

附属書 5A-6 円筒形圧力設備のノズル近傍の減肉部の p-M 法による評価 (規定)

1. 記号の意味^[1,2]

附属書 5A-6 で用いる記号の意味は、附属書 5A による他、次による。

$2c$: $2\sqrt{c_L^2 + c_\theta^2}$, 矩形減肉の相当半径 (mm)

D : $D_o - T_o$, 主管の平均直径 (mm)

D_o : 主管の外径 (mm)

d : 枝管 (ノズル) の平均直径 (mm)

g : $1 - 20\left(\frac{a}{2c}\right)^{0.75} \alpha^3$, 曲げ応力修正係数

g_m : $\begin{cases} 1 & : a = 0 \\ 0.5g & : a \neq 0 \end{cases}$, 枝管と主管の接合部における曲げの補正係数

l : 枝管の溶接止端から評価する減肉までの距離 (mm)

$M_t(\lambda_a)$: $t = a$ として計算された貫通欠陥に関するバルジング効果を表す係数であって、

$M_t(\lambda)$ を $\lambda = \lambda_a$ として計算した値

$M_t(\lambda)$: $\sqrt{1 + 0.317\lambda^2}$, 貫通欠陥に関するバルジング効果を表す係数

M_s : $1 / \{1 - (a/t) + (a/t)(1/M_t(\lambda_a))\}$, 減肉に対するバルジング効果を表す係数

$q_p(\xi)$: 内圧負荷に対する弾性応力調整係数

$q_{M\eta}(\xi, \eta)$: 枝管への曲げ負荷に対する弾性応力調整係数

$q_{MB}(\xi)$: 主管への曲げ負荷に対する弾性応力調整係数

t : 枝管の板厚 (mm)

T_o : 主管の板厚 (mm)

X : $\frac{l}{2.5\sqrt{R_i T_o}}$, l と応力集中部の距離との比

α : $\pi a c / \{T_o (\pi c + 4T_o)\}$, 相当減肉深さ比

λ_a : $1.428c / \sqrt{R_i a}$, 表面減肉に関するシェルパラメータ

σ_f : $\text{Min}(\sigma_{ys}^{\text{min}} / 1.5, \sigma_{ys} / 1.5)$, 許容応力 (N/mm²)

σ_{ys} : 設計温度における降伏応力 (N/mm²)

σ_{ys}^{min} : 規定最小降伏応力 (N/mm²)

ξ : 枝管の上から見た主管軸方向からの角度 (減肉位置方向) (deg)

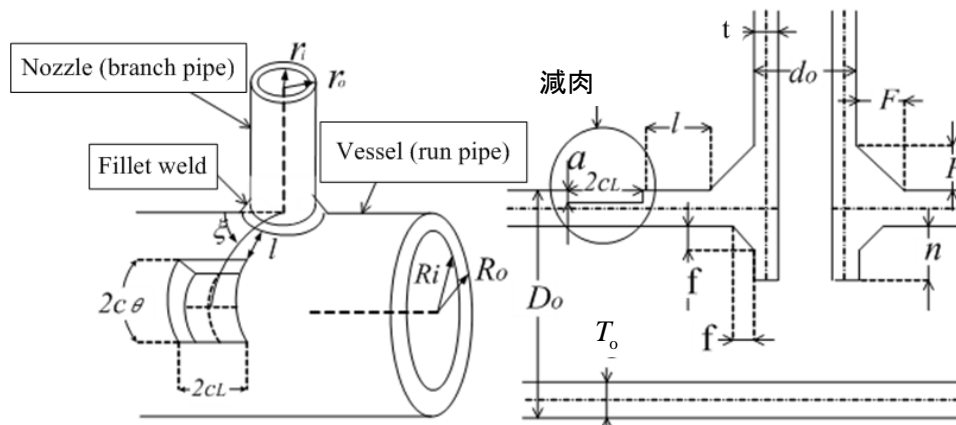
2. p-M 線図による評価

以下の各ステップに従い評価を行う。

ステップ 1: 評価する部材と減肉部の寸法及び材料特性 (材料の降伏応力) を決定する。

ステップ 2: 評価する減肉の主管及び枝管との位置関係を決定する (附属書5A-6図1を参照)。

本附属書は減肉が主管にある場合に適用する。



附属書 5A-6 図 1 円筒形圧力設備のノズル近傍の減肉 [1,2]

