

本資料のうち、枠囲みの内容は
商業機密の観点や防護上の観点
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-補-E-20-0710-1_改9
提出年月日	2021年10月15日

補足-710-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書の
補足説明資料

目次

I. はじめに

1. 強度計算の方針に関する補足説明資料
 - 1.1 風力係数について
 - 1.2 強度計算時の施設の代表性について
 - 1.3 構造強度評価における評価対象部位の選定について
2. 竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算に関する補足説明資料
 - 2.1 設計飛来物の衝突による衝撃荷重の算定について
 - 2.2 鉄筋コンクリートの衝突解析モデルにおける破断限界の設定について
 - 2.3 原子炉建屋屋根スラブ変形評価の許容値の設定について
 - 2.4 原子炉建屋 CR 階外壁及び屋根スラブの貫通及び裏面剥離評価について
 - 2.5 鉄筋コンクリート部材の貫通評価及び裏面剥離評価について
 - 2.6 ブローアウトパネル開口部から侵入する風に対する対応方針について
3. 屋外の重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算に関する補足説明資料
 - 3.1 固縛装置の設計における保守性について
 - 3.2 固縛装置の設計における設備の代表性について
 - 3.3 資機材保管用コンテナ及び小型船舶について
 - 3.4 固縛装置の評価対象部位について
4. 防護対策施設の強度計算に関する補足説明資料
 - 4.1 竜巻防護ネットの衝突解析について
 - 4.2 飛来物のオフセット衝突の影響について
 - 4.3 金網の設計裕度の考え方
 - 4.4 ワイヤロープの変形を考慮したネットシステムのたわみについて
 - 4.5 ワイヤロープの初期張力について
 - 4.6 補助金網の影響について
 - 4.7 防護板の貫通評価について
 - 4.8 ストッパーの評価について
 - 4.9 竜巻防護鋼板からの荷重に対する原子炉建屋外壁の強度評価について
5. 排気筒の強度計算に関する補足説明資料
 - 5.1 設計飛来物による構造欠損の想定箇所について
 - 5.2 腐食代の考慮について
6. 衝突評価に関する補足説明資料
 - 6.1 衝突解析の解析手法の保守性について

: 今回提出範囲

I. はじめに

1. 概要

本補足説明資料は、以下の説明書についての内容を補足するものである。
本補足説明資料と添付書類との関連を表-1に示す。

- ・ VI-3-別添 1 竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書

表-1 補足説明資料と添付書類との関連 (1/5)

竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書の 補足説明資料	該当添付書類
1. 強度計算の方針に関する補足説明資料	
1.1 風力係数について	VI-3-別添 1-1-2 「原子炉補機冷却海水ポンプの強度計算書」 VI-3-別添 1-1-3 「高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプの強度計算書」 VI-3-別添 1-1-4 「高圧炉心スプレイ補機冷却海水系ストレートの強度計算書」 VI-3-別添 1-1-5 「復水貯蔵タンクの強度計算書」 VI-3-別添 1-1-6 「配管及び弁の強度計算書」 VI-3-別添 1-1-10-2 「海水ポンプ室門型クレーンの強度計算書」 VI-3-別添 1-1-10-3 「消音器の強度計算書」 VI-3-別添 1-1-10-4 「ミスト配管及びベント配管の強度計算書」
1.2 強度計算時の施設の代表性について	VI-3-別添 1-1-2 「原子炉補機冷却海水ポンプの強度計算書」 VI-3-別添 1-1-4 「高圧炉心スプレイ補機冷却海水系ストレートの強度計算書」 VI-3-別添 1-1-6 「配管及び弁の強度計算書」 VI-3-別添 1-1-8 「換気空調設備の強度計算書」 VI-3-別添 1-1-9 「軽油タンクの強度計算書」 VI-3-別添 1-1-10-3 「消音器の強度計算書」 VI-3-別添 1-1-10-4 「ミスト配管及びベント配管の強度計算書」

表-1 補足説明資料と添付書類との関連 (2/5)

竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書の補足説明資料	該当添付書類
1. 強度計算の方針に関する補足説明資料	
1.3 構造強度評価における評価対象部位の選定について	VI-3-別添 1-1-2 「原子炉補機冷却海水ポンプの強度計算書」 VI-3-別添 1-1-3 「高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプの強度計算書」 VI-3-別添 1-1-4 「高圧炉心スプレイ補機冷却海水系ストレータの強度計算書」 VI-3-別添 1-1-5 「復水貯蔵タンクの強度計算書」 VI-3-別添 1-1-6 「配管及び弁の強度計算書」 VI-3-別添 1-1-7 「排気筒の強度計算書」 VI-3-別添 1-1-8 「換気空調設備の強度計算書」 VI-3-別添 1-1-9 「軽油タンクの強度計算書」 VI-3-別添 1-1-10-2 「海水ポンプ室門型クレーンの強度計算書」 VI-3-別添 1-1-10-3 「消音器の強度計算書」 VI-3-別添 1-1-10-4 「ミスト配管及びベント配管の強度計算書」

表-1 補足説明資料と添付書類との関連 (3/5)

竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書の補足説明資料	該当添付書類
2. 竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算に関する補足説明資料	
2.1 設計飛来物の衝突による衝撃荷重の算定について	VI-3-別添 1-1-1 「竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書」
2.2 鉄筋コンクリートの衝突解析モデルにおける破断限界の設定について	
2.3 原子炉建屋屋根スラブ変形評価の許容値の設定について	
2.4 原子炉建屋 CR 階外壁及び屋根スラブの貫通及び裏面剥離評価について	
2.5 鉄筋コンクリート部材の貫通評価及び裏面剥離評価について	
2.6 ブローアウトパネル開口部から侵入する風に対する対応方針について	
3. 屋外の重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算に関する補足説明資料	
3.1 固縛装置の設計における保守性について	VI-3-別添 1-3 「屋外重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算の方針」 VI-3-別添 1-3-1 「屋外重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算書」
3.2 固縛装置の設計における設備の代表性について	
3.3 資機材保管用コンテナ及び小型船舶について	
3.4 固縛装置の評価対象部位について	

表-1 補足説明資料と添付書類との関連 (4/5)

竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書の補足説明資料	該当添付書類
4. 防護対策施設の強度計算に関する補足説明資料	
4.1 竜巻防護ネットの衝突解析について	VI-3-別添 1-2 「防護対策施設の強度計算の方針」 VI-3-別添 1-2-1-1 「竜巻防護ネットの強度計算書」 VI-3-別添 1-2-1-2 「竜巻防護鋼板の強度計算書」
4.2 飛来物のオフセット衝突の影響について	
4.3 金網の設計裕度の考え方	
4.4 ワイヤロープの変形を考慮したネットシステムのたわみについて	
4.5 ワイヤロープの初期張力について	
4.6 補助金網の影響について	
4.7 防護板の貫通評価について	
4.8 ストッパーの評価について	
4.9 竜巻防護鋼板からの荷重に対する原子炉建屋外壁の強度評価について	

表-1 補足説明資料と添付書類との関連 (5/5)

竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書の補足説明資料	該当添付書類
5. 排気筒の強度計算に関する補足説明資料	
5.1 設計飛来物による構造欠損の想定箇所について	VI-3-別添 1-1-7 「排気筒の強度計算書」
5.2 腐食代の考慮について	
6. 衝突解析に関する補足説明資料	
6.1 衝突解析の解析手法の保守性について	VI-3-別添 1-1-1 「竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書」 VI-3-別添 1-1-5 「復水貯蔵タンクの強度計算書」 VI-3-別添 1-1-7 「排気筒の強度計算書」 VI-3-別添 1-2-1 「防護対策施設の強度計算書」

1.2 強度計算時の施設の代表性について

1. 概要

本資料は、添付書類「VI-3-別添 1 竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書」のうち、添付書類「VI-3-別添 1-1-2 原子炉補機冷却海水ポンプの強度計算書」、添付書類「VI-3-別添 1-1-4 高圧炉心スプレー補機冷却海水系ストレータの強度計算書」、添付書類「VI-3-別添 1-1-6 配管及び弁の強度計算書」、添付書類「VI-3-別添 1-1-8 換気空調設備の強度計算書」、添付書類「VI-3-別添 1-1-9 軽油タンクの強度計算書」、添付書類「VI-3-別添 1-1-10-3 消音器の強度計算書」及び添付書類「VI-3-別添 1-1-10-4 ミスト配管及びベント配管の強度計算書」において、同種類の計算対象施設が複数存在する施設に対して、代表となる施設を選定して計算を行う場合の代表性について説明するものである。

2. 代表性の説明

2.1 原子炉補機冷却海水ポンプ

原子炉補機冷却海水ポンプは4台設置されており、全てが同一設計となっている。

2.2 高圧炉心スプレイ補機冷却海水系ストレーナ

高圧炉心スプレイ補機冷却海水系ストレーナは2台設置されており、全てが同一設計となっている。

2.3 軽油タンク

軽油タンクは、非常用ディーゼル発電設備軽油タンクA～F及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備軽油タンクが設置されており、非常用ディーゼル発電設備軽油タンクA～Fは全てが同一設計となっている。

軽油タンクにおいて、設計竜巻による気圧差荷重は軽油タンクベント配管を介して軽油タンク本体内部に作用する。軽油タンクは軽油タンク室及び軽油タンク室(H)内に設置されており、軽油タンクの外面は設計竜巻による気圧差荷重が作用することから、タンクの許容外圧の算出式より許容外圧が最も厳しくなる軽油タンクを選定する。

$$P_a = \frac{4 \cdot B \cdot t}{3 \cdot D_o}$$

B : 設計・建設規格 付録材料図表 Part7 図 3 に規定される値 D _o : 円筒胴の外径 P _a : 許容外圧 t : 円筒胴の計算厚さ

軽油タンクの選定結果を表 2-1 に示す。

表 2-1 軽油タンク (添付書類「VI-3-別添 1-1-9 軽油タンクの強度計算書」)
の代表選定結果

系統		円筒胴の外径 (mm)	円筒胴の計算厚さ (mm)	許容外圧 (MPa)	選定
軽油タンク	A系(A, C, E)	3556	28	0.26	
	B系(B, D, F)	3556	28	0.26	
	H P C S系	4056	28	0.20	○

