

VI-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

VI-3-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	2
2.1 評価対象施設	2
2.2 評価方針	3
2.2.1 評価の分類	3
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	9
4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界	30
4.1 荷重及び荷重の組合せ	30
4.2 許容限界	40
4.2.1 建物・構造物	41
4.2.2 機器・配管系	45
5. 強度評価方法	57
5.1 建物・構造物に関する評価式	58
5.1.1 鉄筋コンクリート造構造物	58
5.1.2 主排気筒	62
5.2 機器・配管系に関する評価式	66
5.2.1 軽油タンク	66
5.2.2 吸気配管	74
5.2.3 ダンパ（換気空調系）	76
5.2.4 角ダクト（換気空調系）	81
5.2.5 丸ダクト（換気空調系）	84
5.2.6 バタフライ弁（換気空調系）	87
5.2.7 ファン（換気空調系）	88
5.2.8 消音器	90
5.2.9 排気管及びミスト管	93
6. 適用規格	96

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、VI-1-1-3「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VI-1-1-3-3「竜巻防護に関する施設の設計方針」（以下「VI-1-1-3-3「竜巻防護に関する施設の設計方針」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、VI-1-1-3「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VI-1-1-3-3-1「竜巻への配慮に関する基本方針」（以下「VI-1-1-3-3-1「竜巻への配慮に関する基本方針」という。）に示す適用規格を用いて実施する。

なお、防護対策施設の設計方針については、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」に示し、具体的な計算の方法及び結果は、VI-3-別添 1-4「防護対策施設の強度計算書」に示す。また、屋外の重大事故等対処設備の固縛装置の設計方針については、VI-3-別添 1-3「固縛装置の強度計算の方針」に示し、具体的な計算の方法及び結果は、VI-3-別添 1-10「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、VI-3-別添 1-5「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VI-3-別添 1-9「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。

コントロール建屋、廃棄物処理建屋、サービス建屋及び6号機主排気筒の強度に関する説明は、令和2年10月14日付け原規規発第2010147号にて認可された柏崎刈羽原子力発電所第7号機の設計及び工事の計画のV-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」による。

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それと組み合わせる荷重を適切に組み合わせた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

VI-1-1-3-3-3「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（建屋）

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維持する必要がある、屋外の外部事象防護対象施設のうち、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（建屋）とする。

(2) 屋外の外部事象防護対象施設（建屋を除く。）

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維持する必要がある、屋外の外部事象防護対象施設（建屋を除く。）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維持する必要がある、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

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維持する必要がある、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、VI-1-1-3-3-3「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「衝突評価」の方針及び「構造強度評価」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、ひずみの変形が生じた場合においても、当該施設の機能を維持可能な変形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、設計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) ひずみ

b. 機器・配管系

- (a) 貫入
- (b) ひずみ

(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、当該施設の機能を維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

以下の「(a) 鉄筋コンクリート造構造物」は、構造を踏まえた評価項目を抽出し分類する。

- (a) 鉄筋コンクリート造構造物
 - イ. 裏面剥離
 - ロ. 転倒及び脱落
 - ハ. 変形

- (b) 主排気筒

b. 機器・配管系

- (a) 軽油タンク
- (b) 吸気配管
- (c) ダンパ
- (d) ダクト
- (e) バタフライ弁
- (f) ファン
- (g) 消音器
- (h) 排気管及びミスト管

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（建屋）	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建屋 ・タービン建屋海水熱交換器区域
(2) 屋外の外部事象防護対象施設（建屋を除く。）	<ul style="list-style-type: none"> ・軽油タンク
(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"> ・非常用ディーゼル発電設備吸気配管 ・ダンパ（換気空調系） ・角ダクト（換気空調系）及び丸ダクト（換気空調系） ・バタフライ弁（換気空調系） ・ファン（換気空調系）
(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. 機械的影響を及ぼす可能性がある施設 b. 機能的影響を及ぼす可能性がある施設	<ul style="list-style-type: none"> a. 機械的影響を及ぼす可能性がある施設 <ul style="list-style-type: none"> ・5号機タービン建屋 ・5号機主排気筒 b. 機能的影響を及ぼす可能性がある施設 <ul style="list-style-type: none"> ・非常用ディーゼル発電設備排気消音器 ・非常用ディーゼル発電設備排気管 ・ミスト管（燃料ディタンク，非常用ディーゼル発電設備機関本体，潤滑油補給タンク，燃料油ドレンタンク）

3. 構造強度設計

VI-1-1-3-3-1「竜巻への配慮に関する基本方針」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、VI-1-1-3-3-3「竜巻防護に関する施設の設計方針」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維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

VI-1-1-3-3-3「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」で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（建屋）

原子炉建屋及びタービン建屋海水熱交換器区域は、VI-1-1-3-3-3「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」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、設計飛来物が竜巻より防護すべき施設を内包する施設の外殻を構成する部材を貫通せず、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外殻を構成する部材自体の転倒及び脱落が生じない設計とする。また、原子炉建屋は上記に加え、放射性物質の閉じ込め機能を維持するために、設計飛来物が建屋の外殻を構成する部材を貫通せず、また裏面剥離が生じず、VI-2「耐震性に関する説明書」のうちVI-2-1-9「機能維持の基本方針」の「4.3 気密性の維持」を踏まえ、屋根スラブ及び耐震壁に生じる応力やひずみが、おおむね弾性状態にとどまる設計とする。

(2) 屋外の外部事象防護対象施設（建屋を除く。）

a. 軽油タンク

軽油タンクは、VI-1-1-3-3-3「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」の「3.1(1)c. 性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ、設計竜巻の風圧力による荷重、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、屋外の軽油タンクエリアに設けた基礎に基礎ボルトで固定し、軽油タンクの主要な構造部材が非常用所内母線へ7日間の電源供給が継続できるよう燃料を保有する機能を維持可能な構造強度を有する設計とする。

また、設計竜巻による設計飛来物による衝撃荷重に対し、有意な変形を生じない設計とする。

(3) 外気と繋がっている屋内の外部事象防護対象施設

a. 非常用ディーゼル発電設備吸気配管

非常用ディーゼル発電設備吸気配管は、VI-1-1-3-3-3「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」の「3.1(3)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維持可能な構造強度を有する設計とする。

b. ダンパ（換気空調系）

ダンパ（換気空調系）は、VI-1-1-3-3-3「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」の「3.1(3)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、換気空調系のダクトに固定し、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. 角ダクト（換気空調系）及び丸ダクト（換気空調系）

角ダクト（換気空調系）及び丸ダクト（換気空調系）は、VI-1-1-3-3-3「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」の「3.1(3)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、タービン建屋、コントロール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維持可能な構造強度を有する設計とする。

d. バタフライ弁（換気空調系）

バタフライ弁（換気空調系）は、VI-1-1-3-3-3「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」の「3.1(3)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に対し、換気空調系のダクトに固定し、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。

e. ファン（換気空調系）

ファン（換気空調系）は、VI-1-1-3-3-3「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」の「3.1(3)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、タービン建屋、コントロール建屋の床面等に基礎ボルトで固定し、主要な構造部材が非常用電気品区域、非常用ディーゼル発電機、中央制御室、コントロール建屋計測制御電源盤区域及び海水熱交換器区域の冷却に必要な風量を送風する機能を維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。

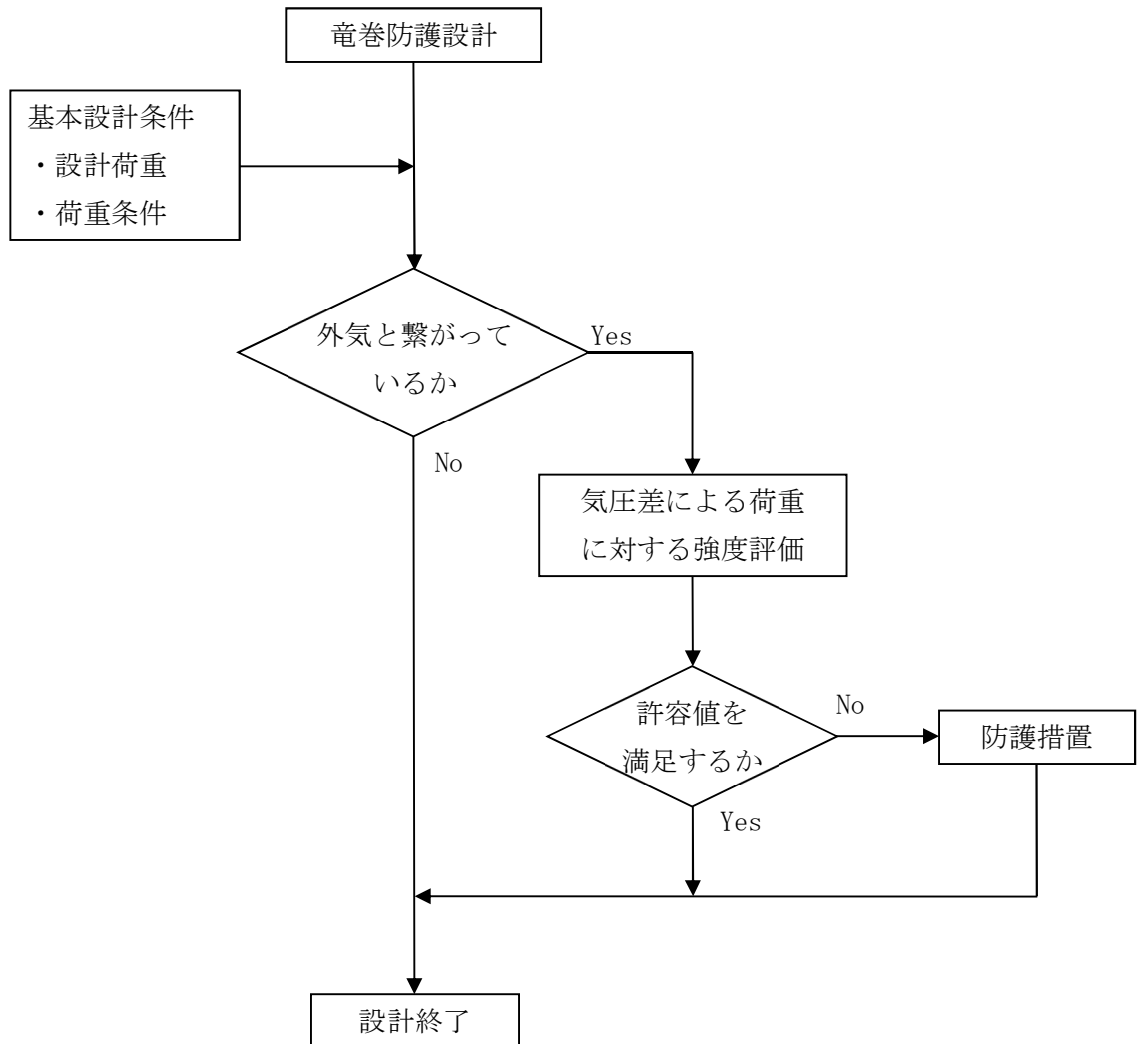


図3-1 屋内の外部事象防護対象施設の設計フロー

(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. 機械的影響を及ぼす可能性がある施設

(a) 5号機タービン建屋

5号機タービン建屋は、VI-1-1-3-3-3「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」の「3.4(3) 性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、竜巻より防護すべき施設を内包するタービン建屋海水熱交換器区域に接触による影響を及ぼさない設計とする。

(b) 5号機主排気筒

5号機主排気筒は、VI-1-1-3-3-3「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」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、設計竜巻の風圧力による荷重、設計飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、軽油タンク及び竜巻より防護すべき施設を内包する原子炉建屋に倒壊による影響を及ぼさない設計とする。

b. 機能的影響を及ぼす可能性がある施設

(a) 非常用ディーゼル発電設備排気消音器

非常用ディーゼル発電設備排気消音器は、VI-1-1-3-3-3「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」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、設計竜巻の風圧力による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、排気機能を維持するために、建屋屋上に設けたコンクリート基礎にボルトで固定し、主要な構造部材が排気機能を維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設備排気管

非常用ディーゼル発電設備排気管は、VI-1-1-3-3-3「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」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、設計竜巻の風圧力による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、排気機能を維持するために、サポートによる支持で建屋床面等に固定し、主要な構造部材が排気機能を維持可能な構造強度を有する設計とする。

(c) ミスト管(燃料ディタンク, 非常用ディーゼル発電設備機関本体, 潤滑油補給タンク, 燃料油ドレンタンク)

ミスト管は、VI-1-1-3-3-3「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」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、設計竜巻の風圧力による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、通気機能を維持するために、サポートによる支持で建屋壁面等に固定し、主要な構造部材が通気機能を維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

VI-1-1-3-3-3「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」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、VI-1-1-3-3-1「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」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（建屋）

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（原子炉建屋及びタービン建屋海水熱交換器区域）

(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VI-1-1-3-3-1「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」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及び原子炉建屋の放射性物質の閉じ込め機能を維持する設計とするために、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(3) 強度評価方法」に示す限界厚さ評価式により算出した厚さを基に評価を行う。最小厚さ以上であることの確認ができない屋根スラブについては、鉄筋又はデッキプレートが終局状態に至るようなひずみが生じないことを解析により確認する。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。

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、建屋の外殻を構成する部材自体の脱落を生じない設計及び原子炉建屋の放射性物質の閉じ込め機能を維持する設計とするために、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(3) 強度評価方法」に示す限界厚さ評価式により算出した厚

さを基に評価を行う。最小厚さ以上であることの確認ができない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が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。

また、建屋を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計及び原子炉建屋の放射性物質の閉じ込め機能を維持する設計とするため、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、屋根スラブのデッキプレート、屋根スラブのスタッド及び外壁に終局状態に至るような応力又はひずみが生じないこと、加えて鉄骨架構に終局状態に至る変形を生じないことを計算及び解析により確認する。評価方法としては、「5.1.1(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又は層間変形角を基に評価を行う。

表 3-1 建屋の構造計画 (1/3)

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

表 3-1 建屋の構造計画 (2/3)

施設 名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
原子炉建屋	鉄筋コンクリート造 (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、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。	<p>(東西方向断面)</p> <p>(単位 : m)</p>
			<p>(南北方向断面)</p> <p>(単位 : m)</p>

表 3-1 建屋の構造計画 (3/3)

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
タービン建屋海水熱交換器区域	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、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。	<p>(東西方向断面)</p> <p>(単位：m)</p> <p>(南北方向断面)</p> <p>(単位：m)</p>

K6 ① VI-3-別添 1-1 R0

(2) 屋外の外部事象防護対象施設（建屋を除く。）

a. 軽油タンク

(a) 構造設計

軽油タンクは、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及びVI-1-1-3-3-1「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」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

軽油タンクは鋼製の平底たて置円筒形容器を主体構造とし、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、胴板を介して基礎ボルトに伝達する構造とする。

軽油タンクの構造計画を表3-2に示す。

(b) 評価方針

イ. 衝突評価

軽油タンクの衝突評価については、設計飛来物が軽油タンク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貫通限界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、「5.2.1(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。

更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。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。

ロ. 構造強度評価

軽油タンクの構造強度評価については、設計竜巻の風圧力による荷重、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、軽油タンクを構成する胴板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、「5.2.1(3) 強度評価方法」に示すとおり、評価式により算出した応力を基に評価を行う。

表 3-2 軽油タンクの構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】 軽油タンクは、軽油タンクエリアに設置する設計としている。</p>			
軽油タンク	鋼製の胴板で構成する平底たて置円筒形容器	容器底部をコンクリート基礎に基礎ボルトで固定する。	<p>正面図</p> <p>基礎図</p>

(3) 外気と繋がっている屋内の外部事象防護対象施設

a. 非常用ディーゼル発電設備吸気配管

(a) 構造設計

非常用ディーゼル発電設備吸気配管は、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及びVI-1-1-3-3-1「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」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

非常用ディーゼル発電設備吸気配管は鋼製の配管を主体構造とし、支持構造物により床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。

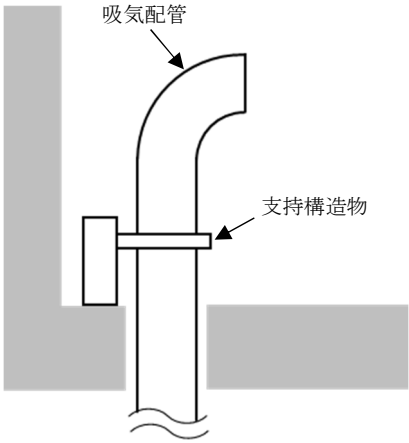
非常用ディーゼル発電設備吸気配管の構造計画を表 3-3 に示す。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

非常用ディーゼル発電設備吸気配管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、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、「5.2.2(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 非常用ディーゼル発電設備吸気配管の構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】 非常用ディーゼル発電設備吸気配管は、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>			
非常用ディーゼル発電設備吸気配管	鋼製の配管で構成する。	配管は、支持構造物により床等から支持する。	

b. ダンパ（換気空調系）

(a) 構造設計

ダンパ（換気空調系）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 VI-1-1-3-3-1「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」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

ダンパ（換気空調系）は鋼製のケーシング、ベーン及びシャフトを主体構造とし、接続ダクトにより支持する構造とする。また、作用する荷重については、ケーシング及びベーンに作用し、ベーンを介してシャフトに伝達する構造とする。

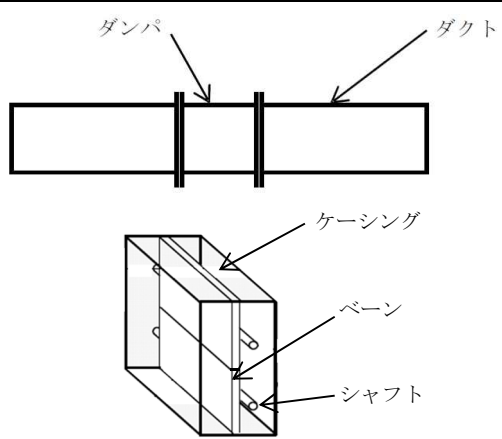
ダンパ（換気空調系）の構造計画を表 3-4 に示す。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

ダンパ（換気空調系）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、「5.2.3(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 3-4 ダンパ（換気空調系）の構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
【位置】			
ダンパ（換気空調系）は、十分な強度を有する建屋（原子炉建屋、タービン建屋海水熱交換器区域及びコントロール建屋）内に設置する設計としている。			
ダンパ（換気空調系）	ケーシング、ベーン及びシャフトで構成する。	接続ダクトにより支持する。	

c. 角ダクト（換気空調系）及び丸ダクト（換気空調系）

(a) 構造設計

角ダクト（換気空調系）及び丸ダクト（換気空調系）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VI-1-1-3-3-1「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」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

角ダクト（換気空調系）及び丸ダクト（換気空調系）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、床及び梁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。

角ダクト（換気空調系）及び丸ダクト（換気空調系）の構造計画を表3-5に示す。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

角ダクト（換気空調系）及び丸ダクト（換気空調系）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、角ダクト（換気空調系）及び丸ダクト（換気空調系）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「5.2.4(3) 強度評価方法」及び「5.2.5(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 3-5 角ダクト（換気空調系）及び丸ダクト（換気空調系）の構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
【位置】			
角ダクト（換気空調系）及び丸ダクト（換気空調系）は、十分な強度を有する建屋（原子炉建屋、タービン建屋海水熱交換器区域及びコントロール建屋）内に設置する設計としている。			
角ダクト（換気空調系）及び丸ダクト（換気空調系）	鋼製のダクトで構成する。	ダクトは、支持構造物により建屋壁、床及び梁等から支持する。	

d. バタフライ弁（換気空調系）

(a) 構造設計

バタフライ弁（換気空調系）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VI-1-1-3-3-1「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」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

バタフライ弁（換気空調系）は鋼製の弁箱、弁体及び弁棒で構成し、接続ダクトにより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。

バタフライ弁（換気空調系）の構造計画を表3-6に示す。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

バタフライ弁（換気空調系）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が、バタフライ弁の試験圧力以下であることを確認する。評価方法としては、「5.2.6(3) 強度評価方法」に示すとおり、バタフライ弁の試験圧力と気圧差を基に評価を行う。

表3-6 バタフライ弁（換気空調系）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】 バタフライ弁（換気空調系）は、十分な強度を有する建屋（コントロール建屋）内に設置する設計としている。</p>			
バタフライ弁（換気空調系）	弁箱、弁体及び弁棒で構成する。	接続ダクトにより支持する。	

e. ファン（換気空調系）

(a) 構造設計

ファン（換気空調系）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 VI-1-1-3-3-1「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」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

ファン（換気空調系）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（換気空調系）の構造計画を表 3-7 に示す。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

ファン（換気空調系）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，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，「5.2.7(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 3-7 ファン（換気空調系）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（換気空調系）は，十分な強度を有する建屋（原子炉建屋，タービン建屋海水熱交換器区域及びコントロール建屋）内に設置する設計としている。</p>			
ファン（換気空調系）	ケーシング及びケーシング内の羽根車，主軸で構成する。	床に基礎ボルトで支持する。	

- (4) 波及的影響を及ぼす可能性がある施設
 - a. 機械的影響を及ぼす可能性がある施設
 - (a) 5号機タービン建屋
 - イ. 構造設計

5号機タービン建屋は、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及びVI-1-1-3-3-1「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」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

5号機タービン建屋は、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）とし、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。

5号機タービン建屋の構造計画を表3-8に示す。

ロ. 評価方針

(イ) 構造強度評価

5号機タービン建屋の構造強度評価については、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、5号機タービン建屋がタービン建屋海水熱交換器区域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、5号機タービン建屋の地震応答解析モデルを用いて算出した層間変形角及び5号機タービン建屋とタービン建屋海水熱交換器区域間の最小相対変位を基に評価を行う。

表3-8 5号機タービン建屋の構造計画 (1/2)

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

表 3-8 5号機タービン建屋の構造計画 (2/2)

施設 名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
5号機タービン建屋	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、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。	<p>(東西方向断面)</p> <p>(単位：m)</p>
			<p>(南北方向断面)</p> <p>(単位：m)</p>

(b) 5号機主排気筒

イ. 構造設計

5号機主排気筒は、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及びVI-1-1-3-3-1「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」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

5号機主排気筒の筒身は、鋼管を主体構造とし、筒身を鉄塔がサポートにより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に伝達する構造とする。

5号機主排気筒の構造計画を表3-9に示す。

ロ. 評価方針

(イ) 構造強度評価

5号機主排気筒の構造強度評価については、設計竜巻の風圧力による荷重、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、鉄塔及び基礎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、「5.1.2(3) 強度評価方法」に示すとおり、評価式により算出した応力を基に評価を行う。

表 3-9 5号機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】 5号機主排気筒は、5号機原子炉建屋の東側に設置する設計としている。</p>			
5号機主排気筒	鋼管で構成する。	筒身を鉄塔がサポートにより支持する。	<p>▽ T.M.S.L. 160000 ▽ T.M.S.L. 152000 ▽ T.M.S.L. 137000 ▽ T.M.S.L. 126000 ▽ T.M.S.L. 112000 ▽ T.M.S.L. 94000 ▽ T.M.S.L. 73000 ▽ T.M.S.L. 47500 ▽ T.M.S.L. 12000 (G.L.)</p> <p>筒身 鉄塔</p> <p>(単位：mm)</p>

K6 ① VI-3-別添 1-1 R0

b. 機能的影響を及ぼす可能性がある施設

(a) 非常用ディーゼル発電設備排気消音器

イ. 構造設計

非常用ディーゼル発電設備排気消音器は、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及びVI-1-1-3-3-1「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」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

非常用ディーゼル発電設備排気消音器は、鋼製の胴板を主体構造とし、原子炉建屋屋上面に設けたコンクリート基礎部金物に本体を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、非常用ディーゼル発電設備排気消音器を介し、取付ボルトに伝達する構造とする。

非常用ディーゼル発電設備排気消音器の構造計画を表 3-10 に示す。

ロ. 評価方針

(イ) 構造強度評価

非常用ディーゼル発電設備排気消音器の構造強度評価については、設計竜巻の風圧力による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、非常用ディーゼル発電設備排気消音器の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、「5.2.8(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 非常用ディーゼル発電設備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	
【位置】 非常用ディーゼル発電設備排気消音器は、原子炉建屋屋上面に設置する設計としている。			
非常用ディーゼル発電設備排気消音器	鋼製の胴板で構成する。	原子炉建屋屋上面に設けたコンクリート基礎部金物に本体を取付ボルトで固定する。	

- (b) 非常用ディーゼル発電設備排気管及びミスト管（燃料ディタンク，非常用ディーゼル発電設備機関本体，潤滑油補給タンク，燃料油ドレンタンク）

イ. 構造設計

非常用ディーゼル発電設備排気管及びミスト管（燃料ディタンク，非常用ディーゼル発電設備機関本体，潤滑油補給タンク，燃料油ドレンタンク）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VI-1-1-3-3-1「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」で設定している荷重を踏まえ，以下の構造とする。

非常用ディーゼル発電設備排気管及びミスト管（燃料ディタンク，非常用ディーゼル発電設備機関本体，潤滑油補給タンク，燃料油ドレンタンク）は，鋼製の配管を主体構造とし，支持構造物により建屋床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，配管本体に作用する構造とする。

非常用ディーゼル発電設備排気管及びミスト管（燃料ディタンク，非常用ディーゼル発電設備機関本体，潤滑油補給タンク，燃料油ドレンタンク）の構造計画を表 3-11 に示す。

ロ. 評価方針

(イ) 構造強度評価

非常用ディーゼル発電設備排気管及びミスト管（燃料ディタンク，非常用ディーゼル発電設備機関本体，潤滑油補給タンク，燃料油ドレンタンク）の構造強度評価については，設計竜巻の風圧力による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し，非常用ディーゼル発電設備排気管及びミスト管（燃料ディタンク，非常用ディーゼル発電設備機関本体，潤滑油補給タンク，燃料油ドレンタンク）の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，「5.2.9(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 非常用ディーゼル発電設備排気管及びミスト管（燃料ディタンク，非常用ディーゼル発電設備機関本体，潤滑油補給タンク，燃料油ドレンタンク）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】 非常用ディーゼル発電設備排気管及びミスト管（燃料ディタンク，非常用ディーゼル発電設備機関本体，潤滑油補給タンク，燃料油ドレンタンク）は，原子炉建屋屋上面に設置する設計としている。</p>			
非常用ディーゼル発電設備排気管	鋼製の配管で構成する。	配管は，支持構造物により建屋床面等に固定する。	
ミスト管（燃料ディタンク，非常用ディーゼル発電設備機関本体，潤滑油補給タンク，燃料油ドレンタンク）			

「3.2 機能維持の方針」に示す構造設計と作用する荷重の伝達を基に，表3-12に示すとおり評価対象部位を設定する。

表3-12 竜巻の影響を考慮する施設 強度評価対象部位 (1/3)

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 タービン建屋海水 熱交換器区域	屋根スラブ（デッキ プレート含む。） スタッド 壁面 構造躯体	衝突	貫通 ひずみ	竜巻より防護すべき施設を内包する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を内包する施設の外殻となる屋根スラブ及び壁面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を内包する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を内包する施設の外殻となる屋根スラブ及び壁面を評価対象部位として選定する。
			構造 強度	転倒及び 脱落	竜巻より防護すべき施設を内包する施設の外殻となる部分への設計飛来物の作用を考慮し、当該部の転倒及び脱落を生じないことを確認するため、屋根スラブのデッキプレート、屋根スラブを固定するスタッド及び構造躯体を評価対象部位として選定する。
屋外の外部事象防護対象施設	軽油タンク	胴板 屋根板	衝突	貫入 ひずみ	軽油タンクの外殻を構成する部材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及び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、軽油タンクの胴板及び屋根板を評価対象部位として選定する。
				構造 強度	軽油タンク

表 3-12 竜巻の影響を考慮する施設 強度評価対象部位 (2/3)

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
外気と繋がっている屋内の外部事象防護対象施設	非常用ディーゼル発電設備吸気配管	配管本体	構造強度	吸気配管	非常用ディーゼル発電設備吸気配管は、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、配管本体を評価対象部位として選定する。
	ダンパ (換気空調系)	ケーシング ベーン シャフト	構造強度	ダンパ	換気空調系のダンパは、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、閉止しているダンパには、竜巻の気圧差による荷重がケーシング、ベーン及びシャフトに作用することから、ケーシング、ベーン及びシャフトを評価対象部位として選定する。
	角ダクト (換気空調系) 及び丸ダクト (換気空調系)	ダクト鋼板	構造強度	ダクト	換気空調系のダクトは、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。
	バタフライ弁 (換気空調系)	耐圧部	構造強度	バタフライ弁	換気空調系のバタフライ弁は、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、閉止しているバタフライ弁には竜巻の気圧差による荷重が耐圧部に作用することから、耐圧部を評価対象部位として選定する。
	ファン (換気空調系)	ケーシング	構造強度	ファン	換気空調系のファンは、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 3-12 竜巻の影響を考慮する施設 強度評価対象部位 (3/3)

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	5号機タービン建屋	構造躯体	構造強度	変形	竜巻より防護すべき施設を内包する施設への接触による波及的影響を考慮し、5号機タービン建屋の構造躯体である耐震壁、鉄骨架構を評価対象部位として選定する。
	5号機主排気筒	鉄塔部基礎	構造強度	主排気筒	設計竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重は、筒身又は鉄塔部に作用し、基礎に伝達するため、筒身の支持部材である鉄塔部及び基礎を評価対象部位として選定する。
	非常用ディーゼル発電設備排気消音器	取付ボルト	構造強度	消音器	消音器に設計竜巻の風圧力による荷重が作用した際に、本体を支持するための主要な支持部材である取付ボルトを評価対象部位として選定する。
	非常用ディーゼル発電設備排気管	配管本体	構造強度	排気管及びミスト管	排気管の主要な機能である排気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。
	ミスト管（燃料デ イスタック、非常用 ディーゼル発電設 備機関本体、潤滑 油補給タンク、燃 料油ドレインタン ク）	配管本体	構造強度	排気管及びミスト管	ミスト管の主要な機能である通気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、VI-1-1-3-3-1「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、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設計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})

フジタモデルにおける竜巻の最大気圧低下量は、流れの連続式と運動量保存則から導出される以下の圧力ポアソン方程式を用いる。

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial x_3^2} \right) = - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} \right)$$

ρ : 空気密度 (kg/m³)

p : 圧力 (N/mm²)

χ : 座標 (—)

U : 風速ベクトル (—)

ν : 動粘性係数 (m²/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)
92	14	78	6400

(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竜巻の影響を考慮する施設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「原子力発電所の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「REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision1」(米国原子力規制委員会) より $\rho=1.226 \text{ kg/m}^3$ とする。

設計用速度圧については施設の形状に影響を受けないため、設計竜巻の設計用速度圧 (q) は施設の形状によらず、 $q=5188.43 \text{ N/m}^2$ 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}) は圧力ポアソン方程式から、 $\Delta P_{max}=6400 \text{ N/m}^2$ とする。

(c) 設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)

設計飛来物である足場パイプ及び鋼製足場板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、設計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。

なお、VI-1-1-3-3-1「竜巻への配慮に関する基本方針」の「2.1.2(2) 設計飛来物」において、評価対象物の設置場所その他環境条件に応じて、砂利についても設計飛来物として設定しているが、砂利の貫通限界厚さは1mm未満であり、また、砂利等の極小飛来物の衝突は瞬間的で衝突時間が極めて短く、設備全体にもたらす荷重としての影響は軽微であると考えられることから、砂利による影響は考慮しない。

設計飛来物の寸法、質量及び飛来速度を表4-2に示す。設計飛来物の飛来速度については、設置(変更)許可を受けたとおり設定する。

表4-2 設計飛来物の諸元

	足場パイプ	鋼製足場板
寸法 (m)	4×0.05×0.05	4×0.25×0.04
質量 (kg)	11	14
水平方向の飛来速度 (m/s)	42	55
鉛直方向の飛来速度 (m/s)	38	18

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) を考慮した荷重 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) 及び設計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 (1/3))

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、設計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 (1/3))

軽油タンクは、風圧力による荷重、設計飛来物による衝撃荷重及び常時作用する荷重の組合せを基本とする。軽油タンクは屋外施設であり閉じた施設ではないため、気圧差による荷重は考慮しない。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。

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（2/3））

外気と繋がっている屋内の施設である非常用ディーゼル発電設備吸気配管，換気空調系のダンパ，角ダクト，丸ダクト，バタフライ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設計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。

非常用ディーゼル発電設備吸気配管については，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。また，非常用ディーゼル発電設備吸気配管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。

換気空調系については，運転時の内圧が給気側は負圧，排気側は正圧となるが，保守性を考慮し気圧差による荷重と同等の向きに作用するものとして，運転時の状態で作用する荷重を組み合わせる。なお，ダンパ及びバタフライ弁については閉止していることから，運転時の状態で作用する荷重は考慮しない。また，バタフライ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（3/3））

機械的影響を及ぼす可能性がある施設のうち，5号機タービン建屋に関しては，風圧力による荷重，気圧差による荷重，設計飛来物による衝撃荷重及び常時作用する荷重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。

5号機主排気筒に関しては，風圧力による荷重，設計飛来物による衝撃荷重及び常時作用する荷重の組合せを基本とする。5号機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。

機能的影響を及ぼす可能性がある施設のうち，非常用ディーゼル発電設備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。非常用ディーゼル発電設備排気消音器は，排気機能が健全であれば良く，仮に設計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は考慮しない。また，非常用ディーゼル発電設備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，評価対象部位に対し作用しないため考慮しない。

非常用ディーゼル発電設備排気管及びミスト管（燃料ディタンク，非常用ディーゼル発電設備機関本体，潤滑油補給タンク，燃料油ドレンタンク）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。非常用ディーゼル発電設備排気管及びミスト管（燃料ディタンク，非常用ディーゼル発電設備機関本体，潤滑油補給タンク，燃料油ドレンタンク）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。非常用ディーゼル発電設備排気管及びミスト管（燃料ディタンク，非常用ディーゼル発電設備機関本体，潤滑油補給タンク，燃料油ドレンタンク）は，排気又は通気機能

が健全であれば良く、仮に設計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箇所から排気又は通気されるため、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は考慮しない。また、非常用ディーゼル発電設備排気管及びミスト管（燃料ディタンク、非常用ディーゼル発電設備機関本体、潤滑油補給タンク、燃料油ドレンタンク）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。

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 (1/3)

分類	強度評価の対象施設	評価項目	荷重						運転時の状態 で作用する荷重 (F_p)	
			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)	設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)		
			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 タービン建屋海水熱交換器区域	衝突	—	—	—	—	○	—	○	—
		構造強度	○	—	○	—	—	—	—	—
屋外の外部事象防護対象施設	軽油タンク	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 (2/3)

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 _a)			風圧力による荷重 (W _w)	気圧差による荷重 (W _p)	設計飛来物による衝撃荷重 (W _M)	運転時の状態で作作用する荷重 (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	非常用ディーゼル発電設備吸気配管	構造強度	—	—	—	○	—	—	—	○
	ダンパ (換気空調系)	構造強度	○	—	—	—	○	—	—	—
	角ダクト (換気空調系) 及び丸ダクト (換気空調系)	構造強度	○	—	—	—	—	○	—	○
	バタフライ弁 (換気空調系)	構造強度	—	—	—	—	—	○	—	—
	ファン (換気空調系)	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 (3/3)

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 _a)			風圧力による荷重 (W _w)	気圧差による荷重 (W _p)	設計飛来物による衝撃荷重 (W _M)	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	5号機タービン建屋	構造強度	○	—	○	○	○	○	—	○	—
	5号機主排気筒	構造強度	○	—	—	○	—	○	—	○	—
	非常用ディーゼル発電設備排気消音器	構造強度	○	—	—	○	—	—	—	—	—
	非常用ディーゼル発電設備排気管	構造強度	○	—	—	○	—	—	—	—	○
	ミスト管 (燃料ダイタンク, 非常用ディーゼル発電設備機関本体, 潤滑油補給タンク, 燃料油ドレタンク)	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
W _M	N	設計飛来物による衝撃荷重
W _P	N	気圧差による荷重
W _W	N	風圧力による荷重
ρ	kg/m ³	空気密度
Δ P _{max}	N/m ²	最大気圧低下量

b. 自重による荷重の算出

自重による荷重は以下の通り計算する。

$$H = m \cdot g$$

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」（日本建築学会）に準拠して、次式のとおり算出する。

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

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

(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。

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

(c) 設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)

設計飛来物による衝撃荷重は、設計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 (—)	最大気圧低下量 ΔP_{max} (N/m ²)
92	1.226	1.0	6400

4.2 許容限界

許容限界は、VI-1-1-3-3-3「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」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 JEAG4601・補-1984」（日本電気協会）、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987」（日本電気協会）及び「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」（日本電気協会）（以下「JEAG4601」という。）を準用できる施設については、JEAG4601に基づき「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1-2005/2007」（日本機械学会）（以下「JSME」という。）の付録材料図表及びJIS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、JSMEや既往の実験式に基づき許容限界を設定する。

ただし、JSME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JSMEにないものは機能維持の評価方針を考慮し、JEAG4601に基づいた許容限界を設定する。

4.2.1 建物・構造物

(1) 許容限界の設定

a. 衝突評価

(a) 貫通 (表 4-8 (1/4))

建物・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及び原子炉建屋の放射性物質の閉じ込め機能を維持する設計とするために、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を内包する施設の外殻を構成する部材の最小厚さを許容限界として設定する。

(b) ひずみ (表 4-8 (1/4))

建屋・構造物の衝突による貫通評価のうち、設計飛来物の貫通を生じない最小厚さ以上であることの確認ができない建屋の屋根スラブにおいては、設計飛来物による衝撃荷重に対し、屋根スラブの鉄筋又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針としていることを踏まえ、鉄筋又はデッキプレートの破断ひずみを許容限界として設定する。鉄筋又はデッキプレートの破断ひずみは、J I S規格値 / T F (T F =) を許容限界とする。

b. 構造強度評価

(a) 裏面剥離 (表 4-8 (1/4))

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を内包する施設の外殻を構成する部材自体の脱落を生じない設計及び原子炉建屋の放射性物質の閉じ込め機能を維持する設計とするために、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じない最小厚さ以上であることを計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、施設の最小部材厚さを許容限界として設定する。また、許容限界を超えた場合は、裏面剥離に至るようなひずみを生じないことを解析により確認する評価方針としていることを踏まえ、デッキプレートの破断ひずみを許容限界として設定する。デッキプレートの破断ひずみは、J I S規格値 / T F (T F =) を許容限界とする。

(b) 転倒及び脱落 (表 4-8 (1/4))

鉄筋コンクリート造構造物の転倒及び脱落の評価については、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、竜巻より防護すべき施設を内包する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及び原子炉建屋の放射性物質の閉じ込め機能を維持する設計とするために、構造躯体のうち耐震壁に終局状態に至るようなひずみ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、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 J E A G 4 6 0 1 に基づき 2.0×10^{-3} とする。また、構造躯体のうち鉄骨架構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評価方針としていることを踏まえ、

「2015年版建築物の構造関係技術基準解説書（国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所）（以下「技術基準解説書」という。）」に基づく層間変形角の制限値を許容限界として設定する。

屋根スラブのデッキプレートに生じる応力については、JIS及び「鋼構造設計規準－許容応力度設計法－」に基づく短期許容応力度を許容限界とし、屋根スラブのスタッドについては、「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。

(c) 構造躯体の変形（表 4-8（4/4））

外部事象防護対象に波及的影響を及ぼす可能性のある施設については、設計竜巻による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、5号機タービン建屋がタービン建屋海水熱交換器区域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、タービン建屋海水熱交換器区域との離隔距離を許容限界として設定する。

(d) 主排気筒（表 4-8（4/4））

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、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、軽油タンク及び竜巻より防護すべき施設を内包する原子炉建屋に倒壊による影響を及ぼさないために、鉄塔及び基礎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針としていることを踏まえ、「鋼構造設計規準－許容応力度設計法－」等に応じた材料強度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	スタッド頭部の支圧面積
$a_c a$	mm^2	スタッドの断面積で、軸部断面積とねじ部有効断面積の小なる方の値
D	mm	スタッドの頭部直径
d	mm	スタッドの軸部直径
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
$l_{c e}$	mm	スタッドの強度計算用埋込み長さ ($l_{c e} = l_e$)
l_e	mm	スタッドのコンクリート内への有効埋込み長さ
p_a	N	スタッド1本あたりの許容引張力
p_{a1}	N	スタッド鋼材の降伏により定まる場合のスタッド1本あたりの許容引張力
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スタッド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スタッド1本あたりの許容引張力
π	—	円周率
$c \sigma_t$	N/mm^2	コーン状破壊に対するコンクリートの引張強度
$s \sigma_{p a}$	N/mm^2	スタッドの引張強度
$s \sigma_y$	N/mm^2	スタッドの規格降伏点強度
Φ_1	—	低減係数
Φ_2	—	低減係数

b. 許容限界式

(a) スタッドの許容限界式

コンクリート躯体中に定着されたスタッド 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：日本建築学会 2010 年改定」より

$$p_{a1} = \Phi_1 \cdot s \sigma_{pa} \cdot a_c a$$

$$p_{a2} = \Phi_2 \cdot c \sigma_t \cdot A_c$$

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

ここで、

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

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

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

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

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

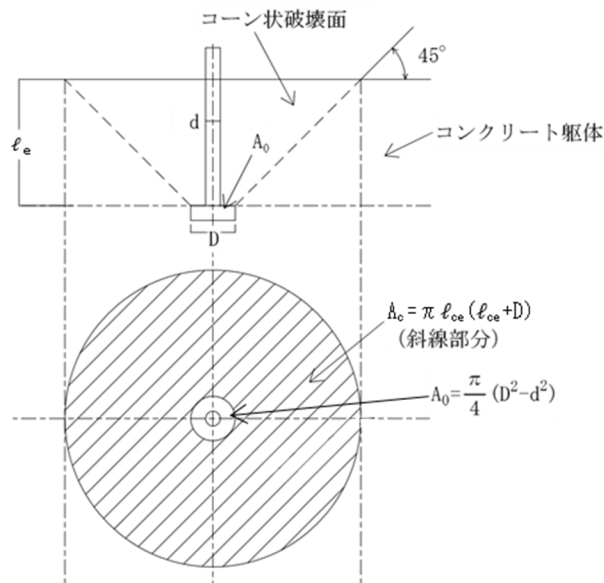


図 4-1 スタッド側面の有効投影面積

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 (2/4))

軽油タンクの衝突による貫入評価においては、設計飛来物による衝撃荷重に対し、軽油タンクの外殻を構成する部材が、設計飛来物の貫通を生じない貫通限界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、部材厚さを許容限界として設定する。ただし、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) ひずみ (表 4-8 (2/4))

軽油タンクの衝突によるひずみの評価においては、設計飛来物による衝撃荷重に対し、軽油タンクの外殻を構成する部材が、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、軽油タンク胴板及び屋根板の破断ひずみを許容限界として設定する。軽油タンク胴板及び屋根板の破断ひずみは、J I S規格値/TF (TF =) を許容限界とする。

b. 構造強度評価

(a) 軽油タンク (表 4-8 (2/4))

軽油タンク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、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、軽油タンクを構成する胴板及び基礎ボルトが、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。

(b) 吸気配管 (表 4-8 (3/4))

吸気配管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、配管本体が、おおむね弾性状態に留まることにより、その施設の安全機能に影響を及ぼすことのないことを計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、J E A G 4 6 0 1 等に準じて許容応力状態Ⅲ_ASの許容応力を許容限界として設定する。

(c) ダンパ (表 4-8 (3/4))

ダンパ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、ダンパを構成するケーシング、ベーン及びシャフトが、おおむね弾性状態に留まることを計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、J E A G 4 6 0 1 等に準じて許容応力状態Ⅲ_ASの許容応力を許容限界として設定する。

(d) ダクト (表 4-8 (3/4))

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

(e) バタフライ弁 (表 4-8 (3/4))

バタフライ弁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に対し、バタフライ弁の試験圧力以下であることを確認する評価方針としていることを踏まえ、バタフライ弁の耐圧部に発生する圧力に対して、バタフライ弁の試験圧力を許容限界として設定する。

(f) ファン (表 4-8 (3/4))

ファン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、ファンを構成するケーシングが、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、クリップリング座屈に応じた許容応力を許容限界として設定する。

(g) 消音器 (表 4-8 (4/4))

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及びその他考慮すべき荷重に対し、消音器を支持する取付ボルトが、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おそれが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。

(h) 排気管及びミスト管 (表 4-8 (4/4))

排気管及びミスト管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、配管本体が、おおむね弾性状態に留まることにより、その施設の安全機能に影響を及ぼすことのないことを計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、J E A G 4 6 0 1等に準じて許容応力状態Ⅲ_ASの許容応力を許容限界として設定する。

(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
c	mm	ダクト板・ファンケーシングの長さ
d_1	mm	ダクト内径
d_2	mm	ダクト外径
E	MPa	ヤング率
F	MPa	J S M E SSB-3121.1(1)により規定される値
f_1	N	ダクト自重による圧縮荷重
f_2	N	設計竜巻による内外圧差と運転圧による圧縮荷重
f_b	MPa	曲げモーメントにより生じる座屈応力
f_c	MPa	軸圧縮荷重により生じる座屈応力
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
$f_{t s}$	MPa	J S M E SSB-3131により規定されるせん断力と引張力を同時に受けるボルトの許容引張応力
g	m/s^2	重力加速度
k_p	—	座屈係数
$M_{c r}$	$N \cdot mm$	弾性座屈曲げモーメント
n	—	座屈モードの次数
P_m	N	ダクト板1枚あたりの限界荷重
r	mm	半径
R_B	mm	胴平均半径
t	mm	容器の外殻・ダクト板・ファンケーシングの肉厚
Z_c	—	円筒殻の座屈応力の式における係数
Z	mm^3	断面係数
α_1	—	安全率
β	—	円筒殻の座屈応力の式における係数
η_B	—	R_B / t
η_1	—	$1200 \cdot g / F$
η_2	—	$8000 \cdot g / F$
η_3	—	$9600 \cdot g / F$

表 4-7 許容限界式に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
ν	—	ポアソン比
π	—	円周率
σ_b	MPa	ダクト自重により作用する曲げ応力
σ_{cr1}	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_{cr2}	MPa	弾性座屈曲げ応力
σ_{xb}	MPa	曲げモーメントにより生じる圧縮応力
σ_{xc}	MPa	軸圧縮荷重により生じる圧縮応力
σ_y	MPa	降伏応力
σ_{pb}	MPa	設計竜巻による内外圧差と運転圧による軸方向圧縮荷重による応力
τ_b	MPa	せん断応力
ϕ_b	MPa	座屈応力 f_b を算出する際の関数
ϕ_c	MPa	座屈応力 f_c を算出する際の関数

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、次式で算出される。

$$f_{ts} = \text{Min} \{ 1.4 (1.5 f_t) - 1.6 \tau_b, 1.5 f_t \}$$

(b) 軽油タンクの許容限界式

胴の座屈評価は以下の式による。

$$\frac{\alpha_1 \cdot \sigma_{xc}}{f_c} + \frac{\alpha_1 \cdot \sigma_{xb}}{f_b} \leq 1$$

イ. 軸圧縮荷重により生じる座屈応力 f_c は、次の式で算出する。

$$f_c = \begin{cases} F & (\eta_B \leq \eta_1) \\ F \left[1 - \frac{1}{6800 \cdot g} \{ F - \phi_c(\eta_2) \} (\eta_B - \eta_1) \right] & (\eta_1 < \eta_B < \eta_2) \\ \phi_c(\eta_B) & (\eta_2 \leq \eta_B \leq 800) \end{cases}$$

ここで、 $\phi_c(\eta_B) = 0.6 \frac{E}{\eta_B} \left[1 - 0.901 \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{1}{16} \sqrt{\eta_B} \right) \right\} \right]$

ロ. 曲げモーメントにより生じる座屈応力 f_b は、次の式で算出する。

$$f_b = \begin{cases} F & (\eta_B \leq \eta_1) \\ F \left[1 - \frac{1}{8400 \cdot g} \{ F - \phi_b(\eta_3) \} (\eta_B - \eta_1) \right] & (\eta_1 < \eta_B < \eta_3) \\ \phi_b(\eta_B) & (\eta_3 \leq \eta_B \leq 800) \end{cases}$$

$$\text{ここで, } \phi_b(\eta_B) = 0.6 \frac{E}{\eta_B} \left[1 - 0.731 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{1}{16} \sqrt{\eta_B}\right) \right\} \right]$$

ハ. 安全率 α_1

安全率は、各荷重の組合せに対して

$$\alpha_1 = \begin{cases} 1.0 & (\eta_B \leq \eta_1) \\ 1.0 + \frac{F}{13600 \cdot g} (\eta_B - \eta_1) & (\eta_1 < \eta_B < \eta_2) \\ 1.5 & (\eta_2 \leq \eta_B) \end{cases}$$

$$\text{ここで, } \eta_B = \frac{R_B}{t}, \quad \eta_1 = 1200 \cdot g / F,$$

$$\eta_2 = 8000 \cdot g / F, \quad \eta_3 = 9600 \cdot g / F$$

(c) 角ダクトの許容限界式

イ. 常時作用する荷重（自重）＋設計竜巻の気圧差による荷重及び運転時の状態で作用する荷重に対する許容限界

ダクト自重による圧縮荷重 f_1 と設計竜巻による内外圧差及び運転圧による圧縮荷重 f_2 の和が、許容荷重 P_m 以下であることを確認する。

なお、ダクト自重による圧縮荷重 f_1 はダクト板 1 枚あたりの圧縮荷重として算出され、設計竜巻による内外圧差及び運転圧による圧縮荷重 f_2 はダクト板 4 枚あたりの圧縮荷重として算出される。許容荷重 P_m はダクト板 1 枚あたりとして算出されるため、関係は以下の式で表わされる。

$$4 \cdot f_1 + f_2 \leq 4 \cdot P_m$$

ここで、

$$P_m = \frac{\pi}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \sqrt{E \cdot \sigma_y \cdot t^2}$$

(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_{cr1} 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_{cr1} は、円筒殻の座屈応力の式より算出する。

$$\sigma_{cr1} = \frac{k_p \cdot \pi^2 \cdot E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{c}\right)^2$$

$$k_p = \frac{(1+\beta^2)^2}{0.5+\beta^2} + \frac{12 \cdot Z_c^2}{\pi^4(1+\beta^2)^2(0.5+\beta^2)}$$

$$\beta = \frac{c \cdot n}{\pi \cdot r}$$

$$Z_c = \frac{c^2}{r \cdot t} \sqrt{1-\nu^2}$$

ここで、座屈モードの次数 n は、 k_p が最小となる時の次数とする。

ロ. 常時作用する荷重（自重）＋設計竜巻の気圧差による荷重及び運転時の状態で作用する荷重に対する許容限界

ダクト自重により作用する曲げ応力 σ_b と設計竜巻による内外差圧及び運転圧による軸方向圧縮荷重による応力 σ_{pb} の和が、弾性座屈曲げ応力 σ_{cr2} 以下であることを確認する。

$$\sigma_b + \sigma_{pb} \leq \sigma_{cr2}$$

ここで、

$$\sigma_{cr2} = \frac{M_{cr}}{Z}$$

$$M_{cr} = \frac{0.72 \cdot E \cdot r \cdot t^2}{(1-\nu^2)}$$

$$Z = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{d_2^4 - d_1^4}{d_2}$$

(e) ファンの許容限界式

イ. 外圧に対する許容応力

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） $\sigma_{c r 1}$ 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 $\sigma_{c r 1}$ は、円筒殻の座屈応力の式より算出する。

$$\sigma_{c r 1} = \frac{k_p \cdot \pi^2 \cdot E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{c}\right)^2 \quad \square$$

$$k_p = \frac{(1 + \beta^2)^2}{0.5 + \beta^2} + \frac{12 \cdot Z_c^2}{\pi^4 (1 + \beta^2)^2 (0.5 + \beta^2)}$$

$$\beta = \frac{c \cdot n}{\pi \cdot r}$$

$$Z_c = \frac{c^2}{r \cdot t} \sqrt{1 - \nu^2}$$

表 4-8 施設ごとの許容限界 (1/4)

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	屋根スラブ 壁面	衝突	変形	貫通 ひずみ	施設の最小部材厚さが貫通限界厚さ以上とする。 鉄筋又はデッキプレートとの発生ひずみが、JIS規格値/T F (TF=□) を考慮した値以下とする。
					変形	裏面剥離による コンクリート片 の飛散	施設の最小部材厚さが裏面剥離限界厚さ以上とする。
	タービン建屋海水 熱交換器区域	$F_d + W_T (W_W, W_P, W_M)$	デッキプレート	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	発生応力が, JIS及び「鋼構造設計規準-許容応力度設計法-」に基づく許容応力度以下とする。
					引張		発生荷重が, 「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。
				スタッド	構造 耐震壁	変形	コンクリートのせん断ひずみが制限値 (2.0×10^{-3}) 以下とする。
					鉄骨 架構	変形	変形が, 「技術基準解説書」に基づく層間変形角以下とする。

表 4-8 施設ごとの許容限界 (2/4)

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	軽油タンク	W_M	胴板 屋根板	衝突	変形	貫入	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。
						ひずみ	
		$F_d + W_T$ (W_w , W_M)	胴板 基礎ボルト	構造 強度	一次一般膜, 組合せ, 座屈 引張, せん断, 組合せ	部材の降伏	JEAG4601等に準じて許容応力状態Ⅲ _A S ^{*1} *2及び座屈に対する評価式を満足する許容応力以下とする。

注記*1 : JEAG4601を基に, 表4-9 クラス1・クラス2, 3・その他の支持構造物の許容限界を準用する。

*2 : JEAG4601を基に, 表4-10 クラス2, 3 容器の許容限界を準用する。

表 4-8 施設ごとの許容限界 (3/4)

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	非常用ブイゼル発電設備吸気配管	$W_P + F_P$	配管本体	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 ^{*2} の許容応力以下とする。
	ダンパ (換気空調系)	$F_d + W_P$	ケーシング ベーン シャフト	構造強度	曲げ, せん断	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 ^{*1} の許容応力以下とする。
	角ダクト (換気空調系) 及び丸ダクト (換気空調系)	$F_d + W_P + F_P$	ダクト鋼板	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 ^{*1} 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。
	バタフライ弁 (換気空調系)	W_P	耐圧部	構造強度	変形	部材の降伏	試験圧力以下とする。
	ファン (換気空調系)	$W_P + F_P$	ケーシング	構造強度	座屈	部材の降伏	クリッピング座屈に応じた許容応力以下とする。

注記*1 : J E A G 4 6 0 1 を基に, 表 4-9 クラス 1・クラス 2, 3・その他の支持構造物の許容限界を準用する。

*2 : J E A G 4 6 0 1 を基に, 表 4-11 クラス 2, 3 配管の許容限界を準用する。

表 4-8 施設ごとの許容限界 (4/4)

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	5号機タービン建屋	$F_d + W_T (W_w, W_P, W_M)$	構造躯体	構造強度	変形	接触	隣接するタービン建屋海水熱交換器区域との相対変位が建屋間の離隔距離以下とする。
	5号機主排気筒	$F_d + W_T (W_w, W_M)$	鉄塔部, 基礎	構造強度	引張, 曲げ, せん断, 組合せ	部材の降伏	「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—」等に応じた許容応力度以下とする。
	非常用ディーゼル発電設備排気消音器	$F_d + W_w$	取付ボルト	構造強度	引張, せん断, 組合せ	部材の降伏	J E A G 4 6 0 1 等に準じて許容応力状態Ⅲ _A S ^{*1} の許容応力以下とする。
	非常用ディーゼル発電設備排気管	$F_d + W_w + F_P$	配管本体	構造強度	一次応力 (曲げ応力を含む)	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 ^{*2} の許容応力以下とする。
	ミスト管 (燃料デ イタンク, 非常用 ディーゼル発電設 備機関本体, 潤滑 油補給タンク, 燃 料油ドレンタン ク)	$F_d + W_w + F_P$	配管本体	構造強度	一次応力 (曲げ 応力を含む)	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 ^{*2} の許容応力以下とする。

注記*1 : J E A G 4 6 0 1 を基に, 表 4-9 クラス 1・クラス 2, 3・その他の支持構造物の許容限界を準用する。

*2 : J E A G 4 6 0 1 を基に, 表 4-11 クラス 2, 3 配管の許容限界を準用する。

表 4-9 クラス 1・クラス 2, 3・その他の支持構造物の許容限界

許容応力 状態	許容限界*1, *2, *3 (ボルト以外)				許容限界*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	$1.5f_t$	$1.5f_s$	$1.5f_c$	$1.5f_b$	$1.5f_t$	$1.5f_s$

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 容器の許容限界

許容応力 状態	許容限界		
	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	S_y , と $0.6S_u$ の小さい方。 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 $1.2S$ とする。	左欄の 1.5 倍の値	$2S_y$

表 4-11 クラス 2, 3 配管の許容限界

許容応力 状態	許容限界	
	一次一般膜応力	一次応力 (曲げ応力を含む)
Ⅲ _A S	S_y と $0.6S_u$ の小さい方。 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 $1.2S$ 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 $1.2S$ 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。

- ・ FEM 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。

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 又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容器、配管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定する。

(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

評価対象部位	応力等の状態
屋根スラブ	・変形
壁面	・曲げ
構造躯体	・せん断
スタッド	・引張

(3) 強度評価方法

a. 記号の定義

Degen 式による貫通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、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 5-4 に示す。

表 5-2 Degen 式による貫通限界厚さの算定に用いる記号

記号	単位	定義
D	kgf/cm ³	設計飛来物直径密度 ($D = W / d^3$)
d	cm	設計飛来物直径
e	cm	貫通限界厚さ
F_c	kgf/cm ²	コンクリートの設計基準強度
N	—	設計飛来物の形状係数
V	m/s	壁面 設計飛来物の衝突速度（水平）
		屋根 設計飛来物の衝突速度（鉛直）
W	kgf	設計飛来物重量
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	設計飛来物直径
f_c'	kgf/cm ²	コンクリートの設計基準強度
S	cm	裏面剥離限界厚さ
V	m/s	壁面 設計飛来物の衝突速度 (水平)
		屋根 設計飛来物の衝突速度 (鉛直)
V_0	m/s	飛来物基準速度
W	kgf	設計飛来物重量
α_s	—	低減係数

表 5-4 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)
(設計飛来物による衝撃荷重)

記号	単位	定義
F_m	N	設計飛来物による衝撃荷重
L_1	m	設計飛来物の最も短い辺の全長
m	kg	設計飛来物質量
V	m/s	設計飛来物の衝突速度 (水平)
τ	s	設計飛来物と被衝突体の接触時間

表 5-4 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)
(屋根スラブのデッキプレート及びスタッド)

記号	単位	定義
L	m	デッキプレートの支持スパン
M	kN・m	設計竜巻による単位幅あたりの曲げモーメント (=Max { M_1 , M_2 })
M_1	kN・m	支持スパン中央部における単位幅あたりの曲げモーメント
M_2	kN・m	支持位置における単位幅あたりの曲げモーメント
p	mm	スタッドの間隔
Q	kN/m	デッキプレート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 { ω_{T1} , ω_{T2} })
ω_{T1}	kN/m	複合荷重 W_{T1} による単位幅あたりの荷重
ω_{T2}	kN/m	複合荷重 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)

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。

1.52 ≤ X/d ≤ 13.42 の場合

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

X/d ≤ 1.52 の場合

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

修正 NDRC 式を以下に示す。

X/d ≤ 2.0 の場合

$$X/d = 2 \left\{ \left(12145 / \sqrt{F_c} \right) \cdot N \cdot d^{0.2} \cdot D \cdot (V/1000)^{1.8} \right\}^{0.5}$$

X/d ≥ 2.0 の場合

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

(b) Chang 式による裏面剥離限界厚さの算定

Chang 式を以下に示す。

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

(c) 力学における標準式による荷重及び応力の算定

イ. 設計飛来物による衝撃荷重

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

ロ. デッキプレートに発生する単位幅あたりの曲げモーメント

$$M = \text{Max} \{M_1, M_2\}$$

ここで,

$$M_1 = \frac{9}{128} (\omega_T - \omega_d) \cdot L^2$$

$$M_2 = \frac{1}{8} (\omega_T - \omega_d) \cdot L^2$$

ハ. デッキプレートに発生する単位幅あたりのせん断力

$$Q = \frac{5}{4} (\omega_T - \omega_d) \cdot L$$

ニ. スタッド1本あたりの発生引張力

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

ここで,

$$Q = \frac{\omega_T \cdot L}{2}$$

5.1.2 主排気筒

(1) 評価条件

5号機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. 5号機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、設計竜巻による設計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。

5号機主排気筒のモデル図を図5-1に示す。

- b. 計算に用いる寸法は公称値を使用する。

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-5に示す。

表5-5 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	評価内容
鉄塔部	・ 組合せ (圧縮+曲げ)
基礎	・ 引張 ・ せん断 ・ 曲げ

(3) 強度評価方法

- a. 記号の定義

5号機主排気筒の強度評価に用いる記号を表5-6に示す。

表 5-6 5号機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	鋼材の曲げ材料強度
f_c	N/mm ²	鋼材の圧縮材料強度
σ_b	N/mm ²	鋼材の曲げ応力度
σ_c	N/mm ²	鋼材の平均圧縮応力度
A	mm ²	断面積
Z_p	mm ³	塑性断面係数
σ_{t1}	N/mm ²	鉄塔の引張応力度
T_a	kN	アンカーボルト1本当たりの引張力
σ_t	N/mm ²	アンカーボルトの引張応力度
f_{ts}	N/mm ²	鋼材の引張材料強度
n	本	アンカーボルトの本数
A_0	mm ²	アンカーボルトのねじ部有効断面積
Q_a	kN	アンカーボルト1本当たりのせん断力
τ	N/mm ²	せん断応力度
f_s	N/mm ²	鋼材, コンクリートのせん断材料強度
a_t	mm ²	必要鉄筋量
a_0	mm ²	実施配筋量

b. 計算モデル

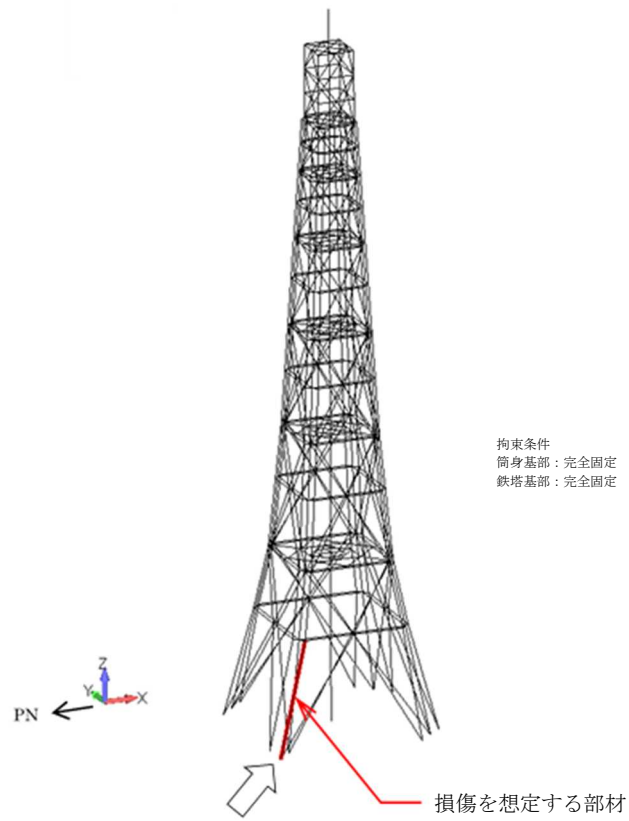


図 5-1 5号機主排気筒の計算モデル図

c. 評価方法

(a) 応力評価方法

5号機主排気筒について、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

5号機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. 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、「建築基準法施行令第90条、第96条」及び「平13国交告第1024号」に準拠して行う。

・ 組合せ（圧縮＋曲げ）

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

・ 引張

$$\frac{\sigma_t}{f_{ts}} \leq 1$$

・ 曲げ

$$\frac{a_t}{a_0} \leq 1$$

・ せん断

$$\frac{\tau}{f_s} \leq 1$$

(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 機器・配管系に関する評価式

5.2.1 軽油タンク

(1) 評価条件

軽油タンクの強度評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

- a. 貫通計算においては、評価対象部位に設計飛来物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。
- b. 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、水頭圧及び自重に対する、胴板及び基礎ボルトの構造強度を1質点系モデルとして計算を行う。ここで、風荷重の作用点は胴板高さの1/2とし、設計飛来物による衝撃荷重の作用点は胴板最上部とする。軽油タンクのモデル図を図5-2に示す。
- c. 自重については、設計荷重の抗力として作用する場合は質量が小さい方が安全側の評価となることから、基礎ボルトの構造強度評価においては、空重量による評価を実施する。
- d. 計算に用いる寸法は公称値を使用する。

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-7に示す。

表5-7 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	応力等の状態
屋根板	・変形
胴板	・変形 ・一次一般膜 ・組合せ ・座屈
基礎ボルト	・引張 ・せん断 ・組合せ

(3) 強度評価方法

a. 記号の定義

軽油タンクの衝突評価に用いる記号を表 5-8 に、強度評価に用いる記号を表 5-9 に示す。

表 5-8 軽油タンクの衝突評価に用いる記号

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

表 5-9 軽油タンクの強度評価に用いる記号 (1/2)

記号	単位	定義
A _b	mm ²	基礎ボルト呼び径断面積
C _c	—	基礎ボルト計算における係数
C _t	—	基礎ボルト計算における係数
D _c	mm	基礎ボルト中心円直径
D _i	mm	胴内径
D _{b i}	mm	ベースプレート内径
D _{b o}	mm	ベースプレート外径
e	—	基礎ボルト計算における係数
F _c	N	基礎に作用する圧縮力
F _t	N	基礎ボルトに作用する引張力
g	m/s ²	重力加速度
H _h	mm	液面高さ
k	—	基礎ボルト計算における中立軸の荷重係数
ℓ _g	mm	胴板高さの1/2+底板
ℓ _M	mm	胴板最上部の高さ
ℓ ₁ , ℓ ₂	mm	基礎ボルト計算における中立軸から荷重作用点までの距離
M _{T2}	N・mm	設計竜巻による複合荷重により作用するモーメント
m _e	kg	空質量

表 5-9 軽油タンクの強度評価に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
n	—	基礎ボルト本数
s	—	基礎ボルトと基礎の縦弾性係数比
t	mm	胴板厚
t_1	mm	基礎ボルト面積相当板幅
t_2	mm	圧縮側基礎相当幅
W_M	N	設計飛来物による衝撃荷重
W_W	N	設計竜巻の風圧力による荷重
W_{T2}	N	設計竜巻による複合荷重 ($W_{T2}=W_W+W_M$)
z	—	基礎ボルト計算における係数
α_2	rad	基礎ボルト計算における中立軸を定める角度
π	—	円周率
ρ	—	軽油の比重
σ_1	MPa	胴に生じる組合せ一次応力
σ_b	MPa	基礎ボルトに生じる引張応力
σ_c	MPa	基礎に生じる圧縮応力
σ_x	MPa	胴に生じる軸方向応力の和
σ_{x2}	MPa	自重 (空質量) により胴に生じる軸方向応力
σ_{x4}	MPa	設計竜巻による胴に生じる軸方向応力
σ_{xb}	MPa	曲げモーメントにより生じる圧縮応力
σ_{xc}	MPa	軸圧縮荷重により生じる圧縮応力
σ_ϕ	MPa	胴に生じる周方向応力の和
$\sigma_{\phi 1}$	MPa	静水頭により胴に生じる周方向応力
τ	MPa	設計竜巻により胴に生じるせん断応力
τ_b	MPa	基礎ボルトに生じるせん断応力

b. 計算モデル

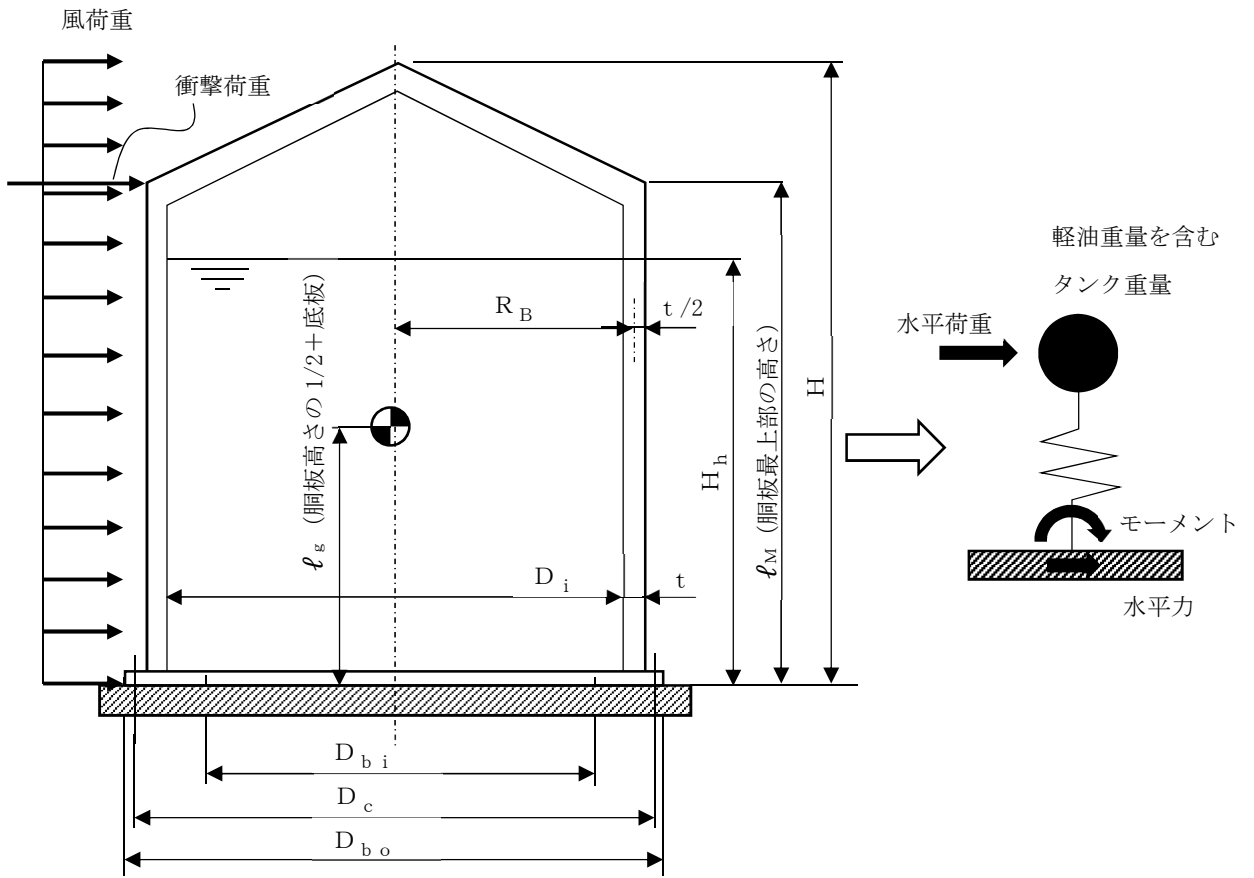


図5-2 軽油タンクのモデル図

c. 評価方法

(a) BRL 式による貫通限界厚さの算出

設計飛来物が軽油タンク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。

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

ここで、等価直径 d は下式のとおり。

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

(b) 設計竜巻により発生するモーメント

設計竜巻により作用するモーメント M_{T2} は以下のようにして計算する。

$$M_{T2} = W_W \cdot \ell_g + W_M \cdot \ell_M$$

(c) 胴に生じる応力

イ. 静水頭により胴に生じる周方向応力

$$\sigma_{\phi 1} = \frac{10^{-6} \cdot g \cdot \rho \cdot H_h \cdot D_i}{2t}$$

ロ. 胴の自重（空質量）により胴に生じる軸方向応力

$$\sigma_{x2} = \frac{m_e \cdot g}{\pi (D_i + t) \cdot t}$$

ハ. 設計竜巻により生じる応力

設計竜巻により胴に生じる軸方向応力

$$\sigma_{x4} = \frac{4M_{T2}}{\pi (D_i + t)^2 \cdot t}$$

設計竜巻により胴に生じるせん断応力

$$\tau = \frac{2W_{T2}}{\pi (D_i + t) \cdot t}$$

ニ. 組合せ応力

胴に生じる周方向応力の和

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

胴に生じる軸方向応力の和

$$\sigma_x = \sigma_{x 2} + \sigma_{x 4}$$

胴に生じる組合せ一次応力

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \left\{ (\sigma_x + \sigma_{\phi}) + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_{\phi})^2 + 4\tau^2} \right\}$$