ステップ 3 :

評価する荷重形式を定める。本評価では、内圧のみが作用する場合、内圧及び主管へ曲げモーメントが作用する場合並びに内圧及び枝管への曲げモーメントが作用する場合の3つの荷重形式から評価するものを選択する（曲げモーメントの荷重形式については**附属書 5A-6 図 2**を参照）。



a) 主管へ曲げモーメントが作用する場合 b) ノズルへ曲げモーメントが作用する場合

附属書 5A-6 図 2 ノズルを有する圧力設備の外部曲げモーメントの荷重形式

ステップ 4 : 限界圧力、限界曲げモーメントをそれぞれ求める。

① 内圧のみが作用する場合の限界圧力 $P_{\text{predicted}}^L$ を求める。

$$P_{\text{predicted}}^L = \frac{3(1-\alpha)^2 \sigma_f}{\left| g_m \cdot A_b^p \right| + \sqrt{(g_m \cdot A_b^p)^2 + \{3(1-\alpha)M_s \cdot A_m^p\}^2}} \quad (1)$$

$$A_m^p = q_p(\xi) \cdot k_m^p(\xi, X) \cdot f_{vm}^p \cdot D / (2T_o)$$

$$A_b^p = q_p(\xi) \cdot k_b^p(\xi, X) \cdot f_{vb}^p \cdot D / (2T_o)$$

$q_p(\xi)$ は弾性応力調整係数であって、ここでは0.85とする。

k_b^p 及び k_m^p は弾性応力集中係数であって、ここでは以下の値とする。

$$k_m^p = 0.5019$$

$$k_b^p = -0.6038$$

$$f_{vm}^p = 1.2356 - 0.00161(d/D)^{1.0} (D/T_o)^{0.6} (t/T_o)^{-2.4} \\ + 0.6330(d/D)^{1.0} (D/T_o)^{0.5} (t/T_o)^{-0.8}$$

$$f_{vb}^p = -1.7988 + 3.5474(d/D)^{0.6} (D/T_o)^{0.3} (t/T_o)^{-0.2} \\ - 0.05716(d/D)^{1.2} (D/T_o)^{0.3} (t/T_o)^{2.9} - f_{vm}^p$$

② 主管に外部曲げモーメントが作用する場合の限界モーメント $M_{B\text{predicted}}^L$ を求める。

$$M_{B\text{predicted}}^L = \frac{3(1-\alpha)^2 \sigma_f}{\left| g_m \cdot A_b^{\text{MB}} \right| + \sqrt{(g_m \cdot A_b^{\text{MB}})^2 + \{3(1-\alpha)M_s \cdot A_m^{\text{MB}}\}^2}} \quad (2)$$

$$A_m^{\text{MB}} = 4q_{\text{MB}}(\xi) \cdot k_m^{\text{MB}} \cdot f_{\text{vm}}^p / (\pi D^2 T_o)$$

$$A_b^{\text{MB}} = 4q_{\text{MB}}(\xi) \cdot k_b^{\text{MB}} \cdot f_{\text{vb}}^p / (\pi D^2 T_o)$$

$q_{\text{MB}}(\xi)$ は弾性応力調整係数であって、ここでは0.79とする。

k_b^{MB} 及び k_m^{MB} は弾性応力集中係数であって、ここでは以下の値とする。

$$k_b^{\text{MB}} = 1.4732$$

$$k_m^{\text{MB}} = 0.6614$$

③ ノズルに外部曲げモーメントが作用する場合の限界モーメント $M_{\eta\text{predicted}}^L$ を求める。

$$M_{\eta\text{predicted}}^L = \frac{3(1-\alpha)^2 \sigma_f}{\left| g_m \cdot A_b^{\text{M}\eta} \right| + \sqrt{(g_m \cdot A_b^{\text{M}\eta})^2 + \{3(1-\alpha)M_s \cdot A_m^{\text{M}\eta}\}^2}} \quad (3)$$

