

本資料のうち、枠囲みの内容は、営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	工認-091 改 13
提出年月日	平成 30 年 4 月 19 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 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針

目次

1. 概要	1
2. 強度評価の基本方針.....	1
2.1 評価対象施設.....	1
2.2 評価方針	2
3. 構造強度設計.....	5
3.1 構造強度の設計方針.....	5
3.2 機能維持の方針.....	10
4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界.....	57
4.1 荷重及び荷重の組合せ.....	57
4.2 許容限界	67
5. 強度評価方法.....	83
5.1 建屋・構造物に関する評価式.....	84
5.2 機器・配管系に関する評価式.....	92
6. 適用規格	139

1. 概要

本資料は、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」（以下「技術基準規則」という。）第7条及びその「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」（以下「解釈」という。）に適合し、技術基準規則第54条及びその解釈に規定される「重大事故等対処設備」を踏まえた重大事故等対処設備に配慮する設計とするため、V-1-1-2「発電用原子炉施設の自然現象等による損傷防止に関する説明書」のうちV-1-1-2-3-3「竜巻防護に関する施設の設計方針」（以下「V-1-1-2-3-3」という。）に基づき、竜巻の影響を考慮する施設が、設計竜巻に対して要求される強度を有することを確認するための強度評価方針について説明するものである。

強度評価は、V-1-1-2「発電用原子炉施設の自然現象等による損傷防止に関する説明書」のうちV-1-1-2-3-1「竜巻への配慮に関する基本方針」（以下「V-1-1-2-3-1」という。）に示す適用規格を用いて実施する。

竜巻飛来物防護対策設備である防護対策施設の設計方針については、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」に示し、屋外重大事故等対処設備の固縛装置の設計方針については、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。具体的な計算の方法及び結果は、V-3-別添 1-2-1「防護対策施設の強度計算書」及び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。その他の竜巻の影響を考慮する施設の具体的な計算の方法及び結果は、V-3-別添 1-1-1「竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書」から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」に示す。

2. 強度評価の基本方針

強度評価は、「2.1 評価対象施設」に示す評価対象施設を対象として、「4.1 荷重及び荷重の組合せ」で示す設計竜巻荷重及び組み合わせるべきその他の荷重による組合せ荷重により生じる応力等が「4.2 許容限界」で示す許容限界内にあることを「5. 強度評価方法」に示す計算方法を使用し、「6. 適用規格」に示す適用規格を用いて確認する。

2.1 評価対象施設

V-1-1-2-3-3 の「3. 要求機能及び性能目標」にて構造強度上の性能目標を設定している竜巻の影響を考慮する施設を強度評価の対象とする。強度評価を行うにあたり、評価対象施設を以下のとおり分類することとし、表 2-1 に示す。

(1) 竜巻より防護すべき施設を内包する施設

屋内の竜巻より防護すべき施設を防護する外殻となる、竜巻より防護すべき施設を内包する施設とする。

(2) 屋外の防護対象施設

設計竜巻荷重及びそれと組み合わせる荷重に対し構造強度を保持する必要がある屋外の防護対象施設とする。

(3) 外気と繋がっている屋内の防護対象施設

設計竜巻荷重及びそれと組み合わせる荷重に対し構造強度を保持する必要がある、

外気と繋がっている屋内の防護対象施設とする。

(4) 防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設

防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設とする。

2.2 評価方針

竜巻の影響を考慮する施設は、V-1-1-2-3-3の「3. 要求機能及び性能目標」にて設定している構造強度設計上の性能目標を達成するため、「2.1 評価対象施設」で分類した施設ごとに、竜巻に対する強度評価を実施する。

強度評価の評価方針は、それぞれ「2.2.1(1) 衝突評価」の方針、「2.2.1(2) 構造強度評価」の方針及び「2.2.1(3) 動的機能維持評価」の方針に分類でき、評価対象施設はこれらの評価を実施する。

防護対象施設及び波及的影響を及ぼす可能性がある施設の強度評価は、防護措置として設置する防護対策施設、竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度評価を踏まえたものであるため、防護対策施設、竜巻より防護すべき施設を内包する施設について示したうえで、防護対象施設及び防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設について示す。

2.2.1 評価の分類

(1) 衝突評価

衝突評価は、竜巻による設計飛来物による衝撃荷重に対する直接的な影響の評価として、評価対象施設が、貫通を生じず、ひずみ等の変形が生じた場合においても、防護対象施設の機能を保持可能な状態に留めることを確認する評価とする。

評価対象施設の構造及び当該施設の機能を考慮し、飛来物の衝突により想定される損傷モードを以下のとおり分類し、それぞれの評価方針を設定する。

a. 建屋・構造物

(a) 貫通

(2) 構造強度評価

構造強度評価は、竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重により生じる応力等に対し、評価対象施設及びその支持構造物が、当該施設の機能を保持可能な構造強度を有することを確認する評価とする。構造強度評価は、構造強度により閉止性及び開閉機能を確保することの評価を含む。

構造強度評価は、評価対象施設の構造を考慮し、以下の分類ごとに評価方針を設定する。

a. 建屋・構造物

建屋・構造物の構造強度評価は、鉄筋コンクリート造構造物と鋼製構造物に分類し、その構造を踏まえた評価項目を抽出する。

(a) 鉄筋コンクリート造構造物

イ. 裏面剥離

ロ. 脱落

ハ. 倒壊

(b) 鋼製構造物

イ. 脱落

ロ. 倒壊

b. 機器・配管系

(a) 立形ポンプ

(b) 4脚たて置円筒形容器

(c) たて置円筒形容器

(d) よこ置円筒形容器

(e) 排気筒

(f) 配管及び弁

(g) ダクト

(h) 隔離弁

(i) ファン

(j) 冷凍機

(3) 動的機能維持評価

動的機能維持評価は、設計竜巻荷重及びその他の荷重に対し、竜巻時及び竜巻通過後において、評価対象施設のうちポンプ等の動的機器が、当該施設の動的機能を保持可能なことを確認する評価とする。

a. 機器・配管系

(a) 立形ポンプ

表 2-1 強度評価における施設分類

強度評価における分類	施設名称
(1) 竜巻より防護すべき施設を内包する施設	<ul style="list-style-type: none"> ・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
(2) 屋外の防護対象施設	<ul style="list-style-type: none"> ・非常用ディーゼル発電機吸気フィルタ ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機吸気フィルタ ・非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフトファン ・中央制御室換気系冷凍機 ・残留熱除去系海水系ポンプ ・残留熱除去系海水系ストレーナ ・非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ ・非常用ディーゼル発電機用海水ストレーナ ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプ ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ストレーナ ・排気筒 ・配管及び弁（中央制御室換気系冷凍機，残留熱除去系海水系ポンプ及びディーゼル発電機用海水ポンプ周り並びに非常用ガス処理系排気配管）
(3) 外気と繋がっている屋内の防護対象施設	<ul style="list-style-type: none"> ・ダクト（非常用換気空調設備） ・隔離弁（非常用換気空調設備） ・ファン（非常用換気空調設備）
(4) 防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設 a. 機械的影響を与える可能性がある施設 b. 機能的影響を与える可能性がある施設	a. 機械的影響を与える可能性がある施設 <ul style="list-style-type: none"> ・サービス建屋 ・海水ポンプエリア防護壁 ・鋼製防護壁 b. 機能的影響を与える可能性がある施設 <ul style="list-style-type: none"> ・非常用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排気消音器 ・非常用ディーゼル発電機排気配管 ・非常用ディーゼル発電機燃料デイトankベント管 ・非常用ディーゼル発電機機関ベント管 ・非常用ディーゼル発電機潤滑油サンプタンクベント管 ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気配管 ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料デイトankベント管 ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機機関ベント管 ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機潤滑油サンプタンクベント管 ・残留熱除去系海水系配管（放出側） ・非常用ディーゼル発電機用海水配管（放出側） ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水配管（放出側）

3. 構造強度設計

V-1-1-2-3-1 で設定している設計竜巻に対し、「2.1 評価対象施設」で設定している施設が、構造強度設計上の性能目標を達成するよう、V-1-1-2-3-3 の「4. 機能設計」で設定している各施設が有する機能を踏まえ、構造強度の設計方針を設定する。

各施設の構造強度の設計方針を設定し、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、各施設の構造強度を保持するよう構造設計と評価方針を設定する。

3.1 構造強度の設計方針

V-1-1-2-3-3 の「3. 要求機能及び性能目標」で設定している構造強度上の性能目標を達成するための設計方針を「2.1 評価対象施設」で設定している評価対象施設分類ごとに示す。

(1) 竜巻より防護すべき施設を内包する施設

原子炉建屋、タービン建屋、使用済燃料乾式貯蔵建屋及び軽油貯蔵タンクタンク室は、V-1-1-2-3-3 の「3. 要求機能及び性能目標」の「3.4(3) 性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、設計飛来物が竜巻より防護すべき施設に衝突することを防止するために、竜巻より防護すべき施設を内包する施設のうち、竜巻より防護すべき施設の外殻を構成する部材を設計飛来物が貫通せず、また、竜巻より防護すべき施設に波及的影響を与えないために、竜巻より防護すべき施設を内包する施設のうち、竜巻より防護すべき施設の外殻を構成する部材の転倒及び脱落が生じない設計とする。

(2) 屋外の防護対象施設

a. 非常用ディーゼル発電機吸気フィルタ，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機吸気フィルタ

非常用ディーゼル発電機吸気フィルタ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機吸気フィルタ（以下「ディーゼル発電機吸気フィルタ」という。）は、V-1-1-2-3-3 の「3. 要求機能及び性能目標」の「3.1(1)c. 性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、脚部をディーゼル発電機室屋上面に設けたコンクリート基礎に固定し、主要な構造部材がディーゼル発電機の吸気機能を保持可能な構造強度を有する設計とする。

b. 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン，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

非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフベントファン（以下「ディーゼル発電機室ルーフベントファン」という。）は、V-1-1-2-3-3 の「3. 要求機能及び性能目標」の「3.1(1)c. 性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ、設計竜巻の風圧力による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、ディーゼル発電機室屋上面に設けたコンクリート基礎に本体を基礎ボルトで固定し、主要な構造部材がディーゼル発電機室からの排気機能を保持可能な構造強度を有する設計とする。

c. 中央制御室換気系冷凍機

中央制御室換気系冷凍機は、V-1-1-2-3-3の「3. 要求機能及び性能目標」の「3.1(1)c. 性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ、設計竜巻の風圧力による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、原子炉建屋付属棟屋上面に取付ボルトで固定し、主要な構造部材が中央制御室の冷却のための熱交換機能を保持可能な構造強度を有する設計とする。

d. 残留熱除去系海水系ポンプ

残留熱除去系海水系ポンプは、V-1-1-2-3-3の「3. 要求機能及び性能目標」の「3.1(1)c. 性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、海水ポンプ室床面のコンクリート基礎に本体を基礎ボルトで固定するとともに、ポンプの機能維持に必要な付属品を本体にボルト固定し、主要な構造部材が海水の送水機能を保持可能な構造強度を有する設計とする。また、海水を送水するための動的機能を保持する設計とする。

e. 非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ、高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプ

非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプ（以下「ディーゼル発電機用海水ポンプ」という。）は、V-1-1-2-3-3の「3. 要求機能及び性能目標」の「3.1(1)c. 性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、海水ポンプ室床面のコンクリート基礎に本体を基礎ボルトで固定するとともに、ポンプの機能維持に必要な付属品を本体にボルト固定し、主要な構造部材が海水の送水機能を保持可能な構造強度を有する設計とする。また、海水を送水するための動的機能を保持する設計とする。

f. 残留熱除去系海水系ストレーナ

残留熱除去系海水系ストレーナは、V-1-1-2-3-3の「3. 要求機能及び性能目標」の「3.1(1)c. 性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、海水ポンプ室床面のコンクリート基礎に本体を基礎ボルトで固定し、主要な構造部材が海水中の固形物を除去する機能を保持可能な構造強度を有する設計とする。

g. 非常用ディーゼル発電機用海水ストレーナ、高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ストレーナ

非常用ディーゼル発電機用海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ストレーナ（以下「ディーゼル発電機用海水ストレーナ」という。）は、V-1-1-2-3-3の「3. 要求機能及び性能目標」の「3.1(1)c. 性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、海水ポンプ室床面のコンクリート基礎に本体を基礎ボルトで固定し、主要な構造部材が海水中の固形物を除去する機能を保持可能な構造強度を有する設計とする。

h. 排気筒

排気筒は、V-1-1-2-3-3 の「3. 要求機能及び性能目標」の「3.1(1)c. 性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、排気筒の支持架構にサポートで支持し、主要な構造部材が流路を確保する機能を保持可能な構造強度を有する設計とする。

i. 配管及び弁（中央制御室換気系冷凍機周り，残留熱除去系海水系ポンプ及びディーゼル発電機用海水ポンプ周り並びに非常用ガス処理系排気配管）

配管及び弁（中央制御室換気系冷凍機周り，残留熱除去系海水系ポンプ及びディーゼル発電機用海水ポンプ周り並びに非常用ガス処理系排気配管）は、V-1-1-2-3-3 の「3. 要求機能及び性能目標」の「3.1(1)c. 性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ、設計竜巻の風圧力による荷重，気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し，原子炉付属棟屋上床面及び海水ポンプ室に設けたコンクリート基礎，支持架構に固定し，主要な構造部材が流路を確保する機能を保持可能な構造強度を有する設計とする。

(3) 外気と繋がっている屋内の防護対象施設

a. ダクト（非常用換気空調設備）

ダクト（非常用換気空調設備）は、V-1-1-2-3-3 の「3. 要求機能及び性能目標」の「3.1(2)c. 性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ，設計竜巻の気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し，原子炉建屋の壁面等にサポートで支持し，主要な構造部材が流路を確保する機能を保持可能な構造強度を有する設計とする。

b. 隔離弁（非常用換気空調設備）

隔離弁（非常用換気空調設備）は、V-1-1-2-3-3 の「3. 要求機能及び性能目標」の「3.1(2)c. 性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ，設計竜巻の気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し，非常用換気空調設備のダクトに固定し，開閉可能な機能及び閉止性の維持を考慮して主要な構造部材が構造健全性を維持する設計とする。

「(3) 外気と繋がっている屋内の防護対象施設」の屋内の防護対象施設の設計フローを図 3-1 に示す。

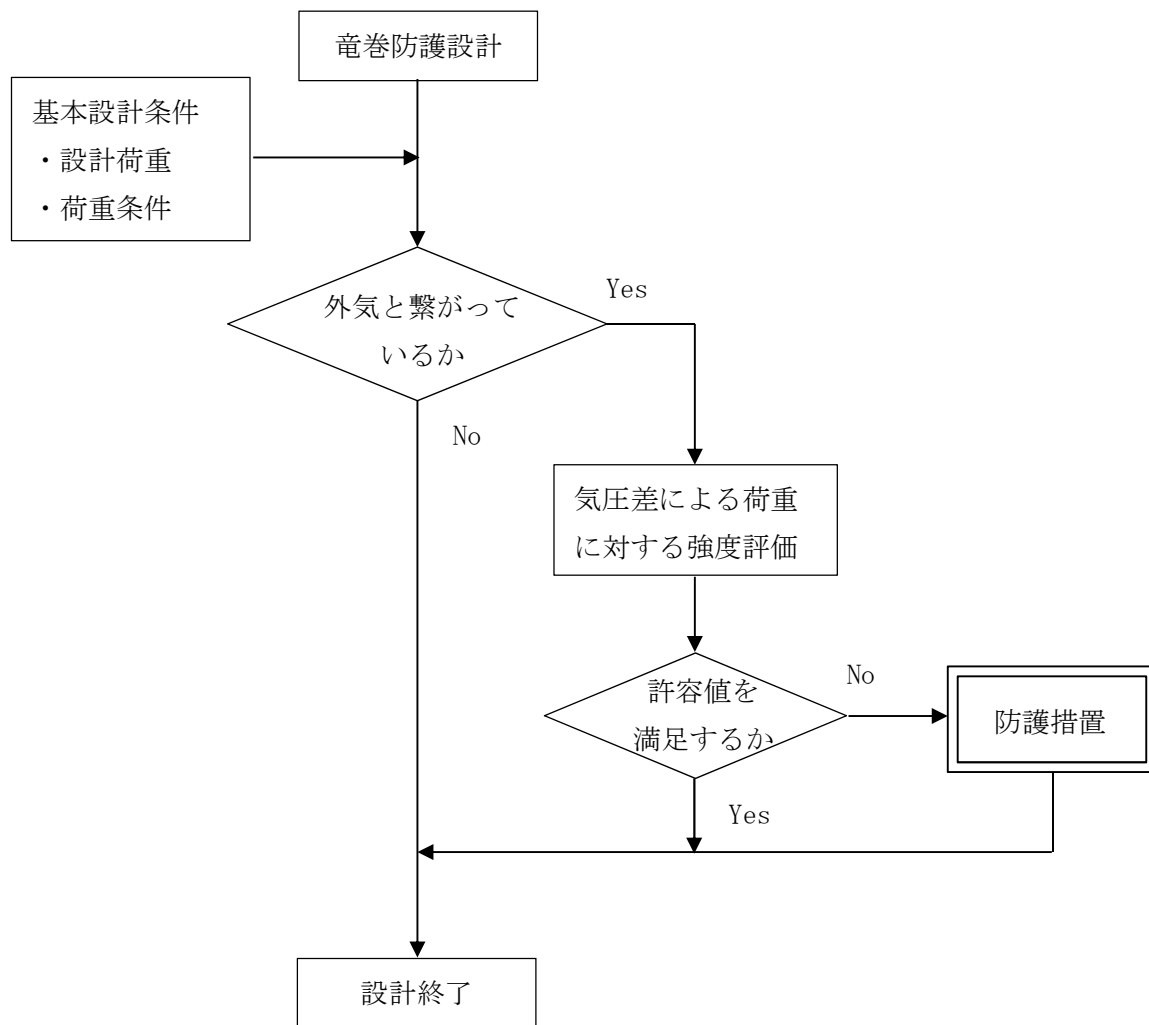


図 3-1 屋内の防護対象施設の設計フロー

(5) 防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設

a. 機械的影響を与える可能性がある施設

(a) サービス建屋

サービス建屋は、V-1-1-2-3-3 の「3. 要求機能及び性能目標」の「3.5(3) 性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、竜巻より防護すべき施設を内包する原子炉建屋及びタービン建屋に接触による影響を及ぼさない設計とする。

(b) 鋼製防護壁

鋼製防護壁は、V-1-1-2-3-3 の「3. 要求機能及び性能目標」の「3.5(3) 性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ、設計竜巻の風圧力による荷重、設計飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、防護対象施設に倒壊による影響を及ぼさない設計とする。

b. 機能的影響を与える可能性がある施設

(a) 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

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。）は、V-1-1-2-3-3 の「3. 要求機能及び性能目標」の「3.5(3) 性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ、設計竜巻の風圧力による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、排気機能を保持するために、ディーゼル発電機室屋上面に設けたコンクリート基礎に本体を取付ボルト又は基礎ボルトで固定し、主要な構造部材が排気機能を保持可能な構造強度を有する設計とする。

(b) ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管

非常用ディーゼル発電機排気配管、非常用ディーゼル発電機燃料デイトンクベント管、非常用ディーゼル発電機機関ベント管、非常用ディーゼル発電機潤滑油サンプタンクベント管、高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気配管、高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料デイトンクベント管、高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機機関ベント管、高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機潤滑油サンプタンクベント管（以下「ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管」という。）は、V-1-1-2-3-3 の「3. 要求機能及び性能目標」の「3.5(3) 性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ、設計竜巻の風圧力による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、排気機能を保持するために、サポートによる支持で建屋壁面等に固定し、主要な構造部材が排気機能を保持可能な構造強度を有する設計とする。

(c) 残留熱除去系海水系配管（放出側）

残留熱除去系海水系配管（放出側）は、V-1-1-2-3-3 の「3. 要求機能及び性能目標」の「3.5(3) 性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、海水放出機能を保持するために、サポート又は架台による支持で固定し、主要な構造部材が海水放出機能を保持可能な構造強度を有する設計とする。

- (d) 非常用ディーゼル発電機用海水配管（放出側）及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水配管（放出側）

非常用ディーゼル発電機用海水配管（放出側）及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水配管（放出側）（以下「ディーゼル発電機用海水配管（放出側）」という。）は、V-1-1-2-3-3の「3. 要求機能及び性能目標」の「3.5(3) 性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、海水放出機能を保持するために、サポート又は架台による支持で固定し、主要な構造部材が海水放出機能を保持可能な構造強度を有する設計とする。

3.2 機能維持の方針

V-1-1-2-3-3の「3. 要求機能及び性能目標」で設定している構造強度上の性能目標を達成するために、「3.1 構造強度の設計方針」に示す設計方針を踏まえ、V-1-1-2-3-1の「2.1.3(2) 荷重の組合せ及び許容限界」で設定している荷重を適切に考慮して、各施設の構造設計及びそれを踏まえた評価方針を設定する。

(1) 竜巻より防護すべき施設を内包する施設

竜巻より防護すべき施設を内包する施設の機能維持の方針は、施設の設置状況に応じ、以下の方針とする。

a. 建屋（原子炉建屋、タービン建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋）

(a) 構造設計

建屋は、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及びV-1-1-2-3-1の「2.1.3(2) 荷重の組合せ及び許容限界」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

建屋に作用する荷重は、外殻を構成する屋根スラブ及び外壁に作用し、建屋内に配置された耐震壁又は鉄骨架構を介し、直接岩盤等に支持する基礎版へ伝達する構造とする。

建屋の構造計画を表 3-1 に示す。

(b) 評価方針

イ. 衝突評価

建屋の衝突評価については、設計飛来物が竜巻より防護すべき施設の外殻を構成する部材を貫通しない設計とするために、設計飛来物による衝撃荷重に対し、当該部材が設計飛来物の貫通を生じない厚さ以上であることを計算及び解析により確認する。評価方法としては、「5.1.1 鉄筋コンクリート造構造物(3)強度評価方法」に示す強度評価式により算出した厚さもしくはFEMを用いた解析により算出したひずみを基に評価を行う。

また、竜巻より防護すべき施設の外殻となる部材である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）及び原子炉建屋附属棟1階電気室搬入口水密扉についても、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、設計飛来物が外殻となる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）及び原子炉建屋付属棟 1 階電気室搬入口水密扉を貫通しない設計とするために、当該部材が設計飛来物の貫通を生じない厚さ以上であることを計算により確認する。評価方法としては、「5.1.1 鉄筋コンクリート造構造物(3)強度評価方法」に示す強度評価式を基に評価を行う。

ロ. 構造強度評価

建屋の構造強度評価については、竜巻より防護すべき施設に波及的影響を与えない確認として、設計飛来物による衝撃荷重に対し、竜巻より防護すべき施設の外殻とな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及び壁面のうち、コンクリートの裏面剥離により内包する防護対象施設への影響が考えられる箇所については、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。評価方法としては、「5.1.1 鉄筋コンクリート造構造物(3) 強度評価方法」に示す強度評価式により算出した厚さを基に評価を行う。外殻となる屋根スラブ及び壁面において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、屋根スラブについては、デッキプレートが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。評価方法としては、FEMを用いた解析により算出したひずみを基に評価を行う。その他の部位については、当該部位若しくは当該部位の裏面剥離の影響を受ける防護対象施設に、裏面剥離対策が施されていることを確認する。

また、防護対象施設の外殻とな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、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、屋根スラブ、屋根スラブのスタッドボルト及び構造躯体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を計算及び解析により確認する。評価方法としては、FEMを用いた解析により算出したひずみ及び「5.1.2 鋼製構造物(3) 強度評価方法」に示す強度評価式により算出した応力並びに建屋の地震応答解析モデルを用いて算出したせん断ひずみを基に評価を行う。

防護対象施設の外殻となる部材である原子炉建屋大物搬入口扉（原子炉建屋原子炉棟水密扉）及び原子炉建屋付属棟 1 階電気室搬入口水密扉については、設計竜巻の気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、扉支持部材の破断による脱落を生じないことを計算により確認する。

表 3-1 建屋の構造計画(1/3)

施設 分類	施設名称	計画の概要		説明図
		主体構造	支持構造	
建屋	【位置】			
	<div></div>			

表 3-1 建屋の構造計画 (2/3)

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
原子炉建屋	鉄筋コンクリート造の主体構造及び鉄骨造の陸屋根で構成する。	荷重は建屋の外殻を構成する屋根及び外壁に作用し、建屋内に配置された耐震壁等を介し、基礎版へ伝達する構造とする。	

表 3-1 建屋の構造計画 (3/3)

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
タービン建屋	鉄筋コンクリート造の主体構造及び鉄骨造の陸屋根で構成する。	荷重は建屋の外殻を構成する屋根及び外壁に作用し、建屋内に配置された耐震壁等を介し、基礎版へ伝達する構造とする。	

表 3-1 建屋の構造計画(4/4)

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
使用済燃料乾式 貯蔵建屋	鉄筋コンクリート造（一部鉄骨鉄筋コンクリート造及び鉄骨造）で構成する。	荷重は建屋の外殻を構成する屋根及び外壁に作用し、基礎版へ伝達する構造とする。	

b. 軽油貯蔵タンクタンク室

(a) 構造設計

軽油貯蔵タンクタンク室は、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及びV-1-1-2-3-1の「2.1.3(2) 荷重の組合せ及び許容限界」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

軽油貯蔵タンクタンク室は、地下に埋設された鉄筋コンクリート造とし、地上部に露出する開口部は鋼製の蓋を設置する構造とする。

軽油貯蔵タンクタンク室に作用する荷重は、地上に露出した鋼製蓋に作用し、鉄筋コンクリート造の躯体を介し、直接岩盤等に支持する基礎版へ伝達する構造とする。

軽油貯蔵タンクタンク室の構造計画を表 3-2 に示す。

(b) 評価方針

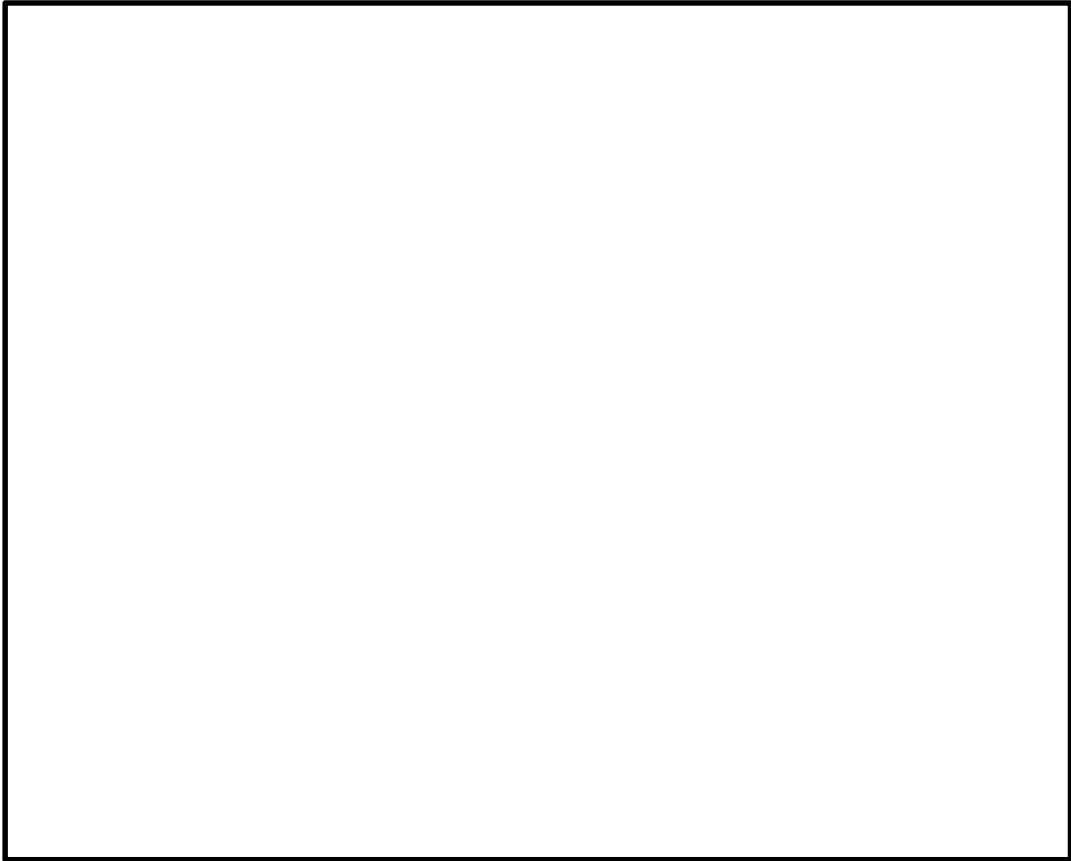
イ. 衝突評価

軽油貯蔵タンクタンク室の衝突評価については、設計飛来物による衝撃荷重に対し、設計飛来物が施設の外殻を構成する部材を貫通しない設計とするために、地上に露出した鋼製蓋が設計飛来物の貫通を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。評価方法としては、「5.1.1 鉄筋コンクリート造構造物(3)強度評価方法」に示す強度評価式により算出した厚さを基に評価を行う。

ロ. 構造強度評価

軽油貯蔵タンクタンク室の構造強度評価については、設計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、軽油貯蔵タンクタンク室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、頂版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。評価方法としては、「5.1.1 鉄筋コンクリート造構造物 (3)強度評価方法」に示す強度評価式により算出した厚さを基に評価を行う。

表 3-2 軽油貯蔵タンクタンク室の構造計画(1/2)

施設 分類	施設名称	計画の概要		説明図
		主体構造	支持構造	
建屋	【位置】			
				

NT2 補② V-3-別添 1-1 R1

表 3-2 軽油貯蔵タンクタンク室の構造計画(2/2)

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
軽油貯蔵タンク タンク室	地下に埋設された外殻の躯体を鉄筋コンクリート造とし，地上部に露出する開口部は鋼製の蓋により構成する。	荷重は地上に露出した鋼製蓋に作用し，鉄筋コンクリート造の躯体を介し，基礎版へ伝達する設計とする。	

(2) 屋外の防護対象施設

a. ディーゼル発電機吸気フィルタ

(a) 構造設計

ディーゼル発電機吸気フィルタは、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及びV-1-1-2-3-1の「2.1.3(2) 荷重の組合せ及び許容限界」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

ディーゼル発電機吸気フィルタの構造は4脚たて置円筒型容器構造とし、支持脚はディーゼル発電機室屋上面基礎部に溶接により固定する構造とする。

また、作用する荷重については、ディーゼル発電機吸気フィルタに作用し、支持脚に伝達される構造とする。

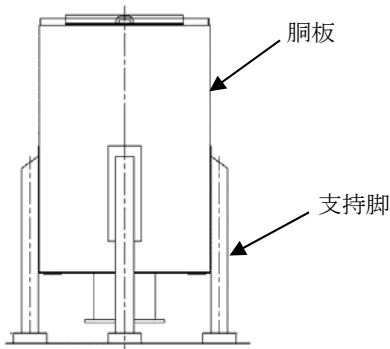
ディーゼル発電機吸気フィルタの構造計画を表3-2に示す。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

ディーゼル発電機吸気フィルタの構造強度評価については、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、ディーゼル発電機吸気フィルタの胴板及び支持脚に生じる応力が許容応力以下であることを計算により確認する。評価方法としては、「5.2.2(1) 4脚たて置円筒形容器（ディーゼル発電機吸気フィルタ）(3) 強度評価方法」に示すとおり、評価式により算出した応力を基に評価を行う。

表 3-2 ディーゼル発電機吸気フィルタの構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
【位置】 ディーゼル発電機吸気フィルタは、ディーゼル発電機室屋上面に設置する設計としている。			
ディーゼル発電機吸気フィルタ	4脚たて置円筒型容器	ディーゼル発電機室屋上面に設けたコンクリート基礎の基礎プレートに溶接で固定する。	

b. ディーゼル発電機室ルーフベントファン

(a) 構造設計

ディーゼル発電機室ルーフベントファンは、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及びV-1-1-2-3-1の「2.1.3(2) 荷重の組合せ及び許容限界」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

ディーゼル発電機室ルーフベントファンは、鋼製のケーシング及び羽根車を主体構造とし、ディーゼル発電機室屋上面に設けたコンクリート基礎に本体を基礎ボルトで固定する構造とする。また、作用する荷重については、ケーシングに作用し、基礎ボルトに伝達する構造とする。

ディーゼル発電機室ルーフベントファンの構造計画を表 3-3 に示す。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

ディーゼル発電機室ルーフベントファンの構造強度評価については、設計竜巻の風圧力による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、ディーゼル発電機室ルーフベントファンを構成する基礎ボルトに生じる応力が許容応力以下であることを計算により確認する。評価方法としては、「5.2.4.(3) ファン c. 強度評価方法」に示すとおり、評価式により算出した応力を基に評価を行う。

表 3-3 ディーゼル発電機室ルーフベントファンの構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
【位置】 ディーゼル発電機室ルーフベントファンは、ディーゼル発電機室屋上面に設置する設計としている。			
ディーゼル発電機室ルーフベントファン	ケーシング及び羽根車などの鋼材で構成する。	ディーゼル発電機室屋上面に設けたコンクリート基礎に本体を基礎ボルトで固定する。	

NT2 補② V-3-別添 1-1 R1

c. 中央制御室換気系冷凍機

(a) 構造設計

中央制御室換気系冷凍機は、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及びV-1-1-2-3-1の「2.1.3(2) 荷重の組合せ及び許容限界」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

中央制御室換気系冷凍機は、空気を冷却する熱交換器、圧縮機及び送風機をケーシングで覆ったユニット形式とし、原子炉建屋付属棟屋上面に取付ボルトで固定する構造とする。また、作用する荷重については、ケーシングに作用し、取付ボルトに伝達する構造とする。

中央制御室換気系冷凍機の構造計画を表 3-4 に示す。

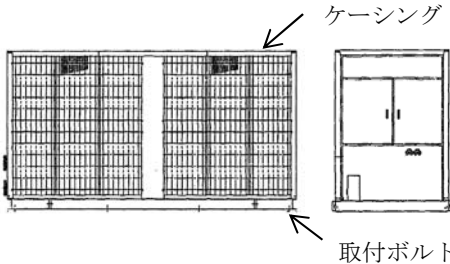
(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

中央制御室換気系冷凍機の構造強度評価については、設計竜巻の風圧力による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、中央制御室換気系冷凍機のケーシングを支持する取付ボルトに生じる応力が許容応力以下であることを計算により確認する。

評価方法としては、「5.2.4.(4) 冷凍機 c. 強度評価方法」に示すとおり、評価式により算出した応力を基に評価を行う。

表 3-4 中央制御室換気系冷凍機の構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<div>【位置】</div> <div>中央制御室換気系冷凍機は、原子炉建屋付属棟屋上面に設置する設計としている。</div>			
中央制御室 換気系冷凍機	空気を冷却する熱交換器、圧縮機及び送風機をケーシングで覆ったユニット形式で構成する。	原子炉建屋付属棟屋上面に取付ボルトで固定する。	<div></div> <div>ケーシング</div> <div>取付ボルト</div>

d. 残留熱除去系海水系ポンプ

(a) 構造設計

残留熱除去系海水系ポンプは、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及びV-1-1-2-3-1の「2.1.3(2) 荷重の組合せ及び許容限界」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

残留熱除去系海水系ポンプは、立形ポンプの上に原動機を取り付け、原動機によりポンプの軸を回転させる構造とする。

ポンプはコンクリート基礎に基礎ボルトで固定し、原動機はポンプの上の原動機支え台にボルトで結合する構造とする。端子箱等のポンプの機能保持に必要な附属品は、原動機にボルトで結合する。また、作用する荷重については、各取付ボルトを介して接続する構造部材に伝達し、基礎ボルトに伝達する構造とする。

残留熱除去系海水系ポンプの構造計画を表 3-5 に示す。

(b) 評価方針

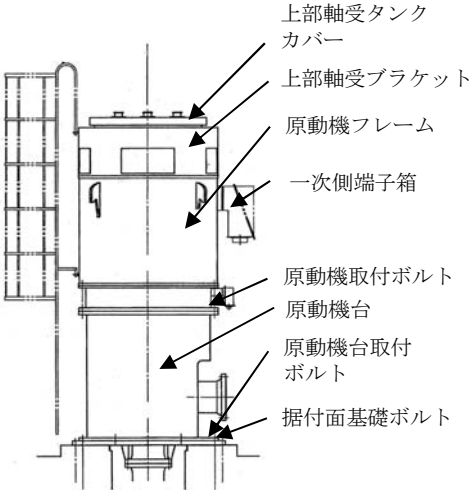
イ. 構造強度評価

残留熱除去系海水系ポンプの構造強度評価については、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、残留熱除去系海水系ポンプ及びポンプの機能保持に必要な附属品を支持する基礎ボルト及び取付ボルト並びにポンプの機能保持に必要な附属品を支持する原動機フレームに生じる応力が許容応力以下であることを計算により確認する。評価方法としては、「5.2.1(1) 立形ポンプ c. 強度評価方法」に示すとおり、評価式により算出した応力を基に評価を行う。

ロ. 動的機能維持評価

残留熱除去系海水系ポンプの動的機能維持評価については、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、軸受部における発生荷重が、動的機能を保持可能な許容荷重以下であることを計算により確認する。評価方法としては、「5.2.1(1) 立形ポンプ c. 強度評価方法」に示すとおり、評価式により算出した荷重を基に評価を行う。

表 3-5 残留熱除去系海水系ポンプの構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
【位置】 残留熱除去系海水系ポンプは、海水ポンプ室に設置する設計としている。			
残留熱除去系海水系ポンプ	立形ポンプ	コンクリート基礎に基礎ボルトで固定する。	
残留熱除去系海水系ポンプ原動機	鋼製の原動機フレームに附属品が取り付けられた構造	立形ポンプの上にボルト（原動機取付ボルト）で結合する。附属品は取付ボルトで固定する。	

e. ディーゼル発電機用海水ポンプ

(a) 構造設計

ディーゼル発電機用海水ポンプは、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及びV-1-1-2-3-1の「2.1.3(2) 荷重の組合せ及び許容限界」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

ディーゼル発電機用海水ポンプは、立形ポンプの上に原動機を取り付け、原動機によりポンプの軸を回転させる構造とする。

ポンプはコンクリート基礎に基礎ボルトで固定し、原動機はポンプの上の原動機支え台にボルトで結合する構造とする。端子箱等のポンプの機能保持に必要な附属品は、原動機にボルトで結合する。また、作用する荷重については、各取付ボルトを介して接続する構造部材に伝達し、基礎ボルトに伝達する構造とする。

ディーゼル発電機用海水ポンプの構造計画を表 3-6 に示す。

(b) 評価方針

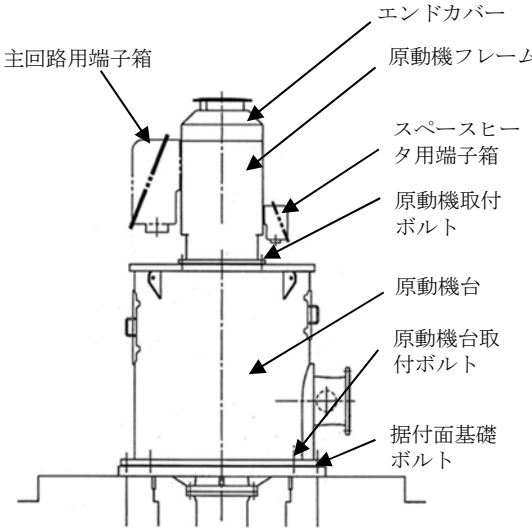
イ. 構造強度評価

ディーゼル発電機用海水ポンプの構造強度評価については、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、ディーゼル発電機用海水ポンプ及びポンプの機能保持に必要な附属品を支持する基礎ボルト及び取付ボルト並びにポンプの機能保持に必要な附属品を支持する原動機フレームに生じる応力が許容応力以下であることを計算により確認する。評価方法としては、「5.2.1(1) 立形ポンプ c. 強度評価方法」に示すとおり、評価式により算出した応力を基に評価を行う。

ロ. 動的機能維持評価

ディーゼル発電機用海水ポンプの動的機能維持評価については、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、軸受部における発生荷重が、動的機能を保持可能な許容荷重以下であることを計算により確認する。評価方法としては、「5.2.1(1) 立形ポンプ c. 強度評価方法」に示すとおり、評価式により算出した荷重を基に評価を行う。

表 3-6 ディーゼル発電機用海水ポンプの構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
【位置】 ディーゼル発電機用海水ポンプは、海水ポンプ室に設置する設計としている。			
ディーゼル 発電機用海 水ポンプ	立形ポンプ	コンクリート基礎に基礎 ボルトで固定する。	
ディーゼル 発電機用海 水ポンプ原 動機	鋼製の原動機 フレームに附 属品が取り付 けられた構造	立形ポンプの上にボルト （原動機取付ボルト）で 結合する。附属品は取付 ボルトで固定する。	

f. 残留熱除去系海水系ストレーナ

(a) 構造設計

残留熱除去系海水系ストレーナは、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及びV-1-1-2-3-1の「2.1.3 (2) 荷重の組合せ及び許容限界」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

残留熱除去系海水系ストレーナは円筒型の容器と支持脚が鋳物一体構造となったたて置円筒形容器を主体構造とし、支持脚をコンクリート基礎に基礎ボルトで固定する構造とする。また、作用する荷重については、支持脚を介して基礎ボルトに伝達する構造とする。

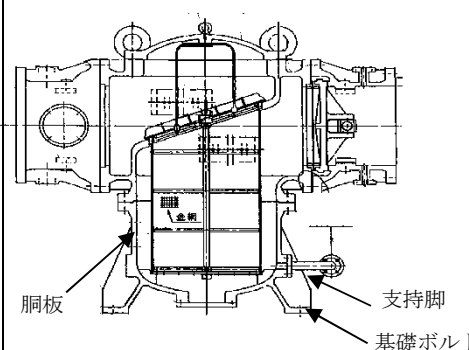
残留熱除去系海水系ストレーナの構造計画を表 3-7 に示す。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

残留熱除去系海水系ストレーナの構造強度評価については、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、海水ストレーナを支持する基礎ボルトに生じる応力が許容応力以下であることを計算により確認する。評価方法としては、「5.2.2(2) たて置円筒形容器 c. 強度評価方法」に示すとおり、評価式により算出した応力を基に評価を行う。

表 3-7 残留熱除去系海水系ストレーナの構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
【位置】 残留熱除去系海水系ストレーナは、海水ポンプ室に設置する設計としている。			
残留熱除去系海水系ストレーナ	円筒型の容器と支持脚が鋳物一体構造となったたて置円筒形容器	支持脚をコンクリート基礎に基礎ボルトで固定する。	

g. ディーゼル発電機用海水ストレーナ

(a) 構造設計

ディーゼル発電機用海水ストレーナは、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及びV-1-1-2-3-1の「2.1.3 (2) 荷重の組合せ及び許容限界」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

ディーゼル発電機用海水ストレーナは円筒型の容器と支持脚が鋳物一体構造となつたたて置円筒形容器を主体構造とし、支持脚をコンクリート基礎に基礎ボルトで固定する構造とする。また、作用する荷重については、支持脚を介して基礎ボルトに伝達する構造とする。

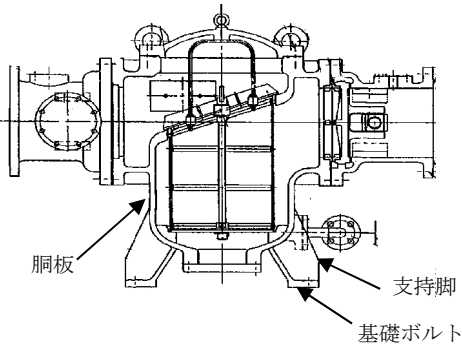
ディーゼル発電機用海水ストレーナの構造計画を表 3-8 に示す。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

ディーゼル発電機用海水ストレーナの構造強度評価については、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、ディーゼル発電機用海水ストレーナを支持する基礎ボルトに生じる応力が許容応力以下であることを計算により確認する。評価方法としては、「5.2.2(2) たて置円筒形容器 c. 強度評価方法」に示すとおり、評価式により算出した応力を基に評価を行う。

表 3-8 ディーゼル発電機用海水ストレーナの構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
【位置】 ディーゼル発電機用海水ストレーナは、海水ポンプ室に設置する設計としている。			
ディーゼル発電機用海水ストレーナ	円筒型の容器と支持脚が鋳物一体構造となったたて置円筒形容器	支持脚をコンクリート基礎に基礎ボルトで固定する。	

h. 排気筒

(a) 構造設計

排気筒は、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及びV-1-1-2-3-1の「2.1.3(2) 荷重の組合せ及び許容限界」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

排気筒の筒身は、鋼管を主体構造とし、排気筒を支持する鉄塔にサポート及びダンパで支持する構造とする。また、作用する荷重については、筒身及び鉄塔を介して基礎ボルトに伝達する構造とする。

排気筒の構造計画を表 3-9 に示す。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

排気筒の構造強度評価については、設計竜巻の風圧力による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、筒身及び鉄塔に生じる応力が許容応力以下であることを計算により確認する。評価方法としては、「5.2.3 排気筒(3) 強度評価方法」に示すとおり、評価式により算出した応力を基に評価を行う。

表 3-9 排気筒の構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】</p> <p>排気筒は，屋外に設置する設計としている。</p>			
排気筒	鋼管で構成する。	筒身を支持する鉄塔にサポート及びダンパで支持する。	

- i. 配管及び弁（中央制御室換気系冷凍機周り，残留熱除去系海水系ポンプ及びディーゼル発電機用海水ポンプ周り並びに非常用ガス処理系排気配管）

(a) 構造設計

中央制御室換気系冷凍機周り，残留熱除去系海水系ポンプ及びディーゼル発電機用海水ポンプ周り並びに非常用ガス処理系排気配管の配管及び弁は，「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及びV-1-1-2-3-1の「2.1.3(2) 荷重の組合せ及び許容限界」で設定している荷重を踏まえ，以下の構造とする。

中央制御室換気系冷凍機周り，残留熱除去系海水系ポンプ及びディーゼル発電機用海水ポンプ周り並びに非常用ガス処理系排気配管の配管及び弁は，鋼製の配管本体及び弁を主体構造とし，支持構造物により床及び壁等に支持する構造とする。また，作用する荷重については，配管本体に作用する構造とする。

中央制御室換気系冷凍機周り，残留熱除去系海水系ポンプ及びディーゼル発電機用海水ポンプ周り並びに非常用ガス処理系排気配管の配管及び弁の構造計画を表 3-10 に示す。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

配管及び弁（中央制御室換気系冷凍機周り，残留熱除去系海水系ポンプ及びディーゼル発電機用海水ポンプ周り並びに非常用ガス処理系排気配管）の構造強度評価については，設計竜巻の風圧力による荷重，気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し，配管本体に生じる応力が許容応力以下であることを計算により確認する。評価方法としては，「5.2.4 配管及び弁(3) 強度評価方法」に示すとおり，評価式により算出した応力を基に評価を行う。

表 3-10 配管及び弁（中央制御室換気系冷凍機周り，残留熱除去系海水系ポンプ及びディーゼル発電機用海水ポンプ周り並びに非常用ガス処理系排気配管）の構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
【位置】 配管及び弁は、原子炉建屋付属棟屋上の中央制御室換気系冷凍機エリア及び海水ポンプ室並びに原子炉建屋壁面及び排気筒の支持鉄塔で支持する設計としている。			
配管及び弁 （中央制御室換気系冷凍機周り，残留熱除去系海水系ポンプ及びディーゼル発電機用海水ポンプ周り並びに非常用ガス処理系排気配管）	配管本体及び弁で構成する。	配管本体及び弁は、支持構造物により床及び壁等から支持する。	

(3) 外気と繋がっている屋内の防護対象施設

a. ダクト（非常用換気空調設備）

(a) 構造設計

ダクト（非常用換気空調設備）は、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及びV-1-1-2-3-1の「2.1.3(2) 荷重の組合せ及び許容限界」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

ダクトは、鋼製のダクトを主体構造とし、支持構造物により建屋壁、床及びはり等に支持する構造とする。また、作用する荷重については、ダクト鋼板に作用する構造とする。

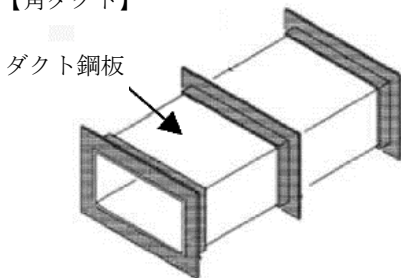
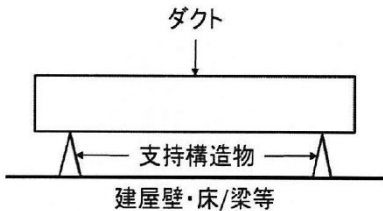
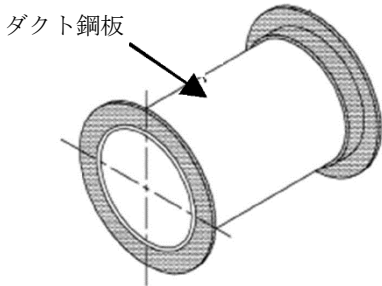
ダクト（非常用換気空調設備）の構造計画を表 3-11 に示す。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

ダクト（非常用換気空調設備）の構造強度評価については、設計竜巻の気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、ダクトを構成するダクト鋼板に生じる応力が許容応力以下であることを計算により確認する。評価方法としては、ダクト形状で評価方法を分類し「5.2.5(1) ダクト a. 角ダクト(c) 強度評価方法」及び「5.2.5(1) ダクト b. 丸ダクト(c) 強度評価方法」に示すとおり、評価式により算出した応力を基に評価を行う。

表 3-11 ダクト（非常用換気空調設備）の構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
【位置】 ダクト（非常用換気空調設備）は、十分な強度を有する建屋（原子炉建屋）に設置する設計としている。			
ダクト（非常用換気空調設備）	ダクト鋼板で構成する。	ダクトは、支持構造物により建屋壁，床及び梁等から支持する。	<p>【角ダクト】</p>  <p>ダクト</p>  <p>【丸ダクト】</p> 

b. 隔離弁（非常用換気空調設備）

(a) 構造設計

隔離弁（非常用換気空調設備）は、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及びV-1-1-2-3-1 の「2.1.3(2) 荷重の組合せ及び許容限界」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

隔離弁は、弁箱、弁体及び弁棒で構成し、接続ダクトで支持する構造とする。

内部の弁体、弁棒が回転することにより弁の開閉動作を行う構造とし、閉止時には、上流と下流の圧力差が気密性を有する弁の耐圧部に作用する構造とする。

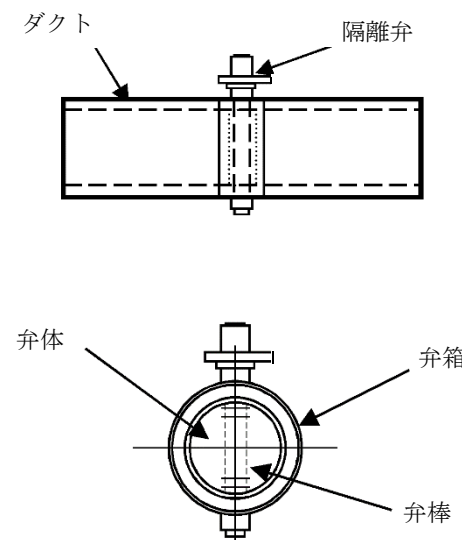
隔離弁（非常用換気空調設備）の構造計画を表 3-12 に示す。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

隔離弁（非常用換気空調設備）の構造強度評価については、開閉可能な機能及び閉止性を考慮して、設計竜巻の気圧差で生じる圧力差が隔離弁の呼び圧力以下であることを確認する。評価方法としては、「5.2.5(2) 隔離弁 c. 強度評価方法」に示すとおり、隔離弁（非常用換気空調設備）の呼び圧力と気圧差を基に評価を行う。

表 3-12 隔離弁（非常用換気空調設備）の構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
【位置】 隔離弁（非常用換気空調設備）は、十分な強度を有する建屋（原子炉建屋）内に設置する設計としている。			
隔離弁（非常用換気空調設備）	弁箱，弁体及び弁棒で構成する。	接続ダクトで支持する。	

(4) 防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設

a. 機械的影響を与える可能性がある施設

(a) サービス建屋

イ. 構造設計

サービス建屋は、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及びV-1-1-2-3-1 の「2.1.3(2) 荷重の組合せ及び許容限界」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

サービス建屋は、発電所建設時に設置した部分（以下「既設部」という。）及び、その後に増設した部分（以下「増設部」という。）で構成され、既設部及び増設部並びに原子炉建屋及びタービン建屋は、それぞれ構造的に独立した建物である。本評価では原子炉建屋及びタービン建屋に隣接する既設部を対象とする。（以下、「サービス建屋」という場合は、既設部を指す。）

サービス建屋は、鉄筋コンクリート造のラーメン構造である。荷重は建屋の外殻を構成する屋根及び外壁に作用し、建屋内に配置された耐震壁等を介し、基礎版へ伝達する構造とする。

サービス建屋の構造計画を表 3-13 に示す。

ロ. 評価方針

(イ) 構造強度評価

サービス建屋の構造強度評価については、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、サービス建屋が原子炉建屋及びタービン建屋に接触する変形を生じないことを計算により確認する。評価方法としては、建屋の地震応答解析モデルを用いて算出した変位を基に評価を行う。

表 3-13 サービス建屋の構造計画(1/2)

施設分類	施設名称	計画の概要		説明図
		主体構造	基礎構造	
建屋				

表 3-13 サービス建屋の構造計画(2/2)

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	基礎構造	
サービス 建屋	鉄筋コンクリート造のラーメン構造で構成する。	荷重は建屋の外殻を構成する屋根及び外壁に作用し、建屋内に配置された耐震壁等を介し、基礎版へ伝達する構造とする。	

(b) 鋼製防護壁

イ. 構造設計

鋼製防護壁は、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している鋼製防護壁及びV-1-1-2-3-1 の「2.1.3(2) 荷重の組合せ及び許容限界」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

鋼製防護壁は防潮堤の一部であり、鉛直及び水平方向に配置された鋼板で構成される鋼殻構造で構成され、添接板と高力ボルトを用いた摩擦接合により結合される、分割したブロックの集合体として全体を構成する。荷重は防護壁に作用し、基礎へ伝達する構造とする。

鋼製防護壁の構造計画を表 3-14 に示す。

ロ. 評価方針

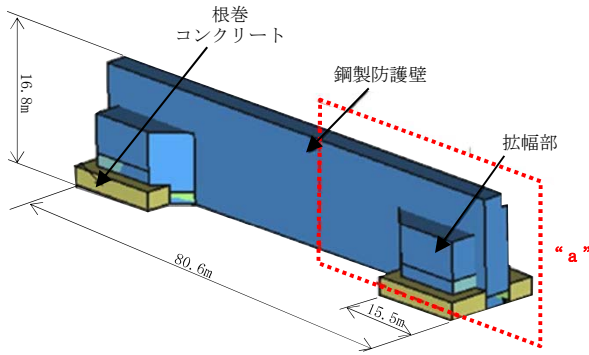
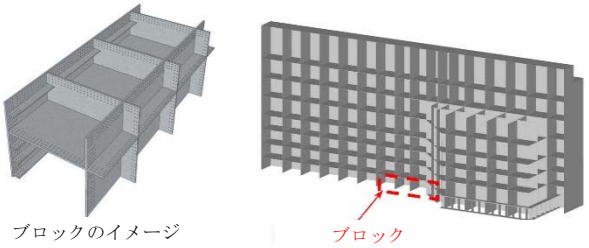
(イ) 構造強度評価

鋼製防護壁の構造強度評価については、設計竜巻の風圧力による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、鋼製防護壁に転倒が生じないことを計算により確認する。評価方法としては、「5.1.2 鋼製構造物(3) 強度評価方法」に示す評価式により算出した設計竜巻の風圧力による荷重が、津波による荷重に包絡されることを確認する。

表 3-14 鋼製防護壁の構造計画 (1/2)

施設分類	施設名称	計画の概要		説明図
		主体構造	基礎構造	
建屋				

表 3-14 鋼製防護壁の構造計画 (2/2)

施設 名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
【位置】			
鋼製 防護壁	鉛直及び水平方向に配置された鋼板で構成される鋼殻構造であり、添接板と高力ボルトを用いた摩擦接合により結合される、分割したブロックの集合体として全体を構成する。	荷重は防護壁に作用し、基礎へ伝達する構造とする。	<div><p>(鳥瞰図)</p><div><p>ブロックのイメージ</p><p>ブロック</p><p>(内部透視図 (“a” 部))</p></div></div>

b. 機能的影響を与える可能性がある施設

(a) ディーゼル発電機排気消音器

イ. 構造設計

ディーゼル発電機排気消音器は、「3.1 構造強度の設計方針」で設定しているディーゼル発電機排気消音器の設計方針及びV-1-1-2-3-1の「2.1.3(2) 荷重の組合せ及び許容限界」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

ディーゼル発電機排気消音器は、鋼製の胴板を主体構造とし、ディーゼル発電機室屋上面に設けたコンクリート基礎に本体を取付ボルト又は基礎ボルトで固定する構造とする。また、作用する荷重については、ディーゼル発電機排気消音器を介し、取付ボルト又は基礎ボルトに伝達する構造とする。

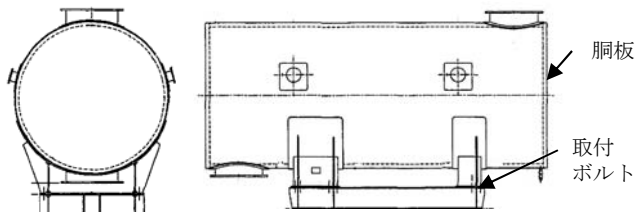
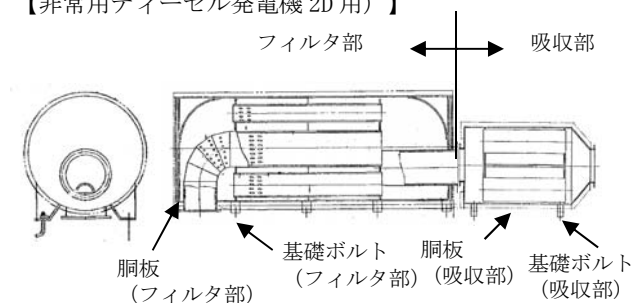
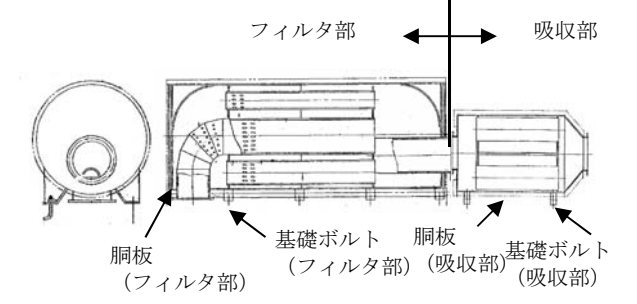
ディーゼル発電機排気消音器の構造計画を表 3-15 に示す。

ロ. 評価方針

(イ) 構造強度評価

ディーゼル発電機排気消音器の構造強度評価については、設計竜巻の風圧力による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、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に生じる応力が許容応力以下であることを計算により確認する。評価方法としては、「5.2.2(3) よこ置円筒形容器 c. 強度評価方法」に示すとおり、評価式により算出した応力を基に評価を行う。

表 3-15 ディーゼル発電機排気消音器の構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
ディーゼル 発電機排気 消音器	鋼板で構成 する。	ディーゼル発 電機室屋上面 に設けたコン クリート基礎 に本体を取付 ボルト又は基 礎ボルトで固 定する。	<p>【非常用ディーゼル発電機 2C 用）】</p> 
			<p>【非常用ディーゼル発電機 2D 用）】</p> 
			<p>【高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用）】</p> 

- (b) ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管並びに残留熱除去系海水系配管（放出側）及びディーゼル発電機用海水配管（放出側）

イ. 構造設計

ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管並びに残留熱除去系海水系配管（放出側）及びディーゼル発電機用海水配管（放出側）は、「3.1 構造強度の設計方針」で設定しているディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管並びに残留熱除去系海水系配管（放出側）及びディーゼル発電機用海水配管（放出側）の設計方針及びV-1-1-2-3-1の「2.1.3(2) 荷重の組合せ及び許容限界」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管並びに残留熱除去系海水系配管（放出側）及びディーゼル発電機用海水配管（放出側）は、鋼製の配管を主体構造とし、サポートによる支持で建屋壁面等に固定する構造とする。また、作用する荷重については、配管本体からサポートを介して建屋壁及び床等に作用する構造とする。

ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管並びに残留熱除去系海水系配管（放出側）及びディーゼル発電機用海水配管（放出側）の構造計画を表 3-16 に示す。

ロ. 評価方針

(イ) 構造強度評価

ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管並びに残留熱除去系海水系配管（放出側）及びディーゼル発電機用海水配管（放出側）の構造強度評価については、設計竜巻の風圧力による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、排気配管及びベント管の配管本体及びサポート部に生じる応力が許容応力以下であることを計算により確認する。評価方法としては、「5.2.4 配管及び弁(3) 強度評価方法」に示すとおり、評価式により算出した応力を基に評価を行う。

表 3-16 ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管並びに
 残留熱除去系海水系配管（放出側）及びディーゼル発電機用海水配管（放出側）の構造計画

施設 名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
ディーゼル発 電機付属排気 配管	鋼管で構成す る。	サポートによる 支持で建屋壁面 等に固定する。	
ディーゼル発 電機付属ベン ト配管			
残留熱除去系 海水系配管 （放出側） ディーゼル発 電機用海水配 管（放出側）			

表 3-17 竜巻の影響を考慮する施設 強度評価対象部位 (1/6)

分類	施設名称	評価対象部位	評価項目	評価項目 分類	選定理由
竜巻より防護すべき施設を内包する施設	原子炉建屋	屋根スラブ（デッキプレート含む）、外壁、構造躯体	衝突	貫通	竜巻より防護すべき施設の外殻となる部分への設計飛来物の衝突を考慮し、当該部に貫通が生じないことを確認するため、竜巻より防護すべき施設の外殻となる外壁及び屋根スラブを評価対象部位として選定する。
			構造強度	裏面剥離	竜巻より防護すべき施設の外殻となる部分への設計飛来物の衝突を考慮し、当該部の脱落による影響が生じないことを確認するため、竜巻より防護すべき施設の外殻となる外壁及び屋根スラブを評価対象部位として選定する。
				転倒・脱落	竜巻より防護すべき施設の外殻となる部分への竜巻による荷重の作用を考慮し、当該部の転倒及び脱落が生じないことを確認するため、構造躯体及び屋根スラブを評価対象部位として選定する。
		原子炉建屋大物搬入口扉（機器搬入口内側扉）	衝突	貫通	設計飛来物の衝突を考慮し、設計飛来物の運動エネルギーが、原子炉建屋原子炉棟水密扉及び本扉による吸収可能エネルギー以下とするため、竜巻より防護すべき施設の外殻となる原子炉建屋大物搬入口扉（機器搬入口内側扉）を評価対象部位として選定する。
		原子炉建屋大物搬入口扉（原子炉建屋原子炉棟水密扉）	衝突	貫通	設計飛来物の衝突を考慮し、設計飛来物の運動エネルギーが、原子炉建屋機器搬入口内側扉及び本扉による吸収可能エネルギー以下とするため、竜巻より防護すべき施設の外殻となる原子炉建屋大物搬入口扉（原子炉建屋原子炉棟水密扉）を評価対象部位として選定する。
			構造強度	転倒・脱落	竜巻より防護すべき施設の外殻となる部分への竜巻の気圧差による荷重の作用を考慮し、当該部の転倒及び脱落が生じないことを確認するため、竜巻より防護すべき施設の外殻となる原子炉建屋大物搬入口扉（原子炉建屋原子炉棟水密扉）を評価対象部位として選定する。
		原子炉建屋附属棟 1 階電気室搬入口水密扉	衝突	貫通	竜巻より防護すべき施設の外殻となる部分への設計飛来物の衝突を考慮し、当該部に終局状態に至るようなひずみが生じないことを確認するため、竜巻より防護すべき施設の外殻となる原子炉建屋附属棟 1 階電気室搬入口水密扉を評価対象部位として選定する。
			構造強度	転倒・脱落	竜巻より防護すべき施設の外殻となる部分への竜巻の気圧差による荷重の作用を考慮し、当該部の転倒及び脱落が生じないことを確認するため、竜巻より防護すべき施設の外殻となる原子炉建屋附属棟 1 階電気室搬入口水密扉を評価対象部位として選定する。

表 3-18 竜巻の影響を考慮する施設 強度評価対象部位(2/6)

