

東海第二発電所	工事計画審査資料
資料番号	補足-421-8 改0
提出年月日	平成30年3月22日

工事計画に係る補足説明資料

重大事故等クラス2機器及び

重大事故等クラス2支持構造物の強度計算の基本方針

補足-421-8 【重大事故等クラス2機器におけるクラス2機器の  
規定によらない場合の評価について】

平成30年3月

日本原子力発電株式会社

本資料は、工認添付書類「V-3-1-6 重大事故等クラス2機器及び重大事故等クラス2支持構造物の強度計算の基本方針」の記載内容を補足するためのものである。以下に補足説明項目を示す。

## 目次

1. クラス2機器の規定によらない場合の評価対象機器 .....1
2. クラス2機器の規定によらない場合の評価 .....3

1. クラス2機器の規定によらない場合の評価対象機器

設計・建設規格又は告示第501号に評価式が規定されていない場合、又は、より精緻な評価を実施する必要がある場合について、同等性又は精緻な評価を行うために使用する規定及び適用系統・設備を以下に示す。適用式の詳細については「2. クラス2機器の規定によらない場合の評価」にて説明を行う。なお、以下の適用規定は、先行PWRでの評価と同じである。

評価方法	適用規格・適用式	適用系統・設備	先行PWRの適用系統（参考）										
a. 評価式が規定されていない場合													
(a) 長方形板の大たわみ式を用いた評価	機械工学便覧 (4 辺単純支持の長方形板が等分布荷重を受ける場合の長方形板の大たわみ式) <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px 0;"> <p style="text-align: center;">計算式</p> <math display="block">\frac{256(1-\nu^2)}{\pi^4 E t^4} (P + g D_p) =</math> <math display="block">\frac{4}{3} \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{c^2} \right)^2 \frac{\delta_{max}^2}{t} + \left\{ \frac{4\nu}{a^2 c^2} + (3-\nu^2) + \left( \frac{1}{a^4} + \frac{1}{c^4} \right) \right\} \left( \frac{\delta_{max}}{t} \right)^3</math> <math display="block">\sigma_{max} = \frac{\pi^2 E \delta_{max}}{8(1-\nu^2)} \left\{ \frac{(2-\nu^2)\delta_{max} + 4t}{a^2} + \frac{\nu(\delta_{max} + 4t)}{c^2} \right\}</math> </div>	<ul style="list-style-type: none"> <li>中央制御室換気空調系 ダクト</li> <li>緊急時対策所換気系 ダクト</li> </ul> <p>* : 設計・建設規格クラス2管の規格が適用できない長方形ダクトについて評価</p> <p>* : 「2.(1) 長方形の大たわみ式を用いた矩形ダクトの評価」に記載</p>	[美浜] <ul style="list-style-type: none"> <li>換気設備</li> <li>圧力低減設備</li> </ul>										
			[伊方] <ul style="list-style-type: none"> <li>換気設備</li> <li>圧力低減設備</li> </ul>										
(b) クラス3ポンプの規定を準用した評価	設計・建設規格 (第3種機器の評価式) <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">型 式</th> <th colspan="2">クラス</th> <th rowspan="2">備 考</th> </tr> <tr> <th>2</th> <th>3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>立形ポンプ</td> <td style="text-align: center;">-</td> <td style="text-align: center;"> <math display="block">t = \frac{P D_o}{2(S \eta + P \gamma)}</math> </td> <td>・内圧を受ける円筒の応力式であるLameの修正式に基づく。</td> </tr> </tbody> </table>	型 式	クラス		備 考	2	3	立形ポンプ	-	$t = \frac{P D_o}{2(S \eta + P \gamma)}$	・内圧を受ける円筒の応力式であるLameの修正式に基づく。	<ul style="list-style-type: none"> <li>残留熱除去系海水ポンプ</li> <li>緊急用海水系ポンプ</li> <li>非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ</li> <li>高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプ</li> </ul> <p>* : 設計・建設規格クラス2ポンプの規格が適用できない立形ポンプについて評価</p> <p>* : 「2.(2) 立形ポンプの評価」に記載</p>	[美浜] <ul style="list-style-type: none"> <li>海水ポンプ</li> </ul>
			型 式	クラス		備 考							
2	3												
立形ポンプ	-	$t = \frac{P D_o}{2(S \eta + P \gamma)}$	・内圧を受ける円筒の応力式であるLameの修正式に基づく。										
[伊方] <ul style="list-style-type: none"> <li>海水ポンプ</li> </ul>													