$$A_m^{\text{M}\eta} = 4q_{\text{M}\eta}(\xi, \eta) \cdot k_m^{\text{M}\eta} \sqrt{(f_{\text{vm}}^{\text{Mi}})^2 \cos^2 \eta + (f_{\text{vm}}^{\text{Mo}})^2 \sin^2 \eta} / (\pi d^2 t)$$

$$A_b^{\text{M}\eta} = 4q_{\text{M}\eta}(\xi, \eta) \cdot k_b^{\text{M}\eta} \sqrt{(f_{\text{vb}}^{\text{Mi}})^2 \cos^2 \eta + (f_{\text{vb}}^{\text{Mo}})^2 \sin^2 \eta} / (\pi d^2 t)$$

$q_{\text{M}\eta}(\xi, \eta)$ は弾性応力調整係数であって、ここでは1.13とする。

$k_m^{\text{M}\eta}$ 及び $k_b^{\text{M}\eta}$ は弾性応力集中係数であって、ここでは以下の値とする。

$$k_m^{\text{M}\eta} = 0.7394$$

$$k_b^{\text{M}\eta} = 0.9681$$

$$f_{vm}^{M_i} = \left[\begin{array}{l} 0.3722 - 0.6740(d/D) + 1.615(d/D)^2 \\ -0.8049(d/D)^3 \end{array} \right]$$

$$\times (D/T_o)^{0.5800} (t/T_o)^{0.8097}$$

$$f_{vb}^{M_i} = \left[\begin{array}{l} -0.0022 + 4.729(d/D) - 8.674(d/D)^2 \\ +5.237(d/D)^3 \end{array} \right]$$

$$\times (D/T_o)^{0.5260} (t/T_o)^{0.812} - f_{vm}^{M_i}$$

$$f_{vm}^{M_o} = \left[\begin{array}{l} -0.0980 + 0.9376(d/D) - 1.427(d/D)^2 \\ +0.7837(d/D)^3 \end{array} \right]$$

$$\times (D/T_o)^{0.8566} (t/T_o)^{0.7317}$$

$$f_{vb}^{M_o} = \left[\begin{array}{l} 0.0947 + 1.099(d/D) - 0.2395(d/D)^2 \\ -0.5410(d/D)^3 \end{array} \right]$$

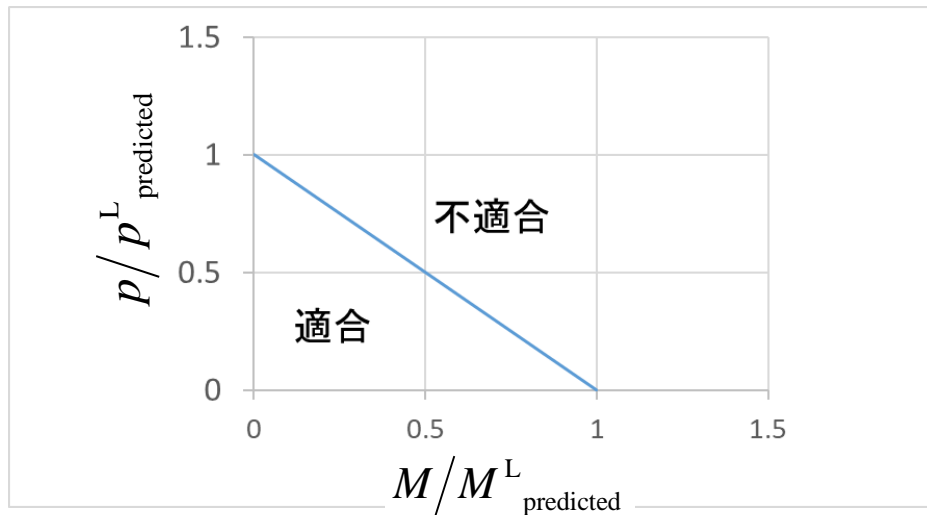
$$\times (D/T_o)^{0.8972} (t/T_o)^{1.115} - f_{vm}^{M_o}$$

