

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第6号機	設計及び工事計画審査資料
資料番号	KK6 添-3-013-10 改0
提出年月日	2023年12月21日

## VI-3-別添 1-4-7 竜巻防護扉の強度計算書

2023年12月  
東京電力ホールディングス株式会社

VI-3-別添 1-4-7 竜巻防護扉の強度計算書

## 目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	2
2.1 位置	2
2.2 構造概要	7
2.3 評価方針	8
2.4 適用規格	10
3. 強度評価方法	11
3.1 記号の定義	11
3.2 評価対象部位	13
3.3 荷重及び荷重の組合せ	17
3.4 許容限界	19
3.5 評価方法	24
4. 評価条件	33
4.1 貫通評価	33
4.2 変形評価	34
4.3 応力評価	35
5. 強度評価結果	36
5.1 貫通評価	36
5.2 変形評価	38
5.3 応力評価	40

## 1. 概要

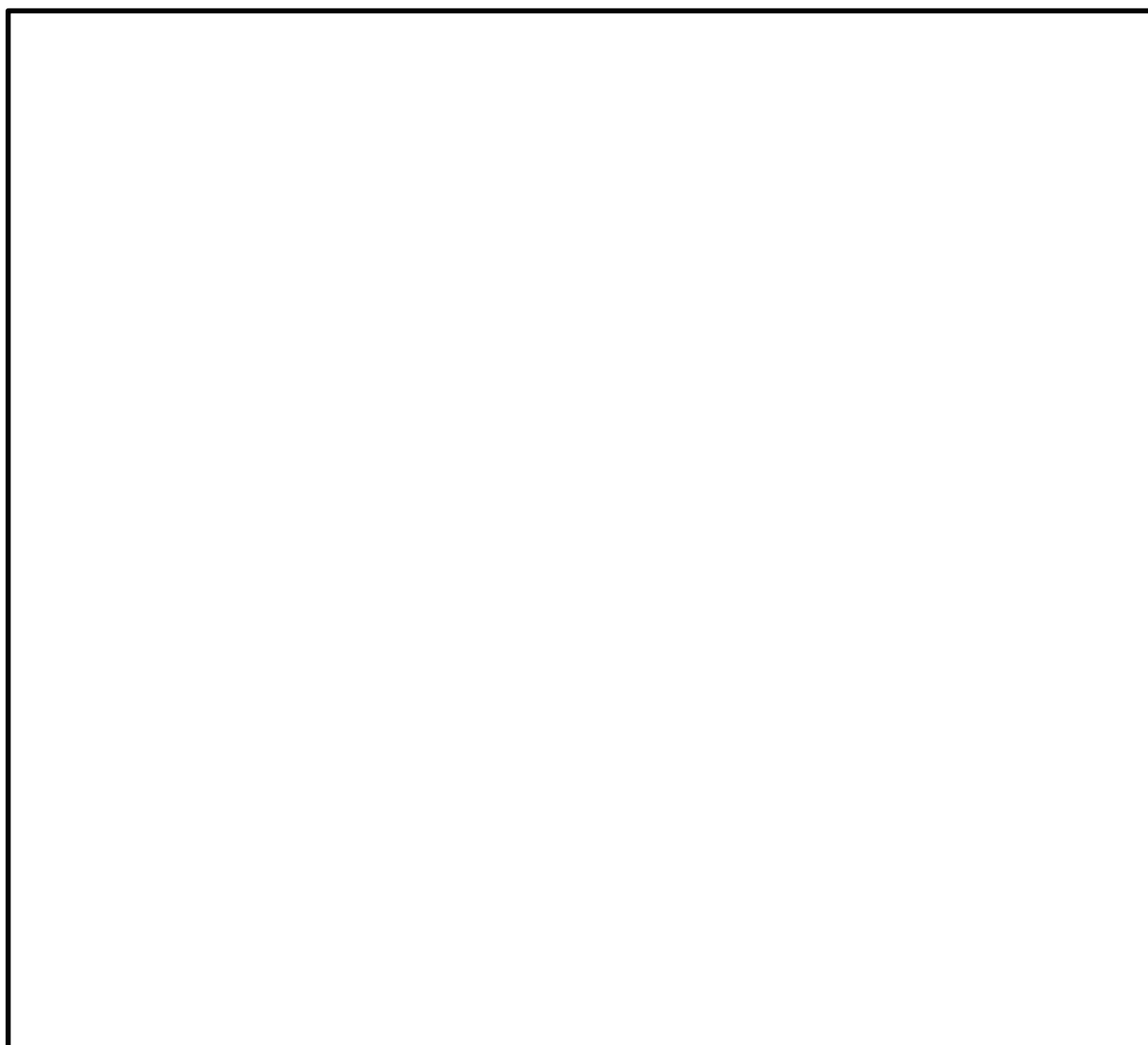
本資料は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」のとおり、防護対策施設のうち、竜巻防護扉が、設計竜巻による設計飛来物の衝突に対し、竜巻時及び竜巻通過後においても、外部事象防護対象施設に設計飛来物を衝突させず、また、機械的な波及的影響を与えず、外部事象防護対象施設の安全機能を考慮して、竜巻防護扉が構造健全性を有することを確認するものである。

## 2. 基本方針

VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」を踏まえ、竜巻防護扉の「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。