評価方法	適用規格・適用式	適用系統・設備	先行 PWR の適用系統 (参考)
(c) ねじ山のせん断破壊式を用いた評価	機械工学便覧 (ねじ山のせん断破壊荷重評価式)  <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> <p style="text-align: center;">計 算 式</p> <math display="block">AB = (P/2) + (d_p - D_c) \tan \alpha</math> <math display="block">W_B = \pi D_c \overline{AB} z \tau_B</math> <math display="block">F_B = (W_B - F_t) / A</math> </div>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 高圧窒素ボンベラック</li> <li>・ 二次隔離弁操作室 空気ボンベラック</li> <li>・ 中央制御室退避室 空気ボンベラック (可搬の連結管と常設配管の継手)</li> </ul> <p>* : 設計・建設規格クラス 2 管の規格が適用できないねじ込み継手について評価</p> <p>* : 「2.(3) ねじ山のせん断破壊式を用いたねじ込み継手の評価」に記載</p>	[美浜] <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 制御用空気設備</li> <li>・ 換気設備</li> </ul>
		<p>* : 「2.(3) ねじ山のせん断破壊式を用いたねじ込み継手の評価」に記載</p>	[伊方] <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 原子炉補機冷却設備</li> <li>・ 制御用空気設備</li> <li>・ 計測装置</li> <li>・ 換気設備</li> </ul>
b. 精緻な評価を実施する必要がある場合			
(a) クラス 1 容器の規定を準用した評価	設計・建設規格 (第 1 種容器の規定) <ul style="list-style-type: none"> <li>・ クラス 1 容器の規定を準用し、解析による評価を実施</li> <li>・ 機器によっては、公式による評価と解析による評価を組み合わせ、その健全性を確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 残留熱除去系ポンプ</li> <li>・ 高圧炉心スプレイ系ポンプ</li> <li>・ 低圧炉心注水ポンプ (ケーシングカバー)</li> </ul> <p>* : 設計・建設規格クラス 2 機器の評価において、公式による評価を満足しない部位について評価</p> <p>* : 「2.(4) クラス 1 容器の規定を準用又は参考とした評価」に記載</p>	[美浜] <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 海水ストレーナ</li> <li>・ 起動用空気だめ</li> <li>・ 余熱除去ポンプ</li> <li>・ 充てん／高圧注入ポンプ</li> <li>・ 1 次系冷却水ポンプ</li> </ul> [伊方] <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 原子炉補機冷却水ポンプ</li> <li>・ タービン動補助給水ポンプ</li> <li>・ 電動補助給水ポンプ</li> </ul>

## 2. クラス2機器の規定によらない場合の評価

ここでは、設計・建設規格又は告示第501号に評価式\*1が規定されていない場合、又は、より精緻な評価を実施する必要がある場合の評価方法について説明する。

設計・建設規格又は告示第501号に評価式が規定されていない場合、同等性を示す評価式により評価を実施する。より精緻な評価が必要な場合は、クラス1容器の規定を準用した評価により十分な強度を有することを確認する。

図2-1に重大事故等クラス2機器の技術基準規則適合性確認フローを示す。今回の工事計画対象設備である重大事故等クラス2機器の評価のうち、フローに基づき抽出された同等性評価方法を以下に示す。

- a. 評価式が規定されていない場合
  - (a) 長方形板の大たわみ式\*2を用いた評価
  - (b) クラス3ポンプの規定を準用した評価
  - (c) ねじ山のせん断破壊式\*3を用いた評価
  
- b. 精緻な評価を実施する必要がある場合
  - (a) クラス1容器の規定を準用した評価

注記 \*1：評価式とは、設計・建設規格にて評価する場合はクラス2機器の評価式、告示第501号にて評価する場合は第3種容器、第4種容器及び第2種管の評価式を示す。

