

本資料のうち、枠囲みの内容は、商業機密あるい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7
提出年月日	平成30年3月22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 ディーゼル発電機吸気フィルタの強度計算書

V-3-別添 1-1-3 残留熱除去系海水系ポンプの強度計算書

V-3-別添 1-1-4 ディーゼル発電機用海水ポンプの強度計算書

V-3-別添 1-1-5 残留熱除去系海水系ストレーナの強度計算書

V-3-別添 1-1-6 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 1-1-7 排気筒の強度計算書

V-3-別添 1-1-8 配管及び弁の強度計算書

V-3-別添 1-1-9 換気空調設備の強度計算書

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 1-1-10-2 消音器の強度計算書

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.....	3
2.4 適用規格.....	4
3. 強度評価方法.....	5
3.1 記号の定義.....	5
3.2 評価対象部位.....	7
3.3 荷重及び荷重の組合せ.....	8
3.4 許容限界.....	9
3.5 評価方法.....	10
4. 評価条件.....	14
5. 強度評価結果.....	17

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、非常用ディーゼル発電機排気消音器及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器（以下「ディーゼル発電機排気消音器」という。）が竜巻時及び竜巻通過後においても、消音器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

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、ディーゼル発電機排気消音器の「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

ディーゼル発電機排気消音器は、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、図2-1に示す位置に設置する。

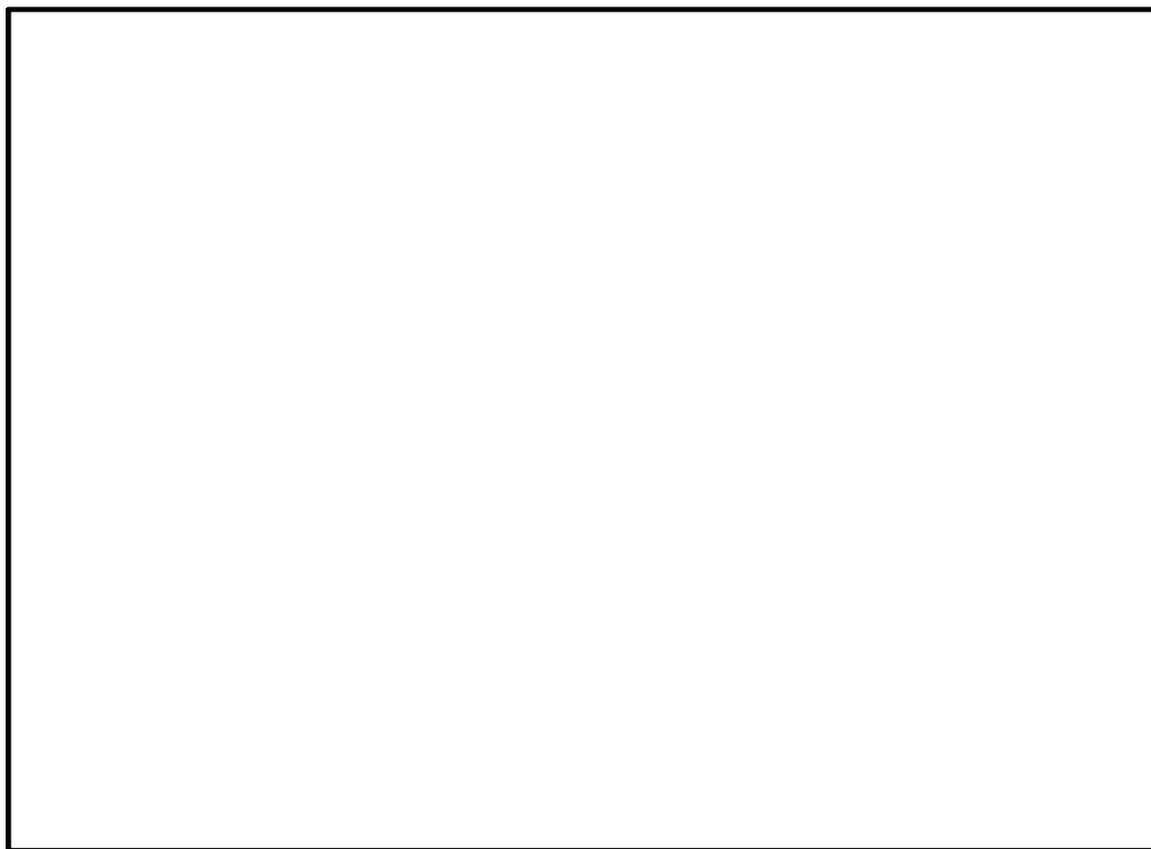


図 2-1 ディーゼル発電機排気消音器の位置図

2.2 構造概要

ディーゼル発電機排気消音器について、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、ディーゼル発電機排気消音器の構造を示す。

ディーゼル発電機排気消音器は屋外に設置しており、取付ボルト又は基礎ボルトにより固定している。ディーゼル発電機排気消音器の概要図を図2-2～図2-4に示す。

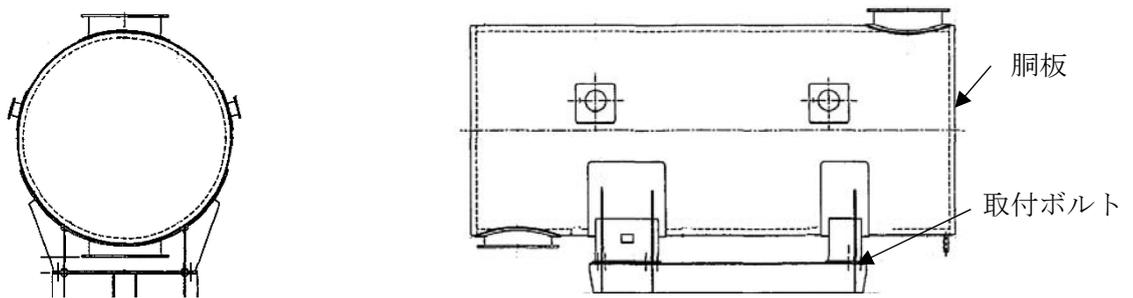


図2-2 ディーゼル発電機排気消音器概要図（非常用ディーゼル発電機2C）

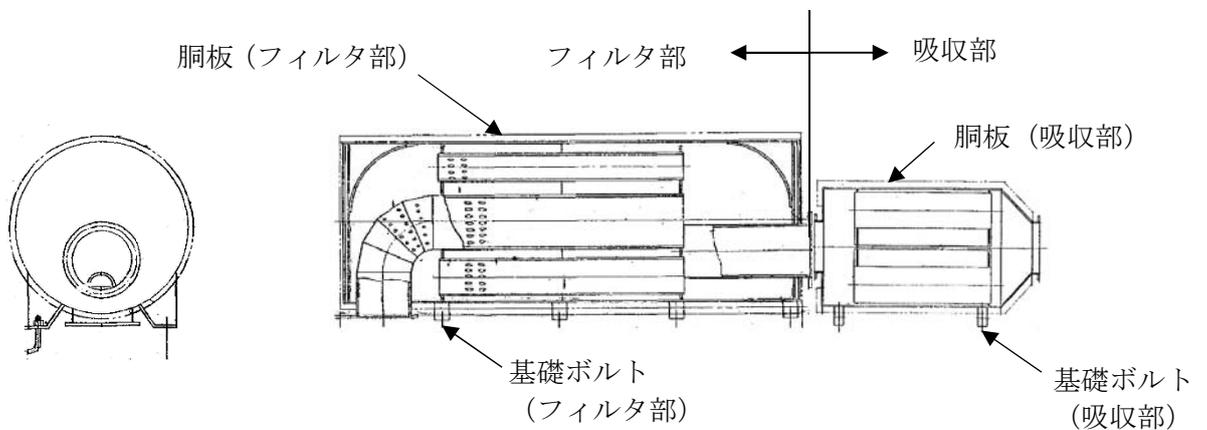


図2-3 ディーゼル発電機排気消音器概要図（非常用ディーゼル発電機2D）

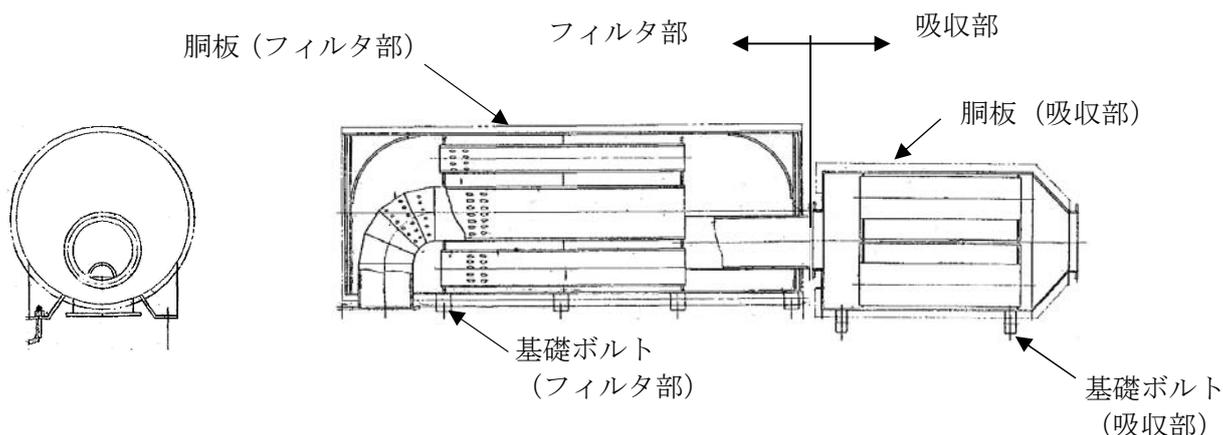


図2-4 ディーゼル発電機排気消音器概要図（高圧炉心スプレー系ディーゼル発電機）

2.3 評価方針

ディーゼル発電機排気消音器の強度評価は、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、ディーゼル発電機排気消音器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。

ディーゼル発電機排気消音器の強度評価フローを図2-5に示す。ディーゼル発電機排気消音器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、評価対象部位を選定する。強度評価においては、ディーゼル発電機排気消音器に対して、設計竜巻の風圧力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 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）及び「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）（以下「JEAG 4601」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」に示すよこ置円筒型容器の評価式を用いる。

ディーゼル発電機排気消音器の許容限界は、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、JEAG 4601の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

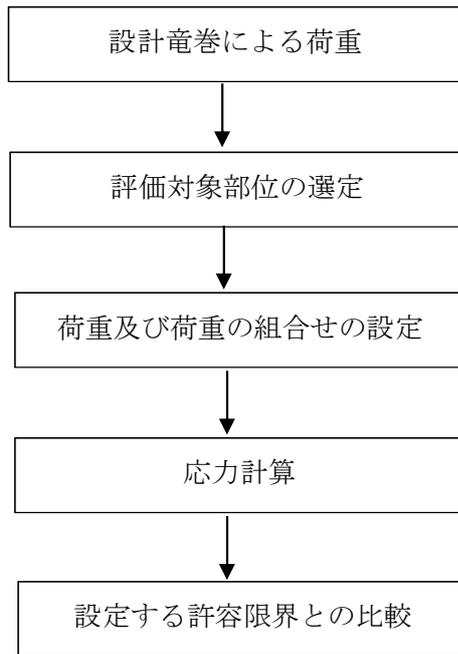


図2-5 ディーゼル発電機排気消音器の強度評価フロー

2.4 適用規格

- ・「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 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
- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC 1-2005/2007」（社）日本機械学会（以下「JSME」という。）

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

ディーゼル発電機排気消音器の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 (1/2)

記号	単位	定義
A	m ²	受圧面積（風向に垂直な面に投影した面積）
A _A	m ²	軸方向応力評価における受圧面積（風向に垂直な面に投影した面積）
A _b	mm ²	基礎ボルトの軸断面積
A _H	m ²	軸直角方向応力評価における受圧面積（風向に垂直な面に投影した面積）
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
C _A	—	軸方向応力評価における建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
C _H	—	軸直角方向応力評価における建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
d	mm	基礎ボルト呼び径
F	MPa	J S M E S S B-3121.1(1)により規定される値
F _{bA}	N	基礎ボルトに対する軸方向応力評価における引張力
F _{bH}	N	基礎ボルトに対する軸直角方向応力評価における引張力
f _s	MPa	J S M E S S B-3121.1により規定される供用応力状態A及びBでの許容せん断応力
f _t	MPa	J S M E S S B-3121.1により規定される供用応力状態A及びBでの許容引張応力
G	—	ガスト影響係数
g	m/s ²	重力加速度（g = 9.80665）
H	mm	排気消音器の高さ（全高）
h	mm	排気消音器重心高さ
L _{gH}	mm	重心から基礎ボルト間の軸直角方向水平距離
L _H	mm	支点から基礎ボルト間の軸直角方向水平距離
L _{gA}	mm	重心から基礎ボルト間の軸方向水平距離
L _A	mm	支点から基礎ボルト間の軸方向水平距離
m	kg	排気消音器の質量
N	—	基礎ボルトの本数

表3-1 強度評価に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
n_{fA}	—	軸方向応力評価における引張力を受ける基礎ボルトの本数
n_{fH}	—	軸直角方向応力評価における引張力を受ける基礎ボルトの本数
Q_b	N	基礎ボルトに対するせん断力
q	N/m ²	設計用速度圧
S_u	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_y	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
V_D	m/s	設計竜巻の最大風速
W	mm	排気消音器の幅
W_M	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_P	N	設計竜巻による気圧差による荷重
W_T	N	設計竜巻による複合荷重
W_{T1}	N	設計竜巻による複合荷重 ($W_{T1} = W_P$)
W_{T2}	N	設計竜巻による複合荷重 ($W_{T2} = W_W + 0.5 \cdot W_P + W_M$)
W_{TA}	N	軸方向応力評価における設計竜巻による複合荷重 (W_{T2})
W_{TH}	N	軸直角方向応力評価における設計竜巻による複合荷重 (W_{T2})
W_W	N	設計竜巻の風圧力による荷重
ρ	kg/m ³	空気密度
ΔP	N/m ²	設計竜巻の気圧低下量
π	—	円周率
σ_{bA}	MPa	軸方向応力評価における基礎ボルトに生じる引張応力
σ_{bH}	MPa	軸直角方向応力評価における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

ディーゼル発電機排気消音器の評価対象部位は、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。

風圧力による荷重は、ディーゼル発電機排気消音器に作用し、取付ボルト又は基礎ボルトに作用する。

排気消音器の転倒により、ディーゼル発電機の排気機能を閉塞させる波及的影響を考慮し、取付ボルト、基礎ボルトを評価対象部位として設定する。

なお、ディーゼル発電機排気消音器（非常用ディーゼル発電機2D）及びディーゼル発電機排気消音器（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機）は、フィルタ部と吸収部がフランジで結合されているが、おおむね弾性範囲であれば大きな変位は発生せず、風荷重による応力はフィルタ部と吸収部各々直下の基礎ボルトに発生すると考えられることから、フィルタ部と吸収部に分けて評価を行う。

ディーゼル発電機排気消音器の強度評価における評価対象部位を、図3-1～図3-3に示す。

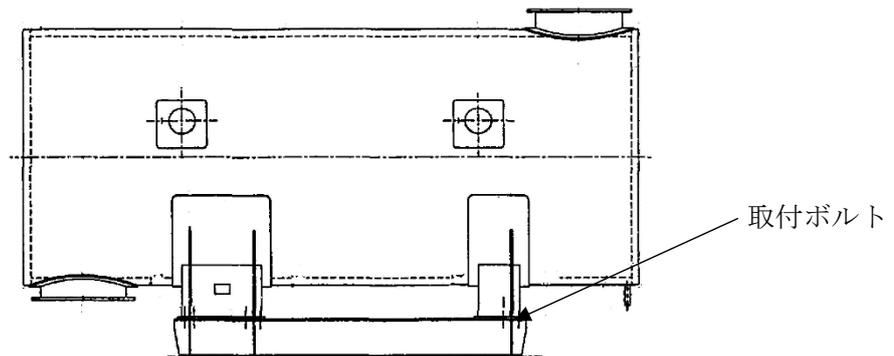


図3-1 ディーゼル発電機排気消音器（非常用ディーゼル発電機2C）の評価対象部位

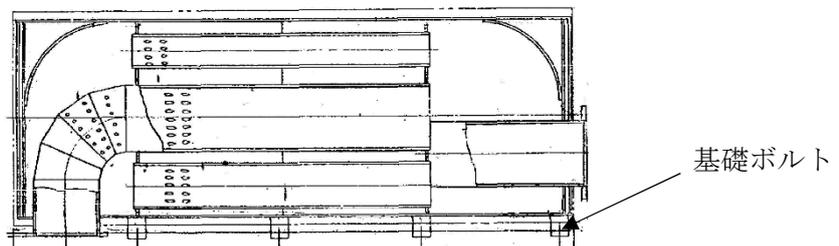


図3-2 ディーゼル発電機排気消音器（非常用ディーゼル発電機2D、高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機）の評価対象部位（フィルタ部）

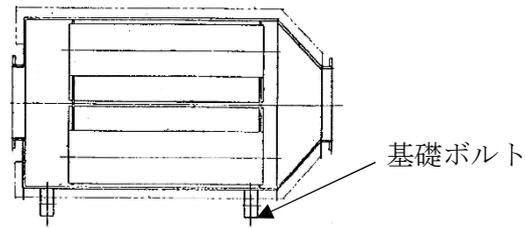


図3-3 ディーゼル発電機排気消音器（非常用ディーゼル発電機 2 D，
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機）の評価対象部位（吸収部）

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

構造強度評価に用いる荷重を以下に示す。

a. 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、持続的に生じる荷重である自重を考慮する。

b. 設計竜巻による荷重

屋外の施設であるため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、ディーゼル発電機排気消音器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、ディーゼル発電機排気消音器が仮に飛来物による衝撃荷重によって貫通しても、その貫通箇所又は本来の排気箇所から排気されるため、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重に衝撃荷重を考慮しない。

(a) 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。

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

(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」にて設定している荷重の組合せを踏まえ、ディーゼル発電機排気消音器の評価対象部位ごとに設定する。

ディーゼル発電機排気消音器の取付ボルト及び基礎ボルトには、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 3-2 に示す。

表 3-2 荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
波及的影響を及ぼす可能性がある施設	ディーゼル発電機排気消音器 (非常用ディーゼル発電機 2 C)	取付ボルト	①自重 ②風圧力による荷重
	ディーゼル発電機排気消音器 (非常用ディーゼル発電機 2 D)	基礎ボルト	
	ディーゼル発電機排気消音器 (高圧炉心スプレー系ディーゼル発電機)		

3.4 許容限界

ディーゼル発電機排気消音器の取付ボルト又は基礎ボルトの許容限界は、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に従って、「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、J E A G 4 6 0 1 に基づく許容応力状態Ⅲ_AS の許容応力の許容荷重を用いる。

許容限界は 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_AS 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、評価対象部位の最高使用温度又は周囲環境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。

ディーゼル発電機排気消音器の取付ボルト又は基礎ボルトの許容限界について、表3-3に示す。

表3-3 許容限界

評価対象部位	許容応力状態	応力の種類		許容限界
取付ボルト 又は 基礎ボルト	Ⅲ _A S	一次 応力	引張	$1.5 f_t$
			せん断	$1.5 f_s$
			組合せ	$\text{Min} \{1.5 f_t, (2.1 f_t - 1.6 \tau)\}$

3.5 評価方法

ディーゼル発電機排気消音器の強度評価は、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」にて設定しているディーゼル発電機排気消音器の評価式を用いる。

(1) 計算モデル

受圧面の重心位置に風圧力による荷重が作用する 1 質点系モデルとして計算を行う。非常用ディーゼル発電機 2 C 排気消音器の評価モデル図を図 3-4、図 3-5 に、非常用ディーゼル発電機 2 D 排気消音器，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器の評価モデル図を図 3-6～図 3-9 に示す。

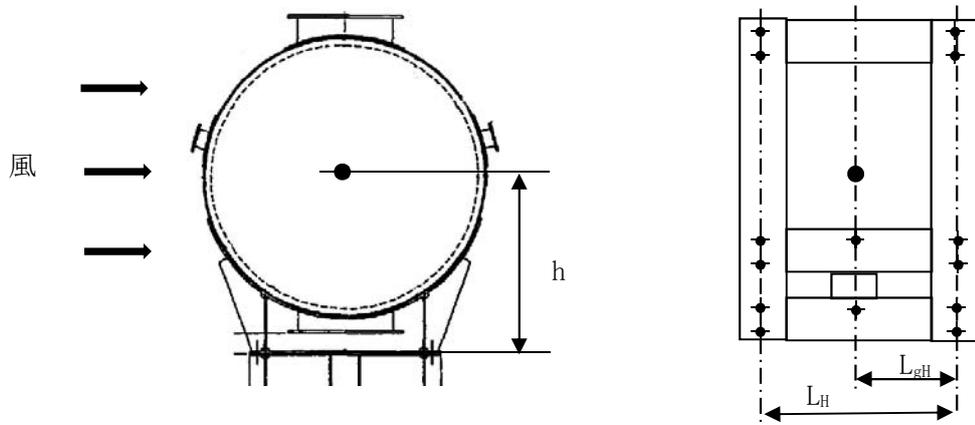


図 3-4 非常用ディーゼル発電機 2 C 排気消音器の評価モデル図（軸直角方向）

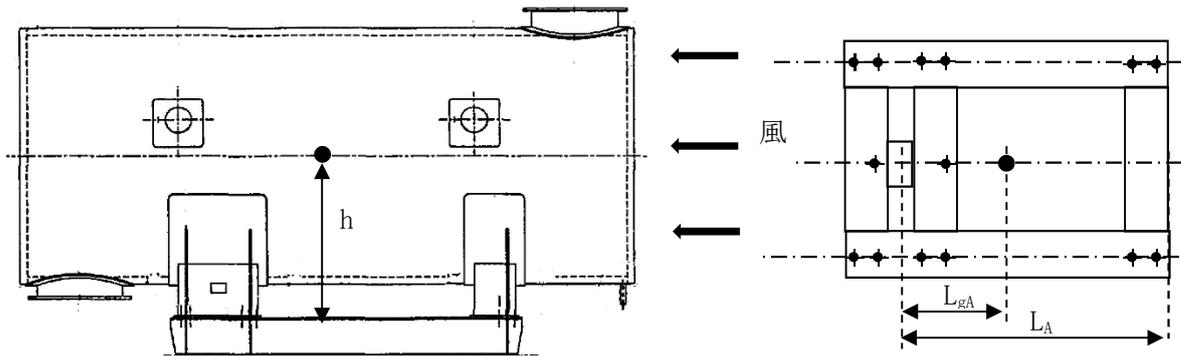


図 3-5 非常用ディーゼル発電機 2 C 排気消音器の評価モデル図（軸方向）

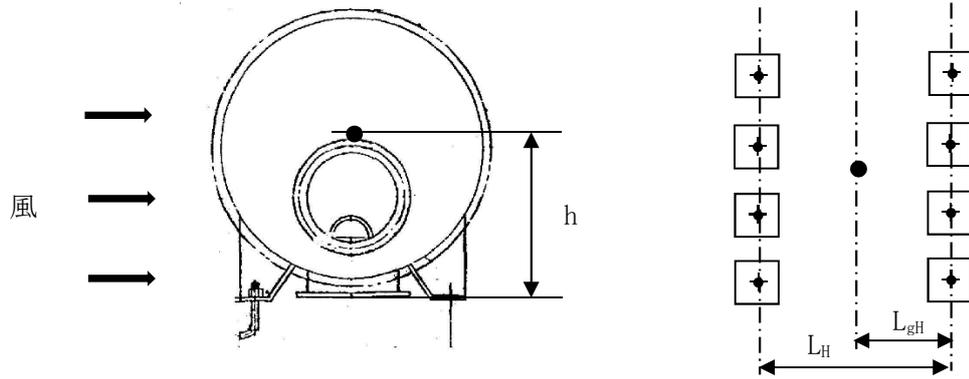


図 3-6 非常用ディーゼル発電機 2D排気消音器，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器の評価モデル図（フィルタ部軸直角方向）

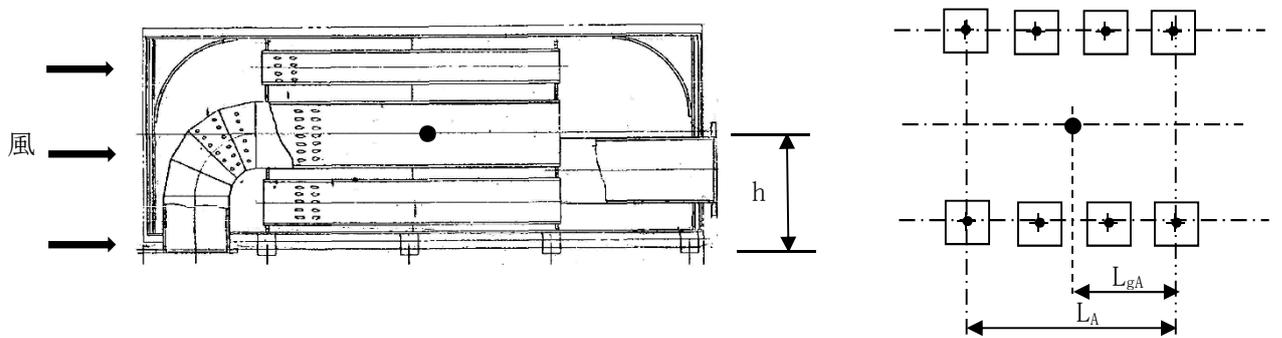


図 3-7 非常用ディーゼル発電機 2D排気消音器，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器の評価モデル図（フィルタ部軸方向）

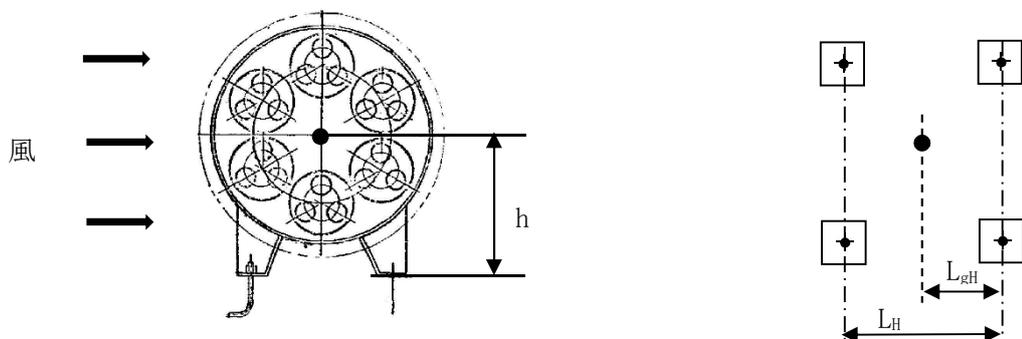


図 3-8 非常用ディーゼル発電機 2D排気消音器，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器モデル図（吸収部軸直角方向）

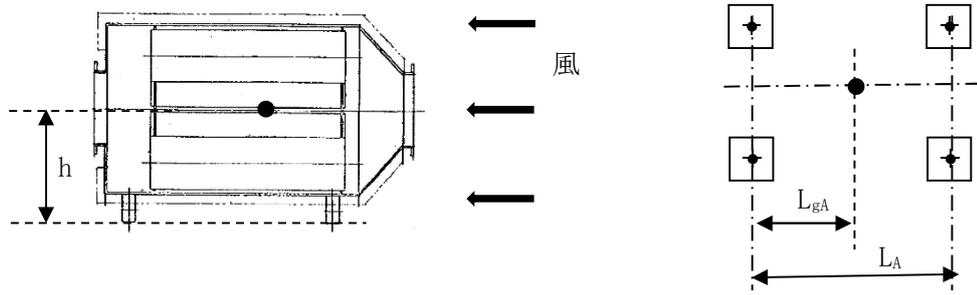


図 3-9 非常用ディーゼル発電機 2D 排気消音器，高圧炉心スプレー系ディーゼル発電機排気消音器の評価モデル図（吸収部軸方向）

(2) 計算方法

a. 引張応力

取付ボルト又は基礎ボルトに対する引張力は最も厳しい条件として，図 3-3～図 3-9 で取付ボルト又は基礎ボルトを支点とする転倒を考え，これを片側の取付ボルト又は基礎ボルトで受けるものとして計算する。

(a) 軸直角方向

イ. 引張力

$$F_{bH} = \frac{W_T \cdot h - m \cdot g \cdot L_{gH}}{n_{fH} \cdot L_H}$$

ロ. 引張応力

$$\sigma_{bH} = \frac{F_{bH}}{A_b}$$

ここで，取付ボルト又は基礎ボルトの軸断面積 A_b は

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

(b) 軸方向

イ. 引張力

$$F_{bA} = \frac{W_T \cdot h - m \cdot g \cdot L_{gA}}{n_{fA} \cdot L_A}$$

ロ. 引張応力

$$\sigma_{bA} = \frac{F_{bA}}{A_b}$$

ここで，取付ボルト又は基礎ボルトの軸断面積 A_b は

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

b. せん断応力

取付ボルト又は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。

(a) せん断力

$$Q_b = W_T$$

(b) せん断応力

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

4. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-1～表 4-8 に示す。

表 4-1 許容応力評価に用いる条件（非常用ディーゼル発電機 2 C 排気消音器）

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	SNB7	50	715	838	586	439	338

表 4-2 許容応力評価に用いる条件（非常用ディーゼル発電機 2 D 排気消音器，高圧炉心スプレ
イ系ディーゼル発電機排気消音器）

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

表 4-3 評価条件

q (N/m ²)	G (-)
6.1×10^3	1.0

表 4-4 評価条件（非常用ディーゼル発電機 2 C 排気消音器基礎ボルト）

L_{gH} (mm)	L_H (mm)	L_{gA} (mm)	L_A (mm)	A_H (m ²)	A_A (m ²)
800	1600	1100	2925	20.10	8.613

C_H (-)	C_A (-)	W (mm)	H (mm)	h (mm)	m (kg)
1.2	2.4	6300	3190	1640	8248

g (m/s ²)	ボルト サイズ	N (-)	n_{fH} (-)	n_{fA} (-)	A_b (mm ²)
9.80665	M30	14	6	2	706.9

表 4-5 評価条件 (非常用ディーゼル発電機 2 D 排気消音器フィルタ部基礎ボルト)

L_{gH} (mm)	L_H (mm)	L_{gA} (mm)	L_A (mm)	A_H (m^2)	A_A (m^2)
700	1400	1800	5100	22.29	7.995

C_H (-)	C_A (-)	W (mm)	H (mm)	h (mm)	m (kg)
1.2	2.4	7250	3075	1775	9500

g (m/s^2)	ボルト サイズ	N (-)	n_{fH} (-)	n_{fA} (-)	A_b (mm^2)
9.80665	M30	8	4	2	706.9

表 4-6 評価条件 (非常用ディーゼル発電機 2 D 排気消音器吸収部基礎ボルト)

L_{gH} (mm)	L_H (mm)	L_{gA} (mm)	L_A (mm)	A_H (m^2)	A_A (m^2)
700	1400	794	2000	6.975	4.950

C_H (-)	C_A (-)	W (mm)	H (mm)	h (mm)	m (kg)
1.2	2.4	3100	2250	1150	4500

g (m/s^2)	ボルト サイズ	N (-)	n_{fH} (-)	n_{fA} (-)	A_b (mm^2)
9.80665	M30	4	2	2	706.9

表 4-7 評価条件（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器フィルタ部基礎ボルト）

L_{gH} (mm)	L_H (mm)	L_{gA} (mm)	L_A (mm)	A_H (m^2)	A_A (m^2)
675	1350	1550	4200	16.80	5.945

C_H (-)	C_A (-)	W (mm)	H (mm)	h (mm)	m (kg)
1.2	2.4	6075	2765	1690	9500

g (m/s^2)	ボルト サイズ	N (-)	n_{fH} (-)	n_{fA} (-)	A_b (mm^2)
9.80665	M30	8	4	2	706.9

表 4-8 評価条件（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器吸収部基礎ボルト）

L_{gH} (mm)	L_H (mm)	L_{gA} (mm)	L_A (mm)	A_H (m^2)	A_A (m^2)
450	900	794	2000	6.681	4.202

C_H (-)	C_A (-)	W (mm)	H (mm)	h (mm)	m (kg)
1.2	2.4	3100	2155	1180	4500

g (m/s^2)	ボルト サイズ	N (-)	n_{fH} (-)	n_{fA} (-)	A_b (mm^2)
9.80665	M30	4	2	2	706.9

5. 強度評価結果

強度評価結果を表 5-1, 表 5-2 に示す。

非常用ディーゼル発電機 2 C 排気消音器基礎ボルト, 非常用ディーゼル発電機 2 D 排気消音器基礎ボルト及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器基礎ボルトに発生する応力は許容応力以下である。

表 5-1 強度評価結果 (軸直角方向)

評価対象部位	損傷モード	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
非常用ディーゼル発電機 2 C 排気消音器基礎ボルト	引張	27	439
	せん断	15	338
	組合せ	27	439
非常用ディーゼル発電機 2 D 排気消音器 (フィルタ部) 基礎ボルト	引張	57	173
	せん断	29	133
	組合せ	57	173
非常用ディーゼル発電機 2 D 排気消音器 (吸収部) 基礎ボルト	引張	15	173
	せん断	19	133
	組合せ	15	173
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器 (フィルタ部) 基礎ボルト	引張	38	173
	せん断	22	133
	組合せ	38	173
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器 (吸収部) 基礎ボルト	引張	30	173
	せん断	18	133
	組合せ	30	173

表 5-2 強度評価結果（軸方向）

評価対象部位	損傷モード	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
非常用ディーゼル発電機 2 C 排気消音器基礎ボルト	引張	29	439
	せん断	13	338
	組合せ	29	439
非常用ディーゼル発電機 2 D 排気消音器フィルタ部基礎ボルト	引張	5	173
	せん断	21	133
	組合せ	5	173
非常用ディーゼル発電機 2 D 排気消音器吸収部基礎ボルト	引張	18	173
	せん断	26	133
	組合せ	18	173
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器フィルタ部基礎ボルト	引張	1	173
	せん断	16	133
	組合せ	1	173
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器吸収部基礎ボルト	引張	14	173
	せん断	22	133
	組合せ	14	173

V-3-別添 1-2-1-1 防護ネットの強度計算書

目次

1.	概要	1
2.	基本方針	1
2.1	位置	1
2.2	構造概要	10
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	19
3.3	荷重及び荷重の組合せ	22
3.4	許容限界	25
3.5	評価方法	32
4.	評価条件	45
4.1	荷重条件	45
4.2	防護ネット仕様	45
5.	強度評価結果	48
5.1	ネットに作用する外力エネルギー評価	48
5.2	破断評価	48
5.3	たわみ評価	50

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及び使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の防護ネットが、防護対象施設の機能喪失に至る可能性のある飛来物（以下「飛来物」という。）が防護対象施設へ衝突することを防止するために、主要な部材が破断せず、たわみを生じても飛来物が防護対象施設と衝突しないよう、飛来物のエネルギーが防護ネットの限界吸収エネルギーの値を下回っていること、及び防護ネットを構成する部材が許容限界に至らない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、防護ネットの「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

防護ネットは、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）、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。

防護ネットの設置位置図を図 2-1 に、各設置位置におけるネットの割付展開図を図 2-2 から図 2-8 に示す。

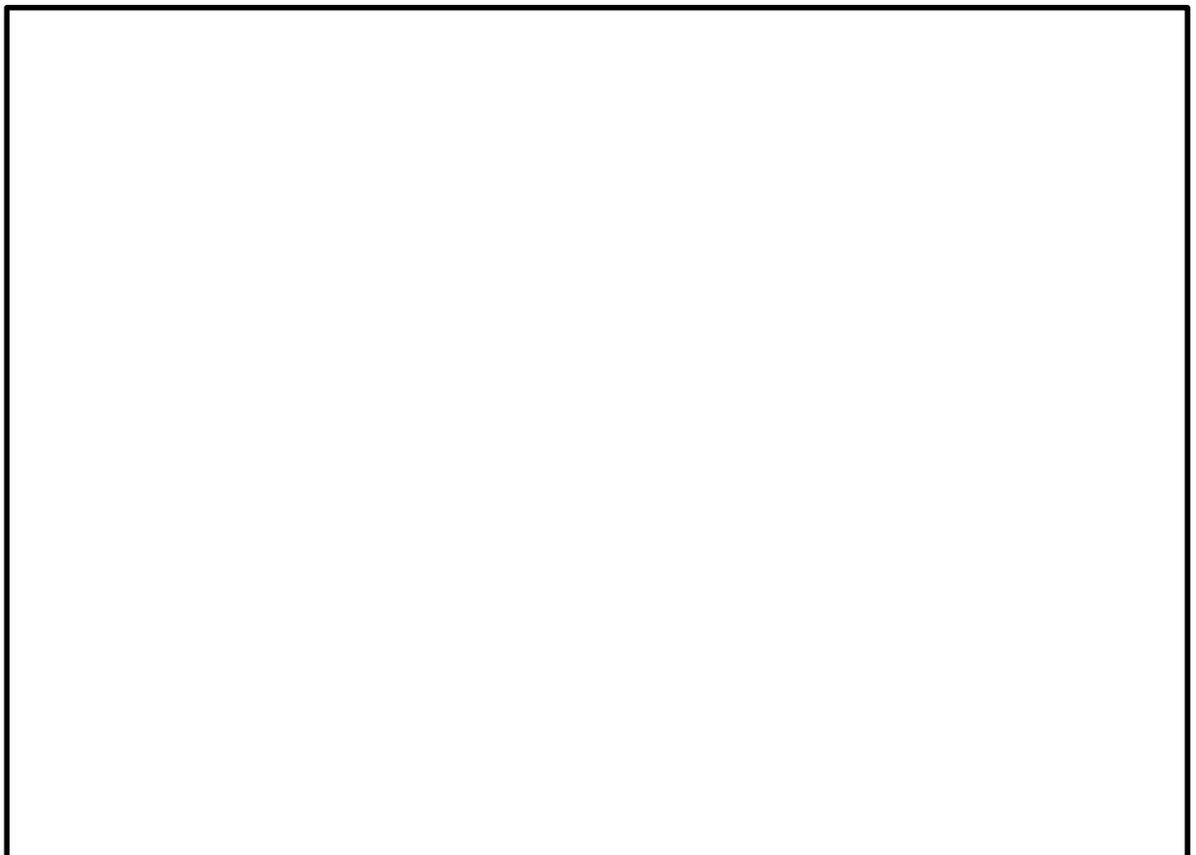


図 2-1 防護ネットの設置位置図

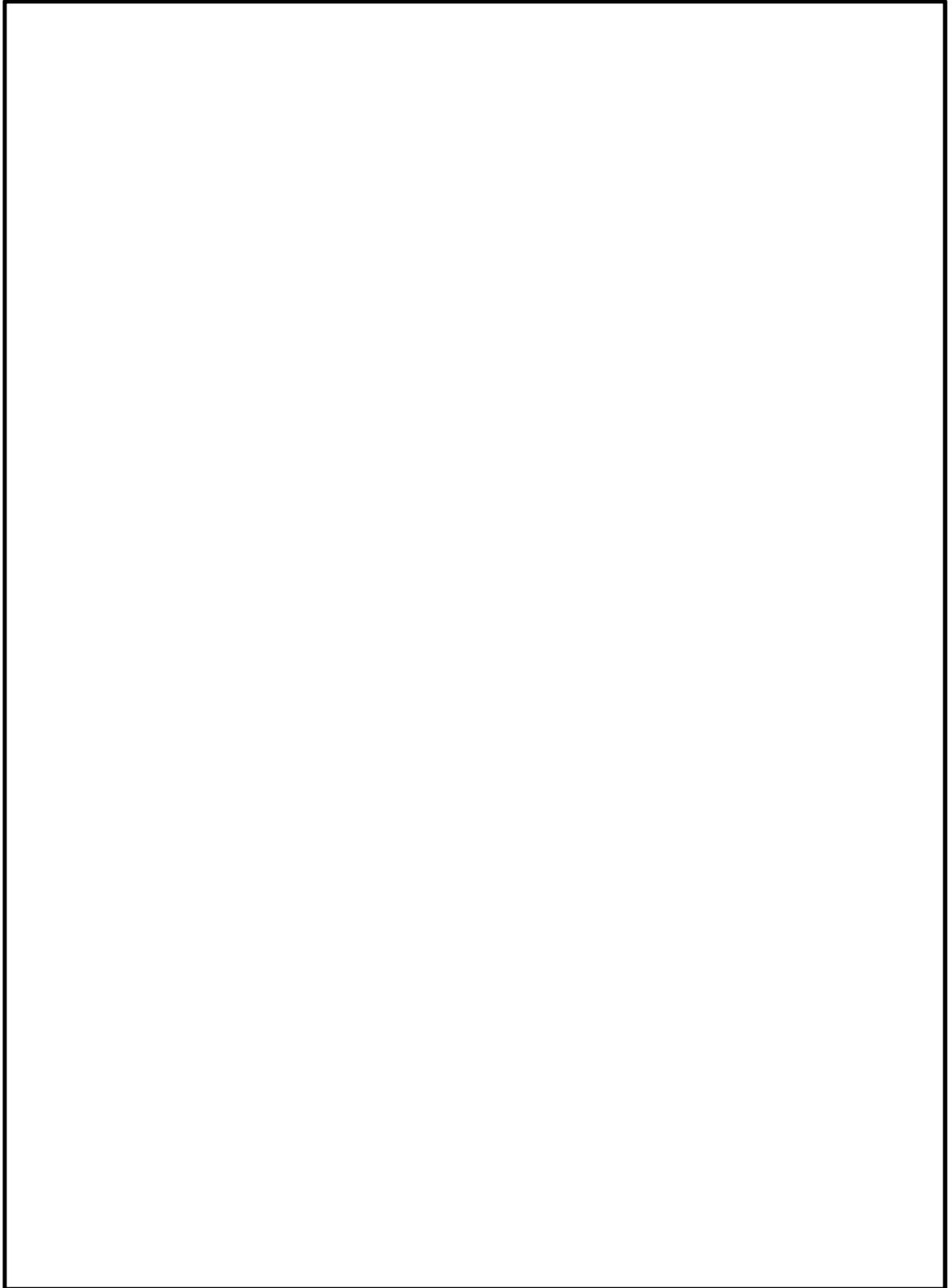


図 2-2 防護ネットの割付展開図
(海水ポンプエリア竜巻防護対策施設)

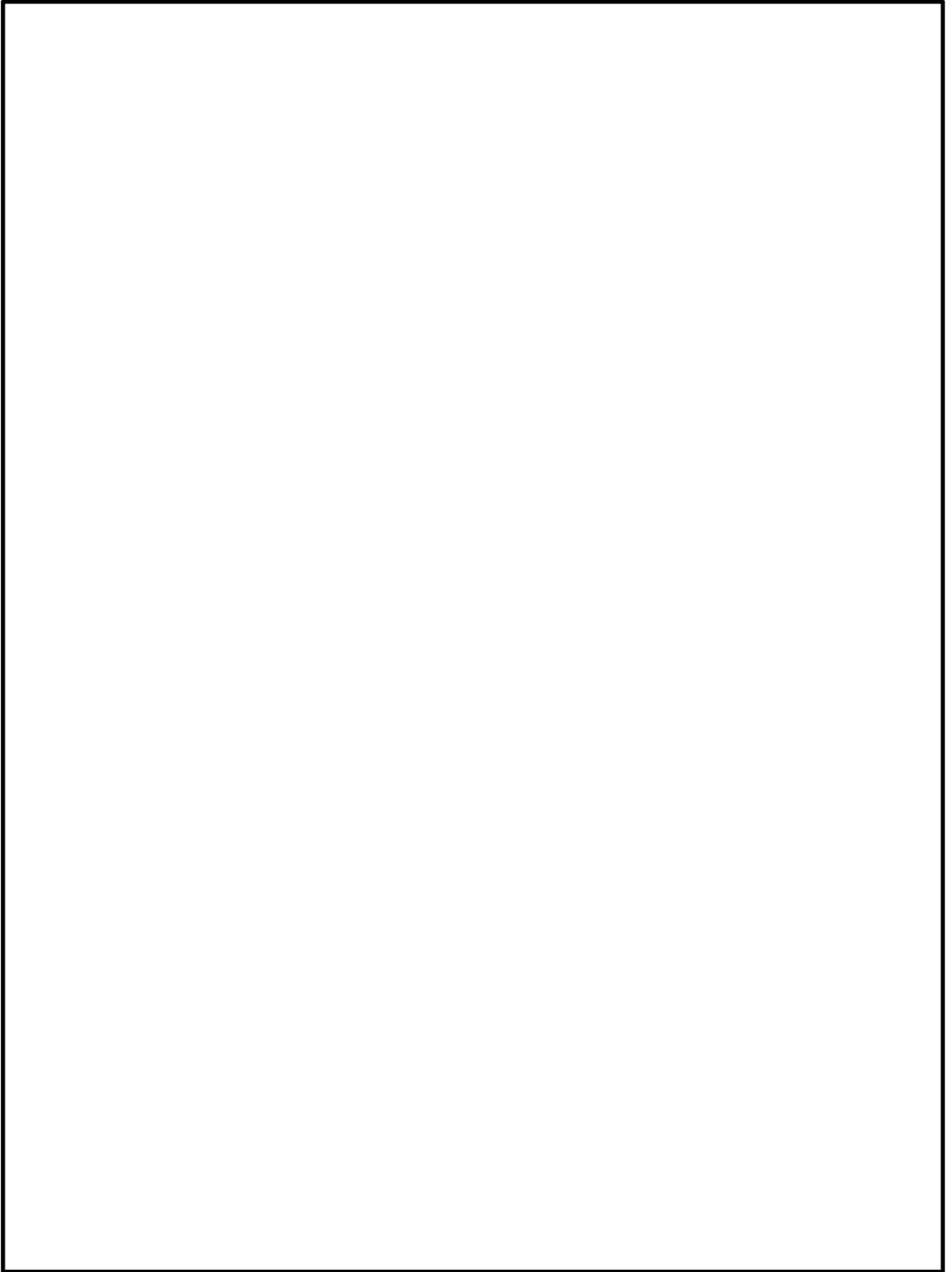


図 2-3 防護ネットの割付展開図
(2 C 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

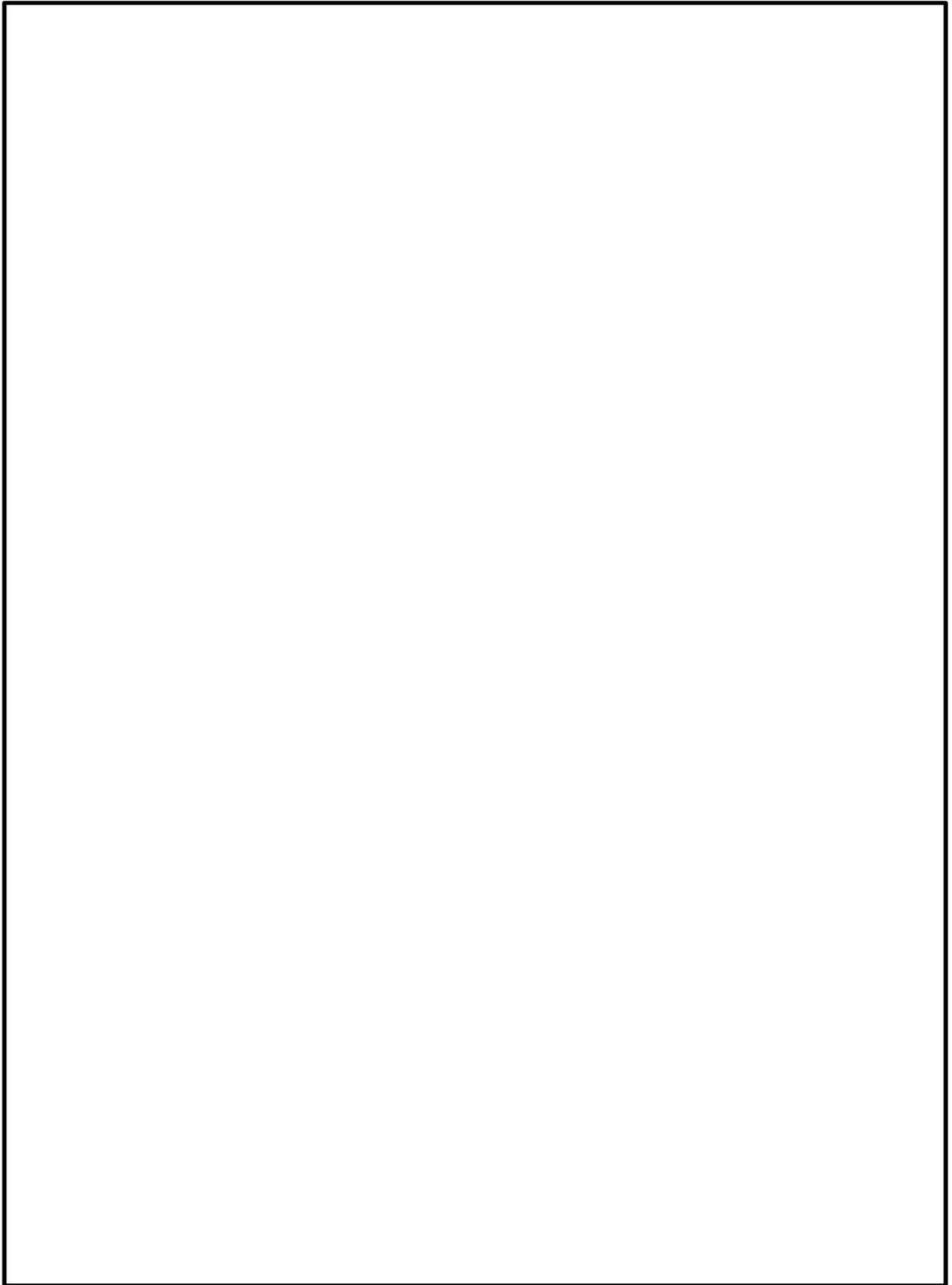


図 2-4 防護ネットの割付展開図(1/2)
(2D非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

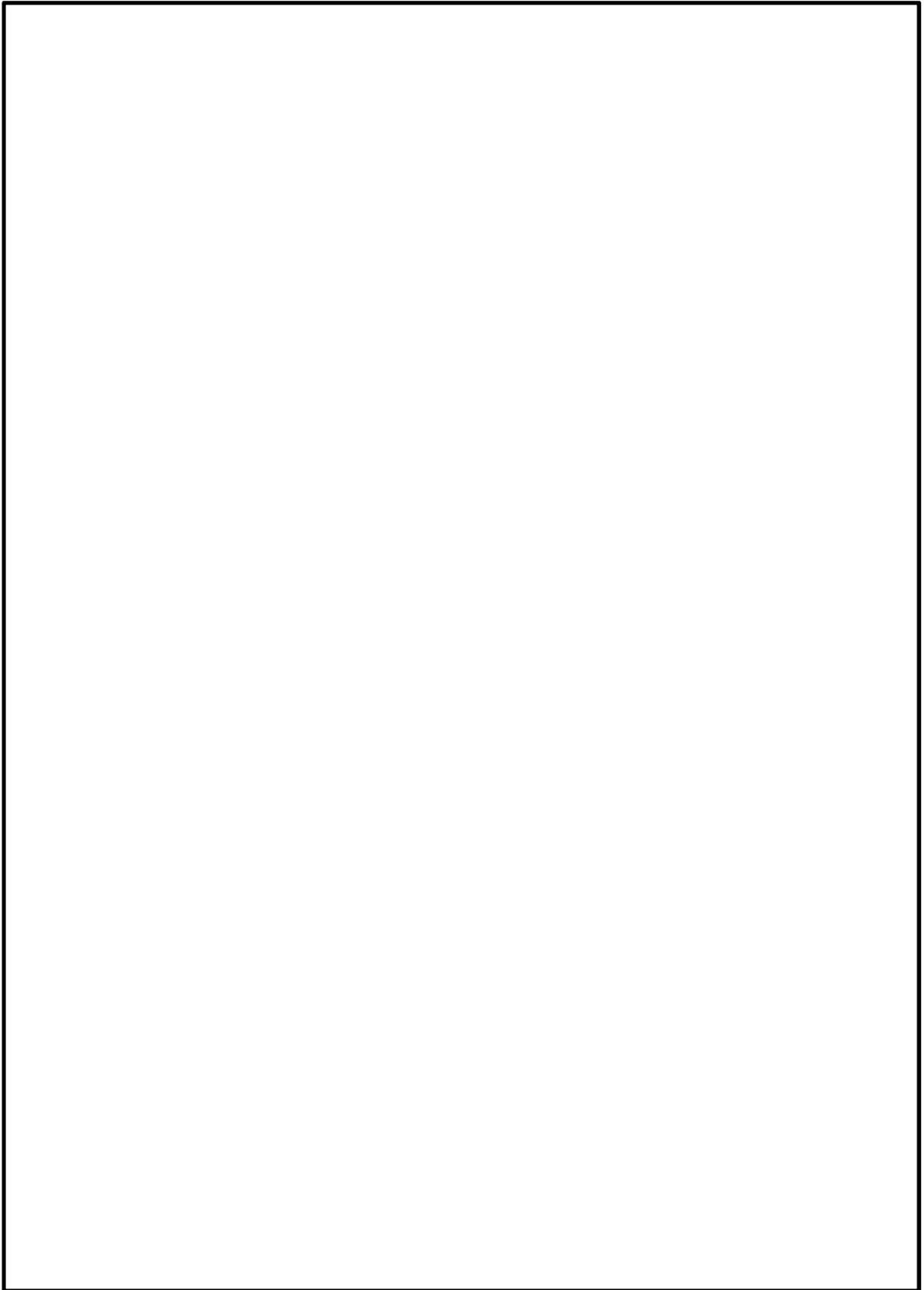


図 2-4 防護ネットの割付展開図(2/2)
(2D非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

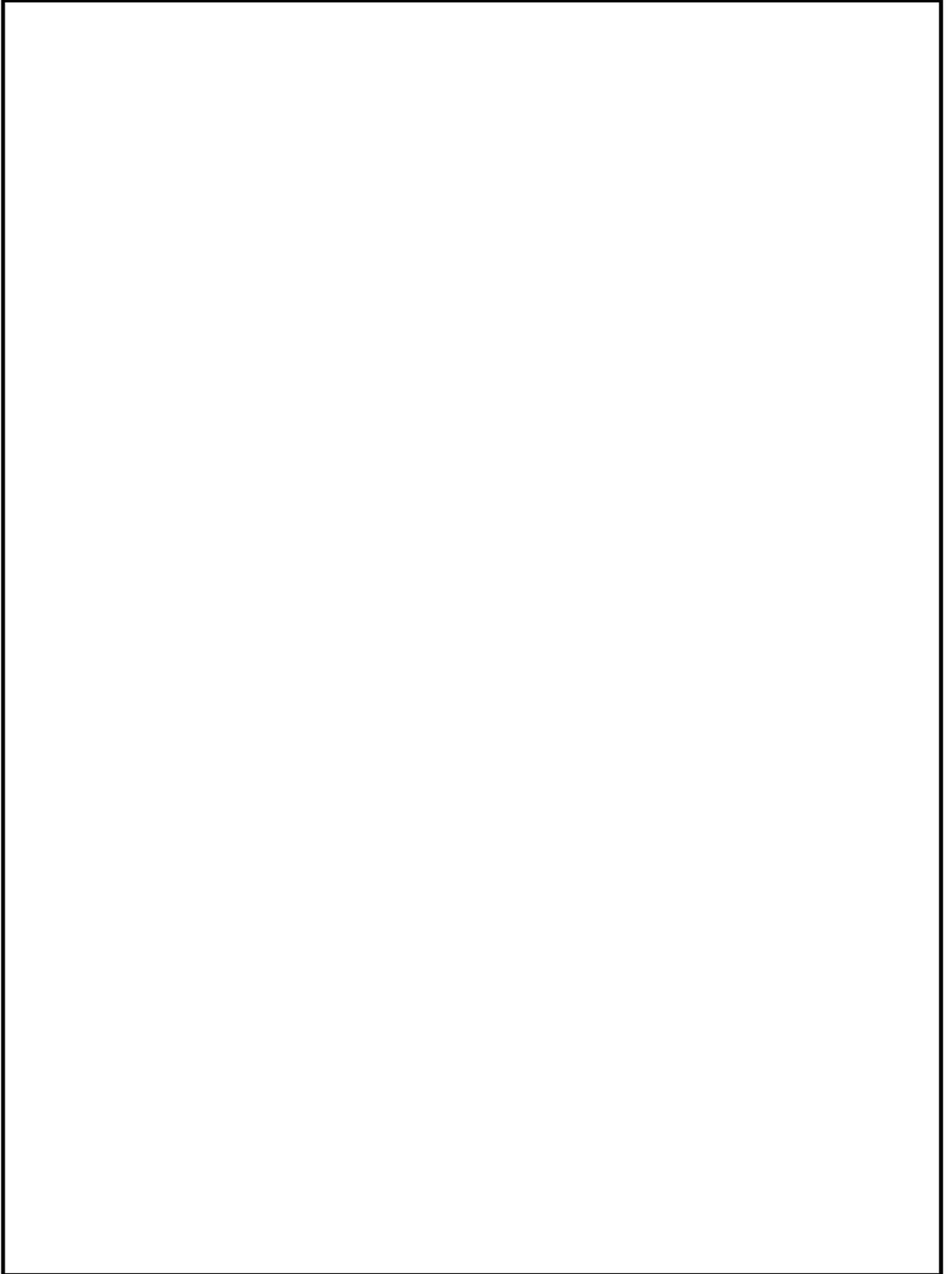


図 2-5 防護ネットの割付展開図
(高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

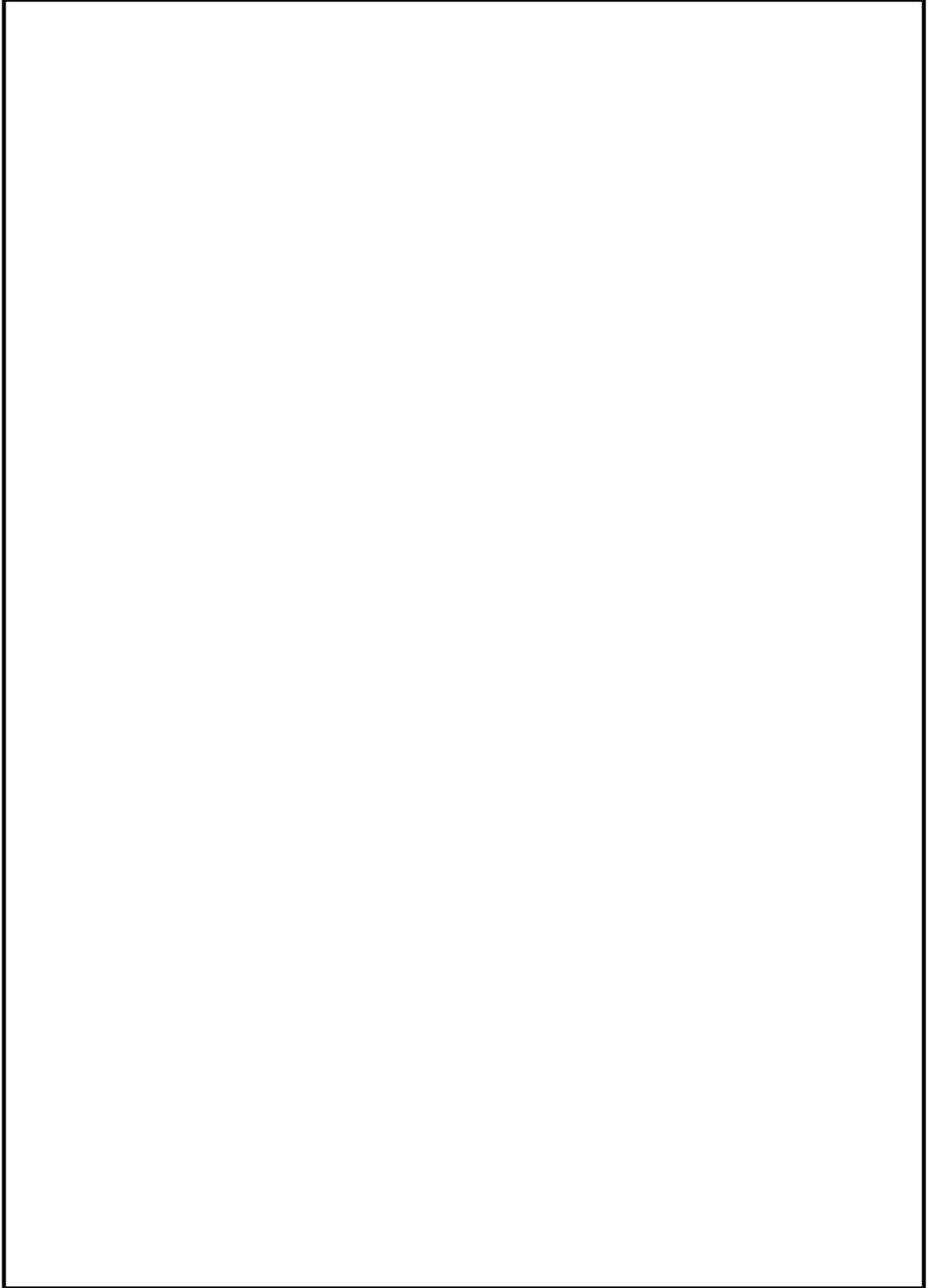


図 2-6 防護ネットの割付展開図(1/2)
(中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設)