ステップ 5 :

p-M線図で評価を行う。

ただし、 $\frac{p}{p_{\text{predicted}}^L} = 1 - \frac{|M|}{M_{\text{predicted}}^L}$ 、 $M_{\text{predicted}}^L = M_{B_{\text{predicted}}}^L$ 又は $M_{\eta_{\text{predicted}}}^L$ とする。

附属書5A-6図3のp-M線図において、評価する内圧 p 及び曲げモーメント M がp-M線図の適合領域にプロットされれば適合と評価する。



附属書5A-6図3 円筒形圧力設備のノズル近傍に減肉がある場合のp-M線図^{1,2)}

3. より詳細な検討を行う場合の評価方法

2. の評価においては、安全側の評価として、ノズル近傍で最も応力集中が大きくなる箇所に減肉があるという前提の評価となっている。

ここでは、より正確に減肉の位置に応じた評価を行う場合の方法を示す。ただし、この場合、評価を行う減肉のある部位以外の部位が先に塑性崩壊する場合もあり得るため、減肉がないとした場合の2.の評価を行うべきである。この場合には、 $\alpha = 0$ 、 $M_s = 1$ 及び $g_m = 1$ として限界圧力及び各限界モーメントを求めればよい。

以下により正確に減肉の位置に応じた評価を行う場合の方法を示す。

① 内圧のみが作用する場合の限界圧力を求める

$$p_{\text{predicted}}^L = \frac{3(1-\alpha)^2 \sigma_f}{\left| g_m \cdot A_b^P \right| + \sqrt{(g_m \cdot A_b^P)^2 + \{3(1-\alpha)M_s \cdot A_m^P\}^2}} \quad (4)$$

$$A_m^P = q_p(\xi) \cdot k_m^P(\xi, X) \cdot f_{vm}^P \cdot D / (2T_o)$$

$$A_b^P = q_p(\xi) \cdot k_b^P(\xi, X) \cdot f_{vb}^P \cdot D / (2T_o)$$

$q_p(\xi)$ は弾性応力調整係数であって附属書5A-6表2で与えられる。

k_b^P 及び k_m^P は弾性応力集中係数であって附属書5A-6表1で与えられる。

附属書5A-6表1 内圧が作用する場合の弾性応力集中係数 k_b^P 及び k_m^P [1,2]

ξ (deg)	k_m^P					
	X					
	0.00	0.04	0.10	0.20	0.50	≥ 0.8
0	0.3926	0.4086	0.4142	0.4170	0.4188	0.4198
45	0.4750	0.5019	0.4611	0.4453	0.4496	0.4468
90	0.3258	0.3675	0.3868	0.4021	0.4440	0.4247

ξ (deg)	k_b^P					
	X					
	0.00	0.04	0.10	0.20	0.50	≥ 0.8
0	-0.6038	-0.4156	-0.3816	-0.3401	-0.2674	-0.2333
45	-0.1778	-0.0488	-0.1475	-0.1481	-0.0853	-0.0745
90	0.3410	0.5006	0.3956	0.2464	0.0290	-0.1341

注) この表にない値は線形補間により内挿して求めてもよい。

附属書5A-6表2 内圧が作用する場合の弾性応力調整係数 $q_p(\xi)$ [1,2]

ξ (deg)	q_p
0	0.75
45	0.86
90	0.85

注) この表にない値は線形補間により内挿して求めてもよい。

$$f_{vm}^P = 1.2356 - 0.00161(d/D)^{1.0} (D/T_o)^{0.6} (t/T_o)^{-2.4} + 0.6330(d/D)^{1.0} (D/T_o)^{0.5} (t/T_o)^{-0.8}$$

$$f_{vb}^P = -1.7988 + 3.5474(d/D)^{0.6} (D/T_o)^{0.3} (t/T_o)^{-0.2} - 0.05716(d/D)^{1.2} (D/T_o)^{0.3} (t/T_o)^{2.9} - f_{vm}^P$$