ホ. 軸圧縮荷重及び曲げモーメントにより生じる圧縮応力

軸圧縮荷重により生じる圧縮応力

$$\sigma_{xc} = \sigma_{x 2}$$

曲げモーメントにより生じる圧縮応力

$$\sigma_{xb} = \sigma_{x 4}$$

(d) 基礎ボルト評価

イ. 基礎ボルトに生じるせん断応力

$$\tau_b = \frac{W_{T2}}{n \cdot A_b}$$

ロ. 基礎ボルトに生じる引張応力

基礎ボルトに引張力が発生しないのは、 α_2 が π に等しくなったときであり、 α_2 を π に近づけた場合の値 $e = 0.75$ 及び $z = 0.25$ を F_t を求める式に代入し、得られる F_t の値によって引張力の有無を次のように判断する。

- ・ $F_t \leq 0$ ならば、引張力は作用しない。
- ・ $F_t > 0$ ならば、引張力は作用しているので次の計算を行う。

転倒モーメント M_{T2} が作用した場合に生じる基礎ボルトの引張荷重と基礎部の圧縮荷重については、荷重と変位量の釣合い条件を考慮することにより求める。基礎の荷重説明図を図 5-3 に示す。

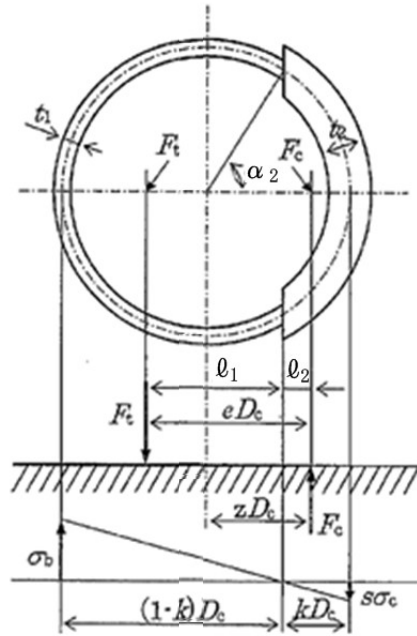


図5-3 基礎の荷重説明図 (J E A G 4 6 0 1-1987 より抜粋)

(イ) σ_b , σ_c を仮定して係数kを求める。

$$k = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_b}{s \cdot \sigma_c}}$$

(ロ) α_2 を求める。

$$\alpha_2 = \cos^{-1}(1 - 2k)$$

(ハ) 各定数 e, z, C_t 及び C_c を求める。

$$e = \frac{1}{2} \left\{ \frac{(\pi - \alpha_2) \cos^2 \alpha_2 + \frac{1}{2}(\pi - \alpha_2) + \frac{3}{2} \sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2}{(\pi - \alpha_2) \cos \alpha_2 + \sin \alpha_2} \right\} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\frac{1}{2} \alpha_2 - \frac{3}{2} \sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2 + \alpha_2 \cdot \cos^2 \alpha_2}{\sin \alpha_2 - \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2} \right\}$$

$$z = \frac{1}{2} \left\{ \cos \alpha_2 + \frac{\frac{1}{2} \alpha_2 - \frac{3}{2} \sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2 + \alpha_2 \cdot \cos^2 \alpha_2}{\sin \alpha_2 - \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2} \right\}$$

$$C_t = \frac{2 \{ (\pi - \alpha_2) \cos \alpha_2 + \sin \alpha_2 \}}{1 + \cos \alpha_2}$$

$$C_c = \frac{2 (\sin \alpha_2 - \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2)}{1 - \cos \alpha_2}$$

(二) 各定数を用いて F_t , F_c を求める。

$$F_t = \frac{M_{T2} - m_e \cdot g \cdot z \cdot D_c}{e \cdot D_c}$$

$$F_c = F_t + m_e \cdot g$$

(ホ) σ_b , σ_c を求める。

$$\sigma_b = \frac{2F_t}{t_1 \cdot D_c \cdot C_t}$$

$$\sigma_c = \frac{2F_c}{(t_2 + s \cdot t_1) D_c \cdot C_c}$$

ここで,

$$t_1 = \frac{n \cdot A_b}{\pi \cdot D_c}$$

$$t_2 = \frac{1}{2} (D_{b_o} - D_{b_i}) - t_1$$

5.2.2 吸気配管

(1) 評価の条件

吸気配管の強度評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

- a. 吸気配管は建屋内に設置されているため、気圧差による荷重を配管内部に受けるものとして計算を行う。吸気配管のモデル図を図 5-4 に示す。
- b. 計算に用いる寸法は公称値を使用する。

(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
配管本体	・周方向応力

(3) 強度評価方法

a. 記号の定義

吸気配管の強度評価に用いる記号を表 5-11 に示す。

表 5-11 吸気配管の強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
P_1	Pa	運転圧
P_b	Pa	配管に作用する圧力
r_m	mm	平均半径
t	mm	配管厚さ
ΔP	N/m^2	設計竜巻の気圧低下量
σ_θ	MPa	周方向応力

b. 計算モデル

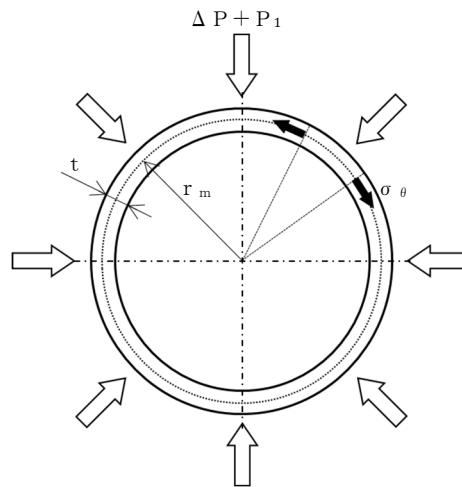


図 5-4 吸気配管のモデル図

c. 評価方法

配管にかかる外圧は、設計竜巻により発生する気圧差及び運転圧が影響するので、

$$P_b = \Delta P + P_1$$

(a) 外圧により生じる周方向応力

$$\sigma_\theta = \frac{P_b \cdot r_m}{t}$$

5.2.3 ダンパ（換気空調系）

(1) 評価の条件

ダンパの強度評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

- a. ケーシングは、ケーシング板材を4辺に分割し、その1辺を同等の断面性能を持つ単純支持梁として計算を行う。ケーシングのモデル図を図5-5に示す。
- b. ベーンは、四辺支持長方形板に等分布荷重がかかるものとし、曲げ応力による計算を行う。ベーンのモデル図を図5-6に示す。
- c. シャフトは、内部圧力及び自重により発生する荷重が両端のシャフトに作用するが、片端に作用するものとし、シャフト断面についてせん断応力による計算を行う。シャフトのモデル図を図5-7に示す。
- d. 計算に用いる寸法は公称値を使用する。

(2) 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
ケーシング	・曲げ
ベーン	・曲げ
シャフト	・せん断

(3) 強度評価方法

a. 記号の定義

ダンパの強度評価に用いる記号を表5-13に示す。

表5-13 ダンパの強度評価に用いる記号（1/2）

記号	単位	定義
A_s	mm^2	シャフト断面積
E	MPa	ヤング率
e_c	mm	ケーシングにおける断面の重心高さ
F_{1b}	N/mm^2	ベーンの内部圧力による分布荷重
F_{1c}	N/mm	ケーシングの内部圧力による分布荷重
F_{1s}	N	内部圧力によりシャフトにかかるせん断荷重
F_{2b}	N/mm^2	ベーンの自重による分布荷重
F_{2c}	N/mm	ケーシングの自重による分布荷重
F_{2s}	N	ベーンの自重によりシャフトにかかるせん断荷重

表 5-13 ダンパの強度評価に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
g	m/s^2	重力加速度
H_b	mm	ベーン幅
I_c	mm^4	ケーシングの断面二次モーメント
L_c	mm	面間寸法
L_s	mm	シャフト直径
l_b	mm	ベーン長さ
l_c	mm	ケーシング長さ
M_c	$N \cdot mm$	ケーシングに作用する最大曲げモーメント
m_b	kg	ベーン質量
m_c	kg	ケーシング質量
P	MPa	内部圧力
t_b	mm	ベーン板厚
Z_c	mm^3	ケーシングの断面係数
δ_{bmax}	mm	面外荷重によるベーンの最大変位量
ΔP	N/m^2	設計竜巻の気圧低下量
ν	—	ポアソン比
π	—	円周率
σ_{bmax}	MPa	ベーンの中心に生じる面外荷重による最大応力
σ_{cmax}	MPa	ケーシングに生じる最大曲げ応力
σ_{smax}	MPa	シャフトに生じる最大せん断応力

b. 計算モデル

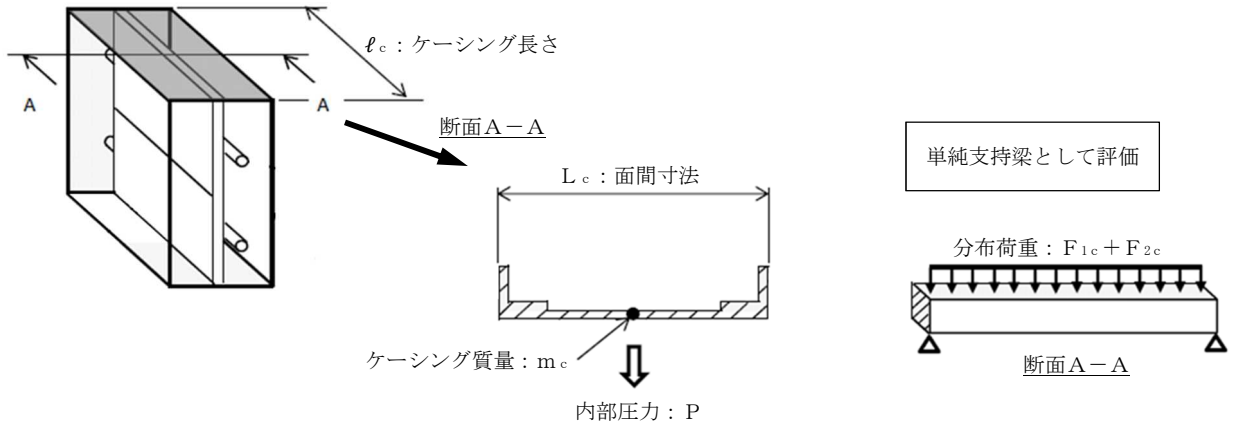


図 5-5 ケーシングのモデル図

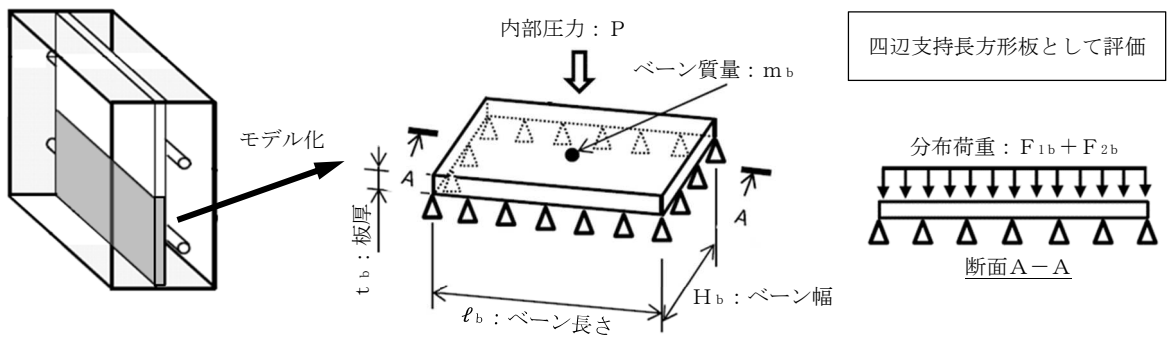


図 5-6 ベーンのモデル図

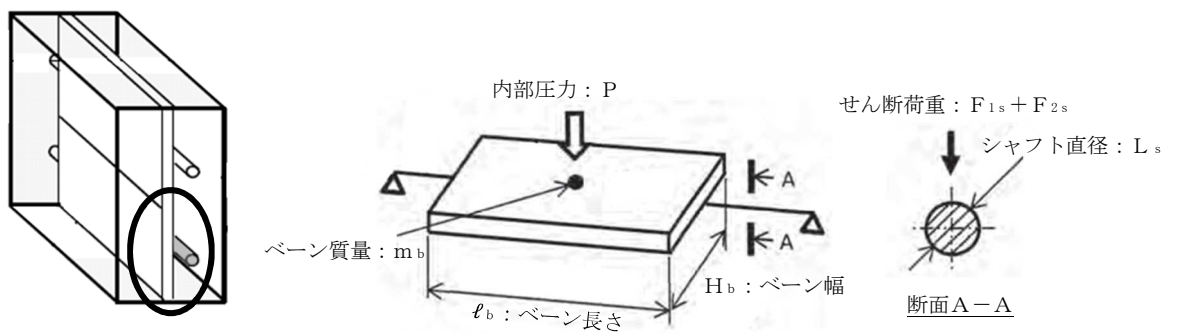


図 5-7 シャフトのモデル図

c. 評価方法

内部圧力は、設計竜巻により発生する気圧差によって発生するので、

$$P = \Delta P$$

(a) ケーシング

ケーシングに作用する最大曲げモーメント

$$M_c = \frac{\ell_c^2 (F_{1c} + F_{2c})}{8}$$

ここで、

$$F_{1c} = P \cdot L_c$$

$$F_{2c} = \frac{m_c \cdot g}{\ell_c}$$

ケーシングに生じる最大曲げ応力

$$\sigma_{c \max} = \frac{M_c}{Z_c}$$

ここで、

$$Z_c = \frac{I_c}{e_c}$$

(b) ベーン

ベーンに生じる発生応力は、四辺単純支持の長方形板が等分布荷重を受ける場合において、中心に生じる外圧及び自重による面外荷重により作用する最大応力 $\sigma_{b \max}$ とその面外荷重によるベーンの最大変位量 $\delta_{b \max}$ との関係は、以下の式で表わされる。

機械工学便覧に記載されている四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。

$$\sigma_{b \max} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot \delta_{b \max}}{8(1-\nu^2)} \left\{ \frac{(2-\nu^2) \delta_{b \max} + 4 t_b}{\ell_b^2} + \frac{\nu (\delta_{b \max} + 4 t_b)}{H_b^2} \right\} \dots \dots (5.1)$$

$$\frac{256(1-\nu^2)(F_{1b} + F_{2b})}{\pi^6 \cdot E \cdot t_b^4} = \frac{4}{3} \left(\frac{1}{\ell_b^2} + \frac{1}{H_b^2} \right)^2 \frac{\delta_{b \max}}{t_b} + \left\{ \frac{4\nu}{\ell_b^2 \cdot H_b^2} + (3-\nu^2) \left(\frac{1}{\ell_b^4} + \frac{1}{H_b^4} \right) \right\} \left(\frac{\delta_{b \max}}{t_b} \right)^3 \dots \dots (5.2)$$

ここで,

$$F_{1b} = P$$

$$F_{2b} = \frac{m_b \cdot g}{\ell_b \cdot H_b}$$

式 (5.2) より得られる δ_{bmax} の値を式 (5.1) へ代入し, σ_{bmax} を算出する。

(c) シャフト

シャフトに生じる最大せん断応力

$$\sigma_{smax} = \frac{F_{1s} + F_{2s}}{A_s}$$

ここで,

$$F_{1s} = P \cdot H_b \cdot \ell_b$$

$$F_{2s} = m_b \cdot g$$

$$A_s = \left(\frac{L_s}{2} \right)^2 \cdot \pi$$

5.2.4 角ダクト（換気空調系）

(1) 評価の条件

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。

- a. 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四辺単純支持長方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。角ダクトのモデル図を図5-8に示す。
- b. 計算に用いる寸法は公称値を使用する。

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-14に示す。

表5-14 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

(3) 強度評価方法

a. 記号の定義

角ダクトの強度評価に用いる記号を表5-15に示す。

表5-15 角ダクトの強度評価に用いる記号 (1/2)

記号	単位	定義
a	mm	ダクト幅
b	mm	ダクト高さ
c	mm	補強ピッチ
D_p	kg/m^2	単位面積あたりのダクト鋼板の質量
E	MPa	ヤング率
f_1	N	ダクト自重による圧縮荷重
f_2	N	面内荷重（外圧）による圧縮荷重
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
P_o	Pa	運転圧

表 5-15 角ダクトの強度評価に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
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
μ	kg/m	ダクト単位重量
ν	—	ポアソン比
π	—	円周率
σ_{max}	MPa	中心に生じる面外荷重による最大応力

b. 計算モデル

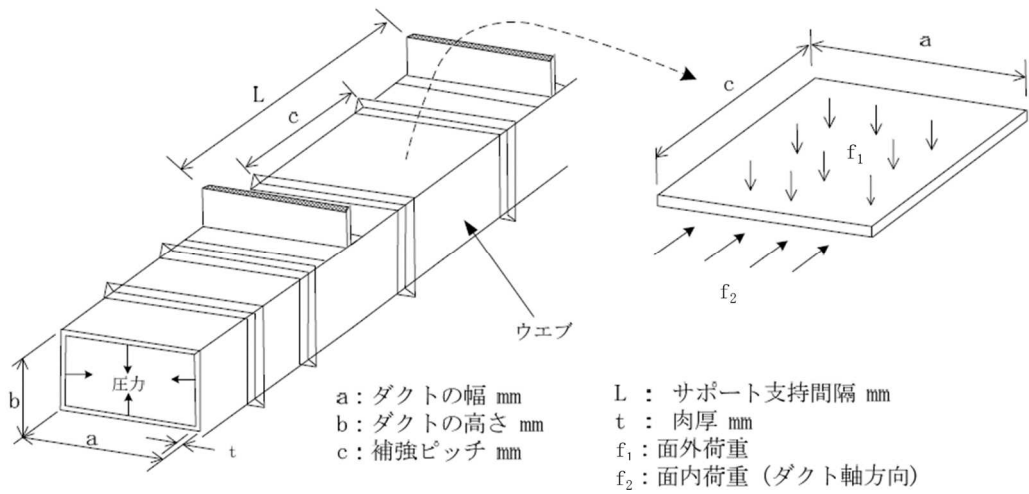


図 5-8 角ダクトのモデル図

c. 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及び運転圧が影響するので、 $P = \Delta P + P_0$ 。

(a) 面外荷重による発生応力

四辺単純支持（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四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。

$$\sigma_{max} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot \delta_{max}}{8(1-\nu^2)} \left\{ \frac{(2-\nu^2)\delta_{max} + 4t}{a^2} + \frac{\nu(\delta_{max} + 4t)}{c^2} \right\} \dots \dots (5.3)$$

$$\frac{256(1-\nu^2)}{\pi^6 \cdot E \cdot t^4} (P + g \cdot D_p) = \frac{4}{3} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{c^2} \right)^2 \frac{\delta_{max}}{t} + \left\{ \frac{4\nu}{a^2 \cdot c^2} + (3-\nu^2) \left(\frac{1}{a^4} + \frac{1}{c^4} \right) \right\} \left(\frac{\delta_{max}}{t} \right)^3 \dots \dots (5.4)$$

式 (5.4) より得られる δ_{max} の値を式 (5.3) へ代入し， σ_{max} を算出する。

(b) 面内荷重による発生応力

イ. 自重による発生応力

自重によりダクト鋼板に作用する圧縮荷重は，以下の式により算出する。

$$f_1 = \frac{M_p}{b}$$

ここで，

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

ロ. 外圧による発生応力

ダクト面内が受ける気圧差と運転圧による圧縮荷重は，以下の式により算出する。

$$f_2 = (a + 2t) \cdot (b + 2t) \cdot P \cdot 10^{-6}$$

5.2.5 丸ダクト（換気空調系）

(1) 評価の条件

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。

- a. 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。丸ダクトのモデル図を図5-9に示す。
- b. 計算に用いる寸法は公称値を使用する。

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-16に示す。

表5-16 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)	・ 曲げ ・ 座屈

(3) 強度評価方法

a. 記号の定義

丸ダクトの強度評価に用いる記号を表5-17に示す。

表5-17 丸ダクトの強度評価に用いる記号 (1/2)

記号	単位	定義
A_1	mm^2	ダクト全断面積
A_2	mm^2	ダクト板の断面積
d_1	mm	ダクト内径
d_2	mm	ダクト外径
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
P_o	Pa	運転圧
r_m	mm	ダクトの平均半径
t	mm	ダクト板厚
Z	mm^3	断面係数
ΔP	N/m^2	設計竜巻の気圧低下量
μ	kg/m	ダクト単位重量
π	—	円周率

表 5-17 丸ダクトの強度評価に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
σ_b	MPa	ダクト自重による曲げ応力
σ_{pb}	MPa	面内荷重 (外圧) による圧縮応力
σ_{cripl}	MPa	外圧により生じる周方向応力

b. 計算モデル

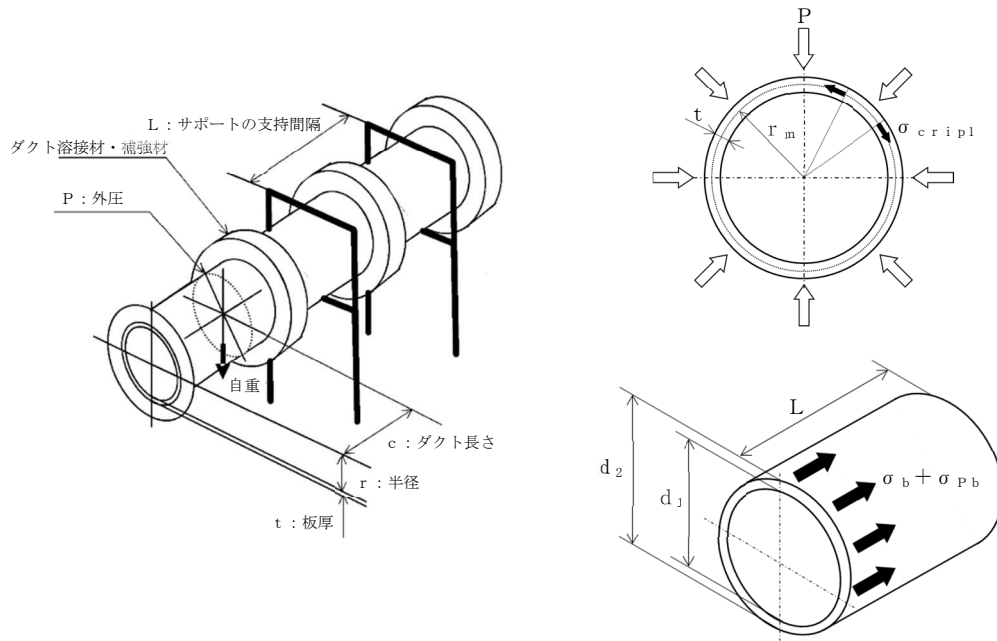


図 5-9 丸ダクトのモデル図

c. 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及び運転圧が影響するので、

$$P = \Delta P + P_0$$

(a) 外圧により生じる周方向応力

$$\sigma_{cripl} = \frac{P \cdot r_m}{t}$$

(b) 面内荷重による発生応力

イ. 自重による発生応力

自重によりダクト鋼板に作用する曲げ応力は、以下の式により算出する。

$$\sigma_b = \frac{M_p}{Z}$$

ここで,

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

$$Z = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{d_2^4 - d_1^4}{d_2}$$

ロ. 外圧による発生応力

ダクト面内が受ける気圧差と運転圧による圧縮応力は、以下の式により算出する。

$$\sigma_{pb} = P \cdot \frac{A_1}{A_2}$$

ここで,

$$A_1 = \frac{\pi}{4} \cdot d_2^2$$

$$A_2 = \frac{\pi}{4} \cdot (d_2^2 - d_1^2)$$

5.2.6 バタフライ弁（換気空調系）

(1) 評価の条件

バタフライ弁の強度評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

- a. 設計竜巻により発生する圧力とバタフライ弁の試験圧力との比較を行う。

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表 5-18 に示す。

表 5-18 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	応力等の状態
耐圧部	・変形

(3) 強度評価方法

a. 記号の定義

バタフライ弁の強度評価に用いる記号を表 5-19 に示す。

表 5-19 バタフライ弁の強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
P	MPa	内部圧力
ΔP	N/m ²	設計竜巻の気圧低下量

b. 評価方法

内部圧力は、設計竜巻により発生する気圧差によって発生するので、

$$P = \Delta P$$

5.2.7 ファン（換気空調系）

(1) 評価の条件

ファンの強度評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

- a. ファン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。ファンのモデル図を図5-10に示す。
- b. 計算に用いる寸法は公称値を使用する。

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-20に示す。

表5-20 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	応力等の状態
ケーシング	・座屈

(3) 強度評価方法

a. 記号の定義

ファンの強度評価に用いる記号を表5-21に示す。

表5-21 ファンの強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
P_1	Pa	運転圧
P_b	Pa	ファンケーシングに作用する圧力
r_m	mm	平均半径
t	mm	ケーシング板厚
ΔP	N/m^2	設計竜巻の気圧低下量
σ_θ	MPa	周方向応力

b. 計算モデル

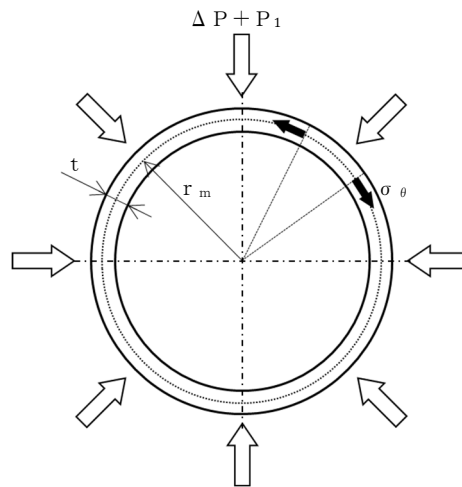


図5-10 ファンのモデル図

c. 評価方法

ファンにかかる外圧は、設計竜巻により発生する気圧差及び運転圧が影響するので、

$$P_b = \Delta P + P_1$$

(a) 外圧により生じる周方向応力

$$\sigma_\theta = \frac{P_b \cdot r_m}{t}$$

5.2.8 消音器

(1) 評価の条件

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及び自重に対する、取付ボルトの構造強度を1質点系モデルとして計算を行う。ここで、風荷重の作用点は胴板高さの1/2とする。消音器のモデル図を図5-11に示す。
- b. 自重については、設計荷重の抗力として作用する場合は質量が小さい方が安全側の評価となることから、取付ボルトの構造強度評価において考慮しない。
- c. 計算に用いる寸法は公称値を使用する。

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-22に示す。

表5-22 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

(3) 強度評価方法

a. 記号の定義

消音器の強度評価に用いる記号を表5-23に示す。

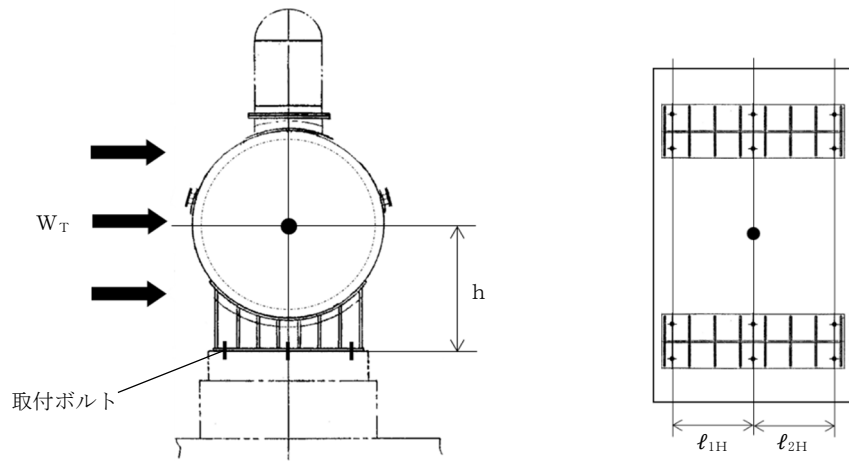
表5-23 消音器の強度評価に用いる記号 (1/2)

記号	単位	定義
A_b	mm^2	取付ボルトの断面積
d	mm	取付ボルト呼び径
F_{bA}	N	軸方向における引張力
F_{bH}	N	軸直角方向における引張力
h	mm	消音器重心高さ
l_{1A}	mm	軸方向における取付ボルトから重心までの距離
l_{2A}	mm	軸方向における取付ボルトから重心までの距離
l_{1H}	mm	軸直角方向における取付ボルトから重心までの距離
l_{2H}	mm	軸直角方向における取付ボルトから重心までの距離
N	—	取付ボルト本数
n_{fA}	—	軸方向における引張力を受ける取付ボルト本数
n_{fH}	—	軸直角方向における引張力を受ける取付ボルト本数

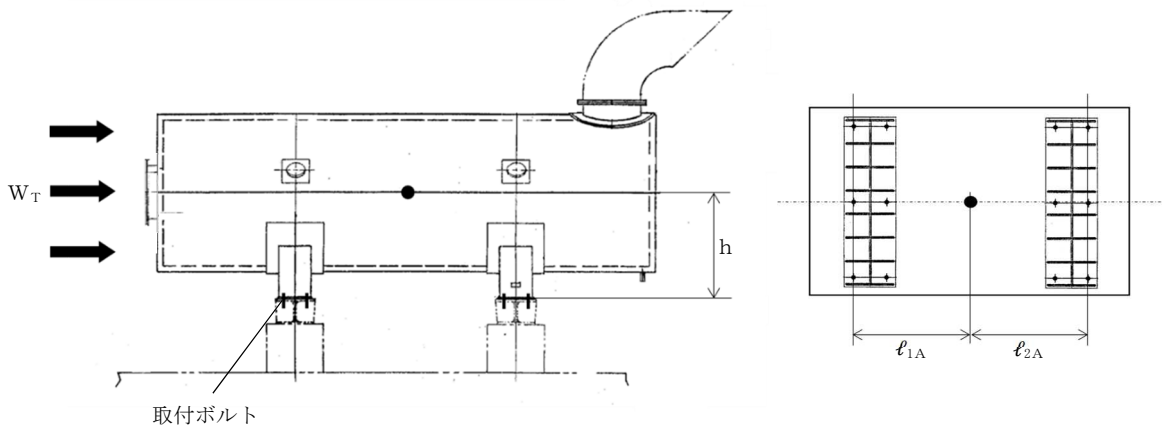
表 5-23 消音器の強度評価に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
Q_b	N	取付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_{bA}	MPa	軸方向における取付ボルトに生じる引張応力
σ_{bH}	MPa	軸直角方向における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



(軸直角方向)



(軸方向)

図 5-11 消音器のモデル図

c. 評価方法

(a) 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、取付ボルトを支点とする転倒を考え、これをもう片側の取付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

$$F_{bH} = \frac{W_T \cdot h}{\ell_{1H} + \ell_{2H}}$$

引張応力

$$\sigma_{bH} = \frac{F_{bH}}{n_{fH} \cdot A_b}$$

ここで、

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

ロ. 軸方向

引張力

$$F_{bA} = \frac{W_T \cdot h}{\ell_{1A} + \ell_{2A}}$$

引張応力

$$\sigma_{bA} = \frac{F_{bA}}{n_{fA} \cdot A_b}$$

(b) せん断応力

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

イ. せん断力

$$Q_b = W_T$$

ロ. せん断応力

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

5.2.9 排気管及びミスト管

(1) 評価の条件

排気管及びミスト管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サポートの支持間隔が最長となる箇所を用いる。排気管及びミスト管のモデル図を図5-12に示す。
- b. サポート（配管支持構造物）については、建屋内外に関わらず地震に対して耐荷重設計がなされており、配管本体に竜巻の風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。
- c. 計算に用いる寸法は公称値を使用する。

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-24に示す。

表5-24 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（曲げ応力含む）

(3) 強度評価方法

a. 記号の定義

排気管及びミスト管の強度評価に用いる記号を表5-25に示す。

表5-25 排気管及びミスト管の強度評価に用いる記号（1/2）

記号	単位	定義
D	mm	管外径
g	m/s ²	重力加速度
L	mm	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	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

表 5-25 排気管及びミスト管の強度評価に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
σ	MPa	配管に生じる応力
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

b. 計算モデル

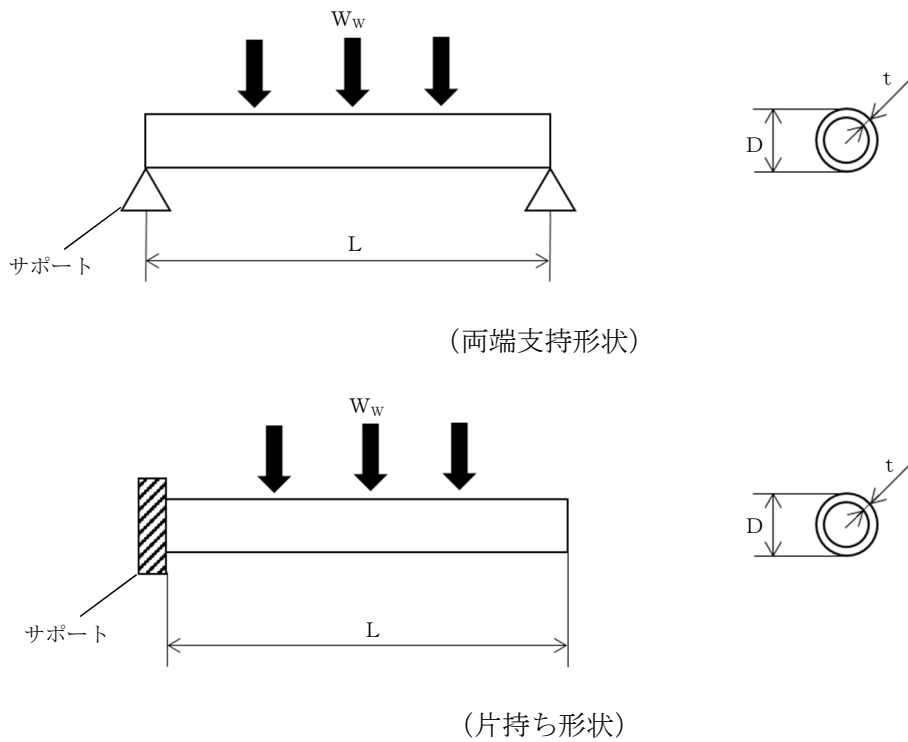


図 5-12 排気管及びミスト管のモデル図

c. 評価方法

(a) 竜巻による応力計算

イ. 風圧力により生じる応力

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

・両端支持形状

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

・片持ち支持形状

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

ここで,

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

(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。

イ. 自重により生じる応力

・両端支持形状

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

・片持ち支持形状

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

$$w = m \cdot g$$

ロ. 内圧により生じる応力

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

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、配管に生じる応力は以下の式により算出する。

$$\sigma = \sigma_{\text{自重}} + \sigma_{\text{内圧}} + \sigma_{\text{ww}}$$

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、VI-1-1-3-3-1「竜巻への配慮に関する基本方針」による。

- ・ 建築基準法及び同施行令
- ・ 「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」
(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」 (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」 (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」 (日本機械学会)
- ・ 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」 (昭和51年10月高温構造安全技術研究組合)
- ・ タービンミサイル評価について (昭和52年7月20日原子炉安全専門審査会)
- ・ U. S. Nuclear Regulatory Commission:REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision1, March 2007
- ・ Methodology for Performing Aircraft Impacts Assessments for New Plant Designs
(Nuclear Energy Institute 2011 Rev8 (NEI07-13))
- ・ 「建築物荷重指針・同解説」 (日本建築学会, 2004改定)
- ・ 「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—」 (日本建築学会, 2005改定)
- ・ 「各種合成構造設計指針・同解説」 (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」 (日本建築学会, 2010改定)
- ・ 「鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説—許容応力度設計と保有水平耐力—」 (日本建築学会, 2001改定)
- ・ 「2015年版 建築物の構造関係技術基準解説書」 (国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所, 2015)
- ・ 日本産業規格 (J I S)

VI-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	2
2.1 対象施設	2
2.2 構造強度の設計方針	2
2.3 荷重及び荷重の組合せ	5
2.4 構造設計	13
2.5 評価方針	29
3. 防護対策施設の構成要素の設計方針	32
3.1 竜巻防護ネットの構造設計	32
3.2 竜巻防護鋼製フードの構造設計	35
3.3 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の構造設計	36
3.4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の構造設計	37
3.5 建屋内防護壁の構造設計	38
3.5.1 原子炉補機冷却海水系配管防護壁の構造設計	38
3.5.2 換気空調系ダクト防護壁の構造設計	39
3.5.3 竜巻防護ネット（防護鋼板部）の構造設計	40
3.6 竜巻防護扉の構造設計	41
4. 防護対策施設の構成要素の評価方針	42
4.1 竜巻防護ネットの評価方針	42
4.2 竜巻防護鋼製フードの評価方針	46
4.3 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の評価方針	48
4.4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の評価方針	50
4.5 建屋内防護壁の評価方針	52
4.5.1 原子炉補機冷却海水系配管防護壁，換気空調系ダクト防護壁（No. 50 及び No. 55） 及び竜巻防護ネット（防護鋼板部）の評価方針	52
4.5.2 換気空調系ダクト防護壁（No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B)）の評価方針	55
4.6 竜巻防護扉の評価方針	57
5. 許容限界	59
5.1 竜巻防護ネットの許容限界	59
5.2 竜巻防護鋼製フードの許容限界	69
5.3 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の許容限界	69
5.4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の許容限界	70
5.5 建屋内防護壁の許容限界	70
5.5.1 原子炉補機冷却海水系配管防護壁，換気空調系ダクト防護壁（No. 50 及び No. 55） 及び竜巻防護ネット（防護鋼板部）の許容限界	70
5.5.2 換気空調系ダクト防護壁（No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B)）の許容限界	71
5.6 竜巻防護扉の許容限界	71

6.	強度評価方法	72
6.1	竜巻防護ネットの強度評価	72
6.2	竜巻防護鋼製フードの強度評価	93
6.3	非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の強度評価	94
6.4	非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の強度評価	95
6.5	建屋内防護壁の強度評価	96
6.5.1	原子炉補機冷却海水系配管防護壁，換気空調系ダクト防護壁（No. 50 及び No. 55） 及び竜巻防護ネット（防護鋼板部）の強度評価	96
6.5.2	換気空調系ダクト防護壁（No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B)）の強度評価	98
6.6	竜巻防護扉の強度評価	99
7.	適用規格	101

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」に適合する設計とするため、VI-1-1-3「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VI-1-1-3-3-3「竜巻防護に関する施設の設計方針」（以下「VI-1-1-3-3-3「竜巻防護に関する施設の設計方針」」という。）に基づき、防護対策施設が、設計竜巻に対して要求される強度を確保するための強度設計方針について説明するものである。

コントロール建屋に設置する竜巻防護鉄筋コンクリート製フードの強度に関する説明は、令和2年10月14日付け原規規発第2010147号にて認可された柏崎刈羽原子力発電所第7号機の設計及び工事の計画のV-3-別添1-2「防護対策施設の強度計算の方針」による。

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と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

VI-1-1-3-3-3「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」にて設定している以下の防護対策施設を対象とする。

- ・ 建屋開口部竜巻防護ネット（以下「竜巻防護ネット」という。）
- ・ 建屋開口部竜巻防護フード（以下「竜巻防護鋼製フード」という。）
- ・ 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板
- ・ 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板
- ・ 建屋内防護壁（原子炉補機冷却海水系配管防護壁及び換気空調系ダクト防護壁）
- ・ 竜巻防護扉

2.2 構造強度の設計方針

防護対策施設は、設計飛来物（以下「飛来物」という。）の外部事象防護対象施設への衝突を防止するものであり、VI-1-1-3-3-3「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」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、以下の設計とする。

(1) 竜巻防護ネット

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考慮すべき荷重に対し、飛来物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、飛来物が外部事象防護対象施設へ衝突しないよう捕捉できる設計とする。

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考慮すべき荷重に対し、飛来物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、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を支持する機能を維持可能な構造強度を有し、外部事象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。

なお、竜巻防護ネットのうち防護鋼板部の設計方針については「(5)c. 竜巻防護ネット（防護鋼板部）」に示す。

(2) 竜巻防護鋼製フード

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、飛来物が防護鋼板を貫通せず、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えない設計とする。

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考慮すべき荷重

に対し、飛来物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、飛来物が架構を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載する防護鋼板を支持する機能を維持可能な構造強度を有し、外部事象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。

(3) 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板

防護鋼板は、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、飛来物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、飛来物が防護鋼板を貫通せず、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えない設計とする。

架構は、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、飛来物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、飛来物が架構を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載する防護鋼板を支持する機能を維持可能な構造強度を有し、外部事象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。

(4) 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板

防護鋼板は、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、飛来物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、飛来物が防護鋼板を貫通せず、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えない設計とする。

架構は、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、飛来物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、飛来物が架構を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載する防護鋼板を支持する機能を維持可能な構造強度を有し、外部事象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。

(5) 建屋内防護壁

a. 原子炉補機冷却海水系配管防護壁

防護鋼板は、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、飛来物が防護鋼板を貫通せず、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えない設計とする。

架構は、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、飛来物が架構を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載する防護鋼板を支持する機能を維持可能な構造強度を有し、外部事象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。

b. 換気空調系ダクト防護壁

防護鋼板は、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、飛来物が防護鋼板を貫通せず、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えない設計とする。

架構は、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、飛来物が架構を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載する防護鋼板を支持する機能を維持可能な構造強度を有し、外部事象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。

c. 竜巻防護ネット（防護鋼板部）

防護鋼板は、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、飛来物が防護鋼板を貫通せず、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えない設計とする。

架構は、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、飛来物が架構を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載する防護鋼板を支持する機能を維持可能な構造強度を有し、外部事象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。

(6) 竜巻防護扉

竜巻防護扉は、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、飛来物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、飛来物が竜巻防護扉を構成する部材を貫通せず、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないために、竜巻防護扉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

防護対策施設の強度評価に用いる荷重の種類及び荷重の組合せは、VI-1-1-3「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VI-1-1-3-3-1「竜巻への配慮に関する基本方針」(以下「VI-1-1-3-3-1「竜巻への配慮に関する基本方針」という。)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、竜巻防護ネットの自重により作用する荷重は、ネットの設置方向を考慮する。水平方向に設置する場合、鉛直下向きに自重が発生するものとして評価するが、鉛直方向に設置する場合、自重と飛来物による衝撃荷重の作用方向が異なることから、自重は考慮しない。

b. 設計竜巻による荷重 (W_T)

設計竜巻(最大風速 92m/s)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 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})

フジタモデルにおける竜巻の最大気圧低下量は、流れの連続式と運動量保存則から導出される以下の圧力ポアソン方程式を用いる。

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial x_3^2} \right) = - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} \right)$$

ρ : 空気密度(kg/m³)

p : 圧力(N/mm²)

χ : 座標(—)

U : 風速ベクトル(—)

ν : 動粘性係数(m²/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)
92	14	78	6400

(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。

竜巻の最大風速は、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。

竜巻の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「REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision1」(米国原子力規制委員会) より $\rho=1.226\text{kg/m}^3$ とする。

設計用速度圧 q については、施設の形状によらず $q=5188.43\text{N/m}^2$ 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する。

(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策施設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。

飛来物の諸元を表 2-2 に示す。

表 2-2 飛来物の諸元

	足場パイプ	鋼製足場板
寸法 長さ×幅×奥行き (m)	4×0.05×0.05	4×0.25×0.04
質量 (kg)	11	14
水平方向の飛来速度 (m/s)	42	55
鉛直方向の飛来速度 (m/s)	38	18

c. 運転時の状態で作用する荷重 (F_P)

運転時の状態で作用する荷重は、配管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竜巻による荷重は、設計竜巻の気圧差による荷重 (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。防護対策施設の構成要素別の荷重の組合せを、表 2-3 に示す。

表 2-3 (1/2) 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	竜巻防護ネット	防護ネット	構造強度	—*1	—	○	—*2	○	—
	竜巻防護鋼製フード	防護鋼板	衝突	—	—	—	—	○	—
			構造強度	○	—	○	—*2	○	—
		架構	構造強度	○	○*3	○	—*2	○	—
	非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板	防護鋼板	衝突	—	—	—	—	○	—
			構造強度	○	○	○	○	○	—
		架構	構造強度	○	○*3	○	○	○	—
	非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板	防護鋼板	衝突	○	—	○	○	○	—
			構造強度	○	—	○	○	○	—
		架構	構造強度	○	○*3	○	○	○	—

注記*1 : 鉛直設置であるため、自重と飛来物による衝撃荷重の作用方向が異なることから、自重は考慮しない。

*2 : 閉じた施設でないことから、気圧差は生じない。

*3 : 防護鋼板に作用する飛来物による衝撃荷重を含む。

表 2-3 (2/2) 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	原子炉補機冷却海水系配管防護壁	防護鋼板	衝突	—	—	—	—	○	—
			構造強度	○	—	—*1	—*2	○	—
		架構	構造強度	○	○*3	—*1	—*2	○	—
	換気空調系ダクト防護壁	防護鋼板	衝突	○*4	—	—	—	○	—
			構造強度	○	—	—*1	—*2	○	—
		架構	構造強度	○	○*3	—*1	—*2	○	—
	竜巻防護ネット(防護鋼板部)	防護鋼板	衝突	—	—	—	—	○	—
			構造強度	○	—	—*1	—*2	○	—
		架構	構造強度	○	○*3	—*1	—*2	○	—
	竜巻防護扉		衝突	—	—	—	—	○	—
			構造強度	○	—	○	○	○	—

注記*1 : 屋内に設置されており、風圧力は作用しない。

*2 : 閉じた施設でないことから、気圧差は生じない。

*3 : 防護鋼板に作用する飛来物による衝撃荷重を含む。

*4 : 衝突解析を実施する場合に考慮する。

(3) 荷重の算定方法

「2.3(1) 荷重の種類」で設定している荷重のうち、竜巻防護ネットに生じ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2-4に示す。

表2-4 荷重の算出に用いる記号

記号	単位	定義
A	m ²	竜巻防護ネットの受圧面積
A _a	m ²	ネットの面積
C	—	風力係数
d	m	飛来物衝突時の飛来物の移動距離
E _f	kJ	飛来物衝突時にネットに作用する外力エネルギー
F _a	kN	飛来物衝突時にネットが受ける最大衝撃荷重
F _a '	kN	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
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	飛来物の質量
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	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	飛来物の移動速度
v ₁	m/s	飛来物衝突時の速度
V _D	m/s	設計竜巻の風速
W _w	kN	風圧力による荷重
δ	m	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. 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」（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、 $q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_D^2$

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、次式のとおり算出する。

$$A = \phi \cdot A_a$$

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。

$$A_a = L_1 \cdot L_2$$

(b) 飛来物による衝撃荷重の算出

飛来物衝突時にネットが受ける衝撃荷重 F_a' を図2-1に示すような二等辺三角形荷重 (F_a' は時間とともに比例的に増加する) と仮定する。

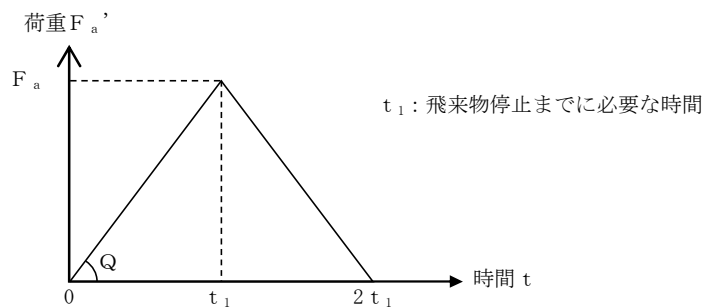


図 2-1 ネットに作用する衝撃荷重の時間変化の模式図

ここで、飛来物がネットに接触し ($t=0$)、ネットが最大変形し ($t=t_1$)、飛来物がリバウンドする ($t=t_1 \sim 2t_1$) 過程において、飛来物はネットに接触しているものと考え、最大衝撃荷重の発生時間は、ネットが最も変形し、エネルギーを蓄えているときに生じているものとして $t=t_1$ とする。これより、衝撃荷重 F_a' は以下のとおり算出される。

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

したがって、ネットへの衝突後の飛来物の移動速度 v は、飛来物の運動量の変化から、式(2.1)の衝撃荷重 F_a' を基に、以下のとおり算出される。

$$v = -\frac{1}{m} \int_0^t F_a' \, dt$$

$$= -\frac{Q \cdot t^2}{2 \cdot m} + v_1 \dots\dots\dots (2.2)$$

さらに、ネットへの衝突後の飛来物の移動距離 d は、式(2.2)の速度 v から以下のとおり算出される。

$$d = \int_0^t v \, dt$$

$$= -\frac{Q \cdot t^3}{6 \cdot m} + v_1 \cdot t \dots\dots\dots (2.3)$$

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たわみ量 δ は、飛来物の速度は $v=0$ であるから、式(2.2)、(2.3)より、

$$Q \cdot t_1^2 = 2 \cdot m \cdot v_1 \dots\dots\dots (2.4)$$

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

上記2式を連立し、

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

よって、

$$t_1 = \frac{3 \cdot \delta}{2 \cdot v_1} \dots\dots\dots (2.5)$$

以上より、時間 t_1 における飛来物による衝撃荷重 F_a' は式(2.1)、(2.4)より、

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

さらに、式(2.5)と連立し、

$$F_a' = \frac{4 \cdot m \cdot v_1^2}{3 \cdot \delta} \dots\dots\dots (2.6)$$

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

$$E_f = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 \dots\dots\dots (2.7)$$

したがって、式(2.6)、(2.7)より、

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

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) 竜巻防護ネット

竜巻防護ネットは、防護ネット及び架構で構成され、飛来物が侵入した場合に外部事象防護対象施設に衝突する可能性のある原子炉建屋及びタービン建屋壁面の開口部に設置することで、飛来物が建屋内に侵入することを防止し、外部事象防護対象施設と防護ネットの隔離を確保することなどにより、防護ネットにたわみが生じたとしても、外部事象防護対象施設に飛来物を衝突させない構造とする。また、防護ネットは架構を介して、鉄筋コンクリート造の原子炉建屋躯体又はタービン建屋躯体に支持される構造とする。

防護ネットは、ネット、ワイヤロープ、シャックル、接続用の治具等より構成され、防護ネットに作用する荷重をワイヤロープ、シャックル及び接続用の治具を介して架構に伝達し、架構から鉄筋コンクリート造の原子炉建屋躯体又はタービン建屋躯体に伝達する構造とする。

ネットは、らせん状の硬鋼線を3次元的に編み込み、編み込みの方向によって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、ネット寸法、ネットに作用する荷重、ネットの有する限界吸収エネルギー及び飛来物衝突時のたわみ量を考慮し、設置する層数を設定し、展開方向を直交させ、複数層重ねて設置する構造とする。

ネットを支持する架構は、H形鋼等から構成され、上載するネット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躯体又はタービン建屋躯体に伝達する構造とする。なお、外部事象防護対象施設に衝突する可能性がある飛来物はネットで捕捉する構造とするため、架構は建屋の開口部より大きな構造とし、飛来物の衝突により仮に架構が損傷した場合であっても、外部事象防護対象施設に飛来物を衝突させない構造とする。

竜巻防護ネットの構造計画を表2-5に示す。

表 2-5 竜巻防護ネットの構造計画

構成要素	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】 防護ネット及び架構は、飛来物が侵入した場合、外部事象防護対象施設に衝突する可能性のある原子炉建屋及びタービン建屋壁面の開口部に設置する設計としている。</p>			
防護ネット	<p>防護ネットは、鋼製のネット、ワイヤロープ、シャックル、接続用の治具及び架構より構成する。</p>	<p>防護ネットに作用する荷重は、ネット接続用シャックル及びワイヤロープ、ロープ接続用シャックル及び接続用の治具を介して架構に伝達し、架構から鉄筋コンクリート造の原子炉建屋躯体又はタービン建屋躯体に伝達する構造とする。</p>	<p>正面図</p>
架構	<p>架構は、鋼製のH形鋼等より構成する。</p>		<p>側面図</p> <p>(建屋内設置：ブローアウトパネル部) (概要図)</p> <p>(建屋外設置：その他) (概要図)</p>

K6 ① VI-3-別添1-2 R0

防護ネットは、2層以上重ね合わせ、展開方向を直交させて設置する。この時のネットタイプを、ネットタイプⅠ、ネットタイプⅡとする。ネットを架構に設置した場合のネットタイプⅠ、Ⅱの展開方向を図2-2に、ネット設置層数別のネットタイプの重ね方を図2-3に示す。

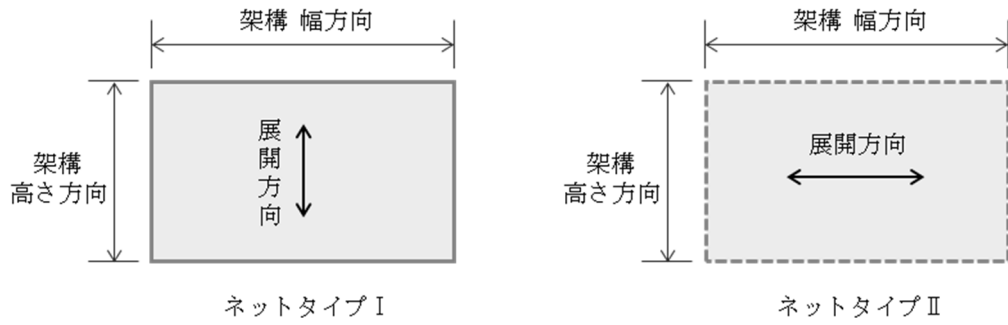


図2-2 ネットを架構に設置した場合のネットタイプⅠ、Ⅱの展開方向

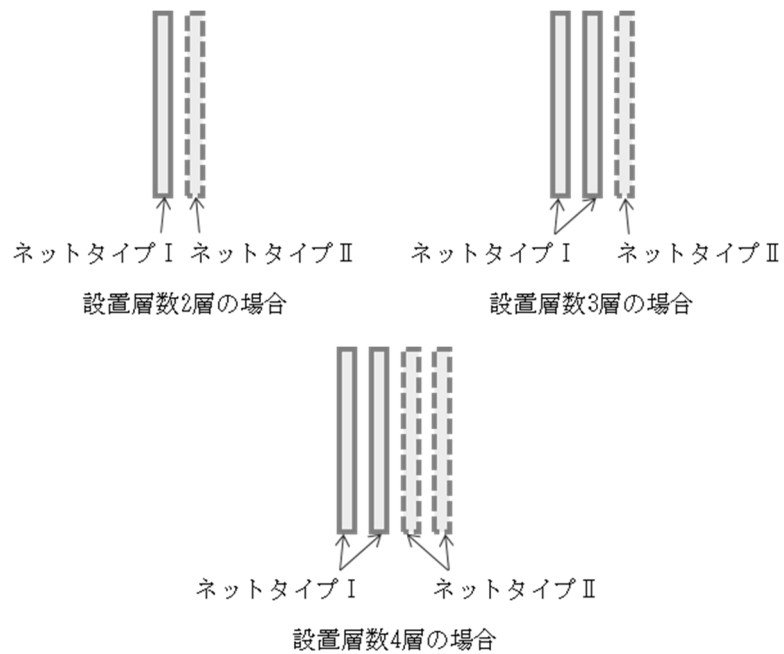


図2-3 ネット設置層数別のネットタイプの重ね方

(2) 竜巻防護鋼製フード

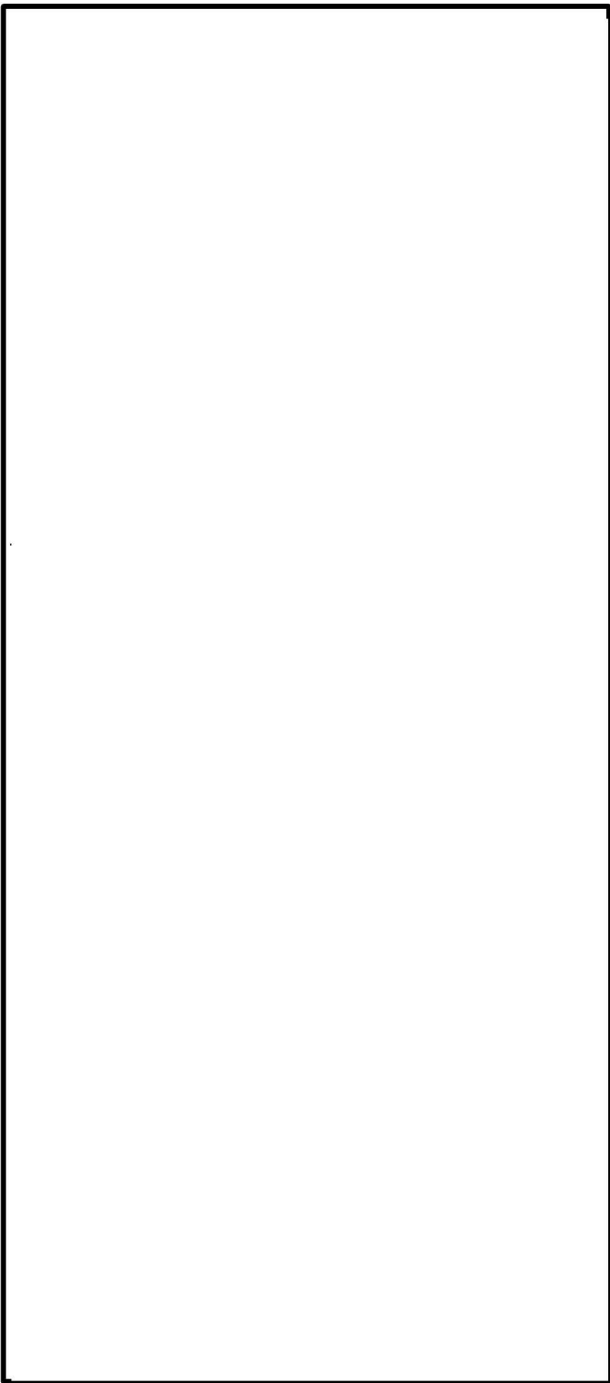
竜巻防護鋼製フードは、防護鋼板及び架構で構成され、飛来物が侵入した場合に外部事象防護対象施設に衝突する可能性のある原子炉建屋壁面の開口部を取り囲むように設置することで、飛来物が建屋内に侵入することを防止し、防護鋼板にたわみ及び変形が生じたとしても、外部事象防護対象施設に飛来物を衝突させない構造とする。また、防護鋼板は架構を介して、鉄筋コンクリート造の原子炉建屋躯体に支持される構造とする。

防護鋼板は、鋼板より構成され、防護鋼板に作用する荷重は架構を介して鉄筋コンクリート造の原子炉建屋躯体に伝達する構造とする。

防護鋼板を支持する架構は、H形鋼等から構成され、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躯体に伝達する構造とする。

竜巻防護鋼製フードの構造計画を表2-6に示す。

表 2-6 竜巻防護鋼製フードの構造計画

構成要素	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】 防護鋼板及び架構は、飛来物が侵入した場合、外部事象防護対象施設に衝突する可能性のある原子炉建屋壁面の開口部に設置する設計としている。</p>			
防護鋼板	防護鋼板は、鋼製の鋼板より構成する。	防護鋼板に作用する荷重は、架構を介して鉄筋コンクリート造の原子炉建屋躯体に伝達する構造とする。	
架構	架構は、鋼製の H 形鋼等より構成する。	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躯体に伝達する構造とする。	

K6 ① VI-3-別添 1-2 R0

(3) 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板は、防護鋼板及び架構で構成され、外部事象防護対象施設を取り囲むように設置することで、飛来物が外部事象防護対象施設へ衝突することを防止し、防護鋼板にたわみ及び変形が生じたとしても、外部事象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軽油タンク基礎に支持される構造とする。

防護鋼板は、鋼板より構成され、防護鋼板に作用する荷重は架構を介して鉄筋コンクリート造の軽油タンク基礎に伝達する構造とする。

防護鋼板を支持する架構は、H形鋼等から構成され、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軽油タンク基礎に伝達する構造とする。

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の構造計画を表 2-7 に示す。

表 2-7 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の構造計画

構成要素	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】 防護鋼板及び架構は、衝突する可能性のある外部事象防護対象施設を取り囲むように軽油タンクエリアに設置する設計としている。</p>			
防護鋼板	<p>防護鋼板は、鋼製の鋼板より構成する。</p>	<p>防護鋼板に作用する荷重は、架構を介して鉄筋コンクリート造の軽油タンク基礎に伝達する構造とする。</p>	
架構	<p>架構は、鋼製の H 形鋼等より構成する。</p>	<p>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軽油タンク基礎に伝達する構造とする。</p>	

K6 ① VI-3-別添 1-2 R0

(4) 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板は、防護鋼板及び架構で構成され、外部事象防護対象施設を取り囲むように設置することで、飛来物が外部事象防護対象施設へ衝突することを防止し、防護鋼板にたわみ及び変形が生じたとしても、外部事象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軽油タンク基礎に支持される構造とする。

防護鋼板は、鋼板より構成され、防護鋼板に作用する荷重は架構を介して鉄筋コンクリート造の軽油タンク基礎に伝達する構造とする。

防護鋼板を支持する架構は、L 形鋼等から構成され、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軽油タンク基礎に伝達する構造とする。

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の構造計画を表 2-8 に示す。

表 2-8 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の構造計画

構成要素	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】 防護鋼板及び架構は、衝突する可能性のある外部事象防護対象施設を取り囲むように軽油タンクエリアに設置する設計としている。</p>			
防護鋼板	防護鋼板は、鋼製の鋼板より構成する。	防護鋼板に作用する荷重は、架構を介して鉄筋コンクリート造の軽油タンク基礎に伝達する構造とする。	
架構	架構は、鋼製のL形鋼等より構成する。	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軽油タンク基礎に伝達する構造とする。	

K6 ① VI-3-別添 1-2 R0

(5) 建屋内防護壁

a. 原子炉補機冷却海水系配管防護壁

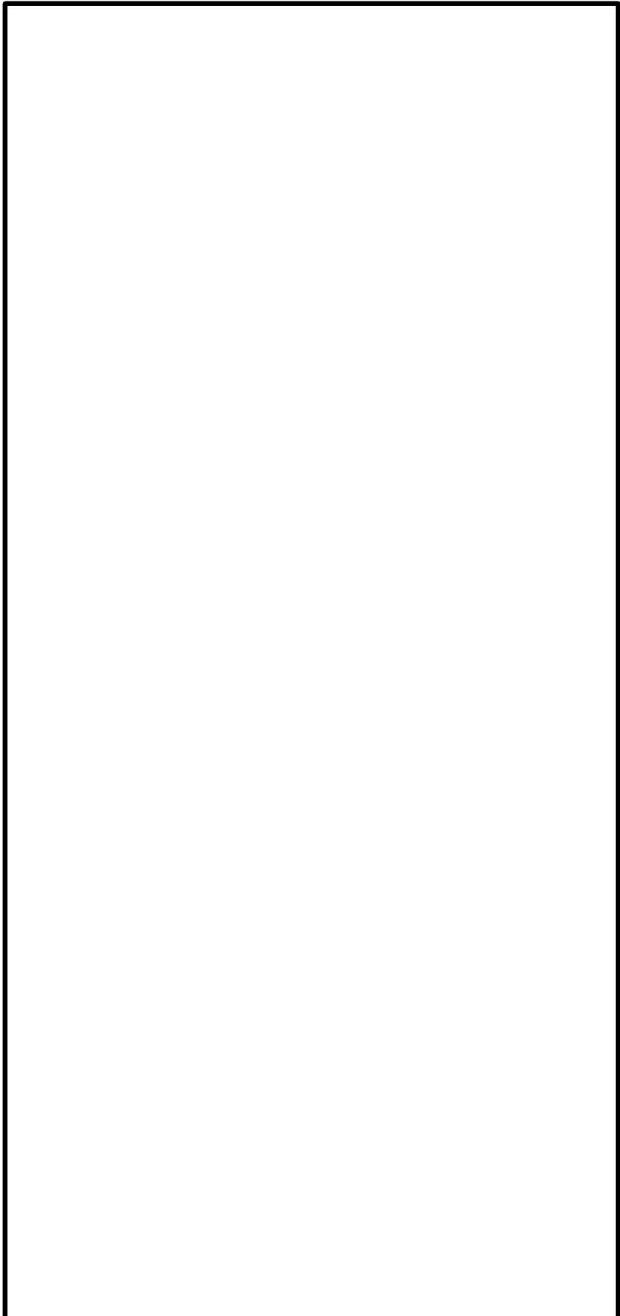
原子炉補機冷却海水系配管防護壁は、防護鋼板及び架構で構成され、建屋開口部から飛来物が侵入した場合に衝突する可能性のある外部事象防護対象施設を取り囲むように設置することで、飛来物が外部事象防護対象施設へ衝突することを防止し、防護鋼板にたわみ及び変形が生じたとしても、外部事象防護対象施設に飛来物を衝突させない構造とする。また、防護鋼板は架構を介して、鉄筋コンクリート造のタービン建屋躯体に支持される構造とする。

防護鋼板は、鋼板より構成され、防護鋼板に作用する荷重は架構を介して鉄筋コンクリート造のタービン建屋躯体に伝達する構造とする。

防護鋼板を支持する架構は、H形鋼等から構成され、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タービン建屋躯体に伝達する構造とする。

原子炉補機冷却海水系配管防護壁の構造計画を表 2-9 に示す。

表 2-9 原子炉補機冷却海水系配管防護壁の構造計画

構成要素	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】 防護鋼板及び架構は、建屋開口部から飛来物が侵入した場合、衝突する可能性のある外部事象防護対象施設を取り囲むように設置する設計としている。</p>			
防護鋼板	防護鋼板は、鋼製の鋼板より構成する。	防護鋼板に作用する荷重は、架構を介して鉄筋コンクリート造のタービン建屋躯体に伝達する構造とする。	
架構	架構は、鋼製のH形鋼等より構成する。	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タービン建屋躯体に伝達する構造とする。	

K6 ① VI-3-別添 1-2 R0

b. 換気空調系ダクト防護壁

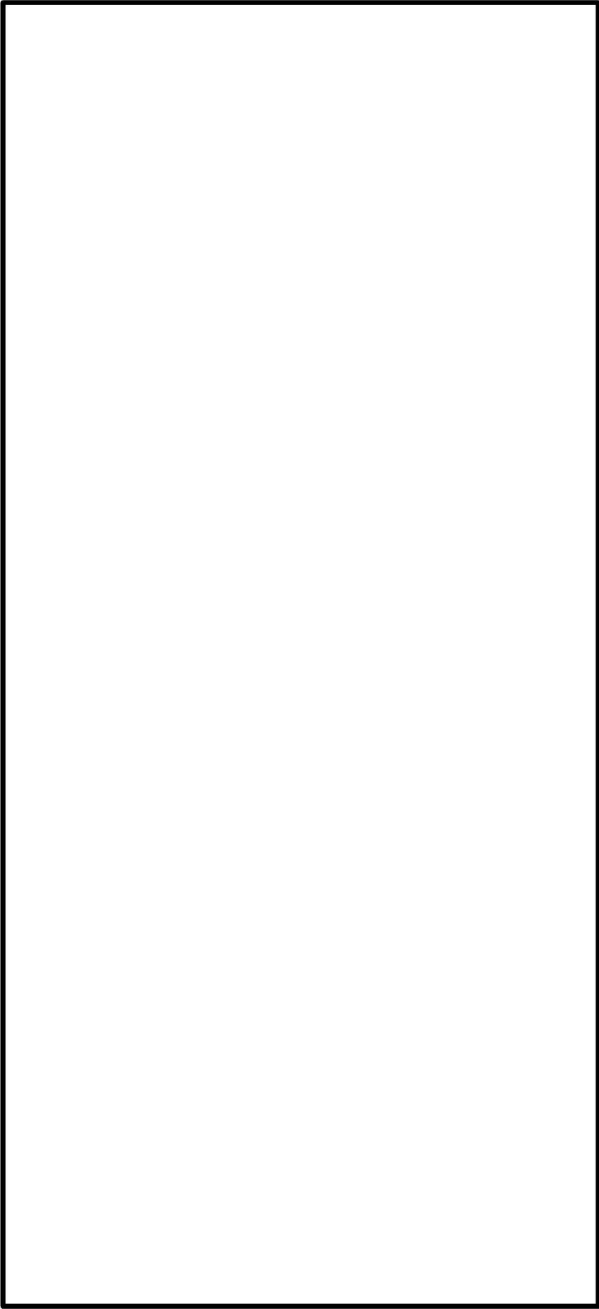
換気空調系ダクト防護壁は防護鋼板及び架構で構成され、建屋開口部から飛来物が侵入した場合に衝突する可能性のある外部事象防護対象施設を取り囲むように設置することで、飛来物が外部事象防護対象施設へ衝突することを防止し、防護鋼板にたわみ及び変形が生じたとしても、外部事象防護対象施設に飛来物を衝突させない構造とする。また、防護鋼板は架構を介して、鉄筋コンクリート造のタービン建屋躯体又はコントロール建屋躯体に支持される構造とする。

防護鋼板は、鋼板より構成され、防護鋼板に作用する荷重は架構を介して鉄筋コンクリート造のタービン建屋躯体又はコントロール建屋躯体に伝達する構造とする。

防護鋼板を支持する架構は、H 形鋼等から構成され、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タービン建屋躯体又はコントロール建屋躯体に伝達する構造とする。

換気空調系ダクト防護壁の構造計画を表 2-10 に示す。

表 2-10 換気空調系ダクト防護壁の構造計画

構成要素	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】 防護鋼板及び架構は、建屋開口部から飛来物が侵入した場合、衝突する可能性のある外部事象防護対象施設を取り囲むように設置する設計としている。</p>			
防護鋼板	<p>防護鋼板は、鋼製の鋼板より構成する。</p>	<p>防護鋼板に作用する荷重は、架構を介して鉄筋コンクリート造のタービン建屋躯体又はコントロール建屋躯体に伝達する構造とする。</p>	
架構	<p>架構は、鋼製の H 形鋼等より構成する。</p>	<p>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タービン建屋躯体又はコントロール建屋躯体に伝達する構造とする。</p>	

