

本資料のうち、枠囲みの内容は、
営業秘密又は防護上の観点から
公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	工認-1027 改 2
提出年月日	平成 30 年 9 月 13 日

V-3-9-1-3-2 所員用エアロックの強度計算書

目次

1. 概要	1
2. 一般事項	1
2.1 構造計画	1
2.2 評価方針	3
2.3 適用基準	3
2.4 記号の説明	4
2.5 計算精度と数値の丸め方	6
3. 評価部位	7
4. 強度評価	8
4.1 強度評価方法	8
4.2 荷重の組合せ及び許容限界	8
4.3 計算方法	12
4.4 計算条件	24
4.5 応力の評価	24
5. 評価結果	24
5.1 重大事故等対処設備	24
6. 引用文献	24

1. 概要

本計算書は、所員用エアロックの強度計算書である。

所員用エアロックは、設計基準対象施設の所員用エアロックを重大事故等クラス2容器として兼用する機器である。

以下、重大事故等クラス2容器として添付書類「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」にて設定している構造強度の設計方針に基づき所員用エアロックの強度評価について示す。

2. 構造説明

2.1 構造計画

所員用エアロックの構造計画を表 2-1 に示す。

表 2-1 構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
<p>・所員用エアロックは原子炉格納容器に溶接で支持される。</p>	<p>・内径 <input type="text"/>、板厚 <input type="text"/> 長さ <input type="text"/> の円筒胴及び板厚 <input type="text"/> の扉板で構成される鋼製構造物である。</p>	<p>所員用エアロック 拡大図 (単位: mm)</p>

2.2 評価方針

所員用エアロックの応力評価は、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 2.3 重大事故等クラス2機器であって原子炉格納容器の構造及び強度」に基づき「2.1 構造計画」にて示す所員用エアロックの部位を踏まえた「3.2 解析範囲」にて設定する箇所において、供用状態Eにおける温度、圧力の条件による応力等が許容限界に収まることを、「4. 強度評価」にて示す方法にて確認することで実施する。確認結果を「5. 評価結果」に示す

所員用エアロックの強度評価フローを図 2-1 に示す。

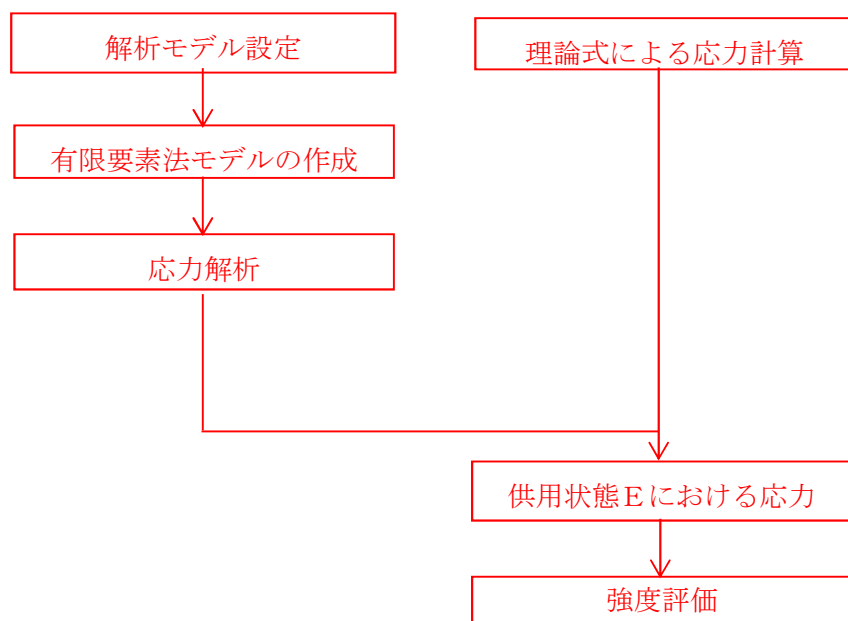


図 2-1 所員用エアロックの強度評価フロー

2.3 適用基準

適用基準を以下に示す。

- (1) 発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2005年版（2007年追補版含む。） J S M E S N C 1-2005/2007（日本機械学会）（以下「設計・建設規格」という。

2.4 記号の説明

記号	記号の説明	単位
A	面積	mm ²
a	平板の長辺の長さ	mm
b	長さ, 平板の短辺の長さ	mm
d	各部位の直径 (i=1, 2, b, h, p)	mm
h	長さ	mm
L	ビームのスパン	mm
ℓ	長さ	mm
M	曲げモーメント	N・mm
P	圧力	kPa
P _{SA}	内圧	kPa
P _b	一次曲げ応力	MPa
P _L	一次局部膜応力	MPa
P _m	一次一般膜応力	MPa
q	分布荷重	N/mm ²
R	半径	mm
S _u	材料の設計引張強さ	MPa
T _{SA}	温度	°C
t	板厚	mm
w _B	単位長さあたりに加わる荷重	N/mm
w _D	単位長さあたりに加わる荷重	N/mm
y	長さ	mm
y _G	長さ	mm
Z	断面係数	mm ³
α	係数	—
β	係数	—
θ	角度	°
σ _b	曲げ応力	MPa