\*2：機械工学便覧に記載されている4辺単純支持の長方形板が等分布荷重を受ける場合の長方形板の大たわみ式

\*3：機械工学便覧に記載されているねじ山のせん断破壊荷重評価式

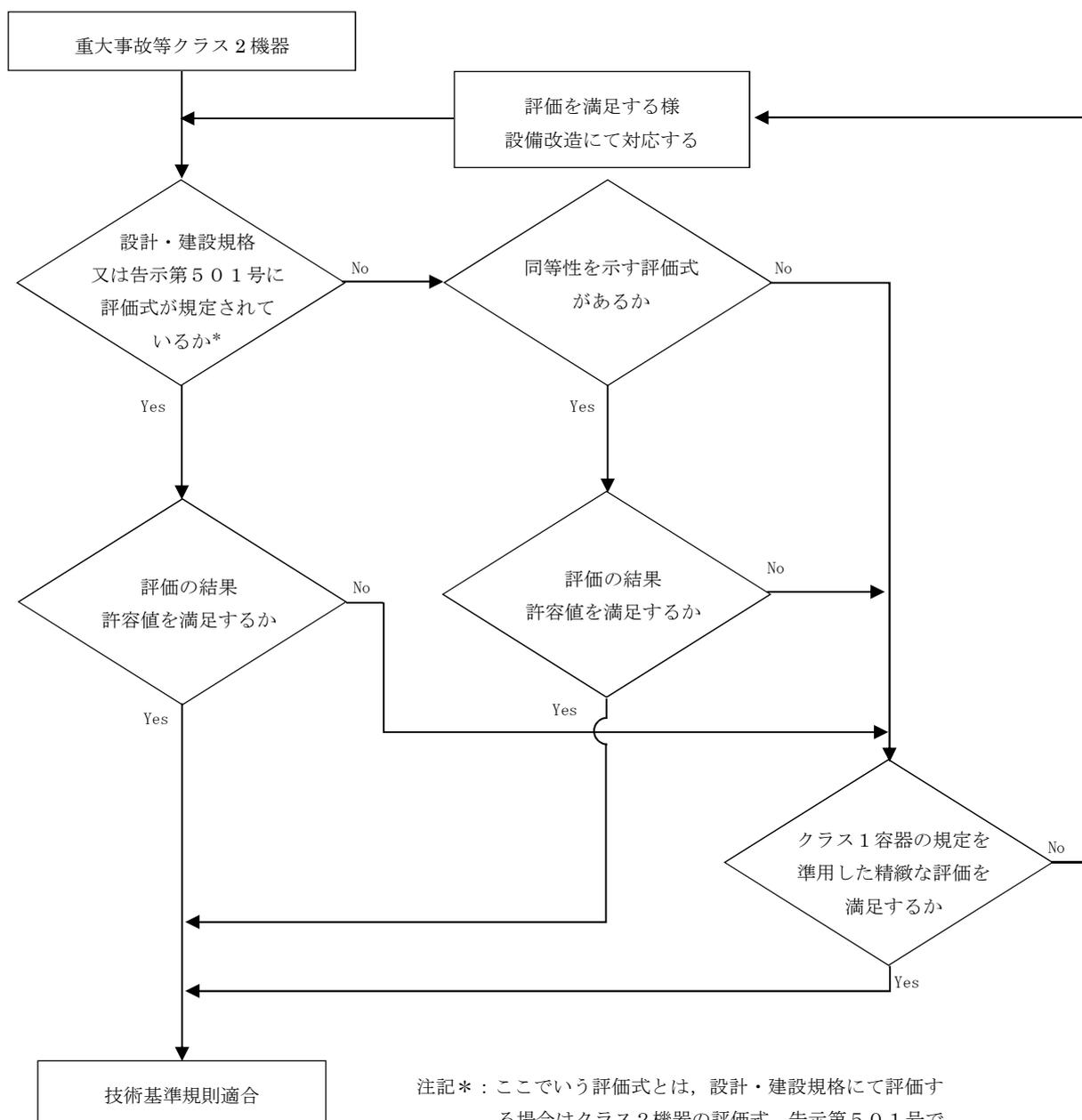


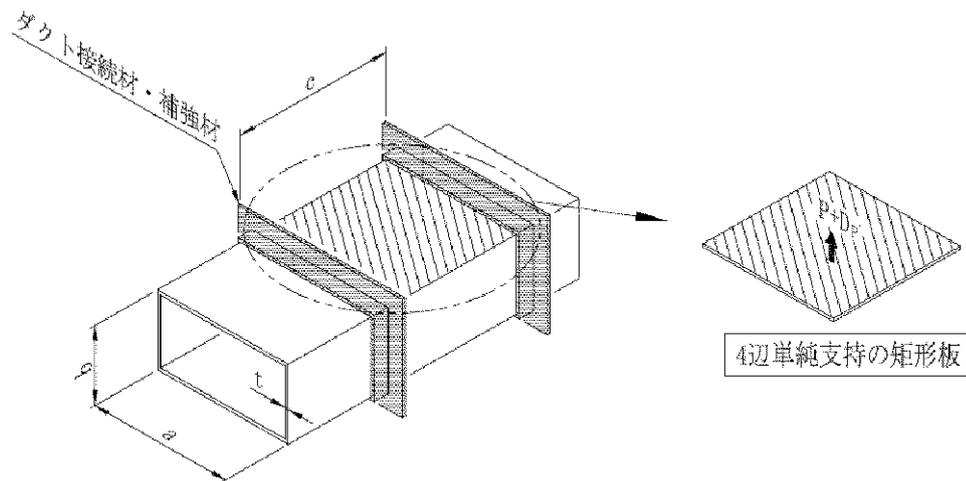
図2-1 重大事故等クラス2機器の技術基準規則適合性確認フロー

(1) 長方形の大たわみ式を用いた矩形ダクトの評価

重大事故等クラス2管のうち矩形ダクトについては、形状が円形ではないことから、設計・建設規格に規定されているクラス2管の円形を前提とした評価式を適用することができない。このため、矩形ダクトの強度評価については、以下に示すとおり重大事故等クラス2管の評価手法として妥当性を確認した機械工学便覧に記載されている長方形板の大たわみ式及び判断基準を用いた評価を実施する。

a. 評価式

クラス2管の評価式を適用できない矩形ダクトについて、矩形ダクトの任意のダクト鋼板面のうち2辺は他の2つの側面のダクト鋼板で支持されており、残りの2辺は補強部材（及び接続材）で支持された、4辺単純支持長方形板とみなすことができる。実際の使用条件では、この鋼板面に圧力と自重の等分布荷重である面外荷重が作用する。鋼板面は、この面外荷重により薄い平板が板厚の半分以上大きくたわみ、膜引張応力状態で応力の釣合いが保たれ、鋼板中心部で最大応力が発生する。このように、薄い平板が板厚の半分以上の比較的大きなたわみを生じる挙動を示す場合の応力評価には、機械工学便覧記載の長方形板の大たわみ式（次項に示す2つの式）が適していることから、矩形ダクトの強度評価には、機械工学便覧記載の4辺単純支持長方形板の大たわみ式を用いる。



計算に使う記号

記号	単位	定義
t	mm	ダクトの厚さ
a	mm	ダクト幅
