

本資料のうち、枠囲みの内容は
商業機密の観点から公開できま
せん。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-工-B-08-0029_改1
提出年月日	2021年10月26日

VI-3-3-6-1-2-8 サプレッションチェンバ出入口の強度計算書

02 ③ VI-3-3-6-1-2-8 RO

2021年10月
東北電力株式会社

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	5
3. 評価部位	6
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応力	8
4.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態	8
4.2.2 許容応力	8
4.2.3 使用材料の許容応力評価条件	8
4.2.4 設計荷重	12
4.3 計算方法	13
4.3.1 蓋板（応力評価点 P1）	14
4.3.2 フランジ及びボルト（応力評価点 P2 及び P3）	15
4.3.3 円筒胴及びサプレッションチェンバ出入口取付部 （応力評価点 P4 及び P5）	17
4.4 計算条件	21
4.5 応力の評価	21
5. 評価結果	22
5.1 重大事故等対処設備としての評価結果	22
6. 参照図書	24

1. 概要

本計算書は、サブプレッションチェンバ出入口の強度計算書である。

サブプレッションチェンバ出入口は、設計基準対象施設のサブプレッションチェンバ出入口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「VI-1-8-1 原子炉格納施設の設計条件に関する説明書」及び「VI-3-1-5 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」に基づき、サブプレッションチェンバ出入口の強度評価を示す。

なお、本計算書においては、重大事故等時における荷重に対して、平成 2 年 5 月 24 日付け元資庁第 14466 号にて認可された工事計画の添付書類（参照図書(1)及び(2)）（以下「既工認」という。）に示す手法に従い強度評価を行う。

2. 一般事項

2.1 構造計画

サブプレッションチェンバ出入口の構造計画を表 2-1 に示す。

表 2-1 構造計画

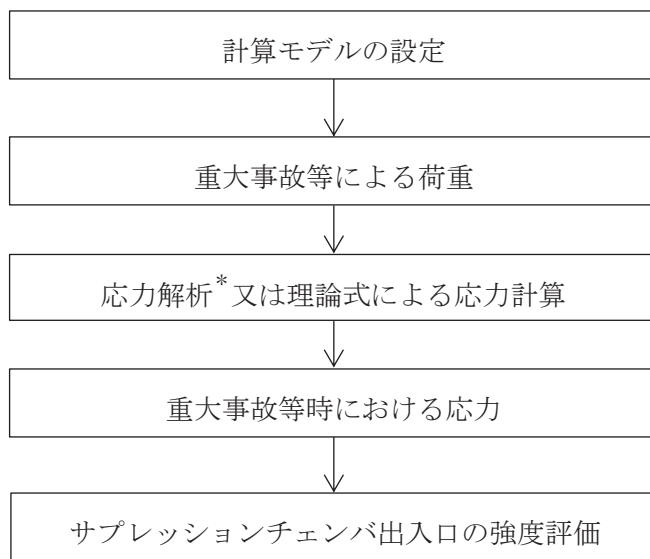
計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
<p>サプレッションチェンバ 出入口は、サプレッショ ンチェンバに支持され る。 鉛直方向荷重及び水平方 向荷重は、サプレッショ ンチェンバ及びボックス サポートを介して原子炉 建屋に伝達される。</p>	<p>サプレッションチェン バ出入口は、内径 <input type="text"/> mm、板厚 <input type="text"/> mm の円筒 胴及び板厚 <input type="text"/> mm の蓋 板、フランジで構成さ れる鋼製構造物であ る。</p>	<p style="text-align: right;">(単位：mm)</p>

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

2.2 評価方針

サブプレッションチェンバ出入口の応力評価は、添付書類「VI-1-8-1 原子炉格納施設の設計条件に関する説明書」及び「VI-3-1-5 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」にて設定した荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界に基づき、「3. 評価部位」にて設定する箇所において重大事故等時における温度、圧力による応力等が許容限界内に収まることを、「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。

