

2021年6月29日

石油連盟 御中  
石油化学工業協会 御中

供用適性評価規格委員会  
高度化検討分科会 事務局

「p-M 法に対する産業界の技術的見解について」に関する事務局の見解について

2021年6月7日付でご提出いただきました頭書の文書に関しまして、事務局の見解は以下のとおりです。高度化検討分科会での議論の参考としていただければ幸いです。

#### 産業界の技術的見解（抜粋）その1

石油連盟及び石化協としては協議検討した結果、p-M 法は破壊力学の問題と塑性崩壊の問題の混同等の技術的疑義があり、これを採用し運用することには問題があると考えております。即ち、円筒と平板のキズ周りの応力分布が同じになるように、破壊力学の考え方によって求められた Folias の Mt 値および Chell の Ms 値について、p-M 法はバルジングファクターと称し、円筒の周方向応力を板の無限遠方応力から導出する材料力学的な係数と考えています。キズを想定して破壊力学によって求めた係数を、キズを想定しない材料力学の係数とするこの考え方は誤りです。また、破壊モードとして考えるべき、局部崩壊と全体崩壊についても考慮していません。

#### 事務局の見解

・p-M 法は、現在の欠陥評価手法での主流である限界荷重解（欠陥を有する弾完全塑性体の全断面降伏条件を材料力学を用いた力学的な釣合関係から導かれる）に基づき導かれる参照応力を基礎としています。なお、円筒の効果を平板の膜応力に近似的に取り込む（円筒による膨れ効果による見掛け上の膜応力の増分）ためにバルジングファクターとして、非貫通欠陥に対しては Ms\_Chell 値、貫通欠陥に対しては Folias の Mt 値を用いています。

Folias の Mt 値および Chell の Ms 値については、以下に示される記述で API579-1\*においてもバルジングファクターであると明記されています。

\* 9C. 2. 3 Surface Correction Factor for Shells

9C. 2. 3. 1 Overview

A surface correction (also referred to as the Folias or bulging factor) is used to quantify the local increase in the state of stress at the location of a crack in a shell type structure that occurs because of local bulging.

・ p-M 法では、Willoughby 提案の評価欠陥の周りの評価領域 ( $2W = \pi c/2 + 2t$  :  $c$ =欠陥の軸方向長さの半長、 $t$ =肉厚) を採用し、欠陥前面の残肉厚領域が全断面降伏する条件を力学的釣合式により導いています。これと同様な取り扱い、API579-1 (9C. 39) でも行われています。ただし、p-M 法では、欠陥前面の残肉厚領域が全断面降伏する場合は基準となっていますが、欠陥深さ  $a$  が大きいときには、Willoughby 提案の評価欠陥の周りの評価領域そのままでは、適切ではないので、 $y (=a/t$  :  $a$ =欠陥深さ、 $t$ =肉厚)、 $\tau (=t/R_i$  :  $R_i$ =円筒内径) の関数でその評価領域範囲を補正しています\*\*。

\*\* 詳しくは、HPI Z101-2:2011 (26) 式およびその引用文献を参照ください。

・ p-M 法では、欠陥前面の残肉厚領域が全断面降伏する場合を考えているので当然、破壊 (破裂) するまでの荷重は考えていません。p-M 法で破壊 (破裂) するまでの荷重を考えない理由としては、FFS 規格として考えたときに、欠陥前面で全断面降伏していても破裂まで至っていない状態であっても欠陥前部残断面の载荷能力の著しい低下を許容し継続使用することは許されないのが通常であると考えためです。他方、API579-1 においては、破裂荷重を基準として考えているため、破裂荷重より低い実使用圧力においては応力を過小評価してしまうという本質的な問題があります。その本質的な問題を避けるため圧力容器の設計規格では、p-M 法と同様に、全断面降伏が限界荷重として採用されています。FFS 規格では、破壊 (破裂) を考える以前に、欠陥前面の残肉厚領域が全断面降伏するか否か (欠陥前面での全断面降伏) を考えなければ安全側の評価はできません。