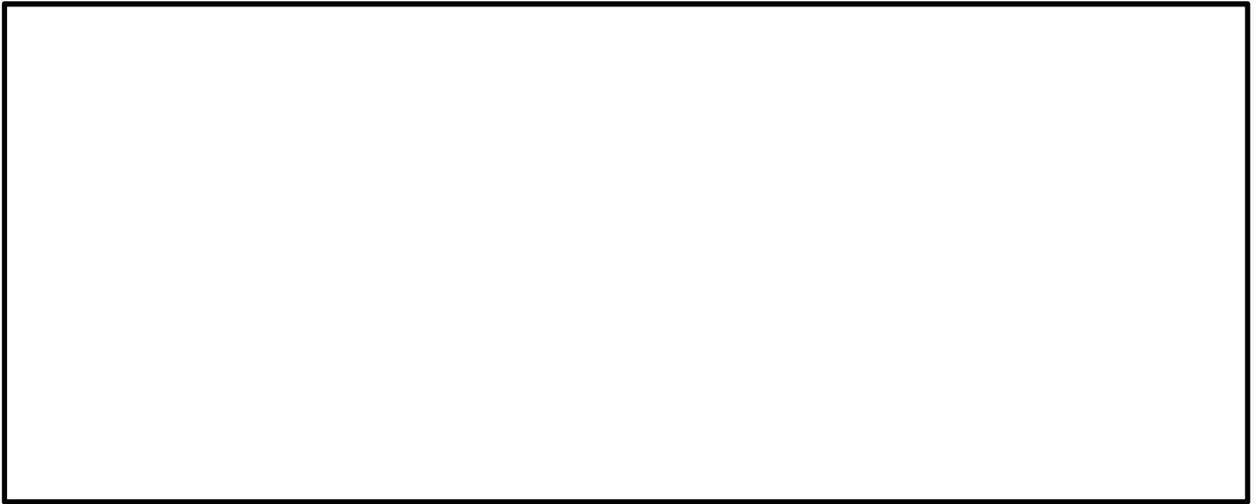


図 2-7 防護ネットの割付展開図(2/2)
(中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設)

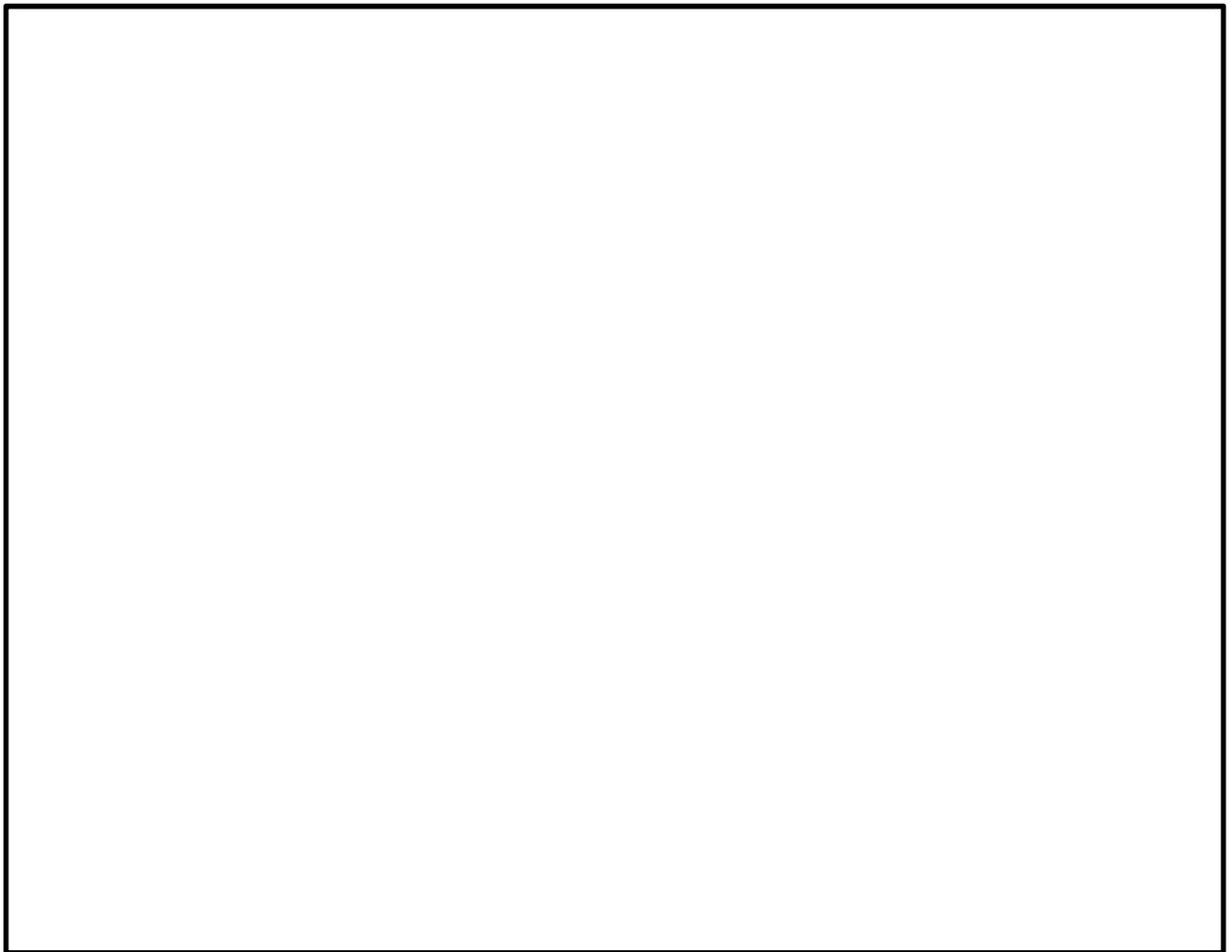


図 2-7 防護ネットの割付展開図
原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設

NT2 補② V-3-別添 1-2-1-1 R1

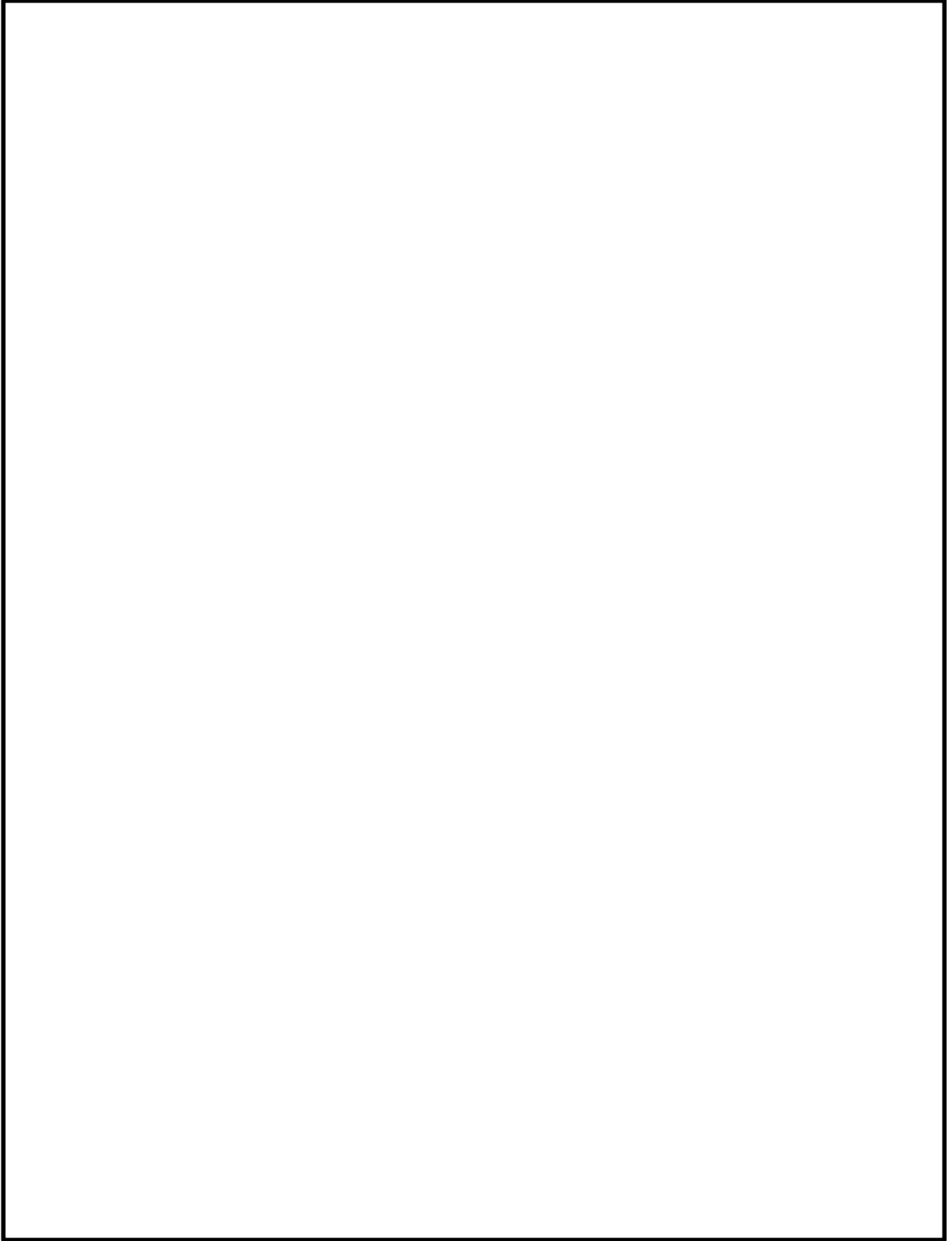


図 2-8 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設配置図

2.2 構造概要

防護ネットの構造は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「3.1 防護ネットの構造設計」に示す構造計画を踏まえて設定する。

防護ネットは、ネット、ワイヤロープ、接続治具（支持部、固定部）及び鋼製枠から構成され、原子炉建屋及び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。防護ネットは、防護対象施設又は開口部周辺に設置した架構に接続ボルト等を用いて取付けられ、架構は基礎若しくは建屋の床及び壁により支持される。

防護ネットのうちネットは、四隅にワイヤロープを縫うようにはわせたワイヤロープにより支持し、ワイヤロープは接続治具（支持部）を介して、鋼製枠に設置した接続治具（固定部）にて支持する構造とする。

防護ネットは、ネットに作用する自重、飛来物による衝撃荷重及び風圧力による荷重をワイヤロープ、接続治具（支持部、固定部）を介して、鋼製枠に伝達する。

防護ネットのうちネットは、飛来物が衝突した際に局部的に生じる衝撃荷重に耐え、変形することにより飛来物の持つ運動エネルギーを吸収し、防護対象施設への衝突を防止するものである。ネットは、らせん状の硬鋼線を3次元的に編み込み、編み込みの方向によって主に荷重を受け持つ展開方向と展開直角方向の異方性を持っており、ネットに対してL字に張った2本のワイヤロープで支持される。

ワイヤロープは、展開方向に並行するワイヤロープと、展開方向に直交するワイヤロープが接合されていることから、ワイヤロープの張力が均一に発生する構造となっており、ワイヤロープは接続治具（支持部）であるターンバックル及びシャックルで支持される。ワイヤロープは、ネットの自重による平常時のたわみが大きくなるように、初期張力をかけ、トルク管理を行う。また、ネットは2枚以上重ねて敷設するため、それぞれのネットの機能が発揮されるよう、ワイヤロープや接続治具等はネットごとに同じ構成にて設置する。

防護ネットの概要図を図 2-9 に示す。

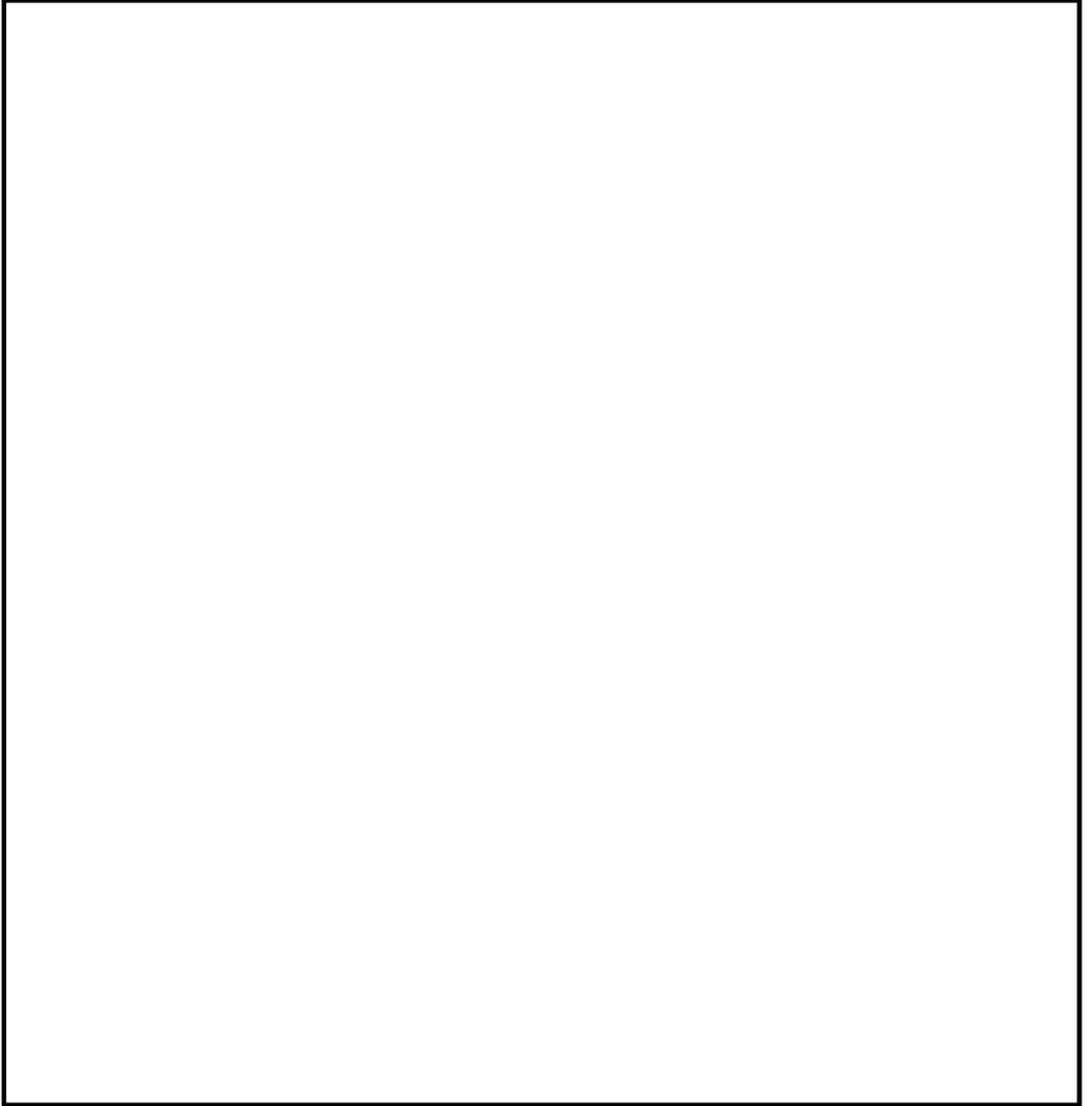


図 2-9 防護ネットの概要図

2.3 評価方針

防護ネットの強度計算は、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、防護ネット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。

防護ネットの評価フローを図 2-10 に示す。

防護ネット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、防護ネットは内側に設置した防護対象施設の機能喪失に至る可能性のある飛来物を捕捉し防護対象施設へ衝突させないために、破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を有すること、及びたわみが生じても、飛来物が防護対象施設と衝突しないよう防護対象施設との離隔が確保できることを確認する。

防護ネットのうち、ネットは破断が生じないことの確認として、ネットが飛来物のエネルギーを吸収することができること、及び飛来物の衝突箇所においてネット目合いの破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を有することを評価する。また、防護ネットが飛来物を捕捉可能であることを確認するために、設計荷重に対して、ネットを支持するワイヤロープ及び接続治具（支持部、固定部）に破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を有することを評価する。

防護ネットのうち、たわみについては、ネットに作用する設計荷重に対して、ネット及びワイヤロープにたわみが生じた場合でも、飛来物が防護対象施設に接触しないことを評価する。

評価においては、防護ネットの形状、及び評価条件として、展開方向寸去と展開直角方向寸法の比（以下「アスペクト比」という。）、飛来物の衝突位置の影響及びネットの等価剛性の取扱いの影響を考慮した評価を実施する。

ネット寸法のアスペクト比については、電力中央研究所報告書「高強度金網を用いた竜巻飛来物対策工の合理的な衝撃応答評価手法」（総合報告：O01）（以下「電中研報告書」という。）の評価式の適用性が確認されている 1:1～2:1 の範囲で使用し、その範囲を外れる部分はエネルギー吸収等において有効な面積とならないため、ネットの吸収エネルギー評価、ネットの破断評価及びたわみ評価において、評価ごとに保守的な設定となるように、アスペクト比を考慮した評価を実施する。アスペクト比の影響を考慮した評価におけるネット寸法の設定方法については、「3.5 評価方法」に示す。また、アスペクト比の影響を考慮した評価におけるネット寸法は、「4. 評価条件」に示す。

飛来物の衝突位置の影響については、評価において飛来物がネット中心に衝突する場合について評価を実施することから、中央位置からずれた位置（以下「オフセット位置」という。）に衝突する場合の影響を考慮し、ネット、ワイヤロープ及び接続治具の破断評価において、評価における係数を設定する。係数の設定については「3.5 評価方法」に示す。

ネットの等価剛性については、電中研にて複数回実施している衝撃引張試験の結果から算出する。等価剛性の算出の方法を考慮し、ネットの吸収エネルギー評価及び防護ネットのたわみ評

価において、評価における係数を設定する。係数の設定については、「3.4 許容限界」に示す。

ネット評価の考慮事項の選定について、表 2-1 に示す。

防護ネットを支持し、ネットに作用する荷重が伝達される架構の強度評価は、V-3-別添 1-2-1-3「架構の強度計算書」に示す。

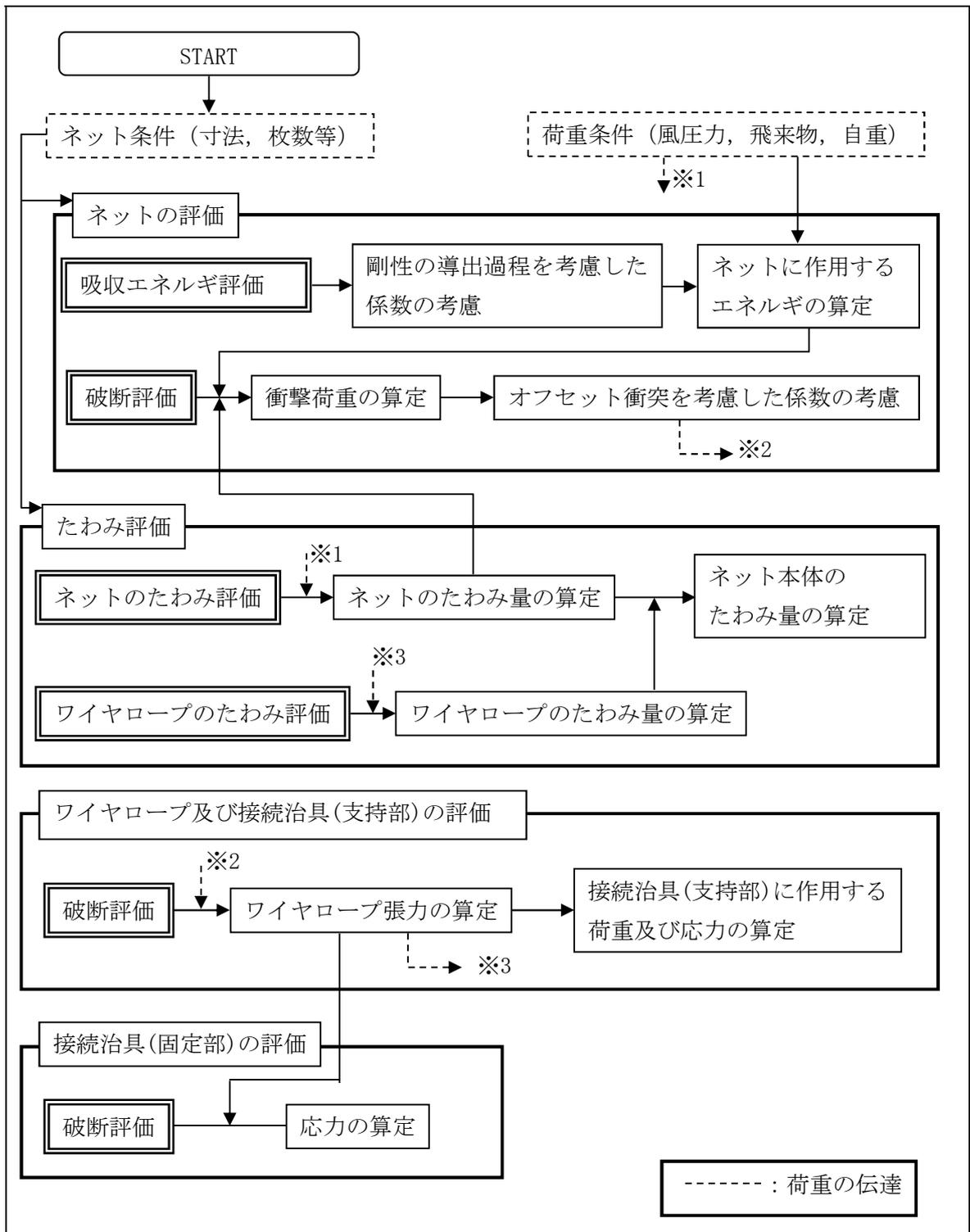


図 2-10 防護ネットの評価フロー

表 2-1 ネット評価の考慮事項の選定

	吸収エネルギー評価	破断評価	たわみ評価
算出方法	飛来物の有する運動エネルギー、自重及び風圧力により生じるエネルギーを算出し、ネットに生じるエネルギーの総量を算出。	自重、飛来物によるネットへの衝撃荷重及び風圧力による荷重を算出し、ネットの引張荷重及びワイヤロープの張力、接続治具に発生する応力を算出。	自重、飛来物による衝撃荷重及び風圧力による荷重によりネット及びワイヤロープに生じるたわみ量を算出。
アスペクト比	アスペクト比の影響を考慮してネット寸法を設定。	アスペクト比の影響を考慮してネット寸法を設定。	アスペクト比の影響を考慮してネット寸法を設定。
衝突位置	オフセット衝突時のネットの吸収エネルギーは中央衝突と同等であることから、オフセットによる影響はなく考慮不要。	オフセット衝突時の衝撃荷重が中央衝突より増加することを算出荷重に考慮する。	ネットの最大たわみ位置である中央位置のたわみ及びオフセット位置のたわみを考慮して、たわみ量を設定。
ネット剛性	等価剛性の算出過程の影響から定められる係数を限界吸収エネルギーに考慮する。	荷重による各部位の評価であり、ネットの等価剛性を用いた評価は行っていないため考慮不要。	等価剛性の算出過程の影響から定められる係数を飛来物の衝突によりネット本体に生じるたわみ量に考慮する。

NT2 補② V-3-別添 1-2-1-1 R0

2.4 適用規格

適用する規格，基準，指針等を以下に示す。

- ・ 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。))
- ・ 「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
- ・ 「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—」 (社) 日本建築学会 (2005)
- ・ 「建築物荷重指針・同解説」 (社) 日本建築学会 (2004 改定)
- ・ 「小規模吊橋指針・同解説」 (社) 日本道路協会

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 防護ネット

a. 吸収エネルギー評価

吸収エネルギー評価に用いる記号を表 3-1 に示す。

表 3-1 吸収エネルギー評価に用いる記号(1/2)

記号	単位	定義
a	mm	ネット 1 目合いの対角寸法
a_s	mm	ネット 1 目合いの破断変位
b	mm	設計飛来物の端面の長辺方向寸法
c	mm	設計飛来物の端面の短辺方向寸法
E_f	kJ	設計飛来物衝突時にネットに作用するエネルギー
E_i	kJ	i 番目の列におけるネットの吸収可能なエネルギー
E_{max}	kJ	ネット設置枚数 n を考慮した限界吸収エネルギー
E_t	kJ	ネット設置枚数 n を考慮したネットに作用する全エネルギー
E_w	kJ	自重及び風圧力によりネットに作用するエネルギー
F_i	kN	設計飛来物衝突時の i 番目の列における作用力
F_w	kN	自重及び風圧力によりネットに作用する荷重
K	kN/m	ネット 1 目合いの等価剛性
K_x	kN/m	ネット設置枚数 n を考慮したネット 1 目合いの展開方向の 1 列の等価剛性
K_x'	kN/m	ネット 1 目合いの展開方向の 1 列の等価剛性
L_x	m	ネット展開方向寸法
L_y	m	ネット展開直角方向寸法
m	kg	設計飛来物の質量
N_x	—	ネット展開方向目合い数
N_y	—	ネット展開直角方向目合い数
P_i	kN	設計飛来物衝突時にネットに発生する i 番目の列における張力
P_w	kN	ネットの自重により作用する荷重
v	m/s	設計飛来物の移動速度
W_w	kN	風圧力によりネットに作用する荷重
X_i	m	i 列目のネットの伸び

表 3-1 吸収エネルギー評価に用いる記号(2/2)

記号	単位	定義
δ	m	設計飛来物衝突時のネットの最大たわみ量
δ_a	m	自重及び風圧力における荷重によるたわみ量
δ_i	m	i 番目の列におけるネットのたわみ量
δ_{max}	m	ネットの最大たわみ量
θ_i	deg	i 番目の列におけるネットたわみ角
θ_{max}	deg	ネットの最大たわみ角
ϕ	—	ネットの充実率
ρ	kg/m ³	空気密度

b. 破断評価

破断評価に用いる記号を表 3-2 に示す。

表 3-2 破断評価に用いる記号(1/2)

記号	単位	定義
a_w	mm	取付けプレート溶接部ののど厚
A_b	mm ²	ボルト呼び径断面積
C_c	—	ワイヤグリップの効率
E_t	kJ	ネット設置枚数nを考慮したネットに作用する全外力エネルギー
F_1	kN	設計飛来物衝突時のネットの許容荷重（ネット1目合いの破断荷重）
F_2	kN	設計飛来物衝突時にネット目合い1箇所が受ける衝撃荷重の最大値
F_3	kN	ワイヤロープ破断荷重（JIS規格値）
F_a	kN	設計飛来物衝突時にネットが受ける最大衝撃荷重
$F_{a'}$	kN	設計飛来物衝突時にネットが受けるオフセット衝突を加味した最大衝撃荷重
F_P	kN	ワイヤロープにより接続用の治具（支持部）に作用する荷重
F_{P1}	kN	設計飛来物がネットに衝突する際に1本目のワイヤロープから隅角部へ作用する合成荷重
F_{P2}	kN	設計飛来物がネットに衝突する際に2本目のワイヤロープから隅角部へ作用する合成荷重
F_x	kN	設計飛来物がネットに衝突する際ワイヤロープから隅角部へ作用するX方向の合成荷重
F_y	kN	設計飛来物がネットに衝突する際ワイヤロープから隅角部へ作用するY方向の合成荷重

表 3-2 破断評価に用いる記号(2/2)

記号	単位	定義
L	mm	面取り長さ
L_{Pw}	mm	取付けプレート溶接部の有効長さ
L_{P1}	mm	アイプレート長さ (縦方向)
L_{P2}	mm	アイプレート長さ (横方向)
L_x	m	ネット展開方向寸法
L_y	m	ネット展開直角方向寸法
n	枚	ネット設置枚数
n_1	個	飛来物の衝突位置周辺のネット1枚当たりの目合いの個数
n_2	本	隅角部固定ボルト本数
S	mm	アイプレート溶接部の溶接脚長
T'	kN	設計飛来物のネットへの衝突によりn枚のネットに発生する張力の合計の最大値
T_1'	kN	設計飛来物のネットへの衝突によりワイヤロープ1本に作用する張力の最大値
T_x	kN	設計飛来物のネットへの衝突により展開方向のワイヤロープから発生するX方向の荷重
T_x'	kN	設計飛来物のネットへの衝突により展開直角方向のワイヤロープから発生するX方向の荷重
T_y	kN	設計飛来物のネットへの衝突により展開方向のワイヤロープから発生するY方向の荷重
T_y'	kN	設計飛来物のネットへの衝突により展開直角方向のワイヤロープから発生するY方向の荷重
δ	m	設計飛来物衝突時のネットの最大たわみ量
δ_w	m	ワイヤロープのたわみ量
θ	deg	設計飛来物衝突時のネットのたわみ角
θ_{w1}	deg	ネット展開方向に平行なワイヤロープのたわみ角
θ_{w2}	deg	ネット展開直角方向に平行なワイヤロープのたわみ角
θ_x	deg	設計飛来物衝突時のネット展開方向に平行のネットたわみ角
θ_y	deg	設計飛来物衝突時のネット展開直角方向に平行のネットたわみ角
σ_s	MPa	隅角部固定ボルトに発生するせん断応力
τ_w	MPa	アイプレート溶接部に発生するせん断応力

c. たわみ評価

たわみ評価に用いる記号を表 3-3 に示す。

表 3-3 たわみ評価に用いる記号(1/2)

記号	単位	定義
E_i	kJ	i番目の列におけるネットの吸収可能なエネルギー
E_t	kJ	ネット設置枚数nを考慮したネットに作用する全外力エネルギー
F_a	kN	飛来物衝突時にネットが受ける最大衝撃荷重
F_p	kN	設計飛来物がネットに衝突する際2方向のワイヤーから支持部へ作用する合成荷重
K_x	kN/m	ネット1目合いの展開方向の1列の等価剛性
L_b	m	変形前のワイヤロープ長さ
L_{min}	m	防護ネットと防護対象施設の最小離隔距離
L_x	m	ネット展開方向寸法
L_y'	m	ワイヤロープへの飛来物の影響範囲
L_y	m	ネット展開直角方向寸法
L_z	m	ワイヤロープの全長
n	枚	ネット設置枚数
N_y	個	ネット展開直角方向目合い数
S	m	変形後のワイヤロープ長さ
S_x	m	ネット展開方向と平行に配置されているワイヤロープの変形後の長さ
S_y	m	ネット展開直角方向と平行に配置されているワイヤロープの変形後の長さ
T_1'	kN	設計飛来物のネットへの衝突により1枚のネットのワイヤロープ1本に作用する張力の最大値
δ	m	飛来物衝突時のネットの最大たわみ量
δ_i	m	飛来物衝突時のi番目の列におけるネットのたわみ量
δ'	m	設計飛来物衝突時のワイヤロープの変形による伸び量
δ_t	m	ワイヤロープのたわみ量を含めた防護ネット全体のたわみ量
δ_w	m	ワイヤロープのたわみ量
δ_{wx}	m	ネット展開方向に平行に配置されているワイヤロープの変形後のたわみ量
δ_{wy}	m	ネット展開直角方向に平行に配置されているワイヤロープの変形後のたわみ量

表 3-3 たわみ評価に用いる記号(2/2)

記号	単位	定義
ϵ	—	ワイヤロープのひずみ量
θ	deg	設計飛来物衝突時のネットのたわみ角
θ_x	deg	設計飛来物衝突時のネット展開方向に平行のネットのたわみ角
θ_y	deg	設計飛来物衝突時のネット展開直角方向に平行のネットのたわみ角

3.2 評価対象部位

(1) 防護ネット

a. ネット

ネットの評価対象部位は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.1 防護ネットの許容限界」にて示している評価対象部位を踏まえて、「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。

設計荷重は、ネットに直接作用する。このため、設計荷重に対する評価対象部位は、ネットとする。評価対象部位について図 3-1 に示す。

b. ワイヤロープ

ワイヤロープの評価対象部位は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.1 防護ネットの許容限界」にて示している評価対象部位を踏まえて、「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。

設計荷重は、ネットに作用し、ワイヤロープに作用するため、設計荷重に対する評価対象部位は、ワイヤロープとする。

c. 接続治具（支持部）

接続治具（支持部）の評価対象部位は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.1 防護ネットの許容限界」にて示している評価対象部位を踏まえて、「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。

設計荷重は、ネットに作用し、ワイヤロープを介して接続治具（支持部）に作用するため、設計荷重に対する評価対象部位は、接続治具（支持部）であるターンバックル及びシヤックルとする。

d. 接続治具（固定部）

接続治具（固定部）の評価対象部位は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.1 防護ネットの許容限界」にて示している評価対象部位を踏まえて、「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。

設計荷重は、ネットに作用し、ワイヤロープ、接続治具（支持部）を介して接続治具（固定部）である隅角部固定ボルト、アイプレートに作用する。

アイプレートは、プレート本体、プレートと鋼製枠の溶接部、プレートとリブの溶接部及びリブと鋼製枠の溶接部と評価部位があるが、評価上溶接線が最も短いリブと鋼製枠の溶接部を評価対象部位とする。

隅角部固定ボルトの評価対象部位を図 3-2 に、アイプレート（溶接部）の評価対象部位を図 3-3 に示す。

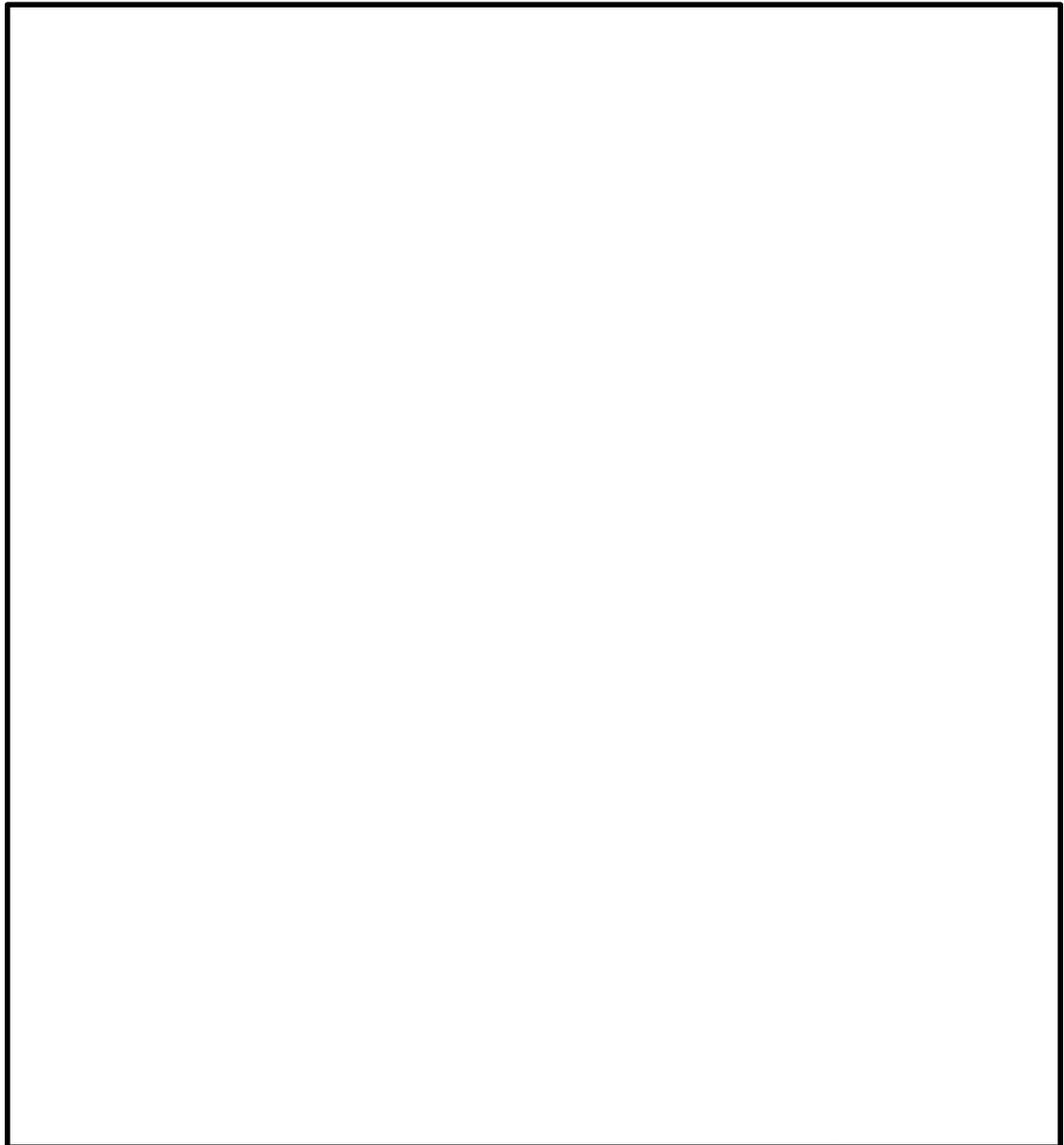


図 3-1 ネットの評価対象部位

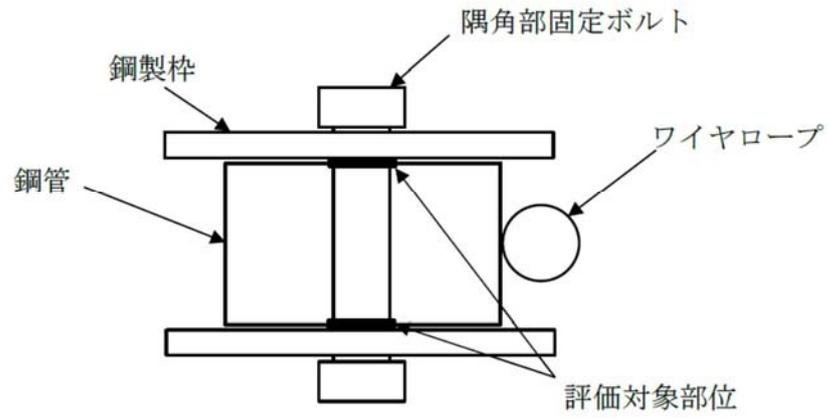


図 3-2 隅角部固定ボルトの評価対象部位

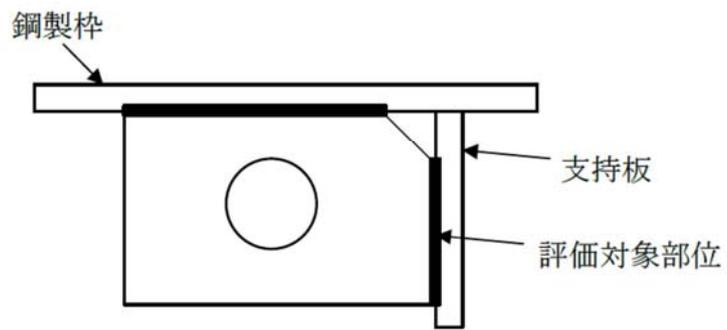


図 3-3 ワイヤロープの取付けプレート(溶接部)の評価対象部位

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」にて設定している荷重の種類を踏まえ設定する。

(1) 荷重の設定

a. 常時作用する荷重

自重を考慮する。なお、これらの荷重はネットの設置方向を考慮する。自重は鉛直下向きに発生するため、水平方向に設置した防護ネットに対し、考慮することとする。鉛直方向設置ネットについては、自重と飛来物の衝突荷重は作用する方向が異なることから考慮しない。

また、ワイヤロープ及び接続治具（支持部、固定部）の自重については、ネットから作用する荷重に比べ十分に小さいことから考慮しない。

ワイヤロープ及び接続治具（支持部、固定部）の評価時は、上載荷重としてネットの自重を考慮する。

b. 設計竜巻による荷重

設計竜巻による荷重として、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び飛来物の衝撃荷重を考慮する。なお、防護ネットは閉じた空間にないため、気圧差による荷重は考慮しない。飛来物による衝撃荷重としては、衝撃荷重が大きくなる向きで飛来物がネットに衝突することを想定する。

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 設計竜巻による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 ΔP_{max} (N/m ²)
100	15	85	8900

(a) 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。

$$W_w = \frac{q \cdot G \cdot C \cdot A_a \cdot \phi}{1000}$$

設計用速度圧 q は、次式により算定する。

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

(b) 飛来物による衝撃荷重

破断評価においては、飛来物による衝撃荷重は以下のとおり算出する。

ネットの飛来物による衝撃荷重 F_a'' は時間とともに比例的に増加すると仮定すると、衝撃荷重 F_a'' は以下のとおり算出される。

$$F_a'' = Q \cdot t \quad \dots \quad \textcircled{1}$$

したがって、速度 v は式①の衝撃荷重 F_a'' から、以下のとおり算出される

$$\begin{aligned} v &= -\frac{1}{m} \int_0^t F_a'' dt \\ &= -\frac{Q \cdot t^2}{2m} + v_1 \quad \dots \quad \textcircled{2} \end{aligned}$$

さらに、設計飛来物の移動距離 d は、式②の速度 v から以下のとおり算出される。

$$\begin{aligned} d &= \int_0^t v dt \\ &= -\frac{Q \cdot t^3}{6m} + v_1 t \quad \dots \quad \textcircled{3} \end{aligned}$$

設計飛来物が衝突しネットのたわみが最大になる時間 t_1 におけるネットの変位は δ 、設計飛来物の速度は0であるから、式②及び③より、

$$Q \cdot t_1^2 = 2m v_1 \quad \dots \quad \textcircled{4}$$

$$\delta = -\frac{Q \cdot t_1^3}{6m} + v_1 t_1$$

上記2式を連立し、

$$\delta = \frac{2}{3} v_1 t_1$$

よって、

$$t_1 = \frac{3}{2v_1} \delta \quad \dots \quad \textcircled{5}$$

以上より、時間 t_1 における衝撃荷重 F_a'' は式①及び④より、

$$F_a'' = \frac{2m v_1}{t_1}$$

さらに、式⑤と連立し、

$$F_a'' = \frac{4m v_1^2}{3 \cdot \delta} \quad \dots \quad \textcircled{6}$$

また、時間 t_1 における設計飛来物の衝突によりネットに作用するエネルギー E_f は、衝突時の設計飛来物の運動エネルギーとして、以下より求められる。

$$E_f = \frac{1}{2} m v_1^2 \quad \dots \quad \textcircled{7}$$

従って、式⑥及び⑦より、

$$F_a'' = \frac{8E_f}{3 \cdot \delta} \cdot \cdot \quad \text{⑧}$$

(2) 荷重の組合せ

a. ネット

(a) ネット

ネット目合い寸法 40 mm のネットを 2 枚設置するため、鋼製パイプはすり抜けることはないが、鋼製パイプよりも小さい飛来物のすり抜け低減対策として、念のためにネット 2 枚の上部にさらにネット目合い寸法 40 mm のネット 1 枚を補助金網として設置していることから、これを上載荷重とし、ネットに作用する荷重として、上載荷重、ネットの自重、飛来物がネットに衝突する場合の衝撃荷重及び風圧力による荷重を組み合わせた荷重を設定する。

(b) ワイヤロープ及び接続治具（支持部）

設計飛来物がネットに衝突する場合にワイヤロープ等に作用する荷重は、ネットからワイヤロープに伝達し、その荷重を接続治具（支持部）を介して接続治具（固定部）に伝達することから、ネットに作用する荷重を評価対象部位であるワイヤロープ及び接続治具（支持部）に作用する荷重として設定する。

ワイヤロープ及び接続治具（支持部）に作用する自重及び風圧力による荷重については、ネットに作用する荷重に比べて十分小さいことから考慮しない。

(c) 接続治具（固定部）

設計飛来物がネットに衝突する場合にネット取付部への荷重は、ネットからワイヤロープ、接続治具（支持部）を介して接続治具（固定部）に作用することから、ワイヤロープからの荷重を評価対象部位である隅角部固定ボルト、アイプレートに作用する荷重として設定する。

接続治具（固定部）に作用する自重及び風圧力による荷重については、ネットに作用する荷重に比べて十分小さいことから考慮しない。

吸収エネルギー評価、破断評価及びたわみ評価における、ネット、ワイヤロープ及び接続治具（支持部及び固定部）に作用する荷重及びその組合せを表 3-5 から表 3-7 に示す。

表 3-5 吸収エネルギー評価における荷重及びその組合せ

ネット		考慮する荷重		
		常時作用する荷重	飛来物による衝撃荷重	風圧力による荷重
<ul style="list-style-type: none"> 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） 海水ポンプ室周り 使用済燃料乾式貯蔵建屋外壁 	水平	○ (自重+上載荷重)	○	—
	側面	—	○	○

<凡例> ○：考慮する，—：考慮しない

表 3-6 破断評価における荷重及びその組合せ(2/2)

設置エリア		評価対象部位	考慮する荷重		
			常時作用する荷重	飛来物による衝撃荷重	風圧力による荷重
<ul style="list-style-type: none"> 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） 海水ポンプ室周り 使用済燃料乾式貯蔵建屋外壁 	水平	ネット	○ (自重+上載荷重)	○	—
		ワイヤロープ	○ (自重+上載荷重)	○	—
	側面	ネット	—	○	○
		ワイヤロープ	—	○	○

<凡例> ○：考慮する，—：考慮しない

3.4 許容限界

ネットの許容限界は、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。

吸収エネルギー評価，破断評価及びたわみ評価の許容限界を以下に示す。

(1) 吸収エネルギー評価

吸収エネルギー評価においては、計算により算出するネットの限界吸収エネルギーがネットに作用する外力エネルギー以上であることにより、ネットが破断しないことを確認する。ネット1目合いの要素試験の結果から得られる目合い展開方向の限界伸び量によりネットの最大変形角が定まり、ネット最大変形角における吸収エネルギーがネットの有する限界吸収エネルギー E_{max} となる。 E_{max} に係数を考慮した値を吸収エネルギー評価の許容限界とする。

限界吸収エネルギーは、複数枚を重ね合わせたネットを一体として扱ったモデルにて算出する。また、ネットの変形及び吸収エネルギーの分布を考慮したオフセット衝突位置での吸収エネルギー評価の結果、電中研報告書を参照して、ネット最大たわみ時のネットの全長は飛来物のネットへの衝突位置によらずネット最大たわみ時展開方向の長さで一定であり、ネットに発生する張力も一定となることから、飛来物のネットへの衝突位置によらずネットから飛来物への反力も同等となり、オフセット位置への飛来物の衝突時の吸収エネルギーは中央衝突時と同等となる。したがって、吸収エネルギー評価では中央衝突の場合にて評価を行う。

最大吸収エネルギーは、ネット1目合いの展開方向の1列の等価剛性、展開方向寸及びたわみ量から、以下のとおり算出される。吸収エネルギー評価におけるネットのモデル図を図3-4に示す。