サブプレッションチェンバ出入口の強度評価フローを図 2-1 に示す。



注記*：応力評価点 P5 の応力状態を詳細に把握するために適用

図 2-1 サブプレッションチェンバ出入口の強度評価フロー

2.3 適用基準

適用基準を以下に示す。

- (1) 発電用原子力設備に関する構造等の技術基準（昭和55年10月30日 通商産業省告示第501号）（以下「告示第501号」という。）

2.4 記号の説明

記号	記号の説明	単位
D	死荷重	—
d_i	直径 ($i = 1, 2, 3 \dots$)	mm
g_0	ハブ先端の厚さ	mm
g_1	ハブ背面の厚さ	mm
G_i	内側ガスケットの平均径	mm
G_o	外側ガスケットの平均径	mm
l_i	長さ ($i = 1, 2$)	mm
M_{SA}	機械的荷重 (SA 短期機械的荷重)	—
P_{SA}	圧力 (SA 短期圧力)	kPa
R	半径	mm
S	許容引張応力	MPa
S_u	設計引張強さ	MPa
S_y	設計降伏点	MPa
$S_y (RT)$	40°Cにおける設計降伏点	MPa
t_i	厚さ ($i = 1, 2, 3$)	mm
T_{SA}	温度 (SA 短期温度)	°C
W	荷重	N
σ_{H1}	フランジと胴との接合部の軸方向応力	MPa
σ_{H2}	フランジと胴との接合部の周方向応力	MPa
σ_R	フランジの半径方向応力	MPa
σ_R'	ボルト中心円におけるフランジの半径方向応力	MPa
σ_T	フランジの周方向応力	MPa
ASS	オーステナイト系ステンレス鋼	—
HNA	高ニッケル合金	—