## 産業界の技術的見解 (抜粋) その 2

### 2.1. $M_t$ の考え方

$M_t$  は  $M_t$ =貫通亀裂のある「無限幅」平板の崩壊時遠方応力  $\sigma_m$  と貫通亀裂のある円筒の崩壊時周方向応力  $\sigma_{hoop}$  の比であり、

$$\text{正(API法、脆性破壊に対し); } M_t = \frac{\text{貫通亀裂を持つ無限平板の破壊時膜応力}}{\text{貫通亀裂を持つ円筒の破壊時周応力}} = \frac{\sigma_m}{\sigma_{hoop}}$$

として表現されるものであるが、き裂の進展がない塑性崩壊においては流動応力  $\sigma_{flow}$  を用いて

$$\text{正(API法、塑性崩壊に対し); } M_t = \frac{\text{キズの無い容器の崩壊荷重}}{\text{貫通き裂のある容器の崩壊荷重}} = \frac{\sigma_{flow}}{\sigma_{hoop}}$$

と表現できるものである。

一方、p-M 法は上記と違い下記の通り「有限幅」平板と円筒の關係に解釈し論を展開してしまっており、材料力学的な応力の換算係数とも解釈してしまっている。

$$\text{誤(pM法、脆性\&塑性破壊共に); } M_t = \frac{\text{貫通亀裂を持つ有限幅平板の}\sigma_m}{\text{貫通亀裂を持つ円筒の}\sigma_{hoop}}$$

## 事務局の見解

・上記の Mt の定義は誤りです。Folias 論文では上記のような実験によって Mt を決めるような定義はなされていません。Folias は平板と円筒とに作用する膜応力が同じであっても応力拡大係数で考える膜応力を見掛け上、バルジングファクター Mt だけ増したと見做せば、平板の関係式を円筒の場合に拡張できると考えているのであって、上式のように破壊時の応力(または崩壊荷重)を用いての定義とはなっていない。

・p-M 法の Mt の定義は、Folias の定義(弾性体のシェル理論による理論解\*) そのもので与えています。

\* E. S. Folias, Int. J. Frac. Mech., 1, 2 (1965) pp.104-113

### 産業界の技術的見解 (抜粋) その 3

#### 2. Ms の考え方について

表面キズのある容器に対する表面修正係数(Surface Correction Factor) Ms は次式で定義されるものである。

$$\begin{aligned} \text{正(API法)}; Ms &= \frac{\text{キズの無い容器の崩壊荷重}}{\text{キズのある容器の崩壊荷重}} = \frac{\sigma_{flow}}{\sigma_{hoop}} \\ \text{誤(pM法)}; Ms &= \frac{\text{キズのある平板の崩壊荷重}}{\text{キズのある円筒の崩壊荷重}} = \frac{\sigma_{plate}}{\sigma_{hoop}} \end{aligned}$$

これは Chell の論文(Application of the CEGB Failure Assessment Procedure, R6, to Surface Flaws)並びに Kiefner の論文(PROGRESS IN FLAW GROWTH AND FRACTURE TOUGHNESS TESTING, ASTM STP 536)にて明確に定義し示されている。一方、p-M 法はこの解釈を否定し、Ms を表面キズのある平板の崩壊時遠方応力と表面キズのある円筒の崩壊時周応力の比として扱ってしまっており、材料力学的な応力の換算係数と解釈してしまっている。

#### 事務局の見解

・バルジングファクターは、その物理的意味から、以下の大小関係が成り立つはずです。

$$1 \leq \text{非貫通欠陥のバルジングファクター} Ms \leq \text{貫通欠陥のバルジングファクター} Mt$$

しかし、上記 API 法の Ms = (キズのない円筒の崩壊荷重) / (キズのある円筒の崩壊荷重) のような定義を行うと、(1)欠陥による断面減少効果と(2)バルジング効果の双方が Ms に入ってくることとなります。このように定義された Ms は、a/t(a=欠陥深さ、t=肉厚)が大きくなると、Folias の Mt 以上の値となり、バルジングファクターの物理的意味からは、あり得ない結果を与えます。

Kiefner\*が上記の定義(崩壊荷重を用いて実験的に定めた)で Ms を求めたときに使用された試験条件は以下です。

\* J. F. Kiefner et. al., ASTM STP536 (1973) pp. 461-481.