② 主管に外部曲げモーメントが作用する場合の限界モーメント $M_{B\text{predicted}}^L$ を求める。

$$M_{B\text{predicted}}^L = \frac{3(1-\alpha)^2 \sigma_f}{\left| g_m \cdot A_b^{MB} \right| + \sqrt{(g_m \cdot A_b^{MB})^2 + \left\{ 3(1-\alpha) M_s \cdot A_m^{MB} \right\}^2}} \quad (5)$$

$$A_m^{MB} = 4q_{MB}(\xi) \cdot k_m^{MB} \cdot f_{vm}^p / (\pi D^2 T_o)$$

$$A_b^{MB} = 4q_{MB}(\xi) \cdot k_b^{MB} \cdot f_{vb}^p / (\pi D^2 T_o)$$

$q_{MB}(\xi)$ は弾性応力調整係数であって**附属書5A-6表4**で与えられる。

k_b^{MB} 及び k_m^{MB} は弾性応力集中係数であって**附属書5A-6表3**で与えられる。

附属書5A-6表3 主管に曲げモーメントが作用する場合の弾性応力集中係数 k_b^{MB} 及び k_m^{MB} [1,2]

k_m^{MB}						
ξ (deg)	X					
	0.00	0.04	0.10	0.20	0.50	≥ 0.8
0	0.2437	0.3115	0.3578	0.3965	0.4672	0.4937
45	0.6614	0.6216	0.5717	0.5224	0.4496	0.4064
90	0.3442	0.3661	0.3854	0.4002	0.3781	0.3150

k_b^{MB}						
ξ (deg)	X					
	0.00	0.04	0.10	0.20	0.50	≥ 0.8
0	1.4732	1.4672	0.9851	0.4873	-0.0558	-0.0166
45	0.6951	0.5351	0.5274	0.5193	0.2784	0.1922
90	-0.7236	-0.5943	-0.5067	-0.3830	-0.0967	0.0218

注) この表にない値は線形補間により内挿して求めてもよい。

附属書5A-6表4 主管に曲げモーメントが作用する場合の弾性応力調整係数 $q_{MB}(\xi)$ [1,2]

ξ (deg)	q_{MB}
0	0.77
45	0.74
90	0.79

注) この表にない値は線形補間により内挿して求めてもよい。

③ ノズルに外部曲げモーメントが作用する場合の限界モーメント $M_{\eta\text{predicted}}^L$ を求める。

$$M_{\eta \text{ predicted}}^L = \frac{3(1-\alpha)^2 \sigma_f}{\left| g_m \cdot A_b^{M\eta} \right| + \sqrt{(g_m \cdot A_b^{M\eta})^2 + \{3(1-\alpha)M_s \cdot A_m^{M\eta}\}^2}} \quad (6)$$

$$A_m^{M\eta} = 4q_{M\eta}(\xi, \eta) \cdot k_m^{M\eta} \sqrt{(f_{vm}^{Mi})^2 \cos^2 \eta + (f_{vm}^{Mo})^2 \sin^2 \eta} / (\pi d^2 t)$$

$$A_b^{M\eta} = 4q_{M\eta}(\xi, \eta) \cdot k_b^{M\eta} \sqrt{(f_{vb}^{Mi})^2 \cos^2 \eta + (f_{vb}^{Mo})^2 \sin^2 \eta} / (\pi d^2 t)$$

$q_{M\eta}(\xi, \eta)$ は弾性応力調整係数であって**附属書5A-6表6**で与えられる。

$k_m^{M\eta}$ 及び $k_b^{M\eta}$ は弾性応力集中係数であって**附属書5A-6表5**で与えられる。

$$f_{vm}^{Mi} = \left[\begin{array}{l} 0.3722 - 0.6740(d/T_o) + 1.615(d/D)^2 \\ -0.8049(d/D)^3 \end{array} \right] \\ \times (D/T_o)^{0.5800} (t/T_o)^{0.8097}$$