2.5 計算精度と数値の丸め方

精度は、有効数字6桁以上を確保する。

表示する数値の丸め方は表2-2に示すとおりとする。

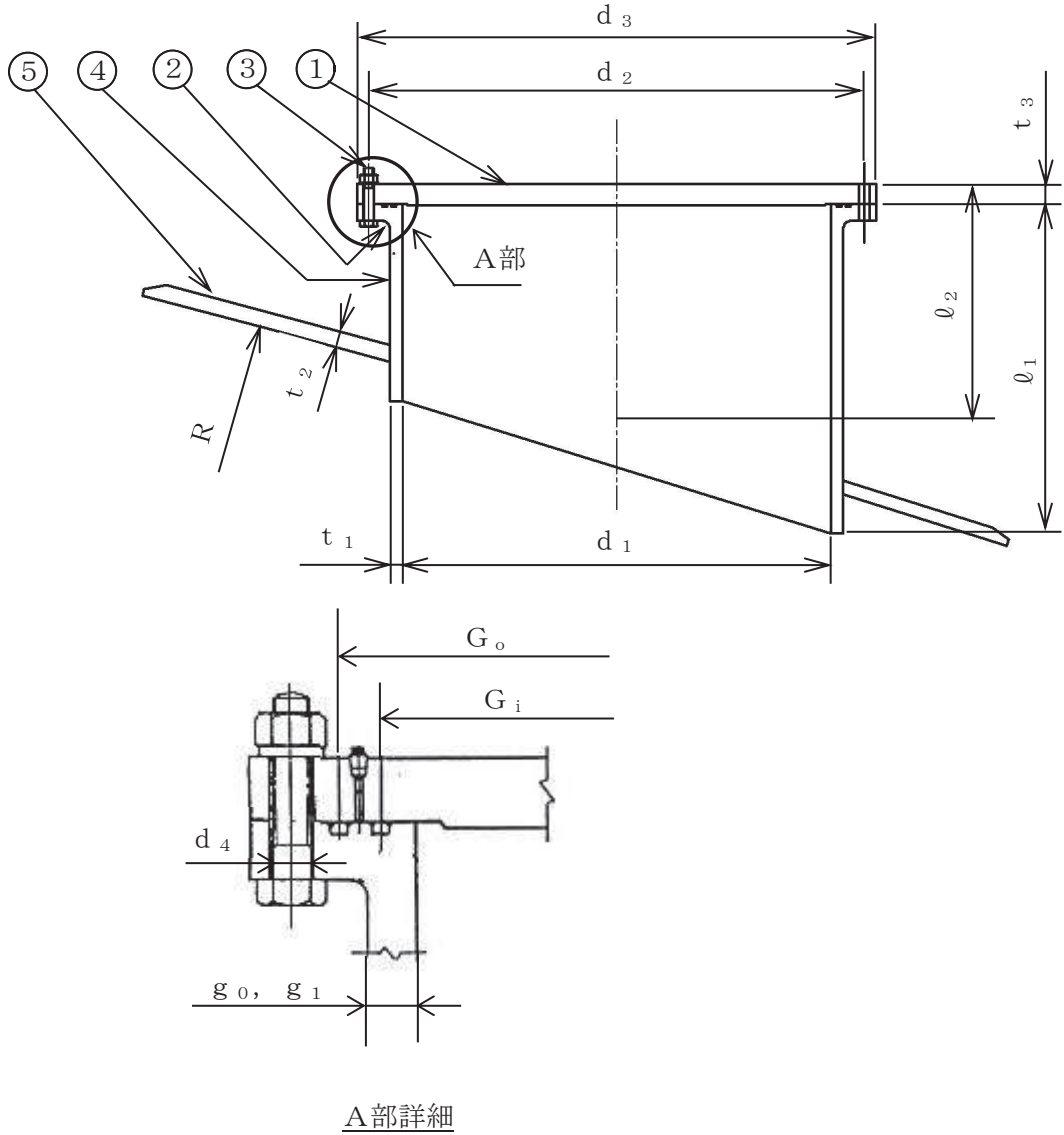
表 2-2 表示する数値の丸め方

数値の種類	単位	処理桁	処理方法	表示桁
最高使用圧力	kPa	—	—	整数位
	MPa	—	—	有効数字 3 桁
温度	℃	—	—	整数位
許容応力*	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数位
算出応力	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位

注記*：告示第 5 0 1 号別表に記載された温度の間における許容引張応力，設計降伏点及び設計引張強さは，比例法により補間した値の小数点以下第 2 位を切り捨て，小数点以下第 1 位までの値として算出する。得られた値を SI 単位に換算し，SI 単位に換算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

サプレッションチェンバ出入口の形状及び主要寸法を図 3-1 に、評価部位及び使用材料を表 3-1 に示す。



- ① 蓋板
- ② フランジ
- ③ ボルト
- ④ 円筒胴
- ⑤ 補強板

d_1		d_2		d_3		d_4		R	
l_1		l_2		g_0		g_1		t_3	
G_o		G_i		t_1		t_2			

(単位：mm)

図 3-1 サプレッションチェンバ出入口の形状及び主要寸法

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

表 3-1 評価部位及び使用材料表

評価部位	使用材料	備考
蓋板	SGV49	
フランジ	SFVC2B	
ボルト		
円筒胴	SGV49	
補強板	SGV49	

02 ③ VI-3-3-6-1-2-8 R1

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4. 強度評価

4.1 強度評価方法

- (1) サプレッションチェンバ出入口は、円筒胴がサプレッションチェンバに支持された構造であり、荷重はサプレッションチェンバ及びボックスサポートを介して原子炉建屋に伝達される。

サプレッションチェンバ出入口の強度評価として、添付書類「VI-1-8-1 原子炉格納施設の設計条件に関する説明書」において設定された荷重を用いて、参照図書(1)及び(2)に示す既工認の手法に従い強度評価を行う。