材質：ラインパイプ材 X50～X60 ( $\sigma_{ys} \geq 358 \sim 413 \text{MPa}$ ),  $R_i/t=31 \sim 48$  ( $D_o=406 \sim 1067 \text{mm}$ ,  $t=6.35 \sim 15.6 \text{mm}$ ),  $c/t=4.3 \sim 23.6$ , 試験温度=常温

これに対して、FFS 規格は、材料、円筒寸法、欠陥寸法、使用温度などが極めて多様で広範囲な条件に適用できることが必須であり、Kiefner 実験式の適用範囲ではカバーできない条件もカバーすることが必要です。API 法のように、Kiefner の実験式が広範に成り立つと考えることは非合理的であると判断されます。全断面降伏現象は当然、材質、使用温度などの材料特性にも依存します。したがって、FFS 評価式には、それらの材料特性（降伏強度の温度依存性）が加味されている必要があります。また、大径管に対しても当然正しく評価できる必要がありますが、 $M_s\text{-Chell}$  と  $M_s\text{-Kiefner}$  はいずれも円筒の径が大きくなると平板に近づくため、円筒の効果がなくなっていき  $M_s=1$  に近づいていく性質があります。

これに対して、p-M 法の参照応力解では  $\sigma_{ref}=M_s\text{-Chell}/(1-\alpha) \sigma_m \rightarrow \sigma_m/(1-\alpha)$  ( $\sigma_m$ : 欠陥がないときに作用する膜応力) となり、欠陥の影響は  $\alpha$  を介して考慮されています。しかし、API 法の参照応力解では  $\sigma_{ref}=M_s\text{-Kiefner} \sigma_m \rightarrow \sigma_m$  となり、径が大きくなると、欠陥があったとしても欠陥がないときの膜応力  $\sigma_m$  に参照応力解が近づきます。このことは、API 法では、径が大きいために、欠陥の影響をほとんど考慮せずに評価をするという極めて危険な評価をすることになります。また、内圧以外に他の力が作用する場合には、破裂圧よりも小さい内圧（当然運転圧力は破裂圧より小さいので、内圧単独の場合もこの場合に当てはまります）によって生じる欠陥近くの応力状態を正しく評価する必要がありますが、Kiefner の実験式を用いて内圧が小さい場合に内挿することは、破裂内圧を基準として原点である内圧 0 まで直線内挿するので、実際の弾性変形域で発生する応力とは異なる評価となり、危険側の評価となります。すなわち、API 法では、与えられた内圧によって見積もられる応力は常に過小評価されることとなります。

・ p-M 法での  $M_s$  の定義は、上記で指摘されている定義とは異なった定義になっています。バルジングファクターの物理的意味から妥当である以下の関係が成り立つように  $M_s$  はなっています。

$1 \leq$  非貫通欠陥のバルジングファクター  $M_s \leq$  貫通欠陥のバルジングファクター  $M_t$

すなわち、p-M 法では、欠陥深さ  $a=0$  の欠陥がない場合に  $M_s=1$ 、 $a/t=1$  の貫通欠陥（Folias が考えている形状）の場合には  $M_s=M_t$  となる以下に示す理論的に導びかれた次式を用いています。

$$M_s = \frac{1}{1 - \frac{a}{t} + \frac{a}{t} \frac{1}{M_t(a)}}$$

## 産業界の技術的見解（抜粋）その 4

### 4. 上記を破壊試験データと比較した結果

上記 API 法と p-M 法の両式を破壊試験データと比較した結果を添付します。p-M 法は Ms の考え方に誤りがあるため、破壊試験実験値を予測せず、下域にズレており破壊圧の予測式になっておらず、破壊予測値が運転域に近すぎ、API 法と同じ合否基準では殆どが供用不可となり使い物にならない。

### 事務局の見解

上述のとおり、p-M 法の参照応力は全断面降伏を基準として求めたものであるため、破裂圧力を予測するためのものではありません。また、欠陥を有する円筒の内圧 P の増加による円筒の変形挙動は、次の過程をたどると考えられます。