分類	施設名称	評価対象部位	評価項目	評価項目 分類	選定理由
竜巻より防護すべき施設を内包する施設	タービン建屋	防護対象施設が設置されている区画の建屋内壁，構造躯体	衝突	貫通	竜巻より防護すべき施設の外殻となる部分への設計飛来物の衝突を考慮し，当該部に貫通が生じないことを確認するため，防護対象施設が設置されている区画の建屋内壁を評価対象部位として選定する。
			構造強度	転倒・脱落	竜巻より防護すべき施設の外殻となる部分への竜巻による荷重の作用を考慮し，当該部の転倒及び脱落が生じないことを確認するため，構造躯体を評価対象部位として選定する。
	使用済燃料乾式 貯蔵建屋	屋根スラブ，外壁	衝突	貫通	竜巻より防護すべき施設の外殻となる部分への設計飛来物の衝突を考慮し，当該部に貫通が生じないことを確認するため，竜巻より防護すべき施設の外殻となる外壁及び屋根スラブを評価対象部位として選定する。
			構造強度	転倒・脱落	竜巻より防護すべき施設の外殻となる部分への竜巻による荷重の作用を考慮し，当該部の転倒及び脱落が生じないことを確認するため，竜巻より防護すべき施設の外殻となる外壁及び屋根スラブを評価対象部位として選定する。
	軽油貯蔵タンク タンク室	鋼製蓋	衝突	貫通	竜巻より防護すべき施設の外殻となる部分への設計飛来物の衝突を考慮し，当該部に貫通が生じないことを確認するため，施設の外殻となる鋼製蓋を評価対象部位として選定する。
		頂版	衝突	貫通	竜巻より防護すべき施設の外殻となる部分への設計飛来物の衝突を考慮し，当該部に貫通が生じないことを確認するため，竜巻より防護すべき施設の外殻となる頂版を評価対象部位として選定する。
			構造強度	裏面剥離によるコンクリート片の飛散	竜巻より防護すべき施設の外殻となる部分への設計飛来物の衝突を考慮し，当該部の脱落による影響が生じないことを確認するため，竜巻より防護すべき施設の外殻となる頂版をを評価対象部位として選定する。

表 3-18 竜巻の影響を考慮する施設 強度評価対象部位 (3/6)

分類	施設名称	評価対象部位	評価項目	評価項目 分類	選定理由
屋外の防護対象施設	ディーゼル発電機吸気フィルタ	胴板 支持脚	構造強度	4脚たて置円筒型容器	竜巻の風圧力による荷重及び気圧差による荷重は、胴板及び胴板を支持する支持脚に作用する。これらは、外荷重として作用する地震荷重と同様なものであるため、J E A G 4 6 0 1 の 4 脚たて置円筒形容器の計算方法を準用し、胴板、支持脚を評価対象部位として選定する。
	ディーゼル発電機ルーフベントファン	基礎ボルト	構造強度	ファン	竜巻の風圧力による荷重及び気圧差による荷重の影響を受けるファン据付面より上部の各部位のうち、支持断面積の小さな部位に大きな応力が生じるため、基礎ボルトを評価対象部位として選定する。
	中央制御室換気系冷凍機	取付ボルト	構造強度	冷凍機	竜巻の風圧力による荷重及び気圧差による荷重の影響を受ける冷凍機据付面より上部の各部位のうち、支持断面積の小さな部位に大きな応力が生じるため、取付ボルトを評価対象部位として選定する。
	残留熱除去系海水系ポンプ ディーゼル発電機用海水ポンプ	基礎ボルト 取付ボルト 原動機フレーム	構造強度	立形ポンプ	竜巻の風圧力による荷重及び気圧差による荷重の影響を受けるポンプ据付面より上部の各部位のうち、支持断面積の小さな部位に大きな応力が生じるため、基礎ボルト、本体各部取付けボルト及び原動機フレームを評価対象部位として選定する。
		軸受部	機能維持	立形ポンプ	外殻に面する部分への竜巻による荷重の作用を考慮し、施設の外殻を構成する部材の変形によって、ポンプの動作に影響がないことを確認するため、動的機能維持に必要な軸受部を評価対象部位として選定する。
	残留熱除去系海水系ストレーナ ディーゼル発電機用海水ストレーナ	基礎ボルト	構造強度	たて置円筒形容器	竜巻の風圧力による荷重及び気圧差による荷重の影響を受けるストレーナ据付面より上部の各部位のうち、 ストレーナ胴板、支持脚は鋳物一体成型であり 1 個の大きなブロックと見なせ 、支持断面積の小さな部位に大きな応力が生じるため、基礎ボルトを評価対象部位として選定する。

表 3-18 竜巻の影響を考慮する施設 強度評価対象部位 (4/6)

分類	施設名称	評価対象部位	評価項目	評価項目分類	選定理由
屋外の防護対象施設	排気筒	筒身, 鉄塔	構造強度	排気筒	竜巻の風圧力による荷重は, 筒身及び鉄塔に作用するため, これら を評価対象部位として選定する。
	配管及び弁 (中央制御室換気系冷凍機周り, 残留熱除去系海水系ポンプ及びディーゼル発電機用海水ポンプ周り並びに非常用ガス処理系排気配管)	配管本体	構造強度	配管及び弁	竜巻の風圧力による荷重及び気圧差による荷重は, 配管仕様と支持間隔による受圧面積に応じて配管本体に作用するため, 配管本体を 評価対象部位として選定する。

表 3-18 竜巻の影響を考慮する施設 強度評価対象部位 (5/6)

分類	施設名称	評価対象部位	評価項目	評価項目 分類	選定理由
屋内外気と繋がっている の防護対象施設	ダクト（非常用換気空調設備）	ダクト鋼板	構造強度	ダクト	換気空調設備のダクトは、建屋内に設置されていることから竜巻の風圧力による荷重は直接受けないが、竜巻の気圧差による荷重が考えられるため、ダクト本体の鋼板部を評価対象部位として選定する。
	隔離弁（非常用換気空調設備）	耐圧部	構造強度	隔離弁	換気空調設備の隔離弁は、建屋内に設置されていることから竜巻の風圧力による荷重は直接受けないが、竜巻の気圧差による荷重が耐圧部に作用することから、耐圧部を評価対象部位として選定する。

表 3-18 竜巻の影響を考慮する施設 強度評価対象部位 (6/6)

分類	施設名称	評価対象部位	評価項目	評価項目 分類	選定理由
防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設	サービス建屋	構造躯体	構造強度	変形	防護対象施設を内包する施設に隣接する建屋の接触による波及的影響を考慮し、構造躯体を評価対象部位として選定する。
	鋼製防護壁	鋼製躯体	構造強度	変形	防護対象施設を内包する施設に隣接する防護壁の接触による波及的影響を考慮し、防護壁の鋼製躯体を評価対象部位として選定する。
	ディーゼル発電機排気消音器	基礎ボルト 取付ボルト	構造強度	消音器	竜巻の風圧力による荷重による荷重の影響を受ける消音器据付面より上部の各部位のうち、排気消音器の転倒による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、支持断面積の小さな部位に大きな応力が発生することから、取付ボルト又は基礎ボルトを評価対象部位として選定する。
	ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管	配管本体	構造強度	配管及び弁	ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管の主要な機能である流路形成機能を維持するために、主要な構成部材である配管本体を評価対象部位として選定する。
	残留熱除去系海水系配管（放出側） ディーゼル発電機用海水配管（放出側）	配管本体	構造強度	配管及び弁	海水配管（放出側）の主要な機能である流路形成機能を維持するために、主要な構成部材である配管本体を評価対象部位として選定する。

4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界

竜巻の影響を考慮する施設の強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せを、「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に、許容限界を「4.2 許容限界」に示す。

4.1 荷重及び荷重の組合せ

竜巻の影響を考慮する施設の強度評価にて考慮する荷重及び荷重の組合せは、V-1-1-2-3-1の「2.1.3(2) 荷重の組合せ及び許容限界」を踏まえ、以下のとおり設定する。

(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、水頭圧及び上載荷重とする。

b. 竜巻による荷重(W_T)

竜巻による荷重は、設計竜巻の以下の特性を踏まえ、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び飛来物による衝撃荷重とする。設計竜巻の特性値を表 4-1 に示す。

・ 竜巻の最大気圧低下量(ΔP_{max})

$$\Delta P_{max} = \rho \cdot V_{Rm}^2$$

ρ : 空気密度(=1.22 kg/m³)

V_{Rm} : 竜巻の最大接線風速(m/s)

・ 竜巻の最大接線風速(V_{Rm})

$$V_{Rm} = V_D - V_T$$

V_D : 竜巻の最大風速(m/s)

V_T : 竜巻の移動速度(m/s)

・ 竜巻の移動速度(V_T)

$$V_T = 0.15 \cdot V_D$$

V_D : 竜巻の最大風速(m/s)

表 4-1 設計竜巻の特性値

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)

風圧力による荷重は、竜巻の最大風速による荷重である。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るが、鉛直方向の風圧力に対して脆弱と考えられる防護対象施設等が存在する場合には、鉛直方向の最大風速等に基づいて算出した鉛直方向の風圧力についても考慮する。

風圧力による荷重は、施設の形状により変化するため、施設の部位ごとに異なる。そのため、各施設及び評価対象部位に対して厳しくなる方向からの風を想定し、各施設の部位ごとに荷重を設定する。

ガスト影響係数(G)は設計竜巻の風速が最大瞬間風速をベースとしていることから、施設の形状によらず竜巻影響評価ガイドを参照して、 $G=1.0$ とする。空気密度(ρ)は「建築物荷重指針・同解説」((社)日本建築学会(2004改定))より $\rho=1.22 \text{ kg/m}^3$ とする。

設計用速度圧については施設の形状に影響を受けないため、設計竜巻の設計用速度圧(q)は施設の形状によらず $q=6100 \text{ N/m}^2$ と設定する。

(b) 気圧差による荷重(W_p)

外気と隔離されている区画の境界部など、気圧差による圧力影響を受ける設備及び竜巻より防護すべき施設を内包する施設の建屋の壁、屋根等においては、竜巻による気圧低下によって生じる施設等の内外の気圧差による荷重が発生する。閉じた施設(通気がない施設)については、この圧力差により閉じた施設の隔壁に外向きに作用する圧力が生じるとみなし設定することを基本とする。

部分的に閉じた施設(通気がある施設等)については、施設の構造健全性を評価する上で厳しくなるよう作用する荷重を設定する。

気圧差による荷重は、施設の形状により変化するため、施設の部位ごとに異なる。そのため、各施設の部位ごとに荷重を算出する。

最大気圧低下量(ΔP_{max})は空気密度及び最大接線風速から、 $\Delta P_{max}=8900 \text{ N/m}^2$ とする。

(c) 飛来物による衝撃荷重(W_M)

設計飛来物である鋼製材及び乗用車の衝突による影響が大きくなる向きで防護対象施設等に衝突した場合の衝撃荷重を算出する。

衝突評価においても、飛来物の衝突による影響が大きくなる向きで衝突することを考慮して評価を行う。

飛来物の寸法、重量及び飛来速度を表 4-2 に示す。設計飛来物の飛来速度については、設置(変更)許可を受けたとおり設定する。また、その他の飛来物については、解析コード「TONBOS」を用いて算出した速度を飛来速度として設定する。

なお、評価に用いた解析コード「TONBOS」の検証及び妥当性確認等の概要については、付録 23「計算機プログラム(解析コード)の概要・TONBOS」に示す。

表 4-2 飛来物の諸元

	鋼製材	砂利
寸法(m)	4.2×0.3×0.2	0.04×0.04×0.04
重量(kg)	135	0.18
水平方向の飛来速度(m/s)	51	62
鉛直方向の飛来速度(m/s)	34	42

c. 運転時に作用する荷重(F_P)

運転時の状態で作用する荷重として、配管等にかかる内圧やポンプのスラスト荷重等の運転時荷重とする。

(2) 荷重の組合せ

竜巻の影響を考慮する施設の設計に用いる竜巻の荷重は、気圧差による荷重(W_P)を考慮した W_{T1} 並びに設計竜巻の風圧力による荷重(W_W)、気圧差による荷重(W_P)及び飛来物による衝撃荷重(W_M)を組み合わせた複合荷重 W_{T2} を以下のとおり設定する。

$$W_{T1} = W_P$$

$$W_{T2} = W_W + 0.5 \cdot W_P + W_M$$

竜巻の影響を考慮する施設には W_{T1} 及び W_{T2} の両荷重をそれぞれ作用させる。各施設の設計竜巻による荷重の組合せについては、施設の設置状況及び構造を踏まえ適切な組合せを設定する。施設分類ごとの荷重の組合せの考え方を以下に示す。

a. 竜巻より防護すべき施設を内包する施設（表 4-3(1/5)）

設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重として、風圧力による荷重、気圧差による荷重、飛来物による衝撃荷重及び常時作用する荷重の組合せを基本とする。

b. 屋外の防護対象施設（表 4-3(2/5, 3/5)）

ディーゼル発電機吸気フィルタ、ディーゼル発電機ルーフベントファン、中央制御室換気系冷凍機、残留熱除去系海水系海水ポンプ、ディーゼル発電機用海水ポンプ、残留熱除去系海水系ストレーナ、ディーゼル発電機用海水ストレーナ、排気筒、配管及び弁（中央制御室換気系冷凍機周り、残留熱除去系海水系ポンプ及びディーゼル発電機用海水ポンプ周り、非常用ガス処理系排気配管）に関しては、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び常時作用する荷重の組合せを基本とする。残留熱除去系海水系海水ポンプ、ディーゼル発電機用海水ポンプ、残留熱除去系海水系ストレーナ、ディーゼル発電機用海水ストレーナ、配管及び弁（中央制御室換気系冷凍機周り、残留熱除去系海水系ポンプ及びディーゼル発電機用海水ポンプ周り）には運転時にスラスト荷重や内圧等が作用するため、運転時の状態で作用する荷重も考慮する。ディーゼル発電機ルーフベントファン、中央制御室換気系冷凍機、非常用ガス処理系排気配管、排気筒は屋外施設であり閉じた施設ではないため、気圧差による荷重を考慮しない。非常用ガス処理系排気配管、排気筒は排気機能が健全であれば良く、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。ディーゼル発電機吸気フィルタは、設計飛来物が衝突により貫通することを考慮しても、閉塞することがなく、ディーゼル発電機の吸気機能は維持されるため、衝撃荷重については考慮しない。また、竜巻防護対策施設を設置する施設については、竜巻防護ネットを通過する小さな飛来物による衝撃荷重は、衝突される機器へ伝わる加速度が小さく、機器へ作用する荷重は強度に影響を与えないので衝撃荷重を考慮しない。

c. 外気と繋がっている屋内の防護対象施設（表 4-3(4/5)）

外気と繋がっている屋内の施設である非常用換気空調設備のダクト、隔離弁は建屋内に設置しているため、風圧力による荷重及び飛来物による衝撃荷重は考慮しないが、外気と繋がっているために施設に作用する気圧差による荷重と常時作用する荷重を組み合わせることを基本とする。運転時の状態で作用する荷重に関しては、気圧差による荷重の抗力となるため組み合わせない。また、隔離弁の自重は内圧荷重に比べ十分小さいことから、自重を考慮しない。

d. 防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設(表 4-3 (5/5))

機械的影響を与える可能性がある施設のうち、サービス建屋は、風圧力による荷重、気圧差による荷重、飛来物による衝撃荷重及び常時作用する荷重の組合せを基本とする。運転時の状態で作用する荷重については作用しないため考慮しない。鋼製防護壁は屋外施設であり閉じた施設ではないため、気圧差による荷重を考慮しない。また、鋼製防護壁の変形評価において設計飛来物による衝撃荷重の影響は軽微であるため、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。

機能的影響を与える可能性がある施設のディーゼル発電機排気消音器、ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管、残留熱除去系海水系配管（放出側）、ディーゼル発電機用海水配管（放出側）は、風圧力による荷重及び常時作用する荷重の組合せを基本とする。ディーゼル発電機排気消音器、ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管、残留熱除去系海水系配管（放出側）、ディーゼル発電機用海水配管（放出側）は排気又は排水機能が健全であれば良く、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又は排水されるため、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。また、ディーゼル発電機排気消音器、ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管は屋外施設であり閉じた施設ではないため、気圧差による荷重を考慮しない。設計基準事故時及び重大事故等時の荷重は、竜巻による荷重と重ならないため、運転時に作用する荷重を考慮しない。

上記の施設分類ごとの荷重の組合せの考え方を踏まえ、各評価対象施設における評価項目ごとの荷重の組合せを表 4-3 に示す。

表 4-3 竜巻の影響を考慮する施設の荷重の組合せ (1/5)

分類	強度評価の対象施設	評価項目	荷重						
			常時作用する荷重 (F _d)			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)	運転時の状態で 作用する荷重 (F _p)
			自重	水頭圧	上 載 荷 重				
竜巻より防護すべき施設 内包する施設	原子炉建屋，タービン建屋， 使用済燃料乾式貯蔵建屋	衝突	○*	—	○*	○*	—	○	—
		構造強度	○	—	○	○	○	○	—
	軽油貯蔵タンクタンク室	衝突	—	—	—	—	—	○	—
		構造強度	—	—	—	—	—	○	—

(○：考慮する荷重を示す。)

注記 *：「設計飛来物の貫通を生じない最小厚さであること」の確認においては考慮しない。

表 4-3 竜巻の影響を考慮する施設の荷重の組合せ (2/5)

分類	強度評価の対象施設	評価項目	荷重						
			常時作用する荷重 (F_d)			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)	運転時の状態で 作用する荷重 (F_p)
			自重	水頭圧	上載荷重				
屋外の防護対象施設	ディーゼル発電機吸気フィルタ	構造強度	○	—	—	○	○	—	—
	ディーゼル発電機ルーフベントファン	構造強度	○	—	—	○	—	—	—
	中央制御室換気系冷凍機	構造強度	○	—	—	○	—	—	—
	残留熱除去系海水系ポンプ，ディーゼル発電機用海水ポンプ	構造強度	○	—	—	○	○	—	○
		機能維持	—	—	—	○	○	—	○
	残留熱除去系海水系ストレーナ，ディーゼル発電機用海水ストレーナ	構造強度	○	—	—	○	○	—	○

(○：考慮する荷重を示す。)

表 4-3 竜巻の影響を考慮する施設の荷重の組合せ (3/5)

分類	強度評価の対象施設	評価項目	荷重						
			常時作用する荷重 (F_d)			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)	運転時の状態で 作用する荷重 (F_p)
			自重	水頭圧	上 載 荷 重				
屋外の 防護対象施設	非常用ガス処理系排気配管	構造強度	○	—	—	○	—	—	—
	排気筒	構造強度	○	—	—	○	—	—	—
	配管及び弁（中央制御室換気系 冷凍機，残留熱除去系海水系ポンプ 及びディーゼル発電機用海水ポンプ 周り）	構造強度	○	—	—	○	○	—	○

(○：考慮する荷重を示す。)

表 4-3 竜巻の影響を考慮する施設の荷重の組合せ (4/5)

分類	強度評価の対象施設	評価項目	荷重						
			常時作用する荷重 (F _d)			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)	運転時の状態で 作用する荷重 (F _p)
			自重	水頭圧	上 載 荷 重				
外気と繋がっている 屋内の 防護対象施設	ダクト（非常用換気空調設備）	構造強度	○	—	—	—	○	—	—
	隔離弁（非常用換気空調設備）	構造強度	—	—	—	—	○	—	—

(○：考慮する荷重を示す。)

表 4-3 竜巻の影響を考慮する施設の荷重の組合せ (5/5)

分類	強度評価の対象施設	評価項目	荷重						
			常時作用する荷重 (F_d)			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)	運転時の状態で 作用する荷重 (F_P)
			自重	水頭圧	上 載 荷 重				
防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設	サービス建屋	構造強度	○	—	○	○	○	○	—
	鋼製防護壁	構造強度	○	—	—	○	—	—	—
	ディーゼル発電機排気消音器	構造強度	○	—	—	○	—	—	—
	ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管	構造強度	○	—	—	○	—	—	—
	残留熱除去系海水系配管（放出側），ディーゼル発電機用海水配管（放出側）	構造強度	○	—	—	○	○	—	○

(○：考慮する荷重を示す。)

(3) 荷重の算定方法

「4.1(1) 荷重の種類」で設定している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 4-4 に示す。

表 4-4 荷重の算出に用いる記号

記号	単位	定義
A	m ²	施設の受圧面積
C	—	風力係数（施設の形状や風圧力が作用する部位（屋根、壁等）に応じて設定する。）
G	—	ガスト影響係数
g	m/s ²	重力加速度
H	N	自重による荷重
m	kg	質量
q	N/m ²	設計用速度圧
R _m	m	最大接線風速半径
V _D	m/s	設計竜巻の風速
V _{Rm}	m/s	設計竜巻の最大接線風速
W _M	N	飛来物による衝撃荷重
W _P	N	気圧差による荷重
W _W	N	風圧力による荷重
ρ	kg/m ³	空気密度
Δ P _{max}	N/m ²	最大気圧低下量

b. 自重による荷重の算出

自重による荷重は以下のとおり計算する。

$$H = m \cdot g$$

c. 竜巻による荷重の算出

(a) 風圧力による荷重(W_W)

風圧力による荷重は、「建築基準法施行令」及び「建築物荷重指針・同解説」（（社）日本建築学会）に準拠して、次式のとおり算出する。

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

ここで,

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

(b) 気圧差による荷重(W_P)

気圧差による荷重は、次式のとおり算出する。

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

ここで,

$$\Delta P_{max} = \rho \cdot V_{Rm}^2$$

(c) 飛来物による衝撃荷重(W_M)

飛来物による衝撃荷重は、飛来物が衝突する施設、評価対象部位及び評価方法に応じて適切に設定する必要があるため、個別計算書にその算出方法を含めて記載する。

評価条件を表 4-5 に示す。

表 4-5 評価条件

最大風速 V_D (m/s)	空気密度 ρ (kg/m ³)	ガスト影響 係数 G (-)	設計用 速度圧 q (N/m ²)	最大接線 風速 V (m/s)	最大気圧 低下量 ΔP (N/m ²)
100	1.22	1.0	6100	85	8900

4.2 許容限界

許容限界は、V-1-1-2-3-3 の「3. 要求機能及び性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標及び「3.2 機能維持の方針」に示す評価方針を踏まえて、評価項目ごとに設定する。

「4.1 荷重及び荷重の組合せ」で設定している荷重及び荷重の組合せを含めた、評価項目ごとの許容限界を表 4-8 に示す。

各施設の許容限界の詳細は、各計算書で評価対象部位の損傷モードを踏まえ評価項目を選定し、評価項目ごとに許容限界を定める。

「原子力発電所耐震設計技術指針重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984」((社) 日本電気協会)、「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987」((社) 日本電気協会) 及び「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」((社) 日本電気協会) (以下「J E A G 4 6 0 1」という。) を準用できる施設については、J E A G 4 6 0 1 に基づき「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 (以下「J S M E」という。) の付録材料図表及び J I S の材料物性値により許容限界を算出している。その他施設や衝撃荷重のみを考慮する施設については、J S M E や既往の実験式に基づき許容限界を設定する。

ただし、J S M E の適用を受ける機器であって、供用状態に応じた許容値の規定が J S M E にないものは機能維持の評価方針を考慮し、J E A G 4 6 0 1 に基づいた許容限界を設定する。

4.2.1 建屋・構造物

(1) 許容限界の設定

a. 衝突評価

(a) 貫通 (表 4-8(1/6))

建屋・構造物の衝突による貫通評価においては、設計飛来物による衝撃荷重に対し、設計飛来物が竜巻より防護すべき施設の外殻を構成する部材を貫通しない設計とするために、設計飛来物の貫通を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評価方針としていることを踏まえ、竜巻より防護すべき施

設の外殻を構成する部材の最小厚さ若しくは部材の吸収エネルギーを許容限界として設定する。また、許容限界を超えた場合は、貫通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評価方針としていることを踏まえ、デッキプレート

の許容ひずみを許容限界として設定する。

b. 構造強度評価

(a) 裏面剥離（表 4-8（1/6））

設計飛来物による衝撃荷重に対し、竜巻より防護すべき施設の外殻を構成する部材自体の脱落による影響を生じない設計とするために、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評価方針としていることを踏まえ、施設の最小部材厚さを許容限界として設定する。また、許容限界を超えた場合は、裏面剥離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評価方針としていることを踏まえ、デッキプレートの許容ひずみを許容限界として設定する。

(b) 転倒及び脱落（表 4-8（1/6））

鉄筋コンクリート造構造物の転倒及び脱落の評価については、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、竜巻より防護すべき施設の外殻とな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、構造躯体に終局状態に至るような変形が生じないことを計算により確認する方針としていることを踏まえ、コンクリートの終局せん断ひずみに基づく制限値を許容限界として設定する。制限値は 2.0×10^{-3} とする。

鉄骨造構造物の転倒及び脱落の評価については、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、竜巻より防護すべき施設の外殻とな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、構造躯体に終局状態に至るような変形が生じないことを計算により確認する方針としていることを踏まえ、「鋼構造設計規準・同解説—許容応力度設計法—」等に基づく許容耐力を許容限界として設定する。

また、屋根スラブに生じる応力については、「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」に基づく終局強度を許容限界として設定する。屋根スラブのスタッドボルトにおいては、「各種合成構造設計指針・同解説」に基づく許容耐力を許容限界として設定する。

水密扉の転倒及び脱落の評価については、設計竜巻の気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、施設の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、扉支持部材の破断による転倒及び脱落が生じないことを計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、「鋼構造設計規準・同解説—許容応力度設計法—」に準じて短期許容応力度を許容限界として設定する。

(c) 構造躯体の変形（表 4-8（6/6））

防護対象施設に波及的影響を与える可能性のある施設については、設計竜巻荷重及びその他の荷重に対し、サービス建屋が原子炉建屋及びタービン建屋に接触する変形を生じないことを計算及び解析により確認する評価方針としていることを踏まえ、原子炉建屋及びタービン建屋との離隔距離を許容限界として設定する。

また、鋼製防護壁が海水ポンプ室に接触する変形を生じないことを竜巻以外の荷重との比較により確認する評価方針としていることを踏まえ、津波による荷重を許容限界として設定する。

(2) 許容限界設定方法

a. 記号の定義

許容限界式に使用する記号を表 4-6 に示す。

表 4-6 許容限界式に用いる記号

記号	単位	定義
A_c	mm^2	コーン状破壊面の有効投影面積
A_0	mm^2	頭付きアンカーボルト頭部の支圧面積
sca	mm^2	頭付きアンカーボルトの断面積で、軸部断面積とねじ部有効断面積の小さな方の値
b	mm	部材幅
D	mm	頭付きアンカーボルト頭部の直径
d	mm	頭付きアンカーボルト軸部の直径
F_c	N/mm^2	コンクリートの設計基準強度
f_n	N/mm^2	コンクリートの支圧強度
f_s	N/mm^2	コンクリートの許容せん断応力度
f_t	N/mm^2	鉄筋の許容引張応力度
j	mm	応力中心間距離 ($j = (7/8) \cdot d$)
l_{ce}	mm	頭付きアンカーボルトの強度計算用埋込み長さ ($l_{ce} = l_e$)
l_e	mm	頭付きアンカーボルトのコンクリート内への有効埋込み長さ
M_a	$\text{kN} \cdot \text{m}$	屋根スラブの単位幅の許容曲げモーメント
P_a	kN	スタッドボルト 1 本あたりの許容引張力
p_a	N	頭付きアンカーボルト 1 本あたりの許容引張力
p_{a1}	N	頭付きアンカーボルトの降伏により定まる場合のアンカーボルト 1 本あたりの許容引張断力
p_{a2}	N	定着したコンクリート躯体のコーン状破壊により定まる場合の頭付きアンカーボルト 1 本あたりの許容引張力
p_{a3}	N	コンクリートの支圧破壊により定まるアンカーボルト 1 本あたりの許容せん断力
Q_a	kN	屋根スラブの単位幅の許容せん断力
$c\sigma_t$	N/mm^2	コーン状破壊に対するコンクリートの引張強度
$s\sigma_{pa}$	N/mm^2	頭付きアンカーボルトの引張強度
$s\sigma_y$	N/mm^2	頭付きアンカーボルトの規格降伏点強度
ϕ_1	—	低減係数
ϕ_2	—	低減係数
a_t	mm^2	引張鉄筋断面積

b. 許容限界式

(a) 頭付きアンカーボルトの許容限界式

コンクリート躯体中に定着された頭付きアンカーボルト1本あたりの許容引張力 p_a は、以下の3式で算定される値のうち、いずれか小なる値とする。

「各種合成構造設計指針・同解説：（社）日本建築学会，2010年改定」より

$$p_{a1} = \phi_1 \cdot s \sigma_{pa} \cdot s c a$$

$$p_{a2} = \phi_2 \cdot c \sigma_t \cdot A_c$$

$$p_{a3} = f_n \cdot A_0$$

ここで

$$s \sigma_{pa} = s \sigma_y$$

$$c \sigma_t = 0.31 \sqrt{F_c}$$

$$A_c = \pi \cdot l_{ce} (l_{ce} + D)$$

$$f_n = \sqrt{A_c / A_0} \cdot F_c \quad \text{ただし, } \sqrt{A_c / A_0} \text{ が6を超える場合は6とする。}$$

$$A_0 = \pi (D^2 - d^2) / 4$$

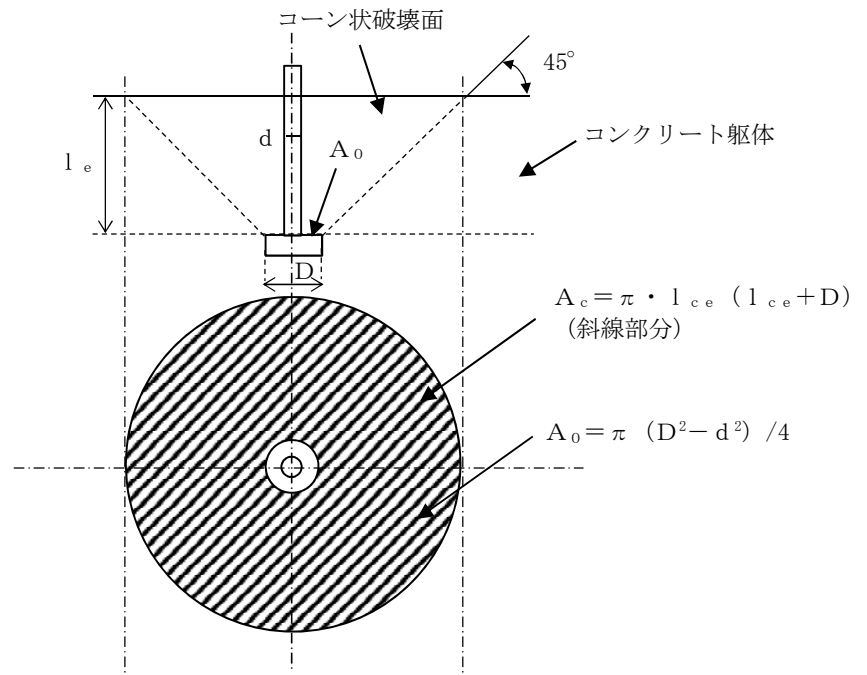


図4-1 頭付きアンカーボルトの側面の有効投影面積

(b) 屋根スラブの許容曲げモーメント

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

(c) 屋根スラブの許容せん断力

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

(d) スタッドボルト1本あたりの許容引張力

$$P_a = \min \{ p_{a1}, p_{a2}, p_{a3} \}$$

4.2.2 機器・配管系

(1) 許容限界の設定

a. 構造強度評価

(a) 立形ポンプ（表 4-8（3/6））

立形ポンプの構造強度評価においては、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、立形ポンプ及び立形ポンプの機能維持に必要な附属品を支持する基礎ボルト、取付ボルト並びにポンプの機能保持に必要な附属品を支持する原動機フレームが、おおむね弾性状態に留まることにより、その施設の安全機能に影響を及ぼすことのないことを計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、J E A G 4 6 0 1 等に準じて許容応力状態Ⅲ_AS の許容応力を許容限界として設定する。

(b) 4 脚たて置円筒形容器（表 4-8（3/6））

4 脚たて置円筒形容器の構造強度評価においては、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、4 脚たて置円筒形容器を構成する胴板、支持脚が、おおむね弾性状態に留まることにより、その施設の安全機能に影響を及ぼすことのないことを計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、J E A G 4 6 0 1 等に準じて許容応力状態Ⅲ_AS 及び座屈に対する評価式を満足する許容応力を許容限界として設定する。

(c) たて置円筒形容器（表 4-8（3/6））

たて置円筒形容器の構造強度評価においては、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、たて置円筒形容器を構成する基礎ボルトが、おおむね弾性状態に留まることにより、その施設の安全機能に影響を及ぼすことのないことを計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、J E A G 4 6 0 1 等に準じて許容応力状態Ⅲ_AS の許容応力を許容限界として設定する。

(d) よこ置円筒形容器（表 4-8（6/6））

よこ置円筒形容器の構造強度評価においては、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、よこ置円筒形容器を構成する基礎ボルトが、おおむね弾性状態に留まることにより、その施設の安全機能に影響を及ぼすことのないことを計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、J E A G 4 6 0 1 等に準じて許容応力状態Ⅲ_AS の許容応力を許容限界として設定する。

(e) 排気筒（表 4-8（4/6））

排気筒の構造強度評価においては、設計竜巻の風圧力による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、風路を確保する機能を保持するために筒身及び鉄塔が、おおむね弾性状態に留まることにより、その施設の安全機能に影響を及ぼすことの

ないことを計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、「容器構造設計指針」等に応じた材料強度を許容限界として設定する。

(f) 配管及び弁（表 4-8（4/6）,（6/6））

配管及び弁の構造強度評価においては、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、配管本体が、おおむね弾性状態に留まることにより、その施設の安全機能に影響を及ぼすことのないことを計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、J E A G 4 6 0 1 等に準じて許容応力状態Ⅲ_AS の許容応力を許容限界として設定する。

(g) ダクト（表 4-8（5/6））

ダクトの構造強度評価においては、設計竜巻の気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、ダクトを構成するダクト鋼板が、おおむね弾性状態に留まることを計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、J E A G 4 6 0 1 等に準じて許容応力状態Ⅲ_AS 及び座屈に対する評価式を満足する許容応力又はクリップリング座屈に応じた許容応力を許容限界として設定する。

(h) 隔離弁（表 4-8（5/6））

隔離弁の構造強度評価においては、設計竜巻の気圧差で生じる圧力差が隔離弁の呼び圧力以下であることを確認する評価方針としていることを踏まえ、隔離弁の耐圧部に発生する圧力に対して、弁の呼び圧力を許容限界として設定する。

(i) ファン（表 4-8（3/6））

ファンの構造強度評価においては、風圧力による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、ファンの基礎ボルトが、おおむね弾性状態に留まることを計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、J E A G 4 6 0 1 等に準じて許容応力状態Ⅲ_AS の許容応力を許容限界として設定する。

(j) 冷凍機（表 4-8（3/6））

冷凍機の構造強度評価においては、風圧力による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、冷凍機の取付ボルトが、おおむね弾性状態に留まることを計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、J E A G 4 6 0 1 等に準じて許容応力状態Ⅲ_AS の許容応力を許容限界として設定する。

b. 動的機能維持評価

(a) 立形ポンプ（表 4-8（3/6））

立形ポンプの動的機能維持評価においては、立形ポンプの軸受部は、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、軸受部における発生荷重が、動的機能を保持可能な許容荷重以下であることを計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、軸受部の接触面圧の許容荷重を許容限界として設定する。

(2) 許容限界設定方法

a. 記号の定義

許容限界式に使用する記号を表 4-7 に示す。

表 4-7 許容限界式に用いる記号

記号	単位	定義
a	mm	ダクト幅
b	mm	ダクト高さ
c	mm	補強ピッチ
E	MPa	ヤング率
f_c	MPa	脚の許容圧縮応力
f_{br}	MPa	脚の半径方向軸まわりの許容曲げ応力
f_{bt}	MPa	脚の半径方向に直角な方向の軸まわりの許容曲げ応力
f_t	MPa	J S M E SSB-3121. 1により規定される供用状態 A 及び B での許容引張応力
I	mm ⁴	断面二次モーメント
k_p	—	座屈係数
M	N・mm	ダクトに作用する曲げモーメント
M_{crip}	N・mm	クリップリング座屈が発生する際に作用する曲げモーメント
M_p	N・mm	自重により作用する曲げモーメント
n	—	座屈モードの次数
r	mm	丸ダクトのダクト半径
t	mm	ダクト板厚
π	—	円周率
ν	—	ポアソン比
Z_c	—	円筒かくの座屈応力の式における係数
β	—	円筒かくの座屈応力の式における係数
ΔP	N/m ²	設計竜巻の気圧低下量
σ_{crip}	MPa	クリップリング座屈が発生する際に生じる周方向応力
σ_{cripl}	MPa	外圧により生じる周方向応力
σ_{p1}	MPa	面内荷重（外圧）による発生応力
σ_{p2}	MPa	面内荷重（自重）による発生応力
σ_{sc}	MPa	脚の圧縮応力の和
σ_{sr}	MPa	脚の半径方向軸まわりの圧縮側曲げ応力の和
σ_{st}	MPa	脚の半径方向に直角な軸まわりの圧縮側曲げ応力の和
σ_w	MPa	短期荷重（設計竜巻による内外差圧）による発生応力と長期荷重（自重）による発生応力の和
σ_x	MPa	x 方向応力
σ_y	MPa	y 方向応力
τ	MPa	せん断応力
τ_{xy}	MPa	x y 面に作用するせん断応力

b. 許容限界式

(a) 支持構造物の許容限界式

イ. ボルト

引張力とせん断力を同時に受けるボルトの許容引張応力 f_{ts} は以下のとおり。

$$\text{Min} \{ 1.5 f_t, (2.1 f_t - 1.6 \tau) \}$$

ロ. 溶接部

溶接部については引張応力とせん断応力の組合せが考えられる場合、J S ME SSB-3121.1(6)、SSB-3121.2を準用し、組合せ応力に対しても評価を行う。

垂直応力とせん断応力を生じる構造部分の応力は、以下に示す、垂直応力とせん断応力の組合せ応力の許容応力の評価式を満足しなければならない。

$$1.5 f_t \geq \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3 \tau_{xy}^2}$$

(b) 4脚たて置円筒形容器の許容限界式

支持脚について、以下の式にて座屈評価を行う。

$$1 \geq \frac{\sigma_{sr}}{f_{br}} + \frac{\sigma_{st}}{f_{bt}} + \frac{\sigma_{sc}}{f_c}$$

(c) 角ダクトの許容限界式

イ. 長期荷重（自重）＋短期荷重（設計竜巻による内外差圧）に対する許容限界

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



ここで

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

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

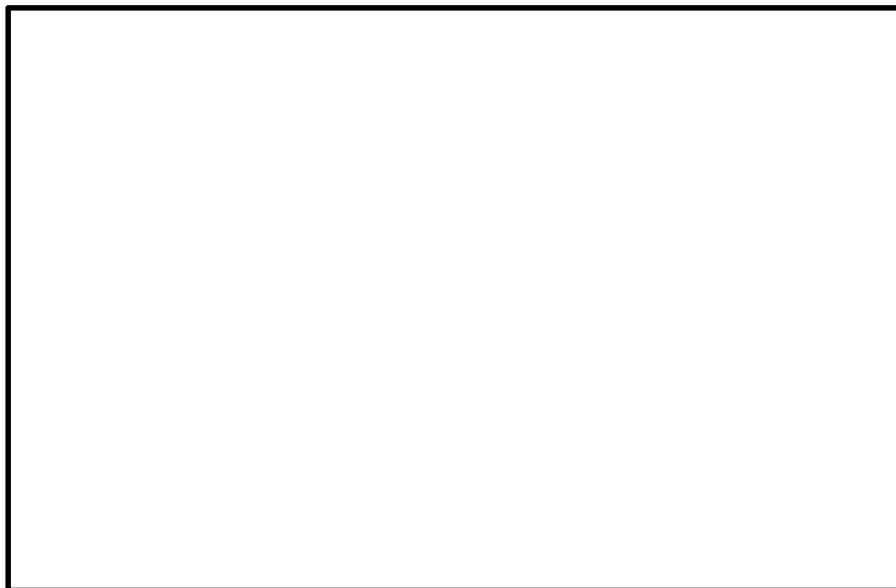


(d) 丸ダクトの許容限界式

イ. 外圧に対する許容限界

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

外圧によるクリップリング座屈が発生する際に生じる周方向応力 σ_{crip} は、円筒殻の座屈応力の式より算出する。



- b. 長期荷重（自重）＋短期荷重（設計竜巻による内外差圧）に対する許容限界
自重により作用する曲げモーメント M_P と外圧 ΔP （設計竜巻による気圧低下量）の組合せが，下式を満足させるものとする。



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

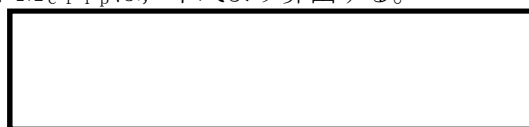


表 4-8 施設ごとの許容限界(1/6)

施設 分類	施設名称	荷重の 組合せ	評価対象部位	評価 項目	機能損傷モード		許容限界
					応力等の状態	限界状態	
竜巻より防護すべき施設を内包する施設	原子炉建屋，タービン建屋，使用済燃料乾式貯蔵建屋	W_M	屋根スラブ，外壁（防護対象施設が設置されている区画の建屋内壁を含む）	衝突	せん断	貫通	施設の最小部材厚さが貫通限界厚さ以上とする。
							デッキプレートの発生ひずみ が，JIS規格値／ T_F （ $T_F=2.0$ ）を考慮した値以下とする。
		F_d+W_T （ W_W ， W_P ）		構造強度	せん断	裏面剥離による コンクリート片の飛散	施設の最小部材厚さが裏面剥離限界厚さ以上とする。
							コンクリートのせん断ひずみが 設定値（ 2.0×10^{-3} ）以下とする。
					曲げ，せん断	部材の破断による部材自体の転倒及び脱落	鉄骨造部の部材が，「鋼構造設計規準・同解説—許容応力度設計法—」等に基づく許容耐力以下とする。
							屋根スラブのスタッドボルトが，「各種合成構造設計指針・同解説」に基づく許容耐力以下とする。

表 4-8 施設ごとの許容限界 (2/6)

施設 分類	施設名称	荷重の 組合せ	評価対象部位	評価 項目	機能損傷モード		許容限界
					応力等の状態	限界状態	
竜巻より防護すべき施設を内包する施設	原子炉建屋	W_M	原子炉建屋大物搬入口扉（機器搬入口内側扉）	衝突	せん断	貫通	設計飛来物の運動エネルギーが、原子炉建屋原子炉棟水密扉及び本扉による吸収可能エネルギー以下とする。
		W_M	大物搬入口扉（原子炉建屋原子炉棟水密扉）	衝突	せん断	貫通	設計飛来物の運動エネルギーが、機器搬入口内側扉及び本扉による吸収可能エネルギー以下とする。
		$F_d + W_P$		構造強度	曲げ，せん断，組合せ	部材の降伏	「鋼構造設計規準・同解説」の短期許容応力度以下とする。
		W_M	原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉	衝突	せん断	貫通	施設の最小部材厚さが貫通限界厚さ以上とする。
		$F_d + W_P$		構造強度	曲げ，せん断，組合せ	部材の降伏	「鋼構造設計規準・同解説」の短期許容応力度以下とする。
	軽油貯蔵タンクタンク室	W_M	鋼製蓋	衝突	せん断	貫通	施設の最小部材厚さが貫通限界厚さ以上とする。
			頂版	衝突	せん断	貫通	施設の最小部材厚さが貫通限界厚さ以上とする。
				構造強度	せん断	裏面剥離によるコンクリート片の飛散	施設の最小部材厚さが裏面剥離限界厚さ以上とする。

表 4-8 施設ごとの許容限界 (3/6)

施設 分類	施設名称	荷重の 組合せ	評価対象 部位	評価 項目	機能損傷モード		許容限界
					応力等の状態	限界状態	
屋外の 防護対象施設	ディーゼル発電機吸気フ ィルタ	$F_d + W_T (W_W, W_P)$	胴板	構造 強度	一次一般膜, 一 次, 一次+二次	部材の降伏	J E A G 4 6 0 1 等に準じて許 容応力状態Ⅲ _A S の許容応力以下 とする。
			支持脚	構造 強度	組合せ, 座屈	部材の降伏	
	ディーゼル発電機ルー ベントファン	$F_d + W_W$	基礎ボルト	構造 強度	引張, せん断, 組合せ	部材の降伏	J E A G 4 6 0 1 等に準じて許 容応力状態Ⅲ _A S の許容応力以下 とする。
	中央制御室換気系冷凍機	$F_d + W_W$	取付ボルト	構造 強度	引張, せん断, 組合せ	部材の降伏	J E A G 4 6 0 1 等に準じて許 容応力状態Ⅲ _A S の許容応力以下 とする。
	残留熱除去系海水系ポン プ, ディーゼル発電機用 海水ポンプ	$F_d + W_T (W_W, W_P)$ + F_P	ボルト, 原 動機フレー ム	構造 強度	引張, せん断, 組合せ	部材の降伏	J E A G 4 6 0 1 等に準じて許 容応力状態Ⅲ _A S の許容応力以下 とする。
			軸受部	機能 維持	接触	軸と軸受が接 触	
	残留熱除去系海水系スト レーナ, ディーゼル発電 機用海水ストレーナ	$F_d + W_T (W_W, W_P)$ + F_P	基礎ボルト	構造 強度	引張, せん断, 組合せ	部材の降伏	J E A G 4 6 0 1 等に準じて許 容応力状態Ⅲ _A S の許容応力以下 とする。

表 4-8 施設ごとの許容限界 (4/6)

施設 分類	施設名称	荷重の組合せ	評価対象 部位	評価 項目	機能損傷モード		許容限界
					応力等の状態	限界状態	
屋 外 の 防 護 対 象 施 設	非常用ガス処理系排気配 管	$F_d + W_w$	配管本体	構造 強度	一次（膜＋曲 げ）	部材の降伏	J E A G 4 6 0 1 等に準じて許 容応力状態Ⅲ _A S の許容応力以下 とする。
	排気筒	$F_d + W_w$	筒身，鉄 塔	構造 強度	組合せ	部材の降伏	「鋼構造設計基準」等に準じて 断面算定を行う。
	配管及び弁（中央制御室 換気系冷凍機，残留熱除 去系海水系ポンプ及びデ ィーゼル発電機用海水ポ ンプ周り）	$F_d + W_T (W_w, W_p) +$ F_p	配管本体	構造 強度	一次（膜＋曲 げ）	部材の降伏	J E A G 4 6 0 1 等に準じて許 容応力状態Ⅲ _A S の許容応力以下 とする。

表 4-8 施設ごとの許容限界 (5/6)

施設 分類	施設名称	荷重の組合せ	評価対象 部位	評価 項目	機能損傷モード		許容限界
					応力等の状態	限界状態	
外気と繋がっている屋内の 防護対象施設	ダクト（非常用換気空調設備）	$F_d + W_P$	ダクト鋼板 （本体）	構造 強度	曲げ，座屈	部材の降伏	J E A G 4 6 0 1 等に準じて許容応力状態Ⅲ _A S及び座屈に対する評価式を満足する許容応力以下又はクリップリング座屈に応じた許容応力以下とする。
	隔離弁（非常用換気空調設備）	W_P	耐圧部	構造 強度	変形	部材の降伏	呼び圧力以下とする。

表 4-8 施設ごとの許容限界 (6/6)

施設 分類	施設名称	荷重の 組合せ	評価対象 部位	評価 項目	機能損傷モード		許容限界
					応力等の状態	限界状態	
防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設	サービス建屋	$F_d + W_T (W_W, W_P)$	構造躯体	構造強度	せん断	接触	変形量が、隣接する原子炉建屋及びタービン建屋との離隔距離以下とする。
	鋼製防護壁	$F_d + W_W$	鋼製躯体	構造強度	せん断	接触	変形量が、隣接する海水ポンプ室との離隔距離以下とする。
	ディーゼル発電機排気消音器	$F_d + W_W$	取付ボルト 基礎ボルト	構造強度	引張, せん断, 組合せ	部材の降伏	J E A G 4 6 0 1 等に準じて許容応力状態Ⅲ _A S の許容応力以下とする。
	ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管	$F_d + W_W$	配管本体	構造強度	一次 (膜+曲げ)	部材の降伏	J E A G 4 6 0 1 等に準じて許容応力状態Ⅲ _A S の許容応力以下とする。
	残留熱除去系海水系配管 (放出側), ディーゼル発電機用海水配管 (放出側)	$F_d + W_T (W_W, W_P) + F_P$	配管本体	構造強度	一次 (膜+曲げ)	部材の降伏	J E A G 4 6 0 1 等に準じて許容応力状態Ⅲ _A S の許容応力以下とする。

表 4-9 クラス 1・クラス 2, 3・その他の支持構造物の許容応力

許容応力 状態	許容応力*1 *2 *3 (ボルト以外)				許容応力*2 (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
Ⅲ _A S	$1.5 f_t$	$1.5 f_s$	$1.5 f_c$	$1.5 f_b$	$1.5 f_t$	$1.5 f_s$

注記 *1: 「鋼構造設計規準 S I 単位版」(2002 年日本建築学会)等の幅厚比の制限を満足させる。

*2: 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。

*3: 耐圧部に溶接等により直接取り付けられる支持構造物であって耐圧部と一体の応力解析を行うものについては、耐圧部と同じ許容応力とする。

表 4-10 クラス 2, 3 容器の許容応力

許容応力 状態	許容応力		
	一次一般膜応力	一次膜応力+ 一次曲げ応力	一次+二次応力
Ⅲ _A S	$\text{Min}[S_y, 0.6 S_u]$	左欄の 1.5 倍の値	$2 S_y$

表 4-11 クラス 2, 3 配管の許容応力

許容応力 状態	許容応力	
	一次一般膜応力	一次応力 (曲げ応力を含む)
Ⅲ _A S	$\text{Min}[S_y, 0.6 S_u]$ ただし、オーステナイト系ステンレス 鋼及び高ニッケル合金については 1.2 Sとしてもよい	S_y ただし、オーステナイト系ステンレス 鋼及び高ニッケル合金については 1.2 Sとしてもよい

5. 強度評価方法

評価手法は、以下に示す解析法により、適用性に留意の上、規格及び基準類や既往の文献において適用が妥当とされる手法に基づき実施することを基本とする。

- ・ F E M等を用いた解析法
- ・ 定式化された評価式を用いた解析法

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」を参照して、設計竜巻による荷重は地震荷重と同様に施設に作用する場合は、地震荷重と同様に外力として評価をするため、J E A G 4 6 0 1を適用可能とする。ただし、閉じた施設となる屋外配管等については、その施設の大きさ及び形状を考慮した上で、気圧差を見かけ上の配管の内圧の増加として評価する。

風圧力による荷重の影響を考慮する施設については、建築基準法施行令等に基づき風圧力による荷重を考慮し、設備の受圧面に対して等分布荷重として扱って良いことから、評価上高さの1/2または荷重作用点より高い重心位置に集中荷重として作用するものとする。

設計竜巻による荷重が作用する場合に強度評価を行う施設のうち、強度評価方法として、ポンプ、容器及び建屋等の定式化された評価式を用いた解析法を以下に示す。

ただし、以下に示す強度評価方法が適用できない施設及び評価対象部位については、個別計算書にその強度評価方法を含めて記載する。

5.1 建屋・構造物に関する評価式

5.1.1 鉄筋コンクリート造構造物

(1) 評価条件

- a. 貫通限界厚さは、NEI07-13に示されているDegen式を用いて算定する。
Degen式における貫入深さは、「タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日原子炉安全専門審査会）」で用いられている修正NDRC式を用いて算定する。
- b. 裏面剥離限界厚さは、NEI07-13に示されているChang式を用いて算定する。
- c. 荷重及び応力は力学における標準式を用いて算出する。

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-1に示す。

表5-1 評価対象部位及び評価内容

施設名称	評価対象部位	評価内容
原子炉建屋	屋根スラブ 外壁 構造躯体	貫通 裏面剥離 転倒及び脱落
	デッキプレート	貫通
タービン建屋	防護対象施設が設置されている 区画の建屋内壁（オペレーティ ングフロア床版，気体廃棄物処 理系バルブ室） 構造躯体	貫通 裏面剥離 転倒及び脱落
軽油貯蔵タンクタンク室	鋼製蓋支持部 頂版	貫通 裏面剥離
サービス建屋	構造躯体	変形

(3) 強度評価方法

a. 記号の定義

Degen式による貫入限界厚さの算定に用いる記号を表5-2に，修正NDRC式による貫入深さの算定に用いる記号を表5-3に，Chang式による裏面剥離限界厚さの算定に用いる記号を表5-4に，力学における標準式による荷重の算定に用いる記号を表5-5に示す。

表5-2 Degen式による貫入限界厚さの算定に用いる記号

記号	単位	定義
d	cm	設計飛来物直径
e	cm	貫通限界厚さ（コンクリート）
X	cm	貫入深さ
α_e	—	低減係数

表5-3 修正NDRC式による貫入深さの算定に用いる記号

記号	単位	定義
d	cm	設計飛来物直径
D	kgf/cm ³	設計飛来物直径密度(=W/d ³)
F _c	kgf/cm ²	コンクリートの設計基準強度
N	—	設計飛来物の形状係数
V	m/s	設計飛来物の衝突速度
W	kgf	設計飛来物重量
X	cm	貫入深さ

表5-4 Chang式による裏面剥離限界厚さの算定に用いる記号

記号	単位	定義
d	cm	設計飛来物直径
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	m/s	設計飛来物の衝突速度
W	kgf	設計飛来物重量
α _s	—	低減係数

表5-5 力学における標準式による荷重の算定に用いる記号

記号	単位	定義
F _m	N	設計飛来物による衝撃荷重
L ₁	m	設計飛来物の最も短い辺の長さ
m	kg	設計飛来物の質量
V	m/s	設計飛来物の衝突速度
τ	s	設計飛来物と被衝突体との接触時間

b. 評価方法

(a) Degen式による貫通限界厚さの算定

Degen式を以下に示す。

$X/d \leq 1.52$ の場合

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

$1.52 \leq X/d \leq 13.42$ の場合

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

修正NDRC式を以下に示す。

$X/d \leq 2$ の場合

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

$X/d \geq 2$ の場合

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

- (b) Chang式による裏面剥離限界厚さの算定
Chang式を以下に示す。

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

- (c) 力学における標準式による荷重の算定

イ. 設計飛来物による衝撃荷重

$$F_m = m \cdot V / \tau = m \cdot V^2 / L_1$$

5.1.2 鋼製構造物

(1) 評価条件

- a. 飛来物が防護対象施設に衝突する場合の貫通限界厚さを、「タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日 原子炉安全専門審査会）」で用いられているBRL式を用いて算出する。
- b. 荷重及び応力は力学における標準式を用いて算出する。

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-6に示す。

表5-6 評価対象部位及び評価内容

施設名称	評価対象部位	評価内容
原子炉建屋	屋根スラブ (スタッドボルト)	脱落
	原子炉建屋大物搬入口扉 (原子炉建屋原子炉棟水密扉)	貫通 転倒及び脱落
	原子炉建屋大物搬入口扉 (機器搬入口内側扉)	貫通
	原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉	貫通 転倒及び脱落
軽油貯蔵タンクタンク室	鋼製蓋	貫通
鋼製防護壁	構造躯体	変形

(3) 強度評価方法

a. 記号の定義

BRL式による貫入限界厚さの算定に用いる記号を表5-7に、力学における標準式による荷重及び応力の算定に用いる記号を表5-8に示す。

表5-7 BRL式による貫入限界厚さの算定に用いる記号

記号	単位	定義
A	m ²	設計飛来物の諸元から算出される等価面積
d	m	設計飛来物が衝突する衝突断面の等価直径
K	—	鋼板の材質に関する係数
M	kg	設計飛来物の質量
T	mm	貫通限界厚さ
V	m/s	設計飛来物の衝突速度

表5-8 力学における標準式による荷重及び応力の算定に用いる記号(1/2)

(屋根スラブ及びスタッドボルト)

記号	単位	定義
L	m	屋根スラブの支持スパン
M	kN・m	屋根スラブに生じる単位幅の曲げモーメント
p	mm	スタッドボルトの間隔
Q	kN/m	屋根スラブに生じる単位幅のせん断力
T	kN	スタッドボルトに生じる引張力
ω_d	kN/m	常時作用する荷重による単位幅あたりの荷重
ω_T	kN/m	設計竜巻による単位幅あたりの荷重 ($=\max\{\omega_{T1}, \omega_{T2}\}$)
ω_{T1}	kN/m	設計竜巻荷重 W_{T1} による単位幅あたりの荷重
ω_{T2}	kN/m	設計竜巻荷重 W_{T2} による単位幅あたりの荷重 (設計飛来物による衝撃荷重 W_M は考慮しない)

表5-9 力学における標準式による荷重及び応力の算定に用いる記号(2/2)

(水密扉)

記号	単位	定義
L_b	m	軸支持間距離 (カンヌキ)
L_p	m	軸支持間距離 (カンヌキ受けピン)
M	kN	曲げモーメント
n	箇所	カンヌキの箇所数
P_o	kN	竜巻の気圧差による荷重
Q	kN	せん断力
R_p	kN	気圧差による荷重による反力
T	kN	引張力

b. 評価方法

(a) BRL式による貫通限界厚さの算定

BRL式を以下に示す。

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

ここで等価直径 d は下式のとおり。

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$$

(b) 力学における標準式による荷重及び応力の算定

イ. 単位幅の屋根スラブにおける発生モーメント

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

ロ. 単位幅の屋根スラブにおける発生せん断力

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

ハ. スタッドボルト 1 本あたりの発生引張力

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

ニ. 水密扉の扉支持部材に生じる荷重

水密扉の扉支持部材のうち、ヒンジ部はヒンジアーム、ヒンジピン、ヒンジボルト、アンカーで構成され、カンヌキ部はカンヌキ、カンヌキ受けピン、カンヌキ受けボルトで構成されており、次式により算定する竜巻の気圧差による荷重による反力から、各部材に発生する荷重を算定する。

尚、ヒンジ部へはヒンジ側にもカンヌキが配されているため、竜巻の気圧差に伴う荷重は発生しない。

水密扉の概要例を図5-1に示す。また、カンヌキ部に生じる荷重の例を図5-2に示す。

$$R_P = \frac{P_0}{n}$$

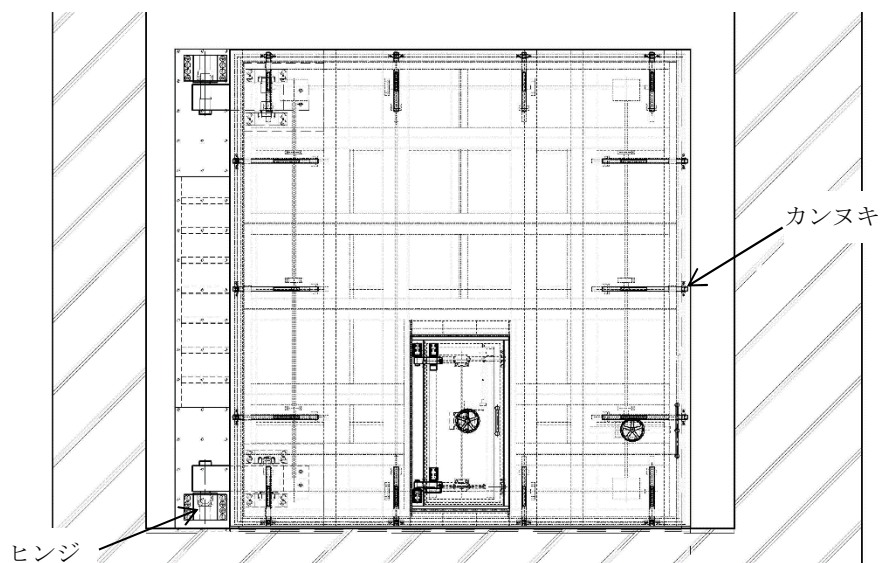


図5-1 水密扉概要 (例)

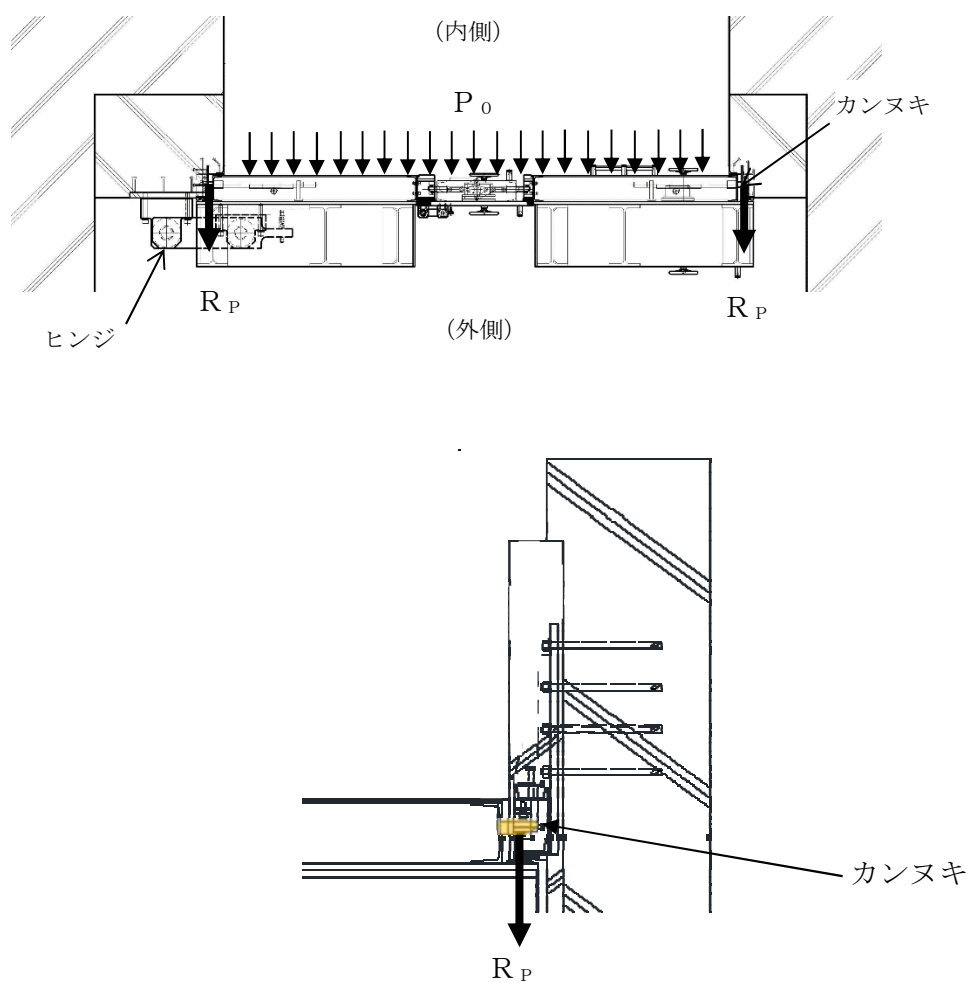


図5-2 カンヌキ部に生じる荷重の例

(イ) カンヌキ

カンヌキに生じる荷重は、次式により算定する。カンヌキに生じる荷重の例を図5-3に示す。

$$M = R_P \cdot L_b$$

$$Q = R_P$$

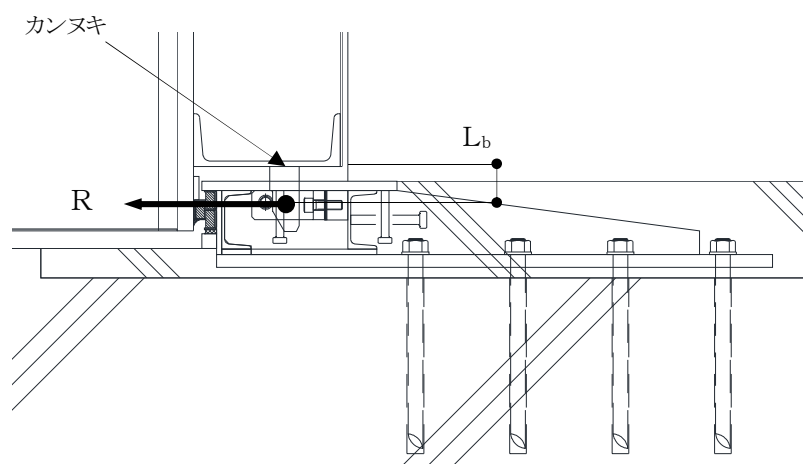


図5-3 カンヌキに生じる荷重の例

(ロ) カンヌキ受けピン

カンヌキ受けピンに生じる荷重は、次式により算定する。カンヌキ受けピンに生じる荷重の例を図5-4に示す。

$$M = R_p \cdot \frac{L_p}{4}$$

$$Q = R_p$$

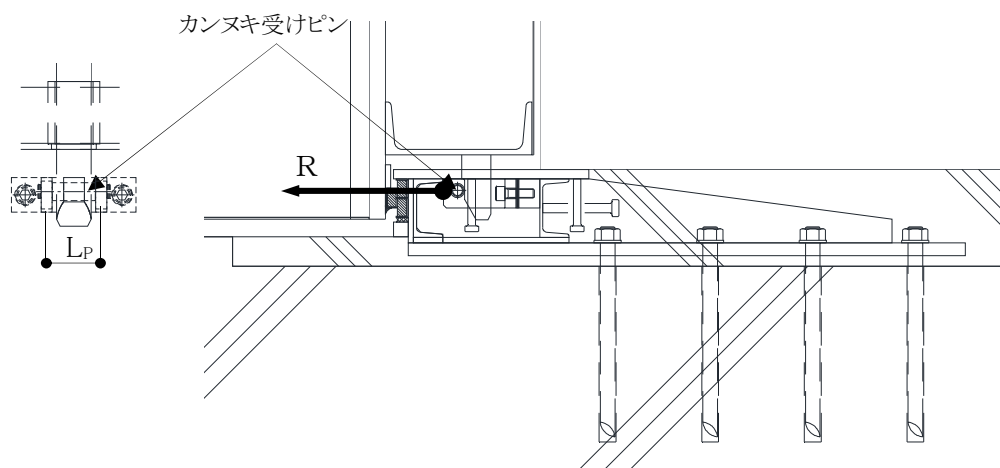


図5-4 カンヌキ受けピンに生じる荷重の例

(ハ) カンヌキ受けボルト

カンヌキ受けボルトに生じる荷重は、次式により算定する。カンヌキ受けボルトに生じる荷重の例を図5-5に示す。

$$T = R_p$$

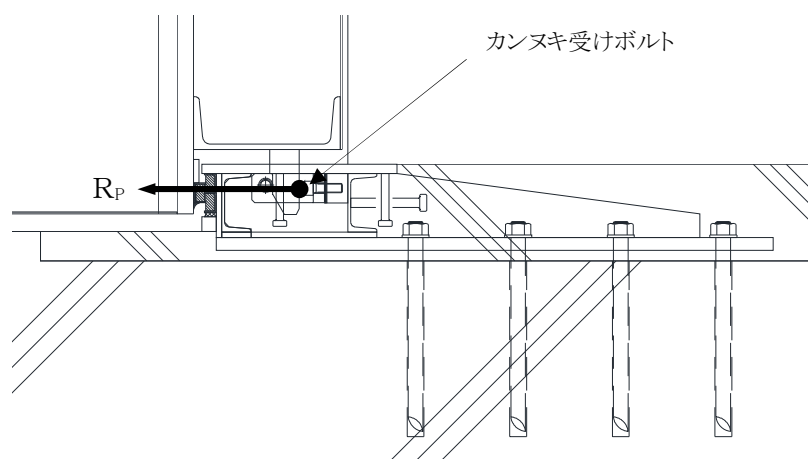


図5-5 カンヌキ受けボルトに生じる荷重の例

5.2 機器・配管系に関する評価式

5.2.1 ポンプ

(1) 立形ポンプ

a. 評価条件

立形ポンプの強度評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

- (a) 応力計算において、1質点系モデルとし、ポンプ部は全高の1/2の位置に、モータ部は風圧力による荷重の作用中心と同等、あるいはより高い重心作用位置に複合荷重が作用することとする。また、設計竜巻による風荷重はそれぞれの評価対象部位に対して発生応力が大きくなる方向から当たるものとする。