2.4 配管 (添付書類「VI-3-別添 1-1-6 配管及び弁の強度計算書」, 添付書類「VI-3-別添 1-1-9 軽油タンクの強度計算書」及び添付書類「VI-3-別添 1-1-10-4 ミスト配管及びベント配管の強度計算書」における配管)

代表の選定方法は、添付書類「VI-3-別添 1-1-6 配管及び弁の強度計算書」, 添付書類「VI-3-別添 1-1-9 軽油タンクの強度計算書」及び添付書類「VI-3-別添 1-1-10-4

ミス配管及びベント配管の強度計算書」の「3.5 評価方法」に記載のとおり、評価に用いる支持間隔について管外径，材料ごとにサポートの支持間隔が最長となる箇所を選定し代表とする。

以下に，添付書類「VI-3-別添 1-1-6 配管及び弁の強度計算書」，添付書類「VI-3-別添 1-1-9 軽油タンクの強度計算書」及び添付書類「VI-3-別添 1-1-10-4 ミス配管及びベント配管の強度計算書」における各応力の算出式を示す。

風圧力による荷重及び自重により生じる応力は支持間隔（L）の 2 乗に比例するため，応力が大きくなる箇所として，管外径，材料ごとにサポートの支持間隔が最長となる箇所を選定する。選定において，風圧力による荷重及び自重により生じる応力を以下に示す応力算出式を用いて求める場合，配管の曲がり部が応力の算出結果に与える影響は十分小さいことから，ここでは，曲がり部を直管とみなして，代表箇所を選定する。竜巻影響評価における屋外配管の曲がり部の影響について別紙-1 に示す。

（両端支持形状）

$$\sigma_{ww} = \frac{W_w \cdot L^2}{8 \cdot Z}$$

$$\sigma_{自重} = \frac{w \cdot L^2}{8 \cdot Z}$$

（片持ち支持形状）

$$\sigma_{ww} = \frac{W_w \cdot L^2}{2 \cdot Z}$$

$$\sigma_{自重} = \frac{w \cdot L^2}{2 \cdot Z}$$

σ_{ww} ：風圧力により生じる応力 $\sigma_{自重}$ ：自重により生じる応力 W_w ：単位長さ当たりの設計竜巻の風圧力による荷重 w ：単位長さ当たりの自重による荷重 L ：支持間隔 Z ：断面係数

配管の代表箇所を選定結果を表 2-2～表 2-5 にそれぞれ示す。

表 2-2 配管（添付書類「VI-3-別添 1-1-6 配管及び弁の強度計算書」）の代表選定結果

系統		支持形状	管外径 (mm)	材料	最長支持間隔 (m)	代表箇所
原子炉補機冷却 海水ポンプ周り	A系	両端支持	508.0	SM400C	10.4	
	B系	両端支持	508.0	SM400C	14.7	○
	A系	両端支持	60.5	STS410	2.0	
	B系	両端支持	60.5	STS410	3.1	○
高圧炉心スプレイ補機冷 却海水ポンプ周り		両端支持	216.3	STS410	7.0	○
		両端支持	60.5	STS410	2.0	○
非常用ガス処理系（屋外 配管）		両端支持	318.5	STS410	15.4	○

表 2-3 配管（添付書類「VI-3-別添 1-1-9 軽油タンクの強度計算書」）の代表選定結果

系統		支持形状	管外径 (mm)	材料	最長支持間隔 (m)	代表箇所
燃料移送 ポンプ室	A系	両端支持	60.5	STPT370	3.2	○
		両端支持	76.5	STPT370	0.492	○
	B系	両端支持	60.5	STPT370	3.2	
		両端支持	76.5	STPT370	0.492	
	H P C S系	両端支持	60.5	STPT370	2.165	
		両端支持	76.5	STPT370	0.492	

注記*：最長支持間隔が同一の場合はA系を代表として選定する

表 2-4 配管(添付書類「VI-3-別添 1-1-10-4 ミスト配管及びベント配管の強度計算書」)
の代表選定結果 (ミスト配管)

系統		支持形状	管外径 (mm)	材料	最長支持 間隔(m)	代表 箇所
機関ミスト配管	A系	両端支持	114.3	STPT410	2.016	
	B系		114.3	STPT410	3.296	○
	H P C S系		114.3	STPT410	2.301	
	A系	片持ち 支持	216.3	STPT410	0.422	○
	B系		216.3	STPT410	0.422	
	H P C S系		216.3	STPT410	0.422	
潤滑油サンプタンク ミスト配管及び潤滑 油補給タンクミスト 配管	A系	両端支持	76.3	STPT410	1.978	
	B系		76.3	STPT410	3.258	○
	H P C S系		76.3	STPT410	2.282	
	A系	片持ち 支持	114.3	STPT410	0.418	○
	B系		114.3	STPT410	0.418	
	H P C S系		114.3	STPT410	0.418	
燃料油ドレンタンク ミスト配管	A系	両端支持	42.7	STPT410	2.310	○
	B系		42.7	STPT410	2.245	
	H P C S系		42.7	STPT410	2.267	
	A系	片持ち 支持	76.3	STPT410	0.388	
	B系		76.3	STPT410	0.388	
	H P C S系		76.3	STPT410	0.418	○
燃料デイタンク ミスト配管	A系	両端支持	60.5	STPT410	2.637	
	B系		60.5	STPT410	2.683	○
	H P C S系		60.5	STPT410	2.536	
	A系	片持ち 支持	89.1	STPT410	1.222	○
	B系		89.1	STPT410	1.222	
	H P C S系		89.1	STPT410	1.222	

