

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 27
提出年月日	平成 30 年 6 月 29 日

V-3-別添 1 竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書

目次

- V-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針
 - V-3-別添 1-1-1 竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書
 - V-3-別添 1-1-2 残留熱除去系海水系ポンプの強度計算書
 - V-3-別添 1-1-3 残留熱除去系海水系ストレーナの強度計算書
 - V-3-別添 1-1-4 排気筒の強度計算書
 - V-3-別添 1-1-5 換気空調設備の強度計算書
 - V-3-別添 1-1-6 ディーゼル発電機用海水ポンプの強度計算書
 - V-3-別添 1-1-7 ディーゼル発電機用海水ストレーナの強度計算書
 - V-3-別添 1-1-8 ディーゼル発電機吸気口の強度計算書
 - V-3-別添 1-1-9 配管及び弁の強度計算書
 - V-3-別添 1-1-10 波及的影響を及ぼす可能性がある施設の強度計算書
 - V-3-別添 1-1-10-1 建屋及び構造物の強度計算書
 - V-3-別添 1-1-10-2 消音器の強度計算書
 - V-3-別添 1-1-10-3 排気管、放出管及びベント管の強度計算書
- V-3-別添 1-2 防護対策施設の強度計算の方針
 - V-3-別添 1-2-1 防護対策施設の強度計算書
 - V-3-別添 1-2-1-1 防護ネットの強度計算書
 - V-3-別添 1-2-1-2 防護鋼板の強度計算書
 - V-3-別添 1-2-1-3 架構の強度計算書
- V-3-別添 1-3 屋外重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算の方針
 - V-3-別添 1-3-1 屋外重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算書

: 今回ご説明分

V-3-別添 1-1 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.....	67
4.1 荷重及び荷重の組合せ.....	67
4.2 許容限界.....	78
5. 強度評価方法.....	96
5.1 建屋・構造物に関する評価式.....	97
5.2 機器・配管系に関する評価式.....	105
6. 適用規格.....	158

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) 屋外の外部事象防護対象施設

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外部事象防護対象施設とする。

(3) 外気と繋がっている屋内の外部事象防護対象施設

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**外部事象**防護対象施設とする。

- (4) **外部事象**防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設

外部事象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。

外部事象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、**外部事象**防護対象施設及び**外部事象**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、貫入等の変形が生じた場合においても、当該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

b. 機器・配管系

(a) 貫入

(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) 海水ポンプ
- (b) ディーゼル発電機吸気口
- (c) 海水ストレーナ
- (d) 消音器
- (e) 主排気筒
- (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) 海水ポンプ

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"> ・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) 屋外の外部事象防護対象施設	<ul style="list-style-type: none"> ・非常用ディーゼル発電機吸気口 ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機吸気口 ・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 ・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 ・主排気筒 ・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） ・非常用ガス処理系排気筒（配管部を含む。以下同じ。） ・原子炉建屋*
(3) 外気と繋がっている屋内の外部事象防護対象施設	<ul style="list-style-type: none"> ・中央制御室換気系隔離弁，ファン（ダクト含む。），非常用ディーゼル発電機室換気系ダクト及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室換気系ダクト（以下「非常用換気空調設備」という。） ・原子炉建屋換気系隔離弁及びダクト（原子炉建屋原子炉棟貫通部）
<p>(4) 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設</p> <p>a. 機械的影響を与える可能性がある施設</p> <p>b. 機能的影響を与える可能性がある施設</p>	<p>a. 機械的影響を与える可能性がある施設</p> <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 <p>b. 機能的影響を与える可能性がある施設</p> <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）

注記 *：原子炉建屋は屋外の外部事象防護対象施設だが，竜巻より防護すべき施設を内包する機能も有することから，強度評価においては「竜巻より防護すべき施設を内包する施設」の分類で評価する。

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、設計竜巻による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) 屋外の外部事象防護対象施設

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

非常用ディーゼル発電機吸気口及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機吸気口（以下「ディーゼル発電機吸気口」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溶接で固定し、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内の空気の排出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空調用冷水を冷却する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. 主排気筒

主排気筒は、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、設計竜巻による荷重及びその他考慮

すべき荷重に対し、主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並びに非常用ガス処理系排気筒）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外部事象防護対象施設

- a. ダクト（非常用換気空調設備及び原子炉建屋換気系（原子炉建屋原子炉棟貫通部））

ダクト（非常用換気空調設備及び原子炉建屋換気系（原子炉建屋原子炉棟貫通部））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及び原子炉建屋換気系（原子炉建屋原子炉棟貫通部））

隔離弁（非常用換気空調設備及び原子炉建屋換気系（原子炉建屋原子炉棟貫通部））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又は原子炉建屋換気系（原子炉建屋原子炉棟貫通部）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。

- c. ファン（非常用換気空調設備）

ファン（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、原子炉建屋床面に基礎ボルトで固定し、主要な構造部材が中央制御室の冷却に必要な風量を送風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外部事象防護対象施設」の屋内の外部事象防護対象施設の設計フローを図 3-1 に示す。

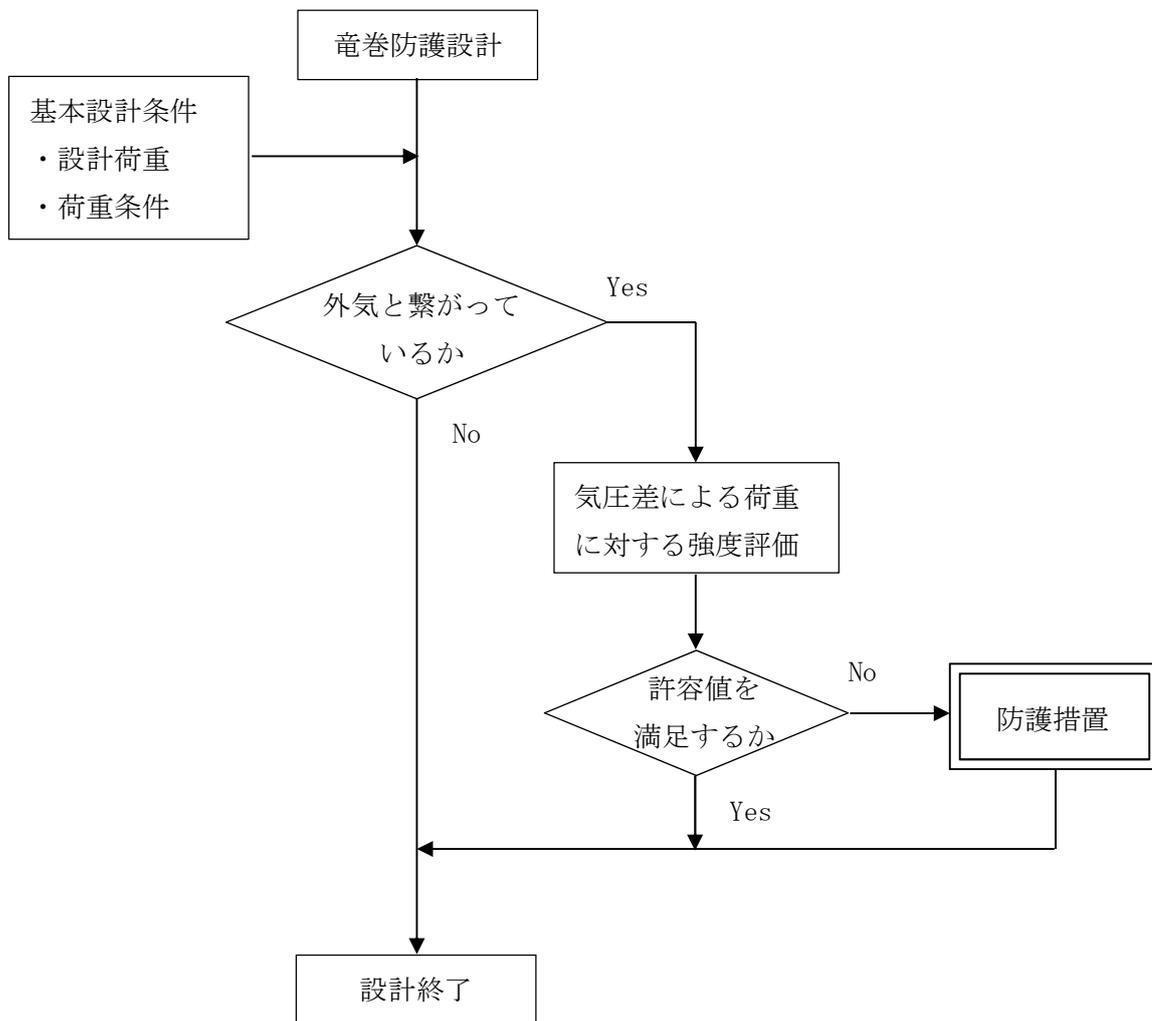


図 3-1 屋内の外部事象防護対象施設の設計フロー

(4) 外部事象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「3.4(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、設計竜巻による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) 海水ポンプエリア防護壁

海水ポンプエリア防護壁は、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、外部事象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。

(c) 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「3.4(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、外部事象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「3.4(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「3.4(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「3.4(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「3.4(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、原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉、原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)、原子炉建屋付属棟1階東側水密扉、原子炉建屋付属棟1階南側水密扉、原子炉建屋付属棟2階東側機器搬入口扉、原子炉建屋付属棟2階サンプルタンク室連絡通路扉、原子炉建屋付属棟3階バルブ室東側扉、原子炉建屋付属棟3階バルブ室北側扉、原子炉建屋付属棟3階西側非常用階段連絡口扉、空調機械室搬入口扉、空調機械室搬入口扉(潜戸)、原子炉建屋付属棟4階南東側機器搬入口扉についても、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

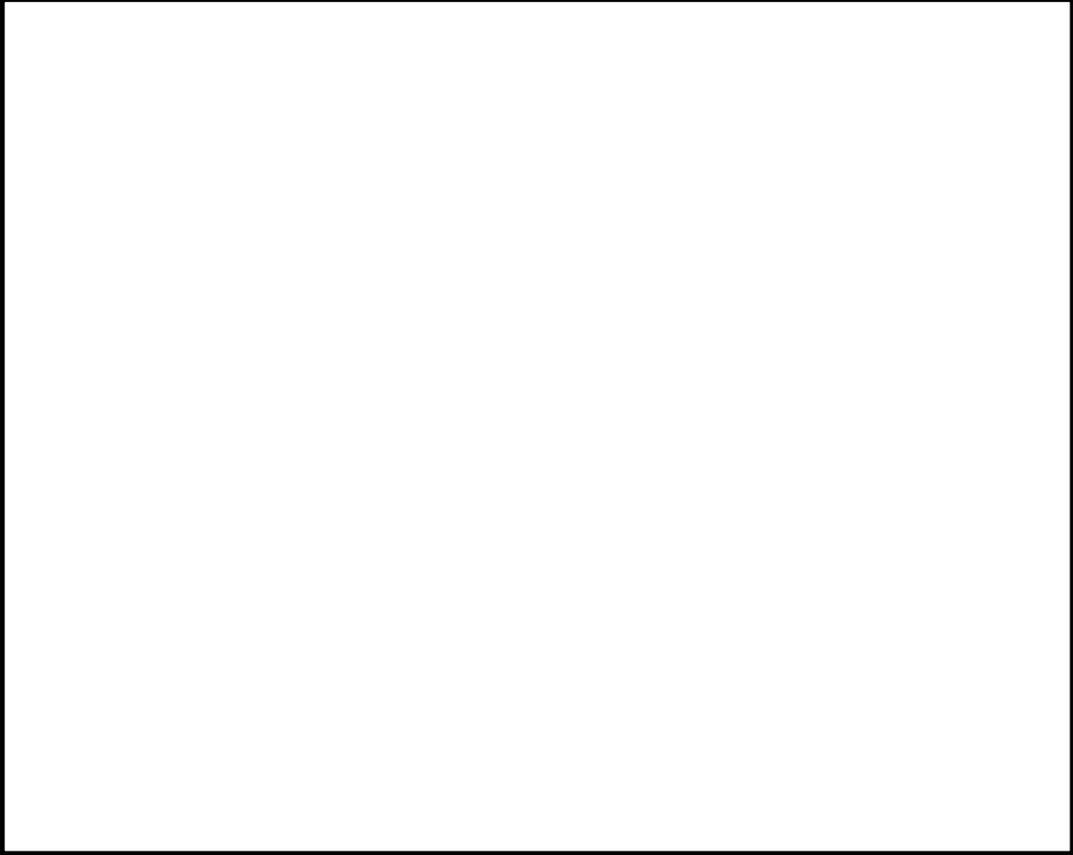
建屋の構造強度評価については、竜巻より防護すべき施設に波及的影響を与えない確認として、設計飛来物による衝撃荷重に対し、竜巻より防護すべき施設の外殻となる部材自体の脱落を生じない設計とするために、外殻となる屋根スラブ及び壁面のうち、コンクリートの裏面剥離により内包する外部事象防護対象施設への影響が考えられる箇所については、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じない最小厚さ以上であることを計算により確認する。評価方法としては、「5.1.1 鉄筋コンクリート造構造物(3)強度評価方法」に示す強度評価式により算出した厚さを基に評価を行う。外殻となる屋根スラブ及び壁面において裏面剥離によるコンクリート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外部事象防護対象施設に、裏面剥離対策が施されていることを確認する。

また、外部事象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。

外部事象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、原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉、原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)、原子炉建屋付属棟1階東側水密扉、原子炉建屋付属棟1階南側水密扉、原子炉建屋付属棟2階東側機器搬入口扉、原子炉建屋付属棟2階サンプルタンク室連絡通路扉、原子炉建屋付属棟3階バルブ室東側扉、原子炉建屋付属棟3階バルブ室北側扉、原子炉建屋付属棟3階西側非常用階段連絡口扉、空調機械室搬

入口扉，空調機械室搬入口扉（潜戸），原子炉建屋付属棟4階南東側機器搬入口扉については，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(1/6)

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 R4

表 3-1 建屋の構造計画 (2/6)

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(3/6)

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			

NT2 補② V-3-別添 1-1 R4

表 3-1 建屋の構造計画(4/6)

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			

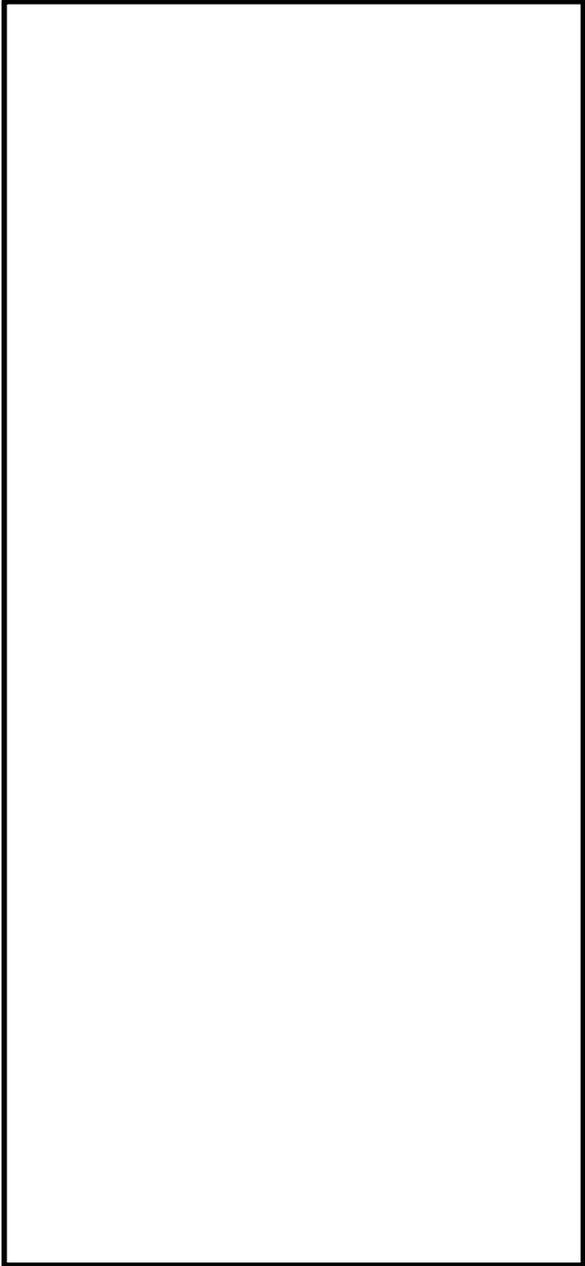
NT2 補② V-3-別添 1-1 R4

表 3-1 建屋の構造計画 (5/6)

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。	

NT2 補② V-3-別添 1-1 R4

表 3-1 建屋の構造計画 (6/6)

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

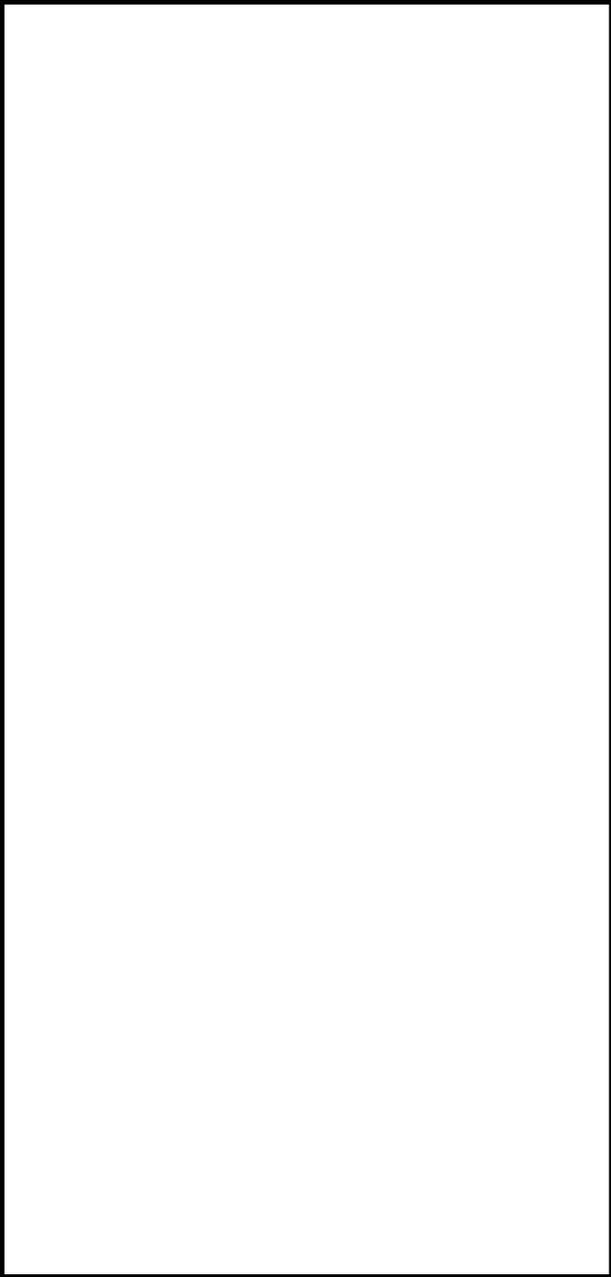
軽油貯蔵タンクタンク室の構造強度評価については、設計飛来物による衝撃荷重に対し、竜巻より防護すべき施設に波及的影響を与えないよう、軽油貯蔵タンクタンク室の外殻を構成する部材自体の脱落を生じない設計とするために、頂版が裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じない最小厚さ以上であることを計算により確認する。評価方法としては、「5.1.1 鉄筋コンクリート造構造物 (3)強度評価方法」に示す強度評価式により算出した厚さを基に評価を行う。

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 R4

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	<p>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。</p>	<p>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。</p>	

(2) 屋外の外部事象防護対象施設

a. ディーゼル発電機吸気口

(a) 構造設計

ディーゼル発電機吸気口は、「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口の構造は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口に作用し、支持脚及び支持脚基礎溶接部に伝達される構造とする。

ディーゼル発電機吸気口の構造計画を表3-3に示す。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

ディーゼル発電機吸気口の構造強度評価については、設計竜巻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口の胴板、支持脚及び支持脚基礎溶接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、「5.2.2(1) ディーゼル発電機吸気口(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 3-3 ディーゼル発電機吸気口の構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】 ディーゼル発電機吸気口は、ディーゼル発電機室屋上面に設置する設計としている。</p>			
ディーゼル発電機吸気口	鋼板の胴板で構成する 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。	

NT2 補② V-3-別添 1-1 R4

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、吐出フード及びケーシングに作用し、吐出フード取付ボルト、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 3-4 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吐出フード取付ボルト及び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 3-4 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	
<p>【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。</p>			
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 R4

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 3-5 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 3-5 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	
<p>【位置】 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。</p>			
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。	

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、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付属品は、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 3-6 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付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付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) 海水ポンプ 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) 海水ポンプ 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 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	
<p>【位置】</p> <p>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。</p>			
残留熱除去系海水系ポンプ	鋼製の立形ポンプ	コンクリート基礎に基礎ボルトで固定する。	<p>上部軸受タンクカバー 上部軸受ブラケット 原動機フレーム 一次側端子箱 原動機取付ボルト 原動機台 原動機台取付ボルト 据付面基礎ボルト</p>
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付属品が取り付けられた構造	ポンプの上にボルト（原動機取付ボルト）で結合する。付属品は取付ボルトで固定する。	

NT2 補② V-3-別添 1-1 R4

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、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付属品は、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 3-7 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付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付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) 海水ポンプ 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) 海水ポンプ 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 3-7 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	
<p>【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。</p>			
ディーゼル 発電機用海 水ポンプ	鋼製の立形 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 フレームに付 属品が取り付 けられた構造	ポンプの上にボルト（原 動機取付ボルト）で結合 する。付属品は取付ボル トで固定する。	

NT2 補② V-3-別添 1-1 R4

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 3-8 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) **海水ストレーナ** 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 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	
<p>【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。</p>			
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った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 3-9 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) 海水ストレーナ 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 3-9 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	
<p>【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。</p>			
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. 主排気筒

(a) 構造設計

主排気筒は、「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。

主排気筒の筒身は、鋼管を主体構造とし、主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。

主排気筒の構造計画を表 3-10 に示す。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

主排気筒の構造強度評価については、設計竜巻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 主排気筒(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 3-10 主排気筒の構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】 主排気筒は、屋外に設置する設計としている。</p>			
主排気筒	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。	

NT2 補② V-3-別添 1-1 R4

- 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筒）

(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筒の配管及び弁は，「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筒の配管及び弁は，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筒の配管及び弁の構造計画を表 3-11 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筒）の構造強度評価については，設計竜巻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 3-11 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】 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主排気筒の支持鉄塔で支持する設計としている。</p>			
<p>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筒）</p>	<p>配管本体及び弁で構成する。</p>	<p>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。</p>	

NT2 補② V-3-別添 1-1 R4

(3) 外気と繋がっている屋内の外部事象防護対象施設

a. ダクト（非常用換気空調設備及び原子炉建屋換気系（原子炉建屋原子炉棟貫通部））

(a) 構造設計

ダクト（非常用換気空調設備及び原子炉建屋換気系（原子炉建屋原子炉棟貫通部））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。

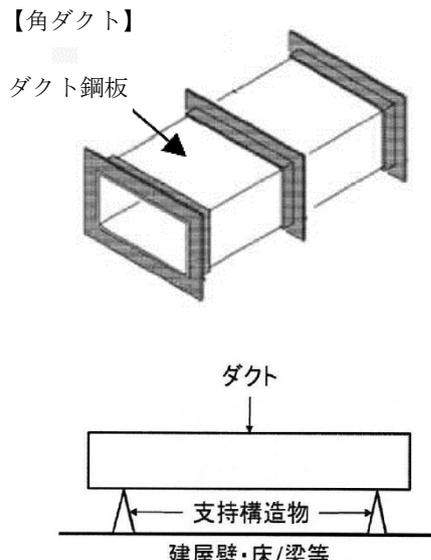
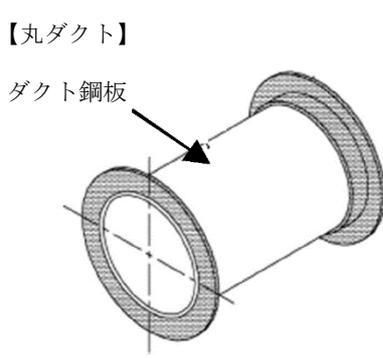
ダクト（非常用換気空調設備及び原子炉建屋換気系（原子炉建屋原子炉棟貫通部））の構造計画を表3-12に示す。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

ダクト（非常用換気空調設備及び原子炉建屋換気系（原子炉建屋原子炉棟貫通部））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 3-12 ダクト（非常用換気空調設備及び原子炉建屋換気系（原子炉建屋原子炉棟貫通部））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】 ダクト（非常用換気空調設備及び原子炉建屋換気系（原子炉建屋原子炉棟貫通部））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。</p>			
<p>ダクト（非常用換気空調設備及び原子炉建屋換気系（原子炉建屋原子炉棟貫通部））</p>	<p>ダクト鋼板で構成する。</p>	<p>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>	<p>【角ダクト】</p>  <p>ダクト鋼板</p> <p>ダクト</p> <p>支持構造物</p> <p>建屋壁・床/梁等</p> <p>【丸ダクト】</p>  <p>ダクト鋼板</p>

NT2 補② V-3-別添 1-1 R4

b. 隔離弁（非常用換気空調設備及び原子炉建屋換気系（原子炉建屋原子炉棟貫通部））

(a) 構造設計

隔離弁（非常用換気空調設備及び原子炉建屋換気系（原子炉建屋原子炉棟貫通部））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。

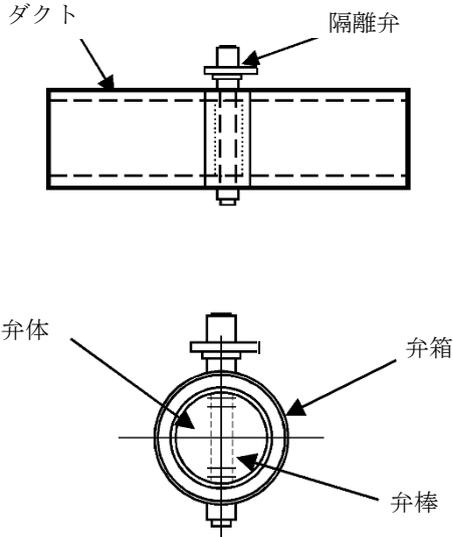
隔離弁（非常用換気空調設備及び原子炉建屋換気系（原子炉建屋原子炉棟貫通部））の構造計画を表 3-13 に示す。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

隔離弁（非常用換気空調設備及び原子炉建屋換気系（原子炉建屋原子炉棟貫通部））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、設計竜巻の気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、発生す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、「5.2.5(2) 隔離弁 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 3-13 隔離弁（非常用換気空調設備及び原子炉建屋換気系（原子炉建屋原子炉棟貫通部））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>隔離弁（非常用換気空調設備及び原子炉建屋換気系（原子炉建屋原子炉棟貫通部））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。</p>			
<p>隔離弁（非常用換気空調設備及び原子炉建屋換気系（原子炉建屋原子炉棟貫通部））</p>	<p>弁箱，弁体及び弁棒で構成する。</p>	<p>接続ダクトで支持する。</p>	

NT2 補② V-3-別添 1-1 R4

c. ファン（非常用換気空調設備）

(a) 構造設計

ファン（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。

ファンは流路を形成するケーシング、冷却するための空気を送り込む羽根車及び原動機からの回転力を伝達する主軸で形成し、床に基礎ボルトで支持する構造とする。

ファン（非常用換気空調設備）の構造計画を表 3-14 に示す。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

ファン（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、設計竜巻の気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、発生す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、「5.2.5(2) 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 3-14 ファン（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	
<p>【位置】 ファン（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。</p>			
<p>ファン（非常用換気空調設備）</p>	<p>ケーシング及び羽根車などの鋼材で構成する。</p>	<p>床に基礎ボルトで支持する。</p>	<p>The technical drawings illustrate the fan's construction. The upper drawing is a side elevation showing the motor (原動機) mounted on a base, driving the fan assembly. The lower drawing is a top-down view of the fan housing (ケーシング) and the fan wheel (羽根車), showing the circular components and their assembly.</p>

(4) 外部事象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 3-15 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、設計竜巻による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 3-15 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				

NT2 補② V-3-別添 1-1 R4

表 3-15 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。	

NT2 補② V-3-別添 1-1 R4

(b) 海水ポンプエリア防護壁

イ. 構造設計

海水ポンプエリア防護壁は、「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。

海水ポンプエリア防護壁は、鉄筋コンクリート壁並びに鉄骨架構及び鋼板で構成され、また、竜巻飛来物に対する防護ネット及び防護鋼板を取り付ける架構としての役割も有する。荷重は防護壁に作用し、基礎へ伝達する構造とする。

海水ポンプエリア防護壁の構造計画を表 3-16 に示す。

ロ. 評価方針

(イ) 構造強度評価

海水ポンプエリア防護壁の構造強度評価については、設計竜巻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等に接触する変形を生じないように、当該防護壁の変形が弾性限界の範囲に留まることを確認する。

表 3-16 海水ポンプエリア防護壁の構造計画 (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				

NT2 補② V-3-別添 1-1 R4

表 3-16 海水ポンプエリア防護壁の構造計画 (2/2)

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
海水ポンプ エリア防護 壁	鉄筋コンクリート壁並びに鉄骨架構及び鋼板で構成する。	荷重は防護壁に作用し、基礎へ伝達する構造とする。	<p>正面図</p> <p>立面図</p>

NT2 補② V-3-別添 1-1 R4

(c) 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。

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 3-17 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 3-17 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				

NT2 補② V-3-別添 1-1 R4

表 3-17 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	
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。	<p>(鳥瞰図)</p> <p>(内部透視図 (“a”部))</p>

NT2 補② V-3-別添 1-1 R4

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。

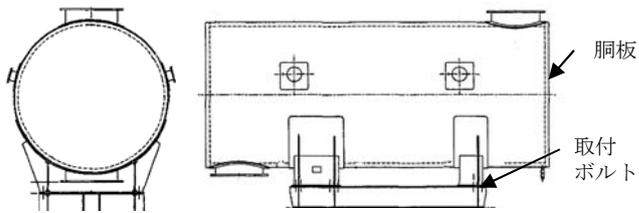
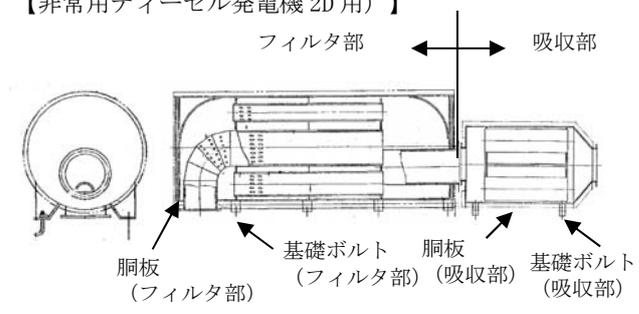
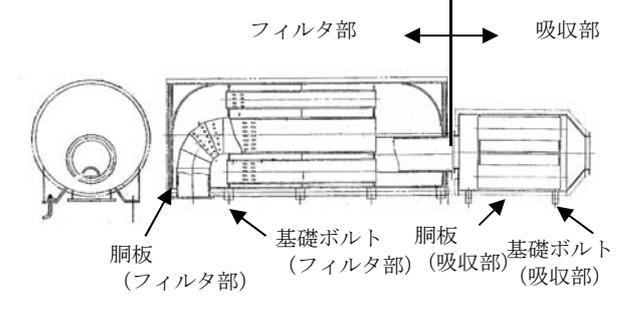
ディーゼル発電機排気消音器の構造計画を表 3-18 に示す。

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) 消音器 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 3-18 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> 

NT2 補② V-3-別添 1-1 R4

- (b) 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）並びに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，残留熱除去系海水系配管（放出側）並びに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，残留熱除去系海水系配管（放出側）並びに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，残留熱除去系海水系配管（放出側）並びに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，残留熱除去系海水系配管（放出側）並びにディーゼル発電機用海水配管（放出側）の構造計画を表 3-19 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，残留熱除去系海水系配管（放出側）並びに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 3-19 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）並びに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 3-20 竜巻の影響を考慮する施設 強度評価対象部位 (1/8)

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。	
				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。	
			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。	
		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付属棟 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 3-20 竜巻の影響を考慮する施設 強度評価対象部位 (2/8)

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	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋附属棟1階電気室搬入口水密扉 原子炉建屋附属棟1階東側水密扉 原子炉建屋附属棟1階南側水密扉 原子炉建屋附属棟2階東側機器搬入口扉 原子炉建屋附属棟2階サンプルタンク室連絡通路扉 原子炉建屋附属棟3階バルブ室東側扉 原子炉建屋附属棟3階バルブ室北側扉 原子炉建屋附属棟3階西側非常用階段連絡口扉 空調機械室搬入口扉 空調機械室搬入口扉 (潜戸) 原子炉建屋附属棟4階南東側機器搬入口扉 	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扉を評価対象部位として選定する。

表 3-20 竜巻の影響を考慮する施設 強度評価対象部位(3/8)

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	外部事象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, 外部事象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等の衝突を考慮し, 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。
			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。
		頂版	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頂版を評価対象部位として選定する。

表 3-20 竜巻の影響を考慮する施設 強度評価対象部位 (4/8)

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
屋外の外部事象防護対象施設	ディーゼル発電機吸気口	胴板 支持脚 支持脚基礎溶接部	構造強度	ディーゼル発電機吸気口	設計竜巻による荷重は、ディーゼル発電機吸気口の胴板に作用し、支持脚及び支持脚基礎溶接部に伝達される。 このことから、胴板、支持脚及び支持脚基礎溶接部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	外殻を構成する部材	衝突	貫入	ファンの全方向からの飛来物を考慮し、外殻に面する部材に貫通が生じないことを確認するため、ファンを構成する部材のうち外殻に面する部材を評価対象部位として扱う。
		吐出フード取付ボルト 基礎ボルト	構造強度	ファン	設計竜巻による荷重は、吐出フード及びケーシングに作用し、吐出フード取付ボルト、基礎ボルトに伝達されるが、荷重を受ける各部位のうち、支持断面積の小さな部位に大きな応力が生じることになる。 このことから、吐出フード取付ボルト及び基礎ボルトを構造強度評価の評価対象部位として選定する。
	中央制御室換気系冷凍機	外殻を構成する部材	衝突	貫入	冷凍機の全方向からの飛来物を考慮し、外殻に面する部材に貫通が生じないことを確認するため、冷凍機を構成する部材のうち外殻に面する部材を評価対象部位として扱う。
		取付ボルト	構造強度	冷凍機	設計竜巻による荷重は、ケーシングを介し、冷凍機を固定している取付ボルトに作用する。荷重を受ける各部位のうち、支持断面積の小さな部位に大きな応力が生じることになる。 このことから、取付ボルトを構造強度評価の評価対象部位として選定する。

表 3-20 竜巻の影響を考慮する施設 強度評価対象部位 (5/8)

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
屋外の外部事象防護対象施設	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	外殻を構成する部材	衝突	貫入	外殻に面する部分への設計飛来物の衝突を考慮し、ポンプ据付面より上部の全方向からの飛来物を考慮し、外殻に面する部材に貫通が生じないことを確認するため、ポンプを構成する部材のうち外殻に面する部材を評価対象部位として選定する。
		基礎ボルト 取付ボルト 原動機フレーム	構造強度	海水ポンプ	設計竜巻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 主要構造部材である 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	海水ポンプ	ポンプ据付面より上部に竜巻により荷重を受けた際に、 原動機フレーム等が変位することにより軸と軸受が接触した場合に動的機能維持が困難となるため 、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	外殻を構成する部材	衝突	貫入	ストレーナの全方向からの飛来物を考慮し、外殻に面する部材に貫通が生じないことを確認するため、ストレーナを構成する部材のうち外殻に面する部材を評価対象部位として扱う。
		基礎ボルト	構造強度	海水ストレーナ	設計竜巻による荷重により発生する応力は、 支持断面積の小さい箇所が厳しくなることから、支持断面積の小さい 残留熱除去系海水系ストレーナの基礎ボルトを評価対象部位として選定する。

表 3-20 竜巻の影響を考慮する施設 強度評価対象部位 (6/8)

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
屋外の外部事象防護対象施設	主排気筒	筒身, 鉄塔	構造強度	主排気筒	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筒)	外殻を構成する部材	衝突	貫入	配管の全方向からの飛来物を考慮し, 貫入により施設の機能が喪失する可能性がある箇所として配管の最小板厚部を選定する。
		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 3-20 竜巻の影響を考慮する施設 強度評価対象部位 (7/8)

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 の 外 気 と 繋 が っ て い る 防 護 対 象 施 設	ダクト（非常用換気 空調設備及び原子炉 建屋換気系（原子炉 建屋原子炉棟貫通 部））	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 空調設備及び原子炉 建屋換気系（原子炉 建屋原子炉棟貫通 部））	弁箱 弁体 弁棒	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、耐圧部である弁箱、弁体、弁棒を評価対象部位として選定する。
	ファン（非常用換気 空調設備）	ケーシング	構造強度	ファン	換気空調設備のファンは、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、耐圧部であるケーシングを評価対象部位として選定する。

表 3-20 竜巻の影響を考慮する施設 強度評価対象部位 (8/8)

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
外部事象 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	外部事象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	外部事象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	設計竜巻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閉塞により、ディーゼル発電機の排気機能に影響を与える波及的影響を考慮し、本体を支持するための主要な支持部材であり、支持断面積が小さく、発生する応力箇所が厳しくなる取付ボルト又は基礎ボルトを評価対象部位として設定する。
	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外部事象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 $\rho=1.22$ 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 $q=6100$ 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、 $\Delta P_{max}=8900$ 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車両の衝突による影響が大きくなる向きで外部事象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)許可申請において示すとおり設定する。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	車両
寸法(m)	4.2×0.3×0.2	0.04×0.04×0.04	3.6×2.5×8.6
重量(kg)	135	0.18	5000
水平方向の飛来速度(m/s)	51	62	52
鉛直方向の飛来速度(m/s)	34	42	—*

注記 *：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。

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. 屋外の外部事象防護対象施設 (表 4-3(2/5), 3/5))

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）に関しては、風圧力による荷重、気圧差による荷重、竜巻防護ネットを通過する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。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トファン、中央制御室換気系冷凍機に関しては、風圧力による荷重、竜巻防護ネットを通過する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。ディーゼル発電機ルーフトファン、中央制御室換気系冷凍機は、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。運転時の状態で作用する荷重については評価対象部位に対し作用しないため考慮しない。

非常用ガス処理系排気筒、主排気筒に関しては、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。非常用ガス処理系排気筒、主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。運転時の状態で作用する荷重については、気圧差同様考慮しない。非常用ガス処理系排気筒、主排気筒に関しては、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口に関しては、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。運転時の状態で作用する荷重については、給気口であり内圧は発生しないため考慮しない。また、ディーゼル発電機吸気口に関しては、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。

c. 外気と繋がっている屋内の外部事象防護対象施設（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及び原子炉建屋換気系（原子炉建屋原子炉棟貫通部）のダクト、隔離弁及びファン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、隔離弁及びファン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. 外部事象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、サービス建屋に関しては、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。

鋼製防護壁に関しては、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。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うち、ディーゼル発電機排気消音器に関しては、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。また、ディーゼル発電機排気消音器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。運転時の状態で作用する荷重については、気圧差同様考慮しない。

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）並びにディーゼル発電機用海水配管（放出側）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。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）並びにディーゼル発電機用海水配管（放出側）には運転時に内圧が作用するため，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）並びに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。

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	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				
屋外の外部事象防護対象施設	ディーゼル発電機吸気口	構造強度	○	-	-	○	○	-	-
	ディーゼル発電機ルーベントファン	衝突	-	-	-	-	-	○	-
		構造強度	○	-	-	○	-	○	-
	中央制御室換気系冷凍機	衝突	-	-	-	-	-	○	-
		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	衝突	-	-	-	-	-	○	-
		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	衝突	-	-	-	-	-	○	-
		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				
屋外の外部事象防護対象施設	非常用ガス処理系排気筒	構造強度	○	—	—	○	—	—	—
	主排気筒	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）	衝突	—	—	—	—	—	○	—
		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外部事象防護対象施設	ダクト (非常用換気空調設備及び原子炉建屋換気系 (原子炉建屋原子炉棟貫通部))	構造強度	○	-	-	-	○	-	-
	隔離弁 (非常用換気空調設備及び原子炉建屋換気系 (原子炉建屋原子炉棟貫通部))	構造強度	-	-	-	-	○	-	-
	ファン (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				
外部事象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	○	—	○	○	○	○	—
	海水ポンプエリア防護壁	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
ΔP _{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

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、**鉄筋**、**デッキプレート** **若しくはライナ**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建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 とする。

鉄骨造建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、屋根スラブ及び屋根スラブのスタッドにおいては、「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））

外部事象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。

海水ポンプ室防護壁については、海水ポンプエリア防護壁の鉄筋コンクリート壁並びに鉄骨架構と近接する防護対象施設との最小離隔距離を考慮し設定するものであるが、弾性限界内の変形に留めることとし短期許容応力度を許容限界として設定する。

鋼製防護壁については、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 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

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

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

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

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

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

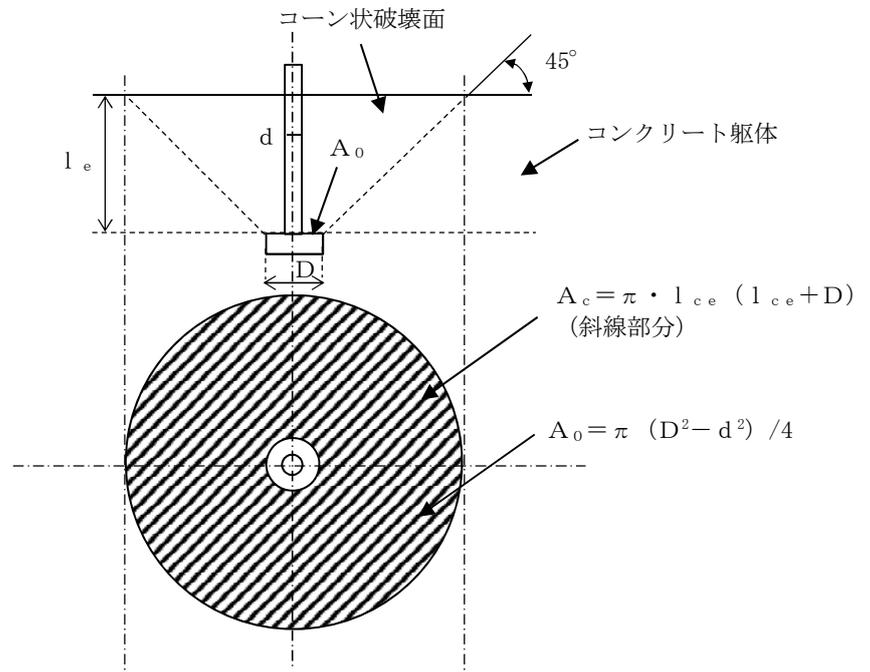


図4-1 頭付きアンカーボルトの側面の有効投影面積

(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. 衝突評価

(a) 貫入 (表 4-8 (3/6, 4/6))

衝突による貫入評価においては、飛来物による衝撃荷重に対し、外殻を構成する部材が、機能喪失に至る可能性のある変形を生じないことを計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、部材厚さを許容限界として設定する。但し、耐圧部については部材厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さを許容限界として設定する。

b. 構造強度評価

(a) 海水ポンプ (表 4-8 (3/6))

海水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、海水ポンプ及び海水ポンプの機能維持に必要な付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付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) ディーゼル発電機吸気口 (表 4-8 (3/6))

ディーゼル発電機吸気口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、ディーゼル発電機吸気口を構成する胴板、支持脚及び支持脚基礎溶接部が、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) 海水ストレーナ (表 4-8 (4/6))

海水ストレーナ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、海水ストレーナ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) 消音器 (表 4-8 (6/6))

消音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、消音器を構成する取付ボルト又は基礎ボルトが、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

EAG4601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) 主排気筒 (表 4-8 (4/6))

主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、JEAG4601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、JEAG4601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ピ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、設計竜巻の気圧差及びその他考慮すべき荷重に対し、隔離弁が、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、弾性範囲内である部材の降伏応力を許容限界として設定する。

(i) ファン (表 4-8 (3/6))

屋内のファンの構造強度評価においては、計竜巻の気圧差及びその他考慮すべき荷重に対し、ファンのケーシングが、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、JEAG4601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。

屋外の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、ファンの取付ボルト及び基礎ボルトが、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、JEAG4601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、JEAG4601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) 海水ポンプ (表 4-8 (3/6))

海水ポンプの動的機能維持評価においては、海水ポンプの軸受部は、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 (1/2)

記号	単位	定義
a	mm	ダクト幅
b	mm	ダクト高さ
c	mm	補強ピッチ
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_{crip1}	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

表 4-7 許容限界式に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
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) **ディーゼル発電機吸気口**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

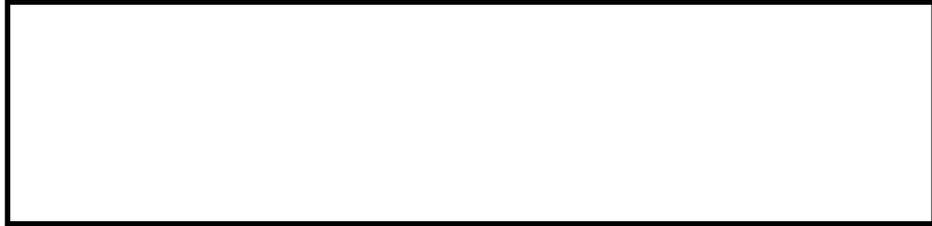
自重により発生する曲げモーメント M と発生応力 σ_{p2} の関係は以下の式で表される。



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。

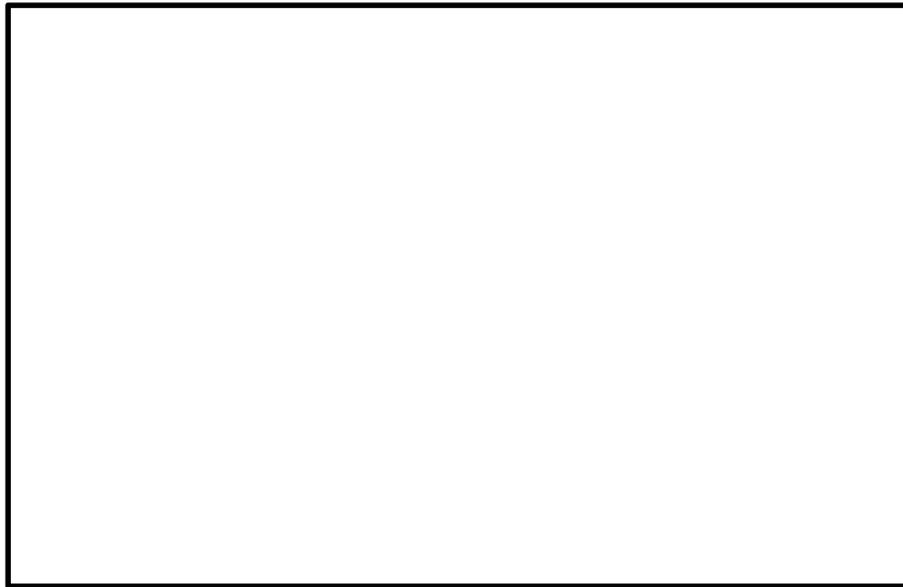


(d) 丸ダクトの許容限界式

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ピ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(1/7)

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（外部事象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。
				構造強度	曲げ，せん断	部材の破断による部材自体の転倒及び脱落	裏面剥離によるコンクリート片の飛散
		コンクリートのせん断ひずみが設定値 以下とする。					
							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。
		$F_d + W_T$ (W_w, W_p)		屋根スラブのスタッドが，「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 (2/7)

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	<ul style="list-style-type: none"> ・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階東側水密扉 ・原子炉建屋付属棟1階南側水密扉 ・原子炉建屋付属棟2階東側機器搬入口扉 ・原子炉建屋付属棟2階サンプルタンク室連絡通路扉 ・原子炉建屋付属棟3階バルブ室東側扉 ・原子炉建屋付属棟3階バルブ室北側扉 ・原子炉建屋付属棟3階西側非常用階段連絡口扉 ・空調機械室搬入口扉 ・空調機械室搬入口扉（潜戸） ・原子炉建屋付属棟 4 階南東側機器搬入口扉 	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。
$F_d + W_P$	<ul style="list-style-type: none"> ・空調機械室搬入口扉 ・空調機械室搬入口扉（潜戸） ・原子炉建屋付属棟 4 階南東側機器搬入口扉 	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。		

表 4-8 施設ごとの許容限界 (3/7)

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	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	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(4/7)

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	
屋外の外部事象防護対象施設	ディーゼル発電機吸気口	$F_d + W_T (W_w, W_p)$	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	
			支持脚基礎溶接部	構造強度	引張, せん断, 組合せ	部材の降伏	
	ディーゼル発電機ルーフベントファン	$F_d + (W_w, W_M)$	外殻を構成する部材	衝突	変形	空気の排出機能の喪失	評価式により算定した貫通限界厚さが, 外殻を構成する部材の厚さ未満とする。
			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。
	中央制御室換気系冷凍機	$F_d + (W_w, W_M)$	外殻を構成する部材	衝突	変形	冷却機能の喪失	評価式により算定した貫通限界厚さが, 外殻を構成する部材の厚さ未満とする。
			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	$F_d + W_T (W_w, W_p, W_M) + F_p$	外殻を構成する部材	衝突	変形	送水機能の喪失	評価式により算定した貫通限界厚さが, 外殻を構成する部材の厚さ未満とする。
			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。
			原動機フレーム	構造強度	曲げ	部材の降伏	
			軸受部	機能維持	接触	軸と軸受が接触する	軸受荷重が接触面圧の許容荷重以下とする。

表 4-8 施設ごとの許容限界 (5/7)

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	
屋外の外部事象防護対象施設	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	$F_d + W_T (W_w, W_p, W_m) + F_p$	外殻を構成する部材	衝突	変形	固形物除去機能の喪失	評価式により算定した貫通限界厚さが、外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ未満とする。
			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。
	非常用ガス処理系排気筒	$F_d + W_w$	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。
	主排気筒	$F_d + W_w$	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)	$F_d + W_T (W_w, W_p, W_m) + F_p$	外殻を構成する部材	衝突	変形	固形物除去機能の喪失	評価式により算定した貫通限界厚さが、外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ未満とする。
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 (6/7)

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 外部事象防護対象施設	ダクト（非常用換気空調設備及び 原子炉建屋換気系（原子炉建屋原子炉棟貫通部））	$F_d + W_P$	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ピ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及び 原子炉建屋換気系（原子炉建屋原子炉棟貫通部））	W_P	弁箱	構造強度	周方向応力	部材の降伏	弾性範囲内である部材の降伏応力を許容限界とする。
			弁体	構造強度	曲げ	部材の降伏	
			弁棒	構造強度	せん断	部材の降伏	
ファン（非常用換気空調設備）	W_P	ケーシング	構造強度	周方向応力	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(7/7)

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	
外部事象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	$F_d + W_T (W_w, W_p) + F_p$	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。
	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	外部事象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、Chang式による裏面剥離限界厚さの算定に用いる記号を表5-3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	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5-3 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	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	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）
V ₀	m/s	飛来物基準速度
W	kgf	飛来物重量
α _s	—	低減係数

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

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

(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。

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

5.1.2 鋼製構造物

(1) 評価条件

- a. 飛来物が**外部事象**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5-4に示す。

表5-4 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)	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
	原子炉建屋附属棟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
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)

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_0	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 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。

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

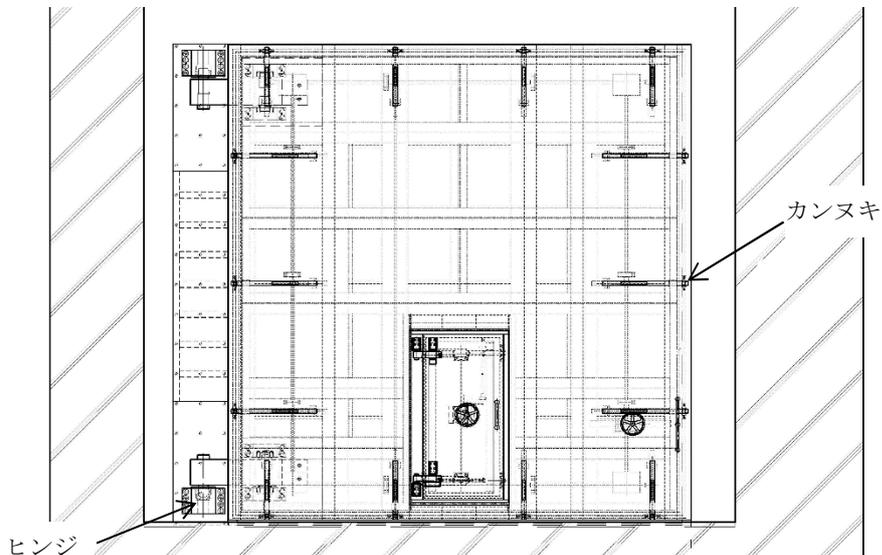


図5-1 水密扉概要 (例)

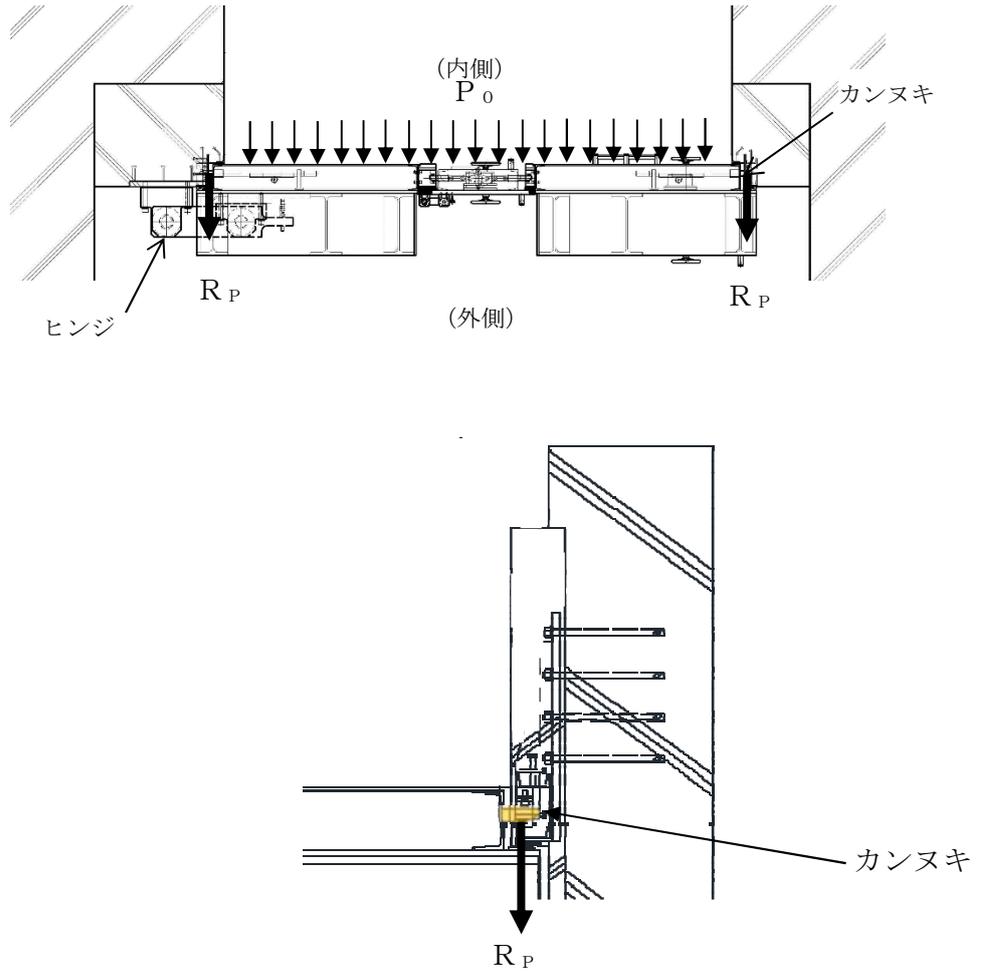


図5-2 カンヌキ部に生じる荷重の例

(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。

$$M = R_P \cdot L_b$$

$$Q = R_P$$

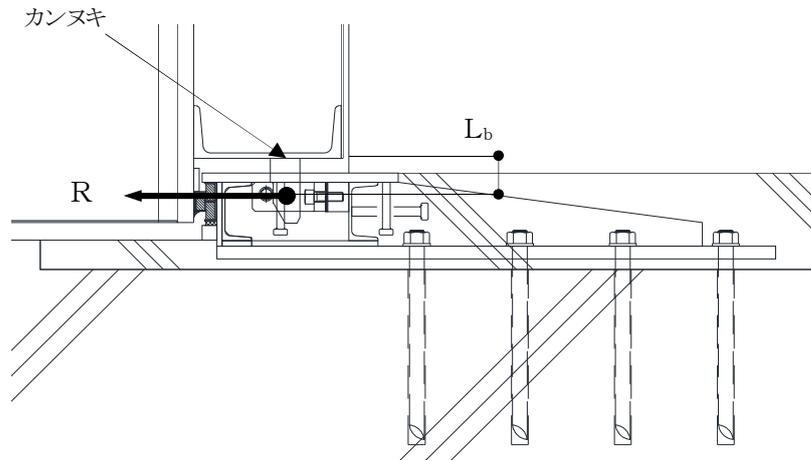


図5-3 カンヌキに生じる荷重の例

(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。

$$M = R_P \cdot \frac{L_P}{4}$$

$$Q = R_P$$

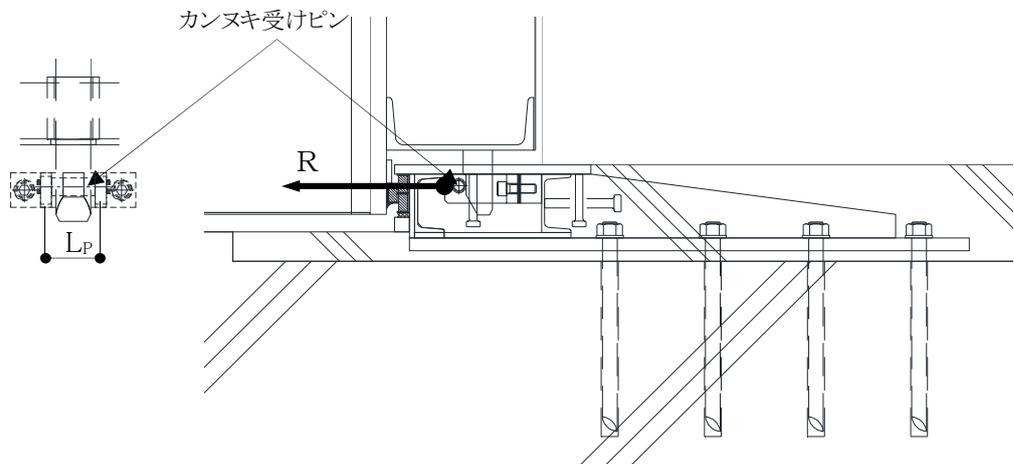


図5-4 カンヌキ受けピンに生じる荷重の例

(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。

$$T = R_p$$

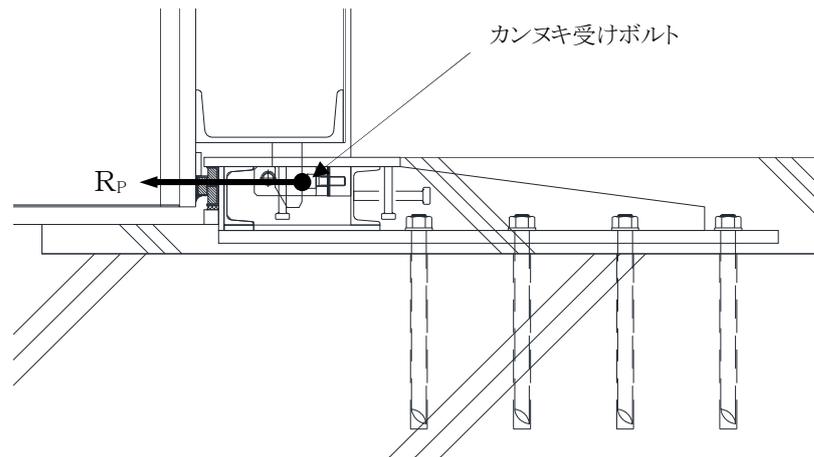


図5-5 カンヌキ受けボルトに生じる荷重の例

5.2 機器・配管系に関する評価式

5.2.1 衝突評価が必要な機器

(1) 評価条件

衝突評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

- a. 貫通計算においては、評価対象部位に飛来物が衝突した際に跳ね返らず、貫通するものとして評価する。

(2) 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
飛来物が衝突する可能性がある部位のうち、最小板厚部等、貫通によって当該施設が機能喪失する可能性がある箇所	衝突による貫通力

(3) 強度評価方法

a. 記号の定義

衝突評価に用いる記号を表5-11に示す。

表5-11 衝突評価に用いる記号

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

b. 評価方法

(a) 貫通限界厚さの算出

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

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

5.2.2 ポンプ

(1) 海水ポンプ

a. 評価条件

海水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。

海水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5-12に示す。

表5-12 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"> ・曲げ
軸受部	<ul style="list-style-type: none"> ・曲げ

c. 強度評価方法

- (a) 記号の定義

海水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5-13，表5-14に示す。

表5-13 海水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
D	mm	原動機フレーム外径
d	mm	原動機フレーム内径
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	N・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	MPa	原動機フレームの曲げ応力
σ_{bt}	MPa	ボルトの引張応力
τ	MPa	せん断応力

表5-14 海水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	N・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

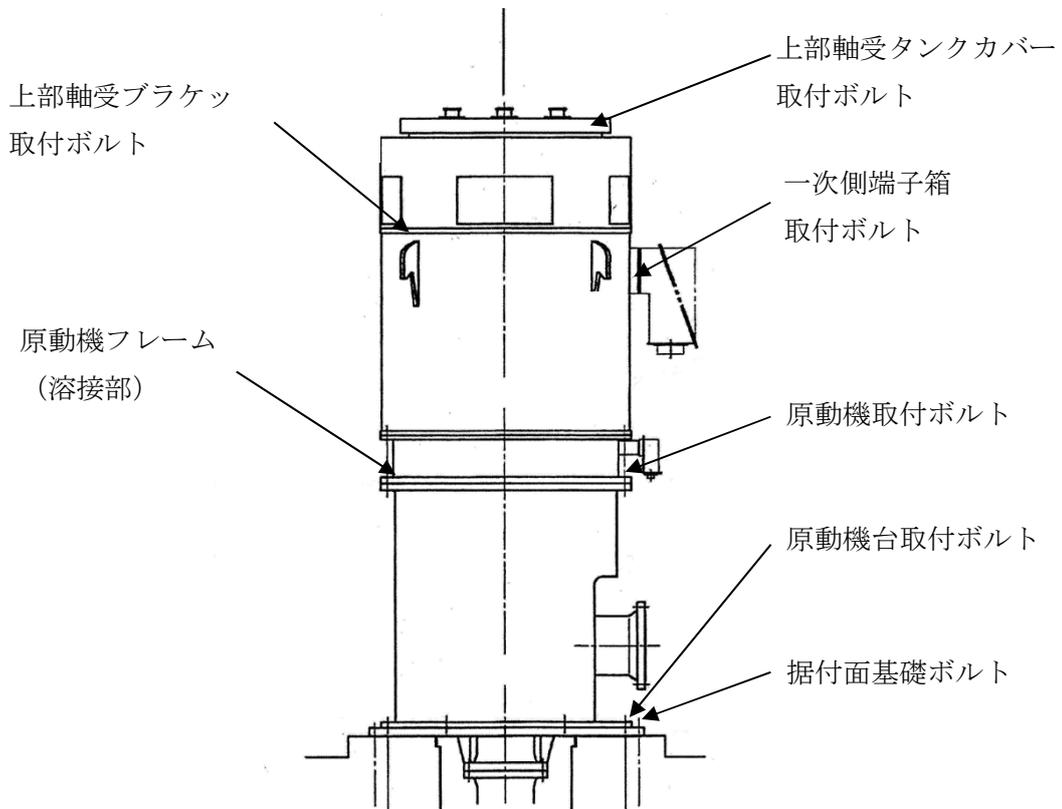


図 5-6(1/2) 海水ポンプの強度評価対象部位 (残留熱除去系海水系ポンプ)

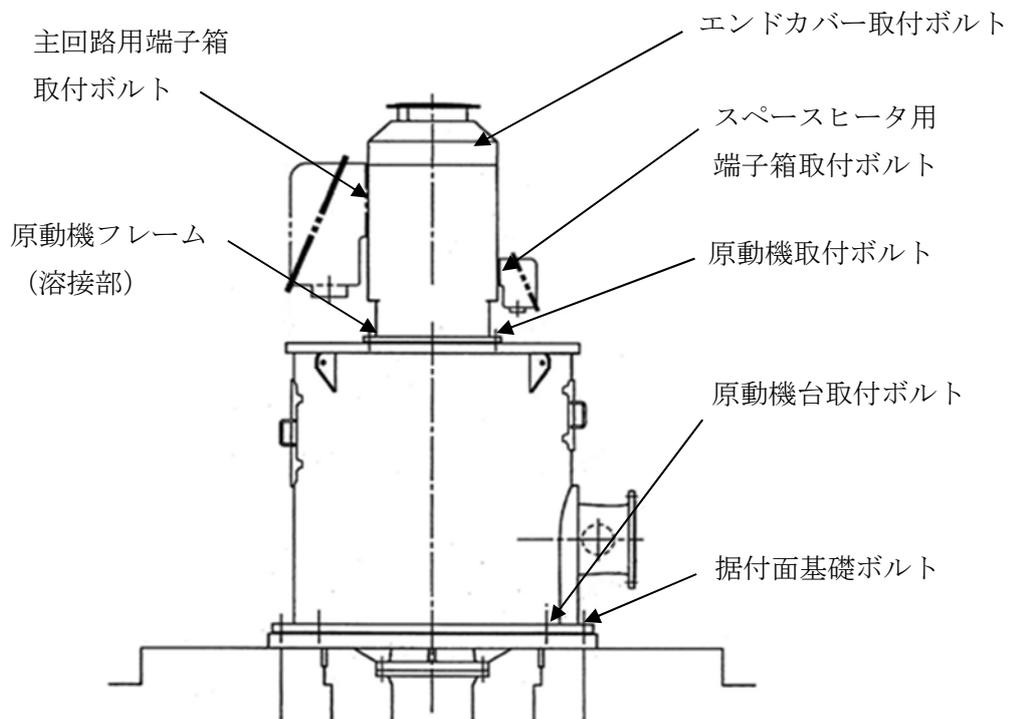


図 5-6(2/2) 海水ポンプの強度評価対象部位 (ディーゼル発電機用海水ポンプ)

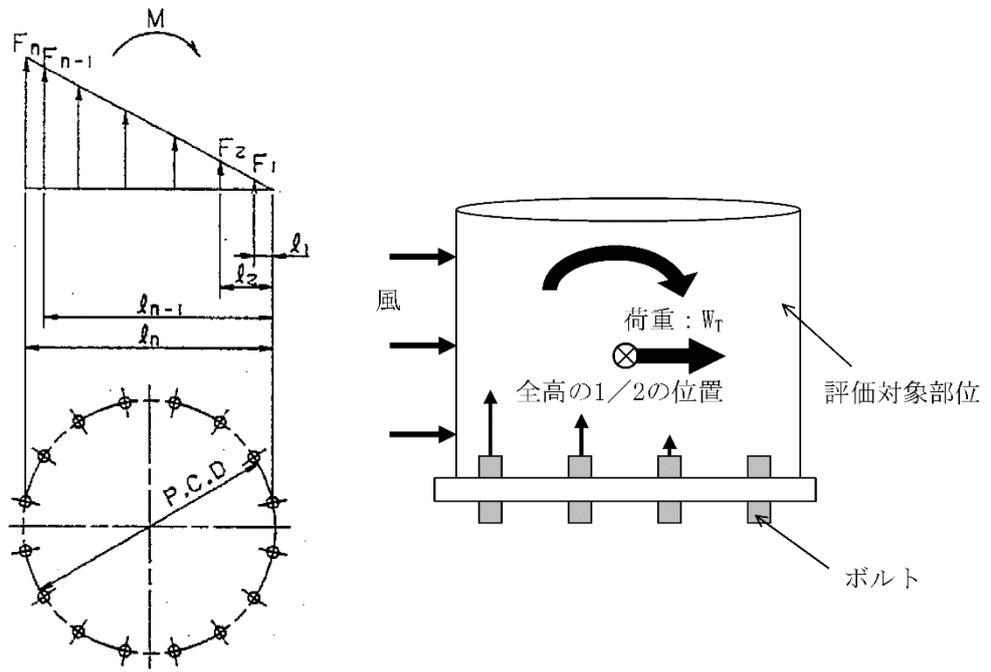


図 5-7(1/2) 応力の計算モデル図 (ポンプ部)

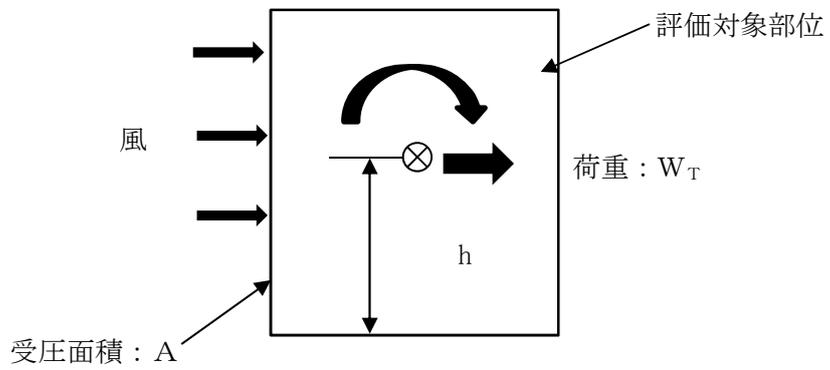


図 5-7(2/2) 応力の計算モデル図 (原動機部)

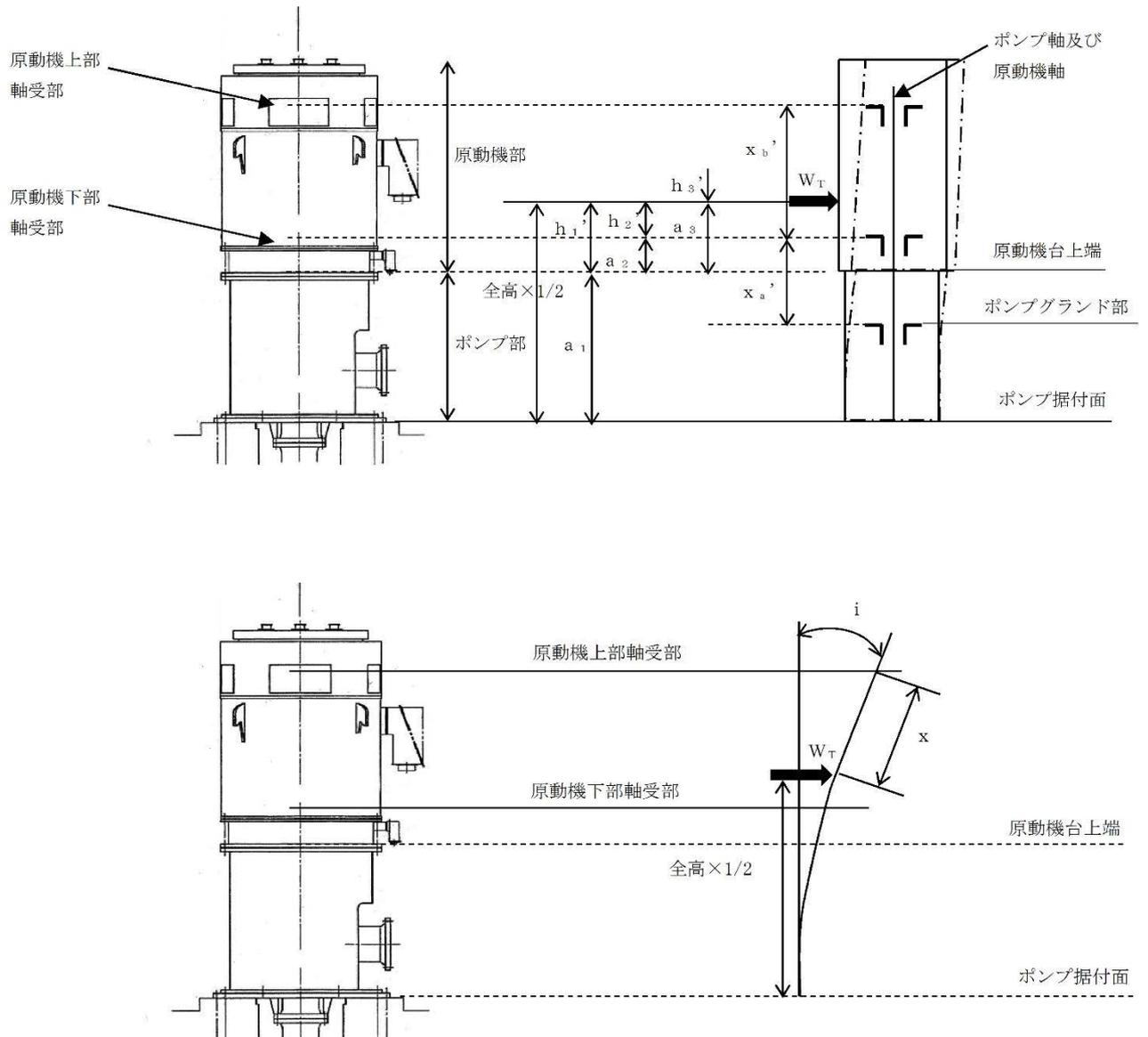


図 5-8(1/2) 海水ポンプのたわみ量計算モデル (残留熱除去系海水系ポンプ)

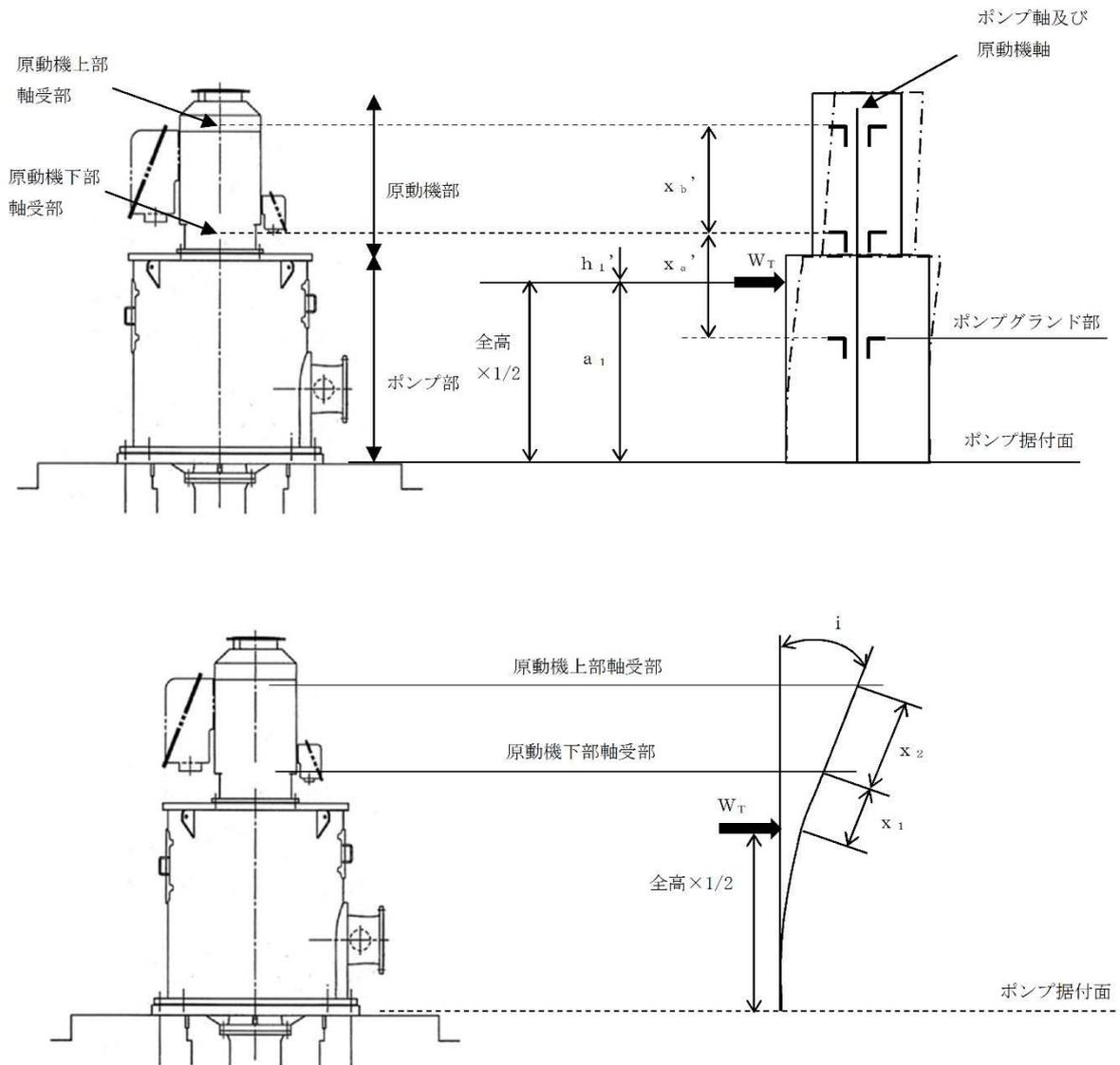


図 5-8(2/2) 海水ポンプのたわみ量計算モデル (ディーゼル発電機用海水ポンプ)

(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

$$M = W_T \cdot \text{全高} / 2$$

- ・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

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

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

【原動機フレーム】

原動機フレームの応力算出方法を以下に示す。

- ・曲げ応力

$$\sigma = \frac{M}{Z}$$

ここで,

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

【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

$$F_b = \frac{M}{L_1 \cdot N}$$

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

・せん断応力

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

ここで，

$$F_H = \sqrt{W_T^2 + H^2}$$

【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），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），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上端部（評価上厳しい条件）に作用した際の，取付ボルトに生じる引張応力を算出し評価する。

(i) 風による転倒モーメントM

$$M = W_T \cdot h_u$$

(ii) 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，

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

(iii) せん断応力 τ

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

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

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

5.2.3 容器

(1) **ディーゼル発電機吸気口**

a. 評価条件

ディーゼル発電機吸気口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，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。

ディーゼル発電機吸気口のモデル図を図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5-15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
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
支持脚基礎溶接部	<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

ディーゼル発電機吸気口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 (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 , C _L	-	応力の補正係数
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 S S B-3121. 1(1)により規定される値
F _o	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口高さ
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 _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
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
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
k _L	-	アタッチメントパラメータ軸方向の補正係数
k _c	-	アタッチメントパラメータ周方向の補正係数

表5-16 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・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・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・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・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・mm	胴に生じる軸方向の曲げモーメント
M_ϕ	N・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	設計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	-	アタッチメントパラメータ
γ	-	シェルパラメータ

表5-16 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5-16 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

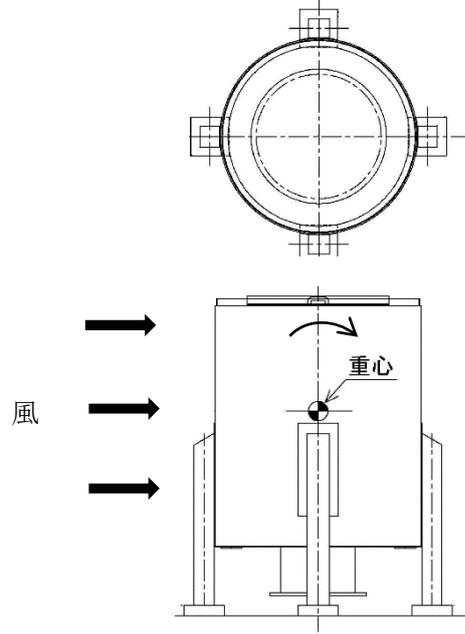


図 5-9 ディーゼル発電機吸気口の評価モデル図

(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、

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

式を代入して

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

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

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

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口に静水頭、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。

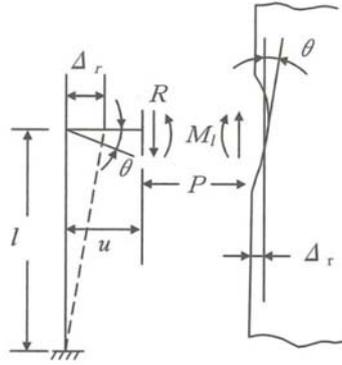


図 5-10 脚下端が固定の場合の脚及び胴の変形

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

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

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

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

したがって

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

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

鉛直方向モーメント M_L により生じる胴の局部応力は、図 5-11 に示す 3 次元 FEM モデルより求める (以下*を付記する) ことにより算定する。

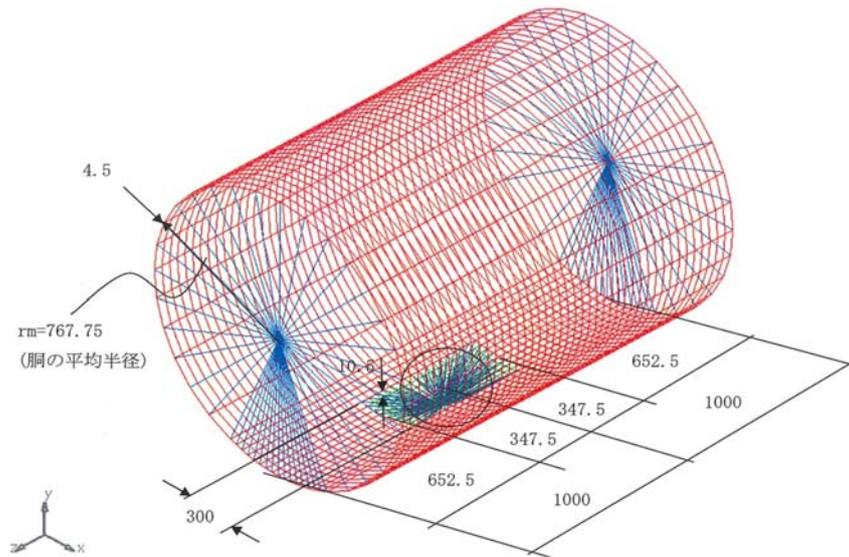


図 5-11 3次元 FEM モデル

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

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

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。

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

(ニ) 風荷重による胴の曲げ応力

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

(ホ) Z 方向荷重による胴の脚つけ根部の応力

- ・ 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。

$$\sigma_{\phi 61} = \left[\frac{N_{\phi}}{P_1 / r_m} \right]^* \left(\frac{P_1}{r_m \cdot t} \right)$$

$$\sigma_{x61} = \left[\frac{N_x}{P_1 / r_m} \right]^* \left(\frac{P_1}{r_m \cdot t} \right)$$

鉛直方向曲げモーメント M_1 により生じる胴の局部応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 71} = \left[\frac{N_{\phi}}{M_1 / (r_m^2 \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{M_1}{r_m^2 \cdot t \cdot \beta_L} \right) C_L^*$$

$$\sigma_{x71} = \left[\frac{N_x}{M_1 / (r_m^2 \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{M_1}{r_m^2 \cdot t \cdot \beta_L} \right) C_L^*$$

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。

$$\sigma_{\phi 81} = \left[\frac{N_{\phi}}{M_c / (r_m^2 \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{M_c}{r_m^2 \cdot t \cdot \beta_c} \right) C_c^*$$

$$\sigma_{x81} = \left[\frac{N_x}{M_c / (r_m^2 \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{M_c}{r_m^2 \cdot t \cdot \beta_c} \right) C_c^*$$

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。

$$\tau_{c1} = \frac{Q}{4C_1 \cdot t}$$

鉛直方向せん断力 R_1 によるせん断応力は、次による。

$$\tau_{L2} = \frac{R_1}{4C_2 \cdot t}$$

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。

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

・ 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。

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

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

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。

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

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

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。

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

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

(へ) X方向荷重による胴の脚つけ根部の応力

・ 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。

$$\tau_{L5} = \tau_{L2} / \sqrt{2}$$

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。

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

・ 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。

$$\sigma_{\phi 92} = \sigma_{\phi 62} / \sqrt{2}$$

$$\sigma_{x 92} = \sigma_{x 62} / \sqrt{2}$$

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。

$$\sigma_{\phi 102} = \sigma_{\phi 72} / \sqrt{2}$$

$$\sigma_{x 102} = \sigma_{x 72} / \sqrt{2}$$

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。

$$\sigma_{\phi 112} = \sigma_{\phi 82} / \sqrt{2}$$

$$\sigma_{x 112} = \sigma_{x 82} / \sqrt{2}$$

(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。

・ 一次一般膜応力

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

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

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

・ 一次応力 (膜+曲げ)

胴の評価点を図 5-12 に示す。

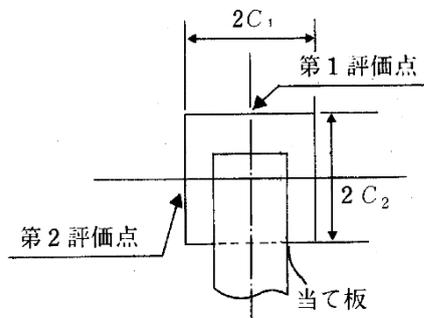


図 5-12 胴の評価点

① Z方向荷重が作用した場合

・第1脚つけ根部

(第1評価点)

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

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

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

(第2評価点)

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

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

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

・第2脚つけ根部

(第1評価点)

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

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

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

(第2評価点)

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

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

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

② X方向荷重が作用した場合

(第1評価点)

$$\sigma_{\phi x 1} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 3} + \sigma_{\phi 4} + \sigma_{\phi 9 1} + \sigma_{\phi 1 0 1}$$

$$\sigma_{x x 1} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sigma_{x 3} + \sigma_{x 4} + \sigma_{x 5} + \sigma_{x 9 1} + \sigma_{x 1 0 1}$$

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

(第2評価点)

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

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

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

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

・ 組合せ一次+二次応力

① Z方向荷重が作用した場合

・ 第1脚つけ根部

(第1評価点)

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

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

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

(第2評価点)

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

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

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

・ 第2脚つけ根部

(第1評価点)

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

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

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

(第2評価点)

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

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

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

② X方向荷重が作用した場合

(第1評価点)

$$\sigma_{\phi x 3} = \sigma_{\phi 9 1} + \sigma_{\phi 1 0 1} + \sigma_{\phi 9 2} + \sigma_{\phi 1 0 2}$$

$$\sigma_{x x 3} = \sigma_{x 5} + \sigma_{x 9 1} + \sigma_{x 1 0 1} + \sigma_{x 9 2} + \sigma_{x 1 0 2}$$

$$\sigma_{2 5} = \sigma_{\phi x 3} + \sigma_{x x 3} + \sqrt{(\sigma_{\phi x 3} - \sigma_{x x 3})^2 + 4(\tau_{c 4} + \tau_6)^2}$$

(第2評価点)

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

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

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

$$\sigma_2 = \max[\sigma_{2 1}, \sigma_{2 2}, \sigma_{2 3}, \sigma_{2 4}, \sigma_{2 5}, \sigma_{2 6}]$$

ハ. 脚の応力計算

(イ) 運転時質量による応力

$$\sigma_{s 1} = \frac{R}{A_s}$$

$$\sigma_{s 2} = \frac{\max[|R \cdot u - M_L - P \cdot L|, |R \cdot u - M_L|]}{Z_{s t}}$$

(ロ) 風荷重 (Z方向) による応力

・ 第1脚

$$\sigma_{s 5} = \frac{R_1}{A_s}$$

$$\sigma_{s 6} = \frac{\max[|R_1 \cdot u - M_1 - P_1 \cdot L|, |R_1 \cdot u - M_1|]}{Z_{s t}}$$

□・ 第2脚

$$\sigma_{s 7} = \frac{\max[|Q \cdot L - M_3|, |M_3|]}{Z_{s r}}$$

(ハ) X方向荷重による応力

$$\sigma_{s 8} = \frac{R_1}{\sqrt{2} \cdot A_s}$$

$$\sigma_{s 9} = \frac{\max[|R_1 \cdot u - M_1 - P_1 \cdot L|, |R_1 \cdot u - M_1|]}{\sqrt{2} \cdot Z_{s t}}$$

$$\sigma_{s 10} = \frac{\max[|Q \cdot L - M_3|, |M_3|]}{\sqrt{2} \cdot Z_{s r}}$$

(二) 組合せ応力

脚の最大応力は、下記式による。

① Z方向荷重が作用した場合

- 第1脚

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

- 第2脚

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

② 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

① Z方向荷重が作用した場合

- 第1脚

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

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

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

- 第2脚

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

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

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

② 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。

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

ニ. 支持脚基礎溶接部の応力計算

(イ) 引張応力の算出

風圧力による荷重 W_{T2} によるモーメント M により、2本の支持脚には吸気口の支持脚基礎溶接部に作用する引張荷重 T が作用する。

モーメントの釣り合いを考えると、

$$M = W_{T2} \cdot L_g = 2 \cdot T \cdot L_1$$

よって吸気口の支持脚基礎溶接部に作用する引張荷重 T は以下のようになる。

$$T = \frac{W_{T2} \cdot L_g}{2L_1}$$

吸気口の支持脚基礎溶接部に生じる引張応力 σ_t は以下のようになる。

$$\sigma_t = \frac{T}{A_w} = \frac{W_{T2} \cdot L_g}{2L_1 \cdot A_w}$$

(ロ) せん断応力の算出

吸気口の支持脚基礎溶接部に作用するせん断荷重 Q は以下のようになる。

$$Q_1 = \frac{W_{T2}}{4}$$

よって、吸気口の支持脚基礎溶接部に生じるせん断応力 τ は以下のようになる。

$$\tau = \frac{Q_1}{A_w} = \frac{W_{T2}}{4A_w}$$

(ハ) 組合せ応力の算出

$$\sigma = \sqrt{\sigma_t^2 + 3\tau^2}$$

(2) **海水ストレーナ**（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

海水ストレーナ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。

海水ストレーナのモデル図を図5-13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

海水ストレーナの強度計算に用いる記号を表5-18に示す。

表5-18 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。海水ストレーナのモデル図を図5-13に示す。

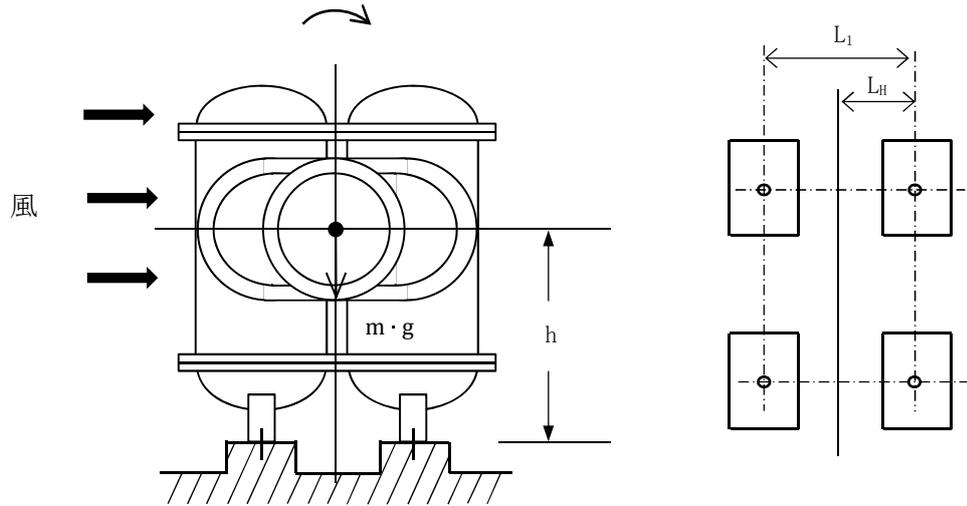


図5-13 海水ストレーナのモデル図

(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 3-3 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) **消音器** (ディーゼル発電機排気消音器)

a. 評価条件

消音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，設計竜巻による発生荷重はおおむね弾性範囲内となるよう設計するため大きな変位は発生せず，フィルタ部又は吸収部に発生した応力が他方に伝達する影響は小さいため，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取付ボルト又は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。

消音器のモデル図を図5-14～図5-16に示す。

b. 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-19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
取付ボルト 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

消音器の強度計算に用いる記号を表5-20に示す。

表5-20 消音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

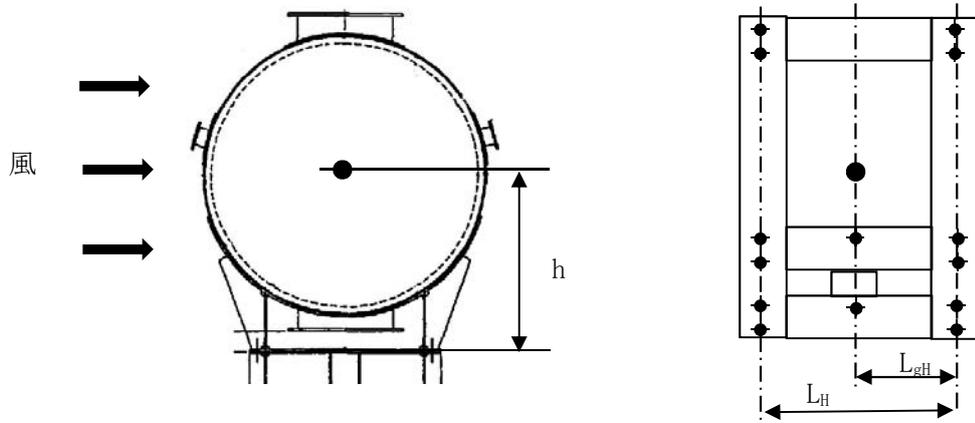


図 5-14(1/2) 非常用ディーゼル発電機 2 C 排気消音器の評価モデル図 (軸直角方向)

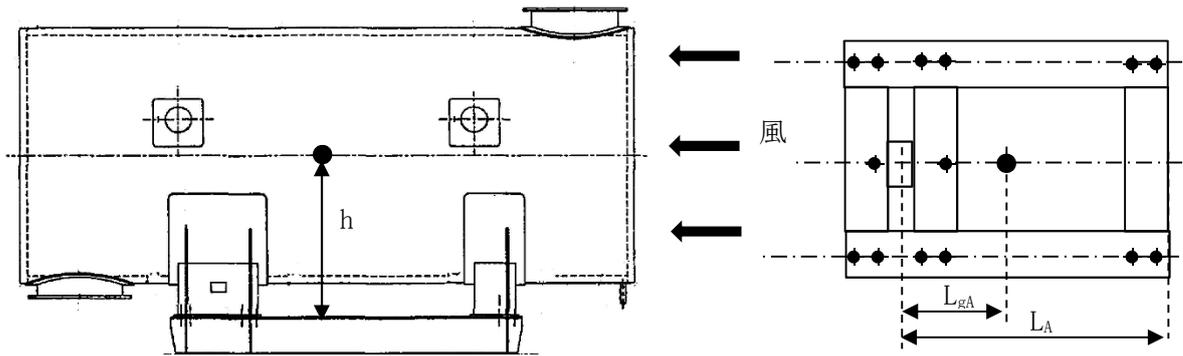


図 5-14(2/2) 非常用ディーゼル発電機 2 C 排気消音器の評価モデル図 (軸方向)

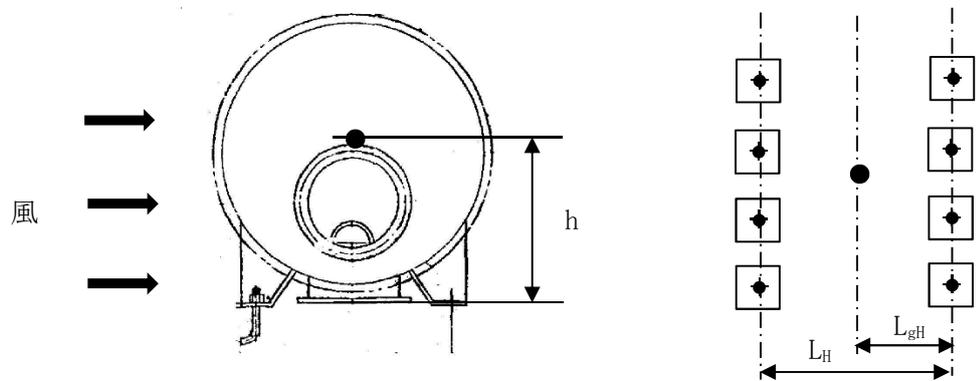


図 5-15(1/2) 非常用ディーゼル発電機 2 D 排気消音器, 高压炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器の評価モデル図 (フィルタ部軸直角方向)

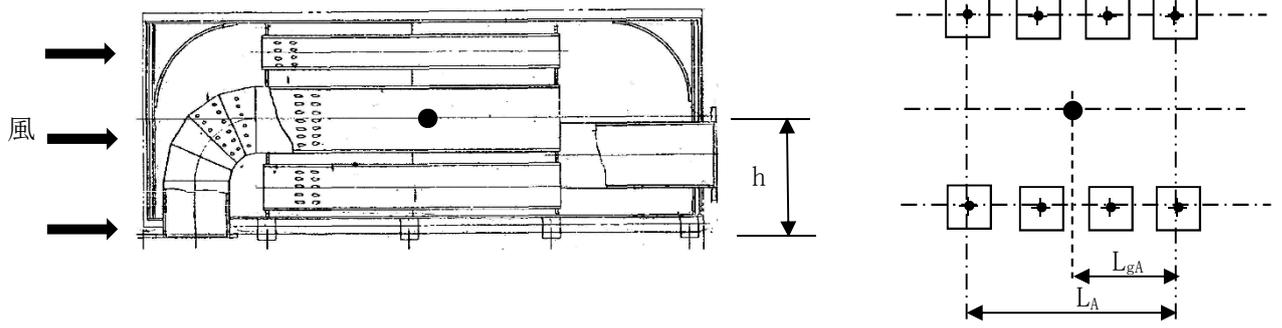


図 5-15(2/2) 非常用ディーゼル発電機 2D 排気消音器，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器の評価モデル図（フィルタ部軸方向）

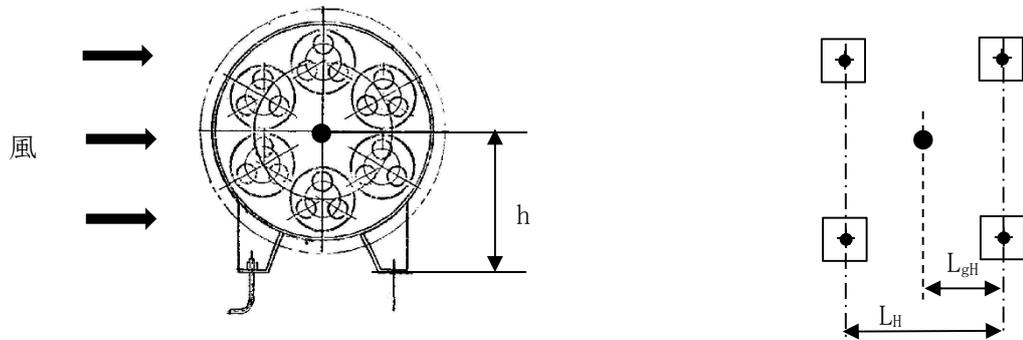


図 5-16(1/2) 非常用ディーゼル発電機 2D 排気消音器，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器モデル図（吸収部軸直角方向）

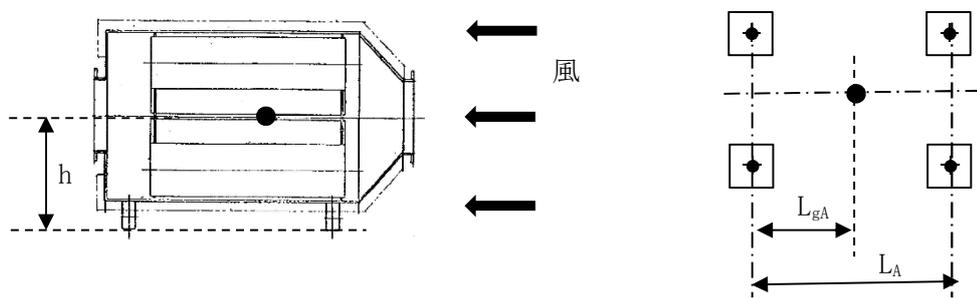


図 5-16(2/2) 非常用ディーゼル発電機 2D 排気消音器，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器の評価モデル図（吸収部軸方向）

(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

・ 引張力

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

・ 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

・ 引張力

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

・ 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

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

5.2.4 主排気筒

(1) 評価条件

主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. 主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一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5-17に示す。

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-21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
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

主排気筒の強度評価に用いる記号を表5-22に示す。

表5-22 主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
f_{c_r}	N/mm^2	圧縮材料強度
$f_{c_r_s}$	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
σ_{c_b}	N/mm^2	圧縮側曲げ応力度

b. 計算モデル

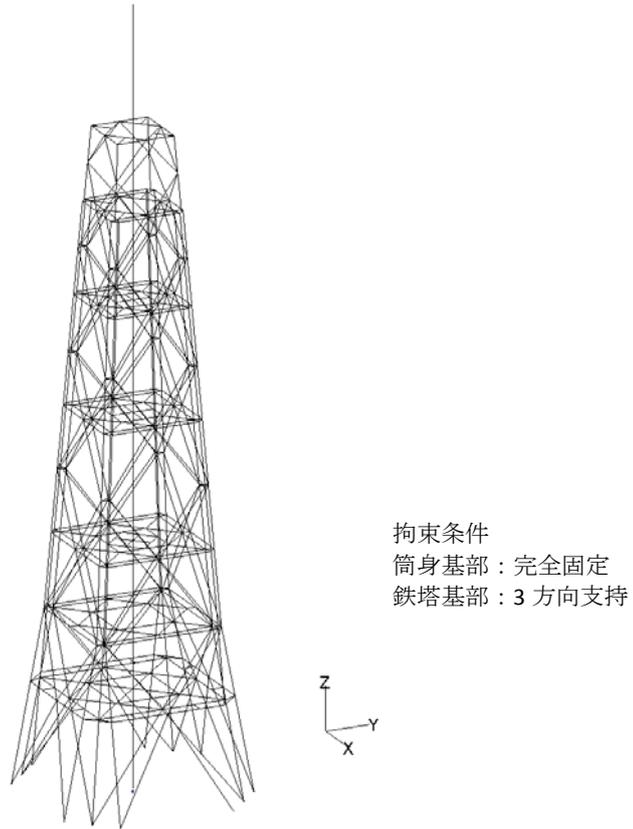


図 5-17 主排気筒モデル図

c. 評価方法

(a) 応力評価方法

主排気筒について、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

主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。

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

かつ

$$\frac{\tau}{s f_{c r}} \leq 1$$

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。

5.2.5 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5-23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
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5-24に示す。

表5-24 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5-18, 図5-19に示す。

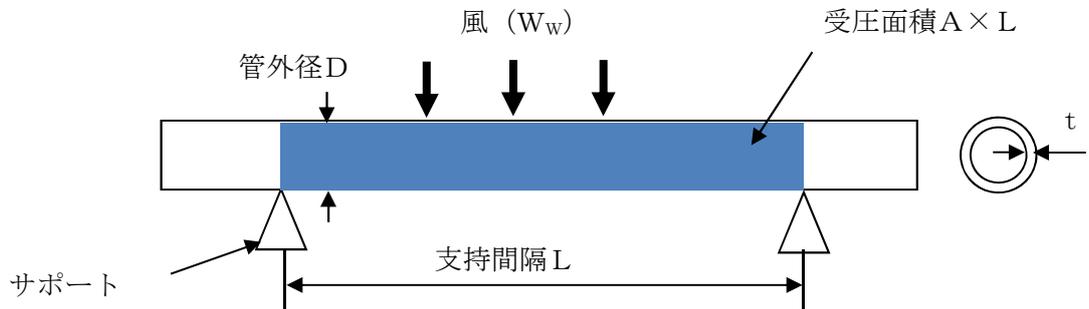


図 5-18 配管モデル図 (両端支持形状)

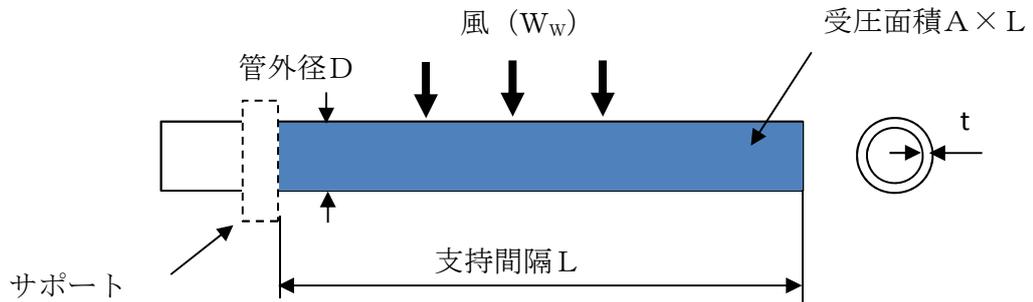


図 5-19 配管モデル図 (片持ち形状)

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。

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

$$w = m \cdot g$$

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

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。

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

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

5.2.6 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5-20に示す。

(b) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-25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)	<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5-26に示す。

表5-26 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

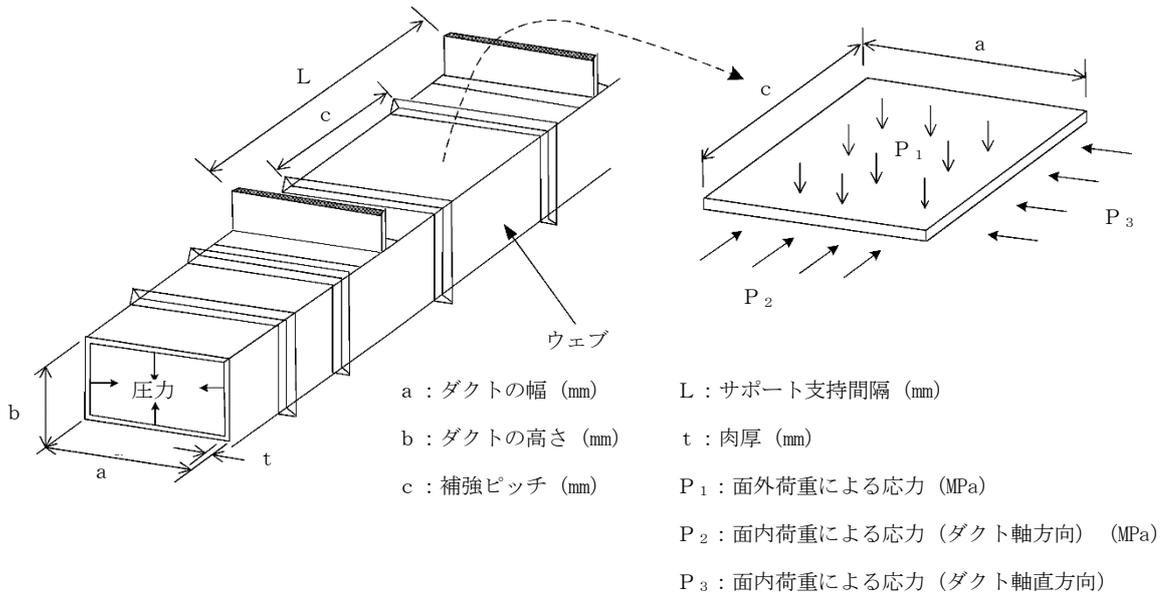


図5-20 角ダクトモデル図

ハ. 評価方法

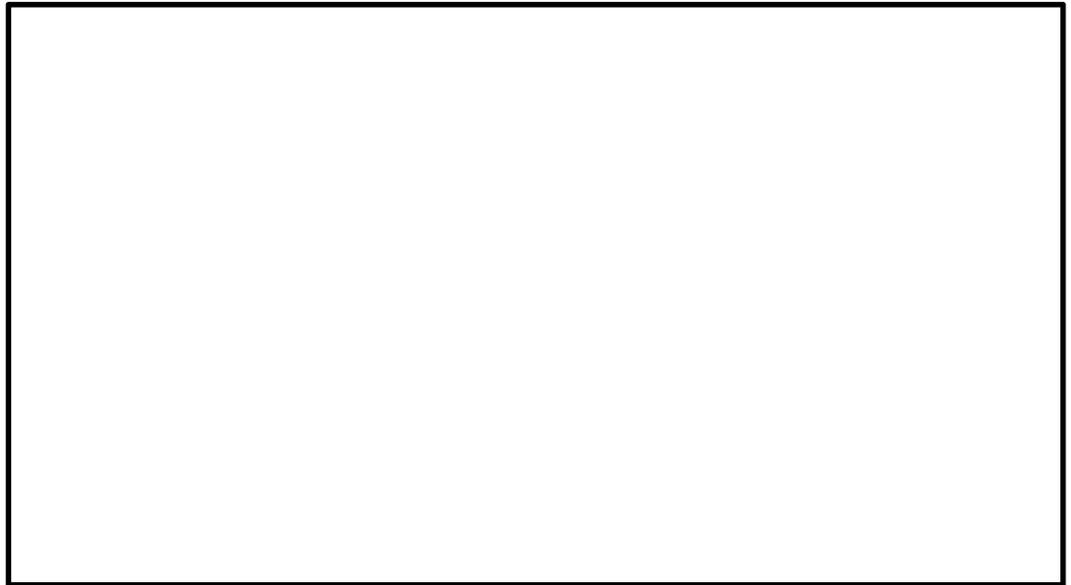
ダクトにかかる外圧は、設計竜巻により発生する気圧差が影響するので、

$$P = \Delta P$$

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

- ・ 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。



- ・ 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。

$$M_p = \frac{g \cdot \mu \cdot \ell}{8}$$

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5-21に示す。

(b) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-27に示す。

表5-27 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5-28に示す。

表5-28 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

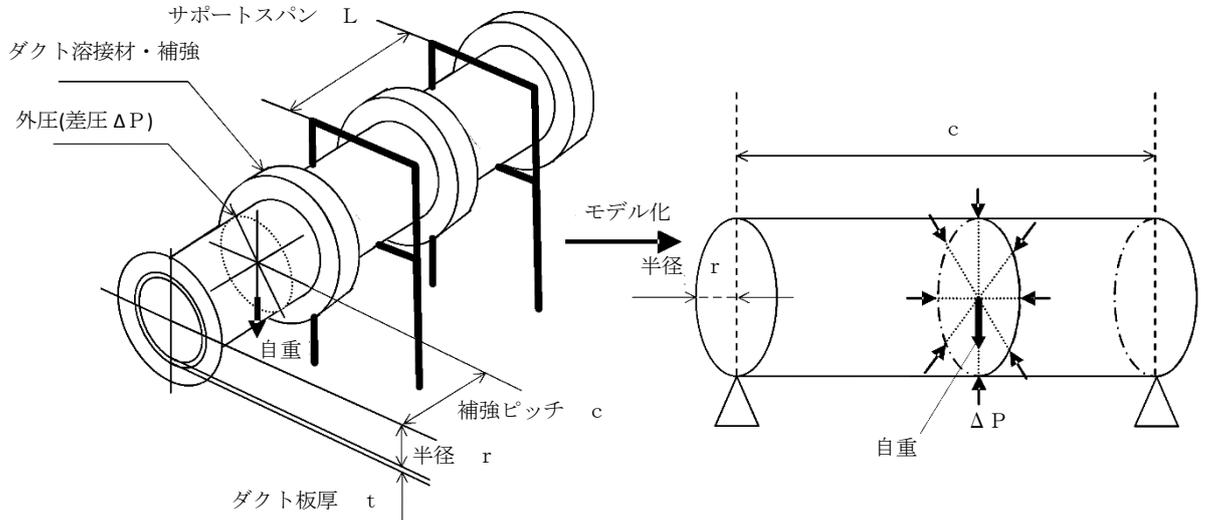


図5-21 丸ダクトモデル図

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 $\sigma_{c r i p l}$

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

(ロ) 自重により作用する曲げモーメント M_p

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

(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) 弁箱は両端を補強部材で支持された円筒の梁とみなし、計算を行う。弁箱のモデル図を図5-19に示す。
- (b) 弁体は円板であるため、等分布荷重が作用する周辺支持円板とみなし、計算を行う。評価モデルを図5-20に示す。
- (c) 弁体を受ける等分布荷重を支持する弁棒断面について、計算を行う。評価モデルを図5-21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

機器形状	評価対象部位	応力等の状態
バタフライ弁	弁箱	周方向応力
	弁体	曲げ
	弁棒	せん断

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5-30に示す。

表5-30 隔離弁の強度計算に用いる記号

記号	単位	定義
A_s	m^2	弁棒の断面積
A_v	m^2	弁体の受圧面積
a	mm	弁体の半径
d	mm	弁棒の直径
F_1	N	設計竜巻の気圧低下により弁棒に受ける荷重
F_2	N	弁体自重により弁棒に受ける荷重
g	m/s^2	重力加速度 ($g=9.80665$)
h	mm	弁体の板厚
m_v	kg	弁体自重
m_s	kg	弁棒自重
P_1	Pa	設計竜巻の気圧低下により弁体に受ける応力
P_2	Pa	自重により弁体に受ける応力
p_v	Pa	弁体に受ける応力
p_s	N	弁棒に受ける荷重
r	mm	内半径
t	mm	板厚
π	—	円周率
τ	MPa	弁棒に対するせん断応力
σ_{max}	MPa	弁体に対する曲げ応力
σ_θ	MPa	周方向応力
ΔP	hPa	設計竜巻の気圧低下量

(b) 評価方法

(a) 弁箱

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

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

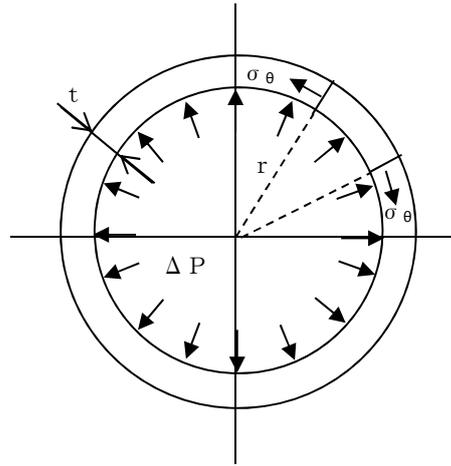


図5-22 弁箱モデル図

(b) 弁体

弁体に作用する曲げ応力の計算方法を以下に示す。

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

$$P_1 = \Delta P$$

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

ここで

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

弁体に受ける応力 p_v は次による。

$$p_v = P_1 + P_2$$

弁体に対する曲げ応力は次による。

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

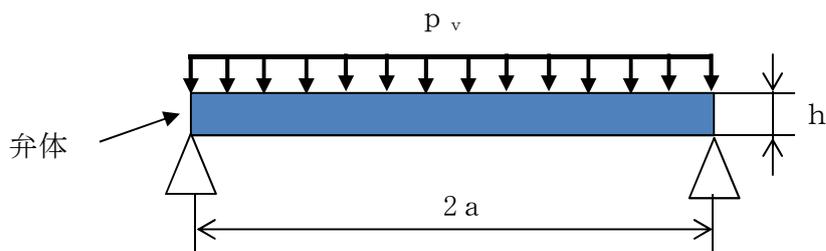


図 5-23 弁体モデル図

(c) 弁棒

弁棒に作用するせん断応力の計算方法を以下に示す。

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

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

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

弁棒に受ける荷重 p_s は次による。

$$p_s = F_1 + F_2$$

弁棒に対するせん断応力は次による。

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

ここで

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

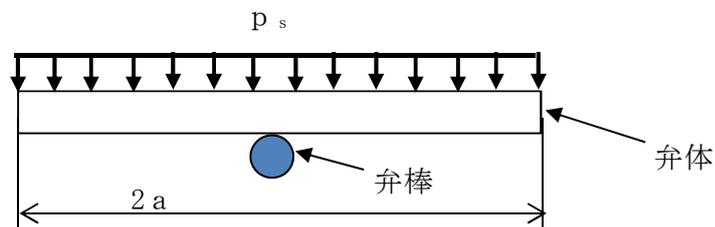


図 5-24 弁棒モデル図

(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) 屋内に設置するファンの計算モデルは両端を補強部材で支持された円筒の梁とみなし、計算を行う。ファンケーシングモデル図を図3-14に示す。
- (b) 屋外に設置するファンの計算モデルは円筒形の1質点モデルとし、上端部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5-31に示す。

表5-31 評価対象施設，部位及び評価内容

評価対象施設	評価対象部位	応力等の状態
屋内に設置するファン	ケーシング	周方向応力
屋外に設置するファン	取付ボルト 基礎ボルト	・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5-32に示す。

表5-32 ファンの強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A_b	mm^2	ボルトの軸断面積
F_b	N	ボルトに対する引張力
F_i	N	各ボルトに作用する引張力
g	m/s^2	重力加速度 ($g=9.80665$)
h	mm	全高
L_i	mm	各ボルト間の距離
M	$\text{N}\cdot\text{mm}$	設計竜巻により作用するモーメント
m	kg	ファンの質量
N	—	ボルトの本数
Q_b	N	ボルトに対するせん断力
q	N/m^2	設計用速度圧
r	mm	ケーシング内半径
t	mm	ケーシング板厚
ΔP	N/m^2	設計竜巻の気圧低下量
W_M	N	設計竜巻による飛来物の衝撃荷重
σ_b	MPa	ボルトに生じる引張応力
σ_θ	MPa	周方向応力
τ	MPa	ボルトに生じるせん断応力

イ. 屋内に設置するファン

(イ) 計算方法

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

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

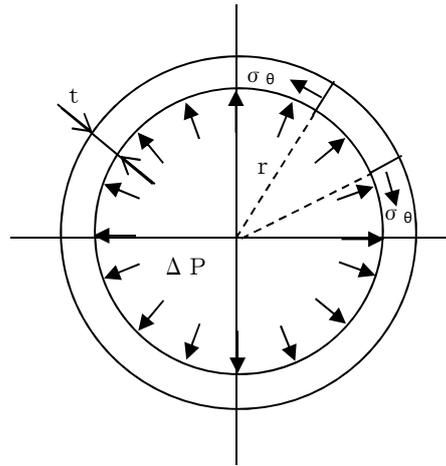


図5-25 ファンケーシングモデル図

ロ. 屋外に設置するファン

(イ) 計算方法

・引張応力

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

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

(3.1) (3.2) 式より,

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

ここで

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

ボルトに生じる引張応力 σ_b は次式より求める。

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

・せん断応力

ボルトに対するせん断応力は、ボルト全本数で受けるものとして計算する。

・せん断力

$$Q_b = W_w$$

- せん断応力

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

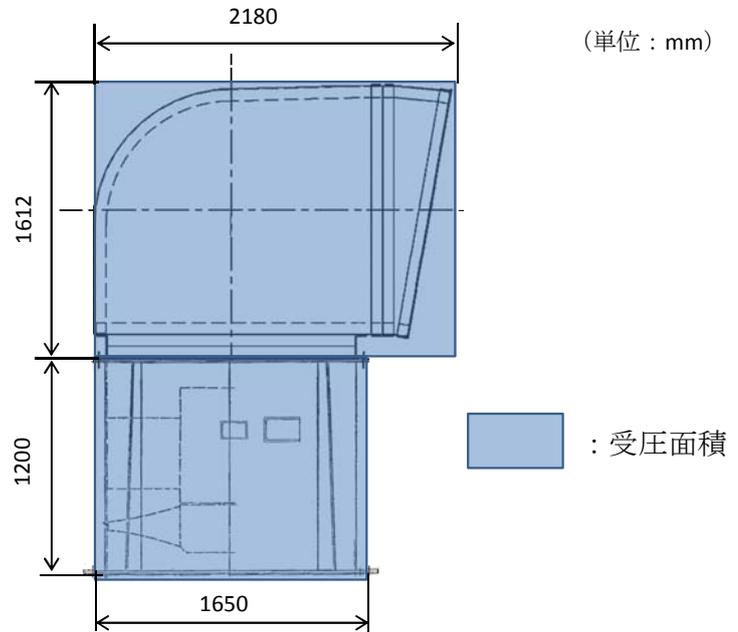


図 5-26 ファンモデル図

(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5-33に示す。

表5-33 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	応力等の状態
取付ボルト	<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5-34に示す。

表5-34 冷凍機の強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A_b	mm ²	取付ボルトの軸断面積
d	mm	取付ボルト呼び径
F_b	N	取付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	取付ボルト間の水平距離
L_H	mm	重心から取付ボルト間の水平距離
m	kg	冷凍機の運転質量
N	—	取付ボルトの本数
n_f	—	引張力を受ける取付ボルトの本数
Q_b	N	取付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	取付ボルトに生じる引張応力
τ	MPa	取付ボルトに生じるせん断応力

(b) 計算モデル

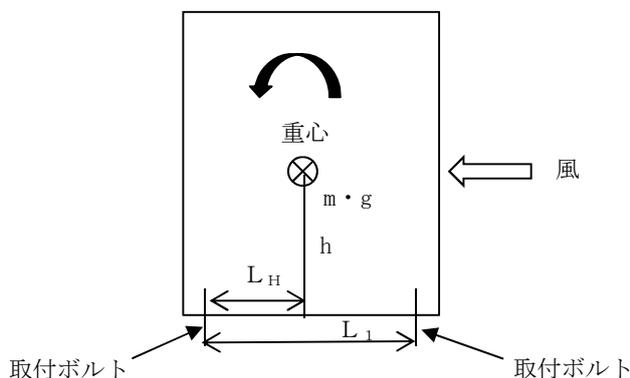


図 5-27 冷凍機モデル図

(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 3-18 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

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

(ロ) 引張応力

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

ロ. せん断応力

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。

- ・ せん断力
 $Q_b = W_w$

- ・ 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

V-3-別添 1-1-1 竜巻より防護すべき施設を内包する施設の
強度計算書

目次

1. 概要.....	1
2. 基本方針.....	1
2.1 位置.....	1
2.2 構造概要.....	2
2.3 評価方針.....	19
2.4 適用規格.....	21
3. 強度評価方法.....	22
3.1 記号の定義.....	22
3.2 評価対象部位.....	23
3.3 荷重及び荷重の組合せ.....	24
3.4 許容限界.....	27
3.5 評価方法.....	29
4. 評価条件.....	53
4.1 貫通評価.....	66
4.2 裏面剥離評価.....	68
4.3 変形評価.....	70
5. 強度評価結果.....	81
5.1 貫通評価.....	81
5.2 裏面剥離評価.....	82
5.3 変形評価.....	83

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、緊急時対策所（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、設置（変更）許可申請において示す設計飛来物（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。

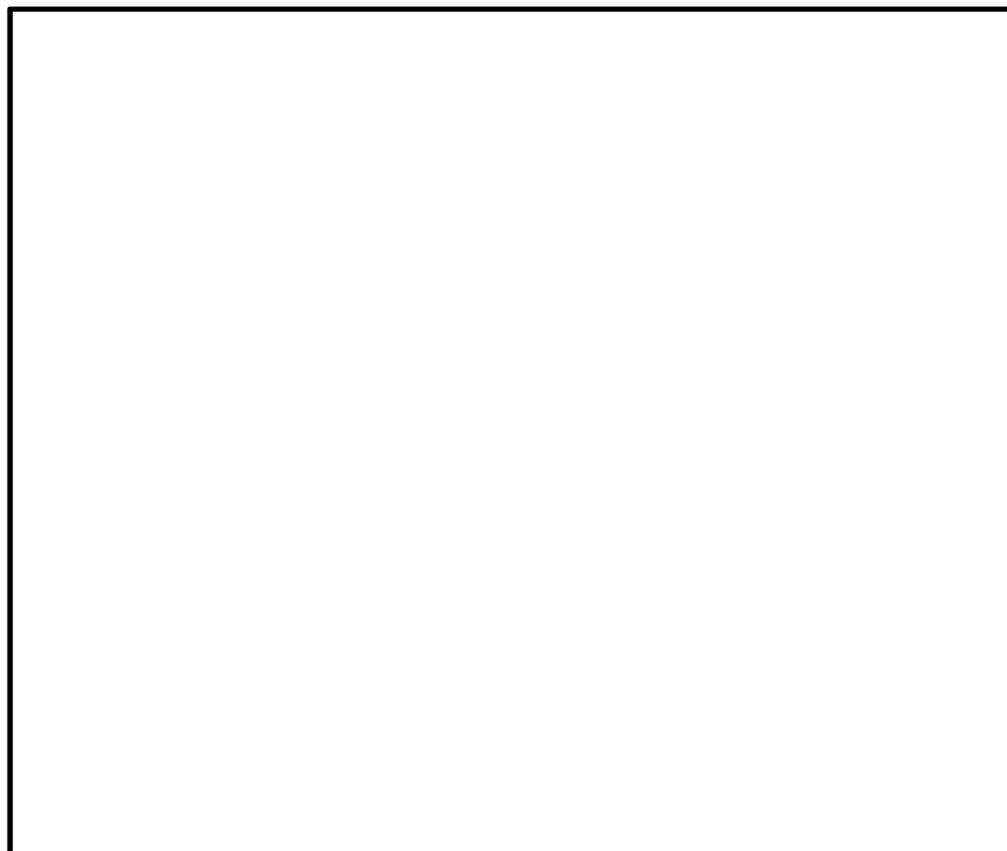


図 2-1 建屋及び構造物の配置図

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 2-18 に示す。

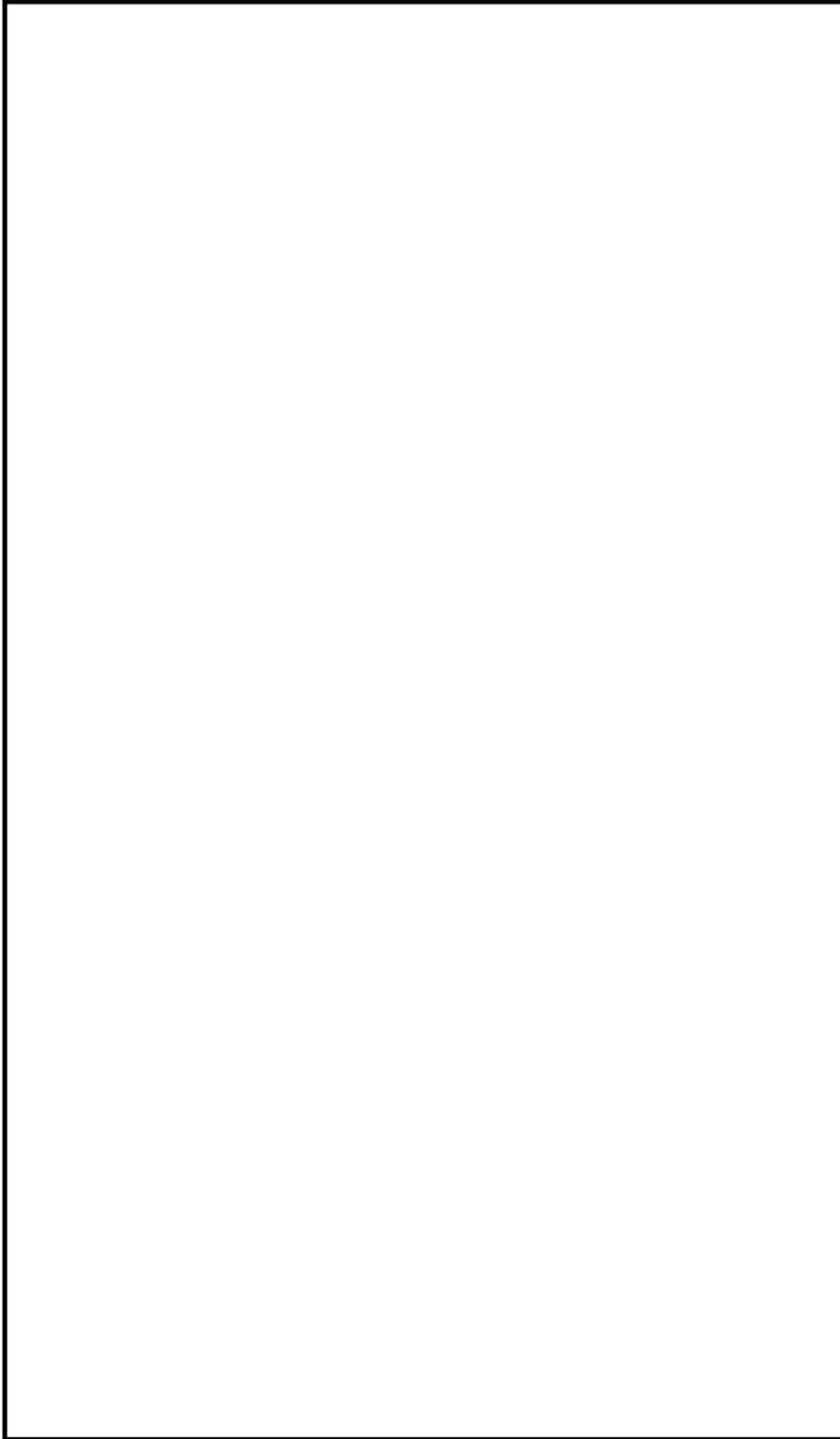


図2-2 原子炉建屋の概略平面図

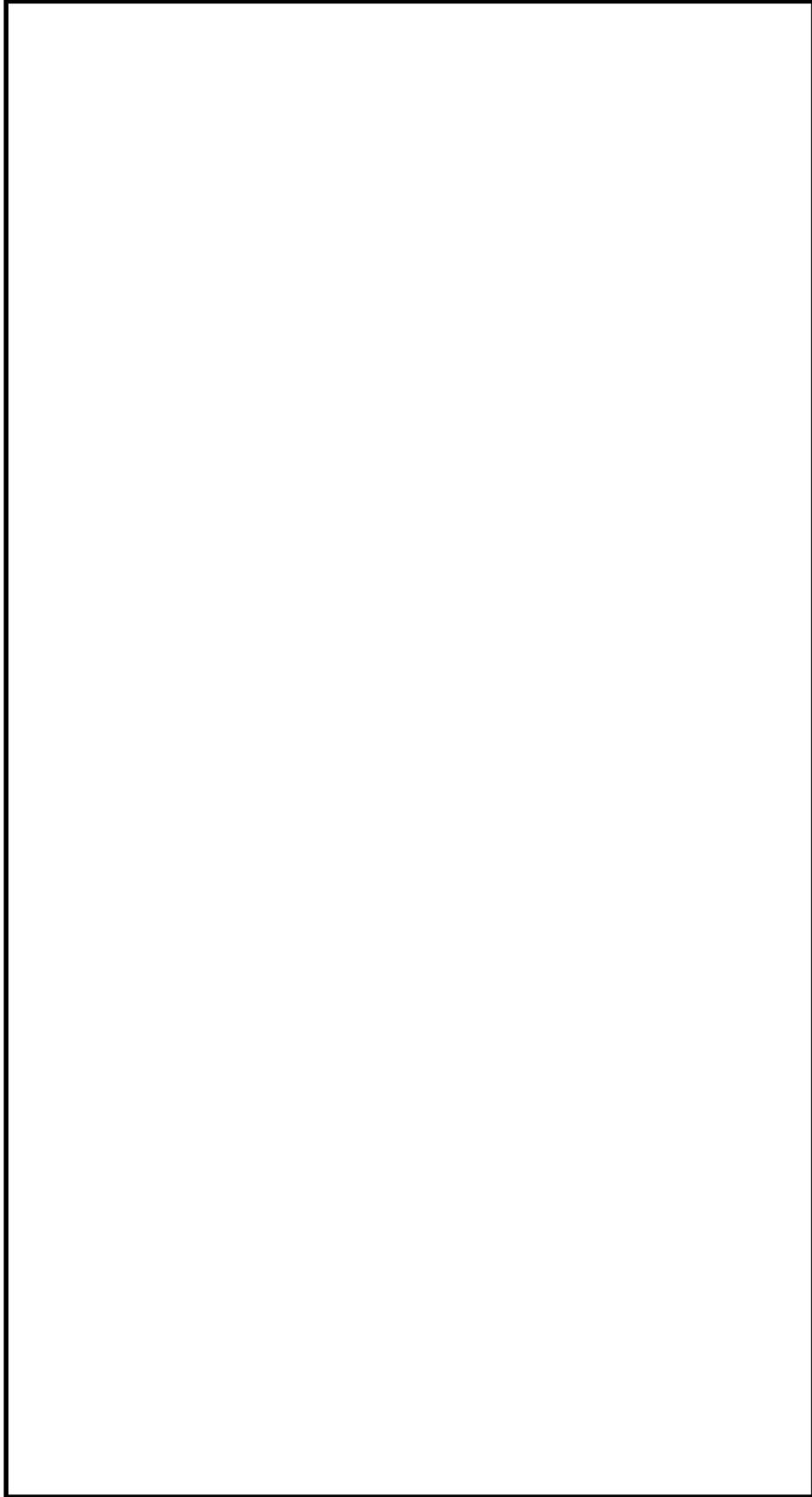


図 2-3 原子炉建屋の概略断面図(1/2)



図 2-3 原子炉建屋の概略断面図(2/2：鉄骨構造部)



図2-4 外殻となる扉の位置図（立面図：東側）



図2-5 外殻となる扉の位置図（立面図：西側）

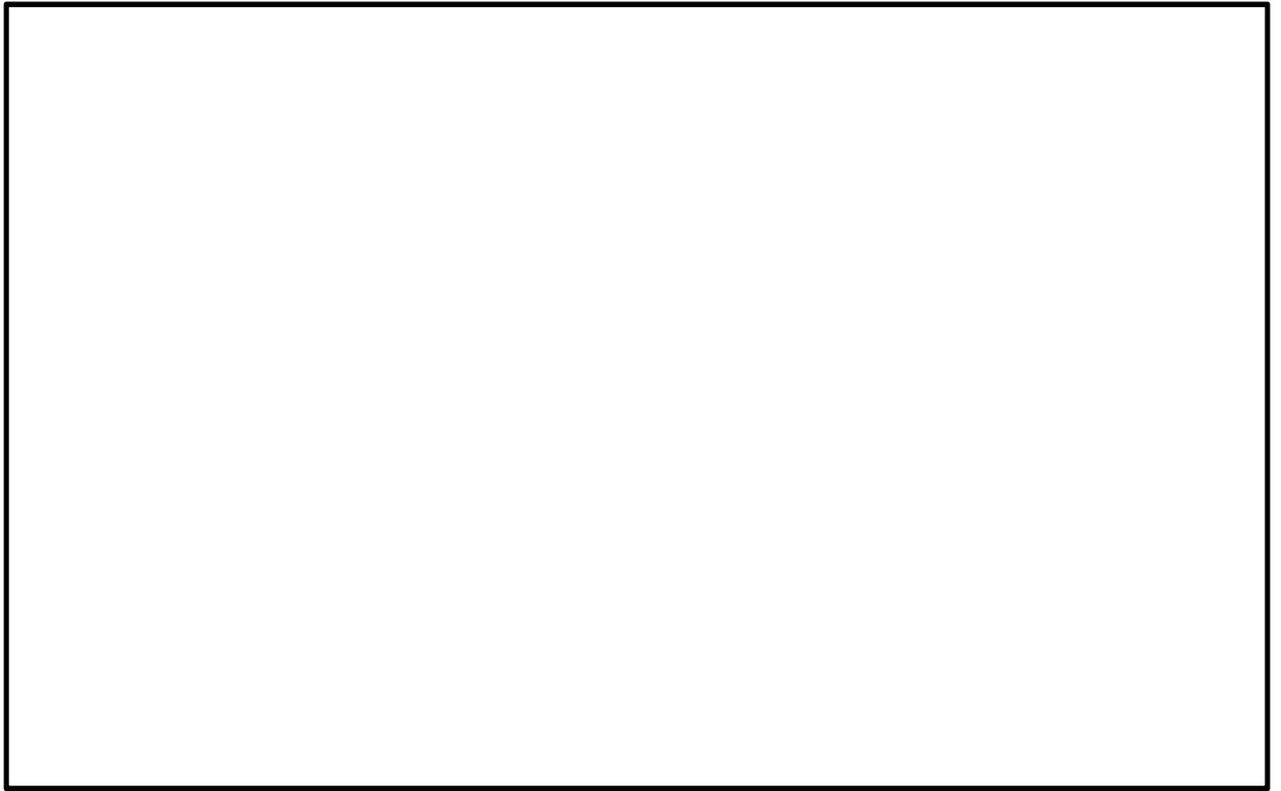


図2-6 外殻となる扉の位置図（立面図：南側）

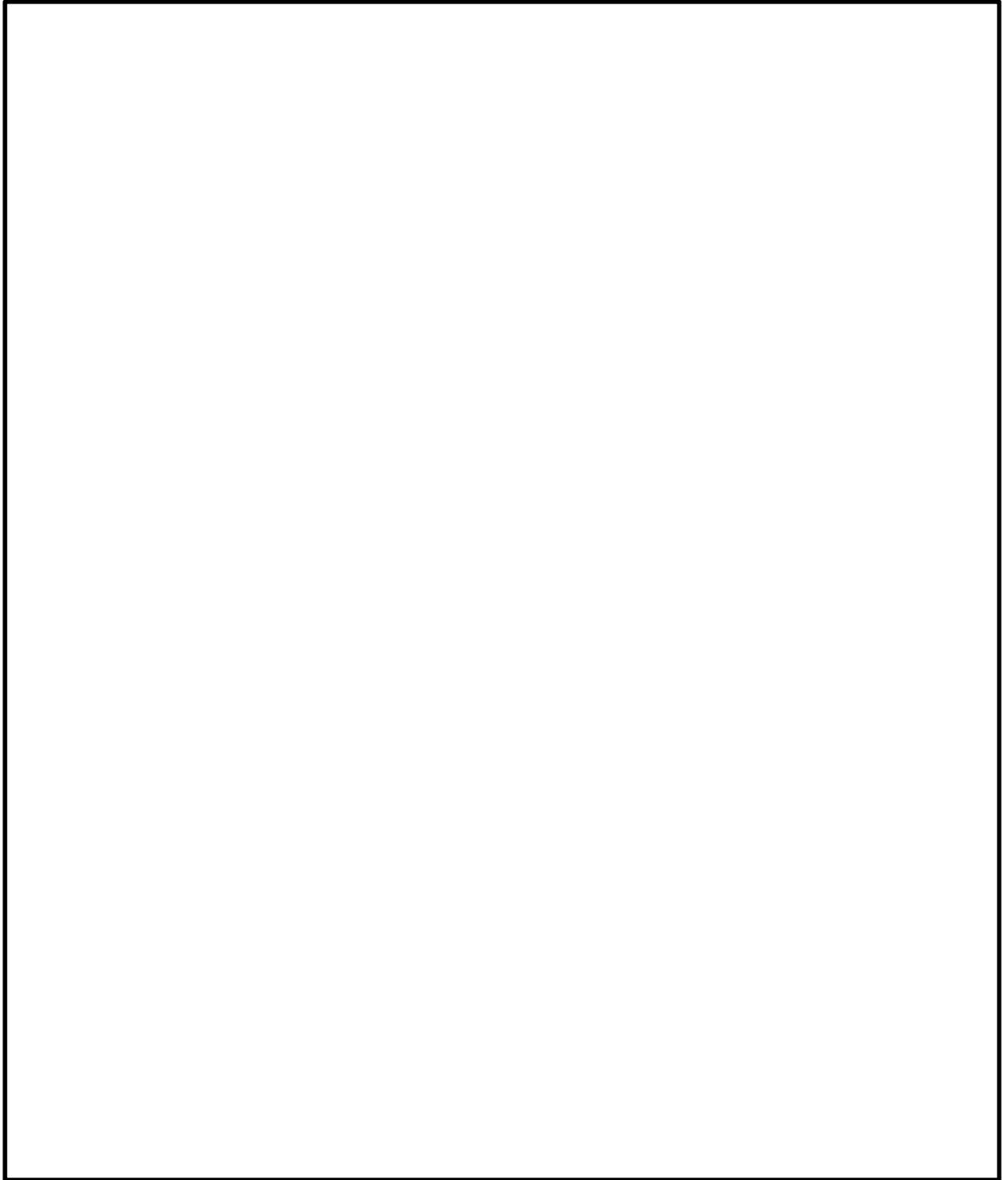


図2-7 原子炉建屋の外殻となる扉の位置図 (EL. 8.2m)

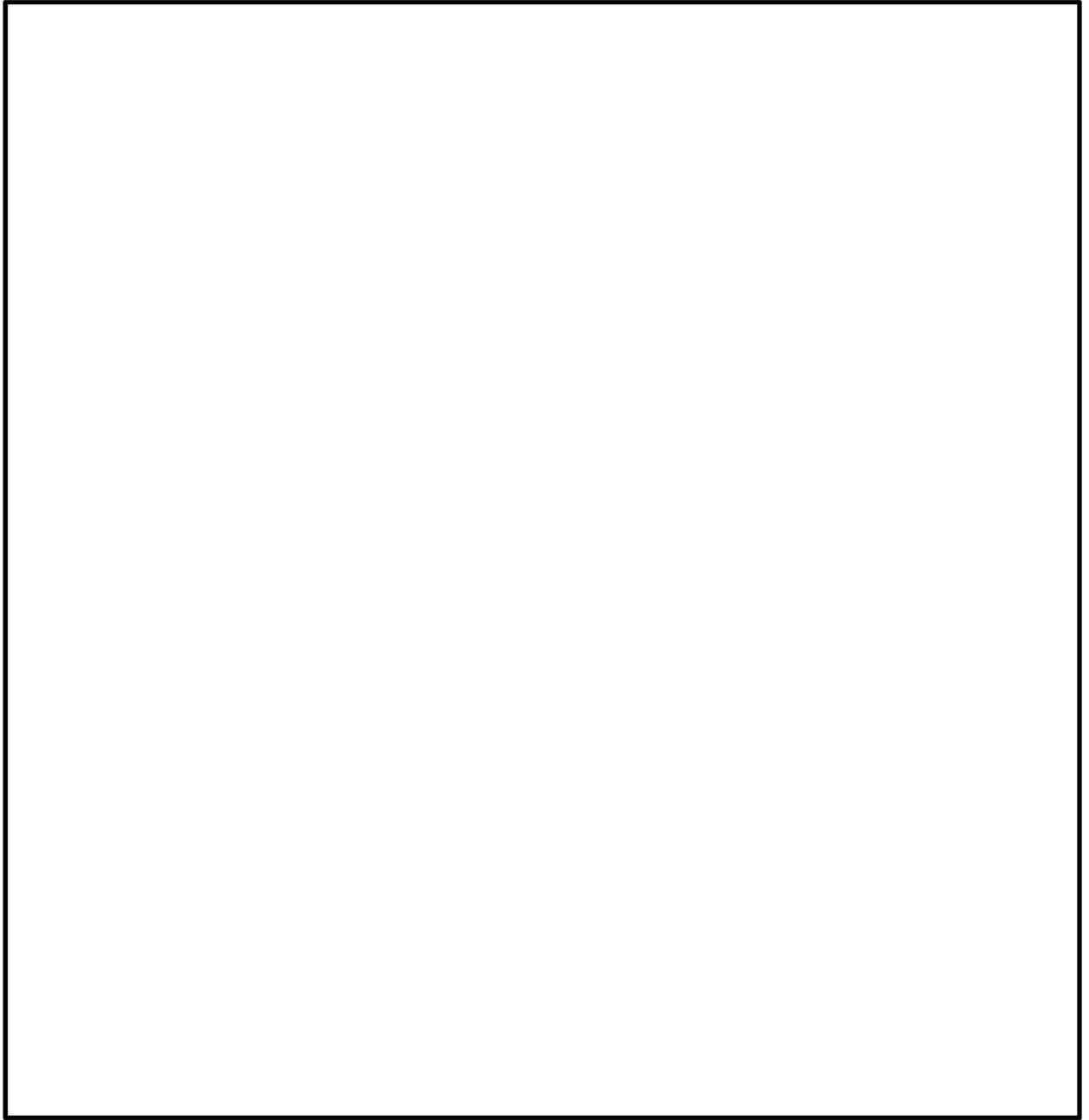


図2-8 原子炉建屋の外殻となる扉の位置図 (EL. 14.0m)

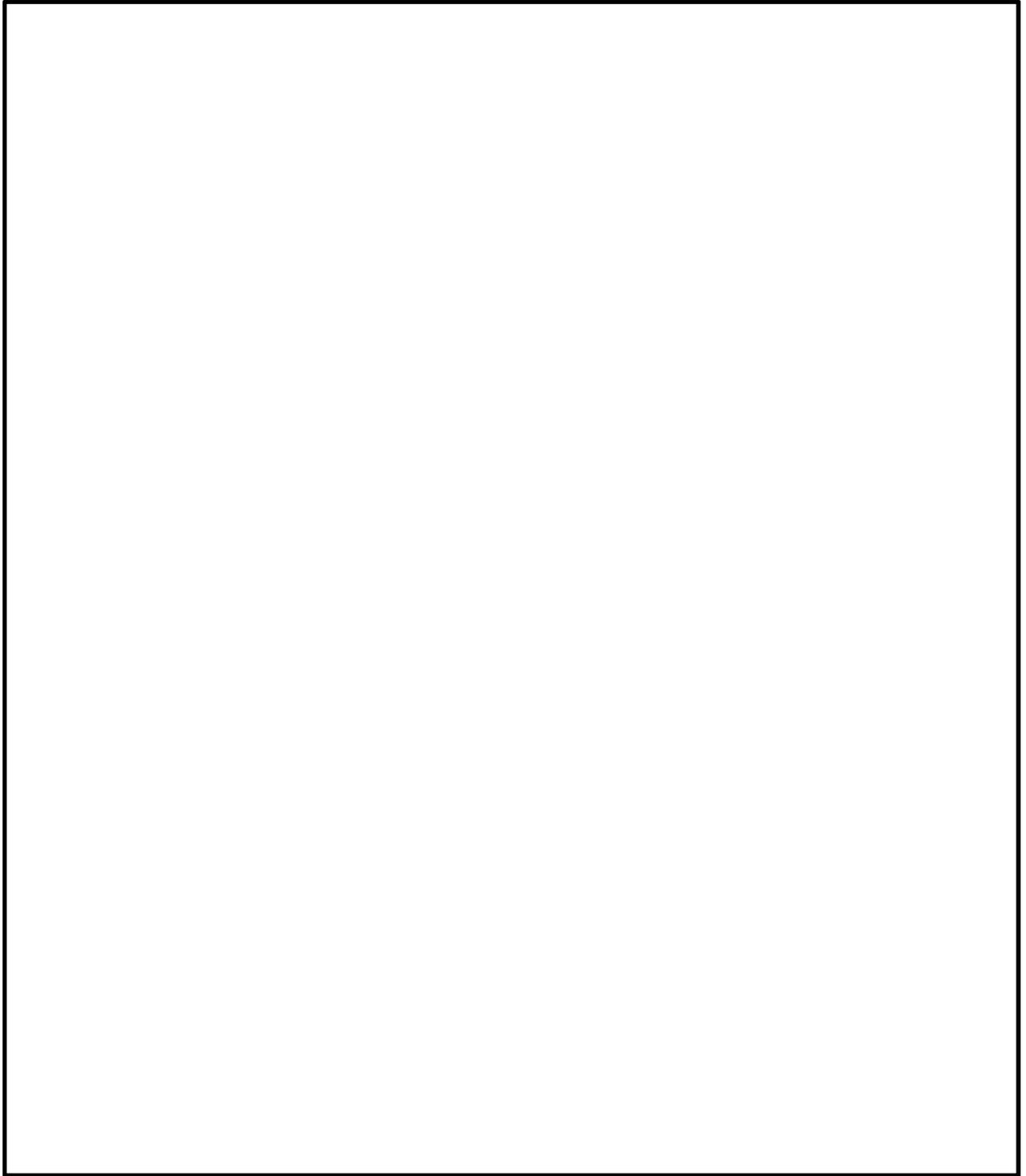


図2-9 原子炉建屋外殻となる扉の位置図 (EL. 20.3m, EL. 23.0m)

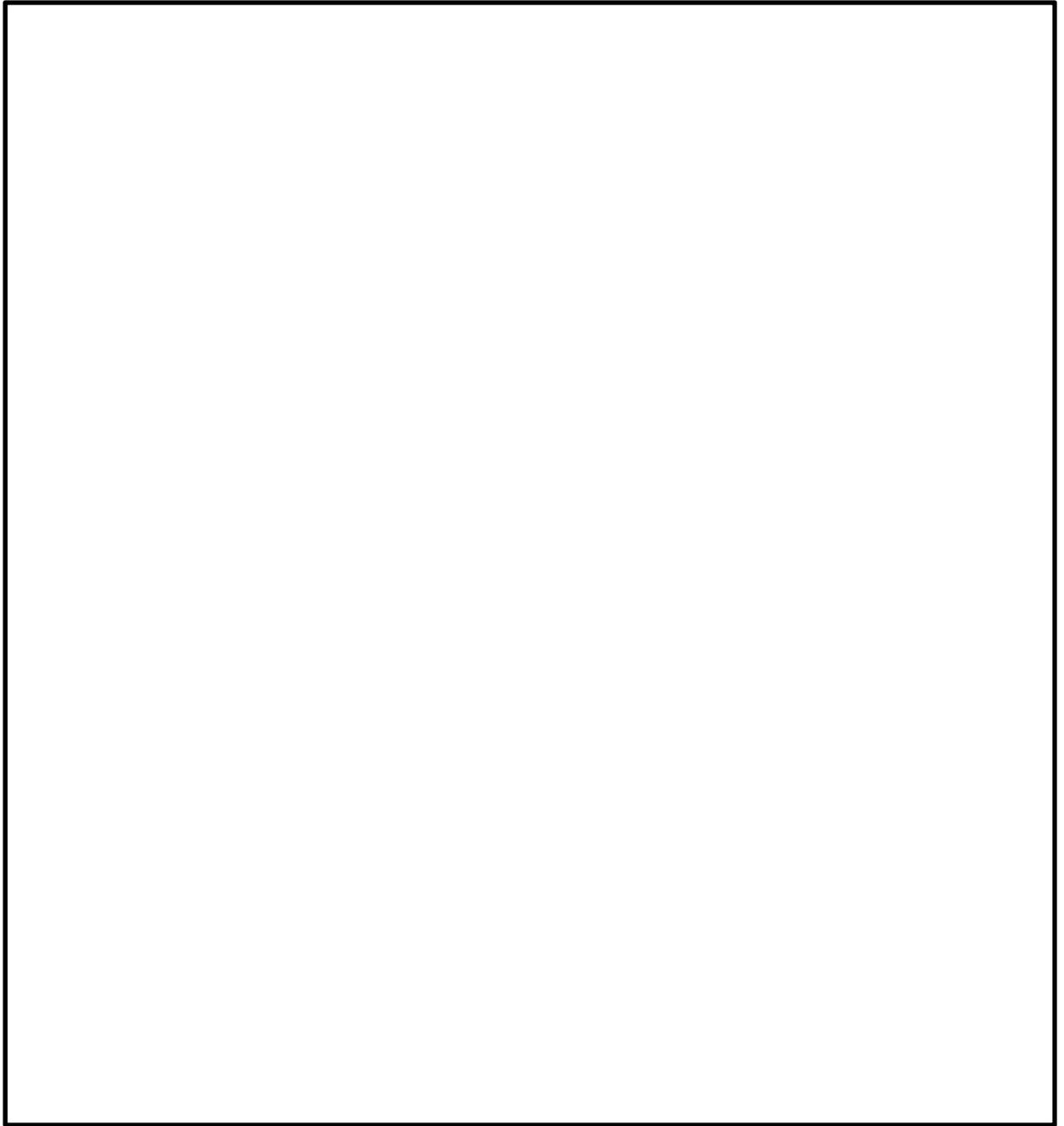


図2-10 原子炉建屋の外殻となる扉の位置図 (EL. 29.0m)

