

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-091 改 16
提出年月日	平成 30 年 5 月 7 日

## V-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

## 目次

### V-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

V-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

V-3-別添 1-1-2 残留熱除去系海水系ポンプの強度計算書

V-3-別添 1-1-3 残留熱除去系海水系ストレーナの強度計算書

V-3-別添 1-1-4 排気筒の強度計算書

V-3-別添 1-1-5 換気空調設備の強度計算書

V-3-別添 1-1-6 ディーゼル発電機用海水ポンプの強度計算書

V-3-別添 1-1-7 ディーゼル発電機用海水ストレーナの強度計算書

V-3-別添 1-1-8 ディーゼル発電機吸気フィルタの強度計算書

V-3-別添 1-1-9 配管及び弁の強度計算書

V-3-別添 1-1-10 波及的影響を及ぼす可能性がある施設の強度計算書

V-3-別添 1-1-10-1 建屋及び構造物の強度計算書

V-3-別添 1-1-10-2 消音器の強度計算書

V-3-別添 1-1-10-3 排気管、放出管及びベント管の強度計算書

### V-3-別添 1-2 防護対策施設の強度計算の方針

V-3-別添 1-2-1 防護対策施設の強度計算書

V-3-別添 1-2-1-1 防護ネットの強度計算書

V-3-別添 1-2-1-2 防護鋼板の強度計算書

V-3-別添 1-2-1-3 架構の強度計算書

### V-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

V-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

：今回ご説明分

V-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

## 目次

1. 概要.....	1
2. 基本方針.....	1
2.1 位置.....	1
2.2 構造概要.....	2
2.3 評価方針.....	12
2.4 適用規格.....	14
3. 強度評価方法.....	15
3.1 記号の定義.....	15
3.2 評価対象部位.....	16
3.3 荷重及び荷重の組合せ.....	17
3.4 許容限界.....	20
3.5 評価方法.....	23
4. 評価条件.....	43
4.1 貫通評価.....	43
4.2 裏面剥離評価.....	45
4.3 変形評価.....	45
5. 強度評価結果.....	51
5.1 貫通評価.....	51
5.2 裏面剥離評価.....	52
5.3 変形評価.....	53

## 1. 概要

本資料は、V-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」に示すとおり、竜巻より防護すべき施設を内包する施設である原子炉建屋、タービン建屋、使用済燃料乾式貯蔵建屋（以下「建屋」という。）及び軽油貯蔵タンクタンク室（以下「構造物」という。）が、設計飛来物（以下「飛来物」という。）の衝突に加え、風圧力及び気圧差に対し、竜巻時及び竜巻通過後においても、竜巻より防護すべき施設の安全機能を損なわないよう、内包する竜巻より防護すべき施設に飛来物が衝突することを防止する機能を有すること及び竜巻より防護すべき施設に必要な機能を損なわないことを確認するものである。

## 2. 基本方針

建屋及び構造物について、V-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「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、建屋及び構造物の「2.1 位置」，「2.2 構造概要」，「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

### 2.1 位置

建屋及び構造物の配置図を図2-1に示す。

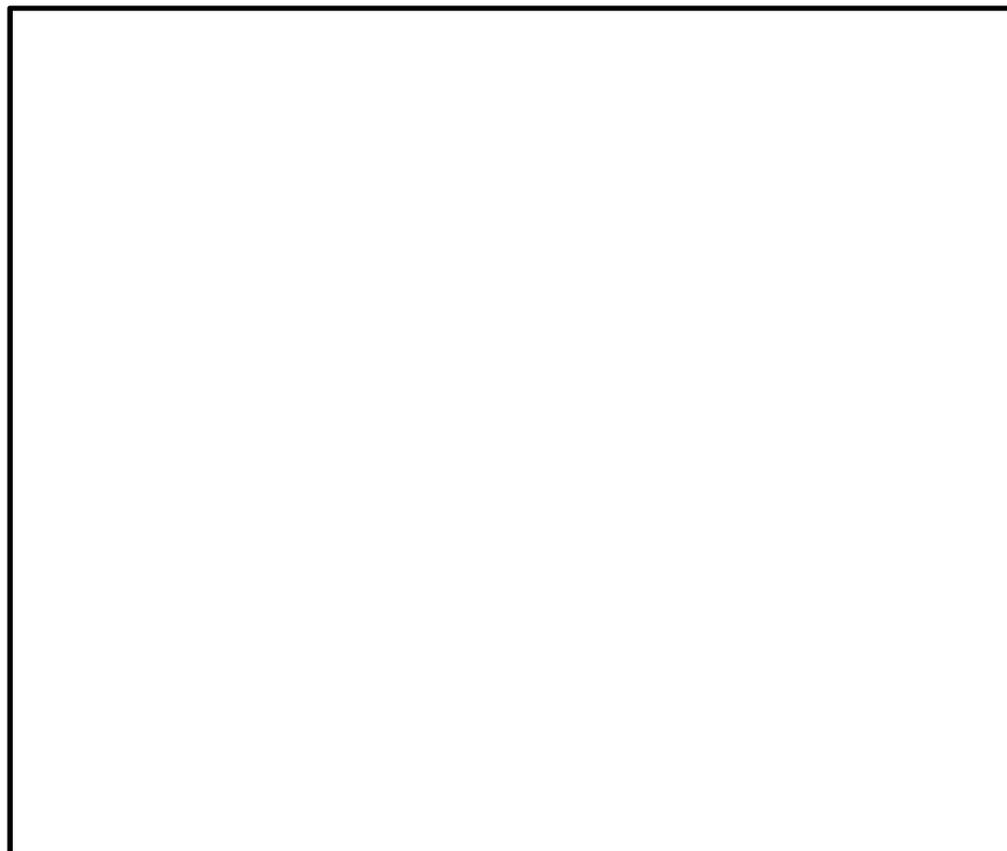


図 2-1 建屋及び構造物の配置図

## 2.2 構造概要

建屋及び構造物は、V-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「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画とする。

建屋は、主体構造が鉄筋コンクリート造で、一部鉄骨造を有する構造である。また、原子炉建屋には、外殻を構成する部材として鋼製の原子炉建屋大物搬入口扉（原子炉建屋原子炉棟水密扉及び機器搬入口内側扉）、原子炉建屋付属棟 1 階電気室搬入口水密扉等の扉が設置されている。

軽油貯蔵タンクタンク室は、地中に埋設された構造物であり、地上部に露出する頂版を含めた外殻の躯体は鉄筋コンクリート造とし、地上部に露出する開口部の蓋は鋼製である。

建屋及び構造物の概略平面図及び概略断面図を図 2-2～図 2-9 に示す。

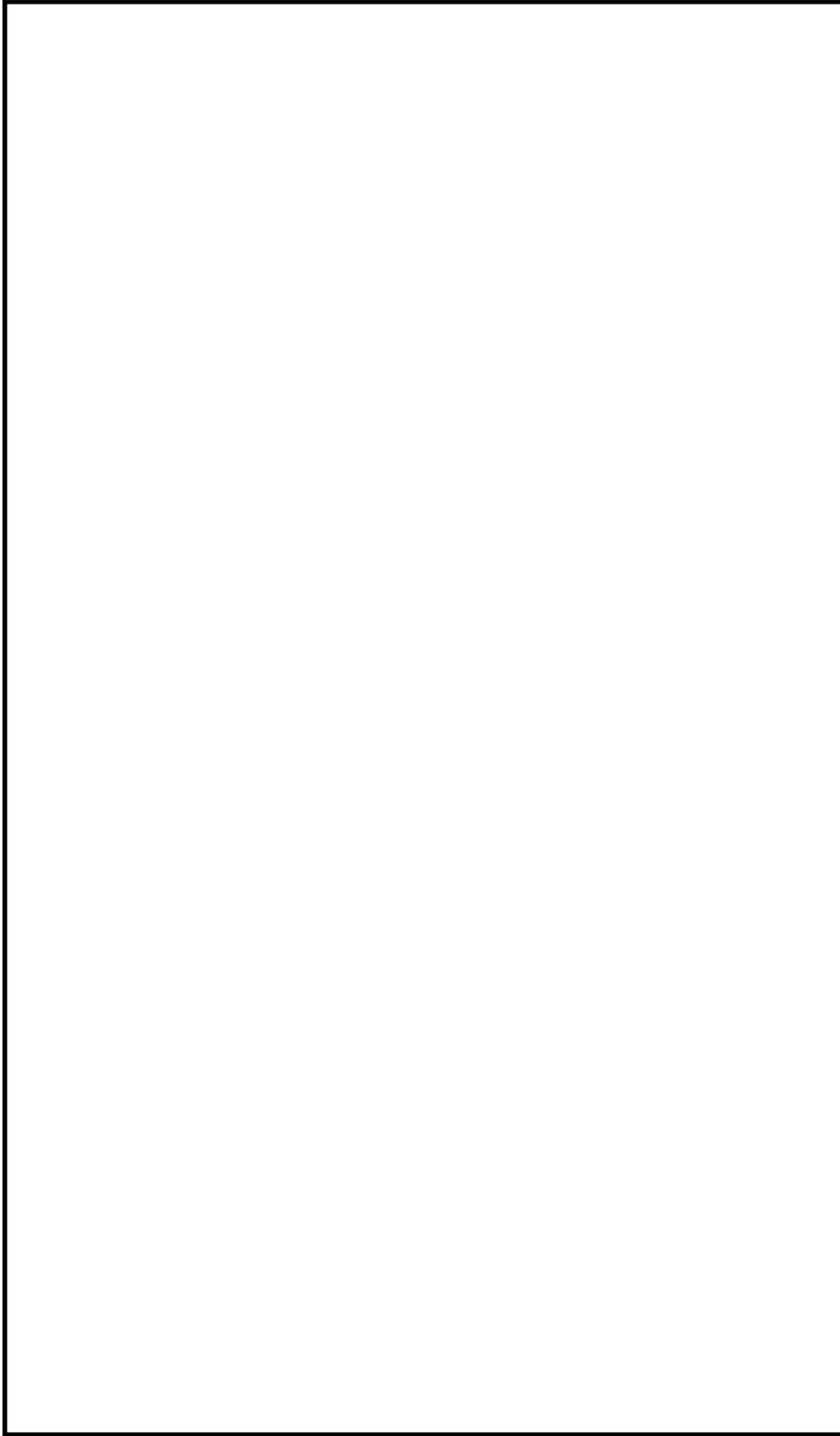


図2-2 原子炉建屋の概略平面図

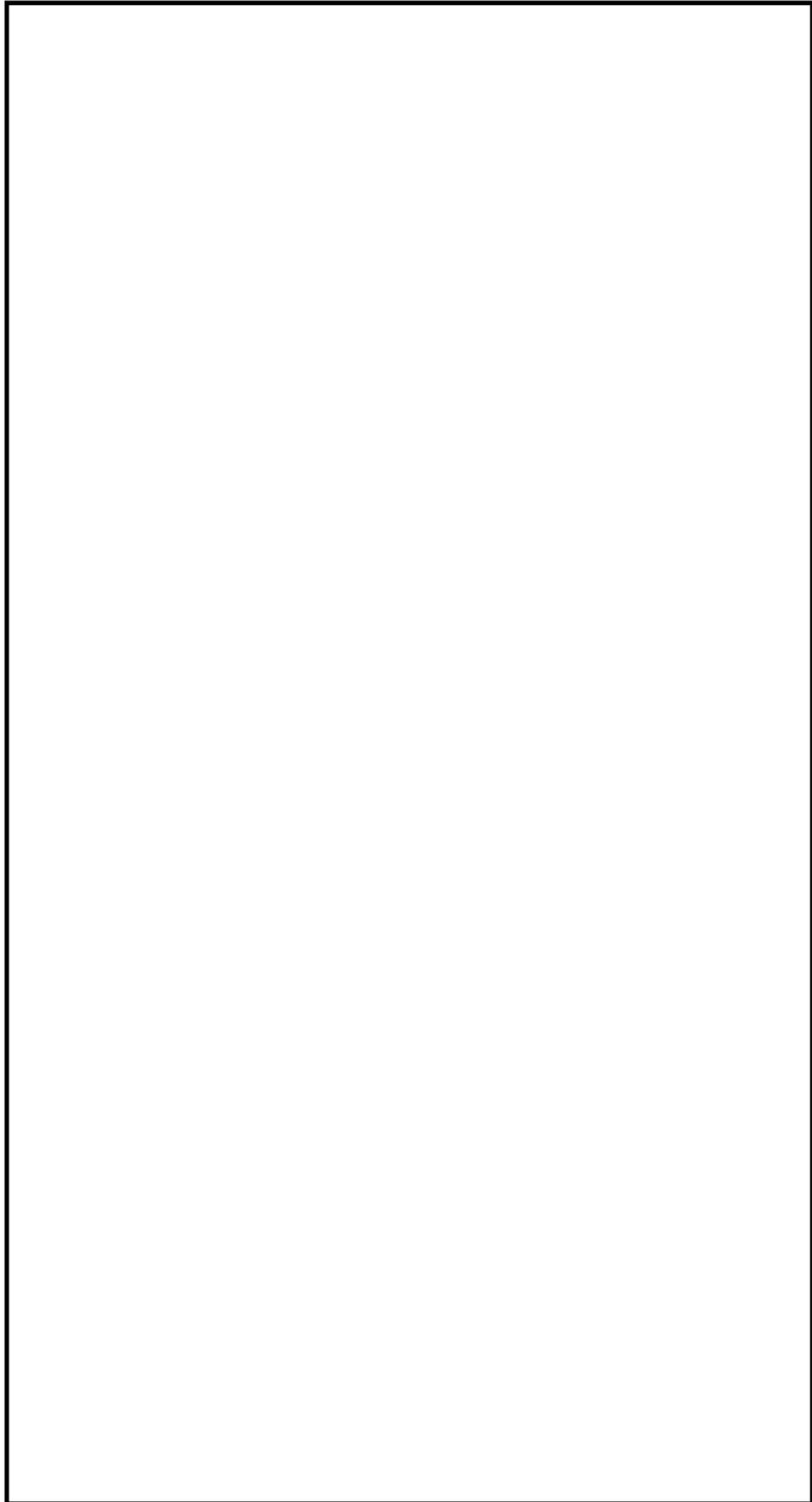


図 2-3 原子炉建屋の概略断面図 (1/2)

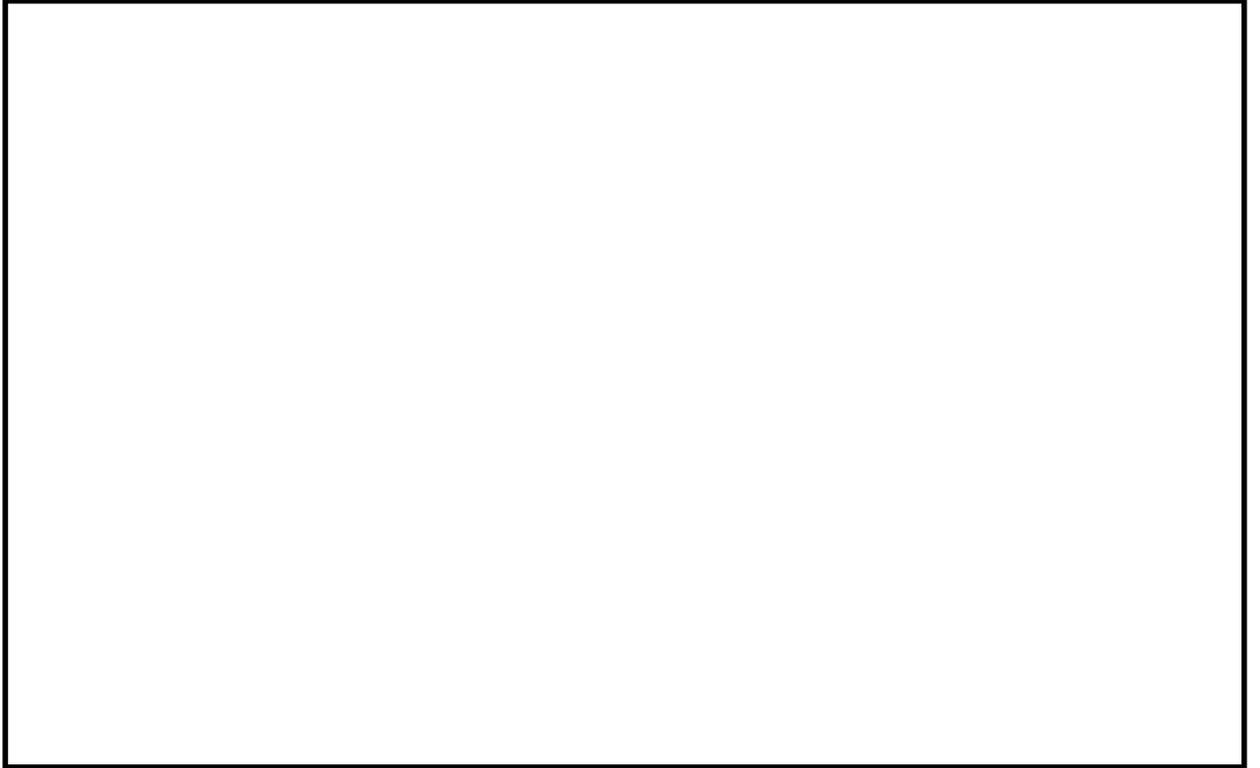


図 2-3 原子炉建屋の概略断面図(2/2)

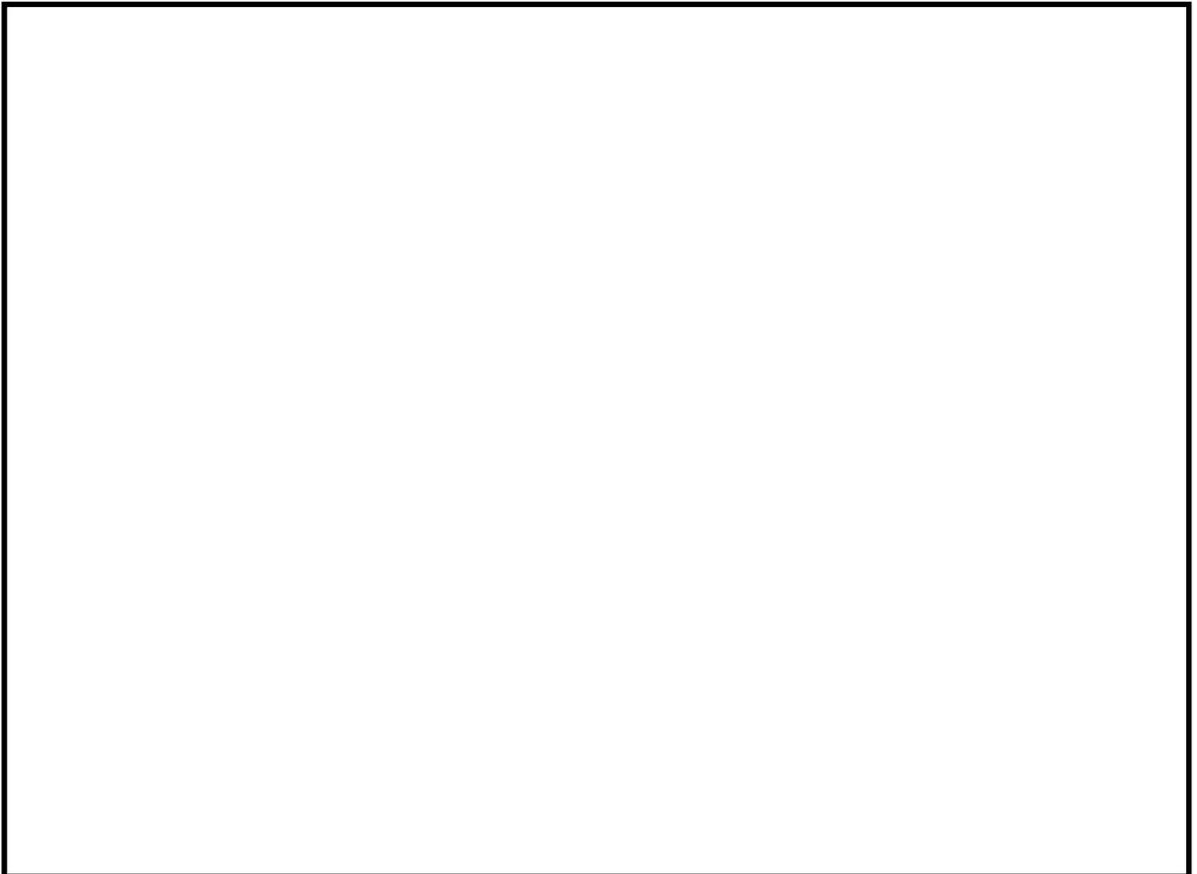


図 2-4 タービン建屋の概略平面図

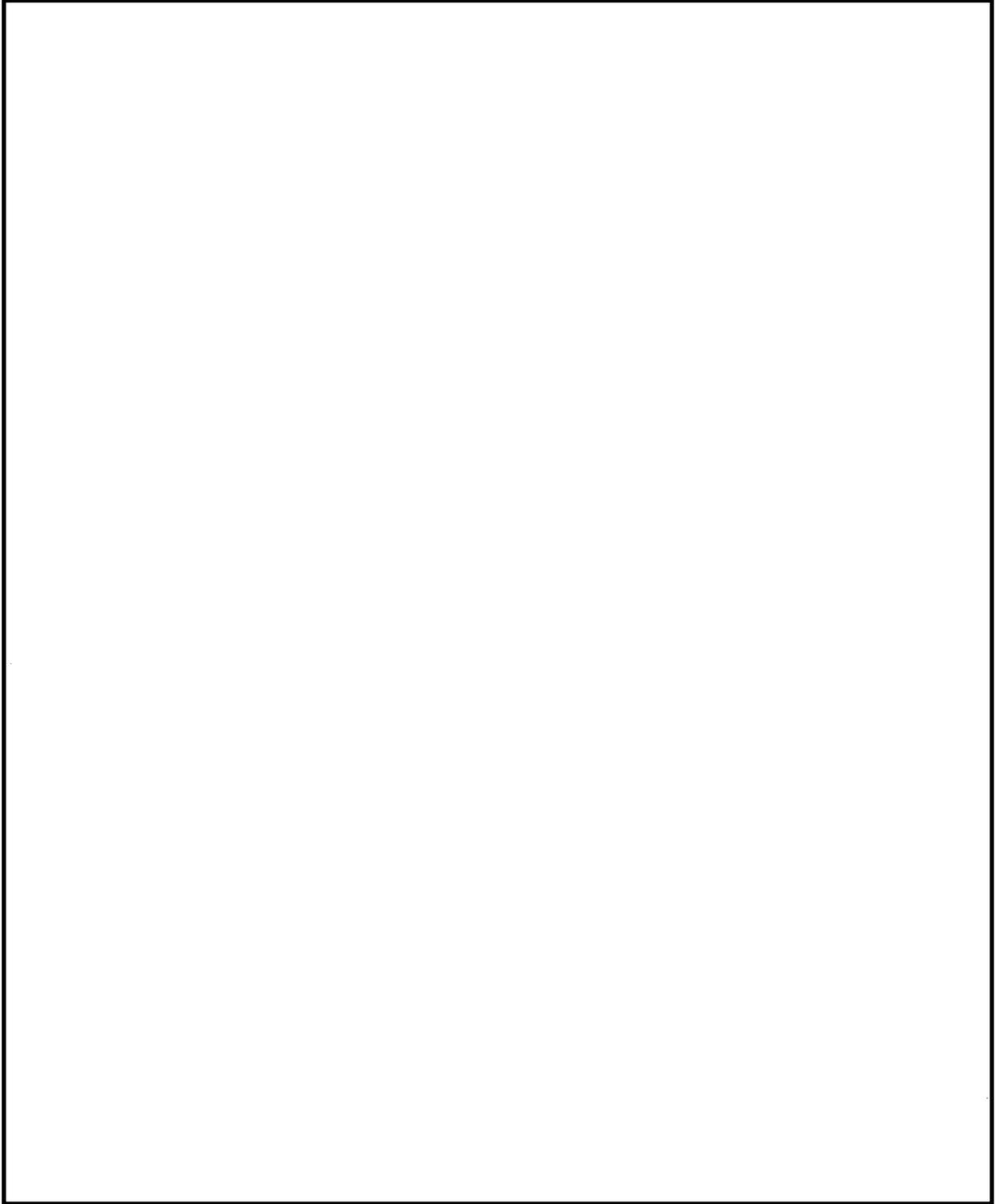


図 2-5 タービン建屋の概略断面図

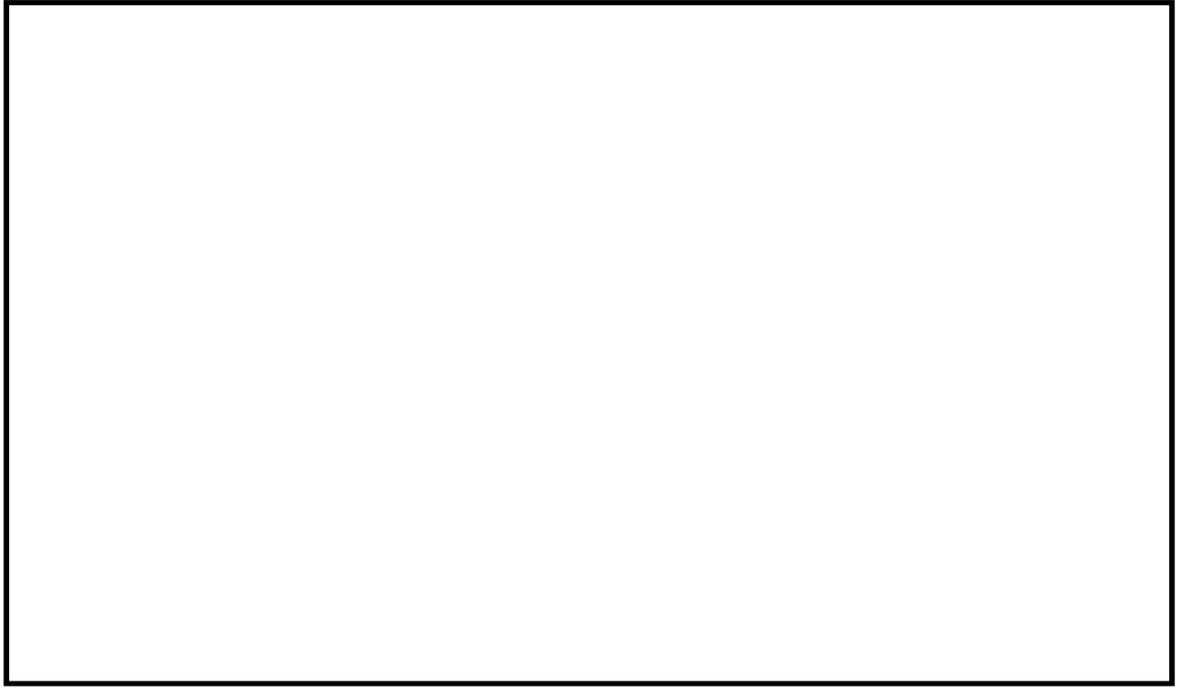


図 2-6 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略平面図

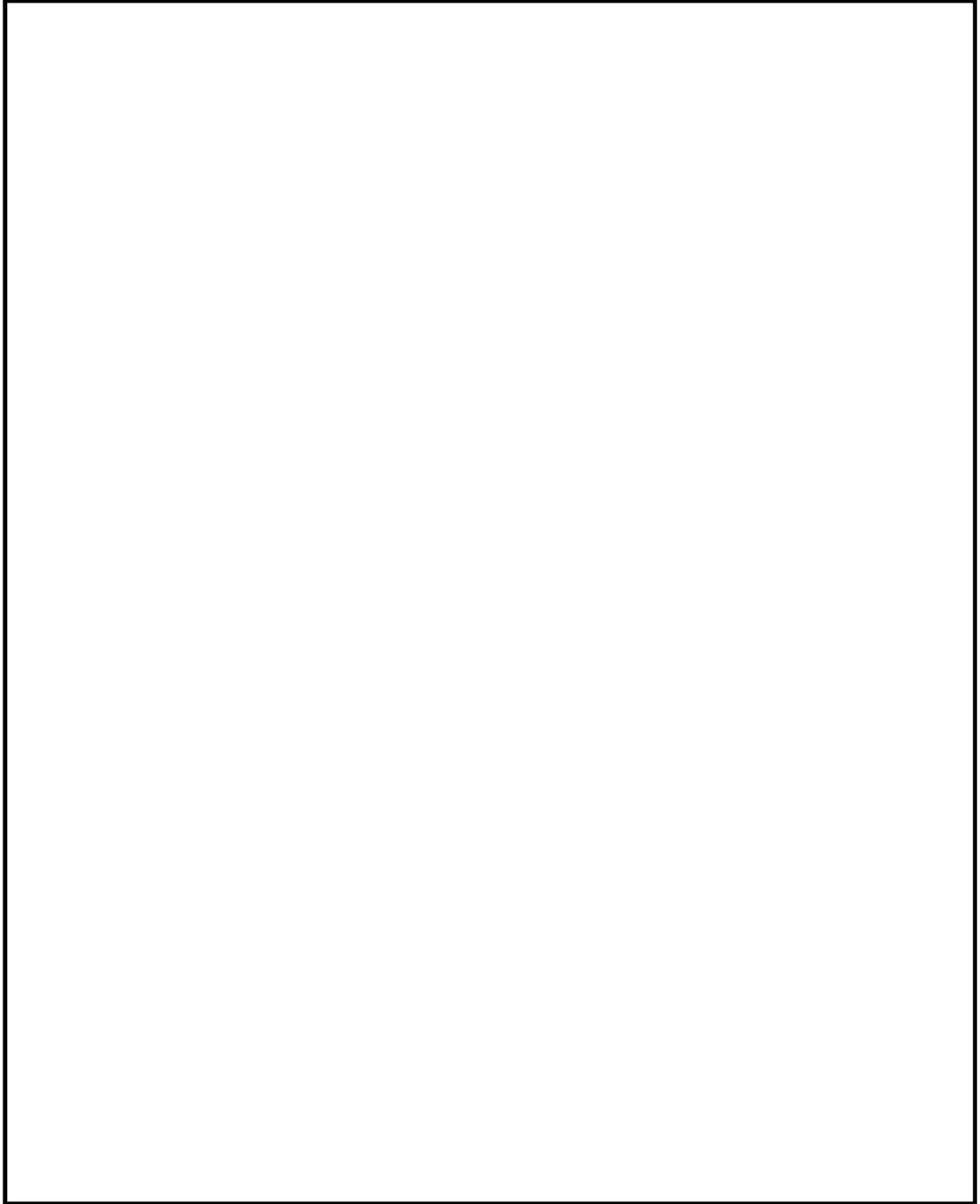


図 2-7 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略断面図



図2-8 軽油貯蔵タンクタンク室の概略平面図

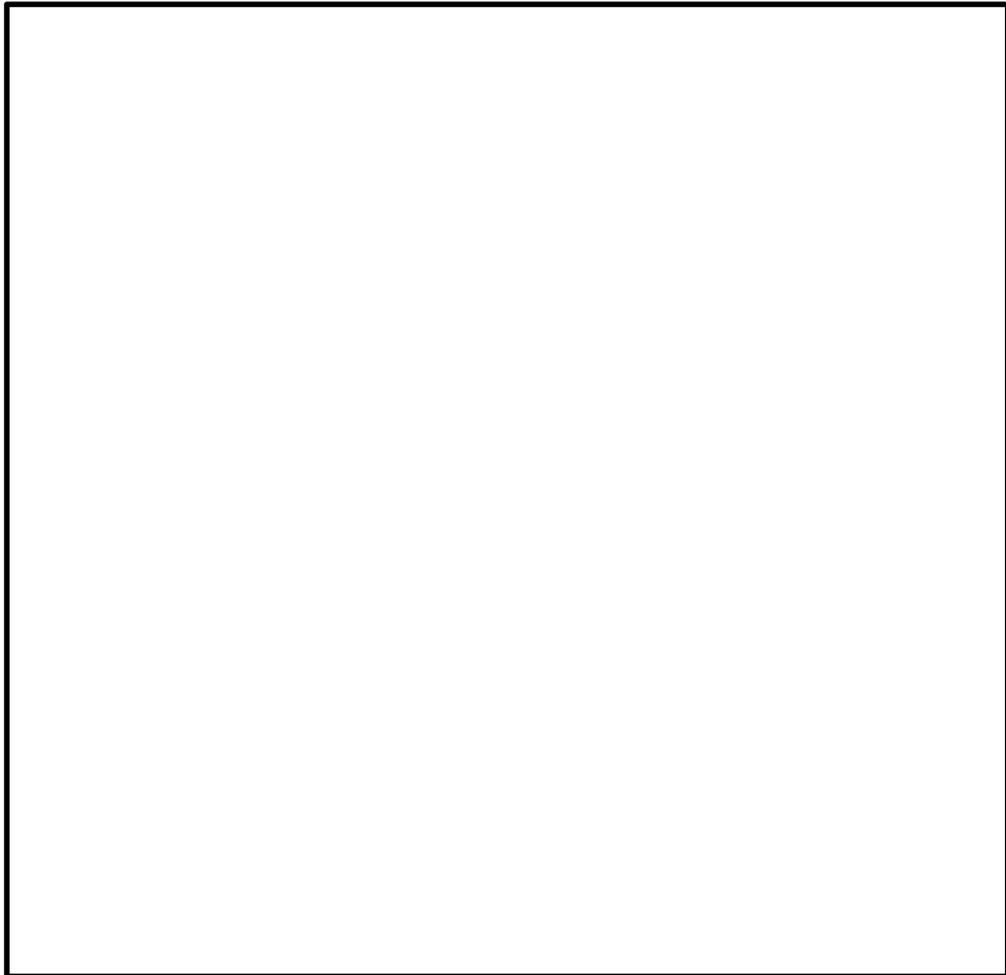


図2-9 軽油貯蔵タンクタンク室の概略断面図

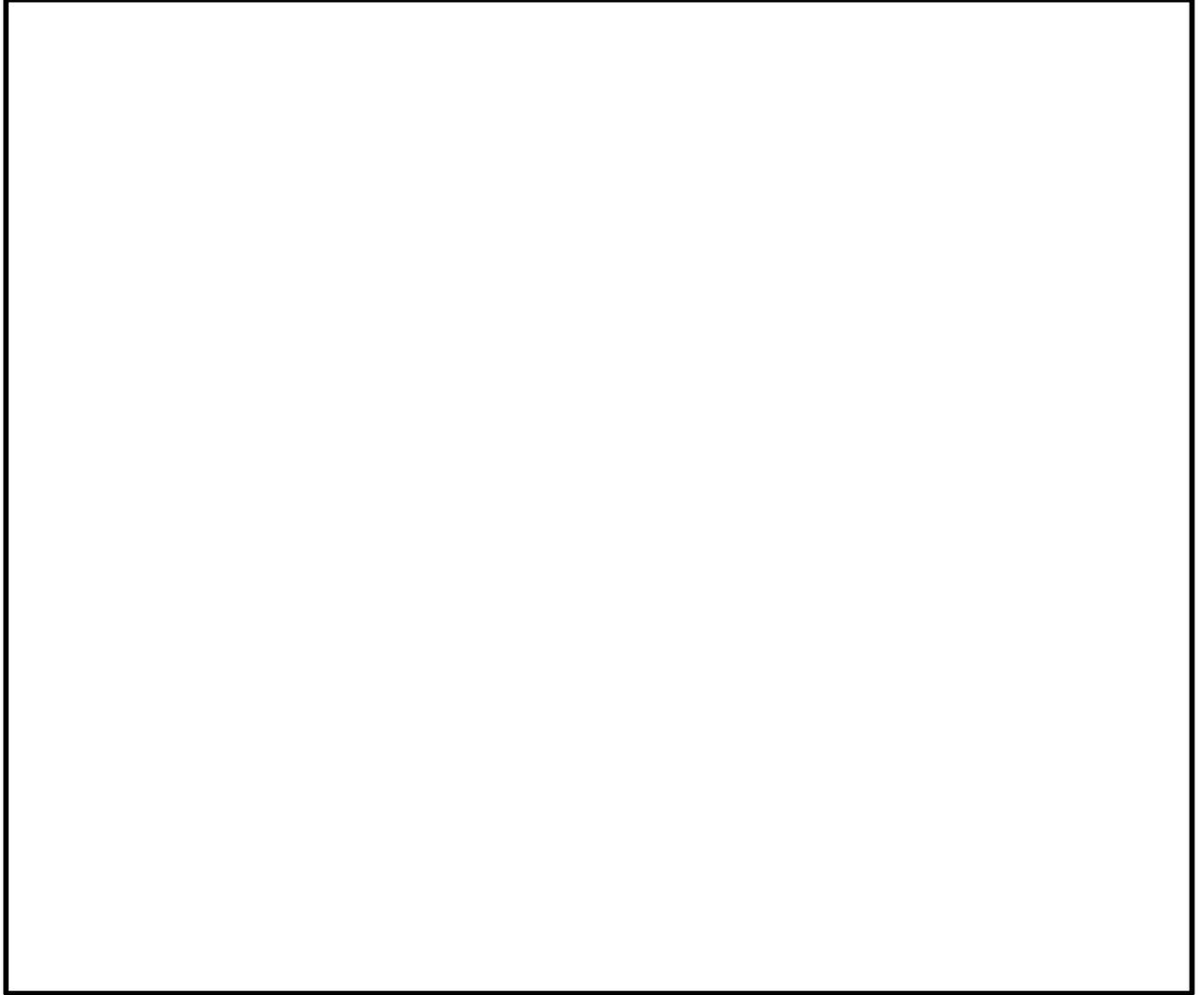


図2-10 緊急時対策所の概略平面図

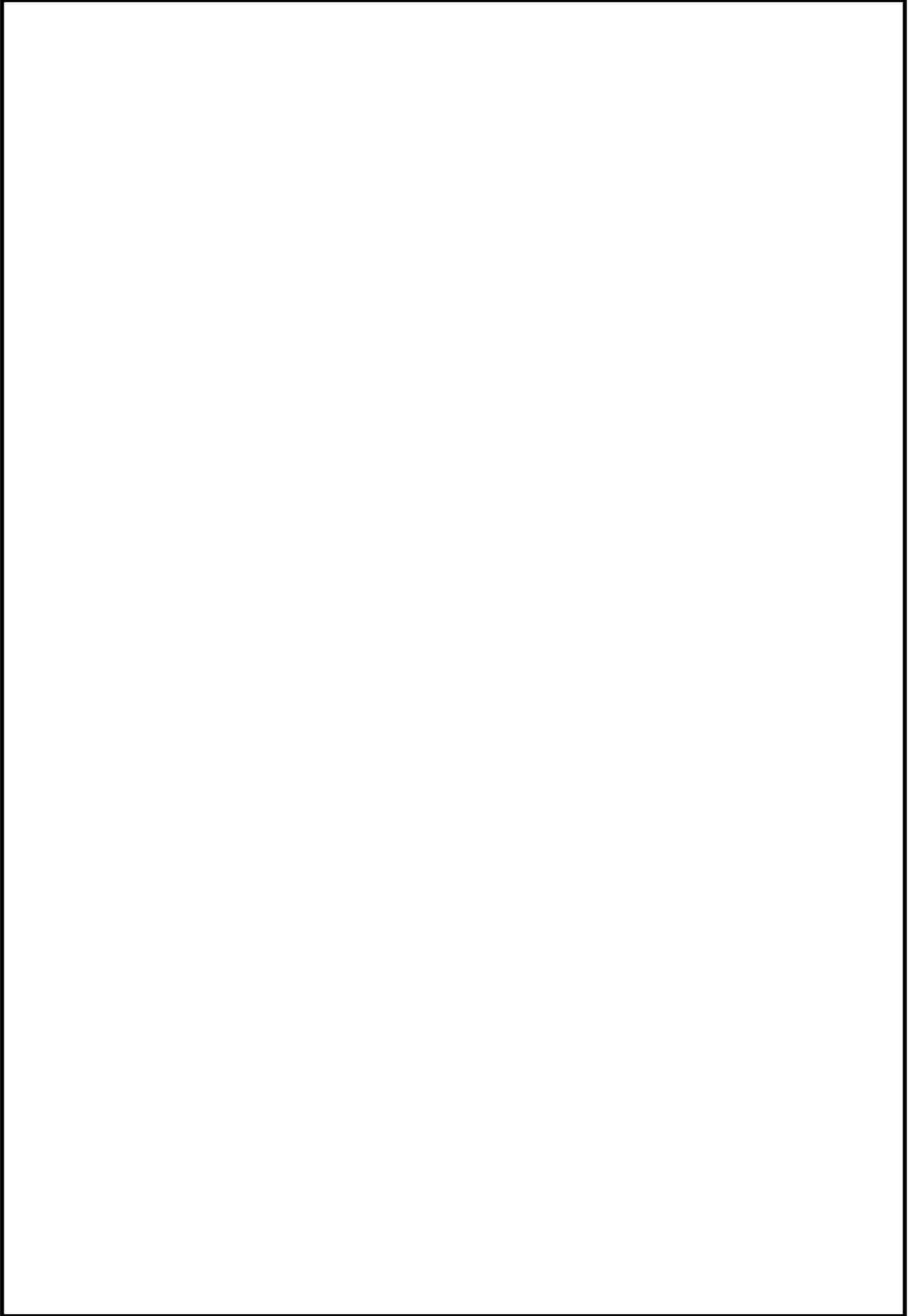


図2-11 緊急時対策所の概略断面図

## 2.3 評価方針

建屋及び構造物の強度評価は、V-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」及び「4.2 許容限界」を踏まえ、竜巻より防護すべき施設が安全機能を損なわないことを、「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

建屋及び構造物の強度評価においては、その構造を踏まえ、設計竜巻荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を設定する。

具体的には、飛来物が竜巻より防護すべき施設に衝突する直接的な影響の評価として、建屋及び構造物の外殻を構成する部材に対する「衝突評価」を行う。また飛来物が竜巻より防護すべき施設に衝突・接触する波及的な影響の評価として、建屋及び構造物の外殻を構成する部材の裏面剥離による飛散の影響並びに建屋及び構造物の外殻を構成する部材の転倒・脱落の影響に対する「構造強度評価」を行う。

### 2.3.1 貫通評価

飛来物が建屋及び構造物の外殻を構成する部材を貫通しない設計とするために、飛来物による衝撃荷重に対し、防護すべき施設の外殻を構成する部材が設計飛来物の貫通を生じないことを計算若しくは解析により確認する。

具体的には、防護すべき施設の外殻となる区画の屋根、外壁及び内壁、並びに開口部建具並びに構造物の地上露出部が、設計飛来物の貫通を生じない厚さを有していることを、計算により確認する。貫通を生じない厚さを有していることの確認が出来ない場合においては、これらに終局状態に至るようなひずみを生じないことを、解析により確認する。

### 2.3.2 構造強度評価

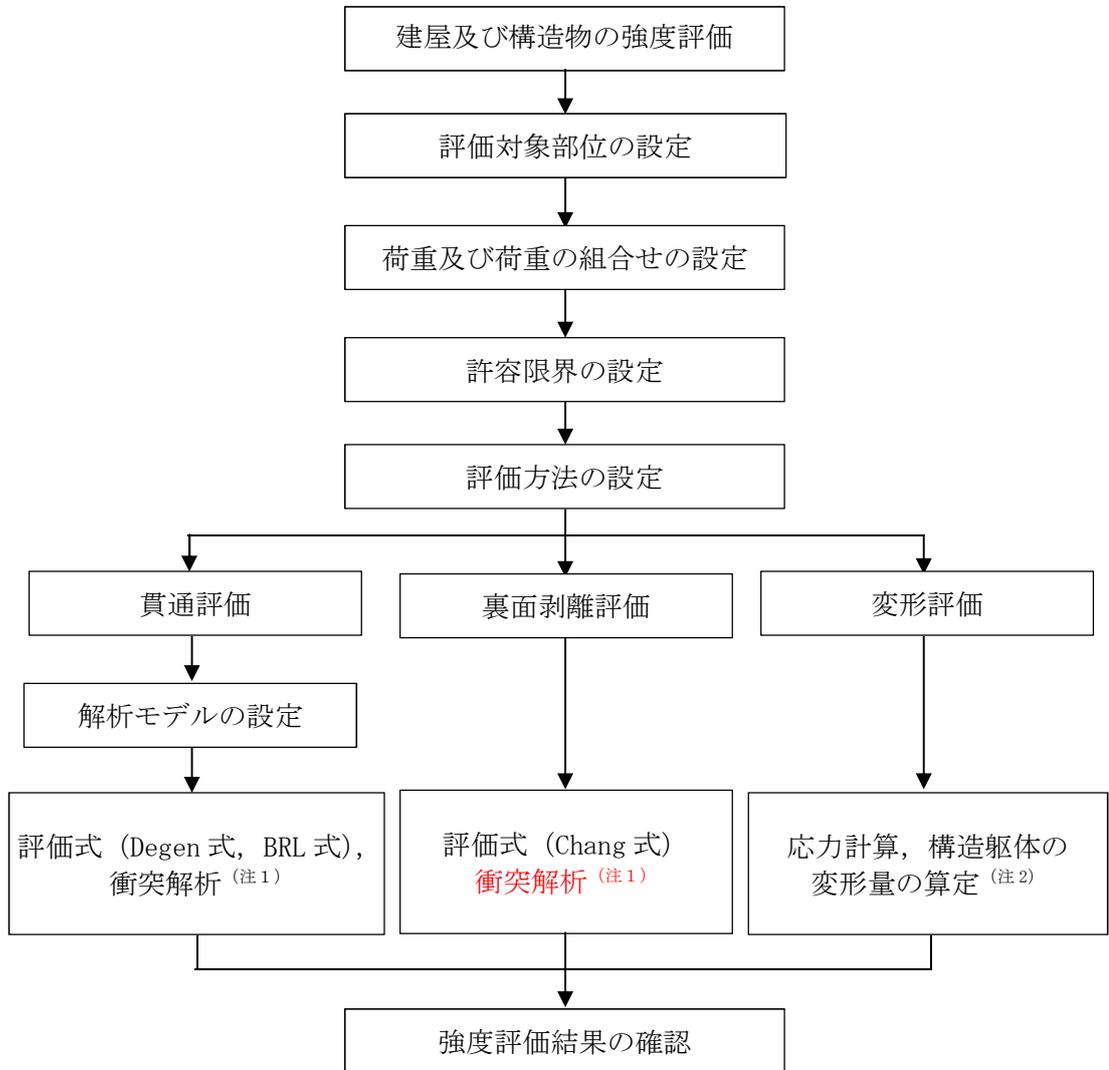
飛来物による衝撃荷重に対し、竜巻より防護すべき施設に波及的影響を与えないよう、防護すべき施設の外殻を構成する部材自体の脱落を生じない設計とするために、これらについて、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じないことを計算により確認する。（以下「裏面剥離評価」という。）

具体的には、RC造の建屋及び構造物について、飛来物による衝撃荷重に対し、施設の外殻を構成する部材自体の脱落を生じない設計とするために、外殻となる屋根スラブ、外壁及び内壁並びに構造物の鉄筋コンクリートが、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じない最小厚さ以上であることを計算により確認する。

外殻を構成する部材で、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じない最小厚さ以上であることの確認ができない場合は、裏面剥離の影響を受ける防護対象施設が当該部位の近傍にないことを確認するか、裏面剥離が生じない構造であることを解析により確認する。

また、外殻を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とするために、設計荷重に対し、外殻となる屋根スラブ、屋根スラブのスタッドボルト、外壁及び内壁に終局状態に至るようなひずみ又は応力が生じないこと、鉄骨架構に終局状態に至るような変形が生

しないことを計算及び解析により確認する。(以下「変形評価」という。)  
 建屋及び構造物の設計荷重作用時の強度評価フローを図2-10に示す。



(注1) 3次元FEMモデルを用いた動的評価を実施する。

(注2) 地震応答解析モデルを用いた静的評価を実施する。

図2-10 強度評価フロー

## 2.4 適用規格

- 鋼構造設計規準 -許容応力度設計法- ( (社) 日本建築学会, 2005改定)
- Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev 8P(NEI07-13)) (以下「NEI07-13」という。)
- 建築基準法及び同施行令
- 建築物荷重指針・同解説 ( (社) 日本建築学会, 2004改定)
- ISES7607-3「軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査 その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討」 (高温構造安全技術研究組合)
- 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 ( (社) 日本建築学会, 2010改定) (以下「RC規準」という。)
- 「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987」 ( (社) 日本電気協会)
- 「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」 ( (社) 日本電気協会)
- 「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 J S M E S N C 1-2005/2007」 (社) 日本機械学会
- 日本工業規格 ( J I S )
- 「各種合成構造設計指針・同解説」 ( (社) 日本建築学会, 2010改定) (以下「各種合成指針」という。)
- 建築耐震設計における保有耐力と変形性能 ( (社) 日本建築学会, 1990 改定)

### 3. 強度評価方法

#### 3.1 記号の定義

建屋及び構造物の評価に用いる記号を表3-1～表3-4に示す。

表 3-1 貫通評価に用いる記号 (Degen 式)

記号	単位	定義	
D	kgf/cm <sup>3</sup>	飛来物直径密度 $D = W / d^3$	
d	cm	飛来物の (等価) 直径	
e	cm	貫通限界厚さ (コンクリート)	
F <sub>c</sub>	kgf/cm <sup>2</sup>	コンクリートの設計基準強度	
N	—	飛来物の形状係数	
V	m/s	外壁	飛来物の衝突速度 (水平)
		屋根	飛来物の衝突速度 (鉛直)
W	kgf	飛来物重量	
X	cm	貫入深さ	
α <sub>e</sub>	—	低減係数	

表 3-2 貫通評価に用いる記号 (BRL 式)

記号	単位	定義
d	cm	飛来物の (等価) 直径
k	—	鋼板の材質に関する係数
M	kg	飛来物の質量
T	m	貫通限界厚さ (鋼製部材)
V	m/s	飛来物の衝突速度 (鉛直)

表 3-3 裏面剥離評価に用いる記号 (Chang 式)

記号	単位	定義	
d	cm	飛来物の (等価) 直径	
f <sub>c</sub> '	kgf/cm <sup>2</sup>	コンクリートの設計基準強度	
S	cm	裏面剥離限界厚さ	
V	cm/s	外壁	飛来物の衝突速度 (水平)
		屋根	飛来物の衝突速度 (鉛直)
V <sub>0</sub>	cm/s	飛来物基準速度	
W	kgf	飛来物重量	
α <sub>s</sub>	—	低減係数	

表 3-4 変形評価に用いる記号（水密扉）

記号	単位	定義
$A_k$	$\text{mm}^2$	カンヌキ断面積
$A_p$	$\text{mm}^2$	カンヌキ受けピン断面積
$A_b$	$\text{mm}^2$	カンヌキ受けボルト断面積
$A_d$	$\text{m}^2$	扉の受圧面積
$L_k$	$\text{mm}$	カンヌキ支持間距離
$L_p$	$\text{mm}$	カンヌキ受けピン支持間距離
$M_k$	$\text{kN/mm}$	カンヌキに生じる曲げモーメント
$M_p$	$\text{kN/mm}$	カンヌキ受けピンに生じる曲げモーメント
$n$	箇所	カンヌキ部箇所数
$n_b$	本	カンヌキ受けボルト本数
$Q_k$	$\text{kN}$	カンヌキに生じるせん断力
$Q_p$	$\text{kN}$	カンヌキ受けピンに生じるせん断力
$R$	$\text{kN}$	気圧差による荷重による反力
$T$	$\text{kN}$	引張力
$W_p$	$\text{kN}$	気圧差による荷重
$Z_k$	$\text{mm}^3$	カンヌキの断面係数
$Z_p$	$\text{mm}^3$	カンヌキ受けピンの断面係数
$\Delta P$	$\text{N/m}^2$	単位面積当たりの最大気圧低下量
$\sigma_b$	$\text{N/mm}^2$	曲げ応力度
$\sigma_t$	$\text{N/mm}^2$	引張応力度
$\sigma_x$	$\text{N/mm}^2$	組合せ応力度
$\tau$	$\text{N/mm}^2$	せん断応力度

### 3.2 評価対象部位

建屋及び構造物の評価対象部位は、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「4.2 許容限界」に示す評価対象部位を踏まえて設定する。

#### 3.2.1 貫通評価

##### (1) 建屋

設計荷重に対して、外殻を構成する部材が飛来物を貫通させないことの確認において、建屋については、屋根スラブ、外壁並びに防護すべき施設の外殻となる建屋内の部位のうちタービン建屋オペレーティングフロア床版、気体廃棄物処理系隔離弁を内包する区画の壁面並びに開口部建具のうち原子炉建屋機器搬入口扉、原子炉建屋附属棟1階電気室搬入口扉、**また、重大事故対処施設の環境条件維持に関与する扉**を評価対象部位として選定する。

## (2) 構造物

外殻を構成する部材が飛来物を貫通させないことの確認において、軽油貯蔵タンクタンク室については、鋼製蓋及び鉄筋コンクリート造の頂版を評価対象部位として選定する。

## 3.2.2 裏面剥離評価

## (1) RC造建屋

設計荷重に対して、外殻を構成する部材が飛来物による裏面剥離を生じないことの確認において、建屋については、**防護すべき施設の外殻となる**屋根スラブ、外壁並びに建屋内の部位のうちタービン建屋オペレーティングフロア床版、気体廃棄物処理系隔離弁を内包する区画の壁面を評価対象部位として設定する。

## (2) 構造物

設計荷重に対して、外殻を構成する部材が飛来物による裏面剥離を生じないことの確認において、軽油貯蔵タンクタンク室については、鉄筋コンクリート造の頂版を評価対象部位として選定する。

## 3.2.3 変形評価

## (1) 建屋

設計荷重に対して、外殻を構成する部材自体が防護対象施設へ衝突等の影響を与える変形に至らないことの確認において、建屋については、設計荷重が外殻を構成する屋根スラブ及び外壁に作用し、耐震壁を介して直接岩盤に支持する基礎版へ伝達されるため、設計荷重が直接作用する、**防護すべき施設の外殻となる**屋根スラブ及び外壁のうち、屋根スラブについては、代表として部材厚が最も薄い原子炉建屋原子炉棟の屋根スラブを、**並びに**外壁については原子炉建屋（RC造部及び鉄骨造部）、タービン建屋、使用済燃料乾式貯蔵建**及び緊急時対策所建屋**を評価対象部位として設定する。

## (2) 構造物

設計荷重に対して、外殻を構成する部材自体が竜巻により防護すべき施設へ衝突等の影響を与える変形に至らないことの確認において、軽油貯蔵タンクタンク室については、地中に埋設され竜巻の風荷重を受け難い構造であることから、評価は不要とする。

## 3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組み合わせは、V-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」に示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

### 3.3.1 荷重の設定

強度評価に用いる荷重を以下に示す。

(1) 風圧力による荷重 ( $W_w$ )

風圧力による荷重 $W_w$ は、下式により算定する。

風力係数 $C$ は、「建築基準法及び同施行令」に基づき設定する。

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

(2) 気圧差による荷重 ( $W_p$ )

気圧差による荷重 $W_p$ については、気圧差による荷重が最大となる「閉じた施設」を想定し、下式により算定する。

$$W_p = \Delta P \cdot A$$

(3) 飛来物による衝撃荷重 ( $W_M$ )

飛来物による衝撃荷重 $W_M$ は、表3-4に示す飛来物の衝突に伴う荷重とするが、この荷重は瞬間的に作用するものであり、またこれら飛来物に対し質量が十分に大きな建物および構造物が評価の対象対象であるため、これらの施設の全体的な挙動に対する評価（変形評価）においては考慮せず、評価対象施設に対する瞬間的且つ局所的な影響の評価（貫通、裏面剥離）時のみ考慮する。

表3-4 飛来物の諸元

飛来物	寸法 (m)	質量 (kg)	水平方向の 飛来速度 (m/s)	鉛直方向の 飛来速度 (m/s)	衝突対象
鋼製材	4.2×0.2× 0.3	135	51	34	全ての建屋及び構造物
車両	3.6×2.5× 8.6	5000	52	—※	<ul style="list-style-type: none"> <li>・使用済燃料乾式貯蔵建屋</li> <li>・緊急時対策所</li> </ul>

※：種々の車両の飛散解析結果と衝突対象建屋の屋根スラブの高さ及び厚さの関係から、車両が屋根に到達することは考え難く、仮に屋根に到達した場合でも、飛跡頂点から屋根までの落下距離は僅かであり、有意な衝突速度にならないと考えられるため。

(4) 常時作用する荷重 ( $F_d$ )

常時作用する荷重 $F_d$ として、自重及び上載荷重を考慮する。

### 3.3.2 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せは、V-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」を踏まえ、設計竜巻荷重及び常時作用する荷重を組み合わせる。

荷重の組合せを表 3-5 に示す。

表3-5 荷重の組合せ

評価内容	評価対象部位	荷重の組合せ	
貫通評価	(式による評価) ・屋根スラブ, 外壁及び内壁 ・扉板	$W_M$	
	(解析による評価) ・原子炉建屋屋根スラブ	複合荷重 $W_{T2}$	$W_W + 1/2W_P + W_M + F_d$
裏面剥離評価	(式による評価) ・屋根スラブ, 外壁及び内壁	$W_M$	
	(解析による評価) ・原子炉建屋屋根スラブ及び外壁	複合荷重 $W_{T2}$	$W_W + 1/2W_P + W_M + F_d$
変形評価	(式による評価) ・原子炉建屋 (RC造部及び鉄骨造部) ・タービン建屋 ・使用済燃料乾式貯蔵建屋	複合荷重 $W_{T2}$	$W_W + 1/2W_P + F_d$
	(式による評価) ・水密扉(カンヌキ部)	$W_P$	

$W_M$ : 風圧力による荷重       $W_P$ : 気圧差による荷重

$W_M$ : 飛来物による衝撃荷重       $F_d$ : 常時作用する荷重

### 3.4 許容限界

建屋及び構造物の許容限界は、V-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「4.2 許容限界」に示す許容限界を踏まえて、評価対象部位ごとに、評価内容に応じて設定する。

#### 3.4.1 貫通評価

貫通評価の許容限界は、式による評価を行う場合においては表 3-6 に示す最小部材厚さとする。

表3-6 貫通評価の許容限界（式による評価）

評価内容	評価対象部位	
貫通評価 (式による評価)	コンクリート	原子炉建屋
		タービン建屋
		使用済燃料乾式貯蔵建屋
		軽油貯蔵タンクタンク室
		緊急時対策所
	扉板（鋼板）	

※1：防護すべき施設の外壳となる、タービン建屋オペレーティングフロア床版、気体廃棄物処理系隔離弁を内包する区画の壁面

※2：屋上への車両の衝突は評価対象外（表3-4より）

※3：地中の構造物のため、側壁は露出していない。

※4：複数枚の板が直列の構成となっている、原子炉建屋機器搬入口扉が該当する。

式による評価を満足せず、解析による評価を行う場合における許容限界を、表3-7に示す。

表3-7 貫通評価の許容限界（解析による評価）

評価内容	評価対象部位	破断ひずみ
貫通評価 (解析による評価)	鉄筋	0.081

### 3.4.2 裏面剥離評価

裏面剥離評価において、式による評価を行う場合においては表3-8に示す最小部材厚さとする。

表3-8 裏面剥離評価の許容限界（式による評価）

評価内容	評価対象部位		最少部材厚さ(mm)	
			鉛直方向	水平方向
裏面剥離評価 (式による評価)	コンク リート	原子炉建屋	100	300
		タービン建屋	800 <sup>※1</sup>	1300 <sup>※1</sup>
		使用済燃料乾式貯蔵建屋	450 <sup>※2</sup>	450
		軽油貯蔵タンクタンク室	2000	— <sup>※3</sup>
		緊急時対策所	600 <sup>※2</sup>	1000

※1：防護すべき施設の外殻となる、タービン建屋オペレーティングフロア床版、気体廃棄物処理系隔離弁を内包する区画の壁面

※2：屋上への車両の衝突は評価対象外（表3-4より）。

※3：地中の構造物のため、側壁は露出していない。

式による評価を満足せず、解析による評価を行う場合における許容限界は、表3-9に示すコンクリート内面のライナ若しくはデッキプレートの破断ひずみとする。

表3-9 裏面剥離評価の許容限界（解析による評価）

評価内容	評価対象部位		破断ひずみ
裏面剥離評価 (解析による評価)	裏面に内張材（ライナ若しくはデッキプレートが）無いコンクリート版	下層の鉄筋	
	裏面に内張材（ライナ若しくはデッキプレート）があるコンクリート版	内張材	

## 3.4.3 変形評価

屋根スラブ及びスタッドボルトの変形評価の許容限界は、それぞれ RC 規準及び各種合成指針に基づく強度とし、RC 造の建屋全体の変形評価の許容限界は、耐震壁のせん断ひずみに関する許容限界に基づく  $2000\mu$  とする。