K6 ① VI-3-別添 1-2 R0

c. 竜巻防護ネット（防護鋼板部）

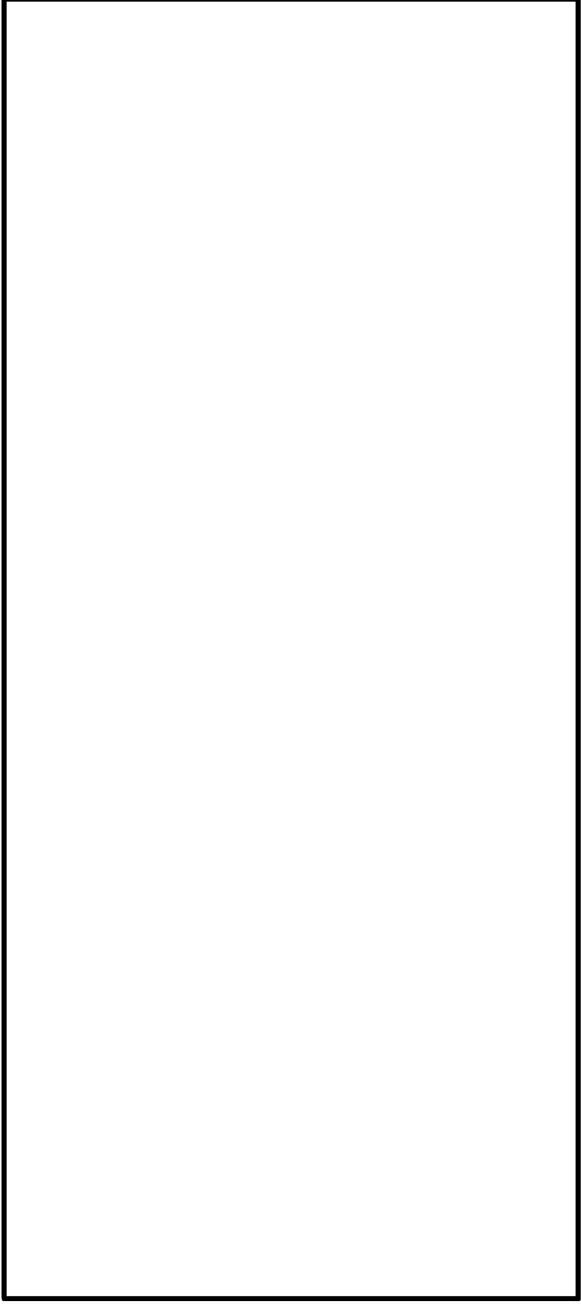
竜巻防護ネット（防護鋼板部）は防護鋼板及び架構で構成され、飛来物が侵入した場合に外部事象防護対象施設に衝突する可能性のある原子炉建屋壁面の開口部に設置することで、飛来物が建屋内に侵入することを防止し、防護鋼板にたわみ及び変形が生じたとしても、外部事象防護対象施設に飛来物を衝突させない構造とする。また、防護鋼板は架構を介して、鉄筋コンクリート造の原子炉建屋躯体に支持される構造とする。

防護鋼板は、鋼板より構成され、防護鋼板に作用する荷重は架構を介して鉄筋コンクリート造の原子炉建屋躯体に伝達する構造とする。

防護鋼板を支持する架構は、H形鋼等から構成され、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躯体に伝達する構造とする。

竜巻防護ネット（防護鋼板部）の構造計画を表 2-11 に示す。

表 2-11 竜巻防護ネット（防護鋼板部）の構造計画

構成要素	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】 防護鋼板及び架構は、飛来物が侵入した場合、外部事象防護対象施設に衝突する可能性のある原子炉建屋壁面の開口部に設置する設計としている。</p>			
防護鋼板	防護鋼板は、鋼製の鋼板より構成する。	防護鋼板に作用する荷重は、架構を介して鉄筋コンクリート造の原子炉建屋躯体に伝達する構造とする。	
架構	架構は、鋼製のH形鋼等より構成する。	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躯体に伝達する構造とする。	

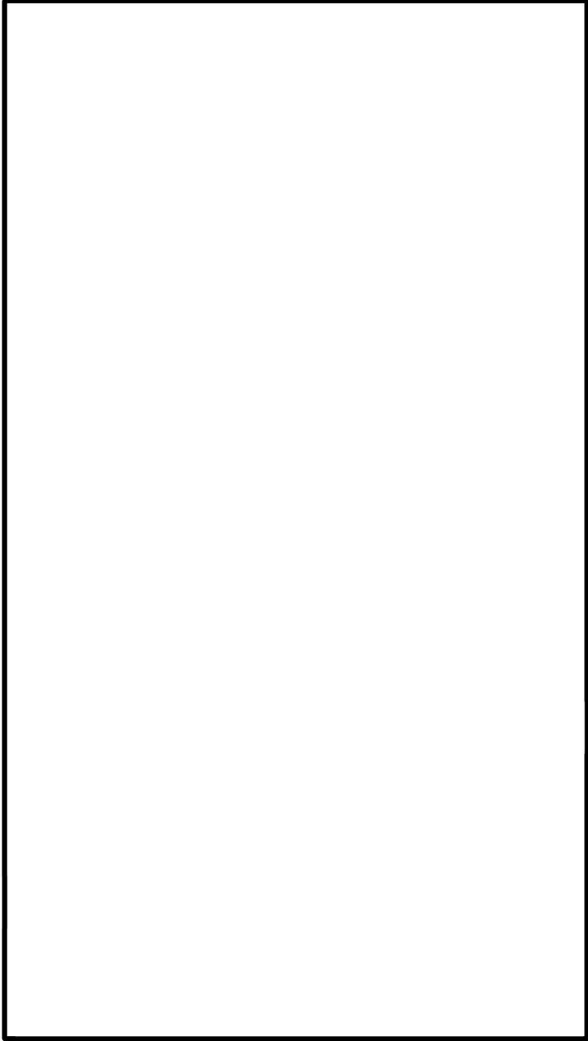
K6 ① VI-3-別添 1-2 R0

(6) 竜巻防護扉

竜巻防護扉は、表側鋼板、芯材、扉枠等の鋼製の材料で構成され、外部に面する扉部材に作用する荷重をアンカーボルトにより固定された扉枠を介して周辺躯体である鉄筋コンクリート造の壁（以下「外壁」という。）に支持される構造である。

竜巻防護扉の構造計画を表 2-12 に示す。

表 2-12 竜巻防護扉の構造計画

構成要素	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】 竜巻防護扉は、建屋外部からの飛来物が竜巻防護扉に衝突する場合、外壁と一体的に外部事象防護対象施設との離隔を確保出来るように設置する設計としている。</p>			
表側鋼板	表側鋼板は、鋼製の鋼板より構成する。	表側鋼板に作用する荷重は、芯材、ヒンジ及びカンヌキに伝わり、アンカーボルトにより固定された扉枠を介し、建屋躯体に伝達する構成とする。	
芯材	芯材は、鋼製の H 型鋼等により構成する。	芯材に作用する荷重は、ヒンジ及びカンヌキに伝わり、アンカーボルトにより固定された扉枠を介し、建屋躯体に伝達する構成とする。	
扉枠	扉枠は、鋼製の鋼板より構成する。	扉枠に作用する荷重は、アンカーボルトを介し、建屋躯体に伝達する構成とする。	

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) 竜巻防護ネット

a. 防護ネット

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、主要な部材が破断しなければ飛来物を捕捉可能であり、飛来物が外部事象防護対象施設と衝突しない。したがって、防護ネットのうち、ネット、ワイヤロープ、シャックル及び接続用の治具が、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計算により確認する。

また、外部事象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及び飛来物による衝撃荷重に対し、飛来物が外部事象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を生じて、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を確保できることを計算により確認する。

なお、架構については、竜巻防護ネットの正面方向からの飛来物の衝突に対しては、架構部材下の原子炉建屋躯体で荷重を受け止めるため、架構部材の著しい変形は生じず、また側面及び上面からの衝突については、衝突方向に対する架構部材の衝突面は架構部材一本のみでありその面積は僅かであることから、飛来物が衝突する可能性は極めて低いと考えられる。仮に衝突が生じた場合でも、衝突を受けた部位を除く3辺の架構部材によりネットは保持されるものと考えられることから、評価対象外とする。

(2) 竜巻防護鋼製フード

a. 防護鋼板

飛来物による衝撃荷重に対し、飛来物が外部事象防護対象施設に衝突することを防止するために、防護鋼板が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。

また、外部事象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、飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、防護鋼板に終局状態に至るようなひずみが生じないことを解析により確認する。

b. 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考慮すべき荷重に対し、上載する防護鋼板を支持し、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、架構に終局状態に至るようなひずみが生じないことを解析により確認する。

(3) 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板

a. 防護鋼板

飛来物による衝撃荷重に対し、飛来物が外部事象防護対象施設に衝突することを防止するために、防護鋼板が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。

また、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、防護鋼板に終局状態に至るようなひずみが生じないことを解析により確認する。

b. 架構

設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、上載する防護鋼板を支持し、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、架構に終局状態に至るようなひずみが生じないことを解析により確認する。

(4) 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板

a. 防護鋼板

設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、飛来物が外部事象防護対象施設に衝突することを防止し、また、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、防護鋼板に終局状態に至るようなひずみが生じないことを解析により確認する。

b. 架構

設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、上載する防護鋼板を支持し、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、架構に終局状態に至るようなひずみが生じないことを解析により確認する。

(5) 建屋内防護壁

a. 原子炉補機冷却海水系配管防護壁、換気空調系ダクト防護壁 (No. 50 及び No. 55) 及び竜巻防護ネット (防護鋼板部)

(a) 防護鋼板

飛来物による衝撃荷重に対し、飛来物が外部事象防護対象施設に衝突することを防止するために、防護鋼板が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。

また、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、防護鋼板に終局状態に至るようなひずみが生じないことを解析により確認する。

(b) 架構

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、上載する防護鋼板を支持し、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、架構に終局状態に至るようなひずみが生じないことを解析により確認する。

- b. 換気空調系ダクト防護壁 (No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B))
- (a) 防護鋼板
- 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、飛来物が外部事象防護対象施設に衝突することを防止し、また、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、防護鋼板に終局状態に至るようなひずみが生じないことを解析により確認する。
- (b) 架構
- 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、上載する防護鋼板を支持し、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、架構に終局状態に至るようなひずみが生じないことを解析により確認する。
- (6) 竜巻防護扉
- 飛来物による衝撃荷重に対し、飛来物が外部事象防護対象施設に衝突することを防止するために、表側鋼板が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。
- また、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、表側鋼板及び芯材に終局状態に至るようなひずみが生じないことを解析により確認するとともに、設計竜巻の気圧差による荷重に対し、カンヌキに発生する応力度が部材の許容限界を上回ら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、設計を実施する。

3.1 竜巻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、飛来物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、飛来物が防護対策施設を構成する主要な部材を破断することなく架構に荷重を伝達し、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竜巻防護ネットで捕捉できる設計とする。

竜巻防護ネットの設計フローを図 3-1 に示す。

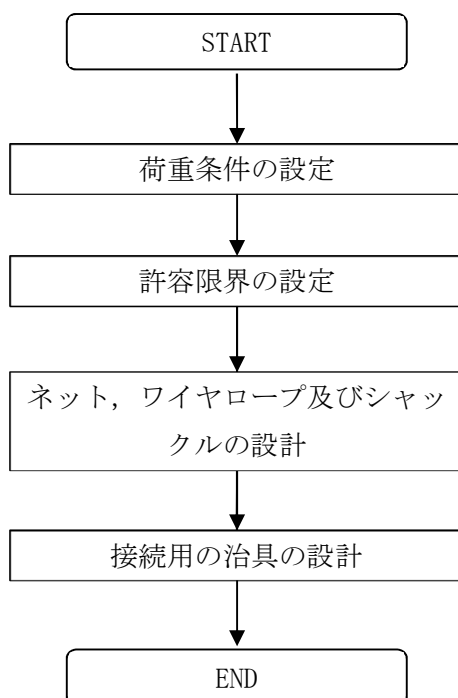


図 3-1 竜巻防護ネットの設計フロー

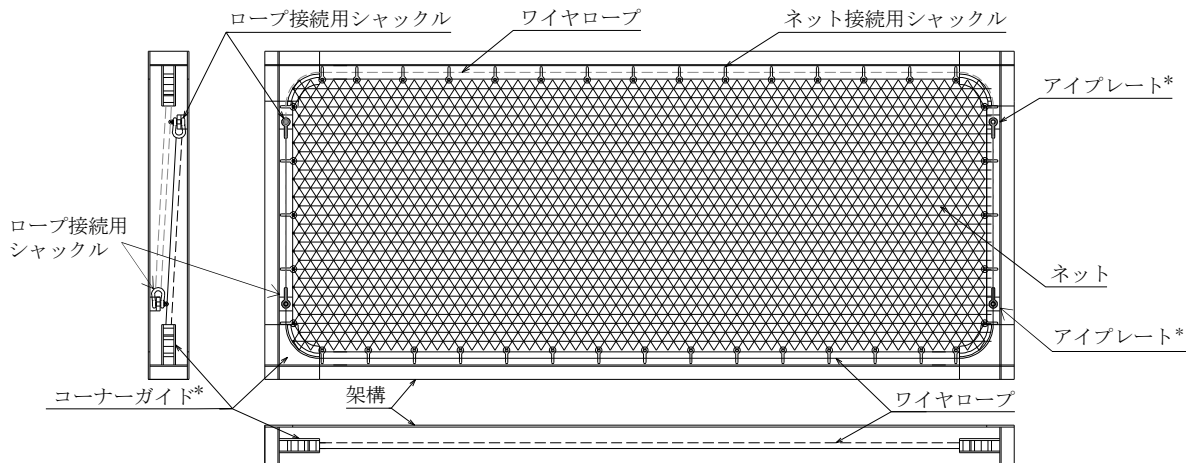
竜巻防護ネットの概要図を図 3-2 に示す。ネット、ワイヤロープ、シャックル及び接続用の治具により構成され、ネットの 4 辺をワイヤロープにより支持し、ワイヤロープは架構に設置したシャックル及び接続用の治具にて支持する構造とする。ワイヤロープの端部にはシャックルを設置し、シャックルを架構に設置したアイプレートに接続する構造とする。

竜巻防護ネットは、ネットに作用する荷重、ネットの有する限界吸収エネルギー及び飛来物衝突時のたわみ量を考慮し、設置する層数を設計する。

ネットは、電力中央研究所報告「竜巻飛来物に対する防護ネットの評価手法と対策工法の提案」(研究報告：N13014) (以下「電中研報告書 N13014」という。) 及び電力中央研究所報告「竜巻飛来物に対する硬鋼線製防護ネットの対貫通性能に関する試験的評価」(研究報告：N14009) (以下「電中研報告書 N14009」という。) の評価式の適用性が確認されているネットを用いた

設計とする。

竜巻防護ネットを構成するネット、ワイヤロープ、シャックル及び接続用の治具についての構造設計を以下に示す。



注記*：接続用の治具

図 3-2 竜巻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る。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。ネットの剛性及び1目合いの破断変位等は、電中研報告書N14009を参考に、ネットの引張試験結果に基づいて設定している。

ネットの寸法は、架構の寸法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設計する。

(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、ワイヤロープは、ネット展開方向2辺とネット展開直角方向1辺又は、ネット展開直角方向2辺とネット展開方向1辺を2本のワイヤロープでU字形に設置し、このワイヤロープと対称に設置したワイヤロープとの合計4本でネット全層数を支持することにより、ワイヤロープに作用する荷重が均一となるように設計する。

(3) シャックル

a. ロープ接続用シャックル

ロープ接続用シャックルは、ワイヤロープ端部に設置し、ワイヤロープを介して直接作用する荷重に対して、ロープ接続用シャックルが破断することのない強度を有する設計と

する。

b. ネット接続用シャックル

(a) ネット接続用シャックル

ネット接続用シャックルは、ネット端部とワイヤロープ間に設置し、ネットを介して直接作用する荷重に対して、ネット接続用シャックルが破断することのない強度を有する設計とする。

(b) シャックル接続目合い間隔

シャックル接続目合い間隔は、シャックル接続目合いの合計耐力が、ネットを介して直接作用する荷重を上回るように設計する。

(4) 接続用の治具

接続用の治具には緩衝装置を設置していない。したがって、接続用の治具には、飛来物による衝突直後に、荷重が急激に増加する場合も含めて、ネットへの飛来物による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に対して、接続用の治具が破断することのない強度を有する設計とする。

接続用の治具は、コーナーガイド及びロープ接続用シャックルを架構に接続するアイプレートである。

3.2 竜巻防護鋼製フードの構造設計

「2.2 構造強度の設計方針」に基づき、飛来物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、飛来物が防護対策施設を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載する防護鋼板を支持する機能を維持可能な構造強度を有する設計とする。

また、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないために、防護対策施設を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とする。

竜巻防護鋼製フードの設計フローを図3-3に示す。

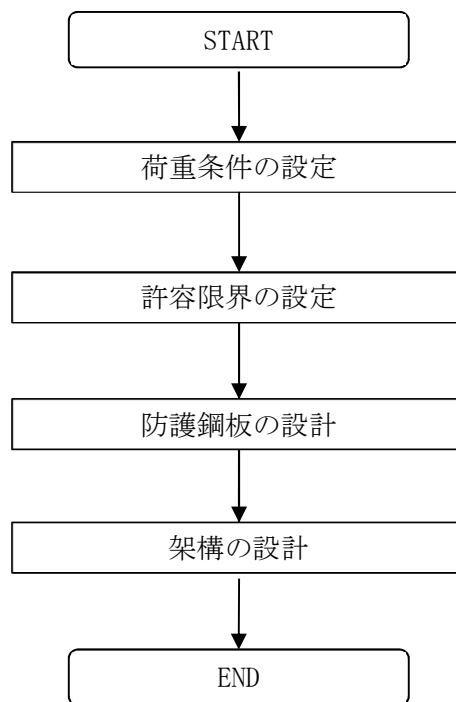


図3-3 竜巻防護鋼製フードの設計フロー

竜巻防護鋼製フードを構成する防護鋼板は、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。

竜巻防護鋼製フードを構成する架構は、H形鋼等より構成し、上載する防護鋼板からの荷重を支持する設計とする。

架構の主体構造は、柱、はり、ブレース等の鋼材であり、外殻に面する柱及びはりに防護鋼板を設置し、柱脚部のアンカーボルトで建屋躯体に固定する設計とする。また、作用する荷重については、飛来物による衝撃荷重が支配的であり、防護鋼板に作用する荷重を、周囲の柱、はり及びブレースに伝達し、柱脚部のアンカーボルトを介して建屋躯体に伝達する設計とする。

3.3 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の構造設計

「2.2 構造強度の設計方針」に基づき、飛来物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、飛来物が防護対策施設を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載する防護鋼板を支持する機能を維持可能な構造強度を有する設計とする。

また、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないために、防護対策施設を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とする。

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の設計フローを図3-4に示す。

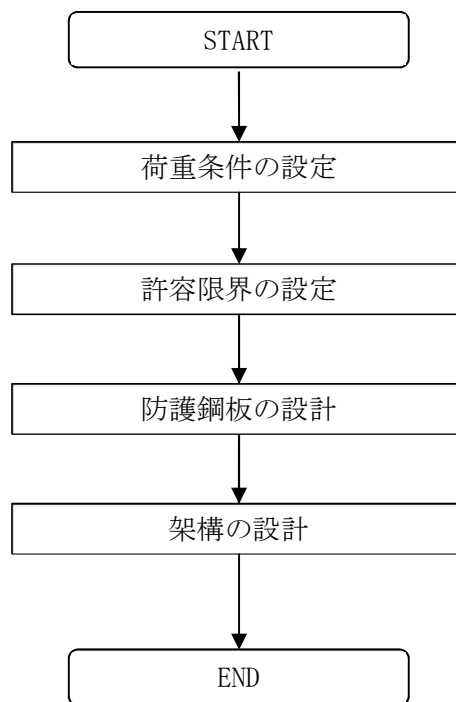


図3-4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の設計フロー

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板を構成する防護鋼板は、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。

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ配管防護板を構成する架構は、H形鋼等より構成し、上載する防護鋼板からの荷重を支持する設計とする。

架構の主体構造は、柱、はり、ブレース等の鋼材であり、外殻に面する柱及びはりに防護鋼板を設置し、柱脚部のアンカーボルトでコンクリート基礎に固定する設計とする。また、作用する荷重については、飛来物による衝撃荷重が支配的であり、防護鋼板に作用する荷重を、周囲の柱、はり及びブレースに伝達し、柱脚部のアンカーボルトを介してコンクリート基礎に伝達する設計とする。

3.4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の構造設計

「2.2 構造強度の設計方針」に基づき、飛来物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、飛来物が防護対策施設を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載する防護鋼板を支持する機能を維持可能な構造強度を有する設計とする。

また、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないために、防護対策施設を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とする。

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の設計フローを図 3-5 に示す。

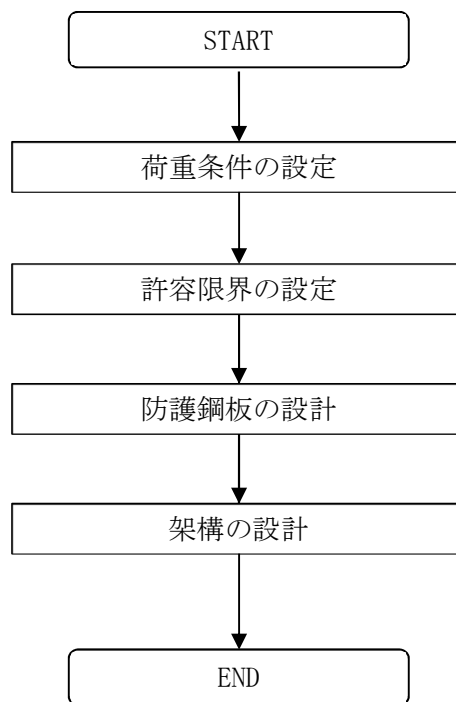


図 3-5 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の設計フロー

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板を構成する防護鋼板は、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。

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板を構成する架構は、L 形鋼等より構成し、上載する防護鋼板からの荷重を支持する設計とする。

架構の主体構造は、柱、はり、ブレース等の鋼材であり、外殻に面する柱及びはりに防護鋼板を設置し、柱脚部のアンカーボルトでコンクリート基礎に固定する設計とする。また、作用する荷重については、飛来物による衝撃荷重が支配的であり、防護鋼板に作用する荷重を、周囲の柱、はり及びブレースに伝達し、柱脚部のアンカーボルトを介してコンクリート基礎に伝達する設計とする。

3.5 建屋内防護壁の構造設計

3.5.1 原子炉補機冷却海水系配管防護壁の構造設計

「2.2 構造強度の設計方針」に基づき、飛来物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、飛来物が防護対策施設を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載する防護鋼板を支持する機能を維持可能な構造強度を有する設計とする。

また、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないために、防護対策施設を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とする。

原子炉補機冷却海水系配管防護壁の設計フローを図 3-6 に示す。

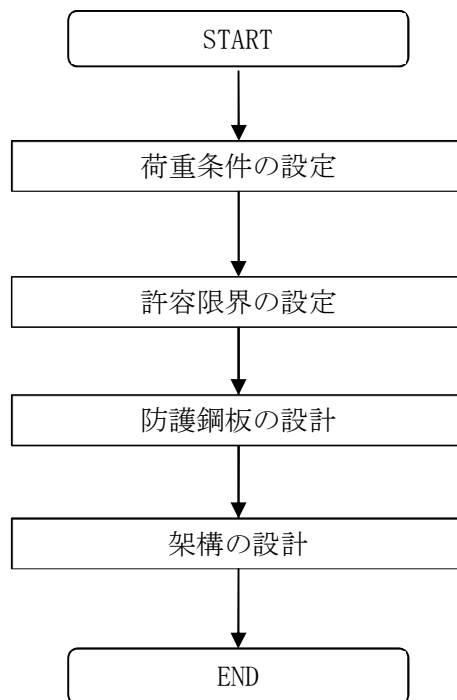


図 3-6 原子炉補機冷却海水系配管防護壁の設計フロー

原子炉補機冷却海水系配管防護壁を構成する防護鋼板は、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。

原子炉補機冷却海水系配管防護壁を構成する架構は、角形鋼管等より構成し、上載する防護鋼板からの荷重を支持する設計とする。

架構の主体構造は、柱、はり、ブレース等の鋼材であり、外殻に面する柱及びはりに防護鋼板を設置し、柱脚部のアンカーボルトで建屋躯体に固定する設計とする。また、作用する荷重については、飛来物による衝撃荷重が支配的であり、防護鋼板に作用する荷重を、周囲の柱、はり及びブレースに伝達し、柱脚部のアンカーボルトを介して建屋躯体に伝達する設計とする。

3.5.2 換気空調系ダクト防護壁の構造設計

「2.2 構造強度の設計方針」に基づき、飛来物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、飛来物が防護対策施設を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載する防護鋼板を支持する機能を維持可能な構造強度を有する設計とする。

また、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないために、防護対策施設を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とする。

換気空調系ダクト防護壁の設計フローを図3-7に示す。

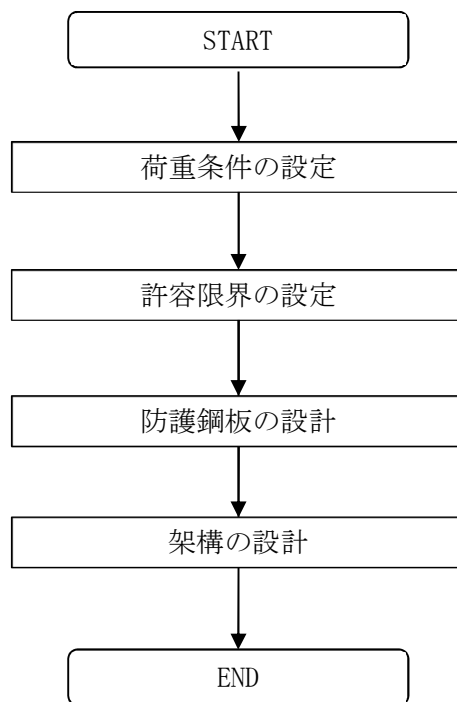


図3-7 換気空調系ダクト防護壁の設計フロー

換気空調系ダクト防護壁を構成する防護鋼板は、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。

換気空調系ダクト防護壁を構成する架構は、H形鋼、角形鋼管等より構成し、上載する防護鋼板からの荷重を支持する設計とする。

架構の主体構造は、柱、はり、ブレース等の鋼材であり、外殻に面する柱及びはりに防護鋼板を設置し、柱脚部のアンカーボルトで建屋躯体に固定する設計とする。また、作用する荷重については、飛来物による衝撃荷重が支配的であり、防護鋼板に作用する荷重を、周囲の柱及びはりに伝達し、柱脚部のアンカーボルトを介して建屋躯体に伝達する設計とする。

3.5.3 竜巻防護ネット（防護鋼板部）の構造設計

「2.2 構造強度の設計方針」に基づき、飛来物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、飛来物が防護対策施設を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載する防護鋼板を支持する機能を維持可能な構造強度を有する設計とする。

また、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないために、防護対策施設を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とする。

竜巻防護ネット（防護鋼板部）の設計フローを図 3-8 に示す。

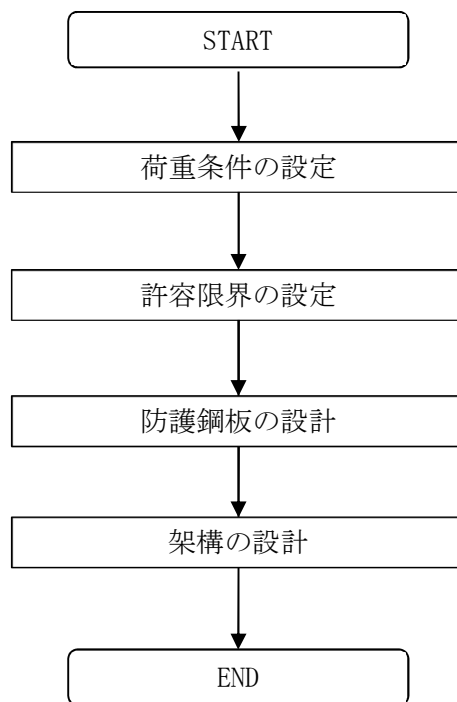


図 3-8 竜巻防護ネット（防護鋼板部）の設計フロー

竜巻防護ネット（防護鋼板部）を構成する防護鋼板は、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。

竜巻防護ネット（防護鋼板部）を構成する架構は、H 形鋼等より構成し、上載する防護鋼板からの荷重を支持する設計とする。

架構の主体構造は、柱、はり、ブレース等の鋼材であり、外殻に面する柱及びはりに防護鋼板を設置し、柱脚部のアンカーボルトで建屋躯体に固定する設計とする。また、作用する荷重については、飛来物による衝撃荷重が支配的であり、防護鋼板に作用する荷重を、周囲の柱及びはりに伝達し、柱脚部のアンカーボルトを介して建屋躯体に伝達する設計とする。

3.6 竜巻防護扉の構造設計

「2.2 構造強度の設計方針」に基づき、飛来物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、飛来物が竜巻防護扉を構成する部材を貫通せず、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないために、竜巻防護扉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。

竜巻防護扉の設計フローを図3-9に示す。

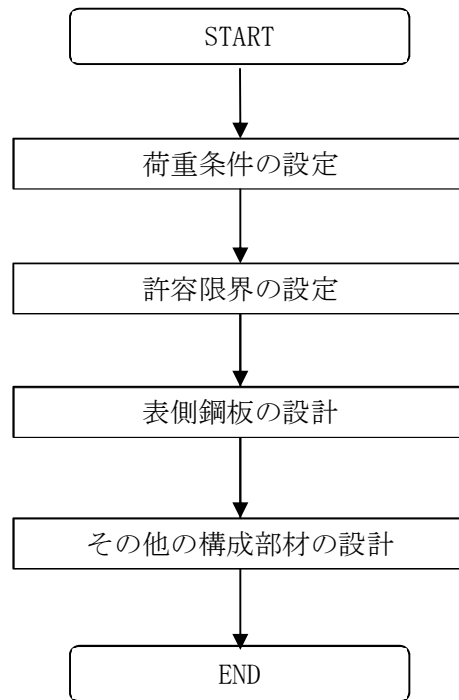


図3-9 竜巻防護扉の設計フロー

竜巻防護扉を構成する表側鋼板は、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。

竜巻防護扉は、表側鋼板、芯材、扉枠、アンカーボルト、カンヌキ等より構成し、施設に作用する荷重を支持する設計とする。

竜巻防護扉は、表側鋼板、芯材、扉枠等の鋼材を主構造とし、アンカーボルトによって建屋躯体に固定された扉枠に対し、カンヌキによって扉本体を扉枠と固定することで支持する設計とする。また、作用する荷重については、表側鋼板に作用する荷重を、芯材、扉枠を介して、カンヌキに作用する荷重を、扉枠を介して、それぞれ建屋躯体に伝達する設計とする。

4. 防護対策施設の構成要素の評価方針

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

防護対策施設を設計する上で、飛来物の衝突回数については、屋外の物品等の飛来物となりうるものは、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、竜巻の影響期間中に複数の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飛来物の衝突は考慮しない設計とする。

また、高所に設置され下方に空間を有する配置となる、竜巻防護鋼製フードについては、これら施設の下方から、飛来物の様な重量がある飛来物が上昇しながら到達することは考え難いことから、竜巻防護鋼製フードの下面にはネットや防護鋼板は取り付けないこととする。

防護対策施設は、飛来物衝突に対して、防護対策施設を構成する部材が許容限界を満足し、外部事象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。

4.1 竜巻防護ネットの評価方針

(1) 防護ネット

「2.5(1)a. 防護ネット」の設計方針に基づき、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、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、シャックル及び接続用の治具が、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計算により確認する。その方法は「6.1 竜巻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及び算出されるネット目合いに作用する引張荷重を基に構造強度評価を行う。

また、「2.5(1)a. 防護ネット」の設計方針に基づき、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、飛来物が外部事象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、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 竜巻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基にたわみ評価を行う。

防護ネットの評価フローを図4-1に示す。

防護ネットの具体的な計算方法及び結果は、VI-3-別添 1-4-1「竜巻防護ネットの強度計算書」に示す。

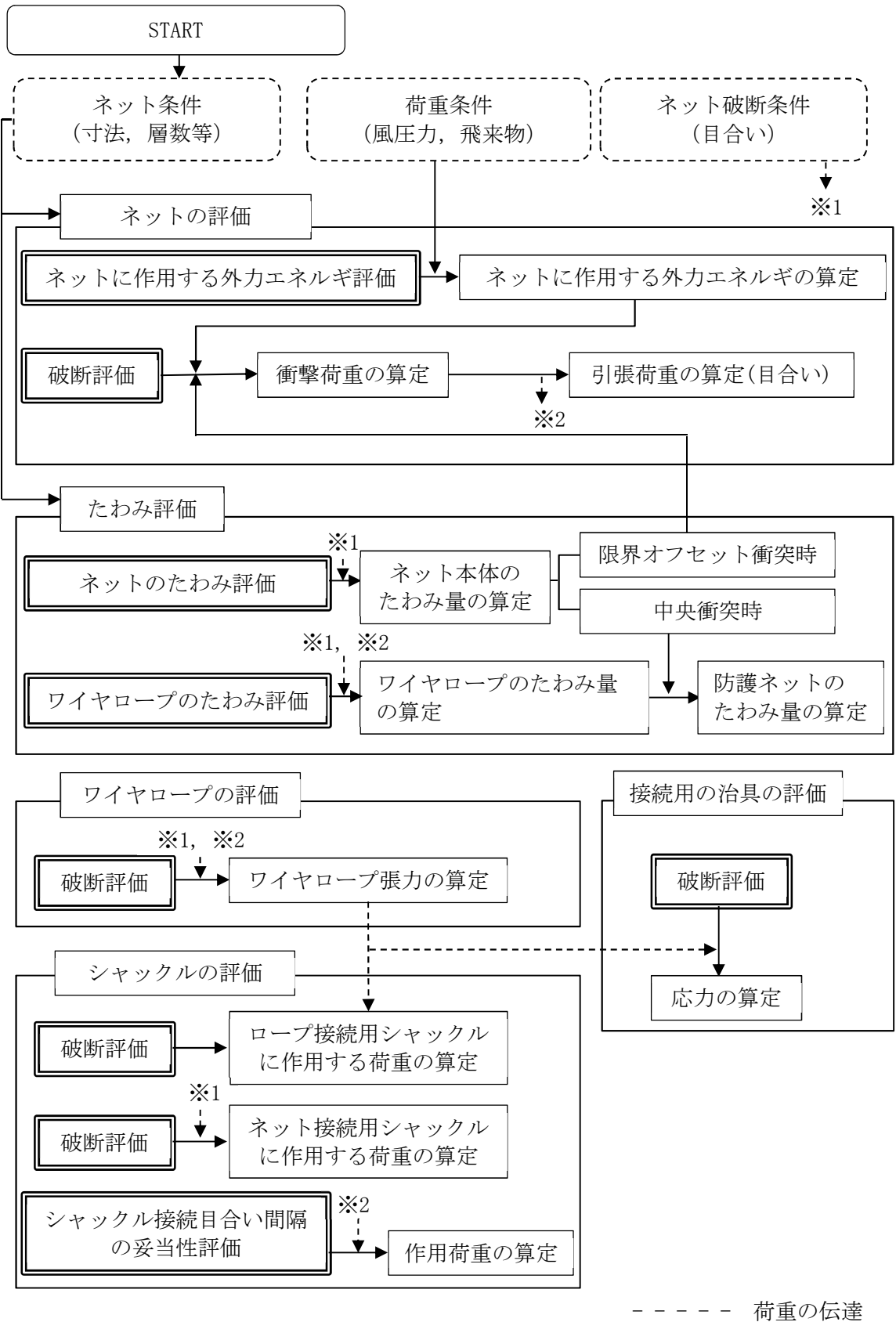


図 4-1 竜巻防護ネットの評価フロー

a. 構造強度評価

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、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、シャックル及び接続用の治具に、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。

設計竜巻の風圧力による荷重、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、設計竜巻の風圧力による荷重及び飛来物による衝撃荷重が作用する場合に、ネット全体でエネルギーを吸収することから、ネットの限界吸収エネルギーを求め、ネットに作用する外力エネルギーと比較評価する。評価方法としては、電中研報告書 N13014、電中研報告書 N14009 及び電力中央研究所報告「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:001) (以下「電中研報告書 001」という。)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、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、衝突箇所においてネットの目合いに作用する引張荷重を電中研評価式により評価する。さらに、ネットが機能を発揮できるために、ネットに作用する荷重がネット接続用シャックル、ワイヤロープ、ロープ接続用シャックル及び接続用の治具に伝達され、その荷重によりワイヤロープ及びシャックルに作用する荷重を電中研評価式等により評価する。

なお、接続治具には緩衝装置が設置されていないため、飛来物による衝突直後の荷重の急激な増加として、動的荷重の影響を考慮した評価を実施する。動的荷重の影響については、動的荷重による動的応答倍率を考慮し、三角波の動的応答倍率の最大値を考慮する。

(a) ネットに作用する外力エネルギー評価

ネットに作用する外力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。

(b) ネット、ワイヤロープ、シャックル及び接続用の治具の破断評価

ネットの破断評価においては、ネットに作用する外力エネルギー評価と同様にネットの有効面積を設定し評価する。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、シャックル及び接続用の治具については、飛来物の衝突位置として、中央位置からずれたオフセット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。

b. たわみ評価

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、飛来物が外部事象防護

対象施設に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、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及び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、ネットと外部事象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。

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。

4.2 竜巻防護鋼製フードの評価方針

防護鋼板については、「2.5(2)a. 防護鋼板」の評価方法に基づき、飛来物による衝撃荷重に対し、飛来物が外部事象防護対象施設に衝突することを防止するために、防護鋼板が飛来物の貫通を生じない最小厚さ以上であることを確認する。また、外部事象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、飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、防護鋼板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。

架構については、「2.5(2)b. 架構」の評価方法に基づき、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、上載する防護鋼板を支持し、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、架構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。

竜巻防護鋼製フードの評価フローを図4-2に示す。

竜巻防護鋼製フードの具体的な計算方法及び結果は、VI-3-別添 1-4-2「竜巻防護鋼製フードの強度計算書」に示す。

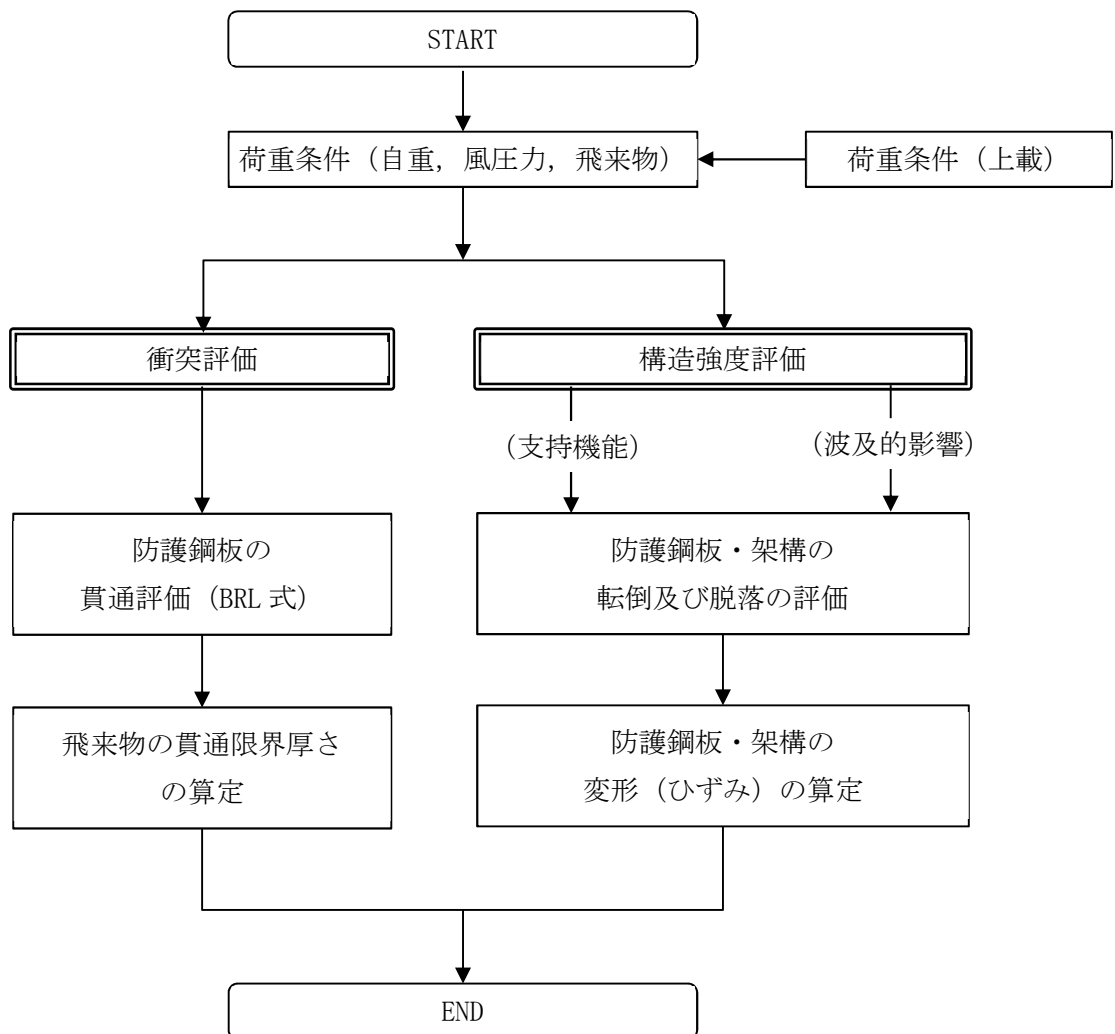


図4-2 竜巻防護鋼製フードの評価フロー

(1) 衝突評価

飛来物による衝撃荷重に対し、防護対策施設を構成する部材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を貫通させないために、竜巻防護鋼製フードの防護鋼板が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。衝突評価には、「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 BRL 式を用いる。

(2) 構造強度評価

上載する防護鋼板の自重及び防護鋼板への飛来物の衝突時の荷重に対し、これらを支持する機能を維持可能な構造強度を有することの確認並びに、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、施設を構成する部材自体の転倒及び脱落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、飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、防護鋼板及び架構に終局状態に至るようなひずみが生じないことを計算により確認する。評価方法は、3次元 FEM による衝突解析により評価する。使用する解析コードは「LS-DYNA」とする。

4.3 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の評価方針

防護鋼板については、「2.5(3)a. 防護鋼板」の評価方法に基づき、飛来物による衝撃荷重に対し、飛来物が外部事象防護対象施設に衝突することを防止するために、防護鋼板が飛来物の貫通を生じない最小厚さ以上であることを確認する。また、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、防護鋼板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。

架構については、「2.5(3)b. 架構」の評価方法に基づき、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、上載する防護鋼板を支持し、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、架構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。

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の評価フローを図4-3に示す。

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の具体的な計算方法及び結果は、VI-3-別添1-4-4「非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の強度計算書」に示す。

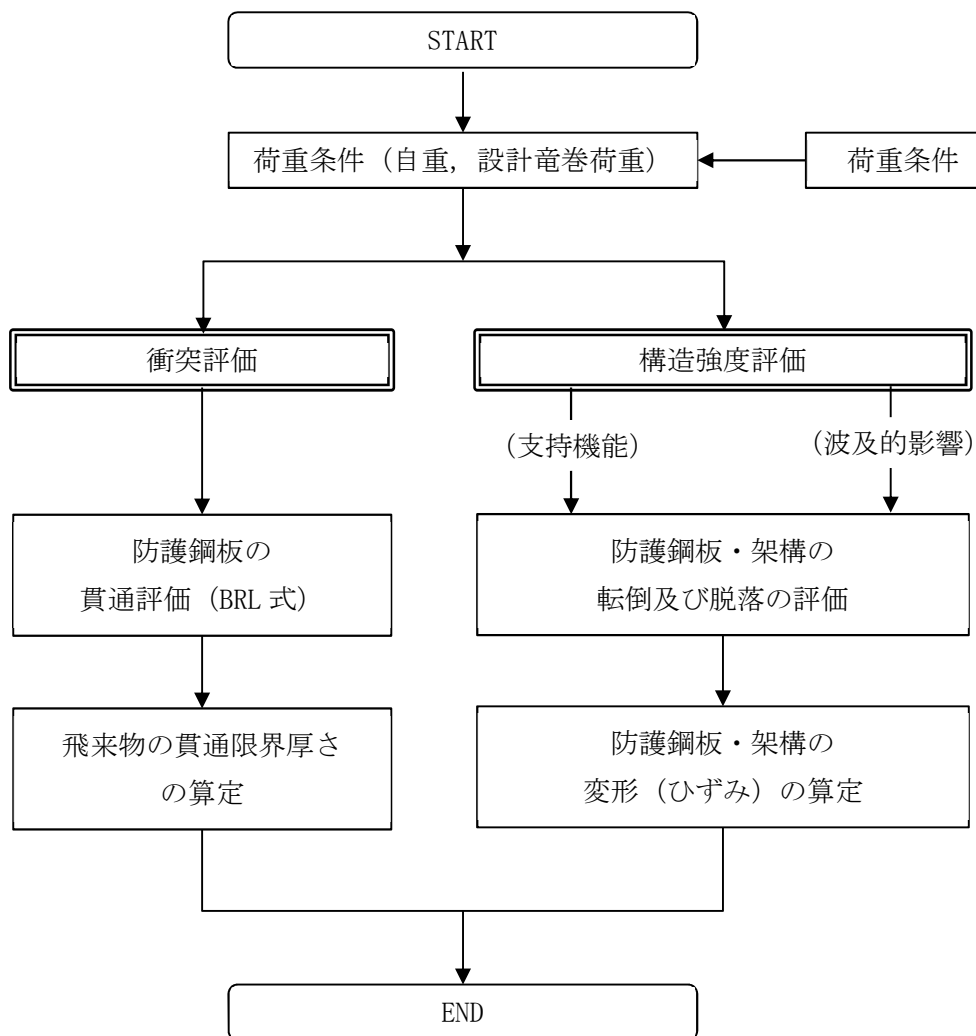


図4-3 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の評価フロー

(1) 衝突評価

飛来物による衝撃荷重に対し、防護対策施設を構成する部材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を貫通させないために、非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の防護鋼板が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。衝突評価には、「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 BRL 式を用いる。

(2) 構造強度評価

上載する防護鋼板の自重及び防護鋼板への飛来物の衝突時の荷重に対し、これらを支持する機能を維持可能な構造強度を有することの確認並びに、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、施設を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じないことの確認として、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、防護鋼板及び架構に終局状態に至るようなひずみが生じないことを計算により確認する。評価方法は、3次元 FEM による衝突解析により評価する。使用する解析コードは「LS-DYNA」とする。

4.4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の評価方針

防護鋼板については、「2.5(4)a. 防護鋼板」の評価方法に基づき、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、飛来物が外部事象防護対象施設に衝突することを防止し、また、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、防護鋼板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。

架構については、「2.5(4)b. 架構」の評価方法に基づき、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、上載する防護鋼板を支持し、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、架構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。

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の評価フローを図4-4に示す。

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の具体的な計算方法及び結果は、VI-3-別添1-4-5「非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の強度計算書」に示す。

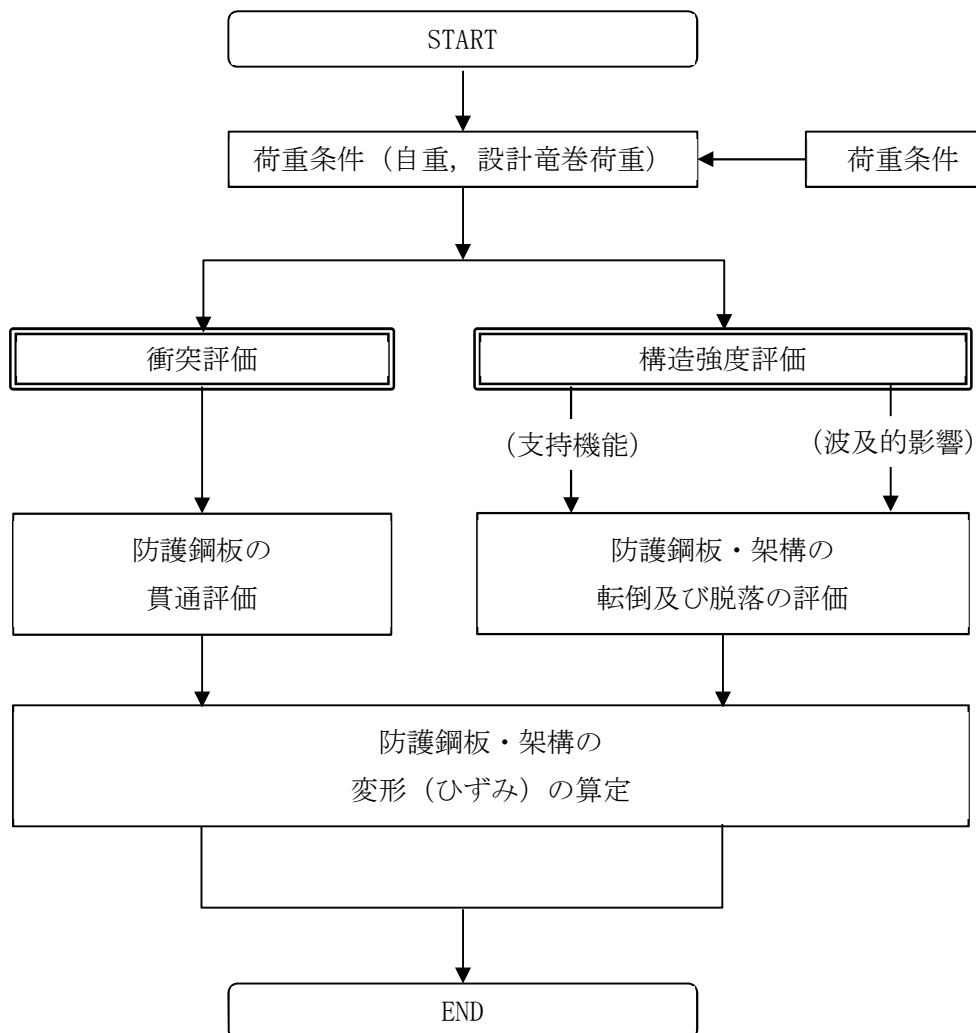


図4-4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の評価フロー

(1) 衝突評価

設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、防護対策施設を構成する部材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を貫通させないために、非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の防護鋼板に、終局状態に至るようなひずみが生じないことを計算により確認する。評価方法は、3次元 FEM による衝突解析により評価する。使用する解析コードは「LS-DYNA」とする。

(2) 構造強度評価

上載する防護鋼板の自重及び防護鋼板への飛来物の衝突時の荷重に対し、これらを支持する機能を維持可能な構造強度を有することの確認並びに、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、施設を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じないことの確認として、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、防護鋼板及び架構に終局状態に至るようなひずみが生じないことを計算により確認する。評価方法は、3次元 FEM による衝突解析により評価する。使用する解析コードは「LS-DYNA」とする。

4.5 建屋内防護壁の評価方針

4.5.1 原子炉補機冷却海水系配管防護壁，換気空調系ダクト防護壁（No. 50 及び No. 55）及び竜巻防護ネット（防護鋼板部）の評価方針

防護鋼板については、「2.5(5)a.(a) 防護鋼板」の評価方法に基づき、飛来物による衝撃荷重に対し、飛来物が外部事象防護対象施設に衝突することを防止するために、防護鋼板が飛来物の貫通を生じない最小厚さ以上であることを確認する。また、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、防護鋼板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。

架構については、「2.5(5)a.(b) 架構」の評価方法に基づき、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、上載する防護鋼板を支持し、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、架構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。

原子炉補機冷却海水系配管防護壁，換気空調系ダクト防護壁（No. 50 及び No. 55）及び竜巻防護ネット（防護鋼板部）の評価フローを図 4-5 に示す。

原子炉補機冷却海水系配管防護壁，換気空調系ダクト防護壁（No. 50 及び No. 55）及び竜巻防護ネット（防護鋼板部）の具体的な計算方法及び結果は、VI-3-別添 1-4-6「建屋内防護壁の強度計算書」に示す。

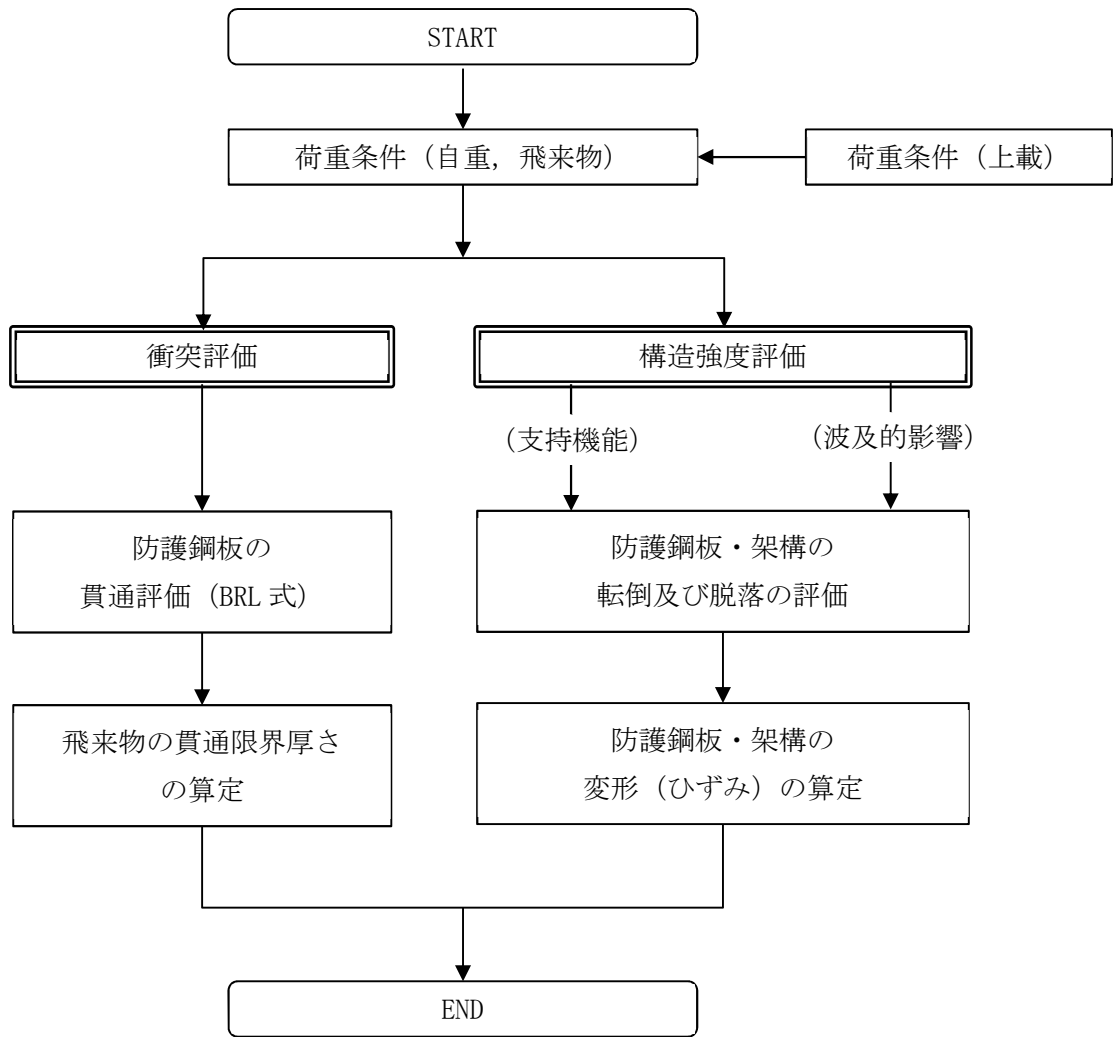


図 4-5 原子炉補機冷却海水系配管防護壁，換気空調系ダクト防護壁 (No. 50 及び No. 55) 及び竜巻防護ネット (防護鋼板部) の評価フロー

(1) 衝突評価

飛来物による衝撃荷重に対し、防護対策施設を構成する部材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を貫通させないために、原子炉補機冷却海水系配管防護壁、換気空調系ダクト防護壁 (No. 50 及び No. 55) 及び竜巻防護ネット (防護鋼板部) の防護鋼板が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。衝突評価には、「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 BRL 式を用いる。

(2) 構造強度評価

上載する防護鋼板の自重及び防護鋼板への飛来物の衝突時の荷重に対し、これらを支持する機能を維持可能な構造強度を有することの確認並びに、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、施設を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じないことの確認として、飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、防護鋼板及び架構に終局状態に至るようなひずみが生じないことを計算により確認する。評価方法は、3次元 FEM による衝突解析により評価する。使用する解析コードは「LS-DYNA」とする。

4.5.2 換気空調系ダクト防護壁 (No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B)) の評価方針

防護鋼板については、「2.5(5)b.(a) 防護鋼板」の評価方法に基づき、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、飛来物が外部事象防護対象施設に衝突することを防止し、また、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、防護鋼板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。

架構については、「2.5(5)b.(b) 架構」の評価方法に基づき、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、上載する防護鋼板を支持し、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、架構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。

換気空調系ダクト防護壁 (No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B)) の評価フローを図 4-6 に示す。

換気空調系ダクト防護壁 (No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B)) の具体的な計算方法及び結果は、VI-3-別添 1-4-6 「建屋内防護壁の強度計算書」に示す。

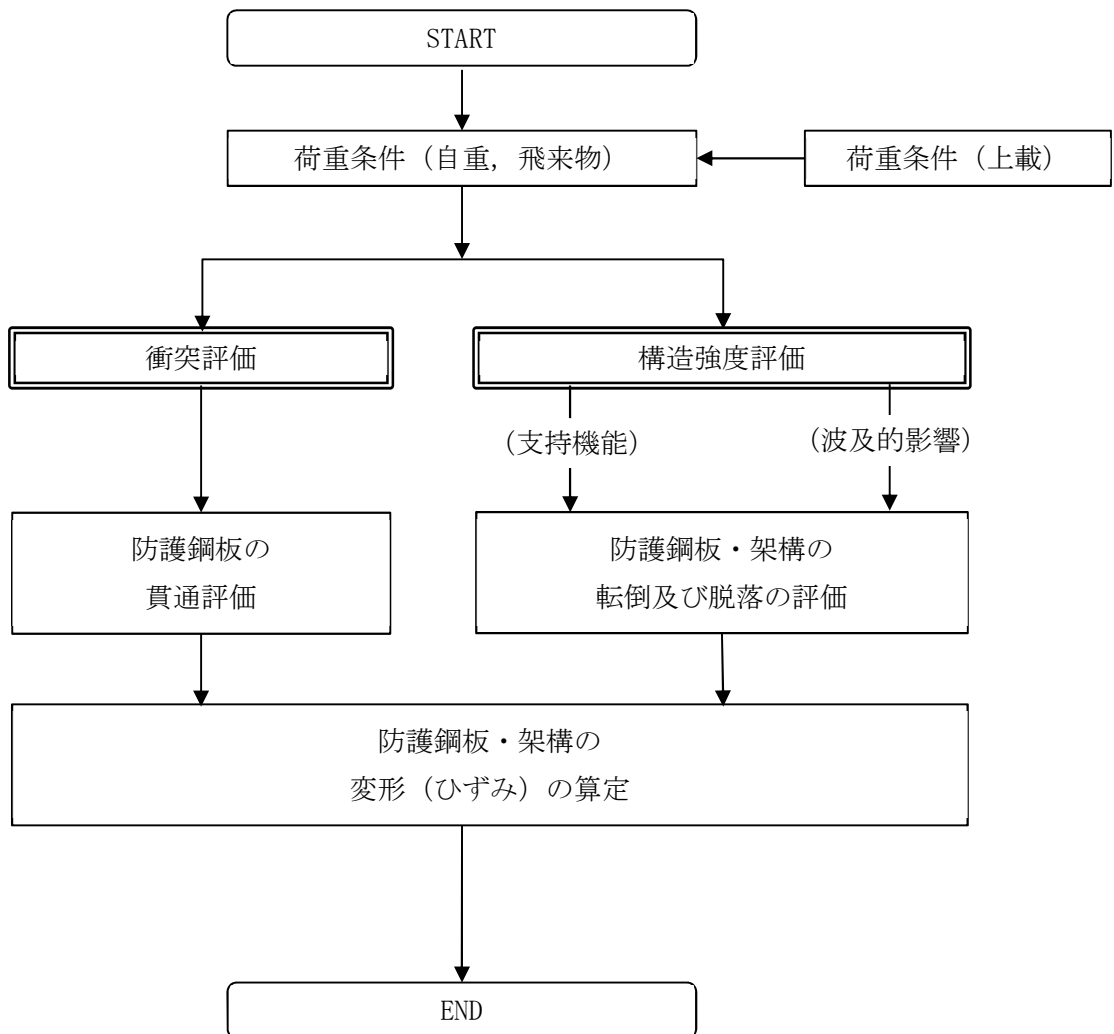


図 4-6 換気空調系ダクト防護壁 (No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B)) の評価フロー

(1) 衝突評価

飛来物による衝撃荷重に対し、防護対策施設を構成する部材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を貫通させないために、換気空調系ダクト防護壁（No. 11, No. 12(A)及びNo. 12(B)）の防護鋼板に、終局状態に至るようなひずみが生じないことを計算により確認する。評価方法は、3次元 FEM による衝突解析により評価する。使用する解析コードは「LS-DYNA」とする。

(2) 構造強度評価

上載する防護鋼板の自重及び防護鋼板への飛来物の衝突時の荷重に対し、これらを支持する機能を維持可能な構造強度を有することの確認並びに、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、施設を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じないことの確認として、飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、防護鋼板及び架構に終局状態に至るようなひずみが生じないことを計算により確認する。評価方法は、3次元 FEM による衝突解析により評価する。使用する解析コードは「LS-DYNA」とする。

4.6 竜巻防護扉の評価方針

表側鋼板については「2.5(6) 竜巻防護扉」の評価方法に基づき、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、飛来物が外部事象防護対象施設に衝突することを防止するために、表側鋼板が飛来物の貫通を生じない最小厚さ以上であることを確認する。

また、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、表側鋼板、芯材に終局状態に至るようなひずみが生じないこと、カンヌキに生じる応力度が部材の許容限界を上回らないことを確認する。

竜巻防護扉の評価フローを図4-7に示す。

竜巻防護扉の具体的な計算方法及び結果は、VI-3-別添 1-4-7「竜巻防護扉の強度計算書」に示す。

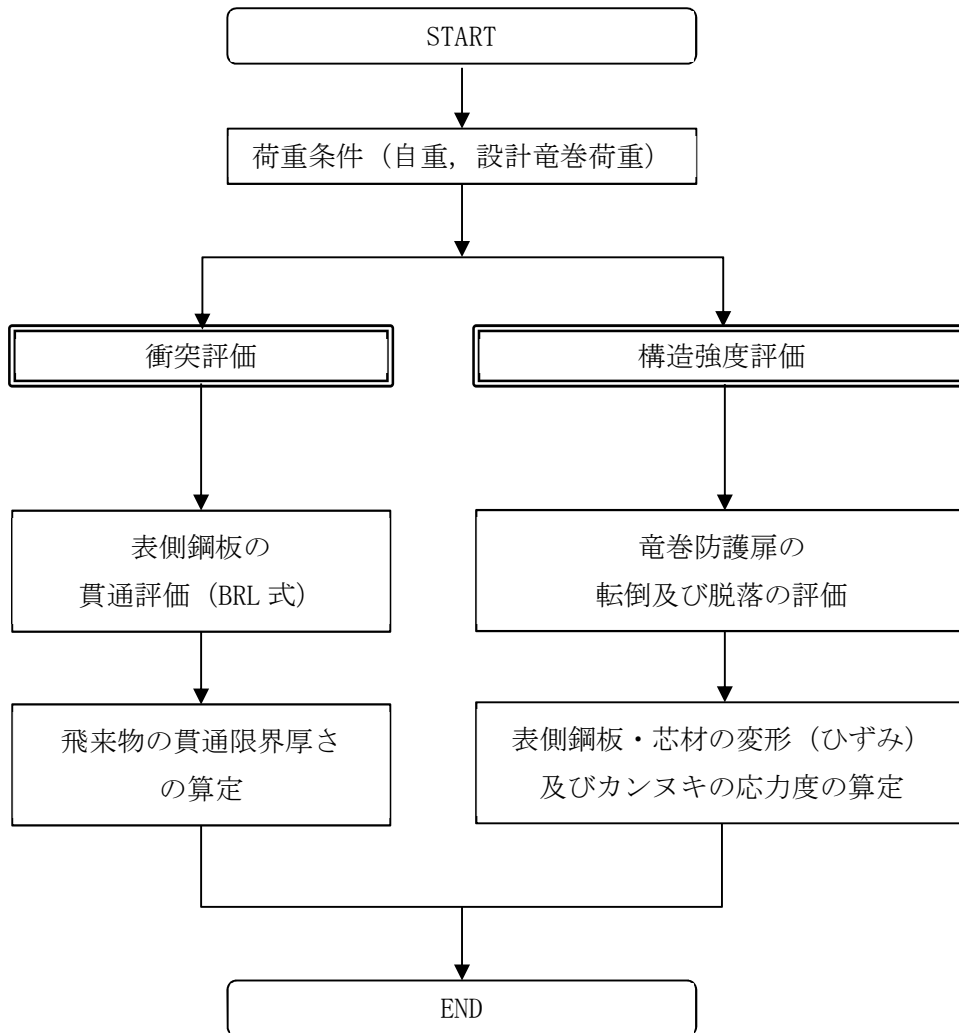


図 4-7 竜巻防護扉の評価フロー

(1) 衝突評価

飛来物による衝撃荷重に対し、防護対策施設を構成する部材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を貫通させないために、竜巻防護扉の表側鋼板が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。衝突評価には、「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BRL式を用いる。

(2) 構造強度評価

表側鋼板への飛来物の衝突時の荷重に対し、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、施設を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じないことの確認として、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、表側鋼板及び芯材に終局状態に至るようなひずみが生じないこと、並びにカンヌキに生じる応力度が部材の許容限界を上回らないことを計算により確認する。評価方法は、3次元FEMによる衝突解析及び力学における標準式による荷重の算定により評価する。使用する解析コードは「LS-DYNA」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 竜巻防護ネットの許容限界

(1) 防護ネットの許容限界

a. 構造強度評価

防護ネットは、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する評価を行うため、破断せず、荷重が作用するとしても外部事象防護対象施設に飛来物を衝突させないために、防護ネットの主要な部材に、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、シャックル及び接続用の治具の許容限界を以下のとおり設定する。

(a) ネット

ネットの破断に対する許容限界は、ネットに作用する外力エネルギー評価及び破断評価（引張荷重評価）に対して設定する。

ネットに作用する外力エネルギー評価は、飛来物によりネットに与えられる全外力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評価方針としていることを踏まえ、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1目合いの展開方向の破断荷重を許容限界とする。具体的には、ネット1目合いに作用する引張荷重を算出するため、ネットの引張試験に基づくネット1目合いの展開方向の破断荷重を許容限界とする。ネットは目合いがそれぞれ変形することで飛来物のエネルギーを吸収するため、ネット1目合いの引張荷重の評価を実施する。

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	
ネットに作用する 外力エネルギー評価の許容限界	破断評価の許容限界
ネット設置層数nを考慮した 限界吸収エネルギー	ネット1目合いの 展開方向の許容引張荷重*
E_{max}	F_{1x}

注記*：ネットの引張試験より求めたネット1目合いあたりの展開方向の破断荷重

(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EN規格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、そのワイヤグリップ効率 C_c に基づき、許容限界を設定する。

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	許容限界	備考
F_3^{*1}	$C_c^{*2} \cdot F_3^{*1}$	ワイヤグリップの効率を考慮

注記*1 : EN 12385-4 「6×19S+IWRC φ16」の破断荷重

*2 : 日本道路協会「小規模吊橋指針・同解説」

(c) シャックル

シャックルに関する許容限界は、シャックルの破断評価及びシャックル接続目合い間隔の妥当性評価に対して設定する。シャックルの破断評価は、シャックルが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ことから、メーカー保証値である破断荷重を許容限界とする。

シャックルの許容限界を表5-3に示す。

表5-3 シャックルの許容荷重

種別	許容限界
	シャックルの破断荷重
ロープ接続用シャックル	F_4
ロープ接続用シャックル (ブローアウトパネル用)	F_5
ネット接続用シャックル (バウ型シャックル)	F_6
ネット接続用シャックル (長シャックル)	F_7

シャックル接続目合い間隔の妥当性評価は、ネット接続用シャックルが接続する目合いの合計耐力を許容限界とする。なお、1目合いの耐力は、ネットの引張試験に基づくネット1目合いの破断荷重とする。

シャックル接続目合い間隔の許容限界を表5-4に示す。

表 5-4 シャックル接続目合い間隔の許容限界

許容限界
シャックル接続目合いの合計耐力
B_t

(d) 接続用の治具

接続用の治具の破断評価は、接続用の治具に、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評価方針としていることを踏まえ、接続用の治具の許容限界は、J E A G 4 6 0 1 を準用し、「その他の支持構造物」の許容限界を適用し、許容応力状態 IV_{AS} から算出した許容応力を許容限界とする。ネットに作用する荷重は、ワイヤロープを介して接続用の治具に作用するため、評価部位は、接続用の治具であるコーナーガイドの溶接部及びアイプレートの溶接部とする。

接続用の治具の許容限界を表 5-5 に示す。

表 5-5 接続用の治具の許容限界

許容応力状態	許容限界*		
	引張	曲げ	せん断
IV_{AS}	$1.5f_t^*$	$1.5f_b^*$	$1.5f_s^*$

注記*：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。

b. たわみ評価

防護ネットのたわみ評価は、防護ネットの飛来物の衝突による最大のたわみ量が外部事象防護対象施設との最小離隔距離未満であることを確認することから、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 5-6 に示す。

表 5-6 防護ネットのたわみ評価の許容限界

許容限界
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}

(2) 許容限界の設定方法

a. 記号の定義

防護ネットの強度評価における許容限界の算出に用いる記号を表 5-7 に示す。

表 5-7 防護ネットの強度評価における許容限界の算出に用いる記号

記号	単位	定義
a_x	mm	ネット 1 目合いの展開方向の対角寸法
a_y	mm	ネット 1 目合いの展開直角方向の対角寸法
b	mm	飛来物の端面の長辺方向寸法
B_t	kN	シャックル接続目合いの合計耐力
B_x	kN	ネット展開方向の接続目合いの耐力
B_y	kN	ネット展開直角方向の接続目合いの耐力
c	mm	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エネルギー
E_{max}	kJ	ネット設置層数 n を考慮した限界吸収エネルギー
F_{1x}	kN	ネット 1 目合いの展開方向の破断荷重
F_{1y}	kN	ネット 1 目合いの展開直角方向の破断荷重
F_i	kN	i 番目の列におけるネットの作用力
K	kN/m	ネット 1 目合いの展開方向の等価剛性
K_x	kN/m	ネット設置層数 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 層のネット 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_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_{xs}	個	ネット展開方向の一辺あたりのシャックル接続目合い数
N_y	個	ネット展開直角方向目合い数
N_{ys}	個	ネット展開直角方向の一辺あたりのシャックル接続目合い数
n	層	ネット設置層数
n'	層	ネット接続用シャックルに取り付けるネット層数
P_i	kN	飛来物衝突時にネットに発生する i 番目の列におけるネットの張力
X_i	m	i 列目のネットの伸び
δ_i	m	i 番目の列におけるネットのたわみ量
δ_{max1}	m	ネットの最大たわみ量
θ_i	°	i 番目の列におけるネットたわみ角
θ_{max}	°	ネットの最大たわみ角

b. ネットに作用する外力エネルギー評価

ネットに作用する外力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。ネット引張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。

限界吸収エネルギーは、複数層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、電中研報告書 N13014 及び電中研報告書 001 を参照し、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を評価した結果、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、ネットに作用する外力エネルギー評価では中央衝突の場合にて評価を行う。

ネットの吸収エネルギーは、電中研報告書 N14009 を参照し、飛来物が衝突した際、ネットの変形は同心円状に拡がることから、短辺側のネット寸法のうち小さい方の寸法を一辺とする正方形のネットとして、ネットの吸収エネルギーが小さくなるように評価する。

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、展開方向寸法及びたわみ量から、以下のとおり算出される。限界吸収エネルギー算出におけるネットのモデル図を図 5-1 に示す。