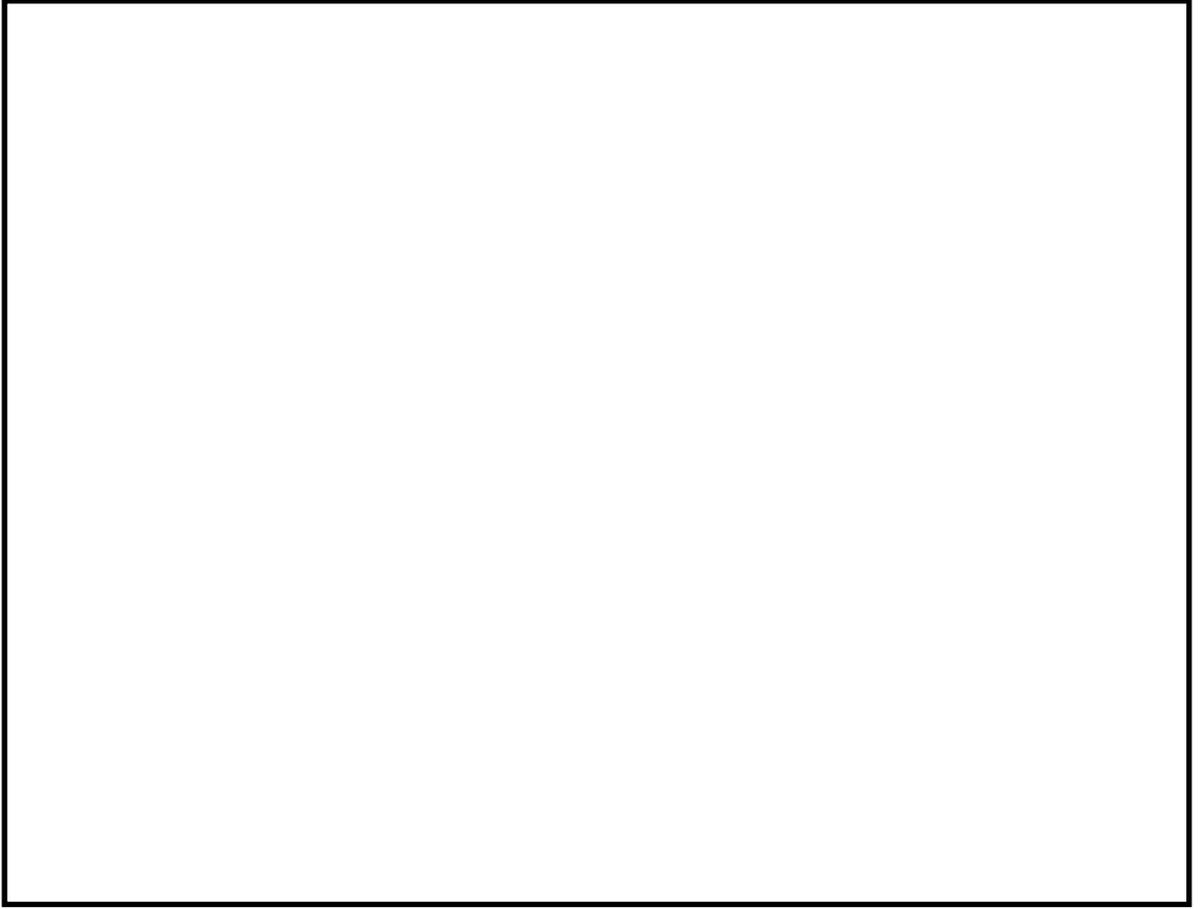


図 2-11 タービン建屋の概略平面図

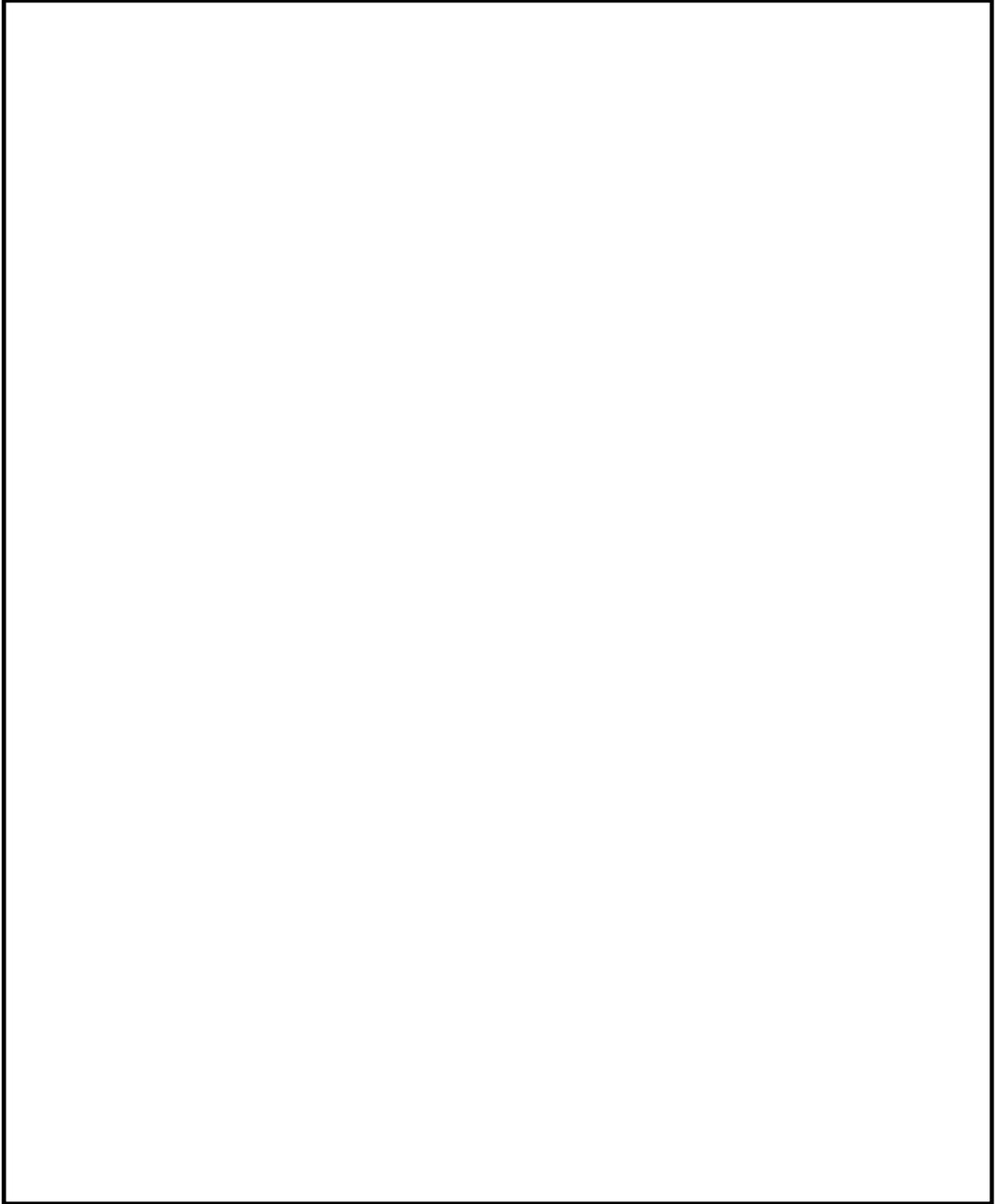


図 2-12 タービン建屋の概略断面図

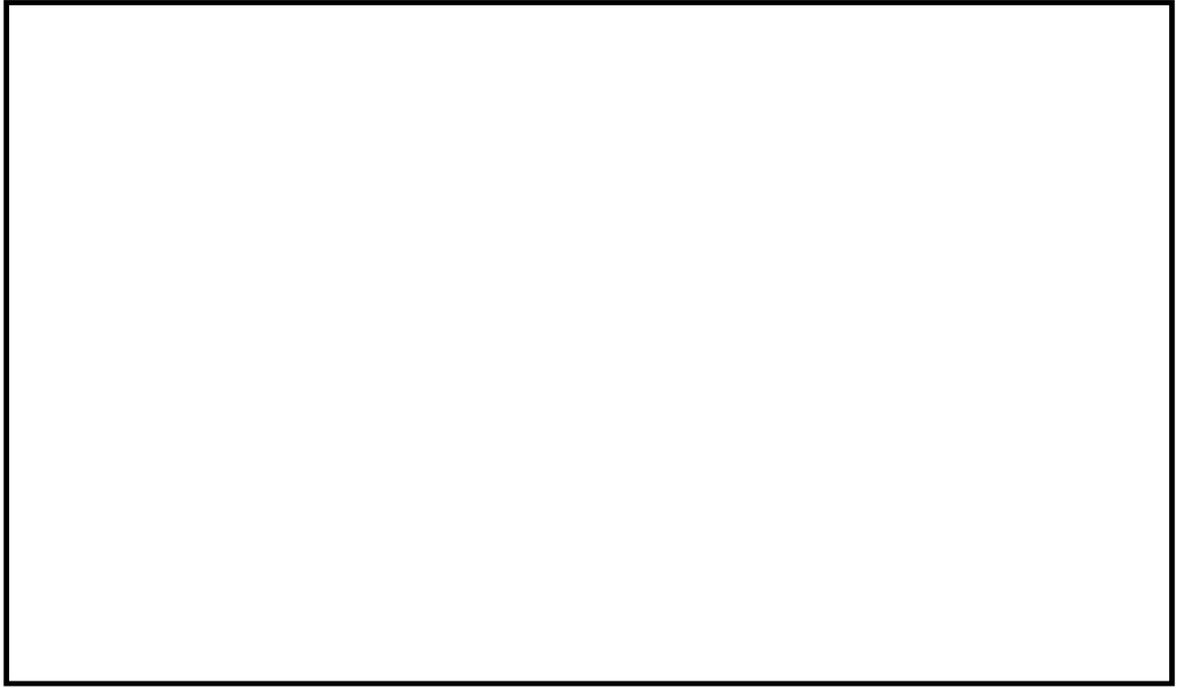


図 2-13 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略平面図

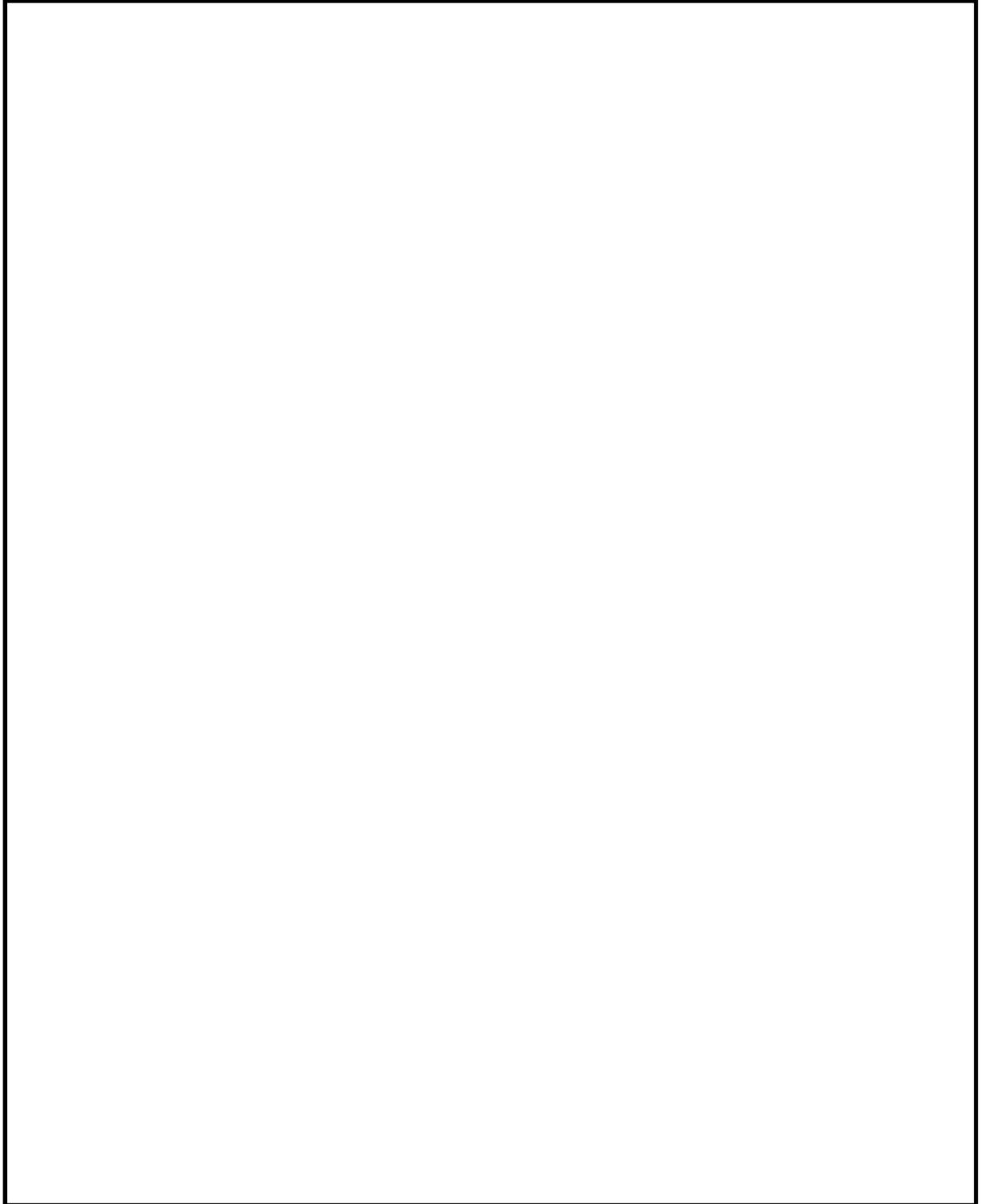


図 2-14 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略断面図

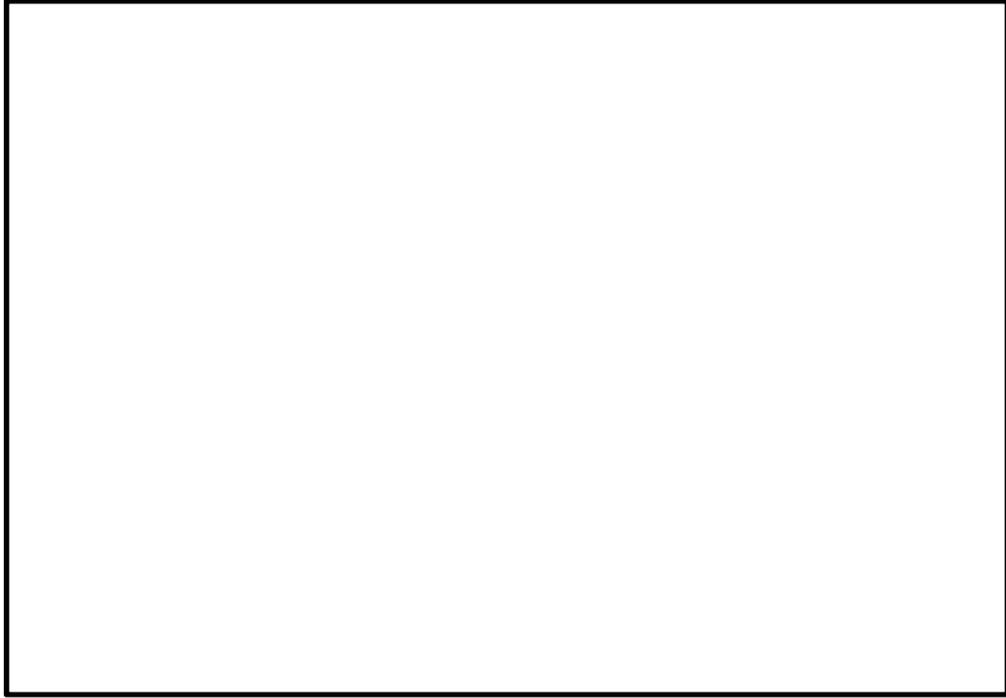


図2-15 軽油貯蔵タンクタンク室の概略平面図

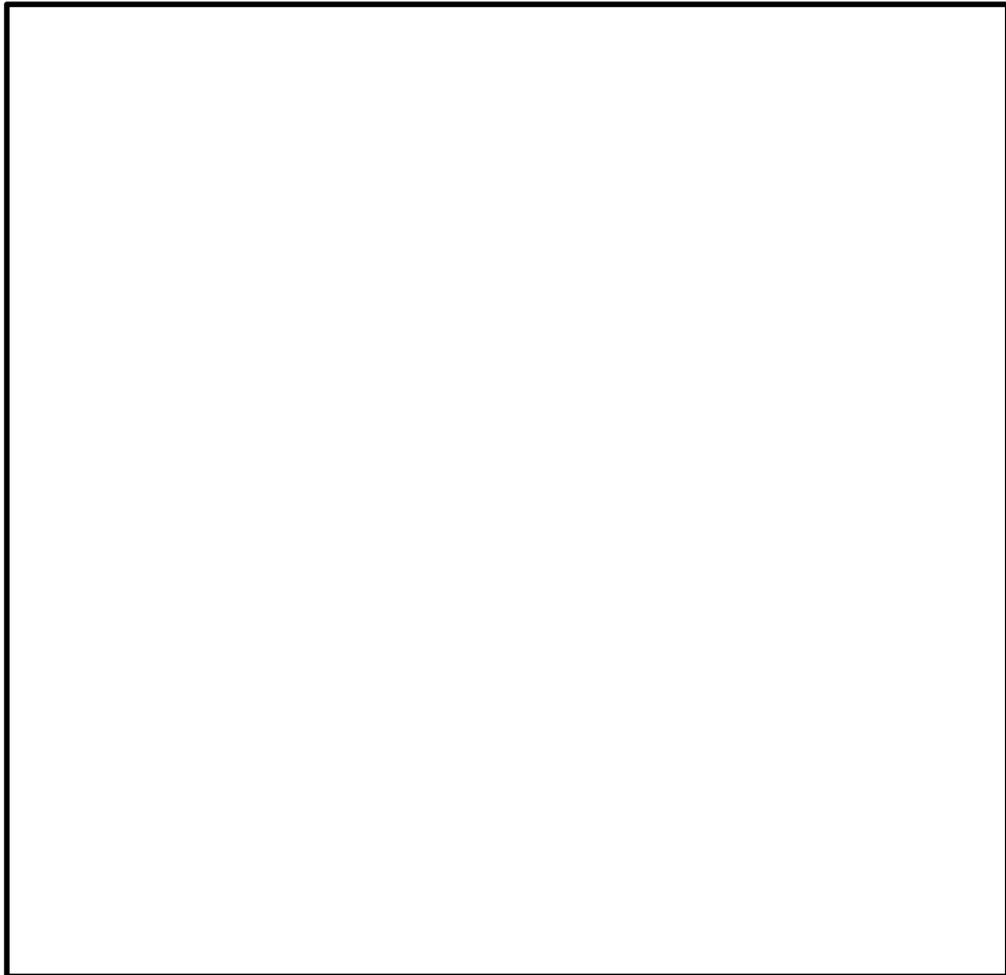


図2-16 軽油貯蔵タンクタンク室の概略断面図

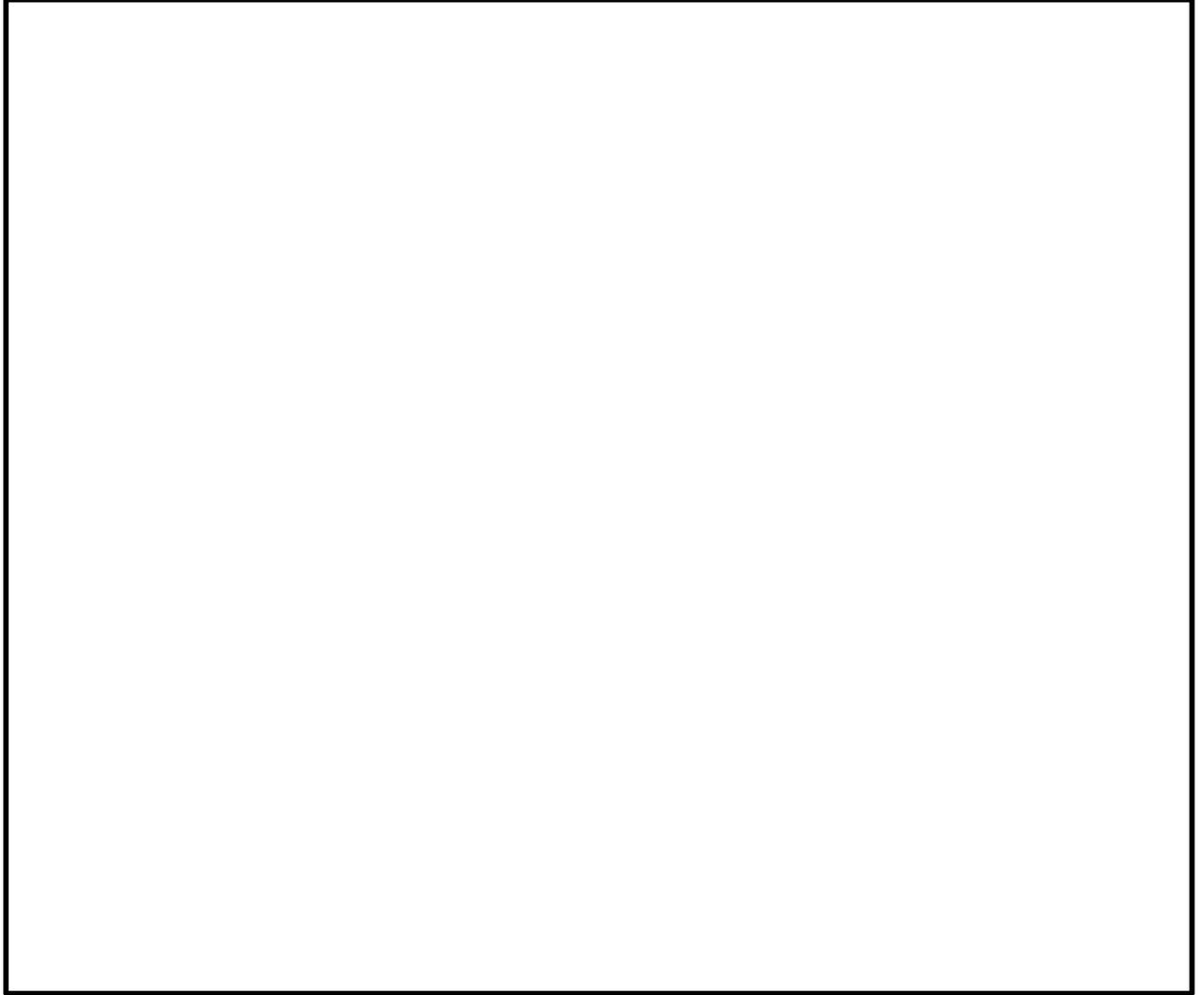


図2-17 緊急時対策所の概略平面図

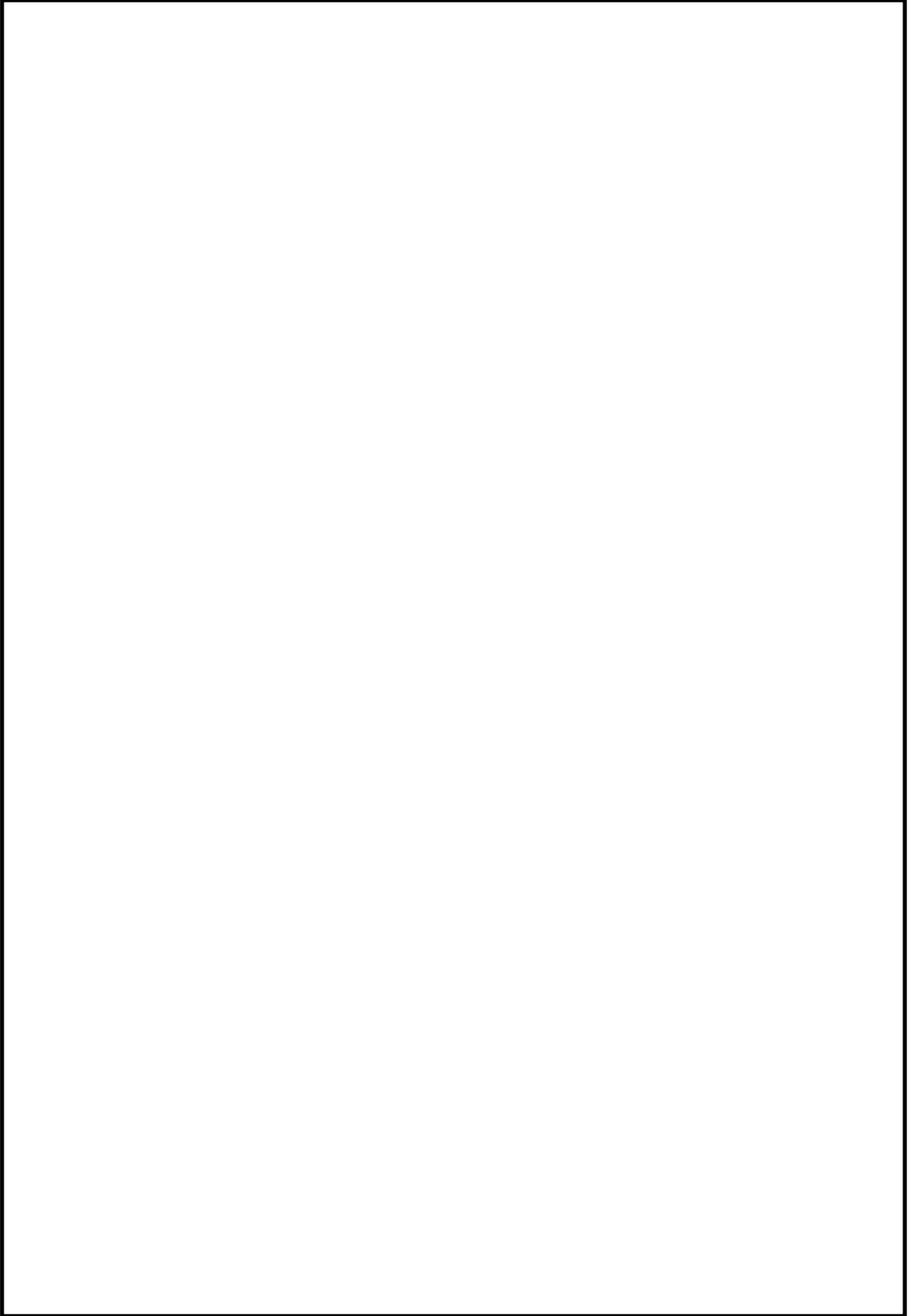


図2-18 緊急時対策所の概略断面図

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。

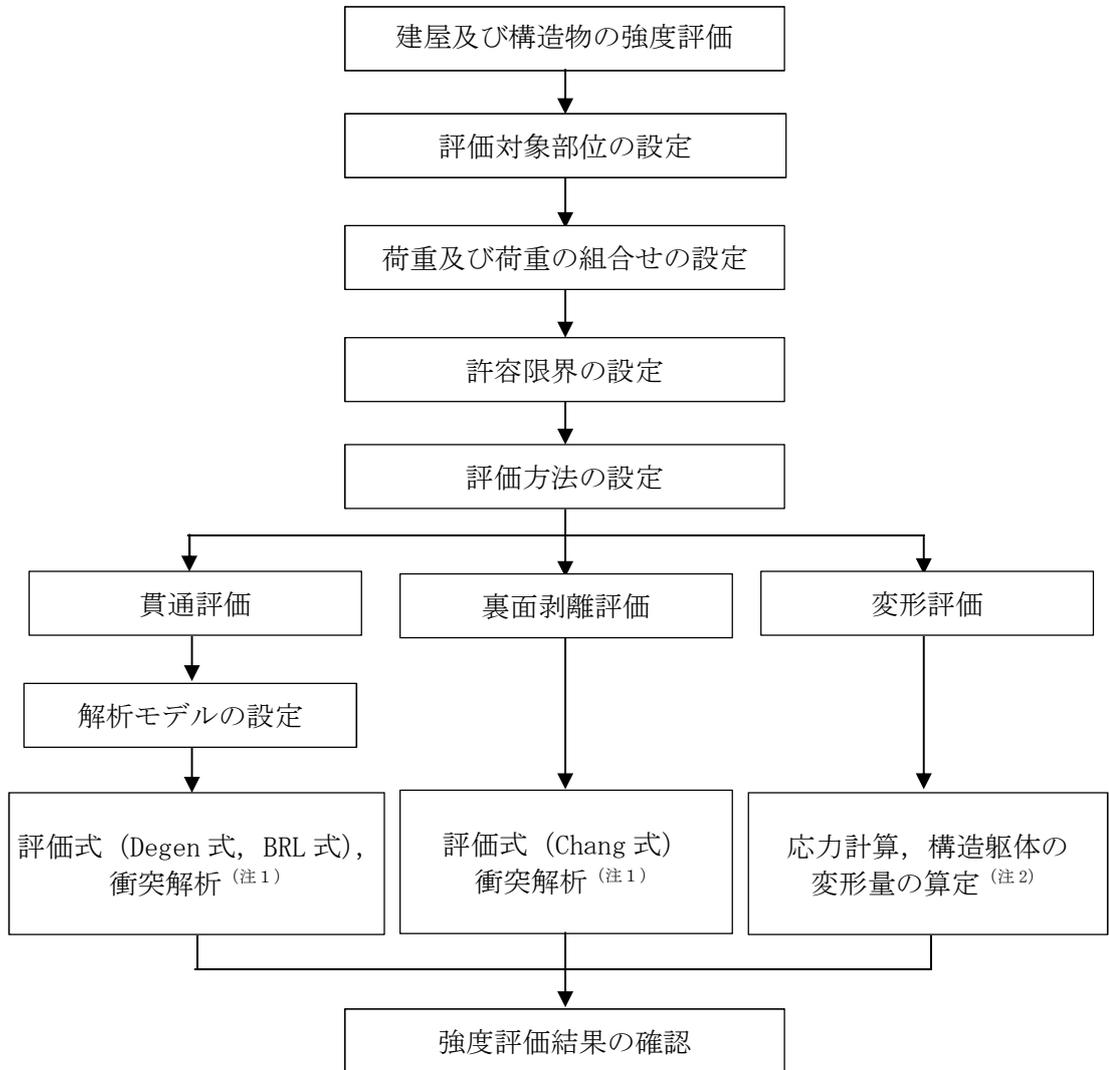
（以下「裏面剥離評価」という。）

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2-19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2-19 強度評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・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 JEAG 4601-1987」（（社）日本電気協会）
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1991 追補版」（（社）日本電気協会）
- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC 1-2005/2007」（社）日本機械学会
- ・日本工業規格（JIS）
- ・「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。)

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	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)
V ₀	m/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（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	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_1	kN/mm	カンヌキバーに生じる曲げモーメント
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	本	ボルト本数
n_h	箇所	ヒンジ部箇所数
n_k	箇所	カンヌキ部箇所数
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り荷重負担部に発生する反力
T	kN	引張力
W_p	kN	気圧差による荷重
Z_1	mm^3	カンヌキバーの断面係数
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，また，重大事故対処施設の環境条件維持に関与する扉を評価対象部位として選定する。

(2) 構造物

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

3.2.2 裏面剥離評価

(1) RC造建屋

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

(2) 構造物

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

3.2.3 変形評価

(1) 建屋

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

(2) 構造物

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

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組み合わせは，V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

3.3.1 荷重の設定

強度評価に用いる荷重を以下に示す。

(1) 風圧力による荷重 (W_w)

風圧力による荷重 W_w は、下式により算定する。

風力係数 C は、「建築基準法及び同施行令」に基づき設定する。

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

(2) 気圧差による荷重 (W_p)

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

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

(3) 飛来物による衝撃荷重 (W_M)

飛来物による衝撃荷重 W_M は、表3-5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3-5 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	設計飛来物として、全ての 建屋及び構造物を対象
車両	3.6×2.5× 8.6	5000	52	—※	隣接事業所からの飛来物の 代表的なものとして、以下の 施設を対象 ・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 3-6 に示す。

表3-6 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 (扉板)	W_M	
	(解析による評価) ・原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ	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) ・原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ ・原子炉建屋外壁	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 ・緊急時対策所建屋	複合荷重 W_{T2}	$W_w + 1/2W_p + F_d$
	(式による評価) ・原子炉建屋 (鉄骨造部外装板) ・扉(カンヌキ部)	W_p	

W_w : 風圧力による荷重 W_p : 気圧差による荷重

W_M : 飛来物による衝撃荷重 F_d : 常時作用する荷重

3.4 許容限界

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 3-7 に示す最小部材厚さとする。

表3-7 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		許容限界	
			貫通限界厚さ (mm) ^{※1}	
			鉛直方向	水平方向
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	鋼製材	
			車両	
		軽油貯蔵タンクタンク室		
	緊急時対策所	鋼製材		
		車両		
扉板（鋼板）				

※1：特記ない場合は、鋼製材に対する値

※2：屋上への車両の衝突は評価対象外（表3-4より）

※3：地中の構造物のため、側壁は露出していない。

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

式による評価を満足せず、解析による評価を行う場合における許容限界を、表3-8に示す。

表3-8 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	許容限界
貫通評価 (解析による評価)	鉄筋 (原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ)	

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 3-9 に示す最小部材厚さとする。

表3-9 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		許容限界	
			裏面剥離限界厚さ(mm) ^{※1}	
			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		
		タービン建屋		
		使用済燃料乾式貯蔵建屋	鋼製材	
			車両	
		軽油貯蔵タンクタンク室		
		緊急時対策所	鋼製材	
車両				

※1：特記ない場合は、鋼製材に対する値

※2：屋上への車両の衝突は評価対象外（表3-4より）。

※3：地中の構造物のため、側壁は露出していない。

式による評価を満足せず、解析による評価を行う場合における許容限界は、表3-10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3-10 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		許容限界
裏面剥離評価 (解析による評価)	外壁（原子炉建屋原子炉棟 ^{※1} ）	下層の鉄筋	
	屋根スラブ（原子炉建屋原子炉棟 ^{※2} ）	デッキプレート	
	外壁（使用済燃料乾式貯蔵建屋 ^{※3} ）	ライナ	

※1：鋼製材に対する裏面剥離限界厚さを満たさない部位（内張材無し）のうち、最も厚さの小さいものとして選定

※2：鋼製材に対する裏面剥離限界厚さを満たさない部位（内張材あり）

※3：車両に対する必要最小厚さを満たさない箇所

3.4.3 変形評価

屋根スラブ及びスタッド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 2.0×10^{-3} とする。

変形評価の許容限界を表 3-11 に示す。

表3-11 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 (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	「鋼構造設計規準－許容応力度設計法－」に準じた短期許容応力度
変形評価 (鉄骨造部)	外装板	面外	取付ボルトの許容引張荷重
		面内	鉄骨架構の層間変形角 $1/60$ (rad)※
変形評価 (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	

※：外装材メーカーの技術資料による

3.5 評価方法

3.5.1 貫通評価

(1) 貫通評価式による評価

a. 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。

$$X/d \leq 1.52 \text{ の場合,}$$

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

ここで、貫入深さ X は、

$$X/d \leq 2.0 \text{ の場合,}$$

$$X/d = \{(48580/\sqrt{F_c}) \cdot N \cdot d^{0.2} \cdot D \cdot (V/1000)^{1.8}\}^{0.5}$$

b. 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。

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

なお、BRL式による許容限界を1枚では満足しない箇所については、BRL式をエネルギー吸収量の観点により変形した以下の式に基づき、直列する複数枚の鋼製障壁によるエネルギー吸収量の総和が、設計飛来物の運動エネルギーを上回ることを確認する。

複数の鋼板 (n 枚) を考慮し、 i 枚目の板厚を t_i とすると、 i 枚目の板で吸収可能なエネルギー e_i は、

$$e_i = \left(1.4396 \times 10^9 \cdot K^2 \cdot d^{\frac{3}{2}} \right) \cdot t_i^{\frac{3}{2}} \quad \dots \textcircled{3}$$

よって、 n 枚の板により吸収可能な飛来物の運動エネルギー E は

$$E = \sum_{i=1}^n E_i$$

(2) 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に示す。

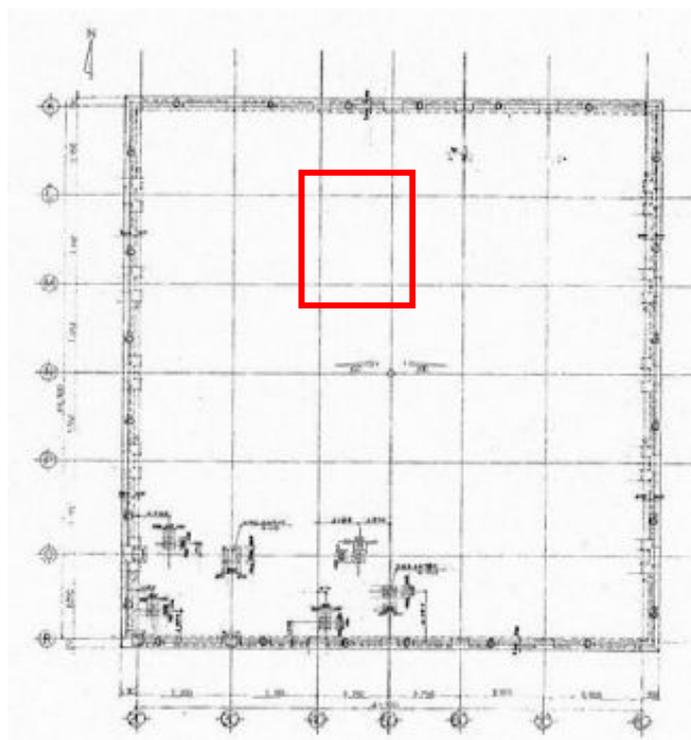


図3-1 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブのモデル化範囲

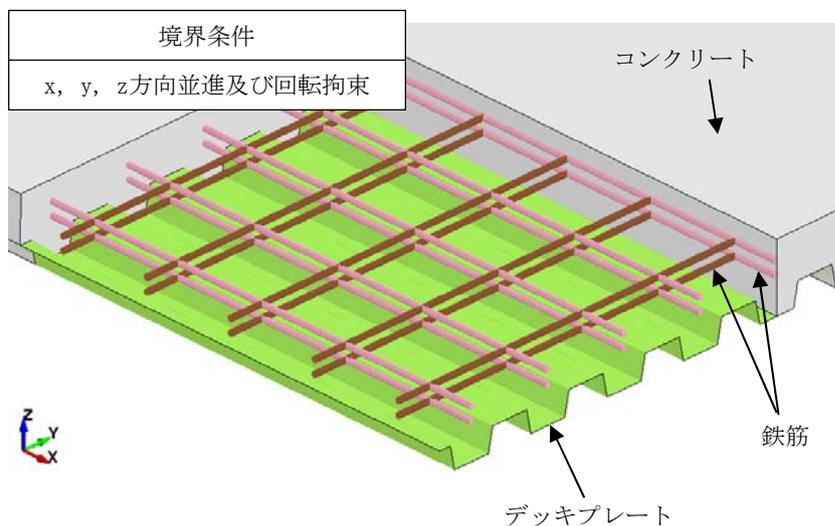


図3-2 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの解析モデル

(b) 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。

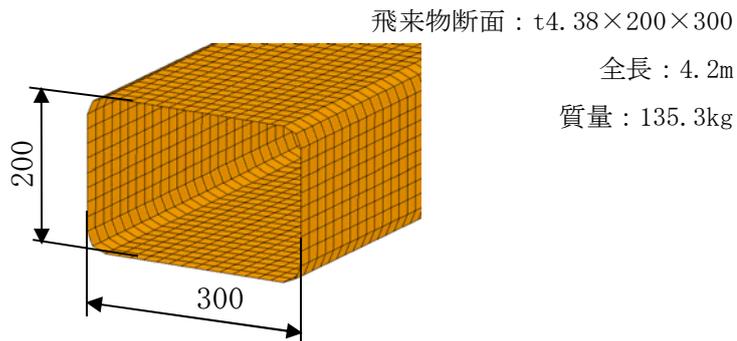


図3-3 飛来物の解析モデル図

b. 材料定数

コンクリート，鉄筋，デッキプレート及び設計飛来物の材料定数をそれぞれ表3-12から表3-15に示す。

表3-12 コンクリートの材料定数

種類	設計基準強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)
普通 コンクリート	22.1	2.21×10 ⁴	0.2	23.0

表3-13 鉄筋の材料定数

種類	降伏応力 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	単位体積重量 (kN/m ³)
SD345	345	2.05×10 ⁵	77

表3-14 デッキプレートの材料定数

種類	降伏応力 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	単位体積重量 (kN/m ³)
SDP1T	205	2.05×10 ⁵	77

表3-15 設計飛来物の材料定数

種類	降伏応力 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	単位体積重量 (kN/m ³)
SS400	245	2.05×10 ⁵	77

c. 材料の非線形特性

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とし、引張側は主応力が引張強度に到達後に引張主応力と直交方向にひび割れが生じるものとして、ひずみに応じて保持応力を低下させる引張軟化特性を与える。圧縮強度は、NEI07-13に従い、設計基準強度に対して動的増加率1.25を乗じた値とする。

鋼製部材である鉄筋、デッキプレート及び設計飛来物の応力-ひずみ曲線は、第1折れ点を「降伏応力-降伏ひずみ」、第2折れ点を「破断相当応力-破断相当ひずみ」とするトリリニア型とする。鉄筋、デッキプレート及び設計飛来物の降伏応力は、降伏応力に動的増加率を乗じた値、破断相当応力は、動的増加率を乗じた降伏応力及び引張強さを結ぶ線のうち、規格値の伸びを後述の多軸性係数で除したひずみ（破断相当ひずみ）時に相当する応力とする。

動的増加率は、NEI07-13に基づく値（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））とする。

金属材料の破断ひずみは、JISに規定されている伸びの下限値を基に設定する。また、NEI 07-13においてTF（多軸性係数）を2.0とすることが推奨されていることを踏まえ、鉄筋及びデッキプレートの破断相当ひずみはTF=2.0を考慮する。なお、設計飛来物の破断相当ひずみは、設計飛来物が破断することなく継続的に荷重が掛かるように配慮し、TF=1.0とする。

コンクリート、鉄筋、デッキプレート及び設計飛来物の圧縮及び引張強度をそれぞれ表3-16及び表3-17に示す。

表3-16 コンクリートの圧縮及び引張強度

種別	設計基準強度 (N/mm ²)	材料モデル	
		圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
躯体 コンクリート	22.1	27.6	2.55

表3-17 鉄筋、デッキプレート及び設計飛来物の降伏及び破断強度

種別	材質	規格値（公称応力）		材料モデル（真応力，真ひずみ）		
		降伏応力 (N/mm ²)	破断応力 (N/mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)	破断相当 応力 (N/mm ²)	破断相当 塑性ひずみ
鉄筋	SD345	345	490	380.2	494.2	0.082
デッキ プレート	SDP1T	205	270	264.8	307.8	0.082
設計飛来物	SS400	245	400	316.6	533.3	0.189

コンクリート、鉄筋、デッキプレート及び設計飛来物の応力-ひずみ関係を、それぞれ図3-4から図3-7に示す。

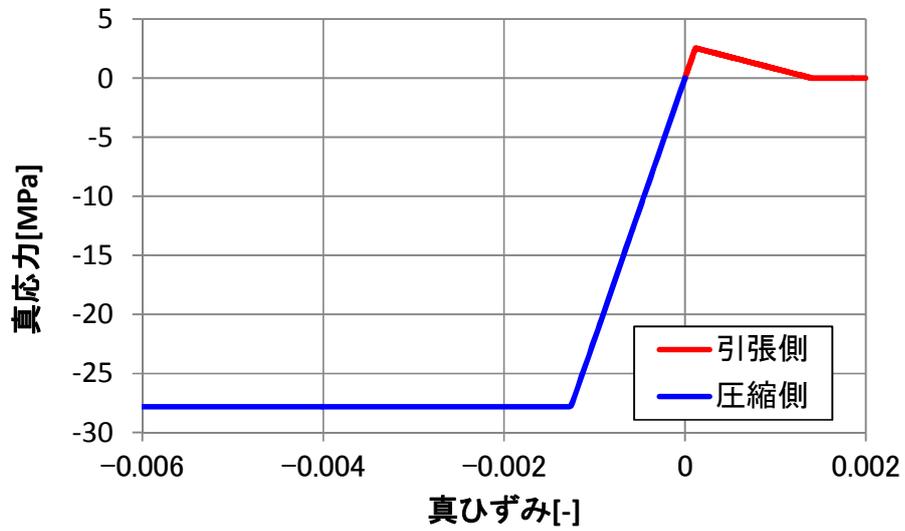


図3-4 真応力-真ひずみ関係 (コンクリート)

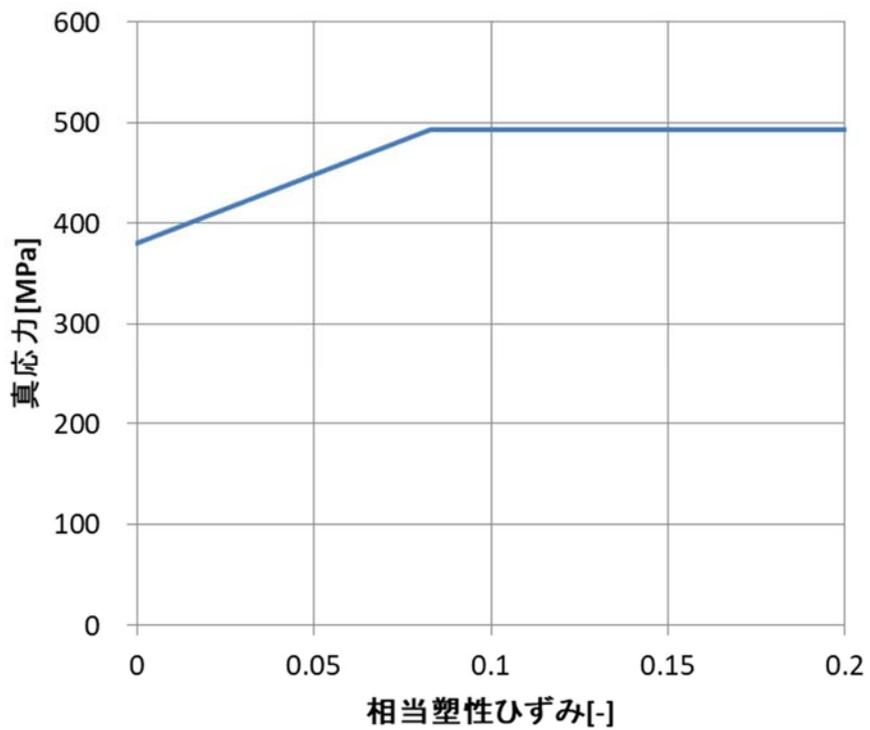


図3-5 真応力-真ひずみ関係 (鉄筋)

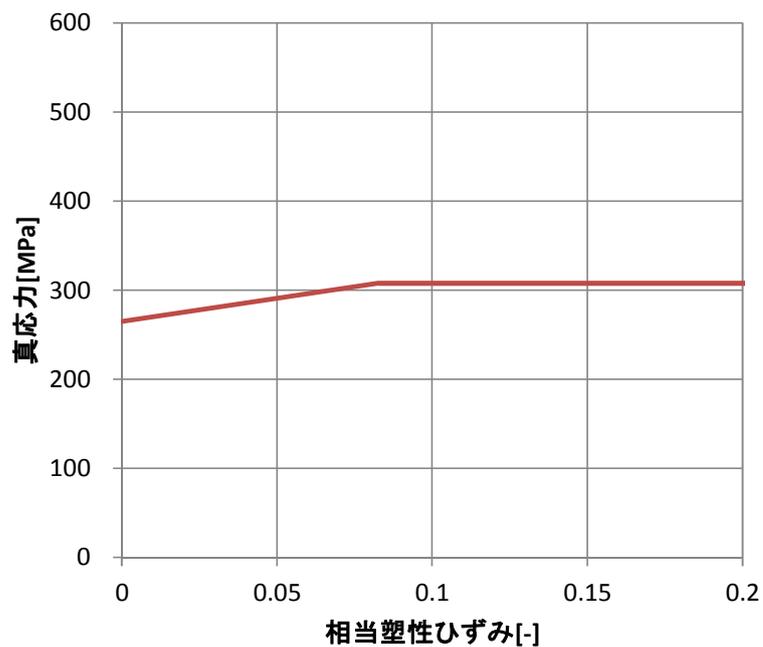


図3-6 真応力-真ひずみ関係 (デッキプレート)

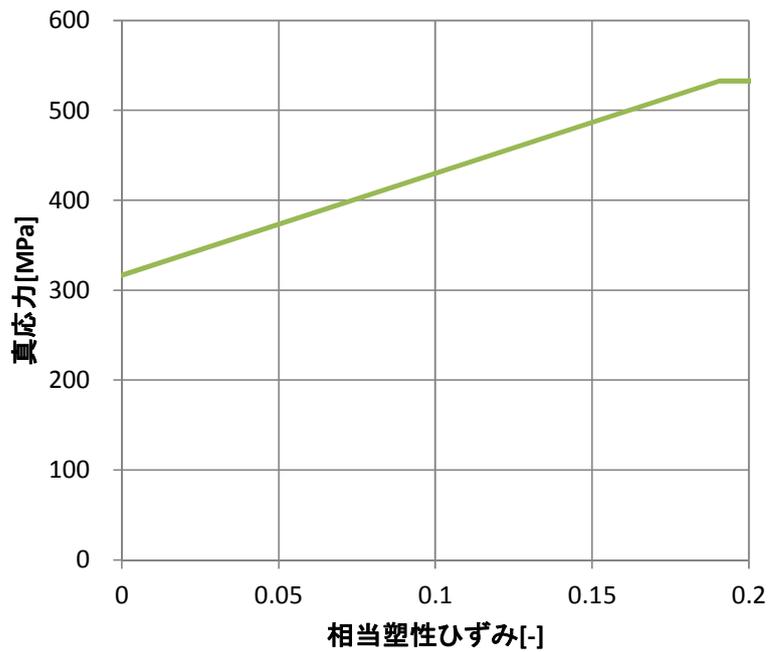


図3-7 真応力-真ひずみ関係 (デッキプレート)

3.5.2 裏面剥離評価

(1) Chang式による評価

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。

$$S = 1.84 \alpha_s \cdot \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0.13} \cdot \frac{\left(\frac{W \cdot V^2}{0.0980} \right)^{0.4}}{d^{0.2} \cdot f_c^{0.4}}$$

(2) 原子炉建屋原子炉棟壁面に対する衝突解析

原子炉建屋原子炉棟屋根スラブを除く、鋼製材に対してChang式による裏面剥離限界厚さを満足しない箇所のうち、版厚が最も小さい原子炉建屋原子炉棟6階の壁面を代表箇所を選定し、3次元FEMモデルを用いた衝突解析を行い、裏面側の鉄筋に発生するひずみが表3-9に示す許容限界を超えないことを確認する。

a. 解析モデル

(a) 建屋壁面

鋼製材に対しChang式の限界厚さを満足しない箇所について、FEM評価の対象となる箇所（原子炉建屋原子炉棟6階壁面）の構造及び解析モデルを図3-8に示す。コンクリートはソリッド要素、鉄筋はビーム要素でモデル化する。

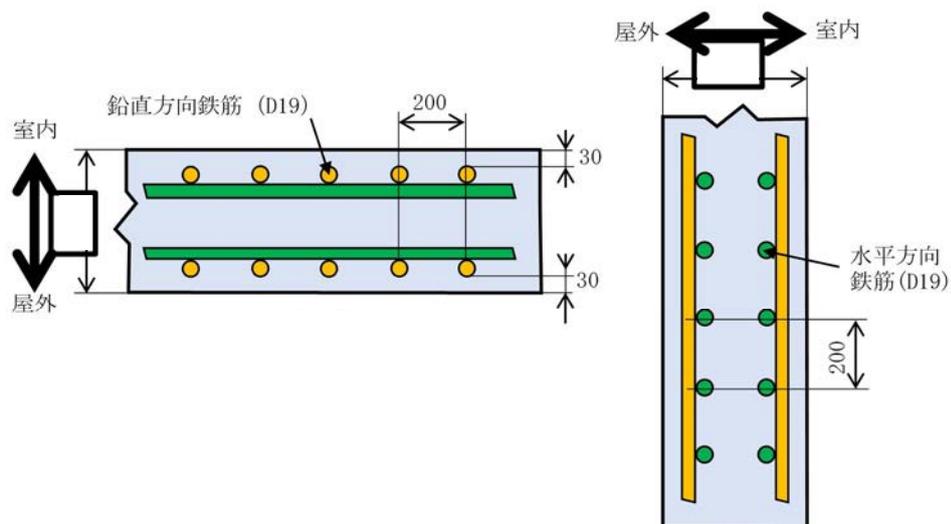


図3-8 鋼製材に対する裏面剥離評価解析対象箇所の構造及び解析モデル

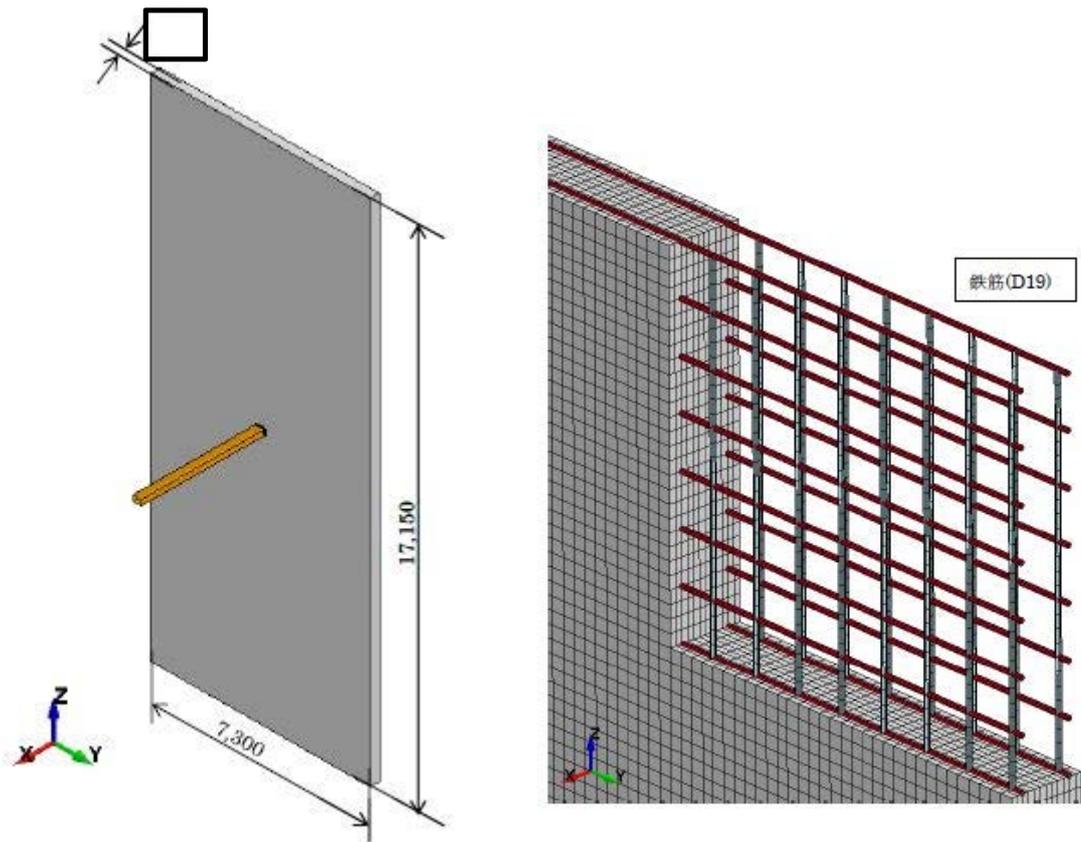


図3-8 鋼製材に対する裏面剥離評価解析対象箇所の構造及び解析モデル（続き）

(b) 飛来物

飛来物は、原子炉建屋屋根スラブの解析モデルと同じ鋼製材を用いる。

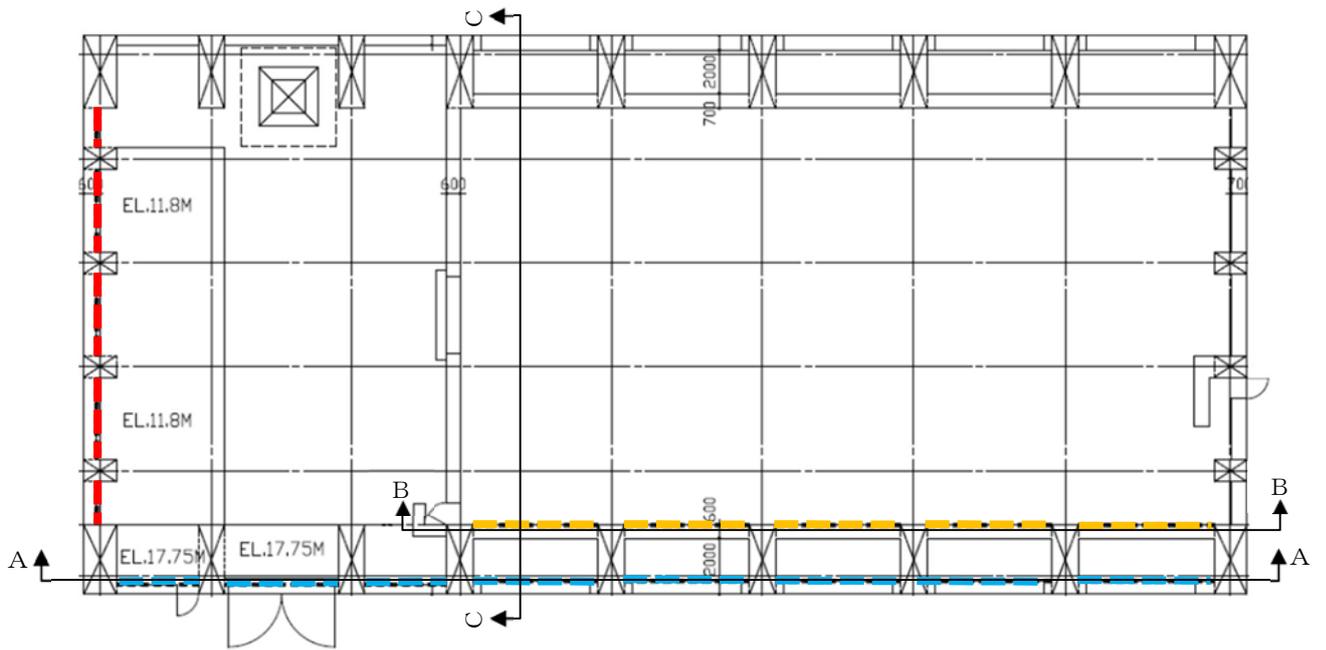
b. 材料定数及び材料の非線形特性

コンクリート及び鉄筋の材料物性については、原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの解析に同じ。

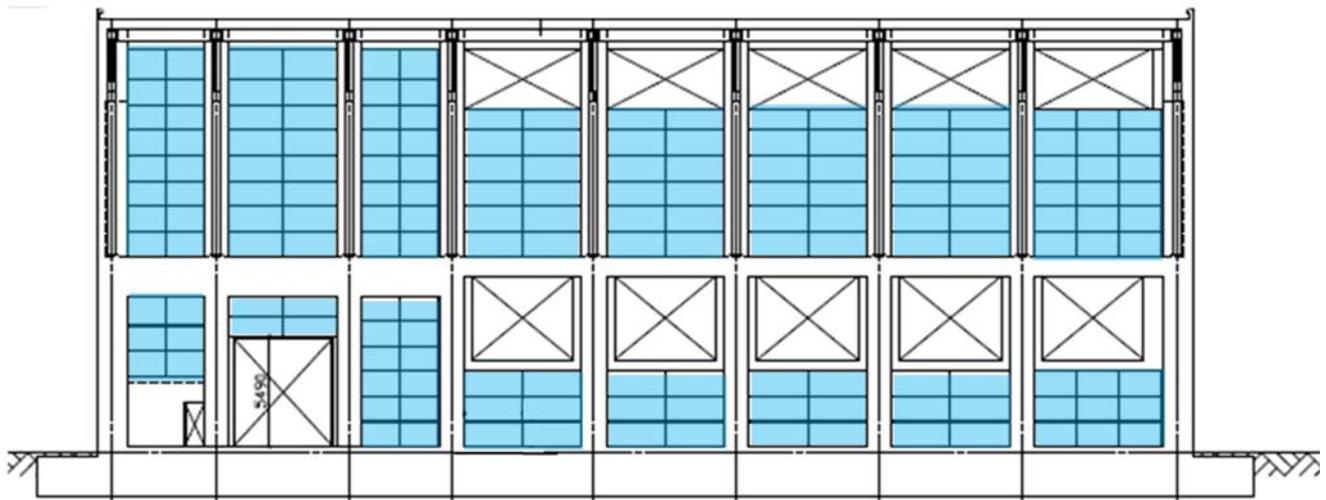
(3) 使用済燃料乾式貯蔵建屋壁面に対する衝突解析

車両に対してChang式による裏面剥離限界厚さを満足しない、使用済燃料乾式貯蔵建屋の壁面に対しては、裏面に鋼製ライナを施工する対策を講ずる。当該補強構造については、3次元FEMモデルを用いた衝突解析を行い、裏面のライナに発生するひずみが表3-9に示す許容限界を超えないことを確認する。

鋼製ライナの貼付箇所を図3-9に示す。鋼製ライナは、アンカーボルトにより建屋壁面に固定する。

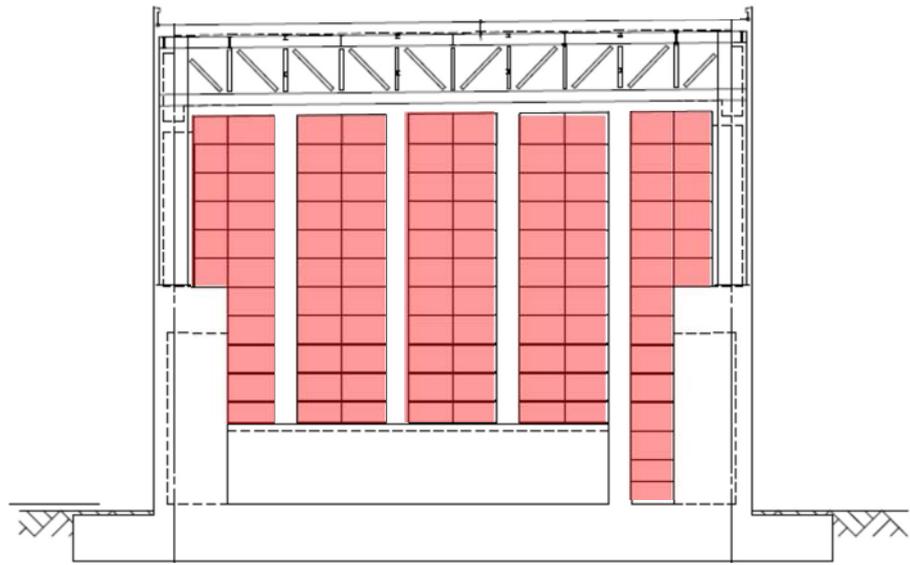


<平面図>



<東側 内壁面 (B-B視)>

図3-9 鋼製ライナ貼付範囲 (1/2)



<南側壁面 (C-C 視) >

図3-9 鋼製ライナ貼付範囲 (2/2)

a. 解析モデル

(a) 建屋壁面

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，車両の衝突を想定する建屋東面及び南面の最薄部の版厚と配筋ピッチは同じであることから，鉄筋径が小さい南面を代表箇所として抽出した。

コンクリートはソリッド要素，鉄筋はビーム要素及びライナはシェル要素でモデル化する。

使用済燃料乾式貯蔵建屋の壁面の構造及び解析モデルを図3-10に示す。

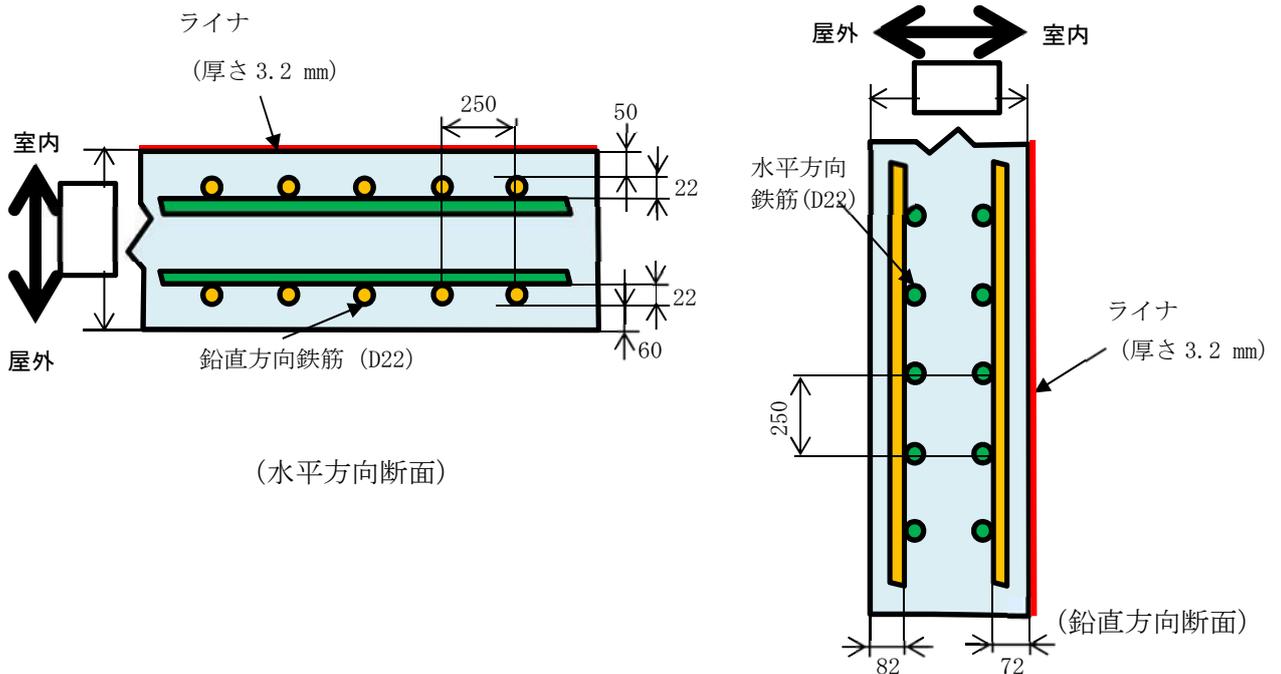
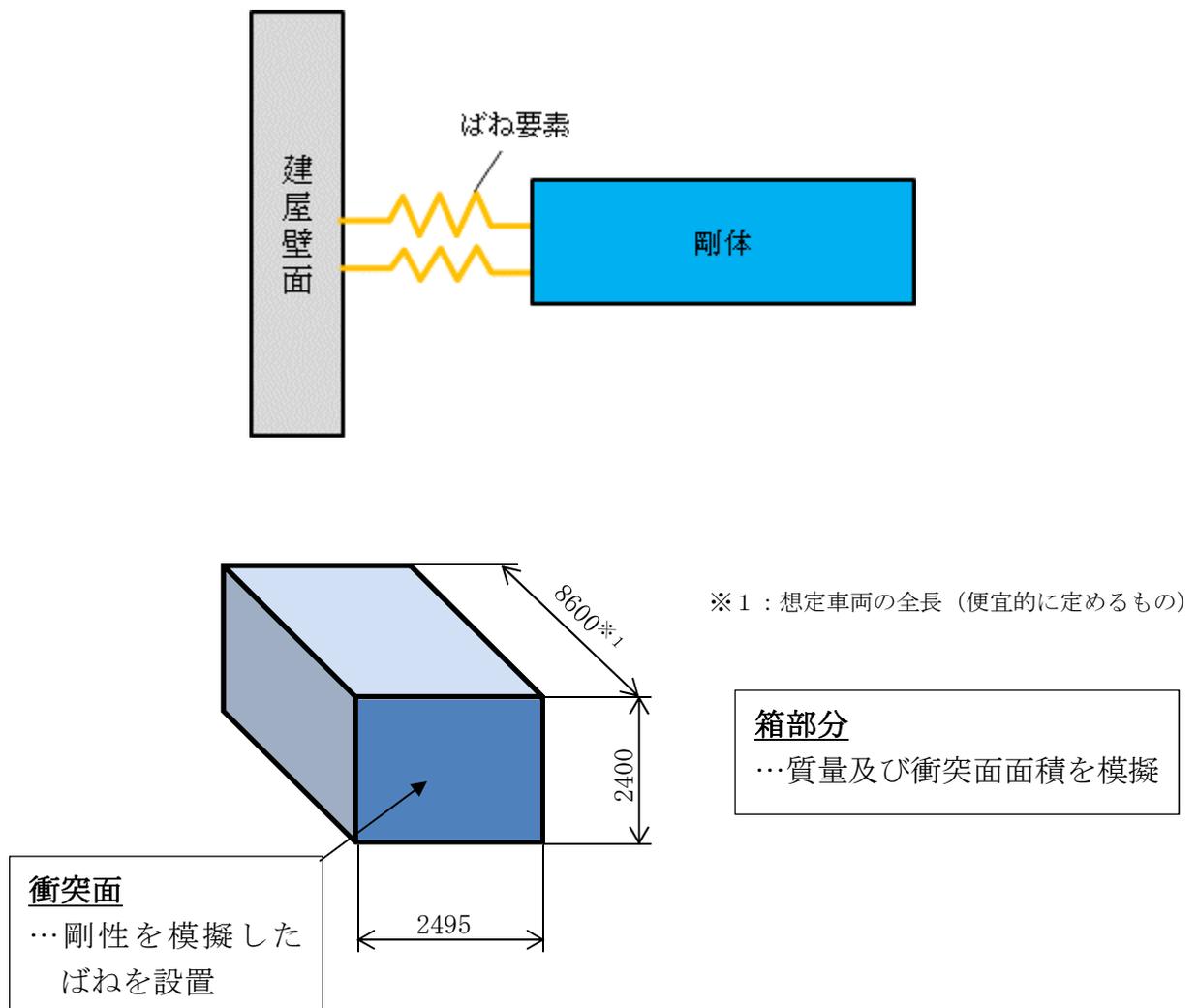


図3-10 車両に対する裏面剥離評価解析対象箇所の構造及び解析モデル

(b) 飛来物

飛来物として想定する車両のモデル及び衝突位置を図3-11に示す。車両は、車両剛性を衝突面の接点数で除した剛性を持つバネを、衝突面の接点ごとに配分した剛体としてモデル化した。また、建屋の柱間のスパンと車両（トラック相当）の長さが上回り、横向き時には柱で衝突荷重を支えることになるため、壁面のみで負荷を受けるよう、車両は正面衝突するモデルとした。また、衝突面の寸法については、衝突想定箇所となるキャビンの寸法を踏まえ設定した。

車両の解析モデルを図3-11に、車両モデルの諸元を表3-18に示す。



※1：想定車両の全長（便宜的に定めるもの）

図3-11 車両の解析モデル

表3-18 車両モデル諸元

寸法 ^{※1} (m)	衝突面寸法 ^{※2} (m)	質量 (kg)
3.6×2.5×8.6	幅 2.495 高さ 2.400	5000

※1：簡易式評価

※2：車両諸元のモデルとなったトラック（8tクラス）のキャビン前面寸法をもとに設定

b. 材料定数

コンクリート，鉄筋，ライナの材料定数及び車両モデルの剛性を，それぞれ表3-19～表3-22に示す。

表3-19 コンクリートの材料定数

設計基準強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)
23.5	2.25×10^4	0.2	24

表3-20 鉄筋の材料定数

種類	降伏応力 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	単位体積重量 (kN/m ³)
SD390	390	2.05×10^5	77

表3-21 ライナの材料定数

種類	降伏応力 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	単位体積重量 (kN/m ³)
SS400	245	2.05×10^5	77

表3-22 車両モデルの剛性

剛性 [※] (N/m)
2.94×10^6

※：自動車の衝突安全（名古屋大学出版会）を参照し、以下のとおり算出。

$$588 \text{ (N/m/kg)} \times 5,000 \text{ (kg)} = 2.94 \times 10^6 \text{ (N/m)}$$

c. 材料の非線形特性

材料の非線形特性の考え方は，原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの解析に同じ。
コンクリート，鉄筋及びライナの強度をそれぞれ表3-23及び表3-24に示す。

表3-23 コンクリートの圧縮及び引張強度

種別	設計基準強度 (N/mm ²)	材料モデル	
		圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
躯体 コンクリート	23.5	29.4	3.08

表3-24 鉄筋及びライナの降伏及び破断強度

種別	材質	規格値 (公称応力)		材料モデル (真応力, 真ひずみ)		
		降伏応力 (N/mm ²)	破断応力 (N/mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)	破断相当 応力 (N/mm ²)	破断相当 塑性ひずみ
鉄筋	SD390	390	560	429.9	556.9	0.074
ライナ	SS400	245	400	316.6	425.0	0.095

コンクリート、鉄筋及びライナの真応力-真ひずみ関係を、それぞれ図3-12から図3-14に示す。



図3-12 真応力-真ひずみ関係 (コンクリート)



図3-13 真応力-真ひずみ関係 (鉄筋)



図3-14 真応力-真ひずみ関係 (ライナ)

3.5.3 変形評価

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

原子炉建屋 (RC構造部), タービン建屋, 使用済燃料乾式貯蔵建屋及び緊急時対策所建屋の変位は, 設計荷重による建屋の層せん断力及び各部材のせん断力-せん断ひずみ関係 (Q-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及び緊急時対策所建屋の地震応答解析モデルを図3-14から図3-17に，Q - γ 関係を表3-25～表3-28に示す。

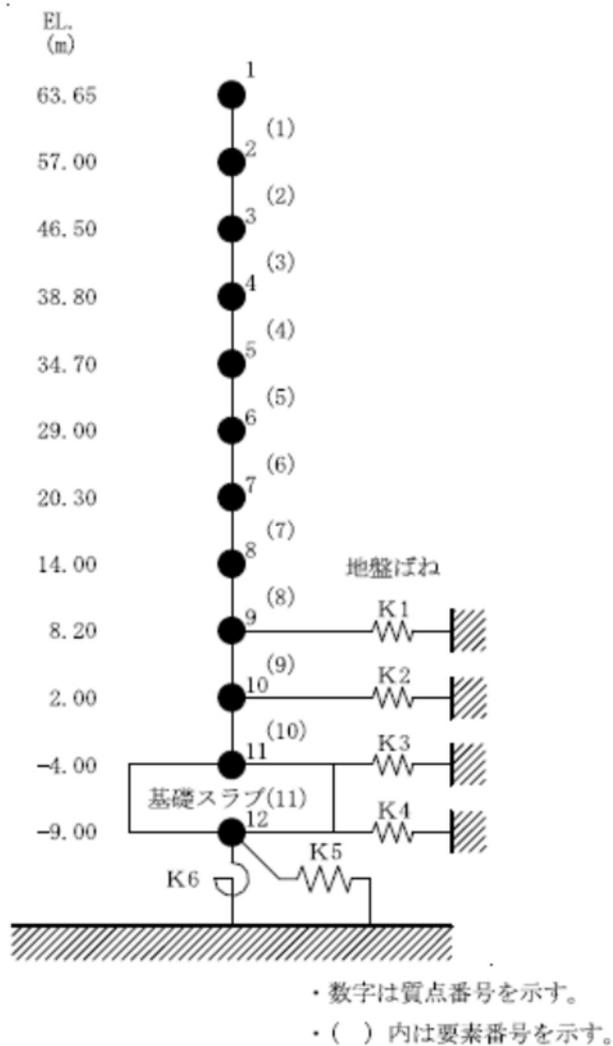


図3-14 原子炉建屋の地震応答解析モデル

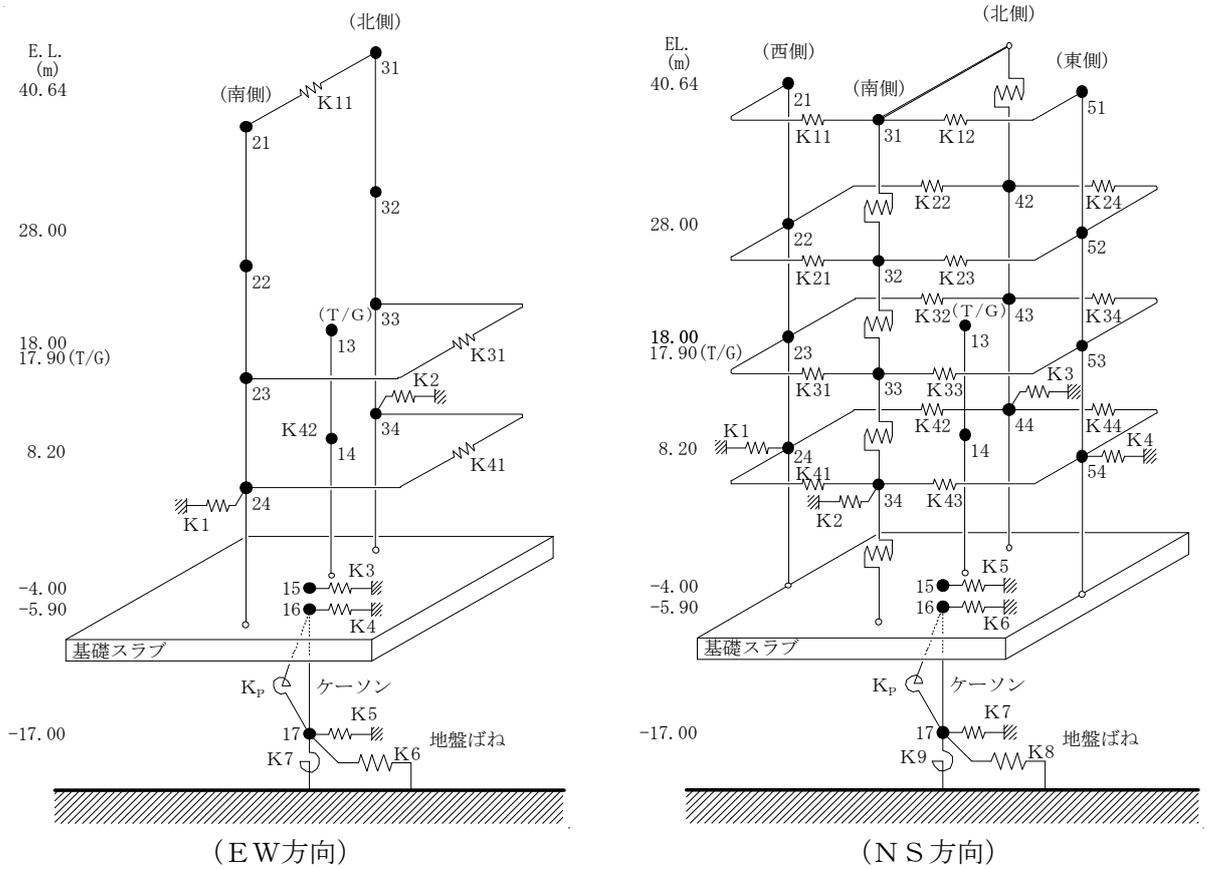


図3-15 タービン建屋の地震応答解析モデル

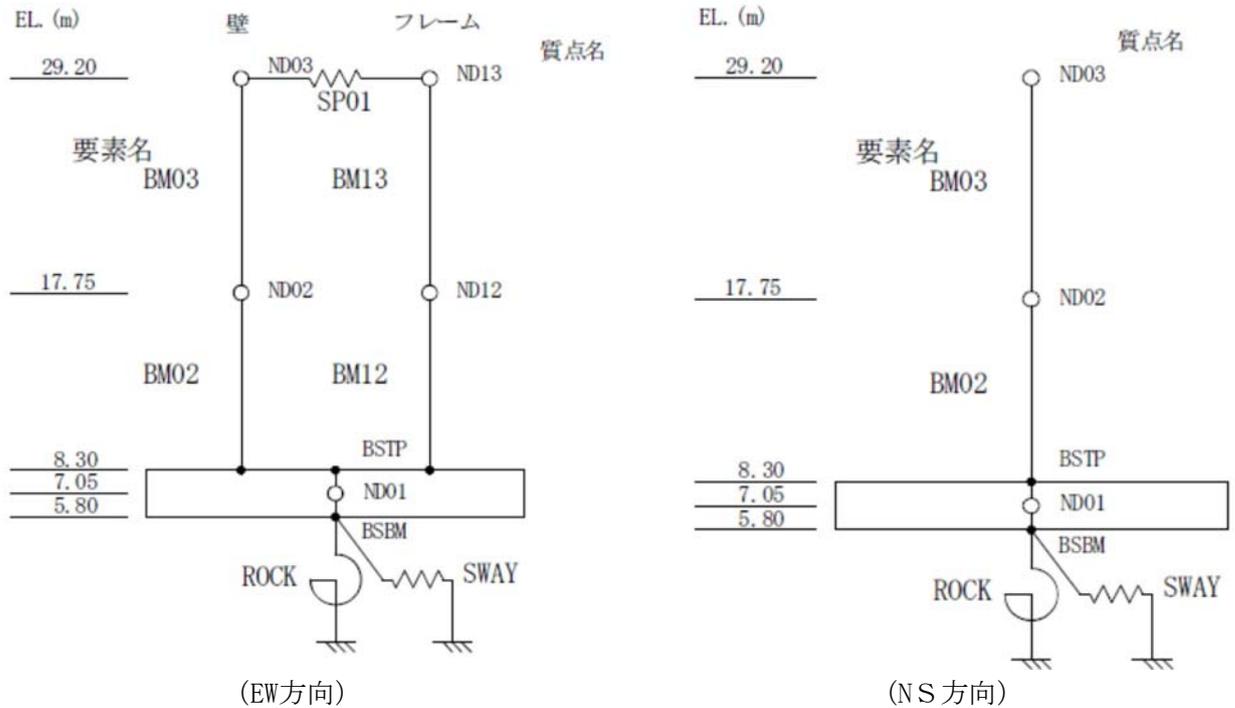


図3-16 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデル

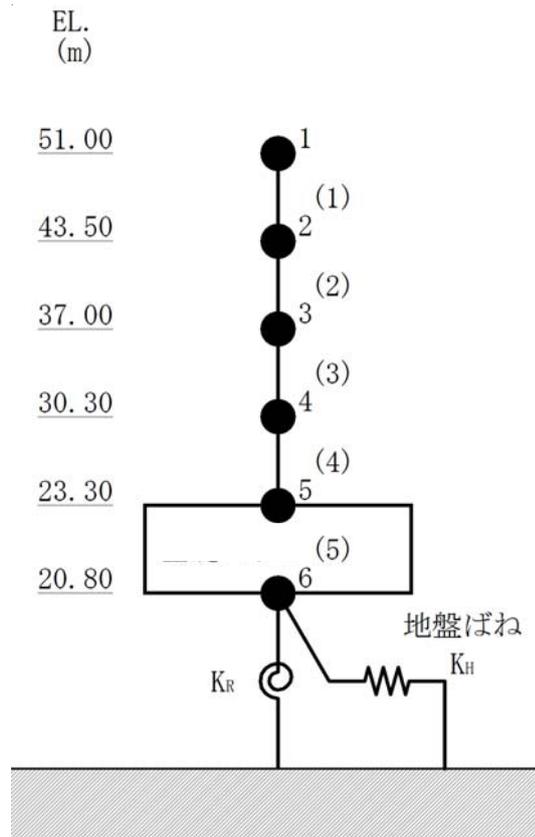


図3-17 緊急時対策所建屋の地震応答解析モデル

表3-25 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)			$(\times 10^{-3} (-))$		
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)			$(\times 10^{-3} (-))$		
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3-26 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)			$(\times 10^{-3} (-))$		
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)			$(\times 10^{-3} (-))$		
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3-27 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)			$(\times 10^{-3} (-))$		
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)			$(\times 10^{-3} (-))$		
29.20 ~ 17.75	BM03	4.19E+04	5.66E+04	1.14E+05	0.191	0.573	4.0
17.75 ~ 8.30	BM02	6.19E+04	8.37E+04	1.62E+05	0.197	0.590	4.0

表3-28 緊急時対策所建屋の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)			(×10 ⁻³ (-))		
43.50 ~ 51.00	1	1.18E+05	1.59E+05	2.96E+05	0.177	0.530	4.000
37.00 ~ 43.50	2	3.23E+05	4.35E+05	7.75E+05	0.181	0.542	4.000
30.30 ~ 37.00	3	3.29E+05	4.44E+05	7.56E+05	0.193	0.579	4.000
23.30 ~ 30.30	4	3.77E+05	5.10E+05	8.44E+05	0.205	0.614	4.000

(b) EW方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 Q ₁	第2折点 Q ₂	終局点 Q ₃	第1折点 γ ₁	第2折点 γ ₂	終局点 γ ₃
(m)	-	(kN)			(×10 ⁻³ (-))		
43.50 ~ 51.00	1	8.43E+04	1.14E+05	1.89E+05	0.177	0.530	4.000
37.00 ~ 43.50	2	2.57E+05	3.46E+05	6.04E+05	0.179	0.538	4.000
30.30 ~ 37.00	3	2.69E+05	3.62E+05	6.05E+05	0.192	0.577	4.000
23.30 ~ 30.30	4	3.21E+05	4.34E+05	7.11E+05	0.204	0.613	4.000

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

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

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

(2) 原子炉建屋（鉄骨構造部）

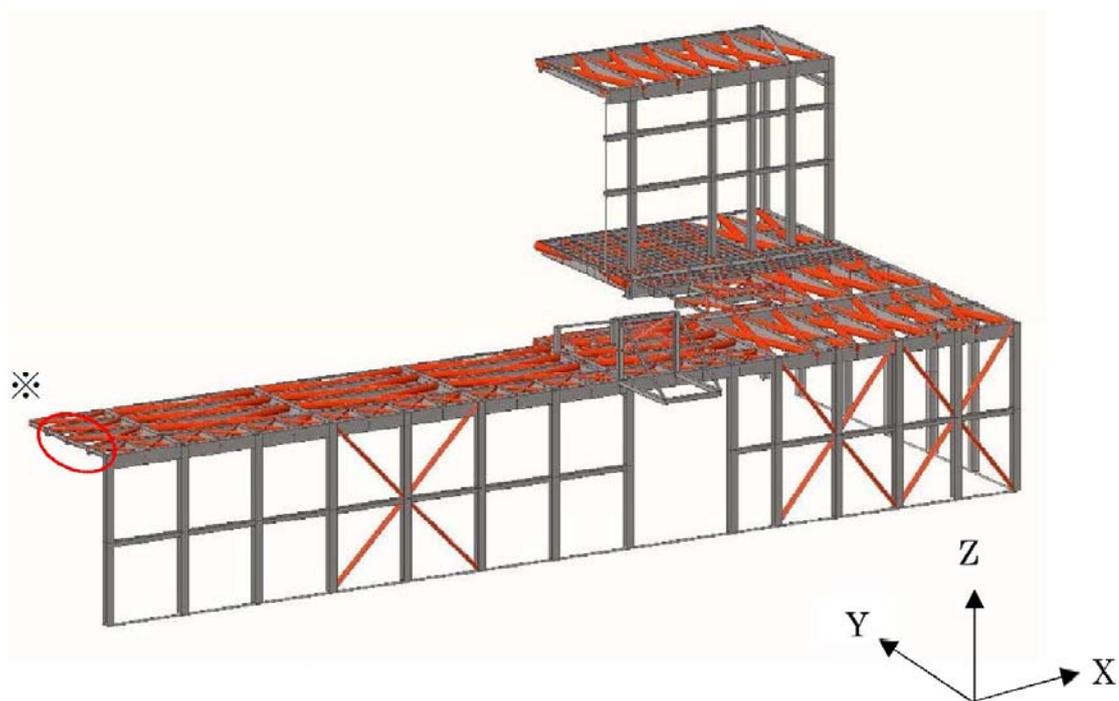
a. 鉄骨架構

原子炉建屋（鉄骨構造部）のうち鉄骨架構については、図3-18に示す付属棟東部のモデルの様に、原子炉建屋原子炉棟との接合部をピン支持とした3次元フレームモデルについて、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。

飛来物による衝撃荷重 W_M については、瞬間的に作用するものであり、当該部の質量は飛来物に対し十分に大きなものであること、また当該部は頑健な原子炉建屋（RC造部）に支えられた構造となっていることから、飛来物の衝突荷重で当該部の全体的な倒壊を起こすことは考え難いが、衝突による架構構成部材（鉄骨）の部分的な損傷を生じ

た場合には、その後に作用する自重若しくは風荷重により倒壊しないことが必要となるため、飛来物の衝突荷重は、柱若しくははりの一本を喪失したものと置き換えたモデルとして考慮する。

また、鉄骨造部分に対する地震荷重については、建屋の変位が加わらない方向については、各区画に作用する原子炉建屋の応答加速度を入力する。建屋からの変位を受ける方向については、その変位を入力し、発生する荷重を算出する。



- ・水平床面はコンクリートスラブが配置されているため、ブレース置換により剛性評価を行う。
- ・RC周辺躯体との接合部は、上図※部分を除いて境界条件をピンとする。
※部分はX方向にローラーとし、軸ブレースの地震時の評価を行う。

図3-18 原子炉建屋（鉄骨構造部）の解析モデル（1/2）

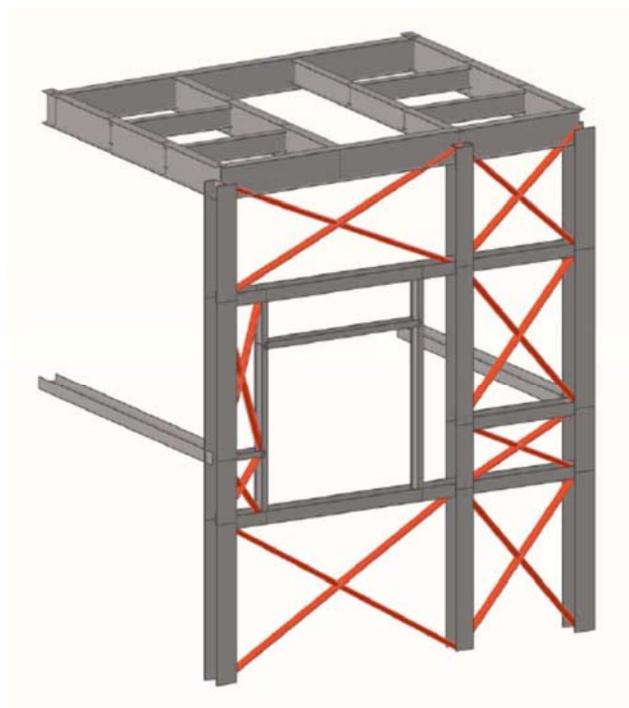
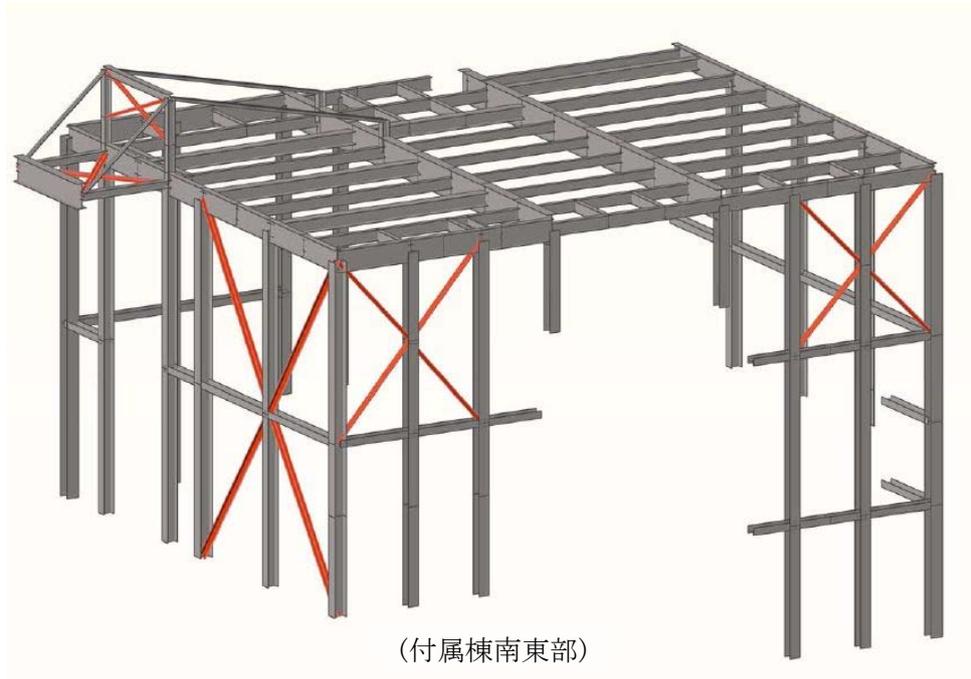


図3-18 原子炉建屋（鉄骨構造部）の解析モデル（2/2）

b. 外装板

原子炉建屋（鉄骨構造部）のうち外装板については、図3-19に示すように、鉄骨架構にボルト止めしたパネルを嵌め合わせた構造となっている。これについて、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。

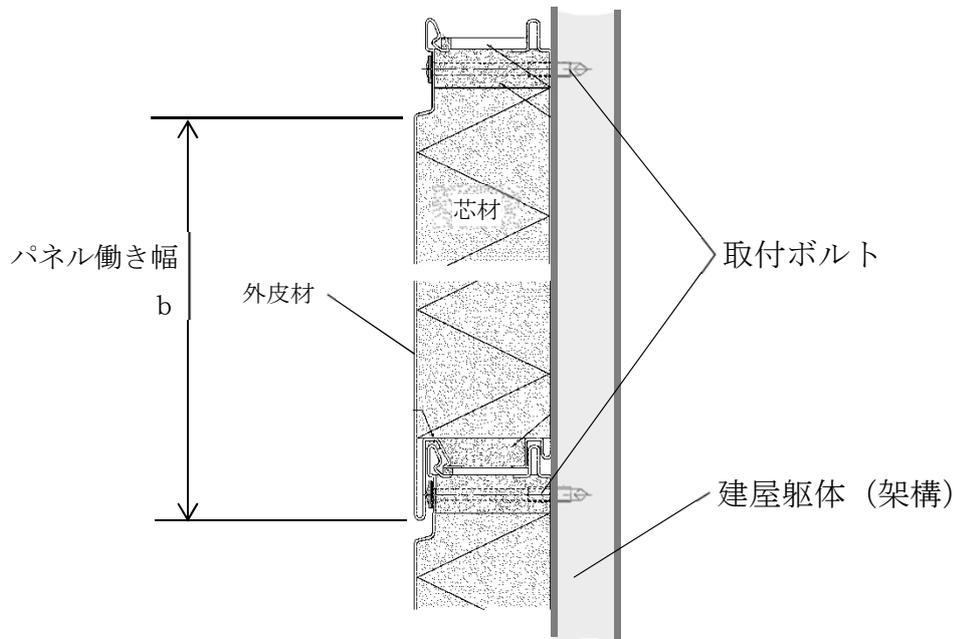


図3-19 原子炉建屋（鉄骨構造部）のうち外装板の取付構造

竜巻荷重に対する外装板の脱落防止の観点からは、図3-20に示すような、気圧差による荷重 W_p により発生する、外装板の曲げ及び取付ボルトの引張が支配的であるため、下式にて曲げ応力及び取付ボルトに作用する荷重を算定する。

取付幅 l の外装板における最大曲げ応力

$$M = \frac{\Delta P \cdot l^2}{8 \cdot Z}$$

ΔP : 気圧差による荷重

Z : 外装材の断面係数

外装板 1 枚当たりの、気圧差による面外方向荷重

$$F = l \cdot b \cdot \Delta P$$

b : 外装材の働き幅

取付ボルト 1 本あたりに生じる最大引張荷重

$$R_1 = 1.1 F$$

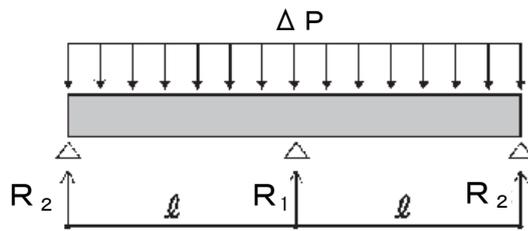


図 3-20 気圧差により外装板に作用する荷重

また、外装板については、地震時における脱落防止も求められる軽量の外装板においては、面外方向の地震荷重は、竜巻荷重に包絡される*ため、評価を省略する。面内方向については、建屋の層間変形角が、外装板の脱落や変形が生じなかったことが試験により確認されている 1/60 以下であることを確認する。

※：本評価の条件では、外装板1区画当たりの面外方向荷重の最大値は以下のとおり。

- ・ 竜巻荷重：約2.4 kN
- ・ 地震荷重：約0.09 kN

(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、両端固定はりとして評価する。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3-21に示す。

単位幅の屋根スラブにおける発生モーメント

$$M = \frac{(\omega_T - \omega_d) \cdot L^2}{12}$$

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

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

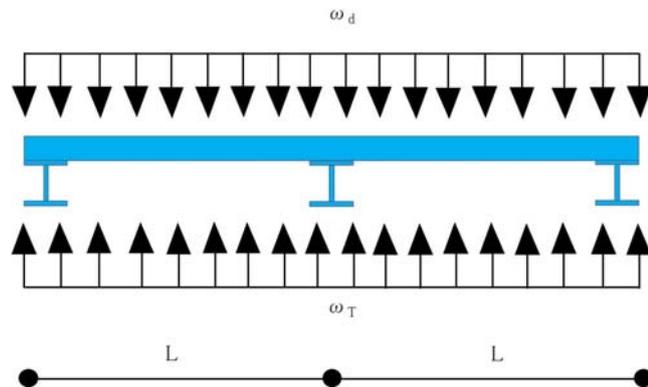


図3-21 屋根スラブに作用する荷重の概要

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} 、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} 及びコンクリート部の支圧破壊により定まる許容引張力 P_{a3} のうち、最も小さい値とする。

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。

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

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

$$P_a = \min(P_{a1}, P_{a2}, P_{a3})$$

(4) 扉

扉の閉状態を維持する部材について、気圧差による荷重 W_P により発生する応力を算出し、許容限界を超えないことを確認する。

下記の扉を評価対象とする。

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

- ・原子炉建屋付属棟1階南側水密扉
- ・原子炉建屋付属棟2階東側機器搬入口扉
- ・原子炉建屋付属棟2階サンプルタンク室連絡通路扉
- ・原子炉建屋付属棟3階バルブ室東側扉
- ・原子炉建屋付属棟3階バルブ室北側扉
- ・原子炉建屋付属棟3階西側非常用階段連絡口扉
- ・空調機械室搬入口扉
- ・空調機械室搬入口扉（潜戸）
- ・原子炉建屋付属棟4階南東側機器搬入口扉

- a. 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)及び原子炉建屋付属棟1階東側水密扉に関する評価

(a) 応力評価

原子炉建屋大物搬入口扉のうち原子炉建屋原子炉棟水密扉，原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉及び原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)及び原子炉建屋付属棟1階東側水密扉について，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）に掛かる曲げ，せん断及び引張荷重をモデル化し，評価を行う。カンヌキ部に作用する荷重，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。

イ. カンヌキ部に生じる荷重

カンヌキ部に生じる荷重は気圧差による荷重 W_P をカンヌキ部で負担した場合に発生する反力 R_P から算定する。カンヌキ部に生じる荷重を図3-22に示す。

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

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

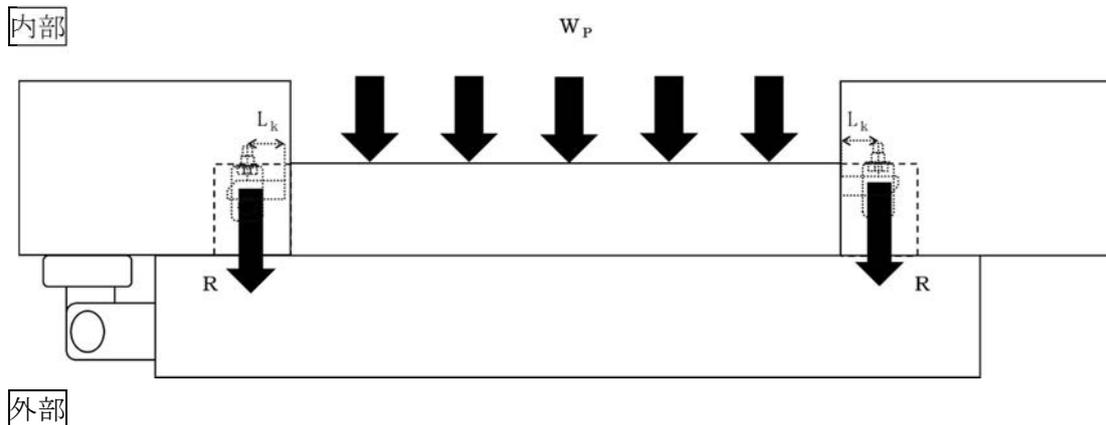


図3-22 カンヌキ部に生じる荷重

イ. カンヌキ

カンヌキ部の詳細図を図3-23に示す。カンヌキに生じる曲げモーメント M_k 及びせん断力 Q_k は次式により算定する。

$$M_k = R \cdot L_k$$

$$Q_k = R$$

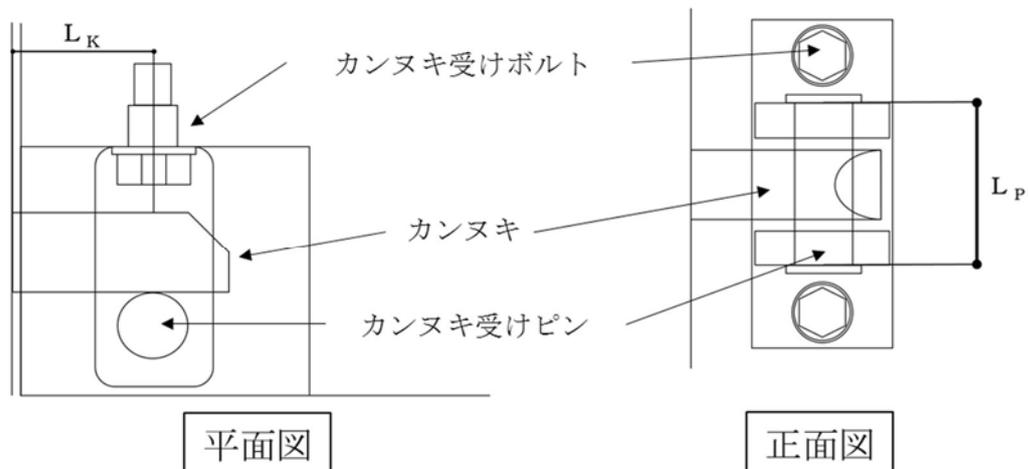


図3-23 カンヌキ部詳細図

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。

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

$$Q_p = R$$

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。

$$T = R$$

(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3-29に示す。

イ. 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。

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

ロ. 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。

$$\sigma_b = M_p / Z_p$$

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

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。

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

表3-29 評価対象部位の許容限界

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

- b. 原子炉建屋付属棟2階サンプルタンク室連絡通路扉，原子炉建屋付属棟3階バルブ室東側扉，原子炉建屋付属棟3階バルブ室北側扉、空調機械室搬入口扉及び空調機械室搬入口扉（潜戸）についての評価

(a) 応力評価

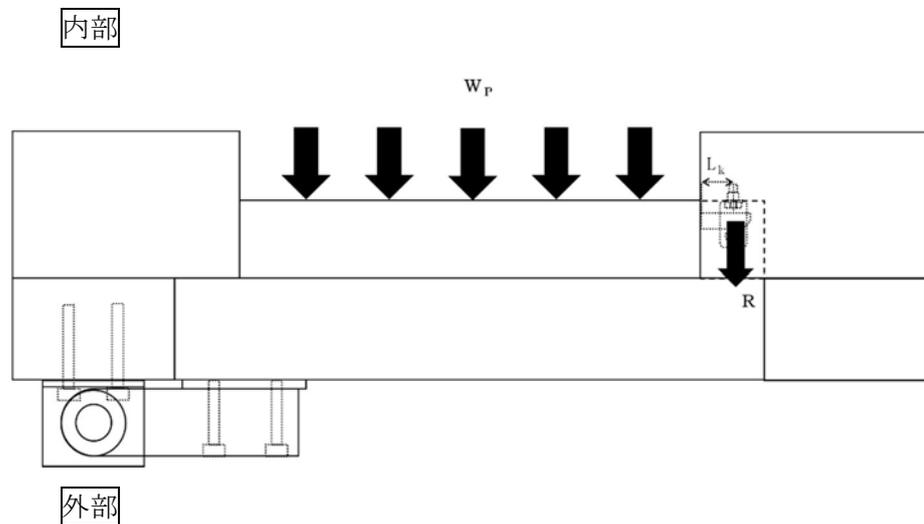
評価対象扉について，カンヌキ部（カンヌキ，カンヌキ受けピン及びカンヌキ受けボルト）に掛かる曲げ，せん断及び引張荷重をモデル化し，評価を行う。ヒンジ部及びカンヌキ部に作用する荷重，発生曲げモーメントM，発生せん断力Q及び発生引張力Tの算定式を以下に示す。

イ. カンヌキ部に生じる荷重

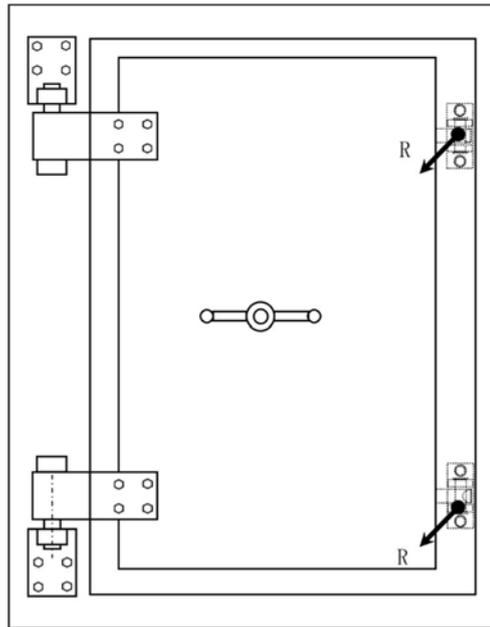
カンヌキ部に生じる荷重は，気圧差による荷重 W_p をカンヌキ部で負担した場合に発生する反力Rから算定する。

$$W_p = \Delta P \cdot A_d$$

$$R = \frac{W_p}{n_k + n_h}$$



<扉平面図>



<扉立面図>

図3-24 カンヌキ部に生じる荷重

ロ. カンヌキ

カンヌキ部の詳細図を図3-25に示す。カンヌキに生じる曲げモーメント M_k 及びせん断力 Q_k は次式により算定する。

$$M_k = R \cdot L_k$$

$$Q_k = R$$

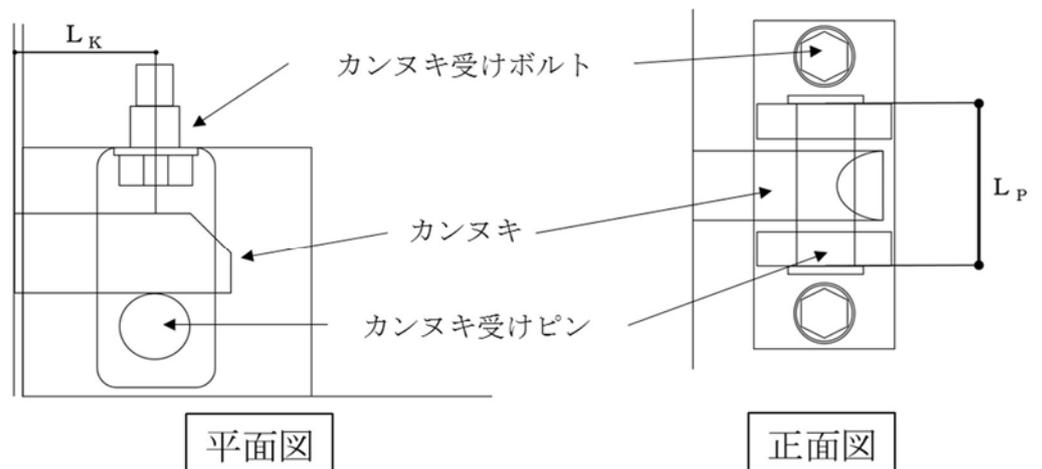


図3-25 カンヌキ部詳細図

へ. 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。

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

$$Q_p = R$$

ト. 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。

$$T = R$$

(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3-30に示す。

イ. 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。

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

ロ. 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。

$$\sigma_b = M_p / Z_p$$

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

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。

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

表3-30 評価対象部位の許容限界

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

c. 原子炉建屋付属棟南側水密扉及び原子炉建屋付属棟西側非常用階段連絡口扉についての評価

(a) 応力評価

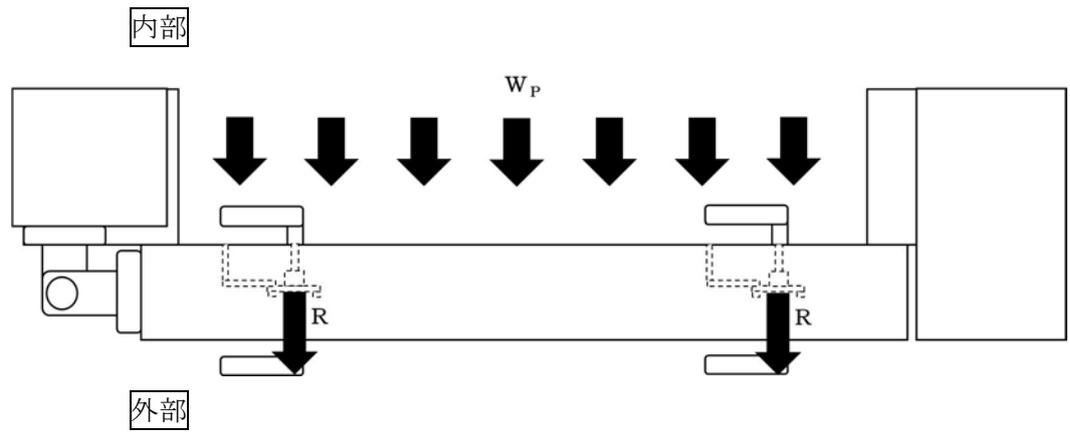
評価対象扉について、カンヌキ部（カンヌキバー及びカンヌキ受けボルト）に掛かる曲げ、せん断及び引張荷重をモデル化し、評価を行う。カンヌキ部に作用する荷重、発生曲げモーメントM、発生せん断力Q及び発生引張力Tの算定式を以下に示す。

イ. カンヌキ部に生じる荷重

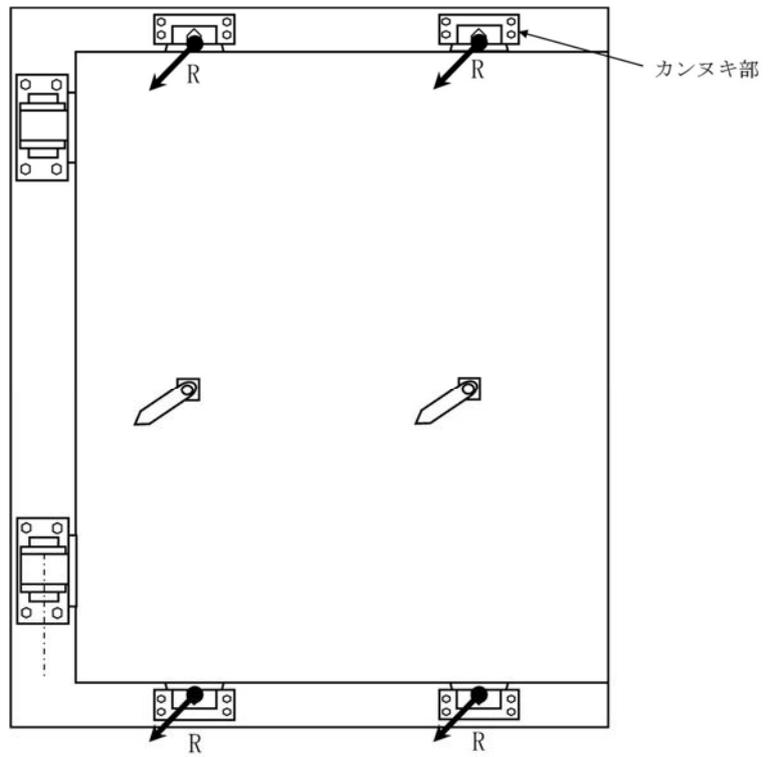
カンヌキ部に生じる荷重は、気圧差による荷重 W_P をヒンジ部及びカンヌキ部で負担した場合に発生する反力Rから算定する。

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

$$R = \frac{W_P}{n_k + n_h}$$



<扉平面図>



<扉立面図>

図3-31 ヒンジ部及びカンヌキ部に生じる荷重

イ. カンヌキバー

カンヌキ部の詳細図を図3-32に示す。カンヌキバーに生じる曲げモーメント M_1 は次式により算定する。

$$M_1 = R \cdot L_k$$

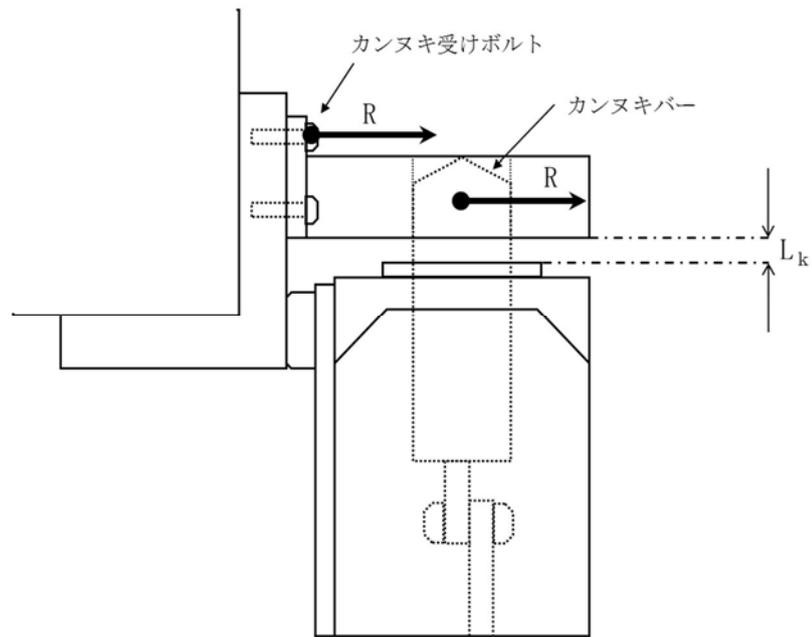


図3-32 カンヌキ部詳細図

ロ. 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。

$$T = R$$

(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3-31に示す。

イ. カンヌキバー

カンヌキバーに生じる曲げ応力度を算定し、短期許容応力度以下であることを確認する。

$$\sigma_b = M_1 / Z_1$$

ロ. 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 T_1 を次式により算定し、短期許容応力度以下であることを確認する。

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

表3-31 評価対象部位の許容限界

評価対象部材		材質	許容限界値(N/mm ²)	
			曲げ・引張	せん断
カンヌキ部	カンヌキバー	SUS304N2	345	199
	カンヌキ受けボルト	SUS304	205	118

d. 原子炉建屋付属棟2階東側機器搬入口扉及び原子炉建屋付属棟4階南東側機器搬入口扉についての評価

(a) 応力評価

評価対象扉について、パネル取付ボルト及びアンカーボルトに掛かるせん断及び引張荷重をモデル化し、評価を行う。パネル取付ボルト及びアンカーボルトに作用する荷重、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。

イ. パネル取付ボルト及びアンカーボルトに生じる荷重

パネル取付ボルト及びアンカーボルトに生じる荷重は、気圧差による荷重 W_p をパネル取付ボルト及びアンカーボルトで負担した場合に発生する反力 R から算定する。

$$W_p = R = \Delta P \cdot A_d$$

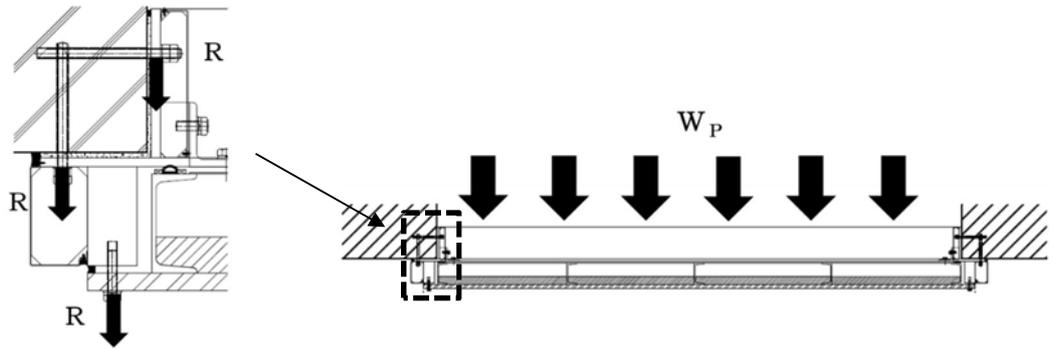


図3-33 扉平面図

ロ. パネル取付ボルト

パネル取付ボルトの詳細図を図3-35に示す。パネル取付ボルトに生じる引張力Tは次式により算定する。

$$T = R / n$$

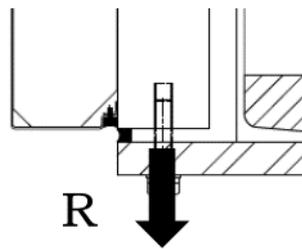


図3-35 パネル取付部詳細図

ハ. アンカーボルト（外部側）

アンカーボルト（外部側）の詳細図を図3-36に示す。アンカーボルト（外部側）に生じる引張力Tは次式により算定する。

$$T = R / n$$

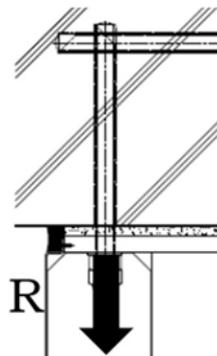


図3-36 アンカーボルト（外部側）詳細図

ニ. アンカーボルト（内部側）

アンカーボルト（内部側）の詳細図を図3-37に示す。アンカーボルト（内部側）に生じるせん断力Qは次式により算定する。

$$Q = R / n$$

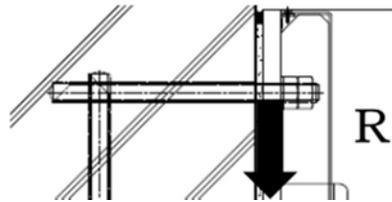


図3-37 アンカーボルト（内部側）詳細図

(b) 断面検定

イ. パネル取付ボルト

パネル取付ボルトに生じる引張応力度Tを次式により算定し、短期許容応力度以下であることを確認する。

$$\sigma_t = T / A_b$$

ロ. アンカーボルト（外部側）

アンカーボルト（外部側）に生じる引張応力度Tを次式により算定し、短期許容応力度以下であることを確認する。

$$\sigma_t = T / A_b$$

ハ. アンカーボルト（内部側）

アンカーボルト（内部側）に生じるせん断応力度Qを次式により算定し、短期許容応力度以下であることを確認する。

$$\tau = Q / A_b$$

表3-32 評価対象部位の許容限界

評価対象部材	材質	許容限界値(N/mm ²)	
		引張	せん断
パネル取付ボルト	追而		
アンカーボルト（外部側）			
アンカーボルト（内部側）			

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		—
		車両	0.60		—
d	飛来物直径	鋼製材	27.6		cm
		車両	338.5		cm
F_c	コンクリートの設計基準強度		原子炉建屋	225	kgf/cm ²
			タービン建屋	225	
			使用済燃料 乾式貯蔵建屋	240	
			緊急時対策所建屋	306	
			軽油貯蔵タンクタンク室	408	
N	飛来物の形状係数	鋼製材	1.14		—
		車両	0.72		—
D	飛来物直径密度 W/d^3	鋼製材	6.42×10^{-3}		kgf/cm ³
		車両	1.29×10^{-4}		kgf/cm ³
W	飛来物重量	鋼製材	135		kgf
		車両	5000		kgf
V	飛来物の衝突速度	鋼製材	水平	51	m/s
			鉛直	34	
		車両	水平	52	m/s
			鉛直	—※	

※：表3-4を参照

4.1.2 鋼製部

鋼製部の貫通評価に用いる条件を表4-2に示す。

表4-2 貫通評価に用いる入力値（鋼製部）

記号	記号の説明		数値		単位
d	飛来物直径	鋼製材	7.90		cm
k	鋼板の材質に関する係数		1		—
M	飛来物重量	鋼製材	135		kg
V	飛来物の衝突速度	鋼製材	水平	51	m/s
			鉛直	34	
t ₁	原子炉建屋原子炉棟水密扉の板厚 (大扉外側カバープレート)		0.0032		m
t ₂	原子炉建屋原子炉棟水密扉の板厚 (大扉スキンプレート)		0.0280		m
t ₃	原子炉建屋原子炉棟水密扉の板厚 (大扉内側カバープレート)		0.0032		m
t ₄	機器搬入口内側扉の板厚 (フェースプレート※)		0.0060		m
—	設計飛来物の運動エネルギー		175.6		kJ

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貫通評価における、「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4-3 解析ケース（原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ貫通評価）

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	躯体コンクリート(最小部： <input style="width: 20px; height: 15px; border: 1px solid black;" type="text"/> mm) 鉄筋(D13@180, 200)

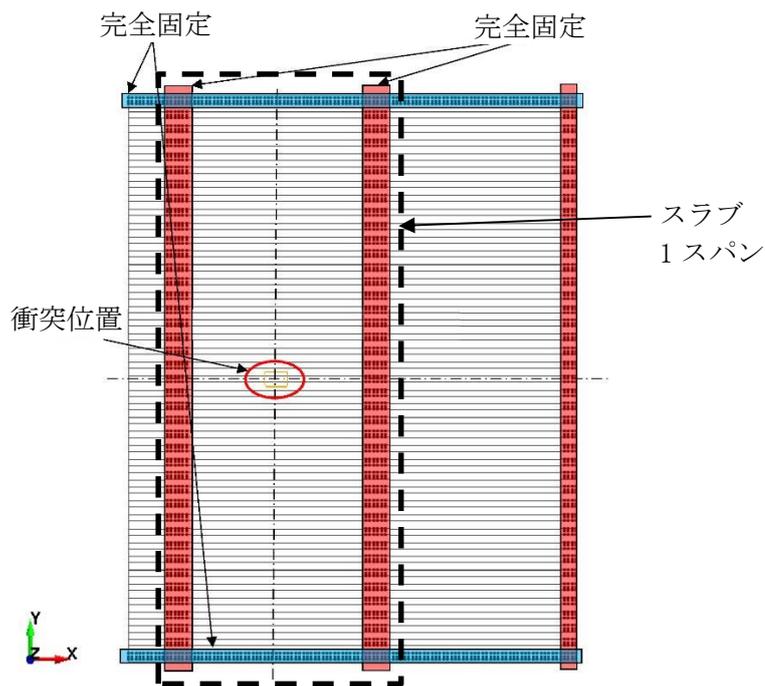


図4-1 解析ケース図

4.2 裏面剥離評価

裏面剥離評価に用いる条件を表 4-4 に示す。

表4-4 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		—
		車両	0.55		
V_0	飛来物基準速度	鋼製材	60.96		m/s
		車両	60.96		
d	飛来物直径	鋼製材	27.6		cm
		車両	338.5		
f_c'	コンクリートの設計基準強度	原子炉建屋	225		kgf/cm ²
		タービン建屋	225		
		使用済燃料 乾式貯蔵建屋	240		
		緊急時対策所建屋	306		
		軽油貯蔵タンクタンク室	408		
W	飛来物重量	鋼製材	135		kgf
		車両	5000		
V	飛来物の衝突速度	鋼製材	水平	51	m/s
			鉛直	34	
		車両	水平	52	
			鉛直	—*	

※：表3-4を参照

4.2.3 原子炉建屋壁面

原子炉建屋壁面の裏面剥離評価における、「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4-5に、解析ケース図を図4-2に示す。

表4-5 解析ケース（原子炉建屋壁面裏面剥離評価）

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 外壁	鋼製材	中央部	鉛直：縦	躯体コンクリート (<input type="text" value=""/> mm) 鉄筋 (D19@200)

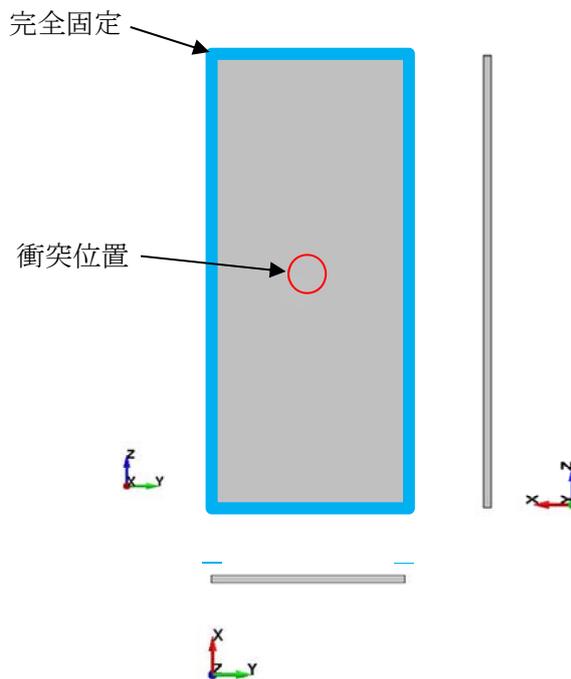


図4-2 解析ケース図（原子炉建屋壁面裏面剥離評価）

4.2.4 使用済燃料乾式貯蔵建屋壁面

使用済燃料乾式貯蔵建屋壁面の裏面剥離評価における、「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、建屋壁面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4-6に、解析ケース図を図4-3に示す。

表4-6 解析ケース（使用済燃料乾式貯蔵建屋壁面裏面剥離評価）

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 外壁	鋼製材	中央部	鉛直：縦	躯体コンクリート(<input type="text"/> mm) 鉄筋(D22@250)



図4-3 解析ケース図（使用済燃料乾式貯蔵建屋壁面裏面剥離評価）

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4-7から表4-10に示す。

表4-7 原子炉建屋変形評価の評価条件 (1/5) (RC構造部)

質点	高さ (E. L.) (m)	位置	風力係数 ^{※1}	受圧面積 (m ²)	
				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4-7 原子炉建屋変形評価の評価条件 (2/5) (鉄骨造部分：風荷重)

区画	高さ (E. L.) (m)	位置	風力係数 ^{※1}	受圧面積 (m ²)	
				N-S方向	E-W方向
付属棟 南東	22.0 ～ 35.0	風上	0.8	156	162
		風下	0.4		
付属棟 東側	14.0 ～ 22.0	風上	0.8	— ^{※2}	391
		風下	0.4		
隔離弁室 ①	22.0 ～ 30.0	風上	0.8	46	57
		風下	0.4		
隔離弁室 ②	22.0 ～ 30.0	風上	0.8	13	104
		風下	0.4		

※1：風下側の係数は、風上側と同じ向きを正とする。

※2：構造上、N-S方向に対し見附面を有しない。

表4-7 原子炉建屋変形評価の評価条件 (3/5) (鉄骨造部分：主要部材断面)

部材断面	材質	主な使用部位
H-350×350×12×19	SS400	柱
H-300×300×10×15	SS400	柱
H-800×500×19×40	SM490A	梁
H-800×300×16×32	SM490A	梁
H-600×300×16×32	SM490A	梁
H-600×200×11×17	SS400	梁
H-500×200×10×16	SS400	梁
H-300×150×6.5×9	SS400	梁

原子炉建屋(鉄骨造部分)の竜巻評価における、架構部材の欠損想定位置を図4-4に示す。当該部材は、竜巻時及び通常時(竜巻襲来後の状態)の状態において、架構を支える軸力が最大となる箇所を抽出した。

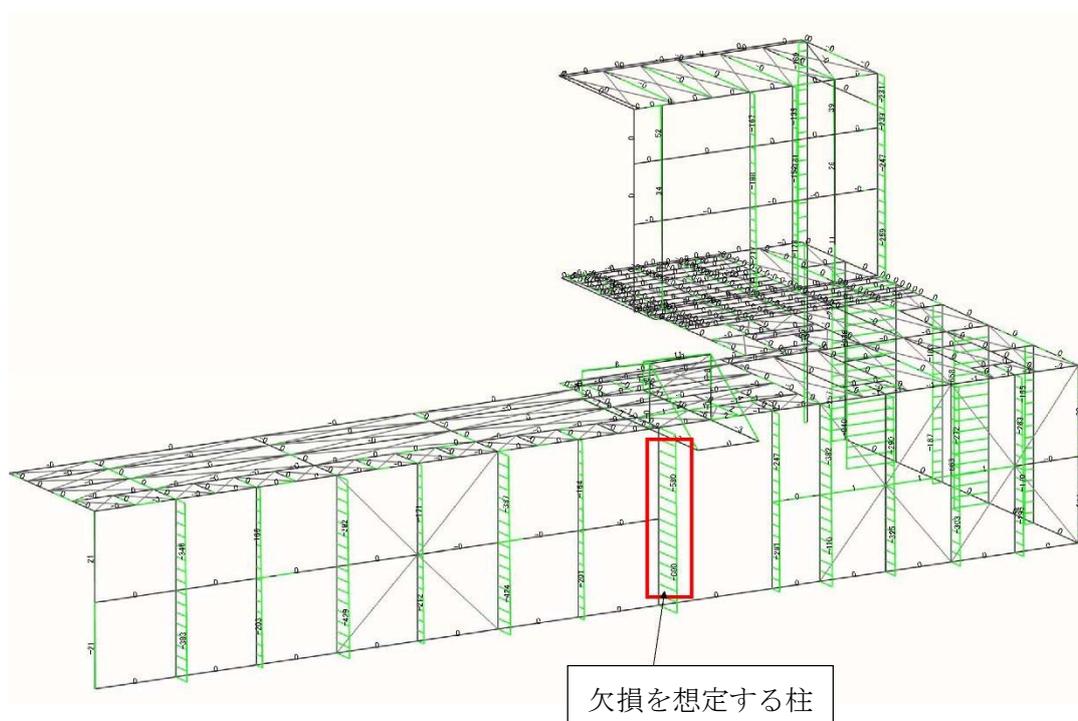


図4-4 欠損を想定する架構部材

表4-7 原子炉建屋変形評価の評価条件 (4/5) (鉄骨造部分：地震荷重)

区画	高さ (E.L.) (m)	入力値	
		N-S方向	E-W方向
付属棟 南東	22.0	加速度 1.40	加速度 1.40
	35.0		
付属棟 東側	14.0	加速度 1.29	変位 4.5 mm
	22.0		
隔離弁室 ①	22.0	加速度 1.37	変位 4.8 mm
	30.0		
隔離弁室 ②	22.0	変位 4.8 mm	変位 4.8 mm
	30.0		

表4-7 原子炉建屋変形評価の評価条件 (5/5) (鉄骨造部分：外装材仕様)

項目	記号	値	単位
外装材の取付幅	\varnothing	450	mm
外装材の断面係数	Z	3.70×10^4	mm ³
外装材の働き幅	b	600	mm

表4-8 タービン建屋変形評価の評価条件

質点	高さ (E.L.) (m)	位置	風力係数※	受圧面積 (m ²)	
				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		

※：風下側の係数は、風上側と同じ向きを正とする。

表4-9 使用済燃料乾式貯蔵建屋変形評価の評価条件

質点	高さ (E. L.) (m)	位置	風力係数※	受圧面積 (m ²)	
				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		

※：風下側の係数は，風上側と同じ向きを正とする。

表4-10 緊急時対策所建屋変形評価の評価条件

質点	高さ (E. L.) (m)	位置	風力係数※	受圧面積 (m ²)	
				N-S方向	E-W方向
1	51.00	風上	0.8	154	228
		風下	0.4		
2	43.50	風上	0.8	256	265
		風下	0.4		
3	37.00	風上	0.8	272	320
		風下	0.4		
4	30.30	風上	0.8	275	333
		風下	0.4		

※：風下側の係数は，風上側と同じ向きを正とする。

(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4-11に示す。

表4-11 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ変形評価の評価条件

記号	記号の説明	数値	単位
q	設計用速度圧	6100	N/m ²
C	風力係数	1.0	—
G	ガスト影響係数	1	—
ΔP	最大気圧低下量	8900	N/m ²
A_c	コーン状破壊面の有効投影面積	33123	mm ²
A_0	頭付きアンカーボルト頭部の支圧面積	442.3	mm ²
$s_c a$	頭付きアンカーボルトの断面積で、軸部断面積とねじ部有効断面積の小なる方の値	284	mm ²
b	部材幅	1000	mm
d'	部材の有効せい	50	mm
L	屋根スラブの支持スパン	2270	mm
p	頭付きアンカーボルトの間隔	360	mm
D	頭付きアンカーボルト頭部の直径	30.4	mm
d	頭付きアンカーボルト軸部の直径	19	mm
F_c	コンクリートの設計基準強度	22.1	N/mm ²
f_n	コンクリートの支圧強度	132.6	N/mm ²
f_s	コンクリートの許容せん断応力度	1.06	N/mm ²
f_t	鉄筋の許容引張応力度	345	N/mm ²
a_t	引張鉄筋断面積	703.9	mm ²
j	応力中心間距離 ($j = (7/8) \cdot d'$)	43.8	mm
l_{ce}	頭付きアンカーボルトの強度計算用埋込み長さ ($l_{ce} = l_e$)	88.6	mm
l_e	頭付きアンカーボルトのコンクリート内への有効埋込み長さ	88.6	mm
$c \sigma_t$	コーン状破壊に対するコンクリートの引張強度	1.457	N/mm ²
$s \sigma_{pa}$	頭付きアンカーボルトの引張強度	235	N/mm ²
$s \sigma_y$	頭付きアンカーボルトの規格降伏点強度	235	N/mm ²
ϕ_1	低減係数	1	—
ϕ_2	低減係数	0.67	—
ωd	常時作用する荷重による単位幅あたりの荷重	3.37	kN/m
$\omega T1$	評価に用いる竜巻の荷重 W_{T1} による単位幅あたりの荷重	-8.9*	kN/m
$\omega T2$	評価に用いる竜巻の荷重 W_{T2} による単位幅あたりの荷重	-10.55*	kN/m

※：下向きの荷重を正の値とする。

(3) 扉

- a. 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)及び原子炉建屋付属棟1階東側水密扉

上記扉の変形評価に用いる条件を表4-11～4-13に示す。

表4-11 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	25.9	m^2
		ΔP	単位面積当たりの最大気圧低下量	8900	N/m^2
		n_k	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	mm^2
		n_b	ボルト本数	2	本

表4-12 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	3.61	m^2
		ΔP	単位面積当たりの最大気圧低下量	8900	N/m^2
		n_k	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	mm^2
		n_b	ボルト本数	2	本

表4-13 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	1.57	m^2
		ΔP	単位面積当たりの最大気圧低下量	8900	N/m^2
		n_k	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	mm^2
		n_b	ボルト本数	2	本

表4-14 原子炉建屋付属棟1階東側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	4.84	m^2
		ΔP	単位面積当たりの最大気圧低下量	8900	N/m^2
		n_k	カンヌキ部箇所数	6	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	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	mm^2
		n_b	ボルト本数	2	本

- b. 原子炉建屋付属棟2階サンプルタンク室連絡通路扉，原子炉建屋付属棟3階バルブ室東側扉，原子炉建屋付属棟3階バルブ室北側扉，空調機械室搬入口扉及び空調機械室搬入口扉（潜戸）

上記扉の変形評価に用いる条件を表4-15～表4-17に示す。

表4-15 原子炉建屋付属棟2階サンプルタンク室連絡通路扉，原子炉建屋付属棟3階バルブ室東側扉及び原子炉建屋付属棟3階バルブ室北側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	扉受圧面積	1.49	m^2
		ΔP	単位面積当たりの最大気圧低下量	8900	N/m^2
		n_k	カンヌキ部箇所数	2	箇所
		n_h	ヒンジ部箇所数	2	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	75	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	80	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	mm^2
		n	ボルト本数	2	本

表4-16 空調機械室搬入口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	扉受圧面積	17.42	m^2
		ΔP	単位面積当たりの最大気圧低下量	8900	N/m^2
		n_k	カンヌキ部箇所数	4	箇所
		n_h	ヒンジ部箇所数	2	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	65	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	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	—	mm^2
		n	ボルト本数	—	本

表4-17 空調機械室搬入口扉（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	扉受圧面積	1.84	m^2
		ΔP	単位面積当たりの最大気圧低下量	8900	N/m^2
		n_k	カンヌキ部箇所数	2	箇所
		n_h	ヒンジ部箇所数	2	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	75	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	80	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	mm^2
		n	ボルト本数	2	本

- c. 原子炉建屋付属棟1階南側水密扉及び原子炉建屋付属棟3階西側非常用階段連絡口扉
上記扉の変形評価に用いる条件を表4-18～表4-19に示す。

表4-18 原子炉建屋付属棟1階南側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	扉受圧面積	3.59	m^2
		ΔP	単位面積当たりの最大気圧低下量	8900	N/m^2
		n_k	カンヌキ部箇所数	4	箇所
		n_h	ヒンジ部箇所数	2	箇所
カンヌキ部	カンヌキバー	L_k	軸支持間距離	19	mm
		Z_1	断面係数	12271	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	4	mm^2
		n	ボルト本数	157	本

表4-19 原子炉建屋付属棟3階西側非常用階段連絡口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	扉受圧面積	1.67	m^2
		ΔP	単位面積当たりの最大気圧低下量	8900	N/m^2
		n_k	カンヌキ部箇所数	2	箇所
		n_h	ヒンジ部箇所数	2	箇所
カンヌキ部	カンヌキバー	L_k	軸支持間距離	19	mm
		Z_1	断面係数	2651	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	84.3	mm^2
		n	ボルト本数	4	本

- d. 原子炉建屋付属棟2階東側機器搬入口扉及び原子炉建屋付属棟4階南東側機器搬入口扉
上記扉の変形評価に用いる条件を表4-20～表4-21に示す。

表4-20 原子炉建屋付属棟2階東側機器搬入口扉の変形評価の評価条件

部位	記号	記号の説明	数値	単位
パネル取付ボルト	A_b	ボルト一本当たりの断面積	追而	mm^2
	n	ボルト本数		本
アンカーボルト（外部側）	A_b	ボルト一本当たりの断面積		mm^2
	n	ボルト本数		本
アンカーボルト（内部側）	A_b	ボルト一本当たりの断面積		mm^2
	n	ボルト本数		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	部材厚さ※1 (mm)	貫通限界 厚さ (mm)
貫通評価	原子炉建屋	屋根スラブ		鋼製材	100※2	
		外壁	R C 部	鋼製材	300	
			鋼構造部	鋼製材	16※3	
	タービン建屋	オペレーティング フロア床版※3		鋼製材	800	
		気体廃棄物処理系 隔離弁設置エリア壁		鋼製材	1000	
	使用済燃料乾式 貯蔵建屋	屋根スラブ		鋼製材	450	
		外壁	車両	—		
			鋼製材	450		
	外壁	車両	450			
		軽油貯蔵タンク タンク室	頂版	鋼製材	2000	
	緊急時対策所	建屋屋根スラブ		鋼製材	600	
		建屋外壁		鋼製材	1000	
		建屋外壁		車両	1000	
		建屋外壁		車両	1000	
	扉	原子炉建屋 大物搬入口扉		鋼製材	28	
(吸収エネルギー評価)		鋼製材	175.9 kJ			
上記以外		鋼製材	32			

※1：評価部位の中で最少のもの

※2：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

※3：防護鋼板として、当該厚さでの耐貫通性を確認済（「V-3-別添1-2-1-2 防護鋼板の強度計算書」）

※4：竜巻より防護すべき施設の上部のスラブを対象とする。

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 原子炉棟	屋根スラブ (鉄筋)	鋼製材	2.0×10^{-3} *	8.2×10^{-2}

* : 速報値

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	部材厚さ ^{※1} (mm)	裏面剥離 限界厚さ (mm)	
裏面剥離評価	原子炉建屋	屋根スラブ	鋼製材	100 ^{※2}	
		外壁 R C部	鋼製材	300 ^{※2}	
	タービン建屋	オペレーティング フロア床版 ^{※3}	鋼製材	800	
		気体廃棄物処理系 隔離弁設置エリア壁	鋼製材	1000	
	使用済燃料乾式 貯蔵建屋	屋根スラブ	鋼製材	450	
			車両	—	
		外壁	鋼製材	450 ^{※4}	
	車両		450 ^{※2}		
	軽油貯蔵タンク タンク室	頂版	鋼製材	2000	
	緊急時対策所	建屋屋根スラブ	鋼製材	600	
			車両	—	
		建屋外壁	鋼製材	1000	
車両			1000		

※1 : 評価部位の中で最少のもの

※2 : 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

※3 : 竜巻より防護すべき施設の上部のスラブを対象とする。

※4 : 内包する防護すべき施設への影響がないことを、表 5-2 (2/2) の原子炉建屋外壁を代表とした評価により確認

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	0.013*	0.082
		外壁*	鋼製材	9.79×10^{-4} *	2.0×10^{-3}
	使用済燃料 乾式貯蔵建屋	外壁	車両	追而	

※：外殻となるRC壁の代表箇所（最少版厚部位）

*：速報値

5.3 変形評価

(1) 建屋（RC造部）

建屋のRC造部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（RC造部））

評価項目	部位	評価結果 (-)	許容限界 (-)
建屋の せん断ひずみ	原子炉建屋	4.2×10^{-5}	2.0×10^{-3}
	タービン建屋	4.7×10^{-5}	2.0×10^{-3}
	使用済燃料乾式貯蔵建屋	5.0×10^{-5}	2.0×10^{-3}
	緊急時対策所	8.8×10^{-6}	2.0×10^{-3}

(2) 原子炉建屋（鉄骨構造部）

a. 鉄骨架構

部材の欠損を想定した場合に原子炉建屋（鉄骨構造部）の部材に発生する応力度と許容限界の比較を表5-4(1/2)に示す。鉄骨架構に生じる応力度が、許容限界を超えないことを確認した。

検定比が最大となる箇所について、図5-1に示す。

表5-4(1/2) 変形評価結果（原子炉建屋（鉄骨構造部）鉄骨架構：竜巻時）

評価項目	評価結果	許容限界
鉄骨架構の 発生応力度	0.62 (検定比)	1*

※短期許容応力度

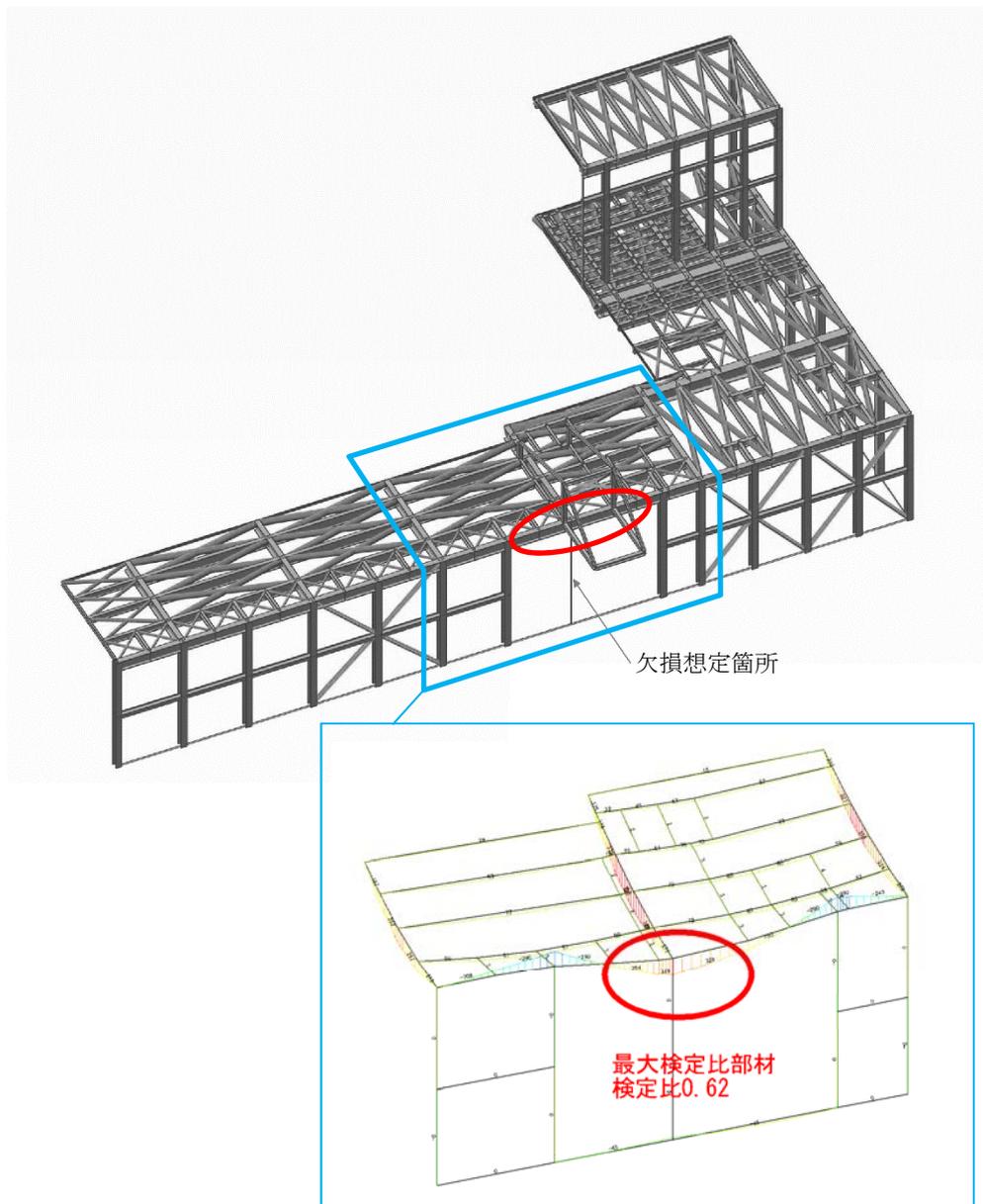


図5-1 最大検定比の発生箇所（竜巻時）

また、地震時における評価結果を表5-4(2/2)に示す。発生応力度は許容限界を超えないことを確認した。

検定比が最大となる箇所について、図5-2に示す。

表5-4(2/2) 変形評価結果（原子炉建屋（鉄骨構造部）鉄骨架構：地震時）

評価項目	評価結果	許容限界
鉄骨架構の発生応力度	0.96 (検定比)	1*

※短期許容応力度

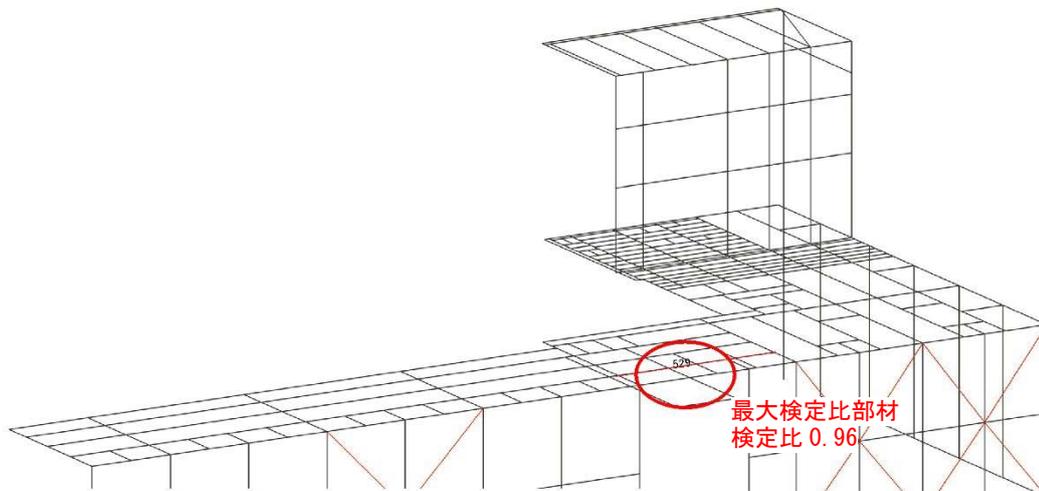


図5-2 最大検定比の発生箇所（地震時）

b. 外装板

外装板の曲げ応力及び取付ボルトの発生荷重と許容限界の比較を表5-5(1/2)に示す。いづれにおいても許容限界を超えないことを確認した。

表5-5(1/2) 変形評価結果（原子炉建屋（鉄骨構造部）外装板：竜巻時）

評価項目	評価結果	許容限界
外装板の曲げ応力	6.1 (N/mm ²)	40 (N/mm ²)
外装板取付ボルトの引張荷重	2.6 (kN)	3.0 (kN)

また、地震時における評価結果を表5-4(2/2)に示す。地震による建屋の層間変形角が、許容限界を超えないことを確認した。

表5-5(2/2) 変形評価結果（原子炉建屋（鉄骨構造部）外装板：地震時）

評価項目	評価結果	許容限界
層間変形角	1 / 1538	1 / 60

(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（単位幅）の曲げモーメント	3 (kN・m)	10 (kN・m)
屋根スラブのせん断力	9 (kN)	46 (kN)
スタッドの発生引張力	4 (kN)	32 (kN)

(4) 扉

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

評価対象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 原子炉建屋大物搬入口扉のうち原子炉建屋原子炉棟水密扉，原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉，原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)，原子炉建屋付属棟1階東側水密扉の変形評価結果

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	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	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)	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
原子炉建屋付属棟1階 東側水密扉	カンヌキ部	カンヌキ	94	205
		カンヌキ受けピン ^(注1)	271	686
		カンヌキ受けボルト	35	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

- b. 原子炉建屋付属棟2階サンプルタンク室連絡通路扉，原子炉建屋付属棟3階バルブ室東側扉，原子炉建屋付属棟3階バルブ室北側扉，空調機械室搬入口扉及び空調機械室搬入口扉（潜戸）

評価対象扉に生じる荷重と許容限界の比較を表5-6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5-6 原子炉建屋付属棟2階サンプルタンク室連絡通路扉，原子炉建屋付属棟3階バルブ室東側扉，原子炉建屋付属棟3階バルブ室北側扉，空調機械室搬入口扉及び空調機械室搬入口扉（潜戸）の評価結果