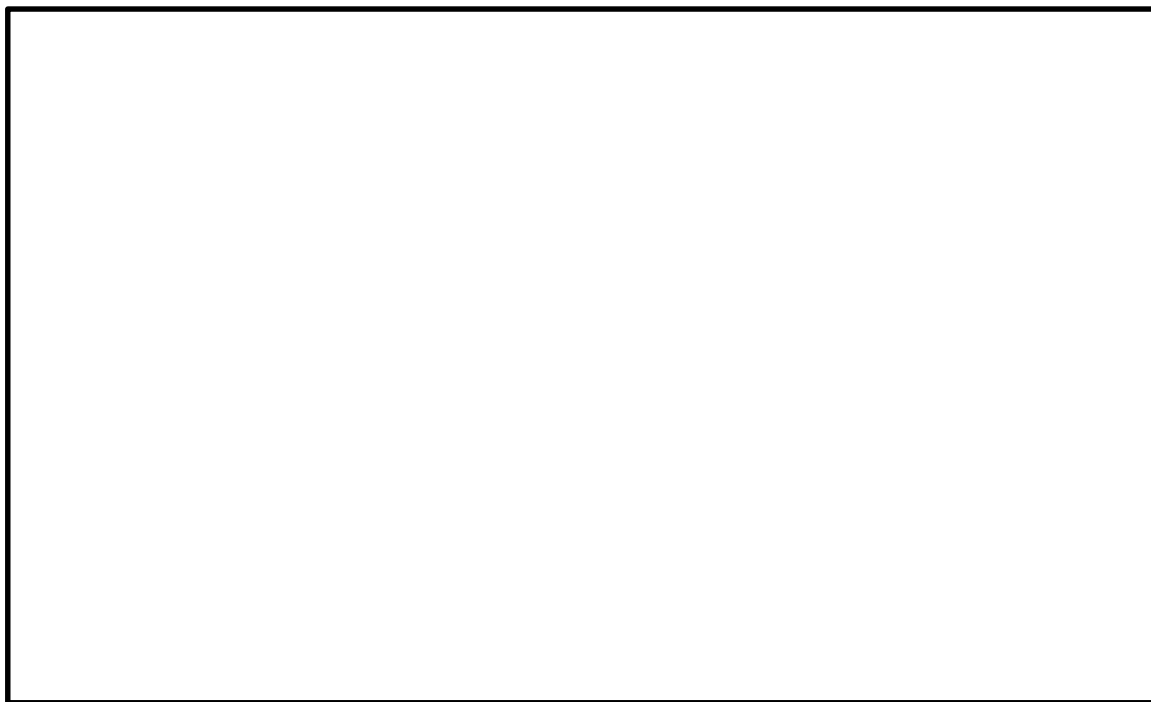
### 2.1 位置

竜巻防護扉は、原子炉建屋、タービン建屋、コントロール建屋及び屋外の燃料移送ポンプエリアに設置する。竜巻防護扉の設置位置を図 2-1 から図 2-4 に示す。



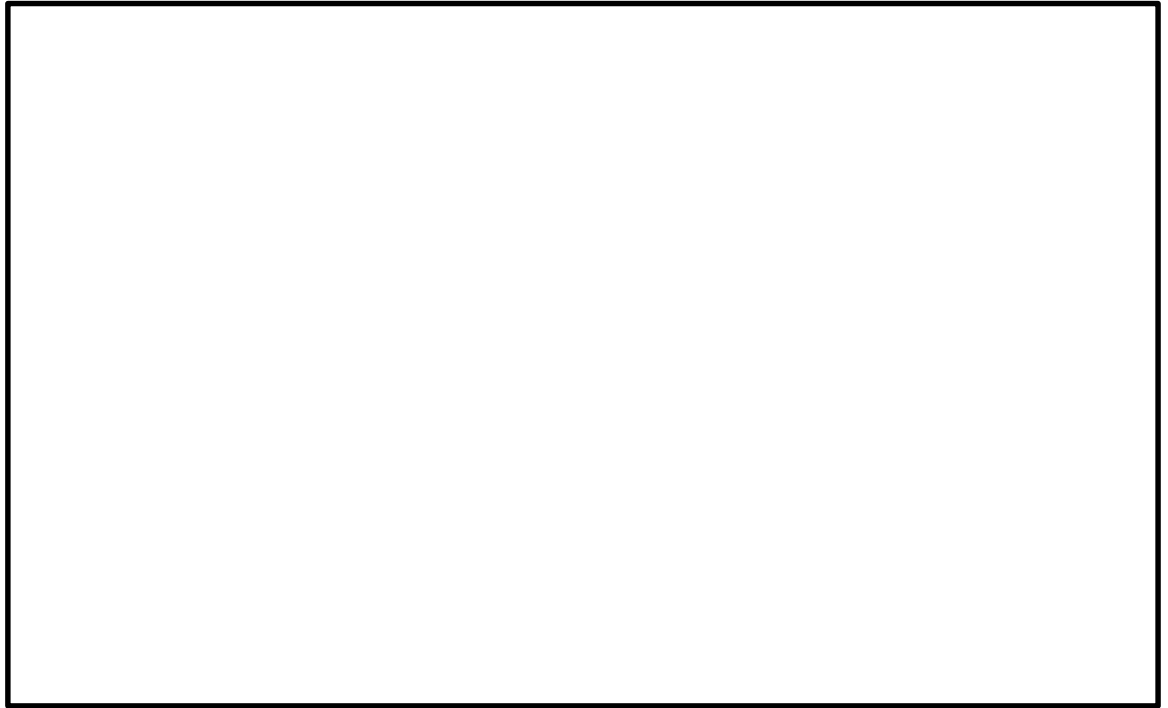
原子炉建屋 T.M.S.L. 12.3m

図 2-1 竜巻防護扉の位置図（原子炉建屋）（1/2）



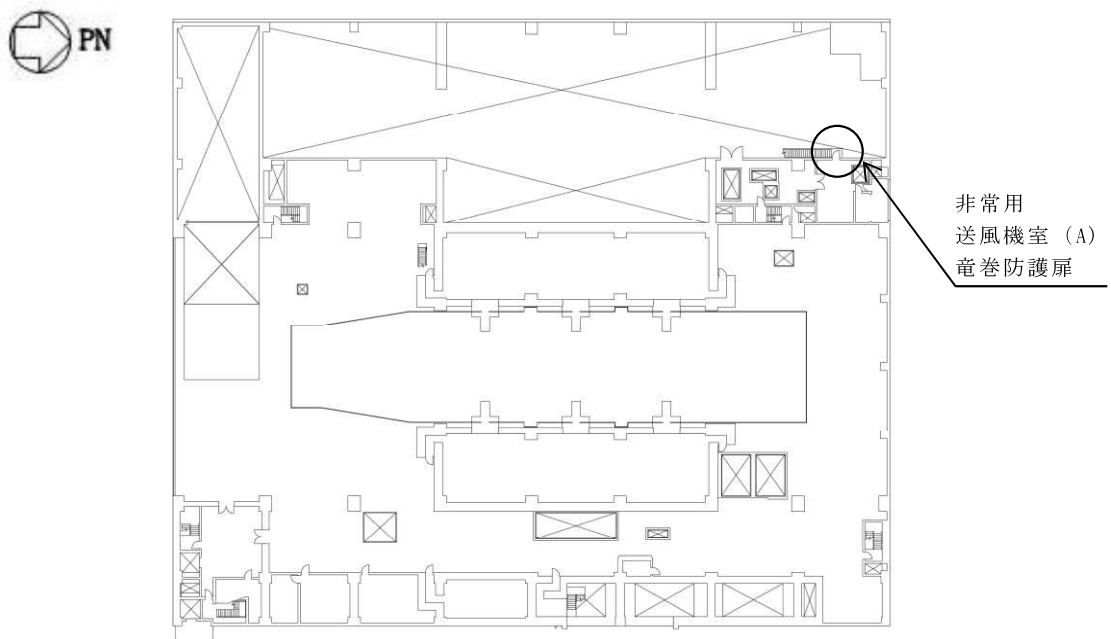
原子炉建屋 T. M. S. L. 34. 5m

図 2-1 竜巻防護扉の位置図（原子炉建屋）（2/2）



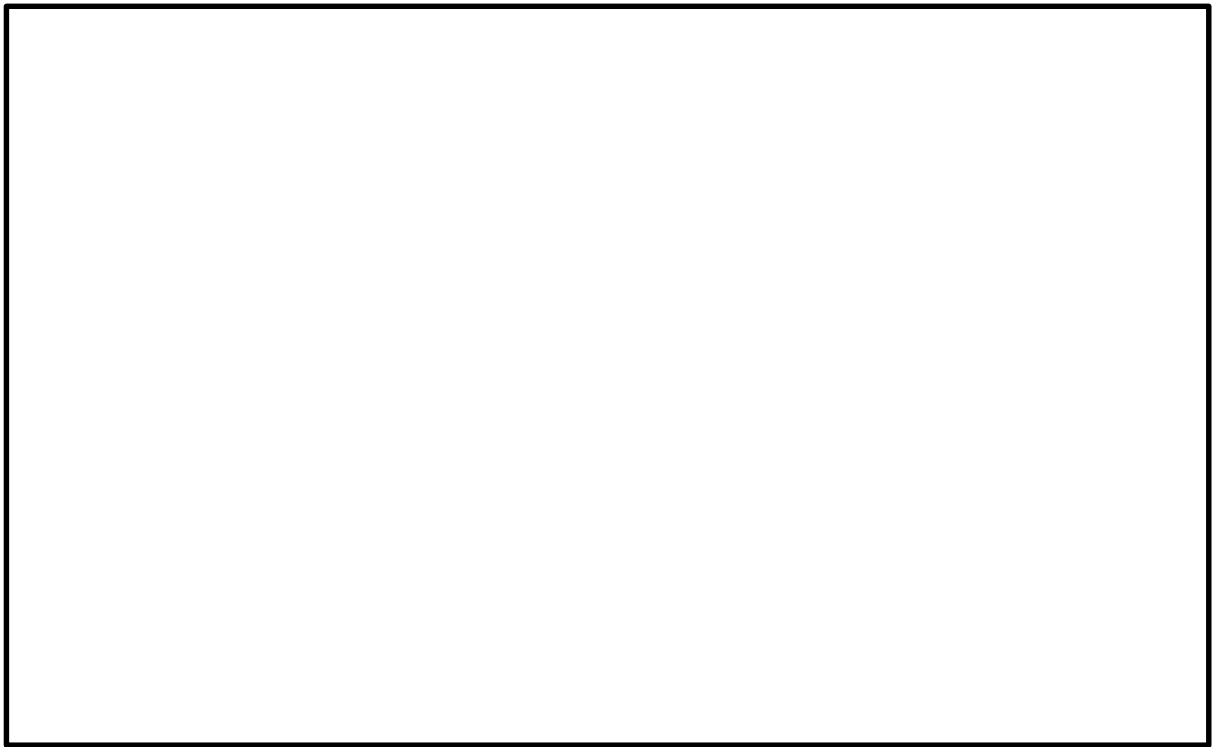
タービン建屋 T. M. S. L. 12. 3m

図 2-2 竜巻防護扉の位置図 (タービン建屋) (1/2)



タービン建屋 T. M. S. L. 20. 4m

図 2-2 竜巻防護扉の位置図 (タービン建屋) (2/2)



コントロール建屋 T.M.S.L. 24.1m

図 2-3 竜巻防護扉の位置図（コントロール建屋）



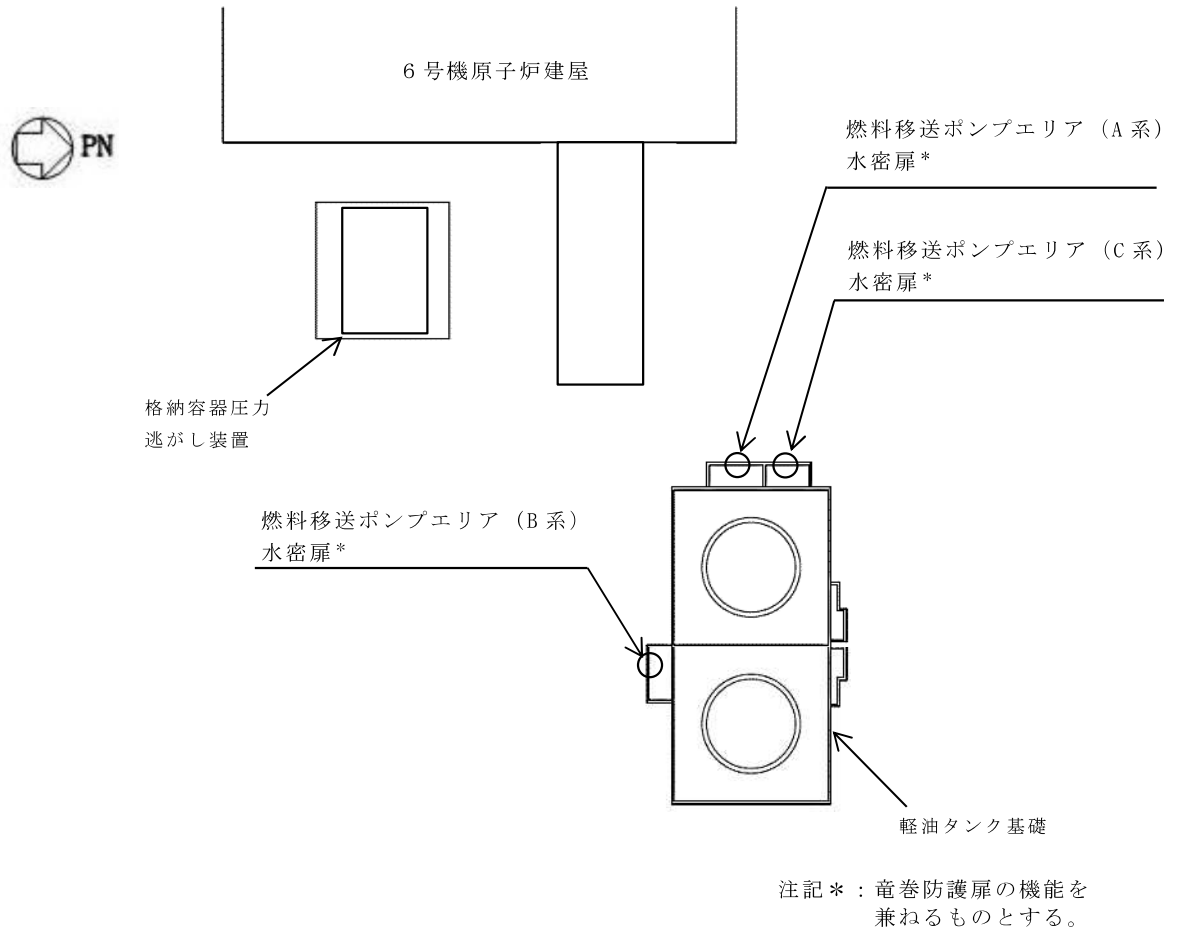


図 2-4 竜巻防護扉の位置図 (燃料移送ポンプエリア)