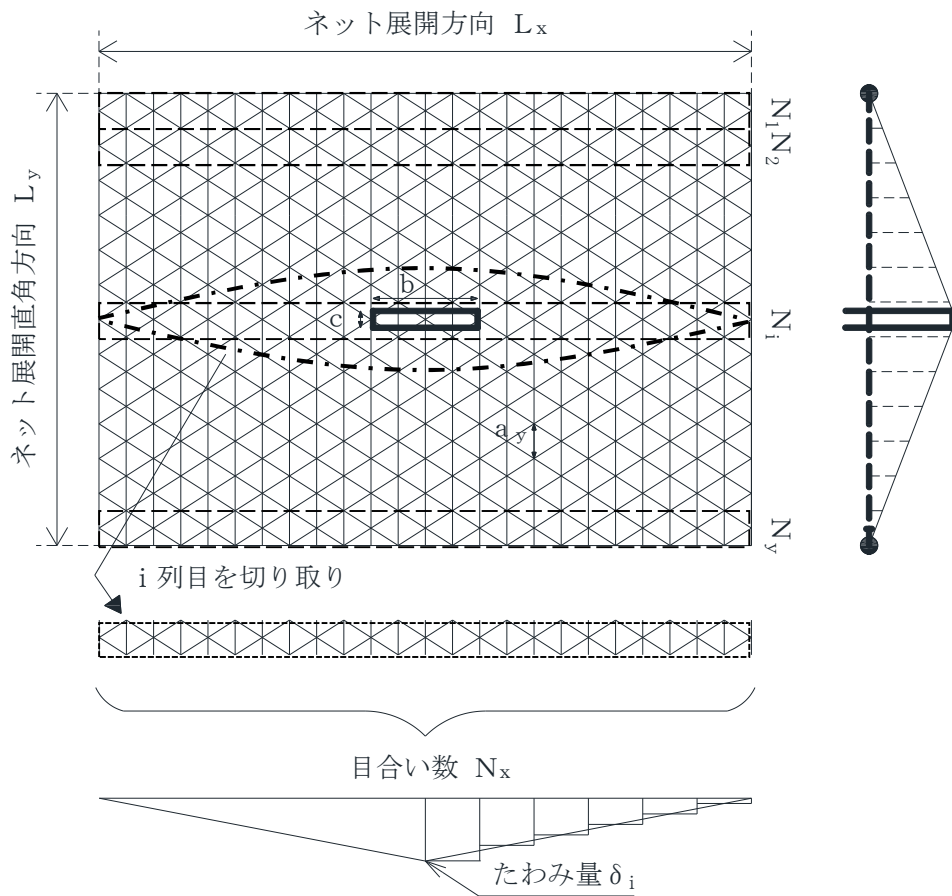


図 5-1 限界吸収エネルギー算出におけるネットのモデル図

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展開直角方向の対角寸法 a_y 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。

$$\text{ネット展開直角方向目合い列数} = \frac{c}{a_y}$$

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。

ネットに作用する外力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。

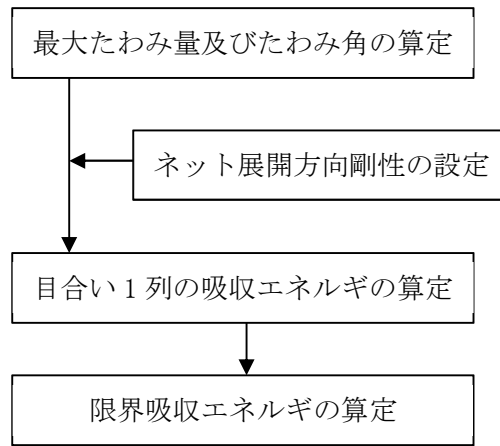
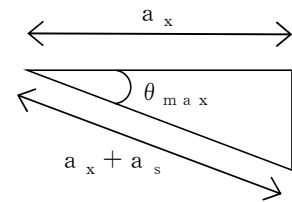


図5-2 ネットに作用する外力エネルギー評価の許容限界の算定フロー

ネット引張試験から、1目合いの展開方向の破断変位を設定する。ネット1目合いの展開方向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_{max1} は次式により算定される。

$$\delta_{max1} = \frac{L_x}{2} \cdot \tan(\theta_{max})$$

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



ネットを構成するネット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目合いの展開方向の対角寸法 a_x から求める。ネット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目合いの展開直角方向の対角寸法 a_y 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列あたりばね定数 K を持つばねを 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列あたりの剛性 K_x' は、

$$L_x = L_y$$

$$N_x = \frac{1000 \cdot L_x}{a_x}, \quad N_y = \frac{1000 \cdot L_y}{a_y}$$

$$\text{ネット展開方向剛性 } K_x' = \frac{K}{N_x}$$

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、ネット設置層数 n 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。

$$K_x = K_x' \times n$$

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_{max1} 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。

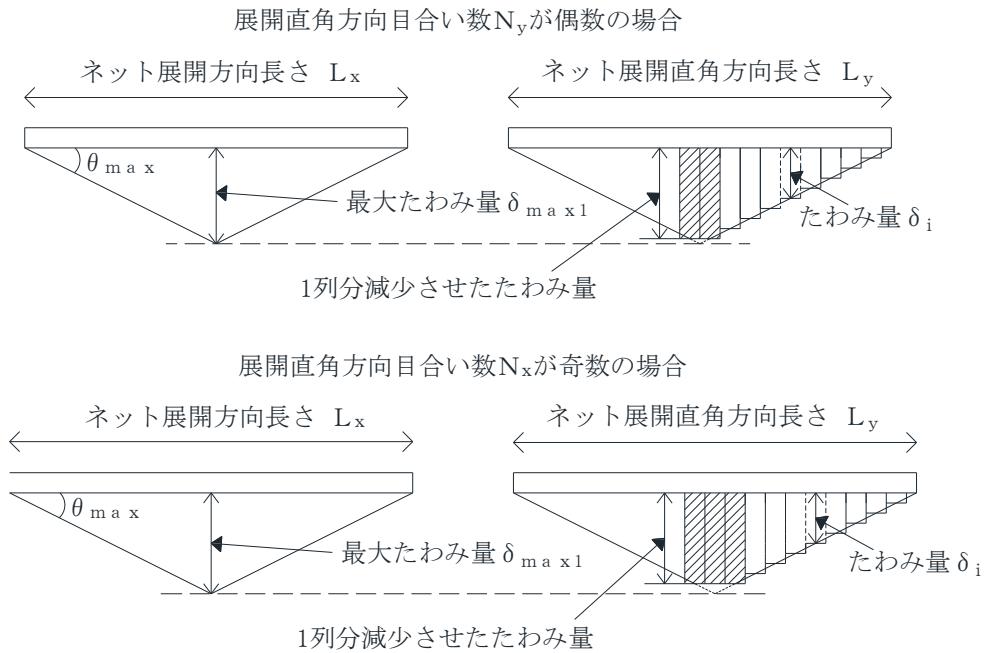


図 5-3 ネットの最大たわみ量と最大たわみ角

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。

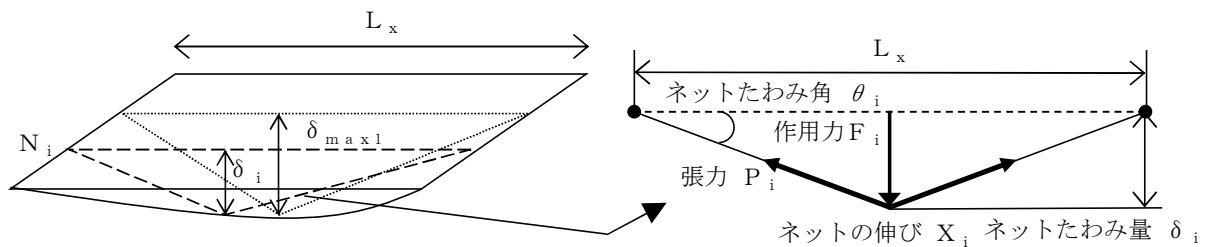


図 5-4 ネットに作用する力のつり合い

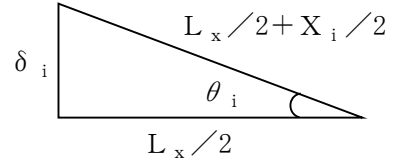
i 番目の列におけるネットの張力 P_i は、飛来物の衝突位置の左右を分割して考えると、伸び量は $X_i/2$ 、剛性は $2 \cdot K_x$ となることから、

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

$$=K_x \cdot X_i$$

となる。また、 i 番目の列におけるネットの作用力 F_i は変位置とたわみ量の関係から、

$$\begin{aligned} F_i &= 2 \cdot P_i \cdot \sin(\theta_i) \\ &= 2 \cdot K_x \cdot X_i \cdot \sin(\theta_i) \\ &= 2 \cdot K_x \cdot L_x \cdot (\tan(\theta_i) - \sin(\theta_i)) \\ &= 4 \cdot K_x \cdot \delta_i \cdot \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2}} \right) \dots\dots\dots (5.1) \end{aligned}$$



ネットに飛来物が衝突した際のネットにかかる張力 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 は次式で示される。

$$\begin{aligned} E_i &= \int_0^{\delta_i} F_i \cdot d \cdot \delta_i \\ &= \int_0^{\delta_i} 4 \cdot K_x \cdot \delta_i \cdot \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2}} \right) \cdot d \cdot \delta_i \\ &= 2 \cdot K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x \left(\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \dots\dots (5.2) \end{aligned}$$

以上から、ネット設置層数 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。

$$\begin{aligned} E_{max} &= \sum_{i=1}^{N_y} E_i \\ &= \sum_{i=1}^{N_y} \left(2 \cdot K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x \left(\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \right) \dots\dots (5.3) \end{aligned}$$

c. シャックル接続目合い間隔の妥当性評価

シャックル接続目合い間隔の妥当性評価においては、ネット接続用シャックルが接続するネット目合いの合計耐力 B_t が、「6.1(3)c. 破断評価」にて算出される最大衝撃荷重 F_a 以上であることにより、シャックル接続目合いが破断しないことを確認する。

接続目合いの合計耐力 B_t は、ネット展開方向の接続目合いの耐力 B_x とネット展開直角方向の接続目合いの耐力 B_y を足し合わせるにより求める。

$$B_x = F_{1y} \cdot N_{xS} \cdot n' \cdot 2$$

$$B_y = F_{1x} \cdot N_{yS} \cdot n' \cdot 2$$

$$B_t = B_x + B_y$$

ここで、ネット接続用シャックルに取り付けるネット層数 n' は、最大2層のため $n' = 2$ とする。

なお、シャックル接続目合い間隔の妥当性評価用のネット寸法は、シャックル接続数が少なくなるよう、ネットタイプ I, II の展開及び展開直角方向寸法の最小値を用いて設定し、接続目合いの合計耐力が小さくなるように評価する。

また、シャックル接続目合い間隔は、電中研報告書 N14009 を参考に、ネット展開方向が 3 目合いに 1 つ、ネット展開直角方向が 4 目合いに 1 つ接続することを基本とする。

5.2 竜巻防護鋼製フードの許容限界

(1) 衝突評価

飛来物による衝撃荷重に対し、防護対策施設を構成する部材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を貫通させないために、竜巻防護鋼製フードの防護鋼板が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、防護鋼板の最小部材厚さを許容限界として設定する。

(2) 構造強度評価

上載する防護鋼板の自重及び防護鋼板への飛来物の衝突時の荷重に対し、これらを支持する機能を維持可能な構造強度を有することの確認並びに、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、防護鋼板及び架構自体の転倒及び脱落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、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、終局状態に至るようなひずみ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、鋼材の破断ひずみを許容限界として設定する。鋼材の破断ひずみは、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、「NEI07-13:Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs」(以下「NEI07-13」という。)において、TF(多軸性係数)を□とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF=□を考慮して設定する。

5.3 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の許容限界

(1) 衝突評価

飛来物による衝撃荷重に対し、防護対策施設を構成する部材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を貫通させないために、非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の防護鋼板が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、防護鋼板の最小部材厚さを許容限界として設定する。

(2) 構造強度評価

上載する防護鋼板の自重及び防護鋼板への飛来物の衝突時の荷重に対し、これらを支持する機能を維持可能な構造強度を有することの確認並びに、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、防護鋼板及び架構自体の転倒及び脱落を生じないことの確認として、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、終局状態に至るようなひずみ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、鋼材の破断ひずみを許容限界として設定する。鋼材の破断ひずみは、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、NEI07-13において、TF(多軸性係数)を□とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF=□を考慮して設定する。

5.4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の許容限界

(1) 衝突評価

設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、防護対策施設を構成する部材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を貫通させないために、非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の防護鋼板に終局状態に至るようなひずみ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、鋼材の破断ひずみを許容限界として設定する。鋼材の破断ひずみは、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、NEI07-13において、TF（多軸性係数）を□とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF=□を考慮して設定する。

(2) 構造強度評価

上載する防護鋼板の自重及び防護鋼板への飛来物の衝突時の荷重に対し、これらを支持する機能を維持可能な構造強度を有することの確認並びに、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、防護鋼板及び架構自体の転倒及び脱落を生じないことの確認として、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、終局状態に至るようなひずみ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、鋼材の破断ひずみを許容限界として設定する。鋼材の破断ひずみは、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、NEI07-13において、TF（多軸性係数）を□とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF=□を考慮して設定する。

5.5 建屋内防護壁の許容限界

5.5.1 原子炉補機冷却海水系配管防護壁、換気空調系ダクト防護壁（No. 50 及び No. 55）及び竜巻防護ネット（防護鋼板部）の許容限界

(1) 衝突評価

飛来物による衝撃荷重に対し、防護対策施設を構成する部材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を貫通させないために、原子炉補機冷却海水系配管防護壁、換気空調系ダクト防護壁（No. 50 及び No. 55）及び竜巻防護ネット（防護鋼板部）の防護鋼板が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、防護鋼板の最小部材厚さを許容限界として設定する。

(2) 構造強度評価

上載する防護鋼板の自重及び防護鋼板への飛来物の衝突時の荷重に対し、これらを支持する機能を維持可能な構造強度を有することの確認並びに、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、防護鋼板及び架構自体の転倒及び脱落を生じないことの確認として、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、終局状態に至るようなひずみ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、鋼材の破断ひずみを許容限界として設定する。鋼材の破断ひずみは、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、NEI07-13において、TF（多軸性係数）を□とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF=□を考慮して設定する。

5.5.2 換気空調系ダクト防護壁 (No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B)) の許容限界

(1) 衝突評価

飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、防護対策施設を構成する部材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を貫通させないために、換気空調系ダクト防護壁 (No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B)) の防護鋼板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評価方針としていることを踏まえ、鋼材の破断ひずみを許容限界として設定する。鋼材の破断ひずみは、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、NEI07-13において、TF (多軸性係数) を とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕として TF = を考慮して設定する。

(2) 構造強度評価

上載する防護鋼板の自重及び防護鋼板への飛来物の衝突時の荷重に対し、これらを支持する機能を維持可能な構造強度を有することの確認並びに、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、防護鋼板及び架構自体の転倒及び脱落を生じないことを確認として、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、終局状態に至るようなひずみ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、鋼材の破断ひずみを許容限界として設定する。鋼材の破断ひずみは、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、NEI07-13において、TF (多軸性係数) を とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕として TF = を考慮して設定する。

5.6 竜巻防護扉の許容限界

(1) 衝突評価

飛来物による衝撃荷重に対し、防護対策施設を構成する部材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を貫通させないために、竜巻防護扉の表側鋼板が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、表側鋼板の最小部材厚さを許容限界として設定する。

(2) 構造強度評価

表側鋼板への飛来物の衝突時の荷重に対し、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、竜巻対策扉の転倒及び脱落を生じないことを確認として、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、終局状態に至るようなひずみ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、鋼材の破断ひずみを許容限界として設定する。鋼材の破断ひずみは、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、NEI07-13において、TF (多軸性係数) を とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕として TF = を考慮して設定する。

また、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、カンヌキ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—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。

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
- ・ FEM 等を用いた解析法

6.1 竜巻防護ネットの強度評価

(1) 評価方針

- a. ネットの限界吸収エネルギーの算出においては、ネットの展開方向に 1 目合いごとに帯状に分割したネット 1 目合いの展開方向の 1 列の等価剛性を求め、各列が分担するエネルギーを各列のたわみ量及び等価剛性から算定し、それらを積算することによりネットの吸収エネルギーを算出する。

ここで、ネット 1 目合いの展開方向の 1 列の等価剛性については、ネットを構成する 1 目合いがそれぞれ K の等価剛性を持っているため、1 列あたりばね定数 K を持つばねを N_x 個直列に接続したものと考えることができる。

- b. 風圧力による荷重 W_w 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。一方、ネット展開方向に対しては、設計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、保守的に外力エネルギー量が大きくなるよう、風圧力による荷重 W_w が全てネット展開方向寸法 L_x の中央に作用するとして、ネットにかかる作用力の式を用いて 1 列あたりの風圧力による荷重によりネットに作用す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。

なお、風圧力による荷重は、風圧力が大きくなるよう、ネットタイプ I, II のうち、大きい方の面積を用いて算出する。

- c. ネットに作用する飛来物の衝撃荷重について、ネットのたわみ量と飛来物の運動エネルギーから飛来物による衝撃荷重の関係式を用いて算出する。ネットに作用する衝撃荷重算定については、飛来物の運動エネルギーに加え、風圧力による荷重によりネットに作用する外力エネルギーも考慮する。

- d. 防護ネットの飛来物衝突時のたわみ量について、ネットの最大たわみ量と、ワイヤロープに発生する張力から求める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を算出する。

なお、ネットのたわみ量は、電中研報告書 N14009 を参照し、飛来物が衝突した際、ネットの変形は同心円状に拡がることから、短辺側のネット寸法から算出する。ただし、保守的にネットたわみ量が大きくなるよう、たわみ評価用のネット展開方向寸法 L_{x2} 及びネット展開直角方向寸法 L_{y2} は、ネットタイプ I, II のうち、短辺側寸法が大きいネットタイプの寸法を用いる。

(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	・ ネットに作用する外力エネルギー ・ 引張荷重 ・ たわみ
ワイヤロープ	・ 引張荷重 ・ たわみ
シャックル	・ せん断荷重 ・ シャックル接続目合い間隔
接続用の治具*	・ 引張応力 ・ 曲げ応力 ・ せん断応力

注記*：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) 強度計算

a. 記号の定義

ネット，ワイヤロープ，シャックル及び接続用の治具の強度評価に用いる記号を表6-2に示す。

表 6-2 (1/3) 防護ネットの強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A_{cs}	mm^2	cs 部の断面積
A_{ct}	mm^2	ct 部の断面積
A_i	mm^2	i 部の断面積
B_t	kN	シャックル接続目合いの合計耐力
e_1	mm	図芯軸から P_{2a} 荷重作用点までの距離
e_2	mm	図芯軸から P_{2b} 荷重作用点までの距離
E_f	kJ	飛来物衝突時にネットに作用する外力エネルギー
E_{max}	kJ	ネット設置層数 n を考慮した限界吸収エネルギー
E_t	kJ	ネット設置層数 n を考慮したネットに作用する全外力エネルギー
E_w	kJ	風圧力による荷重によりネットに作用する外力エネルギー
F_{1x}	kN	ネット 1 目合いの展開方向の破断荷重
F_2	kN	ネットに飛来物が衝突した際に生じるネット目合い 1 箇所が受ける衝撃荷重の最大値
F_a	kN	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_i	kN	飛来物衝突時の i 番目の列におけるネットへの作用力
F_w	kN	風圧力による荷重によるネットのたわみ量算出用荷重
K_x	kN/m	ネット設置層数 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
L_b	m	変形前のワイヤロープ長さ
L_{bx}	m	架構長辺部のコーナーガイド間の長さ
L_{by}	m	架構短辺部のコーナーガイド間の長さ
L_n	m	ネットたわみ量算出用のネット寸法
L_x	m	ネット展開方向寸法
L_{x2}	m	たわみ評価用のネット展開方向寸法
L_{y2}	m	たわみ評価用のネット展開直角方向寸法
l_{ct}	mm	コーナーガイド取付プレートの長さ
l_{cs}	mm	コーナーガイドの長さ
l_i	mm	アイプレートの i 部側固定端から荷重点までの距離
M_{i1}	N・mm	i 部の P_{2a} による曲げモーメント
M_{i2}	N・mm	i 部の P_{2b} による曲げモーメント
m	kg	飛来物の質量
N_y	個	ネット展開直角方向目合い数
n	層	ネット設置層数
n_1	個	飛来物の衝突位置周辺のネット 1 層あたりの目合い数

表 6-2 (2/3) 防護ネットの強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
P_{1a}	N	コーナーガイドに作用する荷重 (架構平面方向)
P_{1b}	N	コーナーガイドに作用する荷重 (架構奥行方向)
P_{2a}	N	アイプレートに作用する荷重 (架構軸方向)
P_{2ay}	N	アイプレートに作用する荷重 (架構軸直角方向)
P_{2b}	N	アイプレートに作用する荷重 (架構奥行方向)
P_N	kN	ネット接続用シャックル 1 箇所あたりの作用荷重
P_R	kN	ロープ接続用シャックル 1 箇所あたりの作用荷重
P_x	N	コーナーガイドに作用する荷重 (架構長辺方向)
P_y	N	コーナーガイドに作用する荷重 (架構短辺方向)
R_{ct}	mm	コーナーガイドの半径
S	m	変形後のワイヤロープ長さ
S_x	m	架構長辺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	架構短辺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'	kN	ネットに発生する張力の合計の最大値
T_1'	kN	ワイヤロープ 1 本に作用する張力
v_1	m/s	飛来物衝突時の速度
W_w	kN	風圧力による荷重
Z_{cs}	mm ³	cs 部の断面係数
Z_{ct}	mm ³	ct 部の断面係数
Z_{ip}	mm ³	i 部の極断面係数
Z_{i1}	mm ³	i 部の面内方向断面係数
Z_{i2}	mm ³	i 部の面外方向断面係数
δ'	m	飛来物衝突時のワイヤロープの変形による伸び量
δ_a	m	風圧力による荷重によるネットのたわみ量
δ_i	m	i 番目の列におけるネットのたわみ量
δ_{max1}	m	ネットの最大たわみ量
δ_{max2}	m	限界オフセット時における飛来物の累積移動量
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	架構長辺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	架構短辺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 6-2 (3/3) 防護ネットの強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
σ_i	MPa	i 部に対する垂直応力とせん断応力の組合せ応力
σ_{ib}	MPa	i 部に対する合計曲げ応力
σ_{ib1}	MPa	i 部に対する曲げ応力 (面内方向)
σ_{ib2}	MPa	i 部に対する曲げ応力 (面外方向)
σ_{it}	MPa	i 部に対する引張応力
τ_{cs}	MPa	cs 部に対する合計せん断応力
τ_{cs1}	MPa	cs 部に対するせん断力によるせん断応力
τ_{cs2}	MPa	cs 部に対する曲げモーメントによるせん断応力
τ_{cs3}	MPa	cs 部に対する引張力によるせん断応力
τ_{ct}	MPa	ct 部に対する合計せん断応力
τ_{ct1}	MPa	ct 部に対する引張力によるせん断応力
τ_{ct2}	MPa	ct 部に対するせん断力によるせん断応力
τ_{ct3}	MPa	ct 部に対する曲げモーメントによるせん断応力
τ_i	MPa	i 部に対する合計せん断応力
τ_{i1}	MPa	i 部に対する引張力によるせん断応力
τ_{i2}	MPa	i 部に対するねじりモーメントによるせん断応力
θ_1	°	架構長辺方向に平行なワイヤロープの水平投影たわみ角
θ_2	°	架構短辺方向に平行なワイヤロープの水平投影たわみ角
θ_{max}	°	ネットの最大たわみ角
θ_{wx}	°	架構長辺方向に平行なワイヤロープのたわみ角
θ_{wy}	°	架構短辺方向に平行なワイヤロープのたわみ角
θ_x	°	ネット展開方向に平行のネットたわみ角
θ_y	°	ネット展開直角方向に平行のネットたわみ角

b. ネットに作用する外力エネルギー評価

ネットに作用する外力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定のモデル化を行い、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、複数層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(5.3)より、 E_{max} は以下のとおりである。

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

風圧力による荷重 W_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、 W_w が全てネット展開方向 L_x の中央に作用するとして、ネットにかかる作用力の式を用いて1列あたりの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 並びに風圧力による荷重から算出する F_w を式(5.1)の F_i に代入し、 F_w と W_w が近似し、かつ F_w が W_w 以上となるよう、風圧力による荷重によるネットのたわみ量 δ_a を導出する。

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

ただし、 $F_w \geq W_w$

上式にて導出された δ_a を式(5.3)において、展開方向の1列あたりの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列数倍する以下の式に代入することにより、風圧力による荷重によりネットに作用する外力エネルギー E_w が算出される。

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

飛来物の衝突によりネットに作用する外力エネルギー E_f としては、衝突時の飛来物の運動エネルギーとして、以下より求められる。

$$E_f = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2$$

飛来物の飛来速度は、水平の飛来速度にて算出する。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、その飛来速度は水平最大飛来速度を用いる。

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

$$E_t = E_f + E_w$$

c. 破断評価

(a) ネットの破断評価

ネットに飛来物が衝突した際の衝撃により生じる引張荷重による破断評価モデルを図 6-1 に示す。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 層あたり n_1 となる。

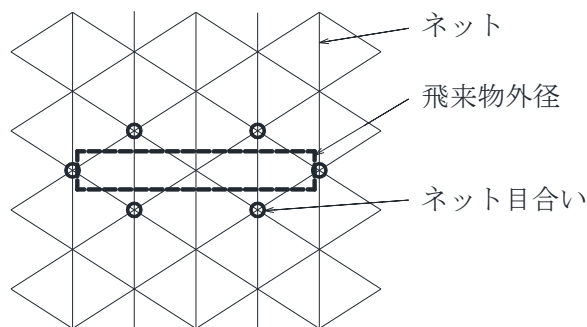


図 6-1 ネットの破断評価モデル

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」にて算出した式(2.8)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、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、ネットの最大たわみ量は、限界オフセット時の飛来物の累積移動量 δ_{max2} を用いて、式(2.8)より

$$F_a = \frac{8 \cdot E_t}{3 \cdot \delta_{max2}}$$

となる。

飛来物が防護ネットに衝突した場合、飛来物の衝突位置周辺のネットの 1 層あたりの目合い数を n_1 とすると、衝撃荷重を受け止めるネットの目合い数は、ネット設置層数を考慮し、 $n_1 \times n$ 箇所となり、目合い 1 箇所あたりの衝撃荷重の最大値は、

$$F_2 = F_a \cdot \frac{1}{n_1 \cdot n}$$

となる。

(b) ワイヤロープの破断評価

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風圧力によりネットに作用する荷重

②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、4本のワイヤロープをU字に設置し、さらにワイヤロープが接続用の治具のコーナーガイドにより拘束されない構造としている。

風圧力による荷重及び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、飛来物が衝突する場合のネットに発生する張力の合計である張力 T' は、図 6-2 に示す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。

ここで、動的応答倍率による係数 1.52 を考慮する。

$$T' = \frac{F_a}{2 \cdot \sin \theta_{max}} \cdot 1.52$$

ここで、 θ_{max} は以下の式で求められる。

$$\theta_{max} = \tan^{-1} \frac{2 \cdot \delta_{max1}}{L_x}$$

図 6-2 より、ワイヤロープは、ネット展開方向 2 辺とネット展開直角方向 1 辺、又は、ネット展開直角方向 2 辺とネット展開方向 1 辺を 1 本のワイヤロープで U 字形に計 2 本設置し、このワイヤロープと対称に設置したワイヤロープとの合計 4 本でネットを支持することにより、展開方向及び展開直角方向ともにワイヤロープで支持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 $T' / 4$ と設定する。

ワイヤロープ 1 本に発生する張力 T_1' は

$$T_1' = \frac{T'}{4} \dots\dots\dots (6.1)$$

と算出される。

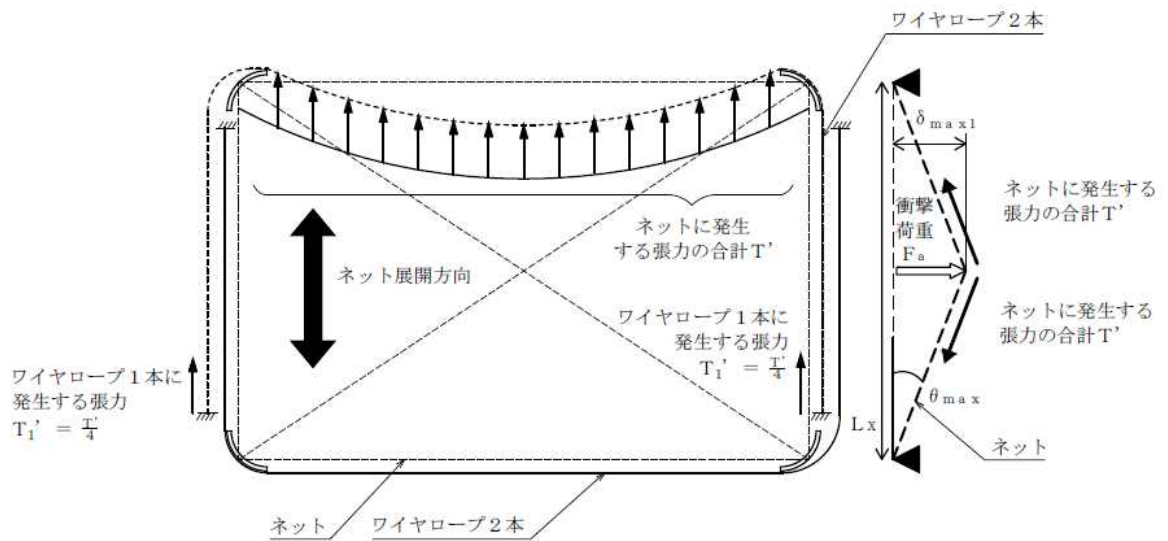


図 6-2 ネット及びワイヤロープに発生する力のつり合い
(ネット平面図及び断面図)

(c) シャックルの破断評価

イ. ロープ接続用シャックル

ロープ接続用シャックルには、2本のワイヤロープが接続される。ロープ接続用シャックルは、ワイヤロープの引張荷重が作用する場合においても破断しない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2本分を乗じた作用荷重 P_R により評価を実施する。

$$P_R = T_1' \cdot 2$$

ロ. ネット接続用シャックル

(イ) ネット接続用シャックル

ネット接続用シャックルは、ネットを最大2層取り付ける場合においても破断しないことを確認することから、引張荷重の最大値としてネット1目合いの展開方向の破断荷重 F_{1x} に2層分を乗じた作用荷重 P_N により評価を実施する。

$$P_N = F_{1x} \cdot 2$$

(ロ) シャックル接続目合い間隔の妥当性評価

シャックル接続目合い間隔の妥当性評価においては、最大衝撃荷重 F_a が、ネット接続用シャックルが接続するネット目合いの合計耐力 B_t を下回ることを確認する。

(d) 接続用の治具の破断評価

イ. コーナーガイド

ワイヤロープは、設置するネット枚数に係わらず2本設置するため、コーナーガイドの溶接部にかかる応力は、ワイヤロープ2本を考慮し評価する。

ここで、ワイヤロープはたわみによりコーナーガイドに対して、 θ_1 及び θ_2 の水平投影たわみ角を有することから、コーナーガイドへ作用する荷重はこのたわみ角を考慮する。

ネットのたわみとワイヤロープのたわみ角の関係を図6-3に、ワイヤロープのたわみ図を図6-4に示す。

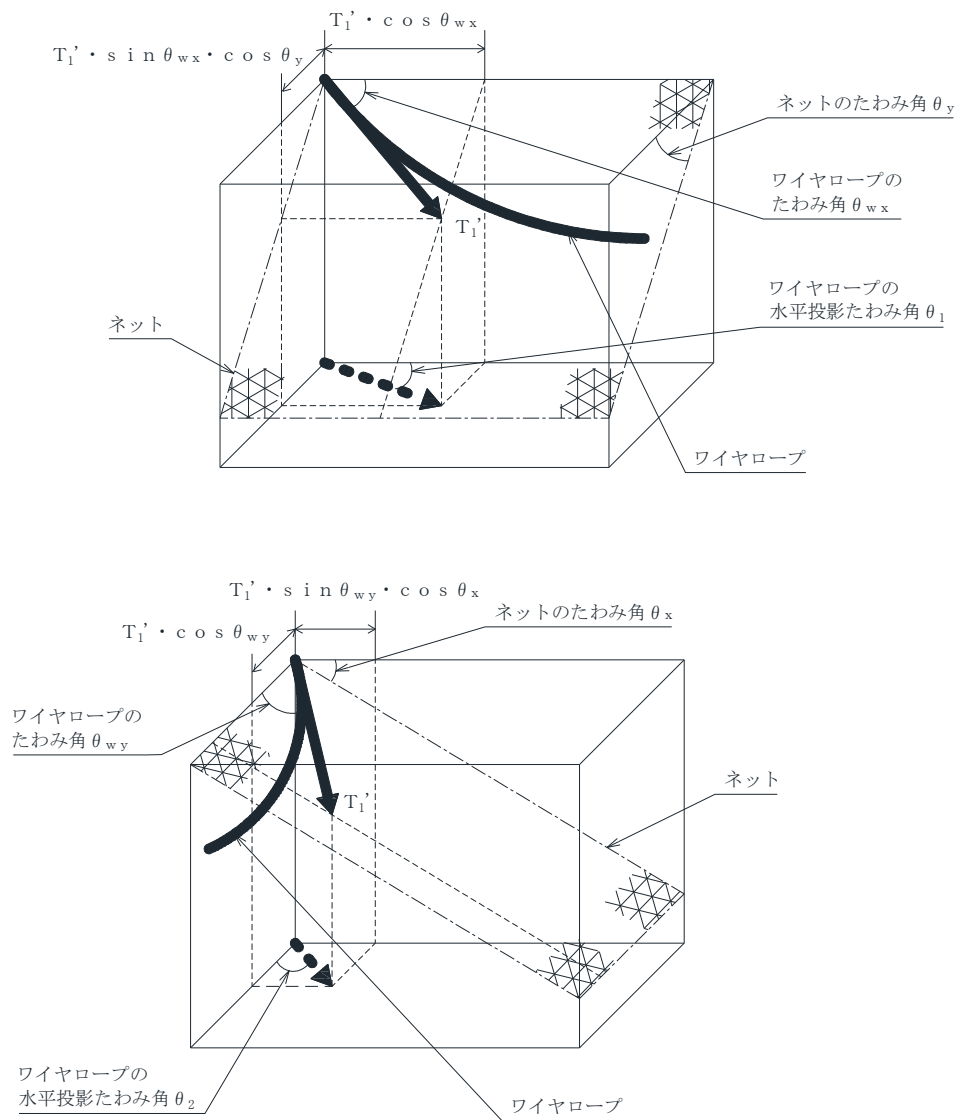


図6-3 ネットのたわみとワイヤロープのたわみ角の関係

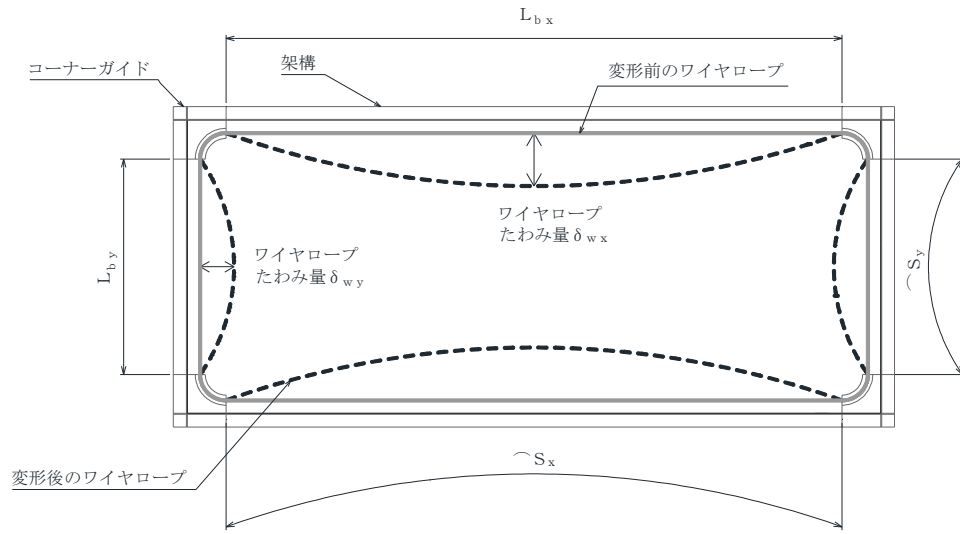


図 6-4 ワイヤロープのたわみ図

図 6-3 及び図 6-4 より，架構長辺に平行なワイヤロープの水平投影たわみ角 θ_1 は，

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \tan^{-1} \left(\frac{T_1' \cdot \sin \theta_{wx} \cdot \cos \theta_y}{T_1' \cdot \cos \theta_{wx}} \right) \\ &= \tan^{-1} (\tan \theta_{wx} \cdot \cos \theta_y)\end{aligned}$$

より求まる。

ただし， θ_y ， θ_{wx} は以下の式で求められる。

$$\begin{aligned}\theta_y &= \tan^{-1} \left(\frac{2 \cdot \delta_{max1}}{L_{y2}} \right) \\ \theta_{wx} &= \cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{1 + 16 \cdot \left(\frac{\delta_{wx}}{L_{bx}} \right)^2}}\end{aligned}$$

また，架構短辺方向に平行なワイヤロープの水平投影たわみ角 θ_2 は，

$$\begin{aligned}\theta_2 &= \tan^{-1} \left(\frac{T_1' \cdot \sin \theta_{wy} \cdot \cos \theta_x}{T_1' \cdot \cos \theta_{wy}} \right) \\ &= \tan^{-1} (\tan \theta_{wy} \cdot \cos \theta_x)\end{aligned}$$

より求まる。

ただし、 θ_x 、 θ_{wy} は以下の式で求められる。

$$\theta_x = \tan^{-1} \left(\frac{2 \cdot \delta_{\max 1}}{L_{x2}} \right)$$

$$\theta_{wy} = \cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{1 + 16 \cdot \left(\frac{\delta_{wy}}{L_{by}} \right)^2}}$$

コーナーガイドの荷重状態を図 6-5 に示す。

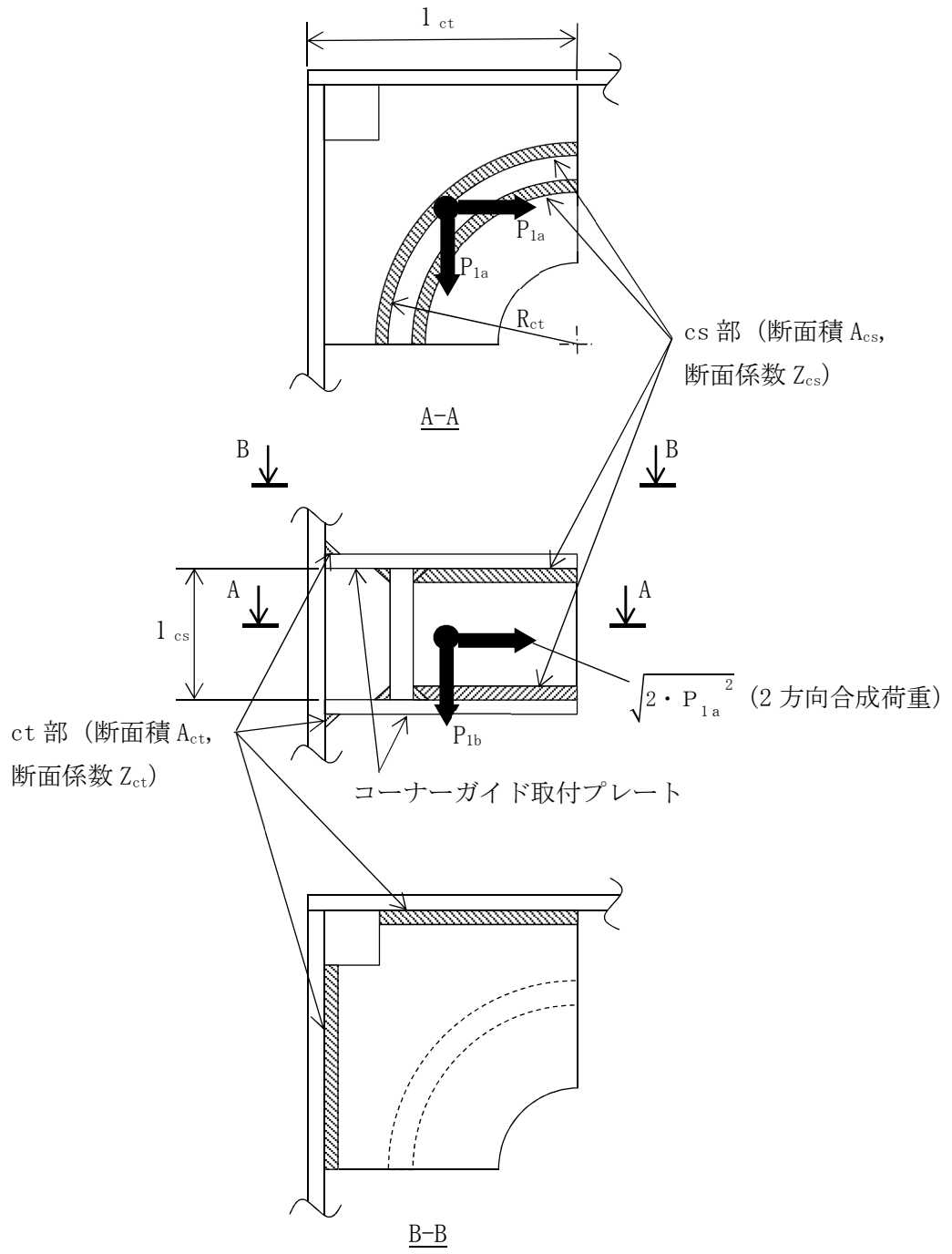


図 6-5 コーナーガイドの荷重状態

コーナーガイドに作用する荷重（架構平面方向） P_{1a} は、

$$P_{1a} = \text{Max} (P_x, P_y)$$

$$P_x = 2 \cdot (T_1' \cdot \cos \theta_1 + T_1' \cdot \sin \theta_2)$$

$$P_y = 2 \cdot (T_1' \cdot \sin \theta_1 + T_1' \cdot \cos \theta_2)$$

コーナーガイドに作用する荷重（架構奥行方向） P_{1b} は、

$$P_{1b} = 2 \cdot (T_1' \cdot \sin \theta_{wx} \cdot \sin \theta_y) + 2 \cdot (T_1' \cdot \sin \theta_{wy} \cdot \sin \theta_x)$$

cs 部に対するせん断力によるせん断応力 τ_{cs1} は、

$$\tau_{cs1} = \frac{\sqrt{2 \cdot P_{1a}^2}}{2 \cdot A_{cs}}$$

cs 部に対する曲げモーメントによるせん断応力 τ_{cs2} は、

$$\tau_{cs2} = \frac{\sqrt{2 \cdot P_{1a}^2 \cdot l_{cs}}}{8 \cdot Z_{cs}}$$

cs 部に対する引張力によるせん断応力 τ_{cs3} は、

$$\tau_{cs3} = \frac{P_{1b}}{2 \cdot A_{cs}}$$

cs 部に対する合計せん断応力 τ_{cs} は、

$$\tau_{cs} = \sqrt{\tau_{cs1}^2 + (\tau_{cs2} + \tau_{cs3})^2}$$

で求まる。

ct 部に対する引張力によるせん断応力 τ_{ct1} は,

$$\tau_{ct1} = \frac{P_{1a}}{2 \cdot A_{ct}}$$

ct 部に対するせん断力によるせん断応力 τ_{ct2} は,

$$\tau_{ct2} = \frac{\sqrt{\left(\frac{P_{1a}}{2}\right)^2 + \left(\frac{P_{1b}}{2}\right)^2}}{A_{ct}}$$

ct 部に対する曲げモーメントによるせん断応力 τ_{ct3} は,

$$\tau_{ct3} = \frac{P_{1b}}{2} \cdot \frac{\left(1_{ct} - \frac{R_{ct}}{\sqrt{2}}\right)}{Z_{ct}}$$

ct 部に対する合計せん断応力 τ_{ct} は,

$$\tau_{ct} = \sqrt{(\tau_{ct1} + \tau_{ct3})^2 + \tau_{ct2}^2}$$

で求まる。

ロ. 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、アイプレートの溶接部には応力が発生するため、評価を実施する。

ここで、アイプレートの溶接部である*i*部のうち、組合せ応力が最も大きいA点を評価対象点とする。

アイプレートの荷重状態を図6-6に示す。

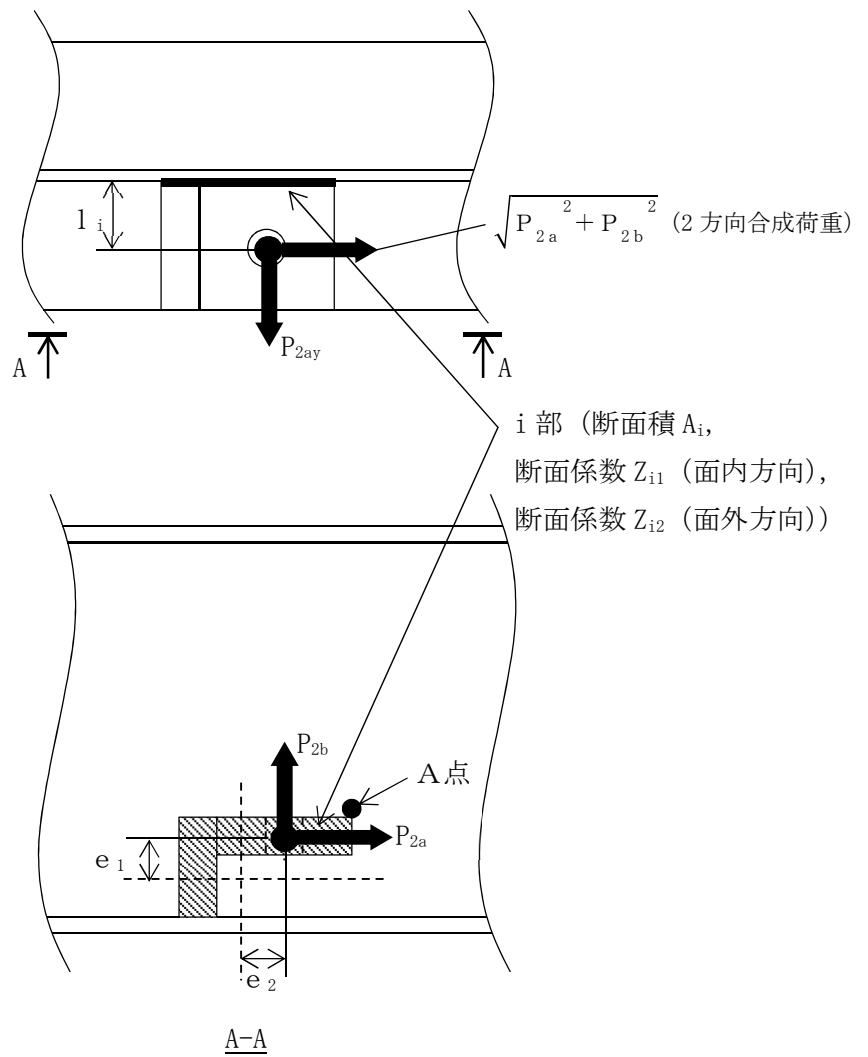


図6-6 アイプレートの荷重状態

アイプレートに作用する荷重(架構軸方向) P_{2a} は,

$$P_{2a} = 2 \cdot T_1'$$

アイプレートに作用する荷重(架構軸直角方向) P_{2ay} は,

$$P_{2ay} = 2 \cdot T_1' \cdot \sin \theta_1$$

アイプレートに作用する荷重(架構奥行方向) P_{2b} は, アイプレート設置位置によって決まり,

アイプレートが架構の縦部(垂直部)に設置される場合,

$$P_{2b} = 2 \cdot \left(T_1' \cdot \sin \theta_{wy} \cdot \sin \theta_x \right)$$

アイプレートが架構の横部(水平部)に設置される場合,

$$P_{2b} = 2 \cdot \left(T_1' \cdot \sin \theta_{wx} \cdot \sin \theta_y \right)$$

となる。

また, 引張応力 σ_{it} は,

$$\sigma_{it} = \frac{P_{2ay}}{A_i}$$

引張力によるせん断応力 τ_{i1} は,

$$\tau_{i1} = \frac{\sqrt{P_{2a}^2 + P_{2b}^2}}{A_i}$$

ねじりモーメントによるせん断応力 τ_{i2} は,

$$\tau_{i2} = \frac{P_{2a} \cdot e_1 + P_{2b} \cdot e_2}{Z_{ip}}$$

合計せん断応力 τ_i は,

$$\tau_i = \tau_{i1} + \tau_{i2}$$

i 部に作用する曲げモーメント M_{i1} 及び曲げモーメント M_{i2} は,

$$M_{i1} = P_{2a} \cdot l_i$$

$$M_{i2} = P_{2b} \cdot l_i$$

曲げ応力 σ_{ib1} 及び曲げ応力 σ_{ib2} は,

$$\sigma_{ib1} = \frac{M_{i1}}{Z_{i1}}$$

$$\sigma_{ib2} = \frac{M_{i2}}{Z_{i2}}$$

合計曲げ応力 σ_{ib} は,

$$\sigma_{ib} = \sigma_{ib1} + \sigma_{ib2}$$

以上より、垂直応力とせん断応力の組合せ応力 σ_i は,

$$\sigma_i = \sqrt{(\sigma_{ib} + \sigma_{it})^2 + 3 \cdot \tau_i^2}$$

で求まる。

d. たわみ評価

(a) ネットのたわみ量の算出

ネットのたわみ量は、最大たわみ量 δ_{max1} を用いる。

たわみ評価用のネット展開方向寸法 L_{x2} 及びネット展開直角方向寸法 L_{y2} は、ネットタイプ I, II のうち、短辺側寸法が大きいネットタイプの寸法を用いる。

また、 δ_{max1} は、たわみ評価用のネット展開方向寸法 L_{x2} 、展開直角方向寸法 L_{y2} のうち小さい方の寸法となる、ネットたわみ量算出用のネット寸法 L_n から算出する。

$$\delta_{max1} = \frac{L_n}{2} \cdot \tan(\theta_{max})$$

(b) 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－伸び曲線）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(6.1)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及びワイヤロープのひずみ量から、ワイヤロープの変形による伸び量 δ' が算出される。

飛来物の衝突によりワイヤロープが図 6-7 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。

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

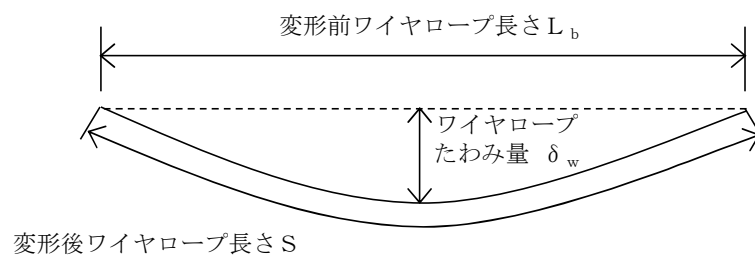


図 6-7 ワイヤロープ変形図

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_t の算出を行う。ネット及びワイヤロープ変形図を図 6-8 に示す。

架構長辺方向と平行に配置されているコーナーガイド間のワイヤロープの変形後の長さを S_x 、架構短辺方向と平行に配置されているコーナーガイド間の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、ワイヤロープの伸び量 δ' は、架構長辺方向 2 辺、架構短辺方向 1 辺にワイヤロープが配置される場合は、

$$\delta' = (S_x (\delta_{wx}) - L_{bx}) \cdot 2 + (S_y (\delta_{wy}) - L_{by})$$

架構短辺方向2辺、架構長辺方向1辺にワイヤロープが配置される場合は、

$$\delta' = (S_x (\delta_{wx}) - L_{bx}) + (S_y (\delta_{wy}) - L_{by}) \cdot 2$$

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、ワイヤロープのたわみ量を含めた防護ネット全体のたわみ量 δ_t は、

$$\begin{aligned} \delta_t &= \sqrt{\left(\delta_{wy} + \frac{L_{x2}}{2 \cdot \cos \theta_x}\right)^2 - \left(\frac{L_{x2}}{2}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\delta_{wx} + \frac{L_{y2}}{2 \cdot \cos \theta_y}\right)^2 - \left(\frac{L_{y2}}{2}\right)^2} \end{aligned}$$

と表される。

ここで、 θ_x 及び θ_y は、最大たわみ量 δ_{max1} より、以下の式で求められる。

$$\theta_x = \tan^{-1} \left(\frac{2 \cdot \delta_{max1}}{L_{x2}} \right)$$

$$\theta_y = \tan^{-1} \left(\frac{2 \cdot \delta_{max1}}{L_{y2}} \right)$$

したがって、ワイヤロープのたわみ量 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の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。

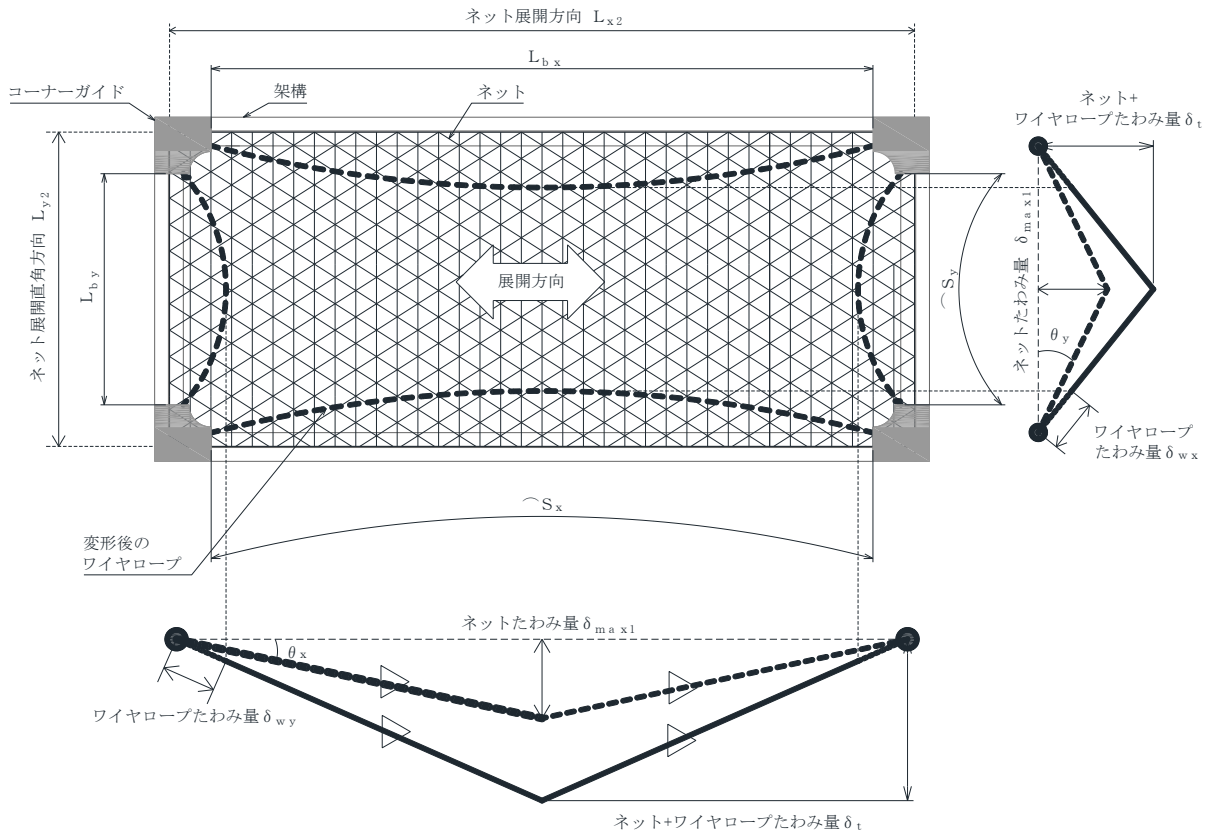


図 6-8 ネット及びワイヤロープ変形図

6.2 竜巻防護鋼製フードの強度評価

(1) 評価方針

- a. 竜巻防護鋼製フードの強度評価は、定式化された評価式を用いた解析法により衝突評価を、FEMを用いた衝突解析により構造強度評価を実施する。
- b. 衝突解析に用いるモデルは、竜巻防護鋼製フードの構造及び想定される荷重の伝達を踏まえ、作成する。

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表 6-3 に示す。

表 6-3 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	評価内容
防護鋼板	<ul style="list-style-type: none"> ・衝突評価 ・構造強度評価
架構	<ul style="list-style-type: none"> ・構造強度評価

(3) 強度計算

a. 記号の説明

強度評価に用いる記号を表 6-4 に示す。

表 6-4 BRL 式による貫通限界厚さの算定に用いる記号

記号	単位	定義
d	m	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	m	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. 衝突評価

飛来物が、防護鋼板に直接衝突する場合の貫通限界厚さを、「タービンミサイル評価について（昭和 52 年 7 月 20 日原子炉安全専門審査会）」で用いられる BRL 式を用いて算出する。

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

c. 構造強度評価

飛来物が、防護鋼板に直接衝突した場合における、衝突位置の構造強度評価（ひずみ）を実施する。

6.3 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の強度評価

(1) 評価方針

- a. 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の強度評価は、定式化された評価式を用いた解析法により衝突評価を、FEMを用いた衝突解析により構造強度評価を実施する。
- b. 衝突解析に用いるモデルは、非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の構造及び想定される荷重の伝達を踏まえ、作成する。

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表 6-5 に示す。

表 6-5 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	評価内容
防護鋼板	<ul style="list-style-type: none"> ・ 衝突評価 ・ 構造強度評価
架構	<ul style="list-style-type: none"> ・ 構造強度評価

(3) 強度計算

a. 記号の説明

強度評価に用いる記号を表 6-6 に示す。

表 6-6 BRL 式による貫通限界厚さの算定に用いる記号

記号	単位	定義
d	m	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	m	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. 衝突評価

飛来物が、防護鋼板に直接衝突する場合の貫通限界厚さを、「タービンミサイル評価について（昭和 52 年 7 月 20 日原子炉安全専門審査会）」で用いられる BRL 式を用いて算出する。

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

c. 構造強度評価

飛来物が、防護鋼板に直接衝突した場合における、衝突位置の構造強度評価（ひずみ）を実施する。

6.4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の強度評価

(1) 評価方針

- a. 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の強度評価は、FEM を用いた衝突解析により衝突評価及び構造強度評価を実施する。
- b. 衝突解析に用いるモデルは、非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の構造及び想定される荷重の伝達を踏まえ、作成する。

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表 6-7 に示す。

表 6-7 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	評価内容
防護鋼板	・ 衝突評価 ・ 構造強度評価
架構	・ 構造強度評価

(3) 強度計算

飛来物が、防護鋼板に直接衝突した場合における、衝突位置の構造強度評価（ひずみ）を実施する。

6.5 建屋内防護壁の強度評価

6.5.1 原子炉補機冷却海水系配管防護壁，換気空調系ダクト防護壁（No. 50 及び No. 55）及び竜巻防護ネット（防護鋼板部）の強度評価

(1) 評価方針

- a. 原子炉補機冷却海水系配管防護壁，換気空調系ダクト防護壁（No. 50 及び No. 55）及び竜巻防護ネット（防護鋼板部）の強度評価は，定式化された評価式を用いた解析法により衝突評価を，FEM を用いた衝突解析により構造強度評価を実施する。
- b. 衝突解析に用いるモデルは，原子炉補機冷却海水系配管防護壁，換気空調系ダクト防護壁（No. 50 及び No. 55）及び竜巻防護ネット（防護鋼板部）の構造及び想定される荷重の伝達を踏まえ，作成する。

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表 6-8 に示す。

表 6-8 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	評価内容
防護鋼板	<ul style="list-style-type: none"> ・ 衝突評価 ・ 構造強度評価
架構	<ul style="list-style-type: none"> ・ 構造強度評価

(3) 強度計算

a. 記号の説明

強度評価に用いる記号を表 6-9 に示す。

表 6-9 BRL 式による貫通限界厚さの算定に用いる記号

記号	単位	定義
d	m	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	m	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. 衝突評価

飛来物が，防護鋼板に直接衝突する場合の貫通限界厚さを，「タービンミサイル評価について（昭和 52 年 7 月 20 日原子炉安全専門審査会）」で用いられる BRL 式を用いて算出する。

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

c. 構造強度評価

飛来物が、防護鋼板に直接衝突した場合における、衝突位置の構造強度評価（ひずみ）を実施する。

6.5.2 換気空調系ダクト防護壁 (No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B)) の強度評価

(1) 評価方針

- a. 換気空調系ダクト防護壁 (No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B)) の強度評価は、FEM を用いた衝突解析により衝突評価及び構造強度評価を実施する。
- b. 衝突解析に用いるモデルは、換気空調系ダクト防護壁 (No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B)) の構造及び想定される荷重の伝達を踏まえ、作成する。

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表 6-10 に示す。

表 6-10 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	評価内容
防護鋼板	・ 衝突評価 ・ 構造強度評価
架構	・ 構造強度評価

(3) 強度計算

飛来物が、防護鋼板に直接衝突した場合における、衝突位置の衝突評価（ひずみ）及び構造強度評価（ひずみ）を実施する。

6.6 竜巻防護扉の強度評価

(1) 評価方針

- a. 竜巻防護扉の強度評価は、定式化された評価式を用いた解析法により衝突評価を、FEMを用いた衝突解析及び力学における標準式による荷重の算定により構造強度評価を実施する。
- b. 衝突解析に用いるモデルは、竜巻防護扉の構造及び想定される荷重の伝達を踏まえ、作成する。

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表 6-11 に示す。

表 6-11 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	評価内容
表側鋼板	<ul style="list-style-type: none"> ・ 衝突評価 ・ 構造強度評価
芯材	<ul style="list-style-type: none"> ・ 構造強度評価
カンヌキ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 構造強度評価

(3) 強度計算

a. 記号の説明

強度評価に用いる記号を表 6-12 及び表 6-13 に示す。

表 6-12 BRL 式による貫通限界厚さの算定に用いる記号

記号	単位	定義
d	m	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	m	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

表 6-13 力学における標準式による荷重及び応力の算定に用いる記号

記号	単位	定義
A_1	m^2	表側鋼板の受圧面積
A_2	mm^2	カンヌキの断面積
L	mm	カンヌキと扉枠の距離
n	本	カンヌキの本数
R	N	カンヌキ 1 本あたりに生じる荷重
w_P	Pa	気圧差による等分布荷重 (ΔP_{max})
W_P	N	気圧差による荷重 ($\Delta P_{max} \times A_1$)
Z	mm^3	カンヌキ 1 本あたりの断面係数
σ	MPa	カンヌキ 1 本あたりに生じる曲げ応力度
τ	MPa	カンヌキ 1 本あたりに生じるせん断応力度

b. 衝突評価

飛来物が、防護鋼板に直接衝突する場合の貫通限界厚さを、「タービンミサイル評価について（昭和 52 年 7 月 20 日原子炉安全専門審査会）」で用いられる BRL 式を用いて算出する。

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

c. 構造強度評価

(a) 飛来物が、表側鋼板に直接衝突した場合における、衝突位置の構造強度評価（ひずみ）を実施する。

(b) 気圧差による荷重発生後において、カンヌキの構造強度評価（応力度）を実施する。評価においては、下記の力学における標準式を用いる。

イ. カンヌキ 1 本あたりに生じる荷重

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

ロ. カンヌキ 1 本あたりに生じる曲げ応力度

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

ハ. カンヌキ 1 本あたりに生じるせん断応力度

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

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、VI-1-1-3-3-1「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。

- ・ 建築基準法及び同施行令
- ・ 「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」
(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」(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」(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」(日本機械学会)
- ・ ISE7607-3「軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査 その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討」(昭和51年10月高温構造安全技術研究組合)
- ・ タービンミサイル評価について(昭和52年7月20日原子炉安全専門審査会)
- ・ U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision1, March 2007
- ・ Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8 (NEI 07-13))
- ・ 「建築物荷重指針・同解説」(日本建築学会, 2004改定)
- ・ 「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—」(日本建築学会, 2005改定)
- ・ 「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」(日本建築学会, 2010改定)
- ・ 「小規模吊橋指針・同解説」(日本道路協会 平成20年8月)
- ・ 日本産業規格 (J I S)
- ・ E N 1 2 3 8 5 - 4 : 2002

VI-3-別添 1-3 固縛装置の強度計算の方針

目 次

1. 概要	1
-------------	---

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

可搬型代替注水ポンプ（A-2級）（7号機設備，6,7号機共用）及びタンクローリ（4kL）（7号機設備，6,7号機共用）の固縛装置の強度評価方針に関する説明は、令和2年10月14日付け原規規発第2010147号にて認可された柏崎刈羽原子力発電所第7号機的设计及び工事の計画のV-3-別添1-3「固縛装置の強度計算の方針」による。

VI-3-別添 1-4 防護対策施設の強度計算書

VI-3-別添 1-4-1 竜巻防護ネットの強度計算書

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	2
2.1 位置	2
2.2 構造概要	9
2.3 評価方針	11
2.4 適用規格	13
3. 強度評価方法	14
3.1 記号の定義	14
3.2 評価対象部位	20
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	36
4. 評価条件	53
4.1 荷重条件	53
4.2 竜巻防護ネット仕様	54
5. 強度評価結果	59
5.1 ネットに作用する外力エネルギー評価	59
5.2 破断評価	60
5.3 たわみ評価	69

1. 概要

本資料は、VI-3-別添1-2「防護対策施設の強度計算の方針」のとおり、防護対策施設のうち、竜巻防護ネットが、外部事象防護対象施設に設計飛来物が衝突することを防止するために、主要な構造部材が破断せず、たわみを生じても外部事象防護対象施設に設計飛来物が衝突しないよう、竜巻防護ネットを構成する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

VI-3-別添1-2「防護対策施設の強度計算の方針」を踏まえ、竜巻防護ネットの「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

竜巻防護ネットは、原子炉建屋及びタービン建屋の開口部に設置する。竜巻防護ネットの設置位置を図2-1に、外部事象防護対象施設と竜巻防護ネットの配置イメージ図を図2-2に示す。