評価対象部位		評価結果 (N/mm ²)	許容限界値 (N/mm ²)	
原子炉建屋付属棟2階 サンプルタンク室連絡 通路扉， 原子炉建屋付属棟3階 バルブ室東側扉 及び 原子炉建屋付属棟3階 バルブ室北側扉	カンヌキ部	カンヌキ	20	205
		カンヌキ受けピン ^(注1)	84	345
		カンヌキ受けボルト	11	651
空調機械室搬入口扉（潜戸）	カンヌキ部	カンヌキ	25	205
		カンヌキ受けピン ^(注1)	104	345
		カンヌキ受けボルト	13	651
空調機械室搬入口扉	カンヌキ部	カンヌキ	137	651
		カンヌキ受けピン ^(注1)	383	686
		カンヌキ受けボルト	—	—

(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

- c. 原子炉建屋付属棟南側水密扉及び原子炉建屋付属棟西側非常用階段連絡口扉
 評価対象扉に生じる荷重と許容限界の比較を表5-7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5-7 原子炉建屋付属棟南側水密扉及び原子炉建屋付属棟西側非常用階段連絡口扉の変形評価結果

評価対象部位		評価結果 (N/mm ²)	許容限界値 (N/mm ²)	
原子炉建屋付属棟南側 水密扉	カンヌキ部	カンヌキバー	8	345
		カンヌキ受けボルト	8	205
原子炉建屋付属棟西側 非常用階段連絡口扉	カンヌキ部	カンヌキバー	27	345
		カンヌキ受けボルト	11	205

- d. 原子炉建屋付属棟2階東側機器搬入口扉及び原子炉建屋付属棟4階南東側機器搬入口扉
 評価対象扉に生じる荷重と許容限界の比較を表5-8に示す。扉体固定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5-8 原子炉建屋付属棟2階東側機器搬入口扉及び原子炉建屋付属棟4階南東側機器搬入口扉の変形評価結果

評価対象部位	評価結果 (N/mm ²)	許容限界値 (N/mm ²)
パネル取付ボルト	追而	
アンカーボルト (外部側)		
アンカーボルト (内部側)		

V-3-別添 1-1-2 残留熱除去系海水系ポンプの強度計算書

目次

1. 概要.....	1
2. 基本方針.....	1
2.1 位置.....	1
2.2 構造概要.....	2
2.3 評価方針.....	3
2.4 適用規格.....	5
3. 強度評価方法.....	6
3.1 記号の定義.....	6
3.2 評価対象部位.....	10
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.....	17
4. 評価条件.....	30
5. 強度評価結果.....	34

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、残留熱除去系海水系ポンプが竜巻時及び竜巻通過後においても、送水機能の維持を考慮して、主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

残留熱除去系海水系ポンプについて、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、残留熱除去系海水系ポンプの「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

残留熱除去系海水系ポンプは、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示すとおり、屋外の海水ポンプ室に設置する。

海水ポンプ室の位置図を図2-1に示す。

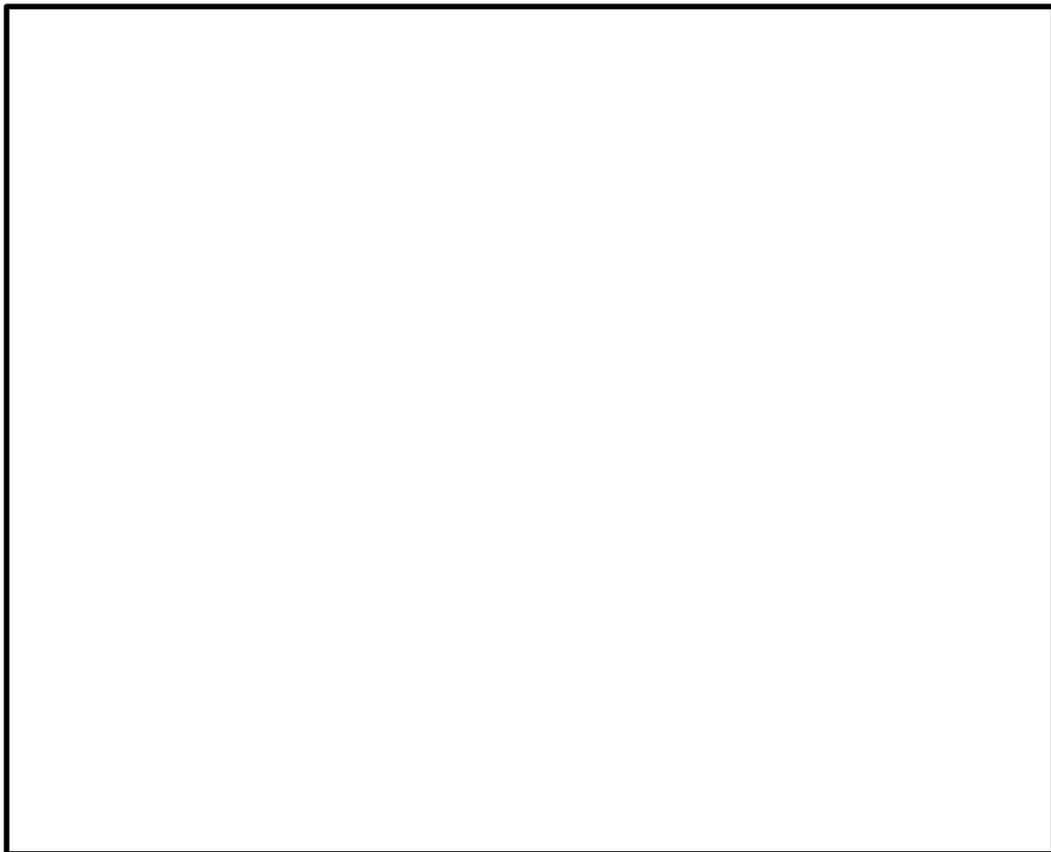


図 2-1 海水ポンプ室の位置図

2.2 構造概要

残留熱除去系海水系ポンプについて、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、残留熱除去系海水系ポンプの構造を示す。

残留熱除去系海水系ポンプは、ポンプ据付面から原動機台までのポンプ部と、原動機台より上部の原動機部からなる立形ポンプであり、同一設計の残留熱除去系海水系ポンプを4台設置している。残留熱除去系海水系ポンプの概要図を図2-2に示す。

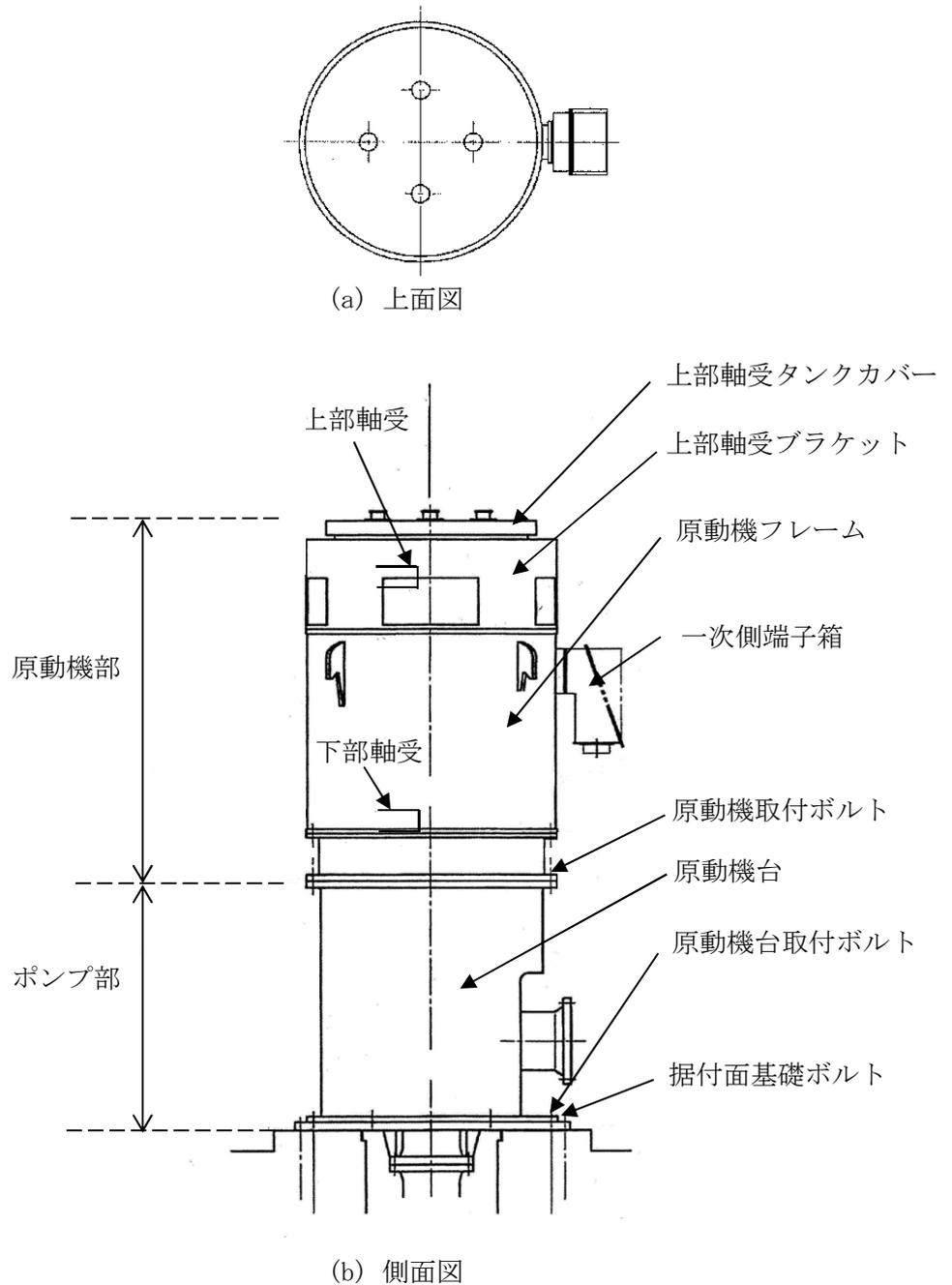


図2-2 残留熱除去系海水系ポンプの概要図

2.3 評価方針

残留熱除去系海水系ポンプの強度評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している、荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、残留熱除去系海水系ポンプの評価対象部位に作用する貫入及び応力等が、許容限界に収まることを「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

残留熱除去系海水系ポンプの強度評価においては、その構造を踏まえ、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を選定する。

(1) 衝突評価の評価方針

残留熱除去系海水系ポンプの衝突評価フローを図2-3に示す。衝突評価においては、竜巻防護ネットを設置する場合に考慮する飛来物である砂利の貫通限界厚さが外殻を構成する部材の厚さ未満であることを確認する。衝突評価では、「タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日原子炉安全専門審査会）」で用いられている式を準用し、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 強度評価方法」に示す衝突評価が必要な機器の評価式を用いる。残留熱除去系海水系ポンプの衝突評価における許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 許容限界」に示す許容限界である、外殻を構成する部材の厚さとする。

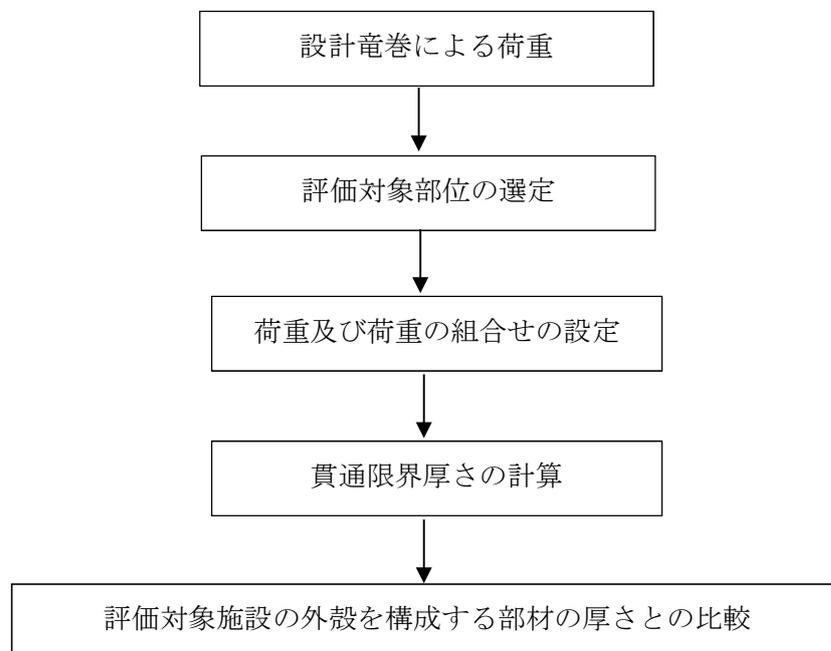


図2-3 残留熱除去系海水系ポンプの衝突評価フロー

(2) 構造強度評価の評価方針

残留熱除去系海水系ポンプの構造強度評価フローを図2-4に示す。構造強度評価において

は、残留熱除去系海水系ポンプに対して、設計竜巻による荷重に運転時の状態で作用する荷重及び自重を加えた応力が許容応力以下であることを確認する。各部材の構造強度評価において、その部材に対して応力が大きくなる方向から風が当たることを想定する。各部材の構造強度評価には、設計竜巻による荷重は水平方向より作用する外荷重という観点で地震荷重と同等なものであると考え、「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG 4601・補-1984」（（社）日本電気協会）、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987」（（社）日本電気協会）及び「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1991 追補版」（（社）日本電気協会）（以下「JEAG 4601」という。）における1質点系モデルによる評価方法を準用し、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価式を用いる。

残留熱除去系海水系ポンプの構造強度評価における許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、JEAG 4601の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

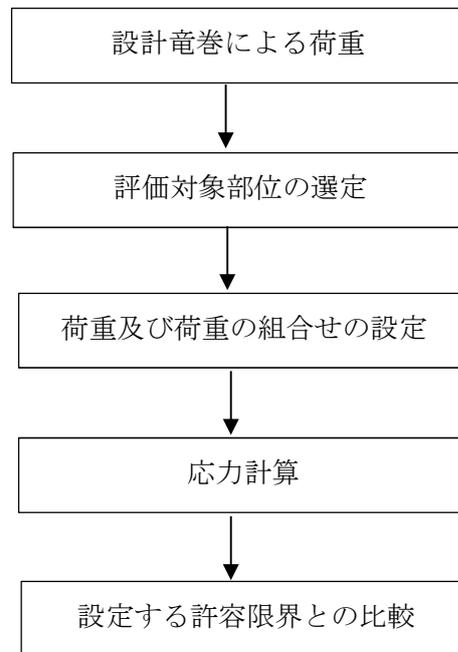


図2-4 残留熱除去系海水系ポンプの構造強度評価フロー

(3) 動的機能維持評価の評価方針

残留熱除去系海水系ポンプの動的機能維持評価フローを図2-5に示す。残留熱除去系海水系ポンプは動的機器であるため、構造強度評価に加え、軸受部の動的機能維持評価を行う。動的機能維持評価においては、残留熱除去系海水系ポンプ据付面から上部の受圧面積が大きくなる方向から風が当たることを想定し、設計竜巻の風圧力による荷重を受けた際のフレーム変位により生じる軸受荷重が接触面圧の許容荷重以下であることを確認する。動的機能維持評価では、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価式を用いる。残留熱除去系海水系ポンプの動的機能維持評価における許

容限界は、V-3-別添 1-1 「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、軸受部の接触面圧の許容荷重とする。

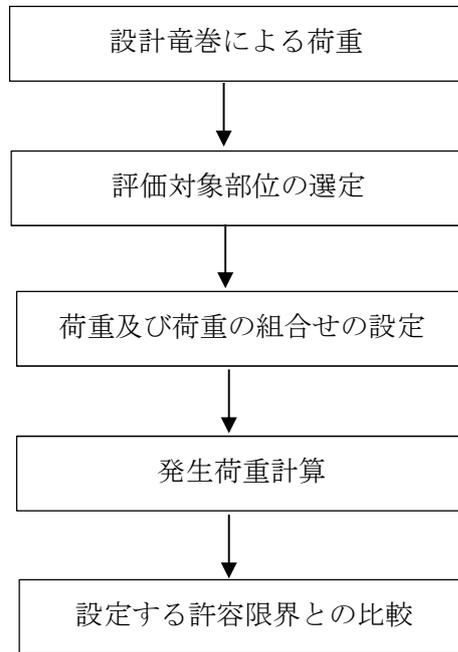


図2-5 残留熱除去系海水系ポンプの動的機能維持評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・「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）」
- ・「建築物荷重指針・同解説」（（社）日本建築学会，2004改定）
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG 4601・補-1984」（社）日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987」（社）日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1991 追補版」（社）日本電気協会
- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC 1-2005/2007」（社）日本機械学会（以下「JSME」という。）

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 衝突評価の記号の定義

残留熱除去系海水系ポンプの衝突評価に用いる記号を表3-1に示す。

表3-1 衝突評価に用いる記号

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

(2) 構造強度評価及び動的機能維持評価の記号の定義

残留熱除去系海水系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3-2及び表3-3に示す。

表3-2 構造強度評価に用いる記号 (1/2)

記号	単位	定義
A	m ²	受圧面積（風向に垂直な面に投影した面積）
A _b	mm ²	ボルトの断面積
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
D	mm	原動機フレーム外径
d	mm	原動機フレーム内径
F	MPa	J SME SSB-3121.1(1)により規定される値
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
f _s	MPa	J SME SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容せん断応力
f _t	MPa	J SME SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容引張応力
G	—	ガスト影響係数
g	m/s ²	重力加速度
H	N	自重による荷重

表3-2 構造強度評価に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
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
L	mm	重心と支点間の距離
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	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
m	kg	質量
N	—	ボルトの本数
q	N/m ²	設計用速度圧
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
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
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	設計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	mm ³	断面係数
ΔP	N/m ²	設計竜巻の気圧低下量
π	—	円周率
σ	MPa	原動機フレームの曲げ応力
σ_{bt}	MPa	ボルトの引張応力
τ	MPa	せん断応力

表3-3 動的機能維持評価に用いる記号 (1/2)

記号	単位	定義
A	m ²	受圧面積 (風向に垂直な面に投影した面積)
a	mm	部材間の長さ
a ₁	mm	ポンプ据付面から原動機台上端までの長さ
a ₂	mm	原動機台上端から原動機下部軸受までの長さ
a ₃	mm	原動機台上端から荷重作用点までの長さ
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
E	MPa	縦弾性係数
E _m	MPa	原動機フレームの縦弾性係数
E _p	MPa	原動機台の縦弾性係数
E _m '	MPa	回転子の縦弾性係数
G	—	ガスト影響係数
h'	mm	基準点から作用点までの距離
h ₁ '	mm	ポンプ据付面から荷重作用点までの距離
h ₂ '	mm	原動機下部軸受から荷重作用点までの距離
h ₃ '	mm	荷重作用点から荷重作用点までの距離
I	mm ⁴	断面二次モーメント
I _m	mm ⁴	原動機フレームの断面二次モーメント
I _m '	mm ⁴	回転子の断面二次モーメント
I _p	mm ⁴	原動機台の断面二次モーメント
i	rad	傾斜
i ₁	rad	ポンプ据付面から原動機台上端部の傾斜
i ₃	rad	原動機台上端部から荷重作用点の傾斜
i ₄	rad	荷重作用点の傾斜
M	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
M _a	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
M _b	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
M _c	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
q	N/m ²	設計用速度圧
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・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
W _M	N	設計竜巻による飛来物の衝撃荷重

表3-3 動的機能維持評価に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
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
x	mm	荷重作用点から評価対象部位までの距離
x'	mm	評価対象部から支点までの距離
x_a'	mm	ポンプグランド部から原動機下部軸受部までの距離
x_b'	mm	原動機下部軸受部から原動機上部軸受部までの距離
y	mm	たわみ量
y_1	mm	ポンプ据付面から原動機台上端部のたわみ量
y_2	mm	原動機台上端部から原動機下部軸受部のたわみ量
y_3	mm	原動機台上端部から荷重作用点のたわみ量
y_4	mm	荷重作用点のたわみ量
y_5	mm	荷重作用点から原動機上部軸受部のたわみ量
y_a	mm	原動機下部案内軸受部のたわみ量
y_b	mm	原動機上部案内軸受部のたわみ量
δ	mm	フレーム変位量
ΔP	N/m^2	設計竜巻の気圧低下量

3.2 評価対象部位

残留熱除去系海水系ポンプの評価対象部位は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 許容限界」にて示す評価対象部位を踏まえ、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し選定する。

(1) 衝突評価の評価対象部位

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

残留熱除去系海水系ポンプ地上部の全方向からの飛来物を考慮し、貫入により施設の機能が喪失する可能性がある箇所として最薄部となる一次側端子箱を選定する。

残留熱除去系海水系ポンプの衝突評価における評価対象部位を図3-1に示す。

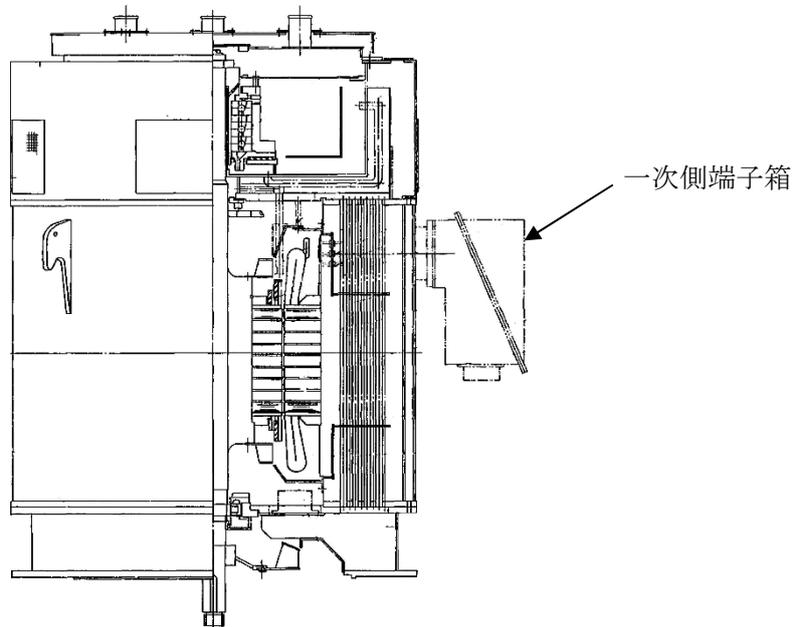


図3-1 残留熱除去系海水系ポンプの評価対象部位（衝突評価）

(2) 構造強度評価の評価対象部位

a. ポンプ部

ポンプ部について、原動機部等に作用する設計竜巻による荷重は、原動機フレーム及び原動機台に作用し、原動機台を介して、基礎面及び原動機部を固定しているボルトに作用する。荷重を受ける各部位のうち、支持断面積の小さな部位に大きな応力が生じることになる。

このことから、以下の部位を構造強度評価の評価対象部位として選定する。

- ・原動機取付ボルト
- ・原動機台取付ボルト
- ・据付面基礎ボルト

b. 原動機部

原動機部について、原動機部等に作用する設計竜巻による荷重は、原動機フレーム及び付属品に作用し、原動機フレーム及び付属品を介して、付属品の取付部を固定するボルトに作用する。

このことから、以下の部位を構造強度評価の評価対象部位として選定する。

- ・原動機フレーム
- ・一次側端子箱取付ボルト
- ・上部軸受ブラケット取付ボルト
- ・上部軸受タンクカバー取付ボルト

残留熱除去系海水系ポンプの構造強度評価における評価対象部位を図3-2、図3-3に示す。

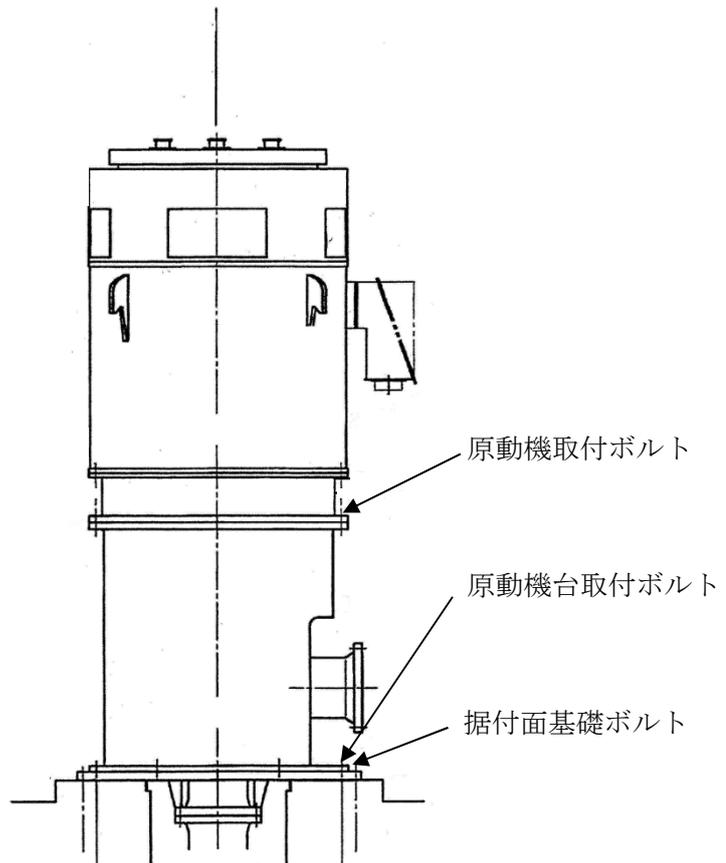


図3-2 残留熱除去系海水系ポンプの構造強度評価対象部位図（ポンプ部）

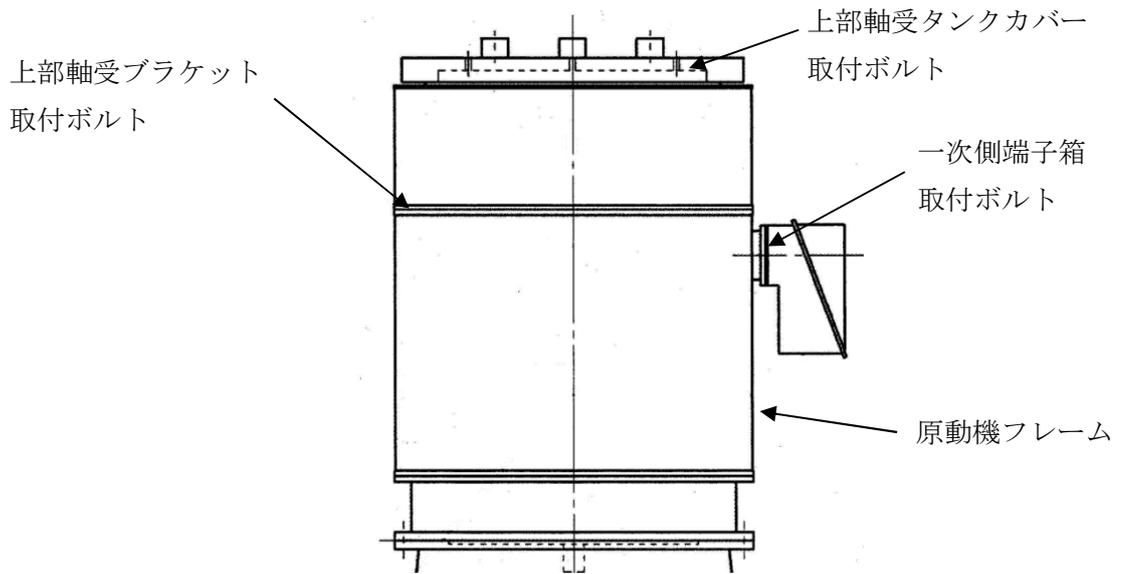


図 3-3 残留熱除去系海水系ポンプの構造強度評価対象部位図（原動機部）

(3) 動的機能維持評価の評価対象部位

ポンプ据付面より上部に竜巻により荷重を受けた際に、原動機フレーム等が変位することにより軸と軸受が接触した場合に動的機能維持が困難となるため、以下の部位を動的機能維持評価の評価対象部位として選定する。

- ・原動機下部軸受部
- ・原動機上部軸受部

残留熱除去系海水系ポンプの動的機能維持評価における評価対象部位を図 3-4 に示す。

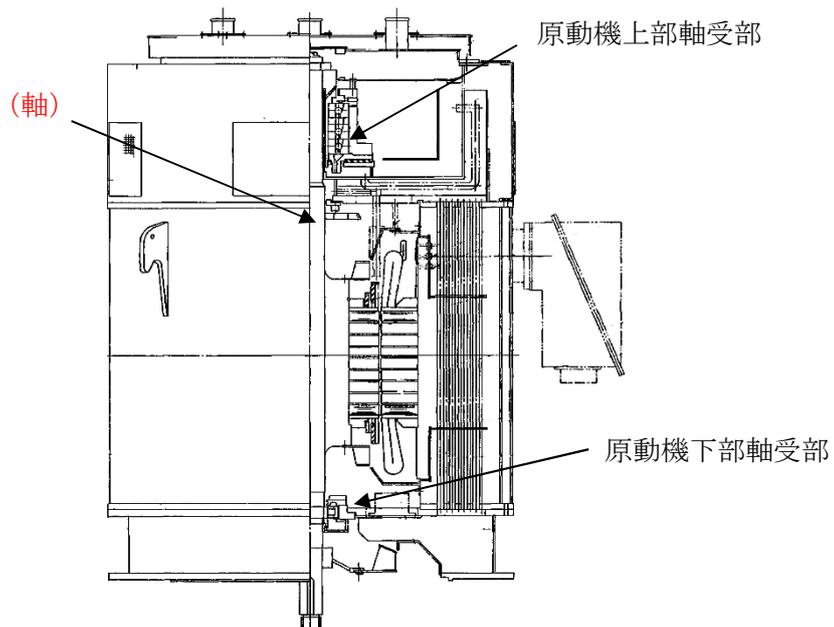


図 3-4 残留熱除去系海水系ポンプ動的機能維持評価対象部位概略図

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

(1) 衝突評価の荷重及び荷重の組合せ

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

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

砂利の諸元を表3-4、残留熱除去系海水系ポンプの衝突評価に用いる荷重を表3-5に示す。

表3-4 砂利の諸元

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

表3-5 残留熱除去系海水系ポンプの衝突評価に用いる荷重

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
屋外の防護対象施設	残留熱除去系海水系ポンプ	一次側端子箱	飛来物による衝撃荷重

(2) 構造強度評価及び動的機能維持評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の設定

構造強度評価及び動的機能維持評価に用いる荷重は、以下の荷重を用いる。

(a) 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、持続的に生じる荷重である自重を考慮する。

自重による荷重は以下のとおり計算する。

$$H = m \cdot g$$

(b) 設計竜巻による荷重

風圧力による荷重，気圧差による荷重を考慮する。防護ネット及び防護鋼板等による風圧力の低減は無いものとして保守的な評価を行う。また，極小飛来物である砂利による衝撃は瞬間的で，衝突時間が極めて短く，衝突される機器へ伝わる加速度が小さいことから，機器へ作用する荷重は構造強度に影響を与えないので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。

イ. 風圧力による荷重(W_w)

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

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

ロ. 気圧差による荷重(W_P)

気圧差による荷重 W_P はV-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1(3)c. (b) 気圧差による荷重」に示す式に従い、算出する。

$$W_P = \Delta P \cdot A$$

ハ. 荷重の組合せ

設計竜巻による複合荷重 W_T (W_{T1} , W_{T2})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(2) 荷重の組合せ」に示す式に従い、算出する。なお、残留熱除去系海水系ポンプは気圧差が生じ難い構造であるため、複合荷重の選定において、 W_{T2} としては気圧差を考慮するが、 W_{T1} の評価は実施しない。

$$W_{T1} = W_P$$

$$W_{T2} = W_w + 0.5W_P + W_M$$

(c) 運転時の状態で作用する荷重

運転時の状態で作用する荷重としては、鉛直下向きに作用するポンプスラスト荷重を考慮する。

b. 荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重の組合せは、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」にて設定している荷重の組合せを踏まえ、残留熱除去系海水系ポンプの評価対象部位ごとに設定する。

ボルト材の構造強度評価時に評価対象部位が鉛直方向に取り付けられており、自重が抗力となる場合は保守的に考慮せず、水平方向に取り付けられている場合（一次側端子箱取付ボルト）は、端子箱自重を考慮する。また、運転時荷重が作用する評価対象部位は全て鉛直方向に取り付けられており、運転時荷重は鉛直方向下向きに作用し抗力となるため、それぞれの構造強度評価を行う際の荷重としては保守的に考慮しない。

残留熱除去系海水系ポンプの評価対象部位に作用する荷重及び強度評価にて考慮する荷重の組合せを表 3-6 に示す。

表 3-6 荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位		荷重	
屋外の外部事 象防護対象施 設	残留熱除去系 海水系ポンプ	構造 強度 評価	ポンプ部	原動機取付ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重
				原動機台取付ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重
				据付面基礎ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重
			原動機部	原動機フレーム	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重
				一次側端子箱取付ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重 ③端子箱自重
				上部軸受ブラケット取付ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重
		上部軸受タンクカバー取付ボルト		①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重	
		動的 機能 維持 評価	原動機上部軸受部	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重	
			原動機下部軸受部	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重	

3.4 許容限界

残留熱除去系海水系ポンプの許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界に従って、「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、外殻を構成する部材の厚さ、J E A G 4 6 0 1に基づく許容応力状態Ⅲ_ASの許容応力及び軸受の接触面圧の許容荷重を用いる。

(1) 衝突評価における許容限界

衝突評価における許容限界は、評価において考慮する飛来物による衝撃荷重に対し、外殻を構成する部材が、機能喪失に至る可能性のある変形を生じないことを計算により確認するため、評価式により算定した貫通限界厚さが外殻を構成する部材の厚さ未満であることを許容限界とする。残留熱除去系海水系ポンプの外殻を構成する部材の厚さを表3-7に示す。

表3-7 残留熱除去系海水系ポンプの外殻を構成する部材の厚さ

防護対象施設	外殻を構成する部材の厚さ
残留熱除去系海水系ポンプ	2.3mm (一次側端子箱)

(2) 構造強度評価における許容限界

構造強度評価における許容限界は J E A G 4 6 0 1 を準用し、「クラス2,3支持構造物」の許容限界を適用し、許容応力状態Ⅲ_AS から算出した許容応力を許容限界とする。J E A G 4 6 0 1 に従い、J S M E 付録材料図表Part5,6の表にて許容応力を計算する際は、評価対象部位の最高使用温度又は周囲環境温度に応じた値をとるものとするが、温度が J S M E 付録材料図表記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算する。ただし、J S M E 付録材料図表Part5,6で比例法を用いる場合の端数処理は、小数点第1位以下を切り捨てた値を用いるものとする。

残留熱除去系海水系ポンプの構造強度評価における許容限界について、表3-8に示す。

表3-8 残留熱除去系海水系ポンプの構造強度評価における許容限界

評価対象部位	許容応力状態	応力の種類		許容限界
		一次応力		
ボルト	Ⅲ _A S		一次応力	引張
		せん断		$1.5 f_s$
		組合せ		$\text{Min} \{1.5 f_t, (2.1 f_t - 1.6 \tau)\}$
原動機フレーム	Ⅲ _A S	一次応力	曲げ	$1.5 f_b$

(3) 動的機能維持評価における許容限界

動的機能維持評価における許容限界は、設計荷重により原動機フレームが変形する場合においても残留熱除去系海水系ポンプの運転継続が可能であるように、軸受の接触面圧の許容荷重を許容限界とする。

軸受の接触面圧の許容荷重を表3-9に示す。

表3-9 軸受の接触面圧の許容荷重

評価対象部位	許容荷重 (N)
原動機上部軸受部	□
原動機下部軸受部	□

3.5 評価方法

(1) 衝突評価の評価方法

残留熱除去系海水系ポンプの衝突評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 強度評価方法」にて設定している衝突評価が必要な機器の評価式を用いる。

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

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

(2) 構造強度評価及び動的機能維持評価の評価方法

残留熱除去系海水系ポンプの構造強度評価及び動的機能維持評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 強度評価方法」にて設定している評価式を用いる。

a. 計算モデル

(a) 構造強度評価

計算モデルは1質点系モデルとし、ポンプ部は全高の1/2の位置に、原動機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。ポンプ部及び原動機部の応力の計算モデル図を図3-5及び図3-6に示す。

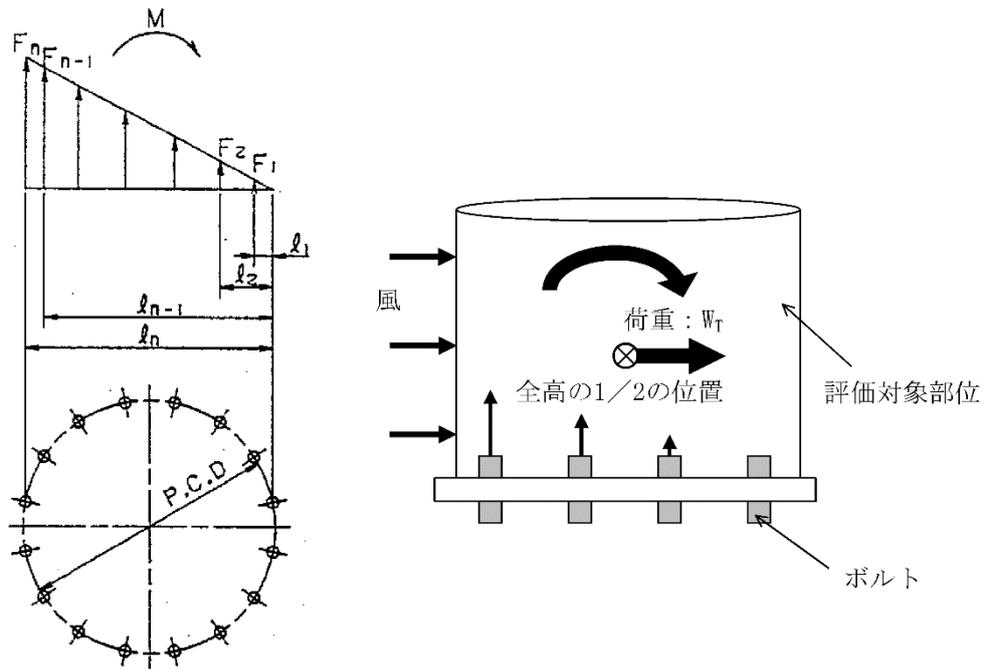


図 3-5 応力の計算モデル図 (ポンプ部)

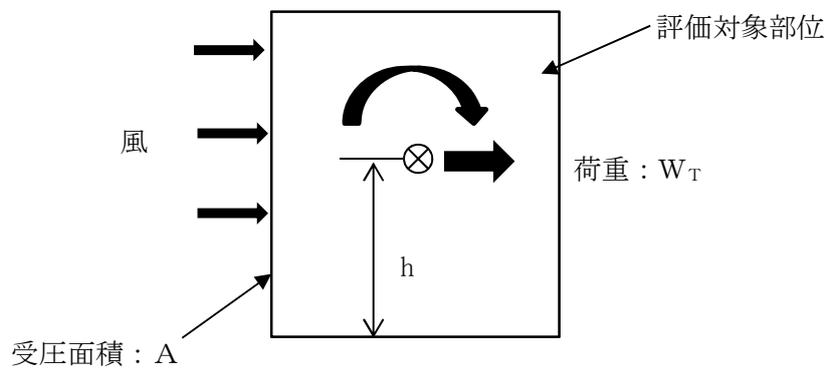


図 3-6 応力の計算モデル図 (原動機部)

(b) 動的機能維持評価

動的機能維持評価の際の原動機フレームのたわみ量計算において、ポンプ据付面から原動機台上端まで（ポンプ部）と、原動機台上端から原動機まで（原動機部）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。ポンプ部の断面性能は原動機台が最も小さいことから、原動機台の断面性能を一様に有する単純円筒形モデルとして評価する。原動機部については原動機フレームの断面性能を用いて評価する。たわみ量計算モデル図を図3-7に示す。

ポンプ据付面より上部の静止体(原動機フレーム等)は、水平方向の複合荷重により、ポンプ据付面を固定端として一方向に変形する。一方、回転体(ポンプ軸及び原動機軸)は、風荷重を受けないため、変形せず、原動機上部から鉛直方向に吊り下げられた状態

を維持する。原動機フレーム等の変形により、軸受反力が許容荷重を超えないことを確認する。

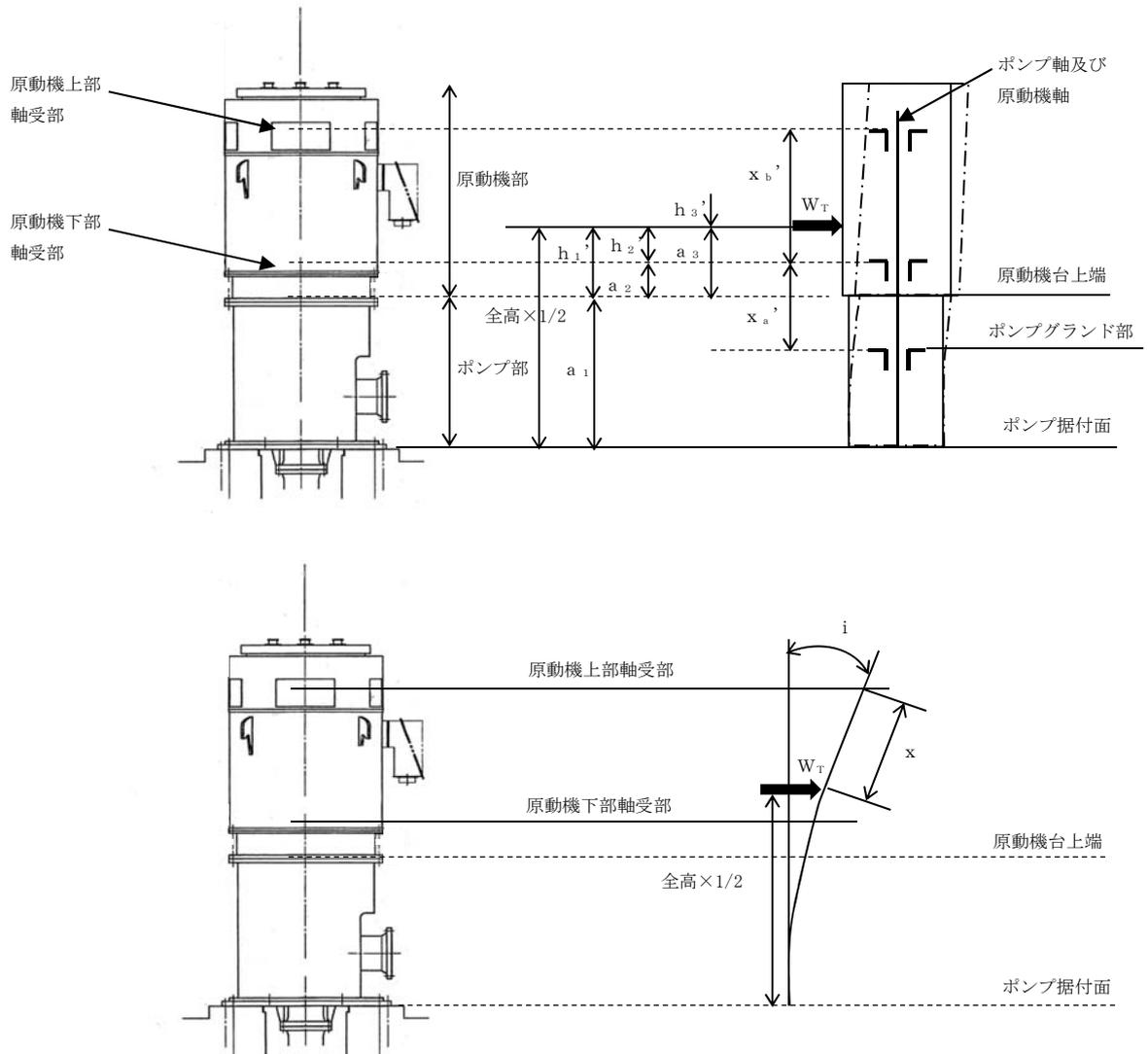


図 3-7 残留熱除去系海水系ポンプのたわみ量計算モデル図

b. 計算方法

(a) 応力の算出

イ. ポンプ部 (ボルト部)

原動機取付ボルト, 原動機台取付ボルト及び据付面基礎ボルトの各ボルト間寸法の配置図を図 3-8~図 3-10 に示す。

(イ) 風による転倒モーメントM

$$M = W_T \cdot \text{全高} / 2$$

(ロ) 引張応力 σ_{bt}

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

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

(3.1) (3.2) 式より,

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

よって,

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

(ハ) せん断応力 τ

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

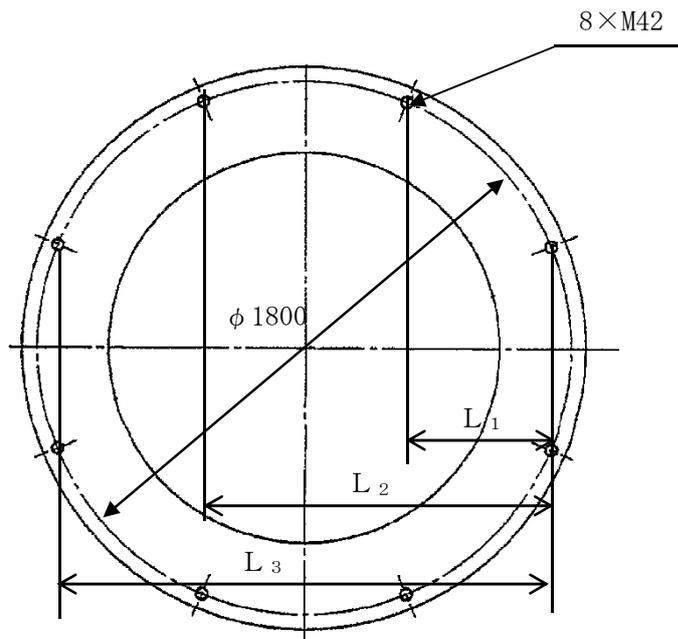


図 3-8 原動機取付ボルトの各ボルト間寸法の配置図

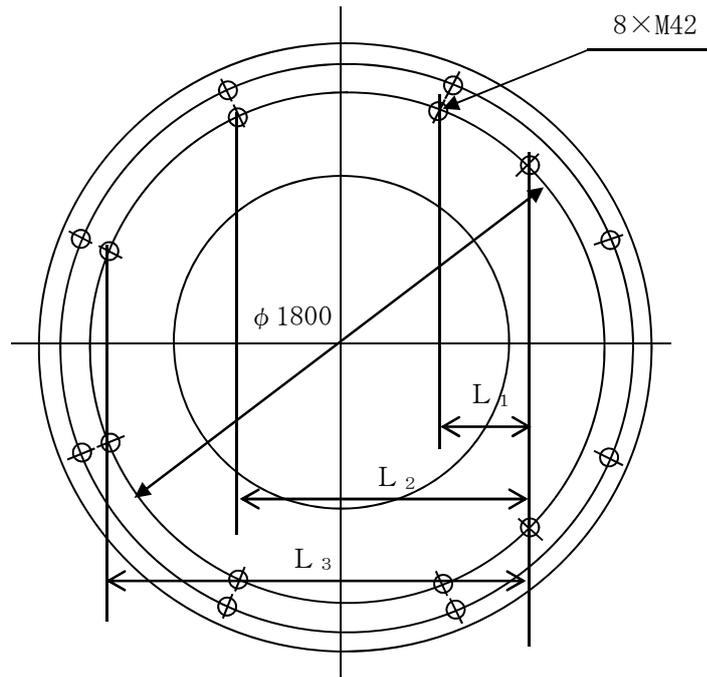


図 3-9 原動機台取付ボルトの各ボルト間寸法の配置図

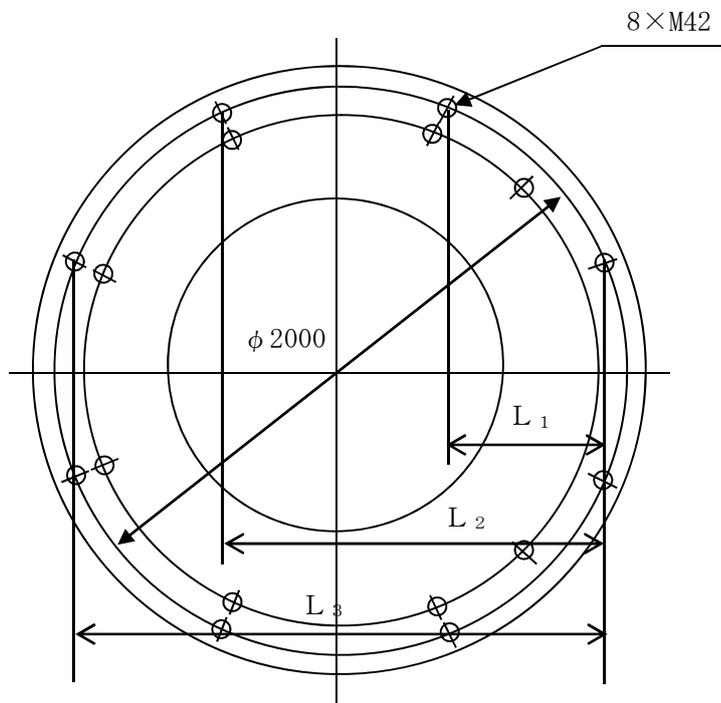


図 3-10 据付面基礎ボルトの各ボルト間寸法の配置図

ロ. 原動機部

原動機フレーム、一次側端子箱ボルト部、上部軸受ブラケット取付ボルト部、上部軸受タンクカバー取付ボルト部の詳細図を図3-11～図3-14に示す。

(イ) 風による転倒モーメントM

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

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

(ロ) 原動機フレーム

原動機フレームの応力算出方法を以下に示す。

・ 曲げ応力

$$\sigma = \frac{M}{Z}$$

ここで、

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

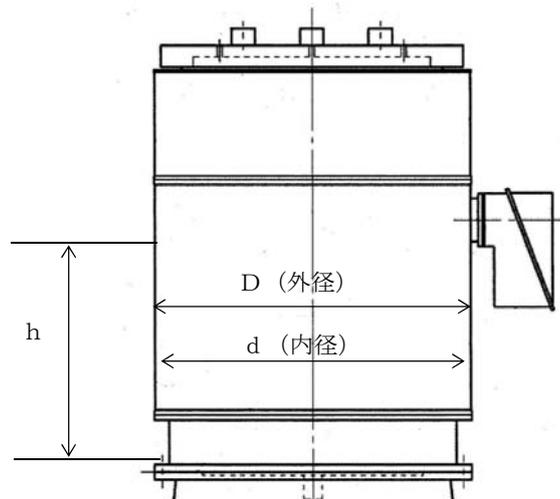


図 3-11 原動機フレーム詳細図

(ハ) 一次側端子箱ボルト部

一次側端子箱ボルト部の応力算出方法を以下に示す。

・ 引張応力

$$F_b = \frac{M}{L_1 \cdot N}$$

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

・せん断応力

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

ここで,

$$F_H = \sqrt{W_T^2 + H^2}$$

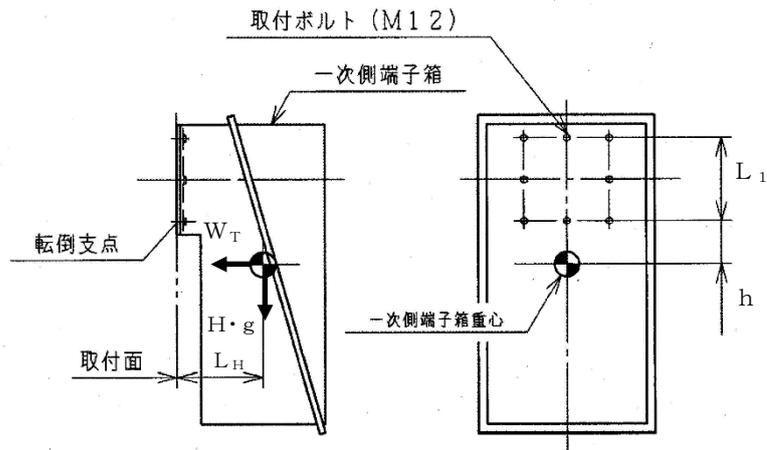


図 3-12 一次側端子箱詳細図

- (二) 上部軸受ブラケット取付ボルト部, 上部軸受タンクカバー取付ボルト部
 上部軸受ブラケット取付ボルト部, 上部軸受タンクカバー取付ボルト部の応力
 算出方法を以下に示す。

・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, **取付ボルト**に生じる引張応力を算出し評価する。

- (i) 風による転倒モーメントM

$$M = W_T \cdot h_u$$

- (ii) 引張応力 σ_{bt}

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

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

(3.1) (3.2) 式より,

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

よって,

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

(iii) せん断応力 τ

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

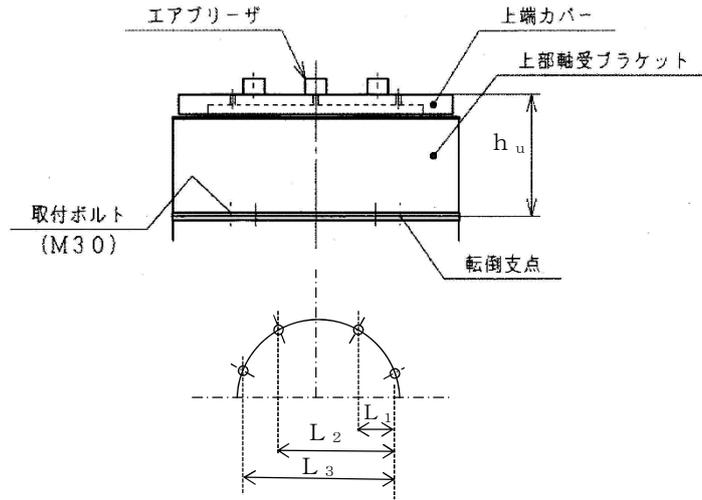


図 3-13 上部軸受ブラケット詳細図

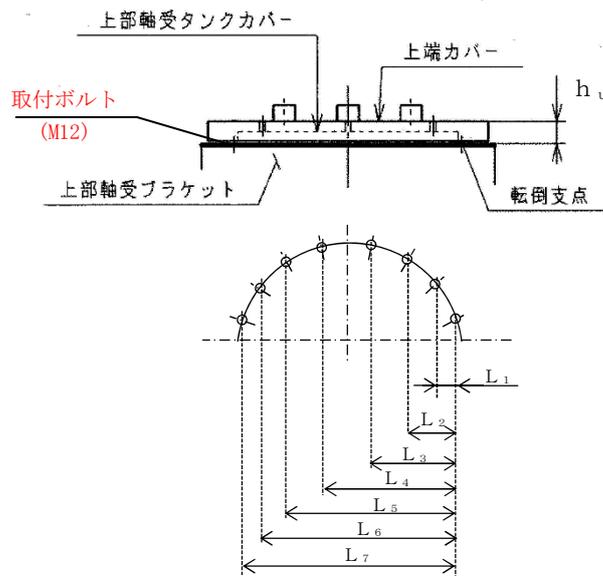


図 3-14 上部軸受タンクカバー詳細図

(b) 発生荷重の計算

イ. たわみ量の計算

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。

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

各部位の受圧部図を図3-15～図3-19に示す。

(単位：mm)

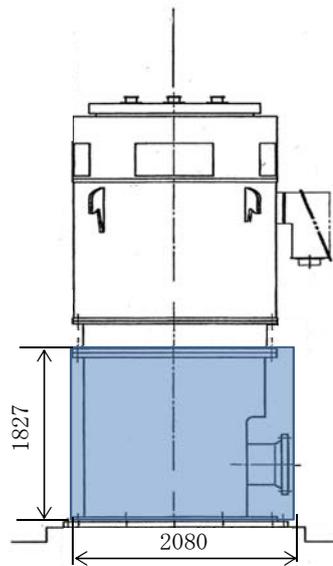


図3-15 原動機台の受圧部図

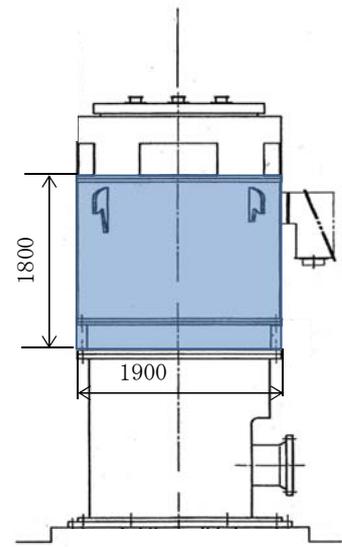


図3-16 原動機フレームの受圧部図

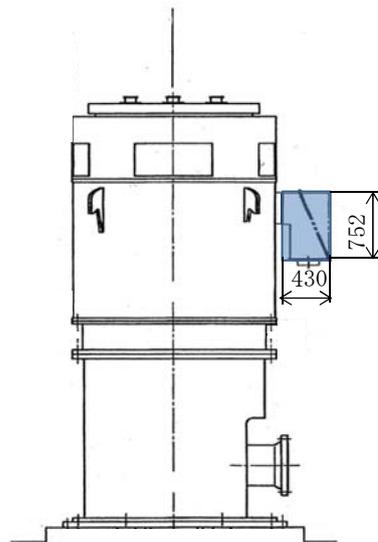


図3-17 一次側端子箱の受圧部図

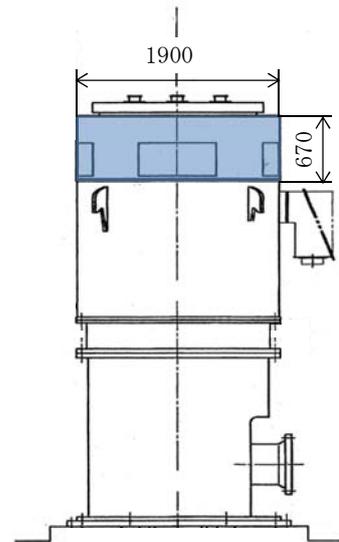


図3-18 上部軸受ブラケットの受圧部図

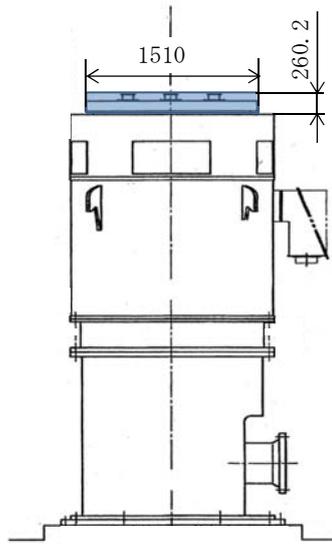


図3-19 上部軸受タンクカバーの受圧部図

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

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

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

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

(イ) 原動機下部軸受部

- ・ポンプ据付面から原動機台上端部のたわみ量 y_1 ，傾斜 i_1

$$y_1 = \frac{M_a \cdot a_1^2}{2 \cdot E_p \cdot I_p} + \frac{W' \cdot a_1^3}{3 \cdot E_p \cdot I_p}$$

$$i_1 = \frac{M_a \cdot a_1}{E_p \cdot I_p} + \frac{W' \cdot a_1^2}{2 \cdot E_p \cdot I_p}$$

$$M_a = W' \cdot h_1'$$

ここで、原動機台の断面図を図3-20に示す。

(単位：mm)

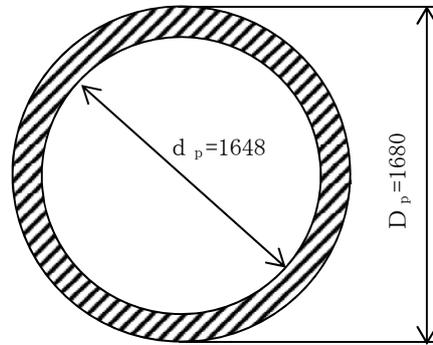


図3-20 原動機台の断面図

円筒形であるため、断面二次モーメントは以下のとおり算出する。

$$I_p = \frac{\pi (D_p^4 - d_p^4)}{64}$$

・原動機台上端部から原動機下部軸受部のたわみ量 y_2

$$y_2 = \frac{M_b \cdot a_2^2}{2 \cdot E_m \cdot I_m} + \frac{W' \cdot a_2^3}{3 \cdot E_m \cdot I_m}$$

$$M_b = W' \cdot h_2'$$

ここで、原動機フレームの断面図を図3-21に示す。

(単位：mm)

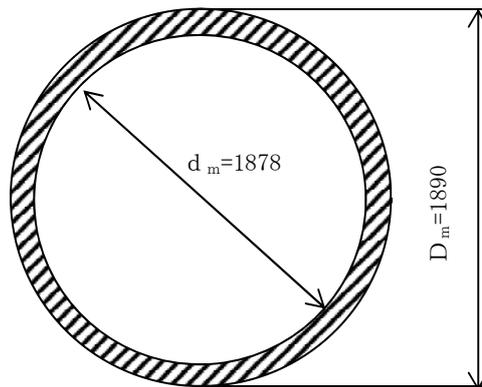


図3-21 原動機フレームの断面図

円筒形であるため、断面二次モーメントは以下のとおり算出する。

$$I_m = \frac{\pi (D_m^4 - d_m^4)}{64}$$

よって、原動機下部軸受部のたわみ量は

$$y_a = y_1 + y_2$$

(ロ) 原動機上部軸受部

・原動機台上端部から荷重作用点のたわみ量 y_3 ，傾斜 i_3

$$y_3 = \frac{M_c \cdot a_3^2}{2 \cdot E_m \cdot I_m} + \frac{W' \cdot a_3^3}{3 \cdot E_m \cdot I_m}$$

$$i_3 = \frac{M_c \cdot a_3}{E_m \cdot I_m} + \frac{W' \cdot a_3^2}{2 \cdot E_m \cdot I_m}$$

$$M_c = W' \cdot h_3'$$

よって、荷重作用点のたわみ量 y_4 ，傾斜 i_4

$$y_4 = y_1 + y_3$$

$$i_4 = i_1 + i_3$$

荷重作用点から原動機上部軸受部のたわみ量 y_5

$$y_5 = x \cdot \sin(i_4)$$

以上より、原動機上部軸受部のたわみ量は

$$y_b = y_4 + y_5$$

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

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

(イ) 原動機下部軸受部の発生荷重

$$W''_m = \frac{3 \cdot E_m' \cdot I_m' \cdot \delta_a}{x_a^3}$$

ここで、 $\delta_a = y_a$

回転子（原動機部）の断面図を図3-22に示す。

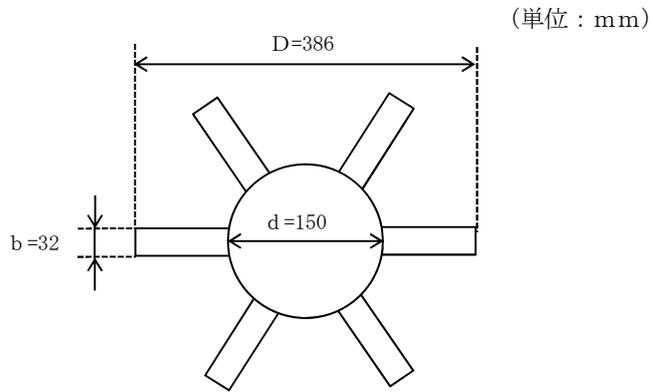


図3-22 回転子（原動機部）の断面図

回転子の断面二次モーメントは以下のとおり算出する。

$$I_m' = \frac{b(D-d) \cdot (D^2 + D \cdot d + d^2 + b^2)}{8} + \frac{\pi d^4}{64}$$

(ロ) 原動機上部軸受部の発生荷重

$$W_m'' = \frac{3 \cdot E_m' \cdot I_m' \cdot \delta_b}{x_b'^3}$$

ここで、 $\delta_b = y_b - y_a$

4. 評価条件

(1) 構造強度評価の評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-1～表 4-14 に示す。

表 4-1 許容応力評価に用いる条件

評価対象部位	材料	温度条件 (°C)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F (MPa)	1.5 f _t (MPa)	1.5 f _s (MPa)	1.5 f _b (MPa)
原動機取付ボルト	SUS304	50* ¹	198	504	205	153	118	—
原動機台取付ボルト	SUS304	50* ¹	198	504	205	153	118	—
据付面基礎ボルト	S22C	50* ¹	260	430	260	195	150	—
原動機フレーム	SS400	60* ²	237	389	237	—	—	273
一次側端子箱取付ボルト	SS400	90* ²	225	376	225	168	129	—
上部軸受ブラケット取付ボルト	SUS304	60* ²	192	489	205	153	118	—
上部軸受タンクカバー取付ボルト	SUS304	90* ²	175	451	205	153	118	—

注記 *1：周囲環境温度

*2：最高使用温度

表 4-2 評価条件

q (N/m ²)	G (-)	Δ P (N/m ²)	W _M (N)
6.1 × 10 ³	1.0	8.9 × 10 ³	0

表 4-3 評価条件 (原動機取付ボルト)

L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	L ₃ (mm)	C (-)	全高 (m)	A (m ²)
487.1	1175.9	1663.0	1.2	2.73	8.354

ボルト サイズ	N (-)	A _b (mm ²)
M42	8	1385

表 4-4 評価条件（原動機台取付ボルト）

L_1 (mm)	L_2 (mm)	L_3 (mm)	C (-)	全高 (m)	A (m^2)
324.4	1013.2	1500.3	1.2	4.557	12.15

ボルト サイズ	N (-)	A_b (mm^2)
M42	8	1385

表 4-5 評価条件（据付面基礎ボルト）

L_1 (mm)	L_2 (mm)	L_3 (mm)	C (-)	全高 (m)	A (m^2)
541.2	1306.6	1847.8	1.2	4.557	12.15

ボルト サイズ	N (-)	A_b (mm^2)
M42	8	1385

表 4-6 評価条件（原動機フレーム）

C (-)	h (mm)	A (m^2)	D (mm)	d (mm)
1.2	1365	8.354	1890	1878

表 4-7 評価条件（一次側端子箱取付ボルト）

C (-)	A (m^2)	ボルト サイズ	A_b (mm^2)	m (kg)	g (m/s^2)
2.4	0.3910	M12	113.1	75	9.80665

N^* (-)	h (mm)	L_1 (mm)	L_H (mm)
8(3)	153	250	238

注記 * : () 内の数字は引張応力計算の際に考慮したボルトの本数

表 4-8 評価条件（上部軸受ブラケット取付ボルト）

C (-)	A (m ²)	ボルト サイズ	A _b (mm ²)	N (-)	L ₁ (mm)
1.2	1.666	M30	706.9	8	303.1

L ₂ (mm)	L ₃ (mm)	h _u (mm)
731.7	1034.7	824

表 4-9 評価条件（上部軸受タンクカバー取付ボルト）

C (-)	A (m ²)	ボルト サイズ	A _b (mm ²)	N (-)	L ₁ (mm)
1.2	0.3929	M12	113.1	16	109.7

L ₂ (mm)	L ₃ (mm)	L ₄ (mm)	L ₅ (mm)	L ₆ (mm)	L ₇ (mm)
312.5	577.5	864.3	1129.2	1332.0	1441.8

h _u (mm)
260.2

(2) 動的機能維持評価の評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-10～表 4-14 に示す。

表 4-10 評価条件（たわみ量の算出）

原動機台の風力 係数 C (-)	原動機フレーム の風力係数 C (-)	一次側端子箱の 風力係数 C (-)	上部軸受ブラケ ットの風力係数 C (-)	上部軸受タンクカ バーの風力係数 C (-)
1.2	1.2	2.4	1.2	1.2

原動機台の受圧 面積 A (m ²)	原動機フレーム の受圧面積 A (m ²)	一次側端子箱の 受圧面積 A (m ²)	上部軸受ブラケ ットの受圧面積 A (m ²)	上部軸受タンクカ バーの受圧面積 A (m ²)
3.800	3.420	0.3234	1.273	0.3929

表 4-11 評価条件（原動機下部軸受部（たわみ量の算出））

変位量計算モデルの材質	温度 (°C)	q (N/m ²)	G (-)	ΔP (N/m ²)	W _M (N)
SS400	50	6.1×10 ³	1.0	8.9×10 ³	0

h ₁ ' (mm)	h ₂ ' (mm)	a ₁ (mm)	a ₂ (mm)	E _p (MPa)	I _p (mm ⁴)
407	73	1872	334	201000	2.895×10 ¹⁰

E _m (MPa)	I _m (mm ⁴)
201000	1.576×10 ¹⁰

表 4-12 評価条件（原動機下部軸受部（発生荷重の算出））

発生荷重計算モデルの材質	温度 (°C)	E _m ' (MPa)	I _m ' (mm ⁴)	x _a ' (mm)	y _a (mm)
S25C	50	201000	2.424×10 ⁸	1064	0.05579

表 4-13 評価条件（原動機上部軸受部（たわみ量の算出））

変位量計算モデルの材質	温度 (°C)	q (N/m ²)	G (-)	ΔP (N/m ²)	W _M (N)
SS400	50	6.1×10 ³	1.0	8.9×10 ³	0

x (mm)	h ₃ ' (mm)	a ₃ (mm)	E _m (MPa)	I _m (mm ⁴)
1750	0	407	201000	1.576×10 ¹⁰

表 4-14 評価条件（原動機上部軸受部（発生荷重の算出））

発生荷重計算モデルの材質	温度 (°C)	E _m ' (MPa)	I _m ' (mm ⁴)	x _b ' (mm)	y _b (mm)
S25C	50	201000	2.424×10 ⁸	1823	0.1448

5. 強度評価結果

(1) 衝突評価結果

竜巻発生時の砂利の貫通限界厚さを表 5-1 に示す。

表 5-1 砂利の貫通限界厚さ

飛来物	貫通限界厚さ T (mm)	
	水平方向	鉛直方向
砂利	1.0	1.0

砂利の貫通限界厚さ(1.0mm)と残留熱除去系海水系ポンプの外殻を構成する部材の厚さとの比較を表5-2に示す。

砂利の貫通限界厚さは、残留熱除去系海水系ポンプの外殻を構成する部材の厚さ未満である。

防護対象施設	外殻を構成する部材の厚さ (mm)	貫通限界厚さ T (mm)	結果
残留熱除去系海水系ポンプ	2.3 (一次側端子箱)	1.0	貫通しない

(2) 構造強度評価結果

a. 原動機取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-1 に示す。

原動機取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-1 評価結果 (原動機取付ボルト)

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	19	153
せん断	9	118
組合せ	19	153

b. 原動機台取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-2 に示す。

原動機台取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-2 評価結果（原動機台取付ボルト）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	53	153
せん断	13	118
組合せ	53	153

c. 据付面基礎ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-3 に示す。

据付面基礎ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-3 評価結果（据付面基礎ボルト）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	41	195
せん断	13	150
組合せ	41	195

d. 原動機フレーム

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-4 に示す。

原動機フレームに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-4 評価結果（原動機フレーム）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
曲げ	9	273

e. 一次側端子箱取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-5 に示す。

一次側端子箱取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-5 評価結果（一次側端子箱取付ボルト）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	16	168
せん断	9	129
組合せ	16	168

f. 上部軸受ブラケット取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-6 に示す。

上部軸受ブラケット取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-6 評価結果（上部軸受ブラケット取付ボルト）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	7	153
せん断	4	118
組合せ	7	153

g. 上部軸受タンクカバー取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-7 に示す。

上部軸受タンクカバー取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-7 評価結果（上部軸受タンクカバー取付ボルト）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	2	153
せん断	3	118
組合せ	2	153

(3) 動的機能維持評価結果

a. 原動機下部軸受部

竜巻発生時の動的機能維持評価結果を表 5-8 に示す。

原動機下部軸受部の発生荷重は、許容荷重以下である。

表 5-8 評価結果（原動機下部軸受部）

発生荷重 W'' (N)	許容荷重 (N)
6770	

b. 原動機上部軸受部

竜巻発生時の動的機能維持評価結果を表 5-9 に示す。

原動機上部軸受部の発生荷重は、許容荷重以下である。

表 5-9 評価結果 (原動機上部軸受部)

発生荷重 W'' (N)	許容荷重 (N)
2148	

V-3-別添 1-1-3 残留熱除去系海水系ストレーナの強度計算書

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.....	2
2.4 適用規格.....	4
3. 強度評価方法.....	5
3.1 記号の定義.....	5
3.2 評価対象部位.....	6
3.3 荷重及び荷重の組合せ.....	7
3.4 許容限界.....	9
3.5 評価方法.....	10
4. 評価条件.....	13
5. 強度評価結果.....	14

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、残留熱除去系海水系ストレーナが竜巻時及び竜巻通過後においても、海水中の固形物を除去する機能の維持を考慮して、主要な構造部材が構造健全性を有すことを確認するものである。

2. 基本方針

残留熱除去系海水系ストレーナについて、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、残留熱除去系海水系ストレーナの「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

残留熱除去系海水系ストレーナは、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示すとおり、屋外の海水ポンプ室に設置する。

海水ポンプ室の位置図を図2-1に示す。

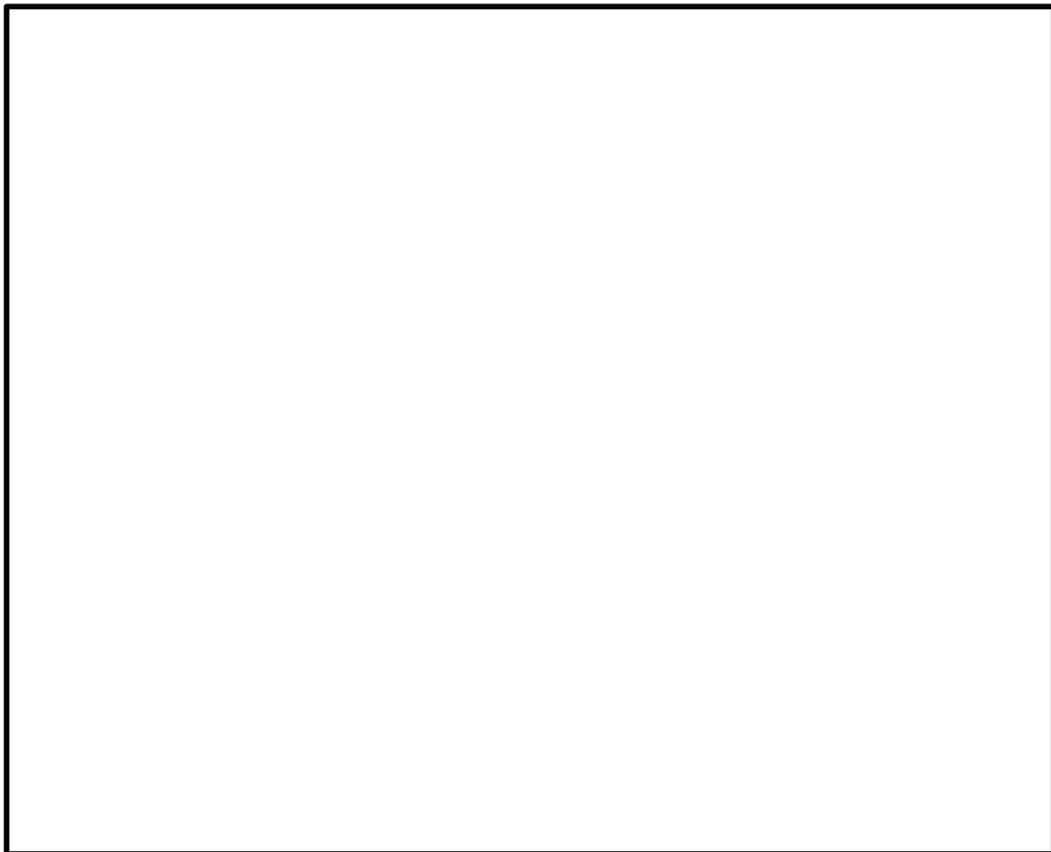


図 2-1 海水ポンプ室の位置図

2.2 構造概要

残留熱除去系海水系ストレーナの構造について、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえて設定する。

残留熱除去系海水系ストレーナは胴板と支持脚が鋳物一体となった構造であり、基礎ボルトで固定されている。同一設計の残留熱除去系海水系ストレーナを2台設置している。

残留熱除去系海水系ストレーナの概要図を図2-2に示す。

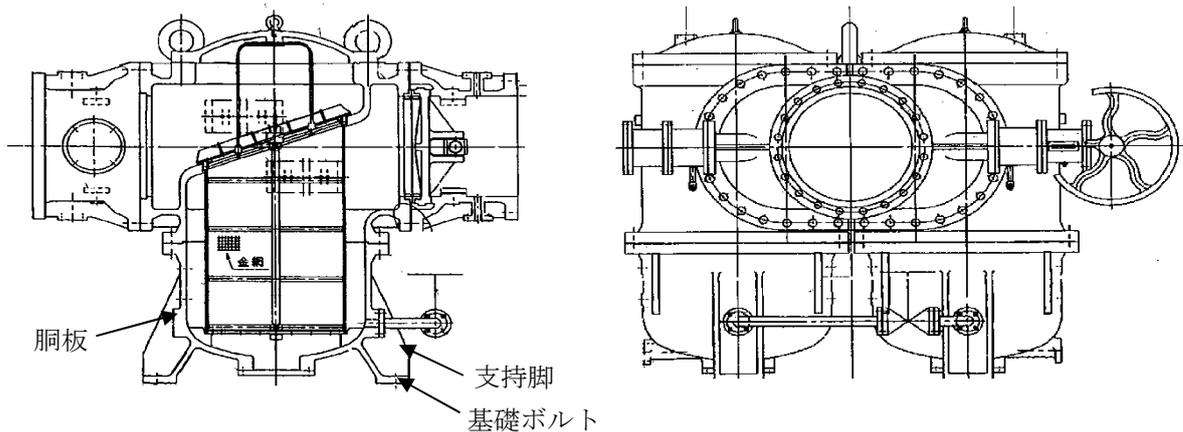


図2-2 残留熱除去系海水系ストレーナの概要図

2.3 評価方針

残留熱除去系海水系ストレーナの強度評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している、荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえて、残留熱除去系海水系ストレーナの評価対象部位に作用する貫入及び応力等が、許容限界に収まることを「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

残留熱除去系海水系ストレーナの強度評価においては、その構造を踏まえ、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を選定する。

(1) 衝突評価の評価方針

残留熱除去系海水系ストレーナの衝突評価フローを図2-3に示す。衝突評価においては、竜巻防護ネットを設置する場合に考慮する飛来物である砂利の貫通限界厚さが外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ未満であることを確認する。衝突評価では、「タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日原子炉安全専門審査会）」で用いられている式を準用し、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 強度評価方法」に示す衝突評価が必要な機器の評価式を用いる。残留熱除去系海水系ストレーナの衝突評価における許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 許容限界」に示す許容限界である、外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さとする。

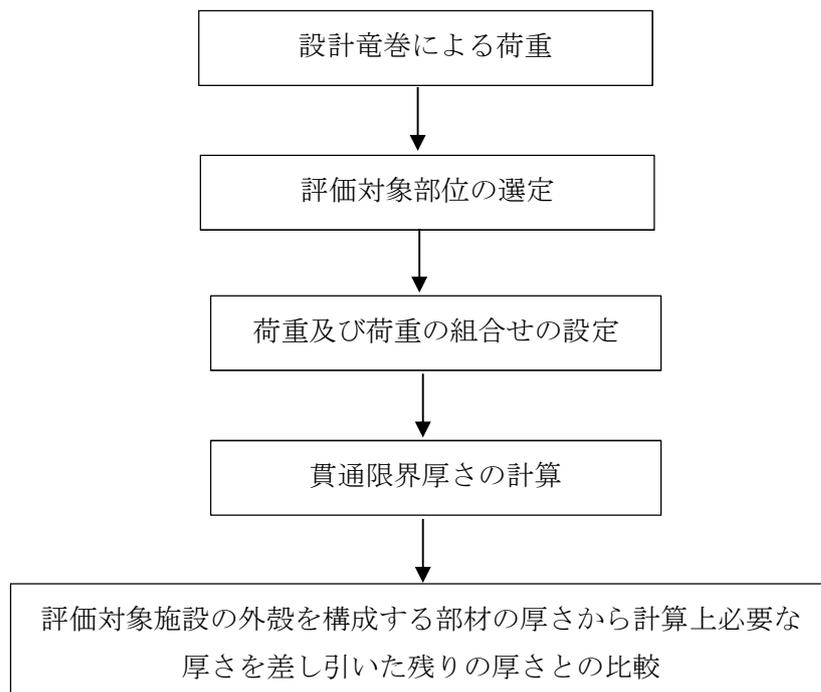


図2-3 残留熱除去系海水系ストレーナの衝突評価フロー

(2) 構造強度評価の評価方針

残留熱除去系海水系ストレーナの構造強度評価フローを図2-4に示す。構造強度評価においては、残留熱除去系海水系ストレーナに対して、設計竜巻による荷重に自重を加えた応力が許容応力以下であることを確認する。構造強度評価において、その部材に対して応力が大きくなる方向から風が当たることを想定する。各部材の構造強度評価には、設計竜巻による荷重は水平方向より作用する外荷重という観点で地震荷重と同等なものであると考え、「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG 4601・補-1984」（（社）日本電気協会）、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987」（（社）日本電気協会）及び「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1991 追補版」（（社）日本電気協会）（以下「JEAG 4601」という。）における1質点系モデルによる評価方法を準用し、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価式を用いる。

残留熱除去系海水系ストレーナの許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、JEAG 4601の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

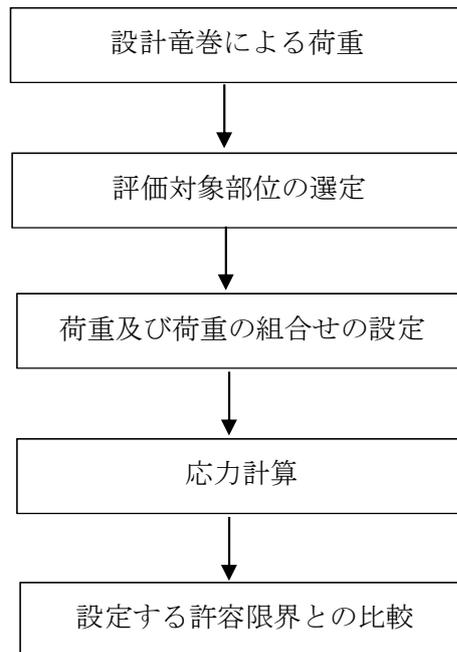


図2-4 残留熱除去系海水系ストレーナの構造強度評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格、基準等を以下に示す。

- ・「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）」
- ・「建築物荷重指針・同解説」（（社）日本建築学会，2004改定）
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984」（社）日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987」（社）日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」（社）日本電気協会
- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 J S M E S N C 1 -2005/2007」（社）日本機械学会（以下「J S M E」という。）

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 衝突評価の記号の定義

残留熱除去系海水系ストレーナの衝突評価に用いる記号を表3-1に示す。

表3-1 衝突評価に用いる記号

記号	単位	定義
D_i	mm	胴の内径
d	m	評価において考慮する飛来物が衝突する衝突断面の等価直径
K	—	鋼板の材質に関する係数
M	kg	評価において考慮する飛来物の質量
P	MPa	最高使用圧力
S	MPa	許容引張応力
T	mm	鋼板の貫通限界厚さ
t	mm	胴の計算上必要な厚さ
v	m/s	評価において考慮する飛来物の飛来速度
η	—	継手効率

(2) 構造強度評価の記号の定義

残留熱除去系海水系ストレーナの構造強度評価に用いる記号を表3-2に示す。

表3-2 構造強度評価に用いる記号(1/2)

記号	単位	定義
A	m^2	受圧面積（風向に垂直な面に投影した面積）
A_b	mm^2	基礎ボルトの軸断面積
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
d	mm	基礎ボルト呼び径
D_o	mm	ストレーナ幅（全幅）
F	MPa	J SME SSB-3121.1(1)により規定される値
F_b	N	基礎ボルトに対する引張力
f_s	MPa	J SME SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容せん断応力
f_t	MPa	J SME SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容引張応力
G	—	ガスト影響係数
g	m/s^2	重力加速度（ $g=9.80665$ ）
H	mm	ストレーナ高さ（全高）
h	mm	ストレーナ重心高さ

表3-2 構造強度評価に用いる記号(2/2)

記号	単位	定義
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
q	N/m^2	設計用速度圧
S_u	MPa	J SME 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 SME 付録材料図表Part5の表にて規定される設計降伏点
W_M	N	設計竜巻による飛来物の衝撃荷重
W_P	N	設計竜巻による気圧差による荷重
W_T	N	設計竜巻による複合荷重
W_{T1}	N	設計竜巻による複合荷重 ($W_{T1} = W_P$)
W_{T2}	N	設計竜巻による複合荷重 ($W_{T2} = W_w + 0.5 \cdot W_P + W_M$)
W_w	N	設計竜巻の風圧力による荷重
ΔP	N/m^2	設計竜巻の気圧低下量
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。

3.2 評価対象部位

残留熱除去系海水系ストレーナの評価対象部位は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

(1) 衝突評価の評価対象部位

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

残留熱除去系海水系ストレーナの全方向からの飛来物を考慮し、貫入により施設の機能が喪失する可能性がある箇所として胴板を選定する。

残留熱除去系海水系ストレーナの衝突評価における評価対象部位を図3-1に示す。

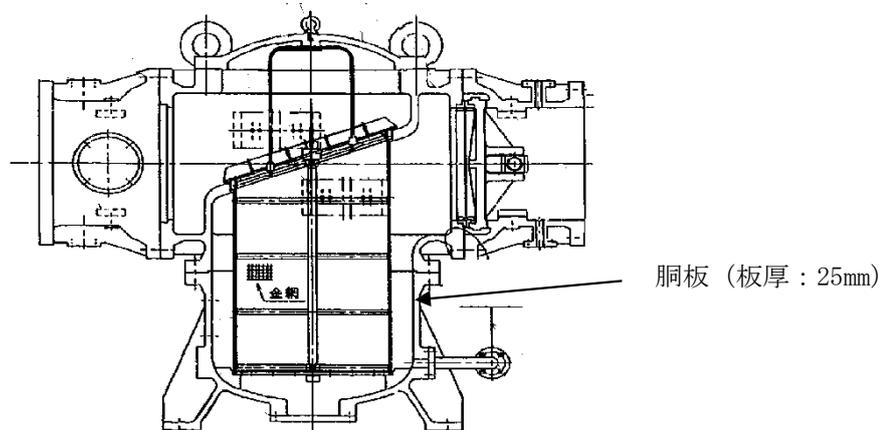


図3-1 残留熱除去系海水系ストレーナの衝突評価の評価対象部位

(2) 構造強度評価の評価対象部位

設計竜巻による荷重は、銅板及び銅板一体の支持脚を介して基礎ボルトに作用する。設計竜巻による荷重により発生する応力は、支持断面積の小さい箇所が厳しくなることから、支持断面積の小さい残留熱除去系海水系ストレーナの基礎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ストレーナの構造強度評価における評価対象部位を、図3-2に示す。

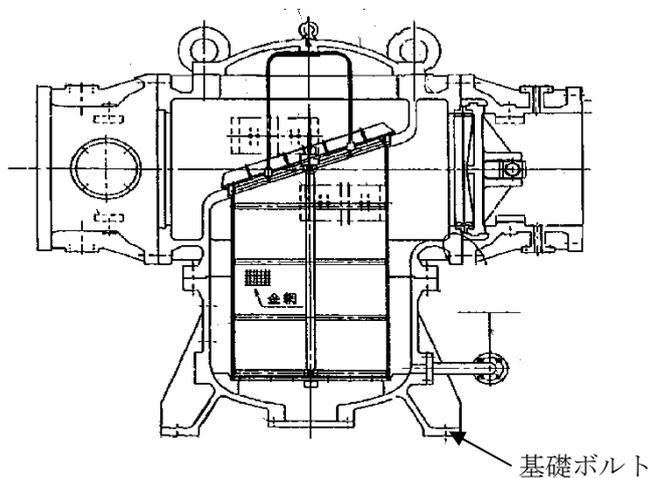


図3-2 残留熱除去系海水系ストレーナの構造強度評価の評価対象部位

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

(1) 衝突評価の荷重及び荷重の組合せ

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

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

砂利の諸元を表3-3、残留熱除去系海水系ストレーナの衝突評価に用いる荷重を表3-4に示す。

表3-3 砂利の諸元

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

表3-4 残留熱除去系海水系ストレーナの衝突評価に用いる荷重

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
屋外の防護対象施設	残留熱除去系海水系 ストレーナ	胴板	飛来物による衝撃荷重

(2) 構造強度評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の設定

構造強度評価に用いる荷重は、以下の荷重を用いる。

(a) 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、持続的に生じる荷重である自重を考慮する。

(b) 設計竜巻による荷重

風圧力による荷重，気圧差による荷重を考慮する。防護ネット及び防護鋼板等による風圧力の低減は無いものとして保守的な評価を行う。また、極小飛来物である砂利による衝撃は瞬間的で、衝突時間が極めて短く、衝突される機器へ伝わる加速度が小さいことから、機器へ作用する荷重は構造強度に影響を与えないので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。

イ. 風圧力による荷重(W_w)

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

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

ロ. 気圧差による荷重(W_p)

気圧差による荷重 W_p はV-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1(3)c.(b) 気圧差による荷重」に示す式に従い、算出する。

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

ハ. 荷重の組合せ

設計竜巻による複合荷重 $W_T(W_{T1}, W_{T2})$ 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(2) 荷重の組合せ」に示す式に従い、算出する。なお、評価対象部位は基礎ボルトであり、気圧差による荷重は発生しないため、複合荷重の選定において、 W_{T2} としては気圧差を考慮するが、 W_{T1} の評価は実施しない。

$$W_{T1} = W_P$$

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

(c) 運転時の状態で作用する荷重

運転時の状態で作用する荷重として、自重に加え内包水の荷重を考慮する。

b. 荷重の組合せ

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

構造強度評価に用いる荷重の組合せを表 3-5 に示す。

表 3-5 荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
屋外の外部事象防護 対象施設	残留熱除去系海水系 ストレーナ	基礎ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重 ③自重

3.4 許容限界

残留熱除去系海水系ストレーナの許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界に従って、「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ及びJ E A G 4 6 0 1に基づく許容応力状態Ⅲ_ASの許容応力の許容荷重を用いる。

(1) 衝突評価の許容限界

衝突評価における許容限界は、評価において考慮する飛来物による衝撃荷重に対し、外殻を構成する部材が、機能喪失に至る可能性のある変形を生じないことを計算により確認するため、評価式により算定した貫通限界厚さが残留熱除去系海水系ストレーナの外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ未満であることを許容限界とする。

残留熱除去系海水系ストレーナにおける計算上必要な厚さは、J S M E PVC-3120 (胴の厚さの規定) に基づき、以下の式より算出する。

$$t = \frac{P \cdot D_i}{2 \cdot S \cdot \eta - 1.2 \cdot P}$$

残留熱除去系海水系ストレーナの外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さを表3-6に示す。

表3-6 残留熱除去系海水系ストレーナの外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ

防護対象施設	外殻を構成する部材の厚さ (mm)	計算上必要な厚さ (mm)	外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ (mm)
残留熱除去系海水系ストレーナ	25	12.9	12.1

(2) 構造強度評価の許容限界

構造強度評価における許容限界は J E A G 4 6 0 1 を準用し、「クラス2,3支持構造物」の許容限界を適用し、許容応力状態 III_AS から算出した許容応力を許容限界とする。J E A G 4 6 0 1 に従い、J S M E 付録材料図表Part5,6の表にて許容応力を計算する際は、評価対象部位の最高使用温度又は周囲環境温度に応じた値をとるものとするが、温度が J S M E 付録材料図表記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算する。ただし、J S M E 付録材料図表Part5,6で比例法を用いる場合の端数処理は、小数点第1位以下を切り捨てた値を用いるものとする。

残留熱除去系海水系ストレーナの構造強度評価における許容限界について、表3-7に示す。

表3-7 残留熱除去系海水系ストレーナの構造強度評価における許容限界

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

3.5 評価方法

(1) 衝突評価の評価方法

残留熱除去系海水系ストレーナの衝突評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 強度評価方法」にて設定している衝突評価が必要な機器の評価式を用いる。

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

る。

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

(2) 構造強度評価の評価方法

残留熱除去系海水系ストレーナの構造強度評価は、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」にて設定している評価式を用いる。

a. 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 3-3 に示す。

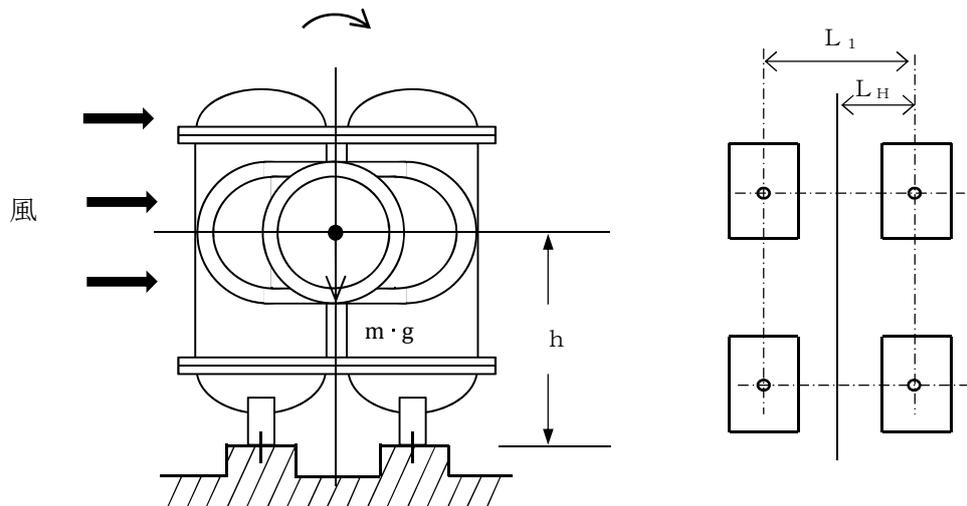


図 3-3 残留熱除去系海水系ストレーナモデル図

b. 計算方法

(a) 引張応力

基礎ボルトに対する引張力は最も厳しい条件として、図 3-3 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

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

(b) 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. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-1～表 4-4 に示す。

表 4-1 許容応力評価に用いる条件

評価対象部位	材料	温度条件 (°C)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	S (MPa)	F (MPa)	$1.5 f_t$ (MPa)	$1.5 f_s$ (MPa)
胴板	SCS14	50*	—	—	108	—	—	—
基礎ボルト	SS400	50*	231	394	—	231	173	133

注記 *：周囲環境温度

表 4-2 評価条件

q (N/m ²)	G (-)	ΔP (N/m ²)	W_M (N)
6.1×10^3	1.0	8.9×10^3	0

表 4-3 評価条件 (胴板)

P (MPa)	D_i (mm)	S (MPa)	η (-)
3.45	790	108	1.0

表 4-4 評価条件 (基礎ボルト)

L_H (mm)	L_1 (mm)	C (-)	D_o (mm)	H (mm)	A (m ²)
515	1030	2.4	2140	1755	3.76

m (kg)	g (m/s ²)	ボルト サイズ	N (-)	n_f (-)	A_b (mm ²)
9850	9.80665	M30	4	2	706.9

h (mm)	W_{T2} (N)
1188	71780

5. 強度評価結果

(1) 衝突評価結果

竜巻発生時の砂利の貫通限界厚さを表 5-1 に示す。

表 5-1 砂利の貫通限界厚さ

飛来物	貫通限界厚さ T (mm)	
	水平方向	鉛直方向
砂利	1.0	1.0

砂利の貫通限界厚さ(1.0mm)と残留熱除去系海水系ストレーナの外壳を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さとの比較を表5-2に示す。

砂利の貫通限界厚さは、残留熱除去系海水系ストレーナの外壳を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ未満である。

表 5-2 防護対象施設の衝突評価結果 (砂利)

防護対象施設	外壳を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ (mm)	貫通限界厚さ T (mm)	結果
残留熱除去系海水系 ストレーナ	12.1	1.0	貫通しない

(2) 構造強度評価結果

構造強度評価結果を表 5-3 に示す。

基礎ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-3 評価結果 (基礎ボルト)

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	25	173
せん断	26	133
組合せ	25	173

V-3-別添 1-1-4 主排気筒の強度計算書

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	4
2.4 適用規格	5
3. 強度評価方法	6
3.1 評価対象部位及び評価方針	6
3.2 荷重及び荷重の組合せ	6
3.3 許容限界	18
3.4 評価方法	18
4. 評価条件	20
5. 評価結果	22
5.1 筒身, 支柱材, 斜材, 水平材, 補助柱材, 補助斜材, 補助水平材	22
5.2 筒身脚部及び鉄塔脚部 (評価方法を含む)	29

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、主排気筒が竜巻時及び竜巻通過後においても、主排気筒の機能の維持を考慮して、主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

主排気筒について、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、主排気筒の「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

主排気筒は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示すとおり、屋外に設置する。

主排気筒の位置図を図2-1に示す。



図 2-1 主排気筒の位置図

2.2 構造概要

主排気筒は、鉄塔支持型の鋼製排気筒である。中央の内径4.5 m、高さ140 mの筒身にかかる水平力を周囲の根開き28 m、高さ104.205 m (EL.112.205 m) の鋼管トラスの4脚鉄塔を補強して支える構造である。補強部分は高さ117.543 m (EL.125.543 m) まで主柱を伸ばすとともに、高さ104.205 m (EL.112.205 m) 以下において8脚増やす。筒身と鉄塔は、図2-2に示す6ヶ所で接続され、制振サポート（以下「オイルダンパ」という。）と弾塑性ダンパで接合した制震構造である。筒身の下端は固定である。

以下に、構造概要を示す。

構造概要

・ 構造形式	鉄塔支持型鋼製
・ 筒身高さ	EL.148.000 m
・ 鉄塔高さ	EL.125.543 m
・ 筒身径	φ 4.500 m (内径)
・ 鉄塔開き	頂部開き 10.387 m 基部開き 28.000 m
・ 支持点位置	EL.125.543 m, EL.112.205 m, EL.95.432 m, EL.75.444 m, EL.52.618 m, EL.26.257 m
・ 接続方法	オイルダンパ (EL.125.543 m, EL.112.205 m) , 弾塑性ダンパ (EL.95.432 m, EL.75.444 m, EL.52.618 m) , 高力ボルト接合 (EL.26.257 m)
・ 基礎	鉄筋コンクリート造

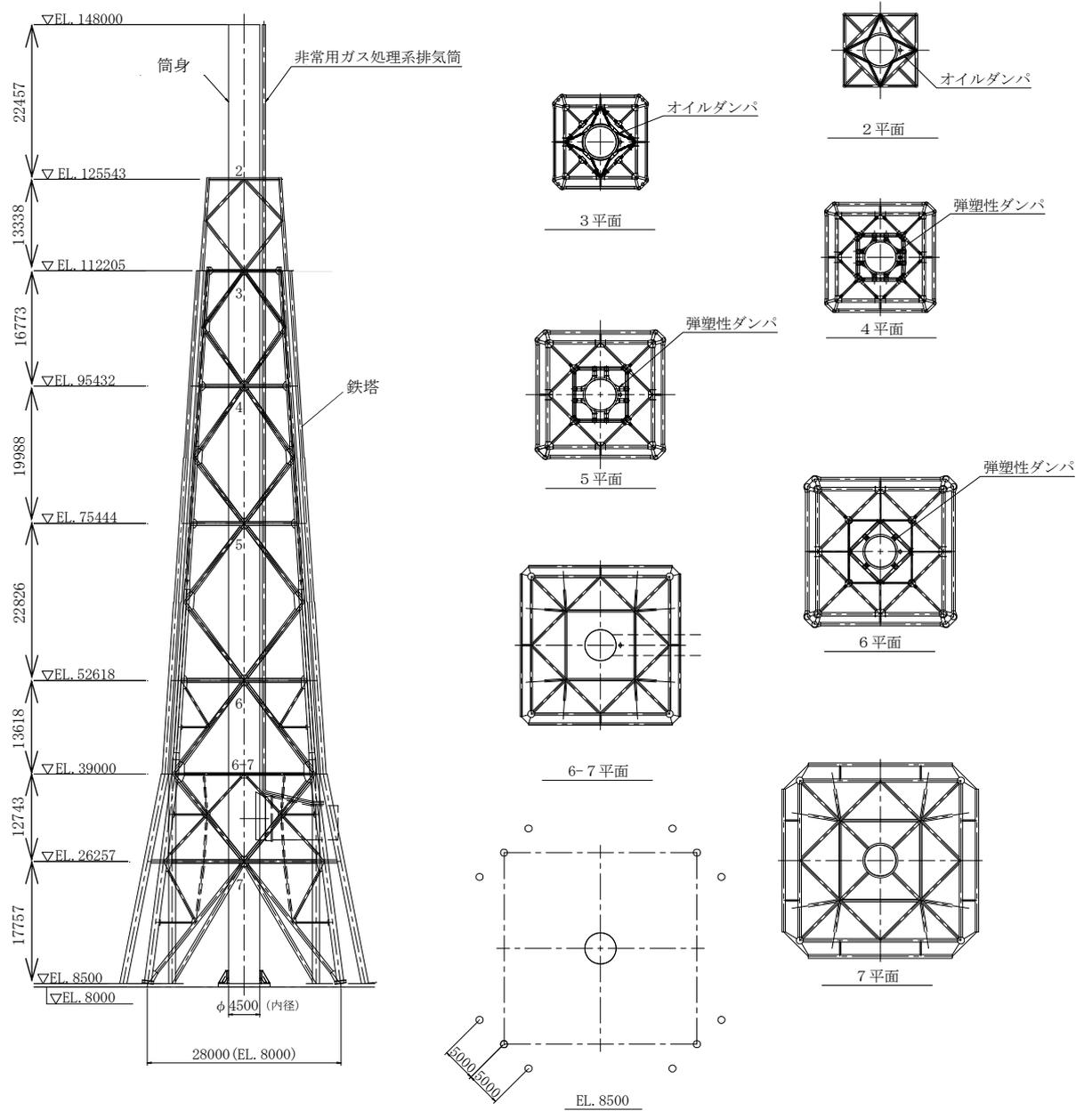


図 2-2 主排気筒概要図 (単位 : mm)

2.3 評価方針

主排気筒の強度評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している、荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、主排気筒の評価対象部位に作用する応力が、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。

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

(1) 強度評価方針

主排気筒の筒身及び鉄塔の強度評価フローを図 2-3 に示す。強度評価においては、主排気筒の構造を踏まえ、設計竜巻による荷重に自重を加えた荷重が主排気筒に作用した場合に、主排気筒の各評価対象部位に作用する荷重、応力等を、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す応力解析による最大部材応力に対して、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示すそれぞれの許容限界以下であることを確認する。

なお、設計竜巻による荷重が耐震評価における荷重に包絡される場合においては、耐震評価の結果により、評価対象部位が許容限界以下であることを確認する。また、設計竜巻による飛来物の衝突は、主排気筒の鉄塔部材を損傷させるものとして考慮し、強度評価においては、飛来物の衝突による衝撃荷重は考慮しないこととする。

主排気筒の筒身及び鉄塔の許容限界は、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である材料強度より算出した弾性限耐力とする。

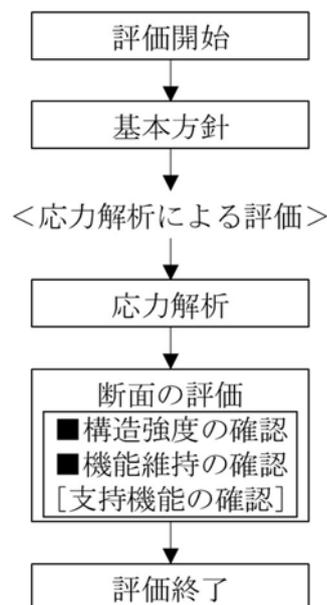


図 2-3 主排気筒の筒身及び鉄塔の強度評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- 建築基準法・同施行令
- 鋼構造設計規準 -許容応力度設計法-（（社）日本建築学会，2005）
- 容器構造設計指針・同解説（（社）日本建築学会，2010）
- 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，1988）
- 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，1999）
- 煙突構造設計施工指針（（一財）日本建築センター，1982）
- 塔状鋼構造設計指針・同解説（（社）日本建築学会，1980）
- 煙突構造設計指針（（社）日本建築学会，2007）
- 日本工業規格（J I S）

3. 強度評価方法

3.1 評価対象部位及び評価方針

主排気筒の応力解析による評価対象部位は、設計竜巻による荷重を受ける主排気筒の筒身、筒身を支持する鉄塔主要部材（支柱材，斜材，水平材，補助柱材，補助斜材，補助水平材，鉄塔脚部）及び脚部とする。

強度評価は、図 3-1 に示す評価フローに基づき、設計荷重に対して、3次元FEMを用いた弾性応力解析を行う。

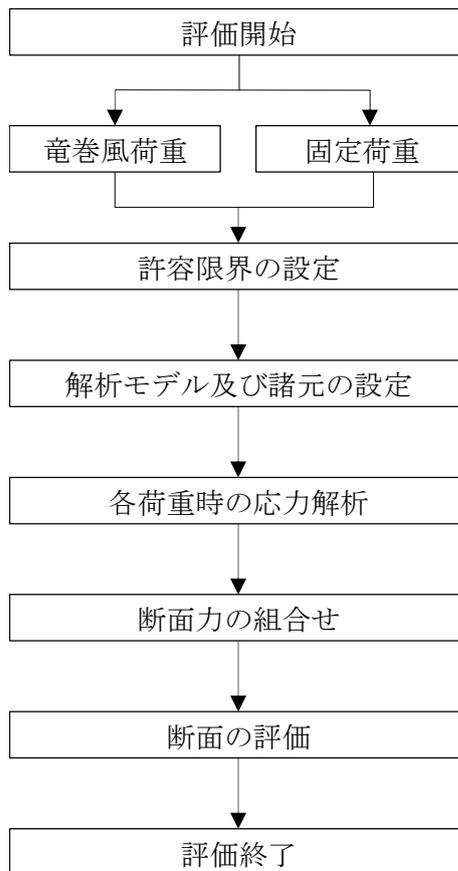


図 3-1 応力解析による評価フロー

3.2 荷重及び荷重の組合せ

荷重及び荷重の組合せは、V-3-別添 1-1 「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

(1) 荷重の設定

a. 固定荷重

固定荷重として、持続的に生じる荷重である筒身及び鉄塔の自重の他に、ダンパ，歩廊等の付属設備の重量を考慮する。

d. 設計竜巻による荷重

屋外の施設であるため風圧力による荷重を考慮する。

(a) 風圧力による荷重 (W_w)

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

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

これより、主排気筒に作用する風荷重は、次式によって算定する。

$$W_{D1} = q_1 \cdot G \cdot C \cdot A$$

ここで

W_{D1} : 地表面からの高さ Z における風荷重 (N)

q_1 : 速度圧 ($q_1 = 6.1 \times 10^{-3}$) (N・mm²)

G : ガスト影響係数 ($G = 1.0$)

C : 風力係数

(筒身部 : $C = 0.9 k_z$ {煙突その他の円筒構造物})

(鉄塔部 {ラチス構造物の風力係数 C })

k_z : $k_z = 1.0$ とする。

A : 地表面からの高さ Z における風向に垂直な面に投影した建築物の面積 (見付面積) (m²)

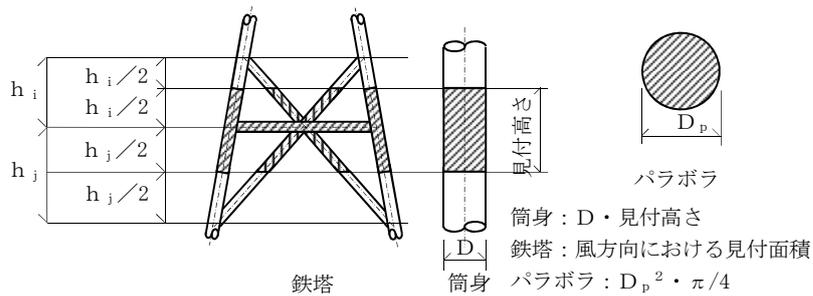


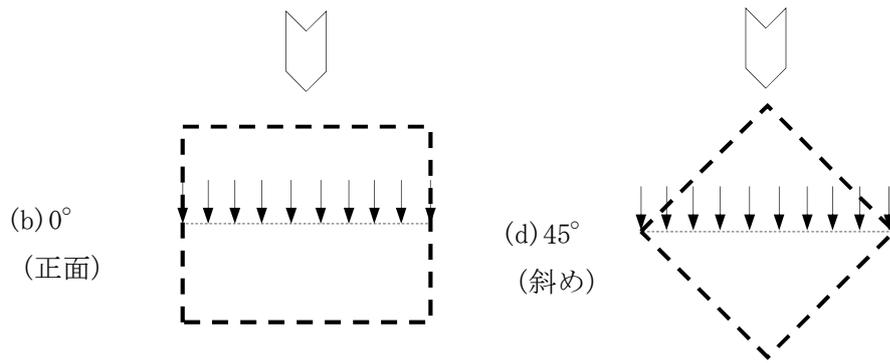
図 3-2 鉄塔及び筒身の見付面積A

表 3-1 ラチス構造物の風力係数C

種類		ϕ	(1)	(2)	(3)
			0.1 以下	0.1 を超え 0.6 未満	0.6
鋼管	(b) 0° (正面)		2.2 k_z	(1) と (3) とに掲げる数値 を直線的に補間した数値	1.5 k_z
	(d) 45° (斜め)		1.7 k_z		1.3 k_z

ここで、 ϕ : 充実率

(風を受ける部分の最外縁に囲まれる面積に対する見付面積の割合)



注1：上図はラチスばり及びラチス柱の断面を表す。

注2：風圧作用面積としては、 $\Sigma \triangleright$ の作用する方向から見たラチス構面の見付面積とする。

図 3-3 ラチス構造物

(b) 竜巻の荷重の組合せ

設計竜巻による複合荷重 W_T (W_{T1} , W_{T2})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(2) 荷重の組合せ」に示す式に従い、算出する。

$$W_{T1} = W_P$$

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

なお、主排気筒は大気中に開かれており、主排気筒内外に気圧差が生じ難い構造であるため、気圧差による荷重は考慮しない($W_P=0$)。

また、「2.3(1) 強度評価方針」に示したとおり、設計飛来物による衝撃荷重 W_M は、飛来物の影響は鉄塔部材を損傷させるものとして考慮していることから考慮しない($W_M=0$)。鉄塔部材の損傷を想定する箇所については、座屈の観点から軸力（圧縮）の影響を考慮し、健全時に負担する軸力（圧縮）が最大であり、損傷による荷重の再配分の影響が最も大きい最下層の主柱の補助柱とする。

図3-4に損傷を想定する箇所を示す。

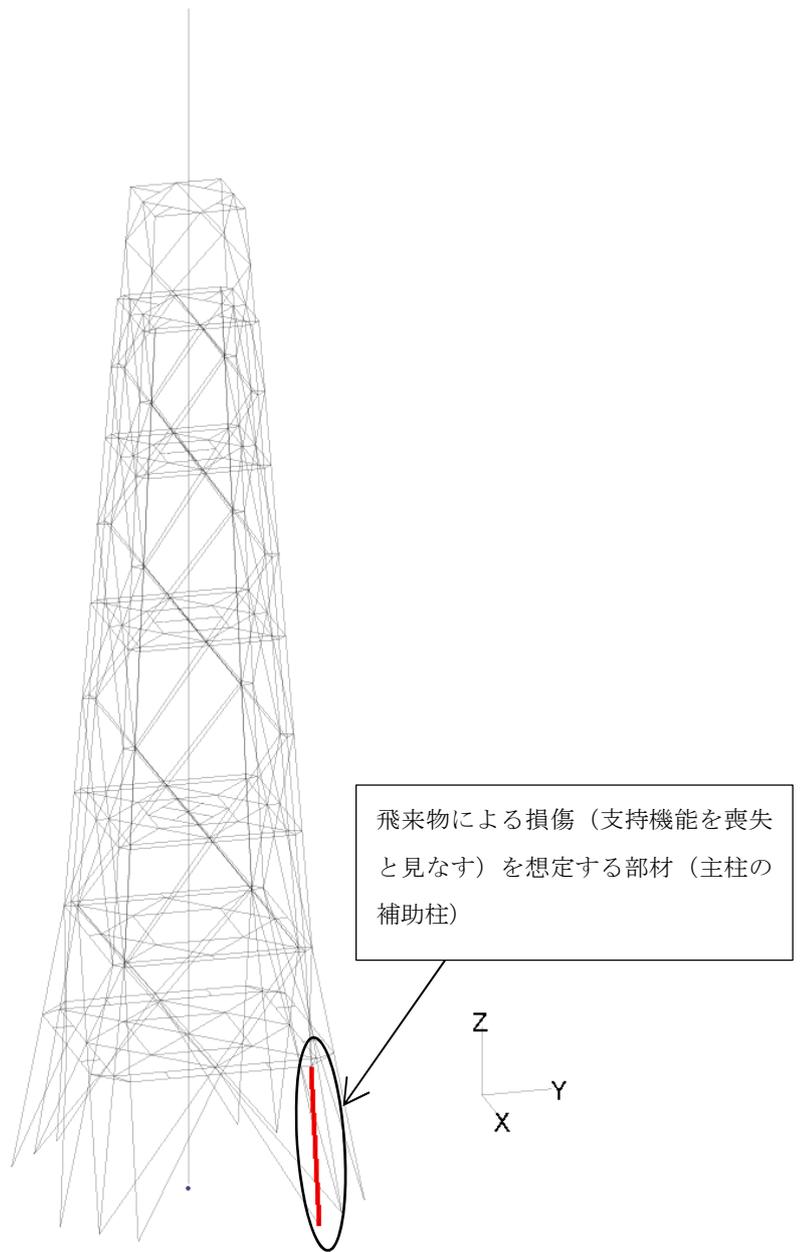


図3-4 飛来物による主排気筒（鉄塔部）の損傷想定箇所

したがって、設計竜巻による複合荷重 W_{T1} は0となり、 W_{T2} を設計竜巻による荷重として正面方向、斜め方向それぞれに対して考慮する。

各荷重を、表 3-2～表 3-6 及び図 3-5～図 3-8 に示す。

表 3-2 鉄塔及び筒身の固定荷重

EL. (m)	固定荷重 (kN)		
	筒身	鉄塔	計
148.000	0	—	0
138.000	141	—	141
125.543	299	0	299
112.205	333	339	672
95.432	379	937	1316
75.444	466	1443	1909
52.618	527	1854	2381
26.257	616	2705	3321
8.500	531	3383	3914

注記：ダンパ、歩廊等の付属設備の重量は、
鉄塔重量に含む。

表 3-3 筒身のせん断力

EL. Z (m)	層間高さ h (m)	せん断力 (kN)	
		竜巻風荷重	
		正面方向	斜め方向
148.000	10.000	0	0
138.000	12.457	124	124
125.543	13.338	335	335
112.205	16.773	639	639
95.432	19.988	992	992
75.444	22.826	1543	1543
52.618	26.361	376	369
26.257	17.757	89	60
8.500	0.000	242	268

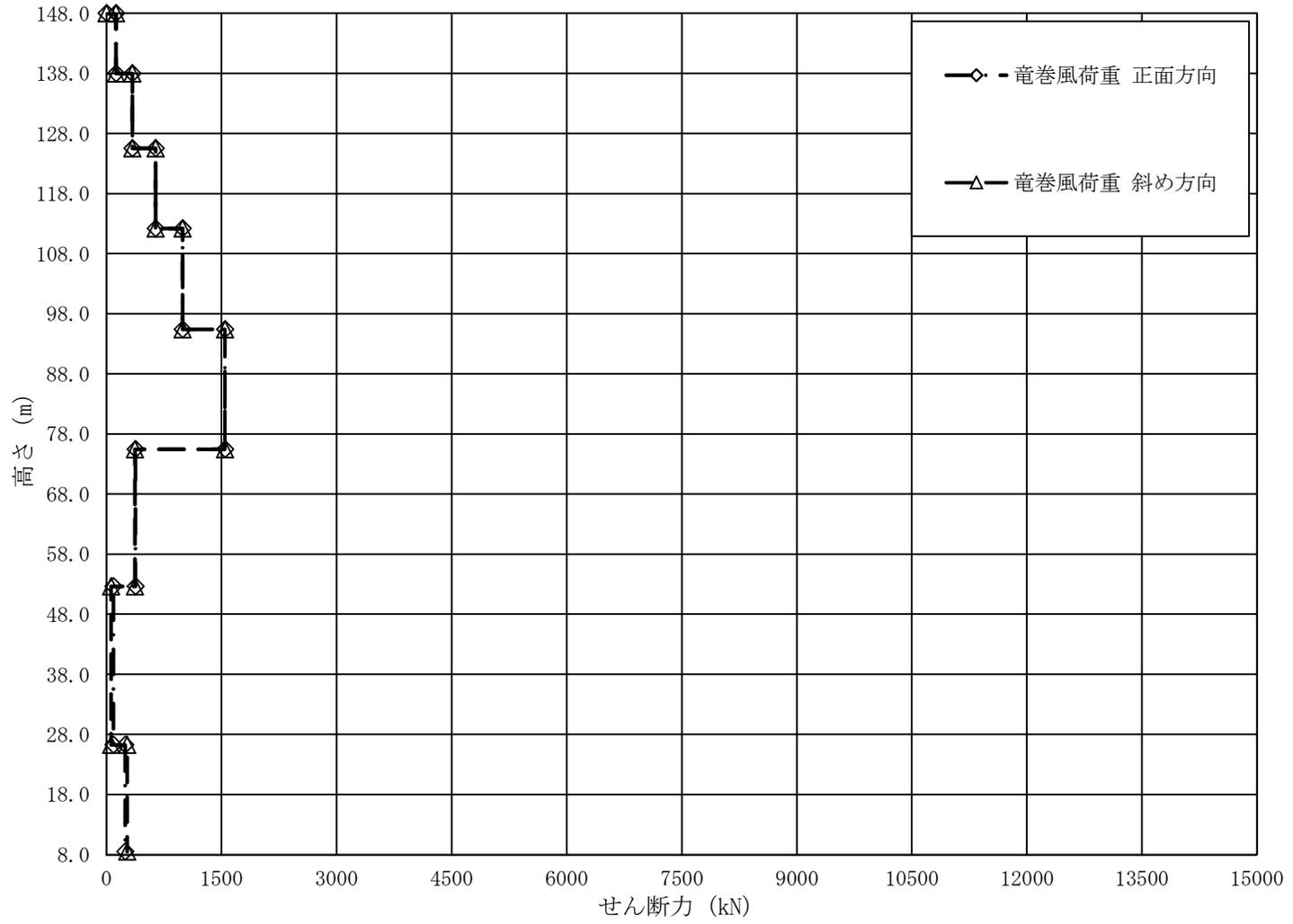


図 3-5 筒身のせん断力

表 3-4 筒身の曲げモーメント

EL. Z (m)	層間高さ h (m)	曲げモーメント (kN・m)	
		竜巻風荷重	
		正面方向	斜め方向
148.000	10.000	0	0
138.000	12.457	1240	1240
125.543	13.338	6259	6259
112.205	16.773	15910	15910
95.432	19.988	34339	34339
75.444	22.826	5871	5868
52.618	26.361	524	679
26.257	17.757	2479	3280
8.500	0.000	11963	13920

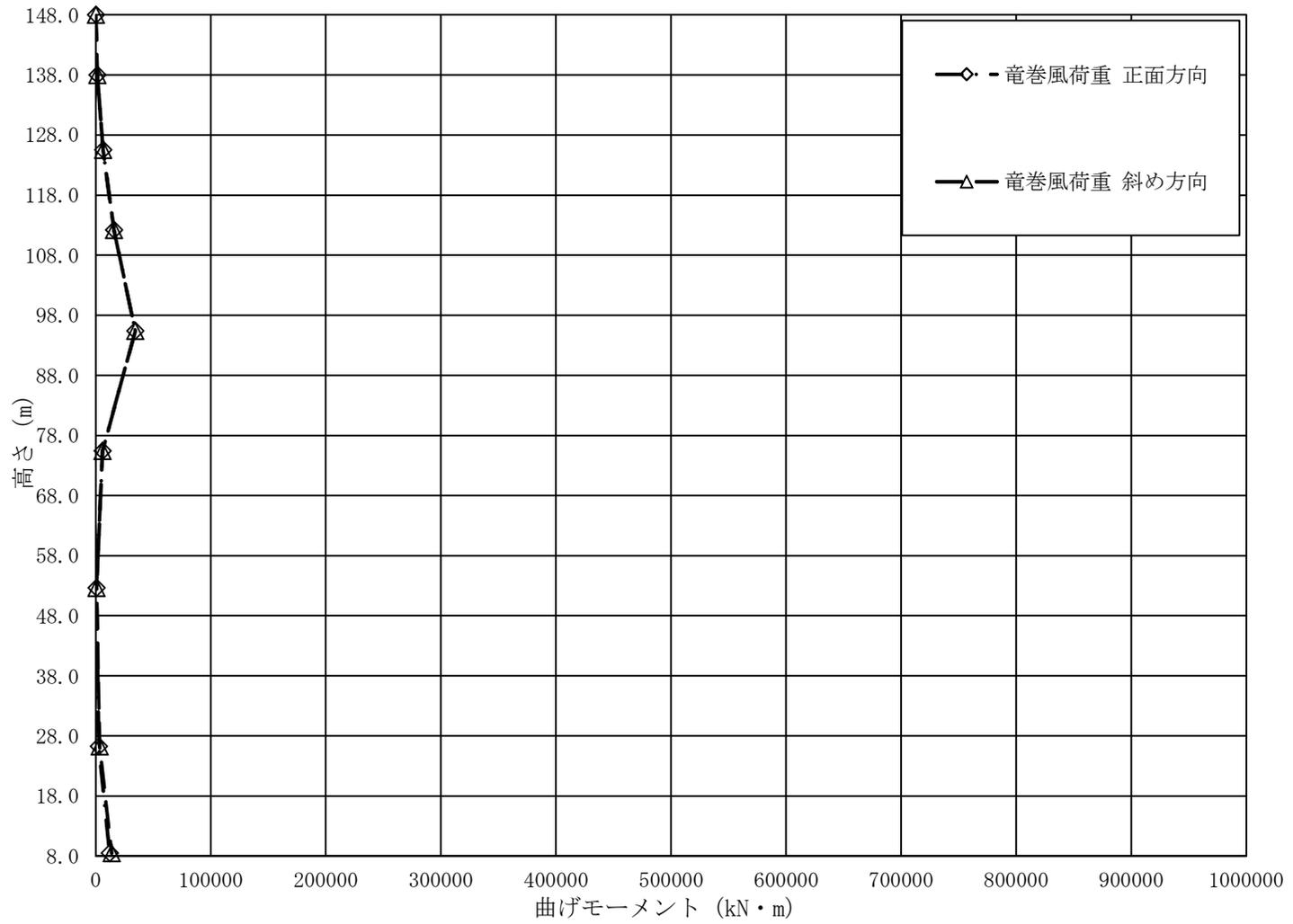


図 3-6 筒身の曲げモーメント

表 3-5 鉄塔のせん断力

EL. Z (m)	層間高さ h (m)	せん断力 (kN)	
		竜巻風荷重	
		正面方向	斜め方向
148.000	10.000	-	-
138.000	12.457	-	-
125.543	13.338	0	0
112.205	16.773	113	139
95.432	19.988	523	670
75.444	22.826	1306	1709
52.618	26.361	3945	4699
26.257	17.757	6201	7455
8.500	0.000	8745	10668

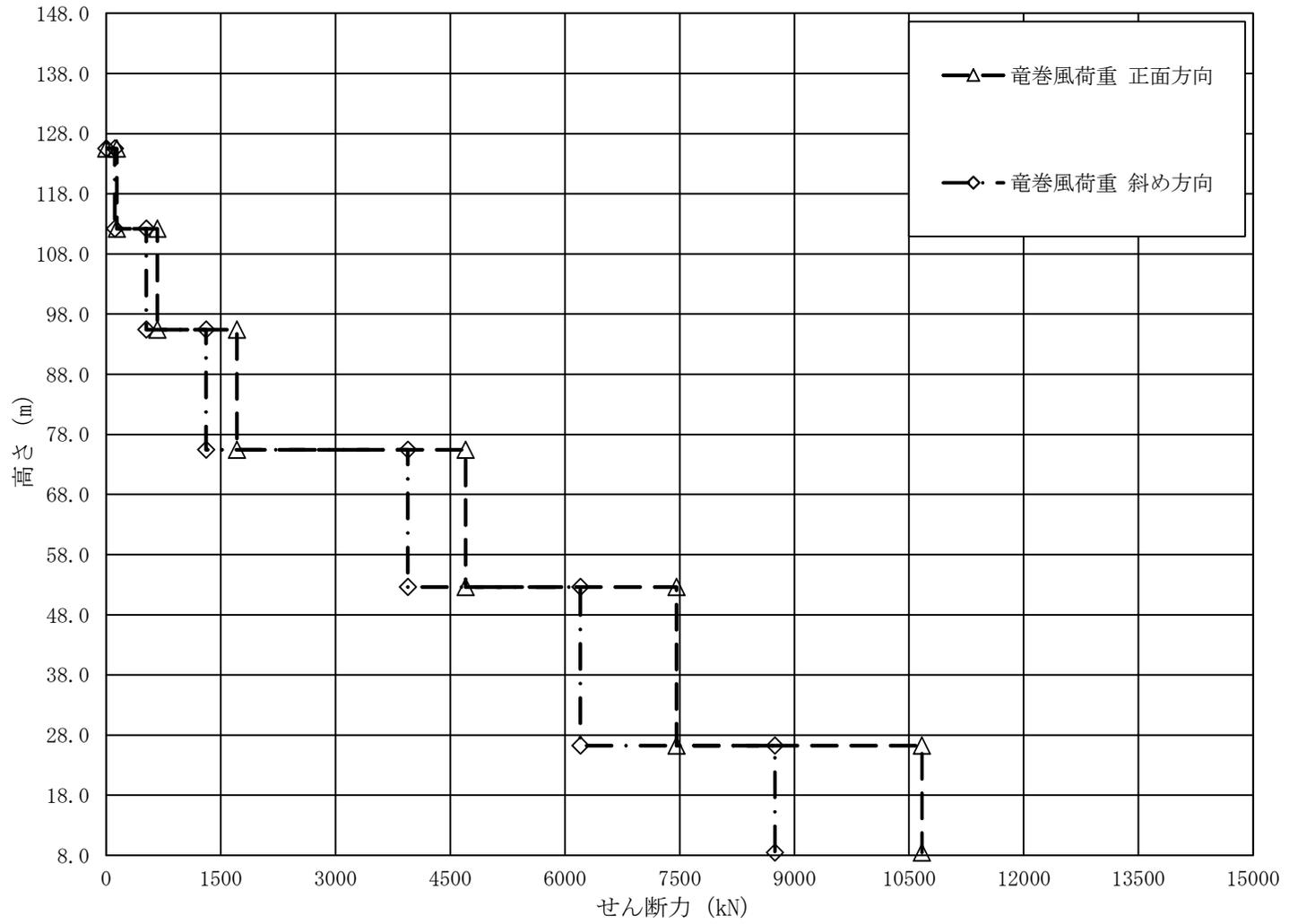


図 3-7 鉄塔のせん断力

表 3-6 鉄塔の曲げモーメント

EL. Z (m)	層間高さ h (m)	曲げモーメント (kN・m)	
		竜巻風荷重	
		正面方向	斜め方向
148.000	10.000	-	-
138.000	12.457	-	-
125.543	13.338	0	0
112.205	16.773	2533	3159
95.432	19.988	13833	17900
75.444	22.826	105517	119134
52.618	26.361	219285	252231
26.257	17.757	398503	467019
8.500	0.000	548605	650574

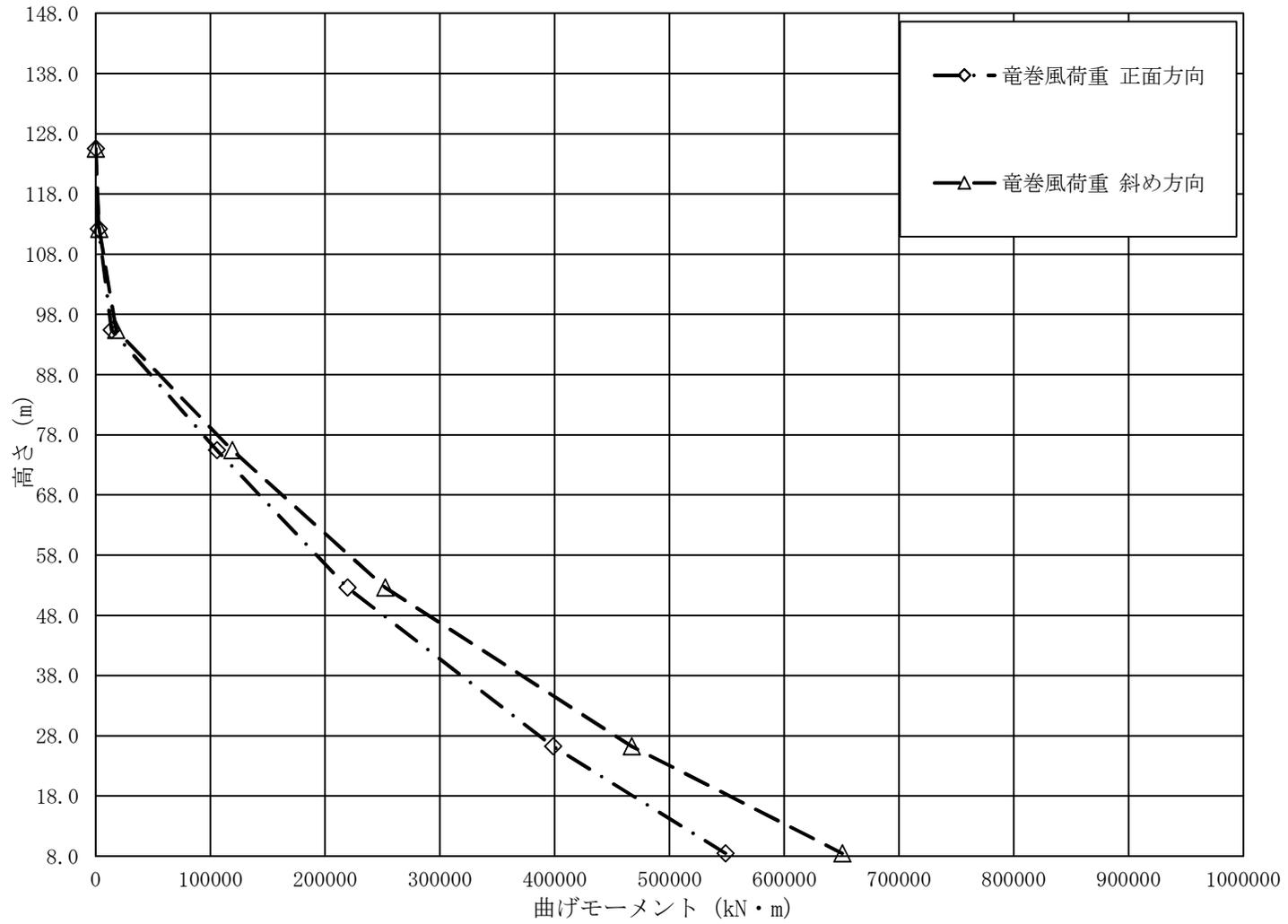


図 3-8 鉄塔の曲げモーメント

(2) 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せは、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に示している荷重及び荷重の組合せを踏まえて、主排気筒の評価対象部位ごとに設定する。

強度評価の荷重の組合せを、表 3-7 に示す。

表 3-7 荷重の組合せ

組合せ荷重 ケース	荷重状態	荷重の組合せ	水平荷重方向
ケース 1	竜巻時	①自重 ②風圧力による荷重	正面
ケース 2			斜め

3.3 許容限界

主排気筒の許容限界は、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界に従って、「3.1 評価対象部位及び評価方針」にて設定した評価対象部位ごとに材料強度より算出した弾性限耐力を用いる。

強度評価の許容限界（準拠規格・基準等）を、表 3-8 に示す。

表 3-8 許容限界（準拠規格・基準等）

評価対象部位	準拠基準等	備考
筒身	容器構造設計指針 短期	F=1.1F と読み替える (建告第 2464 号に規定 された J I S 規定品の み)
鉄塔	告示 材料強度	

3.4 評価方法

(1) 応力評価方法

主排気筒について、3次元 FEM を用いた弾性応力解析を実施する。

(2) 断面の評価方法

主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。**解析には、解析コード「NASTRAN Ver. 2008.0.0」を用いる。**

a. 筒身に対する断面の評価方法

(a) 応力検定

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 2 mm（外側：1 mm，内側：1 mm）を控除した値を用いる。

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

かつ

$$\frac{\tau}{s f_{c r}} \leq 1$$

ここで

σ_c : 平均圧縮応力度 ($\sigma_c = N \cdot 10^3 / A$) (N/mm²)

N : 圧縮力 (kN)

A : 円筒の断面積 (mm²)

$c \sigma_b$: 圧縮側曲げ応力度 ($c \sigma_b = M \cdot 10^6 / Z_c$) (N/mm²)

M : 曲げモーメント (kN・m)

Z_c : 断面係数 (mm³)

τ : せん断応力度 ($\tau = Q \cdot 10^3 / A_s$) (N/mm²)

Q : せん断力 (kN)

A_s : 円筒のせん断断面積 (=A/2) (mm²)

$c f_{c r}$: 圧縮材料強度 (N/mm²)

$b f_{c r}$: 曲げ材料強度 (N/mm²)

$s f_{c r}$: せん断材料強度 (N/mm²)

($c f_{c r}$, $b f_{c r}$, $s f_{c r}$ は次項による。)

(b) 材料強度

材料強度は、「平 12 建告第 2464 号」に準拠し、材料強度 F 値を 1.1 倍した値を用いて許容応力度を算出し、部材に発生する応力が許容応力度を超えないことを確認する。

b. 鉄塔主要部材に対する断面の評価方法

(a) 応力検定

応力に対する断面算定は、「建築基準法施行令第 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 1 mm (外側のみ 1 mm) を控除した値を用いる。

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

ここで

σ_c : 平均圧縮応力度 ($\sigma_c = N \cdot 10^3 / A$) (N/mm²)

σ_b : 曲げ応力度 ($\sigma_b = M \cdot 10^6 / Z_t$) (N/mm²)

f_c : 圧縮材料強度 (N/mm²)

f_b : 曲げ材料強度 (N/mm²)

N : 圧縮力 (kN)

A : 断面積 (mm²)

M : 曲げモーメント (kN・m)
 Z_t : 断面係数 (mm³)
 (f_c , f_bは次項による。)

(b) 材料強度

材料強度は、「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。

4. 評価条件

(1) 強度評価の評価条件

「3. 強度評価方法に用いる評価条件のうち、筒身を表 4-1 に、鉄塔主要部材を表 4-2 に示す。

表 4-1 評価条件 (筒身)

使用部材 φ × t (mm)	材質	腐食代 (mm)	最高使用 温度 (°C)	重力加速度 g (m/s ²)	空気密度 ρ (kg/m ³)
4532.0 × 16.0	SS400	内側 1.0 外側 1.0	35	9.80665	1.22

最大風速 V (m/s)	ガスト 影響係数 G (-)	風力係数 C (-)	k _z (-)	構造物の基準 高さ H (m)	設計用 速度圧 q (N/m ²)
100	1.0	0.9	1.0	140.000	6,100

表 4-2 評価条件 (鉄塔主要部材) (1/2)

分類	使用部材 φ × t (mm)	材質	腐食代 (mm)
主柱材	406.4 × 6.4	S T K 4 0 0	外側 1.0
	406.4 × 12.7		
	558.8 × 12.7		
	812.8 × 12.7		
	1016.0 × 12.7		

表 4-2 評価条件 (鉄塔主要部材) (2/2)

分類	使用部材 $\phi \times t$ (mm)	材質	腐食代 (mm)
斜材	355.6×6.4	S T K 4 0 0	外側 1.0
	457.2×6.4		
	508.0×6.4		
水平材	355.6×6.4	S T K 4 0 0	外側 1.0
	457.2×6.4		
	508.0×6.4		
補助主柱材	406.4×19.0	S T K 4 0 0	外側 1.0
	508.0×19.0	5 9 0 材	
	609.6×19.0		
	812.8×19.0		
	1016.0×19.0		
補助斜材	355.6×12.7	S T K 4 0 0	外側 1.0
	457.2×12.7		
	508.0×12.0	S T K 4 9 0	
	558.8×19.0	5 9 0 材	
補助水平材	355.6×6.4	S T K 4 0 0	外側 1.0
	457.2×6.4		
	508.0×6.4		

最高使用 温度 (°C)	重力加速度 g (m/s^2)	空気密度 ρ (kg/m^3)	最大風速 V (m/s)	ガスト 影響係数 G_f (-)	k_z (-)
35	9.80665	1.22	100	1.0	1.0

構造物の基準 高さ H (m)	設計用 速度圧 q (N/m^2)
140.000	6100

5. 評価結果

5.1 筒身，支柱材，斜材，水平材，補助柱材，補助斜材，補助水平材

「3.4(2) 断面の評価方法」に基づいた断面の評価結果を以下に示す。

(1) 筒身に対する断面評価結果

筒身に対する断面評価のうち，軸力+曲げに対する評価結果を表 5-1 に，せん断に対する評価結果を表 5-2 に示す。

表 5-1 筒身の断面評価 (軸力+曲げ)

EL. Z (m)	使用部材 $\Phi \times t$ (mm)	材質 (-)	設計用断面力		断面性能		材料強度		応力度		判定 $\frac{\sigma_c}{c f_{cr}} + \frac{c \sigma_b}{b f_{cr}}$
			軸力 N (kN)	曲げ M (kN・m)	断面積 A (mm ²)	断面係数 Z _c (mm ³)	圧縮 c f _{cr} (N/mm ²)	曲げ b f _{cr} (N/mm ²)	圧縮 $\sigma_c = N/A_c$ (N/mm ²)	曲げ $\sigma_b = M/Z_c$ (N/mm ²)	
148.000	Φ4532.0×16.0	SS400	141	1240	198600	223000000	192.2	207.2	0.8	5.6	0.04 ≤ 1.00
138.000	Φ4532.0×16.0	SS400	440	6259	198600	223000000	192.2	207.2	2.3	28.1	0.15 ≤ 1.00
125.543	Φ4532.0×16.0	SS400	773	15910	198600	223000000	192.2	207.2	3.9	71.4	0.37 ≤ 1.00
112.205	Φ4532.0×16.0	SS400	1152	34339	198600	223000000	192.2	207.2	5.9	154.0	0.78 ≤ 1.00
95.432	Φ4532.0×16.0	SS400	1618	34339	198600	223000000	192.2	207.2	8.2	154.0	0.79 ≤ 1.00
75.444	Φ4532.0×16.0	SS400	2145	5877	198600	223000000	192.2	207.2	10.9	26.4	0.19 ≤ 1.00
52.618	Φ4532.0×16.0	SS400	2761	3416	198600	223000000	192.2	207.2	14.0	15.4	0.15 ≤ 1.00
26.257	Φ4532.0×16.0	SS400	3292	14022	198600	223000000	192.2	207.2	16.6	62.9	0.39 ≤ 1.00

注記： 腐食代 2 mm (内側：1 mm, 外側：1 mm) を控除した断面により算定した断面性能により評価。

表 5-2 筒身の断面評価 (せん断)

EL. Z (m)	使用部材 $\Phi \times t$ (mm)	材質 (-)	設計用断面力		断面性能		材料強度		応力度		判定 $\frac{\tau}{s f_{cr}}$
			せん断 Q (kN)	曲げ M (kN・m)	せん断断面積 A_s (mm ²)	断面係数 Z_c (mm ³)	せん断 $s f_{cr}$ (N/mm ²)	曲げ $b f_{cr}$ (N/mm ²)	せん断 $\tau = Q/A_s$ (N/mm ²)	曲げ $c \sigma_b = M/Z_c$ (N/mm ²)	
148.000	$\Phi 4532.0 \times 16.0$	SS400	124	-	99300	-	69.6	-	1.3	-	$0.02 \leq 1.00$
138.000	$\Phi 4532.0 \times 16.0$	SS400	490	-	99300	-	60.9	-	5.0	-	$0.09 \leq 1.00$
125.543	$\Phi 4532.0 \times 16.0$	SS400	805	-	99300	-	58.5	-	8.2	-	$0.15 \leq 1.00$
112.205	$\Phi 4532.0 \times 16.0$	SS400	1201	-	99300	-	52.2	-	12.1	-	$0.24 \leq 1.00$
95.432	$\Phi 4532.0 \times 16.0$	SS400	1544	-	99300	-	47.8	-	15.6	-	$0.33 \leq 1.00$
75.444	$\Phi 4532.0 \times 16.0$	SS400	376	-	99300	-	44.7	-	3.8	-	$0.09 \leq 1.00$
52.618	$\Phi 4532.0 \times 16.0$	SS400	273	-	99300	-	41.6	-	2.8	-	$0.07 \leq 1.00$
26.257	$\Phi 4532.0 \times 16.0$	SS400	608	-	99300	-	50.7	-	6.2	-	$0.13 \leq 1.00$

注記： 腐食代 2 mm (内側：1 mm, 外側：1 mm) を控除した断面により算定した断面性能により評価。

(2) 鉄塔主要部材に対する断面評価結果

鉄塔主要部材に対する断面評価のうち、主柱材，斜材，水平材，補助柱材，補助斜材及び補助水平材に対する評価結果を表 5-3～表 5-8 に示す。

表 5-3 主柱の断面評価

EL. Z (m)	使用部材 Φ×t (mm)	材質 (-)	設計用断面力		断面性能			座屈長 L _k (mm)	細長比 λ	材料強度		応力度		判定 $\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b}$
			軸力 N (kN)	曲げ M (kN・m)	断面積 A (mm ²)	断面係数 Z _t (mm ³)	回転半径 i (mm)			圧縮 f _c (N/mm ²)	曲げ f _b (N/mm ²)	圧縮 σ _c =N/A (N/mm ²)	曲げ σ _b =M/Z _t (N/mm ²)	
112.205	Φ406.4×6.4	STK400	120	18	6769	668000	141.2	8240.1	58.4	231.4	258.5	17.8	27.0	0.19 ≤ 1.00
95.432	Φ406.4×12.7	STK400	309	69	14430	1370000	138.8	10477.2	75.5	213.3	258.5	21.5	50.4	0.30 ≤ 1.00
75.444	Φ558.8×12.7	STK400	1703	89	20040	2680000	192.8	9597.2	49.8	238.8	258.5	85.0	33.3	0.49 ≤ 1.00
52.618	Φ812.8×12.7	STK400	3147	189	29370	5770000	282.3	6838.1	24.2	253.8	258.5	107.2	32.8	0.55 ≤ 1.00
26.257	Φ1016.0×12.7	STK400	5849	298	36840	9130000	354.5	9025.3	25.5	253.3	258.5	158.8	32.7	0.76 ≤ 1.00

注記： 腐食代（外側：1 mm）を控除した断面により算定した断面性能により評価。

表 5-4 斜材の断面評価

EL. Z (m)	使用部材 Φ×t (mm)	材質 (-)	設計用断面力		断面性能			座屈長 L _k (mm)	細長比 λ	材料強度		応力度		判定 $\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b}$
			軸力 N (kN)	曲げ M (kN・m)	断面積 A (mm ²)	断面係数 Z _t (mm ³)	回転半径 i (mm)			圧縮 f _c (N/mm ²)	曲げ f _b (N/mm ²)	圧縮 σ _c =N/A (N/mm ²)	曲げ σ _b =M/Z _t (N/mm ²)	
112.205	Φ355.6×6.4	STK400	44	—	5907	—	123.1	10023.4	81.4	205.9	—	7.5	—	0.04 ≤ 1.00
95.432	Φ457.2×6.4	STK400	794	—	7631	—	159.0	12570.6	79.1	208.8	—	104.1	—	0.50 ≤ 1.00
75.444	Φ508.0×6.4	STK400	590	—	8492	—	177.0	14191.3	80.2	207.5	—	69.5	—	0.34 ≤ 1.00
52.618	Φ508.0×6.4	STK400	796	—	8492	—	177.0	8459.3	47.8	240.3	—	93.8	—	0.40 ≤ 1.00
26.257	Φ508.0×6.4	STK400	1087	—	8492	—	177.0	11344.3	64.1	225.9	—	128.1	—	0.57 ≤ 1.00

注記： 腐食代（外側：1 mm）を控除した断面により算定した断面性能により評価。

表 5-5 水平材の断面評価

EL. Z (m)	使用部材 Φ×t (mm)	材質 (-)	設計用断面力		断面性能			座屈長 L _k (mm)	細長比 λ	材料強度		応力度		判定 $\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b}$
			軸力 N (kN)	曲げ M (kN・m)	断面積 A (mm ²)	断面係数 Z _t (mm ³)	回転半径 i (mm)			圧縮 f _c (N/mm ²)	曲げ f _b (N/mm ²)	圧縮 σ _c =N/A (N/mm ²)	曲げ σ _b =M/Z _t (N/mm ²)	
112.205	Φ355.6×6.4	STK400	73	3	5907	506000	123.1	5193.6	42.2	244.3	258.5	12.4	6.0	0.08 ≤ 1.00
95.432	Φ457.2×6.4	STK400	112	10	7631	848000	159.0	6295.0	39.6	246.0	258.5	14.7	11.8	0.11 ≤ 1.00
75.444	Φ508.0×6.4	STK400	182	4	8492	1050000	177.0	7607.2	43.0	243.8	258.5	21.5	3.9	0.11 ≤ 1.00
52.618	Φ508.0×6.4	STK400	244	5	8492	1050000	177.0	9105.9	51.4	237.5	258.5	28.8	4.8	0.14 ≤ 1.00
26.257	Φ508.0×6.4	STK400	399	4	8492	1050000	177.0	11644.2	65.8	224.1	258.5	47.0	3.9	0.23 ≤ 1.00

注記： 腐食代（外側：1 mm）を控除した断面により算定した断面性能により評価。

表 5-6 補助支柱材の断面評価

EL. Z (m)	使用部材 Φ×t (mm)	材質 (-)	設計用断面力		断面性能			座屈長 L _k (mm)	細長比 λ	材料強度		応力度		判定 $\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b}$
			軸力 N (kN)	曲げ M (kN・m)	断面積 A (mm ²)	断面係数 Z _t (mm ³)	回転半径 i (mm)			圧縮 f _c (N/mm ²)	曲げ f _b (N/mm ²)	圧縮 σ _c =N/A (N/mm ²)	曲げ σ _b =M/Z _t (N/mm ²)	
125.543	Φ406.4×19.0	STK400	85	8	21850	2020000	136.8	6573.9	48.1	240.1	258.5	3.9	4.0	0.04 ≤ 1.00
112.205	Φ508.0×19.0	590材	217	71	27600	3250000	172.7	8240.1	47.7	367.0	413.0	7.9	21.9	0.08 ≤ 1.00
95.432	Φ508.0×19.0	590材	591	161	27600	3250000	172.7	10477.2	60.7	338.5	413.0	21.5	49.6	0.19 ≤ 1.00
75.444	Φ609.6×19.0	590材	2331	80	33340	4770000	208.5	11493.1	55.1	351.6	413.0	70.0	16.8	0.24 ≤ 1.00
52.618	Φ812.8×19.0	590材	4491	281	44830	8680000	280.2	13676.2	48.8	364.8	413.0	100.2	32.4	0.36 ≤ 1.00
26.257	Φ1016.0×19.0	590材	6401	401	56320	13800000	352.3	12988.6	36.9	385.4	413.0	113.7	29.1	0.37 ≤ 1.00

注記： 腐食代（外側：1 mm）を控除した断面により算定した断面性能により評価。

表 5-7 補助斜材の断面評価

EL. Z (m)	使用部材 Φ×t (mm)	材質 (-)	設計用断面力		断面性能			座屈長 L _k (mm)	細長比 λ	材料強度		応力度		判定 $\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b}$
			軸力 N (kN)	曲げ M (kN・m)	断面積 A (mm ²)	断面係数 Z _t (mm ³)	回転半径 i (mm)			圧縮 f _c (N/mm ²)	曲げ f _b (N/mm ²)	圧縮 σ _c =N/A (N/mm ²)	曲げ σ _b =M/Z _t (N/mm ²)	
125.543	Φ355.6×12.7	STK400	48	—	12570	—	121.0	8652.7	71.5	217.9	—	3.9	—	0.02 ≤ 1.00
112.205	Φ355.6×12.7	STK400	166	—	12570	—	121.0	10250.4	84.7	201.6	—	13.3	—	0.07 ≤ 1.00
95.432	Φ457.2×12.7	STK400	1052	—	16300	—	156.8	12790.3	81.6	205.7	—	64.6	—	0.32 ≤ 1.00
75.444	Φ508.0×12.0	STK490	1050	—	17110	—	175.0	14423.4	82.4	254.5	—	61.4	—	0.25 ≤ 1.00
52.618	Φ508.0×12.0	STK490	1303	—	17110	—	175.0	17150.9	98.0	210.5	—	76.2	—	0.37 ≤ 1.00
26.257	Φ558.8×19.0	590材	2370	—	30470	—	190.9	20875.2	109.4	169.2	—	77.8	—	0.46 ≤ 1.00

注記： 腐食代（外側：1 mm）を控除した断面により算定した断面性能により評価。

表 5-8 補助水平材の断面評価

EL. Z (m)	使用部材 Φ×t (mm)	材質 (-)	設計用断面力		断面性能			座屈長 L _k (mm)	細長比 λ	材料強度		応力度		判定 $\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b}$
			軸力 N (kN)	曲げ M (kN・m)	断面積 A (mm ²)	断面係数 Z _t (mm ³)	回転半径 i (mm)			圧縮 f _c (N/mm ²)	曲げ f _b (N/mm ²)	圧縮 σ _c =N/A (N/mm ²)	曲げ σ _b =M/Z _t (N/mm ²)	
125.543	Φ355.6×6.4	STK400	30	1	5907	506000	123.1	5193.6	42.2	244.3	258.5	5.1	2.0	0.03 ≤ 1.00
112.205	Φ355.6×6.4	STK400	100	1	5907	506000	123.1	5581.8	45.3	242.2	258.5	17.0	2.0	0.08 ≤ 1.00
95.432	Φ457.2×6.4	STK400	698	7	7631	848000	159.0	6683.2	42.0	244.5	258.5	91.5	8.3	0.41 ≤ 1.00
75.444	Φ508.0×6.4	STK400	146	3	8492	1050000	177.0	7995.4	45.2	242.3	258.5	17.2	2.9	0.09 ≤ 1.00
52.618	Φ508.0×6.4	STK400	371	3	8492	1050000	177.0	9494.1	53.6	235.7	258.5	43.7	2.9	0.20 ≤ 1.00
26.257	Φ508.0×6.4	STK400	398	12	8492	1050000	177.0	10393.1	58.7	231.1	258.5	46.9	11.5	0.25 ≤ 1.00

注記： 腐食代（外側：1 mm）を控除した断面により算定した断面性能により評価。

5.2 筒身脚部及び鉄塔脚部（評価方法を含む）

(1) 筒身脚部の評価

a. 設計荷重

設計荷重は、以下に示す荷重により、筒身脚部の検討を行う。なお、筒身脚部は補強を実施するため、自重は既設部で負担するものとし、補強部のみで設計荷重に対して検討を行う。

筒身脚部の形状図を、図 5-1 及び図 5-2 に示す。

圧縮力	$N_c = 0 \text{ kN}$
	荷重ケース：竜巻荷重 斜め方向載荷時
引抜き力	$N_t = 0 \text{ kN}$
	荷重ケース：竜巻荷重 斜め方向載荷時
曲げモーメント	$M = 13920 \text{ kN}\cdot\text{m}$
	荷重ケース：竜巻荷重 斜め方向載荷時
水平力	$H = 822 \text{ kN}$
	荷重ケース：竜巻荷重 斜め方向載荷時