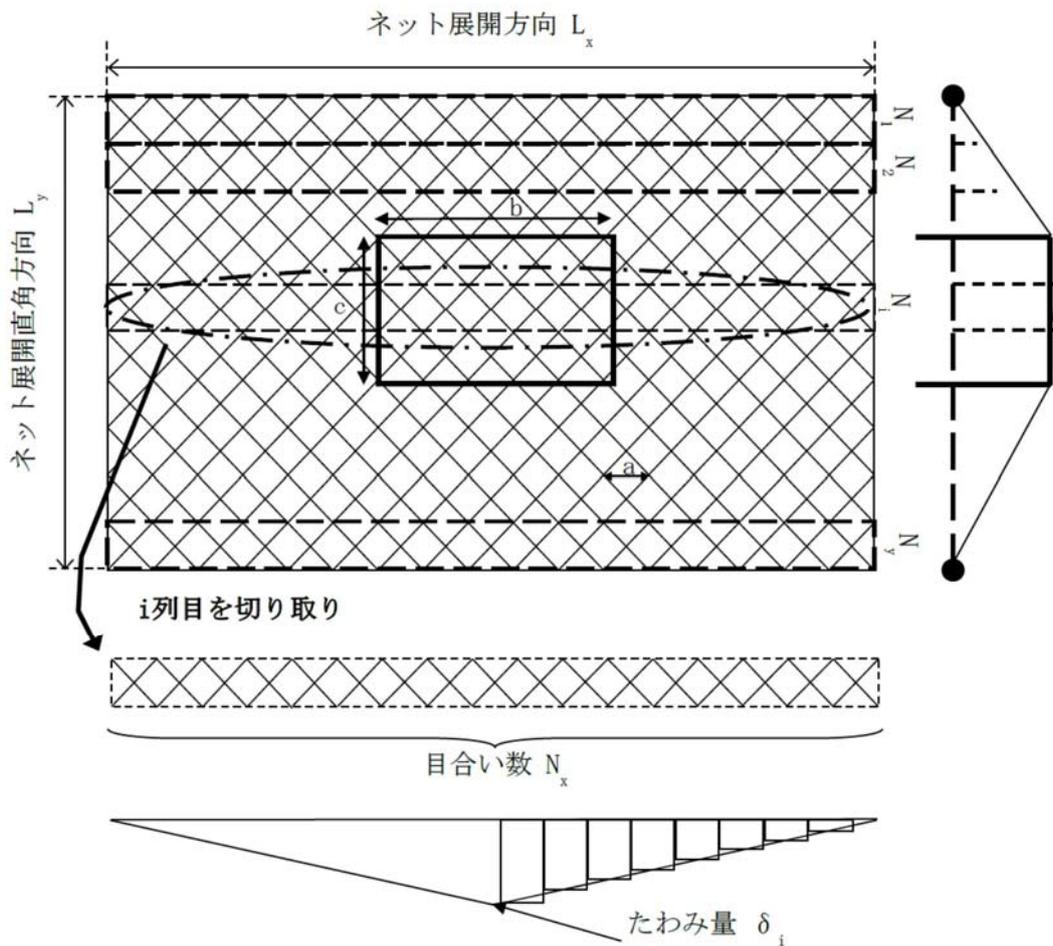


図 3-4 限界吸収エネルギー評価におけるネットのモデル図

図 3-4 に示すとおりネットの展開方向に 1 目合いごとにで囲った形に帯状に分割し、 N_x から N_y までの各列が分担するエネルギーを各列のたわみ量から算定し、それらを積算することによりネットの吸収するエネルギーを算出し、ネットが吸収可能な限界吸収エネルギーを算出する。

ただし、中央部の最大たわみ量が発生する列数は、飛来物の寸法及びネット目合いの対角寸法から算出されるネット展開直角方向目合い列数を考慮して設定する。飛来物の端部寸法 ($b \times c$) 及びネット目合いの対角寸法 a を考慮し、最大たわみが発生する場合のネット展開直角方向目合い列数を以下のとおり算出する。ネットの吸収エネルギーが小さくなるよう、目合い列数の算出に用いる飛来物の寸法として値の小さい寸法 c を適用し、最大たわみが生じる目合い列数を少なくすることにより、限界吸収エネルギーが小さくなるように評価する。

評価モデルとしては、展開方向に 1 目合いごとに帯状に分割するモデルとしており、限界吸収エネルギーが小さく算出されるよう、三角形モデルとして評価を実施する。

吸収エネルギー評価の許容限界の算定フローを図 3-5 に示す。

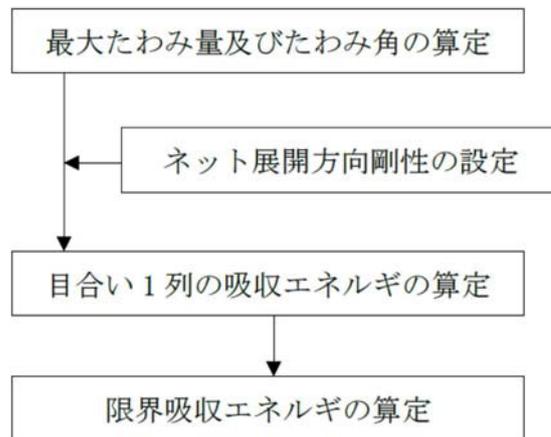
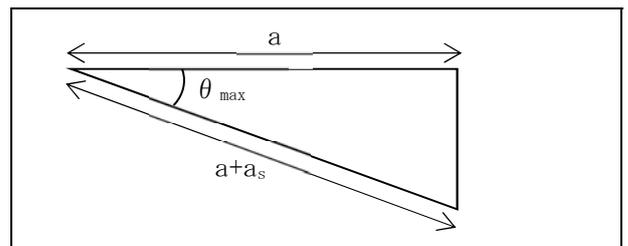


図 3-5 吸収エネルギー評価の許容限界の算定フロー

電中研報告書のネット 1 目合いの引張試験から 1 目合いの破断変位を設定する。ネット 1 目合いの破断変位から算出する最大たわみ角から、飛来物が衝突した際の列の最大たわみ量 δ_{max} は次式により算定される。

$$\delta_{max} = \frac{L_x}{2} \tan \theta_{max}$$

$$\theta_{max} = \cos^{-1} \left(\frac{a}{a + a_s} \right)$$



ネットを構成するネットの展開方向の目合い数 N_x は、ネット展開方向寸法 L_x 及びネット 1 目合いの対角寸法 a から求める。展開直角方向の目合い数 N_y は、ネット展開直角方向寸法 L_y 及びネット 1 目合いの対角寸法 a から求める。ネットを構成する 1 目合いはそれぞ

れ K の等価剛性を持っているため、1 列当たりバネ定数 K を持つバネを N_x 個直列に接続したものと考えることができる。そのため、1 列当たりの剛性 K_x' は

$$N_x = \frac{1000L_x}{a}, \quad N_y = \frac{1000L_y}{a}$$

ネット展開方向剛性 $K_x' = \frac{K}{N_x}$

となる。ただし、 N_x 、 N_y の算出において限界吸収エネルギーの値が小さくなるように N_x は保守的に切り上げ、 N_y は保守的に切り捨てた値を用いる。また、補助金網のエネルギー吸収に期待しないため、補助金網を除くネット設置枚数を考慮したネット展開方向剛性 K_x は、次式により算出される。

$$K_x = K_x'(n + 0.5)$$

飛来物が衝突しなかった列のたわみ量 δ_i は、最大たわみ量 δ_{max} からネット端部のたわみ量 0 までの間を、非接触の列の数の分だけ段階的に減少していくと考える。ネットの最大たわみ量と最大たわみ角を図 3-6 に示す

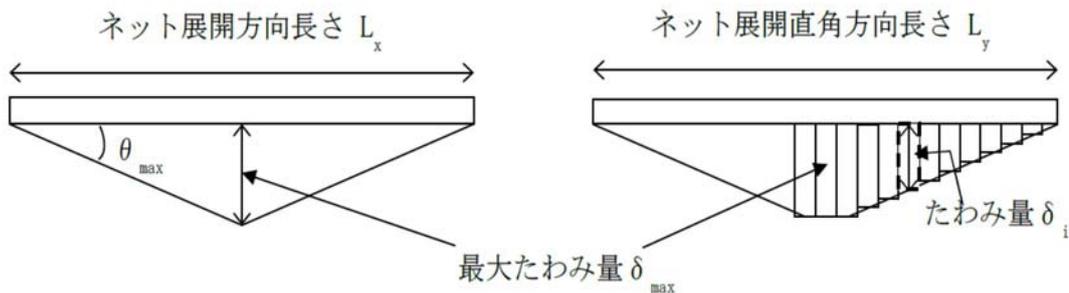


図 3-6 最大たわみ量と最大たわみ角

ネットに飛来物が衝突した際のネットにかかる張力を、ネットの剛性及びネットの伸び量から算出する。ネットに作用する力のつり合いを図 3-7 に示す。

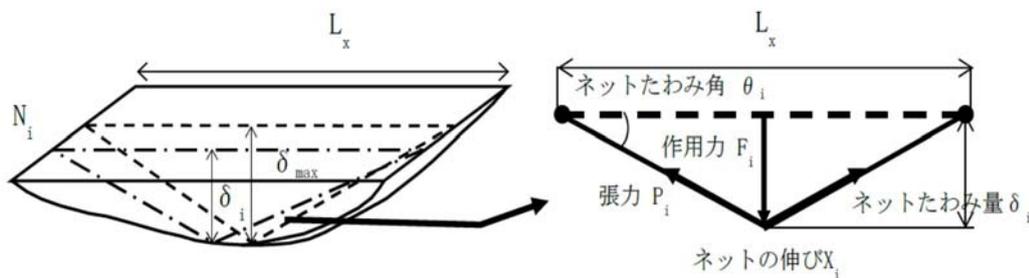


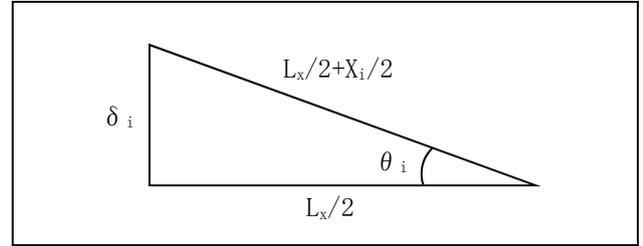
図 3-7 ネットに作用する力のつり合い

i 番目の列におけるネットの張力 P_i は、飛来物の衝突位置の左右を分割して考えると、伸び量は $X_i/2$ 、剛性は $2K_x$ となることから、

$$P_i = 2K_x \left(\frac{X_i}{2} \right)$$

$$= K_x X_i$$

となる。また、作用力 F_i は変位量とたわみ量の関係から、



$$F_i = 2P_i \sin \theta_i$$

$$= 2K_x X_i \sin \theta_i$$

$$= 2K_x L_x \tan \theta_i (\tan \theta_i - \sin \theta_i)$$

$$= 4K_x \delta_i \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2}} \right) \dots \textcircled{9}$$

ネットに飛来物が衝突した際のネットにかかる作用力 F_i を積分することにより i 番目の列における吸収エネルギー E_i を次式に示す。

$$E_i = \int_0^{\delta_i} F_i d\delta_i$$

$$= \int_0^{\delta_i} 4K_x \delta_i \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2}} \right) d\delta_i$$

$$= 2K_x \delta_i^2 - K_x L_x \left(\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \dots \textcircled{10}$$

以上から、ネット設置枚数 n を考慮した限界吸収エネルギー E_{max} は、各列の吸収エネルギー E_i を第1列から第 N_y 列まで積算することにより求められる。

$$E_{max} = \sum_{i=1}^{N_y} E_i$$

$$= \sum_{i=1}^{N_y} \left\{ 2K_x \delta_i^2 - K_x L_x \left(\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \right\} \dots \textcircled{11}$$

(2) 破断評価

a. ネット

破断評価においては、計算により算出するネットに作用する荷重がネットの素材の持つ破断強度以下であることにより、ネットに破断が生じないように十分な余裕を持った強度を有することを確認する。防護ネットは、飛来物の衝突に対し、塑性変形することでエネルギーを吸収し、飛来物を捕捉することから、ネット目合いの破断試験結果を安全側に整理し

たものを許容限界とする。具体的には、ネット目合いに作用する引張荷重を算出するため、電中研報告書を参照してネット目合いの引張試験に基づいた1交点当たりの破断荷重、飛来物衝突時の周辺の交点数及び防護ネットの設置枚数から、防護ネットの許容引張荷重を算出する。

表 3-7 にネットの破断評価の許容限界を示す。

表 3-7 ネットの破断評価の許容限界

評価対象部位	許容限界
ネット	F_1

b. ワイヤロープ

ワイヤロープは、ネットと一体となって飛来物を捕捉するため、ネットと同様に塑性変形を許容することから、破断荷重を許容限界とする。具体的な破断荷重は、ネットメーカーが実施した引張試験にて確認した破断荷重よりも保守的な値である J I S に規定されている破断荷重を許容限界とする。ワイヤロープについては、その端部にワイヤグリップを設置しており、その効率 C_c に基づき、許容限界を表 3-8 のように設定する。

表 3-8 ワイヤロープの破断評価の許容限界

評価対象部位	規格値	許容限界	備考
ワイヤロープ	F_3	$C_c \cdot F_3$	ワイヤグリップの効率を考慮

c. 接統治具（支持部）

ターンバックル及びシャックルは、破断しなければネットを設置位置に保持することができ、飛来物を捕捉可能である。したがって、ワイヤロープの張力に対し、設計荷重が十分な裕度を有していることを確認する。ターンバックル及びシャックルについては、破断荷重よりも保守的な値である、規格値を 1.5 倍した値を許容限界として表 3-9 のように設定する。

表 3-9 ターンバックル及びシャックルに適用する許容限界

評価対象部位	規格値	許容限界
ターンバックル	追而	
シャックル		

d. 接統治具（固定部）

隅角部固定ボルトの破断評価においては、計算により算出する応力が隅角部固定ボルトに破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を許容限界とする。具体的には、隅角部固定ボルトの許容限界は、J E A G 4601 を準用し、「その他の支持構造物」の許容限界を

適用し，許容応力状態IV_AS から算出した許容応力を許容限界とする。
隅角部固定ボルトに適用する許容限界を表 3-10 に示す。

表 3-10 隅角部固定ボルトに適用する許容限界

評価対象部位	材質	温度 (°C)	考慮すべき 損傷モード	許容応力 (MPa)
追而				

(注 1) 各評価対象部位の最高使用温度を示す。

(注 2) f_{s*} : 許容せん断応力

J S M E S S B - 3 1 2 0 又は S S B - 3 1 3 0 に規定される値

(注 3) 母材である取付けプレートの材質

(3) たわみ評価

防護ネットは、自重、設計飛来物による衝撃荷重及び設計竜巻の風圧力による荷重に対し、計算により算出する防護ネットの最大たわみ量がネットと防護対象施設の離隔距離未満であることを確認するため、ネットと防護対象施設の最小離隔距離を許容限界 L_{min} として設定する。

表 3-11 に防護ネットのたわみ評価の許容限界を示す。

表 3-11 防護ネットのたわみ評価の許容限界

評価対象項目	許容限界
防護ネットの 最大たわみ量	ネットと防護対象施設の 最少隔離距離 (L_{min})

3.5 評価方法

防護ネットのネットに吸収エネルギー評価、破断評価及びたわみ評価の方法を以下に示す。評価に際しては、アスペクト比及び飛来物の衝突位置の影響に対して以下を考慮した評価を実施する。

・アスペクト比の取扱い

ネットは展開方向、展開直角方向の2方向で剛性が異なり、それぞれの方向に対して伸び量の制限があるため、展開方向：展開直角方向のアスペクト比が1:1～2:1の範囲で使用し、その範囲を外れる部分はエネルギー吸収等において有効な面積とならないとして評価する。アスペクト比が1:1より小さな場合（展開方向寸法が展開直角方向寸法より短い場合）は、アスペクト比を1:1として評価する。エネルギー吸収できる量が小さく、破断荷重が大きく算出されるように設定する。アスペクト比が2:1より大きな場合（展開方向寸法が展開直角方向寸法の2倍より長い場合）は、ネット評価寸法のアスペクト比を2:1とするが、吸収エネルギー評価及びたわみ評価においては、エネルギー吸収できる量が小さく、たわみ量が大きくなるように、展開方向の1列の等価剛性は本来のネット形状の展開方向寸法に対応する値を用いて評価する。一方、破断評価においては、破断荷重が大きくなるように、展開方向寸法を短く見込んで等価剛性を設定し評価する。

アスペクト比が 1:1 より小さな場合の評価方法を表 3-12、アスペクト比が 2:1 より大き

な場合の評価方法を表 3-13 に示す。

表 3-12 アスペクト比が 1:1 より小さな場合の評価方法

評価項目	吸収エネルギー	破断	たわみ
評価区画イメージ			

表 3-13 アスペクト比が 2:1 より大きな場合の評価方法

評価項目	吸収エネルギー	破断	たわみ
評価区画イメージ	<p>限界吸収エネルギー量が小さくなるようにアスペクト比を設定</p> <p>(K値算出用)</p>	<p>作用する荷重が大きくなるようにアスペクト比を設定</p> <p>(K値算出用)</p>	<p>たわみ量が大きくなるようにアスペクト比を設定</p> <p>(K値算出用)</p>

・飛来物の衝突位置の影響

評価においては、飛来物の衝突位置として中央位置に衝突することを想定した評価を実施しており、中央位置からずれたオフセット位置に衝突する場合の影響を考慮する。

吸収エネルギー評価においては、電中研報告書を参照して、ネット最大たわみ時のネットの全長は飛来物のネットへの衝突位置によらずネット最大たわみ時展開方向の長さで一定であり、ネットに発生する張力も一定となることから、飛来物のネットへの衝突位置によらずネットから飛来物への反力も同等となり、オフセット位置への飛来物の衝突時の吸収エネルギーは中央衝突時と同等となる。従って、吸収エネルギー評価では中央衝突の場合にて評価を行う。

破断評価においては、中央位置への衝突に対してオフセット位置への衝突では、その移動距離が短くなることから、式⑦から中央位置衝突時よりもオフセット位置衝突時の方が作用する荷重が大きくなることを踏まえ、作用する荷重が大きくなるように、中央位置衝突時とオフセット位置衝突時の移動距離を踏まえた係数を作用する荷重に乗じる。ただし、ネット端部近傍に衝突する場合には、飛来物は傾き、飛来物の側面がネットや架構に

接触すると考えられ、衝撃荷重は小さくなる。

たわみ評価においては、ネットの全長が飛来物の衝突位置によらず、ネット最大たわみ時展開方向の長さで一定となるため、たわみの軌跡が楕円状となることを考慮して評価する。さらに、ネットに対して飛来物がオフセット位置へ衝突した場合においても、各ワイヤロープに対して均等に張力が発生するため、算出結果は飛来物の衝突位置によらず適用可能である。また、ワイヤロープの初期張力は小さくワイヤロープの評価において有意ではないため計算上考慮しない。

(1) 吸収エネルギー評価

吸収エネルギー評価においては、電中研評価式を参照して、ネットが異方性材料であることを考慮した吸収エネルギー算出のモデル化を行い、自重、上載荷重、風圧力による荷重及び飛来物による衝撃荷重による外力エネルギーがネットの有する限界吸収エネルギーを下回ることを確認する。

評価においては、複数枚の重ね合わせたネットを一体として考えたモデルにて評価を実施する。

式⑩より、 E_{max} は以下のとおりである。

$$E_{max} = \sum_{i=1}^{N_y} \left\{ 2K_x \delta_i^2 - K_x L_x \left(\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \right\} \cdot \cdot \quad \text{⑩}$$

自重、上載荷重及び風圧力による荷重によりネットに作用する荷重 F_w は、ネット全体に等分布荷重として作用するものであるため、実現象に合わせネット展開直角方向に対しては荷重が等分布となるよう作用させる。一方、ネット展開方向に対しては、評価モデル上の制約により均一に荷重を作用させることが困難であるため、ネットに作用する外力エネルギーが保守的に大きくなるよう、 F_w が全てネット展開方向 L_x の中央に作用したとして、ネットにかかる作用力の式を用いて展開方向の1列当たりの自重、上載荷重及び風圧力による荷重によりネットが受ける外力エネルギーを算出し、列数倍することでネット全体が自重、上載荷重及び風圧力による荷重により受ける外力エネルギーを算出する。

評価条件である K_x 及び L_x 並びに自重、上載荷重及び風圧力による荷重から算出する F_w を式⑨に代入して数値計算を実施することにより、自重、上載荷重及び風圧力による荷重によるたわみ量 δ_a が算出される。

$$F_w = N_y \times 4K_x \delta_a \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4\delta_a^2 + L_x^2}} \right)$$

但し、 $F_w = P_w + W_w$

上式にて算出した δ_a を式⑩において、展開方向の1列当たりの自重及び風圧力による荷重によりネットが受けるエネルギーを列数倍する以下の式に代入することにより、自重及び風圧力による荷重によりネットが受けるエネルギー E_w が算出される。

$$E_w = N_y \times \left\{ 2K_x \delta_i^2 - K_x L_x \left(\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \right\}$$

設計飛来物の衝突によりネットに作用するエネルギー E_f は、衝突時の設計飛来物の運動エネルギーとして、以下より求められる。

$$E_f = \frac{1}{2} m v^2$$

飛来物の飛来速度は、鉛直の飛来速度にて算出する。斜め方向から衝突した場合の飛来速度の水平方向速度成分及び鉛直方向速度成分は、評価に用いる鉛直最大飛来速度を下回る。また、飛来物がネットに対して斜め方向から衝突する場合は、飛来物が衝突後に回転し、ネットと飛来物の衝突面積が大きくなるため、ネットに局部的に作用する荷重は小さくなる。したがって、飛来物の衝突方向は、ネットに局部的に作用する荷重が大きくなるようにネットに対して垂直に入射するものとし、その飛来速度は鉛直最大飛来速度を用いる。

以上から、ネット設置枚数 n を考慮したネットに作用する全外力エネルギー E_t が以下のとおり算出される。

$$E_t = E_f + E_w \cdot \cdot \textcircled{12}$$

(2) 破断評価

破断評価においては、電中研の評価式を参照して、ネットに作用する飛来物による衝撃荷重が防護ネットを構成する部材の局部的な耐力未満であることを確認する。

評価に際しては、「2.3 評価の方針」のとおり、設計飛来物の衝突位置の影響として、オフセット衝突する場合の影響を考慮する。以下にオフセット衝突する場合の影響を係数として考慮した発生値の割増係数の設定方法を示す。

・オフセット衝突を考慮する係数

設計飛来物の移動距離が最も小さくなる場合のオフセット衝突を考えると、中央衝突と比較して8が0.82倍となることから、中央衝突に比べ衝撃荷重が1.22倍となる。

ネット端部近傍に衝突する場合には、飛来物は傾き、飛来物の側面がネットや架構に接触すると考えられ、衝撃荷重は小さくなる。

また、アスペクト比についての扱いは吸収エネルギー評価同様に表 3-12、表 3-13 のとおりとする。

a. ネット

ネットに飛来物が衝突した後、ネットのたわみが増加し、飛来物の運動エネルギーを吸収する。ネットに発生する飛来物による衝撃荷重はネット変位の増加に伴い大きくなり、最大変位発生時に最大値を示すため、破断評価では最大変位発生時の衝撃荷重を用いる。

最大変位発生時において、飛来物の衝突によりネットの目合いはネット展開方向に引張荷重を受けることから、破断評価としてネット目合いの引張荷重評価を実施する。

ネットの破断評価の評価フローを図 3-8 に示す。

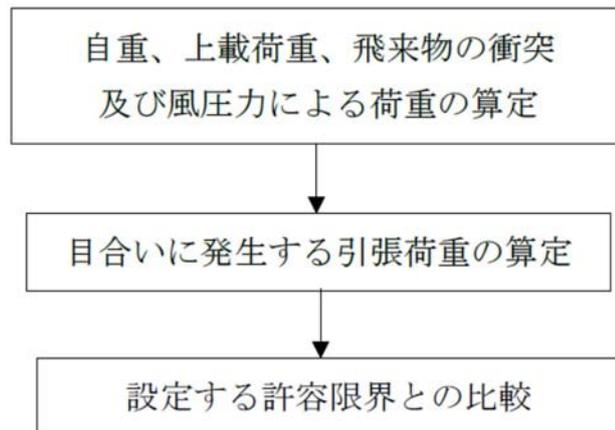


図 3-8 ネットの破断評価フロー

(a) 評価モデル

ネットに飛来物が衝突した際に生じる衝撃について評価を実施する。ネット構造及び飛来物の大きさを考慮し、ネットの目合い数が最小となるモデル化を行う。衝突位置周辺の目合い数はネット 1 枚あたり n_1 点となる。評価モデルを図 3-9 に示す。

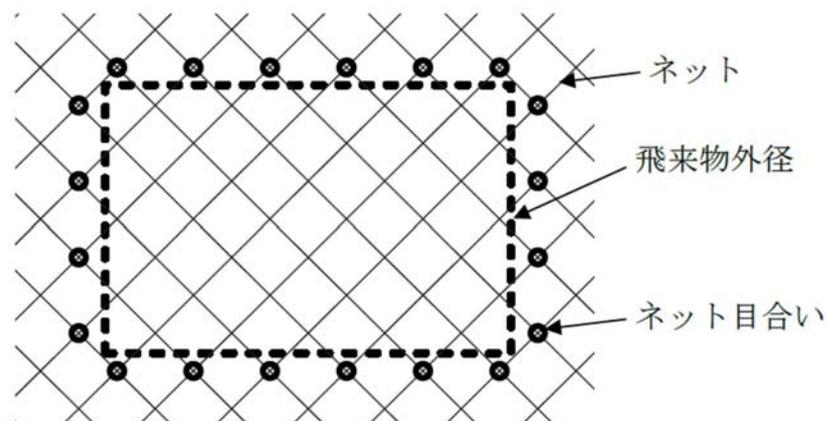


図 3-9 破断評価モデル

(b) 評価方法

ネットに飛来物が衝突した際に生じる衝撃荷重が、ネットの破断荷重以下であり、ネット目合いに破断が生じないように十分な余裕を持った強度を有することを確認する。

ここで、ネットに飛来物が衝突した際に生じる衝撃荷重の最大値 F_a は、「3.3 荷重及び荷重の組合せ」にて算出した式⑧のたわみ量と飛来物による衝撃荷重の関係式を用いて算出する。

飛来物の衝突による荷重に加え、自重、上乗荷重及び風圧力による荷重を考慮するため、 E_f を E_t と置き換えて、式⑧より、

$$F_a = \frac{8E_t}{3 \cdot \delta}$$

となる。

ここで、オフセット衝突による衝撃荷重の増加分による係数 1.22 を考慮し、衝撃

荷重の最大値 F_a' は

$$F_a' = F_a \times 1.22$$

と算出される。

b. ワイヤロープ

設計飛来物による衝撃荷重については、「3.3 荷重及び荷重の組合せ」において算出した飛来物が衝突する場合のネットごとに作用する衝撃荷重の最大値 F_a を考慮する。

防護ネットは、電中研報告書と同様に2本のワイヤロープをL字に設置し、さらにワイヤロープが接続用の治具により拘束されない構造としており、電中研報告書において実施されている衝撃試験における実測値が包絡されることを確認している評価式を用いて評価を実施する。ネットに発生する荷重のつり合いのイメージ図を図3-10に示す。

自重、上載荷重、飛来物による衝撃荷重及び風圧力による荷重によりネットに作用する衝撃荷重の最大値 F_a が集中荷重として作用するとしてモデル化すると、飛来物が衝突する場合のネットに発生する張力の合計の最大値 T' は、図3-10のネット及びワイヤロープに発生する力のつり合いより以下のとおり算出される。

$$T' = \frac{F_a'}{2 \sin \theta}$$

但し、 θ は以下の式で求められる。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2\delta}{L_x}$$

補助金網を除くネット設置枚数を考慮すると、1枚のネットのワイヤロープ1本に発生する張力の最大値 T_1' は、

$$T_1' = \frac{T'}{2} \cdot \frac{1}{n} = \frac{F_a'}{4 \sin \theta}$$

と算出される。

さらに、ワイヤロープが支持する防護ネットの枚数を考慮する。上段のワイヤロープには補助金網が設置されており、2枚のネットを支持しているため、下段のワイヤロープより大きな荷重が作用することとなるため、補助金網設置に伴う荷重の分担を考慮する。

電中研報告書によると、補助金網を設置している上段のワイヤロープには、補助金網を設置していないワイヤロープに比べ、1.5倍の張力が発生していることが確認されている。このことから、上段のワイヤロープは、下段のワイヤロープに比べ、補助金網の影響により1.5倍の張力が発生しているものとし、その影響を考慮する。

補助金網を支持しているワイヤロープに発生する張力 T_1'' は、

$$T_1'' = \frac{T'}{2} = \frac{F_a'}{4 \cdot \sin \theta} \cdot \left(\frac{1.5}{1.5+1} \right)$$

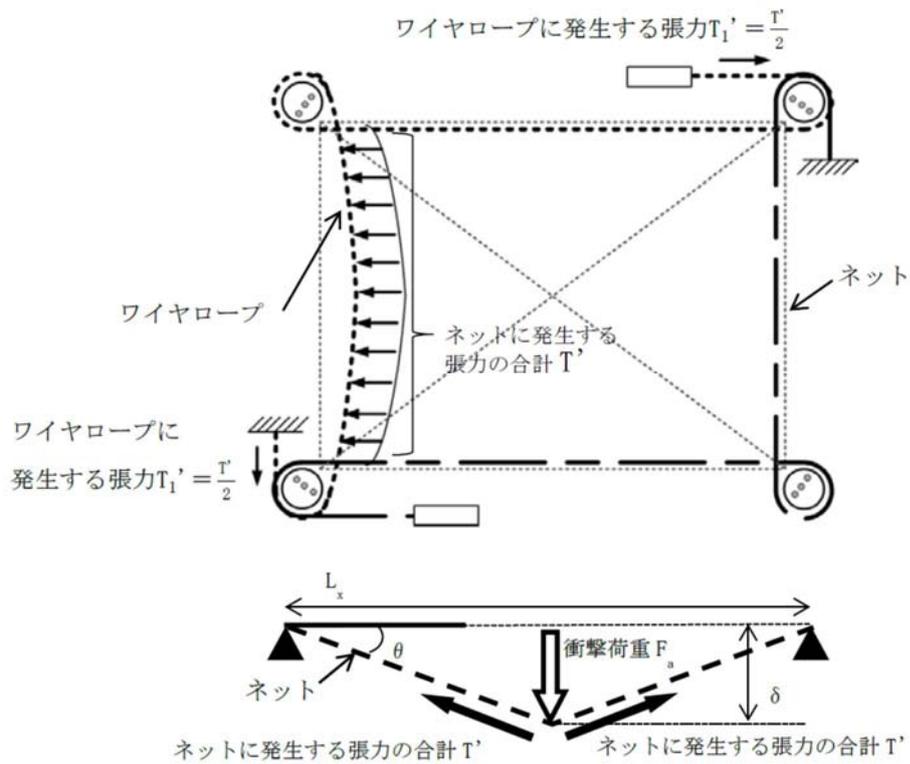


図 3-10 ネット及びワイヤロープに発生する力のつり合い(ネット平面図及び断面図)

c. 接続治具（支持部）

(a) ターンバックル

ターンバックルの評価については、以下の評価を実施する。

ターンバックルに作用するワイヤロープに発生する張力の最大値が、ターンバックルの設計荷重以下であることを確認する。

(b) シャックル

シャックルの評価については、以下の評価を実施する。

シャックルに作用するワイヤロープに発生する張力の最大値が、シャックルの設計荷重以下であることを確認する。

d. 接続治具（固定部）

(a) 隅角部固定ボルト

鋼製枠の 4 隅に設置した隅角部固定ボルトは、ワイヤロープの荷重を、鋼管を介して受けることとなる。

ここで、ワイヤロープはたわみにより鋼管に対して θw_1 、 θw_2 のたわみ角を有することから、隅角部固定ボルトへ作用する荷重にはこのたわみ角を考慮する。

鉛直方向成分は、水平方向成分のように隅角部固定ボルトに対する有意な荷重ではないことから、面内荷重で評価する。

ネットのたわみとワイヤロープのたわみ角の関係を図 3-11 に示す。

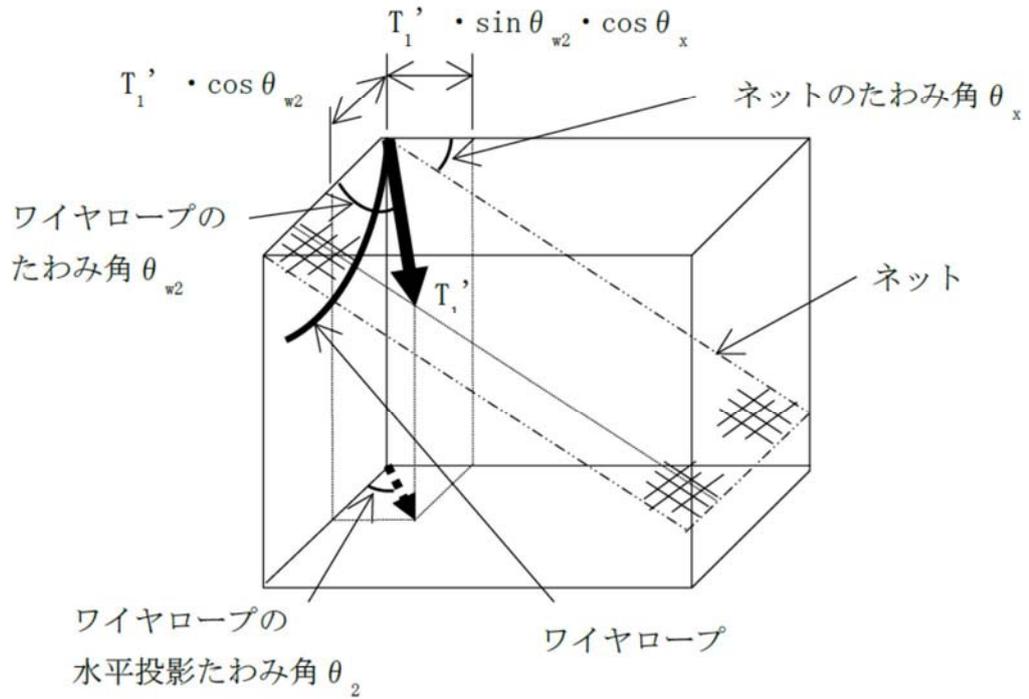
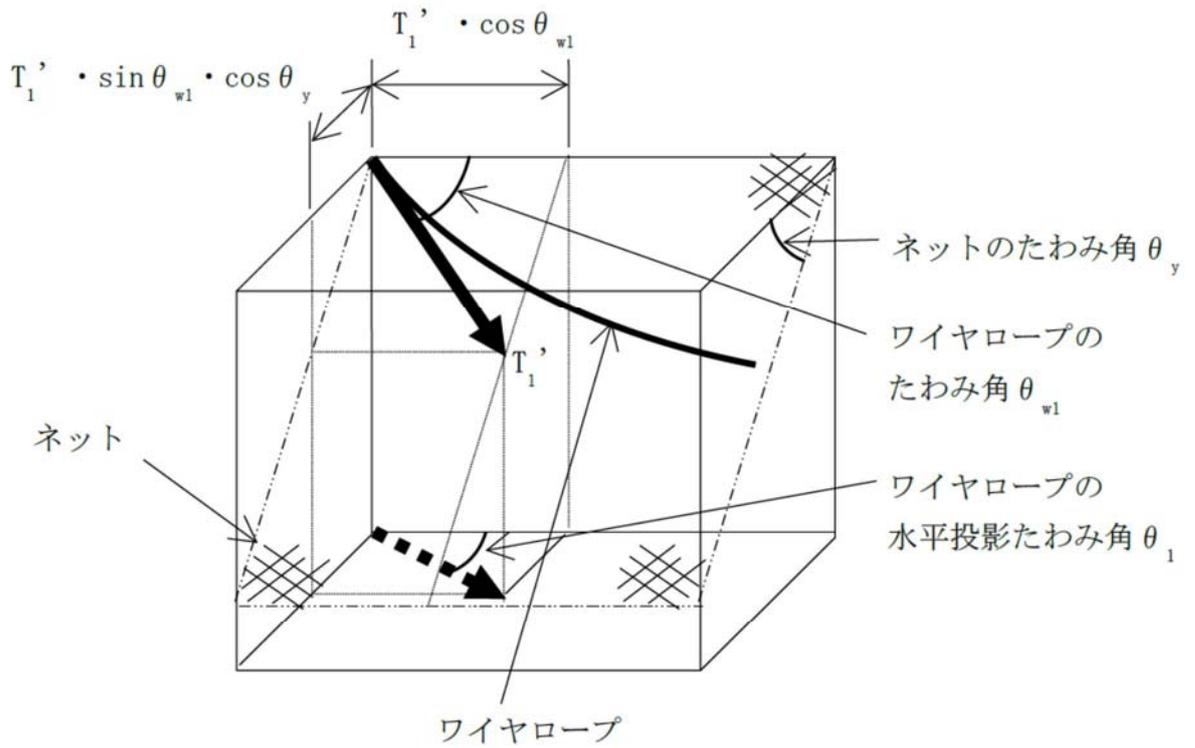


図 3-11 ネットのたわみとワイヤロープのたわみ角の関係

隅角部固定ボルトの荷重状態を図 3-12 に示す。

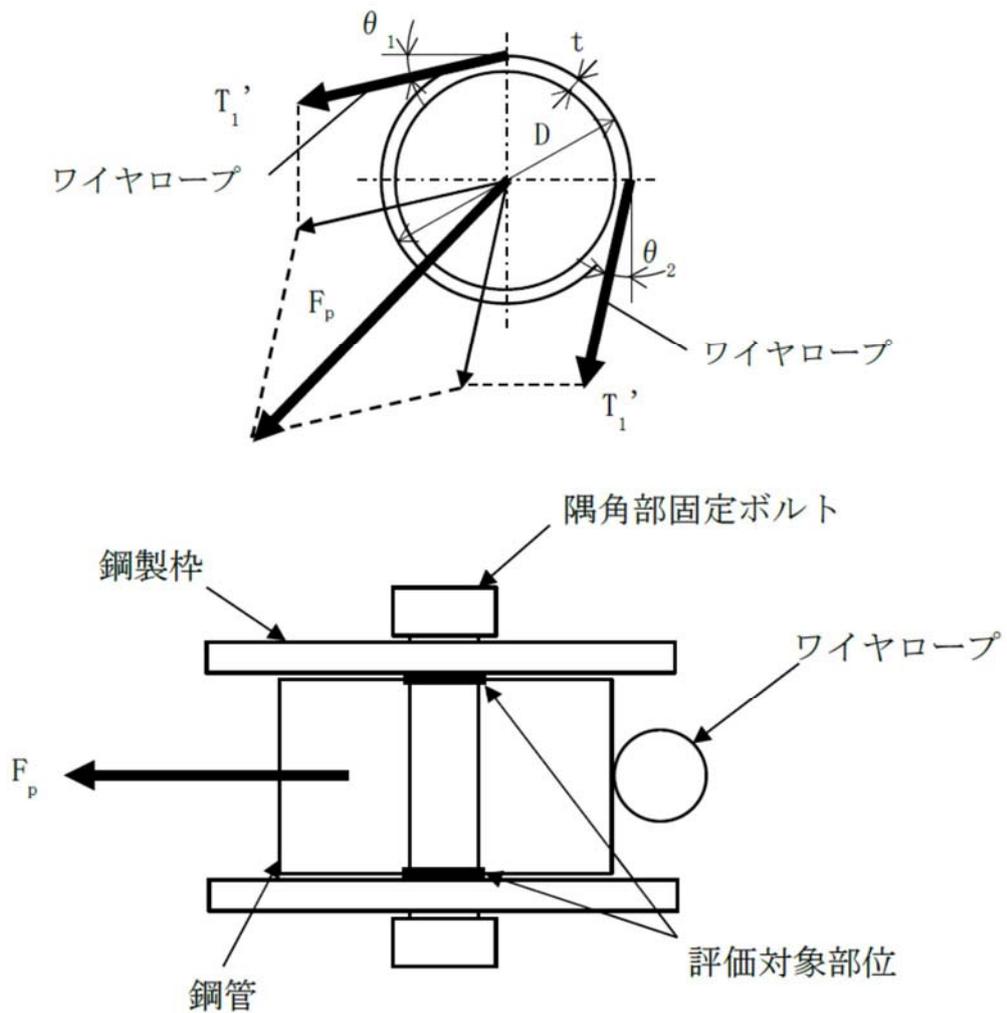


図 3-12 隅角部固定ボルトの荷重状態

図 3-13 より、隅角部固定ボルトへ作用する荷重 F_p は、

$$F_p = \sqrt{(T_1' + T_1' \cdot \cos(90 - \theta_1 - \theta_2))^2 + (T_1' \cdot \sin(90 - \theta_1 - \theta_2))^2}$$

隅角部固定ボルトに発生するせん断応力 τ_s は、

$$\tau_s = \frac{F_p \cdot n}{2 \cdot 3 \cdot A_b}$$

e. アイプレート

飛来物が防護ネットに衝突する場合にネット取付部への衝撃荷重 T_1' は、ワイヤロープの引張荷重として作用し、隅肉溶接部にはせん断応力が発生するため、せん断応力評価を実施する。アイプレートの溶接部を図 3-13 に示す。

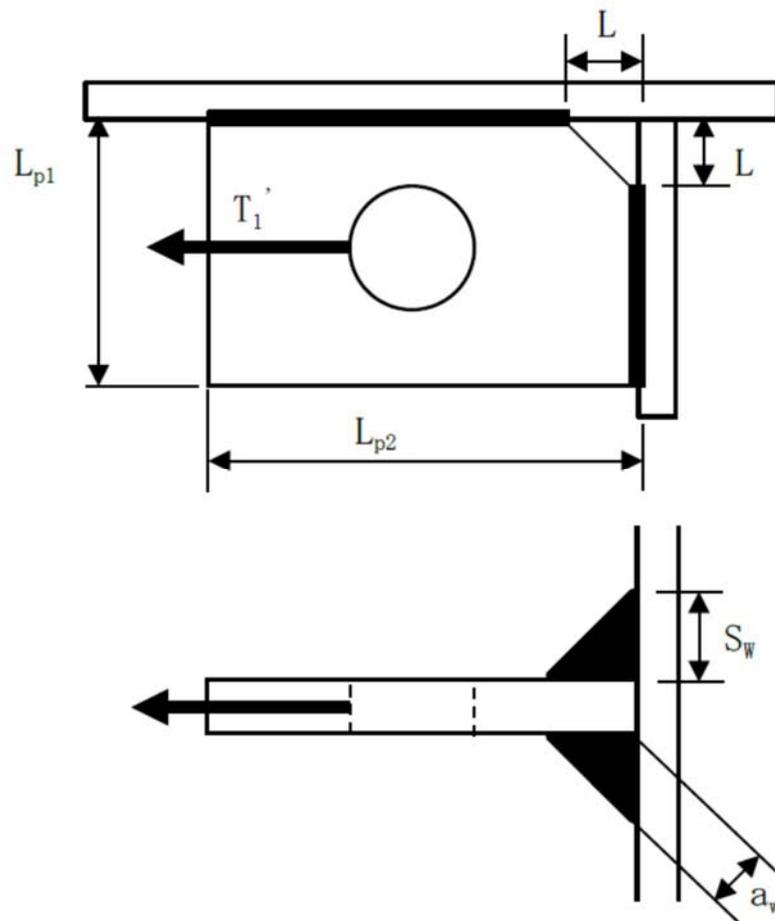


図 3-13 アイプレート溶接部

溶接部の有効脚長 L_{pw} は、

$$L_{pw} = L_{p1} - L - 2S + L_{p2} - L - 2S$$

溶接部に発生するせん断応力 τ_w は、

$$\tau_w = \frac{T}{2a_w L_{pw}}$$

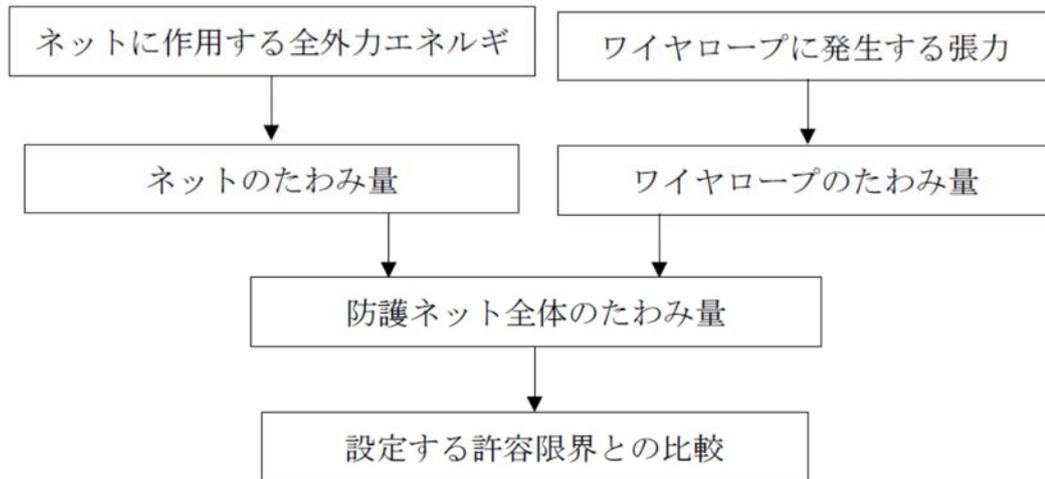
ここで溶接部ののど厚 a_w は以下の式で求められる。

$$a_w = \frac{S_w}{\sqrt{2}}$$

(3) たわみ評価

たわみ評価においては、吸収エネルギー算出モデルを用い、飛来物の運動エネルギー、風圧力による荷重、自重及び上載荷重によるエネルギーを吸収するために必要となるネットのたわみ量を導出する。また、ワイヤロープ張力に応じたワイヤロープのたわみ量についても算出し、離隔距離未満であることを確認する。

たわみ評価の評価フローを図 3-14 に示す。



第 3-14 図 たわみ評価の評価フロー

a. ネット

ネットの変位量と吸収エネルギーとの関係は式⑩のとおり、以下の式にて導出される。

$$E_i = 2K_x \delta_i^2 - K_x L_x \left(\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \quad \dots \quad \text{⑩}$$

ここで、 K_x 及び L_x は定数であるため、

$$\sum_{i=1}^{N_g} E_i = E_t$$

とすることで、ネットへの付加エネルギーに応じたたわみ量 δ を算出することができる。

b. ワイヤロープたわみ量を含めた防護ネット全体のたわみ量の算出

ワイヤロープのたわみ量は、ネット張力によりワイヤロープが放物線状に変形するとし、算出したワイヤロープに発生する張力及びワイヤロープの引張試験結果（荷重－ひずみ曲線）から変形後のワイヤロープ長さを求めることで導出する。

また、ワイヤロープの初期張力は小さくワイヤロープのたわみ量の算出において有意ではないため計算上考慮しない。

式⑩に示す計算方法を用いて算出されるワイヤロープに発生する張力からワイヤロープのひずみ量 ε が算出される。したがって、ワイヤロープの変形による伸び量 δ' は、以下のとおり算出される。

$$\delta' = L_z \cdot \varepsilon$$

また、設計飛来物の衝突によりワイヤロープが図 3-15 のとおり放物線状に変形すると、変形後のワイヤロープ長さ S は放物線の弦長の式を用いて以下のとおり表される。

$$S = \frac{1}{2} \sqrt{L_b^2 + 16\delta_w^2} + \frac{L_b^2}{8\delta_w} \ln \left(\frac{4\delta_w + \sqrt{L_b^2 + 16\delta_w^2}}{L_b} \right)$$

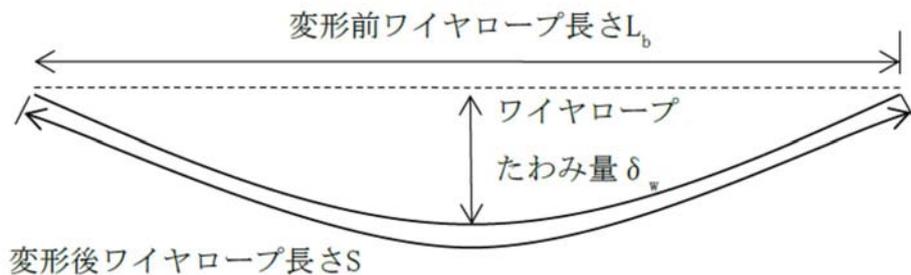


図 3-15 ワイヤロープ変形図

ワイヤロープたわみ量を含めた防護ネット全体のたわみ量 δ_t の算出を行う。ネット及びワイヤロープ変形図を図 3-18 に示す。

ネット展開方向と平行に配置されているワイヤロープの変形後の長さを S_x 、ネット展開直角方向に配置されているワイヤロープの変形後の長さを S_y とすると、 S_x 及び S_y はそれぞれ δ_{wx} 、 δ_{wy} の関数であり、ワイヤロープ伸び量 δ' は、

$$\delta' = \{S_x(\delta_{wx}) - L_x\} + \{S_y(\delta_{wy}) - L_y\}$$

と表される。

また、ネット展開方向と平行な断面から見たたわみ量と、ネット展開方向と直交する断面から見たたわみ量は等しいことから、ワイヤロープたわみ量を含めた防護ネット全体のたわみ量 δ_t は、

$$\delta_t = \sqrt{\left(\delta_{wy} + \frac{L_x}{2 \cos \theta_x}\right)^2 - \left(\frac{L_x}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\delta_{wx} + \frac{L_y}{2 \cos \theta_y}\right)^2 - \left(\frac{L_y}{2}\right)^2}$$

ここで、 θ_x 及び θ_y は、「3.5.3 (1) ネット」で算出したネットに作用する全外力エネルギー E_t に応じたたわみ量 δ より、以下の式で求められる。

$$\theta_x = \tan^{-1} \left(\frac{2 \cdot \delta}{L_x} \right) \quad \theta_y = \tan^{-1} \left(\frac{2 \cdot \delta}{L_y} \right)$$

したがって、ワイヤロープたわみ量 δ_{wx} 及び δ_{wy} を導出することができ、同時にワイヤロープたわみ量を含めた防護ネット全体のたわみ量 δ_t が算出される。

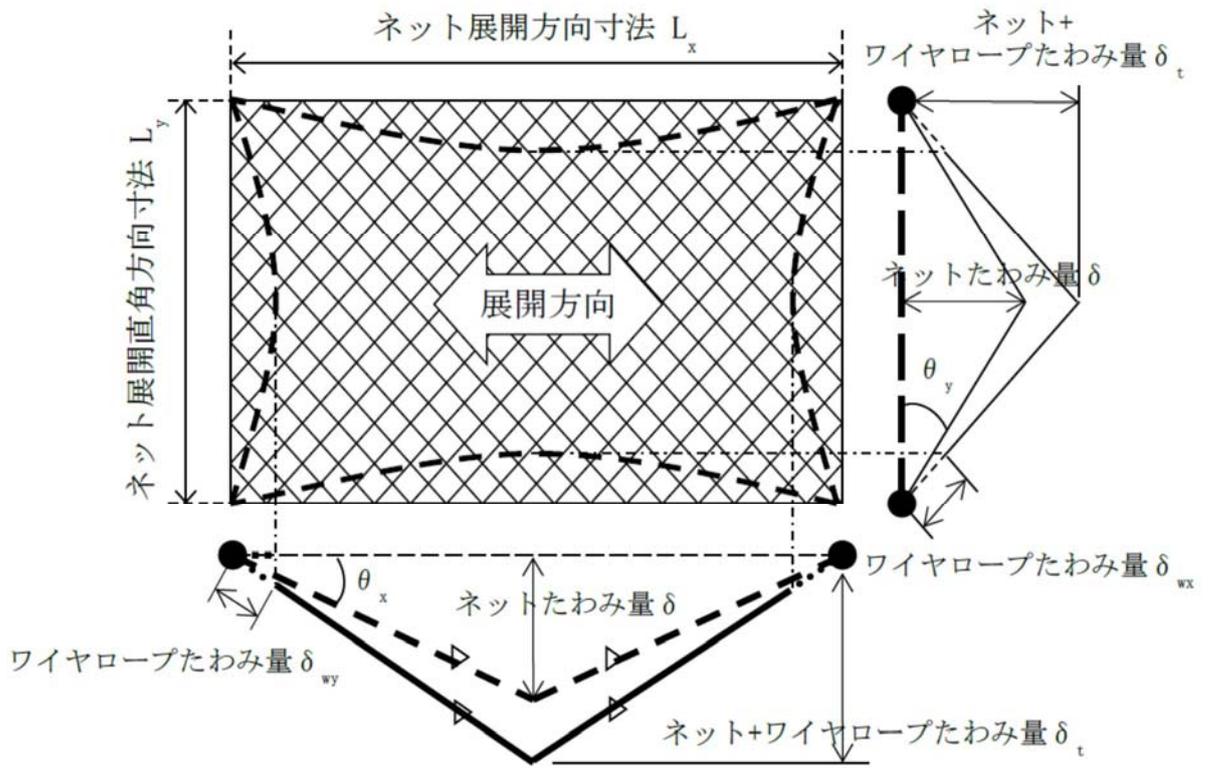


図 3-16 ネット及びワイヤロープ変形図

4. 評価条件

4.1 荷重条件

飛来物による衝撃荷重の算定条件を表 4-1 に、風圧力による荷重の算定条件を表 4-2 に示す。

表 4-1 飛来物による衝撃荷重の算定条件

飛来物	b × c (mm)	m (kg)	V ₁ (m/s)	
			水平方向	鉛直方向
鋼製材	300 × 200	135	51	34

表 4-2 風圧力による荷重の算定条件

C (-)	G (-)	ρ (kg/m ³)	V _D (m/s)
1.2	1.0	1.22	100

4.2 防護ネット仕様

(1) ネット仕様

ネット仕様を表 4-3 に示す。

表 4-3 ネット仕様

項目	記号	仕様	備考
ネット材料	-	追而	
ネット目合い寸法	-		
ネット 1 目合いの対角寸法	a		
ネット 1 目合いの破断変位	a _s		
ネット素線の直径	d'		
ネット 1 目合いの破断荷重	F ₁		
ネット 1 目合いの等価剛性	K		
衝突箇所周辺の ネット 1 枚当たりの目合い数	n ₁		
ネットの素線の引張強度	σ'		
破断時たわみ角	θ _{max}		
ネットの単位面積当たりの質量	m _N		
ネットの充実率	φ		