- (2) 強度評価に用いる寸法は、公称値を用いる。

4.2 荷重の組合せ及び許容応力

4.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態

サプレッションチェンバ出入口の荷重の組合せ及び許容応力状態のうち、重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4-1 に示す。

詳細な荷重の組合せは、添付書類「VI-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、組み合わ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 許容応力

サプレッションチェンバ出入口の許容応力は、添付書類「VI-3-1-5 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」に基づき、表 4-2 及び表 4-3 に示すとおりとする。

4.2.3 使用材料の許容応力評価条件

サプレッションチェンバ出入口の使用材料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。

表 4-1 荷重の組合せ及び許容応力状態（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*1		許容応力状態
原子炉格納施設	原子炉格納容器	サプレッションチェンバ出入口	重大事故等クラス2容器	$D + P_{SA} + M_{SA}$	(V(S)-1) (V(S)-2)	重大事故等時*2

注記*1：（ ）内は添付書類「VI-1-8-1 原子炉格納施設の設計条件に関する説明書」における表3-7の荷重の組合せのNo.を示す。

*2：重大事故等時としてIV_Aの許容限界を用いる。

表4-2 許容応力 (第2種容器)

応力分類 許容 応力状態	一次一般膜応力	一次膜応力+一次曲げ応力
重大事故等時*	運転状態IVの許容応力である $2/3 \cdot S_u$ とする。ただし、ASS及びHNAについては、 $2.4 \cdot S$ と $2/3 \cdot S_u$ の小さい方とする。	左欄の 1.5倍の値

注記*：重大事故等時としてIV_Aの許容限界を用いる。

表4-3 許容応力 (第2種容器耐圧部テンションボルト)

応力分類 許容 応力状態	平均引張応力	平均引張応力+曲げ応力
重大事故等時*	運転状態IVの許容応力である $2/3 \cdot S_u$ とする。ただし、ASS及びHNAについては、 $2.4 \cdot S$ と $2/3 \cdot S_u$ の小さい方とする。	左欄の 1.5倍の値

注記*：重大事故等時としてIV_Aの許容限界を用いる。

表4-4 使用材料の許容応力評価条件（重大事故等対処設備）

評価部位 (応力評価対象)	材料	温度条件 (°C)		S (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (RT) (MPa)
		周囲環境 温度					
蓋板, 円筒胴, 補強板	SGV49	周囲環境 温度	200	—	—	421	—
フランジ	SFVC2B	周囲環境 温度	200	—	—	438	—
ボルト	<input type="text"/>	周囲環境 温度	200	—	—	<input type="text"/>	—

4.2.4 設計荷重

(1) 重大事故等対処設備としての設計荷重

a. 評価圧力及び評価温度

重大事故等対処設備としての評価圧力及び評価温度は、添付書類「VI-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、以下のとおりとする。

内圧 P_{SA} 854kPa (SA 短期)
 温度 T_{SA} 200°C (SA 短期)

b. 死荷重

サブプレッションチェンバ出入口の自重を死荷重とする。

死荷重 kg

c. 水力学的動荷重

重大事故等対処設備としての水力学的動荷重は、以下のとおりとする。

(a) チャギング荷重

サブプレッションチェンバに対して、低流量蒸気凝縮時に以下に示す蒸気凝縮振動荷重が作用する。

最大正圧 kPa
 最大負圧 kPa

(b) 逃がし安全弁作動時の荷重

逃がし安全弁作動時、排気管内の気体が T-クエンチャからサブプレッションプール水中に放出される際、サブプレッションチェンバに圧力振動荷重が作用する。

最大正圧 kPa
 最大負圧 kPa

d. 水位

重大事故等対処設備としての水位は、以下のとおりとする。

水位 O.P. -1514mm

4.3 計算方法

サプレッションチェンバ出入口の応力評価点は、サプレッションチェンバ出入口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
P1	蓋板中央部
P2	フランジ
P3	ボルト
P4	円筒胴
P5	サプレッションチェンバ出入口取付部