筒身脚部に作用する反力に対して、V-2-2-15-1「主排気筒の耐震性についての計算書」の S_s 設計用荷重による反力との比較を表 5-9 に示す。

表 5-9 に示すように、水平力は S_s 設計用荷重による反力の方が大きく、 S_s 設計用荷重に包絡されることを確認できるため、以後の検討は省略する。また鉛直荷重と曲げモーメントによる鉛直方向荷重の合計を比較し、 S_s 設計用荷重の方が大きい場合は、水平力同様検討を省略する。

表 5-9 筒身脚部反力比較表

	竜巻荷重時	S_s 設計用荷重時
圧縮力 (kN)	0	17000
引抜き力 (kN)	0	17000
曲げモーメント (kN・m)	13920	5812
水平力 (kN)	822	1089

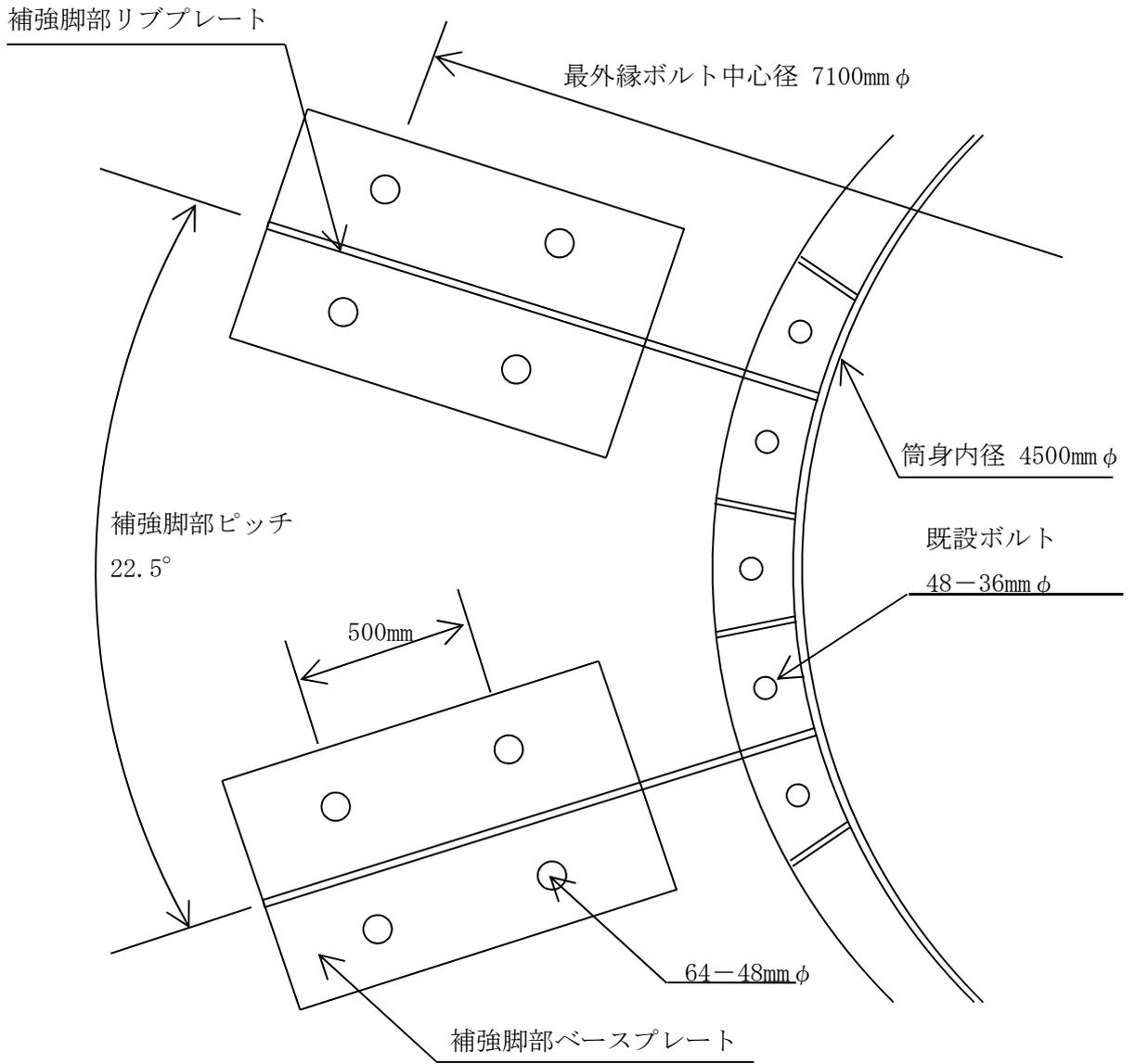


図 5-1 筒身脚部概略図

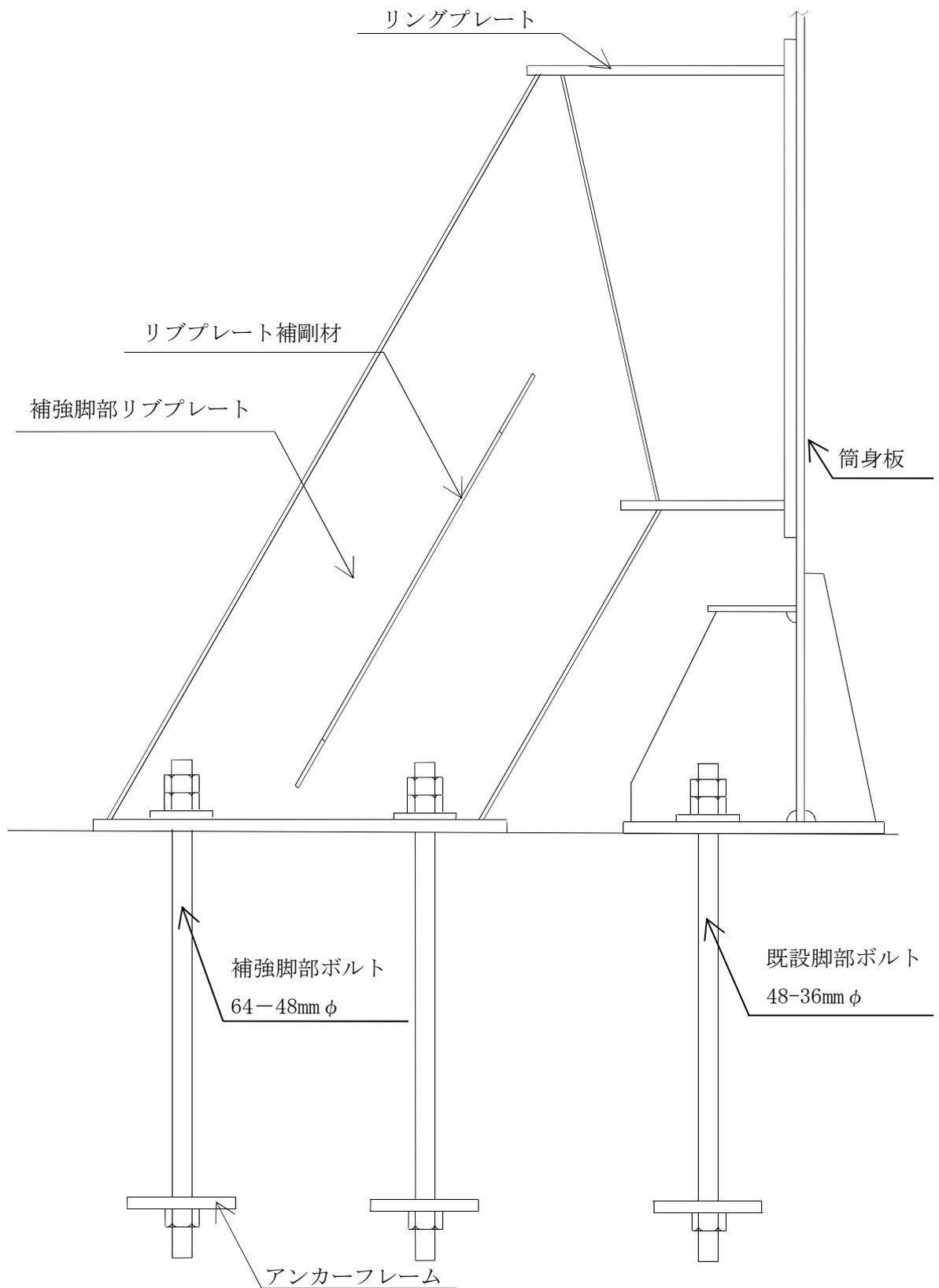


図 5-2 筒身脚部概略図

b. 引抜き力の比較

竜巻時にアンカーボルトが受ける引抜き力と S_s設計用地震時にアンカーボルトが受ける引抜き力を比較することで、引張力と圧縮力が S_s設計用地震荷重に包絡されていることを確認する。

- ・ボルト 1 本に作用する引抜き力

曲げモーメントによる引抜き力は、外側ボルト群からなる有効断面より算出する。

有効断面係数 $Z = 8.366 \times 10^7 \text{ mm}^3$

$$\begin{aligned} \text{曲げモーメントによる引抜き力 } T &= (M \cdot A_1) / Z = \frac{13920 \times 1473}{8.366 \times 10^7} \times 10^3 \\ &= 245.1 \text{ kN} \end{aligned}$$

ボルト引抜き力 $T = 245.1 \text{ kN} < 367.9 \text{ kN}$ (S_s設計用地震荷重時)

竜巻時にアンカーボルトが受ける鉛直力は S_s設計用地震荷重より小さくなるため、水平力同様引張力および圧縮力共に S_s設計用地震荷重に包絡されることを確認できるため、以後の検討を省略する。

(2) 鉄塔脚部の評価

a. 設計荷重

解析より求めた支点反力を座標変換して、鉄塔脚部垂直反力の向きと支柱脚部の軸方向とを一致させ、座標変換後の垂直反力と水平反力の最大値により脚部の検討を行う。

下記の手順に従い算出した反力の、最大圧縮力、最大引張力、最大水平力を以下に示す。

最大圧縮力	$cN_T = 7703 \text{ kN}$	竜巻荷重	斜め方向
最大引張力	$tN_T = 3532 \text{ kN}$	竜巻荷重	斜め方向
最大水平力	$H_T = 911 \text{ kN}$	竜巻荷重	斜め方向

※ただし、最大水平力は $H_T = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$ とする。

鉄塔脚部に作用する反力に対して、V-2-2-14-1「主排気筒の耐震性についての計算書」の S_s設計用荷重による反力との比較を表 5-10 に示す。

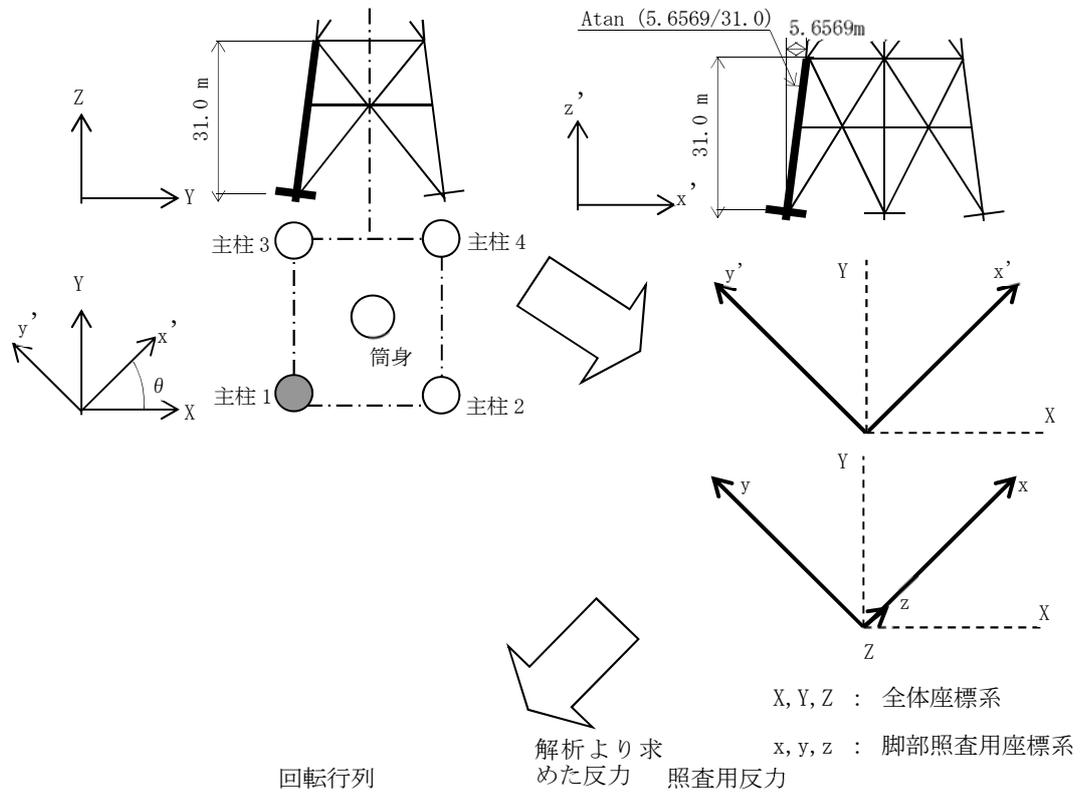
表 5-10 に示すように、引張力は S_s設計用荷重による反力の方が大きく、S_s設計用荷重に包絡されることを確認できるため、以降の検討は省略する。よって、水平力と圧縮力を支持するベースプレート、リブプレート、刃形プレートについての結果を記載する。

表 5-10 鉄塔脚部反力比較

	竜巻荷重時	S _s 設計用荷重時
圧縮力 (kN)	7703	7530
引張力 (kN)	3532	4807
水平力 (kN)	911	837

例) 支柱 1 の座標変換

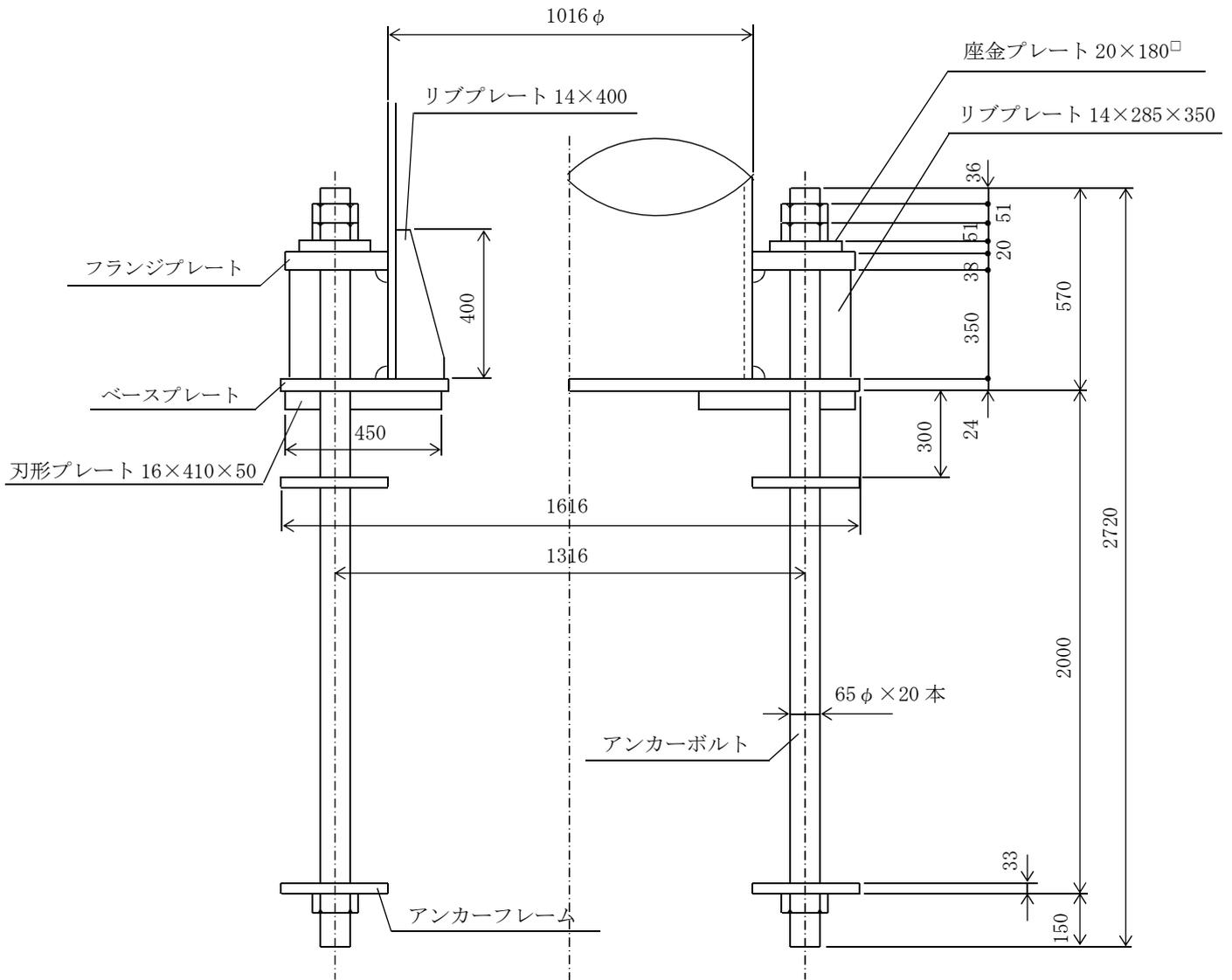
下図のように支柱脚部の軸方向と全体座標系の Z 方向は一致していないため、支柱 1 の解析より求めた反力を Z 軸周りに $\theta = 45^\circ$, 新しい Y 軸 (y') 周りに $\phi = 10.3416^\circ$ 回転する。



$$\begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & \cos \phi \sin \theta & -\sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ \sin \phi \cos \theta & \sin \phi \sin \theta & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} RX \\ RY \\ RZ \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Rx \\ Ry \\ Rz \end{Bmatrix}$$

図 5-3 に、鉄塔脚部の形状図を示す。

NT2 補② V-3-別添 1-1-4 R3



注 特記なき寸法は mm を示す。

図 5-3 鉄塔脚部概略図

b. ベースプレート

ベースプレートの曲げ及びコンクリートへの圧縮応力度について検討する。

・ベースプレート諸元

サイズ	外径	$D_1 = 1616 \text{ mm}$
	内径	$d_1 = 716 \text{ mm}$
	板厚	$t = 24 \text{ mm}$
ボルト孔		20- $\phi 75$
ボルト孔径		$b = 75 \text{ mm}$
ボルト孔欠損断面積		$A_B = b^2/4 \cdot \pi \cdot 20 = 88360 \text{ mm}^2$
材質		S S 4 0 0
設計基準強度		$F = 258.5 \text{ N/mm}^2$
許容引張応力度		$f_t = F = 258.5 \text{ N/mm}^2$
許容曲げ応力度		$f_b = F = 258.5 \text{ N/mm}^2$

(a) 下面のコンクリートに対する検討

・圧着面の断面性能 (ボルト孔控除)

断面積	$A_2 = \pi/4 \cdot (D_1^2 - d_1^2) - A_B$ $= \pi/4 \times (1616^2 - 716^2) - 88360$ $= 1.560 \times 10^6 \text{ mm}^2$
主柱圧縮力	${}_c N_T = 7703 \text{ kN}$
圧着面に作用する圧縮応力度	$\sigma_c = {}_c N_T / A_2$ $= \frac{7703}{1.560 \times 10^6} \times 10^3 = 5.0 \text{ N/mm}^2$

・コンクリート諸元

設計基準強度	$F_c = 22 \text{ N/mm}^2$
許容圧縮応力度	${}_c f_c = 2/3 \cdot F_c = 14.6 \text{ N/mm}^2$
応力度比	$\sigma_c / {}_c f_c = \frac{5.0}{14.6} = 0.35 \leq 1.00$

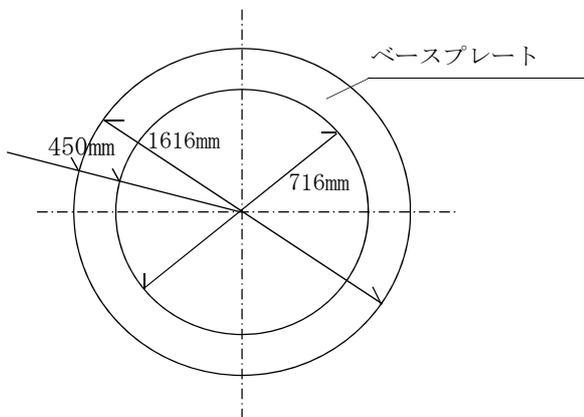


図 5-4 ベースプレートの寸法

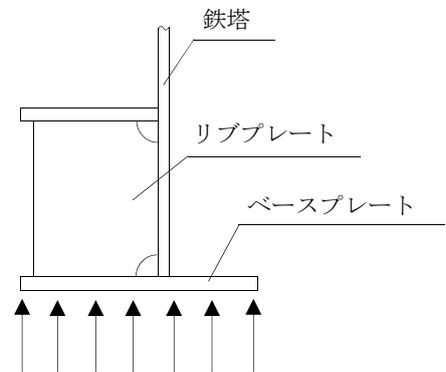


図 5-5 ベースプレートの断面

(a) ベースプレートの曲げに対する検討

ベースプレートを連続梁（リブを支点とする）とみなす。

$$\text{断面係数} \quad Z_1 = \frac{(t - t_c \cdot 1)^2}{6} = \frac{(24 - 1 \times 1)^2}{6} = 88.17 \text{ mm}^3/\text{mm}$$

(※ ベースプレート上面のみの腐食代考慮, 片面腐食代 $t_c = 1\text{mm}$)

・作用力

$$\text{ボルト芯径} \quad D_2 = 1316 \text{ mm}$$

$$\text{ボルト本数} \quad n = 20 \text{ 本}$$

$$\text{支間距離} \quad L = D_2 \cdot \pi / n = 1316 \times \pi / 20 = 206.7 \text{ mm}$$

(ボルト周方向ピッチ)

コンクリートの圧縮応力度

$$\sigma_c = 5.0 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{モーメント} \quad M_1 = 0.6 \cdot \sigma_c \cdot L^2 / 8 = \frac{0.6 \times 5.0 \times 206.7^2}{8} = 16022 \text{ N}\cdot\text{mm}/\text{mm}$$

$$\text{曲げ応力度} \quad \sigma_b = M_1 / Z_1 = \frac{16022}{88.17} = 181.8 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{応力度比} \quad \sigma_b / f_b = \frac{181.8}{258.5} = 0.71 \leq 1.00$$

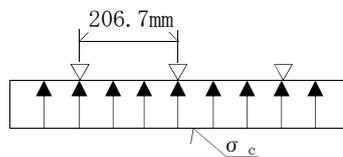


図 5-6 ベースプレート検討図

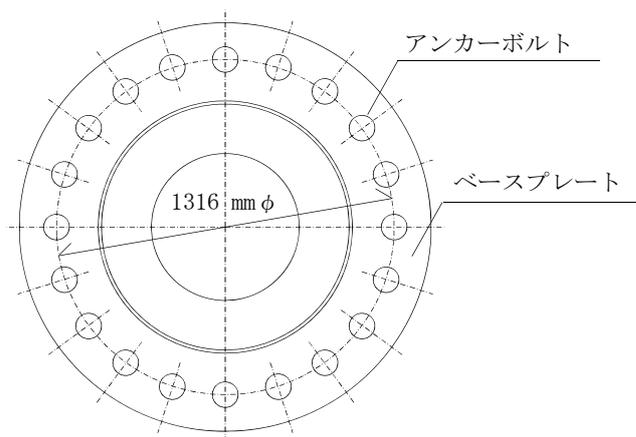


図 5-8 ボルト配置図

c. リブプレート

・リブプレート諸元

サイズ	高さ	H = 350 mm
	幅	B = 300 - 15 - 30 = 255 mm
	板厚	t = 14 mm
	リブ枚数	n = 20 枚
	材質	SS400
	設計基準強度	F = 258.5 N/mm ²
	限界細長比	Λ = 114.2

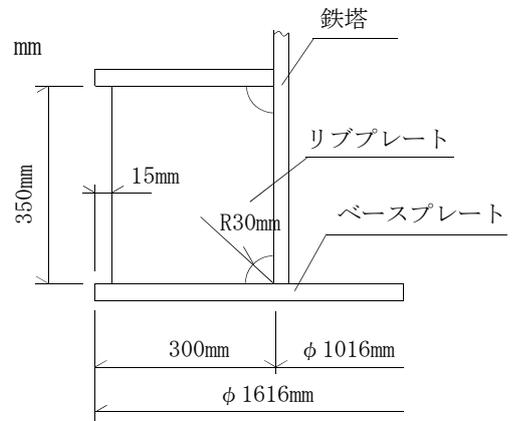


図 5-8 リブプレートの形状

(a) リブの圧縮に対する検討

断面積 $A_2 = (t - t_c \cdot 2) \cdot B = (14 - 1 \times 2) \times 255 = 3060 \text{ mm}^2$

(※ リブ両面の腐食代考慮, 片面腐食代 $t_c = 1\text{mm}$)

断面 2 次半径 $i = (t - t_c \cdot 2) / \sqrt{12} = \frac{(14 - 1 \times 2)}{\sqrt{12}} = 3.5 \text{ mm}$

(腐食代考慮)

座屈長 $\ell_k = H/2 = \frac{350}{2} = 175 \text{ mm}$ (両端固定)

細長比 $\lambda = \ell_k / i = \frac{175}{3.5} = 50.0 < \Lambda = 114.2$

許容圧縮応力度

$$f_c = F \cdot \left\{ 1 - \frac{2}{5} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} = 238.6 \text{ N/mm}^2$$

・作用力

1 枚のリブに作用する圧縮力

最大圧縮力作用時 $P_c = c N_T / n = \frac{7703}{20} = 385.2 \text{ kN}$

最大引張力作用時 $P_t = T N_T / n = \frac{3532}{20} = 176.6 \text{ kN}$

$P_c > P_t$ より以下 P_c に対してのみ照査を行う。

リブに作用する圧縮応力度 $\sigma_c = P_c / A_2 = \frac{385.2}{3060} \times 10^3 = 125.9 \text{ N/mm}^2$

応力度比 $\sigma_c / f_c = \frac{125.9}{238.6} = 0.53 \leq 1.00$

(b) リブの溶接部に対する検討

・溶接部諸元

鉛直方向

溶接長 $\ell_1 = (H - 30 \cdot 2) \cdot 2 = (350 - 30 \times 2) \times 2 = 580 \text{ mm}$

溶接脚長 $S_1 = 10 \text{ mm}$

有効のど厚 $a_1 = 0.7 \cdot S_1 - t_c \cdot 1 = 0.7 \times 10 - 1 \times 1 = 6.0 \text{ mm}$
(腐食代 $t_c = 1\text{mm}$)

有効面積 $A_{s1} = \ell_1 \cdot a_1 = 580 \times 6.0 = 3480 \text{ mm}^2$ (腐食代考慮)

水平方向

溶接長 $\ell_2 = B \cdot 2 = 255 \times 2 = 510 \text{ mm}$

溶接脚長 $S_2 = 10 \text{ mm}$

有効のど厚 $a_2 = 0.7 S_2 - t_c \cdot 1 = 0.7 \times 10 - 1 \times 1 = 6.0 \text{ mm}$
(腐食代 $t_c = 1\text{mm}$)

有効面積 $A_{s2} = \ell_2 \cdot a_2 = 510 \times 6.0 = 3060 \text{ mm}^2$

設計基準強度 $F = 258.5 \text{ N/mm}^2$

許容せん断応力度

$$f_s = F / \sqrt{3} = 149.2 \text{ N/mm}^2$$

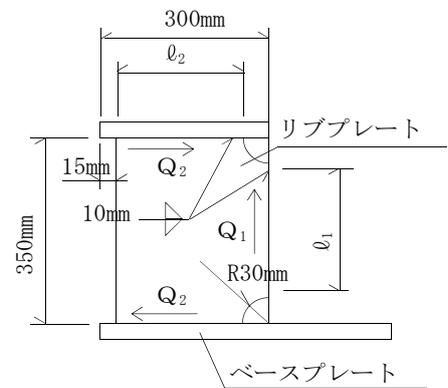


図 5-9 溶接位置図

・作用力

鉛直方向

$$Q_1 = P_c = 385.2 \text{ kN}$$

『5.2(2) c. (a)による』

水平方向（鋼管壁面に作用する偏心モーメント）

$$Q_2 = P_c \cdot 150/H = \frac{385.2 \times 150}{350} = 165.1 \text{ kN}$$

リブに作用するせん断応力度 $\tau_1 = Q_1/A_{s1} = \frac{385.2}{3480} \times 10^3 = 110.7 \text{ N/mm}^2$

$$\tau_2 = Q_2/A_{s2} = \frac{165.1}{3060} \times 10^3 = 54.0 \text{ N/mm}^2$$

応力度比 $\tau_1/f_s = \frac{110.7}{149.2} = 0.75 \leq 1.00$

$$\tau_2/f_s = \frac{54.0}{149.2} = 0.37 \leq 1.00$$

d. 刃形プレート

刃形プレートの強度検討を行う。

- ・圧縮側せん断に対する検討

$$\mu \cdot {}_c N_t = 0.4 \times 7703 = 3081.2 \text{ kN} > 911 \text{ kN}$$

μ : 摩擦係数 (0.4)

圧縮側せん断力に対してはベースプレート下面の摩擦抵抗によって十分抵抗しうるため、検討を省略する。

- ・引張側せん断に対する検討

水平力はアンカーボルトに負担させず全て刃形プレートで負担させる。

刃形プレート諸元

サイズ	高さ	H = 50 mm
	幅	B = 410 mm
	板厚	t = 16 mm
枚数		10枚 (36° ピッチ)
材質		S S 4 0 0
設計基準強度		F = 258.5 N/mm ²
許容曲げ応力度		f _b = F = 258.5 N/mm ²
許容せん断応力度		f _s = F / √3 = 149.2 N/mm ²

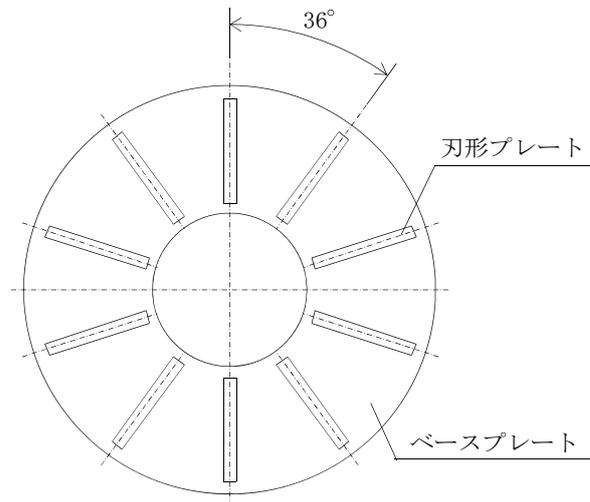


図 5-10 刃形プレート形状図

(a) 刃形プレート母材に対する検討

刃形プレートの強度検討を行う。

断面積 $A_4 = t = 16 \text{ mm}^2/\text{mm}$

断面係数 $Z_4 = t^2/6 = \frac{16^2}{6} = 42.67 \text{ mm}^3/\text{mm}$

単位面積当りの水平力

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \frac{H_T}{H \cdot B \cdot \sum \sin \theta_i} \\ &= \frac{911}{50 \times 410 \times (4 \sin 18^\circ + 4 \sin 54^\circ + 2 \sin 90^\circ)} \times 10^3 \\ &= 6.9 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

モーメント $M_3 = \sigma_c \cdot H^2/2 = \frac{6.9 \times 50^2}{2} = 8625 \text{ N}\cdot\text{mm}/\text{mm}$

せん断力 $Q = \sigma_c \cdot H = 6.9 \times 50 = 345.0 \text{ N/mm}$

曲げ応力度 $\sigma_b = M_3/Z_4 = \frac{8625}{42.67} = 202.2 \text{ N/mm}^2$

せん断応力度 $\tau = Q/A_4 = \frac{345.0}{16} = 21.6 \text{ N/mm}^2$

応力度比 $\sigma_b/f_b = \frac{202.2}{258.5} = 0.79 \leq 1.00$

$\tau/f_s = \frac{21.6}{149.2} = 0.15 \leq 1.00$

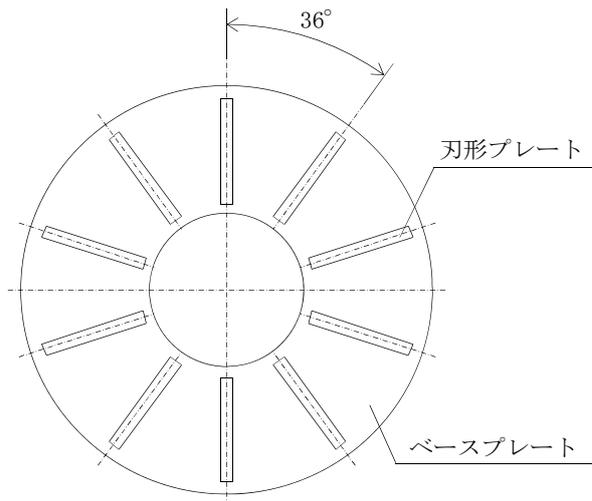


図 5-11 刃形プレート形状図

(b) 刃形プレート溶接部に対する検討
刃形プレートの強度検討を行う。

・溶接部諸元

溶接脚長	$S = 10 \text{ mm}$
有効のど厚	$a = 0.7 \cdot S = 0.7 \times 10 = 7.0 \text{ mm}$
	$\ell_1 = 15.0 \text{ mm}$
	$\ell_2 = 11.5 \text{ mm}$
有効面積 (単位幅当たり)	$A_s = 2 \cdot a = 2 \times 7.0 = 14.00 \text{ mm}^2/\text{mm}$
有効断面係数 (単位幅当たり)	$Z_s = A_s \cdot \ell_2^2 / \ell_1 = \frac{14.0 \times 11.5^2}{15.0}$ $= 123.4 \text{ mm}^3/\text{mm}$
設計基準強度	$F = 258.5 \text{ N/mm}^2$
許容せん断応力度	$f_s = F / \sqrt{3} = 149.2 \text{ N/mm}^2$
曲げ応力度	$\tau_b = M_3 / Z_s = \frac{8625}{123.4} = 69.9 \text{ N/mm}^2$
せん断応力度	$\tau_q = Q / A_s = \frac{345.0}{14.00} = 24.7 \text{ N/mm}^2$
合成応力度	$\tau = \sqrt{\tau_b^2 + \tau_q^2} = \sqrt{69.9^2 + 24.7^2} = 74.2 \text{ N/mm}^2$
応力度比	$\tau / f_s = \frac{74.2}{149.2} = 0.50 \leq 1.00$

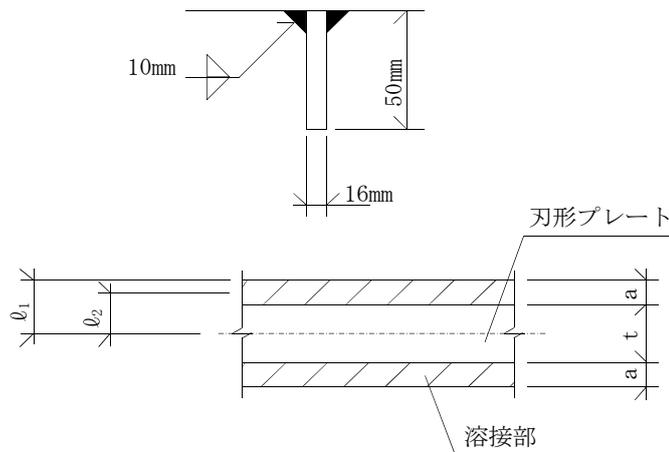


図 5-12 刃形プレート諸元

表 5-11 荷重時算定結果一覧

		発生応力度	許容応力度	$\frac{\text{発生応力度}}{\text{許容応力度}}$
ベースプレート	曲げ応力度	181.8	258.5	0.71 \leq 1.00
リブプレート	溶接部せん断応力度	110.7	149.2	0.75 \leq 1.00
刃形プレート	曲げ応力度	202.2	258.5	0.79 \leq 1.00

(3) 補助鉄塔脚部の評価

a. 設計荷重

設計荷重は、以下に示す荷重により補助鉄塔脚部の検討を行う。

最大圧縮力 $cN_T = 8685 \text{ kN}$ 設計用地震荷重 斜め方向

最大引張力 $tN_T = 5636 \text{ kN}$ 設計用地震荷重 斜め方向

最大水平力 $H_T = 2056 \text{ kN}$ 設計用地震荷重 斜め方向

※ただし、最大水平力は $H_T = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$ とする。

図 5-13 に鉄塔脚部の形状図を示す。

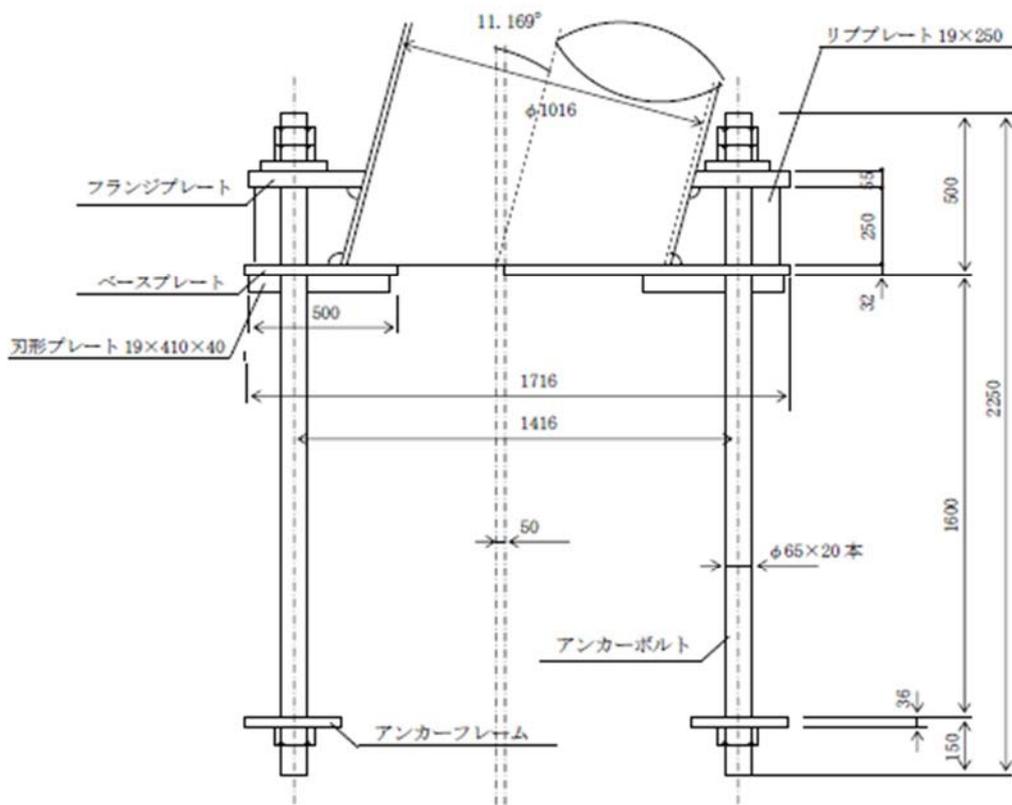


図 5-13 補助鉄塔脚部

補助鉄塔脚部に作用する反力に対して、V-2-2-15-1「主排気筒の耐震性についての計算書」のS₀設計用荷重による反力との比較を表 5-12 に示す。

表 5-12 に示すように、竜巻時の反力はS₀設計用荷重による反力の方が大きく、S₀設計用荷重に包絡されることを確認できるため、以降の検討は省略する。

表 5-12 補助鉄塔脚部反力比較

	竜巻 荷重時	S _s 設計用 荷重時
圧縮力 (kN)	8685	9176
引張力 (kN)	5636	7525
水平力 (kN)	2056	2202

V-3-別添 1-1-5 換気空調設備の強度計算書

目次

1. 概要.....	1
2. 基本方針.....	1
2.1 位置.....	1
2.2 構造概要.....	2
2.3 評価方針.....	5
2.4 適用規格.....	10
3. 強度評価方法.....	11
3.1 記号の定義.....	11
3.2 評価対象部位.....	16
3.3 荷重及び荷重の組合せ.....	20
3.4 許容限界.....	22
3.5 評価方法.....	26
4. 評価条件.....	37
5. 強度評価結果.....	42

1. 概要

本資料は、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、角ダクト、丸ダクト、換気空調設備の隔離弁（以下「隔離弁」という。）、ファン及び冷凍機が竜巻時及び竜巻通過後においても、その施設の機能維持を考慮して、主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

角ダクト、丸ダクト、隔離弁、ファン及び冷凍機の構造について、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、角ダクト、丸ダクト、隔離弁、ファン及び冷凍機の「2.1 位置」、「2.2 構造概要」、「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

2.1 位置

角ダクト、丸ダクト、隔離弁、ファン及び冷凍機は、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示すとおり、十分な強度を有する原子炉建屋内、原子炉建屋付属棟屋上面又はディーゼル発電機室屋上面に設置する。

角ダクト、丸ダクト、隔離弁、ファン及び冷凍機の位置図を図 2-1 に示す。

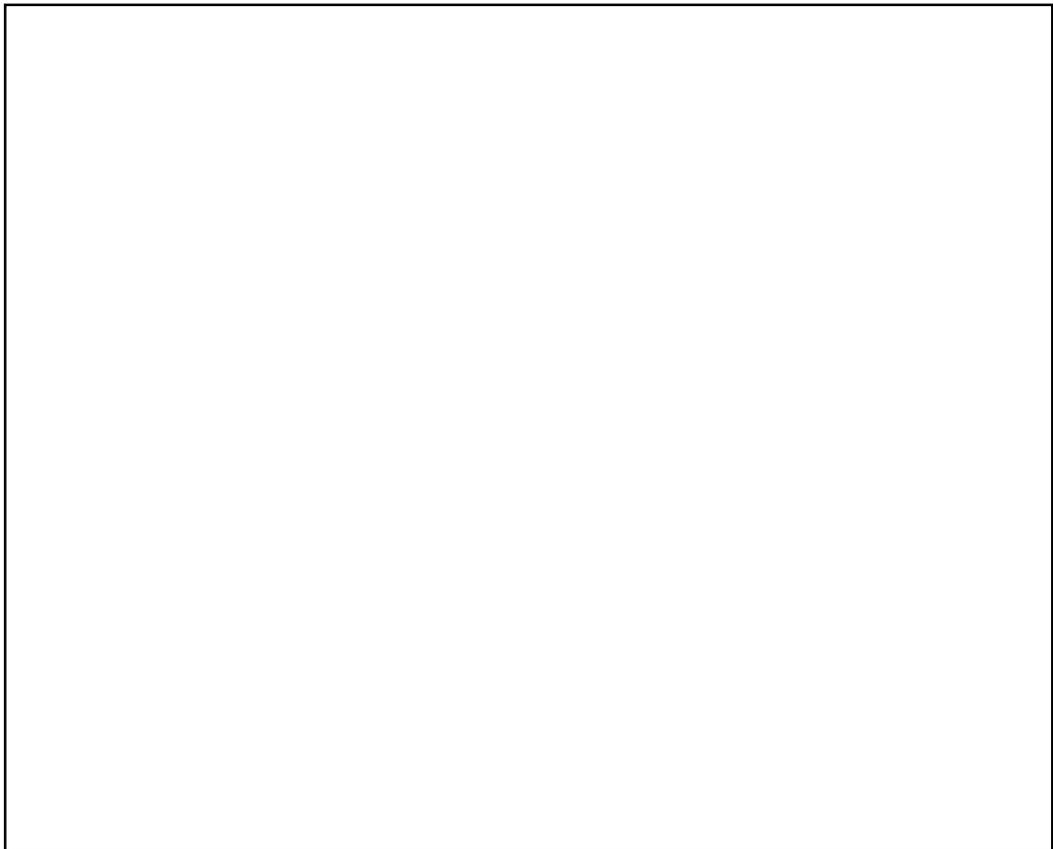


図 2-1 角ダクト、丸ダクト、隔離弁、ファン及び冷凍機の位置図

2.2 構造概要

換気空調設備の構造について、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、換気空調設備の構造を示す。

(1) 角ダクト及び丸ダクトの構造概要

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

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

角ダクトの概要図を図 2-2 に、丸ダクトの概要図を図 2-3 に示す。

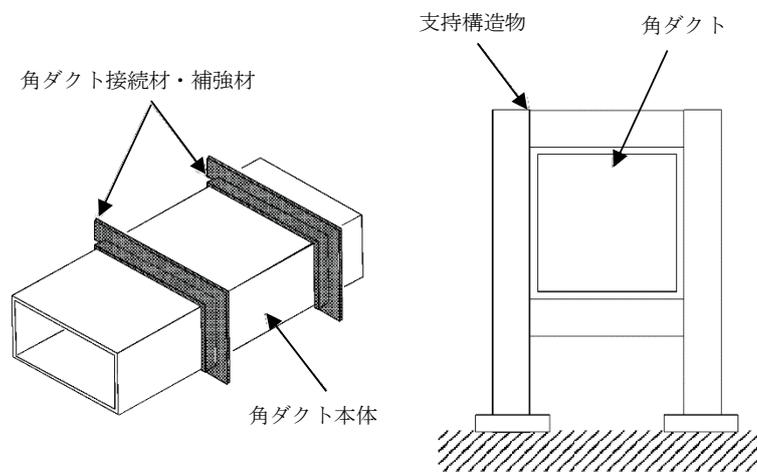


図 2-2 角ダクトの概要図

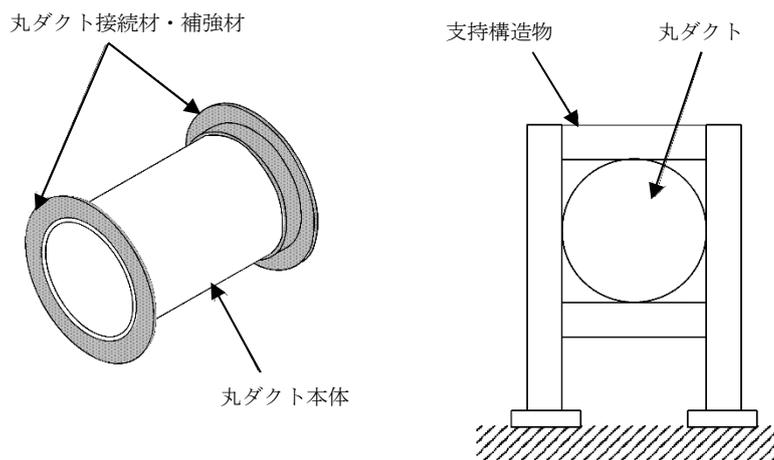


図 2-3 丸ダクトの概要図

(2) 隔離弁の構造概要

隔離弁は弁箱内部の弁体が弁棒を軸として回転することにより、開閉動作を行う弁である。隔離弁の概要図を図 2-4 に示す。

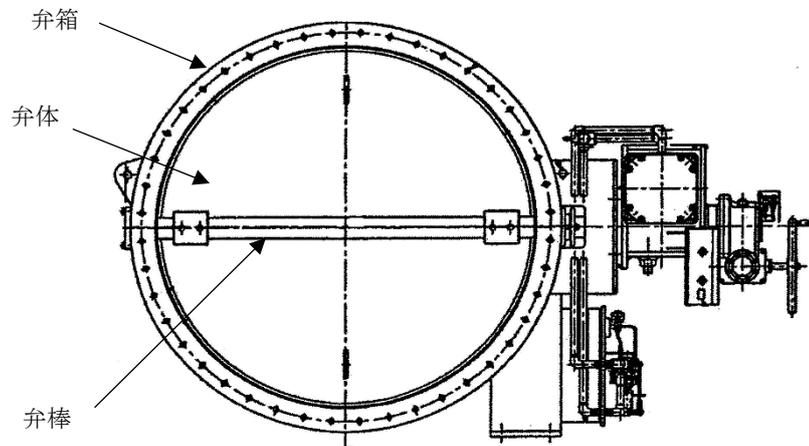


図 2-4 隔離弁の概要図

(3) ファンの構造概要

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

中央制御室換気系フィルタ系ファンは遠心ファンであり、同一構造のファンを屋内に 2 台設置している。非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機ルーフベントファン(以下「ディーゼル発電機室ルーフベントファン」という。)は据付面からケーシング部とケーシング部より上部の吐出フードからなる軸流ファンであり、同一構造のディーゼル発電機室ルーフベントファンを非常用ディーゼル発電機 2 C 室用、非常用ディーゼル発電機 2 D 室用及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室用にそれぞれ 2 台、計 6 台を屋外に設置している。

ファンの概要図を図 2-5、図 2-6 に示す。

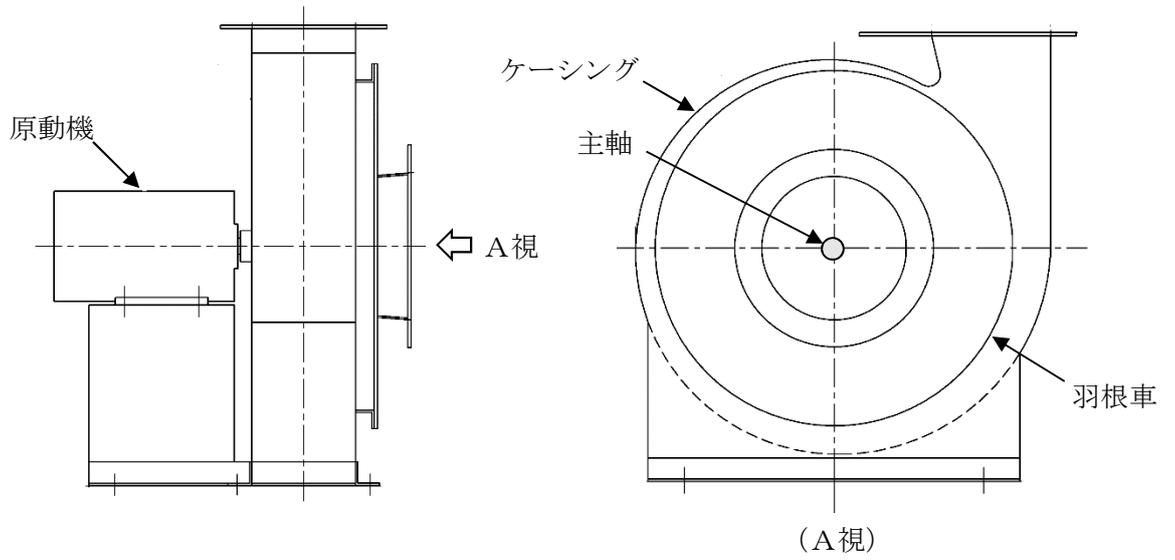


図 2-5 ファンの概要図 (中央制御室換気系フィルタ系ファン)

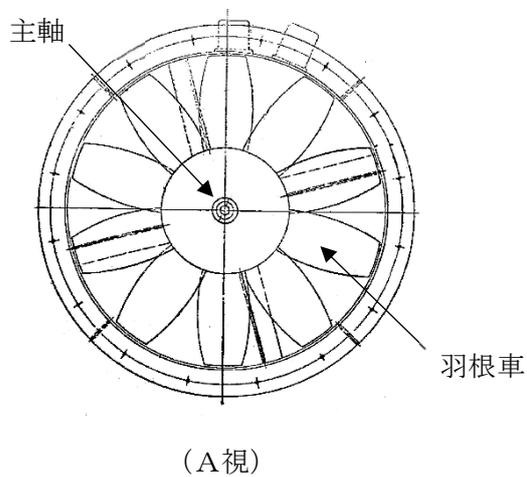
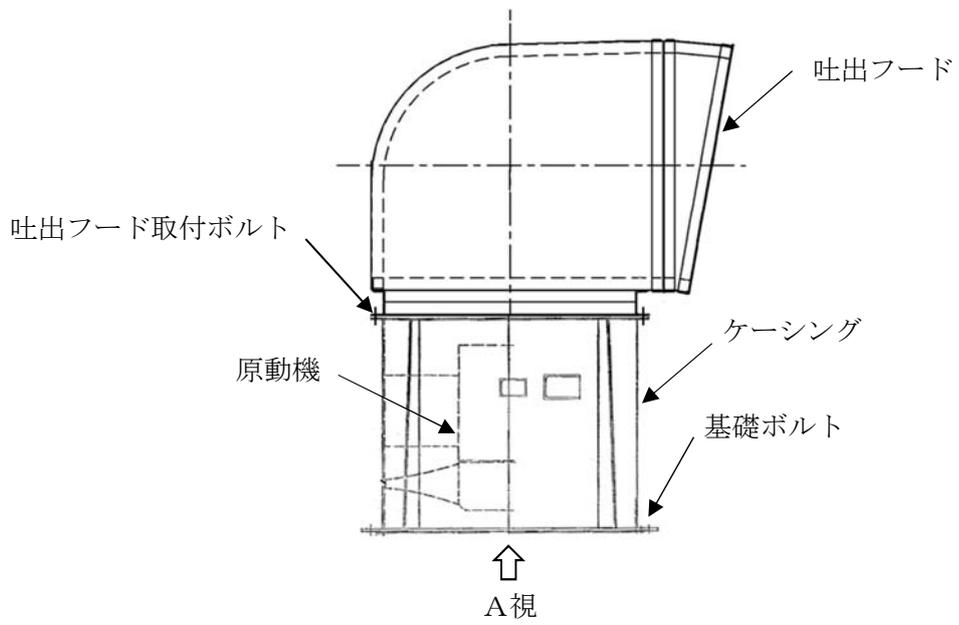


図 2-6 ファンの概要図 (ディーゼル発電機室ルーフベントファン)

(4) 冷凍機の構造概要

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

中央制御室換気系冷凍機の概要図を図 2-7 に示す。

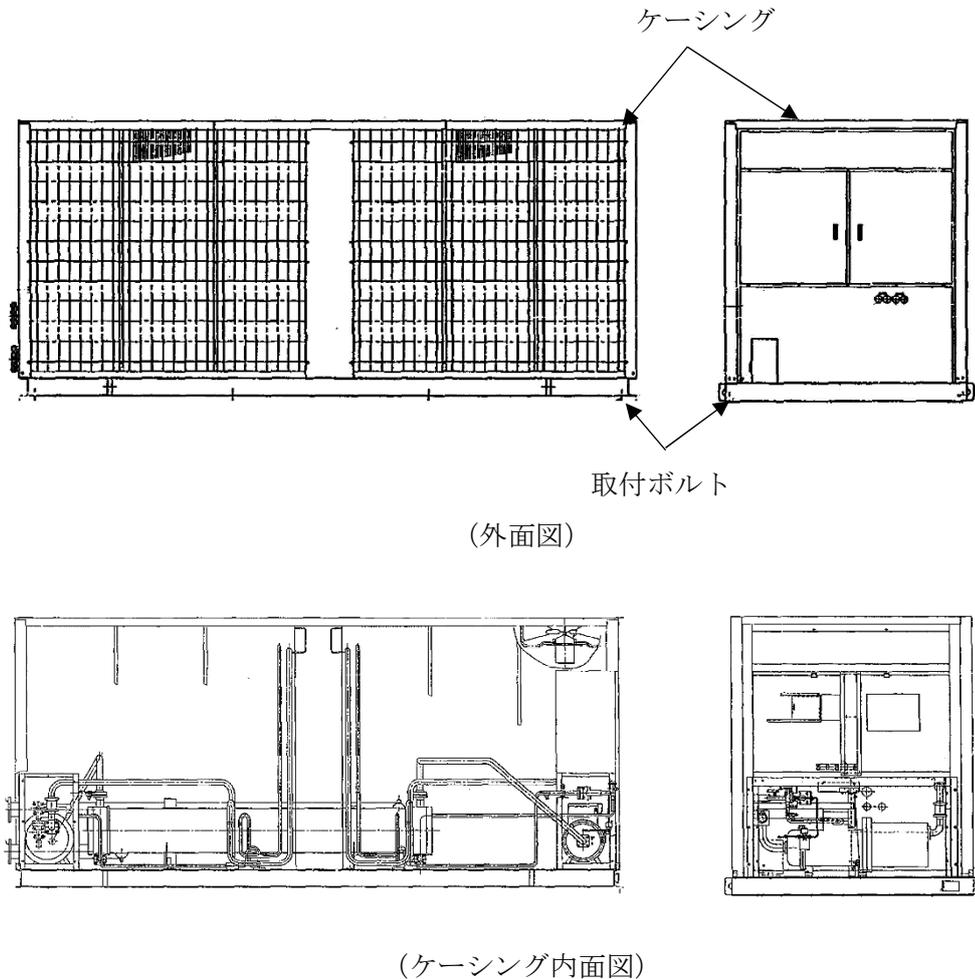


図 2-7 冷凍機の概要図 (中央制御室換気系冷凍機)

2.3 評価方針

換気空調設備の強度評価は、V-3-別添 1-1 「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している、荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、角ダクト、丸ダクト、隔離弁、ファン及び冷凍機の各評価対象部位に作用する貫入及び応力等が、許容限界に収まることを「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

(1) 衝突評価の評価方針

屋外に設置する換気空調設備の衝突評価フローを図2-8に示す。衝突評価においては、竜巻防護ネットを設置する場合に考慮する飛来物である砂利の貫通限界厚さが外壳を構成する

部材の厚さ未満であることを確認する。衝突評価では、「タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日原子炉安全専門審査会）」で用いられている式を準用し、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 強度評価方法」に示す衝突評価が必要な機器の評価式を用いる。屋外に設置する換気空調設備の衝突評価における許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 許容限界」に示す許容限界である、外殻を構成する部材の厚さとする。

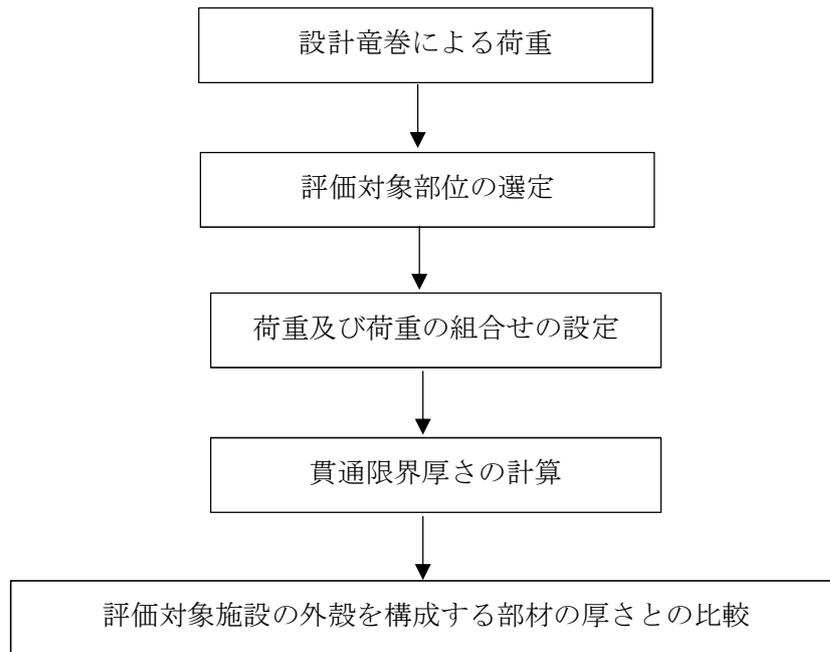


図2-8 屋外に設置する換気空調設備の衝突評価フロー

(2) 構造強度評価の評価方針

a. 角ダクト及び丸ダクトの評価方針

角ダクト及び丸ダクトの構造強度評価フローを図2-9に示す。

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

角ダクトの構造強度評価においては、設計竜巻の気圧差による荷重を短期荷重とみなし、自重との組合せを考慮して、長期荷重（自重）＋短期荷重（設計竜巻による内外差圧）による応力が許容応力以下であることを確認する。構造強度評価では、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価式を用いる。

角ダクトの許容限界は、妥当な安全裕度を考慮して、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、J E A G 4 6 0 1の許容応力状態Ⅲ_ASとする。ただし、座屈に対しては評価式を満足することを確認する。

丸ダクトの構造強度評価においては、設計竜巻の気圧差による荷重を短期荷重とみなし、自重との組合せを考慮して、外圧により生じる周方向応力が許容応力以下であること及び長期荷重（自重）＋短期荷重（設計竜巻による内外差圧）により生じる応力が評価式を満足していることを確認する。構造強度評価では、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価式を用いる。

丸ダクトの許容限界は、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、クリッピング座屈の算出式に応じた値とする。

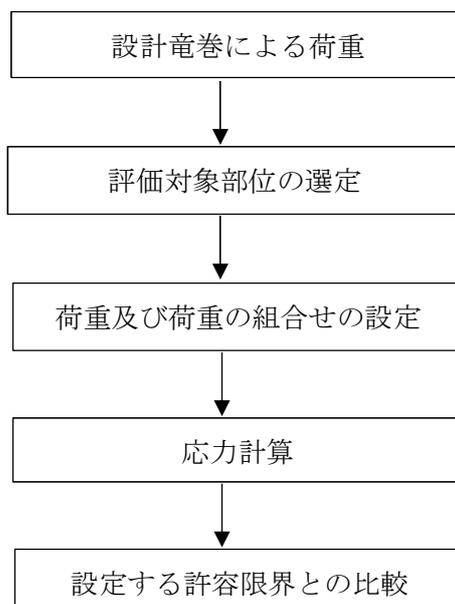


図 2-9 角ダクト及び丸ダクトの構造強度評価フロー

b. 隔離弁の評価方針

隔離弁の構造強度評価フローを図 2-10 に示す。

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

構造強度評価においては、隔離弁に対して、設計竜巻の気圧差による荷重により生じる応力が許容応力以下であることを確認する。構造強度評価では、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価方法を用いる。

隔離弁の許容限界は、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、J E A G 4 6 0 1 の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

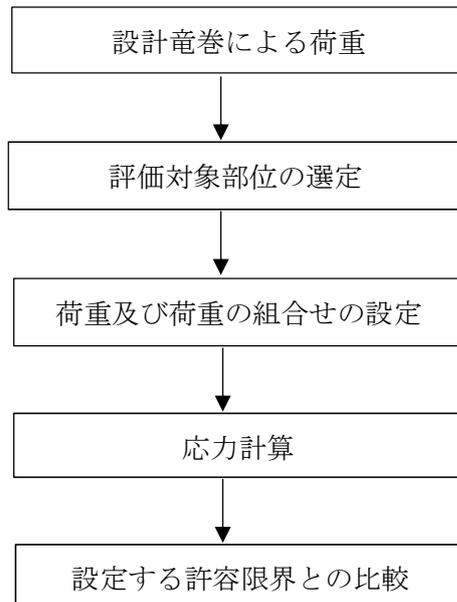


図 2-10 隔離弁の構造強度評価フロー

c. ファンの評価方針

ファンの構造強度評価フローを図 2-11 に示す。

強度評価において、屋外に設置する換気空調設備については、設計竜巻による荷重及び自重を加えた応力が許容応力以下であることを確認する。各部材の構造強度評価において、その部材に対して応力が大きくなる方向から風が当たることを想定する。各部材の構造強度評価には、設計竜巻による荷重は水平方向より作用する外荷重という観点で地震荷重と同等なものであると考え、「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1・補-1984」（（社）日本電気協会）、「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987」（（社）日本電気協会）及び「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」（（社）日本電気協会）（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）における 1 質点系モデルによる評価方法を準用する。

また、竜巻より防護すべき施設を内包する施設内に設置する外気と繋がっている換気空調設備については、設計竜巻の気圧差による荷重により生じる応力が許容応力以下であることを確認する。構造強度評価においては、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価式を用いる。

ファンの許容限界は、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、J E A G 4 6 0 1 の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

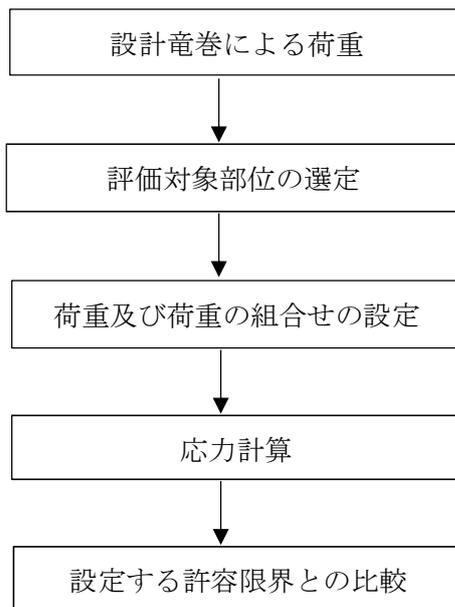


図 2-11 ファンの構造強度評価フロー

d. 冷凍機の評価方針

冷凍機の構造強度評価フローを図 2-12 に示す。

構造強度評価においては、中央制御室換気系冷凍機に対して、設計竜巻による荷重及び自重を加えた応力が許容応力以下であることを確認する。各部材の構造強度評価において、その部材に対して応力が大きくなる方向から風が当たることを想定する。各部材の構造強度評価には、設計竜巻による荷重は水平方向より作用する外荷重という観点で地震荷重と同等なものであると考え、「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1・補-1984」（（社）日本電気協会）、「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987」（（社）日本電気協会）及び「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」（（社）日本電気協会）（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）における1質点系モデルによる評価方法を準用し、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価式を用いる。

冷凍機の許容限界は、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、J E A G 4 6 0 1 の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

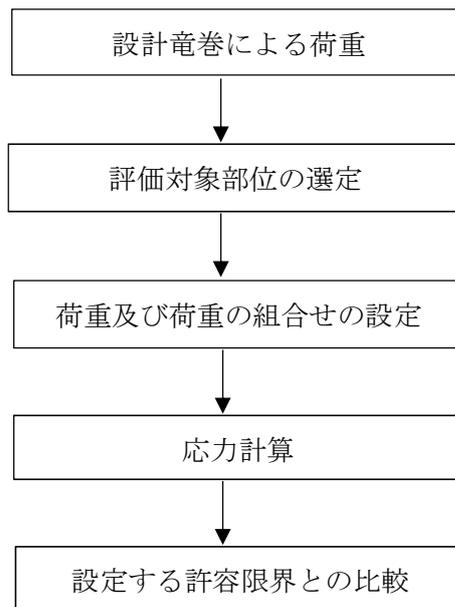


図 2-12 冷凍機の構造強度評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

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

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 衝突評価の記号の定義

屋外に設置する換気空調設備の衝突評価に用いる記号を表3-1に示す。

表3-1 衝突評価に用いる記号

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

(2) 構造強度評価の記号の定義

a. 角ダクト

角ダクトの構造強度評価に用いる記号を表3-2に示す。

表3-2 角ダクトの構造強度評価に用いる記号(1/2)

記号	単位	定義
a	mm	ダクト幅
b	mm	ダクト高さ
c	mm	補強ピッチ
D_p	kg/m 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
I	mm ⁴	断面二次モーメント
L	mm	ダクトサポートの支持間隔
M	N・mm	ダクトに作用する曲げモーメント
M_p	N・mm	自重により作用する曲げモーメント
P	MPa	ダクトにかかる外圧
S_y	MPa	J S ME 付録材料図表Part5の表にて規定される設計降伏点
t	mm	ダクト板厚
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

表3-2 角ダクトの構造強度評価に用いる記号(2/2)

記号	単位	定義
μ	kg/m	ダクトの単位長さ当たり重量
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_{p2}	MPa	面内荷重（自重）による発生応力
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_y	MPa	許容応力

b. 丸ダクト

丸ダクトの構造強度評価に用いる記号を表3-3に示す。

表3-3 丸ダクトの構造強度評価に用いる記号

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

c. 隔離弁

隔離弁の構造強度評価に用いる記号を表 3-4 に示す。

表3-4 隔離弁の構造強度評価に用いる記号

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

d. ファン

ファンの構造強度評価に用いる記号を表3-5に示す。

表3-5 ファンの構造強度評価に用いる記号

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 _b	mm ²	ボルトの軸断面積
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
F	MPa	J S M E SSB-3121.1(1)により規定される値
F _b	N	ボルトに対する引張力
F _i	N	各ボルトに作用する引張力
f _s	MPa	J S M E SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容せん断応力
f _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
G	—	ガスト影響係数
g	m/s ²	重力加速度（g=9.80665）
h	mm	全高
L ₁ ～L ₇	mm	支点と評価ボルト間の距離
L _i	mm	各ボルト間の距離
M	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
m	kg	ファンの質量
N	—	ボルトの本数
Q _b	N	ボルトに対するせん断力
q	N/m ²	設計用速度圧
r	mm	ケーシング内半径
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	ケーシング板厚
W _M	N	設計竜巻による飛来物の衝撃荷重
W _W	N	設計竜巻の風圧力による荷重
ΔP	N/m ²	設計竜巻の気圧低下量
σ _b	MPa	ボルトに生じる引張応力
σ _θ	MPa	周方向応力
τ	MPa	ボルトに生じるせん断応力

e. 冷凍機

冷凍機の構造強度評価に用いる記号を表3-6に示す。

表3-6 冷凍機の構造強度評価に用いる記号

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 _b	mm ²	取付ボルトの軸断面積
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
F	MPa	J S M E SSB-3121.1(1)により規定される値
F _b	N	取付ボルトに対する引張力
f _s	MPa	J S M E SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容せん断応力
f _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
G	—	ガスト影響係数
g	m/s ²	重力加速度（g=9.80665）
h	mm	全高の1/2
L ₁	mm	取付ボルト間の水平距離
L _H	mm	重心から取付ボルト間の水平距離
m	kg	冷凍機の運転質量
N	—	取付ボルトの本数
n _f	—	引張力を受ける取付ボルトの本数
Q _b	N	取付ボルトに対するせん断力
q	N/m ²	設計用速度圧
S _u	MPa	J S M E 付録材料図表Part5の表にて規定される設計引張強さ
S _y	MPa	J S M E 付録材料図表Part5の表にて規定される設計降伏点
W _M	N	設計竜巻による飛来物の衝撃荷重
W _W	N	設計竜巻の風圧力による荷重
σ _b	MPa	取付ボルトに生じる引張応力
τ	MPa	取付ボルトに生じるせん断応力

3.2 評価対象部位

(1) 衝突評価の評価対象部位

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

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

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

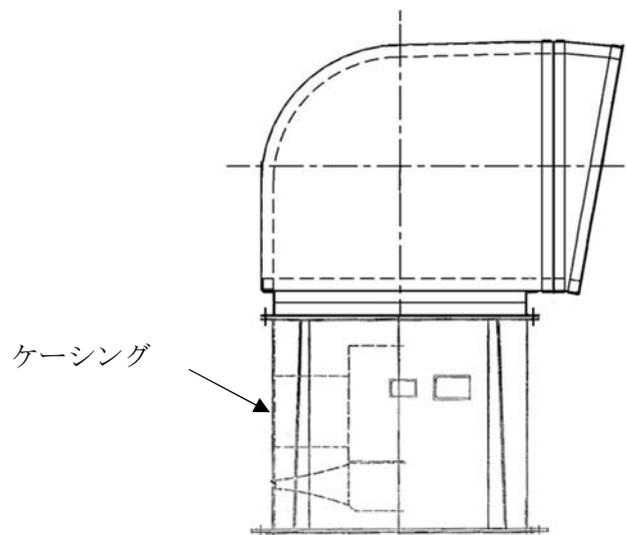


図 3-1 屋外に設置する換気空調設備の衝突評価における評価対象部位
(ディーゼル発電機室ルーフベントファン)

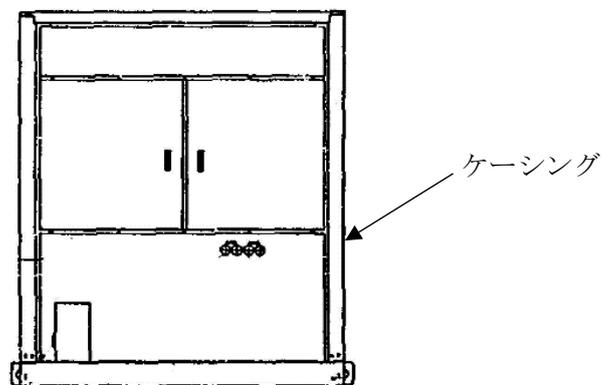


図 3-2 屋外に設置する換気空調設備の衝突評価における評価対象部位
(中央制御室換気系冷凍機)

(2) 構造強度評価の評価対象部位

a. ダクトの評価対象部位

角ダクト及び丸ダクトの評価対象部位は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し選定する。

(a) 角ダクト

下記の外気と繋がる換気空調系を評価対象とする。

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

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

角ダクトは薄肉角筒であり、発生応力はダクト鋼板中央部で最大となることから、ダクト鋼板を評価対象とする。フランジについては曲げモーメントが作用しないため、評価しない。ダクトは支持構造物にダクト鋼板面を接触させて支持されており、設計竜巻の気圧差によりダクトに作用する荷重は、ダクト支持構造物に作用しないことから、ダクト鋼板を評価する。なお、ダクトに接続されるダンパについては、ケーシング形状がダクト同様であり、面間寸法がダクトより短く、肉厚もダクト以上でありダクトの評価に包絡される。

角ダクトの構造強度評価における評価対象部位を図3-3に示す。

ダクト鋼板（本体）

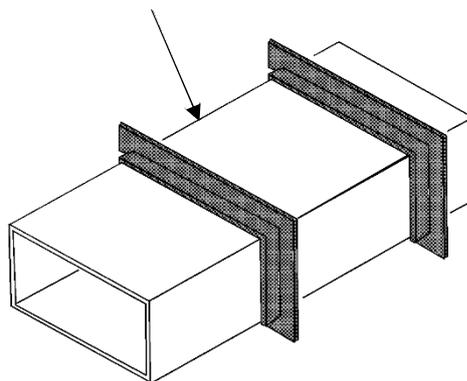


図3-3 角ダクトの評価対象部位

(b) 丸ダクト

下記の外気と繋がる換気空調系を評価対象とする。

- ・原子炉建屋換気系
- ・中央制御室換気系

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

丸ダクトは薄肉円筒であり、座屈を考慮してダクト鋼板を評価対象とする。

丸ダクトの構造強度評価における評価対象部位を図3-4に示す。

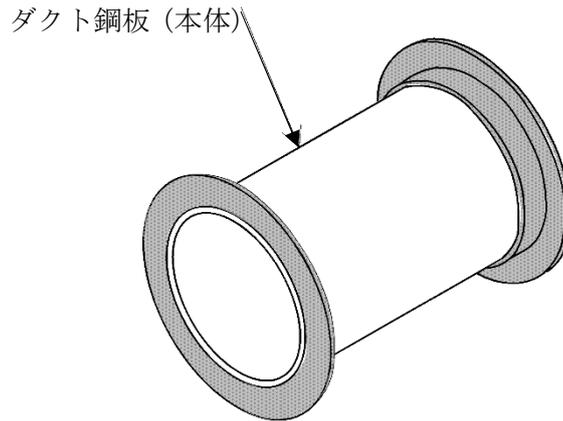


図3-4 丸ダクトの評価対象部位

b. 隔離弁の評価対象部位

隔離弁の評価対象部位は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し選定する。

気圧差による荷重は、隔離弁本体の耐圧部に作用する。

このことから、耐圧部である**弁箱**、**弁体**、**弁棒**を評価対象部位として選定する。

隔離弁の構造強度評価における評価対象部位を、図3-5に示す。

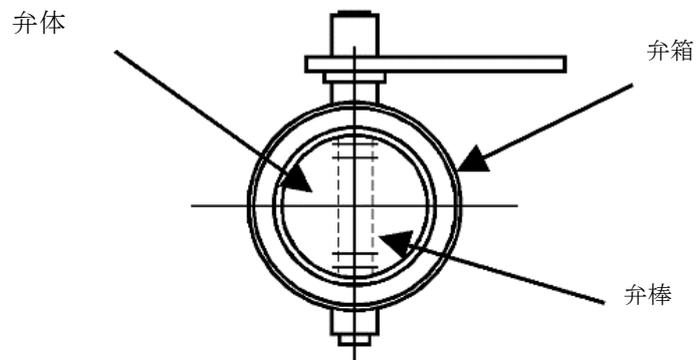


図3-5 隔離弁の評価対象部位

c. ファンの評価対象部位

ファンの評価対象部位は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

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

このことから、ケーシングを評価対象部位として設定する。

また、屋外に設置する換気空調設備におけるファンに作用する設計竜巻による荷重は、吐出フード及びケーシングに作用し、吐出フード取付ボルト、基礎ボルトに伝達されるが、荷重を受ける各部位のうち、支持断面積の小さな部位に大きな応力が生じることになる。

このことから、吐出フード取付ボルト及び基礎ボルトを構造強度評価の評価対象部位として選定する。

ファンの構造強度評価における評価対象部位を、図3-6～図3-7に示す。

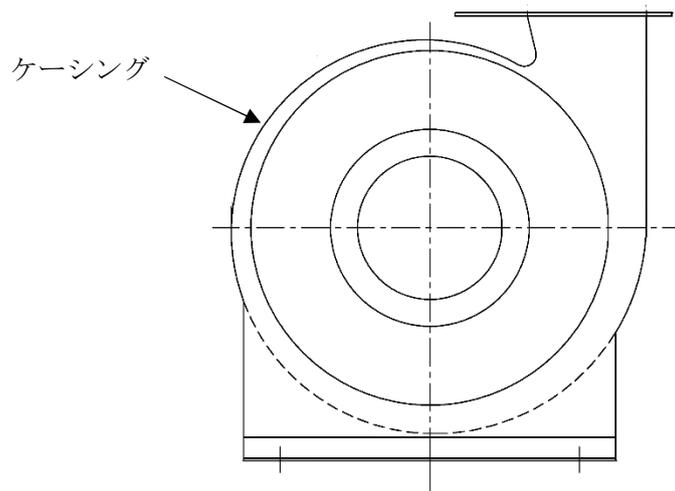


図3-6 ファンの評価対象部位（中央制御室換気系フィルタ系ファン）

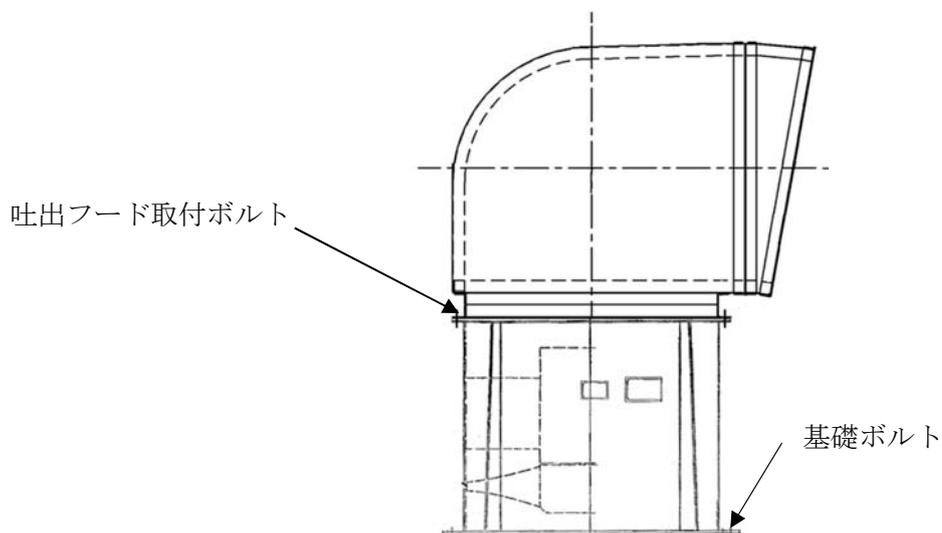


図 3-7 ファンの評価対象部位（ディーゼル発電機室ルーフベントファン）

d. 冷凍機の評価対象部位

冷凍機の評価対象部位は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

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

このことから、取付ボルトを構造強度評価の評価対象部位として選定する。

冷凍機の構造強度評価における評価対象部位を、図3-8に示す。

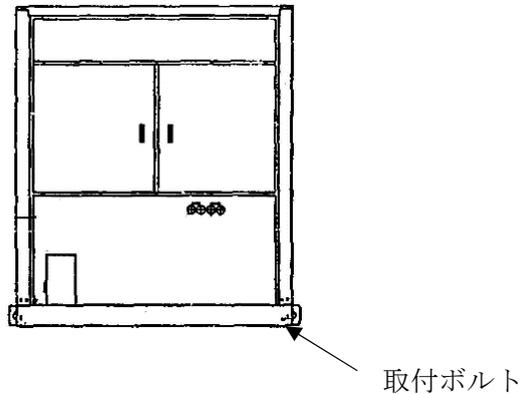


図3-8 冷凍機の評価対象部位（中央制御室換気系冷凍機）

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」にて示している荷重及び荷重の組合せを踏まえ、換気空調設備の評価対象施設ごとに設定する。

(1) 衝突評価の荷重及び荷重の組合せ

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

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

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

表3-7 砂利の諸元

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

表3-8 屋外に設置する換気空調設備の衝突評価に用いる荷重

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

(2) 構造強度評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の設定

構造強度評価に用いる荷重は、以下の荷重を用いる。

(a) 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、持続的に生じる荷重である自重を考慮する。

(b) 設計竜巻による荷重

イ. 建屋内にある換気空調設備については、気圧差による荷重を考慮する。

ロ. 風圧力による荷重、気圧差による荷重を考慮する。防護ネット及び防護鋼板等による風圧力の低減は無いものとして保守的な評価を行う。また、極小飛来物である砂利による衝撃は瞬間的で、衝突時間が極めて短く、衝突される機器へ伝わる加速度が小さいことから、機器へ作用する荷重は構造強度に影響を与えないので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。

(イ) 風圧力による荷重 (W_w)

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

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

b. 荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重の組合せは、評価対象施設ごとに設定する。

なお、開放された施設であるため、ディーゼル発電機室ーフベントファン及び中央制御室換気系冷凍機内外に気圧差は発生しないことから気圧差による荷重は考慮しない。

隔離弁の耐圧部には、気圧差による荷重が作用する。
 建屋内のファンのケーシングには、気圧差による荷重が作用する。
 屋外のファン及び冷凍機には、自重及び風圧力による荷重が作用する。
 強度評価の荷重の組合せを表3-9に示す。

表3-9 荷重の組合せ

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

3.4 許容限界

(1) 衝突評価における許容限界

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

表3-10 屋外に設置する換気空調設備の外殻を構成する部材の厚さ

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

(2) 構造強度評価における許容限界

a. 角ダクトの許容限界

角ダクトの許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」

の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえ、「3.2 評価対象部位」にて設定している評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、許容応力状態Ⅲ_ASとする。

角ダクトの許容限界は、J E A G 4 6 0 1を準用し、「クラス2, 3配管」の許容限界を適用し、許容応力状態Ⅲ_ASから算出した許容応力を許容限界とする。ただし、妥当な安全裕度を考慮し、座屈を生じないように設定する許容限界は、座屈の算出式に応じた値を許容限界として設定する。J E A G 4 6 0 1に従い、J S M E付録材料図表Part5, 6の表にて許容応力を計算する際は、角ダクトの最高使用温度に応じた値をとるものとするが、温度がJ S M E付録材料図表記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算する。ただし、J S M E付録材料図表Part5, 6で比例法を用いる場合の端数処理は、小数点第1位以下を切り捨てた値を用いるものとする。

(a) 面外荷重及び外圧による面内荷重に対する許容限界

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

表 3-11 角ダクトの許容限界

状態	許容限界
	一次応力
	曲げ
許容応力状態 Ⅲ _A S	S _y

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

自重により発生する曲げモーメントMと発生応力 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。



ここで,

$$\sigma_y = S_y$$

b. 丸ダクトの許容限界

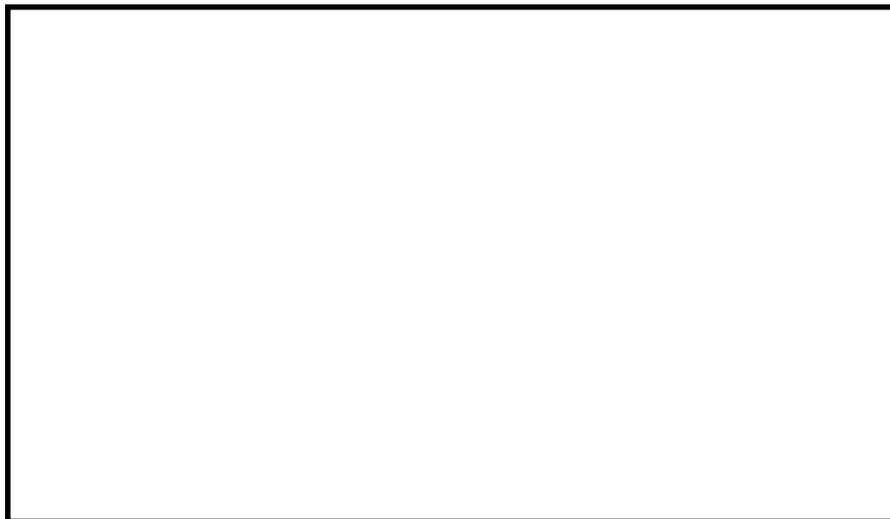
丸ダクトの許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえ、「3.2 評価対象部位」にて設定している評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、クリップリング座屈の算出式に応じた値とする。

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

(a) 外圧に対する許容限界

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

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



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

自重により作用する曲げモーメント M_p と外圧 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ピング座屈が発生する際に作用する曲げモーメント $M_{c r i p}$ は、下式より算出する。



c. 隔離弁の許容限界

隔離弁の許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえ、「3.2 評価対象部位」にて設定している評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し設定する。

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

d. ファンの許容限界

ファンの許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえ、「3.2 評価対象部位」にて設定している評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、許容応力状態 $III_A S$ とする。

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

表3-12 ファンの許容限界（ケーシング）

状態	許容限界
	一次一般膜応力
許容応力状態 $III_A S$	$\text{Min}[S_y, 0.6 S_u]$

表3-13 ファンの許容限界（基礎ボルト，吐出フード取付ボルト）

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

(5) 冷凍機の許容限界

冷凍機の許容限界は，V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえ，「3.2 評価対象部位」にて設定している評価対象部位ごとに，機能損傷モードを考慮し，許容応力状態Ⅲ_ASとする。

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

表3-14 冷凍機の許容限界（取付ボルト）

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

3.5 評価方法

(1) 衝突評価の評価方法

屋外に設置する換気空調設備の衝突評価は，V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 強度評価方法」にて設定している衝突評価が必要な機器の評価式を用いる。

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

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

(2) 構造強度評価の評価方法

a. 角ダクトの評価方法

角ダクトの構造強度評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」にて設定している角ダクトの評価式を用いる。

(a) 計算モデル

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

角ダクトモデル図を図3-9に示す。

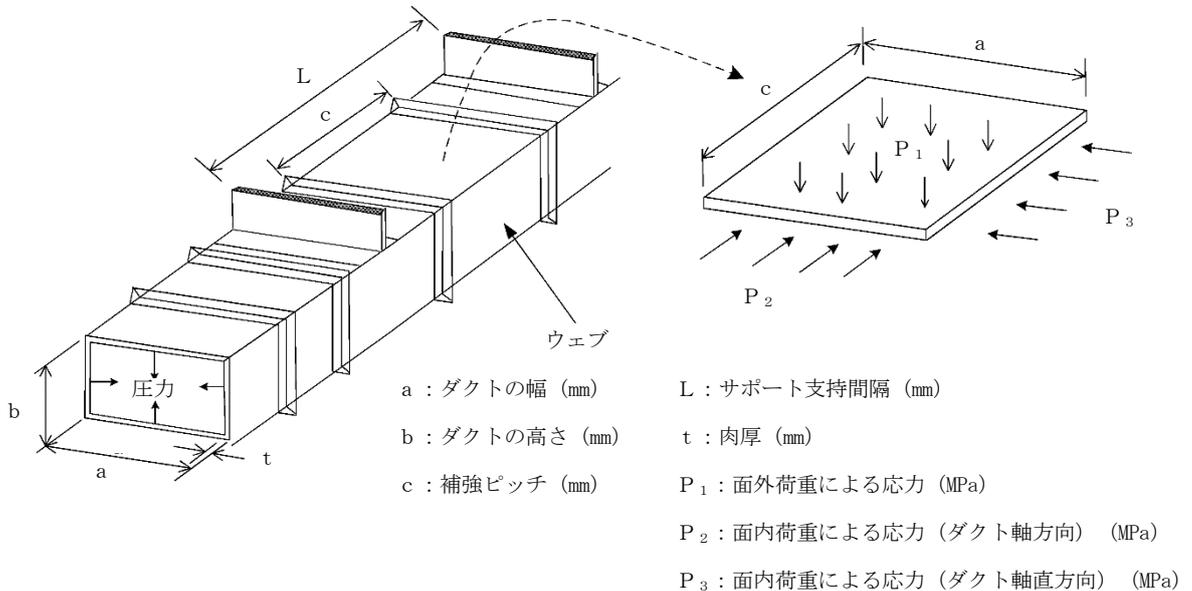


図3-9 角ダクトモデル図

(b) 計算方法

ダクトにかかる外圧は、設計竜巻により発生する気圧差が影響するので、

$$P = \Delta P$$

イ. 面外荷重による発生応力

4辺単純支持（周辺で水平，垂直方向の変位拘束，たわみ角は自由）の長方形板が等分布荷重を受ける場合において，中心に生じる外圧及び自重による面外荷重によ

り作用する最大応力 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「クリッピングの考え方」と日本機械学会ジャーナルの「薄肉長方形及び箱形はりの座屈と強度」に記載されている鶴戸口の式を準用する。

(イ) 外圧による発生応力

薄肉構造物のうち、長方形板の弾性座屈の式より算出する。



(ロ) 自重による曲げモーメント

自重によりダクト鋼板に作用する曲げモーメントは、以下の式により算出する。

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

b. 丸ダクトの評価方法

丸ダクトの構造強度評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」にて設定している評価式を用いる。

(a) 計算モデル

丸ダクトは両端を補強部材で支持された円筒の梁とみなし、計算を行う。丸ダクトモデル図を図3-10に示す。

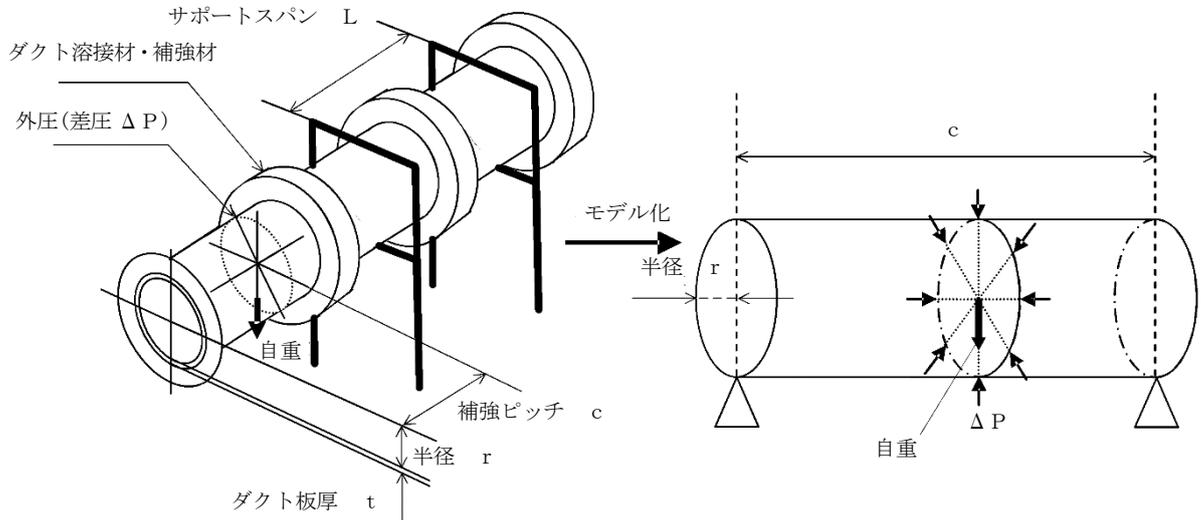


図3-10 丸ダクトモデル図

(b) 計算方法

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

イ. 外圧により生じる周方向応力 $\sigma_{c r i p l}$

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

ロ. 自重により作用する曲げモーメント M_p

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

c. 隔離弁の評価方法

隔離弁の構造強度評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」にて設定している評価方法を用いる。

(a) 弁箱

イ. 計算モデル

弁箱は両端を補強部材で支持された円筒の梁とみなし、計算を行う。弁箱のモデル図を図3-11に示す。

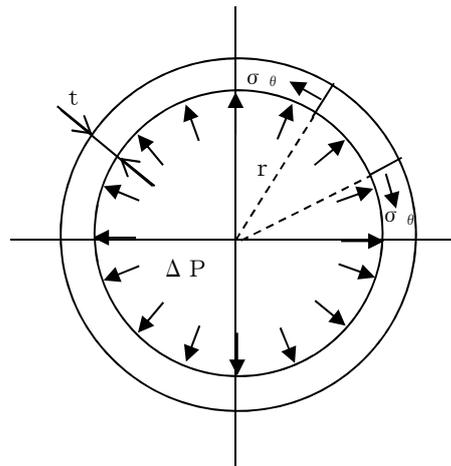


図3-11 弁箱モデル図

ロ. 計算方法

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

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

(b) 弁体

イ. 計算モデル

弁体は円板であるため、等分布荷重が作用する周辺支持円板とみなし、計算を行う。評価モデルを図 3-12 に示す。

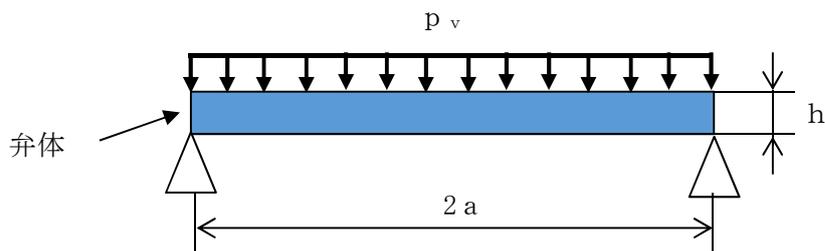


図 3-12 弁体モデル図

ロ. 計算方法

弁体に作用する曲げ応力の計算方法を以下に示す。

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

$$P_1 = \Delta P$$

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

ここで

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

弁体に受ける応力 p_v は次による。

$$p_v = P_1 + P_2$$

弁体に対する曲げ応力は次による。

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

(c) 弁棒

イ. 計算モデル

弁体を受ける等分布荷重を支持する弁棒断面について、計算を行う。評価モデルを図 3-13 に示す。

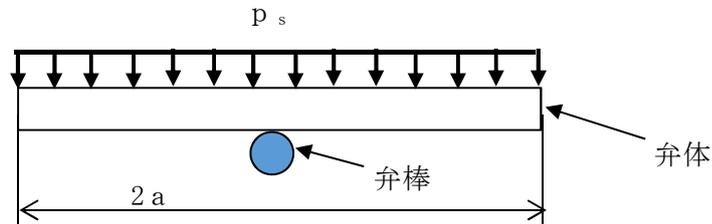


図 3-13 弁棒モデル図

ロ. 計算方法

弁棒に作用するせん断応力の計算方法を以下に示す。

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

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

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

弁棒に受ける荷重 p_s は次による。

$$p_s = F_1 + F_2$$

弁棒に対するせん断応力は次による。

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

ここで

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

d. ファンの評価方法

ファンの構造強度評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」にて設定している評価式を用いる。

(a) 中央制御室換気系フィルタ系ファン

イ. 計算モデル

ファンは両端を補強部材で支持された円筒の梁とみなし、計算を行う。ファンケーシングモデル図を図3-14に示す。

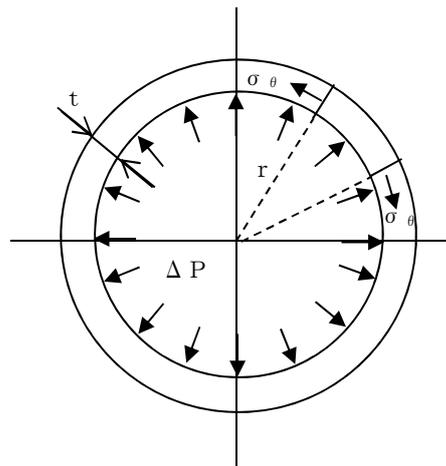


図3-14 ファンケーシングモデル図

ロ. 計算方法

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

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

(b) ディーゼル発電機室ルーフトファン
イ. 計算モデル

ファンの計算モデルは1質点モデルとし、ファンの上端に複合荷重が作用することとする。受圧面積を含めたファンモデル図を図3-15に、基礎ボルト配置図及び吐出フード取付ボルト配置図を図3-16、図3-17に示す。

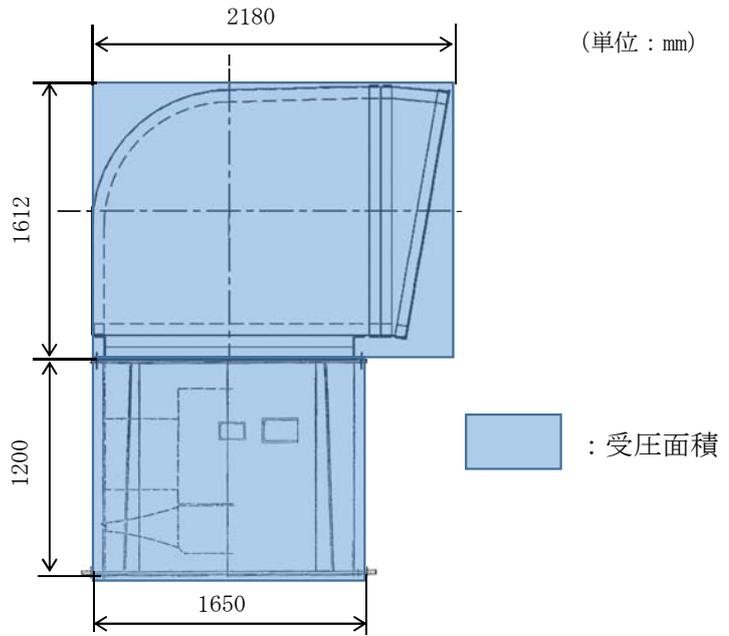


図 3-15 ファンモデル図

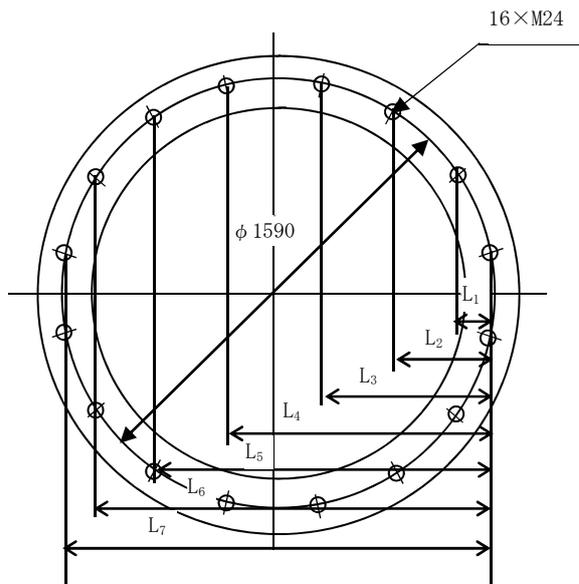


図 3-16 基礎ボルト配置図

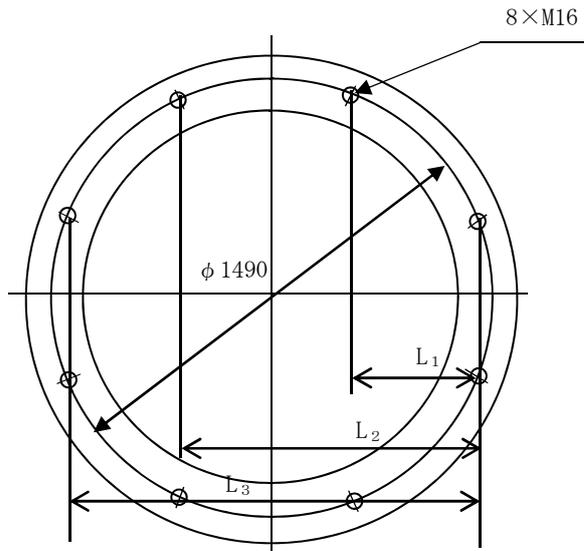


図 3-17 吐出フード取付ボルト配置図

ロ. 計算方法

(イ) 引張応力

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

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

(3.1) (3.2) 式より,

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

ここで

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

基礎ボルト, 吐出フード取付ボルトに生じる引張応力 σ_b は次式より求める。

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

(ロ) せん断応力

基礎ボルト, 吐出フード取付ボルトに対するせん断応力は, 基礎ボルト全本数で

受けるものとして計算する。

- ・ せん断力
 $Q_b = W_w$
- ・ せん断応力

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

e. 冷凍機の評価方法

冷凍機の構造強度評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」にて設定している評価式を用いる。

(a) 計算モデル

冷凍機の計算モデルは立方体の1質点モデルとし、全高の1/2の位置に複合荷重が作用することとする。冷凍機モデル図を図3-18に示す。

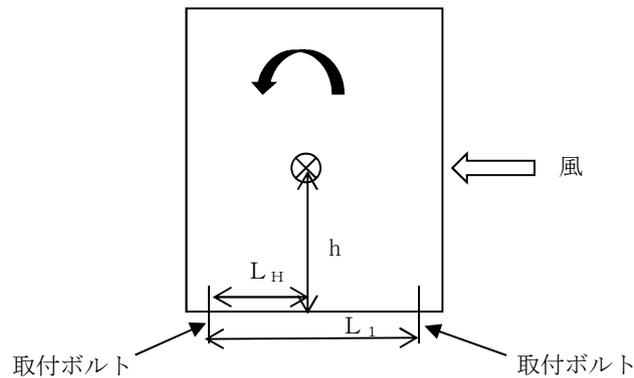


図 3-18 冷凍機モデル図

(b) 計算方法

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 3-18 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

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

(ロ) 引張応力

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

ロ. せん断応力

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。

- せん断力

$$Q_b = W_w$$

- せん断応力

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

4. 評価条件

(1) 角ダクト

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表4-1及び表4-2に示す。

角ダクトにおいて、気圧差による発生応力が最も大きくなるものは面外荷重であり、その発生応力比が最も厳しくなる系統の角ダクトについて記載する。

表 4-1 許容応力計算に用いる条件

材料	温度条件 (°C)	S _y (MPa)
SUS304	40	205

表 4-2 評価条件

系統	ダクト種別
中央制御室換気系	SUS

Δ P (N/m ²)	g (m/s ²)	ν (-)
8.9×10 ³	9.80665	0.3

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

μ (kg/m)	g D _p (N/m ²)	材質	最高使用温度 (°C)	E (MPa)
165.1	155.5	SUS304	40	193800

(2) 丸ダクト

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

表 4-3 評価条件

系統	ダクト種別
中央制御室換気系	SUS

ΔP (N/m ²)	g (m/s ²)	ν (-)
8.9×10^3	9.80665	0.3

ダクトサイズ (mm)	c (mm)	L (mm)
$\phi 450 \times 0.8$	960	3000

μ (kg/m)	材質	最高使用温度 (°C)	E (MPa)
31.3	SUS304	40	193800

(3) 隔離弁の評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表4-4～表4-7に示す。

表 4-4 許容応力計算に用いる条件

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

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

ΔP (N/m ²)	r (mm)	t (mm)	a (mm)	m _v (kg)
8.9×10^3	1150	12	1133	1370

m _s (kg)	g (m/s ²)	h (mm)	d (mm)
315	9.80665	32	150

表 4-6 評価条件（原子炉建屋換気系隔離弁（SB2-11A, 11B））

ΔP (N/m ²)	r (mm)	t (mm)	a (mm)	m _v (kg)
8.9×10^3	241	28	217	35

m _s (kg)	g (m/s ²)	h (mm)	d (mm)
10	9.80665	30	42

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

ΔP (N/m ²)	r (mm)	t (mm)	a (mm)	m _v (kg)
8.9×10^3	222.5	25	215	53

m _s (kg)	g (m/s ²)	h (mm)	d (mm)
10	9.80665	10	58

(4) ファンの評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表4-8～表4-11に示す。

表 4-8 許容応力計算に用いる条件（中央制御室換気系フィルタ系ファン）

評価対象部位	材料	温度条件 (°C)	S _y (MPa)	S _u (MPa)
ケーシング	SS400	40	245	400

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

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

注記 * : 周囲環境温度

表 4-10 評価条件 (中央制御室換気系フィルタ系ファン)

ΔP (N/m ²)	r (mm)	t (mm)
8.9×10^3	595.5	4.5

表 4-11 評価条件 (ディーゼル発電機室ルーフベントファン基礎ボルト)

q (N/m ²)	G (-)	W_M (N)	ケーシングの 風力係数 C (-)	吐出フードの 風力係数 C (-)
6.1×10^3	1.0	0	1.2	2.4

ケーシングの 受圧面積 A (m ²)	吐出フードの 受圧面積 A (m ²)	L_1 (mm)	L_2 (mm)	L_3 (mm)
1.980	3.514	118.7	338.0	624.6

L_4 (mm)	L_5 (mm)	L_6 (mm)	L_7 (mm)	g (m/s ²)
934.8	1221.4	1440.7	1559.4	9.80665

m (kg)	ボルト サイズ	N (-)	A_b (mm ²)	h (mm)
2440	M24	16	452.4	2812

表 4-12 評価条件 (ディーゼル発電機室ルーフトファン吐出フード取付ボルト)

q (N/m ²)	G (-)	W _M (N)	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)
6.1×10 ³	1.0	0	403.2	973.4

L ₃ (mm)	C (-)	g (m/s ²)	A (m ²)	m (kg)
1376.6	2.4	9.80665	3.514	1500

A _b (mm ²)	h (mm)	ボルト サイズ	N (-)
201.1	1612	M16	8

(5) 冷凍機の評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表4-13, 表4-14に示す。

表 4-13 許容応力計算に用いる条件

評価対象部位	材料	温度条件 (°C)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F (MPa)	1.5 f _t (MPa)	1.5 f _s (MPa)
取付ボルト	SS400	50*	231	394	231	173	133

注記 * : 周囲環境温度

表 4-14 評価条件

q (N/m ²)	G (-)	W _M (N)	L _H (mm)	L ₁ (mm)
6.1×10 ³	1	0	910.0	1890

C (-)	g (m/s ²)	A (m ²)	m (kg)	ボルト サイズ
2.4	9.80665	11.48	4680	M20

n _f (-)	N (-)	A _b (mm ²)	h (mm)
4	8	314.2	1125

5. 強度評価結果

(1) 衝突評価結果

竜巻発生時の砂利の貫通限界厚さを表 5-1 に示す。

表 5-1 砂利の貫通限界厚さ

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

砂利の貫通限界厚さ(0.97 mm)と屋外に設置する換気空調設備の外殻を構成する部材の厚さとの比較を表5-2に示す。

砂利の貫通限界厚さは、屋外に設置する換気空調設備の外殻を構成する部材の厚さ未満である。

表 5-2 防護対象施設の衝突評価結果 (砂利)

防護対象施設	外殻を構成する部材の厚さ (mm)	貫通限界厚さ T (mm)	結果
ディーゼル発電機室 ルーフトントファン	9.00	0.97	貫通しない
中央制御室換気系冷 凍機	1.00	0.97	貫通しない

(2) 構造強度評価結果

a. 角ダクト

角ダクト鋼板 (本体) の構造強度評価結果を表5-3に示す。

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

表 5-3 評価結果 (角ダクト)

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

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

b. 丸ダクト

丸ダクト鋼板 (本体) の構造強度評価結果を表5-4に示す。

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

表 5-4 評価結果 (丸ダクト)

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

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

c. 隔離弁

隔離弁の構造強度評価結果を表5-5～表5-7に示す。

弁箱、弁体、弁棒に発生する応力は許容応力以下である。

表 5-5 評価結果（弁箱）

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

表 5-6 評価結果（弁体）

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

表 5-7 評価結果（弁棒）

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

d. ファン

ファンの構造強度評価結果を表5-8、表5-9に示す。

ケーシングに発生する周方向応力は、許容応力以下である。

基礎ボルト及び吐出フード取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-8 評価結果 (ケーシング)

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

表 5-9 評価結果 (基礎ボルト, 吐出フード取付ボルト)

評価対象施設		応力分類	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
ディーゼル発電機室 ルーフベントファン	基礎ボルト	引張	39	173
		せん断	10	133
		組合せ	39	173
	吐出フード取付 ボルト	引張	83	173
		せん断	32	133
		組合せ	83	173

e. 冷凍機

冷凍機の竜巻発生時の構造強度評価結果を表5-10に示す。

取付ボルトに発生する周応力は、許容応力以下である。

表 5-10 評価結果 (取付ボルト)

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

V-3-別添 1-1-6 ディーゼル発電機用海水ポンプの強度計算書

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.....	2
2.4 適用規格.....	5
3. 強度評価方法.....	6
3.1 記号の定義.....	6
3.2 評価対象部位.....	10
3.3 荷重及び荷重の組合せ.....	13
3.4 許容限界.....	16
3.5 評価方法.....	17
4. 評価条件.....	29
5. 強度評価結果.....	33

1. 概要

本資料は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、非常用ディーゼル発電機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。）が竜巻時及び竜巻通過後においても、送水機能の維持を考慮して、主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

ディーゼル発電機用海水ポンプについて、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、ディーゼル発電機用海水ポンプの「2.1 位置」、「2.2 構造概要」、「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

2.1 位置

ディーゼル発電機用海水ポンプは、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示すとおり、屋外の海水ポンプ室に設置する。

海水ポンプ室の位置図を図2-1に示す。

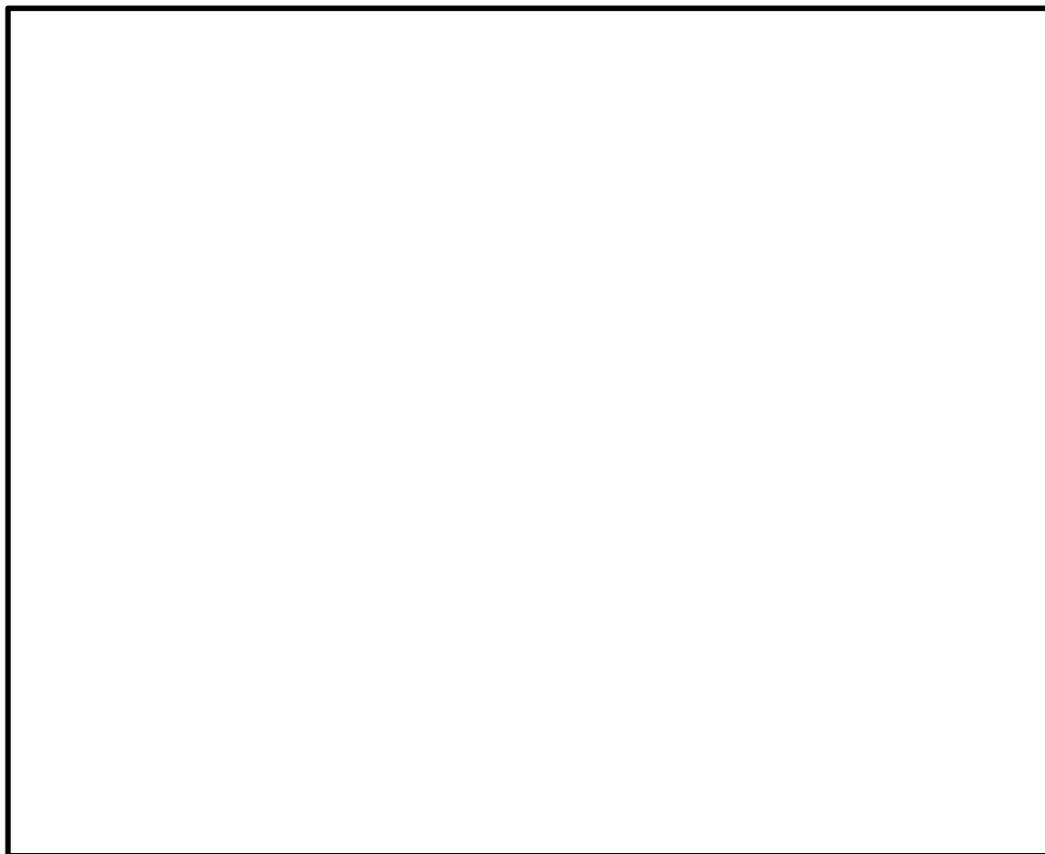


図 2-1 海水ポンプ室の位置図

2.2 構造概要

ディーゼル発電機用海水ポンプについて、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、ディーゼル発電機用海水ポンプの構造を示す。

ディーゼル発電機用海水ポンプは、ポンプ据付面から原動機台までのポンプ部と、原動機台より上部の原動機部からなる立形ポンプであり、同一設計のディーゼル発電機用海水ポンプを3台設置している。ディーゼル発電機用海水ポンプの概要図を図2-2に示す。

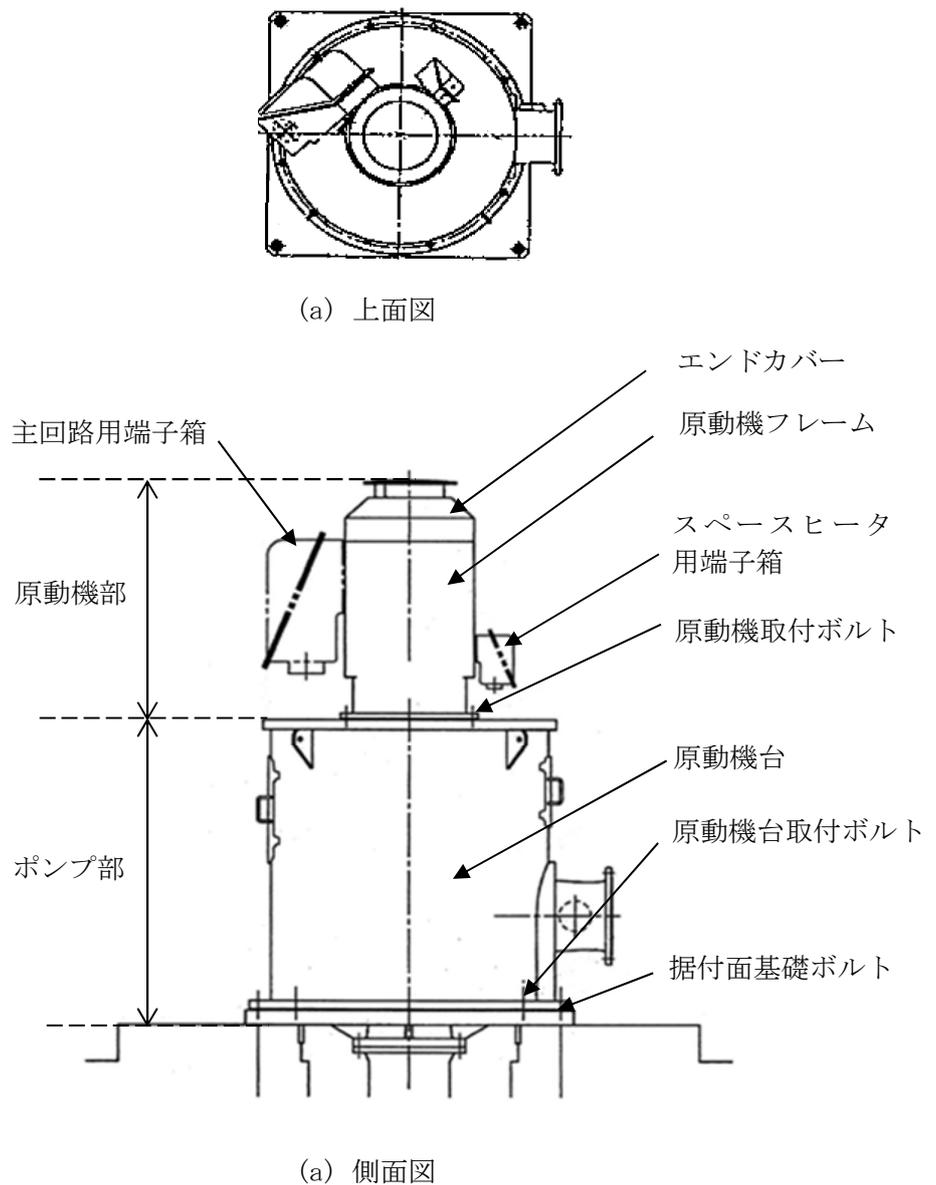


図2-2 ディーゼル発電機用海水ポンプの概要図

2.3 評価方針

ディーゼル発電機用海水ポンプの強度評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している、荷重

及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、ディーゼル発電機用海水ポンプの評価対象部位に作用する貫入及び応力等が、許容限界に収まることを「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

ディーゼル発電機用海水ポンプの強度評価においては、その構造を踏まえ、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を選定する。

(1) 衝突評価の評価方針

ディーゼル発電機用海水ポンプの衝突評価フローを図2-3に示す。衝突評価においては、竜巻防護ネットを設置する場合に考慮する飛来物である砂利の貫通限界厚さが外殻を構成する部材の厚さ未満であることを確認する。衝突評価では、「タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日原子炉安全専門審査会）」で用いられている式を準用し、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 強度評価方法」に示す衝突評価が必要な機器の評価式を用いる。ディーゼル発電機用海水ポンプの衝突評価における許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 許容限界」に示す許容限界である、外殻を構成する部材の厚さとする。

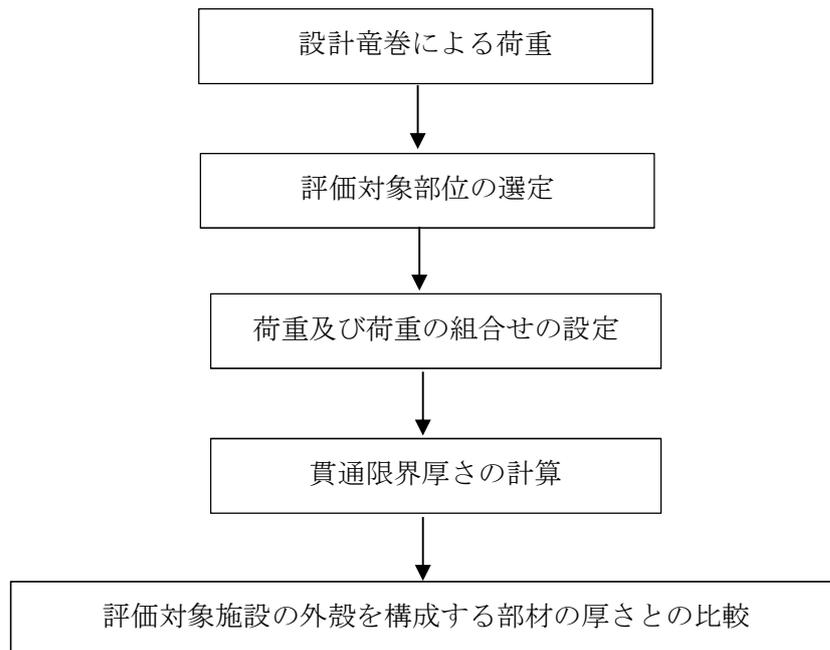


図2-3 ディーゼル発電機用海水ポンプの衝突評価フロー

(2) 構造強度評価の評価方針

ディーゼル発電機用海水ポンプの構造強度評価フローを図2-4に示す。構造強度評価においては、ディーゼル発電機用海水ポンプに対して、設計竜巻による荷重に運転時の状態で作用する荷重及び自重を加えた応力が許容応力以下であることを確認する。各部材の構造強度評価において、その部材に対して応力が大きくなる方向から風が当たることを想定する。各部材の構造強度評価には、設計竜巻による荷重は水平方向より作用する外荷重という観点で

地震荷重と同等なものであると考え、「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1・補-1984」（（社）日本電気協会）、「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987」（（社）日本電気協会）及び「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」（（社）日本電気協会）（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）における1質点系モデルによる評価方法を準用し、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価式を用いる。

ディーゼル発電機用海水ポンプの構造強度評価における許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、J E A G 4 6 0 1の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

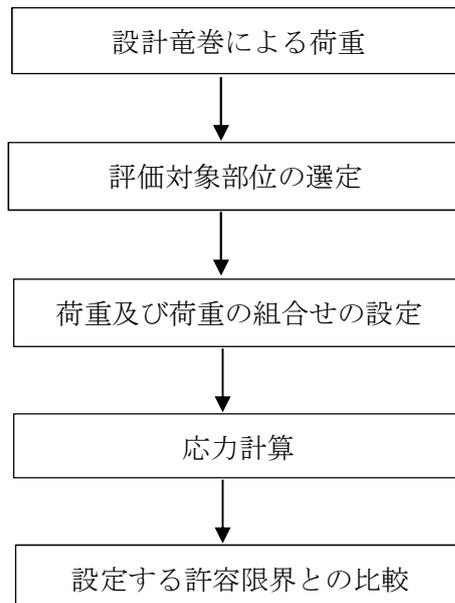


図2-4 ディーゼル発電機用海水ポンプの構造強度評価フロー

(3) 動的機能維持評価の評価方針

ディーゼル発電機用海水ポンプの動的機能維持評価フローを図2-5に示す。残留熱除去系海水系ポンプは動的機器であるため、構造強度評価に加え、軸受部の動的機能維持評価を行う。動的機能維持評価においては、ディーゼル発電機用海水ポンプ据付面から上部の受圧面積が大きくなる方向から風が当たるとを想定し、設計竜巻の風圧力による荷重を受けた際のフレーム変位により生じる軸受荷重が接触面圧の許容荷重以下であることを確認する。動的機能維持評価では、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価式を用いる。ディーゼル発電機用海水ポンプの動的機能維持評価における許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、軸受部の接触面圧の許容荷重とする。

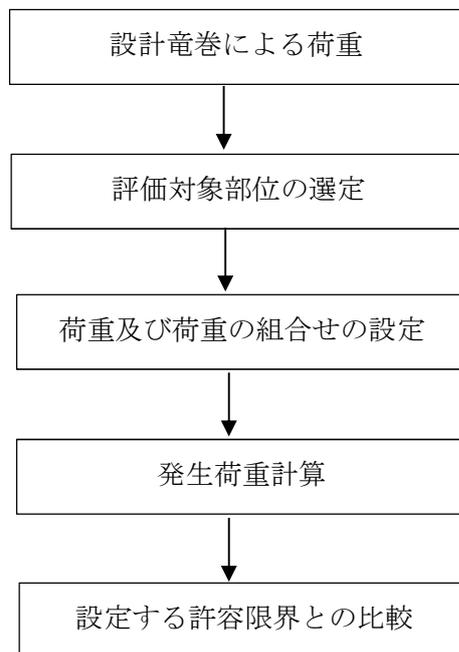


図2-5 ディーゼル発電機用海水ポンプの動的機能維持評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・「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）」
- ・「建築物荷重指針・同解説」（（社）日本建築学会，2004改定）
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1・補-1984」（社）日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987」（社）日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」（社）日本電気協会
- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 J S M E S N C 1-2005/2007」（社）日本機械学会（以下「J S M E」という。）

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 衝突評価の記号の定義

ディーゼル発電機用海水ポンプの衝突評価に用いる記号を表3-1に示す。

表3-1 衝突評価に用いる記号

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

(2) 構造強度評価及び動的機能維持評価の記号の定義

ディーゼル発電機用海水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3-2及び表3-3に示す。

表3-2 構造強度評価に用いる記号(1/2)

記号	単位	定義
A	m ²	受圧面積（風向に垂直な面に投影した面積）
A _b	mm ²	ボルトの断面積
A ₁	m ²	主回路端子箱側面の受圧面積
A ₂	m ²	主回路端子箱上面の受圧面積
A ₃	m ²	原動機フレームの受圧面積
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
D	mm	原動機フレーム外径
d	mm	原動機フレーム内径
F	MPa	J S M E SSB-3121.1(1)により規定される値
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
f _s	MPa	J S M E SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容せん断応力
f _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
G	—	ガスト影響係数
g	m/s ²	重力加速度

表3-2 構造強度評価に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
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
L	mm	重心と支点間の距離
L_H	mm	重心と支点間の距離
$L_1 \sim L_4$	mm	支点と評価ボルト間の距離
L_i	mm	各ボルト間の距離
M	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
m	kg	質量
N	—	ボルトの本数
q	N/m ²	設計用速度圧
S_y	MPa	J SME 付録材料図表Part5の表にて規定される設計降伏点
S_u	MPa	J SME 付録材料図表Part5の表にて規定される設計引張強さ
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	設計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	mm ³	断面係数
ΔP	N/m ²	設計竜巻の気圧低下量
π	—	円周率
σ	MPa	原動機フレームの曲げ応力
σ_{bt}	MPa	ボルトの引張応力
τ	MPa	せん断応力

表3-3 動的機能維持評価に用いる記号 (1/2)

記号	単位	定義
A	m ²	受圧面積 (風向に垂直な面に投影した面積)
a	mm	部材間の長さ
a ₁	mm	ポンプ据付面から荷重作用点までの長さ
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
E	MPa	縦弾性係数
E _p	MPa	原動機台の縦弾性係数
E _m '	MPa	回転子の縦弾性係数
G	—	ガスト影響係数
h'	mm	基準点から作用点までの距離
h ₁ '	mm	荷重作用点から荷重作用点までの距離
I	mm ⁴	断面二次モーメント
I _m '	mm ⁴	回転子の断面二次モーメント
I _p	mm ⁴	原動機台の断面二次モーメント
i	rad	傾斜
i ₁	rad	ポンプ据付面から荷重作用点の傾斜
M	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
M _a	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
q	N/m ²	設計用速度圧
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・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
W _M	N	設計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
x ₁	mm	荷重作用点から原動機下部軸受部までの距離
x ₂	mm	原動機下部軸受部から原動機上部軸受部までの距離
x'	mm	評価対象部から支点までの距離
x _a '	mm	ポンプグランド部から原動機下部軸受部までの距離
x _b '	mm	原動機下部軸受部から原動機上部軸受部までの距離
y	mm	たわみ量
y ₁	mm	ポンプ据付面から荷重作用点のたわみ量
y ₂	mm	荷重作用点から原動機下部軸受部のたわみ量
y ₃	mm	原動機下部軸受部から原動機上部軸受部のたわみ量

表3-3 動的機能維持評価に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
y_a	mm	原動機下部案内軸受部のたわみ量
y_b	mm	原動機上部案内軸受部のたわみ量
δ	mm	フレーム変位量
ΔP	N/m ²	設計竜巻の気圧低下量

3.2 評価対象部位

ディーゼル発電機用海水ポンプの評価対象部位は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 許容限界」にて示す評価対象部位を踏まえ、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し選定する。

(1) 衝突評価の評価対象部位

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

ディーゼル発電機用海水ポンプ地上部の全方向からの飛来物を考慮し、貫入により施設の機能が喪失する可能性がある箇所として最薄部となる主回路端子箱、スペースヒーター用端子箱を選定する。

ディーゼル発電機用海水ポンプの衝突評価における評価対象部位を図3-1に示す。

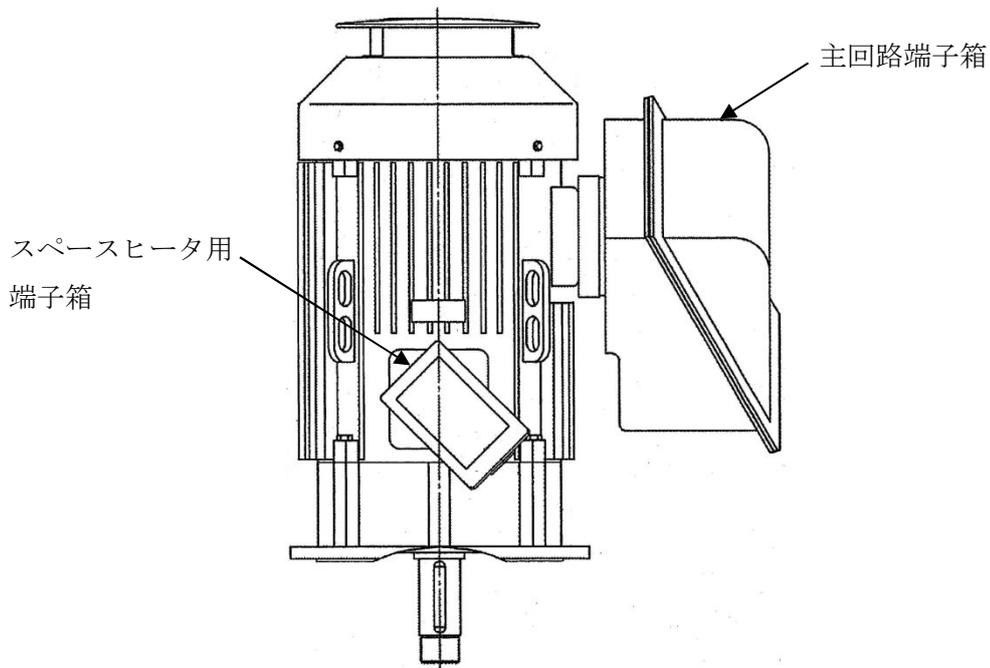


図3-1 ディーゼル発電機用海水ポンプの評価対象部位（衝突評価）

(2) 構造強度評価の評価対象部位

a. ポンプ部

ポンプ部について、原動機部等に作用する設計竜巻による荷重は、原動機フレーム及び原動機台に作用し、原動機台を介して、基礎面及び原動機部を固定しているボルトに作用する。荷重を受ける各部位のうち、支持断面積の小さな部位に大きな応力が生じることになる。

このことから、以下の部位を構造強度評価の評価対象部位として選定する。

- ・原動機取付ボルト
- ・原動機台取付ボルト
- ・据付面基礎ボルト

b. 原動機部

原動機部について，原動機部等に作用する設計竜巻による荷重は，原動機フレーム及び付属品に作用し，原動機フレーム及び付属品を介して，付属品の取付部を固定するボルトに作用する。

このことから，以下の部位を構造強度評価の評価対象部位として選定する。

- ・原動機フレーム
- ・主回路端子箱取付ボルト
- ・スペースヒータ用端子箱取付ボルト
- ・エンドカバー取付ボルト

ディーゼル発電機用海水ポンプの構造強度評価における評価対象部位を図3-2，図3-3に示す。

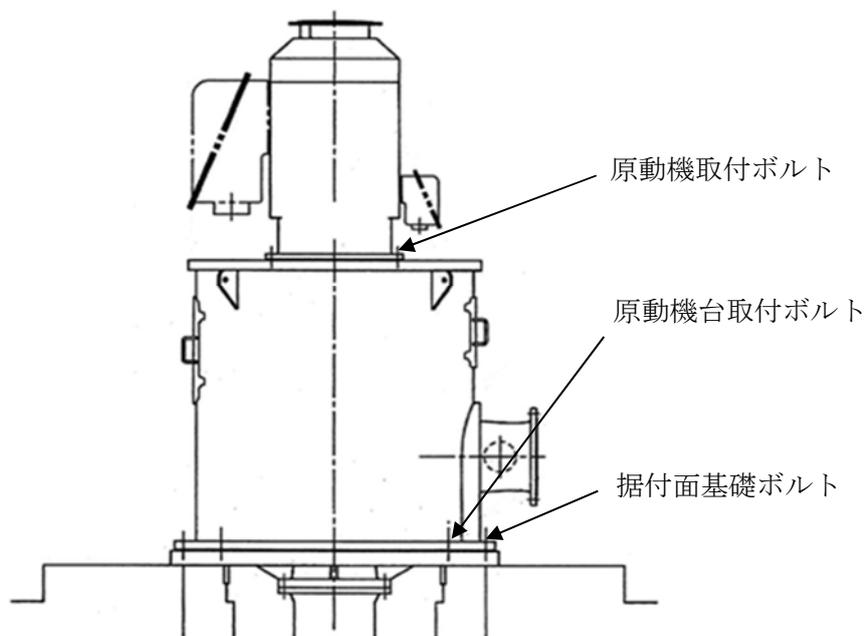


図3-2 ディーゼル発電機用海水ポンプの構造強度評価部位図（ポンプ部）

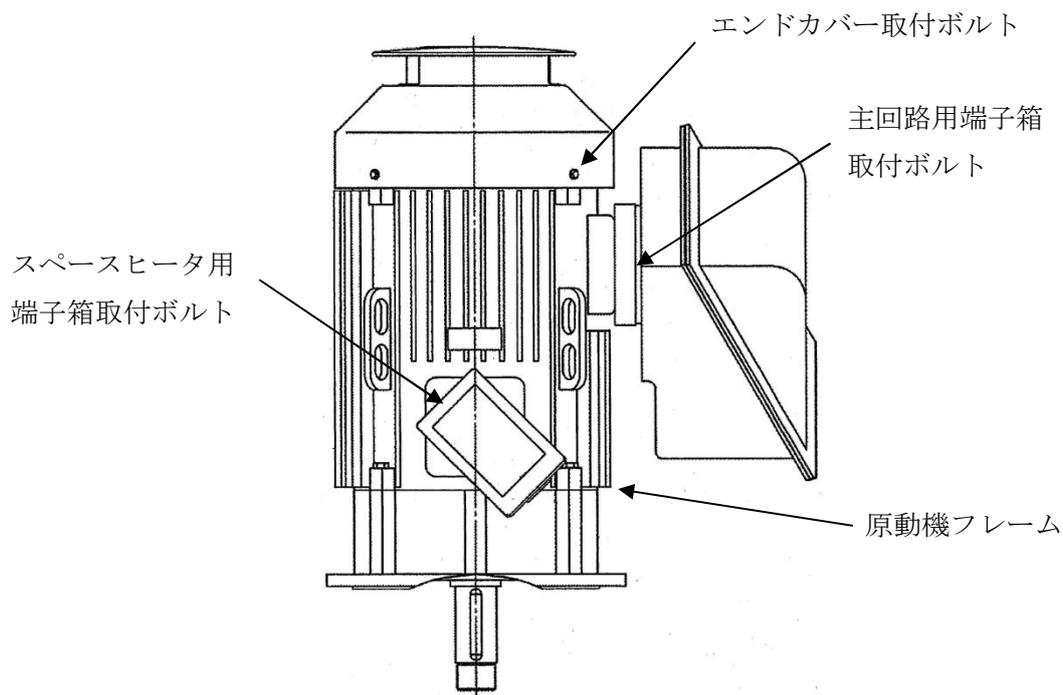


図 3-3 ディーゼル発電機用海水ポンプの構造強度評価部位図（原動機部）

(3) 動的機能維持評価の評価対象部位

ポンプ据付面より上部に竜巻により荷重を受けた際に、原動機フレーム等が変位することにより軸と軸受が接触した場合に動的機能維持が困難となるため、以下の部位を動的機能維持評価の評価対象部位として選定する。

- ・原動機下部軸受部
- ・原動機上部軸受部

ディーゼル発電機用海水ポンプの動的機能維持評価における評価対象部位を図 3-4 に示す。

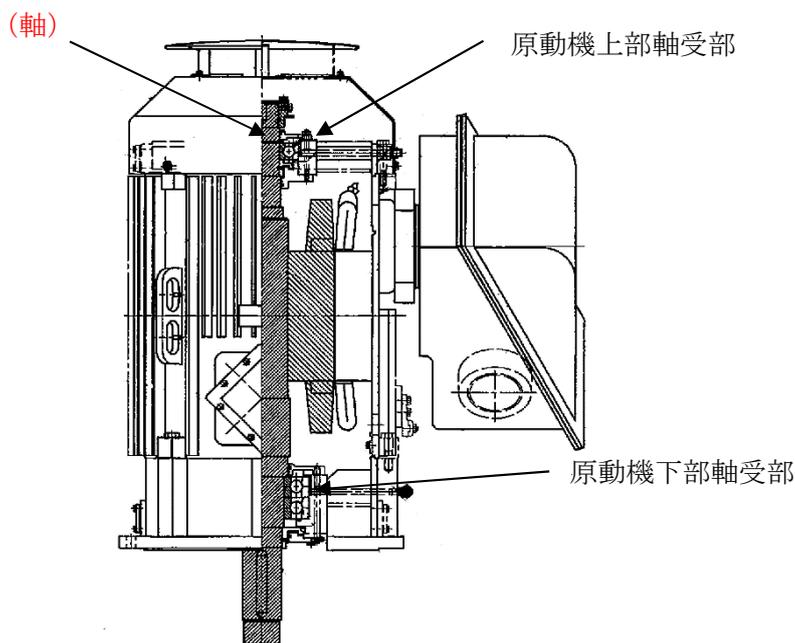


図 3-4 ディーゼル発電機用海水ポンプ動的機能維持評価対象部位概略図

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、V-3-別添 1-1 「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

(1) 衝突評価の荷重及び荷重の組合せ

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

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

砂利の諸元を表3-4、ディーゼル発電機用海水ポンプの衝突評価に用いる荷重を表3-5に示す。

表3-4 砂利の諸元

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

表3-5 ディーゼル発電機用海水ポンプの衝突評価に用いる荷重

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
屋外の防護対象施設	ディーゼル発電機用 海水ポンプ	・主回路端子箱 ・スペースヒータ用端子箱	飛来物による 衝撃荷重

(2) 構造強度評価及び動的機能維持評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の設定

構造強度評価及び動的機能維持評価に用いる荷重を以下に示す。

(a) 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、持続的に生じる荷重である自重を考慮する。

自重による荷重は以下のとおり計算する。

$$H = m \cdot g$$

(b) 設計竜巻による荷重

風圧力による荷重，気圧差による荷重を考慮する。防護ネット及び防護鋼板等による風圧力の低減は無いものとして保守的な評価を行う。また，極小飛来物である砂利による衝撃は瞬間的で，衝突時間が極めて短く，衝突される機器へ伝わる加速度が小さいことから，機器へ作用する荷重は構造強度に影響を与えないので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。

イ. 風圧力による荷重(W_w)

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

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

ロ. 気圧差による荷重(W_p)

気圧差による荷重 W_p はV-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1(3)c. (b) 気圧差による荷重」に示す式に従い，算出する。

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

ハ. 荷重の組合せ

設計竜巻による複合荷重 W_T (W_{T1} , W_{T2})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(2) 荷重の組合せ」に示す式に従い，算出する。なお，ディーゼル発電機用海水ポンプは気圧差が生じ難い構造であるため，複合荷重の選定において， W_{T2} としては気圧差を考慮するが， W_{T1} の評価は実施しない。

$$W_{T1} = W_p$$

$$W_{T2} = W_w + 0.5W_p + W_M$$

(c) 運転時の状態で作用する荷重

運転時の状態で作用する荷重としては，鉛直下向きに作用するポンプスラスト荷重を考慮する。

b. 荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重の組合せは、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」にて設定している荷重の組合せを踏まえ、ディーゼル発電機用海水ポンプの評価対象部位ごとに設定する。

ボルト材の構造強度評価時に評価対象部位が鉛直方向に取り付けられており、自重が抗力となる場合は保守的に考慮せず、水平方向に取り付けられている場合（主回路用端子箱取付ボルト、スペースヒータ用端子箱取付ボルト）は、端子箱自重を考慮する。また、運転時荷重が作用する評価対象部位は全て鉛直方向に取り付けられており、運転時荷重は鉛直方向下向きに作用し抗力となるため、それぞれの構造強度評価を行う際の荷重としては保守的に考慮しない。

ディーゼル発電機用海水ポンプの評価対象部位に作用する荷重及び強度評価にて考慮する荷重の組合せを表 3-6 に示す。

表 3-6 荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位		荷重	
屋外の外部 事象防護対 象施設	ディーゼル 発電機用海 水ポンプ	構造 強度 評価	ポンプ部	原動機取付ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重
				原動機台取付ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重
				据付面基礎ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重
			原動機部	原動機フレーム	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重
				主回路用端子箱取付ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重 ③端子箱自重
				スペースヒータ用端子箱取付ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重 ③端子箱自重
		エンドカバー取付ボルト		①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重	
		動的 機能 維持 評価	原動機上部軸受部	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重	
			原動機下部軸受部	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重	

3.4 許容限界

ディーゼル発電機用海水ポンプの許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界に従って、「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、J E A G 4 6 0 1に基づく許容応力状態Ⅲ_ASの許容応力の許容荷重を用いる。

(1) 衝突評価における許容限界

衝突評価における許容限界は、評価において考慮する飛来物による衝撃荷重に対し、外殻を構成する部材が、機能喪失に至る可能性のある変形を生じないことを計算により確認するため、評価式により算定した貫通限界厚さが外殻を構成する部材の厚さ未満であることを許容限界とする。ディーゼル発電機用海水ポンプの外殻を構成する部材の厚さを表3-7に示す。

表3-7 ディーゼル発電機用海水ポンプの外殻を構成する部材の厚さ

防護対象施設	外殻を構成する部材の厚さ
ディーゼル発電機用海水ポンプ	2.3mm (主回路端子箱, スペースヒータ用端子箱)

(2) 構造強度評価における許容限界

構造強度評価における許容限界はJ E A G 4 6 0 1を準用し、「クラス2,3支持構造物」の許容限界を適用し、許容応力状態Ⅲ_ASから算出した許容応力を許容限界とする。J E A G 4 6 0 1に従い、J S M E付録材料図表Part5,6の表にて許容応力を計算する際は、評価対象部位の最高使用温度又は周囲環境温度に応じた値をとるものとするが、温度がJ S M E付録材料図表記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算する。ただし、J S M E付録材料図表Part5,6で比例法を用いる場合の端数処理は、小数点第1位以下を切り捨てた値を用いるものとする。

ディーゼル発電機用海水ポンプの構造強度評価における許容限界について、表3-8に示す。

表3-8 ディーゼル発電機用海水ポンプの構造強度評価における許容限界

評価対象部位	許容応力状態	応力の種類		許容限界
ボルト	Ⅲ _A S	一次応力	引張	$1.5 f_t$
			せん断	$1.5 f_s$
			組合せ	$\text{Min} \{1.5 f_t, (2.1 f_t - 1.6 \tau)\}$
原動機フレーム	Ⅲ _A S	一次応力	曲げ	$1.5 f_b$

(3) 動的機能維持評価における許容限界

動的機能維持評価における許容限界は、設計荷重により原動機フレームが変形する場合においてもディーゼル発電機用海水ポンプの運転継続が可能であるように、軸受の接触面圧の許容荷重を許容限界とする。

軸受の接触面圧の許容荷重を表3-9に示す。

表3-9 軸受の接触面圧の許容荷重

評価対象部位	許容荷重 (N)
原動機上部軸受部	□
原動機下部軸受部	□

3.5 評価方法

(1) 衝突評価の評価方法

ディーゼル発電機用海水ポンプの衝突評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 強度評価方法」にて設定している衝突評価が必要な機器の評価式を用いる。

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

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

(2) 構造強度評価及び動的機能維持評価の評価方法

ディーゼル発電機用海水ポンプの構造強度評価及び動的機能維持評価は、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」にて設定している評価式を用いる。

a. 計算モデル

(a) 構造強度評価

計算モデルは1質点系モデルとし、ポンプ部は全高の1/2の位置に、原動機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。ポンプ部及び原動機部の応力の計算モデル図を図3-5及び図3-6に示す。

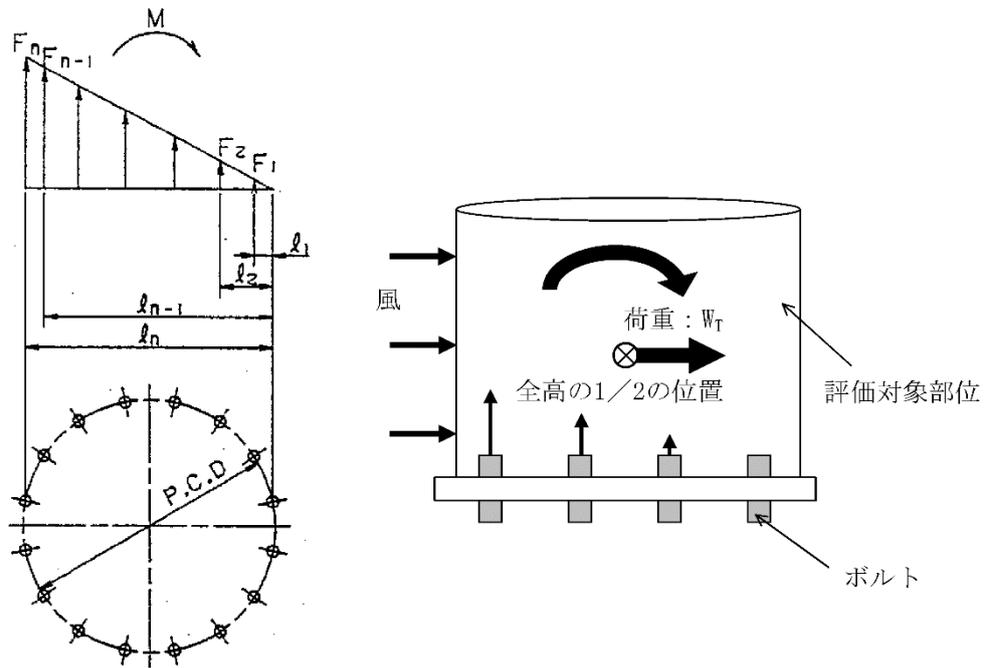


図 3-5 応力の計算モデル図 (ポンプ部)

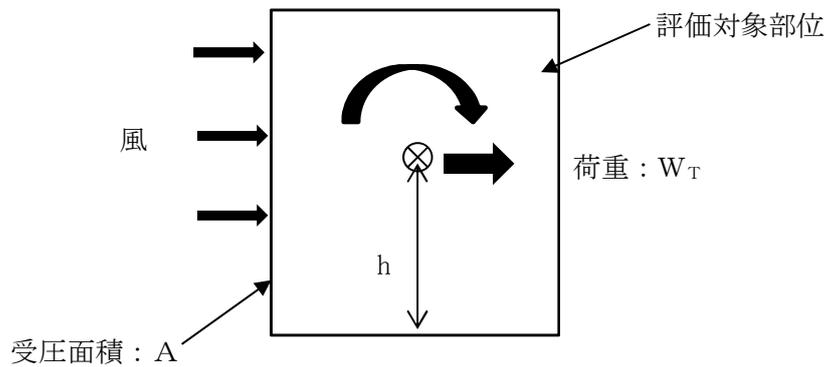


図 3-6 応力の計算モデル図 (原動機部)

(b) 動的機能維持評価

動的機能維持評価の際の原動機フレームのたわみ量計算において、ポンプ据付面から原動機台上端まで（ポンプ部）と、原動機台上端から原動機まで（原動機部）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。ポンプ部の断面性能は原動機台が最も小さいことから、原動機台の断面性能を一様に有する単純円筒形モデルとして評価する。原動機部については原動機フレームの断面性能を用いて評価する。たわみ量計算モデル図を図3-7に示す。

ポンプ据付面より上部の静止体(原動機フレーム等)は、水平方向の複合荷重により、ポンプ据付面を固定端として一方向に変形する。一方、回転体(ポンプ軸及び原動機軸)は、風荷重を受けないため、変形せず、原動機上部から鉛直方向に吊り下げられた状態を維持する。原動機フレーム等の変形により、軸受反力が許容荷重を超えないことを確認する。

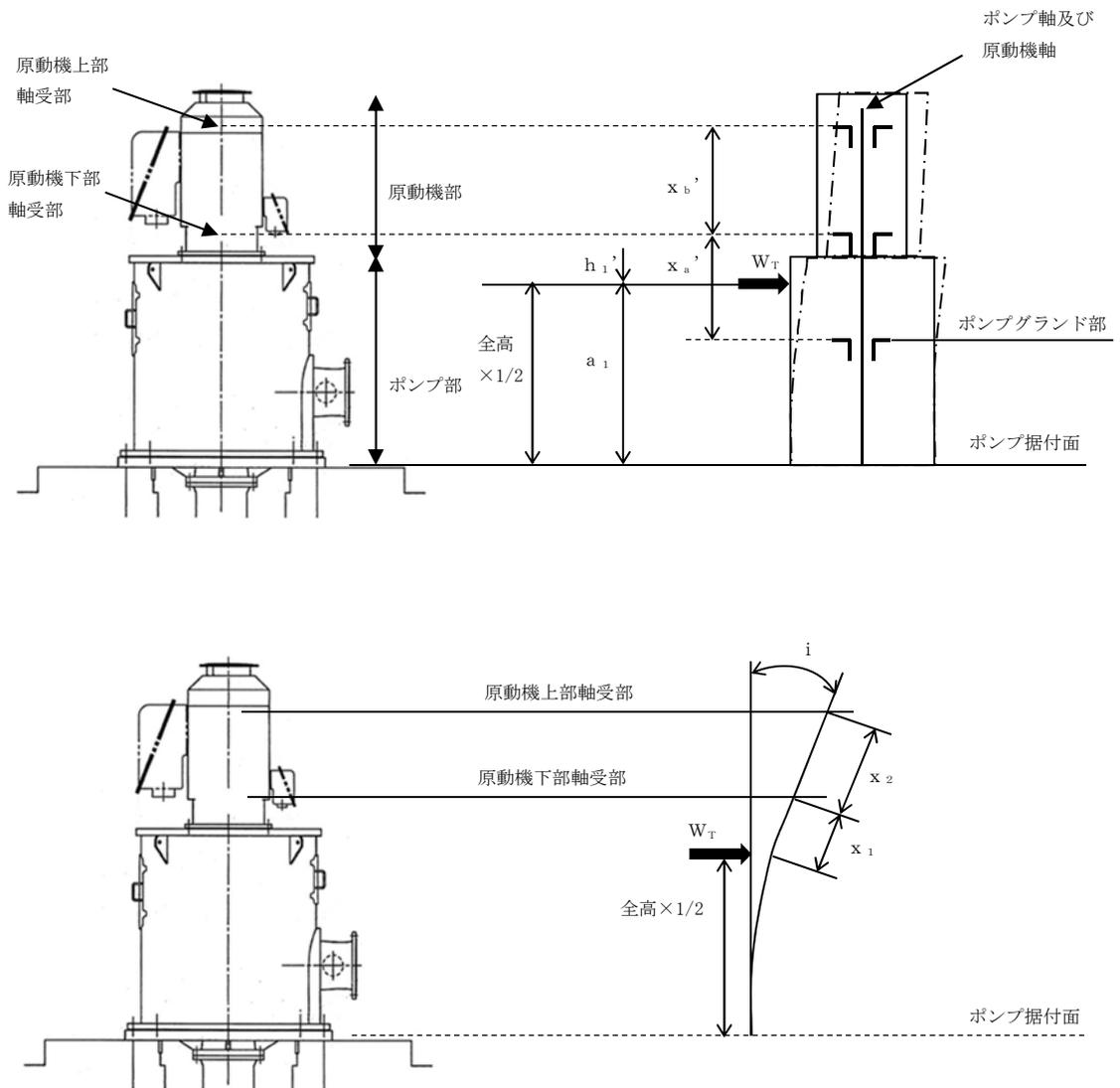


図 3-7 ディーゼル発電機用海水ポンプのたわみ量計算モデル図

b. 計算方法

(a) 応力の算出

イ. ポンプ部 (ボルト部)