b	mm	ダクト高さ
c	mm	ダクト接続材・補強材の接続ピッチ
P	MPa	最高使用圧力
g	mm/s <sup>2</sup>	重力加速度
D <sub>p</sub>	kg/mm <sup>2</sup>	単位面積あたりのダクト鋼板の質量
E	MPa	ヤング率
ν	—	ポアソン比
δ <sub>max</sub>	mm	面外荷重によるダクト鋼板の最大変位量
σ <sub>max</sub>	MPa	面外荷重による一次応力

計算式

$$\frac{256 (1-\nu^2)}{\pi^6 E t^4} (P + g D_p) =$$

$$\frac{4}{3} \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{c^2} \right)^2 \frac{\delta_{max}}{t} + \left\{ \frac{4\nu}{a^2 c^2} + (3-\nu^2) + \left( \frac{1}{a^4} + \frac{1}{c^4} \right) \right\} \left( \frac{\delta_{max}}{t} \right)^3$$

$$\sigma_{max} = \frac{\pi^2 E \delta_{max}}{8 (1-\nu^2)} \left\{ \frac{(2-\nu^2) \delta_{max} + 4t}{a^2} + \frac{\nu (\delta_{max} + 4t)}{c^2} \right\}$$

b. 判断基準

矩形ダクトの強度評価では、設計・建設規格クラス2管に規定のある厚さ計算及び応力計算を参考とし、機械工学便覧のたわみの式を適用した評価を実施する。また、判断基準については以下のとおりとし、裕度については設計・建設規格のクラス2管の規定における許容引張応力S値を適用する。