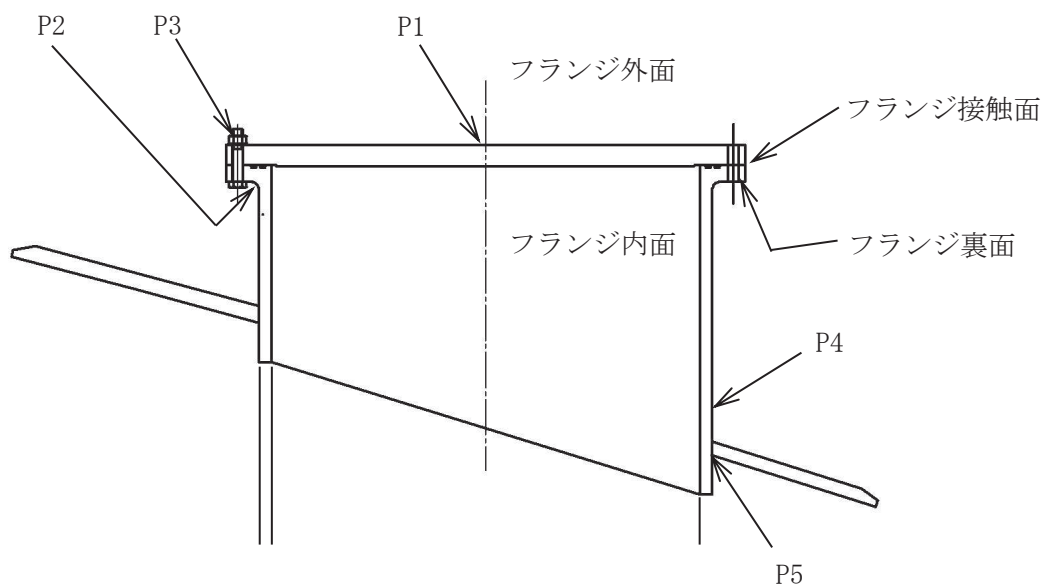


図 4-1 サプレッションチェンバ出入口の応力評価点

4.3.1 蓋板（応力評価点 P1）

内圧により蓋板に生じる応力は，図 4-2 に示すように，蓋板を等分布荷重を受ける外周支持の円板にモデル化し，参照図書(4)に基づき計算する。

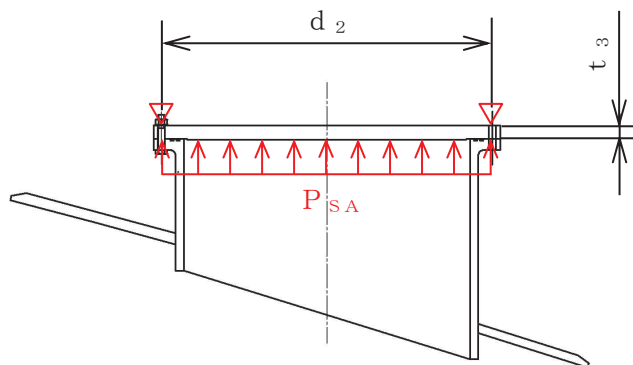


図 4-2 計算モデル

内圧作用時の応力計算方法を示す。

曲げ応力

$$\sigma_b = \frac{3(3+\nu) \cdot \left(\frac{d_2}{2}\right)^2}{8 \cdot t_3} P_{SA}$$

4.3.2 フランジ及びボルト（応力評価点 P2 及び P3）

内圧によりフランジに生じる応力は、参照図書(5)に基づき計算する。また、ボルトに生じる応力は、参照図書(5)及び以下に示す計算方法に基づき計算する。参照図書(5)に基づく計算値を表 4-6 に示す。なお、ここで使用する記号はすべて参照図書(5)に従う。