立形ポンプの強度評価対象部位を図5-6に示す。また、ポンプ部及びモータ部の応力計算モデル図を図5-7に示す。

- (b) たわみ量計算において、ポンプ据付面から原動機支え台上端までと、原動機支え台上端から原動機までの片持ち梁と考え、違う断面性能の一軸中空形モデルで、荷重が全高の半分の位置に作用することとする。

たわみ量計算モデル図を図5-8に示す。

b. 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-10に示す。

表5-10 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	応力等の状態
基礎ボルト，取付ボルト	<ul style="list-style-type: none"> ・引張 ・せん断 ・組合せ
原動機フレーム	<ul style="list-style-type: none"> ・引張 ・せん断 ・組合せ
軸受部	<ul style="list-style-type: none"> ・曲げ

c. 強度評価方法

(a) 記号の定義

立形ポンプの構造強度評価及び動的機能維持評価に用いる記号を表5-11，表5-12に示す。

表5-11 立形ポンプの構造強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A_b	mm^2	ボルトの断面積
A_w	mm^2	原動機フレーム溶接部の断面積
D	mm	原動機フレーム外寸
F_b	N	ボルトに作用する引張力
F_H	N	ボルトに作用するせん断力
F_i	N	各ボルトに作用する引張力
H	N	自重による荷重
h	mm	基準面からの重心距離
h_u	mm	基準面から上端カバー上端までの高さ
h_w	mm	原動機フレーム溶接部高さ
L	mm	重心と支点間の距離
L_g	mm	ポンプ部各評価部位の評価高さ
L_H	mm	重心と支点間の距離
L_i	mm	各ボルト間の距離
$L_1 \sim L_8$	mm	支点と評価ボルト間の距離
M	$\text{N} \cdot \text{mm}$	設計竜巻により作用するモーメント
N	—	ボルトの本数
W_T	N	設計竜巻による複合荷重
W_{T2}	N	設計竜巻による複合荷重 ($W_{T2} = W_w + 0.5 \cdot W_p + W_m$)
π	—	円周率
σ_{mt}	MPa	原動機フレームの引張応力
σ_{bt}	MPa	ボルトの引張応力
τ	MPa	せん断応力

表5-12 立形ポンプの動的機能維持評価に用いる記号

記号	単位	定義
a	mm	部材間の長さ
E	MPa	縦弾性係数
h'	mm	基準点から作用点までの距離
I	mm^4	断面二次モーメント
i	rad	傾斜
M	$\text{N} \cdot \text{mm}$	設計竜巻により作用するモーメント
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'	N	たわみ量及び発生荷重計算において設計竜巻による風圧を受ける面それぞれの W_{T2} の合計の複合荷重
W''	N	発生荷重
x'	mm	評価対象部から支点までの距離
y	mm	たわみ量
δ	mm	フレーム変位量

(b) 計算モデル

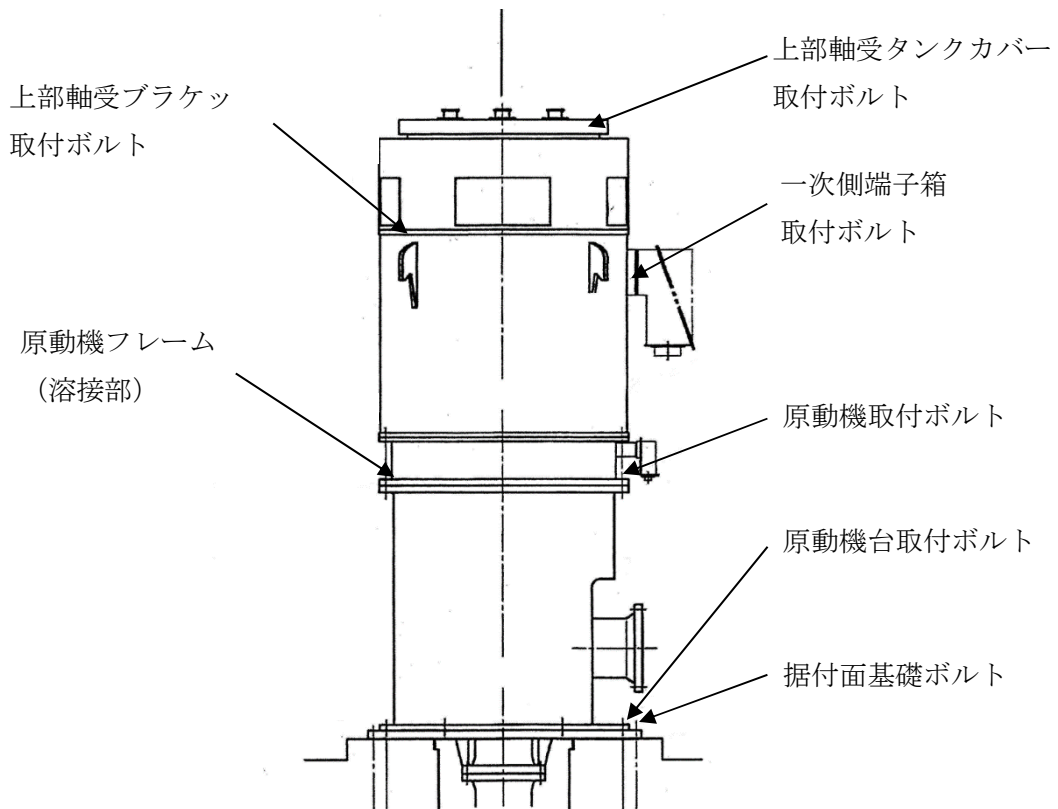


図 5-6 (1/2) 立形ポンプの強度評価対象部位 (残留熱除去系海水系ポンプ)

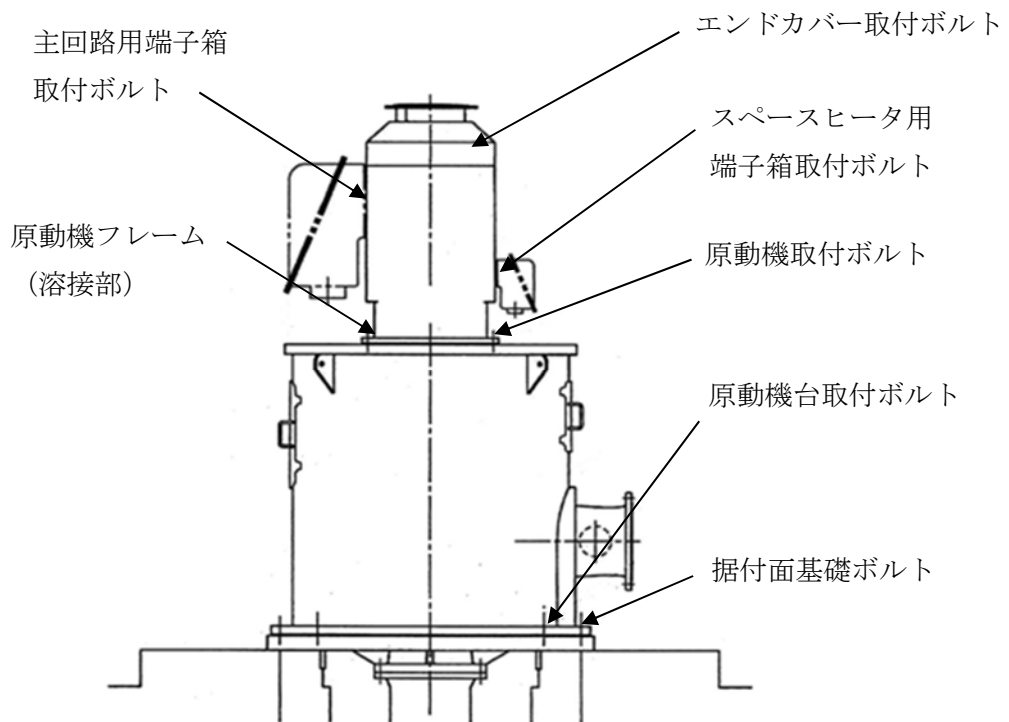


図 5-6 (2/2) 立形ポンプの強度評価対象部位 (ディーゼル発電機用海水ポンプ)

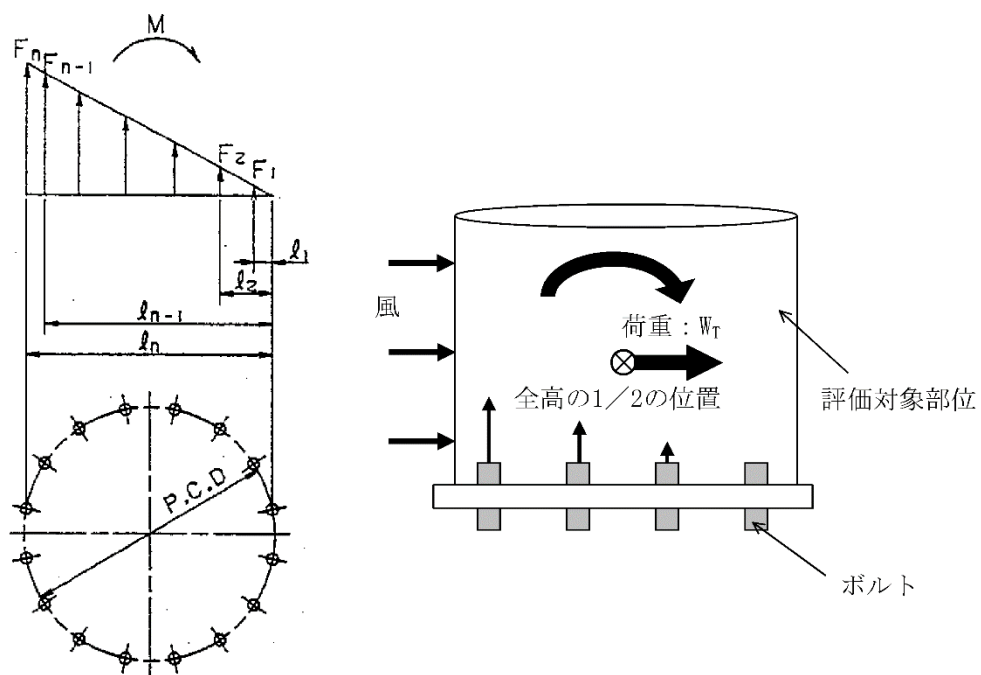


図 5-7(1/2) 応力の計算モデル図 (ポンプ部)

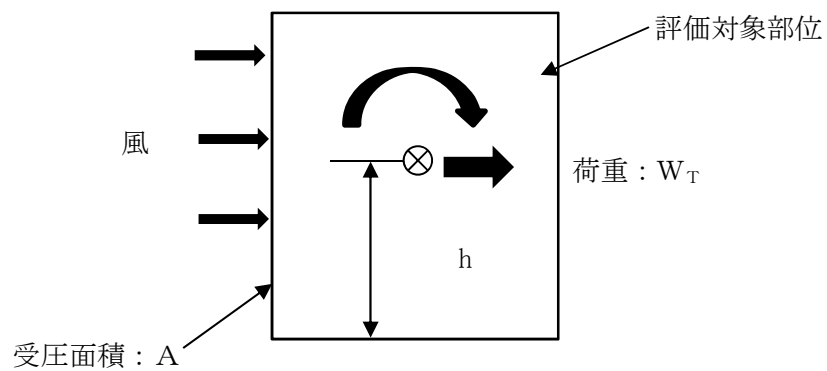


図 5-7(2/2) 応力の計算モデル図 (原動機部)

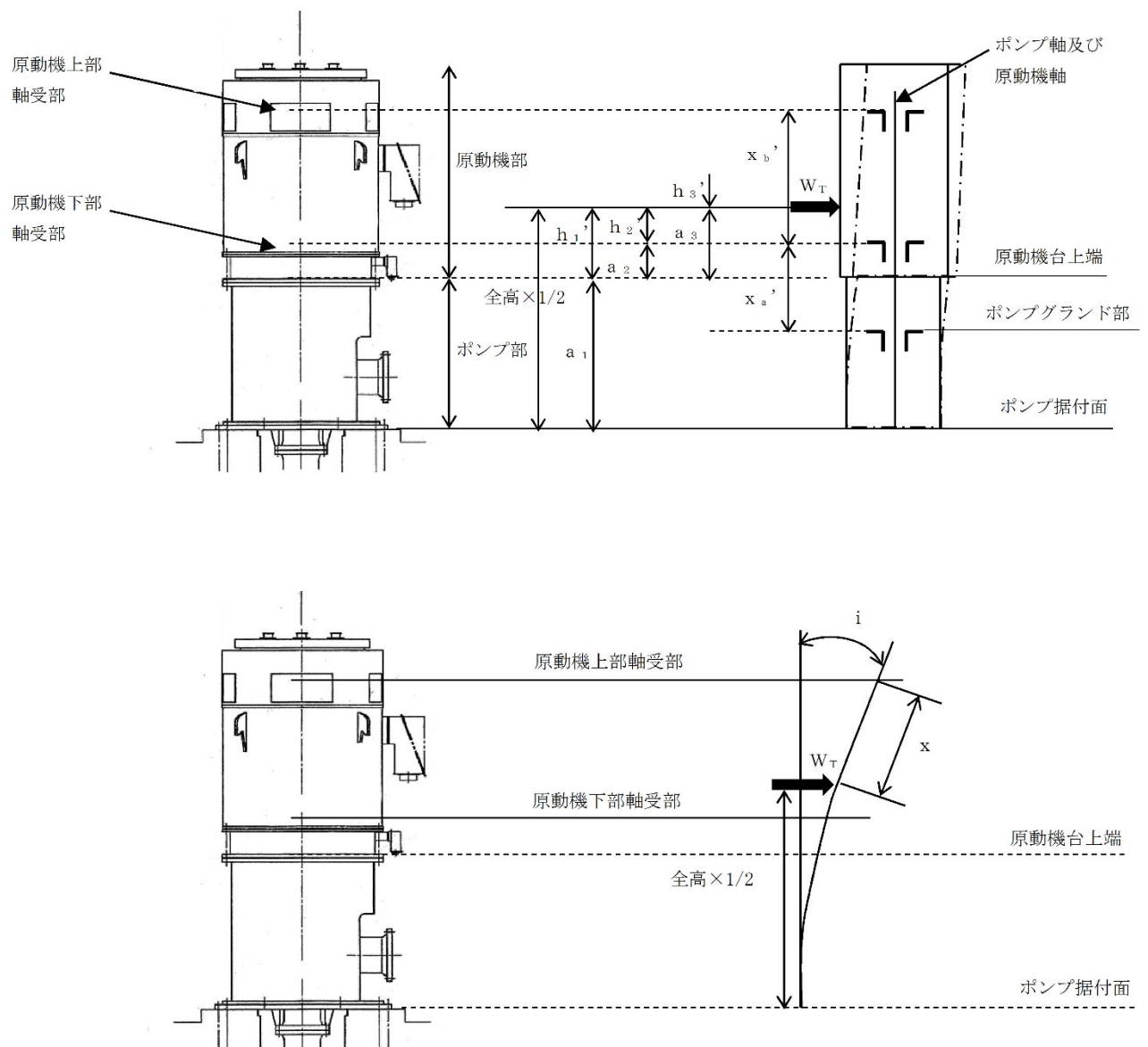


図 5-8(1/2) 立形ポンプのたわみ量計算モデル (残留熱除去系海水系ポンプ)

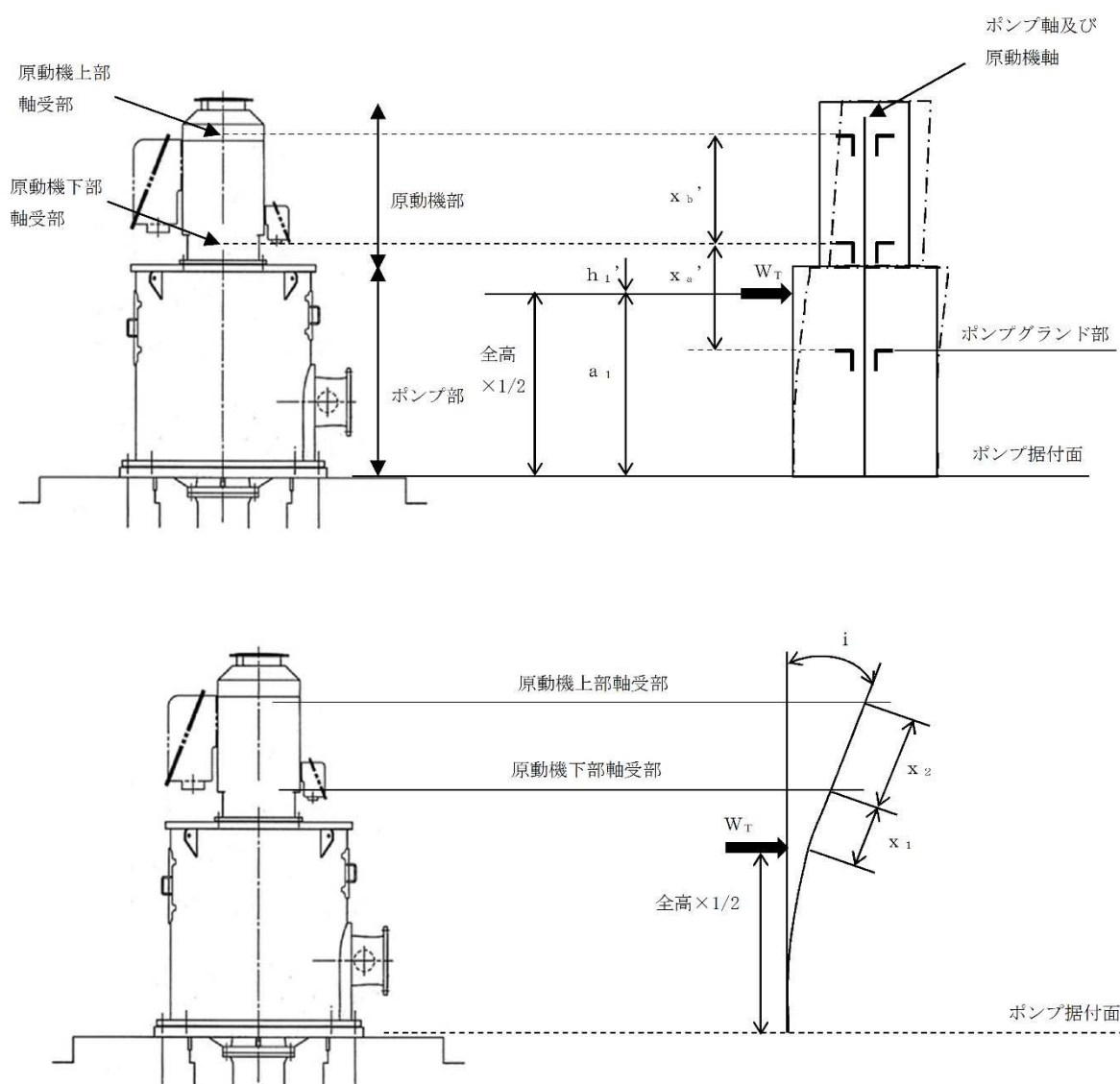


図 5-8(2/2) 立形ポンプのたわみ量計算モデル (ディーゼル発電機用海水ポンプ)

(c) 評価方法

イ. 応力の算出

(イ) ポンプ部

- ・風による転倒モーメントM

$$M = W_{T2} \cdot L_g / 2$$

- ・引張応力 σ_{bt}

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

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

(3.1) (3.2) 式より,

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

よって,

$$\sigma_{bt} = \frac{F_n}{A_b}$$

- ・せん断応力 τ

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

(ロ) 原動機部

- ・風による転倒モーメントM

$$M = W_{T2} \cdot h + H \cdot L \quad (\text{ボルト取付方向が水平方向の場合})$$

$$M = W_{T2} \cdot h \quad (\text{ボルト取付方向が鉛直方向の場合})$$

【原動機フレーム溶接部】

原動機フレーム溶接部の応力算出方法を以下に示す。

- ・引張応力

$$\sigma_{mt} = \frac{5.66 \cdot M}{\pi \cdot h_w \cdot D^2}$$

- ・せん断応力

$$\tau = \frac{W_{T2}}{A_w}$$

【一次側端子箱ボルト部（残留熱除去系海水系ポンプ），主回路用端子箱ボルト部（ディーゼル発電機用海水ポンプ），スペースヒータ用端子箱ボルト部（ディーゼル発電機用海水ポンプ）】

- ・引張応力

$$F_b = \frac{H \cdot h + W_{T2} \cdot L_H}{L_1 \cdot N}$$

$$\sigma_{bt} = \frac{F_b}{A_b}$$

- ・せん断応力

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

ここで,

$$F_H = \sqrt{W_{T2}^2 + H^2}$$

【上部軸受ブラケット取付ボルト部（残留熱除去系海水系ポンプ）】

- ・引張応力

竜巻によって生じる転倒荷重が、上端カバーの上端（評価上厳しい条件）に作用した際の、上部軸受ブラケット取付ボルトに生じる引張応力を算出し評価する。

$$F_b = \frac{h_u \cdot W_{T2} \cdot L_1}{L_1^2 + L_2^2 + L_3^2 + L_4^2}$$

$$\sigma_{bt} = \frac{F_b}{A_b}$$

- ・せん断応力

$$\tau = \frac{W_{T2}}{A_b \cdot N}$$

【上部軸受タンクカバー取付ボルト部（残留熱除去系海水系ポンプ）】

- ・引張応力

竜巻によって生じる転倒荷重が、上端カバーの上端（評価上厳しい条件）に作用した際の、上部軸受ブラケット取付ボルトに生じる引張応力を算出し評価する。

$$F_b = \frac{h_u \cdot W_{T2} \cdot L_1}{L_1^2 + L_2^2 + L_3^2 + L_4^2 + L_5^2 + L_6^2 + L_7^2 + L_8^2}$$

$$\sigma_{bt} = \frac{F_b}{A_b}$$

- ・せん断応力

$$\tau = \frac{W_{T2}}{A_b \cdot N}$$

【エンドカバー取付ボルト部（ディーゼル発電機用海水ポンプ）】

・引張応力

竜巻によって生じる転倒荷重が，エンドカバーの上端（評価上厳しい条件）に作用した際の，エンドカバー取付ボルトに生じる引張応力を算出し評価する。

$$F_b = \frac{h \cdot W_{T2} \cdot L_1}{2 \cdot (L_1^2 + L_2^2)}$$

$$\sigma_{bt} = \frac{F_b}{A_b}$$

・せん断応力

$$\tau = \frac{W_{T2}}{A_b \cdot N}$$

ロ. たわみ量及び発生荷重の計算

(イ) たわみ量の算出

たわみ量の算出において，竜巻による風圧力を受ける面（原動機台，原動機フレーム，一次側端子箱，上部軸受ブラケット，上部軸受タンクカバー）のそれぞれの W_{T2} の合計を複合荷重 W' とする。

$$W' = \Sigma W_{T2}$$

以下のミオソテスの方法より各評価対象部位のたわみ量 y と傾斜 i を算出する。なお，荷重は高さの半分の位置に作用することとする。

ミオソテスの方法

$$y = \frac{M \cdot a^2}{2 \cdot E \cdot I} + \frac{W' \cdot a^3}{3 \cdot E \cdot I}$$

$$i = \frac{M \cdot a}{E \cdot I} + \frac{W' \cdot a^2}{2 \cdot E \cdot I}$$

$$M = W' \cdot h'$$

(ロ) 発生荷重の算出

軸受部において，フレーム変位により作用する軸受反力と軸受許容荷重を比較し，発生荷重が許容荷重より小さいことを確認する。

発生荷重 W'' は次式より計算する。

δ = 評価対象部位の変位量 - 支点の変位量

また，発生荷重は

$$\delta = \frac{W'' \cdot x^3}{3 \cdot E \cdot I}$$

より

$$W'' = \frac{3 \cdot E \cdot I \cdot \delta}{x'^3}$$

5.2.2 容器

(1) 4脚たて置円筒形容器（ディーゼル発電機吸気フィルタ）

a. 評価条件

4脚たて置円筒形容器の強度評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

- (a) 設計竜巻の風圧力による荷重，気圧差による荷重，自重を加えた荷重に対する，胴板，支持脚の構造健全性を1質点系モデルとして計算を行う。ここで，荷重の作用点は評価上高さの1/2より高い容器の重心位置とする。

4脚たて置円筒形容器のモデル図を図5-9に示す。

b. 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-13に示す。

表5-13 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	応力等の状態
胴板	<ul style="list-style-type: none"> ・一次一般膜 ・一次 ・一次＋二次
支持脚	<ul style="list-style-type: none"> ・組合せ ・座屈

c. 強度評価方法

(a) 記号の定義

4脚たて置円筒形容器の強度計算に用いる記号を表5-14に示す。

表5-14 強度評価に用いる記号 (1/4)

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 _s	mm ²	脚の断面積
A _{s r}	mm ²	脚の半径方向軸に対する有効せん断断面積
A _{s t}	mm ²	脚の周方向軸に対する有効せん断断面積
C	-	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
C ₁	mm	アタッチメントである脚の胴への取付部の幅の 1/2 (胴の周方向)
C ₂	mm	アタッチメントである脚の胴への取付部の幅の 1/2 (胴の軸方向)
C _c	-	応力の補正係数 (J E A G 4 6 0 1 参考文献(6.6.3-2))より得られる値)
C _L	-	応力の補正係数 (J E A G 4 6 0 1 参考文献(6.6.3-2))より得られる値)
D _i	mm	胴の内径
E	MPa	胴の縦弾性係数
E _s	MPa	脚の縦弾性係数
F	MPa	J S M E SSB-3121.1(1)により規定される値
F ₀	N	振動モデル系における水平力
f _c	MPa	脚の許容圧縮応力
f _{b r}	MPa	脚の半径方向軸まわりの許容曲げ応力
f _{b t}	MPa	脚の半径方向に直角な方向の軸まわりの許容曲げ応力
f _t	MPa	脚の許容引張応力
G	-	ガスト影響係数
G _s	MPa	脚のせん断弾性係数
g	m/s ²	重力加速度 (=9.80665)
H	m	ディーゼル発電機吸気フィルタ高さ
I	mm ⁴	胴の断面 2 次モーメント
I _{s r}	mm ⁴	脚の半径方向軸に対する断面 2 次モーメント
I _{s t}	mm ⁴	脚の周方向軸に対する断面 2 次モーメント
J _s	mm ⁴	脚のねじりモーメント係数
K ₁ , K ₂	-	J E A G 4 6 0 1 参考文献(6.6.3-2)よりの定数
K _c	-	脚の胴つけ根部における周方向曲げモーメントに対する局部ばね定数 (J E A G 4 6 0 1 参考文献(6.6.3-4)より得られる値)
K _L	-	胴の脚つけ根部における長手方向曲げモーメントに対する局部ばね定数 (J E A G 4 6 0 1 参考文献(6.6.3-4)より得られる値)
K _r	-	胴の脚つけ根部における半径方向荷重に対する局部ばね定数 (J E A G 4 6 0 1 参考文献(6.6.3-4)より得られる値)
k _L	-	J E A G 4 6 0 1 参考文献(6.6.3-2)によるアタッチメントパラメータ軸方向の補正係数
k _c	-	J E A G 4 6 0 1 参考文献(6.6.3-2)によるアタッチメントパラメータ周方向の補正係数

表5-14 強度評価に用いる記号 (2/4)

記号	単位	定義
L	mm	脚の長さ
L_c	mm	脚の中立軸間の距離
L_g	mm	基礎から容器上部重心までの距離
M_1	$N \cdot mm$	風荷重(Z方向)による胴の脚つけ根部の鉛直方向モーメント
M_3	$N \cdot mm$	風荷重(Z方向)による胴の脚つけ根部のねじりモーメント
M_c	$N \cdot mm$	風荷重(Z方向)による胴の脚つけ根部の周方向モーメント (圧縮側)
M_L	$N \cdot mm$	運転時質量による胴の脚つけ根部の鉛直方向モーメント (引張側)
M_x	$N \cdot mm$	胴に生じる軸方向の曲げモーメント
M_ϕ	$N \cdot mm$	胴に生じる周方向の曲げモーメント
m_0	kg	運転時質量
N_x	N/mm	胴に生じる軸方向の膜力
N_ϕ	N/mm	胴に生じる周方向の膜力
P	N	運転時質量による胴の脚つけ根部の半径方向荷重
P_1	N	風荷重(Z方向)による胴の脚つけ根部の半径方向荷重
Q	N	風荷重(Z方向)による胴の脚つけ根部の周方向荷重
q	N/m^2	設計用速度圧
R	N	運転時質量による脚の軸力
R_1	N	風荷重(Z方向)により脚に作用する軸力
r_m	mm	胴の平均半径
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
t	mm	胴の板厚
u	mm	脚の中心軸から胴の板厚中心までの距離
W_1	N	風荷重
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_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	設計竜巻の気圧差による荷重
W_W	N	設計竜巻の風圧力による荷重
Z_{sr}	mm^3	脚の半径方向軸に対する断面係数
Z_{st}	mm^3	脚の周方向軸に対する断面係数
β, β_1, β_2 β_c, β_L	-	J E A G 4 6 0 1 参考文献(6.6.3-2)によるアタッチメントパラメータ
γ	-	J E A G 4 6 0 1 参考文献(6.6.3-2)によるシェルパラメータ

表5-14 強度評価に用いる記号 (3/4)

記号	単位	定義
ΔP	N/m ²	気圧差
Δ_r	mm	運転時質量による胴の半径方向局部変位量
Δ_{r1}	mm	水平力 F_0 による胴の半径方向局部変位量
Δ_{x1}	mm	水平力 F_0 による第1脚上端の水平方向変位量
Δ_{x3}	mm	水平力 F_0 による第2脚上端の水平方向変位量
Δ_{y1}	mm	水平力 F_0 による第1脚の鉛直方向変位量
θ	rad	運転時質量による胴の脚つけ根部における局部傾き角
θ_0	rad	水平力 F_0 による胴の中心軸の傾き角
θ_1	rad	水平力 F_0 による第1脚の傾き角 (圧縮側)
θ_2	rad	水平力 F_0 による胴の第1脚つけ根部における局部傾き角
θ_3	rad	水平力 F_0 による第2脚の傾き角
π	-	円周率
ρ	-	比重
σ_0	MPa	胴の一次一般膜応力の最大値
$\sigma_{0\phi}$	MPa	胴の周方向一次一般膜応力
σ_{0x}	MPa	胴の軸方向一次一般膜応力
σ_1	MPa	胴の一次応力の最大値
σ_2	MPa	胴の一次+二次応力の最大値
$\sigma_{11} \sim \sigma_{14}$	MPa	風荷重 (Z方向) が作用した場合の胴の組合せ一次応力
σ_{15}, σ_{16}	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の胴の組合せ一次応力
$\sigma_{21} \sim \sigma_{24}$	MPa	風荷重 (Z方向) が作用した場合の胴の組合せ一次+二次応力
σ_{25}, σ_{26}	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の胴の組合せ一次+二次応力
σ_s	MPa	脚の組合せ応力の最大値
σ_{s1}, σ_{s2}	MPa	運転時質量による脚の圧縮応力, 曲げ応力
$\sigma_{s5} \sim \sigma_{s7}$	MPa	風荷重 (Z方向) による脚の圧縮応力, 曲げ応力
$\sigma_{s8} \sim \sigma_{s10}$	MPa	風荷重 (X方向) による脚の圧縮応力, 曲げ応力
σ_{sc}	MPa	脚の圧縮応力の和
σ_{sr}	MPa	脚の半径方向軸まわりの圧縮側曲げ応力の和
σ_{st}	MPa	脚の半径方向に直角な軸まわりの圧縮側曲げ応力の和
σ_{sx}	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の脚の組合せ応力
$\sigma_{sz1}, \sigma_{sz2}$	MPa	風荷重 (Z方向) が作用した場合の脚の組合せ応力
σ_{x1}	MPa	静水頭又は内圧による胴の軸方向応力
$\sigma_{\phi 1}$	MPa	静水頭又は内圧による胴の周方向応力
σ_{x2}	MPa	運転時質量による胴の軸方向応力
σ_{x3}	MPa	運転時質量により生じる鉛直方向モーメントによる胴の軸方向応力
$\sigma_{\phi 3}$	MPa	運転時質量により生じる鉛直方向モーメントによる胴の周方向応力
σ_{x4}	MPa	運転時質量により生じる半径方向荷重による胴の軸方向応力
$\sigma_{\phi 4}$	MPa	運転時質量により生じる半径方向荷重による胴の周方向応力
σ_{x5}	MPa	応力が作用した場合の転倒モーメントによる胴の軸方向応力

表5-14 強度評価に用いる記号 (4/4)

記号	単位	定義
$\sigma_{x61}, \sigma_{x62}$	MPa	風荷重(Z方向)が作用した場合の半径方向荷重による胴の軸方向応力
$\sigma_{\phi61}, \sigma_{\phi62}$	MPa	風荷重(Z方向)が作用した場合の半径方向荷重による胴の周方向応力
$\sigma_{x71}, \sigma_{x72}$	MPa	風荷重(Z方向)が作用した場合の鉛直方向モーメントによる胴の軸方向応力
$\sigma_{\phi71}, \sigma_{\phi72}$	MPa	風荷重(Z方向)が作用した場合の鉛直方向モーメントによる胴の周方向応力
$\sigma_{x81}, \sigma_{x82}$	MPa	風荷重 (Z方向) が作用した場合の周方向モーメントによる胴の軸方向応力
$\sigma_{\phi81}, \sigma_{\phi82}$	MPa	風荷重 (Z方向) が作用した場合の周方向モーメントによる胴の周方向応力
$\sigma_{x91}, \sigma_{x92}$	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の半径方向荷重による胴の軸方向応力
$\sigma_{\phi91}, \sigma_{\phi92}$	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の半径方向荷重による胴の周方向応力
$\sigma_{x101}, \sigma_{x102}$	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の鉛直方向モーメントによる胴の軸方向応力
$\sigma_{\phi101}, \sigma_{\phi102}$	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の鉛直方向モーメントによる胴の周方向応力
$\sigma_{x111}, \sigma_{x112}$	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の周方向モーメントによる胴の軸方向応力
$\sigma_{\phi111}, \sigma_{\phi112}$	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の周方向モーメントによる胴の周方向応力
$\sigma_{xx1}, \sigma_{xx2}$	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の胴の軸方向一次応力の和
$\sigma_{xx3}, \sigma_{xx4}$	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の胴の軸方向一次+二次応力の和
$\sigma_{xz1} \sim \sigma_{xz4}$	MPa	風荷重 (Z方向) が作用した場合の胴の軸方向一次応力の和
$\sigma_{xz5} \sim \sigma_{xz8}$	MPa	風荷重 (Z方向) が作用した場合の胴の軸方向一次+二次応力の和
$\sigma_{\phi x1}, \sigma_{\phi x2}$	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の胴の周方向一次応力の和
$\sigma_{\phi x3}, \sigma_{\phi x4}$	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の胴の周方向一次+二次応力の和
$\sigma_{\phi z1} \sim \sigma_{\phi z4}$	MPa	風荷重 (Z方向) が作用した場合の胴の周方向一次応力の和
$\sigma_{\phi z5} \sim \sigma_{\phi z8}$	MPa	風荷重 (Z方向) が作用した場合の胴の周方向一次+二次応力の和
τ_3	MPa	風荷重 (Z方向) により胴の脚つけ根部に生じるねじりモーメントによるせん断応力
τ_6	MPa	風荷重 (X方向) により胴の脚つけ根部に生じるねじりモーメントによるせん断応力
τ_{c1}	MPa	風荷重 (Z方向) により胴の脚つけ根部に生じる周方向せん断応力
τ_{c4}	MPa	風荷重 (X方向) により胴の脚つけ根部に生じる周方向せん断応力
τ_{L1}	MPa	運転時質量により胴の脚つけ根部に生じる軸方向せん断応力
τ_{L2}	MPa	風荷重 (Z方向) により胴の脚つけ根部に生じる軸方向せん断応力
τ_{L5}	MPa	風荷重 (X方向) により胴の脚つけ根部に生じる軸方向せん断応力

(b) 計算モデル

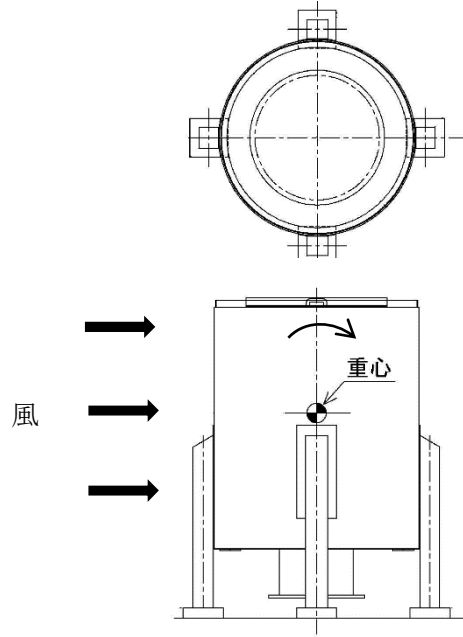


図 5-9 ディーゼル発電機吸気フィルタの評価モデル図

(c) 評価方法

イ. 荷重の設定

水平力の釣合より

$$2P_1 + 2Q = F_0$$

転倒モーメントの釣合より

$$2M_1 - 2M_3 + 2R_1 \cdot r_m = F_0(L_g - L)$$

ただし,

$$r_m = (D_i + t) / 2$$

第 1 脚の水平方向変位量 Δ_{x1} , 傾き角 θ_1 , 鉛直方向変位量 Δ_{y1} は次による。

$$\Delta_{x1} = \frac{P_1 \cdot L^3}{3E_s \cdot I_{st}} + \frac{P_1 \cdot L}{G_s \cdot A_{sr}} + \frac{(M_1 - R_1 \cdot u) L^2}{2E_s \cdot I_{st}}$$

ここで,

$$u = \frac{L_c}{2} - r_m$$

$$\theta_1 = \frac{(M_1 - R_1 \cdot u) L}{E_s \cdot I_{st}} + \frac{P_1 \cdot L^2}{2E_s \cdot I_{st}}$$

$$\Delta_{y1} = \frac{R_1 \cdot L}{A_s \cdot E_s}$$

胴の半径方向局部変位量 Δ_{r1} と局部傾き角 θ_2 は次による。

$$\Delta_{r1} = \frac{K_r \cdot P_1}{r_m \cdot E}$$

$$\theta_2 = \frac{K_L \cdot M_1}{r_m^3 \cdot \beta_L^2 \cdot E}$$

ここで、 β_L は次による。

$$\beta_L = k_L \sqrt[3]{\beta_1 \cdot \beta_2^2}$$

$$\beta_1 = \frac{C_1}{r_m}$$

$$\beta_2 = \frac{C_2}{r_m}$$

第2脚の傾き角 θ_0 と水平方向変位量 Δ_{x3} は、次による。

$$\theta_0 = -\frac{M_3 \cdot L}{E_s \cdot I_{sr}} + \frac{Q \cdot L^2}{2E_s \cdot I_{sr}}$$

$$\Delta_{x3} = \frac{Q \cdot L^3}{3E_s \cdot I_{sr}} + \frac{Q \cdot L}{G_s \cdot A_{st}} - \frac{M_3 \cdot L^2}{2E_s \cdot I_{sr}}$$

第1脚と胴の傾き角の釣合より

$$\theta_1 + \theta_2 - \theta_0 = 0$$

第2脚のねじり角と局部傾き角は等しいことから

$$\theta_3 = \frac{(Q \cdot u - M_c)L}{G_s \cdot J_s} = \frac{K_c \cdot M_c}{r_m^3 \cdot \beta_c^2 \cdot E}$$

ここで、 β_c は次による。

$$\beta_c = k_c \sqrt[3]{\beta_1^2 \cdot \beta_2}$$

$$\beta_1 = \frac{C_1}{r_m}$$

$$\beta_2 = \frac{C_2}{r_m}$$

脚と胴の水平方向変位の釣合より

$$\Delta_{x1} + \Delta_{r1} = \Delta_{x3} + u \cdot \theta_3$$

さらに鉛直方向変位の釣合より

$$\Delta_{y1} - u \cdot \theta_1 - r_m \cdot \theta_0 = 0$$

式を代入して、

$$\frac{R_1 \cdot L}{A_s \cdot E_s} - \frac{u (M_1 - R_1 \cdot u) L}{E_s \cdot I_{s t}} - \frac{u \cdot P_1 \cdot L^2}{2 E_s \cdot I_{s t}} + \frac{r_m \cdot M_3 \cdot L}{E_s \cdot I_{s r}} - \frac{r_m \cdot Q \cdot L^2}{2 E_s \cdot I_{s r}} = 0$$

式を代入して

$$\frac{(M_1 - R_1 \cdot u) L}{E_s \cdot I_{s t}} + \frac{P_1 \cdot L^2}{2 E_s \cdot I_{s t}} + \frac{K_L \cdot M_1}{r_m^3 \cdot \beta_1^2 \cdot E} + \frac{M_3 \cdot L}{E_s \cdot I_{s r}} - \frac{Q \cdot L^2}{2 E_s \cdot I_{s r}} = 0$$

式を変形して

$$\frac{u \cdot Q \cdot L}{G_s \cdot J_s} - \frac{M_c \cdot L}{G_s \cdot J_s} - \frac{K_c \cdot M_c}{r_m^3 \cdot \beta_c^2 \cdot E} = 0$$

式を代入して

$$\begin{aligned} \frac{P_1 \cdot L^3}{3 E_s \cdot I_{s t}} + \frac{P_1 \cdot L}{G_s \cdot A_{s r}} + \frac{(M_1 - R_1 \cdot u) L^2}{2 E_s \cdot I_{s t}} + \frac{K_r \cdot P_1}{r_m \cdot E} \\ - \frac{Q \cdot L^3}{3 E_s \cdot I_{s r}} - \frac{Q \cdot L}{G_s \cdot A_{s t}} + \frac{M_3 \cdot L^2}{2 E_s \cdot I_{s r}} - \frac{u \cdot K_c \cdot M_c}{r_m^3 \cdot \beta_c^2 \cdot E} = 0 \end{aligned}$$

したがって、6 変数 P_1 , Q , R_1 , M_1 , M_3 , M_c に対して上記式を連立させることにより方程式ができる。

ロ. 胴の応力計算

(イ) 静水頭又は内圧による応力

ディーゼル発電機吸気フィルタに静水頭、内圧は発生しないため、 $\sigma_{\phi 1}$ 及び $\sigma_{x 1}$ は 0 となる。

(ロ) 運転時質量による応力

$$\sigma_{x 2} = \frac{m_0 \cdot g}{\pi (D_i + t) t}$$

(ハ) 運転時質量による胴の脚つけ根部の応力

脚下端が固定の場合、軸力 R は次による。

$$R = \frac{m_0 \cdot g}{4}$$

脚下端が固定の場合の脚及び胴の変形を図 5-10 に示す。

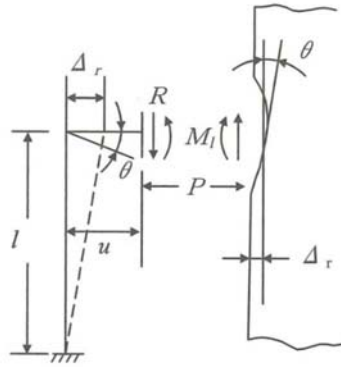


図 5-10 脚下端が固定の場合の脚及び胴の変形

脚の半径方向変位量と胴の半径方向局部変位量は等しいことから

$$\Delta_r = \frac{-P \cdot L^3}{3 \cdot E_s \cdot I_{s t}} + \frac{-P \cdot L}{G_s \cdot A_{s r}} + \frac{(R \cdot u - M_L)L^2}{2E_s \cdot I_{s t}} = \frac{K_r \cdot P}{r_m \cdot E}$$

また、脚上端の傾き角と胴の局部傾き角は等しいことから

$$\theta = \frac{(R \cdot u - M_L)L}{E_s \cdot I_{s t}} - \frac{P \cdot L^2}{2E_s \cdot I_{s t}} = \frac{K_L \cdot M_L}{r_m^3 \cdot \beta_L^2 \cdot E}$$

したがって

$$M_L = \frac{\left(\frac{L^3}{12E_s \cdot I_{s t}} + \frac{L}{G_s \cdot A_{s r}} + \frac{K_r}{r_m \cdot E} \right) \frac{m_0 \cdot g \cdot u \cdot L}{4E_s \cdot I_{s t}}}{\left(\frac{L^3}{3E_s \cdot I_{s t}} + \frac{L}{G_s \cdot A_{s r}} + \frac{K_r}{r_m E} \right) \left(\frac{L}{E_s \cdot I_{s t}} + \frac{K_L}{r_m^3 \cdot \beta_L^2 \cdot E} \right) - \left(\frac{L^2}{2E_s \cdot I_{s t}} \right)^2}$$

$$P = \frac{\frac{\frac{m_0 \cdot g}{4} u - M_L}{2E_s \cdot I_{s t}} L^2}{\frac{L^3}{3E_s \cdot I_{s t}} + \frac{L}{G_s \cdot A_{s r}} + \frac{K_r}{r_m \cdot E}}$$

鉛直方向モーメント M_L により生じる胴の局部応力は、シェルパラメータ γ 及びアタッチメントパラメータ β によって参考文献の表より求めた値(以下*を付記する)を用いて次式により算定する。

$$\sigma_{\phi 3} = \left[\frac{N_{\phi}}{M_L / (r_m^2 \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{M_L}{r_m^2 \cdot t \cdot \beta_L} \right) C_L$$

$$\sigma_{x 3} = \left[\frac{N_x}{M_L / (r_m^2 \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{M_L}{r_m^2 \cdot t \cdot \beta_L} \right) C_L$$

ここで

$$r_m = (D_i + t) / 2$$

$$\gamma = r_m / t$$

$$\beta_1 = C_1 / r_m$$

$$\beta_2 = C_2 / r_m$$

$$\beta_L = \sqrt[3]{\beta_1 \cdot \beta_2^2}$$

$$\beta = \begin{cases} \left\{ 1 - \frac{1}{3} (\beta_1 / \beta_2 - 1) (1 - K_1^*) \right\} \sqrt{\beta_1 \cdot \beta_2} & (\beta_1 / \beta_2 \geq 1) \\ \left\{ 1 - \frac{4}{3} (1 - \beta_1 / \beta_2) (1 - K_2^*) \right\} \sqrt{\beta_1 \cdot \beta_2} & (\beta_1 / \beta_2 < 1) \end{cases}$$

半径方向荷重Pにより生じる胴の局部応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 4} = \left[\frac{N_\phi}{P / r_m} \right]^* \left(\frac{P}{r_m \cdot t} \right)$$

$$\sigma_{x 4} = \left[\frac{N_x}{P / r_m} \right]^* \left(\frac{P}{r_m \cdot t} \right)$$

反力Rによるせん断応力は、次による。

$$\tau_{L 1} = \frac{R}{4 C_2 \cdot t}$$

(二) 風荷重による胴の曲げ応力

$$\sigma_{x 5} = \frac{W_1 (L_g - L) (D_i + 2 t)}{2 I}$$

(ホ) Z方向荷重による胴の脚つけ根部の応力

i. 一次応力

半径方向荷重P₁により生じる胴の局部応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 6 1} = \left[\frac{N_\phi}{P_1 / r_m} \right]^* \left(\frac{P_1}{r_m \cdot t} \right)$$

$$\sigma_{x 6 1} = \left[\frac{N_x}{P_1 / r_m} \right]^* \left(\frac{P_1}{r_m \cdot t} \right)$$

鉛直方向曲げモーメントM₁により生じる胴の局部応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 7 1} = \left[\frac{N_\phi}{M_1 / (r_m^2 \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{M_1}{r_m^2 \cdot t \cdot \beta_L} \right) C_L$$

$$\sigma_{x 7 1} = \left[\frac{N_x}{M_1 / (r_m^2 \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{M_1}{r_m^2 \cdot t \cdot \beta_L} \right) C_L$$

周方向曲げモーメント M_c により生じる胴の局部応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 8 1} = \left[\frac{N_{\phi}}{M_c / (r_m^2 \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{M_c}{r_m^2 \cdot t \cdot \beta_c} \right) C_c$$

$$\sigma_{x 8 1} = \left[\frac{N_x}{M_c / (r_m^2 \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{M_c}{r_m^2 \cdot t \cdot \beta_c} \right) C_c$$

ここで、 β_c は次による。

$$\beta_c = \sqrt[3]{\beta_1^2 \cdot \beta_2}$$

周方向せん断力 Q によるせん断応力は、次による。

$$\tau_{c 1} = \frac{Q}{4C_1 \cdot t}$$

鉛直方向せん断力 R_1 によるせん断応力は、次による。

$$\tau_{L 2} = \frac{R_1}{4C_2 \cdot t}$$

ねじりモーメント M_3 により生じる胴の局部せん断応力は、次による。

$$\tau_3 = \frac{M_3}{2\pi \cdot C_1^2 \cdot t}$$

ii. 二次応力

半径方向荷重 P_1 により生じる胴の局部曲げ応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 6 2} = \left[\frac{M_{\phi}}{P_1} \right]^* \left(\frac{6P_1}{t^2} \right)$$

$$\sigma_{x 6 2} = \left[\frac{M_x}{P_1} \right]^* \left(\frac{6P_1}{t^2} \right)$$

鉛直方向曲げモーメント M_1 により生じる胴の局部曲げ応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 7 2} = \left[\frac{M_{\phi}}{M_1 / (r_m \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{6M_1}{r_m \cdot t^2 \cdot \beta_L} \right)$$

$$\sigma_{x 7 2} = \left[\frac{M_x}{M_1 / (r_m \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{6M_1}{r_m \cdot t^2 \cdot \beta_L} \right)$$

周方向曲げモーメント M_c により生じる胴の局部曲げ応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 8 2} = \left[\frac{M_{\phi}}{M_c / (r_m \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{6M_c}{r_m \cdot t^2 \cdot \beta_c} \right)$$

$$\sigma_{x 8 2} = \left[\frac{M_x}{M_c / (r_m \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{6M_c}{r_m \cdot t^2 \cdot \beta_c} \right)$$

(へ) X方向荷重による胴の脚つけ根部の応力

i. 一次応力

半径方向荷重 P_1 により生じる胴の局部応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 9 1} = \sigma_{\phi 6 1} / \sqrt{2}$$

$$\sigma_{x 9 1} = \sigma_{x 6 1} / \sqrt{2}$$

鉛直方向曲げモーメント M_1 により生じる胴の局部応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 1 0 1} = \sigma_{\phi 7 1} / \sqrt{2}$$

$$\sigma_{x 1 0 1} = \sigma_{x 7 1} / \sqrt{2}$$

周方向曲げモーメント M_c により生じる胴の局部応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 1 1 1} = \sigma_{\phi 8 1} / \sqrt{2}$$

$$\sigma_{x 1 1 1} = \sigma_{x 8 1} / \sqrt{2}$$

周方向せん断力 Q によるせん断応力は、次による。

$$\tau_{c 4} = \tau_{c 1} / \sqrt{2}$$

鉛直方向せん断力 R_1 によるせん断応力は、次による。

$$\tau_{L 5} = \tau_{L 2} / \sqrt{2}$$

ねじりモーメント M_3 により生じる胴の局部せん断応力は、次による。

$$\tau_6 = \tau_3 / \sqrt{2}$$

ii. 二次応力

半径方向荷重 P_1 により生じる胴の局部曲げ応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 9 2} = \sigma_{\phi 6 2} / \sqrt{2}$$

$$\sigma_{x 9 2} = \sigma_{x 6 2} / \sqrt{2}$$

鉛直方向曲げモーメント M_1 により生じる胴の局部応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 1 0 2} = \sigma_{\phi 7 2} / \sqrt{2}$$

$$\sigma_{x 1 0 2} = \sigma_{x 7 2} / \sqrt{2}$$

周方向曲げモーメント M_c により生じる胴の局部応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 1 1 2} = \sigma_{\phi 8 2} / \sqrt{2}$$

$$\sigma_{x 1 1 2} = \sigma_{x 8 2} / \sqrt{2}$$

(ト) 組合せ応力

(イ)～(へ)項によって算出される脚つけ根部に生じる胴の応力は、次により組み合わせる。

i. 一次一般膜応力

$$\sigma_{0\phi} = \sigma_{\phi 1}$$

$$\sigma_{0x} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sigma_{x 5}$$

$$\sigma_0 = \max[\sigma_{0\phi}, \sigma_{0x}]$$

ii. 一次応力（膜＋曲げ）

(i) Z方向荷重が作用した場合

・第1脚つけ根部

(第1評価点)

$$\sigma_{\phi z 1} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 3} + \sigma_{\phi 4} + \sigma_{\phi 6 1} + \sigma_{\phi 7 1}$$

$$\sigma_{x z 1} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sigma_{x 3} + \sigma_{x 4} + \sigma_{x 5} + \sigma_{x 6 1} + \sigma_{x 7 1}$$

$$\sigma_{1 1} = \frac{1}{2} \left\{ \sigma_{\phi z 1} + \sigma_{x z 1} \right\} + \sqrt{(\sigma_{\phi z 1} - \sigma_{x z 1})^2}$$

(第2評価点)

$$\sigma_{\phi z 2} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 4} + \sigma_{\phi 6 1}$$

$$\sigma_{x z 2} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sigma_{x 4} + \sigma_{x 5} + \sigma_{x 6 1}$$

$$\sigma_{1 2} = \frac{1}{2} \left\{ \sigma_{\phi z 2} + \sigma_{x z 2} \right\} + \sqrt{(\sigma_{\phi z 2} - \sigma_{x z 2})^2 + 4(\tau_{L 1} + \tau_{L 2})^2}$$

・第2脚つけ根部

(第1評価点)

$$\sigma_{\phi z 3} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 3} + \sigma_{\phi 4}$$

$$\sigma_{x z 3} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sigma_{x 3} + \sigma_{x 4}$$

$$\sigma_{1 3} = \frac{1}{2} \left\{ \sigma_{\phi z 3} + \sigma_{x z 3} \right\} + \sqrt{(\sigma_{\phi z 3} - \sigma_{x z 3})^2 + 4(\tau_{c 1} + \tau_3)^2}$$

(第2評価点)

$$\sigma_{\phi z 4} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 4} + \sigma_{\phi 8 1}$$

$$\sigma_{x z 4} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sigma_{x 4} + \sigma_{x 8 1}$$

$$\sigma_{1 4} = \frac{1}{2} \left\{ \sigma_{\phi z 4} + \sigma_{x z 4} \right\} + \sqrt{(\sigma_{\phi z 4} - \sigma_{x z 4})^2 + 4(\tau_{L 1} + \tau_3)^2}$$

(ii) X方向荷重が作用した場合

(第1評価点)

$$\sigma_{\phi x 1} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 3} + \sigma_{\phi 4} + \sigma_{\phi 9 1} + \sigma_{\phi 10 1}$$

$$\sigma_{x x 1} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sigma_{x 3} + \sigma_{x 4} + \sigma_{x 5} + \sigma_{x 9 1} + \sigma_{x 10 1}$$

$$\sigma_{1 5} = \frac{1}{2} \left\{ \sigma_{\phi x 1} + \sigma_{x x 1} \right\} + \sqrt{(\sigma_{\phi x 1} - \sigma_{x x 1})^2 + 4(\tau_{c 4} + \tau_6)^2}$$

(第2評価点)

$$\sigma_{\phi x 2} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 4} + \sigma_{\phi 9 1} + \sigma_{\phi 1 1 1}$$

$$\sigma_{xx 2} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sigma_{x 4} + \sigma_{x 5} + \sigma_{x 9 1} + \sigma_{x 1 1 1}$$

$$\sigma_{1 6} = \frac{1}{2} \left\{ \sigma_{\phi x 2} + \sigma_{xx 2} + \sqrt{(\sigma_{\phi x 2} - \sigma_{xx 2})^2 + 4(\tau_{L 1} + \tau_{L 5} + \tau_6)^2} \right\}$$

$$\sigma_1 = \max[\sigma_{1 1}, \sigma_{1 2}, \sigma_{1 3}, \sigma_{1 4}, \sigma_{1 5}, \sigma_{1 6}]$$

iii. 組合せ一次+二次応力

(i) Z方向荷重が作用した場合

・第1脚つけ根部

(第1評価点)

$$\sigma_{\phi z 5} = \sigma_{\phi 6 1} + \sigma_{\phi 6 2} + \sigma_{\phi 7 1} + \sigma_{\phi 7 2}$$

$$\sigma_{xz 5} = \sigma_{x 5} + \sigma_{x 6 1} + \sigma_{x 6 2} + \sigma_{x 7 1} + \sigma_{x 7 2}$$

$$\sigma_{2 1} = \sigma_{\phi z 5} + \sigma_{xz 5} + \sqrt{(\sigma_{\phi z 5} - \sigma_{xz 5})^2}$$

(第2評価点)

$$\sigma_{\phi z 6} = \sigma_{\phi 6 1} + \sigma_{\phi 6 2}$$

$$\sigma_{xz 6} = \sigma_{x 5} + \sigma_{x 6 1} + \sigma_{x 6 2}$$

$$\sigma_{2 2} = \sigma_{\phi z 6} + \sigma_{xz 6} + \sqrt{(\sigma_{\phi z 6} - \sigma_{xz 6})^2 + 4\tau_{L 2}^2}$$

・第2脚つけ根部

(第1評価点)

$$\sigma_{\phi z 7} = 0$$

$$\sigma_{xz 7} = 0$$

$$\sigma_{2 3} = \sigma_{\phi z 7} + \sigma_{xz 7} + \sqrt{(\sigma_{\phi z 7} - \sigma_{xz 7})^2 + 4(\tau_{c 1} + \tau_3)^2}$$

(第2評価点)

$$\sigma_{\phi z 8} = \sigma_{\phi 8 1} + \sigma_{\phi 8 2}$$

$$\sigma_{xz 8} = \sigma_{x 8 1} + \sigma_{x 8 2}$$

$$\sigma_{2 4} = \sigma_{\phi z 8} + \sigma_{xz 8} + \sqrt{(\sigma_{\phi z 8} - \sigma_{xz 8})^2 + 4\tau_3^2}$$

(ii) X方向荷重が作用した場合

(第1評価点)

$$\sigma_{\phi \times 3} = \sigma_{\phi 91} + \sigma_{\phi 101} + \sigma_{\phi 92} + \sigma_{\phi 102}$$

$$\sigma_{x \times 3} = \sigma_{x 5} + \sigma_{x 91} + \sigma_{x 101} + \sigma_{x 92} + \sigma_{x 102}$$

$$\sigma_{25} = \sigma_{\phi \times 3} + \sigma_{x \times 3} + \sqrt{(\sigma_{\phi \times 3} - \sigma_{x \times 3})^2 + 4(\tau_{c4} + \tau_6)^2}$$

(第2評価点)

$$\sigma_{\phi \times 4} = \sigma_{\phi 11} + \sigma_{\phi 91} + \sigma_{\phi 92} + \sigma_{\phi 111} + \sigma_{\phi 112}$$

$$\sigma_{x \times 4} = \sigma_{x 5} + \sigma_{x 91} + \sigma_{x 92} + \sigma_{x 111} + \sigma_{x 112}$$

$$\sigma_{26} = \sigma_{\phi \times 4} + \sigma_{x \times 4} + \sqrt{(\sigma_{\phi \times 4} - \sigma_{x \times 4})^2 + 4(\tau_{L5} + \tau_6)^2}$$

$$\sigma_2 = \max[\sigma_{21}, \sigma_{22}, \sigma_{23}, \sigma_{24}, \sigma_{25}, \sigma_{26}]$$

ハ. 脚の応力計算

(イ) 運転時質量による応力

$$\sigma_{s1} = \frac{R}{A_s}$$

$$\sigma_{s2} = \frac{\max[|R \cdot u - M_L - P \cdot L|, |R \cdot u - M_L|]}{Z_{st}}$$

(ロ) 風荷重 (Z方向) による応力

i. 第1脚

$$\sigma_{s5} = \frac{R_1}{A_s}$$

$$\sigma_{s6} = \frac{\max[|R_1 \cdot u - M_1 - P_1 \cdot L|, |R_1 \cdot u - M_1|]}{Z_{st}}$$

ii. 第2脚

$$\sigma_{s7} = \frac{\max[|Q \cdot L - M_3|, |M_3|]}{Z_{sr}}$$

(ハ) X方向荷重による応力

$$\sigma_{s8} = \frac{R_1}{\sqrt{2} \cdot A_s}$$

$$\sigma_{s9} = \frac{\max[|R_1 \cdot u - M_1 - P_1 \cdot L|, |R_1 \cdot u - M_1|]}{\sqrt{2} \cdot Z_{st}}$$

$$\sigma_{s10} = \frac{\max[|Q \cdot L - M_3|, |M_3|]}{\sqrt{2} \cdot Z_{sr}}$$

(二) 組合せ応力

脚の最大応力は、下記式による。

i. Z 方向荷重が作用した場合

(i) 第 1 脚

$$\sigma_{s z 1} = \sigma_{s 1} + \sigma_{s 2} + \sigma_{s 5} + \sigma_{s 6}$$

(ii) 第 2 脚

$$\sigma_{s z 2} = \sigma_{s 1} + \sigma_{s 2} + \sigma_{s 7}$$

ii. X 方向荷重が作用した場合

$$\sigma_{s x} = \sigma_{s 1} + \sigma_{s 2} + \sigma_{s 8} + \sigma_{s 9} + \sigma_{s 10}$$

$$\sigma_s = \max[\sigma_{s z 1}, \sigma_{s z 2}, \sigma_{s x}]$$

(ホ) 組合せ圧縮応力

i. Z 方向荷重が作用した場合

(i) 第 1 脚

$$\sigma_{s c} = \sigma_{s 1} + \sigma_{s 5}$$

$$\sigma_{s t} = \sigma_{s 2} + \sigma_{s 6}$$

$$\sigma_{s r} = 0$$

(ii) 第 2 脚

$$\sigma_{s c} = \sigma_{s 1}$$

$$\sigma_{s t} = \sigma_{s 2}$$

$$\sigma_{s r} = \sigma_{s 7}$$

ii. X 方向荷重が作用した場合

$$\sigma_{s c} = \sigma_{s 1} + \sigma_{s 8}$$

$$\sigma_{s t} = \sigma_{s 2} + \sigma_{s 9}$$

$$\sigma_{s r} = \sigma_{s 10}$$

圧縮と曲げの組合せについて、座屈評価用の式を次式より求める。

$$\frac{\sigma_{s r}}{f_{b r}} + \frac{\sigma_{s t}}{f_{b t}} + \frac{\sigma_{s c}}{f_c} \leq 1$$

(2) たて置円筒形容器（残留熱除去系海水系ストレーナ，ディーゼル発電機用海水ストレーナ）

a. 評価条件

たて置円筒形容器の強度評価を行う場合，以下の条件に従うものとする。

- (a) 設計竜巻の風圧力による荷重，気圧差による荷重，及び有効運転質量を考慮した自重を加えた荷重に対する，支持脚の構造健全性を1質点系モデルとして計算を行う。ここで，荷重の作用点は評価上高さの1/2より高い容器の重心位置とする。