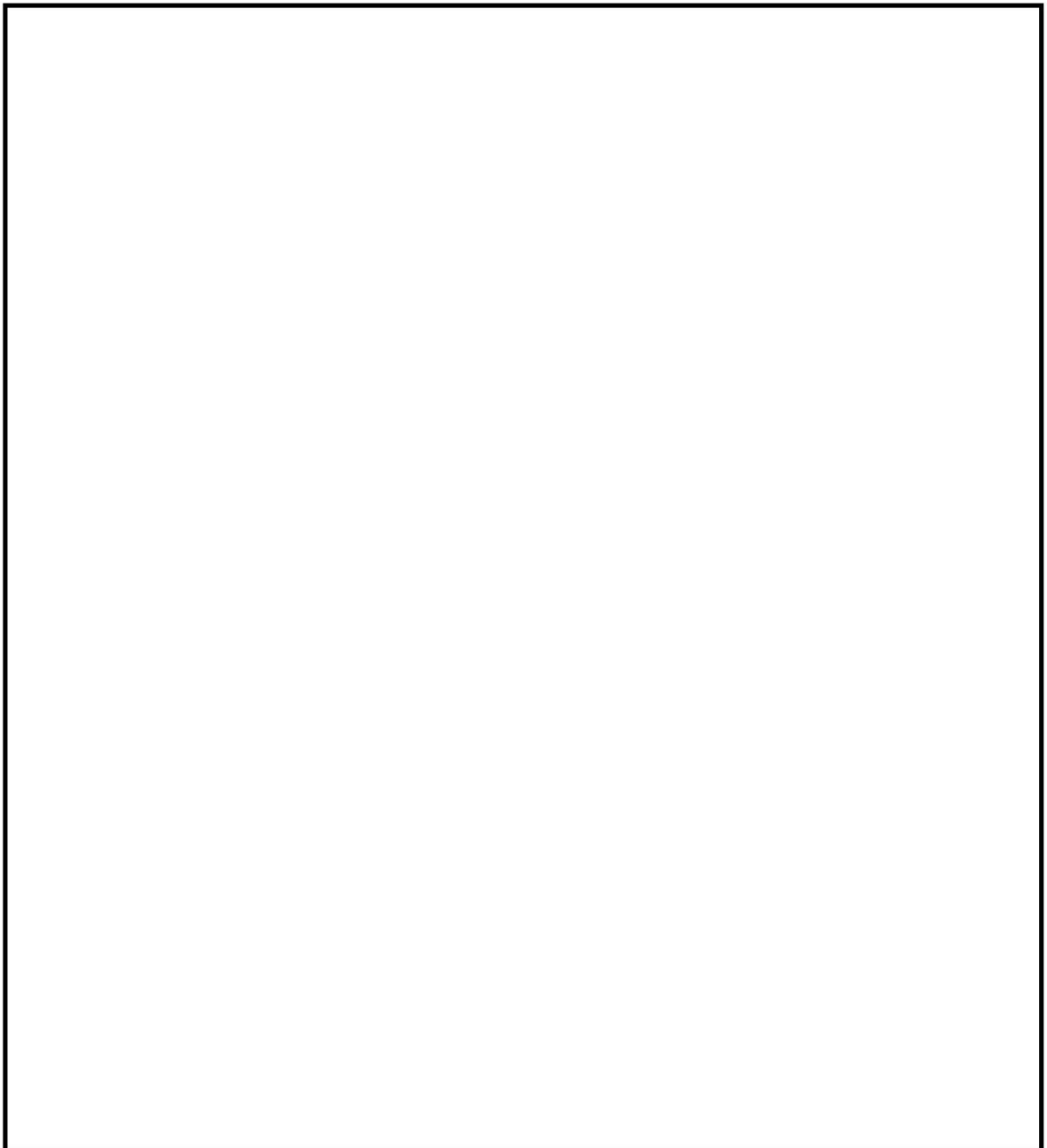


図2-1 (1/6) 竜巻防護ネットの位置図

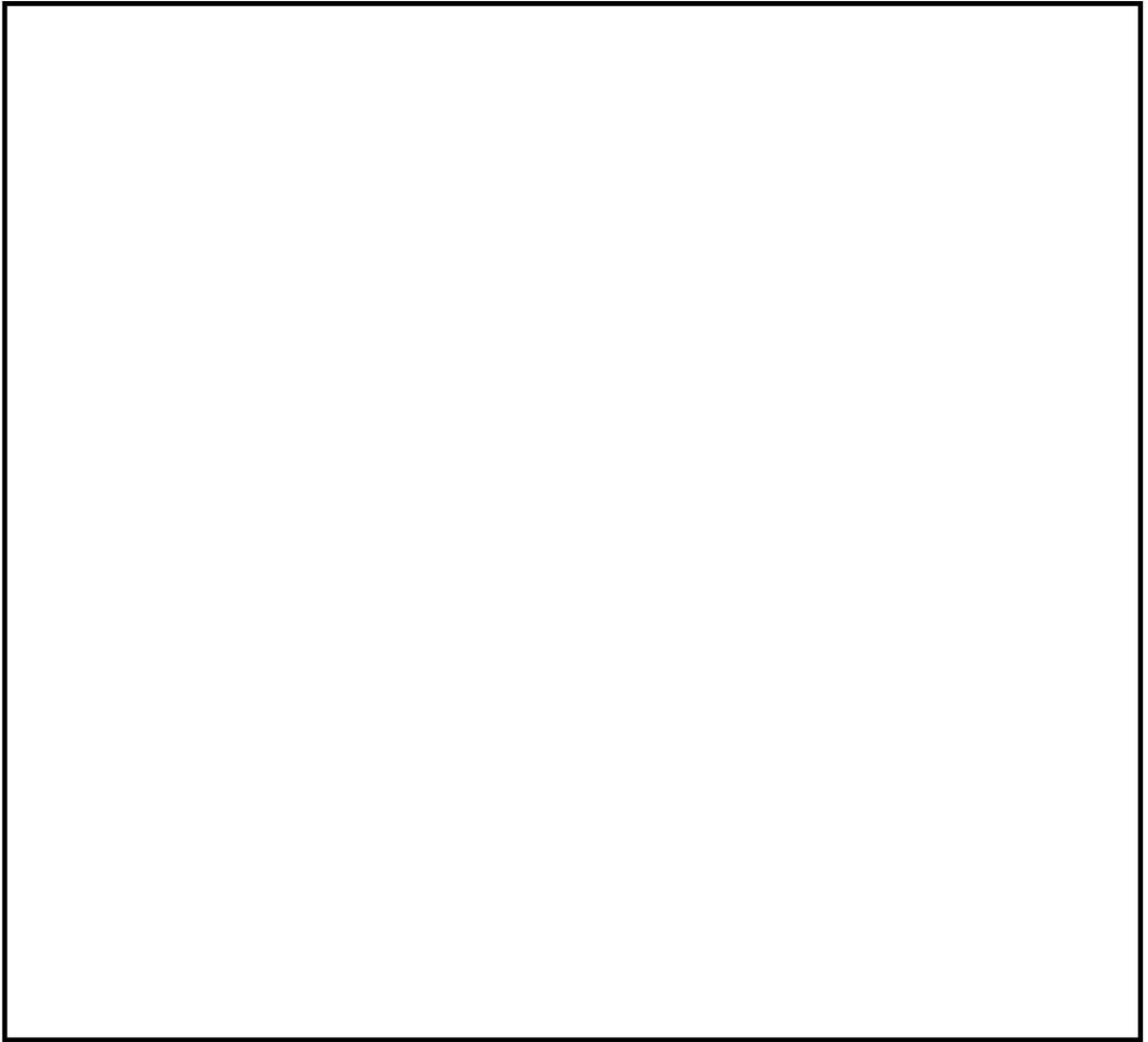


図2-1 (2/6) 竜巻防護ネットの位置図

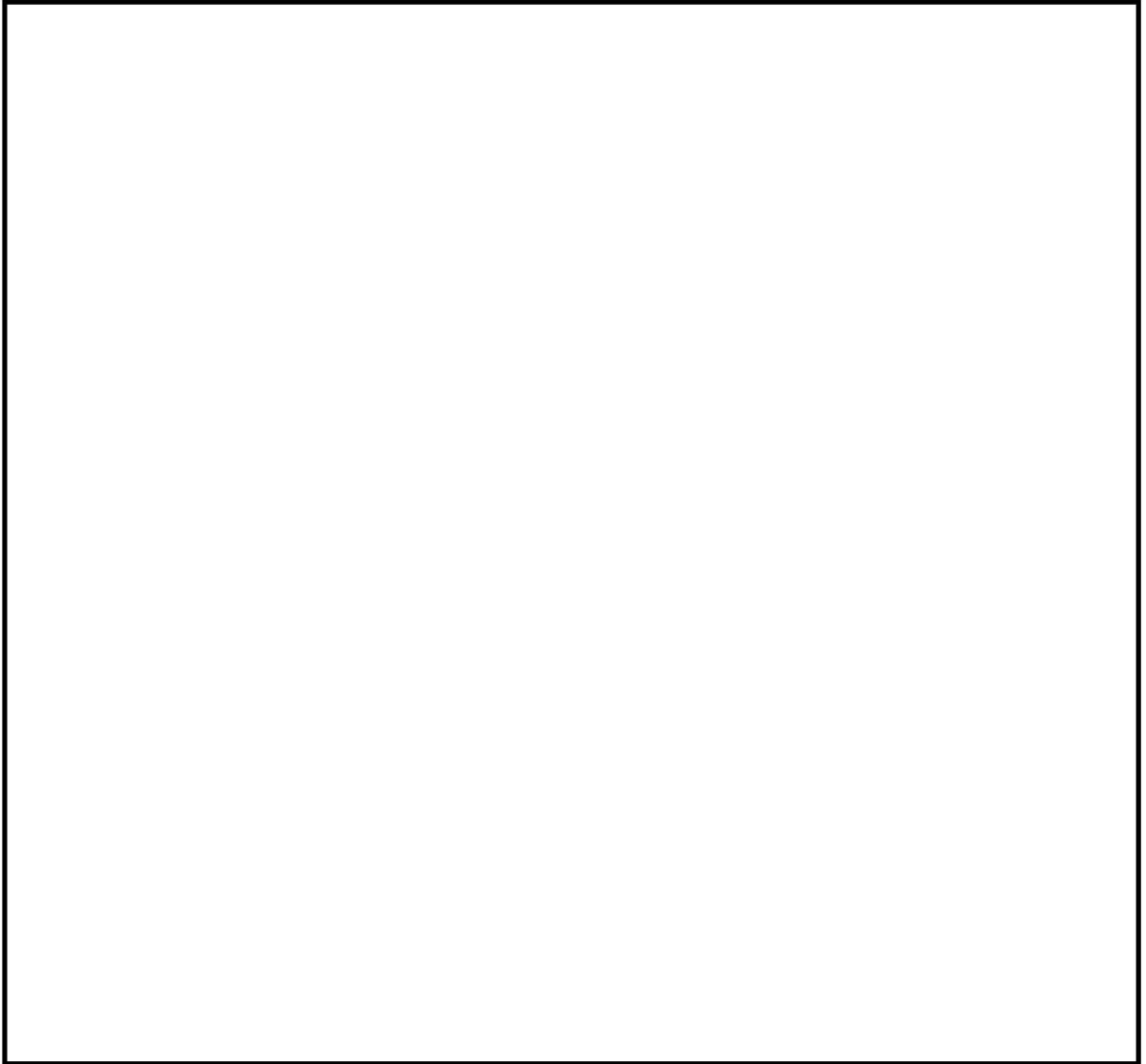


図2-1 (3/6) 竜巻防護ネットの位置図

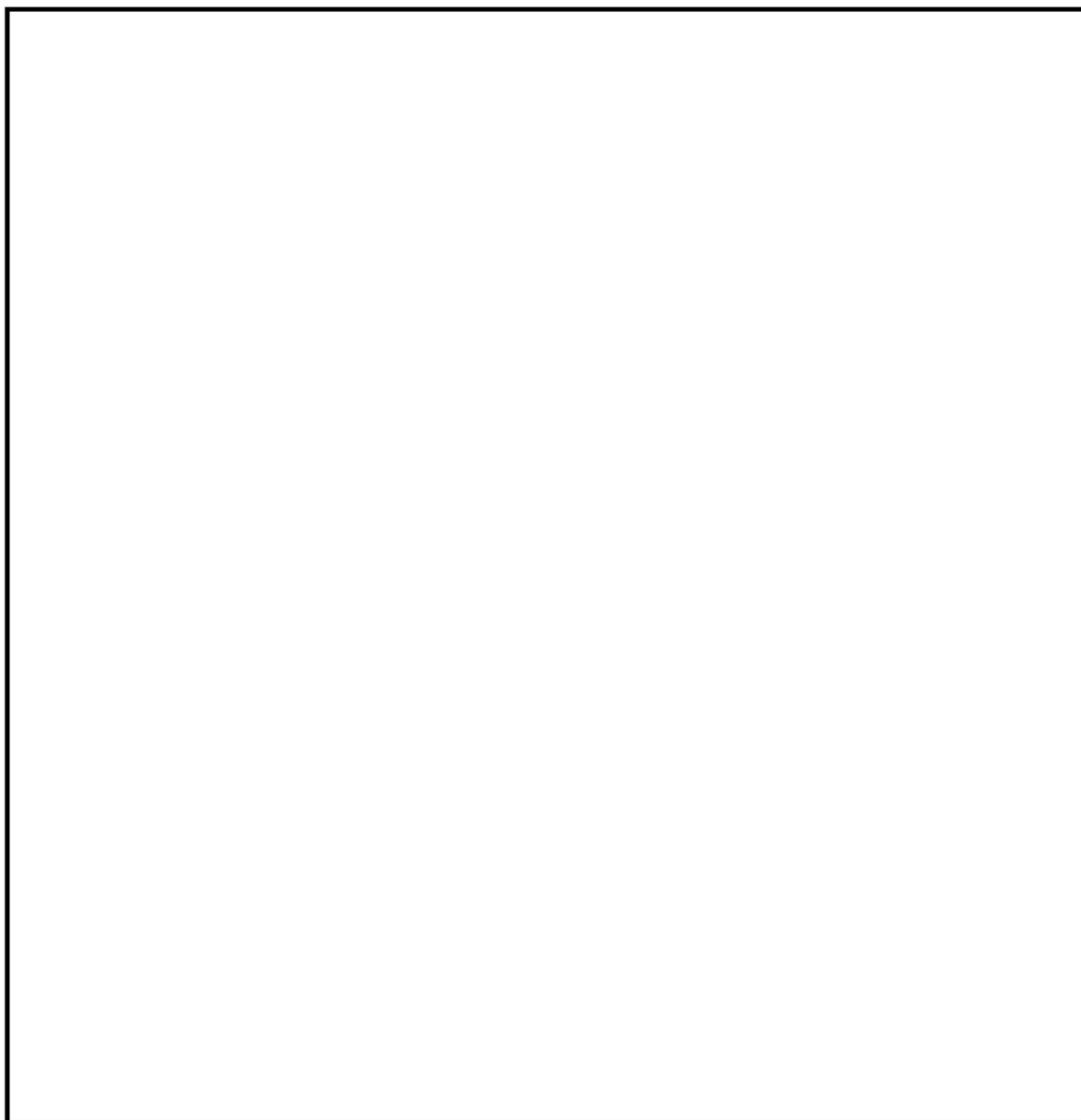


図2-1 (4/6) 竜巻防護ネットの位置図

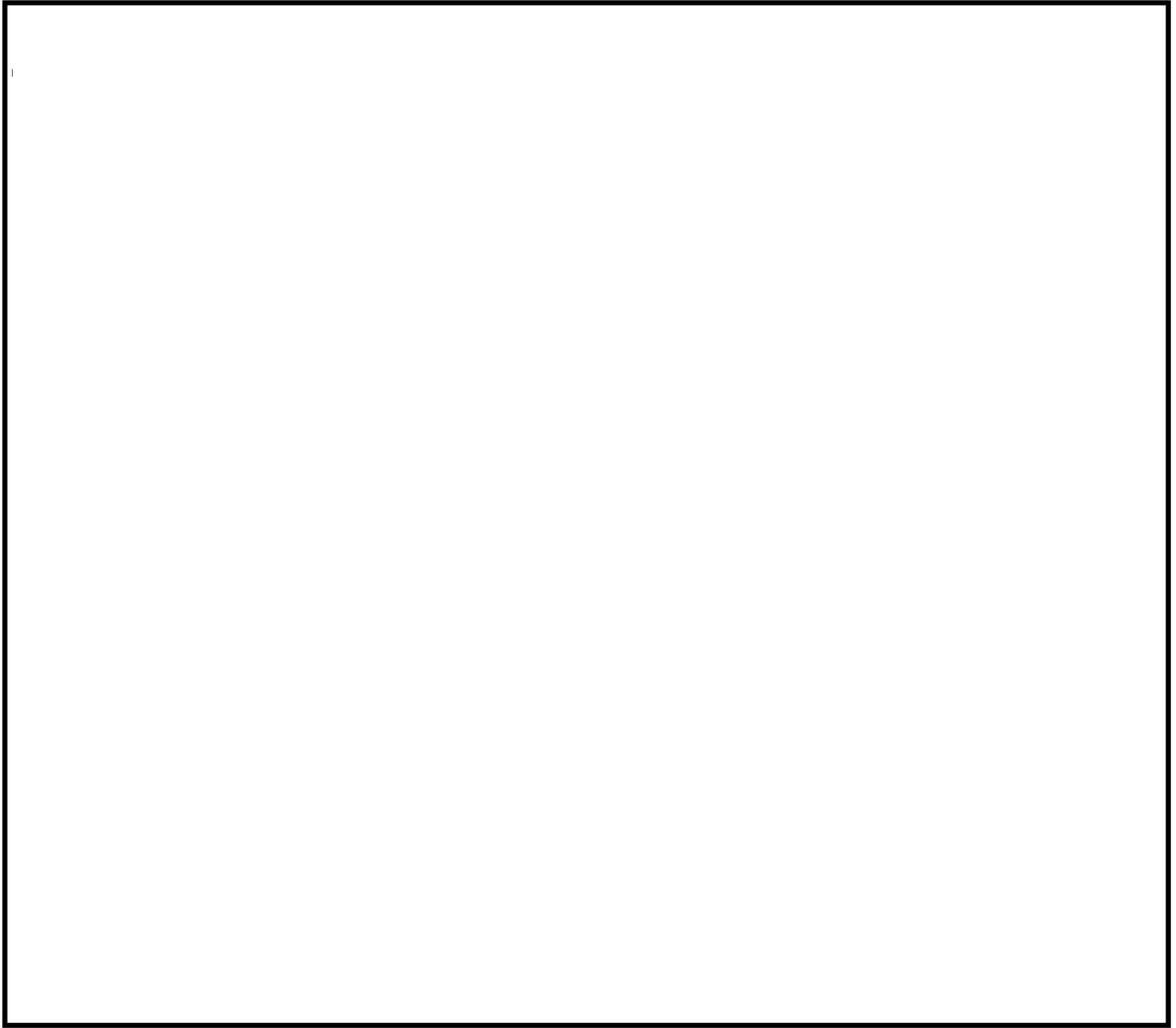


図2-1 (5/6) 竜巻防護ネットの位置図

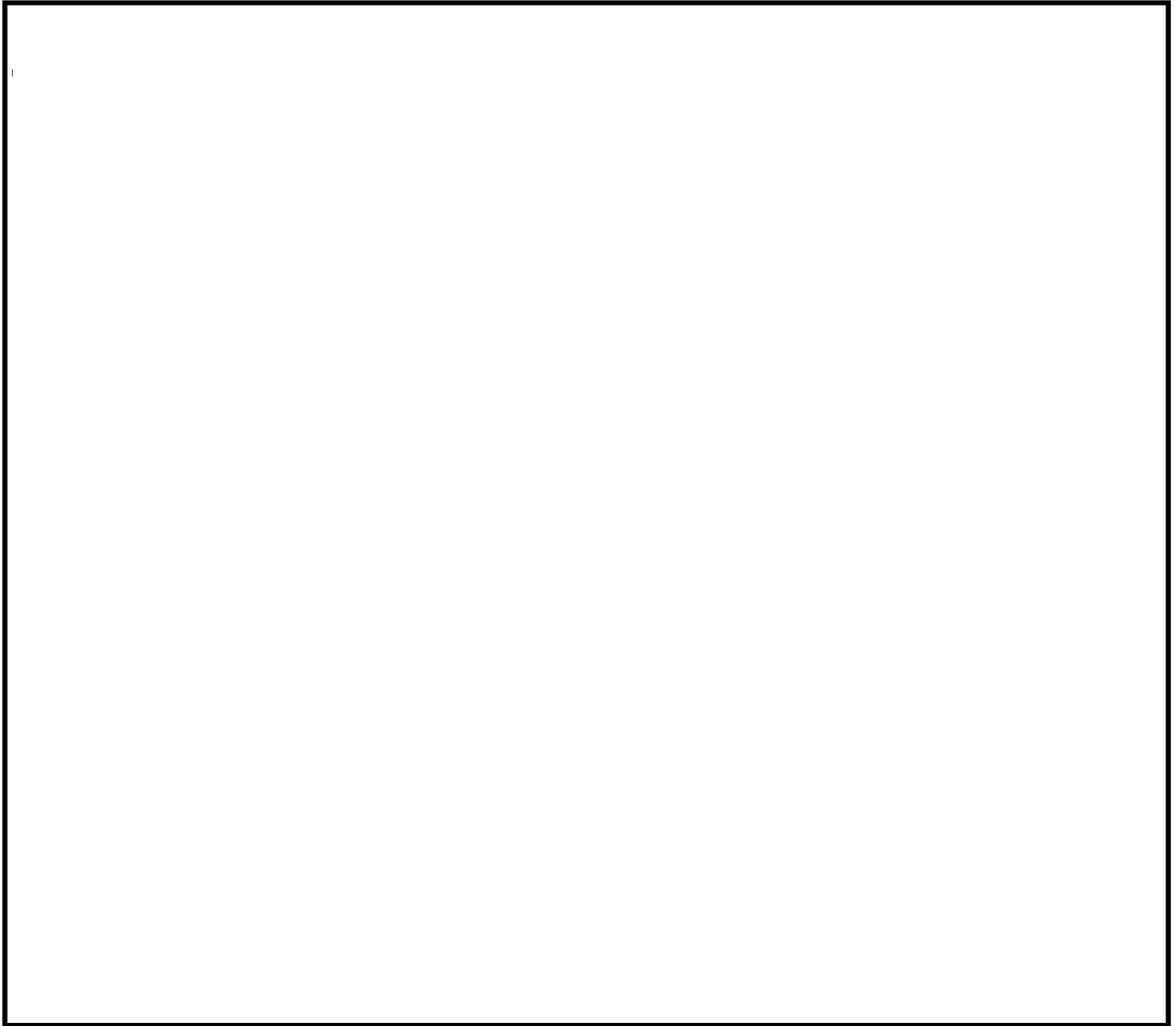


図2-1 (6/6) 竜巻防護ネットの位置図

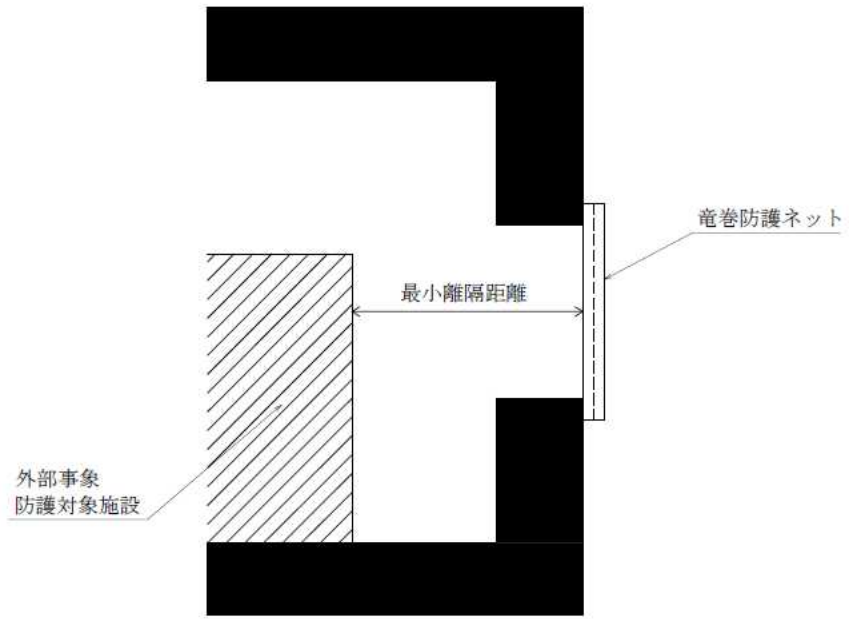


図2-2 竜巻防護ネット配置イメージ図

2.2 構造概要

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

竜巻防護ネットは、ネット、ワイヤロープ、シャックル、接続用の治具及び架構から構成され、原子炉建屋及びタービン建屋の開口部に設置される。

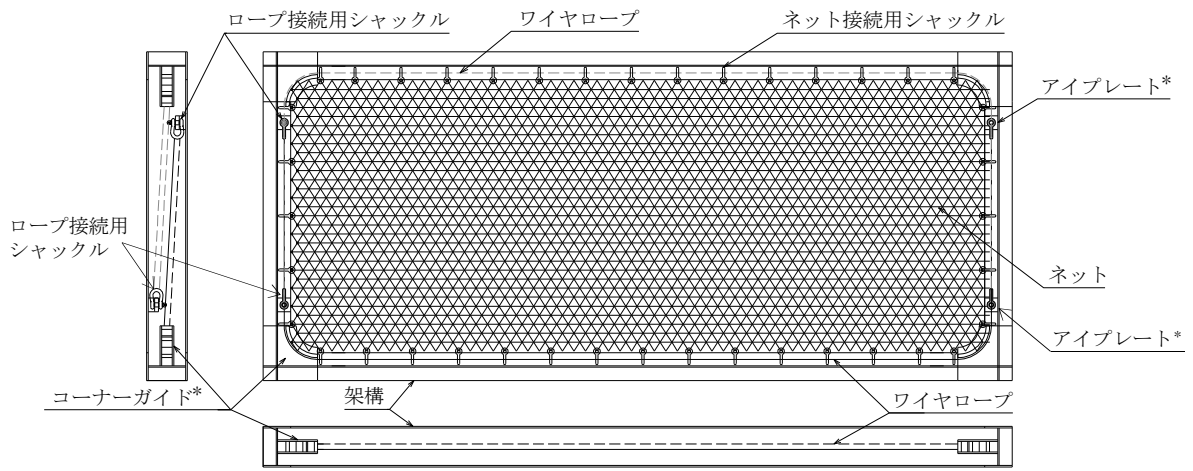
ネットは、ネット端部にシャックルで接続されたワイヤロープにより支持される。ワイヤロープは、架構の四隅に設置した接続用の治具であるコーナーガイドを介して、架構に設置した接続用の治具であるアイプレートにて支持される。ワイヤロープの端部にはシャックルを設置し、架構に設置した接続用の治具であるアイプレートに接続される。

ネットに作用する風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重は、ワイヤロープ、シャックル、接続用の治具及び架構を介して原子炉建屋又はタービン建屋躯体に伝達する。

ネットは、設計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設計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次元的に編み込み、編み込みの方向によって主に荷重を受け持つ展開方向と展開直角方向の異方性を持っており、ネットに対してU字に張った4本のワイヤロープで支持される。

ネット展開方向2辺とネット展開直角方向1辺、又は、ネット展開直角方向2辺とネット展開方向1辺を2本のワイヤロープでU字形に設置し、このワイヤロープと対称に設置したワイヤロープとの合計4本でネット全層数を支持する。展開方向及び展開直角方向ともにワイヤロープで支持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である。

竜巻防護ネットの概要図を図2-3に示す。



注記*：接続用の治具

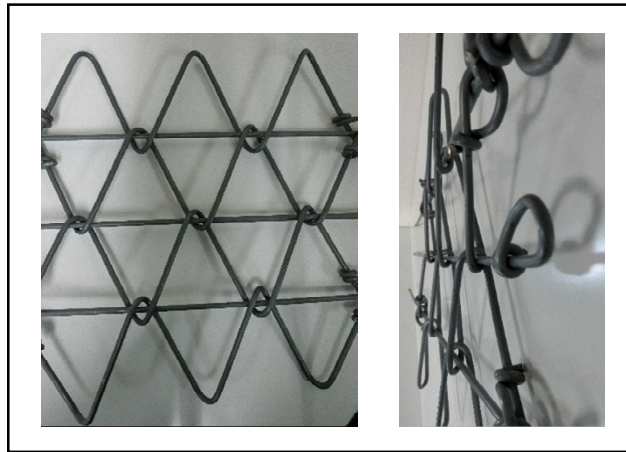


図2-3 竜巻防護ネットの概要図

2.3 評価方針

竜巻防護ネットの強度評価は、VI-3-別添1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」及び「5.1 竜巻防護ネットの許容限界」にて設定している荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、竜巻防護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。

竜巻防護ネットの評価フローを図2-4に示す。

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

具体的には、設計荷重に対して、竜巻防護ネットは、設計飛来物を捕捉し、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、設計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。

ネットは、破断が生じないことの確認として、ネットが設計飛来物のエネルギーを吸収できること及び設計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、竜巻防護ネットが設計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、シャックル及び接続用の治具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。

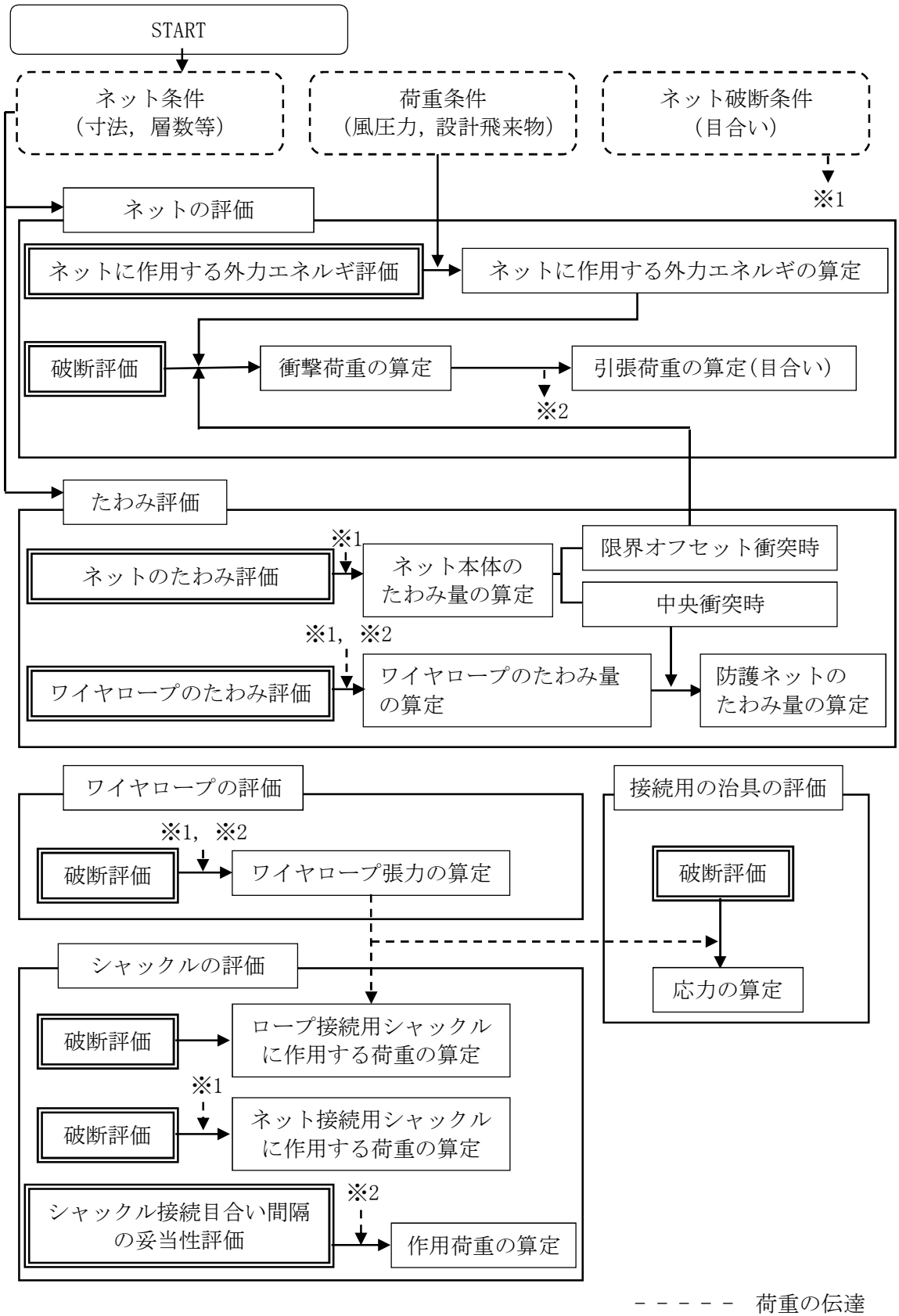


図2-4 竜巻防護ネットの評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・「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」
(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」(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」(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」(日本機械学会)
- ・U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION:REGULATORY GUIDE 1.76 , DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS , Revision1 , March 2007
- ・「建築物荷重指針・同解説」(日本建築学会, 2004改定)
- ・「小規模吊橋指針・同解説」(日本道路協会 平成20年8月)
- ・E N 1 2 3 8 5 - 4 : 2002 (以下「E N」という。)

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 荷重の算定

荷重の算定に用いる記号を表3-1に示す。

表3-1 荷重の算出に用いる記号

記号	単位	定義
A_a	m^2	ネットの面積
C	—	風力係数
d	m	設計飛来物衝突時の設計飛来物の移動距離
E_f	kJ	設計飛来物衝突時にネットに作用する外力エネルギー
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
m	kg	設計飛来物の質量
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

(2) ネットに作用する外力エネルギー評価

ネットに作用する外力エネルギー評価に用いる記号を表3-2に示す。

表3-2 (1/2) ネットに作用する外力エネルギー評価に用いる記号

記号	単位	定義
a_s	mm	ネット1目合いの展開方向の破断変位
a_x	mm	ネット1目合いの展開方向の対角寸法
a_y	mm	ネット1目合いの展開直角方向の対角寸法

表3-2 (2/2) ネットに作用する外力エネルギー評価に用いる記号

記号	単位	定義
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外力エネルギー
E_i	kJ	i 番目の列におけるネットの吸収エネルギー
E_{max}	kJ	ネット設置層数 n を考慮した限界吸収エネルギー
E_t	kJ	ネット設置層数 n を考慮したネットに作用する全外力エネルギー
E_w	kJ	風圧力による荷重によりネットに作用する外力エネルギー
F_i	kN	設計飛来物衝突時の i 番目の列におけるネットへの作用力
F_w	kN	風圧力による荷重によるネットのたわみ量算出用荷重
K	kN/m	ネット1目合いの展開方向の等価剛性
K_x	kN/m	ネット設置層数 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層のネット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_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
n	層	ネット設置層数
P_i	kN	設計飛来物衝突時にネットに発生する i 番目の列におけるネットの張力
v_1	m/s	設計飛来物衝突時の速度
W_w	kN	風圧力による荷重
X_i	m	i 列目のネットの伸び
δ_a	m	風圧力による荷重によるネットのたわみ量
δ_i	m	i 番目の列におけるネットのたわみ量
δ_{max1}	m	ネットの最大たわみ量
θ_i	°	i 番目の列におけるネットたわみ角
θ_{max}	°	ネットの最大たわみ角

(3) 破断評価

破断評価に用いる記号を表3-3に示す。

表3-3 (1/3) 破断評価に用いる記号

記号	単位	定義
A_{cs}	mm^2	cs 部の断面積
A_{ct}	mm^2	ct 部の断面積
A_i	mm^2	i 部の断面積
B_t	kN	シャックル接続目合いの合計耐力
B_x	kN	ネット展開方向の接続目合いの耐力
B_y	kN	ネット展開直角方向の接続目合いの耐力
C_c	—	ワイヤグリップの効率
e_1	mm	図芯軸から P_{2a} 荷重作用点までの距離
e_2	mm	図芯軸から P_{2b} 荷重作用点までの距離
E_f	kJ	設計飛来物衝突時にネットに作用する外力エネルギー
E_t	kJ	ネット設置層数 n を考慮したネットに作用する全外力エネルギー
F_{1x}	kN	ネット1目合いの展開方向の破断荷重
F_{1y}	kN	ネット1目合いの展開直角方向の破断荷重
F_2	kN	ネットに設計飛来物が衝突した際に生じるネット目合い1箇所が受ける衝撃荷重の最大値
F_3	kN	ワイヤロープの破断荷重 (EN規格値)
F_4	kN	ロープ接続用シャックルの破断荷重
F_5	kN	ロープ接続用シャックル (ブローアウトパネル用) の破断荷重
F_6	kN	ネット接続用シャックル (バウ型シャックル) の破断荷重
F_7	kN	ネット接続用シャックル (長シャックル) の破断荷重
F_a	kN	ネットに設計飛来物が衝突した際に生じる衝撃荷重の最大値
f_b^*	MPa	接続用の治具の許容曲げ応力
f_s^*	MPa	接続用の治具の許容せん断応力
f_t^*	MPa	接続用の治具の許容引張応力
L_{bx}	m	架構長辺部のコーナーガイド間の長さ
L_{by}	m	架構短辺部のコーナーガイド間の長さ
L_x	m	ネット展開方向寸法
L_{x2}	m	たわみ評価用のネット展開方向寸法
L_{y2}	m	たわみ評価用のネット展開直角方向寸法
l_{ct}	mm	コーナーガイド取付プレートの長さ

表3-3 (2/3) 破断評価に用いる記号

記号	単位	定義
l_{cs}	mm	コーナーガイドの長さ
l_i	mm	アイプレートの i 部側固定端から荷重点までの距離
M_{i1}	N・mm	i 部の P_{2a} による曲げモーメント
M_{i2}	N・mm	i 部の P_{2b} による曲げモーメント
N_{xs}	個	ネット展開方向の一辺あたりのシャックル接続目合い数
N_{ys}	個	ネット展開直角方向の一辺あたりのシャックル接続目合い数
n	層	ネット設置層数
n'	層	ネット接続用シャックルに取り付けるネット層数
n_1	個	設計飛来物の衝突位置周辺のネット1層あたりの目合い数
P_{1a}	N	コーナーガイドに作用する荷重 (架構平面方向)
P_{1b}	N	コーナーガイドに作用する荷重 (架構奥行方向)
P_{2a}	N	アイプレートに作用する荷重 (架構軸方向)
P_{2ay}	N	アイプレートに作用する荷重 (架構軸直角方向)
P_{2b}	N	アイプレートに作用する荷重 (架構奥行方向)
P_N	kN	ネット接続用シャックル1箇所あたりの作用荷重
P_R	kN	ロープ接続用シャックル1箇所あたりの作用荷重
P_x	N	コーナーガイドに作用する荷重 (架構長辺方向)
P_y	N	コーナーガイドに作用する荷重 (架構短辺方向)
R_{ct}	mm	コーナーガイドの半径
S_x	m	架構長辺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	架構短辺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'	kN	ネットに発生する張力の合計の最大値
T_1'	kN	ワイヤロープ1本に作用する張力
Z_{cs}	mm ³	cs 部の断面係数
Z_{ct}	mm ³	ct 部の断面係数
Z_{ip}	mm ³	i 部の極断面係数
Z_{i1}	mm ³	i 部の面内方向断面係数
Z_{i2}	mm ³	i 部の面外方向断面係数
δ_{max1}	m	ネットの最大たわみ量
δ_{max2}	m	限界オフセット時における設計飛来物の累積移動量
δ_{wx}	m	架構長辺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 (3/3) 破断評価に用いる記号

記号	単位	定義
δ_{wy}	m	架構短辺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
θ_1	°	架構長辺方向に平行なワイヤロープの水平投影たわみ角
θ_2	°	架構短辺方向に平行なワイヤロープの水平投影たわみ角
θ_{max}	°	ネットの最大たわみ角
θ_x	°	ネット展開方向に平行のネットたわみ角
θ_y	°	ネット展開直角方向に平行のネットたわみ角
θ_{wx}	°	架構長辺方向に平行なワイヤロープのたわみ角
θ_{wy}	°	架構短辺方向に平行なワイヤロープのたわみ角
σ_i	MPa	i 部に対する垂直応力とせん断応力の組合せ応力
σ_{ib}	MPa	i 部に対する合計曲げ応力
σ_{ib1}	MPa	i 部に対する曲げ応力 (面内方向)
σ_{ib2}	MPa	i 部に対する曲げ応力 (面外方向)
σ_{it}	MPa	i 部に対する引張応力
τ_{cs1}	MPa	cs 部に対するせん断力によるせん断応力
τ_{cs2}	MPa	cs 部に対する曲げモーメントによるせん断応力
τ_{cs3}	MPa	cs 部に対する引張力によるせん断応力
τ_{cs}	MPa	cs 部に対する合計せん断応力
τ_{ct1}	MPa	ct 部に対する引張力によるせん断応力
τ_{ct2}	MPa	ct 部に対するせん断力によるせん断応力
τ_{ct3}	MPa	ct 部に対する曲げモーメントによるせん断応力
τ_{ct}	MPa	ct 部に対する合計せん断応力
τ_{i1}	MPa	i 部に対する引張力によるせん断応力
τ_{i2}	MPa	i 部に対するねじりモーメントによるせん断応力
τ_i	MPa	i 部に対する合計せん断応力

(4) たわみ評価

たわみ評価に用いる記号を表3-4に示す。

表3-4 たわみ評価に用いる記号

記号	単位	定義
L_b	m	変形前のワイヤロープ長さ
L_{bx}	m	架構長辺部のコーナーガイド間の長さ
L_{by}	m	架構短辺部のコーナーガイド間の長さ
L_{min}	m	竜巻防護ネットと外部事象防護対象施設の最小離隔距離
L_n	m	ネットたわみ量算出用のネット寸法
L_{x2}	m	たわみ評価用のネット展開方向寸法
L_{y2}	m	たわみ評価用のネット展開直角方向寸法
S	m	変形後のワイヤロープ長さ
S_x	m	架構長辺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	架構短辺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
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_{max1}	m	ネットの最大たわみ量
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	架構長辺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	架構短辺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
θ_{max}	°	ネットの最大たわみ角
θ_{wx}	°	架構長辺方向に平行なワイヤロープのたわみ角
θ_{wy}	°	架構短辺方向に平行なワイヤロープのたわみ角
θ_x	°	ネット展開方向に平行のネットたわみ角
θ_y	°	ネット展開直角方向に平行のネットたわみ角

3.2 評価対象部位

(1) ネット

ネットの評価対象部位は、VI-3-別添1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.1 竜巻防護ネットの許容限界」に示す評価対象部位を踏まえ、「2.2 構造概要」に示す構造に基づき、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。評価対象部位を図3-1に示す。

(2) ワイヤロープ

ワイヤロープの評価対象部位は、VI-3-別添1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.1 竜巻防護ネットの許容限界」に示す評価対象部位を踏まえ、「2.2 構造概要」に示す構造に基づき、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、ネットに作用した荷重が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。

(3) シャックル

シャックルの評価対象部位は、VI-3-別添1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.1 竜巻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、「2.2 構造概要」に示す構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

a. ロープ接続用シャックル

設計荷重は、ネットに作用した荷重が、ワイヤロープを介してロープ接続用シャックルに作用するため、設計荷重に対する評価対象部位は、ロープ接続用シャックルとする。

b. ネット接続用シャックル

(a) ネット接続用シャックル

設計荷重は、ネットに作用した荷重がネット接続用シャックルに作用するため、設計荷重に対する評価対象部位は、ネット接続用シャックルとする。

(b) シャックル接続目合い間隔

設計荷重は、ネットに作用した荷重がシャックル接続目合いに作用するため、設計荷重に対する評価対象部位は、シャックル接続目合いとする。

(4) 接続用の治具

接続用の治具の評価対象部位は、VI-3-別添1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.1 竜巻防護ネットの許容限界」に示す評価対象部位を踏まえ、「2.2 構造概要」に示す構造に

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、ワイヤロープ及びシャックルを介して接続用の治具に作用するため、設計荷重に対する評価対象部位は、接続用の治具であるコーナーガイド及びアイプレートとする。

コーナーガイドの評価対象部位を図3-2、アイプレートの評価対象部位を図3-3に示す。

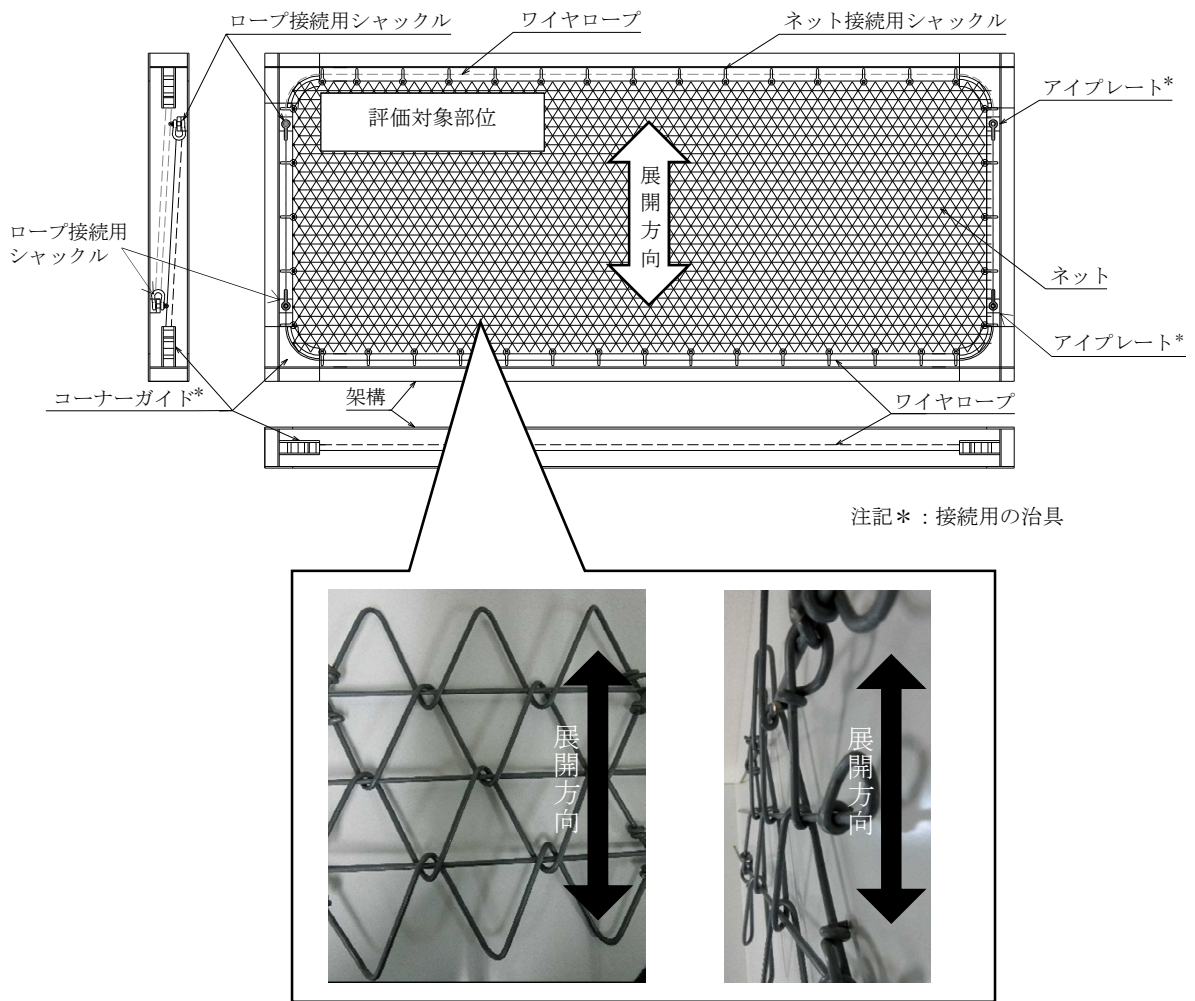


図3-1 ネットの評価対象部位

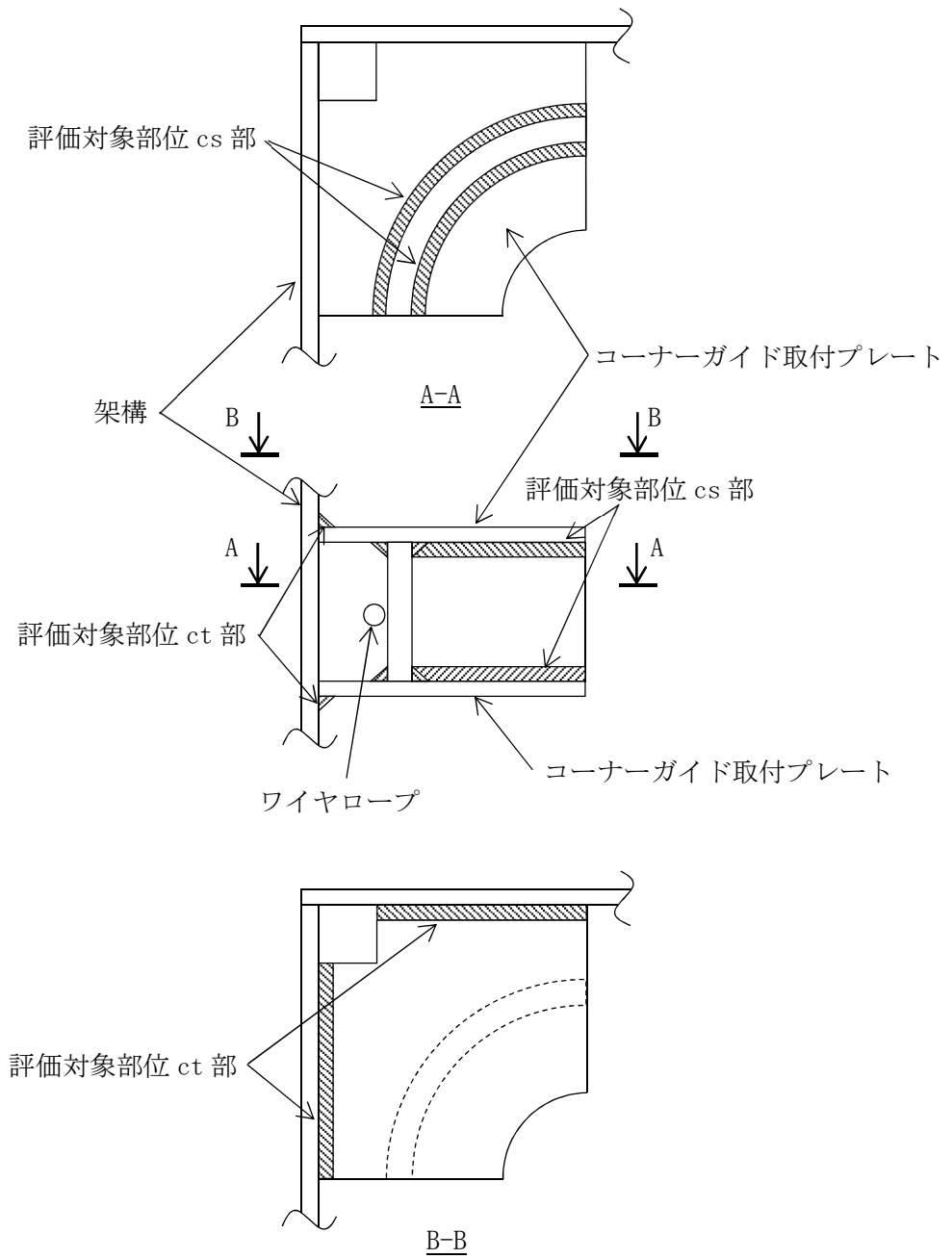


図3-2 コーナーガイドの評価対象部位

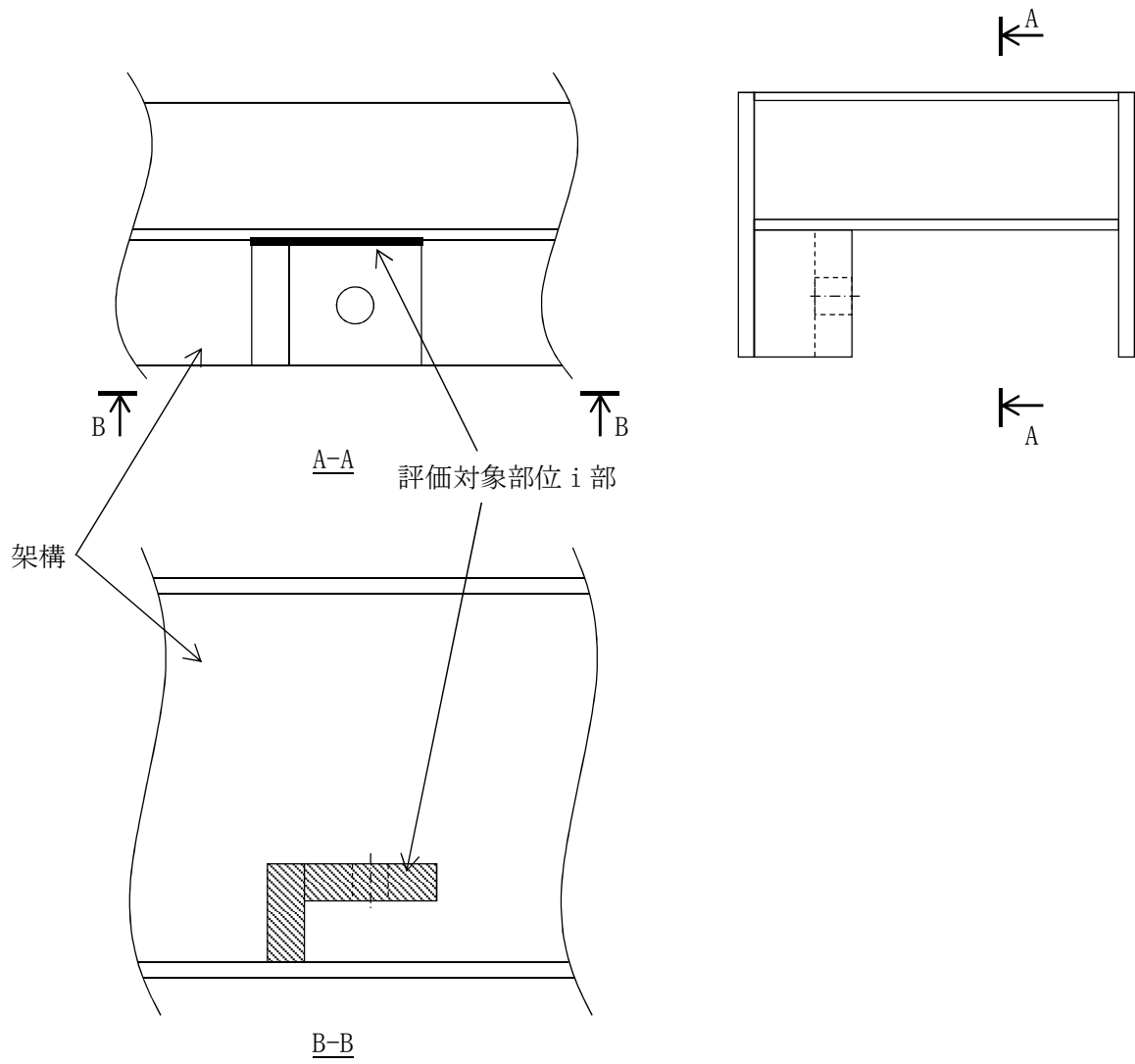


図3-3 アイプレートの評価対象部位

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重は、VI-3-別添1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「竜巻防護ネットの強度計算の方針」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

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3-5に示す。

表3-5 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)
92	14	78	6400

注記*：評価においては、最大風速 $V_D=100$ (m/s)，移動速度 $V_T=15$ (m/s)，最大接線風速 $V_{Rm}=85$ (m/s)，最大気圧低下量 $\Delta P_{max}=7600$ (N/m²)を適用する。

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。

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

b. 設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)

破断評価に用いる設計飛来物による衝撃荷重 (W_M) は以下のとおり算出する。

ネットが受ける設計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。

$$F_a' = Q \cdot t \quad \dots (3.1)$$

したがって、速度 v は式(3.1)の衝撃荷重 F_a' から、以下のとおり算出される。

$$v = -\frac{1}{m} \int_0^t F_a' \, dt$$

$$= -\frac{Q \cdot t^2}{2 \cdot m} + v_1 \quad \dots (3.2)$$

さらに、ネットへの衝突後の設計飛来物の移動距離 d は、式(3.2)の速度 v から以下のとおり算出される。

$$d = \int_0^t v \, dt$$

$$= -\frac{Q \cdot t^3}{6 \cdot m} + v_1 \cdot t \quad \dots (3.3)$$

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たわみ量 δ は、設計飛来物の速度は $v=0$ であるから、式(3.2)及び式(3.3)より、

$$Q \cdot t_1^2 = 2 \cdot m \cdot v_1 \quad \dots (3.4)$$

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

上記2式を連立し、

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

よって、

$$t_1 = \frac{3 \cdot \delta}{2 \cdot v_1} \quad \dots (3.5)$$

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' は式(3.1)及び式(3.4)より、

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

さらに、式(3.5)と連立し、

$$F_a' = \frac{4 \cdot m \cdot v_1^2}{3 \cdot \delta} \quad \dots (3.6)$$

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外力エネルギー 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。

$$E_f = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 \quad \dots (3.7)$$

したがって、式(3.6)及び式(3.7)より、

$$F_a' = \frac{8 \cdot E_f}{3 \cdot \delta} \quad \dots (3.8)$$

c. 常時作用する荷重 (F_d)

常時作用する荷重 (F_d) は、部材の自重とする。竜巻防護ネットの自重により作用する荷重はネットの設置方向を考慮する。水平方向に設置する場合、鉛直下向きに自重が発生するものとして評価するが、鉛直方向に設置する場合、自重と設計飛来物による衝撃荷重の作用方向が異なることから自重は考慮しない。なお、全て鉛直設置であることから、自重は考慮しない。

ワイヤロープ、シャックル及び接続用の治具の評価時においては、ワイヤロープ、シャックル及び接続用の治具の自重については、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。

(2) 荷重の組合せ

a. ネット

ネットに作用する荷重として、風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重を組み合わせる。

b. ワイヤロープ

設計飛来物がネットに衝突する場合にワイヤロープに作用する荷重は、ネットからワイヤロープ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に作用する荷重として設定する。

ワイヤロープに作用する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. シャックル

(a) ロープ接続用シャックル

設計飛来物がネットに衝突する場合にロープ接続用シャックルに作用する荷重は、ネットからワイヤロープに伝達し、その荷重がロープ接続用シャックルに伝達することから、ワイヤロープに作用する荷重を評価対象部位であるロープ接続用シャックルに作用する荷重として設定する。

ロープ接続用シャックルに作用する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。

(b) ネット接続用シャックル

設計飛来物がネットに衝突する場合にネット接続用シャックルに作用する荷重は、ネットからネット接続用シャックル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ネット接続用シャックルに作用する荷重として設定する。

ネット接続用シャックルに作用する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) シャックル接続目合い間隔

設計飛来物がネットに衝突する場合にシャックル接続目合いに作用する荷重は、ネットからシャックル接続目合い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シャックル接続目合いに作用する荷重として設定する。

d. 接続用の治具

設計飛来物がネットに衝突する場合に接続用の治具に作用する荷重は、ネットからワイヤロープ及びシャックルを介してネット接続用の治具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コーナーガイド及びアイプレートに作用する荷重として設定する。

接続用の治具に作用する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。

ネットに作用する外力エネルギー評価、破断評価及びたわみ評価における、ネット、ワイヤロープ、シャックル及び接続用の治具に作用する荷重及びその組合せを表3-6に示す。

表3-6 ネットに作用する外力エネルギー評価、破断評価及びたわみ評価
における荷重及びその組合せ

評価内容	風圧力による荷重 (W_w)	設計飛来物による 衝撃荷重 (W_M)	荷重の組合せ
外力エネルギー評価	○	○	$W_w + W_M$
破断評価	○	○	$W_w + W_M$
たわみ評価	○	○	$W_w + W_M$

3.4 許容限界

竜巻防護ネットの許容限界は、VI-3-別添1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.1 竜巻防護ネットの許容限界」にて設定している許容限界を踏まえて、「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位の機能損傷モードを考慮して設定する。

ネットに作用する外力エネルギー評価、破断評価及びたわみ評価の許容限界を以下に示す。

(1) ネットに作用する外力エネルギー評価

ネットに作用する外力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。ネットの引張試験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。

限界吸収エネルギーは、複数層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、電中研報告書 N13014 及び電中研報告書 001 を参照し、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を評価した結果、ネット最大たわみ時のネットの全長は設計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、設計飛来物のネットへの衝突位置によらずネットから設計飛来物への反力も同等となり、オフセット位置への設計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、ネットに作用する外力エネルギー評価では中央衝突の場合にて評価を行う。

ネットの吸収エネルギーは、電中研報告書 N14009 を参照し、設計飛来物が衝突した際、ネットの変形は同心円状に広がることから、短辺側のネット寸法のうち小さい方の寸法を一辺とする正方形のネットとして、ネットの吸収エネルギーが小さくなるように評価する。

また、ネットの設置層数 n は、実証試験結果を参考に、ネット展開直角方向目合い数 N_y に応じて、展開直角方向目合い数 N_y が 24 個未満の場合は 4 層、24 個以上、29 個未満の場合は 3 層、29 個以上の場合は 2 層として設定する。

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、展開方向寸法及びたわみ量から、以下のとおり算出される。限界吸収エネルギー算出におけるネットのモデル図を図 3-4 に示す。

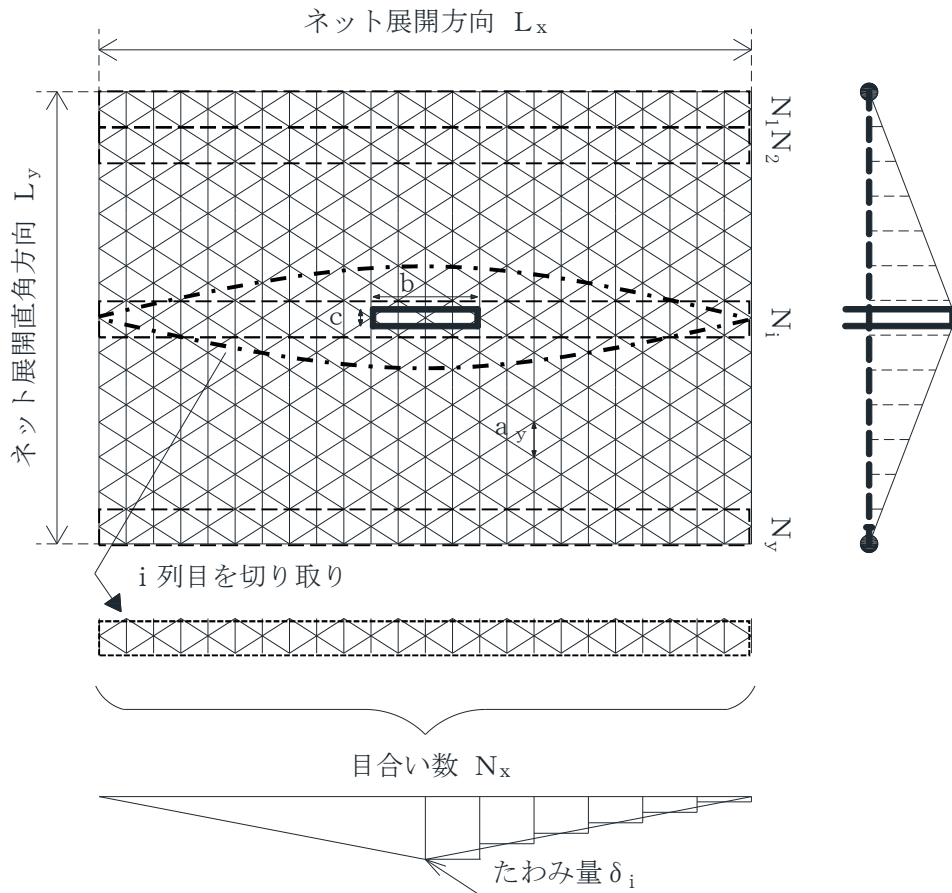


図3-4 限界吸収エネルギー算出におけるネットのモデル図

図3-4に示すとおりネットの展開方向に1目合いごとに で囲った形に帯状に分割し、 N_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。設計飛来物の端部寸法 ($b \times c$) 及びネット目合いの展開直角方向の対角寸法 a_y 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。

$$\text{ネット展開直角方向目合い列数} = \frac{c}{a_y}$$

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。

ネットに作用する外力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。

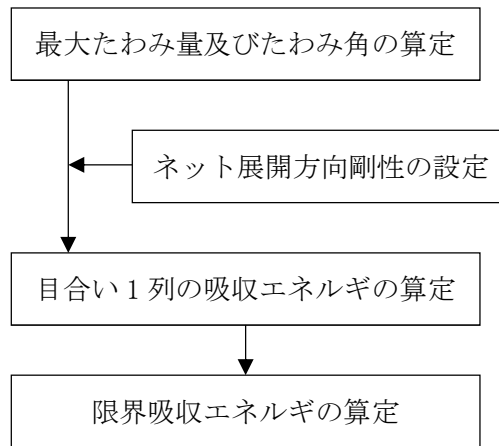
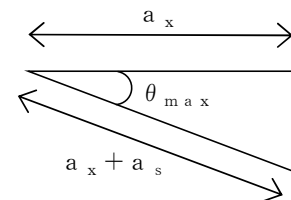


図3-5 ネットに作用する外力エネルギー評価の許容限界の算定フロー

ネット引張試験から、1目合いの展開方向の破断変位を設定する。ネット1目合いの展開方向の破断変位から算出する最大たわみ角から、設計飛来物が衝突した際の列の最大たわみ量 δ_{max1} は次式により算定される。

$$\delta_{max1} = \frac{L_x}{2} \cdot \tan(\theta_{max})$$

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



ネットを構成するネット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目合いの展開方向の対角寸法 a_x から求める。ネット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目合いの展開直角方向の対角寸法 a_y 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列あたりばね定数 K を持つばねを 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列あたりの剛性 K_x' は、

$$L_x = L_y$$

$$N_x = \frac{1000 \cdot L_x}{a_x}, \quad N_y = \frac{1000 \cdot L_y}{a_y}$$

$$\text{ネット展開方向剛性 } K_x' = \frac{K}{N_x}$$

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、ネット設置層数 n 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。

$$K_x = K_x' \cdot n$$

設計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_{max1} 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3-6に示す。

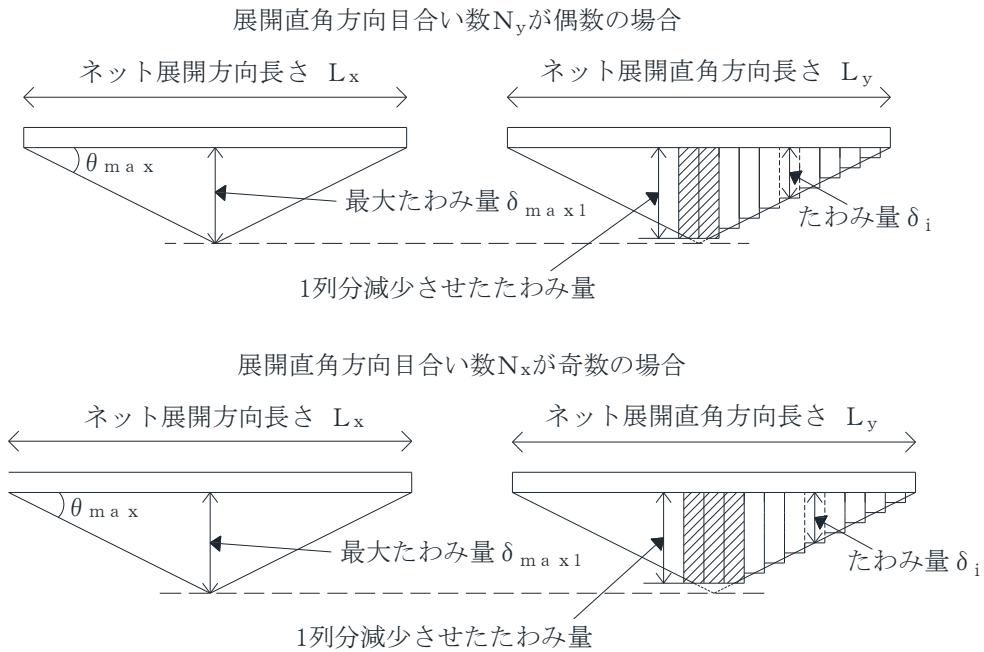


図3-6 ネットの最大たわみ量と最大たわみ角

ネットに設計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。

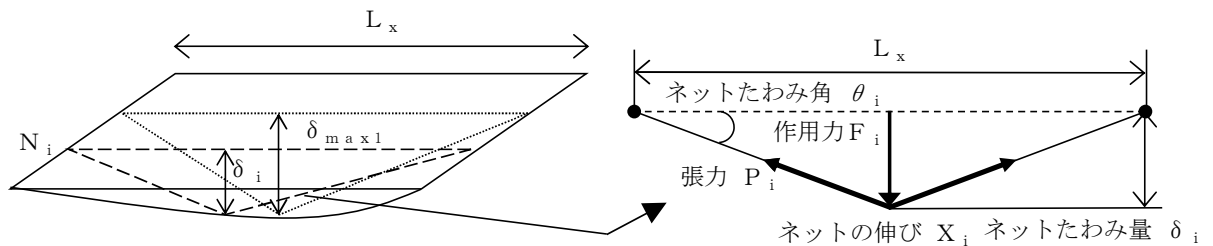


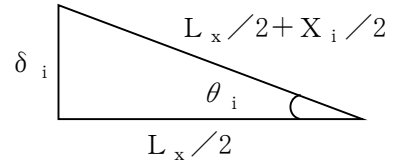
図3-7 ネットに作用する力のつり合い

i 番目の列におけるネットの張力 P_i は、設計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 $2 \cdot K_x$ 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、 i 番目の列におけるネットの作用力 F_i は変位置とたわみ量の関係から、

$$F_i = 2 \cdot P_i \cdot \sin(\theta_i) \\ = 2 \cdot K_x \cdot X_i \cdot \sin(\theta_i) \\ = 2 \cdot K_x \cdot L_x \cdot (\tan(\theta_i) - \sin(\theta_i)) \\ = 4 \cdot K_x \cdot \delta_i \cdot \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2}} \right) \quad \dots (3.9)$$



ネットに設計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 は次式で示される。

$$E_i = \int_0^{\delta_i} F_i \, d\delta_i \\ = \int_0^{\delta_i} 4 \cdot K_x \cdot \delta_i \cdot \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2}} \right) \, d\delta_i \\ = 2 \cdot K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x \left(\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \quad \dots (3.10)$$

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

$$E_{max} = \sum_{i=1}^{N_y} E_i \\ = \sum_{i=1}^{N_y} \left(2 \cdot K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x \left(\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \right) \quad \dots (3.11)$$

(2) 破断評価

a. ネット

破断評価においては、計算により算出するネットに作用する荷重がネットの素材の持つ破断強度以下であることにより、ネットに破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を有することを確認するため、ネットは、設計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、設計飛来物を捕捉することから、ネット1目合いの展開方向の破断荷重を許容限界とする。具体的には、ネット1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 N14009を参照し、ネットの引張試験に基づくネット1目合いの展開方向の破断荷重を許容限界とする。

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_{1x}

b. ワイヤロープ

ワイヤロープは、ネットと一体となって設計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EN規格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、許容限界を設定する。

ワイヤロープの許容限界を表3-8に示す。

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. シャックル

シャックルに関する許容限界は、シャックルの破断評価及びシャックル接続目合い間隔の妥当性評価に対して設定する。

(a) ロープ接続用シャックル及びネット接続用シャックル

ロープ接続用シャックル及びネット接続用シャックルの破断評価は、シャックルが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、設計飛来物を捕捉可能であることから、破断荷重を許容限界とする。

シャックルの許容限界を表3-9に示す。

表3-9 シャックルの許容限界

評価対象部位	許容限界
	シャックルの破断荷重
ロープ接続用シャックル	F ₄
ロープ接続用シャックル (ブローアウトパネル用)	F ₅
ネット接続用シャックル (バウ型シャックル)	F ₆
ネット接続用シャックル (長シャックル)	F ₇

(b) シャックル接続目合い間隔の妥当性評価

シャックル接続目合い間隔の妥当性評価においては、ネット接続用シャックルが接続するネット目合いの合計耐力 B_t を許容限界とする。なお、1目合いの耐力は、ネットの引張試験に基づくネット1目合いの破断荷重とする。

接続目合いの合計耐力 B_t は、ネット展開方向の接続目合いの耐力 B_x とネット展開直角方向の接続目合いの耐力 B_y を足し合わせることで求めらる。

$$B_x = F_{1y} \cdot N_{xs} \cdot n' \cdot 2$$

$$B_y = F_{1x} \cdot N_{ys} \cdot n' \cdot 2$$

$$B_t = B_x + B_y$$

ここで、ネット接続用シャックルに取り付けるネット層数 n' は、最大2層のため $n'=2$ とする。

なお、シャックル接続目合い間隔の妥当性評価用のネット寸法は、シャックル接続数が少なくなるよう、ネットタイプ I、II の展開及び展開直角方向寸法の最小値を用いて設定し、接続目合いの合計耐力が小さくなるように評価する。

また、シャックル接続目合い間隔は、電中研報告書 N14009 を参考に、ネット展開方向が3目合いに1つ、ネット展開直角方向が4目合いに1つ接続することを基本とする。

シャックル接続目合い間隔の許容限界を表3-10に示す。

表3-10 シャックル接続目合い間隔の許容限界

評価対象部位	許容限界
	シャックル接続目合いの合計耐力
シャックル接続目合い間隔	B_t

d. 接続用の治具

接続用の治具であるコーナーガイド及びアイプレートの破断評価においては、計算により算出する応力により破断が生じないように十分な余裕を持った強度を許容限界とする。具体的には、接続用の治具の許容限界は、J E A G 4 6 0 1 を準用し、「その他の支持構造物」の許容限界を適用し、許容応力状態IV_ASから算出した許容応力を許容限界とする。

接続用の治具の許容限界を表3-11に示す。

表3-11 接続用の治具の許容限界

評価対象部位	材質	温度 (°C)	考慮すべき 損傷モード*1	許容応力 (MPa) *2
コーナーガイド溶接部	SS400	40*3	せん断	1.5f _s *
	SM490A			
アイプレート溶接部	SS400		引張	1.5f _t *
	SM490A		せん断 曲げ	1.5f _s * 1.5f _b *

注記*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。

*2 : J S M E SSB-3120に規定される値。

*3 : 各評価対象部位の最高使用温度を示す。

(3) たわみ評価

竜巻防護ネットは、風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対し、計算により算出する竜巻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3-12に竜巻防護ネットのたわみ評価の許容限界を示す。

表3-12 竜巻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
竜巻防護ネットの 最大たわみ量	竜巻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})

3.5 評価方法

竜巻防護ネットのネットに作用する外力エネルギー評価，破断評価及びたわみ評価の方法を以下に示す。

(1) ネットに作用する外力エネルギー評価

ネットに作用する外力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定のモデル化を行い，風圧力による荷重及び設計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，複数層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(3.11)より， E_{max} は以下のとおりである。

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

風圧力による荷重 W_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， W_w が全てネット展開方向寸法 L_x の中央に作用するとして，ネットにかかる作用力の式を用いて1列あたりの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 並びに風圧力による荷重から算出する F_w を式(3.9)の F_i に代入し， F_w と W_w が近似し，かつ F_w が W_w 以上となるよう，風圧力による荷重によるネットのたわみ量 δ_a を導出する。

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

ただし， $F_w \geq W_w$

上式にて導出された δ_a を式(3.11)において，展開方向の1列あたりの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列数倍する以下の式に代入することにより，風圧力による荷重によりネットに作用する外力エネルギー E_w が算出される。

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

設計飛来物の衝突によりネットに作用する外力エネルギー 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。

$$E_f = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2$$

設計飛来物の飛来速度は、水平の飛来速度にて算出する。また、設計飛来物がネット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、その飛来速度は水平最大飛来速度を用いる。

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

$$E_t = E_f + E_w$$

(2) 破断評価

破断評価においては、電中研評価式を参照して、ネットに作用する風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重が竜巻防護ネットを構成する部材の破断荷重未満であることを確認する。

a. ネット

ネットに設計飛来物が衝突した後、ネットのたわみが増加し、設計飛来物の運動エネルギーを吸収する。ネットに発生する風圧力による荷重及び設計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、最大たわみ発生時に最大値を示すため、破断評価では最大たわみ発生時の衝撃荷重を用いる。

最大たわみ発生時において、設計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。

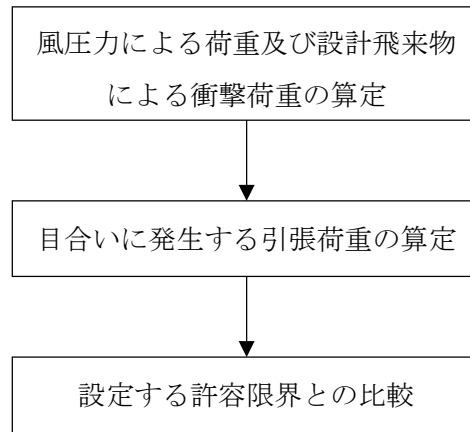


図3-8 ネットの破断評価フロー

(a) 評価モデル

ネットに設計飛来物が衝突した際の衝撃により生じる引張荷重について評価を実施する。ネット構造及び設計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層あたり n_1 となる。評価モデルを図3-9に示す。