## 2.2 構造概要

竜巻防護扉の構造は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「3.6 竜巻防護扉の構造設計」に示す構造設計を踏まえ、設定する。

竜巻防護扉は、表側鋼板、芯材、扉枠等の鋼材を主構造とし、アンカーボルトによって建屋躯体に固定された扉枠に対し、カンヌキによって扉本体を扉枠と固定することで支持する設計とする。

竜巻防護扉の構造図を図 2-5 に示す。



図 2-5 竜巻防護扉の構造図  
(例：原子炉建屋機器搬出入口竜巻防護扉)

## 2.3 評価方針

竜巻防護扉の強度評価は、VI-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「5.6 竜巻防護扉の許容限界」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、竜巻防護扉の評価対象部位に生じるひずみ、応力度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。

竜巻防護扉の評価フローを図 2-6 に示す。

竜巻防護扉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、設計飛来物が外部事象防護対象施設に衝突する直接的な影響の評価として、防護対策施設を構成する部材に対する衝突評価及び防護対策施設自体が外部事象防護対象施設に衝突する波及的な影響の評価として防護対策施設を構成する部位の転倒及び脱落に対する構造強度評価を行う。

### (1) 衝突評価

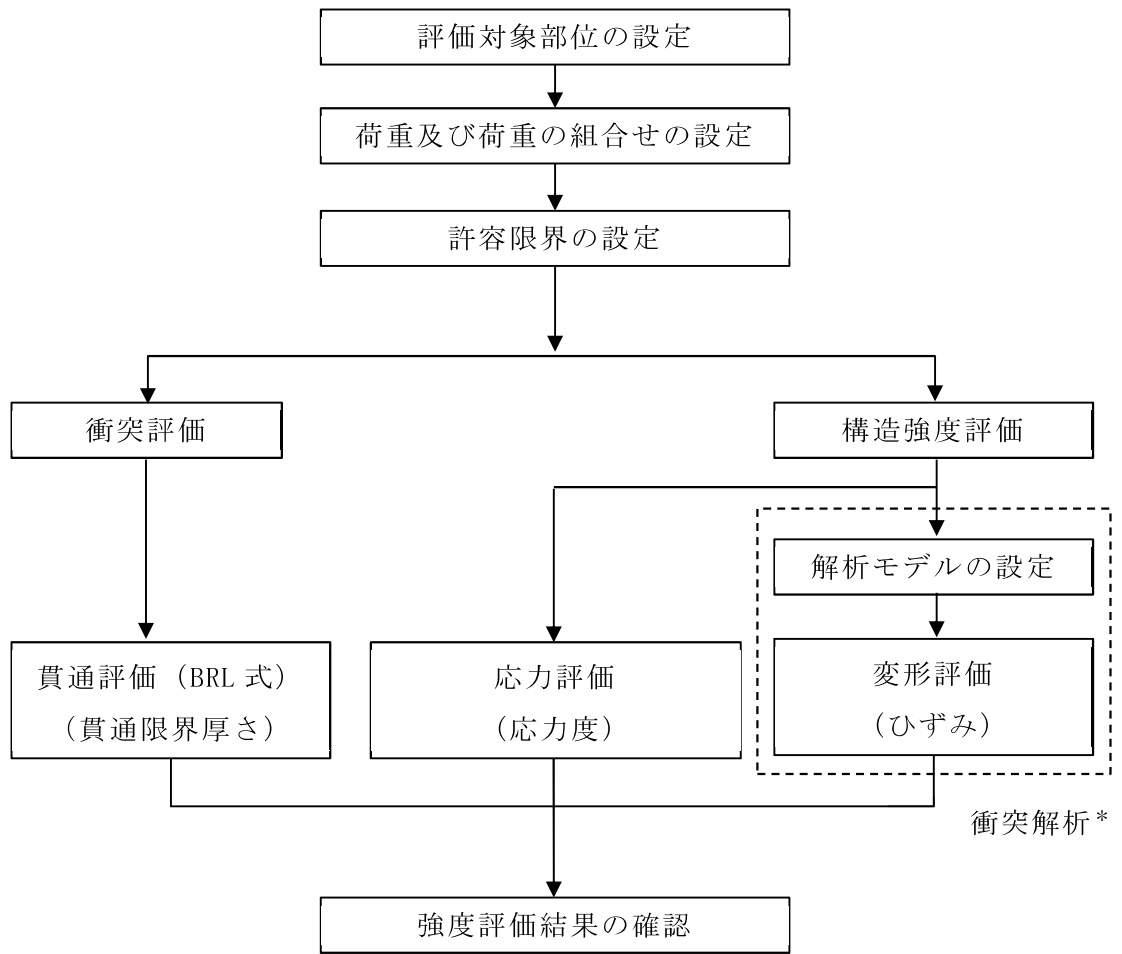
設計荷重に対し、設計飛来物が施設を構成する部材を貫通しない設計とするために、竜巻防護扉の表側鋼板の最小厚さが、設計飛来物の貫通を生じない貫通限界厚さを上回ることを計算により確認する。（以下「貫通評価」という。）

衝突評価には、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「6.6 竜巻防護扉の強度評価」に示す評価式を用いる。

### (2) 構造強度評価

設計荷重に対し、施設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、竜巻防護扉の表側鋼板と芯材に終局状態に至るようなひずみが生じないことを衝突解析により確認する。（以下「変形評価」という。）

また、カンヌキ、カンヌキ受けピン及びカンヌキ受けボルト（以下「カンヌキ部」という。）に生じる応力度が「鋼構造設計規準・同解説－許容応力度設計法－」及び J I S に基づき設定する短期許容応力度を超えないことを、力学における標準式による荷重の算定により確認する。（以下「応力評価」という。）



注記\*：衝突解析においては、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、表側鋼板及び芯材について評価を実施する。

図 2-6 竜巻防護扉の評価フロー

## 2.4 適用規格

適用する規格，規準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法及び同施行令
- ・ 「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」日本機械学会
- ・ ISE7607-3「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」（昭和51年10月高温構造安全技術研究組合）
- ・ 「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）
- ・ U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision1, March 2007
- ・ Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8 (NEI07-13))
- ・ 「建築物荷重指針・同解説」（日本建築学会，2004改定）
- ・ 「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—」（日本建築学会，2005改定）
- ・ 日本産業規格（J I S）

### 3. 強度評価方法

#### 3.1 記号の定義

BRL 式による貫通限界厚さの算定に用いる記号を表 3-1 に、力学における標準式による荷重及び応力の算定に用いる記号を表 3-2 に示す。

表 3-1 BRL 式による貫通限界厚さの算定に用いる記号

記号	単位	定義
d	m	設計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	設計飛来物の質量
T	m	鋼板の貫通限界厚さ
V	m/s	設計飛来物の飛来速度

表 3-2 力学における標準式による荷重及び応力の算定に用いる記号

記号	単位	定義
$A_1$	$m^2$	表側鋼板の受圧面積
$A_2$	$mm^2$	カンヌキの断面積
$A_3$	$mm^2$	カンヌキ受けピンの断面積
$A_4$	$mm^2$	カンヌキ受けボルトの断面積
$C$	—	風力係数
$F_d$	N	常時作用する荷重
$G$	—	ガスト影響係数
$L$	mm	カンヌキと扉枠の距離
$L_P$	mm	カンヌキ受けピンの軸支持間距離
$n$	本	カンヌキの本数
$n_b$	本	カンヌキ受けボルトの本数
$q$	Pa	設計用速度圧
$R$	N	カンヌキ 1 本あたりに生じる荷重
$V_D$	m/s	設計竜巻の最大風速
$W_M$	N	設計飛来物による衝撃荷重
$w_P$	$N/m^2$	気圧差による等分布荷重 ( $\Delta P_{max}$ )
$W_P$	N	気圧差による荷重 ( $\Delta P_{max} \cdot A_1$ )
$W_w$	N	設計竜巻の風圧力による荷重
$Z$	$mm^3$	断面係数
$\rho$	$kg/m^3$	空気密度
$\sigma_b$	MPa	曲げ応力度
$\sigma_T$	MPa	引張応力度
$\tau$	MPa	せん断応力度

### 3.2 評価対象部位

竜巻防護扉の評価対象部位は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.6 竜巻防護扉の許容限界」に示す評価対象部位を踏まえ、設定する。