たて置円筒形容器のモデル図を図5-11に示す。

b. 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-15に示す。

表5-15 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	応力等の状態
基礎ボルト	<ul style="list-style-type: none"> ・引張 ・せん断 ・組合せ

c. 強度評価方法

(a) 記号の定義

たて置円筒形容器の強度計算に用いる記号を表5-16に示す。

表5-16 強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A_b	mm^2	基礎ボルトの軸断面積
d	mm	基礎ボルト呼び径
F_b	N	基礎ボルトに対する引張力
g	m/s^2	重力加速度 ($g=9.80665$)
h	mm	ストレーナ重心高さ
L_1	mm	基礎ボルト間の水平距離
L_H	mm	重心から基礎ボルト間の水平距離
m	kg	容器の有効運転質量*
N	—	基礎ボルトの本数
n_f	—	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
W_{T2}	N	設計竜巻による複合荷重 ($W_{T2}=W_W+0.5 \cdot W_P+W_M$)
π	—	円周率
σ_b	MPa	基礎ボルトに生じる引張応力
τ	MPa	基礎ボルトに生じるせん断応力

注記 *：有効運転質量は，容器の満水時における質量とする。

(b) 計算モデル

設計竜巻の風圧力による荷重，気圧差による荷重，有効運転質量を考慮した荷重に対し，基礎ボルトの構造健全性を1質点系モデルとして計算を行う。ここで，荷重の作用点は評価上高さの1/2より高いストレーナの重心位置とする。残留熱除去系海水系ストレーナのモデル図を図5-11に示す。

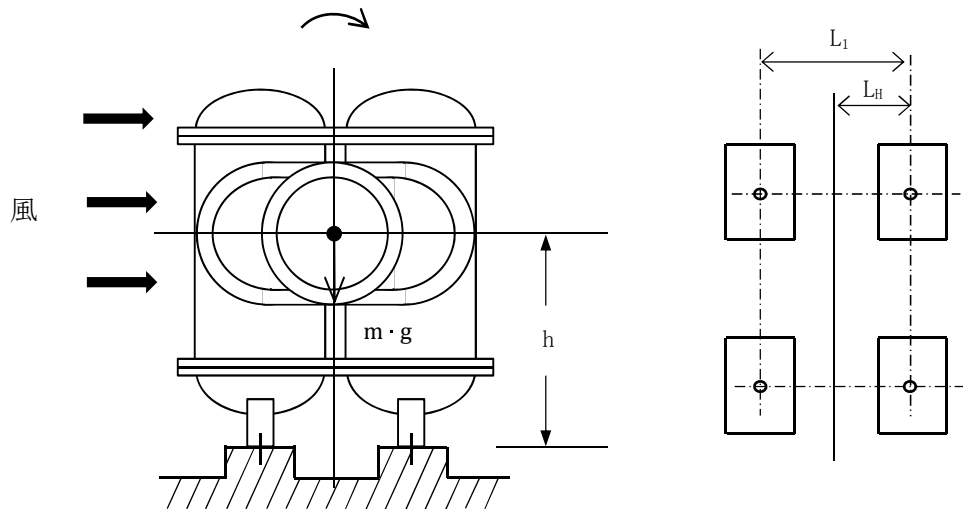


図5-11 たて置円筒形容器のモデル図

(c) 評価方法

イ. 引張応力

基礎ボルトに対する引張力は最も厳しい条件として，図 5-11 で基礎ボルトを支点とする転倒を考え，これを片側の基礎ボルトで受けるものとして計算する。

(イ) 引張力

$$F_b = \frac{W_{T2} \cdot h - m \cdot g \cdot L_H}{n_f \cdot L_1}$$

(ロ) 引張応力

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

ここで，基礎ボルトの軸断面積 A_b は

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

ロ. せん断応力

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

(イ) せん断力

$$Q_b = W_{T2}$$

(ロ) せん断応力

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

(3) よこ置円筒形容器（ディーゼル発電機排気消音器）

a. 評価条件

よこ置円筒形容器の強度評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

- (a) 設計竜巻の風圧力による荷重，気圧差による荷重を考慮した自重を加えた荷重に対する，基礎ボルトの構造健全性を1質点系モデルとして計算を行う。ここで，荷重の作用点は評価上高さの1/2より高い容器の重心位置とする。
- (b) 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，軸直角方向からの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。また，軸方向からの風荷重による応力はフィルタ部と吸収部各々について風が当たるものとして評価することで保守的な評価となるため，フィルタ部と吸収部に分けて評価を行う。

よこ置円筒形容器のモデル図を図5-12～図5-14に示す。

b. 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-17に示す。

表5-17 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	応力等の状態
基礎ボルト	<ul style="list-style-type: none"> ・引張 ・せん断 ・組合せ

c. 強度評価方法

(a) 記号の定義

よこ置円筒形容器の強度計算に用いる記号を表5-18に示す。

表5-18 よこ置円筒形容器の強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A_b	mm^2	基礎ボルトの軸断面積
d	mm	基礎ボルト呼び径
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
g	m/s^2	重力加速度 ($g = 9.80665$)
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
m	kg	排気消音器の質量
N	—	基礎ボルトの本数
Q_b	N	基礎ボルトに対するせん断力
W_T	N	設計竜巻による複合荷重
π	—	円周率
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

(b) 計算モデル

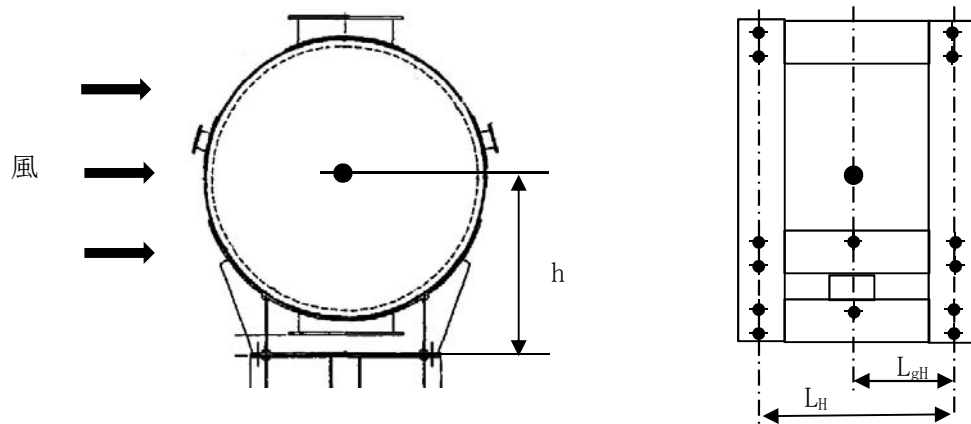


図 5-12(1/2) 非常用ディーゼル発電機 2 C 排気消音器の評価モデル図 (軸直角方向)

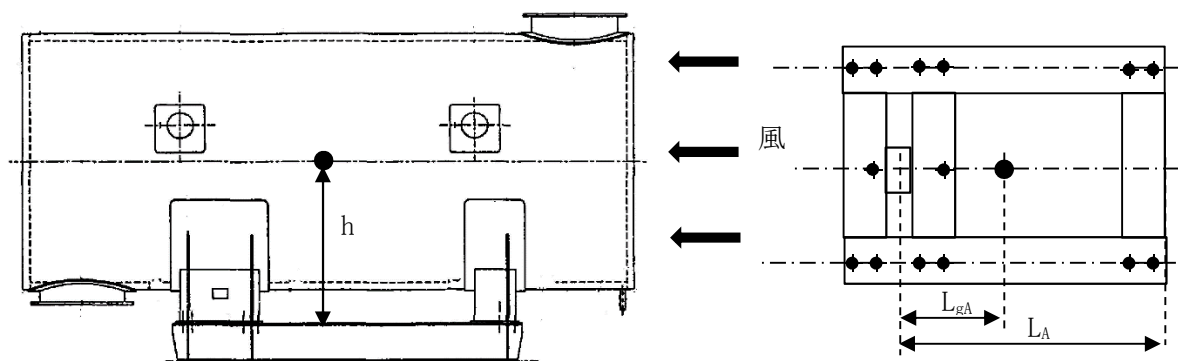


図 5-12(2/2) 非常用ディーゼル発電機 2 C 排気消音器の評価モデル図 (軸方向)

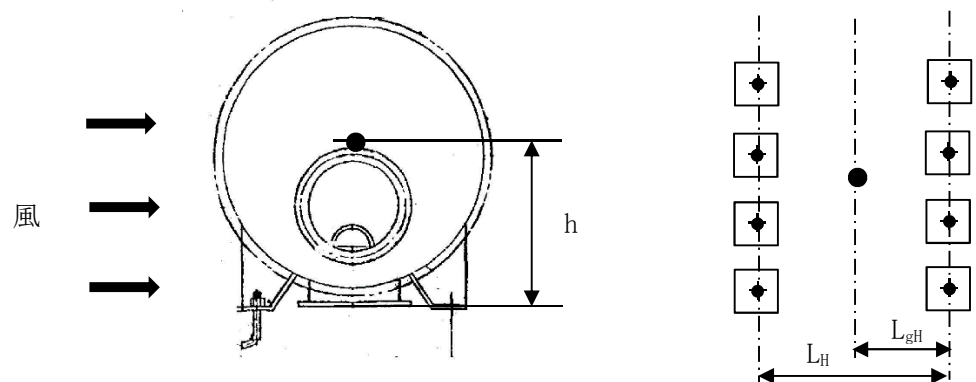


図 5-13(1/2) 非常用ディーゼル発電機 2 D 排気消音器，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器の評価モデル図 (フィルタ部軸直角方向)

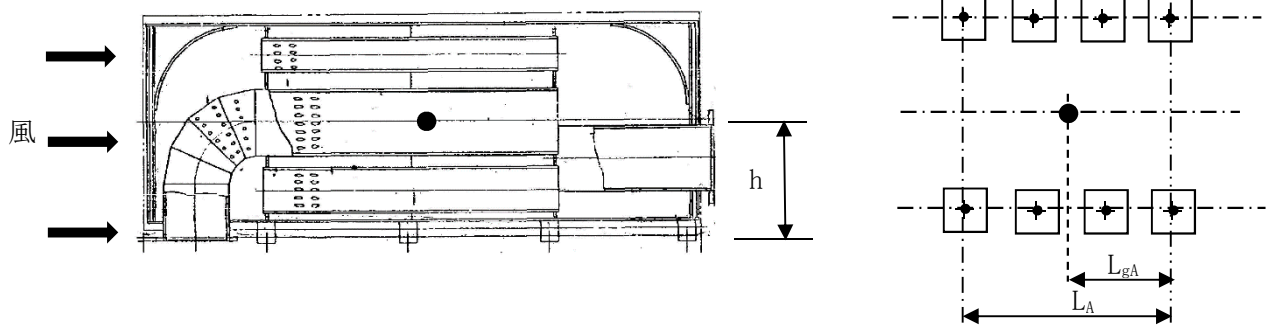


図 5-13(2/2) 非常用ディーゼル発電機 2 D 排気消音器，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器の評価モデル図（フィルタ部軸方向）

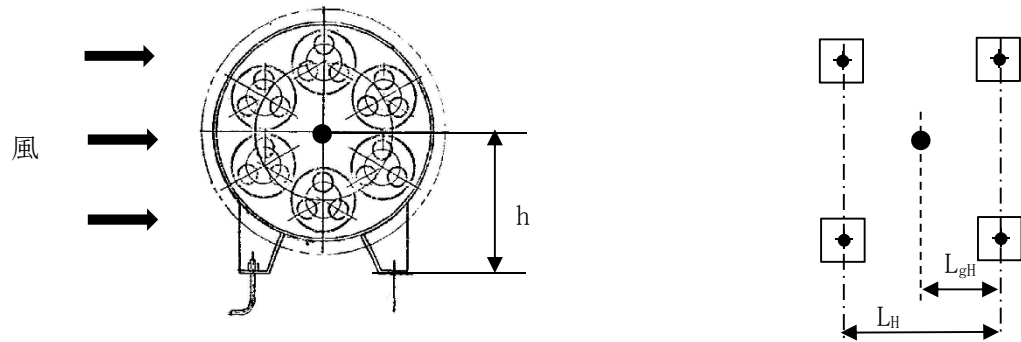


図 5-14(1/2) 非常用ディーゼル発電機 2 D 排気消音器，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器モデル図（吸収部軸直角方向）

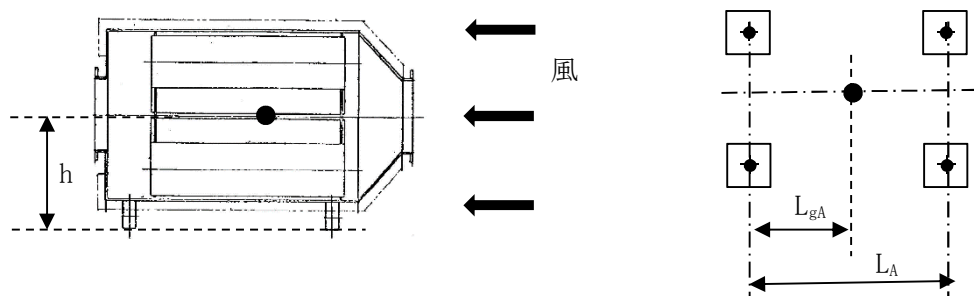


図 5-14(2/2) 非常用ディーゼル発電機 2 D 排気消音器，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器の評価モデル図（吸収部軸方向）

(c) 評価方法

イ. 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 5-12～図 5-14 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。

(イ) 軸直角方向

i. 引張力

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

ii. 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

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

(ロ) 軸方向

i. 引張力

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

ii. 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

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

ロ. 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。

(イ) せん断力

$$Q_b = W_T$$

(ロ) せん断応力

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

5.2.3 排気筒

(1) 評価条件

排気筒の強度評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

- a. 排気筒は筒身と鉄塔が一体となって構成されるため、施設全体で風圧力による様な荷重を受けるモデルとして評価を行う。この際、設計竜巻による飛来物の衝撃荷重は鉄塔の部材を損傷させたモデルとして考慮することとし、 $W_M=0$ とする。

評価モデルを図5-15に示す。

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-19に示す。

表5-19 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	応力等の状態
筒身	・ 組合せ（圧縮＋曲げ） ・ せん断
鉄塔	・ 組合せ（圧縮＋曲げ）

(3) 強度評価方法

a. 記号の定義

排気筒の強度評価に用いる記号を表5-20に示す。

表5-20 排気筒の強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
f_b	N/mm^2	曲げ材料強度
f_c	N/mm^2	圧縮材料強度
${}_c f_{cr}$	N/mm^2	圧縮材料強度
${}_s f_{cr}$	N/mm^2	せん断材料強度
σ_b	N/mm^2	曲げ応力度
σ_c	N/mm^2	平均圧縮応力度
${}_c \sigma_b$	N/mm^2	圧縮側曲げ応力度

b. 計算モデル

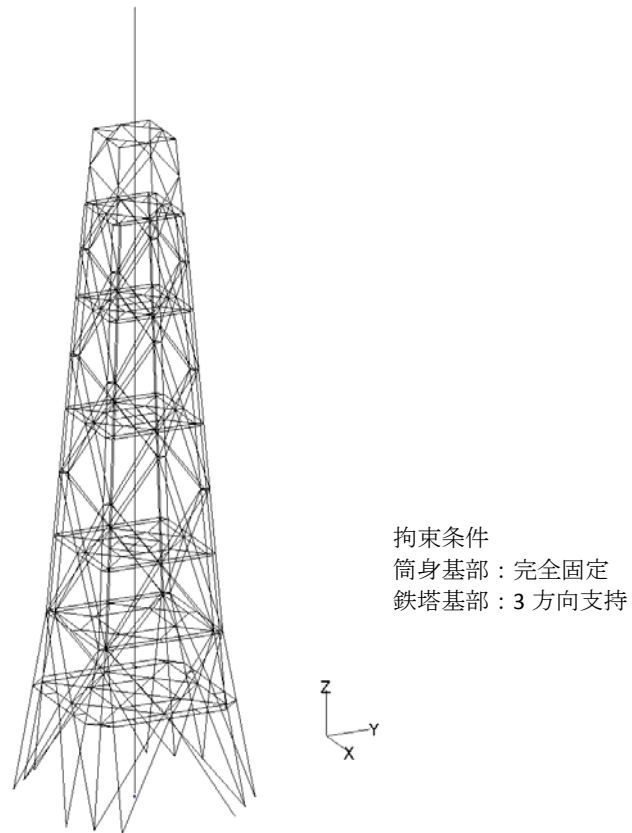


図 5-15 排気筒モデル図

c. 評価方法

(a) 応力評価方法

排気筒について、3次元FEMを用いた弾性応力解析を実施する。

(b) 断面の評価方法

排気筒の断面の評価に用いる応力は、3次元FEMモデルを用いた応力解析により得られた各荷重による断面力（軸力、曲げモーメント、せん断力）を組み合わせることにより算定する。

イ. 筒身板に対する断面の評価方法

(イ) 応力検定

機能維持検討の応力に対する断面算定は、「容器構造設計指針・同解説」に準拠して行う。

なお、断面性能の算定においては、腐食代2mm（外側：1mm，内側：1mm）を控除した数を用いる。

$$\frac{\sigma_c}{c f_{cr}} + \frac{c \sigma_b}{c f_{cr}} \leq 1$$

かつ

$$\frac{\tau}{s f_{cr}} \leq 1$$

ロ． 鉄塔主要部材に対する断面の評価方法

(イ) 応力検定

機能維持検討時の応力に対する断面算定は、「政令第 96 条」及び「平 13 国
交告第 1024 号」に準拠して行う。

なお、断面性能の算定においては、腐食代 1mm（外側のみ 1mm）を控除した値
を用いる。

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1$$

(ロ) 機能維持検討時に対する材料強度

機能維持検討時は、「平 12 建告第 2464 号」に準拠し、材料強度 F 値を 1.1
倍した値を用いて算出した許容応力度に対して、部材に発生する応力が超えな
いことを確認する。

5.2.4 配管及び弁

(1) 評価条件

配管及び弁の強度評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

- a. 配管は一定距離ごとにサポートによって支えられているため、風圧力による一様な
荷重を受ける単純支持梁として評価を行う。評価に用いる支持間隔は標準支持間隔を
用いる。配管のモデル図を図5-16に示す。
- b. 弁を設置している箇所においては、弁の断面係数は配管に比べ大きく、配管の評価
に包絡されるため配管の評価のみを実施する。
- c. サポート（配管支持構造物）については、建屋内外にかかわらず地震に対して耐荷
重設計がなされており、配管本体に竜巻による荷重が作用した場合でも、作用荷重は
耐荷重以下であるため、竜巻による荷重に対するサポートの設計は耐震設計に包絡さ
れる。

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-21に示す。

表5-21 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	応力等の状態
配管本体	一次応力（膜＋曲げ）

(3) 強度評価方法

a. 記号の定義

配管及び弁の強度評価に用いる記号を表5-22に示す。

表5-22 配管及び弁の強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
D	mm	管外径
g	m/s ²	重力加速度 (g = 9.80665)
L	m	支持間隔
M	N・m	風荷重により作用する曲げモーメント
m	kg/m	単位長さ当たりの質量
P	MPa	内圧
t	mm	板厚
W _w	N/m	設計竜巻の単位長さ当たりの風圧力による荷重
w	N/m	単位長さ当たりの自重による荷重
Z	mm ³	断面係数
π	—	円周率
Δ P	N/m ²	気圧差
σ ₁ , σ ₂	MPa	配管に生じる応力
σ _{WP}	MPa	気圧差により生じる応力
σ _{WT1} , σ _{WT2}	MPa	複合荷重により生じる応力
σ _{WW}	MPa	風圧力により生じる応力
σ _{自重}	MPa	自重により生じる応力
σ _{内圧}	MPa	内圧により生じる応力

b. 計算モデル

配管は一定距離ごとにサポートによって支えられているため、風圧力による一様な荷重を受ける単純支持梁として評価を行う。評価に用いる支持間隔は管外径、材質ごとにサポートの支持間隔が最長となる箇所を選定する。保温材を使用している配管については、保温材を含めた受圧面積を考慮して評価を行う。弁を設置している場合はサポート支持間隔が短くなるため、弁を設置している場合の受圧面積は最大支持間隔での受圧面積に包絡される。

配管モデル図を図5-16に示す。

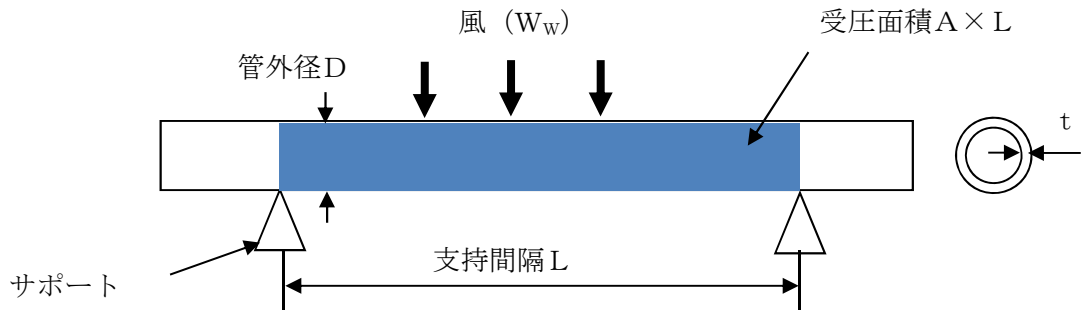


図 5-16 配管及び弁モデル図

c. 評価方法

(a) 竜巻による応力計算

イ. 風圧力により生じる応力

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

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

ここで、

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

ロ. 気圧差により生じる応力

気圧差による荷重は、気圧が低下した分、内圧により生じる1次一般膜応力が増加すると考えて、その応力増加分を以下の式により算定する。

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

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

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

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

(b) 組合せ応力

竜巻荷重と組み合わせる荷重として、配管に常時作用する自重及び運転時に作用する内圧を考慮する。自重により生じる曲げ応力及び内圧により生じる1次一般膜応力は、以下の式により算定する。

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

$$w = m \cdot g$$

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

したがって、自重及び風圧力による荷重により生じる曲げ応力と気圧差による荷重及び内圧により生じる1次一般膜応力を足し合わせ、配管に生じる応力として以下の式により σ_1 及び σ_2 を算出する。

$$\sigma_1 = \sigma_{自重} + \sigma_{内圧} + \sigma_{WT1}$$

$$\sigma_2 = \sigma_{自重} + \sigma_{内圧} + \sigma_{WT2}$$

5.2.5 換気空調設備

(1) ダクト

a. 角ダクト

(a) 評価条件

角ダクトの強度評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

イ. 角ダクトは、任意のダクト面に着目すると、ダクト面は両サイドをほかの2つの側面のダクト面で、軸方向（流れ方向）を補強部材（及び接続部材）で支持された長方形の板とみなすことができる。そのため、鋼板を補強部材と両サイドのウェブで支持された4辺単純支持矩形板とし評価を行う。自重等によりダクトに生じる曲げモーメントに関し、ウェブでの応力分布が線形で、中立面がフランジの両側から等距離の中央線上にあるとする。角ダクトモデル図を図5-17に示す。

(b) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-23に示す。

表5-23 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	応力等の状態
ダクト鋼板 (本体)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 曲げ ・ 座屈

(c) 強度評価方法

イ. 記号の定義

角ダクトの強度評価に用いる記号を表5-24に示す。

表5-24 角ダクトの強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
a	mm	ダクト幅
b	mm	ダクト高さ
c	mm	補強ピッチ
D_p	kg/m^2	単位面積当たりのダクト鋼板の質量
E	MPa	ヤング率
g	m/s^2	重力加速度
L	mm	ダクトサポートの支持間隔
M_p	$\text{N}\cdot\text{mm}$	自重により作用する曲げモーメント
P	MPa	ダクトにかかる外圧
t	mm	ダクト板厚
δ_{\max}	mm	面外荷重によるダクト鋼板の最大変位量
ΔP	N/m^2	設計竜巻の気圧低下量
π	—	円周率
μ	kg/m	ダクト単位重量
ν	—	ポアソン比
σ_{\max}	MPa	中心に生じる面外荷重による最大応力
σ_{p1}	MPa	面内荷重（外圧）による発生応力
σ_y	MPa	許容応力

ロ. 計算モデル

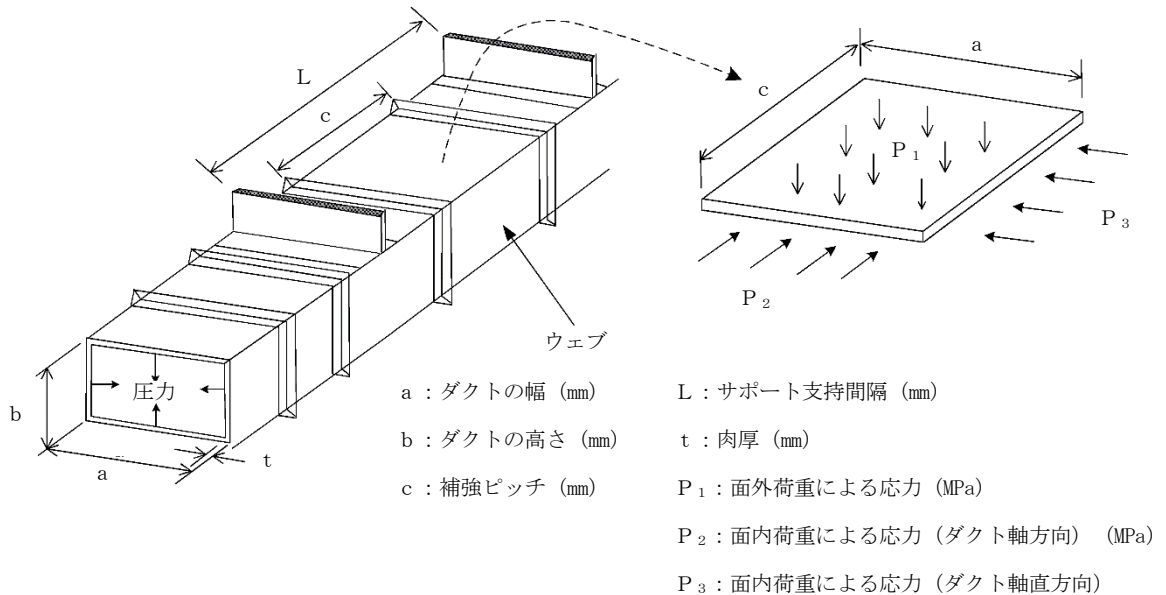


図5-17 角ダクトモデル図

ハ. 評価方法

ダクトにかかる外圧は，設計竜巻により発生する気圧差が影響するので，

$$P = \Delta P$$

(イ) 面外荷重による発生応力

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

機械工学便覧に記載されている4辺単純支持の長方形板が等分布荷重を受ける場合の長方形板の大たわみ式を引用する。



式 (3.2) より得られる δ_{max} の値を式 (3.1) へ代入し， σ_{max} を算出する。

(ロ) 面内荷重による発生応力

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

i. 外圧による発生応力

薄肉構造物のうち，長方形板の弾性座屈の式より算出する。



ii. 自重による曲げモーメント

自重によりダクト鋼板に作用する曲げモーメントは，以下の式により算出する。

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

b. 丸ダクト

(a) 評価条件

丸ダクトの強度評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

イ. 丸ダクトは両端を補強部材で支持された円筒の梁とみなし、計算を行う。

丸ダクトモデル図を図5-18に示す。

(b) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-25に示す。

表5-25 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	応力等の状態
ダクト鋼板 (本体)	・周方向応力 ・座屈

(c) 強度評価方法

イ. 記号の定義

丸ダクトの強度評価に用いる記号を表5-26に示す。

表5-26丸ダクトの強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
c	mm	補強ピッチ
g	m/s ²	重力加速度
L	mm	ダクトサポートの支持間隔
M _p	N・mm	自重により作用する曲げモーメント
r	mm	丸ダクトのダクト半径
t	mm	ダクト板厚
ΔP	N/m ²	設計竜巻の気圧低下量
μ	kg/m	ダクトの単位長さ当たりの質量
σ _{cripl}	MPa	外圧により生じる周方向応力

ロ. 計算モデル

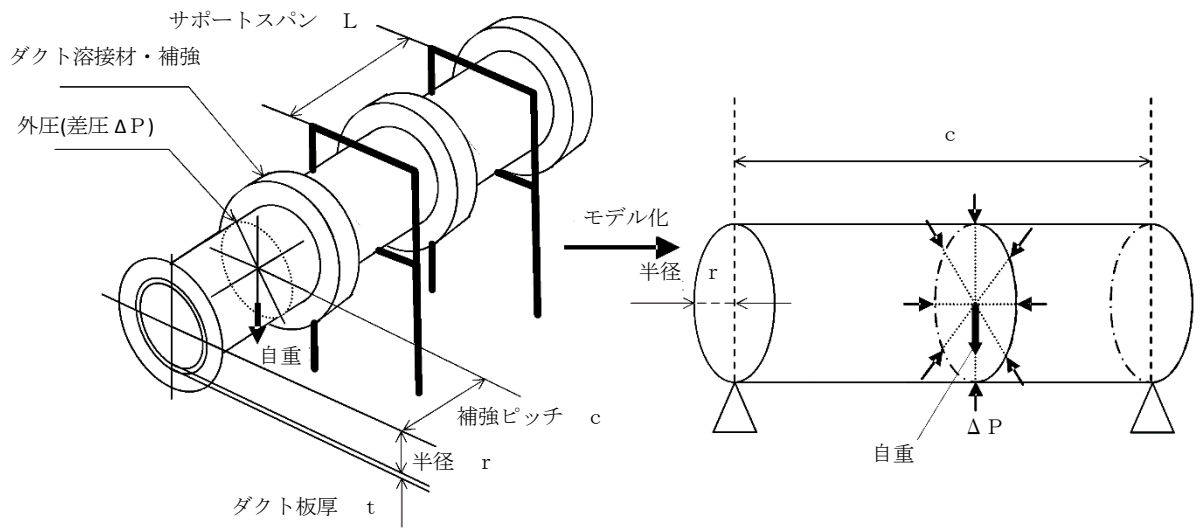


図5-18 丸ダクトモデル図

ハ. 評価方法

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

(イ) 外圧により生じる周方向応力 σ_{cripl}

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

(ロ) 自重により作用する曲げモーメント M_P

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

(2) 隔離弁

a. 評価条件

隔離弁の強度評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

(a) 設計竜巻により発生する圧力と隔離弁の呼び圧力との比較を行う。

b. 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-27に示す。

表5-27 評価対象部位及び評価内容

機器形状	評価対象部位	応力等の状態
バタフライ弁	耐圧部	変形

c. 強度評価方法

(a) 記号の定義

隔離弁の強度計算に用いる記号を表5-28に示す。

表5-28 隔離弁の強度計算に用いる記号

記号	単位	定義
P	hPa	設計竜巻により発生する圧力
ΔP	hPa	設計竜巻の気圧低下量

(b) 評価方法

- ・設計竜巻により発生する圧力

$$P = \Delta P$$

(3) ファン

a. 評価条件

ファンの強度評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

- (a) ファンの計算モデルは円筒形の1質点モデルとし、全高の1/2の位置に複合荷重が作用することとする。ファンモデル図を図5-19に示す。

b. 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-29に示す。

表5-29 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	応力等の状態
基礎ボルト	<ul style="list-style-type: none"> ・引張 ・せん断 ・組合せ

c. 強度評価方法

(a) 記号の定義

ファンの強度計算に用いる記号を表5-30に示す。

表5-30 ファンの強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A_b	mm^2	基礎ボルトの軸断面積
d	mm	基礎ボルト呼び径
F_b	N	基礎ボルトに対する引張力
g	m/s^2	重力加速度 ($g=9.80665$)
h	mm	ファン重心高さ
L_1	mm	基礎ボルト間の水平距離
L_H	mm	重心から基礎ボルト間の水平距離
m	kg	ファンの質量
N	—	基礎ボルトの本数
n_f	—	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
W_{T2}	N	設計竜巻による複合荷重 ($W_{T2}=W_W+0.5\cdot W_P+W_M$)
π	—	円周率
σ_b	MPa	基礎ボルトに生じる引張応力
τ	MPa	基礎ボルトに生じるせん断応力

(b) 計算モデル

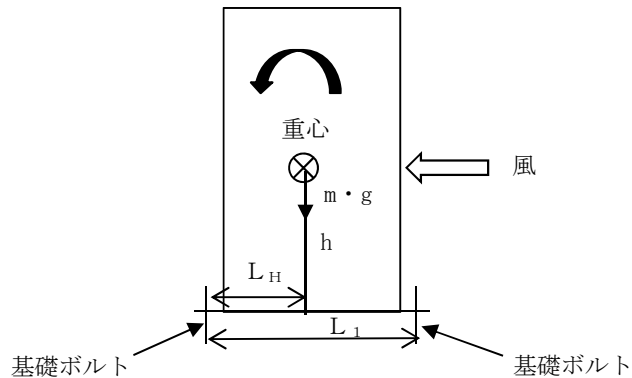


図 5-19 ファンモデル図

(c) 評価方法

イ. 引張応力

基礎ボルトに対する引張力は最も厳しい条件として、図 5-18 で基礎ボルトを支点とする転倒を考え、これを片側の基礎ボルトで受けるものとして計算する。

(イ) 引張力

$$F_b = \frac{W_{T2} \cdot h - m \cdot g \cdot L_H}{n_f \cdot L_1}$$

(ロ) 引張応力

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

ここで、基礎ボルトの軸断面積 A_b は

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

ハ. せん断応力

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

(イ) せん断力

$$Q_b = W_{T2}$$

(ロ) せん断応力

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

(4) 冷凍機

a. 評価条件

冷凍機の強度評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

- (a) 冷凍機の計算モデルは立方体の1質点モデルとし、全高の1/2の位置に複合荷重が作用することとする。冷凍機モデル図を図5-20に示す。

b. 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-31に示す。

表5-31 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	応力等の状態
基礎ボルト	<ul style="list-style-type: none"> ・引張 ・せん断 ・組合せ

c. 強度評価方法

(a) 記号の定義

冷凍機の強度計算に用いる記号を表5-32に示す。

表5-32 冷凍機の強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A_b	mm^2	基礎ボルトの軸断面積
d	mm	基礎ボルト呼び径
F_b	N	基礎ボルトに対する引張力
g	m/s^2	重力加速度 ($g=9.80665$)
h	mm	冷凍機重心高さ
L_1	mm	基礎ボルト間の水平距離
L_H	mm	重心から基礎ボルト間の水平距離
m	kg	冷凍機の運転質量
N	—	基礎ボルトの本数
n_f	—	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
W_{T2}	N	設計竜巻による複合荷重 ($W_{T2}=W_W+0.5\cdot W_P+W_M$)
π	—	円周率
σ_b	MPa	基礎ボルトに生じる引張応力
τ	MPa	基礎ボルトに生じるせん断応力

(b) 計算モデル

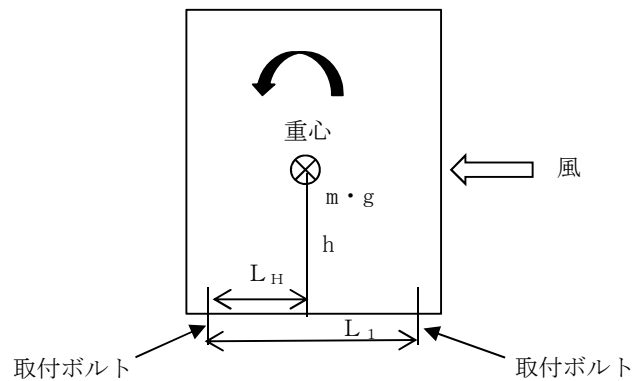


図 5-20 冷凍機モデル図

(c) 評価方法

イ. 引張応力

取付ボルトに対する引張力は最も厳しい条件として、図 5-20 で取付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で受けるものとして計算する。

(イ) 引張力

$$F_b = \frac{W_{T2} \cdot h - m \cdot g \cdot L_H}{n_f \cdot L_1}$$

(ロ) 引張応力

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

ここで、取付ボルトの軸断面積 A_b は

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

ロ. せん断応力

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

(イ) せん断力

$$Q_b = W_{T2}$$

(ロ) せん断応力

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

6. 適用規格

(1) 竜巻の影響を考慮する施設の強度評価に用いる適用規格はV-1-1-2-3-1による。

- ・ 建築基準法及び同施行令
- ・ 「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針（平成2年8月30日原子力安全委員会）」
- ・ 日本工業規格(J I S)
- ・ 「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 - 補 1984」(社) 日本電気協会
- ・ 「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987」(社) 日本電気協会
- ・ 「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」(社) 日本電気協会
- ・ 「発電用原子力設備規格設計・建設規格 J S M E S N C 1 -2005/2007」(社) 日本機械学会
- ・ I S E S 7 6 0 7 -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)
- ・ Methodology for Performing Aircraft Impacts Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8 (N E I O 7 -1 3))
- ・ 「コンクリート標準示方書 設計編」((社) 土木学会, 2007 改定)
- ・ 「建築物荷重指針・同解説」((社) 日本建築学会, 2004 改定)
- ・ 「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」((社) 日本建築学会, 2005 制定)
- ・ 「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)
- ・ 「各種合成構造設計指針・同解説」((社) 日本建築学会, 2010 改定)
- ・ 「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)
- ・ 「ステンレス鋼便覧第3版」(ステンレス協会)

(2) 参考文献

- a. Wichman, K.R. et al, :Local Stress in Spherical and Cylindrical Shells due to External Loadings, Welding Research Council bulletin, March 1979 revision of WRC bulletin 107/August 1965.
- b. Bijlaard, P.P. :Stresses from Radical Loads and External Moments in Cylindrical Pressure Vessels, The Welding Journal, 34(12), Research Supplement, 1955.
- c. 「自動車の衝突安全」2012年2月29日 名古屋大学出版会 著者 水野幸治

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.....	16
3.3 荷重及び荷重の組合せ.....	17
3.4 許容限界.....	19
3.5 評価方法.....	22
4. 評価条件.....	40
4.1 貫通評価.....	40
4.2 裏面剥離評価.....	42
4.3 変形評価.....	42
5. 強度評価結果.....	47
5.1 貫通評価.....	47
5.2 裏面剥離評価.....	48
5.3 変形評価.....	49

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。

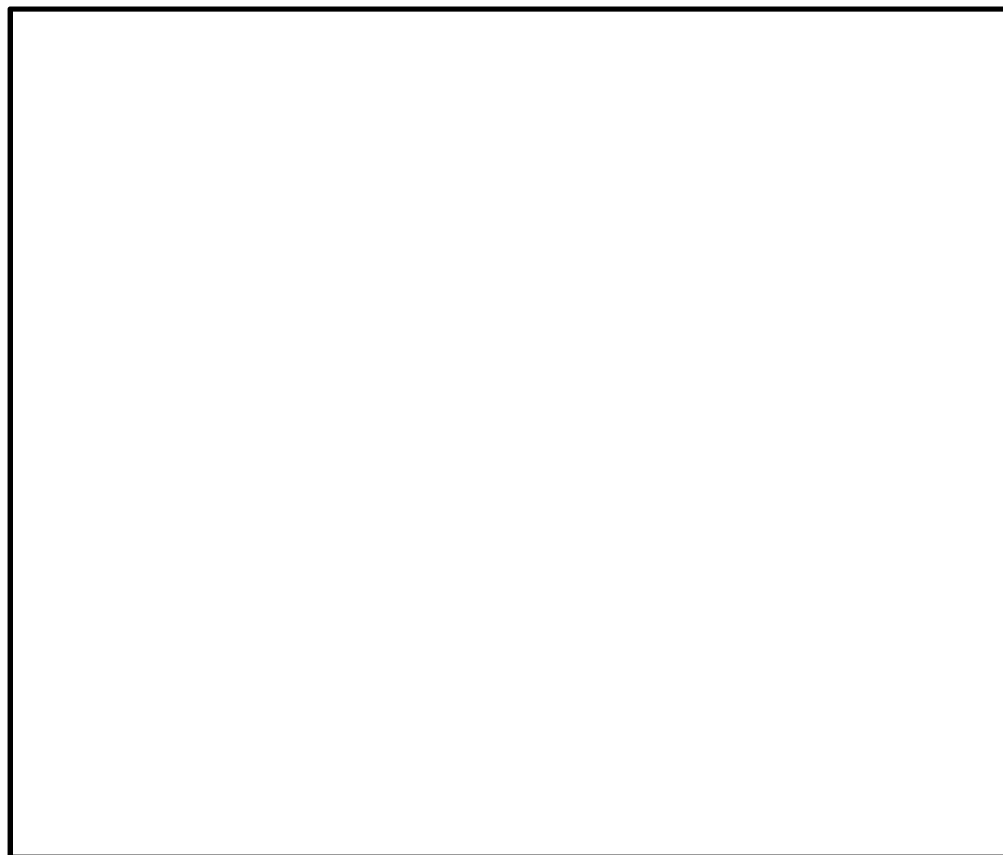


図 2-1 建屋及び構造物の配置図

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。

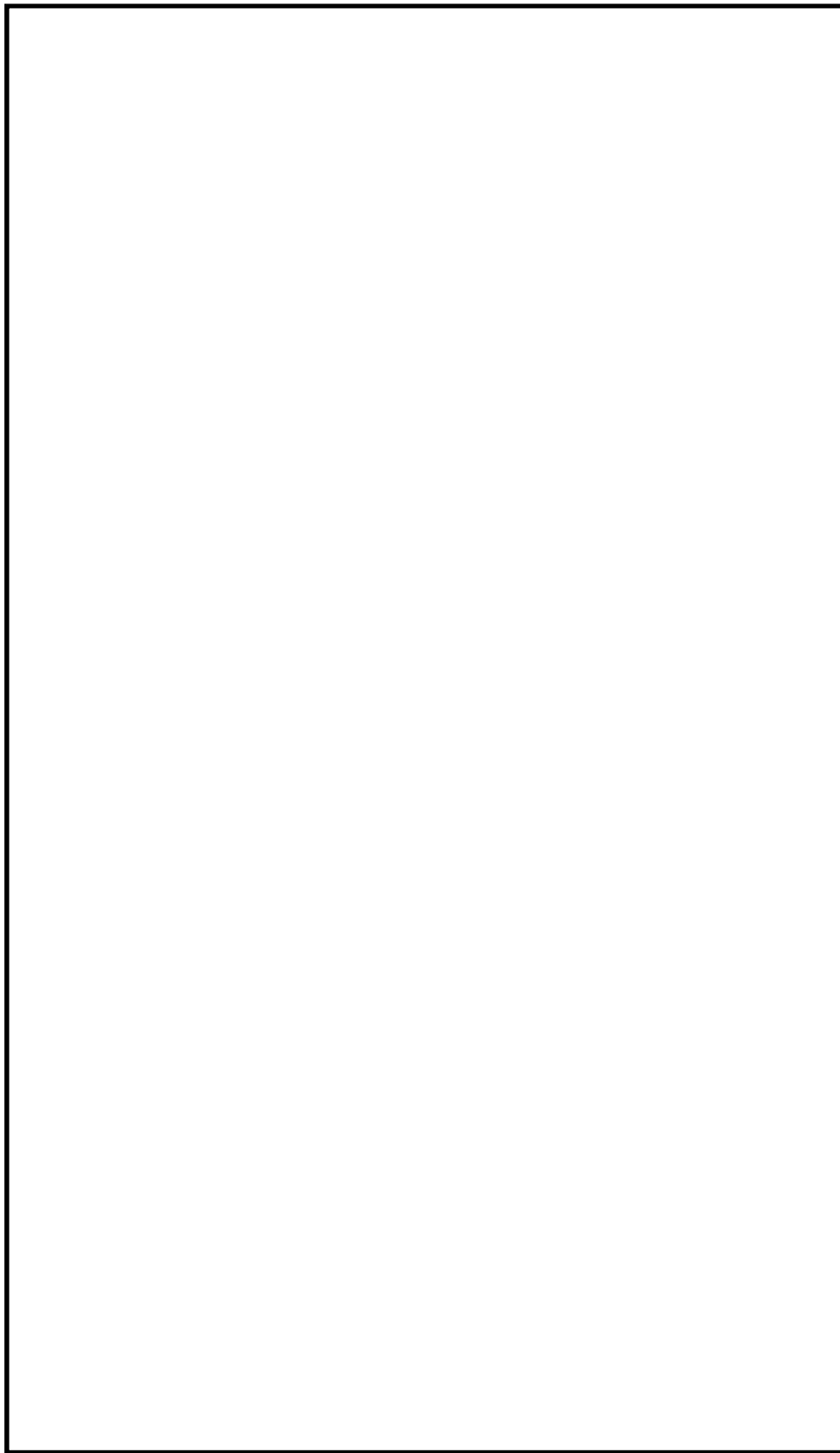


図2-2 原子炉建屋の概略平面図

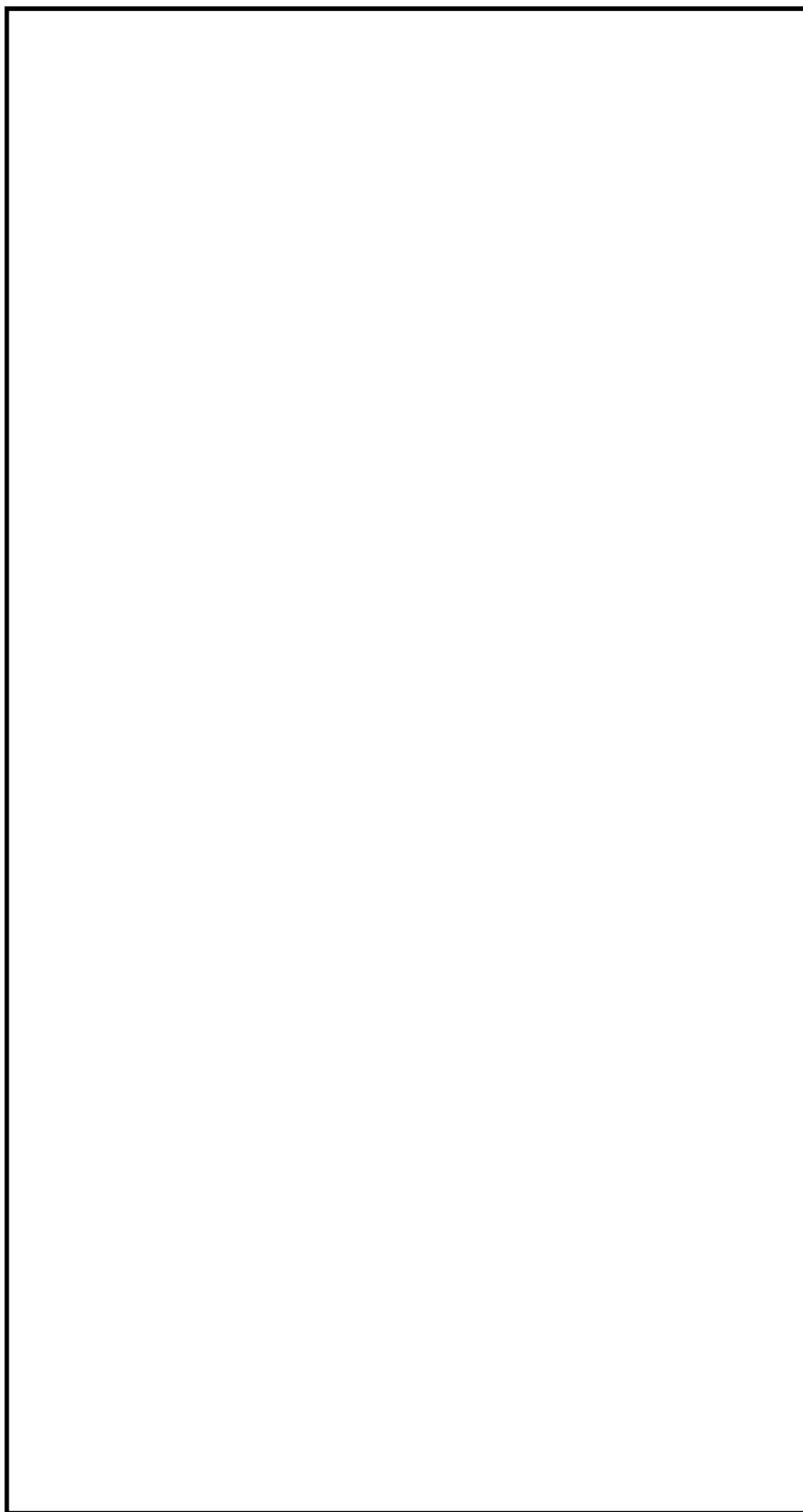


図 2-3 原子炉建屋の概略断面図

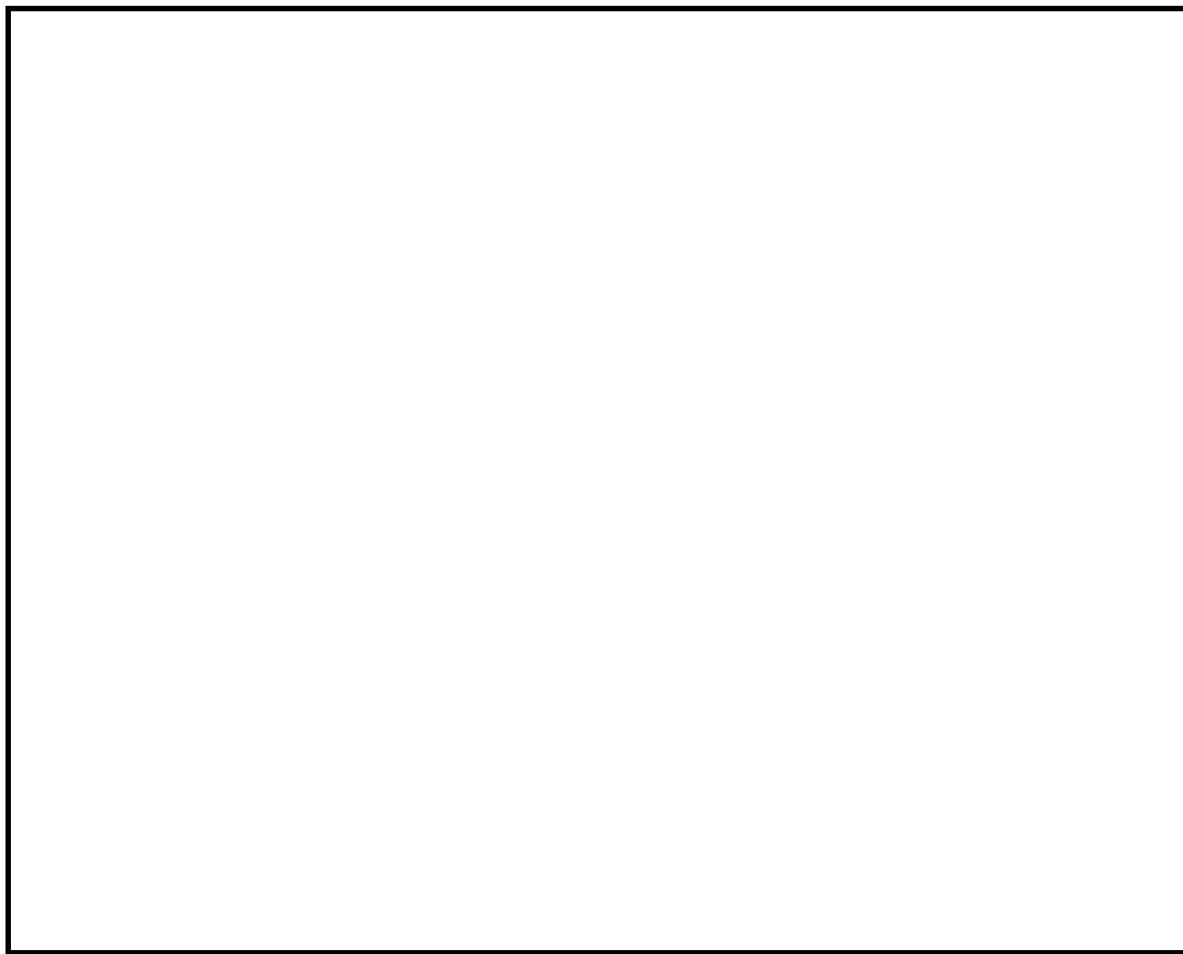


図 2-4 タービン建屋の概略平面図

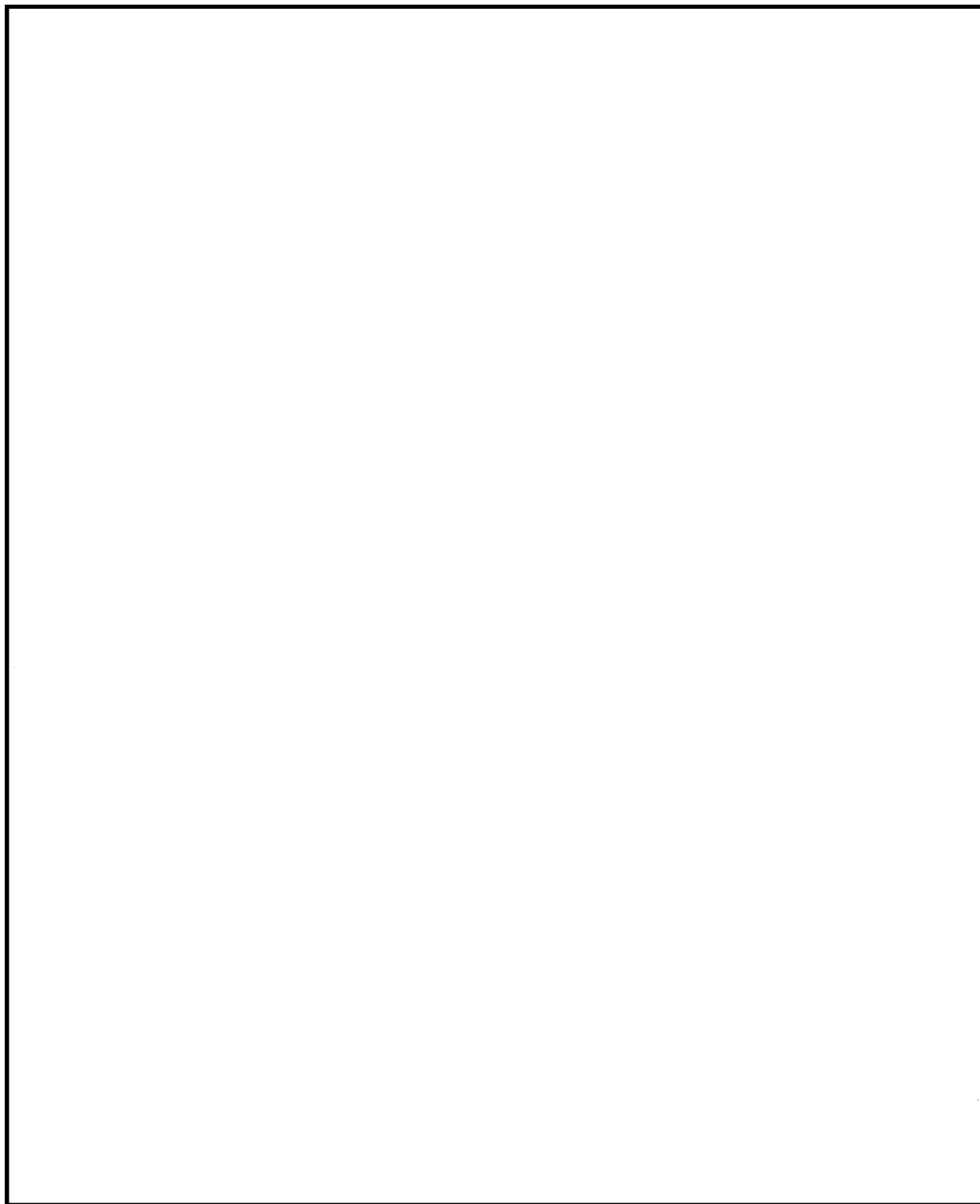


図 2-5 タービン建屋の概略断面図

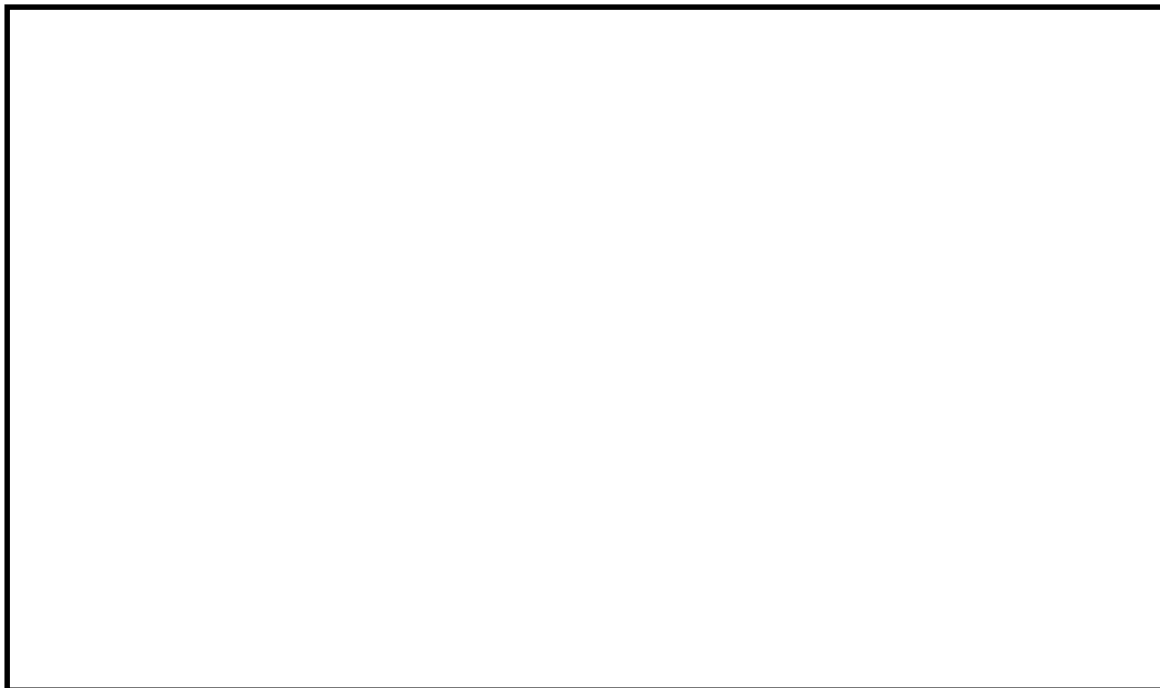


図 2-6 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略平面図

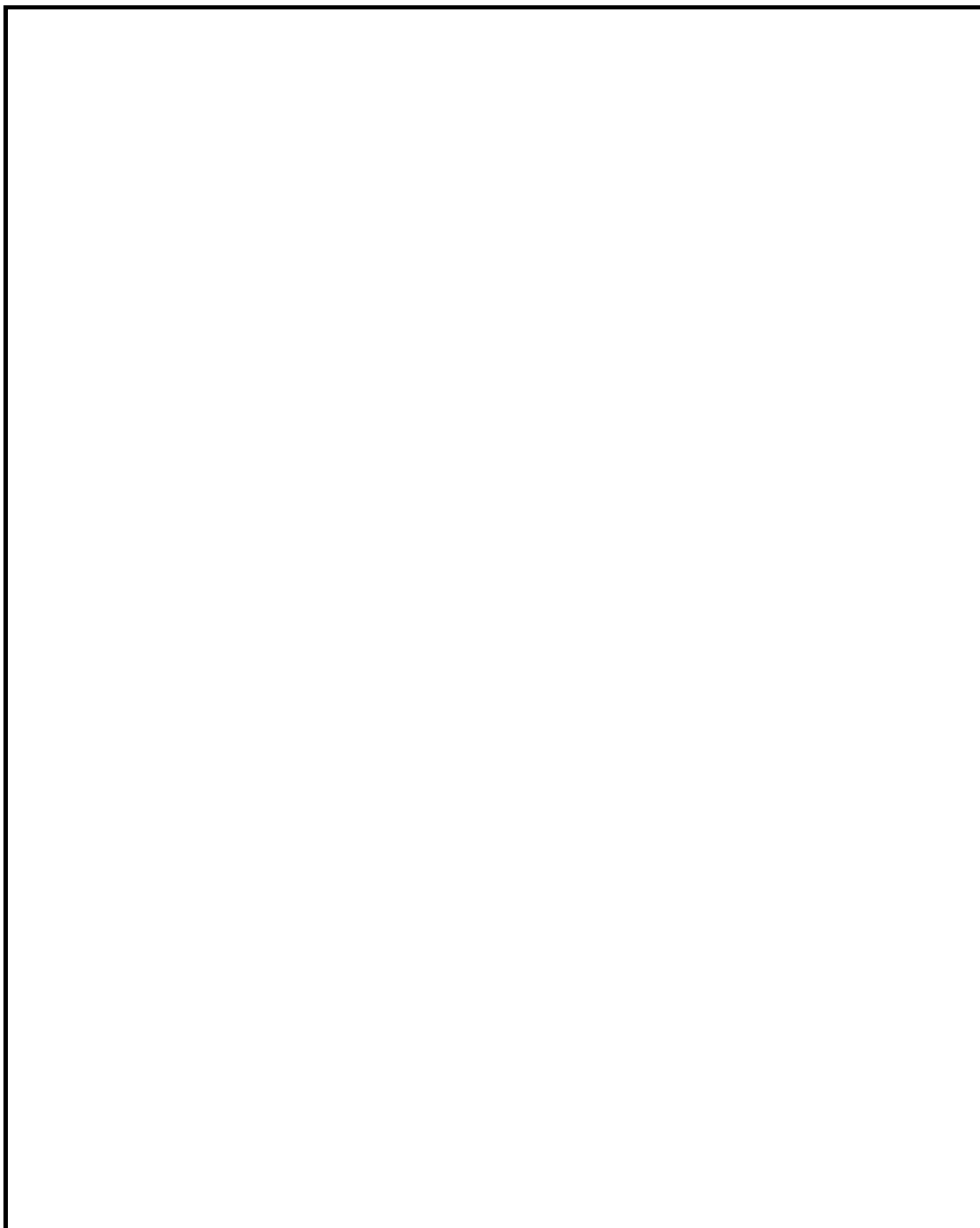


図 2-7 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略断面図



図2-8 軽油貯蔵タンクタンク室の概略平面図

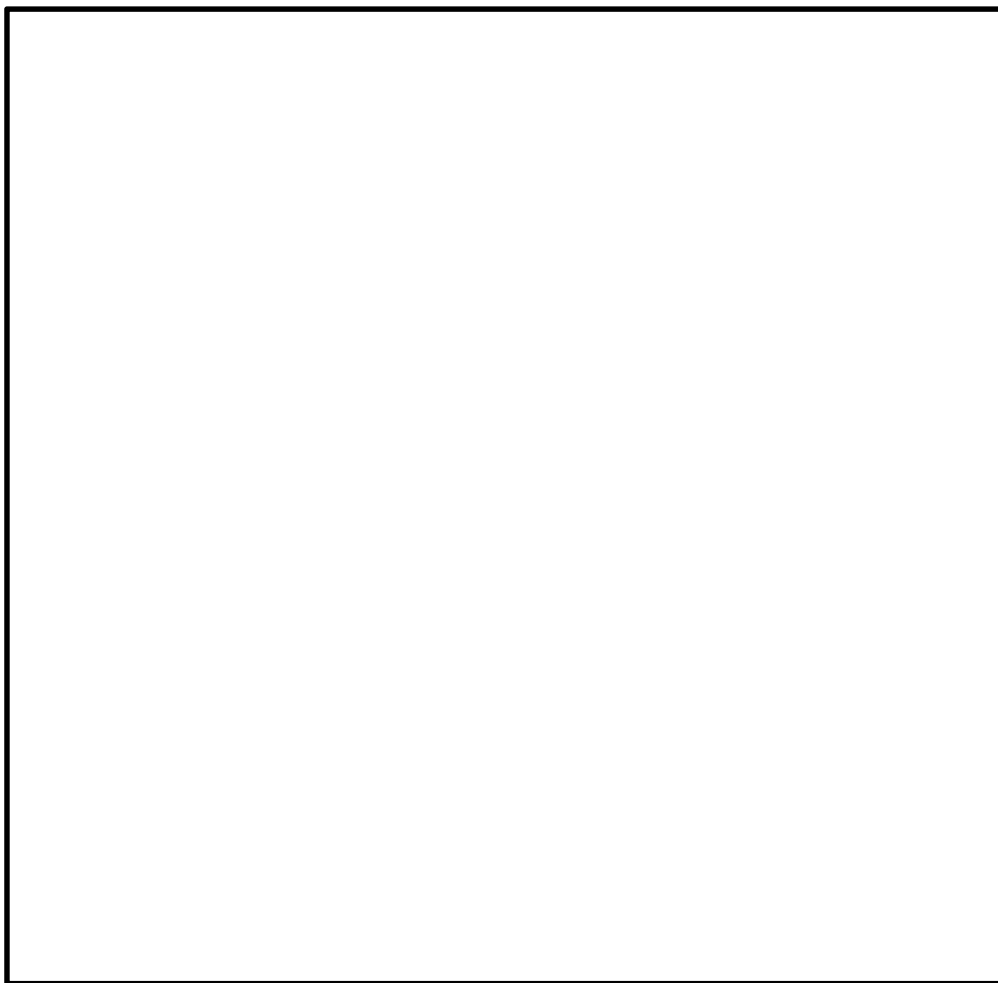


図2-9 軽油貯蔵タンクタンク室の概略断面図



図2-10 緊急時対策所の概略平面図

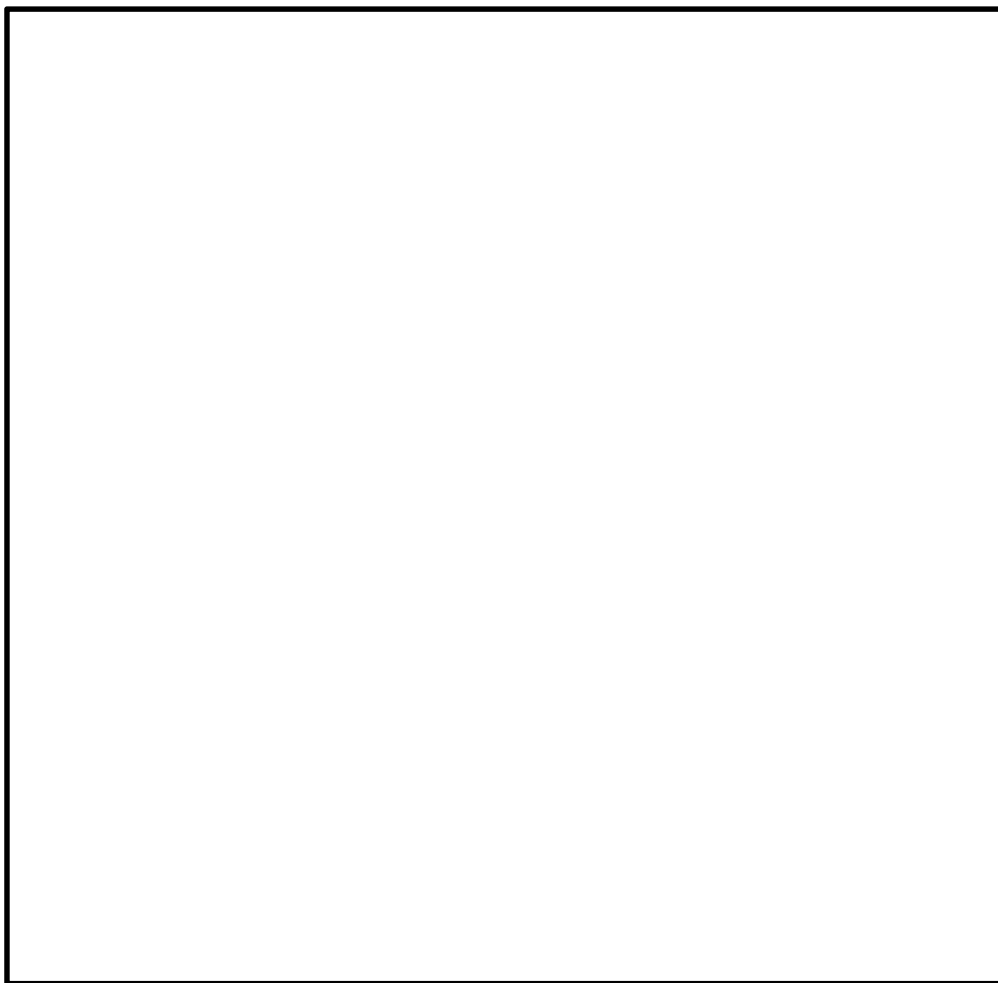


図2-11 緊急時対策所の概略断面図

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

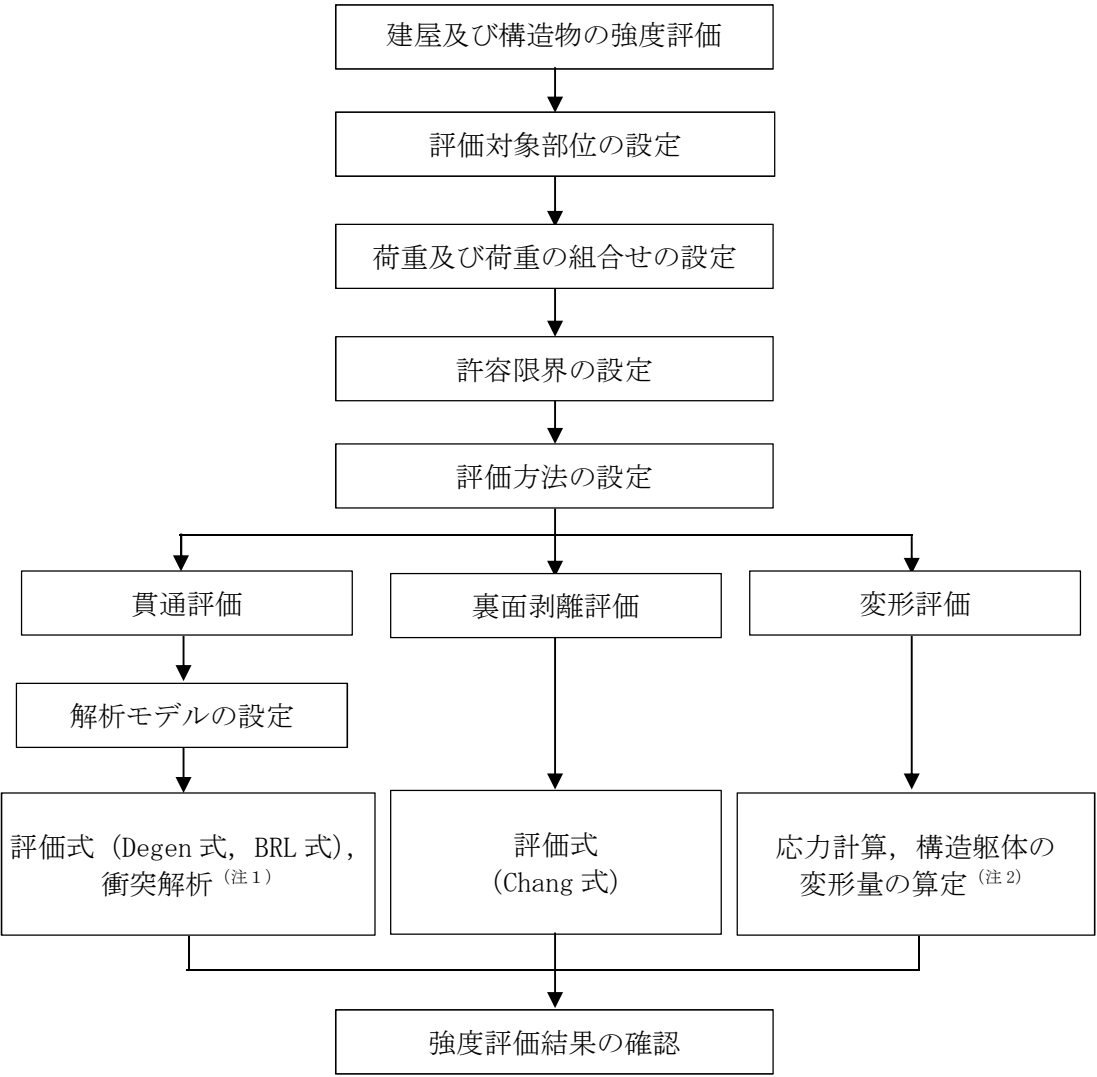
飛来物による衝撃荷重に対し、竜巻より防護すべき施設に波及的影響を与えないよう、防護すべき施設の外殻を構成する部材自体の脱落を生じない設計とするために、これらについて、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じないことを計算により確認する。（以下「裏面剥離評価」という。）