原動機取付ボルト, 原動機台取付ボルト及び据付面基礎ボルトの各ボルト間寸法の配置図を図 3-8~図 3-10 に示す。

(イ) 風による転倒モーメントM

$$M = W_T \cdot \text{全高} / 2$$

(ロ) 引張応力 σ_{bt}

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

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

(3.1) (3.2) 式より,

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

よって,

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

(ハ) せん断応力 τ

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

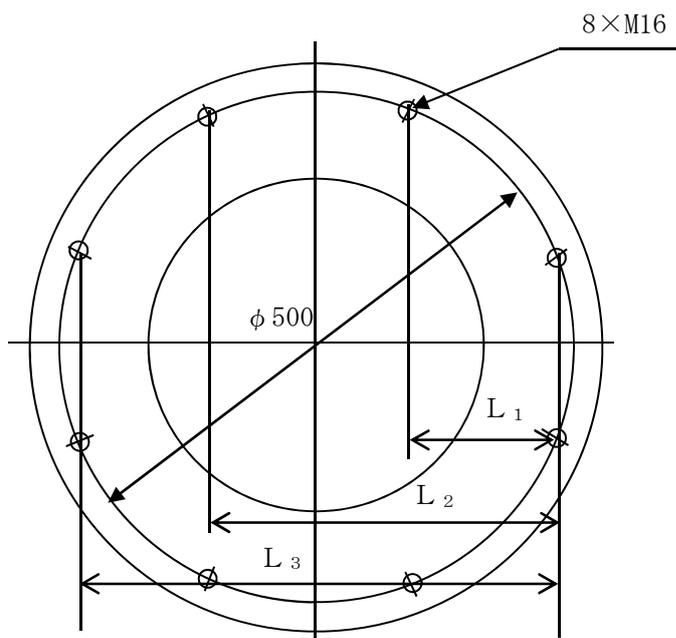


図 3-8 原動機取付ボルトの各ボルト間寸法の配置図

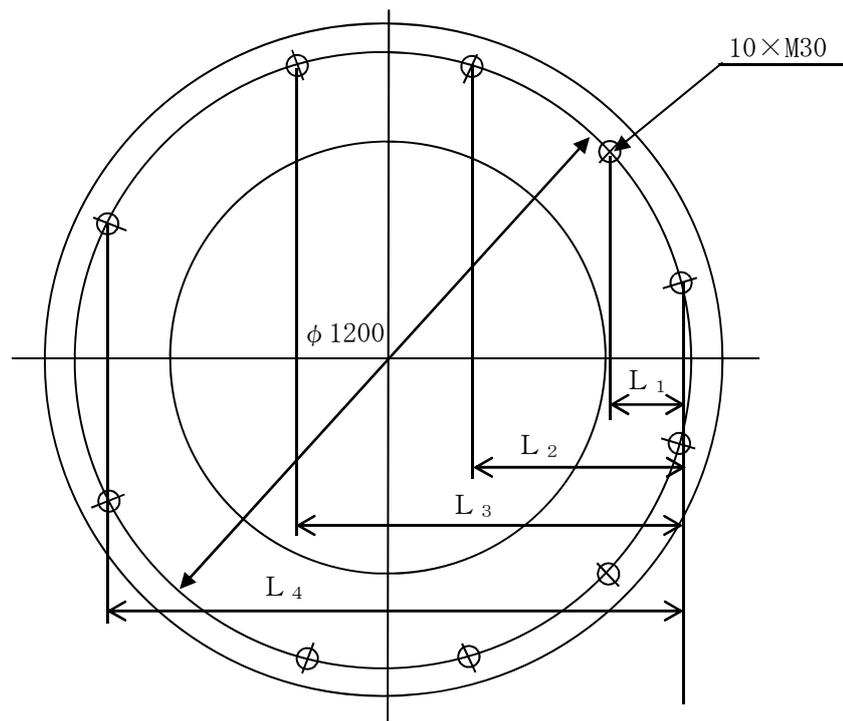


図 3-9 原動機台取付ボルトの各ボルト間寸法の配置図

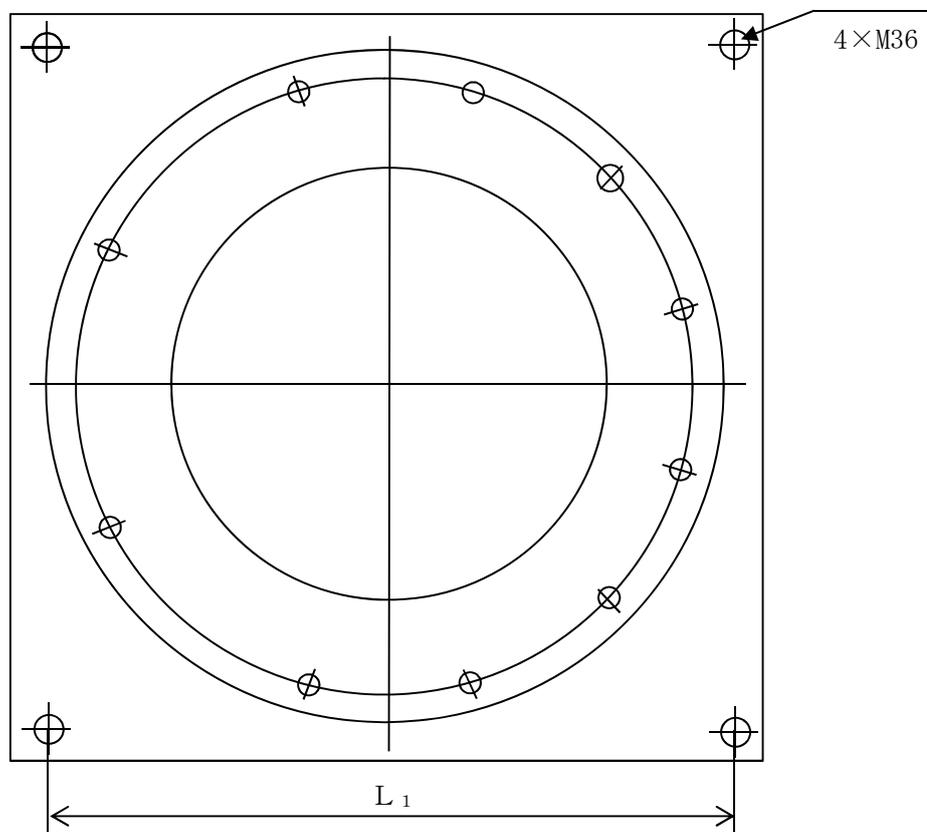


図 3-10 据付面基礎ボルトの各ボルト間寸法の配置図

ロ. 原動機部

原動機フレーム、主回路用端子箱ボルト部、スペースヒータ用端子箱ボルト部、エンドカバー取付ボルト部の詳細図を図3-11～図3-14に示す。

(イ) 風による転倒モーメントM

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

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

(ロ) 原動機フレーム

原動機フレームの応力算出方法を以下に示す。

・曲げ応力

$$\sigma = \frac{M}{Z}$$

ここで、

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

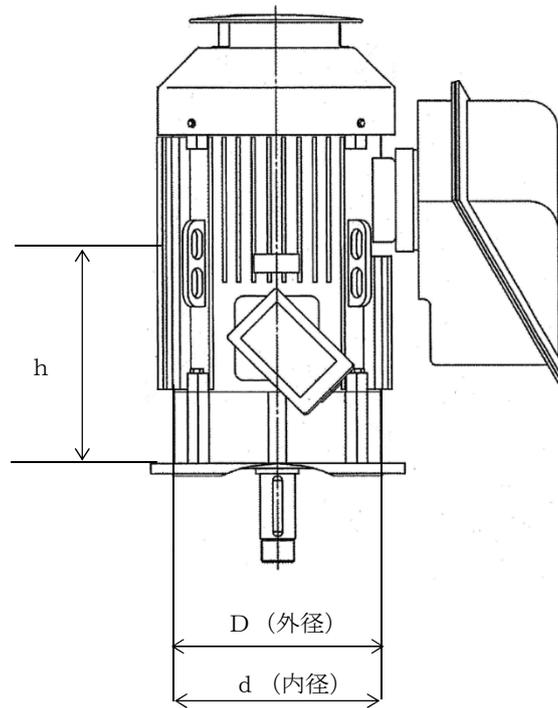


図 3-11 原動機フレーム詳細図

(ハ) 主回路用端子箱ボルト部、スペースヒータ用端子箱ボルト部

主回路用端子箱ボルト部、スペースヒータ用端子箱ボルト部の応力算出方法を以下に示す。

・引張応力

$$F_b = \frac{M}{L_1 \cdot N}$$

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

・せん断応力

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

ここで、

$$F_H = \sqrt{W_T^2 + H^2}$$

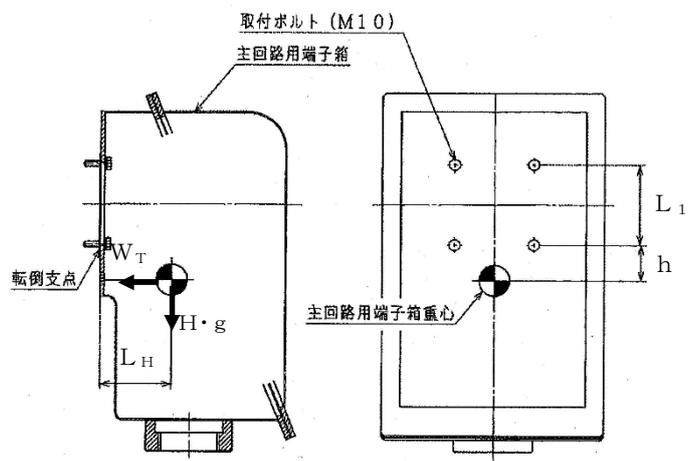


図 3-12 主回路用端子箱ボルト部詳細図

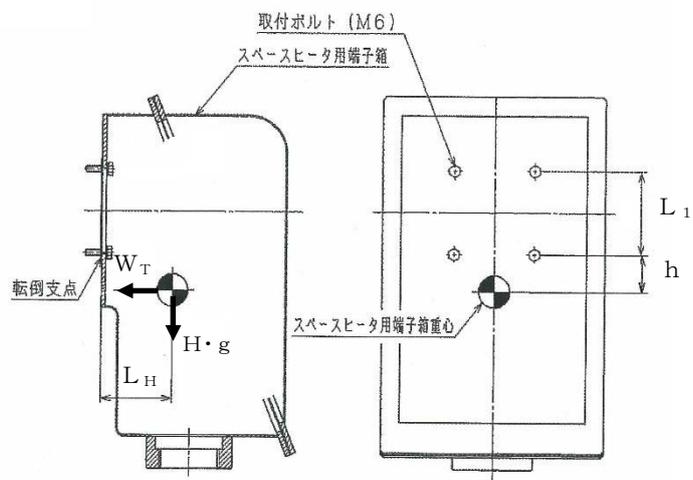


図 3-13 スペースヒータ用端子箱ボルト部詳細図

(二) エンドカバー取付ボルト部

エンドカバー取付ボルト部の応力算出方法を以下に示す。

・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。

(i) 風による転倒モーメントM

$$M = W_T \cdot h_u$$

(ii) 引張応力 σ_{bt}

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

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

(3.1) (3.2) 式より、

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

よって、

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

(iii) せん断応力 τ

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

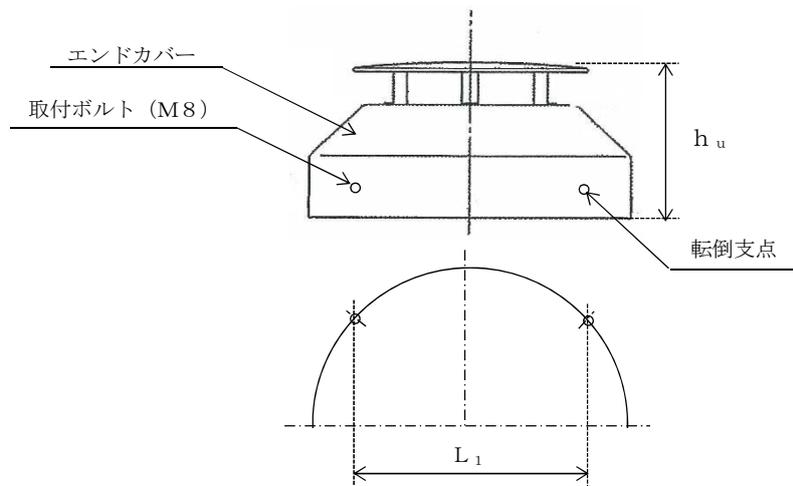


図 3-14 エンドカバー取付ボルト部詳細図

(b) 発生荷重の計算

イ. たわみ量の計算

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、主回路用端子箱、エンドカバー）のそれぞれの W_{T2} の合計を複合荷重 W' とする。

スペースヒータ用端子箱は原動機フレームと受圧面積が重なるため、荷重算出において考慮しない。

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

各部位の受圧部図を図3-15～図3-18に示す

(単位：mm)

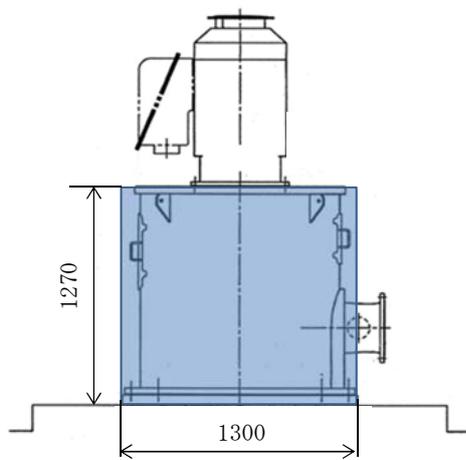


図3-15 原動機台の受圧部図

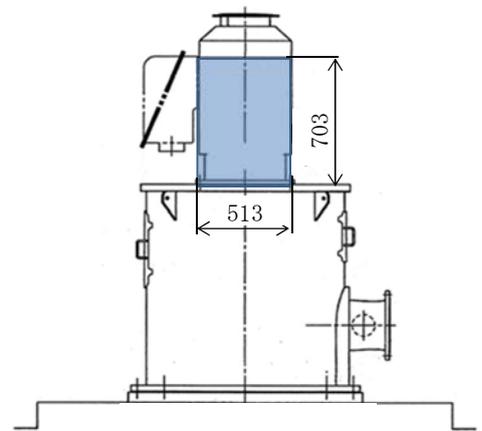


図3-16 原動機フレームの受圧部図

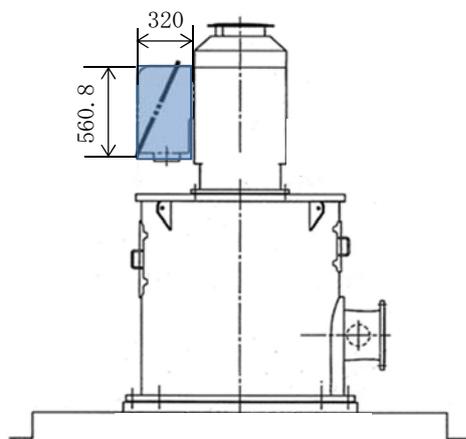


図3-17 主回路用端子箱の受圧部図

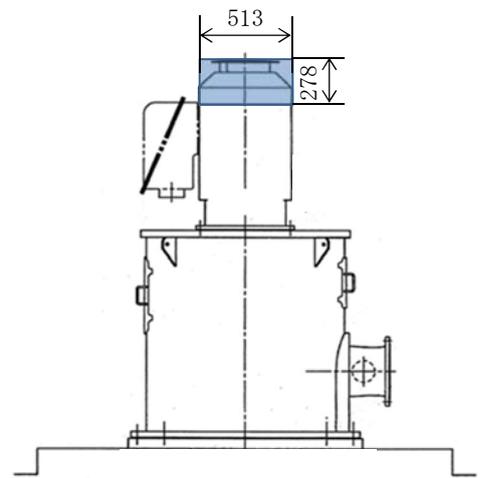


図3-18 エンドカバーの受圧部図

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

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

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

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

(イ) 原動機下部軸受部

・ポンプ据付面から荷重作用点のたわみ量 y_1 、傾斜 i_1

$$y_1 = \frac{M_a \cdot a_1^2}{2 \cdot E_p \cdot I_p} + \frac{W' \cdot a_1^3}{3 \cdot E_p \cdot I_p}$$

$$i_1 = \frac{M_a \cdot a_1}{E_p \cdot I_p} + \frac{W' \cdot a_1^2}{2 \cdot E_p \cdot I_p}$$

$$M_a = W' \cdot h_1'$$

ここで、原動機台の断面図を図3-19に示す。

(単位：mm)

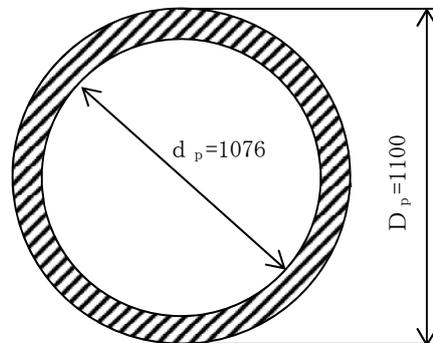


図3-19 原動機台の断面図

円筒形であるため、断面二次モーメントは以下のとおり算出する。

$$I_p = \frac{\pi (D_p^4 - d_p^4)}{64}$$

・荷重作用点から原動機下部軸受部のたわみ量 y_2

$$y_2 = x_1 \cdot \sin(i_1)$$

以上より、原動機下部軸受部のたわみ量は

$$y_a = y_1 + y_2$$

(ロ) 原動機上部軸受部

- ・原動機下部軸受部から原動機上部軸受部のたわみ量 y_3

$$y_3 = x_2 \cdot \sin(i_1)$$

以上より、原動機上部軸受部のたわみ量は

$$y_b = y_a + y_3$$

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

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

(イ) 原動機下部軸受部の発生荷重

$$W''_m = \frac{3 \cdot E_m' \cdot I_m' \cdot \delta_a}{x_a'^3}$$

ここで、 $\delta_a = y_a$

回転子（原動機部）の断面図を図3-20に示す。

(単位：mm)

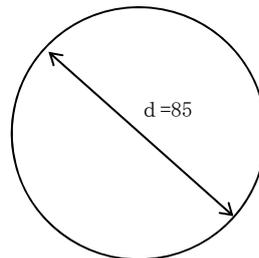


図3-20 回転子（原動機部）の断面図

回転子の断面二次モーメントは以下のとおり算出する。

$$I_m' = \frac{\pi d^4}{64}$$

(ロ) 原動機上部軸受部の発生荷重

$$W''_m = \frac{3 \cdot E_m' \cdot I_m' \cdot \delta_b}{x_b^3}$$

ここで、 $\delta_b = y_b - y_a$

4. 評価条件

(1) 構造強度評価の評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-1～表 4-9 に示す。

表 4-1 許容応力評価に用いる条件

評価対象部位	材料	温度条件 (°C)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F (MPa)	1.5 f _t (MPa)	1.5 f _s (MPa)	1.5 f _b (MPa)
原動機取付ボルト	SUS304	50*1	198	504	205	153	118	—
原動機台取付ボルト	SUS304	50*1	198	504	205	153	118	—
据付面基礎ボルト	S20C	50*1	241	391	241	180	139	—
原動機フレーム	SS400	95*2	223	374	223	—	—	257
主回路端子箱取付ボルト	SS400	100*2	221	373	221	165	127	—
スペースヒータ用端子箱取付ボルト	SS400	100*2	221	373	221	165	127	—
エンドカバー取付ボルト	SS400	50*1	241	394	241	180	139	—

注記 *1：周囲環境温度

*2：最高使用温度

表 4-2 評価条件

q (N/m ²)	G (-)	Δ P (N/m ²)	W _M (N)
6.1×10 ³	1.0	8.9×10 ³	0

表 4-3 評価条件 (原動機取付ボルト)

L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	L ₃ (mm)	C (-)	全高 (m)	A (m ²)
135.3	326.6	461.9	1.2	0.981	1.138

ボルト サイズ	N (-)	A _b (mm ²)
M16	8	201.1

表 4-4 評価条件（原動機台取付ボルト）

L_1 (mm)	L_2 (mm)	L_3 (mm)	L_4 (mm)	C (-)	全高 (m)
155.3	424.3	734.8	1099.2	1.2	2.251

A (m^2)	ボルト サイズ	N (-)	A_b (mm^2)
2.789	M30	10	706.9

表 4-5 評価条件（据付面基礎ボルト）

L_1 (mm)	C (-)	全高 (m)	A (m^2)	ボルト サイズ	N (-)
1200	1.2	2.251	2.789	36	4

A_b (mm^2)
1018

表 4-6 評価条件（原動機フレーム）

C (-)	h (mm)	A (m^2)	D (mm)	d (mm)
1.2	490.5	1.138	449	425

表 4-7 評価条件（主回路端子箱取付ボルト）

C (-)	A (m^2)	ボルト サイズ	A_b (mm^2)	m (kg)	g (m/s^2)
2.4	0.2019	M10	78.54	25	9.80665

N^* (-)	h (mm)	L_H (mm)	L_1 (mm)
4(2)	57.5	109.3	130

注記 * : () 内の数字は引張応力計算の際に考慮したボルトの本数

表 4-8 評価条件（スペースヒータ用端子箱取付ボルト）

C (-)	A (m ²)	ボルト サイズ	A _b (mm ²)	m (kg)	g (m/s ²)
2.4	0.0360	M6	28.27	3.6	9.80665

N*	h (mm)	L _H (mm)	L ₁ (mm)
4(2)	3.8	57.3	80

注記 * : () 内の数字は引張応力計算の際に考慮したボルトの本数

表 4-9 評価条件（エンドカバー取付ボルト）

C (-)	A (m ²)	ボルト サイズ	A _b (mm ²)	N (-)	L ₁ (mm)
1.2	0.1426	M8	50.27	4	362.7

h (mm)
278

(2) 動的機能維持評価の評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-10～表 4-14 に示す。

表 4-10 評価条件（たわみ量の算出）

原動機台の 風力係数 C (-)	原動機フレームの 風力係数 C (-)	主回路用端子箱の 風力係数 C (-)	エンドカバーの 風力係数 C (-)
1.2	1.2	2.4	1.2

原動機台の 受圧面積 A (m ²)	原動機フレームの 受圧面積 A (m ²)	主回路用端子箱の 受圧面積 A (m ²)	エンドカバーの 受圧面積 A (m ²)
1.651	0.3606	0.1795	0.1426

表 4-11 評価条件（原動機下部軸受部（たわみ量の算出））

変位量計算モデルの材質	温度 (°C)	q (N/m ²)	G (-)	ΔP (N/m ²)	W _M (N)
SS400	50	6.1×10 ³	1.0	8.9×10 ³	0

h ₁ ' (mm)	a ₁ (mm)	E _p (MPa)	I _p (mm ⁴)	x ₁ (mm)	y _a (mm)
0	1126	201000	6.070×10 ⁹	242.5	0.01485

表 4-12 評価条件（原動機下部軸受部（発生荷重の算出））

発生荷重計算モデルの材質	温度 (°C)	E _m ' (MPa)	I _m ' (mm ⁴)	x _a ' (mm)
S45C	50	200000	2.562×10 ⁶	640.5

表 4-13 評価条件（原動機上部軸受部（たわみ量の算出））

変位量計算モデルの材質	温度 (°C)	q (N/m ²)	G (-)	ΔP (N/m ²)	W _M (N)
SS400	50	6.1×10 ³	1.0	8.9×10 ³	0

x ₂ (mm)	y _b (mm)
669.5	0.02486

表 4-14 評価条件（原動機上部軸受部（発生荷重の算出））

発生荷重計算モデルの材質	温度 (°C)	E _m ' (MPa)	I _m ' (mm ⁴)	x _b ' (mm)
S45C	50	200000	2.562×10 ⁶	669.5

5. 強度評価結果

(1) 衝突評価結果

竜巻発生時の砂利の貫通限界厚さを表 5-1 に示す。

表 5-1 砂利の貫通限界厚さ

飛来物	貫通限界厚さ T (mm)	
	水平方向	鉛直方向
砂利	1.0	1.0

砂利の貫通限界厚さ(1.0mm)とディーゼル発電機用海水ポンプの外殻を構成する部材の厚さとの比較を表5-2に示す。

砂利の貫通限界厚さは、ディーゼル発電機用海水ポンプの外殻を構成する部材の厚さ未満である。

防護対象施設	外殻を構成する部材の厚さ (mm)	貫通限界厚さ T (mm)	結果
ディーゼル発電機用 海水ポンプ	2.3 (主回路端子箱, スペース ヒータ用端子箱)	1.0	貫通しない

(2) 構造強度評価結果

a. 原動機取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-1 に示す。

原動機取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-1 評価結果 (原動機取付ボルト)

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	23	153
せん断	9	118
組合せ	23	153

b. 原動機台取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-2 に示す。

原動機台取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-2 評価結果（原動機台取付ボルト）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	15	153
せん断	5	118
組合せ	15	153

c. 据付面基礎ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-3 に示す。

据付面基礎ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-3 評価結果（据付面基礎ボルト）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	16	180
せん断	9	139
組合せ	16	180

d. 原動機フレーム

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-4 に示す。

原動機フレームに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-4 評価結果（原動機フレーム）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
曲げ	4	257

e. 主回路端子箱取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-5 に示す。

主回路端子箱取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-5 評価結果（主回路端子箱取付ボルト）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	13	165
せん断	13	127
組合せ	13	165

f. スペースヒータ用端子箱取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-6 に示す。

スペースヒータ用端子箱取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-6 評価結果（スペースヒータ用端子箱取付ボルト）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	2	165
せん断	7	127
組合せ	2	165

g. エンドカバー取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-7 に示す。

エンドカバー取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-7 評価結果（エンドカバー取付ボルト）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	13	180
せん断	9	139
組合せ	13	180

(2) 動的機能維持評価結果

a. 原動機下部軸受部

竜巻発生時の動的機能維持評価結果を表 5-8 に示す。

原動機下部軸受部の発生荷重は，許容荷重以下である。

表 5-8 評価結果（原動機下部軸受部）

発生荷重 W'' (N)	許容荷重 (N)
87	

b. 原動機上部軸受部

竜巻発生時の動的機能維持評価結果を表 5-9 に示す。

原動機上部軸受部の発生荷重は，許容荷重以下である。

表 5-9 評価結果（原動機上部軸受部）

発生荷重 W'' (N)	許容荷重 (N)
52	

V-3-別添 1-1-7 ディーゼル発電機用海水ストレーナの強度計算書

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.....	2
2.4 適用規格.....	4
3. 強度評価方法.....	5
3.1 記号の定義.....	5
3.2 評価対象部位.....	6
3.3 荷重及び荷重の組合せ.....	7
3.4 許容限界.....	9
3.5 評価方法.....	10
4. 評価条件.....	13
5. 強度評価結果.....	14

1. 概要

本資料は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、非常用ディーゼル発電機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。）が竜巻時及び竜巻通過後においても、海中の固形物を除去する機能の維持を考慮して、主要な構造部材が構造健全性を有すことを確認するものである。

2. 基本方針

ディーゼル発電機用海水ストレーナについて、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、ディーゼル発電機用海水ストレーナの「2.1 位置」、「2.2 構造概要」、「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

2.1 位置

ディーゼル発電機用海水ストレーナは、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示すとおり、屋外の海水ポンプ室に設置する。

海水ポンプ室の位置図を図2-1に示す。

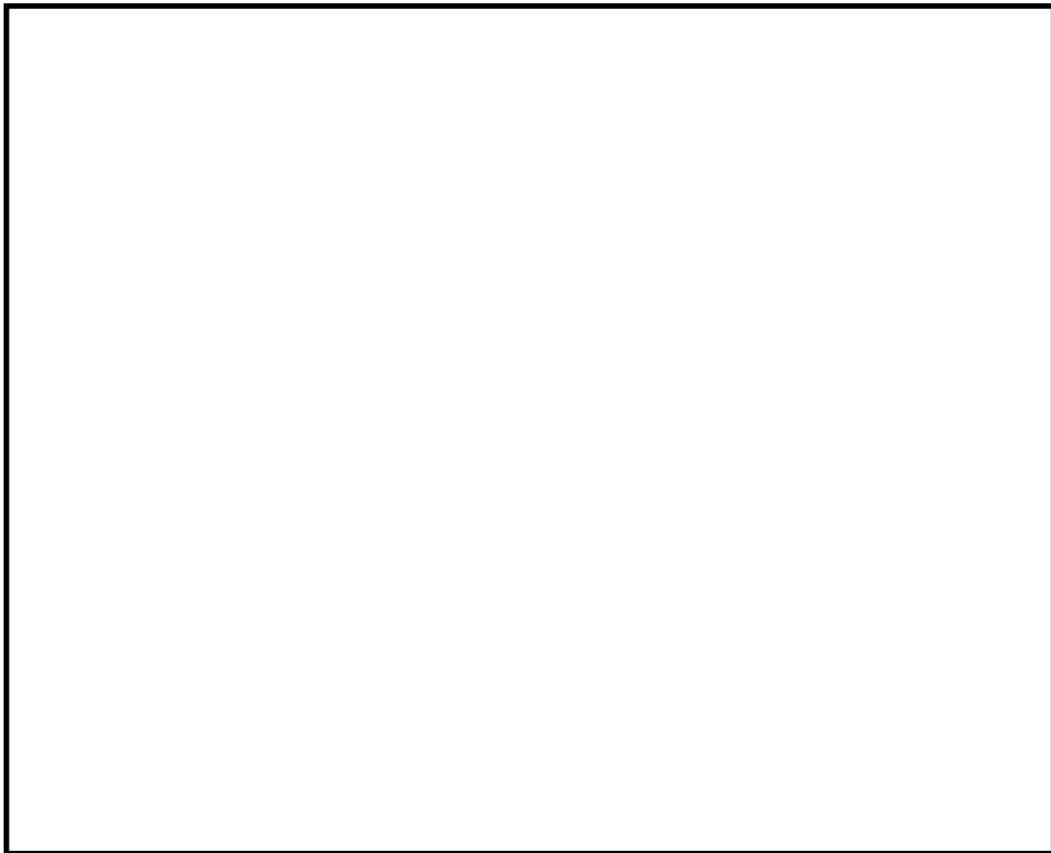


図 2-1 海水ポンプ室の位置図

2.2 構造概要

ディーゼル発電機用海水ストレーナの構造について、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえて設定する。

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った**構造**であり、**基礎ボルトで固定されている**。同一設計のディーゼル発電機用海水ストレーナを3台設置している。

ディーゼル発電機用海水ストレーナの概要図を図2-2に示す。

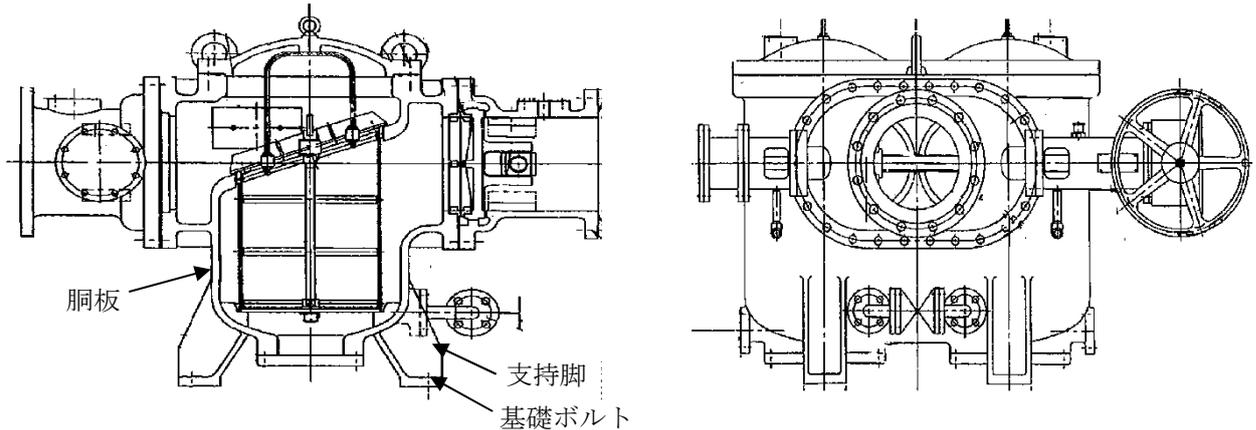


図2-2 ディーゼル発電機用海水ストレーナ概要図

2.3 評価方針

ディーゼル発電機用海水ストレーナの強度評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している、荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえて、ディーゼル発電機用海水ストレーナの評価対象部位に作用する貫入及び応力等が、許容限界に収まることを「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

ディーゼル発電機用海水ストレーナの強度評価においては、その構造を踏まえ、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を選定する。

(1) 衝突評価の評価方針

ディーゼル発電機用海水ストレーナの衝突評価フローを図2-3に示す。衝突評価においては、竜巻防護ネットを設置する場合に考慮する飛来物である砂利の貫通限界厚さが外壳を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ未満であることを確認する。衝突評価では、「タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日原子炉安全専門審査会）」で用いられている式を準用し、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 強度評価方法」に示す衝突評価が必要な機器の評価式を用いる。ディーゼル発電機用海水ストレーナの衝突評価における許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 許容限界」に示す許容限界である、外壳を構成す

る部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さとする。

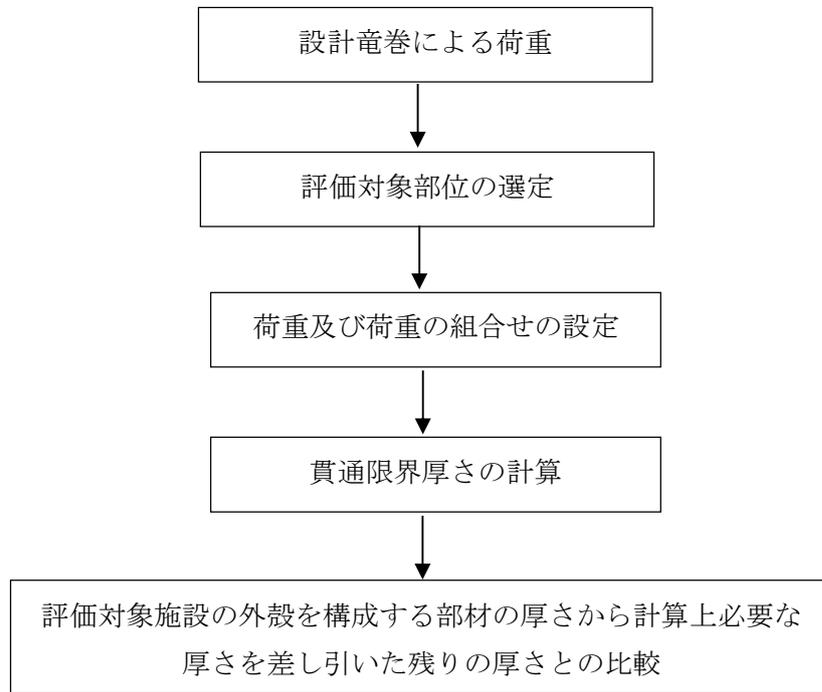


図2-3 ディーゼル発電機用海水ストレーナの衝突評価フロー

(2) 構造強度評価の評価方針

ディーゼル発電機用海水ストレーナの構造強度評価フローを図2-4に示す。構造強度評価においては、ディーゼル発電機用海水ストレーナに対して、設計竜巻による荷重に自重を加えた応力が許容応力以下であることを確認する。構造強度評価において、その部材に対して応力が大きくなる方向から風が当たることを想定する。各部材の構造強度評価には、設計竜巻による荷重は水平方向より作用する外荷重という観点で地震荷重と同等なものであると考え、「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1・補-1984」（（社）日本電気協会）、「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987」（（社）日本電気協会）及び「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」（（社）日本電気協会）（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）における1質点系モデルによる評価方法を準用し、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価式を用いる。

ディーゼル発電機用海水ストレーナの許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、J E A G 4 6 0 1の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

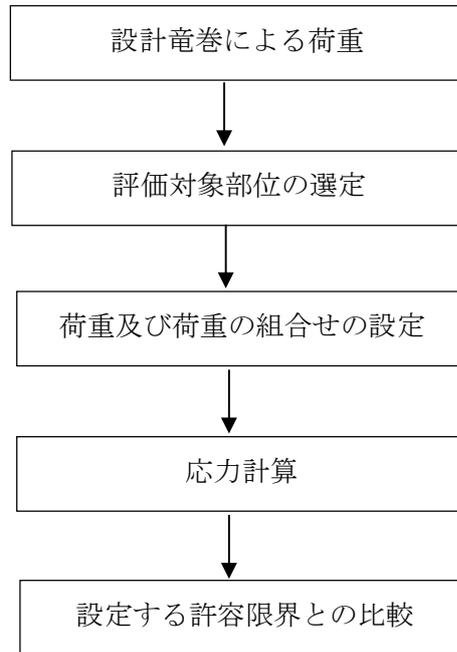


図2-4 ディーゼル発電機用海水ストレーナの構造強度評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・「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）」
- ・「建築物荷重指針・同解説」（（社）日本建築学会，2004改定）
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1・補-1984」（社）日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987」（社）日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」（社）日本電気協会
- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 J S M E S N C 1-2005/2007」（社）日本機械学会（以下「J S M E」という。）

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 衝突評価の記号の定義

ディーゼル発電機用海水ストレーナの衝突評価に用いる記号を表3-1に示す。

表3-1 衝突評価に用いる記号

記号	単位	定義
D_i	mm	胴の内径
d	m	評価において考慮する飛来物が衝突する衝突断面の等価直径
K	—	鋼板の材質に関する係数
M	kg	評価において考慮する飛来物の質量
P	MPa	最高使用圧力
S	MPa	許容引張応力
T	mm	鋼板の貫通限界厚さ
t	mm	胴の計算上必要な厚さ
v	m/s	評価において考慮する飛来物の飛来速度
η	—	継手効率

(2) 構造強度評価の記号の定義

ディーゼル発電機用海水ストレーナの強度評価に用いる記号を表3-1に示す。

表3-2 強度評価に用いる記号(1/2)

記号	単位	定義
A	m^2	受圧面積（風向に垂直な面に投影した面積）
A_b	mm^2	基礎ボルトの軸断面積
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
d	mm	基礎ボルト呼び径
D_o	mm	ストレーナ幅（全幅）
F	MPa	J S M E SSB-3121.1(1)により規定される値
F_b	N	基礎ボルトに対する引張力
f_s	MPa	J S M E SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容せん断応力
f_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
G	—	ガスト影響係数
g	m/s^2	重力加速度（ $g=9.80665$ ）
H	mm	ストレーナ高さ（全高）

表3-2 強度評価に用いる記号(2/2)

記号	単位	定義
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
q	N/m^2	設計用速度圧
S_u	MPa	J S M E 付録材料図表Part5の表にて規定される設計引張強さ
S_y	MPa	J S M E 付録材料図表Part5の表にて規定される設計降伏点
W_M	N	設計竜巻による飛来物の衝撃荷重
W_P	N	設計竜巻による気圧差による荷重
W_T	N	設計竜巻による複合荷重
W_{T1}	N	設計竜巻による複合荷重 ($W_{T1} = W_P$)
W_{T2}	N	設計竜巻による複合荷重 ($W_{T2} = W_W + 0.5 \cdot W_P + W_M$)
W_W	N	設計竜巻の風圧力による荷重
ΔP	N/m^2	設計竜巻の気圧低下量
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。

3.2 評価対象部位

ディーゼル発電機用海水ストレーナの評価対象部位は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

(1) 衝突評価の評価対象部位

評価において考慮する飛来物の衝突により、ディーゼル発電機用海水ストレーナに衝撃荷重が作用し貫入する可能性があるため、貫入によりその施設の機能が喪失する可能性のある箇所を評価対象部位として選定する。

ディーゼル発電機用海水ストレーナの全方向からの飛来物を考慮し、貫入により施設の機能が喪失する可能性がある箇所として胴板を選定する。

ディーゼル発電機用海水ストレーナの衝突評価における評価対象部位を図3-1に示す。

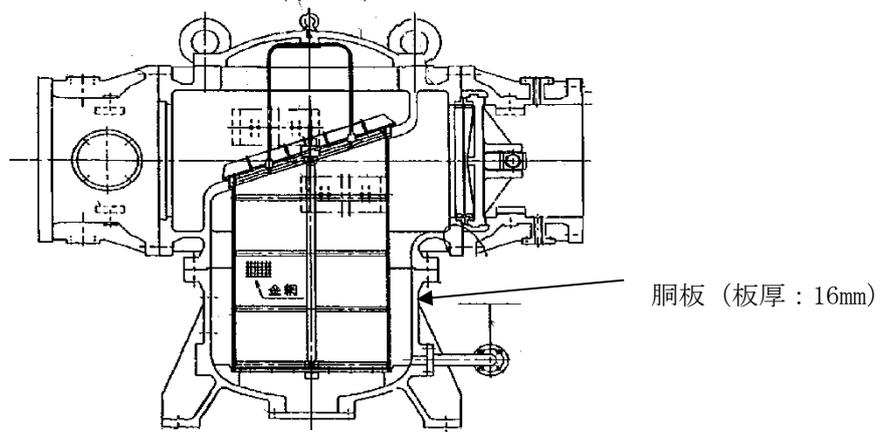


図3-1 ディーゼル発電機用海水ストレーナの衝突評価の評価対象部位

(2) 構造強度評価の評価対象部位

設計竜巻による荷重は、胴板及び胴板一体の支持脚を介して基礎ボルトに作用する。設計竜巻による荷重により発生する応力は、支持断面積の小さい箇所が厳しくなることから、支持断面積の小さいディーゼル発電機用海水ストレーナの基礎ボルトを評価対象部位として選定する。

ディーゼル発電機用海水ストレーナの構造強度評価における評価対象部位を、図3-2に示す。

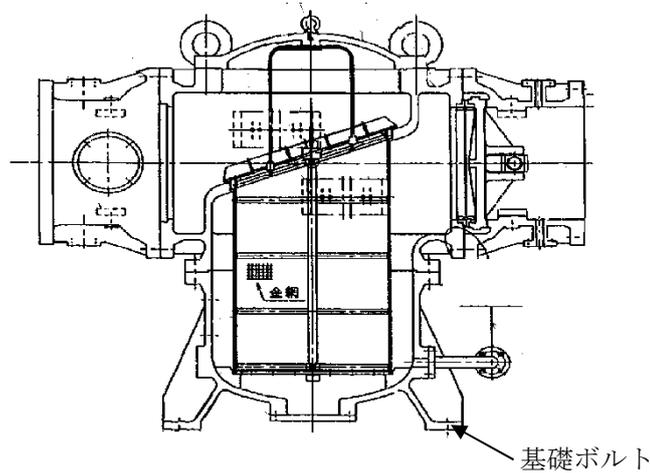


図3-2 ディーゼル発電機用海水ストレーナの構造強度評価の評価対象部位

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

(1) 衝突評価の荷重及び荷重の組合せ

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

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

砂利の諸元を表3-3、ディーゼル発電機用海水ストレーナの衝突評価に用いる荷重を表3-4に示す。

表3-3 砂利の諸元

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

表3-4 ディーゼル発電機用海水ストレーナの衝突評価に用いる荷重

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
屋外の防護対象施設	ディーゼル発電機用 海水ストレーナ	胴板	飛来物による衝撃荷重

(2) 構造強度評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の設定

構造強度評価に用いる荷重を以下に示す。

(a) 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、持続的に生じる荷重である自重を考慮する。

(b) 設計竜巻による荷重

風圧力による荷重，気圧差による荷重を考慮する。防護ネット及び防護鋼板等による風圧力の低減は無いものとして保守的な評価を行う。また、極小飛来物である砂利による衝撃は瞬間的で、衝突時間が極めて短く、衝突される機器へ伝わる加速度が小さいことから、機器へ作用する荷重は構造強度に影響を与えないので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。

イ. 風圧力による荷重(W_w)

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

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

ロ. 気圧差による荷重(W_p)

気圧差による荷重 W_p はV-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1(3)c. (b) 気圧差による荷重」に示す式に従い、算出する。

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

ハ. 荷重の組合せ

設計竜巻による複合荷重 $W_T (W_{T1}, W_{T2})$ 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(2) 荷重の組合せ」に示す式に従い、算出する。なお、評価対象部位は基礎ボルトであり、気圧差による荷重は発生しないため、複合荷重の選定において、 W_{T2} としては気圧差を考慮するが、 W_{T1} の評価は実施しない。

$$W_{T1} = W_P$$

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

(c) 運転時の状態で作用する荷重

運転時の状態で作用する荷重として、自重に加え内包水の荷重を考慮する。

b. 荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重の組合せは、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」にて設定している荷重の組合せを踏まえ、ディーゼル発電機用海水ストレーナの評価対象部位ごとに設定する。

構造強度評価の荷重の組合せを表 3-5 に示す。

表 3-5 荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
屋外の外部事象防護対象施設	ディーゼル発電機用海水ストレーナ	基礎ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重 ③自重

3.4 許容限界

ディーゼル発電機用海水ストレーナの許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界に従って、「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、J E A G 4 6 0 1 に基づく許容応力状態Ⅲ_ASの許容応力の許容荷重を用いる。

(1) 衝突評価の許容限界

衝突評価における許容限界は、評価において考慮する飛来物による衝撃荷重に対し、外殻を構成する部材が、機能喪失に至る可能性のある変形を生じないことを計算により確認するため、評価式により算定した貫通限界厚さがディーゼル発電機用海水ストレーナの外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ未満であることを許容限界とする。

ディーゼル発電機用海水ストレーナにおける計算上必要な厚さは、J S M E PVC-3120 (胴の厚さの規定) に基づき、以下の式より算出する。

$$t = \frac{P \cdot D_i}{2 \cdot S \cdot \eta - 1.2 \cdot P}$$

ディーゼル発電機用海水ストレーナの外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さを表3-6に示す。

表3-6 ディーゼル発電機用海水ストレーナの外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ

防護対象施設	外殻を構成する部材の厚さ (mm)	計算上必要な厚さ (mm)	外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ (mm)
ディーゼル発電機用海水ストレーナ	16	1.4	14.6

(2) 構造強度評価の許容限界

構造強度評価における許容限界はJ E A G 4 6 0 1を準用し、「クラス2,3支持構造物」の許容限界を適用し、許容応力状態Ⅲ_ASから算出した許容応力を許容限界とする。J E A G 4 6 0 1に従い、J S M E 付録材料図表Part5,6の表にて許容応力を計算する際は、評価対象部位の最高使用温度又は周囲環境温度に応じた値をとるものとするが、温度がJ S M E 付録材料図表記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算する。ただし、J S M E 付録材料図表Part5,6で比例法を用いる場合の端数処理は、小数点第1位以下を切り捨てた値を用いるものとする。

ディーゼル発電機用海水ストレーナの構造強度評価における許容限界について、表3-7に示す。

表3-7 ディーゼル発電機用海水ストレーナの構造強度評価における許容限界

評価対象部位	許容応力状態	応力の種類	許容限界
基礎ボルト	Ⅲ _A S	一次応力	
		引張	1.5 f _t
		せん断	1.5 f _s
		組合せ	Min {1.5 f _t , (2.1 f _t - 1.6 τ)}

3.5 評価方法

(1) 衝突評価の評価方法

ディーゼル発電機用海水ストレーナの衝突評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 強度評価方法」にて設定している衝突評価が必要な機器の評価式を用いる。

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

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

(2) 構造強度評価の評価方法

ディーゼル発電機用海水ストレーナの構造強度評価は、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」にて設定している評価式を用いる。

a. 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より高いストレーナの重心位置とする。ディーゼル発電機用海水ストレーナのモデル図を図3-3に示す。

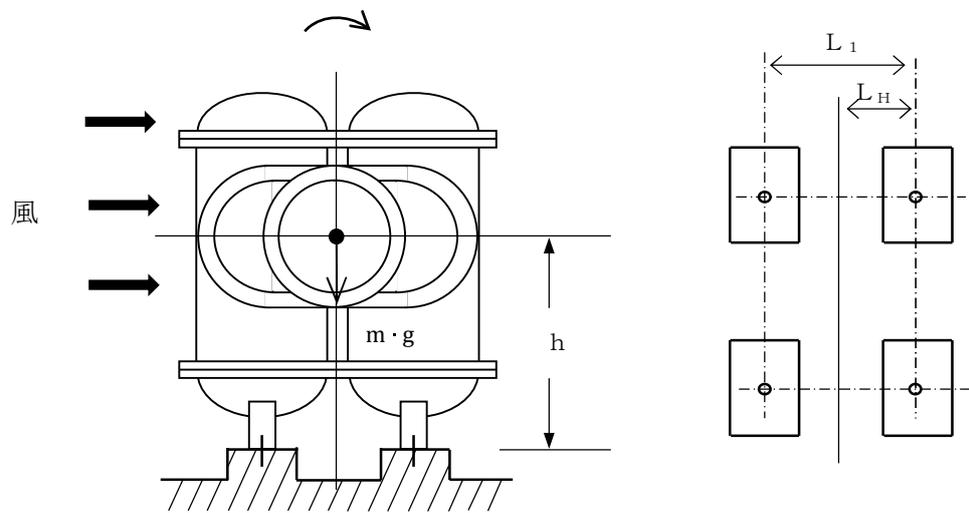


図 3-3 ディーゼル発電機用海水ストレーナモデル図

b. 計算方法

(a) 引張応力

基礎ボルトに対する引張力は最も厳しい条件として，図3-3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

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

(b) 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. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-1～表 4-4 に示す。

表 4-1 許容応力評価に用いる条件

評価対象部位	材料	温度条件 (°C)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	S (MPa)	F (MPa)	$1.5 f_t$ (MPa)	$1.5 f_s$ (MPa)
胴板	SCS14	50*	—	—	108	—	—	—
基礎ボルト	SS400	50*	231	394	—	231	173	133

注記 * : 周囲環境温度

表 4-2 評価条件

q (N/m ²)	G (-)	ΔP (N/m ²)	W_M (N)
6.1×10^3	1.0	8.9×10^3	0

表 4-3 評価条件 (胴板)

P (MPa)	D_i (mm)	S (MPa)	η (-)
0.70	430	108	1.0

表 4-4 評価条件 (基礎ボルト)

L_H (mm)	L_1 (mm)	C (-)	D_o (mm)	H (mm)	A (mm ²)
270	540	2.4	1360	945	1.29

m (kg)	g (m/s ²)	ボルト サイズ	N (-)	n_f (-)	A_b (mm ²)
2050	9.80665	M20	4	2	314.2

h (mm)	W_{T2} (N)
600	24630

5. 強度評価結果

(1) 衝突評価結果

竜巻発生時の砂利の貫通限界厚さを表 5-1 に示す。

表 5-1 砂利の貫通限界厚さ

飛来物	貫通限界厚さ T (mm)	
	水平方向	鉛直方向
砂利	1.0	1.0

砂利の貫通限界厚さ(1.0mm)とディーゼル発電機用海水ストレーナの外壳を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さとの比較を表5-2に示す。

砂利の貫通限界厚さは、ディーゼル発電機用海水ストレーナの外壳を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ未満である。

表 5-2 防護対象施設の衝突評価結果 (砂利)

防護対象施設	外壳を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ (mm)	貫通限界厚さ T (mm)	結果
ディーゼル発電機用 海水ストレーナ	14.6	1.0	貫通しない

(2) 構造強度評価結果

構造強度評価結果を表 5-3 に示す。

基礎ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-3 評価結果 (基礎ボルト)

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	28	173
せん断	20	133
組合せ	28	173

V-3-別添 1-1-8 ディーゼル発電機吸気口の強度計算書

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.....	2
2.4 適用規格.....	3
3. 強度評価方法.....	4
3.1 記号の定義.....	4
3.2 評価対象部位.....	9
3.3 荷重及び荷重の組合せ.....	9
3.4 許容限界.....	10
3.5 評価方法.....	11
4. 評価条件.....	25
5. 強度評価結果.....	26

1. 概要

本資料は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、非常用ディーゼル発電機吸気口及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機吸気口（以下「ディーゼル発電機吸気口」という。）が竜巻時及び竜巻通過後においても、吸気機能の維持を考慮して、主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、ディーゼル発電機吸気口の「2.1 位置」, 「2.2 構造概要」, 「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

2.1 位置

ディーゼル発電機吸気口は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示すとおり、ディーゼル発電機室屋上面に設置する。

ディーゼル発電機吸気口の位置図を図2-1に示す。



図 2-1 ディーゼル発電機吸気口の位置図

2.2 構造概要

ディーゼル発電機吸気口について、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、ディーゼル発電機吸気口の構造を示す。

ディーゼル発電機吸気口は、ディーゼル発電機1基につき2台設置しており、計6台の同一構造の吸気口を設置している。

ディーゼル発電機吸気口の構造は4脚たて置円筒型容器構造であり、胴板と支持脚は溶接で接合しており、支持脚は基礎部に溶接により固定している。

ディーゼル発電機吸気口の概要図を図2-2に示す。

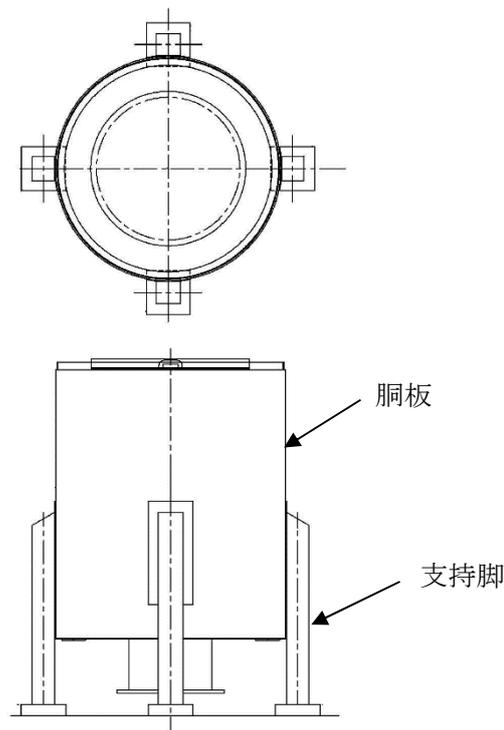


図2-2 ディーゼル発電機吸気口の概要図

2.3 評価方針

ディーゼル発電機吸気口の強度評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している、「4.1 荷重及び荷重の組合せ」及び「4.2 許容限界を踏まえ、ディーゼル発電機吸気口の評価対象部位に作用する応力等が許容限界に収まることを「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

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

ディーゼル発電機吸気口の構造強度評価フローを図2-3に示す。ディーゼル発電機吸気口に対して、設計竜巻による荷重に自重を加えた応力が許容応力以下であることを確認する。各部材の構造強度評価において、その部材に対して応力が大きくなる方向から風が当たること

を想定する。各部材の構造強度評価には、設計竜巻による荷重は水平方向より作用する外荷重という観点で地震荷重と同等なものであると考え、「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1・補-1984」（（社）日本電気協会）、「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987」（（社）日本電気協会）及び「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」（（社）日本電気協会）（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）における1質点系モデルによる評価方法を準用し、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価式を用いる。

ディーゼル発電機吸気口の許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、J E A G 4 6 0 1の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

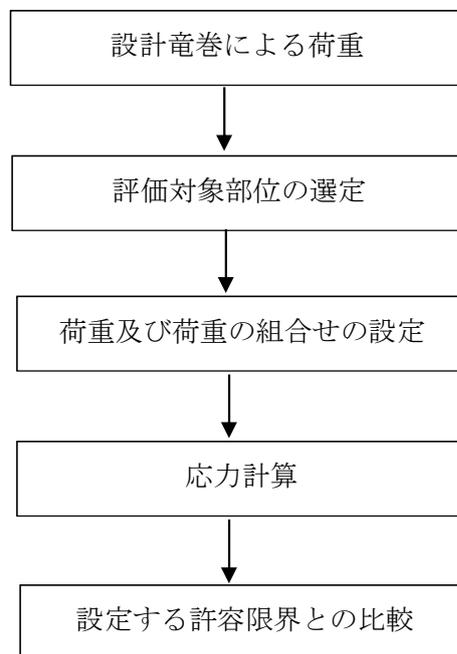


図2-3 ディーゼル発電機吸気口の構造強度評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・「建築物荷重指針・同解説」（（社）日本建築学会，2004改定）
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1・補-1984」（（社）日本電気協会）
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987」（（社）日本電気協会）
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」（（社）日本電気協会）
- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 J S M E S N C 1-2005/2007」（（社）日本機械学会（以下「J S M E」という。））

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

ディーゼル発電機吸気口の構造強度評価に用いる記号を表3-1に示す。

表3-1 構造強度評価に用いる記号 (1/5)

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
A _w	mm ²	支持脚基礎溶接部の有効面積
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 , C _L	-	応力の補正係数
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 S S B - 3 1 2 1 . 1 (1) により規定される値
F _o	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口高さ
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 _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

表3-1 構造強度評価に用いる記号 (2/5)

記号	単位	定義
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
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
k_L	-	アタッチメントパラメータ軸方向の補正係数
k_c	-	アタッチメントパラメータ周方向の補正係数
L	mm	脚の長さ
L_1	mm	支持脚間水平距離
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・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・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・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・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・mm	胴に生じる軸方向の曲げモーメント
M_ϕ	N・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_1	N	支持脚に作用するせん断荷重
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
T	N	支持脚に作用する引張荷重
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

表3-1 構造強度評価に用いる記号 (3/5)

記号	単位	定義
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	設計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	-	アタッチメントパラメータ
γ	-	シェルパラメータ
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

表3-1 構造強度評価に用いる記号 (4/5)

記号	単位	定義
σ_t	MPa	支持脚基礎溶接部に生じる引張応力
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
$\sigma_{x61}, \sigma_{x62}$	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
$\sigma_{\phi 61}, \sigma_{\phi 62}$	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
$\sigma_{\phi 71}, \sigma_{\phi 72}$	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
$\sigma_{\phi 81}, \sigma_{\phi 82}$	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
$\sigma_{\phi 91}, \sigma_{\phi 92}$	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

表3-1 構造強度評価に用いる記号 (5/5)

記号	単位	定義
$\sigma_{x101}, \sigma_{x102}$	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	MPa	支持脚基礎溶接部に生じるせん断応力
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

3.2 評価対象部位

ディーゼル発電機吸気口の評価対象部位は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

設計竜巻による荷重は、ディーゼル発電機吸気口の胴板に作用し、支持脚及び支持脚基礎溶接部に伝達される。

このことから、胴板、支持脚及び支持脚基礎溶接部を評価対象部位として設定する。

ディーゼル発電機吸気口の構造強度評価における評価対象部位を図3-1に示す。

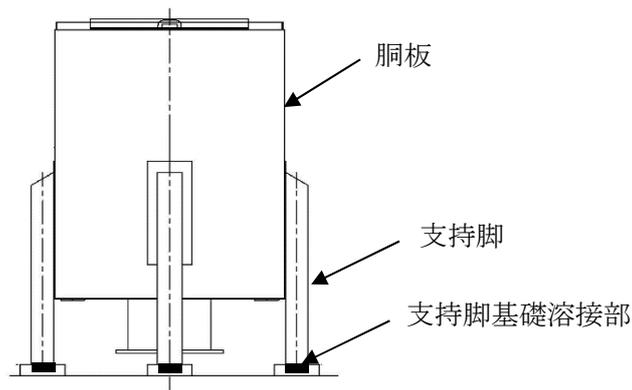


図3-1 ディーゼル発電機吸気口の構造強度評価の評価対象部位

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

(1) 荷重の設定

強度評価に用いる荷重を以下に示す。

a. 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、持続的に生じる荷重である自重を考慮する。

b. 設計竜巻による荷重

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を考慮する。

(a) 風圧力による荷重(W_w)

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

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

(b) 気圧差による荷重(W_p)

気圧差による荷重 W_p は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1(3)c.(b) 気圧差による荷重」に示す式に従い、算出する。

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

(c) 荷重の組合せ

設計竜巻による複合荷重 W_T (W_{T1} , W_{T2})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(2) 荷重の組合せ」に示す式に従い、算出する。なお、ディーゼル発電機吸気口は気圧差が生じ難い構造であるため、複合荷重の選定において、 W_{T2} としては気圧差を考慮するが、 W_{T1} の評価は実施しない。また、ディーゼル発電機吸気口は、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、且つ速やかに補修する方針とするため、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。

$$W_{T1} = W_P$$

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

(2) 荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重の組合せは、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」にて設定している荷重の組合せを踏まえ、ディーゼル発電機吸気口の評価対象部位ごとに設定する。

ディーゼル発電機吸気口の胴板、支持脚及び支持脚基礎溶接部には、自重及び風圧力、気圧差による荷重が作用する。

構造強度評価の荷重の組合せを表3-2に示す。

表 3-2 荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
屋外の外部事象 防護対象施設	ディーゼル発電機 吸気口	<ul style="list-style-type: none"> ・ 胴板 ・ 支持脚 ・ 支持脚基礎溶接部 	<ul style="list-style-type: none"> ① 自重 ② 風圧力による荷重 ③ 気圧差による荷重

3.4 許容限界

ディーゼル発電機吸気口の許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界に従って、「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、J E A G 4 6 0 1に基づく許容応力状態Ⅲ_ASの許容応力の許容荷重を用いる。

ディーゼル発電機吸気口の許容限界は、J E A G 4 6 0 1を準用し、胴板については「クラス2, 3容器」、支持脚及び支持脚基礎溶接部については支持構造物の許容限界を適用し、許容応力状態Ⅲ_ASから算出した許容応力を許容限界とする。また、座屈については評価式を満足することを確認する。J E A G 4 6 0 1に従い、J S M E 付録材料図表Part5, 6の表にて許容応力を計算する際は、評価対象部位の最高使用温度又は周囲環境温度に応じた値をとるものとするが、温度がJ S M E 付録材料図表記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算する。ただし、J S M E 付録材料図表Part5, 6の表で比例法を用いる場合の端数処理は、小数点第1位以下を切り捨てた値を用いるものとする。

ディーゼル発電機吸気口の許容限界について、表3-3に示す。

表3-3 許容限界

評価対象部位	許容応力状態	応力の種類		許容限界
胴板	Ⅲ _A S	一次一般膜		Min (S _y , 0.6S _u)
		一次		上欄の1.5倍
		一次+二次		2S _y
支持脚	Ⅲ _A S	組合せ		1.5f _t
		座屈		$\sigma_{sr}/f_{br} + \sigma_{st}/f_{bt} + \sigma_{sc}/f_c \leq 1$
支持脚 基礎溶接部	Ⅲ _A S	一次	引張	1.5f _t
			せん断	1.5f _s

支持脚については、圧縮、曲げの組合せ応力の最大値を求め、引張応力の許容値で評価する。

また、溶接部について上記応力の組合せが考えられる場合、J S M E SSB-3121.1(6)、SSB-3121.2、SSB-3121.3を準用し、組合せ応力に対しても評価を行う。

以下に組合せ応力の許容応力の評価式を示す。

垂直応力とせん断応力を生じる構造部分の応力は、次の計算式を満足しなければならない。

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

3.5 評価方法

ディーゼル発電機吸気口の構造強度評価は、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」にて設定している評価式を用いる。

評価式は、J E A G 4 6 0 1 の 4 脚たて置き円筒型容器に準拠するが、J E A G 4 6 0 1 の参考文献の範囲に含まれない箇所については、解析コード「MSC/NASTRAN」を用いて、3次元FEMモデルによりモデル化し評価を実施する。

(1) 計算モデル

設計竜巻による荷重及び自重に対する、胴板、支持脚及び支持脚基礎溶接部の構造強度を1質点系モデルとして評価を行う。ここで、荷重の作用点はディーゼル発電機吸気口高さの1/2より高い重心位置に作用させる。ディーゼル発電機吸気口胴板、支持脚及び支持脚基礎溶接部の評価モデル図を図3-2に、ディーゼル発電機吸気口の変形モード図を図3-3に示す。

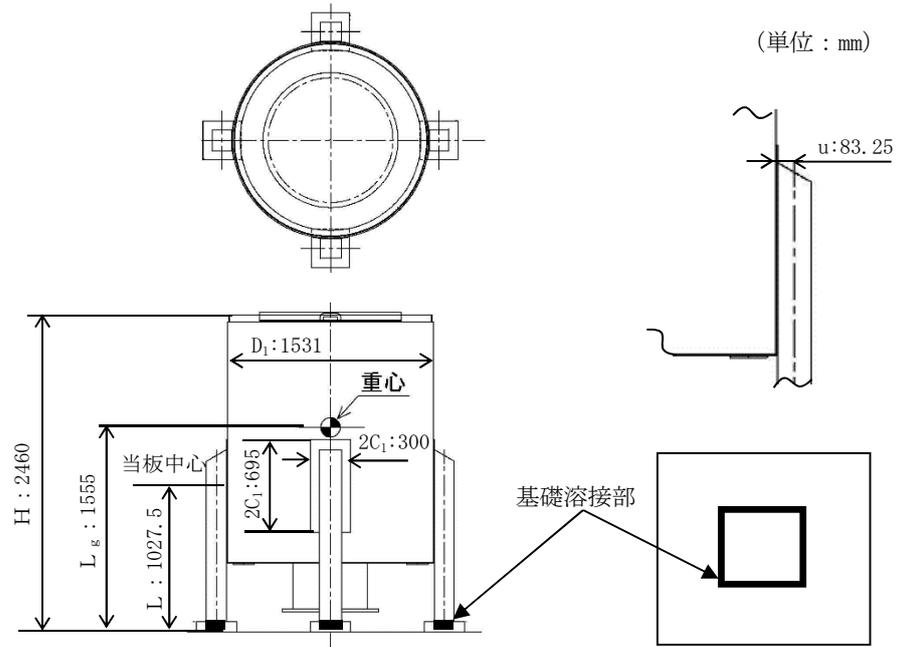


図 3-2 ディーゼル発電機吸気口の評価モデル図

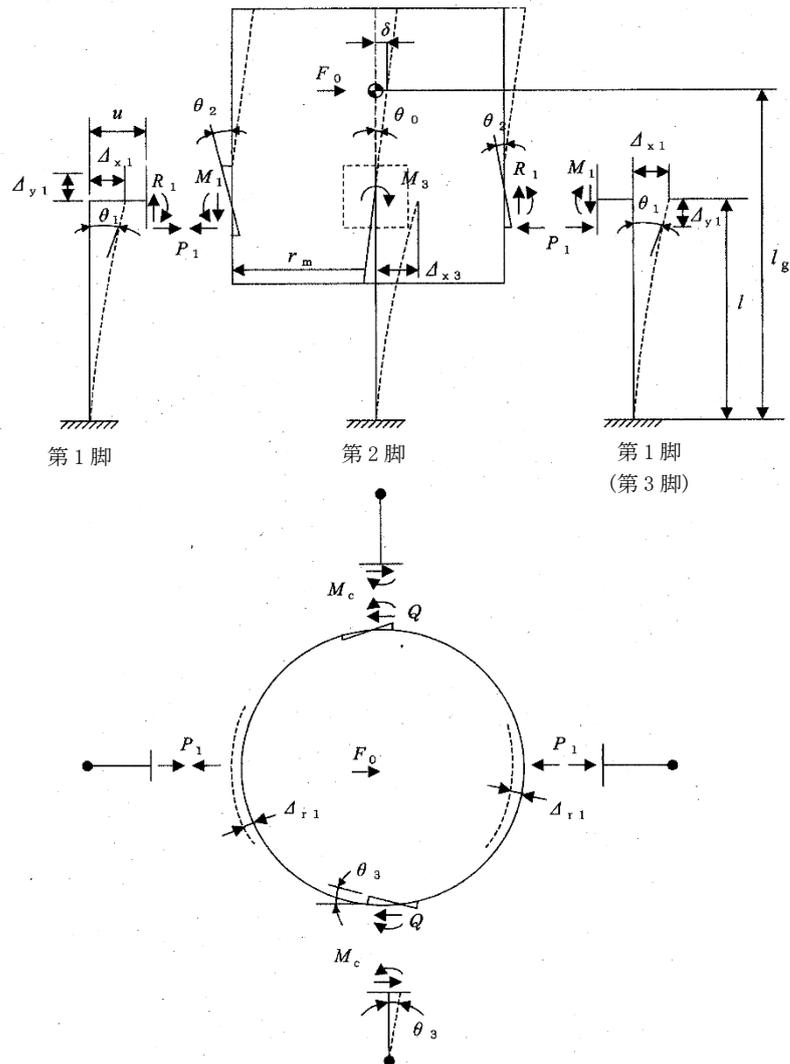


図 3-3 ディーゼル発電機吸気口の変形モード図

(2) 計算方法

a. 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、

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

式を代入して

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

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

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

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。

b. 胴の応力計算

(a) 静水頭又は内圧による応力

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

(b) 運転時質量による応力

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

(c) 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 3-3 に示す。

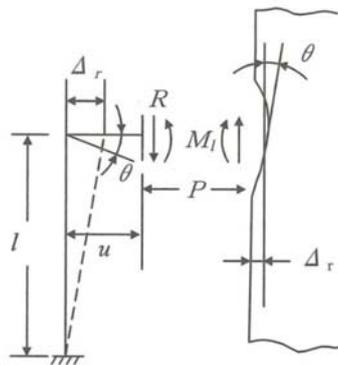


図 3-3 脚下端が固定の場合の脚及び胴の変形

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

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

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

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

したがって

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

$$P = \frac{\frac{m_0 \cdot g}{4} u - M_L}{2E_s \cdot I_{st}} L^2$$

$$P = \frac{L^3}{3E_s \cdot I_{st}} + \frac{L}{G_s \cdot A_{sr}} + \frac{K_r}{r_m \cdot E}$$

鉛直方向モーメント M_L により生じる胴の局部応力は、図 3-4 に示す 3 次元 FEM モデルより求める(以下*を付記する)ことにより算定する。

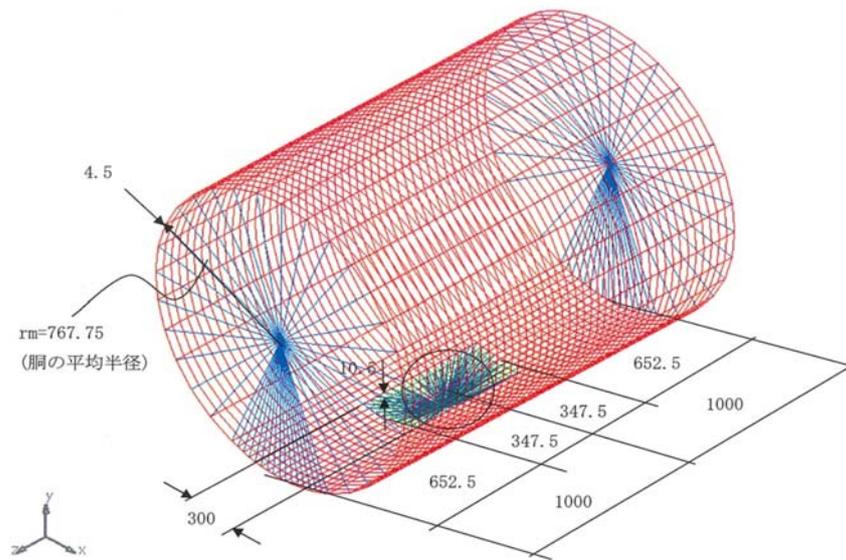


図 3-4 3次元 FEM モデル

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

$$\sigma_{x3} = \left[\frac{N_x}{M_L / (r_m^2 \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{M_L}{r_m^2 \cdot t \cdot \beta_L} \right) C_L^*$$

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。

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

(d) 風荷重による胴の曲げ応力

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

(e) Z方向荷重による胴の脚つけ根部の応力

イ. 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。

$$\tau_{c1} = \frac{Q}{4C_1 \cdot t}$$

鉛直方向せん断力R₁によるせん断応力は、次による。

$$\tau_{L2} = \frac{R_1}{4C_2 \cdot t}$$

ねじりモーメントM₃により生じる胴の局部せん断応力は、次による。

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

ロ. 二次応力

半径方向荷重P₁により生じる胴の局部曲げ応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 62} = \left[\frac{M_\phi}{P_1} \right]^* \left(\frac{6P_1}{t^2} \right)$$

$$\sigma_{x 62} = \left[\frac{M_x}{P_1} \right]^* \left(\frac{6P_1}{t^2} \right)$$

鉛直方向曲げモーメントM₁により生じる胴の局部曲げ応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 72} = \left[\frac{M_\phi}{M_1 / (r_m \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{6M_1}{r_m \cdot t^2 \cdot \beta_L} \right)$$

$$\sigma_{x 72} = \left[\frac{M_x}{M_1 / (r_m \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{6M_1}{r_m \cdot t^2 \cdot \beta_L} \right)$$

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。

$$\sigma_{\phi 82} = \left[\frac{M_\phi}{M_c / (r_m \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{6M_c}{r_m \cdot t^2 \cdot \beta_c} \right)$$

$$\sigma_{x 82} = \left[\frac{M_x}{M_c / (r_m \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{6M_c}{r_m \cdot t^2 \cdot \beta_c} \right)$$

(f) X方向荷重による胴の脚つけ根部の応力

イ. 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。

$$\sigma_{\phi 91} = \sigma_{\phi 61} / \sqrt{2}$$

$$\sigma_{x 91} = \sigma_{x 61} / \sqrt{2}$$

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。

$$\sigma_{\phi 101} = \sigma_{\phi 71} / \sqrt{2}$$

$$\sigma_{x 101} = \sigma_{x 71} / \sqrt{2}$$

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。

$$\sigma_{\phi 111} = \sigma_{\phi 81} / \sqrt{2}$$

$$\sigma_{x 111} = \sigma_{x 81} / \sqrt{2}$$

周方向せん断力 Q によるせん断応力は、次による。

$$\tau_{c4} = \tau_{c1} / \sqrt{2}$$

鉛直方向せん断力 R_1 によるせん断応力は、次による。

$$\tau_{L5} = \tau_{L2} / \sqrt{2}$$

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。

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

ロ. 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。

$$\sigma_{\phi 92} = \sigma_{\phi 62} / \sqrt{2}$$

$$\sigma_{x 92} = \sigma_{x 62} / \sqrt{2}$$

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。

$$\sigma_{\phi 102} = \sigma_{\phi 72} / \sqrt{2}$$

$$\sigma_{x 102} = \sigma_{x 72} / \sqrt{2}$$

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。

$$\sigma_{\phi 112} = \sigma_{\phi 82} / \sqrt{2}$$

$$\sigma_{x 112} = \sigma_{x 82} / \sqrt{2}$$

(g) 組合せ応力

(a)～(f)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。

イ. 一次一般膜応力

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

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

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

ロ. 一次応力 (膜+曲げ)

胴の評価点を図 3-5 に示す。

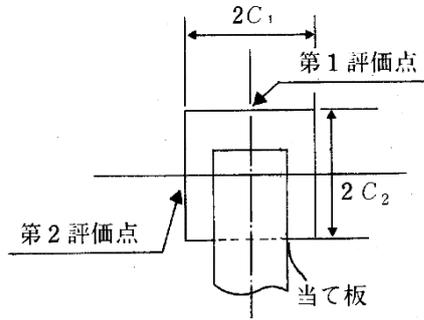


図 3-5 胴の評価点

(イ) Z 方向荷重が作用した場合

・ 第 1 脚つけ根部

(第 1 評価点)

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

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

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

(第 2 評価点)

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

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

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

・ 第 2 脚つけ根部

(第 1 評価点)

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

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

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

(第 2 評価点)

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

$$\sigma_{xz4} = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} + \sigma_{x4} + \sigma_{x81}$$

$$\sigma_{14} = \frac{1}{2} \left\{ \sigma_{\phi z4} + \sigma_{xz4} \right\} + \sqrt{(\sigma_{\phi z4} - \sigma_{xz4})^2 + 4(\tau_{L1} + \tau_3)^2}$$

(ロ) X方向荷重が作用した場合

(第1評価点)

$$\sigma_{\phi x1} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 3} + \sigma_{\phi 4} + \sigma_{\phi 91} + \sigma_{\phi 101}$$

$$\sigma_{xx1} = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} + \sigma_{x3} + \sigma_{x4} + \sigma_{x5} + \sigma_{x91} + \sigma_{x101}$$

$$\sigma_{15} = \frac{1}{2} \left\{ \sigma_{\phi x1} + \sigma_{xx1} \right\} + \sqrt{(\sigma_{\phi x1} - \sigma_{xx1})^2 + 4(\tau_{c4} + \tau_6)^2}$$

(第2評価点)

$$\sigma_{\phi x2} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 4} + \sigma_{\phi 91} + \sigma_{\phi 111}$$

$$\sigma_{xx2} = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} + \sigma_{x4} + \sigma_{x5} + \sigma_{x91} + \sigma_{x111}$$

$$\sigma_{16} = \frac{1}{2} \left\{ \sigma_{\phi x2} + \sigma_{xx2} \right\} + \sqrt{(\sigma_{\phi x2} - \sigma_{xx2})^2 + 4(\tau_{L1} + \tau_{L5} + \tau_6)^2}$$

$$\sigma_1 = \max[\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{14}, \sigma_{15}, \sigma_{16}]$$

ハ. 組合せ一次+二次応力

(イ) Z方向荷重が作用した場合

・第1脚つけ根部

(第1評価点)

$$\sigma_{\phi z5} = \sigma_{\phi 61} + \sigma_{\phi 62} + \sigma_{\phi 71} + \sigma_{\phi 72}$$

$$\sigma_{xz5} = \sigma_{x5} + \sigma_{x61} + \sigma_{x62} + \sigma_{x71} + \sigma_{x72}$$

$$\sigma_{21} = \sigma_{\phi z5} + \sigma_{xz5} + \sqrt{(\sigma_{\phi z5} - \sigma_{xz5})^2}$$

(第2評価点)

$$\sigma_{\phi z6} = \sigma_{\phi 61} + \sigma_{\phi 62}$$

$$\sigma_{xz6} = \sigma_{x5} + \sigma_{x61} + \sigma_{x62}$$

$$\sigma_{22} = \sigma_{\phi z6} + \sigma_{xz6} + \sqrt{(\sigma_{\phi z6} - \sigma_{xz6})^2 + 4\tau_{L2}^2}$$

・第2脚つけ根部

(第1評価点)

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

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

$$\sigma_{23} = \sigma_{\phi z 7} + \sigma_{x z 7} + \sqrt{(\sigma_{\phi z 7} - \sigma_{x z 7})^2 + 4(\tau_{c1} + \tau_3)^2}$$

(第2評価点)

$$\sigma_{\phi z 8} = \sigma_{\phi 81} + \sigma_{\phi 82}$$

$$\sigma_{x z 8} = \sigma_{x 81} + \sigma_{x 82}$$

$$\sigma_{24} = \sigma_{\phi z 8} + \sigma_{x z 8} + \sqrt{(\sigma_{\phi z 8} - \sigma_{x z 8})^2 + 4\tau_3^2}$$

(ロ) X方向荷重が作用した場合

(第1評価点)

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

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

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

(第2評価点)

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

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

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

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

c. 脚の応力計算

(a) 運転時質量による応力

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

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

(b) 風荷重 (Z方向) による応力

イ. 第1脚

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

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

ロ. 第2脚

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

(c) X方向荷重による応力

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

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

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

(d) 組合せ応力

脚の最大応力は、下記式による。

イ. Z方向荷重が作用した場合

(イ) 第1脚

$$\sigma_{sz1} = \sigma_{s1} + \sigma_{s2} + \sigma_{s5} + \sigma_{s6}$$

(ロ) 第2脚

$$\sigma_{sz2} = \sigma_{s1} + \sigma_{s2} + \sigma_{s7}$$

ロ. X方向荷重が作用した場合

$$\sigma_{sx} = \sigma_{s1} + \sigma_{s2} + \sigma_{s8} + \sigma_{s9} + \sigma_{s10}$$

$$\sigma_s = \max[\sigma_{sz1}, \sigma_{sz2}, \sigma_{sx}]$$

(e) 組合せ圧縮応力

イ. Z方向荷重が作用した場合

(イ) 第1脚

$$\sigma_{sc} = \sigma_{s1} + \sigma_{s5}$$

$$\sigma_{st} = \sigma_{s2} + \sigma_{s6}$$

$$\sigma_{sr} = 0$$

(ロ) 第2脚

$$\sigma_{sc} = \sigma_{s1}$$

$$\sigma_{st} = \sigma_{s2}$$

$$\sigma_{sr} = \sigma_{s7}$$

ロ. 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。

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

d. 支持脚基礎溶接部の応力計算

(a) 引張応力の算出

風圧力による荷重 W_{T2} によるモーメント M により、2本の支持脚には吸気口の支持脚基礎溶接部に作用する引張荷重 T が作用する。

モーメントの釣り合いを考えると、

$$M = W_{T2} \cdot L_g = 2 \cdot T \cdot L_1$$

よって吸気口の支持脚基礎溶接部に作用する引張荷重 T は以下のようになる。

$$T = \frac{W_{T2} \cdot L_g}{2L_1}$$

吸気口の支持脚基礎溶接部に生じる引張応力 σ_t は以下のようになる。

$$\sigma_t = \frac{T}{A_w} = \frac{W_{T2} \cdot L_g}{2L_1 \cdot A_w}$$

(b) せん断応力の算出

吸気口の支持脚基礎溶接部に作用するせん断荷重 Q は以下のようになる。

$$Q_1 = \frac{W_{T2}}{4}$$

よって、吸気口の支持脚基礎溶接部に生じるせん断応力 τ は以下のようになる。

$$\tau = \frac{Q_1}{A_w} = \frac{W_{T2}}{4A_w}$$

(c) 組合せ応力の算出

$$\sigma = \sqrt{\sigma_t^2 + 3\tau^2}$$

4. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-1～表 4-3 に示す。

表 4-1 許容応力評価に用いる条件 (ディーゼル発電機吸気口)

評価対象部位	材料	温度条件 (°C)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	F (MPa)	$1.5 f_t$ (MPa)	$1.5 f_s$ (MPa)
胴板	SS400	50	241	394	—	—	—
支持脚	SS400	50	241	394	241	241	—
支持脚基礎溶接部	SS400	50	241	394	241	241	139

表 4-2 評価条件

q (N/m ²)	G (-)	C (-)	ΔP (N/m ²)	W_M (N)
6.1×10^3	1.0	1.2	8.9×10^3	0

表 4-3 評価条件

A (m ²)	A_s (mm ²)	A_w (mm ²)	A_{sr} (mm ²)	A_{st} (mm ²)	C_1 (mm)
3.79	8550	4455	4336	4728	150.0

C_2 (mm)	D_i (mm)	E (MPa)	E_s (MPa)	F_0 (N)	G_s (MPa)
347.5	1531	201000	201000	1	77300

I (mm ⁴)	I_{sr} (mm ⁴)	I_{st} (mm ⁴)	J_s (mm ⁴)	L (mm)	L_1 (mm)
6.398×10^9	3.155×10^7	2.697×10^7	4.316×10^7	1027.5	1203.5

L_c (mm)	L_g (mm)	m_0 (kg)	r_m (mm)	t (mm)	W_w (N)
1702.0	1555.0	1800	767.8	4.5	27740

W_P (N)	W_{T2} (N)	Z_{sr} (mm ³)	Z_{st} (mm ³)
33730	44610	3.824×10^5	3.569×10^5

5. 強度評価結果

構造強度評価結果を表 5-1 に示す。

ディーゼル発電機吸気口に発生する応力は許容応力以下である。

表 5-1 ディーゼル発電機吸気口の評価結果

評価部位	材料	応力	許容応力 [MPa]	発生応力 [MPa]	
胴板	SS400	一次一般膜	236	4	
		一次	354	21	
		一次+二次	482	55	
支持脚	SS400	組合せ	241	26	
		座屈 (圧縮+曲げ)	1※	0.11	
支持脚基礎溶接部	SS400	一次	引張	241	7
			せん断	139	3
			組合せ	241	9

※：検定比（下式）による。

$$\sigma_{sr}/f_{br} + \sigma_{st}/f_{bt} + \sigma_{sc}/f_c \leq 1$$

V-3-別添 1-1-9 配管及び弁の強度計算書

目次

1. 概要.....	1
2. 基本方針.....	1
2.1 位置.....	1
2.2 構造概要.....	2
2.3 評価方針.....	3
2.4 適用規格.....	5
3. 強度評価方法.....	6
3.1 記号の定義.....	6
3.2 評価対象部位.....	7
3.3 荷重及び荷重の組合せ.....	8
3.4 許容限界.....	10
3.5 評価方法.....	11
4. 評価条件.....	14
5. 強度評価結果.....	16

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、屋外に設置してい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。）周りの配管及び弁並びに非常用ガス処理系排気筒（配管部含む。以下同じ。）が竜巻時及び竜巻通過後においても、各配管及び弁の機能維持を考慮して、主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

配管及び弁について、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、配管及び弁の「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

屋外に設置してい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の配管及び弁並びに非常用ガス処理系排気筒は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示すとおり、図2-1に示す位置に設置する。

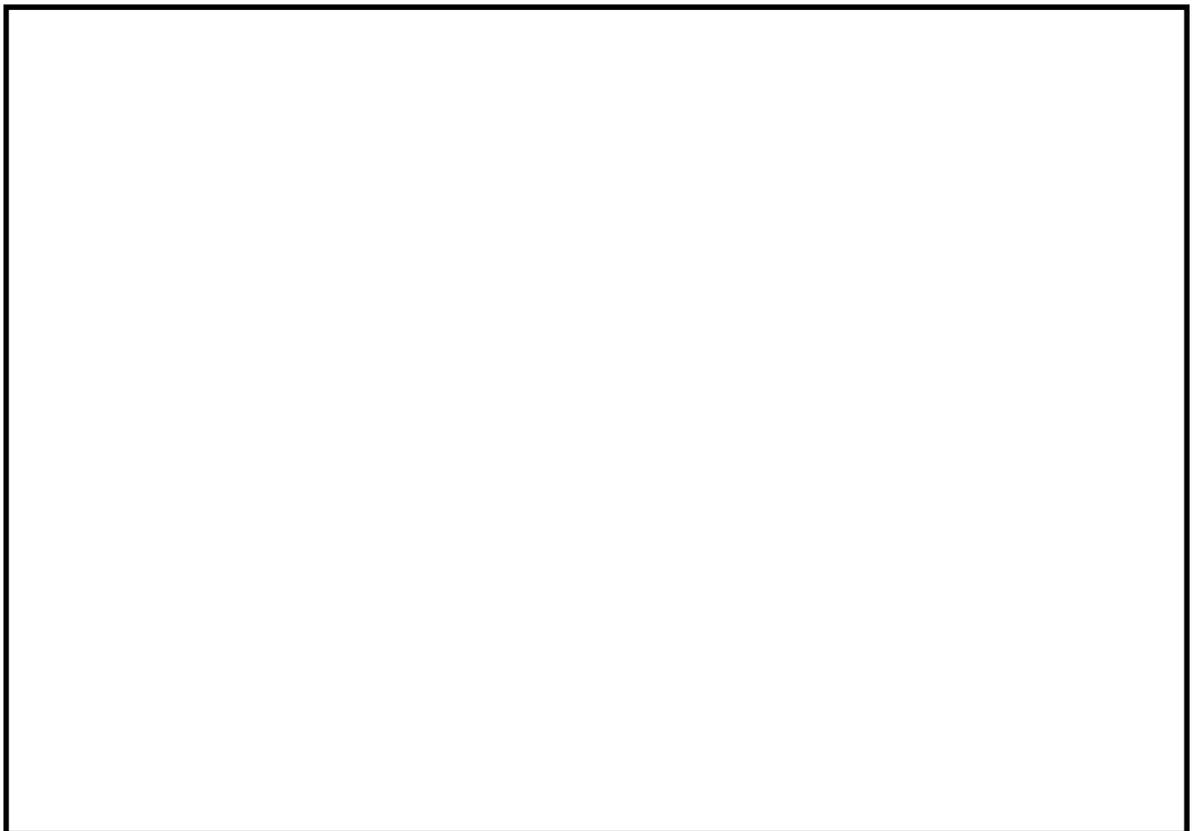


図 2-1 中央制御室換気系冷凍機周り、残留熱除去系海水系ポンプ及びディーゼル発電機用海水ポンプ周りの配管及び弁並びに非常用ガス処理系排気筒の位置図

2.2 構造概要

配管及び弁について、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、配管及び弁の構造を示す。

配管及び弁は、配管本体及び弁で構成され、支持構造物により床、壁等から支持する構造となる。配管及び弁の概要図を図2-2に、各エリアの配管及び弁の配置図を図2-3, 図2-4に示す。

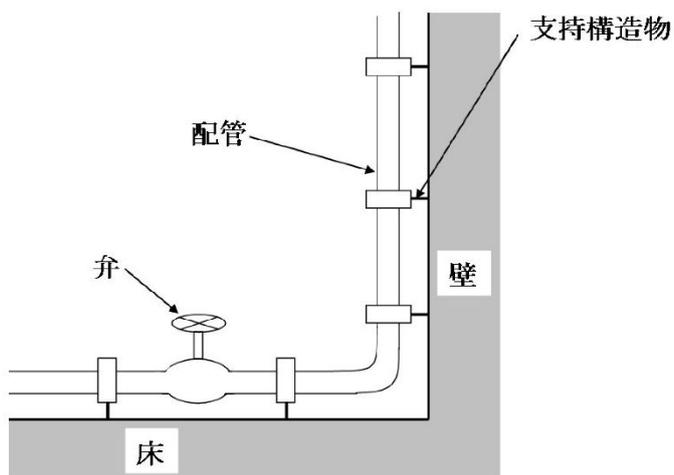


図2-2 配管及び弁の概要図



図2-3 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配管配置図



図2-4 中央制御室換気系冷凍機周り配管及び弁並びに非常用ガス処理系排気筒配置図

2.3 評価方針

配管及び弁の強度評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している、荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、配管及び弁の評価対象部位に作用する貫入及び応力等が、許容限界に収まることを「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

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

(1) 衝突評価の評価方針

配管及び弁の衝突評価フローを図2-5に示す。衝突評価においては、竜巻防護ネットを設置する場合に考慮する飛来物である砂利の貫通限界厚さが外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ未満であることを確認する。衝突評価では、「タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日原子炉安全専門審査会）」で用いられている式を準用し、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 強度評価方法」に示す衝突評価が必要な機器の評価式を用いる。配管及び弁の衝突評価における許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 許容限界」に示す許容限界である、外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さとする。

なお、非常用ガス処理系排気筒が仮に飛来物による衝突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、且つ速やかに補修する方針とするため、非常用ガス処理系排気筒の衝突評価は行わない。

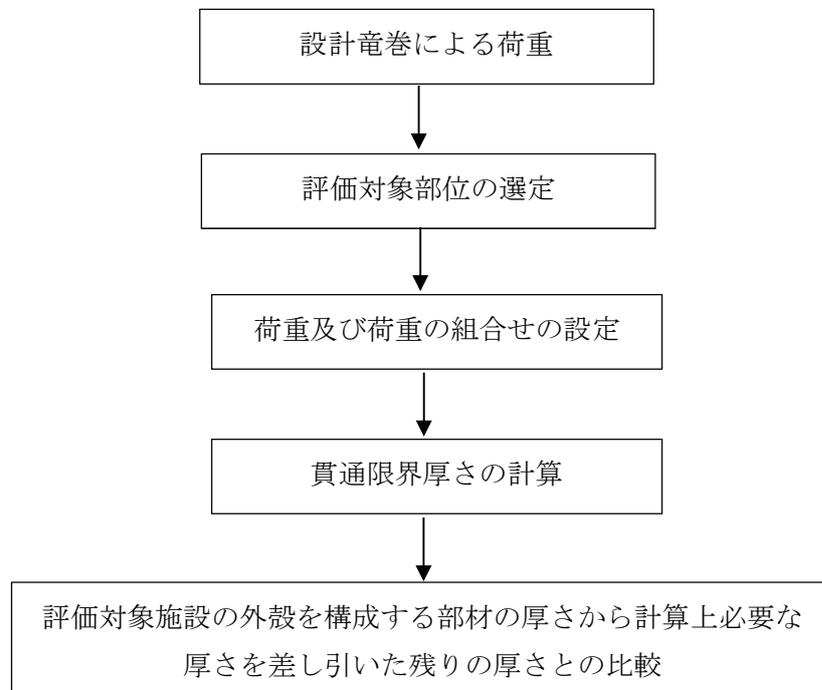


図2-5 配管及び弁の衝突評価フロー

(2) 構造強度評価の評価方針

配管及び弁の構造強度評価フローを図2-6に示す。構造強度評価において、配管及び弁に対し、設計竜巻による荷重に内圧及び自重を加えた応力が許容応力以下であることを確認する。

構造強度評価では、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価式を用いる。配管及び弁の許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG 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 JEAG 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 JEAG 4 6 0 1-1991 追補版」（(社)日本電気協会）（以下「JEAG 4 6 0 1」という。）の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

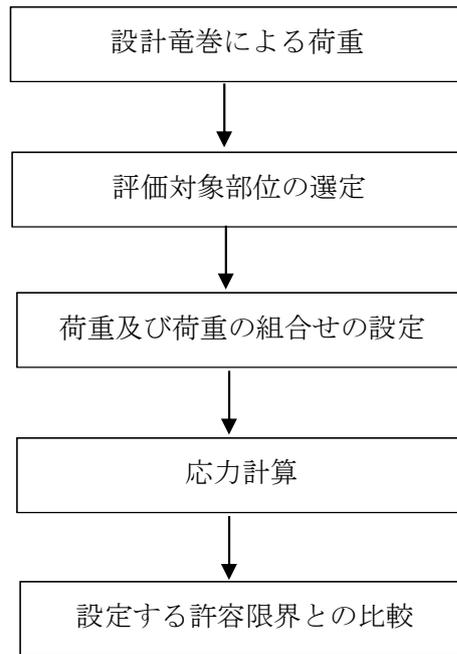


図2-6 配管及び弁の構造強度評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・「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）」
- ・「建築物荷重指針・同解説」（（社）日本建築学会，2004改定）
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG 4601・補-1984」（社）日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987」（社）日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1991 追補版」（社）日本電気協会
- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1-2005/2007」（社）日本機械学会（以下「JSME」という。）

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 衝突評価の記号の定義

配管及び弁の衝突評価に用いる記号を表3-1に示す。

表3-1 衝突評価に用いる記号

記号	単位	定義
D _o	mm	配管の外径
d	m	評価において考慮する飛来物が衝突する衝突断面の等価直径
K	—	鋼板の材質に関する係数
M	kg	評価において考慮する飛来物の質量
P	MPa	最高使用圧力
S	MPa	許容引張応力
T	mm	鋼板の貫通限界厚さ
t	mm	配管の計算上必要な厚さ
v	m/s	評価において考慮する飛来物の飛来速度
η	—	継手効率

(2) 構造強度評価の記号の定義

配管及び弁の構造強度評価に用いる記号を表3-2に示す。

表3-2 構造強度評価に用いる記号 (1/2)

記号	単位	定義
A	m ² /m	単位長さ当たりの施設の受圧面積（風向に垂直な面に投影した面積）
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
D	mm	管外径
G	—	ガスト影響係数
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
q	N/m ²	設計用速度圧
S _y	MPa	J S ME 付録材料図表Part5の表にて規定される設計降伏点
t	mm	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

表3-2 構造強度評価に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
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
ΔP	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
$\sigma_{WT1}, \sigma_{WT2}$	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
$\sigma_{自重}$	MPa	自重により生じる応力
$\sigma_{内圧}$	MPa	内圧により生じる応力

3.2 評価対象部位

配管及び弁の評価対象部位は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

(1) 衝突評価の評価対象部位

評価において考慮する飛来物の衝突により、配管及び弁に衝撃荷重が作用し貫入する可能性があるため、貫入によりその施設の機能が喪失する可能性のある箇所を評価対象部位として選定する。弁が設置されている箇所においては、弁の板厚は配管の板厚に比べ厚く、配管の評価に包絡されるため、配管の評価のみ実施する。

配管及び弁の衝突評価における評価対象部位を図3-1に示す。

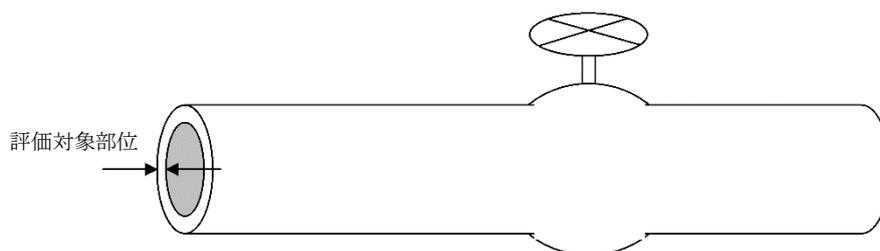


図3-1 配管及び弁の衝突評価の評価対象部位

(2) 構造強度評価の評価対象部位

設計竜巻による荷重は、配管本体に作用する。なお、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。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。
 このことから、配管本体を評価対象部位として選定する。
 配管及び弁の構造強度評価における評価対象部位を図3-2に示す。

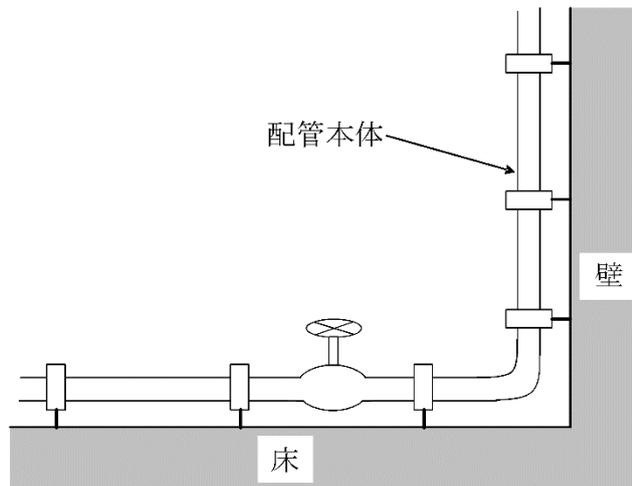


図3-2 配管及び弁の評価対象部位

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

(1) 衝突評価の荷重及び荷重の組合せ

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

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

砂利の諸元を表3-3、配管及び弁の衝突評価に用いる荷重を表3-4に示す。

表3-3 砂利の諸元

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

表3-4 配管及び弁の衝突評価に用いる荷重

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
屋外の防護対象施設	配管及び弁	配管	飛来物による衝撃荷重

(2) 構造強度評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の設定

構造強度評価に用いる荷重を以下に示す。

(a) 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、持続的に生じる荷重である自重を考慮する。

(b) 設計竜巻による荷重

風圧力による荷重、気圧差による荷重を考慮する。防護ネット及び防護鋼板等による風圧力の低減は無いものとして保守的な評価を行う。なお、非常用ガス処理系排気筒は大口径の配管が開放された施設であるため、気圧差は発生しないことから気圧差による荷重は考慮しない。また、非常用ガス処理系排気筒が仮に飛来物による衝撃荷重によって貫通しても、その貫通箇所又は本来の排気箇所から排気され、且つ速やかに補修する方針とするため、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。さらに、極小飛来物である砂利による衝撃は瞬間的で、衝突時間が極めて短く、衝突される機器へ伝わる加速度が小さいことから、機器へ作用する荷重は構造強度に影響を与えないので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。

イ. 風圧力による荷重(W_w)

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

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

ロ. 気圧差による荷重(W_p)

気圧差による荷重 W_p は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価方法に従って、気圧差を見かけ上の配管の内圧の増加として考慮する。具体的な計算方法は、「3.5(2) 計算方法」に示す。

(c) 運転時の状態で作用する荷重

運転時の状態で作用する荷重としては、配管に作用する内圧を考慮する。なお、非常用ガス処理系排気筒の内圧については、気圧差同様考慮しない。

b. 荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重の組合せは、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」にて設定している荷重の組合せを踏まえ、配管及び弁の評価対象部位ごとに設定する。

配管本体には、自重、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び内圧が作用する。

構造強度評価に用いる荷重の組合せを表3-5に示す。

表 3-5 荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
屋外の外部事象防護 対象施設	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 海水ポンプ周り）	配管本体	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重 ③自重 ④内圧
	非常用ガス処理系排気 筒	配管本体	①風圧力による荷重 ②自重

3.4 許容限界

配管及び弁の許容限界は，V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界に従って，「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位ごとに，機能損傷モードを考慮し，外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ及びJ E A G 4 6 0 1に基づく許容応力状態Ⅲ_ASの許容応力の許容荷重を用いる。

(1) 衝突評価の許容限界

衝突評価における許容限界は，評価において考慮する飛来物による衝撃荷重に対し，外殻を構成する部材が，機能喪失に至る可能性のある変形を生じないことを計算により確認するため，評価式により算定した貫通限界厚さが配管及び弁の外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ未満であることを許容限界とする。

残留熱除去系海水系ポンプ周りの配管及び弁における計算上必要な厚さについては，昭和50年6月5日付け50資庁第4488号にて認可された工事計画の工事計画書の添付書類「Ⅲ-1-2-1 残留熱除去系海水系配管の規格計算書」の値を用いる。

また，ディーゼル発電機海水ポンプ周りの配管及び弁における計算上必要な厚さについては，昭和50年10月6日付け50資庁第8313号にて認可された工事計画の工事計画書の添付書類「Ⅲ-1-12-2 非常用予備電源装置内燃機関冷却系海水配管の規格計算書」の値を用いる。

中央制御室換気系冷凍機周りの配管及び弁における計算上必要な厚さは，J S M E P P D-3411に基づき，以下の式より算出する。

$$t = \frac{P \cdot D_o}{2 \cdot S \cdot \eta + 0.8 \cdot P}$$

配管及び弁の外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さを表3-6に示す。

表3-6 配管及び弁の外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ

防護対象施設	外殻を構成する部材の厚さ (mm)	計算上必要な厚さ (mm)	外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ (mm)
残留熱除去系海水系ポンプ周りの配管及び弁	6.0*	1.9*	4.1
ディーゼル発電機海水ポンプ周りの配管及び弁	9.3	1.0	8.3
中央制御室換気系冷凍機周りの配管及び弁	5.5	0.3	5.2

注記 *：工事計画書記載の配管のうち、外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さが最小となる配管を選定

(2) 構造強度評価の許容限界

許容限界は J E A G 4 6 0 1 を準用し、「クラス2,3配管」の許容限界を適用し、許容応力状態Ⅲ_AS から算出した許容応力を許容限界とする。J E A G 4 6 0 1 に従い、J S M E 付録材料図表Part5,6の表にて許容応力を計算する際は、評価対象部位の最高使用温度又は周囲環境温度に応じた値をとるものとするが、温度が J S M E 付録材料図表記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算する。ただし、J S M E 付録材料図表Part5,6で比例法を用いる場合の端数処理は、小数点第1位以下を切り捨てた値を用いるものとする。

配管の構造強度評価における許容限界について、表3-7に示す。

表3-7 配管の許容限界

許容応力状態	許容限界
	一次応力 (膜+曲げ)
Ⅲ _A S	S _y

3.5 評価方法

(1) 衝突評価の評価方法

配管及び弁の衝突評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 強度評価方法」にて設定している衝突評価が必要な機器の評価式を用いる。

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

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

(2) 構造強度評価の評価方法

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

a. 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3-3に示す。

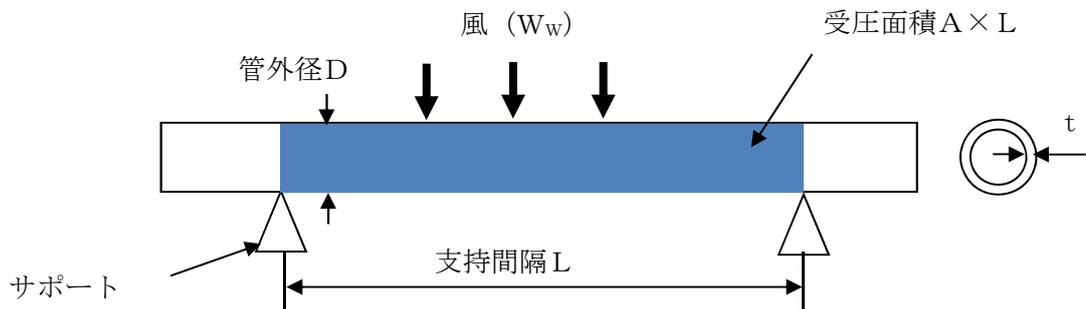


図 3-3 配管モデル図

b. 計算方法

(a) 竜巻による応力計算

イ. 風圧力により生じる応力

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

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

ここで、

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

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。

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

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

4. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-1～表 4-6 に示す。

表 4-1 許容応力計算に用いる条件

評価対象配管	温度条件 (°C)	S _y (MPa)
中央制御室換気系冷凍機周り配管	65.6* ¹	231
残留熱除去系海水系ポンプ周り配管	50* ²	239
	50* ²	319
ディーゼル発電機用海水ポンプ周り配管	50* ²	239

注記 *1：最高使用温度

*2：周囲環境温度

表 4-2 共通評価条件

ガスト係数 G (-)	風力係数 C (-)	設計用速度圧 q (N/m ²)	気圧低下量 ΔP (N/m ²)	重力加速度 g (m/s ²)
1	1.2	6100	8900	9.80665

表 4-3 評価条件 (中央制御室換気系冷凍機周り配管)

管外径 D (mm)	材料	支持間隔 L (m)	板厚 t (mm)	単位長さ当 たりの質量 m (kg/m)	単位長さ当 たりの受圧面積 A (m ² /m)	内圧 P (MPa)
89.1	STPT410	3.25	5.5	17.8	0.1691	0.54

表 4-4 評価条件 (残留熱除去系海水系ポンプ周り配管)

管外径 D (mm)	材料	支持間隔 L (m)	板厚 t (mm)	単位長さ当 たりの質量 m (kg/m)	単位長さ当 たりの受圧面積 A (m ² /m)	内圧 P (MPa)
355.6	STPT410	14.20	11.1	196.6	0.5556	3.46
508.0	SM50B	14.20	12.7	358.0	0.7080	3.46

表 4-5 評価条件（ディーゼル発電機用海水ポンプ周り配管）

管外径 D (mm)	材料	支持間隔 L (m)	板厚 t (mm)	単位長さ当 たりの質量 m (kg/m)	単位長さ当 たりの受圧面積 A (m ² /m)	内圧 P (MPa)
267.4	STPT410	11.03	9.3	119.9	0.4674	0.7

表 4-6 評価条件（非常用ガス処理系排気筒）

管外径 D (mm)	材料	支持間隔 L (m)	板厚 t (mm)	単位長さ当 たりの質量 m (kg/m)	単位長さ当 たりの受圧面積 A (m ² /m)	内圧 P (MPa)
457.2	SM41B	21.04	14.3	156.0	0.4572	0.014

5. 強度評価結果

(1) 衝突評価結果

竜巻発生時の砂利の貫通限界厚さを表 5-1 に示す。

表 5-1 砂利の貫通限界厚さ

飛来物	貫通限界厚さ T (mm)	
	水平方向	鉛直方向
砂利	1.0	1.0

砂利の貫通限界厚さ(1.0mm)と配管及び弁の外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さとの比較を表5-2に示す。

砂利の貫通限界厚さは、配管及び弁の外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ未満である。また、弁の板厚は配管に比べ厚いため、配管の評価に包絡される。

表 5-2 配管及び弁の衝突評価結果 (砂利)

防護対象施設	外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ (mm)	貫通限界厚さ T (mm)	結果
残留熱除去系海水系ポンプ 周りの配管及び弁	4.1	1.0	貫通しない
ディーゼル発電機海水ポンプ 周りの配管及び弁	8.3	1.0	貫通しない
中央制御室換気系冷凍機周 りの配管及び弁	5.2	1.0	貫通しない

(2) 構造強度評価結果

- a. 中央制御室換気系冷凍機周りの配管及び弁
構造強度評価結果を表5-3に示す。

中央制御室換気系冷凍機周りの配管に発生する応力は、許容応力以下である。また、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。

表 5-3 評価結果（中央制御室換気系冷凍機周り）

管外径 D (mm)	材料	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	許容応力 (MPa)
89.1	STPT410	11	68	231

- b. 残留熱除去系海水系ポンプ周りの配管及び弁
構造強度評価結果を表5-4に示す。

残留熱除去系海水系ポンプ周りの配管に発生する応力は、許容応力以下である。また、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。

表 5-4 評価結果（残留熱除去系海水系ポンプ周り）

管外径 D (mm)	材料	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	許容応力 (MPa)
355.6	STPT410	77	179	239
508.0	SM50B	72	127	319

- c. ディーゼル発電機用海水ポンプ周りの配管及び弁
構造強度評価結果を表5-5に示す。

ディーゼル発電機用海水ポンプ周りの配管に発生する応力は、許容応力以下である。また、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。

表 5-5 評価結果（ディーゼル発電機用海水ポンプ周り）

管外径 D (mm)	材料	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	許容応力 (MPa)
267.4	STPT410	44	154	239

d. 非常用ガス処理系排気筒

構造強度評価結果を表5-6に示す。

非常用ガス処理系排気筒に発生する応力は，許容応力以下である。

表 5-6 評価結果（非常用ガス処理系排気筒）

管外径 D (mm)	材料	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	許容応力 (MPa)
457.2	SM41B	40	127	232

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

目次

- 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 1-1-10-1 建屋及び構造物の強度計算書

目次

1. 概要.....	1
2. 基本方針.....	1
2.1 位置.....	1
2.2 構造概要.....	3
2.3 評価方針.....	7
2.4 適用規格.....	10
3. 強度評価方法.....	11
3.1 記号の定義.....	11
3.2 評価対象部位.....	11
3.3 荷重及び荷重の組合せ.....	11
3.4 許容限界.....	13
3.5 評価方法.....	17
4. 評価条件.....	26
4.1 サービス建屋.....	26
4.2 海水ポンプエリア防護壁.....	28
4.3 鋼製防護壁.....	30
5. 強度評価結果.....	31
5.1 サービス建屋.....	31
5.2 海水ポンプエリア防護壁.....	32
5.3 鋼製防護壁.....	33

1. 概要

本資料は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、波及的影響を及ぼす可能性がある施設であるサービス建屋、海水ポンプエリア防護壁及び鋼製防護壁が、設計竜巻による風圧力による荷重、気圧差による荷重及び設計飛来物（以下「飛来物」という。）による衝撃荷重並びにその他の荷重に対し、竜巻時及び竜巻通過後においても、竜巻より防護すべき施設の安全機能を損なわないように、隣接する竜巻より防護すべき施設を内包する原子炉建屋、タービン建屋並びに防護対象施設である残留熱除去系海水系ポンプ等に対して、機械的な波及的影響を及ぼさないことを確認するものである。

2. 基本方針

建屋及び構造物について、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、サービス建屋、海水ポンプエリア防護壁及び鋼製防護壁の「2.1 位置」、「2.2 構造概要」、「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

2.1 位置

サービス建屋は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す配置のとおり、原子炉建屋及びタービン建屋に隣接する建屋である。

海水ポンプエリア防護壁は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す配置のとおり、残留熱除去系海水系ポンプ等に隣接する構造物である。

鋼製防護壁は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す配置のとおり、**残留熱除去系海水系ポンプ等**に隣接する構造物である。

建屋及び構造物の配置図を図2-1及び図2-2に示す。

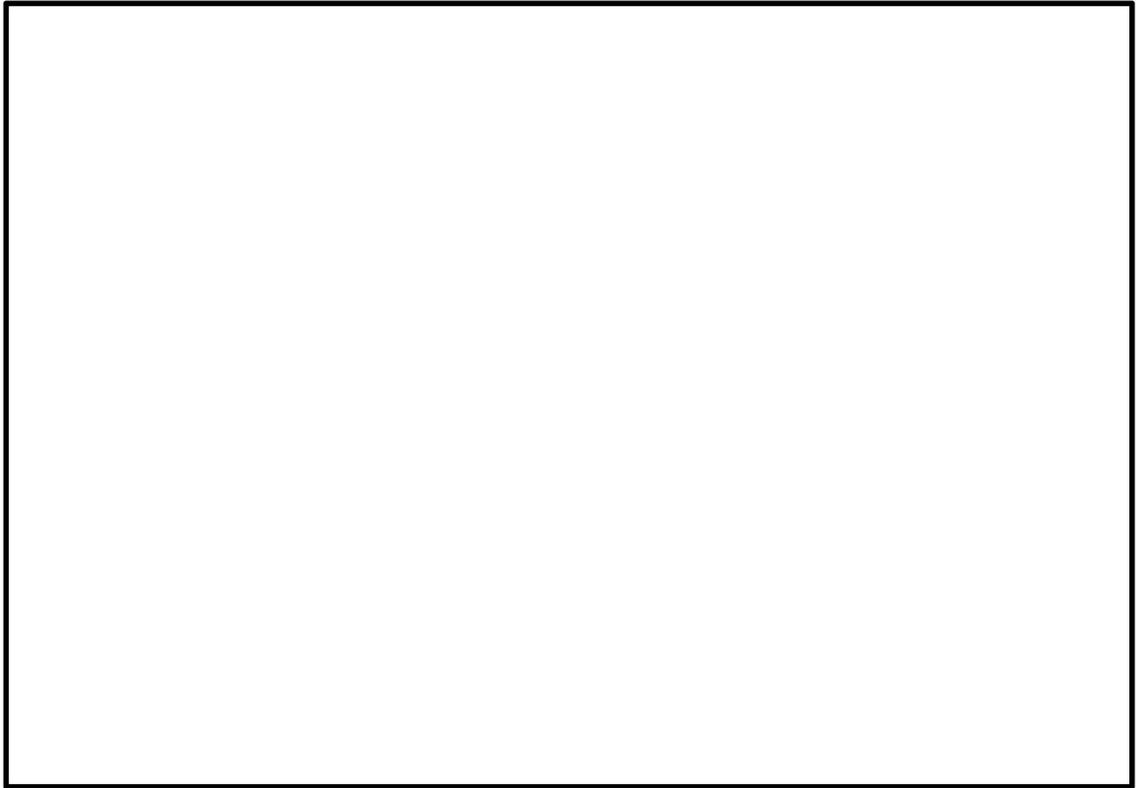


図 2-1 サービス建屋及び鋼製防護壁の配置図

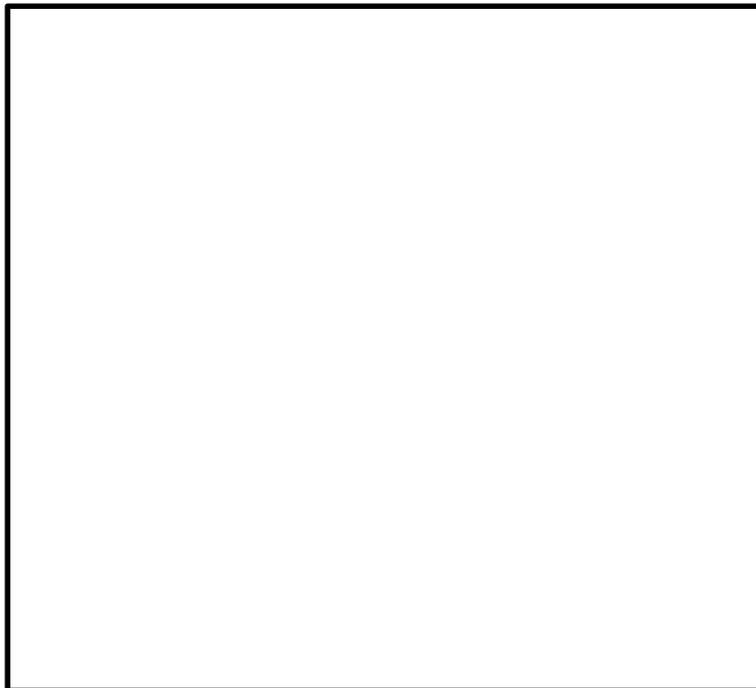


図 2-2 海水ポンプエリア防護壁の配置図

2.2 構造概要

(1) サービス建屋

サービス建屋並びにサービス建屋から波及的影響を受ける恐れがある原子炉建屋及びタービン建屋は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画とする。

サービス建屋は、図2-3に示すとおり、発電所建設時に設置した部分（以下「既設部」という。）及び、その後に増設した部分（以下「増設部」という。）で構成され、既設部及び増設部並びに原子炉建屋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。波及的影響を考慮する本評価においては、原子炉建屋に隣接する既設部を対象とする。

（以下特記の無い限り「サービス建屋」という場合は、既設部を指す。）

サービス建屋、原子炉建屋及びタービン建屋は、鉄筋コンクリート造（以下、「RC造」という。）の躯体で構成する。

サービス建屋の断面図を図2-4に示す。

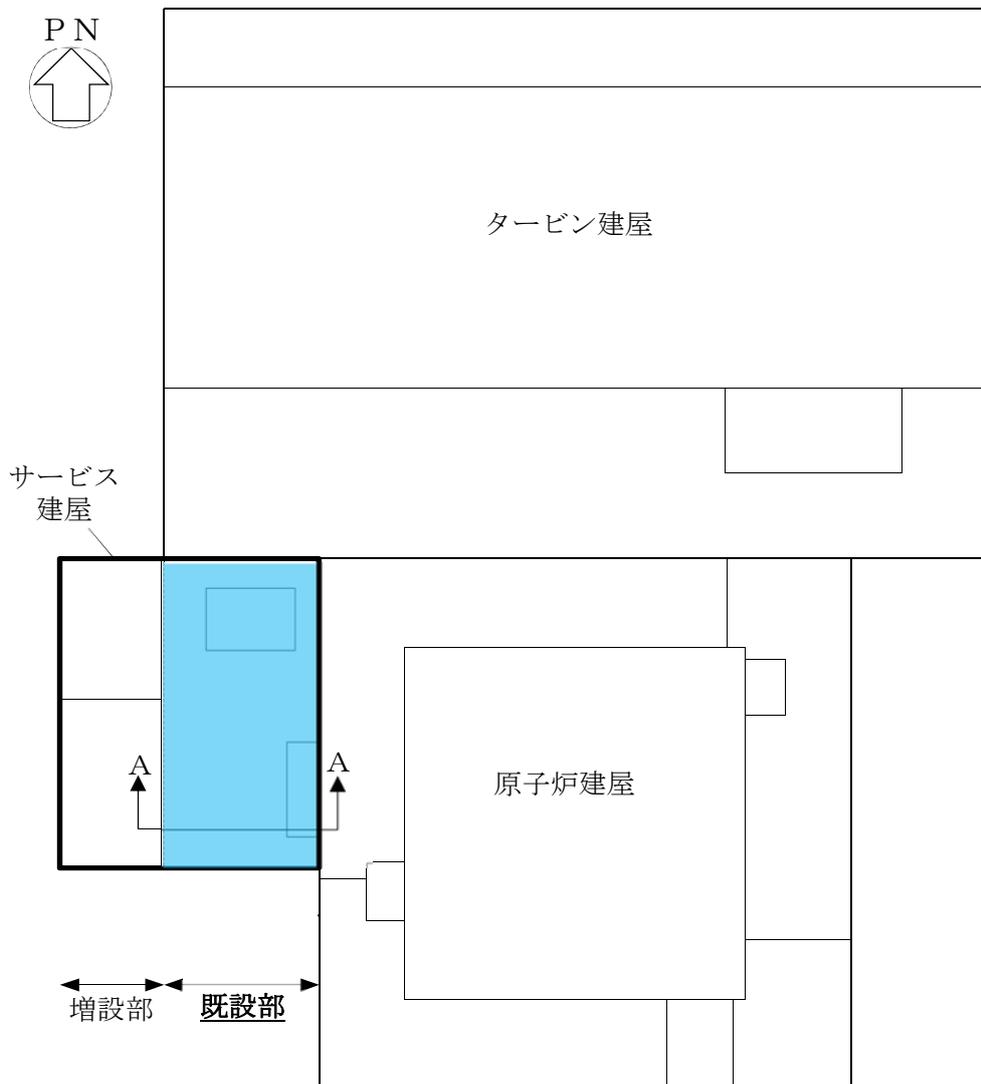


図2-3 サービス建屋、原子炉建屋及びサービス建屋の配置

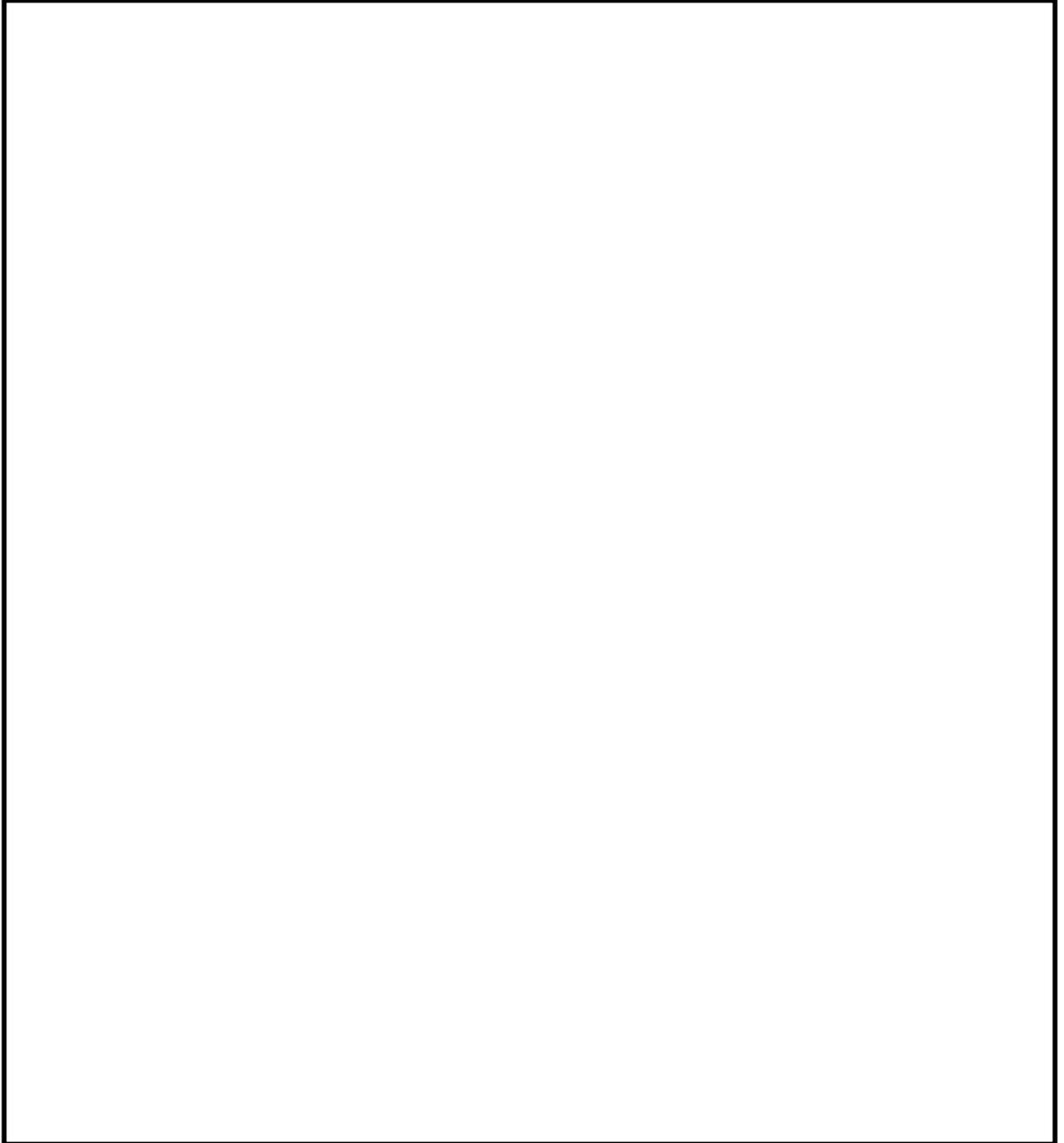


図2-4 サービス建屋 (既設部) 断面図

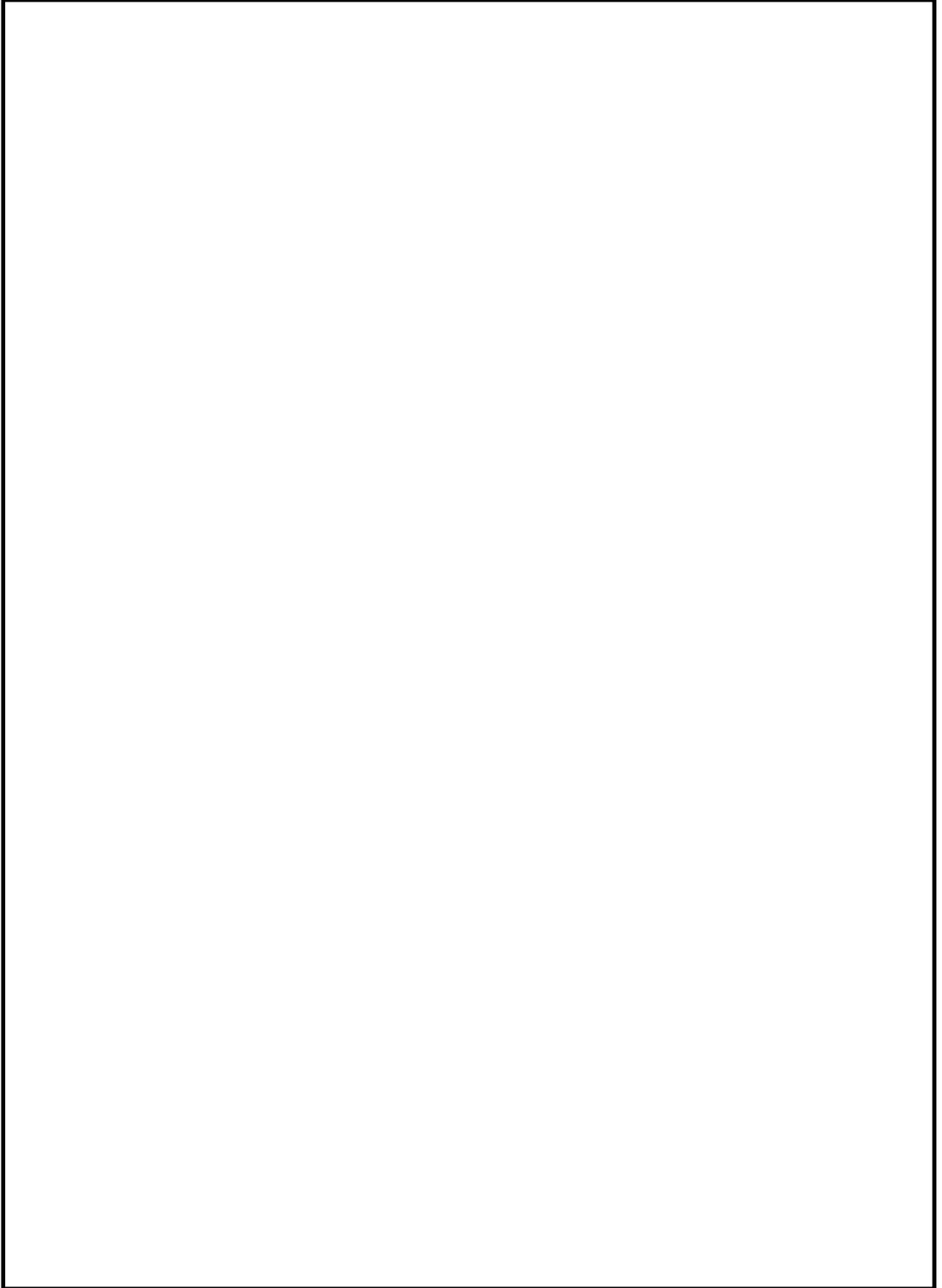
(2) 海水ポンプエリア防護壁

海水ポンプエリア防護壁は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画とする。

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

海水ポンプエリア防護壁の概略構造図を図 2-5 に示す。

NT2 補② V-3-別添 1-1-10-1 R4



2-5 海水ポンプエリア防護壁概略構造図

(3) 鋼製防護壁

鋼製防護壁は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画とする。

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

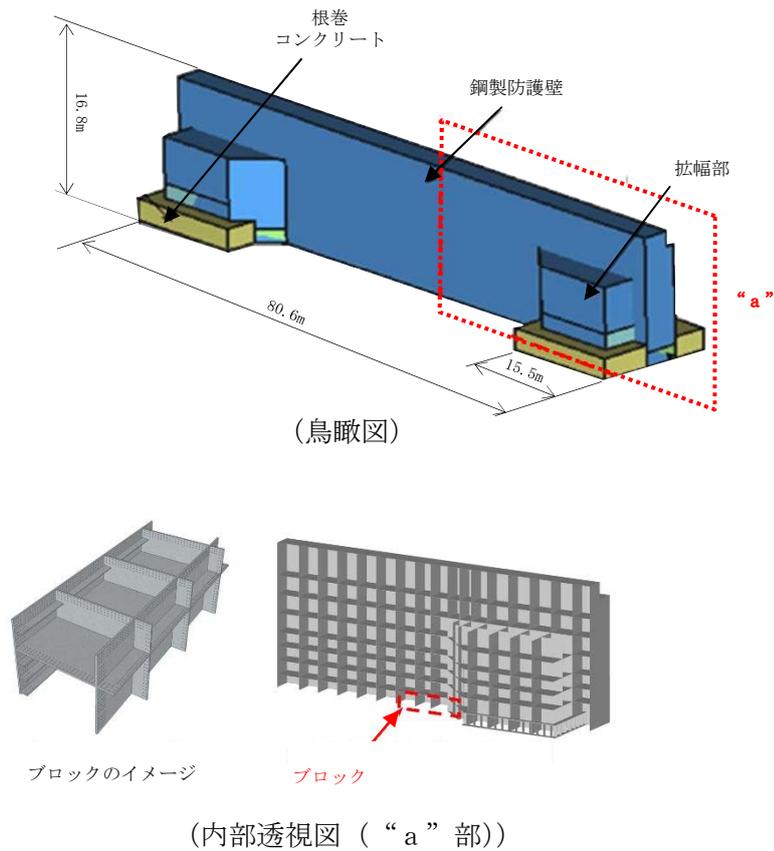


図 2-6 鋼製防護壁概略構造図

2.3 評価方針

(1) サービス建屋

サービス建屋の強度評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している、荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、竜巻より防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないことを、「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

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

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

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

サービス建屋の波及的影響評価フローを図2-7に示す。

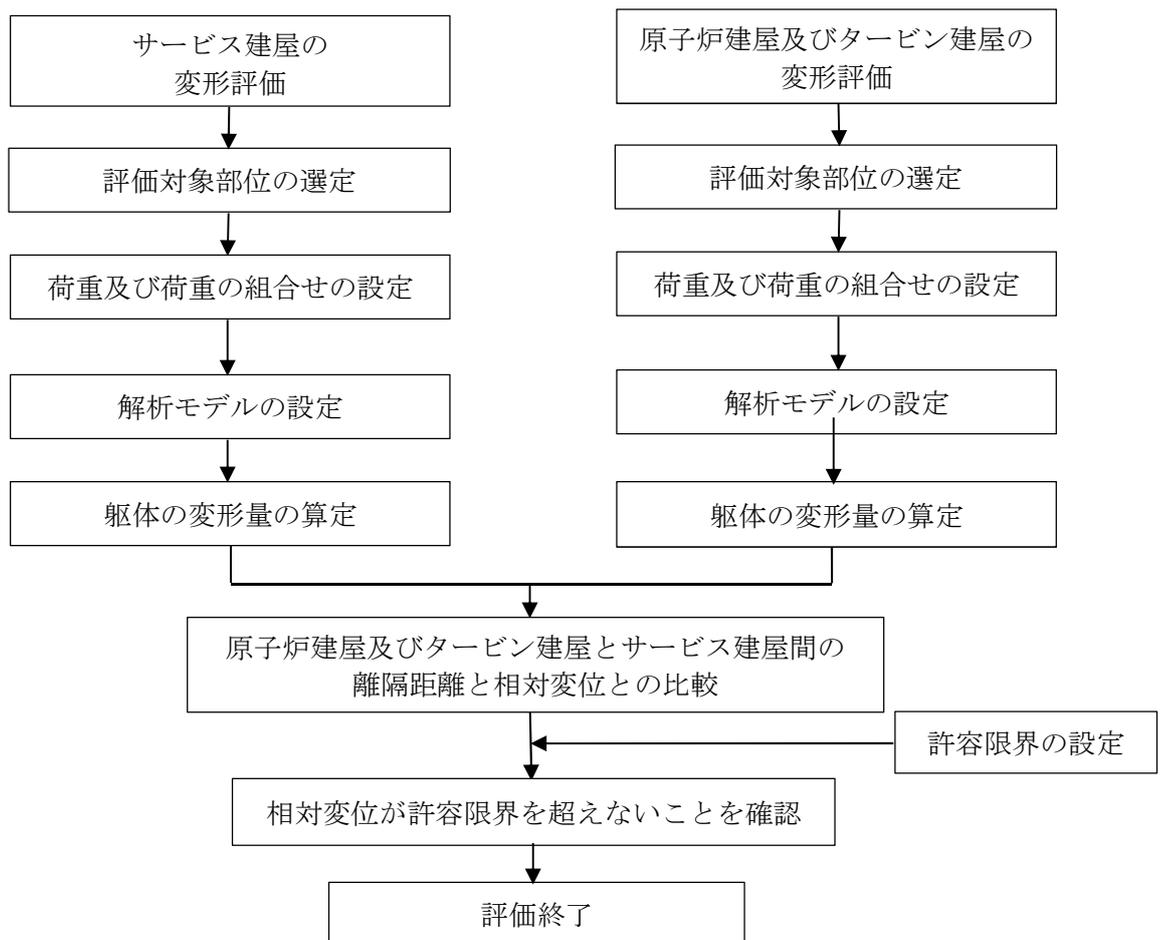


図2-7 サービス建屋の波及的影響評価フロー

(2) 海水ポンプエリア防護壁

海水ポンプエリア防護壁の強度評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している、荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、竜巻より防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないことを、「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

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

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

海水ポンプエリア防護壁の構造強度評価（以下「変形評価」という。）については、設計荷重に対し、残留熱除去系海水系ポンプ等に接触する変形を生じないように、当該防護壁の変形が弾性限界の範囲に留まることを確認する。

海水ポンプエリア防護壁の波及的影響評価フローを図2-8に示す。

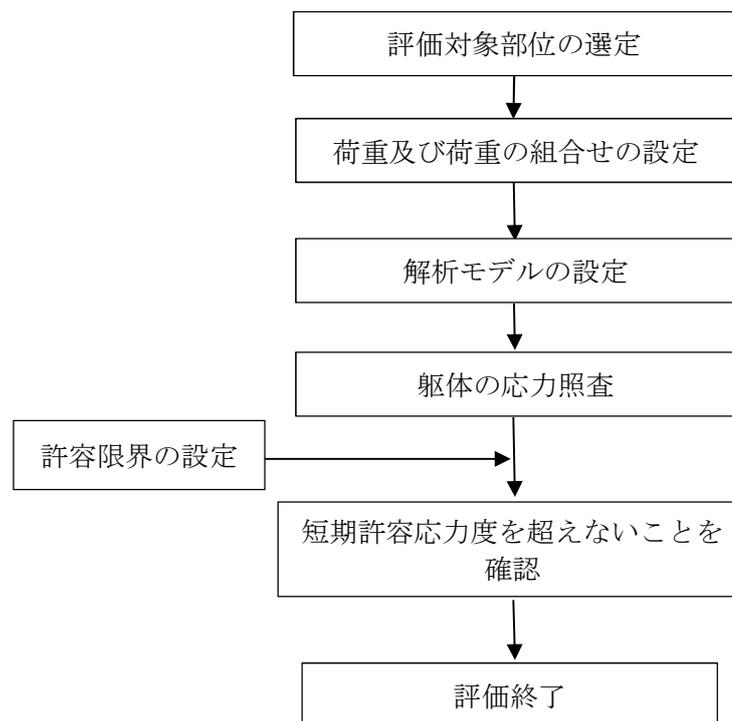


図2-8 海水ポンプエリア防護壁の波及的影響評価フロー

(3) 鋼製防護壁

鋼製防護壁の強度評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している、荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、竜巻より防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないことを、「3.