評価対象部位を図 3-1 に示す。

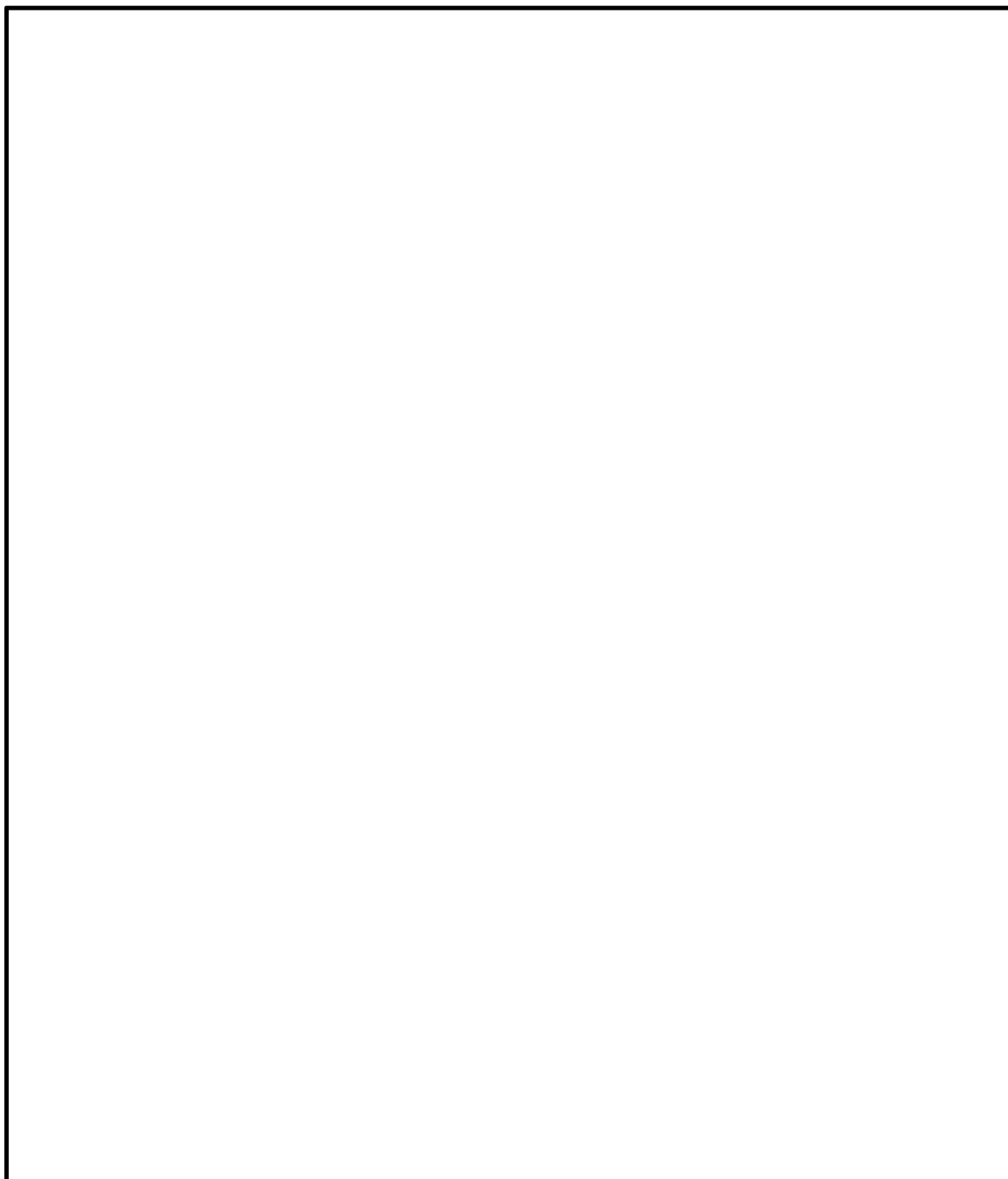


図 3-1 竜巻防護扉の評価位置図



### (1) 貫通評価

設計荷重に対し、設計飛来物が施設を構成する部材を貫通しない設計とするために、竜巻防護扉の表側鋼板の最小厚さが、設計飛来物の貫通を生じない貫通限界厚さを上回ることを計算により確認するものとし、表側鋼板を評価対象部位として設定する。

### (2) 変形評価

設計荷重に対し、施設を構成する部材自体が、転倒及び脱落により外部事象防護対象施設へ接触等の影響を与えない設計とするために、竜巻防護扉の表側鋼板と芯材に終局状態に至るようなひずみが生じないことを解析により確認する。施設を構成する表側鋼板に作用する設計荷重は、芯材、ヒンジ及びカンヌキ部に伝わりアンカーボルトにより固定された扉枠を介して建屋躯体に伝達されることから、これらの部材が評価対象部位として抽出される。

このうち、ヒンジ、カンヌキ部、及びアンカーボルトについては、外部から作用する設計荷重に対して直接的な伝達経路とならないこと、扉枠についてはアンカーボルトの大半が損傷しない限り転倒・脱落は生じないことから、表側鋼板、芯材を評価対象部位として設定する。

ここで、評価対象とする扉は、表側鋼板の厚みが最も薄いもののうち、表側鋼板の面積が最大となる竜巻防護扉を代表として評価するものとし、原子炉建屋機器搬出入口竜巻防護扉とする。

評価の対象とする竜巻防護扉の選定結果として、竜巻防護扉の表側鋼板の最小厚さと面積の一覧を表 3-3 に示す。また、設計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。したがって、変形評価としては、評価対象となる表側鋼板の部材長さ（支持スパン）が最長となる箇所を選定する。

### (3) 応力評価

設計荷重に対し、施設を構成する部材自体が、転倒及び脱落により外部事象防護対象施設へ接触等の影響を与えない設計とするために、カンヌキ部に生じる応力度が「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—」及び J I S に基づき設定する短期許容応力度を超えないことを、力学における標準式による荷重の算定により確認する。

室内側の扉板に作用する荷重が芯材、表側鋼板に作用し、ヒンジ、カンヌキ部及びアンカーボルトにより固定された扉枠を介して建屋躯体に伝達されることから、これらの部材が評価対象部位として抽出される。

このうち、表側鋼板は対貫通性を考慮した厚板であり、またヒンジ、芯材については評価上期待しないこと、アンカーボルトにより固定された扉枠は建屋躯体に埋め込まれて一体化していることから、扉の閉止状態を維持するための支持部材であるカンヌキ及びカンヌキに作用する荷重を負担するカンヌキ受けピン、カンヌキ受けボルトを評価対象部位として設定する。

ここで、カンヌキ部に作用する荷重は「3.3 荷重及び荷重の組合せ」に記載するとおり、気圧差による荷重を設定することから、カンヌキ部に生じる気圧差による荷重が最大となる、即ちカンヌキ 1 本当たりの表側鋼板の負担面積が最大となる竜巻防護扉を代表として評価するものとし、非常用電気品室 (A) 竜巻防護扉を評価対象とする。評価の対象とする竜巻防護扉の選定結果として、カンヌキ 1 本当たりの表側鋼板の負担面積の一覧を表 3-3 に示す。

表 3-3 評価の対象とする竜巻防護扉の選定結果

評価対象の竜巻防護扉	表側鋼板の仕様			カンヌキの本数 (本)	カンヌキ1本当たりの 表側鋼板の負担面積 (m <sup>2</sup> )	表側鋼板の 最小厚さ (mm)	評価対象		
	幅 (mm)	高さ (mm)	面積 (m <sup>2</sup> )				変形評価	応力評価	
非常用ディーゼル発電機 (A) 室 竜巻防護扉1	945	2070	1.96	4	0.49				
非常用ディーゼル発電機 (A) 室 竜巻防護扉2	3800	3610	13.72	12	1.15				
非常用ディーゼル発電機 (B) 室 竜巻防護扉1	945	2070	1.96	4	0.49				
非常用ディーゼル発電機 (B) 室 竜巻防護扉2	3800	3670	13.95	12	1.17				
非常用ディーゼル発電機 (C) 室 竜巻防護扉1	933	2068	1.93	4	0.49				
非常用ディーゼル発電機 (C) 室 竜巻防護扉2	3800	3685	14.00	10	1.41				
可燃性ガス濃度制御系再結合装置室 竜巻防護扉	3400	3870	13.16	12	1.10				
南側ハッチ室 竜巻防護扉	3410	2870	9.79	10	0.98				
南側階段室 竜巻防護扉	945	2010	1.90	4	0.48				
北側ハッチ室 竜巻防護扉	3410	2870	9.79	10	0.98				
原子炉建屋機器搬出入口 竜巻防護扉	5200	5560	28.91	16	1.81			○	
見学者ギャラリー室竜巻防護室扉	扉部	1050	1950	2.05	2		1.03	19	
	鋼板部	-*	-*	-*	-*		-*	19	
非常用電気品室 (A) 竜巻防護扉	2500	2900	7.25	4	1.82			○	
TA-TB/T8-T9通り 竜巻防護扉	825	1955	1.61	4	0.41				
非常用送風機室 (A) 竜巻防護扉	830	1920	1.59	2	0.80	35			
計測制御電源盤区域 (B) (C) ・ 常用電気品区域給気ルーバー室 竜巻防護扉	825	2190	1.81	4	0.46				
計測制御電源盤区域 (A) 給気ルーバー室 竜巻防護扉	825	2190	1.81	4	0.46				
燃料移送ポンプエリア (A系) 水密扉	1274	2161	2.75	2	1.38	22			
燃料移送ポンプエリア (B系) 水密扉	1274	2161	2.75	2	1.38	22			
燃料移送ポンプエリア (C系) 水密扉	1274	2161	2.75	2	1.38	22			

注記\* : カンヌキが無い為評価対象外とした。

### 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、VI-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

強度評価に用いる荷重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> )
92	14	78	6400

#### a. 風圧力による荷重 ( $W_w$ )

風圧力による荷重は、下式により算出する。

$$W_w = q \cdot G \cdot C \cdot A_1$$

設計用速度圧  $q$  は、下式により算定する。

$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_D^2$$

#### b. 気圧差による荷重 ( $W_p$ )

気圧差による荷重は、次式のとおり算出する。

$$W_p = \Delta P_{max} \cdot A_1$$

#### c. 設計飛来物による衝撃荷重 ( $W_M$ )

設計飛来物による衝撃荷重 ( $W_M$ ) は、表 3-5 に諸元を示す設計飛来物の衝突に伴う荷重とする。ここで、設計飛来物の衝突方向は、表 3-5 より設計飛来物の飛来速度が大きく衝突断面積あたりの運動エネルギーが大きい、水平方向を設定するものとする。また、設計飛来物の材料定数を表 3-6 に示す。

貫通評価においては、考慮する設計飛来物として衝突断面積あたりの運動エネルギーが最大となる足場パイプを設定し、足場パイプの衝撃荷重を考慮する。また、評価対象部位に足場パイプが衝突した際に跳ね返らず、貫入する物として評価する。

変形評価においては、考慮する設計飛来物として運動エネルギーが最大となる鋼製足場板を設定し、鋼製足場板の衝撃荷重を考慮する。

表 3-5 設計飛来物の諸元

設計 飛来物	寸法 長さ×幅×奥行き (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)	運動エネルギー (kJ)		衝突断面積あたりの 運動エネルギー (kJ/mm <sup>2</sup> )	
					水平 方向	鉛直 方向	水平 方向	鉛直 方向
足場 パイプ	4×0.05×0.05	11	42	38	10	8	0.0279	0.0223
鋼製 足場板	4×0.25×0.04	14	55	18	21	3	0.0021	0.0003