(a) 厚さ計算

最少板厚を求める場合は、面外荷重による一時応力 $\sigma_{max}$ を許容引張応力S値に置き換えて、2式を解き、両式を満足する $\delta_{max}$ 及びtを求める。この時のtを矩形ダクトの計算上必要な厚さと定義し、ダクトの実際使用厚さが計算上必要な厚さを満足することを確認する。

(b) 応力計算

一次応力を求める場合は、ダクトの実際使用厚さを用いて、2式を解き、両式を満足する $\delta_{max}$ 及び $\sigma_{max}$ を求める。この時の $\sigma_{max}$ を矩形ダクトの一次応力と定義し、一次応力が許容引張応力S値の1.5倍以下であることを確認する。

## (2) 立形ポンプの評価

重大事故等クラス2ポンプのうち立形ポンプについては、設計・建設規格におけるクラス2ポンプに評価式が規定されていないため、立形ポンプの強度評価については、以下に示すとおり重大事故等クラス2ポンプの評価手法として妥当性を確認した設計・建設規格に規定されているクラス3ポンプの評価式及び判断基準を用いた評価を実施する。

### a. 評価式

クラス2ポンプ及びクラス3ポンプのケーシングの強度評価式を表2-1に示す。

ケーシング厚さの評価式については、一般的な材料力学における内圧を受ける薄肉円筒の式又は内圧を受ける円筒の応力式であるLameの修正式に基づいており、横形ポンプにおいては、クラス2ポンプとクラス3ポンプの考え方は同一であり、技術的に同一の強度を有することが要求されている。この考え方については、クラス2管とクラス3管の厚さ計算についても同様であることから、クラス2ポンプに評価式が規定されていない重大事故等クラス2ポンプのうち立形ポンプのケーシングの強度評価については、クラス3ポンプに規定されている立形ポンプの評価式を用いる。

表2-1 設計建設規格 ケーシングの強度評価式

ポンプ型式	設計・建設規格強度評価式		備考
	クラス 2	クラス 3	
横形ポンプ	$t = \frac{PA}{2S}$	$t = \frac{PA}{2S}$	・同じ式である ・内圧を受ける薄肉円筒の式に基づく
立形ポンプ	—	$t = \frac{PD_o}{2(S\eta + Py)}$	・内圧を受ける円筒の応力式であるLameの修正式に基づく。
配管 (参考)	$t = \frac{PD_o}{2S\eta + 0.8P}$	$t = \frac{PD_o}{2S\eta + 0.8P}$	・内圧を受ける円筒の応力式であるLameの修正式に基づく。

$t$  : ケーシング及び吐出エルボ, 揚水管又はボウルの計算上必要な厚さ (mm)  
 $P$  : 最高使用圧力 (MPa)  
 $A$  : 設計・建設規格 図PMC-3320-6又は設計・建設規格 図PMD-3310-1から図PMD-3310-6までに示す寸法 (mm)  
 $S$  : 最高使用温度における設計・建設規格 付録材料図表Part5表5に規定する材料の許容引張応力 (MPa)  
 $D_o$  : 設計・建設規格 図PMD-3310-7に示す吐出エルボの外径寸法, 揚水管の外径寸法, 個々のボウルの吸込み側の最大外径寸法 (mm)  
 $\eta$  : 長手継手の効率で, 設計・建設規格 PMD-3110に定めるところによる。  
 $y$  :  $0.4 (D_o / t \geq 6.0 \text{ の場合})$   
 $d / (d + D_o) (D_o / < 6.0 \text{ の場合})$