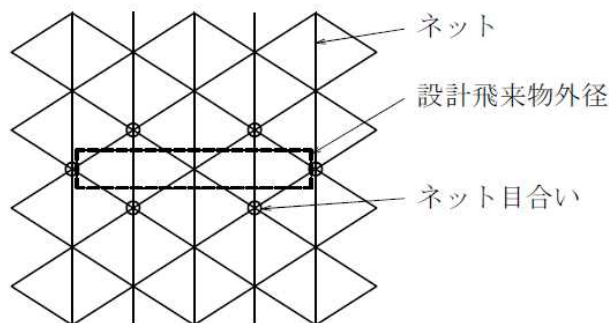


図3-9 ネットの破断評価モデル図

(b) 評価方法

ネットに設計飛来物が衝突した際に生じる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、ネットに設計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(3.8)のたわみ量と設計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、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、ネットの最大たわみ量は、限界オフセット時の設計飛来物の累積移動量

δ_{max2} を用いて、式(3.8)より

$$F_a = \frac{8 \cdot E_t}{3 \cdot \delta_{max2}}$$

となる。

設計飛来物が竜巻防護ネットに衝突した場合、設計飛来物の衝突位置周辺のネットの1層あたりの目合い数を n_1 とすると、衝撃荷重を受け止めるネットの目合い数は、ネット設置層数 n を考慮し、 $n_1 \times n$ 箇所となり、目合い1箇所あたりの衝撃荷重の最大値は、

$$F_2 = F_a \cdot \frac{1}{n_1 \cdot n}$$

となる。

b. ワイヤロープ

風圧力による荷重及び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」において算出した設計飛来物が衝突する場合のネットに作用する衝撃荷重の最大値 F_a を考慮する。

竜巻防護ネットは、4本のワイヤロープをU字に設置し、さらにワイヤロープが接続用の治具のコーナーガイドにより拘束されない構造としている。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。

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ネットに発生する張力の合計である張力 T' は、図3-10に示す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。

ここで、動的応答倍率による係数1.52を考慮する。

$$T' = \frac{F_a}{2 \cdot \sin \theta_{max}} \cdot 1.52$$

ここで、 θ_{max} は以下の式で求められる。

$$\theta_{max} = \tan^{-1} \frac{2 \cdot \delta_{max1}}{L_x}$$

図3-10より、ワイヤロープは、ネット展開方向2辺とネット展開直角方向1辺、又は、ネット展開直角方向2辺とネット展開方向1辺を1本のワイヤロープでU字形に計2本設置し、このワイヤロープと対称に設置したワイヤロープとの合計4本でネットを支持することにより、展開方向及び展開直角方向ともにワイヤロープで支持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 $T' / 4$ と設定する。

ワイヤロープ1本に発生する張力の最大値 T_1' は、

$$T_1' = \frac{T'}{4} \quad \dots (3.12)$$

と算出される。

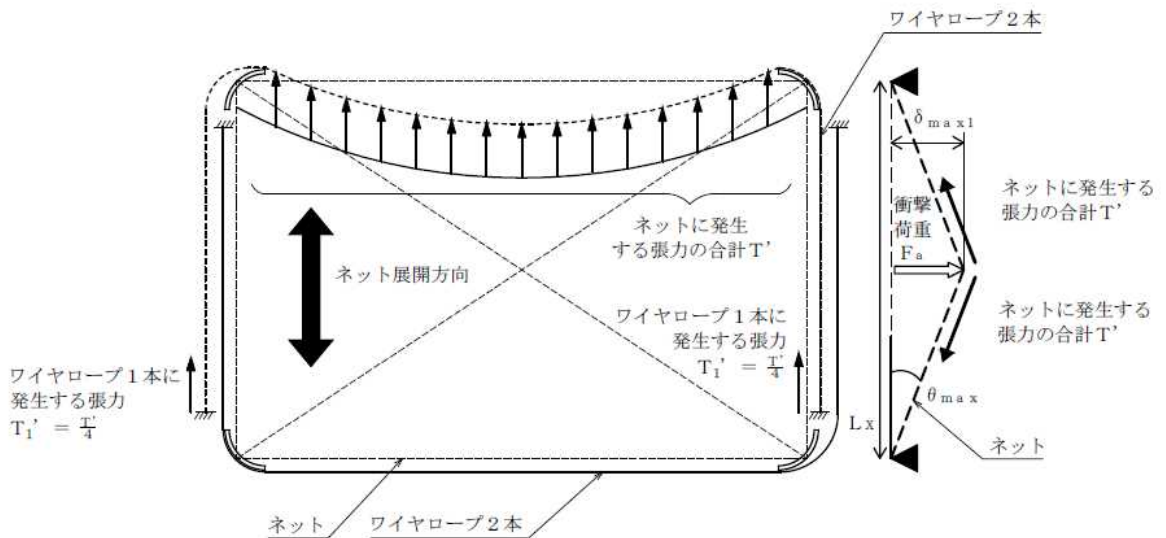


図3-10 ネット及びワイヤロープに発生する力のつり合い
(ネット平面図及び断面図)

c. シャックル

(a) ロープ接続用シャックル

ロープ接続用シャックルには、2本のワイヤロープが接続される。ロープ接続用シャックルは、ワイヤロープの引張荷重が作用する場合においても破断しない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2本分を乗じた作用荷重 P_R により評価を実施する。

$$P_R = T_1' \cdot 2$$

(b) ネット接続用シャックル

ネット接続用シャックルは、ネットを最大2層取り付ける場合においても破断しないことを確認することから、引張荷重の最大値としてネット1目合いの展開方向の破断荷重 F_{1x} に2層分を乗じた作用荷重 P_N により評価を実施する。

$$P_N = F_{1x} \cdot 2$$

(c) シャックル接続目合い間隔の妥当性評価

シャックル接続目合い間隔の妥当性評価においては、最大衝撃荷重 F_a が、ネット接

続用シャックルが接続するネット目合いの合計耐力 B_t を下回ることを確認する。

d. 接続用の治具

(a) コーナーガイド

コーナーガイドにかかる応力は、2本のワイヤロープを考慮し評価する。

ここで、ワイヤロープはたわみによりコーナーガイドに対して、 θ_1 及び θ_2 の水平投影たわみ角を有することから、コーナーガイドへ作用する荷重はこのたわみ角を考慮する。

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、ワイヤロープのたわみ図を図3-12に示す。

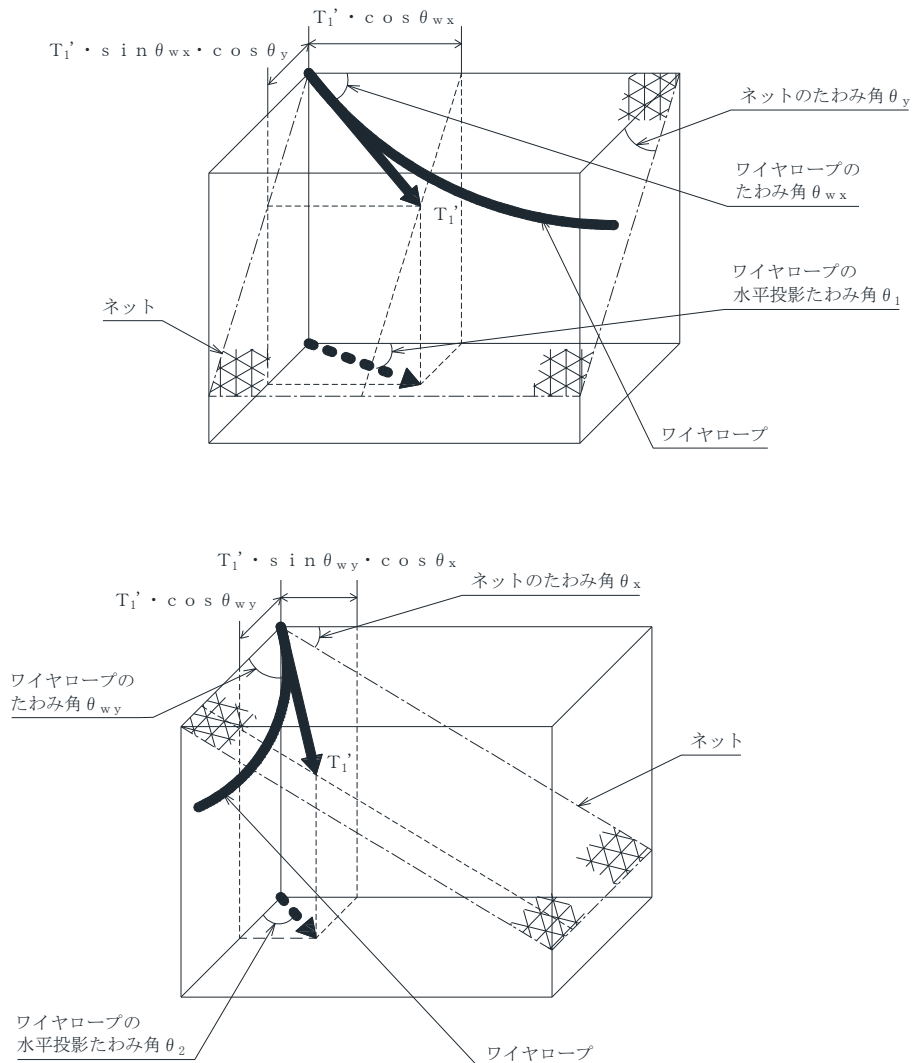


図3-11 ネットのたわみとワイヤロープのたわみ角の関係

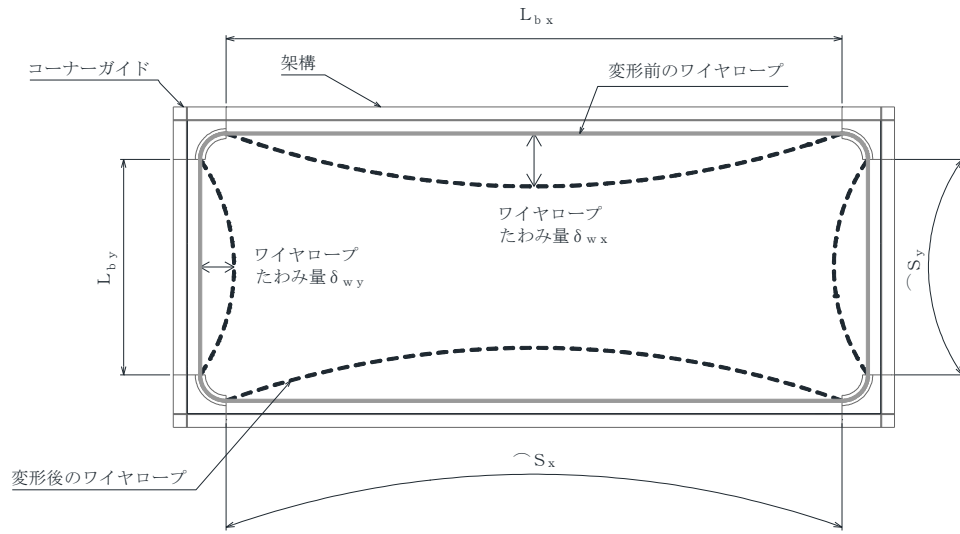


図3-12 ワイヤロープのたわみ図

図3-11及び図3-12より，架構長辺に平行なワイヤロープの水平投影たわみ角 θ_1 は，

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \tan^{-1} \left(\frac{T_1' \cdot \sin \theta_{wx} \cdot \cos \theta_y}{T_1' \cdot \cos \theta_{wx}} \right) \\ &= \tan^{-1} \left(\tan \theta_{wx} \cdot \cos \theta_y \right)\end{aligned}$$

より求まる。

ただし， θ_y ， θ_{wx} は以下の式で求められる。

$$\begin{aligned}\theta_y &= \tan^{-1} \left(\frac{2 \cdot \delta_{max1}}{L_{y2}} \right) \\ \theta_{wx} &= \cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{1 + 16 \cdot \left(\frac{\delta_{wx}}{L_{bx}} \right)^2}}\end{aligned}$$

また，架構短辺方向に平行なワイヤロープの水平投影たわみ角 θ_2 は，

$$\begin{aligned}\theta_2 &= \tan^{-1} \left(\frac{T_1' \cdot \sin \theta_{wy} \cdot \cos \theta_x}{T_1' \cdot \cos \theta_{wy}} \right) \\ &= \tan^{-1} \left(\tan \theta_{wy} \cdot \cos \theta_x \right)\end{aligned}$$

より求まる。

ただし、 θ_x 、 θ_{wy} は以下の式で求められる。

$$\theta_x = \tan^{-1} \left(\frac{2 \cdot \delta_{max1}}{L_{x2}} \right)$$

$$\theta_{wy} = \cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{1 + 16 \cdot \left(\frac{\delta_{wy}}{L_{by}} \right)^2}}$$

コーナーガイドの荷重状態を図3-13に示す。

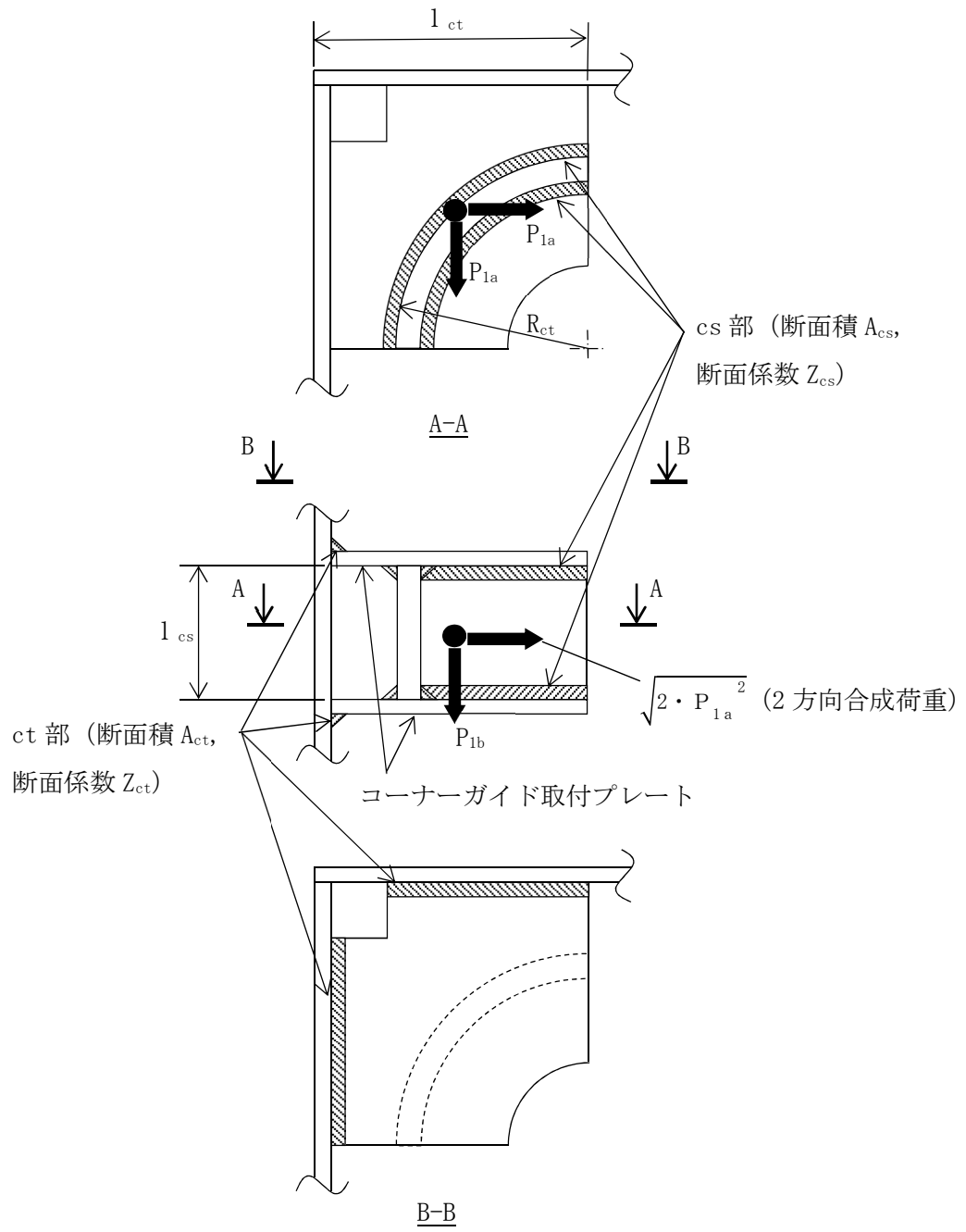


図3-13 コーナーガイドの荷重状態

コーナーガイドに作用する荷重（架構平面方向） P_{1a} は、

$$P_{1a} = \text{Max} (P_x, P_y)$$

$$P_x = 2 \cdot \left(T_1' \cdot \cos \theta_1 + T_1' \cdot \sin \theta_2 \right)$$

$$P_y = 2 \cdot \left(T_1' \cdot \sin \theta_1 + T_1' \cdot \cos \theta_2 \right)$$

コーナーガイドに作用する荷重（架構奥行方向） P_{1b} は、

$$P_{1b} = 2 \cdot \left(T_1' \cdot \sin \theta_{wx} \cdot \sin \theta_y \right) + 2 \cdot \left(T_1' \cdot \sin \theta_{wy} \cdot \sin \theta_x \right)$$

cs 部に対するせん断力によるせん断応力 τ_{cs1} は、

$$\tau_{cs1} = \frac{\sqrt{2 \cdot P_{1a}^2}}{2 \cdot A_{cs}}$$

cs 部に対する曲げモーメントによるせん断応力 τ_{cs2} は、

$$\tau_{cs2} = \frac{\sqrt{2 \cdot P_{1a}^2 \cdot l_{cs}}}{8 \cdot Z_{cs}}$$

cs 部に対する引張力によるせん断応力 τ_{cs3} は、

$$\tau_{cs3} = \frac{P_{1b}}{2 \cdot A_{cs}}$$

cs 部に対する合計せん断応力 τ_{cs} は、

$$\tau_{cs} = \sqrt{\tau_{cs1}^2 + (\tau_{cs2} + \tau_{cs3})^2}$$

で求まる。

ct 部に対する引張力によるせん断応力 τ_{ct1} は,

$$\tau_{ct1} = \frac{P_{1a}}{2 \cdot A_{ct}}$$

ct 部に対するせん断力によるせん断応力 τ_{ct2} は,

$$\tau_{ct2} = \frac{\sqrt{\left(\frac{P_{1a}}{2}\right)^2 + \left(\frac{P_{1b}}{2}\right)^2}}{A_{ct}}$$

ct 部に対する曲げモーメントによるせん断応力 τ_{ct3} は,

$$\tau_{ct3} = \frac{P_{1b}}{2} \cdot \frac{\left(1_{ct} - \frac{R_{ct}}{\sqrt{2}}\right)}{Z_{ct}}$$

ct 部に対する合計せん断応力 τ_{ct} は,

$$\tau_{ct} = \sqrt{(\tau_{ct1} + \tau_{ct3})^2 + \tau_{ct2}^2}$$

で求まる。

(b) アイプレート

設計飛来物が竜巻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、アイプレートの溶接部には応力が発生する。ここで、アイプレートの溶接部である i 部のうち、組合せ応力が最も大きい A 点を評価対象点とする。

アイプレートの荷重状態を図3-14に示す。

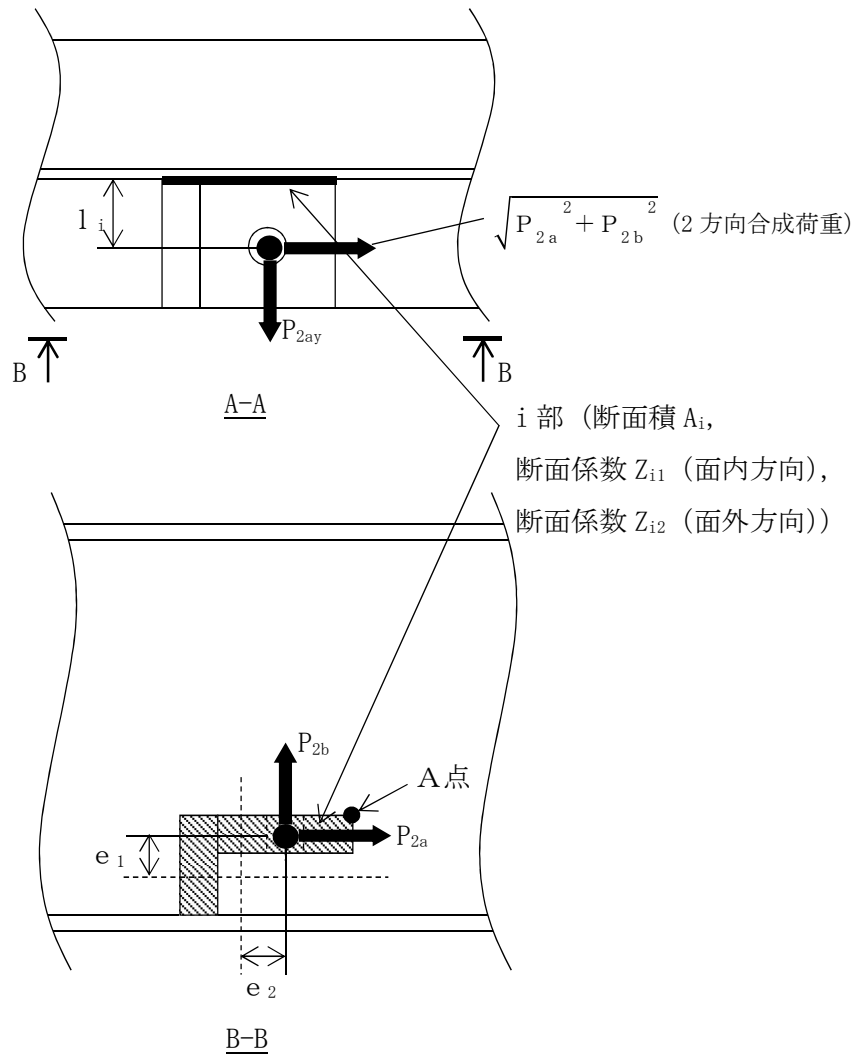


図3-14 アイプレートの荷重状態

アイプレートに作用する荷重(架構軸方向) P_{2a} は,

$$P_{2a} = 2 \cdot T_1'$$

アイプレートに作用する荷重(架構軸直角方向) P_{2ay} は,

$$P_{2ay} = 2 \cdot T_1' \cdot \sin \theta_1$$

アイプレートに作用する荷重(架構奥行方向) P_{2b} は、アイプレート設置位置によって決まり,

アイプレートが架構の縦部(垂直部)に設置される場合,

$$P_{2b} = 2 \cdot \left(T_1' \cdot \sin \theta_{wy} \cdot \sin \theta_x \right)$$

アイプレートが架構の横部(水平部)に設置される場合,

$$P_{2b} = 2 \cdot \left(T_1' \cdot \sin \theta_{wx} \cdot \sin \theta_y \right)$$

となる。

また、引張応力 σ_{it} は,

$$\sigma_{it} = \frac{P_{2ay}}{A_i}$$

引張力によるせん断応力 τ_{i1} は,

$$\tau_{i1} = \frac{\sqrt{P_{2a}^2 + P_{2b}^2}}{A_i}$$

ねじりモーメントによるせん断応力 τ_{i2} は,

$$\tau_{i2} = \frac{P_{2a} \cdot e_1 + P_{2b} \cdot e_2}{Z_{ip}}$$

合計せん断応力 τ_i は,

$$\tau_i = \tau_{i1} + \tau_{i2}$$

i 部に作用する曲げモーメント M_{i1} 及び曲げモーメント M_{i2} は,

$$M_{i1} = P_{2a} \cdot l_i$$

$$M_{i2} = P_{2b} \cdot l_i$$

曲げ応力 σ_{ib1} 及び曲げ応力 σ_{ib2} は、

$$\sigma_{ib1} = \frac{M_{i1}}{Z_{i1}}$$

$$\sigma_{ib2} = \frac{M_{i2}}{Z_{i2}}$$

合計曲げ応力 σ_{ib} は、

$$\sigma_{ib} = \sigma_{ib1} + \sigma_{ib2}$$

以上より、垂直応力とせん断応力の組合せ応力 σ_i は、

$$\sigma_i = \sqrt{(\sigma_{ib} + \sigma_{it})^2 + 3 \cdot \tau_i^2}$$

で求まる。

(3) たわみ評価

たわみ評価においては、ネットの最大たわみ量及びワイヤロープ張力に応じたワイヤロープのたわみ量を基に竜巻防護ネット全体のたわみ量を算出し、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3-15に示す。

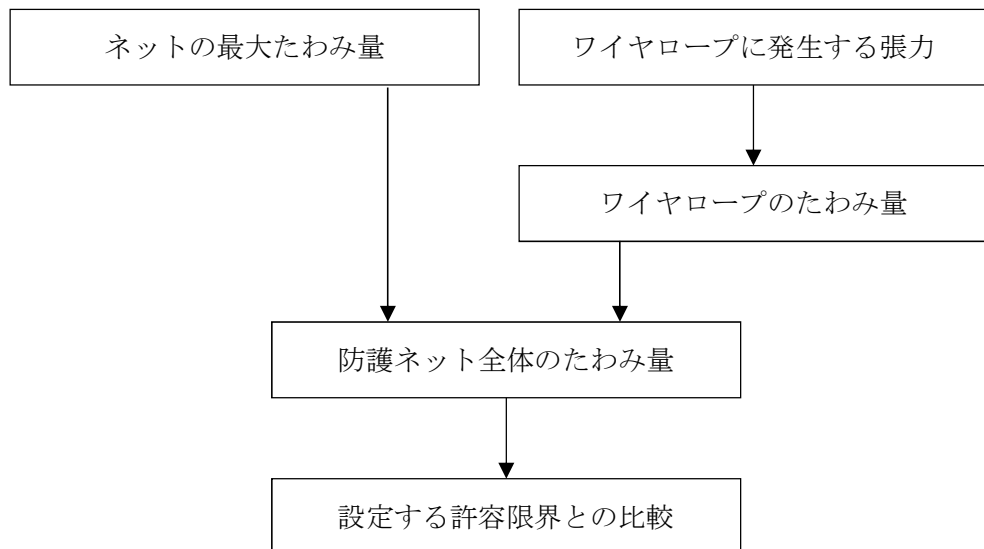


図3-15 たわみ評価の評価フロー

a. ネットのたわみ量の算出

ネットのたわみ量は、最大たわみ量 δ_{max1} を用いる。

たわみ評価用のネット展開方向寸法 L_{x2} 及びネット展開直角方向寸法 L_{y2} は、ネットタイプ I、II のうち、短辺側寸法が大きいネットタイプの寸法を用いる。

また、 δ_{max1} は、たわみ評価用のネット展開方向寸法 L_{x2} 、展開直角方向寸法 L_{y2} のうち小さい方の寸法となる、ネットたわみ量算出用のネット寸法 L_n から算出する。

$$\delta_{max1} = \frac{L_n}{2} \cdot \tan(\theta_{max})$$

b. 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-伸び曲線)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(3.12)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及びワイヤロープのひずみ量から、ワイヤロープの変形による伸び量 δ' が算出される。

設計飛来物の衝突によりワイヤロープが図3-16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。

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

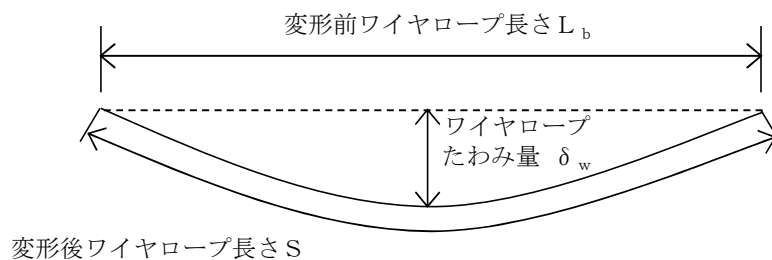


図3-16 ワイヤロープ変形図

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_t の算出を行う。ネット及びワイヤロープ変形図を図3-17に示す。

架構長辺方向と平行に配置されているコーナーガイド間のワイヤロープの変形後の長さを S_x 、架構短辺方向と平行に配置されているコーナーガイド間の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、ワイヤロープの

伸び量 δ' は、架構長辺方向2辺、架構短辺方向1辺にワイヤロープが配置される場合は、

$$\delta' = (S_x (\delta_{wx}) - L_{bx}) \cdot 2 + (S_y (\delta_{wy}) - L_{by})$$

架構短辺方向2辺、架構長辺方向1辺にワイヤロープが配置される場合は、

$$\delta' = (S_x (\delta_{wx}) - L_{bx}) + (S_y (\delta_{wy}) - L_{by}) \cdot 2$$

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、ワイヤロープのたわみ量を含めた防護ネット全体のたわみ量 δ_t は、

$$\begin{aligned} \delta_t &= \sqrt{\left(\delta_{wy} + \frac{L_{x2}}{2 \cdot \cos \theta_x}\right)^2 - \left(\frac{L_{x2}}{2}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\delta_{wx} + \frac{L_{y2}}{2 \cdot \cos \theta_y}\right)^2 - \left(\frac{L_{y2}}{2}\right)^2} \end{aligned}$$

と表される。

ここで、 θ_x 及び θ_y は、最大たわみ量 δ_{max1} より、以下の式で求められる。

$$\theta_x = \tan^{-1} \left(\frac{2 \cdot \delta_{max1}}{L_{x2}} \right)$$

$$\theta_y = \tan^{-1} \left(\frac{2 \cdot \delta_{max1}}{L_{y2}} \right)$$

したがって、ワイヤロープのたわみ量 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の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。

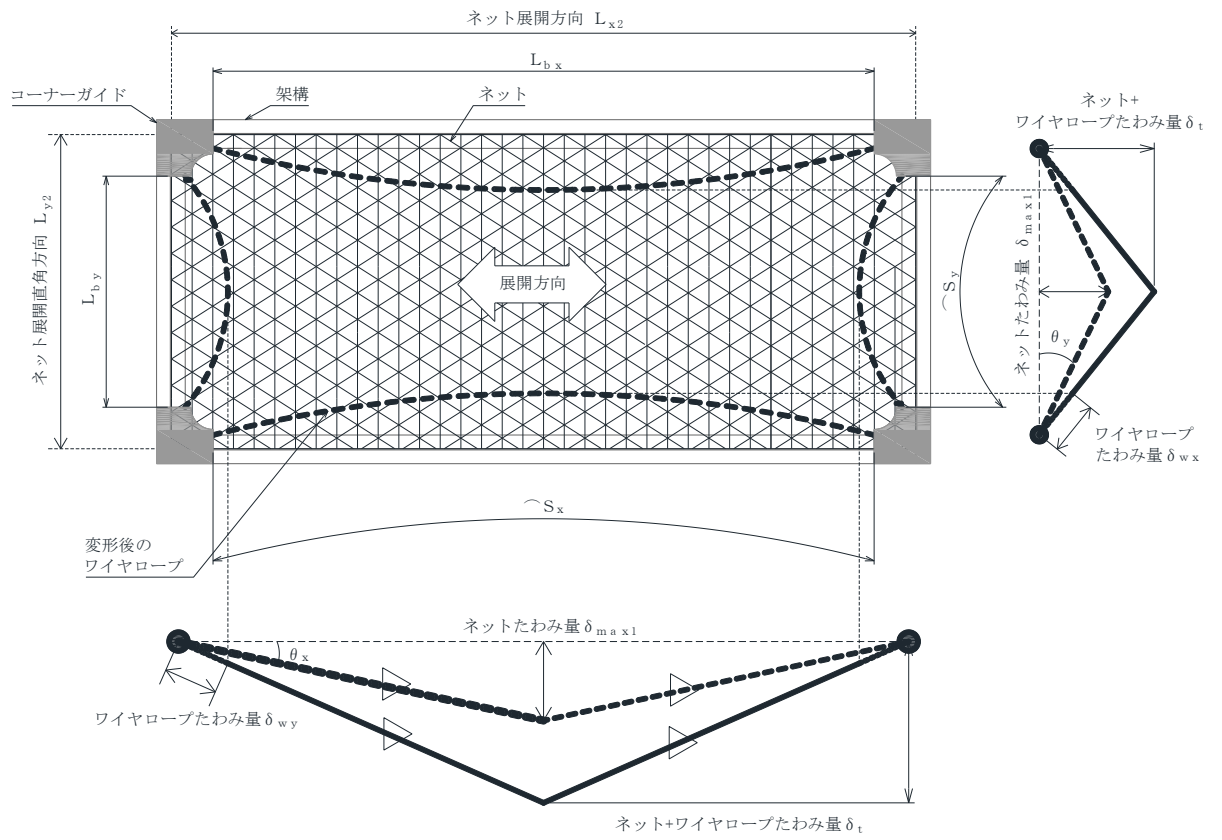


図3-17 ネット及びワイヤロープ変形図

4. 評価条件

4.1 荷重条件

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

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

表4-1 風圧力による荷重の算定条件

C	G	ρ	V_D
(—)	(—)	(kg/m ³)	(m/s)
1.7	1.0	1.226	92*

注記*：評価においては、最大風速 $V_D=100$ (m/s)を適用する。

表4-2 設計飛来物による衝撃荷重の算定条件

設計飛来物	寸法 長さ×幅×奥行き (m)	m (kg)	v_1 (m/s)
			水平方向
鋼製足場板	4×0.25×0.04	14	55*

注記*：評価においては、最大風速 $V_D=100$ (m/s)における、設計飛来物衝突時の速度 $v_1=59$ (m/s)を適用する。

4.2 竜巻防護ネット仕様

(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	—
ネット1目合いの 展開方向の破断変位	a_s	16.9mm	ネットの引張試験結果による
ネット1目合いの 展開方向の対角寸法	a_x	130mm	メーカーの 標準的な値
ネット1目合いの 展開直角方向の対角寸法	a_y	83mm	
ネット素線の直径	d'	4mm	メーカーの 標準的な値
ネット1目合いの 展開方向の破断荷重	F_{1x}	21.1kN	ネットの引張試験結果による
ネット1目合いの 展開直角方向の破断荷重	F_{1y}	17.7kN	
ネット1目合いの 展開方向の等価剛性	K	1249.870kN/m	計算値
衝突箇所近傍の ネットの1層あたりの 目合い数	n_1	6個	—
ネットの素線の引張強度	σ'	1770N/mm ²	メーカーの 標準的な値
破断時たわみ角	θ_{max}	27.7°	計算値
ネットの単位面積あたりの 質量	m_N	4.7kg/m ²	メーカーの 標準的な値
ネットの充実率	ϕ	0.4 (2層) 0.7 (3層, 4層)	計算値*

注記* : 1m^2 あたりの平均充実率 $\phi = \frac{(1\text{m}^2\text{あたりの素線面積} - 1\text{m}^2\text{あたりの素線重複面積})}{\text{単位面積}}$

(2) 竜巻防護ネットの構成

竜巻防護ネットの構成を表4-4に示す。

表4-4 竜巻防護ネットの構成

竜巻防護ネット		ネットサイズ (m)						ネット 設置層数
開口部 管理番号	管理 No.	ネットタイプⅠ			ネットタイプⅡ			n
		$L_{xⅠ}$	×	$L_{yⅠ}$	$L_{xⅡ}$	×	$L_{yⅡ}$	
K6-R-01	26	1.820	×	8.217	8.190	×	1.743	4層
K6-R-02	27	1.820	×	8.217	8.190	×	1.743	4層
K6-R-03	28	1.690	×	8.217	8.190	×	1.660	4層
K6-R-04	29	2.600	×	3.735	3.770	×	2.490	3層
K6-R-05	30	2.600	×	3.735	3.770	×	2.490	3層
K6-R-07	32	2.600	×	3.735	3.770	×	2.490	3層
K6-R-08	33	2.600	×	3.735	3.770	×	2.490	3層
K6-R-11	36	2.600	×	3.735	3.770	×	2.490	3層
K6-R-12	37	2.340	×	3.569	3.640	×	2.407	3層
K6-R-14	38	1.820	×	3.320	3.380	×	1.743	4層
K6-R-15	57	1.950	×	3.320	3.380	×	1.992	4層
K6-T-01	39	3.900	×	3.403	3.510	×	3.901	2層
K6-T-02	40	3.900	×	2.241	2.210	×	3.901	3層
K6-T-03	41	4.420	×	5.644	5.720	×	4.316	2層
ブローアウトパネル	77	2.990	×	5.727	5.720	×	2.988	2層
ブローアウトパネル	78	2.990	×	5.727	5.720	×	2.988	2層
ブローアウトパネル	79	2.990	×	5.727	5.720	×	2.988	2層
ブローアウトパネル	80	2.990	×	5.727	5.720	×	2.988	2層

(3) ワイヤロープ

ワイヤロープの仕様を表4-5に示す。

表4-5 ワイヤロープの仕様

評価対象部位	仕様	径	破断荷重 F ₃ (kN)	ワイヤグリップの 効率C _g	許容限界 (kN)
ワイヤロープ	6×19S+IWRC	φ 16	161 ^{*1}	0.8 ^{*2}	128.8

注記*1 : EN 12385-4の破断荷重

*2 : 日本道路協会「小規模吊橋指針・同解説」

(4) シャックル

シャックルの仕様を表4-6に示す。

表4-6 シャックルの仕様

評価対象部位	仕様	安全稼働荷重 (kN)	破断荷重 F ₄ , F ₅ , F ₆ , F ₇ (kN)
シャックル	バウ型シャックル 7/8"	63.7	382.2
	バウ型シャックル (ブローアウトパネル用) 7/8"	63.7	380.0
	バウ型シャックル 5/8"	32.3	193.8
	長シャックル 呼び19, L200	39.2	196.0

(5) 接続用の治具

a. コーナーガイド

コーナーガイドの評価条件を表4-7に示す。

表4-7 コーナーガイドの評価条件

竜巻防護ネット		材質	記号	入力値
開口部 管理番号	管理 No.			
K6-R-01	26	SS400	$A_{cs} (\text{mm}^2)$	7.099×10^3
K6-R-02	27		$A_{ct} (\text{mm}^2)$	2.730×10^3
K6-R-03	28		$l_{cs} (\text{mm})$	76
K6-R-04	29		$l_{ct} (\text{mm})$	290
K6-R-05	30		$R_{ct} (\text{mm})$	230
K6-R-07	32		$Z_{cs} (\text{mm}^3)$	6.340×10^4
K6-R-08	33		$Z_{ct} (\text{mm}^3)$	1.373×10^5
K6-R-11	36			
K6-R-12	37			
K6-R-14	38			
K6-R-15	57			
K6-T-01	39			
K6-T-02	40			
K6-T-03	41			
ブローアウトパネル	77		SM490A	$A_{cs} (\text{mm}^2)$
	78	$A_{ct} (\text{mm}^2)$		2.730×10^3
	79	$l_{cs} (\text{mm})$		76
	80	$l_{ct} (\text{mm})$		290
		$R_{ct} (\text{mm})$		230
		$Z_{cs} (\text{mm}^3)$		6.340×10^4
		$Z_{ct} (\text{mm}^3)$		1.373×10^5

b. アイプレート

アイプレートの評価条件を表4-8に示す。

表4-8 アイプレートの評価条件

竜巻防護ネット		材質	記号	入力値																		
開口部 管理番号	管理 No.																					
K6-R-01	26	SS400	A_i (mm ²)	4.872×10^3																		
K6-R-02	27		SS400																			
K6-R-03	28					e_1 (mm)	10															
K6-R-04	29					SS400																
K6-R-05	30								e_2 (mm)	27												
K6-R-07	32								SS400													
K6-R-08	33											l_i (mm)	50									
K6-R-11	36											SS400										
K6-R-12	37														Z_{ip} (mm ³)	4.547×10^4						
K6-R-14	38														SS400							
K6-R-15	57																	Z_{i1} (mm ³)	9.514×10^4			
K6-T-01	39																	SS400				
K6-T-02	40																				Z_{i2} (mm ³)	7.394×10^4
K6-T-03	41																				SS400	
ブローアウトパネル		SM490A																				
			e_1 (mm)	10																		
			e_2 (mm)	27																		
			l_i (mm)	50																		
			Z_{ip} (mm ³)	4.547×10^4																		
			Z_{i1} (mm ³)	9.514×10^4																		
			Z_{i2} (mm ³)	7.394×10^4																		

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

ネットに作用する外力エネルギー評価結果を表5-1に示す。

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

表5-1 ネットに作用する外力エネルギー評価結果

竜巻防護ネット		E_t (kJ)	E_{max} (kJ)
開口部 管理番号	管理 No.		
K6-R-01	26	29.4	39.2
K6-R-02	27	29.4	39.2
K6-R-03	28	28.8	32.1
K6-R-04	29	26.5	36.8
K6-R-05	30	26.5	36.8
K6-R-07	32	26.5	36.8
K6-R-08	33	26.5	36.8
K6-R-11	36	26.5	36.8
K6-R-12	37	27.6	50.3
K6-R-14	38	25.9	39.2
K6-R-15	57	26.2	50.5
K6-T-01	39	28.5	77.1
K6-T-02	40	27.5	43.8
K6-T-03	41	35.1	117.4
ブローアウトパネル	77	29.4	56.2
ブローアウトパネル	78	29.4	56.2
ブローアウトパネル	79	29.4	56.2
ブローアウトパネル	80	29.4	56.2

5.2 破断評価

(1) ネット

ネットの破断評価結果を表5-2に示す。衝撃荷重 (F_2) は、ネットの許容荷重 (F_{1x}) を下回っている。

表5-2 ネットの破断評価結果

竜巻防護ネット		F_2 (kN)	F_{1x} (kN)
開口部 管理番号	管理 No.		
K6-R-01	26	10.5	21.0
K6-R-02	27	10.5	21.0
K6-R-03	28	10.8	21.0
K6-R-04	29	13.3	21.0
K6-R-05	30	13.3	21.0
K6-R-07	32	13.3	21.0
K6-R-08	33	13.3	21.0
K6-R-11	36	13.3	21.0
K6-R-12	37	9.9	21.0
K6-R-14	38	9.3	21.0
K6-R-15	57	8.4	21.0
K6-T-01	39	10.5	21.0
K6-T-02	40	10.4	21.0
K6-T-03	41	10.2	21.0
ブローアウトパネル	77	12.3	21.0
ブローアウトパネル	78	12.3	21.0
ブローアウトパネル	79	12.3	21.0
ブローアウトパネル	80	12.3	21.0

(2) ワイヤロープ

ワイヤロープの破断評価結果を表5-3に示す。

ワイヤロープが負担する荷重 (T_1') は、ワイヤロープの許容荷重 ($C_c \cdot F_3$) を下回っている。

表5-3 ワイヤロープの破断評価結果

竜巻防護ネット		T_1' (kN)	$C_c \cdot F_3$ (kN)
開口部 管理番号	管理 No.		
K6-R-01	26	102.9	128.8
K6-R-02	27	102.9	128.8
K6-R-03	28	105.8	128.8
K6-R-04	29	65.1	128.8
K6-R-05	30	65.1	128.8
K6-R-07	32	65.1	128.8
K6-R-08	33	65.1	128.8
K6-R-11	36	65.1	128.8
K6-R-12	37	72.1	128.8
K6-R-14	38	90.7	128.8
K6-R-15	57	82.1	128.8
K6-T-01	39	51.2	128.8
K6-T-02	40	76.0	128.8
K6-T-03	41	49.6	128.8
ブローアウトパネル	77	60.1	128.8
ブローアウトパネル	78	60.1	128.8
ブローアウトパネル	79	60.1	128.8
ブローアウトパネル	80	60.1	128.8

(3) シャックル

a. ロープ接続用シャックル

ロープ接続用シャックルの破断評価結果を表5-4に示す。

ロープ接続用シャックル1箇所あたりの作用荷重 (P_R) は、ロープ接続用シャックルの破断荷重 (F_4) を下回っている。

表5-4 ロープ接続用シャックルの破断評価結果

竜巻防護ネット		P_R (kN)	F_4 (kN)
開口部 管理番号	管理 No.		
K6-R-01	26	205.8	382.2
K6-R-02	27	205.8	382.2
K6-R-03	28	211.6	382.2
K6-R-04	29	130.1	382.2
K6-R-05	30	130.1	382.2
K6-R-07	32	130.1	382.2
K6-R-08	33	130.1	382.2
K6-R-11	36	130.1	382.2
K6-R-12	37	144.2	382.2
K6-R-14	38	181.4	382.2
K6-R-15	57	164.2	382.2
K6-T-01	39	102.3	382.2
K6-T-02	40	151.9	382.2
K6-T-03	41	99.2	382.2

また、ロープ接続用シャックル（ブローアウトパネル用）の破断評価結果を表5-5に示す。

ロープ接続用シャックル1箇所あたりの作用荷重（ P_R ）は、ロープ接続用シャックル（ブローアウトパネル用）の破断荷重（ F_5 ）を下回っている。

表5-5 ロープ接続用シャックル（ブローアウトパネル用）の破断評価結果

竜巻防護ネット		P_R (kN)	F_5 (kN)
開口部 管理番号	管理 No.		
ブローアウトパネル	77	120.2	380.0
ブローアウトパネル	78	120.2	380.0
ブローアウトパネル	79	120.2	380.0
ブローアウトパネル	80	120.2	380.0

b. ネット接続用シャックル

ネット接続用シャックル（バウ型シャックル）の破断評価結果を表5-6に示す。

ネット接続用シャックル1箇所あたりの作用荷重（ P_N ）は、ネット接続用シャックル（バウ型シャックル）の破断荷重（ F_6 ）を下回っている。

表5-6 ネット接続用シャックル（バウ型シャックル）の破断評価結果

竜巻防護ネット		P_N (kN)	F_6 (kN)
開口部 管理番号	管理 No.		
K6-R-01	26	42.2	193.8
K6-R-02	27		
K6-R-03	28		
K6-R-04	29		
K6-R-05	30		
K6-R-07	32		
K6-R-08	33		
K6-R-11	36		
K6-R-12	37		
K6-R-14	38		
K6-R-15	57		
K6-T-01*	39		
K6-T-02*	40		
K6-T-03	41		
ブローアウトパネル	77		
ブローアウトパネル	78		
ブローアウトパネル	79		
ブローアウトパネル	80		

注記* : K6-T-01(No. 39)及びK6-T-02(No. 40)竜巻防護ネットは、ネット接続用シャックルに、バウ型シャックルと長シャックルを用いる。

また、ネット接続用シャックル（長シャックル）の破断評価結果を表5-7に示す。

ネット接続用シャックル1箇所あたりの作用荷重（ P_N ）は、ネット接続用シャックル（長シャックル）の破断荷重（ F_7 ）を下回っている。

表5-7 ネット接続用シャックル（長シャックル）の破断評価結果

竜巻防護ネット		P_N (kN)	F_7 (kN)
開口部 管理番号	管理 No.		
K6-T-01	39	42.2	196.0
K6-T-02	40		

c. シャックル接続目合い間隔

シャックル接続目合い間隔の妥当性評価結果を表5-8に示す。

最大衝撃荷重 (F_a) は、シャックル接続目合いの合計耐力 (B_t) を下回っている。

表5-8 シャックル接続目合い間隔の妥当性評価結果

竜巻防護ネット		F_a (kN)	B_t (kN)
開口部 管理番号	管理 No.		
K6-R-01	26	251.9	703.8
K6-R-02	27	251.9	703.8
K6-R-03	28	259.1	703.8
K6-R-04	29	159.2	1013.7
K6-R-05	30	159.2	1013.7
K6-R-07	32	159.2	1013.7
K6-R-08	33	159.2	1013.7
K6-R-11	36	159.2	1013.7
K6-R-12	37	176.6	1013.7
K6-R-14	38	222.0	703.8
K6-R-15	57	201.0	858.8
K6-T-01	39	125.2	1478.4
K6-T-02	40	185.9	858.8
K6-T-03	41	121.5	1872.5
ブローアウトパネル	77	147.2	1252.8
ブローアウトパネル	78	147.2	1252.8
ブローアウトパネル	79	147.2	1252.8
ブローアウトパネル	80	147.2	1252.8

(4) 接続用の治具

a. コーナーガイド溶接部

コーナーガイド溶接部の破断評価結果のうち、せん断応力の裕度が最も低いコーナーガイド溶接部の結果を表5-9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、コーナーガイド溶接部の許容限界を下回っている。

表5-9 接続用の治具（コーナーガイド溶接部）の破断評価結果

評価対象				発生応力 (MPa)		許容 限界 (MPa)	備考
開口部 管理番号	管理 No.	材質	部位				
K6-R-03	28	SS400	cs 部	せん断	72	161	
			ct 部	せん断	93	161	
ブローアウト パネル	77	SM490A	cs 部	せん断	36	198	
			ct 部	せん断	45	198	

b. アイプレート溶接部

アイプレート溶接部の破断評価結果のうち、組合せ応力の裕度が最も低いアイプレート溶接部の結果を表5-10に示す。

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

表5-10 接続用の治具（アイプレート溶接部）の破断評価結果

評価対象				発生応力 (MPa)		許容 限界 (MPa)	備考
開口部 管理番号	管理 No.	材質	部位				
K6-R-03	28	SS400	i 部	引張	10	280	
				せん断	93	161	
				曲げ	115	280	
				組合せ (垂直+せん断)	203	280	
ブローアウト パネル	77	SM490A	i 部	引張	4	343	
				せん断	59	198	
				曲げ	72	343	
				組合せ (垂直+せん断)	126	343	

5.3 たわみ評価

竜巻防護ネットのたわみ評価結果を表5-11に示す。

竜巻防護ネット全体のたわみ量 (δ_t) は、竜巻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。

表5-11 たわみ評価結果

竜巻防護ネット		最大たわみ量 δ_t (m)	最小離隔距離 L_{min} (m)
開口部 管理番号	管理 No.		
K6-R-01	26	1.198	1.881
K6-R-02	27	1.198	1.900
K6-R-03	28	1.163	1.870
K6-R-04	29	0.986	1.222
K6-R-05	30	0.986	1.222
K6-R-07	32	0.986	1.591
K6-R-08	33	0.986	1.572
K6-R-11	36	0.986	1.570
K6-R-12	37	0.935	1.561
K6-R-14	38	0.769	2.991
K6-R-15	57	0.810	1.764
K6-T-01	39	1.231	5.635
K6-T-02	40	0.917	7.900
K6-T-03	41	1.608	2.685
ブローアウトパネル	77	1.215	30.356
ブローアウトパネル	78	1.215	11.235
ブローアウトパネル	79	1.215	11.235
ブローアウトパネル	80	1.215	11.235

VI-3-別添 1-4-2 竜巻防護鋼製フードの強度計算書

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	2
2.1 位置	2
2.2 構造概要	4
2.3 評価方針	6
2.4 適用規格	8
3. 強度評価方法	9
3.1 記号の定義	9
3.2 評価対象部位	10
3.3 荷重及び荷重の組合せ	12
3.4 許容限界	14
3.5 評価方法	16
4. 評価条件	21
4.1 貫通評価	21
4.2 変形評価	22
5. 強度評価結果	23
5.1 貫通評価	23
5.2 変形評価	24

1. 概要

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

2. 基本方針

VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」を踏まえ、竜巻防護鋼製フードの「2.1 位置」, 「2.2 構造概要」, 「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

2.1 位置

竜巻防護鋼製フードは、原子炉建屋の開口部に設置する。

竜巻防護鋼製フードの設置位置を図 2-1 に示す。

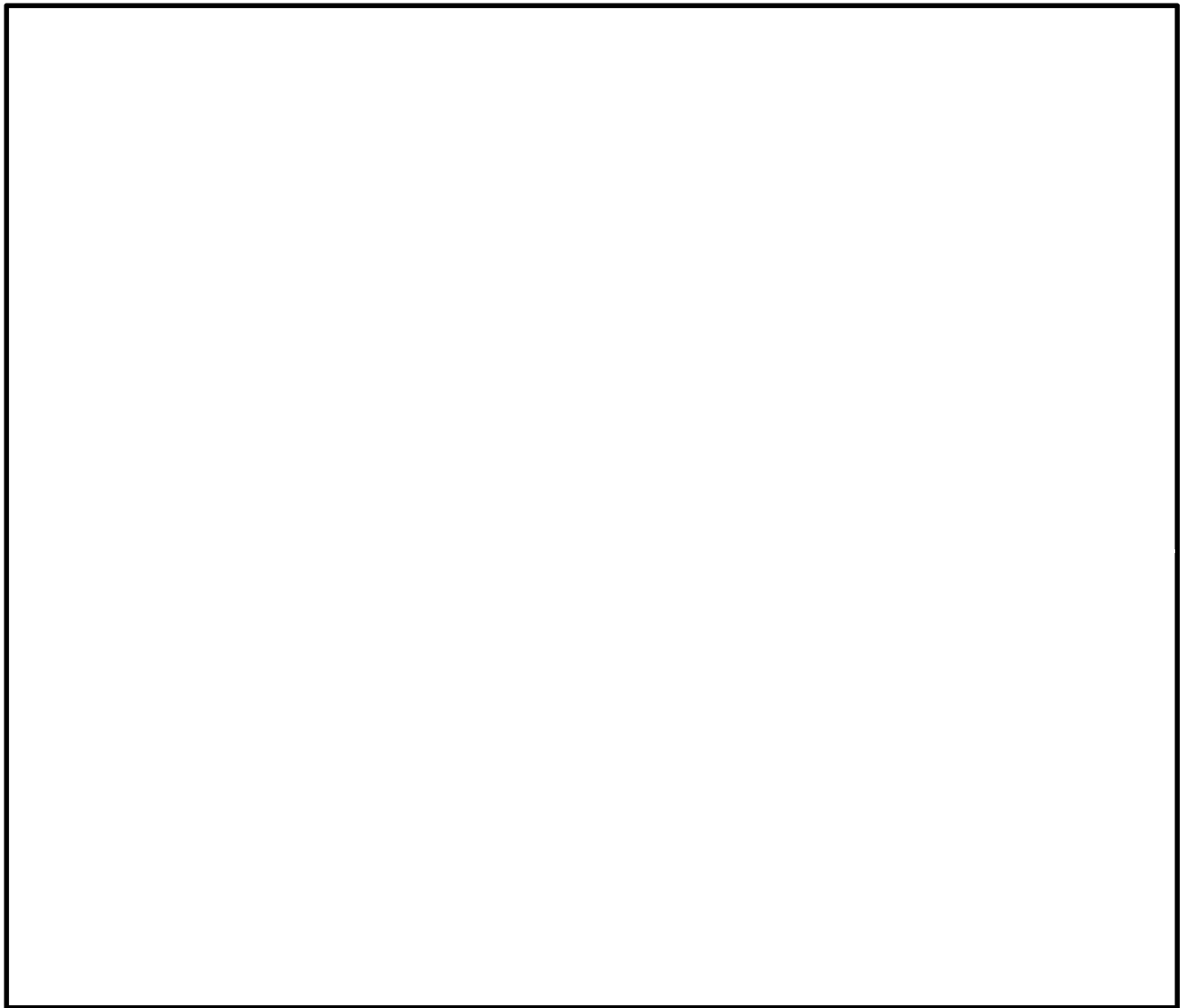


図 2-1 (1/2) 竜巻防護鋼製フードの位置図

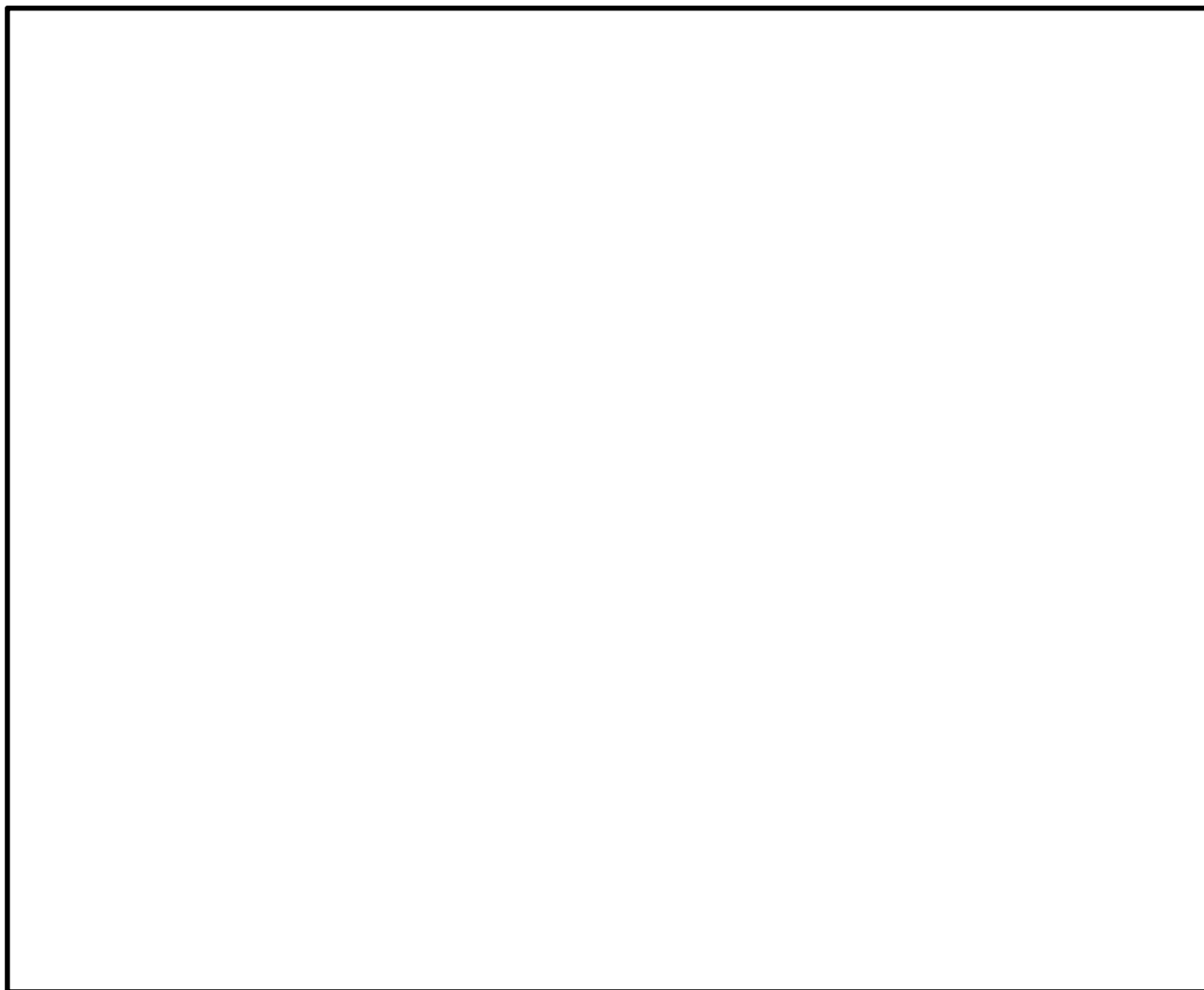


図 2-1 (2/2) 竜巻防護鋼製フードの位置図

2.2 構造概要

竜巻防護鋼製フードの構造は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「3.2 竜巻防護鋼製フードの構造設計」に示す構造設計を踏まえ、設定する。

竜巻防護鋼製フードは、鋼板等で構成する鋼製構造物である。

竜巻防護鋼製フードの構造図を図 2-2 に示す。

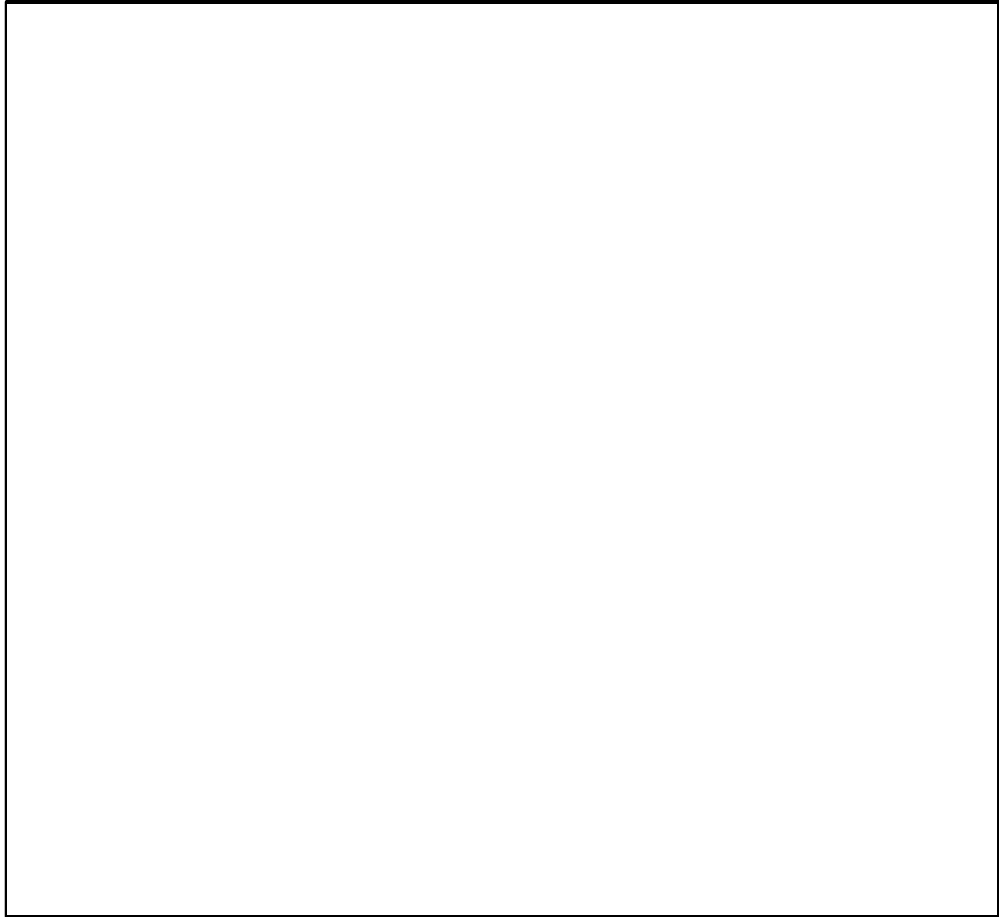


図 2-2 (1/2) 竜巻防護鋼製フード (No. 31, 35) の構造図

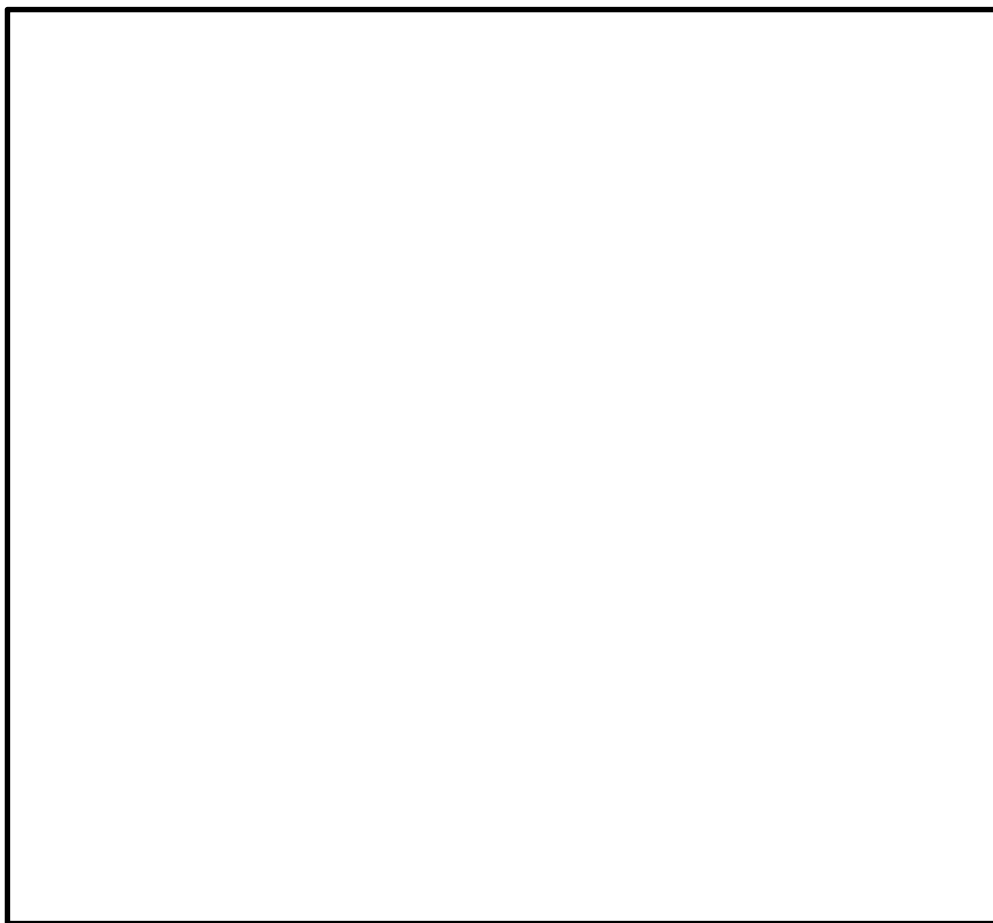


図 2-2 (2/2) 竜巻防護鋼製フード (No. 34, 56) の構造図

2.3 評価方針

竜巻防護鋼製フードの強度評価は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」及び「5.2 竜巻防護鋼製フードの許容限界」にて設定している荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、竜巻防護鋼製フードの評価対象部位に作用する変形等が、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。

竜巻防護鋼製フードの評価フローを図 2-3 に示す。

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

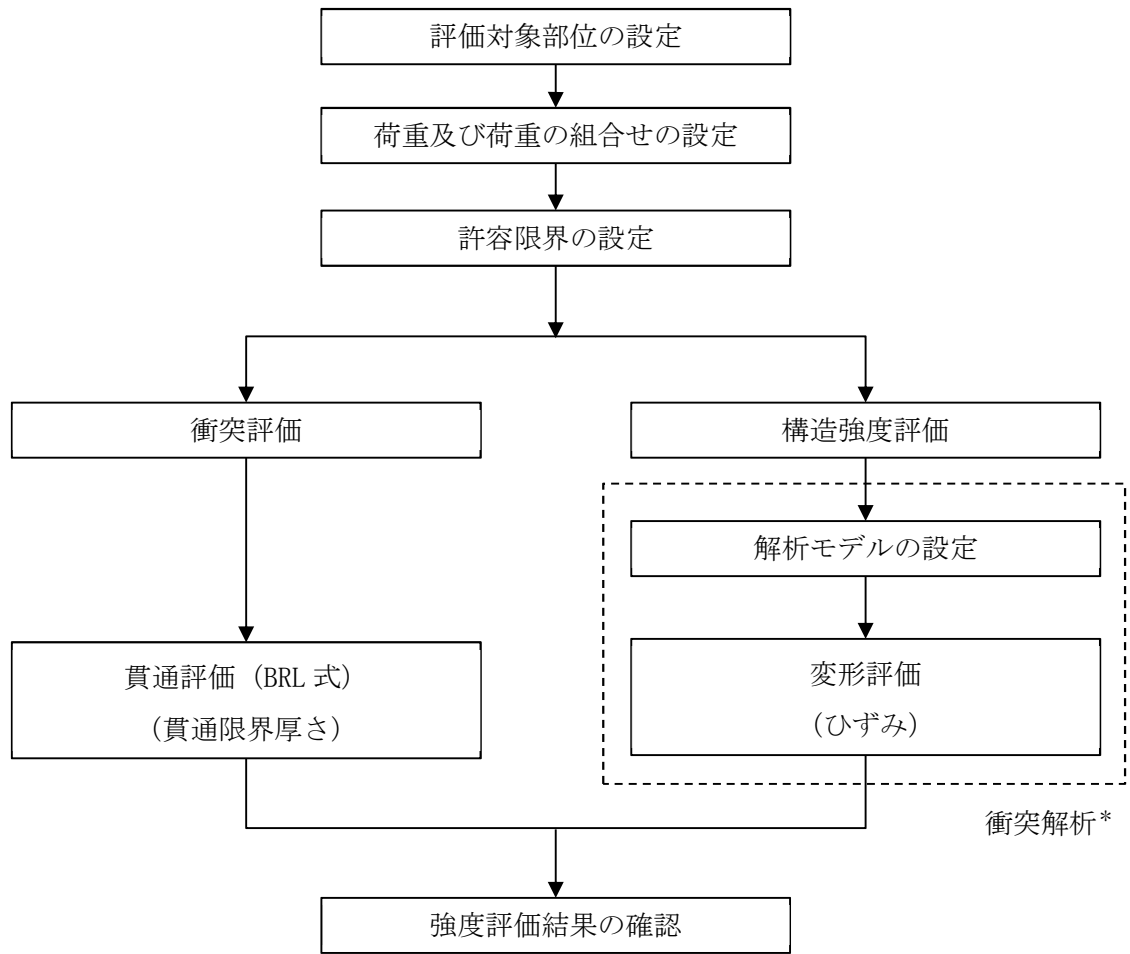
具体的には、設計飛来物が外部事象防護対象施設に衝突する直接的な影響の評価として、防護対策施設を構成する部材に対する衝突評価、及び、防護対策施設自体が外部事象防護対象施設に衝突・接触する波及的な影響の評価として、防護対策施設を構成する部位の転倒及び脱落に対する構造強度評価を行う。

(1) 衝突評価

設計荷重に対し、設計飛来物が施設を構成する部材を貫通しない設計とするために、防護鋼板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。（以下「貫通評価」という。）衝突評価には、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「6.2 竜巻防護鋼製フードの強度評価」に示す評価式を用いる。

(2) 構造強度評価

設計荷重に対し、施設を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とするために、防護鋼板及び架構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。（以下「変形評価」という。）



注記*：衝突解析については，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，防護鋼板及び架構について評価を実施する。

図 2-3 竜巻防護鋼製フードの評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- 建築基準法及び同施行令
- 「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC 1-2005/2007」（日本機械学会）
- ISE7607-3「軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査 その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討」（昭和51年10月高温構造安全技術研究組合）
- タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日原子炉安全専門審査会）
- U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision1, March 2007
- Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8 (NEI 07-13))
- 「建築物荷重指針・同解説」（日本建築学会，2004改定）
- 「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—」（日本建築学会，2005改定）
- 日本産業規格（J I S）

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

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	竜巻防護鋼製フードの受圧面積
C	—	風力係数
d	m	設計飛来物が衝突する衝突断面の等価直径
F _d	N	常時作用する荷重
G	—	ガスト影響係数
K	—	鋼板の材質に関する係数
M	kg	設計飛来物の質量
q	Pa	設計用速度圧
T	m	貫通限界厚さ
V	m/s	設計飛来物の飛来速度
V _D	m/s	設計竜巻の最大風速
W _M	N	設計飛来物による衝撃荷重
W _w	N	設計竜巻の風圧力による荷重
ρ	kg/m ³	空気密度

3.2 評価対象部位

竜巻防護鋼製フードの評価対象部位は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.2 竜巻防護鋼製フードの許容限界」に示す評価対象部位を踏まえ、設定する。

(1) 貫通評価

設計荷重に対し、設計飛来物が施設を構成する部材を貫通しない設計とするために、防護鋼板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。

施設を構成する部材が設計飛来物を貫通させないことの確認においては、外殻を構成する防護鋼板を評価対象部位として設定する。

(2) 変形評価

設計荷重に対し、施設を構成する部材自体が、転倒及び脱落により外部事象防護対象施設へ接触等の影響を与えない設計とするために、防護鋼板及び架構に終局状態に至るようなひずみが生じないことを解析により確認する。