表 4-6 金属面接触の平面フランジに対する計算(その 1)

フランジの使用材料			SFVC2B
胴の使用材料			SGV49
ボルトの使用材料			
ガスケットの使用材料			セルフシーリングガスケット
最高使用圧力	P	(MPa)	854×10^{-3}
最高使用温度		(°C)	200
フランジの許容引張応力	S_f	(MPa)	292
胴の許容引張応力	S_n	(MPa)	281
ボルトの許容引張応力	S_b	(MPa)	
フランジの縦弾性係数	E_f	(MPa)	
ボルトの縦弾性係数	E_b	(MPa)	
フランジの外径	d_3	(mm)	
フランジの内径	d_1	(mm)	
ボルト中心円の直径	d_2	(mm)	
ボルト穴の直径	d_4	(mm)	
ハブ先端の厚さ	g_0	(mm)	
ハブ背面の厚さ	g_1	(mm)	
ハブの長さ	h	(mm)	
ボルトの呼び			
ボルトの本数	n		
ボルトの谷径		(mm)	
内側ガスケットの平均径	G_i	(mm)	
外側ガスケットの平均径	G_o	(mm)	
荷重	(N)	モーメントアーム	(mm)
H =			
H _D =		h _D =	
H _G =		h _G =	
H _T =		h _T =	
フランジに作用するモーメント		M_p	(N・mm)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

表 4-6 金属面接触の平面フランジに対する計算(その 2)

係 数	h_0	222.26
係 数	B_1	1338.0
ボルト初期締付応力	σ_i (MPa)	
初期締付係数	r_s	0.6364
縦弾性係数比	r_e	0.9453
係 数	r_B	0.0030
ボルトの計算長さ	l (mm)	
係 数	a_1	1.1510
係 数	β	1.0624
係 数	h/h_0	0
係 数	g_1/g_0	1
係 数	C_1	1
係 数	C_2	1
係 数	C_3	1
係 数	C_4	0.85
係 数	C_5	0
係 数	Z	5.28
係 数	κ	0.32
モーメントアーム	$h = h_{cmax}$ (mm)	
係 数	j	2.480
係 数	J_1	4.213
係 数	J_2	58.676
係 数	J_3	1.494
係 数	J_4	47.313
係 数	J_5	0.260
係 数	J_6	0.158
フランジ面の外径端における傾き	$E\theta_A$ (MPa)	
フランジ面の内径端における傾き	$E\theta_B$ (MPa)	
モーメント	M_H (N・mm)	
せん断力	Q (N)	
モーメント	M_S (N・mm)	
フランジの接面反力	H_C (N)	
ボルト最小荷重	W_{m1} (N)	
ボルトの所要総断面積	A_m (mm ²)	
実際のボルト総断面積	A_b (mm ²)	1.726E+04
評価: $A_b > A_m$, よって十分である。		

ボルトの内圧作用時の応力計算方法を示す。

平均引張応力

$$\sigma_t = \frac{W_{m1}}{A_b}$$

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4.3.3 円筒胴及びサプレッションチェンバ出入口取付部（応力評価点 P4 及び P5）

(1) サプレッションチェンバに作用する荷重による応力

応力計算方法は、添付書類「VI-3-3-6-1-1-7 サプレッションチェンバの強度計算書」に示すサプレッションチェンバの解析モデルにより算出し評価する。なお、サプレッションチェンバ出入口の取付位置を考慮する。

(2) サプレッションチェンバ出入口に作用する荷重による応力

応力計算方法は、参照図書(1)に示す方法と同じであり、サプレッションチェンバ出入口の自重、寸法等を考慮する。応力評価点 P4, P5 に作用する荷重を表 4-7 に示す。