注記* : 最長支持間隔が同一の場合はA系を代表として選定する

表 2-5 配管(添付書類「VI-3-別添 1-1-10-4 ミスト配管及びベント配管の強度計算書」)
の代表選定結果 (ベント配管)

系統		支持形状	管外径 (mm)	材料	最長支持間隔 (m)	代表 箇所
軽油タンクベント 配管	A系	片持ち 支持	114.3	STPT370	1.127	○
	B系		114.3	STPT370	1.127	
	H P C S系		114.3	STPT370	1.127	
	A系	両端	114.3	STPT370	3.160	○
	B系		114.3	STPT370	3.160	
	H P C S系		114.3	STPT370	2.500	

注記* : 最長支持間隔が同一の場合はA系を代表として選定する

2.5 消音器

非常用ディーゼル発電設備排気消音器が2台、高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備排気消音器が1台設置されている。非常用ディーゼル発電設備排気消音器の2台は同一設計となっている。

2.6 換気空調設備

(1) 角ダクト

角ダクトにおいて、気圧差による発生応力が最も大きくなるものは面外荷重である。面外荷重により発生する応力は主に式中のダクト幅 a, 補強ピッチ c 及び板厚 t の兼ね合いにより変化することから、その発生応力比が最も厳しくなる各系統の角ダクトを抽出し、その中で最も厳しくなる系統の角ダクトを代表角ダクトとする。

以下に、添付書類「VI-3-別添 1-1-8 換気空調設備の強度計算書」における応力の算出式を示す。

a. 面外荷重による発生応力

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

$$\frac{256 \cdot (1 - \nu^2) \cdot (P + g \cdot D_p)}{\pi^6 \cdot E \cdot t^4} = \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{c^2} \right)^2 \cdot \frac{\delta_{max}}{t}$$

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

σ_{max} : 中心に生じる面外荷重による最大応力
 E : ヤング率
 δ_{max} : 面外荷重によるダクト鋼板の最大変位量
 ν : ポアソン比
 t : ダクト板厚
 a : ダクト幅
 c : 補強ピッチ
 g : 重力加速度
 π : 円周率
 P : ダクトにかかる外圧
 D_p : 単位面積当たりのダクト鋼板の質量

式②より得られる δ_{max} の値を式①へ代入し、 σ_{max} を算出する。

角ダクトの代表箇所を選定結果を表2-6に示す。

表2-6 角ダクトの代表選定結果

系統	ダクト寸法 (mm)			材料	面外荷重 (MPa)			代表
	ダクト幅	補強ピッチ	ダクト板厚		発生応力	許容応力	発生応力比	
原子炉補機 (A) 室換気空調系	650	900	0.6	SGCC	114	205	1.80	
原子炉補機 (B) 室換気空調系	650	900	0.6	SGCC	114	205	1.80	
原子炉補機 (HPCS) 室換気空調系	1200	900	3.2	SS400	73	245	3.36	
中央制御室換気空調系	500	1500	2.3	SS400	80	245	3.07	
計測制御電源 (A) 室換気空調系	500	900	0.6	SGCC	110	205	1.87	
計測制御電源 (B) 室換気空調系	450	1800	0.5	SGCC	121	205	1.70	○

(2) 丸ダクト

丸ダクトについては、外気と繋がっている屋内の外部事象防護対象施設のうち中央制御室換気空調系のみ設置されていることから、最も厳しい評価結果の丸ダクトを代表丸ダクトとする。

(3) 隔離弁

隔離弁において、気圧差による荷重は弁箱、弁体及び弁棒にそれぞれ作用することから、その発生応力比が最も厳しくなる各系統の隔離弁を抽出し、その中で最も厳しくなる系統の隔離弁を代表隔離弁とする。

以下に、添付書類「VI-3-別添 1-1-8 換気空調設備の強度計算書」における各応力の算出式を示す。

a. 弁箱に発生する周方向応力

$$\sigma_{\theta} = \frac{\Delta P \cdot r}{t}$$

b. 弁体に発生する曲げ応力

$$\sigma_{max} = 1.24 \cdot \frac{p_v \cdot a^2}{h^2}$$

ここで、

$$p_v = P_1 + P_2$$

$$P_1 = \Delta P$$

$$P_2 = \frac{m_v \cdot g}{A_v}$$

c. 弁棒に発生するせん断応力

$$\tau = \frac{p_s}{2 \cdot A_s}$$

σ_{θ} : 周方向応力
σ_{max} : 弁体に対する曲げ応力
ΔP : 設計竜巻の気圧低下量
g : 重力加速度
r : 内半径
t : 板厚
p_s : 弁棒に受ける荷重
p_v : 弁体に受ける応力
a : 弁棒の断面積
h : 弁体の板厚
A_s : 弁棒の断面積
A_v : 弁体の受圧面積
m_v : 弁体自重
τ : 弁棒に対するせん断応力