$$f_{vb}^{Mi} = \left[\begin{array}{l} -0.0022 + 4.729(d/D) - 8.674(d/D)^2 \\ +5.237(d/D)^3 \end{array} \right] \\ \times (D/T_o)^{0.5260} (t/T_o)^{0.812} - f_{vm}^{Mi}$$

$$f_{vm}^{Mo} = \left[\begin{array}{l} -0.0980 + 0.9376(d/D) - 1.427(d/D)^2 \\ +0.7837(d/D)^3 \end{array} \right] \\ \times (D/T_o)^{0.8566} (t/T_o)^{0.7317}$$

$$f_{vb}^{Mo} = \left[\begin{array}{l} 0.0947 + 1.099(d/D) - 0.2395(d/D)^2 \\ -0.5410(d/D)^3 \end{array} \right] \\ \times (D/T_o)^{0.8972} (t/T_o)^{1.115} - f_{vm}^{Mo}$$

附属書5A-6表5 ノズルに曲げモーメントが作用する場合の弾性応力集中係数 $k_m^{M\eta}$ 及び $k_b^{M\eta}$ [1,2]

		$k_{m}^{M\eta}$					
ξ (deg)	η (deg)	X					
		0.00	0.04	0.10	0.20	0.50	≥ 0.8
0	180	0.2288	0.3104	0.3447	0.3194	0.2732	0.1451
0	225	0.1730	0.3519	0.3195	0.3437	0.2729	0.1243
0	270	-0.6456	-0.5834	-0.5345	-0.4913	-0.3299	-0.2556
0	315	-0.1725	-0.3521	-0.4411	-0.3879	-0.3360	-0.2906
0	360	-0.2288	-0.3104	-0.3447	-0.3194	-0.2732	-0.1451
45	180	0.1063	0.2701	0.2349	0.3369	0.1407	0.0461
45	225	0.1278	0.2312	0.2163	0.2647	0.1061	-0.0402
45	270	-0.1493	0.0603	0.0360	0.0033	-0.0713	-0.0739
45	315	-0.3368	-0.6012	-0.2624	-0.2833	-0.1359	-0.0554
45	360	-0.1063	-0.2701	-0.2349	-0.3369	-0.1407	-0.0461
90	180	0.7394	0.6953	0.6578	0.6140	0.4756	0.3133
90	225	0.1966	0.2685	0.2378	0.1873	0.3200	0.2709
90	270	0.2508	0.4862	0.4713	0.4248	0.4160	0.2315
90	315	0.1892	0.2646	0.2336	0.1833	0.5420	0.2982
90	360	-0.7394	-0.6953	-0.6578	-0.6140	-0.4756	-0.3133

		$k_{b}^{M\eta}$					
ξ (deg)	η (deg)	X					
		0.00	0.04	0.10	0.20	0.50	≥ 0.8
0	180	0.6104	0.6383	0.4330	0.2523	0.0601	0.2245
0	225	0.2835	0.1376	0.1120	0.0457	0.0057	0.0565
0	270	0.0396	0.0739	0.0878	0.0839	0.0381	0.0380
0	315	-0.2873	-0.1378	-0.0466	-0.0197	0.0317	0.0331
0	360	-0.6104	-0.6383	-0.4330	-0.2523	-0.0601	-0.2245
45	180	0.9681	0.8198	0.5968	0.0803	-0.1713	-0.2203
45	225	0.5626	0.5502	0.4288	0.2647	0.1925	0.1532
45	270	0.3990	0.4098	0.3765	0.3342	0.2360	0.1883
45	315	0.2484	0.0900	0.3142	0.2609	0.2646	0.2207
45	360	-0.9681	-0.8198	-0.5968	-0.0803	0.1713	0.2203
90	180	-0.2894	-0.3309	-0.3885	-0.3883	-0.1716	0.0033
90	225	0.7185	0.6948	0.5686	0.4231	0.1226	-0.0013
90	270	0.7176	0.6808	0.5444	0.3850	0.1000	-0.0034
90	315	0.7276	0.7023	0.5754	0.4292	0.0116	-0.0005
90	360	0.2894	0.3309	0.3885	0.3883	0.1716	-0.0033