強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

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

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

鋼製防護壁の構造強度評価については、設計荷重に対し、鋼製防護壁に転倒が生じないことを計算により確認する。評価方法としては、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5.1.2 鋼製構造物(3) 強度評価方法」に示す評価式により算出した設計荷重が、津波による荷重に包絡されることを確認する。

鋼製防護壁の波及的影響評価フローを図2-9に示す。

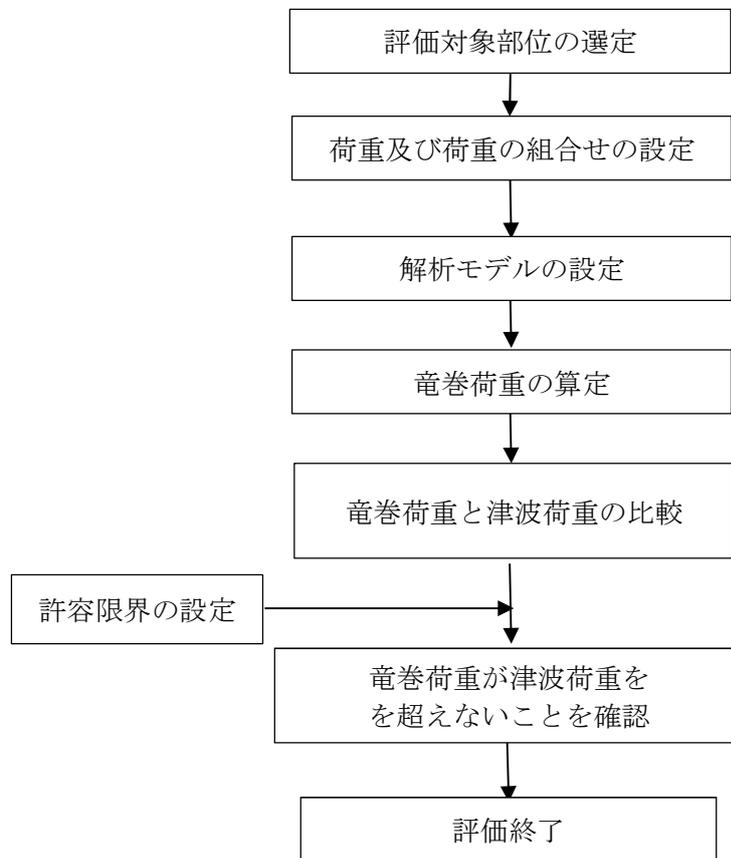


図2-9 鋼製防護壁の波及的影響評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・ 鋼構造設計規準 -許容応力度設計法- （（社）日本建築学会，2005 改定）
- ・ 建築基準法及び同施行令
- ・ 建築物荷重指針・同解説 （（社）日本建築学会，2004 改定）
- ・ 「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987」 （（社）日本電気協会）
- ・ 「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」 （（社）日本電気協会）
- ・ 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 （（社）日本建築学会，2010 改定）
- ・ 発電用原子力設備規格（設計・建設規格（2005 年版（2007 年追補版含む。)) J S M E S N C 1 -2005/2007）（日本機械学会 2007 年 9 月）（以下「設計・建設規格」という。）
- ・ 鋼構造設計規準 許容応力度設計法 日本建築学会
- ・ 道路橋示方書・同解説 （社）日本道路協会
- ・ コンクリート標準示方書 2002 年（構造性能照査編）及び 2012 年（設計編）土木学会

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

波及的影響に関する強度評価に用いる記号を表3-1に示す。

表 3-1 強度評価に用いる記号

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

3.2 評価対象部位

(1) サービス建屋

サービス建屋及の評価対象部位は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す評価対象部位を踏まえて鉄筋コンクリート躯体を設定する。

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

(2) 海水ポンプエリア防護壁

海水ポンプエリア防護壁の評価対象部位は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す評価対象部位を踏まえて鉄筋コンクリート壁並びに鉄骨架構を設定する。

(3) 鋼製防護壁

鋼製防護壁の評価対象部位は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す評価対象部位を踏まえて上部工（鋼殻構造部）を設定する。

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組み合わせは、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

(1) 荷重の設定

強度評価に用いる荷重は、以下の荷重を用いる。

a. 風圧力による荷重 (W_w)

風圧力による荷重 W_w は、下式により算定する。

風力係数 C は、「建築基準法及び同施行令」に基づき設定する。

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

b. 気圧差による荷重 (W_p)

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

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

c. 飛来物による衝撃荷重 (W_M)

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

いる。
なお、飛来物に対し十分に大きな質量を有する施設に対し、当該施設の全体的な変形挙動の評価をする場合には、相対的に極小と見なせる飛来物により瞬間的に作用する衝撃荷重 W_M の影響は軽微と考えられるため、考慮しないものとする。

表3-2 飛来物の諸元

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

d. 常時作用する荷重 (F_d)

常時作用する荷重 F_d として、自重及び上載荷重を考慮する。

(2) 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せは、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」を踏まえて、風圧力による荷重，気圧差による荷重，飛来物による衝撃荷重及び常時作用する荷重を組み合わせる。

荷重の組合せを表3-3に示す。

表3-3 荷重の組合せ

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

W_w ：風圧力による荷重 W_p ：気圧差による荷重

W_M ：飛来物による衝撃荷重 F_d ：常時作用する荷重

3.4 許容限界

(1) サービス建屋

サービス建屋の許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」を踏まえて、評価内容に応じて設定する。

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

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

表3-4 許容限界（サービス建屋）

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

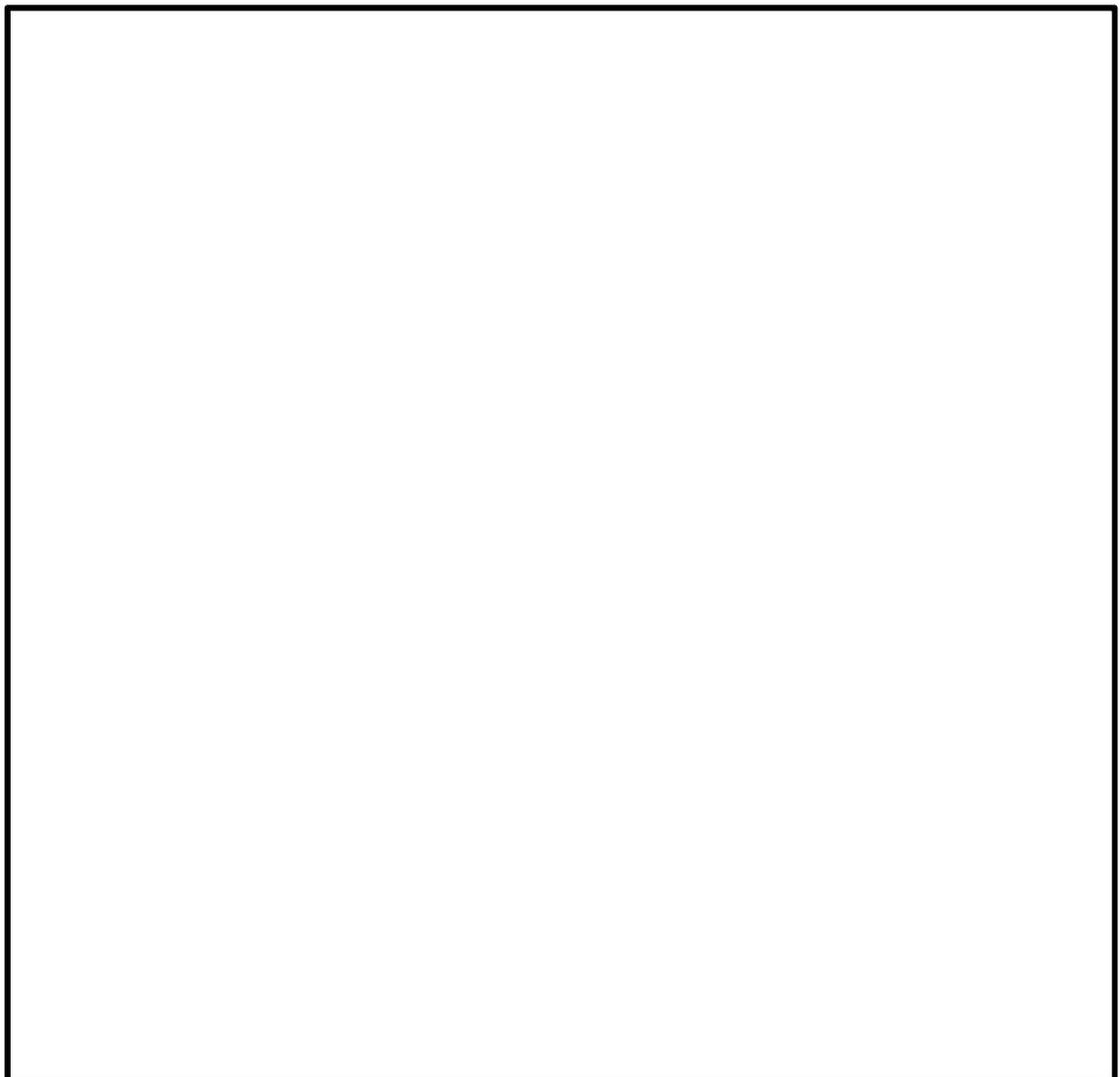


図3-1 サービス建屋と原子炉建屋の境界部断面図

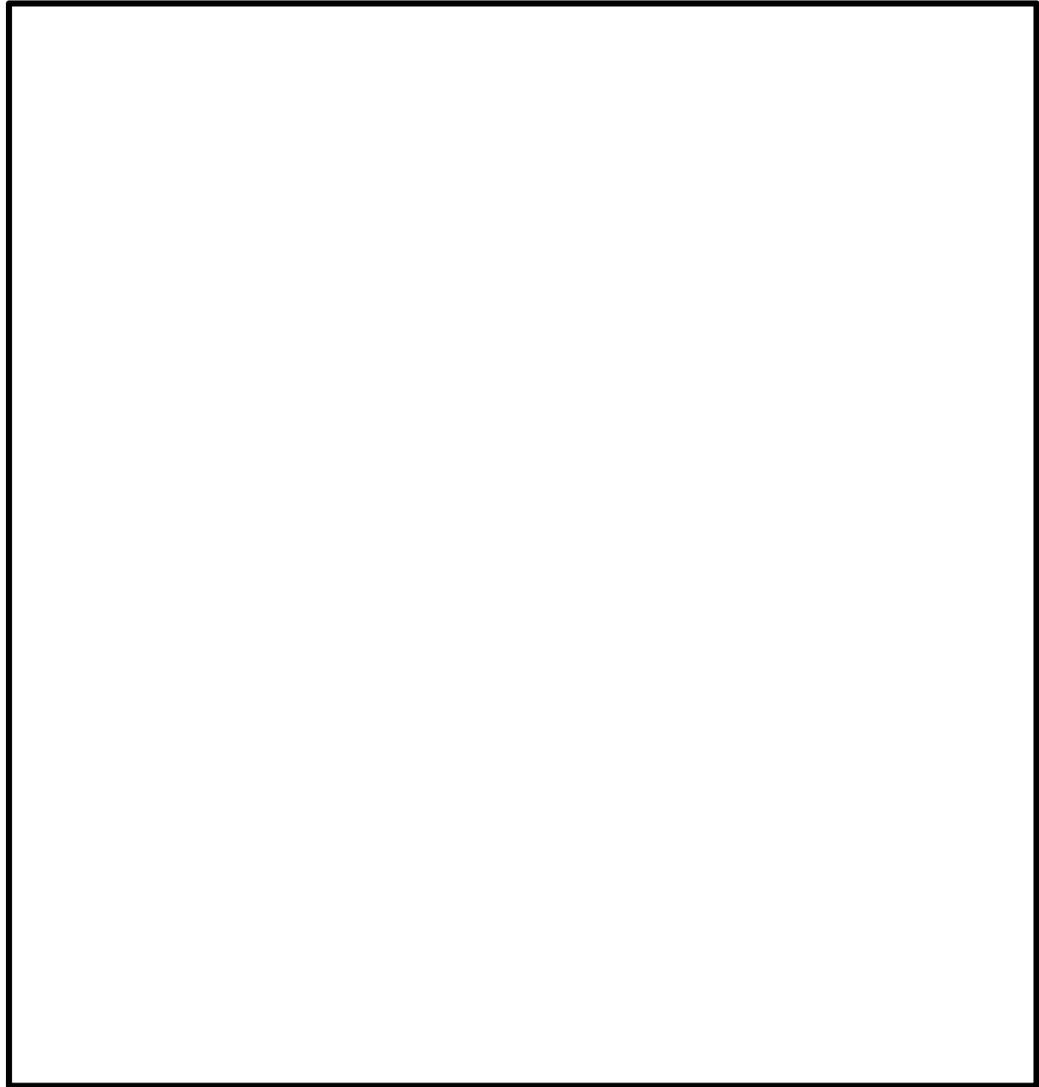


図3-2 サービス建屋とタービン建屋の境界部断面図

(2) 海水ポンプエリア防護壁

海水ポンプエリア防護壁の許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」を踏まえて、評価内容に応じて設定する。

海水ポンプエリア防護壁の鉄筋コンクリート壁並びに鋼製架構及び鋼板壁の変形に対する許容限界は、海水ポンプエリア防護壁の鉄筋コンクリート壁並びに鉄骨架構と近接する防護対象施設との最小離隔距離を考慮し設定するものであるが、弾性限界内の変形に留めることで、防護対象施設との離隔を維持する設計とする。

各エリアに対する許容限界を表3-5に示す。

表 3-5 許容限界 (海水ポンプエリア防護壁)

評価項目			許容限界
海水ポンプ エリア防護壁	躯体の 変形	RC 造部 (エリア①～⑤) 鉄骨架構部 (エリア⑧) 埋込基礎 (エリア⑧)	短期許容応力度以内

表3-6 鋼構造部の許容限界

許容応力 状態	許容限界*1, (ボルト以外)				許容限界*1 (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

*1：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) 鋼製防護壁

鋼製防護壁の許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」を踏まえて、評価内容に応じて設定する。

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

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

表 3-6 許容限界（鋼製防護壁）

評価項目		許容限界	
鋼製防護壁	上部工への風荷重	上部工天端における津波荷重 (基準津波時)	68.2 kN/m ²

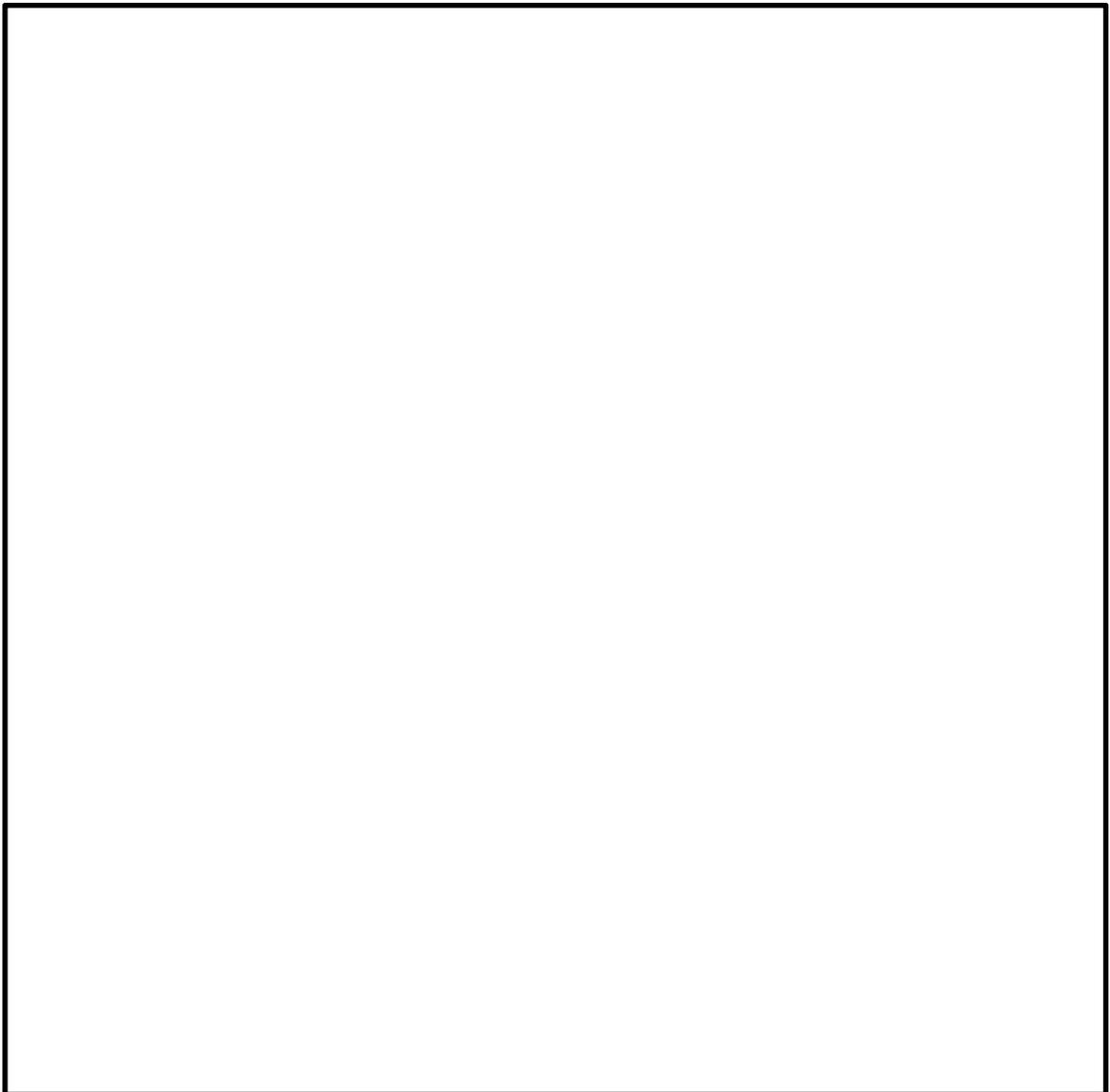


図 3-5 鋼製防護壁と防護対象の位置関係

3.5 評価方法

(1) サービス建屋（原子炉建屋及びタービン建屋を含む）

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

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

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

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

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

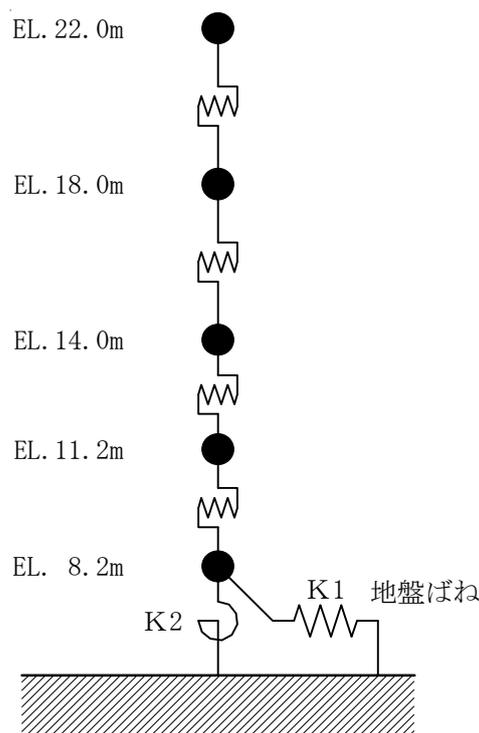


図3-5 サービス建屋の解析モデル

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

原子炉建屋及びタービン建屋のせん断力－せん断ひずみ関係（ $Q-\gamma$ 関係）は、V-3-別添1-1-1「竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書」の「3.5.3 変形評価」に示すものを用いる。

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

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

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

(2) 海水ポンプエリア防護壁

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

海水ポンプエリア防護壁の解析モデル図について、図3-5に示す。

鉄筋コンクリート壁で構成されるエリア②～⑤については、南北方向の壁を片持ちはりモデル、東西方向の壁を3辺固定1辺自由のスラブ、鉄骨架構で構成されるエリア⑧は、鉄骨架構部分を3次元フレームモデルとして評価する。

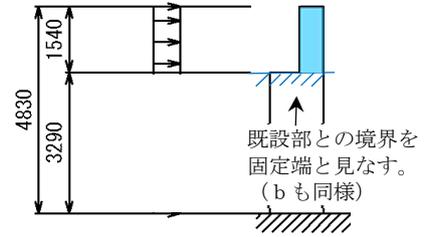
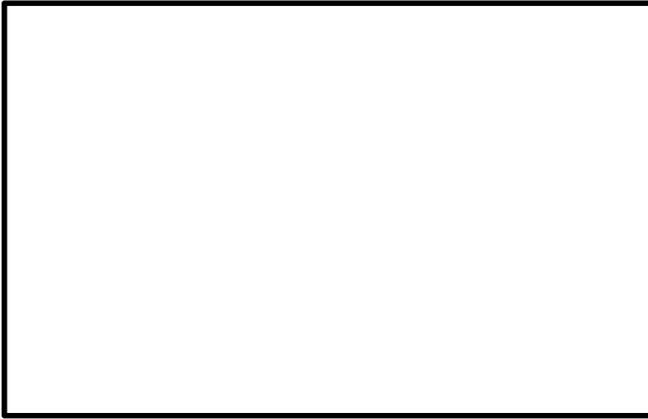
設計荷重のうち、風圧力による荷重 W_w は、海水ポンプエリア防護壁の各エリアの形状を考慮して算出した風力係数及び受圧面積に基づき算出する。

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

飛来物による衝撃荷重 W_M については、エリア②～⑤では、その区画を構成する海水ポンプ室躯体が設計飛来物に対し十分大きな質量を有することを考慮すると、波及的影響の検討対象である躯体の全体的な変形に対する設計飛来物の衝突荷重の影響は軽微と考えられることから、考慮しない。エリア⑧についても、当該部の質量は飛来物に対し十分に大きく、また当該部は頑健な海水ポンプ室躯体に支えられた構造となっていることから、瞬間的に作用する飛来物の衝突荷重のみで当該部の全体的な倒壊を起こすことは考え難いが、鉄骨造の構造物において衝突による架構構成部位（鉄骨）の損傷を生じた場合には、RC造に比べ健全部材への荷重の再配分が大きいと考えられるため、その後に作用する自重若しくは風荷重により倒壊しないことの確認として、飛来物の衝突荷重を、柱の一本を喪失したものと置き換えたモデルとして考慮する。

ここで、エリア⑧と鋼製防護壁は近接しており、エリア⑧の東面に飛来物が深い入射角で衝突することは考え難いため、飛来物は南北方向に飛翔するものを考慮した上で、エリア⑧の南壁及び北壁の構造も踏まえ、飛来物の衝突箇所を、エリア⑧の南端の柱と設定した。

a. 東側クレーン走行路嵩上げ壁



b. 西側クレーン走行路嵩上げ壁

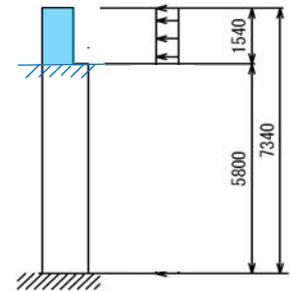
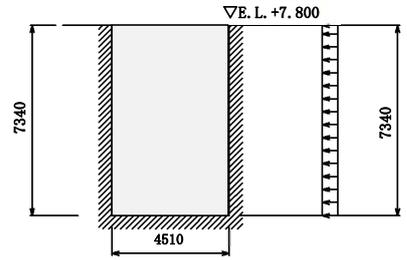


図3-5 海水ポンプエリア防護壁の解析モデル図 (1/5)

c. エリア⑤北側壁



d. エリア①北側壁

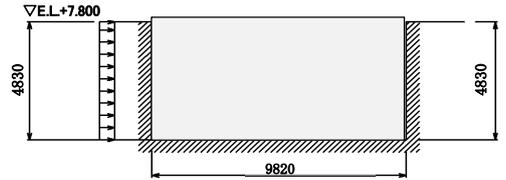
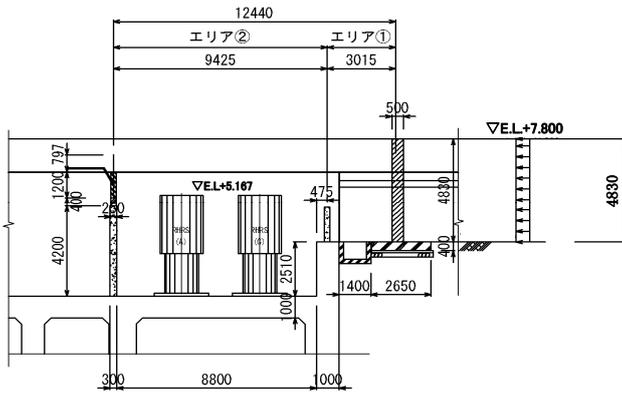
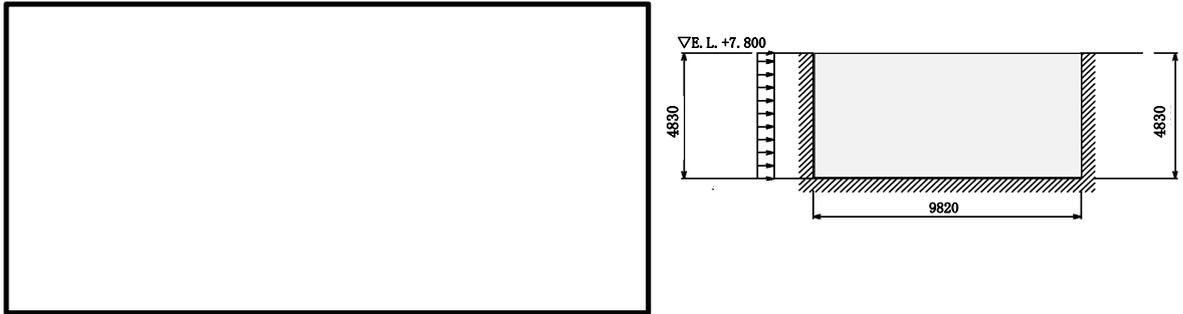


図3-5 海水ポンプエリア防護壁の解析モデル図 (2/5)

e. エリア④南側壁



f. エリア②南側壁、エリア③北側壁

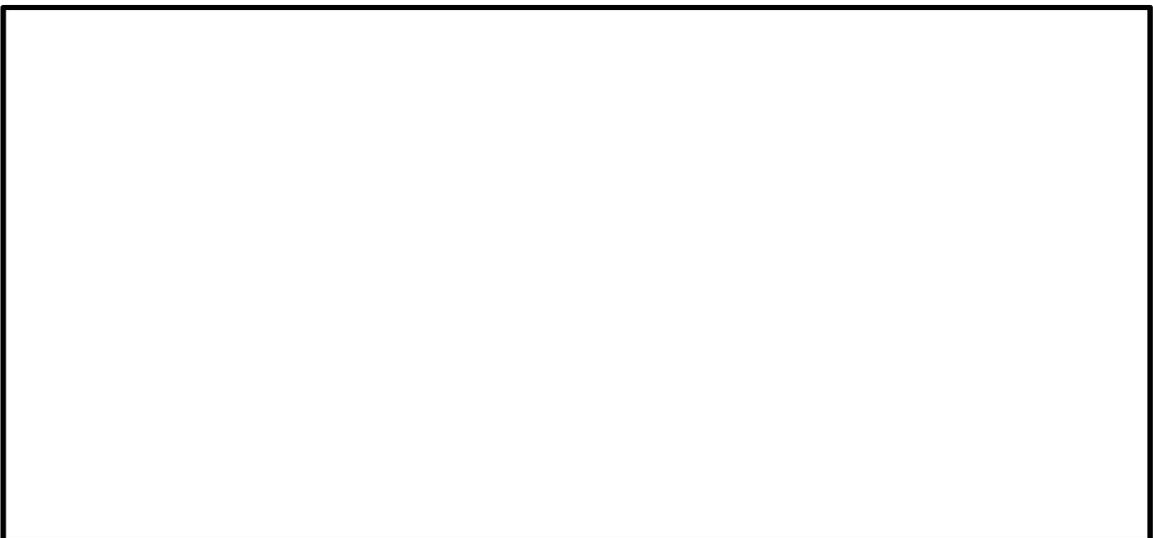
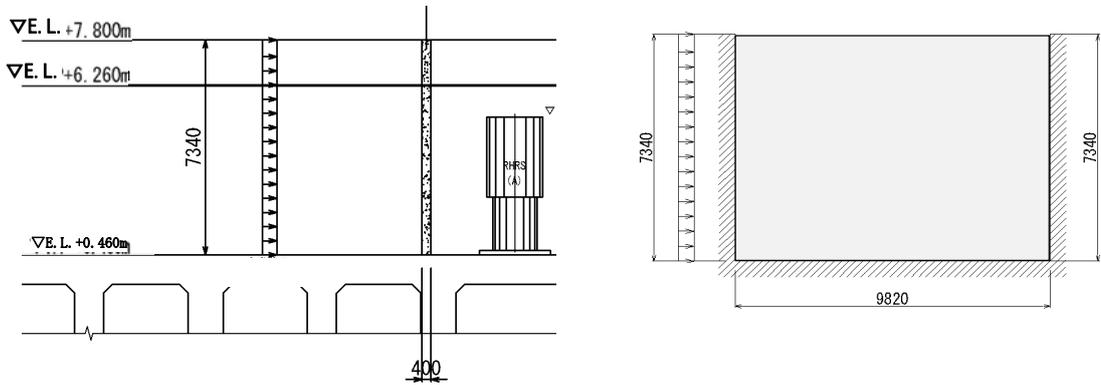
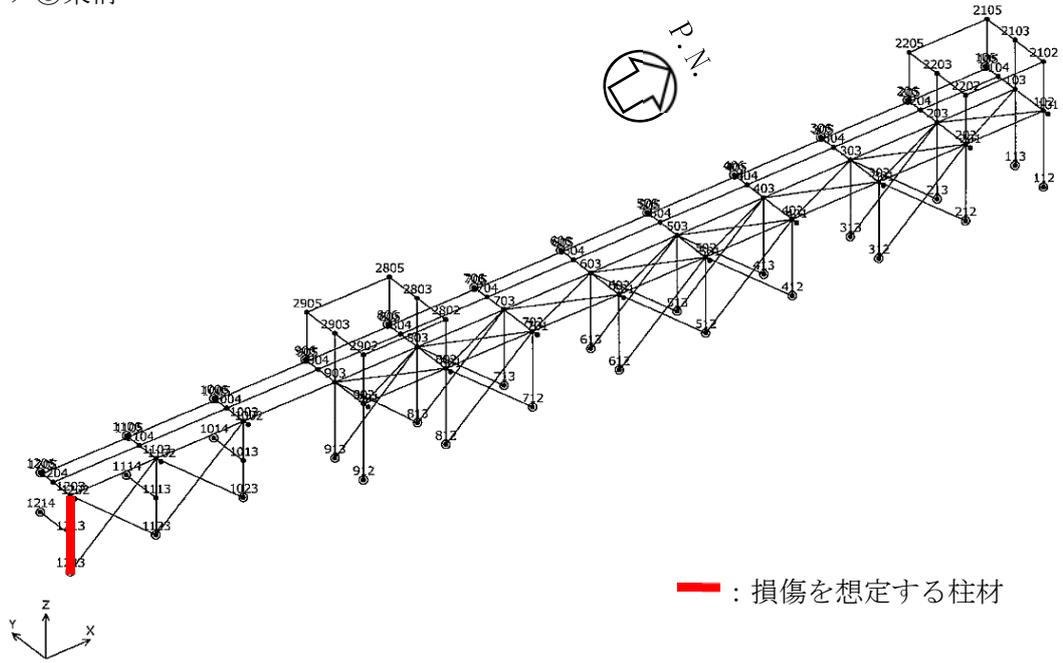


図3-5 海水ポンプエリア防護壁の解析モデル図 (3/5)

エリア⑧架構



— : 損傷を想定する柱材

<エリア⑧への飛来物衝突方向について>

エリア⑧について、

- ・ 東側はごく近傍に鋼製防護壁があり、飛来物は東からの侵入不可。
- ・ 西側は、上部の防護ネット部以外は海水ポンプ室に隠れている
- ・ 北側はコンクリート壁によって柱が隠れている。

↓

主要な柱に対し、飛来物は南方向からのみ衝突し得る。

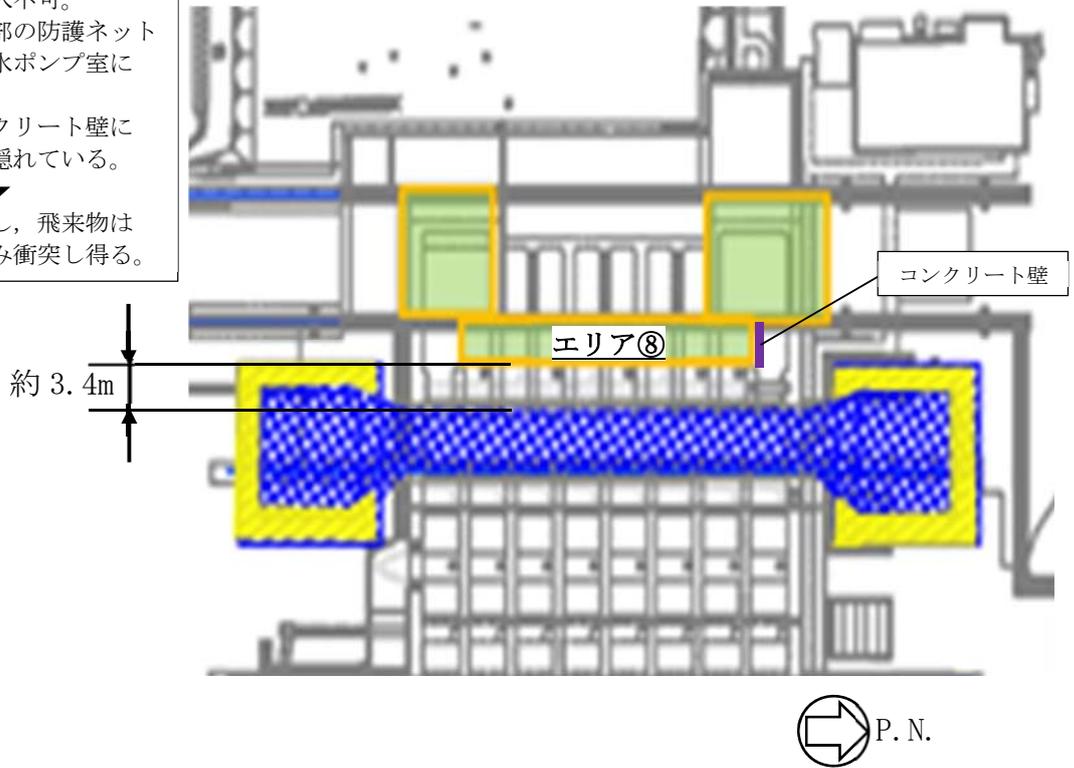


図3-5 海水ポンプエリア防護壁の解析モデル図 (4/5)

エリア⑧埋込基礎

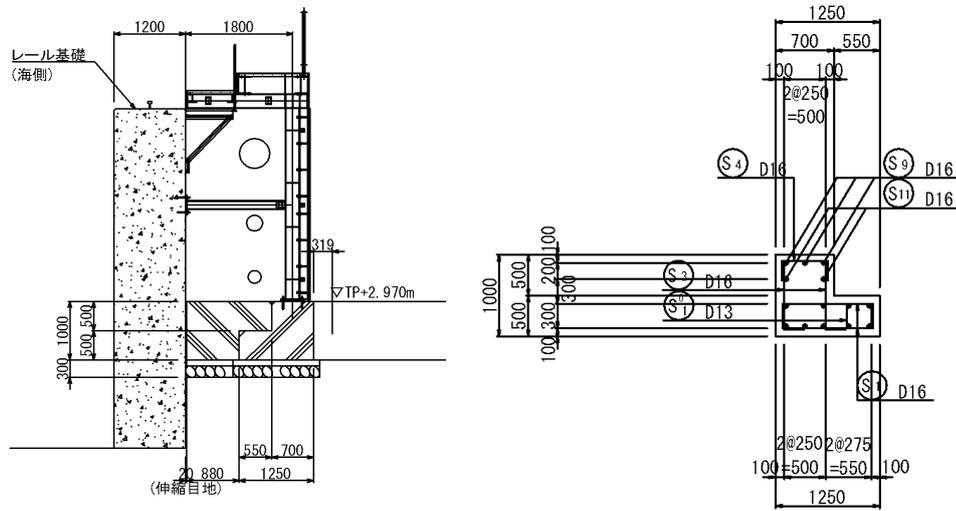


図3-5 海水ポンプエリア防護壁の解析モデル図 (5/5)

鉄筋コンクリートのはりモデルに対しては、土木学会「コンクリート標準示方書〔設計編〕(2012年)に基づき計算機コード「RC断面計算」を使用し、応力を求める。なお、評価に用いる計算機コードの検証及び妥当性確認等の概要については、「V-5-43 計算機プログラム(解析コード)の概要 RC断面計算」に示す。

スラブに対しては、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」の付図により応力を求める。

鉄骨架構のフレームモデルに対しては、計算機コード「Engineer's Studio」を使用し、断面力及び反力を求め、表3-7及び表3-8に示す式に基づき架構部材及びアンカーボルトの応力を算出する。なお、評価に用いる計算機コードの検証及び妥当性確認等の概要については、「V-5-39 計算機プログラム(解析コード)の概要 Engineer's Studio」に示す。

表3-7 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_b		MPa	$\frac{M_y}{Z_y}$, $\frac{M_z}{Z_z}$
せん断応力 τ		MPa	$\frac{Q_y}{A_{sy}}$, $\frac{Q_z}{A_{sz}}$
組合せ 応力	圧縮+曲げ	—	$\max\left(\frac{\sigma_c + \sigma_{bx} + \sigma_{by}}{1.5f_c + 1.5f_b}$, $\frac{\sigma_{bx} + \sigma_{by} - \sigma_c}{1.5f_t}\right)$
	引張+曲げ	—	$\max\left(\frac{\sigma_t + \sigma_{bz} + \sigma_{by}}{1.5f_t}$, $\frac{\sigma_{bz} + \sigma_{by} - \sigma_t}{1.5f_b}\right)$
	曲げ+せん断	—	$\max\left(\frac{\sqrt{(\sigma_c + \sigma_{bz} + \sigma_{by})^2 + 3\tau_z^2}}{1.5f_t}$, $\frac{\sqrt{(\sigma_c + \sigma_{bz} + \sigma_{by})^2 + 3\tau_y^2}}{1.5f_t}\right)$

軸力が引張の場合は、 σ_c を σ_t とする。

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3-8 ボルトの応力計算式

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

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)

(3) 鋼製防護壁

飛来物による衝撃荷重 W_M については、鋼製防護壁が設計飛来物に対し十分大きな質量

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

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

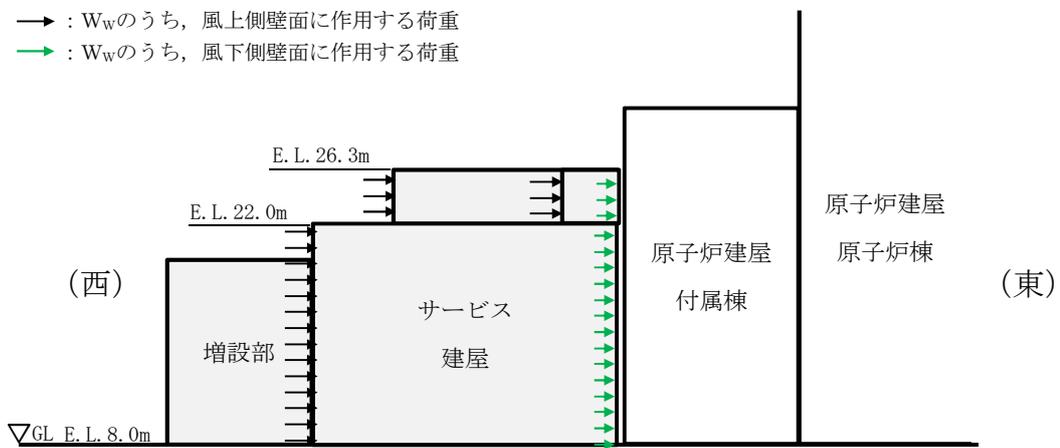
4. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を、以下に示す。

4.1 サービス建屋

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

また，サービス建屋の復元力特性諸元を表4-2に示す。



(a) 東西方向

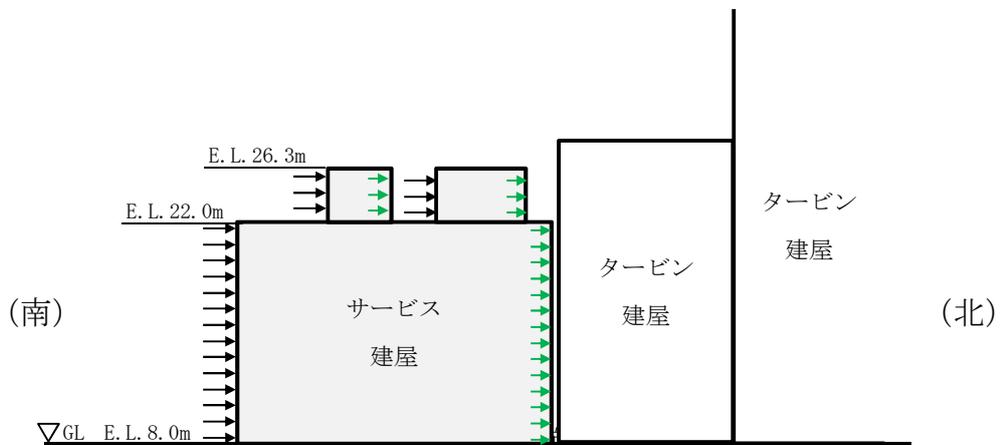


図4-1 サービス建屋への風圧力による荷重 W_w の作用方向模式図

表4-1 サービス建屋の風圧力による荷重 W_w の算出条件

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

※1：風下側の係数は，風上側と同じ向きを正とする。

※2：E. L. 22.0以上の部分を含む。

表 4-2 (1/2) サービス建屋の復元力特性諸元 (EW 方向)

E. L. m	要素 番号	Q_1 (kN)	Q_2 (kN)	Q_3 (kN)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	δ_3 (mm)
22.0 ~ 18.0	1	1450	21600	23000	0.170	9.80	40.0
18.0 ~ 14.0	2	2940	30500	33700	0.321	12.2	40.0
14.0 ~ 11.2	3	3090	45000	47600	0.0859	6.50	28.0
11.2 ~ 8.2	4	2660	51400	54300	0.0734	7.50	30.0

表 4-2 (2/2) サービス建屋の復元力特性諸元 (NS 方向)

E. L. m	要素 番号	Q_1 (kN)	Q_2 (kN)	Q_3 (kN)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	δ_3 (mm)
22.0 ~ 18.0	1	2870	17800	18700	0.388	10.4	40.0
18.0 ~ 14.0	2	3370	28000	29400	0.294	9.10	40.0
14.0 ~ 11.2	3	7520	37400	39300	0.240	6.40	28.0
11.2 ~ 8.2	4	12400	37100	38700	0.490	9.40	30.0

原子炉建屋及びタービン建屋の風圧力による荷重 W_w の算出条件及び復元力特性諸元については，V-3-別添1-1-1「竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書」の「3.5.3 変形評価」に示す。

4.2 海水ポンプエリア防護壁

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

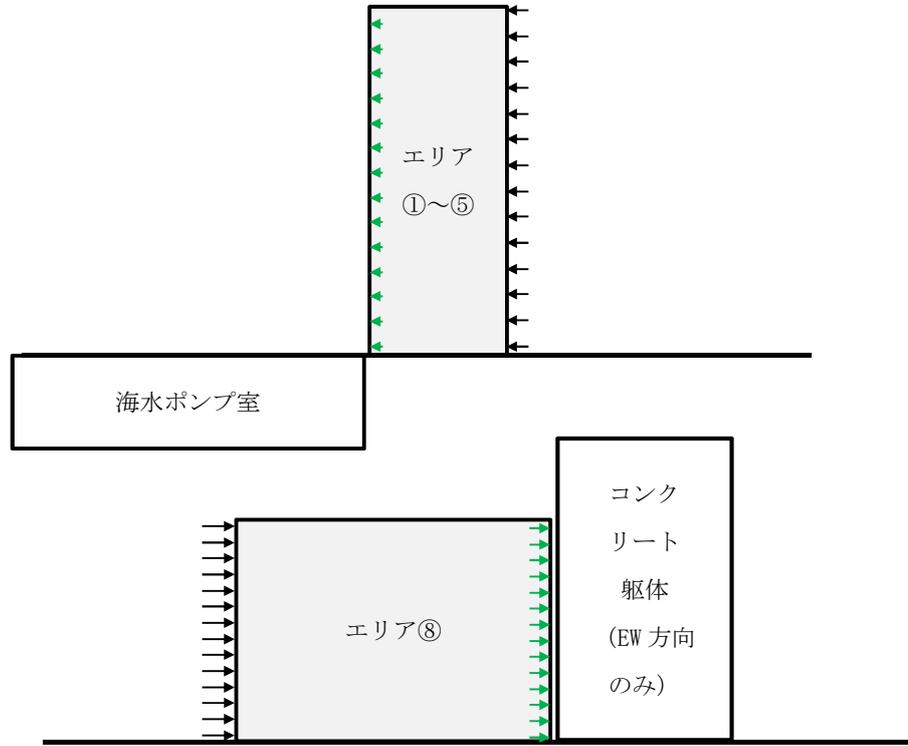


図4-2 風圧力による荷重 W_w の作用方法（海水ポンプエリア防護壁）

表4-3 海水ポンプエリア防護壁の風圧力による荷重 W_w の算出条件

エリア	位置	風力係数C	受圧面積A (m^2)	受圧面積A (m^2)
			EW方向 (W⇒E)	NS方向 (S⇒N)
①～⑤	風上	0.6	部位ごとに算定	
	風下	0.4		
⑧	風上	0.6	122.2	28.2
	風下	0.4		

鉄筋コンクリートの仕様及び許容応力を表4-4に示す。

表 4-4 鉄筋コンクリートの仕様及び許容応力

評価項目		短期許容応力度 (N/mm ²)
コンクリート	許容曲げ圧縮応力度 σ_{ca}	
	許容せん断応力度 τ_{a1}	
鉄筋	許容曲げ引張応力度 σ_{sa2} (軸方向鉄筋)	
	許容曲げ引張応力度 σ_{sa2} (せん断補強筋)	

*1: コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] ((社) 土木学会, 2002 年制定)

*2: 斜め引張鉄筋を考慮する場合は, 「コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] ((社) 土木学会 2002 年制定)」に準拠し, 次式により求められる許容せん断力 (V_a) を許容限界とする。

$$V_a = V_{ca} + V_{sa}$$

ここで,

V_{ca} : コンクリートの許容せん断力

$$V_{ca} = 1/2 \cdot \tau_{a1} \cdot b_w \cdot j \cdot d$$

V_{sa} : 斜め引張鉄筋の許容せん断力

$$V_{sa} = A_w \cdot \sigma_{sa2} \cdot j \cdot d / s$$

τ_{a1} : 斜め引張鉄筋を考慮しない場合の許容せん断応力度

b_w : 有効幅

j : 1/1.15

d : 有効高さ

A_w : 斜め引張鉄筋断面積

σ_{sa2} : 鉄筋の許容引張応力度

s : 斜め引張鉄筋間隔

鉄骨架構の部材の仕様を表4-5に, 許容応力を表4-6に示す。

表4-5 鉄骨架構の部材の仕様 (エリア⑧)

仕様	材質	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比
H-250×250×9×14	SM400	205000	0.3
H-294×200x×8×12	SM400		
L-100×100×10	SS400		
L-150×150×12	SS400		

表 4-6 鋼構造部の使用材料の許容応力

評価部材	材料 (寸法:mm)	温度条件 (°C)		S _y (MPa)	S _u (MPa)	許容応力			
						1.5 f _t	1.5 f _s	1.5 f _c	1.5 f _b
架構	SS400 (t ≤ 16)	周囲 環境 温度	40	245	400	245	141	(※1)	(※2)
	SM400 (t ≤ 16)			245	400	245	141		
アンカー ボルト	S45C			345	570	258	199		

※1：f_cはJSME S NC1-2005/2007 SSB-3121.1(3)の規定に基づき算出する。

※2：f_bはJSME S NC1-2005/2007 SSB-3121.1(4)の規定に基づき算出する。

S_y：材料の使用温度における設計降伏点

4.3 鋼製防護壁

鋼製防護壁の西側に海水ポンプ室が隣接して設置されているため，風圧力による荷重W_wが東から西へ作用する場合の検討を実施する。鋼製防護壁に作用する風圧力による荷重W_wの作用方法を図4-3に，鋼製防護壁の風圧力による荷重W_wの算出条件を表4-7に示す。

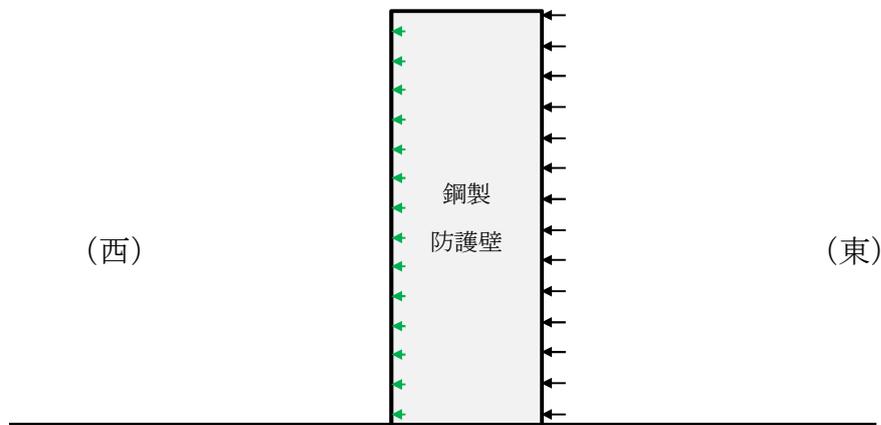


図4-3 風圧力による荷重W_wの作用方法 (鋼製防護壁)

表4-7 鋼製防護壁の風圧力による荷重W_wの算出条件

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

5. 強度評価結果

5.1 サービス建屋

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

表5-1 サービス建屋と原子炉建屋の相対変位の評価結果

(単位：mm)

複合荷重	EL. (m)	設計荷重による最大変位		最大相対変位※	許容限界
		サービス建屋	原子炉建屋		
W _{T1}	22.0	2.3	0.3	2.6	50
W _{T2}	22.0	3.8	0.3	4.1	50

※：保守的に、各建屋の最大変位をお互いが接近する方向に加算したものとする。

表5-2 サービス建屋とタービン建屋の相対変位の評価結果

(単位：mm)

複合荷重	EL. (m)	設計荷重による最大変位		最大相対変位※	許容限界
		サービス建屋	タービン建屋		
W _{T1}	22.0	0.6	0.4	1.0	50
W _{T2}	22.0	0.8	0.5	1.3	50

※：保守的に、各建屋の最大変位をお互いが接近する方向に加算したものとする。

5.2 海水ポンプエリア防護壁

海水ポンプエリア防護壁に作用する竜巻荷重により発生する応力の評価結果を表5-3に示す。発生する応力は許容限界以下であることを確認した。

表5-3 海水ポンプエリア防護壁の発生応力評価結果

評価部位		発生応力 (N/mm ²)	許容限界 (N/mm ²)	備考	
東側クレーン走行路 嵩上げ壁	コンクリート	0.3	12.0		
	鉄筋	2	264		
	せん断	0.02	0.64		
西側クレーン走行路 嵩上げ壁	コンクリート	0.1	13.5		
	鉄筋	6	294		
	せん断	0.01	0.68		
エリア⑤北側壁	コンクリート	0.6	13.5		
	鉄筋	28	294		
	せん断	0.04	0.68		
エリア①北側壁	コンクリート	2.1	13.5		
	鉄筋	85	294		
	せん断	0.08	0.68		
エリア④南側壁	コンクリート	2.1	13.5		
	鉄筋	85	294		
	せん断	0.08	0.68		
エリア②南側壁, エリア③北側壁	コンクリート	3.5	13.5		
	鉄筋	99	294		
	せん断	0.12	0.68		
エリア ⑧	架構	引張+曲げ	0.41	1	単位なし
		曲げ+せん断	0.26	1	単位なし
		圧縮	0.04	1	単位なし
	アンカー ボルト	引張	84	258	
		せん断	66	199	
		組合せ	84	255	

5.3 鋼製防護壁

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

表5-3 鋼製防護壁に対する竜巻荷重と津波荷重
(単位：kN/m²)

竜巻荷重	津波荷重 (許容限界)
6.1	68.2

V-3-別添 1-1-10-2 消音器の強度計算書

目次

1. 概要.....	1
2. 基本方針.....	1
2.1 位置.....	1
2.2 構造概要.....	2
2.3 評価方針.....	3
2.4 適用規格.....	4
3. 強度評価方法.....	5
3.1 記号の定義.....	5
3.2 評価対象部位.....	7
3.3 荷重及び荷重の組合せ.....	8
3.4 許容限界.....	9
3.5 評価方法.....	10
4. 評価条件.....	14
5. 強度評価結果.....	17

1. 概要

本資料は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、非常用ディーゼル発電機排気消音器及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器（以下「ディーゼル発電機排気消音器」という。）が竜巻時及び竜巻通過後においても、消音器の機能維持を考慮して、主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、ディーゼル発電機排気消音器の「2.1 位置」，「2.2 構造概要」，「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

2.1 位置

ディーゼル発電機排気消音器は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示すとおり、図2-1に示す位置に設置する。

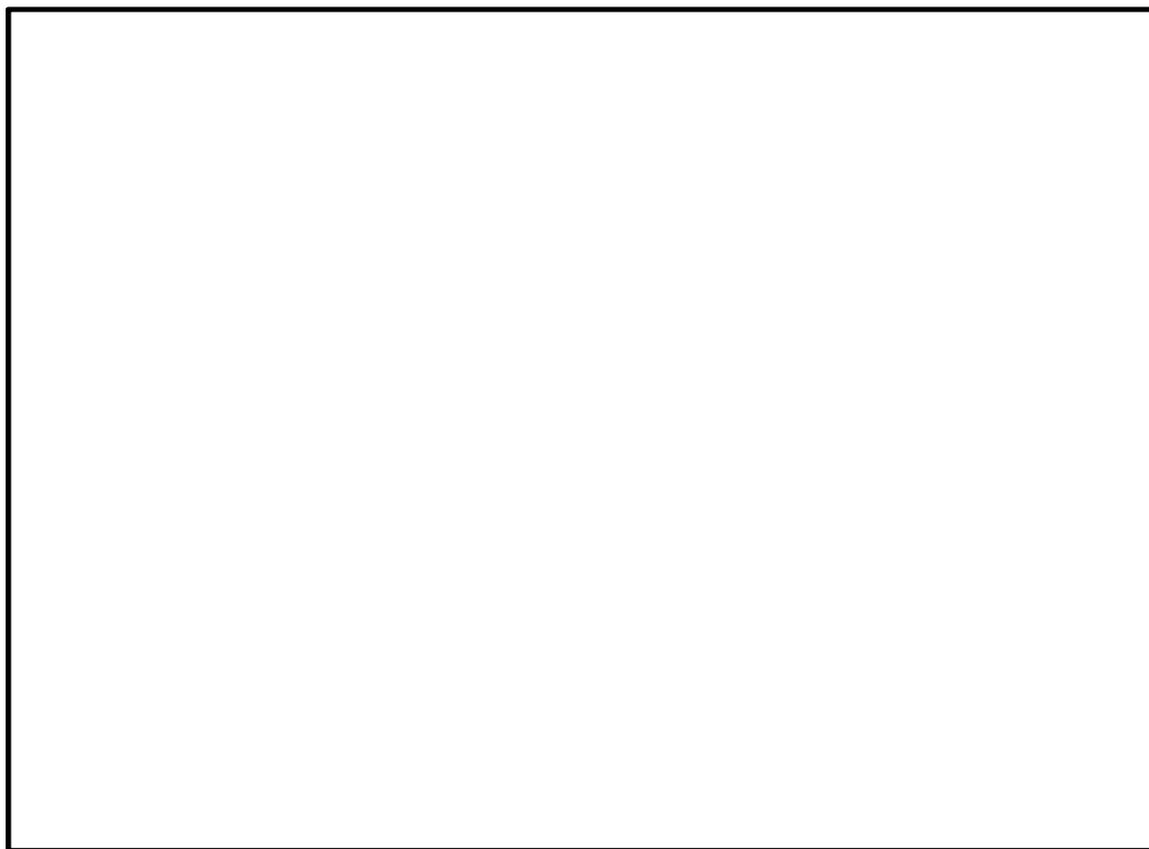


図 2-1 ディーゼル発電機排気消音器の位置図

2.2 構造概要

ディーゼル発電機排気消音器について、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、ディーゼル発電機排気消音器の構造を示す。

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

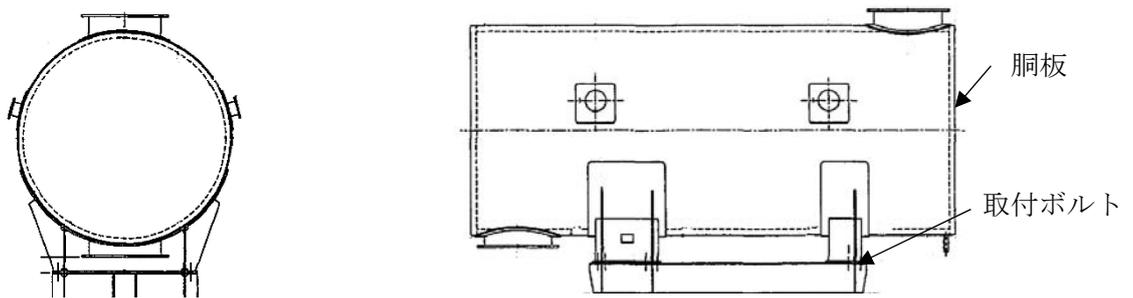


図2-2 ディーゼル発電機排気消音器概要図（非常用ディーゼル発電機2C）

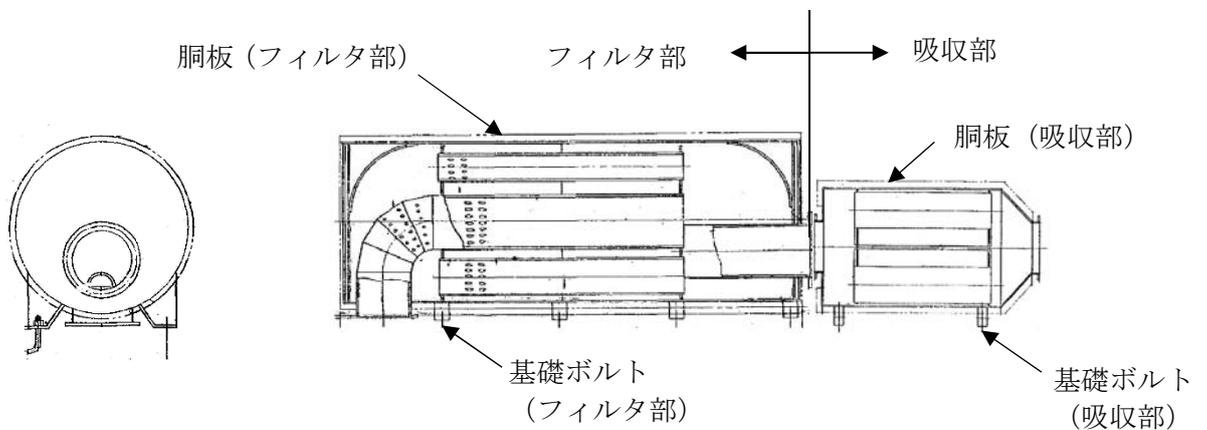


図2-3 ディーゼル発電機排気消音器概要図（非常用ディーゼル発電機2D）

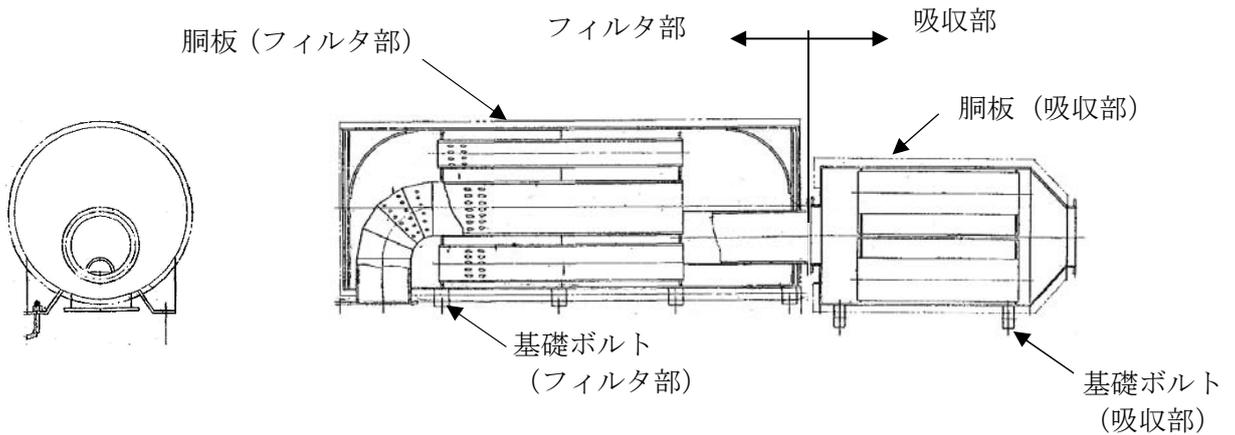


図2-4 ディーゼル発電機排気消音器概要図（高圧炉心スプレー系ディーゼル発電機）

2.3 評価方針

ディーゼル発電機排気消音器の強度評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している、荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、ディーゼル発電機排気消音器の評価対象部位に作用する応力等が許容限界に収まることを「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

ディーゼル発電機排気消音器の強度評価においては、その構造を踏まえ、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を選定する。

ディーゼル発電機排気消音器の構造強度評価フローを図2-5に示す。構造強度評価においては、ディーゼル発電機排気消音器に対して、設計竜巻による荷重に自重を加えた応力が許容応力以下であることを確認する。各部材の構造強度評価には、設計竜巻による荷重は水平方向より作用する外荷重という観点で地震荷重と同様なものであると考え、「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG 4601・補-1984」（（社）日本電気協会）、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987」（（社）日本電気協会）及び「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1991 追補版」（（社）日本電気協会）（以下「JEAG 4601」という。）における1質点系モデルによる評価方法を準用し、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価式を用いる。

ディーゼル発電機排気消音器の許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、JEAG 4601の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

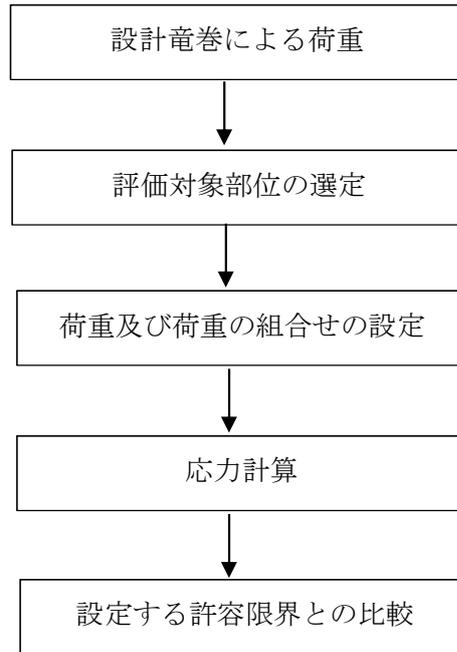


図2-5 ディーゼル発電機排気消音器の構造強度評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・「建築物荷重指針・同解説」（（社）日本建築学会，2004改定）
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984」（社）日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987」（社）日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991追補版」（社）日本電気協会
- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 J S M E S N C 1 -2005/2007」（社）日本機械学会（以下「J S M E」という。）

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

ディーゼル発電機排気消音器の構造強度評価に用いる記号を表3-1に示す。

表3-1 構造強度評価に用いる記号 (1/2)

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

表3-1 構造強度評価に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
n_{fA}	—	軸方向応力評価における引張力を受ける基礎ボルトの本数
n_{fH}	—	軸直角方向応力評価における引張力を受ける基礎ボルトの本数
Q_b	N	基礎ボルトに対するせん断力
q	N/m ²	設計用速度圧
S_u	MPa	J S M E 付録材料図表Part5の表にて規定される設計引張強さ
S_y	MPa	J S M E 付録材料図表Part5の表にて規定される設計降伏点
V_D	m/s	設計竜巻の最大風速
W	mm	排気消音器の幅
W_M	N	設計竜巻による飛来物の衝撃荷重
W_P	N	設計竜巻による気圧差による荷重
W_T	N	設計竜巻による複合荷重
W_{T1}	N	設計竜巻による複合荷重 ($W_{T1} = W_P$)
W_{T2}	N	設計竜巻による複合荷重 ($W_{T2} = W_W + 0.5 \cdot W_P + W_M$)
W_{TA}	N	軸方向応力評価における設計竜巻による複合荷重 (W_{T2})
W_{TH}	N	軸直角方向応力評価における設計竜巻による複合荷重 (W_{T2})
W_W	N	設計竜巻の風圧力による荷重
ρ	kg/m ³	空気密度
ΔP	N/m ²	設計竜巻の気圧低下量
π	—	円周率
σ_{bA}	MPa	軸方向応力評価における基礎ボルトに生じる引張応力
σ_{bH}	MPa	軸直角方向応力評価における基礎ボルトに生じる引張応力
τ	MPa	基礎ボルトに生じるせん断応力

3.2 評価対象部位

ディーゼル発電機排気消音器の評価対象部位は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

設計竜巻による荷重は、ディーゼル発電機排気消音器本体に作用し、支持脚を介して取付ボルト又は基礎ボルトに作用する。

排気消音器の転倒による閉塞により、ディーゼル発電機の排気機能に影響を与える波及的影響を考慮し、転倒を防止するための主要な支持部材のうち、荷重作用点から離れていることから転倒モーメントが大きく作用し、更に支持断面積が小さいことから発生する応力が厳しくなる取付ボルト及び基礎ボルトを評価対象部位として設定する。

なお、ディーゼル発電機排気消音器（非常用ディーゼル発電機 2 D）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、設計竜巻による発生荷重はおおむね弾性範囲内となるよう設計するため大きな変位は発生せず、フィルタ部又は吸収部に発生した応力が他方に伝達する影響は小さいため、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取付ボルト又は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。

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

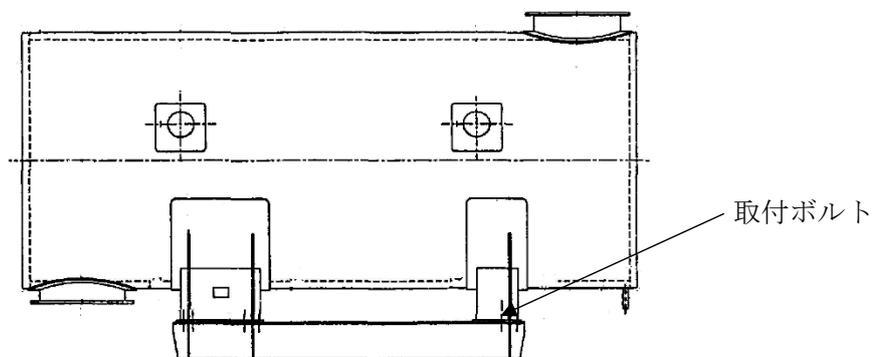


図3-1 ディーゼル発電機排気消音器（非常用ディーゼル発電機 2 C）の評価対象部位

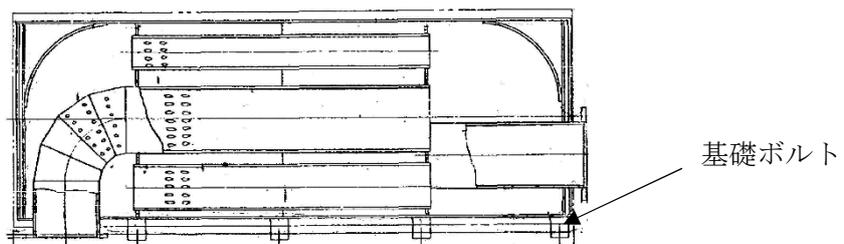


図3-2 ディーゼル発電機排気消音器（非常用ディーゼル発電機 2 D, 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機）の評価対象部位（フィルタ部）

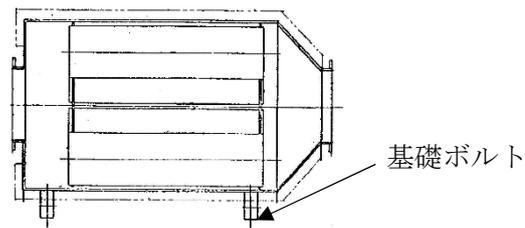


図3-3 ディーゼル発電機排気消音器（非常用ディーゼル発電機 2 D，
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機）の評価対象部位（吸収部）

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

(1) 荷重の設定

構造強度評価に用いる荷重を以下に示す。

a. 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、持続的に生じる荷重である自重を考慮する。

b. 設計竜巻による荷重

屋外の施設であるため風圧力による荷重を考慮する。開放された施設であるため、ディーゼル発電機排気消音器に気圧差は発生しないことから気圧差による荷重は考慮しない。また、ディーゼル発電機排気消音器が仮に飛来物による衝撃荷重によって貫通しても、その貫通箇所又は本来の排気箇所から排気され、且つ速やかに補修する方針とするため、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重に衝撃荷重を考慮しない。

(a) 風圧力による荷重(W_w)

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

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

(2) 荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重の組合せは、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」にて設定している荷重の組合せを踏まえ、ディーゼル発電機排気消音器の評価対象部位ごとに設定する。

ディーゼル発電機排気消音器の取付ボルト及び基礎ボルトには、自重及び風圧力による荷重が作用する。

構造強度評価の荷重の組合せを表 3-2 に示す。

表 3-2 荷重の組合せ

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

3.4 許容限界

ディーゼル発電機排気消音器の取付ボルト又は基礎ボルトの許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界に従って、「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、J E A G 4 6 0 1 に基づく許容応力状態Ⅲ_AS の許容応力の許容荷重を用いる。

許容限界は J E A G 4 6 0 1 を準用し、その他支持構造物の許容限界を適用し、許容応力状態Ⅲ_AS から算出した許容応力を許容限界とする。J E A G 4 6 0 1 に従い、J S M E 付録材料図表Part5, 6の表にて許容応力を計算する際は、評価対象部位の最高使用温度又は周囲環境温度に応じた値をとるものとするが、温度が J S M E 付録材料図表記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算する。ただし、J S M E 付録材料図表Part5, 6で比例法を用いる場合の端数処理は、小数点第1位以下を切り捨てた値を用いるものとする。

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

表3-3 許容限界

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

3.5 評価方法

ディーゼル発電機排気消音器の構造強度評価は、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」にて設定している評価式を用いる。

(1) 計算モデル

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

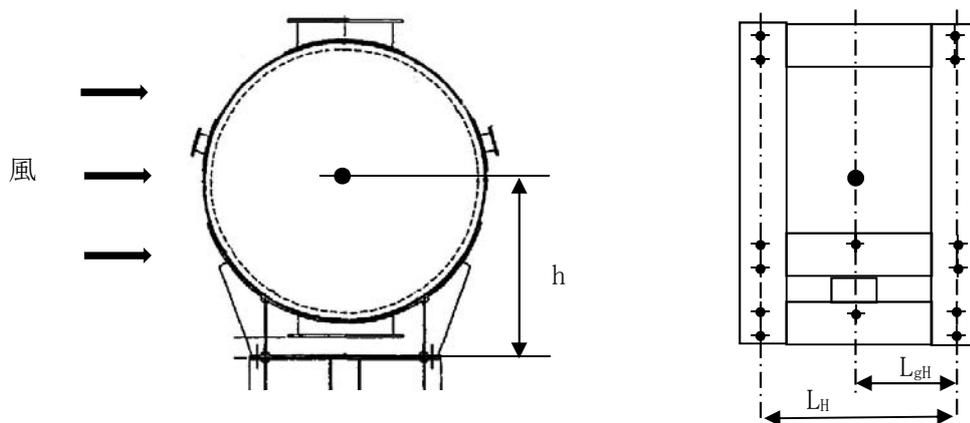


図 3-4 非常用ディーゼル発電機 2 C 排気消音器の評価モデル図（軸直角方向）

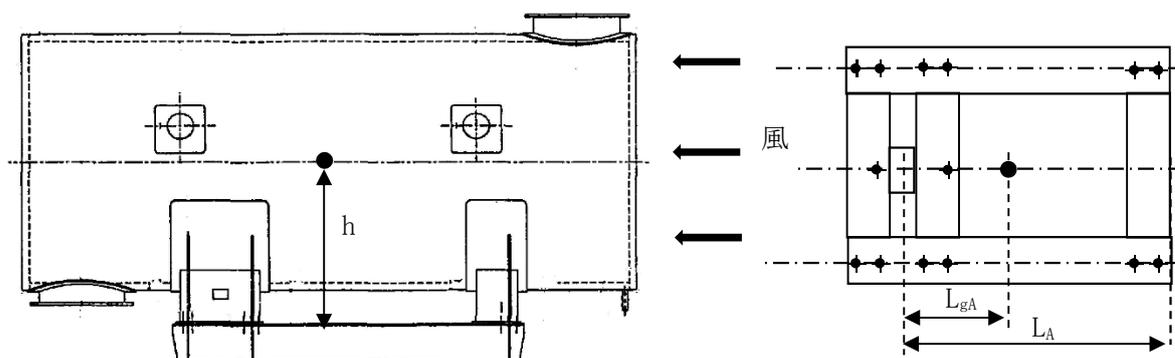


図 3-5 非常用ディーゼル発電機 2 C 排気消音器の評価モデル図（軸方向）

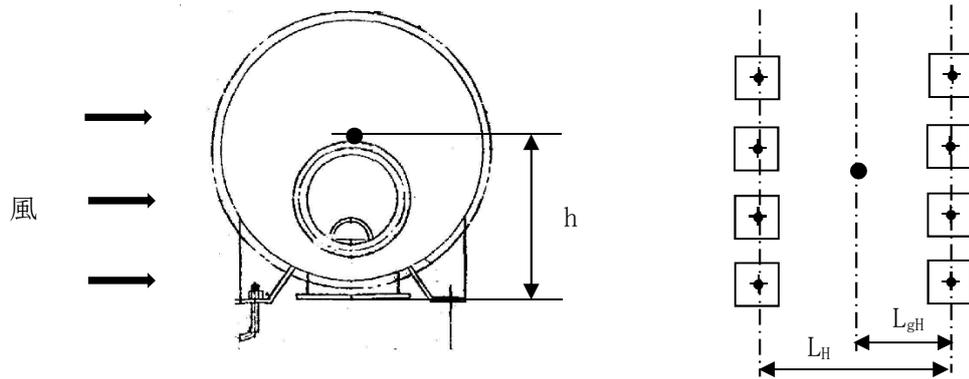


図 3-6 非常用ディーゼル発電機 2D排気消音器，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器の評価モデル図（フィルタ部軸直角方向）

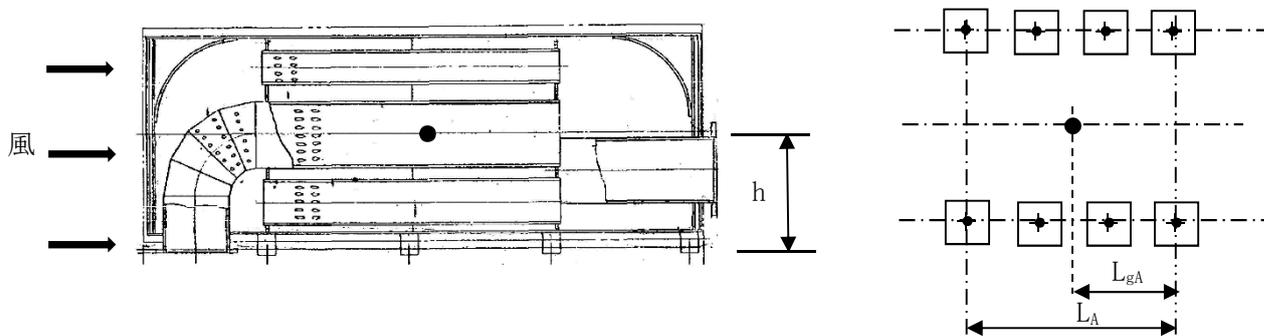


図 3-7 非常用ディーゼル発電機 2D排気消音器，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器の評価モデル図（フィルタ部軸方向）

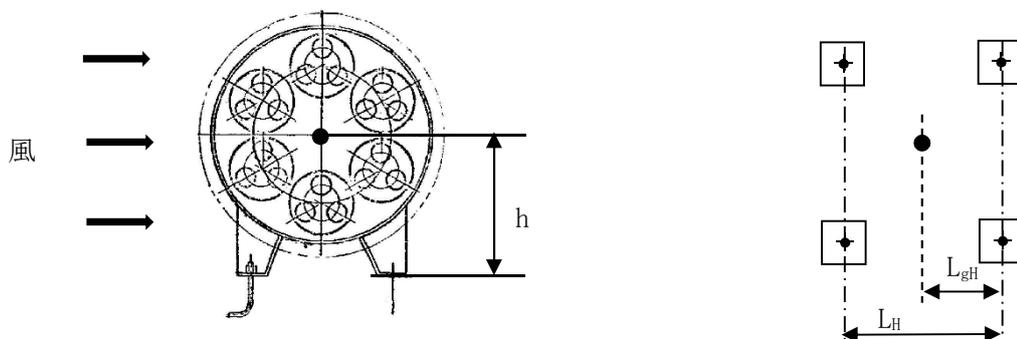


図 3-8 非常用ディーゼル発電機 2D排気消音器，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器モデル図（吸収部軸直角方向）

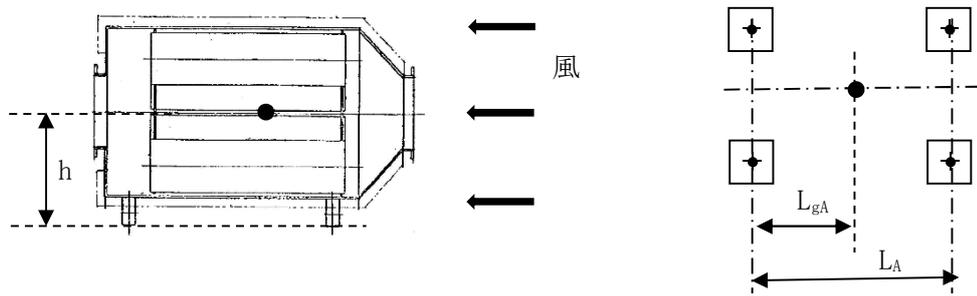


図 3-9 非常用ディーゼル発電機 2D 排気消音器，高圧炉心スプレー系ディーゼル発電機排気消音器の評価モデル図（吸収部軸方向）

(2) 計算方法

a. 引張応力

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

(a) 軸直角方向

イ. 引張力

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

ロ. 引張応力

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

ここで，取付ボルト又は基礎ボルトの軸断面積 A_b は

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

(b) 軸方向

イ. 引張力

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

ロ. 引張応力

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

ここで、取付ボルト又は基礎ボルトの軸断面積 A_b は

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

b. せん断応力

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

(a) せん断力

$$Q_b = W_T$$

(b) せん断応力

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

4. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-1～表 4-8 に示す。

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

評価対象部位	材料	温度条件 (°C)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	F (MPa)	$1.5 f_t$ (MPa)	$1.5 f_s$ (MPa)
取付ボルト	SNB7	50	715	838	586	439	338

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

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

表 4-3 評価条件

q (N/m ²)	G (-)
6.1×10^3	1.0

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

5. 強度評価結果

構造強度評価結果を表 5-1, 表 5-2 に示す。

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

表 5-1 評価結果 (軸直角方向)

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

表 5-2 評価結果（軸方向）

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

V-3-別添 1-1-10-3 排気管，放出管及びベント管の強度計算書

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.....	4
2.4 適用規格.....	5
3. 強度評価方法.....	6
3.1 記号の定義.....	6
3.2 評価対象部位.....	7
3.3 荷重及び荷重の組合せ.....	8
3.4 許容限界.....	9
3.5 評価方法.....	10
4. 評価条件.....	13
5. 強度評価結果.....	15

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、屋外に設置している非常用ディーゼル発電機及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機の付属排気配管（以下「ディーゼル発電機付属排気配管」という。）並びにベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側），非常用ディーゼル発電機及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機の海水配管（放出側）（以下「ディーゼル発電機海水配管（放出側）」という。）並びにサポート部が竜巻時及び竜巻通過後においても，各配管の機能維持を考慮して，主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側）並びにディーゼル発電機海水配管（放出側）について，V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ，ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側）並びにディーゼル発電機海水配管（放出側）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

屋外に設置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，残留熱除去系海水配管（放出側）並びにディーゼル発電機海水配管（放出側）は，V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示すとおり，図2-1に示す位置に設置する。

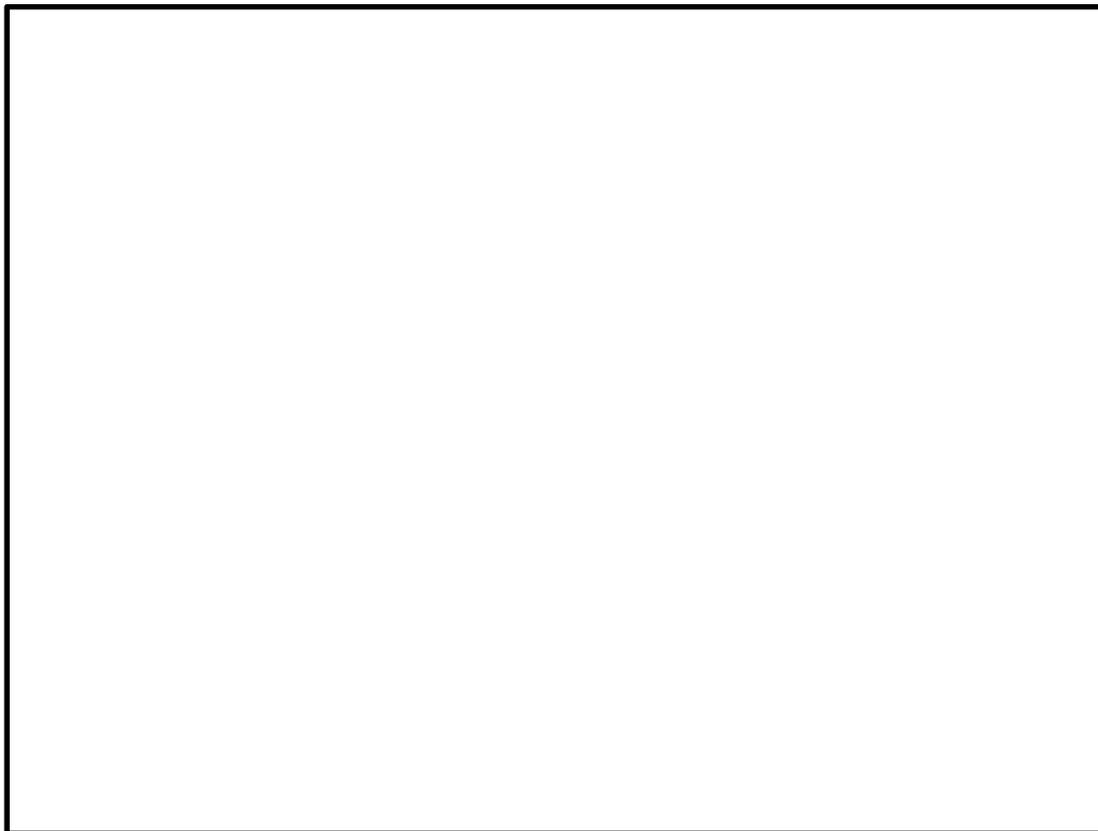


図 2-1 ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側）並びにディーゼル発電機海水配管（放出側）の位置図

2.2 構造概要

ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側）並びにディーゼル発電機海水配管（放出側）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，各配管の構造を示す。

ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側）並びにディーゼル発電機海水配管（放出側）は鋼管で構成される。ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管は建屋壁，床等から支持された配管である。

残留熱除去系海水配管（放出側）及びディーゼル発電機海水配管（放出側）は，建屋壁，基礎コンクリートにサポートで固定された配管である。ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側）並びにディーゼル発電機海水配管（放出側）の概要図を図2-2～図2-4に示す。

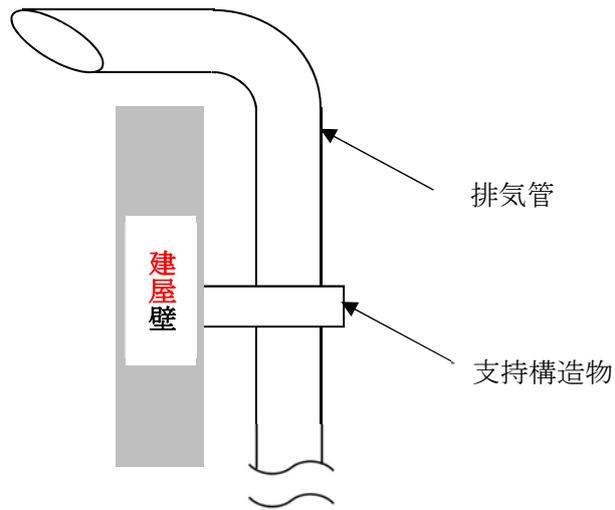


図2-2 ディーゼル発電機付属排気配管の概要図

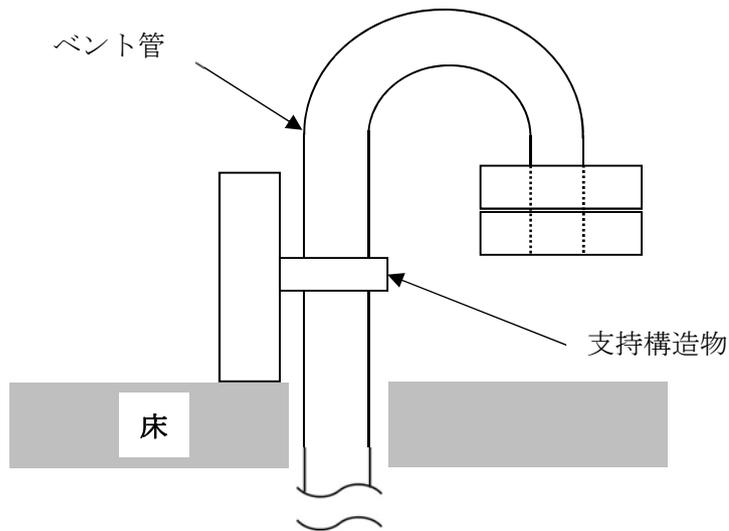


図2-3 ディーゼル発電機付属ベント配管の概要図

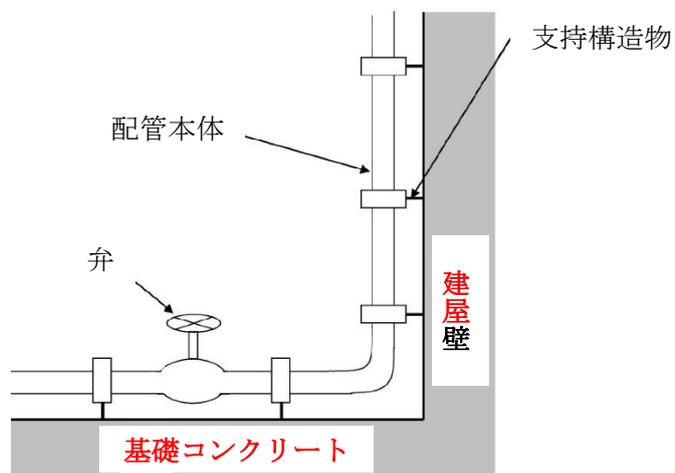


図2-4 残留熱除去系海水配管（放出側）及びディーゼル発電機海水配管（放出側）の概要図

2.3 評価方針

ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側）並びにディーゼル発電機海水配管（放出側）の強度評価は，V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している，荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ，ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側）並びにディーゼル発電機海水配管（放出側）の評価対象部位に作用する応力等が許容限界に収まることを「3. 強度評価方法」に示す方法により，「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し，「5. 強度評価結果」にて確認する。

ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側）並びにディーゼル発電機海水配管（放出側）の構造強度評価フローを図2-5に示す。ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側）並びにディーゼル発電機海水配管（放出側）の構造強度評価においては，その構造を踏まえ，設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し，評価対象部位を選定する。

構造強度評価において，ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側）並びにディーゼル発電機海水配管（放出側）に対しては，設計竜巻による荷重に内圧及び自重を加えた応力が許容応力以下であることを確認する。構造強度評価では，V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価式を用いる。ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側）並びにディーゼル発電機海水配管（放出側）の許容限界は，V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である，「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG 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 JEAG 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 JEAG 4 6 0 1-1991 追補版」（（社）日本電気協会）（以下「JEAG 4 6 0 1」という。）の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

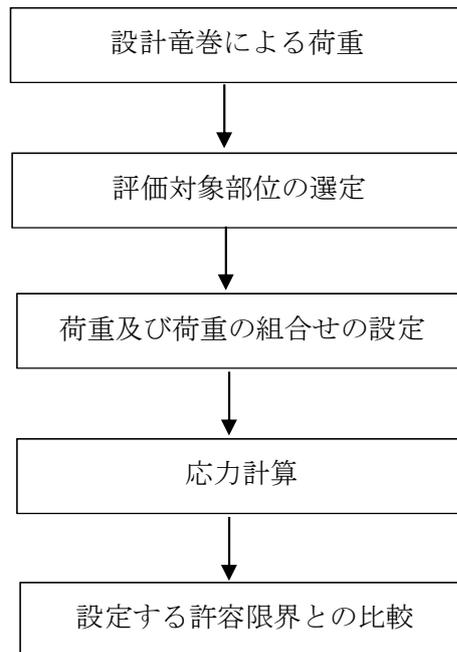


図2-5 ディーゼル発電機附属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側）並びにディーゼル発電機海水配管（放出側）の構造強度評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・「建築物荷重指針・同解説」（（社）日本建築学会，2004改定）
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG 4601・補-1984」（社）日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987」（社）日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1991 追補版」（社）日本電気協会
- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1-2005/2007」（社）日本機械学会（以下「JSME」という。）

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側）並びにディーゼル発電機海水配管（放出側）の構造強度評価に用いる記号を表3-1に示す。

表3-1 構造強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A	m ² /m	単位長さ当たりの施設の受圧面積（風向に垂直な面に投影した面積）
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
D	mm	管外径
G	—	ガスト影響係数
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
q	N/m ²	設計用速度圧
S _y	MPa	J SME 付録材料図表Part5の表にて規定される設計降伏点
t	mm	板厚
V _D	m/s	設計竜巻の最大風速
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
ΔP	N/m ²	気圧差
ρ	kg/m ³	空気密度
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

3.2 評価対象部位

ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側）並びにディーゼル発電機海水配管（放出側）の評価対象部位は，V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って，「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき，設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

設計竜巻による荷重は，配管本体及びサポート（配管支持構造物）に作用する。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（配管支持構造物）の設計は耐震設計に包絡される。

このことから，配管本体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，残留熱除去系海水配管（放出側）並びにディーゼル発電機海水配管（放出側）の構造強度評価における評価対象部位を図3-1～図3-3に示す。

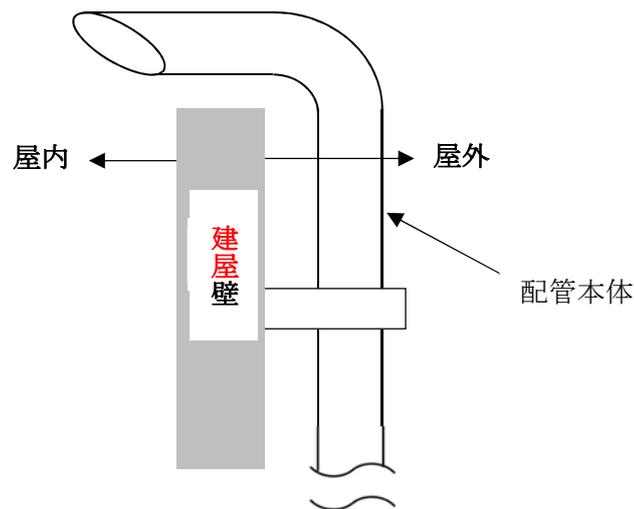


図3-1 ディーゼル発電機付属排気配管の評価対象部位

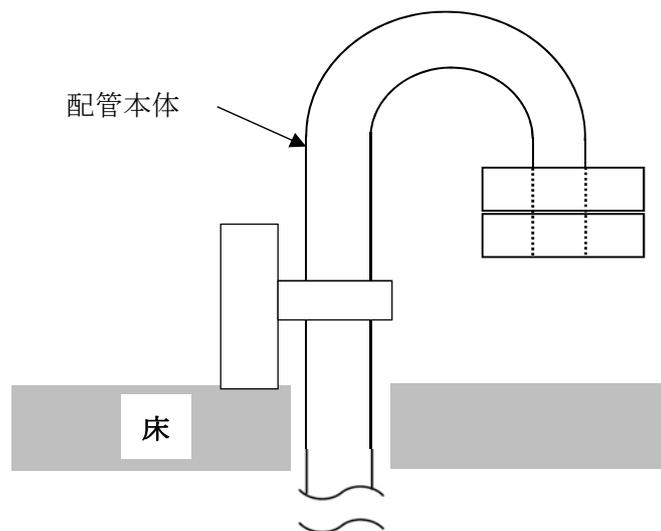


図3-2 ディーゼル発電機付属ベント管の評価対象部位

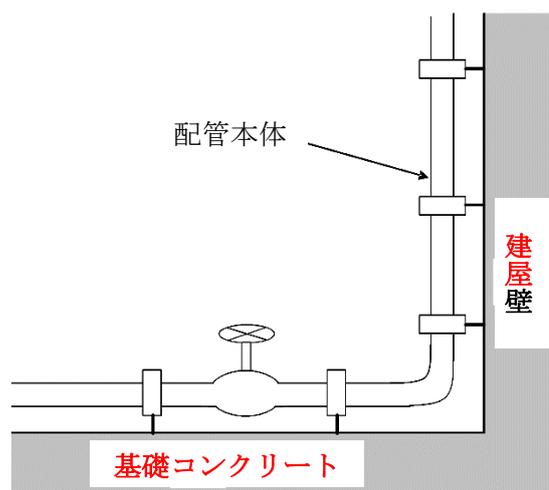


図3-3 残留熱除去系海水配管（放出側）及びディーゼル発電機海水配管（放出側）の評価対象部位

3.3 荷重及び荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、V-3-別添 1-1 「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

(1) 荷重の設定

構造強度評価に用いる荷重を以下に示す。

a. 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、持続的に生じる荷重である自重を考慮する。

b. 設計竜巻による荷重

風圧力による荷重，気圧差による荷重を考慮する。なお，ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側）並びにディーゼル発電機海水配管（放出側）が仮に飛来物による衝撃荷重によって貫通しても，その貫通箇所又は本来の排気又は排水箇所から排気又は排水され，且つ速やかに補修する方針とするため，設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重に衝撃荷重を考慮しない。

(a) 風圧力による荷重(W_w)

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

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

(b) 気圧差による荷重(W_p)

気圧差による荷重 W_p は，V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価方法に従って，気圧差を見かけ上の配管の内圧の増加として考慮する。具体的な計算方法は，「3.5(2) 計算方法」に示す。

c. 運転時の状態で作用する荷重

運転時の状態で作用する荷重としては，配管に作用する内圧を考慮する。

(2) 荷重の組合せ

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

配管本体には，自重，風圧力による荷重，気圧差による荷重及び内圧が作用する。

構造強度評価の荷重の組合せを表 3-2 に示す。

表 3-2 荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
波及的影響を及ぼす可能性がある施設	<ul style="list-style-type: none"> ・ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管 ・残留熱除去系海水配管（放出側） ・ディーゼル発電機海水配管（放出側） 	配管本体	<ul style="list-style-type: none"> ①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重 ③自重 ④内圧

3.4 許容限界

ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側）並びにディーゼル発電機海水配管（放出側）の許容限界は，V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界に従って，「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位ごとに，機能損傷モードを考慮し，J E A G 4 6 0 1に基づく許容応力状態Ⅲ_ASの許容応力の許容荷重を用いる。

ディーゼル発電機付属排気ベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側）及びディーゼル発

電機海水配管（放出側）の許容限界は、J E A G 4 6 0 1 を準用し、「クラス2,3配管」の許容限界を適用し、許容応力状態Ⅲ_ASから算出した許容応力を許容限界とする。J E A G 4 6 0 1 に従い、J S M E 付録材料図表Part5,6の表にて許容応力を計算する際は、評価対象部位の最高使用温度又は周囲環境温度に応じた値をとるものとするが、温度がJ S M E 付録材料図表記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算する。また、ディーゼル発電機付属排気配管の許容限界は、J S M E 付録材料図表Part5の表記載の値以上であることから、外挿値を用いて計算する。ただし、J S M E 付録材料図表Part5,6で比例法を用いる場合の端数処理は、小数点第1位以下を切り捨てた値を用いるものとする。

配管の構造強度評価における許容限界について、表3-3に示す。

表3-3 配管の許容限界

許容応力状態	許容限界
	一次応力（膜+曲げ）
Ⅲ _A S	S_y

3.5 評価方法

ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管、残留熱除去系海水配管（放出側）並びにディーゼル発電機海水配管（放出側）の構造強度評価は、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」にて設定している評価式を用いる。

(1) 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、材料ごとにサポートの支持間隔が最長となる箇所を選定する。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。

なお、ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管は、配管端部が片持ち形状となっていることから、配管端部についても片持ち梁として評価を行う。

両端支持形状の配管モデル図を図 3-4 に、片持ち形状の配管モデル図を図 3-5 に示す。

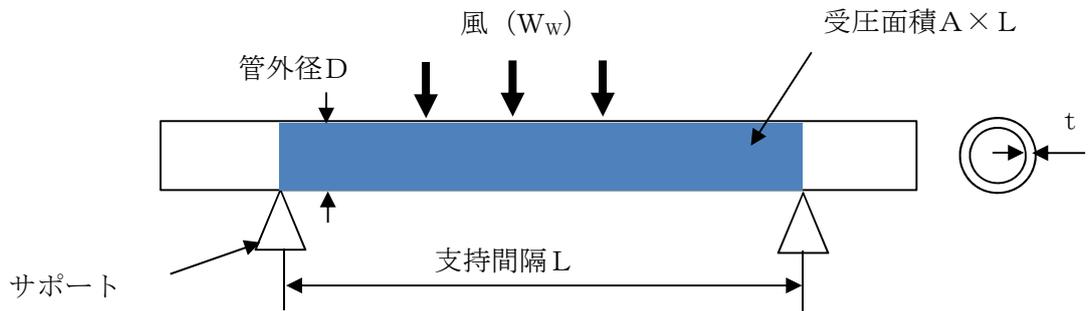


図 3-4 配管モデル図（両端支持形状）

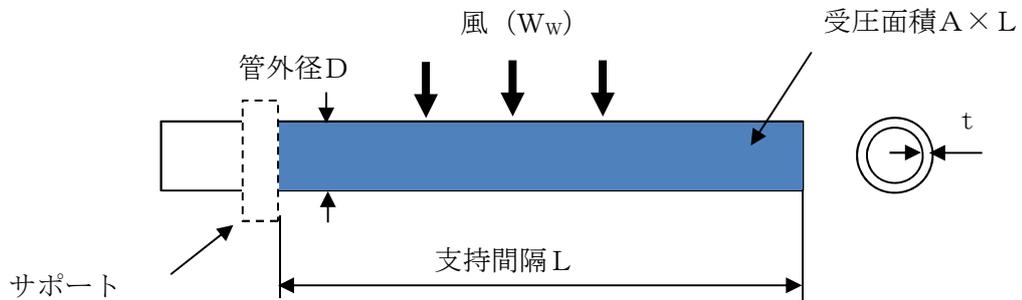


図 3-5 配管モデル図（片持ち形状）

(2) 計算方法

a. 竜巻による応力計算

(a) 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。

(両端支持形状)

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

(片持ち形状)

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

ここで

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

(b) 気圧差により生じる応力

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

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

したがって、(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一次一般膜応力は、以下の式により算定する。

(両端支持形状)

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

(片持ち支持形状)

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

$$W = m \cdot g$$

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

したがって、自重及び風圧力による荷重により生じる曲げ応力と気圧差による荷重及び内圧により生じる一次一般膜応力を足し合わせ、配管に生じる応力として以下の式により σ_1 及び σ_2 を算出する。

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

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

4. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-1～表 4-5 に示す。

表 4-1 許容応力計算に用いる条件

評価対象配管	管外径 (mm)	材料	温度条件 (°C)	S _y (MPa)
非常用ディーゼル発電機付属排気配管	660.4	SM400B	500	116
	863.6	SM400B	500	116
非常用ディーゼル発電機付属ベント配管	42.7	STPT370	55	206
	165.2	STPT370	50	209
	216.3	STPT370	50	209
残留熱除去系海水配管（放出側）	508.0	SB410	66	212
ディーゼル発電機海水配管（放出側）	267.4	STPT410	66	226

表 4-2 評価条件

ガスト係数 G (-)	風力係数 C (-)	設計用速度圧 q (N/m ²)	気圧低下量 ΔP (N/m ²)	重力加速度 g (m/s ²)
1	1.2	6100	8900	9.80665

表 4-3 評価条件（非常用ディーゼル発電機付属排気配管）

管外径 D (mm)	形状	材料	支持間隔 L (m)	板厚 t (mm)	単位長さ当たりの質量 m (kg/m)	単位長さ当たりの受圧面積 A (m ² /m)	内圧 P (kPa)
660.4	両端支持	SM400B	8.500	6.0	115.9	0.8604	5
	片持ち	SM400B	5.570	6.0	115.9	0.8604	5
863.6	両端支持	SM400B	9.362	6.0	151.1	1.064	5
	片持ち	SM400B	7.251	6.0	151.1	1.064	5

表 4-4 評価条件（非常用ディーゼル発電機付属ベント配管）

管外径 D (mm)	形状	材料	支持間隔 L (m)	板厚 t (mm)	単位長さ当 たりの質量 m (kg/m)	単位長さ当 たりの受圧面積 A (m ² /m)	内圧 P (kPa)
42.7	両端支持	STPT370	2.440	3.6	3.470	0.04270	197
	片持ち	STPT370	0.950	3.6	7.570	0.04270	197
165.2	両端支持	STPT370	2.800	7.1	27.70	0.1652	5
	片持ち	STPT370	1.378	7.1	49.30	0.1652	5
216.3	両端支持	STPT370	2.900	8.2	42.10	0.2163	5
	片持ち	STPT370	1.578	8.2	71.30	0.2163	5

表 4-5 評価条件（残留熱除去系海水配管（放出側））

管外径 D (mm)	材料	支持間隔 L (m)	板厚 t (mm)	単位長さ当 たりの質量 m (kg/m)	単位長さ当 たりの受圧面積 A (m ² /m)	内圧 P (kPa)
508.0	SB410	13.35	15.1	362.8	0.5080	700

表 4-6 評価条件（ディーゼル発電機海水配管（放出側））

管外径 D (mm)	材料	支持間隔 L (m)	板厚 t (mm)	単位長さ当 たりの質量 m (kg/m)	単位長さ当 たりの受圧面積 A (m ² /m)	内圧 P (MPa)
267.4	STPT410	10.00	9.3	107.8	0.2674	700

5. 強度評価結果

(1) 非常用ディーゼル発電機付属排気配管

構造強度評価結果を表5-1に示す。

非常用ディーゼル発電機付属排気配管に発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-1 評価結果

管外径 D (mm)	形状	材料	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	許容応力 (MPa)
660.4	両端支持	SM400B	6	34	116
	片持ち	SM400B	10	58	116
863.6	両端支持	SM400B	6	30	116
	片持ち	SM400B	12	72	116

(2) 非常用ディーゼル発電機付属ベント配管

構造強度評価結果を表5-2に示す。

非常用ディーゼル発電機付属ベント配管に発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-2 評価結果

管外径 D (mm)	形状	材料	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	許容応力 (MPa)
42.7	両端支持	STPT370	7	66	206
	片持ち	STPT370	10	45	206
165.2	両端支持	STPT370	3	11	209
	片持ち	STPT370	4	13	209
216.3	両端支持	STPT370	2	8	209
	片持ち	STPT370	4	11	209

(3) 残留熱除去系海水配管（放出側）

構造強度評価結果を表5-3に示す。

残留熱除去系海水配管（放出側）に発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-3 評価結果

管外径 D (mm)	材料	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	許容応力 (MPa)
508.0	SB410	35	64	212

(4) ディーゼル発電機海水配管（放出側）

構造強度評価結果を表5-4に示す。

ディーゼル発電機海水配管（放出側）に発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-4 評価結果

管外径 D (mm)	材料	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	許容応力 (MPa)
267.4	STPT410	34	86	226

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	21
4.2	防護鋼板の評価方針	24
4.3	架構の評価方針	25
5.	許容限界	27
5.1	防護ネットの許容限界	27
5.1.1	許容限界の設定	27
5.1.2	許容限界の設定方法	30
5.2	防護鋼板の許容限界	36
5.2.1	衝突評価	36
5.3	架構の許容限界	36
5.3.1	衝突評価	36
5.3.2	支持機能評価, 波及的影響評価	36
6.	強度評価方法	37
6.1	防護ネットの強度評価	37
7.	適用規格	54

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）許可申請において示す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)	4.2×0.3×0.2	0.04×0.04×0.04
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

また、隣接事業所の敷地からの飛来物のうち、設計飛来物の影響を上回るものとして、車両を想定する。

車両の飛来速度及び諸元を表 2-3 に示す。

表 2-3 飛来物の諸元

	車両
寸法 (m)	3.6×2.5×8.6
質量(kg)	5000
水平方向の飛来速度(m/s)	52
鉛直方向の飛来速度(m/s)	—※

※：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。

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 2-4 に示す。

表 2-4 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)	○	—

設	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 2-5 に示す。

表 2-5 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。

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

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、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

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。	

NT2 補② V-3-別添 1-2 R3

(2) 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設及び原子炉建屋付属棟軽量外壁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及び原子炉建屋付属棟軽量外壁部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。

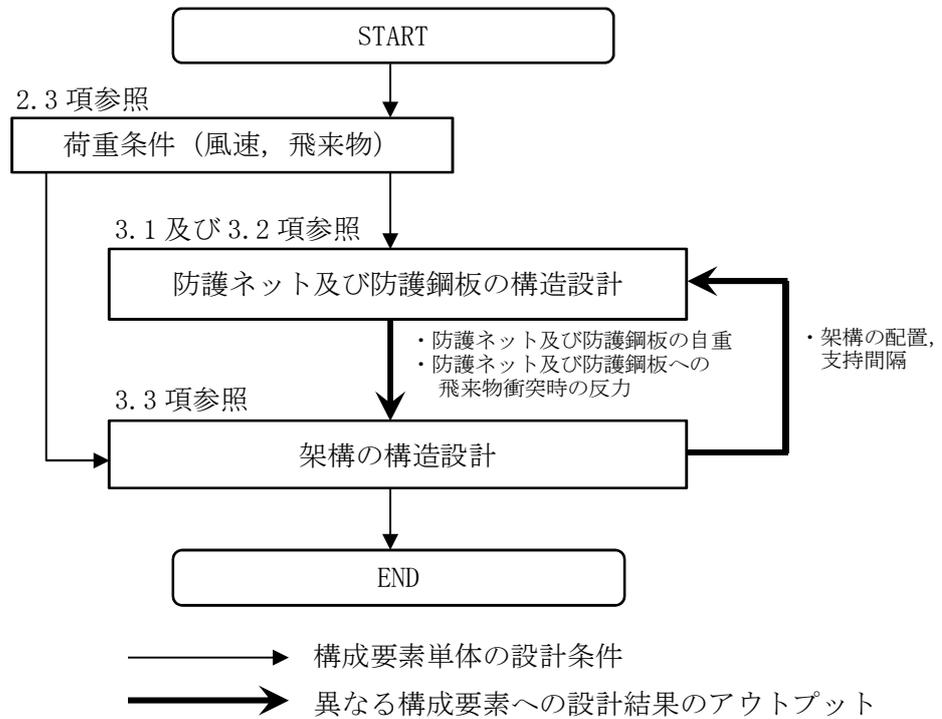


図 3-1 防護対策施設の設計フロー

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、たわみを生じても、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。

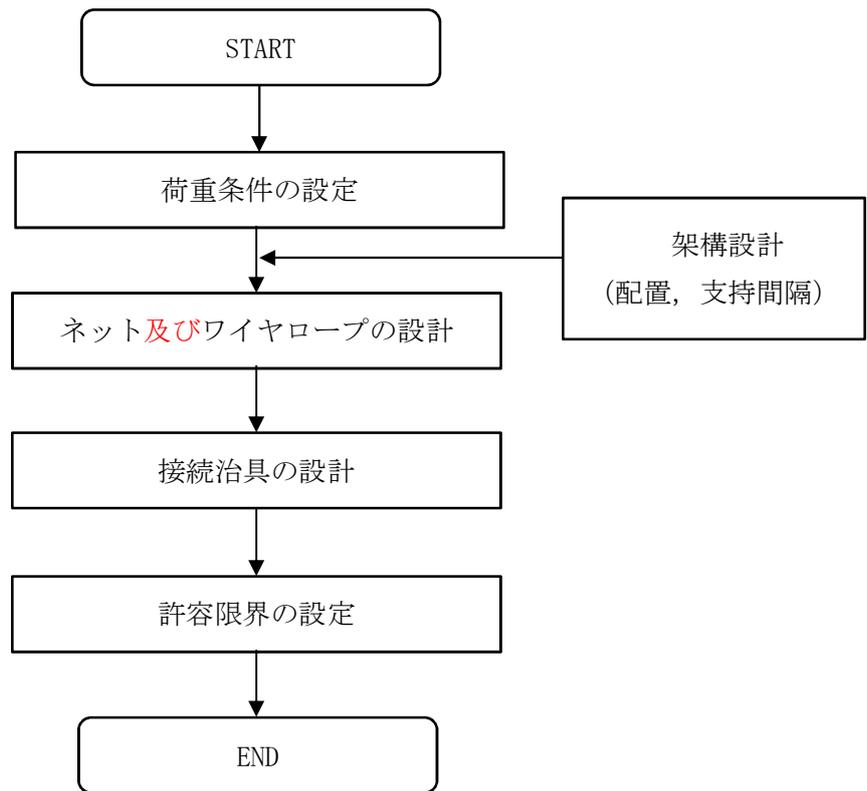


図 3-2 防護ネットの設計フロー

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。

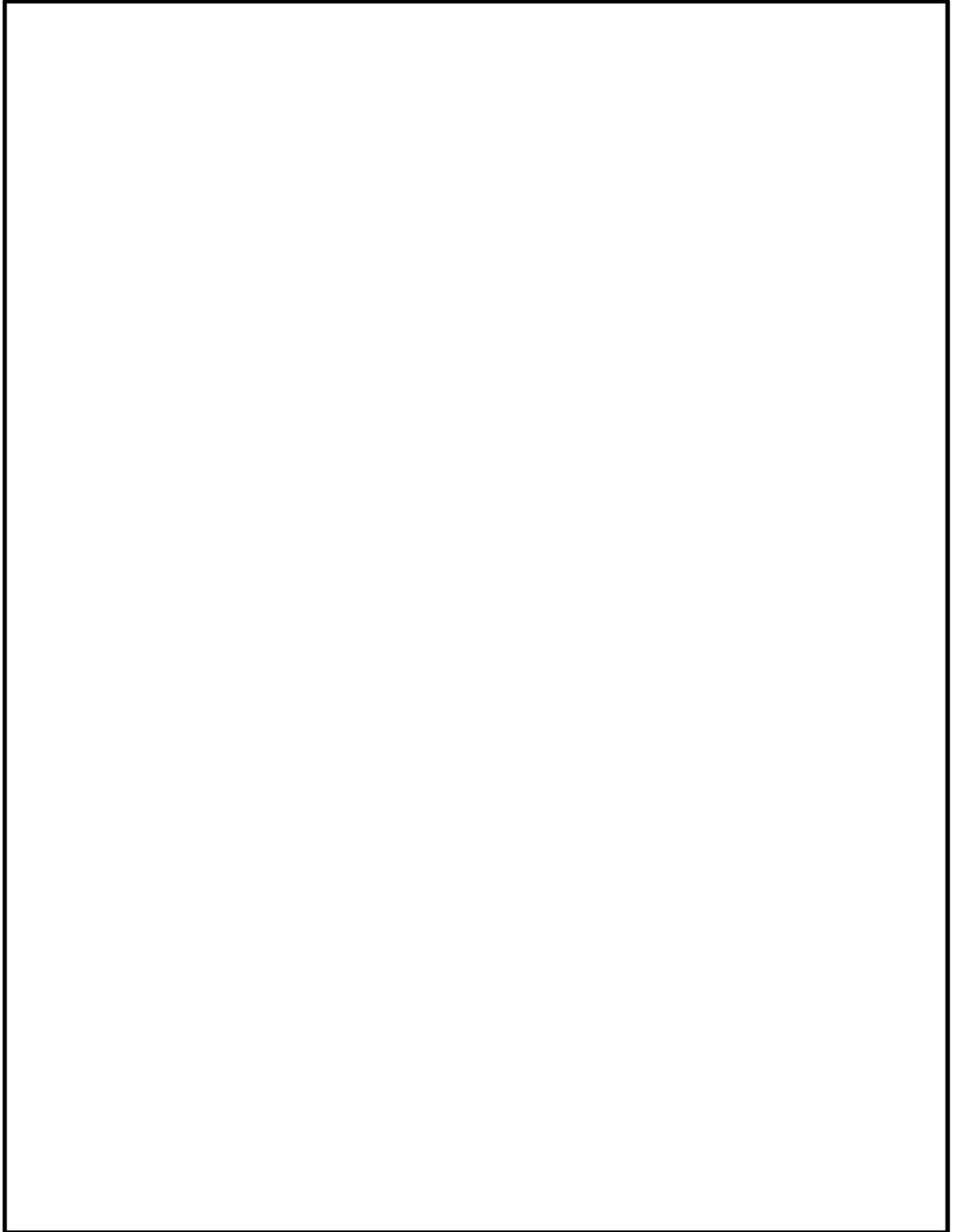


図 3-3 防護ネットの概要図

(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) 接続治具（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。

接続治具は，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。接続治具（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，接続治具（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。

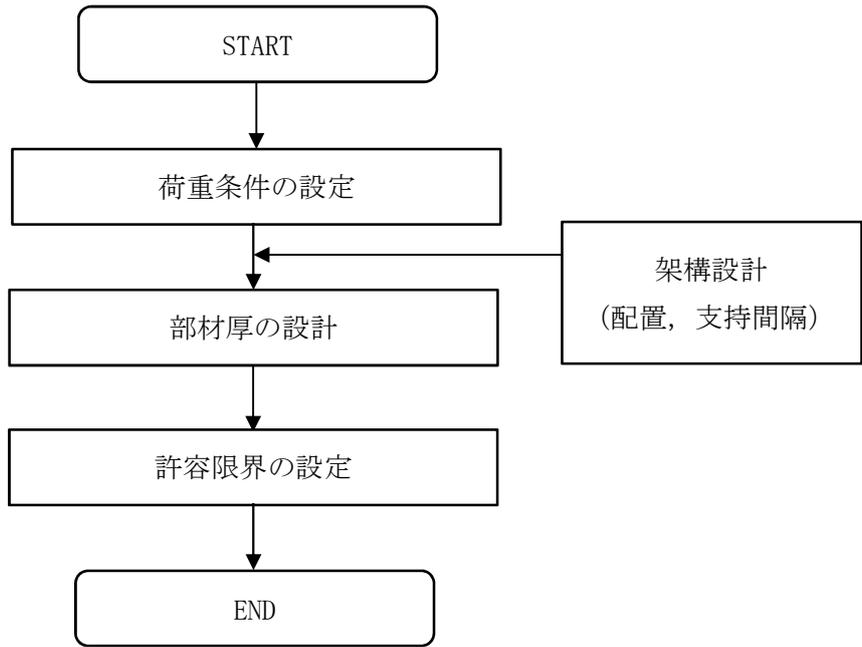


図 3-4 防護鋼板の設計フロー

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。

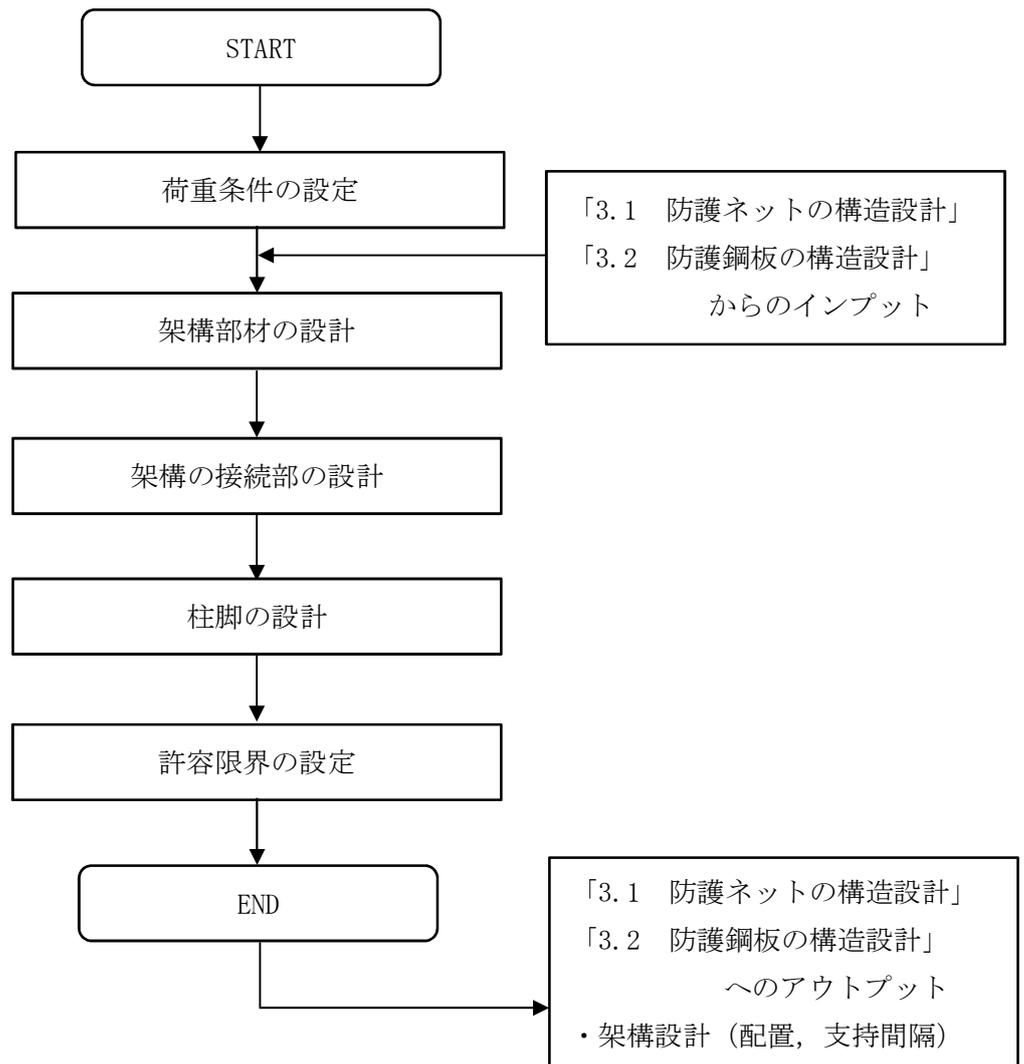


図 3-5 架構の設計フロー

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。これらの要素を組み合わせることで構成される防護対策施設について, その機能の確保するための設計の考え方については, 表 4-1 のとおり整理される。

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。また, 防護対策施設の下から, 設計飛来物の様な重量がある飛来物が上昇しながら飛来することは考え難いことから, 防護ネット及び防護鋼板については, 防護対策施設の下面には取り付けないこととする。

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。

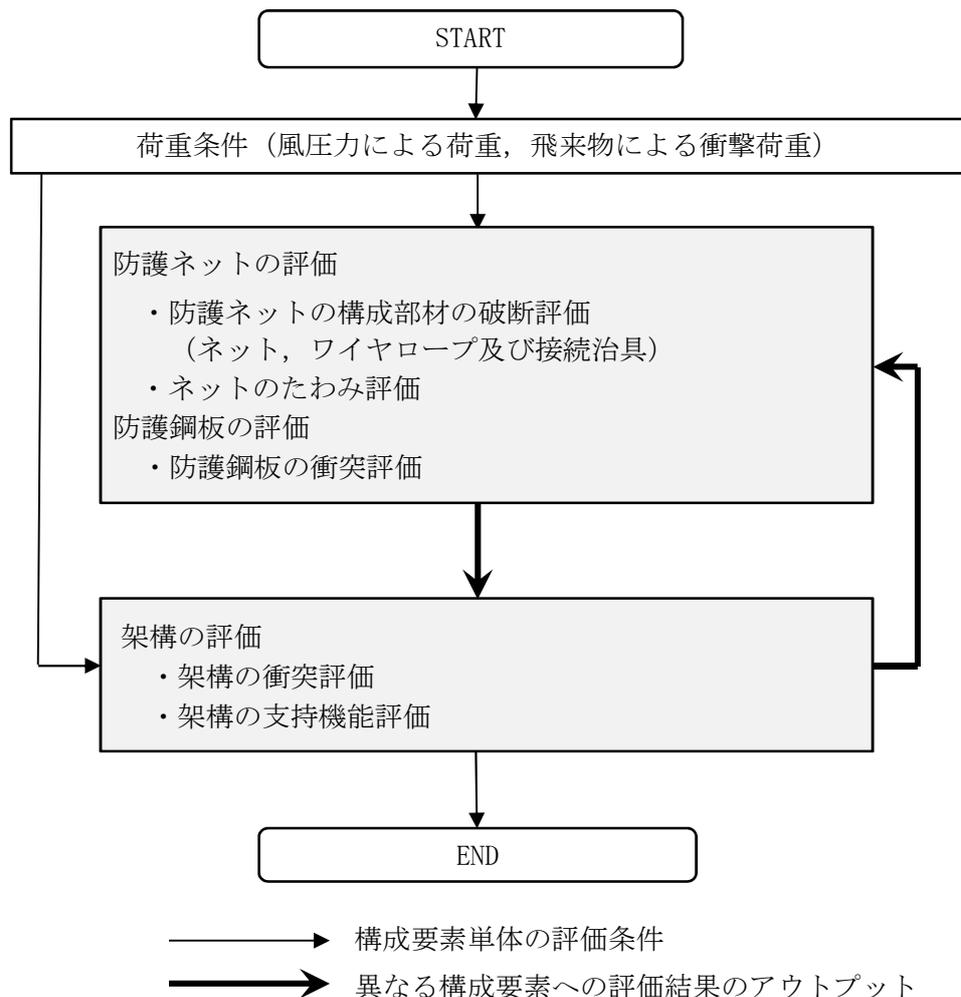


図 4-1 防護対策施設の評価フロー

表 4-1 竜巻防護対策施設の構成要素に要求される機能及び適合性の確認方法

構成要素	要求される機能		機能維持のための確認項目		先行プラントの評価例	備考
	概念	具体的な展開				
防護ネット	障壁の維持 (飛来物の通過阻止)	飛来物が貫通しないこと	鋼製柱	なし (柱の下部に設置される架構の貫通評価で代表させる)	なし	先行プラントについても、同様の判断と推定
			ネット	各々の金網が、飛来物の衝突に際し破断、脱落しないこと 【個別(全数)評価】※2	同左	
	飛来物衝突時の変形による波及的影響の防止	飛来物の衝突によるたわみが、防護対象施設との離隔距離未満であること	鋼製柱	なし (柱の下部に設置される架構のたわみ評価で代表させる)	なし	先行プラントについても、同様の判断と推定
			ネット	ネットのたわみ量の評価 【個別(全数)評価】※1	同左	
防護鋼板	障壁の維持 (飛来物の通過阻止)	飛来物が貫通しないこと	FEMによる衝突解析において、代表部材が貫通、破断しないことを確認 <代表部材の選定の考え方> (同一の材質及び厚さに対し、)周辺の拘束が厳しく、貫通(貫入)に対して厳しいと考えられる最小寸法の鋼板とする。		個別の解析モデル毎に、(変形が大きくなるように、)支持スパンが最大となる箇所を選定	先行プラントでは、曲げによる破断も含めた欠損を考慮し、変形量が大きくなる部材を選定したと推定。東二では、最大スパン部材もたわみ評価において評価し、貫通しないことも合わせて確認済。
	飛来物衝突時の変形による波及的影響の防止	飛来物の衝突によるたわみが、防護対象施設との離隔距離未満であること	FEMによる衝突解析において、代表部材のたわみ量を確認 <代表部材の選定の考え方> (同一の材質及び厚さに対し、)たわみが大きくなる、最大寸法の鋼板とする。		個別の解析モデル毎に、支持スパンが最大となる箇所を選定	

構成要素	要求される機能		機能維持のための確認項目	先行プラントの評価例	備考
	概念	具体的な展開			
架構	障壁の維持 (飛来物の通過阻止)	飛来物が部材を貫通しないこと	FEMによる衝突解析において、代表部材が貫通、破断しないことを確認 <代表部材の選定の考え方> (同一の材質及び断面に対し、) 周辺の拘束が厳しく、貫通に対して厳しいと考えられる最小長さの架構部材とする。	個別の解析モデル毎に、(貫入深さが大きくなるように、) 支持スパンが最大となる箇所を選定	先行プラントでは、曲げによる破断も含めた欠損を考慮し、変形量が大きくなる部材を選定したと推定。 東二では、最大スパン部材もたわみ評価において評価し、貫通しないことも合わせて確認済。
	飛来物衝突時の変形による波及的影響の防止	飛来物の衝撃荷重により、架構部材の接合部が破断しないこと	FEMによる衝突解析において、代表部材端部の破断の有無を確認 <代表部材の選定の考え方> (同一の材質及び厚さに対し、) 曲げが大きくなる、最大長さの架構部材とする。	個別の解析モデル毎に、(貫通評価と同じ、) 支持スパンが最大となる箇所を選定	
		飛来物の衝撃荷重により、架構全体が倒壊しないこと。	FEMによる、バネ-質点系でモデル化した防護設備の衝突解析時の応答加速度を用いて、架構全体に対する強度評価を行う。 【個別(全数)評価】※2		

※1：手計算で算出可能であることから、全数評価を実施

※2：個々の設備の形状に依存するため、全数評価を実施

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。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。

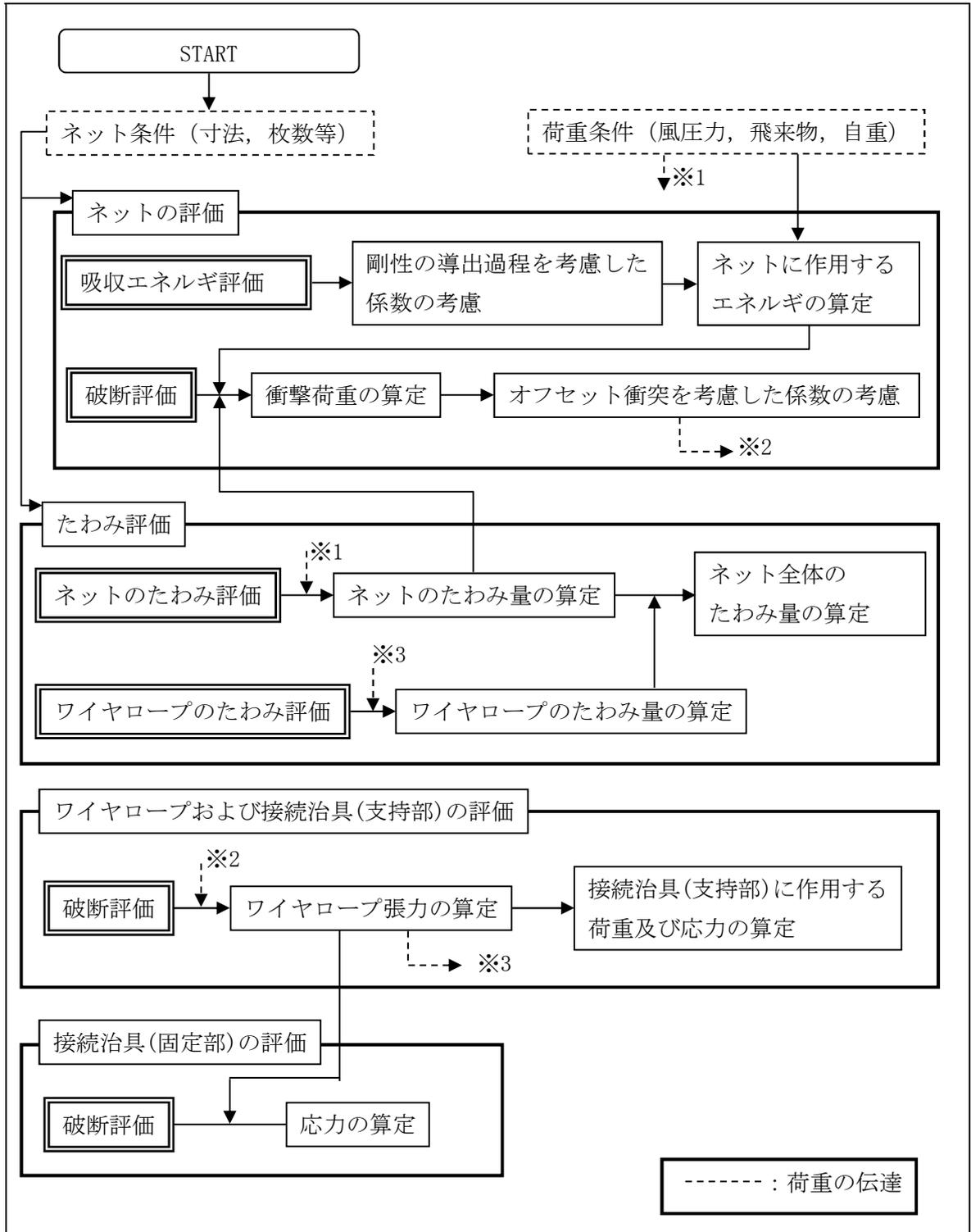


図 4-2 防護ネットの評価フロー

(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に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

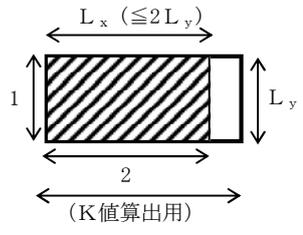
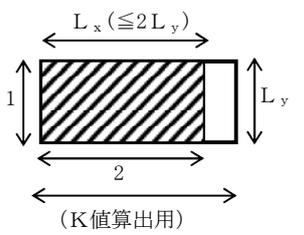
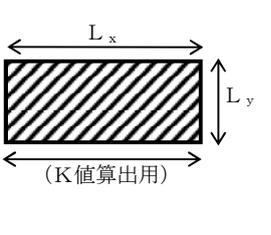
トに破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を有することを確認するために、以下を評価する。

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ように、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、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り、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。

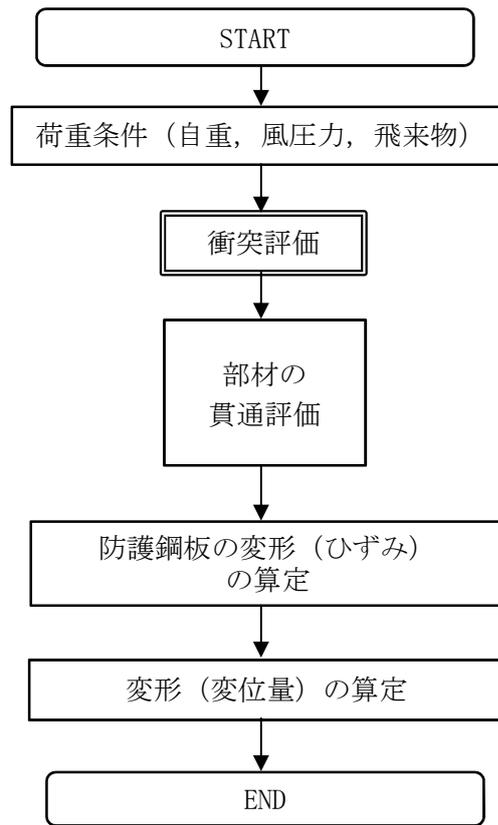


図 4-3 防護鋼板の評価フロー図

(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，FEM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。

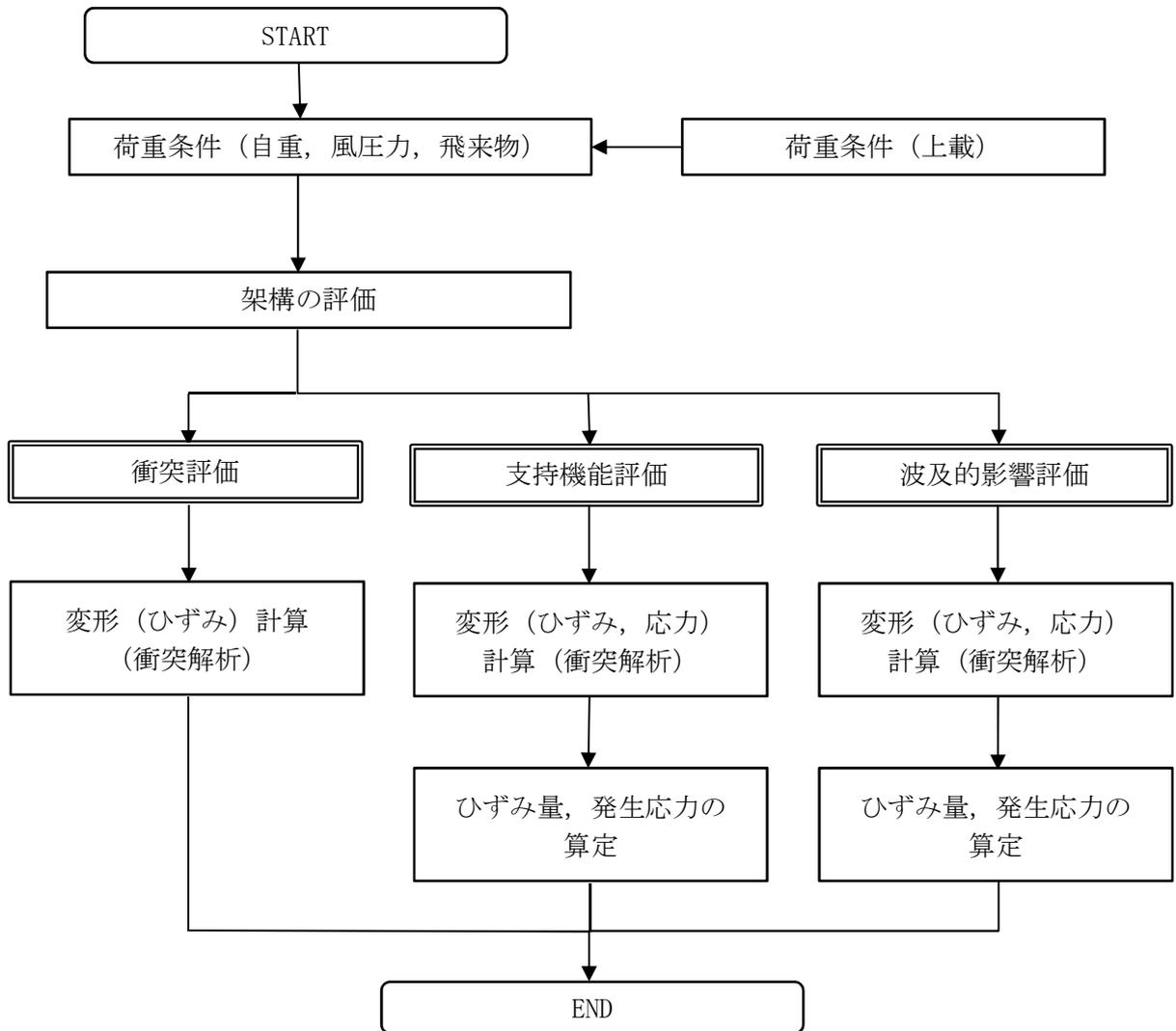


図 4-4 架構の評価フロー図

(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. 接続治具 (支持部)

接続治具 (支持部) の強度評価は、接続治具 (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) 規格値の1.5倍

(注2) メーカーの保証荷重

d. 接続治具（固定部）

接続治具（固定部）の破断評価は、接続治具（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続治具に作用するため、評価対象は、接続治具（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。

接続治具の許容限界を表 5-4 に示す。

表 5-4 接続治具の許容限界

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。

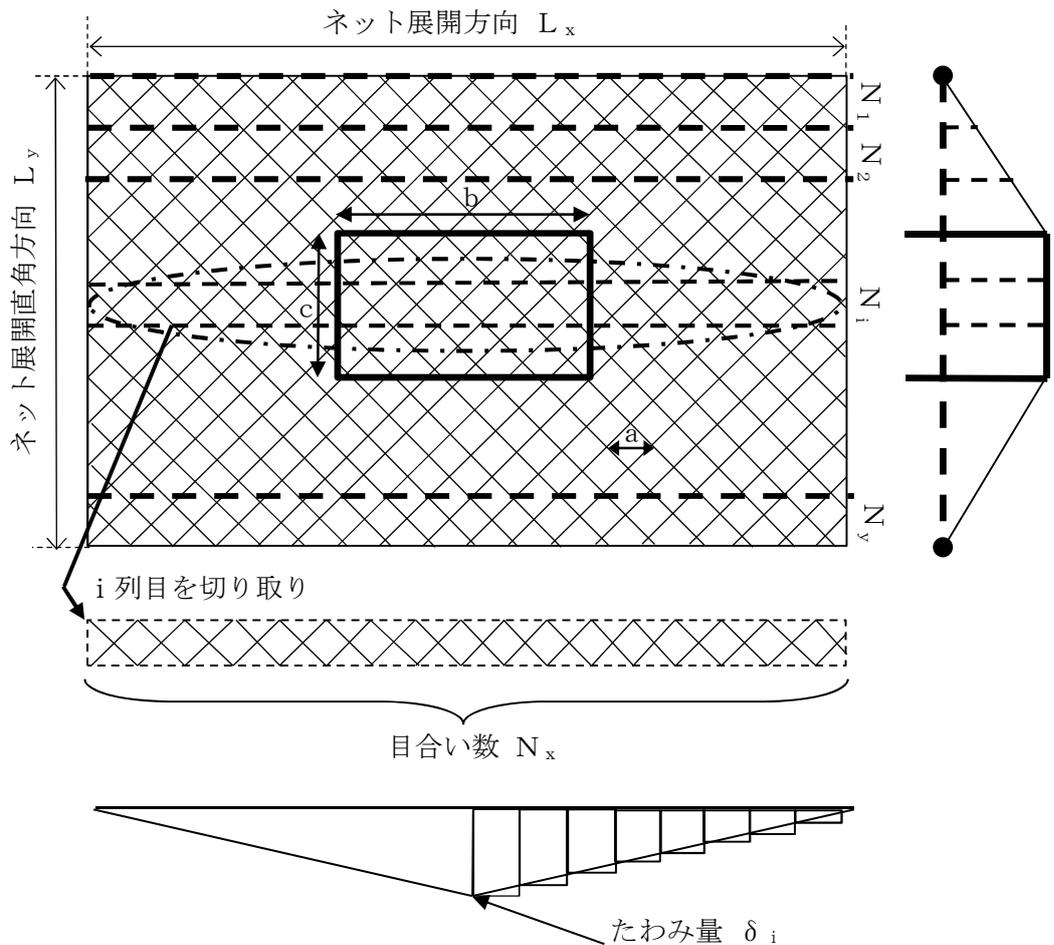


図 5-1 吸収エネルギー評価におけるネットのモデル図

図 5-1 に示すとおりネットの展開方向に 1 目合いごとに [] で囲った形に帯状に分割し、 N_1 から N_y までの各列が分担するエネルギーを各列のたわみ量から算定し、それらを積算することによりネットが吸収するエネルギーを算出し、ネットが吸収可能な限界吸収エネルギーを算出する。

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

$$\text{ネット展開直角方向目合い列数} = \frac{c}{a}$$

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

吸収エネルギー評価の許容限界の算定フローを図 5-2 に示す。

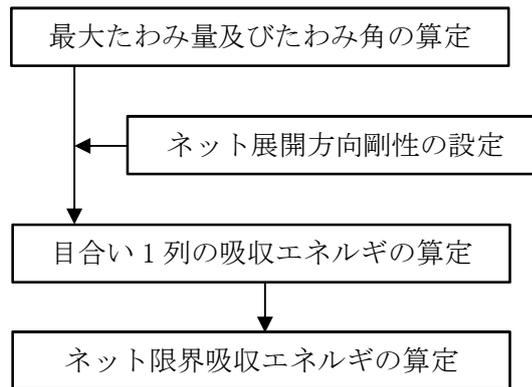
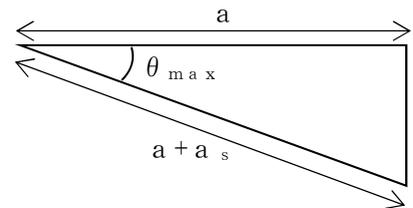


図 5-2 吸収エネルギー評価の許容限界の算定フロー

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 目合い当たりバネ定数 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、

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

$$\text{ネット展開方向剛性 } K_x' = \frac{K}{N_x}$$

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

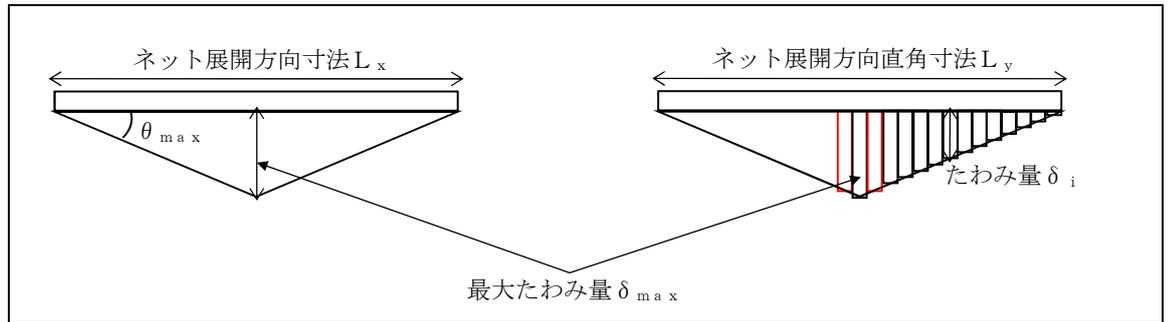


図 5-3 ネットの最大たわみ量と最大たわみ角

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。

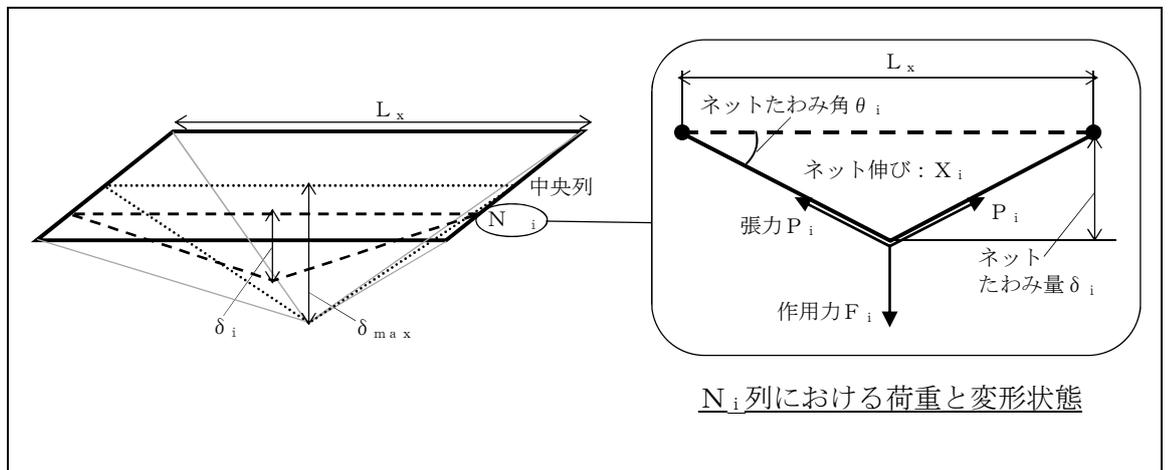


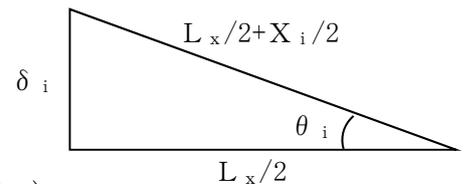
図 5-4 ネットに作用する力のつり合い

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，

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

となる。また，作用力 F_i は変位置とたわみ量の関係から，

$$F_i = 2 \cdot P_i \cdot \sin \theta_i \\ = 2 \cdot K_x \cdot X_i \cdot \sin \theta_i \\ = 2 \cdot K_x \cdot L_x (\tan \theta_i - \sin \theta_i) \\ = 4 \cdot K_x \cdot \delta_i \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2}} \right) \dots \quad (5.1)$$



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。

$$\begin{aligned}
 E_i &= \int_0^{\delta_i} F_i \cdot d\delta \\
 &= \int_0^{\delta_i} 4 \cdot K_x \cdot \delta_i \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2}} \right) d\delta \\
 &= 2 \cdot K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x \left(\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \quad \dots \quad (5.2)
 \end{aligned}$$

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。

$$\begin{aligned}
 E_{max} &= \sum_{i=1}^{N_y} E_i \\
 &= \sum_{i=1}^{N_y} \left\{ 2 \cdot K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x \left(\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \right\} \quad \dots \quad (5.3)
 \end{aligned}$$

(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。

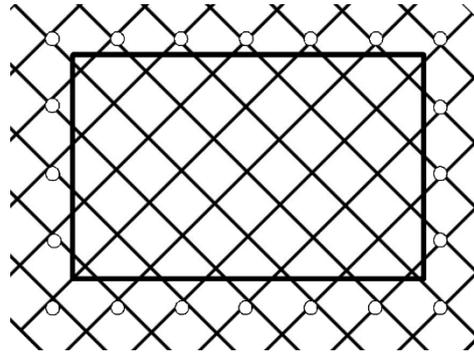


図 5-5 40 mm 目合いの防護ネットに飛来物が衝突した評価モデル

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 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。破断ひずみを超え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，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 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。破断ひずみを超え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。

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，ひずみ量の評価し，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 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。

(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続治具（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続治具（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。

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

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。

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

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。

$$E_t = E_f + E_w \quad \dots (5.4)$$

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_f 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、

$$F_a' = \text{} \cdot F_a$$

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。

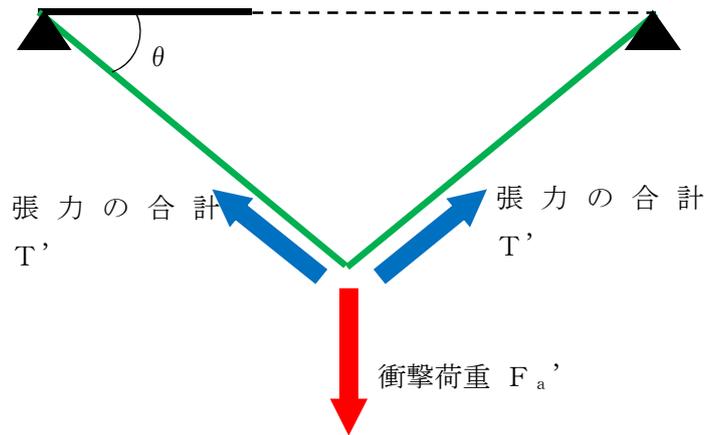


図 6-1 ネットに発生する力のつりあい

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、

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

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。

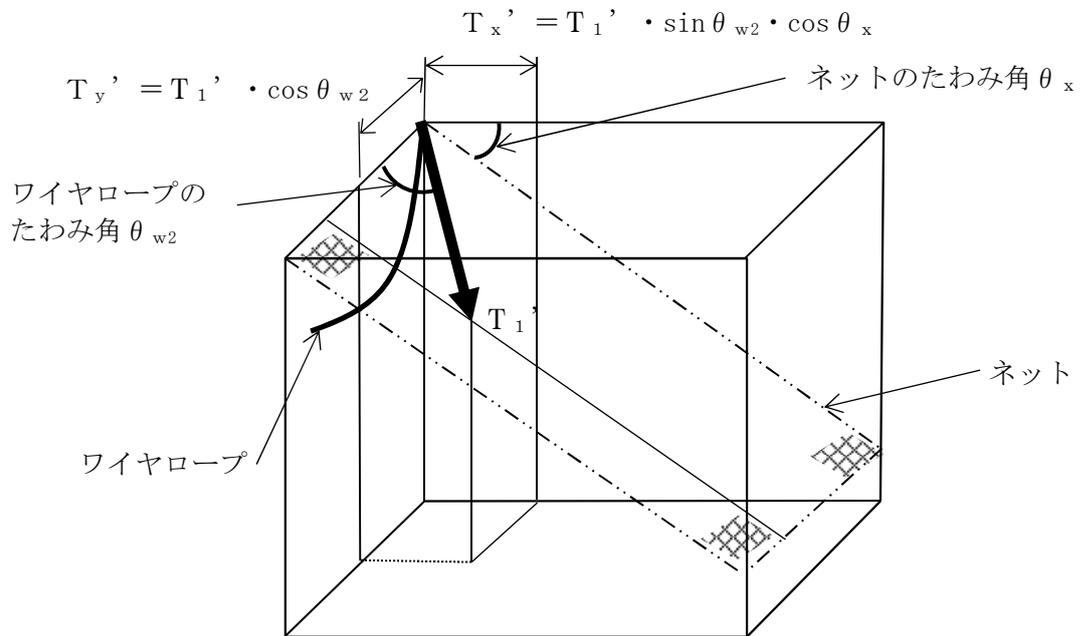
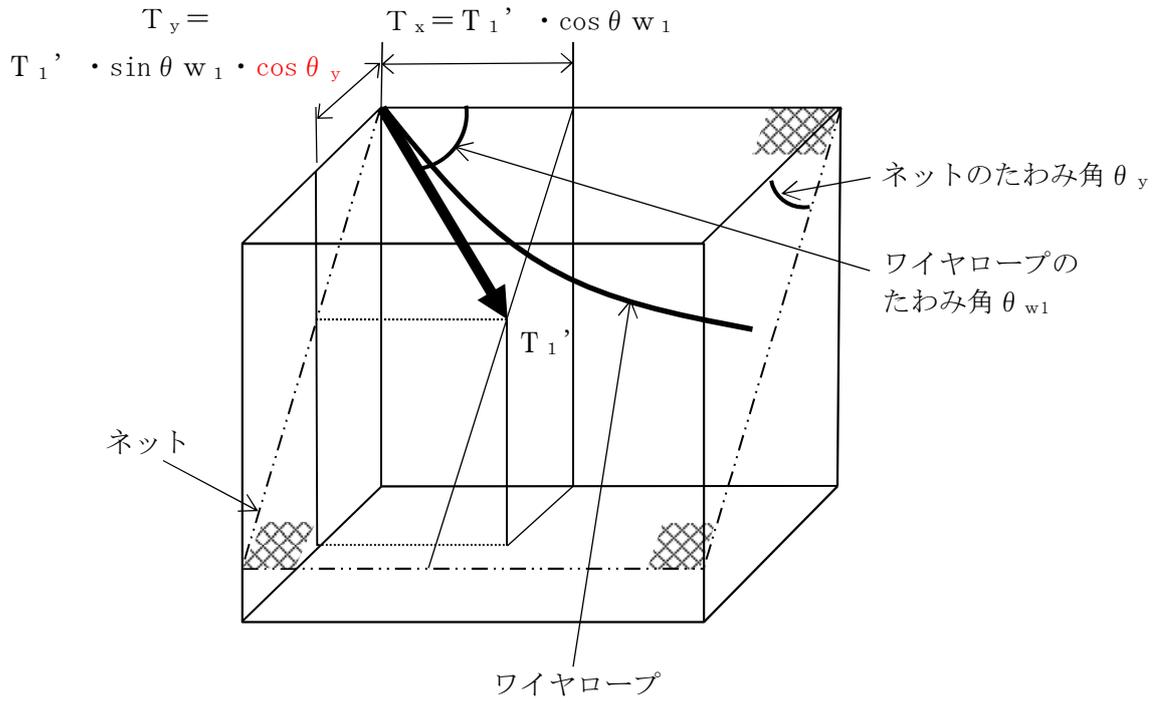


図 6-2 ネットのたわみとワイヤロープのたわみ角の関係

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。

$$T_x = T_1 \cos \theta_{w1}$$

$$T_y = T_1 \sin \theta_{w1} \cdot \cos \theta_y$$

ただし， θ_y ， θ_{w1} は以下の式で求められる。

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

$$\theta_{w1} = \cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{1 + 16 \left(\frac{\delta_{wx}}{L_x} \right)^2}}$$

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、

$$\sigma_s = \frac{F_p}{2 A_c \cdot n_2}$$

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。

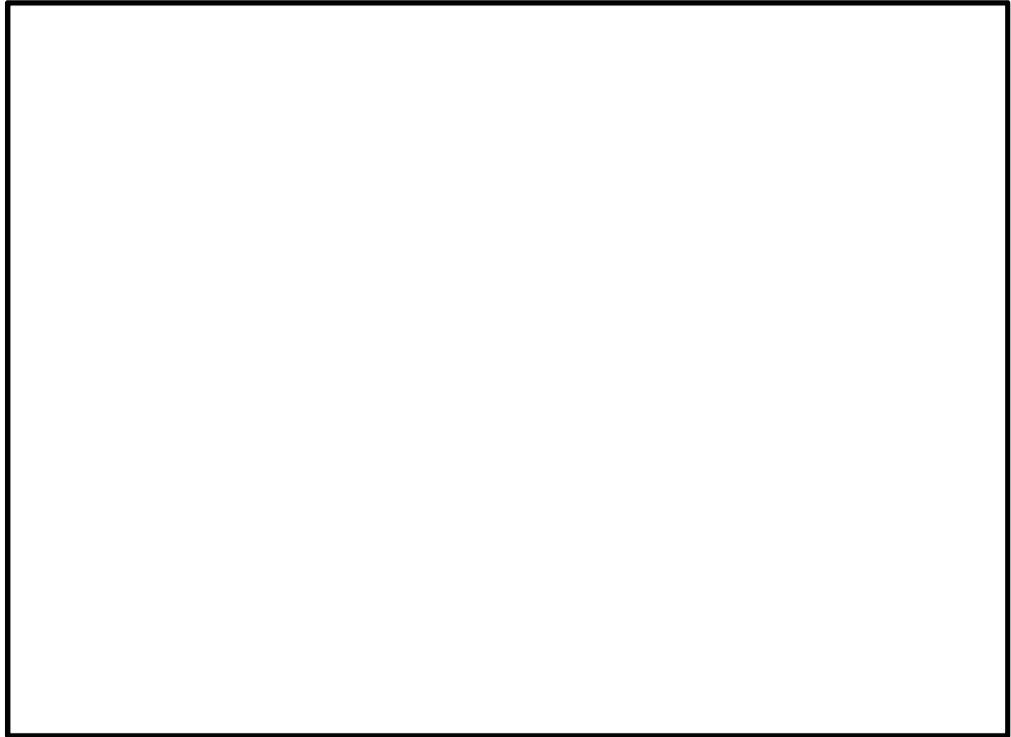


図 6-5 アイプレートの荷重状態

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,

$$\tau_w = \frac{T_1}{2 \cdot a_w \cdot L_{pw}}$$

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。

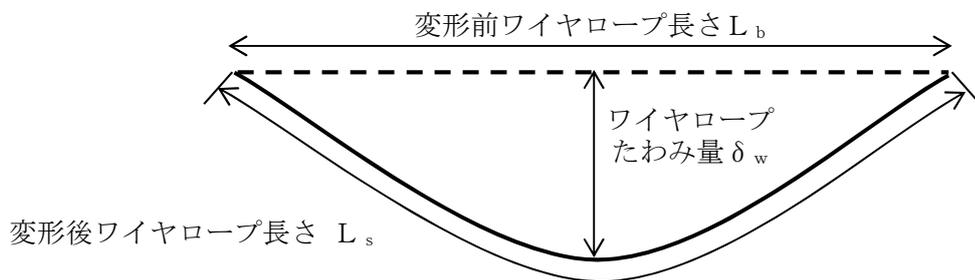


図 6-6 ワイヤロープの変形図

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

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。

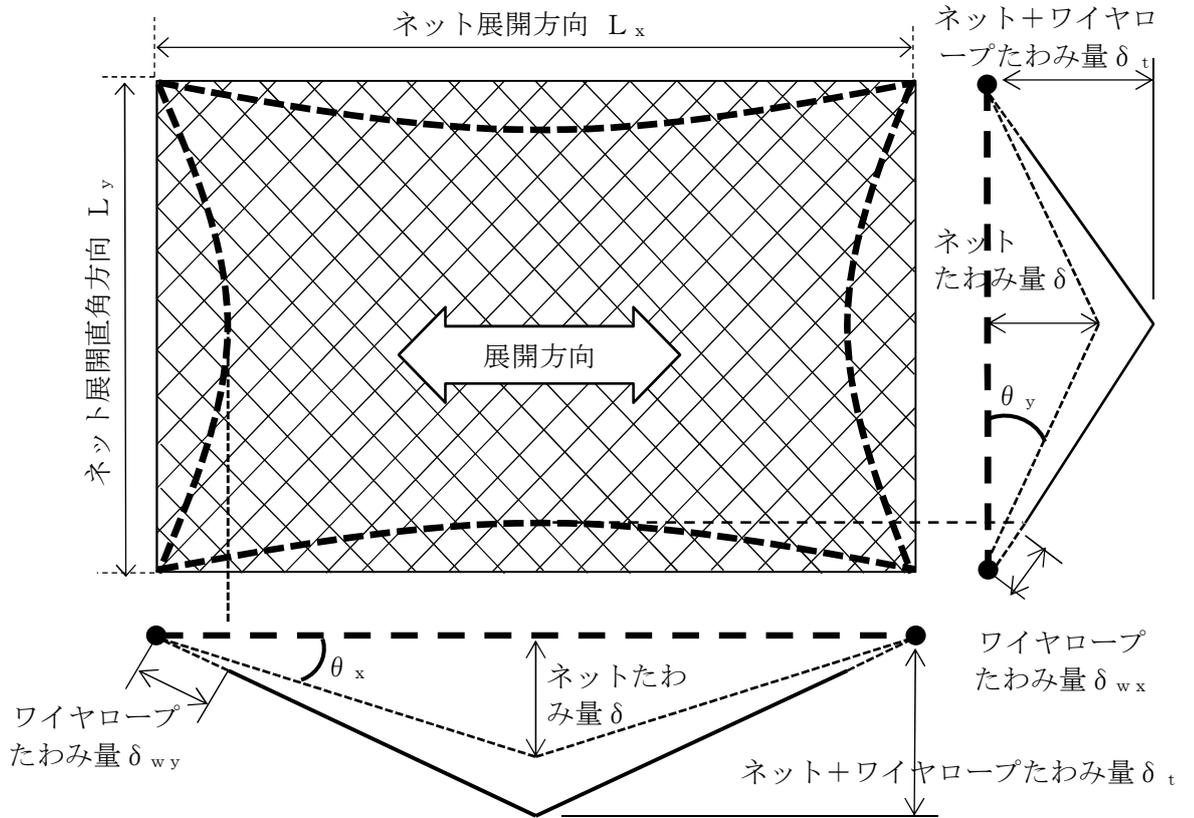


図 6-7 ネット及びワイヤロープ変形図（展開方向が長い場合）

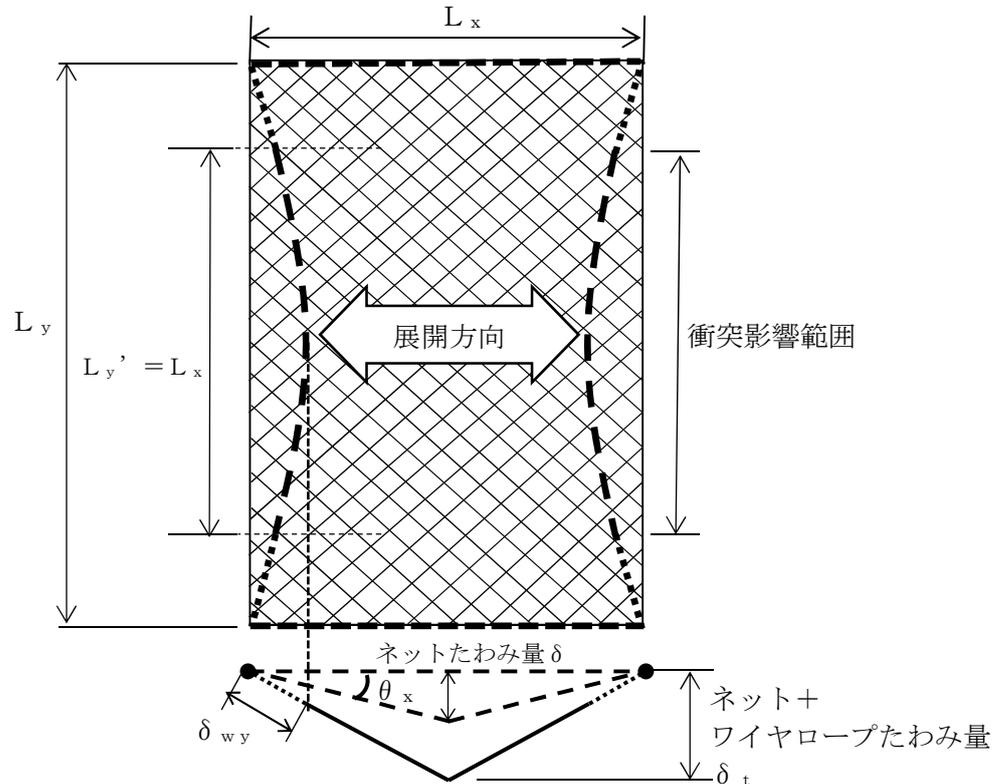


図 6-8 ネット及びワイヤロープ変形図（展開方向が短い場合）

よって、ネットのAspect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。

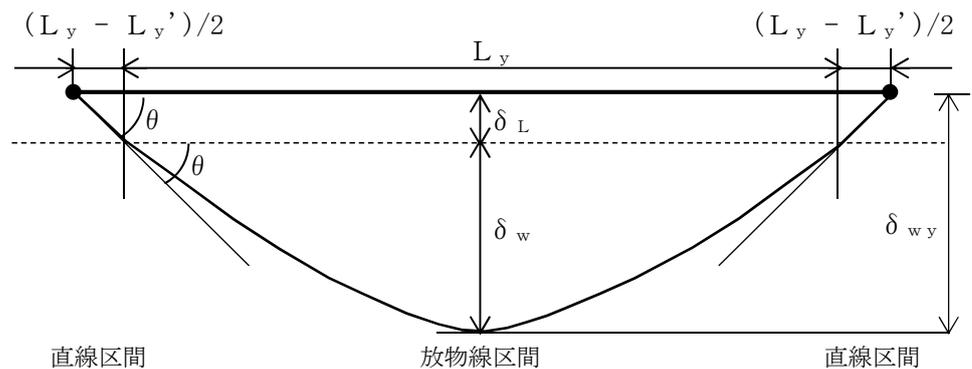


図6-9 ワイヤロープの変形図

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 防護対策施設の強度計算書

目次

- 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 1-2-1-1 防護ネットの強度計算書

目次

1.	概要	1
2.	基本方針	1
2.1	位置	1
2.2	構造概要	11
2.3	評価方針	13
2.4	適用規格	16
3.	強度評価方法	17
3.1	記号の定義	17
3.2	評価対象部位	21
3.3	荷重及び荷重の組合せ	24
3.4	許容限界	28
3.5	評価方法	34
4.	評価条件	48
4.1	荷重条件	48
4.2	防護ネット仕様	48
5.	強度評価結果	53
5.1	ネットに作用する外力エネルギー評価	53
5.2	破断評価	55
5.3	たわみ評価	67

1. 概要

本資料は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」に示すとおり、防護対策施設である非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設、中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設、海水ポンプエリア竜巻防護対策施設、原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設及び使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の防護ネットが、外部事象防護対象施設の機能喪失に至る可能性のある飛来物（以下「飛来物」という。）が外部事象防護対象施設へ衝突することを防止するために、主要な部材が破断せず、たわみを生じても飛来物が外部事象防護対象施設と衝突しないよう、飛来物のエネルギーが防護ネットの限界吸収エネルギーの値を下回っていること、及び防護ネットを構成する部材が許容限界に至らないことを確認するものである。