変形評価の許容限界を表 3-10 に示す。

表3-10 変形評価の許容限界

評価内容	評価対象部位	許容限界	
変形評価 (屋根スラブ)	屋根スラブ	「RC 規準」に基づく終局強度	
	スタッドボルト (屋根支持部)	「各種合成指針」に基づく許容耐力	
変形評価 (建物全体)	建物の構造躯体	RC 造部	せん断ひずみ $2 \times 10^{-3}$
		鉄骨造部	「鋼構造設計規準—許容応 力度設計法—」に準じた短期許容 応力度
変形評価 (水密扉)	カンヌキ部	「鋼構造設計規準—許容応力度設計 法—」に準じた短期許容応力度	

### 3.5 評価方法

#### 3.5.1 貫通評価

##### (1) 鉄筋コンクリート造部分

貫通限界厚さ  $e$  を，別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に基づき，以下に示すDegen式を用いて算出し，外殻となる部位の厚さが許容限界を上回ることを確認する。

$1.52 \leq X/d \leq 13.42$ の場合，

$$e = \alpha_e \{0.69 + 1.29(X/d)\} \cdot d$$

$X/d \leq 1.52$ の場合，

$$e = \alpha_e \{2.2(X/d) - 0.3(X/d)^2\} \cdot d$$

ここで，貫入深さ  $X$  は，

$X/d \leq 2.0$ の場合，

$$X/d = \{(12145/\sqrt{F_c}) \cdot N \cdot d^{0.2} \cdot D \cdot (V/1000)^{1.8}\}^{0.5}$$

$2.0 \leq X/d$ の場合，

$$X/d = \{(12145/\sqrt{F_c}) \cdot N \cdot d^{0.2} \cdot D \cdot (V/1000)^{1.8} + 1\}$$

##### (2) 鋼製部

貫通限界厚さ  $e$  を，別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に基づき，以下に示すBRL式を用いて算出し，外殻となる部位の厚さが許容限界を上回ることを確認する。

$$T^{\frac{3}{2}} = \frac{0.5 \cdot M \cdot V^2}{1.439 \cdot 10^9 \cdot K^2 \cdot d^{\frac{3}{2}}}$$

##### (3) 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブに対する衝突解析

原子炉建屋原子炉棟屋根スラブに対する貫通評価については，風圧力による荷重  $W_w$ ，気圧差による荷重  $W_p$ ，飛来物による衝撃荷重  $W_M$  及び常時作用する荷重  $F_d$  を考慮し，3次元FEMモデルを用いた衝突解析により屋根及び外壁の鉄筋に生じるひずみを算出し，許容限界を超えないことを確認する。

評価対象範囲は，原子炉建屋搭屋部の屋根スラブ及び外壁のうち躯体厚さが最も薄い部分とする。

衝突解析には，解析コード「LS-DYNA」を用いる。解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については，別紙1「計算プログラム（解析コード）の概要」に示す。

## a. 解析モデル

## (a) 屋根スラブ

屋根スラブのモデル化範囲及び飛来物の衝突位置を図3-1に示す，屋根トラスの主トラス間の長さはほぼ同等であることより、評価上重要な使用済燃料貯蔵プール直上となる部位とし，屋根スラブのコンクリート，鉄筋及びデッキプレートモデル化する。

コンクリートはソリッド要素，鉄筋はビーム要素及びデッキプレートはシェル要素でモデル化する。

屋根スラブの解析モデルを図3-2，解析モデルの境界条件を表3-8に示す。

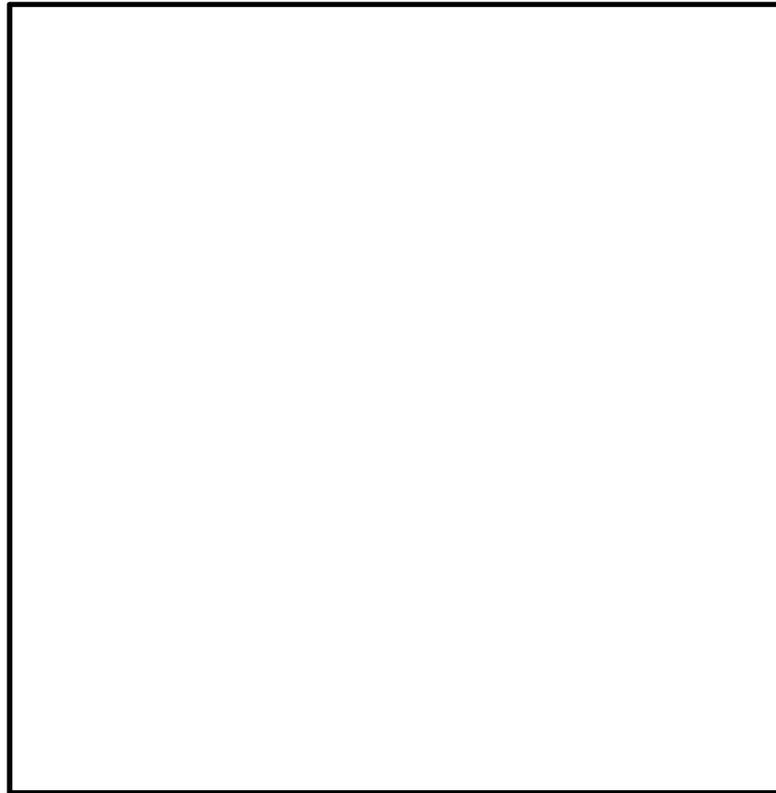


図3-1 原子炉建屋搭屋部屋根スラブモデル化範囲



図3-2 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの解析モデル

(c) 飛来物

飛来物は、衝突時の荷重が保守的となるよう接触断面積を小さくするため、鋼製材は先端部（衝突部）を開口としてシェル要素でモデル化し、自重及び竜巻による風圧力による荷重を作用させた状態で衝突させる。

飛来物の解析モデル図を図3-3に示す。



図3-5 飛来物の解析モデル図

b. 解析モデル

(a) 屋根スラブ及び外壁

コンクリートの材料定数を表3-11，鉄筋の材料定数を表3-12に示す。

表3-11 コンクリートの材料定数

コンクリート 種類	設計基準強度 $F_c$ ( $N/mm^2$ )	ヤング係数 $E$ ( $N/mm^2$ )	ポアソン比 $\nu$	単位体積重量 $\rho$ ( $kN/m^3$ )

表3-12 鉄筋の材料定数

鉄筋 種類	降伏強度 $F_y$ ( $N/mm^2$ )	ヤング係数 $E$ ( $N/mm^2$ )	ポアソン比 $\nu$	単位体積重量 $\rho$ ( $kN/m^3$ )

(b) 飛来物

飛来物の仕様について表3-13に示す。

表3-12 飛来物の仕様

飛来物	サイズ 長さ×幅×奥行き (m)	質量 (kg)	材質
鋼製材	4.2×0.3×0.2	135	SS400

c. 材料の非線形特性

(a) 材料の応力-ひずみ関係

コンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮側が圧縮強度に到達後もその応力を保持するバイリニア型とする。

鉄筋の応力-ひずみ関係はバイリニア型とする。

コンクリートの応力-ひずみ関係を図3-6に、鋼製材の応力-ひずみ関係を図3-7に示す。

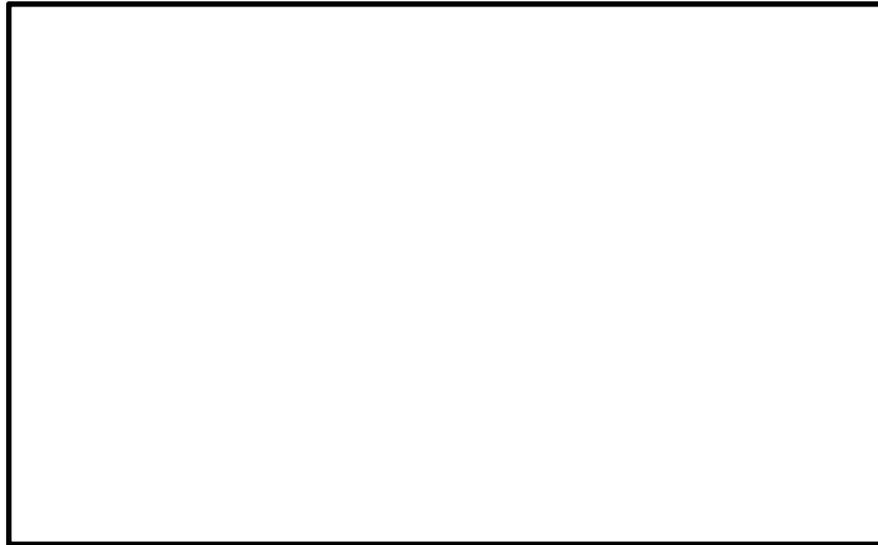


図3-6 真応力-真ひずみ関係 (コンクリート)



図3-7 応力-ひずみ関係 (鉄筋)

(b) ひずみ速度効果

竜巻による飛来物に対する解析は、衝撃問題で変形速度が大きいため、ひずみ速度効果を考慮することとし、このひずみ速度効果として、NEI07-13で規定された割増係数（鉄筋：1.10（降伏応力）、1.05（引張強度）、デッキプレート・飛来物：1.29（降伏応力）、1.10（引張強度））を考慮する。

(c) 破断ひずみ

金属材料の破断ひずみは、JISに規定されている伸びの下限値を基に設定する。また、NEI 07-13においてTF（多軸性係数）を  とすることが推奨されている

ことを踏まえ、安全余裕としてTF=を考慮する。TFについては、鉄筋のみとする。鋼製材は保守的に破断ひずみを超えても荷重を負担するものとする。鉄筋の破断ひずみを表3-13に示す。

表3-13 鉄筋の破断ひずみ

材質	JIS規格値 (下限値)	TF	破断ひずみ
SD295	0.17	2.0	0.081

### 3.5.2 裏面剥離評価

裏面剥離限界厚さSを、別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に基づき、以下に示すChang式を用いて算定し、許容限界を超えないことを確認する。

$$S = 1.84 \alpha_s \cdot \left( \frac{V_0}{V} \right)^{0.13} \cdot \frac{\left( \frac{W \cdot V^2}{980} \right)^{0.4}}{d^{0.2} \cdot f_c^{0.4}}$$

Chang式による限界厚さを満足しない箇所については、3次元FEMモデルを用いた衝突解析を行い、鉄筋に発生するひずみが表3-9に示す許容限界を超えないことを確認する。

なお、評価の結果、裏面剥離の発生が想定され防護対象施設への影響が想定される場合には、内面に鋼板のライナを取り付ける補強を実施するとともに、3次元FEMモデルを用いた衝突解析を行い、当該ライナに発生するひずみが表3-9に示す許容限界を超えないことを確認する。FEM評価の対象となる箇所の構造を、図3-8に示す。



図3-8 裏面剥離評価に関するFEM解析対象箇所の構造

### 3.5.3 変形評価

(1) 原子炉建屋（RC構造部），タービン建屋，使用済燃料乾式貯蔵建屋及び緊急時対策所建屋

原子炉建屋（RC構造部），タービン建屋，使用済燃料乾式貯蔵建屋及び緊急時対策所建屋の変位は，設計荷重による建屋の層せん断力及び各部材のせん断力-せん断ひずみ関係（ $Q-\gamma$ ）関係より算定する。

原子炉建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋の $Q-\gamma$ 関係は，V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」及びV-2-2-4「使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答計算書」に示されるせん断スケルトンカーブ（ $\tau-\gamma$ 関係）に基づき算出する。

タービン建屋の $Q-\gamma$ 関係は，地震応答解析モデルが多軸の質点系モデルを用いており各軸に対しせん断スケルトンカーブを算出していることから，層全体の評価を行うため，各軸のせん断スケルトンカーブを層全体の値に集約したせん断スケルトンカーブに基づき算出する。

原子炉建屋，タービン建屋，使用済燃料乾式貯蔵建屋及び緊急時対策所建屋の地震応答解析モデルを図3-9から図3-11に， $Q-\gamma$ 関係を表3-14から表3-16に示す。

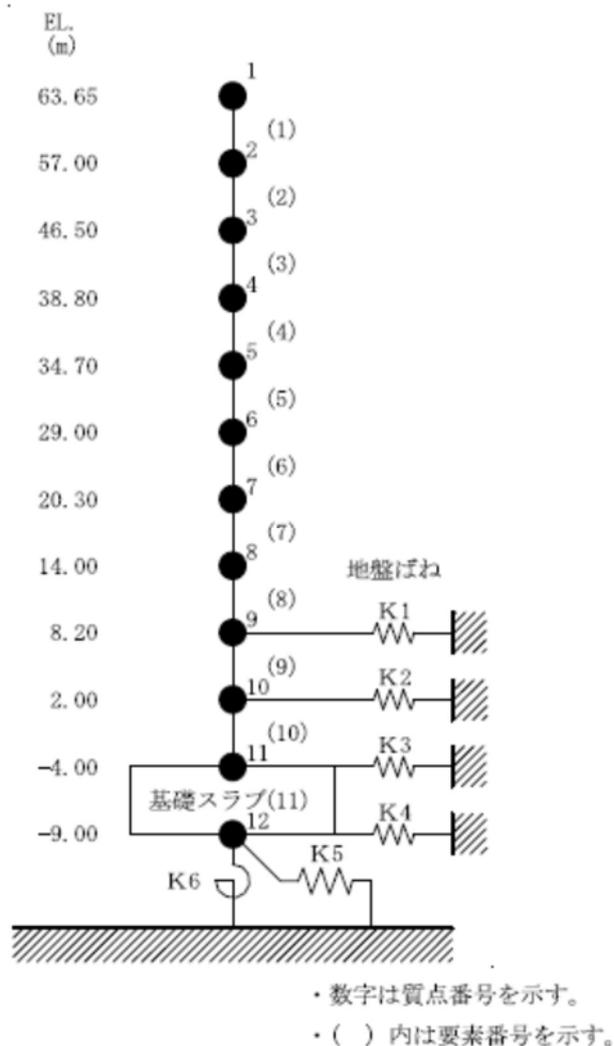


図3-9 原子炉建屋の地震応答解析モデル

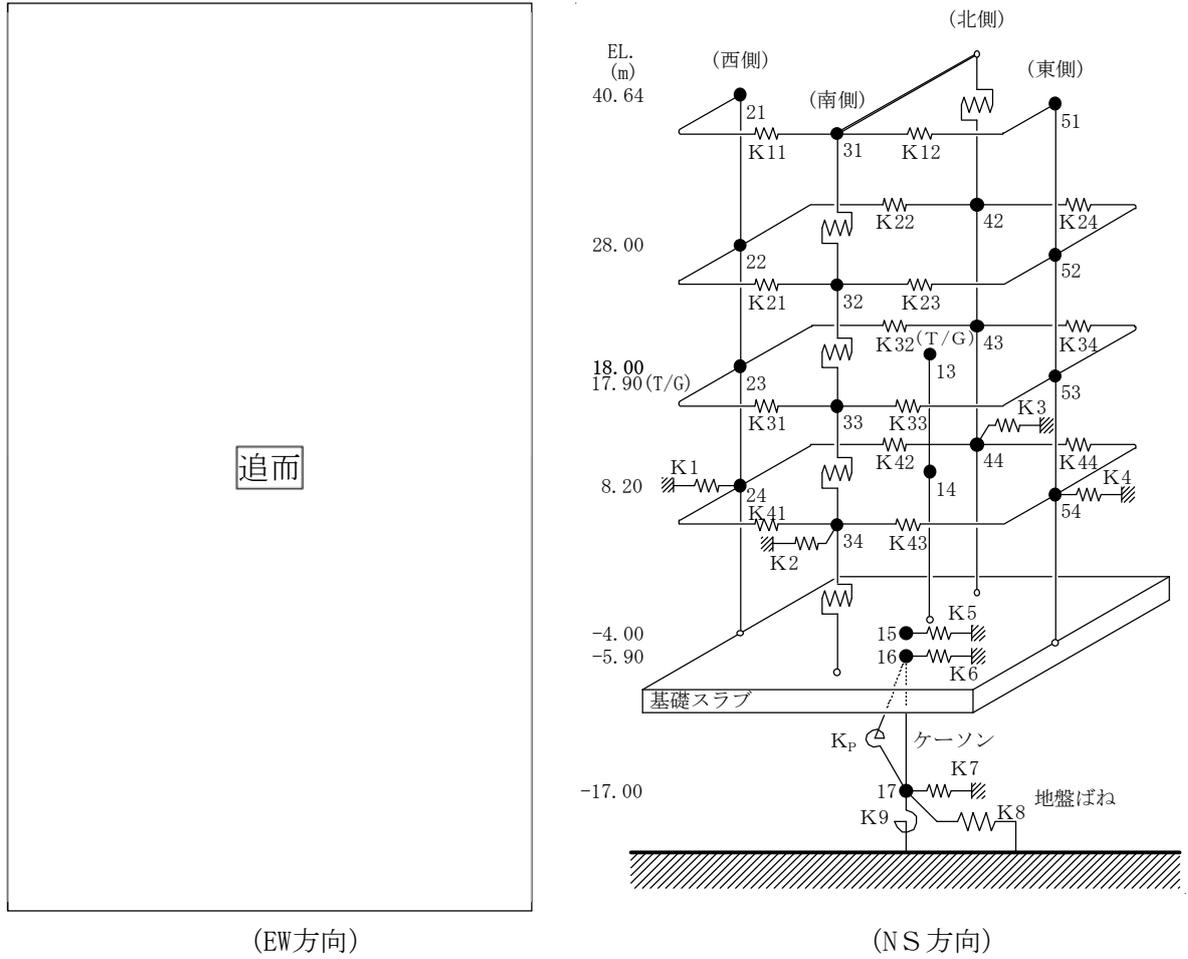


図3-10 タービン建屋の地震応答解析モデル

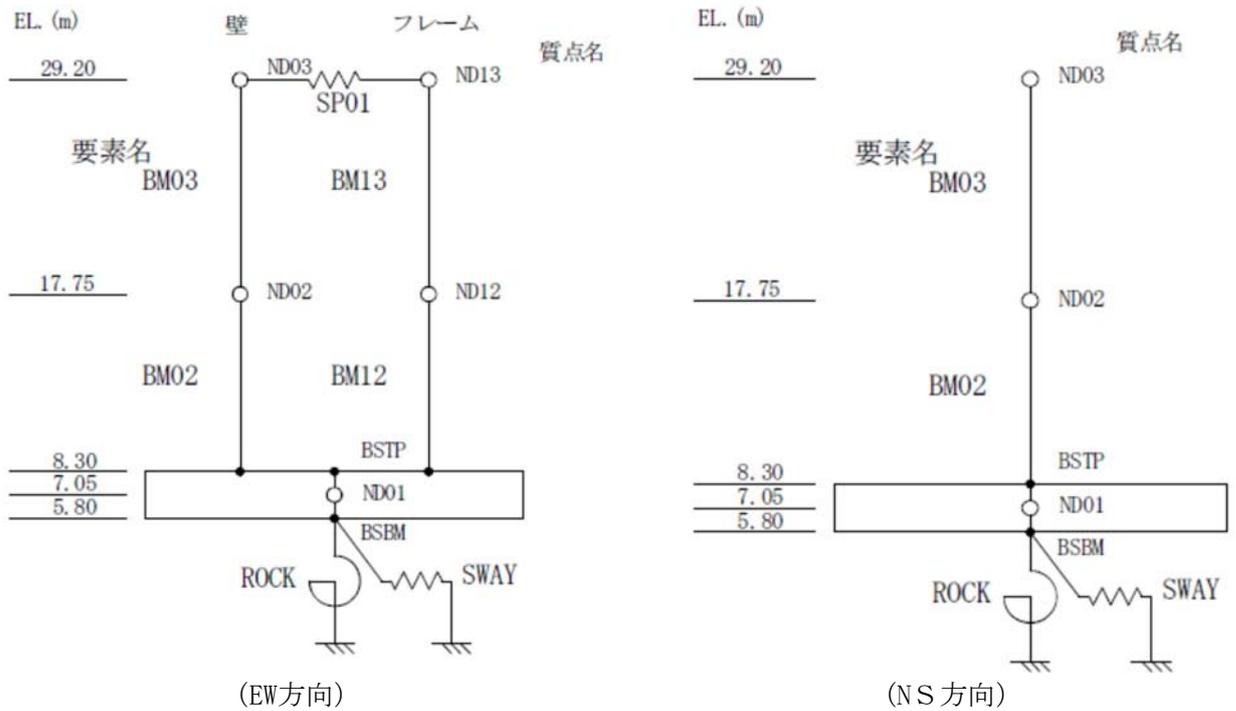


図3-11 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデル

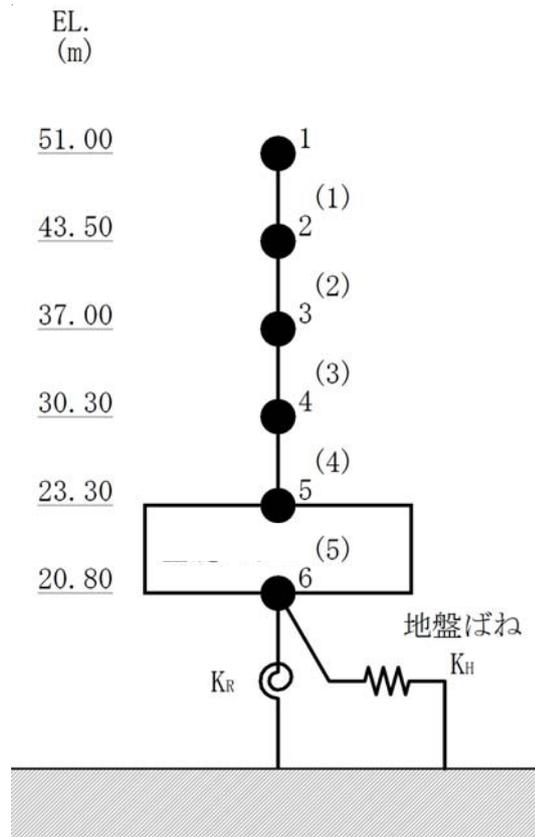


図3-12 緊急時対策所建屋の地震応答解析モデル

表3-14 原子炉建屋のQ- $\gamma$ 関係

(a) NS方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 $Q_1$	第2折点 $Q_2$	終局点 $Q_3$	第1折点 $\gamma_1$	第2折点 $\gamma_2$	終局点 $\gamma_3$
(m)	-	(kN)			$(\times 10^{-3} (-))$		
63.65 ~ 57.00	1	4.37E+04	5.90E+04	1.24E+05	0.174	0.522	4.0
57.00 ~ 46.50	2	4.67E+04	6.31E+04	1.26E+05	0.185	0.555	4.0
46.50 ~ 38.80	3	3.37E+05	4.56E+05	9.29E+05	0.173	0.519	4.0
38.80 ~ 34.70	4	1.78E+05	2.41E+05	5.55E+05	0.145	0.435	4.0
34.70 ~ 29.00	5	1.83E+05	2.47E+05	5.59E+05	0.139	0.417	4.0
29.00 ~ 20.30	6	3.20E+05	4.32E+05	9.29E+05	0.159	0.477	4.0
20.30 ~ 14.00	7	3.90E+05	5.25E+05	1.18E+06	0.174	0.522	4.0
14.00 ~ 8.20	8	6.62E+05	8.94E+05	1.68E+06	0.183	0.549	4.0

(b) EW方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 $Q_1$	第2折点 $Q_2$	終局点 $Q_3$	第1折点 $\gamma_1$	第2折点 $\gamma_2$	終局点 $\gamma_3$
(m)	-	(kN)			$(\times 10^{-3} (-))$		
63.65 ~ 57.00	1	4.08E+04	5.51E+04	1.16E+05	0.174	0.522	4.000
57.00 ~ 46.50	2	4.36E+04	5.89E+04	1.18E+05	0.185	0.555	4.000
46.50 ~ 38.80	3	2.46E+05	3.33E+05	7.13E+05	0.173	0.519	4.000
38.80 ~ 34.70	4	2.10E+05	2.83E+05	6.20E+05	0.162	0.486	4.000
34.70 ~ 29.00	5	2.17E+05	2.93E+05	6.26E+05	0.151	0.453	4.000
29.00 ~ 20.30	6	3.10E+05	4.19E+05	8.82E+05	0.143	0.429	4.000
20.30 ~ 14.00	7	3.56E+05	4.82E+05	1.02E+06	0.172	0.516	4.000
14.00 ~ 8.20	8	5.80E+05	7.83E+05	1.56E+06	0.182	0.546	4.000

表3-15 タービン建屋のQ-γ関係

(a) NS方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 Q <sub>1</sub>	第2折点 Q <sub>2</sub>	終局点 Q <sub>3</sub>	第1折点 γ <sub>1</sub>	第2折点 γ <sub>2</sub>	終局点 γ <sub>3</sub>
(m)	-	(kN)			(×10 <sup>-3</sup> (-))		
40.64 ~ 28.00	1	6.32E+04	8.54E+04	1.18E+05	0.176	0.528	4.000
28.00 ~ 18.00	2	1.84E+05	2.51E+05	3.21E+05	0.228	0.684	4.000
18.00 ~ 8.20	3	4.54E+05	6.26E+05	8.18E+05	0.233	0.699	4.000

(b) EW方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 Q <sub>1</sub>	第2折点 Q <sub>2</sub>	終局点 Q <sub>3</sub>	第1折点 γ <sub>1</sub>	第2折点 γ <sub>2</sub>	終局点 γ <sub>3</sub>
(m)	-	(kN)			(×10 <sup>-3</sup> (-))		
40.64 ~ 28.00	1	1.03E+05	1.39E+05	2.37E+05	0.176	0.528	4.000
28.00 ~ 18.00	2	2.09E+05	2.91E+05	4.39E+05	0.213	0.639	4.000
18.00 ~ 8.20	3	3.82E+05	5.24E+05	7.58E+05	0.230	0.690	4.000

表3-16 使用済燃料乾式貯蔵建屋のQ-γ関係

(a) NS方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 Q <sub>1</sub>	第2折点 Q <sub>2</sub>	終局点 Q <sub>3</sub>	第1折点 γ <sub>1</sub>	第2折点 γ <sub>2</sub>	終局点 γ <sub>3</sub>
(m)	-	(kN)			(×10 <sup>-3</sup> (-))		
29.20 ~ 17.75	BM03	4.50E+04	6.07E+04	1.36E+05	0.198	0.594	4.0
17.75 ~ 8.30	BM02	6.05E+04	8.15E+04	1.56E+05	0.214	0.642	4.0

(b) EW方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 Q <sub>1</sub>	第2折点 Q <sub>2</sub>	終局点 Q <sub>3</sub>	第1折点 γ <sub>1</sub>	第2折点 γ <sub>2</sub>	終局点 γ <sub>3</sub>
(m)	-	(kN)			(×10 <sup>-3</sup> (-))		
29.20 ~ 17.75	BM03	4.19E+04	5.66E+04	1.14E+05	0.191	0.573	4.0
17.75 ~ 8.30	BM02	6.19E+04	8.37E+04	1.62E+05	0.197	0.590	4.0

表3-16 緊急時対策所建屋のQ- $\gamma$ 関係

(a) NS方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 $Q_1$	第2折点 $Q_2$	終局点 $Q_3$	第1折点 $\gamma_1$	第2折点 $\gamma_2$	終局点 $\gamma_3$
(m)	-	(kN)			$(\times 10^{-3} (-))$		
43.50 ~ 51.00	1	1.18E+05	1.59E+05	2.96E+05	0.177	0.530	4.000
37.00 ~ 43.50	2	3.23E+05	4.35E+05	7.75E+05	0.181	0.542	4.000
30.30 ~ 37.00	3	3.29E+05	4.44E+05	7.56E+05	0.193	0.579	4.000
23.30 ~ 30.30	4	3.77E+05	5.10E+05	8.44E+05	0.205	0.614	4.000

(b) EW方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 $Q_1$	第2折点 $Q_2$	終局点 $Q_3$	第1折点 $\gamma_1$	第2折点 $\gamma_2$	終局点 $\gamma_3$
(m)	-	(kN)			$(\times 10^{-3} (-))$		
43.50 ~ 51.00	1	8.43E+04	1.14E+05	1.89E+05	0.177	0.530	4.000
37.00 ~ 43.50	2	2.57E+05	3.46E+05	6.04E+05	0.179	0.538	4.000
30.30 ~ 37.00	3	2.69E+05	3.62E+05	6.05E+05	0.192	0.577	4.000
23.30 ~ 30.30	4	3.21E+05	4.34E+05	7.11E+05	0.204	0.613	4.000

設計荷重のうち、風圧力による荷重 $W_w$ は、建屋の形状を考慮して算出した風力係数及び受圧面積に基づき算出する。

気圧差による荷重 $W_p$ は、建屋の内部から外部に作用し、建屋層全体の評価においては相殺される荷重であるが、保守的に $W_w$ と同じ方向にのみ作用すると見なす。

飛来物による衝撃荷重 $W_M$ は、瞬間的に作用するものであり、またこれら建屋の質量が飛来物に対し十分に大きなものであることから、建屋の全体的な挙動に対する影響は軽微と考えられるため考慮しない。

(2) 原子炉建屋（鉄骨構造部）

原子炉建屋（鉄骨構造部）については、風圧力による荷重 $W_w$ 、気圧差による荷重 $W_p$ 及び常時作用する荷重 $F_d$ により部材に発生する応力度を計算し、許容限界を超えないことを確認する。

(3) 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ

原子炉建屋原子炉棟屋根スラブについて、風圧力による荷重 $W_w$ 、気圧差による荷重 $W_p$ 及び常時作用する荷重 $F_d$ により発生する曲げモーメント及びせん断力を計算し、許容限界を超えないことを確認する。

原子炉建屋原子炉棟屋根スラブは、鉄骨はりにスタッドを介して接続しているため、

はり位置を支持点とした一方向版とし，両端の固定条件はピンとして評価する。スタッドに作用する引張力は，単位幅の屋根スラブに生じるせん断力を当該範囲のスタッドが均等に負担するものとして評価する。

屋根スラブの発生曲げモーメント $M$ 及び発生せん断力 $Q$ 並びにスタッドの発生引張力 $T$ の算定式を以下に示す。また，屋根スラブに作用する荷重の概要を図3-13に示す。

単位幅の屋根スラブにおける発生モーメント

$$M = \frac{(\omega_T - \omega_d) \cdot L^2}{8}$$

単位幅の屋根スラブにおける発生せん断力

$$Q = \frac{(\omega_T - \omega_d) \cdot L}{2}$$

スタッド1本あたりの発生引張力

$$T = Q \cdot \frac{p}{1000}$$

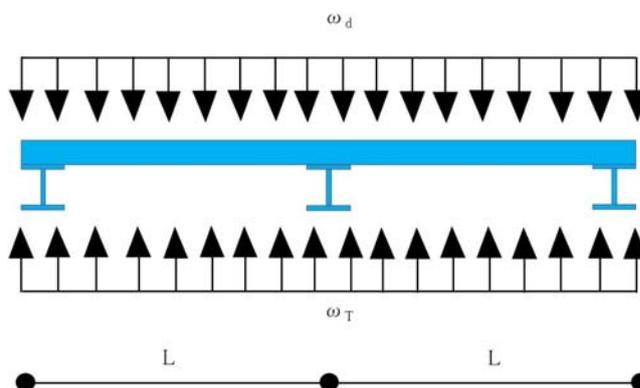


図3-13 屋根スラブに作用する荷重の概要

許容限界である終局強度については，「RC規準」に基づき算定する。

スタッドの許容引張力は，「各種合成指針」に準拠し，スタッドの降伏により定まる許容引張力 $P_{a1}$ 及びコンクリート部のコーン状破壊により定まる許容引張力 $P_{a2}$ のうち小さい値とする。

屋根スラブの許容曲げモーメント $M_a$ 及び許容せん断力 $Q_a$ 並びにスタッドの許容引張力 $P_a$ の算定式を以下に示す。

$$M_a = a_t \cdot f_t \cdot j$$

$$Q_a = b \cdot j \cdot f_s$$

$$P_a = \min(P_{a1}, P_{a2})$$

## (4) 扉

水密扉のカンヌキ部（カンヌキ、カンヌキ受けピン及びカンヌキ受けボルト）等、扉の閉状態を維持する部材について、気圧差による荷重 $W_P$ により発生する応力を算出し、許容限界を超えないことを確認する。

## a. 応力評価

下記の扉を評価対象とする。

- ・原子炉建屋大物搬入口扉のうち原子炉建屋原子炉棟水密扉
- ・原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉
- ・原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)
- ・原子炉建屋付属棟南側水密扉
- ・ベイラー室脇水密扉
- ・原子炉建屋付属棟南側水密扉
- ・原子炉建屋付属棟2階東側機器搬入口扉
- ・原子炉建屋付属棟2階サンプルタンク室連絡通路扉
- ・原子炉建屋付属棟南東側機器搬入口扉
- ・原子炉建屋付属棟西側非常用階段連絡口扉

原子炉建屋大物搬入口扉のうち原子炉建屋原子炉棟水密扉、原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉及び原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)についての、カンヌキ部（カンヌキ、カンヌキ受けピン及びカンヌキ受けボルト）に作用する荷重、発生曲げモーメント $M$ 、発生せん断力 $Q$ 及び発生引張力 $T$ の算定式を以下に示す。その他の扉についても、扉留め部に掛かる曲げ、せん断及び引張荷重をモデル化し、評価を行う。

## (a) カンヌキ部に生じる荷重

カンヌキ部に生じる荷重は気圧差による荷重 $W_P$ をカンヌキ部 $n$ 箇所を負担した場合に発生する反力 $R_P$ から算定する。カンヌキ部に生じる荷重を図3-14に示す。

$$W_P = \Delta P \cdot A_d$$

$$R = \frac{W_P}{n}$$

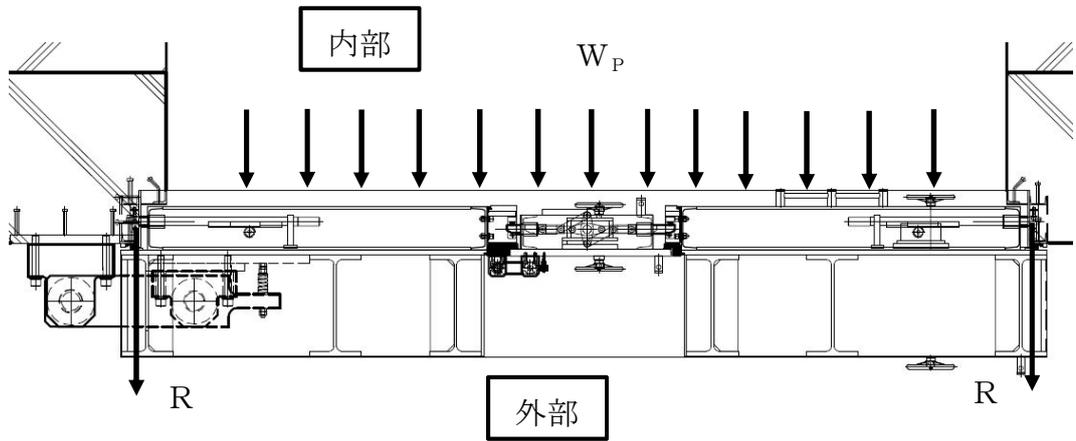


図3-14 カンヌキ部に生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉)

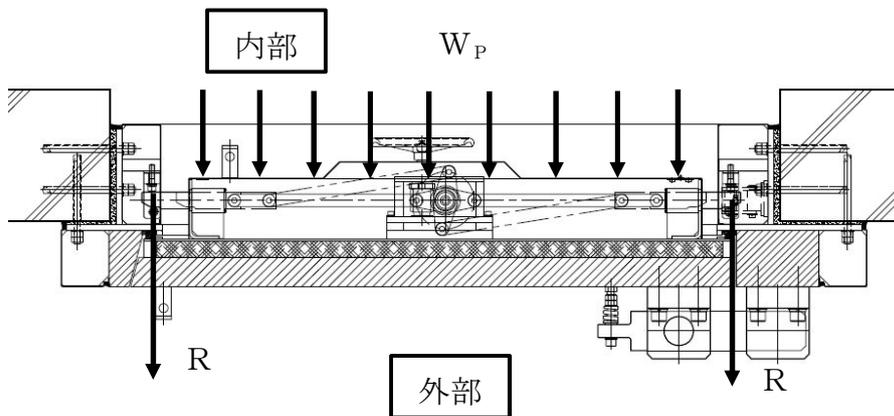


図3-15 カンヌキ部に生じる荷重(電気室搬入口水密扉)

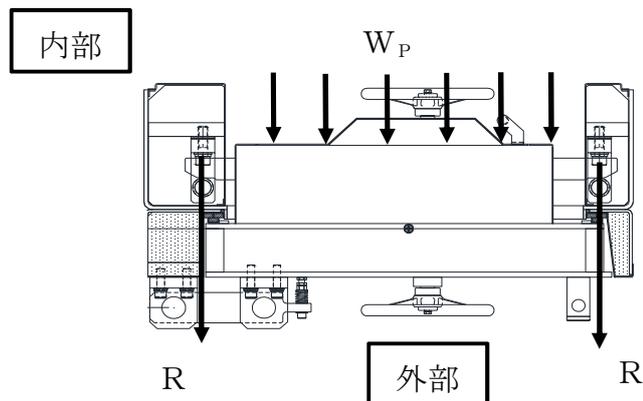


図3-16 カンヌキ部に生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸))

イ. カンヌキ

カンヌキに生じる曲げモーメント $M_k$ 及びせん断力 $Q_k$ は次式により算定する。  
カンヌキに生じる荷重を図3-17～図3-19に示す。

$$M_k = R \cdot L_k$$

$$Q_k = R$$

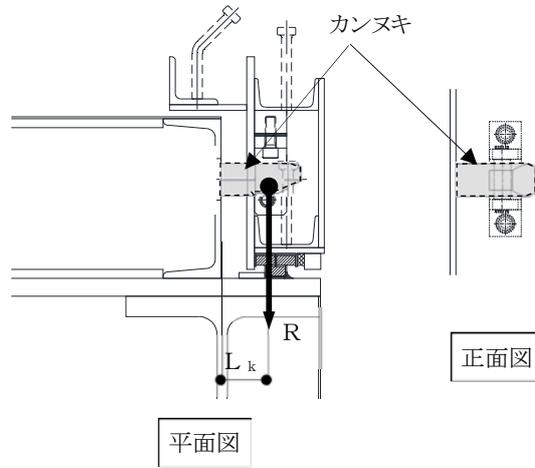


図3-17 カヌキに生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉)

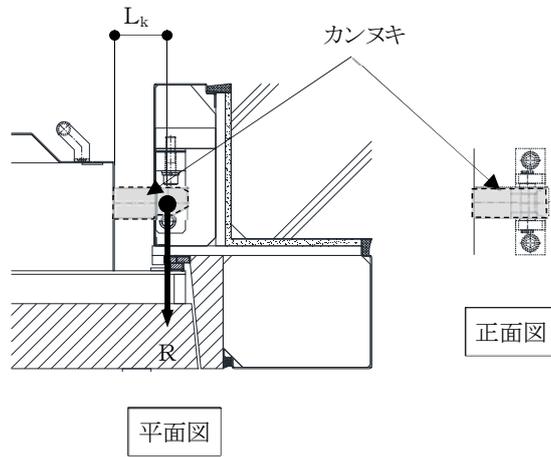


図3-18 カヌキに生じる荷重(電気室搬入口水密扉)

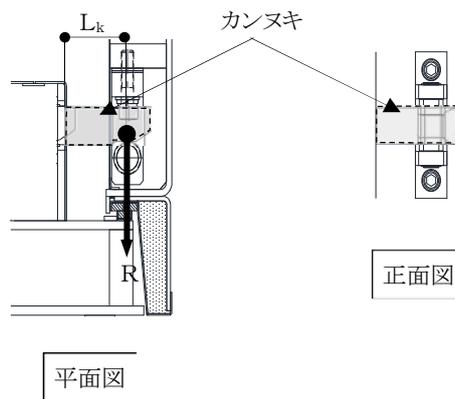


図3-19 カヌキに生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸))

ロ. カヌキ受けピン

カヌキ受けピンに生じる曲げモーメント $M_p$ とせん断力 $Q_p$ は次式により算定する。カヌキ受けピンに生じる荷重を図3-20～図3-22に示す。

$$M_p = \frac{R \cdot L_p}{4}$$

$$Q_p = R$$

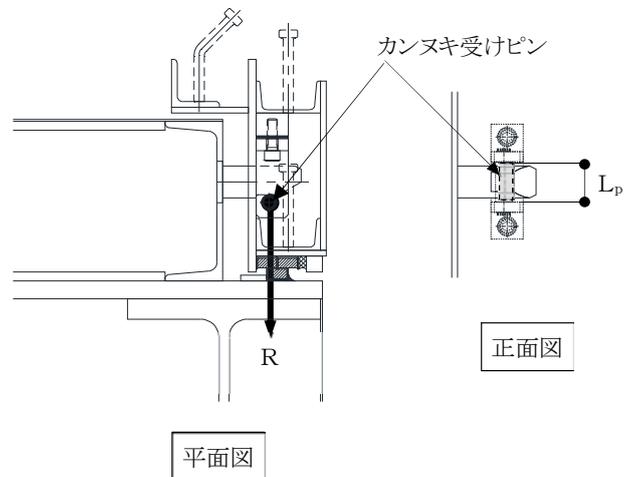


図3-20 カンヌキ受けピンに生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉)

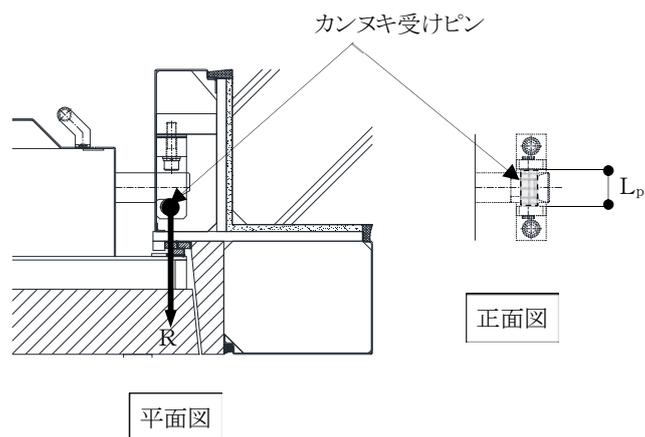


図3-21 カンヌキ受けピンに生じる荷重(電気室搬入口水密扉)

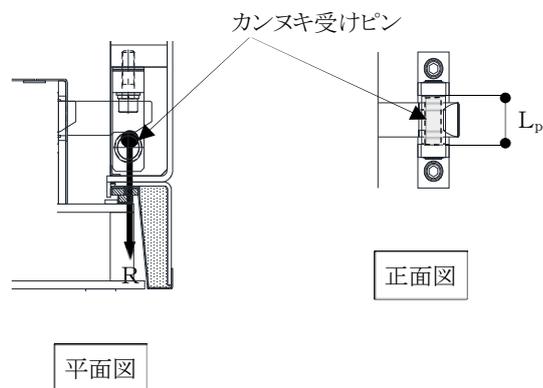


図3-22 カンヌキ受けピンに生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸))

ハ. カンヌキ受けボルト

カンヌキ受けボルトに生じる引張力Tは次式により算定する。カンヌキ受けボルトに生じる荷重を図3-23～図3-25に示す。

T = R

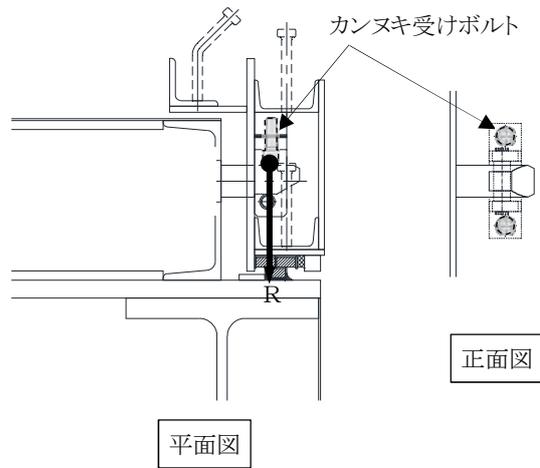


図3-23 カンヌキ受けボルトに生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉)

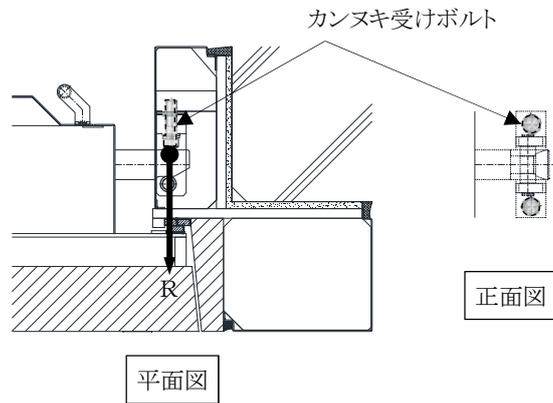


図3-24 カンヌキ受けボルトに生じる荷重(電気室搬入口水密扉)

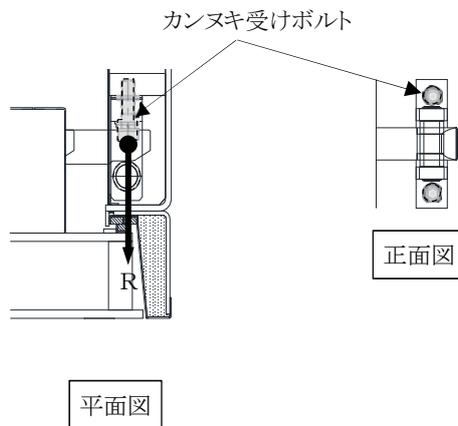


図3-25 カンヌキ受けボルトに生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸))

b. 断面検定

各部材に生じる応力より算定する応力度が許容限界以下であることを確認する。な

お、異なる荷重が同時に作用する部材については、組合せを考慮する。  
評価対象部位の許容限界を表3-17に示す。

(a) カンヌキ

カンヌキに生じる生じる曲げ応力度及びせん断応力度から組合せ応力度を算定し、短期許容応力度以下であることを確認する。

$$\sigma_x = \sqrt{\left(\frac{M_k}{Z_k}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{Q_k}{A_k}\right)^2}$$

(b) カンヌキ受けピン

カンヌキ受けピンに生じる曲げ応力度及びせん断応力度を算定し、評価結果が厳しい方の値が短期許容応力度以下であることを確認する。

$$\sigma_b = M_p / Z_p$$

$$\tau = Q_p / 2 \cdot A_p$$

(c) カンヌキ受けボルト

カンヌキ受けボルトに生じる引張応力度を算定し、短期許容応力度以下であることを確認する。

$$\sigma_t = T / (n_b \cdot A_b)$$

表3-17 評価対象部位の許容限界

評価対象部材		材質	許容限界値 (kN/mm <sup>2</sup> )	
			曲げ・引張	せん断
カンヌキ部	カンヌキ	SUS304	205	—
	カンヌキ受けピン	SCM440	686	396
		S45C	345	199
	カンヌキ受けボルト	SCM435	651	—

4. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を、以下に示す。

4.1 貫通評価

4.1.1 鉄筋コンクリート造部

鉄筋コンクリート造部の貫通評価に用いる条件を表4-1に示す。

表4-1 貫通評価に用いる入力値（鉄筋コンクリート造部）

記号	記号の説明		数値		単位
$\alpha_e$	低減係数	鋼製材	1.0		—
		車両	0.65		—
d	飛来物直径	鋼製材	27.6		cm
		車両	338.5		cm
$F_c$	コンクリートの設計基準強度		原子炉建屋	225	kgf/cm <sup>2</sup>
			タービン建屋	225	
			使用済燃料 乾式貯蔵建屋	240	
			緊急時対策所建屋	300	
N	飛来物の形状係数	鋼製材	1.14		—
		車両	0.72		—
D	飛来物直径密度 $W/d^3$	鋼製材	$6.42 \times 10^{-3}$		kgf/cm <sup>3</sup>
		車両	$1.29 \times 10^{-4}$		kgf/cm <sup>3</sup>
W	飛来物重量	鋼製材	135		kgf
		車両	5000		kgf
V	飛来物の衝突速度	鋼製材	水平	51	m/s
			鉛直	34	
		車両	水平	52	m/s
			鉛直	—*	

※：表3-4を参照

4.1.2 鋼製部

鋼製部の貫通評価に用いる条件を表4-2に示す。

表4-2 貫通評価に用いる入力値（鋼製部）

記号	記号の説明		数値	単位
d	飛来物直径	鋼製材	7.90	cm

k	鋼板の材質に関する係数		1	—
M	飛来物重量	鋼製材	135	kg
V	飛来物の衝突速度	鋼製材	水平	51
			鉛直	34
			m/s	

4.1.3 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ

原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの変形評価における、「3. 強度評価方法」に用いる「LS-DYNA」によるFEM解析の解析ケースを以下に示す。

飛来物の衝突位置は、衝突時間が長く、被衝突部材に伝達するエネルギーが大きくなるように部材長さ（支持スパン）が最大となる位置（中央部）とする。飛来物の衝突方向は鉛直とし、衝突位置のスパンに合わせて、屋根に対して最小断面積で衝突する場合（縦衝突）とする。

解析ケースを表4-3に、解析ケース図を図4-1に示す。

表4-5 解析ケース

評価対象	飛来物	衝突箇所	飛来物の衝突方向	対象部材
原子炉建屋 原子炉棟 屋根スラブ	鋼製材	中央部	鉛直：縦	

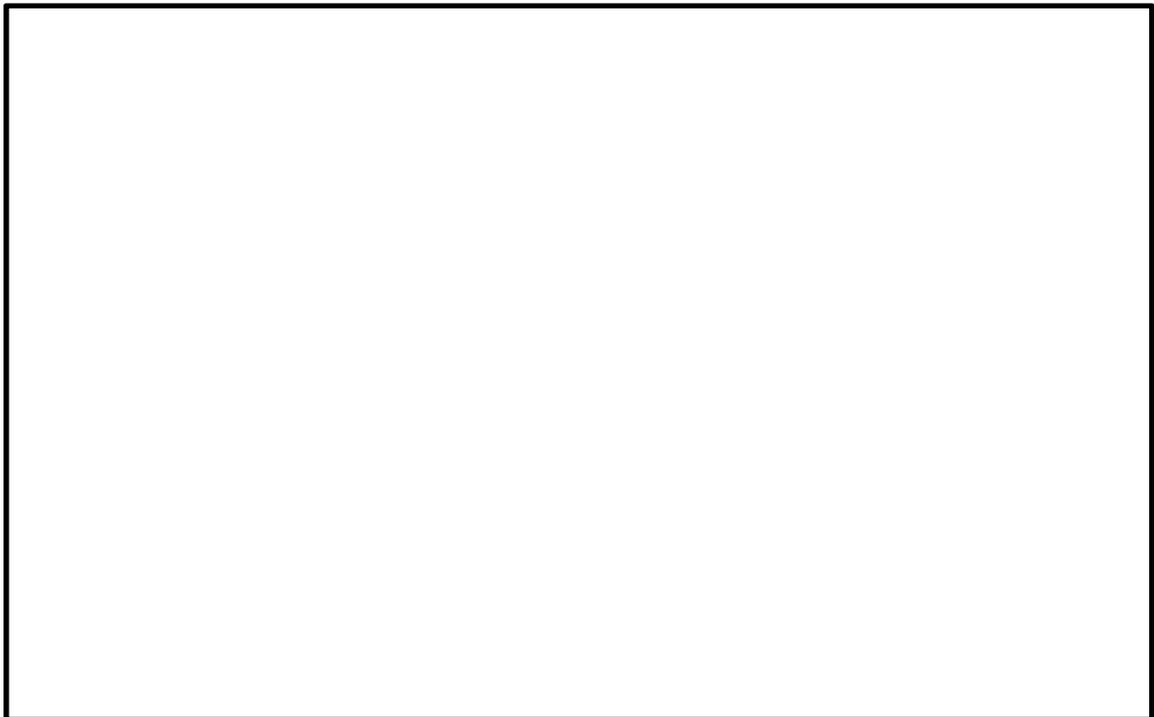


図4-1 解析ケース図

#### 4.2 裏面剥離評価

裏面剥離評価に用いる条件を表 4-3 に示す。

表4-3 屋根スラブの裏面剥離評価式に用いる入力値

記号	記号の説明		数値		単位
$\alpha_s$	低減係数	鋼製材	1.0		—
		車両	0.6		
$V_o$	飛来物基準速度	鋼製材	60.96		m/s
		車両	60.96		
d	飛来物直径	鋼製材	27.6		cm
		車両	338.5		
$f_c'$	コンクリートの設計基準強度		原子炉建屋	225	kgf/cm <sup>2</sup>
			タービン建屋	225	
			使用済燃料 乾式貯蔵建屋	240	
			緊急時対策所建屋	300	
W	飛来物重量	鋼製材	135		kgf
		車両	5000		
V	飛来物の衝突速度	鋼製材	水平	51	m/s
			鉛直	34	
		車両	水平	52	
			鉛直	—*	

※：表3-4を参照

#### 4.3 変形評価

##### (1) 外壁

原子炉建屋，タービン建屋，使用済燃料乾式貯蔵建屋及び緊急時対策所の変形評価に用いる条件を表4-4から表4-7に示す。

表4-4 原子炉建屋変形評価の評価条件 (1/2) (RC構造部)

質点	高さ	位置	風力係数 <sup>※1</sup>	受圧面積	
				N-S方向	E-W方向
1	63.65	風上	0.8	331	354
		風下	0.4		
2	57.00	風上	0.8	447	478
		風下	0.4		
3	46.50	風上	0.8	328	351
		風下	0.4		
4	38.80	風上	0.8	175	187
		風下	0.4		
5	34.70	風上	0.8	266	283
		風下	0.4		
6	29.00	風上	0.8	581	570
		風下	0.4		
7	20.30	風上	0.8	430	432
		風下	0.4		
8	14.00	風上	0.8	396	398
		風下	0.4		

※1：風下側の係数は、風上側と同じ向きを正とする。

表4-4 原子炉建屋変形評価の評価条件 (2/2) (鉄骨造部分)

区画	高さ	位置	風力係数 <sup>※1</sup>	受圧面積	
				N-S方向	E-W方向
付属棟 南東	E. L. 22.0 ～ E. L. 35.0	風上	0.8	153	250
		風下	0.4		
付属棟 東側	E. L. 14.0 ～ E. L. 22.0	風上	0.8	— <sup>※2</sup>	370
		風下	0.4		
隔離弁室 ①	E. L. 22.0 ～ E. L. 30.0	風上	0.8	45	50
		風下	0.4		
隔離弁室 ②	E. L. 22.0 ～ E. L. 30.0	風上	0.8	8.4	91
		風下	0.4		

※1：風下側の係数は、風上側と同じ向きを正とする。

※2：構造上、N-S方向に対し見附面を有しない。

表4-5 タービン建屋変形評価の評価条件

質点	高さ	位置	風力係数 <sup>※1</sup>	受圧面積	
				N-S方向	E-W方向
1	40.64	風上	0.8	1408	585
		風下	0.4		
2	28.00	風上	0.8	1129	733
		風下	0.4		
3	18.00	風上	0.8	1034	696
		風下	0.4		

※1：風下側の係数は、風上側と同じ向きを正とする。

表4-6 使用済燃料乾式貯蔵建屋変形評価の評価条件

質点	高さ	位置	風力係数 <sup>※1</sup>	受圧面積	
				N-S方向	E-W方向
BM03	29.20	風上	0.8	318	658
		風下	0.4		
BM02	17.75	風上	0.8	254	525
		風下	0.4		

※1：風下側の係数は、風上側と同じ向きを正とする。

表4-7 緊急時対策所建屋変形評価の評価条件

質点	高さ	位置	風力係数	受圧面積	
				N-S方向	E-W方向
1	51.00	風上	0.8	154	228
		風下	0.4		
2	43.50	風上	0.8	256	251
		風下	0.4		
3	37.00	風上	0.8	283	305
		風下	0.4		
4	30.30	風上	0.8	275	318
		風下	0.4		

(2) 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ

原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの変形評価に用いる条件を表4-8に示す。

表4-8 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ変形評価の評価条件

記号	記号の説明	数値	単位
q	設計用速度圧	6100	N/m <sup>2</sup>
C	風力係数	1.6	—
G	ガスト影響係数	1	—
$\Delta P$	最大気圧低下量	8900	N/m <sup>2</sup>
$A_c$	コーン状破壊面の有効投影面積	33123	mm <sup>2</sup>
$A_0$	頭付きアンカーボルト頭部の支圧面積	442.3	mm <sup>2</sup>
$s_c a$	頭付きアンカーボルトの断面積で、軸部断面積とねじ部有効断面積の小なる方の値	284	mm <sup>2</sup>
b	部材幅	1000	mm
d'	部材の有効せい	47	mm
L	屋根スラブの支持スパン	1530	mm
p	頭付きアンカーボルトの間隔	360	mm
D	頭付きアンカーボルト頭部の直径	30.4	mm
d	頭付きアンカーボルト軸部の直径	19	mm
$F_c$	コンクリートの設計基準強度	22.1	N/mm <sup>2</sup>
$f_n$	コンクリートの支圧強度	132.6	N/mm <sup>2</sup>
$f_s$	コンクリートの許容せん断応力度	1.07	N/mm <sup>2</sup>
$f_t$	鉄筋の許容引張応力度	324.5	N/mm <sup>2</sup>
$a_t$	引張鉄筋断面積	705	mm <sup>2</sup>
j	応力中心間距離 ( $j = (7/8) \cdot d'$ )	41.1	mm
$l_{ce}$	頭付きアンカーボルトの強度計算用埋込み長さ ( $l_{ce} = l_e$ )	88.6	mm
$l_e$	頭付きアンカーボルトのコンクリート内への有効埋込み長さ	88.6	mm
$c\sigma_t$	コーン状破壊に対するコンクリートの引張強度	6.851	N/mm <sup>2</sup>
$s\sigma_{pa}$	頭付きアンカーボルトの引張強度	235	N/mm <sup>2</sup>
$s\sigma_y$	頭付きアンカーボルトの規格降伏点強度	235	N/mm <sup>2</sup>
$\phi_1$	低減係数	1	—
$\phi_2$	低減係数	0.67	—
$\omega d$	常時作用する荷重による単位幅あたりの荷重	3.472	kN/m
$\omega T1$	評価に用いる竜巻の荷重 $W_{T1}$ による単位幅あたりの荷重	-8.9*	kN/m
$\omega T2$	評価に用いる竜巻の荷重 $W_{T2}$ による単位幅あたりの荷重	-14.21*	kN/m

※：下向きの荷重を正の値とする。

- (3) 原子炉建屋大物搬入口扉のうち原子炉建屋原子炉棟水密扉  
 原子炉建屋原子炉棟水密扉の変形評価に用いる条件を表4-8に示す。

表4-8 原子炉建屋原子炉棟水密扉の変形評価の評価条件

部位		記号	記号の説明	数値	単位
扉体		$A_d$	水密扉受圧面積	25.90	$m^2$
		$\Delta P$	単位面積当たりの最大気圧低下量	8900	$N/m^2$
		$n$	カンヌキ部箇所数	14	箇所
カンヌキ部	カンヌキ	$A_k$	断面積	1963	$mm^2$
		$L_k$	軸支持間距離	66.0	mm
		$Z_k$	断面係数	12270	$mm^3$
	カンヌキ受けピン	$A_p$	断面積	490.9	$mm^2$
		$L_p$	軸支持間距離	91.0	mm
		$Z_p$	断面係数	1534	$mm^3$
	カンヌキ受けボルト	$A_b$	ボルト1本あたりの断面積	157.0	$mm^2$
		$n_b$	ボルト本数	2	本

- (4) 原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉  
 原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉の変形評価に用いる条件を表4-9に示す。

表4-9 原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉の変形評価の評価条件

部位		記号	記号の説明	数値	単位
扉体		$A_d$	水密扉受圧面積	3.606	$m^2$
		$\Delta P$	単位面積当たりの最大気圧低下量	8900	$N/m^2$
		$n$	カンヌキ部箇所数	4	箇所
カンヌキ部	カンヌキ	$A_k$	断面積	1963	$mm^2$
		$L_k$	軸支持間距離	106.0	mm
		$Z_k$	断面係数	12270	$mm^3$
	カンヌキ受けピン	$A_p$	断面積	314.2	$mm^2$
		$L_p$	軸支持間距離	79.0	mm
		$Z_p$	断面係数	785.4	$mm^3$
	カンヌキ受けボルト	$A_b$	ボルト1本あたりの断面積	157.0	$mm^2$
		$n_b$	ボルト本数	2	本

(5) その他の外殻となる扉

a. 原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)