(2) 防護ネット構成

防護ネットの構成を表 4-4 に示す。

表 4-4 防護ネットの構成

防護ネット	ネットサイズ (m)			ネット枚数
	L _x	×	L _y	
追而				

() 内は補助金網

(3) ワイヤロープ、ターンバックル及びシャックル
評価における条件を以下に示す。

a. ワイヤロープ

ワイヤロープの仕様を表 4-5 に示す。

表 4-5 ワイヤロープの仕様

評価対象部位	仕様	径	破断荷重 (kN)	ワイヤグリップ効率
追而				

(注 1) J I S G 3 5 4 9 の破断強度

(注 2) J I S B 2 8 0 9 及び (社) 日本道路協会「小規模吊橋指針・同解説」

b. ターンバックル

ターンバックルの仕様を表 4-6 に示す。

表 4-6 ターンバックルの仕様

評価対象項目	規格値	許容限界
追而		

c. シャックル

シャックルの仕様を表 4-7 に示す。

表 4-7 シャックルの仕様

評価対象項目	規格値	許容限界
追而		

d. 接続用の治具

評価における条件を以下に示す。

(a) 隅角部固定ボルト

隅角部固定ボルトの評価条件を表 4-8 に示す。

表 4-8 隅角部固定ボルトの評価条件

評価対象項目	ボルト径	材質	ボルト本数
追而			

(b) アイプレート

アイプレートの評価条件を表 4-9 に示す。

表 4-9 取付けプレートの評価条件

評価対象項目	アイプレート 母材	プレート長さ		面取り長さ L (mm)	溶接脚長 S _w (mm)
		L _{p1} (mm)	L _{p2} (mm)		
追而					

e. 鋼製枠固定ボルト

鋼製枠固定ボルトの評価条件を表 4-10 に示す。

表 4-10 鋼製枠固定ボルトの評価条件

防護ネット	評価対象項目	ボルト径	材質	ボルト本数
追而				

5. 強度評価結果

5.1 ネットに作用する外力エネルギー評価

竜巻発生時のネットに作用する外力エネルギー評価結果を表 5-1 に示す。

すべての防護ネットにおいて、作用する全エネルギー(E_t)は、防護ネットの限界吸収エネルギー(E_{max})を下回っている。

表 5-1 ネットに作用する外力エネルギー評価結果

防護ネット	E_t (kJ)	E_{max} (kJ)
追而		

5.2 破断評価

(1) ネット

竜巻による飛来物衝突時のネット目合いの破断評価結果を表 5-2 に示す。

すべての防護ネットにおいて、飛来物による衝撃荷重(F_2)は、防護ネットの許容荷重(F_1)を下回っている。

表 5-2 破断評価結果

防護ネット	F_2 (kN)	F_1 (kN)
追而		

(2) ワイヤロープ、ターンバックル及びシャックル

a. ワイヤロープ

竜巻による飛来物衝突時の強度評価結果を表 5-3 に示す。

ワイヤロープが負担する荷重(T_1')は、ワイヤロープの許容荷重(P)を下回っている。

表 5-3 ワイヤロープ強度評価結果

防護ネット	T_1' (kN)	P (kN)
追而		

b. ターンバックル

竜巻による飛来物衝突時の強度評価結果を表 5-4 に示す。
発生荷重は、ターンバックルの許容限界を下回っている。

表 5-4 ターンバックル強度評価結果

防護ネット	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
追而		

(注 1) ワイヤロープ張力である T_1' (第 5-3 表参照) の値を示す。

c. シャックル

竜巻による飛来物衝突時の強度評価結果を表 5-5 に示す。
発生荷重は、シャックルの許容限界を下回っている。

表 5-5 シャックル強度評価結果

防護ネット	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
追而		

(注 1) ワイヤロープ張力が最大である T_1' (表 5-3 参照) の値を示す。

(3) 接続用の治具

a. 隅角部固定ボルト

接続用の治具のうち、隅角部固定ボルトの竜巻による飛来物衝突時の強度評価結果を表 5-6 に示す。

ワイヤロープが負担する荷重 (T_1') による発生応力は、隅角部固定ボルトの許容限界を下回っている。

表 5-6 接続用の治具(隅角固定ボルト)の強度評価結果

防護ネット	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
追而		

b. アイプレート溶接部

接続用の治具のうち、アイプレート溶接部の竜巻による飛来物衝突時の強度評価結果を表 5-7 に示す。

ワイヤロープが負担する荷重(T_1')による発生応力は、アイプレート溶接部の許容限界を下回っている。

表 5-7 接続用の治具(アイプレート溶接部)の強度評価結果

防護ネット	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
追而		

(4) 鋼製枠固定ボルト

鋼製枠固定ボルトの竜巻による飛来物衝突時の強度評価結果を表 5-8 に示す。

発生応力は、鋼製枠固定ボルトの許容限界を下回っている。

表 5-8 鋼製枠固定ボルトの強度評価結果

防護ネット	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
追而		

5.3 たわみ評価

竜巻による飛来物衝突時の強度評価結果を表5-9に示す。

すべての防護ネットにおいて、防護ネットへの飛来物衝突による防護ネット全体のたわみ量(δ_t)は、防護ネットと防護対象施設の最小離隔距離(L_{min})を下回っている。

表 5-9 たわみ評価結果

防護ネット	最大たわみ量 δ_t (m)	最少離隔距離 L_{min} (m)
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	12
2.4 適用規格	13
3. 強度評価方法	14
3.1 記号の定義	14
3.2 評価対象部位	14
3.3 荷重及び荷重の組合せ	15
3.4 許容限界	15
3.5 評価方法	16
4. 評価条件	18
5. 強度評価結果	18

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、原子炉建屋排気隔離弁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）許可を受けた設計飛来物（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。

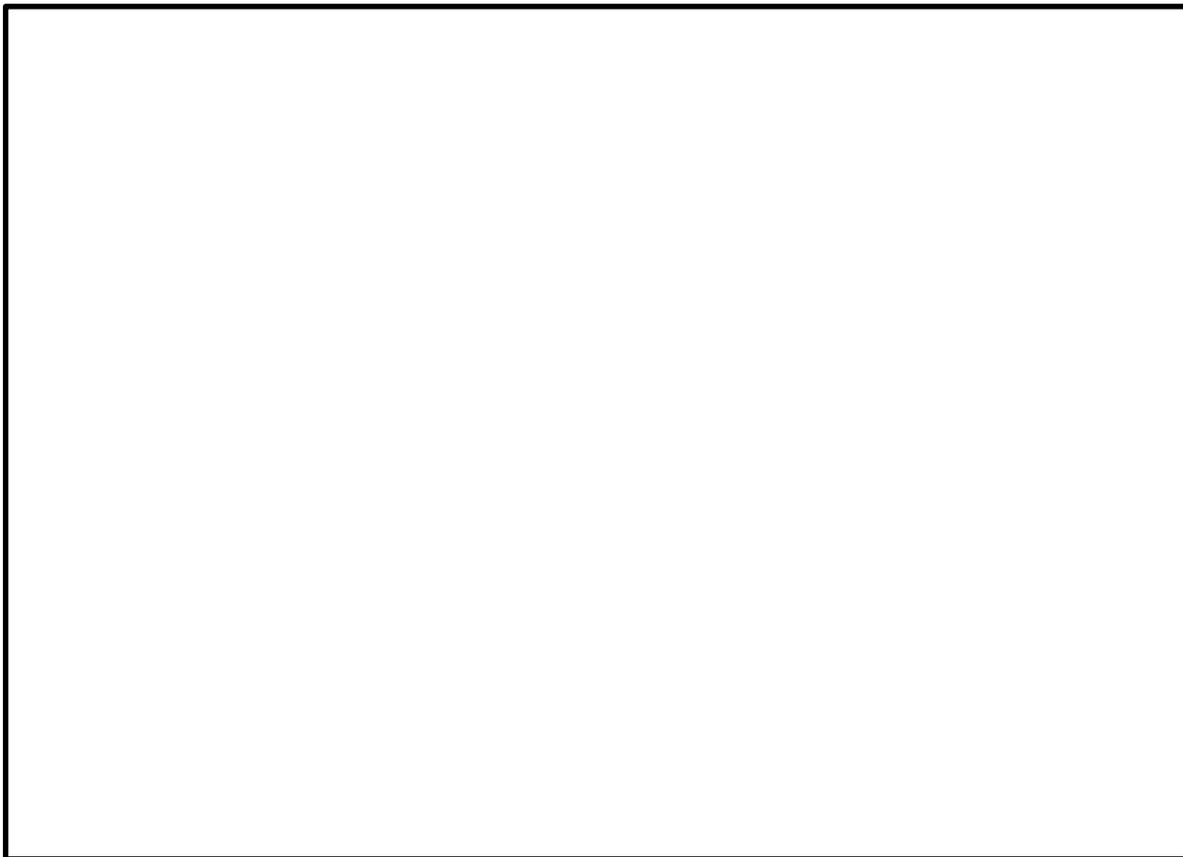
2. 基本方針

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。



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。

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壳となる。

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割付展開図を図 2-2 に示す。

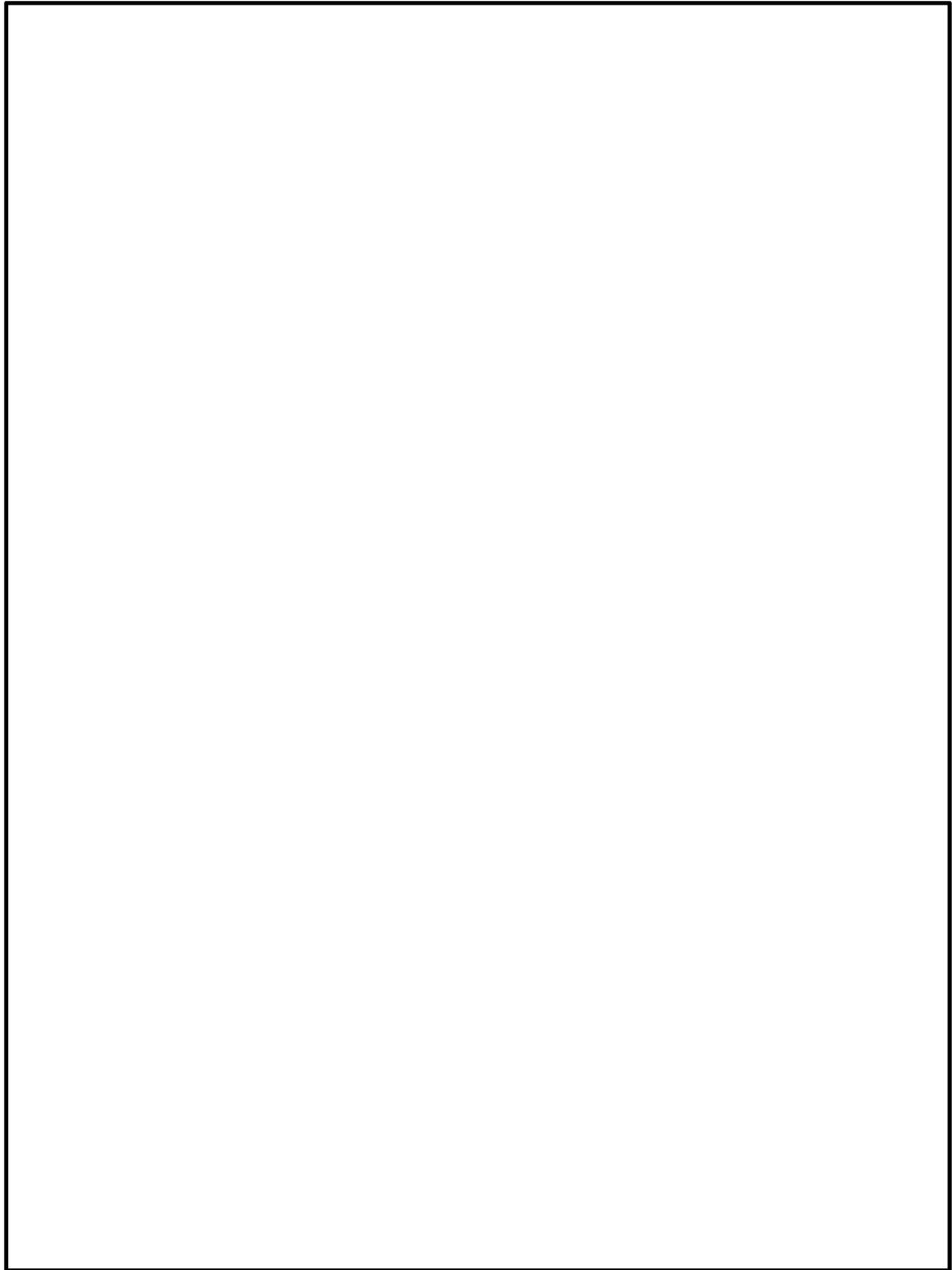


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン防護対策施設防護鋼板の構造図(1/4)
(2 C 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

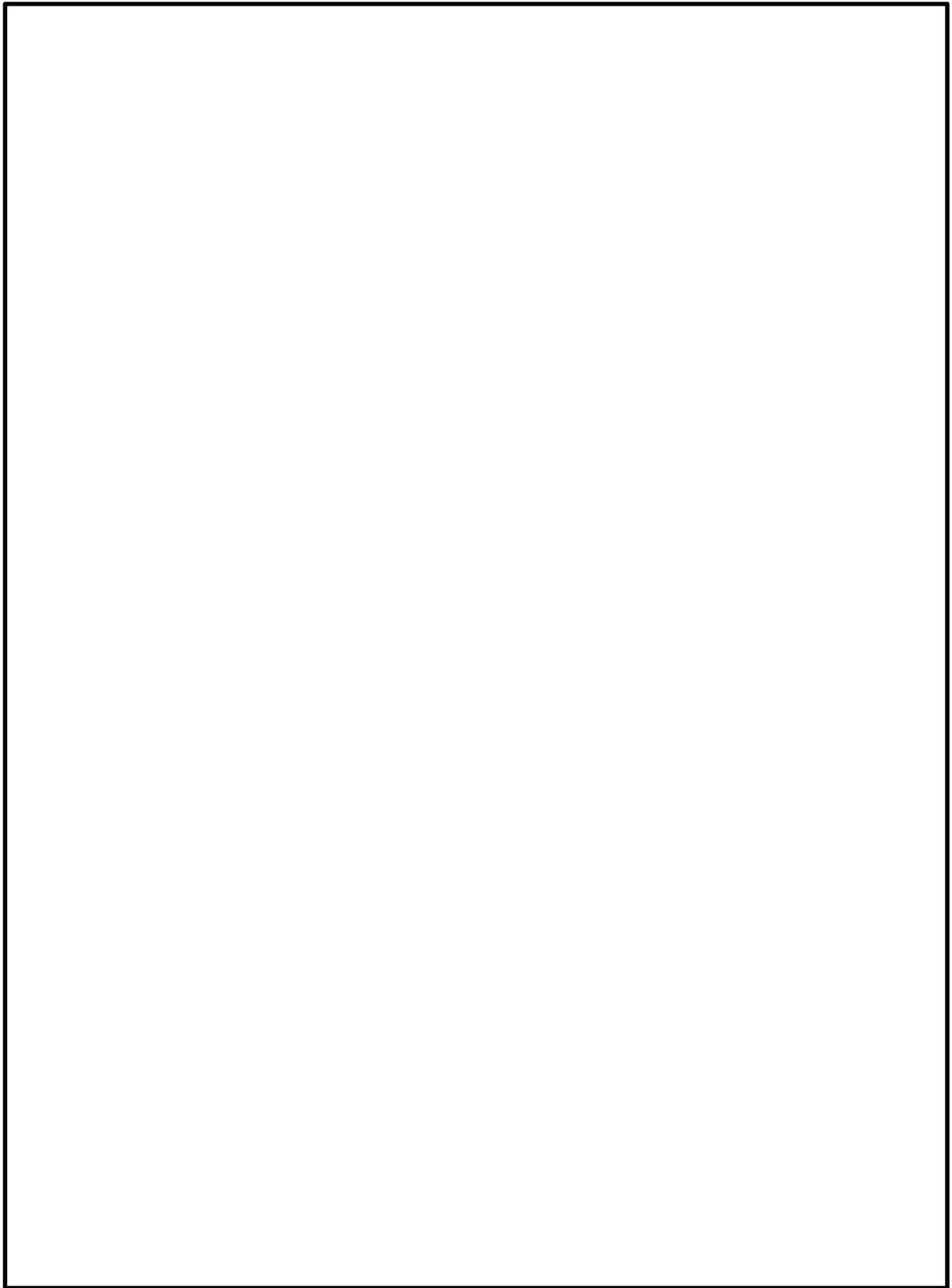


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン防護対策施設防護鋼板の構造図(2/4)
(2 D 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設(1/2))

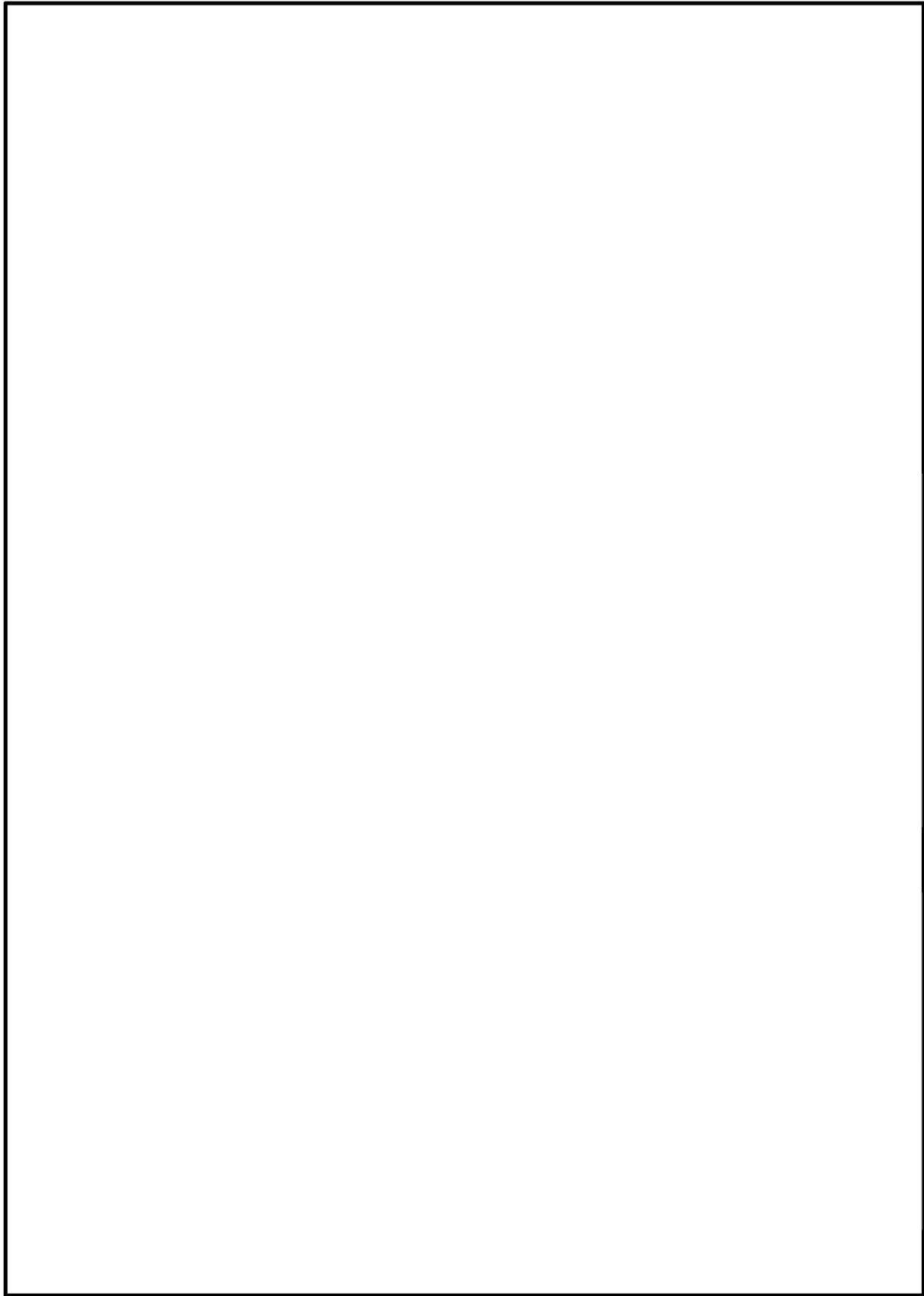


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン防護対策施設防護鋼板の割付展開図 (3/4)
(2 D非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設 (2/2))

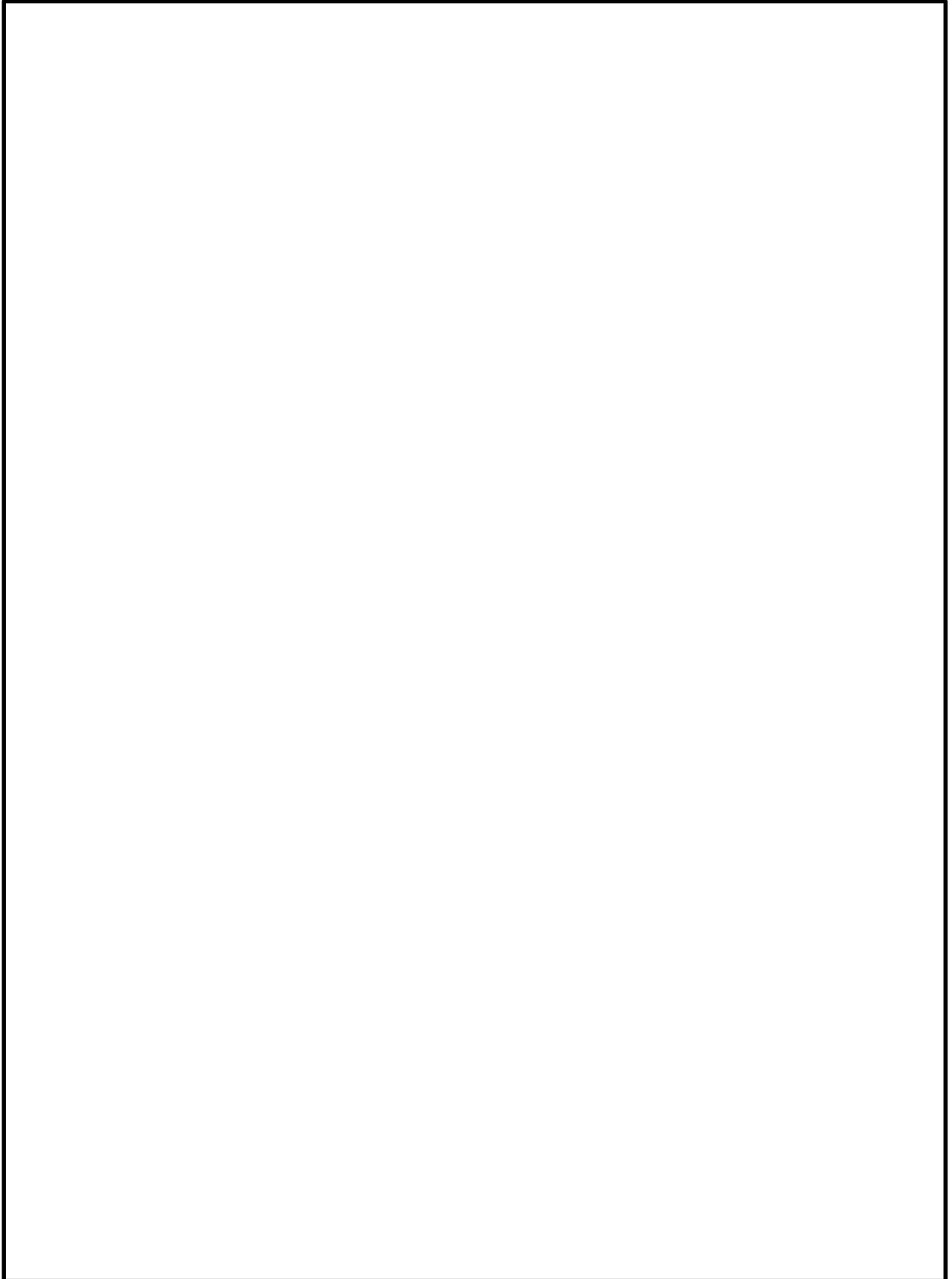


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン防護対策施設防護鋼板の割付展開図(4/4)
(高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

- (2) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構
中央制御室換気系冷凍機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。
中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の割付展開図を図 2-3 に示す。

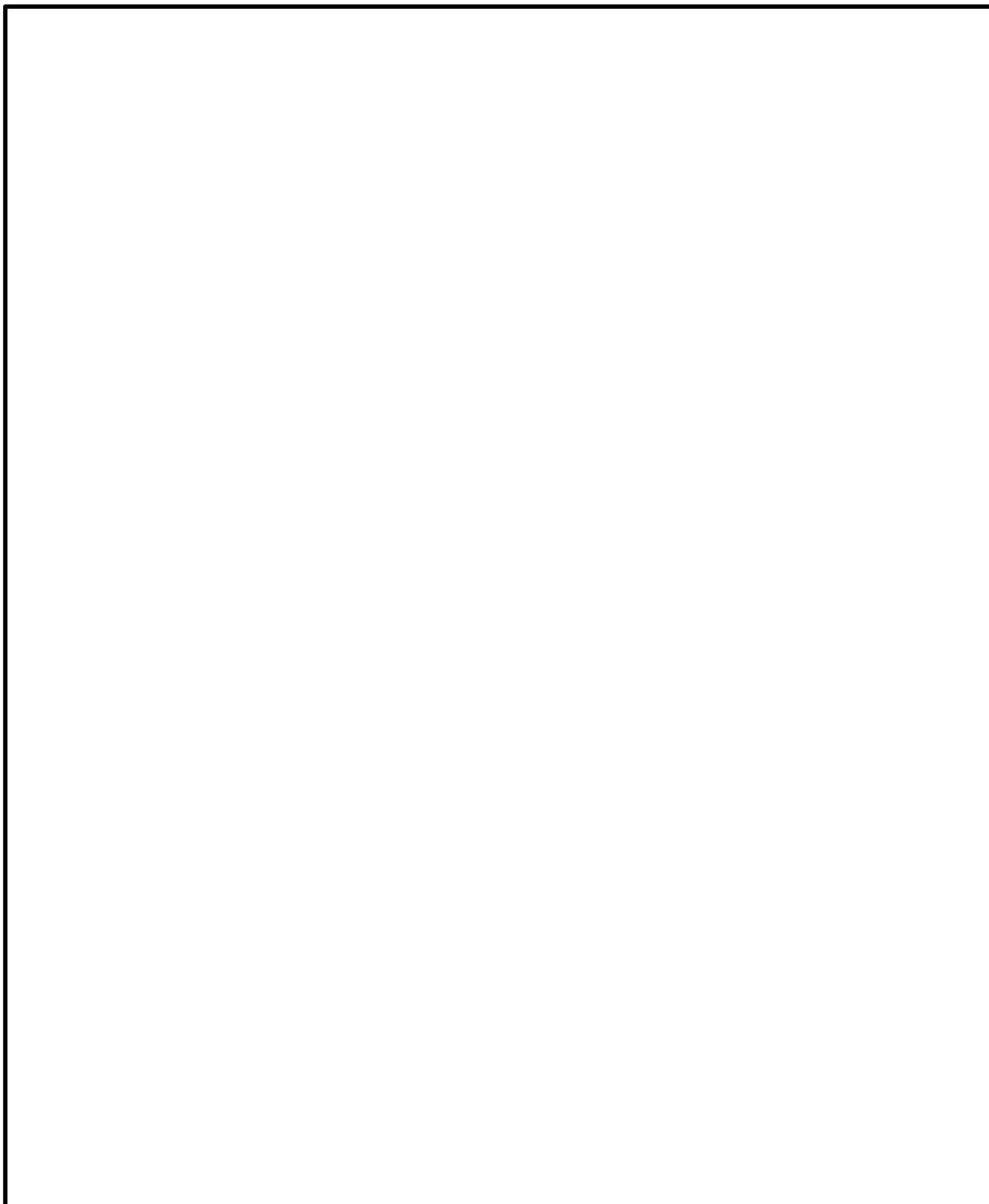


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の割付展開図(1/2)



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割付展開図(2/2)

(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壳となる。

海水ポンプエリア竜巻防護対策施設防護鋼板の割付展開図を図 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割付展開図

(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壳となる。

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割付展開図を図 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防護鋼板の割付展開図

- (5) 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割付展開図を図 2-6 に示す。

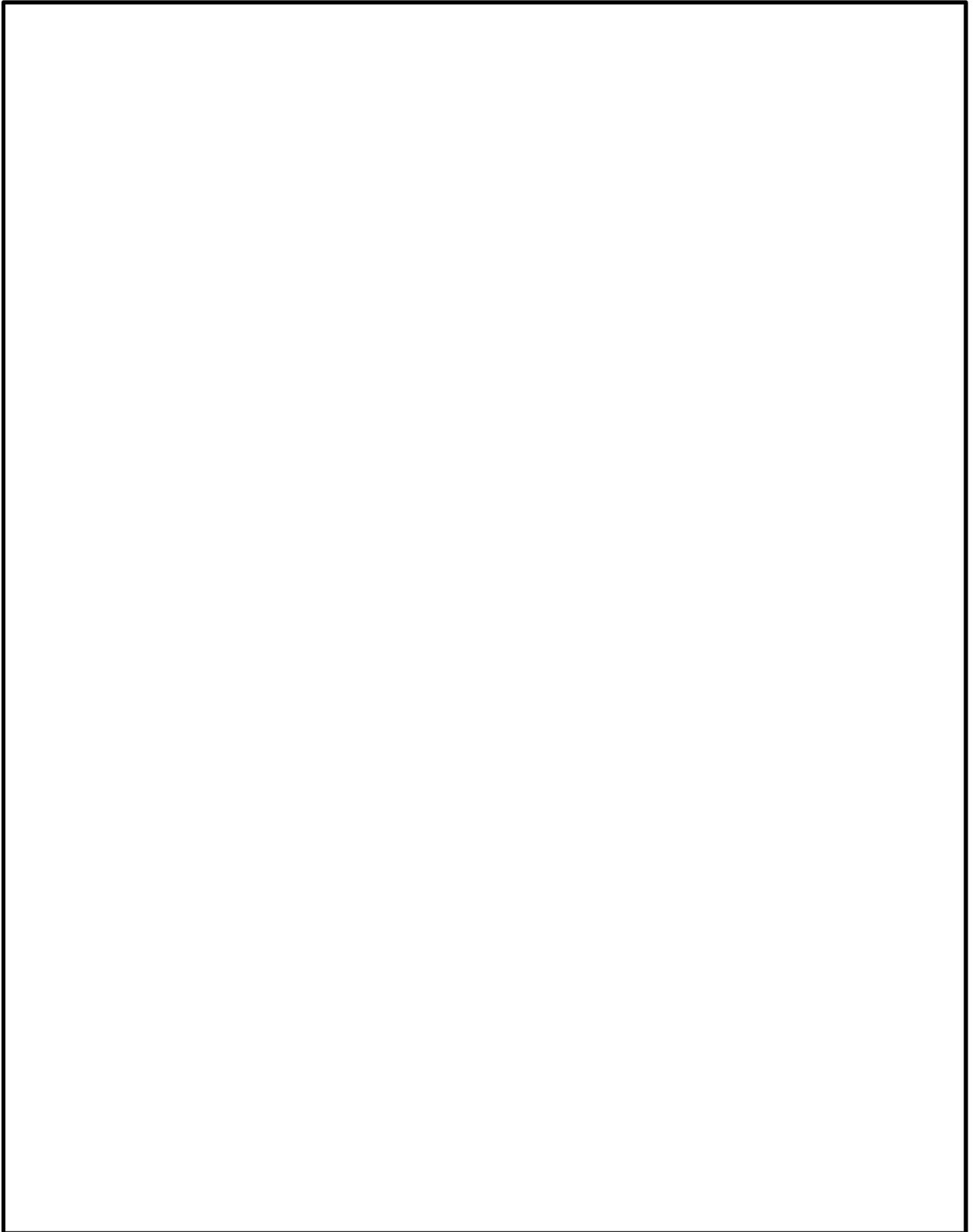


図 2-6 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設防護鋼板の割付展開図

- (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、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。
 原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設防護鋼板の割付展開図を図 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割付展開図



- (7) 原子炉建屋排気隔離弁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。
 原子炉建屋排気隔離弁竜巻防護対策施設防護鋼板の割付展開図を図 2-8 に示す。



図 2-8 原子炉建屋排気隔離弁竜巻防護対策施設防護鋼板の割付展開図

- (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
 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。
 原子炉建屋排気隔離弁竜巻防護対策施設防護鋼板の割付展開図を図 2-9 に示す。



図 2-9 原子炉建屋排気隔離弁竜巻防護対策施設防護鋼板の割付展開図

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。

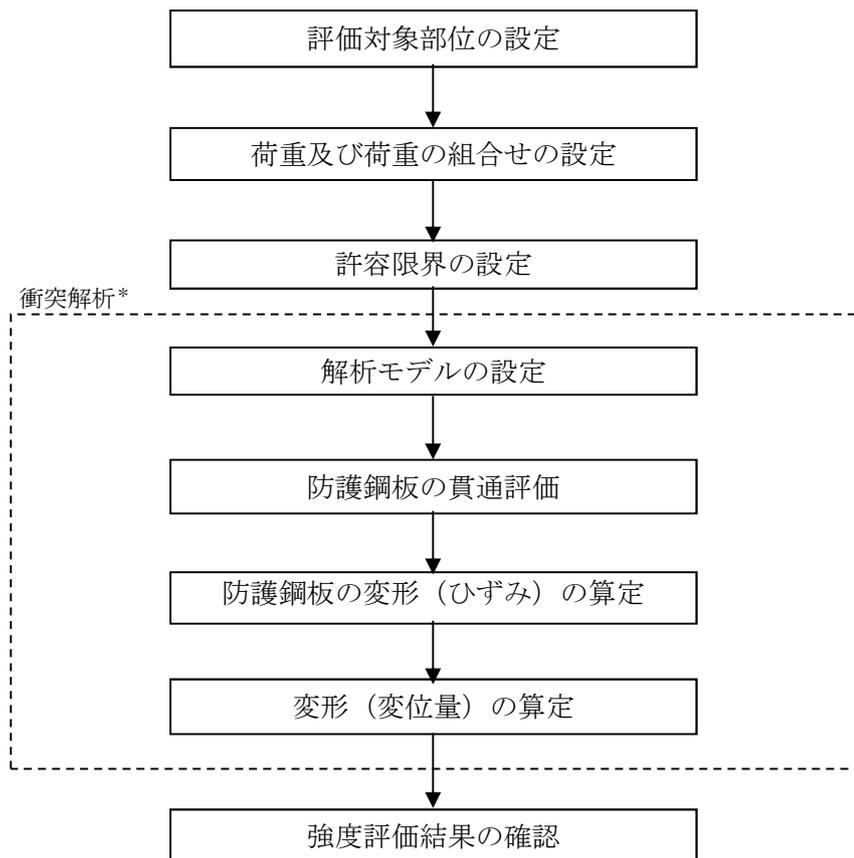
防護鋼板の評価フローを図 2-10 に示す。

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。



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 2-10 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 ²	受圧面積
C	—	風力係数
F _d	N	常時作用する荷重
G	—	ガスト影響係数
q	N/m ²	設計用速度圧
V _D	m/s	竜巻の最大風速
V _{Rm}	m/s	最大接線風速
V _T	m/s	移動速度
W _M	N	飛来物による衝撃荷重
W _W	N	風圧力による荷重
ΔP _{max}	N/m ²	最大気圧低下量
ρ	kg/m ³	空気密度

3.2 評価対象部位

防護鋼板の貫通評価として、飛来物が防護鋼板の主要部材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、解析対象部位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、貫通評価においては、評価対象となる防護鋼板のうち、柱と重なる部分を除いた有効開口部寸法が小さく、厚みが薄い箇所について飛来物の水平衝突及び鉛直衝突それぞれにおいて代表箇所を選定する。なお、防護鋼板の設計においては厚さを一律 で設計することから、有効開口部寸法が小さい箇所が代表となる。

評価対象部位を表 3-2 及び図 3-1 に示す。

表 3-2 防護鋼板の貫通評価対象部位

評価対象部位	設置方向	有効開口部寸法 縦(mm)×横(mm)×厚さ(mm)	材質
	追而		SS400



図 3-1 防護鋼板の貫通評価対象部位

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。

(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 ΔP_{max} (N/m^2)
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、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。

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

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 3-3 に示す飛来物の衝突に伴う荷重とする。

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)
鋼製材	4.2×0.2×0.3	135	51	34

c. 常時作用する荷重(F_D)

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。

(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 3-4 に示す。

表 3-4 荷重の組合せ

評価内容	荷重の組合せ
貫通評価	$W_w + W_M + F_d$

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。

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=2.0を考慮して設定する。
設定した許容限界を表3-5に示す。

表 3-5 許容限界(防護鋼板の貫通評価)

材質	破断ひずみ (真ひずみ)
SS400 (5 < t ≤ 16)	

3.5 評価方法

(1) 解析モデル

防護鋼板の貫通評価は、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。

防護鋼板の解析モデルは、貫通評価においては、評価対象となる防護鋼板のうちはり、柱と重なる部分を除いた有効開口部寸法が小さく、厚みが薄い箇所について飛来物の水平衝突及び鉛直衝突それぞれにおいて代表箇所を選定する。

防護鋼板は「追而」要素でモデル化し、境界条件は、防護鋼板の有効開口部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「追而」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。

防護鋼板及び飛来物の解析モデル図を図3-2に示す。



図 3-2 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 σ_y (MPa)	ヤング係数 E(MPa)	ポアソン比
飛来物 (鋼製材)	SS400	5を超え 16以下	245	2.05×10^5	0.3
防護 鋼板	SS400	5を超え 16以下	245	2.05×10^5	0.3

(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。

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

ここで、 $\sigma_{e,q}$ は動的応力、Aは降伏応力、Bは硬化係数、 ε_{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 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)	防護鋼板
材料	SS400	SS400
B		
n		
$D (s^{-1})$		
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 4-1 に示す。

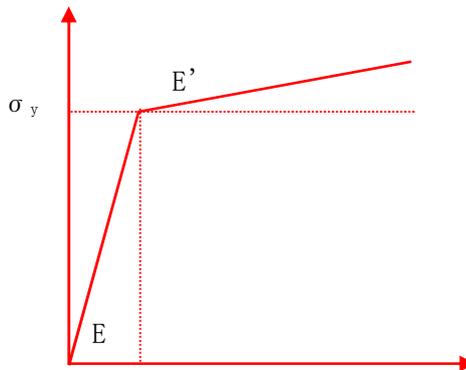


図 4-1 バイリニア型応力-ひずみ関係の概念図

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=2.0を考慮する。TFについては，防護鋼板のみ2.0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

	材質	JIS 規格値 (伸び)	TF	破断ひずみ※
防護鋼板	SS400 (5 < t ≤ 16)	0.17	2.0	

※：真ひずみ換算値

4. 評価条件

防護鋼板における「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。なお、評価に用いる防護鋼板の縦および横の寸法については、公称値を使用し、厚みについては設計確認値を使用する。

防護鋼板の貫通評価においては、はり、柱と重なる部分を除いた有効開口部寸法が小さく、厚みが薄い鋼板の中央部に衝突するケースを設定する。

解析ケースを第 4-1 表及び第 3-1 図に示す。

第 3-2 表 防護鋼板の貫通評価解析ケース

評価対象部位	飛来物の衝突方向	有効開口部寸法 縦(mm)×横(mm)×厚さ(mm)	材質
	追而		SS400



第 4-1 図 解析ケース図

5. 強度評価結果

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、設計飛来物が防護鋼板を貫通しない。

第 5-1 表 貫通評価結果

評価対象部位	解析ケース	ひずみ	
		評価結果	許容限界
	追而		

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

目次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
2.1 固縛対象設備の選定	1
2.2 固縛装置の構造	3
2.3 荷重及び荷重の組合せ	8
3. 設計方針	17
4. 評価方針	21
5. 許容限界	22
6. 強度評価方法	23
6.1 記号の定義	23
6.2 評価対象部位	27
6.3 評価方法	28
7. 適用規格	37

1. 概要

本資料は、V-1-1-2-3-3「竜巻防護に関する施設の設計方針」に示すとおり、屋外に設置する重大事故等対処設備のうち、V-1-1-2-3-2「竜巻の影響を考慮する施設及び固縛対象物の選定」の「4. 竜巻防護のための固縛対象物の選定」で選定する固縛対象物に設置する固縛装置が竜巻襲来時においても、固縛装置の構成要素が、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。）が**固縛対象**設備に作用した場合であっても、固縛状態を維持するために必要な構造強度を有することを計算により確認するための強度設計方針について説明するものである。

2. 基本方針

強度設計は、「2.1 固縛対象設備の選定」に示す設備を対象として、「2.2 固縛装置の構造」に示す固縛装置が「2.3 荷重及び荷重の組合せ」で示す設計竜巻による荷重とこれを組み合わせる荷重を考慮し、「6. 強度評価方法」で示す評価方法により「5. 許容限界」で設定する許容限界を超えない設計とする。

2.1 固縛対象設備の選定

屋外に設置する重大事故等対処設備は、V-1-1-2-別添 1「屋外に設置されている重大事故等対処設備の抽出」に示している。これらの屋外の重大事故等対処設備は、竜巻の風圧力による荷重に対しては、位置的分散を考慮した保管により機能を損なわない設計としており、それとあいまって、悪影響防止として、設計基準事故対処設備や同じ機能を有する他の重大事故等対処設備に衝突し、損傷させることのないように、浮き上がりの発生の有無、横滑り対策の要否を検討し、固縛装置が必要となる屋外の重大事故等対処設備（以下「固縛対象設備」という。）を選定する。なお、複数の固縛対象設備をコンテナ、車両等に保管している場合は、コンテナ、車両等を**収納設備として扱い、収納設備の保管単位に対して固縛対象設備を選定する。**

固縛対象設備は、以下の観点を考慮して選定する。

- ・設備の形状（受圧面積、重量、重心高さ等）
- ・保管場所又は設置状況
- ・設計竜巻による風圧力の影響の有無

固縛対象設備として抽出された屋外の重大事故等対処設備の一覧を表 2-1 に示す。

なお、屋外の常設重大事故等対処設備は、竜巻の風圧力による荷重を考慮した設計又は設置場所により影響を受けないため、固縛対象設備として選定されない。

表 2-1 屋外の重大事故等対処設備のうち評価対象とする固縛対象設備一覧

設備	保管単位	備考
可搬型代替注水大型ポンプ	台	
可搬型代替注水中型ポンプ	台	
可搬型代替注水大型ポンプ (放水用)	台	
放水砲	台	
ホイールローダ	台	
小型船舶	基	船体と船外機は、個別に保管する。
窒素供給装置	台	
窒素供給装置用電源車	台	
汚濁防止膜	台	汚濁防止膜運搬車荷台に積載して保管
泡混合器	基	
泡消火薬剤容器 (大型ポンプ用)	基	
タンクローリ	台	
可搬型代替低圧電源車	台	
可搬型整流器	基	専用ラックに収納して保管
ホース	基	専用コンテナ内に収納して保管
ホース (放水用)	台	専用コンテナ内に収納し、当該コンテナをホース展開車に積載して保管
	基	専用コンテナ内に収納して保管
ケーブル	台	専用コンテナ内に収納し、当該コンテナをホース展開車に積載して保管
	台	可搬型ケーブル運搬車に収納して保管

2.2 固縛装置の構造

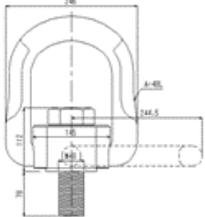
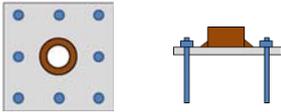
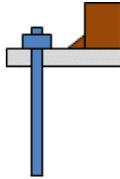
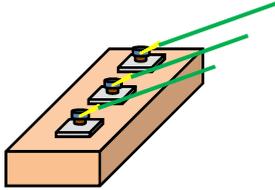
固縛装置は、固縛対象設備が受ける浮き上がり荷重や横滑り荷重を、固縛ロープの連結材、固定材（フレノリンクボルト、アンカープレート）を介してコンクリート等の基礎部で拘束する構造とする。固縛装置の構成要素を表 2-2 に示す。

車両型固縛対象設備の固縛装置の構造を表 2-3（1/2）に示す。車両型固縛対象設備は、V-1-1-6-別添 2「可搬型重大事故等対処設備の設計方針」のとおり、耐震設計においてサスペンションにより、地震に対する影響を軽減できる構造としているため、耐震設計に影響を与えることのないよう、固縛装置に耐震設計で求められる余長を持たせた設計とする。

また、車両型固縛対象設備以外の固縛対象設備の固縛装置は、車両型固縛対象設備を固縛する場合と異なり、耐震設計として、固縛対象設備の構造を期待する設備でないこと、又は保管状態にて固縛対象設備の機能維持を確認していることより、耐震設計への影響は考慮不要とし、余長を持たせた設計とはしない。なお、車両以外の固縛対象設備の一部はコンテナ及びラックに収納並びに運搬車に積載して保管するため、固縛装置は当該保管単位に対して設置するが、この場合の車両については収納設備としており、固縛装置においても余長を持たせた設計とはしないことを基本とする。

車両型固縛対象設備以外（コンテナ型固縛対象設備及び運搬車等に積載した固縛対象設備）の固縛装置の構造を表 2-3（2/2）に示す。

表 2-2 固縛装置の構成要素

固縛装置構成要素名称		概念図	用途
連結材	固縛ロープ		固縛対象設備と固縛装置の固定材をつなぎ、固縛対象設備を拘束するときに使用する。
	フレノリンクボルト		アンカープレートに取付け、リングの部分に連結材を接続し、固縛対象設備を固縛するときに使用する。
固定材	アンカープレート		基礎部を取付け、フレノリンクボルトと連結し、固縛対象設備を固縛するときに使用する。
	接着系アンカー		固定材（アンカープレート）と基礎部を定着させるために使用する。
基礎部（アンカーボルト）	スラブコンクリート		連結材及び固定材との連結により、スラブコンクリートの重量によって、固縛対象設備の浮き上がり及び横滑りを防止するために使用する。

注) 耐震設計での保管状態（収納ラック等への取付）は上記構成要素の対象外とする。

表 2-3 固縛装置の構造 (1/3)

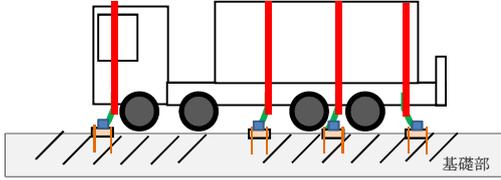
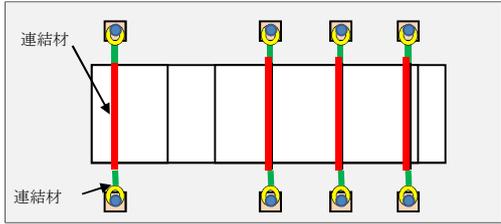
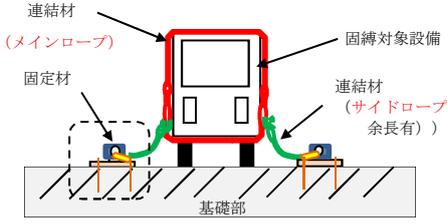
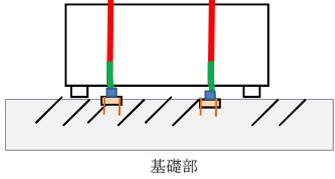
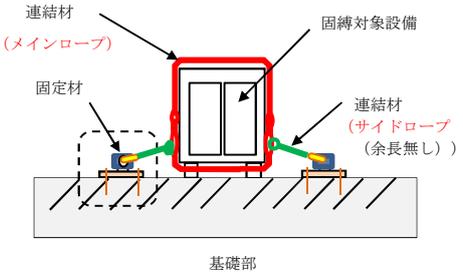
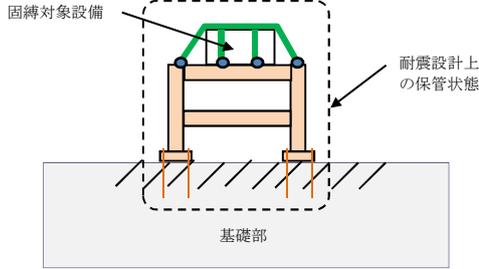
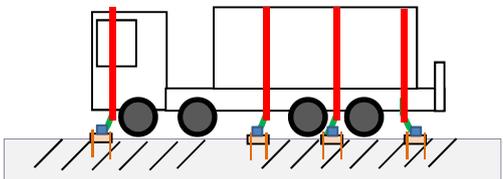
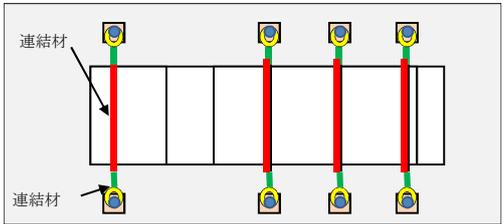
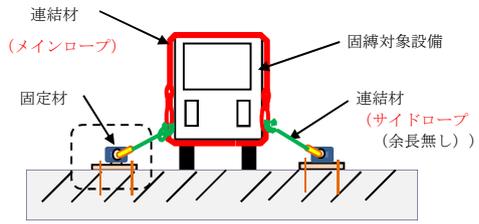
施設 名称	設計の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
固縛装置	車両型 固縛対象 設備	<p>固縛装置は、連結材、固定材及び基礎部から構成し、連結材（メインロープ）を車両型固縛対象設備に巻付け、連結材（サイドロープ）によって固定材（フレノリンクボルト）に固定することで車両を固縛する。</p> <p>車両型固縛対象設備については、連結材（サイドロープ）に余長を持たせて固縛することにより、耐震設計に影響のない設計とする。</p> <p>車両型固縛対象設備は、重大事故等発生時の初動対応時間を確保するために、固縛装置の数を可能な限り少なくすることで、機動性を確保する設計とする。</p>	 <p>(側面図)</p>  <p>(上面図)</p>  <p>(正面図)</p>

表 2-3 固縛装置の構造 (2/3)

施設 名称	設計の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
固 縛 装 置	車両型 以外の 固縛対象 設備	<p>固縛装置は、連結材、固定材及び基礎部から構成し、連結材（メインロープ）を車両型以外の固縛対象設備に巻付け、連結材（サイドロープ）によって固定材（フレノリンクボルト）に固定することで車両を固縛する。連結材には、余長を設けない設計とする。</p>	<p>固縛対象設備をコンテナに収納して保管 (収納コンテナを固縛する場合)</p>  
		<p>固縛対象設備は、重大事故等発生時の初動対応時間を確保するために、固縛装置の数を可能な限り少なくすることで、機動性を確保する設計とする。</p>	<p>固縛対象設備をラックに収納して保管 (耐震設計で保管状態を考慮している場合)</p> 
		<p>耐震設計で設定している固縛対象設備の保管状態（収納ラックに固縛対象設備を固縛して保管）</p> <p>収納ラックに固縛対象設備を固定し、ラックを基礎部に固定する。 (固定のため余長なし)</p> <p>耐震設計により収納ラックが設計されている。</p>	

NT2 補② V-3-別添 1-3 R2

表 2-3 固縛装置の構造 (3/3)

施設 名称	設計の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
固縛装置	車両型 以外の 固縛対象 設備	<p>固縛装置は、連結材、固定材及び基礎部から構成し、連結材（メインロープ）を、固縛対象設備の収納設備としての車両に巻付け、連結材（サイドロープ）によって固定材（フレノリンクボルト）に固定することで車両を固縛する。</p> <p>連結材（サイドロープ）には、余長を設けない設計とする。</p> <p>固縛対象設備は、重大事故等発生時の初動対応時間を確保するために、固縛装置の数を可能な限り少なくすることで、機動性を確保する設計とする。</p>	<p>固縛対象設備を運搬車など積載して保管 (収納設備としての車両を固縛の場合)</p>  <p>基礎部</p> <p>(側面図)</p>  <p>連結材</p> <p>連結材</p> <p>(上面図)</p>  <p>連結材 (メインロープ)</p> <p>固定材</p> <p>固縛対象設備</p> <p>連結材 (サイドロープ (余長無し))</p> <p>基礎部</p> <p>(正面図)</p>

NT2 補② V-3-別添 1-3 R2

2.3 荷重及び荷重の組合せ

固縛対象設備の固縛装置の強度評価に用いる荷重として、竜巻の風荷重によって、固縛対象設備が浮き上がり又は横滑りを起こした場合に、固縛装置に作用する荷重を設計荷重とする。設計荷重は、固縛装置が浮き上がり又は横滑りの挙動を拘束するために発生する荷重であり、固縛対象設備に最大水平風速による風荷重が作用したケースを考慮して設定する。また、余長を設けた固縛装置には、横滑りを始め、移動量が設計余長を超えると連結材が展張し、固縛装置に衝撃荷重が作用するため、この衝撃荷重も設計荷重として考慮する。なお、連結材の展張以後は、竜巻の風速場の特性を考えると、竜巻の風荷重が風向きを変えながらも固縛対象設備に持続的に作用し続けるため、**連結材も展張し続け竜巻が通過するまで固縛対象設備は、円弧を描くように環状に移動すると考えられるため、風荷重が時速荷重として継続して作用する。**また、竜巻の最大水平風速時に浮き上がり及び横滑りの両方が発生する固縛対象設備については、各評価対象部位に対して、両方の荷重状態を比較し大きい荷重を設計荷重とする。

浮き上がりに伴い固縛装置に作用する荷重の算出については、空力パラメータから算出した揚力が自重よりも大きく、浮き上がると判断される固縛対象設備に対して行う。

横滑りに伴い固縛装置に作用する荷重の算出については、固縛対象設備が横滑りによって移動した場合に、**設計基準事故対処設備（防護対象施設）**及び他の重大事故等対処設備との間に障害物がないために衝突し、悪影響を及ぼす可能性がある固縛対象設備に対して行う。

竜巻の風速としては、設計竜巻の最大風速 $V_D=100$ m/sを使用することとする。

なお、設計竜巻の風速場モデルにフジタモデルを適用するため、固縛対象設備に作用する最大水平風速 V_{SA} は、流入層の影響を考慮した水平風速となる。流入層とは、地面付近において地面との摩擦により低下した遠心力と圧力分布のバランスが崩れ、流体が竜巻中心方向の低圧部に引き込まれることにより形成されるもので、摩擦の影響が及ぶ範囲のみで形成される。したがって、流入層に配置される固縛対象設備に作用する風速は、地面からの高さに依存する。評価条件を表 2-4 に示す。

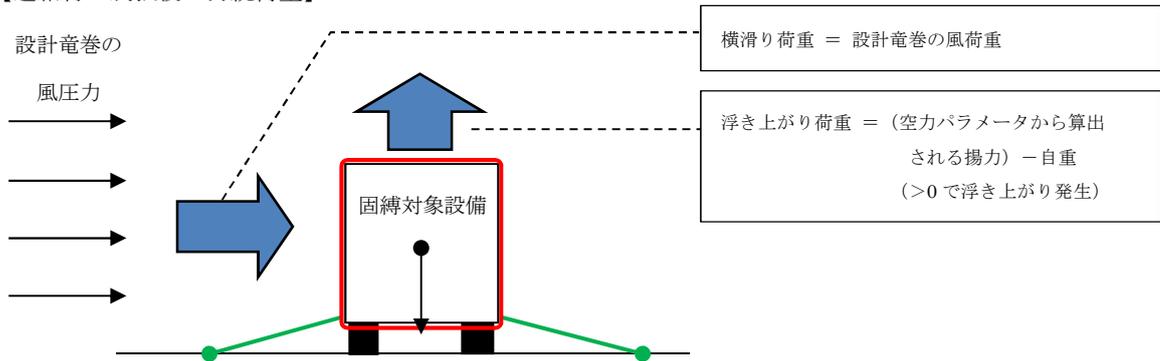
表 2-4 設計竜巻の評価条件

最大風速 V_D (m/s)	最大接線風速 V_{Rm} (m/s)	最大接線風速 の生じる半径 R_m (m)	流入層高 H_i (m)	空気密度 ρ (kg/m ³)	ガスト 影響係数 G (-)
100	85	30	15	1.22	1.0

設計竜巻の風荷重は、固縛対象設備の形状及び風荷重の作用方向による見付面積に応じて異なるため、固縛対象設備に最も厳しくなる方向の風圧力に対して、荷重を設定する。一方、風荷重は、固縛対象設備の外面に沿って作用することには変わらず、見付面積に直角方向に作用する時が、**作用する風圧力が全て固縛対象設備に作用することから、最も厳しい荷重状態となるため、この時の荷重を設定する。**