2. 基本方針

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

2.1 位置

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

防護ネットの設置位置図を図 2-1 に、各設置位置におけるネットの割付展開図を図 2-2 から図 2-9 に示す。

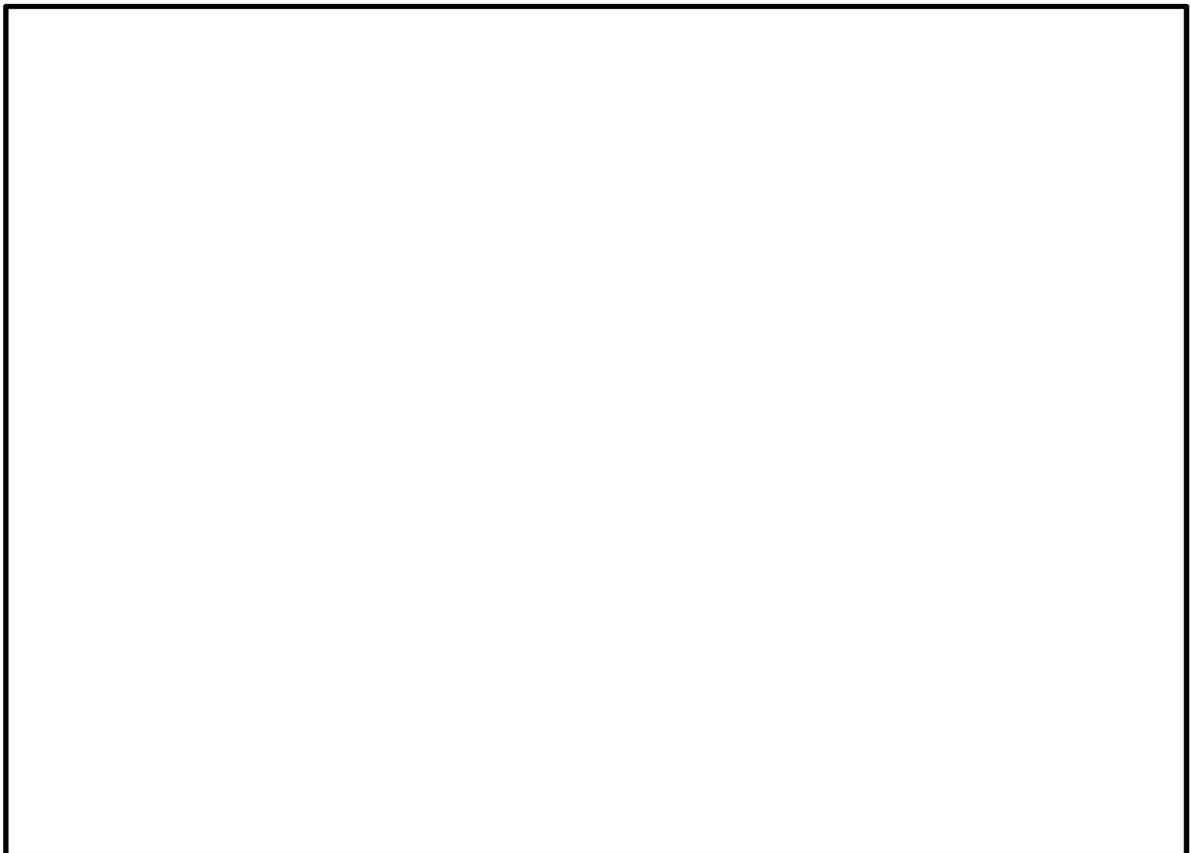


図 2-1 防護ネットの設置位置図

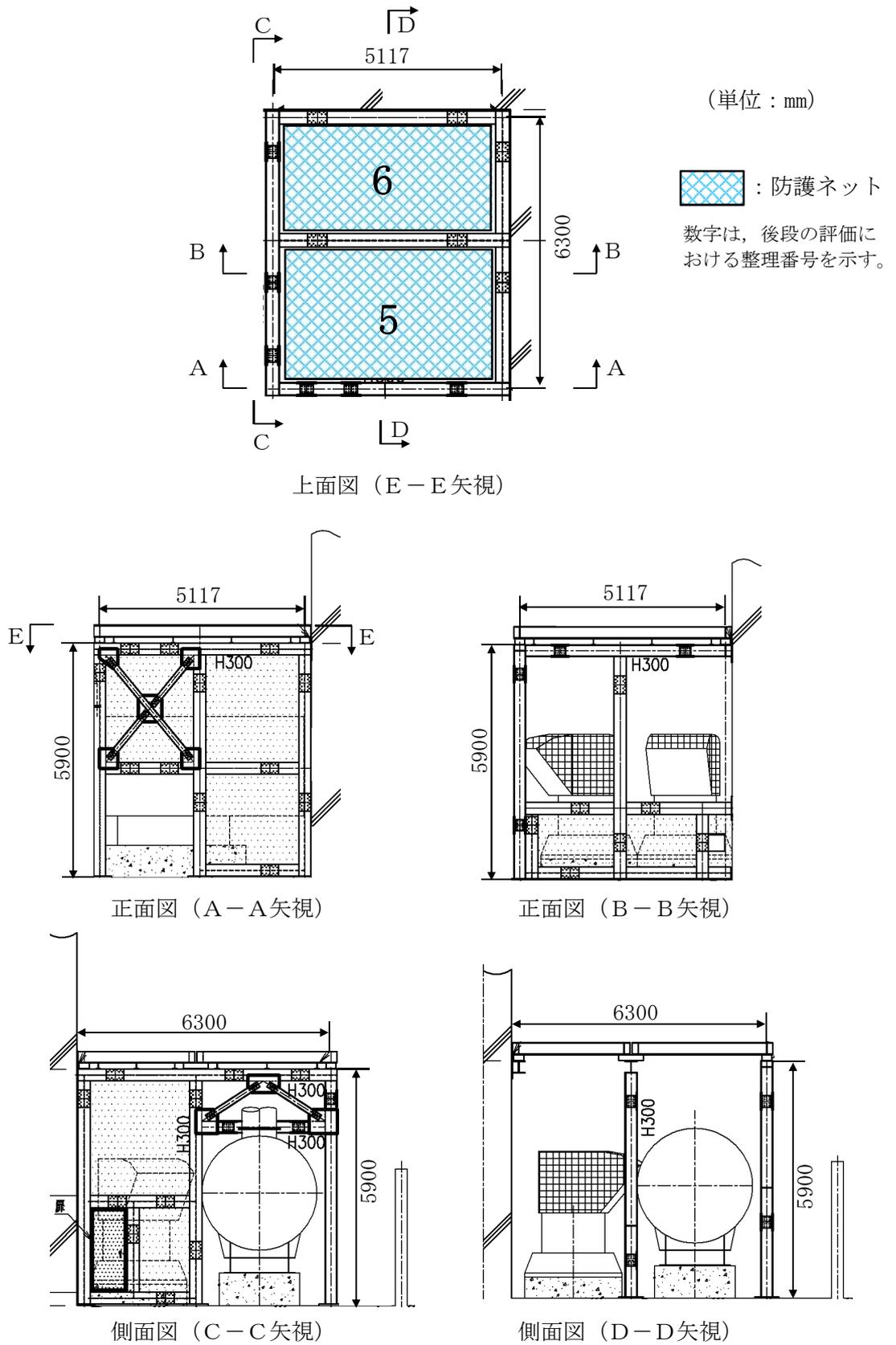


図 2-3 防護ネットの割付展開図

(2 C 非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設)

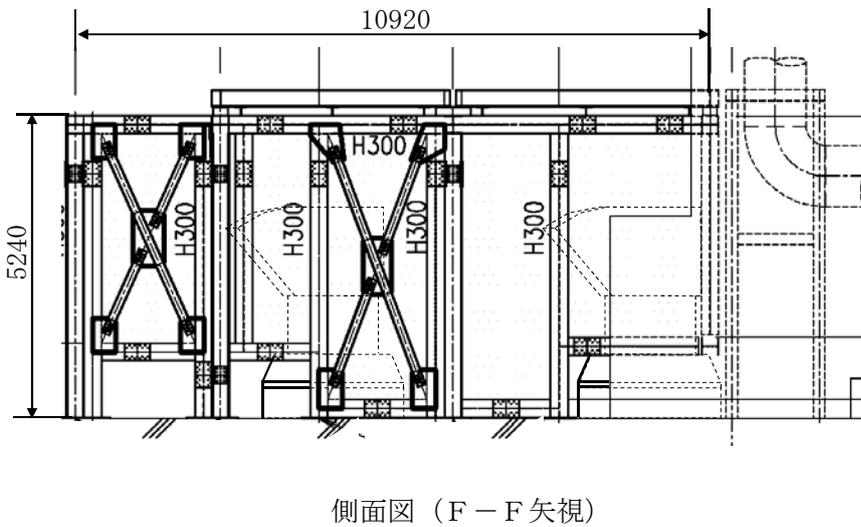
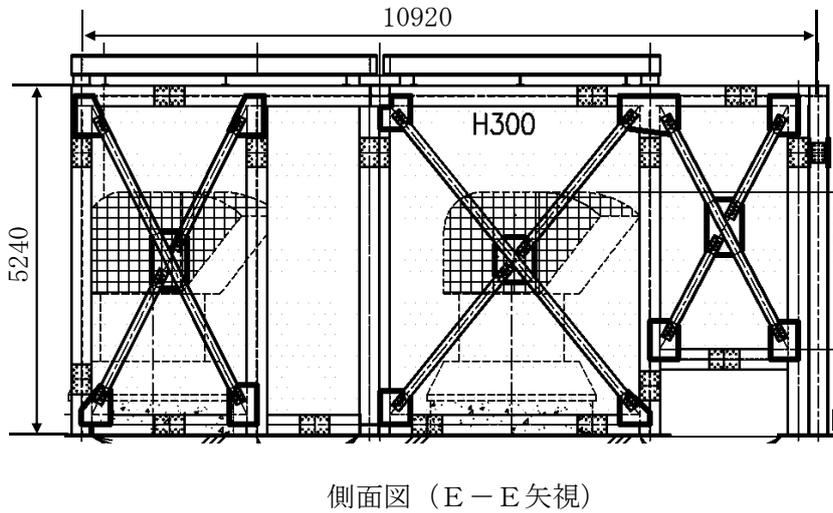
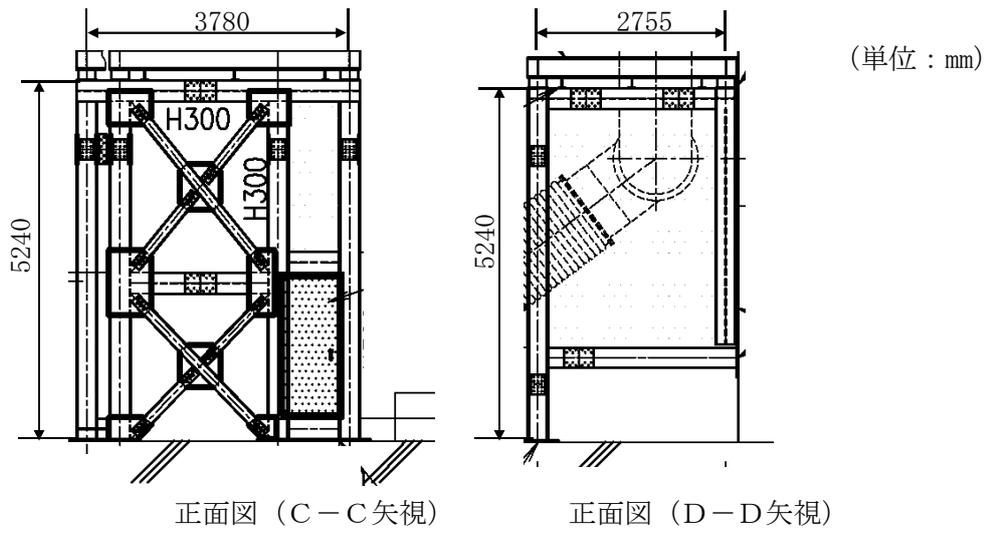
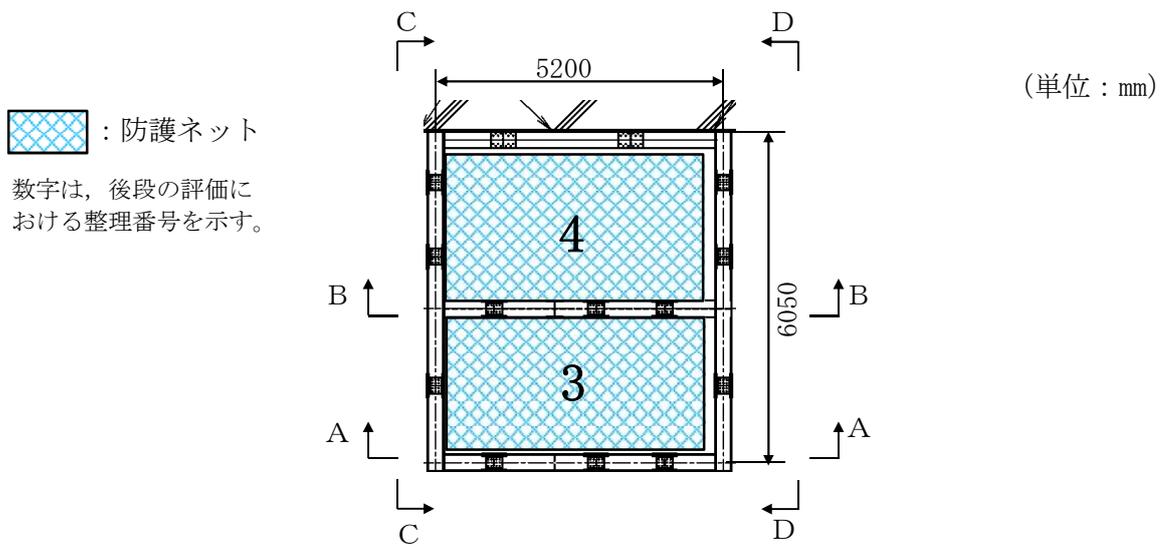
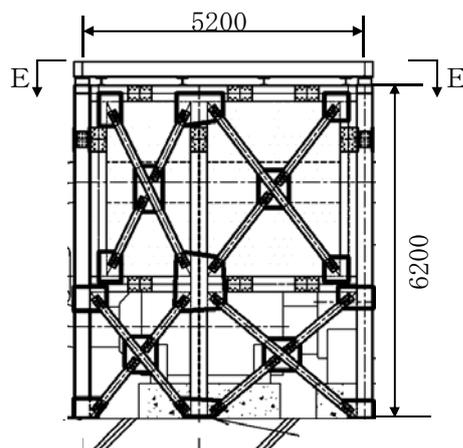


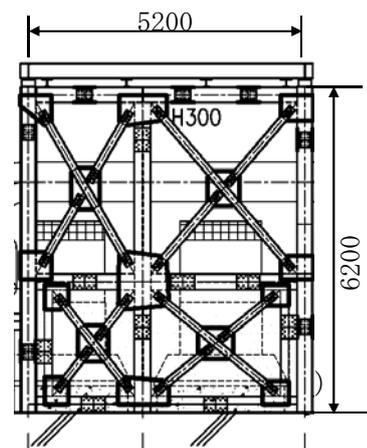
図 2-4 防護ネットの割付展開図(2/2)
(2D非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設)



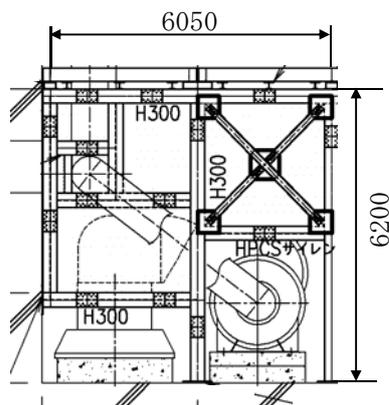
上面図 (E-E 矢視)



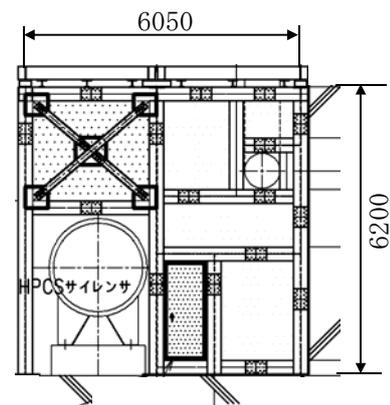
正面図 (A-A 矢視)



正面図 (B-B 矢視)



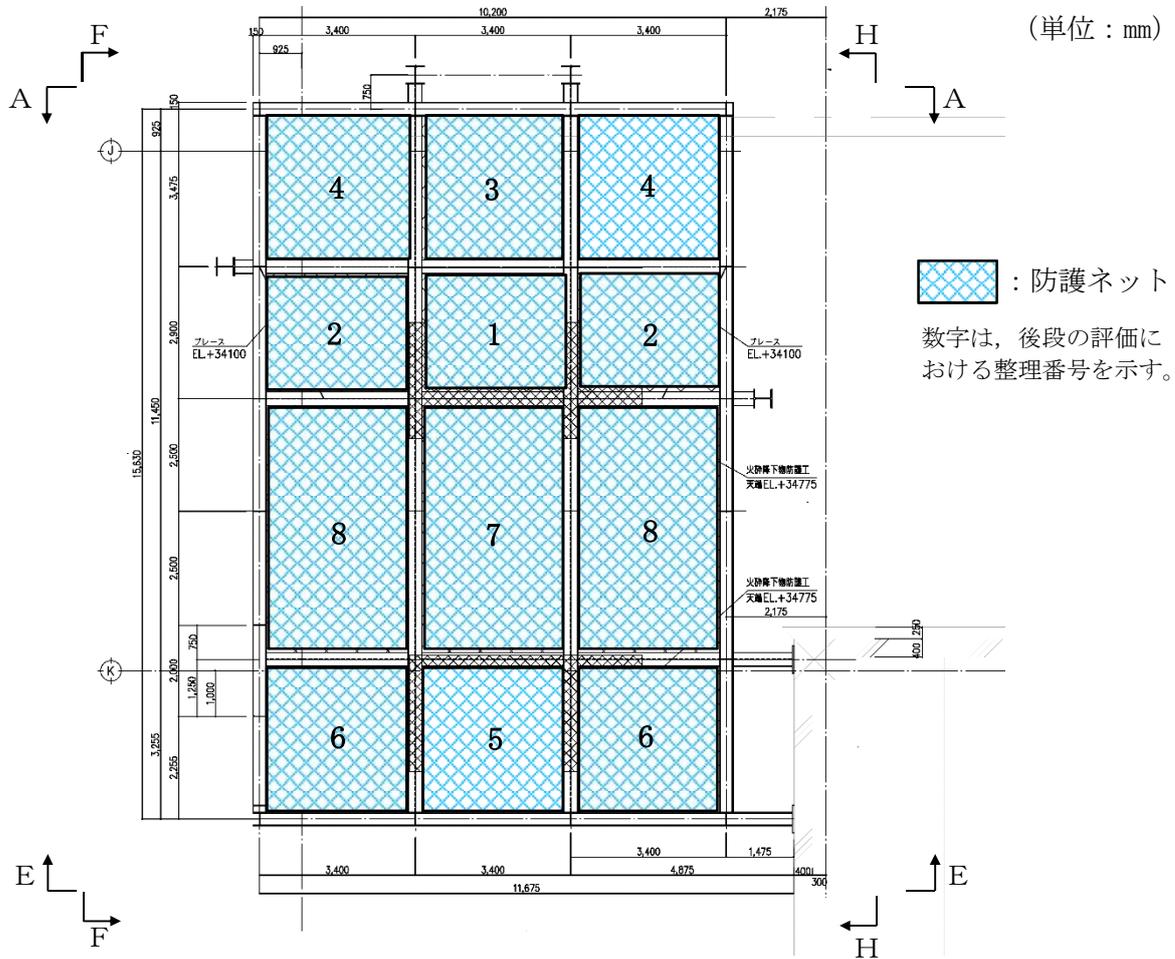
側面図 (C-C 矢視)



側面図 (D-D 矢視)

図 2-5 防護ネットの割付展開図

(高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設)



EL.+36050 伏図

上面図

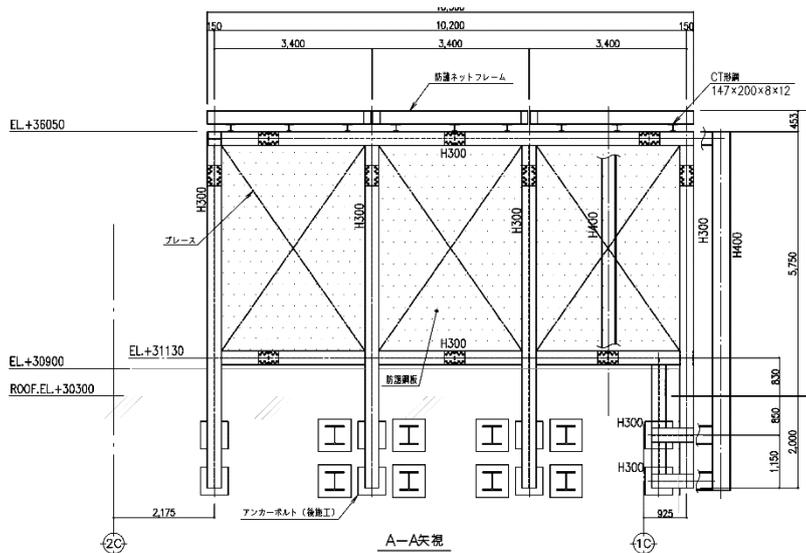


図 2-6 防護ネットの割付展開図(1/2)
(中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設)

(単位：mm)

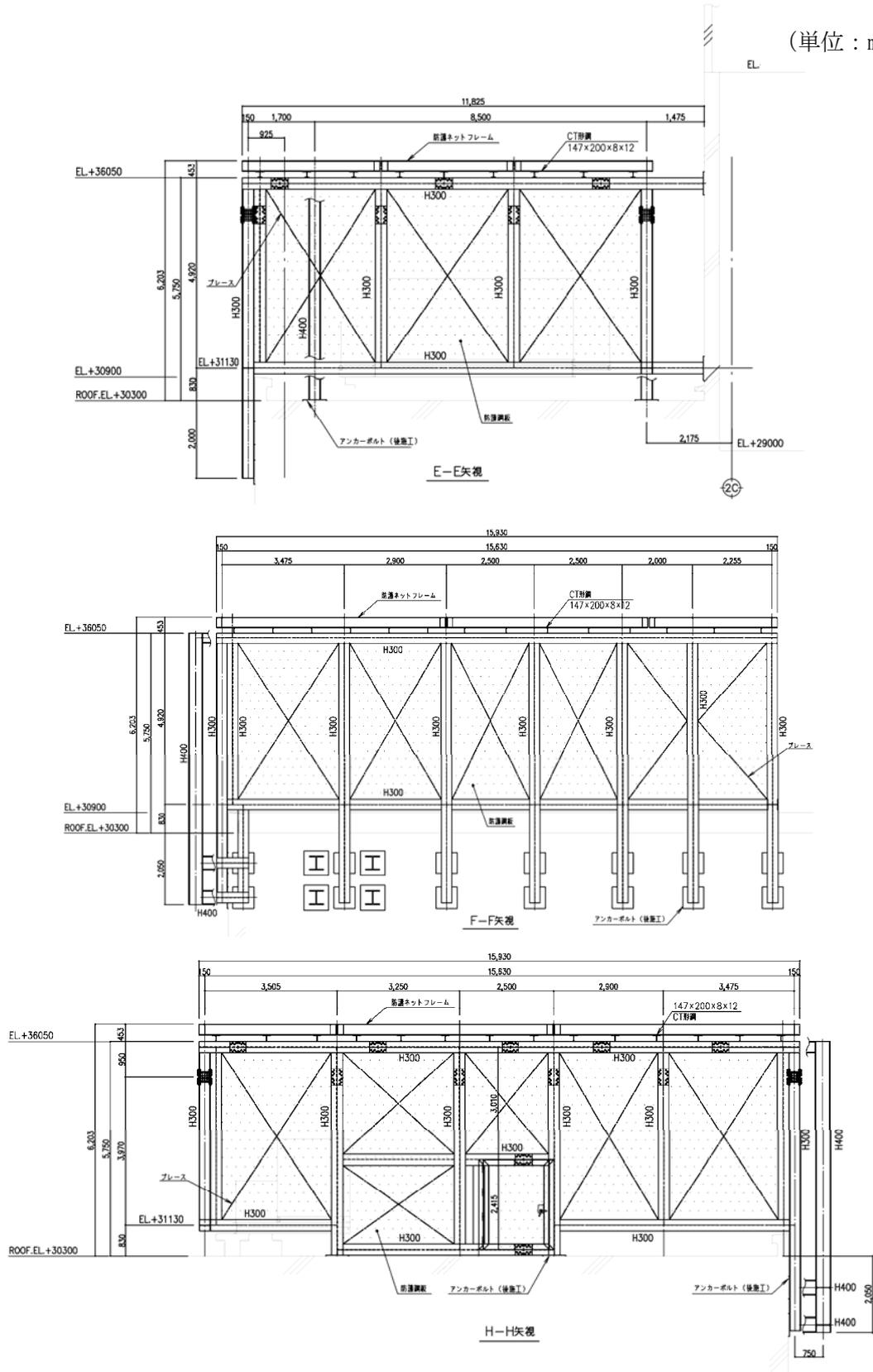
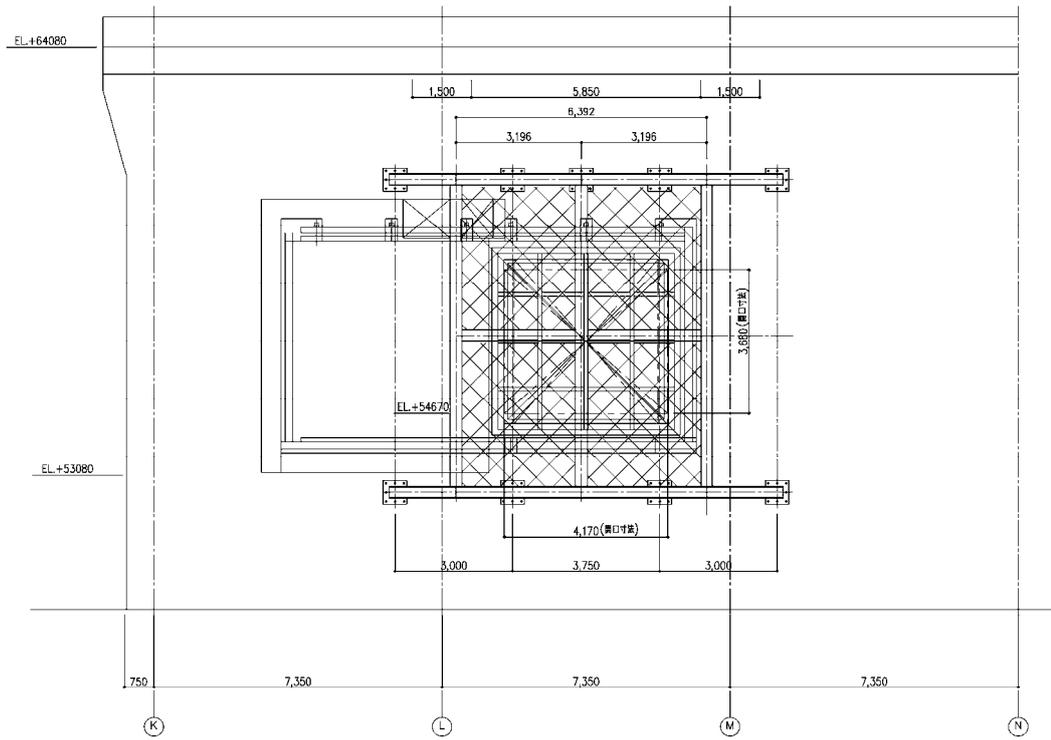


図 2-6 防護ネットの割付展開図
(中央制御室換気系冷凍機巻防護対策施設)



図 2-7 防護ネットの割付展開図
(海水ポンプエリア竜巻防護対策施設配置図)



：防護ネット

数字は、後段の評価における整理番号を示す。

防護ネットフレーム割付図

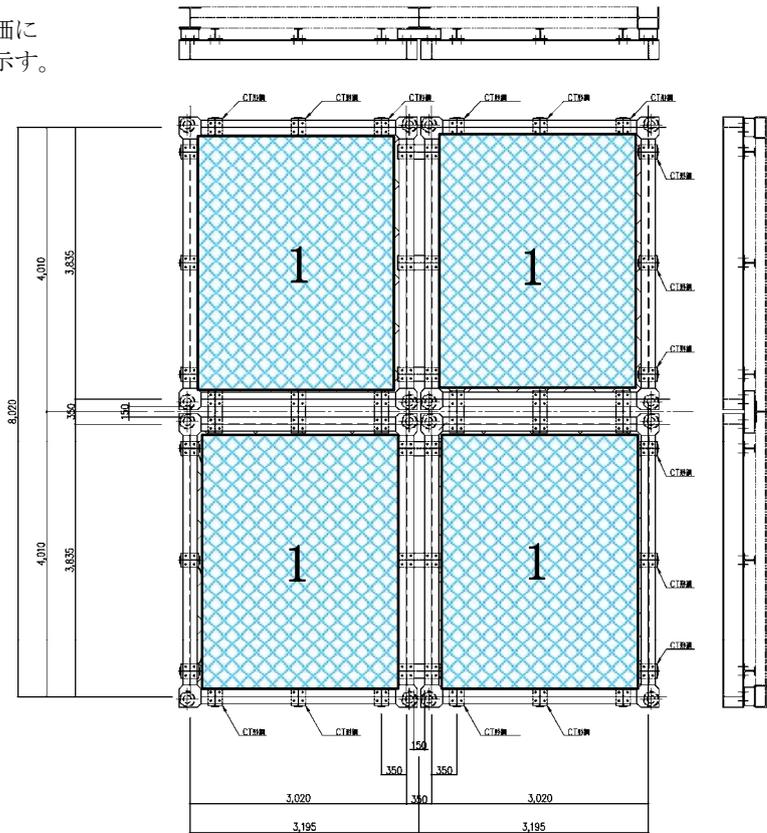


図 2-8 防護ネットの割付展開図

(原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設)

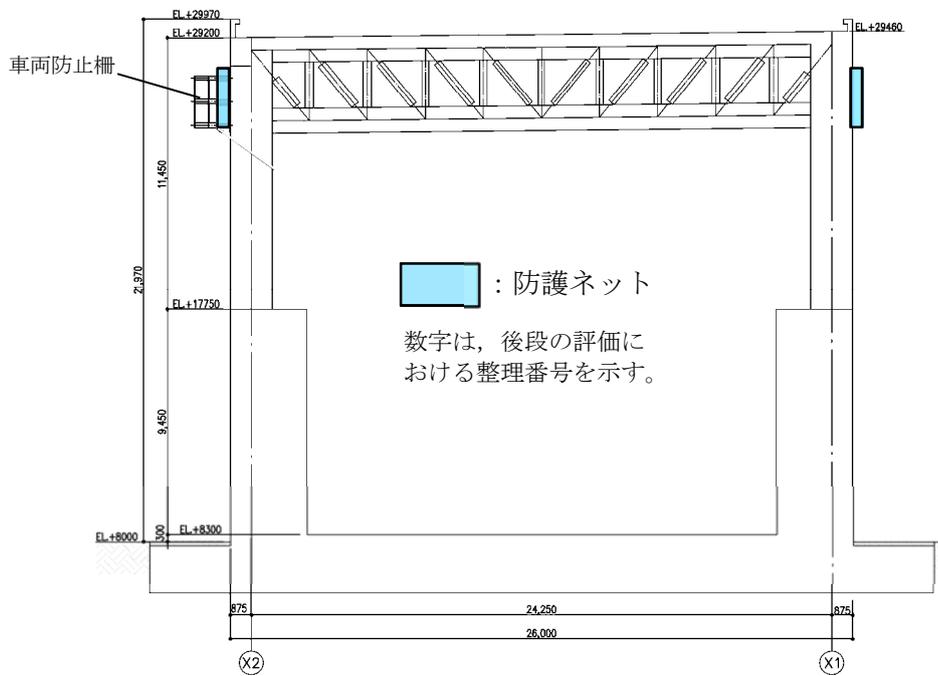
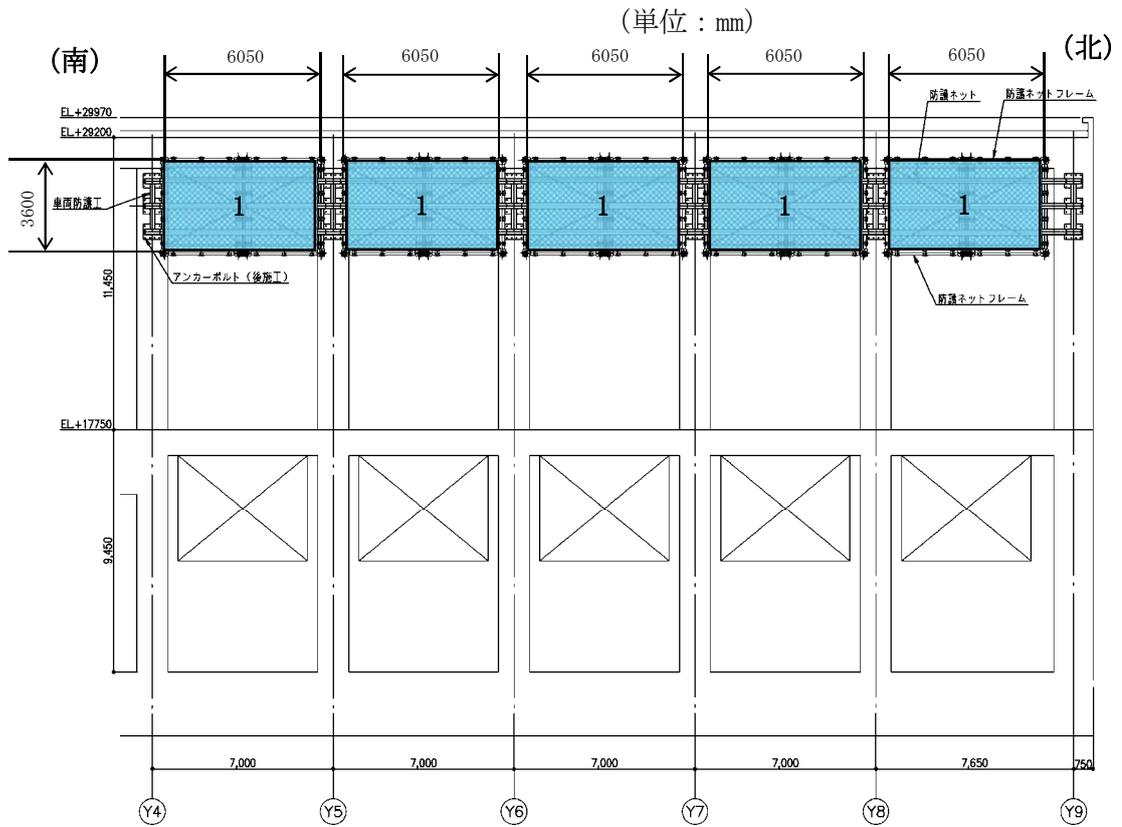


図 2-9 防護ネットの割付展開図
(使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設)

2.2 構造概要

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

防護ネットは、ネット、ワイヤロープ、接続治具（支持部、固定部）及び鋼製枠から構成され、原子炉建屋及び海水ポンプ室周り及び使用済燃料乾式貯蔵建屋外壁に設置する。防護ネットは、外部事象防護対象施設又は開口部周辺に設置した架構に接続ボルト等を用いて取付けられ、架構は基礎若しくは建屋の床及び壁により支持される。

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

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

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

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

防護ネットの概要図を図 2-9 に示す。

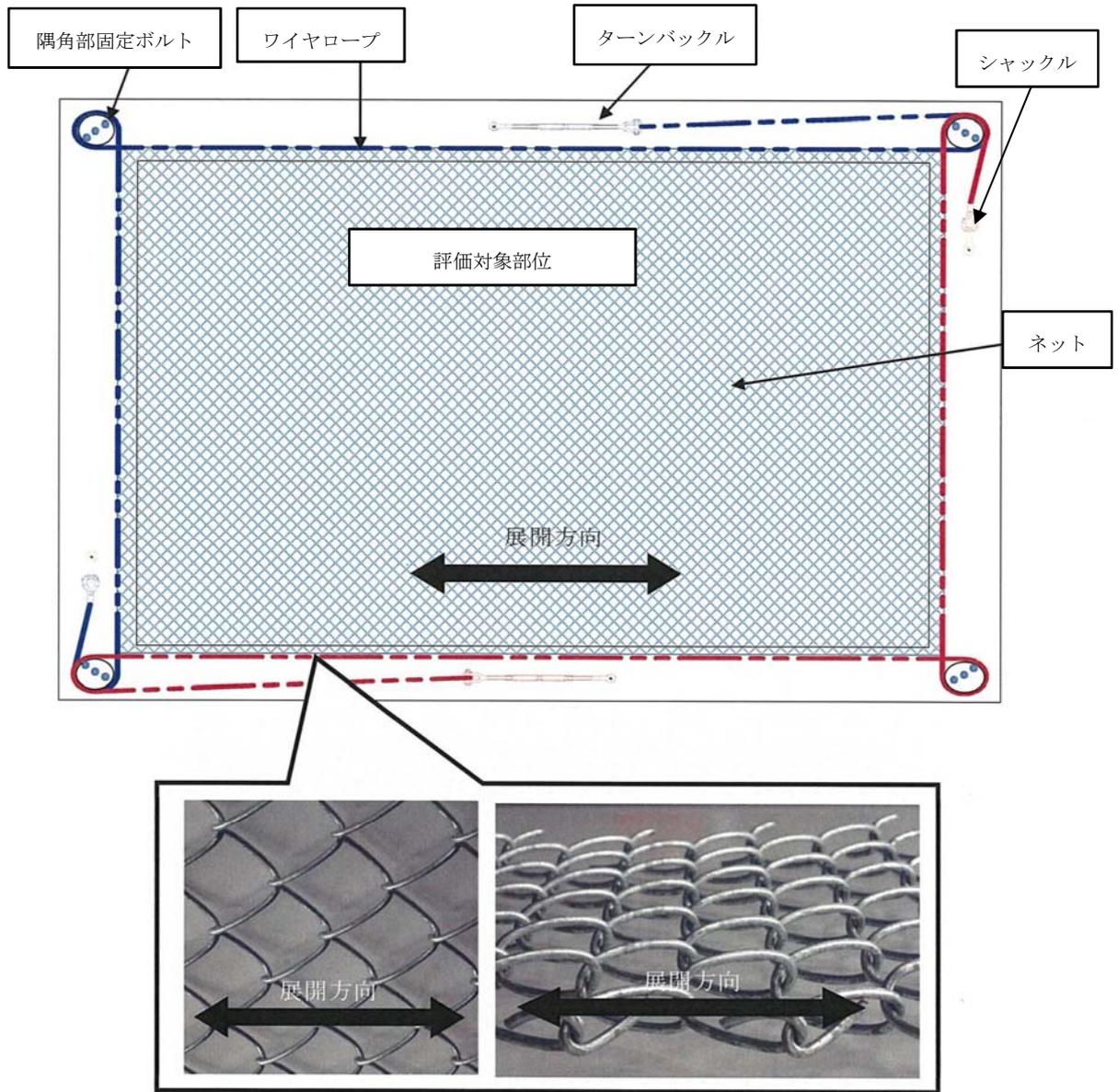


図 2-9 防護ネットの概要図

2.3 評価方針

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

防護ネットの評価フローを図 2-10 に示す。

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

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

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

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

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

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

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

ネットの等価剛性については、電中研にて複数回実施している衝撃引張試験の結果から算出する。等価剛性の算出の方法を考慮し、ネットの吸収エネルギー評価及び防護ネットのたわみ評価において、評価における係数を設定する。係数の設定については、「3.4 許容限界」に示す。

ネット評価の考慮事項の選定について、表 2-1 に示す。

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

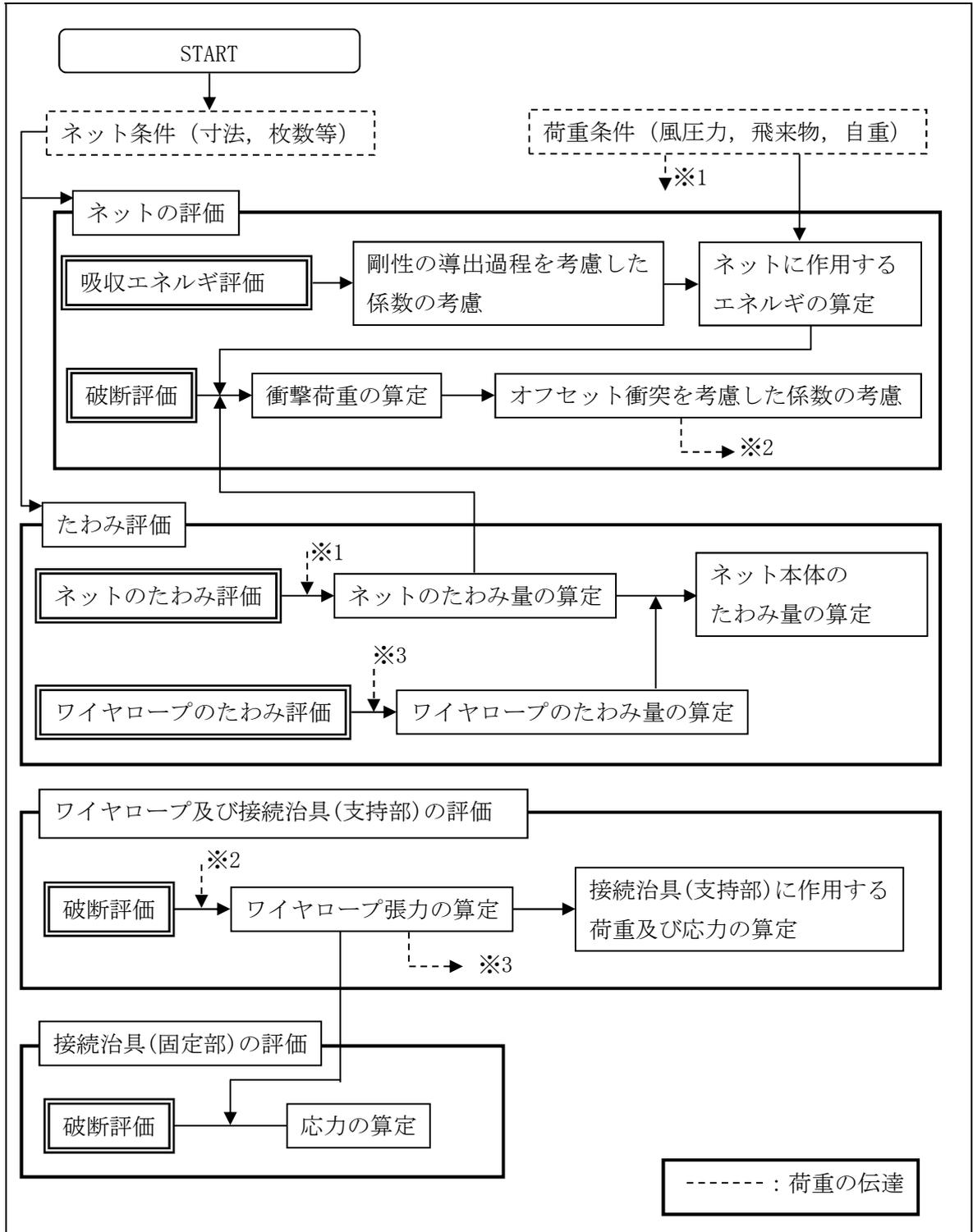


図 2-10 防護ネットの評価フロー

表 2-1 ネット評価の考慮事項の選定

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

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・日本工業規格(J I S)
- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 J S M E S N C 1-2005/2007」
((社) 日本機械学会 (以下「J S M E」という。))
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1・補-1984」 (社) 日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987」 (社) 日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」 (社) 日本電気協会
- ・「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—」 (社) 日本建築学会(2005)
- ・「建築物荷重指針・同解説」 (社) 日本建築学会(2004 改定)
- ・「小規模吊橋指針・同解説」 (社) 日本道路協会

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 防護ネット

a. 吸収エネルギー評価

吸収エネルギー評価に用いる記号を表 3-1 に示す。

表 3-1 吸収エネルギー評価に用いる記号(1/2)

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

表 3-1 吸収エネルギー評価に用いる記号(2/2)

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

b. 破断評価

破断評価に用いる記号を表 3-2 に示す。

表 3-2 破断評価に用いる記号(1/2)

記号	単位	定義
a_w	mm	取付けプレート溶接部ののど厚
A_b	mm ²	ボルト呼び径断面積
C_c	—	ワイヤグリップの効率
E_t	kJ	ネット設置枚数nを考慮したネットに作用する全外力エネルギー
F_1	kN	設計飛来物衝突時のネットの許容荷重 (ネット1目合いの破断荷重)
F_2	kN	設計飛来物衝突時にネット目合い1箇所が受ける衝撃荷重の最大値
F_3	kN	ワイヤロープ破断荷重 (JIS規格値)
F_a	kN	設計飛来物衝突時にネットが受ける最大衝撃荷重
F_a'	kN	設計飛来物衝突時にネットが受けるオフセット衝突を加味した最大衝撃荷重
F_p	kN	ワイヤロープにより接続用の治具 (支持部) に作用する荷重
F_{p1}	kN	設計飛来物がネットに衝突する際に1本目のワイヤロープから隅角部へ作用する合成荷重
F_{p2}	kN	設計飛来物がネットに衝突する際に2本目のワイヤロープから隅角部へ作用する合成荷重
F_x	kN	設計飛来物がネットに衝突する際ワイヤロープから隅角部へ作用するX方向の合成荷重
F_y	kN	設計飛来物がネットに衝突する際ワイヤロープから隅角部へ作用するY方向の合成荷重

表 3-2 破断評価に用いる記号(2/2)

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

c. たわみ評価

たわみ評価に用いる記号を表 3-3 に示す。

表 3-3 たわみ評価に用いる記号(1/2)

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

表 3-3 たわみ評価に用いる記号(2/2)

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

3.2 評価対象部位

(1) 防護ネット

a. ネット

ネットの評価対象部位は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.1 防護ネットの許容限界」にて示している評価対象部位を踏まえて、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

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

b. ワイヤロープ

ワイヤロープの評価対象部位は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.1 防護ネットの許容限界」にて示している評価対象部位を踏まえて、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

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

c. 接続治具（支持部）

接続治具（支持部）の評価対象部位は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.1 防護ネットの許容限界」にて示している評価対象部位を踏まえて、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

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

d. 接続治具（固定部）

接続治具（固定部）の評価対象部位は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.1 防護ネットの許容限界」にて示している評価対象部位を踏まえて、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

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

アイプレートは、プレート本体、プレートと鋼製枠の溶接部、プレートとリブの溶接部

及びリブと鋼製枠の溶接部と評価部位があるが、評価上溶接線が最も短いリブと鋼製枠の溶接部を評価対象部位とする。

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

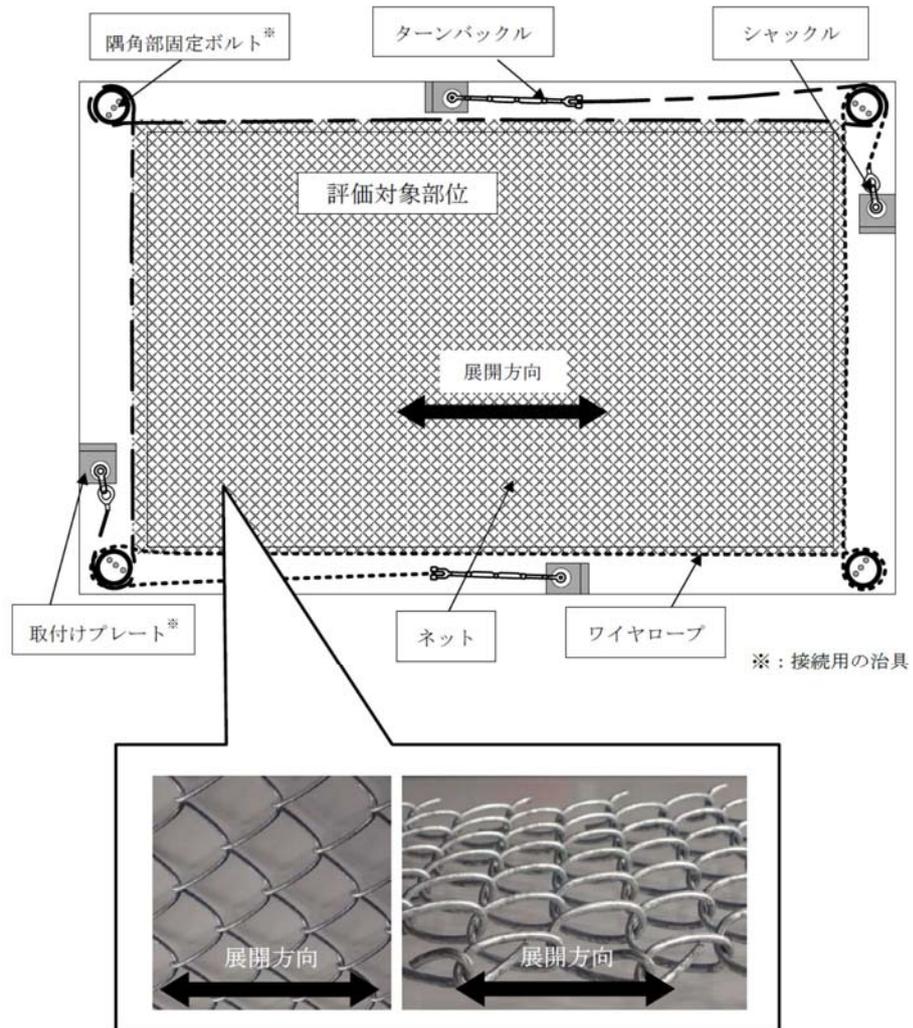


図 3-1 ネットの評価対象部位

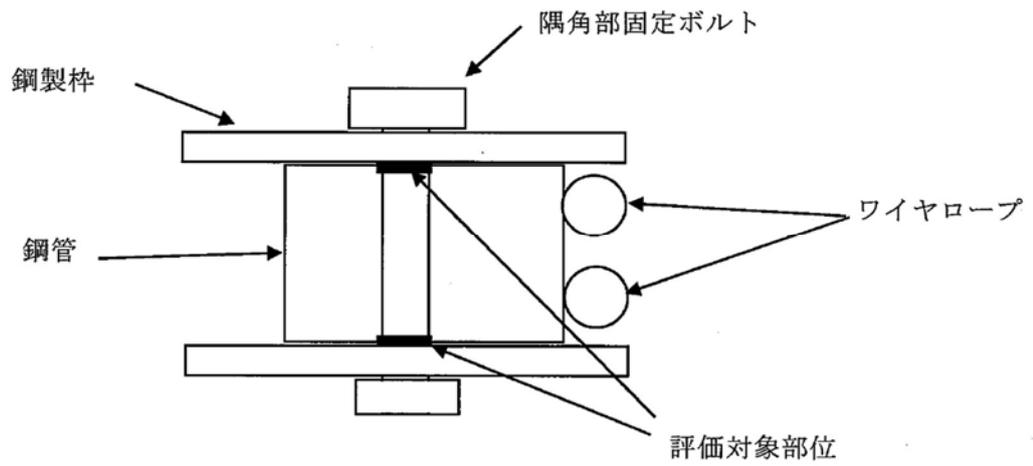


図 3-2 隅角部固定ボルトの評価対象部位

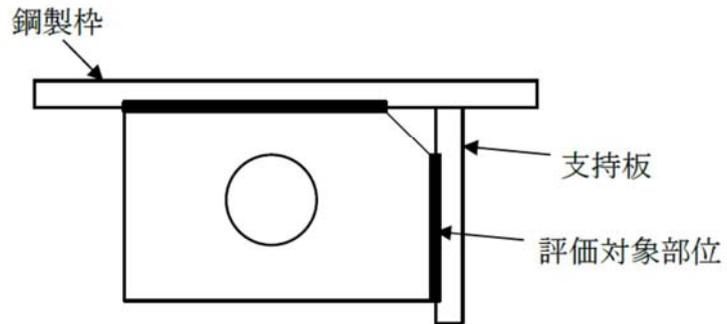


図 3-3 ワイヤロープの取付けプレート(溶接部)の評価対象部位

3.3 荷重及び荷重の組合せ

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

(1) 荷重の設定

a. 常時作用する荷重

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

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

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

b. 設計竜巻による荷重

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

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

表 3-4 設計竜巻による荷重の算定に用いる竜巻の特性値

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

(a) 風圧力による荷重(W_w)

風圧力による荷重 W_w は、次式により算定する。

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

設計用速度圧 q は、次式により算定する。

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

(b) 飛来物による衝撃荷重

破断評価においては、飛来物による衝撃荷重は以下のとおり算出する。

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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} Q \cdot t_1^2 &= 2m \cdot V_1 \\ \delta &= -\frac{Q \cdot t_1^3}{6m} + V_1 t_1 \quad \dots \textcircled{4} \end{aligned}$$

上記2式を連立し、

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

よって、

$$t_1 = \frac{3}{2V_1} \delta \quad \dots \textcircled{5}$$

以上より、時間 t_1 における衝撃荷重 F_a は式①及び④より、

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

さらに、式⑤と連立し、

$$F_a = \frac{4m V_1^2}{3 \cdot \delta} \quad \dots \textcircled{6}$$

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

$$E_f = \frac{1}{2} m V_1^2 \quad \dots \textcircled{7}$$

従って、式⑥及び⑦より、

$$F_a = \frac{8 E_f}{3 \cdot \delta} \quad \dots \textcircled{8}$$

(2) 荷重の組合せ

a. ネット

(a) ネット

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

(b) ワイヤロープ及び接続治具（支持部）

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

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

(c) 接続治具（固定部）

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

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

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

表 3-5 吸収エネルギー評価における荷重及びその組合せ

ネット		考慮する荷重		
		常時作用する荷重	飛来物による衝撃荷重	風圧力による荷重
<ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋（ディーゼル発電機室屋上，原子炉棟外壁及び付属棟屋上） 海水ポンプ室周り 使用済燃料乾式貯蔵建屋外壁 	水平	○ (自重+上載荷重)	○	—
	側面	—	○	○

<凡例> ○：考慮する，—：考慮しない

表 3-6 破断評価における荷重及びその組合せ(2/2)

設置エリア		評価対象部位	考慮する荷重		
			常時作用する荷重	飛来物による衝撃荷重	風圧力による荷重
<ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋（ディーゼル発電機室屋上，原子炉棟外壁及び付属棟屋上） 海水ポンプ室周り 使用済燃料乾式貯蔵建屋外壁 	水平	ネット	○ (自重+上載荷重)	○	—
		ワイヤロープ	○ (自重+上載荷重)	○	—
	側面	ネット	—	○	○
		ワイヤロープ	—	○	○

<凡例> ○：考慮する，—：考慮しない

3.4 許容限界

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

吸収エネルギー評価、破断評価及びたわみ評価の許容限界を以下に示す。

(1) 吸収エネルギー評価

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

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

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

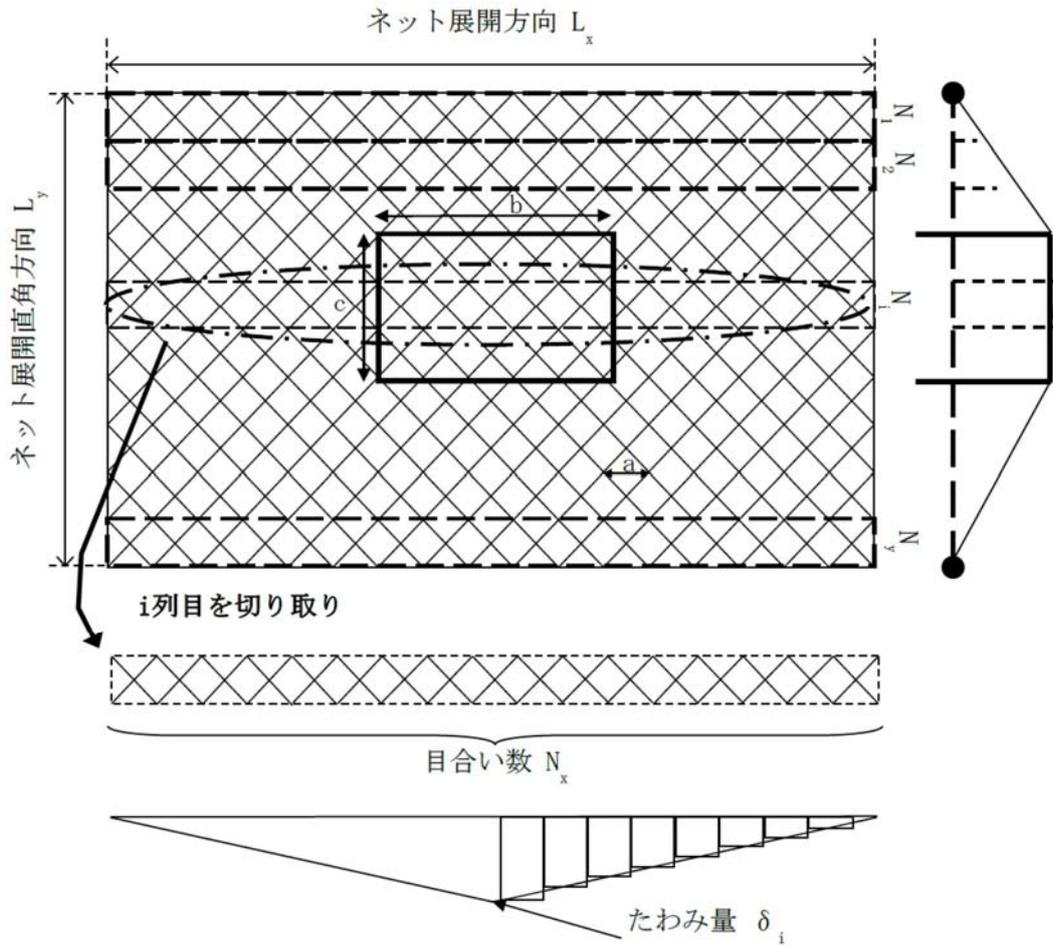


図 3-4 限界吸収エネルギー評価におけるネットのモデル図

図 3-4 に示すとおりネットの展開方向に 1 目合いごとに \square で囲った形に帯状に分割し、 N_1 から N_y までの各列が分担するエネルギーを各列のたわみ量から算定し、それらを積算することによりネットの吸収するエネルギーを算出し、ネットが吸収可能な限界吸収エネルギーを算出する。

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

$$\text{ネット展開直角方向目合い列数} = c / a$$

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

吸収エネルギー評価の許容限界の算定フローを図 3-5 に示す。

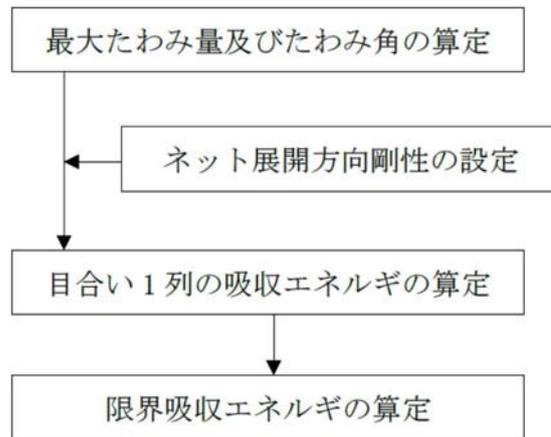
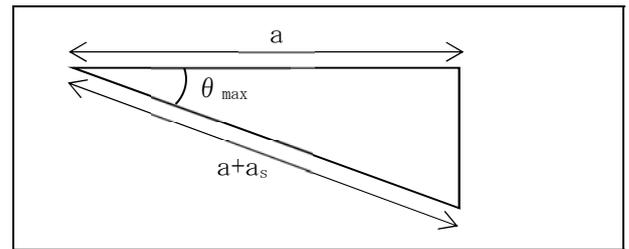


図 3-5 吸収エネルギー評価の許容限界の算定フロー

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

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

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



ネットを構成するネットの展開方向の目合い数 N_x は、ネット展開方向寸法 L_x 及びネット 1 目合いの対角寸法 a から求める。展開直角方向の目合い数 N_y は、ネット展開直角方向寸法 L_y 及びネット 1 目合いの対角寸法 a から求める。ネットを構成する 1 目合いはそれぞれ K の等価剛性を持っているため、1 列当たりバネ定数 K を持つバネを N_x 個直列に接続したものと考えることができる。そのため、1 列当たりの剛性 K'_x は

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

ネット展開方向剛性

$$K'_x = \frac{K}{N_x}$$

となる。ただし、 N_x 、 N_y の算出において限界吸収エネルギーの値が小さくなるように N_x は保守的に切り上げ、 N_y は保守的に切り捨てた値を用いる。なお、電中研報告書によると補助金網は主金網 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、補助金網は 0.5 枚として考慮し、ネット設置枚数を考慮したネット展開方向剛性 K_x は、次式により算出される。

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

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

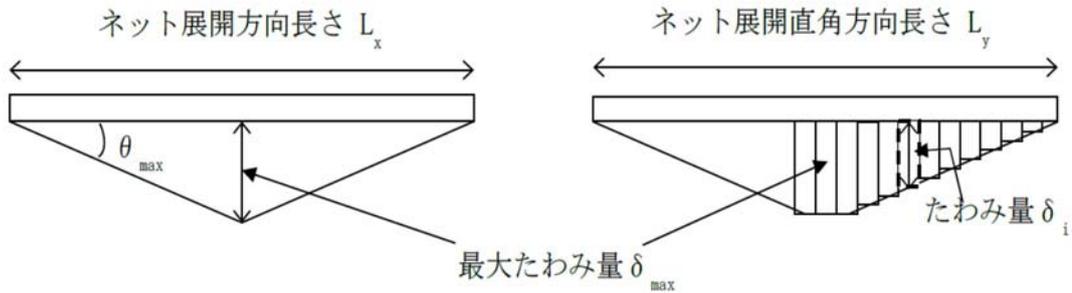


図 3-6 最大たわみ量と最大たわみ角

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

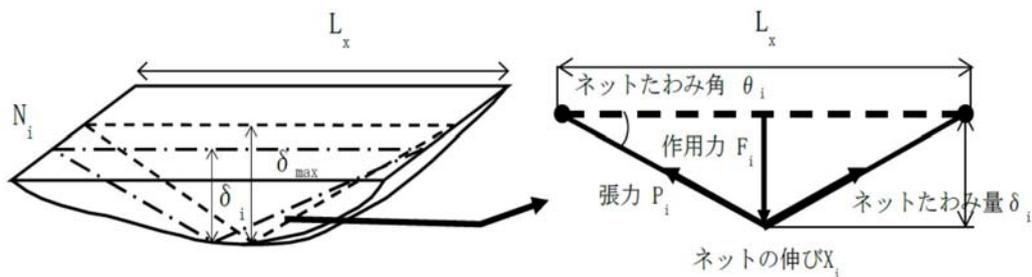


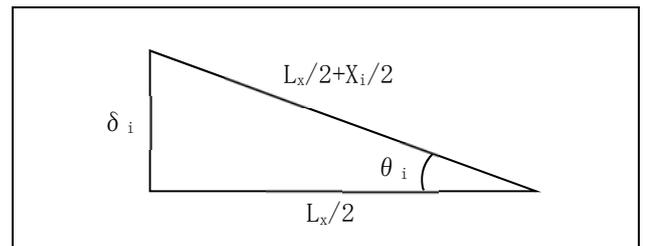
図 3-7 ネットに作用する力のつり合い

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

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

となる。また、作用力 F_i は変位量とたわみ量の関係から、

$$\begin{aligned} F_i &= 2P_i \sin \theta_i \\ &= 2K_x X_i \sin \theta_i \\ &= 2K_x L_x (\tan \theta_i - \sin \theta_i) \\ &= 4K_x \delta_i \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2}} \right) \dots \textcircled{9} \end{aligned}$$



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。

$$\begin{aligned}
 E_i &= \int_0^{\delta_i} F_i d\delta_i \\
 &= \int_0^{\delta_i} 4K_x \delta_i \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2}} \right) d\delta_i \\
 &= 2K_x \delta_i^2 - K_x L_x \left(\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \dots \textcircled{10}
 \end{aligned}$$

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。

$$\begin{aligned}
 E_{max} &= \sum_{i=1}^{N_y} E_i \\
 &= \sum_{i=1}^{N_y} \left\{ 2K_x \delta_i^2 - K_x L_x \left(\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \right\} \dots \textcircled{11}
 \end{aligned}$$

(2) 破断評価

a. ネット

破断評価においては、計算により算出するネットに作用する荷重がネットの素材の持つ破断強度以下であることにより、ネットに破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を有することを確認する。防護ネットは、飛来物の衝突に対し、塑性変形することでエネルギーを吸収し、飛来物を捕捉することから、ネット目合いの破断試験結果を安全側に整理したものを許容限界とする。具体的には、ネット目合いに作用する引張荷重を算出するため、電中研報告書を参照してネット目合いの引張試験に基づいた 1 交点当たりの破断荷重、飛来物衝突時の周辺の交点数及び防護ネットの設置枚数から、防護ネットの許容引張荷重を算出する。

表 3-7 にネットの破断評価の許容限界を示す。

表 3-7 ネットの破断評価の許容限界

評価対象部位	許容限界
ネット	F_1

b. ワイヤロープ

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

表 3-8 ワイヤロープの破断評価の許容限界

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

c. 接続治具（支持部）

ターンバックル及びシャックルは、破断しなければネットを設置位置に保持することができ、飛来物を捕捉可能である。したがって、ワイヤロープの張力に対し、設計荷重が十分な裕度を有していることを確認する。ターンバックルについては、破断荷重よりも保守的な値である、規格値を 1.5 倍した値を許容限界として表 3-9 のように設定する。シャックルについては、試験結果を踏まえたメーカー保証値として、規格値を 2 倍した値を許容限界として設定する。

表 3-9 ターンバックル及びシャックルに適用する許容限界

評価対象部位	規格値	許容限界
ターンバックル	86.8 kN	130.2 kN
シャックル	78.4 kN	156.8 kN

d. 接続治具（固定部）

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

隅角部固定ボルトに適用する許容限界を表 3-10 に示す。

表 3-10 隅角部固定ボルトに適用する許容限界

評価対象部位	材質	温度 (°C)	考慮すべき 損傷モード	許容応力 (MPa)
隅角部固定ボルト	SCM435	40 (注1)	せん断	1.5 f_s^* (注2)
アイプレート溶接部	SM490A (注3)			

(注1) 各評価対象部位の最高使用温度を示す。

(注2) f_s^* : 許容せん断応力

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

(注3) 母材であるアイプレートの材質

(3) たわみ評価

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

表 3-11 に防護ネットのたわみ評価の許容限界を示す。

表 3-11 防護ネットのたわみ評価の許容限界

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

3.5 評価方法

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

・アスペクト比の取扱い

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

アスペクト比が 1:1 より小さな場合の評価方法を表 3-12、アスペクト比が 2:1 より大きな場合の評価方法を表 3-13 に示す。

表 3-12 アスペクト比が 1:1 より小さな場合の評価方法

評価項目	吸収エネルギー	破断	たわみ
評価区画イメージ			

表 3-13 アスペクト比が 2:1 より大きな場合の評価方法

評価項目	吸収エネルギー	破断	たわみ
評価区画イメージ	<p>限界吸収エネルギー量が小さくなるようにアスペクト比を設定</p>	<p>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>

・飛来物の衝突位置の影響

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

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

破断評価においては、中央位置への衝突に対してオフセット位置への衝突では、その移動距離が短くなることから、式⑧から中央位置衝突時よりもオフセット位置衝突時の方が作用する荷重が大きくなることを踏まえ、作用する荷重が大きくなるように、中央位置衝突時とオフセット位置衝突時の移動距離を踏まえた係数を作用する荷重に乗じる。ただし、ネット端部近傍に衝突する場合には、飛来物は傾き、飛来物の側面がネットや架構に接触すると考えられ、衝撃荷重は小さくなる。

たわみ評価においては、ネットの全長が飛来物の衝突位置によらず、ネット最大たわみ

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

(1) 吸収エネルギー評価

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

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

式⑩より、 E_{max} は以下のとおりである。

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

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

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

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

但し、 $F_w = P_w + W_w$

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

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

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 は、衝突時の設計飛来物の運動エネルギーとして、以下より求められる。

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

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

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

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

(2) 破断評価

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

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

・オフセット衝突を考慮する係数

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

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

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

a. ネット

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

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

ネットの破断評価の評価フローを図 3-8 に示す。

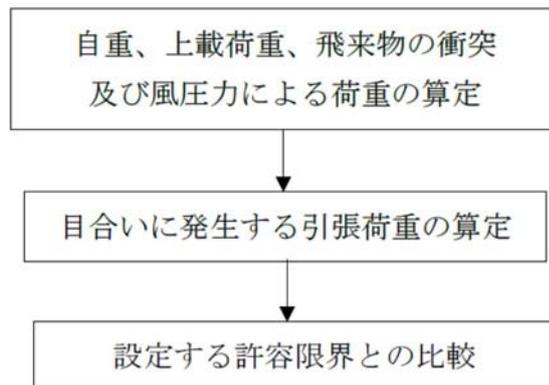


図 3-8 ネットの破断評価フロー

(a) 評価モデル

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

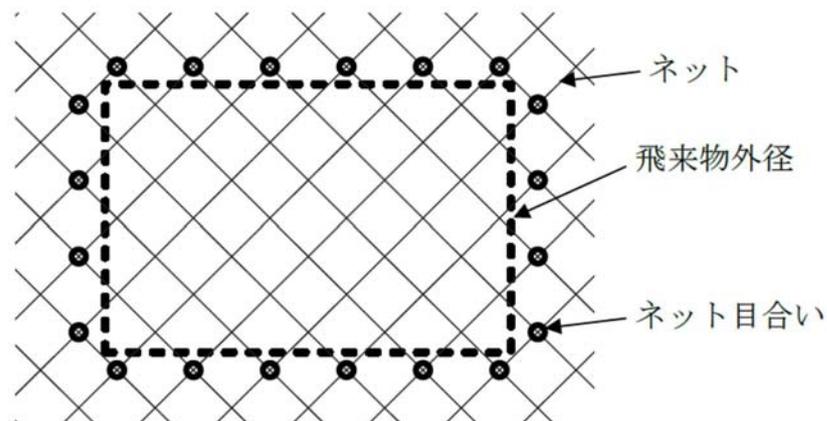


図 3-9 破断評価モデル

(b) 評価方法

ネットに飛来物が衝突した際に生じる衝撃荷重が、ネットの破断荷重以下であり、ネット目合いに破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を有することを確認する。

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

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

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

となる。

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

荷重の最大値 F_a' は

$$F_a' = F_a \times 1.22$$

と算出される。

b. ワイヤロープ

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

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

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

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

但し、 θ は以下の式で求められる。

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

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

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

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の最大値 T_1' は、

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

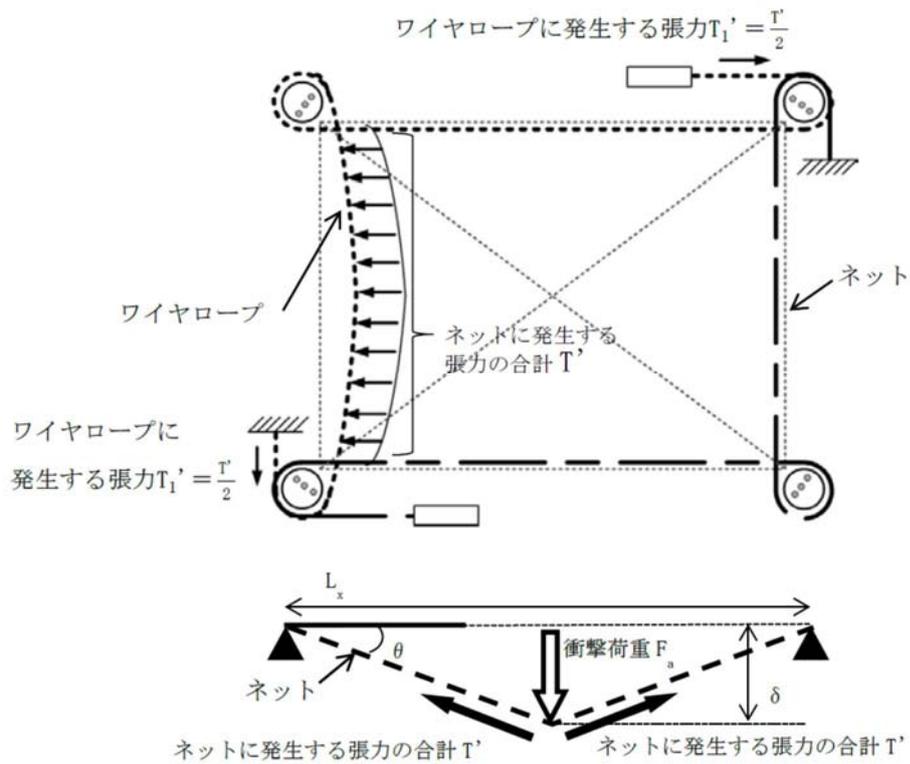


図 3-10 ネット及びワイヤロープに発生する力のつり合い(ネット平面図及び断面図)

c. 接続治具（支持部）

(a) ターンバックル

ターンバックルの評価については、以下の評価を実施する。

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

(b) シャックル

シャックルの評価については、以下の評価を実施する。

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

d. 接続治具（固定部）

(a) 隅角部固定ボルト

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

ここで、ワイヤロープはたわみにより鋼管に対して θ_{w1} 、 θ_{w2} のたわみ角を有することから、隅角部固定ボルトへ作用する荷重にはこのたわみ角を考慮する。

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

ネットのたわみとワイヤロープのたわみ角の関係を図 3-11 に示す。

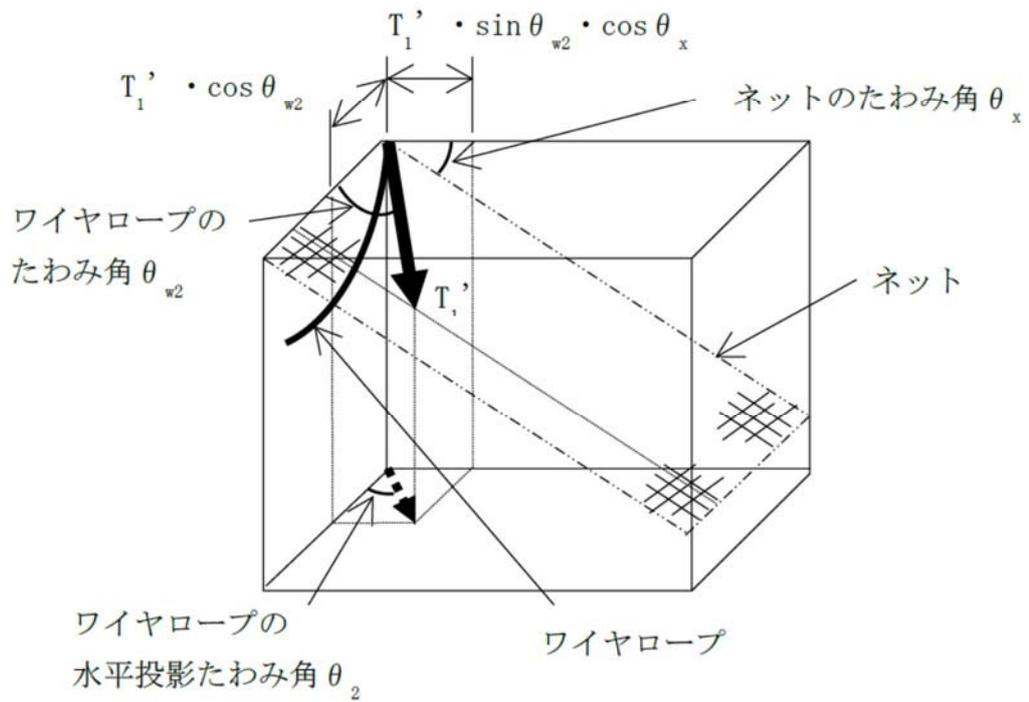
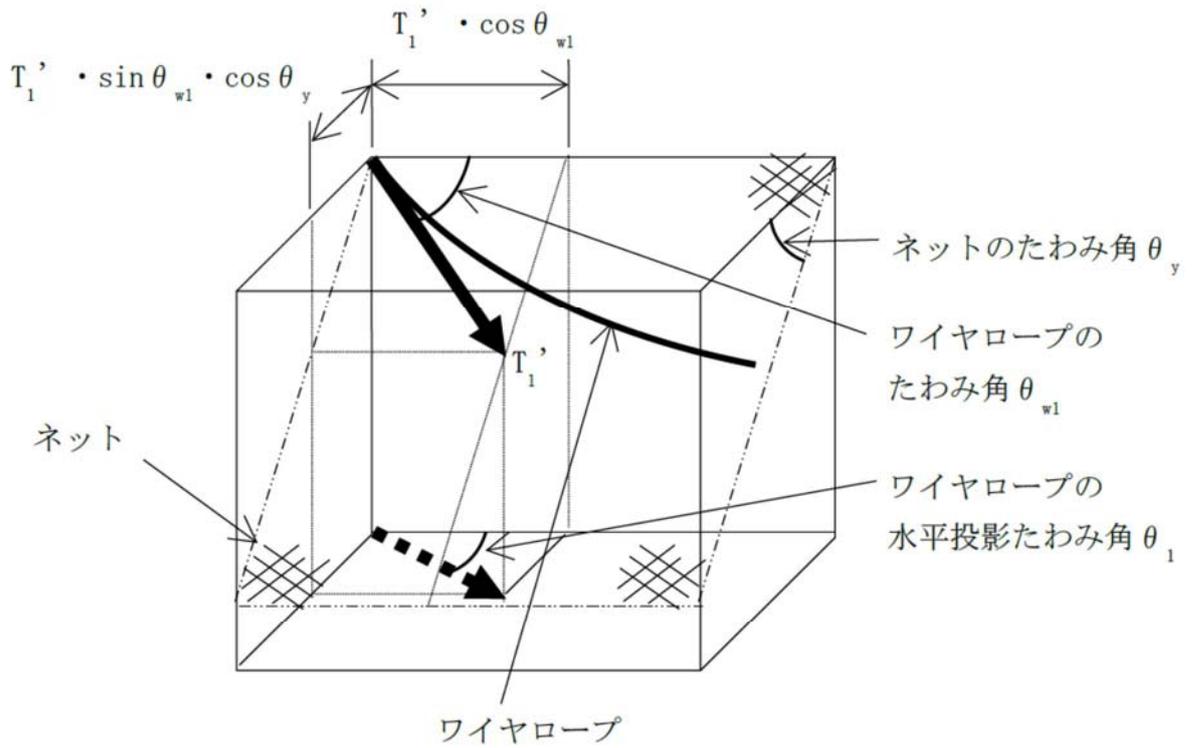


図 3-11 ネットのたわみとワイヤロープのたわみ角の関係

隅角部固定ボルトの荷重状態を図 3-12 に示す。

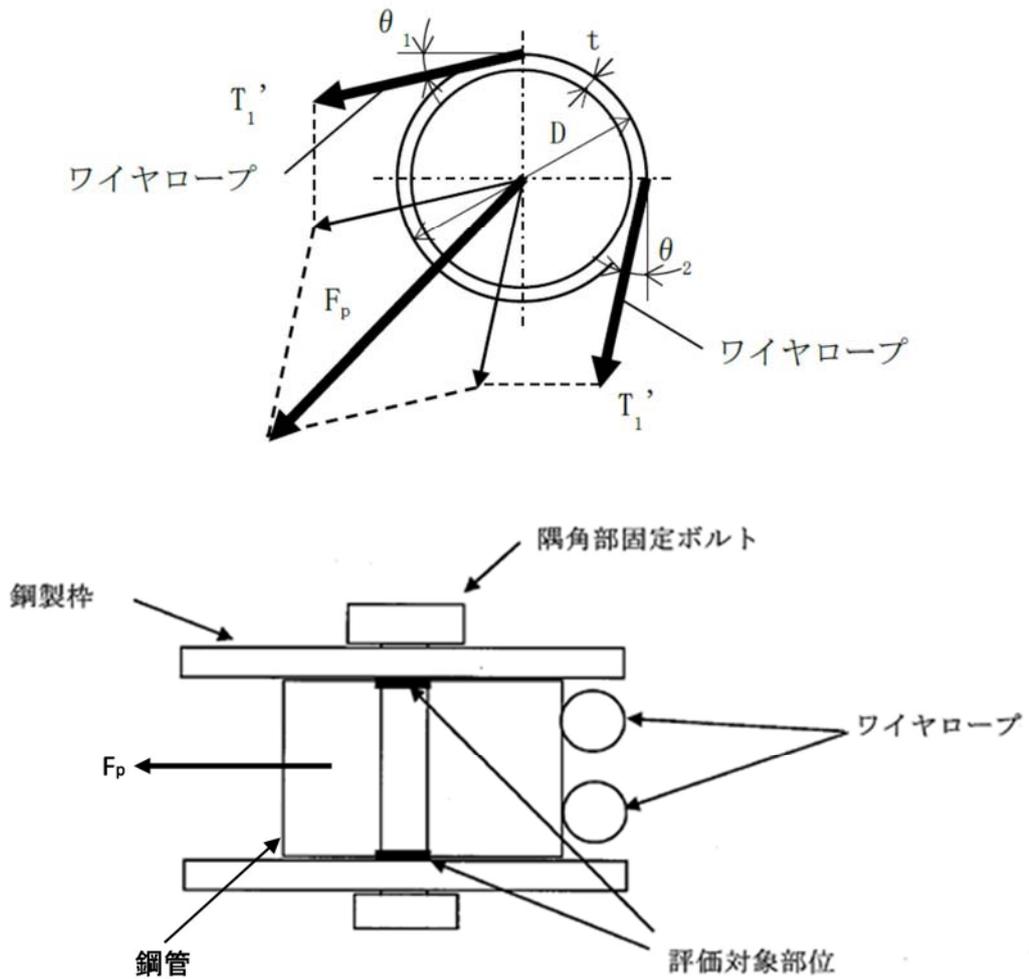


図 3-12 隅角部固定ボルトの荷重状態

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

$$T_x = T_1' \cos \theta_{w1}$$

$$T_y = T_1' \sin \theta_{w1} \cdot \cos \theta_y$$

ただし、 θ_y 、 θ_{w1} は以下の式で求められる。

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

$$\theta_{w1} = \cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{1 + 16 \left(\frac{\delta_{wx}}{L_x} \right)^2}}$$

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。

$$T_x' = T_1' \sin \theta_{w2} \cdot \cos \theta_x$$

$$T_y' = T_1' \cos \theta_{w2}$$

ただし、 θ_x 、 θ_{w2} は以下の式で求められる。

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

$$\theta_{w2} = \cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{1 + 16 \left(\frac{\delta_{wy}}{L_y} \right)^2}}$$

隅各部へ作用するX方向及びY方向への合成荷重は

$$F_x = T_x + T_x'$$

$$F_y = T_y + T_y'$$

より求まる。

1本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 τ_s は、

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

e. アイプレート

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

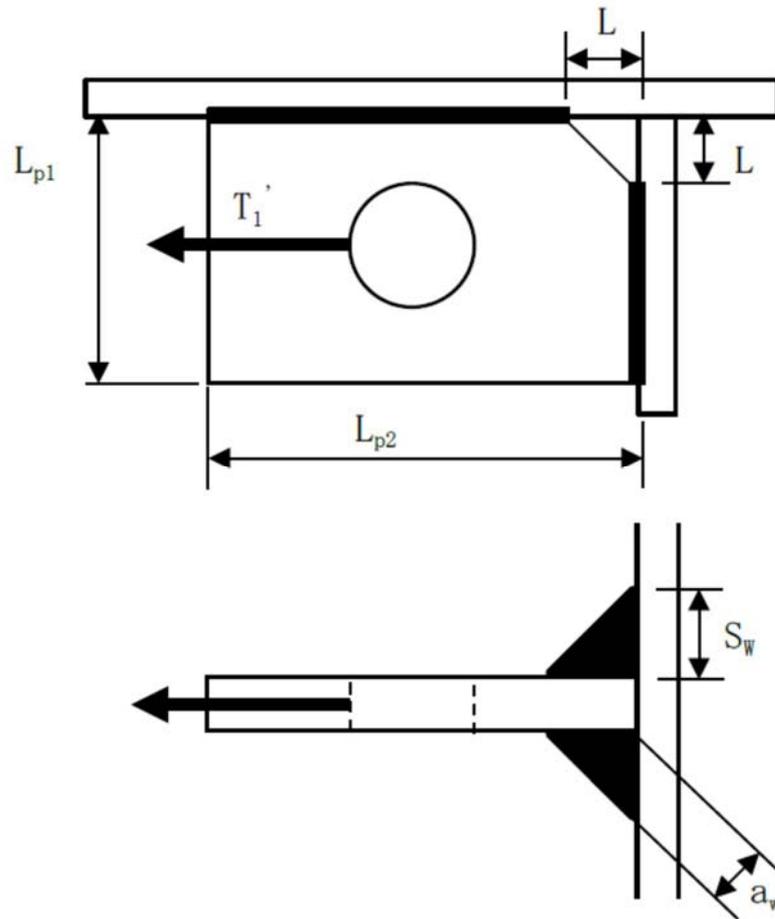


図 3-13 アイプレート溶接部

溶接部の有効脚長 L_{pw} は、

$$L_{pw} = L_{p1} - L - 2S_w + L_{ps} - L - 2S_w$$

溶接部に発生するせん断応力 τ_w は、

$$\tau_w = \frac{T_1'}{2 a_w L_{pw}}$$

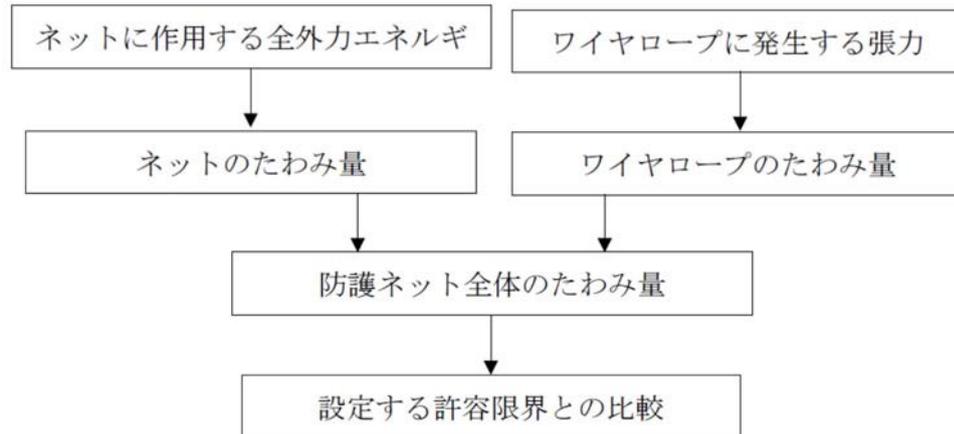
ここで溶接部ののど厚 a_w は以下の式で求められる。

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

(3) たわみ評価

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

たわみ評価の評価フローを図 3-14 に示す。



第 3-14 図 たわみ評価の評価フロー

a. ネット

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

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

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. ワイヤロープたわみ量を含めた防護ネット全体のたわみ量の算出

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

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

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

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

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

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

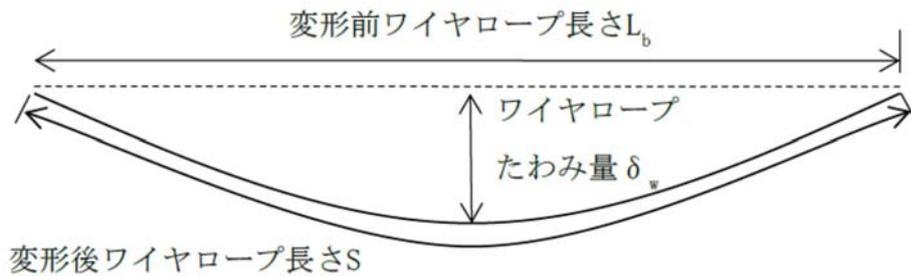


図 3-15 ワイヤロープ変形図

ワイヤロープたわみ量を含めた防護ネット全体のたわみ量 δ_t の算出を行う。ネット及びワイヤロープ変形図を図 3-16 に示す。

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

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

と表される。

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

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

と表される。

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

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

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

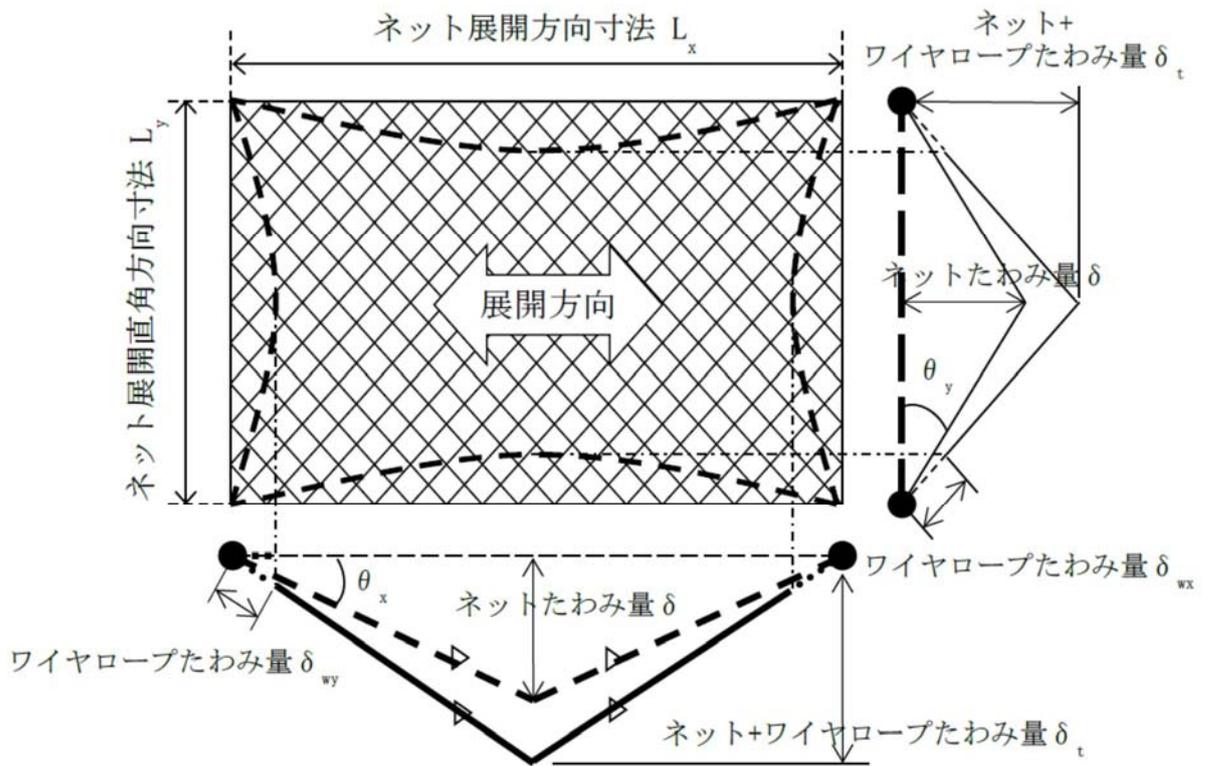


図 3-16 ネット及びワイヤロープ変形図

4. 評価条件

4.1 荷重条件

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

表 4-1 飛来物による衝撃荷重の算定条件

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

表 4-2 風圧力による荷重の算定条件

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

4.2 防護ネット仕様

(1) ネット仕様

ネット仕様を表 4-3 に示す。

表 4-3 ネット仕様

項目	記号	仕様	備考
ネット材料	-	硬鋼線材 (JIS G 3548)	—
ネット目合い寸法	-	40 mm	電中研レポート より
ネット1目合いの対角寸法	a	56.6 mm	
ネット1目合いの破断変位	a _s	13.9 mm	
ネット素線の直径	d'	4 mm	
ネット1目合いの破断荷重	F ₁	17.2 kN	
ネット1目合いの等価剛性	K	1239 kN/m	
衝突箇所周辺の ネット1枚当たりの目合い数	n ₁	20 個	
ネットの素線の引張強度	σ'	1400 MPa	
破断時たわみ角	θ _{max}	36.4 deg	
ネットの単位面積当たりの質量	m _N	5.7 kg/m ²	
ネットの充実率	φ	0.44(3枚 ^{※2})	計算値 ^{※1}

※1 φ = 1 - ((ネット目合い寸法)² / (ネット目合い寸法 + ネット素線径)²)ⁿ

※2 補助金網を含む

(2) 防護ネット構成

a. 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

非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設の防護ネットの構成を表 4-4 に示す。

表 4-4 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設の防護ネットの構成

No.	ネットサイズ (m)			ネット枚数
	L _x	×	L _y	
1	4.100	×	2.585	2 枚 (1 枚)
2	3.680	×	3.130	2 枚 (1 枚)
3	5.030	×	2.455	2 枚 (1 枚)
4	5.030	×	2.727	2 枚 (1 枚)
5	4.947	×	3.005	2 枚 (1 枚)
6	4.947	×	2.427	2 枚 (1 枚)

b. 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設の防護ネットの構成を表 4-5 に示す。

表 4-5 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設の防護ネットの構成

No.	ネットサイズ (m)			ネット枚数
	L _x	×	L _y	
1	2.880	×	2.380	2 枚 (1 枚)
2	3.055	×	2.380	2 枚 (1 枚)
3	3.130	×	2.880	2 枚 (1 枚)
4	3.130	×	3.055	2 枚 (1 枚)
5	3.160	×	2.880	2 枚 (1 枚)
6	3.160	×	3.055	2 枚 (1 枚)
7	5.230	×	2.880	2 枚 (1 枚)
8	5.230	×	3.055	2 枚 (1 枚)

() 内は補助金網

c. 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

海水ポンプエリア竜巻防護対策施設の防護ネットの構成を表 4-6 に示す。

表 4-6 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設の防護ネットの構成

No.	ネットサイズ (m)			ネット枚数
	L _x	×	L _y	
1	3.87	×	3.02	2 枚 (1 枚)
2	3.87	×	3.07	2 枚 (1 枚)
3	3.49	×	3.02	2 枚 (1 枚)
4	3.49	×	3.07	2 枚 (1 枚)
5	3.57	×	3.02	2 枚 (1 枚)
6	3.57	×	3.07	2 枚 (1 枚)
7	4.78	×	3.46	2 枚 (1 枚)
8	4.78	×	3.57	2 枚 (1 枚)
9	3.32	×	3.13	2 枚 (1 枚)
10	3.52	×	3.13	2 枚 (1 枚)

() 内は補助金網

d. 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設

原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設の防護ネットの構成を表 4-7 に示す。

表 4-7 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設の防護ネットの構成

No.	ネットサイズ (m)			ネット枚数
	L _x	×	L _y	
1	3.665	×	2.850	2 枚 (1 枚)

() 内は補助金網

e. 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の防護ネットの構成を表 4-8 に示す。

表 4-8 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の防護ネットの構成

No.	ネットサイズ (m)			ネット枚数
	L _x	×	L _y	
1	3.430	×	2.673	2枚 (1枚)

() 内は補助金網

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

a. ワイヤロープ

ワイヤロープの仕様を表 4-9 に示す。

表 4-9 ワイヤロープの仕様

評価対象部位	仕様	径	破断荷重 (kN)	ワイヤグリップ効率
ワイヤロープ	7×7	φ16	165	0.8

(注1) J I S G 3549の破断強度

(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」

b. ターンバックル

ターンバックルの仕様を表 4-10 に示す。

表 4-10 ターンバックルの仕様

評価対象項目	規格値	許容限界
ターンバックル	86.8 kN	130 kN

c. シャックル

シャックルの仕様を表 4-11 に示す。

表 4-11 シャックルの仕様

評価対象項目	規格値	許容限界
シャックル	78.4 kN	156 [※] kN

※：試験結果に基づくメーカー保証値

d. 接続用の治具

評価における条件を以下に示す。

(a) 隅角部固定ボルト

隅角部固定ボルトの評価条件を表 4-12 に示す。

表 4-12 隅角部固定ボルトの評価条件

評価対象項目	ボルト径	材質	ボルト本数
隅角部固定ボルト	M27	SCM435	3 本

(b) アイプレート

アイプレートの評価条件を表 4-13 に示す。

表 4-13 アイプレートの評価条件

評価対象項目	アイプレート 母材	プレート長さ		面取り長さ L (mm)	溶接脚長 S _w (mm)
		L _{p1} (mm)	L _{p2} (mm)		
取付けプレート	SM490A	90	100	30	7

5. 強度評価結果

5.1 ネットに作用する外力エネルギー評価

竜巻発生時のネットに作用する外力エネルギー評価結果を表 5-1 から表 5-5 に示す。

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

(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

表 5-1 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の
外力エネルギー評価結果

No.	E_t (kJ)	E_{max} (kJ)
1	80	242
2	80	249
3	80	277
4	80	306
5	190	325
6	187	263

(2) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

表 5-2 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設の外力エネルギー評価結果

No.	E_t (kJ)	E_{max} (kJ)
1	80	156
2	80	166
3	80	199
4	80	212
5	80	199
6	80	213
7	80	332
8	80	355

(3) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

表 5-3 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設の外力エネルギー評価結果

No.	E_t (kJ)	E_{max} (kJ)
1	80	254
2	80	263
3	80	227
4	80	235
5	80	234
6	80	242
7	80	357
8	80	367
9	80	223
10	80	239

(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

表 5-4 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設の外力エネルギー評価結果

No.	E_t (kJ)	E_{max} (kJ)
1	183	231

(5) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

表 5-5 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の外力エネルギー評価結果

No.	E_t (kJ)	E_{max} (kJ)
1	182	200

5.2 破断評価

(1) ネット

竜巻による飛来物衝突時のネット目合いの破断評価結果を表 5-6 から表 5-10 に示す。

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

a. 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

表 5-6 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破断評価結果

No.	F_2 (kN)	F_1 (kN)
1	231	1032
2	258	1032
3	196	1032
4	201	1032
5	410	1032
6	367	1032

b. 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

表 5-7 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設の破断評価結果

No.	F_2 (kN)	F_1 (kN)
1	293	1032
2	280	1032
3	287	1032
4	293	1032
5	283	1032
6	290	1032
7	196	1032
8	201	1032

c. 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

表 5-8 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設の破断評価結果

No.	F ₂ (kN)	F ₁ (kN)
1	248	1032
2	251	1032
3	266	1032
4	269	1032
5	263	1032
6	263	1032
7	219	1032
8	221	1032
9	277	1032
10	266	1032

d. 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設

表 5-9 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設の破断評価結果

No.	F ₂ (kN)	F ₁ (kN)
1	469	1032

e. 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

表 5-10 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の破断評価結果

No.	F ₂ (kN)	F ₁ (kN)
1	478	1032

(2) ワイヤロープ, ターンバックル及びシャックル

a. ワイヤロープ

竜巻による飛来物衝突時の強度評価結果を表 5-11 から表 5-15 に示す。

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

(a) 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

表 5-11 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
のワイヤロープ強度評価結果

No.	T_1' (kN)	P (kN)
1	72	132
2	81	132
3	63	132
4	66	132
5	119	132
6	99	132

(b) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

表 5-12 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設のワイヤロープ強度評価結果

No.	T_1' (kN)	P (kN)
1	84	132
2	81	132
3	86	132
4	89	132
5	85	132
6	88	132
7	65	132
8	68	132

(c) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

表 5-13 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設のワイヤロープ強度評価結果

No.	$T_{1'}$ (kN)	P (kN)
1	78	132
2	80	132
3	82	132
4	84	132
5	82	132
6	82	132
7	74	132
8	75	132
9	85	132
10	83	132

(d) 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設

表 5-14 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設のワイヤロープ強度評価結果

No.	$T_{1'}$ (kN)	P (kN)
1	124	132

(e) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

表 5-15 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設のワイヤロープ強度評価結果

No.	$T_{1'}$ (kN)	P (kN)
1	123	132

b. ターンバックル

竜巻による飛来物衝突時の強度評価結果を表 5-16 から表 5-20 に示す。
発生荷重は、ターンバックルの許容限界を下回っている。

(a) 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

表 5-16 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の
ターンバックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
1	72 (注1)	130
2	81 (注1)	130
3	63 (注1)	130
4	66 (注1)	130
5	119 (注1)	130
6	99 (注1)	130

(注1) ワイヤロープ張力である T_1' (第 5-11 表参照) の値を示す。

(b) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

表 5-17 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設のターンバックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
1	84 (注1)	130
2	81 (注1)	130
3	86 (注1)	130
4	89 (注1)	130
5	85 (注1)	130
6	88 (注1)	130
7	65 (注1)	130
8	68 (注1)	130

(注1) ワイヤロープ張力である T_1' (第 5-12 表参照) の値を示す。

(c) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

表 5-18 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設のターンバックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
1	78 ^(注1)	130
2	80 ^(注1)	130
3	82 ^(注1)	130
4	84 ^(注1)	130
5	82 ^(注1)	130
6	82 ^(注1)	130
7	74 ^(注1)	130
8	75 ^(注1)	130
9	85 ^(注1)	130
10	83 ^(注1)	130

(注1) ワイヤロープ張力である T_1' (第 5-13 表参照) の値を示す。

(d) 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設

表 5-19 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設のターンバックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
1	124 ^(注1)	130

(注1) ワイヤロープ張力である T_1' (第 5-14 表参照) の値を示す。

(e) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

表 5-20 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設のターンバックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
1	123 ^(注1)	130

(注1) ワイヤロープ張力である T_1' (第 5-15 表参照) の値を示す。

c. シャックル

竜巻による飛来物衝突時の強度評価結果を表 5-21 から表 5-25 に示す。
発生荷重は、シャックルの許容限界を下回っている。

(a) 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

表 5-21 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の
シャックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
1	72 (注1)	156
2	81 (注1)	156
3	63 (注1)	156
4	66 (注1)	156
5	119 (注1)	156
6	99 (注1)	156

(注1) ワイヤロープ張力である T_1' (第 5-11 表参照) の値を示す。

(b) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

表 5-22 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設のシャックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
1	84 (注1)	156
2	81 (注1)	156
3	86 (注1)	156
4	89 (注1)	156
5	85 (注1)	156
6	88 (注1)	156
7	65 (注1)	156
8	68 (注1)	156

(注1) ワイヤロープ張力である T_1' (第 5-12 表参照) の値を示す。

(c) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

表 5-23 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設のシャックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
1	78 ^(注1)	156
2	80 ^(注1)	156
3	82 ^(注1)	156
4	84 ^(注1)	156
5	82 ^(注1)	156
6	82 ^(注1)	156
7	74 ^(注1)	156
8	75 ^(注1)	156
9	85 ^(注1)	156
10	83 ^(注1)	156

(注1) ワイヤロープ張力が最大である T_1' (表 5-13 参照) の値を示す。

(d) 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設

表 5-24 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設のシャックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
1	124 ^(注1)	156

(注1) ワイヤロープ張力である T_1' (第 5-14 表参照) の値を示す。

(e) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

表 5-25 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設のシャックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
1	123 ^(注1)	156

(注1) ワイヤロープ張力である T_1' (表 5-15 参照) の値を示す。

(3) 接続用の治具

a. 隅角部固定ボルト

接続用の治具のうち、隅角部固定ボルトの竜巻による飛来物衝突時の強度評価結果を表 5-26 から表 5-30 に示す。

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

(a) 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

表 5-26 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の接続用の治具(隅角固定ボルト)の強度評価結果

No.	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
1	69	363
2	78	363
3	60	363
4	63	363
5	116	363
6	95	363

(b) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

表 5-27 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設の接続用の治具(隅角固定ボルト)の強度評価結果

No.	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
1	81	363
2	78	363
3	84	363
4	87	363
5	82	363
6	86	363
7	62	363
8	65	363

(c) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

表 5-28 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設の接続用の治具(隅角固定ボルト)の強度評価結果

No.	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
1	76	363
2	77	363
3	79	363
4	81	363
5	79	363
6	79	363
7	72	363
8	73	363
9	82	363
10	80	363

(d) 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設

表 5-29 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設の接続用の治具
(隅角固定ボルト)の強度評価結果

No.	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
1	122	363

(e) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

表 5-30 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の接続用の治具
(隅角固定ボルト)の強度評価結果

No.	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
1	120	363

b. アイプレート溶接部

接続用の治具のうち、アイプレート溶接部の竜巻による飛来物衝突時の強度評価結果を表 5-31 から表 5-35 に示す。

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

(a) 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

表 5-31 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接続用の治具(アイプレート溶接部)の強度評価結果

No.	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
1	73	135
2	82	135
3	64	135
4	67	135
5	120	135
6	100	135

(b) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

表 5-32 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設の接続用の治具(アイプレート溶接部)の強度評価結果

No.	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
1	85	135
2	82	135
3	87	135
4	90	135
5	86	135
6	89	135
7	66	135
8	69	135

(c) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

表 5-33 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設の接続用の治具(アイプレート溶接部)の強度評価結果

No.	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
1	79	135
2	81	135
3	83	135
4	85	135
5	83	135
6	83	135
7	75	135
8	76	135
9	86	135
10	84	135

(d) 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設

表 5-34 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設の接続用の治具(アイプレート溶接部)の強度評価結果

No.	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
1	125	135

(e) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

表 5-35 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の接続用の治具(アイプレート溶接部)の強度評価結果

No.	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
1	124	135

5.3 たわみ評価

竜巻による飛来物衝突時の強度評価結果を表5-36から表5-40に示す。

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

(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

表 5-36 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たわみ評価結果

No.	最大たわみ量 δ_t (m)	最少離隔距離 L_{min} (m)
1	1.36	1.89
2	1.28	
3	1.56	1.70
4	1.55	
5	1.49	1.90
6	1.55	

(2) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

表 5-37 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設のたわみ評価結果

No.	最大たわみ量 δ_t (m)	最少離隔距離 L_{min} (m)
1	1.09	1.58
2	1.13	
3	1.15	—※1
4	1.15	
5	1.16	1.58
6	1.16	
7	0.24※2	
8	0.24※2	

※1：当該ネットの直下には**外部事象**防護対象施設は無い。

※2：本数値は**外部事象**防護対象施設が存在する領域におけるたわみ量を示す。

外部事象防護対象施設が存在する領域と最大たわみ点の関係は図 5-1 のとおりであり、**外部事象**防護対象施設が存在する領域のたわみは、最大たわみ(No.7：1.60m, No.8：1.58m)に比べ小さいため、ネットが**外部事象**防護対象施設に接触することはない。

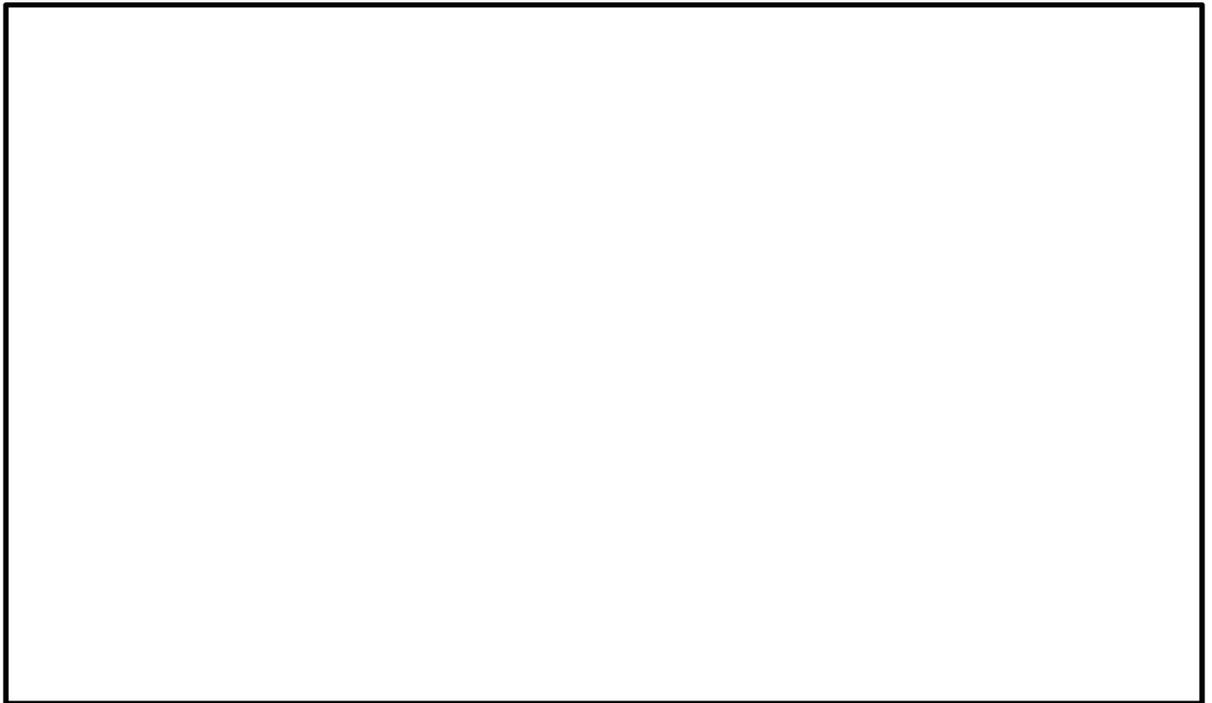


図 5-1 ネット (No. 7, 8) と外部事象防護対象施設の位置関係

(3) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

表 5-38 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設のたわみ評価結果

No.	最大たわみ量 δ_t (m)	最少離隔距離 L_{min} (m)
1	1.31	2.29
2	1.31	
3	1.23	
4	1.24	
5	1.25	
6	1.25	
7	1.50	
8	1.50	
9	1.20	
10	1.25	

(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

表 5-39 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設のたわみ評価結果

No.	最大たわみ量 δ_t (m)	最少離隔距離 L_{min} (m)
1	1.55	2.04

(5) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

表 5-40 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設のたわみ評価結果

No.	最大たわみ量 δ_t (m)	最少離隔距離 L_{min} (m)
1	1.50	1.88

V-3-別添 1-2-1-2 防護鋼板の強度計算書

目次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
2.1 位置	1
2.2 構造概要	2
2.3 評価方針	19
2.4 適用規格	20
3. 強度評価方法	21
3.1 記号の定義	21
3.2 評価対象部位	21
3.3 荷重及び荷重の組合せ	22
3.4 許容限界	24
3.5 評価方法	25
4. 評価条件	29
5. 強度評価結果	31

1. 概要

本資料は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」に示すとおり、防護対策施設である非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設、中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設、海水ポンプエリア竜巻防護対策施設、原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設、中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設、原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設及び原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設の防護鋼板が、設置（変更）許可申請において示す設計飛来物（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**外部事象**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、**外部事象**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。

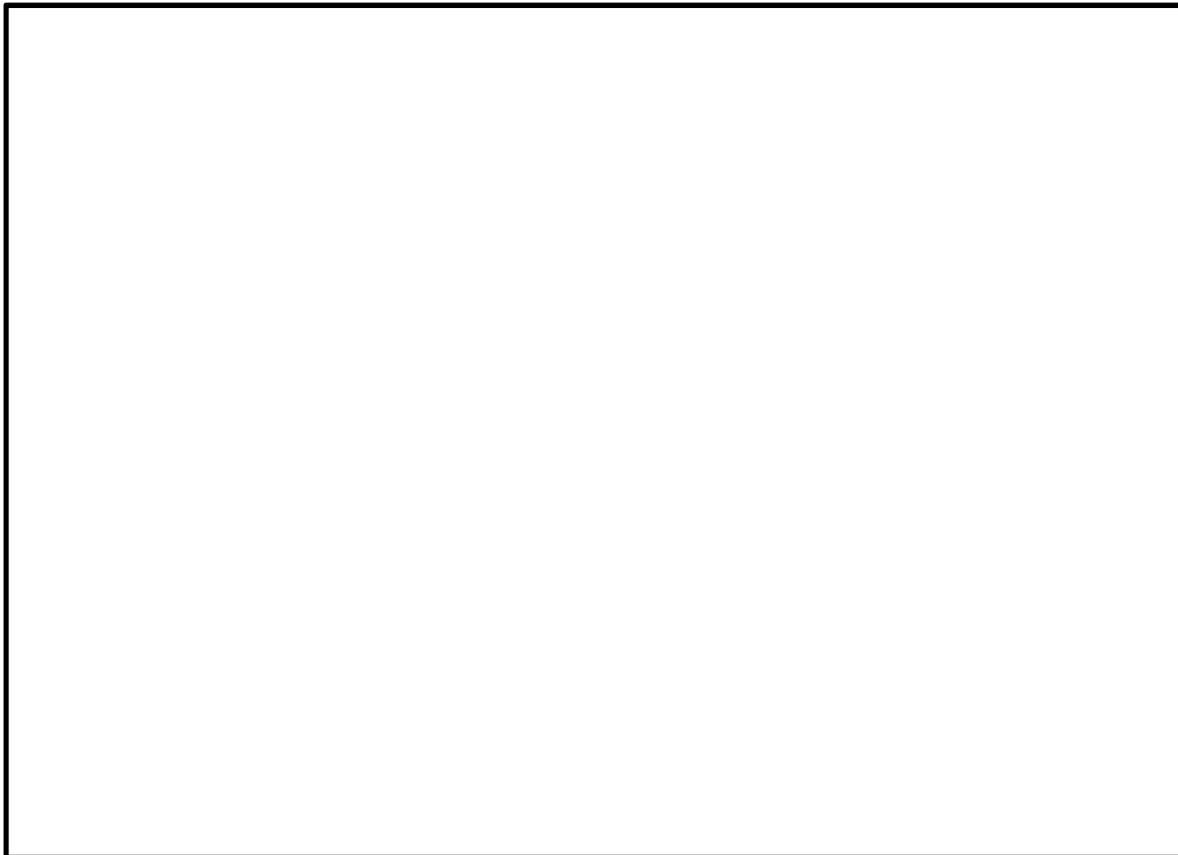


図 2-1 防護鋼板の設置位置図

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。

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、原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設及び原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設の防護鋼板は、鋼板で構成する鋼製構造物である。

(1) 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設防護鋼板

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

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

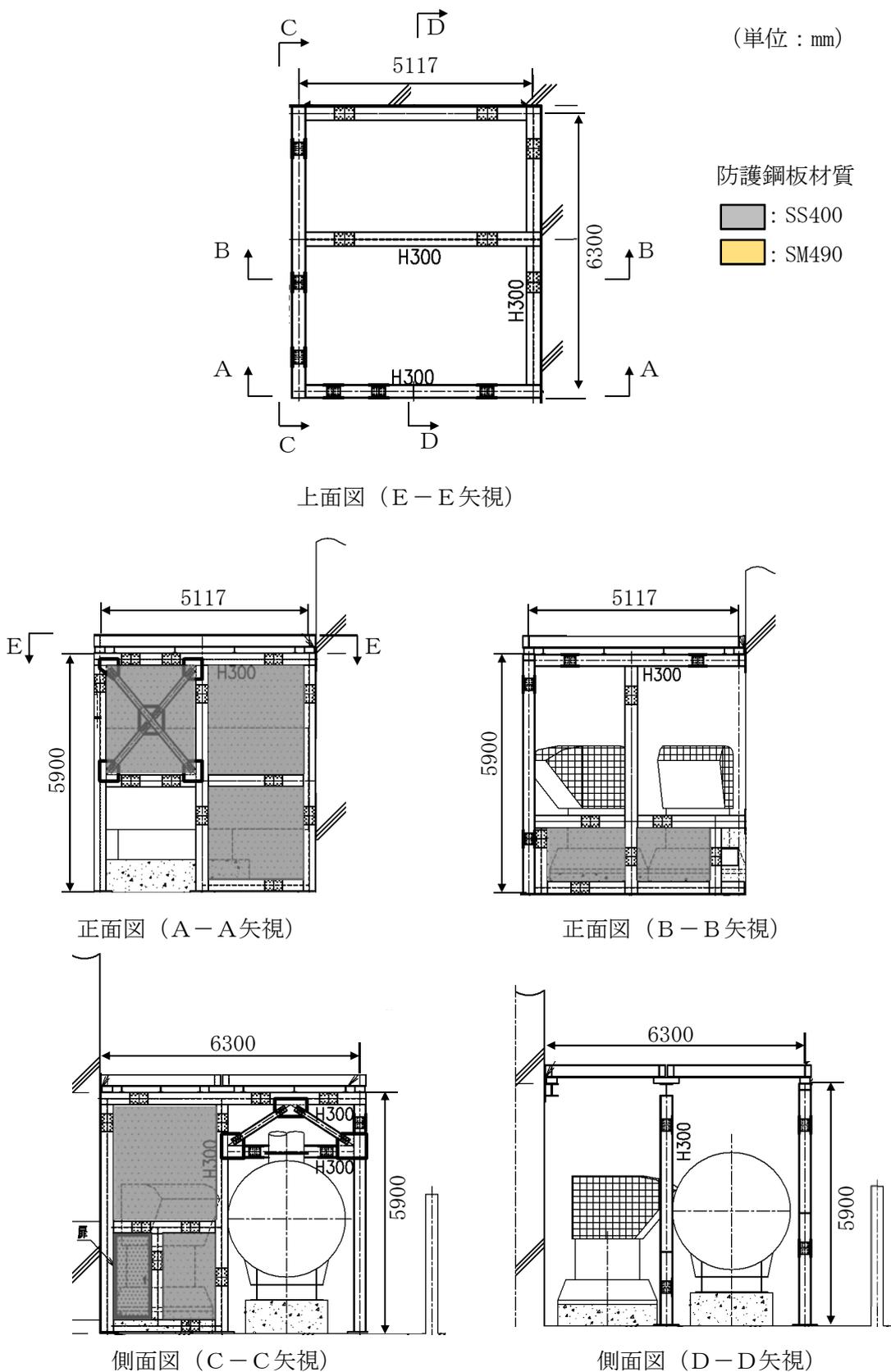
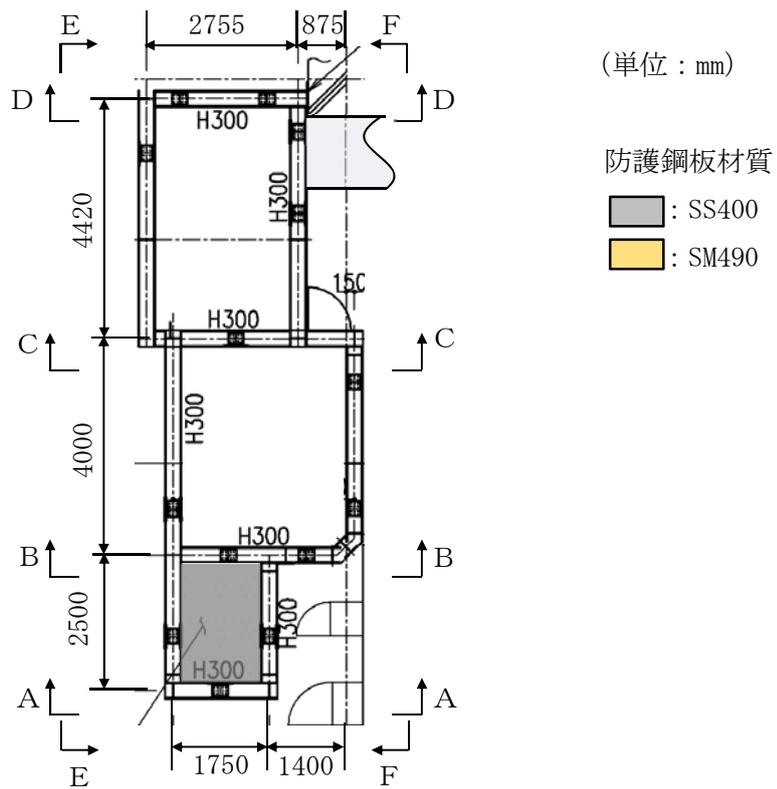
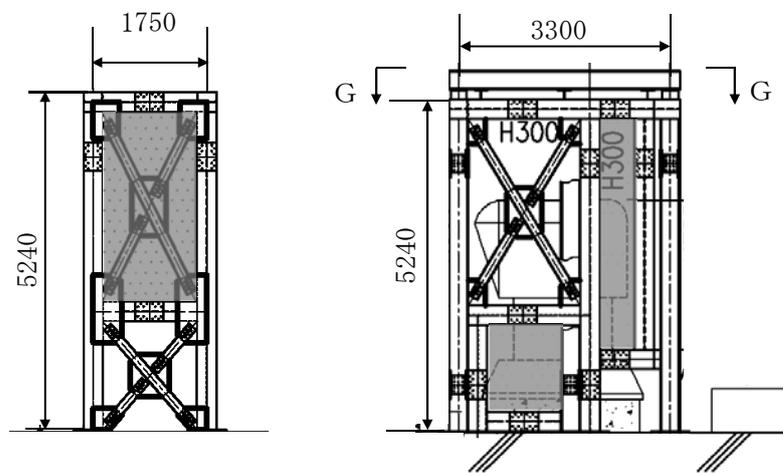


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン防護対策施設防護鋼板の構造図(1/4)
 (2 C 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)



上面図 (G-G 矢視)



正面図 (A-A 矢視)

正面図 (B-B 矢視)

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

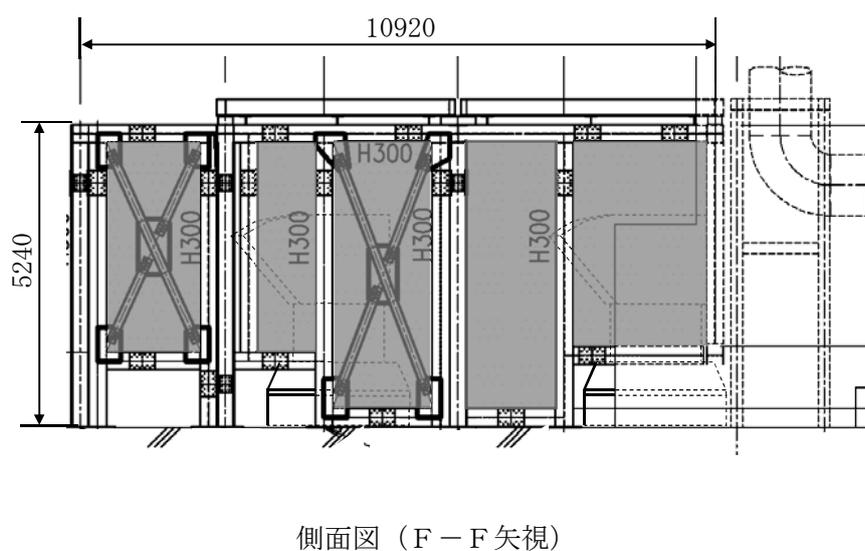
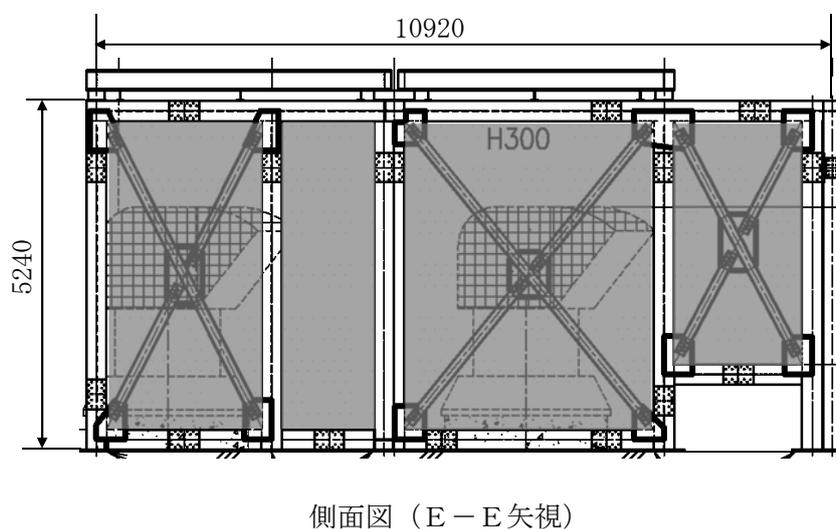
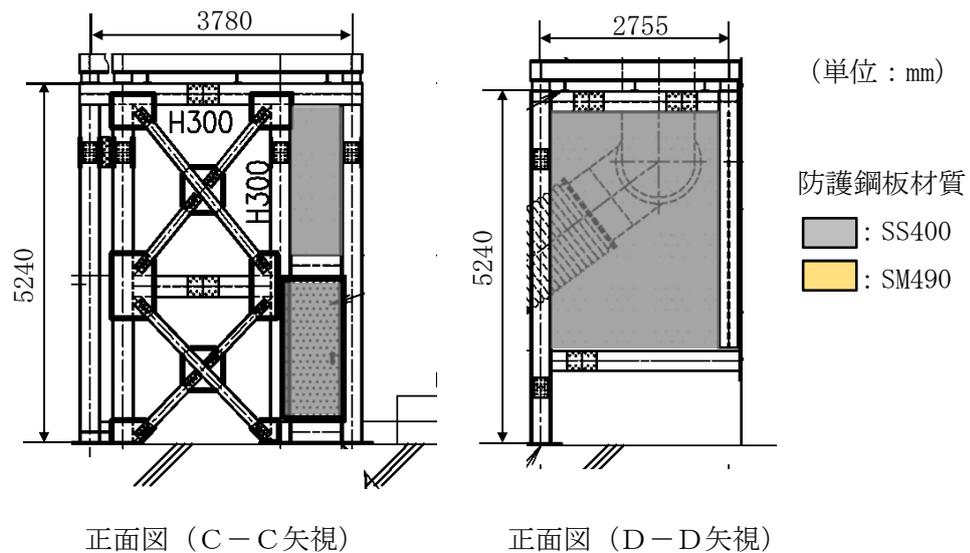
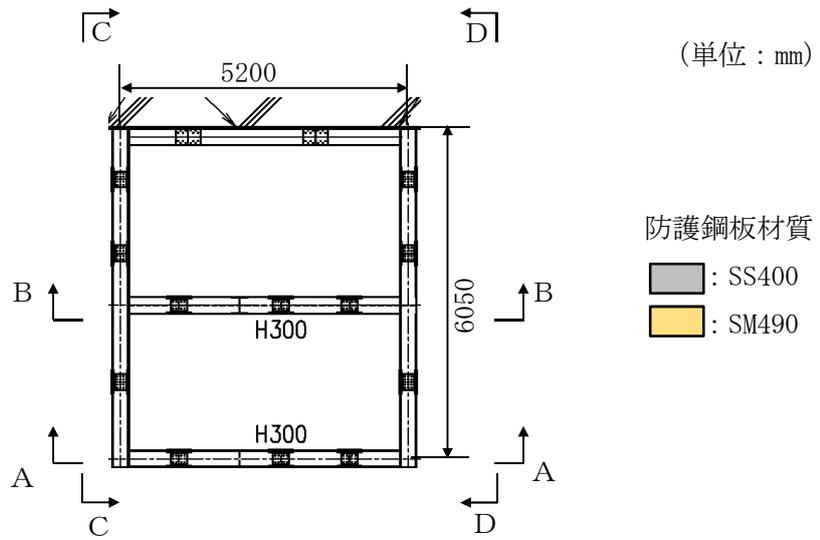
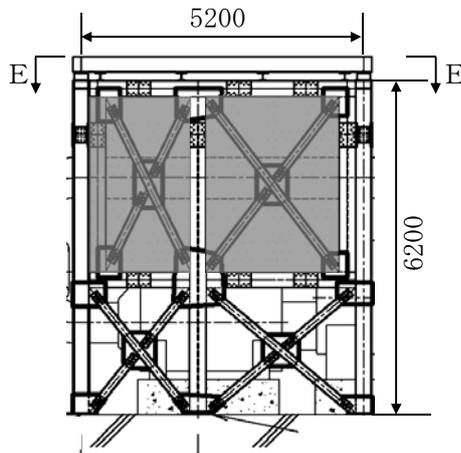


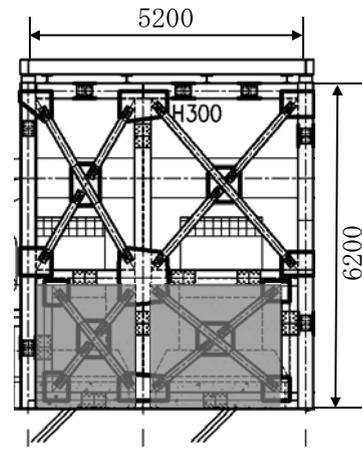
図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン防護対策施設防護鋼板の構造図(3/4)
 (2D非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設(2/2))



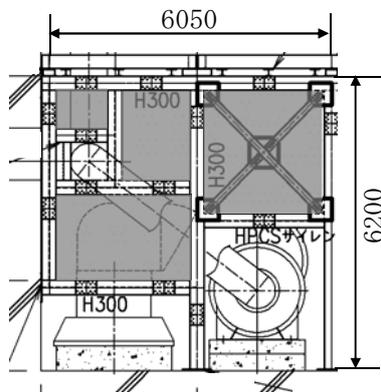
上面図 (E-E 矢視)



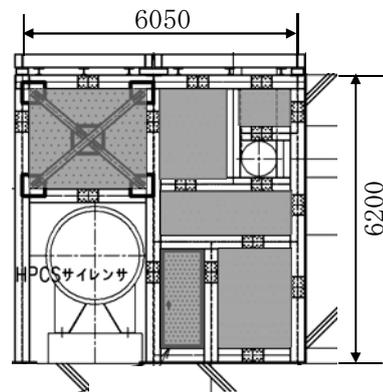
正面図 (A-A 矢視)



正面図 (B-B 矢視)



側面図 (C-C 矢視)



側面図 (D-D 矢視)

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

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

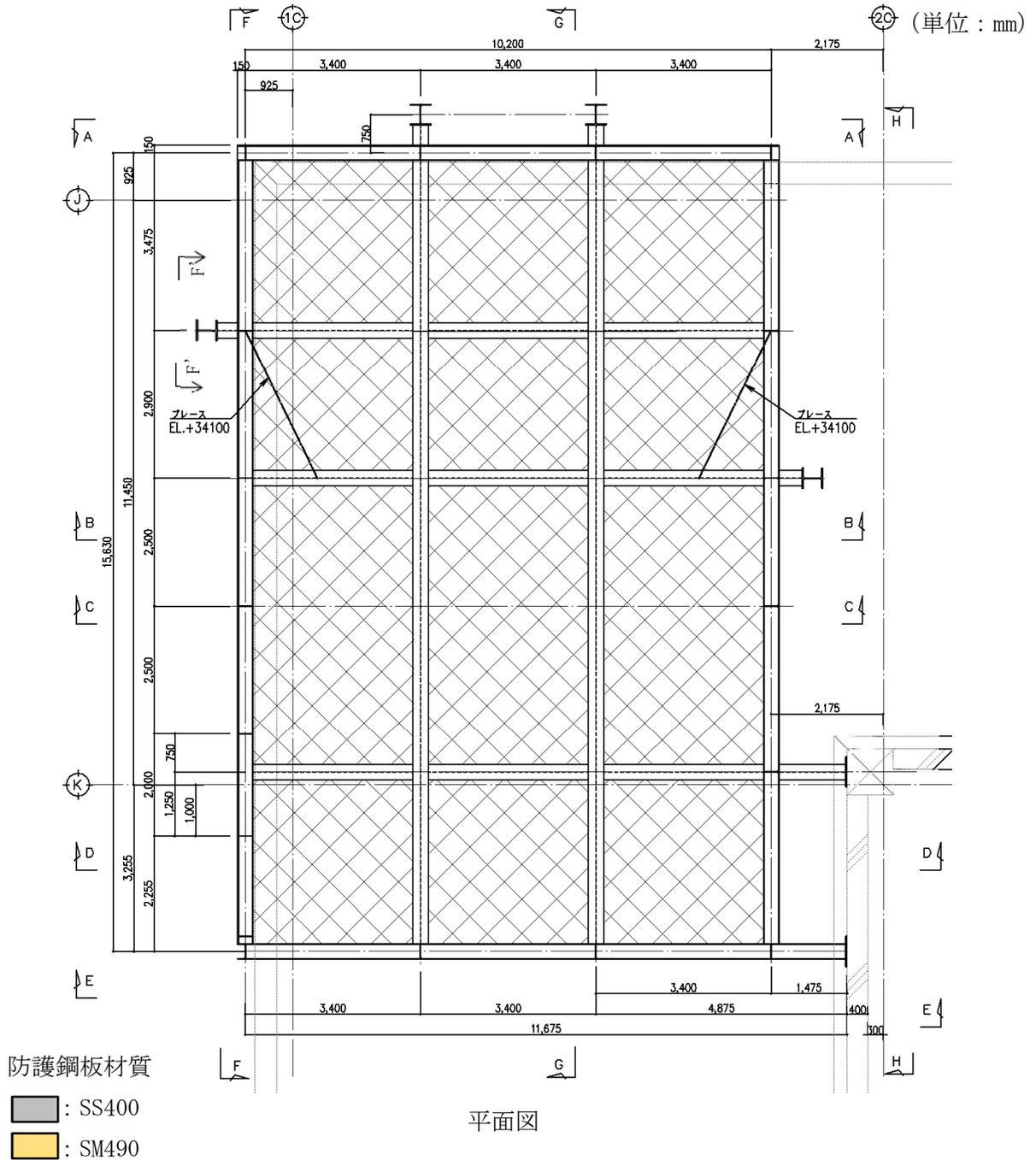
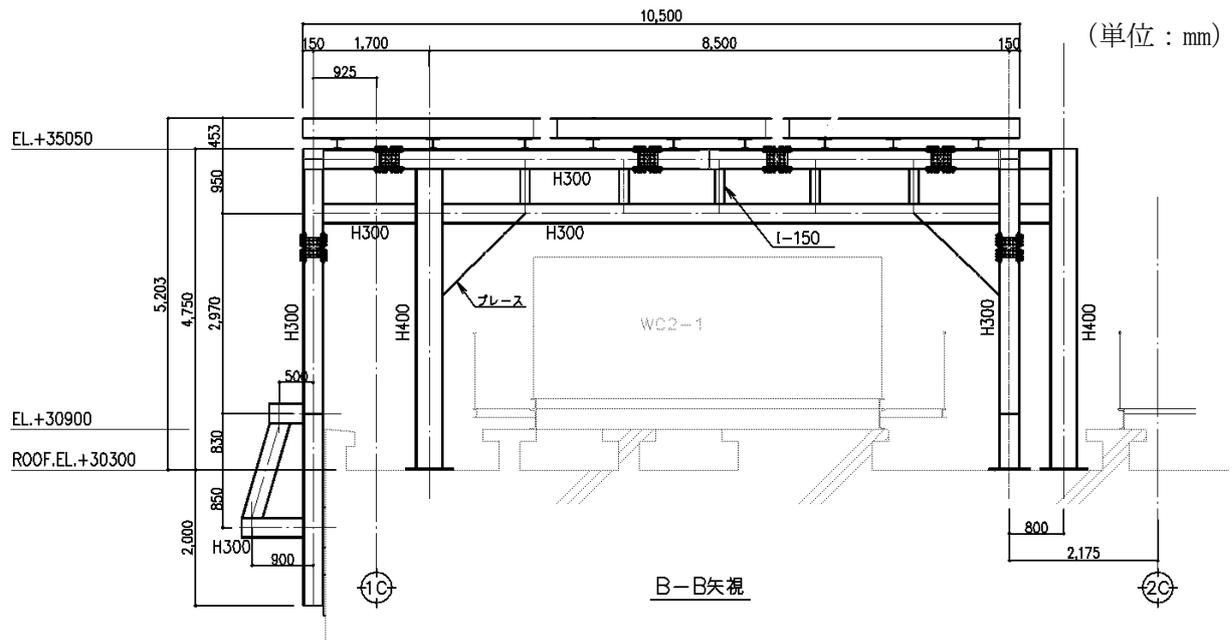


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図(1/6)



防護鋼板材質

■ : SS400

■ : SM490

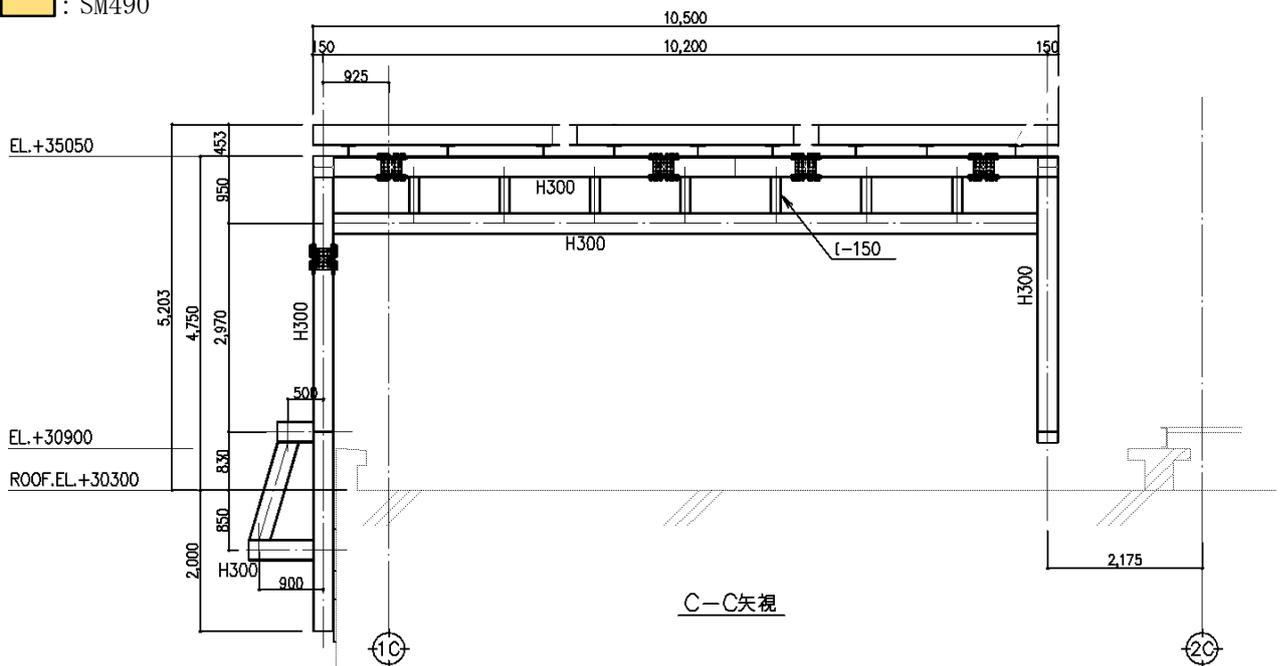
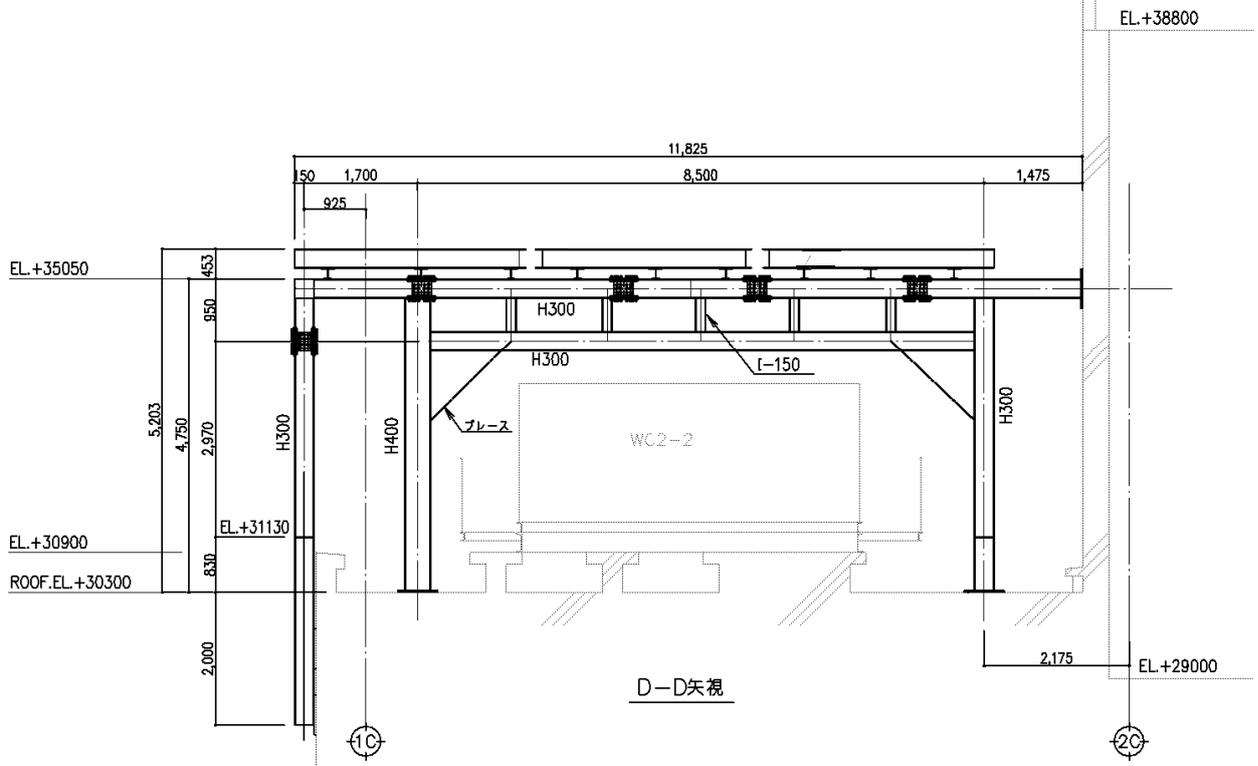


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図(3/6)

(単位：mm)



防護鋼板材質

- : SS400
- : SM490

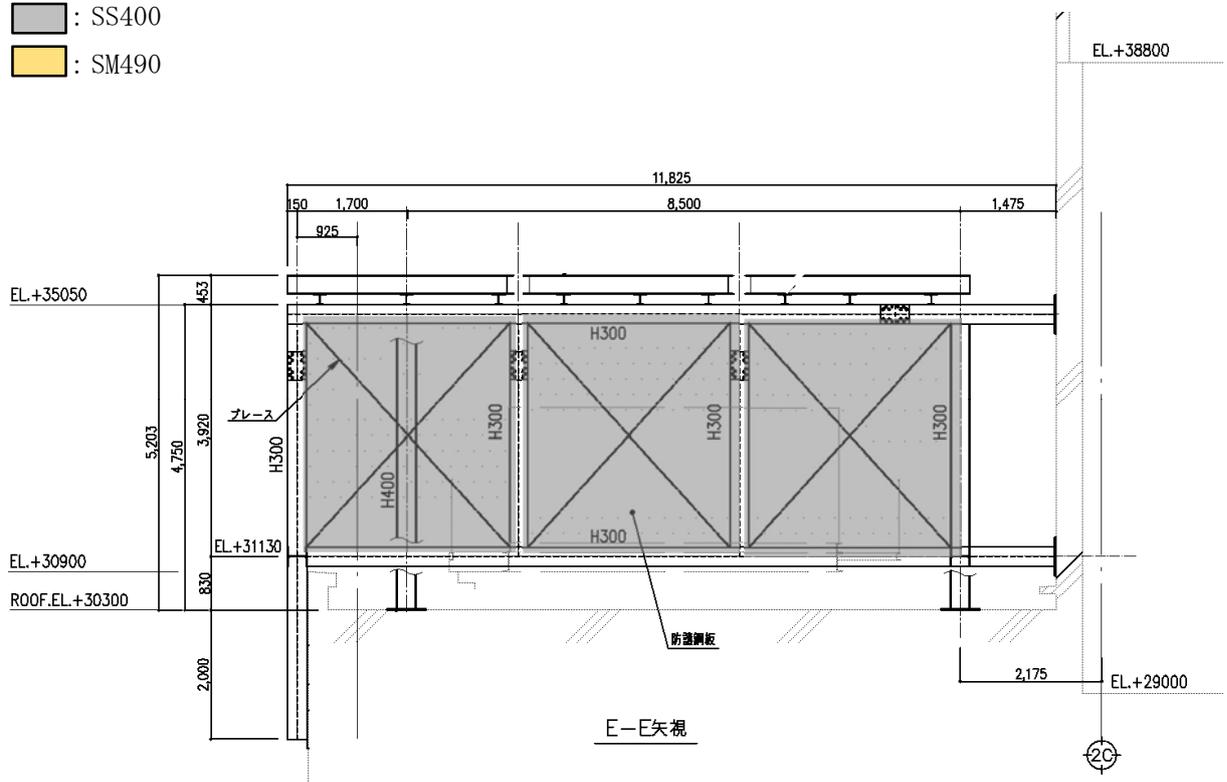
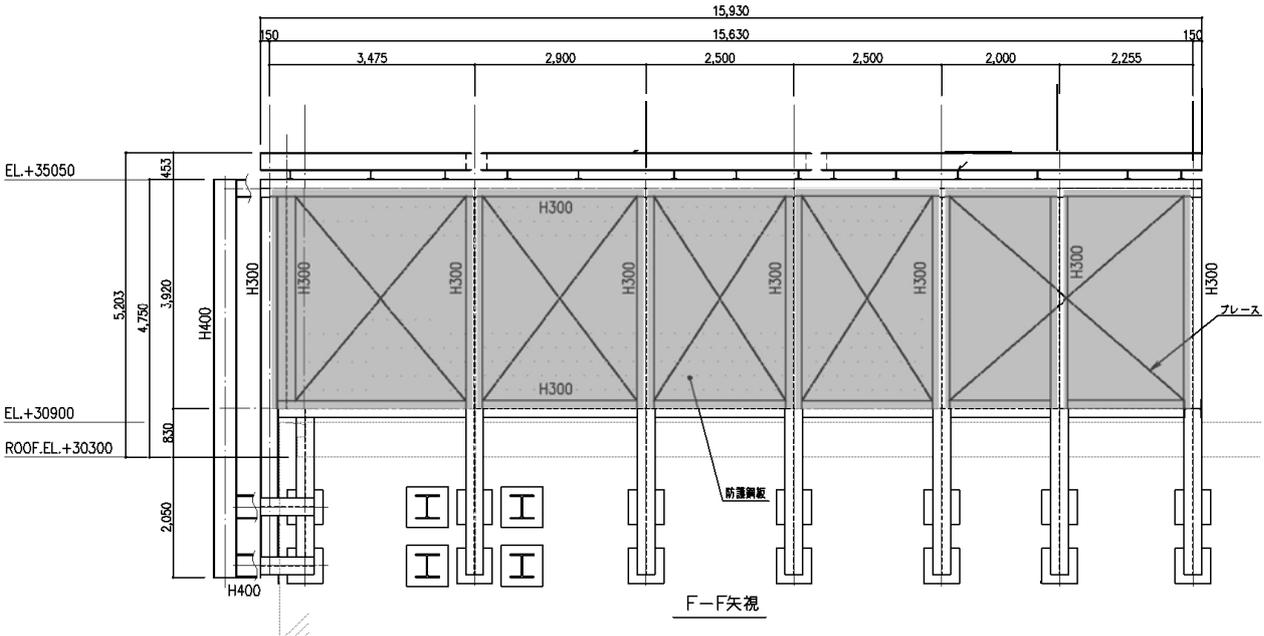


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図(4/6)

(単位：mm)



防護鋼板材質
■ : SS400
■ : SM490

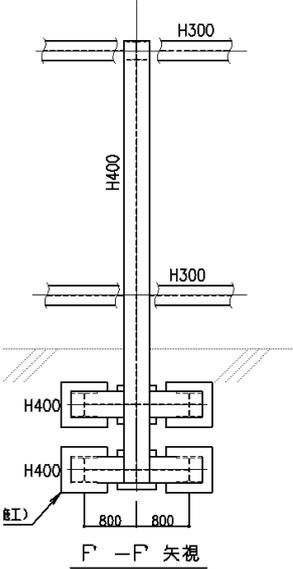
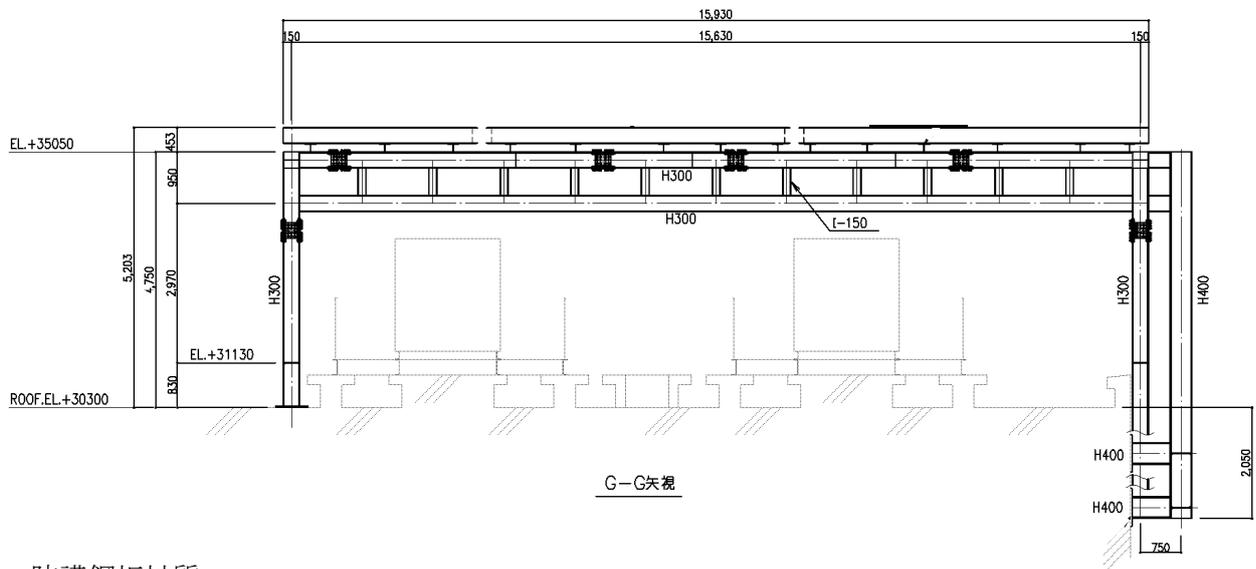


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図 (5/6)

(単位：mm)



防護鋼板材質

■ : SS400

■ : SM490

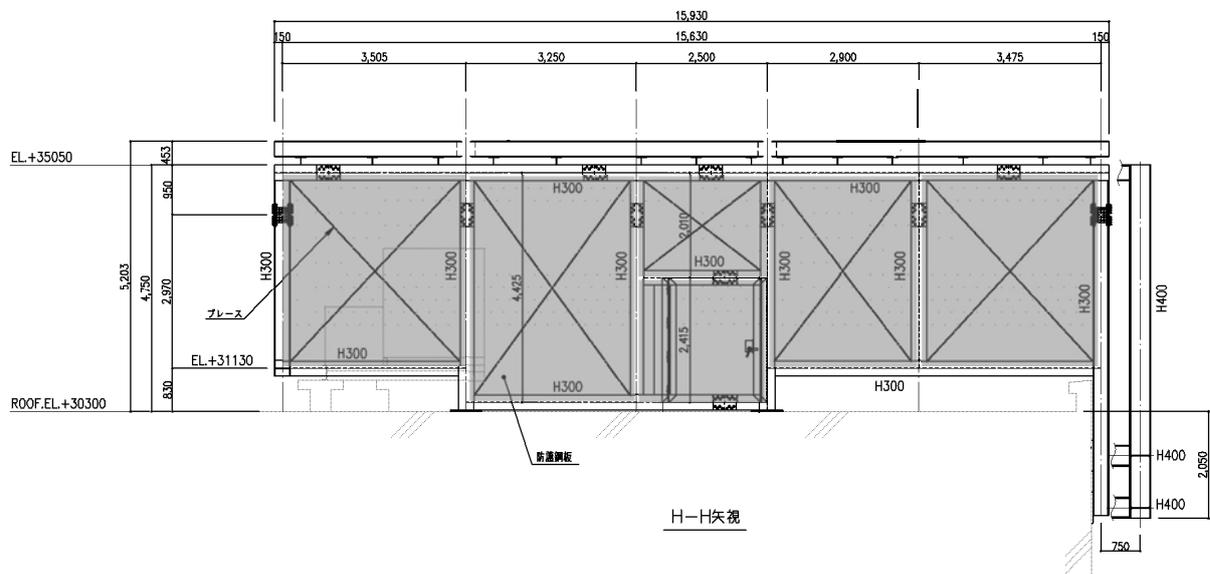
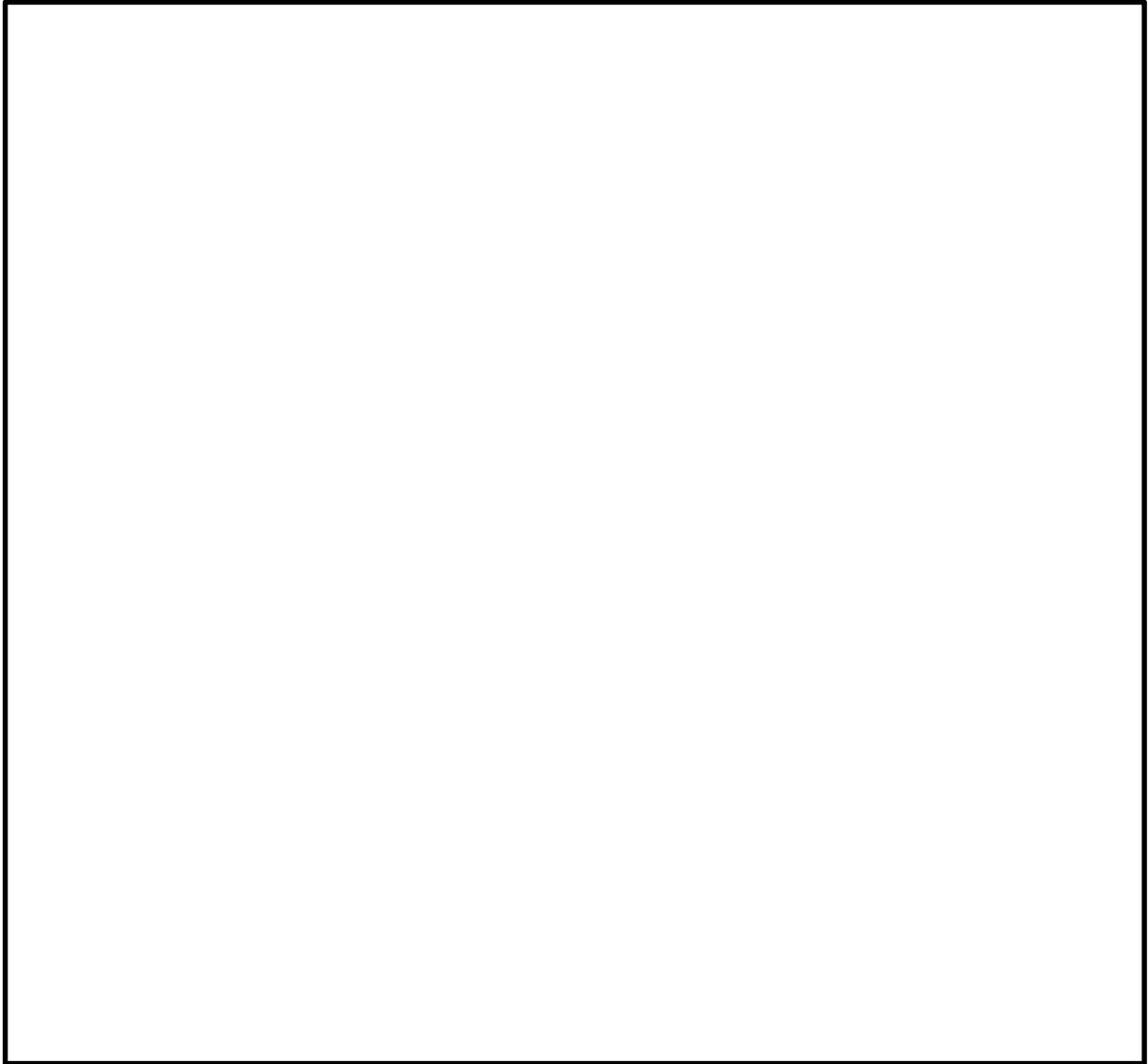