原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)の変形評価に用いる条件を表4-10に示す。

表4-10 原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)の変形評価の評価条件

部位		記号	記号の説明	数値	単位
扉体		$A_d$	水密扉受圧面積	1.570	$m^2$
		$\Delta P$	単位面積当たりの最大 気圧低下量	8900	$N/m^2$
		$n$	カンヌキ部箇所数	4	箇所
カンヌキ部	カンヌキ	$A_k$	断面積	1963	$mm^2$
		$L_k$	軸支持間距離	95.0	mm
		$Z_k$	断面係数	12270	$mm^3$
	カンヌキ受けピン	$A_p$	断面積	314.2	$mm^2$
		$L_p$	軸支持間距離	90.0	mm
		$Z_p$	断面係数	785.4	$mm^3$
	カンヌキ受けボルト	$A_b$	ボルト1本あたりの 断面積	157.0	$mm^2$
		$n_b$	ボルト本数	2	本

5. 強度評価結果

5.1 貫通評価

貫通限界厚さと許容限界の比較を表5-1に示す。式による評価で許容限界を満足しなかった原子炉建屋屋根スラブについては、解析による評価にてデッキプレートが破断しないことを確認した。

表5-1 貫通評価結果(1/2) (式による評価)

評価項目		部位	飛来物	評価結果 (mm)	許容限界 (mm)
貫通評価	原子炉建屋	屋根スラブ	鋼製材	追而	
		外壁	鋼製材		
	タービン建屋	オペレーティング フロア床版	鋼製材		
		気体廃棄物処理系 隔離弁設置エリア壁	鋼製材		
	使用済燃料乾式 貯蔵建屋	屋根スラブ	鋼製材		
			車両		
		外壁	鋼製材		
			車両		
	軽油貯蔵タンク タンク室	頂版	鋼製材		
	緊急時対策所	建屋屋根スラブ	鋼製材		
			車両		
		建屋外壁	鋼製材		
車両					

※：表5-2(2/2)により内包する防護すべき施設への影響がないことを確認

表5-1 貫通評価結果(2/2) (解析による評価)

評価項目		部位	飛来物	評価結果 (-)	許容限界 (-)
貫通評価	原子炉建屋	屋根スラブ	鋼製材	追而	

5.2 裏面剥離評価

裏面剥離限界厚さと許容限界の比較を表5-2に示す。式による評価で許容限界を満足しなかった部位については、解析による評価にてデッキプレート若しくはライナが破断しないことを確認した。

表 5-2 裏面剥離評価結果(1/2) (式による評価)

評価項目		部位	飛来物	評価結果 (mm)	許容限界 (mm)
裏面剥離評価	原子炉建屋	屋根スラブ	鋼製材	追而	
		外壁	鋼製材		
	タービン建屋	オペレーティング フロア床版	鋼製材		
		気体廃棄物処理系 隔離弁設置エリア壁	鋼製材		
	使用済燃料乾式 貯蔵建屋	屋根スラブ	鋼製材		
			車両		
		外壁	鋼製材		
			車両		
	軽油貯蔵タンク タンク室	頂版	鋼製材		
	緊急時対策所	建屋屋根スラブ	鋼製材		
			車両		
		建屋外壁	鋼製材		
車両					

※：表 5-2(2/2)により内包する防護すべき施設への影響がないことを確認

表5-2 裏面剥離評価結果(2/2) (解析による評価)

評価項目		部位	飛来物	評価結果 (-)	許容限界 (-)
評価 裏面剥離	原子炉建屋	屋根スラブ	鋼製材	追而	
		外壁	鋼製材		

5.3 変形評価

(1) 外壁

建屋に生じるせん断ひずみと許容限界の比較を表5-3に示す。建屋に生じるひずみが許容限界を超えないことを確認した。

表 5-3 変形評価結果（建屋）

評価項目	評価結果	評価結果	許容限界
建屋の せん断ひずみ	原子炉建屋	追而	
	タービン建屋		
	使用済燃料乾式貯蔵建屋		
	緊急時対策所		

(2) 原子炉建屋（鉄骨構造部）

原子炉建屋（鉄骨構造部）の部材に発生する応力度を計算し、許容限界を超えないことを確認する。

評価項目	評価結果	許容限界
	追而	

(3) 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ

原子炉建屋原子炉棟屋根スラブに生じる荷重と許容限界の比較を表5-4に示す。スラブ及びスタッドに生じる荷重が建屋に生じるひずみが許容限界を超えないことを確認した。

表5-4 変形評価結果（原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ）

評価項目	評価結果	許容限界
屋根スラブの曲げモーメント	追而	
屋根スラブのせん断応力		
スタッドの発生引張力		

(3) 水密扉

評価対象の水密扉に生じる荷重と許容限界の比較を表5-5に示す。カンヌキ部に生じる荷重が許容限界を超えないことを確認した。

表5-5 変形評価結果

評価対象部位		評価結果 (N/mm <sup>2</sup> )	許容限界値 (N/mm <sup>2</sup> )	
原子炉棟水密扉 原子炉建屋	カンヌキ部	カンヌキ	90	205
		カンヌキ受けピン <sup>(注1)</sup>	245	686
		カンヌキ受けボルト	53	651
電気室搬入口水密扉 原子炉建屋一階	カンヌキ部	カンヌキ	70	205
		カンヌキ受けピン <sup>(注1)</sup>	202	686
		カンヌキ受けボルト	26	651
原子炉棟水密扉(潜戸) 原子炉建屋	カンヌキ部	カンヌキ	28	205
		カンヌキ受けピン <sup>(注1)</sup>	101	345
		カンヌキ受けボルト	12	651

(注1) 曲げ及びせん断のうち評価結果が厳しい方の値を記載

V-3-別添 1-1-5 換気空調設備の強度計算書

## 目次

1. 概要.....	1
2. 基本方針.....	1
2.1 位置.....	1
2.2 構造概要.....	1
2.3 評価方針.....	4
2.4 適用規格.....	9
3. 強度評価方法.....	10
3.1 記号の定義.....	10
3.2 評価対象部位.....	15
3.3 荷重及び荷重の組合せ.....	19
3.4 許容限界.....	21
3.5 評価方法.....	25
4. 評価条件.....	35
5. 強度評価結果.....	40

## 1. 概要

本資料は、V-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」に示すとおり、角ダクト、丸ダクト、換気空調設備の隔離弁（以下「隔離弁」という。）、ファン及び冷凍機が竜巻時及び竜巻通過後においても、その施設の機能維持を考慮して、主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

## 2. 基本方針

角ダクト、丸ダクト、隔離弁、ファン及び冷凍機の構造について、V-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「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、角ダクト、丸ダクト、隔離弁、ファン及び冷凍機の「2.1 位置」、「2.2 構造概要」、「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

### 2.1 位置

角ダクト、丸ダクト、隔離弁、ファン及び冷凍機は、V-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「3.2 機能維持の方針」に示すとおり、十分な強度を有する原子炉建屋内、原子炉建屋付属棟屋上面又はディーゼル発電機室屋上面に設置する。

### 2.2 構造概要

換気空調設備の構造について、V-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「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、換気空調設備の構造を示す。

#### (1) 角ダクト及び丸ダクトの構造概要

角ダクトは、鋼板により構成される四角形断面のダクトであり、支持構造物にダクト鋼板面を接触させて支持する。

丸ダクトは、鋼板により構成される円筒形のダクトであり、支持構造物にダクト鋼板面を接触させて支持する。

角ダクトの概要図を図 2-1 に、丸ダクトの概要図を図 2-2 に示す。

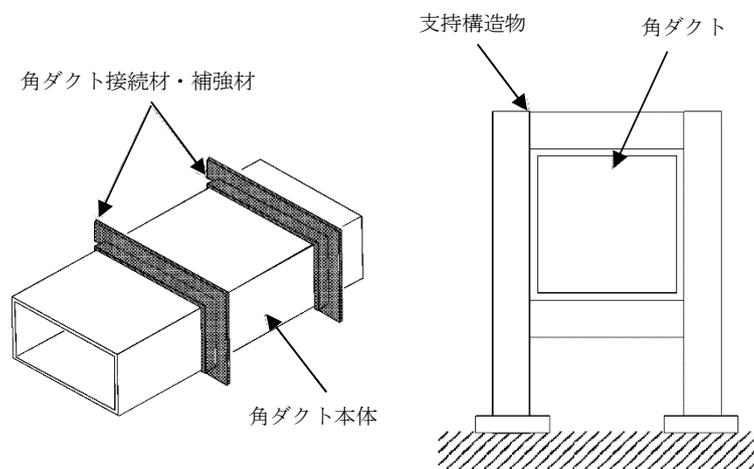


図 2-1 角ダクトの概要図

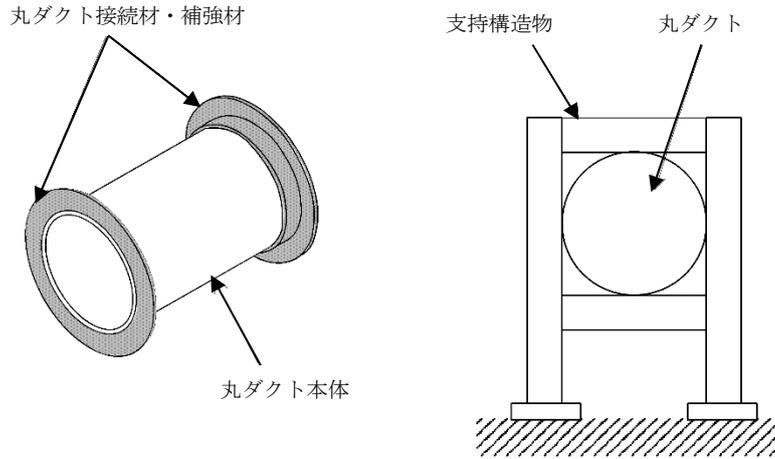


図 2-2 丸ダクトの概要図

(2) 隔離弁の構造概要

隔離弁は弁箱内部の弁体が弁棒を軸として回転することにより、開閉動作を行う弁である。隔離弁の概要図を図 2-3 に示す。

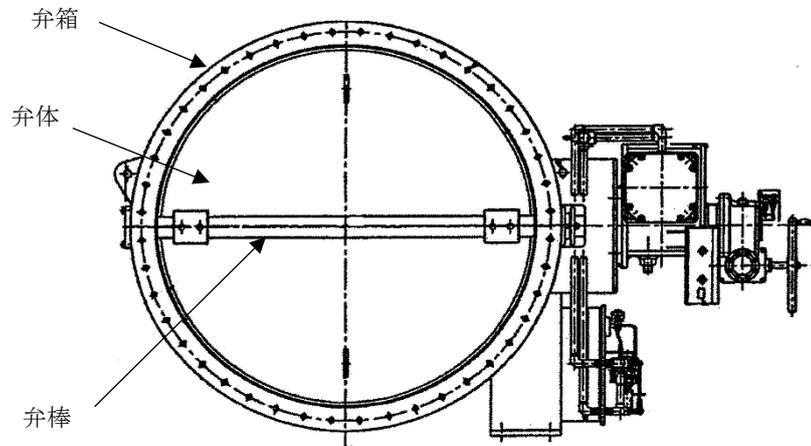


図 2-3 隔離弁の概要図

(3) ファンの構造概要

ファンは流路を形成するケーシング、冷却するための空気を送り込む羽根車及び原動機からの回転力を伝達する主軸で形成する。

中央制御室換気系フィルタ系ファンは屋内に設置しており、非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機ルーフベントファン（以下「ディーゼル発電機室ルーフベントファン」という。）は屋外に設置している。

ファンの概要図を図 2-4, 図 2-5 に示す。

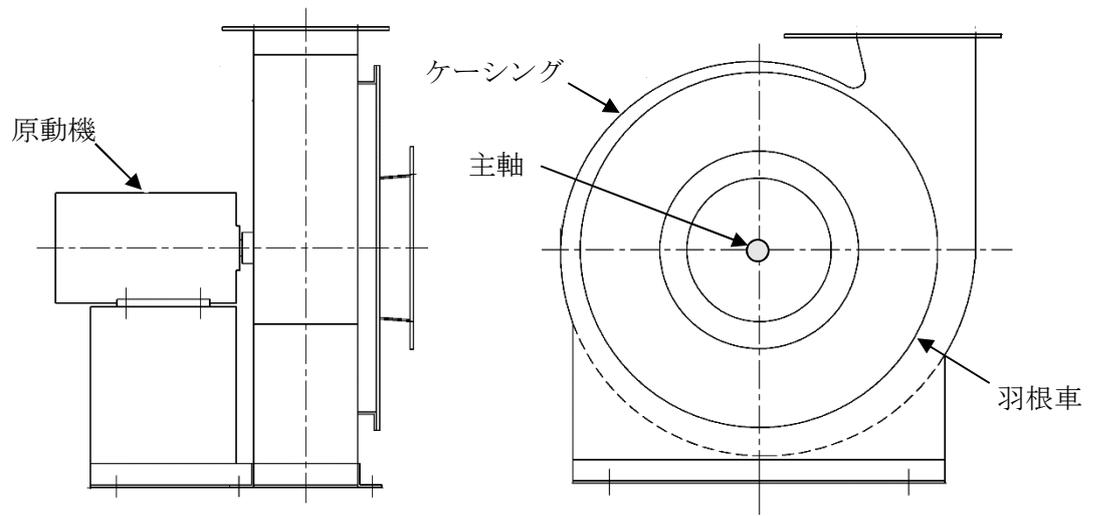


図 2-4 ファンの概要図 (中央制御室換気系フィルタ系ファン)

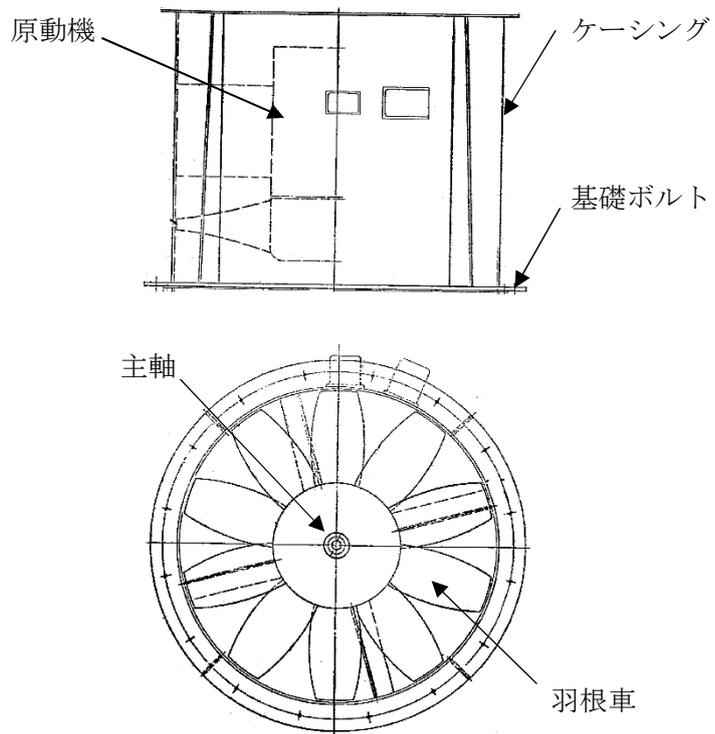


図 2-5 ファンの概要図 (ディーゼル発電機室ルーフベントファン)

(4) 冷凍機の構造概要

中央制御室換気系冷凍機は、空気を冷却する熱交換器、圧縮機及び送風機をケーシングで覆ったユニット形式であり、屋外に設置している。

中央制御室換気系冷凍機の概要図を図 2-6 に示す。

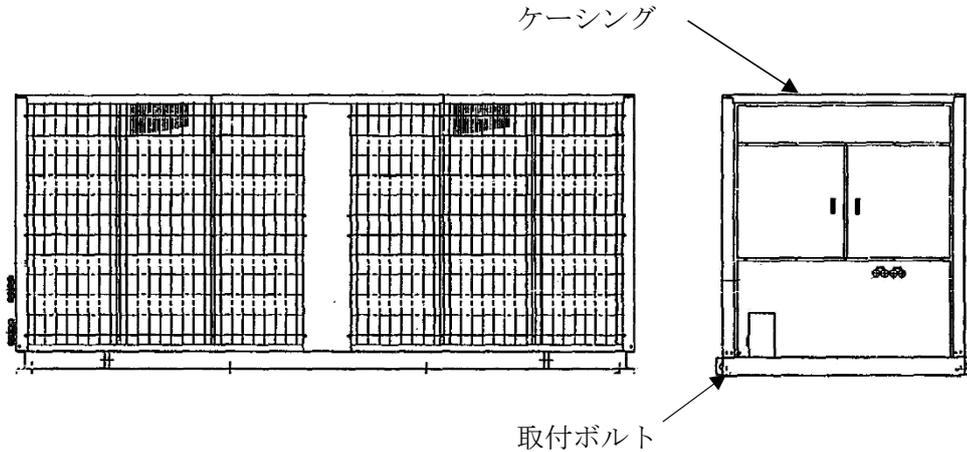


図 2-6 冷凍機の概要図（中央制御室換気系冷凍機）

2.3 評価方針

換気空調設備の強度評価は、V-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. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している、荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、角ダクト、丸ダクト、隔離弁、ファン及び冷凍機の各評価対象部位に作用する貫入及び応力等が、許容限界に収まることを「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

(1) 衝突評価の評価方針

屋外に設置する換気空調設備の衝突評価フローを図2-7に示す。衝突評価においては、竜巻防護ネットを設置する場合に考慮する飛来物である砂利の貫通限界厚さが外壳を構成する部材の厚さ未満であることを確認する。衝突評価では、「タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日原子炉安全専門審査会）」で用いられている式を準用し、V-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. 強度評価方法」に示す衝突評価が必要な機器の評価式を用いる。屋外に設置する換気空調設備の衝突評価における許容限界は、V-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「3.2 許容限界」に示す許容限界である、外壳を構成する部材の厚さとする。

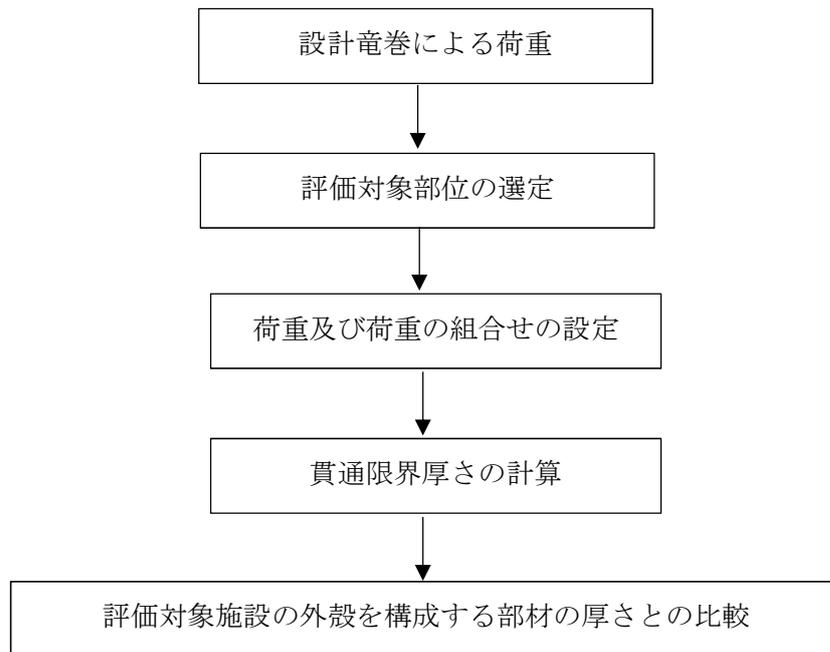


図2-7 屋外に設置する換気空調設備の衝突評価フロー

## (2) 構造強度評価の評価方針

## a. 角ダクト及び丸ダクトの評価方針

角ダクト及び丸ダクトの強度評価フローを図 2-8 に示す。

竜巻より防護すべき施設を内包する施設内に設置する、外気と繋がっている換気空調設備のうち、角ダクト及び丸ダクトの強度評価においては、その構造を踏まえ、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を選定する。

角ダクトの強度評価においては、設計竜巻の気圧差による荷重を短期荷重とみなし、自重との組合せを考慮して、長期荷重（自重）＋短期荷重（設計竜巻による内外差圧）による応力が許容応力以下であることを確認する。強度評価では、V-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」に示す角ダクトの評価式を用いる。

角ダクトの許容限界は、妥当な安全裕度を考慮して、V-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「4.2 許容限界」に示す許容限界である、J E A G 4 6 0 1 の許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>S とする。ただし、座屈に対しては評価式を満足することを確認する。

丸ダクトの強度評価においては、設計竜巻の気圧差による荷重を短期荷重とみなし、自重との組合せを考慮して、外圧により生じる周方向応力が許容応力以下であること及び長期荷重（自重）＋短期荷重（設計竜巻による内外差圧）により生じる応力が評価式を満足していることを確認する。強度評価では、V-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」に示す丸ダクトの評価式を用いる。

丸ダクトの許容限界は、V-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「4.2 許容限界」に示す許容限界である、クリッピング座屈の算出式に応じた値とする。

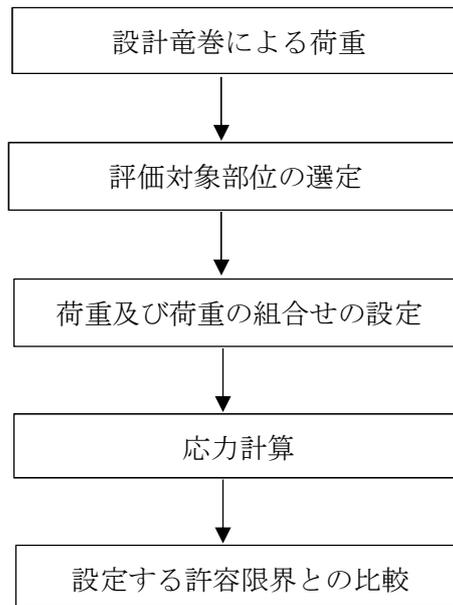


図 2-8 角ダクト及び丸ダクトの強度評価フロー

b. 隔離弁の評価方針

隔離弁の強度評価フローを図 2-9 に示す。

竜巻より防護すべき施設を内包する施設内に設置する、外気と繋がっている換気空調設備のうち、隔離弁の強度評価においては、その構造を踏まえ、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を選定する。

強度評価においては、隔離弁に対して、設計竜巻の気圧差による荷重により生じる応力が許容応力以下であることを確認する。強度評価では、V-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」に示す隔離弁の評価方法を用いる。

隔離弁の許容限界は、V-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「4.2 許容限界」に示す許容限界である、J E A G 4 6 0 1 の許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>Sとする。

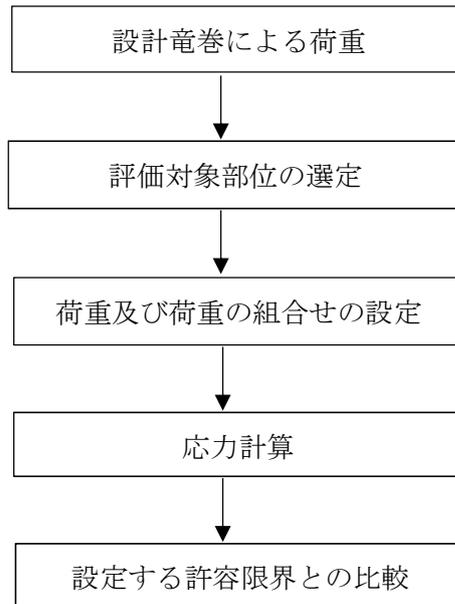


図 2-9 隔離弁の強度評価フロー

## c. ファンの評価方針

ファンの強度評価フローを図 2-10 に示す。

強度評価において、屋外に設置する換気空調設備については、設計竜巻の風圧力による荷重及び自重を加えた応力が許容応力以下であることを確認する。各部材の強度評価には、設計竜巻による荷重は水平方向より作用する外荷重という観点で地震荷重と同様なものであると考え、「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1・補-1984」（（社）日本電気協会）、「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987」（（社）日本電気協会）及び「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」（（社）日本電気協会）（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）における 1 質点系モデルによる評価方法を準用する。また、竜巻より防護すべき施設を内包する施設内に設置する外気と繋がっている換気空調設備については、設計竜巻の気圧差による荷重により生じる応力が許容応力以下であることを確認する。強度評価では、V-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」に示すファンの評価式を用いる。

ファンの許容限界は、V-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「4.2 許容限界」に示す許容限界である、J E A G 4 6 0 1 の許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>Sとする。

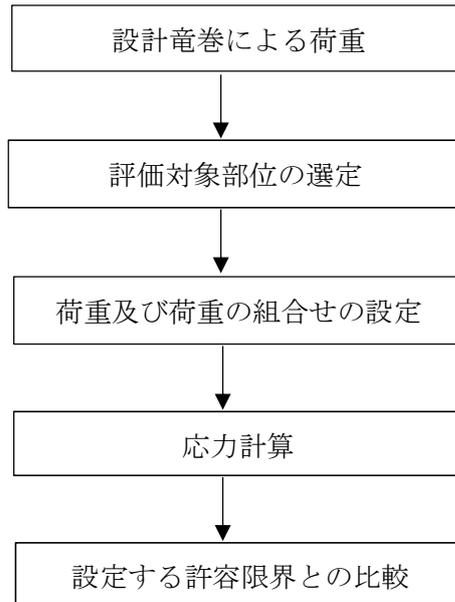


図 2-10 ファンの強度評価フロー

## d. 冷凍機の評価方針

冷凍機の強度評価フローを図 2-11 に示す。

強度評価においては、中央制御室換気系冷凍機に対して、設計竜巻の風圧力による荷重及び自重を加えた応力が許容応力以下であることを確認する。各部材の強度評価には、設計竜巻による荷重は水平方向より作用する外荷重という観点で地震荷重と同様なものであると考え、「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1・補-1984」（（社）日本電気協会）、「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987」（（社）日本電気協会）及び「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」（（社）日本電気協会）（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）における1質点系モデルによる評価方法を準用し、V-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」に示す冷凍機の評価式を用いる。

冷凍機の許容限界は、V-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「4.2 許容限界」に示す許容限界である、J E A G 4 6 0 1 の許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>Sとする。

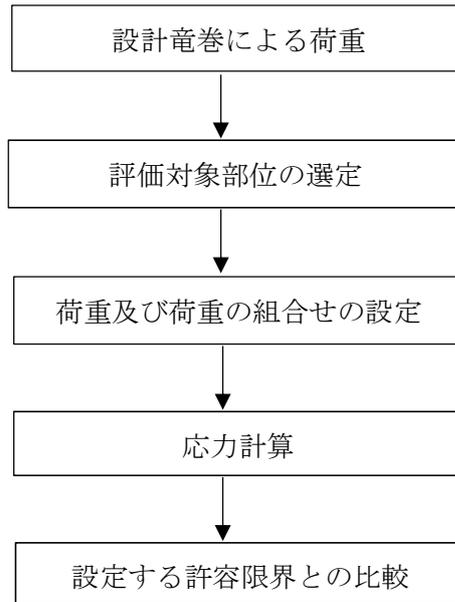


図 2-11 冷凍機の強度評価フロー

#### 2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1・補-1984」  
(社) 日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987」 (社) 日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」 (社) 日本電気協会
- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 J S M E S N C 1-2005/2007」 (社) 日本機械学会 (以下「J S M E」という。)
- ・日本工業規格(J I S)

### 3. 強度評価方法

#### 3.1 記号の定義

##### (1) 衝突評価の記号の定義

屋外に設置する換気空調設備の衝突評価に用いる記号を表3-1に示す。

表3-1 衝突評価に用いる記号

記号	単位	定義
d	m	評価において考慮する飛来物が衝突する衝突断面の等価直径
K	—	鋼板の材質に関する係数
M	kg	評価において考慮する飛来物の質量
T	mm	鋼板の貫通限界厚さ
v	m/s	評価において考慮する飛来物の飛来速度

##### (2) 構造強度評価の記号の定義

###### a. 角ダクト

角ダクトの強度評価に用いる記号を表3-2に示す。

表3-2 角ダクトの強度評価に用いる記号(1/2)

記号	単位	定義
a	mm	ダクト幅
b	mm	ダクト高さ
c	mm	補強ピッチ
$D_p$	kg/m <sup>2</sup>	単位面積当たりのダクト鋼板の質量
E	MPa	ヤング率
g	m/s <sup>2</sup>	重力加速度
I	mm <sup>4</sup>	断面二次モーメント
L	mm	ダクトサポートの支持間隔
M	N・mm	ダクトに作用する曲げモーメント
$M_p$	N・mm	自重により作用する曲げモーメント
P	MPa	ダクトにかかる外圧
$S_y$	MPa	J S ME 付録材料図表Part5の表にて規定される設計降伏点
t	mm	ダクト板厚
$\delta_{max}$	mm	面外荷重によるダクト鋼板の最大変位量
$\Delta P$	N/m <sup>2</sup>	設計竜巻の気圧低下量
$\pi$	—	円周率

表3-2 角ダクトの強度評価に用いる記号(2/2)

記号	単位	定義
$\mu$	kg/m	ダクトの単位長さ当たり重量
$\nu$	—	ポアソン比
$\sigma_{max}$	MPa	中心に生じる面外荷重による最大応力
$\sigma_{p1}$	MPa	面内荷重（外圧）による発生応力
$\sigma_{p2}$	MPa	面内荷重（自重）による発生応力
$\sigma_w$	MPa	短期荷重（設計竜巻による内外差圧）による発生応力と長期荷重（自重）による発生応力の和
$\sigma_y$	MPa	許容応力

b. 丸ダクト

丸ダクトの強度評価に用いる記号を表3-3に示す。

表3-3 丸ダクトの強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
$c$	mm	補強ピッチ
$E$	MPa	ヤング率
$g$	m/s <sup>2</sup>	重力加速度
$k_p$	—	座屈係数
$L$	mm	ダクトサポートの支持間隔
$M_{crip}$	N・mm	クリッピング座屈が発生する際に作用する曲げモーメント
$M_p$	N・mm	自重により作用する曲げモーメント
$n$	—	座屈モードの次数
$r$	mm	丸ダクトのダクト半径
$t$	mm	ダクト板厚
$Z_c$	—	円筒かくの座屈応力の式における係数
$\beta$	—	円筒かくの座屈応力の式における係数
$\Delta P$	N/m <sup>2</sup>	設計竜巻の気圧低下量
$\mu$	kg/m	ダクトの単位長さ当たりの質量
$\nu$	—	ポアソン比
$\pi$	—	円周率
$\sigma_{crip}$	MPa	クリッピング座屈が発生する際に生じる周方向応力
$\sigma_{crip1}$	MPa	外圧により生じる周方向応力

## c. 隔離弁

隔離弁の強度評価に用いる記号を表 3-4 に示す。

表3-4 隔離弁の強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
$A_s$	$m^2$	弁棒の断面積
$A_v$	$m^2$	弁体の受圧面積
$a$	mm	弁体の半径
$d$	mm	弁棒の直径
$F_1$	N	設計竜巻の気圧低下により弁棒に受ける荷重
$F_2$	N	弁体自重により弁棒に受ける荷重
$g$	$m/s^2$	重力加速度 ( $g=9.80665$ )
$h$	mm	弁体の板厚
$m_v$	kg	弁体自重
$m_s$	kg	弁棒自重
$P_1$	Pa	設計竜巻の気圧低下により弁体に受ける応力
$P_2$	Pa	自重により弁体に受ける応力
$p_v$	Pa	弁体に受ける応力
$p_s$	N	弁棒に受ける荷重
$r$	mm	内半径
$S_y$	MPa	J SME 付録材料図表Part5の表にて規定される設計降伏点
$t$	mm	板厚
$\pi$	—	円周率
$\tau$	MPa	弁棒に対するせん断応力
$\sigma_{max}$	MPa	弁体に対する曲げ応力
$\sigma_\theta$	MPa	周方向応力
$\Delta P$	hPa	設計竜巻の気圧低下量

## d. ファン

ファンの強度評価に用いる記号を表3-5に示す。

表3-5 ファンの強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A	m <sup>2</sup>	受圧面積（風向に垂直な面に投影した面積）
A <sub>b</sub>	mm <sup>2</sup>	基礎ボルトの軸断面積
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
F	MPa	J S M E SSB-3121.1(1)により規定される値
F <sub>b</sub>	N	基礎ボルトに対する引張力
F <sub>i</sub>	N	各ボルトに作用する引張力
f <sub>s</sub>	MPa	J S M E SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容せん断応力
f <sub>t</sub>	MPa	J S M E SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容引張応力
G	—	ガスト影響係数
g	m/s <sup>2</sup>	重力加速度（g=9.80665）
h	mm	全高の1/2
L <sub>1</sub> ～L <sub>7</sub>	mm	支点と評価ボルト間の距離
L <sub>i</sub>	mm	各ボルト間の距離
M	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
m	kg	ファンの質量
N	—	基礎ボルトの本数
Q <sub>b</sub>	N	基礎ボルトに対するせん断力
q	N/m <sup>2</sup>	設計用速度圧
r	mm	ケーシング内半径
S <sub>u</sub>	MPa	J S M E 付録材料図表Part5の表にて規定される設計引張強さ
S <sub>y</sub>	MPa	J S M E 付録材料図表Part5の表にて規定される設計降伏点
t	mm	ケーシング板厚
W <sub>M</sub>	N	設置（変更）許可を受けた竜巻による飛来物の衝撃荷重
W <sub>W</sub>	N	設計竜巻の風圧力による荷重
ΔP	N/m <sup>2</sup>	設計竜巻の気圧低下量
σ <sub>b</sub>	MPa	基礎ボルトに生じる引張応力
σ <sub>θ</sub>	MPa	周方向応力
τ	MPa	基礎ボルトに生じるせん断応力

## e. 冷凍機

冷凍機の強度評価に用いる記号を表3-6に示す。

表3-6 冷凍機の強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A	m <sup>2</sup>	受圧面積（風向に垂直な面に投影した面積）
A <sub>b</sub>	mm <sup>2</sup>	基礎ボルトの軸断面積
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
F	MPa	J S M E SSB-3121.1(1)により規定される値
F <sub>b</sub>	N	基礎ボルトに対する引張力
f <sub>s</sub>	MPa	J S M E SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容せん断応力
f <sub>t</sub>	MPa	J S M E SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容引張応力
G	—	ガスト影響係数
g	m/s <sup>2</sup>	重力加速度（g=9.80665）
h	mm	全高の1/2
L <sub>1</sub>	mm	基礎ボルト間の水平距離
L <sub>H</sub>	mm	重心から基礎ボルト間の水平距離
m	kg	冷凍機の運転質量
N	—	基礎ボルトの本数
n <sub>f</sub>	—	引張力を受ける基礎ボルトの本数
Q <sub>b</sub>	N	基礎ボルトに対するせん断力
q	N/m <sup>2</sup>	設計用速度圧
S <sub>u</sub>	MPa	J S M E 付録材料図表Part5の表にて規定される設計引張強さ
S <sub>y</sub>	MPa	J S M E 付録材料図表Part5の表にて規定される設計降伏点
W <sub>M</sub>	N	設置（変更）許可を受けた竜巻による飛来物の衝撃荷重
W <sub>W</sub>	N	設計竜巻の風圧力による荷重
σ <sub>b</sub>	MPa	基礎ボルトに生じる引張応力
τ	MPa	基礎ボルトに生じるせん断応力

### 3.2 評価対象部位

#### (1) 衝突評価の評価対象部位

評価において考慮する飛来物の衝突により、海水ポンプに衝撃荷重が作用し貫入する可能性があるため、貫入によりその施設の機能が喪失する可能性のある箇所を評価対象部位として選定する。

屋外に設置する換気空調設備の全方向からの飛来物を考慮し、貫入により施設の機能が喪失する可能性がある箇所として最薄部となる箇所を選定する。

屋外に設置する換気空調設備の衝突評価における評価対象部位を図3-1、図3-2に示す。

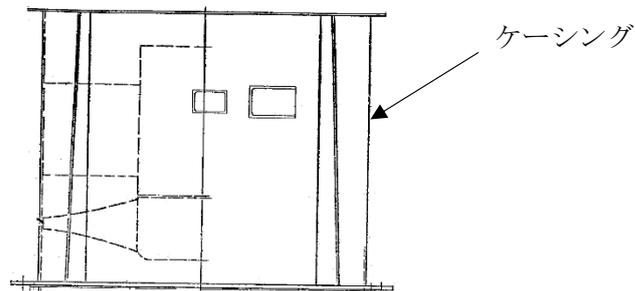


図 3-1 屋外に設置する換気空調設備の衝突評価における評価対象部位  
(ディーゼル発電機室ルーフベントファン)

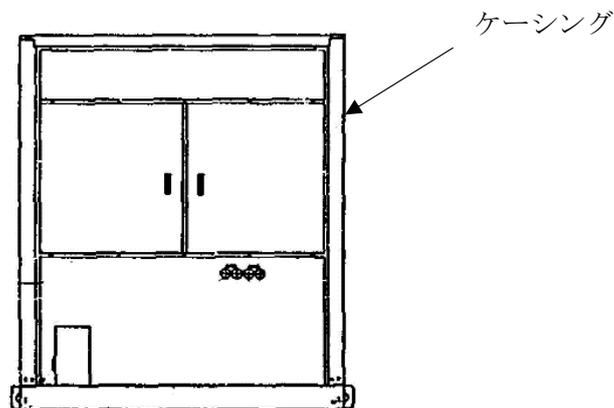


図 3-2 屋外に設置する換気空調設備の衝突評価における評価対象部位  
(中央制御室換気系冷凍機)

#### (2) 構造強度評価の評価対象部位

##### a. ダクトの評価対象部位

角ダクト及び丸ダクトの評価対象部位は、V-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「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し

選定する。

(a) 角ダクト

下記の外気と繋がる換気空調系を評価対象とする。

- ・中央制御室換気系
- ・非常用ディーゼル発電機室換気系
- ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室換気系

気圧差による荷重は、角ダクト本体の薄肉鋼板部に作用する。このことから、ダクト鋼板（本体）を評価対象部位として選定する。

角ダクトは薄肉角筒であり、発生応力はダクト鋼板中央部で最大となることから、ダクト鋼板を評価対象とする。フランジについては曲げモーメントが作用しないため、評価しない。ダクトは支持構造物にダクト鋼板面を接触させて支持されており、設計竜巻の気圧差によりダクトに作用する荷重は、ダクト支持構造物に作用しないことから、ダクト鋼板を評価する。

角ダクトの強度評価における評価対象部位を図3-3に示す。

ダクト鋼板（本体）

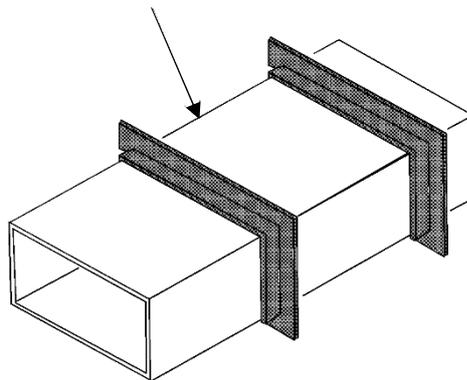


図3-3 角ダクトの評価対象部位

(b) 丸ダクト

下記の外気と繋がる換気空調系を評価対象とする。

- ・原子炉建屋換気系
- ・中央制御室換気系

気圧差による荷重は、丸ダクト本体の薄肉鋼板部に作用する。このことから、ダクト鋼板（本体）を評価対象部位として選定する。

丸ダクトは薄肉円筒であり、座屈を考慮してダクト鋼板を評価対象とする。

丸ダクトの強度評価における評価対象部位を図3-4に示す。

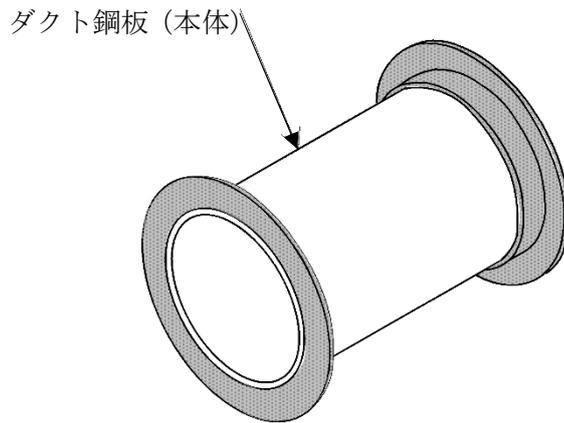


図3-4 丸ダクトの評価対象部位

b. 隔離弁の評価対象部位

隔離弁の評価対象部位は、V-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「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し選定する。

気圧差による荷重は、隔離弁本体の耐圧部に作用する。

このことから、耐圧部を評価対象部位として選定する。

隔離弁の強度評価における評価対象部位を、図3-5に示す。

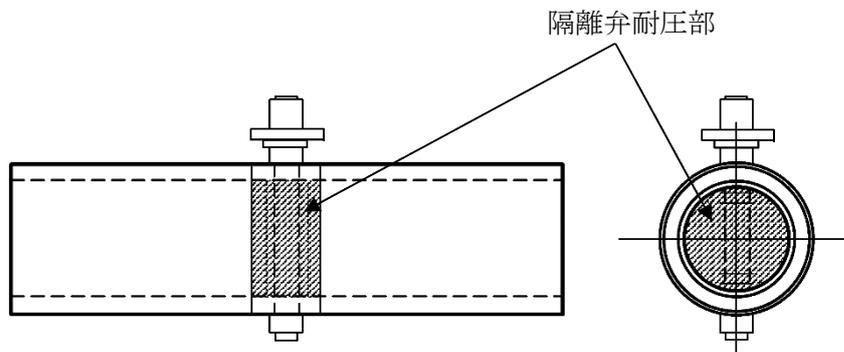


図3-5 隔離弁の評価対象部位

c. ファンの評価対象部位

ファンの評価対象部位は、V-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「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

竜巻より防護すべき施設を内包する施設内に設置する、外気と繋がっている換気空調設備における気圧差による荷重は、ファンのケーシングに作用する。

このことから、ケーシングを評価対象部位として設定する。

また、屋外に設置する換気空調設備におけるファンに作用する風圧力による荷重は、ケーシングを介し、ケーシングを固定している基礎ボルトに作用する。荷重を受ける各部位のうち、支持断面積の小さな部位に大きな応力が生じることになる。

このことから、基礎ボルトを強度評価の評価対象部位として選定する。

ファンの強度評価における評価対象部位を、図3-6～図3-7に示す。

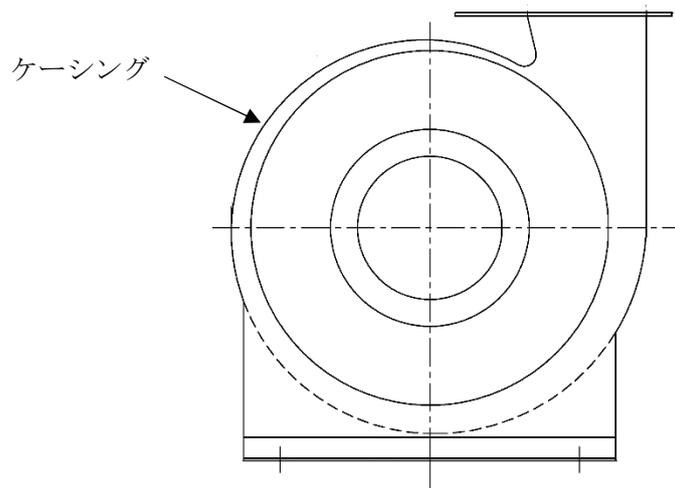


図3-6 ファンの評価対象部位（中央制御室換気系フィルタ系ファン）

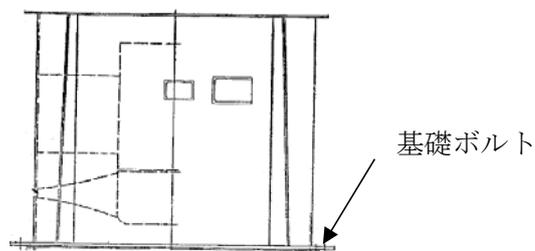


図 3-7 ファンの評価対象部位（ディーゼル発電機室ルーフベントファン）

#### d. 冷凍機の評価対象部位

冷凍機の評価対象部位は、V-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「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

屋外に設置する換気空調設備における冷凍機に作用する風圧力による荷重は、ケーシングを介し、冷凍機を固定している取付ボルトに作用する。荷重を受ける各部位のうち、支持断面積の小さな部位に大きな応力が生じることになる。

このことから、取付ボルトを強度評価の評価対象部位として選定する。

冷凍機の強度評価における評価対象部位を、図3-8に示す。

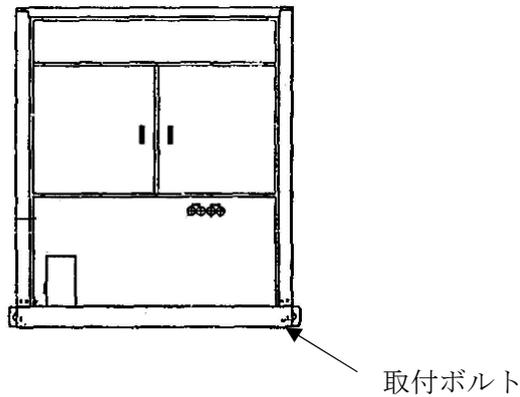


図3-8 冷凍機の評価対象部位（中央制御室換気系冷凍機）

### 3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、V-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」にて示している荷重及び荷重の組合せを踏まえ、換気空調設備の評価対象施設ごとに設定する。

#### (1) 衝突評価の荷重及び荷重の組合せ

衝突評価においては考慮する飛来物として竜巻防護ネット（ネットの網目寸法40(mm)）をすり抜ける砂利を設定し、砂利の衝撃荷重を考慮する。

衝突評価においては、評価対象部位に砂利が衝突した際に跳ね返らず、貫入するものとして評価する。

砂利の諸元を表3-7、屋外に設置する換気空調設備の衝突評価に用いる荷重を表3-8に示す。

表3-7 砂利の諸元

飛来物	d (m)	K (-)	M (kg)	v (m/s)	
				水平方向	鉛直方向
砂利	0.04	1.0	0.18	62	42

表3-8 屋外に設置する換気空調設備の衝突評価に用いる荷重

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
屋外の防護対象施設	ディーゼル発電機室ルーフトファン	ケーシング	飛来物による衝撃荷重
	中央制御室換気系冷凍機	ケーシング	飛来物による衝撃荷重

#### (2) 構造強度評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の設定

強度評価に用いる荷重は、以下の荷重を用いる。

(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。

(b) 設計竜巻による荷重

イ. 建屋内にある換気空調設備については、気圧差による荷重を考慮する。

ロ. 屋外にある換気空調設備については、風圧力による荷重を考慮する。開放された施設であるため、ディーゼル発電機室ルーフトファン及び中央制御室換気系冷凍機内外に気圧差は発生しないことから気圧差による荷重は考慮しない。また、防護対策として、竜巻防護ネットを設置する施設については、V-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」に示すとおり、竜巻防護ネットを通過する小さな飛来物による衝撃荷重は、衝突する機器へ伝わる加速度が小さく、機器へ作用する荷重は強度に影響を与えないので衝撃荷重を考慮しない。

(イ) 風圧力による荷重( $W_w$ )

風圧力による荷重 $W_w$ はV-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。

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

b. 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せは、評価対象施設ごとに設定する。

角ダクト及び丸ダクトのダクト鋼板（本体）には、自重及び気圧差による荷重が作用する。

隔離弁の耐圧部には、気圧差による荷重が作用する。

建屋内のファンのケーシングには、気圧差による荷重が作用する。

屋外のファン及び冷凍機には、自重及び風圧力による荷重が作用する。

強度評価の荷重の組合せを表3-9に示す。

表3-9 荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
外気と繋がっている 屋内の外部事象防護 対象施設	角ダクト	ダクト鋼板（本体）	①自重 ②気圧差による荷重
	丸ダクト	ダクト鋼板（本体）	①自重 ②気圧差による荷重
	隔離弁	耐圧部	①気圧差による荷重
	ファン	ケーシング	①気圧差による荷重
屋外の外部事象防護 対象施設	ファン	基礎ボルト	①自重 ②風圧力による荷重
	冷凍機	取付ボルト	①自重 ②風圧力による荷重

### 3.4 許容限界

#### (1) 衝突評価における許容限界

衝突評価における許容限界は、評価において考慮する飛来物による衝撃荷重に対し、外殻を構成する部材が、機能喪失に至る可能性のある変形を生じないことを計算により確認するため、評価式により算定した貫通限界厚さが外殻を構成する部材の厚さ未満であることを許容限界とする。屋外に設置する換気空調設備の外殻を構成する部材の厚さを表3-10に示す。

表3-10 屋外に設置する換気空調設備の外殻を構成する部材の厚さ

防護対象施設	外殻を構成する部材の厚さ
ディーゼル発電機室ルーフベント ファン	9.0mm (ケーシング)
中央制御室換気系冷凍機	1.0mm (ケーシング)

#### (2) 構造強度評価における許容限界

##### a. 角ダクトの許容限界

角ダクトの許容限界は、V-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「4.2 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえ、「3.2 評価対象部位」にて設定している評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>Sとする。

角ダクトの許容限界は、J E A G 4 6 0 1を準用し、「クラス2, 3配管」の許容限界を適用し、許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>Sから算出した許容応力を許容限界とする。ただし、妥当な安全裕度を考慮し、座屈を生じないように設定する許容限界は、座屈の算出式に応じた値を許容限界として設定する。J E A G 4 6 0 1に従い、J S M E 付録材料図表Part5, 6の表

にて許容応力を計算する際は、角ダクトの最高使用温度に応じた値をとるものとするが、温度が J S M E 付録材料図表記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算する。ただし、J S M E 付録材料図表 Part 5, 6 で比例法を用いる場合の端数処理は、小数点第 1 位以下を切り捨てた値を用いるものとする。

(a) 面外荷重及び外圧による面内荷重に対する許容限界

角ダクトの面外荷重及び外圧による面内荷重に対する許容限界を表 3-11 に示す。

表 3-11 角ダクトの許容限界

状態	許容限界
	一次応力
	曲げ
許容応力状態 III <sub>A</sub> S	S <sub>y</sub>

(b) 長期荷重（自重）＋短期荷重（設計竜巻による内外差圧）に対する許容限界

自重により発生する曲げモーメント M と発生応力  $\sigma_{p2}$  の関係は以下の式で表される。



ここで

$$I = \frac{(a + 2t)(b + 2t)^3 - a \cdot b^3}{12}$$

短期荷重（設計竜巻による内外差圧）による発生応力  $\sigma_{p1}$  と長期荷重（自重）による発生応力  $\sigma_{p2}$  の和  $\sigma_w$  が許容応力  $\sigma_y$  に達した時に座屈が生じることから、長期荷重により発生する曲げモーメント  $M_p$  が、許容応力  $\sigma_y$  と短期荷重による発生応力  $\sigma_{p1}$  の差 ( $\sigma_y - \sigma_{p1}$ ) から求まる長期荷重に対する許容曲げモーメント以下であることを確認する。



ここで、

$$\sigma_y = S_y$$

## b. 丸ダクトの許容限界

丸ダクトの許容限界は、V-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「4.2 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえ、「3.2 評価対象部位」にて設定している評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、クリップリング座屈の算出式に応じた値とする。

丸ダクトの許容限界は、設計荷重に対して、塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が微小なレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有し、座屈を生じないこととするため、クリップリング座屈の算出式に応じた値を許容限界とする。J E A G 4 6 0 1 に従い、J S M E 付録材料図表Part5,6の表にて許容応力を計算する際は、丸ダクトの最高使用温度に応じた値をとるものとするが、温度がJ S M E 付録材料図表記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算する。ただし、J S M E 付録材料図表Part5,6で比例法を用いる場合の端数処理は、小数点第1位以下を切り捨てた値を用いるものとする。

## (a) 外圧に対する許容限界

外圧により生じる周方向応力は、クリップリング座屈が発生する際に生じる周方向応力（座屈応力） $\sigma_{c r i p}$ を超えないこととする。

外圧によるクリップリング座屈が発生する際に生じる周方向応力 $\sigma_{c r i p}$ は、円筒かくの座屈応力の式より算出する。



## (b) 長期荷重（自重）＋短期荷重（設計竜巻による内外差圧）に対する許容限界

自重により作用する曲げモーメント $M_p$ と外圧 $\Delta P$ （設計竜巻による気圧低下量）の組合せが、下式を満足させるものとする。



ここで、自重による曲げによってクリップリング座屈が発生する際に作用する曲げモーメント $M_{c r i p}$ は、下式より算出する。



c. 隔離弁の許容限界

隔離弁の許容限界は、V-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「4.2 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえ、「3.2 評価対象部位」にて設定している評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し設定する。

隔離弁の許容限界は、隔離弁の耐圧部に発生する圧力に対して、部材の降伏応力  $S_y$  を許容限界とする。

d. ファンの許容限界

ファンの許容限界は、V-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「4.2 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえ、「3.2 評価対象部位」にて設定している評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>Sとする。

ファンの許容限界は、J E A G 4 6 0 1を準用し、「クラス2ポンプ」及び「クラス2,3支持構造物」の許容限界を準用し、許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>Sから算出した許容応力を許容限界とする。J E A G 4 6 0 1に従い、J S M E 付録材料図表Part5,6の表にて許容応力を計算する際は、ファンの温度条件に応じた値をとるものとするが、温度がJ S M E 付録材料図表記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算する。ただし、J S M E 付録材料図表Part5,6で比例法を用いる場合の端数処理は、小数点第1位以下を切り捨てた値を用いるものとする。ファンの許容限界を表3-12、表3-13に示す。

表3-12 ファンの許容限界（ケーシング）

状態	許容限界
	一次一般膜応力
許容応力状態 Ⅲ <sub>A</sub> S	Min[ $S_y$ , 0.6 $S_u$ ]

表3-13 ファンの許容限界（基礎ボルト）

状態	応力の種類		許容限界
許容応力状態 Ⅲ <sub>A</sub> S	一次応力	引張	1.5 $f_t$
		せん断	1.5 $f_s$
		組合せ	Min { 1.5 $f_t$ , (2.1 $f_t$ - 1.6 $\tau$ ) }

(5) 冷凍機の許容限界

冷凍機の許容限界は、V-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「4.2 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえ、「3.2 評価対象部位」にて設定している評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>Sとする。

冷凍機の許容限界は、J E A G 4 6 0 1を準用し、「クラス 2,3 支持構造物」の許容限界を準用し、許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>Sから算出した許容応力を許容限界とする。J E A G 4 6 0 1に従い、J S M E 付録材料図表 Part5,6 の表にて許容応力を計算する際は、冷凍機の温度条件に応じた値をとるものとするが、温度が J S M E 付録材料図表記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算する。ただし、J S M E 付録材料図表 Part5,6 で比例法を用いる場合の端数処理は、小数点第 1 位以下を切り捨てた値を用いるものとする。冷凍機の許容限界を表 3-14 に示す。

表3-14 冷凍機の許容限界（基礎ボルト）

状態	応力の種類		許容限界
許容応力状態 Ⅲ <sub>A</sub> S	一次応力	引張	1.5 f <sub>t</sub>
		せん断	1.5 f <sub>s</sub>
		組合せ	Min {1.5 f <sub>t</sub> , (2.1 f <sub>t</sub> - 1.6 τ)}

3.5 評価方法

(1) 衝突評価の評価方法

屋外に設置する換気空調設備の衝突評価は、V-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. 強度評価方法」にて設定している衝突評価が必要な機器の評価式を用いる。

飛来物が防護対象施設に衝突する場合の貫通限界厚さを、「タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日 原子炉安全専門審査会）」で用いられているBRL式を用いて算出する。

$$T^{\frac{3}{2}} = \frac{0.5 \cdot M \cdot v^2}{1.4396 \times 10^9 \cdot K^2 \cdot d^{\frac{3}{2}}}$$

(2) 構造強度評価の評価方法

a. 角ダクトの評価方法

角ダクトの強度評価は、V-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」にて設定している角ダクトの評価式を用いる。

(a) 計算モデル

任意のダクト面に着目すると、ダクト面は両サイドをほかの2つの側面のダクト面で、軸方向（流れ方向）を補強部材（及び接続部材）で支持された長方形の板とみなすことができる。そのため、鋼板を補強部材と両サイドのウェブで支持された4辺単純支持矩形板とし評価を行う。自重等によりダクトに生じる曲げモーメントに関し、ウェブでの応力分布が線形で、中立面がフランジの両側から等距離の中央線上にあるとする。

角ダクトモデル図を図3-15に示す。

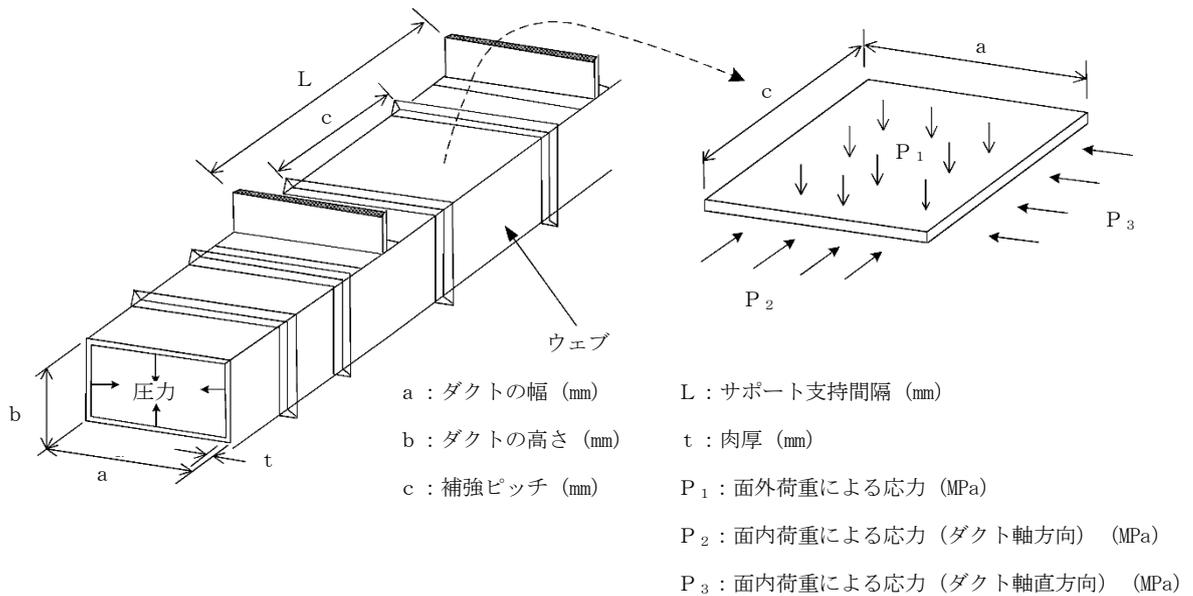


図3-15 角ダクトモデル図

(b) 計算方法

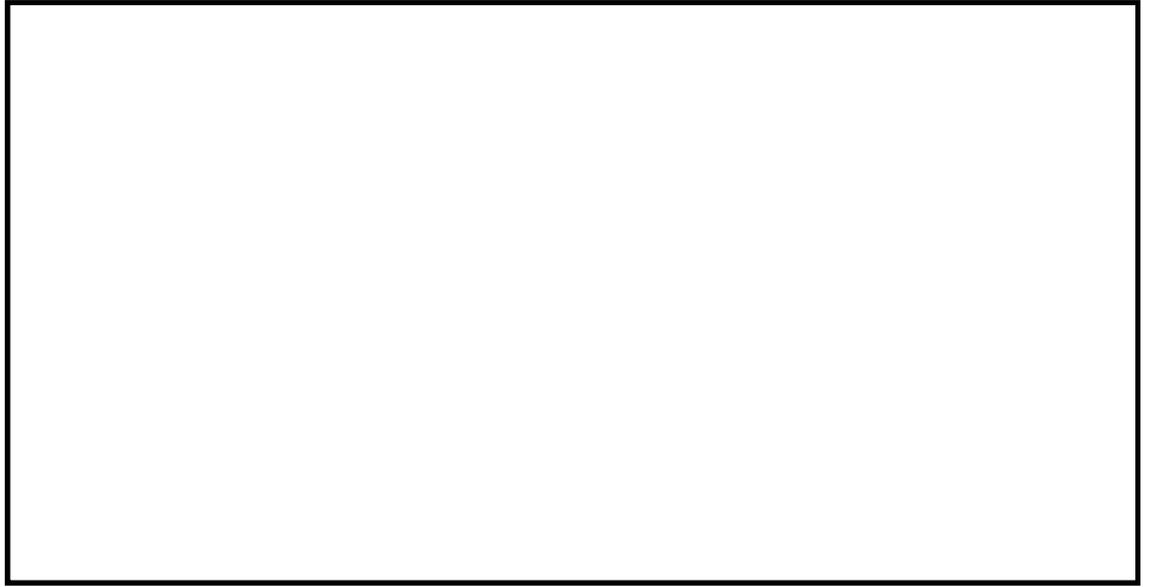
ダクトにかかる外圧は、設計竜巻により発生する気圧差が影響するので、

$$P = \Delta P$$

イ. 面外荷重による発生応力

4辺単純支持（周辺で水平，垂直方向の変位拘束，たわみ角は自由）の長方形板が等分布荷重を受ける場合において，中心に生じる外圧及び自重による面外荷重により作用する最大応力  $\sigma_{max}$  とその面外荷重によるダクト鋼板の最大変位量  $\delta_{max}$  との関係は，以下の式で表される。