表 3-6 設計飛来物の材料定数

設計飛来物	降伏応力 $\sigma_y$ (MPa)	縦弾性係数 E (MPa)	塑性硬化係数 E' (MPa)	ポアソン比
足場パイプ	355	201667	2470	0.3
鋼製足場板	245	201667	1270	0.3

d. 常時作用する荷重 ( $F_d$ )

常時作用する荷重 ( $F_d$ ) は、部材の自重とする。

(2) 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せについては、VI-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、気圧差による荷重、設計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 3-7 に示す。

表 3-7 荷重の組合せ

評価内容	風圧力 による荷重 ( $W_w$ )	気圧差 による荷重 ( $W_p$ )	設計飛来物 による衝撃 荷重 ( $W_M$ )	常時 作用する 荷重 ( $F_d$ )	荷重の組合せ
貫通評価	—	—	○	—	$W_M$
変形評価	○	—	○	○	$W_M + W_w + F_d$
応力評価	—	○	—	—	$W_p$

### 3.4 許容限界

竜巻防護扉の許容限界は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.6 竜巻防護扉の許容限界」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。

#### (1) 評価対象部位の材料仕様

竜巻防護扉の材料仕様を表 3-8 及び表 3-9 に示す。

表 3-8 表側鋼板，芯材の材料仕様

評価対象部位	仕様	材質
表側鋼板	PL- <input type="checkbox"/>	SUS304
芯材	H-250×250×9×14 PL-35	SUS304

表 3-9 カンヌキ部の材料仕様

評価対象部位		仕様	材質
非常用電気品 (A) 竜巻防護扉	カンヌキ	φ 50	SUS304
	カンヌキ受けピン	φ 20	SCM440
	カンヌキ受けボルト	M16	SCM435

(2) 評価対象部位の材料定数

竜巻防護扉の材料定数を表 3-10 に示す。

表 3-10 材料定数

材質	降伏応力 $\sigma_y$ (MPa)	縦弾性係数 E (MPa)	塑性硬化係数 E' (MPa)	ポアソン比
SUS304	205	193667	1550	0.3

(3) 許容限界

a. 貫通評価

竜巻防護扉を構成する表側鋼板の最小厚さを貫通評価の許容限界とした。表 3-11 に設定した許容限界を示す。

表 3-11 貫通評価の許容限界

評価対象の竜巻防護扉		許容限界 (mm)	材質		
非常用ディーゼル発電機 (A) 室 竜巻防護扉1	表側鋼板		SUS304		
非常用ディーゼル発電機 (A) 室 竜巻防護扉2					
非常用ディーゼル発電機 (B) 室 竜巻防護扉1					
非常用ディーゼル発電機 (B) 室 竜巻防護扉2					
非常用ディーゼル発電機 (C) 室 竜巻防護扉1					
非常用ディーゼル発電機 (C) 室 竜巻防護扉2					
可燃性ガス濃度制御系再結合装置室 竜巻防護扉					
南側ハッチ室 竜巻防護扉					
南側階段室 竜巻防護扉					
北側ハッチ室 竜巻防護扉					
原子炉建屋機器搬出入口 竜巻防護扉					
見学者ギャラリー室竜巻防護室扉				扉部	19
				鋼板部	19
非常用電気品室 (A) 竜巻防護扉					35
TA-TB/T8-T9通り 竜巻防護扉					
非常用送風機室 (A) 竜巻防護扉		22			
計測制御電源盤区域 (B) (C) ・ 常用電気品区域給気ルーバー室 竜巻防護扉					
計測制御電源盤区域 (A) 給気ルーバー室 竜巻防護扉	22				
燃料移送ポンプエリア (A系) 水密扉					
燃料移送ポンプエリア (B系) 水密扉					
燃料移送ポンプエリア (C系) 水密扉	22				



b. 変形評価

設計飛来物が竜巻防護扉の表側鋼板へ直接衝突する場合の変形評価における許容限界は、鋼材の破断ひずみを基本として設定する。破断ひずみについては、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.6(2) 構造強度評価」に示すとおり、J I Sに規定されている伸びの下限值を基に設定するが、「NEI07-13: Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs」(以下「NEI07-13」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。

設定した許容限界を表 3-12 に示す。

表 3-12 変形評価の許容限界

評価対象部位		材質	破断ひずみ
竜巻防護扉 (原子炉建屋機器搬出入口)	表側鋼板	SUS304	□
	芯材	SUS304	□

c. 応力評価

応力評価の許容限界を表 3-13 に示す。評価対象部位の材料仕様は表 3-8 に示すとおりとする。

応力評価におけるカンヌキ部の評価は，J I S 及び「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を許容限界として設定する。

表 3-13 応力評価の許容限界

評価対象部位		材質	短期許容応力度	
			曲げ・引張 (MPa)	せん断 (MPa)
非常用電気品室 (A) 竜巻防護扉	カンヌキ	SUS304	205	118
	カンヌキ受けピン	SCM440	686	396
	カンヌキ受けボルト	SCM435	651	—

### 3.5 評価方法

竜巻防護扉の強度評価は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「4.6 竜巻防護扉の評価方針」を踏まえて、衝突評価として貫通評価を実施し、構造強度評価として変形評価及び応力評価を実施する。

#### (1) 貫通評価

「3.3 荷重及び荷重の組合せ」に記載した通り、貫通評価においては設計飛来物を足場パイプに設定する。ここで、設計飛来物が竜巻防護扉の表側鋼板へ直接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) 変形評価

「3.3 荷重及び荷重の組合せ」に記載した通り、変形評価においては設計飛来物を鋼製足場板に設定する。ここで、変形評価に用いる評価対象部位に生じるひずみは、解析モデル及び材料の非線形特性を用いた衝突解析により評価する。

##### a. 解析モデル及び諸元

##### (a) 竜巻防護扉

竜巻防護扉の解析モデル化の範囲は、想定する荷重の伝達を考慮し、竜巻防護扉を構成する表側鋼板、芯材、扉枠、室内側の扉板とする。各部位はシェル要素でモデル化する。竜巻防護扉の解析モデルの境界条件を表 3-14 に、解析モデル図を図 3-3 に示す。

表 3-14 解析モデルの境界条件

項目		境界条件
竜巻防護扉	扉部材と 建屋躯体	Y 方向並進拘束
	扉部材と ヒンジ	X, Y, Z 方向並進拘束

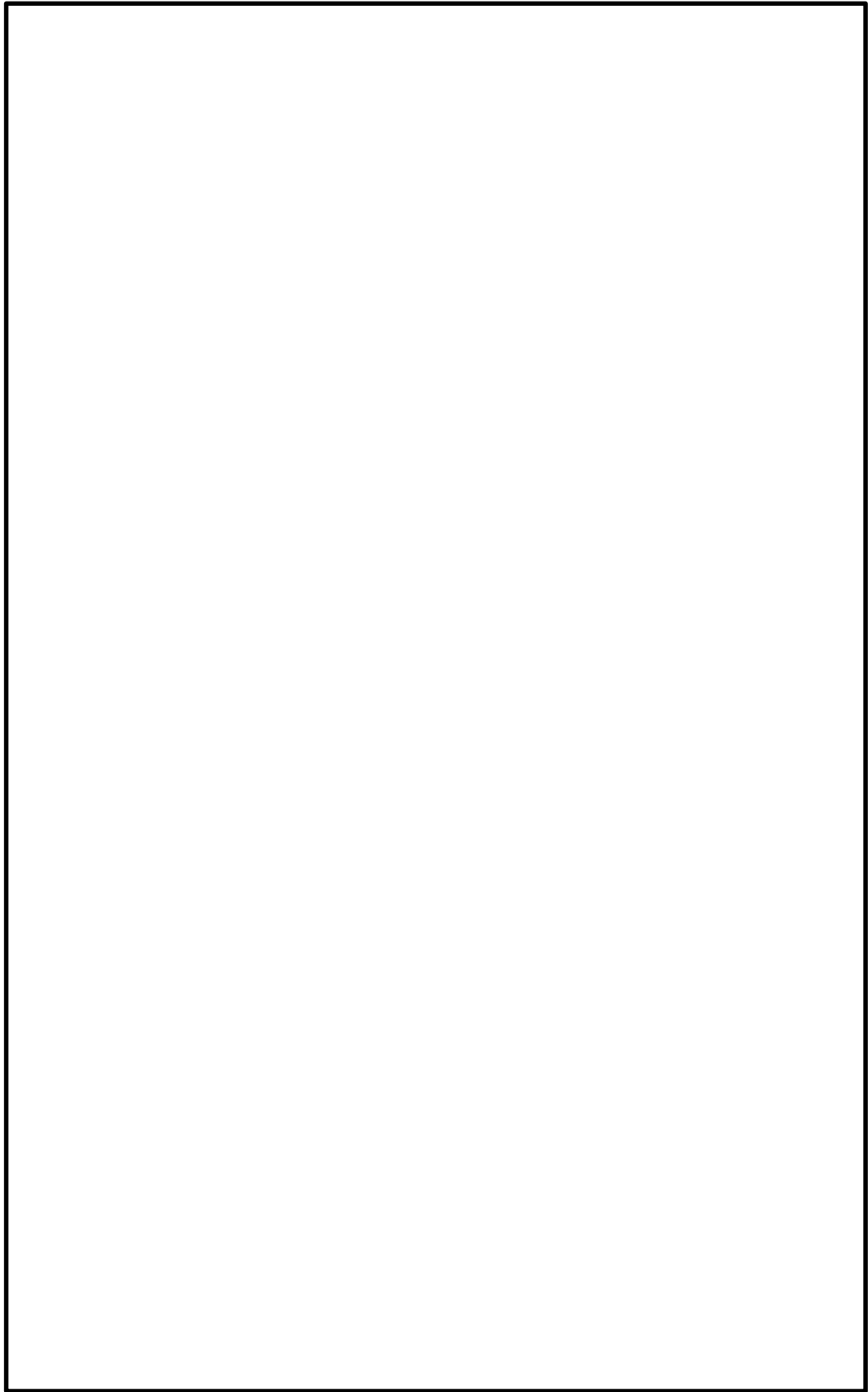


図 3-3 竜巻防護扉の解析モデル図 (1/2)