隔離弁の代表箇所を選定結果を表2-6に示す。

表2-6 隔離弁の代表選定結果

系統	評価対象	発生する応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度	代表
中央制御室換気空調系	弁箱	0.35	280	800	
	弁体	1.90	185	97	
	弁棒	0.59	390	291	
原子炉建屋原子炉棟換気空調系	弁箱	0.40	212	531	○
	弁体	46.52	221	4.75	
	弁棒	1.67	171	102	

(4) ファン

ファンにおいて、発生応力比が最も厳しくなる各系統のファンを抽出し、その中で最も厳しくなる系統のファンを代表ファンとする。

以下に、添付書類「VI-3-別添 1-1-8 換気空調設備の強度計算書」における応力の算出式を示す。

- ・外圧による周方向応力

$$\sigma_{\theta} = \frac{\Delta P \cdot r}{t}$$

σ_{θ} : 周方向応力
 ΔP : 設計竜巻の気圧低下量
 r : ケーシング内半径
 t : ケーシング板厚

ファンの代表箇所の選定結果を表 2-8 に示す。

表 2-8 ファンの代表選定結果

系統	ケーシングに発生 する周方向応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度	代表
原子炉補機 (A) 室換気空調系	1.59	240	150	○
原子炉補機 (B) 室換気空調系	1.59	240	150	
原子炉補機 (H P C S) 室換気空調系	1.59	240	150	
中央制御室換気空調系	1.49	240	161	
計測制御電源 (A) 室換気空調系	1.07	240	224	
計測制御電源 (B) 室換気空調系	1.07	240	224	

注記* : 裕度が同一の場合はA系を代表として選定する

(5) ダンパ

ダンパにおいて、外殻を構成するケーシングの発生応力比が最も厳しくなる各系統のダンパを抽出し、その中で最も厳しくなる系統のダンパを代表ダンパとする。

以下に、添付書類「VI-3-別添 1-1-8 換気空調設備の強度計算書」における各応力の算出式を示す。

a. ケーシング

ケーシングに作用する最大曲げモーメント

$$M_c = \frac{\ell_c^2 \cdot (F_{1c} + F_{2c})}{8}$$

ここで、

$$F_{1c} = P \cdot L_c$$

$$F_{2c} = \frac{m_c \cdot g}{\ell_c}$$

ケーシングに生じる最大曲げ応力

$$\sigma_{cmax} = \frac{M_c}{Z_c}$$

ここで、

$$Z_c = \frac{I_c}{e_c}$$

M_c : ケーシングに作用する最大曲げモーメント
ℓ_c : ケーシング長さ
F_{1c} : ケーシングの内部圧力による分布荷重
F_{2c} : ケーシングの自重による分布荷重
P : 内部圧力
L_c : 面間寸法
m_c : ケーシング質量
g : 重力加速度
σ_{cmax} : ケーシングに生じる最大曲げ応力
Z_c : ケーシングの断面係数
I_c : ケーシングの断面二次モーメント
e_c : ケーシングにおける断面の重心高さ

ダンパの代表箇所を選定結果を表 2-9 に示す。

表 2-9 ダンパの代表選定結果

系統	ケーシング				代表
	材料	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度	
原子炉補機 (A) 室換気空調系	SEHC	81	218	2.69	○
原子炉補機 (B) 室換気空調系	SEHC	81	218	2.69	
原子炉補機 (H P C S) 室換気空調系	SEHC	81	218	2.69	
中央制御室換気空調系	SS400	33	282	8.54	
計測制御電源 (A) 室換気空調系	SS400	26	282	10.84	
計測制御電源 (B) 室換気空調系	SS400	26	282	10.84	

注記* : 裕度が同一の場合はA系を代表として選定する

1. 竜巻影響評価における屋外配管の曲がり部による影響

1.1 概要

竜巻影響評価における屋外配管の構造強度評価は、設計竜巻による荷重に配管の自重及び運転時の状態で作用する荷重である内圧による発生応力を求めており、保守的な風荷重の条件や評価モデルを適用した上で、評価対象部位については、曲がり部を直管と見なして構造強度評価を実施している。これらの曲がり部の影響について、より現実に即した配管の解析モデルによる構造強度評価と比較することで、竜巻影響評価における屋外配管の構造強度評価が保守的に実施されていることを確認し、曲がり部の影響は十分小さいことを説明するものである。

1.2 竜巻影響評価モデルにおける保守性

配管に対する設計竜巻荷重による評価モデルは、配管の外径、材質ごとに、配管の支持間隔が最長となる箇所を選定し、曲がり部を直管と見なした両端支持のはりモデル（以下、「竜巻影響評価モデル」という。）を適用している。荷重としては、配管全面に風荷重が加わるものとし、設計竜巻の風圧力を自重と重畳させて評価を実施している。

これらは、実際に配管に加わる風荷重に対して、保守的なモデルにて評価を実施しており、図1に曲がりを含む配管のモデル化の考え方、表1に実際の配管に対する竜巻影響評価モデルにて考慮している保守性を示す。