設計飛来物の衝突を考慮する場合、運動エネルギーが最大となる水平方向衝突の鋼製足場板を設定する。また、被衝突物の支持間隔が長く、厚さが薄いほどたわみ量が大きくなる傾向にある。したがって、変形評価としては、評価対象となる防護鋼板の支持間隔が長く、厚さが薄い箇所を選定する。なお、防護鋼板の設計においては、厚さを一律 とすることから、支持間隔が最長となる箇所が代表となる。衝突位置については、たわみ量が大きくなるよう部材の中央とする。

評価対象部位を図 3-1 に示す。

なお、No. 31 と No. 35 及び No. 34 と No. 56 竜巻防護鋼製フードは同形状のため、No. 31 と No. 34 竜巻防護鋼製フードを代表として評価する。

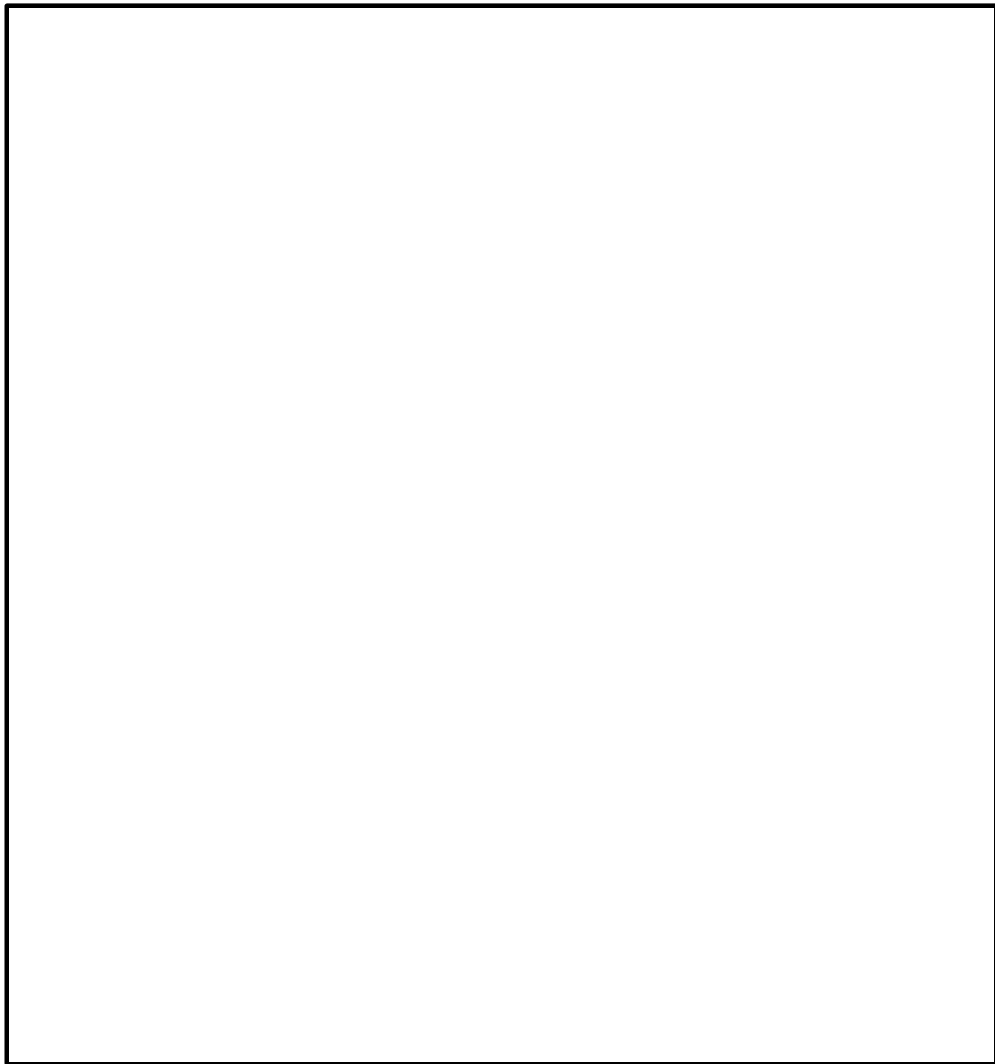


図 3-1 竜巻防護鋼製フードの評価位置図

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

(1) 荷重の設定

強度評価に用いる荷重は以下の荷重を用いる。荷重の算定に用いる竜巻の特性値を表 3-2 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)
92	14	78	6400

注記*：変形評価においては、最大風速 $V_D=100$ (m/s)、移動速度 $V_T=15$ (m/s)、最大接線風速 $V_{Rm}=85$ (m/s)、最大気圧低下量 $\Delta P_{max}=7600$ (N/m²)を適用する。

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。

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

設計用速度圧 q は、下式により算定する。

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

b. 設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)

設計飛来物による衝撃荷重 (W_M) については、表 3-3 に諸元を示す設計飛来物の衝突に伴う荷重とする。また、設計飛来物の材料定数を表 3-4 に示す。飛来速度については、評価の代表性を考慮し、水平方向、鉛直方向の飛来速度のうち大きい水平方向速度を設定する。

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

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

表 3-3 設計飛来物の諸元*

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

注記*：変形評価においては、鋼製足場板の諸元について、最大風速 $V_D=100$ (m/s)時である、水平方向の飛来速度=59 (m/s)、水平方向の運動エネルギー=24 (kJ)、水平方向の衝突断面積あたりの運動エネルギー=0.0024 (kJ/mm²)を適用する。

表 3-4 設計飛来物の材料定数

設計飛来物	降伏応力 σ_y (MPa)	縦弾性係数 E (MPa)	ポアソン比
足場パイプ	355	201667	0.3
鋼製足場板	245	201667	0.3

c. 常時作用する荷重 (F_d)

常時作用する荷重 (F_d) は、部材の自重とする。

(2) 荷重の組合せ

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

荷重の組合せを表 3-5 に示す。

表 3-5 荷重の組合せ

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

3.4 許容限界

竜巻防護鋼製フードの許容限界は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.2 竜巻防護鋼製フードの許容限界」にて設定している許容限界を踏まえて、「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位の機能損傷モードを考慮して設定する。

(1) 評価対象部位の材料仕様

竜巻防護鋼製フードの材料仕様を表 3-6 に示す。

表 3-6 評価対象部位の材料仕様

分類	仕様	材質
防護鋼板		SUS304
架構		SUS304

(2) 評価対象部位の材料定数

竜巻防護鋼製フードの材料定数を表 3-7 に示す。

表 3-7 材料定数

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

(3) 許容限界

a. 貫通評価

防護鋼板の貫通評価の許容限界を表 3-8 に示す。

表 3-8 貫通評価の許容限界

評価対象部位		設置方向	厚さ (mm)	材質
竜巻防護鋼製フード	防護鋼板	側面		SUS304
		上面		SUS304

b. 変形評価

設計飛来物が防護鋼板へ直接衝突する場合の変形評価における許容限界は、鋼材の破断ひずみとする。破断ひずみについては、「3.5(2)e.(c) 破断ひずみ」に示すとおり、JIS に規定されている伸びの下限値を基に設定するが、「NEI07-13 : Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs」(以下「NEI07-13」という。)においてTF(多軸性係数)を とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF = を考慮して設定する。

設定した許容限界を表 3-9 に示す。

表 3-9 変形評価の許容限界

評価対象部位		材質	破断ひずみ*
竜巻防護鋼製フード	防護鋼板	SUS304	
	架構	SUS304	

注記* : 真ひずみ換算値

3.5 評価方法

竜巻防護鋼製フードの強度評価は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「4.2 竜巻防護フードの評価方針」を踏まえて、衝突評価として貫通評価を実施する。また、構造強度評価として変形評価を実施する。

(1) 貫通評価

設計飛来物が竜巻防護鋼製フードの防護鋼板へ直接衝突する場合の貫通限界厚さを、「タービンミサイル評価について（昭和 52 年 7 月 20 日原子炉安全専門審査会）」で用いられる BRL 式を用いて算出する。

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

(2) 変形評価

変形評価に用いる評価対象部位に生じるひずみは、解析モデル及び材料の非線形特性を用いた衝突解析により評価する。

a. 解析モデル及び諸元

(a) 竜巻防護鋼製フード

竜巻防護鋼製フードの解析モデル化の範囲は、想定する荷重の伝達を考慮し、竜巻防護鋼製フードを構成する防護鋼板及び架構とする。防護鋼板及び架構は、シェル要素でモデル化する。竜巻防護鋼製フードの解析モデルの境界条件を表 3-10 に、解析モデル図を図 3-2 から図 3-3 に示す。

表 3-10 解析モデルの境界条件

項目	境界条件
竜巻防護鋼製フードと 原子炉建屋壁	X, Y, Z 方向並進拘束

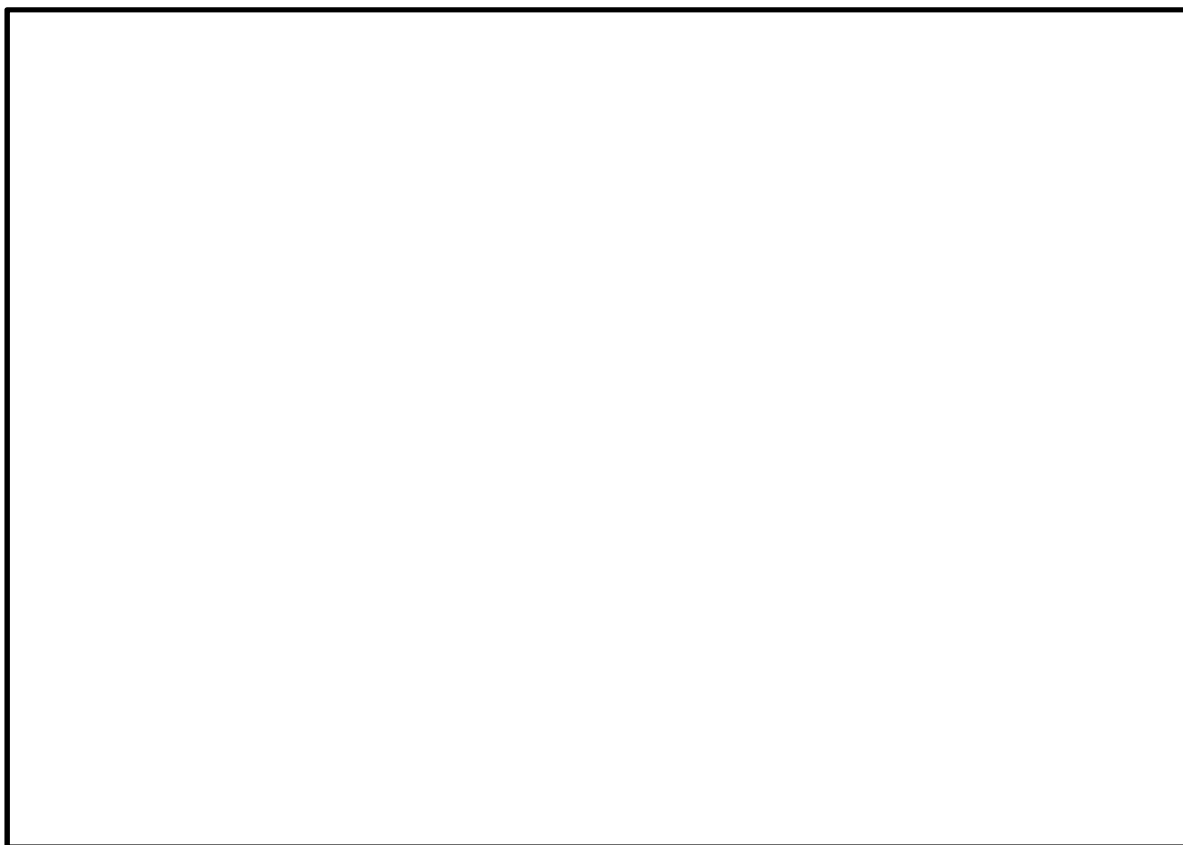


図 3-2 No. 31 竜巻防護鋼製フードの解析モデル図

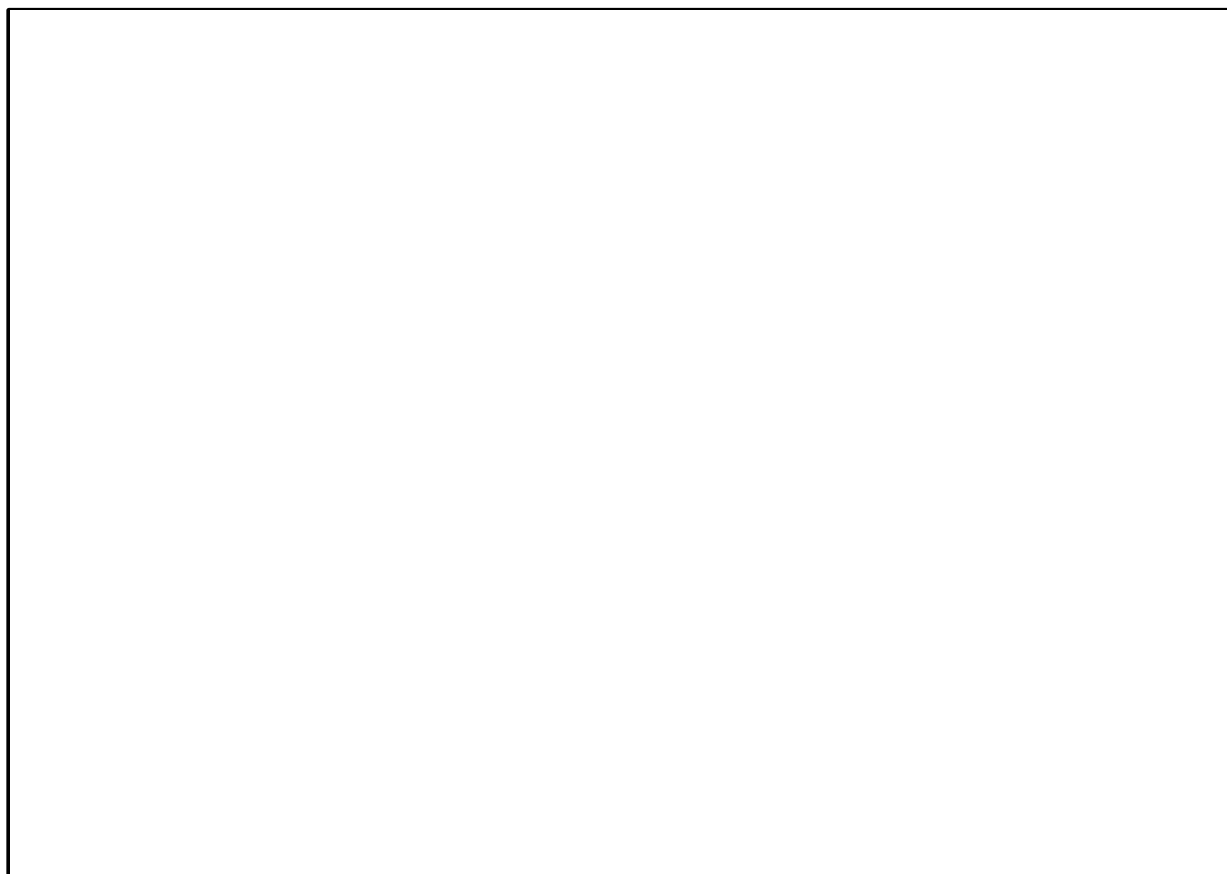


図 3-3 No. 34 竜巻防護鋼製フードの解析モデル図

(b) 設計飛来物

設計飛来物である鋼製足場板は、シェル要素でモデル化する。

設計飛来物の解析モデル図を図3-4に示す。

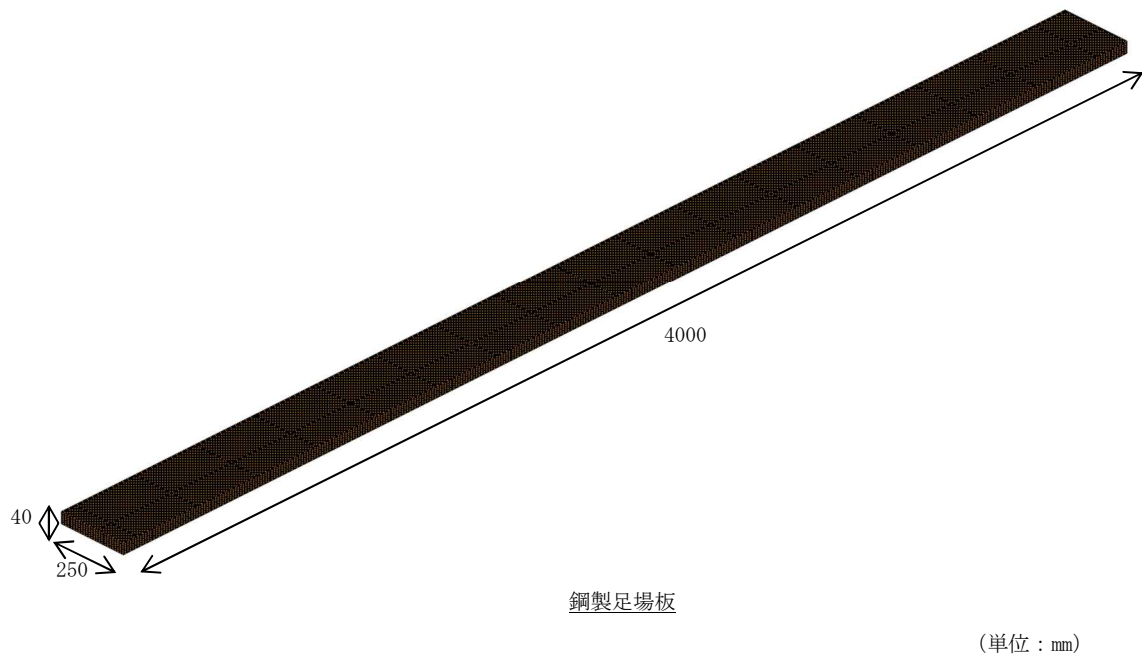


図3-4 設計飛来物の解析モデル図

b. 解析コード

衝突解析には、解析コード「LS-DYNA」を用いる。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「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

c. 使用材料

構成する材料仕様については、「3.4(1) 評価対象部位の材料仕様」に示すとおり設定する。

d. 材料定数

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

e. 材料の非線形特性

(a) 材料の応力-ひずみ関係

竜巻防護鋼製フードの材料モデルでは、鋼材の破断ひずみを設定し、破断ひずみを越えた要素が荷重を負担しないことを考慮する。

材料の応力-ひずみ関係はバイリニア型とし、降伏後の塑性硬化係数（2次勾配E'）は、表3-7に示す値とする。

材料に適用する応力-ひずみ関係の概念図を図3-5に示す。

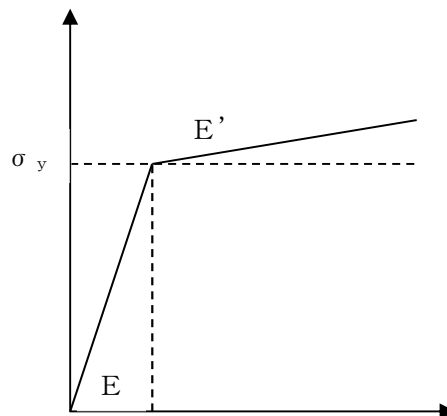


図3-5 応力-ひずみ関係の概念図

(b) ひずみ速度効果

竜巻による設計飛来物に対する解析は、衝撃問題で変形速度が大きいため、ひずみ速度効果を考慮することとし、以下に示す Cowper-Symonds の式を適用する。

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

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

ひずみ速度依存性パラメータを表 3-11 に示す。

表 3-11 ひずみ速度依存性パラメータ

	鋼製足場板	竜巻防護鋼製フード	
		防護鋼板	架構
材料	SS400	SUS304	SUS304
C (s ⁻¹)			
P			

(c) 破断ひずみ

破断ひずみは、J I Sに規定されている伸びの下限値を基に設定する。また、「NEI07-13」においてTF（多軸性係数）を□とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF=□を考慮する。TFについては、竜巻防護鋼製フードのみ□とする。鋼製足場板は保守的に破断ひずみを超えても荷重を負担するものとする。

材料モデルにおける破断ひずみを表 3-12 に示す。

表 3-12 材料モデルにおける破断ひずみ

種別	材質	J I S規格値 (下限値)	TF	破断ひずみ*
防護鋼板	SUS304	0.4		
架構	SUS304	0.4		

注記*：真ひずみ換算値

4. 評価条件

4.1 貫通評価

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

表 4-1 防護鋼板の貫通評価式に用いる評価条件

評価条件		数値
d (m)		0.021
K		1.0
M (kg)		11
V (m/s)	水平方向	42
	鉛直方向	38

4.2 変形評価

竜巻防護鋼製フードの変形評価は、図 3-1 に示す竜巻防護鋼製フードの最大変形が生じると想定される鋼板中央部に衝突するケースを設定する。

解析ケースを表 4-2 及び図 4-1 に示す。

表 4-2 解析ケース (変形評価)


評価箇所		衝突箇所	飛来物の 衝突方向	対象部材
竜巻防護鋼製 フード	No. 31	防護鋼板	水平	
	No. 34	防護鋼板	水平	



図 4-1 解析ケース (竜巻防護鋼製フード (全 No. 共通))

5. 強度評価結果

5.1 貫通評価

足場パイプの貫通限界厚さを表 5-1 に示す。

表 5-1 足場パイプの貫通限界厚さ

		貫通限界厚さ (mm)
貫通限界厚さ	水平方向	17
	鉛直方向	15

竜巻防護鋼製フードの貫通評価結果として、貫通限界厚さと許容限界の比較を表 5-2 に示す。

許容限界は、設計飛来物による貫通を生じない貫通限界厚さを上回っており、貫通しない。

表 5-2 防護鋼板の板厚と貫通限界厚さの比較

評価対象部位		設置方向	評価結果 (mm)	許容限界 (mm)
竜巻防護鋼製 フード	防護 鋼板	側面	17	
		上面	15	

5.2 変形評価

評価結果を表 5-3 及び図 5-1 から図 5-2 に示す。

竜巻防護鋼製フードに生じるひずみは許容限界を超えない。

表 5-3 衝突解析結果

評価項目	評価対象部位		評価結果	許容限界*
ひずみ	No. 31	防護鋼板		
		架構		
	No. 34	防護鋼板		
		架構		

注記* : 真ひずみ換算値

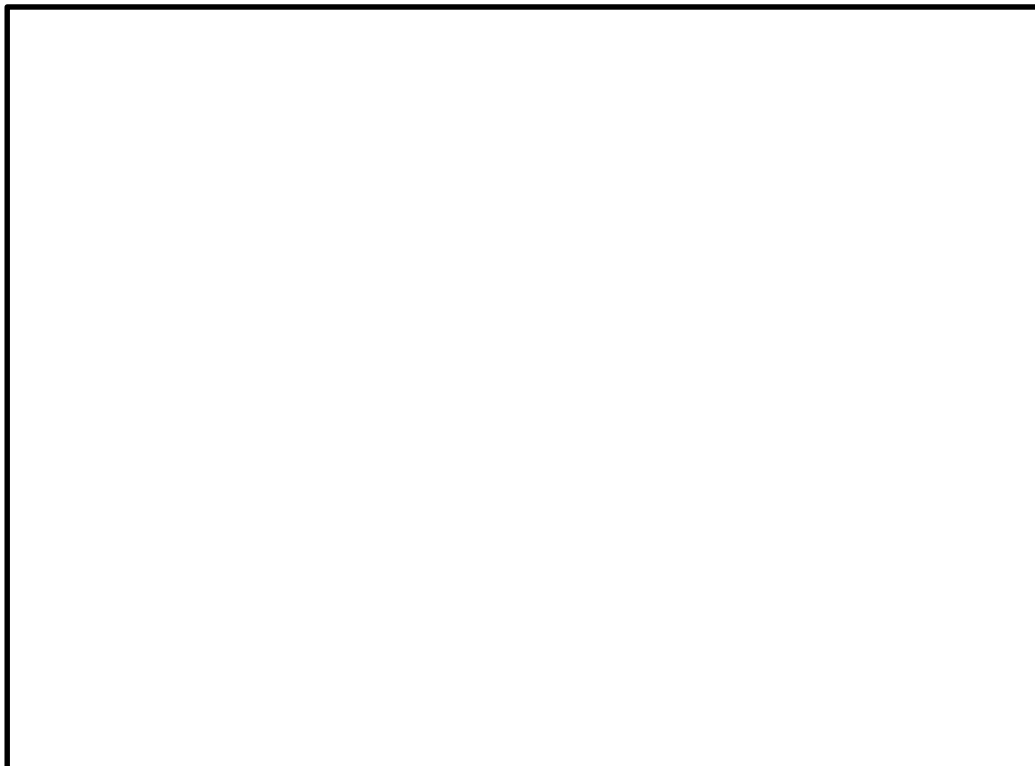


図 5-1(1/2) 防護鋼板のひずみ分布図 (竜巻防護鋼製フード (No. 31))



図 5-1(2/2) 架構のひずみ分布図 (竜巻防護鋼製フード (No. 31))



図 5-2(1/2) 防護鋼板のひずみ分布図 (竜巻防護鋼製フード (No. 34))



図 5-2(2/2) 架構のひずみ分布図 (竜巻防護鋼製フード (No. 34))

VI-3-別添 1-4-3 竜巻防護鉄筋コンクリート製フードの強度計算書

目 次

1. 概要	1
-------------	---

1. 概要

本資料は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」のとおり、防護対策施設のうち、竜巻防護鉄筋コンクリート製フード（以下「コンクリ製フード」という。）が、設計竜巻による設計飛来物の衝突に対し、竜巻時及び竜巻通過後においても、外部事象防護対象施設に設計飛来物を衝突させず、また、機械的な波及的影響を与えず、外部事象防護対策施設の安全機能を考慮して、コンクリ製フードを構成する壁及びスラブが構造健全性を有することを確認するものである。

コンクリ製フードの強度に関する説明は、令和2年10月14日付け原規規発第2010147号にて認可された柏崎刈羽原子力発電所第7号機の設計及び工事の計画のV-3-別添 1-4-3「竜巻防護鉄筋コンクリート製フードの強度計算書」による。

VI-3-別添 1-4-4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の
強度計算書

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	2
2.1 位置	2
2.2 構造概要	3
2.3 評価方針	5
2.4 適用規格	7
3. 強度評価方法	8
3.1 記号の定義	8
3.2 評価対象部位	9
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	15
4. 評価条件	20
4.1 貫通評価	20
4.2 変形評価	21
5. 強度評価結果	23
5.1 貫通評価	23
5.2 変形評価	24

1. 概要

本資料は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」のとおり、防護対策施設のうち、非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板が、設計竜巻による設計飛来物の衝突に対し、竜巻時及び竜巻通過後においても、外部事象防護対象施設に設計飛来物を衝突させず、また、機械的な波及的影響を与えず、外部事象防護対象施設の安全機能を考慮して、非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板を構成する防護鋼板及び架構が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」を踏まえ、非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の「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

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板は、屋外の軽油タンクエリアに設置する。

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の設置位置を図 2-1 に示す。

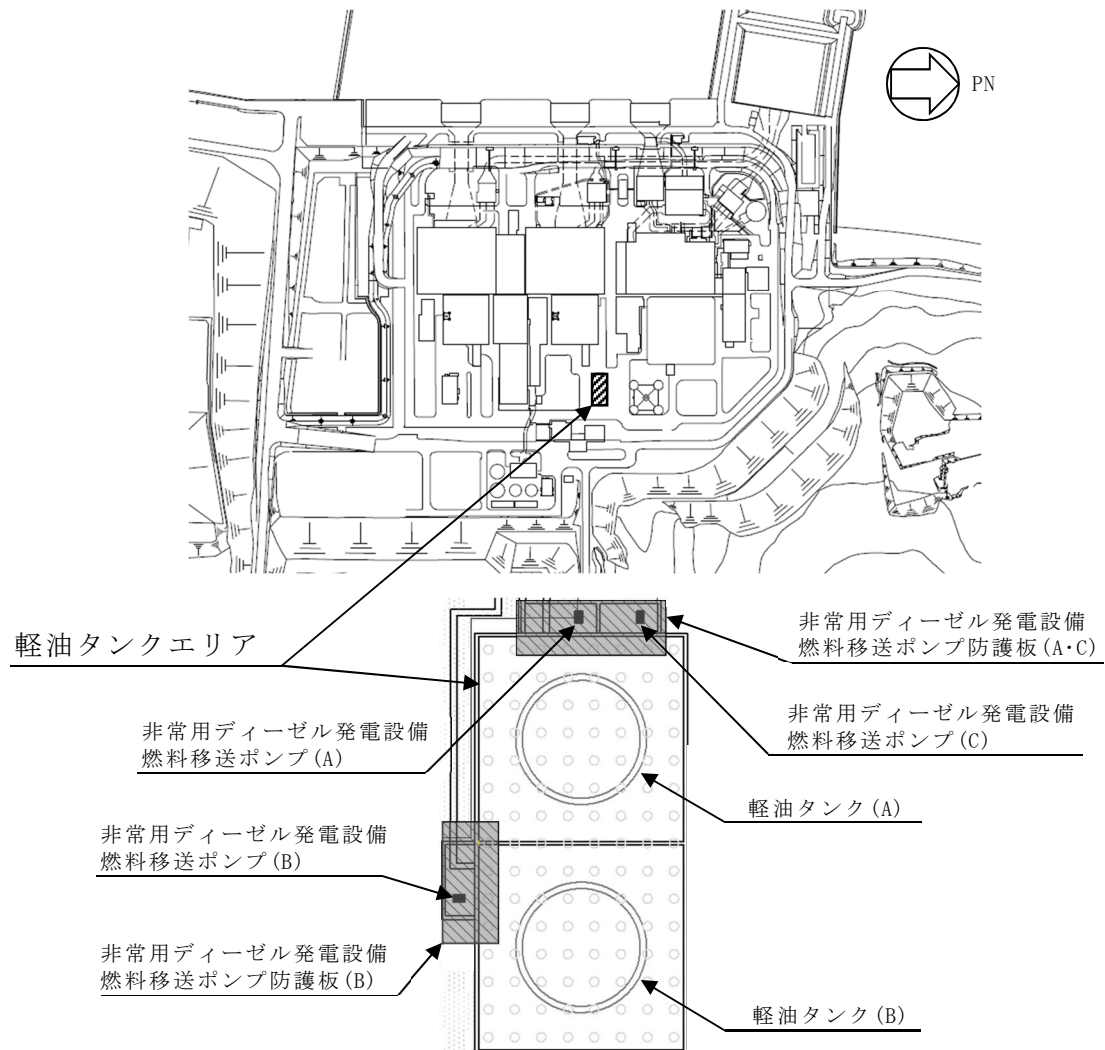


図 2-1 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の位置図

2.2 構造概要

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の構造は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「3.4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の構造設計」に示す構造設計を踏まえ、設定する。

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板は、鋼板等で構成する鋼製構造物である。

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の構造図を図 2-2 及び図 2-3 に示す。

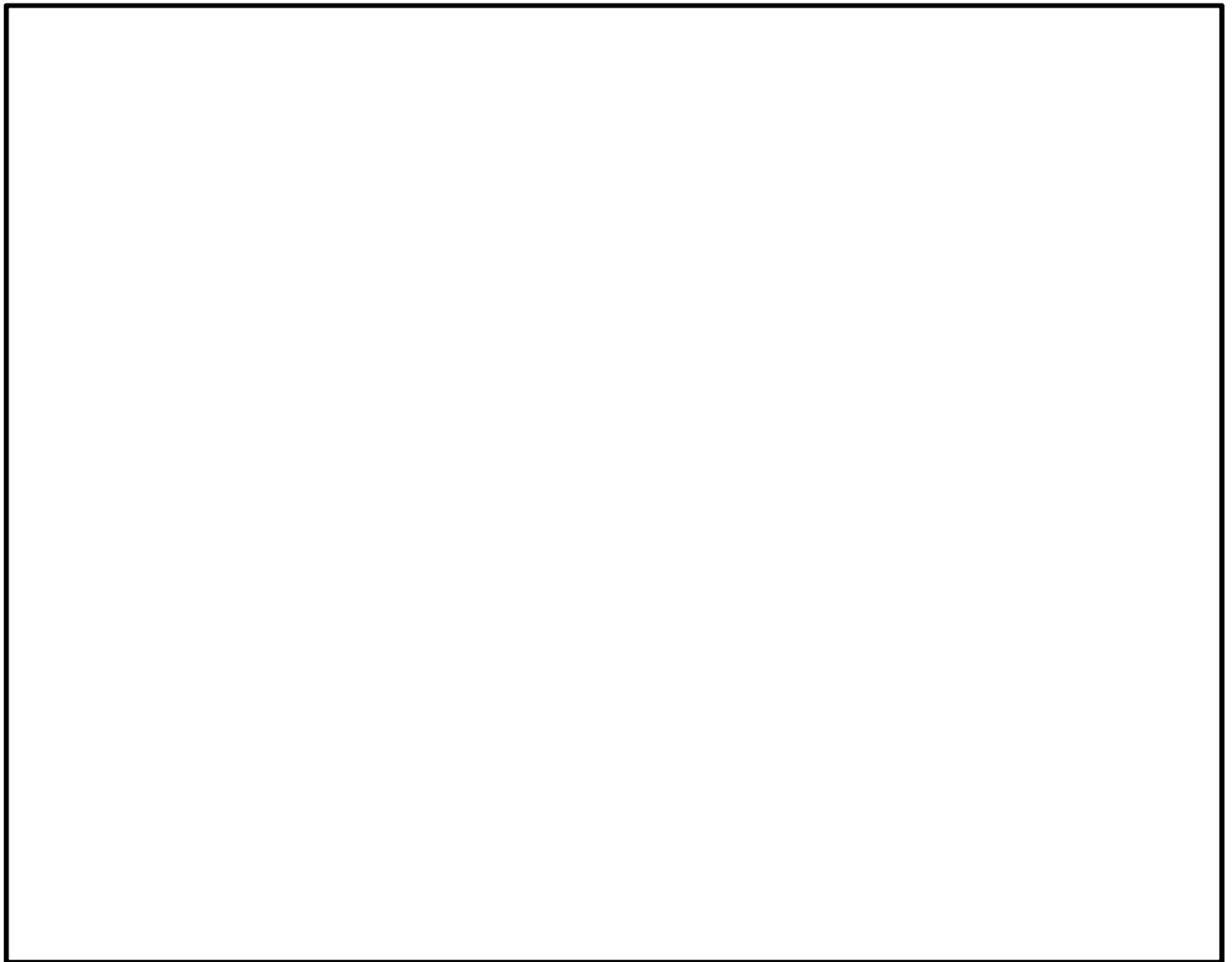


図 2-2 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板(A・C)の構造図

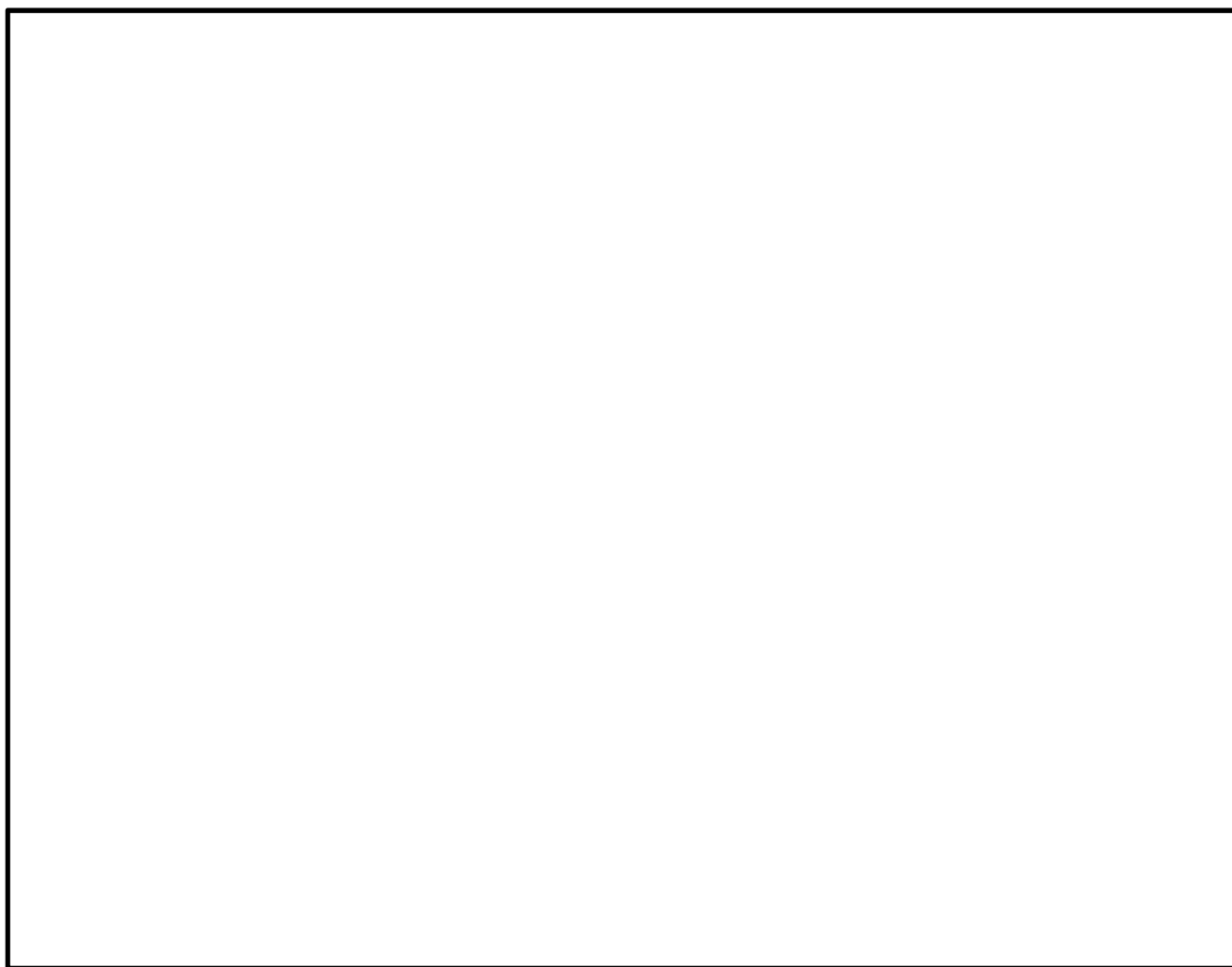


図 2-3 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板(B)の構造図

2.3 評価方針

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の強度評価は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」及び「5.4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の許容限界」にて設定している荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の評価対象部位に作用する変形等が、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。

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の評価フローを図 2-4 に示す。

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の強度評価においては、その構造を踏まえ、設計竜巻荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を設定する。

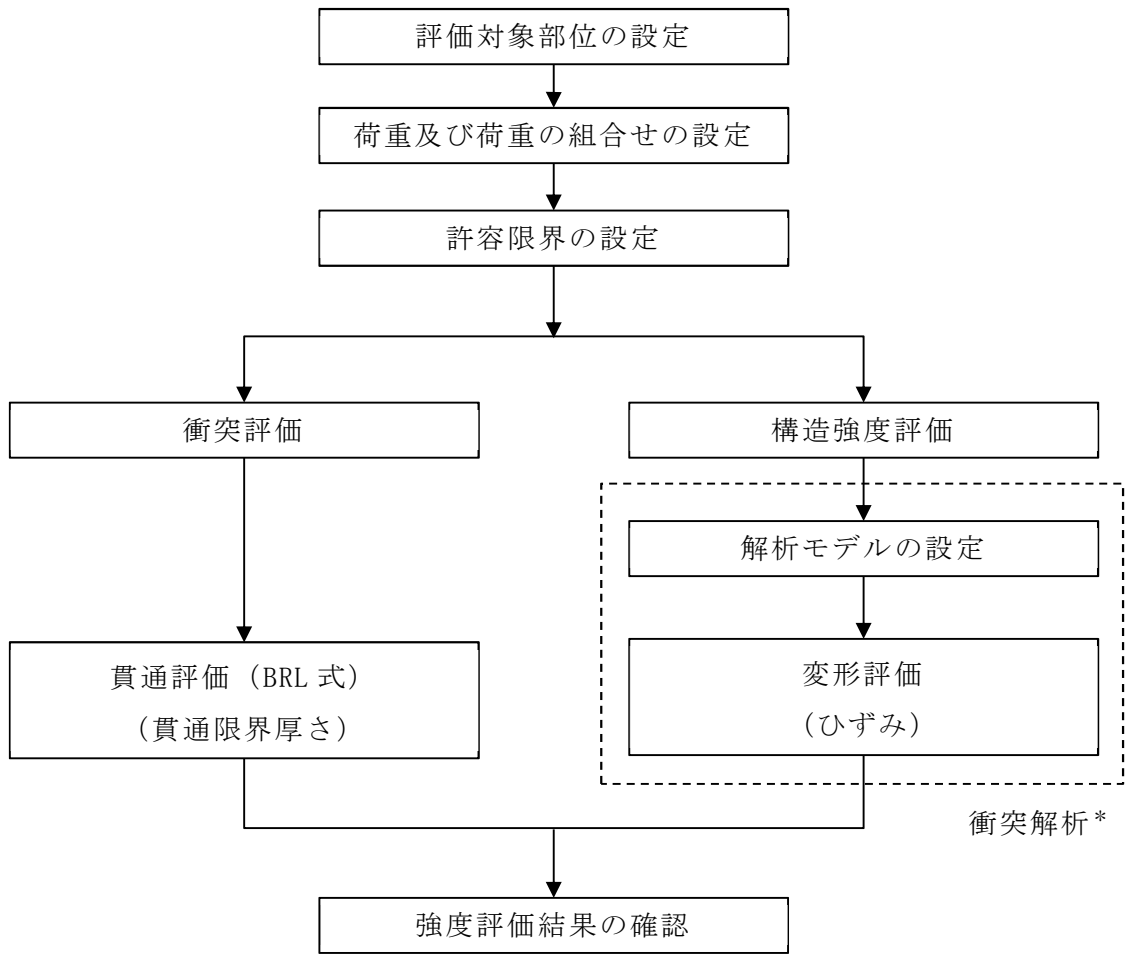
具体的には、設計飛来物が外部事象防護対象施設に衝突する直接的な影響の評価として、防護対策施設を構成する部材に対する衝突評価、及び、防護対策施設自体が外部事象防護対象施設に衝突・接触する波及的な影響の評価として、防護対策施設を構成する部位の転倒及び脱落に対する構造強度評価を行う。

(1) 衝突評価

設計荷重に対し、設計飛来物が施設を構成する部材を貫通しない設計とするために、防護鋼板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。（以下「貫通評価」という。）衝突評価には、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「6.4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の強度評価」に示す評価式を用いる。

(2) 構造強度評価

設計荷重に対し、施設を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とするために、防護鋼板及び架構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。（以下「変形評価」という。）



注記*：衝突解析については、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、防護鋼板及び架構について評価を実施する。

図 2-4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- 建築基準法及び同施行令
- 「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC 1-2005/2007」（日本機械学会）
- ISE7607-3「軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査 その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討」（昭和51年10月高温構造安全技術研究組合）
- タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日原子炉安全専門審査会）
- U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision1, March 2007
- Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8 (NEI 07-13))
- 「建築物荷重指針・同解説」（日本建築学会，2004改定）
- 「鋼構造設計規準－許容応力度設計法－」（日本建築学会，2005改定）
- 日本産業規格（JIS）

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

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	非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の受圧面積
C	—	風力係数
d	m	設計飛来物が衝突する衝突断面の等価直径
F _d	N	常時作用する荷重
G	—	ガスト影響係数
K	—	鋼板の材質に関する係数
M	kg	設計飛来物の質量
q	Pa	設計用速度圧
T	m	貫通限界厚さ
V	m/s	設計飛来物の飛来速度
V _D	m/s	設計竜巻の最大風速
W _M	N	設計飛来物による衝撃荷重
W _P	N	気圧差による荷重
W _W	N	設計竜巻の風圧力による荷重
ΔP _{max}	N/m ²	最大気圧低下量
ρ	kg/m ³	空気密度

3.2 評価対象部位

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の評価対象部位は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の許容限界」に示す評価対象部位を踏まえ、設定する。

(1) 貫通評価

設計荷重に対し、設計飛来物が施設を構成する部材を貫通しない設計とするために、防護鋼板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。

施設を構成する部材が設計飛来物を貫通させないことの確認においては、外殻を構成する防護鋼板を評価対象部位として設定する。

(2) 変形評価

設計荷重に対し、施設を構成する部材自体が、転倒及び脱落により外部事象防護対象施設へ接触等の影響を与えない設計とするために、防護鋼板及び架構に終局状態に至るようなひずみが生じないことを解析により確認する。

設計飛来物の衝突を考慮する場合、運動エネルギーが最大となる水平方向衝突の鋼製足場板を設定する。また、被衝突物の支持間隔が長く、厚さが薄いほどたわみ量が大きくなる傾向にある。したがって、変形評価としては、評価対象となる防護鋼板の支持間隔が長く、厚さが薄い箇所を選定する。なお、防護鋼板の設計においては、厚さを一律 とすることから、支持間隔が最長となる箇所が代表となる。衝突位置については、たわみ量が大きくなるよう部材の中央とする。

評価対象部位を図 3-1 及び図 3-2 に示す。

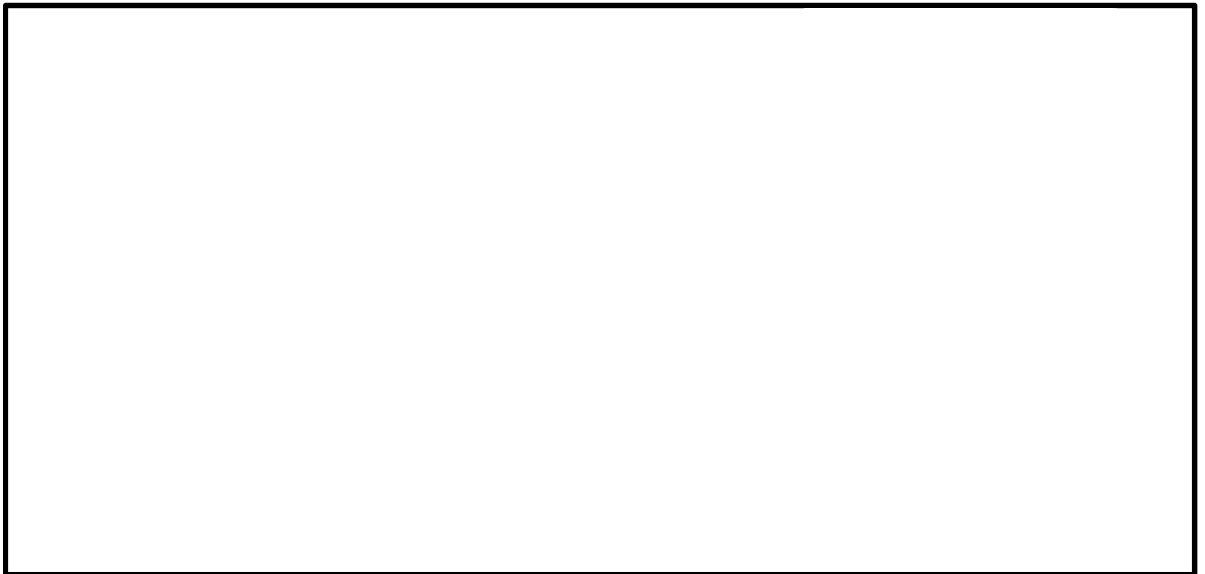


図 3-1 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板(A・C)の評価位置図

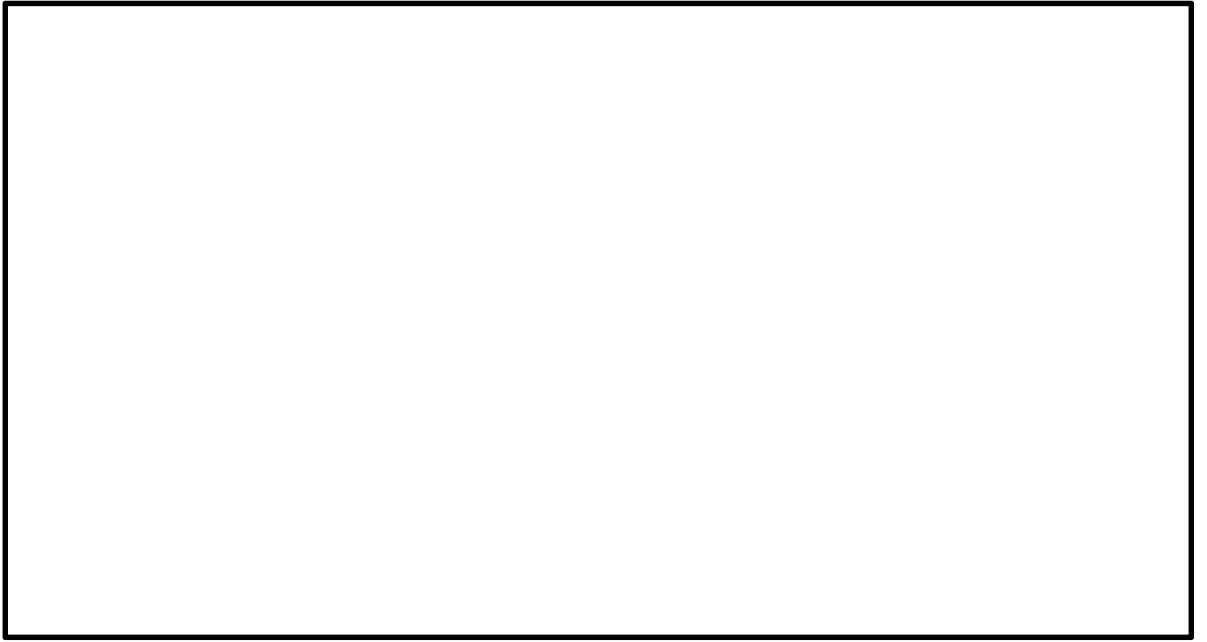


図 3-2 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板(B)の評価位置図

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

(1) 荷重の設定

強度評価に用いる荷重は以下の荷重を用いる。荷重の算定に用いる竜巻の特性値を表 3-2 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)
92	14	78	6400

a. 風圧力による荷重 (W_W)

風圧力による荷重 (W_W) は、下式により算出する。

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

設計用速度圧 q は、下式により算定する。

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

b. 気圧差による荷重 (W_P)

気圧差による荷重 (W_P) は、下式により算出する。

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

c. 設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)

設計飛来物による衝撃荷重 (W_M) については、表 3-3 に諸元を示す設計飛来物の衝突に伴う荷重とする。また、設計飛来物の材料定数を表 3-4 に示す。飛来速度については、評価の代表性を考慮し、水平方向、鉛直方向の飛来速度のうち大きい水平方向速度を設定する。

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

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

表 3-3 設計飛来物の諸元

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

表 3-4 設計飛来物の材料定数

設計飛来物	降伏応力 σ_y (MPa)	縦弾性係数 E (MPa)	ポアソン比
足場パイプ	355	201667	0.3
鋼製足場板	245	201667	0.3

d. 常時作用する荷重 (F_d)

常時作用する荷重 (F_d) は、部材の自重とする。

(2) 荷重の組合せ

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

荷重の組合せを表 3-5 に示す。

表 3-5 荷重の組合せ

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

3.4 許容限界

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の許容限界は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の許容限界」にて設定している許容限界を踏まえて、「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位の機能損傷モードを考慮して設定する。

(1) 評価対象部位の材料仕様

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の材料仕様を表 3-6 に示す。

表 3-6 評価対象部位の材料仕様

分類	仕様	材質
防護鋼板		SS400
架構		SS400

(2) 評価対象部位の材料定数

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の材料定数を表 3-7 に示す。

表 3-7 材料定数

材質	厚さ (mm)	降伏応力 σ_y (MPa)	縦弾性係数 E (MPa)	塑性硬化係数 E' (MPa)	ポアソン比
SS400			201667		0.3
SS400			201667		0.3

(3) 許容限界

a. 貫通評価

防護鋼板の貫通評価の許容限界を表 3-8 に示す。

表 3-8 貫通評価の許容限界

評価対象部位		設置方向	厚さ (mm)	材質
非常用ディーゼル発電設備 燃料移送ポンプ防護板	防護鋼板	側面		SS400
		上面		SS400

b. 変形評価

設計飛来物が防護鋼板へ直接衝突する場合の変形評価における許容限界は、鋼材の破断ひずみとする。破断ひずみについては、「3.5 (2)e. (c) 破断ひずみ」に示すとおり、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、「NEI07-13: Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs」(以下「NEI07-13」という。)において T F (多軸性係数) を とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕として T F = を考慮して設定する。

設定した許容限界を表 3-9 に示す。

表 3-9 変形評価の許容限界

評価対象部位		材質	破断ひずみ*
非常用ディーゼル発電設備 燃料移送ポンプ防護板	防護鋼板	SS400	
	架構	SS400	

注記* : 真ひずみ換算値

3.5 評価方法

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の強度評価は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「4.4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の評価方針」を踏まえて、衝突評価として貫通評価を実施する。また、構造強度評価として変形評価を実施する。

(1) 貫通評価

設計飛来物が防護鋼板へ直接衝突する場合の貫通限界厚さを、「タービンミサイル評価について（昭和 52 年 7 月 20 日原子炉安全専門審査会）」で用いられる BRL 式を用いて算出する。

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

(2) 変形評価

変形評価に用いる評価対象部位に生じるひずみは、解析モデル及び材料の非線形特性を用いた衝突解析により評価する。

a. 解析モデル及び諸元

(a) 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の解析モデル化の範囲は、想定する荷重の伝達を考慮し、非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板を構成する防護鋼板及び架構とする。防護鋼板及び架構は、シェル要素でモデル化する。非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の解析モデルの境界条件を表 3-10 に、解析モデル図を図 3-3 及び図 3-4 に示す。

表 3-10 解析モデルの境界条件

項目	境界条件
非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板と軽油タンク基礎	X, Y, Z 方向並進拘束

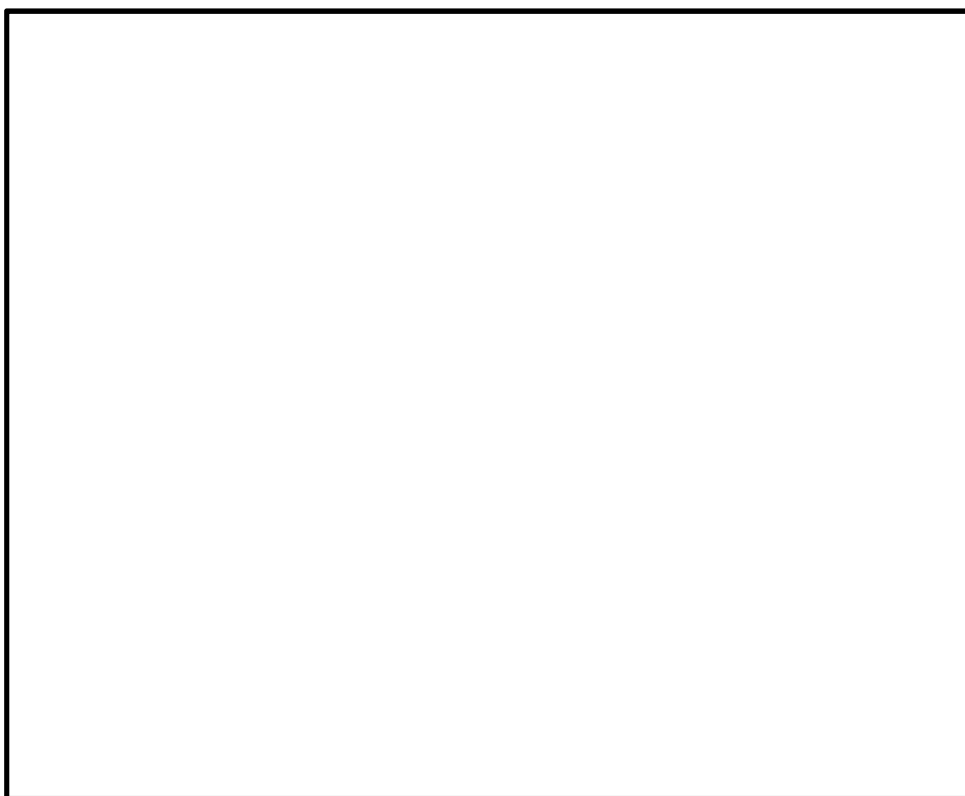


図 3-3 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板(A・C)の解析モデル図



図 3-4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板(B)の解析モデル図

(b) 設計飛来物

設計飛来物である鋼製足場板は、シェル要素でモデル化する。

設計飛来物の解析モデル図を図 3-5 に示す。

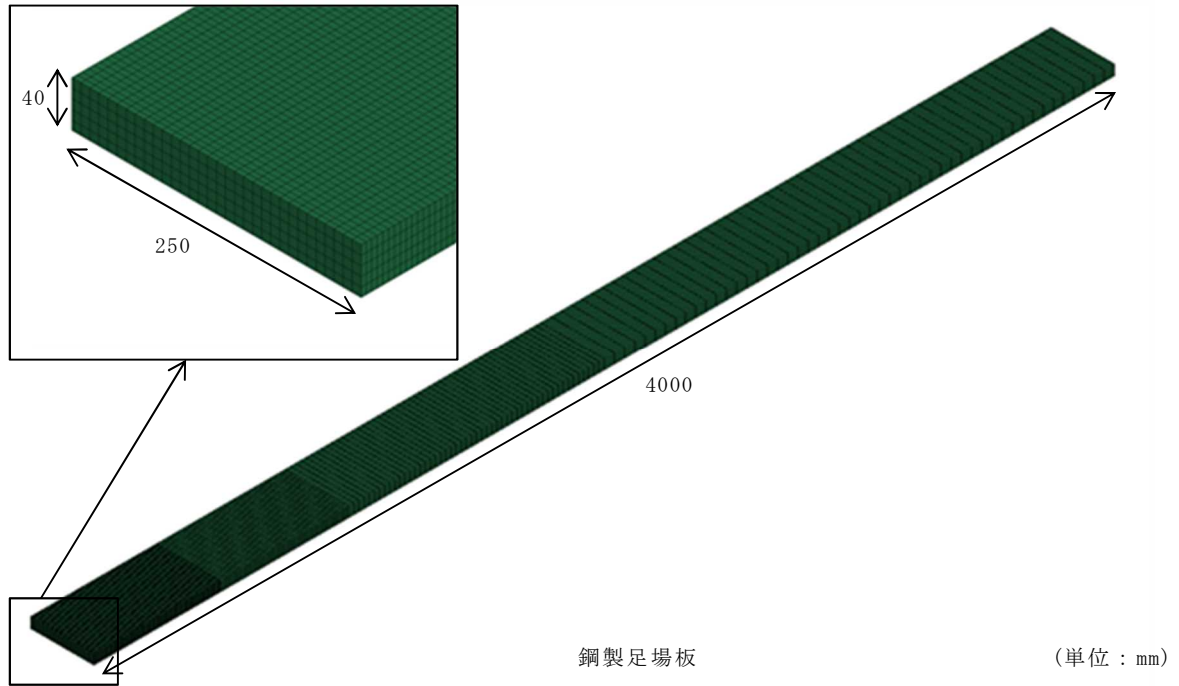


図 3-5 設計飛来物の解析モデル図

b. 解析コード

衝突解析には、解析コード「LS-DYNA」を用いる。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「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

c. 使用材料

構成する材料仕様については、「3.4(1) 評価対象部位の材料仕様」に示すとおり設定する。

d. 材料定数

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板に使用する鋼材の材料定数については、「3.4(2) 評価対象部位の材料定数」に示すとおり設定する。

e. 材料の非線形特性

(a) 材料の応力-ひずみ関係

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の材料モデルでは、鋼材の破断ひずみを設定し、破断ひずみを越えた要素が荷重を負担しないことを考慮する。

材料の応力-ひずみ関係はバイリニア型とし、降伏後の塑性硬化係数（2次勾配 E' ）は、表 3-7 に示す値とする。

材料に適用する応力-ひずみ関係の概念図を図 3-6 に示す。

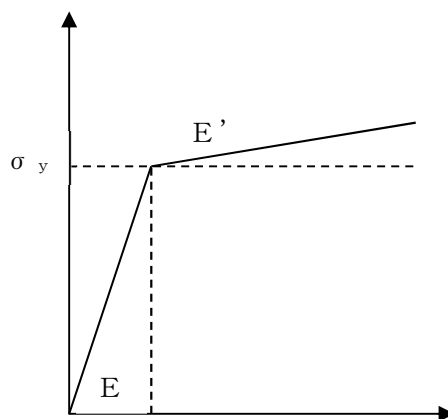


図 3-6 応力-ひずみ関係の概念図

(b) ひずみ速度効果

竜巻による設計飛来物に対する解析は、衝撃問題で変形速度が大きいため、ひずみ速度効果を考慮することとし、以下に示す Cowper-Symonds の式を適用する。

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

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

ひずみ速度依存性パラメータを表 3-11 に示す。

表 3-11 ひずみ速度依存性パラメータ

	鋼製足場板	非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板	
		防護鋼板	架構
材料	SS400	SS400	SS400
C (s ⁻¹)			
P			

(c) 破断ひずみ

破断ひずみは、J I Sに規定されている伸びの下限値を基に設定する。また、「NEI07-13」においてTF（多軸性係数）を□とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF=□を考慮する。TFについては、非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板のみ□とする。鋼製足場板は保守的に破断ひずみを超えても荷重を負担するものとする。

材料モデルにおける破断ひずみを表 3-12 に示す。

表 3-12 材料モデルにおける破断ひずみ

種別	材質	J I S規格値 (下限値)	TF	破断ひずみ*
防護鋼板	SS400 □			
架構	SS400 □			

注記*：真ひずみ換算値

4. 評価条件

4.1 貫通評価

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

表 4-1 防護鋼板の貫通評価式に用いる評価条件

評価条件		数値
d (m)		0.021
K		1.0
M (kg)		11
V (m/s)	水平方向	42
	鉛直方向	38

4.2 変形評価

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の変形評価は、図 3-1 及び図 3-2 に示す非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の最大変形が生じると想定される鋼板中央部に衝突するケースを設定する。

解析ケースを表 4-2 並びに図 4-1 及び図 4-2 に示す。

表 4-2 解析ケース（変形評価）

評価箇所	衝突箇所	飛来物の 衝突方向	対象部材
非常用ディーゼル発電設備 燃料移送ポンプ防護板	防護鋼板	水平	



図 4-1 解析ケース（非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板(A・C)）

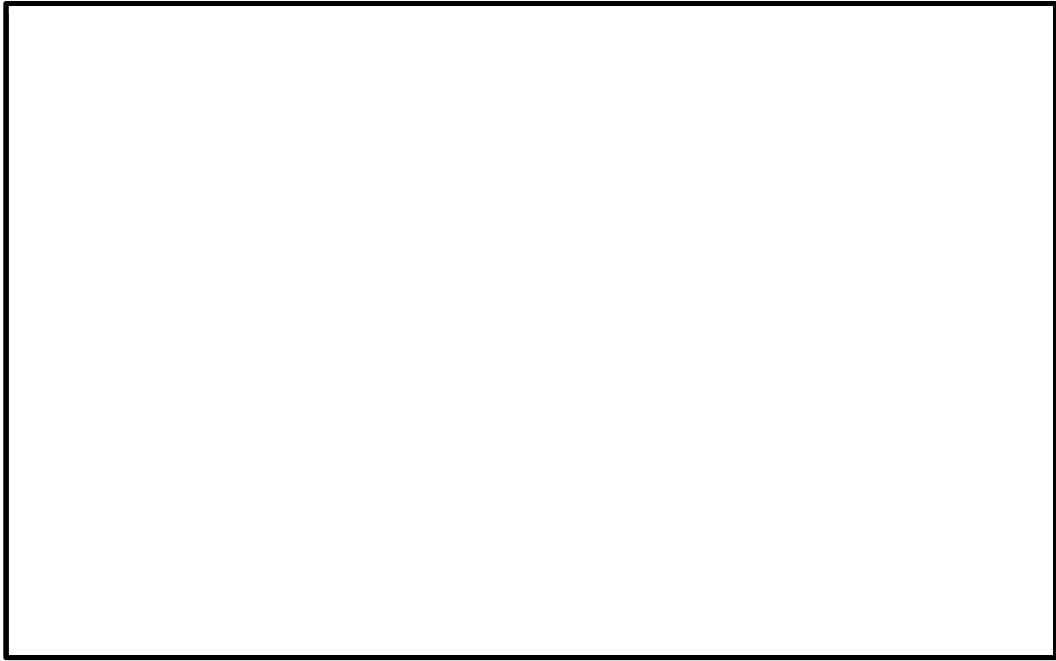


図 4-2 解析ケース（非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板(B)）

5. 強度評価結果

5.1 貫通評価

足場パイプの貫通限界厚さを表 5-1 に示す。

表 5-1 足場パイプの貫通限界厚さ

		貫通限界厚さ (mm)
貫通限界厚さ	水平方向	17
	鉛直方向	15

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の貫通評価結果として、貫通限界厚さと許容限界の比較を表 5-2 に示す。

許容限界は、設計飛来物による貫通を生じない貫通限界厚さを上回っており、貫通しない。

表 5-2 防護鋼板の板厚と貫通限界厚さの比較

評価対象部位		設置方向	評価結果 (mm)	許容限界 (mm)
非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板	防護鋼板	側面	17	
		上面	15	

5.2 変形評価

評価結果を表 5-3 並びに図 5-1 から図 5-4 に示す。

非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板に生じるひずみは許容限界を超えない。

表 5-3 衝突解析結果

評価項目	評価対象部位		評価結果	許容限界*
ひずみ	A・C	防護鋼板		
		架構		
	B	防護鋼板		
		架構		

注記*：真ひずみ換算値

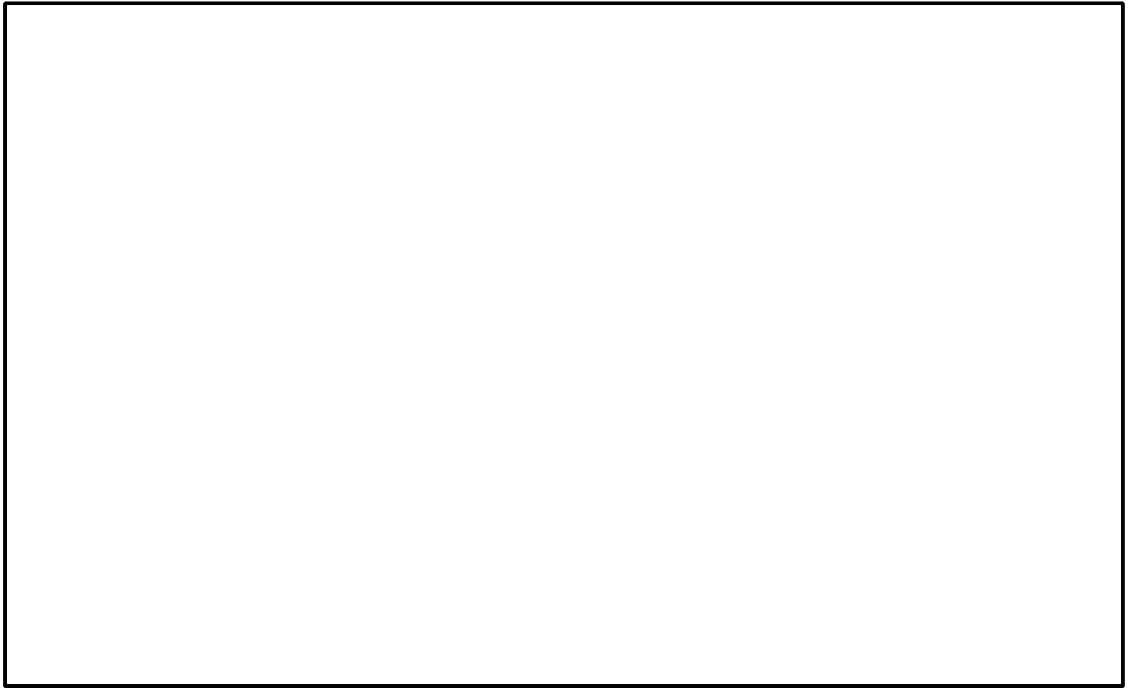


図 5-1 防護鋼板のひずみ分布図
(非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板(A・C))

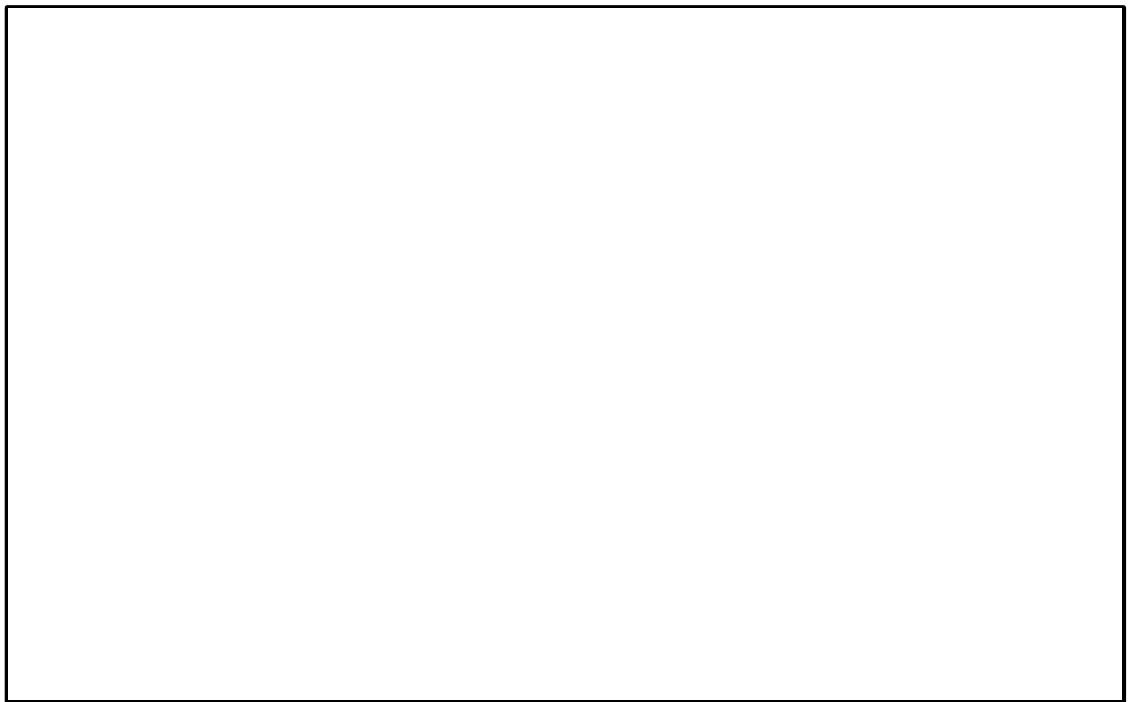


図 5-2 架構のひずみ分布図
(非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板(A・C))