設計荷重の考え方の概念図を図 2-1 に示す。

【連結材の展張後の持続荷重】



【連結材の余長展張時の衝撃荷重】

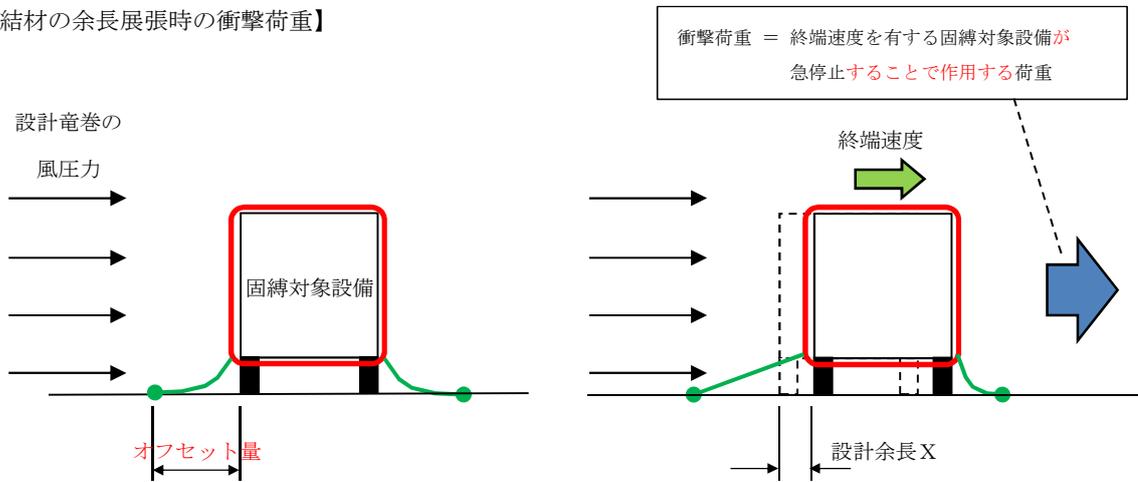


図 2-1 設計荷重の考え方の概念図

(1) 荷重の種類

- a. 常時作用する荷重 (F_d)

常時作用する荷重は、持続的に生じる荷重であり、自重とする。

- b. 風圧力による荷重 (W_w)

風圧力による荷重は、固縛対象設備に発生し、連結材、固定材（フレノリンクボルト及びアンカープレート）を介して基礎（アンカーボルト）に作用する。

竜巻による最大風速は、一般的には水平方向の風速として設定され、これにより固縛対象設備は横滑りを生じるような力を受けるが、鉛直方向に対しても、風圧力により固縛対象設備に揚力が発生し、浮き上がりが生じるような力を受けるため、鉛直方向の荷重についても考慮した設計とする。

(2) 竜巻の風圧力による荷重の算定

竜巻の風圧力による荷重を考慮し、荷重の算出式を以下に示す。

- a. 記号の定義

荷重の算出に用いる記号を表 2-5 に示す。

表 2-5 荷重の算出に用いる記号

記号	単位	定義
V_D	m/s	設計竜巻の最大風速
V_{Rm}	m/s	設計竜巻の最大接線風速
V_{SA}	m/s	固縛対象設備に作用する最大水平風速
R_m	m	最大接線風速の生じる半径
H_i	m	流入層高さ
$C_{Di} (i=1, 2, 3)$	—	固縛対象設備の形状に応じた抗力係数
$A_i (i=1, 2, 3)$	m ²	固縛対象設備の各面の投影面積
W	m	固縛対象設備の幅
L	m	固縛対象設備の長さ
H	m	固縛対象設備の高さ
m	kg	固縛対象設備の質量
g	m/s ²	重力加速度 ($g=9.80665$)
ρ	kg/m ³	空気密度
q	N/m ²	設計用速度圧
G	—	ガスト影響係数
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
A	m ²	固縛対象設備の最大受圧面積
$V_{SAS, F}$	m/s	固縛対象設備が浮き上がりを開始する風速
$V_{SAS, S}$	m/s	固縛対象設備が横滑りを開始する風速
$C_D A/m$	m ² /kg	空力パラメータ
μ_s	—	固縛対象設備と路面の静摩擦係数
μ_d	—	固縛対象設備と路面の動摩擦係数
X	mm	固縛装置の設計余長
L_{OF}	mm	固縛対象設備と固縛装置（アンカー点）のオフセット量
n	箇所	固縛装置の箇所数
n'	個	固縛装置 1 箇所あたりの固定材の配置数
k	N/m	連結材の等価剛性 ($=E_{RP} \cdot A_{RP} / L_{RP}$)
E_{RP}	N/mm ²	連結材の弾性係数
A_{RP}	mm ²	連結材の断面積
L_{RP}	m	連結材の長さ
F_d	kN	固縛対象設備の自重
$F_{L, m}$	kN	固縛対象設備に作用する保守的に設定した揚力
P_v	kN	固縛対象設備に作用する浮き上がり荷重
P_H	kN	固縛対象設備に作用する横滑り荷重
P_i	kN	固縛対象設備に作用する衝撃荷重

b. 浮き上がり荷重

(a) 浮き上がりを考慮する対象設備の選定

浮き上がりを考慮する対象設備の選定に当たっては、固縛対象設備に対する浮き上がり荷重の発生の有無により抽出する。

(b) 浮き上がり荷重

固縛対象設備の浮き上がり時に発生する荷重 P_V は、設計竜巻により当該固縛対象設備に発生する鉛直力とする。

浮き上がり荷重は、固縛対象設備の形状による空力パラメータを用いて算出される揚力が自重を上回る（＝空力パラメータから算出される揚力－自重 > 0 ）場合に上向きの力として固縛対象設備に作用する。

固縛対象設備に作用する揚力は、揚力係数の代わりに保守的な設定となる抗力係数を用いることにより保守的に設定された揚力 $F_{L, m}$ を用い、以下の式にて算出する。

$$F_{L, m} = \frac{1}{2} \rho \cdot V_{SA}^2 \cdot C_D A$$

ρ : 空気の密度

V_{SA} : 固縛対象設備に作用する設計竜巻の最大水平風速

$C_D A$: 抗力係数と見付面積の積の平均値

保守的な揚力を空力パラメータ $C_D A/m$ を用いた式に展開すると、浮き上がり荷重 P_V は次に示す式により算出する。

$$\begin{aligned} P_V &= F_{L, m} - m \cdot g = \frac{1}{2} \rho \cdot V_{SA}^2 \cdot C_D A - m \cdot g \\ &= m \left(\frac{1}{2} \rho \cdot V_{SA}^2 \cdot \frac{C_D A}{m} - g \right) \end{aligned}$$

なお、空力パラメータの算出等については「東京工芸大学，“平成 21～22 年度原子力安全基盤調査研究（平成 22 年度）竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究”，独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究成果報告書，平成 23 年 2 月」に基づき、以下の $C_D A/m$ として算出する。

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{0.33 (C_{D1} A_1 + C_{D2} A_2 + C_{D3} A_3)}{m}$$

c. 横滑り荷重

(a) 横滑りを考慮する対象設備の選定

横滑りを考慮する対象設備の選定に当たっては、固縛対象設備が横滑りにより移動した場合、防護対象施設及び他の重大事故等対処設備との間に障害物がないために衝突し、悪影響を及ぼす可能性がある固縛対象設備を抽出する。

固縛対象設備が保管される可搬型重大事故等対処設備保管場所（西側）又は可搬型重大事故等対処設備保管場所（南側）においては、防護対象施設及び他の重大事故等対処設備と互いに衝突する可能性があるため、全固縛対象設備を、横滑りを考慮する対象設備として選定する。

(b) 横滑りに伴い発生する荷重

横滑りに伴い発生する荷重 P_H は、設計竜巻の風圧力による荷重が当該固縛対象設備に作用する水平力とし、「建築基準法施行令」及び「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説」に準拠して、次に示すとおり W_w とする。

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

q : 設計用速度圧

G : ガスト係数 (=1.0)

C : 風力係数

A : 受圧面積 (固縛対象設備の見付面積の最大値)

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

ρ : 空気の密度

V_{SA} : 固縛対象設備に作用する最大水平風速

d. 衝撃荷重

(a) 衝撃を考慮する対象設備の選定

衝撃を考慮する対象設備の選定に当たっては、固縛装置の余長の有無により抽出する。また、余長を有していても風荷重の方向によって横滑り等の移動をしない場合もあり、当該ケースについては検討ケースとはしない。

(b) 固縛装置作動に伴い発生する衝撃荷重

固縛装置が作動（余長が展張）することで、固縛対象設備が急停止し、それに伴い、固縛装置には衝撃荷重 P_i が発生する。図 2-2 に示すように、固縛対象設備が作動直前に有していた速度 v_{SA} が、急停止により 0 になったとし、連結材の弾性的に拘束力を生じる性質から、連結材をバネとしたモデルを用いて、損失した運動量が衝撃荷重になったとして、以下の手順によって衝撃荷重 P_i を算出する。

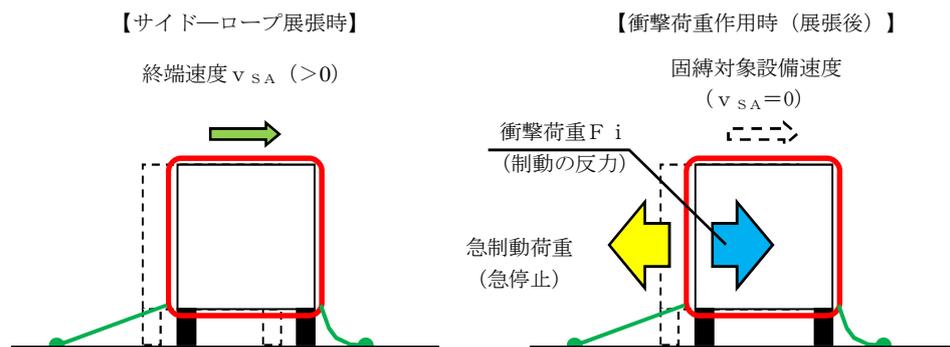


図 2-2 連結材の展張以後の固縛対象設備の概要モデル

イ. 固縛対象設備の挙動開始風速の算出

固縛対象設備が浮き上がり又は横滑りを始める時の風速を算出する。

浮き上がり開始風速 $V_{SAS, F}$ は、浮き上がり荷重 P_V が0となる時の風速であり、以下の式によって算出する。

$$V_{SAS, F} = \sqrt{\frac{2 \cdot g}{\rho \cdot \frac{C_D A}{m}}}$$

横滑り開始風速 $V_{SAS, S}$ は、風圧力による荷重と静止摩擦力が釣り合った時の風速であり、以下の式によって算出する。

$$V_{SAS, S} = \sqrt{\frac{2 \mu_s \cdot g}{\rho \cdot \left(\frac{G C A}{m} + \mu_s \frac{C_D A}{m} \right)}}$$

μ_s : 固縛対象設備の静摩擦係数 (=0.44)

(道路構造令の記載数値を参考として、保守的に 20km/h の路面とタイヤのすべり摩擦係数を静摩擦係数として設定)

ロ. 固縛装置の余長がなくなる時点での終端速度の算定

固縛対象設備が挙動を開始してから連結材 (サイドロープ) が展張する時点での固縛対象設備が持つ速度である終端速度 $v_{SA, OT}$ を算出する。以下横滑りに対して、算定例を記載する。

固縛対象設備が横滑りを始めた風速から最大風速となる風速を、設計竜巻の風速分布曲線より、保守性を考慮して線形近似した以下の式を使用する。

$$V'_{SA} = a t + b \quad \dots \quad \text{①}$$

V'_{SA} : t 秒後に固縛対象設備が受ける竜巻の風速

a : 風速の近似式の定数

b : 風速の近似式の定数 (=滑り出し風速)

停止している固縛対象設備が動き出し、設計余長分を移動した時の加速度 a_{SA} を、荷重と加速度の関係から算出する。

$$a_{SA} = \frac{F}{m} = \frac{W - F_{fd}}{m} = \frac{1}{2} \rho \frac{G \cdot C \cdot A}{m} V'_{SA}{}^2 - \mu_d \cdot g \quad \dots \quad \text{②}$$

F_{fd} : 固縛対象設備に作用する動摩擦力

μ_d : 固縛対象設備の動摩擦係数 (=0.29)

(道路構造令の記載数値を参考として、保守的に 120km/h の路面とタイヤのすべり摩擦係数を動摩擦係数として設定)

ここで、Kを以下に示すように置いて、②式の v'_{SA} に①式を代入し、 t に対する式として整理すると、③式となる。

$$K = \frac{1}{2} \rho \frac{G \cdot C \cdot A}{m}$$

$$a_{SA} = K \cdot a^2 \cdot t^2 + 2K \cdot a \cdot b \cdot t + (K \cdot b^2 - \mu_d \cdot g) \dots \textcircled{3}$$

固縛対象設備の速度 v_{SA} は、加速度 a_{SA} を時間 t で積分し、初期条件を考慮することで④式となる。(初期条件 $t=0$ のとき、 $v_{SA}=0$)

$$v_{SA} = \int a_{SA} dt$$

$$= \frac{1}{3} K \cdot a^2 \cdot t^3 + K \cdot a \cdot b \cdot t^2$$

$$+ (K \cdot b^2 - \mu_d \cdot g) t \dots \textcircled{4}$$

固縛対象設備の移動距離 x_{SA} は、速度 v_{SA} を時間 t で積分し、初期条件を考慮すると以下の式となる。(初期条件 $t=0$ のとき、 $x_{SA}=0$)

$$x_{SA} = \int v_{SA} dt$$

$$= \frac{1}{12} K \cdot a^2 \cdot t^4 + \frac{1}{3} K \cdot a \cdot b \cdot t^3$$

$$+ \frac{1}{2} (K \cdot b^2 - \mu_d \cdot g) t^2 \dots \textcircled{5}$$

固縛対象設備の移動距離 x_{SA} が設計余長 X となるケースとして、⑤式を t について解くと、滑り始めてから固縛装置が作動するまでの時間 t_i が算出できる。

④式に t_i を代入することで、固縛装置が作動する時点での固縛対象設備の速度として、終端速度 $v_{SA,OT}$ が算出される。

ハ. 固縛装置に作用する衝撃荷重の算定

固縛対象設備の停止時に、固縛装置に作用する衝撃荷重は、停止に伴う衝撃荷重によって連結材に作用する張力に加え、風圧力及び動摩擦力による荷重 F_i' を静荷重として、連結材張力による衝撃荷重 F_i 算出後に加算する。固縛対象設備が有する運動量は $m v_{SA}$ である。固縛装置が作用し始めて Δt の間に停止したとすると、連結材に発生する衝撃荷重 F_i と運動量の関係は、⑥式に示すとおりとなる。

$$\int_0^{\Delta t} F_i(t) dt = m \cdot v_{SA} \dots \textcircled{6}$$

固縛装置の連結材は、弾性的に拘束力を生じる性質を有しており、バネ定数 k を有するバネとして考え、連結材に弾性的な力が作用し、固縛対象設備の速度が0になったとすると、振幅を B として、連結材の変位 x_{RP} は、⑦式で表される。

$$x_{RP} = B \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t\right) \quad \dots \textcircled{7}$$

また、フックの法則により連結材に発生する衝撃荷重 F_i は⑧式となる。

$$F_i(t) = k \cdot x_{RP} = k \cdot B \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t\right) \quad \dots \textcircled{8}$$

k : 連結材のバネ定数 (連結材の等価剛性)

⑧式を⑥式に代入して積分し、初期条件を考慮して、振幅について解くと⑨式となる。(初期条件: $t=0$ のとき $v_{SA}=v_{SA,OT}$, $t=\Delta t$ のとき $v_{SA}=0$)

$$B = v_{SA,OT} \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} \quad \dots \textcircled{9}$$

また、衝撃荷重 F_i は、⑧式の正弦関数が 1 のときに最大値 ($=k \cdot B$) となり、連結材の変位も最大となる。その時間 t_i' は、以下の式となる。

$$t_i' = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} \quad \dots \textcircled{10}$$

さらに、風荷重と動摩擦力の差分による静荷重 F_i' が作用する。固縛対象設備に作用する風速は、①式に t_i を代入して算出する。

$$V''_{SA} = a \cdot t_i + b$$

$$F_i' = W_W - F_{fd}$$

$$= \frac{1}{2} \rho \left(\frac{G \cdot C \cdot A}{m} + \frac{C_D A}{m} \right) V''_{SA}{}^2 - \mu_d \cdot g$$

固縛装置作動により固縛対象設備の急停止に伴う荷重は、衝撃荷重 F_i に加えて静荷重 F_i' を加算した荷重とし、衝撃荷重 P_i とする。

(3) 荷重の組合せ

固縛対象設備に作用する荷重は、常時作用荷重 (F_d)、風荷重による浮き上がり荷重 (P_V)、横滑り荷重 (P_H) 及び衝撃荷重 (P_i) を考慮する。

この荷重及び荷重の組合せを表 2-6 「固縛装置の荷重の組合せ」に示す。

表 2-6 固縛装置の荷重の組合せ

強度評価の対象施設	評価内容	荷重の組合せ
固縛装置	構造強度	$F_d + P_v$ 又は $F_d + P_H$ 又は $F_d + P_i$ (固縛対象設備に作用する荷重)

(4) 設計荷重の選定

設計荷重の選定に当たっては、浮き上がりに伴い発生する荷重、横滑りに伴い発生する荷重及び固縛装置が挙動を停止させることにより発生する衝撃荷重を考慮し、評価対象部位に対してより厳しい荷重を設計荷重とする。

3. 設計方針

固縛対象設備に風圧力による荷重が作用すると、固縛装置に風荷重に相当する荷重が伝わり、浮き上がり荷重又は横滑り荷重が作用し、固縛対象設備は移動しようとする。連結材（サイドロープ）に余長の有無により、移動が拘束される場合と連結材（サイドロープ）の展張までは移動できる場合があるが、固縛装置を構成している連結材は、柔軟な挙動ができる部材を選定しているため、固縛対象設備に作用する荷重に伴い、連結材には引張荷重が伝達されることは同様である。なお、連結材（サイドロープ）に余長を持たせた固縛装置は、固縛対象設備の移動に伴い連結材が緊張状態になる前は、固縛装置に有意な荷重は発生しない。

以上により、固縛装置の強度設計においては、構成要素ごとに強度評価を実施する。

固縛装置は、表 2-2 に示す構成要素ごとに適切な裕度（安全率）を確保する定格荷重を定め、固縛装置に作用する荷重以上の耐力を持つ構成要素を整理すると、連結材の余長の有無に違いはあるが構成要素は同一で、強度評価の方法に関しても同じであり、表 3-1 に示すとおりとする。

評価上最も裕度の小さい固縛装置の選定及びその固縛装置に対する強度評価について、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」に示す。

「2.1 固縛対象設備の選定」にて選定された固縛対象設備について、固縛装置の対策目的及び型式（構成要素の組合せ）を表 3-2 に示す。

表 3-1 固縛装置の構成

型式	連結材	固定材	基礎部（アンカーボルト）
A	固縛ロープ （余長あり）	フレノリンク ボルト	接着系アンカーボルト
B	固縛ロープ （余長なし）	フレノリンク ボルト	接着系アンカーボルト

表 3-2 固縛装置の対策目的及び型式(1/3)

区分	固縛対象設備 設備名称	保管に関する事項			固縛装置対策目的		備考
		保管 単位	保管状態の特記事項	保管場所*1	横滑り	浮き 上がり	
車両 型	可搬型代替注水大型ポンプ	台	—	西側 南側	○	○*2	有
	可搬型代替注水大型ポンプ (放水用)	台	—	西側 南側 (予備)	○	○*2	有
	可搬型代替注水中型ポンプ	台	—	西側 南側	○	○*2	有
	可搬型代替低圧電源車	台	—	西側 南側	○	○	有
	タンクローリ	台	—	西側 南側 (予備)	○	○	有
	窒素供給装置	台	車両搭載型	西側 南側 (予備)	○	○*2	有
	窒素供給装置用電源車	台	—	西側 南側 (予備)	○	○	有

注記 *1：保管場所は以下を示す。

西側：可搬型重大事故等対処設備保管場所（西側），南側：可搬型重大事故等対処設備保管場所（南側）

*2：浮き上がりは生じるが，余長が展張することはないため，固縛装置に浮き上がり荷重は作用しない。

表 3-2 固縛装置の対策目的及び型式(2/3)

区分	固縛対象設備		保管に関する事項			固縛装置対策目的		備考
	設備名称	保管単位	保管状態の特記事項	保管場所*	横滑り	浮き上がり	余長有無	
車両型以外	ホイールローダ	台	—	西側 南側 (予備)	○	○	有	
	ホース	基	ホースを収納した 専用コンテナで保管	西側 南側	○	○	無	
		台	ホースを収納した 専用コンテナをホース 展張車に積載して保管	西側 南側	○	○	有	ホース運搬の 運用性を考慮して 余長を設定する。
	ホース (放水用)	基	ホースを収納した 専用コンテナで保管	西側 南側 (予備)	○	○	無	
		台	ホースを収納した 専用コンテナをホース 展張車に積載して保管	西側 南側 (予備)	○	○	有	ホース運搬の 運用性を考慮して 余長を設定する。
	放水砲	台	—	西側 南側 (予備)	○	○	無	
	泡混合器	基	—	西側 南側 (予備)	○	○	無	
	泡消火薬剤容器 (大型ポンプ用)	基	—	西側 南側 (予備)	○	○	無	

注記 * : 保管場所は以下を示す。

西側 : 可搬型重大事故等対処設備保管場所 (西側) , 南側 : 可搬型重大事故等対処設備保管場所 (南側)

表 3-2 固縛装置の対策目的及び型式(3/3)

区分	固縛対象設備		保管に関する事項			固縛装置対策目的		余長 有無	備考
	設備名称	保管 単位	保管状態の特記事項	保管場所*	横滑り	浮き 上がり			
車両 型 以外	ケーブル	台	ケーブルを収納した 可搬型ケーブル運搬車 に積載して保管	西側 南側	○	○	無		
	可搬型整流器	基	専用ラックに収納して 保管	西側 南側	○	○	無	耐震設計において 保管状態を考慮して 設計している。	
	汚濁防止膜	台	汚濁防止膜運搬車の荷 台に積載して保管	西側 南側（予備）	○	○	無		
	小型船舶（船外機）	基	専用ラックに収納して 保管	西側 南側（予備）	○	○	無	耐震設計において 保管状態を考慮して 設計している。	
	小型船舶（船体）	基	専用架台に積載して保 管	西側 南側（予備）	○	○	無		

注記 *：保管場所は以下を示す。

西側：可搬型重大事故等対処設備保管場所（西側），南側：可搬型重大事故等対処設備保管場所（南側）

4. 評価方針

固縛装置の強度評価は、設計荷重が固縛装置に作用することにより、評価対象部位にかかる荷重及び応力等が、「5. 許容限界」に示す許容限界に収まることを、「6. 強度評価方法」に示す方法により確認する。

固縛装置の強度評価においては、その構造を踏まえ、「2.3 荷重の及び荷重の組合せ」に示す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。

(1) 強度評価方針

固縛装置の強度評価フローを図 4-1 に示す。固縛装置の強度評価においては、その構造を踏まえ、設計竜巻の風圧力による荷重が固縛対象設備に作用した場合に固縛装置を構成している連結材、固定材及び基礎部（アンカーボルト）に作用する荷重、応力等が「5. 許容限界」にて示すそれぞれの許容限界以下であることを確認する。

なお、強度評価を行うことを基本とするが、耐震設計において固縛対象設備の保管状態を考慮したうえで、耐震評価結果として機能維持が確認できている場合は、耐震評価結果よりも設計竜巻の風荷重が小さいことを確認することで、設計竜巻の風圧力による荷重によって悪影響を及ぼすことがないと評価する。

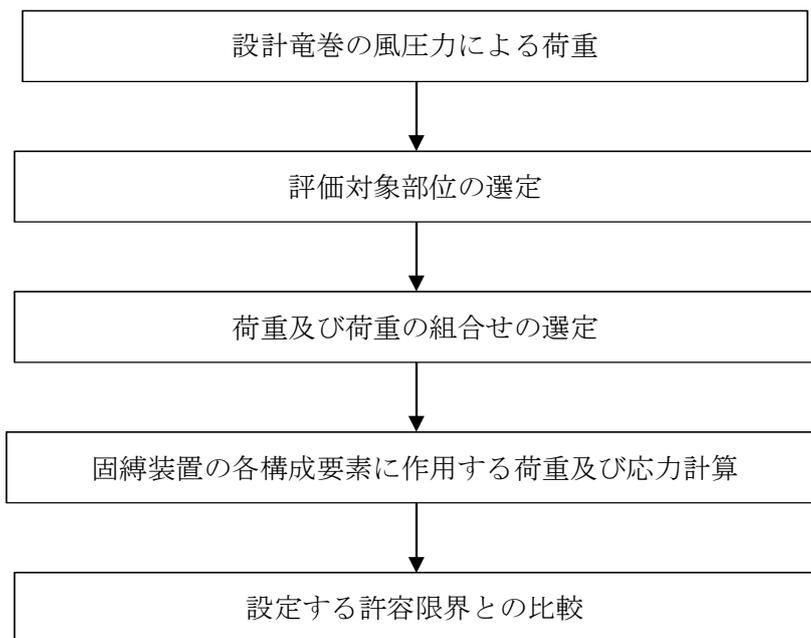


図 4-1 固縛装置の強度評価フロー

5. 許容限界

固縛装置の許容限界は、「6.2 評価対象部位」にて設定している評価対象部位ごとに、評価内容に応じて設定する。

固縛装置に要求される機能は、竜巻により設計荷重を受けた固縛対象設備に浮き上がり又は横滑りが発生した場合であってもその移動を制限し、**防護対象施設**や同じ機能を有する他の重大事故等対処設備に衝突することを防止すること（悪影響防止）である。そのため、竜巻による固縛対象設備の浮き上がり又は横滑りによる移動を制限する際に、固縛装置に作用する荷重に対して、固縛状態を維持することが求められる。そこで、固縛装置の許容限界としては、終局耐力を適用し、**許容限界以下であり、固縛状態を維持するために必要な強度を有する**設計とする。

ただし、取替えが容易にできない基礎部（アンカーボルト）については、竜巻襲来時に永久変形を生じさせないために、許容限界として降伏耐力又は短期許容応力度を適用することとする。なお、発電所敷地内に竜巻が発生した場合は、事象収束後、設備の損傷の有無及び竜巻の規模を確認し、損傷が確認された場合の処置については、保安規定に定める。

(1) 連結材

固縛に必要となる連結材（**メインロープ及びサイドロープ**）については、設計竜巻による荷重に対し、連結材の破断が生じない設計とする。

このため、当社がその妥当性を確認したメーカ提示値の引張強度を許容限界とする。

(2) 固定材

a. フレノリンクボルト

固定材のうち、フレノリンクボルトについては、設計竜巻による荷重に対し、フレノリンクボルトの破断が生じない設計とする。

このため、当社がその妥当性を確認したメーカ提示値の使用荷重に対し、安全係数を考慮した値を許容限界とする。

b. アンカープレート

固定材のうち、アンカープレートについては、設計竜巻による荷重に対し、鋼材の破断が生じない設計とする。

このため、「鋼構造塑性設計指針」に基づく、部材の終局耐力を許容限界とする。

(3) 基礎部（アンカーボルト）

a. 接着系アンカーボルト

基礎部（アンカーボルト）のうち、接着系アンカーボルトについては、設計竜巻による荷重に対し、接着系アンカーボルトの破断が生じない設計とする。

このため、「各種合成構造設計指針・同解説」に基づく、短期許容応力度を許容限界とする。

6. 強度評価方法

6.1 記号の定義

(1) 強度評価の記号の定義

連結材の強度評価に用いる記号を表 6-1、固定材及び基礎部（アンカーボルト）の強度評価に用いる記号を表 6-2 に示す。

表 6-1 連結材の強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
F_d	kN	固縛対象設備の自重
P_v	kN	固縛対象設備に作用する浮き上がり荷重
P_H	kN	固縛対象設備に作用する横滑り荷重
P_i	kN	固縛対象設備に作用する衝撃荷重
P	kN	固縛対象設備に作用する検討用荷重
N	箇所	固縛装置の箇所数
n_1	個	固縛装置 1 箇所あたりの固定材の配置数
P_1	kN	連結材 1 組当たりに作用する荷重
$P_{1,m}$	kN	連結材（メインロープ）1 組当たりに作用する荷重
$P_{1,s}$	kN	連結材（サイドロープ）1 組当たりに作用する荷重
θ_{v1}	deg	浮き上がり時に固縛装置の連結材（サイドロープ）と定着面となす角度
θ_{v2}	deg	横滑り時に固縛装置の連結材（サイドロープ）と定着面となす角度
θ_H	deg	横滑り時（設備進行方向）に固縛装置の連結材（サイドロープ）が初期位置と展張時の位置となす角度
A	m^2	固縛対象設備の最大受圧面積
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
G	—	ガスト影響係数
q	N/m^2	設計用速度圧
V_D	m/s	設計竜巻の最大風速
V_{Rm}	m/s	設計竜巻の最大接線風速
V_{SA}	m/s	固縛対象設備に作用する最大水平風速
ρ	kg/m^3	空気密度
$C_{Di} (i=1, 2, 3)$	—	固縛対象設備の形状に応じた抗力係数
$A_i (i=1, 2, 3)$	m^2	固縛対象設備の各面の投影面積
H	m	固縛対象設備の高さ
m	kg	固縛対象設備の質量
g	m/s^2	重力加速度（ $g=9.80665$ ）

表 6-2 固定材及び基礎部（アンカーボルト）の強度評価に用いる記号（1/3）

記号	単位	定義
F_d	kN	固縛対象設備の自重
P_v	kN	固縛対象設備に作用する浮き上がり荷重
P_H	kN	固縛対象設備に作用する横滑り荷重
P_i	kN	固縛対象設備に作用する衝撃荷重
P	kN	固縛対象設備に作用する検討用荷重
N	箇所	固縛装置の箇所数
n_2	個	固縛装置 1 箇所あたりの固定材の配置数
P_2	kN	フレノリンクボルト 1 本あたりに作用する荷重
P_3	kN	アンカープレート 1 箇所あたりに作用する荷重
θ_{v1}	deg	浮き上がり時に固縛装置の連結材（サイドロープ）と定着面となす角度
θ_{v2}	deg	横滑り時に固縛装置の連結材（サイドロープ）と定着面となす角度
θ_H	deg	横滑り時（設備進行方向）に固縛装置の連結材（サイドロープ）が初期位置と展張時の位置とのなす角度
A	m^2	固縛対象設備の最大受圧面積
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
G	—	ガスト影響係数
q	N/m^2	設計用速度圧
V_D	m/s	設計竜巻の最大風速
V_{Rm}	m/s	設計竜巻の最大接線風速
V_{SA}	m/s	固縛対象設備に作用する最大水平風速
ρ	kg/m^3	空気密度
$C_{Di} (i=1, 2, 3)$	—	固縛対象設備の形状に応じた抗力係数
$A_i (i=1, 2, 3)$	m^2	固縛対象設備の各面の見付面積
H	m	固縛対象設備の高さ
m	kg	固縛対象設備の質量
g	m/s^2	重力加速度（ $g = 9.80665$ ）
F	N/mm^2	鋼材の基準強度
σ_y	N/mm^2	検討対象部材の降伏応力度で、基準強度 F 値を 1.1 倍した値
τ_y	N/mm^2	検討対象部材のせん断降伏応力度（ $\tau_y = \sigma_y / \sqrt{3}$ ）
f_b	N/mm^2	検討対象部材の短期許容曲げ応力度
f_t	N/mm^2	検討対象部材の短期許容引張応力度

表 6-2 固定材及び基礎部（アンカーボルト）の強度評価に用いる記号（2/3）

記号	単位	定義
h	mm	ベースプレート板厚芯からのフレノリンクボルト芯までの高さ
L_1	mm	両端のアンカーボルト芯間距離
d_t	mm	ベースプレート端部から引張側アンカーボルト芯までの距離
B	mm	ベースプレートの幅
t	mm	ベースプレートの厚さ
$Z_{p y}$	mm	ベースプレートの y 軸まわりの塑性断面係数
$Z_{p x}$	mm	ベースプレートの x 軸まわりの塑性断面係数
A	mm	ベースプレートの断面積
M_y	kN・mm	x 方向検討荷重によるベースプレートの y 軸まわり曲げモーメント
M_x	kN・mm	y 方向検討荷重によるベースプレートの x 軸まわり曲げモーメント
M_{y-z}	kN・mm	z 方向検討荷重によるベースプレートの y 軸まわり曲げモーメント
$M_{p y}$	kN・mm	ベースプレートの y 軸まわりの終局曲げモーメント
$M_{p x}$	kN・mm	ベースプレートの x 軸まわりの終局曲げモーメント
Q_x	kN	x 方向検討荷重によるベースプレートのせん断力
Q_y	kN	y 方向検討荷重によるベースプレートのせん断力
Q_{x-z}	kN	z 方向検討荷重によるベースプレートのせん断力
$Q_{p x}$	kN	x 方向検討荷重に対するベースプレートの終局せん断力
$Q_{p y}$	kN	y 方向検討荷重に対するベースプレートの終局せん断力
$Q_{p z}$	kN	z 方向検討荷重に対するベースプレートの終局せん断力
α	—	アンカーボルトのねじ部における断面積の低減を考慮した係数 (=0.75)
A_e	mm ²	アンカーボルトの有効断面積
n	本	一組のアンカープレートにおけるアンカーボルト本数
n'	本	一組のアンカープレートにおける引張側アンカーボルト本数
T_v	kN	z 方向の検討荷重によりアンカーボルト 1 本当たりに生ずる引張力
T_H	kN	x 又は y 方向の検討荷重によりアンカーボルト 1 本当たりに生ずる引張力
ϕ_1	—	アンカーボルトの降伏引張力を決定する際の低減係数で、アンカーボルトの降伏による場合は 1.0
F_c	N/mm ²	アンカーボルトが定着するコンクリートの設計基準強度 (=40)
σ_{qa}	N/mm ²	接着系アンカーボルトの許容せん断応力度 (=0.7× f_t)
Q	kN	検討荷重によりアンカーボルト 1 本当たりに生ずるせん断力
γ	kN/m ³	基礎自重算定用のコンクリートの単位体積重量

表 6-2 固定材及び基礎部（アンカーボルト）の強度評価に用いる記号（3/3）

記号	単位	定義
Q_{a1}	kN	接着系アンカーボルトの検討において、アンカーボルトのせん断強度により決定される許容せん断力
Q_{a2}	kN	定着した躯体の支圧強度により決定される許容せん断力
ϕ_2	—	アンカーボルトの降伏せん断力を決定する際の低減係数で、コンクリートの支圧による場合は 2/3
${}_c\sigma_{qa}$	N/mm ²	基礎コンクリートの支圧強度で、 $0.5 \times \sqrt{F_c \cdot E_c}$
E_c	N/mm ²	コンクリートのヤング係数で、 $3.35 \times 10^4 \times (\gamma/24)^2 \times (F_c/60)^{1/3}$
A_{qc}	mm ²	せん断力に対するコーン状破壊面の有効投影面積
A_L	mm	接着系アンカーボルトにおいては、埋込長さ
A_{Le}	mm	接着系アンカーボルトの有効埋込長さ
A_{Lce}	mm	接着系アンカーボルトの強度算定用埋込長さ
A_{da}	mm	接着系アンカーボルトの呼び径
α_1 α_2 α_3	—	接着系アンカーボルトにおいて、へりあき及びアンカーボルトのピッチによる付着強度の低減係数
C_1, C_2, C_3	mm	接着系アンカーボルトのへりあき寸法又はアンカーボルトピッチの 1/2
P_{a1}	kN	接着系アンカーボルトにおいて、アンカーボルトの降伏により決定される 1 本当たりの許容引張力
P_{a3}	kN	接着系アンカーボルトにおいて、アンカーボルトの付着力により決定される 1 本当たりの許容引張力
ϕ_3	—	接着系アンカーボルトの許容引張力を決定する際の付着力による低減係数 (=2/3)
τ_a	N/mm ²	接着系アンカーボルトにおける許容付着応力度
τ_{bavg}	N/mm ²	接着系アンカーの基本平均付着強度で、カプセル式・有機系の場合 ($=10\sqrt{F_c/21}$)
P_a	kN	接着系アンカーボルト 1 本当たりの短期許容引張力
Q_a	kN	接着系アンカーボルト 1 本当たりの短期許容せん断力
Q_{a3}	kN	定着した躯体のコーン状破壊により決定される許容せん断力
${}_c\sigma_t$	N/mm ²	コーン状破壊に対するコンクリートの引張強度 ($=0.31 \times \sqrt{F_c}$)

6.2 評価対象部位

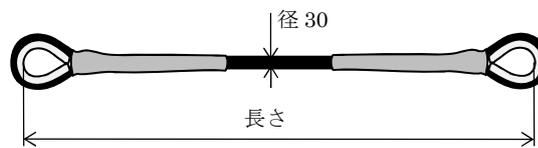
固縛装置の評価対象部位は、「2.2 固縛装置の構造」にて設定している構造に基づき、「2.3 荷重及び荷重の組合せ」に示す設計竜巻の風圧力の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

(1) 連結材

- ・連結材本体（固縛ロープ（高強度繊維ロープ））

※連結材に作用する荷重を、メーカー提示値の規格引張強度と比較するため、評価対象部位は固縛ロープ本体とする。

連結材の評価対象部位を図 6-1 に示す。



（高強度繊維ロープ φ30）

図 6-1 連結材の評価対象部位

(2) 固定材

a. フレノリンクボルト

- ・フレノリンクボルト本体

※フレノリンクボルトに作用する荷重は、メーカー提示値の使用荷重に対し、安全係数を考慮した値と比較するため評価対象部位はフレノリンクボルト本体とする。

b. アンカープレート

アンカープレートについては、ベースプレートの評価対象部位として設定する。

- ・ベースプレート

(3) 基礎部（アンカーボルト）

接着系アンカーボルトにより構成されるため、評価対象部位として設定する。

- ・接着系アンカーボルト

固定材（フレノリンクボルト及びアンカープレート）及び基礎部（アンカーボルト）の評価対象部位を図 6-2 に示す。

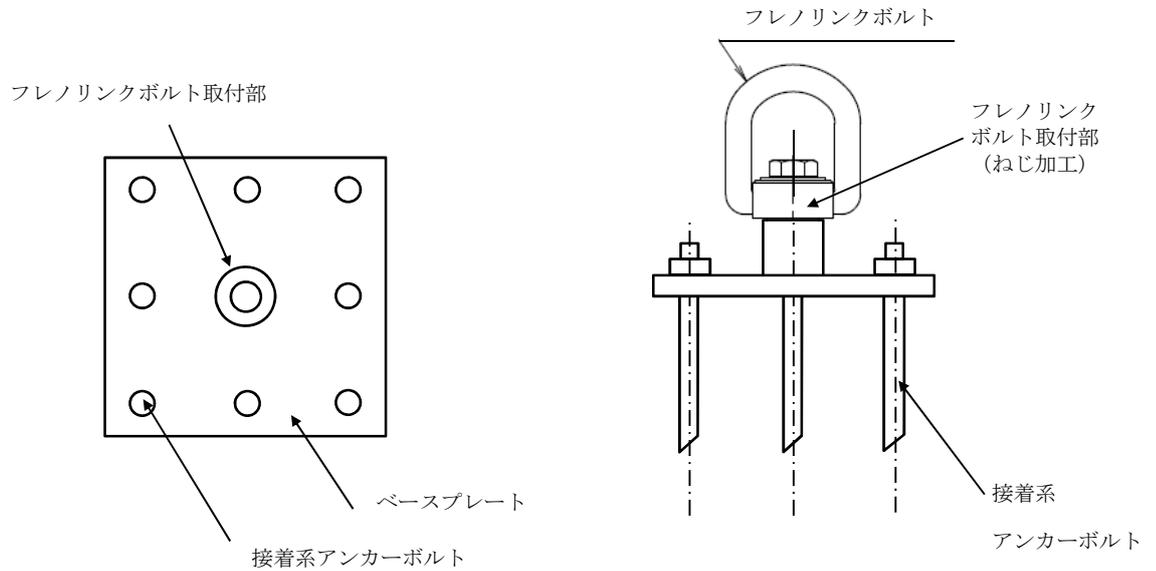


図 6-2 固定材及び基礎部（アンカーボルト）の評価対象部位

6.3 評価方法

(1) 連結材の評価方法

連結材に作用する荷重が、固縛装置の箇所数×連結材 1 組当たりの許容限界を超えないことを確認するため、連結材 1 組当たりに作用する荷重を、以降に示す浮き上がり及び横滑りの荷重状態に対して算定し、そのうち最も大きい荷重を選定する。

a. 浮き上がり時

設計竜巻の風荷重による揚力が固縛対象設備に作用して浮き上がる状態を考える。固縛対象設備が浮き上がった場合には、両側に配置した固縛装置（連結材（サイドロープ））で抵抗することから連結材に作用する荷重を以下の式により算定する。浮き上がり時の評価モデルの概要図を図 6-3 に示す。

連結材に作用する荷重のうち、メインロープ又はサイドロープ作用する荷重のうち大きい荷重を、浮き上がり時の連結材の検討用荷重 P_1 とする。

$$P_1 = \max\left(\frac{P}{n_1} \cdot \frac{1}{\sin \theta_{v1}}, \frac{P}{2}\right) = \frac{P}{n_1} \cdot \frac{1}{\sin \theta_{v1}} \quad (n_1 \cdot \sin \theta_{v1} \leq 2 \text{ より})$$

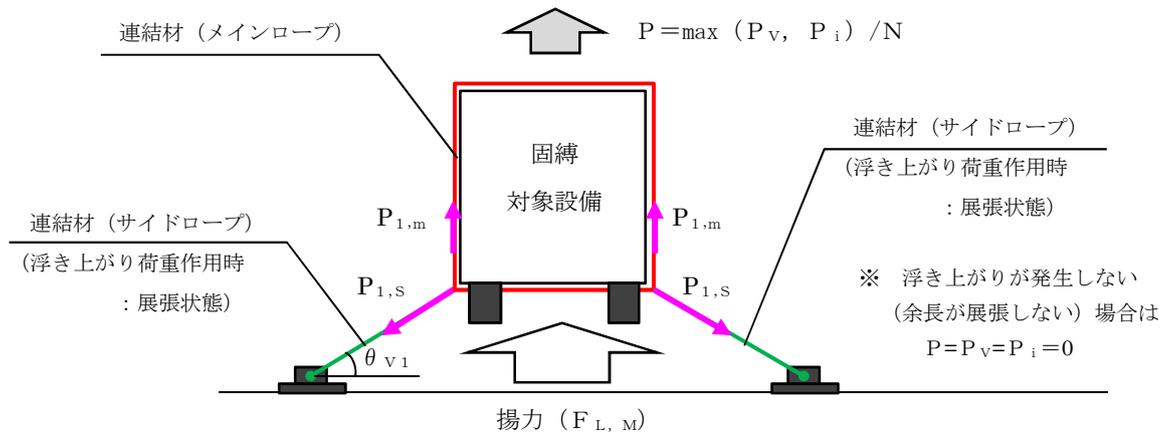


図 6-3 浮き上がり時の連結材の評価モデルの概要図

b. 横滑り時

設計竜巻による風荷重が固定対象設備に作用して横滑りする状態を考え、連結材に作用する荷重は算定するが、横滑りの方向により連結材に作用する荷重状態が異なるため、横滑り方向に対して、荷重を算定する。

(a) 側面方向の横滑り時

固定対象設備が側面方向（進行方向直角方向）に横滑りした場合には、固定装置は片側に配置した固定装置（連結材（サイドロープ））のみで抵抗することとなるから、連結材の検討用荷重 P_1 は以下の式により算定する。横滑り時（側面方向）の評価モデルの概要図を図 6-4 に示す。

連結材に作用する荷重のうち、メインロープ又はサイドロープ作用する荷重のうち大きい荷重を、側面方向の横滑り時の連結材の検討用荷重 P_1 とする。

$$P_1 = \max \left(P \cdot \frac{1}{\cos \theta_{V2}}, \frac{P}{2} \right) = P \cdot \frac{1}{\cos \theta_{V2}} \quad (\cos \theta_{V2} \leq 1 < 2 \text{ より})$$

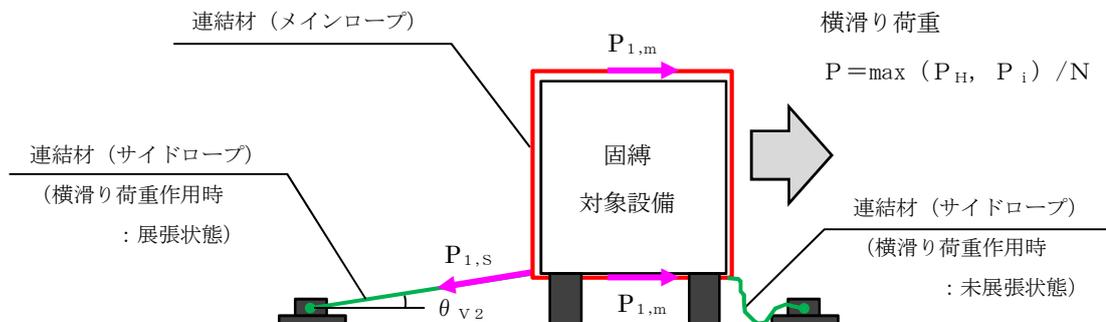


図 6-4 横滑り時（側面方向）の連結材の評価モデルの概要図

(b) 正面方向の横滑り時

固縛対象設備が正面方向（進行方向）に横滑りした場合には、両側に配置した固縛装置（連結材（サイドロープ））で抵抗することから、連結材の検討用荷重 P_1 は以下の式により算定する。横滑り時（正面方向）の評価モデルの概要図を図6-5に示す。

連結材に作用する荷重のうち、メインロープ又はサイドロープ作用する荷重のうち大きい荷重を、正面方向の横滑り時の連結材の検討用荷重 P_1 とする。

$$P_1 = \max \left(\frac{P}{n_1} \cdot \frac{1}{\sin \theta_H} \cdot \frac{1}{\cos \theta_{V2}}, \frac{P}{n_1} \cdot \frac{1}{\tan \theta_H} \right)$$

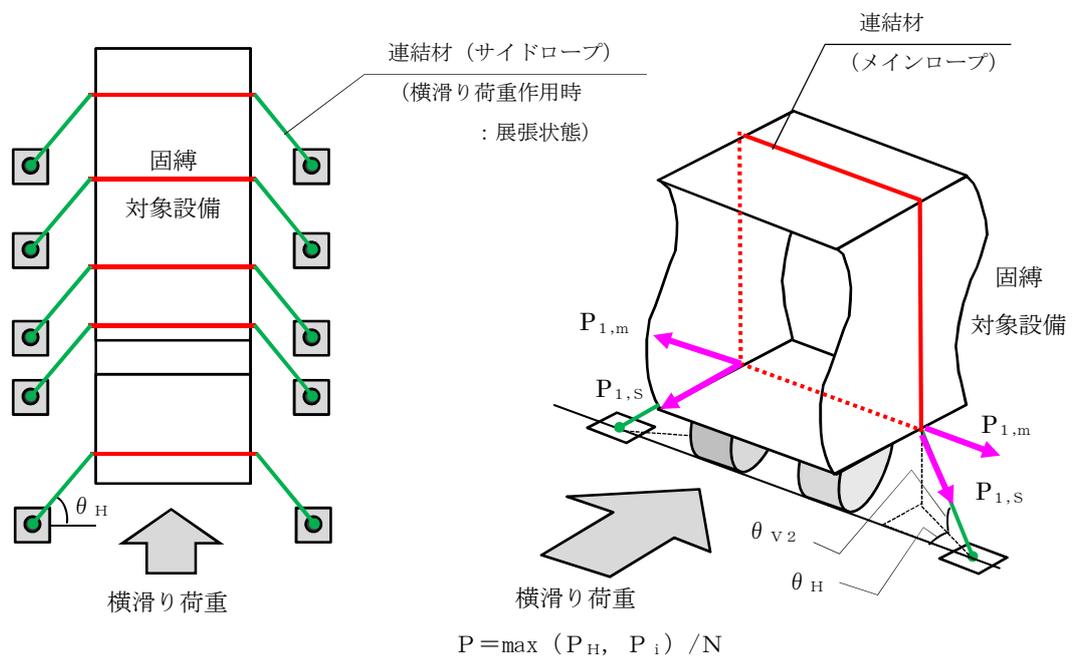


図6-5 横滑り時（正面方向）の連結材の評価モデルの概要図

(2) 固定材の評価方法

a. フレノリンクボルトの評価方法

フレノリンクボルトに作用する荷重も連結材と同様に、固縛装置の箇所数×フレノリンクボルト1本当たりの許容限界を超えないことを確認するため、フレノリンクボルト1本当たりに作用する荷重を、以降に示す浮き上がり及び横滑りの荷重状態に対して算定し、そのうち最も大きい荷重を選定する。

なお、フレノリンクボルトは連結材のうちサイドロープと同一の作用線上に配置されることから、連結材のサイドロープの荷重を検討用荷重 P_2 とする。

また、荷重の評価モデルは連結材と同様である。

(a) 浮き上がり時

浮き上がり時のフレノリンクボルトの検討用荷重 P_2 は以下の式で算定する。

$$P_2 = \frac{P}{n_2} \cdot \frac{1}{\sin \theta_{V1}}$$

(b) 横滑り時

イ. 側面方向の横滑り時

側面方向の横滑り時のフレノリンクボルトの検討用荷重 P_2 は以下の式で算定する。

$$P_2 = P \cdot \frac{1}{\cos \theta_{V2}}$$

ロ. 正面方向の横滑り時

正面方向の横滑り時のフレノリンクボルトの検討用荷重 P_2 は以下の式で算定する。

$$P_2 = \frac{P}{n_2} \cdot \frac{1}{\cos \theta_H} \cdot \frac{1}{\cos \theta_{V2}}$$

b. アンカープレートの評価方法

(a) 計算モデル

アンカープレートの評価は、図 6-6 に示す x 、 y 、 z 方向に作用する荷重として、検討用荷重 P_3 を選定し、各検討荷重に対して部材断面に生ずる荷重等を算定し、評価を行う。

ただし、フレノリンクボルトはボルト芯を軸として回転するため、 x 方向と y 方向は同一の評価条件となるため、選定した最大の値となる検討用荷重 P_3 が x 方向に作用する場合にて評価する。

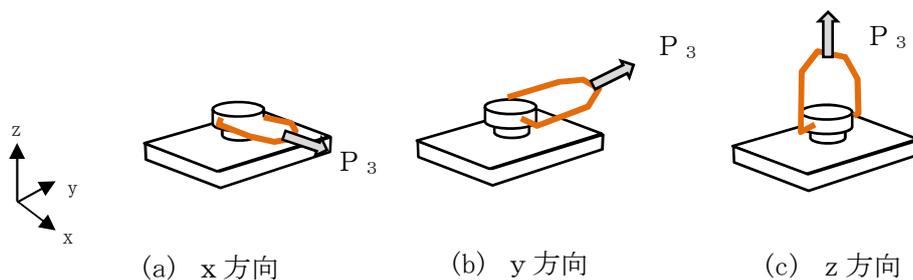


図 6-6 アンカープレートの計算モデルの概要図

(b) 計算方法

イ. x 方向荷重時の検討

アンカープレートのうち、ベースプレートに対し、 x 方向に荷重が作用した場合の計算モデルの概要図を図 6-7 に示す。

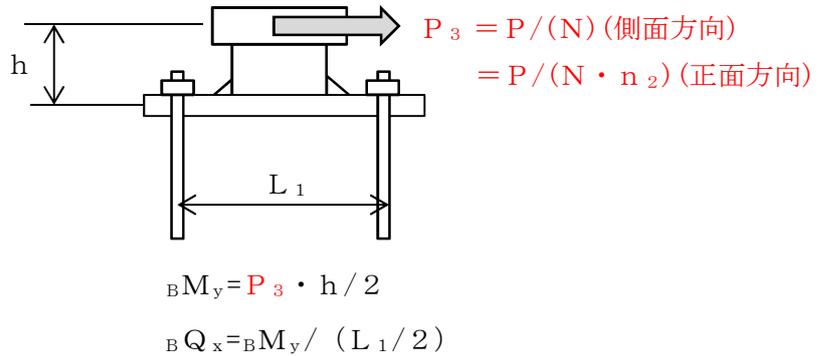


図 6-7 x 方向に荷重が作用した場合の計算モデルの概要図

・曲げに対する検討

検討用荷重 P_3 によるベースプレートの y 軸まわり曲げモーメント ${}_B M_y$ は、以下の式により算定する。

$${}_B M_y = P_3 \cdot \frac{h}{2}$$

ベースプレートの y 軸まわりの塑性断面係数 ${}_B Z_{p y}$ は、以下の式により算定する。

$${}_B Z_{p y} = \frac{{}_B B \cdot {}_B t^2}{4}$$

許容限界であるベースプレートの y 軸まわりの終局曲げモーメント ${}_B M_{p y}$ は、「鋼構造塑性設計指針」に基づき、以下の式により算定する。

$${}_B M_{p y} = \sigma_y \cdot {}_B Z_{p y} \cdot 10^{-3}$$

・せん断に対する検討

検討用荷重 P_3 によるベースプレートのせん断力 ${}_B Q_x$ は、以下の式により算定する。

$${}_B Q_x = \frac{{}_B M_y}{\frac{L_1}{2}}$$

ベースプレートの断面積 ${}_B A$ は、以下の式により算定する。

$${}_B A = {}_B B \cdot {}_B t$$

許容限界であるベースプレートの終局せん断力 ${}_B Q_{p x}$ は、「鋼構造塑性設計指針」に基づき、以下の式により算定する。

$${}_B Q_{p_y} = \tau_y \cdot {}_B A \cdot 10^{-3}$$

ロ. z 方向荷重時の検討

アンカープレートのうち、ベースプレートに対し、z 方向に荷重が作用した場合の計算モデルの概要図を図 6-8 に示す。

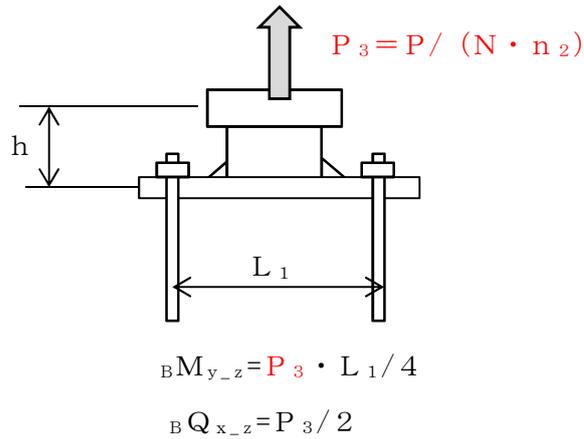


図 6-8 z 方向に荷重が作用した場合の計算モデルの概要図

・曲げに対する検討

検討用荷重 P_3 によるベースプレートの y 軸まわり曲げモーメント ${}_B M_{y-z}$ は、以下の式により算定する。

$${}_B M_{y-z} = P_3 \cdot \frac{L_1}{4}$$

ベースプレートの y 軸まわりの塑性断面係数 ${}_B Z_{p_y}$ は、以下の式により算定する。

$${}_B Z_{p_y} = \frac{{}_B B \cdot {}_B t^2}{4}$$

許容限界であるベースプレートの y 軸まわりの終局曲げモーメント ${}_B M_{p_y}$ は、「鋼構造塑性設計指針」に基づき、以下の式により算定する。

$${}_B M_{p_y} = \sigma_y \cdot {}_B Z_{p_y} \cdot 10^{-3}$$

・せん断に対する検討

検討用荷重 P_3 によるベースプレートのせん断力 ${}_B Q_x$ は、以下の式により算定する。

$${}_B Q_{x,z} = \frac{P_3}{2}$$

ベースプレートの断面積 ${}_B A$ は、以下の式により算定する。

$${}_B A = {}_B B \cdot {}_B t$$

許容限界であるベースプレートの終局せん断力 ${}_B Q_{p,z}$ は、「鋼構造塑性設計指針」に基づき、以下の式により算定する。

$${}_B Q_{p,z} = \tau_y \cdot {}_B A \cdot 10^{-3}$$

(3) 基礎部（アンカーボルト）の評価方法

a. 接着系アンカーボルトの評価方法

(a) 引張に関する検討

接着系アンカーボルトの降伏引張耐力に関する検討は以下による。

アンカーボルトの有効断面積 ${}_A A_e$ は、以下の式により算定する。

$${}_A A_e = {}_A \alpha \cdot \frac{\pi \cdot d_a^2}{4}$$

z 方向の検討用荷重 P_3 によりアンカーボルト 1 本あたりに生ずる引張力 ${}_A T_V$ は、以下の式により算定する。

$${}_A T_V = P_3$$

x 又は y 方向の検討用荷重 P_3 によりアンカーボルト 1 本あたりに生ずる引張力 ${}_A T_H$ は、以下の式により算定する。

$${}_A T_H = \frac{P_3 \cdot h}{\frac{7}{8} d_t \cdot n}$$

アンカーボルトの降伏により決定される 1 本あたりの許容引張力 P_{a1} は、以下の式により算定する。

$$P_{a1} = \phi_1 \cdot f_t \cdot {}_A A_e \cdot 10^{-3}$$

アンカーボルトの付着力により決定される 1 本あたりの許容引張力 P_{a3} は、以下の式により算定する。

$$P_{a3} = \phi_3 \cdot \tau_a \cdot \pi \cdot {}_A d_a \cdot {}_A L_{ce} \cdot 10^{-3}$$