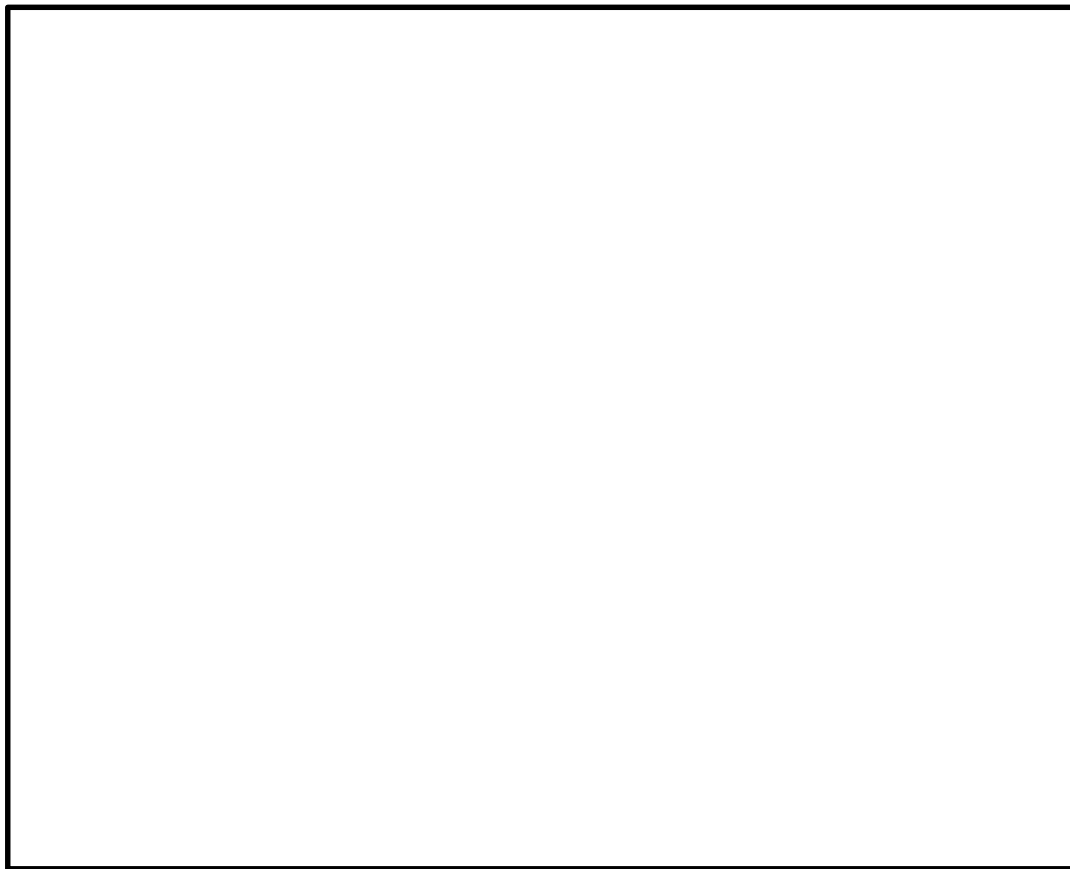


図 3-3 竜巻防護扉の解析モデル図 (2/2)

(b) 設計飛来物

設計飛来物である鋼製足場板は、シェル要素でモデル化する。

設計飛来物の解析モデル図を図 3-4 に示す。

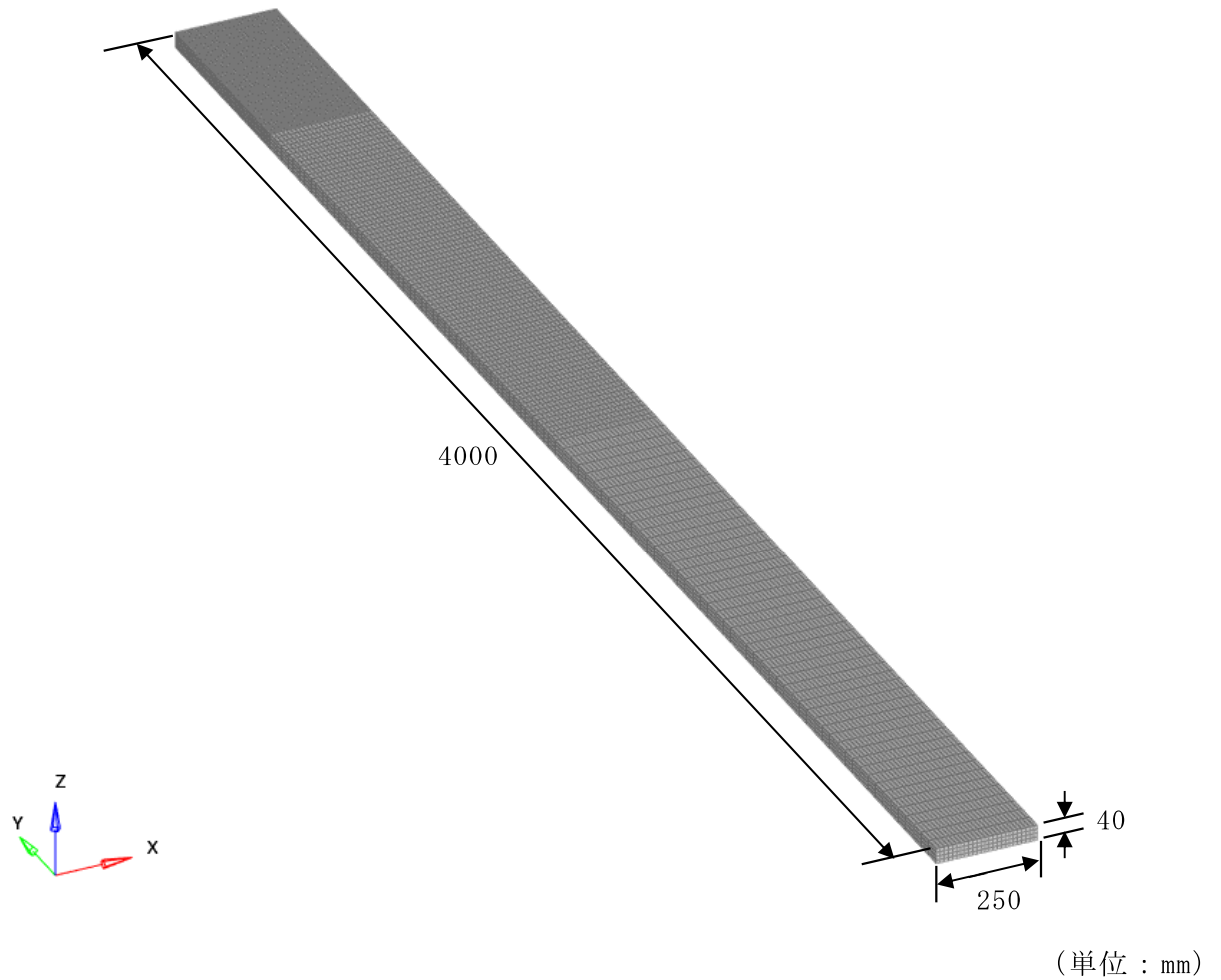


図 3-4 設計飛来物の解析モデル図

## b. 解析コード

衝突解析には，解析コード「LS-DYNA」を用いる。

## c. 使用材料

竜巻防護扉に使用する鋼材の仕様については，「3.4(1) 評価対象部位の材料仕様」に示すとおり設定する。

## d. 材料定数

竜巻防護扉に使用する鋼材の材料定数については，「3.4(2) 評価対象部位の材料定数」に示すとおり設定する。

## e. 材料の非線形特性

## (a) 材料の応力－ひずみ関係

竜巻防護扉の材料モデルでは，鋼材の破断ひずみを設定し，破断ひずみを超えた要素が荷重を負担しないことを考慮する。

材料の応力－ひずみ関係はバイリニア型とし，降伏後の塑性硬化係数（2次勾配 $E'$ ）は，表 3-10 に示す値とする。

材料に適用する応力－ひずみ関係の概念図を図 3-5 に示す。

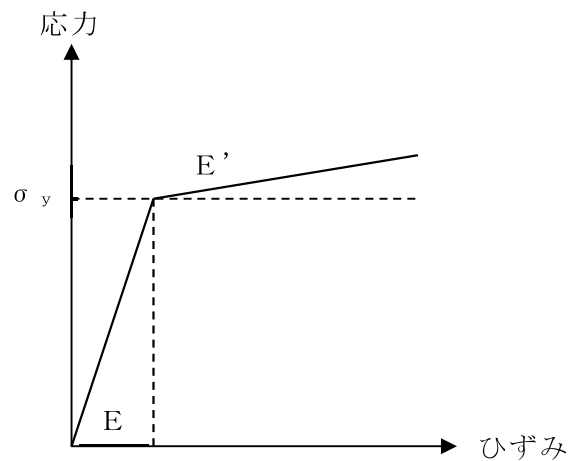


図 3-5 応力－ひずみ関係の概念図

(b) ひずみ速度効果

竜巻による設計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、以下に示す Cowper-Symonds の式を適用する。

$$\sigma_D = \sigma_S \cdot \left\{ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right\}$$

ここで、 $\sigma_D$ は動的応力、 $\sigma_S$ は静的応力、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度、 $C$ 及び $P$ はひずみ速度依存性パラメータを表す。

ひずみ速度依存性パラメータを表 3-15 に示す。

表 3-15 ひずみ速度依存性パラメータ

	鋼製足場板	竜巻防護扉	
		表側鋼板	芯材
材料	SS400	SUS304	SUS304
C (s <sup>-1</sup> )			
P			

(c) 破断ひずみ

破断ひずみは、J I Sに規定されている伸びの下限値を基に設定する。また、「NEI07-13」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、竜巻防護扉のみ□とする。鋼製足場板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。