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を引用する。



式 (3.2) より得られる  $\delta_{max}$  の値を式 (3.1) へ代入し、 $\sigma_{max}$  を算出する。

ロ. 面内荷重による発生応力

機械工学便覧の「クリッピングの考え方」と日本機械学会ジャーナルの「薄肉長方形及び箱形はりの座屈と強度」に記載されている鷓戸口の式を準用する。

(イ) 外圧による発生応力

薄肉構造物のうち、長方形板の弾性座屈の式より算出する。



(ロ) 自重による曲げモーメント

自重によりダクト鋼板に作用する曲げモーメントは、以下の式により算出する。

$$M_p = \frac{g \cdot \mu \cdot L^2}{8}$$

b. 丸ダクトの評価方法

丸ダクトの強度評価は、V-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」にて設定している丸ダクトの評価式を用いる。

(a) 計算モデル

丸ダクトは両端を補強部材で支持された円筒の梁とみなし、計算を行う。丸ダクトモデル図を図3-16に示す。

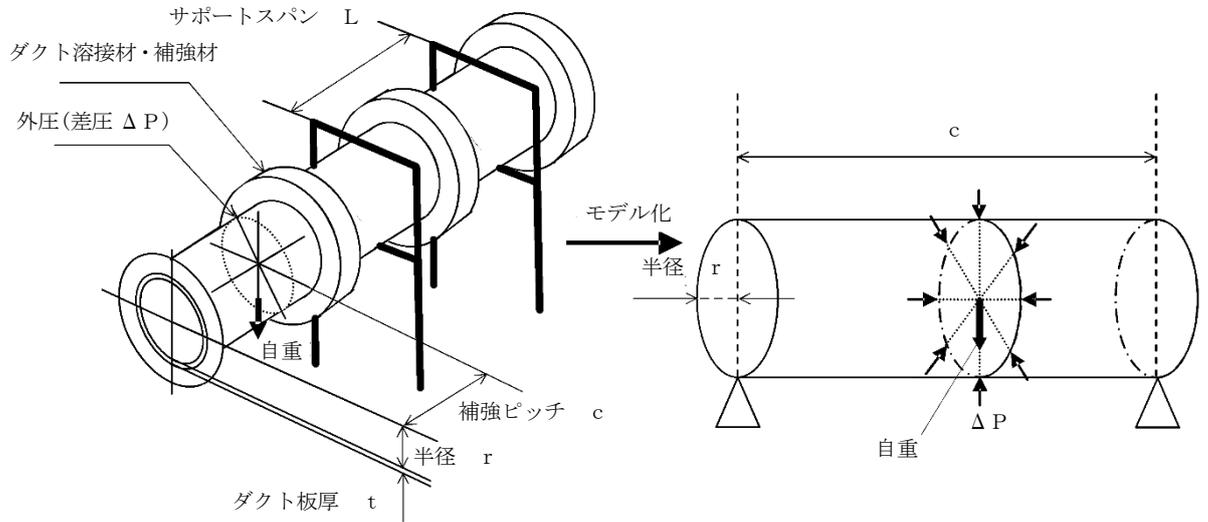


図3-16 丸ダクトモデル図

(b) 計算方法

計算式においては機械工学便覧及び「軽構造の理論とその応用（日本科学技術連盟（1966）」に記載されている式を準用する。

イ. 外圧により生じる周方向応力  $\sigma_{c r i p l}$

$$\sigma_{c r i p l} = \frac{\Delta P \cdot r}{t}$$

ロ. 自重により作用する曲げモーメント  $M_p$

$$M_p = \frac{g \cdot \mu \cdot L^2}{8}$$

c. 隔離弁の評価方法

隔離弁の強度評価は、V-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」にて設定している隔離弁の評価方法を用いる。

(a) 弁箱

イ. 計算モデル

弁箱は両端を補強部材で支持された円筒の梁とみなし、計算を行う。弁箱のモデル図を図3-17に示す。

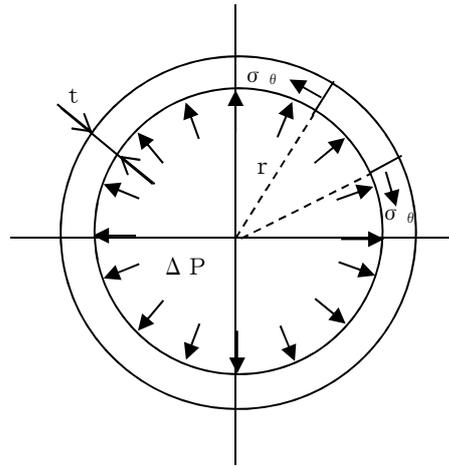


図3-17 弁箱モデル図

ロ. 計算方法

計算式においては機械工学便覧及び「軽構造の理論とその応用（日本科学技術連盟(1966)）」に記載されている式を準用する。

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

(b) 弁体

イ. 計算モデル

弁体は円板であるため、等分布荷重が作用する周辺支持円板とみなし、計算を行う。評価モデルを図 3-18 に示す。

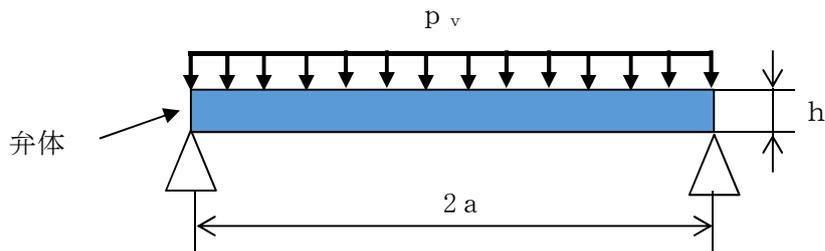


図 3-18 弁体の評価モデル

ロ. 計算方法

弁体に作用する曲げ応力の計算方法を以下に示す。

設計竜巻の気圧低下により弁体を受ける応力  $P_1$  及び自重により弁体を受ける応力  $P_2$  は次による。

$$P_1 = \Delta P$$

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

ここで

$$A_v = \frac{\pi}{4} (2a)^2$$

弁体に受ける応力  $p_v$  は次による。

$$p_v = P_1 + P_2$$

弁体に対する曲げ応力は次による。

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

(c) 弁棒

イ. 計算モデル

弁体を受ける等分布荷重を支持する弁棒断面について、計算を行う。評価モデルを図 3-19 に示す。

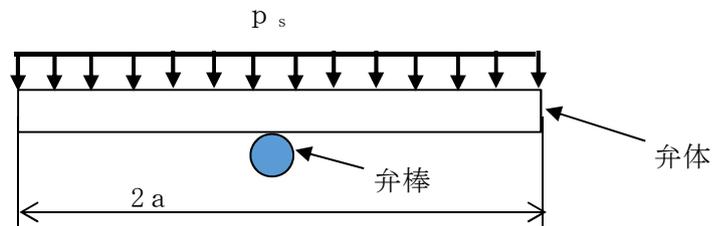


図 3-19 弁棒の評価モデル

ロ. 計算方法

弁棒に作用するせん断応力の計算方法を以下に示す。

設計竜巻の気圧低下により弁棒に受ける荷重  $F_1$  及び弁体及び弁棒自重により弁棒に受ける荷重  $F_2$  は次による。

$$F_1 = \Delta P \cdot \frac{\pi}{4} (2a)^2$$

$$F_2 = (m_v + m_s) \cdot g$$

弁棒に受ける荷重  $p_s$  は次による。

$$p_s = F_1 + F_2$$

弁棒に対するせん断応力は次による。

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

ここで

$$A_s = \frac{\pi}{4} d^2$$

d. ファンの評価方法

ファンの強度評価は、V-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」にて設定しているファンの評価式を用いる。

(a) 中央制御室換気系フィルタ系ファン

イ. 計算モデル

ファンは両端を補強部材で支持された円筒の梁とみなし、計算を行う。ファンケーシングモデル図を図3-20に示す。

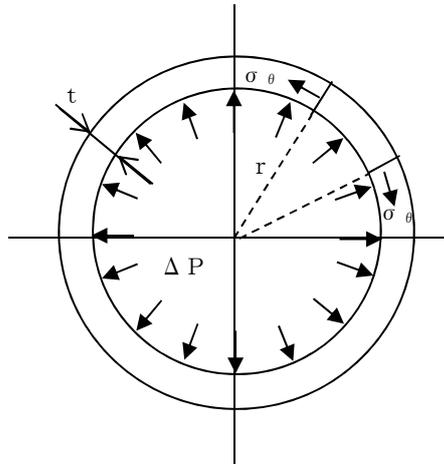


図3-20 ファンケーシングモデル図

ロ. 計算方法

計算式においては機械工学便覧及び「軽構造の理論とその応用（日本科学技術連盟(1966)）」に記載されている式を準用する。

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

(b) ディーゼル発電機室ルーフベントファン

イ. 計算モデル

ファンの計算モデルは円筒形の1質点モデルとし、全高の1/2の位置に複合荷重が作用することとする。ファンモデル図を図3-21に示す。

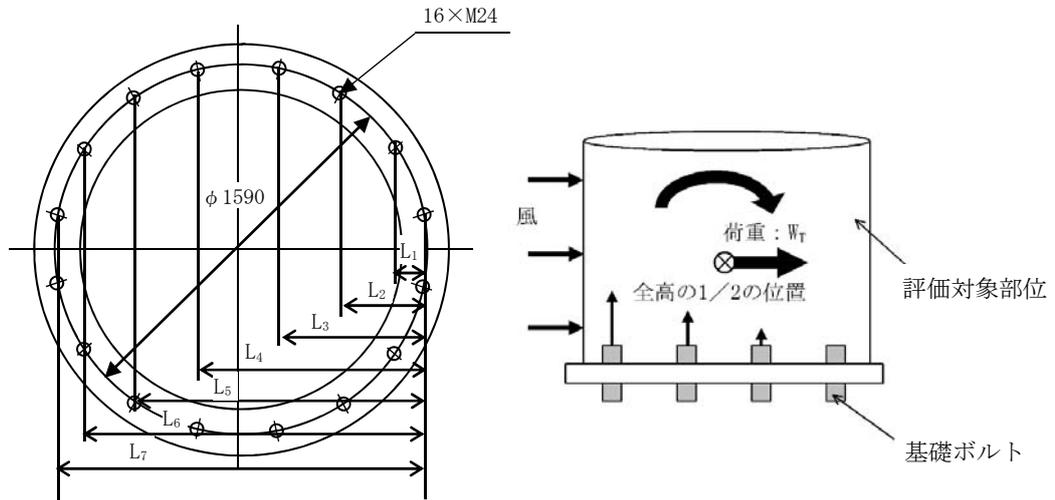


図 3-21 ファンモデル図

ロ. 計算方法

(イ) 引張応力

$$M = 2 \sum_{i=1}^n F_i \cdot L_i \quad \dots \quad (3.1)$$

$$\frac{F_i}{L_i} = \text{一定} \quad \dots \quad (3.2)$$

(3.1) (3.2) 式より,

$$F_n = \frac{M}{2 \sum_{i=1}^n L_i} L_n$$

ここで

$$M = W_w \cdot h - m \cdot g \cdot \frac{L_n}{2}$$

基礎ボルトの生じる引張応力  $\sigma_b$  は次式より求める。

$$\sigma_b = \frac{F_n}{A_b}$$

(ロ) せん断応力

基礎ボルトに対するせん断応力は、基礎ボルト全本数で受けるものとして計算する。

- ・ せん断力  
 $Q_b = W_w$
- ・ せん断応力

$$\tau = \frac{Q_b}{A_b \cdot N}$$

e. 冷凍機の評価方法

冷凍機の強度評価は、V-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」にて設定している冷凍機の評価式を用いる。

(a) 計算モデル

冷凍機の計算モデルは立方体の1質点モデルとし、全高の1/2の位置に複合荷重が作用することとする。冷凍機モデル図を図3-22に示す。

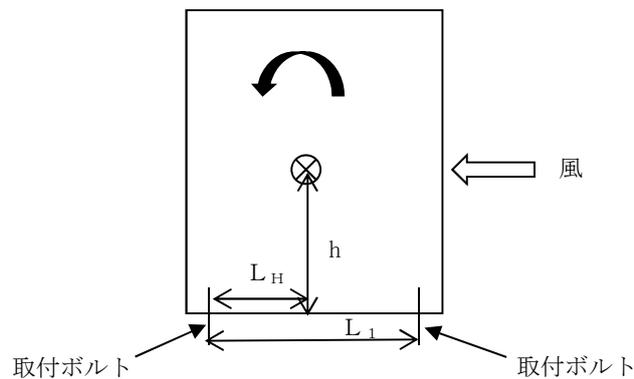


図 3-22 冷凍機モデル図

(b) 計算方法

イ. 引張応力

基礎ボルトに対する引張力は最も厳しい条件として、図 3-16 で基礎ボルトを支点とする転倒を考え、これを片側の基礎ボルトで受けるものとして計算する。

(イ) 引張力

$$F_b = \frac{W_w \cdot h - m \cdot g \cdot L_H}{n_f \cdot L_1}$$

(ロ) 引張応力

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_b}$$

ロ. せん断応力

基礎ボルトに対するせん断応力は、基礎ボルト全本数で受けるものとして計算する。

・ せん断力

$$Q_b = W_w$$

・ せん断応力

$$\tau = \frac{Q_b}{A_b \cdot N}$$

## 4. 評価条件

## (1) 角ダクト

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表4-1及び表4-2に示す。

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り、その発生応力比が最も厳しくなる系統の角ダクトについて記載する。

表 4-1 許容応力計算に用いる条件

材料	温度条件 (°C)	$S_y$ (MPa)
SUS304	40	205

表 4-2 評価条件

系統	ダクト種別
中央制御室換気系	SUS

$\Delta P$ (N/m <sup>2</sup> )	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	$\nu$ (-)
$8.9 \times 10^3$	9.80665	0.3

a (mm)	b (mm)	t (mm)	c (mm)	L (mm)
3200	2000	2.0	1830	1830

$\mu$ (kg/m)	$g D_p$ (N/m <sup>2</sup> )	材質	最高使用温度 (°C)	E (MPa)
165.1	155.5	SUS304	40	193800

## (2) 丸ダクト

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表4-3に示す。丸ダクトにおいて、気圧差による発生応力が最も厳しくなるのは周方向応力であるため、その発生応力比が最も厳しくなる系統の丸ダクトについて記載する。

表 4-3 評価条件

系統		ダクト種別	
中央制御室換気系		SUS	
$\Delta P$ (N/m <sup>2</sup> )	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	$\nu$ (-)	
$8.9 \times 10^3$	9.80665	0.3	
ダクトサイズ (mm)	$c$ (mm)	$L$ (mm)	
$\phi 450 \times 0.8$	960	3000	
$\mu$ (kg/m)	材質	最高使用温度 (°C)	$E$ (MPa)
31.3	SUS304	40	193800

(3) 隔離弁の評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表4-4～表4-7に示す。

表 4-4 許容応力計算に用いる条件

評価対象施設		評価対象 部位	材質	温度条件 (°C)	$S_y$ (MPa)
原子炉建屋換気系隔離弁	SB2-1A, 1B, 1C, 1D, 2A, 2B, 2C, 2D	弁箱	SS400	40	245
		弁体	SS400	40	235
		弁棒	SUS420J2	40	225
	SB2-11A, 11B	弁箱	SCPH2	40	245
		弁体	SCPH2	40	245
		弁棒	SUS403	40	390
中央制御室換気系隔離弁	SB2-18A, 18B, 19A, 19B, 20A, 20B	弁箱	SCPH2	40	245
		弁体	SCS13	40	185
		弁棒	SUS420J2	40	225

表 4-5 評価条件（原子炉建屋換気系隔離弁（SB2-1A, 1B, 1C, 1D, 2A, 2B, 2C, 2D））

$\Delta P$ (N/m <sup>2</sup> )	r (mm)	t (mm)	a (mm)	m <sub>v</sub> (kg)
$8.9 \times 10^3$	1150	12	1133	1370

m <sub>s</sub> (kg)	g (m/s <sup>2</sup> )	h (mm)	d (mm)
315	9.80665	32	150

表 4-6 評価条件（原子炉建屋換気系隔離弁（SB2-11A, 11B））

$\Delta P$ (N/m <sup>2</sup> )	r (mm)	t (mm)	a (mm)	m <sub>v</sub> (kg)
$8.9 \times 10^3$	241	28	217	35

m <sub>s</sub> (kg)	g (m/s <sup>2</sup> )	h (mm)	d (mm)
10	9.80665	30	42

表 4-7 評価条件（中央制御室換気系隔離弁（SB2-18A, 18B, 19A, 19B, 20A, 20B））

$\Delta P$ (N/m <sup>2</sup> )	r (mm)	t (mm)	a (mm)	m <sub>v</sub> (kg)
$8.9 \times 10^3$	222.5	25	215	53

m <sub>s</sub> (kg)	g (m/s <sup>2</sup> )	h (mm)	d (mm)
10	9.80665	10	58

(4) ファンの評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表4-8～表4-11に示す。

表 4-8 許容応力計算に用いる条件（中央制御室換気系フィルタ系ファン）

評価対象部位	材料	温度条件 (°C)	S <sub>y</sub> (MPa)	S <sub>u</sub> (MPa)
ケーシング	SS400	40	245	400

表 4-9 許容応力計算に用いる条件（ディーゼル発電機室ルーフベントファン）

評価対象部位	材料	温度条件 (°C)	$S_y$ (MPa)	$S_u$ (MPa)	F (MPa)	$1.5 f_t$ (MPa)	$1.5 f_s$ (MPa)
基礎ボルト	SS400	50*	231	394	231	173	133

注記 \*：周囲環境温度

表 4-10 評価条件（中央制御室換気系フィルタ系ファン）

$\Delta P$ (N/m <sup>2</sup> )	r (mm)	t (mm)
$8.9 \times 10^3$	590.5	4.5

表 4-11 評価条件（ディーゼル発電機室ルーフベントファン基礎ボルト）

q (N/m <sup>2</sup> )	G (-)	$W_M$ (N)
$6.1 \times 10^3$	1.0	0

$L_1$ (mm)	$L_2$ (mm)	$L_3$ (mm)	$L_4$ (mm)	$L_5$ (mm)	$L_6$ (mm)
118.7	338.0	624.6	934.8	1221.4	1440.7

$L_7$ (mm)	C (-)	g (m/s <sup>2</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	m (kg)	ボルト サイズ
1559.4	1.2	9.80665	1.980	940	M24

N (-)	$A_b$ (mm <sup>2</sup> )	h (mm)
16	452.4	600

(5) 冷凍機の評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表4-12, 表4-13に示す。

表 4-12 許容応力計算に用いる条件

評価対象部位	材料	温度条件 (°C)	$S_y$ (MPa)	$S_u$ (MPa)	F (MPa)	$1.5 f_t$ (MPa)	$1.5 f_s$ (MPa)
取付ボルト	SS400	50*	231	394	231	173	133

注記 \*：周囲環境温度

表 4-13 評価条件

q (N/m <sup>2</sup> )	G (-)	W <sub>M</sub> (N)
6.1 × 10 <sup>3</sup>	1	0

L <sub>H</sub> (mm)	L <sub>1</sub> (mm)	C (-)	g (m/s <sup>2</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	m (kg)
910.0	1890	2.4	9.80665	11.48	4680

ボルト サイズ	n <sub>f</sub> (-)	N (-)	A <sub>b</sub> (mm <sup>2</sup> )	h (mm)
M20	4	8	314.2	1125

## 5. 強度評価結果

## (1) 衝突評価結果

竜巻発生時の砂利の貫通限界厚さを表 5-1 に示す。

表 5-1 砂利の貫通限界厚さ

飛来物	貫通限界厚さ T (mm)	
	水平方向	鉛直方向
砂利	0.58	0.97

砂利の貫通限界厚さ(0.97 mm)と屋外に設置する換気空調設備の外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さとの比較を表5-2に示す。

砂利の貫通限界厚さは、屋外に設置する換気空調設備の外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ未満である。

表 5-2 防護対象施設の衝突評価結果 (砂利)

防護対象施設	外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ (mm)	貫通限界厚さ T (mm)	結果
ディーゼル発電機室 ルーフベントファン	8.03	0.97	貫通しない
中央制御室換気系冷 凍機	0.03	0.97	貫通しない

## (2) 構造強度評価結果

## a. 角ダクト

角ダクト鋼板 (本体) の強度評価結果を表5-3に示す。

ダクト鋼板に発生する応力は許容応力以下であり、また、自重 (長期) + 設計竜巻による内外差圧 (短期) による面内荷重による発生モーメントは許容応力以下である。

表 5-3 強度評価結果

系統	ダクト種別	ダクトサイズ(mm)
中央制御室換気系	鋼板	3200×2000×2.0

面外荷重		外圧による面内荷重		長期荷重（自重）＋短期荷重 （設計竜巻による内外差圧に よる面内荷重）	
発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	発生値 (kN・mm)	許容値 (kN・mm)
125	205	61	205	678	81597

b. 丸ダクト

丸ダクト鋼板（本体）の強度評価結果を表5-4に示す。

ダクト鋼板に発生する周方向応力は許容応力以下であり、また、長期荷重（自重）＋短期荷重（設計竜巻による内外差圧）により発生する応力は許容応力以下である。

表 5-4 強度評価結果

系統	ダクト種別	ダクトサイズ(mm)
中央制御室換気系	SUS	φ 450×0.8

気圧差により生じる周方向応力(MPa)		長期荷重（自重）＋短期荷重 （設計竜巻による内外差圧）による制限値	
発生応力	許容応力	発生値	許容値
3	9	0.3	0.9

c. 隔離弁

隔離弁の強度評価結果を表5-5～表5-7に示す。

弁箱、弁体、弁棒に発生する応力は許容応力以下である。

表 5-5 強度評価結果（弁箱）

評価対象施設		弁箱に発生する 周方向応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
原子炉建屋換気系隔離弁	SB2-1A, 1B, 1C, 1D, 2A, 2B, 2C, 2D	1	245
	SB2-11A, 11B	1	245
中央制御室換気系隔離弁	SB2-18A, 18B, 19A, 19B, 20A, 20B	1	245

表 5-6 強度評価結果（弁体）

評価対象施設		弁体に発生する 曲げ応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
原子炉建屋換気系隔離弁	SB2-1A, 1B, 1C, 1D, 2A, 2B, 2C, 2D	20	235
	SB2-11A, 11B	1	245
中央制御室換気系隔離弁	SB2-18A, 18B, 19A, 19B, 20A, 20B	8	185

表 5-7 強度評価結果（弁棒）

評価対象施設		弁棒に発生する せん断応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
原子炉建屋換気系隔離弁	SB2-1A, 1B, 1C, 1D, 2A, 2B, 2C, 2D	3	225
	SB2-11A, 11B	2	390
中央制御室換気系隔離弁	SB2-18A, 18B, 19A, 19B, 20A, 20B	1	225

## d. ファン

ファンの強度評価結果を表5-8、表5-9に示す。

ケーシングに発生する周方向応力は、許容応力以下である。

基礎ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-8 強度評価結果（ケーシング）

評価対象施設	ケーシングに発生する 周方向応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
中央制御室換気系フィルタ系ファン	2	240

表 5-9 強度評価結果（基礎ボルト）

評価対象施設	応力分類	基礎ボルトに発生する応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
ディーゼル発電機室ルー フベントファン	引張	1	173
	せん断	3	133
	組合せ	1	173

## e. 冷凍機

冷凍機の竜巻発生時の強度評価結果を表5-10に示す。

取付ボルトに発生する周応力は、許容応力以下である。

表 5-10 強度評価結果（取付ボルト）

評価対象施設	応力分類	基礎ボルトに発生する応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
中央制御室換気系冷凍機	引張	63	173
	せん断	67	133
	組合せ	63	135



V-3-別添 1-1-10-1 建屋及び構造物の強度計算書

## 目次

1. 概要.....	2
2. 基本方針.....	2
2.1 位置.....	2
2.2 構造概要.....	4
2.3 評価方針.....	9
2.4 適用規格.....	12
3. 強度評価方法.....	13
3.1 記号の定義.....	13
3.2 評価対象部位.....	13
3.3 荷重及び荷重の組合せ.....	13
3.4 許容限界.....	15
3.5 評価方法.....	19
4. 評価条件.....	22
4.1 サービス建屋.....	22
4.2 海水ポンプエリア防護壁.....	24
4.3 鋼製防護壁.....	25
5. 強度評価結果.....	27
5.1 サービス建屋.....	27
5.2 海水ポンプエリア防護壁.....	27
5.3 鋼製防護壁.....	27

## 1. 概要

本資料は、V-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」に示すとおり、波及的影響を及ぼす可能性がある施設であるサービス建屋、海水ポンプエリア防護壁及び鋼製防護壁が、設計竜巻による風圧力による荷重、気圧差による荷重及び設計飛来物（以下「飛来物」という。）による衝撃荷重並びにその他の荷重に対し、竜巻時及び竜巻通過後においても、竜巻より防護すべき施設の安全機能を損なわないように、隣接する竜巻より防護すべき施設を内包する原子炉建屋、タービン建屋並びに防護対象施設である残留熱除去系海水系ポンプ等に対して、機械的な波及的影響を及ぼさないことを確認するものである。

## 2. 基本方針

建屋及び構造物について、V-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「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、サービス建屋、海水ポンプエリア防護壁及び鋼製防護壁の「2.1 位置」、「2.2 構造概要」、「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

### 2.1 位置

サービス建屋は、V-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「3.2 機能維持の方針」に示す配置のとおり、原子炉建屋及びタービン建屋に隣接する建屋である。

海水ポンプエリア防護壁は、V-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「3.2 機能維持の方針」に示す配置のとおり、残留熱除去系海水系ポンプ等に隣接する構造物である。

鋼製防護壁は、V-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「3.2 機能維持の方針」に示す配置のとおり、海水ポンプ室に隣接する構造物である。

建屋及び構造物の配置図を図2-1及び図2-2に示す。

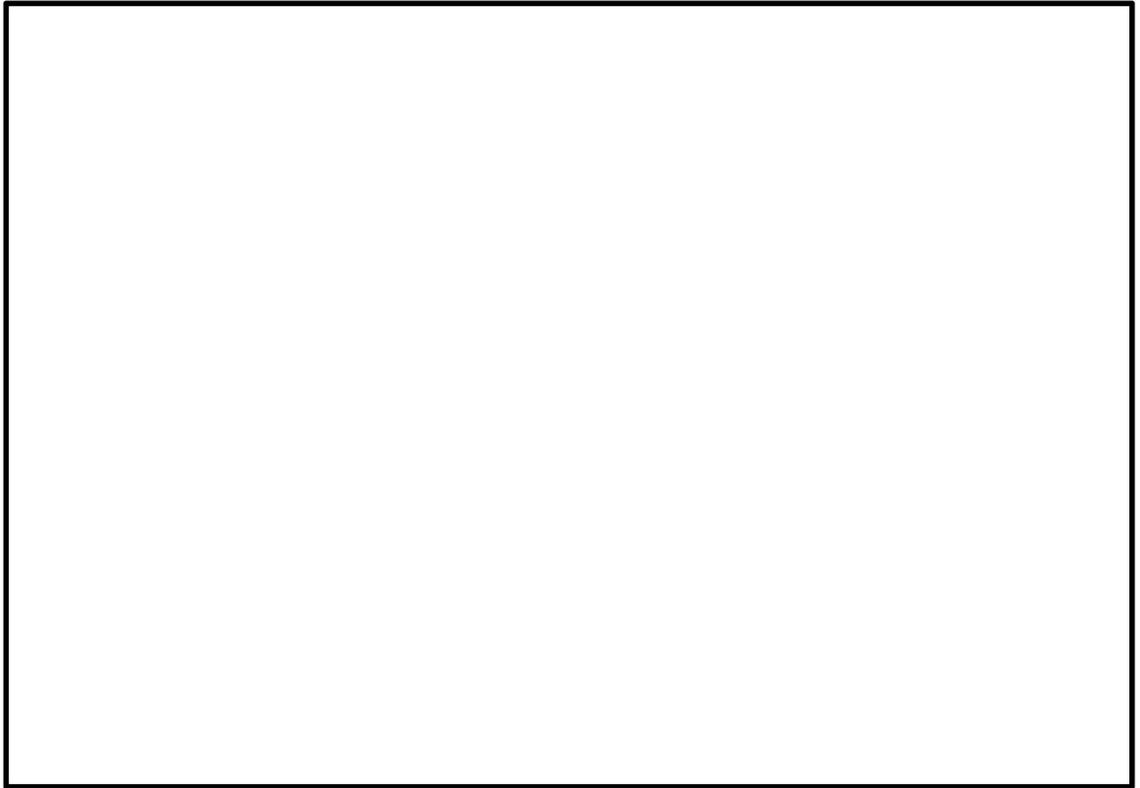


図 2-1 サービス建屋及び鋼製防護壁の配置図

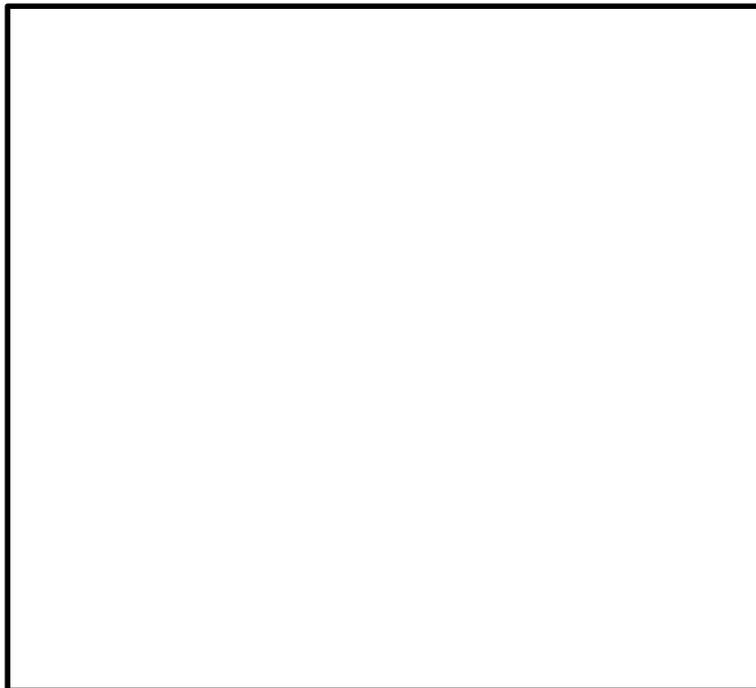


図 2-2 海水ポンプエリア防護壁の配置図

## 2.2 構造概要

### (1) サービス建屋

サービス建屋並びにサービス建屋から波及的影響を受ける恐れがある原子炉建屋及びタービン建屋は、V-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「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画とする。

サービス建屋は、図2-3に示すとおり、発電所建設時に設置した部分（以下「既設部」という。）及び、その後に増設した部分（以下「増設部」という。）で構成され、既設部及び増設部並びに原子炉建屋は、それぞれ構造的に独立した建物である。波及的影響を考慮する本評価においては、原子炉建屋に隣接する既設部を対象とする。（以下特記の無い限り「サービス建屋」という場合は、既設部を指す。）

サービス建屋、原子炉建屋及びタービン建屋は、鉄筋コンクリート造の躯体で構成する。

サービス建屋の断面図を図2-4に示す。

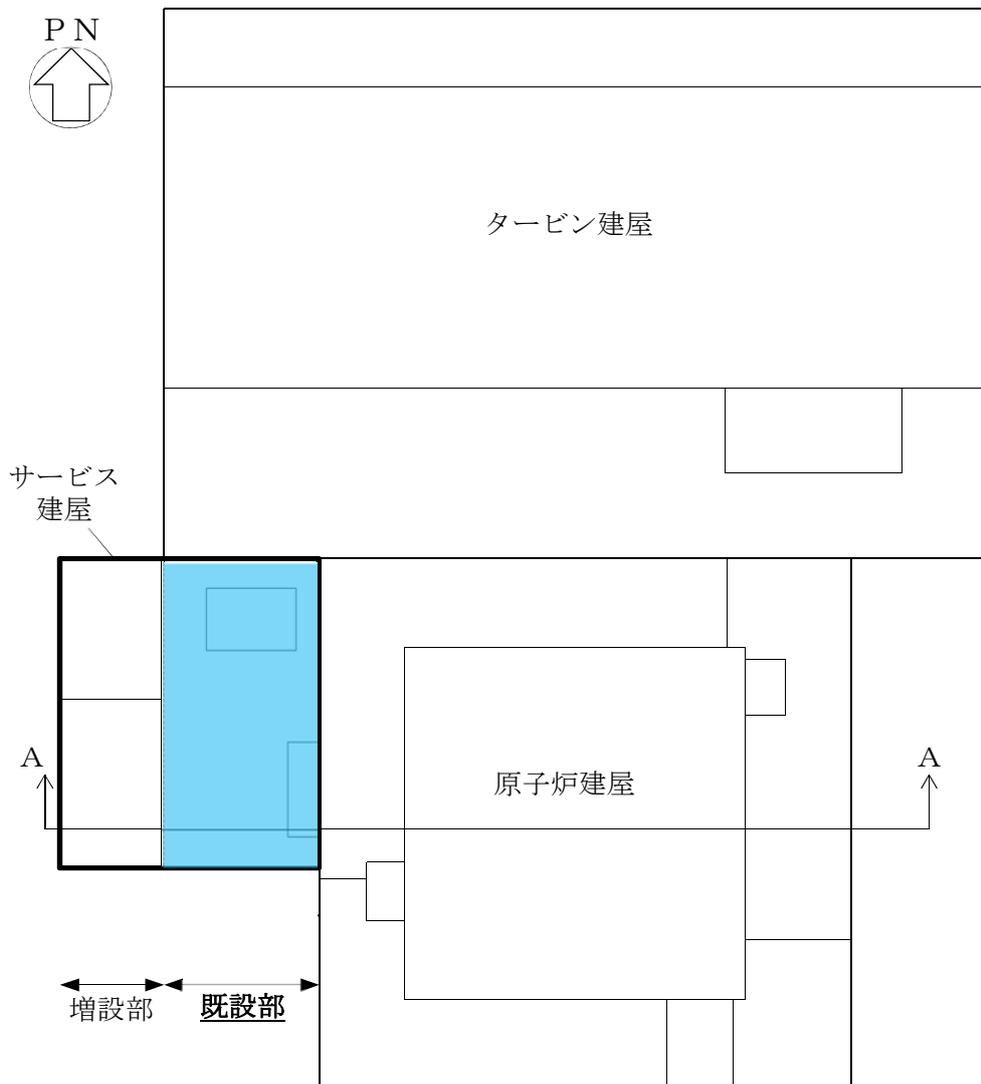


図2-3 サービス建屋、原子炉建屋及びサービス建屋の配置

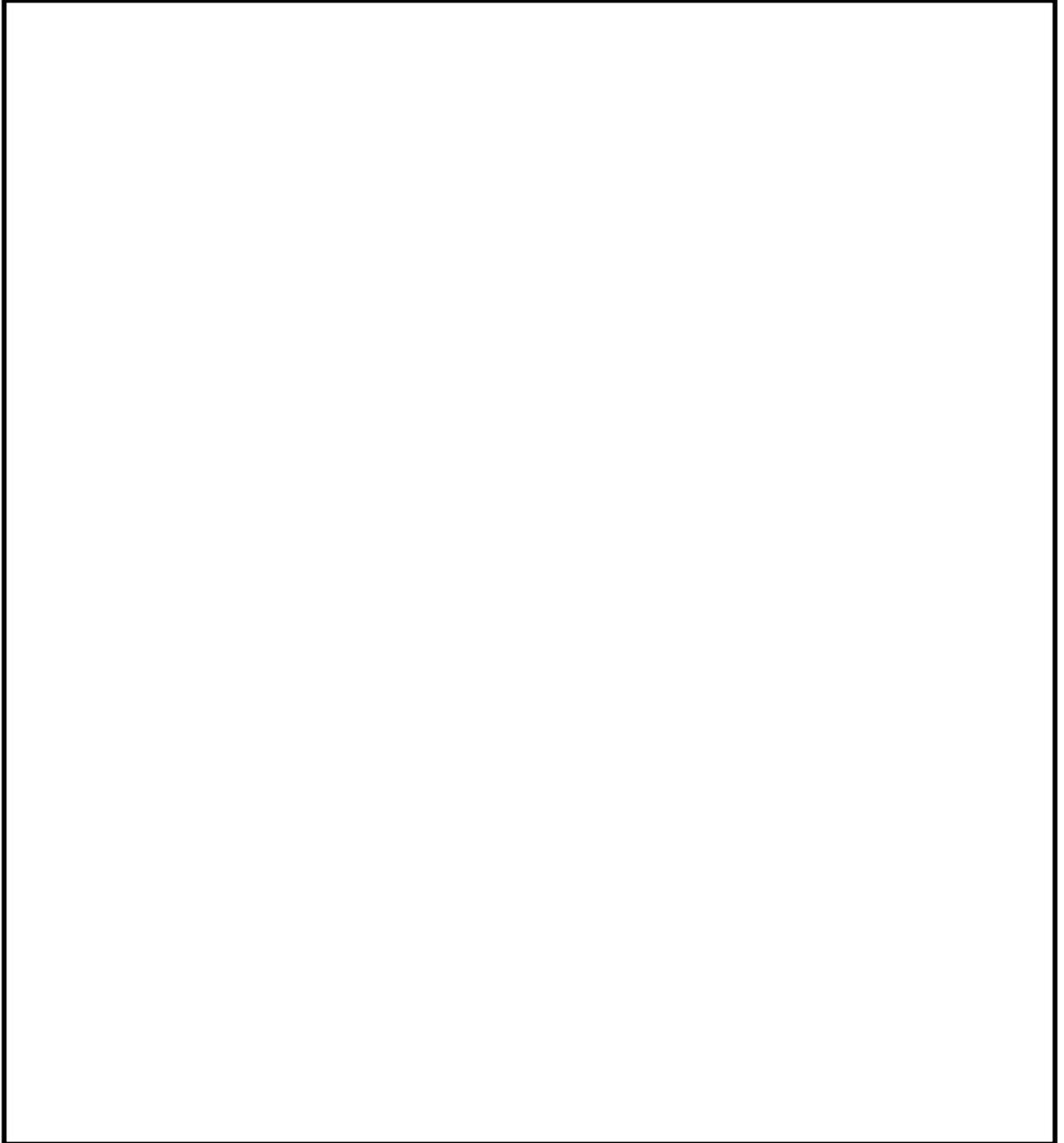


図2-4 サービス建屋断面図

(2) 海水ポンプエリア防護壁

海水ポンプエリア防護壁は、V-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「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画とする。

海水ポンプエリア防護壁は、鉄筋コンクリート壁並びに鉄骨架構及び鋼板で構成され、また、竜巻飛来物に対する防護ネット及び防護鋼板を取り付ける架構としての役割も有する。海水ポンプエリア防護壁の概略構造図を図 2-5 に示す。

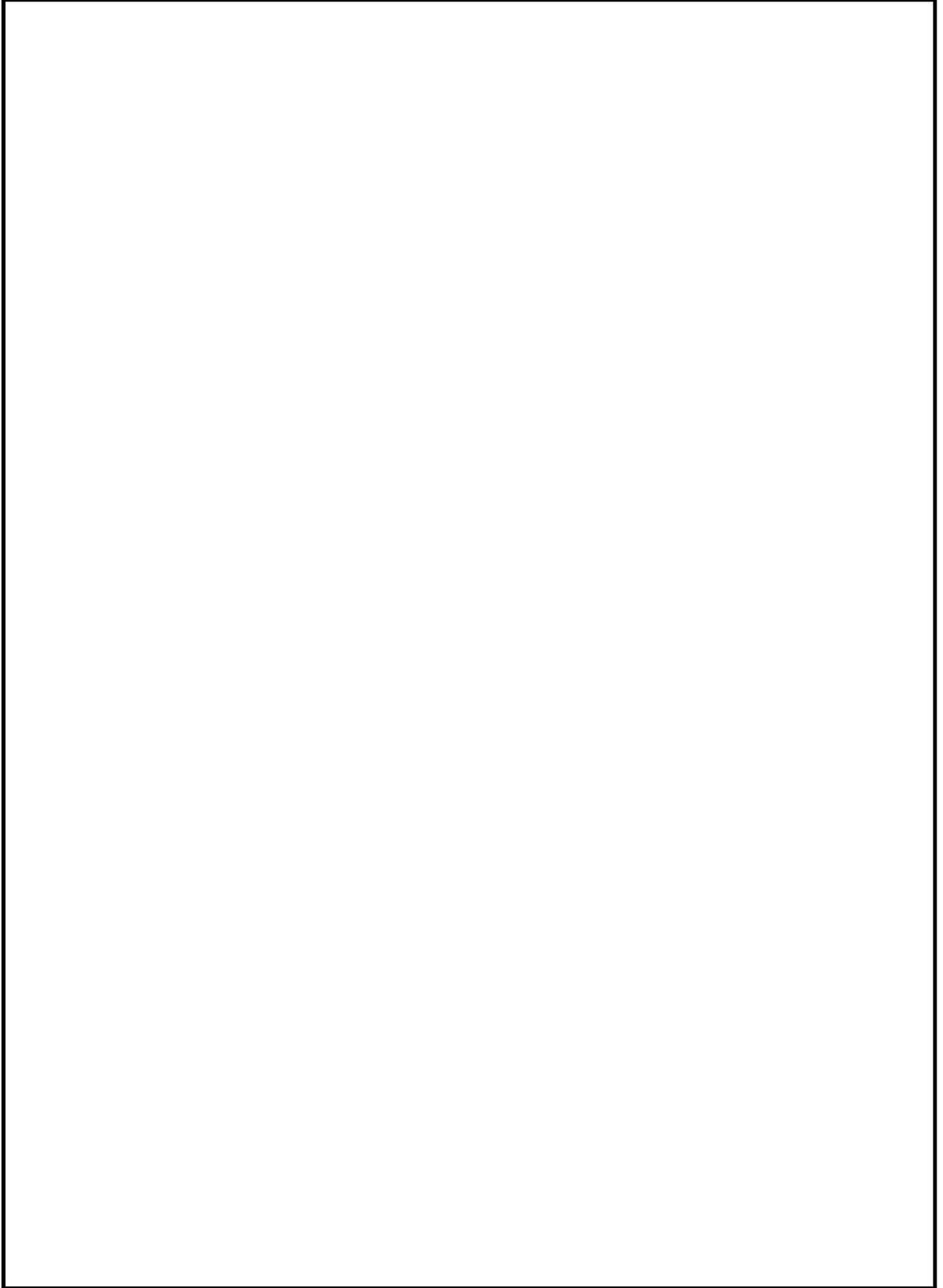


図 2-5 海水ポンプエリア防護壁概略構造図(1/2)

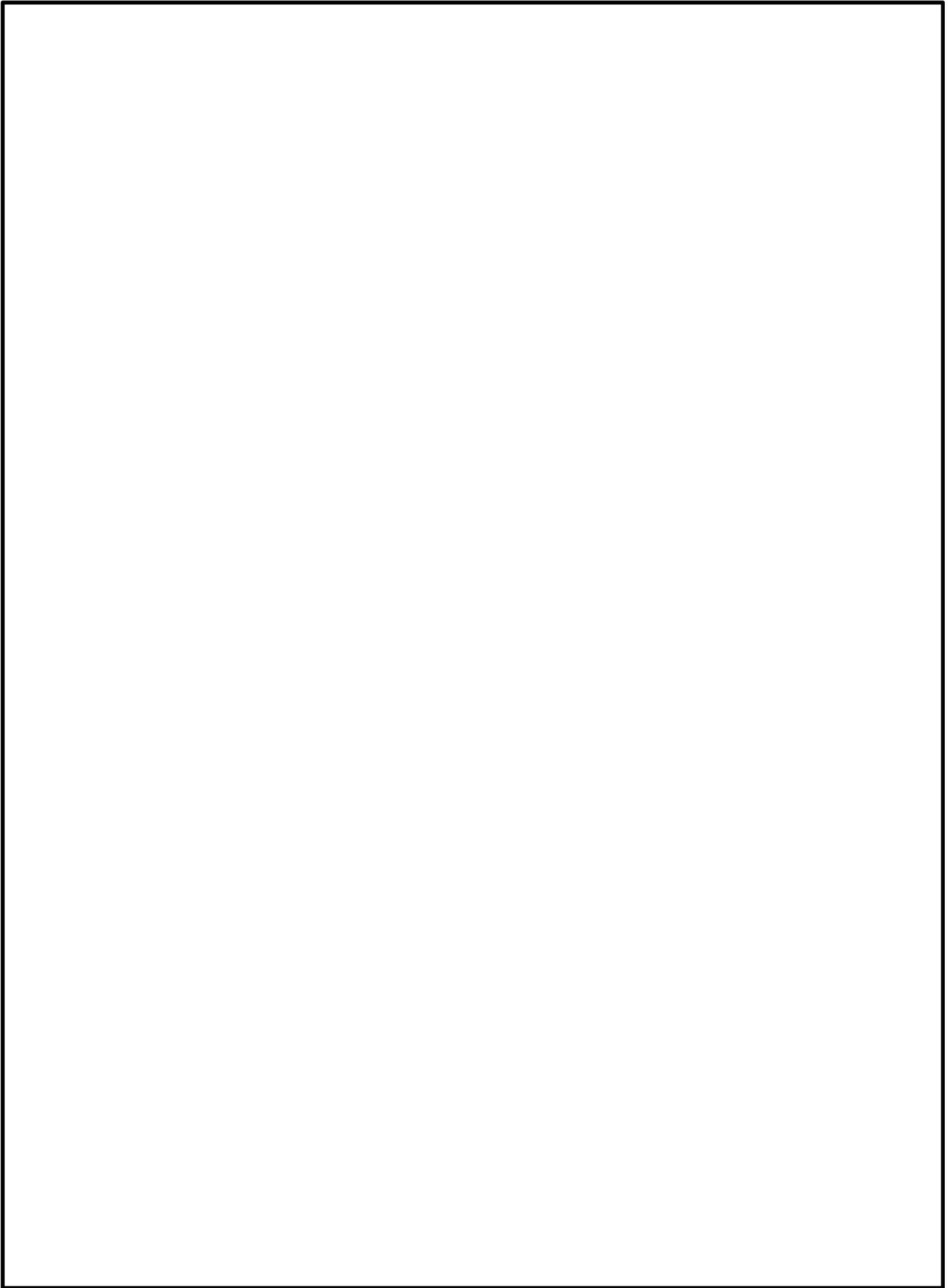


図 2-5 海水ポンプエリア防護壁概略構造図(2/2)

(3) 鋼製防護壁

鋼製防護壁は、V-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「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画とする。

鋼製防護壁は防潮堤の一部であり、鉛直及び水平方向に配置された鋼板で構成される鋼殻構造で構成され、添接板と高力ボルトを用いた摩擦接合により結合される、分割したブロックの集合体として全体を構成する。鋼製防護壁の概略構造図を図 2-6 に示す。

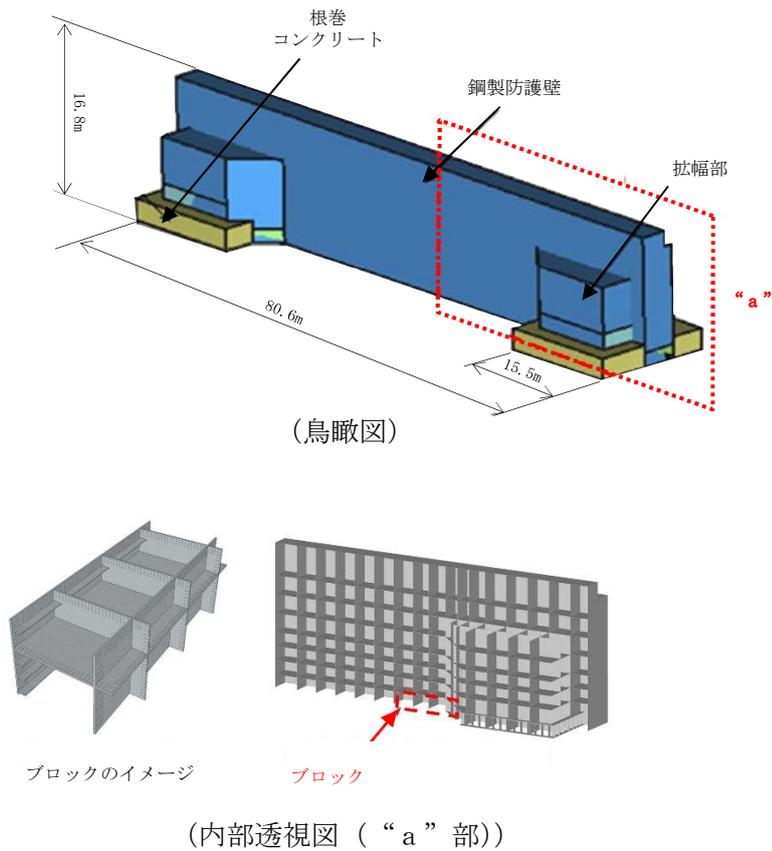


図 2-6 鋼製防護壁概略構造図

## 2.3 評価方針

### (1) サービス建屋

サービス建屋の強度評価は、V-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. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している、荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、竜巻より防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないことを、「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

サービス建屋の強度評価においては、その構造を踏まえ、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を設定する。

具体的には、サービス建屋が隣接する竜巻より防護すべき施設を内包する原子炉建屋及びタービン建屋との接触によって影響を及ぼさないことを確認する「構造強度評価」を行う。

サービス建屋の構造強度評価（以下「変形評価」という。）については、設計荷重に対し、原子炉建屋及びタービン建屋との相対変位を計算及び解析により算出し、接触する変形を生じないことを確認する。

サービス建屋の波及的影響評価フローを図2-7に示す。

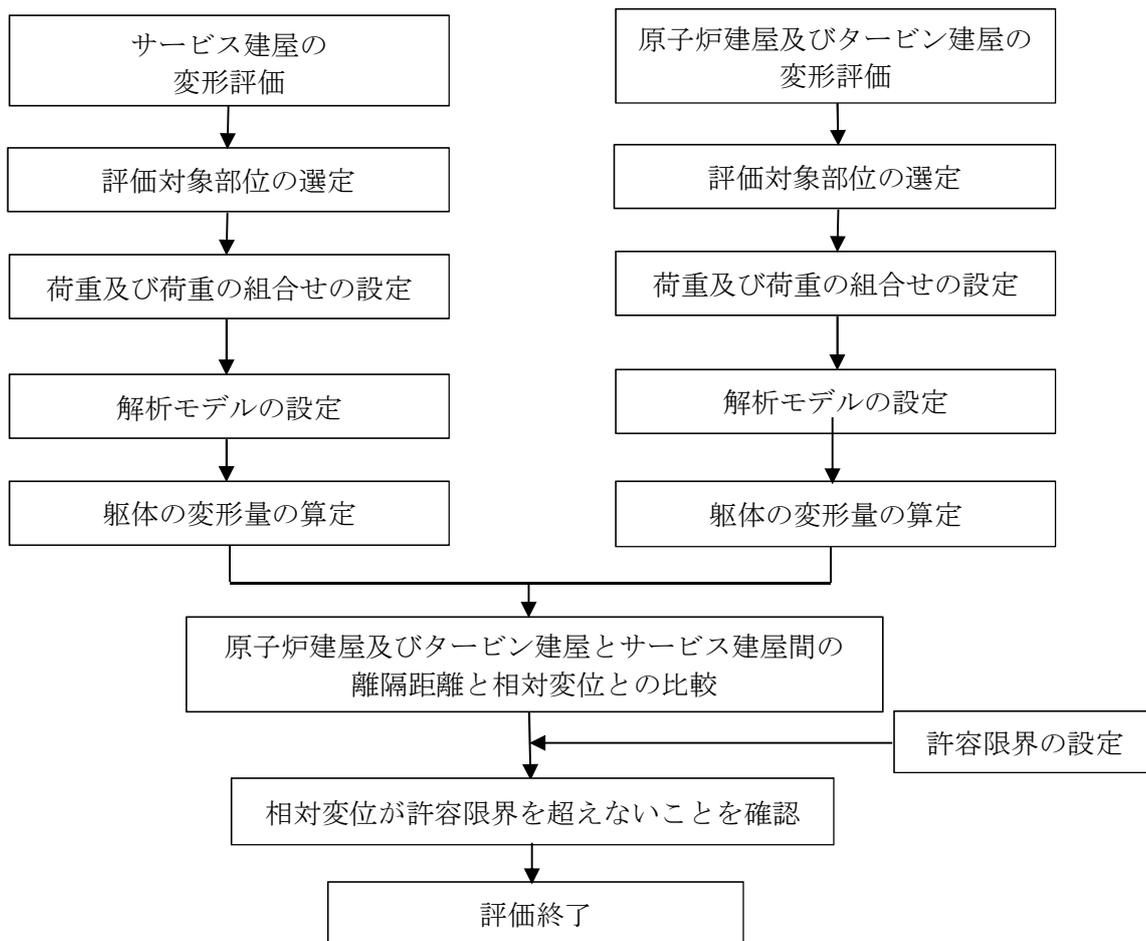


図2-7 サービス建屋の波及的影響評価フロー

## (2) 海水ポンプエリア防護壁

海水ポンプエリア防護壁の強度評価は、V-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. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している、荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、竜巻より防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないことを、「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

海水ポンプエリア防護壁の強度評価においては、その構造を踏まえ、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を設定する。

具体的には、海水ポンプエリア防護壁が隣接する残留熱除去系海水系ポンプ等との接触によって影響を及ぼさないことを確認する「構造強度評価」を行う。

海水ポンプエリア防護壁の構造強度評価（以下「変形評価」という。）については、設計荷重に対し、残留熱除去系海水系ポンプ等に接触する変形を生じないことを確認する。

海水ポンプエリア防護壁の波及的影響評価フローを図2-8に示す。

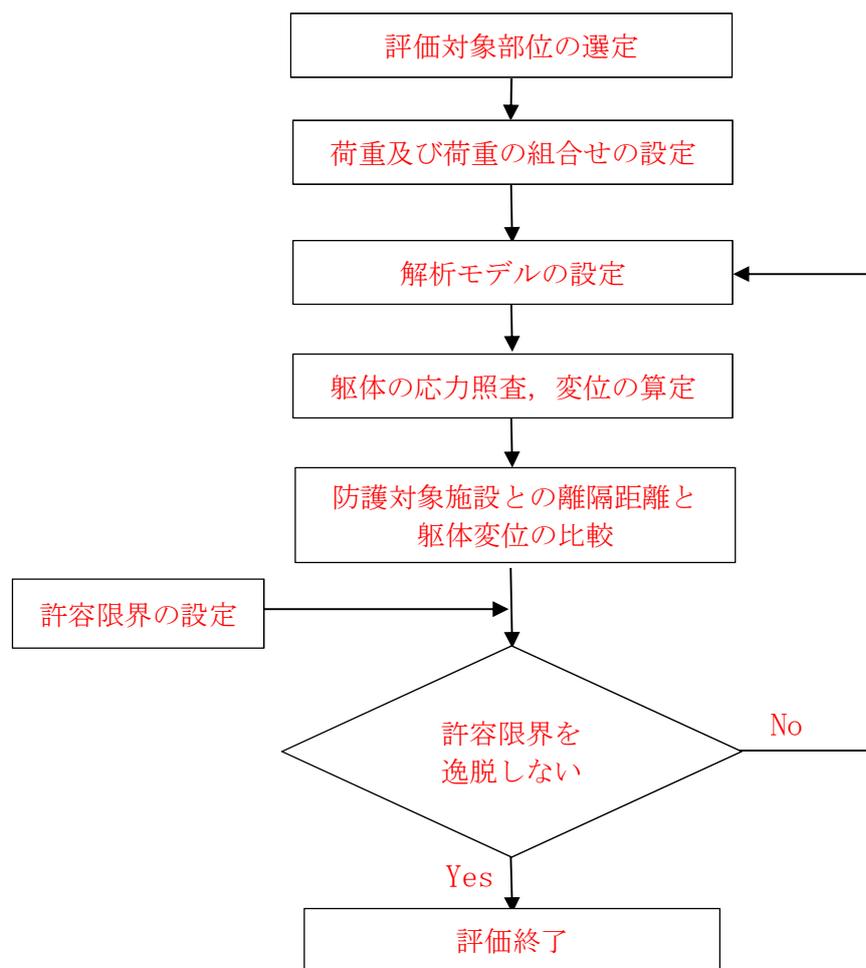


図2-8 海水ポンプエリア防護壁の波及的影響評価フロー

## (3) 鋼製防護壁

鋼製防護壁の強度評価は、V-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. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している、荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、竜巻より防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないことを、「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

鋼製防護壁の強度評価においては、その構造を踏まえ、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を設定する。

具体的には、鋼製防護壁が隣接する海水ポンプ室内の竜巻より防護すべき施設に影響を及ぼさないことを確認する「構造強度評価」を行う。

鋼製防護壁の構造強度評価については、設計荷重に対し、鋼製防護壁に転倒が生じないことを計算により確認する。評価方法としては、V-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「5.1.2 鋼製構造物(3) 強度評価方法」に示す評価式により算出した設計荷重が、津波による荷重に包絡されることを確認する。

鋼製防護壁の波及的影響評価フローを図2-9に示す。

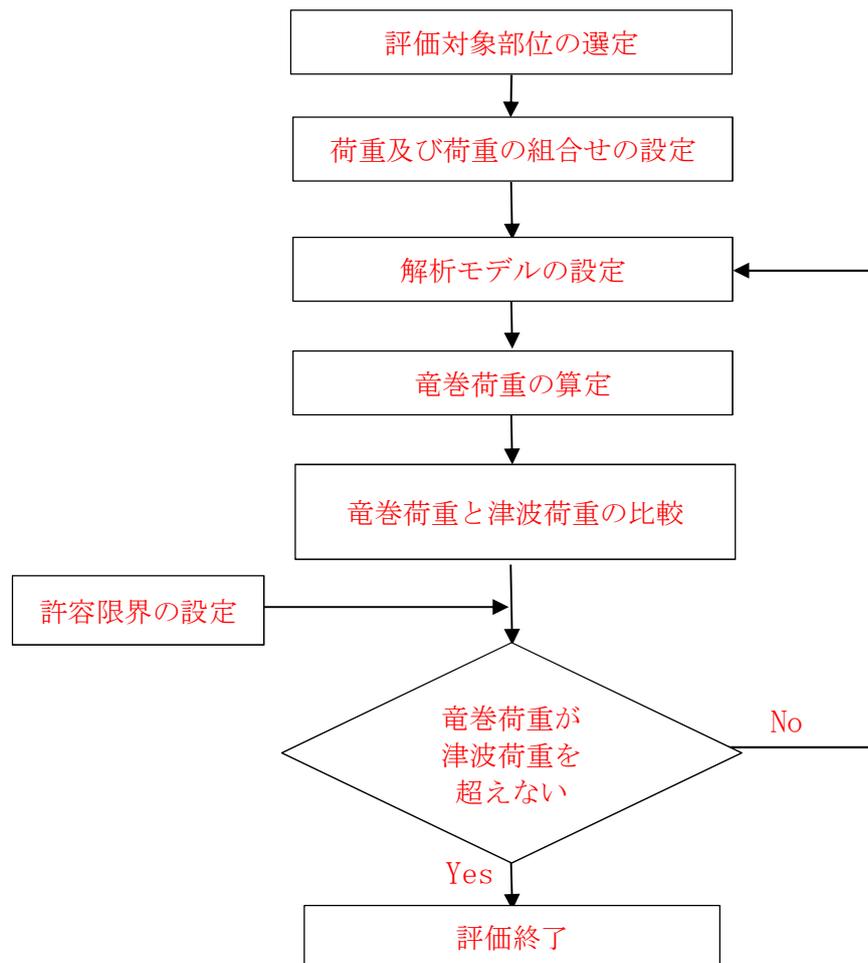


図2-9 鋼製防護壁の波及的影響評価フロー

## 2.4 適用規格

- ・鋼構造設計規準 -許容応力度設計法- ( (社) 日本建築学会, 2005 改定)
- ・建築基準法及び同施行令
- ・建築物荷重指針・同解説 ( (社) 日本建築学会, 2004 改定)
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987」 ( (社) 日本電気協会)
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」 ( (社) 日本電気協会)
- ・鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 ( (社) 日本建築学会, 2010 改定)
- ・鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 -許容応力度設計と保有水平耐力- ( (社) 日本建築学会 2001 年改定)
- ・建築耐震設計における保有耐力と変形性能 ( (社) 日本建築学会, 1990 改定)