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3-4に示す。

表 3-1 貫通評価に用いる記号（Degen 式）

記号	単位	定義	
D	kgf/cm 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	

表 3-4 変形評価に用いる記号（水密扉）

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

3.2 評価対象部位

建屋及び構造物の評価対象部位は、別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す評価対象部位を踏まえて設定する。

3.2.1 貫通評価

(1) 建屋

設計荷重に対して、外殻を構成する部材が飛来物を貫通させないことの確認において、建屋については、屋根スラブ、外壁並びに防護すべき施設の外殻となる建屋内の部位のうちタービン建屋オペレーティングフロア床版、気体廃棄物処理系隔離弁を内包する区画の壁面並びに開口部建具のうち原子炉建屋機器搬入口扉、原子炉建屋附属棟1階電気室搬入口扉、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) R C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（**R C造部及び鉄骨造部**）、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	3.6×2.5× 8.6	5000	52	—※	・使用済燃料乾式貯蔵建屋 ・緊急時対策所

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

(4) 常時作用する荷重 (F_d)

常時作用する荷重 F_d として、自重及び上載荷重を考慮する。

3.3.2 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せは、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の、「4.1 荷重及び荷重の組合せ」を踏まえ、設計竜巻荷重及び常時作用する荷重を組み合わせる。

荷重の組合せを表 3-5 に示す。

表3-5 荷重の組合せ

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

W_M ：風圧力による荷重 W_P ：気圧差による荷重

W_M ：飛来物による衝撃荷重 F_d ：常時作用する荷重

3.4 許容限界

建屋及び構造物の許容限界は、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界を踏まえて、評価対象部位ごとに、評価内容に応じて設定する。

3.4.1 貫通評価

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

表3-6 貫通評価の許容限界（式による評価）

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

※1：屋上への車両の衝突は評価対象外（表3-4より）。

※2：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	100	300
		タービン建屋	追而	
		使用済燃料乾式貯蔵建屋	450	—※1
		軽油貯蔵タンクタンク室	追而(頂版)	—※
		緊急時対策所	追而	—※1

※1：屋上への車両の衝突は評価対象外（表3-4より）。

※2：地中の構造物のため，側壁は露出していない。

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

表3-9 裏面剥離評価の許容限界（解析による評価）

評価内容	評価対象部位	破断ひずみ
裏面剥離評価 (解析による評価)	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、RC 造の建屋全体の変形評価の許容限界は、耐震壁のせん断ひずみに関する許容限界に基づく 2000μ とする。

変形評価の許容限界を表 3-10 に示す。

表3-10 変形評価の許容限界

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

3.5 評価方法

3.5.1 貫通評価

(1) 鉄筋コンクリート造部分

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

$1.52 \leq X/d \leq 13.42$ の場合、

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

$X/d \leq 1.52$ の場合、

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

ここで、貫入深さ X は、

$X/d \leq 2.0$ の場合、

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

$2.0 \leq X/d$ の場合、

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

(2) 鋼製部

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

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

(3) 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブに対する衝突解析

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

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

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

a. 解析モデル

(a) 屋根スラブ

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

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

屋根スラブの解析モデルを図3-2，解析モデルの境界条件を表3-8に示す。

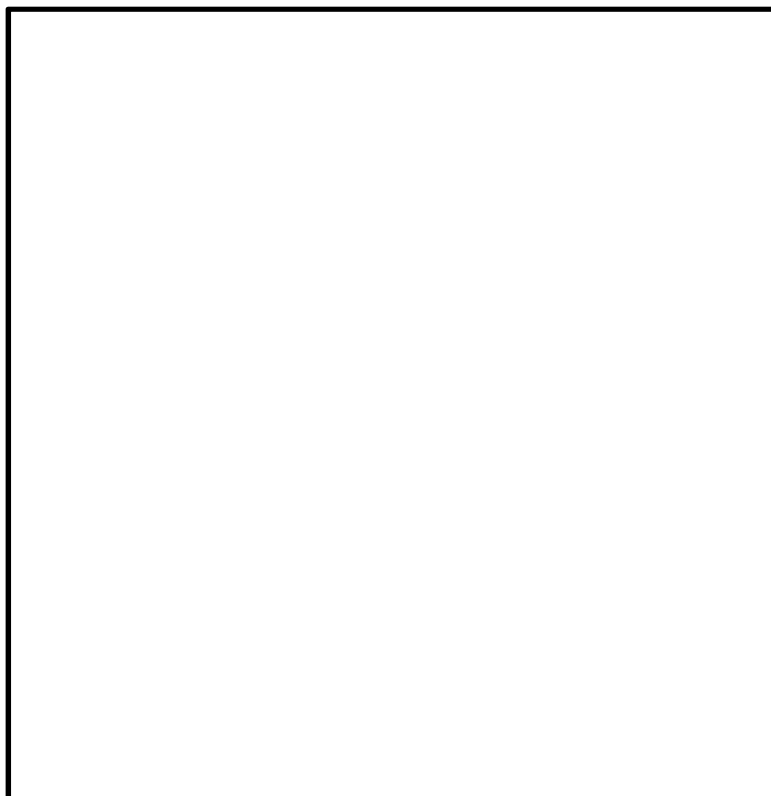


図3-1 原子炉建屋搭屋部屋根スラブモデル化範囲

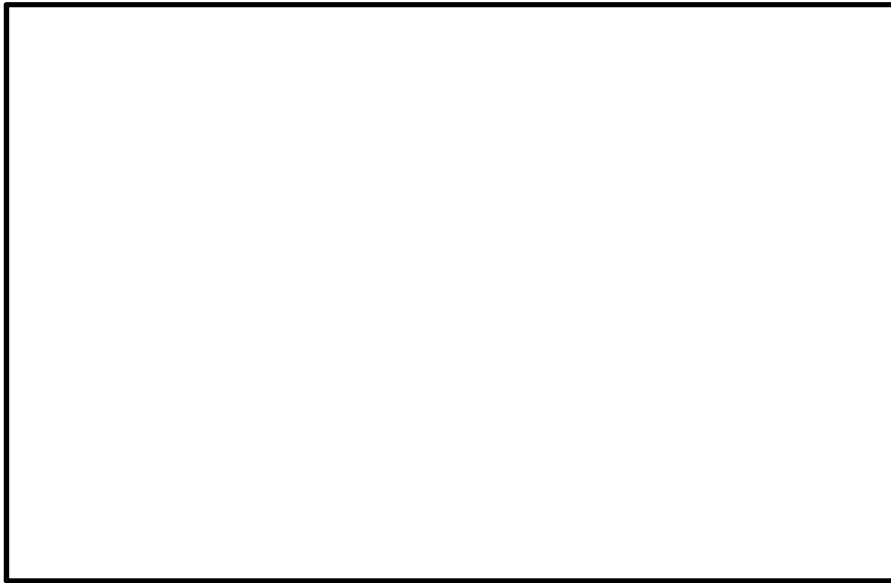


図3-2 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの解析モデル

(c) 飛来物

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

飛来物の解析モデル図を図3-3に示す。

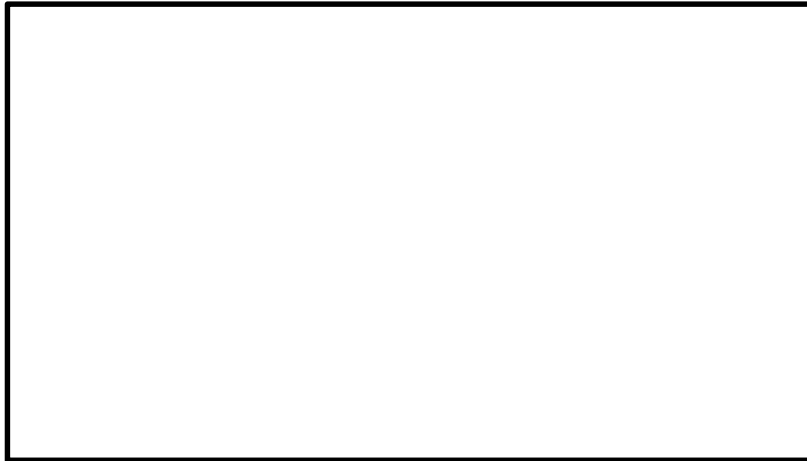


図3-5 飛来物の解析モデル図

b. 解析モデル

(a) 屋根スラブ及び外壁

コンクリートの材料定数を表3-11，鉄筋の材料定数を表3-12に示す。

表3-11 コンクリートの材料定数

コンクリート 種類	設計基準強度 F_c (N/mm^2)	ヤング係数 E (N/mm^2)	ポアソン比 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。

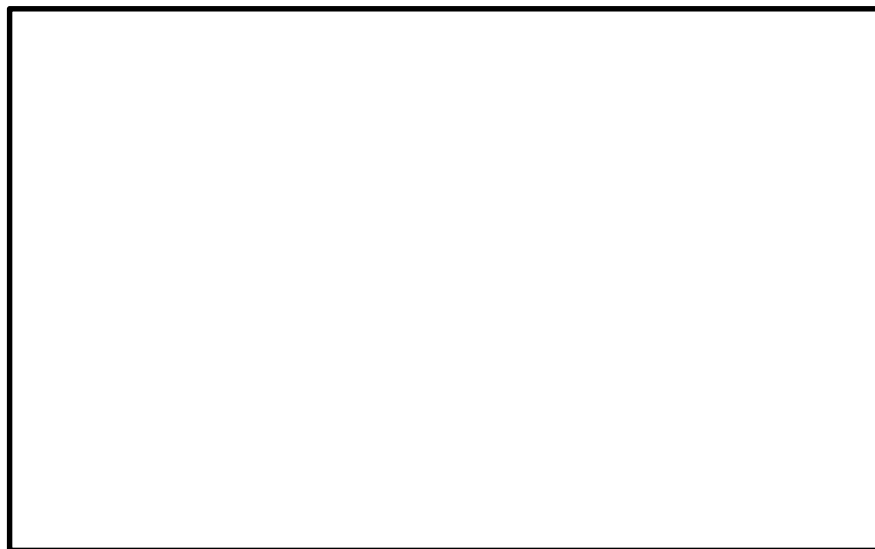


図3-6 真応力－真ひずみ関係（コンクリート）



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

原子炉建屋（RC構造部）、タービン建屋、使用済燃料乾式貯蔵建屋及び緊急時対策所の変位は、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-γ）関係より算定する。

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

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

原子炉建屋，タービン建屋，使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデルを図3-8から図3-10に， $Q - \gamma$ 関係を表3-14から表3-16に示す。

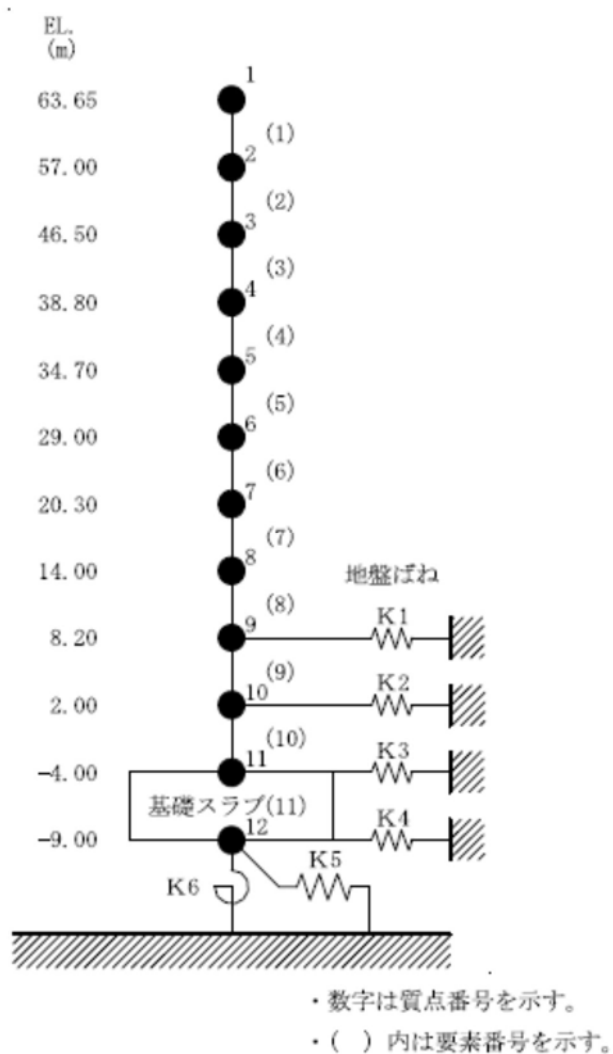
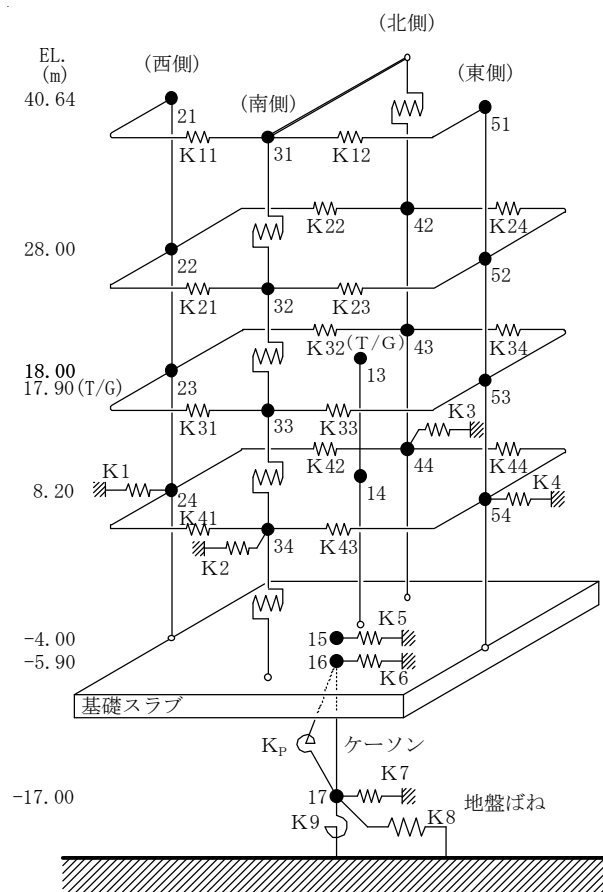


図3-8 原子炉建屋の地震応答解析モデル



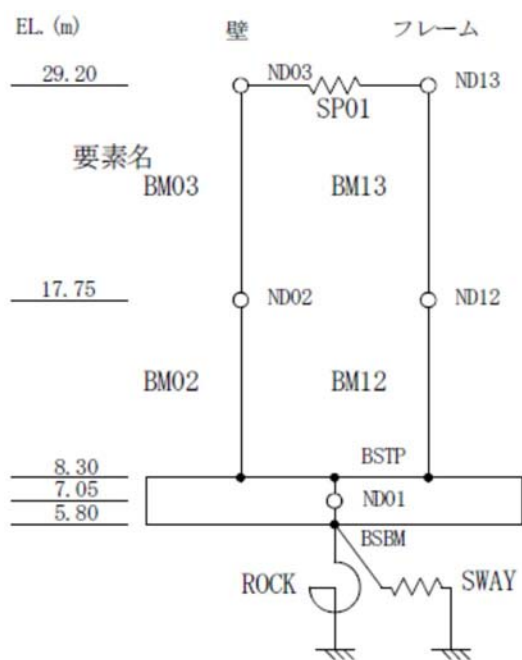
追而

(EW方向)

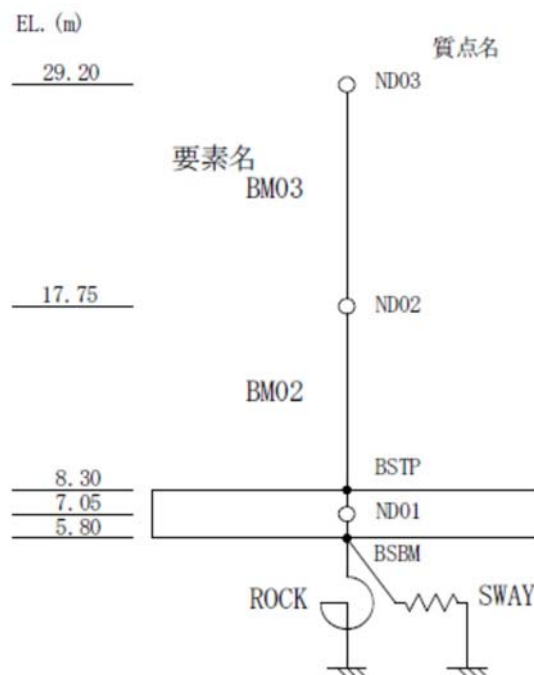


(NS方向)

図3-9 タービン建屋の地震応答解析モデル



(EW方向)



(NS方向)

図3-10 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデル

表3-14 原子炉建屋のQ- γ 関係

(a) NS方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 Q_1	第2折点 Q_2	終局点 Q_3	第1折点 γ_1	第2折点 γ_2	終局点 γ_3
(m)	-	(kN)			$(\times 10^{-3} \text{ (-)})$		
63.65 ~ 57.00	1	4.37E+04	5.90E+04	1.24E+05	0.174	0.522	4.0
57.00 ~ 46.50	2	4.67E+04	6.31E+04	1.26E+05	0.185	0.555	4.0
46.50 ~ 38.80	3	3.37E+05	4.56E+05	9.29E+05	0.173	0.519	4.0
38.80 ~ 34.70	4	1.78E+05	2.41E+05	5.55E+05	0.145	0.435	4.0
34.70 ~ 29.00	5	1.83E+05	2.47E+05	5.59E+05	0.139	0.417	4.0
29.00 ~ 20.30	6	3.20E+05	4.32E+05	9.29E+05	0.159	0.477	4.0
20.30 ~ 14.00	7	3.90E+05	5.25E+05	1.18E+06	0.174	0.522	4.0
14.00 ~ 8.20	8	6.62E+05	8.94E+05	1.68E+06	0.183	0.549	4.0

(b) EW方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 Q_1	第2折点 Q_2	終局点 Q_3	第1折点 γ_1	第2折点 γ_2	終局点 γ_3
(m)	-	(kN)			$(\times 10^{-3} \text{ (-)})$		
63.65 ~ 57.00	1	4.08E+04	5.51E+04	1.16E+05	0.174	0.522	4.000
57.00 ~ 46.50	2	4.36E+04	5.89E+04	1.18E+05	0.185	0.555	4.000
46.50 ~ 38.80	3	2.46E+05	3.33E+05	7.13E+05	0.173	0.519	4.000
38.80 ~ 34.70	4	2.10E+05	2.83E+05	6.20E+05	0.162	0.486	4.000
34.70 ~ 29.00	5	2.17E+05	2.93E+05	6.26E+05	0.151	0.453	4.000
29.00 ~ 20.30	6	3.10E+05	4.19E+05	8.82E+05	0.143	0.429	4.000
20.30 ~ 14.00	7	3.56E+05	4.82E+05	1.02E+06	0.172	0.516	4.000
14.00 ~ 8.20	8	5.80E+05	7.83E+05	1.56E+06	0.182	0.546	4.000

表3-15 タービン建屋のQ- γ 関係

(a) NS方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 Q_1	第2折点 Q_2	終局点 Q_3	第1折点 γ_1	第2折点 γ_2	終局点 γ_3
(m)	-	(kN)			$(\times 10^{-3} \text{ (-)})$		
40.64 ~ 28.00	1	6.32E+04	8.54E+04	1.18E+05	0.176	0.528	4.000
28.00 ~ 18.00	2	1.84E+05	2.51E+05	3.21E+05	0.228	0.684	4.000
18.00 ~ 8.20	3	4.54E+05	6.26E+05	8.18E+05	0.233	0.699	4.000

(b) EW方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 Q_1	第2折点 Q_2	終局点 Q_3	第1折点 γ_1	第2折点 γ_2	終局点 γ_3
(m)	-	(kN)			$(\times 10^{-3} \text{ (-)})$		
40.64 ~ 28.00	1	1.03E+05	1.39E+05	2.37E+05	0.176	0.528	4.000
28.00 ~ 18.00	2	2.09E+05	2.91E+05	4.39E+05	0.213	0.639	4.000
18.00 ~ 8.20	3	3.82E+05	5.24E+05	7.58E+05	0.230	0.690	4.000

表3-16 使用済燃料乾式貯蔵建屋のQ- γ 関係

(a) NS方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 Q_1	第2折点 Q_2	終局点 Q_3	第1折点 γ_1	第2折点 γ_2	終局点 γ_3
(m)	-	(kN)			$(\times 10^{-3} \text{ (-)})$		
29.20 ~ 17.75	BM03	4.50E+04	6.07E+04	1.36E+05	0.198	0.594	4.0
17.75 ~ 8.30	BM02	6.05E+04	8.15E+04	1.56E+05	0.214	0.642	4.0

(b) EW方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 Q_1	第2折点 Q_2	終局点 Q_3	第1折点 γ_1	第2折点 γ_2	終局点 γ_3
(m)	-	(kN)			$(\times 10^{-3} \text{ (-)})$		
29.20 ~ 17.75	BM03	4.19E+04	5.66E+04	1.14E+05	0.191	0.573	4.0
17.75 ~ 8.30	BM02	6.19E+04	8.37E+04	1.62E+05	0.197	0.590	4.0

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

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

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

(2) 原子炉建屋（鉄骨構造部）

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

(3) 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ

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

原子炉建屋原子炉棟屋根スラブは、鉄骨はりにスタッドを介して接続しているため、はり位置を支持点とした一方向版とし、両端の固定条件はピンとして評価する。スタッドに作用する引張力は、単位幅の屋根スラブに生じるせん断力を当該範囲のスタッドが均等に負担するものとして評価する。

屋根スラブの発生曲げモーメント M 及び発生せん断力 Q 並びにスタッドの発生引張力 T の算定式を以下に示す。また、屋根スラブに作用する荷重の概要を図3-11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

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

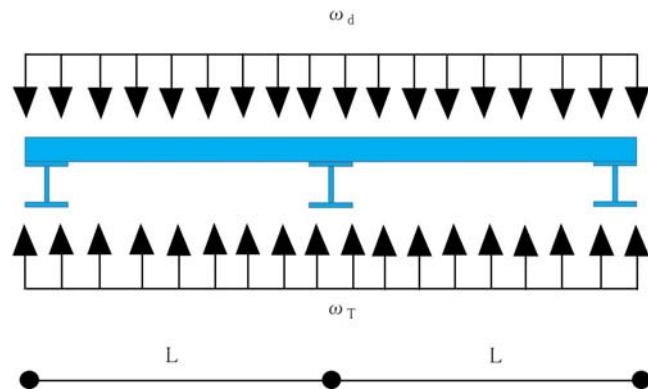


図3-11 屋根スラブに作用する荷重の概要

許容限界である終局強度については、「RC規準」に基づき算定する。

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

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

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

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

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

(4) 水密扉

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

a. 応力評価

下記の水密扉を評価対象とする。

- ・ 原子炉建屋大物搬入口扉のうち原子炉建屋原子炉棟水密扉
- ・ 原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉
- ・ 原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)

カンヌキ部（カンヌキ、カンヌキ受けピン及びカンヌキ受けボルト）に作用する荷重、発生曲げモーメント M 、発生せん断力 Q 及び発生引張力 T の算定式を以下に示す。

(a) カンヌキ部に生じる荷重

カンヌキ部に生じる荷重は気圧差による荷重 W_P をカンヌキ部 n 箇所で負担した場合に発生する反力 R_P から算定する。カンヌキ部に生じる荷重を図3-12に示

す。

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

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

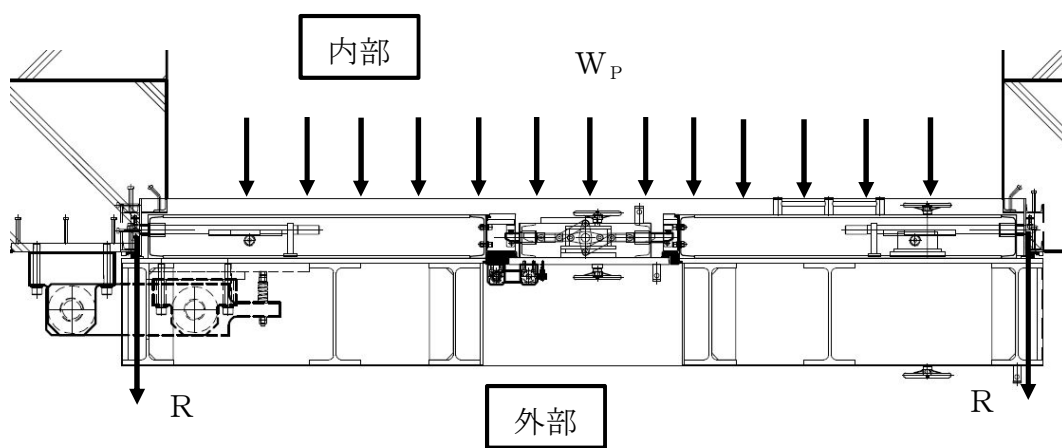


図3-12 カンヌキ部に生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉)

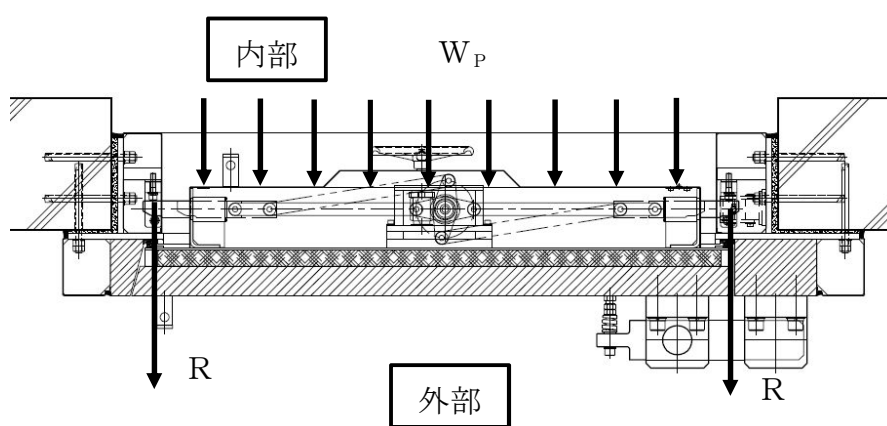


図3-13 カンヌキ部に生じる荷重(電気室搬入口水密扉)

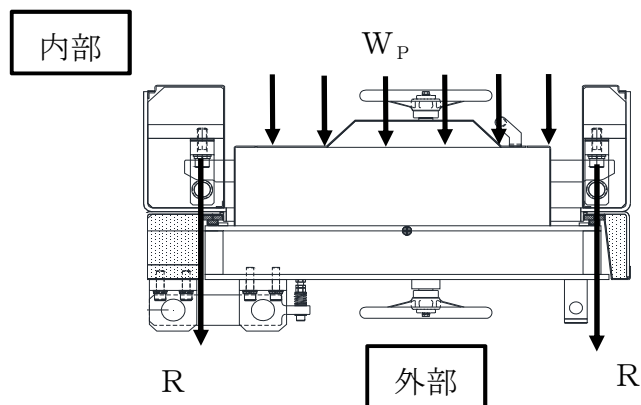


図3-14 カンヌキ部に生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸))

イ. カンヌキ

カンヌキに生じる曲げモーメント M_k 及びせん断力 Q_k は次式により算定する。
カンヌキに生じる荷重を図3-15～図3-17に示す。

$$M_k = R \cdot L_k$$

$$Q_k = R$$

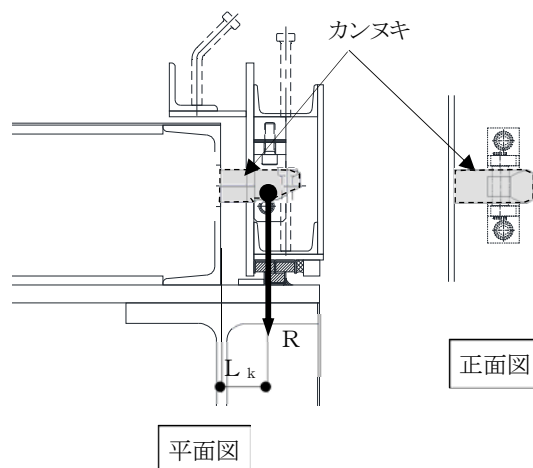


図3-15 カンヌキに生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉)

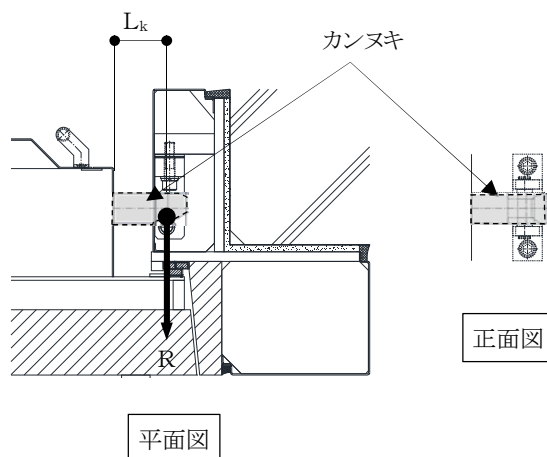


図3-16 カンヌキに生じる荷重(電気室搬入口水密扉)

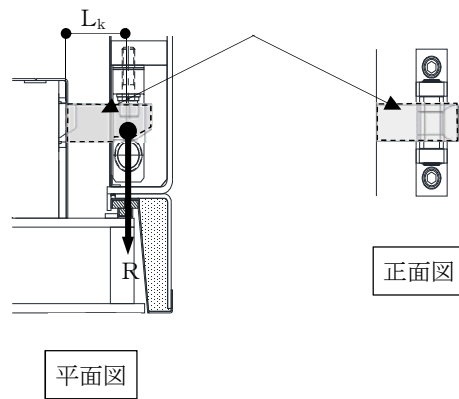


図3-17 カンヌキに生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸))

ロ. カンヌキ受けピン

カンヌキ受けピンに生じる曲げモーメント M_p とせん断力 Q_p は次式により算定する。カンヌキ受けピンに生じる荷重を図3-18～図3-20に示す。

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

$$Q_p = R$$

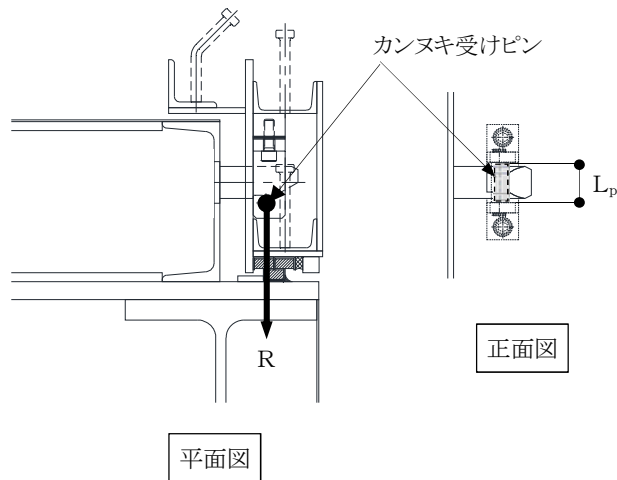


図3-18 カンヌキ受けピンに生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉)

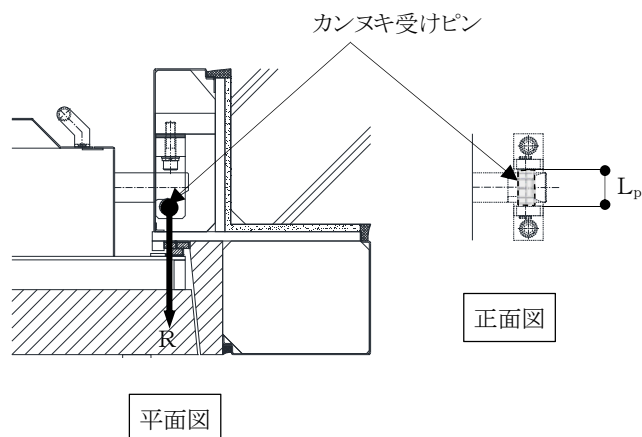


図3-19 カンヌキ受けピンに生じる荷重(電気室搬入口水密扉)

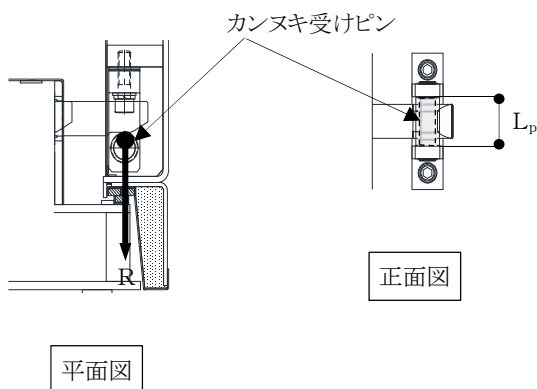


図3-20 カンヌキ受けピンに生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸))
ハ. カンヌキ受けボルト

カンヌキ受けボルトに生じる引張力 T は次式により算定する。カンヌキ受けボルトに生じる荷重を図3-21～図3-23に示す。

$$T = R$$

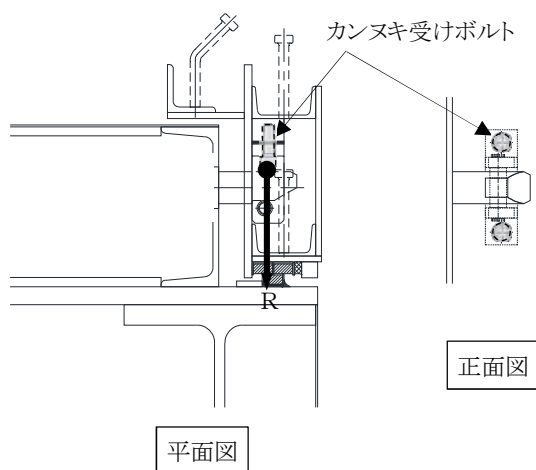


図3-21 カンヌキ受けボルトに生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉)

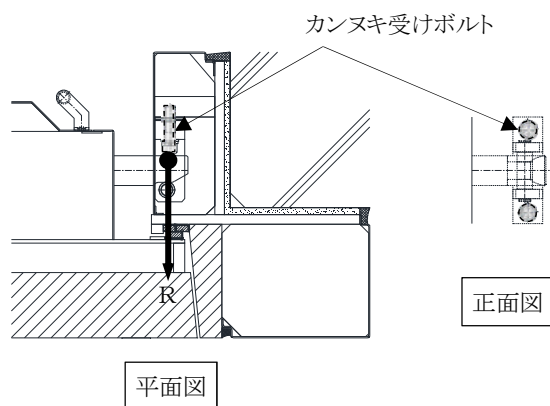


図3-22 カンヌキ受けボルトに生じる荷重(電気室搬入口水密扉)



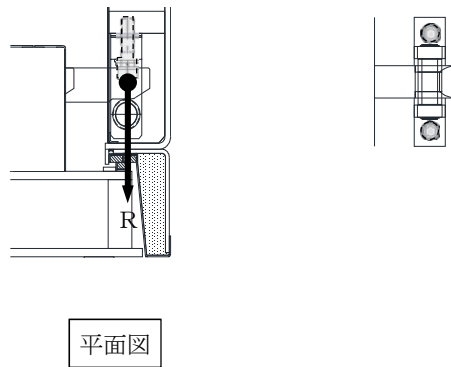


図3-23 カンヌキ受けボルトに生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸))

b. 断面検定

各部材に生じる応力より算定する応力度が許容限界以下であることを確認する。なお、異なる荷重が同時に作用する部材については、組合せを考慮する。

評価対象部位の許容限界を表3-17に示す。

(a) カンヌキ

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

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

(b) カンヌキ受けピン

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

$$\sigma_b = M_p / Z_p$$

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

(c) カンヌキ受けボルト

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

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

表3-17 評価対象部位の許容限界

評価対象部材			材質	許容限界値 (kN/mm ²)	
				曲げ・引張	せん断
原子炉建屋原子炉棟 水密扉	カンヌキ部	カンヌキ	SUS304	205	—
		カンヌキ受けピン	SCM440	686	396
		カンヌキ受けボルト	SCM435	651	—
原子炉建屋1階電気 室搬入口水密扉	カンヌキ部	カンヌキ	SUS304	205	—
		カンヌキ受けピン	SCM440	686	396
		カンヌキ受けボルト	SCM435	651	—
原子炉建屋原子炉棟 水密扉(潜戸)	カンヌキ部	カンヌキ	SUS304	205	—
		カンヌキ受けピン	S45C	345	199
		カンヌキ受けボルト	SCM435	651	—

4. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を、以下に示す。

4.1 貫通評価

4.1.1 鉄筋コンクリート造部

鉄筋コンクリート造部の貫通評価に用いる条件を表4-1に示す。

表4-1 貫通評価に用いる入力値（鉄筋コンクリート造部）

記号	記号の説明		数値		単位
α_e	低減係数	鋼製材	1.0		—
		乗用車	追而		—
d	飛来物直径	鋼製材	27.6		cm
		乗用車	追而		cm
F_c	コンクリートの設計基準強度		追而		kgf/cm ²
N	飛来物の形状係数	鋼製材	1.14		—
		乗用車	追而		—
D	飛来物直径密度 W/d^3	鋼製材	6.42E-03		kgf/cm ³
		乗用車	追而		kgf/cm ³
W	飛来物重量	鋼製材	135		kgf
		乗用車	追而		kgf
V	飛来物の衝突速度	鋼製材	水平	51	m/s
			鉛直	34	
		乗用車	水平	追而	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	

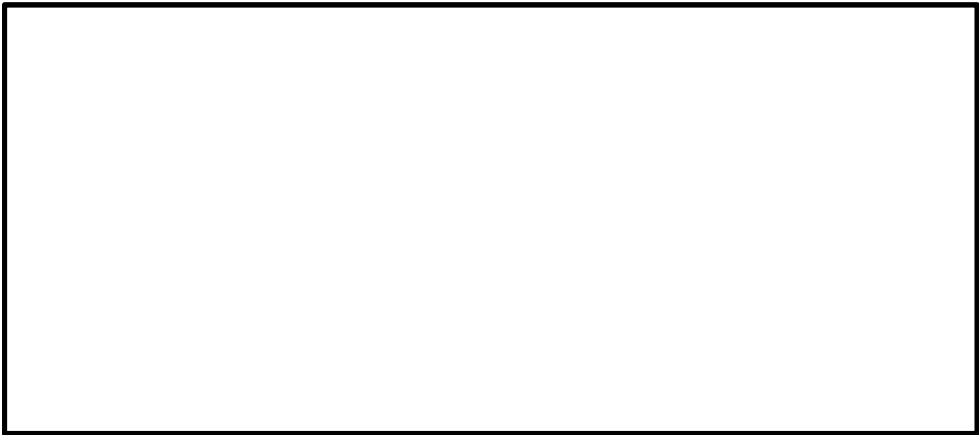


図4-1 解析ケース図

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	1.0		—
		乗用車			
V_0	飛来物基準速度	鋼製材	追而		m/s
		乗用車			
d	飛来物直径	鋼製材	27.6		cm
		乗用車	追而		
f_c'	コンクリートの設計基準強度		追而		kgf/cm ²
W	飛来物重量	鋼製材	135		kgf
		乗用車	追而		
V	飛来物の衝突速度	鋼製材	水平	51	m/s
			鉛直	34	
		乗用車	水平	追而	
			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 (1/2) (RC構造部)

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

※1：風下側の係数は、風上側と同じ向きを正とする。

表4-4 原子炉建屋変形評価の評価条件 (2/2) (鉄骨造部分)

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※1	受圧面積	
				N－S方向	E－W方向
1	40.64	風上	0.8	1408	585
		風下	0.4		
2	28.00	風上	0.8	1129	733
		風下	0.4		
3	18.00	風上	0.8	1034	696
		風下	0.4		

※1：風下側の係数は、風上側と同じ向きを正とする。

表4-6 使用済燃料乾式貯蔵建屋変形評価の評価条件

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

※1：風下側の係数は，風上側と同じ向きを正とする。

表4-7 緊急時対策所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の変形評価の評価条件

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

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

表4-9 原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉の変形評価の評価条件

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

(5) その他の外殻となる扉

a. 原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)

原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)の変形評価に用いる条件を表4-10に示す。

表4-10 原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)の変形評価の評価条件

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

5. 強度評価結果

5.1 貫通評価

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

表5-1 貫通評価結果(1/2) (式による評価)

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

※：表5-2(2/2)により内包する防護すべき施設への影響がないことを確認

表5-1 貫通評価結果(2/2) (解析による評価)

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

5.2 裏面剥離評価

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

表 5-2 裏面剥離評価結果(1/2) (式による評価)

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

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

表5-2 裏面剥離評価結果(2/2) (解析による評価)

評価項目		部位	飛来物	評価結果 (－)	許容限界 (－)
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) 原子炉建屋（鉄骨構造部）

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

評価項目	評価結果	許容限界
	追而	

(3) 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ

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

表5-4 変形評価結果（原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ）

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

(3) 水密扉

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

表5-5 変形評価結果

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

(注1) 曲げ及びせん断のうち評価結果が厳しい方の値を記載

V-3-別添 1-2 防護対策施設の強度計算の方針

目次

1. 概要	1
2. 強度設計の基本方針	1
2.1 対象施設	1
2.2 構造強度の設計方針	1
2.3 荷重及び荷重の組合せ	2
2.4 構造設計	8
2.5 評価方針	11
3. 防護対策施設の構成要素の設計方針	12
3.1 防護ネットの構造設計	12
3.2 防護鋼板の構造設計	15
3.3 架構の構造設計	16
4. 防護対策施設の構成要素の評価方針	18
4.1 防護ネットの評価方針	19
4.2 防護鋼板の評価方針	22
4.3 架構の評価方針	23
5. 許容限界	25
5.1 防護ネットの許容限界	25
5.1.1 許容限界の設定	25
5.1.2 許容限界の設定方法	28
5.2 防護鋼板の許容限界	34
5.2.1 衝突評価	34
5.3 架構の許容限界	34
5.3.1 衝突評価	34
5.3.2 支持機能評価，波及的影響評価	34
6. 強度評価方法	35
6.1 防護ネットの強度評価	35
7. 適用規格	52

1. 概要

本資料は、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」第7条及び「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」に適合する設計とするため、V-1-1-2「発電用原子炉施設の自然現象等による損傷の防止に関する説明書」のうちV-1-1-2-3-3「竜巻防護に関する施設の設計方針」に基づき、竜巻飛来物防護対策設備である防護対策施設が、設計竜巻に対して要求される強度を有することを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. 強度設計の基本方針

強度設計は、「2.1 対象施設」に示す施設を対象として、「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 対象施設

V-1-1-2「発電用原子炉施設の自然現象等による損傷の防止に関する説明書」のうちV-1-1-2-3-3「竜巻防護に関する施設の設計方針」の「3. 要求機能及び性能目標」に基づき、以下の防護対策施設を対象とする。

- ・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
- ・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
- ・中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設
- ・原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設
- ・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
- ・原子炉建屋排気隔離弁竜巻防護対策施設
- ・原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設

2.2 構造強度の設計方針

防護対策施設は、設置（変更）許可を受けた設計飛来物のうち鋼製材（以下「飛来物」という。）の防護対象施設への衝突を防止するものであり、V-1-1-2-3-3「竜巻防護に関する施設の設計方針」の「3.3(3) 性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ、防護ネット、防護鋼板及び架構で構成し、次に示す設計とする。

(1) 防護ネット

防護ネットは、設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、飛来物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、たわみを生じてても、防護対象施設の機能喪失に至る可能性がある飛来物が防護対象施設と衝突しないよう捕捉できる設計とする。

(2) 防護鋼板

防護鋼板は、設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対

し、飛来物が防護対象施設へ衝突することを防止するために、飛来物が防護鋼板を貫通せず、防護対象施設に波及的影響を与えない設計とする。

(3) 架構

架構は、設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、飛来物が防護対象施設へ衝突することを防止するために、飛来物が架構を構成する主要な構造部材を貫通せず、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想強度を有し、防護対象施設に波及的影響を与えないために、架構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。

2.3 荷重及び荷重の組合せ

竜巻の影響を考慮する施設の強度評価において考慮する荷重は、V-1-1-2「発電用原子炉施設の自然現象等による損傷の防止に関する説明書」のうちV-1-1-2-3-1「竜巻への配慮に関する基本方針」の「2.1.3(2) 荷重の組合せ及び許容限界」を踏まえ、以下のとおり設定する。

(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、自重及び上載荷重とする。なお、防護ネットの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(F_T)

設計竜巻（100 m/s）による荷重は、設計竜巻の特性を踏まえ、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び飛来物による衝撃荷重とする。設計竜巻の特性値を表 2-1 に示す。

- ・設計竜巻の移動速度(V_T)

$$V_T = 0.15 \cdot V_D$$

V_D ：設計竜巻の最大風速(m/s)

- ・竜巻の最大接線風速(V_{Rm})

$$V_{Rm} = V_D - V_T$$

V_T ：設計竜巻の移動速度(m/s)

- ・竜巻の最大気圧低下量(ΔP_{max})

$$\Delta P_{max} = \rho \cdot V_{Rm}^2$$

ρ ：空気密度(=1.22 kg/m³)

V_{Rm} ：設計竜巻の最大接線風速(m/s)

表 2-1 設計竜巻の特性値

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)

風圧力による荷重は、設計竜巻の最大風速による荷重である。

竜巻の風速は、一般的には水平方向の風速として算出されるが、鉛直方向の風圧力に対して脆弱と考えられる防護対象施設等が存在する場合には、鉛直方向の最大風速等に基づいて算出した鉛直方向の風圧力についても考慮する。

風圧力による荷重は、施設の形状により変化するため、施設の部位ごとに異なる。そのため、各施設及び評価対象部位に対して厳しくなる方向からの風を想定し、各施設の部位ごとに荷重を設定する。

ガスト影響係数 G は、設計竜巻の風速が最大瞬間風速をベースとしていること等から施設の形状によらず「竜巻影響評価ガイド」を参照して、 $G=1.0$ とする。空気密度 ρ は「建築物荷重指針・同解説」（社）日本建築学会（2004改定）より $\rho=1.22 \text{ kg/m}^3$ とする。

設計用速度圧 q については、施設の形状によらず $q=6100 \text{ N/m}^2$ とする。

(b) 気圧差による荷重(W_p)

外気と隔離されている区画の境界部など、気圧差による圧力影響を受ける施設の建屋壁、屋根等においては、設計竜巻による気圧低下によって生じる施設等の内外の気圧差による荷重が発生する。閉じた施設（通気がない施設）については、この圧力差により閉じた施設の隔壁に外向きに作用する圧力が生じるとみなし、気圧差による荷重を設定することを基本としているが、防護対策施設は外気と通じており、施設の外殻に面する部材に気圧差は生じないことから考慮しない。

(c) 飛来物による衝撃荷重(W_M)

衝突による影響が大きくなる向きで飛来物が防護対象施設等に衝突した場合の衝撃荷重を算出する。

衝突評価においても、飛来物の衝突による影響が大きくなる向きで衝突することを考慮して評価を行う。

飛来物の飛来速度及び諸元を表 2-2 に示す。

表 2-2 飛来物の諸元

	鋼製材	砂利
寸法 (m)	$4.2 \times 0.3 \times 0.2$	$0.04 \times 0.04 \times 0.04$
質量 (kg)	135	0.18
水平方向の飛来速度 (m/s)	51	62
鉛直方向の飛来速度 (m/s)	34	42

c. 運転時に作用する荷重 (F_p)

運転時の状態で作用する荷重は、配管等に作用する内圧等であり、防護対策施設には作用しないため考慮しない。

(2) 荷重の組合せ

竜巻の影響を考慮する施設の設計に用いる竜巻の荷重は、気圧差による荷重(W_P)を考慮した複合荷重(W_{T1})，設計竜巻の風圧力による荷重(W_W)，気圧差による荷重(W_P)及び飛来物による衝撃荷重(W_M)を組み合わせた複合荷重(W_{T2})を以下のとおり設定する。

$$W_{T1} = W_P$$

$$W_{T2} = W_W + 0.5 \cdot W_P + W_M$$

竜巻の影響を考慮する施設には、 W_{T1} 及び W_{T2} の両荷重をそれぞれ作用させる。各施設の設計竜巻による荷重の組合せについては、施設の設置状況及び構造を踏まえ、適切な組合せを設定する。防護対策施設の構成要素別の荷重の組合せを、表 2-3 に示す。

表 2-3 防護対策施設の構成要素別の荷重の組合せ

分類	強度設計の対象施設		評価内容	荷重					
				常時作用する荷重 (F_d)		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)	運転時の 状態で 作用する 荷重 (F_P)
				自重	上載 荷重				
防 護 対 策 施 設	防護 ネット	上面	構造 強度	○	○	— (注1)	— (注2)	○	—
		側面		— (注3)	—	○	— (注2)	○	—
	防護 鋼板	上面	構造 強度	○	○	— (注1)	— (注2)	○	—
		側面		— (注3)	—	○	— (注2)	○	—
	架構		構造 強度	○	○ (注4)	—	— (注2)	○	—

(注1) 水平設置の防護ネット及び防護鋼板であるため、風荷重は考慮しない。

(注2) 外気と通じており、気圧差は生じない。

(注3) 鉛直設置の防護ネット及び防護鋼板であるため、自重は考慮しない。

(注4) 防護ネット及び防護鋼板に作用する風圧力による荷重及び飛来物による衝撃荷重を含む。

(3) 荷重の算定方法

「(1) 荷重の種類」で設定している荷重の算出式を以下に示す。

a. 記号の定義

防護ネットの部材の評価における荷重算出に用いる記号を，表 2-4 に示す。

表 2-4 防護ネットの部材の評価における荷重算出に用いる記号

記号	単位	定義
A	m ²	防護ネット又は防護鋼板の受圧面積
A _a	m ²	ネットの面積
C	—	風力係数（施設の形状や風圧力が作用する部位（屋根，壁等）に応じて設定する。）
d	m	設計飛来物衝突時の設計飛来物の移動距離
E _f	kJ	設計飛来物が衝突しネットのたわみ量が最大になる時間にネットに作用するエネルギー
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衝撃荷重
G	—	ガスト影響係数
g	m/s ²	重力加速度（g = 9.80665）
L ₁	m	ネットの展開方向の実寸法
L ₂	m	ネットの展開直角方向の実寸法
m	kg	設計飛来物の質量
m _N	kg/m ²	ネットの単位質量
n	枚	ネットの設置枚数
P _w	kN	ネットの自重及び上載荷重により作用する荷重
Q	kN/s	衝撃荷重が時間とともに比例する際の比例係数
q	Pa	設計用速度圧
t	s	時間
t ₁	s	設計飛来物が衝突しネットのたわみ量が最大になる時間
V	m/s	設計飛来物の移動速度
V ₁	m/s	設計飛来物衝突時の速度
V _D	m/s	設計竜巻の最大風速
W _w	kN	風圧力による荷重
δ	m	設計飛来物衝突時のネットの最大たわみ量
ρ	kg/m ³	空気密度
φ	—	ネットの充実率

b. 自重による荷重の算出

防護ネット及び防護鋼板に常時作用する荷重として、自重を考慮する。自重により作用する荷重は、ネット等の設置方向を考慮する。水平設置の場合は、鉛直下向きに発生するものとして評価する。鉛直設置の場合は、自重と飛来物の衝撃荷重の作用する方向が異なることから考慮しない。

防護ネットにおいては、機械工学便覧を参考にすると、自重による荷重 P_w は、

$$\text{水平方向設置 } P_w = \frac{A_a \cdot m_N \cdot g \cdot n}{1000}$$

と算出される。

A_a はネットの実寸法 L_1 、 L_2 を用いて、以下の式で求められる。

$$A_a = L_1 \cdot L_2$$

c. 竜巻による荷重の算出

(a) 風圧力による荷重 (W_w)

風圧力による荷重は、「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、次式のとおり算出する。

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

$$\text{ここで, } q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_D^2$$

防護ネットにおいては、ネットの充実率を ϕ とすると、風圧力による荷重を受けるネットの受圧面積 A は次式のとおりとなる。

$$A = \phi \cdot A_a$$

d. 飛来物による衝撃荷重の算出

防護ネットにおいて、ネットと設計飛来物による衝撃荷重 F_a'' は時間とともに比例して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。

$$F_a'' = Q \cdot t \quad \dots (2.1)$$

従って、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。

$$\begin{aligned} V &= -\frac{1}{m} \int_0^t F_a'' dt \\ &= \frac{Q \cdot t^2}{2 \cdot m} + V_1 \cdot t \quad \dots (2.2) \end{aligned}$$

さらに、設計飛来物の移動距離 d は、(2.2) 式の数値 V から以下のとおり算出される。

$$\begin{aligned} d &= \int_0^t V dt \\ &= \frac{Q \cdot t^3}{6 \cdot m} + V_1 \cdot t \quad \dots (2.3) \end{aligned}$$

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 におけるネットの最大変位 δ は、設計飛来物の速度は $V=0$ であるから、(2.2)、(2.3) 式より、

$$Q \cdot t_1^2 = 2 \cdot m \cdot V_1 \quad \dots (2.4)$$

$$\delta = -\frac{Q \cdot t_1^3}{6 \cdot m} + V_1 \cdot t_1$$

上記2式を連立し、

$$\delta = \frac{2}{3} V_1 \cdot t_1$$

よって、

$$t_1 = \frac{3}{2 \cdot V_1} \cdot \delta \quad \dots (2.5)$$

以上より、時間 t_1 における設計飛来物による衝撃荷重 F_a は (2.1)、(2.4) 式より、

$$F_a = \frac{2 \cdot m \cdot V_1}{t_1}$$

さらに、(2.5) 式と連立し、

$$F_a = \frac{4 \cdot m \cdot V_1^2}{3 \cdot \delta} \quad \dots (2.6)$$

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 をとしては、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。

$$E_f = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_1^2 \quad \dots (2.7)$$

従って、(2.6)、(2.7) 式より、

$$F_a = \frac{8 \cdot E_f}{3 \cdot \delta} \quad \dots (2.8)$$

(2.8) 式にたわみ評価で算出する設計飛来物が衝突する場合のネットの最大たわみ量 δ を代入し、 F_a を算出する。

2.4 構造設計

防護対策施設は、「2.2 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及び「2.3 荷重及び荷重の組合せ」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

- (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、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及び原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設

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は、防護ネット、防護鋼板及び架構で構成し、防護対象施設を取り囲むように設置することで、飛来物が防護対象施設へ衝突することを防止し、防護対象施設と構成部材（防護ネット、防護鋼板及び架構を

構成する部材)の離隔を確保することなどにより、構成部材にたわみ及び変形が生じたとしても、防護対象施設に飛来物を衝突させない構造とする。また、海水ポンプ室躯体または原子炉建屋躯体に支持する構造とする。

防護ネットは鋼製のネット、ワイヤロープ、接統治具(支持部、固定部)、鋼製枠を主体構造とし、接統ボルトを用いて架構により支持する。鋼製ネットに作用する飛来物による衝撃荷重、風圧力による荷重及びその他の荷重はワイヤロープ、接統治具(支持部、固定部)を介して鋼製枠に伝達し、鋼製枠から架構を介して支持躯体に伝達する構造とする。

鋼製ネットは、らせん状の硬鋼線を3次的に編み込み、編み込みの方向によって荷重を受け持つ展開方向と展開直角方向の異方性を持ち、架構の配置、鋼製ネットに作用する荷重及び防護対象施設との離隔に応じて、鋼製ネットの展開方向と展開直角方向の長さの比を考慮して、鋼製枠内に複数枚を重ねて設置する構造とする。また、鋼製ネットに飛来物が衝突した際、ワイヤロープに瞬間的な荷重が作用するのを防ぐため、鋼製枠の四隅には緩衝材を設置する設計とする。防護ネットの構造計画を表2-5に示す。

防護鋼板は、設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、飛来物が防護対象施設へ衝突することを防止するために、飛来物が防護鋼板を貫通せず、防護対象施設に波及的影響を与えない設計とする。

防護ネット及び防護鋼板を支持する架構は、H形鋼等より構成され、施設の外壳に作用する荷重並びに上載する防護ネット及び防護鋼板からの荷重を支持する構造とする。また、架構に作用する荷重は、アンカーボルトを介して、海水ポンプ室躯体または原子炉建屋躯体に伝達する構造とする。

表 2-5 防護ネット及び防護鋼板の構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
防護ネット	防護ネットは、鋼製のネット、ワイヤロープ、接続治具（支持部、固定部）及び鋼製枠で構成する。	接続ボルトを用いて、架構により支持し、架構を介して鉄筋コンクリート造の海水ポンプ室躯体または原子炉建屋躯体に伝達する構造とする。	

(2) 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設

中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設、原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設及び原子炉建屋排気隔離弁竜巻防護対策施設は、防護鋼板及び架構で構成し、飛来物が侵入した場合に防護対象施設に衝突する可能性のある原子炉建屋付属棟壁面の開口部を取り囲むように設置することで、飛来物が建屋内に侵入することを防止し、建屋外壁と防護鋼板の離隔を確保することなどにより、防護鋼板にたわみ及び変形が生じたとしても、防護対象施設に飛来物を衝突させない構造とする。また、防護鋼板は架構を介して、鉄筋コンクリート造の原子建屋付属棟躯体に支持する構造とする。

防護鋼板を支持する架構は、H形鋼等から構成され、施設の外殻に作用する荷重及び上載する防護鋼板からの荷重を支持する構造とする。また、架構に作用する荷重は、アンカーボルトを介して、鉄筋コンクリート造の原子炉建屋付属棟躯体に伝達する構造とする。

(3) 原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設

原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設は、防護鋼板で構成し、飛来物が侵入した場合に防護対象施設に衝突する可能性のある原子炉建屋開口閉鎖部の開口部を取り囲むように設置することで、飛来物が建屋内に侵入することを防止し、防護対象施設と防護鋼板の離隔を確保することなどにより、防護鋼板にたわみ及び変形が生じたとしても、防護対象施設