接着系アンカーボルトにおける許容付着応力度 τ_a は以下の式により算定する。

$$\tau_a = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \tau_{bavg}$$

接着系アンカーボルトにおいて、へりあき及びアンカーボルトのピッチによる付着強度の低減係数は以下の式により算定する。

$$\alpha_n : 0.5 \cdot (C_n / A L_{ce}) + 0.5$$

$$A L_e = A L - d_a$$

$$A L_{ce} = A L_e - 2 \cdot d_a$$

ここで、

$$(C_n / A L_{ce}) \geq 1.0 \text{ の場合は, } (C_n / A L_{ce}) = 1.0$$

$$A L_e \geq 10 d_a \text{ の場合は, } A L_e = 10 d_a \text{ とする。}$$

アンカーボルトの許容耐力 P_a は、以下の式により算定する。

$$P_a = \min(P_{a1}, P_{a3})$$

(b) セン断に関する検討

検討用荷重 P_3 によりアンカーボルト 1 本あたりに生ずるせん断力 AQ は、以下の式により算定する。

$$AQ = \frac{P_3}{n}$$

アンカーボルトのせん断強度により決定される許容せん断力 Q_{a1} は、以下の式により算定する。

$$Q_{a1} = \phi_1 \cdot s \sigma_{qa} \cdot A A_e \cdot 10^{-3}$$

定着した躯体の支圧強度により決定される許容せん断力 Q_{a2} は、以下の式により算定する。

$$Q_{a2} = \phi_2 \cdot c \sigma_{qa} \cdot A A_e \cdot 10^{-3}$$

せん断力に対するコーン状破壊面の有効投影面積 A_{qc} は、アンカーボルトのへりあき寸法を c とすると以下の式により算定する。

$$A_{qc} = 0.5 \cdot \pi \cdot c^2$$

定着した躯体のコーン状破壊により決定される許容せん断力 Q_{a3} は、以下の式により算定する。

$$Q_{a3} = \phi_3 \cdot c \sigma_t \cdot A_{qc} \cdot 10^{-3}$$

アンカーボルトの許容せん断力 Q_a は、以下の式により算定する。

$$Q_a = \min(Q_{a1}, Q_{a2}, Q_{a3})$$

(c) 引張とせん断を同時に受ける場合に関する検討

コンクリートに埋め込まれるアンカーボルトとしての引張力とせん断力の組合せ力に対する検定は、「各種合成構造設計指針・同解説」に基づき、以下の式によって行う。

$$\left[\frac{A T_H}{P_a} \right]^2 + \left[\frac{A Q}{Q_a} \right]^2 \leq 1$$

7. 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・ 日本工業規格（J I S）
- ・ 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）
- ・ 鋼構造塑性設計指針（（社）日本建築学会，2010 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）
- ・ 各種合成構造設計指針・同解説（（社）日本建築学会，2010 改定）

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

目次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
2.1 位置	1
2.2 構造装置全体の構造概要	3
2.3 固縛装置構成要素の構造概要	3
2.4 評価方針	5
2.5 適用規格	5
3. 強度評価方法	6
3.1 記号の定義	6
3.2 評価対象部位	12
3.3 荷重及び荷重の組合せ	13
3.4 許容限界	18
3.5 評価方法	19
4. 評価条件	27
4.1 可搬型代替注水中型ポンプの評価条件	27
5. 評価結果	30
5.1 可搬型代替注水中型ポンプの評価結果	30

1. 概要

本資料は、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」に示すとおり、固縛装置が必要となる屋外の重大事故等対処設備（以下「固縛対象設備」という。）の固縛装置が、竜巻襲来時においても、固縛構成要素が、設計竜巻による荷重とこれを組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）が固縛対象設備に作用した場合であっても、固縛状態を維持するために必要な構造強度を有するよう、作用する荷重が許容限界以下であることを確認するものである。

2. 基本方針

固縛装置は、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」の「3. 設計方針」に示すとおり、固縛対象設備の構造によって連結材の余長の有無に違いはあるが、固縛装置の構成要素の組合せは、表 2-1 に示す 1 つである。

当該固縛装置に対して、強度評価を行い、固縛状態を維持し、必要な構造強度を有していることを確認する。

なお、固縛対象設備の設置される固縛装置の強度評価の結果、許容限界に対する裕度が最も低い固縛装置は、「可搬型代替注水中型ポンプ」に設置する固縛装置であり、本資料においては、可搬型代替注水中型ポンプを固縛対象設備とした評価を示す。

表 2-1 固縛装置の構成

固縛対象設備	連結材	固定材	基礎部 (アンカーボルト)	対象の 固縛対象 設備数
車両型	固縛ロープ (余長あり)	フレノリンク ボルト	接着系アンカーボルト	7
車両型以外	固縛ロープ (余長なし)			10

2.1 位置

屋外に設置する重大事故等対処設備は、V-1-1-2-3-3「竜巻防護に関する施設の設計方針」の「3.2 (3) 性能目標」のとおり、位置的分散を考慮した保管としており、固縛対象設備も同様であり、それぞれ可搬型重大事故等対処設備保管場所（西側）及び可搬型重大事故等対処設備保管場所（南側）に設置しており、これらの固縛装置も同じ場所に設置する。

固縛装置の設置位置図を図 2-1 に示す。

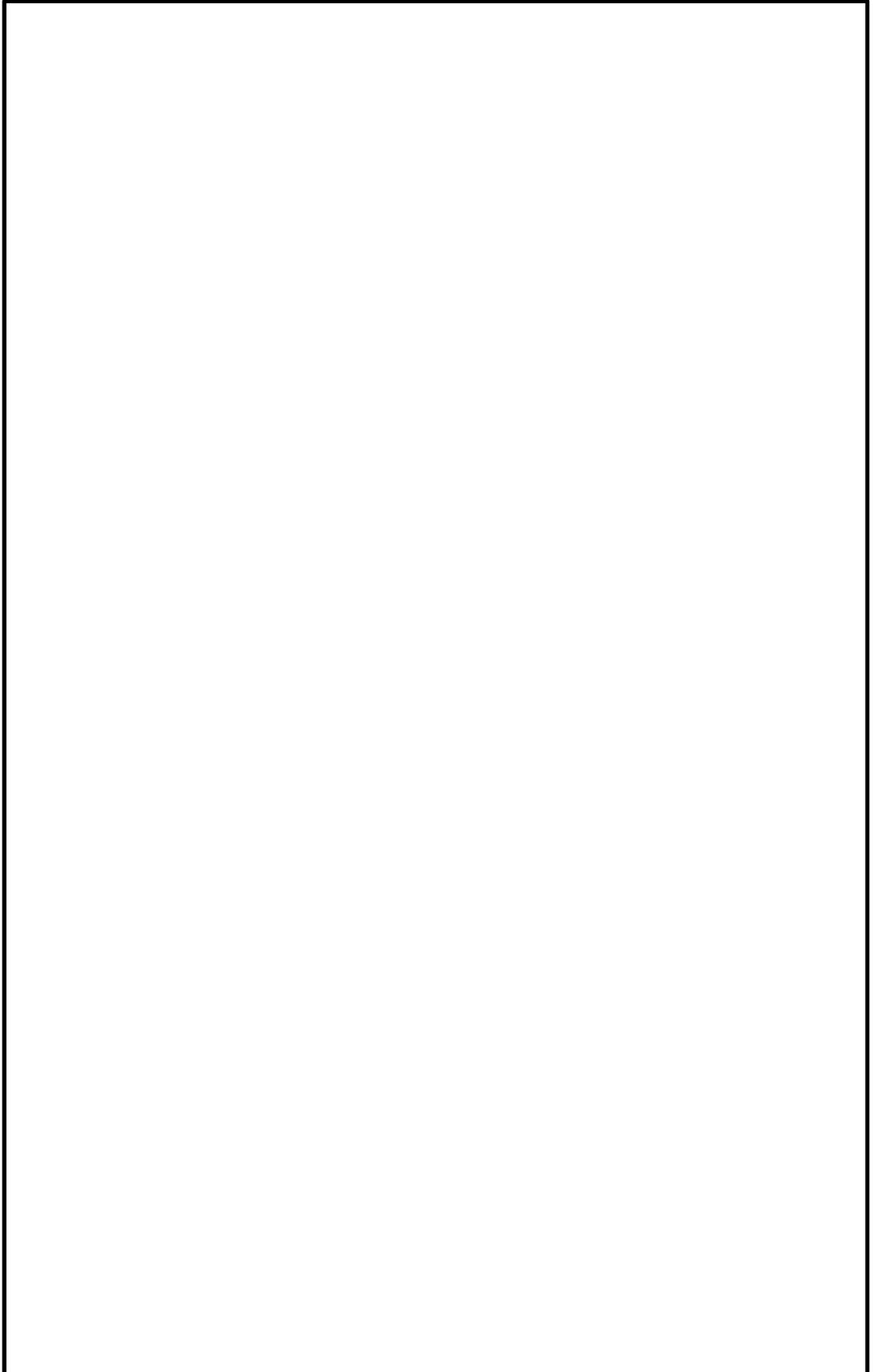
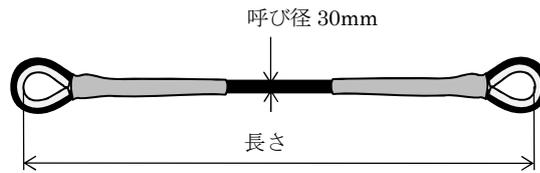
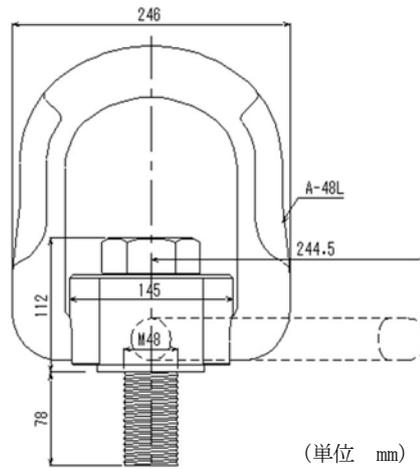


図 2-1 固縛装置の設置位置図



(高強度繊維ロープ ϕ 30mm(被覆部)
 ϕ 22mm(被覆無し部))

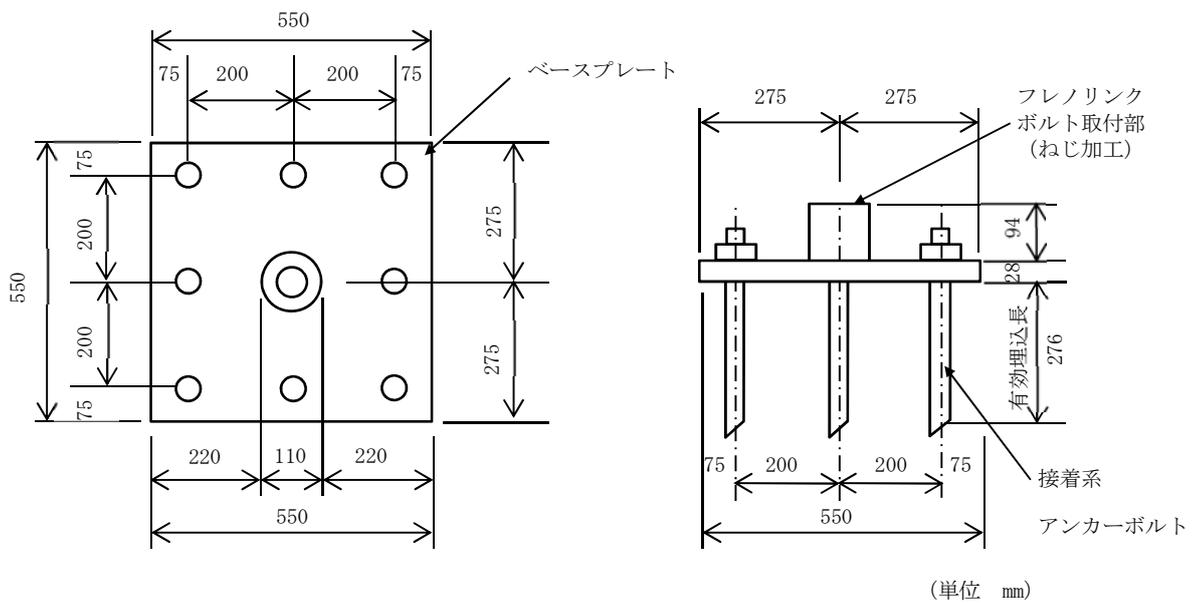
図 2-3 連結材の概要図



(単位 mm)

(フレノリンクボルト (A-48L))

図 2-4 フレノリンクボルトの概要図



(単位 mm)

図 2-5 固定材 (アンカープレート) 及び基礎部 (アンカーボルト) の概要図

2.4 評価方針

固縛装置の強度評価は、設計荷重が固縛装置に作用することにより評価対象部位に生ずる荷重及び応力等が、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」の「5. 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。

固縛装置の強度評価において、その構造を踏まえ、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」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」に示す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。

(1) 強度評価方針

固縛装置の強度評価フローを図 2-6 に示す。固縛装置の強度評価においては、その構造を踏まえ、設計竜巻の風圧力による荷重が固縛対象設備に作用した場合に、固縛装置を構成している連結材、固定材及び基礎部（アンカーボルト）に作用する荷重等が「3.4 許容限界」にて示すそれぞれの許容限界以下であることを確認する。

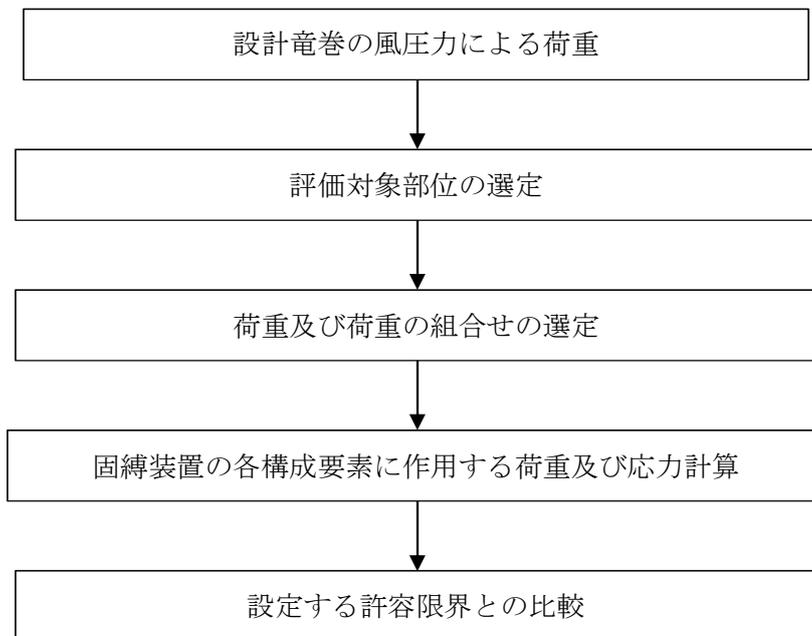


図 2-6 固縛装置の強度評価フロー

2.5 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・ 日本工業規格（J I S）
- ・ 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）
- ・ 鋼構造塑性設計指針（（社）日本建築学会，2010 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）
- ・ 各種合成構造設計指針・同解説（（社）日本建築学会，2010 改定）

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 強度評価の記号の定義

固縛対象設備に作用する荷重の評価に用いる記号を表 3-1, 連結材の強度評価に用いる記号を表 3-2, 固定材及び基礎部（アンカーボルト）の強度評価に用いる記号を表 3-3 に示す。

表 3-1 固縛対象設備に作用する荷重の算出に用いる記号 (1/2)

記号	単位	定義
V_D	m/s	設計竜巻の最大風速
V_{Rm}	m/s	設計竜巻の最大接線風速
V_{SA}	m/s	固縛対象設備に作用する最大水平風速
R_m	m	最大接線風速の生じる半径
H_i	m	流入層高さ
$C_{Di} (i=1, 2, 3)$	—	固縛対象設備の形状に応じた抗力係数
$A_i (i=1, 2, 3)$	m ²	固縛対象設備の各面の投影面積
W	m	固縛対象設備の幅
L	m	固縛対象設備の長さ
H	m	固縛対象設備の高さ
m	kg	固縛対象設備の質量
g	m/s ²	重力加速度 ($g=9.80665$)
ρ	kg/m ³	空気密度
q	N/m ²	設計用速度圧
G	—	ガスト影響係数
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
A	m ²	固縛対象設備の最大受圧面積
$V_{SAS, F}$	m/s	固縛対象設備が浮き上がりを開始する風速
$V_{SAS, S}$	m/s	固縛対象設備が横滑りを開始する風速
$C_D A/m$	m ² /kg	空力パラメータ
μ_s	—	固縛対象設備と路面の静摩擦係数
μ_d	—	固縛対象設備と路面の動摩擦係数
X	mm	固縛装置の設計余長
L_{OF}	mm	固縛対象設備と固縛装置（アンカー点）のオフセット量
n	箇所	固縛装置の箇所数
n'	個	固縛装置 1 箇所あたりの固定材の配置数

表 3-1 荷重の算出に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
k	N/m	連結材の等価剛性 ($= E_{RP} \cdot A_{RP} / L_{RP}$)
E_{RP}	N/mm ²	連結材の弾性係数
A_{RP}	mm ²	連結材の断面積
L_{RP}	m	連結材の長さ
F_d	kN	固縛対象設備の自重
$F_{L, m}$	kN	固縛対象設備に作用する保守的に設定した揚力
P_v	kN	固縛対象設備に作用する浮き上がり荷重
P_H	kN	固縛対象設備に作用する横滑り荷重
P_i	kN	固縛対象設備に作用する衝撃荷重

表 3-2 連結材の強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
F_d	kN	固縛対象設備の自重
P_v	kN	固縛対象設備に作用する浮き上がり荷重
P_H	kN	固縛対象設備に作用する横滑り荷重
P_i	kN	固縛対象設備に作用する衝撃荷重
P	kN	固縛対象設備に作用する検討用荷重
N	箇所	固縛装置の箇所数
n_1	個	固縛装置 1 箇所あたりの固定材の配置数
P_1	kN	連結材 1 組あたりに作用する荷重
$P_{1,m}$	kN	連結材（メインロープ）1 組あたりに作用する荷重
$P_{1,s}$	kN	連結材（サイドロープ）1 組あたりに作用する荷重
θ_{v1}	deg	浮き上がり時に固縛装置の連結材（サイドロープ）と定着面となす角度
θ_{v2}	deg	横滑り時に固縛装置の連結材（サイドロープ）と定着面となす角度
θ_H	deg	横滑り時（設備進行方向）に固縛装置の連結材（サイドロープ）が初期位置と展張時の位置とのなす角度
A	m^2	固縛対象設備の最大受圧面積
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
G	—	ガスト影響係数
q	N/m^2	設計用速度圧
V_D	m/s	設計竜巻の最大風速
V_{Rm}	m/s	設計竜巻の最大接線風速
V_{SA}	m/s	固縛対象設備に作用する最大水平風速
ρ	kg/m^3	空気密度
$C_{Di} (i=1, 2, 3)$	—	固縛対象設備の形状に応じた抗力係数
$A_i (i=1, 2, 3)$	m^2	固縛対象設備の各面の投影面積
H	m	固縛対象設備の高さ
m	kg	固縛対象設備の質量
g	m/s^2	重力加速度（ $g = 9.80665$ ）

表 3-3 固定材及び基礎部（アンカーボルト）の強度評価に用いる記号（1/3）

記号	単位	定義
F_d	kN	固縛対象設備の自重
P_v	kN	固縛対象設備に作用する浮き上がり荷重
P_H	kN	固縛対象設備に作用する横滑り荷重
P_i	kN	固縛対象設備に作用する衝撃荷重
P	kN	固縛対象設備に作用する検討用荷重
N	箇所	固縛装置の箇所数
n_2	個	固縛装置 1 箇所あたりの固定材の配置数
P_2	kN	フレノリンクボルト 1 本あたりに作用する荷重
P_3	kN	アンカープレート 1 箇所あたりに作用する荷重
θ_{v1}	deg	浮き上がり時に固縛装置の連結材（サイドロープ）と定着面となす角度
θ_{v2}	deg	横滑り時に固縛装置の連結材（サイドロープ）と定着面となす角度
θ_H	deg	横滑り時（設備進行方向）に固縛装置の連結材（サイドロープ）が初期位置と展張時の位置とのなす角度
A	m^2	固縛対象設備の最大受圧面積
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
G	—	ガスト影響係数
q	N/m^2	設計用速度圧
V_D	m/s	設計竜巻の最大風速
V_{Rm}	m/s	設計竜巻の最大接線風速
V_{SA}	m/s	固縛対象設備に作用する最大水平風速
ρ	kg/m^3	空気密度
$C_{Di} (i=1, 2, 3)$	—	固縛対象設備の形状に応じた抗力係数
$A_i (i=1, 2, 3)$	m^2	固縛対象設備の各面の見付面積
H	m	固縛対象設備の高さ
m	kg	固縛対象設備の質量
g	m/s^2	重力加速度（ $g = 9.80665$ ）
F	N/mm^2	鋼材の基準強度
σ_y	N/mm^2	検討対象部材の降伏応力度で、基準強度 F 値を 1.1 倍した値
τ_y	N/mm^2	検討対象部材のせん断降伏応力度（ $\tau_y = \sigma_y / \sqrt{3}$ ）
f_b	N/mm^2	検討対象部材の短期許容曲げ応力度
f_t	N/mm^2	検討対象部材の短期許容引張応力度

表 3-3 固定材及び基礎部（アンカーボルト）の強度評価に用いる記号（2/3）

記号	単位	定義
h	mm	ベースプレート板厚芯からのフレノリンクボルト芯までの高さ
L_1	mm	両端のアンカーボルト芯間距離
d_t	mm	ベースプレート端部から引張側アンカーボルト芯までの距離
B	mm	ベースプレートの幅
t	mm	ベースプレートの厚さ
$Z_{p y}$	mm ³	ベースプレートの y 軸まわりの塑性断面係数
$Z_{p x}$	mm ³	ベースプレートの x 軸まわりの塑性断面係数
A	mm ²	ベースプレートの断面積
M_y	kN・mm	x 方向検討荷重によるベースプレートの y 軸まわり曲げモーメント
M_x	kN・mm	y 方向検討荷重によるベースプレートの x 軸まわり曲げモーメント
M_{y-z}	kN・mm	z 方向検討荷重によるベースプレートの y 軸まわり曲げモーメント
$M_{p y}$	kN・mm	ベースプレートの y 軸まわりの終局曲げモーメント
$M_{p x}$	kN・mm	ベースプレートの x 軸まわりの終局曲げモーメント
Q_x	kN	x 方向検討荷重によるベースプレートのせん断力
Q_y	kN	y 方向検討荷重によるベースプレートのせん断力
Q_{x-z}	kN	z 方向検討荷重によるベースプレートのせん断力
$Q_{p x}$	kN	x 方向検討荷重に対するベースプレートの終局せん断力
$Q_{p y}$	kN	y 方向検討荷重に対するベースプレートの終局せん断力
$Q_{p z}$	kN	z 方向検討荷重に対するベースプレートの終局せん断力
α	—	アンカーボルトのねじ部における断面積の低減を考慮した係数 (=0.75)
A_e	mm ²	アンカーボルトの有効断面積
n	本	一組のアンカープレートにおけるアンカーボルト本数
n'	本	一組のアンカープレートにおける引張側アンカーボルト本数
T_v	kN	z 方向の検討荷重によりアンカーボルト 1 本あたりに生ずる引張力
T_H	kN	x 又は y 方向の検討荷重によりアンカーボルト 1 本あたりに生ずる引張力
ϕ_1	—	アンカーボルトの降伏引張力を決定する際の低減係数で、アンカーボルトの降伏による場合は 1.0
f_c	N/mm ²	アンカーボルトが定着するコンクリートの設計基準強度
σ_{qa}	N/mm ²	接着系アンカーボルトの許容せん断応力度 (=0.7× f_t)
Q	kN	検討荷重によりアンカーボルト 1 本あたりに生ずるせん断力
γ	kN/m ³	基礎自重算定用のコンクリートの単位体積重量

表 3-3 固定材及び基礎部（アンカーボルト）の強度評価に用いる記号（3/3）

記号	単位	定義
Q_{a1}	kN	接着系アンカーボルトの検討において、アンカーボルトのせん断強度により決定される許容せん断力
Q_{a2}	kN	定着した躯体の支圧強度により決定される許容せん断力
ϕ_2	—	アンカーボルトの降伏せん断力を決定する際の低減係数で、コンクリートの支圧による場合は 2/3
${}_c\sigma_{qa}$	N/mm ²	基礎コンクリートの支圧強度で、 $0.5 \times \sqrt{F_c \cdot E_c}$
E_c	N/mm ²	コンクリートのヤング係数で、 $3.35 \times 10^4 \times (\gamma/24)^2 \times (F_c/60)^{1/3}$
A_{qc}	mm ²	せん断力に対するコーン状破壊面の有効投影面積
A_L	mm	接着系アンカーボルトにおいては、埋込長さ
A_{Le}	mm	接着系アンカーボルトの有効埋込長さ
A_{Lce}	mm	接着系アンカーボルトの強度算定用埋込長さ
A_{da}	mm	接着系アンカーボルトの呼び径
α_1 α_2 α_3	—	接着系アンカーボルトにおいて、へりあき及びアンカーボルトのピッチによる付着強度の低減係数
C_1, C_2, C_3	mm	接着系アンカーボルトのへりあき寸法又はアンカーボルトピッチの 1/2
P_{a1}	kN	接着系アンカーボルトにおいて、アンカーボルトの降伏により決定される 1 本当たりの許容引張力
P_{a3}	kN	接着系アンカーボルトにおいて、アンカーボルトの付着力により決定される 1 本当たりの許容引張力
ϕ_3	—	接着系アンカーボルトの許容引張力を決定する際の付着力による低減係数 (=2/3)
τ_a	N/mm ²	接着系アンカーボルトにおける許容付着応力度
τ_{bavg}	N/mm ²	接着系アンカーの基本平均付着強度で、カプセル式・有機系の場合 ($=10\sqrt{F_c/21}$)
P_a	kN	接着系アンカーボルト 1 本当たりの短期許容引張力
Q_a	kN	接着系アンカーボルト 1 本当たりの短期許容せん断力
Q_{a3}	kN	定着した躯体のコーン状破壊により決定される許容せん断力
${}_c\sigma_t$	N/mm ²	コーン状破壊に対するコンクリートの引張強度 ($=0.31 \times \sqrt{F_c}$)

3.2 評価対象部位

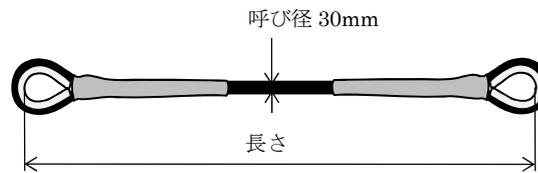
固縛装置の評価対象部位は、「2.2 固縛装置の構造」にて設定している構造に基づき、「2.3 荷重及び荷重の組合せ」に示す設計竜巻の風圧力の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

(1) 連結材

- ・連結材本体（固縛ロープ（高強度繊維ロープ））

※連結材に作用する荷重を、メーカー提示値の規格引張強度と比較するため、評価対象部位は連結材本体とする。

連結材の評価対象部位を図 3-1 に示す。



(高強度繊維ロープ ϕ 30mm (被覆部)
 ϕ 22mm (被覆無し部))

図 3-1 連結材の評価対象部位

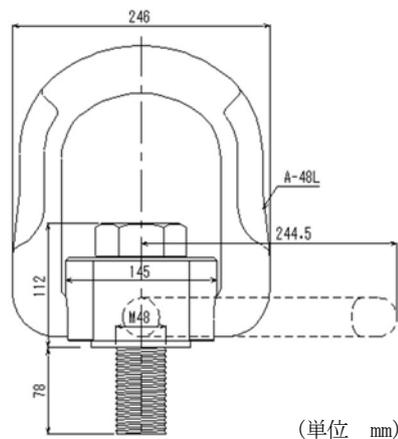
(2) 固定材

a. フレノリンクボルト

- ・フレノリンクボルト本体

※フレノリンクボルトに作用する荷重は、メーカー提示値の使用荷重に対し、安全係数を考慮した値と比較するため評価対象部位はフレノリンクボルト本体とする。

フレノリンクボルトの評価対象部位を図 3-2 に示す。



(フレノリンクボルト (A-48L))

図 3-2 フレノリンクボルトの評価対象部位

- b. アンカープレート
アンカープレートについては、ベースプレートの評価対象部位として設定する。
・ベースプレート
- (3) 基礎部（アンカーボルト）
基礎部（アンカーボルト）は、接着系アンカーボルトを評価対象部位として設定する。
・接着系アンカーボルト

固定材（アンカープレート）及び基礎部（アンカーボルト）の評価対象部位を図 3-3 に示す。

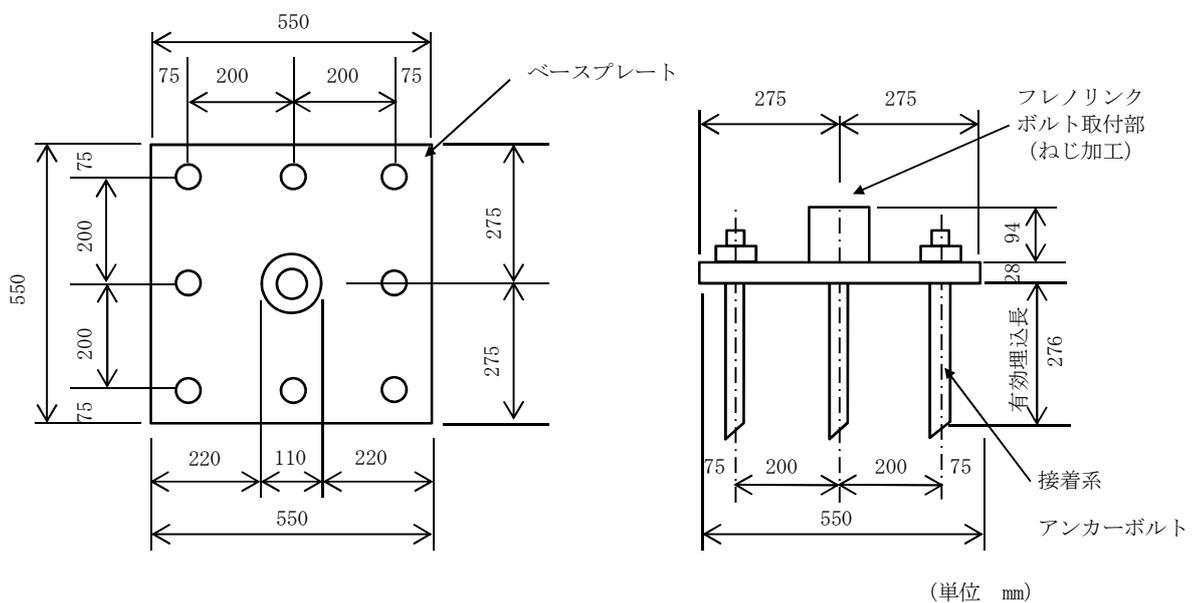


図 3-3 固定材（アンカープレート）及び基礎部（アンカーボルト）の評価対象部位

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 1-3「屋外重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算の方針」の「2.3 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. 常時作用する荷重 (F_d)

常時作用する荷重は、持続的に生じる荷重であり、自重とする。

b. 風圧力による荷重 (W_w)

風圧力による荷重は、固縛対象設備に発生し、連結材、固定材（フレノリンクボルト及びアンカープレート）を介して基礎（アンカーボルト）に作用する。

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」の「2.3(1) 荷重の種類」に示すように、竜巻による最大風速は、一般的には水平方向の風速として設定され、これにより固縛対象設備は横滑りを生じるような力を受けるが、鉛直方向に対し

でも、風圧力により固縛対象設備に揚力が発生し、浮き上がりが生じるような力を受けるため、鉛直方向の荷重についても考慮した設計とする。

(a) 竜巻の風圧力による荷重

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」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」に基づき、荷重を選定する。

イ. 浮き上がり荷重

固縛対象設備の浮き上がり時に発生する荷重 P_V は、設計竜巻により当該固縛対象設備に発生する鉛直力とする。

浮き上がり荷重は、固縛対象設備の形状による空力パラメータを用いて算出される揚力が自重を上回る（＝空力パラメータから算出される揚力－自重 > 0）場合に上向きの力として固縛対象設備に作用する。

固縛対象設備に作用する揚力は、揚力係数の代わりに保守的な設定となる抗力係数を用いることにより保守的に設定された揚力 $F_{L, m}$ を用い、空力パラメータ $C_D A/m$ を用いた式に展開し、浮き上がり荷重 P_V は次に示すとおり算出する。

$$P_V = F_{L, m} - m \cdot g = \frac{1}{2} \rho \cdot V_{SA}^2 \cdot C_D A - m \cdot g$$

$$= m \left(\frac{1}{2} \rho \cdot V_{SA}^2 \cdot \frac{C_D A}{m} - g \right)$$

なお、空力パラメータの算出等については「東京工芸大学，“平成 21～22 年度原子力安全基盤調査研究（平成 22 年度）竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究”，独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究成果報告書，平成 23 年 2 月」に基づき、以下の $C_D A/m$ として算出する。

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{0.33(C_{D1} A_1 + C_{D2} A_2 + C_{D3} A_3)}{m}$$

ロ. 横滑り荷重

横滑りに伴い発生する荷重 P_H は、設計竜巻の風圧力による荷重が当該固縛対象設備に作用する水平力とし、「建築基準法施行令」及び「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説」に準拠して、次に示すとおり W_w とする。

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

ハ. 衝撃荷重

連結材（サイドロープ）に余長を有する固縛装置が作動（余長が展張）する時に固縛対象設備の急停止に伴い固縛装置に発生する**衝撃荷重** P_i は、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」の「2.3(2)d. 衝撃荷重」に基づき、以下によって算出する。

(イ) 固縛対象設備の挙動開始風速の算出

固縛対象設備が浮き上がり又は横滑りを始める時の風速を算出する。

浮き上がり開始風速 $V_{SAS, F}$ は、浮き上がり荷重 P_V が 0 となる時の風速であり、以下の式によって算出する。

$$V_{SAS, F} = \sqrt{\frac{2 \cdot g}{\rho \cdot \frac{C_{DA}}{m}}}$$

横滑り開始風速 $V_{SAS, S}$ は、風圧力による荷重と静止摩擦力が釣り合った時の風速であり、以下の式によって算出する。

$$V_{SAS, S} = \sqrt{\frac{2 \mu_s \cdot g}{\rho \cdot \left(\frac{GCA}{m} + \mu_s \frac{C_{DA}}{m} \right)}}$$

(ロ) 固縛装置の余長がなくなる時点での終端速度の算定

固縛対象設備が挙動を開始してから連結材（サイドロープ）が展張する時点での固縛対象設備が持つ速度である終端速度 $v_{SA, OT}$ を算出する。以下算出は横滑りを例に記載する。

固縛対象設備が横滑りを始めた風速から最大風速となる風速を、設計竜巻の風速分布曲線より、保守性を考慮して線形近似した以下の式を使用する。

$$V'_{SA} = a t + b \quad \cdots \quad \text{①}$$

V'_{SA} : t 秒後に固縛対象設備が受ける竜巻の風速

a : 風速の近似式の定数

b : 風速の近似式の定数 (= 滑り出し風速)

停止している固縛対象設備が動き出し、設計余長分を移動した時の加速度 a_{SA} を、荷重と加速度の関係から算出する。

$$a_{SA} = \frac{F}{m} = \frac{W_w - F_{fd}}{m} = \frac{1}{2} \rho \frac{G \cdot C \cdot A}{m} \cdot V'^2_{SA} - \mu_d \cdot g \quad \cdots \quad \text{②}$$

F_{fd} : 固縛対象設備に作用する動摩擦力

ここで、K を以下に示すように置いて、②式の V'_{SA} に①式を代入し、t に対する式として整理すると、③式となる。

$$K = \frac{1}{2} \rho \frac{G \cdot C \cdot A}{m}$$

$$a_{SA} = K \cdot a^2 \cdot t^2 + 2K \cdot a \cdot b \cdot t + (K \cdot b^2 - \mu_d \cdot g) \quad \cdots \quad \text{③}$$

固縛対象設備の速度 v_{SA} は、加速度 a_{SA} を時間 t で積分し、初期条件を考慮することで④式となる。（初期条件 t = 0 のとき、 $v_{SA} = 0$ ）

$$\begin{aligned}
 v_{SA} &= \int a_{SA} dt \\
 &= \frac{1}{3}K \cdot a^2 \cdot t^3 + K \cdot a \cdot b \cdot t^2 \\
 &\quad + (K \cdot b^2 - \mu_d \cdot g) t \dots \text{④}
 \end{aligned}$$

固縛対象設備の移動距離 x_{SA} は、速度 v_{SA} を時間 t で積分し、初期条件を考慮すると以下の式となる。(初期条件 $t=0$ のとき、 $x_{SA}=0$)

$$\begin{aligned}
 x_{SA} &= \int v_{SA} dt \\
 &= \frac{1}{12}K \cdot a^2 \cdot t^4 + \frac{1}{3}K \cdot a \cdot b \cdot t^3 \\
 &\quad + \frac{1}{2} (K \cdot b^2 - \mu_d \cdot g) t^2 \dots \text{⑤}
 \end{aligned}$$

固縛対象設備の移動距離 x_{SA} が設計余長 X となる時として、⑤式を t について解くと、滑り始めてから固縛装置が作動するまでの時間 t_i が算出できる。

④式に t_i を代入することで、固縛装置が作動する時点での固縛対象設備の速度として、終端速度 $v_{SA, OT}$ が算出される。

(ハ) 固縛装置に作用する衝撃荷重の算定

固縛対象設備の停止時に、固縛装置に作用する衝撃荷重は、停止に伴う衝撃荷重によって連結材に作用する張力に加え、風圧力及び動摩擦力による荷重 F_i' を静荷重として、連結材張力による衝撃荷重 F_i 算出後に加算する。固縛対象設備が有する運動量は $m v_{SA}$ である。固縛装置が作用し始めて Δt の間に停止したとすると、連結材に発生する衝撃荷重 F_i と運動量の関係は、⑥式のとおりとなる。

$$\int_0^{\Delta t} F_i(t) dt = m \cdot v_{SA} \dots \text{⑥}$$

固縛装置の連結材は、弾性的に拘束力を生じる性質を有しており、バネ定数 k を有するバネとして考え、連結材に弾性的な力が作用し、固縛対象設備の速度が 0 になったとすると、振幅を B として、連結材の変位 x_{RP} は、以下の式で表される。また、フックの法則により連結材に発生する衝撃荷重 F_i は⑧式となる。

$$x_{RP} = B \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t\right) \dots \text{⑦}$$

$$F_i(t) = k \cdot x_{RP} = k \cdot B \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t\right) \dots \text{⑧}$$

次に、⑧式を⑥式に代入して積分し、初期条件を考慮して、振幅について解くと⑨式となる。（初期条件： $t=0$ のとき $v_{SA}=v_{SA,OT}$ 、 $t=\Delta t$ のとき $v_{SA}=0$ ）

$$B = v_{SA,OT} \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} \quad \dots \textcircled{9}$$

また、衝撃荷重 F_i は、⑧式の正弦関数が1のときに最大値（ $=k \cdot B$ ）となり、連結材の変位も最大となるその時間 t_i' は、以下の式となる。

$$t_i' = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} \quad \dots \textcircled{10}$$

さらに、風荷重と動摩擦力の差分による静荷重 F_i' が作用する。固縛対象設備に作用する風速は、①式に t_i を代入して算出する。

$$V''_{SA} = a \cdot t_i + b$$

$$F_i' = W_W - F_m$$

$$= \frac{1}{2} \rho \left(\frac{G \cdot C \cdot A}{m} + \frac{C_D A}{m} \right) V''_{SA}{}^2 - \mu_d \cdot g$$

固縛装置作動により固縛対象設備の急停止に伴う荷重は、衝撃荷重 F_i に加えて静荷重 F_i' を加算した荷重とし、衝撃荷重 P_i とする。

(2) 荷重の組合せ

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」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」に示す、常時作用荷重（ F_d ）、風荷重による浮き上がり荷重（ P_v ）、横滑り荷重（ P_H ）及び衝撃荷重（ P_i ）を考慮する。

この荷重及び荷重の組合せを表 3-4 に示す。

表 3-4 固縛装置の荷重の組合せ

強度評価の対象施設	評価内容	荷重の組合せ
固縛装置	構造強度	$F_d + P_v$ 又は $F_d + P_H$ 又は $F_d + P_i$ （固縛対象設備に作用する荷重）

(3) 固縛対象設備に考慮する荷重の組合せ

「2. 基本方針」に記載したとおり、「3.3(1) 荷重設定」, 「3.3(2) 荷重の組合せ」に基づき評価した結果, 最も裕度の低い固縛装置を有する可搬型代替注水中型ポンプに対して考慮する荷重を表 3-5 に示す。

表 3-5 可搬型代替注水中型ポンプに考慮する荷重の組合せ

固縛対象設備	固縛装置の構成	荷重の組合せ
可搬型代替注水 中型ポンプ	フレノリンクボルト + アンカープレート + 接着系アンカーボルト	$F_d + \text{衝撃荷重 } P_i$ (側面方向の横滑り)

3.4 許容限界

固縛装置の許容限界は, 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」の「5. 許容限界」に示すとおり, 「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, 評価内容に応じて設定する。評価においては, 許容限界以下であることを確認する。

(1) 連結材

固縛に必要となる連結材(固縛ロープ)については, 設計竜巻による荷重に対し, 連結材の破断が生じない設計とする。

このため, 当社がその妥当性を確認したメーカ提示値の規格引張強度を許容限界とする。

(2) 固定材

a. フレノリンクボルト

固定材のうち, フレノリンクボルトについては, 設計竜巻による荷重に対し, フレノリンクボルトの破断が生じない設計とする。

このため, 当社がその妥当性を確認したメーカ提示値の使用荷重に対し, 安全係数を考慮した値を許容限界とする。

b. アンカープレート

固定材のうち, アンカープレートについては, 設計竜巻による荷重に対し, 鋼材の破断が生じない設計とする。

このため, 「鋼構造塑性設計指針」に基づく, 部材の終局耐力を許容限界とする。

(3) 基礎部(アンカーボルト)

a. 接着系アンカーボルト

基礎部(アンカーボルト)のうち, 接着系アンカーボルトについては, 設計竜巻による荷重に対し, 接着系アンカーボルトの破断が生じない設計とする。

このため, 「各種合成構造設計指針・同解説」に基づく, 短期許容応力度を許容限界とする。

3.5 評価方法

(1) 連結材の評価方法

連結材に作用する荷重が、固縛装置の箇所数×連結材1組当たりの許容限界を超えないことを確認するため、連結材1組当たりに作用する荷重を、以降に示す浮き上がり及び横滑りの荷重状態に対して算定し、そのうち最も大きい荷重を選定する。

a. 浮き上がり時

設計竜巻の風荷重による揚力が固縛対象設備に作用して浮き上がる状態を考える。固縛対象設備が浮き上がった場合には、両側に配置した固縛装置（連結材（サイドロープ））で抵抗することから連結材に作用する荷重を以下の式により算定する。浮き上がり時の評価モデルの概要図を図3-4に示す。

連結材に作用する荷重のうち、メインロープ又はサイドロープ作用する荷重のうち大きい荷重を、浮き上がり時の連結材の検討用荷重 P_1 とする。

$$P_1 = \max \left(\frac{P}{n_1} \cdot \frac{1}{\sin \theta_{v1}}, \frac{P}{2} \right) = \frac{P}{n_1} \cdot \frac{1}{\sin \theta_{v1}} \quad (n_1 \cdot \sin \theta_{v1} \leq 2 \text{ より})$$

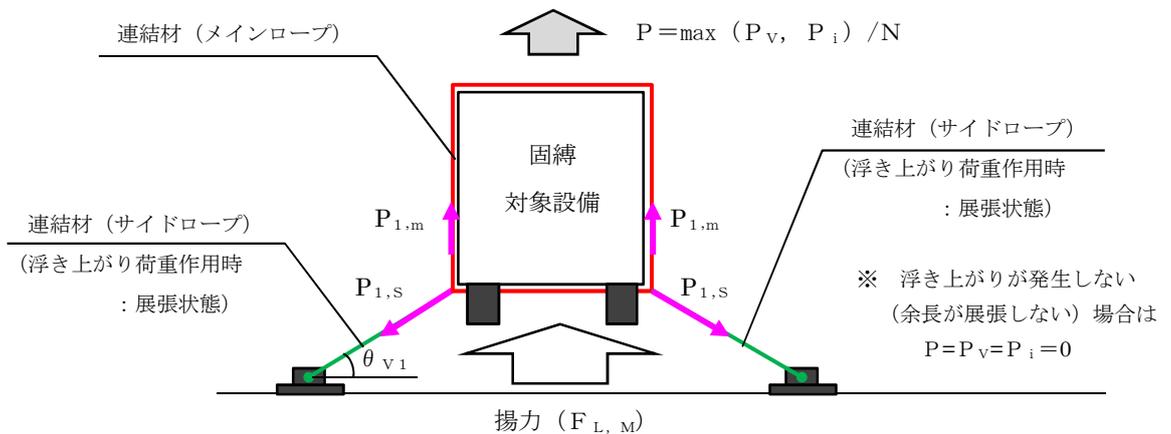


図3-4 浮き上がり時の連結材の評価モデルの概要図

b. 横滑り時

設計竜巻による風荷重が固縛対象設備に作用して横滑りする状態を考え、連結材に作用する荷重は算定するが、横滑りの方向により連結材に作用する荷重状態が異なるため、横滑り方向に対して、荷重を算定する。

(a) 側面方向の横滑り時

固縛対象設備が側面方向（進行方向直角方向）に横滑りした場合には、固縛装置は片側に配置した固縛装置（連結材（サイドロープ））のみで抵抗することとなるから、連結材の検討用荷重 P_1 は以下の式により算定する。横滑り時（側面方向）の評価モデルの概要図を図3-5に示す。

連結材に作用する荷重のうち、メインロープ又はサイドロープ作用する荷重のうち大きい荷重を、側面方向の横滑り時の連結材の検討用荷重 P_1 とする。

$$P_1 = \max \left(P \cdot \frac{1}{\cos \theta_{V2}}, \frac{P}{2} \right) = P \cdot \frac{1}{\cos \theta_{V2}} \quad (\cos \theta_{V2} \leq 1 < 2 \text{ より})$$

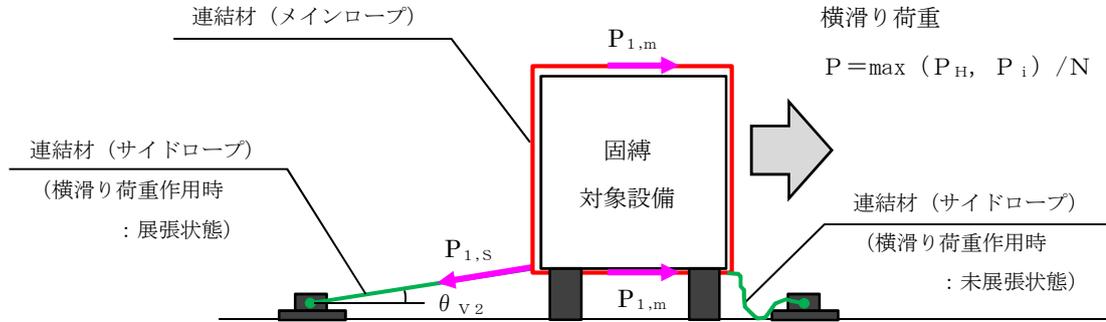


図 3-5 横滑り時（側面方向）の連結材の評価モデルの概要図

(b) 正面方向の横滑り時

固定対象設備が正面方向（進行方向）に横滑りした場合には、両側に配置した固定装置（連結材（サイドロープ））で抵抗することから、連結材の検討用荷重 P_1 は以下の式により算定する。横滑り時（正面方向）の評価モデルの概要図を図 3-6 に示す。

連結材に作用する荷重のうち、メインロープ又はサイドロープ作用する荷重のうち大きい荷重を、正面方向の横滑り時の連結材の検討用荷重 P_1 とする。

$$P_1 = \max \left(\frac{P}{n_1} \cdot \frac{1}{\sin \theta_H} \cdot \frac{1}{\cos \theta_{V2}}, \frac{P}{n_1} \cdot \frac{1}{\tan \theta_H} \right)$$

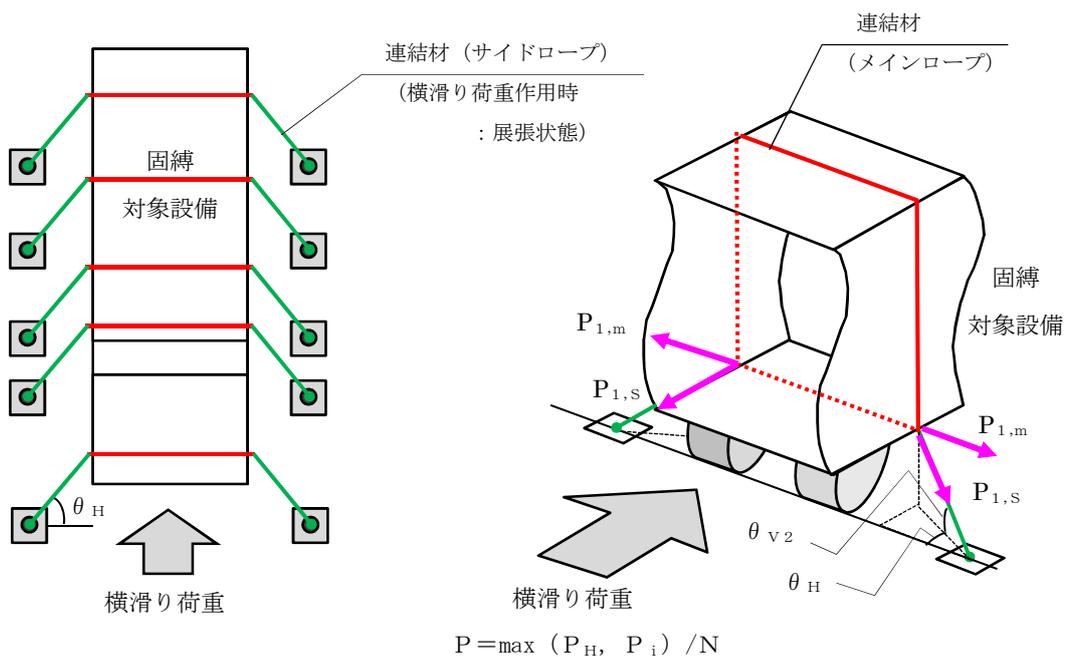


図 3-6 横滑り時（正面方向）の連結材の評価モデルの概要図

(2) 固定材の評価方法

a. フレノリンクボルトの評価方法

フレノリンクボルトに作用する荷重も連結材と同様に、固縛装置の箇所数×フレノリンクボルト1本当たりの許容限界を超えないことを確認するため、フレノリンクボルト1本当たりに作用する荷重を、以降に示す浮き上がり及び横滑りの荷重状態に対して算定し、そのうち最も大きい荷重を選定する。

なお、フレノリンクボルトは連結材のうちサイドロープと同一の作用線上に配置されることから、連結材のサイドロープの荷重を検討用荷重 P_2 とする。

また、荷重の評価モデルは連結材と同様である。

(a) 浮き上がり時

浮き上がり時のフレノリンクボルトの検討用荷重 P_2 は以下の式で算定する。

$$P_2 = \frac{P}{n_2} \cdot \frac{1}{\sin \theta_{V1}}$$

(b) 横滑り時

イ. 側面方向の横滑り時

側面方向の横滑り時のフレノリンクボルトの検討用荷重 P_2 は以下の式で算定する。

$$P_2 = P \cdot \frac{1}{\cos \theta_{V2}}$$

ロ. 正面方向の横滑り時

正面方向の横滑り時のフレノリンクボルトの検討用荷重 P_2 は以下の式で算定する。

$$P_2 = \frac{P}{n_2} \cdot \frac{1}{\cos \theta_H} \cdot \frac{1}{\cos \theta_{V2}}$$

b. アンカープレートの評価方法

(a) 計算モデル

アンカープレートの評価は、図3-7に示す x 、 y 、 z 方向に作用する荷重として、検討用荷重 P_3 を選定し、各検討荷重に対して部材断面に生ずる荷重等を算定し、評価を行う。