材料モデルにおける破断ひずみを表 3-16 に示す。

表 3-16 材料モデルにおける破断ひずみ

種別	材質	J I S規格値 (下限値)	TF	破断ひずみ
表側鋼板	SUS304	0.4	□	□
芯材	SUS304	0.4	□	□



(3) 応力評価

気圧差による荷重 ( $W_P$ ) によりカンヌキ部に発生する応力度を算出し、許容限界を超えないことを確認する。

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 ( $W_P$ ) をカンヌキ部で負担した場合に発生する反力  $R$  から算定する。

カンヌキ部に生じる荷重を図 3-6 に示す。

$$W_P = \Delta P_{\max} \cdot A_1$$

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

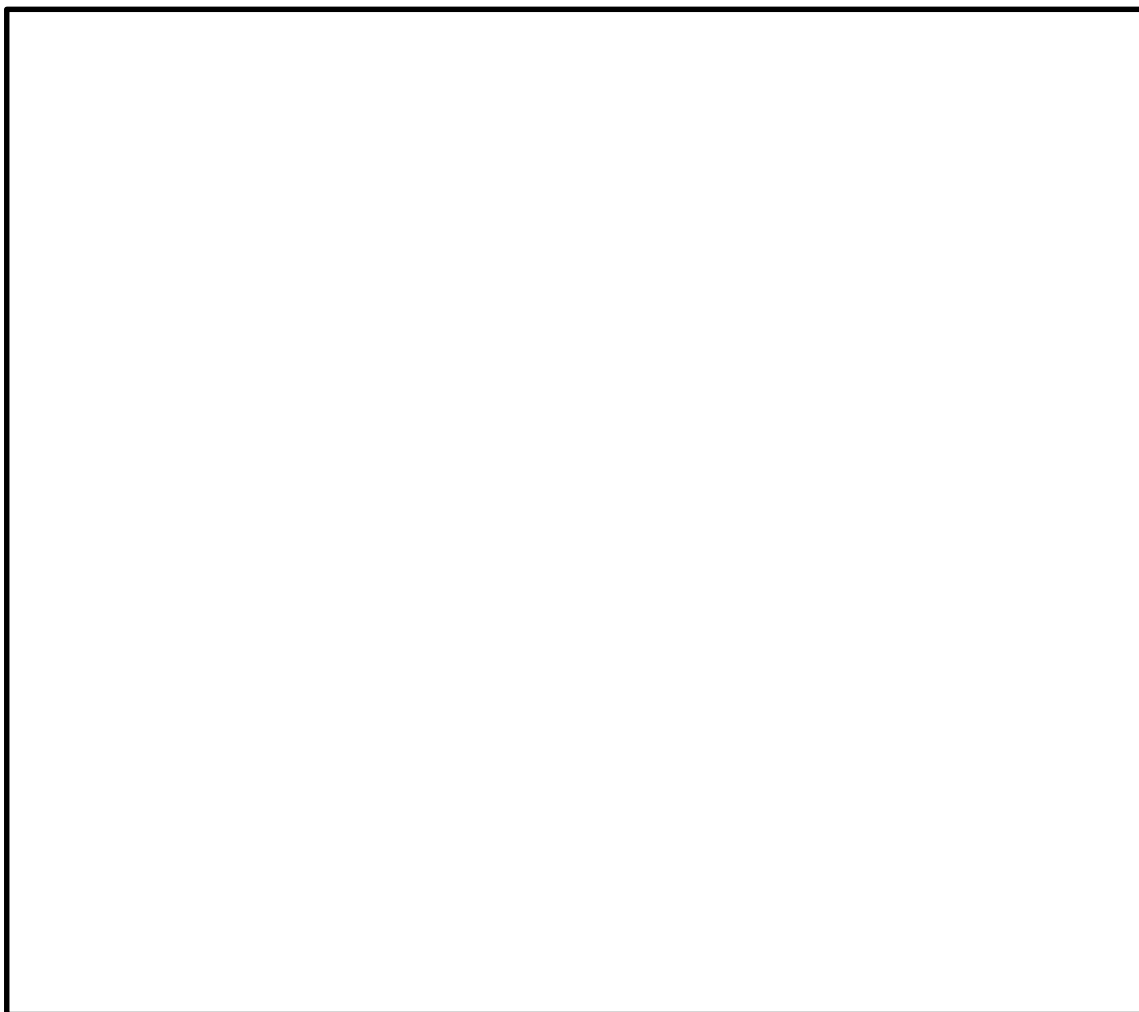


図 3-6 カンヌキ部に生じる荷重

(a) カンヌキ

カンヌキ部の詳細図及びカンヌキの評価に用いるモデルの概念図を図 3-7 に示す。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。

$$M_k = R \cdot L$$

$$Q_k = R$$

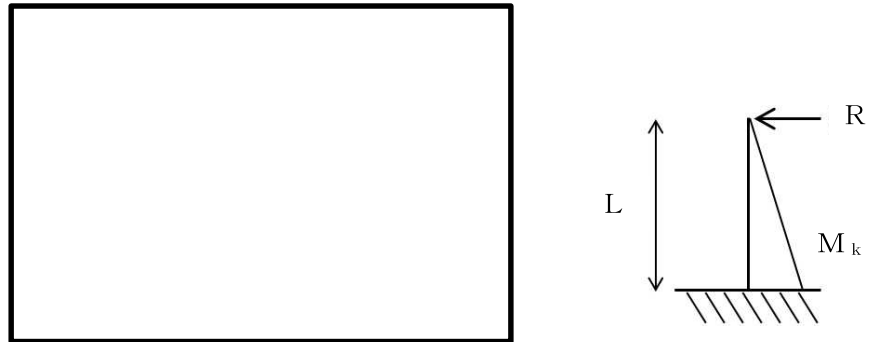


図 3-7 カンヌキ部の詳細図及びモデルの概念図 (A 部)

(b) カンヌキ受けピン

カンヌキ受けピン及びカンヌキ受けボルトの詳細図及びカンヌキ受けピンの評価に用いるモデルの概念図を図 3-8 に示す。カンヌキ受けピンに生じる曲げモーメント  $M_P$  及びせん断力  $Q_P$  は次式により算定する。

$$M_P = \frac{R \cdot L_P}{4}$$

$$Q_P = \frac{R}{2}$$

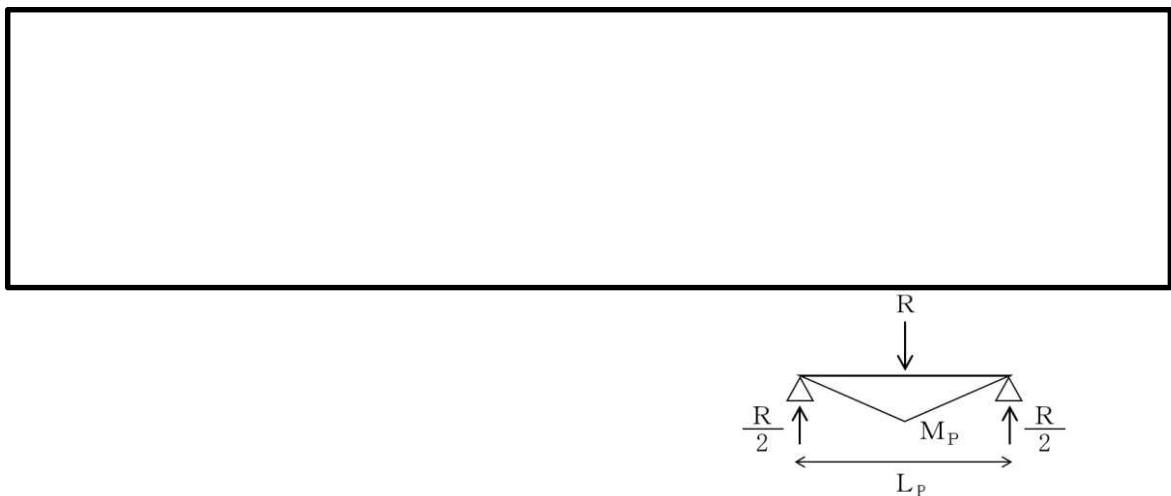


図 3-8 カンヌキ受けピン及びカンヌキ受けボルトの詳細図及びモデルの概念図

(c) カンヌキ受けボルト

カンヌキ受けボルト 1 本あたりに生じる引張力 T は以下のとおり。

$$T = \frac{R}{n_b}$$

b. 断面検定

カンヌキ部に生じる応力度が許容限界以下であることを確認する。カンヌキ部の許容限界は表 3-12 のとおり。

(a) カンヌキ 1 本あたりに生じる曲げ応力度

$$\sigma_b = \frac{R \cdot L}{Z}$$

カンヌキ 1 本あたりに生じるせん断応力度

$$\tau = \frac{R}{A_2}$$

(b) カンヌキ受けピン 1 本あたりに生じる曲げ応力度

$$\sigma_b = \frac{R \cdot L_P}{4 \cdot Z}$$

カンヌキ受けピン 1 本あたりに生じるせん断応力度

$$\tau = \frac{R}{2 \cdot A_3}$$

(c) カンヌキ受けボルト 1 本あたりに生じる引張応力度

$$\sigma_T = \frac{R}{n_b \cdot A_4}$$

#### 4. 評価条件

##### 4.1 貫通評価

貫通評価において、表側鋼板の貫通評価式に用いる評価条件を表 4-1 に示す。

表 4-1 表側鋼板の貫通評価に用いる評価条件

評価条件		数値
d (m)		0.021
K		1.0
M (kg)		11
V (m/s)	水平方向	42

#### 4.2 変形評価

竜巻防護扉の変形評価は、図 3-1 に示す竜巻防護扉の最大変形が生じると想定される表側鋼板中央部に衝突するケースを設定する。

解析ケースを表 4-2 表及び図 4-1 に示す。

表 4-2 解析ケース（変形評価）

評価箇所	衝突箇所	設計飛来物の 衝突方向	対象部材
竜巻防護扉	表側鋼板	水平	PL- <input type="checkbox"/> H-250×250×9×14 PL-35