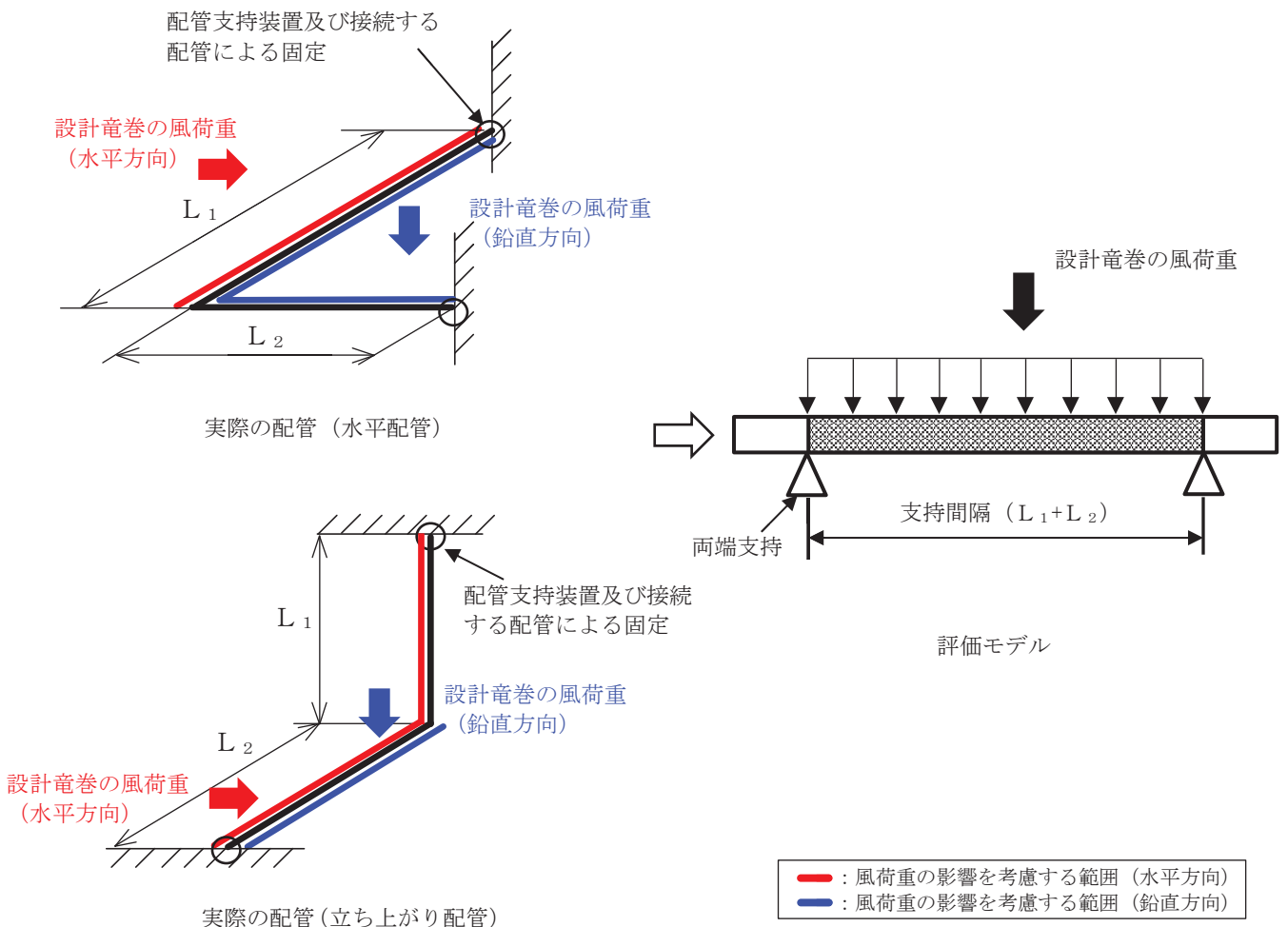


図1 曲がりを含む配管のモデル化の考え方

表1 曲がりを含む配管のモデル化における評価の保守性

評価条件	実際の配管	評価モデル
風荷重	風の方向により定まる受圧面積による風荷重	受圧面積を全面とした風荷重
境界条件	配管支持装置による固定	両端単純支持

配管に曲がりを含む場合、局所的に応力が集中する可能性があるが、これらを確認する観点で、曲がりを考慮しない竜巻影響評価モデルとより現実に即した耐震評価で用いる3次元はりモデルによる解析モデル（以下、「解析モデル」という。）を比較することで、竜巻影響評価における保守性を確認する。

1.3 竜巻影響評価モデルによる評価

(1) 評価対象部位

配管の曲がりの影響は配管に存在する曲がり箇所が多いほどその影響が大きいことから、支持間隔中に曲がりが多い原子炉補機冷却海水ポンプ周りの配管のうちB系（以下「原子炉補機冷却海水ポンプ周り配管」という。）を評価対象配管として評価を実施した。

図2に海水ポンプ室補機ポンプエリアの配管配置図及び評価対象配管を示す。



図2 海水ポンプ室補機ポンプエリアの配管配置図及び評価対象配管

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

(2) 評価に用いる荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の設定

構造強度評価に用いる荷重を以下に示す。

(a) 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、持続的に生じる荷重である自重を考慮する。なお、自重には配管自体の質量のほか、保温材の付加質量及び管内の流体の質量を考慮するものとする。

単位長さ当たりの自重による荷重は以下のとおり計算する。

$$w = m \cdot g$$

(b) 設計竜巻による荷重

風圧力による荷重及び気圧差による荷重を考慮する。風荷重については、原子炉補機冷却海水ポンプ周り配管が設置される海水ポンプ室補機ポンプエリアがピット構造であることによる風圧力の低減、及び竜巻防護ネットの設置による風圧力の低減は無いものとして保守的な評価を行う。