(1) 欠陥部を含め弾性変形をする (2) 欠陥部に塑性変形が開始する (3) 欠陥前面の残肉厚領域が全断面降伏をする (4) 欠陥部だけではなく円筒のかなりの領域が塑性変形をする (5) 欠陥部で大きく変形をして破裂を生じる

p-M 法では (3) の状態を基準点として考えていますが、API 法では (5) の状態を基準点として考えています。(5) の状態は (3) の状態よりも内圧 P は大きく評価されます。しかし、「産業界の技術的見解 その 1」への「事務局の見解」で述べたように、FFS 規格では、(5) の破壊（破裂）状態に至る前の、(3) の状態、すなわち、欠陥前面の残肉厚領域が全断面降伏するか否か（欠陥前面での全断面降伏）でもって判断すべきと考えます。このような考え方は、压力容器の設計規格においても同様に採用されている考え方です。

API 法のように、破裂圧力を基準に考えると破裂圧力より十分低い圧力である設備の実使用圧力において応力を過小評価（危険側評価）する問題が出てきます。さらに、API 法が使用する破裂荷重を基準とする Kiefner の提案式を使用すると、その式では使用温度が高温になった場合の材料の降伏強さの低下の影響を考慮していないために危険側評価を与えることは明らかです。

## 産業界の技術的見解（抜粋）その 5

### 5. HPIS Z101-2 規格について

「HPIS Z101-2 圧力機器のき裂状欠陥評価方法—第 2 段階評価」ですが、この規格を HPI (p-M) 法という表現をすることは、亀裂状欠陥評価法である同規格 (HPIS Z 101-2) を、減肉評価にもそのまま適用できるような誤解を与えるので不適切です。この規格の中で p-M 法のオリジナル部分が採用されているのは、5.3.2 および 5.3.3 節の「円筒の軸方向欠陥」の半楕円き裂に対する式のみ (前項 3 の式) であり、同一視すべきではありません。

尚、HPIS Z101-2 規格に問題となっている pM 法の半楕円き裂の式 (前項 3 の式) が採用された経緯ですが、添付の通り調査した結果、委員会について議論ができたものの、結論が出ていなかったことも確認されています。

### 事務局の見解

き裂状欠陥であっても減肉であっても、欠陥部の応力を算定するため材料を弾完全塑性体とみなした限界荷重解析 (リミットアナリシス) による近似解、すなわち、p-M 法の参照応力解は、欠陥の形状によらず全断面降伏荷重は等しくなりますので、共通に用いることができるものです。また、HPI Z101-2 規格においては周方向表面欠陥評価においても p-M 法と同じ参照応力解が採用されており、圧力機器の FFS 評価において最も重要と考えられる円筒の軸方向表面欠陥 (主に内圧に対する評価) 及び周方向表面欠陥 (主に内圧が作用した状態における地震などの外部荷重が重畳する場合に対する評価) それぞれの参照応力が p-M 法と HPIS Z101-2 においては同じものとなっております。なお、「p-M 法での半楕円き裂の式に対して HPI 委員会で議論が出て結論が出ていなかった」ということはありえません。HPIS Z101-2 の規格にその式が採用され刊行されているという事実は、HPI の規格策定プロセス、すなわち委員会での承認、パブコメ等の審議プロセスを経て制定されているものと考えますので、「結論が出ていなかった」というご指摘は当たらないと考えます。

なお、ご指摘を受けて、添付書類を含めて再度確認いたしました。HPIS Z101-2 の制定は 2011 年 9 月 30 日ですが、ご指摘の IJPVP 論文が掲載されたのは 2011 年 12 月であり、HPIS Z101-2 の審議過程で IJPVP 論文が影響したというのは事実誤認です。

また、IJPVP 論文の中で  $M_s$  を誤用しているというご指摘については「産業界の技術的見解 その 3」への「事務局の見解」で述べたとおりであり、誤っているのは API 579-1 の参照応力解における  $M_s$  の適用方法です。また、その API 579-1 の  $M_s$  を含む参照応力解の導出について論じた ASME PVP 2020-21805 及び 21806 は誤解に基づいたものと判断されます。

以上