図 4-1 解析ケース（変形評価）

### 4.3 応力評価

竜巻防護扉の応力評価に用いる条件を表 4-3 に示す。

表 4-3 応力評価に用いる評価条件（非常用電気品室（A）竜巻防護扉）

記号	定義	数値	単位
$A_1$	表側鋼板の受圧面積	7.25	$m^2$
$A_2$	カンヌキの断面積	1963	$mm^2$
$A_3$	カンヌキ受けピンの断面積	314	$mm^2$
$A_4$	カンヌキ受けボルトの断面積	157	$mm^2$
L	カンヌキと扉枠の距離	43	mm
$L_P$	カンヌキ受けピンの軸支時間距離	58	mm
n	カンヌキの本数	4	本
$n_b$	カンヌキ受けボルトの本数	2	本
R	カンヌキ1本あたりに生じる荷重	11600	N
$w_P$	気圧差による等分布荷重 ( $\Delta P_{max}$ )	6400	$N/m^2$
$W_P$	気圧差による荷重 ( $\Delta P_{max} \times A_1$ )	46400	N
Z	断面係数	カンヌキ	12272 $mm^3$
		カンヌキ受けピン	785 $mm^3$

## 5. 強度評価結果

### 5.1 貫通評価

竜巻発生時の竜巻防護扉の表側鋼板の貫通限界厚さを表 5-1 に示す。

表 5-1 貫通限界厚さ

評価対象部位		貫通限界厚さ (mm)
竜巻防護扉	表側鋼板	17

竜巻防護扉の貫通評価結果として、貫通限界厚さと許容限界の比較を表 5-2 に示す。  
竜巻防護扉の評価対象部位の許容限界が、設計飛来物による貫通を生じない貫通限界厚さを上回ることを確認した。

表 5-2 貫通評価結果

評価対象の竜巻防護扉		評価結果 (mm)	許容限界 (mm)
非常用ディーゼル発電機 (A) 室 竜巻防護扉1		17	
非常用ディーゼル発電機 (A) 室 竜巻防護扉2		17	
非常用ディーゼル発電機 (B) 室 竜巻防護扉1		17	
非常用ディーゼル発電機 (B) 室 竜巻防護扉2		17	
非常用ディーゼル発電機 (C) 室 竜巻防護扉1		17	
非常用ディーゼル発電機 (C) 室 竜巻防護扉2		17	
可燃性ガス濃度制御系再結合装置室 竜巻防護扉		17	
南側ハッチ室 竜巻防護扉		17	
南側階段室 竜巻防護扉		17	
北側ハッチ室 竜巻防護扉		17	
原子炉建屋機器搬出入口 竜巻防護扉		17	
見学者ギャラリー室竜巻防護室扉	扉部	17	19
	鋼板部	17	19
非常用電気品室 (A) 竜巻防護扉		17	
TA-TB/T8-T9通り 竜巻防護扉		17	
非常用送風機室 (A) 竜巻防護扉		17	35
計測制御電源盤区域 (B) (C) ・ 常用電気品区域給気ルーバー室 竜巻防護扉		17	
計測制御電源盤区域 (A) 給気ルーバー室 竜巻防護扉		17	
燃料移送ポンプエリア (A系) 水密扉		17	22
燃料移送ポンプエリア (B系) 水密扉		17	22
燃料移送ポンプエリア (C系) 水密扉		17	22

表側鋼板



## 5.2 変形評価

評価結果を表 5-3 並びに図 5-1 及び図 5-2 に示す。

竜巻防護扉に生じるひずみが許容限界を超えない。

表 5-3 評価結果

評価対象部位		評価結果	許容限界
竜巻防護扉 (原子炉建屋機器搬出入口)	表側鋼板	0	0.2
	芯材	0	0.2

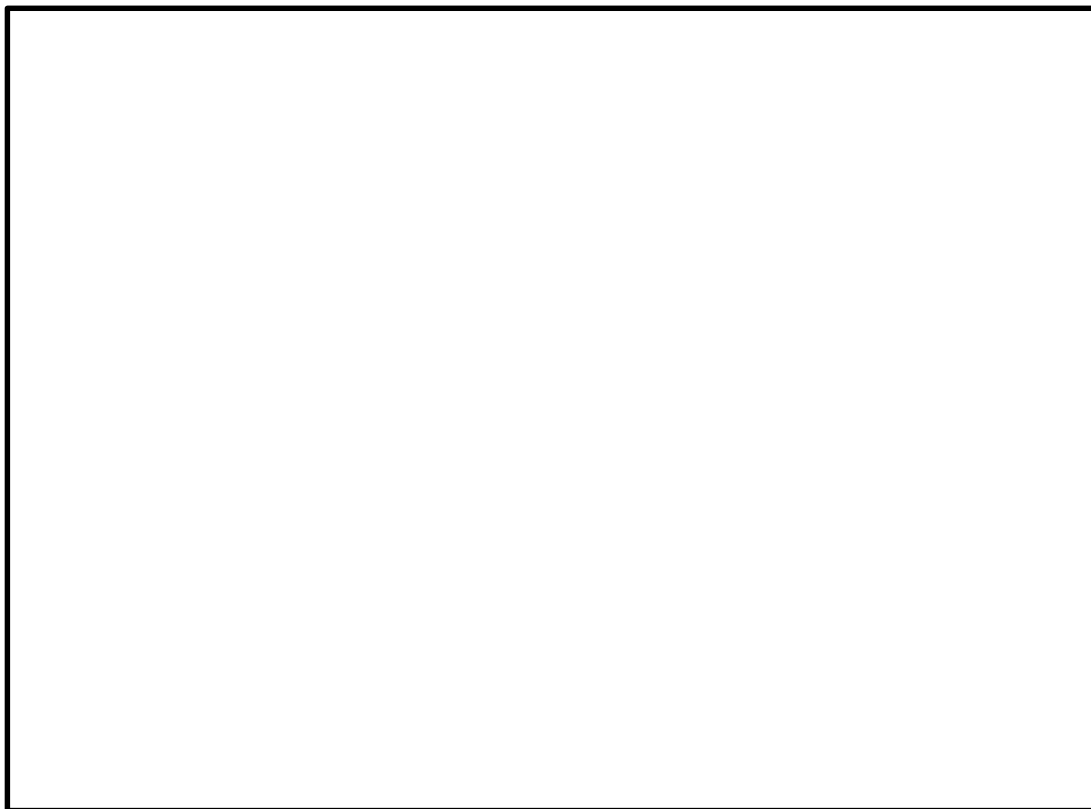


図 5-1 表側鋼板のひずみ分布図

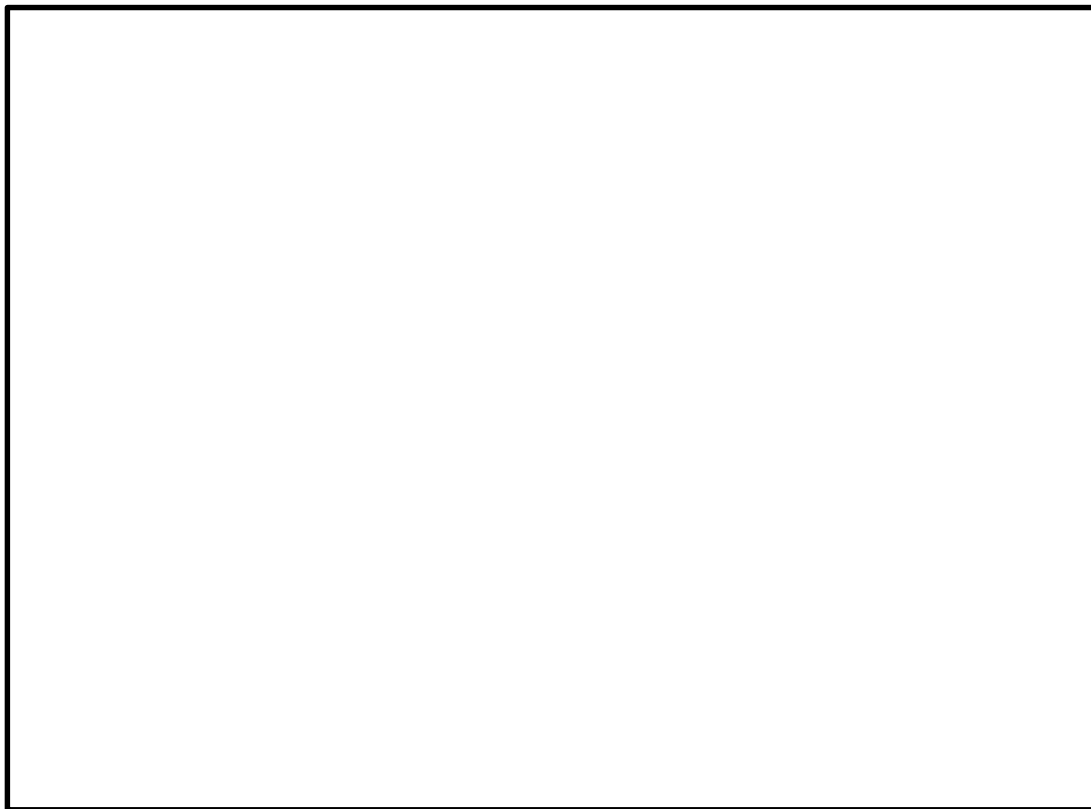


図 5-2 芯材のひずみ分布図

### 5.3 応力評価

評価結果を表 5-4 に示す。

竜巻防護扉のカンヌキ部に生じる応力度は、許容限界を超えない。

表 5-4 評価結果 (単位：MPa)

評価対象の竜巻防護扉		評価結果		許容限界
		項目	数値	
非常用電気品室 (A) 竜巻防護扉	カンヌキ	曲げ応力度	40.7	205
		せん断応力度	5.91	118
	カンヌキ受けピン	曲げ応力度	215	686
		せん断応力度	18.5	396
	カンヌキ受けボルト	引張応力度	37.0	651