表 4-7 応力評価点 P4, P5 に作用する荷重*2

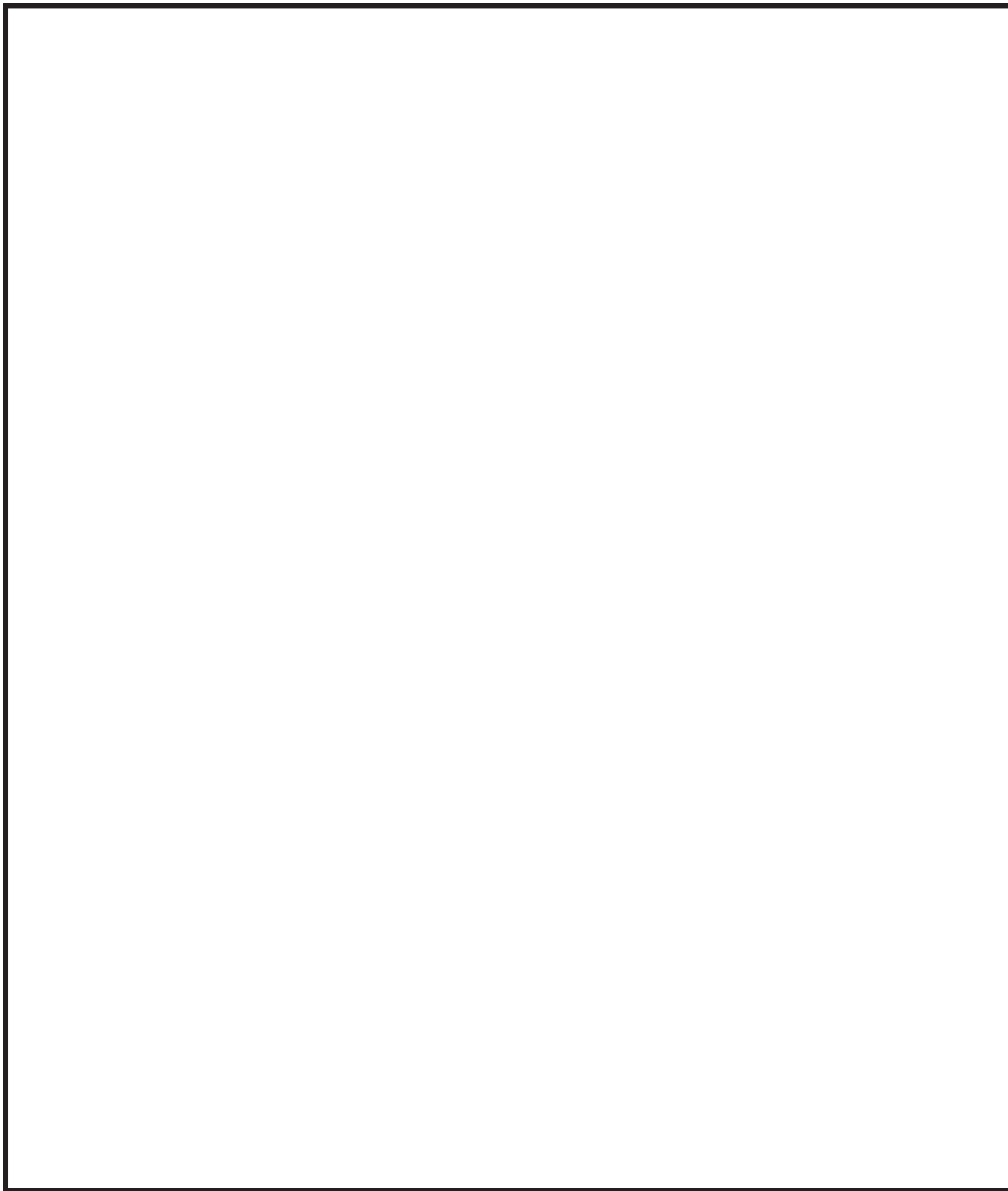
荷重の種類*1	死荷重
P	W
M _L	—
M _C	—

注記*1：図 4-3 に示す荷重の記号による。

*2：応力評価点 P4 に対し、「4.2.4 設計荷重」に示す圧力も作用する。

表 4-7 の荷重によりサプレッションチェンバ出入口取付部に生じる応力を、参照図書(3)に基づき計算する方法を以下に示す。

なお、ここで使用する記号はすべて参照図書(3)に従う。



枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

荷重Pによる応力

方向	応力 評価点	位置	図の 番号	図からの 読取值	図からの読取值に 乗じる値	応力の 絶対値

02 ③ VI-3-3-6-1-2-8 R0

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

荷重 M_L による応力

方向	応力 評価点	位置	図の 番号	図からの 読取值	図からの読取值に 乗じる値	応力の 絶対値

荷重 M_C による応力

方向	応力 評価点	位置	図の 番号	図からの 読取值	図からの読取值に 乗じる値	応力の 絶対値

O 2 ③ VI-3-3-6-1-2-8 R 0

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4.4 計算条件

応力計算に用いる荷重を、「4.2 荷重の組合せ及び許容応力」に示す。

4.5 応力の評価

「4.3 計算方法」で求めた応力が許容応力以下であること。

5. 評価結果

5.1 重大事故等対処設備としての評価結果

サブレッションチェンバ出入口の重大事故等時の状態を考慮した場合の強度評価結果を以下に示す。発生値は許容限界を満足している。

(1) 強度評価結果

強度評価結果を表 5-1 に示す。

表 5-1 重大事故等時に対する評価結果 (D + P_{SA} + M_{SA})

評価対象設備	応力評価点		応力分類		重大事故等時		判定	備考	
					算出応力	許容応力			
					MPa	MPa			
サプレッション チェンバ出入口	P1	蓋板中央部	一次一般膜応力		156	281	○		
			一次膜応力+一次曲げ応力		156	421	○		