2.5 計算精度と数値の丸め方

表示する数値の丸め方は表 2-2 に示すとおりとする。

表 2-2 表示する数値の丸め方

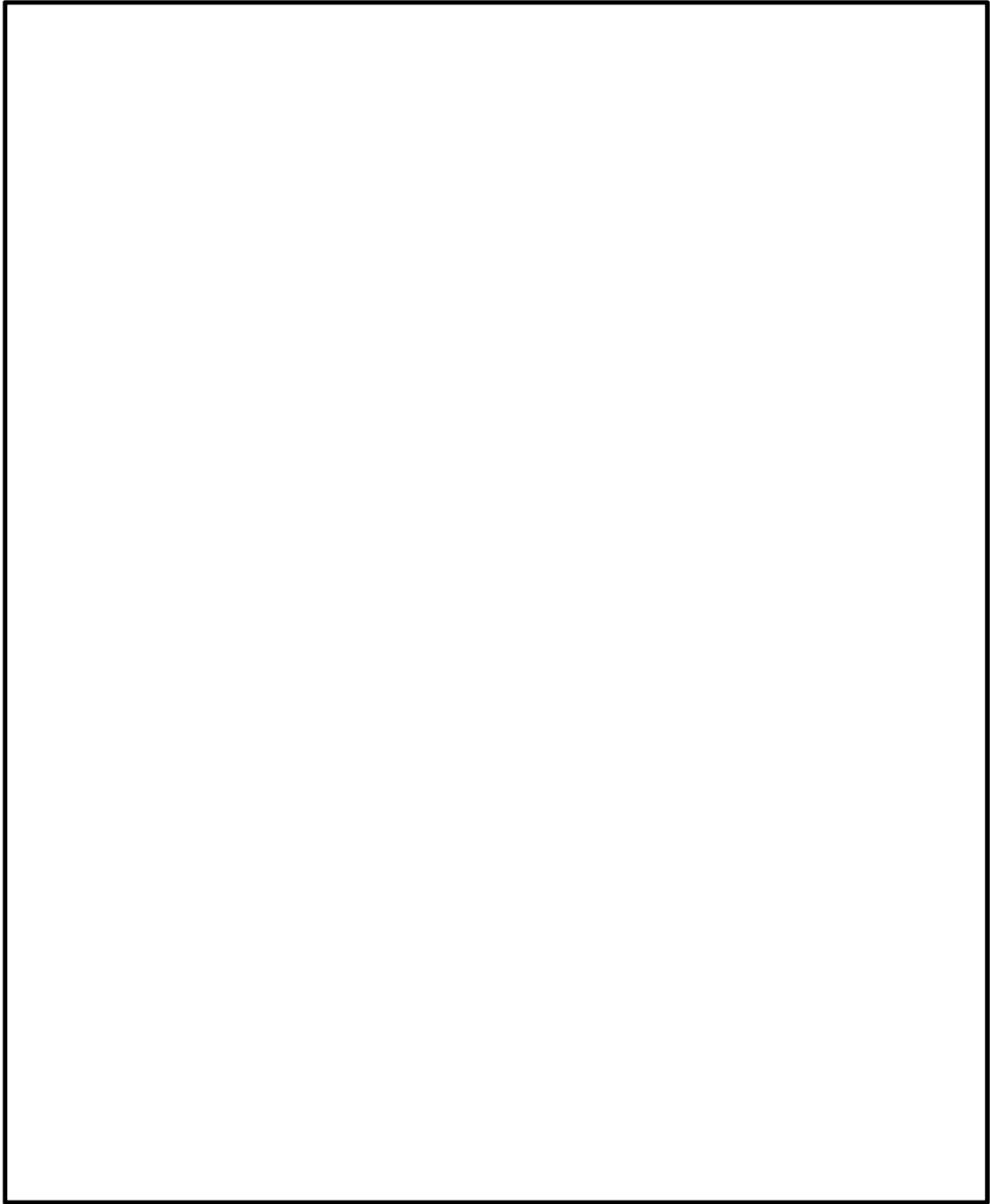
数値の種類	単位	処理桁	処理方法	表示桁
面積	mm ²	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁* ¹
断面係数	mm ³	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁* ¹
断面二次モーメント	mm ⁴	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁* ¹
力	N	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁* ¹
モーメント	N・mm	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁* ¹
算出応力	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位
許容応力* ²	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数位

注記 *1：絶対値が 1000 以上のときは、べき数表示とする。

*2：設計・建設規格 付録材料図表に記載された温度の中間における引張強さ及び降伏点は比例法により補間した値の小数点以下第 1 位を切り捨て、整数位までの値とする。

3. 評価部位

所員用エアロックの形状及び主要寸法を図 3-1 に、使用材料及び使用部位を表 3-1 に示す。



(単位：mm)

図 3-1 所員用エアロックの形状及び主要寸法

表 3-1 使用材料表

使用部位	使用材料		備考
内側・外側扉	SGV49 相当		SGV480*
内側・外側隔壁板	SGV49 相当		SGV480*
垂直・水平ビーム	SGV49 相当		SGV480*
ドライウエル円錐部シェル	SGV49 相当		SGV480*
補強板	SGV49 相当		SGV480*

注記 *：新 JIS を示す。

4. 強度評価

4.1 強度評価方法

- (1) 所員用エアロックは、原子炉格納容器のドライウエル円錐部に支持される構造物である。所員用エアロックに作用する自重、機械的荷重及び圧力荷重を用いて、構造強度評価を行う。
- (2) 構造評価に用いる寸法は、公称値を使用する。
- (3) 概略構造図を表 2-1 に示す。

4.2 荷重の組合せ及び許容限界

4.2.1 荷重の組合せ及び供用状態

所員用エアロックの荷重の組合せ及び供用状態のうち、重大事故等対処設備に用いるものを表 4-1 に示す。

詳細な荷重の組合せは、添付書類「V-1-8-1 原子炉格納施設の設計条件に関する説明書」に従い、対象機器の設置位置等を考慮し決定する。なお、考慮する荷重の組合せは、組合せる荷重の大きさを踏まえ、評価上厳しくなる組合せを選定する。