イ. 風圧力による荷重(W_w)

風圧力による荷重 W_w は、添付書類「VI-3-別添1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1(3)c. (a) 風圧力による荷重」に示す式に従い、算出する。

$$W_w = q \cdot G \cdot C \cdot A$$

ロ. 気圧差による荷重(W_p)

気圧差による荷重 W_p は、添付書類「VI-3-別添1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価方法に従って、気圧差を見かけ上の配管の内圧の増加として考慮する。

(c) 運転時の状態で作用する荷重

運転時の状態で作用する荷重としては、配管に作用する内圧 (P) を考慮する。

b. 荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重の組合せは、添付書類「VI-3-別添1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」にて設定している荷重の組合せを踏まえて設定する。

配管には、自重、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び内圧が作用する。

構造強度評価に用いる荷重の組合せを表2に示す。

表 2 荷重の組合せ

評価対象部位	組み合わせる荷重
原子炉補機冷却海水ポンプ周り配管	① 風圧力による荷重 ② 気圧差による荷重 ③ 自重 ④ 内圧

(2) 構造強度評価の許容限界

配管の許容限界は、J E A G 4 6 0 1を準用し、「クラス 2,3 配管」の許容限界を適用する。設計荷重に対して、当該施設に要求される安全機能を維持できるように弾性設計とするため、許容応力状態Ⅲ_ASから算出した以下の許容応力を許容限界とする。管の構造強度評価における許容限界及び許容応力を表 3 に示す。

表 3 管の許容限界及び許容応力

評価対象配管	材料	許容限界	許容応力 (MPa)
		一次応力 (膜+曲げ)	
原子炉補機冷却海水 ポンプ周り配管	SM400C	S_y	211

注記 * : 最高使用温度である 50℃における値

(3) 構造強度評価方法

配管及び弁の構造強度評価は、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」にて設定している評価式を用いる。

a. 計算モデル

配管は風圧力による一様な荷重を受ける単純支持梁として評価を行う。保温材を使用している配管については、保温材を含めた受圧面積を考慮して評価を行う。

配管モデル図を図3に示す。

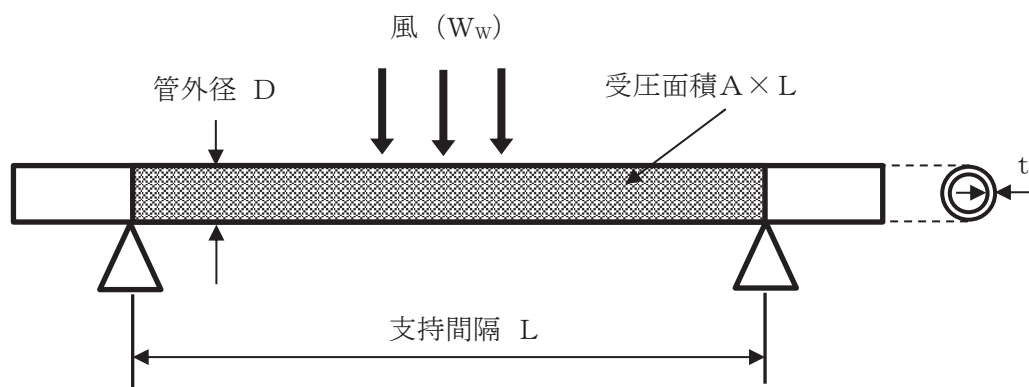


図 3 配管モデル図

b. 計算方法

(a) 竜巻による応力計算

イ. 風圧力により生じる応力

風圧力による荷重が配管の支持スパンに等分布荷重として加わり、曲げ応力を発生させるものとして、以下の式により算定する。

$$\sigma_{WW} = \frac{M}{Z} = \frac{W_w \cdot L^2}{8 \cdot Z}$$

ここで、

$$Z = \frac{\pi}{32 \cdot D} \left\{ D^4 - (D - 2 \cdot t)^4 \right\}$$

ロ. 気圧差により生じる応力

気圧差による荷重は、気圧が低下した分、内圧により生じる一次一般膜応力が増加すると考えて、その応力増加分を以下の式により算定する。

$$\sigma_{WP} = \frac{\Delta P \cdot D}{4 \cdot t}$$

したがって、イ.及びロ.項の複合荷重により生じる応力 σ_{WT1} 及び σ_{WT2} は以下の式により算出する。

$$\sigma_{WT1} = \sigma_{WP}$$

$$\sigma_{WT2} = \sigma_{WW} + 0.5 \cdot \sigma_{WP}$$

(b) 組合せ応力

竜巻荷重と組み合わせる荷重として、配管に常時作用する自重及び運転時に作用する内圧を考慮する。自重により生じる曲げ応力及び内圧により生じる一次一般膜応力は、以下の式により算定する。

$$\sigma_{自重} = \frac{w \cdot L^2}{8 \cdot Z}$$

$$w = m \cdot g$$

$$\sigma_{内圧} = \frac{P \cdot D}{4 \cdot t}$$

したがって、自重及び風圧力による荷重により生じる曲げ応力と気圧差による荷重及び内圧により生じる一次一般膜応力を足し合わせ、配管に生じる応力として以下の式により σ を算出する。