に飛来物を衝突させない構造とする。また、防護鋼板は直接原子建屋付属棟躯体に支持する構造とする。防護鋼板に作用する荷重は、アンカーボルトを介して、鉄筋コンクリート造の原子炉建屋付属棟躯体に伝達する構造とする。

2.5 評価方針

防護対策施設の強度評価は、「2.4 構造設計」を踏まえ、以下の評価方針とする。

(1) 防護ネット

設計竜巻の風圧力による荷重，設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し，主要な部材が破断しなければ設計飛来物は捕捉可能であり，飛来物が防護対象施設と衝突しない。従って，防護ネットのうち鋼製ネット，ワイヤロープ及び接統治具（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，計算により確認する。

また，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に対し，防護対象施設の機能喪失に至る可能性のある飛来物が防護対象施設と衝突しないよう捕捉するために，防護ネットのうち鋼製ネット及びワイヤロープにたわみを生じても，防護対象施設との離隔を確保できることを計算により確認する。

(2) 防護鋼板

設計竜巻の風圧力による荷重，飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し，飛来物が防護対象施設に衝突することを防止するために，飛来物が防護鋼板を貫通し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解析により確認する。

(3) 架構

設計竜巻の風圧力による荷重，飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し，飛来物が防護対象施設に衝突することを防止するために，架構部材に対し，飛来物が貫通しないこと及び架構部材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解析により確認する。

また，設計竜巻の風圧力による荷重，設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し，架構全体が，施設の倒壊に至るような変形が生じないことを計算により確認する。

さらに，防護対象施設に波及的影響を与えないよう，設計竜巻の風圧力による荷重，設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し，架構全体が倒壊を生じないことを計算により確認する。

3. 防護対策施設の構成要素の設計方針

防護対策施設は、「2.2 構造強度の設計方針」に基づき、「2.4 構造設計」で示した構造と、「2.3 荷重及び荷重の組合せ」で設定した荷重を踏まえ、防護対策施設を構成する要素間での荷重の受け渡し、要素ごとの設計及び設計結果の全体設計への反映を行う。

防護対策施設の設計フローを図 3-1 に示す。

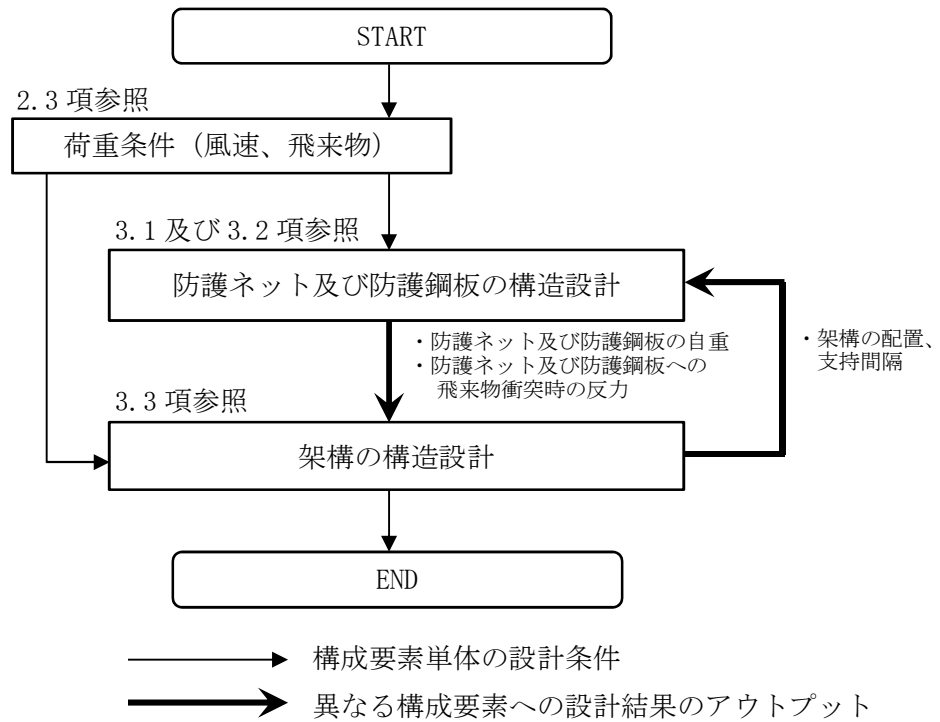


図 3-1 防護対策施設の設計フロー

3.1 防護ネットの構造設計

「2.2 構造強度の設計方針」に基づき、防護対象施設の機能喪失に至る可能性のある飛来物が防護対象施設へ衝突することを防止可能な設計とするため、飛来物の防護対象施設への衝突に対し、主要な部材が破断することなく架構に荷重を伝達し、たわみを生じて、防護対象施設の機能喪失に至る可能性のある飛来物が防護対象施設と衝突しないよう防護ネットで捕捉できる設計とする。

防護ネットの設計フローを図 3-2 に示す。

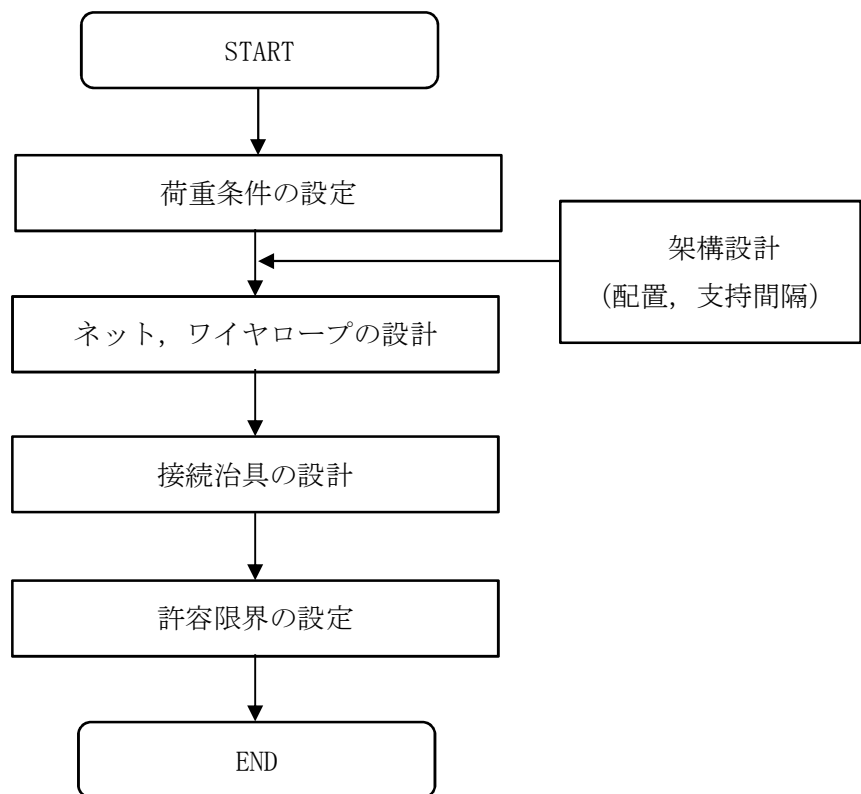


図 3-2 防護ネットの設計フロー

防護ネットの概要図を図 3-3 に示す。ネット、ワイヤロープ、接続治具（支持部、固定部）及び鋼製枠により構成され、ネットの 4 辺をワイヤロープにより支持し、ワイヤロープは鋼製枠に設置した接続治具にて支持する構造とする。ワイヤロープの端部はターンバックル又はシャックルを設置し、ターンバックル又はシャックルを鋼製枠に設置したアイプレートに接続する構造とする。

防護ネットは、40 mm 目合いのネット 3 枚で構成する。

防護ネットは、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。）にて適用性が確認されている評価式及びネットの物性値を用いた設計とする。

防護ネットと架構の接続部の構造設計は、V-3-別添 1-2-1-3「架構の強度計算書」による。

防護ネットを構成するネット、ワイヤロープ及び接続治具（支持部、固定部）についての構造設計を以下に示す。

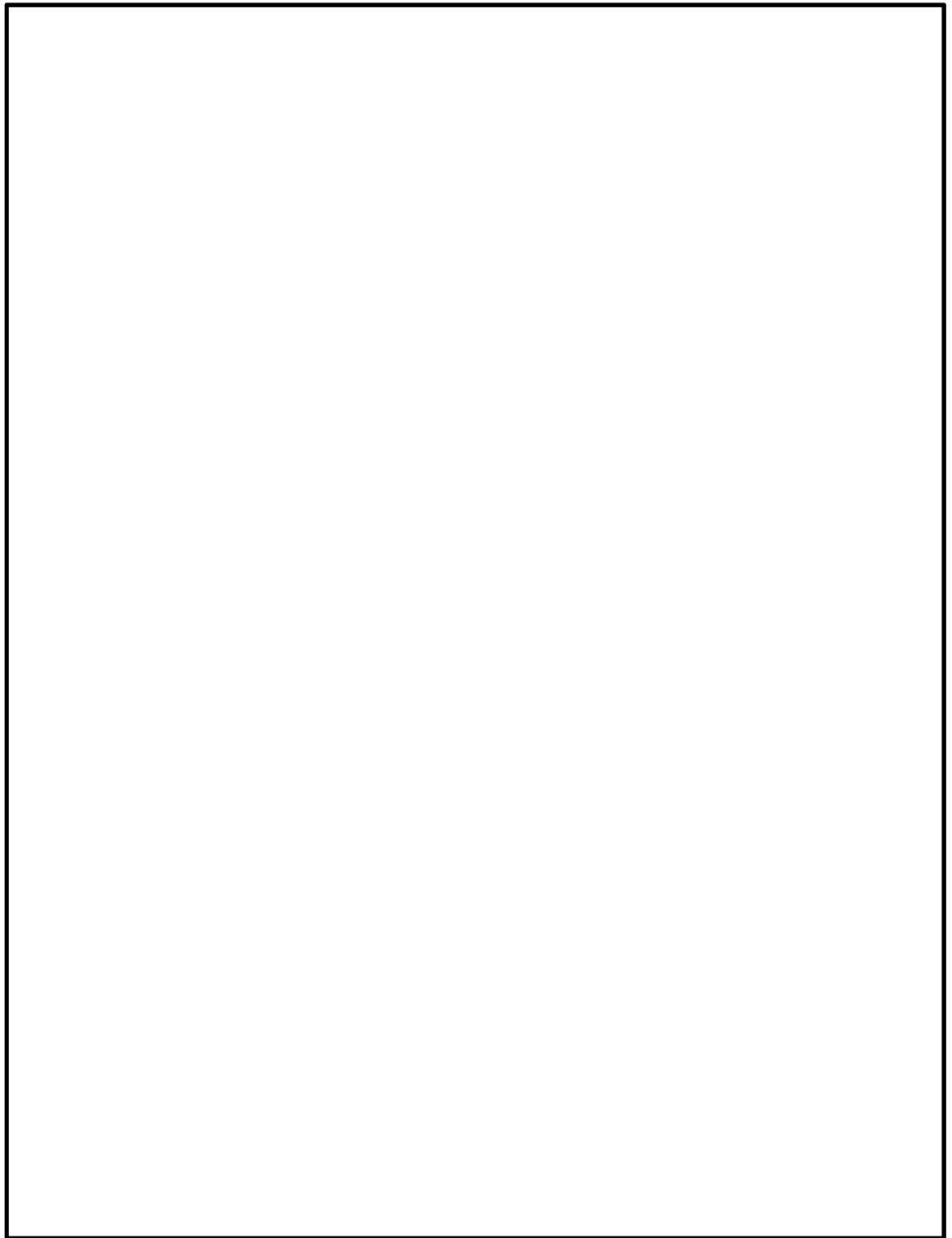


図 3-3 防護ネットの概要図

(1) ネット

ネットは、らせん状の硬鋼線を山形に折り曲げて列線とし、3 次元的に交差させて編み込んだものであり、編み込みの向きにより、展開方向とその直角方向の異方性を有する材料であり、展開方向が主に荷重を受け持ち、展開方向と展開直角方向で剛性や伸び量が異なるため、これらの異方性を考慮した設計とする。ネットは、電中研報告書において、その剛性、

最大たわみ時のたわみ角，1 目合いの破断変位等が確認されている。

ネットの寸法は，架構の柱・梁の間隔並びにネットの展開方向と展開直角方向の剛性や伸び量の異方性を考慮して，展開方向と展開直角方向の寸法の比（以下「アスペクト比」という。）について，原則として電中研報告書にて適用性が確認されている範囲（1:1～2:1）に入るように設計する。ただし，設定する寸法での限界吸収エネルギー量等を踏まえ，設置するネットの枚数を増やし，衝撃荷重に対する耐力を持たせるとともにたわみ量を低減させる設計とする。

(2) ワイヤロープ

ワイヤロープの取付部は，展開方向のワイヤロープと展開直角方向のワイヤロープで荷重の伝達分布が異なり，さらにワイヤロープの巻き方によりワイヤロープ間の荷重伝達に影響を及ぼす可能性があるため，ネットに対して 2 本を L 時に設置することにより，ワイヤロープに作用する荷重が均一となるような設計とする。

防護ネットの基本構造において，ワイヤロープは鋼製枠内に上下 2 段設置しており，上段のワイヤロープは 40 mm 目合いのネット 2 枚を支持するため，ワイヤロープは支持するネット枚数を考慮した設計とする。

(3) 接統治具（支持部，固定部）

電中研報告書の評価式を適用するため，衝突試験における試験体と同じ構造を採用しており，飛来物衝突時に急激な荷重が作用するのを抑制するために緩衝装置を四隅に設置する設計とする。

接統治具は，ネットへの飛来物の衝突によりネットからワイヤロープを介して直接作用する荷重若しくは発生する応力に対して，破断することのない強度を有する設計とする。接統治具（支持部）はワイヤロープを支持するターンバックル及びシャックルであり，接統治具（固定部）はターンバックルまたはシャックルを鋼製枠に設置するアイプレートや隅角部固定ボルトである。

3.2 防護鋼板の構造設計

「2.2 構造強度の設計方針」に基づき，防護対象施設の機能喪失に至る可能性のある飛来物が防護対象施設へ衝突することを防止可能な設計とするため，飛来物の防護対象施設への衝突に対し，防護鋼板が貫通することなく架構に荷重を伝達し，たわみを生じて，防護対象施設の機能喪失に至る可能性のある飛来物が防護対象施設と衝突しないよう防護鋼板で捕捉できる設計とする。

防護鋼板の設計フローを図 3-4 に示す。

防護鋼板は，飛来物による衝突に対し，貫通しない部材厚さを確保する設計とする。

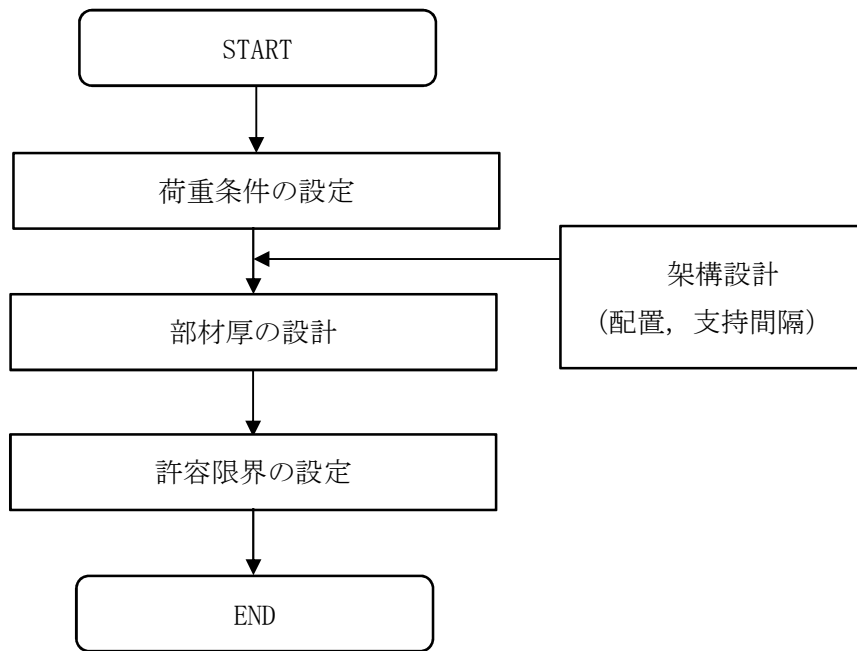


図 3-4 防護鋼板の設計フロー

3.3 架構の構造設計

「2.2 構造強度の設計方針」に基づき，防護対象施設の機能喪失に至る可能性のある飛来物が防護対象施設へ衝突することを防止可能な設計とするため，飛来物が架構を構成する主要な構造部材を貫通せず，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設計とする。

また，防護対象施設に波及的影響を与えないために，架構を構成する部材自体の脱落を生じない設計とする。

架構の設計フローを図 3-5 に示す。

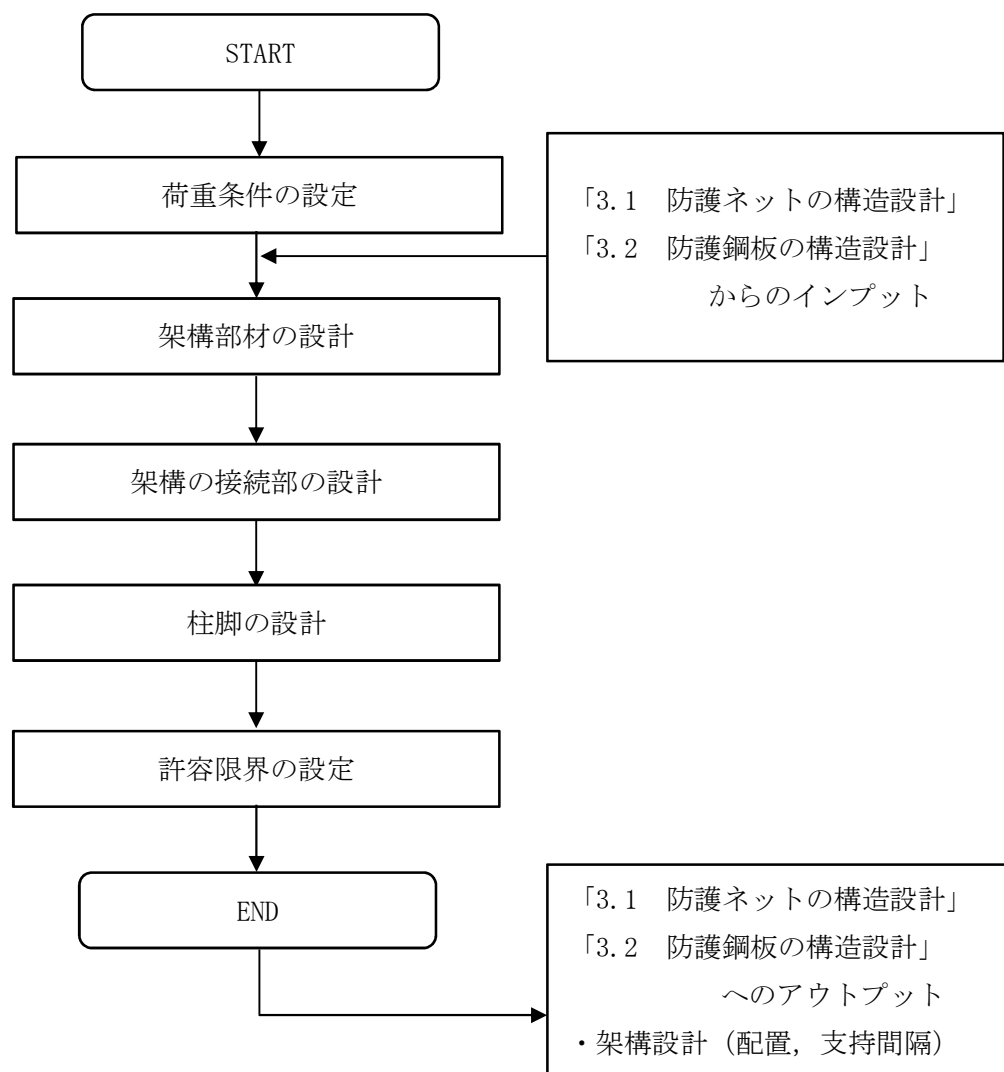


図 3-5 架構の設計フロー

架構はH形鋼等から構成し、防護ネット及び防護鋼板からの荷重を支持する設計とする。

防護ネット及び防護鋼板を支持する架構は、架構部材、架構の接続部及び柱脚部より構成され、架構の接続部は溶接又はボルトにより接続し、柱脚部はアンカーボルトにより建屋等に固定する設計とする。架構の接続部については、母材と同等の耐力を有する設計とする。

防護ネット及び防護鋼板への飛来物衝突時の荷重は、隣り合う架構又は柱等の主架構及び柱脚のアンカーボルトを介して建屋等へ伝達する設計とする。飛来物が架構に直接衝突する場合は、架構から柱脚のアンカーボルトを介して建屋等へ伝達する設計とする。

4. 防護対策施設の構成要素の評価方針

「2.3 荷重及び荷重の組合せ」, 「2.5 評価方針」及び「3. 防護対策施設の構成要素の設計方針」に基づき, 防護対策施設の構成要素ごとの評価方針を設定する。

防護対策施設を設計する上で, 飛来物の衝突回数については, 屋外の鋼製材等の飛来物となり得るものは, 飛散防止管理を実施し, 飛来物となるものが少なくなるように運用することにより, 竜巻時及び竜巻通過時において複数の設計飛来物が同一の防護対策施設に衝突する可能性は十分低いことから, 同一の防護対策施設への複数の設計飛来物の衝突は考慮しない設計とする。

防護対策施設は, 飛来物衝突に対し, 防護対策施設を構成する部材が許容限界に至ることなく, 防護対象施設が飛来物の影響を受けないことを確認する。

防護対策施設の評価フローを図 4-1 に示す。

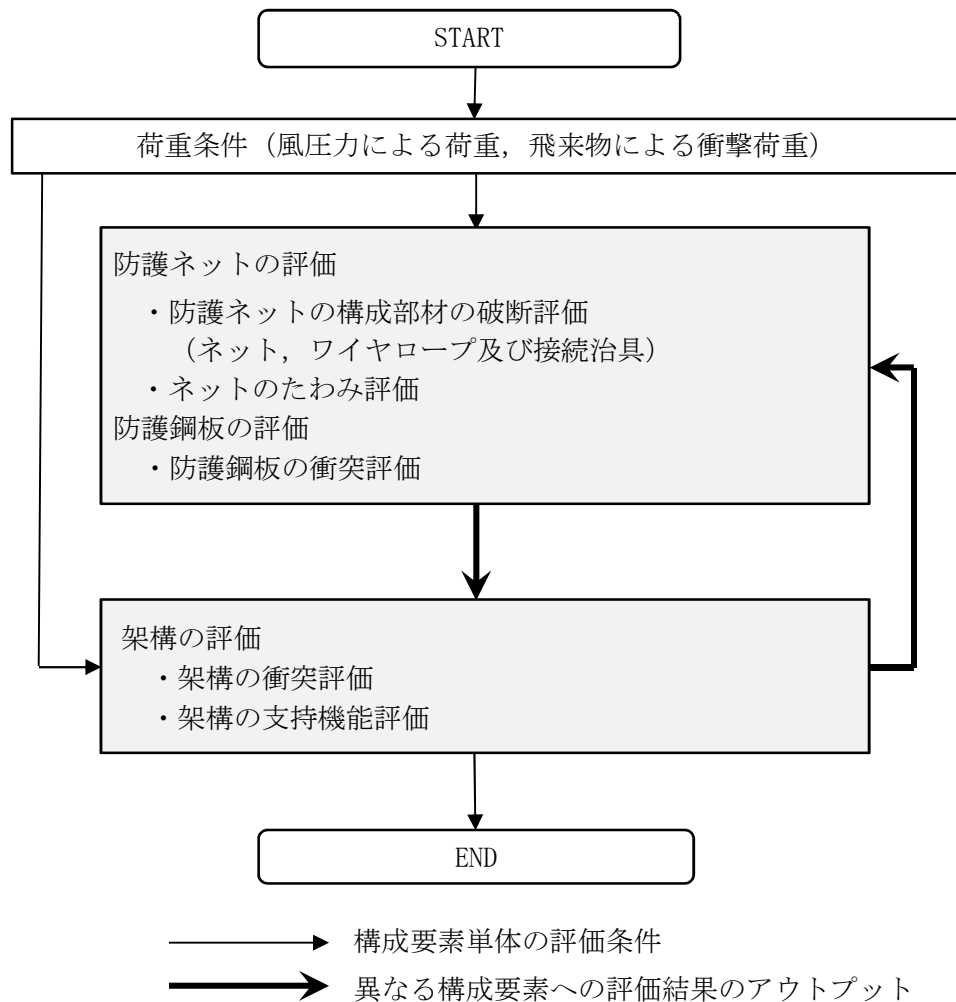


図 4-1 防護対策施設の評価フロー

4.1 防護ネットの評価方針

「2.5(1) 防護ネット」の評価方針に基づき、設計竜巻の風圧力による荷重、設計飛来物による衝撃荷重及びその他の考慮すべき荷重に対し、主要な部材が破断しないために、防護ネットのうちネット、ワイヤロープ及び接統治具（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計算により確認する。その方法は、「6.1 防護ネットの強度評価」に示すとおり、ネットの限界吸収エネルギー、算出される衝撃荷重を元に破断評価を行う。

「2.5 評価方針」に基づき、設計竜巻の風圧力による荷重、設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、防護対象施設の機能喪失に至る可能性のある飛来物が防護対象施設と衝突しないよう捕捉するために、防護ネットのうちネット及びワイヤロープにたわみが生じても、設計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を確保できることを計算により確認する。その方法は、「6.1 防護ネットの強度評価」に示すとおり、算出されるネットのたわみ量を元にたわみ評価を行う。

防護ネットの評価フローを図 4-2 に示す。防護ネットは竜巻による荷重が作用する場合に、破断が生じることなく、たわみが生じたとしても飛来物が防護対象施設と衝突しないような離隔を有することを確認する。

防護ネットの破断及びたわみに対する評価方針を以下に示す。

防護ネットの具体的な計算の方法及び結果は、V-3-別添 1-2-1-1「防護ネットの強度計算書」に示す。

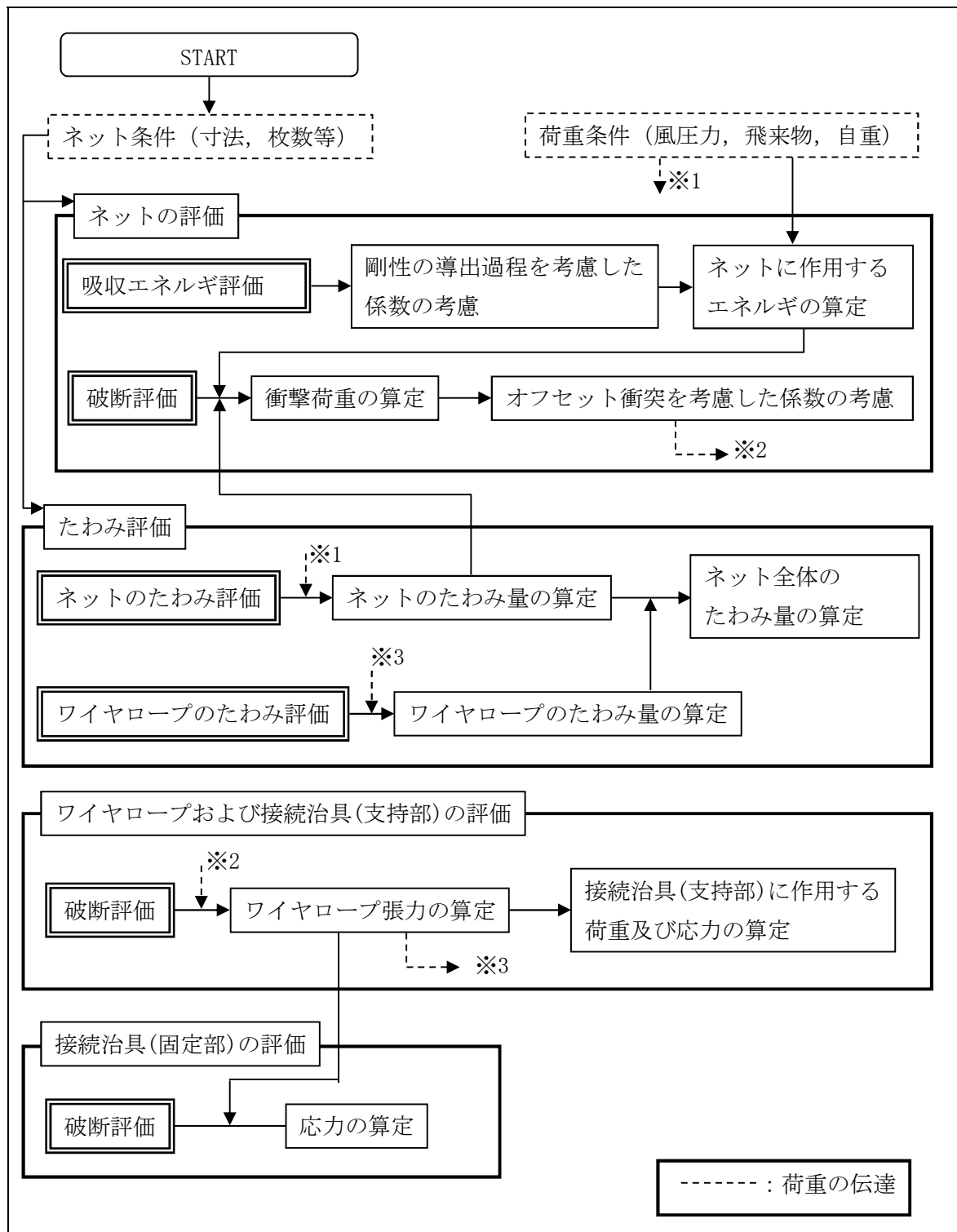


図 4-2 防護ネットの評価フロー

(1) 強度評価

設計竜巻の風圧力による荷重，設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し，主要な部材が破断しないために，防護ネットのうちネット，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計算により確認する。

自重，風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重がネットに作用する場合に，ネッ

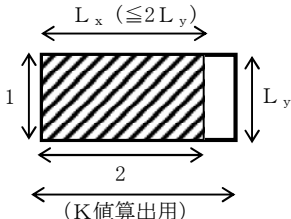
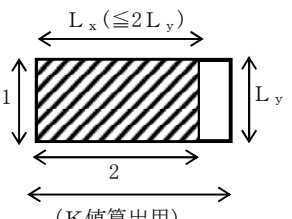
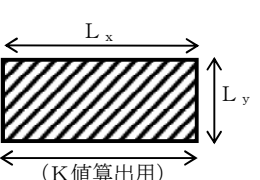
トに破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を有することを確認するために、以下を評価する。

ネットについては、設計竜巻による荷重が作用する場合に、ネット全体でエネルギー吸収することから、ネットの吸収エネルギーを評価する。評価方法としては、電中研報告書において、ネットへの適用性が確認されている評価式（以下「電中研評価式」という。）を参照して評価する。また、設計飛来物の衝突箇所において、破断が生じないことを確認するために、ネットに作用する引張荷重を、電中研評価式を参照して評価する。さらに、ネットが機能を発揮できるために、ネットに作用する荷重がワイヤロープ及び接続治具に伝達され、その荷重によりワイヤロープ及び接続治具（支持部）に発生する荷重、並びに接続治具（固定部）に発生する応力が許容値以下であることを確認する。

ネット、ワイヤロープ及び接続治具（支持部、固定部）の破断に対する評価においては、ネット寸法に対するアスペクト比及びネットの衝突位置の影響について、以下のとおり考慮して評価を実施する。

ネットのアスペクト比について、評価ごとの展開方向及び展開直角方向の寸法の設定方法を表 4-1 に示す。

表 4-1 評価ごとの展開方向及び展開直角方向寸法の設定方法

評価項目	吸収エネルギー	破断	たわみ
アスペクト比	<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>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>たわみ量が大きくなるようにアスペクト比を設定</p> 

a. ネットの吸収エネルギー評価

ネットの吸収エネルギー評価においては、ネットの目合いの方向に従ってネット剛性を設定し、ネットのエネルギー吸収に有効な面積を考慮し、アスペクト比を考慮して、ネットの有効面積を設定し評価を実施する。また、飛来物の衝突位置の違いによりたわみ量の影響があり、衝突位置、ネット剛性の設定によるたわみ量への影響を考慮して、評価を実施する。

ネットのアスペクト比については、ネットのエネルギー吸収性能が主に荷重を受け持つ展開方向寸法によることから、評価ごとに保守的な評価となるように、評価においてはアスペクト比を考慮した展開方向及び展開直角方向の寸法を設定する。

b. ネット、ワイヤロープ及び接続治具（支持部、固定部）の溶接部の破断評価

ネットの破断評価においては、吸収エネルギー評価と同様にネットのアスペクト比を考慮

して、ネットの有効面積を設定し評価する。ネットのアスペクト比は、ネット目合いの方向を踏まえ、評価が保守的となるように、ネットの有効面積を設定して評価を実施する。また、衝突位置を考慮して評価を実施する。

ネット、ワイヤロープ及び接続治具については、飛来物の衝突位置として、中央位置からずれた（以下「オフセット」という。）衝突についても考慮する。具体的には、電中研評価式では飛来物がネット中央位置に衝突する場合についてのみ評価を実施するため、オフセット位置に衝突する場合の評価においては、中央位置に衝突する場合とオフセット位置に衝突する場合の飛来物の移動距離を考慮した評価を実施する。

ネットのアスペクト比については、吸収エネルギー評価と同様に考慮する。

(2) たわみ評価

設計竜巻の風圧力による荷重、設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、飛来物が防護対象施設と衝突しないよう捕捉するために、防護ネットのうちネット及びワイヤロープが、たわみを生じても、設計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を確保できることを計算により確認する。

防護ネットは、設計竜巻の風圧力による荷重、設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重がネットに作用する場合に、ネットがたわむことでエネルギーを吸収することから、ネット及びワイヤロープがたわんでも、ネットと防護対象施設が衝突しないことを確認するために、ネットとワイヤロープのたわみ量を考慮して評価する。評価方法としては、電中研評価式等を用いて評価する。

ネット及びワイヤロープのたわみ評価においては、ネット寸法に対するアスペクト比を考慮して評価を実施する。

たわみ評価においても、構造強度評価と同様にネット寸法に対するアスペクト比を考慮する必要がある、評価が保守的となるように、ネットの有効面積を設定して評価を実施する。

評価の条件についても、構造強度評価と同様に飛来物のネットの衝突位置を考慮して評価を実施する。

ネットのアスペクト比については、吸収エネルギー評価と同様に考慮する。

4.2 防護鋼板の評価方針

「2.5(2) 防護鋼板」の評価方針に基づき、設計竜巻の風圧力による荷重、設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、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させ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ないことを確認する。

防護鋼板の評価フローを図 4-3 に示す。

防護鋼板の具体的な計算方法及び結果は、V-3-別添 1-2-1-2「防護鋼板の強度計算書」に示す。

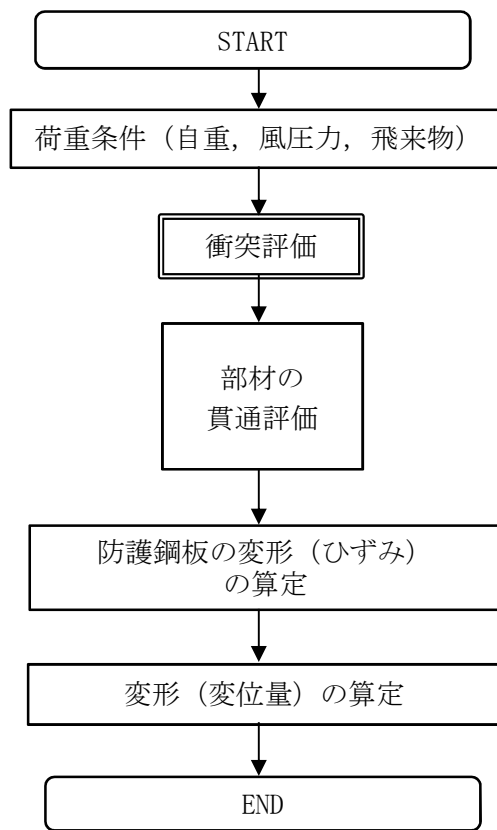


図 4-3 防護鋼板の評価フロー図

(1) 衝突評価

設計竜巻の風圧力による荷重，設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し，防護対策施設の外壳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位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解析により確認する。評価方法は，F E Mを用いた解析とする。

4.3 架構の評価方針

「2.5(3) 架構」の評価方針に基づき，設計竜巻の風圧力による荷重，設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し，飛来物を貫通させないために，終局状態に至るようなひずみを生じないこと及び架構の部材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解析により確認する。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ないことを確認する。

また，「2.5(3) 架構」の評価方針に基づき，上載する防護ネット及び防護鋼板の自重並びに防護ネット，防護鋼板及び架構への飛来物の衝突時の荷重に対し，これらを支持する構造強度を有することの確認として，設計竜巻の風圧力による荷重，設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し，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並びに架構全体に防護対策施設の倒壊に至るような変形が生じないことを解析により確

認する。架構の接続部については、母材と同等の耐力を有することから架構部材の評価に包絡される。

さらに、「2.5(3) 架構」の評価方針に基づき、防護対象施設に波及的影響を与えないよう、架構全体が倒壊を生じないことの確認として、設計竜巻の風圧力による荷重、設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、架構部材および架構と建屋等のボルト接合のアンカーボルトが破断を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解析により確認する。

架構の評価フローを図 4-4 に示す。

架構の具体的な計算方法及び結果は、V-3-別添 1-2-1-3「架構の強度計算書」に示す。

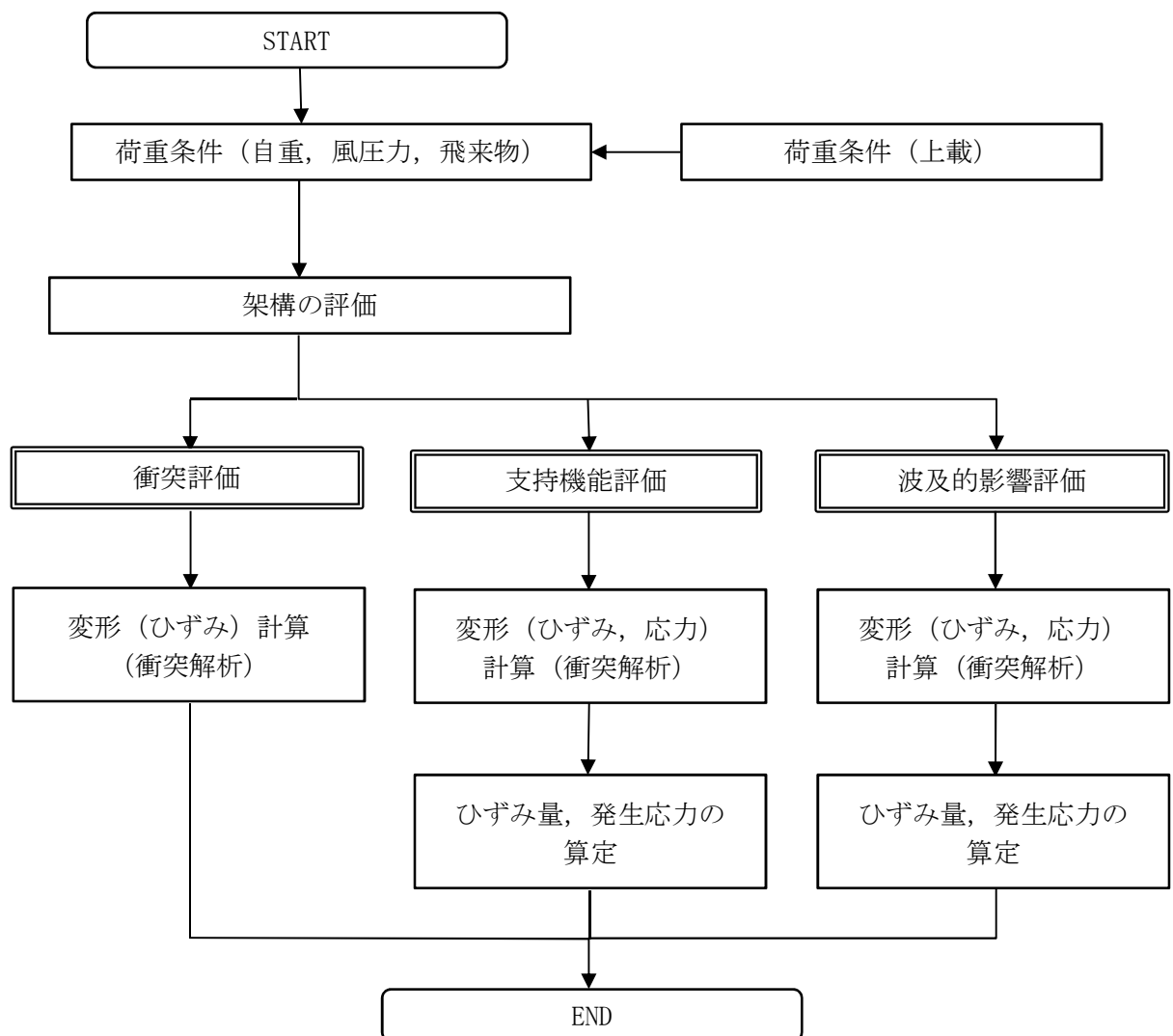


図 4-4 架構の評価フロー図

(1) 衝突評価

設計竜巻の風圧力による荷重、設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、架構を構成する部材が飛来物を貫通させないために、架構の部材が終局状態に至るようなひずみを生じないこと及び部材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解析により確認する。評価方法は、FEMを用いた解析とする。

(2) 支持機能評価及び波及的影響評価

上載する防護ネット及び防護鋼板の自重並びに防護ネット、防護鋼板及び架構への飛来物の衝突時の荷重に対し、これらを支持する構造強度を有すること及び防護対象施設に波及的影響を与えないことの確認として、設計竜巻の風圧力による荷重、設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、架構部材及び架構と建屋等のボルト接合のアンカーボルト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並びに架構全体に防護対策施設の倒壊に至るような変形が生じないことを解析により確認する。

設計竜巻の風圧力による荷重、設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重が架構に作用する場合に、各部材について以下のとおり評価する。

a. 架構部材

架構部材については、ひずみ量を評価し、破断が生じないことを確認する。評価方法は、FEMを用いた解析とする。

b. 架構全体

架構全体については、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、架構及び架構と建屋等のボルト接合部のアンカーボルトにおいて、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。評価方法は、FEMを用いた解析とする。

5. 許容限界

「2.5 評価方針」及び「4. 防護対策施設の構成要素の評価方針」を踏まえ、防護対策施設の構成要素ごとの設計に用いる許容限界を設定する。

5.1 防護ネットの許容限界

5.1.1 許容限界の設定

(1) 強度評価

防護ネットは、設計竜巻の風圧力による荷重、設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対する評価を行うため、破断せず、荷重が作用するとしても防護ネットが内包する防護対象施設に設計飛来物を衝突させないために、防護ネットの主要な部材が、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許容限界として設定する。

防護ネットのうちネット、ワイヤロープ及び接続治具（支持部、固定部）の許容限界を以下のとおり設定する。

a. ネット

ネットの許容限界は、吸収エネルギー評価及び破断評価（引張荷重評価）において設定する。

吸収エネルギー評価は、設計飛来物によりネットに与えられる全エネルギーがネットの限界吸収エネルギー以下であることにより、ネットが破断しないことを確認することから、ネットの限界吸収エネルギーを許容限界とする。

破断評価は、ネットが破断を生じないよう十分な余裕を持った強度を有することを確認する評価方針としている。ネットは、飛来物の衝突に対し、塑性変形することでエネ

ルギを吸収し、飛来物を捕捉することから、飛来物の衝撃荷重に対し、ネットの許容引張荷重を許容限界とする。ネットの許容限界を表 5-1 に示す。

表 5-1 ネットの許容限界

許容限界	
吸収エネルギー評価の許容値	破断評価の許容値
ネット設置枚数 n を考慮した 限界吸収エネルギー	ネット設置枚数 n を考慮した 許容引張荷重
E_{max}	F_{max}

b. ワイヤロープ

ワイヤロープの端部にはワイヤグリップを取付ける。一般にワイヤロープの破断荷重の値はメーカーの引張試験によれば J I S 規格値よりも大きいので、ワイヤロープの許容限界は、J I S に規定する破断荷重にワイヤグリップ効率 C_c を乗じた値とする。

ワイヤロープの許容限界を表 5-2 に示す。

表 5-2 ワイヤロープの許容限界

規格値	許容値
F_3 (注1)	C_c (注2) $\cdot F_3$ (注1)

(注1) J I S G 3549 の破断荷重

(注2) J I S B 2809 及び (社) 日本道路協会「小規模吊橋指針・同解説」

c. 接統治具 (支持部)

接統治具 (支持部) の強度評価は、接統治具 (支持部) として、ワイヤロープを支持するターンバックル及びシャックルが、ワイヤロープから受ける引張荷重に対し、破断が生じない十分な強度を有することを確認する評価方針としていることを踏まえ、基本として、メーカーカタログの荷重を許容限界とする。

ターンバックル及びシャックルの許容限界を表 5-3 に示す。

表 5-3 ターンバックル及びシャックルの許容限界

評価部位	許容荷重
ターンバックル	P ^(注1)
シャックル	P ^(注2)

(注1) メーカーカタログの保証荷重

(注2) メーカーカタログの破断荷重

d. 接統治具（固定部）

接統治具（固定部）の破断評価は、接統治具（固定部）である隅角部固定ボルト及びアイプレートが、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評価方針としていることを踏まえ、十分な余裕を考慮して「鋼構造設計規準・許容応力度法」に基づいた短期許容応力度を許容限界とする。設計竜巻による荷重は、ネットに作用し、ワイヤロープを介して接統治具に作用するため、評価対象は、接統治具（固定部）である隅角部固定ボルト及びアイプレートとする。アイプレートは、プレート本体、プレートと鋼製枠、プレートとリブ及び鋼製枠とリブの溶接部が存在するが、強度評価上、溶接脚長が短いアイプレートとリブの溶接部を評価対象部位とする。

接統治具の許容限界を表 5-4 に示す。

表 5-4 接統治具の許容限界

応力度	許容限界	
	引張	せん断
短期許容応力度	$1.5 f_t$	$1.5 f_s$

(2) たわみ評価

防護ネットは、飛来物衝突時にたわんだとしても、飛来物が防護対象施設に衝突することがないように、十分な離隔を有していることを確認する評価方針としていることを踏まえ、ネットと防護対象施設の最小離隔距離Lを許容限界として設定する。

防護ネットのたわみ評価の許容限界を表 5-5 に示す。

表 5-5 防護ネットのたわみ評価の許容限界

許容限界
ネットと防護対象施設の最小離隔距離
L

5.1.2 許容限界の設定方法

(1) 記号の定義

防護ネットの強度評価における許容値の算出に用いる記号を表 5-6 に示す。

表 5-6 防護ネットの強度評価における許容値の算出に用いる記号

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_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
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_{max}	kN	ネット設置枚数 n を考慮した防護ネットの許容破断荷重
F_{40}	kN	40 mm 目合いネットの 1 交点当たりの許容引張荷重
K	kN/m	ネット 1 目合いの等価剛性
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
n	枚	ネット設置枚数
N_i	個	i 列目のネット展開直角方向目合い数
N_x	個	ネット展開方向目合い数
N_y	個	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
X_i	m	i 列目のネットの伸び
δ_i	m	設計飛来物衝突時の i 番目の列におけるネットのたわみ量
δ_{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	ネットの最大可能なたわみ角

(2) 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エネルギー吸収量がネットの有する最大吸収エネルギー E_{max} となる。この値に以下の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。

限界吸収エネルギーは、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 5-1 に示す。

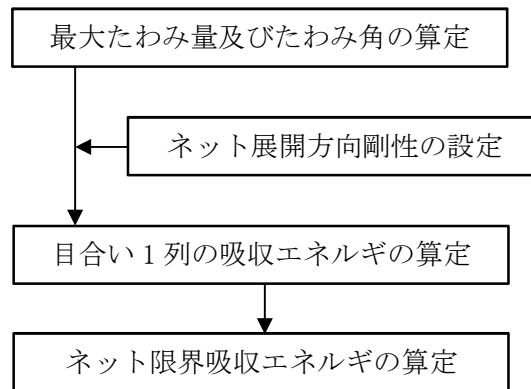
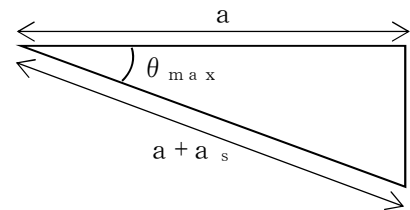


図 5-2 吸収エネルギー評価の許容限界の算定フロー

ネット 1 目合いの最大伸び量は，電中研報告書のネット目合いの引張試験から求められ，そこ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，

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

$$\text{ネット展開方向剛性} \quad K'_x = \frac{K}{N_x}$$

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，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。電中研報告書によると，40 mm 目合いの補助金網は，飛来物落下試験において 40 mm 目合い 0.5 枚相当の吸収エネルギー能力を有していることが確認されていることから，補助金網については，40 mm 目合いの金網 0.5 枚として考慮する。

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

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} から定着部のたわみ量 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 5-3 に示す

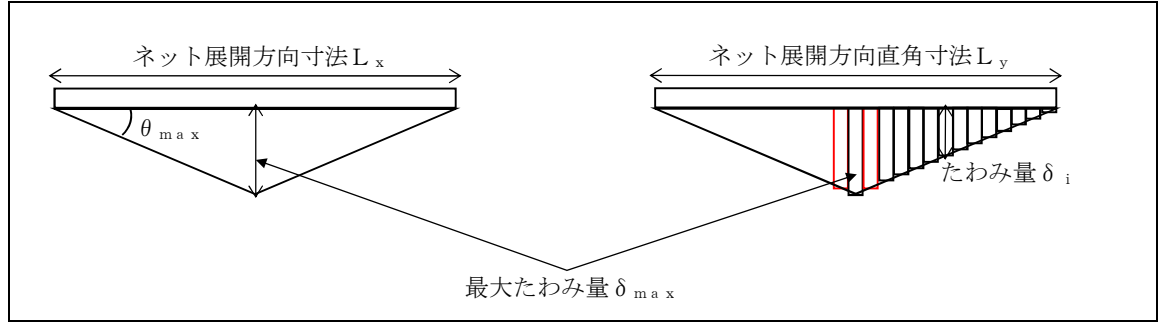


図 5-3 ネットの最大たわみ量と最大たわみ角

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 5-4 に示す。

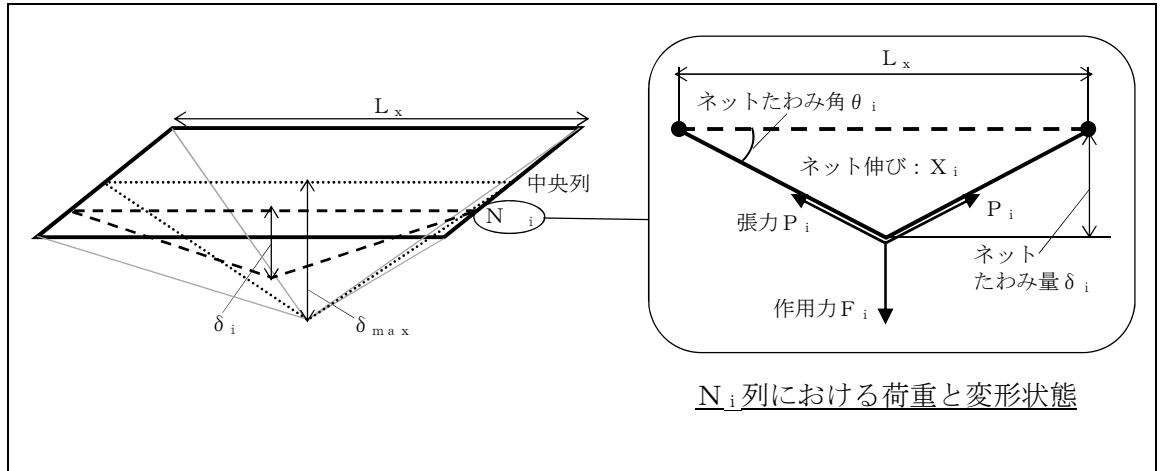


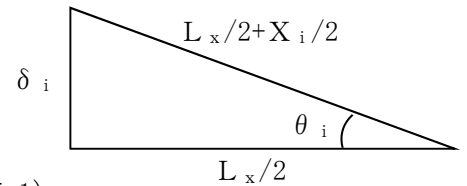
図 5-4 ネットに作用する力のつり合い

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，

$$\begin{aligned} P_i &= 2 \cdot K_x \cdot \left(\frac{X_i}{2} \right) \\ &= K_x \cdot X_i \end{aligned}$$

となる。また，作用力 F_i は変位量とたわみ量の関係から，

$$\begin{aligned} F_i &= 2 \cdot P_i \cdot \sin \theta_i \\ &= 2 \cdot K_x \cdot X_i \cdot \sin \theta_i \\ &= 2 \cdot K_x \cdot L_x (\tan \theta_i - \sin \theta_i) \\ &= 4 \cdot K_x \cdot \delta_i \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2}} \right) \quad \dots \quad (5.1) \end{aligned}$$



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。

$$\begin{aligned}
E_i &= \int_0^{\delta_i} F_i \cdot d\delta \\
&= \int_0^{\delta_i} 4 \cdot K_x \cdot \delta_i \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2}} \right) d\delta \\
&= 2 \cdot K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x \left(\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \quad \cdots \quad (5.2)
\end{aligned}$$

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。

$$\begin{aligned}
E_{max} &= \sum_{i=1}^{N_y} E_i \\
&= \sum_{i=1}^{N_y} \left\{ 2 \cdot K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x \left(\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \right\} \quad \cdots \quad (5.3)
\end{aligned}$$

(3) 許容引張荷重の評価

防護ネットの許容引張評価においては、計算により算出する防護ネットの許容引張荷重が飛来物の衝撃荷重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。

40 mm 目合いの防護ネットに飛来物（鋼製材）が衝突した評価モデルを図 5-5 に示す。

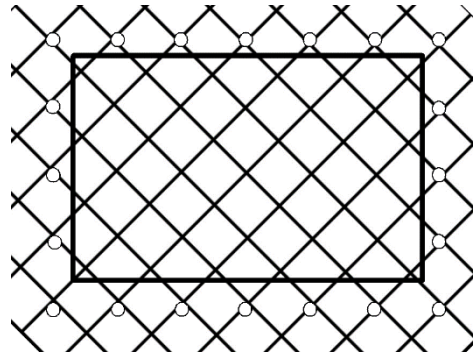


図 5-5 40 mm 目合いの防護ネットに飛来物が衝突した評価モデル

防護ネットの許容引張荷重はネットの 1 交点当たりの許容引張荷重から定まり、飛来物衝突時の周辺交点数から算出される許容引張荷重を許容限界とする。

図 5-5 に示すように、40 mm 目合いのネットは鋼製材が衝突した際、20 交点が接触するため、許容引張荷重 F_{max} は以下のとおり算出される。

$$F_{max} = F_{40} \cdot 20 \cdot n$$

5.2 防護鋼板の許容限界

5.2.1 衝突評価

設計竜巻の風圧力による荷重，設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し，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を解析により確認する評価方針としていることを踏まえ，破断ひずみを許容限界として設定する。破断ひずみは，J I Sに規定されている伸びの下限値を基に設定するが，「NE I 07-13：Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Design」（以下「NE I 07-13」という。）において，TF（多軸性係数）を□とすることが推奨されていることを踏まえ，安全余裕として $TF = \square$ を考慮して設定する。破断ひずみを超えるようなひずみが確認される場合には，その範囲を確認し飛来物が貫通するものでないことを確認する。

また，防護鋼板の変形による内包する防護対象施設への影響がないことを確認するために，飛来物の衝突方向の変位量を求め，その許容限界は防護対象施設までの距離に妥当な安全余裕を考慮して設定する。

5.3 架構の許容限界

5.3.1 衝突評価

設計竜巻の風圧力による荷重，設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し，飛来物を貫通させないために，架構部材が，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評価方針としていることを踏まえ，破断ひずみを許容限界として設定する。破断ひずみは，J I Sに規定されている伸びの下限値を基に設定するが，「NE I 07-13」において，TF（多軸性係数）を□とすることが推奨されていることを踏まえ，安全余裕として $TF = \square$ を考慮して設定する。破断ひずみを超えるようなひずみが確認される場合には，その範囲を確認し飛来物が貫通するものでないことを確認する。

5.3.2 支持機能評価，波及的影響評価

上載する防護ネット及び防護鋼板の自重並びに防護ネット，防護鋼板及び架構への飛来物の衝突時の荷重に対し，これらを支持する構造強度を有すること及び防護対象施設に波及的影響を与えないことの確認として，設計竜巻の風圧力による荷重，設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し，架構部材および架構と建屋等のボルト接合のアンカーボルト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並びに架構全体に防護対策施設の倒壊に至るような変形が生じないことを解析により確認する評価方針としていることを踏まえ，以下のとおり許容限界を設定する。

(1) 架構部材

架構部材の評価は，ひずみ量进行评估し，破断が生じないことを確認する評価方針としていることを踏まえ，破断ひずみを許容限界として設定する。破断ひずみは，J I Sに規定されている伸びの下限値を基に設定するが「NE I 07-13」において，TF（多軸性係数）を□とすることが推奨されていることを踏まえ，安全余裕として $TF = \square$ 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。

(2) 架構全体

架構全体の評価は、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、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評価方針としていることを踏まえ、架構においては、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、J E A G 4 6 0 1 等に準じて許容応力状態Ⅳ_ASの許容応力を許容限界とする。架構と建屋等のボルト接合部のアンカーボルトにおいては、取替が容易にできないことから、降伏耐力又は短期許容応力度を許容限界とする。

6. 強度評価方法

評価手法は、以下に示す解析法により、適用性に留意の上、規格及び基準類や既往の文献において適用が妥当とされる手法に基づき実施することを基本とする。

- ・定式化された評価式を用いた解析法
- ・F E M等を用いた解析法

6.1 防護ネットの強度評価

(1) 評価方針

- a. ネットの限界エネルギーの算出においては、ネットの展開方向に1目合い毎に帯状に分割し、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する。
- b. ネットの限界吸収エネルギーの算出においては、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。
- c. 自重と風圧力によるネットに作用する荷重は、ネット全体に等分布荷重として作用するものであり、ネット展開直角方向に対しては荷重が均一となるよう作用させる。
- d. 一方、ネット展開方向に対しては、設計モデル上均一に荷重を作用させることが困難であるため、保守的にエネルギーが大きくなるよう、自重及び風圧力によりネットに作用する荷重 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算出し、列数倍することでネット全体が自重及び風圧力による荷重により受けるエネルギーを算出する。

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表 6-1 に示す。

表 6-1 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位		評価内容
ネット		<ul style="list-style-type: none"> ・限界吸収エネルギー ・引張 ・たわみ
ワイヤロープ		<ul style="list-style-type: none"> ・引張 ・たわみ
接続治具（支持部）	ターンバックル	・引張
	シャックル	・引張
接続治具（固定部）	隅角部固定ボルト	・せん断
	溶接部	・せん断

(3) 強度計算

a. 記号の定義

ネット、ワイヤロープ及び接統治具（支持部、固定部）の強度評価に用いる記号を表 6-2 に示す。

表 6-2 ネット、ワイヤロープ及び接統治具（支持部、固定部）の強度評価に用いる記号(1/3)

記号	単位	定義
a_w	mm	取付けプレート溶接部ののど厚
A_c	mm^2	隅角部固定ボルトの断面積
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_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_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_i	kN	設計飛来物衝突時の i 番目の列における作用力
F_p	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合成荷重
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
F_w	kN	自重及び風圧力によりネットに作用する荷重
K_x	kN/m	ネット設置枚数を考慮したネット1目合いの展開方向の1列の等価剛性
L	mm	面取り長さ
L_b	mm	変形前のワイヤロープ長さ
L_{pr}	mm	アイプレートの有効抵抗幅

表 6-2 ネット、ワイヤロープ及び接続治具（支持部、固定部）の強度評価に用いる記号(2/3)

記号	単位	定義
L_{pw}	mm	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_s	mm	直線区間のワイヤロープの変形後の長さの合計
L_x	m	ネット展開方向寸法（吸収エネルギー、破断及びたわみ設計が安全側となるよう考慮する。）
L_y	m	ネット展開直角方向寸法（吸収エネルギー、破断及びたわみ設計が安全側となるよう考慮する。）
L_y'	m	飛来物衝突の影響範囲
L_z	m	ワイヤロープの全長
m	kg	設計飛来物の質量
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
N_y	個	ネット展開直角方向目合い数
P_w	kN	ネットの自重により作用する荷重
S	mm	すみ肉厚さ
S_x	mm	ネット展開方向と平行に配置したワイヤロープの変形後の長さ
S_y	mm	ネット展開方向と直交するワイヤロープの変形後の長さ
V	m/s	設計飛来物の飛来速度
T'	kN	設計飛来物のネットへの衝突によりネットに発生する張力
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に発生する張力
T_1''	kN	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_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
W_w	kN	風圧力による荷重
Z	mm ³	溶接部断面係数

表 6-2 ネット、ワイヤロープ及び接続治具（支持部、固定部）の強度評価に用いる記号(3/3)

記号	単位	定義
ε	—	ワイヤロープのひずみ量
δ	m	設計飛来物衝突時のネットの最大たわみ量
δ'	m	変形によるワイヤロープ伸び量
δ_a	m	自重及び風圧力による荷重によるたわみ量
δ_i	m	設計飛来物衝突時の i 番目の列におけるネットのたわみ量
δ_L	m	直線区間のワイヤロープのたわみ量
δ_t	m	ネットとワイヤロープの合計たわみ量
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したワイヤロープの変形後のたわみ量
δ_{wy}	m	ネット展開方向に直交に配置したワイヤロープの変形後のたわみ量
θ	deg	設計飛来物衝突時のネットのたわみ角
θ_{w1}	deg	ネット展開方向にワイヤロープのたわみ角
θ_{w2}	deg	ネット展開直角方向に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	溶接部に発生するせん断応力

b. 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、設計飛来物による衝突荷重、風圧力による荷重及び自重によるエネルギーを算出する。

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。

(5.3) 式より、 E_{max} は以下のとおりである。

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

自重及び風圧力による荷重によりネットに作用する荷重は、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、ネットに作用するエネルギー量が保守的に大きくなるよう、 F_w がすべてネット展開方向 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算出し、列数倍することでネット全体が自重及び風圧力による荷重により受けるエネルギーを算出する。

評価条件である K_x 及び L_x 並びに自重及び風圧力による荷重から算出する F_w を (5.1) 式の F_i に代入して数値計算を実施することにより、自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。

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

ただし、 $F_w = P_w + W_w$

上式にて算出した δ_a を (5.3) 式において、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。

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

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 としては、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。

$$E_f = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2$$

設計飛来物の飛来速度は、ネットの設置方向により、水平設置の場合は鉛直の飛来速度、鉛直設置の場合は水平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、評価に用いる水平最大飛来速度及び鉛直最大飛来速度を下回る。また、設計飛来物がネットの設置方向に対して斜め方向から衝突する場合は、設計飛来物が衝突後に回転し、ネットと設計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、設計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、その飛来速度はネットの設置方向に応じ、水平設置の場合は鉛直最大飛来速度、鉛直設置の場合は、水平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。

$$E_t = E_f + E_w \quad \cdots (5.4)$$

c. 破断評価

(a) ネットの引張荷重評価

防護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、「2.3 荷重及び荷重の組合せ」にて算出した (2.8) 式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。

設計飛来物の衝突による荷重に加え、自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、(2.8) 式より、

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

となる。

E_t としては、(5.4)式により設計飛来物による運動エネルギー E_t 並びに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 から算出したネットに作用する全エネルギー量を代入する。 δ としては、たわみ評価で算出する設計飛来物が衝突する場合のネットの最大たわみ量を代入し、 F_a を算出する。

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 を考慮し、衝撃荷重の最大値 F_a' は、

$$\text{ }$$

と算出される。

(b) ワイヤロープの破断評価

破断評価における衝撃荷重と、ネットとワイヤロープの接続構造からワイヤロープに作用する荷重を導出する。

ワイヤロープの設計において、ワイヤロープに発生する荷重として以下を考慮する。

- ① ネットの自重により作用する荷重
- ② 風圧力によりネットに作用する荷重
- ③ 設計飛来物の衝突によりネットに作用する衝撃荷重

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緩衝材により拘束されない構造としており、衝突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。

自重、風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃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、設計飛来物が衝突する場合の設置枚数 n を考慮したネットに発生する張力の合計である張力 T' は、図6-1に示すネットに発生する力のつりあいより以下のとおり算出され、各辺のワイヤロープが結合されていることから張力が一定となるため、ワイヤロープ1本が負担する張力は $\frac{T'}{2}$ と設定する。