4.2.2 許容限界

所員用エアロックの許容限界を表 4-2 及び表 4-3 に示す。

4.2.3 使用材料の許容応力評価条件及び許容応力

所員用エアロックの許容応力評価条件のうち、重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4-4 に示す。また、使用材料のうち、重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4-5 及び表 4-6 に示す。

表4-1 荷重の組合せ及び供用状態（重大事故等対処設備）

施設区分		機器名称	機器等の区分	荷重の組合せ	供用状態
原子炉格納施設	原子炉格納容器	所員用エアロック	重大事故等クラス2容器	$D + P_{SA}$	E*

D : 死荷重

P_{SA} : 運転状態Vにおける圧力荷重

注記 * : 供用状態Eとして供用状態Dの許容限界を用いる。

表4-2 許容限界

供用状態	一次一般膜応力	一次応力 (曲げ応力を含む)
E*	$2/3 S_u$	$1.5 \times 2/3 S_u$

注記 * : 供用状態Eとして供用状態Dの許容限界を用いる。

表 4-3 使用材料の許容応力評価条件（重大事故等対処設備）

材料	温度条件 (°C)		S (MPa)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	S_y (RT) (MPa)
	SGV480	周辺環境温度	200	-	-	422
SNCM439	周辺環境温度	200	-	-	865	-

表4-4 許容応力

(単位：MPa)

材料	温度 (°C)	供用状態	許容応力	
			一次応力	
			P_m	$P_L + P_b$
SGV480	200	E	281	422

4.2.4 設計荷重

(1) 重大事故等対処設備としての評価圧力及び評価温度

内圧 P_{SA} 620 kPa

温度 T_{SA} 200 °C

(2) 死荷重

a. 所員用エアロックの自重

b. ドライウエルの自重

所員用エアロックより上部のドライウエルの自重及びシェルに取付くアタッチメントの自重の重量を死荷重とする。

4.3 計算方法

4.3.1 応力評価点

所員用エアロックの応力評価点は、所員用エアロックを構成する部材の形状及び荷重伝達経路を考慮し、発生応力が大きくなる部位を選定する。選定した応力評価点を表 4-5 及び図 4-1 に示す。

表 4-5 応力評価点

応力評価点番号	応力評価点
P 1	内側扉
P 2	外側扉
P 3	内側隔壁板
P 4	内側隔壁垂直ビーム
P 5	内側隔壁上部水平ビーム
P 6	内側隔壁下部水平ビーム
P 7	外側隔壁板
P 8	外側隔壁垂直ビーム
P 9	外側隔壁上部水平ビーム
P 1 0	外側隔壁下部水平ビーム
P 1 1	円筒部と補強板との結合部 (P 1 1 - 1 ~ P 1 1 - 3)
P 1 2	ドライウェル円錐部シェルと補強板との結合部 (P 1 2 - 1 ~ P 1 2 - 3)