### 3. 強度評価方法

#### 3.1 記号の定義

波及的影響に関する強度評価に用いる記号を表3-1に示す。

表 3-1 強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A	m <sup>2</sup>	受圧面積
C	—	風力係数
F <sub>m</sub>	N	飛来物による衝撃荷重
G	—	ガスト影響係数
m	kg	飛来物の質量
ΔP	N/m <sup>2</sup>	単位面積あたりの最大気圧低下量
q	N/m <sup>2</sup>	設計用速度圧
V	m/s	飛来物の衝突速度

#### 3.2 評価対象部位

##### (1) サービス建屋

サービス建屋及の評価対象部位は、V-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「4.2 許容限界」に示す評価対象部位を踏まえて鉄筋コンクリート躯体を設定する。

また、設計荷重に対し、サービス建屋による原子炉建屋及びタービン建屋への波及的影響評価を行うため、鉄筋コンクリート造である原子炉建屋及びタービン建屋の耐震壁を評価対象部位とする。

##### (2) 海水ポンプエリア防護壁

海水ポンプエリア防護壁の評価対象部位は、V-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「4.2 許容限界」に示す評価対象部位を踏まえて鉄筋コンクリート壁並びに鉄骨架構及び鋼板壁を設定する。

##### (3) 鋼製防護壁

鋼製防護壁の評価対象部位は、V-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「4.2 許容限界」に示す評価対象部位を踏まえて上部工（鋼殻構造部）を設定する。

#### 3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組み合わせは、V-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」に示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

(1) 荷重の設定

強度評価に用いる荷重は、以下の荷重を用いる。

a. 風圧力による荷重 ( $W_w$ )

風圧力による荷重 $W_w$ は、下式により算定する。

風力係数 $C$ は、「建築基準法及び同施行令」に基づき設定する。

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

b. 気圧差による荷重 ( $W_p$ )

気圧差による荷重 $W_p$ については、気圧差による荷重が最大となる「閉じた施設」を想定し、下式により算定する。

$$W_p = \Delta P \cdot A$$

c. 飛来物による衝撃荷重 ( $W_M$ )

飛来物による衝撃荷重 $W_M$ については、表3-2に示す飛来物の衝突に伴う荷重としている。

なお、飛来物に対し受分に大きな質量を有する施設に対し、当該施設の全体的な変形挙動の評価をする場合には、相対的に極小と見なせる飛来物により瞬間的に作用する衝撃荷重 $W_M$ の影響は軽微と考えられるため、考慮しないものとする。

表3-2 飛来物の諸元

飛来物	寸法 (m)	質量 (kg)	最大水平速度 (m/s)	最大鉛直速度 (m/s)
鋼製材	4.2×0.3×0.2	135	51	34

d. 常時作用する荷重 ( $F_d$ )

常時作用する荷重 $F_d$ として、自重及び上載荷重を考慮する。

(2) 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せは、V-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」を踏まえて、風圧力による荷重，気圧差による荷重，飛来物による衝撃荷重及び常時作用する荷重を組み合わせる。

荷重の組合せを表3-3に示す。

表3-3 荷重の組合せ

評価対象部位	荷重の組合せ
複合荷重 $W_{T1}$	$W_p + F_d$
複合荷重 $W_{T2}$	$W_w + 1/2W_p + W_M + F_d$

$W_w$ ：風圧力による荷重       $W_p$ ：気圧差による荷重

$W_M$ ：飛来物による衝撃荷重       $F_d$ ：常時作用する荷重

### 3.4 許容限界

#### (1) サービス建屋

サービス建屋の許容限界は、V-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「4.2 許容限界」を踏まえて、評価内容に応じて設定する。

サービス建屋の躯体の変形（原子炉建屋及びタービン建屋に対する相対変位）に対する許容限界は、サービス建屋と原子炉建屋の離隔距離及びサービス建屋とタービン建屋の離隔距離とする。

設定した許容限界を表3-4に、サービス建屋と原子炉建屋及びタービン建屋の境界部の断面図を図3-1及び図3-2に示す。

表3-4 許容限界（サービス建屋）

	評価項目	許容限界
サービス建屋	躯体の変形	原子炉建屋との離隔距離： 50 mm
		タービン建屋との離隔距離： 50 mm

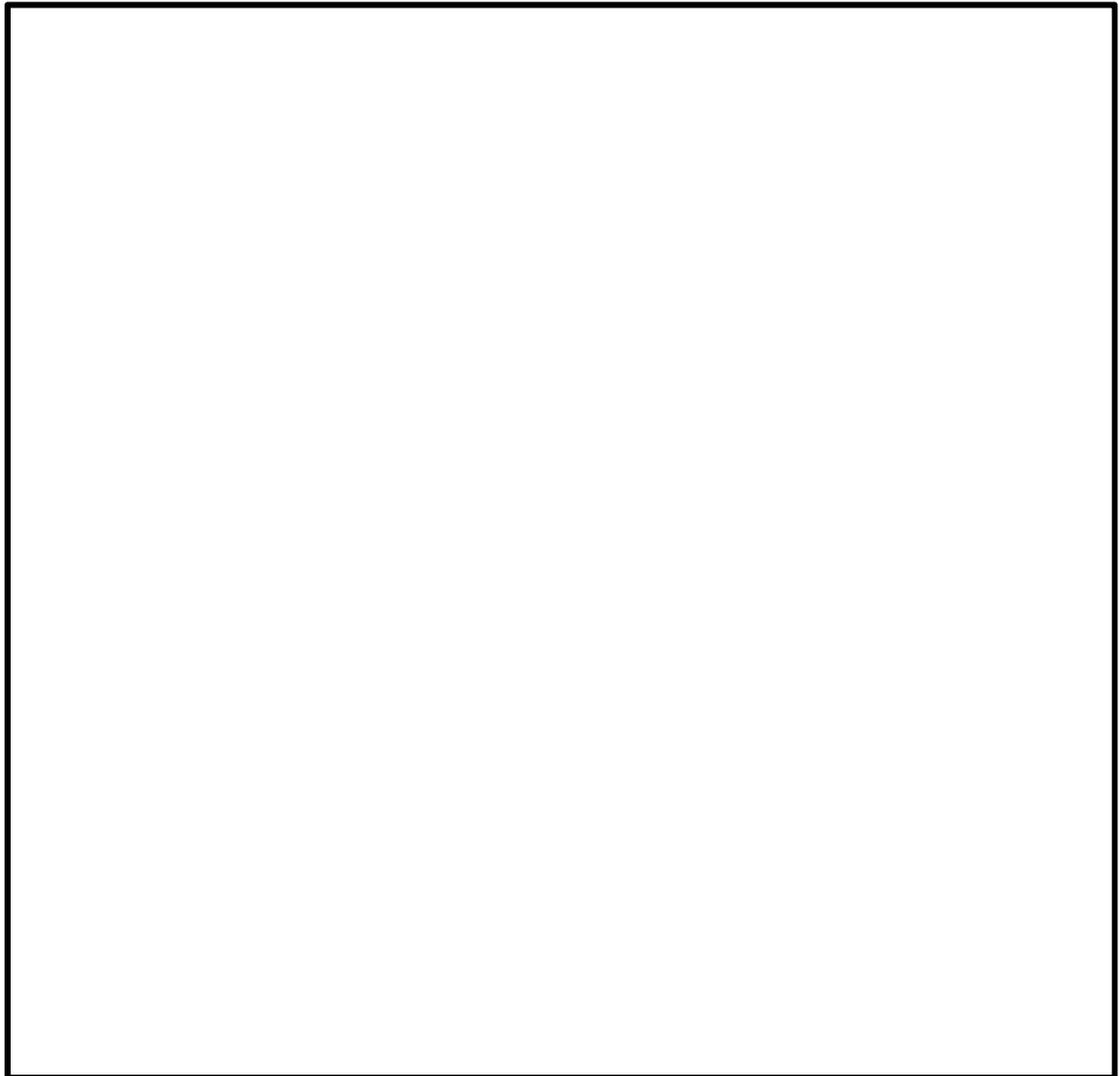


図3-1 サービス建屋と原子炉建屋の境界部断面図

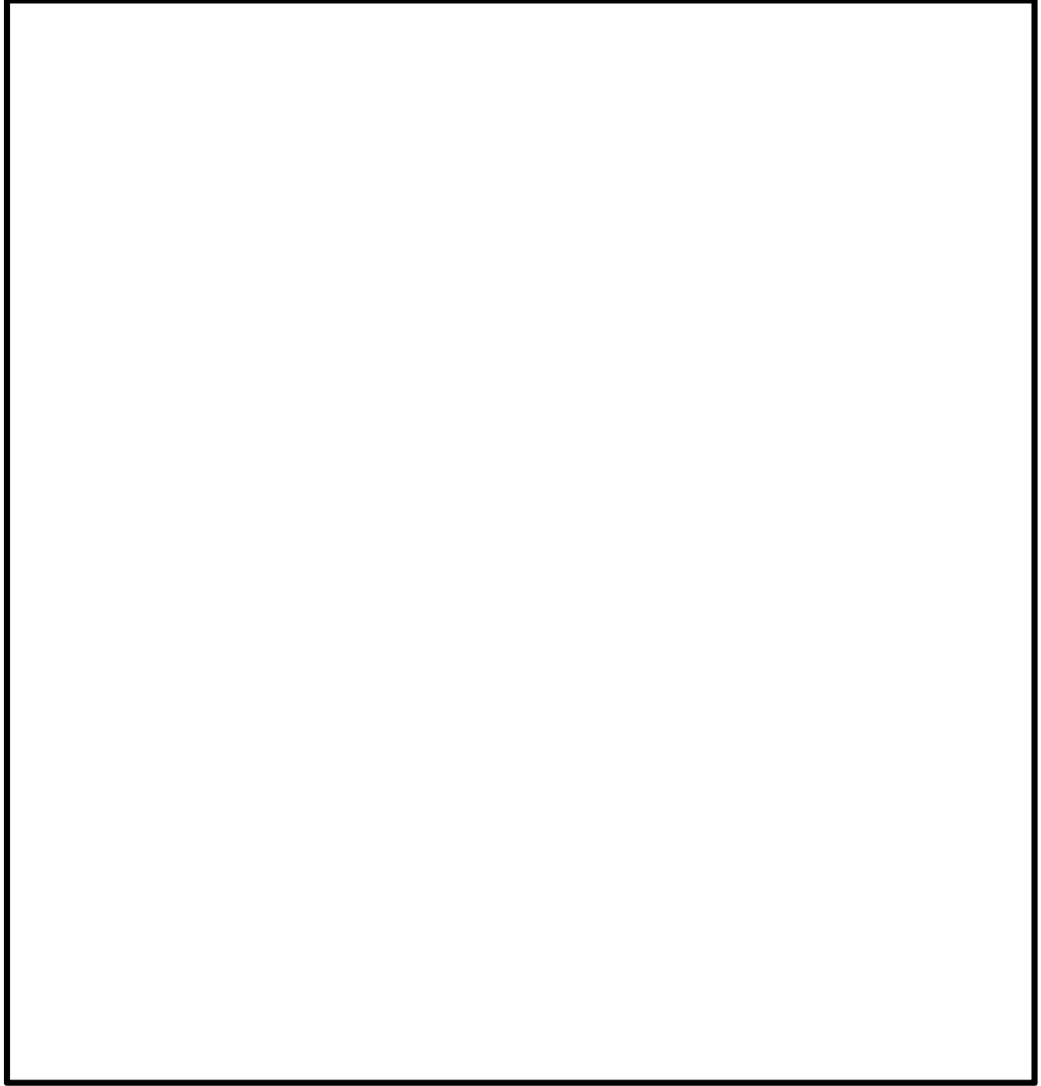


図3-2 サービス建屋とタービン建屋の境界部断面図

(2) 海水ポンプエリア防護壁

海水ポンプエリア防護壁の許容限界は、V-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「4.2 許容限界」を踏まえて、評価内容に応じて設定する。

海水ポンプエリア防護壁の鉄筋コンクリート壁並びに鋼製架構及び鋼板壁の変形に対する許容限界は、海水ポンプエリア防護壁の鉄筋コンクリート壁並びに鋼製架構及び鋼板壁と近接する防護対象施設との最小離隔距離を考慮し設定する。但し、エリア①～⑤を構成する鉄筋コンクリート躯体は、竜巻から防護すべき施設の支持構造物に取り付けられていることを勘案し、変形を抑制する設計とする。

各エリアに対する許容限界を表3-5に、海水ポンプエリア防護壁と防護対象施設の最小離隔部位を図3-4に示す。

表3-5 許容限界（海水ポンプエリア防護壁）

評価項目		許容限界	
海水ポンプエリア 防護壁	躯体の 変形	エリア①～⑤	鉄筋コンクリート壁が 概ね弾性変形の範囲に留まること
		エリア⑦	電線管との離隔距離
		エリア⑧	残留熱除去系海水系配管との 離隔距離

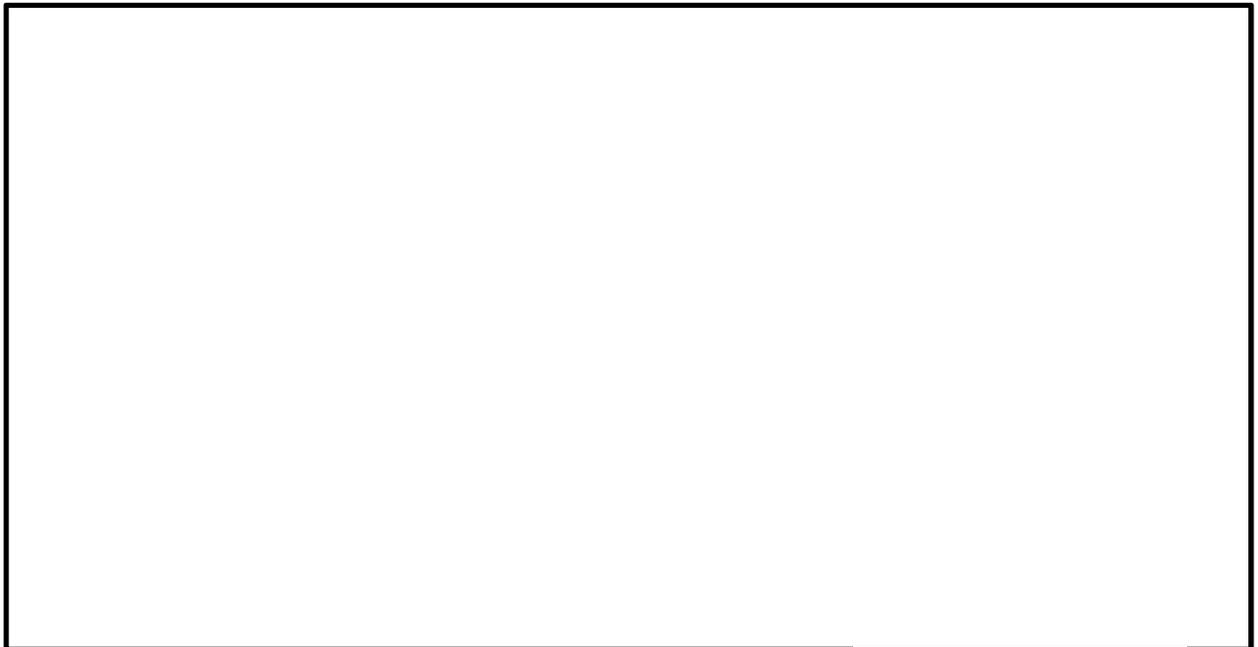


図 3-4 エリア⑦及び⑧における防護対象との位置関係

(3) 鋼製防護壁

鋼製防護壁の許容限界は、V-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「4.2 許容限界」を踏まえて、評価内容に応じて設定する。

鋼製防護壁の上部工（鋼殻構造部）の評価における許容限界は、上部工に作用する津波荷重とする。

設定した許容限界を表3-6に、鋼製防護壁と防護対象施設の位置関係を図3-5に示す。

表 3-6 許容限界（鋼製防護壁）

評価項目		許容限界	
鋼製防護壁	上部工への風荷重	上部工天端における津波荷重 (基準津波時)	

※暫定値

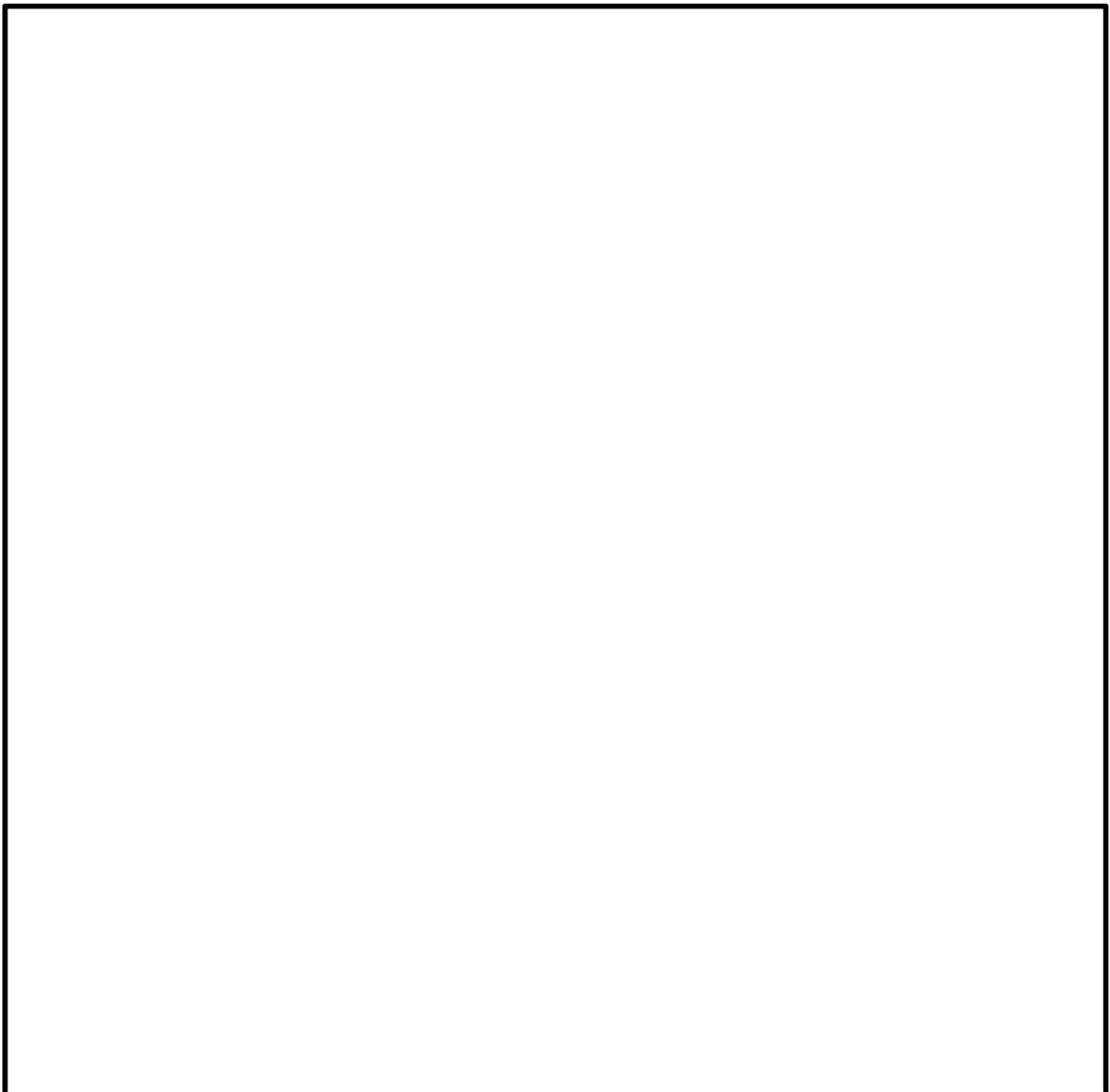


図 3-5 鋼製防護壁と防護対象の位置関係

### 3.5 評価方法

#### (1) サービス建屋（原子炉建屋及びタービン建屋を含む）

サービス建屋の躯体の変位は、設計荷重による建屋の層せん断力及び各部材のせん断力－変位関係（ $Q-\delta$  関係）より算定する。

サービス建屋の解析モデルを図3-5に示す。解析モデルは、V-2-11-2-12「サービス建屋の耐震性についての計算書」に示す地震応答解析モデルを用いる。原子炉建屋はサービス建屋の東側、タービン建屋はサービス建屋の北側に位置するため、EW方向及びNS方向を検討対象とする。

設計荷重のうち、風圧力による荷重 $W_w$ は、建屋の形状を考慮して算出した風力係数及び受圧面積に基づき算出する。

気圧差による荷重 $W_p$ は、建屋の内部から外部に作用することから、建屋層全体の評価においては相殺されるが、保守的に $W_w$ の作用方向のみに作用するものとして考慮する。

飛来物による衝撃荷重 $W_M$ は、瞬間的な荷重であり、且つサービス建屋は飛来物に対し十分に大きな質量を有することを考慮すると、建屋層全体の変形への設計飛来物の衝突荷重の影響は軽微と考えられることから、考慮しない。

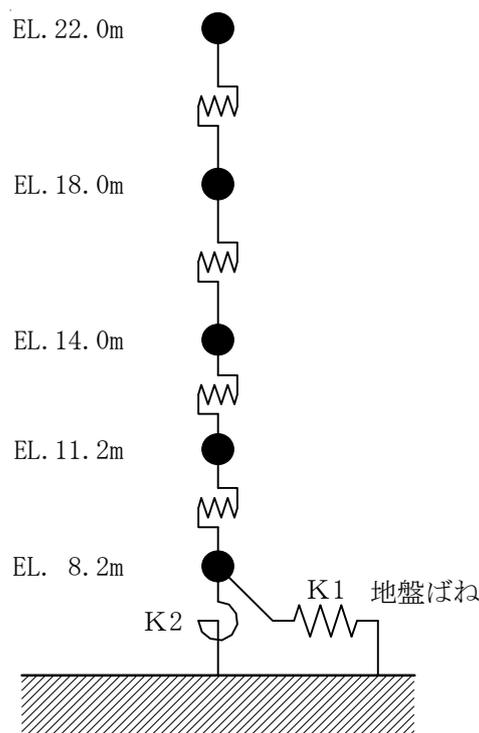


図3-5 サービス建屋の解析モデル

原子炉建屋及びタービン建屋の変位は、設計荷重による建屋の層せん断力及び各部材のせん断力－せん断ひずみ関係（ $Q-\gamma$  関係）より算定する。

原子炉建屋及びタービン建屋のせん断力－せん断ひずみ関係（ $Q-\gamma$  関係）は、V-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」の「3.5.3 変形評価」に示すものを用いる。

設計荷重のうち、風圧力による荷重 $W_w$ は、建屋の形状を考慮して算出した風力係数及び受圧面積に基づき算出する。

気圧差による荷重 $W_p$ は、建屋の内部から外部に作用し、建屋層全体の評価においては相殺される荷重されるが、保守的に、風圧力による荷重 $W_w$ の加力方向にのみ作用するものとする。

飛来物による衝撃荷重 $W_M$ は、瞬間的な荷重であり、且つ原子炉建屋及びタービン建屋は飛来物に対し十分に大きな質量を有することを考慮すると、建屋層全体の変形への設計飛来物の衝突荷重の影響は軽微と考えられることから、考慮しない。

## (2) 海水ポンプエリア防護壁

海水ポンプエリア防護壁の変位は、評価対象の各エリアの構造モデルに竜巻荷重を入力することにより算定する。

海水ポンプエリア防護壁の解析モデル図について、エリア①からエリア⑤を図3-5に、エリア⑦及びエリア⑧を図3-6に示す。鉄筋コンクリート壁で構成されるエリア①～⑤については、南北方向の壁を片持ちはりモデル、東西方向の壁を3辺固定1辺自由の不等分布スラブに、鉄骨架構で構成されるエリア⑦及びエリア⑧は、3次元弾性はりモデルを用いる。

防護対象施設との位置関係を考慮し、エリア⑦についてはEW方向及びNS方向を、エリア⑧についてはEW方向及びNS方向を検討対象とする。

設計荷重のうち、風圧力による荷重 $W_w$ は、海水ポンプエリア防護壁の各エリアの形状を考慮して算出した風力係数及び受圧面積に基づき算出する。

気圧差による荷重 $W_p$ については、海水ポンプエリア防護壁の各エリアは解放された区画となっているため考慮しない。

飛来物による衝撃荷重 $W_M$ について、エリア①～⑤については、その区画を構成する海水ポンプ室躯体が設計飛来物に対し十分大きな質量を有することを考慮すると、波及的影響の検討対象である躯体の全体的な変形に対する設計飛来物の衝突荷重の影響は軽微と考えられることから、考慮しない。エリア⑦及びエリア⑧については、各エリアを構成する鉄骨構造物の剛性と質量をそれぞれ模した、図3-6に示すばね-質点系モデルに設計飛来物を衝突させた際の応答加速度に対応する荷重として、各エリアのモデルに入力する。

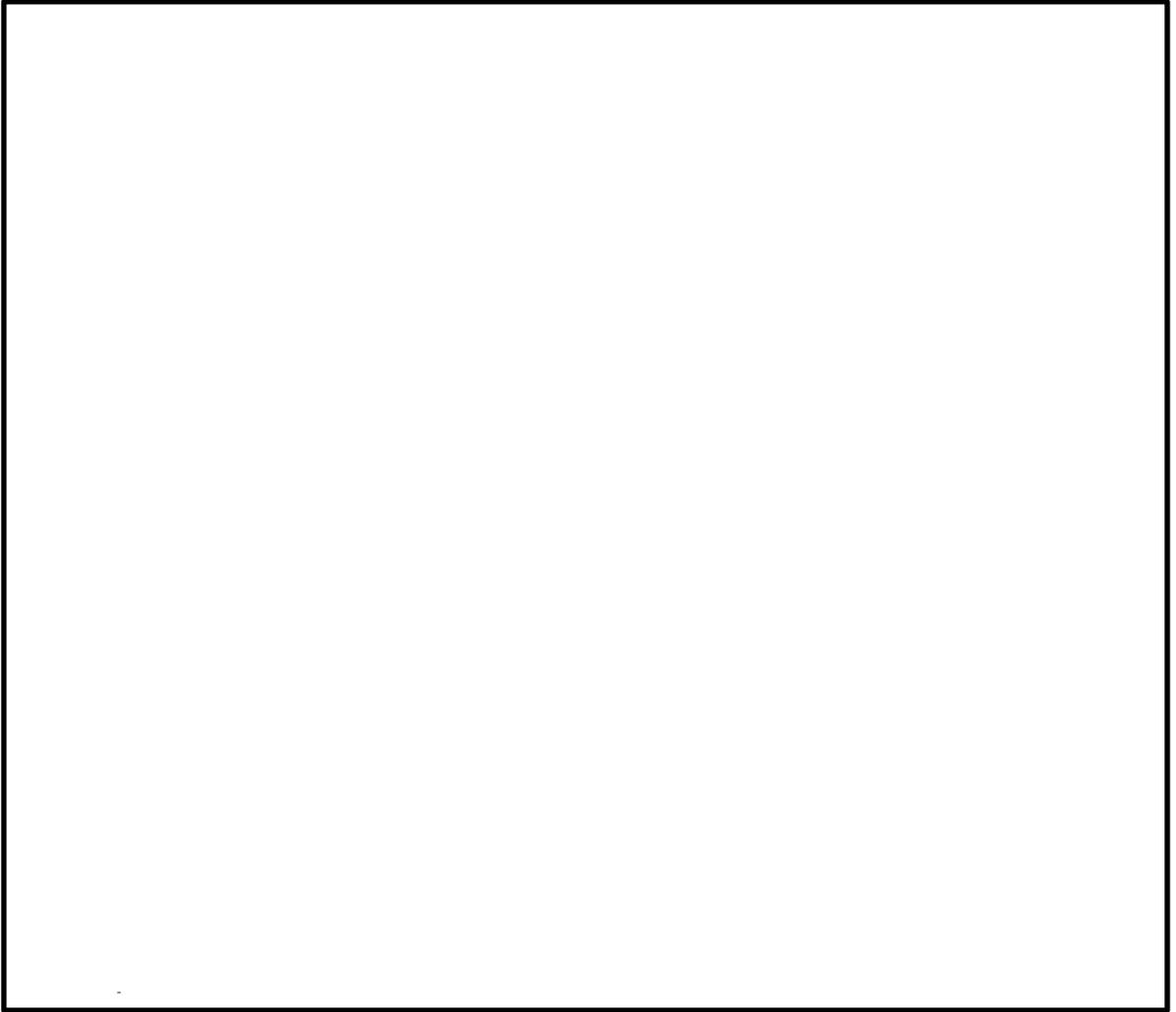


図3-5 海水ポンプエリア防護壁の解析モデル図

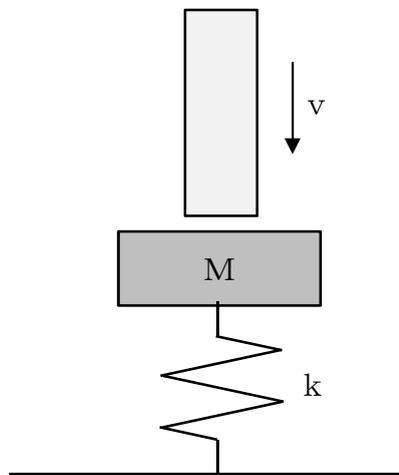


図3-6 エリア⑦, ⑧の応答加速度解析モデル

(3) 鋼製防護壁

飛来物による衝撃荷重 $W_M$ については、鋼製防護壁が設計飛来物に対し十分大きな質量を有することを考慮すると、波及的影響の検討対象である躯体の全体的な変形に対する設計飛来物の衝突荷重の影響は軽微と考えられることから、考慮しない。また、構造的に竜巻による気圧低下が鋼製防護壁を東方向から押す様に作用する事も考え難い。

このため、鋼製防護壁に作用するのは風圧力による荷重のみとなるので、この風荷重が、設計上健全性が確認された津波荷重に包絡されていることを確認する。

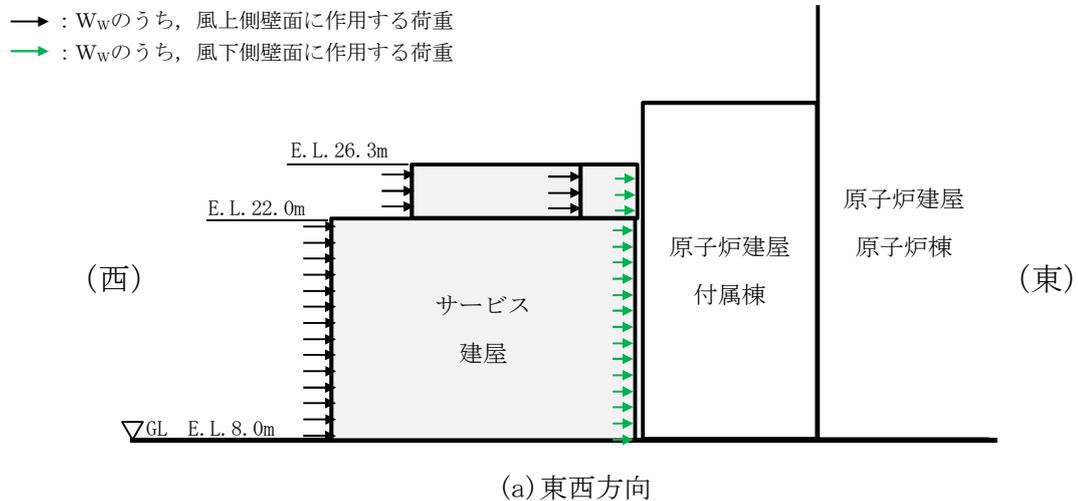
4. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を、以下に示す。

4.1 サービス建屋

サービス建屋の東側に原子炉建屋、サービス建屋の北側にタービン建屋が隣接しているため、風圧力による荷重 $W_w$ が西から東へ作用する場合及び南から北へ作用する場合の検討を実施する。サービス建屋に作用する風圧力による荷重 $W_w$ の作用方向の模式図を図4-1に、サービス建屋の風圧力による荷重 $W_w$ の算出条件を表4-1に示す。サービス建屋の風下側壁面は、原子炉建屋及びサービス建屋が接近して配置されており、実際には風下側壁面には風荷重が作用しないと考えられるが、本評価では保守的に風下側の風荷重も考慮するものとする。

また、サービス建屋の復元力特性諸元を表4-2に示す。



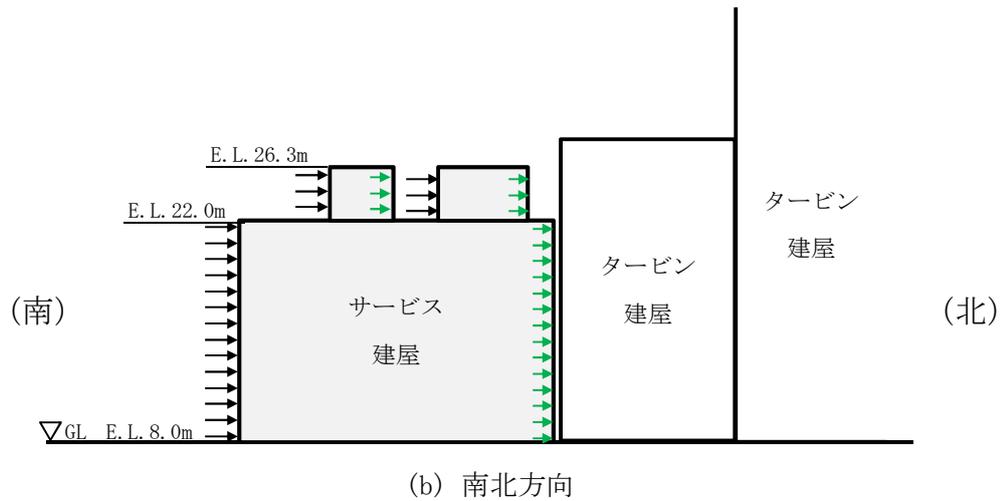


図4-1 サービス建屋への風圧力による荷重 $W_w$ の作用方向模式図

表4-1 サービス建屋の風圧力による荷重 $W_w$ の算出条件

E. L. (m)	位置	風力係数 $C^{※1}$	受圧面積 A ( $m^2$ )	
			EW方向 (W⇒E)	NS方向 (S⇒N)
22.0 ~ 18.0	風上	0.8	270 $^{※2}$	157 $^{※2}$
	風下	0.4		
18.0 ~ 14.0	風上	0.8	161	80
	風下	0.4		
14.0 ~ 11.2	風上	0.8	113	56
	風下	0.4		
11.2 ~ 8.2	風上	0.8	129	64
	風下	0.4		

※1：風下側の係数は、風上側と同じ向きを正とする。

※2：E. L. 22.0以上の部分を含む。

表 4-2(1/2) サービス建屋の復元力特性諸元 (EW 方向)

E. L. m	要素 番号	$Q_1$ (kN)	$Q_2$ (kN)	$Q_3$ (kN)	$\delta_1$ (mm)	$\delta_2$ (mm)	$\delta_3$ (mm)
22.0 ~ 18.0	1	1800	15800	19000	0.242	6.70	31.9
18.0 ~ 14.0	2	5700	21100	22700	0.916	12.0	40.0
14.0 ~ 11.2	3	3000	27300	29900	0.152	6.50	28.0
11.2 ~ 8.2	4	2570	36600	39200	0.114	7.20	30.0

表 4-2(2/2) サービス建屋の復元力特性諸元 (NS 方向)

E. L. m	要素 番号	$Q_1$ (kN)	$Q_2$ (kN)	$Q_3$ (kN)	$\delta_1$ (mm)	$\delta_2$ (mm)	$\delta_3$ (mm)
22.0 ~ 18.0	1	2870	17800	18700	0.388	10.4	40.0
18.0 ~ 14.0	2	3370	28000	29400	0.294	9.10	40.0
14.0 ~ 11.2	3	7520	37400	39300	0.240	6.40	28.0
11.2 ~ 8.2	4	12400	37100	38700	0.490	9.40	30.0

原子炉建屋及びタービン建屋の風圧力による荷重 $W_w$ の算出条件及び復元力特性諸元については、V-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」の「3.5.3 変形評価」に示す。

#### 4.2 海水ポンプエリア防護壁

海水ポンプエリア防護壁の各エリアは南北及び東西方向に設置されており、その内部に防護対象施設が設置されているため、風圧力による荷重 $W_w$ が西から東へ作用する場合及び北から南へ作用する場合の検討を実施する。各エリアに作用する風圧力による荷重 $W_w$ の作用方法を図4-2に、海水ポンプエリア防護壁の風圧力による荷重 $W_w$ の算出条件を表4-3に示す。

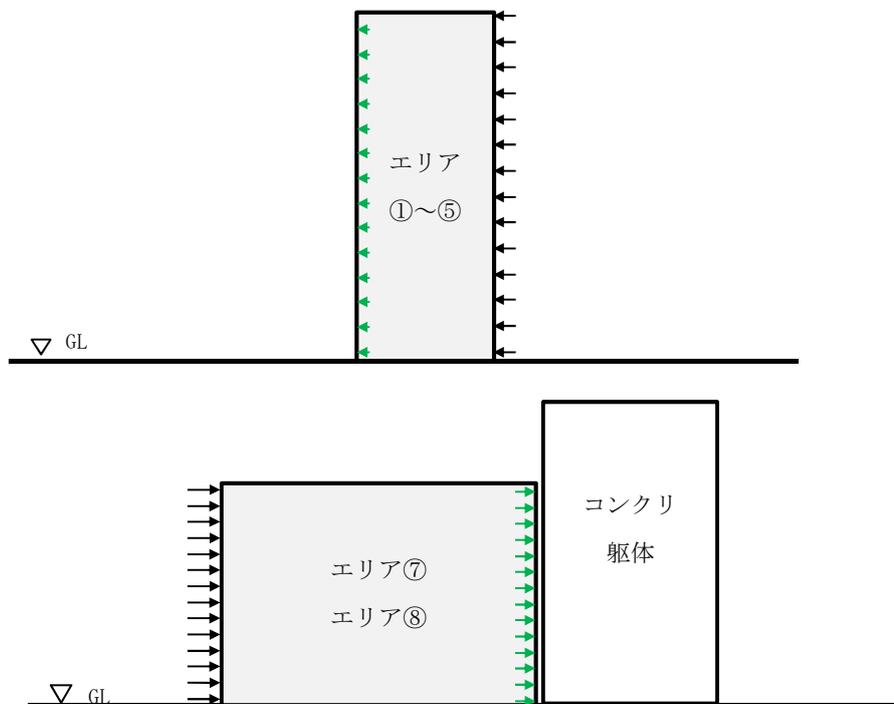


図4-2 風圧力による荷重 $W_w$ の作用方法 (海水ポンプエリア防護壁)

表4-3 海水ポンプエリア防護壁の風圧力による荷重 $W_w$ の算出条件

エリア	位置	風力係数C	受圧面積A ( $m^2$ )	受圧面積A ( $m^2$ )
			EW方向 (W⇒E)	NS方向 (S⇒N)
①②③④⑤	風上	0.6	部位ごとに算定	
	風下	0.4		
⑦	風上	0.6	19.3	10.9
	風下	0.4		
⑧	風上	0.6	122.2	28.2
	風下	0.4		

エリア⑦及びエリア⑧における飛来物による衝撃荷重 $W_M$ については、「V-3-別添1-2-1-3 架構の強度計算書」に示す方法により考慮する。

#### 4.3 鋼製防護壁

鋼製防護壁の西側に海水ポンプ室が隣接して設置されているため、風圧力による荷重 $W_w$ が東から西へ作用する場合の検討を実施する。鋼製防護壁に作用する風圧力による荷重 $W_w$ の作用方法を図4-3に、鋼製防護壁の風圧力による荷重 $W_w$ の算出条件を表4-4に示す。

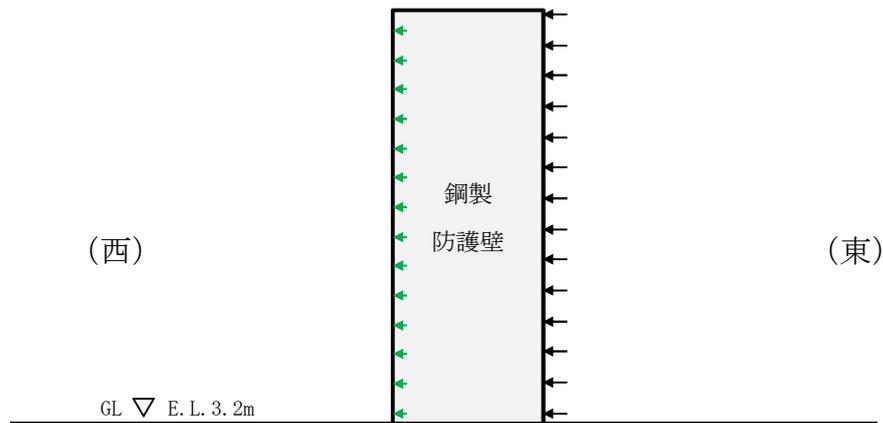


図4-3 風圧力による荷重 $W_w$ の作用方法 (鋼製防護壁)

表4-4 鋼製防護壁の風圧力による荷重 $W_w$ の算出条件

項目	記号	単位	備考
速度圧	6100	N/mm <sup>2</sup>	
ガスト影響係数	1	—	
風力係数	1.0	—	「建築物荷重指針・同解説」を参照
見付面積	1	m <sup>2</sup>	単位面積当たりの荷重で評価

5. 強度評価結果

5.1 サービス建屋

サービス建屋と原子炉建屋の相対変位及びサービス建屋とタービン建屋の相対変位の評価結果を表5-1及び表5-2に示す。原子炉建屋及びタービン建屋と隣接する点の変位に基づく相対変位が、許容限界を超えないことを確認した。

表5-1 サービス建屋と原子炉建屋の相対変位の評価結果

(単位：mm)

複合荷重	EL. (m)	設計荷重による最大変位		最大相対変位※	許容限界
		サービス建屋	原子炉建屋		
W <sub>T1</sub>	25.65	3.1	0.3	3.4	50
W <sub>T2</sub>	25.65	3.8	0.3	4.1	50

※：保守的に、各建屋の最大変位をお互いが接近する方向に加算したものとする。

表5-2 サービス建屋とタービン建屋の相対変位の評価結果

(単位：mm)

複合荷重	EL. (m)	設計荷重による最大変位		最大相対変位※	許容限界
		サービス建屋	タービン建屋		
W <sub>T1</sub>	22.0	0.6	0.3	0.9	50
W <sub>T2</sub>	22.0	0.7	0.4	1.1	50

※：保守的に、各建屋の最大変位をお互いが接近する方向に加算したものとする。

5.2 海水ポンプエリア防護壁

追而

5.3 鋼製防護壁

鋼製防護壁に作用する竜巻荷重と津波荷重の評価結果を表5-3に示す。竜巻荷重が許容限界である津波荷重を超えないことを確認した。

表5-3 鋼製防護壁に対する竜巻荷重と津波荷重

(単位：kN)

竜巻荷重	津波荷重 (許容限界)
追而	

V-3-別添 1-2-1-2 防護鋼板の強度計算書

## 目次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
2.1 位置	1
2.2 構造概要	2
2.3 評価方針	19
2.4 適用規格	20
3. 強度評価方法	21
3.1 記号の定義	21
3.2 評価対象部位	21
3.3 荷重及び荷重の組合せ	22
3.4 許容限界	23
3.5 評価方法	25
4. 強度評価結果	28

## 1. 概要

本資料は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」に示すとおり、防護対策施設である非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設、中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設、海水ポンプエリア竜巻防護対策施設、原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設、中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設、原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設及び原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設の防護鋼板が、設置（変更）許可に示す設計飛来物（以下「飛来物」という。）の衝突に加え、風圧力に対し、竜巻時及び竜巻通過後においても防護対象施設に飛来物を衝突させず、また、機械的な波及的影響を与えず、防護対象施設の安全機能維持を考慮して、防護鋼板が構造健全性を有することを確認するものである。

## 2. 基本方針

V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」を踏まえ、防護鋼板の「2.1 位置」、 「2.2 構造概要」、 「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

### 2.1 位置

防護鋼板は、原子炉建屋（ディーゼル発電機室屋上、原子炉棟外壁及び付属棟屋上並びに外壁）及び海水ポンプ室周りに設置する。

防護鋼板の設置位置図を図 2-1 に示す。

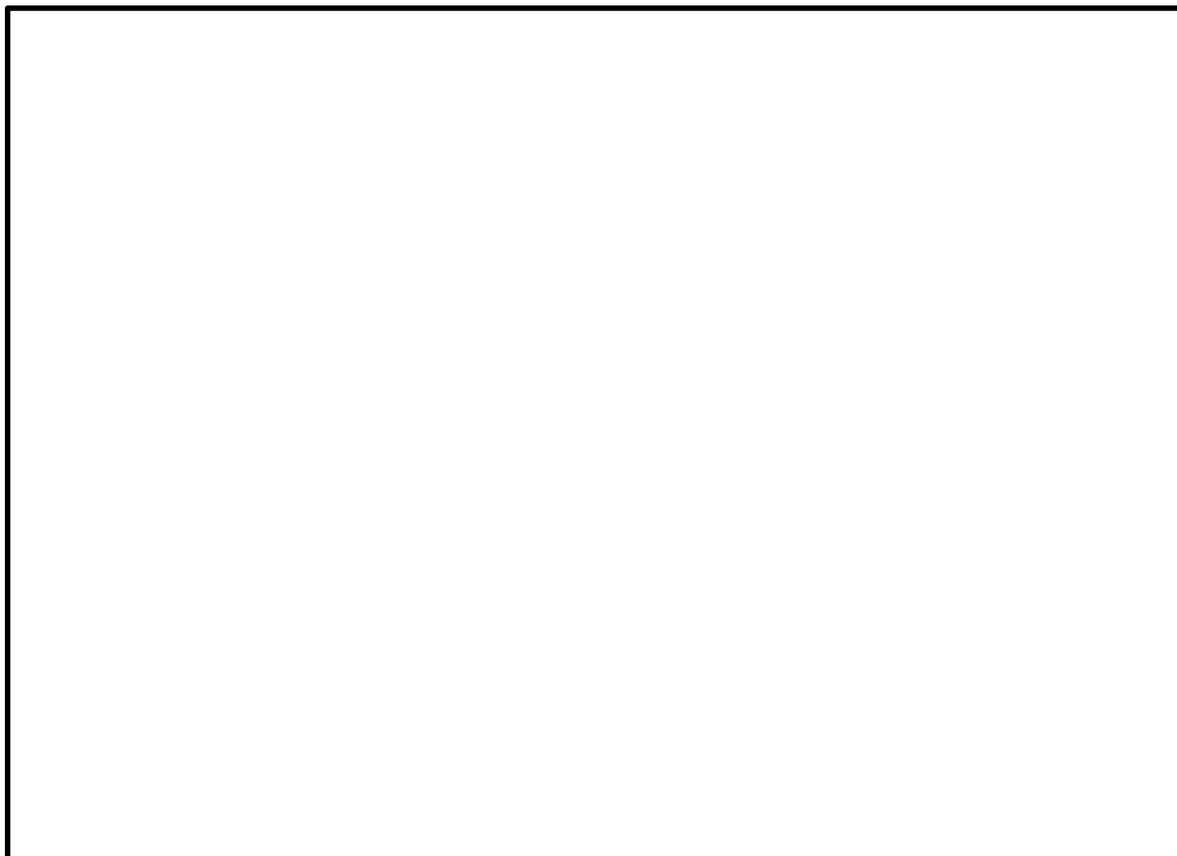


図 2-1 防護鋼板の設置位置図

## 2.2 構造概要

防護鋼板の構造は、V-3-別添 2「防護対策施設の強度計算の方針」の「3.2 防護鋼板の構造設計」に示す構造計画を踏まえて設定する。

### (1) 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設防護鋼板

非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設防護鋼板は、当該防護対策施設の架構に取り付けられ施設の外殻となる。

非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図を図 2-2 に示す。

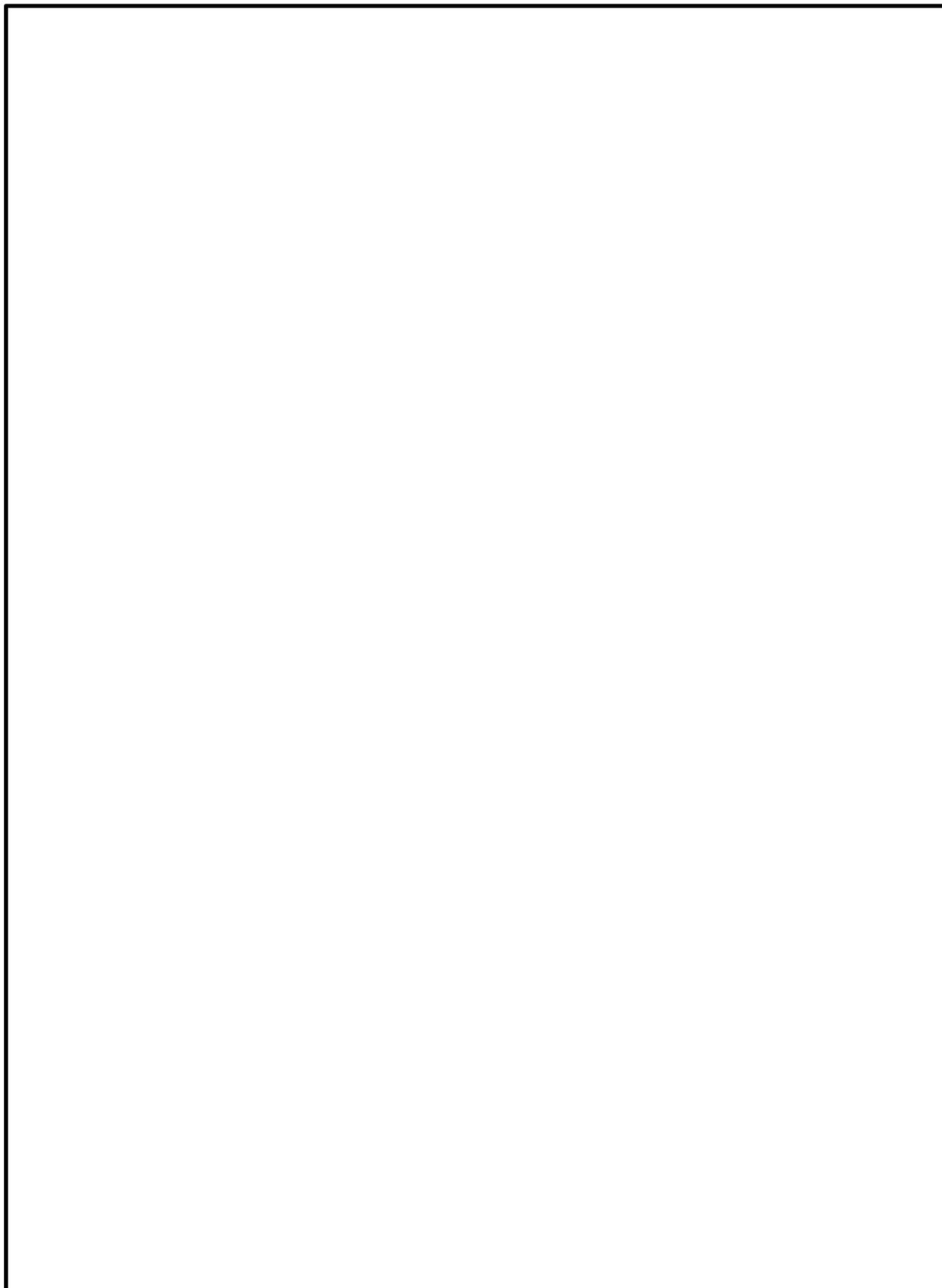


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン防護対策施設防護鋼板の構造図(1/4)  
(2 C非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

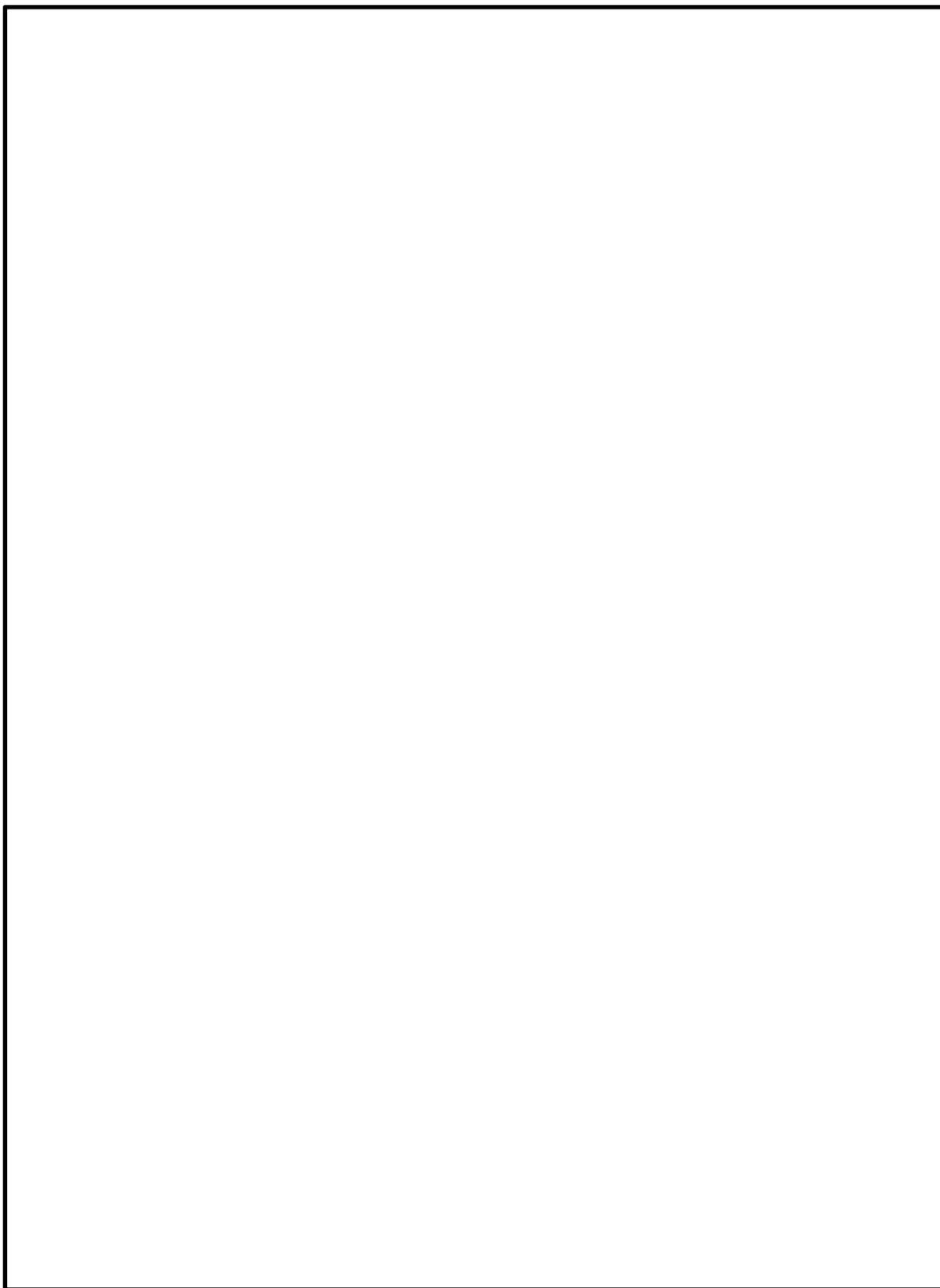


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン防護対策施設防護鋼板の構造図(2/4)  
(2D非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設(1/2))

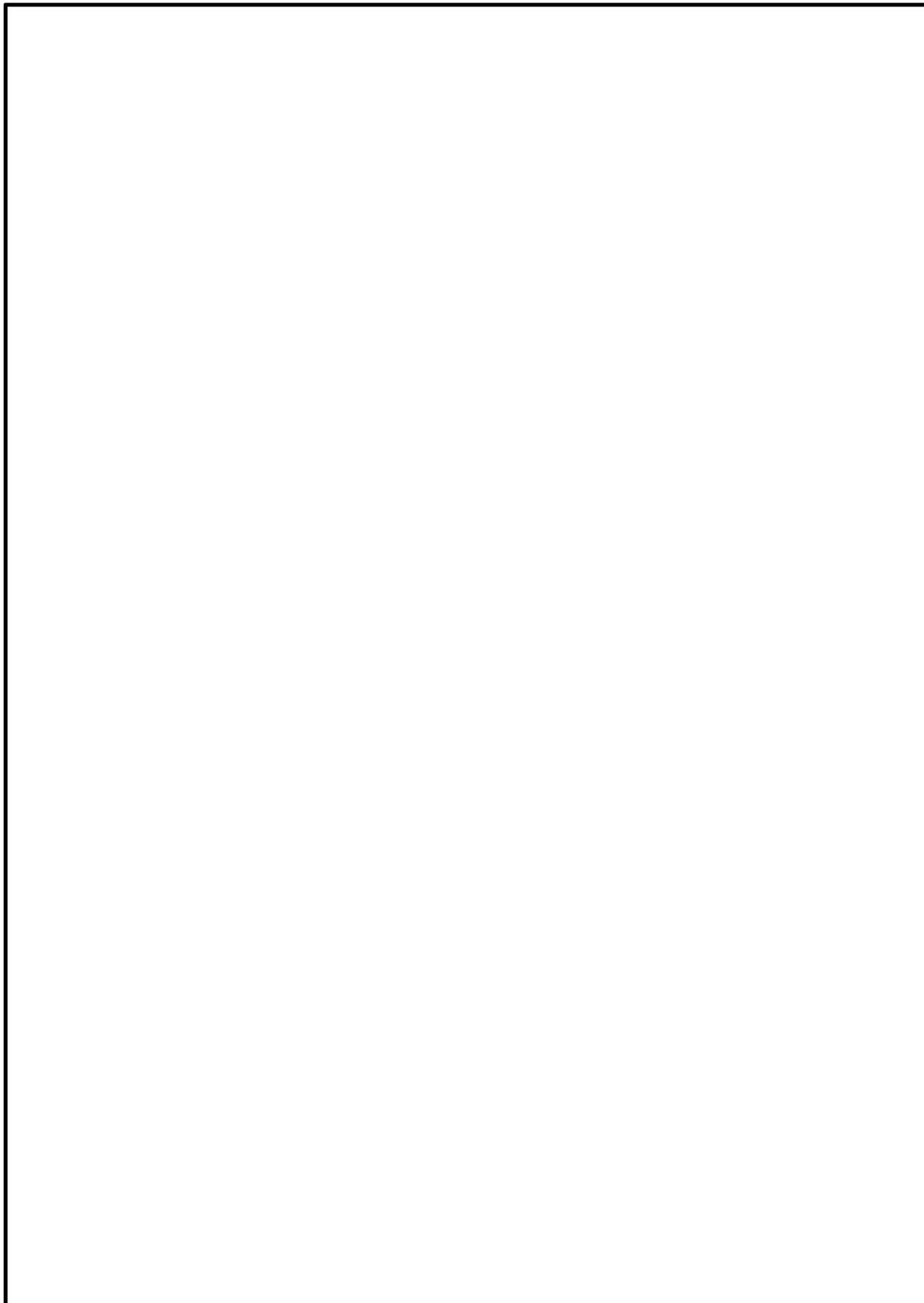


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン防護対策施設防護鋼板の構造図(3/4)  
(2D非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設(2/2))