b. 判断基準

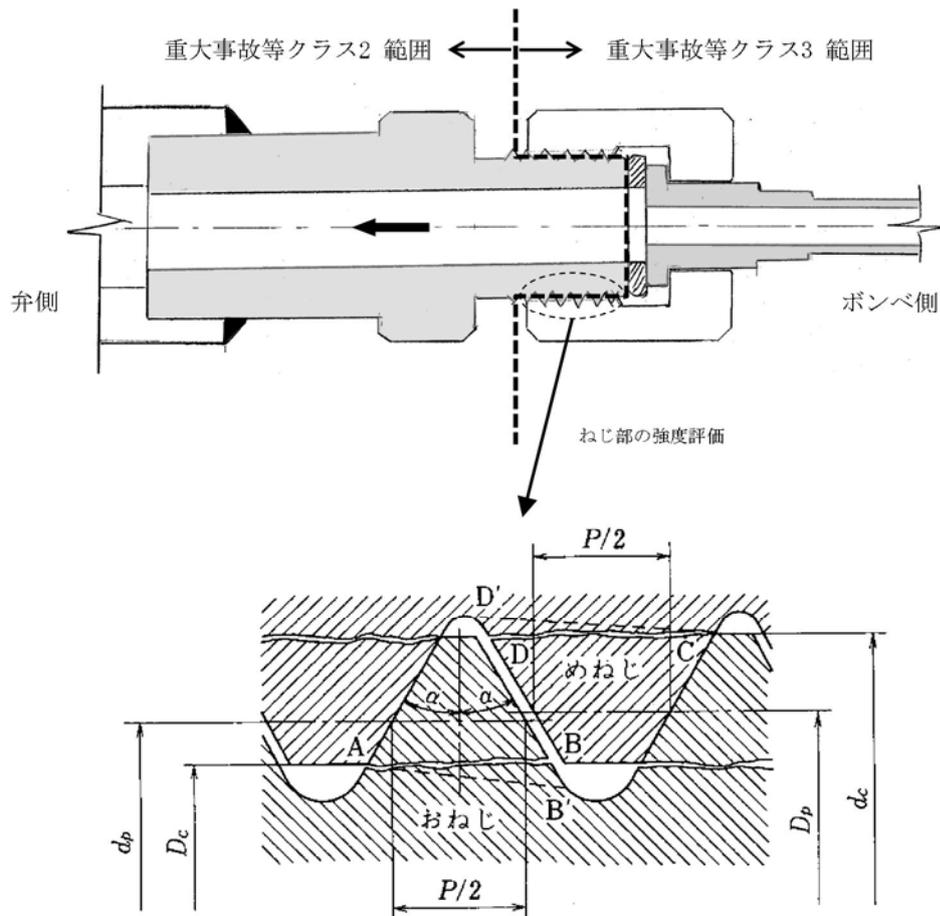
立形ポンプのケーシングの強度評価では, クラス 3 ポンプに規定されている立形ポンプの評価式を用いた評価を実施するが, 裕度については設計・建設規格のクラス 2 ポンプのケーシングの規定における許容引張応力  $S$  値を適用する。

(3) ねじ山のせん断破壊式を用いたねじ込み継手の評価

重大事故等クラス2管のうちねじ込み継手については端部がねじ部であるため設計・建設規格に規定されているクラス2管の評価式を適用することができない。このため、ねじ部の強度評価については、以下に示す機械工学便覧に記載されているねじ部のせん断破壊評価式を準用した評価を実施する。

a. 評価式

クラス2管の評価式を適用できないねじ部のせん断応力評価について、使用するねじはJIS B 0208 (1965)「ウィット細目ネジ及びユニファイ細目ネジ」に適合したものを使用することから、ねじ部の強度評価に用いられる機械工学便覧記載のねじ山のせん断破壊式を用い評価する。また、継手部の厚さ計算については、設計・建設規格に規定されている計算上必要な厚さの規定を用いる。



計算に使う記号及び計算式

記号	単位	定義
AB	mm	おねじのせん断長さ
P	mm	ピッチ
$d_p$	mm	おねじの外径
$D_c$	mm	おねじの有効径
$\alpha$	°	ねじ角度
$W_B$	N	おねじのねじ山の許容軸方向荷重
Z	—	負荷能力があるとみなされるねじ山の数 $z = (L - 0.5P)/P$
$\tau_B$	MPa	おねじ材料の許容せん断応力
L	mm	ねじの基準長さ
$F_B$	MPa	おねじの耐圧力
$F_t$	N	ねじ締付トルクによる引抜荷重
A	mm <sup>2</sup>	内圧評価断面積