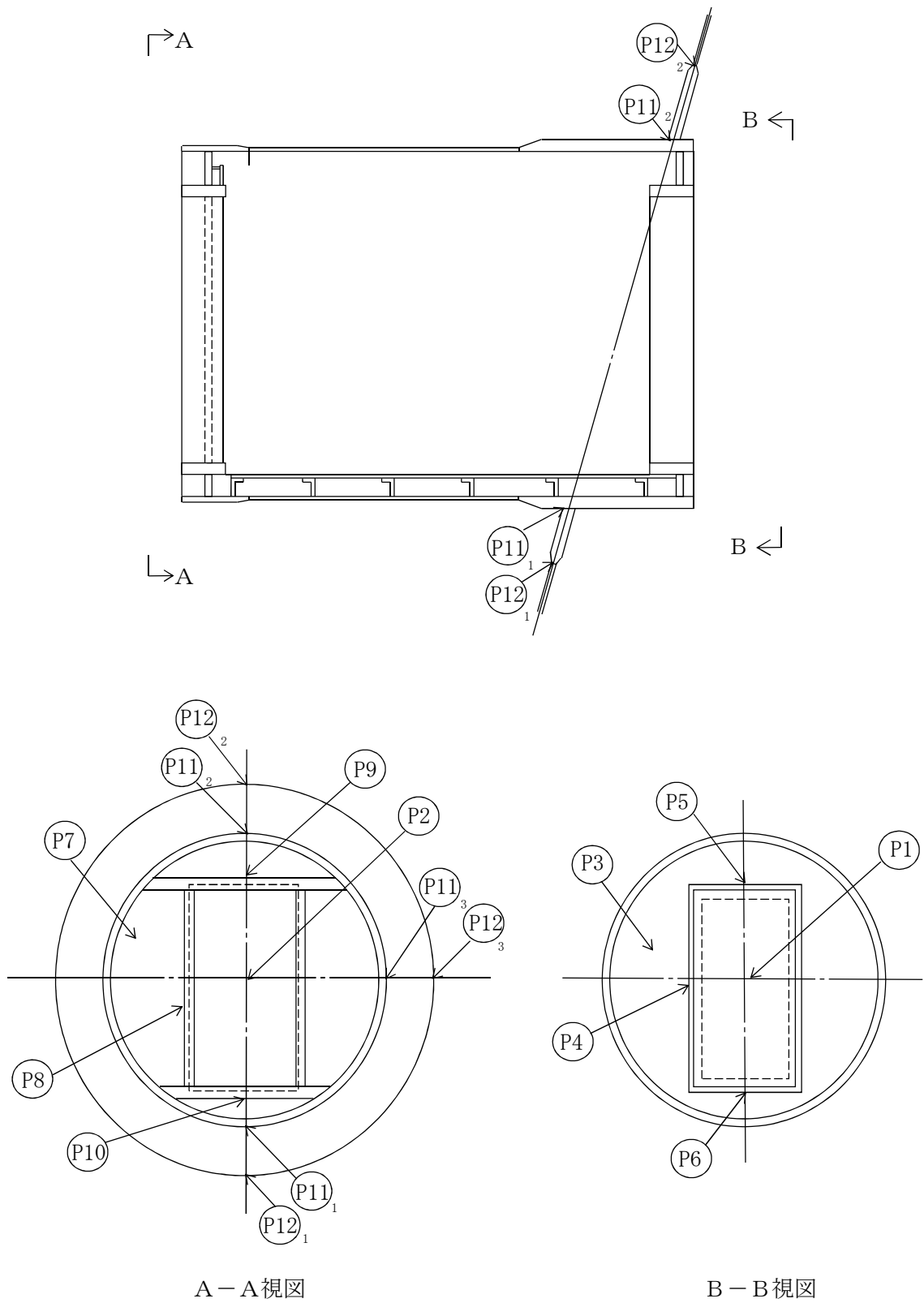


図 4-1 所員用エアロックの応力評価点

4.3.2 応力計算方法

荷重により所員用エアロックに生じる応力の算出には、応力評価点P 1～P 10は理論解で計算し算出する。応力評価点P 11及びP 12の算出には、三次元シェルモデルによる有限要素解析手法を適用する。

4.3.2.1 内側扉、外側扉、内側遮蔽壁及び外側遮蔽壁（応力評価点P 1～P 8）の応力評価方法

(1) 内側扉（応力評価点P 1）

a. 形状及び寸法

内側扉の形状及び寸法を図 4-2 に示す。

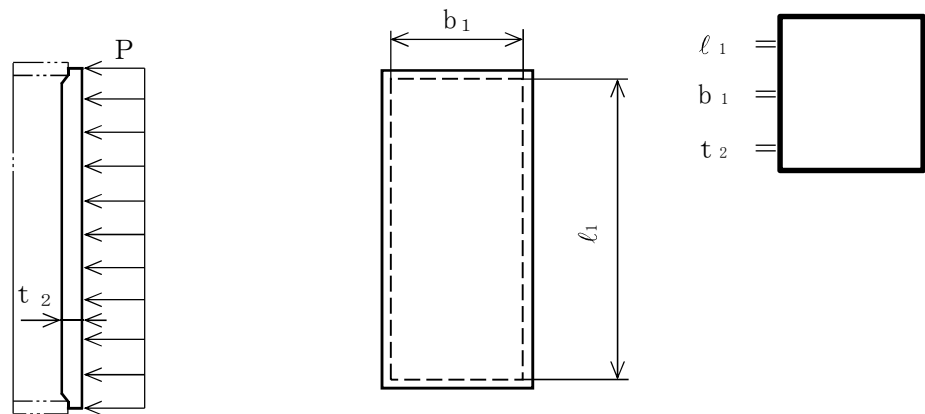


図 4-2 内側扉の形状及び寸法（単位：mm）

b. 評価圧力による応力

評価圧力による内側扉の応力は、引用文献(1)により、4辺支持の矩形板に等分布荷重を受けるものとして次のように計算する。最大応力は扉の中央に発生し、その応力は次のようになる。

$$\sigma_b = \pm \beta \cdot \frac{q \cdot b^2}{t^2} = \pm \beta \cdot \frac{P \cdot b_1^2}{t_2^2}$$

ここで β は a/b によって定まる係数である。

$$\frac{a}{b} = \frac{l_1}{b_1}$$

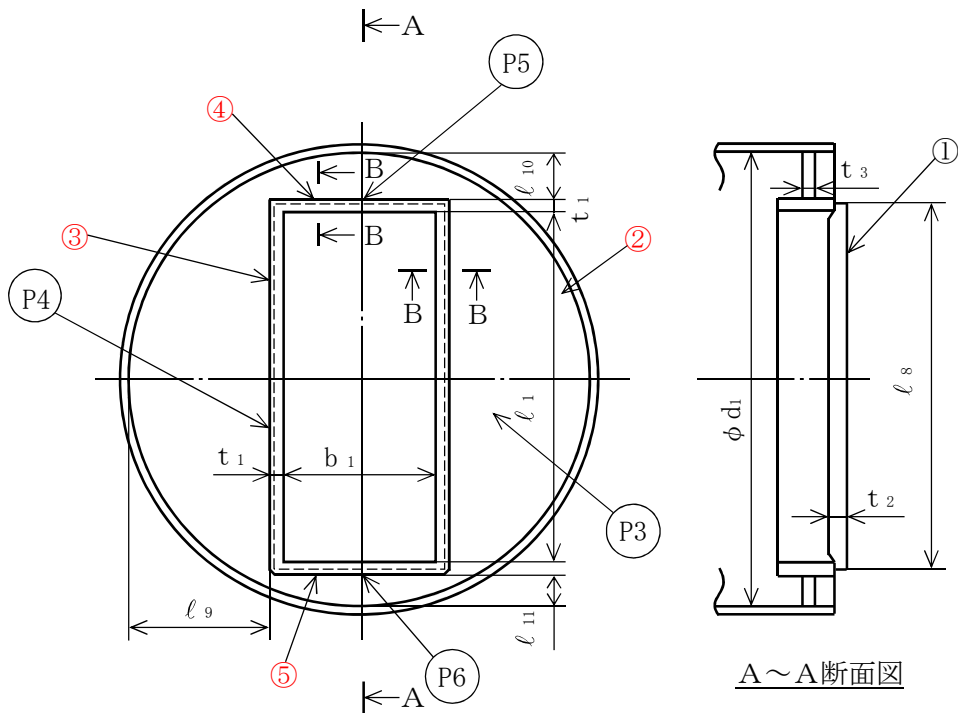
(2) 外側扉 (応力評価点 P 2)