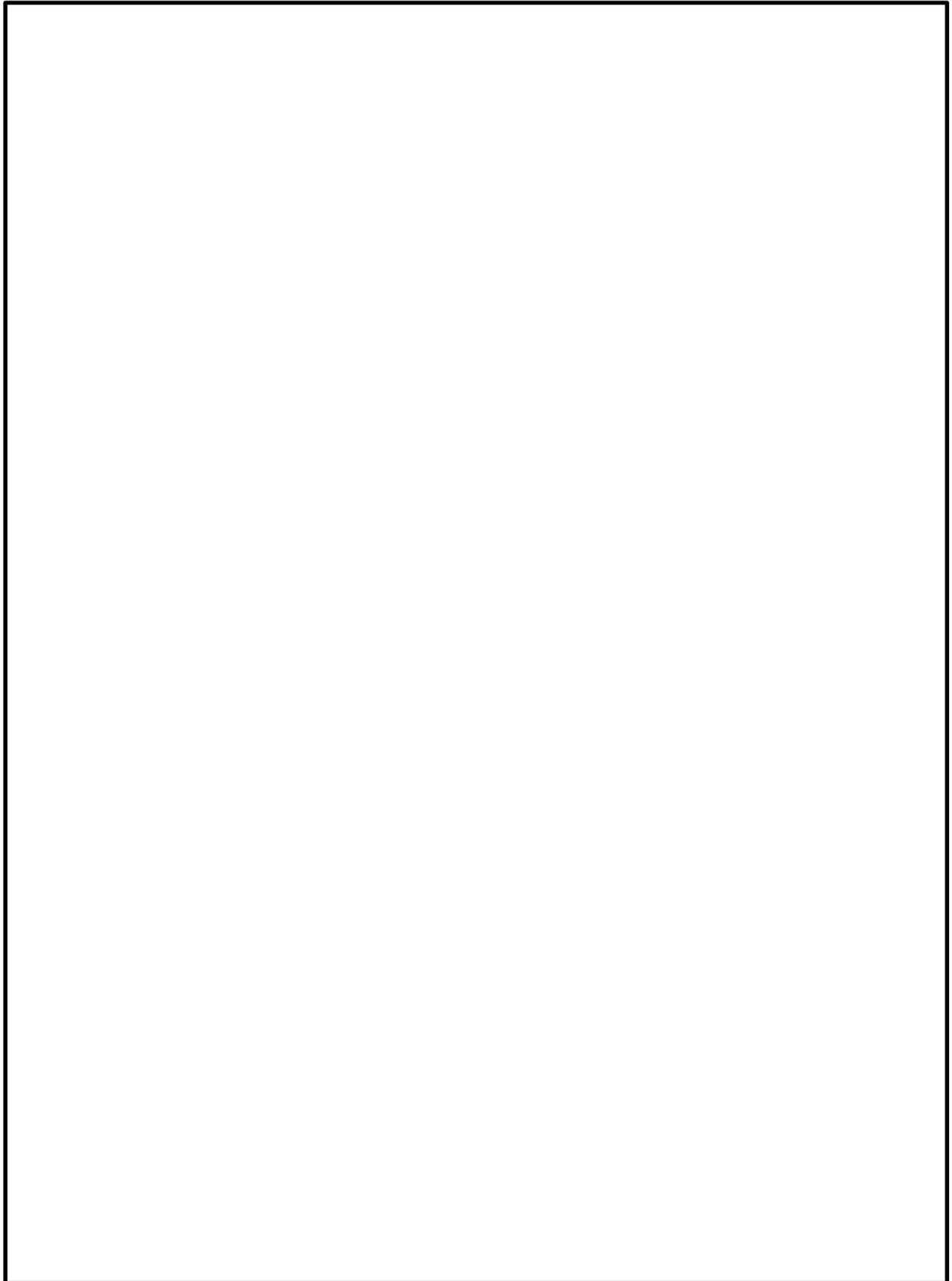


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン防護対策施設防護鋼板の構造図(4/4)  
(高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

(2) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設**防護鋼板**

中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板は、当該防護対策施設の架構に取り付けられ施設の外殻となる。

中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の**構造図**を図 2-3 に示す。

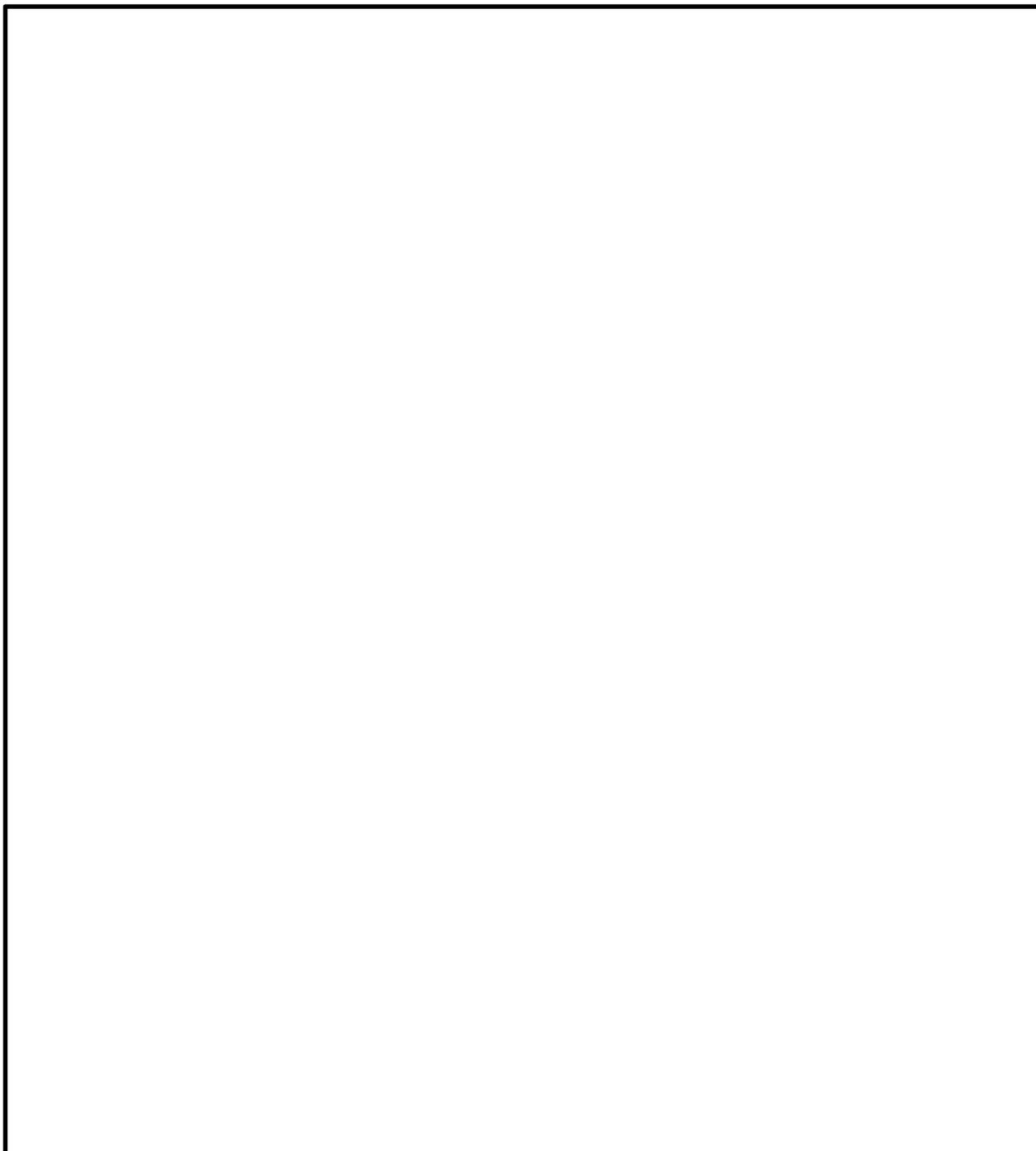


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図(1/6)

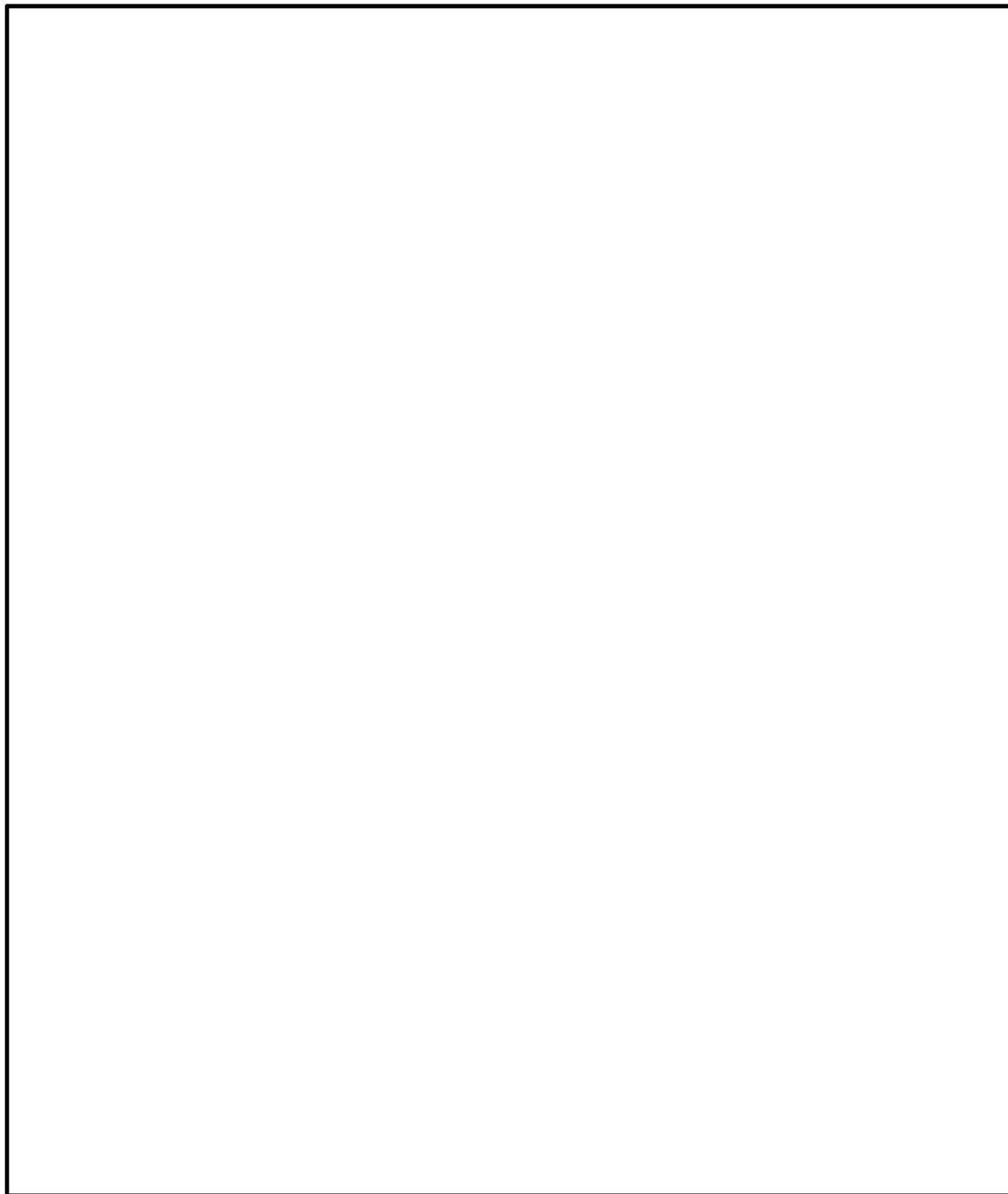


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図 (2/6)

NT2 補② V-3-別添 1-2-1-2 R3

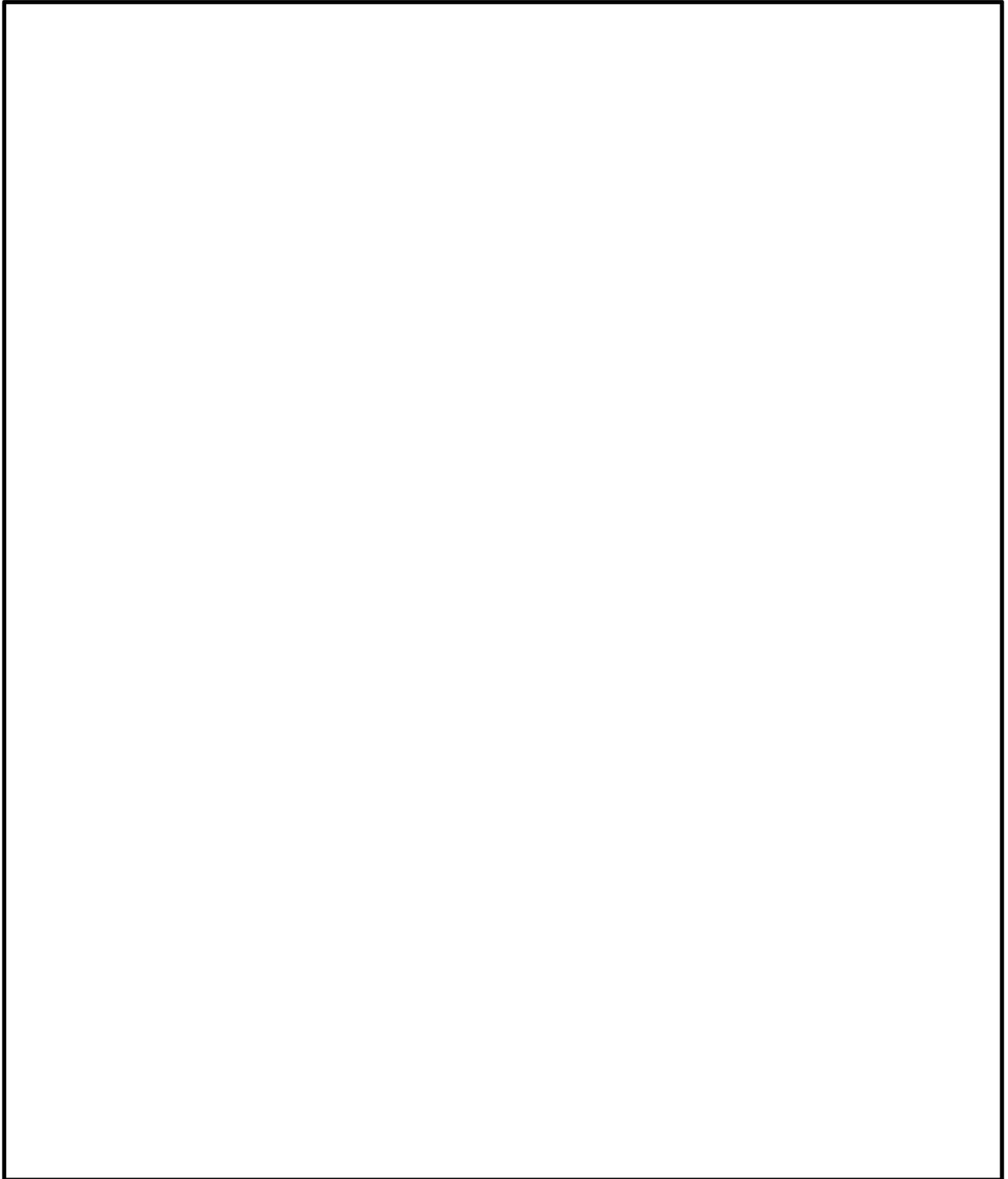


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図 (3/6)

NT2 補② V-3-別添 1-2-1-2 R3

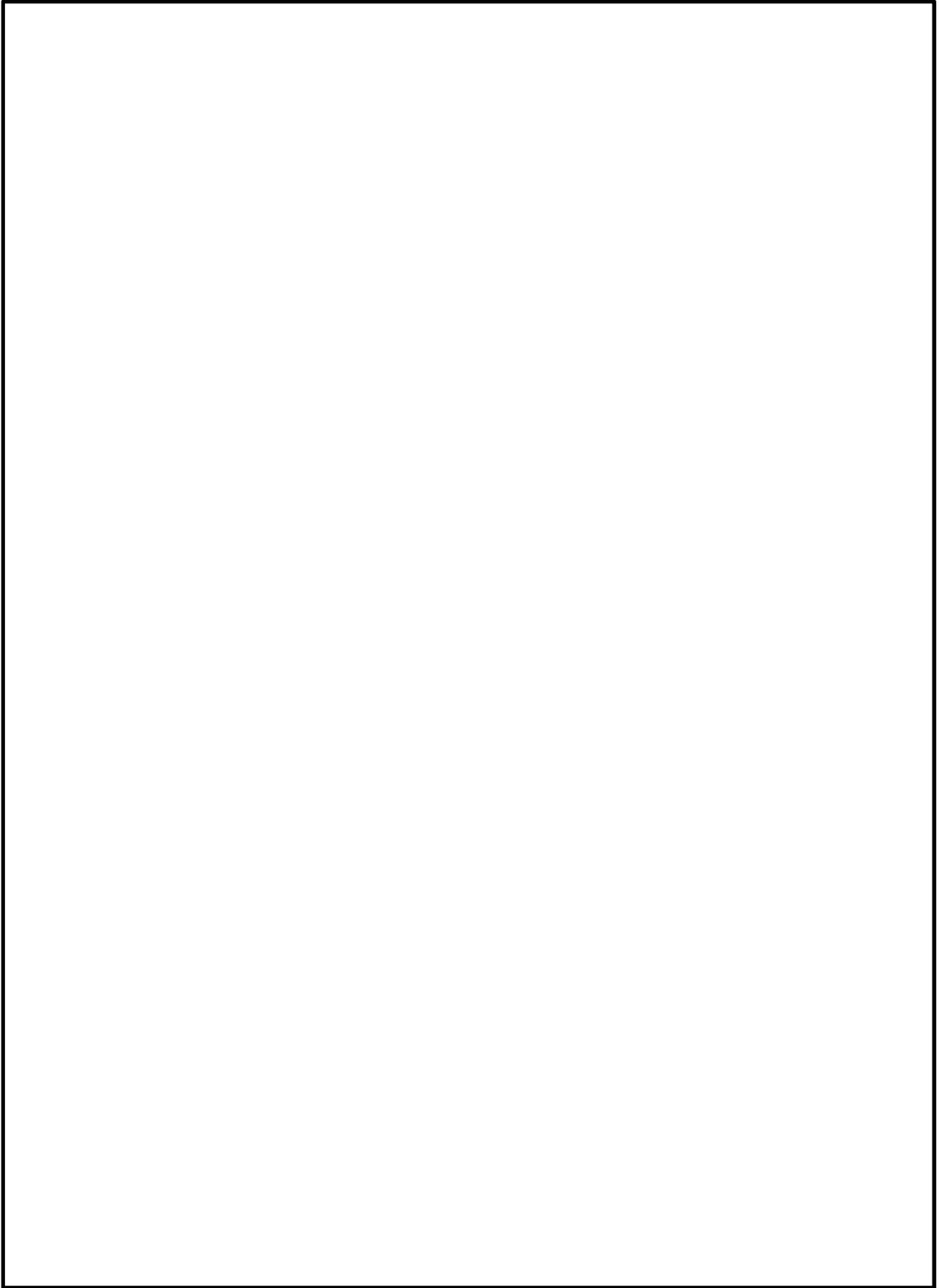


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図(4/6)

NT2 補② V-3-別添 1-2-1-2 R3

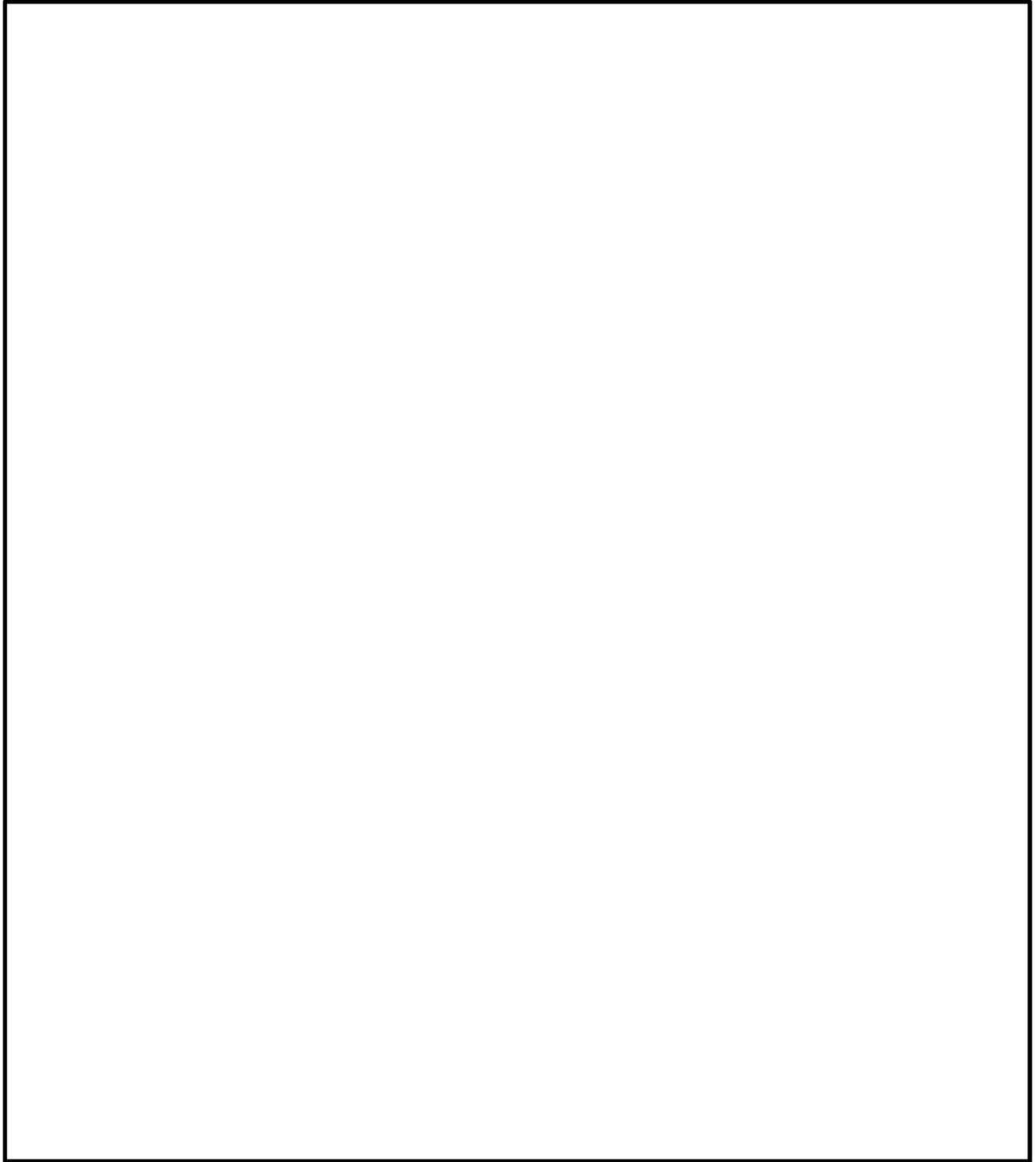


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図 (5/6)

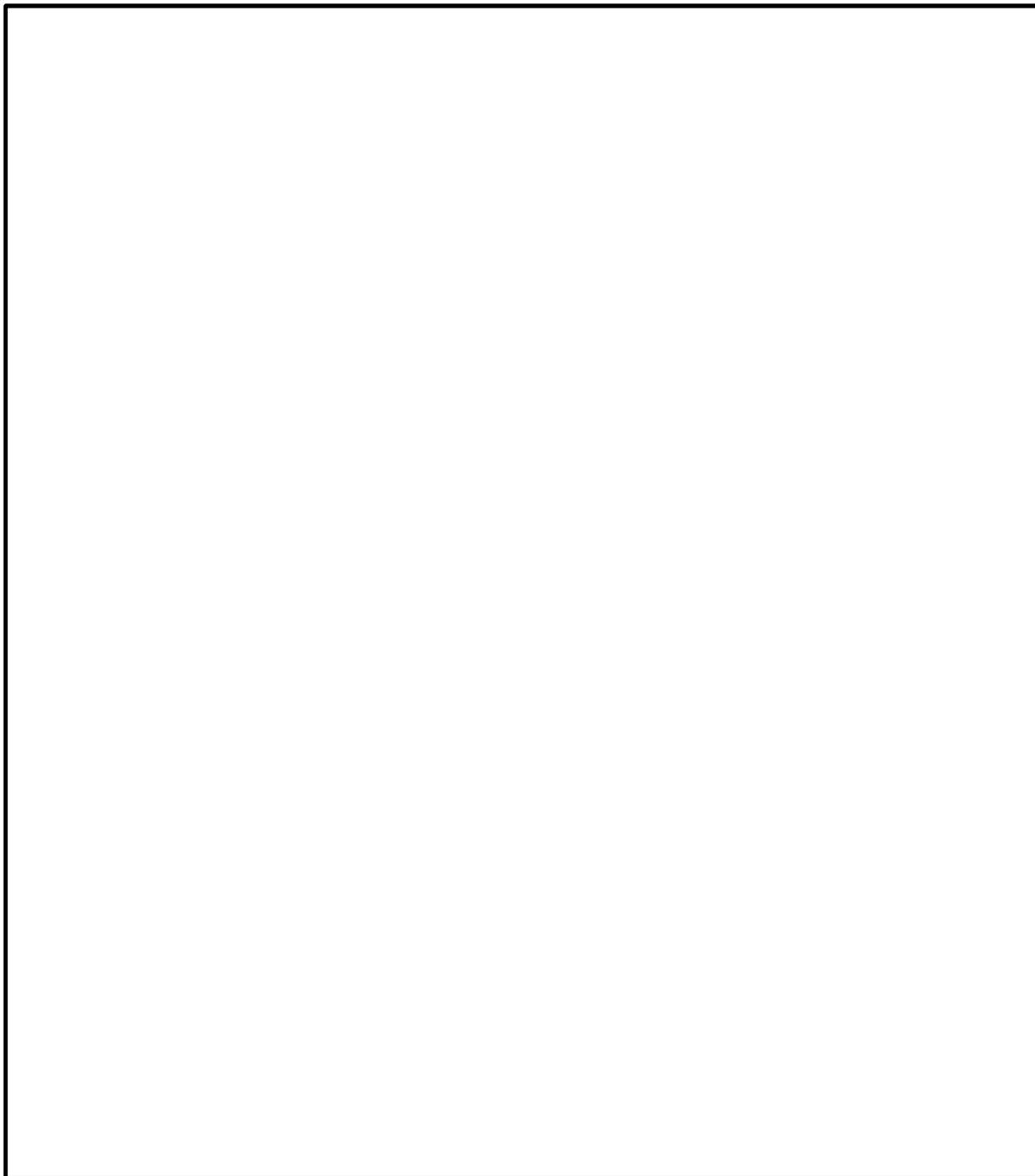


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図(6/6)

(3) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設**防護鋼板**

海水ポンプエリア竜巻防護対策施設防護鋼板は、当該防護対策施設の架構に取り付けられ施設の外殻となる。

海水ポンプエリア竜巻防護対策施設防護鋼板の**構造図**を図 2-4 に示す。

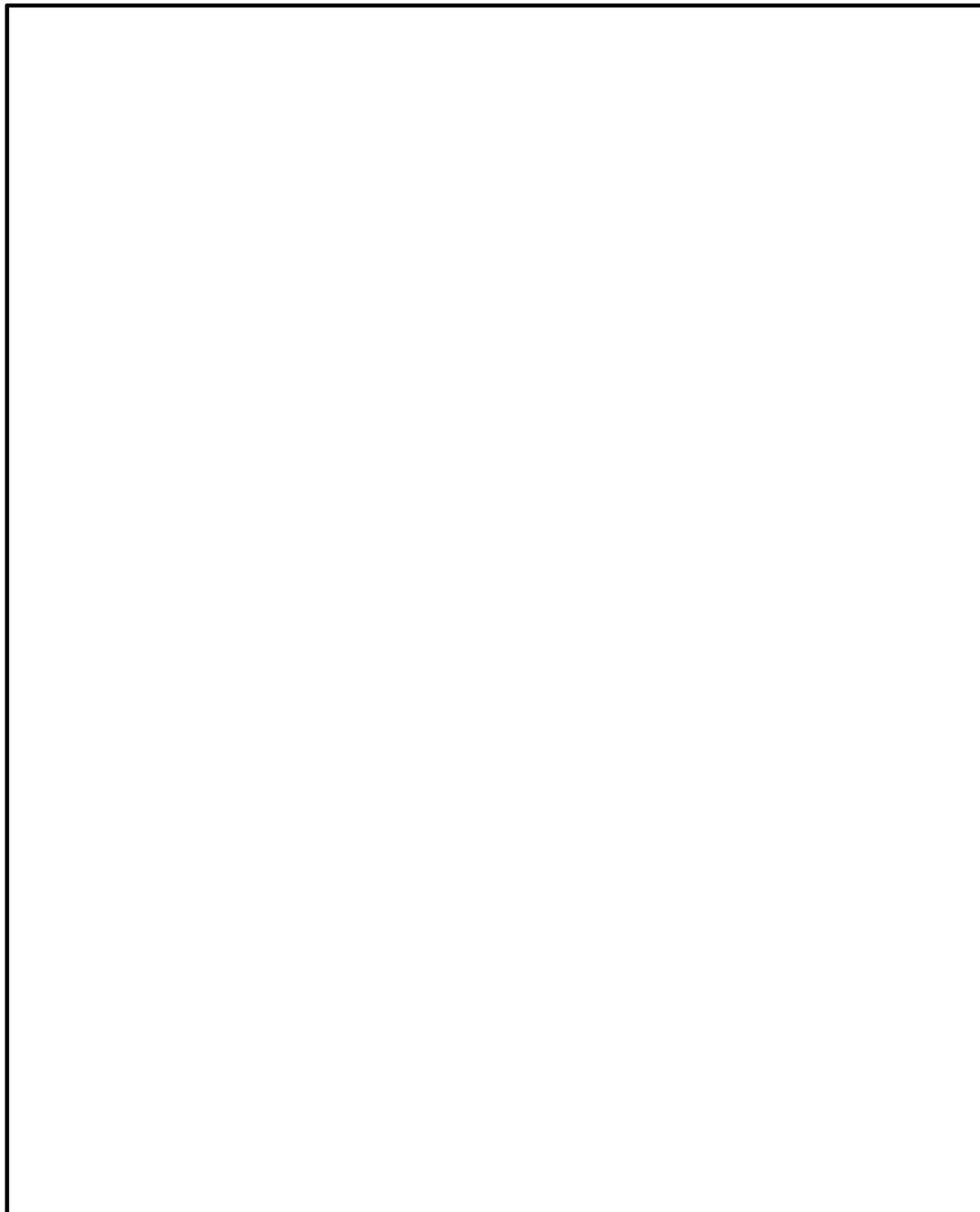


図 2-4 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設**防護鋼板**の**構造図** (1/2) (エリア⑦)

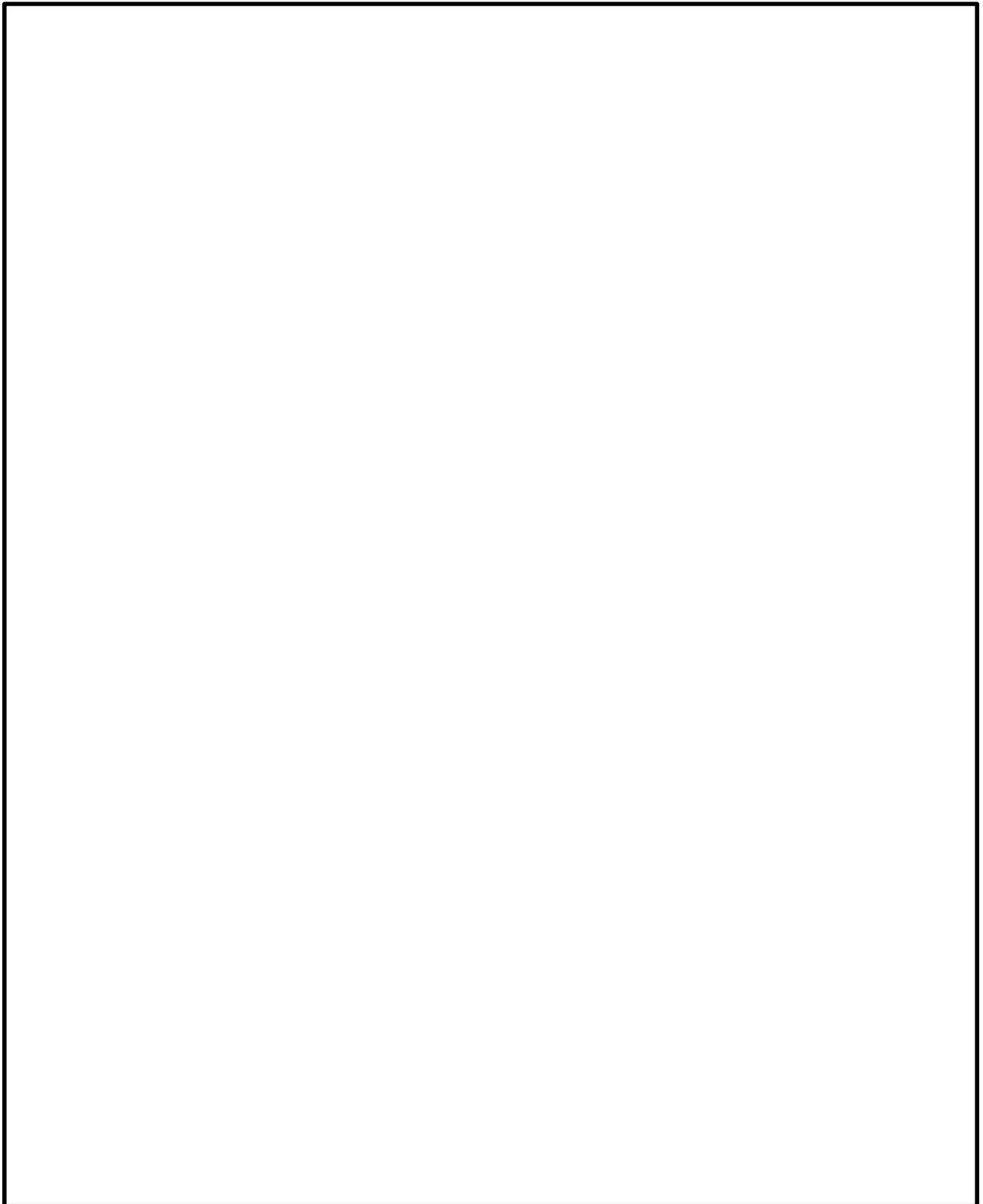


図 2-4 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図 (2/2) (エリア⑧)

(4) 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設防護鋼板

中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設の防護鋼板は、当該防護対策施設の架構に取り付けられ施設の外殻となる。

中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図を図 2-5 に示す。

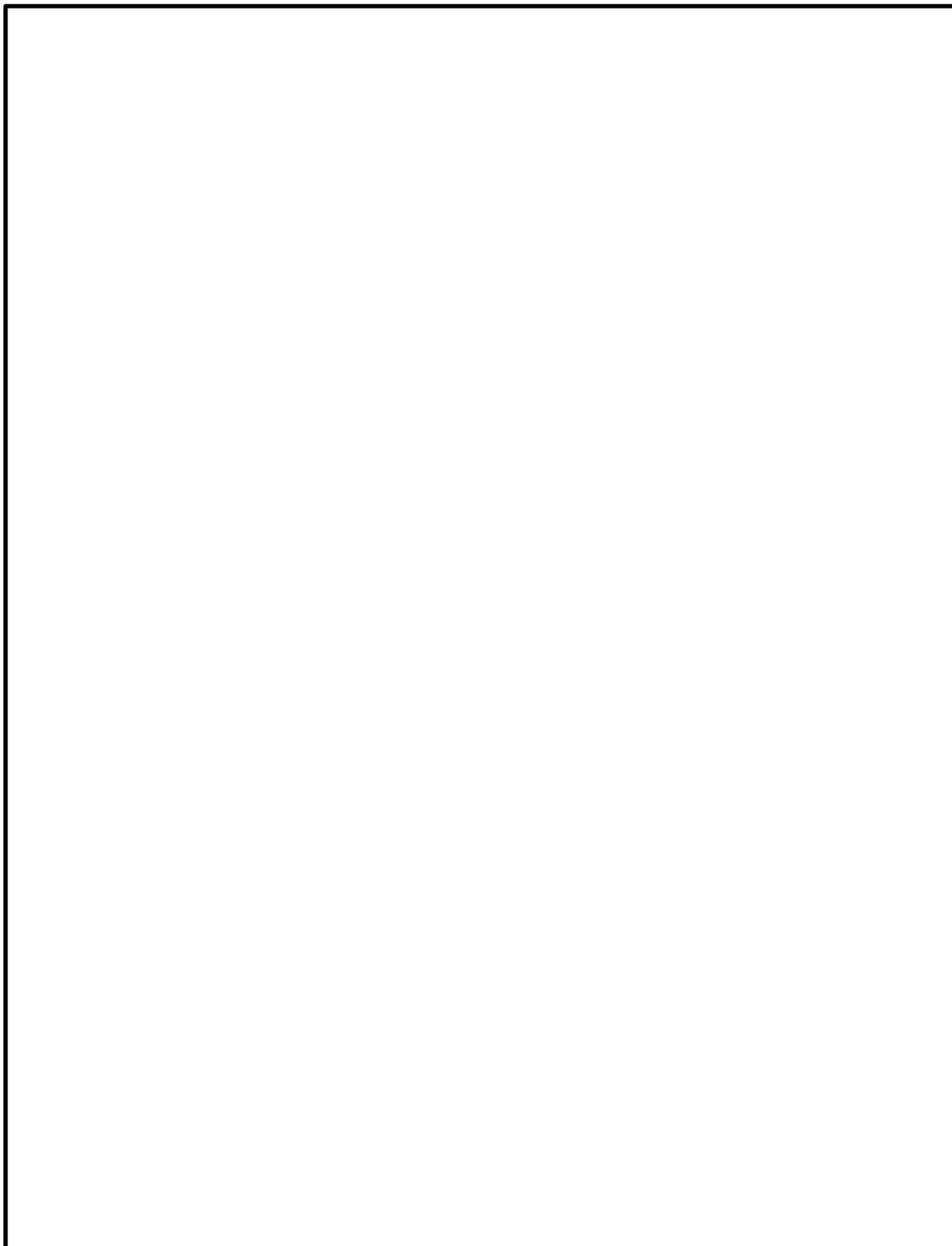


図 2-5 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図

(5) 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設防護鋼板

原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設防護鋼板は、当該防護対策施設の架構に取り付けられ施設の外殻となる。

原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図を図 2-6 に示す。

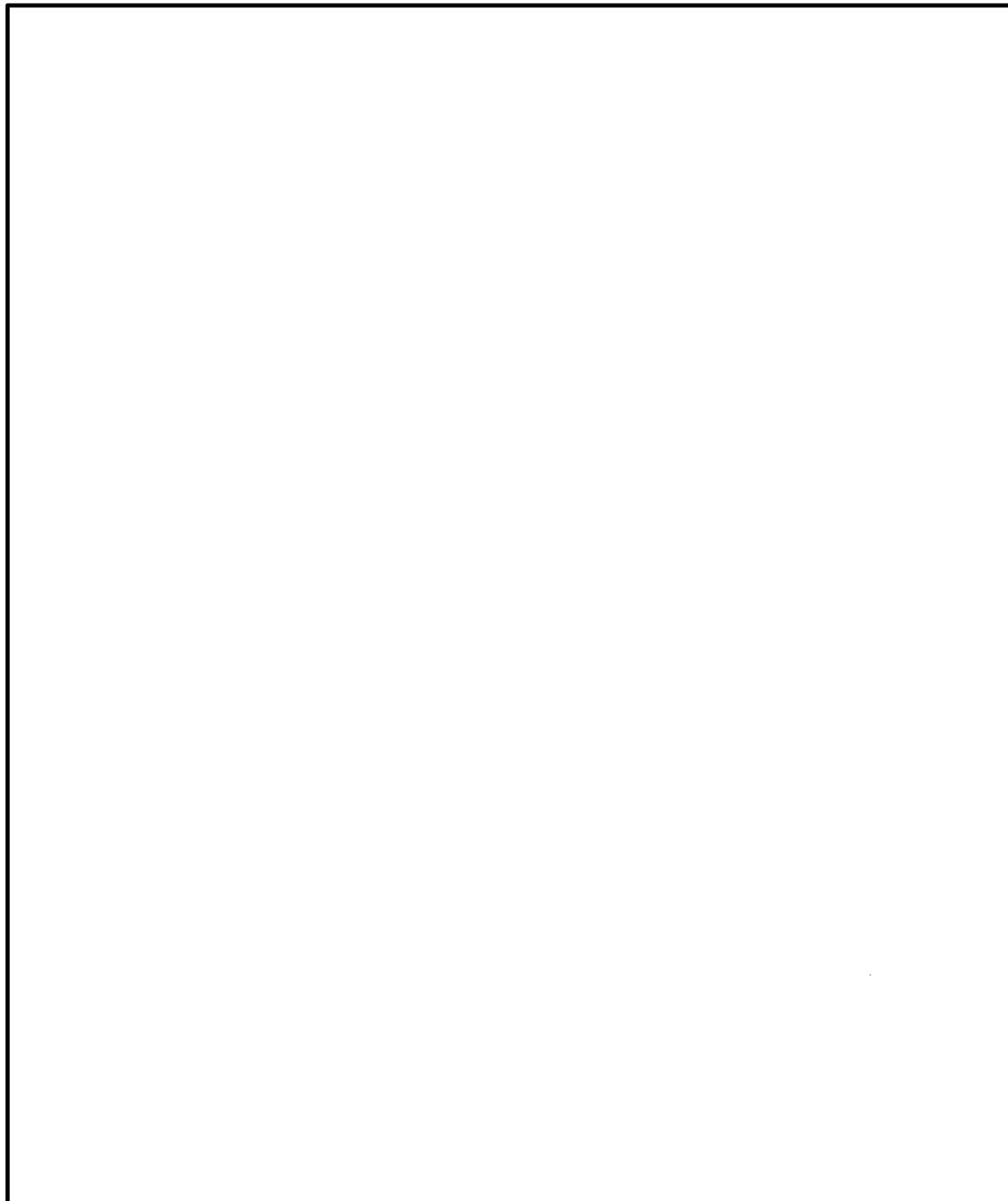


図 2-6 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図

(6) 原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設防護鋼板

原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設防護鋼板は、建屋の構造骨組に取り付けられ、竜巻に対する施設の外殻となる。

原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図を図 2-7 に示す。

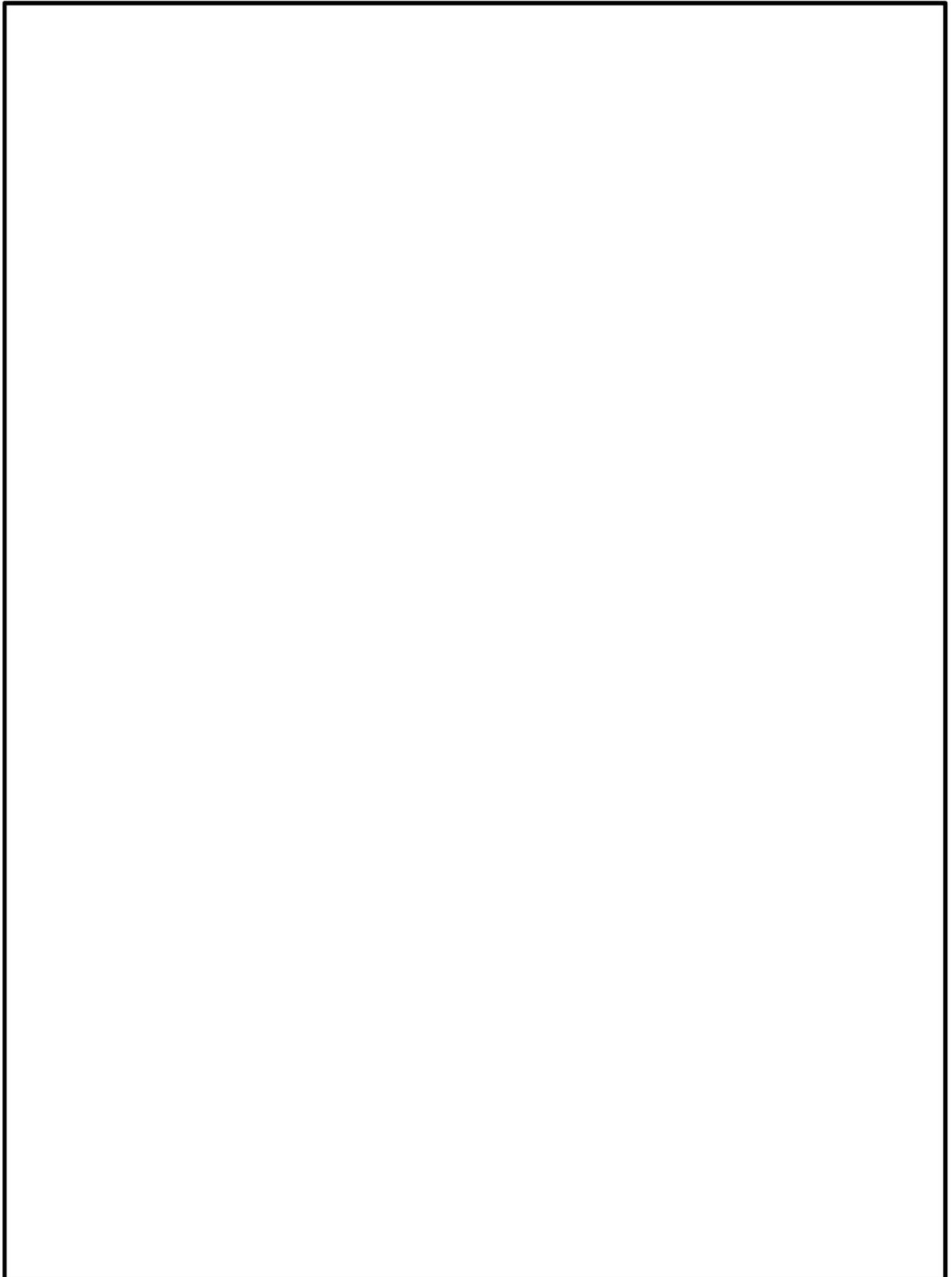


図 2-7 原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図

(9) 原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板

原子炉建屋排気隔離弁竜巻防護対策施設防護鋼板は、当該防護対策施設の架構に取り付けられ施設の外殻となる。

原子炉建屋付属棟開口閉鎖部防護鋼板の構造図を図 2-8 に示す。

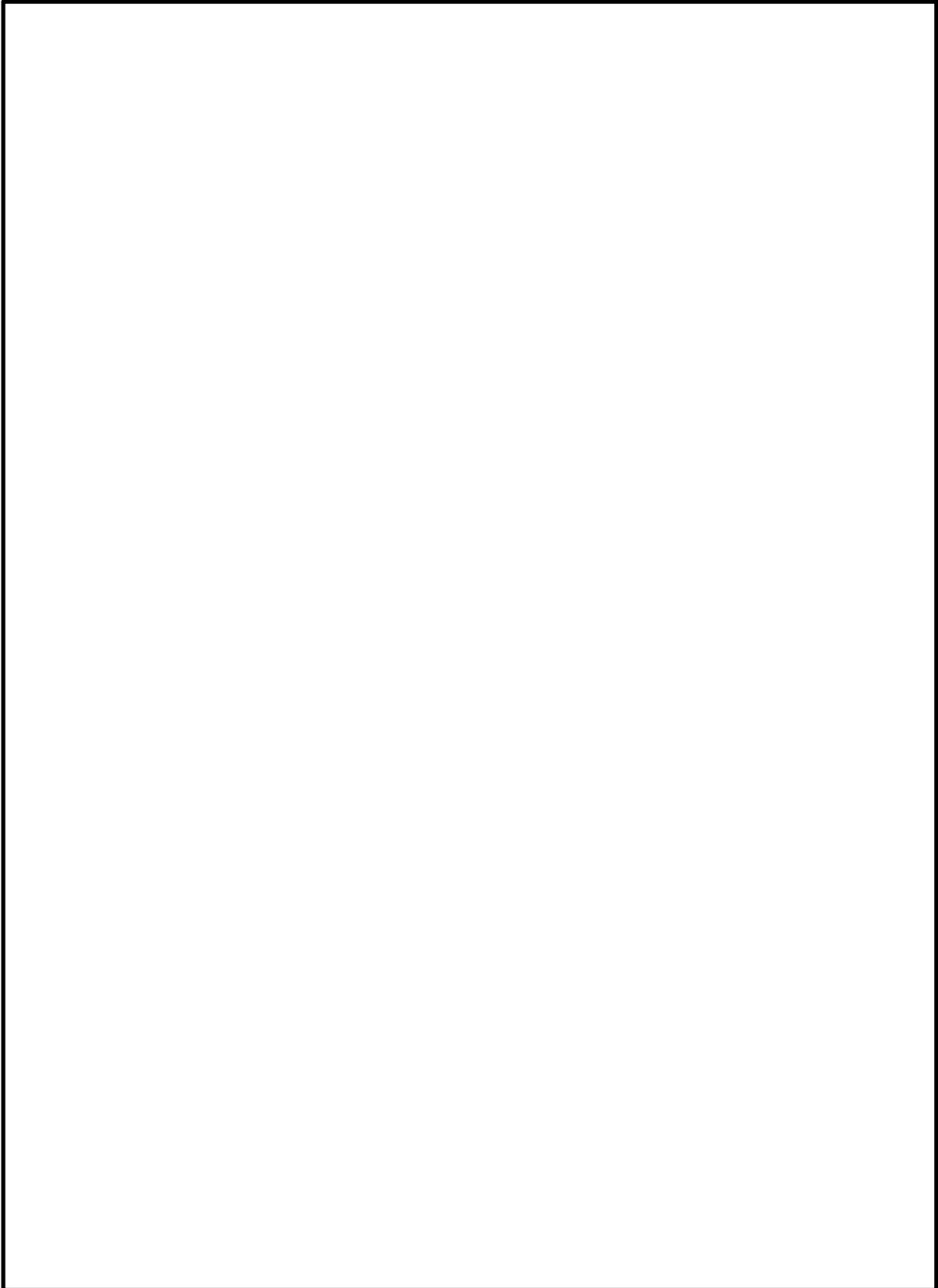


図 2-8 原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図

### 2.3 評価方針

防護鋼板の強度計算は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」及び「5. 許容限界」にて設定している荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえて、防護鋼板の評価対象部位に作用する応力等が許容限界に収まることを「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

防護鋼板の評価フローを図 2-9 に示す。

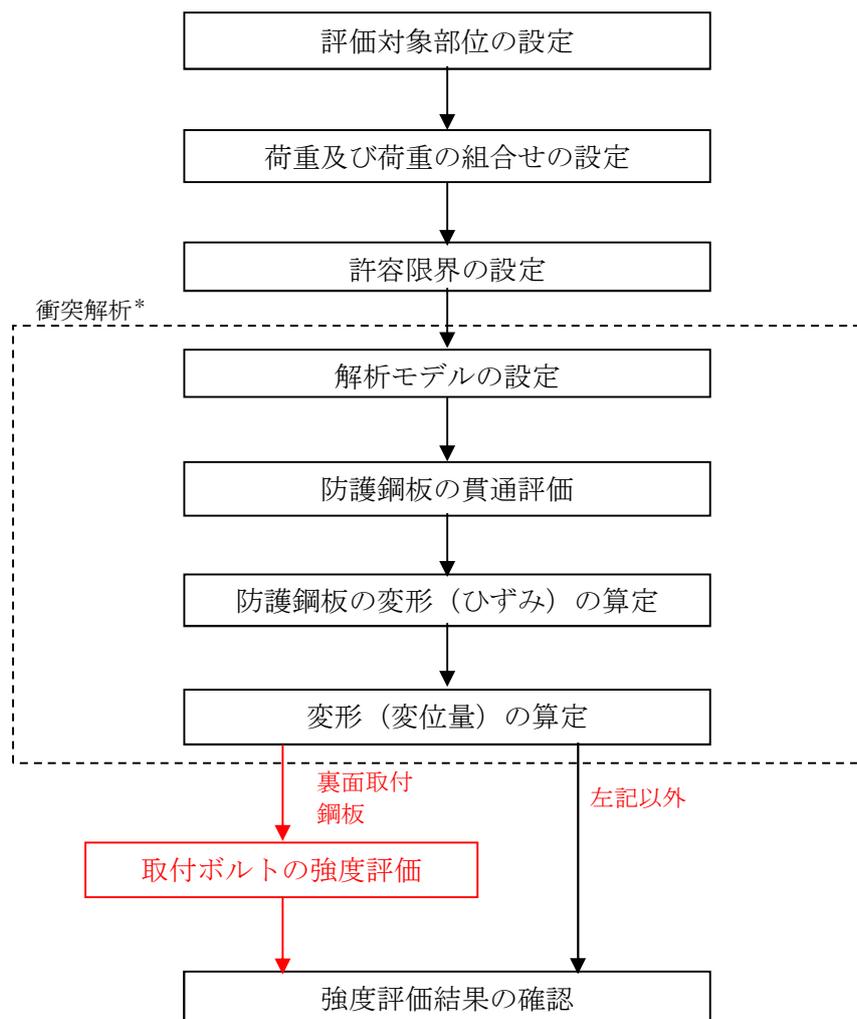
防護鋼板の強度評価においては、その構造を踏まえて、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を設定する。

具体的には、飛来物が防護対象施設に衝突する直接的な影響の評価として、防護対策施設の外殻を構成する防護鋼板に対する貫通評価を実施する。

貫通評価においては、設計荷重に対して、施設の外殻を構成する部材が飛来物を貫通させないために、防護鋼板が終局状態に至るようなひずみを生じないこと（貫通評価）及び防護鋼板の変形量が防護対策施設と防護対象施設の離隔距離に対して妥当な安全余裕を有すること（変形評価）を確認する。

終局状態に至るようなひずみが確認される場合においては、その範囲を確認し、飛来物が貫通するものではないことを確認する。

また、防護鋼板をボルトで留める際には、支持構造物の設計荷重に対する表側の面に設置し、防護鋼板に作用する設計荷重を、支持構造物側に流す設計を基本とする。但し、建屋の内表面へのボルト留めが必要な構造となる、原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板については、ボルトにて設計荷重を全て受け止める構造となることから、据付ボルトが設計荷重に対し破断し、防護鋼板が脱落しないことを確認する（裏面取付鋼板ボルト評価）。



注記\* : 衝突解析については、3次元FEMモデル解析を実施する。

図 2-9 防護鋼板の評価フロー

## 2.4 適用規格

適用する規格，基準，指針等を以下に示す。

- Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Design (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8 (NE I 07-13))
- 日本工業規格 (J I S)
- 「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 J S M E S N C 1-2005/2007」  
( (社) 日本機械学会 (以下「J S M E」という。))
- 「建築物荷重指針・同解説」 (社) 日本建築学会 (2004 改定)
- 「伝熱工学資料 (改訂第 4 版)」 ( (社) 日本機械学会)

### 3. 強度評価方法

#### 3.1 記号の定義

##### (1) 荷重の設定

荷重の設定に用いる記号を表 3-1 に示す。

表 3-1 荷重の設定に用いる記号

記号	単位	定義
A	m <sup>2</sup>	防護鋼板の受圧面積
C	—	防護鋼板の風力係数
F <sub>d</sub>	N	常時作用する荷重
G	—	ガスト影響係数
q	N/m <sup>2</sup>	設計用速度圧
V <sub>D</sub>	m/s	竜巻の最大風速
V <sub>Rm</sub>	m/s	最大接線風速
V <sub>T</sub>	m/s	移動速度
W <sub>M</sub>	N	飛来物による衝撃荷重
W <sub>W</sub>	N	風圧力による荷重
ΔP <sub>max</sub>	N/m <sup>2</sup>	最大気圧低下量
ρ	kg/m <sup>3</sup>	空気密度
F <sub>t</sub>	N	取付ボルトに対し作用する引張力
A <sub>b</sub>	mm <sup>2</sup>	取付ボルトの軸断面積
d	mm	取付ボルトの呼び径
N	—	取付ボルトの本数
σ <sub>bt</sub>	N/mm <sup>2</sup>	取付ボルト 1 本当たりの引張応力

#### 3.2 評価対象部位

##### (1) 貫通評価

防護鋼板の貫通評価として、飛来物が防護鋼板に直接衝突した場合についての解析を行う。

飛来物の衝突を考慮する場合、被衝突物の荷重負担面積が小さいほど衝突エネルギーが分散されず、貫通に係る局所的な損傷が大きくなる傾向にある。従って、貫通評価としては荷重負担面積の小さい部位に代表性があるため、評価対象となる防護鋼板の材質ごとに、開口部寸法が小さく厚みが薄い箇所を踏まえ選定する。なお、防護鋼板の設計においては、厚さを一律   とすることから、開口部寸法が小さい箇所が代表となる。

貫通評価に用いる防護鋼板の仕様を表 3-2 に示す。

表 3-2 貫通評価に用いる防護鋼板の仕様

ケース	寸法 縦(mm)×横(mm)	厚さ	材質
1	1030×1030		
2	827×933		

## (2) 変形評価

防護鋼板の変形評価として、飛来物が防護鋼板に直接衝突した場合についての解析を行う。

飛来物の衝突を考慮する場合、被衝突物の寸法が大きいほどたわみ量が大きくなる傾向にある。従って、変形評価としては、評価対象となる防護鋼板の材料ごとに、開口部寸法が大きく厚みが薄い箇所を踏まえ選定する。なお、防護鋼板の設計においては、厚さを一律  とすることから、開口部寸法が大きい箇所が代表となる。

変形評価に用いる防護鋼板の仕様を表 3-3 に示す。

表 3-3 変形評価に用いる防護鋼板の仕様

ケース	寸法 縦(mm)×横(mm)	厚さ	材質
1	3800×4712		
2	1850×2000		

## 3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重は、V-3-別添 1-2 「防護対策施設の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」を踏まえて設定する。

## (1) 荷重の設定

強度評価には以下の荷重を用いる。荷重の算定に用いる竜巻の特性値を表 3-4 に示す。

表 3-4 荷重の算定に用いる竜巻の特性値

最大風速 $V_D$ (m/s)	移動速度 $V_T$ (m/s)	最大接線風速 $V_{Rm}$ (m/s)	最大気圧低下量 $\Delta P_{max}$ (N/m <sup>2</sup> )
100	15	85	8,900

a. 風圧力による荷重( $W_w$ )

風圧力による荷重 $W_w$ は、下式により算定する。

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

設計用速度圧  $q$  は、下式により算定する。

$$q = (1/2) \rho \times V_D^2$$

b. 飛来物による衝撃荷重 ( $W_M$ )

飛来物による衝撃荷重 ( $W_M$ ) は、表 3-5 に示す飛来物の衝突に伴う荷重とする。飛来速度については、評価の代表性を考慮し、水平、鉛直の飛来速度のうち大きい方である水平方向速度を設定する。

表 3-5 飛来物の諸元

飛来物	寸法 (m)	質量 (kg)	飛来速度 (m/s)
鋼製材	4.2×0.2×0.3	135	51

c. 常時作用する荷重 ( $F_D$ )

常時作用する荷重 ( $F_D$ ) としては、自重を考慮する。

(2) 荷重の組合せ

貫通評価、変形評価に用いる荷重の組合せは、V-3-別添 1-2 「防護対策施設の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」のとおり、風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及び常時作用する荷重を組み合わせる。

荷重の組合せを表 3-6 に示す。

表 3-6 荷重の組合せ

評価内容	荷重の組合せ
貫通評価 変形評価 裏面取付鋼板ボルト評価	$W_W + W_M + F_D$

ここで、風圧力による荷重と自重の組合せを考えた場合、鉛直設置鋼板への飛来物衝突時の変形方向（水平）においては、想定する風圧力（想定最大値：6100=7320 N/m<sup>2</sup>）が卓越する。これは、水平設置鋼板の衝突時変形方向（鉛直下向き）に作用する、風圧力（上向きのため考慮しない）と鋼板の自重（約    N/m<sup>2</sup>）の和より大きくなることから、評価においては、代表性を考慮し鉛直設置鋼板の風圧力を想定した荷重を設定する。

3.4 許容限界

防護鋼板の許容限界は、V-3-別添 1-2 「防護対策施設の強度計算の方針」の「5. 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえて設定する。

(1) 貫通評価

貫通評価の許容限界としては、鋼材の破断ひずみを設定する。破断ひずみについては、「3.5.(3)b. 破断ひずみ」に示すとおり、JIS に規定されている伸びの下限値を基に設定するが、「NEI 07-13 : Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs」(以下「NEI 07-13」という。)においてTF(多軸性係数)を□とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF=□を考慮して設定する。

貫通評価の許容限界を表 3-7 に示す。

表 3-7 許容限界(防護鋼板の貫通評価)

ケース	材質	破断ひずみ (真ひずみ)
1		
2		

(2) 変形評価

変形評価の許容限界としては、防護鋼板の材質ごとに、それぞれが適用されている部位における防護対象施設との離隔距離未満の変形量を設定する。

変形評価の許容限界を表 3-8 に示す。

表 3-8 許容限界(防護鋼板の変形評価)

ケース	材質	衝突方向変位量(mm)
1		
2		

(2) 裏面取付鋼板ボルト評価

裏面取付鋼板ボルト評価の許容限界としては、J E A G 4 6 0 1を準用し、その他支持構造物の許容限界を適用し、許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>Sから算出した許容応力を許容限界とする。