	P2	フランジ	ボルト中心円における フランジの半径方向応力	σ_R'	接触面	28	292	○	
					裏面	-28	292	○	
			フランジの半径方向応力	σ_R	接触面	-35	292	○	
					裏面	36	292	○	
			フランジの周方向応力	σ_T	接触面	-7	292	○	
					裏面	-1	292	○	
			フランジと胴との接合部 の軸方向応力	σ_{H1}	内面	-46	438	○	
					外面	61	438	○	
	フランジと胴との接合部 の周方向応力	σ_{H2}	内面	-10	438	○			
			外面	23	438	○			
	組合せ応力		$(\sigma_H^* + \sigma_R) / 2 =$	49	292	○			
			$(\sigma_H^* + \sigma_T) / 2 =$	34	292	○			
	P3	ボルト	平均引張応力		140		○		
P4	円筒胴円筒胴	一次膜応力+一次曲げ応力		15	421	○			
P5	サプレッションチェンバ 出入口取付部	一次膜応力+一次曲げ応力		210	421	○			

注記* : σ_H は σ_{H1} と σ_{H2} のいずれか大きい値とする。

6. 参照図書

- (1) 女川原子力発電所第2号機 第2回工事計画認可申請書
添付書類「IV-3-1-2-4 原子炉格納容器配管貫通部の強度計算書」
- (2) 女川原子力発電所第2号機 第2回工事計画認可申請書
添付書類「IV-3-1-2-2 サプレッションチェンバスリーブの基本板厚計算書」
- (3) K. R. Wichman, A. G. Hopper and J. L. Mershon, “Local Stresses in Spherical and Cylindrical Shells due to External Loadings”, Welding Research Council Bulletin, No. 107 (1965)
- (4) Raymond J. Roark, Warren C. Young and Richard G. Budynas, “Roark’s Formulas for Stress and Strain”, Seventh Edition (2002)
- (5) J I S B 8 2 4 3 -1981 圧力容器の構造 附属書2 フランジの応力計算方法