外側扉は内側扉と同じ形状であり、荷重としては、評価圧力しか受けることがないので、「5.2.1(1) 内側扉」と同じ結果となる。

(3) 内側隔壁 (応力評価点 P 3 ~ P 6)

a. 形状及び寸法

内側隔壁の形状及び寸法を図 5-3 に示す。



- ① 内側扉 ② 隔壁板 ③ 垂直ビーム
- ④ 上部水平ビーム ⑤ 下部水平ビーム

(単位 : mm)

図 4-3 内側隔壁の形状及び寸法

b. 隔壁板（応力評価点 P 3）

(a) 評価圧力による応力

評価圧力による隔壁板の応力は，引用文献(1)により，周辺固定の円板に等分布荷重を受けるものとして次のように計算する。

最大曲げモーメント

$$M_r = \frac{q \cdot a^2}{8} = \frac{P \cdot (d_1/2)^2}{8}$$

曲げ応力

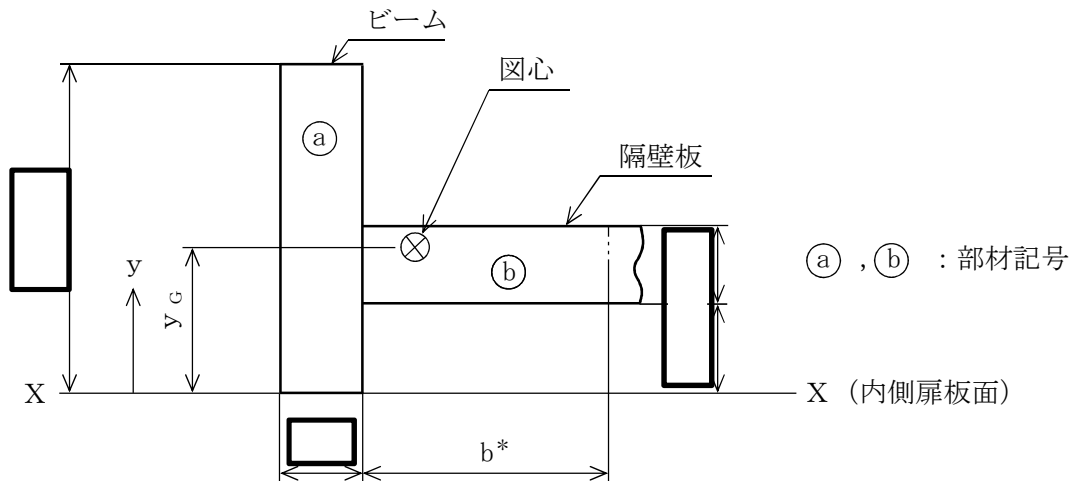
$$\sigma_b = \frac{M_r}{Z}$$

ここに，

$$Z = \frac{t^3}{6}$$

c. ビーム（応力評価点 P 4～P 6）

(a) 断面係数



注記 * : b 寸法は表 4-8 に示す。

図 4-4 ビームの断面（図 4-3 B～B 断面図）（単位：mm）

垂直ビーム，上部及び下部水平ビームの断面係数は，次により求められる。計算結果は表 4-8 に示す。

$$Z = \frac{\sum [b \cdot h^3 / 12 + A \cdot (y - y_G)^2]}{\ell - y_G}$$

ここに,

b : 部材の幅 (mm)

h : 部材の高さ (mm)

A : 部材の面積 (mm²)

y : X-X軸から各部材の図心までの距離 (mm)

y_G : X-X軸から部材全体の図心までの距離 (mm)

$$= \sum (A \times y) / \sum A$$

ℓ : ビームの高さ (mm)

表 4-6 ビームの断面係数

名称	部材	部材の幅	面積	部材図心	面積×図心	全体の図心	部材の断面二次モーメント		断面係数
		b^{*1} (mm)	A ($\times 10^3 \text{mm}^2$)	y (mm)	$A \times y$ ($\times 10^6 \text{mm}^3$)	y_G (mm)	$b \cdot h^3/12$ ($\times 10^6 \text{mm}^4$)	$A \cdot (y-y_G)^2$ ($\times 10^6 \text{mm}^4$)	Z ($\times 10^6 \text{mm}^3$)
垂直 ビーム	㊶								
	㊷								
	Σ								
上部水平 ビーム	㊶								
	㊷								
	Σ								
下部水平 ビーム	㊶								
	㊷								
	Σ								

注記 *1：寸法は仮定した長さを示す。

*2：寸法は図 5-3 を参照。

(b) 評価圧力による応力

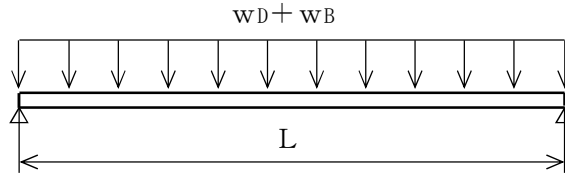


図 4-5 内圧によりビームに加わる荷重

評価圧力により扉にかかる荷重が垂直ビーム、上部及び下部水平ビームに加わるものとする。各ビームの単位長さあたりに加わる荷重、 w_D は次のようになる。

$$w_D = \frac{P \cdot (\ell_1 + 2 \cdot t_1) \cdot (b_1 + 2 \cdot t_1)}{2 \cdot (\ell_1 + b_1 + 2 \cdot t_1)}$$