ただし、フレノリンクボルトはボルト芯を軸として回転するため、 x 方向と y 方向は同一の評価条件となるため、選定した最大の値となる検討用荷重 P_3 が x 方向に作用する場合にて評価する。

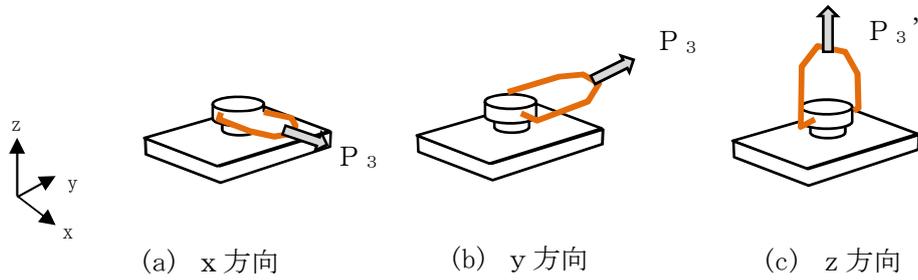


図 3-7 アンカープレートの計算モデルの概要図

(b) 計算方法

イ. x 方向荷重時の検討

アンカープレートのうち、ベースプレートに対し、x 方向に荷重が作用した場合の計算モデルの概要図を図 3-8 に示す。

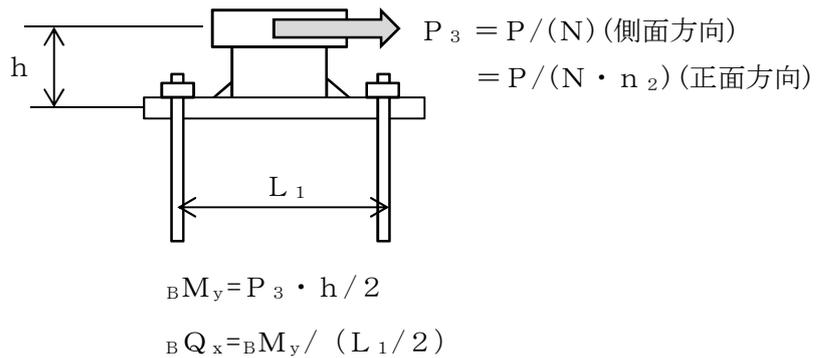


図 3-8 x 方向に荷重が作用した場合の計算モデルの概要図

・曲げに対する検討

検討用荷重 P_3 によるベースプレートの y 軸まわり曲げモーメント ${}_B M_y$ は、以下の式により算定する。

$${}_B M_y = P_3 \cdot \frac{h}{2}$$

ベースプレートの y 軸まわりの塑性断面係数 ${}_B Z_{py}$ は、以下の式により算定する。

$${}_B Z_{py} = \frac{{}_B B \cdot {}_B t^2}{4}$$

許容限界であるベースプレートの y 軸まわりの終局曲げモーメント ${}_B M_{py}$ は、「鋼構造塑性設計指針」に基づき、以下の式により算定する。

$${}_B M_{py} = \sigma_y \cdot {}_B Z_{py} \cdot 10^{-3}$$

・せん断に対する検討

検討用荷重 P_3 によるベースプレートのせん断力 ${}_B Q_x$ は、以下の式により算定する。

$${}_B Q_x = \frac{{}_B M_y}{\frac{L_1}{2}}$$

ベースプレートの断面積 ${}_B A$ は、以下の式により算定する。

$${}_B A = {}_B B \cdot {}_B t$$

許容限界であるベースプレートの終局せん断力 ${}_B Q_{p_x}$ は、「鋼構造塑性設計指針」に基づき、以下の式により算定する。

$${}_B Q_{p_y} = \tau_y \cdot {}_B A \cdot 10^{-3}$$

ロ. z 方向荷重時の検討

アンカープレートのうち、ベースプレートに対し、z 方向に荷重が作用した場合の計算モデルの概要図を図 3-9 に示す。

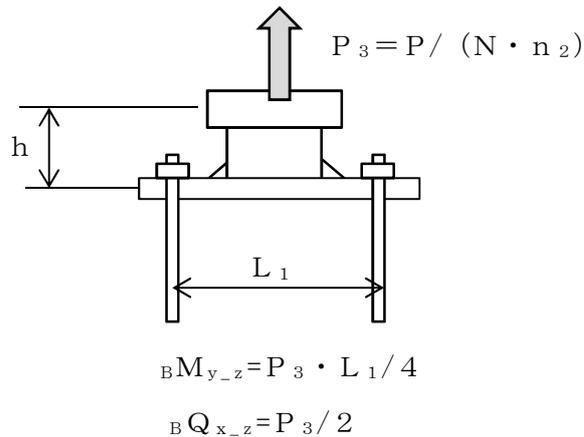


図 3-9 z 方向に荷重が作用した場合の計算モデルの概要図

・曲げに対する検討

検討用荷重 P_3 によるベースプレートの y 軸まわり曲げモーメント ${}_B M_{y-z}$ は、以下の式により算定する。

$${}_B M_{y-z} = P_3 \cdot \frac{L_1}{4}$$

ベースプレートの y 軸まわりの塑性断面係数 ${}_B Z_{p_y}$ は、以下の式により算定する。

$${}_B Z_{p_y} = \frac{{}_B B \cdot {}_B t^2}{4}$$

許容限界であるベースプレートの y 軸まわりの終局曲げモーメント ${}_B M_{p_y}$ は、「鋼構造塑性設計指針」に基づき、以下の式により算定する。

$${}_B M_{p_y} = \sigma_y \cdot {}_B Z_{p_y} \cdot 10^{-3}$$

・せん断に対する検討

検討用荷重 P_3 によるベースプレートのせん断力 ${}_B Q_x$ は、以下の式により算定する。

$${}_B Q_{x,z} = \frac{P_3}{2}$$

ベースプレートの断面積 ${}_B A$ は、以下の式により算定する。

$${}_B A = {}_B B \cdot {}_B t$$

許容限界であるベースプレートの終局せん断力 ${}_B Q_{p_z}$ は、「鋼構造塑性設計指針」に基づき、以下の式により算定する。

$${}_B Q_{p_z} = \tau_y \cdot {}_B A \cdot 10^{-3}$$

(3) 基礎部（アンカーボルト）の評価方法

a. 接着系アンカーボルトの評価方法

(a) 引張に関する検討

接着系アンカーボルトの降伏引張耐力に関する検討は以下による。

アンカーボルトの有効断面積 ${}_A A_e$ は、以下の式により算定する。

$${}_A A_e = {}_A \alpha \cdot \frac{\pi \cdot d_a^2}{4}$$

z 方向の検討用荷重 P_3 によりアンカーボルト 1 本当たりに生ずる引張力 ${}_A T_V$ は、以下の式により算定する。

$${}_A T_V = P_3$$

x 又は y 方向の検討用荷重 P_3 によりアンカーボルト 1 本当たりに生ずる引張力 ${}_A T_H$ は、以下の式により算定する。

$${}_A T_H = \frac{P_3 \cdot h}{\frac{7}{8} d_t \cdot n}$$

アンカーボルトの降伏により決定される 1 本当たりの許容引張力 P_{a1} は、以下の式により算定する。

$$P_{a1} = \phi_1 \cdot f_t \cdot {}_A A_e \cdot 10^{-3}$$

アンカーボルトの付着力により決定される 1 本当たりの許容引張力 P_{a3} は、以下の式により算定する。

$$P_{a3} = \phi_3 \cdot \tau_a \cdot \pi \cdot A_d \cdot A_{L_{ce}} \cdot 10^{-3}$$

接着系アンカーボルトにおける許容付着応力度 τ_a は以下の式により算定する。

$$\tau_a = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \tau_{bavg}$$

接着系アンカーボルトにおいて、へりあき及びアンカーボルトのピッチによる付着強度の低減係数は以下の式により算定する。

$$\alpha_n : 0.5 \cdot (C_n / A_{L_{ce}}) + 0.5$$

$$A_{L_e} = A_L - d_a$$

$$A_{L_{ce}} = A_{L_e} - 2 \cdot d_a$$

ここで、

$$(C_n / A_{L_{ce}}) \geq 1.0 \text{ の場合は、 } (C_n / A_{L_{ce}}) = 1.0$$

$$A_{L_e} \geq 10 d_a \text{ の場合は、 } A_{L_e} = 10 d_a \text{ とする。}$$

アンカーボルトの許容耐力 P_a は、以下の式により算定する。

$$P_a = \min(P_{a1}, P_{a3})$$

(b) せん断に関する検討

検討用荷重 P_3 によりアンカーボルト 1 本当たりに生ずるせん断力 AQ は、以下の式により算定する。

$$AQ = \frac{P_3}{n}$$

アンカーボルトのせん断強度により決定される許容せん断力 Q_{a1} は、以下の式により算定する。

$$Q_{a1} = \phi_1 \cdot s \sigma_{qa} \cdot A_{A_e} \cdot 10^{-3}$$

定着した躯体の支圧強度により決定される許容せん断力 Q_{a2} は、以下の式により算定する。

$$Q_{a2} = \phi_2 \cdot c \sigma_{qa} \cdot A_{A_e} \cdot 10^{-3}$$

せん断力に対するコーン状破壊面の有効投影面積 A_{qc} は、アンカーボルトのへりあき寸法を c とすると以下の式により算定する。

$$A_{qc} = 0.5 \cdot \pi \cdot c^2$$

定着した躯体のコーン状破壊により決定される許容せん断力 Q_{a3} は、以下の式により算定する。

$$Q_{a3} = \phi_3 \cdot c \sigma_t \cdot A_{qc} \cdot 10^{-3}$$

アンカーボルトの許容せん断力 Q_a は、以下の式により算定する。

$$Q_a = \min(Q_{a1}, Q_{a2}, Q_{a3})$$

(c) 引張とせん断を同時に受ける場合に関する検討

コンクリートに埋め込まれるアンカーボルトとしての引張力とせん断力の組合せ力に対する検定は、「各種合成構造設計指針・同解説」に基づき、以下の式によって行う。

$$\left[\frac{A T_H}{P_a} \right]^2 + \left[\frac{A Q}{Q_a} \right]^2 \leq 1$$

4. 評価条件

評価に用いる寸法は、公称値を使用する。

4.1 可搬型代替注水中型ポンプの評価条件

可搬型代替注水中型ポンプの評価条件を、表 4-1～表 4-8 に示す。

表 4-1 評価条件

固縛対象設備	V_D (m/s)	V_{Rm} (m/s)	R_m (m)	H_i (m)	ρ (kg/m ³)	g (m/s ²)
可搬型代替注水 中型ポンプ	100	85	30	15	1.22	9.80665

表 4-2 評価条件（固縛対象設備）

固縛対象設備	B (m)	L (m)	H (m)	m (m)	μ_s (-)	μ_d (-)
可搬型代替注水 中型ポンプ	2.490	8.260	3.430	14800	0.44	0.29

C_{D1} (-)	C_{D2} (-)	C_{D3} (-)	A_1 (m ²)	A_2 (m ²)	A_3 (m ²)	G (-)	C (-)
2.0	2.0	2.0	8.541	20.567	28.332	1.0	1.2

V_{SA} (m/s)	$V_{SAS, F}$ (m/s)	$V_{SAS, S}$ (m/s)	
		側面	正面
88.1	79.0	45.4	62.2

表 4-3 評価条件 (固縛装置)

固縛対象設備	N (箇所)	X (mm)	L _{OF} (m)	θ_{V1} (°)	θ_{V2} (°)	θ_H (°)
可搬型代替注水 中型ポンプ	5	600	900	60.2	34.0	53.2

表 4-4 評価条件 (連結材)

評価対象	仕様	A _{RP} (mm ²)	E _{RP} (N/mm ²)	L _{RP} (m)	n ₁ (個)
連結材	高強度繊維ロープ	380.13	15785	6.568	2

表 4-5 評価条件 (固定材のうちフレノリンクボルト)

評価対象	仕様	型式	n ₂ (個)
固定材	フレノリンクボルト	A-48L	2

表 4-6 評価条件 (固定材のうちアンカープレート)

評価対象	評価部位	材質	F (N/mm ²)	B _B (mm)	B _t (mm)
固定材	アンカープレート	SN400B	235	550	28

h (mm)	L ₁ (mm)	d _t (mm)	n ₂ (個)
136	400	475	2

表 4-7 評価条件（基礎部（アンカーボルト））

評価対象	評価部位	材質	F (N/mm ²)	f _b (N/mm ²)	f _t (N/mm ²)
基礎部 (アンカーボルト)	接着系 アンカーボルト	SS400	235	235	235

d _a (mm)	n ₂ (個)	A n (本)	A n' (本)	A L (mm)	A a (mm)	c (mm)
24	2	8	3	300	200	400

α ₁ (-)	α ₂ (-)	α ₃ (-)	F _C (N/mm ²)	γ (kN/m ³)
1.0	0.76	0.76	40	24.5

表 4-8 評価条件（固縛対象設備に作用する荷重）

固縛対象設備	P _v (kN)	P _H (kN)		P _i (kN)	
		側面	正面	側面	正面
可搬型代替注水 中型ポンプ	35.0	161.0	48.5	676.0	713.7

5. 評価結果

5.1 可搬型代替注水中型ポンプの評価結果

(1) 連結材の評価結果

連結材の評価結果を表 5-1 に示す。連結材に作用する荷重は許容限界以下であり，固縛状態を維持するために必要な構造強度を有している。

表 5-1 連結材の評価結果

評価対象	作用荷重 ケース	作用荷重 (kN)	許容限界 (kN)	裕度
連結材	衝撃荷重 (側面方向 横滑り)	163.1	250	1.53

(2) 固定材の評価結果

a. フレノリンクボルト

固定材のうちフレノリンクボルトの評価結果を表 5-2 に示す。フレノリンクボルトに作用する荷重は許容限界以下であり，固縛状態を維持するために必要な構造強度を有している。

表 5-2 固定材（フレノリンクボルト）の評価結果

評価対象	作用荷重 ケース	作用荷重 (kN)	許容限界 (kN)	裕度
フレノリンク ボルト	衝撃荷重 (側面方向 横滑り)	163.1	735	4.50

b. アンカープレート

固定材のうちアンカープレートの評価結果を表 5-3 に示す。アンカープレートに作用する荷重は許容限界以下であり，固縛状態を維持するために必要な構造強度を有している。

表 5-3 固定材（アンカープレート）の評価結果

評価対象	作用荷重 ケース (水平方向)	x (y) 方向 荷重の曲げ モーメント (kN・mm)	許容限界 (kN・mm)	x (y) 方向 せん断力 (kN)	許容限界 (kN)
アンカー プレート	衝撃荷重 (側面方向 横滑り)	9193.6	27812.4	46.0	2279.2

作用荷重 ケース (鉛直方向)	z 方向荷重 の曲げ モーメント (kN・mm)	許容限界 (kN・mm)	z 方向 せん断力 (kN)	許容限界 (kN)	裕度*
浮き上がり 荷重	350.0	27812.4	1.8	2279.2	3.02

注) * : 最小裕度のみ記載

(3) 基礎部（アンカーボルト）の評価結果

基礎部（アンカーボルト）の評価結果を表 5-4 に示す。アンカーボルトに作用する荷重は許容限界以下であり、固縛状態を維持するために必要な構造強度を有している。

表 5-4 基礎部（アンカーボルト）の評価結果

評価対象	作用荷重 ケース (水平方向)	引張力 (kN)	許容限界 (kN・mm)	せん断力 (kN)	許容限界 (kN)
接着系 アンカーボルト	衝撃荷重 (側面方向 横滑り)	14.8	79.7	16.9	55.6

引張力+ せん断力	許容限界	裕度*
0.1391	1.0	3.28

注) * : 最小裕度のみ記載

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.....	11
2.4 適用規格.....	13
3. 強度評価方法.....	14
3.1 記号の定義.....	14
3.2 評価対象部位.....	15
3.3 荷重及び荷重の組合せ.....	16
3.4 許容限界.....	18
3.5 評価方法.....	20
4. 評価条件.....	28
4.1 貫通評価.....	28
4.2 裏面剥離評価.....	30
4.3 変形評価.....	30
5. 強度評価結果.....	33
5.1 貫通評価.....	33
5.2 裏面剥離評価.....	34
5.3 変形評価.....	35

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。

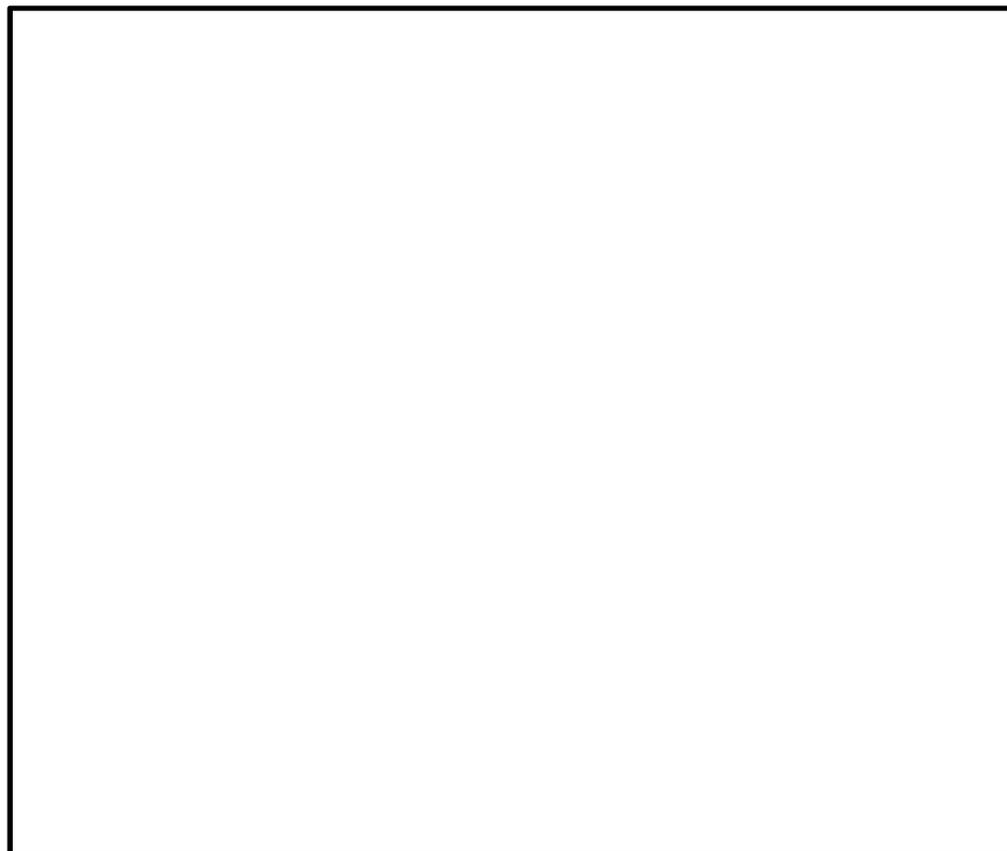


図 2-1 建屋及び構造物の配置図

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。

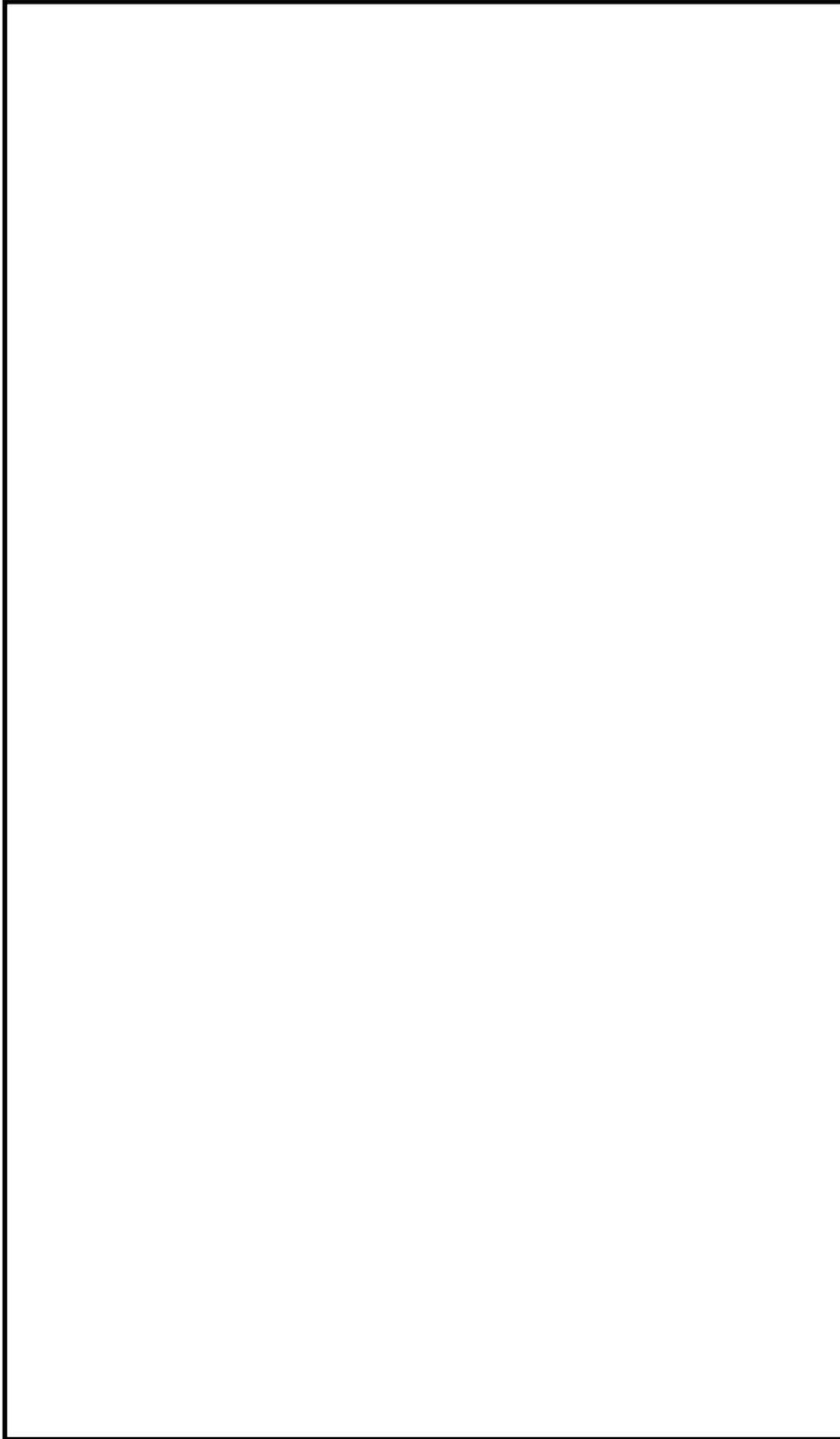


図2-2 原子炉建屋の概略平面図

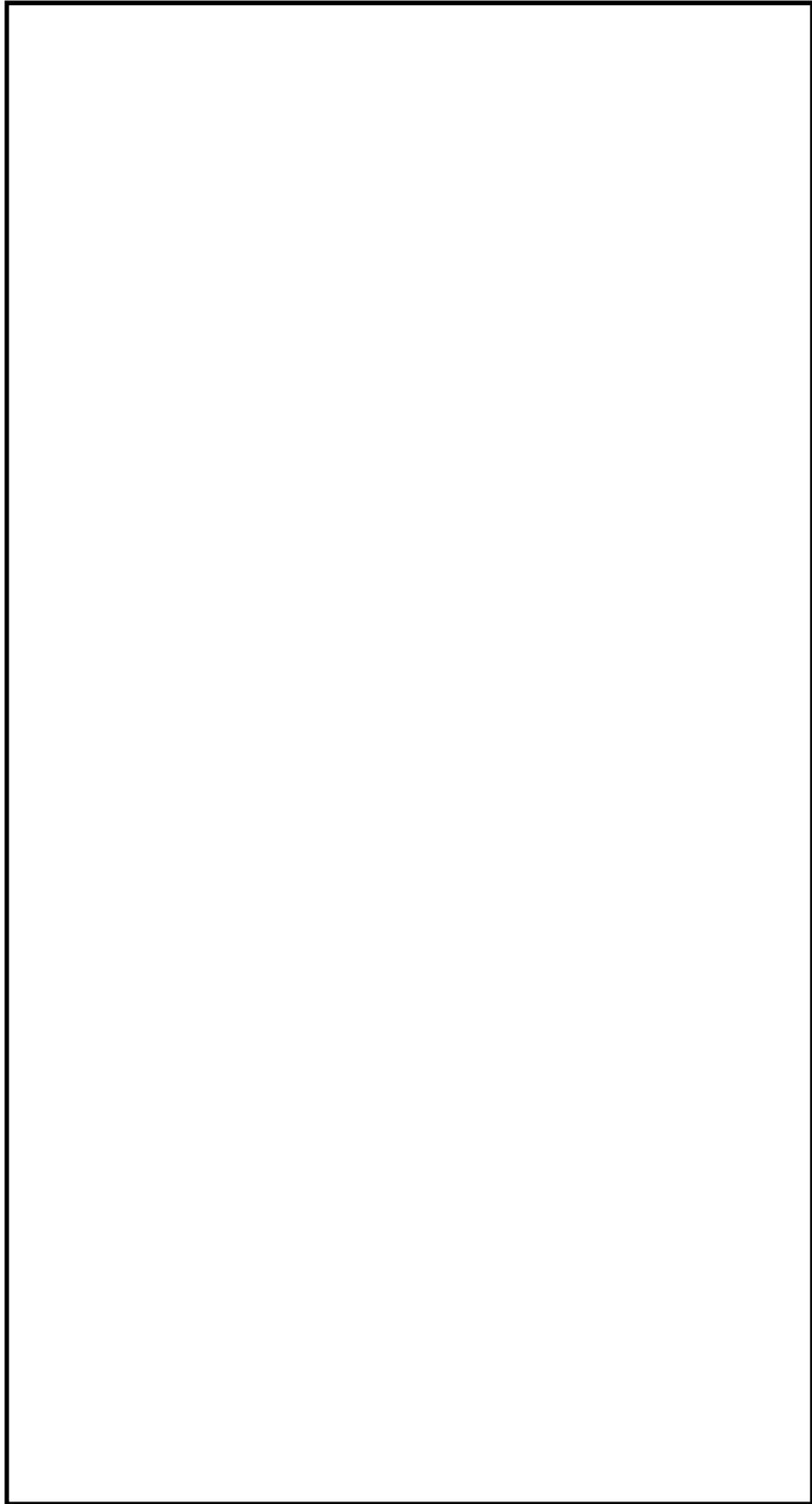


図 2-3 原子炉建屋の概略断面図

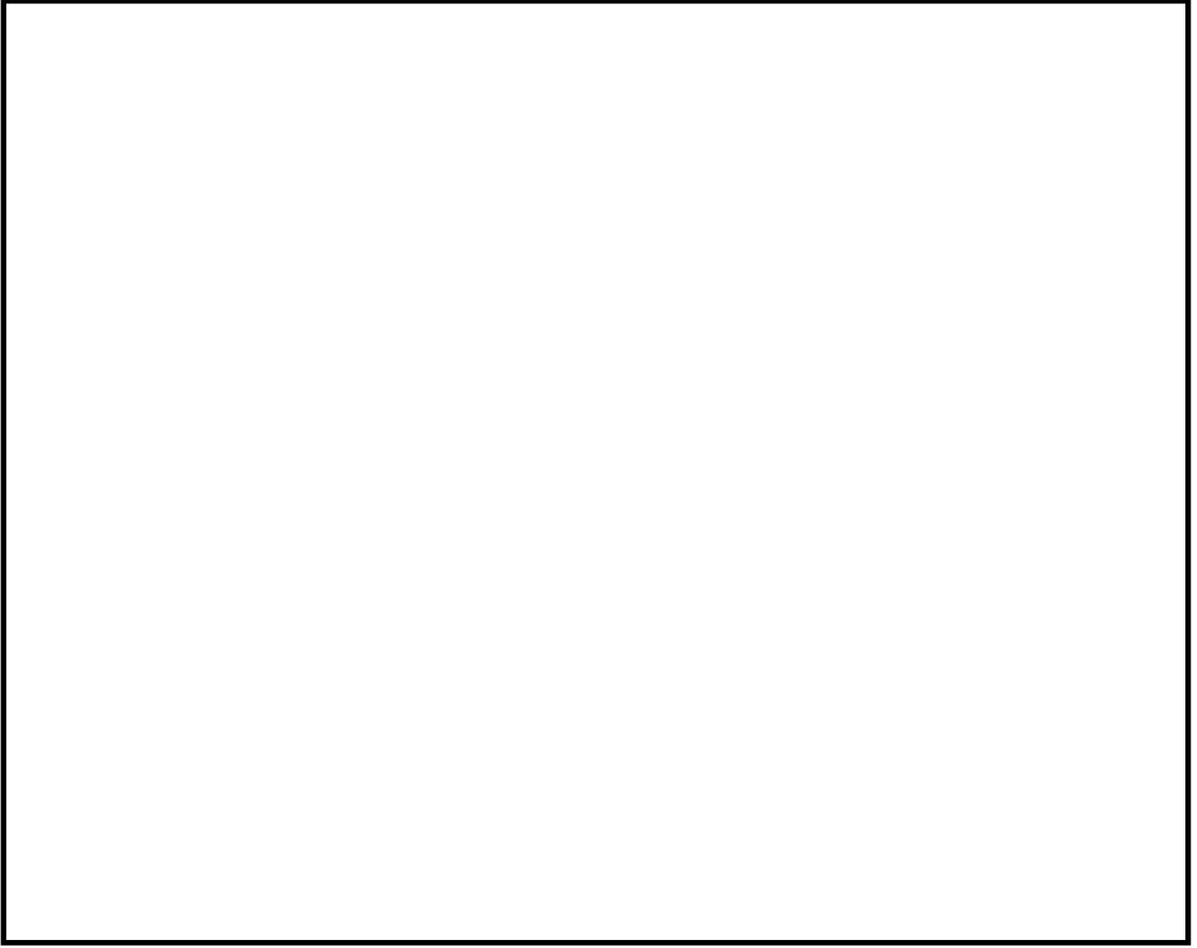


図 2-4 タービン建屋の概略平面図

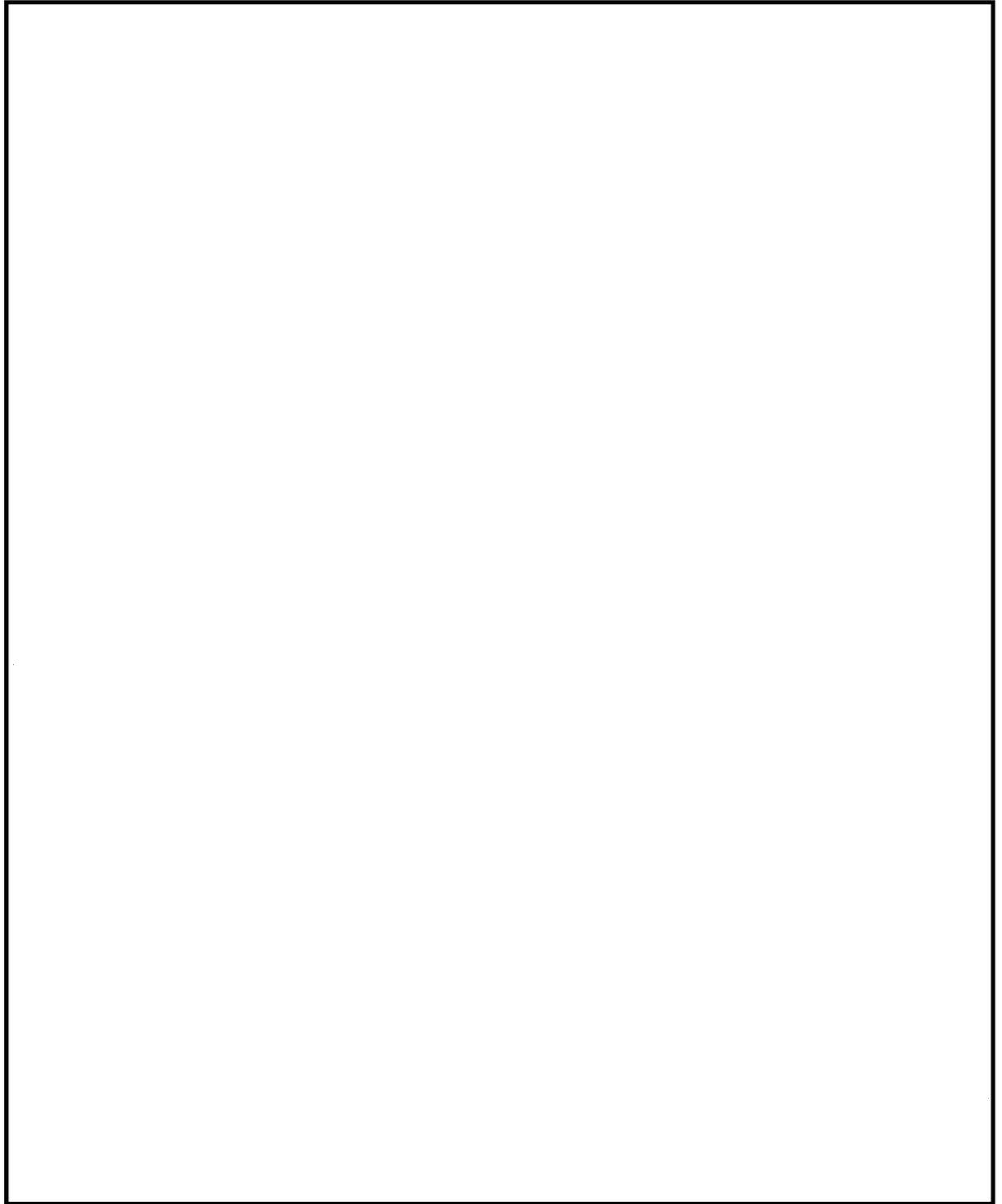


図 2-5 タービン建屋の概略断面図

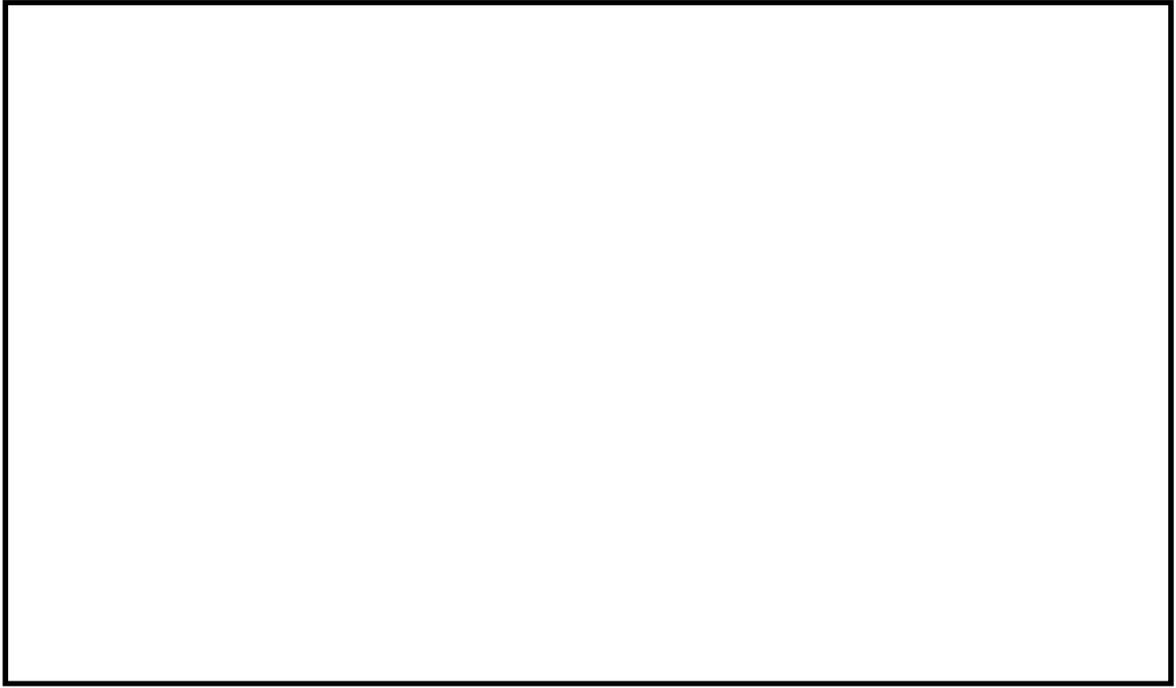


図 2-6 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略平面図

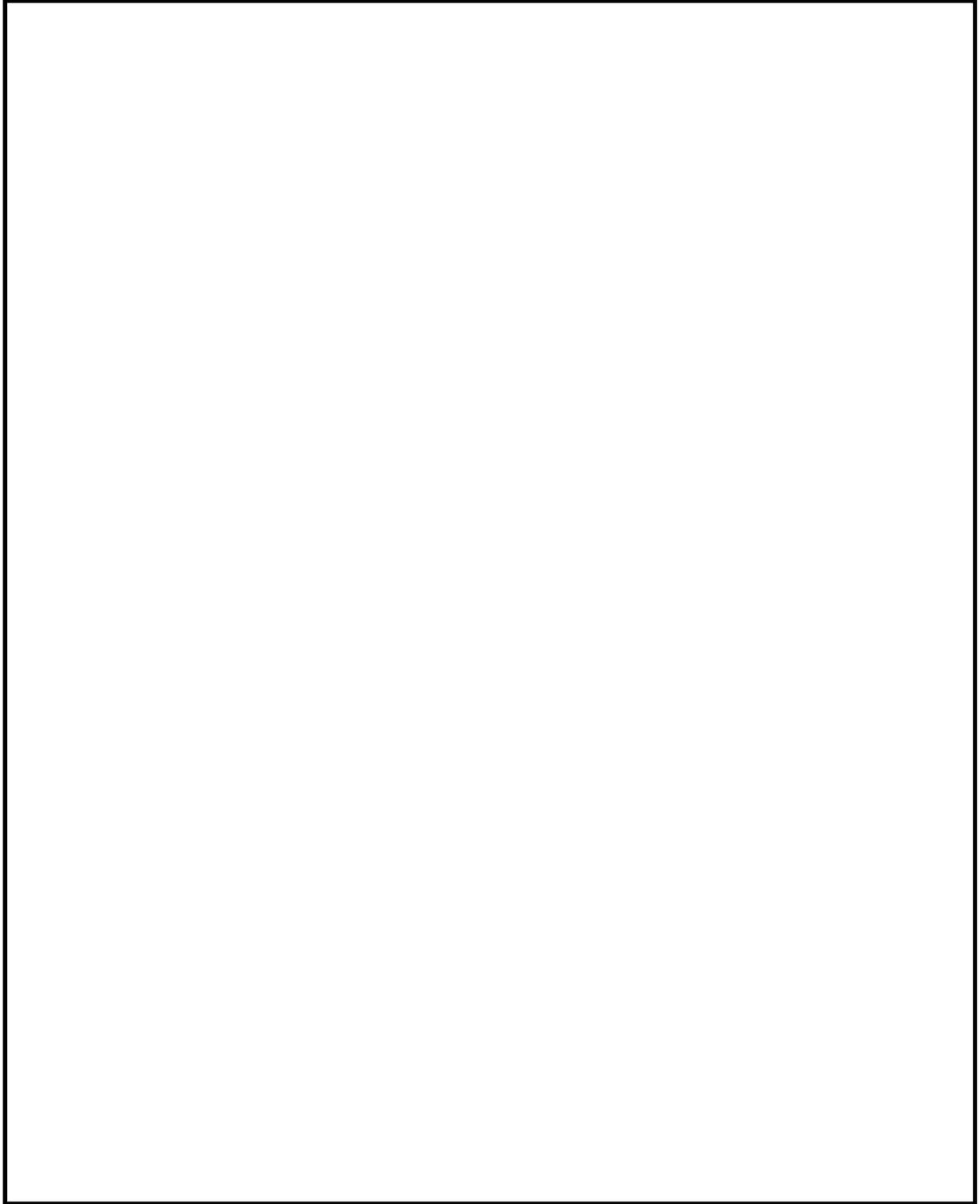


図 2-7 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略断面図



図2-8 軽油貯蔵タンクタンク室の概略平面図

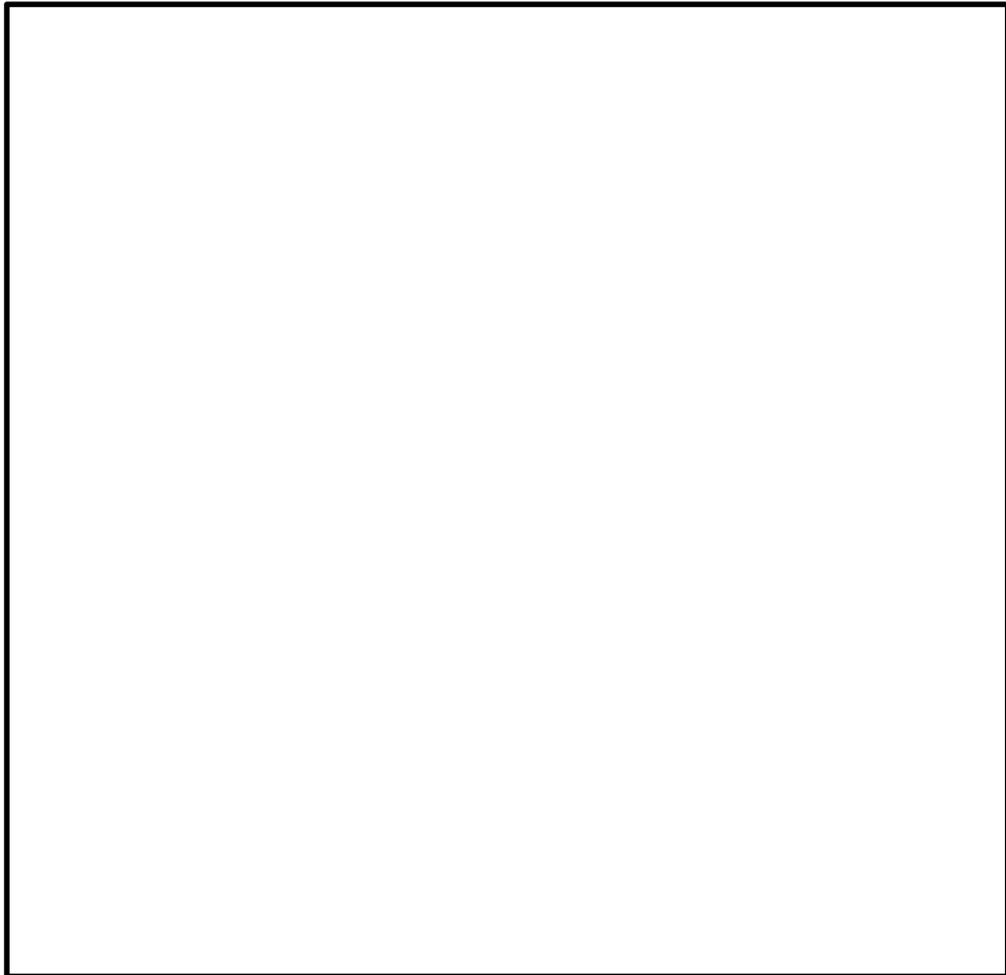


図2-9 軽油貯蔵タンクタンク室の概略断面図

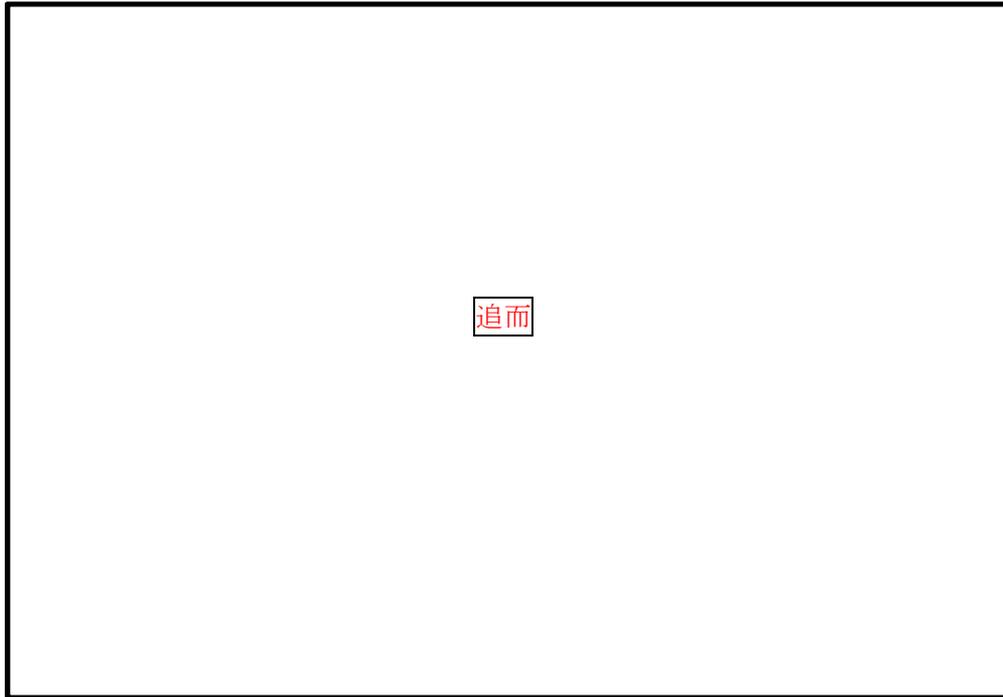


図2-10 緊急時対策所の概略平面図

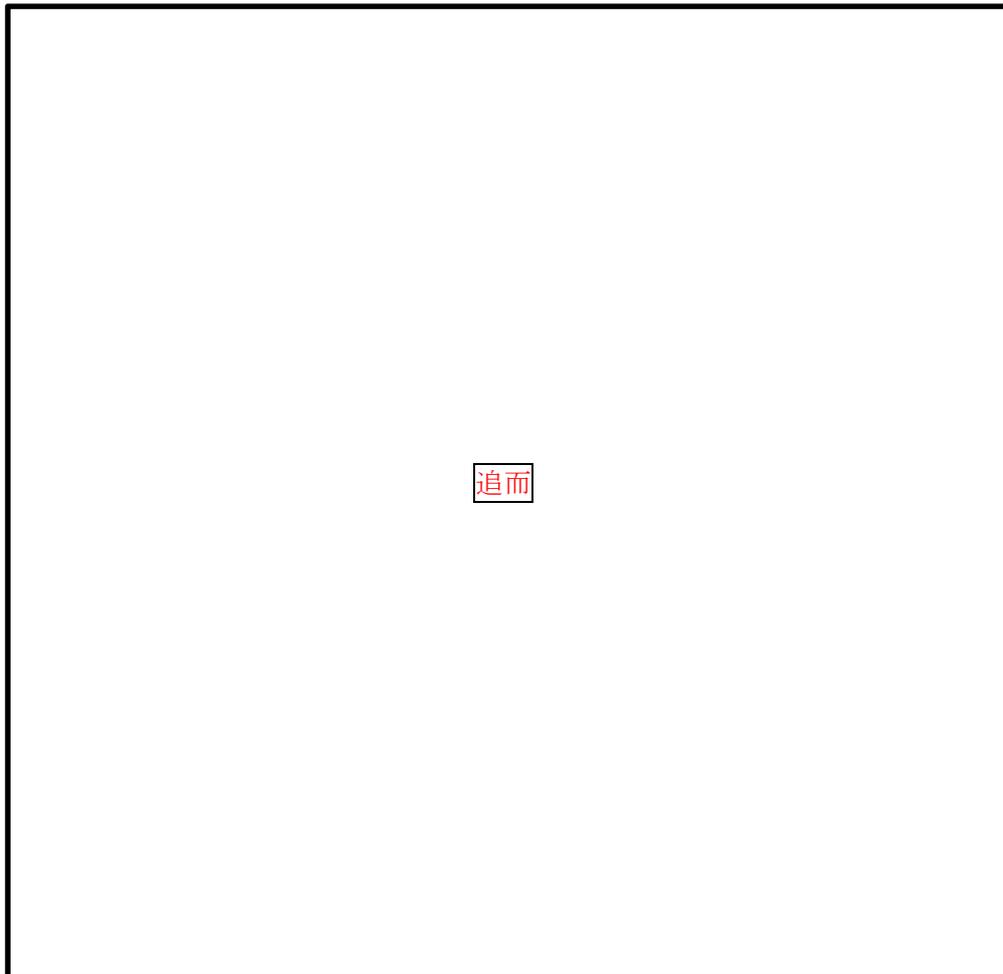


図2-11 緊急時対策所の概略断面図

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

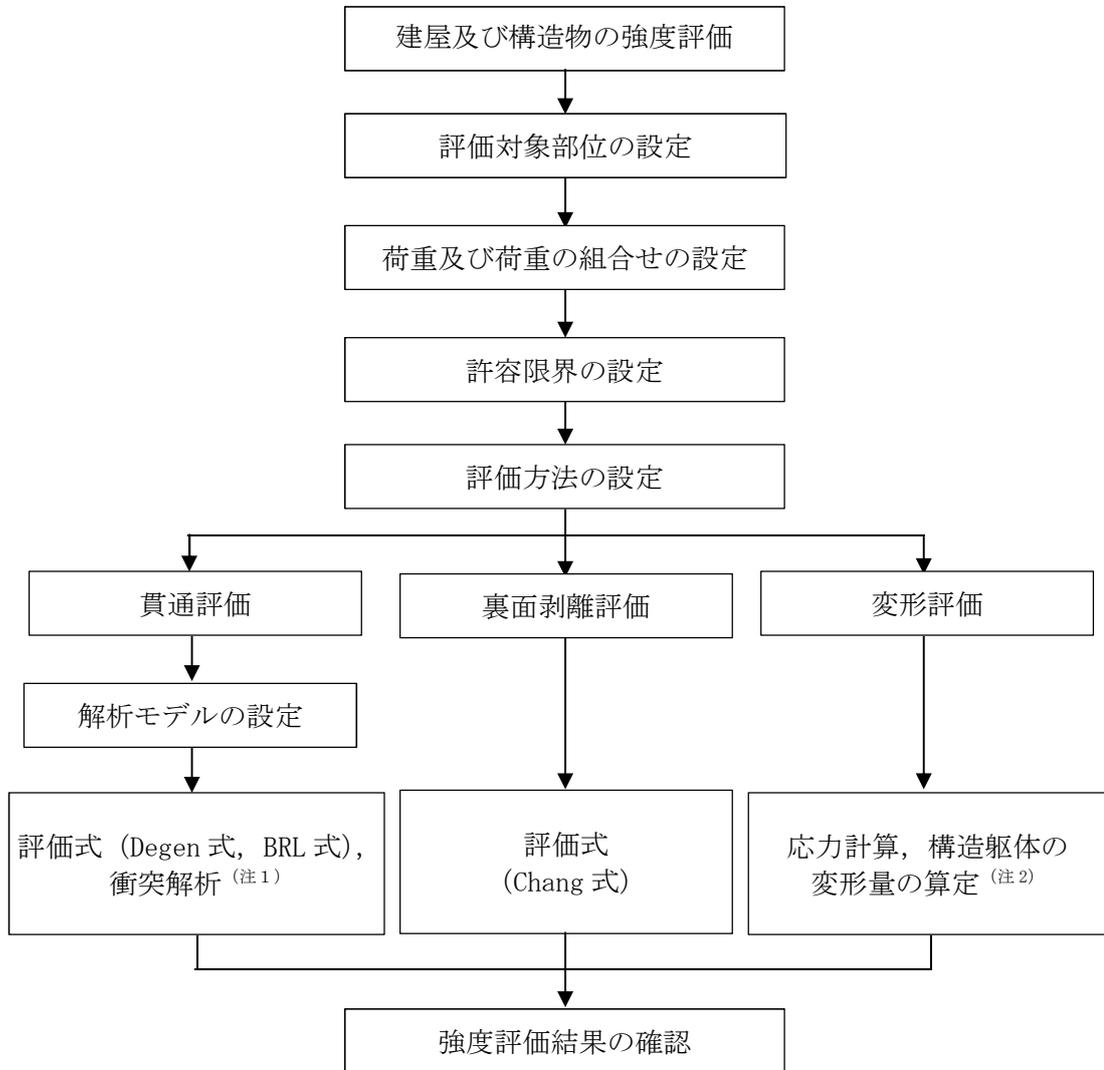
飛来物による衝撃荷重に対し、竜巻より防護すべき施設に波及的影響を与えないよう、防護すべき施設の外殻を構成する部材自体の脱落を生じない設計とするために、これらについて、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じないことを計算により確認する。（以下「裏面剥離評価」という。）

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3-3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 ³	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 _c	kgf/cm ²	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 _e	—	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 _c '	kgf/cm ²	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 ₀	cm/s	飛来物基準速度
W	kgf	飛来物重量
α _s	—	低減係数

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、**追而**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、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屋根スラブ及び外壁のうち、屋根スラブについては部材厚が最も薄い原子炉建屋原子炉棟の屋根スラブを、及び外壁については原子炉建屋、タービン建屋及び使用済燃料乾式貯蔵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	追而				<ul style="list-style-type: none"> ・ 使用済燃料乾式貯蔵建屋 ・ 緊急時対策所

(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 ・タービン建屋 ・使用済燃料乾式貯蔵建屋 ・扉取付部	複合荷重 W_{T2}	$W_W + 1/2W_P + F_d$

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
	鋼板	

※：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	追而

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	追而	
		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	追而(頂版)	—※
		緊急時対策所	追而	

※：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
貫通評価 (解析による評価)	コンクリート内面のライナ若しくは デッキプレート	追而

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、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 μ 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	せん断ひずみ 2×10^{-3}