$$\sigma = \sigma_{自重} + \sigma_{内圧} + \sigma_{WT2}$$

(4) 評価条件

(b)の評価方法に用いる評価の条件を表4に示す。

表4 評価条件

ガスト係数 G (-)	風力係数 C (-)	設計用速度圧 q (MPa)	気圧低下量 ΔP (MPa)	重力加速度 g (m/s ²)	管外径 D (mm)
1	1.2	6.13×10^{-3}	7.6×10^{-3}	9.80665	508.0
材料	支持間隔 L (m)	板厚 t (mm)	単位長さ当たりの質量 m (kg/m)	単位長さ当たりの受圧面積 A (m ² /m)	内圧 P (MPa)
SM400C	14.7	9.5	330.4	0.6380	0.78

(5) 評価結果

竜巻影響評価モデルによる構造強度結果を表5に示す。

表5 竜巻影響評価モデルによる評価結果

自重による曲げ 応力 $\sigma_{\text{自重}}$ (MPa)	風圧力による曲 げ応力 σ_{ww} (MPa)	気圧差及び内圧 による膜応力 $\sigma_{\text{内圧}}$ (MPa)	発生応力 σ (MPa)	許容応力 (MPa)
48	70	11	129	211

1.4 解析モデルによる評価

解析モデルによる評価は、耐震評価で用いる配管の3次元はりモデルによる解析を実施した。

(1) 評価対象部位

解析モデルによる評価における評価対象範囲は、竜巻影響評価モデルと同様の部位とする。

解析に用いる原子炉補機冷却海水ポンプ周り配管の解析モデルを図4に示す。

(2) 荷重条件

原子炉補機冷却海水ポンプ周り配管に対する解析評価において考慮する荷重については、竜巻影響評価モデルと同様に自重、設計竜巻による荷重及び内圧をそれぞれ考慮する。設計竜巻による荷重のうち、風圧力による荷重の作用方向は保守的に自重と重畳する鉛直方向に作用するものとする。評価に用いる荷重及び荷重の組合せを表6及び表7にそれぞれ示す。

表6 評価に用いる荷重条件

荷重	荷重値
自重 (w)	$w = 3241 \text{ N/m}$
設計竜巻による荷重 (W_w, W_p)	$W_w = 4694 \text{ N/m}$ $W_p = 7.6 \times 10^{-3} \text{ MPa}$
内圧 (P)	$P = 0.78 \text{ MPa}$

表7 荷重の組合せ

評価対象部位	組み合わせる荷重
原子炉補機冷却海水ポンプ周り配管	① 風圧力による荷重 ② 気圧差による荷重 ③ 自重 ④ 内圧

(3) 構造強度評価方法

解析モデルによる構造強度の評価方法を以下に示す。なお、解析には解析コード「ISAP-IV」を用いた。

$$S_{p r m} = \frac{P \cdot D_0}{4 \cdot t} + \frac{0.75 \cdot i_1 \cdot (M_a + M_b)}{Z}$$

$S_{p r m}$: 一次応力

P : 気圧差荷重及び内圧

D_0 : 配管の外形

t : 配管の板厚

M_a : 管の自重により生じるモーメント

M_b : 風圧力による荷重により生じるモーメント

i_1 : 応力係数 (設計・建設規格 PPC-3810 に規定する値又は 1.33
のいずれか大きい方の値)

- a. 表 6 に示す荷重条件にて原子炉補機冷却海水ポンプ周り配管に荷重が作用した場合の発生応力について確認する。なお、竜巻防護ネットによる風圧力の低減は無いものとして保守的な評価を行う。
- b. 配管支持点の境界条件については、評価対象配管の連続性及び配管の支持構造物による拘束を考慮し、固定条件とする。
- c. 配管の質量については、配管自体の質量の他に弁等の集中質量、保温材等の付加質量及び管内流体の質量を考慮するものとする。
- d. 配管の受圧面積については、配管に取り付けられた保温材を含めた受圧面積を考慮して評価を行う。



図 4 原子炉補機冷却海水ポンプ周り配管の解析モデル

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(4) 解析評価結果

解析モデルによる評価結果を表8に示す。評価結果は、設計竜巻による荷重により発生する応力のうち最大応力が発生する評価点について示す。

表8 解析評価結果における評価点の最大値

評価点 番号	自重による 曲げ応力 (MPa)	風圧力による 曲げ応力 (MPa)	気圧差及び内圧 による膜応力 (MPa)	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
43	31	33	12	76	211

以上より、竜巻影響評価モデルの評価に対して、解析モデルの評価による発生応力が小さいことから、現実に即した解析モデルによって、曲がり部を考慮した評価を実施した場合でも、一様分布の風荷重にて評価をした場合には、竜巻影響評価モデルの評価が保守的な結果を与えることを確認した。

これは、竜巻評価で考慮している一様分布の風荷重の評価においては、動的な耐震評価に比べて、曲げによる影響は小さく、竜巻影響評価モデルにおける評価条件の保守性が上回るためと考えられる。

よって、竜巻に対する配管評価における、曲がり部の影響は十分小さく、竜巻の配管評価全体として保守的な評価が実施されていることを確認した。