評価圧力により隔壁板に加わる荷重の半分が各ビームに加わるものとする。各ビームの単位長さあたりに加わる荷重、 w_B は次のようになる。

- ・垂直ビームに対して、

$$w_B = \frac{P \cdot \ell_9}{2}$$

- ・上部水平ビームに対して、

$$w_B = \frac{P \cdot \ell_{10}}{2}$$

- ・下部水平ビームに対して、

$$w_B = \frac{P \cdot \ell_{11}}{2}$$

- ・最大曲げモーメントは次により求められる。計算結果は表 5-3 に示す。

$$M_{\max} = \frac{(w_D + w_B) \cdot L^2}{8}$$

ここに、 L ：ビームのスパン

$$= \ell_1 + 2 \cdot t_1 \quad (\text{垂直ビームに対して})$$

$$= b_1 + 2 \cdot t_1 \quad (\text{上部, 下部水平ビームに対して})$$

- ・最大曲げ応力は次により求められる。計算結果は表 5-3 に示す。

$$\sigma_b = \frac{M_{\max}}{Z}$$

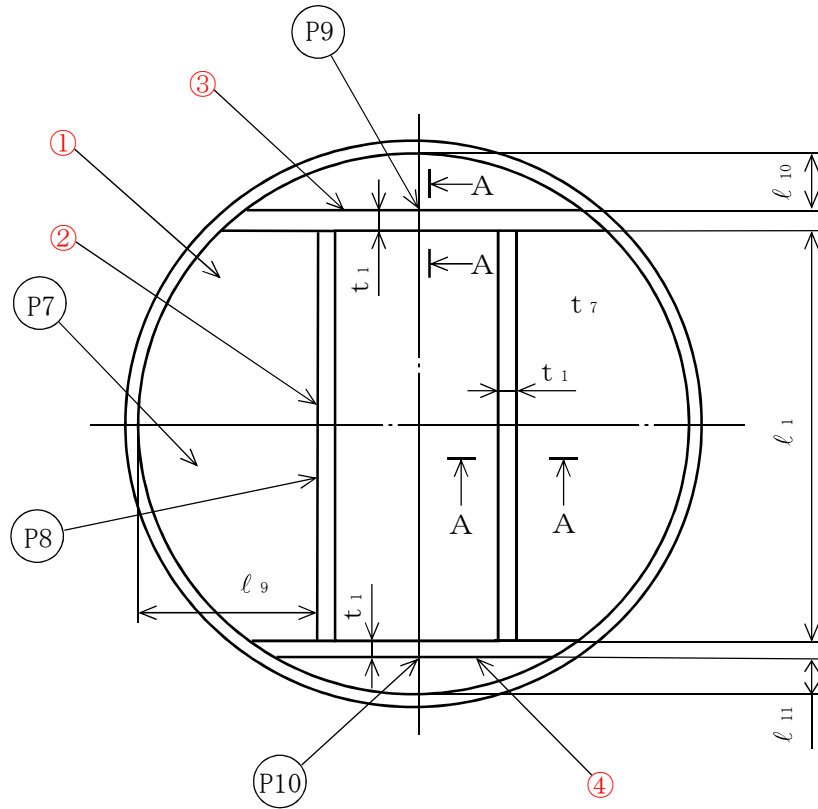
表 4-7 ビームの評価圧力による応力

応力 評価点	名 称	$w_D + w_B$ (N/mm)	L (mm)	M_{max} ($\times 10^6 \text{Nmm}$)	Z ($\times 10^6 \text{mm}^3$)	σ_b (MPa)
P 4	垂 直 ビーム					184
P 5	上部水平 ビーム					25
P 6	下部水平 ビーム					22

(4) 外側隔壁 (応力評価点 P 7 ~ P 1 0)

a. 形状及び寸法

外側隔壁の形状及び寸法を図 5-6 に示す。



- ① 隔壁板 ② 垂直ビーム ③ 上部水平ビーム
- ④ 下部水平ビーム

図 4-6 外側隔壁の形状及び寸法 (単位 : mm)

b. 隔壁板 (応力評価点 P 7)

(a) 評価圧力による応力

評価圧力による隔壁板の応力は、引用文献(1)により、隔壁板を長径 l_1 、短径 l_9 であるような周辺固定の楕円板であるとして計算する。

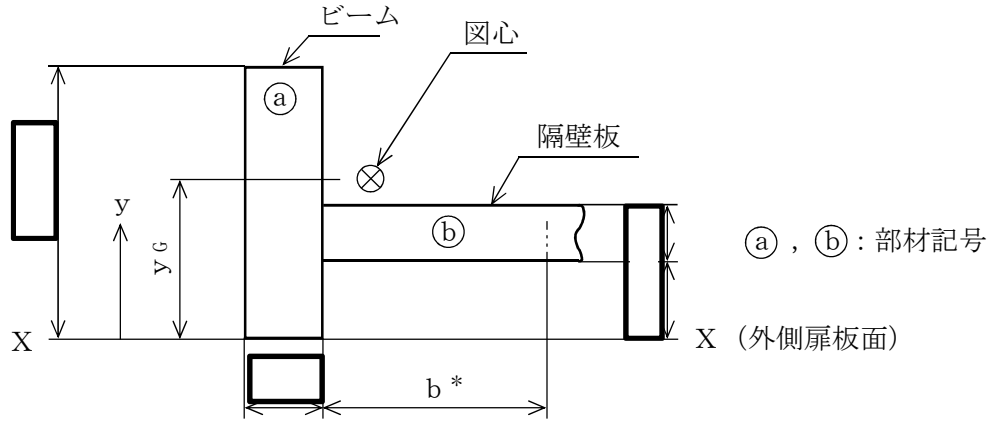
$$\alpha = \frac{b}{a} = \frac{l_9/2}{l_1/2} = \frac{l_9}{l_1}$$

