ce \cdot \alpha} = 1$ $RSF := \frac{1}{Ms_k} = 0.9$				
$Ms_k := \frac{1}{1 - Ce \cdot \alpha} = 1$.111			
$RSF = \frac{1}{Ms_k} = 0.9$				
健全容器破壊圧		t		
$Burst_Press_ND \coloneqq$	$\sigma flow \cdot {Ri +}$	$\frac{0.6 \cdot t}{0.6 \cdot t} = 5.60$)3 <i>MPa</i>	
減肉容器破壊圧		+		
Burst_Press_Dame	$aged \coloneqq \sigma flow$	$\cdot \frac{c}{Ri + 0.6 \cdot t}$	-RSF = 5.043 M	IPa .
API法合格圧				
$MAWPr := MAWP \cdot \frac{RSF}{0.9}$	=2 MPa			

周方向欠陥の評価 $2 \cdot c \cdot \left(\frac{EL}{EC}\right)$ = $74.05 \ \textit{mm}$ ** sl>2cEL/ECなので5.4.2.2 i)より周方向欠陥評価要。5.4.3.4へ進む。 5.4.3.4の計算 $Df := D + 2 \cdot (tmm - FCA) = (2.012 \cdot 10^3) \ mm$ $\theta \coloneqq \frac{sl}{Df} = 0.368$ Psl := min(MAWPr, Pd) = 2 MPa $\sigma cm := \frac{Psl}{RSF \cdot \cos(\alpha_{\theta})} \cdot \left(\frac{2 \cdot Ri}{2 \cdot Ro - 2 Ri} + 0.6\right) = 114.444 MPa$ $\lambda c := 1.285 \cdot \frac{sl}{\sqrt{D_{r}t}} = 4.797$ $\times \lambda c \leq 9$, OK $Mtc := \frac{1 + 0.1404 \cdot \lambda c^{2} + 0.002046 \cdot \lambda c^{4}}{1 + 0.09556 \cdot \lambda c^{2} + 0.0005024 \cdot \lambda c^{4}} = 1.534$ $Msc := \frac{1 - \frac{1}{Mtc} \cdot \frac{a}{tc}}{1 - \frac{a}{tc}} = 1.788$ $Ix := \frac{\pi}{64} \cdot (Do^4 - D^4) = 0.064 \ m^4$ $Iy := Ix = 0.064 \ m^4$ $R := \frac{Df}{2} = 1.006 \ m$ $d := \left(Df - \frac{D}{2}\right) = 1.012 \ m$ $Ily := R^{3} d \cdot \left(\left(1 - \frac{3 \cdot d}{2 \cdot R} + \frac{d^{2}}{R^{2}} - \frac{d^{3}}{4 \cdot R^{3}} \right) \cdot \left(\theta - \sin(\theta) \cos(\theta) \right) \right) = 0.008 \ m^{4}$ $Aa := \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 3.142 \ m^2$ $Am := \frac{\pi}{4} \cdot (Do^2 - D^2) = 0.125 \ m^2$ $At := \frac{(0.5 \cdot \pi \cdot (D + Do) - sl) \cdot (D + Do)}{8} = 2.83 \ m^{2} \quad Atf := \frac{sl \cdot (Do + Df)}{8} = 0.375 \ m^{2}$

 $Af := \frac{\theta}{4} \cdot (Df^{2} - D^{2}) = 0.004 \ \mathbf{m}^{2} \qquad Aw := Aa + Af = 3.146 \ \mathbf{m}^{2}$ $\hat{y} := \frac{1}{12} \cdot \sin(\theta) \cdot \frac{(Df^{3} - D^{3})}{Am - Af} = 0.036 \ \mathbf{m} \qquad ya := \hat{y} + \frac{Do}{2} = 1.056 \ \mathbf{m}$

石連/石化 添付資料-3 評価限界温度における FEM結果について

$$yb \coloneqq \hat{y} + \frac{Df}{2} \cdot \cos(\theta) = 0.975 \ m$$

$$xa \coloneqq 0.0 \ m \quad xb \coloneqq \frac{Do}{2} \cdot \sin(\theta) = 0.367 \ m \quad b \coloneqq \frac{1}{12} \cdot \frac{\sin(\theta) \cdot (Df^3 - D^3)}{Aa + Af} = 0.001 \ m$$

$$\sigma lmA \coloneqq \frac{Msc}{EC \cdot \cos(\alpha_{\theta})} \cdot \left(\frac{Aw}{Am - Af} \cdot Psl + \frac{F}{Am - Af} + \frac{1}{Iy} \cdot My \right) = 100.602 \ MPa$$

$$\sigma lmB \coloneqq \frac{Msc}{EC \cdot \cos(\alpha_{\theta})} \cdot \left(\frac{Aw}{Am - Af} \cdot Psl + \frac{F}{Am - Af} \right) = 100.064 \ MPa$$

$$\tau \coloneqq \frac{MT}{2 \cdot (At + Atf) \cdot (tmm + FCA)} + \frac{V}{Am - Af} = 0 \ MPa$$

$$\sigma eA \coloneqq (\sigma cm^2 - \sigma cm \cdot \sigma lmA + \sigma lmA^2 + 3 \cdot \tau^2)^{0.5} = 108.19 \ MPa$$

$$\sigma eB \coloneqq (\sigma cm^2 - \sigma cm \cdot \sigma lmB + \sigma lmB^2 + 3 \cdot \tau^2)^{0.5} = 107.975 \ MPa$$

$$Hf \coloneqq 1.0$$

$$Criteria \coloneqq Hf \cdot \frac{Sa}{0.9} = 114.444 \ MPa$$

$$\max(\sigma eA, \sigma eB) = 108.19 \ MPa$$

$$Criteria \trianglerighteq F \in \delta \circlearrowleft \Theta \triangleq \Theta$$