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図(6/6)

(3) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設防護鋼板

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

海水ポンプエリア竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図を図 2-4 に示す。



側面図 (A-A 矢視)

図 2-4 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図 (1/2)

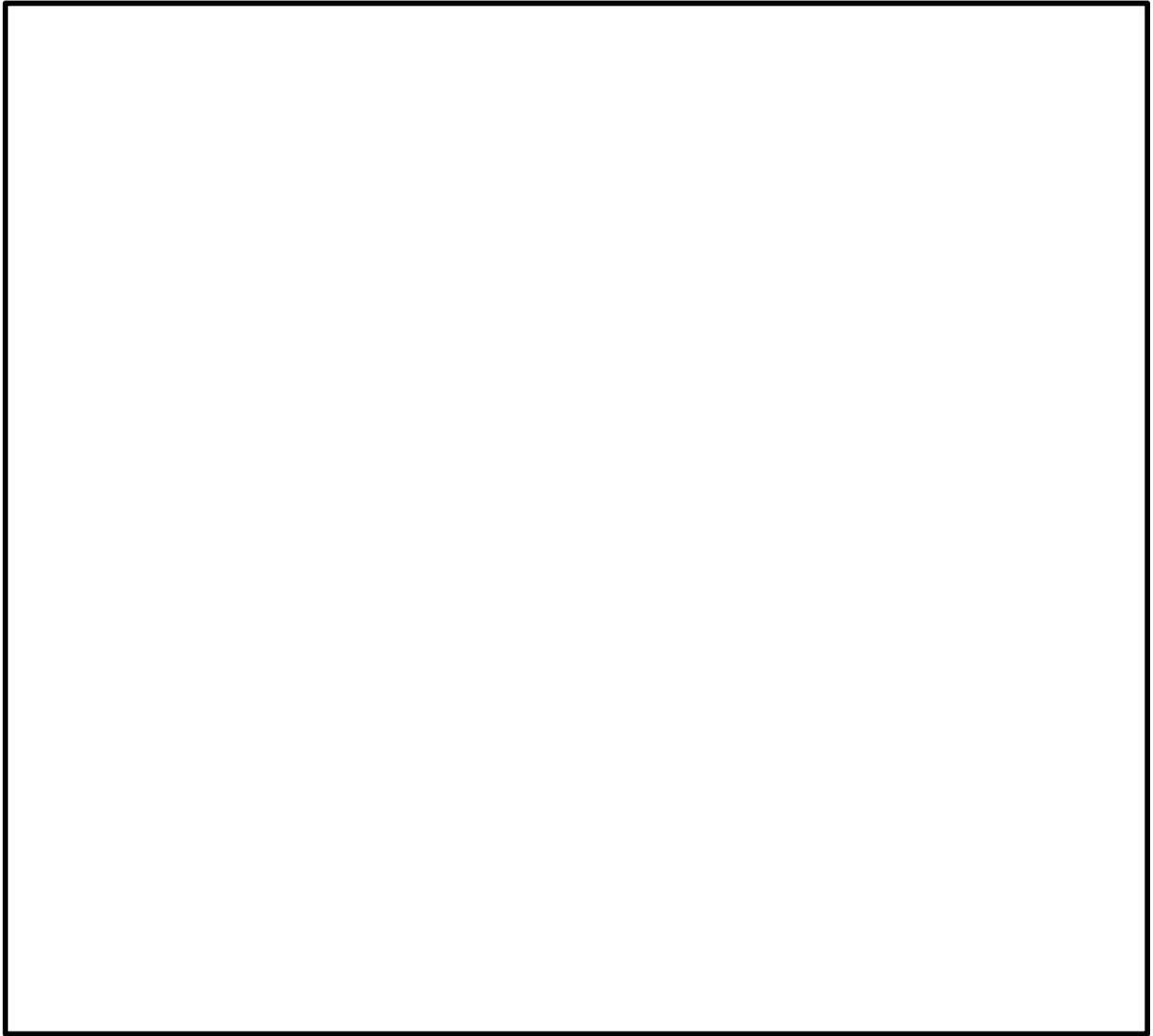


図 2-4 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図 (2/2)

(4) 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設防護鋼板

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

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

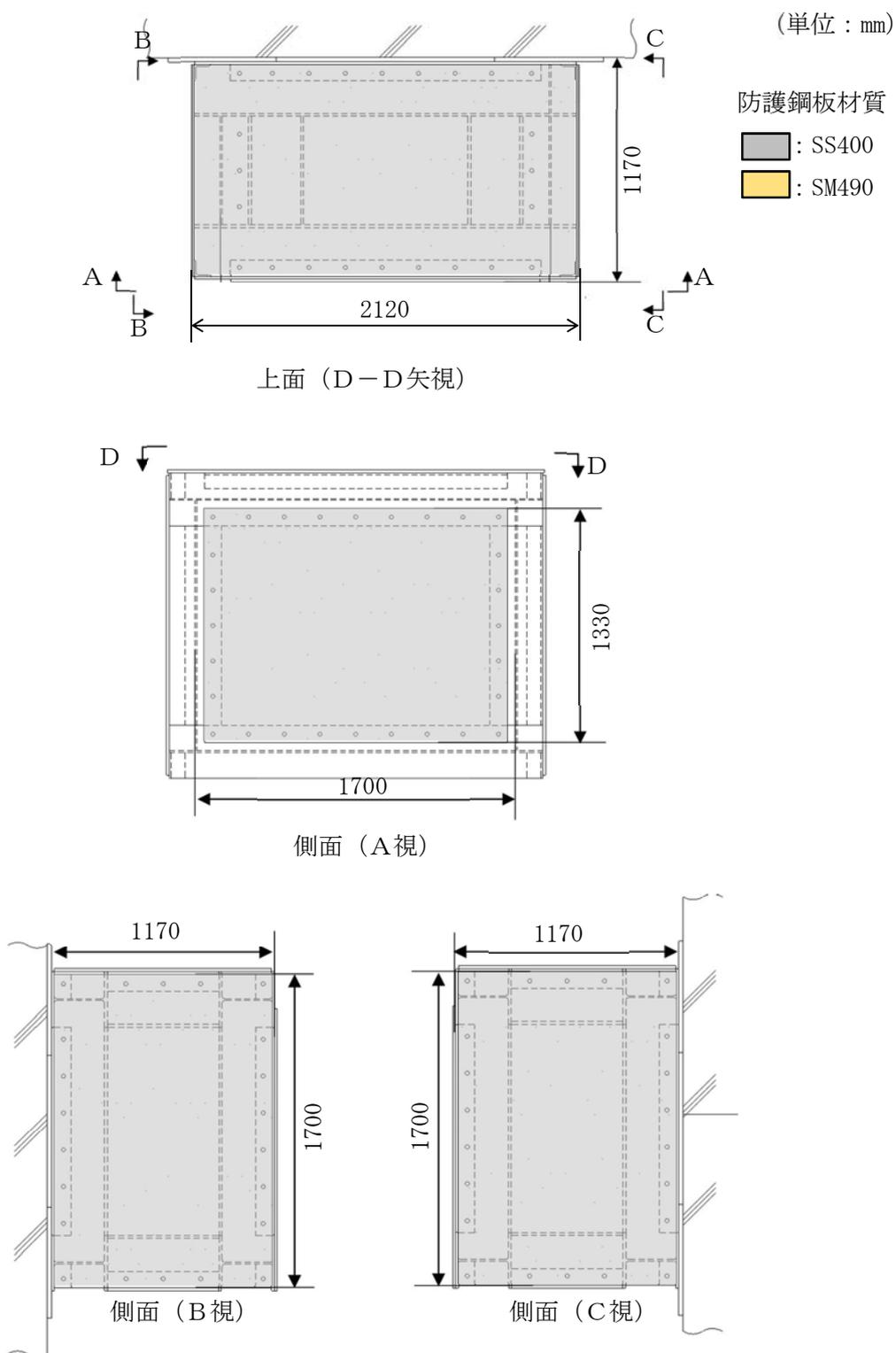


図 2-5 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図

(5) 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設防護鋼板

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

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

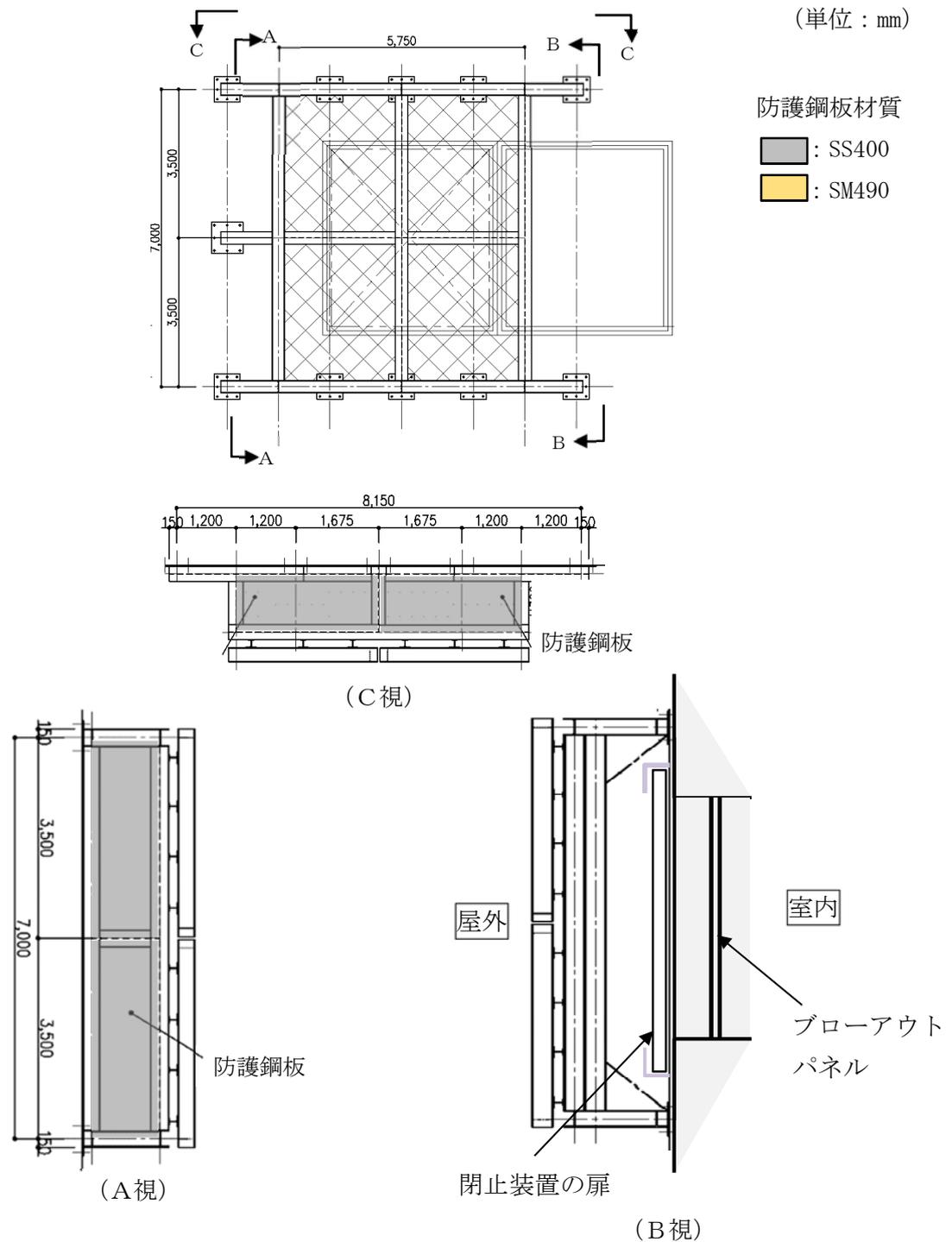
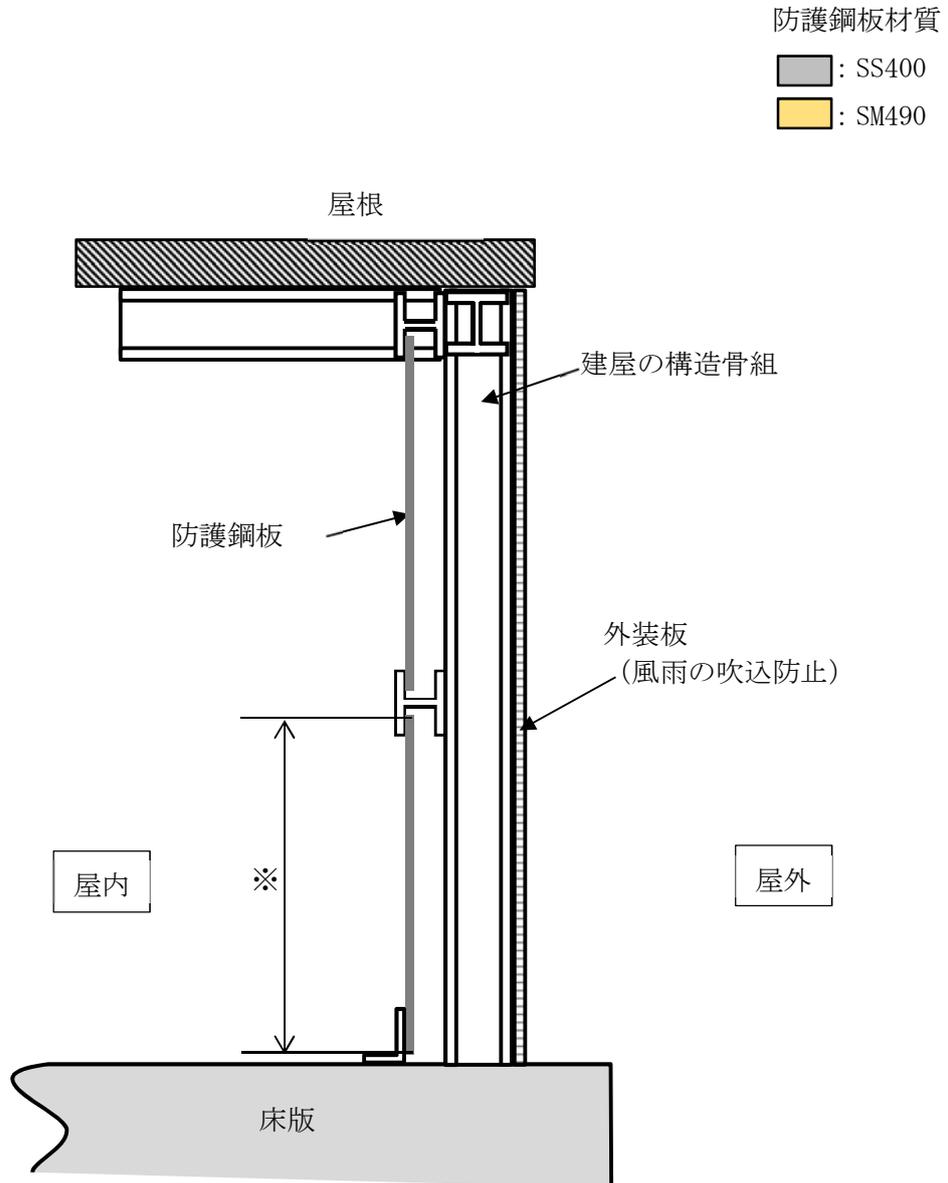


図 2-6 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図

(6) 原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設防護鋼板

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

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



※：貫通評価で健全性が確認された最小寸法以上

図 2-7 原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図

(7) 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壳となる。

原子炉建屋付属棟開口閉鎖部防護鋼板の構造図を図 2-8 に示す。

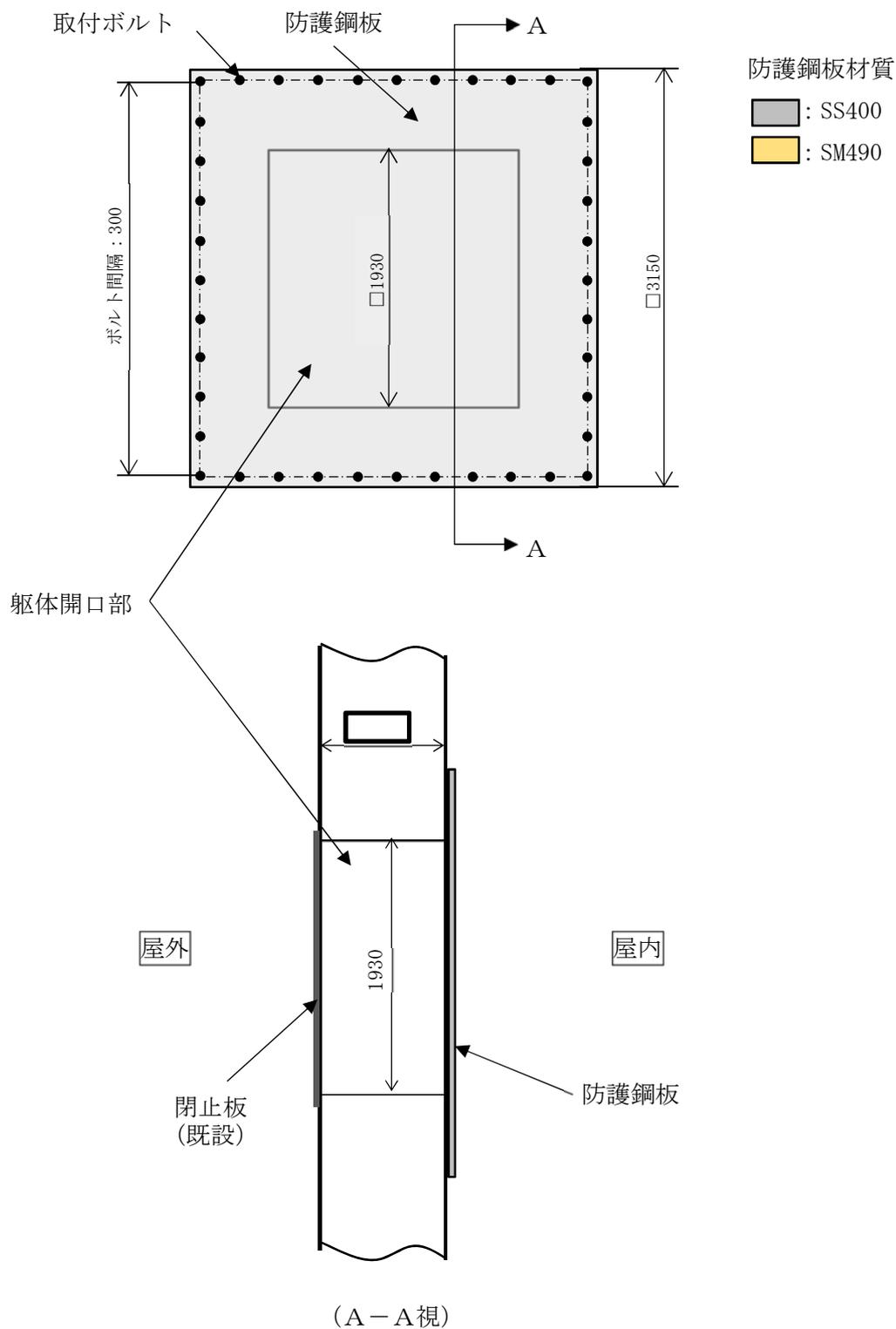


図 2-8 原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図

2.3 評価方針

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

防護鋼板の評価フローを図 2-9 に示す。

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

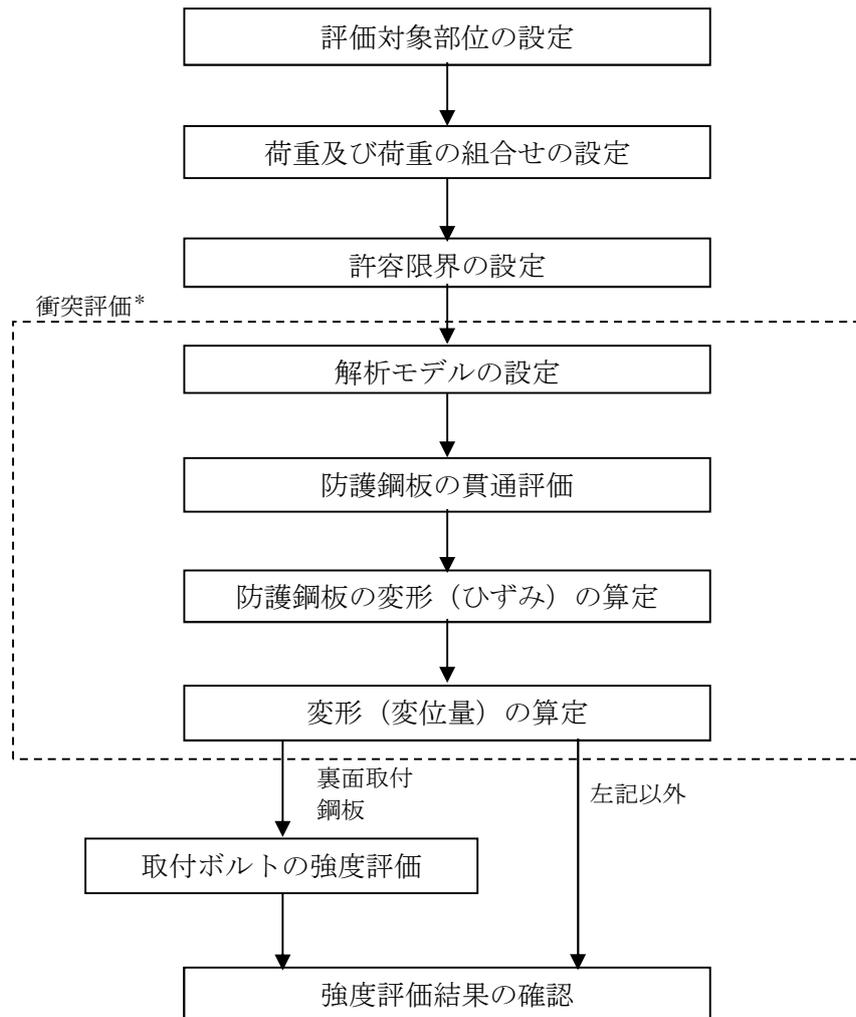
具体的には、飛来物が**外部事象**防護対象施設に衝突する直接的な影響の評価として、防護対策施設の外殻を構成する防護鋼板に対する衝突評価を実施する。

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

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

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

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



注記* : 衝突解析については、3次元FEMモデル解析を実施する。

図 2-9 防護鋼板の評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- 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)
- 「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)

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	防護鋼板の受圧面積
C	—	防護鋼板の風力係数
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
F _t	N	取付ボルトに対し作用する引張力
A _b	mm ²	取付ボルトの軸断面積
d	mm	取付ボルトの呼び径
N	—	取付ボルトの本数
σ _b	N/mm ²	取付ボルト 1 本当たりの引張応力
τ _b	N/mm ²	取付ボルト 1 本当たりのせん断応力

3.2 評価対象部位

3.2.1 衝突評価

衝突評価として、「2.3 評価方針」に示すとおり、防護対策施設の外殻を構成する防護鋼板を対象とする。

(1) 貫通評価

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

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

貫通評価に用いる防護鋼板の仕様を表 3-2 に示す。

表 3-2 貫通評価に用いる防護鋼板の仕様

ケース	寸法 縦(mm)×横(mm)	厚さ	材質	備考
1	1030×1030		SS400	幅、高さの最小寸法の組合せ
2	827×933		SM490	

(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		SS400
2	1850×2000		SM490

3.2.1 裏面取付鋼板ボルト評価

裏面取付鋼板ボルト評価として、「2.3 評価方針」に示すとおり、ボルトにて設計荷重を全て受け止める構造となる、原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板の取付ボルト及び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取付ボルトを対象とする。

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、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。なお、防護対策施設は外殻に面する部材に気圧差は生じないことから、気圧差による荷重は考慮しない。

荷重の組合せを表 3-6 に示す。

表 3-6 荷重の組合せ

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

なお、貫通評価及び変形評価においては、風圧力による荷重と自重の組合せを考えた場合、鉛直設置鋼板への飛来物衝突時の変形方向（水平）においては、想定する風圧力（想定最大値：6100=7320 N/m²）が卓越する。これは、水平設置鋼板の衝突時変形方向（鉛直下向き）に作用する、風圧力（上向きのため考慮しない）と鋼板の自重（約 N/m²）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、「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位の機能損傷モードを考慮して設定する。

(1) 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。

貫通評価の許容限界を表3-7に示す。

表 3-7 許容限界(防護鋼板の貫通評価)

ケース	材質	破断ひずみ (真ひずみ)
1	SS400	
2	SM490	

(2) 変形評価

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

変形評価の許容限界を表3-8に示す。

表 3-8 許容限界(防護鋼板の変形評価)

ケース	材質	衝突方向変位量(mm)
1	SS400	
2	SM490	

(3) 裏面取付鋼板ボルト評価

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

裏面取付鋼板ボルト評価の許容限界を表3-9に示す。

表 3-9 許容限界(裏面取付鋼板ボルト評価評価)

許容応力 状態	応力の種類		許容限界
Ⅲ _A S	一次 応力	引 張	$1.5f_t$
		せん断 [※]	$1.5f_s$
		組合せ [※]	$\text{Min} \{1.5 f_t, (2.1 f_t - 1.6 \tau)\}$

※一方の荷重が卓越する場合は評価しない

具体的な許容限界を表 3-10 に示す。

表 3-10 裏面取付鋼板ボルトの許容限界 (1/2)
(原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板)

評価対象部位	材料	温度条件 (°C)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	$1.5 f_t$ (MPa)	$1.5 f_s$ (MPa)
取付ボルト	SM490	40	325	490	243	187

表 3-10 裏面取付鋼板ボルトの許容限界 (2/2)
(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)

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

3.5 評価方法

3.5.1 貫通評価及び変形評価

(1) 解析モデル

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

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

防護鋼板及び飛来物の解析モデル図を図 3-1 に示す。

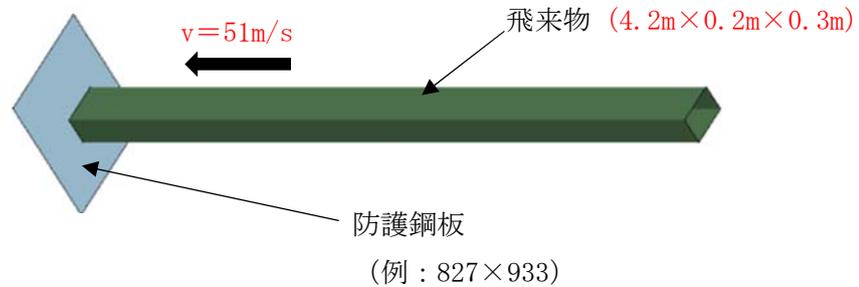


図 3-1 防護鋼板及び飛来物の解析モデル図

(2) 材料定数

飛来物及び防護鋼板に使用する鋼材の材料定数を表 3-11 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 3-11 使用材料の材料定数

	材質	厚さ (mm)	降伏応力 σ_y (MPa)	ヤング係数 E (MPa)	ポアソン比
飛来物 (鋼製材)	SS400	5 を超え 16 以下	245	2.05×10^5	0.3
防護 鋼板	SS400			2.05×10^5	0.3
	SM490			2.05×10^5	0.3

(3) 鋼製材料の非線形特性

a. 材料の応力—ひずみ関係

飛来物の衝突に対する解析は、変形速度が大きいいためひずみ速度効果を考慮することとし、以下に示す Cowper—Symonds の式を適用する。

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

ここで、 $\sigma_{e,q}$ は動的応力、A は降伏応力、B は硬化係数、 ε_{p1} は相当塑性ひずみ、 $\dot{\varepsilon}_{p1}$ は無次元相当塑性ひずみ速度、n は硬化指数、D 及び q はひずみ速度係数を表す。これらのパラメータを表 3-12 に示す。これらのパラメータは、日本溶接協会の動的物性の推定式 (WES 式) にフィッティングする様に選定した。

表 3-12 Cowper-Symonds 式への入力パラメータ

	飛来物 (鋼製材)	防護鋼板	
材料	SS400	SS400	SM490
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。

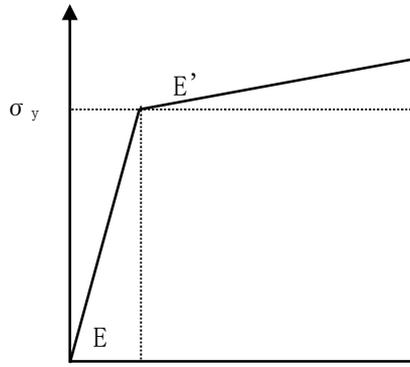


図 3-2 バイリニア型応力-ひずみ関係の概念図

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TF（多軸性係数）を 2.0 とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF= 2.0 を考慮する。TFについては、防護鋼板のみ 2.0 とする。

鋼製材は、保守的に破断ひずみを超えても要素を削除せず、荷重を負担するものとする。防護鋼板の破断ひずみを表 3-13 に示す。

表 3-13 防護鋼板の破断ひずみ

ケース	材質	JIS 規格値 (伸び)	TF	破断ひずみ※
1	SS400		2.0	
2	SM490		2.0	

※：真ひずみ換算値

3.5.2 裏面取付鋼板ボルト評価

(1) 評価モデル

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

イ. 引張力

$$F_t = W_w + W_M$$

ロ. 引張応力

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

ここで、

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

また、地震荷重に対しては、以下のとおり評価する。

イ. 地震荷重

$$\text{水平方向} : F_H = 3 \cdot C_H \cdot m$$

$$\text{鉛直方向} : F_V = C_V \cdot m$$

ロ. 発生応力

$$\text{引張} : \sigma_b = F_H / (N \cdot A_b)$$

$$\text{せん断} : \tau_b = F_V / (N \cdot A_b)$$

また、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取付ボルトに対しても、地震荷重に対し以下のとおり評価する。

鋼板の単位幅当たりの地震荷重

$$\text{水平方向} : F_H = C_H \cdot m'$$

$$\text{鉛直方向} : F_V = C_V \cdot m'$$

C_H : 水平方向震度

C_V : 鉛直方向震度

m' : 鋼板の単位幅当たりの重量

取付ボルトの発生応力

$$\text{引張} : \sigma_b = F_H / (N' \cdot A_b)$$

$$\text{せん断} : \tau_b = F_V / (N' \cdot A_b)$$

N' : 鋼板の単位幅当たりの取付ボルト本数

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。

表 4-1 風荷重の算出に用いる条件（共通）

q (N/m ²)	G (-)
6.1×10 ³	1.0

防護鋼板の貫通評価及び変形評価における風荷重の算出条件を、表 4-2 に示す。

表 4-2 風荷重の算出に用いる条件（貫通評価，変形評価）

C (-)	A (m ²)		
1.2	貫通評価	ケース 1	1.06
		ケース 2	0.772
	変形評価	ケース 1	17.9
		ケース 2	3.70

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取付ボルトの竜巻評価の条件を、表 4-3 に示す。

表 4-3 裏面取付鋼板ボルトの評価条件（竜巻）
(原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板)

C (-)	A (m ²)	W _w (kN)	W _M (kN)	ボルト サイズ	N (-)	A _b (mm ²)
0.8	3.73	34	4000	M24	40	452

ここで、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荷重W_Mは、貫通評価及び変形評価に用いた鋼板に作用する単位長さ当たりの荷重が、図 4-1 に示すとおり 4 辺の長さが大きくなるほど低下するデータを基に、以下のとおり設定した。

- ・ 開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板の固定端 4 辺の長さの合計：12.0 m
- ・ 図 4-1 で、12.6 m より小さい最近ケースの単位長さ当たりの荷重： kN/m

より、開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板に作用するW_Mは、

$$W_M = 12.0 \times \text{$$

$$= \text{} \text{ kN}$$

となり、これを保守側に丸めて 4000 kN とした。

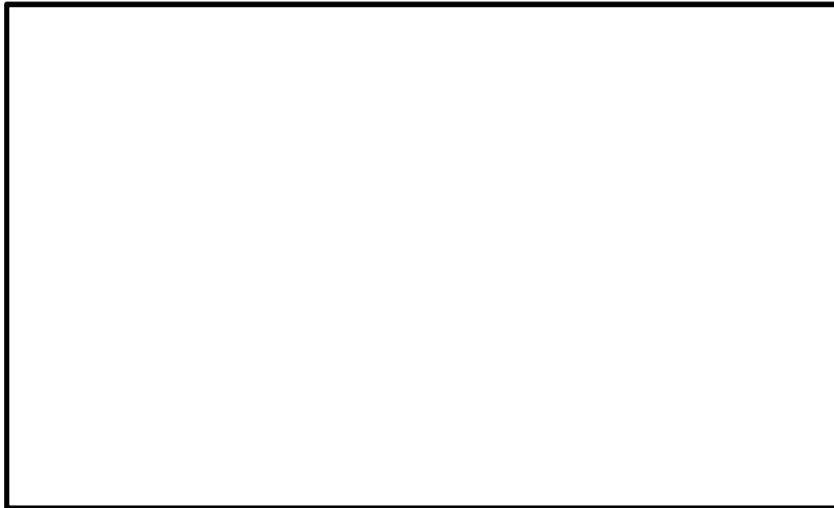


図 4-1 防護鋼板固定端に作用する荷重

原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板に作用する耐震評価の条件については、表 4-4 のとおり。

表 4-4 裏面取付鋼板ボルトの耐震評価条件（地震）
（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）

方向	震度 (-)	鋼板質量 (kg)	荷重 (kN)
水平	1.03	1247	13
鉛直	0.78		10

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取付ボルトの耐震評価の条件については、表 4-5 のとおり。

表 4-5 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耐震評価条件

方向	震度 (-)	鋼板質量 (kg/m)	地震荷重 (kN/m)	ボルト径	N' (1/m)	A _b (mm ²)
水平	追而					
鉛直						

5. 強度評価結果

(1) 貫通評価

防護鋼板の貫通評価結果を表 5-1 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。

表 5-1 貫通評価結果

ケース	ひずみ	
	評価結果	許容限界
1	0.081	
2	0.044	

(2) 変形評価

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

表 5-2 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	130	
2	79	

(3) 裏面取付鋼板ボルト評価

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取付ボルト評価の結果を表 5-3 及び表 5-4 に示す。取付ボルトに発生する応力は許容限界を超えず，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が脱落することはない。

表 5-3 裏面取付鋼板ボルト評価結果（竜巻）

(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)

発生応力(N/mm ²)	許容限界(N/mm ²)
	243

表 5-4 裏面取付鋼板ボルト評価結果（地震）
 （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）

応力分類	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	29	243
せん断	23	187
組合せ	29	243

また、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取付ボルト評価の結果を表 5-5 に示す。取付ボルトに発生する応力は許容限界を超えず、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が脱落することはない。

表 5-5 裏面取付鋼板ボルト評価結果（地震）
 （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）

応力分類	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張		
せん断		
組合せ		

追而

V-3-別添 1-2-1-3 架構の強度計算書

目次

1.	概要	1
2.	基本方針	1
2.1	位置	1
2.2	構造概要	2
2.3	評価方針	19
2.4	適用規格	21
3.	強度評価方法	22
3.1	記号の定義	22
3.2	評価対象部位	22
3.3	荷重及び荷重の組合せ	23
3.4	許容限界	24
3.5	評価方法	26
4.	評価条件	39
5.	強度評価結果	43
5.1	貫通評価	43
5.2	支持機能評価	43

1. 概要

本資料は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」に示すとおり、防護対策施設である非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設、中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設、海水ポンプエリア竜巻防護対策施設、原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設、中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設、使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の架構が、設置（変更）許可申請書に示す設計飛来物（以下「飛来物」という。）の衝突に加え、風圧力に対し、竜巻時及び竜巻通過後においても外部事象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、外部事象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。

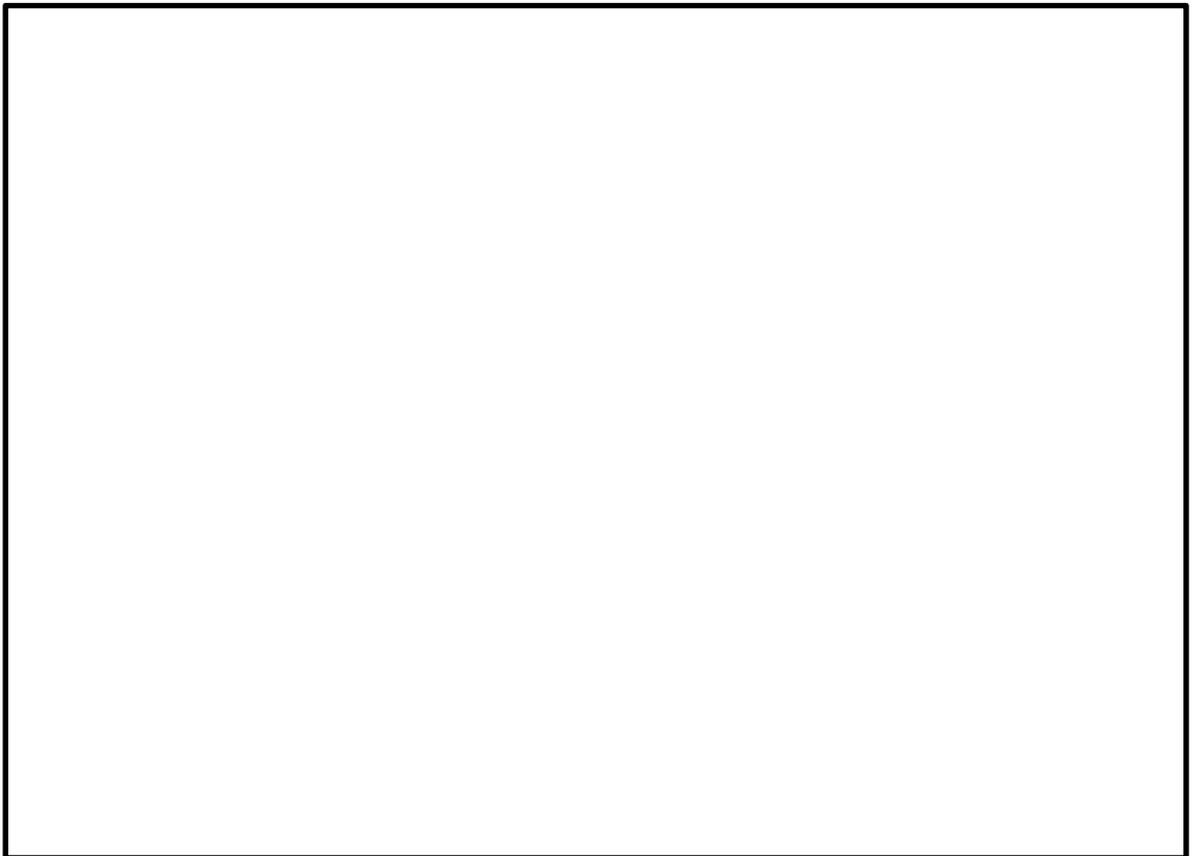


図 2-1 架構の設置位置図

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、外部事象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。

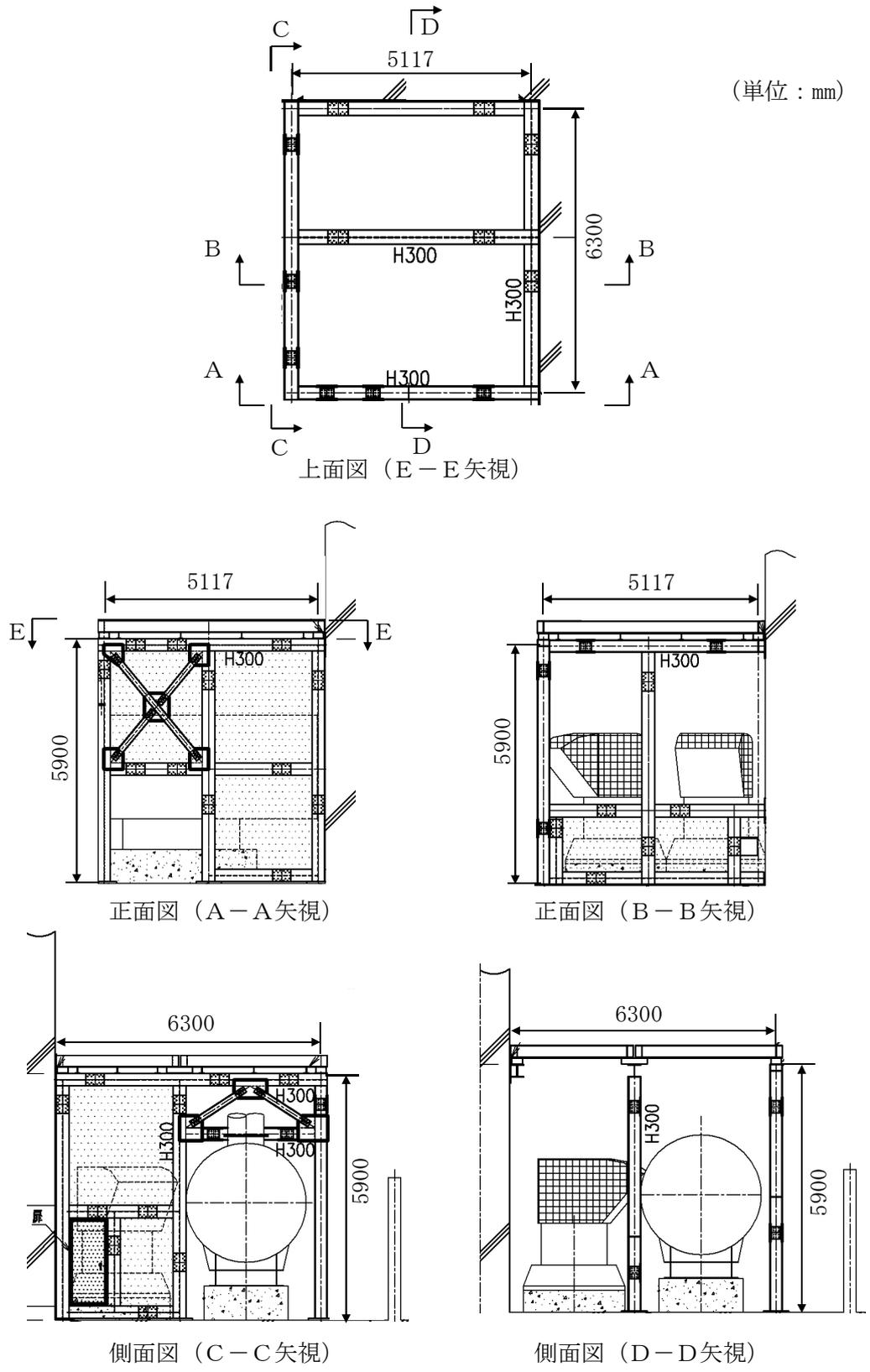


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造図(1/4)
 (2 C 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

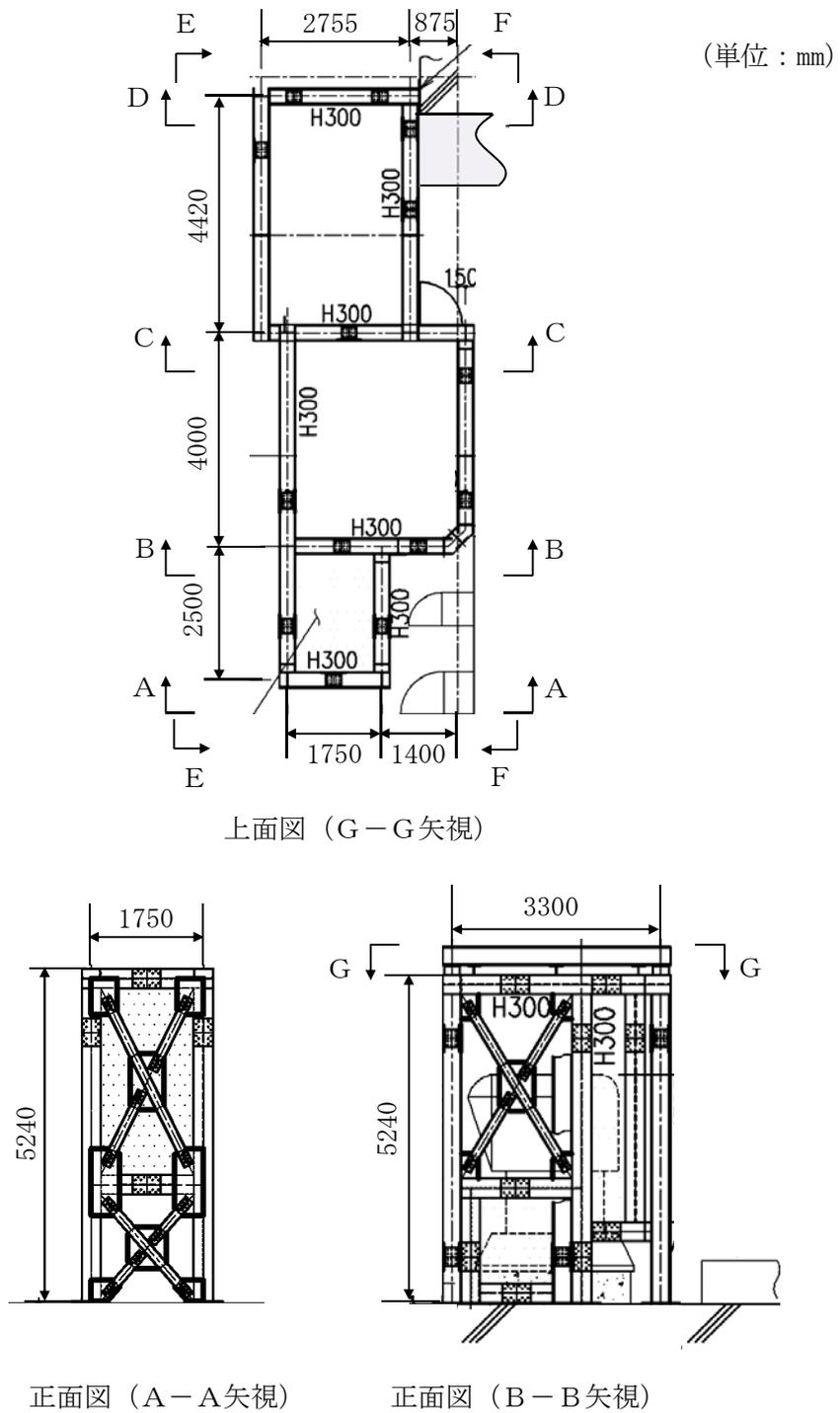


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造図(2/4)
(2D非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設(1/2))

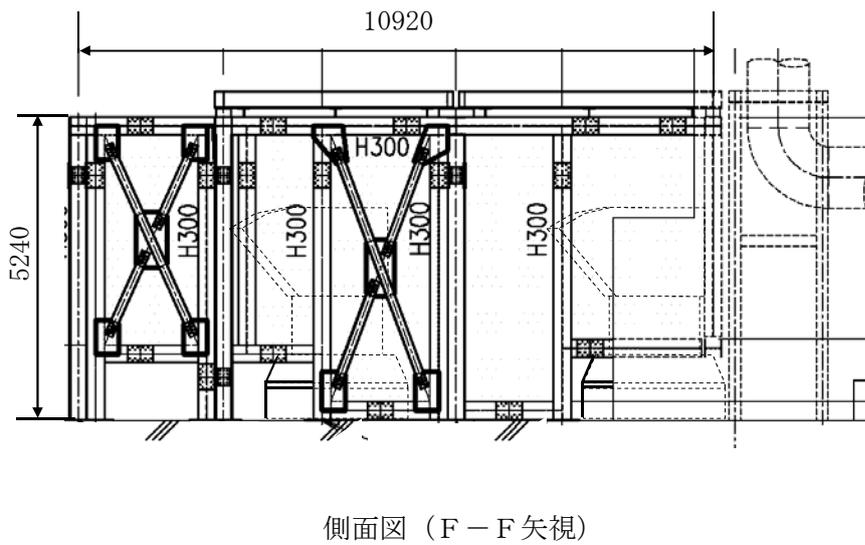
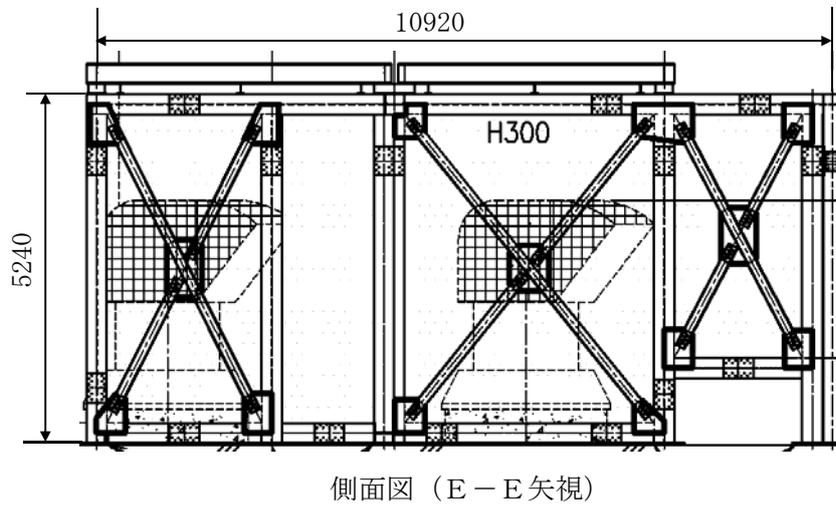
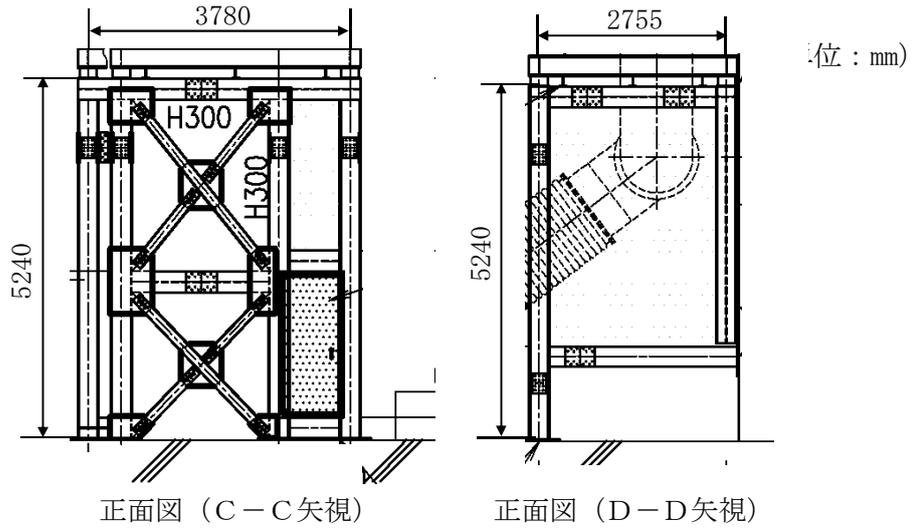


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造図(3/4)
(2D非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設(2/2))

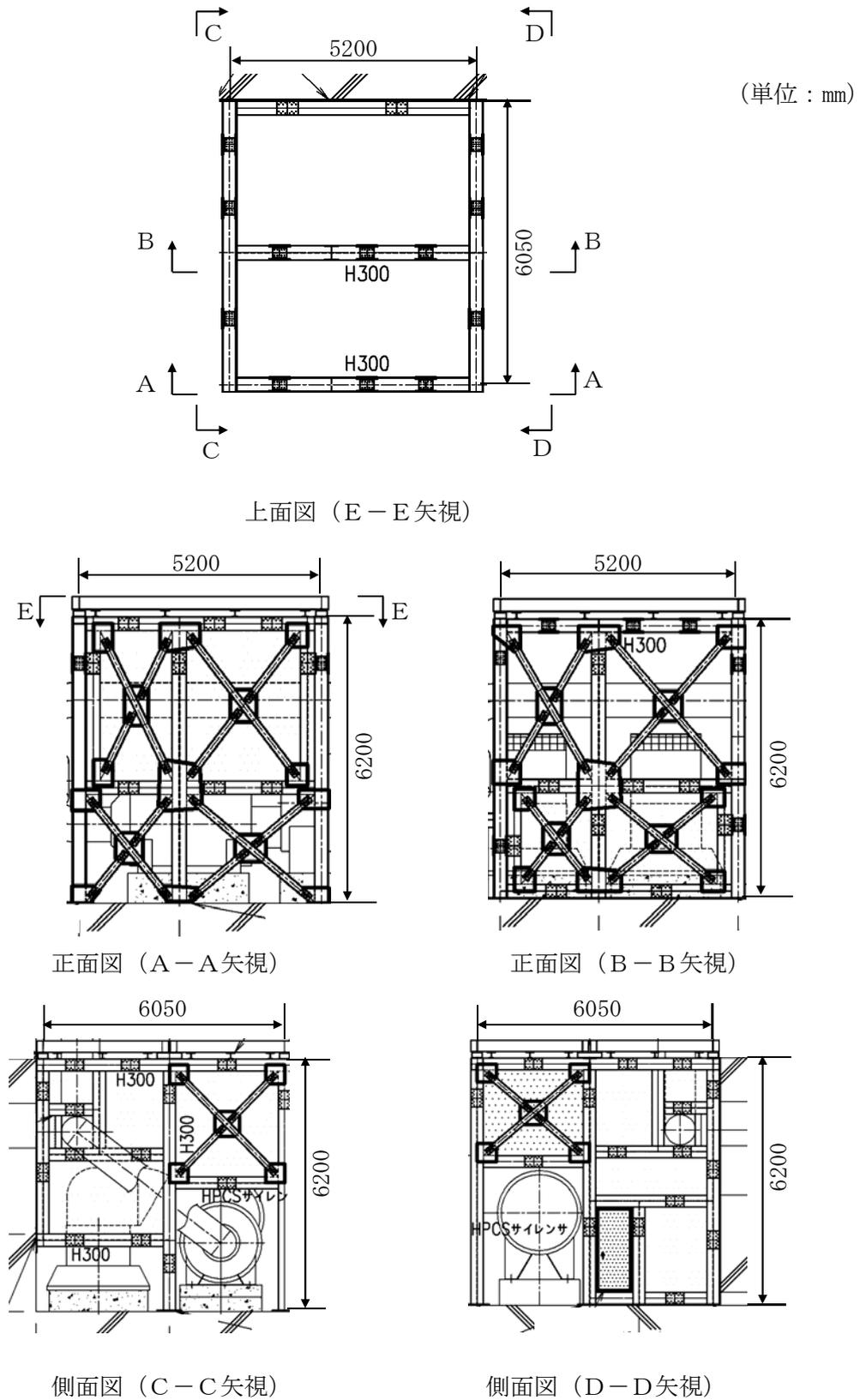


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造図 (3/4)
 (高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

(2) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構

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

中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造を図 2-3 に示す。

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

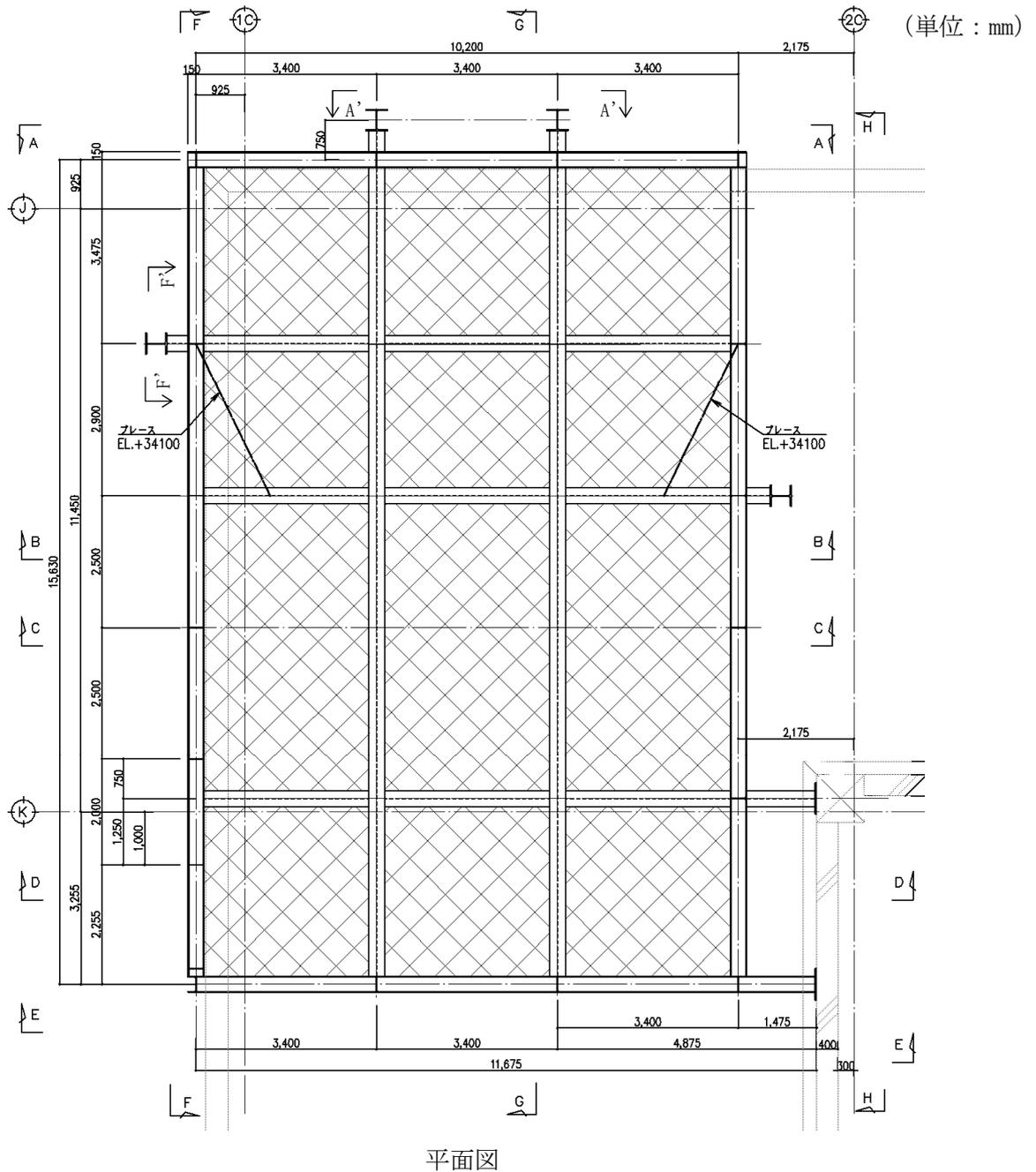


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(1/6)

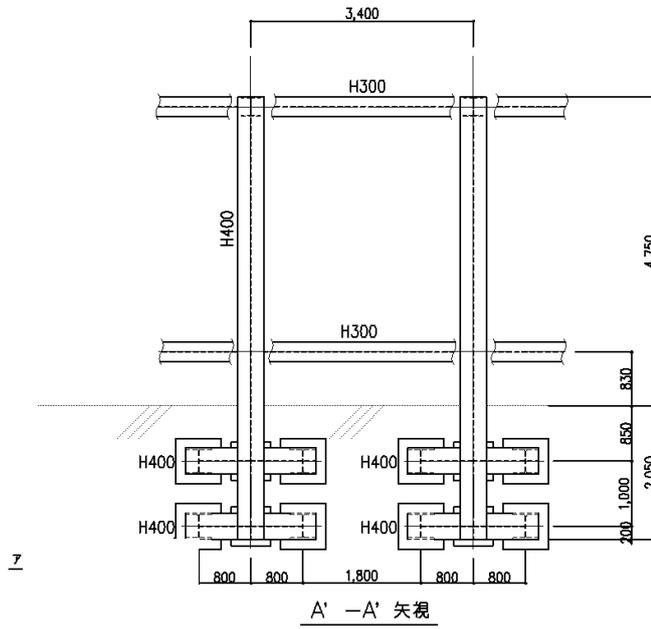
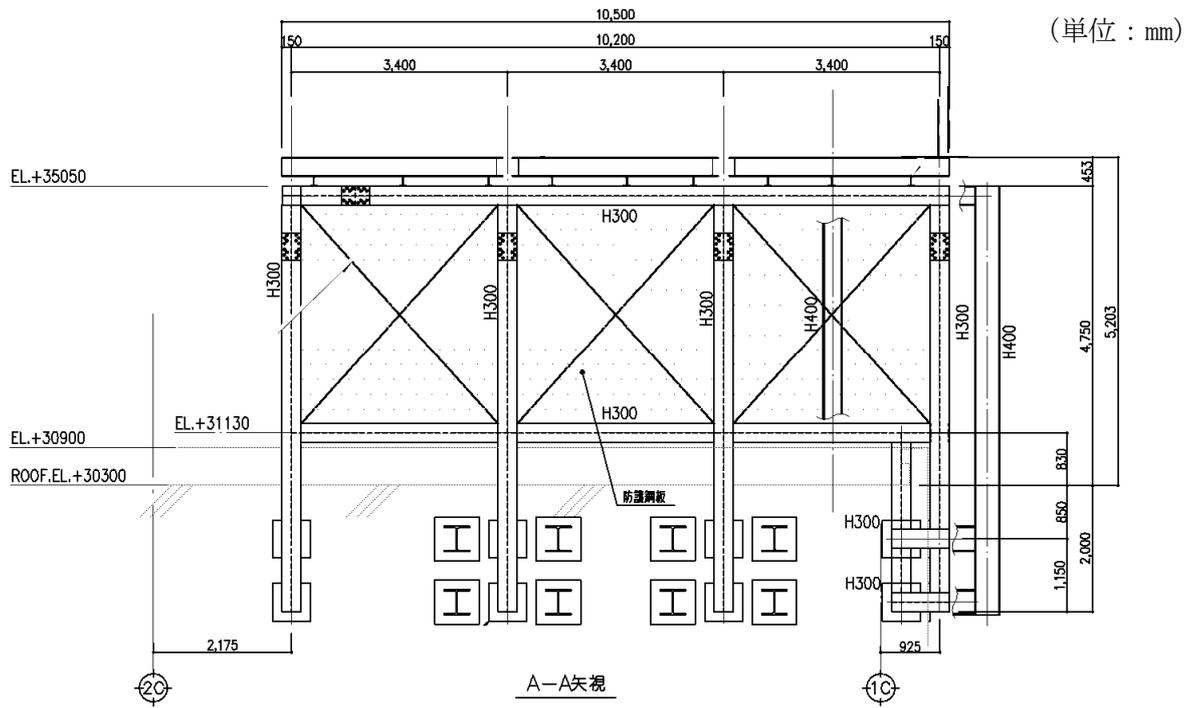


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(2/6)

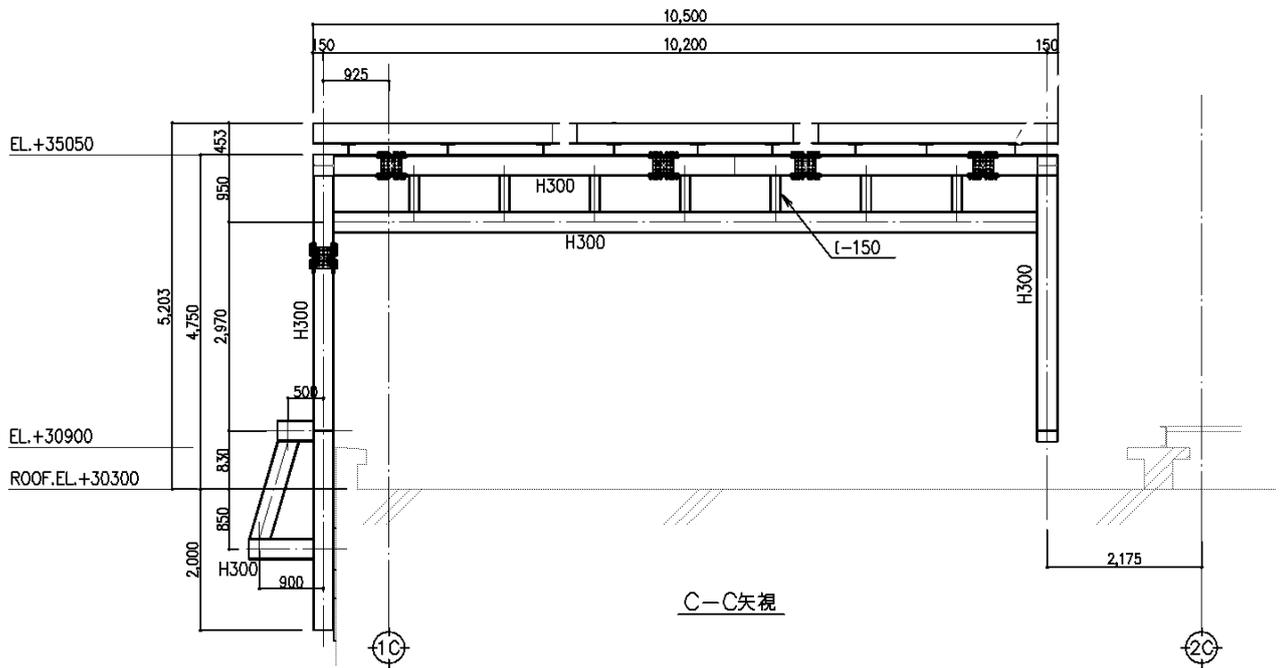
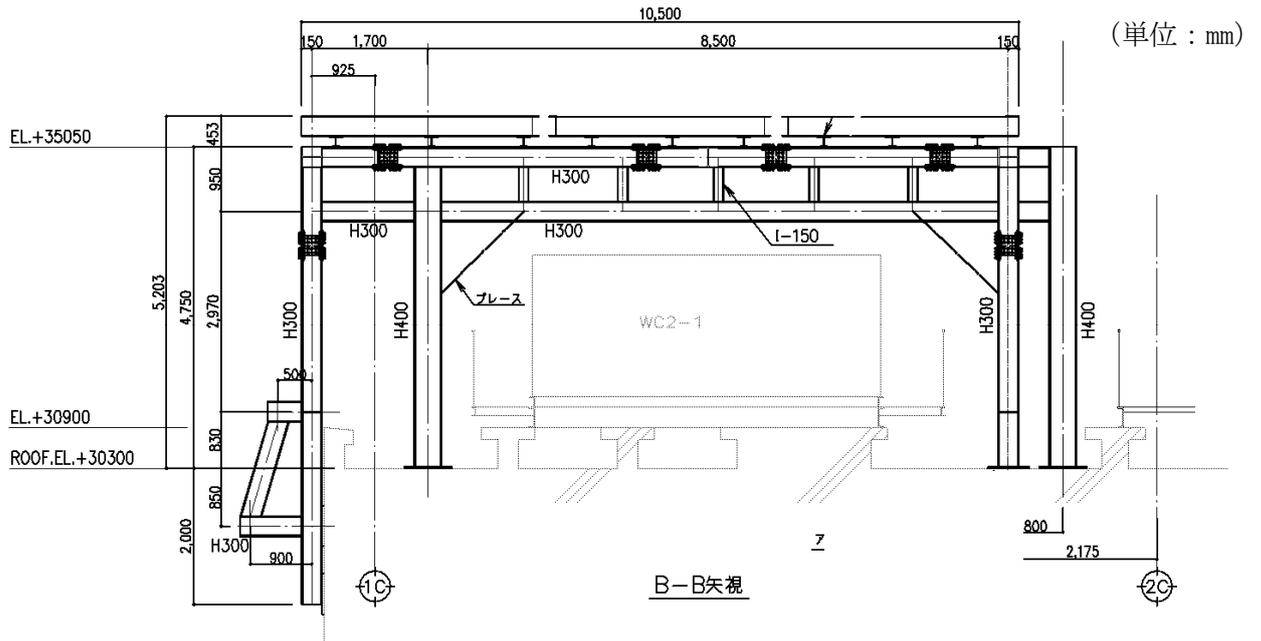


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(3/6)

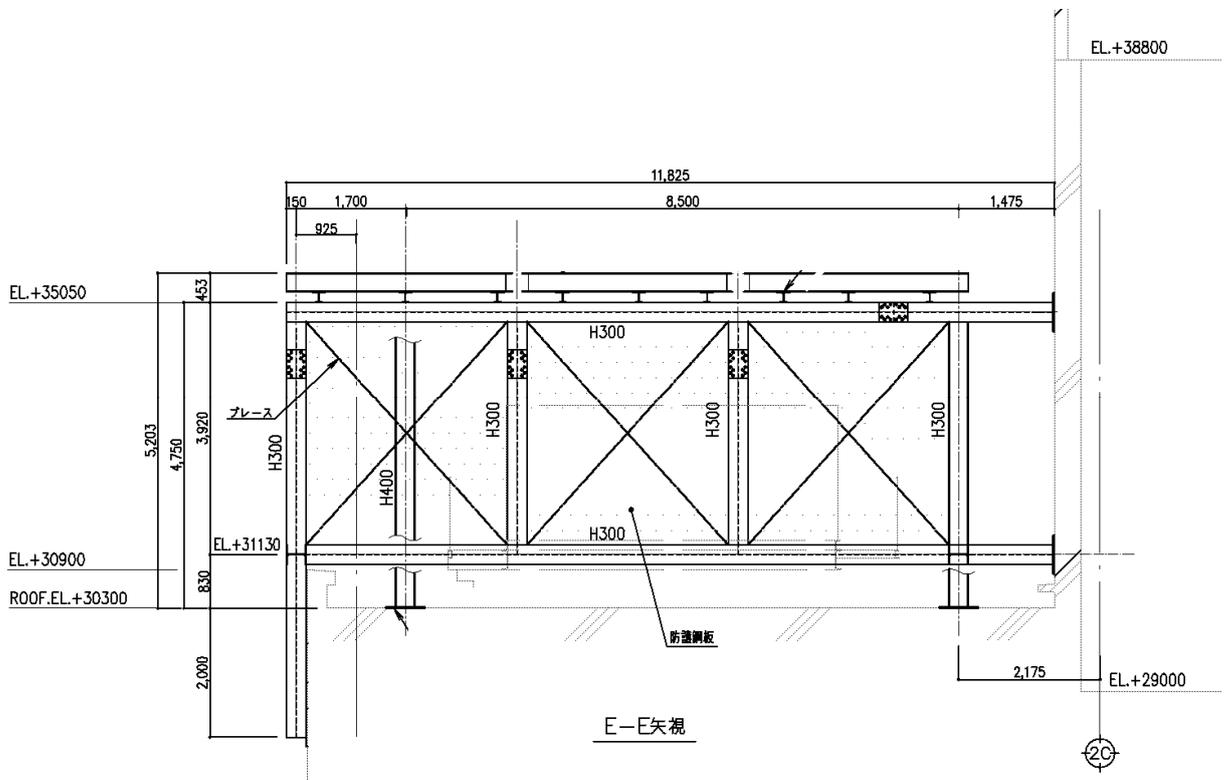
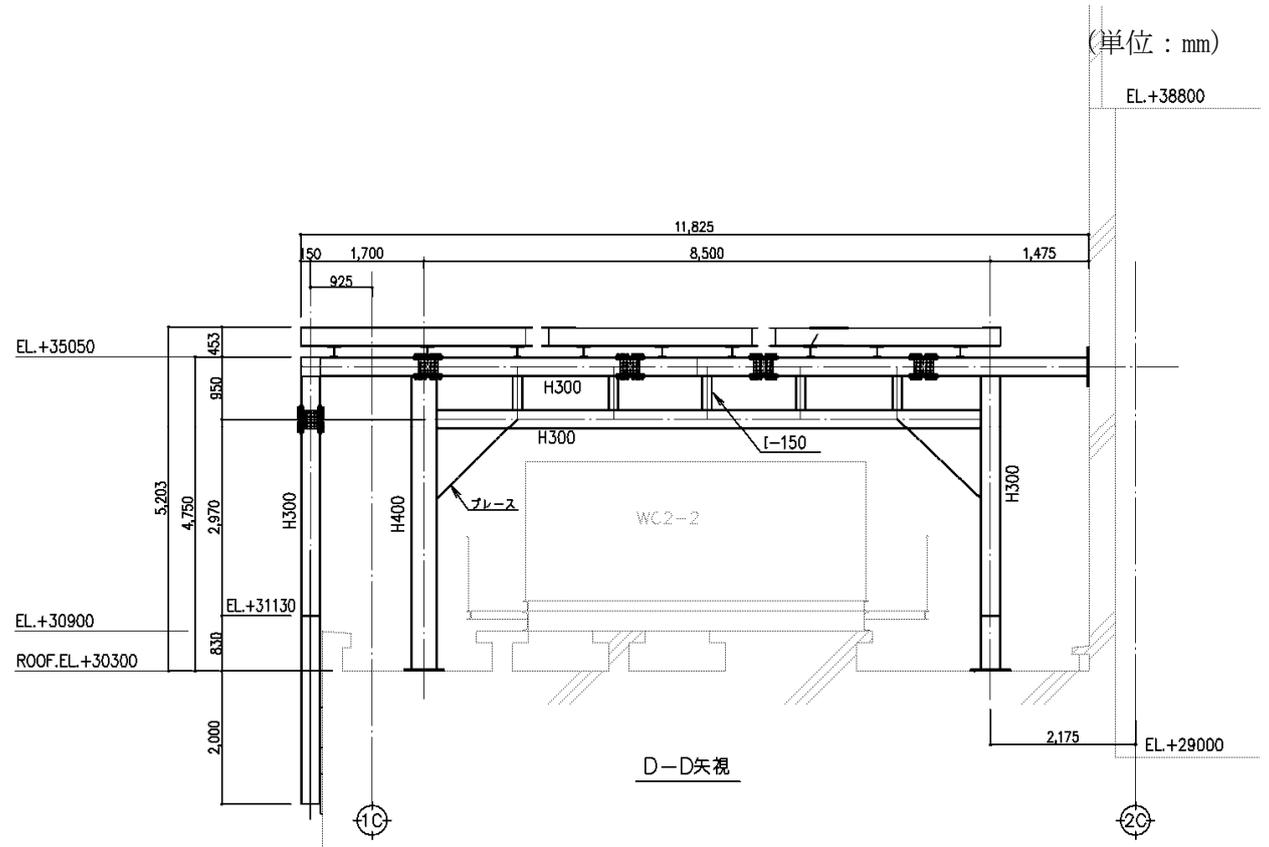
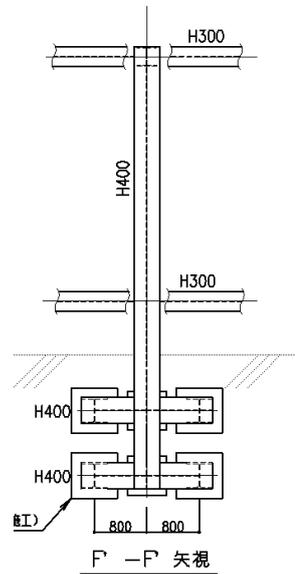
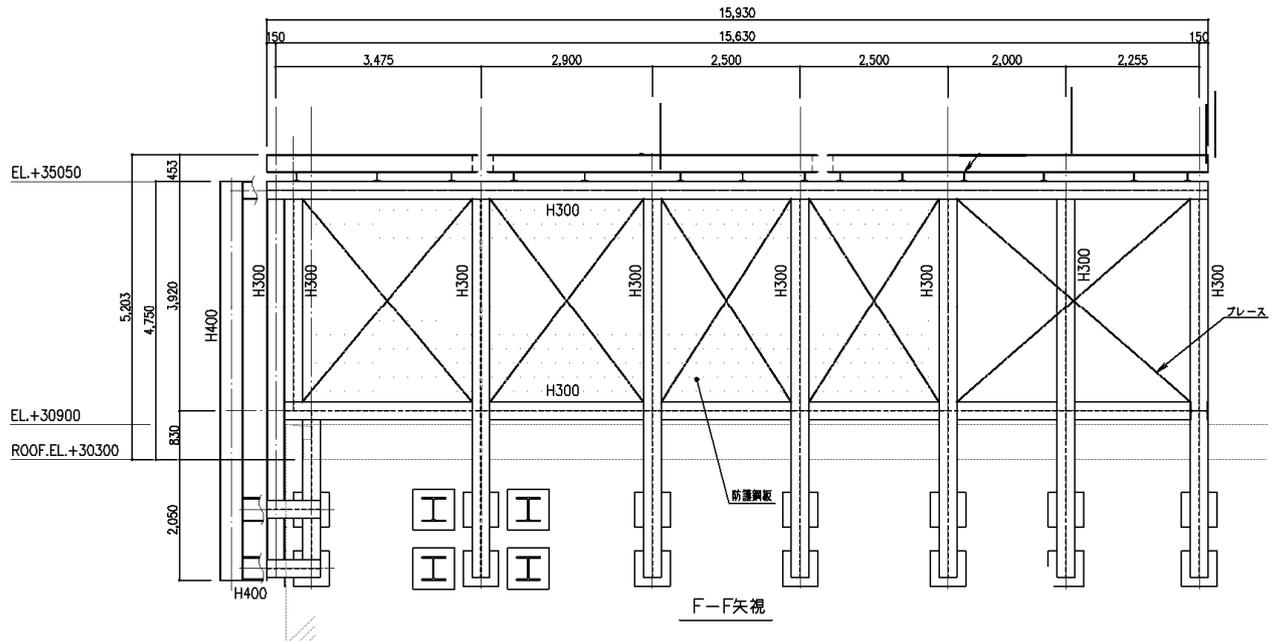


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(4/6)

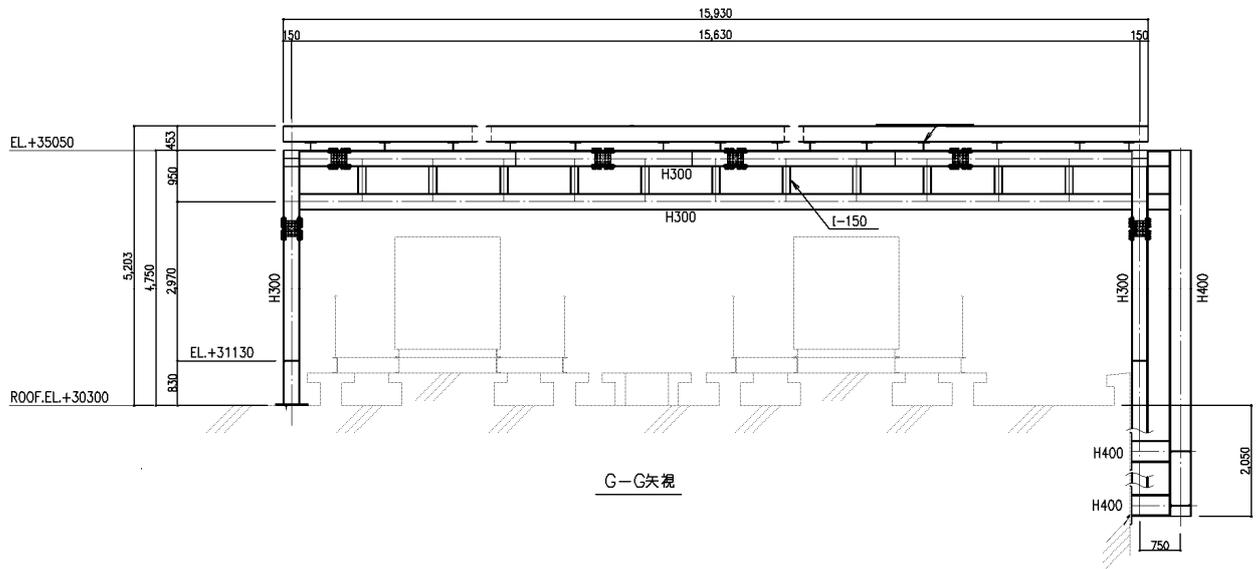
(単位：mm)



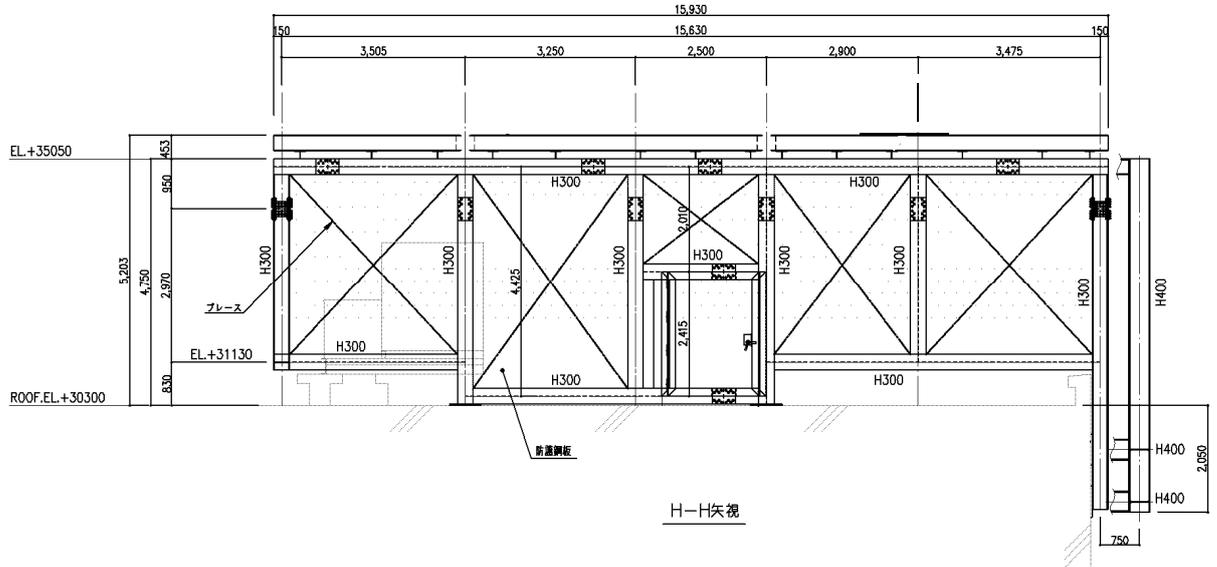
NT2 補② V-3-別添 1-2-1-3 R6

図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(5/6)

(単位：mm)



G-G矢視



H-H矢視

NT2 補② V-3-別添 1-2-1-3 R6

図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(6/6)

(3) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構

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

海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構の構造図を図 2-4 に示す。

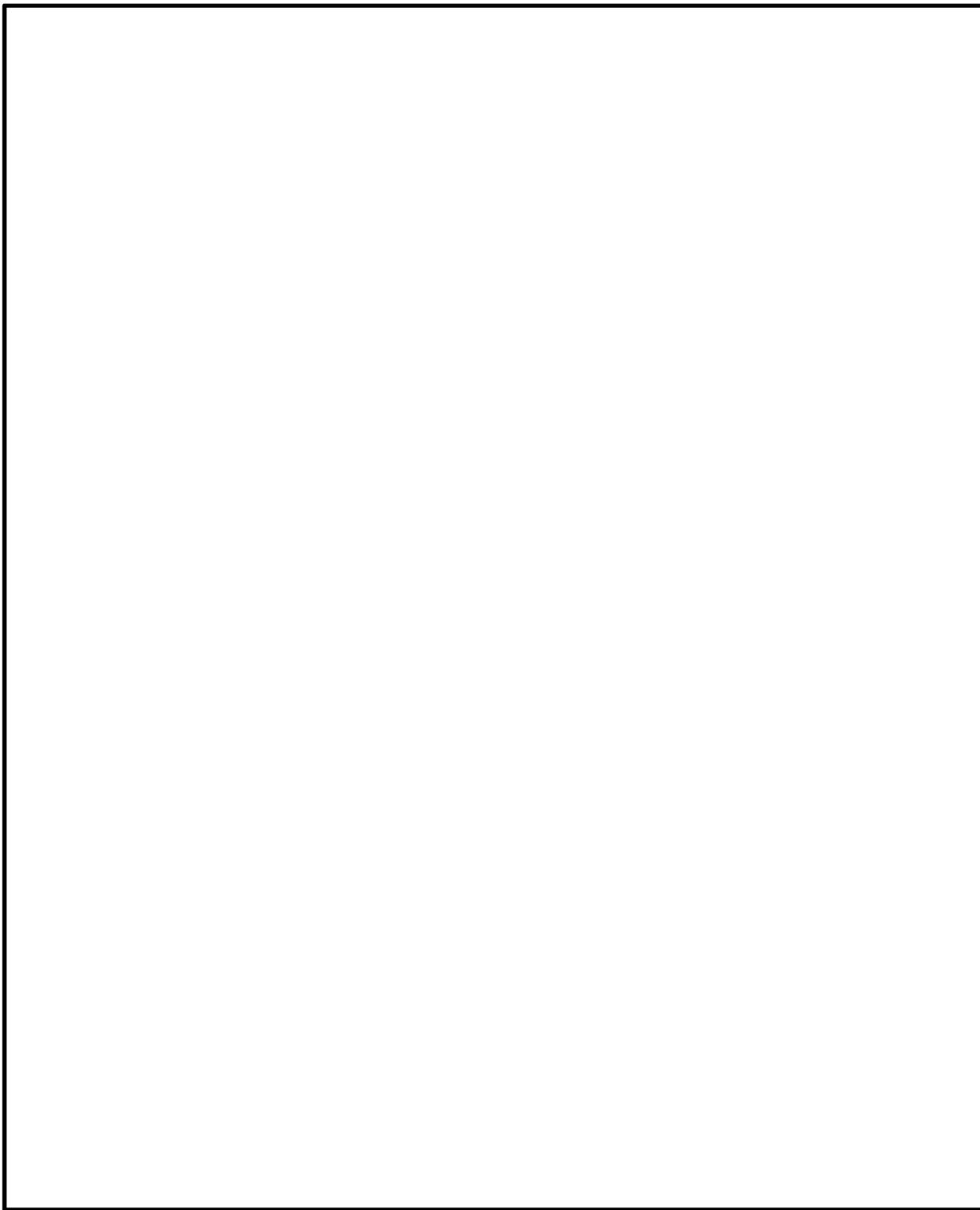


図 2-4 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構の構造図(1/2)

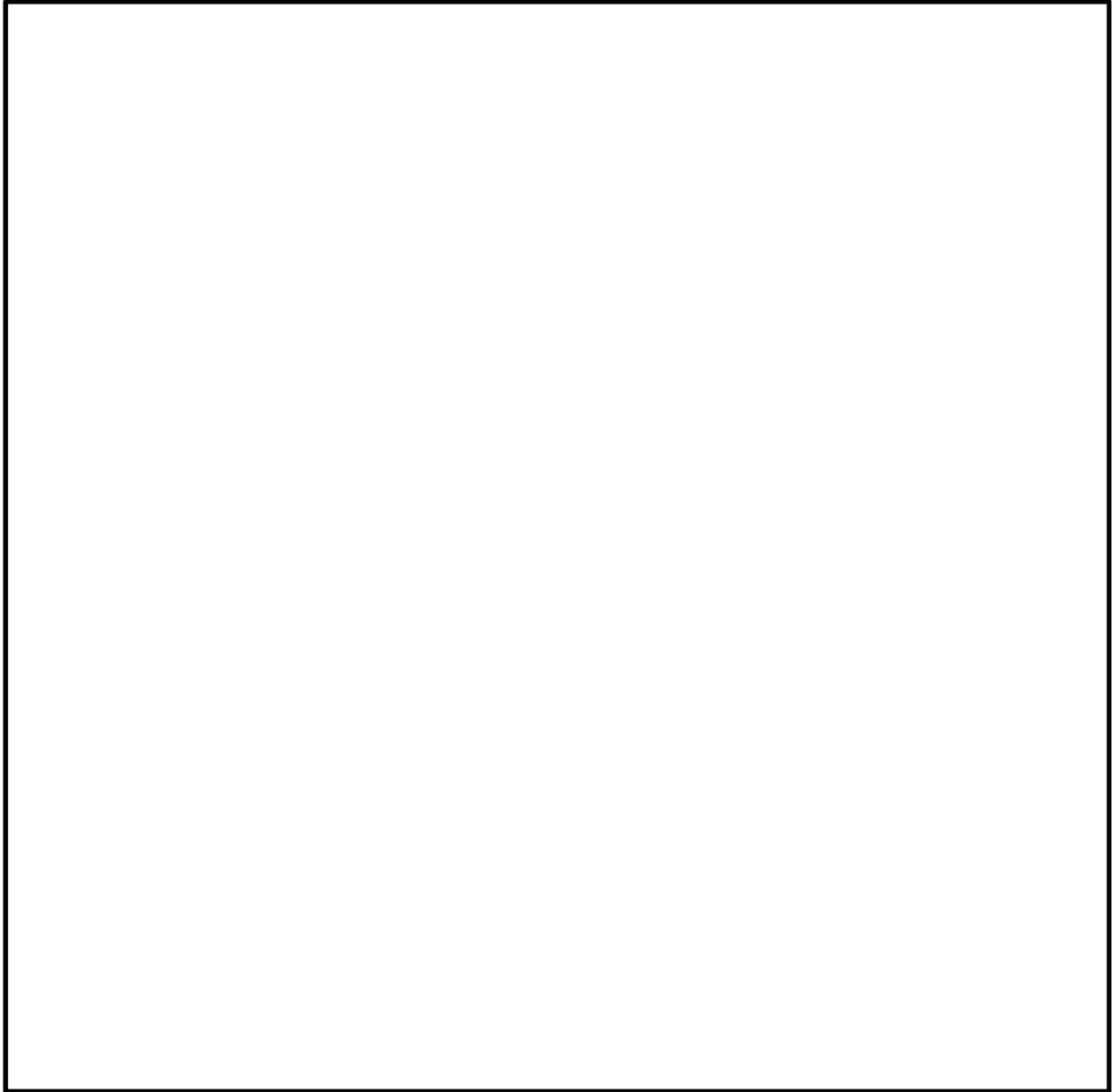


図 2-4 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構の構造図(2/2)

(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、外部事象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。

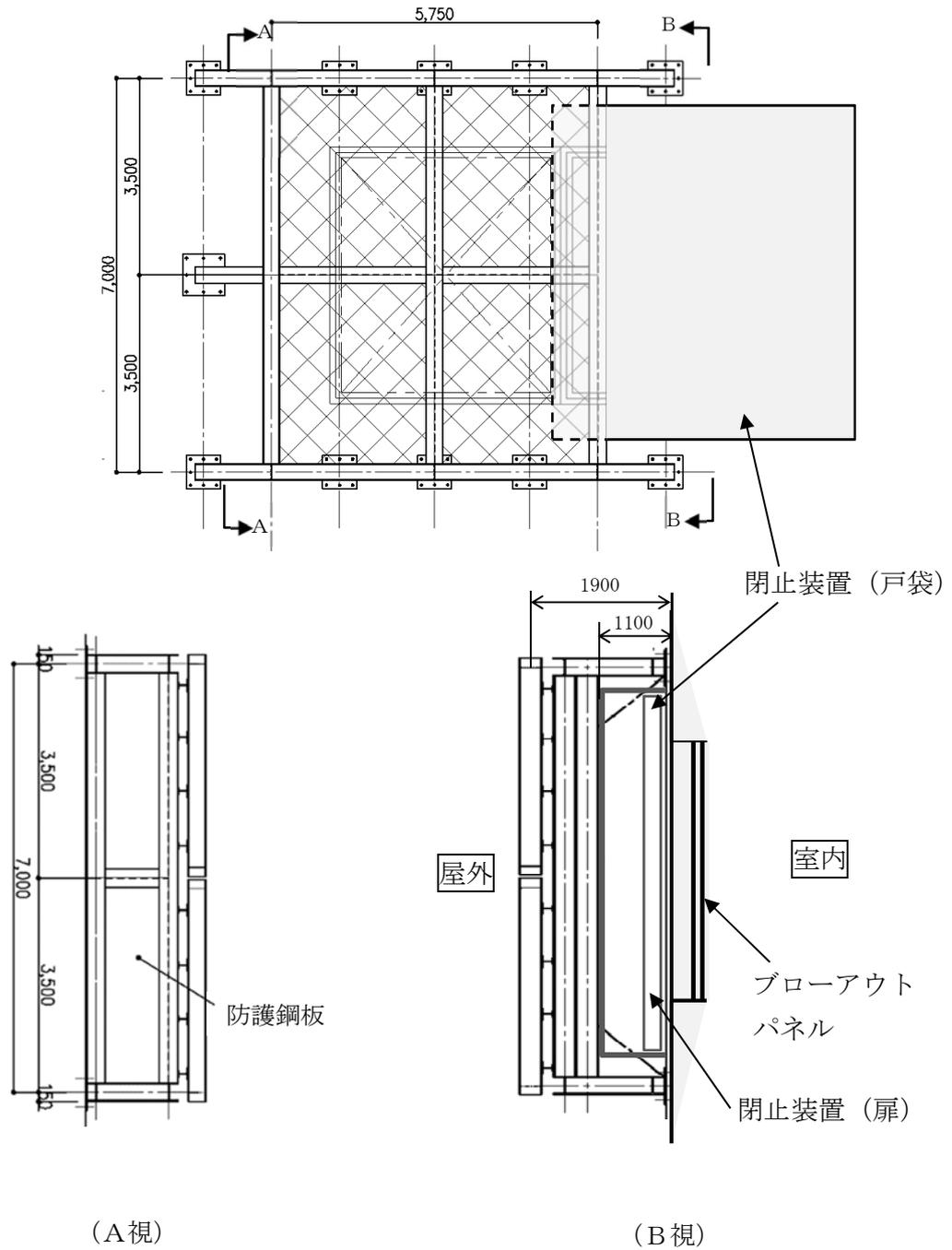


図2-5 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構の構造図

(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、外部事象防護対象施設である中央制御室換気系ファン等を内包する施設として柱、はり等により構成される。

中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構の構造を図 2-6 に示す。

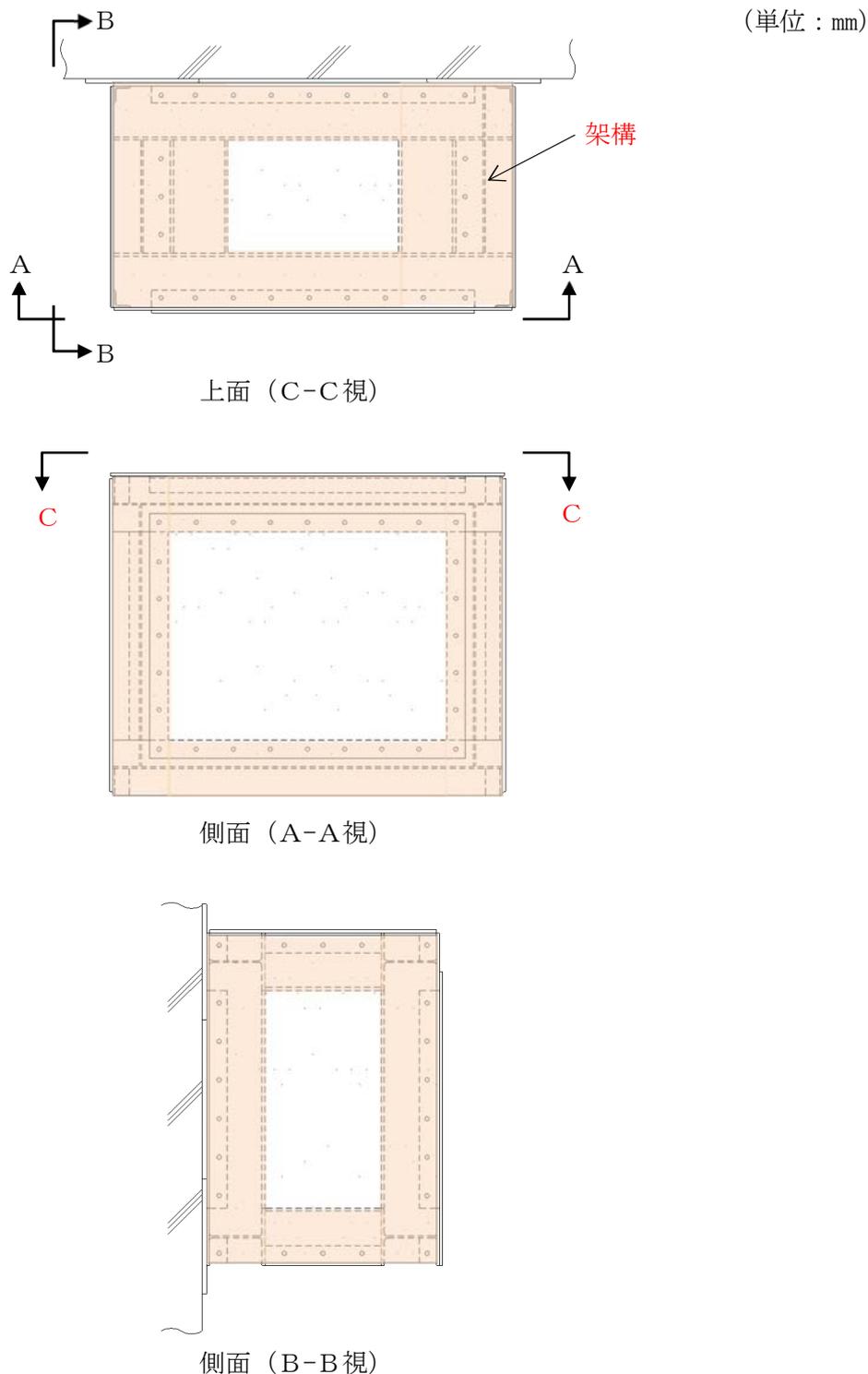
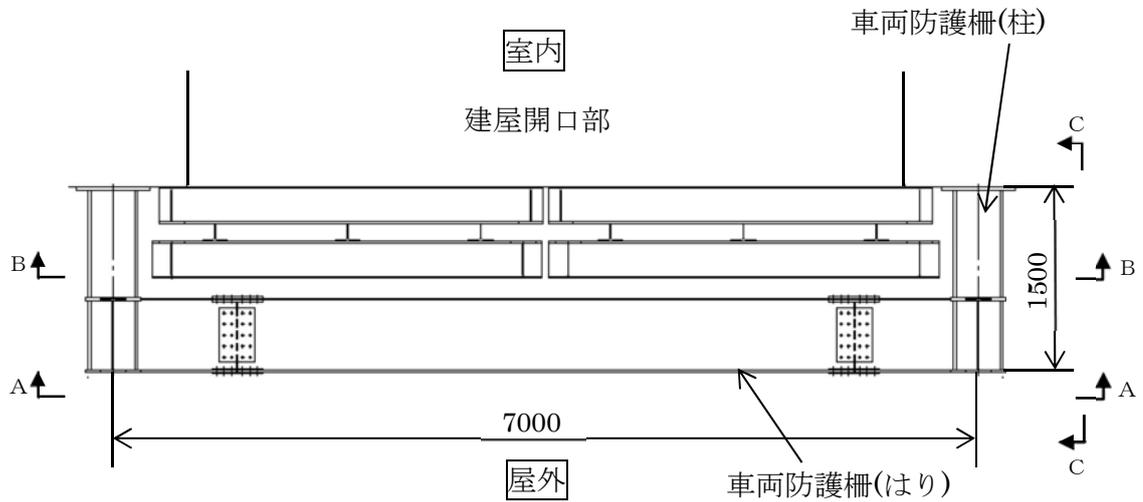


図 2-6 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構の構造図

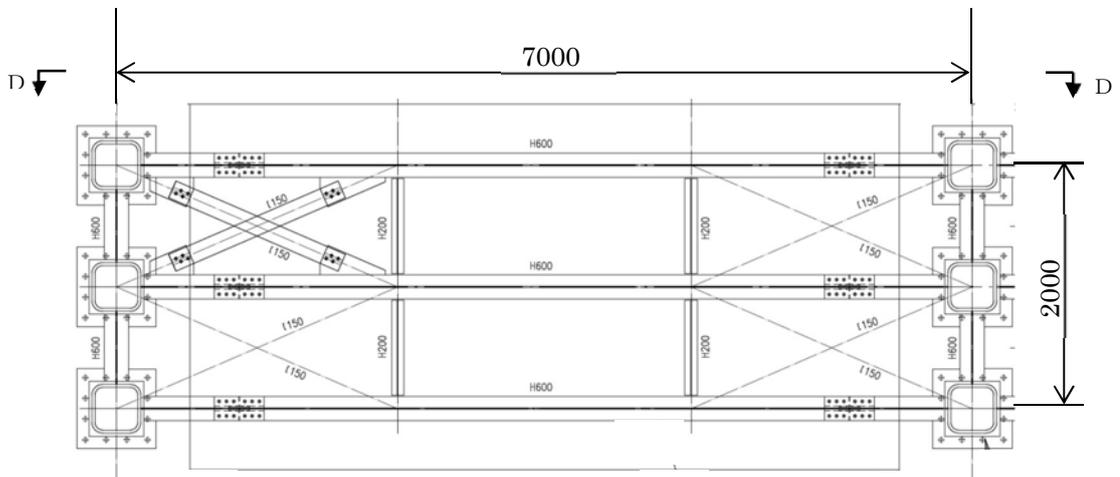
(6) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構

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

使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構の構造を図 2-7 に示す。

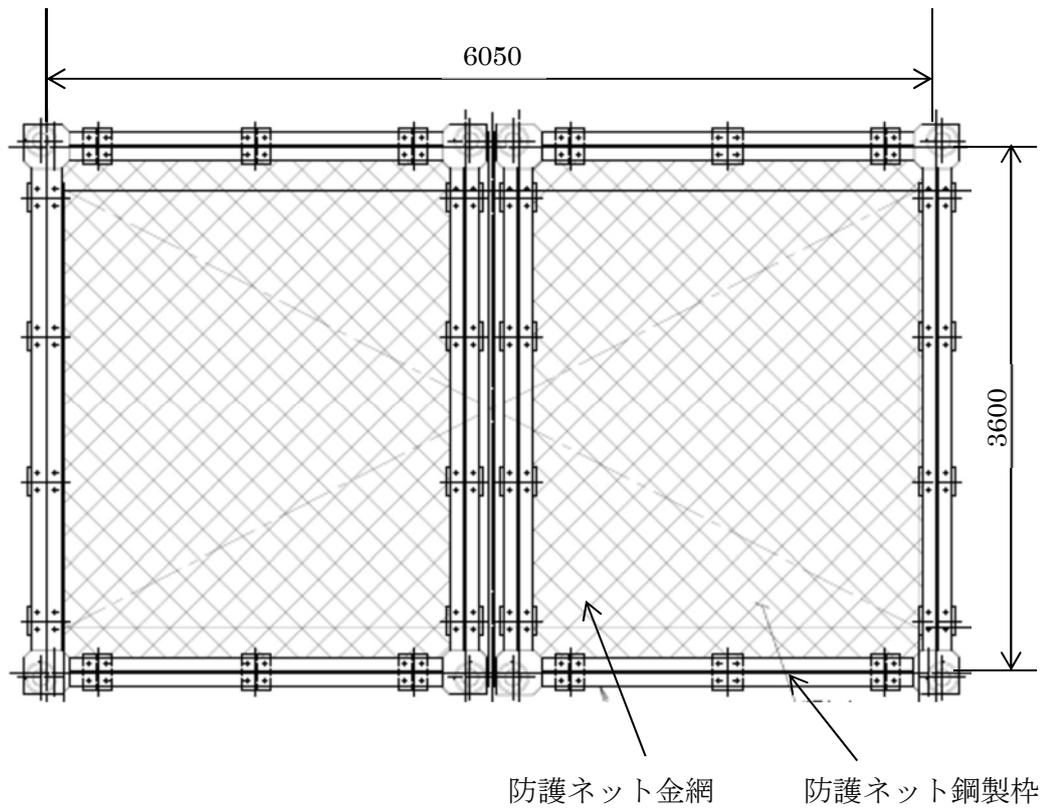


上面図 (D-D 矢視)

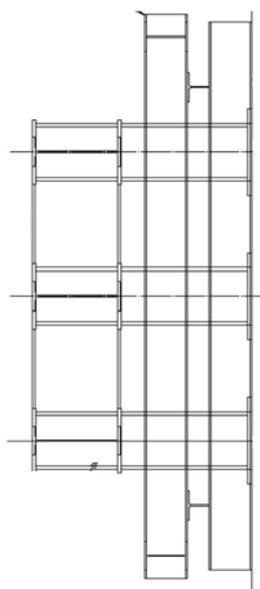


正面図 (A-A 矢視)

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(1/2)



正面図 (B-B 矢視)



側面図 (C-C 矢視)

図 2-7 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構の構造図(2/2)

2.3 評価方針

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

架構の評価フローを図 2-8 に示す。

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

具体的には、設計荷重に対して、外部事象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。）を貫通し外部事象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、架構が倒壊し外部事象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（母材部）を飛来物が貫通し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（母材部）に全断面欠損に至るようなひずみが生じないように、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。

b. 架構全体の支持機能評価

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

なお、海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構全体に対する支持機能評価については、「V-3-別添 1-1-10-1 建屋及び構造物の強度計算書」におけるが架構鋼製部材（鉄骨）の損傷を仮定した場合の評価に包含されるため、評価を省略する。

(3) 波及的影響評価

波及的影響評価については、「2.3(2) 支持機能評価」の評価に同じ。

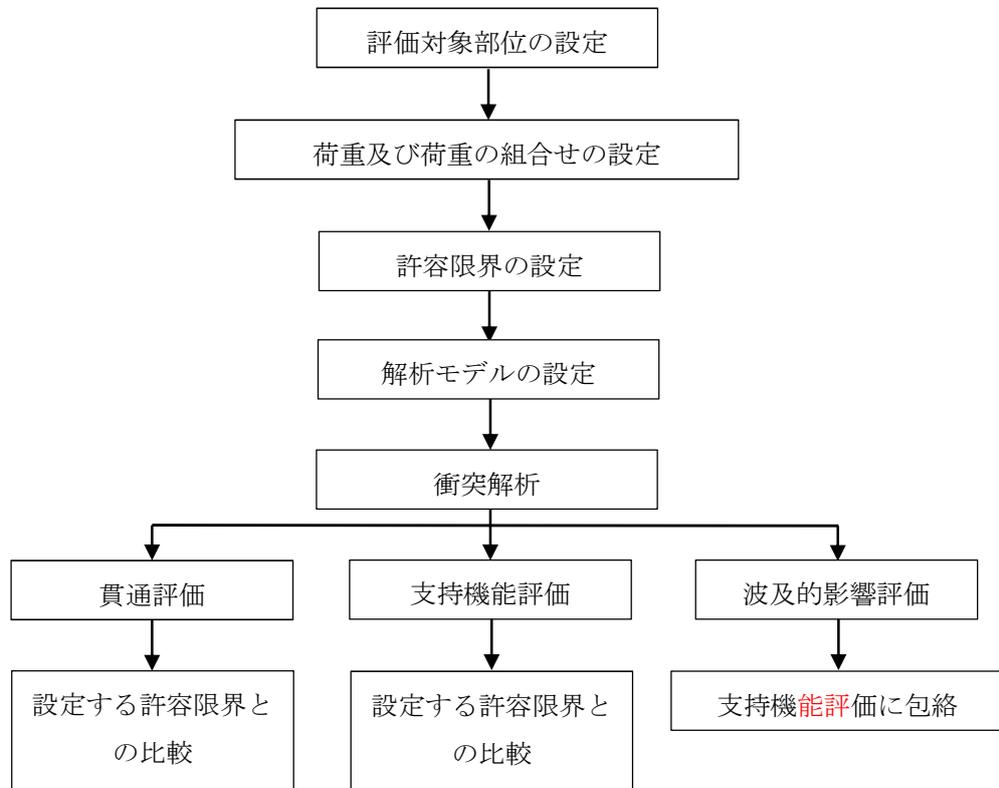


図 2-8 架構の評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1-2005/2007」
（（社）日本機械学会（以下「JSME」という。））
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 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）

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
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

(1) 車両に対する評価

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

(2) 鋼製材に対する評価

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

3.2.2 支持機能評価

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

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

この評価においては、各防護対策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
車両	3.6×2.5×8.6	5000	52	—※	使用済燃料乾式貯蔵容器 竜巻防護対策施設のうち、 車両防止柵
鋼製材	4.2×0.2×0.3	135	51	34	上記以外の防護対策施設

※：建屋排気口からの侵入は、構造上水平方向のみを考慮すれば良い。

表 3-4 飛来物の特性値

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

(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

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

貫通評価において許容限界とする部材せい位置を図 3-1 に示す。

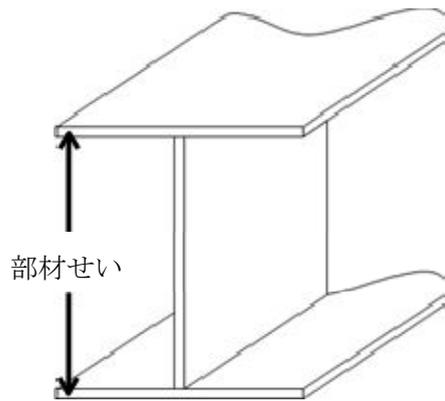


図 3-1 貫通評価における許容限界とする部材せい

(2) 支持機能評価

a. 架構部材の支持機能評価

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

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

使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の車両防止柵の応力については、接触する部材をはりと見なしたモデルに基づき、弾性限界を許容限界として設定する。破断ひずみについては、「4. (1)c. (c) 破断ひずみ」に示すとおり、JIS に規定されている伸びの下限值を基に設定するが、「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	許容限界	対象
SM490 []	降伏応力 (短期許容応力度)	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
SM490 []	破断ひずみ (真ひずみ) []	上記以外の防護対策施設

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**外部事象**防護対象施設に影響を与えないという観点で、許容限界を以下のとおり設定する。

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

表 3-7 許容応力(その他の支持構造物)

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

(注) 応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対しても評価を行う。

表 3-8 使用材料の許容応力(単位：MPa)

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

(注 1) 規定に基づき算出する。

(注 2) 規定に基づき算出する。

(注 3) 据付状況に応じ、適切な規定に基づき算出する。

3.5 評価方法

(1) 車両に対する評価

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

(2) 鋼製材に対する評価

鋼製材の衝突を想定する架構の強度評価は、貫通評価及び架構部材の支持機能評価において

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

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

(1) 貫通評価

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

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

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

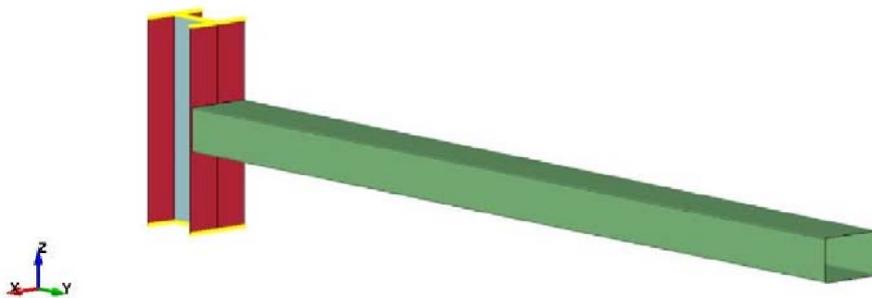


図 3-2 貫通評価モデル図(代表部材モデルと飛来物)

(2) 支持機能評価

a. 架構部材の支持機能評価

飛来物が架構部材に衝突する場合については、「3.5(1) 衝突評価」で評価した解析モデルにおいて、飛来物が架構部材に衝突する場合の架構部材端部に発生するひずみ量を算出し、架構部材端部に破断が生じないことを確認する。飛来物が架構部材に衝突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及び原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構においては，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。

使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の車両防止柵においては，車両と車両防止柵を2自由度系のバネ質点モデルでモデル化し，両者の応答を連成させた評価により算出した，車両防止柵に生じる応答加速度に基づく荷重を3次元FEMモデルに入力し，自重も考慮した静的解析を実施する。

(a) 解析モデル及び諸元

解析モデルは，防護壁を構成する架構部材をはり要素にてモデル化した3次元FEMモデルとする。架構に取り付けられる防護ネット及び防護鋼板の質量は，解析モデルの中で考慮している。

解析モデルを図3-3～図3-7に，用いられる部材の諸元を表3-9に示す。

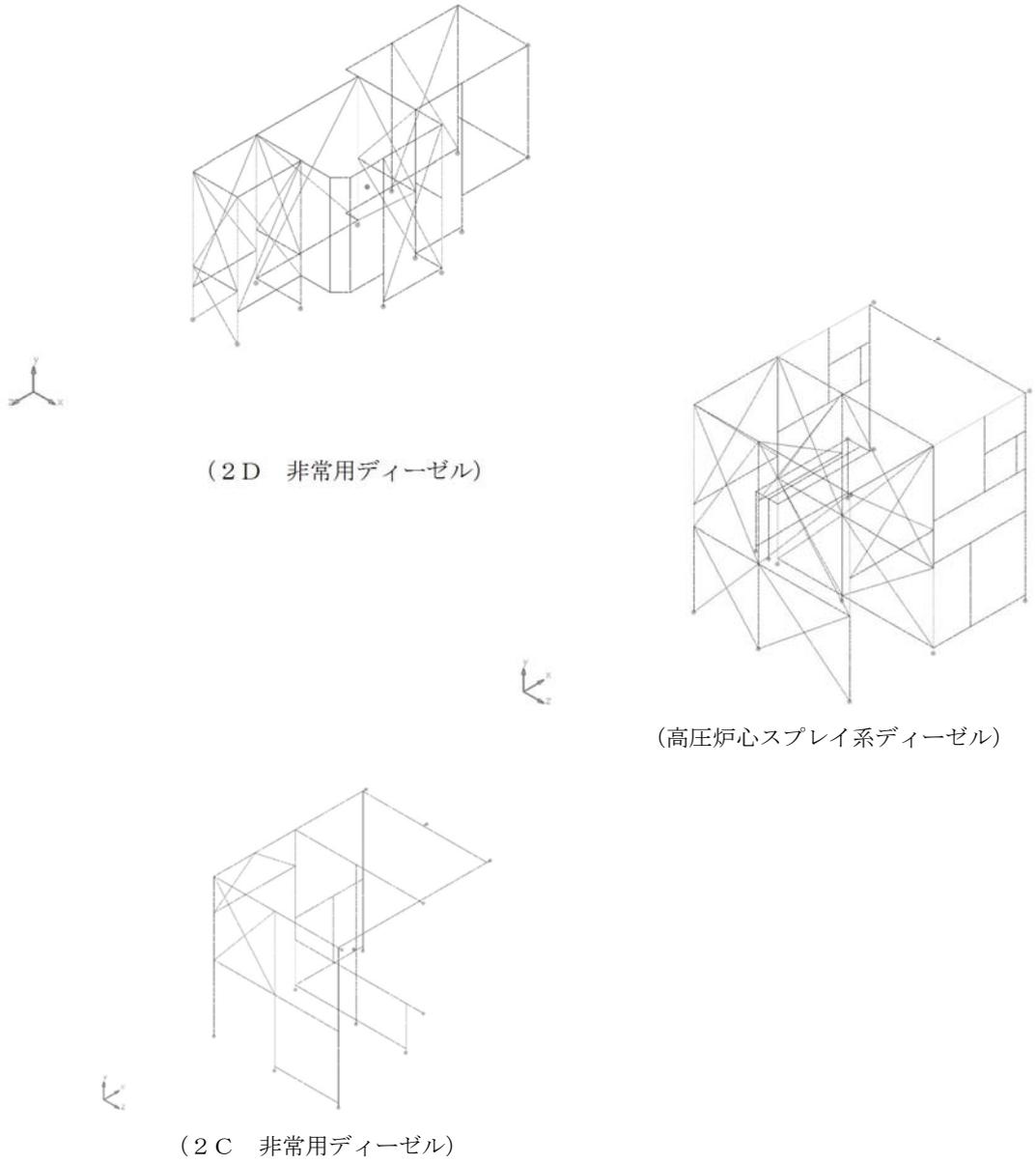


図 3-3 解析モデル図(非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構)

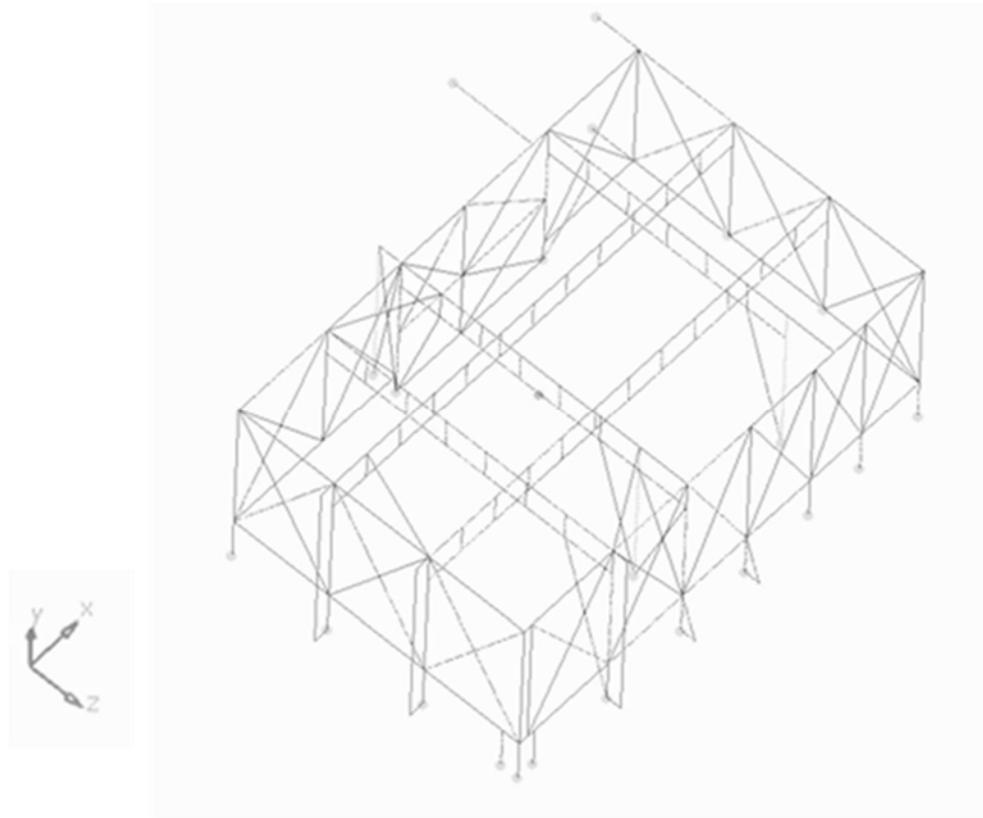


図 3-4 解析モデル図(中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構)

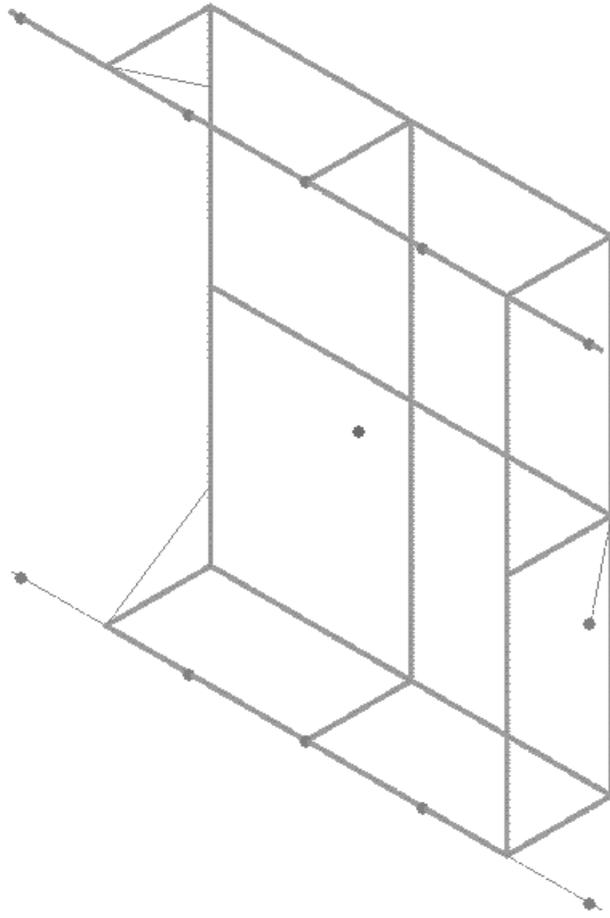


図 3-5 解析モデル図(原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構)

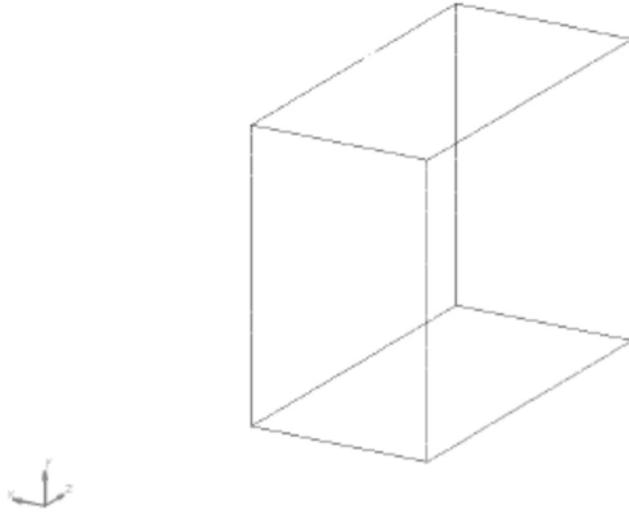


図 3-6 解析モデル図(中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構)

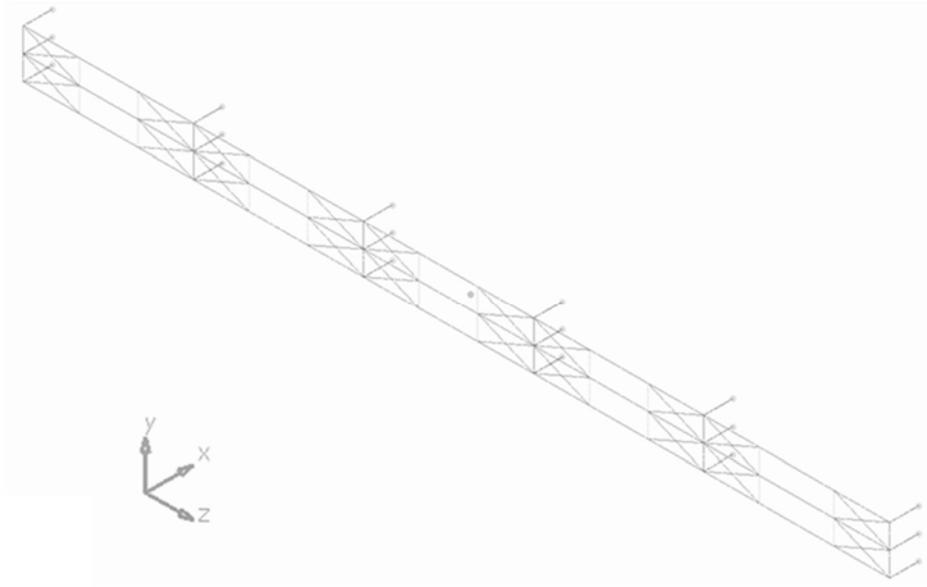


図 3-7 解析モデル図(使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構)

表 3-9 部材の諸元

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

(b) 固有値解析

非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構，中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構，中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構及び原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構においては，図 3-3～図 3-6 の解析モデルに対し，解析コード「MSC/NASTRAN」を用いて，固有値解析を行う。

(c) 応答加速度の算出

設計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，防護対策施設を図 3-8 に示す 1 自由度のバネ-質点系でモデル化し，両者の応答を連成させた評価により算出する。飛来物の衝突速度については，水平方向のバネ定数については水平方向の飛来速度を，鉛直方向のバネ定数については鉛直方向の飛来速度を用いる。なお，飛来物の解析モデル及び材料特性等は「3.5(1) 衝突評価」と同様である。

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

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

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

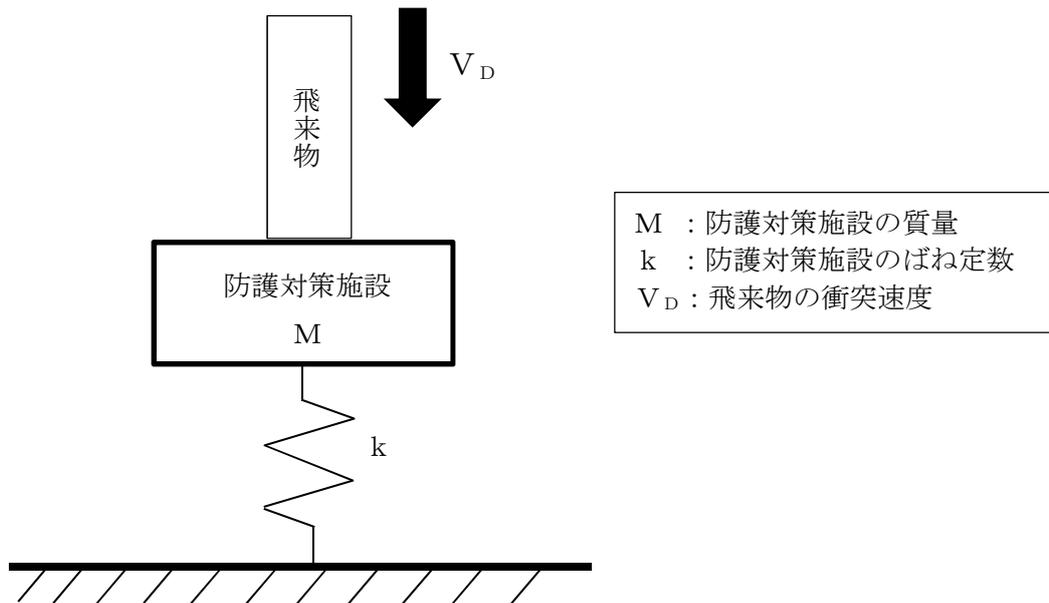


図 3-8 応答加速度評価モデル

車両の衝突による防護対策施設の応答加速度は、図 3-9 に示す 2 自由度系のバネ質点モデルでモデル化し、両者の応答を連成させた評価により算出する。排気ガラルの位置で衝突する車両の衝突速度については、水平方向の飛来速度を用いる。

防護対策施設に作用する加速度 \ddot{x}_1 は、以下の式で求められる。

$$\ddot{x}_1 = \frac{m_n(v_2 - v_1)}{m_1} \omega \sin \omega t$$

ここで、

$$m_n = \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)}$$

$$\omega = \sqrt{k_n / m_n}$$

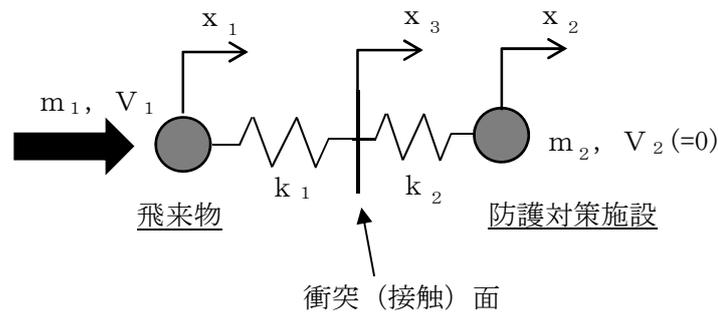
$$k_n = \frac{k_1 k_2}{(k_1 + k_2)}$$

これより、加速度 \ddot{x}_1 の最大値 \ddot{x}_{1m} は以下のとおりとなる。

$$\ddot{x}_{1m} = \frac{m_n(v_2 - v_1)}{m_1} \omega$$

本評価においては、防護対策施設に作用する加速度の最大値 \ddot{x}_{1m} は車両防止柵のはりの中心における加速度として与えられ、当該加速度にはりの全質量を乗じて、車両防止柵に作用する荷重を算定する。なお、実際にははりの両端が拘束されていることから、中心から離れたはりの部位に働く加速度は、図 3-10 に示す様にはりの中心の加速度 \ddot{x}_{1m} より小さくなる。このため、はりの全質量にはり中心の加速度 \ddot{x}_{1m} を乗じて

荷重を算定することには、保守性が確保されている。



m : 質量
k : ばね定数
x : (衝突時の) 初期位置からの変位
V : (衝突時の) 初期速度

図 3-9 2 自由度系のバネ質点モデル

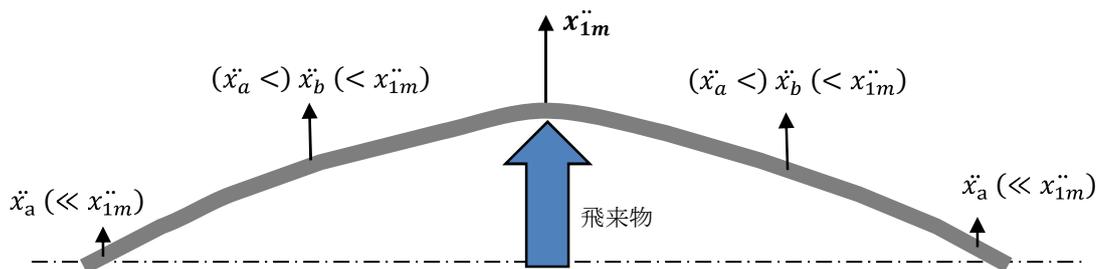


図 3-10 はりに作用する加速度の分布イメージ

(d) 各部材の発生応力の算出

非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構，中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構及び中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構，海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構，原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構及び使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構においては，架構全体の支持機能評価においては，「3.5(2)b.(c) 応答加速度の算出」で算出した飛来物が衝突した際の応答加速度を図 3-3～図 3-7 に示す 3 次元 FEM モデルに入力し，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 3-10 に，アンカーボルトの応力計算式を表 3-11 に示す。

表 3-10 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	-	$\max\left(\frac{\sigma_c + \frac{\sigma_{bx} + \sigma_{by}}{1.5f_b}}{1.5f_c}, \frac{\sigma_{bx} + \sigma_{by} - \sigma_c}{1.5f_t}\right)$
	引張+曲げ	-	$\max\left(\frac{\sigma_t + \frac{\sigma_{bz} + \sigma_{by}}{1.5f_b}}{1.5f_t}, \frac{\sigma_{bz} + \sigma_{by} - \sigma_t}{1.5f_b}\right)$
	曲げ+せん断	-	$\max\left(\frac{\sqrt{(\sigma_c + \frac{\sigma_{bz} + \sigma_{by}}{1.5f_b})^2 + 3\tau_z^2}}{1.5f_t}, \frac{\sqrt{(\sigma_c + \frac{\sigma_{bz} + \sigma_{by}}{1.5f_b})^2 + 3\tau_y^2}}{1.5f_t}\right)$ 軸力が引張の場合は、 σ_c を σ_t とする。

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 3-11 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	—	$\frac{F_x}{A_b}$

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

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

表 4-1 架構部材の仕様

評価対象	評価部材番号	寸法	評価方法	材質
<ul style="list-style-type: none"> ・ 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 ・ 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 	①-1	H-300×300×10×15 長さ：900	部材破断評価 (部材せい：300)	SM490
	①-2	H-300×300×10×15 長さ：6050	たわみ評価	
<ul style="list-style-type: none"> ・ 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構 	②-1	 長さ：1250	部材破断評価 (部材せい： )	SS400
	②-2	 長さ：8915	たわみ評価	
	②-3	 長さ：10320		

表 4-2 飛来物の仕様

飛来物	サイズ 長さ×幅×高さ (m)	質量 (kg)	材質
鋼製材	4.2×0.3×0.2	135	SS400
車両	3.6×2.5×8.6	5000	—(注 1)

(注 1) 車両の剛性は 2.94×10^6 N/m とする。

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	SS400			2.05×10^5	0.3
	SM490	5 を超え 16 以下	245	2.05×10^5	0.3
		16 を超え 40 以下	235	2.05×10^5	0.3

c. 動的解析における鋼製材料の非線形特性

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

(a) 材料の応力—ひずみ関係

以下に示す Cowper—Symonds の式を適用する。

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

ここで、 σ_{eq} は動的応力、Aは降伏応力、Bは硬化係数、 ε_{pl} は相当塑性ひずみ、 $\dot{\varepsilon}_{pl}$ は無次元相当塑性ひずみ速度、nは硬化指数、D及びqはひずみ速度係数を表す。ひこれらのパラメータを表 4-4 に示す。これらのパラメータは、日本溶接協会の動的物性の推定式（WES 式）にフィッティングする様に選定した。

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	SS400	SM490
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第 4-1 図に示す。

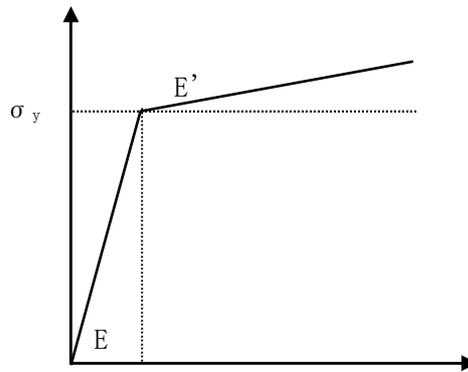


図 4-1 バイリニア型応力-ひずみ関係の概念図

(b) 破断ひずみ

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

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

材料ごとの破断ひずみを表 4-5 に示す。

表 4-5 架構部材の破断ひずみ

ケース	材質	JIS 規格値 (伸び)	T F	破断ひずみ※
1	SS400		2.0	0.081
2	SM490		2.0	0.081

※：真ひずみ換算値

(2) 架構全体の支持機能評価

a. 使用材料及び寸法

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

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

表 4-6 架構の使用材料及び寸法の仕様

評価対象	評価部材番号	仕様	材質
使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設車両防止柵	③-1	H-600×200×11×17	SM490

b. 材料定数

架構の使用材料の材料定数を表 4-7 に示す。

表 4-7 架構の使用材料の材料定数

材料	単位体積重量 (kg/m ³)	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比
SM400	7860	2.05×10^5	0.3
SM490	7860	2.05×10^5	0.3

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

	評価部材 番号	飛来物	貫入深さ (mm)	許容限界 (mm)
<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 ・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 	①-1	鋼製材	35	300
海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構	②-1	鋼製材	82.5	□

5.2 支持機能評価

5.2.1 部材の支持機能評価

(1) 架構への衝突時の支持機能評価

飛来物の架構への衝突時の支持機能評価結果を表 5-2 に示す。架構部材端部に生じる最大ひずみが破断ひずみを上回るケースも認められたが、全断面の破断に至ることはなく、架構部材端部で破断が生じることなく部材は支持される。また、部材の最大ひずみが破断ひずみを下回っていることから、荷重が作用する箇所付近の部材についても破断に至ることはない。

表 5-2 支持機能評価(架構部材への衝突時)

評価対象	評価部材 番号	飛来物	最大 ひずみ	破断ひずみ (許容限界)
<ul style="list-style-type: none"> ・非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設架構 ・中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構 ・中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構 ・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 	①-2	鋼製材	>0.081 全断面の破断 には至らない	0.081
海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構	②-2	鋼製材	0.0006	0.081
	②-3		0.0002	

5.2.2 架構全体の支持機能評価

(1) 固有値解析

図 3-3～図 3-11 の解析モデルによる固有値解析結果を表 5-15～表 5-20 に示す。

表 5-15 固有振動数(2C非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設架構)

次数	質量 (kg)	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	刺激係数			卓越方向
				X 方向	Y 方向	Z 方向	
2	2.09×10 ⁴	22.292	0.04486	1.66	0.00	0.05	X 方向
4		29.145	0.03431	-0.90	-0.06	-1.99	Z 方向
15		59.359	0.01685	0.32	-1.13	0.06	Y 方向

表 5-16 固有振動数(2D非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設架構)

次数	質量 (kg)	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	刺激係数			卓越方向
				X 方向	Y 方向	Z 方向	
6	4.16×10 ⁴	18.834	0.05310	3.69	-0.11	0.14	X 方向
7		21.787	0.04590	0.32	-0.05	-3.40	Z 方向
31		42.496	0.02353	-0.20	-1.26	0.32	Y 方向

表 5-17 有振動数(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
竜巻防護対策施設架構)

次数	質量 (kg)	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	刺激係数			卓越方向
				X 方向	Y 方向	Z 方向	
9	3.32×10 ⁴	24.313	0.04113	-0.01	-0.06	1.40	Z 方向
13		32.885	0.03041	2.04	-0.19	0.20	X 方向
30		56.570	0.01768	-0.01	-1.07	0.31	Y 方向

表 5-18 固有振動数(中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構)

次数	質量 (kg)	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	刺激係数			卓越方向
				X 方向	Y 方向	Z 方向	
1	1.21×10 ⁵	6.055	0.1652	8.11	-0.11	-0.23	X 方向
2		6.674	0.1498	0.16	0.06	7.52	Z 方向
55		15.974	0.0626	-0.46	3.10	1.36	Y 方向

表 5-19 固有振動数(原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構)

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

表 5-20 固有振動数(中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構)

次数	質量 (kg)	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	刺激係数			卓越方向
				X 方向	Y 方向	Z 方向	
1	3310	122.863	0.0081	0.00	-1.26	0.00	Y 方向
3		160.005	0.0063	0.00	0.00	1.21	Z 方向
8		269.641	0.0037	0.70	-0.02	0.00	X 方向

(3) 各部材の発生応力の算出

架構各部材に発生する応力の算出結果を表 5-22 に示す。

なお、評価結果は許容応力に対する発生応力の比（検定比）が最も大きいものを記載している。検定比が最大となる点を、図 5-1～図 5-7 に示す。

表 5-22 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
2C 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	架構	曲げ+せん断	0.42	1.0	単位なし
	アンカーボルト	引張	170	235	
		せん断	59	135	
		組合せ	170	234	
2D 非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設架構	架構	曲げ+せん断	0.34	1.0	単位なし
	アンカーボルト	引張	147	235	
		せん断	52	135	
		組合せ	147	235	
高圧炉心スプレイ系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	架構	曲げ+せん断	0.34	1.0	単位なし
	アンカーボルト	引張	199	235	
		せん断	101	135	
		組合せ	199	167	
中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構	架構	曲げ+せん断	0.70	1.0	単位なし
	アンカーボルト	引張	163	235	
		せん断	86	135	
		組合せ	141	191	
中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構	架構	曲げ+せん断	0.18	1.0	単位なし
	アンカーボルト	引張	8	177	
		せん断	99	138	
		組合せ	8	177	
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	追而			
	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設車両防止柵	架構	曲げ+せん断	0.76	1.0	単位なし
	アンカーボルト	引張	86	235	
		せん断	85	135	
		組合せ	86	193	

(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

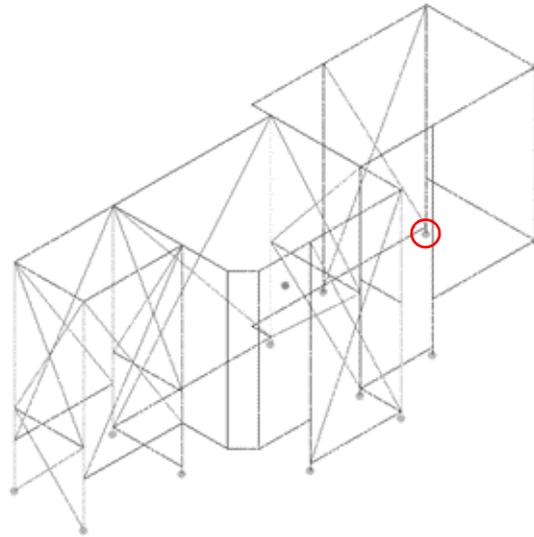


図 5-1 架構の最大検定比発生点（2 C 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構）

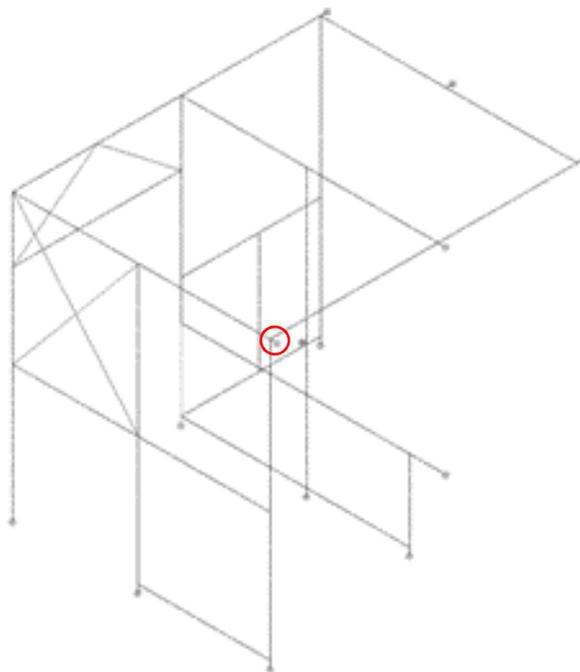


図 5-2 架構の最大検定比発生点（2 D 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構）

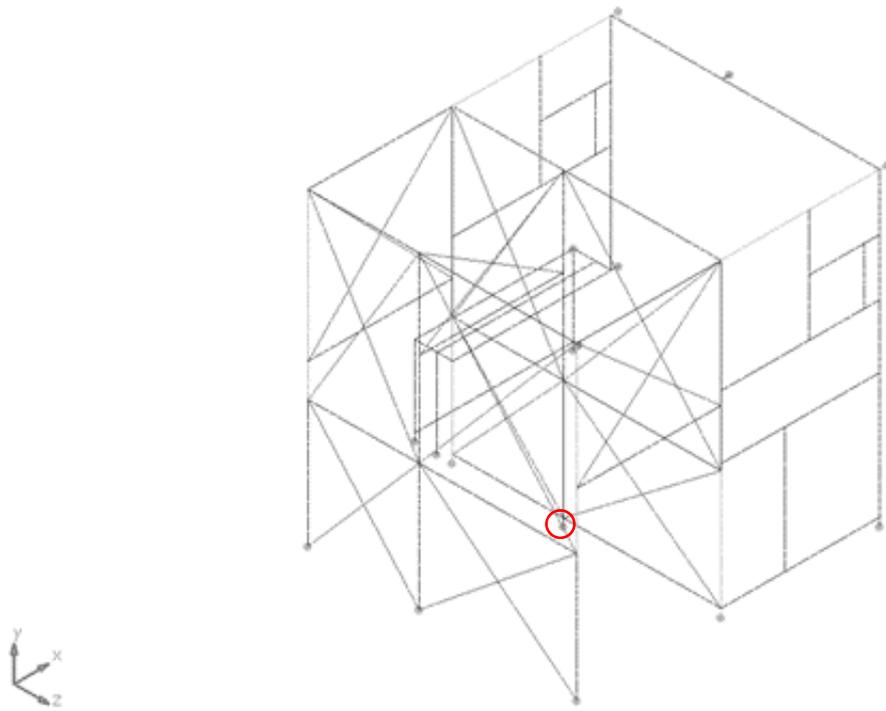


図 5-3 架構の最大検定比発生点（高圧炉心スプレイ系非常用ディーゼル発電機室
ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構）

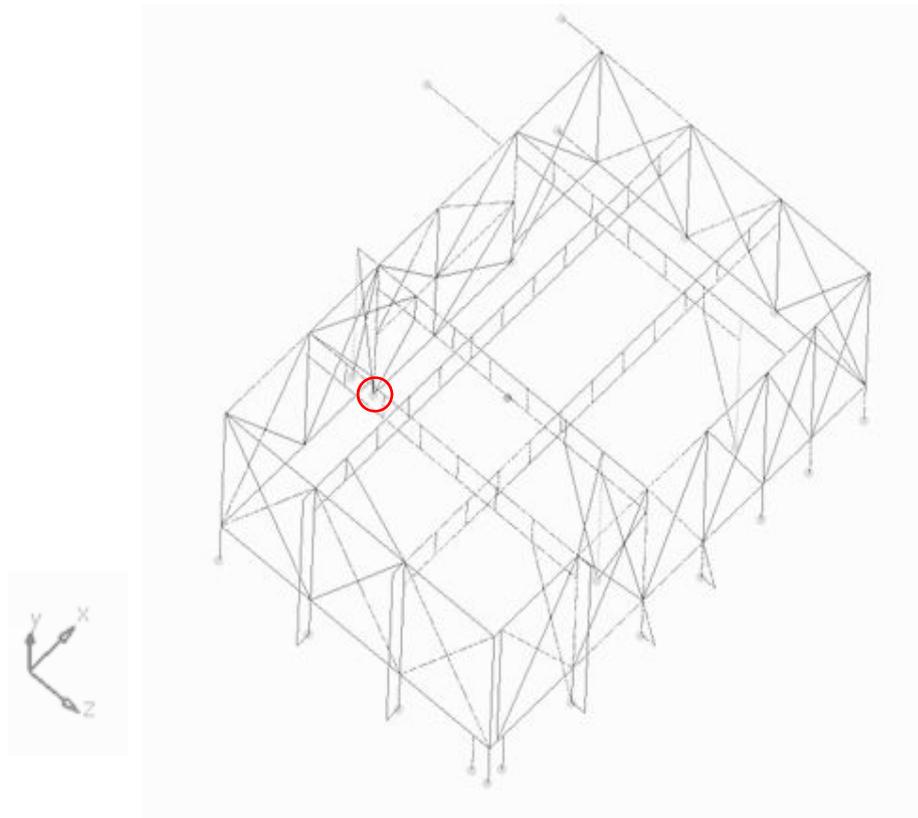


図 5-4 架構の最大検定比発生点（中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構）

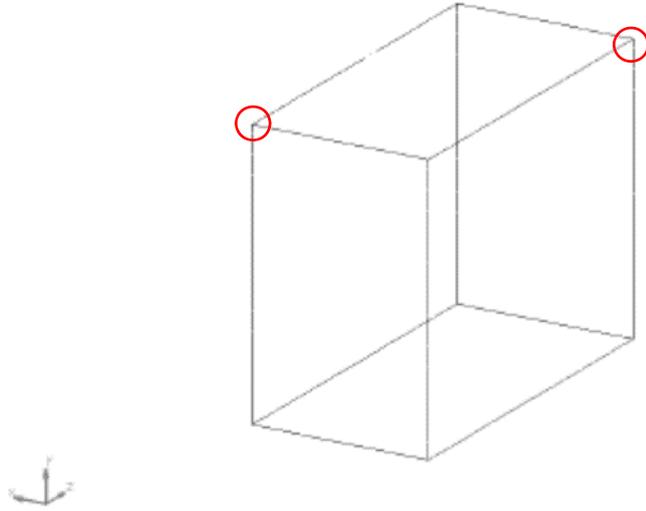


図 5-5 架構の最大検定比発生点（中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構）

追而

図 5-6 架構の最大検定比発生点（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）

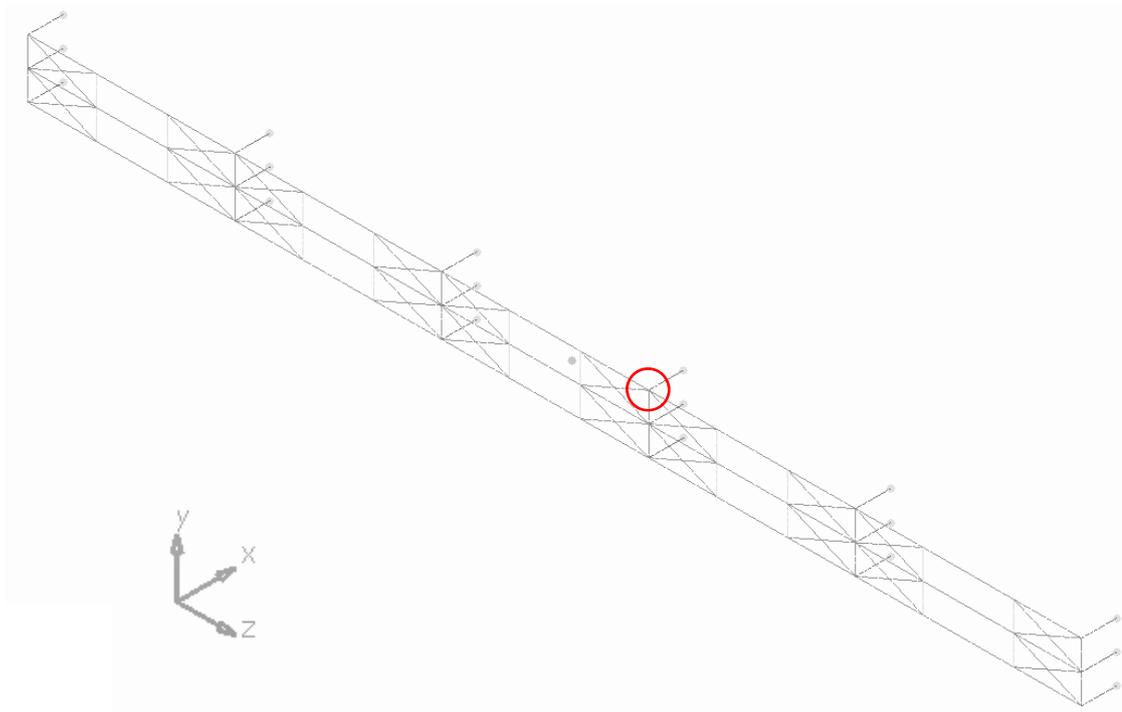


図 5-7 架構の最大検定比発生点（使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設設車両防止柵）