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

ただし、 θ は以下の式で求められる。

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

ネットに発生する力のつりあいを図6-1に示す。

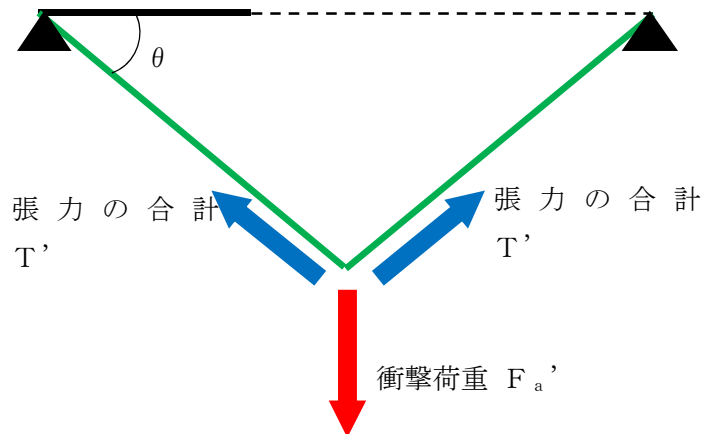


図 6-1 ネットに発生する力のつりあい

ネットを n 枚重ねて設置する場合、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、

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

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、

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

ネットに対して設計飛来物がオフセット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ことが衝突試験により確認されており、算出結果は設計飛来物の衝突位置によらず適用可能である。

(c) 接続治具（支持部）の破断評価

イ. ターンバックル

ターンバックルは、ワイヤロープの引張荷重が作用する場合においても、許容値を満足することを確認することから、引張荷重の最大値として、ワイヤロープに発生する張力 T_1' により評価を実施する。

ロ. シャックル

シャックルは、ワイヤロープの引張荷重が作用する場合においても、許容値を満足することを確認することから、引張荷重の最大値として、ワイヤロープに発生する張力 T_1' により評価を実施する。

(d) 接続治具（固定部）の破断評価

イ. 隅角部固定ボルト

ワイヤロープは、設置するネット枚数に応じて設置するため、隅角部固定ボルトにかかる応力は、ネット枚数ごとに評価する。

ここで、ワイヤロープはたわみにより鋼管に対して θ_{w1} 、 θ_{w2} のたわみ角を有することから、隅角部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溶接部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 6-2 に示す。

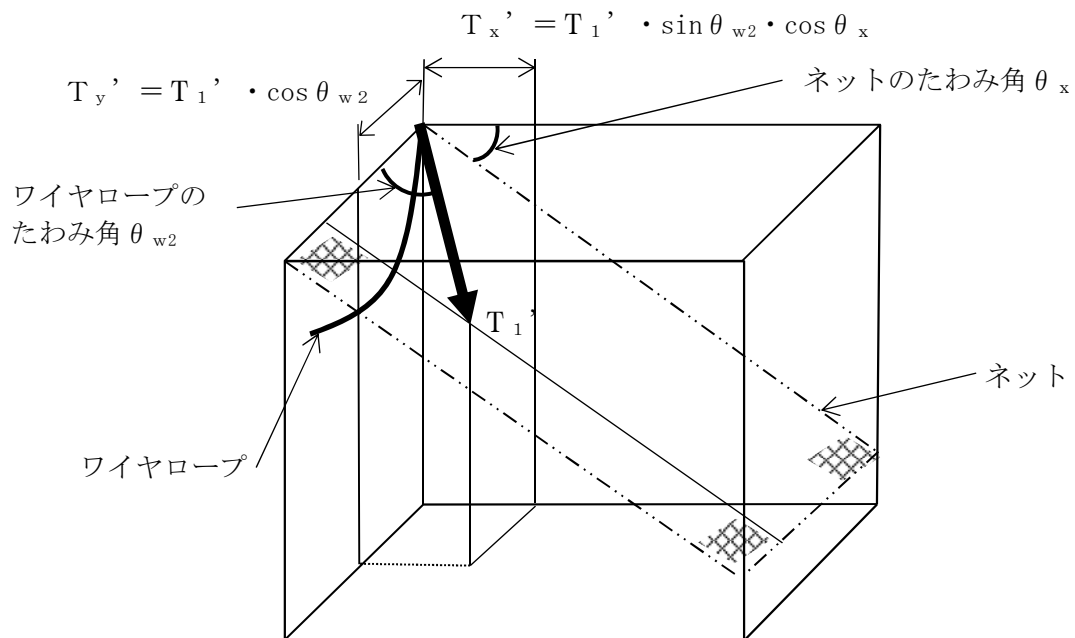
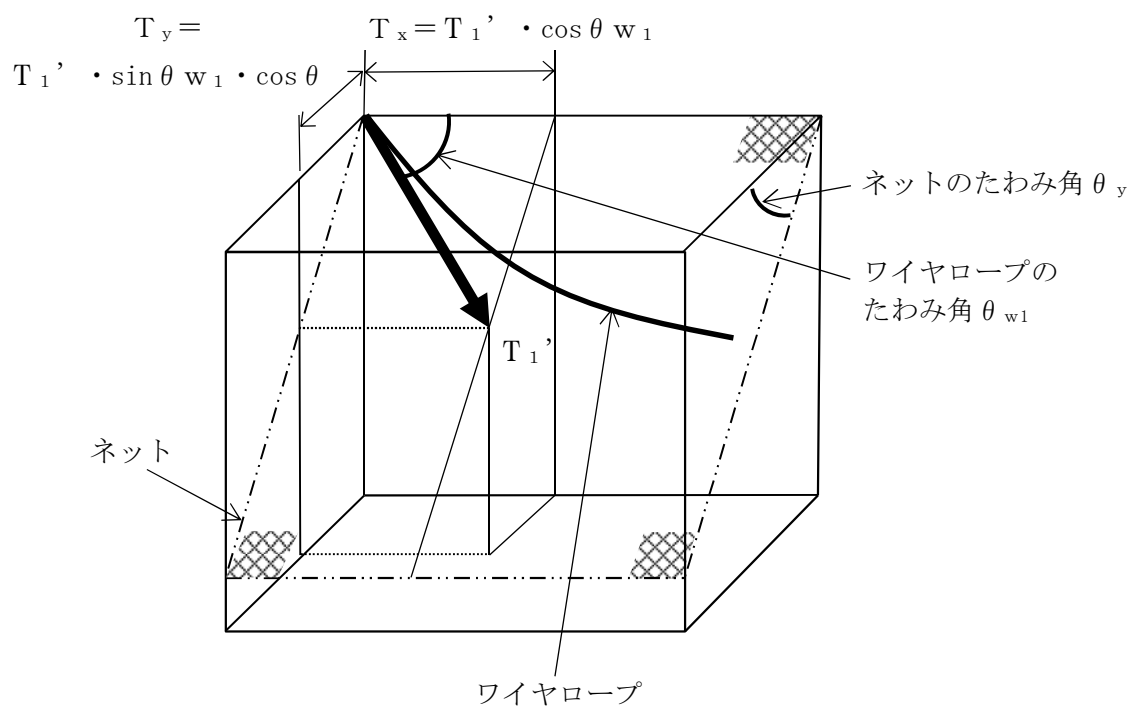


図 6-2 ネットのたわみとワイヤロープのたわみ角の関係

鋼管の荷重状態を図 6-3，隅角部固定ボルトの荷重状態を図 6-4 に示す。

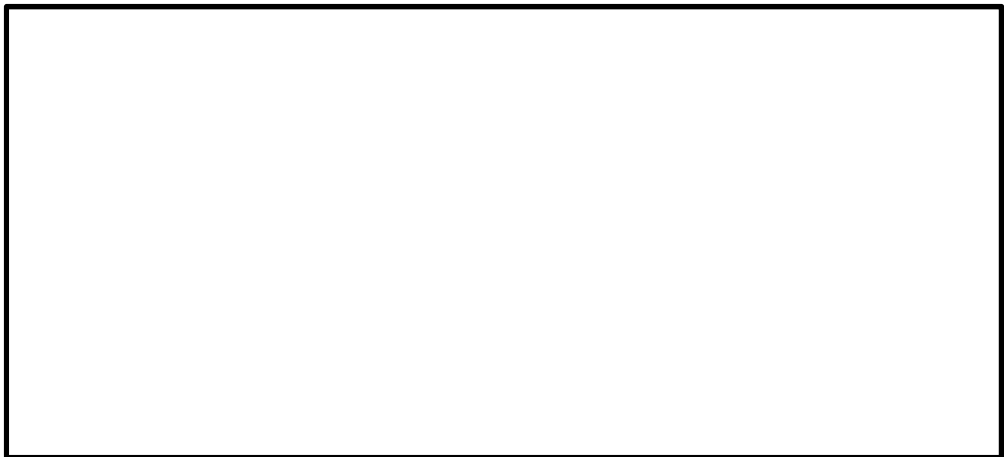


図 6-3 鋼管の荷重状態

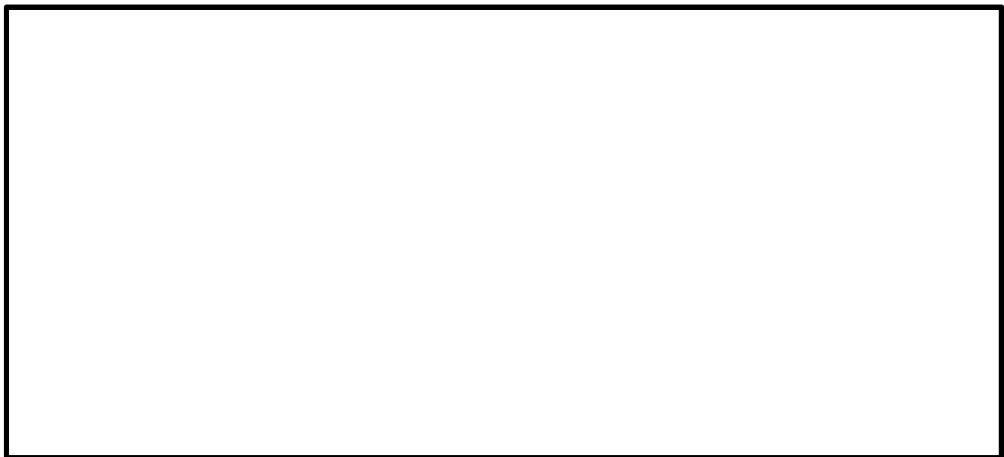


図 6-4 隅角部固定ボルトの荷重状態

隅角部固定ボルトに発生するせん断応力を力の釣合いの関係から以下の評価式を用いて算出する。

ネット展開方向ワイヤロープから発生する各方向の荷重， T_x 及び T_y は，以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} T_x &= T_1' \sin \theta_{w1} \cdot \cos \theta_x \\ T_y &= T_1' \cos \theta_{w1} \end{aligned}$$

ただし， θ_x ， θ_{w1} は以下の式で求められる。

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

$$\theta_{w1} = \cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{1 + 16 \left(\frac{\delta_w}{L_x} \right)^2}}$$

また、ネット展開直角方向ワイヤロープから発生する各方向の荷重、 T_x' 及び T_y' は以下の関係となる。

$$\begin{aligned} T_x' &= T_1' \sin \theta_{w2} \cdot \cos \theta_x \\ T_y' &= T_1' \cos \theta_{w2} \end{aligned}$$

ただし、 θ_x 、 θ_{w2} は以下の式で求められる。

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

$$\theta_{w2} = \cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{1 + 16 \left(\frac{\delta_{wy}}{L_y} \right)^2}}$$

隅角部へ作用するX方向及びY方向への合成荷重は

$$\begin{aligned} F_x &= T_x + T_x' \\ F_y &= T_y + T_y' \end{aligned}$$

より求まる。

1 本目のワイヤロープから隅角部へ作用する合成荷重は

$$F_{p1} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

より求まる。

2 本目のワイヤロープから隅角部へ作用する合成荷重は

$$F_{p2} = F_{p1} / 1.5$$

より求まる。

ワイヤロープから隅角部へ作用する合成荷重 F_p は

$$F_p = F_{p1} + F_{p2}$$

以上より、隅角部固定ボルトに発生するせん断応力 σ_s は、

$$\sigma_s = \frac{F_p}{A_c \cdot n_2}$$

ロ. アイプレート

設計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、すみ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。アイプレートの荷重状態を図 6-5 に示す。

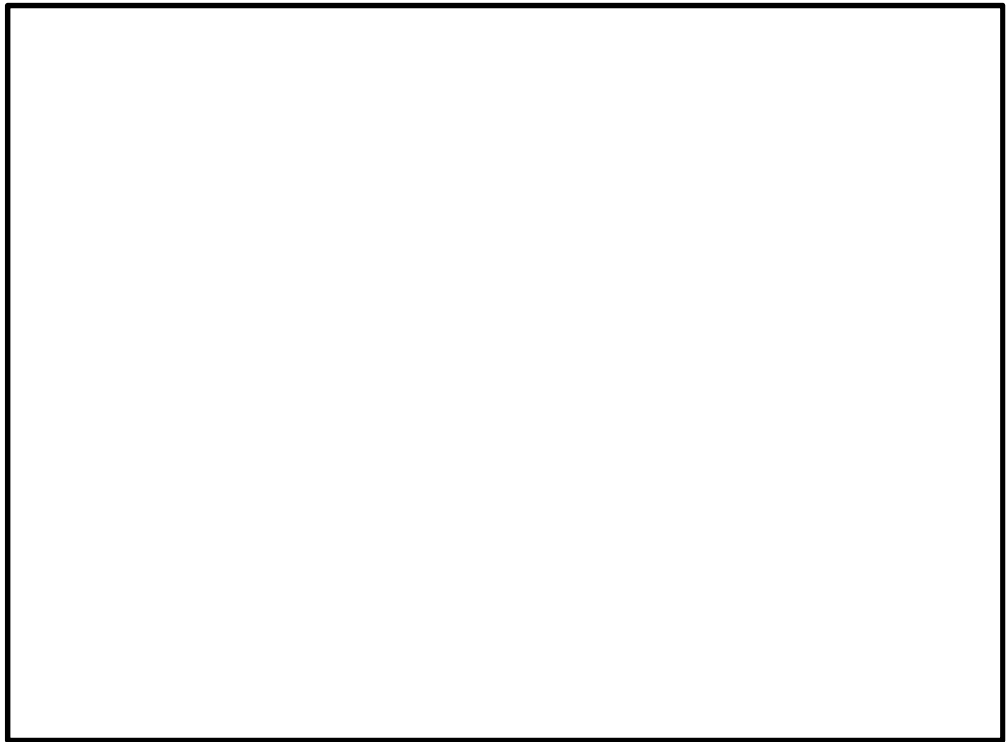


図 6-5 アイプレートの荷重状態

溶接部の有効脚長 L_{pw} は,

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

溶接部に発生するせん断応力 τ_w は,

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

ここで溶接部ののど厚 a_w は以下の式で求められる。

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

d. たわみ評価

(a) ネットのたわみ量の算出

ネットの変位量と吸収エネルギーとの関係は、「5.1.2(2) 限界吸収エネルギーの算定」の(5.2)式のとおり、以下の式にて導出される。

$$E_i = 2 \cdot K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x \left(\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right)$$

ここで、 K_x 及び L_x は定数であるため、

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

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) ワイヤロープのたわみ量を含めた防護ネットのたわみ量の算出

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、「6.1(3)c. ワイヤロープ、ターンバックル及びシャックルの破断評価」に示す方法を用いて算出される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。

$$T_1 = \frac{F_a}{4n \cdot \sin \theta}$$

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。

以下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。よって、変形によるワイヤロープの伸び量 δ' は、以下のとおり算出される。

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

ワイヤロープの変形図を図 6-6 に示す。設計飛来物の衝突によりワイヤロープは放物線状に変形すると、変形後のワイヤロープ長さ L_s は放物線の弦長の式を用いて以下のとおり表される。

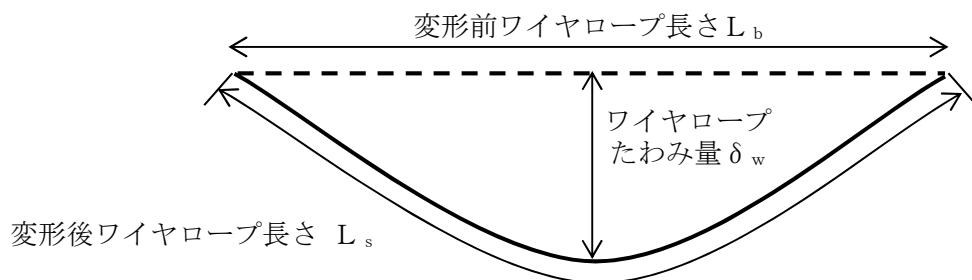


図 6-6 ワイヤロープの変形図

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

また、ワイヤロープはネットのアスペクト比により、変形形状が異なる。ネット及びワイヤロープ変形図（展開方向が長い場合）を図 6-7、ネット及びワイヤロープ変形図（展開方向が短い場合）を図 6-8 に示す。

「展開方向寸法＞展開直角方向寸法」の場合は、飛来物の衝突によるネット変形がネット全体に及ぶため図 6-7 にとおり 4 辺のワイヤロープが変形する形状となり、「展開方向寸法＜展開直角方向寸法」の場合は、ネット変形がネット展開方向長さの範囲に制限されるため、図 6-8 にとおりネット展開直角方向のワイヤロープのみが変形する形状となる。

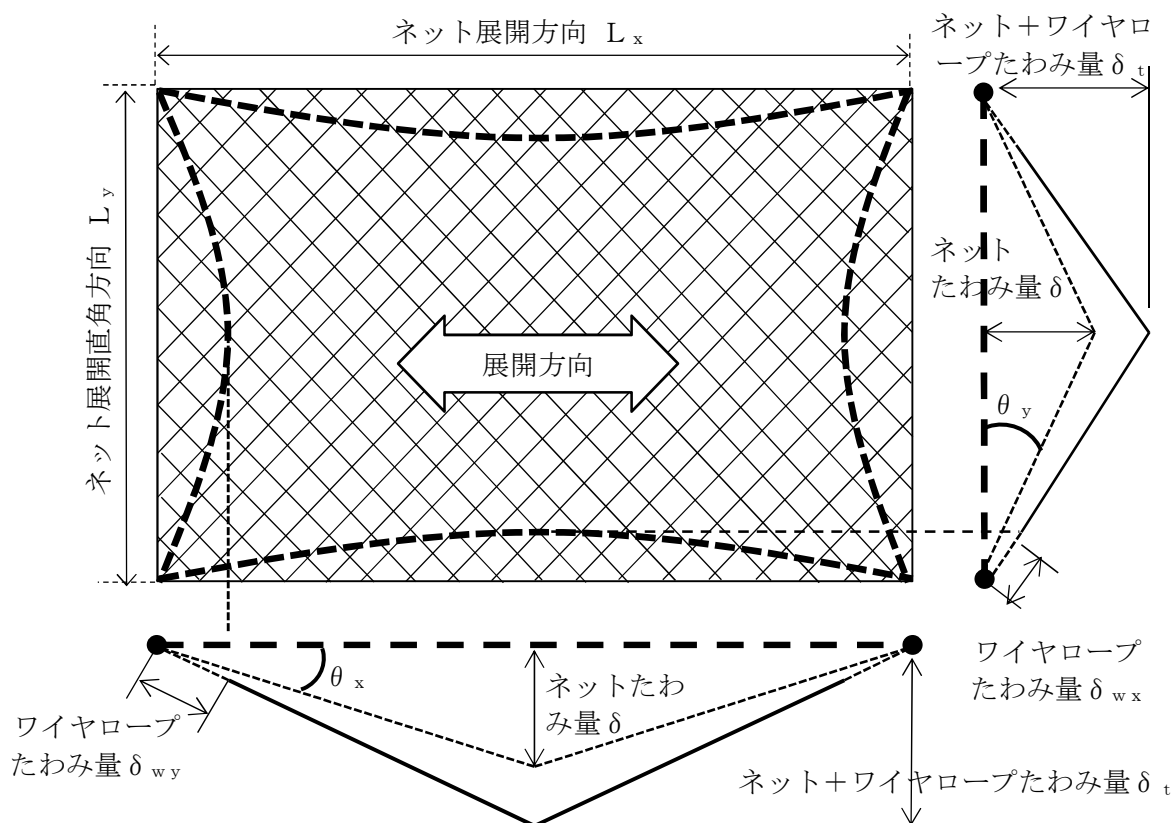


図 6-7 ネット及びワイヤロープ変形図（展開方向が長い場合）

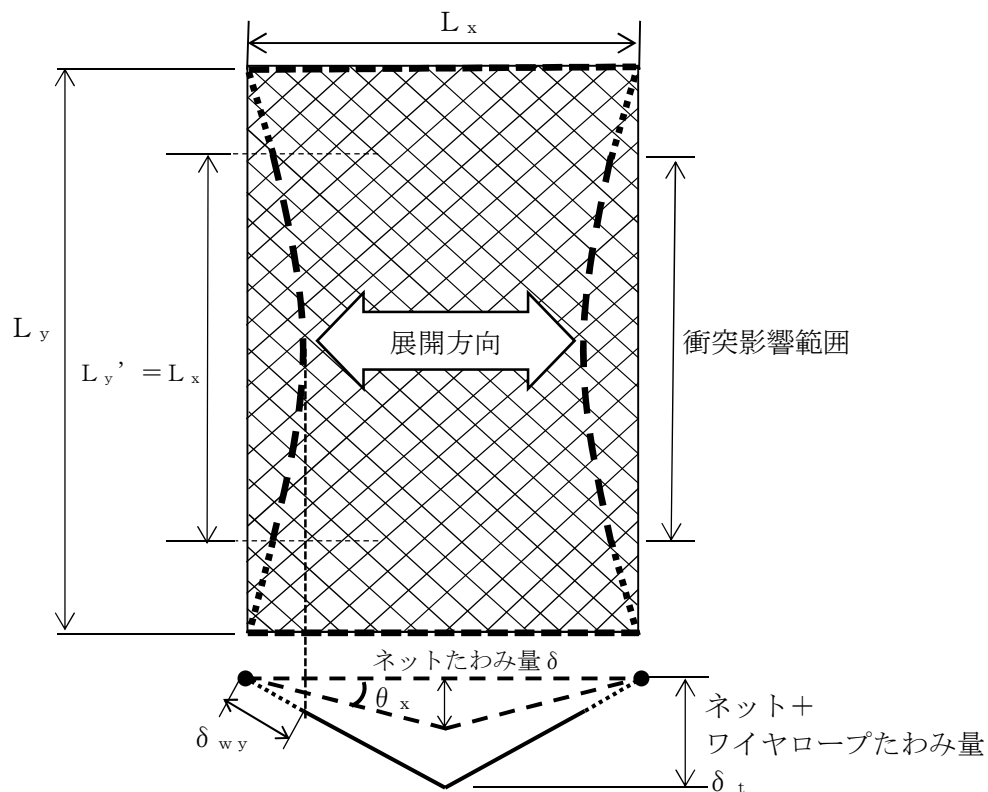


図 6-8 ネット及びワイヤロープ変形図（展開方向が短い場合）

よって、ネットのアスペクト比に応じ、ワイヤロープたわみ量を含めた防護ネットのたわみ量の算出を行う。

展開方向寸法＞展開直角方向寸法の場合、図 6-7 のとおり、ネット展開方向と平行に配置したワイヤロープの変形後の長さを S_x 、ネット展開方向と直交す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、

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

と表され、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のたわみ量 δ_t が算出される。

展開直角方向寸法＞展開方向寸法の場合、図 6-8 より、ワイヤロープ伸び量 δ' が、 L_y の範囲に集約されて変形する。展開直角方向寸法＞展開方向寸法の場合における、ワイヤロープの変形図を図 6-9 に示す。

ワイヤロープは、飛来物の影響範囲 (L_y') にのみ分布荷重が発生するため放物線状となり、その両端部は放物線状に変形したワイヤロープからの引張力のみが作用するため、両端部の接線がそのままネット端部まで延長される形となる。

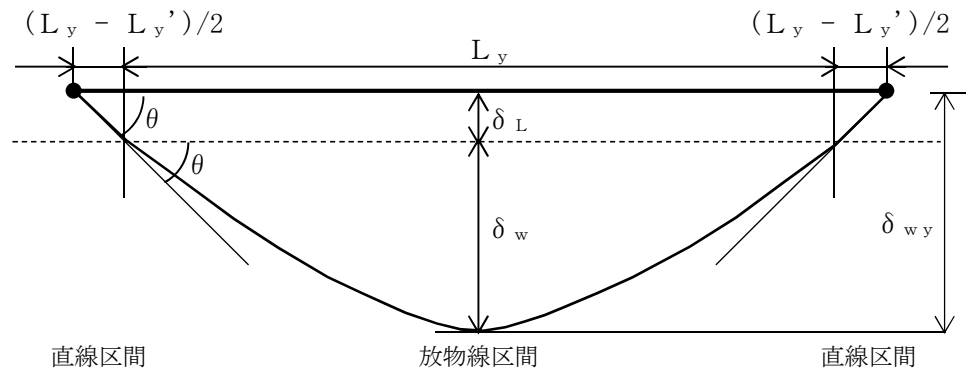


図 6-9 ワイヤロープの変形図

ネット展開方向と直交するワイヤロープの変形後の長さを S_y とすると、 S_y は δ_w の関数であり、

$$S_y = S_y(\delta_w)$$

と表される。

また、直線区間のワイヤロープの変形後の長さの合計 L_s は、

$$L_s = \frac{L_y - L_y'}{\cos \theta}$$

と表される。

L_y （展開方向に直交する辺）の変形後のワイヤロープ長さ S_t は、

$$S_t = L_y + \delta'$$

と算出されることから、

$$\begin{aligned} L_y + \delta' &= S_y + L_s \\ &= S_y(\delta_w) + \frac{L_y - L_y'}{\cos \theta} \end{aligned}$$

となり、 L_y 、 L_y' 、 δ' 、 θ は定数であることから、放物線区間のワイヤロープたわみ量 δ_w を導出することができる。

また、直線区間のワイヤロープのたわみ量 δ_L は、

$$\delta_L = \frac{L_y - L_y'}{2} \tan \theta$$

と算出されることから、放物線区間、直線区間を含むワイヤロープ全体のたわみ量が、

$$\delta_{wy} = \delta_w + \delta_L$$

と算出される。

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

より、ワイヤロープたわみ量を含めた防護ネットのたわみ量 δ_t が算出される。

7. 適用規格

竜巻の影響を考慮する施設の強度評価に用いる適用規格は、V-1-1-2「発電用原子炉施設の自然現象等による損傷防止に関する説明書」のうちV-1-1-2-3-1「竜巻への配慮に関する基本方針」による。

これらのうち、防護対策施設の強度設計に用いる規格、基準等を以下に示す。

- ・「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)
- ・「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))
- ・「小規模吊橋指針・同解説」((社) 日本道路協会)
- ・Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Design (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8 (N E I 07-13))

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	16
2.4 適用規格	17
3. 強度評価方法	18
3.1 記号の定義	18
3.2 評価対象部位	18
3.3 荷重及び荷重の組合せ	19
3.4 許容限界	20
3.5 評価方法	21
4. 強度評価結果	24

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、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）許可に示す設計飛来物（以下「飛来物」という。）の衝突に加え、風圧力に対し、竜巻時及び竜巻通過後においても防護対象施設に飛来物を衝突させず、また、機械的な波及的影響を与えず、防護対象施設の安全機能維持を考慮して、防護鋼板が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

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

2.1 位置

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

防護鋼板の設置位置図を図 2-1 に示す。

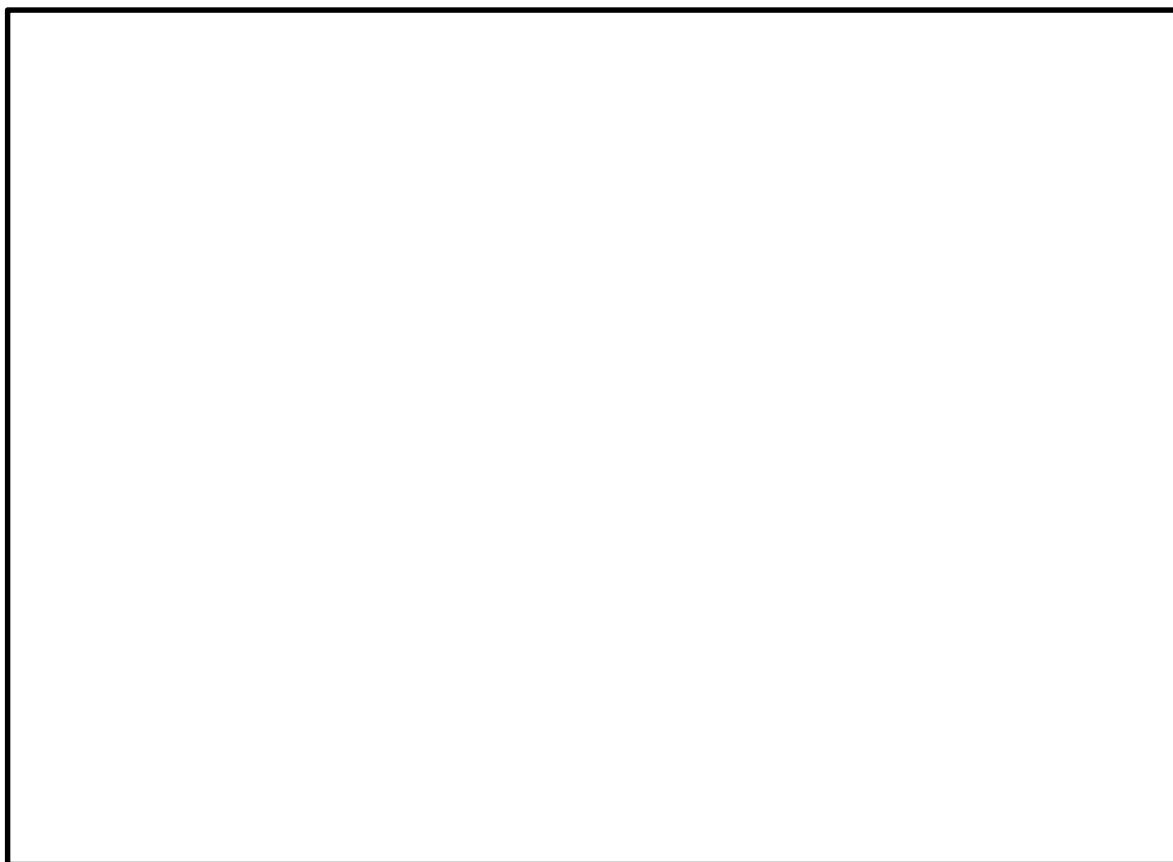


図 2-1 防護鋼板の設置位置図

2.2 構造概要

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

(1) 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設防護鋼板

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

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

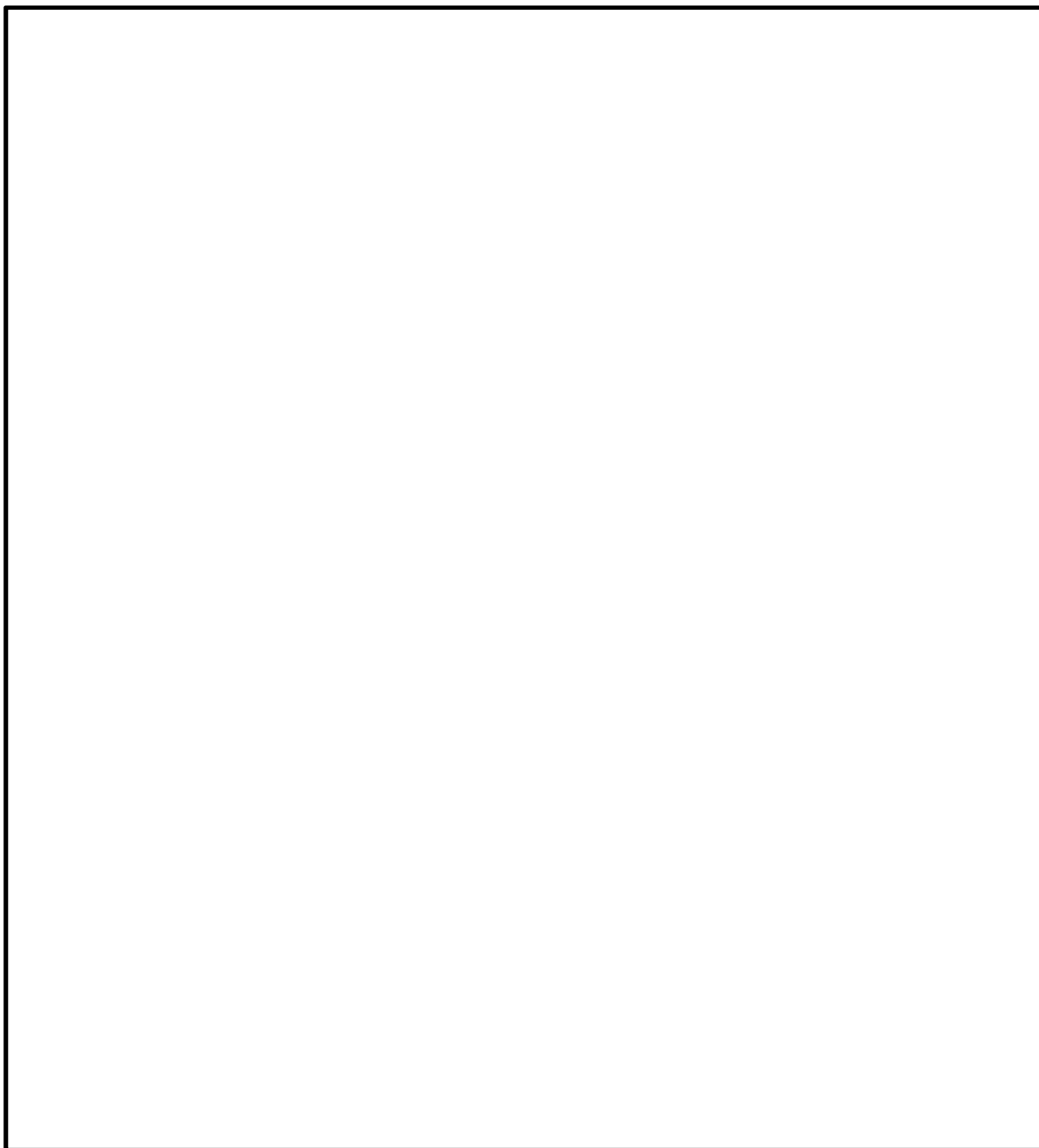


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン防護対策施設防護鋼板の構造図(1/4)
(2 C 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

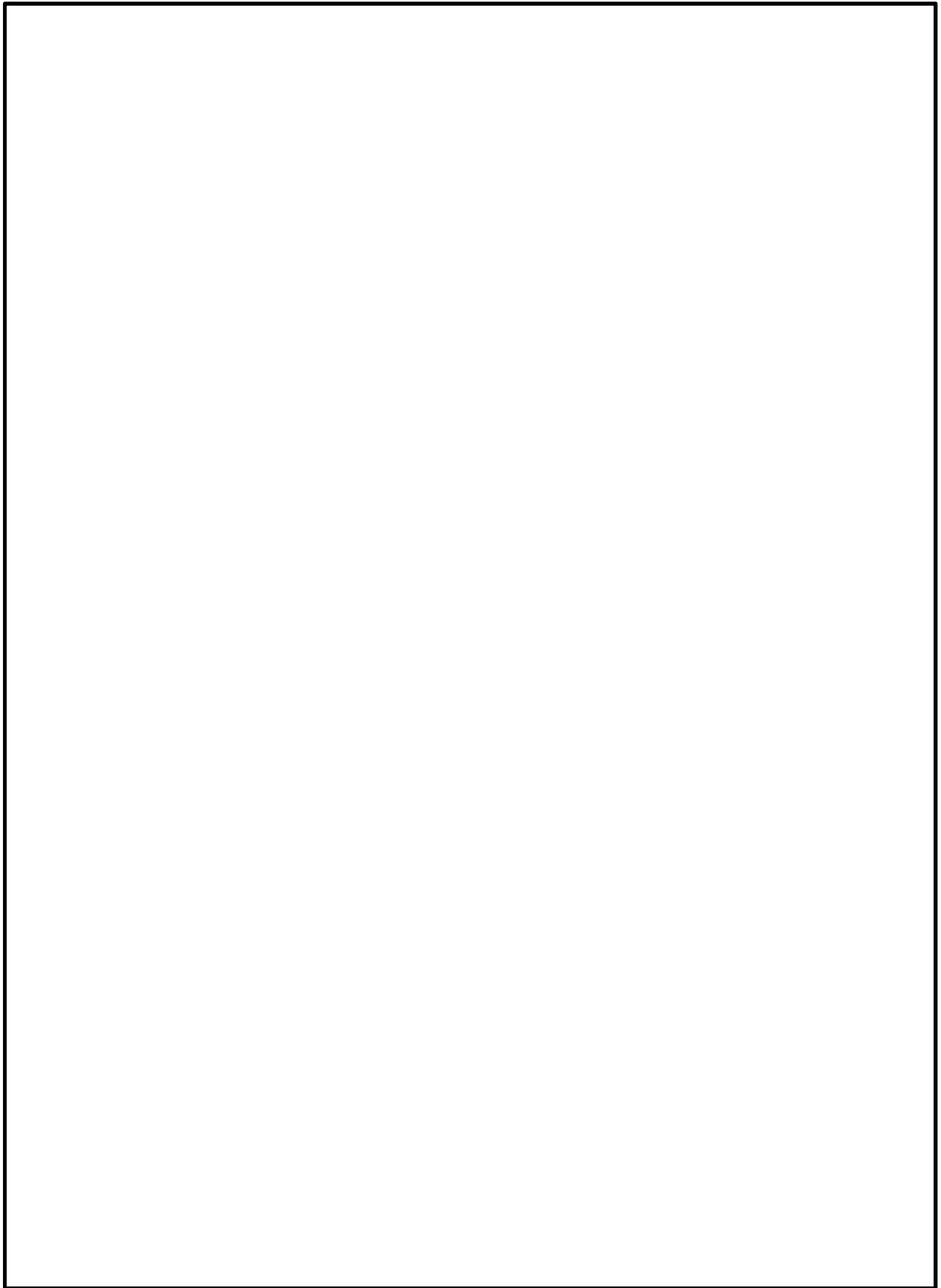


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン防護対策施設防護鋼板の構造図(2/4)
(2 D 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設(1/2))

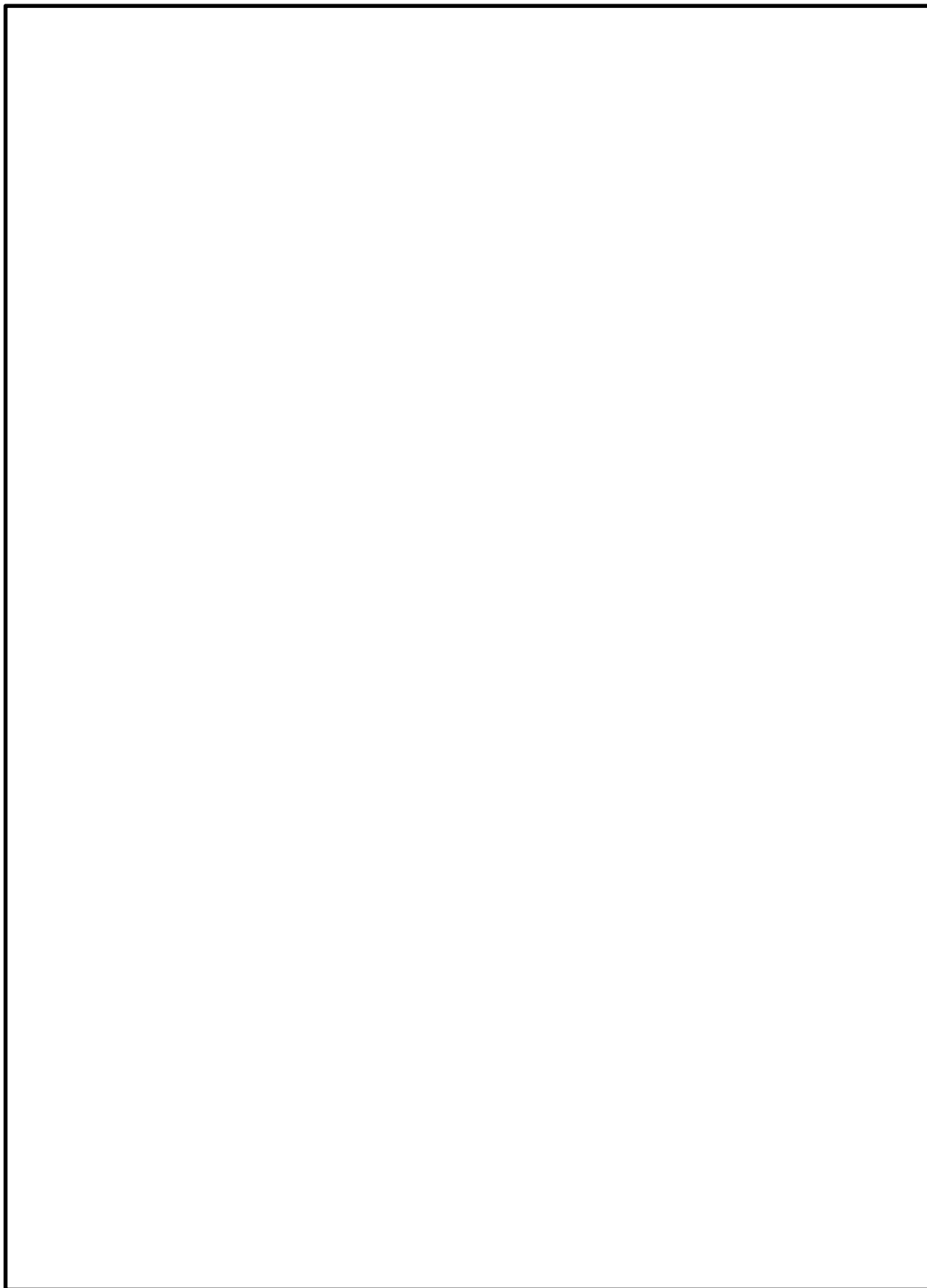


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン防護対策施設防護鋼板の割付展開図 (3/4)
(2 D 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設 (2/2))

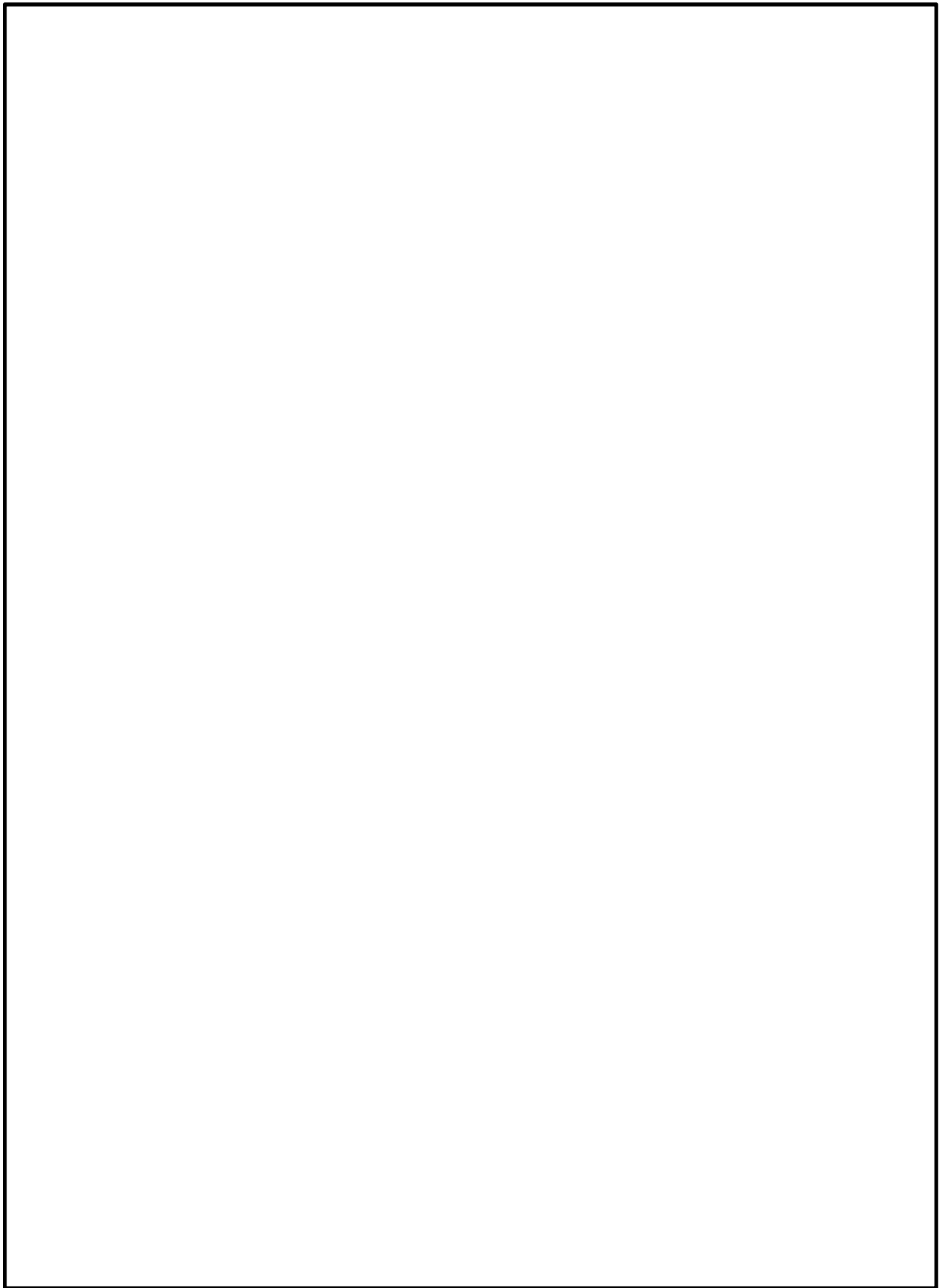


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン防護対策施設防護鋼板の割付展開図(4/4)
(高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

(2) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設**防護鋼板**

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

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

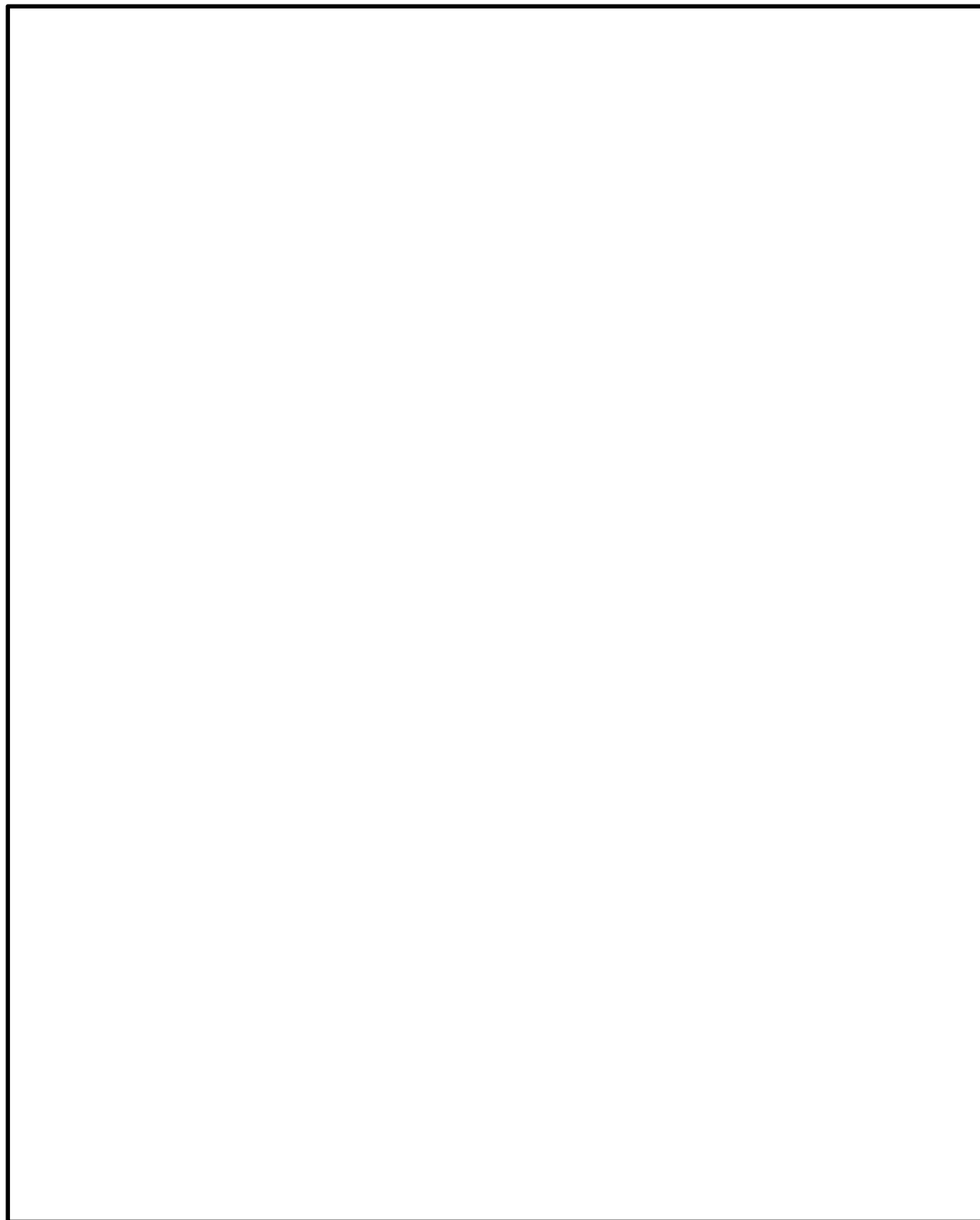


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の割付展開図(1/2)

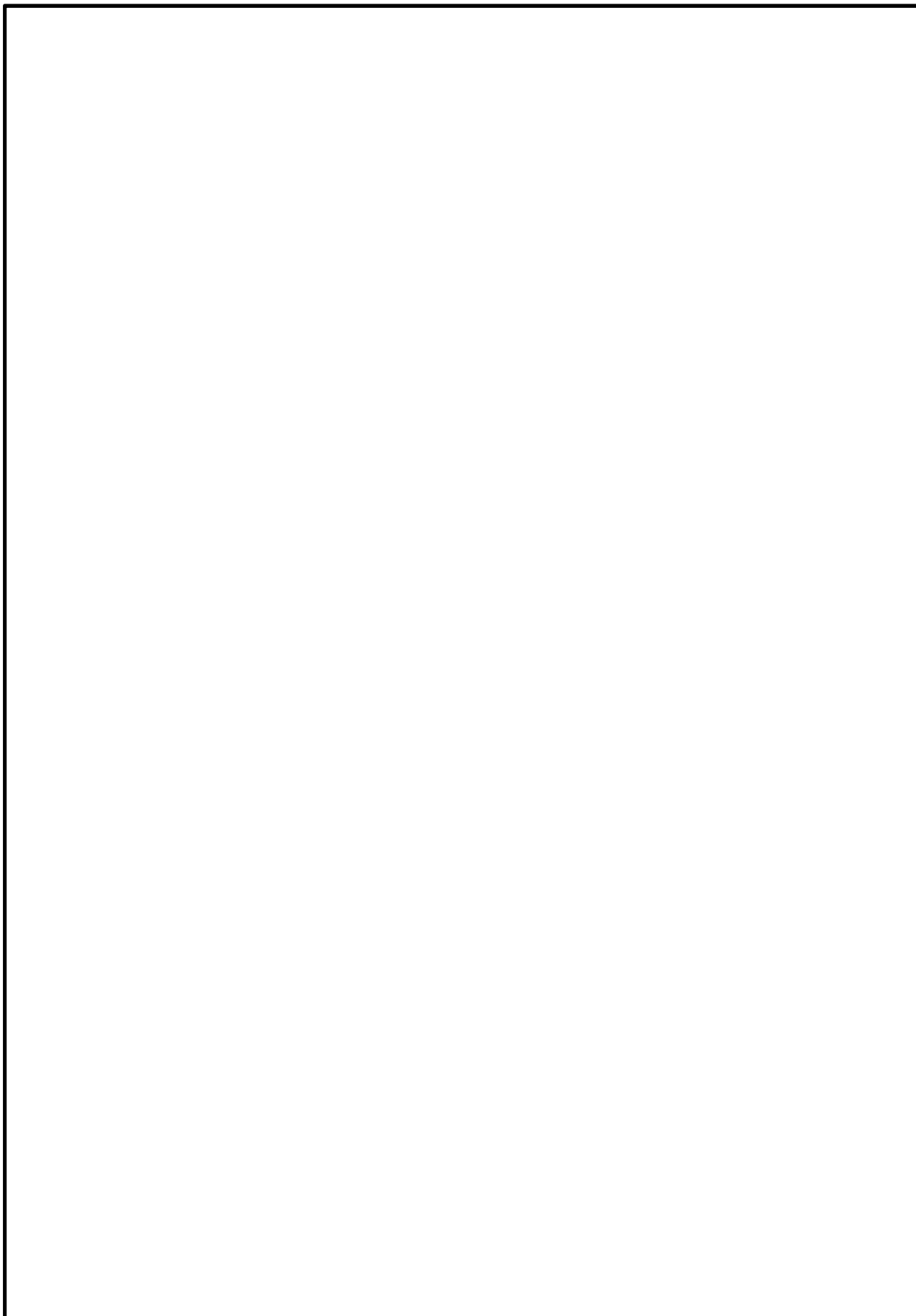


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の割付展開図 (2/2)

(3) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設**防護鋼板**

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

海水ポンプエリア竜巻防護対策施設防護鋼板の割付展開図を図 2-4 に示す。

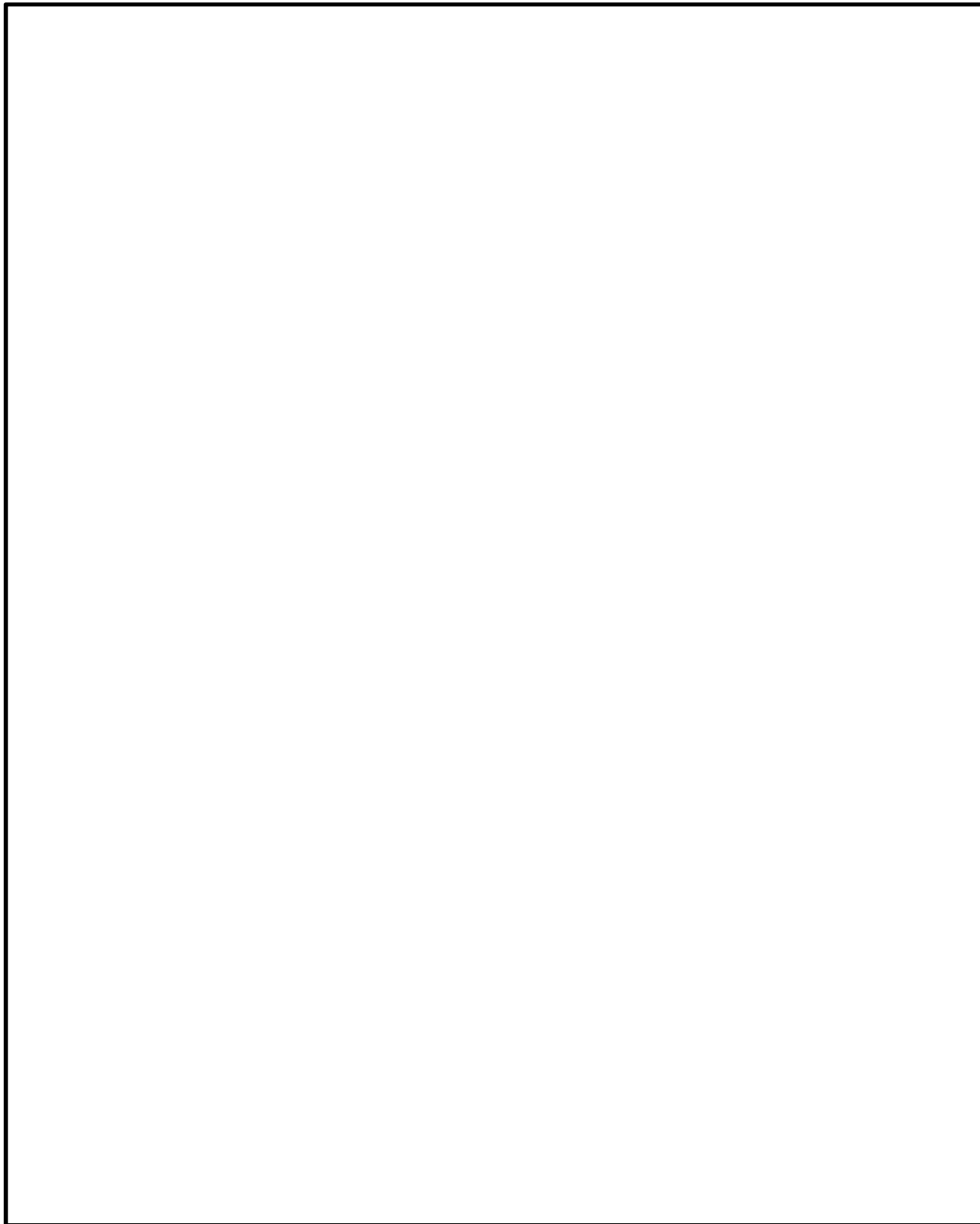


図 2-4 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設**防護鋼板**の割付展開図 (1/2) (エリア⑦)

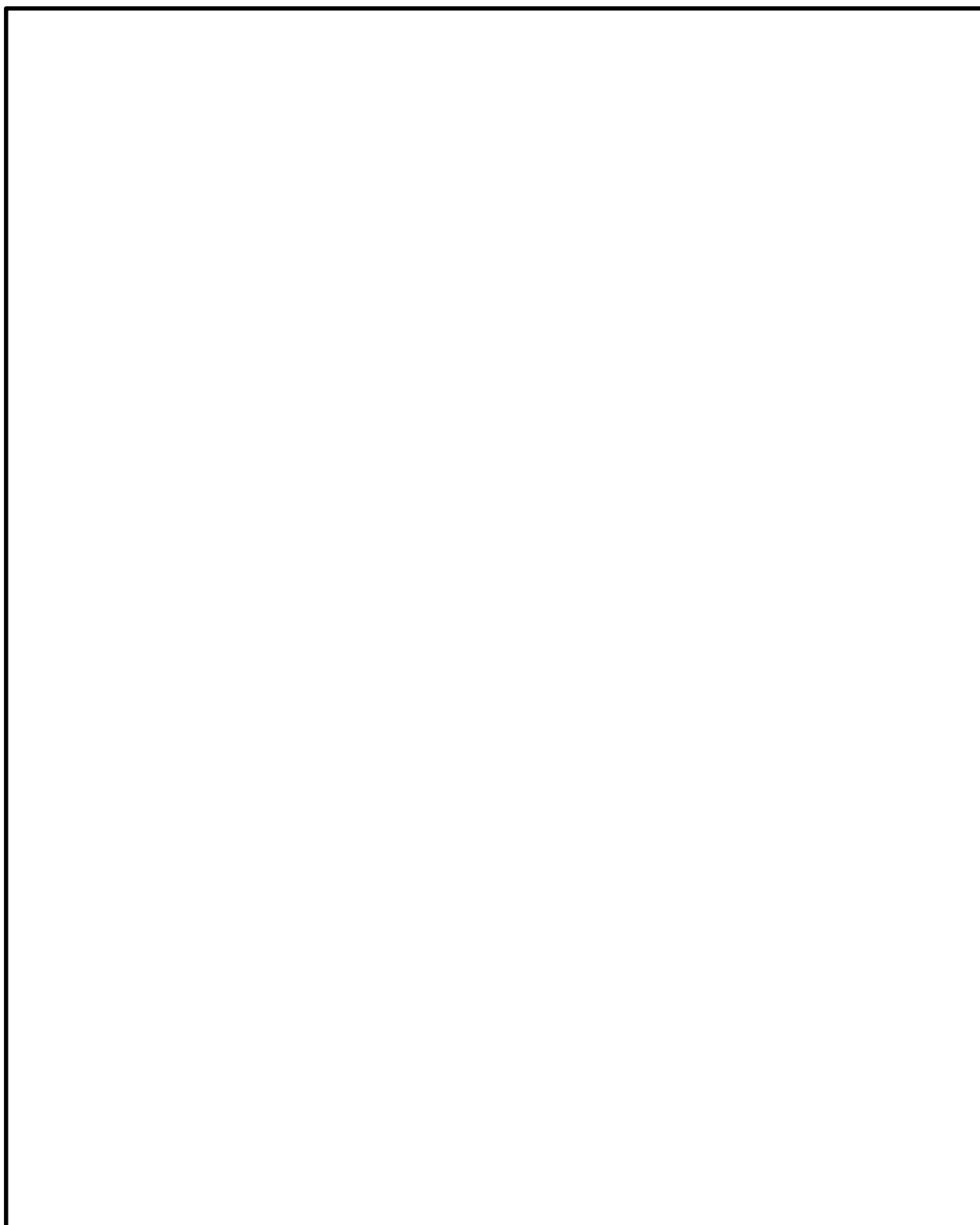


図 2-4 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設防護鋼板の割付展開図 (2/2) (エリア⑧)