最大応力は次のように計算される。

$$\sigma_b = \frac{6 \cdot q \cdot b^2}{t^2 \cdot (3 + 2 \cdot a^2 + 3 \cdot a^4)} = \frac{6 \cdot P \cdot (\ell_g/2)^2}{t_7^2 \cdot (3 + 2 \cdot a^2 + 3 \cdot a^4)}$$

c. ビーム（応力評価点 P 8～P 10）

(a) 断面係数



注記 * : b寸法は表 5-4 に示す。

図 4-7 ビームの断面（図 5-6 A～A断面図）（単位：mm）

垂直ビーム、上部及び下部水平ビームの断面係数は、「4.3.2.1(3)c.(a) 断面係数」の項と全く同じ方法で求めることが出来る。計算結果は表 5-4 に示す。

表 4-8 ビームの断面係数

名称	部材	部材の幅	面積	部材図心	面積×図心	全体の図心	部材の断面二次モーメント		断面係数
		b^{*1} (mm)	A ($\times 10^3 \text{mm}^2$)	y (mm)	$A \times y$ ($\times 10^6 \text{mm}^3$)	y_G (mm)	$b \cdot h^3/12$ ($\times 10^6 \text{mm}^4$)	$A \cdot (y-y_G)^2$ ($\times 10^6 \text{mm}^4$)	Z ($\times 10^6 \text{mm}^3$)
垂直 ビーム	Ⓐ								
	Ⓑ								
	Σ								
上部水平 ビーム	Ⓐ								
	Ⓑ								
	Σ								
下部水平 ビーム	Ⓐ								
	Ⓑ								
	Σ								

注記 *1: 寸法は仮定した長さを示す。

*2: 寸法は図 5-6 を参照。

(b) 評価圧力による応力

評価圧力により各ビームに生じる最大曲げモーメントは「4.3.2.1(1)(b) 評価圧力による応力」の項で計算した値と同じになる。

最大曲げ応力は同項と同様にして求められる。計算結果は表 5-5 に示す。

表 4-9 ビームの評価圧力による応力

応力 評価点	名 称	M_{max} ($\times 10^6 \text{Nmm}$)	Z ($\times 10^6 \text{mm}^3$)	σ_b (MPa)
P 8	垂直ビーム			226
P 9	上部水平ビーム			30
P 1 0	下部水平ビーム			27

4.3.2.2 円筒部と補強板との結合部及びドライウェル円錐部シェルと補強板との結合部に生じる応力の算出（応力評価点P 1 1及びP 1 2）

(1) 所員用エアロックに作用する荷重による応力

所員用エアロックに作用する死荷重による応力は、図 4-8 に示す所員用エアロックの解析モデルを用いて算出する。解析モデルの諸元を表 4-6 に示す。

(2) 原子炉格納容器に作用する荷重による応力

原子炉格納容器に作用する圧力及び死荷重による応力は、添付書類「V-3-9-1-1-4 ドライウェル本体及びサプレッション・チェンバ本体の強度計算書」で解析した応力を用いる。

(3) 応力の足し合わせ

表 4-1 及び図 4-1 で示した応力評価点での応力は、(1)で求めた所員用エアロックに作用する荷重による応力と、(2)で求めた原子炉格納容器に作用する荷重による応力を適切に足し合わせることで算出する。

(4) 解析コード

解析コードはMSC NASTRANを用いる。なお、評価に用いる解析コードMSC NASTRANの検証及び妥当性確認等の概要については、添付書類「V-5-1 計算機プログラム（解析コード）の概要・MSC NASTRAN」に示す。