注) 評価する減肉の位置により ξ, η がこの表にない場合には附属書5A-6表7により置換を行う。
この表にない値は線形補間により内挿して求めてもよい。

附属書5A-6表6 ノズルに曲げモーメントが作用する場合の弾性応力調整係数 $q_{M\eta}(\xi, \eta)$ [1,2]

ξ (deg)	η (deg)	$q_{M\eta}$
0	180	0.59
	225	1.09
	270	1.13
	315	1.09
	360	0.59
45	180	0.67
	225	0.63
	270	0.78
	315	0.72
	360	0.72
90	180	0.56
	225	0.76
	270	0.54
	315	0.76
	360	0.56

注) この表にない値は線形補間により内挿して求めてもよい。

附属書 5A-6表 7 枝管への曲げ負荷における角度の置換え [1,2]

附属書 5A-60

著作権法により無断での複製、転載等は禁止されております。

	$0 \leq \xi \leq \frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2} < \xi \leq \pi$	$\pi < \xi \leq \frac{3\pi}{2}$	$\frac{3\pi}{2} < \xi \leq 2\pi$
$0 \leq \eta < \pi$	$\xi = \xi$ $\eta = 2\pi - \eta$ $k_m^P = k_m^P$ $k_b^P = k_b^P$ $k_m^{M_\eta} = -k_m^{M_\eta}$ $k_b^{M_\eta} = -k_b^{M_\eta}$	$\xi = \pi - \xi$ $\eta = \pi + \eta$ $k_m^P = k_m^P$ $k_b^P = k_b^P$ $k_m^{M_\eta} = -k_m^{M_\eta}$ $k_b^{M_\eta} = -k_b^{M_\eta}$	$\xi = \xi - \pi$ $\eta = \pi + \eta$ $k_m^P = k_m^P$ $k_b^P = k_b^P$ $k_m^{M_\eta} = k_m^{M_\eta}$ $k_b^{M_\eta} = k_b^{M_\eta}$	$\xi = 2\pi - \xi$ $\eta = 2\pi - \eta$ $k_m^P = k_m^P$ $k_b^P = k_b^P$ $k_m^{M_\eta} = k_m^{M_\eta}$ $k_b^{M_\eta} = k_b^{M_\eta}$
$\pi \leq \eta \leq 2\pi$	$\xi = \xi$ $\eta = \eta$ $k_m^P = k_m^P$ $k_b^P = k_b^P$ $k_m^{M_\eta} = k_m^{M_\eta}$ $k_b^{M_\eta} = k_b^{M_\eta}$	$\xi = \pi - \xi$ $\eta = 3\pi - \eta$ $k_m^P = k_m^P$ $k_b^P = k_b^P$ $k_m^{M_\eta} = k_m^{M_\eta}$ $k_b^{M_\eta} = k_b^{M_\eta}$	$\xi = \xi - \pi$ $\eta = 3\pi - \eta$ $k_m^P = k_m^P$ $k_b^P = k_b^P$ $k_m^{M_\eta} = -k_m^{M_\eta}$ $k_b^{M_\eta} = -k_b^{M_\eta}$	$\xi = 2\pi - \xi$ $\eta = \eta$ $k_m^P = k_m^P$ $k_b^P = k_b^P$ $k_m^{M_\eta} = -k_m^{M_\eta}$ $k_b^{M_\eta} = -k_b^{M_\eta}$

④ 2.のステップ5と同じとする。

<参考文献>

- [1] Konosu, S., Ogasawara, K., and Oyamada, K., “Procedure for Plastic Collapse Assessment of a Local Thin Area near Vessel and Nozzle Intersections Subjected to Internal Pressure and External Loadings”, ASME PVP2015-45538
- [2] Oyamada, K., Konosu, S., Miyashita, T., Ohno, T., and Suzuki, H., “Validity of procedure for plastic collapse assessment of a local thin area near vessel and nozzle intersections subjected to internal pressure and external loading”, ASME PVP2015-45512