計算式
$AB = (P/2) + (d_p - D_c) \tan \alpha$ $W_B = \pi D_c \overline{AB} z \tau_B$ $F_B = (W_B - F_t) / A$

b. 許容値

ねじ部のせん断評価は、機械工学便覧記載のせん断破壊式を準用した評価を実施するが、ねじ込み継手は管と管とを接続する継手であることから許容値については設計・建設規格クラス2管の規定における許容引張応力Sを基に求めた許容せん断応力 $S/\sqrt{3}$ を適用する。

(4) クラス1容器の規定を準用又は参考とした評価

重大事故等クラス2機器の評価において、公式による評価を満足しない部位については、より精緻な評価を実施する必要があるため、設計・建設規格にて規定されている準用規定に基づき、クラス1容器の規定を準用し、解析による評価を実施する。そのため機器によっては、公式による評価と解析による評価を組み合わせ、その健全性を確認する方針とする。

クラス1容器の規定を満足しない場合は、重大事故等時に求められる機能を発揮できるよう、クラス1容器の規定を参考とした評価を実施する。

a. 公式による評価と解析による評価の組合せ

設計・建設規格のクラス2機器の評価は公式による評価が基本となるが、公式による評価を満足しない部位を含む機器は、公式による評価と解析による評価を組み合わせた評価を実施する。

(a) クラス2機器の公式による評価

設計・建設規格のクラス2機器の評価については、設計・建設規格 PVC-3000（クラス2容器の設計）、PPC-3000（管の設計）、PMC-3000（クラス2ポンプの設計）の各機器の規定において、胴、管、ケーシング等の一般部の板厚評価式、開口部に対する補強及びフランジの簡易評価式等、強度評価式が種々に与えられているが、構造不連続部等の局所に着目した強度評価方法については明確にされていない。

設計建設規格のクラス2機器であっても、構造不連続部等の局所的に応力が高い部分も存在すると考えられるが、各機器の規定されている強度評価は、一般部に対し、許容値を低く設定（許容引張応力 $S$ ）して裕度のある評価を行うことで、局所の健全性も担保している。

(b) 解析による評価

評価対象部位のうち公式による評価を満足しない部位については、より精緻な評価としてクラス1容器の規定を準用し、解析による評価を実施する。解析による評価は、構造不連続部等の局所的に応力が高い部位を模擬した詳細な解析に応じた許容値（許容応力 $S_m$ ）を設定し、より精緻な評価を行うことで、局所の健全性を確認している。

(c) 評価対象部位間の相互影響

前述の(b)項に記載の機器は、評価対象部位ごとに公式と解析による評価が混在する機器であり、以下に示すとおり部位間の相互影響を適切に考慮することで、機器としての健全性を確認する。

イ. 一体構造体

主管に設けられた管台等の一体構造体中に存在する構造不連続部等の局所では、一般部に比べ発生応力が大きくなり、その局部応力により局所周辺も発生応力が引き上げられると考えられる。そのため、局部応力が隣接する部位に及ぼす影響の有無を適切に評価する必要がある。

局部応力が隣接する部位に及ぼす影響については、設計・建設規格 解説にその考え方が示されており、設計・建設規格 解説 PVB-3513（補強面積の設置条件）及び設計・建設規格 解説 PVB-3530（補強をしない穴の適合条件）では、殻理論に基づく軸対称殻上の局所が及ぼす影響範囲について示されている。設計・建設規格 解説 PVB-3513には「 $0.5\sqrt{R \cdot t}$ に局部応力のほとんどが収まる」と示されている。

以上のことから、主管に設けられた管台等の一体構造体内に存在する構造不連続部等の局所の評価について、局部応力が及ぼす影響範囲 $0.5\sqrt{R \cdot t}$ を網羅するように適切にモデル化することで、一体構造体として評価を実施する。

ロ. 一体でない構造体

フランジとボルト等の一体でない異なる構造体中に存在する評価対象部位間では、荷重・変位伝達等を個別に設定することで、独立した部位として個々に評価を実施する。