裏面取付鋼板ボルト評価の許容限界を表 3-9 に示す。

表 3-9

許容限界(裏面取付鋼板ボルト評価)

許容応力状態	許容限界
	1次応力(引張)
Ⅲ <sub>A</sub> S	1.5 ft

### 3.5 評価方法

#### 3.5.1 貫通評価及び変形評価

##### (1) 解析モデル

防護鋼板の貫通評価及び変形評価は、解析コード「LS-DYNA」を用いて3次元FEMモデルによりモデル化し評価を実施する。なお、評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、別紙1「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

防護鋼板はシェル要素でモデル化し、境界条件は、防護鋼板の端部を完全固定とする。飛来物は、衝突時の荷重が保守的となるよう接触断面積を小さくするため、先端部（衝突部）を開口としてシェル要素でモデル化する。

防護鋼板及び飛来物の解析モデル図を図3-1に示す。



図 3-1 防護鋼板及び飛来物の解析モデル図

##### (2) 材料定数

飛来物及び防護鋼板に使用する鋼材の材料定数を表3-9に示す。

材料定数は、JIS及び「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—（社）日本建築学会（2005改定）」に基づき設定する。

表 3-9 使用材料の材料定数

	材質	厚さ (mm)	降伏応力 $\sigma_y$ (MPa)	ヤング係数 E (MPa)	ポアソン比
飛来物 (鋼製材)					
防護 鋼板					

##### (3) 鋼製材料の非線形特性

###### a. 材料の応力-ひずみ関係

飛来物の衝突に対する解析は、変形速度が大きいいためひずみ速度効果を考慮することとし、

以下に示す Cowper-Symonds の式を適用する。

$$\sigma_{e_q} = (A + B \varepsilon_{p1}^n) \left\{ 1 + (\dot{\varepsilon}_{p1}/D)^{1/q} \right\}$$

ここで、 $\sigma_{e_q}$ は動的応力、Aは降伏応力、Bは硬化係数、 $\varepsilon_{p1}$ は相当塑性ひずみ、 $\dot{\varepsilon}_{p1}$ は無次元相当塑性ひずみ速度、nは硬化指数、D及びqはひずみ速度係数を表す。これらのパラメータを表 3-10 に示す。

表 3-10 Cowper-Symonds 式への入力パラメータ

	飛来物 (鋼製材)	防護鋼板
材料		
B		
n		
D (s <sup>-1</sup> )		
q		

材料の応力-ひずみ関係はバイリニア型とする。

バイリニア型応力-ひずみ関係の概念図を図 3-2 に示す。

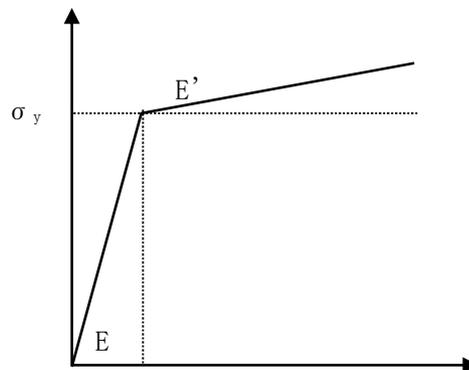


図 3-2 バイリニア型応力-ひずみ関係の概念図

b. 破断ひずみ

破断ひずみは、JIS に規定されている伸びの下限値を基に設定する。また、「NEI 07-13」においてTF (多軸性係数) を 2.0 とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF=  を考慮する。TFについては、防護鋼板のみ  とする。

鋼製材は、保守的に破断ひずみを超えても要素を削除せず、荷重を負担するものとする。防護鋼板の破断ひずみを表 4-5 に示す。

表 4-5 防護鋼板の破断ひずみ

ケース	材質	JIS 規格値 (伸び)	T F	破断ひずみ※
1				
2				

※：真ひずみ換算値

### 3.5.2 裏面取付鋼板ボルト評価

#### (1) 評価モデル

原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板の、裏面取付鋼板ボルト評価における引張応力は、防護鋼板の受圧面積に対する風圧力及び設計飛来物の衝突荷重に対し、これを全て取付ボルトで受けるものとして計算する。

#### イ. 引張力

$$F_t = W_w + W_M$$

#### ロ. 引張応力

$$\sigma_{bt} = F_{bt} / (N \cdot A_b)$$

ここで,

$$A_b = \pi \cdot d^2 / 4$$

4. 評価条件

「3.強度評価方法」に用いる評価条件のうち、（原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板）に関するものを、表 4-1 から表 4-3 に示す。

表 4-1 裏面取付鋼板ボルト評価に用いる条件  
（原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板）

評価対象部位	材料	温度条件 (°C)	$S_y$ (MPa)	$S_u$ (MPa)	$1.5 f_t$ (MPa)
取付ボルト					

表 4-2 評価条件

q (N/m <sup>2</sup> )	G (-)
$6.1 \times 10^3$	0.8

表 4-3 評価条件（原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板）

C (-)	A (m <sup>2</sup> )	$W_M$ (kN)	ボルト サイズ	N (-)	$A_b$ (mm <sup>2</sup> )

5. 強度評価結果

(1) 貫通評価

防護鋼板の貫通評価結果を第 5-1 表に示す。防護鋼板のひずみは許容限界を超えず、設計飛来物は防護鋼板を貫通しない。

第 5-1 表 貫通評価結果

ケース	ひずみ	
	評価結果	許容限界
1		
2		

(2) 変形評価

防護鋼板の変形評価結果を第 5-2 表に示す。衝突方向変位量は許容限界を超えず、防護鋼板が防護対象施設に接触することはない。

第 5-2 表 変形評価結果

ケース	衝突方向変位量	
	評価結果 (mm)	許容限界 (mm)
1		
2		

(3) 裏面取付鋼板ボルト評価

裏面取付鋼板ボルト評価の結果を第 5-3 表に示す。取付ボルトに発生する応力は許容限界を超えず、防護鋼板が脱落することはない。

第 5-3 表 裏面取付鋼板ボルト評価結果

衝突方向変位量	
発生応力 (N/mm <sup>2</sup> )	許容限界 (N/mm <sup>2</sup> )



V-3-別添 1-2-1-3 架構の強度計算書

## 目次

1.	概要	1
2.	基本方針	1
2.1	位置	1
2.2	構造概要	2
2.3	評価方針	18
2.4	適用規格	20
3.	強度評価方法	21
3.1	記号の定義	21
3.2	評価対象部位	21
3.3	荷重及び荷重の組合せ	22
3.4	許容限界	23
3.5	評価方法	25
4.	評価条件	38
5.	強度評価結果	42
5.1	貫通評価	42
5.2	支持機能評価	42

## 1. 概要

本資料は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」に示すとおり、防護対策施設である非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設、中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設、海水ポンプエリア竜巻防護対策施設、原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設、中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設、使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の架構が、設置（変更）許可申請書に示す設計飛来物（以下「飛来物」という。）の衝突に加え、風圧力に対し、竜巻時及び竜巻通過後においても防護対象施設に飛来物を衝突させず、また、機械的な波及的影響を与えず、防護対象施設の安全機能維持を考慮して、架構の主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

## 2. 基本方針

V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」を踏まえ、架構の「2.1 位置」、 「2.2 構造概要」、 「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

### 2.1 位置

架構は、原子炉建屋（ディーゼル発電機室屋上、原子炉棟外壁及び付属棟屋上並びに外壁）、海水ポンプ室周り及び使用済燃料乾式貯蔵建屋外壁に設置する。

架構の設置位置図を図 2-1 に示す。

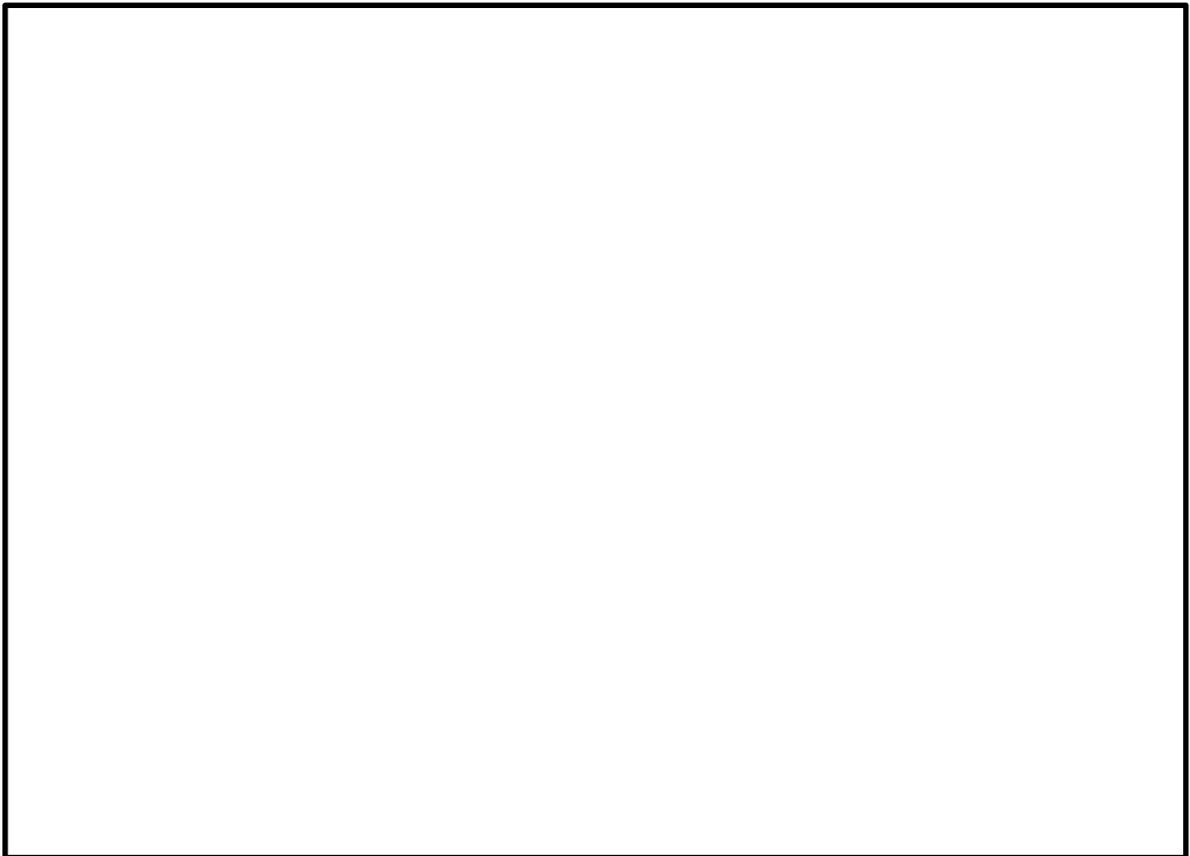


図 2-1 架構の設置位置図

## 2.2 構造概要

架構の構造は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「3.3 架構の構造設計」に示す構造計画を踏まえて設定する。

### (1) 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構

非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設の架構は、防護ネット及び防護鋼板を設置するための鉄骨構造であり、防護対象施設であるディーゼル発電機室ルーフベントファンを内包する施設として、柱、はり等により構成される。

非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造を図 2-2 に示す。

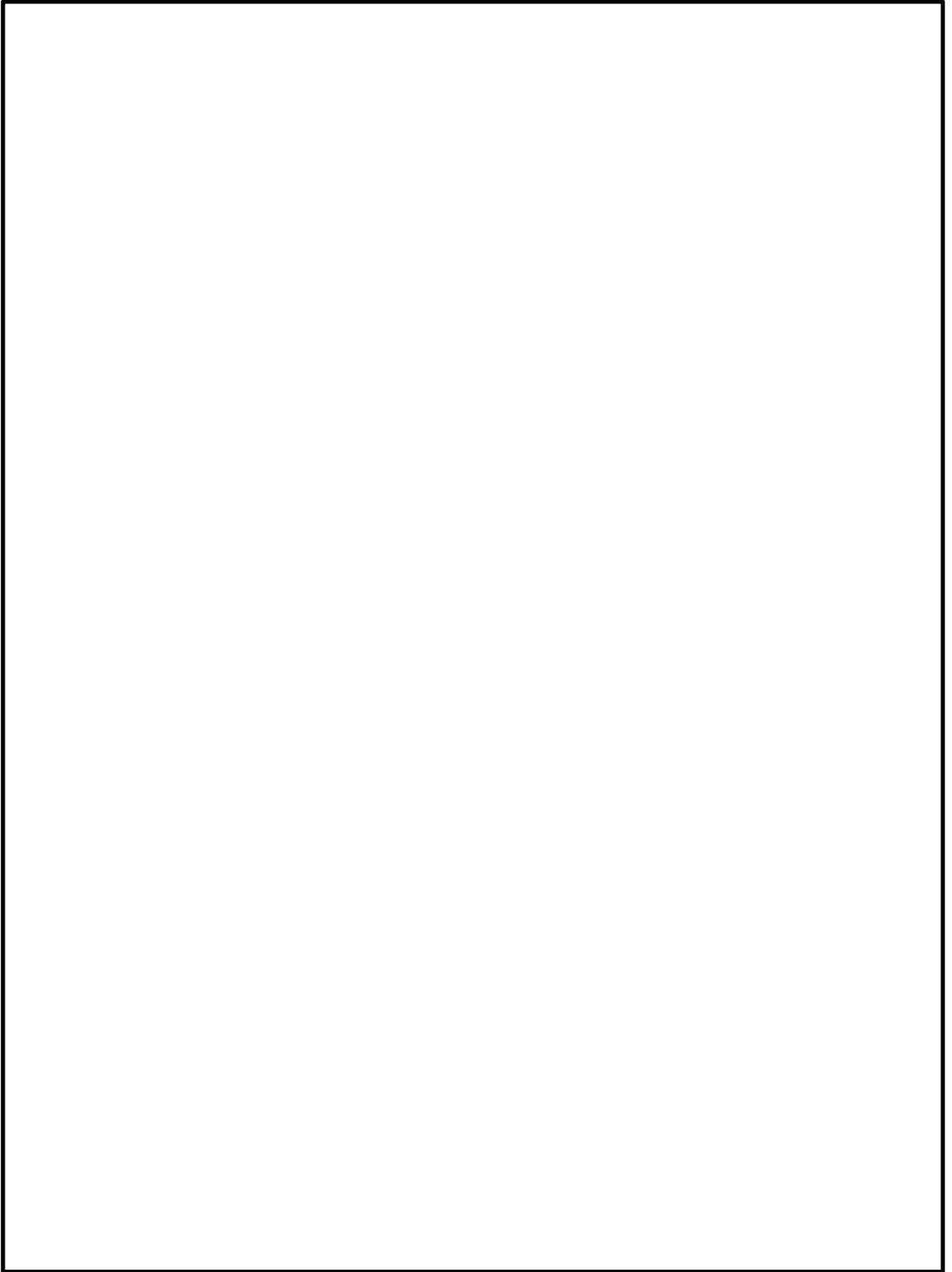


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造図(1/4)  
(2 C 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

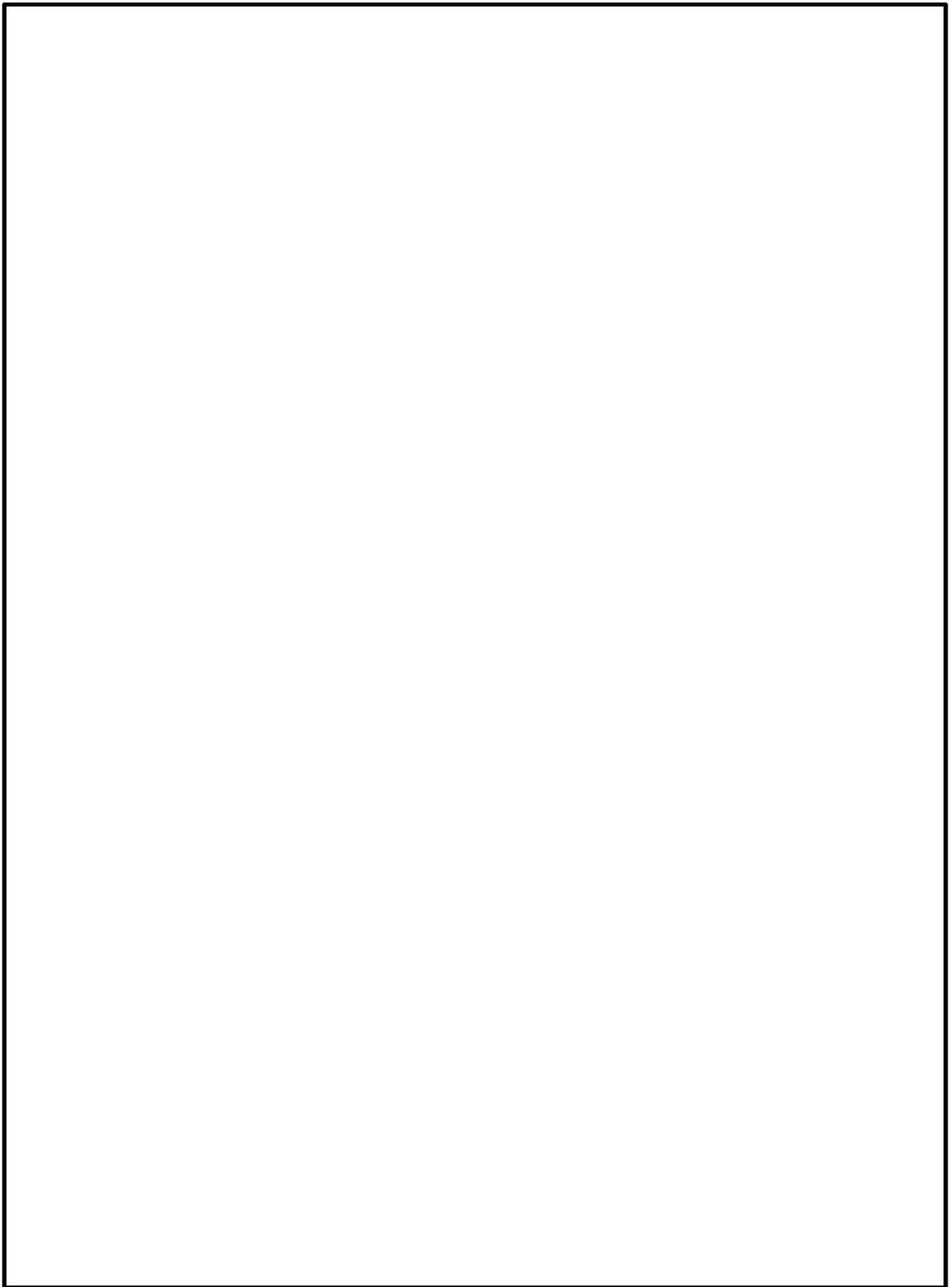


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設架構の構造図(2/4)  
(2D非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設(1/2))

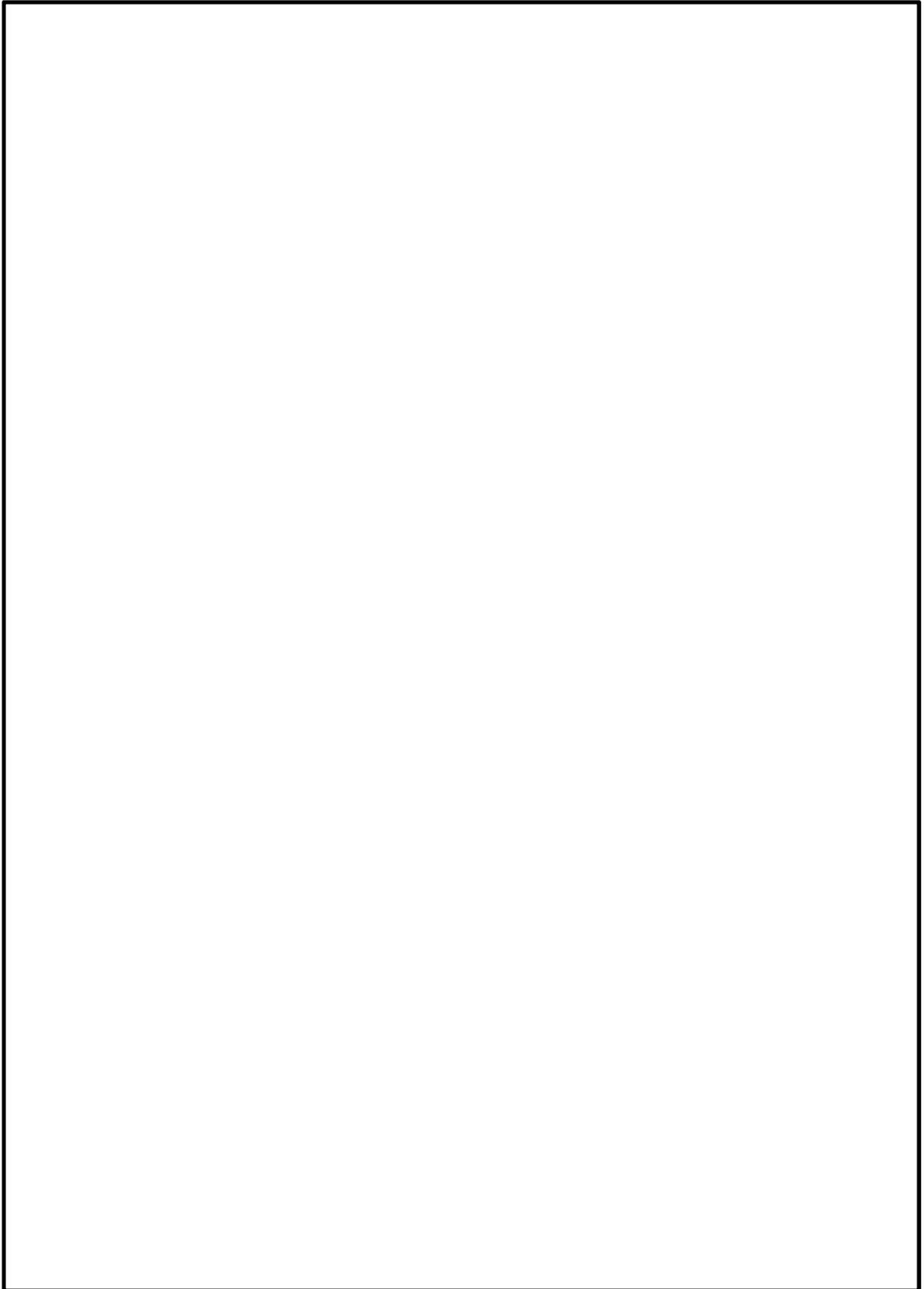


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造図(3/4)  
(2 D非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設(2/2))

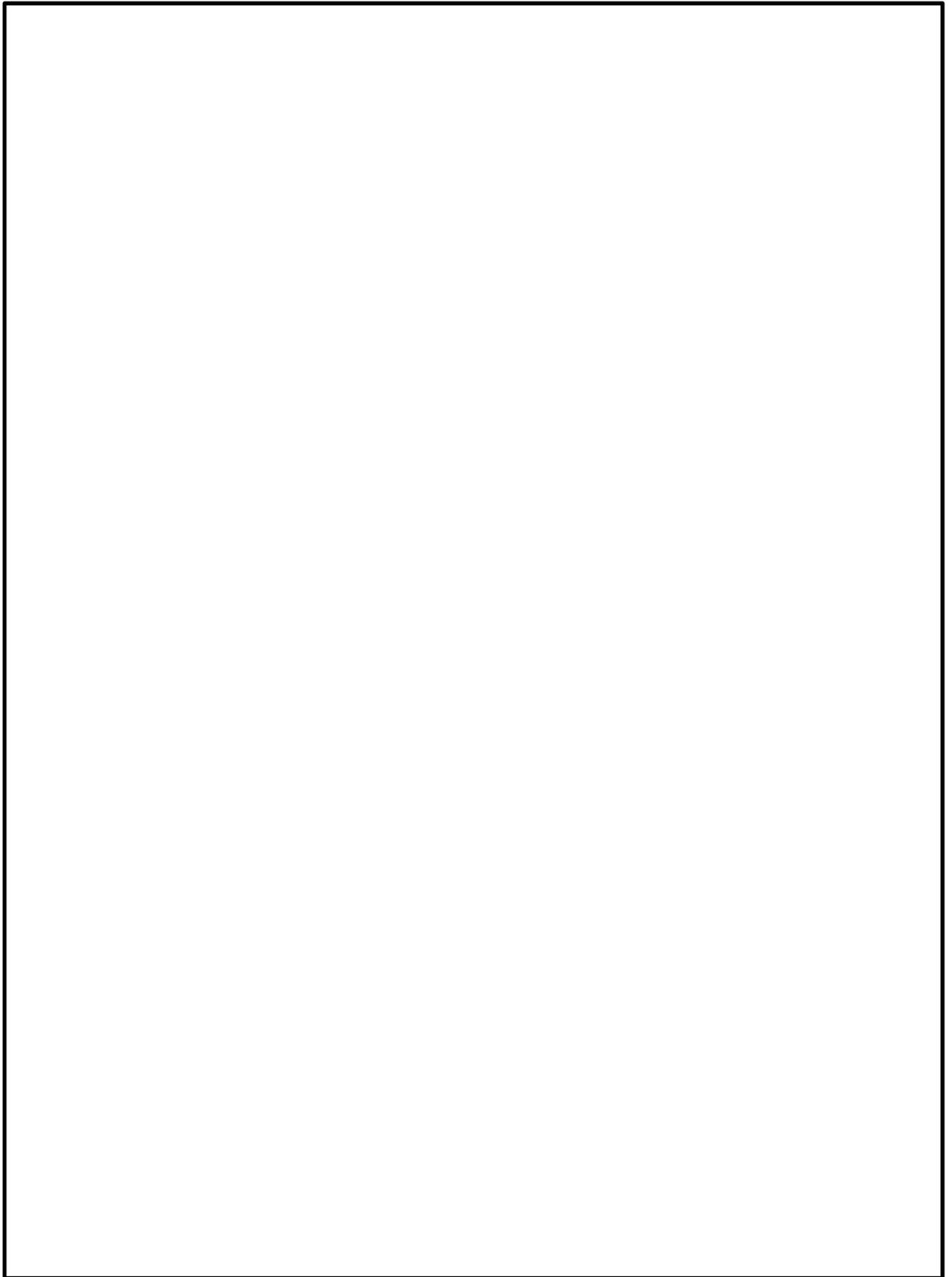


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造図(3/4)  
(高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

(2) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構

中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設の架構は、防護ネット及び防護鋼板を設置するための鉄骨構造であり、防護対象施設である中央制御室換気系冷凍機を内包する施設として、柱、はり等により構成される。

中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造を図 2-3 に示す。

中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図を図 2-3 に示す。

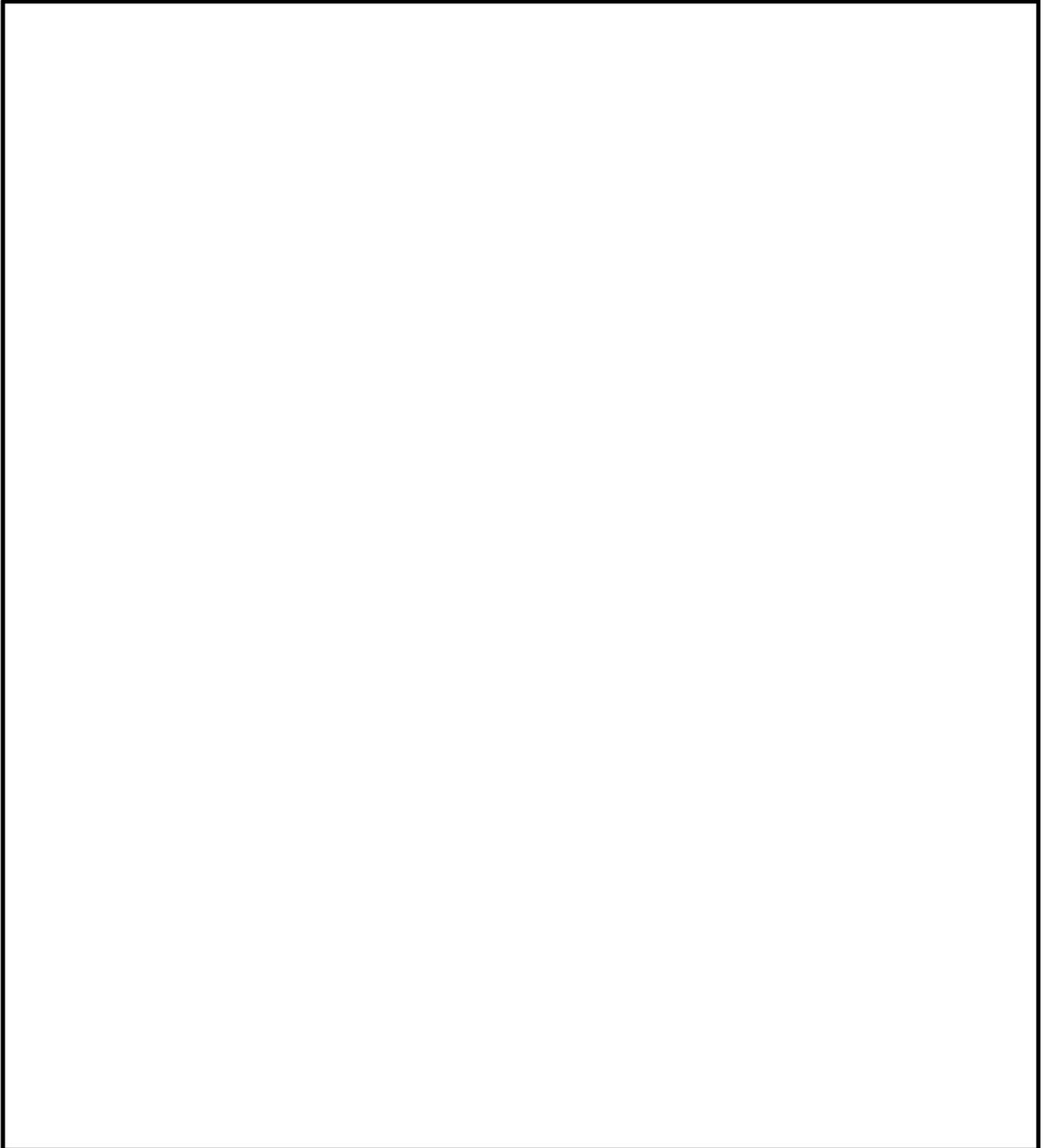


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(1/6)

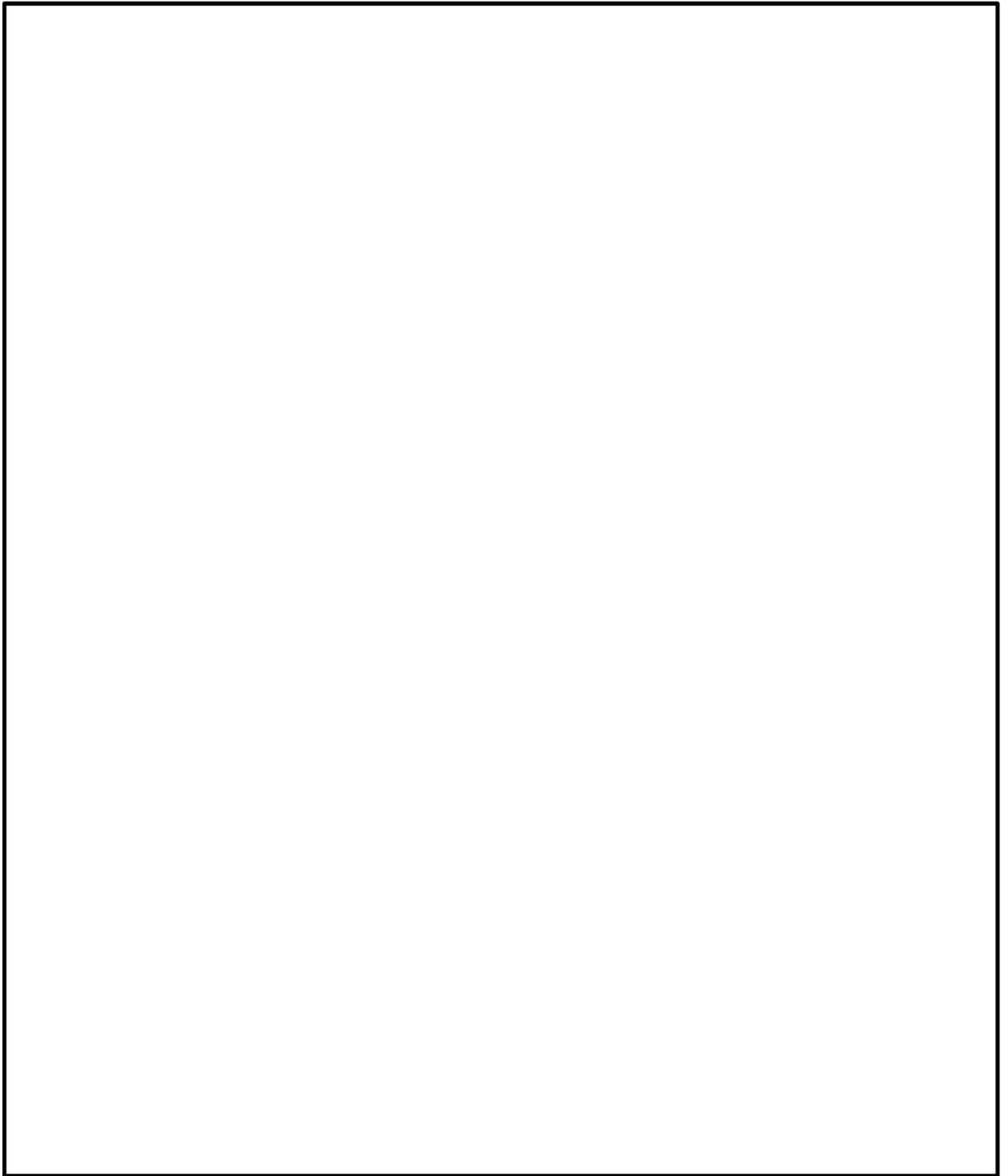


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(2/6)

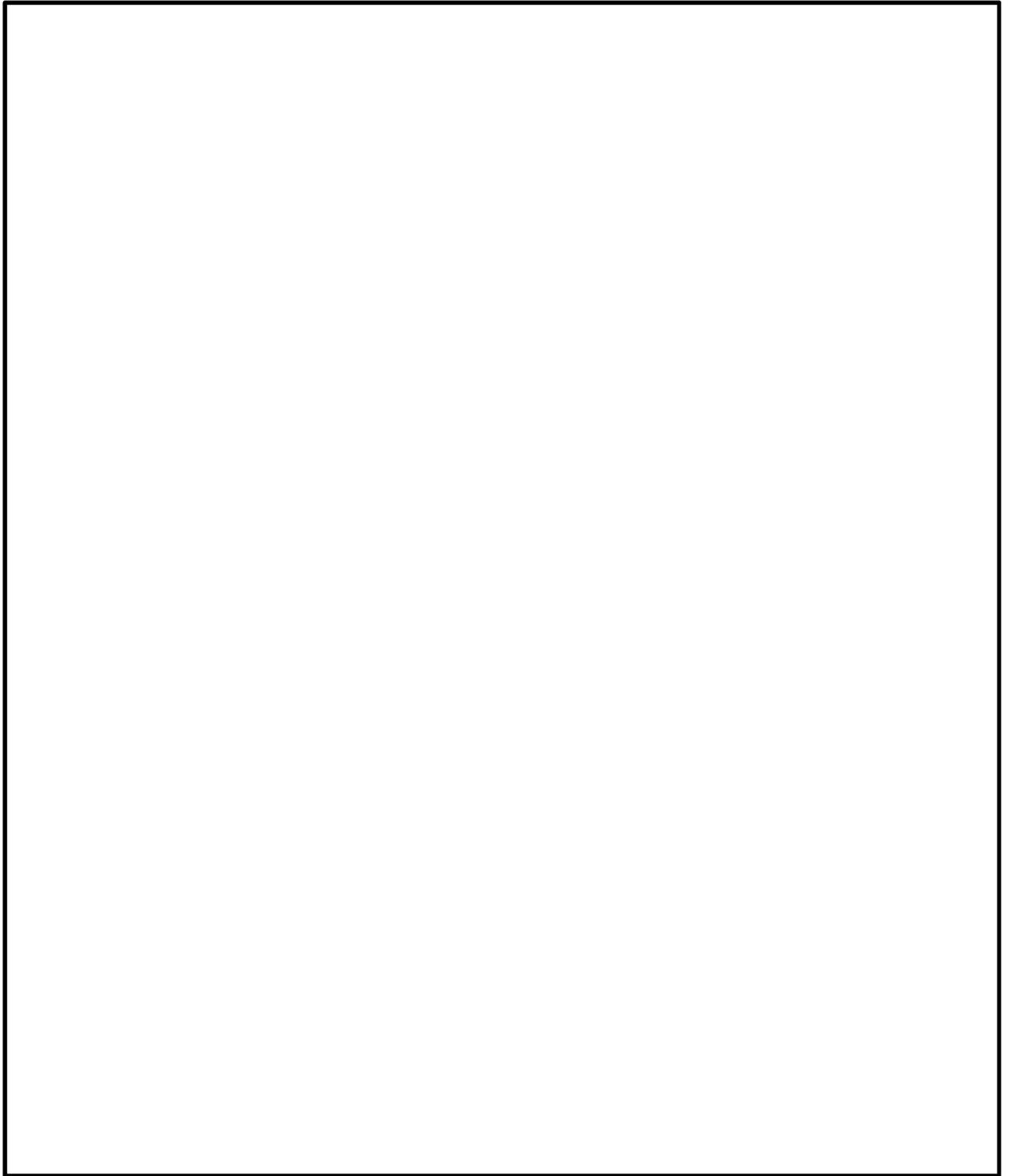


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(3/6)

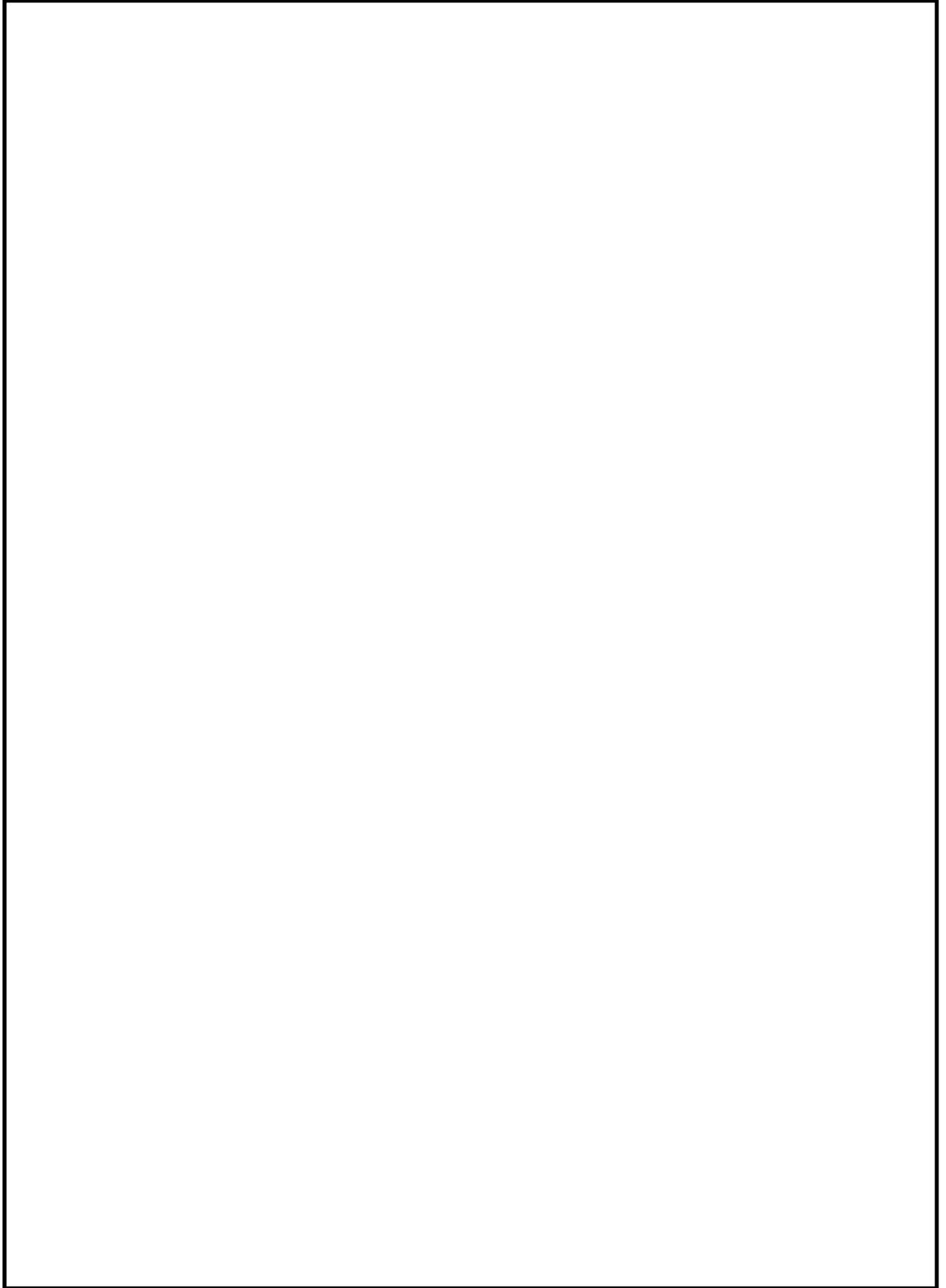


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(4/6)

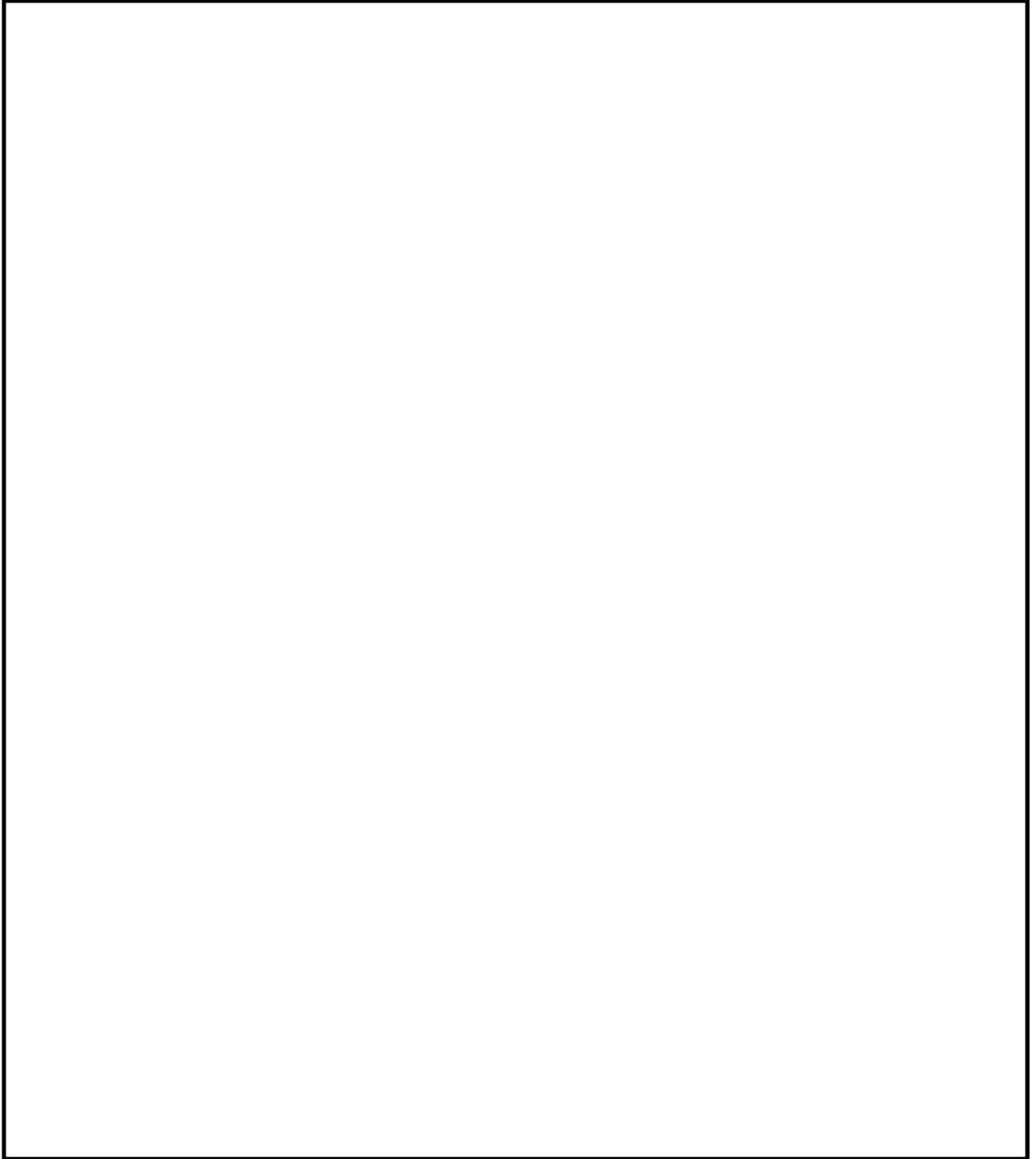


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(5/6)

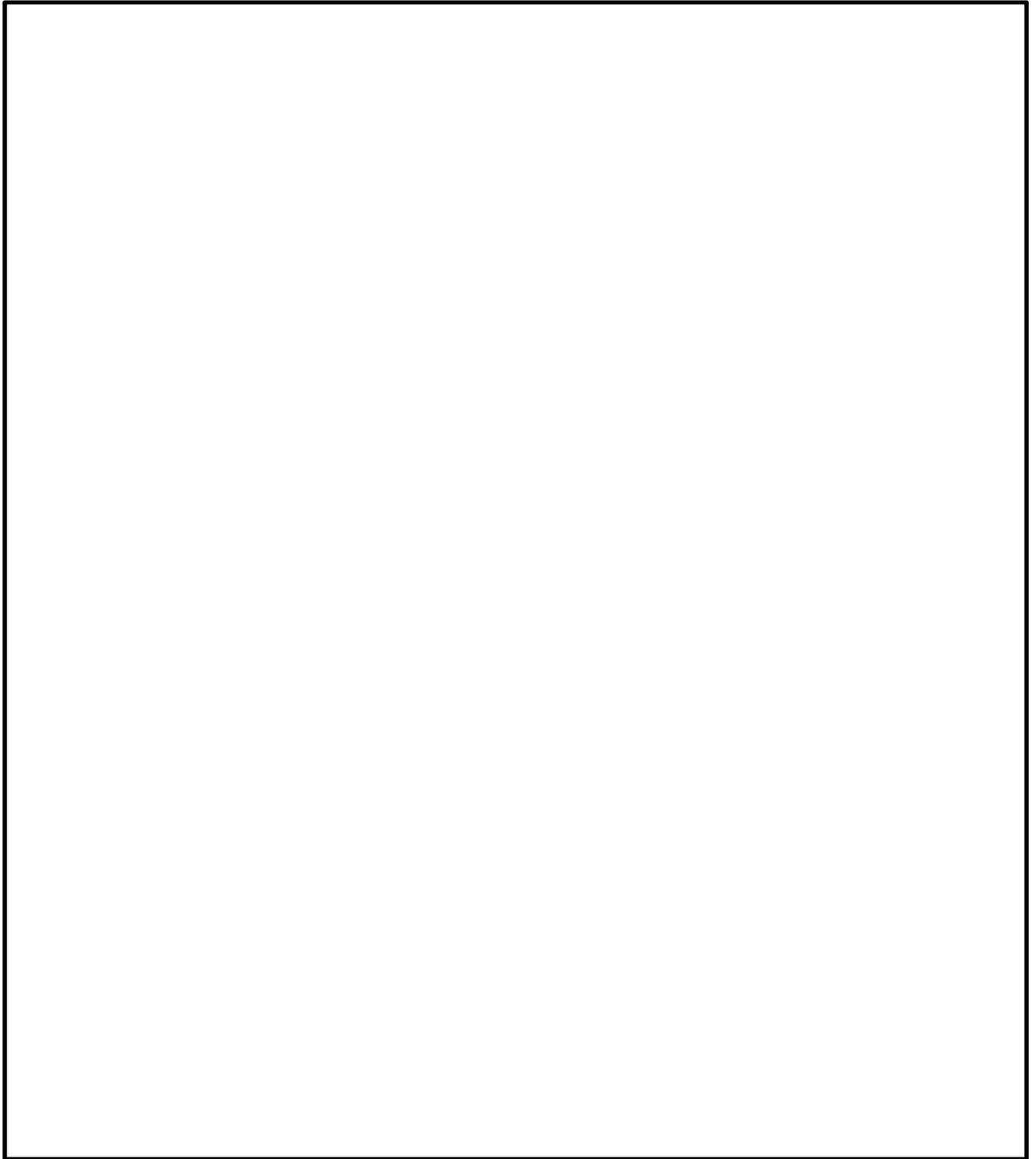


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(6/6)

(3) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構

海水ポンプエリア竜巻防護対策施設の架構は、防護ネット及び防護鋼板を設置するための鉄骨構造であり、防護対象施設である残留熱除去系海水系配管等を内包する施設として、柱、はり等により構成される。

海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構の構造図を図 2-4 に示す。

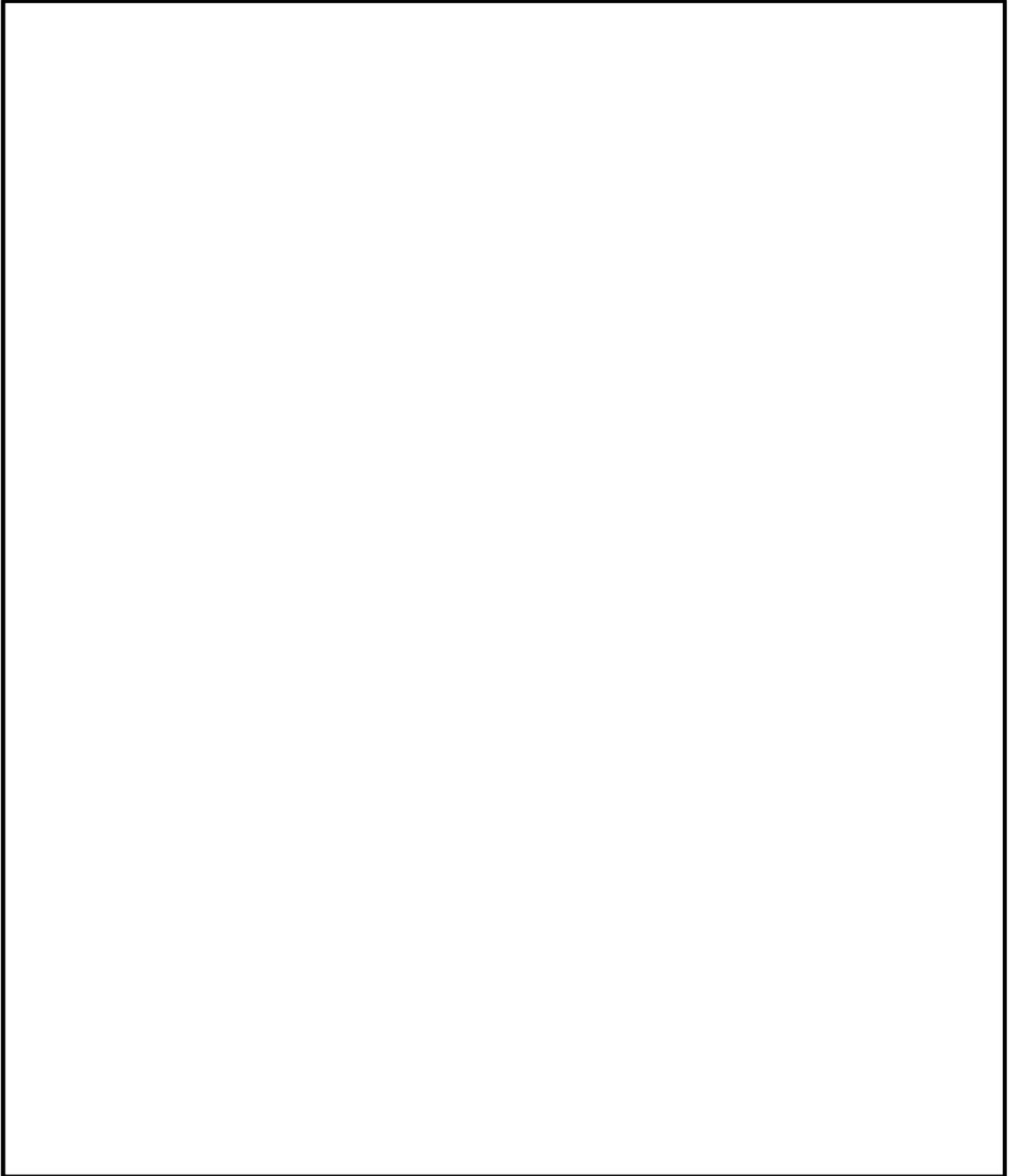


図 2-4 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構の構造図 (1/2) (エリア⑦)

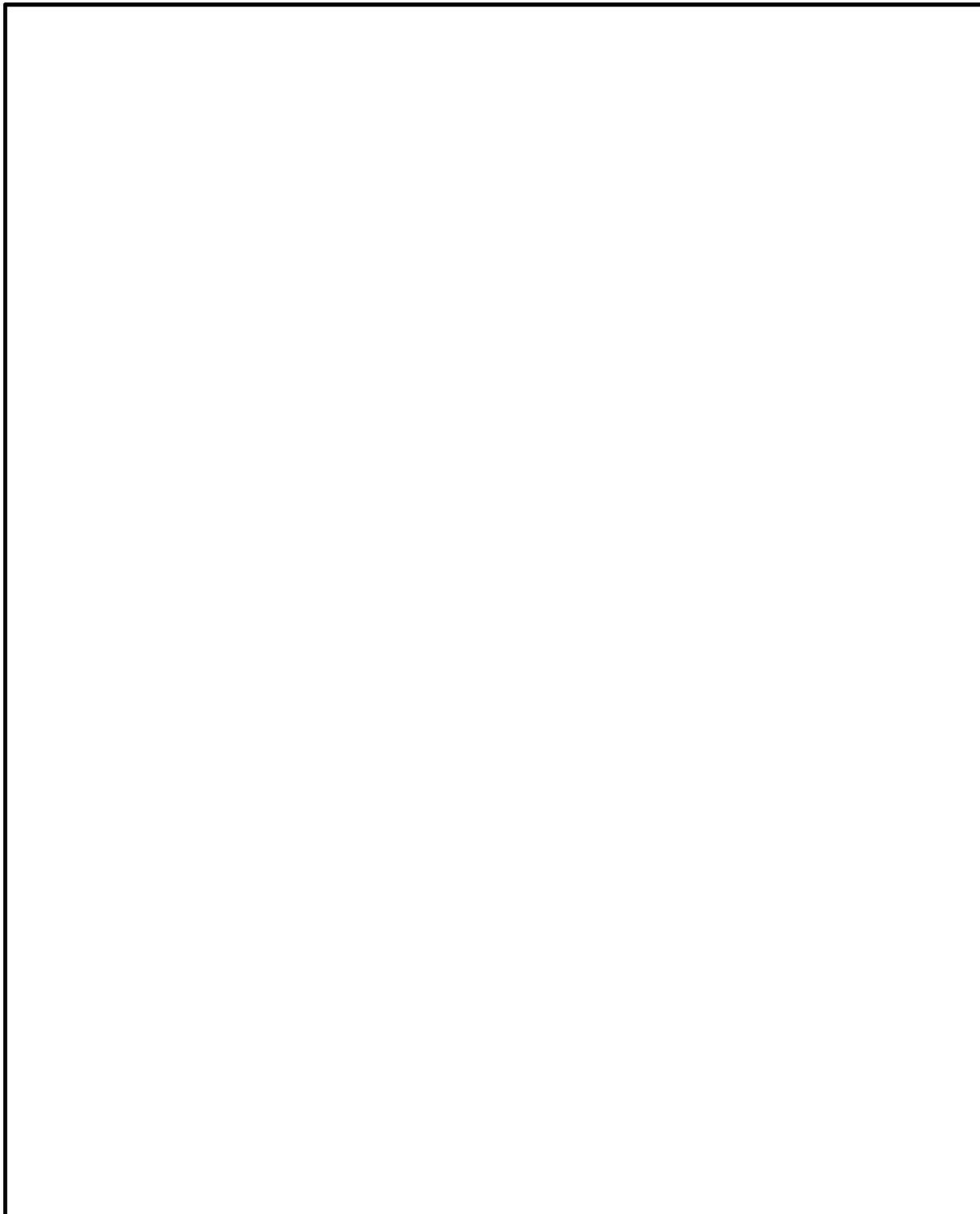


図 2-4 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構の構造図 (2/2) (エリア⑧)

(4) 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構

原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構は、防護ネット及び防護鋼板を設置するための鉄骨構造であり、防護対象施設である原子炉建屋外側ブローアウトパネル及び原子炉建屋原子炉棟 6 階設置設備（使用済燃料プール及び燃料プール冷却浄化系真空破壊弁）を内包する施設として柱、はり等により構成される。

原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構の構造を図 2-5 に示す。

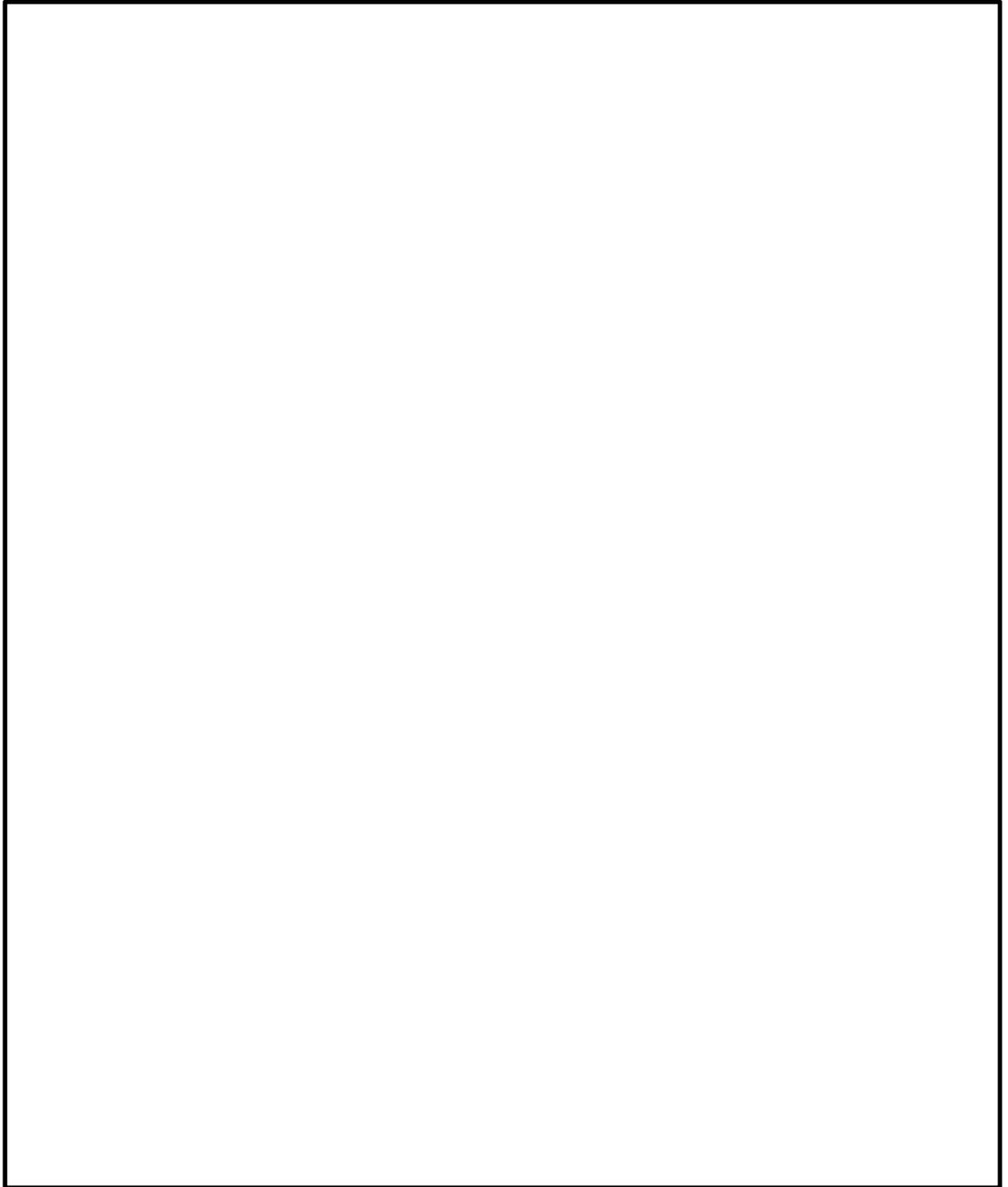


図 2-5 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構の構造図

(5) 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構

中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構は、防護鋼板を設置するための鉄骨構造であり、防護対象施設である中央制御室換気系ファン等を内包する施設として柱、はり等により構成される。