(4) 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設防護鋼板

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

中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設防護鋼板の割付展開図を図 2-5 に示す。

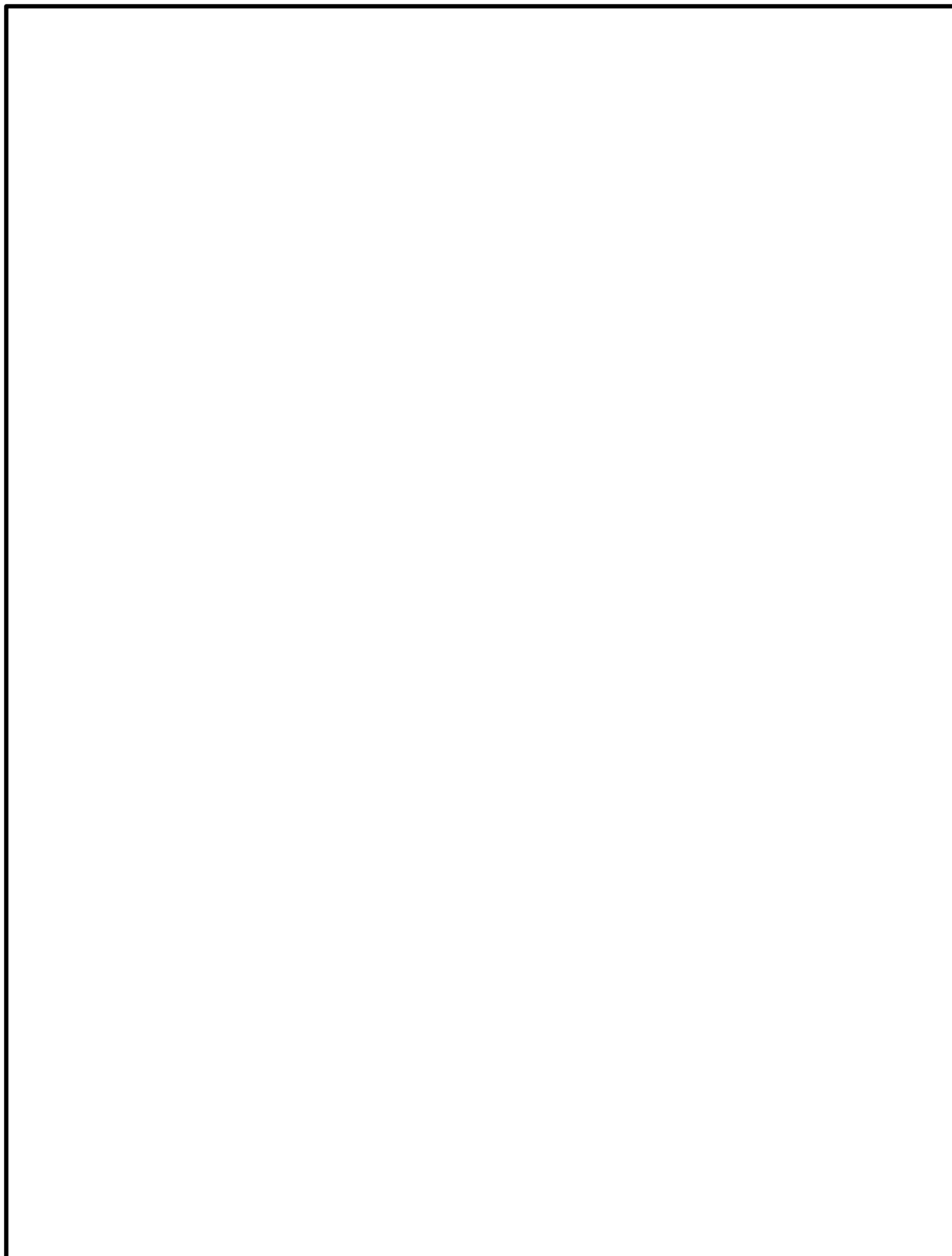


図 2-5 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設防護鋼板の割付展開図

(5) 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設**防護鋼板**

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

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

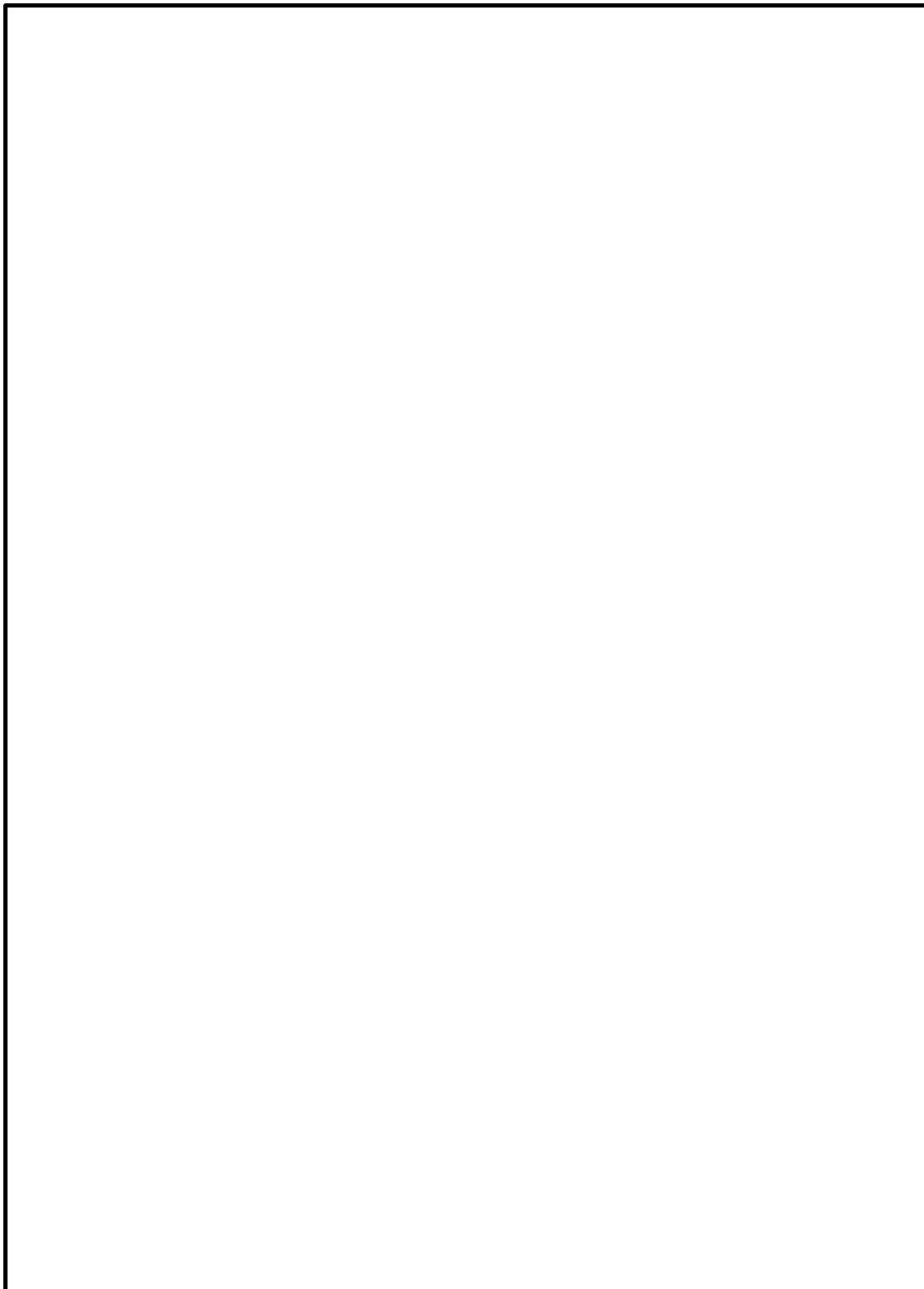


図 2-6 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設防護鋼板の割付展開図

(6) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設防護鋼板

使用済燃料乾式貯蔵容器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。

使用済燃料乾式貯蔵容器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。

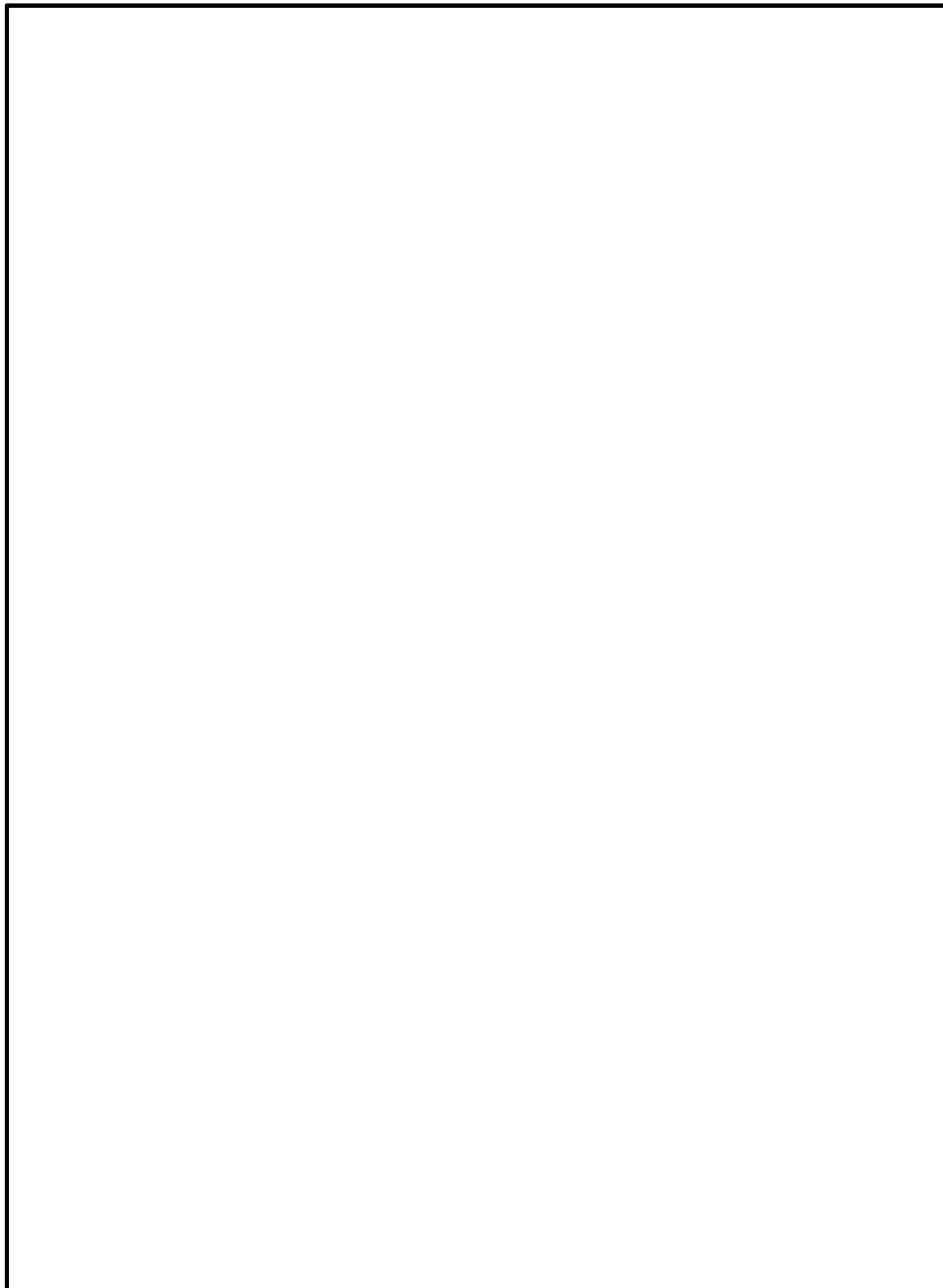


図 2-7 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設防護鋼板の割付展開図

(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

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 2-8 に示す。

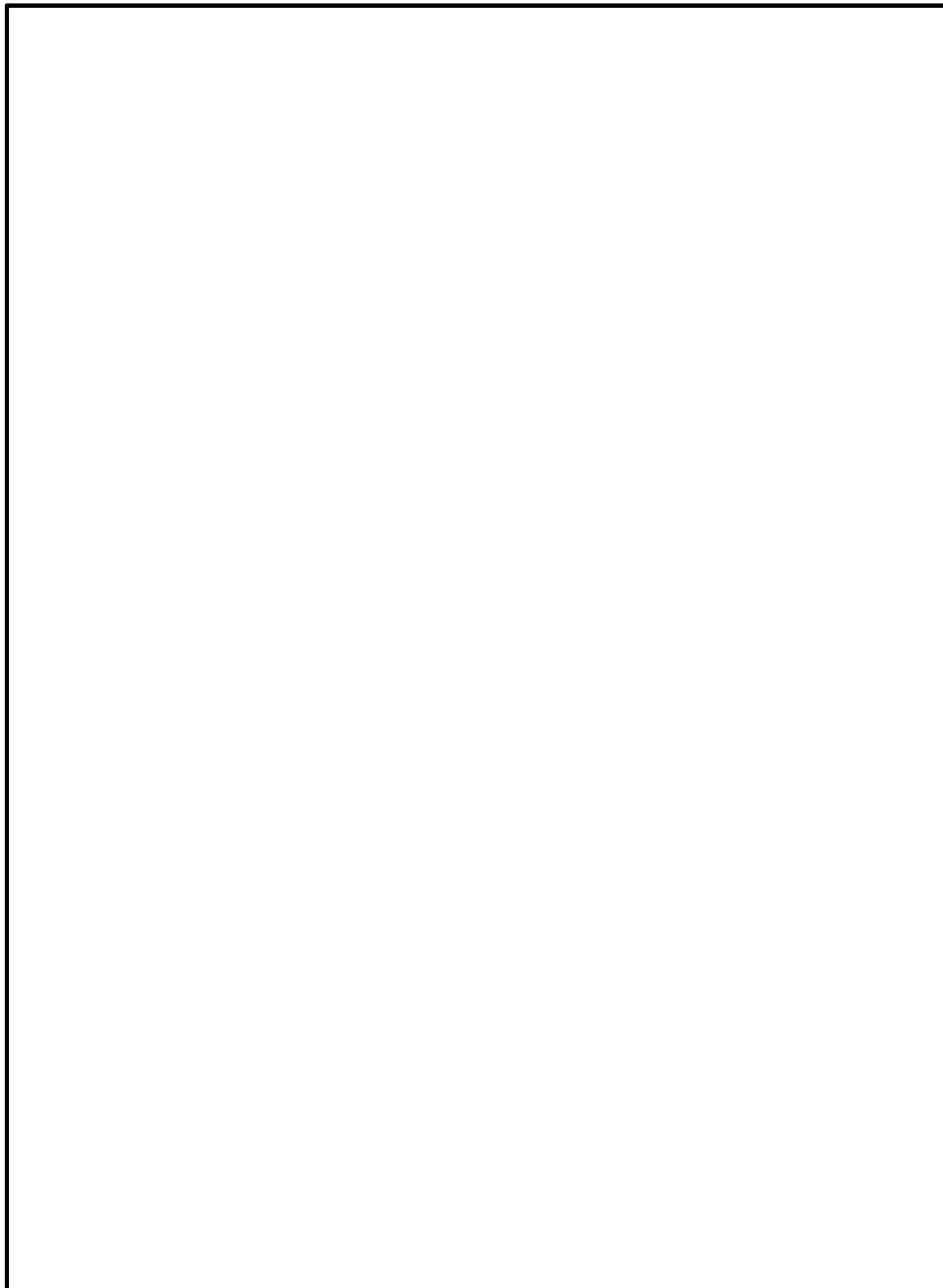


図 2-8 原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設防護鋼板の割付展開図

(8) 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 2-9 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

(9) 原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板

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

原子炉建屋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 2-10 に示す。

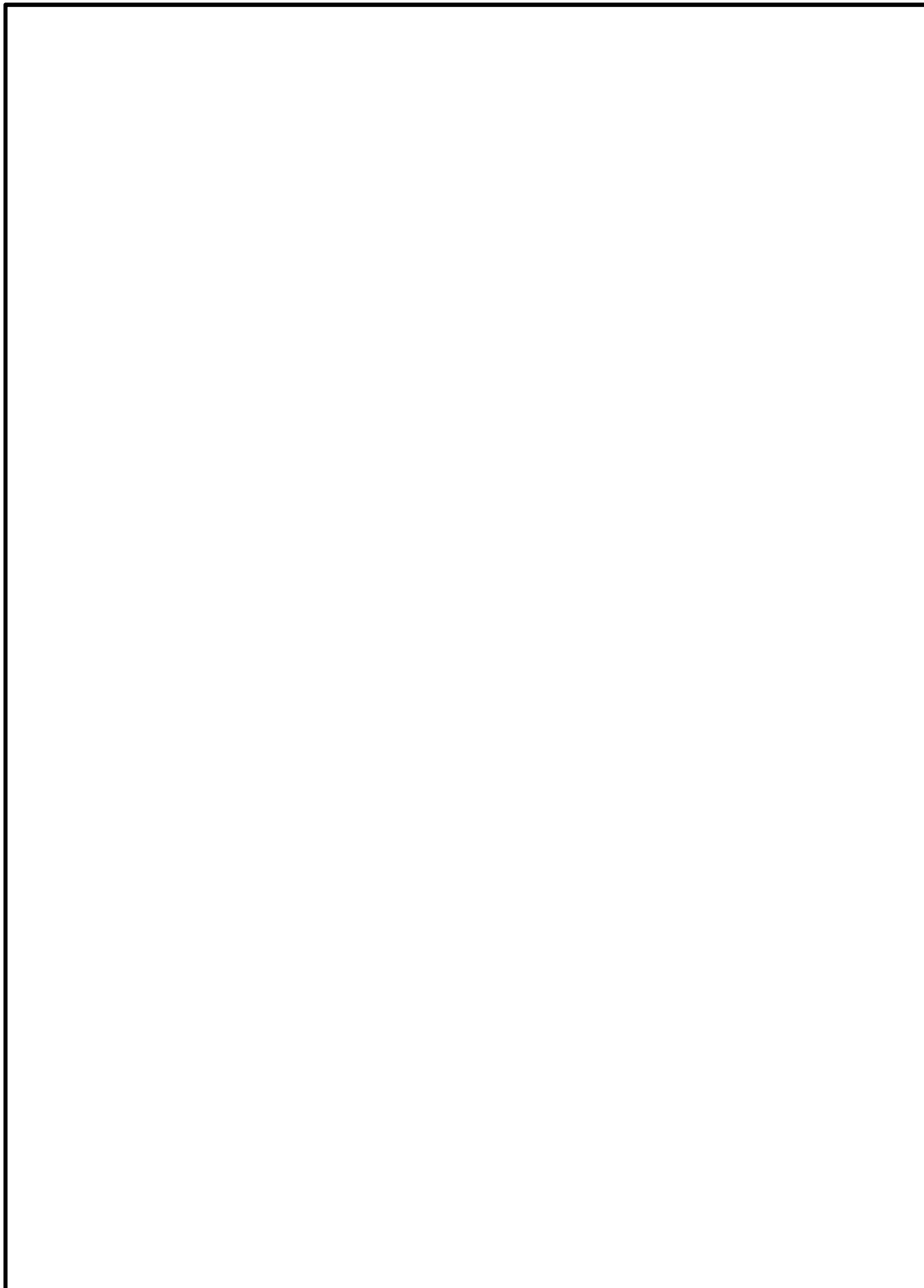


図 2-10 原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板の割付展開図

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。

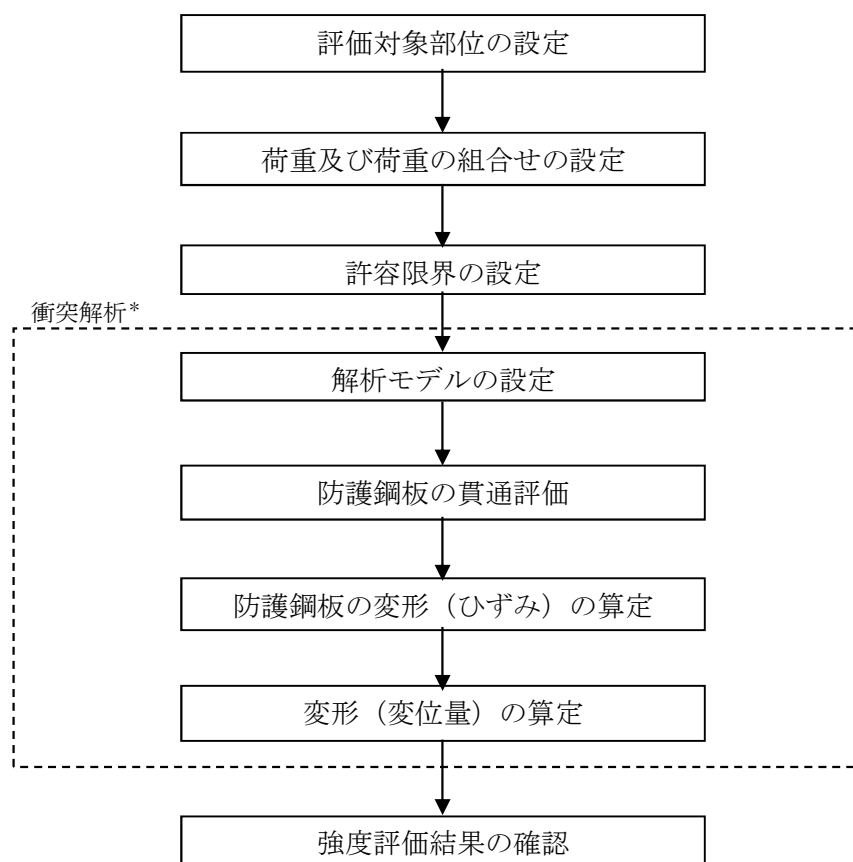
防護鋼板の評価フローを図 2-10 に示す。

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

(1) 貫通評価

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

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

貫通評価に用いる防護鋼板の仕様を表 3-2 に示す。

表 3-2 貫通評価に用いる防護鋼板の仕様

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

(2) 変形評価

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

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

変形評価に用いる防護鋼板の仕様を表 3-3 に示す。

表 3-3 変形評価に用いる防護鋼板の仕様

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

3.3 荷重及び荷重の組合せ

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

(1) 荷重の設定

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

表 3-4 荷重の算定に用いる竜巻の特性値

最大風速 V_D (m/s)	移動速度 V_T (m/s)	最大接線風速 V_{Rm} (m/s)	最大気圧低下量 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、下式により算定する。

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

設計用速度圧 q は、下式により算定する。

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

b. 飛来物による衝撃荷重(W_M)

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

表 3-5 飛来物の諸元

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

c. 常時作用する荷重(F_D)

常時作用する荷重(F_D)としては、自重を考慮する。

(2) 荷重の組合せ

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

荷重の組合せを表 3-6 に示す。

表 3-6 荷重の組合せ

評価内容	荷重の組合せ
貫通評価	$W_W + W_M + F_d$

ここで、風圧力による荷重と自重の組合せを考えた場合、鉛直設置鋼板への飛来物衝突時の変形方向（水平）においては、想定する風圧力（想定最大値： $6100\text{N/m}^2 \times 1.2$ （風力係数）＝ 7320 N/m^2 ）が卓越する。これは、水平設置鋼板の衝突時変形方向（鉛直下向き）に作用する、風圧力（上向きのため考慮しない）と自重（約 N/m^2 ）の和より大きくなることから、評価においては、代表性を考慮し鉛直設置鋼板の風圧力を想定した荷重を設定する。

3.4 許容限界

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

(1) 貫通評価

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

貫通評価及び変形評価の許容限界を表 3-7 に示す。

表 3-7 許容限界(防護鋼板の貫通評価)

ケース	材質	破断ひずみ (真ひずみ)
1		
2		

(2) 変形評価

変形評価の許容限界としては，防護鋼板の各材質ごとに，それぞれが適用されている部位における防護対象施設との離隔距離のうち，最少となるものを設定する。

変形評価の許容限界を表 3-8 に示す。

表 3-8 許容限界(防護鋼板の変形評価)

ケース	材質	衝突方向変位量(mm)
1		
2		

3.5 評価方法

(1) 解析モデル

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

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

防護鋼板及び飛来物の解析モデル図を図 3-1 に示す。

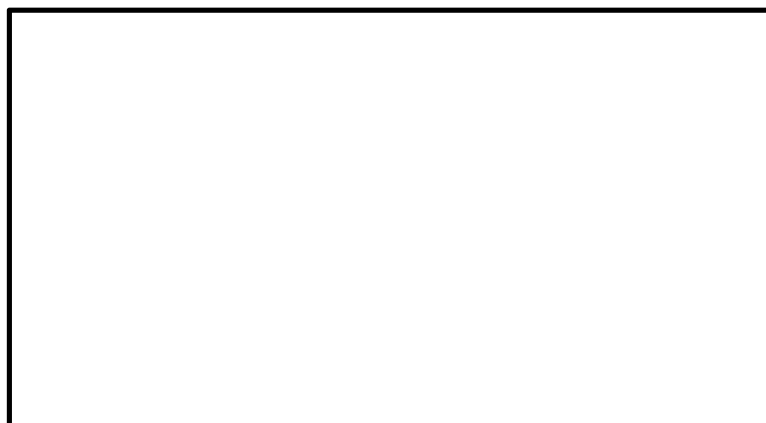


図 3-1 防護鋼板及び飛来物の解析モデル図

(2) 材料定数

飛来物及び防護鋼板に使用する鋼材の材料定数を表 3-9 に示す。

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

表 3-9 使用材料の材料定数

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

(3) 鋼製材料の非線形特性

a. 材料の応力－ひずみ関係

飛来物の衝突に対する解析は、変形速度が大きいいためひずみ速度効果を考慮することとし、以下に示す Cowper－Symonds の式を適用する。

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

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。これらのパラメータを表 3-10 に示す。

表 3-10 Cowper-Symonds 式への入力パラメータ

	飛来物 (鋼製材)	防護鋼板
材料		
B		
n		
D (s ⁻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 3-2 に示す。

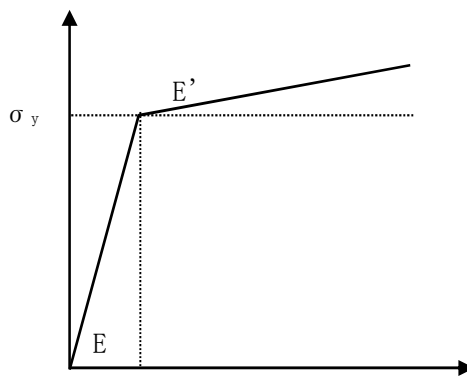


図 3-2 バイリニア型応力-ひずみ関係の概念図

b. 破断ひずみ

破断ひずみは、JIS に規定されている伸びの下限値を基に設定する。また、「NEI 07-13」において 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、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

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

※：真ひずみ換算値

4. 強度評価結果

(1) 貫通評価

防護鋼板の貫通評価結果を第 4-1 表に示す。防護鋼板のひずみは許容限界を超えず，設計飛来物は防護鋼板を貫通しない。

第 4-1 表 貫通評価結果

ケース	ひずみ	
	評価結果	許容限界
1		
2		

(2) 変形評価

防護鋼板の変形評価結果を第 4-2 表に示す。衝突方向変位量は許容限界を超えず，防護鋼板が防護対象施設に接触することはない。

第 4-1 表 変形評価結果

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

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	10
2.4	適用規格	12
3.	強度評価方法	13
3.1	記号の定義	13
3.2	評価対象部位	13
3.3	荷重及び荷重の組合せ	13
3.4	許容限界	15
3.5	評価方法	19
4.	評価条件	30
5.	強度評価結果	34
5.1	貫通評価	34
5.2	支持機能評価	34

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。

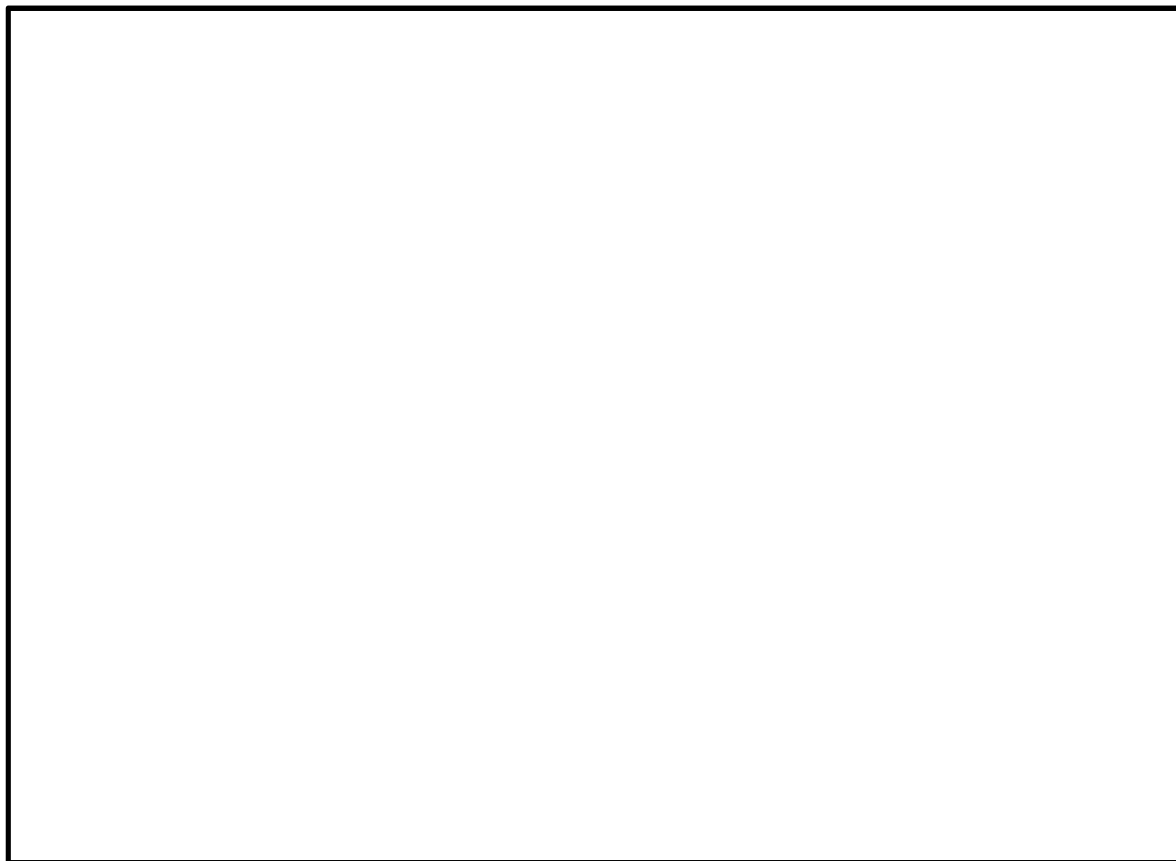


図 2-1 架構の設置位置図

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。

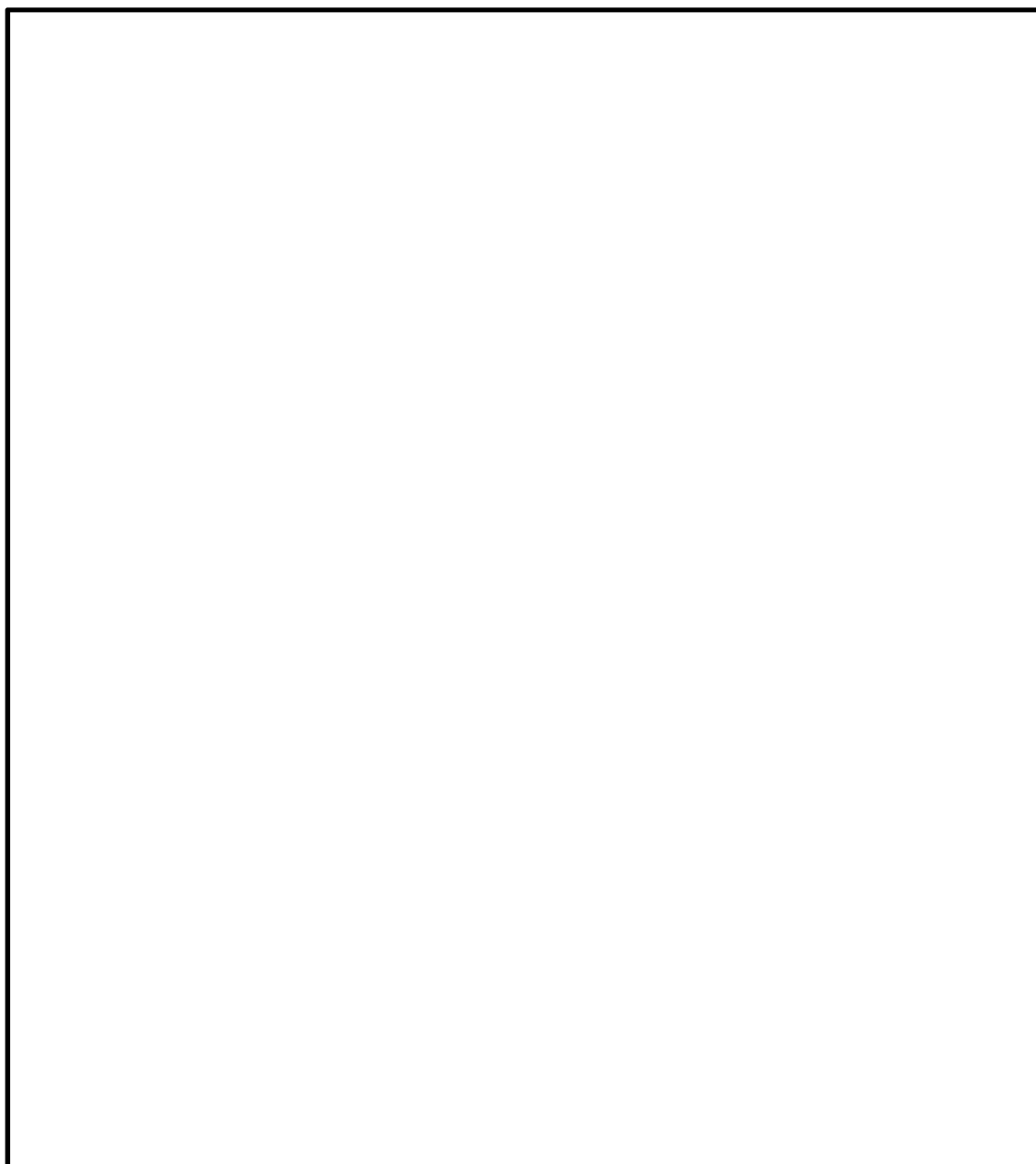


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造図(1/4)
(2 C 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

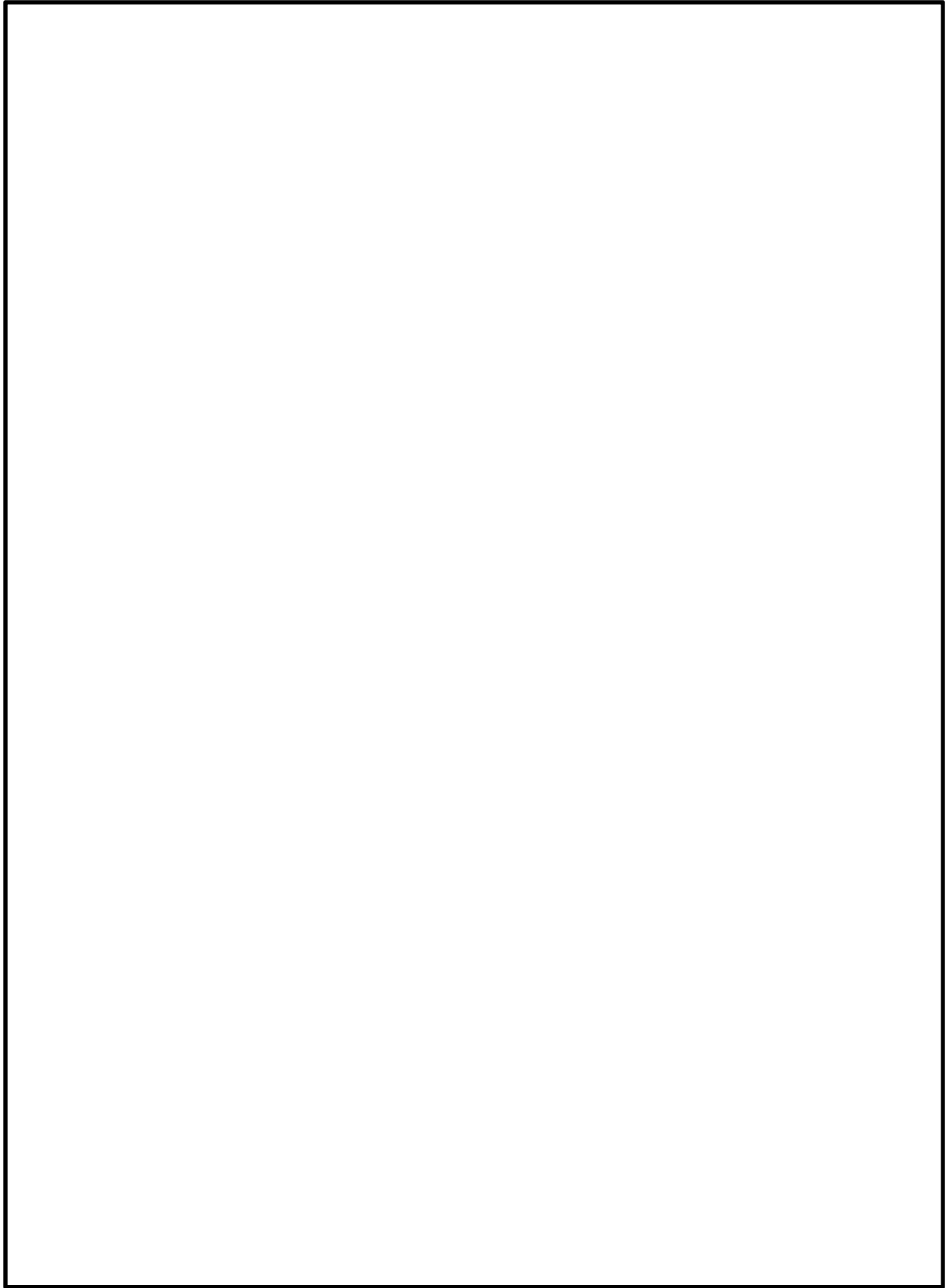


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造図 (2/3)
(2 D 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

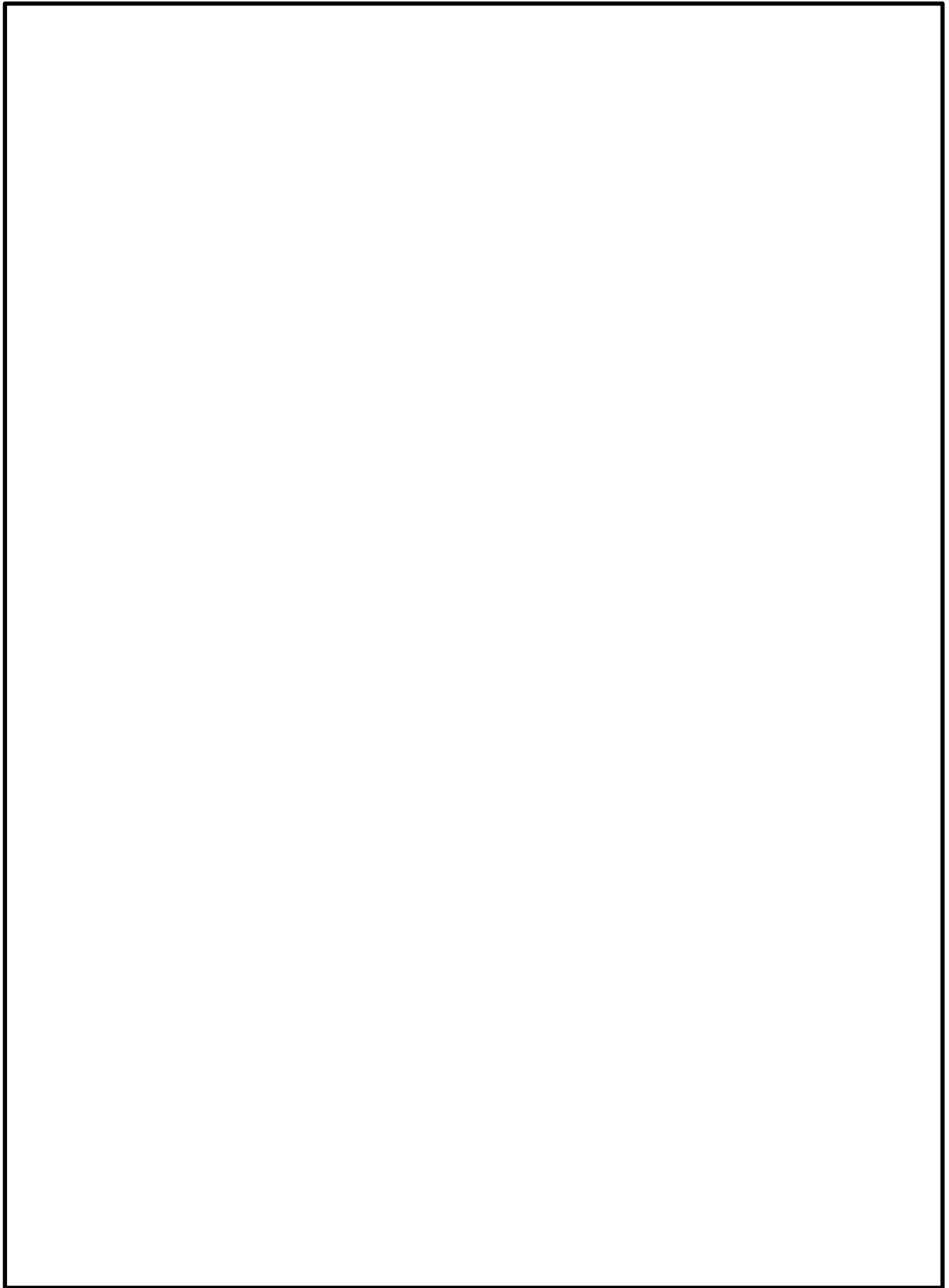


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造図 (3/3)
(高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

(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。

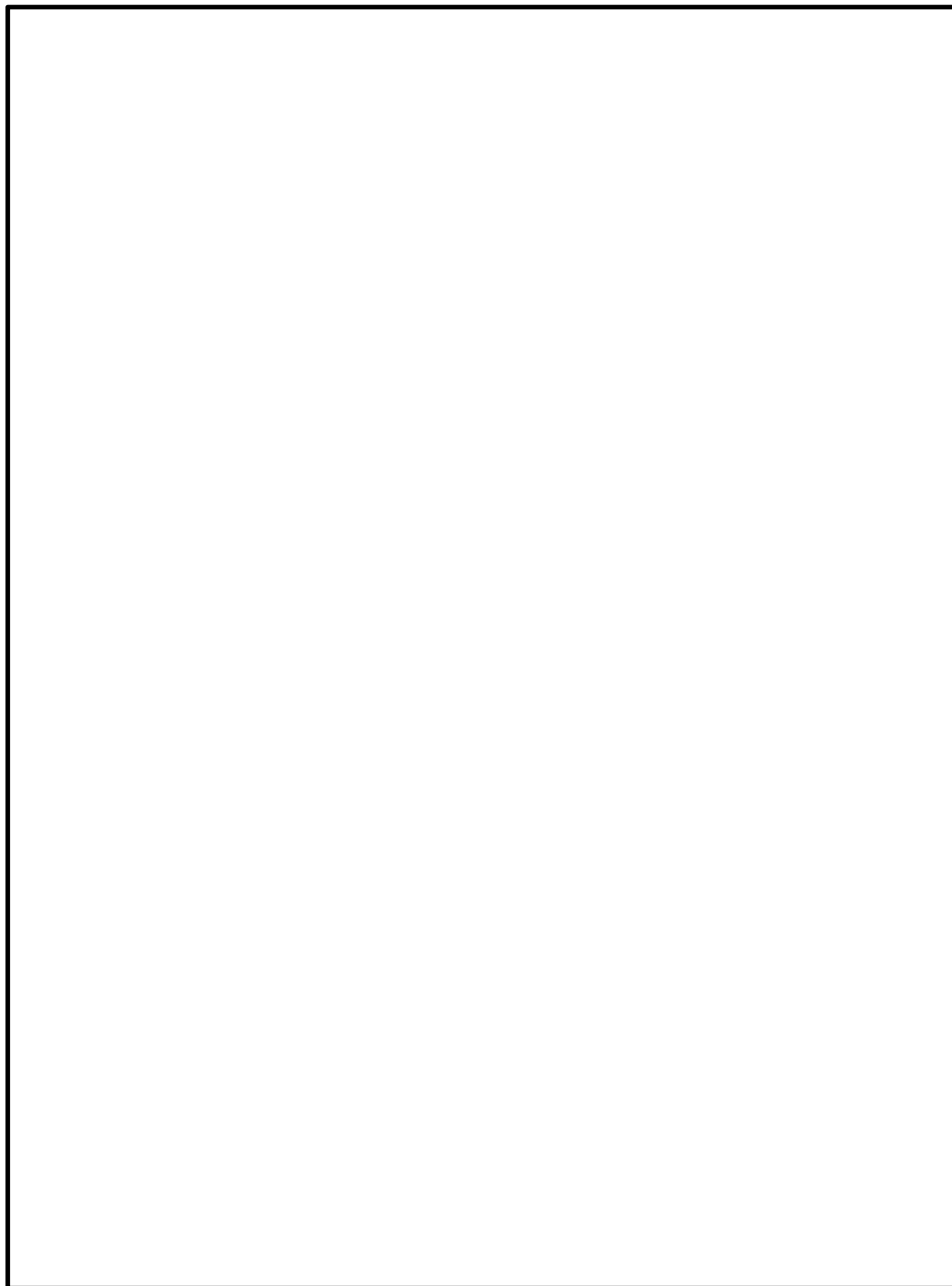


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図

(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。

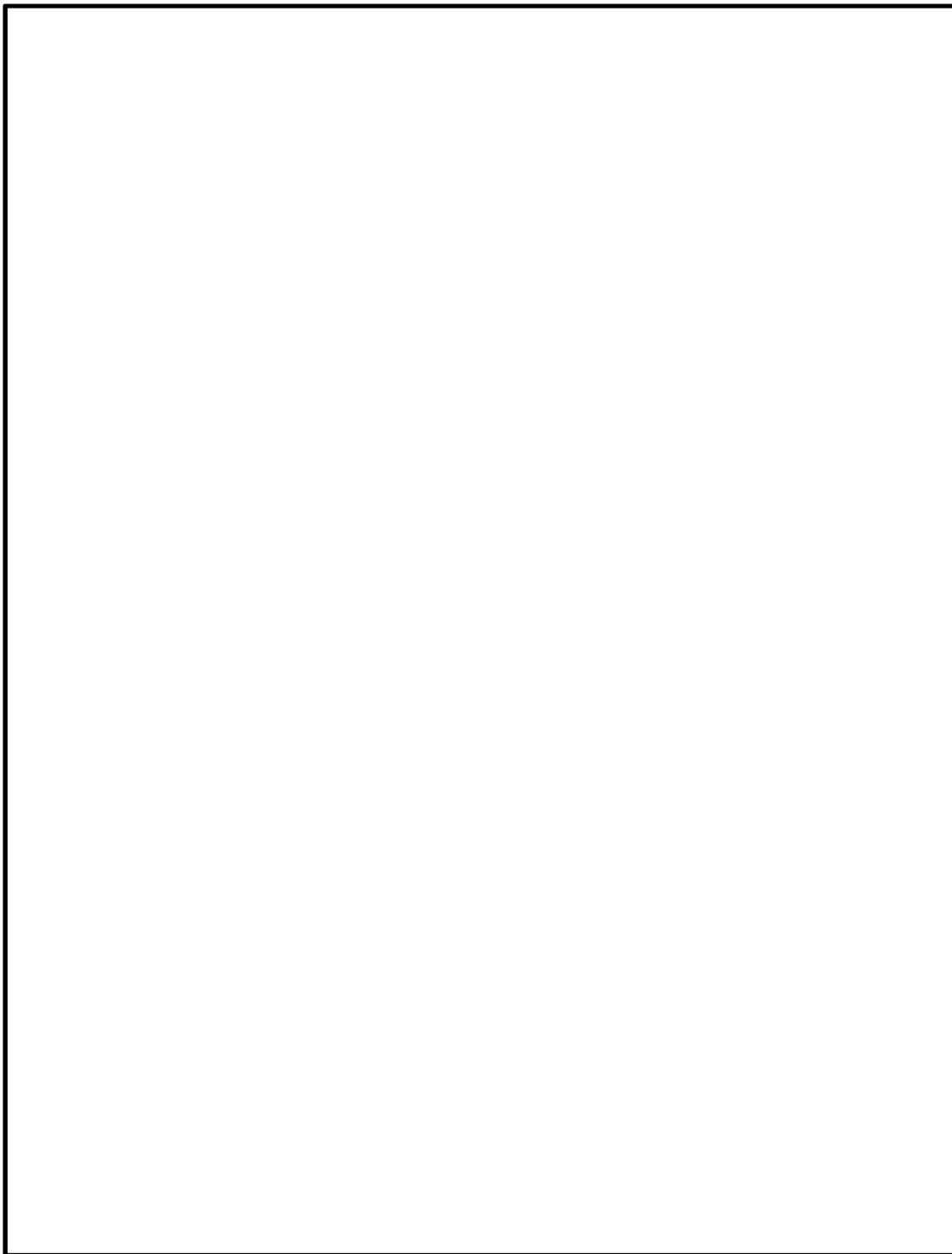


図 2-4 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構の構造図

(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。

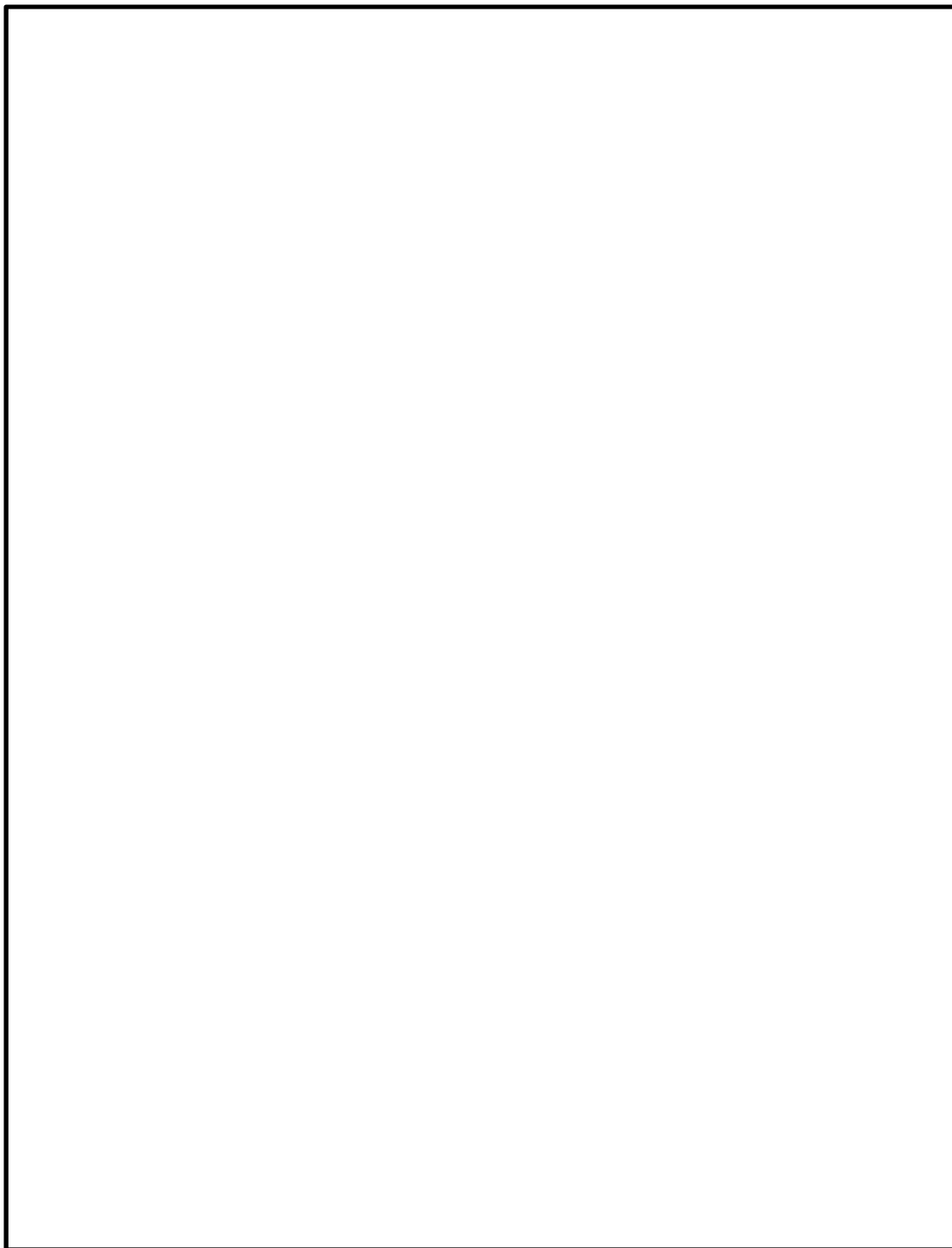


図 2-5 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構の構造図

(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。

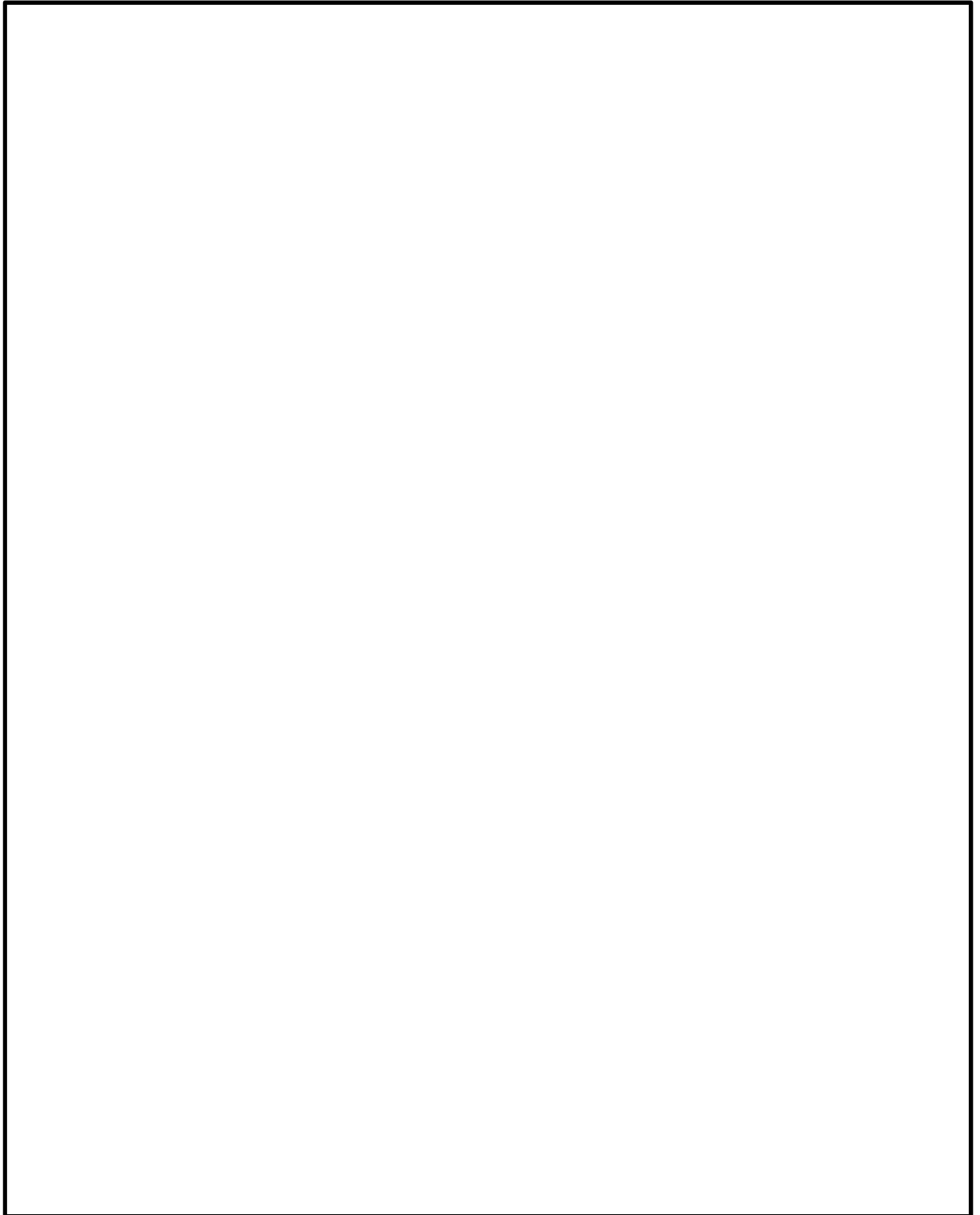


図 2-6 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構の構造図

(6) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構

使用済燃料乾式貯蔵容器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、柱、はり等により構成される。

使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構の構造を図 2-7 に示す。



図 2-7 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構の構造図

(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。

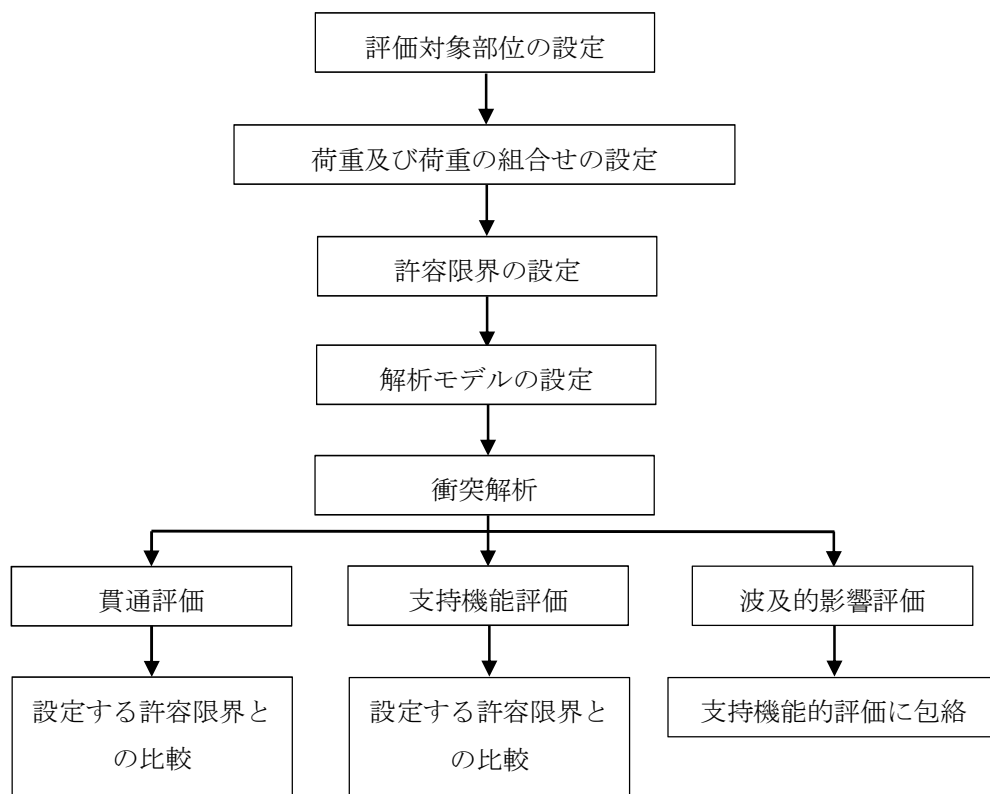


図 2-10 架構の評価フロー

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

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

3.3 荷重及び荷重の組合せ

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

3.3.1 荷重の設定

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

表 3-2 荷重の算定に用いる竜巻の特性値

最大風速 V_D (m/s)	移動速度 V_T (m/s)	最大接線風速 V_{Rm} (m/s)	最大気圧低下量 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	3.6×2.5×8.6	5000	52	—※	使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の うち、車両防止柵

※：建屋排気口からの侵入は、構造上水平方向のみを考慮すれば良い。

表 3-4 飛来物の特性値

飛来物	ヤング係数 (N/mm^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。

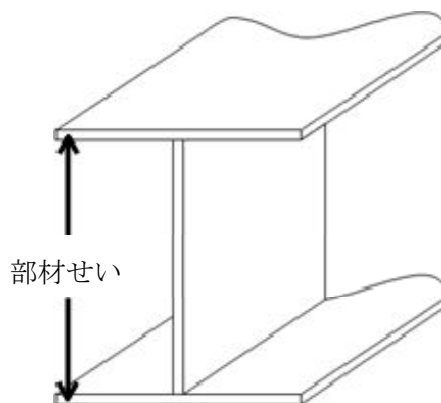


図 3-1 貫通評価における許容限界とする部材せい

(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 ($5 < t \leq 16$)	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 (℃)	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 (℃)	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 (℃)	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 (℃)	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 (℃)	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 (℃)	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。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次元フレーム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。

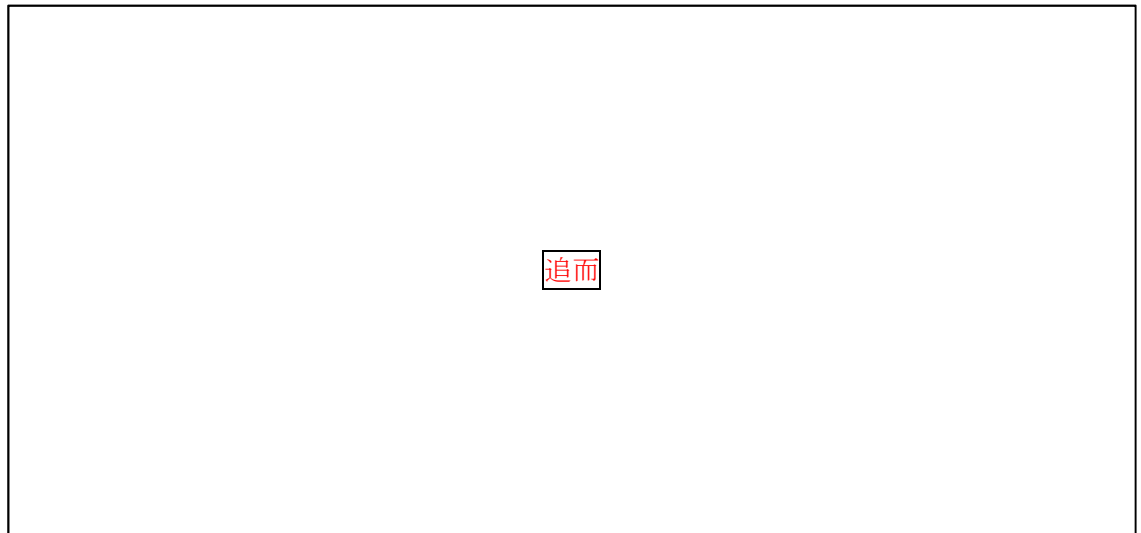


図 3-2 解析モデル図(代表部材モデルと飛来物)

(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

非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構，中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構及び中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構，海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構，原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構及び使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構においては，架構全体の支持機能評価においては，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。

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においては，当該架構が原子炉建屋に繋がって一体化した構造であることを鑑み，飛来物の衝撃荷重の影響は，衝突により柱若しくははりの一本を喪失したモデルに置き換えた上で，風圧力による荷重，気圧差による荷重及び常時作用する荷重を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ベントファン竜巻防護対策施設架構)



図 3-4 解析モデル図(中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構)



図 3-5 解析モデル図(海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構)

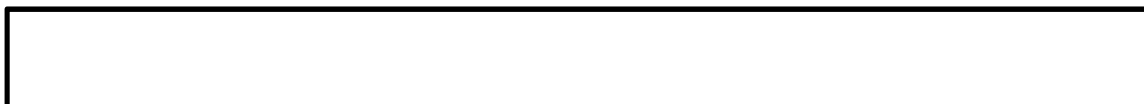


図 3-6 解析モデル図(原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構)



図 3-7 解析モデル図(中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構)



図 3-8 解析モデル図(使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構)



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	℃	
	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	℃	
	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	T	℃	

	(雰囲気温度)			
	縦弾性係数	E	MPa	
	ポアソン比	ν	-	
	全体質量	-	kg	

(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ベン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
						X 方向
						Y 方向

表 3-16 固有振動数(中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構)

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

表 3-17 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
						X 方向
						Y 方向

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

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

表 3-19 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	
<div>追而</div>						Z 方向
						X 方向
						Y 方向

表 3-20 固有振動数(使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構)

次数	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	
<div>追而</div>						Z 方向
						X 方向
						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 3-12 に、応答加速度算出結果を表 3-23 に示す。

表 3-23 防護対策施設の諸元

	全体質量 M (kg)	方向		固有振動数 f (Hz)	バネ定数 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	追而
			Y		
		鉛直	Z		
中央制御室換気系冷凍機竜巻防護		水平	X		

対策施設架構			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	
			Y	
		鉛直	Z	

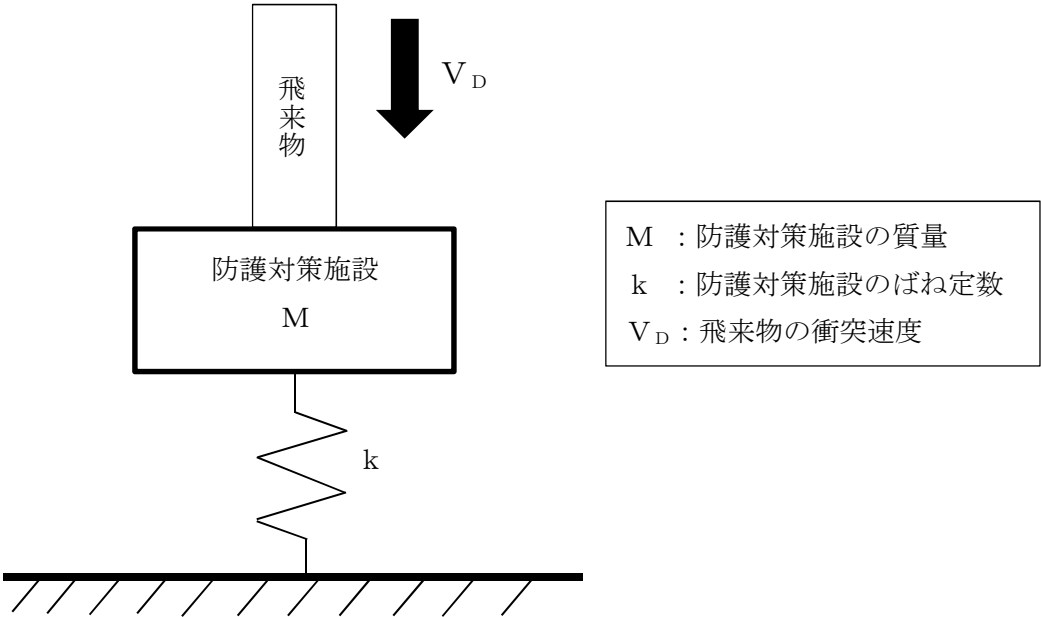


図 3-12 応答加速度評価モデル

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ベン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		

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

非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構，中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構及び中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構，海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構，原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構及び使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構においては，架構全体の支持機能評価においては，「3.5(2)b.(c) 応答加速度の算出」で算出した飛来物が衝突した際の応答加速度を図 3-3～図 3-11 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	$\frac{Q_y}{A_{sy}}, \frac{Q_z}{A_{sz}}$
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_{sy}, A_{sz} : 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 室ルーフベントファン竜 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	

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. 動的解析における鋼製材料の非線形特性

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

(a) 材料の応力－ひずみ関係

，以下に示す Cowper－Symonds の式を適用する。

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

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。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	
n	1	1	追而
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。

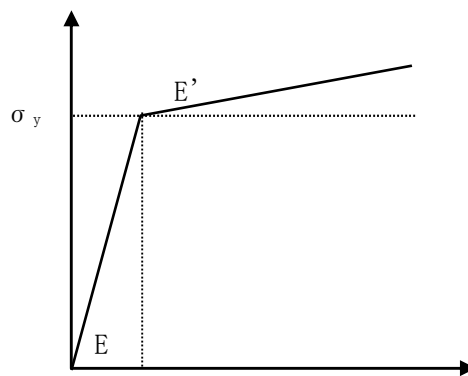


図 4-1 バイリニア型応力-ひずみ関係の概念図

(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	

※：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の近傍の部材についても破断に至ることはない。

表 5-2 支持機能評価(架構部材への衝突時)

評価対象	評価部材 番号	飛来物	最大 ひずみ	破断ひずみ (許容限界)
<ul style="list-style-type: none"> ・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 ルーフベントファン竜巻防 護対策施設架構	架構	追而			
	アンカー ボルト				
中央制御室換気系冷凍機竜 巻防護対策施設架構	架構				
	アンカー ボルト				
中央制御室換気系開口部竜 巻防護対策施設架構	架構				
	アンカー ボルト				
海水ポンプエリア竜巻防護 対策施設架構	架構				
	アンカー ボルト				
原子炉建屋外側ブローアウ トパネル竜巻防護対策施設 架構	架構				
	アンカー ボルト				
使用済燃料乾式貯蔵容器竜 巻防護対策施設架構	架構				
	アンカー ボルト				
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