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。

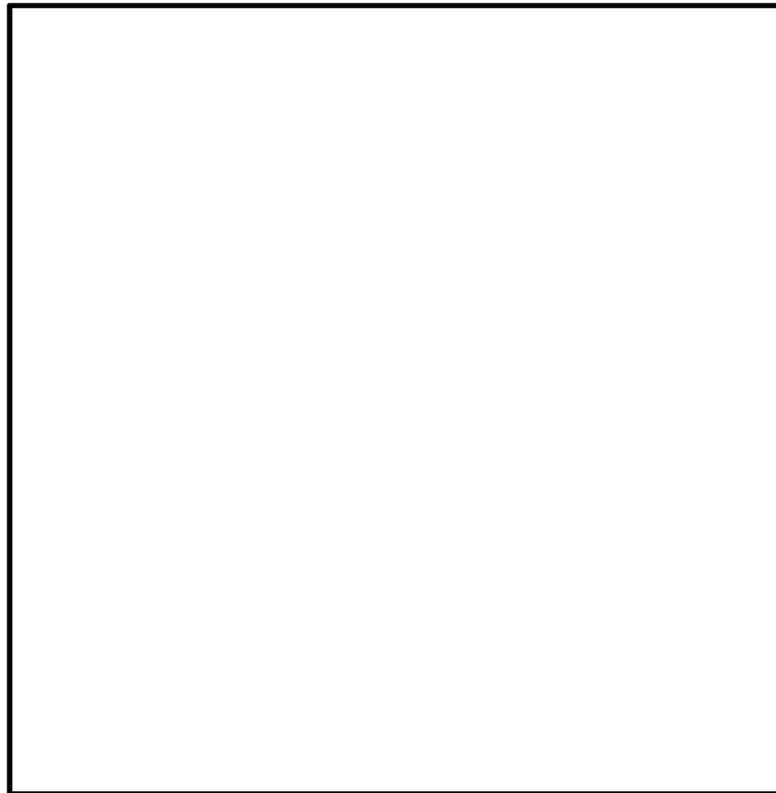


図3-1 原子炉建屋搭屋部屋根スラブモデル化範囲



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 ν	単位体積重量 ρ (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 ν	単位体積重量 ρ (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	剛性 (N/m)
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。

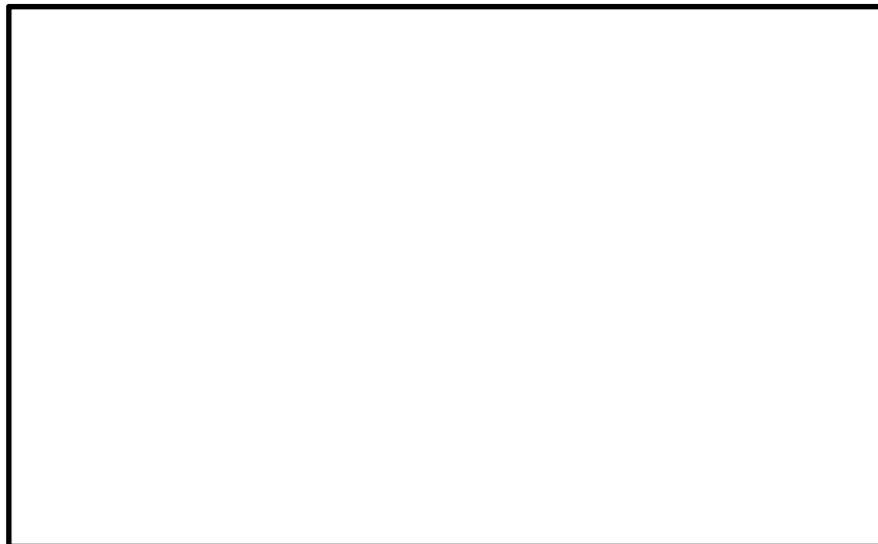


図3-6 真応力-真ひずみ関係 (コンクリート)



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=2.0を考慮する。TFについては、鉄筋のみ2.0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
追而			

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。

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

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3-7に示す許容限界を超えないことを確認する。解析モデルについては、追而。

3.5.3 変形評価

(1) 建屋

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。各建屋の $Q-\gamma$ 関係は、V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」、V-2-11-2-11「タービン建屋の耐震性についての計算書」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。

原子炉建屋、タービン建屋、使用済燃料乾式貯蔵建屋の $Q-\gamma$ 関係を、表3-14から表3-16に示す。



図3-14 原子炉建屋の $Q-\gamma$ 関係



図3-15 タービン建屋の $Q-\gamma$ 関係



図3-16 使用済燃料乾式貯蔵建屋の $Q-\gamma$ 関係

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3-17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3-17 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。

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

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

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

(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）については、気圧差による荷重 WP 及び常時作用する荷重 F_d 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

追而

b. 断面検定

追而

(4) 原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉

追而

(5) その他の外殻となる扉

追而

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
α_e	低減係数	鋼製材	追而		—
		乗用車			—
d	飛来物直径	鋼製材			cm
		乗用車			cm
F_c	コンクリートの設計基準強度				kgf/cm ²
N	飛来物の形状係数	鋼製材			—
		乗用車			—
D	飛来物直径密度 W/d^3	鋼製材			kgf/cm ³
		乗用車			kgf/cm ³
W	飛来物重量	鋼製材			kgf
		乗用車			kgf
V	飛来物の衝突速度	鋼製材		水平	m/s
			鉛直		
		乗用車	水平	m/s	
			鉛直		

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	m/s
			鉛直	34	

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	

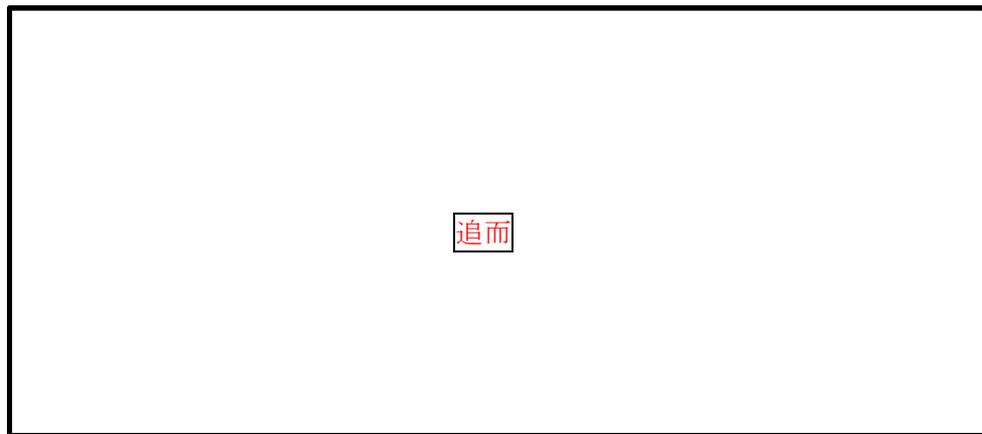


図4-1 解析ケース図

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		
α_s	低減係数	鋼製材	追而		—		
		乗用車					
V_o	飛来物基準速度	鋼製材				m/s	
		乗用車					
d	飛来物直径	鋼製材				cm	
		乗用車					
f_c'	コンクリートの設計基準強度						kgf/cm ²
W	飛来物重量	鋼製材					kgf
		乗用車					
V	飛来物の衝突速度	鋼製材	水平		m/s		
			鉛直				
		乗用車	水平				
			鉛直				

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

質点	高さ	位置	風力係数	受圧面積	
				N-S方向	E-W方向
			追而		

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	受圧面積	
				N-S方向	E-W方向
			追而		

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	受圧面積	
				N-S方向	E-W方向
		追而			

表4-7 緊急時対策所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
		追而			

(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
	追而		

(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変形評価の評価条件

部位	記号	記号の説明	数値	単位
		追而		

(4) 原子炉建屋附属棟1階電気室搬入口水密扉

原子炉建屋附属棟1階電気室搬入口水密扉の変形評価に用いる条件を表4-8に示す。

表4-8 原子炉建屋附属棟1階電気室搬入口水密扉変形評価の評価条件

部位	記号	記号の説明	数値	単位
		追而		

(5) その他の外殻となる扉

追而

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 (-)
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		

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) 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) 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

原子炉建屋大物搬入口扉のうち原子炉建屋原子炉棟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建屋に生じる応力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）

評価対象部位	評価結果	許容限界
追而		

- (4) 原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉

追而

- (5) その他の外殻となる扉

追而

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	13
2.4	適用規格	15
3.	強度評価方法	16
3.1	記号の定義	16
3.2	評価対象部位	16
3.3	荷重及び荷重の組合せ	16
3.4	許容限界	18
3.5	評価方法	21
4.	評価条件	33
5.	強度評価結果	37
5.1	貫通評価	37
5.2	支持機能評価	37

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、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排気隔離弁竜巻防護対策施設の架構が、設置（変更）許可を受けた設計飛来物（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。

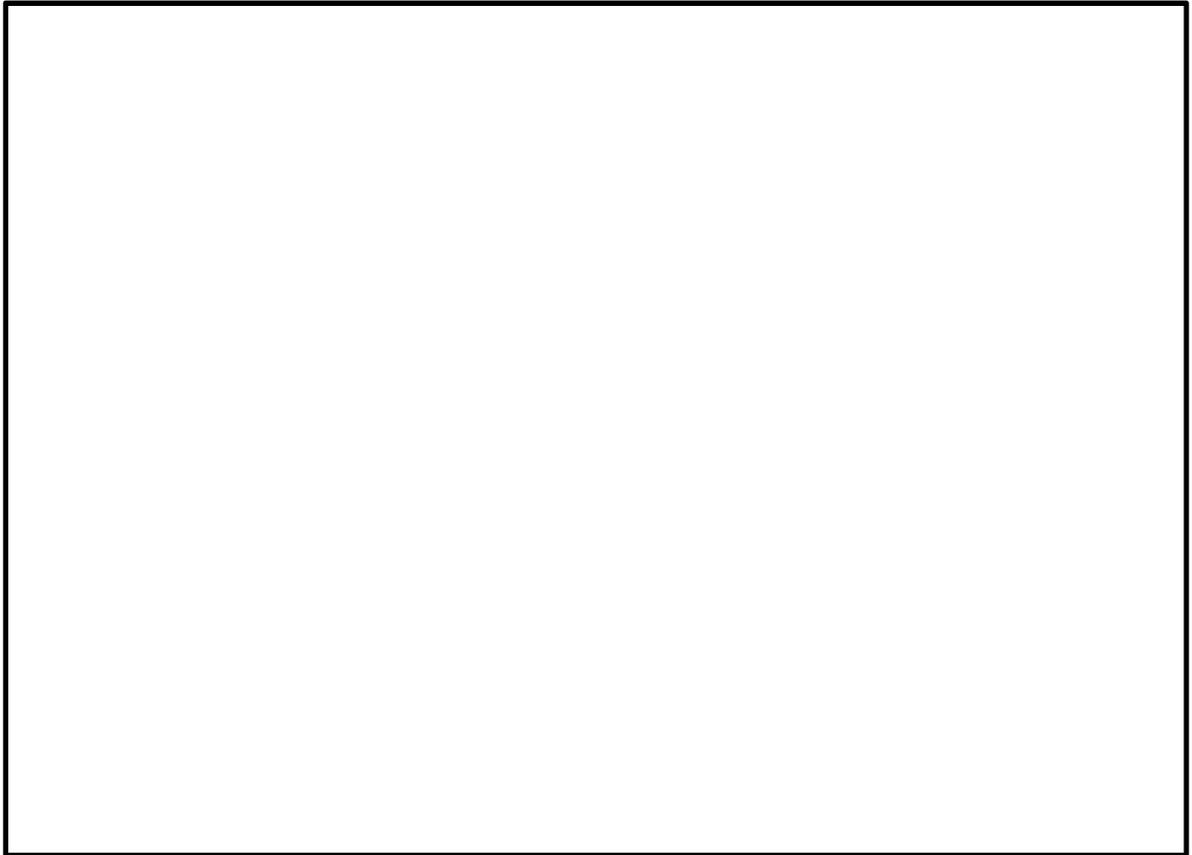


図 2-1 架構の設置位置図

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。

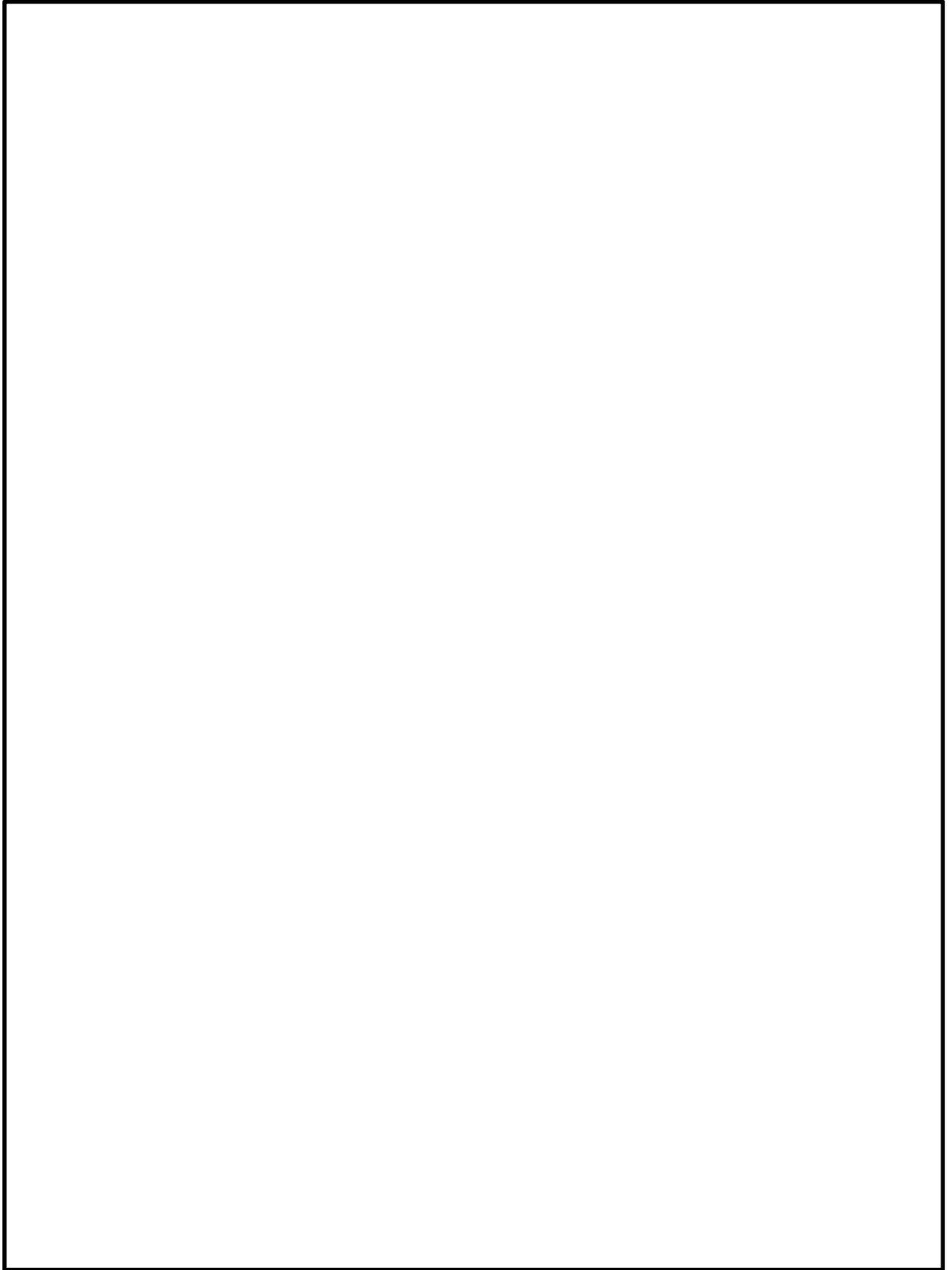


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造図(1/4)
(2 C 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

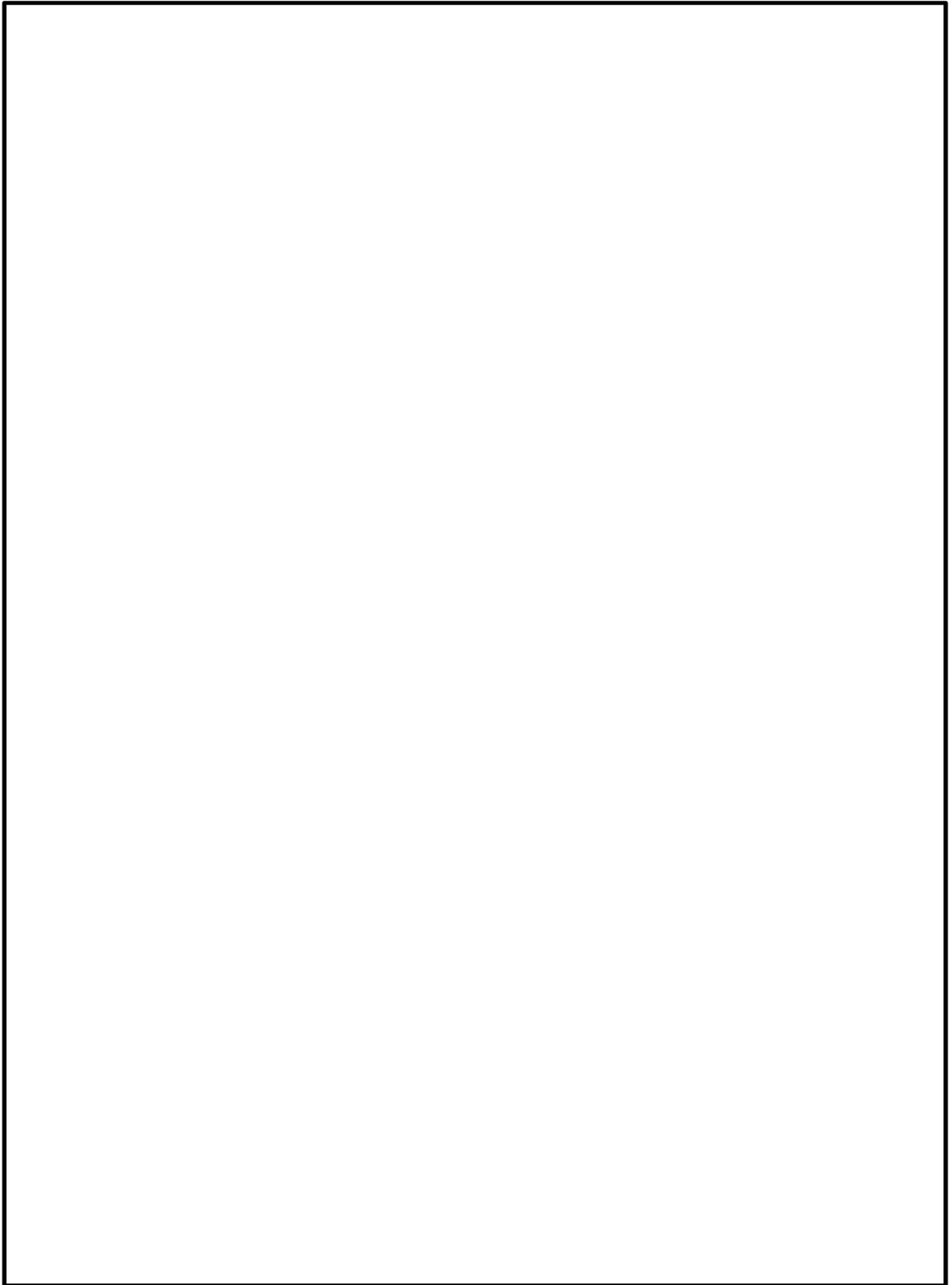


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設架構の構造図(2/4)
(2D非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設(1/2))

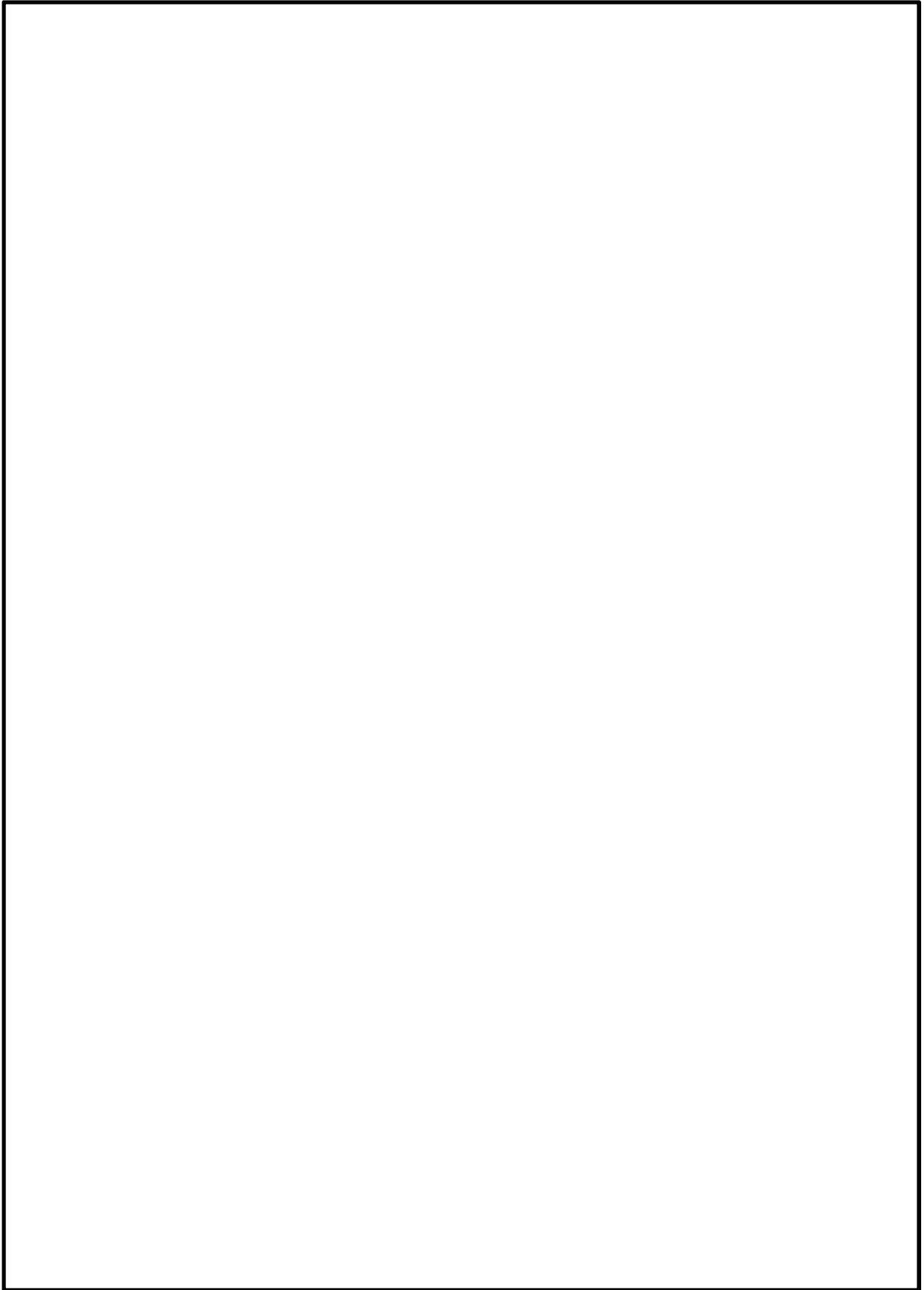


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造図(3/4)
(2 D非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設(2/2))

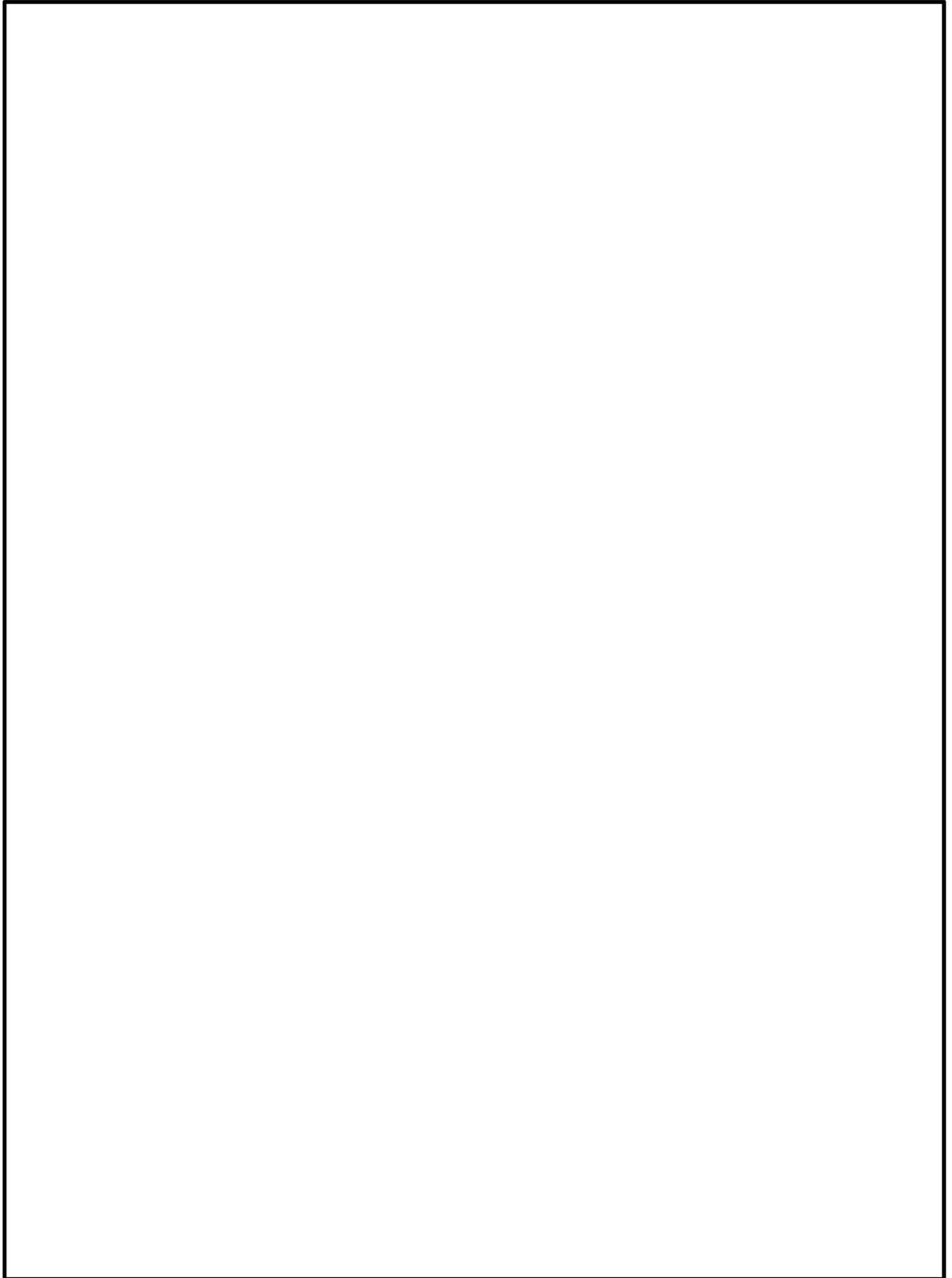


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造図(3/4)
(高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

(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。

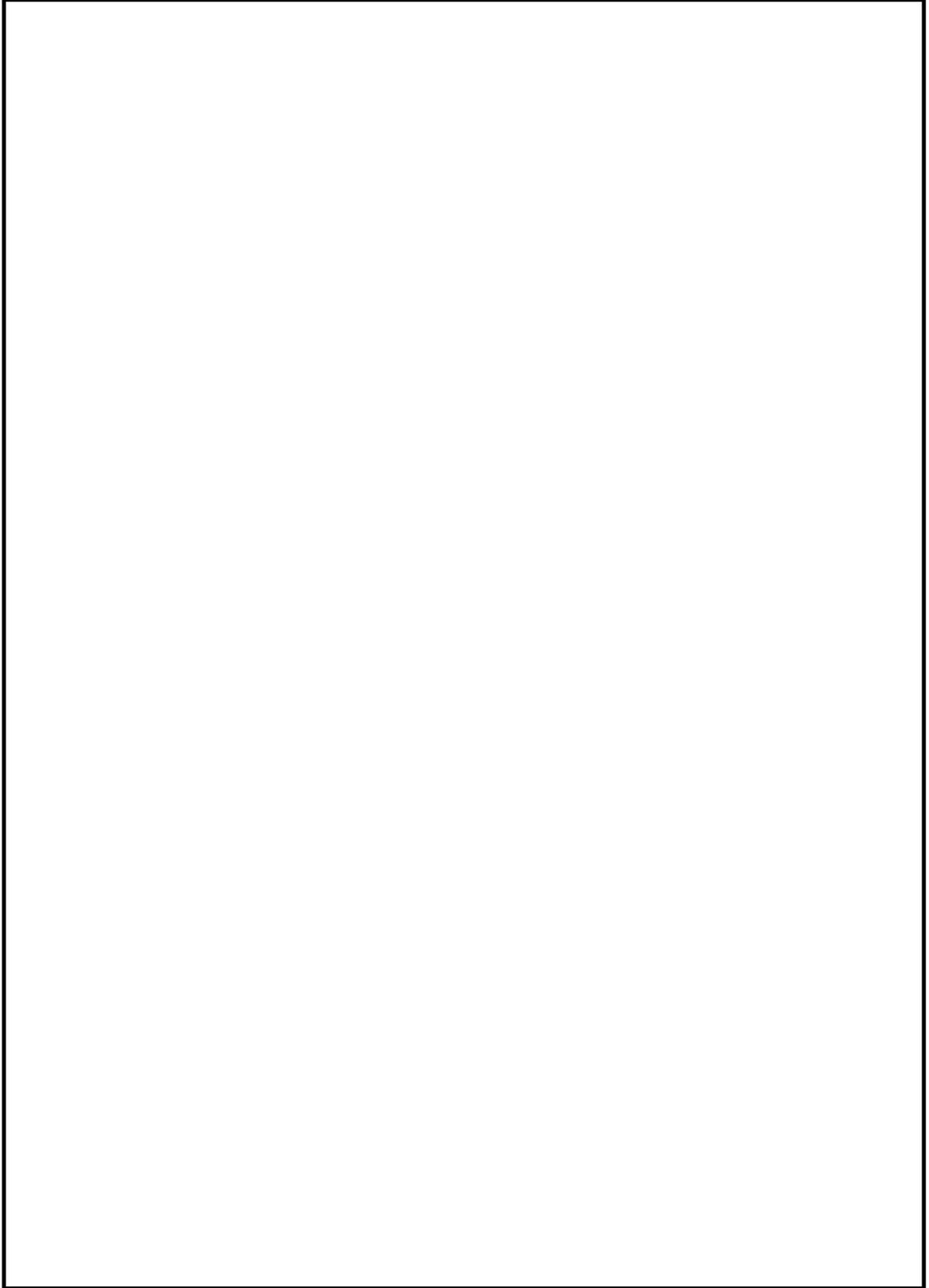


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(1/2)

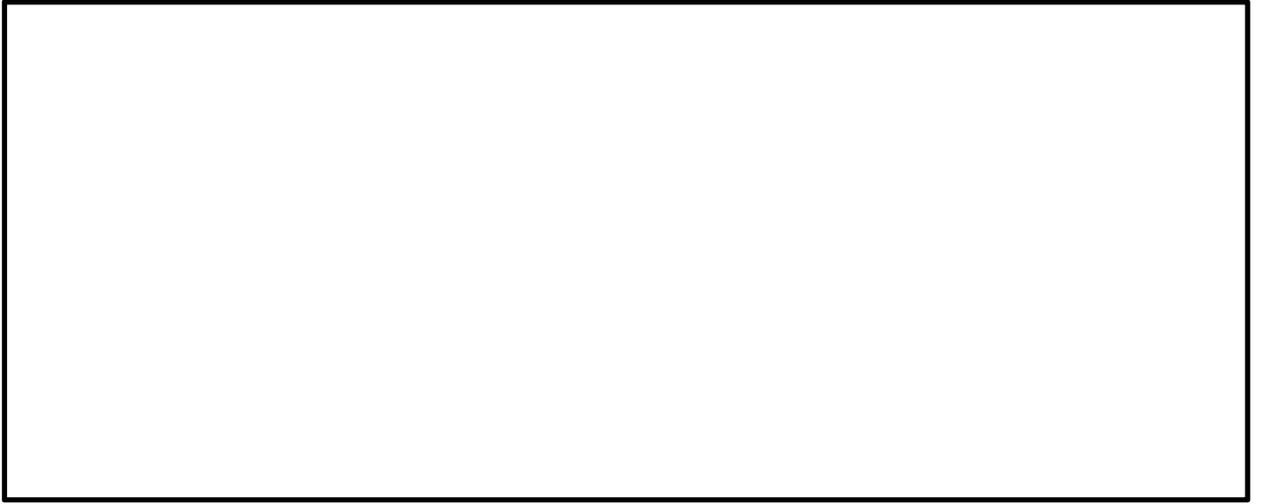


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(2/2)

(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

(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。

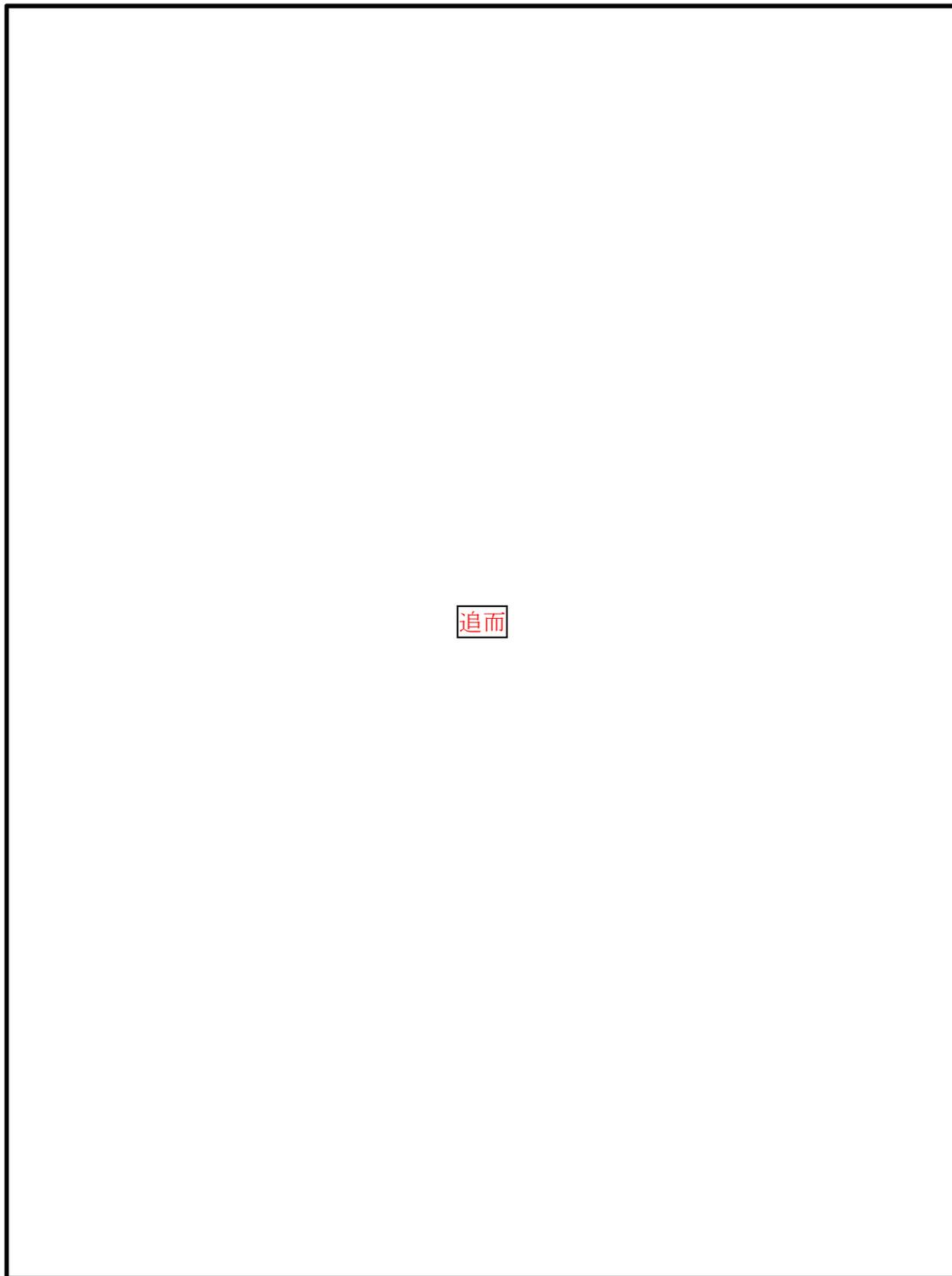


図 2-6 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構の構造図

(6) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構

追而

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

(7) 原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設架構

原子炉建屋付属棟軽量外壁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、柱、はり等により構成される。

原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設架構の構造を図 2-8 に示す。



図 2-8 原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設架構の構造図

(8) 原子炉建屋排気隔離弁竜巻防護対策施設架構

原子炉建屋排気隔離弁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原子炉建屋排気隔離弁等を内包する施設として柱、はり等により構成される。

原子炉建屋排気隔離弁竜巻防護対策施設架構の構造を図 2-9 に示す。



図 2-9 原子炉建屋排気隔離弁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 2-10 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**、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。

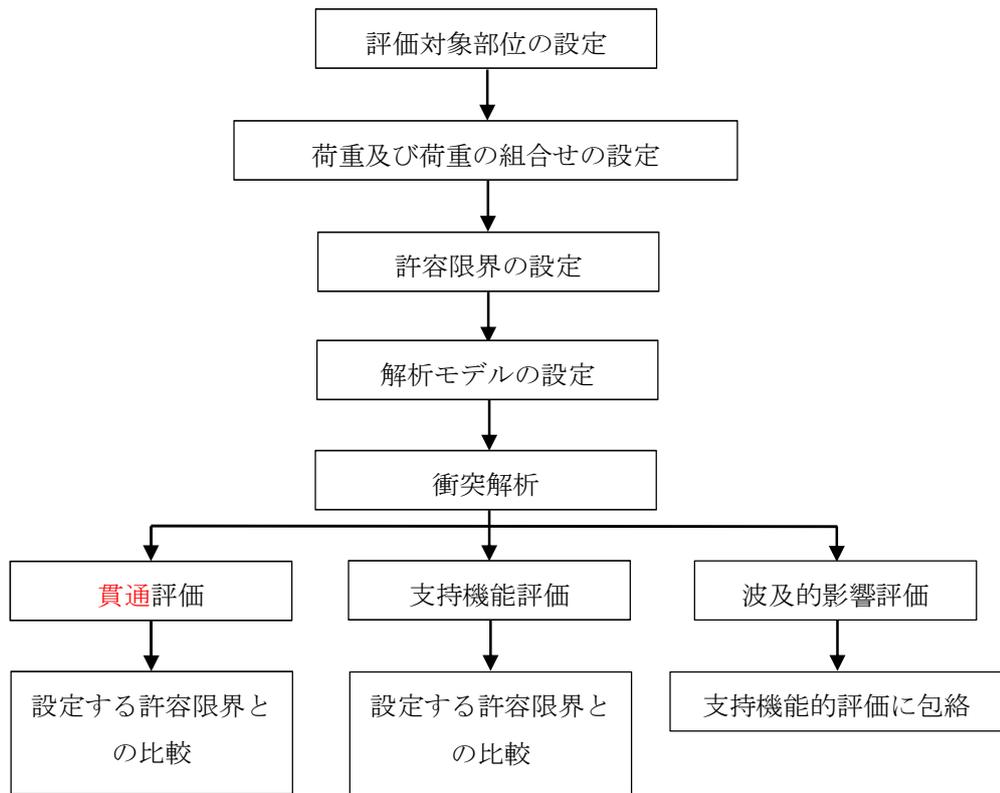


図 2-10 架構の評価フロー

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 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。））
- ・「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
- ・日本工業規格（J I S）
- ・「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）
- ・「鋼構造限界状態設計指針・同解説」（（社）日本建築学会，以下）

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 ²	受圧面積
C	—	風力係数
F _d	N	常時作用する荷重
G	—	ガスト影響係数
q	N/m ²	設計用速度圧
V _D	m/s	竜巻の最大風速
V _{Rm}	m/s	最大接線風速
V _T	m/s	移動速度
W _M	N	飛来物による衝撃荷重
W _w	N	風圧力による荷重
ΔP _{max}	N/m ²	最大気圧低下量
ρ	kg/m ³	空気密度

3.2 評価対象部位

3.2.1 貫通評価

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-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 ΔP_{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
鋼製材	4.2×0.2×0.3	135	51	34	全ての防護対策施設
車両	追而				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

表 3-4 飛来物の特性値

飛来物	ヤング係数 (N/mm^2)	ポアソン比	剛性 (N/m)
鋼製材	2.05×10^5	0.3	—
車両	—	—	追而

(3) 常時作用する荷重(F_d)

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		$W_w + W_M + F_d$
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。

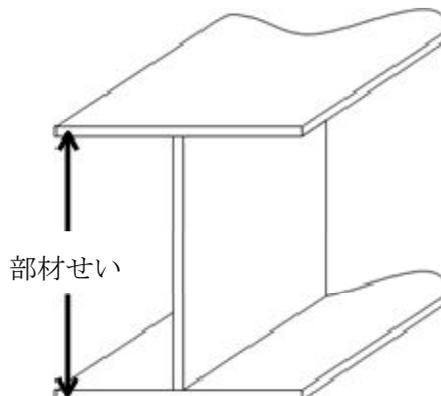


図 3-1 貫通評価における許容限界とする部材せい

(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、貫通が防止できても部材端部が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、部材端部及びその近傍が破断しないことを確認する。

許容限界としては、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、「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=2.0 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	破断ひずみ (真ひずみ)
SM490 (5 < t ≤ 16)	0.081
追而	

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、許容限界としては、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「鋼構造限界状態設計指針・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 から表 3-13 に示す。

表 3-7 許容応力(その他の支持構造物)

許容 応力 状態	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
IV _A S	$1.5 f_t^*$	$1.5 f_s^*$	$1.5 f_c^*$	$1.5 f_b^*$	$1.5 f_t^*$	$1.5 f_s^*$

(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

(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)

(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			追而					
アンカー ボルト								

表 3-9 使用材料の許容応力

(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)

(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			追而					
アンカー ボルト								

表 3-10 使用材料の許容応力

(海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構)

(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			追而					
アンカー ボルト								

表 3-11 使用材料の許容応力
(使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構)

(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			追而					
アンカー ボルト								

表 3-12 使用材料の許容応力
(原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設架構)

(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			追而					
アンカー ボルト								

表 3-13 使用材料の許容応力
(原子炉建屋排気隔離弁竜巻防護対策施設架構)

(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			追而					
アンカー ボルト								

3.5 評価方法

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バ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「**追而**」を、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、使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構、原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設架構及び原子炉建屋排気隔離弁竜巻防護対策施設架構は「**追而**」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。

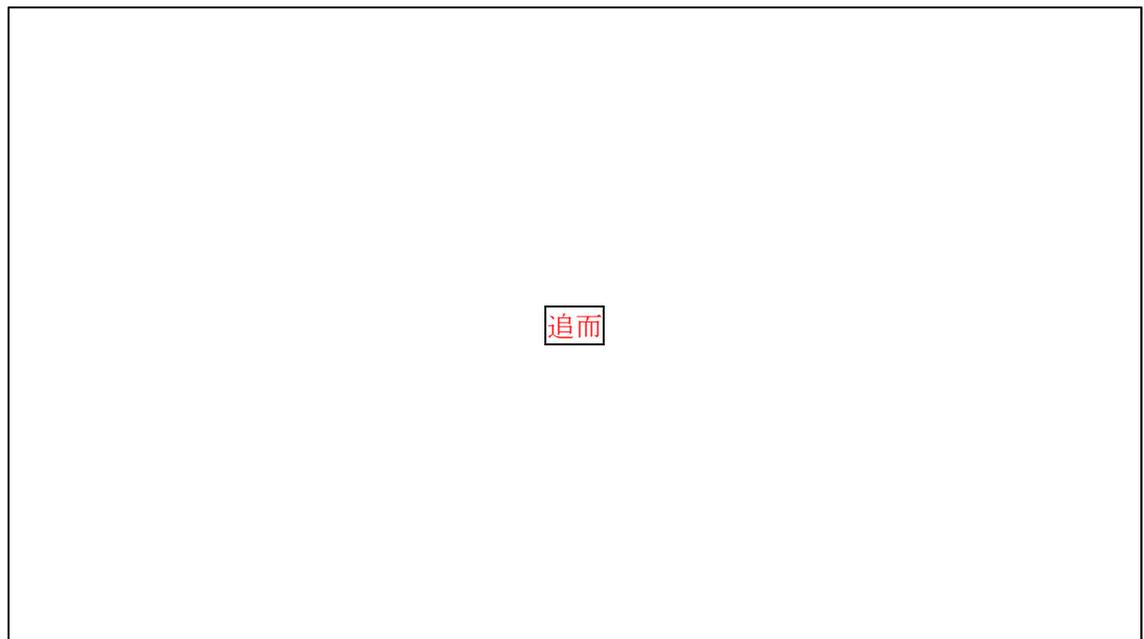


図 3-2 解析モデル図(代表部材モデルと飛来物)

(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

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、機器の諸元を表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)

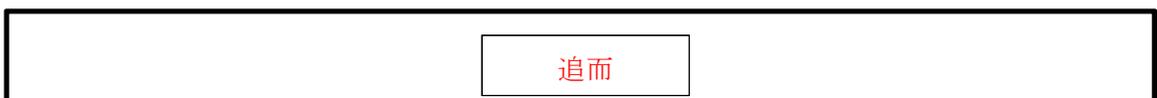


図3-4 解析モデル図(中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構)



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)



図 3-9 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 3-10 解析モデル図(原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設架構)



図 3-11 解析モデル図(原子炉建屋排気隔離弁竜巻防護対策施設架構)



表 3-14 機器の諸元(1/2)

	項目	記号	単位	入力値
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	材質	-	-	追而
	温度条件 (雰囲気温度)	T	℃	
	縦弾性係数	E	MPa	
	ポアソン比	ν	-	
	全体質量	-	kg	
中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構	材質	-	-	
	温度条件 (雰囲気温度)	T	℃	
	縦弾性係数	E	MPa	
	ポアソン比	ν	-	
	全体質量	-	kg	
海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構	材質	-	-	
	温度条件 (雰囲気温度)	T	℃	
	縦弾性係数	E	MPa	
	ポアソン比	ν	-	
	全体質量	-	kg	

表 3-14 機器の諸元(2/2)

	項目	記号	単位	入力値
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	材質	-	-	追 而
	温度条件 (雰囲気温度)	T	°C	
	縦弾性係数	E	MPa	
	ポアソン比	ν	-	
	全体質量	-	kg	
中央制御室換気系開口部竜巻 防護対策施設架構	材質	-	-	
	温度条件 (雰囲気温度)	T	°C	
	縦弾性係数	E	MPa	
	ポアソン比	ν	-	
	全体質量	-	kg	
使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻 防護対策施設架構	材質	-	-	
	温度条件 (雰囲気温度)	T	°C	
	縦弾性係数	E	MPa	
	ポアソン比	ν	-	
	全体質量	-	kg	
原子炉建屋付属棟軽量外壁部 竜巻防護対策施設架構	材質	-	-	
	温度条件 (雰囲気温度)	T	°C	
	縦弾性係数	E	MPa	
	ポアソン比	ν	-	
	全体質量	-	kg	
原子炉建屋排気隔離弁竜巻防 護対策施設架構	材質	-	-	
	温度条件 (雰囲気温度)	T	°C	
	縦弾性係数	E	MPa	
	ポアソン比	ν	-	
	全体質量	-	kg	

NT2 補② V-3-別添 1-2-1-3 R1

(b) 固有値解析結果

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トファン竜巻防護対策施設架構)

次数	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
追而						X 方向
追而						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	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
追而						X 方向
追而						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	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
追而						X 方向
追而						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	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
追而						X 方向
追而						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	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
追而						X 方向
追而						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	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
追而						X 方向
追而						Y 方向

表 3-21 固有振動数(原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設架構)

次数	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
追而						X 方向
追而						Y 方向

表 3-22 固有振動数(原子炉建屋排気隔離弁竜巻防護対策施設架構)

次数	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
追而						X 方向
追而						Y 方向

(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。

防護対策施設の諸元を表 3-23 に、応答加速度評価モデルを図 3-3 に、応答加速度算出結果を表 3-24 に示す。

表 3-23 防護対策施設の諸元

	全体質量	方向		固有振動数	バネ定数
	M (kg)			f (Hz)	k (N/m)
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	追 而	水平	X	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	X		
			Y		
鉛直		Z			
海水ポンプエリア竜巻防護対策施 設架構		水平	X		
			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	X		
			Y		
鉛直		Z			
中央制御室換気系開口部竜巻防護 対策施設架構		水平	X		
			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		水平	X		
	Y				
鉛直	Z				
原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻 防護対策施設架構	水平	X			
		Y			
鉛直	Z				
原子炉建屋排気隔離弁竜巻防護対 策施設架構	水平	X			
		Y			
鉛直	Z				

NT2 補② V-3-別添 1-2-1-3 R1

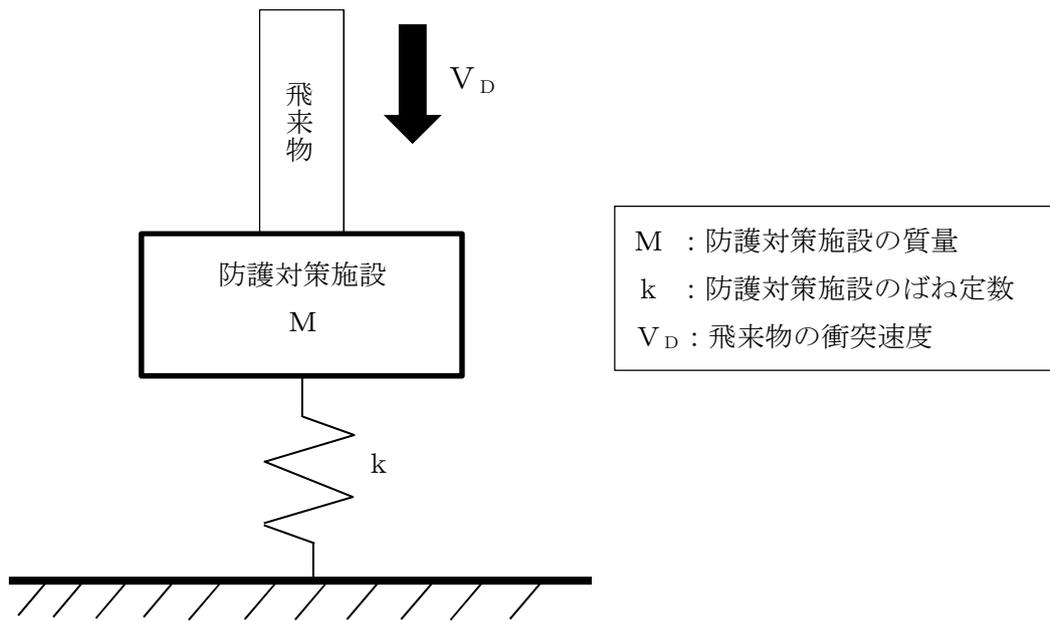


図 3-3 応答加速度評価モデル

表 3-24 応答加速度算出結果

	応答加速度 (m/s ²)	
	水平方向	鉛直方向
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	追而	
中央制御室換気系冷凍機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		
中央制御室換気系開口部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		
原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設架構		
原子炉建屋排気隔離弁竜巻防護対策施設架構		

注：太枠線は評価に用いる応答加速度を示す。

(d) 各部材の発生応力の算出

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 3-11 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 σ_t		MPa	$\frac{N_t}{A}$
圧縮応力 σ_c		MPa	$\frac{N_c}{A}$
曲げ応力 σ_{by}, σ_{bz}		MPa	$\frac{M_y}{Z_y}, \frac{M_z}{Z_z}$
せん断応力 τ_y, τ_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 σ_b		MPa	$\frac{F_x}{A_b}$
せん断応力 τ_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(mm²)

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

衝突評価に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
非常用ディーゼル発電機 室ルーフトントファン竜 巻防護対策施設架構	①-1	追 而	(部材せい：)	追 而
	①-2		(部材せい：)	
中央制御室換気系冷凍機 竜巻防護対策施設架構	②-1		(部材せい：)	
	②-2		(部材せい：)	
海水ポンプエリア竜巻防 護対策施設架構	③-1		(部材せい：)	
	③-2		(部材せい：)	
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	④-1		(部材せい：)	
	④-2		(部材せい：)	
中央制御室換気系開口部 竜巻防護対策施設架構	⑤-1		(部材せい：)	
	⑤-2		(部材せい：)	
使用済燃料乾式貯蔵容器 竜巻防護対策施設架構	⑥-1		(部材せい：)	
	⑥-2		(部材せい：)	
原子炉建屋付属棟軽量外 壁部竜巻防護対策施設架 構	⑦-1		(部材せい：)	
	⑦-2		(部材せい：)	
原子炉建屋排気隔離弁竜 巻防護対策施設架構	⑧-1		(部材せい：)	
	⑧-2		(部材せい：)	

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	SS400

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 σ_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	2.05×10^5	0.3
架構 部材	SM490	5 を超え 16 以下	245	2.05×10^5	0.3
			追而		

c. 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、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。

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

ここで、 σ_{eq} は動的応力、Aは降伏応力、Bは硬化係数、 ε_{pl} は相当塑性ひずみ、 $\dot{\varepsilon}_{pl}$ 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	SS400	SM490	
B	1420	2590	追而
n	1	1	
D (s ⁻¹)	118000	180000	
q	6	4.9	

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。

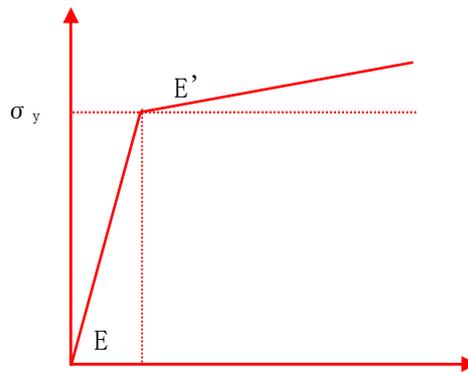


図 4-1 バイリニア型応力-ひずみ関係の概念図

(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 破断ひずみ

	材質	JIS 規格値 (伸び)	T F	破断ひずみ※
架構	SM490 (5 < t ≤ 16)	0.17	2.0	
	追而			

※：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

架構全体の支持機能評価にて選定する架構の材料及び寸法の仕様を表 4-6 に示す。

表 4-6 架構の使用材料及び寸法の仕様

評価対象	仕様	材質
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	追而	追而
中央制御室換気系冷凍機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		
中央制御室換気系開口部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		
原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設架構		
原子炉建屋排気隔離弁竜巻防護対策施設架構		

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 (kN/m ³)	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比
追而			

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

a. 海水ピットポンプ室架構

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付近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"> ・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 	追而			
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				

5.2.2 架構全体の支持機能評価

架構全体の支持機能評価結果を表 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				
原子炉建屋付属棟軽量外壁 部竜巻防護対策施設架構	架構				
	アンカー ボルト				
原子炉建屋排気隔離弁竜巻 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、

τ : ボルトに作用するせん断応力