中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構の構造を図 2-6 に示す。

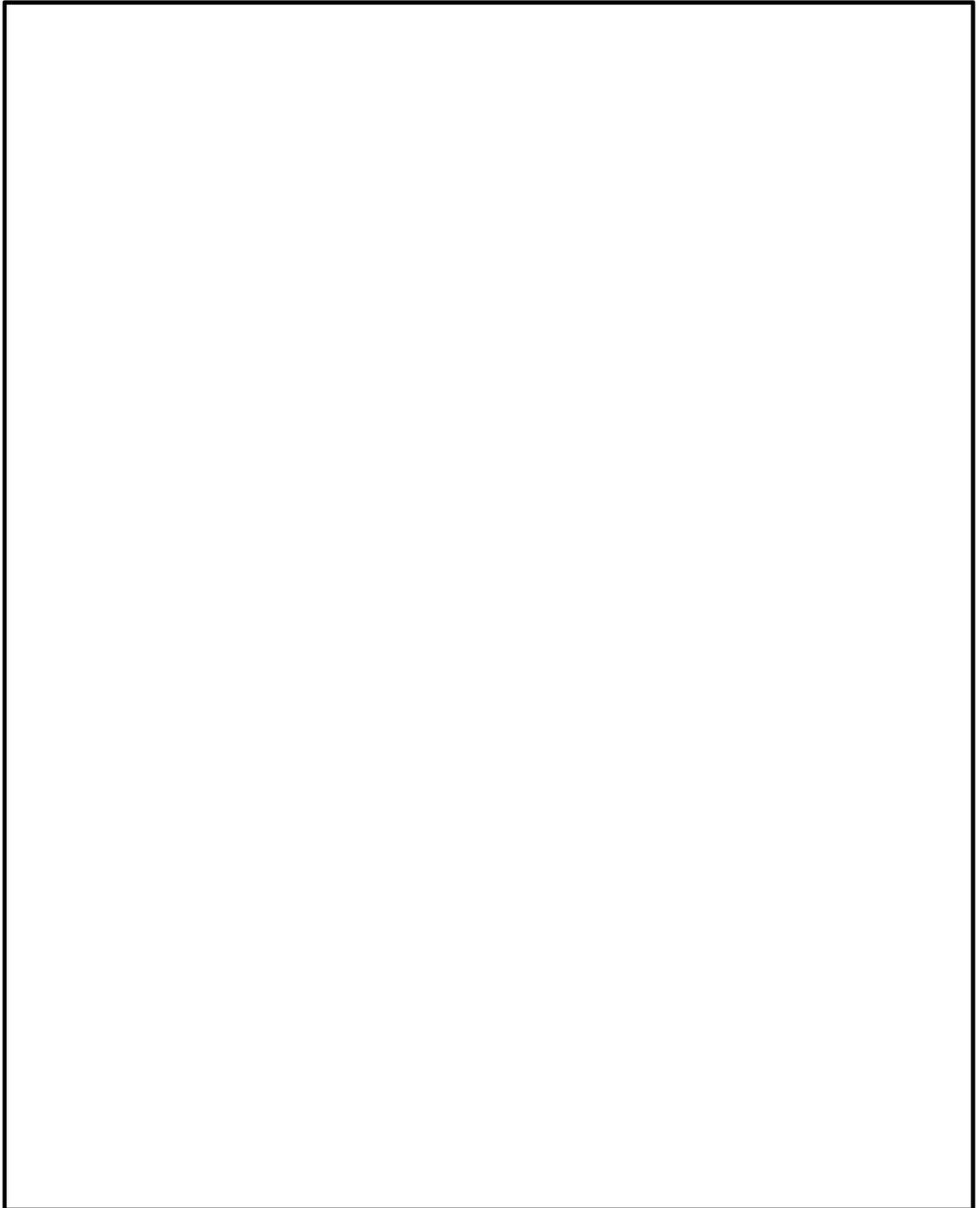


図 2-6 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構の構造図

(6) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構

使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構は、車両防止柵としての機能を有する鉄骨構造であり、柱、はり等により構成される。

使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構の構造を図 2-7 に示す。

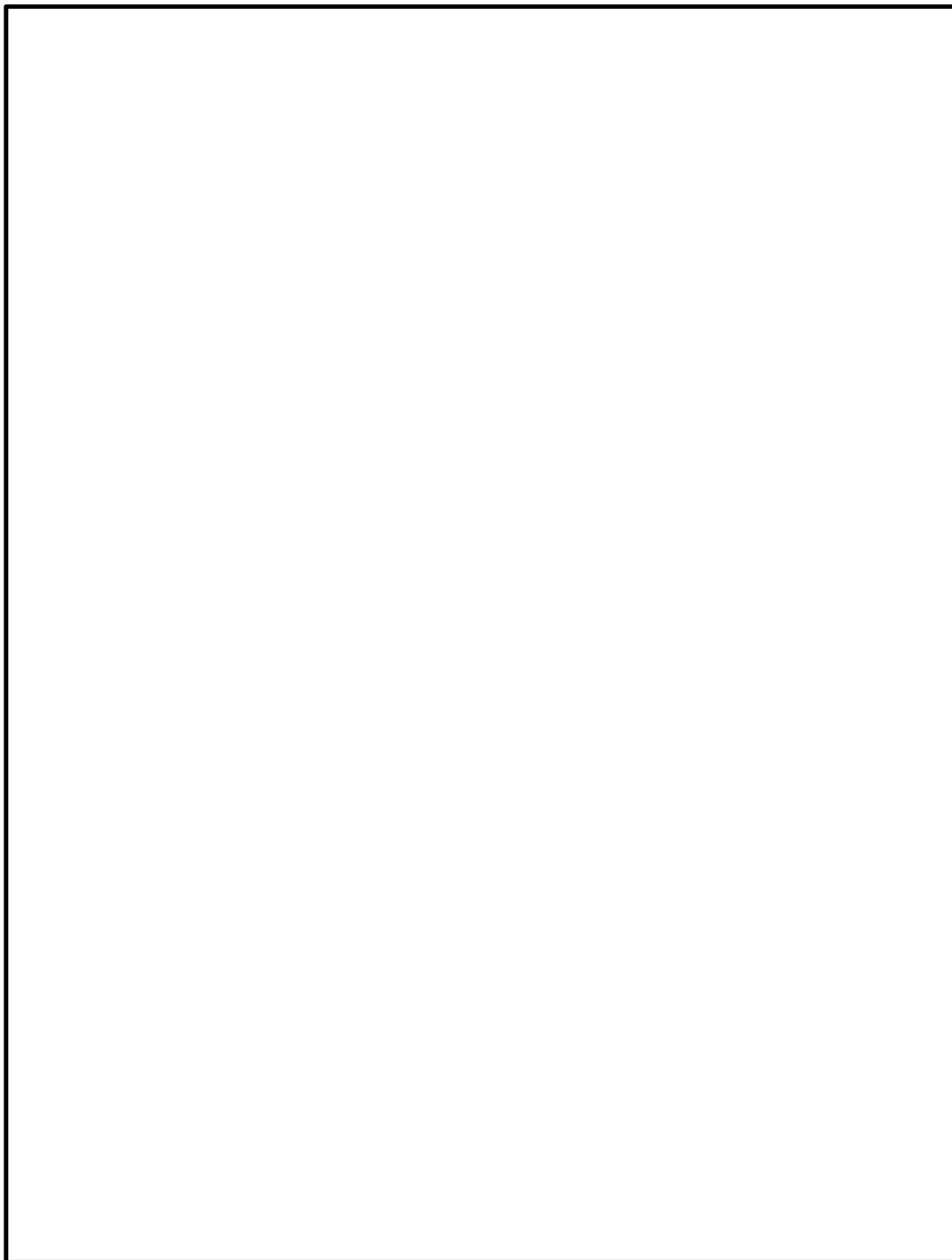


図 2-7 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構の構造図

## 2.3 評価方針

架構の強度計算は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」及び「5. 許容限界」にて設定している荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえて、架構の評価対象部位に作用する応力等が許容限界に収まることを「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

架構の評価フローを図 2-8 に示す。

架構の強度評価においては、その構造を踏まえて、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を設定する。

具体的には、設計荷重に対して、防護対象施設の機能喪失に至る可能性のある飛来物が架構を構成する柱、はり等の部材（以下「架構部材」という。）を貫通し防護対象施設へ衝突しないことを確認するための、架構部材に対する貫通評価を実施する。また、架構に上載する防護ネット及び防護鋼板を支持する機能を保持可能な構造強度を有することを確認するための、架構部材及び架構全体に対する支持機能評価を実施する。

さらに、設計竜巻の風圧力による荷重及び飛来物による衝撃荷重並びにその他の荷重に対し、架構が倒壊し防護対象施設に機械的な波及的影響を与えないことを確認するための、波及的影響評価を実施する。

以下に、これらの評価にて確認する評価項目を示す。

### (1) 貫通評価

飛来物の架構への直接衝突により、架構部材が全断面欠損に至らないことを確認する。

### (2) 支持機能評価

#### a. 架構部材の支持機能評価

飛来物の架構、防護ネット及び防護鋼板への衝突において、架構部材に破断が生じないよう十分な余裕を持った強度が確保されていることを確認する。

#### b. 架構全体の支持機能評価

飛来物が衝突した際の衝撃荷重により架構全体に作用する応答加速度に対して、防護対策施設の倒壊に至るような架構の変形が生じないように、架構及び架構と建屋等の接合部に十分な余裕を持った強度が確保されていることを確認する。

### (3) 波及的影響評価

波及的影響評価については、「2.3(2) 支持機能評価」の評価に同じ。

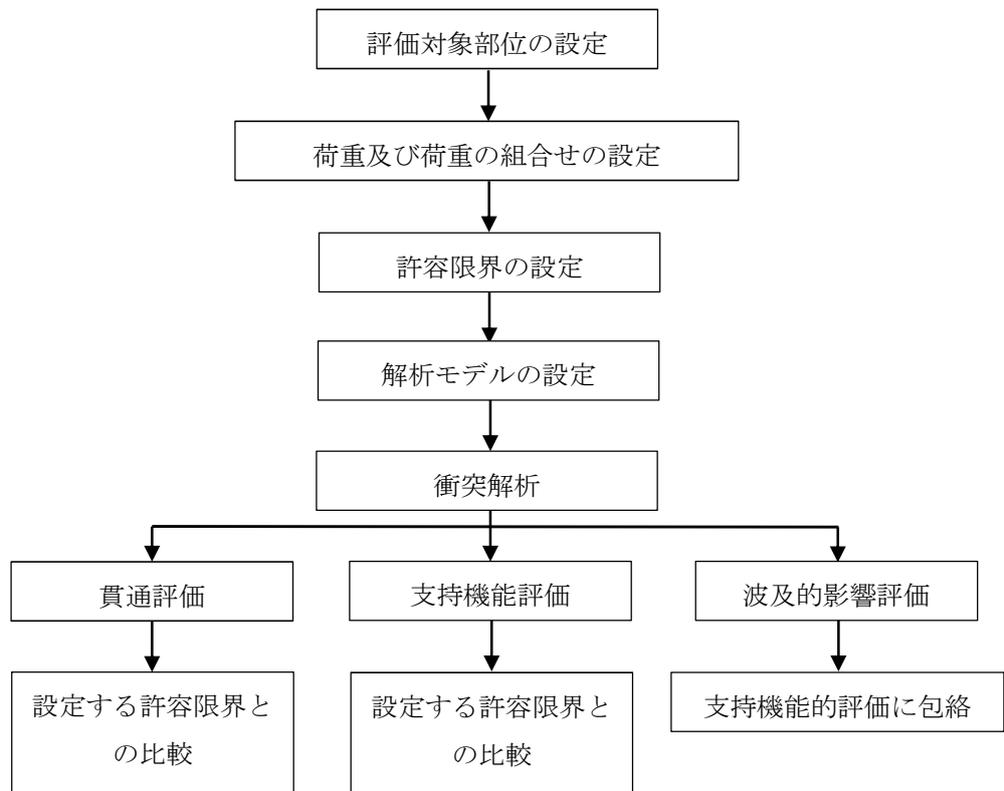


図 2-8 架構の評価フロー

## 2.4 適用規格

適用する規格，基準，指針等を以下に示す。

- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1-2005/2007」  
（（社）日本機械学会（以下「JSME」という。））
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG 4601・補-1984」（社）日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987」（社）日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1991 追補版」（社）日本電気協会
- ・日本工業規格（JIS）
- ・「建築物荷重指針・同解説」（（社）日本建築学会，2004 改定）
- ・「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—」（（社）日本建築学会，2005 改定）
- ・「鋼構造接合部設計指針」（（社）日本建築学会，2012 改定）
- ・Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8(NEI 07-13))
- ・「伝熱工学資料（改訂第4版）」（（社）日本機械学会）

### 3. 強度評価方法

#### 3.1 記号の定義

##### 3.1.1 荷重の設定

荷重の設定に用いる記号を表 3-1 に示す。

表 3-1 荷重の設定に用いる記号

記号	単位	定
A	m <sup>2</sup>	受圧面積
C	—	風力係数
F <sub>d</sub>	N	常時作用する荷重
G	—	ガスト影響係数
q	N/m <sup>2</sup>	設計用速度圧
V <sub>D</sub>	m/s	竜巻の最大風速
V <sub>Rm</sub>	m/s	最大接線風速
V <sub>T</sub>	m/s	移動速度
W <sub>M</sub>	N	飛来物による衝撃荷重
W <sub>w</sub>	N	風圧力による荷重
Δ P <sub>max</sub>	N/m <sup>2</sup>	最大気圧低下量
ρ	kg/m <sup>3</sup>	空気密度

#### 3.2 評価対象部位

##### 3.2.1 貫通評価

###### (1) 車両に対する評価

車両防止柵の部材に対する車両の衝突は局部的な事象ではなく、貫通という損傷モードは考慮しない。（「3.2.2 支持機能評価」の中で、曲げに対する破断の有無を評価する）

###### (2) 鋼製材に対する評価

鋼製材の衝突を想定する架構部材の貫通評価として、飛来物が架構部材に直接衝突した場合についての解析を行う。架構部材の変形が最も大きくなるよう、架構部材のうち、部材厚さが薄く、長さが最短となるものを代表として抽出し解析を行う。

##### 3.2.2 支持機能評価

架構全体の支持機能評価として、飛来物が防護対策設備に衝突した場合の架構全体の支持機能についての評価を行う。

本評価は、バネー質点系でモデル化した飛来物及び防護設備の応答解析結果より算出した、飛来物が衝突した際の衝撃荷重により架構全体に作用する応答加速度を用いた静的解析を行う。

この評価においては、各防護対象施設の架構及びアンカーボルトを評価対象部位として選定する。

### 3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重は、別添 1-2 「防護対策施設の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」を踏まえて設定する。

#### 3.3.1 荷重の設定

強度評価には以下の荷重を用いる。荷重の算定に用いる竜巻の特性値を表 3-2 に示す。

表 3-2 荷重の算定に用いる竜巻の特性値

最大風速 $V_D$ (m/s)	移動速度 $V_T$ (m/s)	最大接線風速 $V_{Rm}$ (m/s)	最大気圧低下量 $\Delta P_{max}$ ( $N/m^2$ )
100	15	85	8900

#### (1) 風圧力による荷重( $W_w$ )

風圧力による荷重 $W_w$ は、次式により算定する。

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

設計用速度圧 $q$ は、次式により算定する。

$$q = (1/2) \rho \times V_D^2$$

#### (2) 飛来物による衝撃荷重( $W_M$ )

飛来物による衝撃荷重( $W_M$ )は、表 3-3 及び表 3-4 に示す飛来物の衝突に伴う荷重とする。

また、架構全体の支持機能評価に用いる衝撃荷重は、飛来物の衝突により施設に発生する応答加速度から算出する。応答加速度の算出方法及び結果については、「3.5(2)b.(c) 応答加速度の算出」に示す。

表 3-3 飛来物の諸元

飛来物	寸法 (m)	質量 (kg)	水平方向の 飛来速度 (m/s)	鉛直方向の 飛来速度 (m/s)	衝突対象
車両	3.6×2.5×8.6	5000	52	—※	使用済燃料乾式貯蔵容器 竜巻防護対策施設のうち、 車両防止柵
鋼製材	4.2×0.2×0.3	135	51	34	上記以外の防護対策施設

※：建屋排気口からの侵入は、構造上水平方向のみを考慮すれば良い。

表 3-4 飛来物の特性値

飛来物	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	剛性 (N/m)
車両	—	—	2.94×10 <sup>3</sup>
鋼製材	2.05×10 <sup>5</sup>	0.3	—

(3) 常時作用する荷重(F<sub>d</sub>)

架構部材の自重，架構に取り付く防護ネット及び防護鋼板等の荷重を考慮する。

3.3.2 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せは，V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」のとおり，風圧力による荷重，飛来物による衝撃荷重及び常時作用する荷重を組み合わせる。

荷重の組合せを表 3-5 に示す。

表 3-5 荷重の組合せ

評価内容		荷重の組合せ
貫通評価		W <sub>w</sub> +W <sub>M</sub> +F <sub>d</sub>
支持機能評価	架構部材	
	架構全体	

3.4 許容限界

架構の許容限界は，V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5. 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえて，「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位の機能損傷モードを考慮して設定する。

貫通評価及び支持機能評価の許容限界を以下に示す。

(1) 貫通評価

飛来物である鋼製材の貫通防止を満足する許容限界として，部材が破断しない飛来物の貫入深さを設定する。架構部材のうちH形鋼はフランジ面を防護施設に対して外向きとして設定していることから，部材せいを貫入深さの許容限界とする。

貫通評価において許容限界とする部材せい位置を図 3-1 に示す。

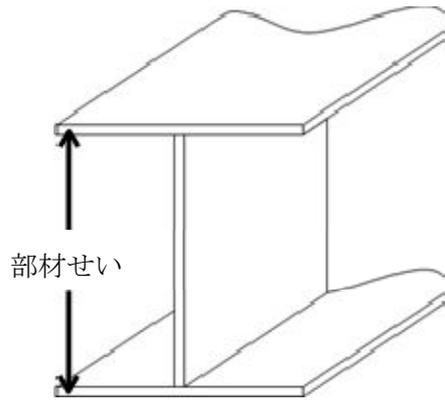


図 3-1 貫通評価における許容限界とする部材せい

(2) 支持機能評価

a. 架構部材の支持機能評価

飛来物が架構及び防護鋼板に衝突する場合は、衝突部において貫通が防止できても、架構部材が曲げ等により破断し架構の支持機能が保持されないことが考えられることから、その様な架構部材の破断が生じないことを確認する。

許容限界としては、FEM 解析を実施しない部材（使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設のうち、車両防止柵）については、発生する応力により判断し、FEM 解析を実施した部材については、鋼材の破断ひずみを基本として設定する。

車両防止柵の応力については、接触する部材をはりと見なしたモデルに基づき、弾性限界を許容限界として設定する。破断ひずみについては、「4. (1)c. (c) 破断ひずみ」に示すとおり、JIS に規定されている伸びの下限値を基に設定するが、「NEI 07-13 : Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs」（以下「NEI 07-13」という。）においてTF（多軸性係数）を  とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF= を考慮して設定する。

最大ひずみが破断ひずみを超える場合には、破断箇所を確認し全断面に発生しないことを確認する。

設定した許容限界を表 3-6 に示す。

表 3-6 許容限界(架構部材の支持機能評価)

材質	許容限界	対象

b. 架構全体の支持機能評価

飛来物が架構又は防護鋼板に衝突する場合、衝撃荷重により架構は衝突方向に変位するが、架構の終局耐力以上の荷重が作用した場合は、変位が止まらず倒壊に至る。防護対策施設の倒壊により防護対象施設に影響を与えないという観点で、許容限界を以下のとおり設定する。

鋼製材もしくは車両の衝突により塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が微小なレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有することを確認するため、JIS 規格及び建築学会「鋼構造設計規準」、 「各種合成構造設計指針・同解説」に基づき設定した架構の許容応力を表 3-7 に、使用材料の許容応力を表 3-8 に示す。

表 3-7 許容応力(その他の支持構造物)

許容限界 (ボルト以外)				許容限界 (ボルト等)	
一次応力				一次応力	
引張	せん断	圧縮	曲げ	引張	せん断
$1.5 f_t$	$1.5 f_s$	$1.5 f_c$	$1.5 f_b$	$1.5 f_t$	$1.5 f_s$

(注) 応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対しても評価を行う。

表 3-8 使用材料の許容応力

(単位：MPa)

評価箇所	材料	評価用 温度 (°C)	$S_y$	$S_u$	許容応力			
					$1.5 f_t^*$	$1.5 f_s^*$	$1.5 f_c^*$	$1.5 f_b^*$
架構	SM400 ( $5 < t \leq 16$ )	40	245	400	245	141	(注 1)	(注 2)
	SM490 ( $5 < t \leq 16$ )	40	325	490	325	187	(注 1)	(注 2)
アンカー ボルト	SS400	40	235	400	(注 3)			

(注 1) 規定に基づき算出する。

(注 2) 規定に基づき算出する。

(注 3) 据付状況に応じ、適切な規定に基づき算出する。

3.5 評価方法

(1) 車両に対する評価

車両防止柵の強度評価は、架構全体の支持機能評価においては、解析コード「MSC/NASTRAN」を用いて、3次元 FEM モデルによりモデル化し評価を実施する。

(2) 鋼製材に対する評価

鋼製材の衝突を想定する架構の強度評価は、貫通評価及び架構部材の支持機能評価においては、解析コード「LS-DYNA」を用いて 3 次元 FEM モデルによりモデル化し、架構全体の支持機能評価においては、非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設架構、中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構、中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構及び原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構においては、解析コード「MSC/NASTRAN」を、海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構は「Engineer's Studio」を用いて、3 次元 FEM モデルによりモデル化し評価を実施する。

なお、評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、別紙 1「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

#### (1) 貫通評価

飛来物の衝突による衝突箇所の衝突評価においては、架構の主要部材に飛来物を直接衝突させた解析を行うことで評価する。この評価では、図 3-2 に示すとおり、架構部材の解析モデルの評価対象部位に設計飛来物の解析モデルを衝突させた解析を行う。

飛来物による衝撃荷重は、架構部材の変形が最大となるよう、部材の中央に作用させることを基本とする。

飛来物は、衝突時の荷重が保守的となるようにするため、鋼製材は先端部（衝突部）を開口として接触断面積を小さくモデル化し、自重及び竜巻による風圧力による荷重を作用させた状態で衝突させる。

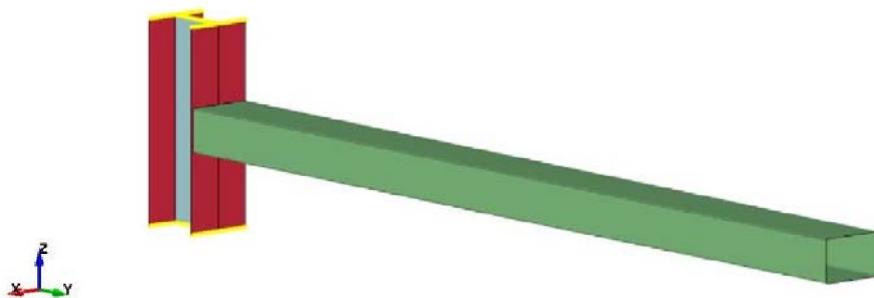


図 3-2 貫通評価モデル図(代表部材モデルと飛来物)

#### (2) 支持機能評価

##### a. 架構部材の支持機能評価

飛来物が架構部材に衝突する場合については、「3.5(1) 衝突評価」で評価した解析モデルにおいて、飛来物が架構部材に衝突する場合の架構部材端部に発生するひずみ量を算出し、架構部材端部に破断が生じないことを確認する。飛来物が架構部材に衝突する場合に架構部材端部に破断が生じないことを確認することにより、その部材の近傍の部材につ

いても、破断が生じないことを確認する。

最大ひずみが破断ひずみを超える場合には、破断箇所を確認し全断面に発生しないことを確認する。

b. 架構全体の支持機能評価

非常用ディーゼル発電機室ルーベントファン竜巻防護対策施設架構、中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構及び中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構、海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構、原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構及び使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構においては、架構全体の支持機能評価においては、飛来物が衝突した際の応答加速度を3次元FEMモデルの質点に入力し、設計竜巻の風圧力による荷重及び自重も考慮した静的解析を実施する。

(a) 解析モデル及び諸元

解析モデルは、防護壁を構成する架構部材をはり要素にてモデル化した3次元FEMモデルとする。

解析モデルを図3-3～図3-11に、用いられる部材の諸元を表3-14に示す。

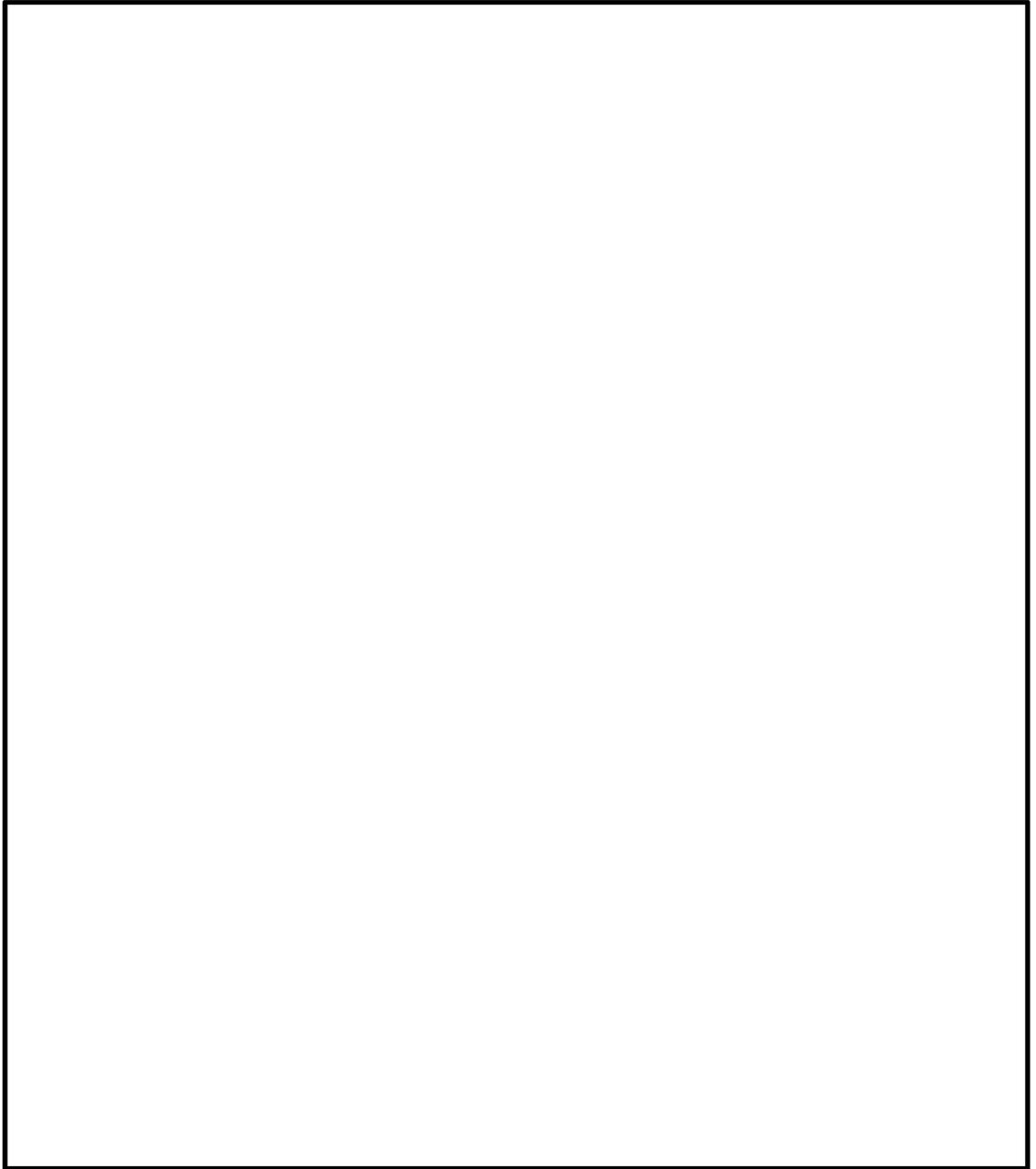


図 3-3 解析モデル図(非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構)

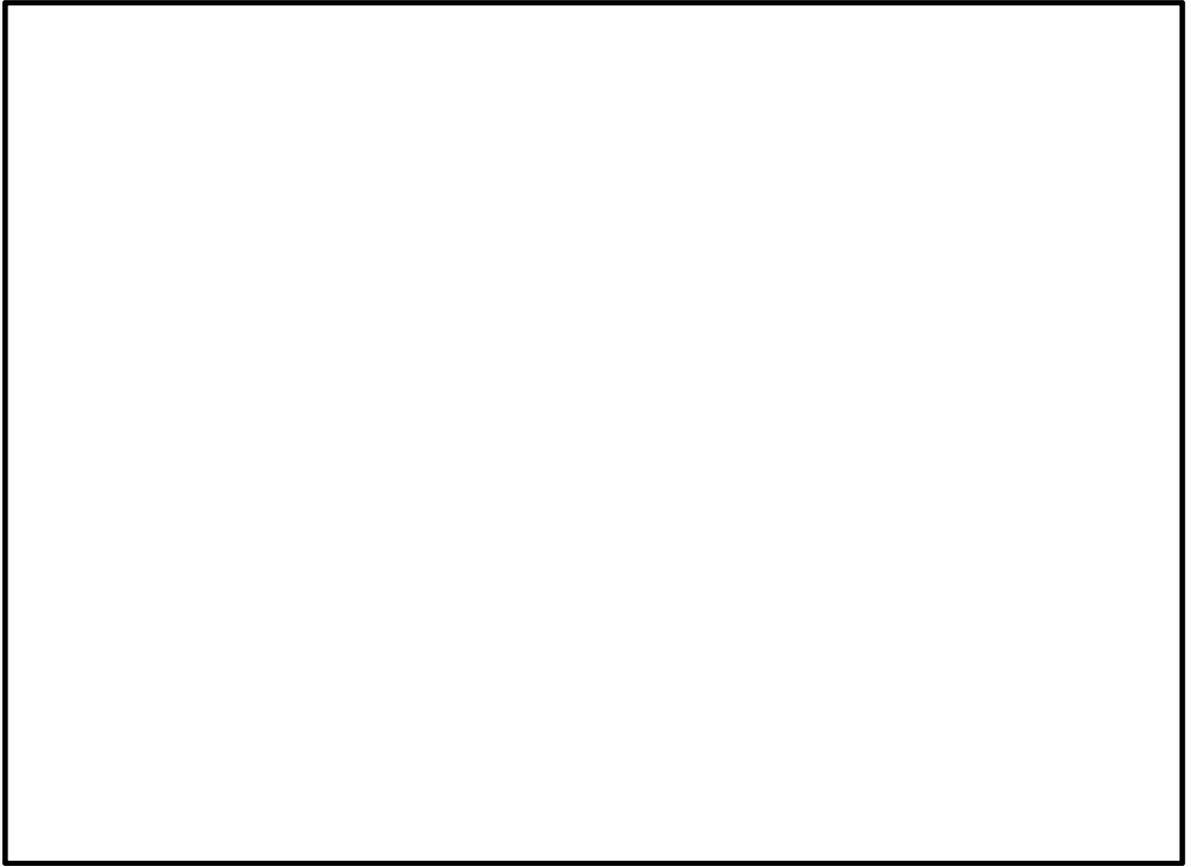


図 3-4 解析モデル図(中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構)

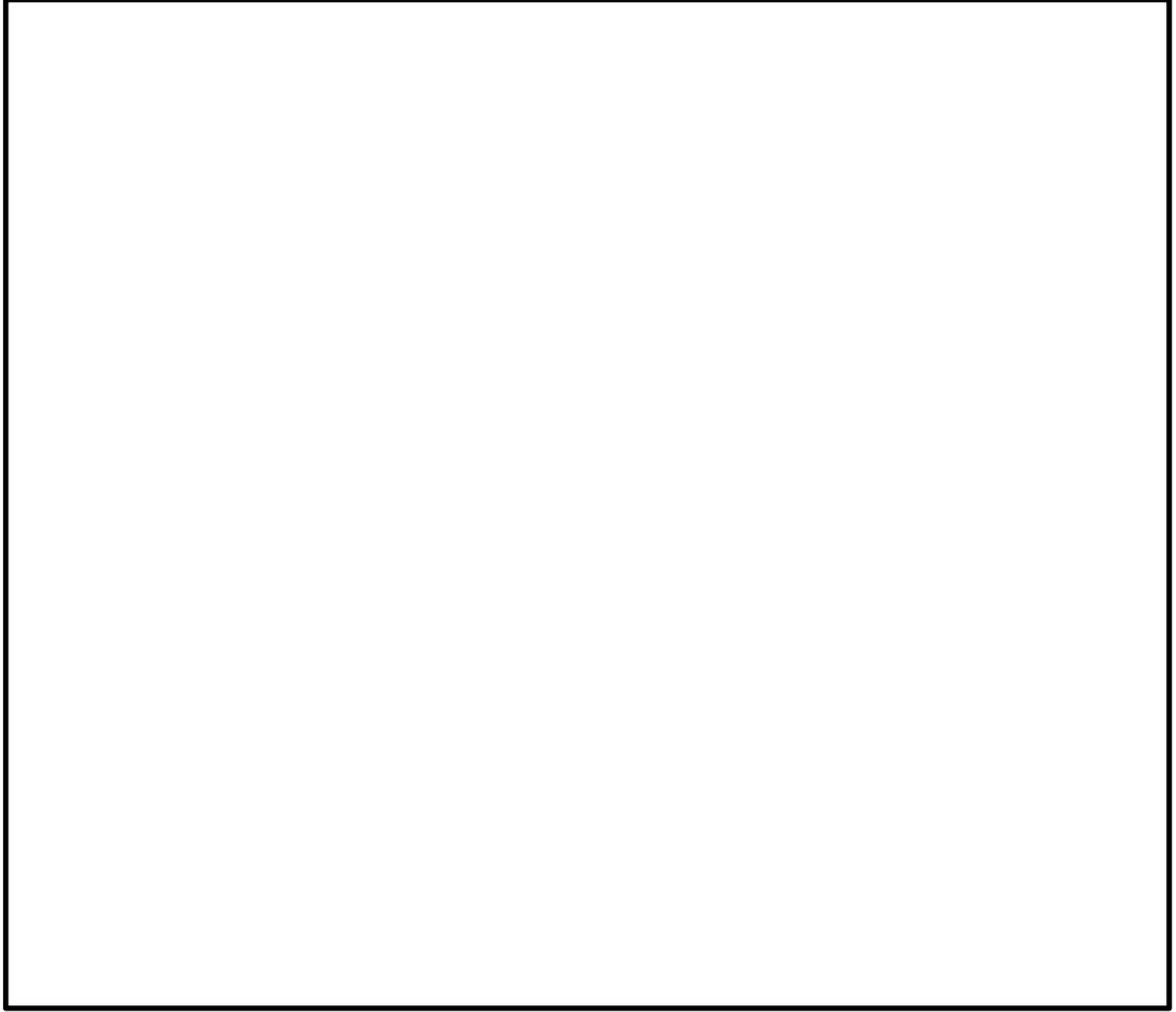


図 3-5 解析モデル図(海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構)

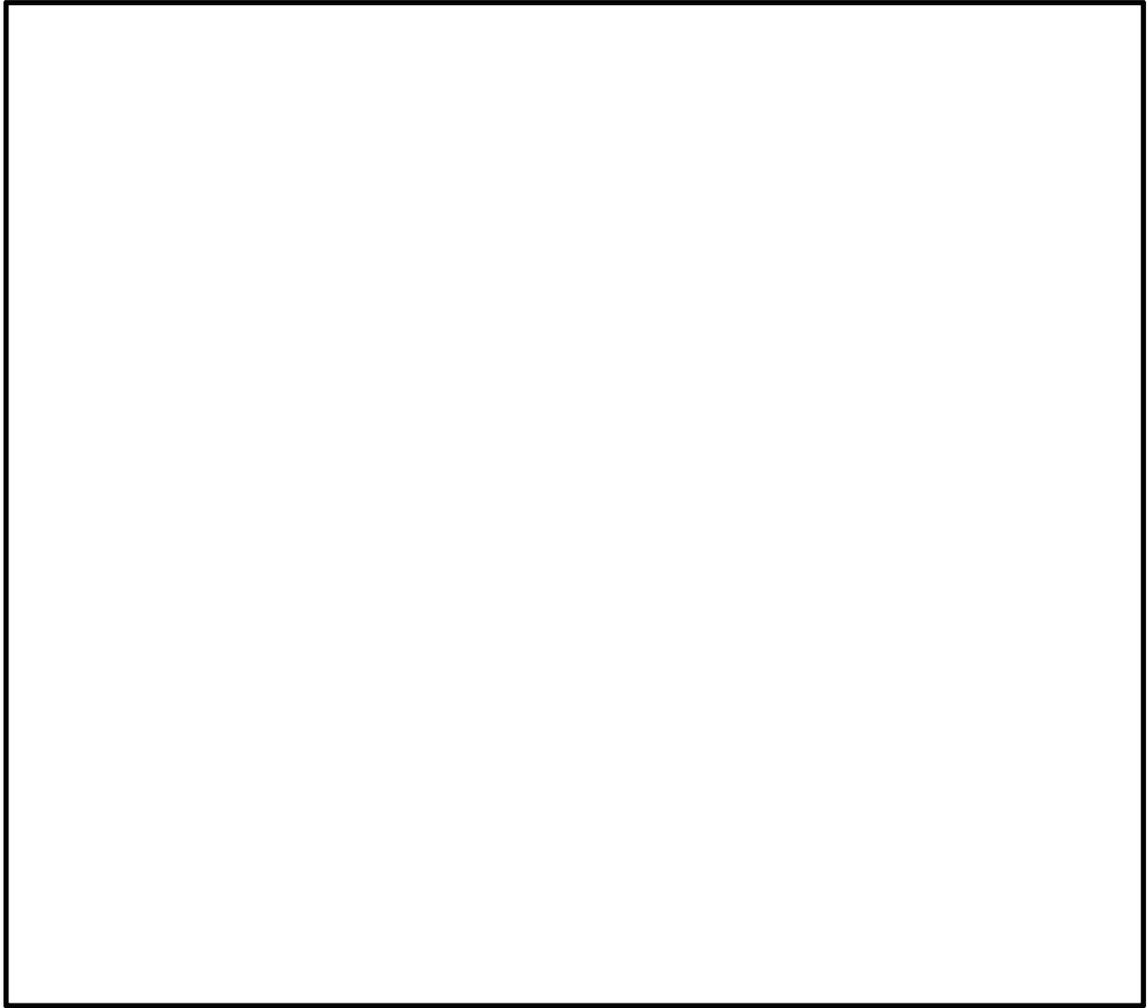


図 3-6 解析モデル図(原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構)

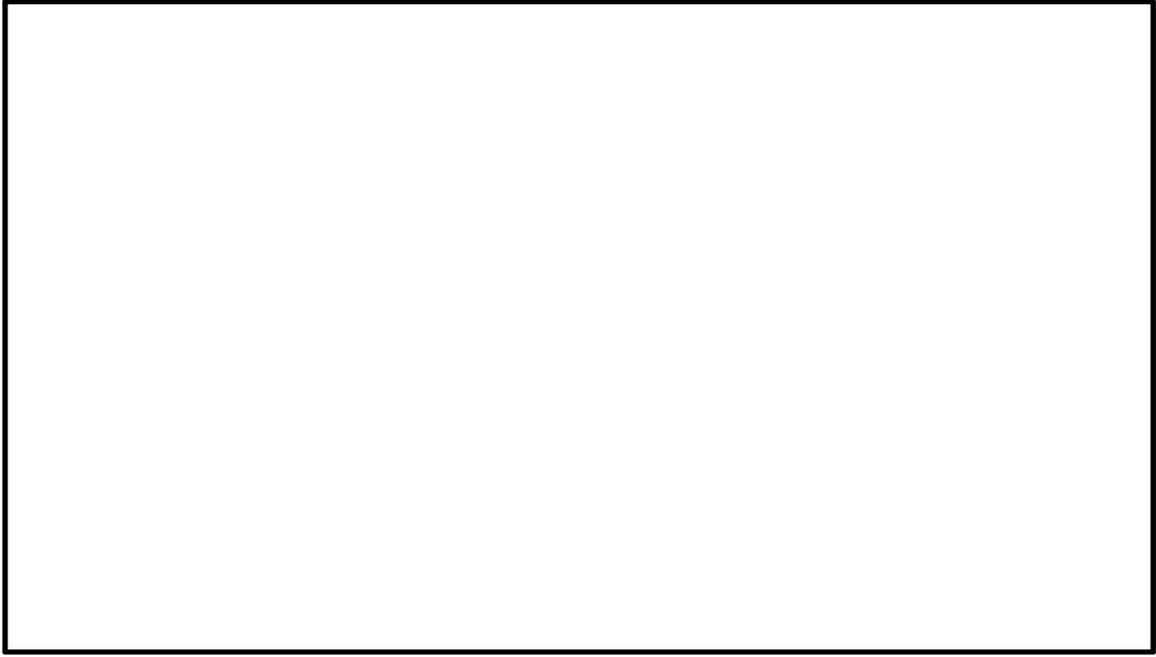


図 3-7 解析モデル図(中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構)

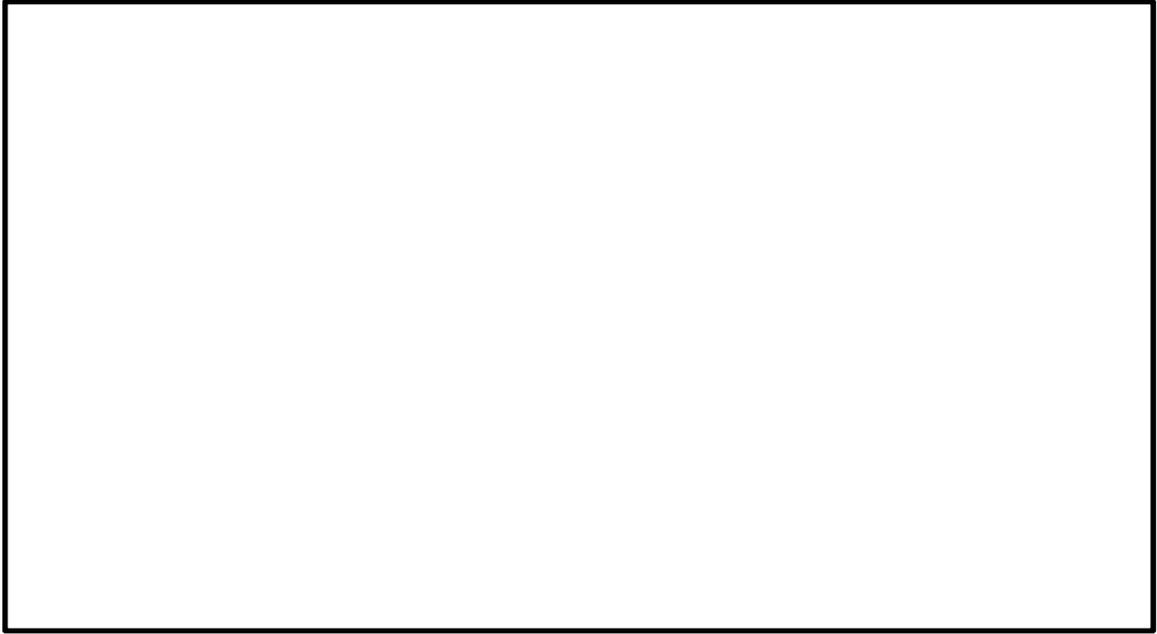


図 3-8 解析モデル図(使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構)

表 3-14 部材の諸元

項目	記号	単位	入力値
材質	-	-	SM400, SM400
温度条件 (雰囲気温度)	T	°C	40
縦弾性係数	E	MPa	$2.05 \times 10^5$
ポアソン比	$\nu$	-	0.3

(b) 固有値解析

図 3-3～図 3-7 の解析モデルに対し、非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構、中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構、中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構及び原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構においては、解析コード「MSC/NASTRAN」を、海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構は「Engineer's Studio」を用いて、固有値解析結果を行う。

(c) 応答加速度の算出

飛来物の衝突による防護対策施設の応答加速度は、解析コード「LS-DYNA」を用いて、飛来物を FEM モデル、防護対策施設を 1 自由度のバネ-質点系でモデル化し、両者の応答を連成させた評価により算出する。飛来物の衝突速度については、水平方向のバネ定数については水平方向の飛来速度を、鉛直方向のバネ定数については鉛直方向の飛来速度を用いる。なお、飛来物の解析モデル及び材料特性等は「3.5(1) 衝突評価」と同様である。

防護対策施設のバネ定数  $k$  は、「3.5(2)b. (b) 固有値解析結果」にて算出した固有振動数  $f$  と防護対策施設の質量  $M$  を用いて以下の式で求める。

$$k = M(2\pi f)^2$$

ここで、固有振動数  $f$  については、各方向において最も刺激係数が大きいモード振動次数のものを選定する。また、防護施設の質量  $M$  については、応答加速度はバネ定数が大きい方が大きくなる傾向であることを踏まえ、防護施設の全体質量とする。

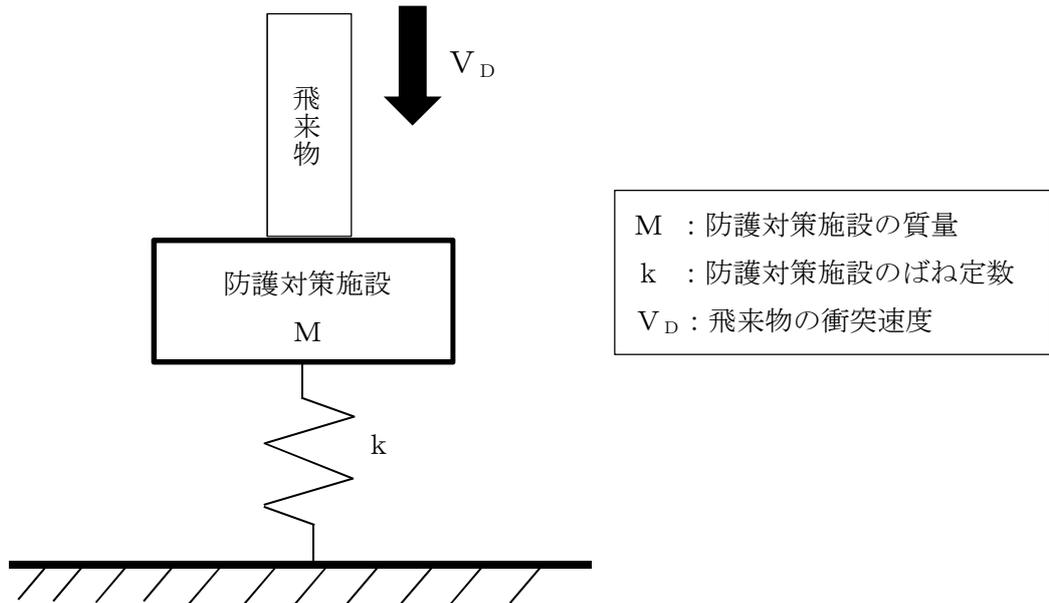


図 3-12 応答加速度評価モデル

(d) 各部材の発生応力の算出

非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構，中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構及び中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構，海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構，原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構及び使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構においては，架構全体の支持機能評価においては，「3.5(2)b.(c) 応答加速度の算出」で算出した飛来物が衝突した際の応答加速度を図 3-3～図 3-7 に示す 3 次元 FEM モデルの各質点に入力し，設計竜巻の風圧力による荷重及び自重も考慮した静的解析により，各部材に生じる曲げモーメント，せん断力及び軸力を算出し，評価対象部位の発生応力を求め，許容限界に収まっていることを確認する。架構の応力計算式を表 3-25 に，アンカーボルトの応力計算式を表 3-26 に示す。

表 3-25 架構の応力計算式

応力の種類		単位	応力計算式
引張応力 $\sigma_t$		MPa	$\frac{N_t}{A}$
圧縮応力 $\sigma_c$		MPa	$\frac{N_c}{A}$
曲げ応力 $\sigma_{by}, \sigma_{bz}$		MPa	$\frac{M_y}{Z_y}, \frac{M_z}{Z_z}$
せん断応力 $\tau_y, \tau_z$		MPa	$\frac{Q_y}{A_{s_y}}, \frac{Q_z}{A_{s_z}}$
組合せ 応力	圧縮+曲げ	-	$\max \left( \frac{\sigma_c}{1.5 f_c^*} + \frac{\sigma_{bz} + \sigma_{by}}{1.5 f_b^*}, \frac{\sigma_{bz} + \sigma_{by} - \sigma_c}{1.5 f_t^*} \right)$
	引張+曲げ	-	$\max \left( \frac{\sigma_t + \sigma_{bz} + \sigma_{by}}{1.5 f_t^*}, \frac{\sigma_{bz} + \sigma_{by} - \sigma_t}{1.5 f_b^*} \right)$
	曲げ+せん断	-	$\max \left( \frac{\sigma_t + \sigma_{bz} + \sigma_{by}}{1.5 f_t^*}, \frac{\sigma_{bz} + \sigma_{by} - \sigma_t}{1.5 f_b^*} \right)$

ここで、

- A : 断面積 (mm)
- $Z_y, Z_z$  : 断面係数(Y, Z 軸回り) (mm)
- $A_{s_y}, A_{s_z}$  : せん断断面積(Y, Z) (mm)
- $N_t, N_c$  : 軸力(引張, 圧縮) (N)
- $M_y, M_z$  : 曲げモーメント(Y, Z 軸回り) (N・mm)
- $Q_y, Q_z$  : せん断力(Y, Z 軸) (N)

表 3-26 ボルトの応力計算

応力の種類		単位	応力計算式
引張応力 $\sigma_b$		MPa	$\frac{F_x}{A_b}$
せん断応力 $\tau_b$		MPa	$\frac{\sqrt{F_y^2 + F_z^2}}{A_b}$
組合せ 応力	せん断+引張	MPa	$\frac{F_x}{A_b}$

ここで

$F_x, F_y, F_z$  : 引張力(X軸), せん断力(Y軸, Z軸) (N)

$A_b$  : ボルトの断面積(mm<sup>2</sup>)

4. 評価条件

(1) 衝突評価及び架構部材の支持機能評価

a. 使用材料及び寸法

衝突評価の代表として選定する架構部材の仕様を表 4-1 に、飛来物の仕様を表 4-2 に示す。

表 4-1 架構部材の仕様

評価対象	評価部材番号	仕様		材質
<ul style="list-style-type: none"> <li>・非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設架構</li> <li>・中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構</li> <li>・原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構</li> <li>・中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構</li> </ul>	①-1	H-300×300×10×15 長さ：900	部材破断評価 (部材せい：300)	SM490
	①-2	H-300×300×10×15 長さ：6050	たわみ評価	
<ul style="list-style-type: none"> <li>・海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構</li> </ul>	②-1	H-294×200×8×12 長さ：1250	部材破断評価 (部材せい：294)	SM400
	②-2	H-294×200×8×12 長さ：8915	たわみ評価	
	②-3	H-294×200×8×12 長さ：8915		

表 4-2 飛来物の仕様

飛来物	サイズ 長さ×幅×高さ (m)	質量 (kg)	材質
鋼製材	4.2×0.3×0.2	135	

b. 材料定数

飛来物及び架構部材に使用する鋼材の材料定数を表 4-3 に示す。

材料定数は、JIS 及び「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—（社）日本建築学会（2005 改定）」に基づき設定する。

表 4-3 使用材料の材料定数

	材質	厚さ (mm)	降伏応力 $\sigma_y$ (MPa)	ヤング係数 E (MPa)	ポアソン比
鋼製材	SS400	5 を超え 16 以下	245	$2.05 \times 10^5$	0.3
架構 部材	SM400	5 を超え 16 以下	235	$2.05 \times 10^5$	0.3
	SM490	5 を超え 16 以下	245	$2.05 \times 10^5$	0.3
		16 を超え 40 以下	235	$2.05 \times 10^5$	0.3

c. 動的解析における鋼製材料の非線形特性

飛来物の衝突に対する動的解析を行う場合は、衝撃問題で変形速度が大きいため、ひずみ速度効果を考慮する。

(a) 材料の応力—ひずみ関係

，以下に示す Cowper—Symonds の式を適用する。

$$\sigma_{e q} = (A + B \varepsilon_{p l}^n) \left\{ 1 + (\dot{\varepsilon}_{p l} / D)^{1/q} \right\}$$

ここで、 $\sigma_{e q}$ は動的応力、Aは降伏応力、Bは硬化係数、 $\varepsilon_{p l}$ は相当塑性ひずみ、 $\dot{\varepsilon}_{p l}$ は無次元相当塑性ひずみ速度、nは硬化指数、D及びqはひずみ速度係数を表す。ひこれらのパラメータを表 4-4 に示す。

表 4-4 Cowper-Symonds 式への入力パラメータ

	飛来物 (鋼製材)	架構部材
材料		
B		
n		
D (s <sup>-1</sup> )		
q		

材料の応力-ひずみ関係はバイリニア型とする。

バイリニア型応力-ひずみ関係の概念図を第 4-1 図に示す。

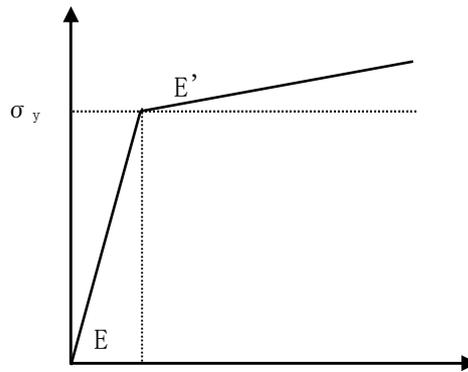


図 4-1 バイリニア型応力-ひずみ関係の概念図

(b) 破断ひずみ

破断ひずみは、JIS に規定されている伸びの下限値を基に設定する。また、「NEI 07-13」において T F (多軸性係数) を 2.0 とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕として T F=2.0 を考慮する。T F については、架構のみ 2.0 とする。

なお鋼製材は、保守的に破断ひずみを超えても要素を削除せず、荷重を負担するものとする。

材料ごとの破断ひずみを表 4-5 に示す。

表 4-5 架構部材の破断ひずみ

ケース	材質	JIS 規格値 (伸び)	T F	破断ひずみ※
1				
2				

※：真ひずみ換算値

(2) 架構全体の支持機能評価

a. 使用材料及び寸法

各架構に用いられる材料及び寸法は、表 4-1 で評価した部材の条件から逸脱しない様に選定する。

なお、衝突評価を実施しない、使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構については、表 4-6 のとおりとする。

表 4-6 架構の使用材料及び寸法の仕様

評価対象	評価部材番号		材質
使用済燃料乾式貯蔵容器 竜巻防護対策施設架構	③-1	H-600×200×11×17	SM490

b. 材料定数

架構の使用材料の材料定数を表 4-7 に示す。

表 4-7 架構の使用材料の材料定数

材料	単位体積重量 (kg/m <sup>3</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比

5. 強度評価結果

5.1 貫通評価

飛来物の架構への貫通評価結果を表 5-1 に示す。

評価部材のすべてのケースにおいて貫入深さが部材せいを下回っており、架構部材の全断面喪失は発生しないため、飛来物が架構部材を貫通し、防護対策施設の内側に侵入することはない。

表 5-1 飛来物の架構部材への衝突評価結果

評価対象	評価部材番号	飛来物	貫入深さ (mm)	許容限界 (mm)
追而				

5.2 支持機能評価

5.2.1 部材の支持機能評価

(1) 架構への衝突時の支持機能評価

飛来物の架構への衝突時の支持機能評価結果を表 5-2 に示す。架構部材端部に生じる最大ひずみは破断ひずみを下回っているため、架構部材端部で破断が生じることなく部材は支持される。また、部材の最大ひずみが破断ひずみを下回っていることから、荷重が作用する箇所の近傍の部材についても破断に至ることはない。

表 5-2 支持機能評価(架構部材への衝突時)

評価対象	評価部材番号	飛来物	最大ひずみ	破断ひずみ (許容限界)
<ul style="list-style-type: none"> <li>・非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設架構</li> <li>・中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構</li> <li>・中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構</li> <li>・原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構</li> </ul>	追而			
海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構				
使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構				

5.2.2 架構全体の支持機能評価

(1) 固有値解析

図 3-3～図 3-11 の解析モデルによる固有値解析結果を表 3-15～表 3-22 に示す。

表 3-15 固有振動数(非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構)

次数	質量 (kg)	固有振動 数 (Hz)	固有周期 (sec)	刺激係数			卓越方向
				X 方向	Y 方向	Z 方向	
							Z 方向
							X 方向
							Y 方向

表 3-16 固有振動数(中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構)

次数	質量 (kg)	固有振動 数 (Hz)	固有周期 (sec)	刺激係数			卓越方向
				X 方向	Y 方向	Z 方向	
							Z 方向
							X 方向
							Y 方向

表 3-17 固有振動数(海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構)

次数	質量 (kg)	固有振動 数 (Hz)	固有周期 (sec)	刺激係数			卓越方向
				X 方向	Y 方向	Z 方向	
							Z 方向
							X 方向
							Y 方向

表 3-18 固有振動数(原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構)

次数	質量 (kg)	固有振動 数 (Hz)	固有周期 (sec)	刺激係数			卓越方向
				X 方向	Y 方向	Z 方向	
							Z 方向
							X 方向
							Y 方向

表 3-19 固有振動数(中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構)

次数	質量 (kg)	固有振動 数 (Hz)	固有周期 (sec)	刺激係数			卓越方向
				X 方向	Y 方向	Z 方向	
	追而						Z 方向
							X 方向
							Y 方向

表 3-20 固有振動数(使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構)

次数	質量 (kg)	固有振動 数 (Hz)	固有周期 (sec)	刺激係数			卓越方向
				X 方向	Y 方向	Z 方向	
	追而						Z 方向
							X 方向
							Y 方向

(2) 応答加速度解析

図 3-防護対策施設の固有振動数を踏まえたバネ定数及び応答加速度の算出結果を表 3-23 に示す。

表 3-23 防護対策施設のバネ定数及び応答加速度

	全体質量 M (kg)	方向		固有振動数 f (Hz)	バネ定数 k (N/m)	応答 加速度 (m/s <sup>2</sup> )
		水平	鉛直			
非常用ディーゼル発電機室ルーフトンファン竜巻防護対策施設架構	追而	水平	X	追而	追而	
			Y			
鉛直		Z				
		中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構	水平			
Y						
鉛直		Z				
		海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構	水平			
Y						
鉛直		Z				
		原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構	水平			
Y						
鉛直	Z					
	中央制御室換気系開口	水平	X			

部竜巻防護対策施設架 構			Y			
		鉛直	Z			
使用済燃料乾式貯蔵容 器竜巻防護対策施設架 構	追而	水平	X	追而		
			Y			
		鉛直	Z			
		水平	Y			
		鉛直	Z			

注：太枠線は評価に用いる応答加速度を示す。

(3) 各部材の発生応力の算出

架構各部材に発生する応力の算出結果を表 5-3 に示す。

なお、評価結果は許容応力に対する発生応力の裕度が最も小さいものを記載している。

表 5-3 架構全体の支持機能評価結果

	評価部位	応力分類	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)	備考
非常用ディーゼル発電機室 ルーフベントファン竜巻防 護対策施設架構	架構				追而
	アンカー ボルト				
中央制御室換気系冷凍機竜 巻防護対策施設架構	架構				
	アンカー ボルト				
中央制御室換気系開口部竜 巻防護対策施設架構	架構				
	アンカー ボルト				
海水ポンプエリア竜巻防護 対策施設架構	架構				
	アンカー ボルト				
原子炉建屋外側ブローアウ トパネル竜巻防護対策施設 架構	架構				
	アンカー ボルト				
使用済燃料乾式貯蔵容器竜 巻防護対策施設架構	架構				
	アンカー ボルト				

(注) ボルトの引張応力とせん断応力との組合せ応力  $f_{ts}$  の評価基準値は以下の通り。

$$f_{ts} = 1.4 \times 1.5 f_t^* - 1.6 \tau$$

且つ

$$f_{ts} \leq 1.5 f_t^*$$

ここで、

$\tau$  : ボルトに作用するせん断応力