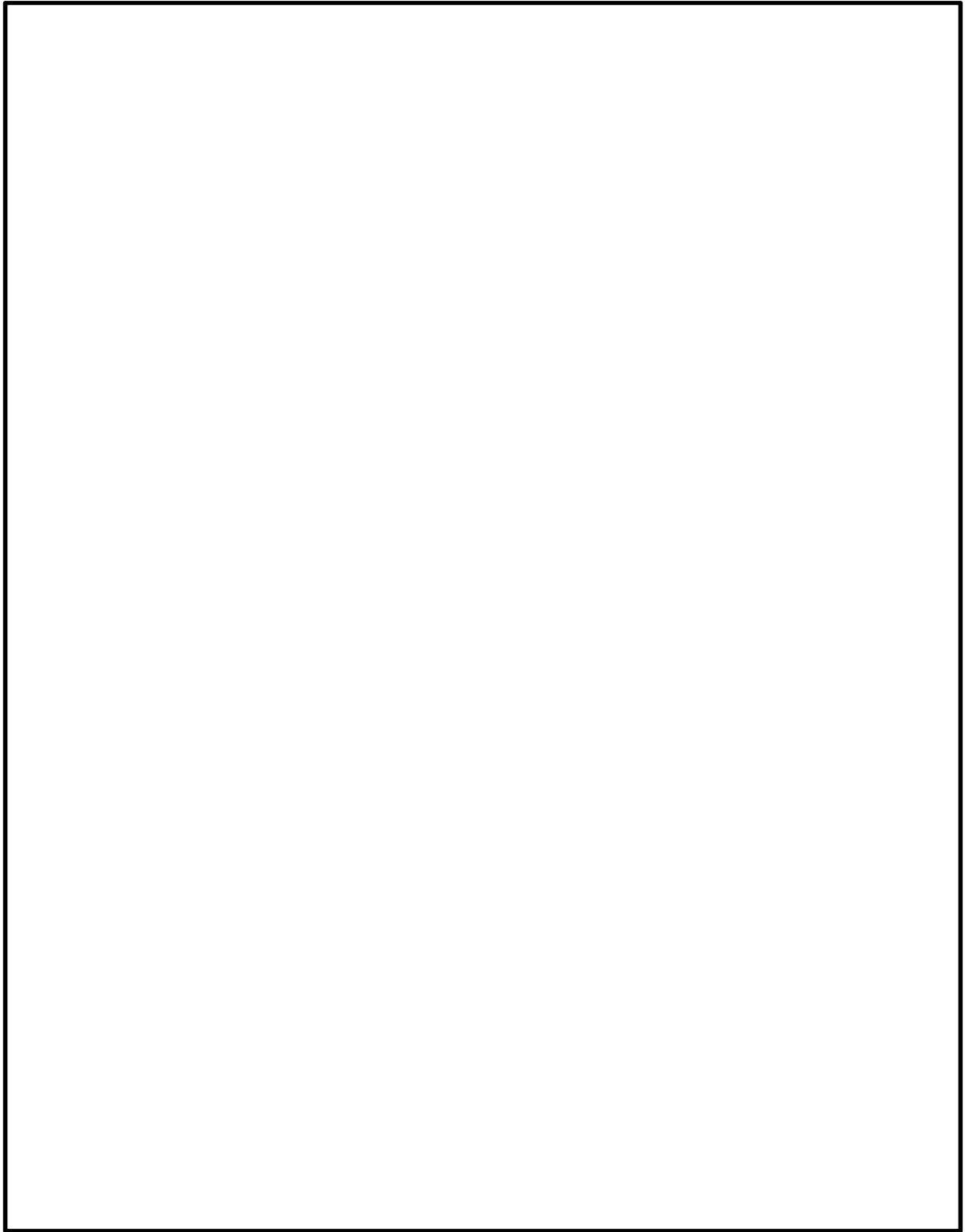


図 4-8 所員用エアロック解析モデル

表 4-10 所員用エアロックの解析モデル諸元表

項目	記号	単位	入力値
材質	—	—	SGV480
質量	m _o	kg	
温度条件	T	℃	66(ドライウエル) 32(サプレッション・チェンバ)
縦弾性係数	E	MPa	200000(ドライウエル) 202000(サプレッション・チェンバ)
ポアソン比	ν	—	0.3
節点数	—	個	
要素数	—	個	

4.4 計算条件

応力計算に用いる自重及び荷重は、本計算書の 4.2 項 荷重の組合せ及び許容限界に示す。

4.5 応力の評価

4.3 項 計算方法で求めた応力は表 4-2 及び 4-3 に記載される値以下であること。

5. 評価結果

5.1 重大事故等対処設備としての評価結果

所員用エアロックの重大事故等対処設備としての強度評価結果を以下に示す。発生値は許容値を満足している。

(1) 供用状態Eに対する評価

供用状態Eに対する応力評価結果を表 5-1 に示す。

表 5-1 (1) 供用状態 E に対する評価結果 (D + P_{SA})

評価対象設備	評価部位		応力分類	E		判定	備考
				発生値	許容値		
				MPa	MPa		
所員用 エアロック	P 1	内側扉	一次膜応力強さ＋一次曲げ応力強さ	41	422	○	
	P 2	外側扉	一次膜応力強さ＋一次曲げ応力強さ	41	422	○	
	P 3	内側隔壁板	一次膜応力強さ＋一次曲げ応力強さ	119	422	○	
	P 4	内側隔壁垂直ビーム	一次膜応力強さ＋一次曲げ応力強さ	184	422	○	
	P 5	内側隔壁上部水平ビーム	一次膜応力強さ＋一次曲げ応力強さ	25	422	○	
	P 6	内側隔壁下部水平ビーム	一次膜応力強さ＋一次曲げ応力強さ	22	422	○	

表 5-1 (2) 供用状態Eに対する評価結果 (D + P_{SA})

評価対象設備	評価部位		応力分類	E		判定	備考
				発生値	許容値		
				MPa	MPa		
所員用 エアロック	P 7	外側隔壁板	一次膜応力強さ＋一次曲げ応力強さ	107	422	○	
	P 8	外側隔壁垂直ビーム	一次膜応力強さ＋一次曲げ応力強さ	226	422	○	
	P 9	外側隔壁上部水平ビーム	一次膜応力強さ＋一次曲げ応力強さ	30	422	○	
	P 1 0	外側隔壁下部水平ビーム	一次膜応力強さ＋一次曲げ応力強さ	27	422	○	

表 5-1 (3) 供用状態Eに対する評価結果 (D + P_{SA})

評価対象設備	評価部位		応力分類	E		判定	備考
				発生値	許容値		
				MPa	MPa		
所員用 エアロック	P 1 1 - 1	円筒部と補強板との結合部	一次膜応力強さ＋一次曲げ応力強さ	236	422	○	
	P 1 1 - 2	円筒部と補強板との結合部	一次膜応力強さ＋一次曲げ応力強さ	243	422	○	
	P 1 1 - 3	円筒部と補強板との結合部	一次膜応力強さ＋一次曲げ応力強さ	240	422	○	
	P 1 2 - 1	ドライウエル円錐部シェルと補強板との結合部	一次膜応力強さ＋一次曲げ応力強さ	237	422	○	
	P 1 2 - 2	ドライウエル円錐部シェルと補強板との結合部	一次膜応力強さ＋一次曲げ応力強さ	243	422	○	
	P 1 2 - 3	ドライウエル円錐部シェルと補強板との結合部	一次膜応力強さ＋一次曲げ応力強さ	239	422	○	

6. 引用文献

(1) WARREN C. YOUNG

“ROARK’S FORMULAS for Stress and Strain” 8th Edition