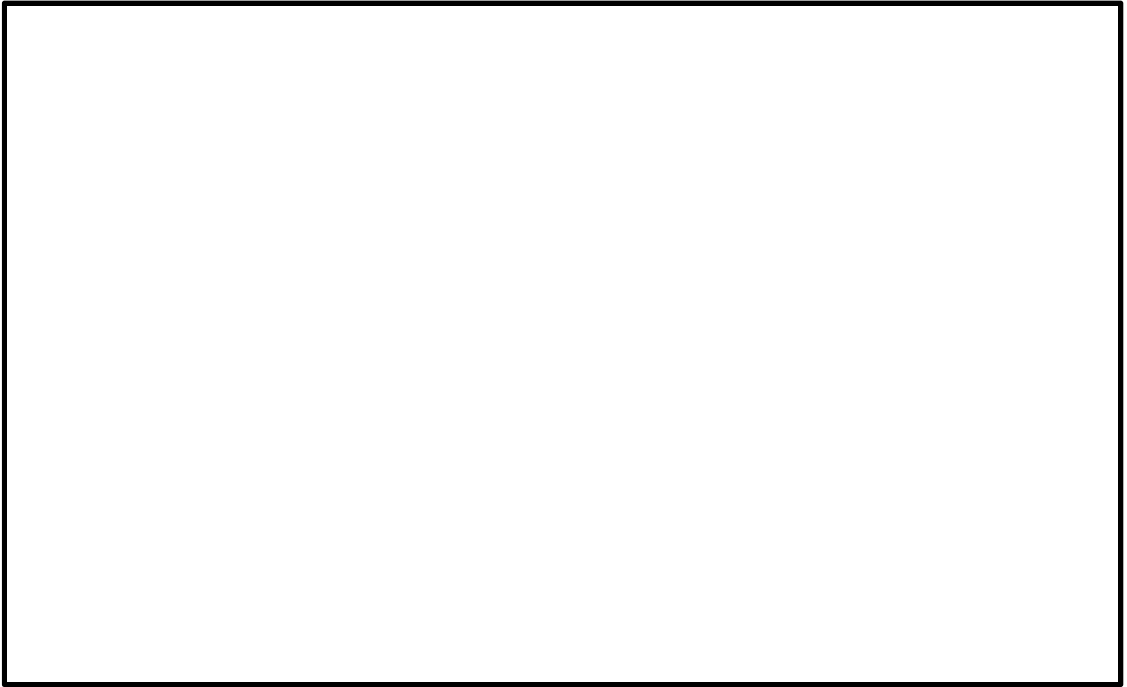


図 5-3 防護鋼板のひずみ分布図
(非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板(B))

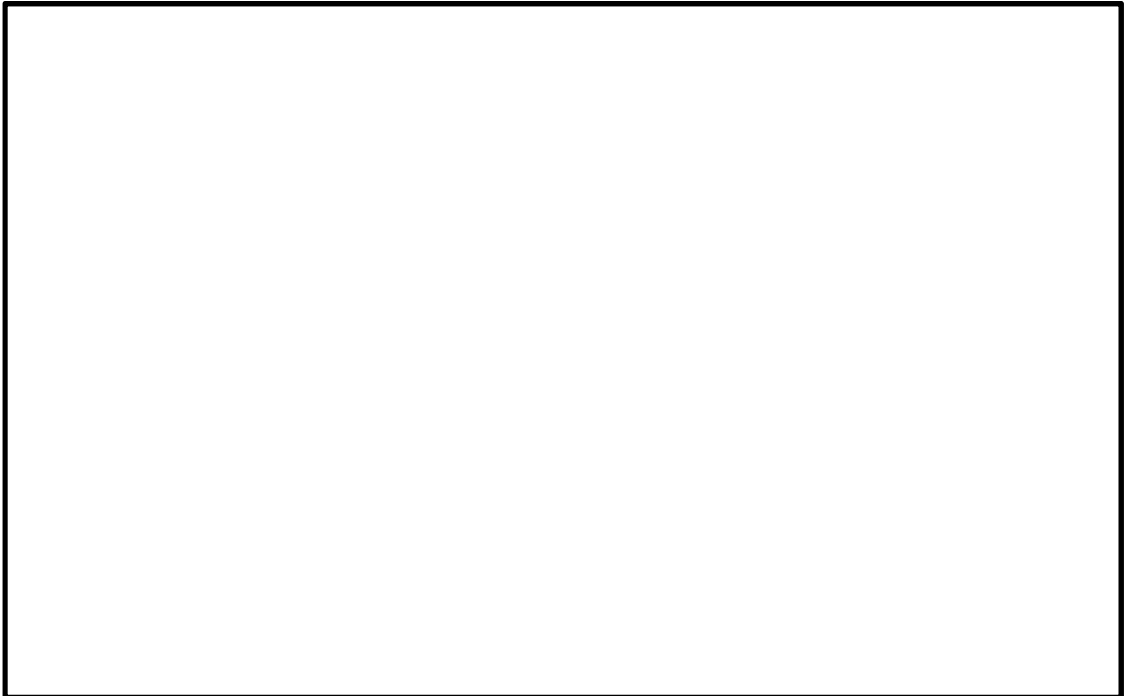


図 5-4 架構のひずみ分布図
(非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板(B))

VI-3-別添 1-4-5 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の
強度計算書

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	2
2.1 位置	2
2.2 構造概要	3
2.3 評価方針	7
2.4 適用規格	9
3. 強度評価方法	10
3.1 記号の定義	10
3.2 評価対象部位	11
3.3 荷重及び荷重の組合せ	14
3.4 許容限界	17
3.5 評価方法	20
4. 評価条件	26
4.1 貫通評価	26
4.2 変形評価	29
5. 強度評価結果	32
5.1 貫通評価	32
5.2 変形評価	35

1. 概要

本資料は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」のとおり、防護対策施設のうち、非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板が、設計竜巻による設計飛来物の衝突に対し、竜巻時及び竜巻通過後においても、外部事象防護対象施設に設計飛来物を衝突させず、また、機械的な波及的影響を与えず、外部事象防護対象施設の安全機能を考慮して、非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板を構成する防護鋼板及び架構が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」を踏まえ、非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の「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

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板は、屋外の軽油タンクエリアに設置する。

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の設置位置を図 2-1 に示す。

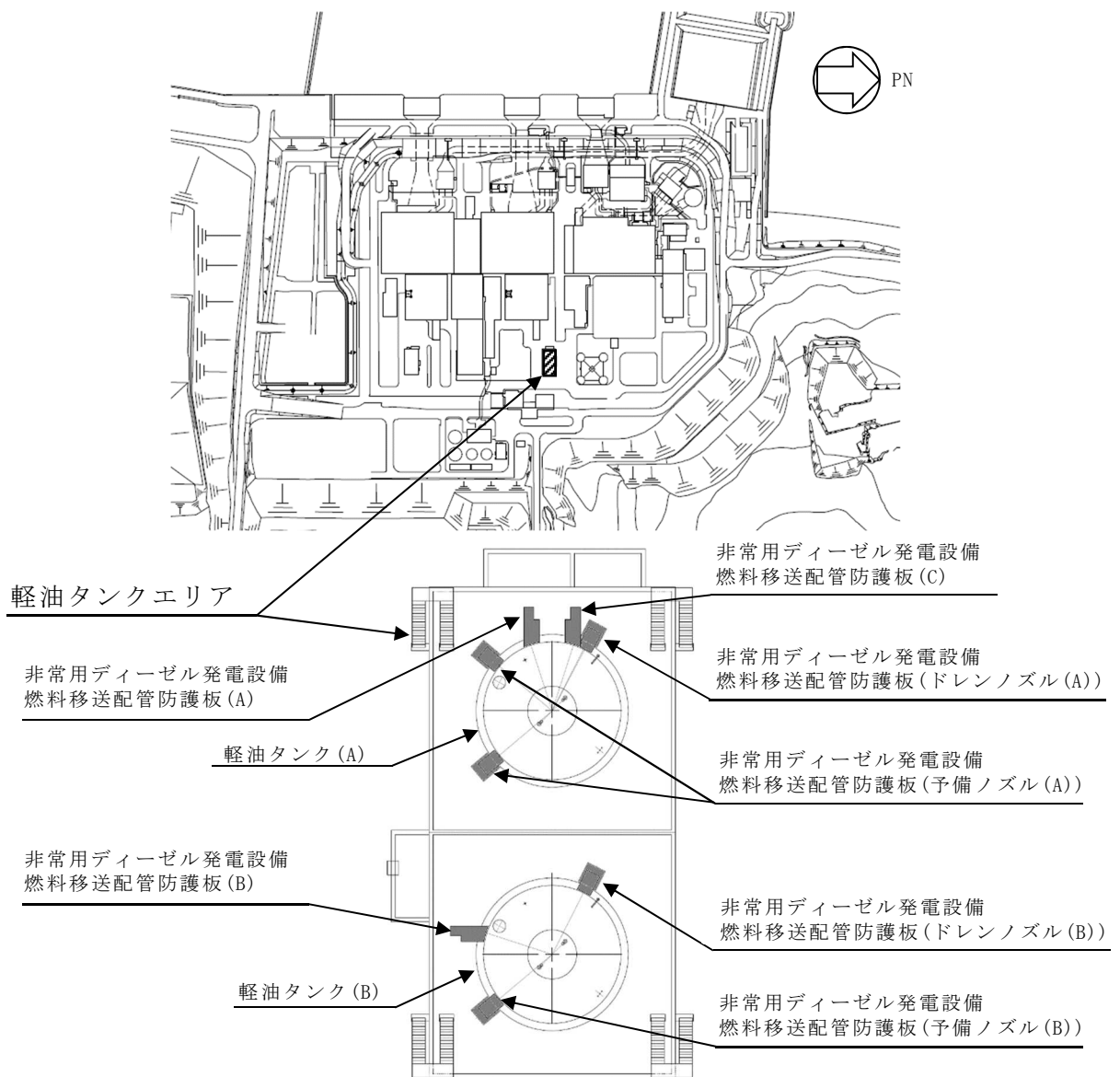


図 2-1 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の位置図

2.2 構造概要

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の構造は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「3.4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の構造設計」に示す構造設計を踏まえ、設定する。

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板は、鋼板等で構成する鋼製構造物である。

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の構造図を図 2-2 から図 2-5 に示す。

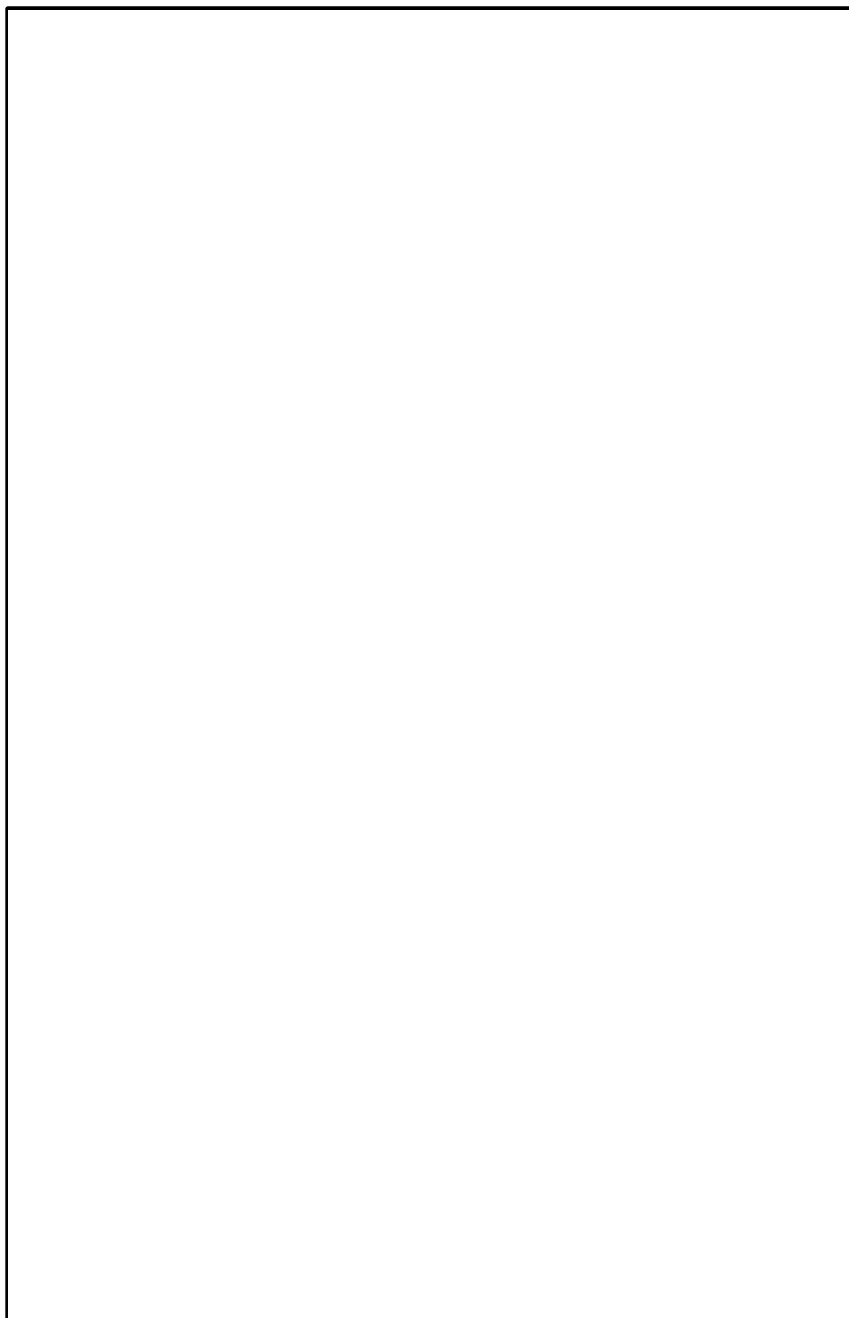


図 2-2 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板(A)及び(C)の構造図

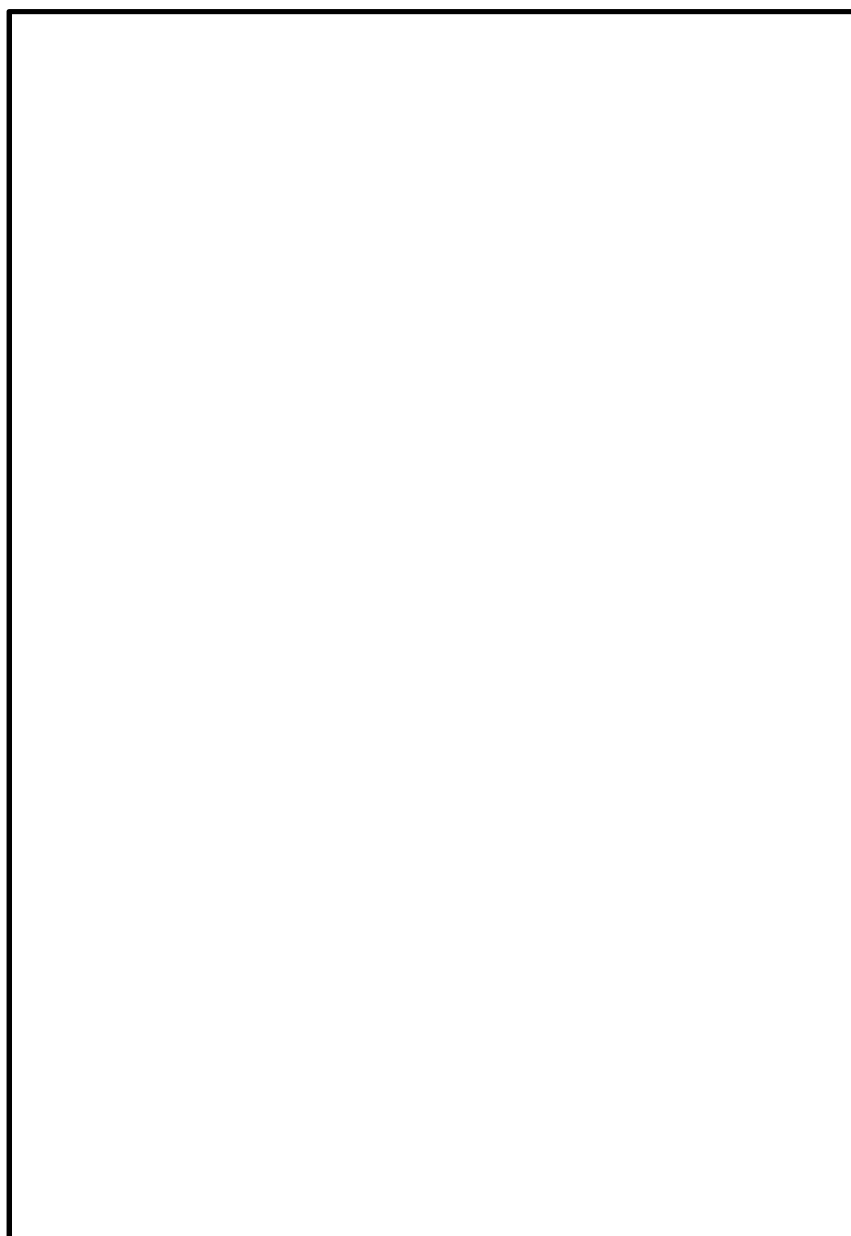


図 2-3 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板(B)の構造図

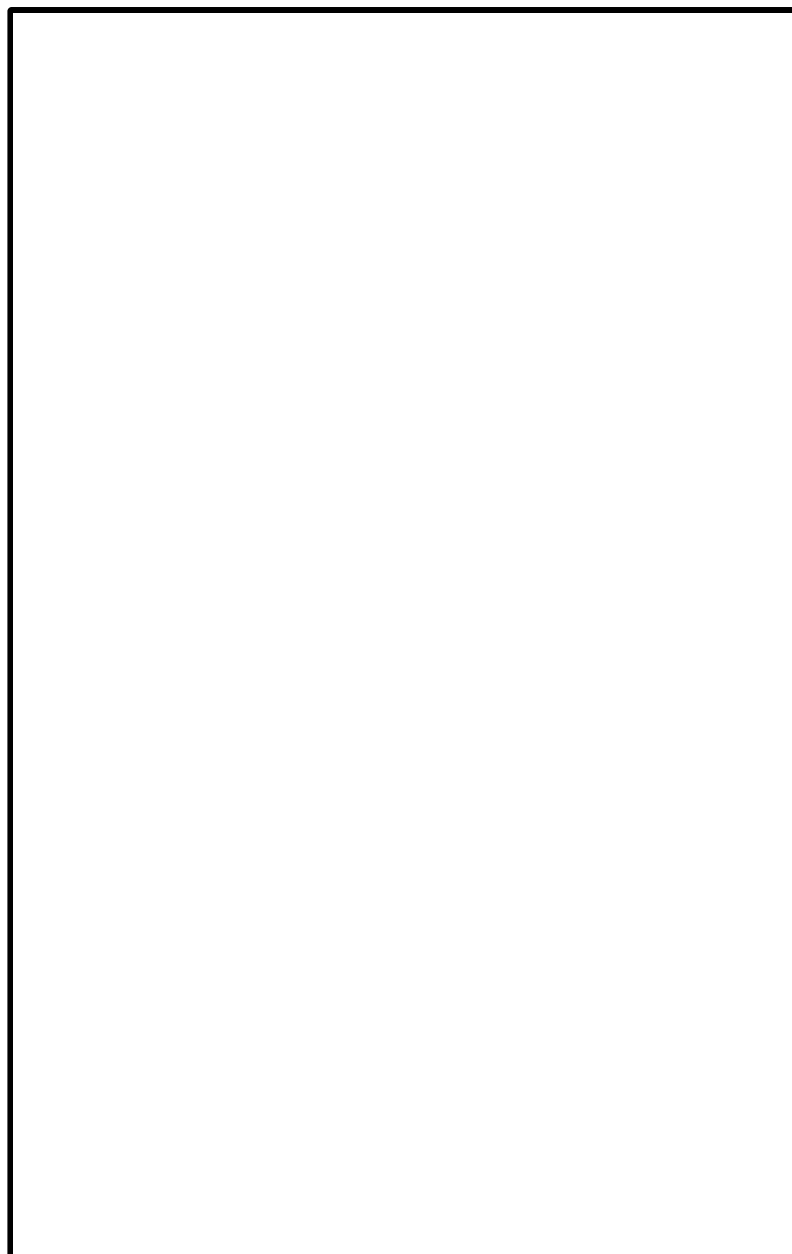


図 2-4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板（ドレンノズル(A)）の構造図

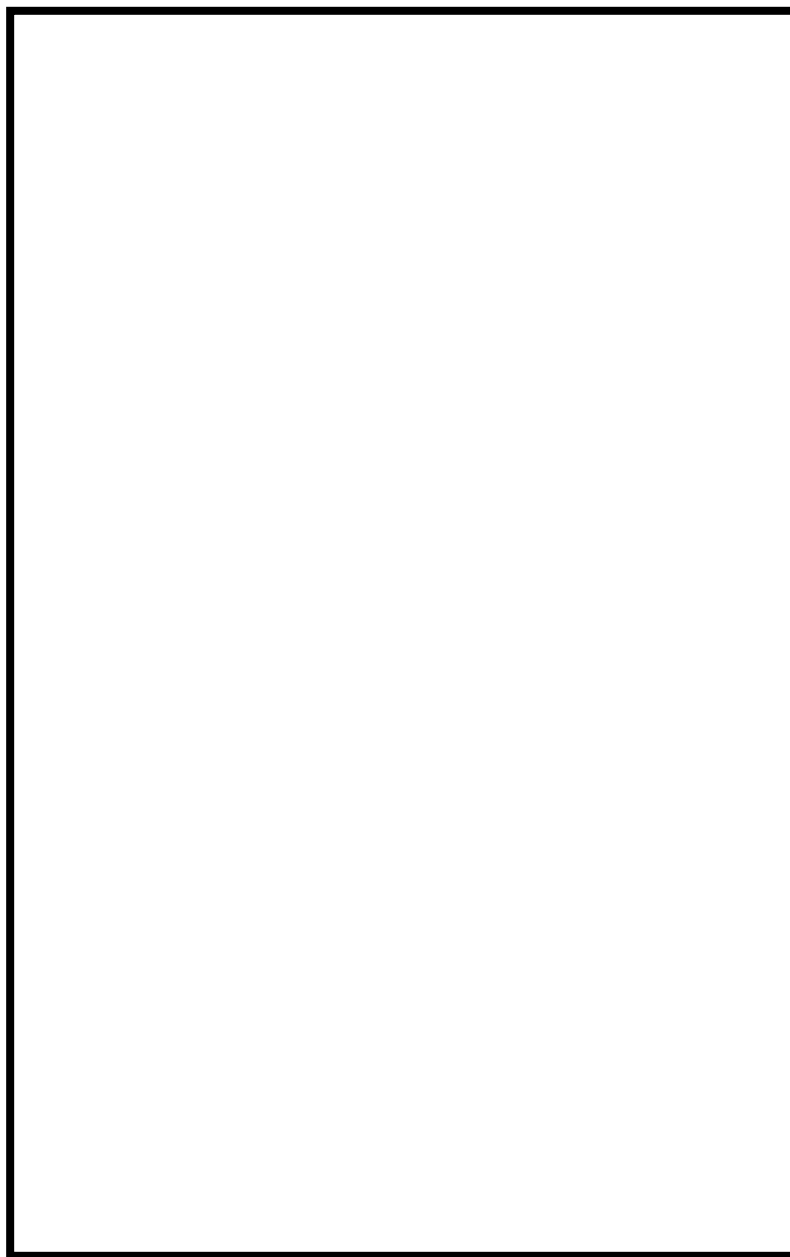


図 2-5 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板
(ドレンノズル(B), 予備ノズル(A)及び(B)) の構造図

2.3 評価方針

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の強度評価は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」及び「5.4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の許容限界」にて設定している荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の評価対象部位に作用する変形等が、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。

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の評価フローを図 2-6 に示す。

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の強度評価においては、その構造を踏まえ、設計竜巻荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を設定する。

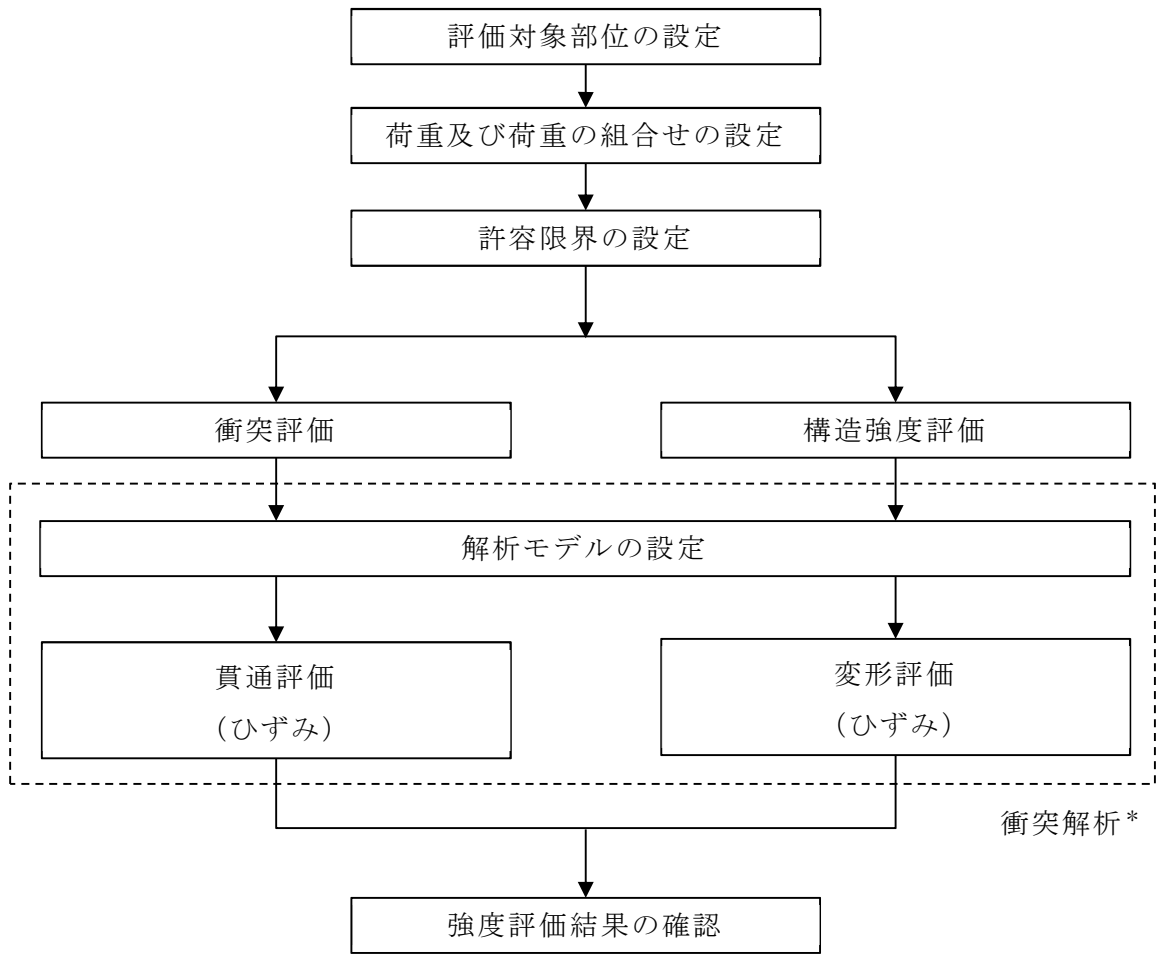
具体的には、設計飛来物が外部事象防護対象施設に衝突する直接的な影響の評価として、防護対策施設を構成する部材に対する衝突評価、及び、防護対策施設自体が外部事象防護対象施設に衝突・接触する波及的な影響の評価として、防護対策施設を構成する部位の転倒及び脱落に対する構造強度評価を行う。

(1) 衝突評価

設計荷重に対し、設計飛来物が施設を構成する部材を貫通しない設計とするために、防護鋼板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。（以下「貫通評価」という。）

(2) 構造強度評価

設計荷重に対し、施設を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とするために、防護鋼板及び架構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。（以下「変形評価」という。）



注記*：衝突解析については、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、防護鋼板及び架構について評価を実施する。

図 2-6 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- 建築基準法及び同施行令
- 「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC 1-2005/2007」(日本機械学会)
- U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision1, March 2007
- Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8 (NEI 07-13))
- 「建築物荷重指針・同解説」(日本建築学会, 2004 改定)
- 「鋼構造設計規準－許容応力度設計法－」(日本建築学会, 2005 改定)
- 日本産業規格 (J I S)

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

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	非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の受圧面積
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	Pa	設計用速度圧
V _D	m/s	設計竜巻の最大風速
W _M	N	設計飛来物による衝撃荷重
W _P	N	気圧差による荷重
W _W	N	設計竜巻の風圧力による荷重
ΔP _{max}	N/m ²	最大気圧低下量
ρ	kg/m ³	空気密度

3.2 評価対象部位

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の評価対象部位は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の許容限界」に示す評価対象部位を踏まえ、設定する。

(1) 貫通評価

設計荷重に対し、設計飛来物が施設を構成する部材を貫通しない設計とするために、防護鋼板に終局状態に至るようなひずみが生じないことを解析により確認する。

設計飛来物の衝突を考慮する場合、被衝突物の支持間隔が長く、厚さが薄いほどたわみ量が大きくなる傾向にある。したがって、変形評価としては、評価対象となる防護鋼板の支持間隔が長く、厚さが薄い箇所を選定する。なお、防護鋼板の設計においては、厚さを一律 とすることから、支持間隔が最長となる箇所が代表となる。衝突位置については、たわみ量が大きくなるよう部材の中央とする。

評価対象部位を図3-1から図3-4に示す。

なお、非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板(A)、(B)及び(C)のうちユニット1-2は、防護鋼板の支持間隔が最長となる箇所及び寸法が同一のため、「(C)/ユニット1-2」を代表として評価する。非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板(A)、(B)及び(C)のうちユニット3は、防護鋼板の支持間隔が最長となる箇所は同一ではあるものの、評価対象となる防護鋼板の寸法が(A)と(C)が同一であり(B)が異なるため、「(C)/ユニット3」及び「(B)/ユニット3」を代表として評価する。非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板(予備ノズル(A)及び(B)、ドレンノズル(A)及び(B))は、防護鋼板の支持間隔が最長となる箇所及び寸法が同一のため、「ドレンノズル(B)」を代表として評価する。

(2) 変形評価

設計荷重に対し、施設を構成する部材自体が、転倒及び脱落により外部事象防護対象施設へ接触等の影響を与えない設計とするために、防護鋼板及び架構に終局状態に至るようなひずみが生じないことを解析により確認する。

変形評価の評価対象部位は貫通評価と同じである。



図3-1 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 ((C)/ユニット1-2)
の評価位置図

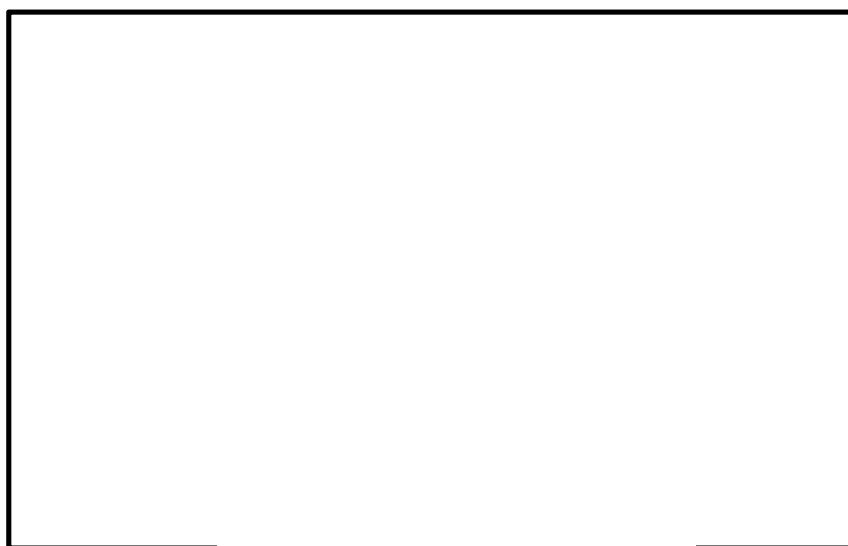


図3-2 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 ((C)/ユニット3)
の評価位置図

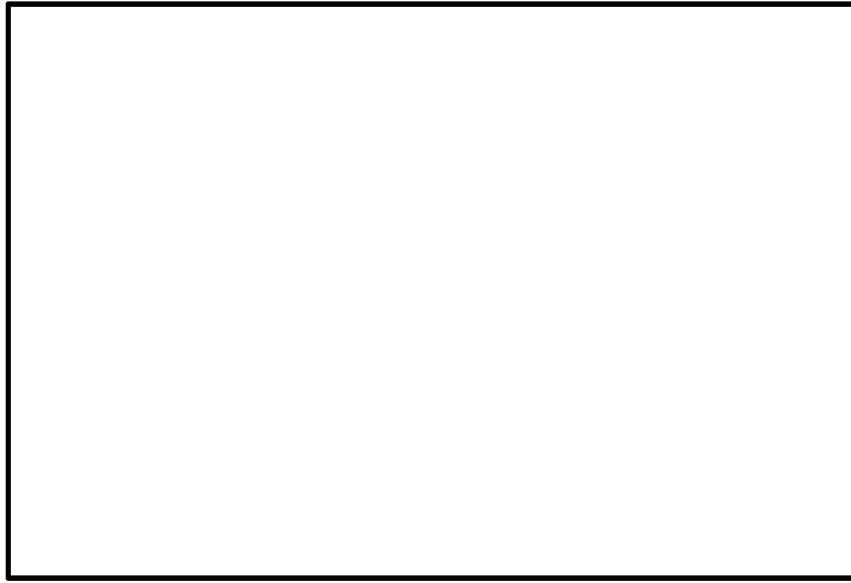


図3-3 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板（(B)/ユニット3）
の評価位置図

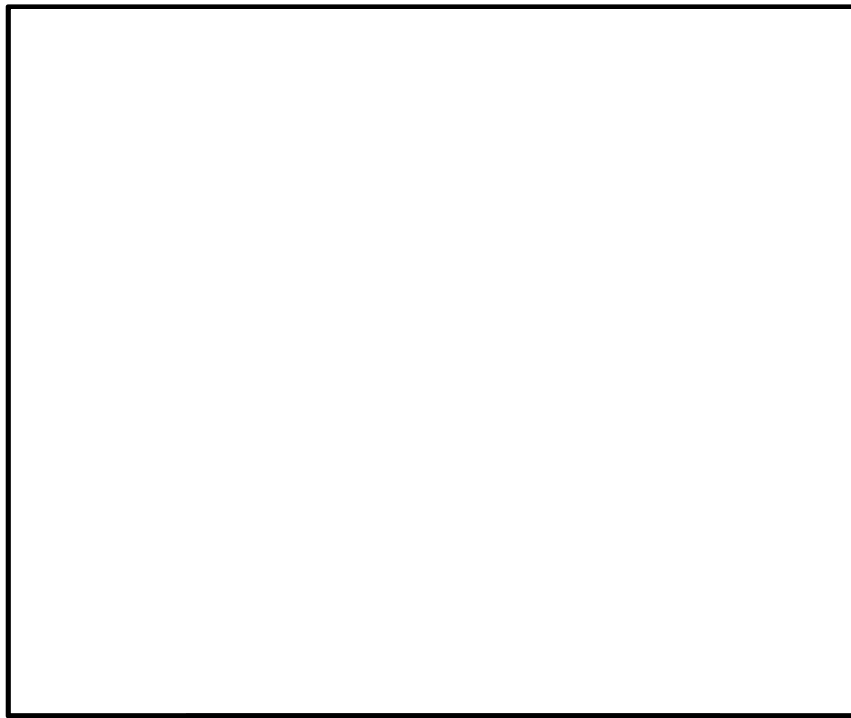


図3-4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板（ドレンノズル(B)）
の評価位置図

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

(1) 荷重の設定

強度評価に用いる荷重は以下の荷重を用いる。荷重の算定に用いる竜巻の特性値を表 3-2 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)
92	14	78	6400

注記*：衝突解析においては、最大風速 $V_D = 100$ (m/s)，移動速度 $V_T = 15$ (m/s)，最大接線風速 $V_{Rm} = 85$ (m/s)，最大気圧低下量 $\Delta P_{max} = 7600$ (N/m²) を適用する。

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。

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

設計用速度圧 q は、下式により算定する。

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

b. 気圧差による荷重 (W_p)

気圧差による荷重 (W_p) は、下式により算出する。

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

c. 設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)

設計飛来物による衝撃荷重 (W_M) については、表 3-3 に諸元を示す飛来物の衝突に伴う荷重とする。また、設計飛来物の材料定数を表 3-4 に示す。飛来速度については、評価の代表性を考慮し、水平方向、鉛直方向の飛来速度のうち大きい水平方向速度を設定する。

貫通評価においては、考慮する設計飛来物として衝突断面積あたりの運動エネルギーが最大となる足場パイプを設定し、足場パイプの衝撃荷重を考慮する。

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

表 3-3 設計飛来物の諸元*

設計飛来物	寸法 長さ×幅×奥行き (m)	質量 (kg)	水平方向の 飛来速度 (m/s)	鉛直方向の 飛来速度 (m/s)	運動エネルギー (kJ)		衝突断面積あたりの 運動エネルギー (kJ/mm ²)	
					水平方向	鉛直方向	水平方向	鉛直方向
足場パイプ	4×0.05×0.05	11	42	38	10	8	0.0279	0.0223
鋼製足場板	4×0.25×0.04	14	55	18	21	3	0.0021	0.0003

注記*：衝突解析においては、竜巻風速 100m/s 時の足場パイプ（水平方向の飛来速度 46m/s，鉛直方向の飛来速度 38m/s），鋼製足場板（水平方向の飛来速度 59m/s，鉛直方向の飛来速度 18m/s）の諸元を適用する。

表 3-4 設計飛来物の材料定数

設計飛来物	降伏応力 σ_y (MPa)	縦弾性係数 E (MPa)	ポアソン比
足場パイプ	355	201667	0.3
鋼製足場板	245	201667	0.3

d. 常時作用する荷重 (F_d)

常時作用する荷重 (F_d) は、部材の自重とする。

(2) 荷重の組合せ

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

荷重の組合せを表 3-5 に示す。

表 3-5 荷重の組合せ

評価内容	風圧力 による 荷重 (W_w)	気圧差 による 荷重 (W_p)	設計飛来 物による 衝撃荷重 (W_M)	常時作用 する荷重 (F_d)	荷重の組合せ
貫通評価 及び 変形評価	○	○	○	○	$W_w + W_p + W_M + F_d$

3.4 許容限界

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の許容限界は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の許容限界」にて設定している許容限界を踏まえて、「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位の機能損傷モードを考慮して設定する。

(1) 評価対象部位の材料仕様

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の材料仕様を表 3-6 から表 3-8 に示す。

表 3-6 評価対象部位の材料仕様

(非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 ((C)/ユニット 1-2))

分類	仕様	材質
防護鋼板		SUS304
架構		SS400

表 3-7 評価対象部位の材料仕様

(非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 ((C)/ユニット 3 及び(B)ユニット 3))

分類	仕様	材質
防護鋼板		SUS304
架構		SS400

表 3-8 評価対象部位の材料仕様

(非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 (ドレンノズル(B)))

分類	仕様	材質
防護鋼板		SUS304
架構		SS400

(2) 評価対象部位の材料定数

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の材料定数を表 3-9 に示す。

表 3-9 材料定数

材質	厚さ (mm)	降伏応力 σ_y (MPa)	縦弾性係数 E (MPa)	塑性硬化係数 E' (MPa)	ポアソン比
SUS304	—	<input type="text"/>	193667	<input type="text"/>	0.3
SS400	<input type="text"/>	<input type="text"/>	201667	<input type="text"/>	0.3

(3) 許容限界

a. 貫通評価

飛来物が防護鋼板へ直接衝突する場合の貫通評価における許容限界は、鋼材の破断ひずみとする。破断ひずみについては、「3.5(2)e.(c) 破断ひずみ」に示すとおり、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、「NEI07-13 : Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs」(以下「NEI07-13」という。)において T F (多軸性係数) を とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕として T F = を考慮して設定する。

設定した許容限界を表 3-10 に示す。

表 3-10 貫通評価の許容限界

評価対象部位		材質	破断ひずみ*
非常用ディーゼル発電設備 燃料移送配管防護板	防護鋼板	SUS304	<input type="text"/>

注記* : 真ひずみ換算値

b. 変形評価

飛来物が防護鋼板へ直接衝突する場合の変形評価における許容限界は、鋼材の破断ひずみとする。

設定した許容限界を表 3-11 に示す。

表 3-11 変形評価の許容限界

評価対象部位		材質	破断ひずみ*
非常用ディーゼル発電設備 燃料移送配管防護板	防護鋼板	SUS304	
	架構	SS400	

注記*：真ひずみ換算値

3.5 評価方法

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の強度評価は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「4.4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の評価方針」を踏まえて、衝突評価として貫通評価を実施する。また、構造強度評価として変形評価を実施する。

(1) 貫通評価及び変形評価

貫通評価及び変形評価に用いる評価対象部位に生じるひずみは、解析モデル及び材料の非線形特性を用いた衝突解析により評価する。

a. 解析モデル及び諸元

(a) 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の解析モデル化の範囲は、想定する荷重の伝達を考慮し、非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板を構成する防護鋼板及び架構とする。防護鋼板及び架構は、シェル要素でモデル化する。非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の解析モデルの境界条件を表 3-12 に、解析モデル図を図 3-5 から図 3-8 に示す。

表 3-12 解析モデルの境界条件

項目	境界条件
非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板と軽油タンク基礎	X, Y, Z 方向並進拘束



図 3-5 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 ((C)ユニット 1-2)
の解析モデル図



図 3-6 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 ((C)/ユニット 3)
の解析モデル図

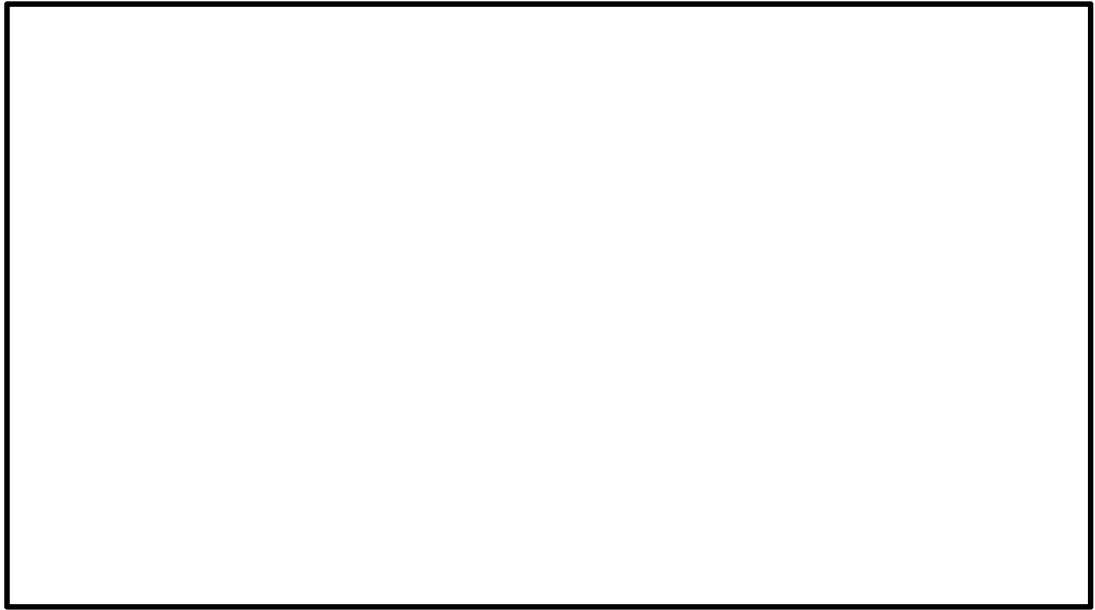


図 3-7 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 ((B)ユニット 3)
の解析モデル図



図 3-8 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 (ドレンノズル(B))
の解析モデル図

(b) 設計飛来物

設計飛来物である足場パイプ及び鋼製足場板は、シェル要素でモデル化する。
設計飛来物の解析モデル図を図 3-9 に示す。

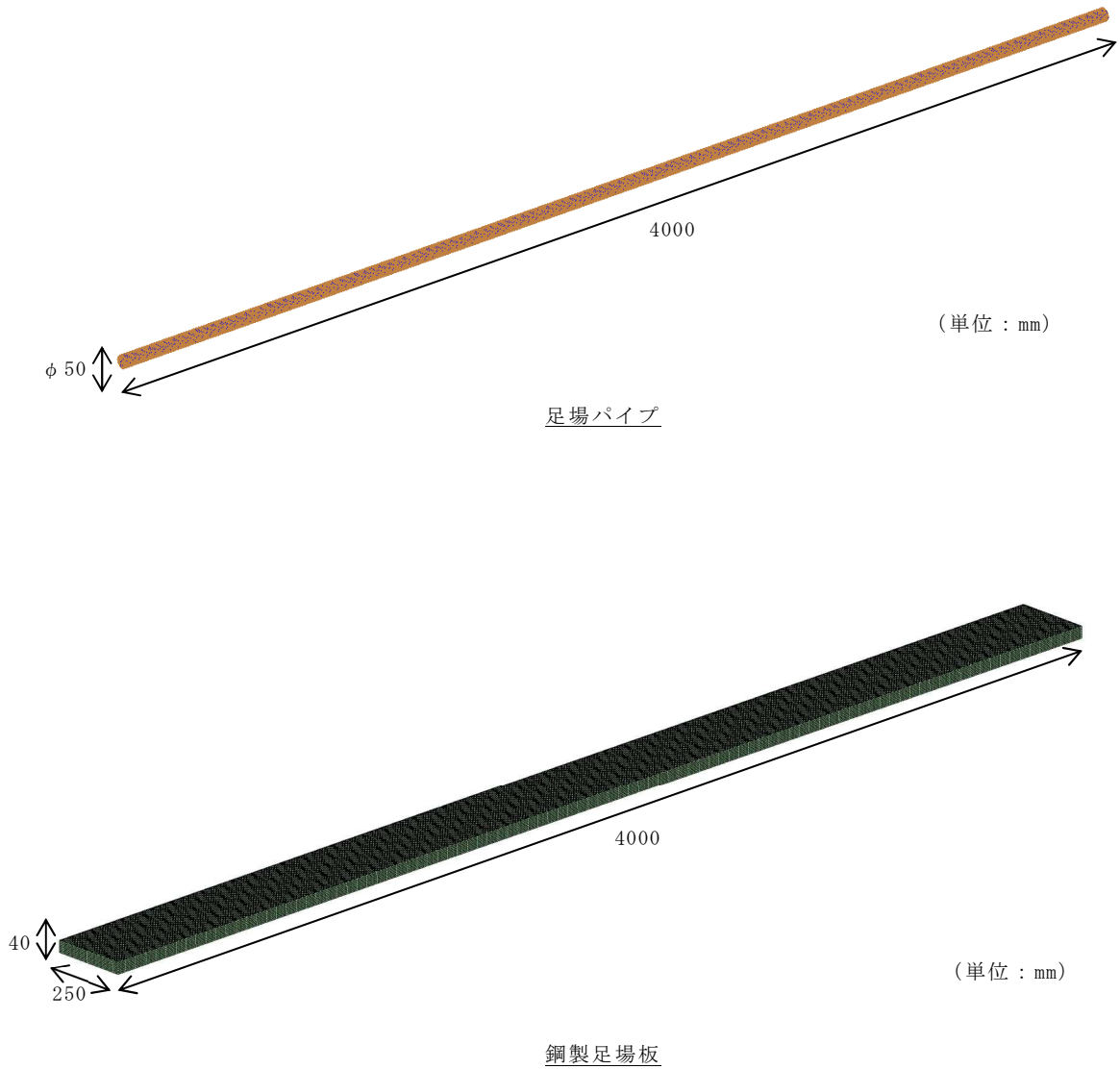


図 3-9 設計飛来物の解析モデル図

b. 解析コード

衝突解析には、解析コード「LS-DYNA」を用いる。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「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

c. 使用材料

構成する材料仕様については、「3.4(1) 評価対象部位の材料仕様」に示すとおり設定する。

d. 材料定数

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板に使用する鋼材の材料定数については、「3.4(2) 評価対象部位の材料定数」に示すとおり設定する。

e. 材料の非線形特性

(a) 材料の応力－ひずみ関係

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の材料モデルでは、鋼材の破断ひずみを設定し、破断ひずみを越えた要素が荷重を負担しないことを考慮する。

材料の応力－ひずみ関係はバイリニア型とし、降伏後の塑性硬化係数（2次勾配 E' ）は、表 3-9 に示す値とする。

材料に適用する応力－ひずみ関係の概念図を図 3-10 に示す。

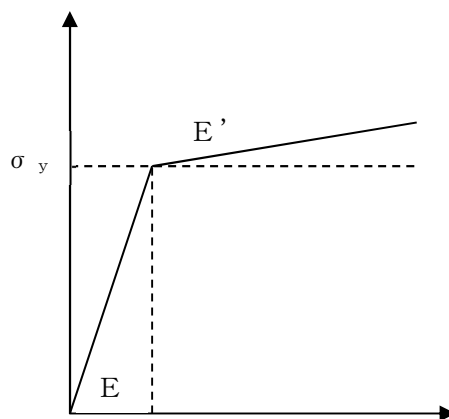


図 3-10 応力－ひずみ関係の概念図

(b) ひずみ速度効果

竜巻による設計飛来物に対する解析は、衝撃問題で変形速度が大きいため、ひずみ速度効果を考慮することとし、以下に示す Cowper-Symonds の式を適用する。

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

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

ひずみ速度依存性パラメータを表 3-13 に示す。

表 3-13 ひずみ速度依存性パラメータ

	足場パイプ	鋼製足場板	非常用ディーゼル発電設備 燃料移送配管防護板	
			防護鋼板	架構
材料	STK500	SS400	SUS304	SS400
C (s ⁻¹)				
P				

(c) 破断ひずみ

破断ひずみは、J I Sに規定されている伸びの下限值を基に設定する。また、「NEI07-13」においてTF（多軸性係数）を□とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF=□を考慮する。TFについては、非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板のみ□とする。足場パイプ及び鋼製足場板は保守的に破断ひずみを超えても荷重を負担するものとする。

材料モデルにおける破断ひずみを表 3-14 に示す。

表 3-14 材料モデルにおける破断ひずみ

種別	材質	J I S 規格値 (下限値)	TF	破断ひずみ*
防護鋼板	SUS304	0.40		
架構	SS400 □	□		

注記*：真ひずみ換算値

4. 評価条件

4.1 貫通評価

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の貫通評価は、図 3-1 から図 3-4 に示す換気空調系ダクト防護壁の最大変形が生じると想定される鋼板中央部に衝突するケースを設定する。

解析ケースを表 4-1 及び図 4-1 から図 4-4 に示す。

表 4-1 解析ケース（貫通評価）

評価箇所	衝突箇所	飛来物の 衝突方向	対象部材
非常用ディーゼル発電設備 燃料移送配管防護板 (C)/ユニット 1-2)	防護鋼板	水平	
非常用ディーゼル発電設備 燃料移送配管防護板 (C)/ユニット 3)	防護鋼板	水平	
非常用ディーゼル発電設備 燃料移送配管防護板 (B)/ユニット 3)	防護鋼板	水平	
非常用ディーゼル発電設備 燃料移送配管防護板 (ドレンノズル(B))	防護鋼板	水平	

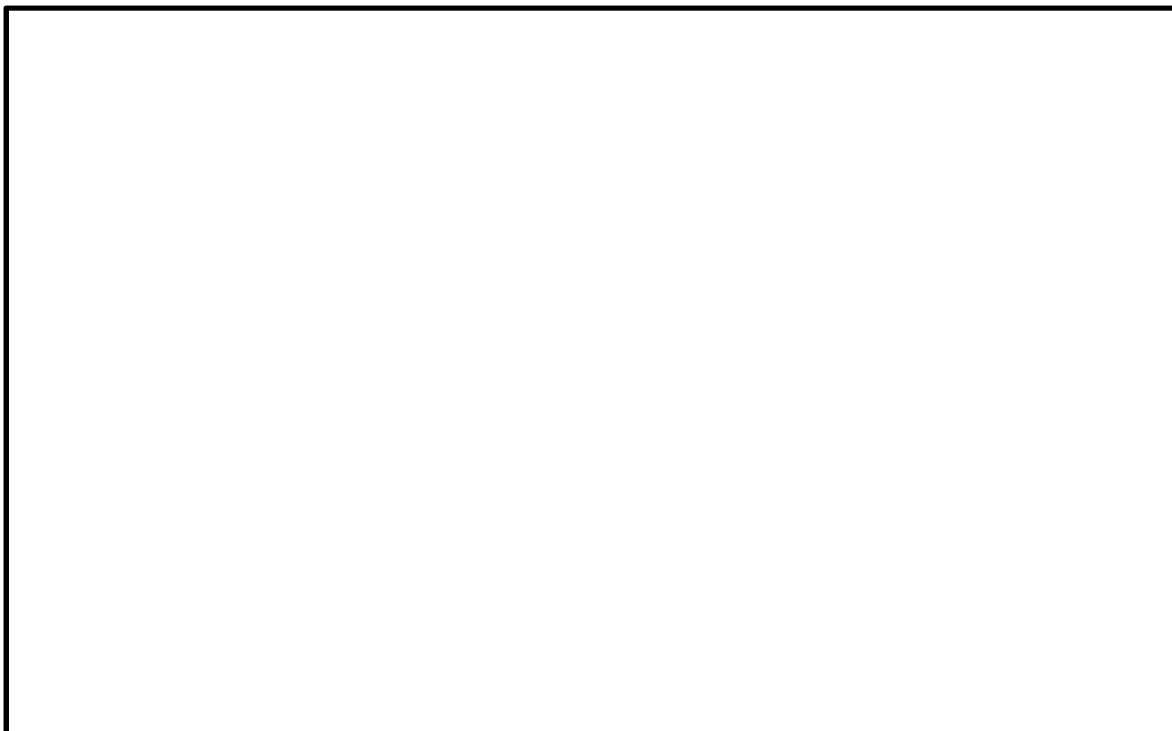


図 4-1 解析ケース

(非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 ((C)/ユニット 1-2))



図 4-2 解析ケース

(非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 ((C)/ユニット 3))

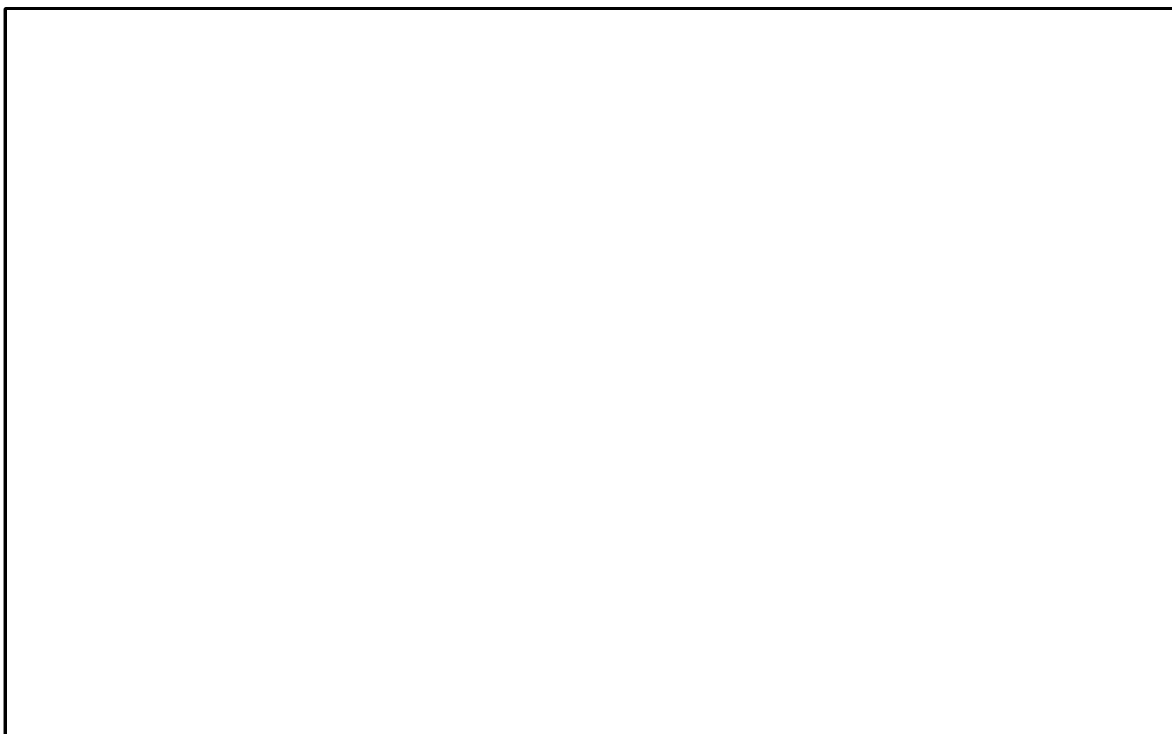


図 4-3 解析ケース

(非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 (B)/ユニット 3))

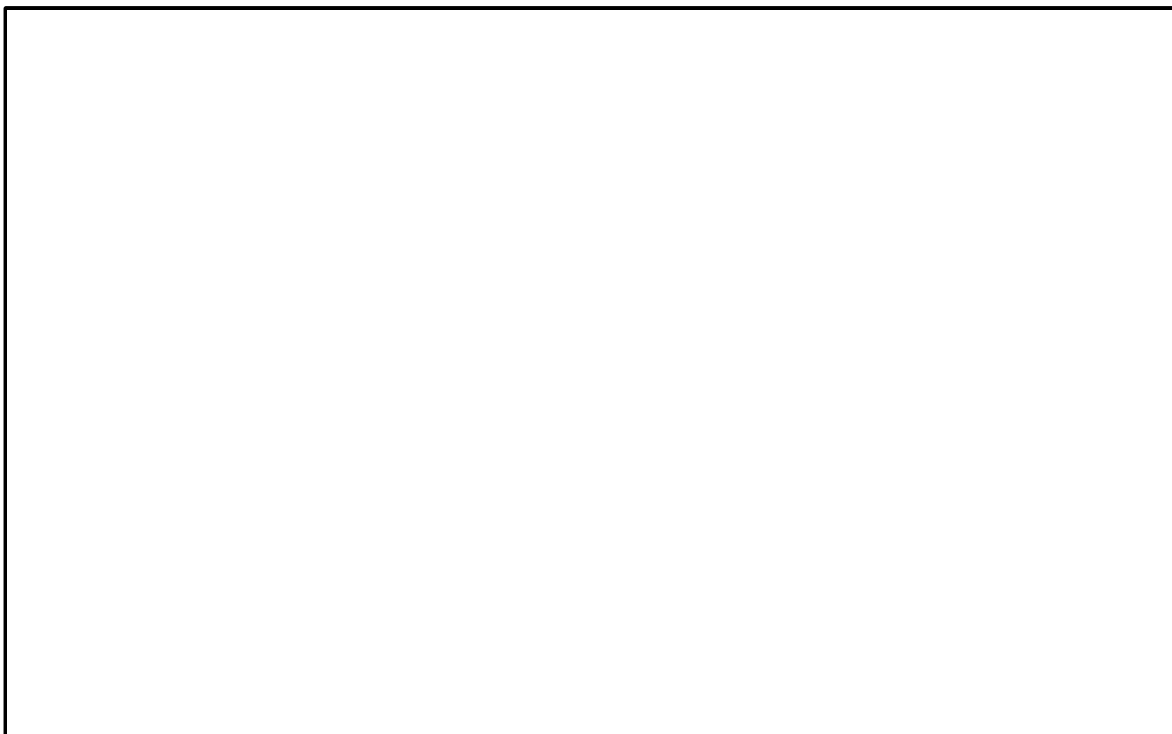


図 4-4 解析ケース

(非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 (ドレンノズル(B)))

4.2 変形評価

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の変形評価は、図 3-1 から図 3-4 に示す非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の最大変形が生じると想定される鋼板中央部に衝突するケースを設定する。

解析ケースを表 4-2 並びに図 4-5 から図 4-8 に示す。

表 4-2 解析ケース（変形評価）





評価箇所	衝突箇所	飛来物の 衝突方向	対象部材
非常用ディーゼル発電設備 燃料移送配管防護板 (C)/ユニット 1-2)	防護鋼板	水平	
非常用ディーゼル発電設備 燃料移送配管防護板 (C)/ユニット 3)	防護鋼板	水平	
非常用ディーゼル発電設備 燃料移送配管防護板 (B)/ユニット 3)	防護鋼板	水平	
非常用ディーゼル発電設備 燃料移送配管防護板 (ドレンノズル(B))	防護鋼板	水平	



図 4-5 解析ケース

(非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 ((C)/ユニット 1-2))

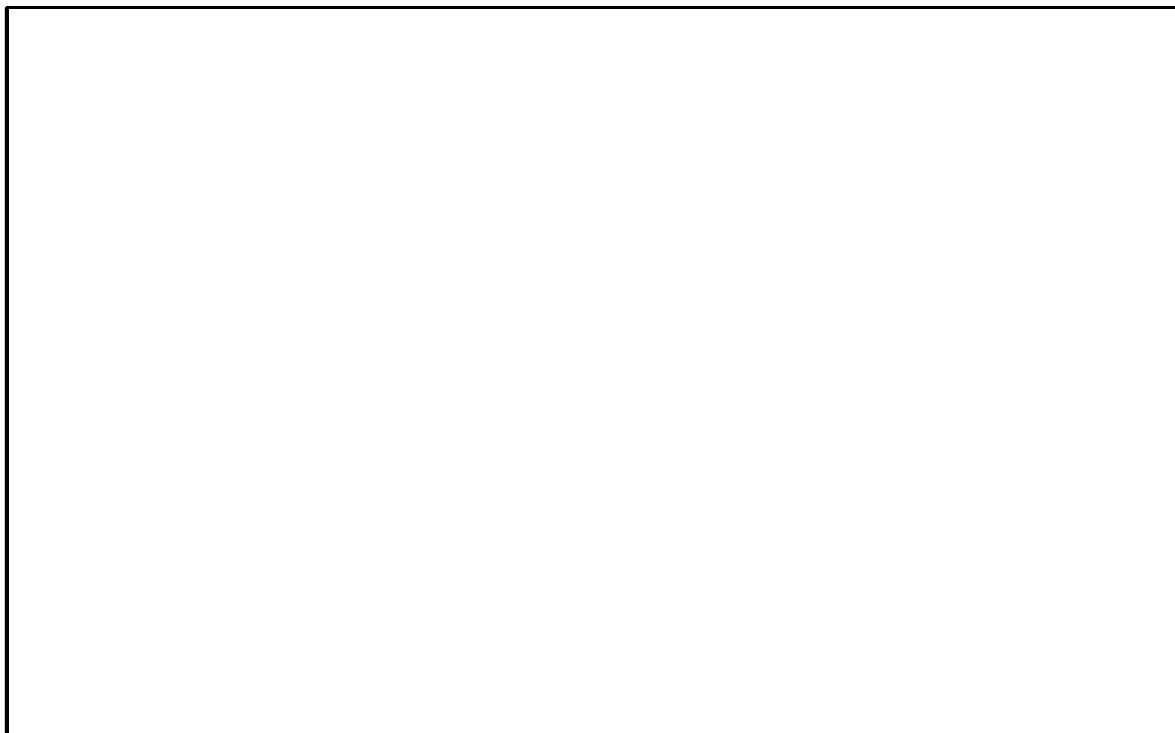


図 4-6 解析ケース

(非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 ((C)/ユニット 3))

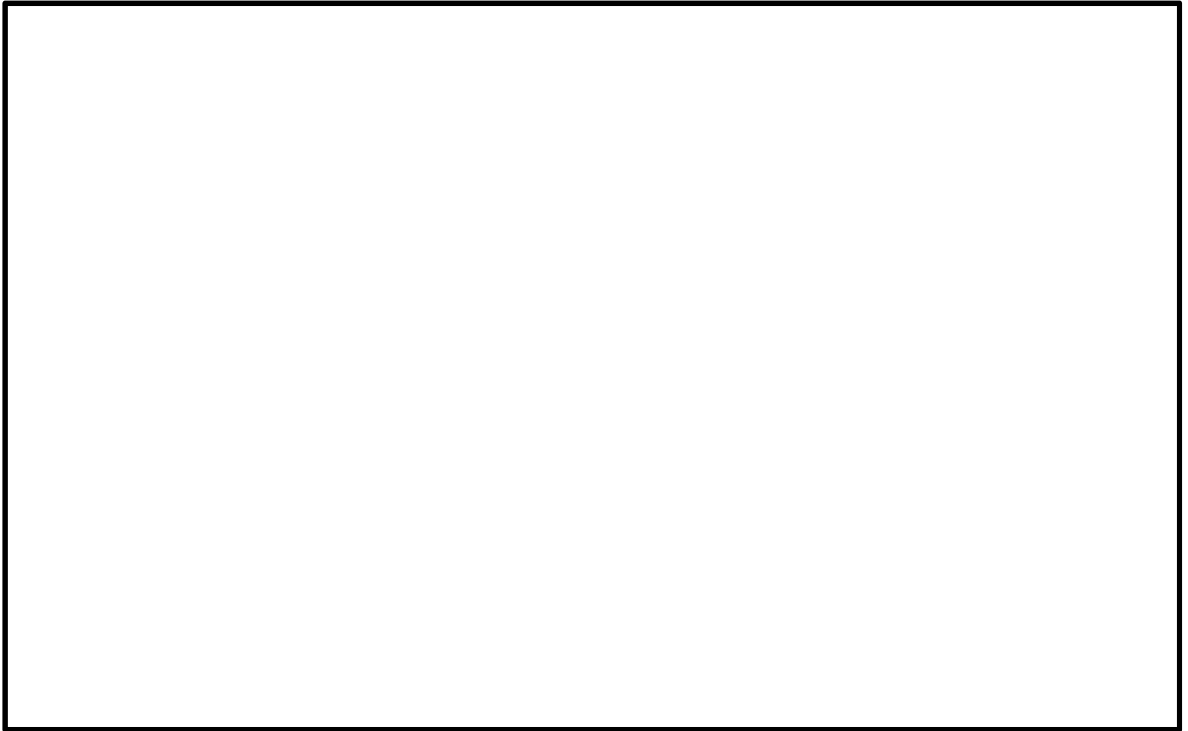


図 4-7 解析ケース

(非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 (B)/ユニット 3))

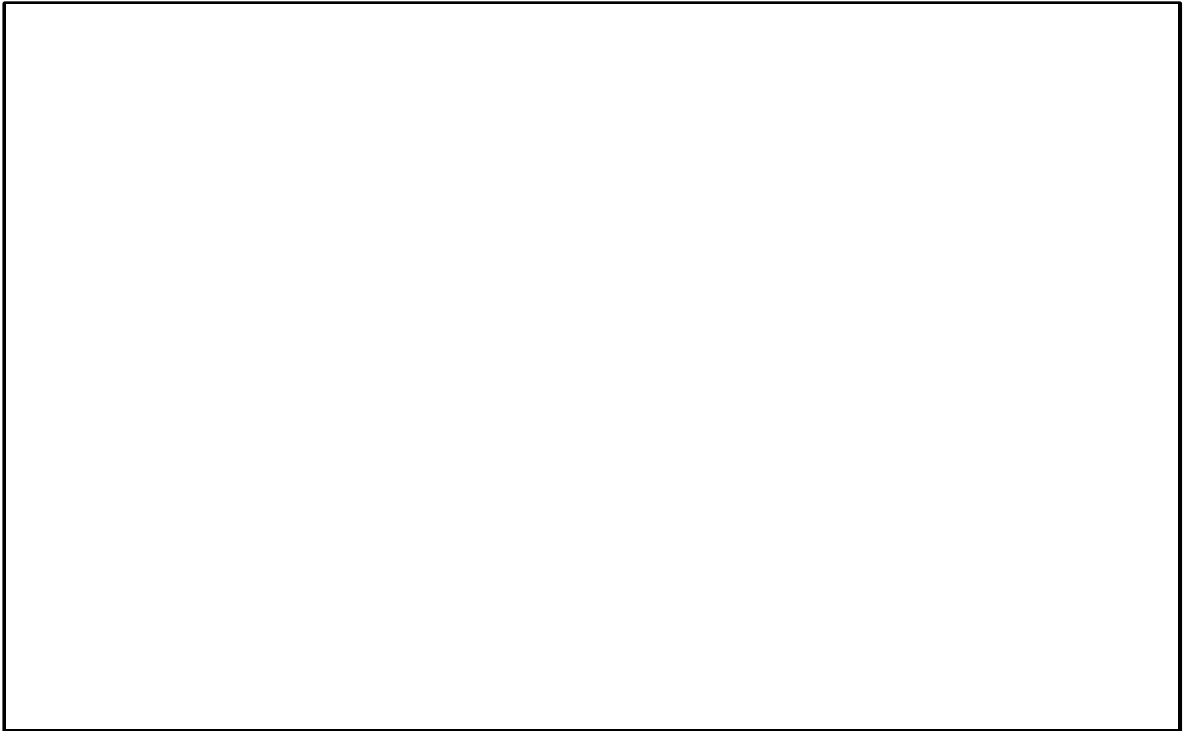


図 4-8 解析ケース

(非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 (ドレンノズル(B)))

5. 強度評価結果

5.1 貫通評価

評価結果を表 5-1 並びに図 5-1 から図 5-4 に示す。

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板に生じるひずみは許容限界を超えない。

表 5-1 衝突解析結果

評価項目	評価対象部位		評価結果	許容限界*
ひずみ	(C)/ユニット 1-2	防護鋼板		
	(C)/ユニット 3	防護鋼板		
	(B)/ユニット 3	防護鋼板		
	ドレンノズル (B)	防護鋼板		

注記* : 真ひずみ換算値

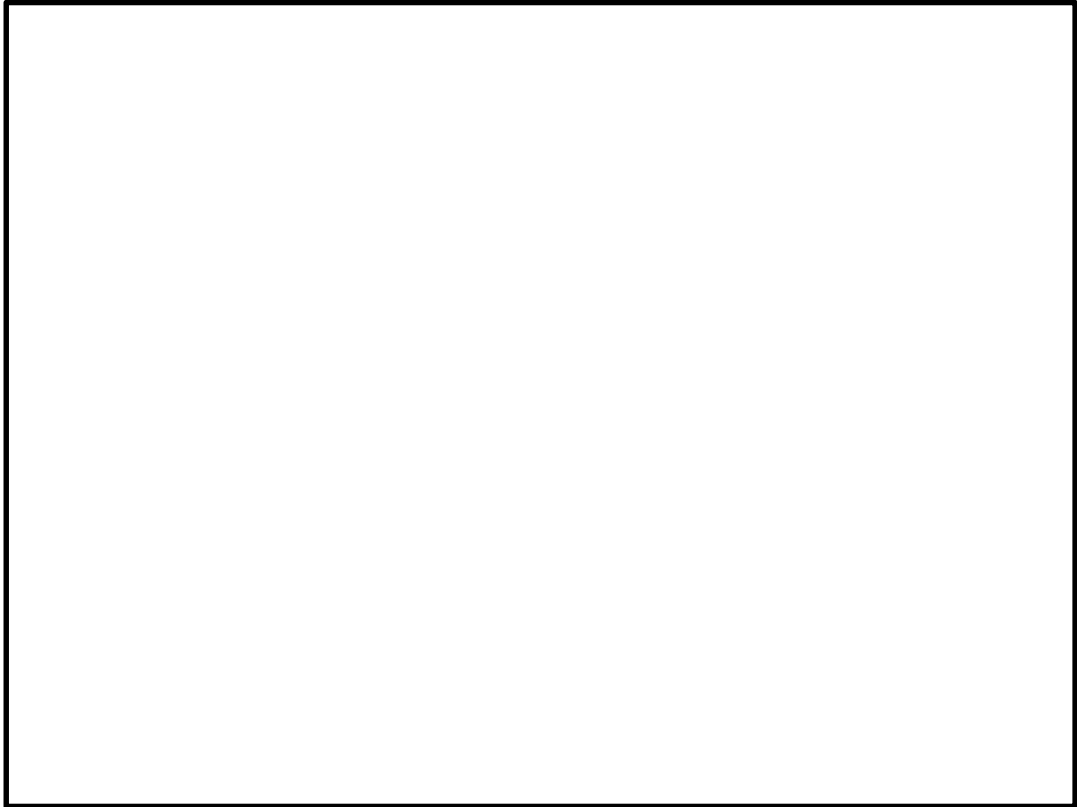


図 5-1 防護鋼板のひずみ分布図
(非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 ((C)/ユニット 1-2))

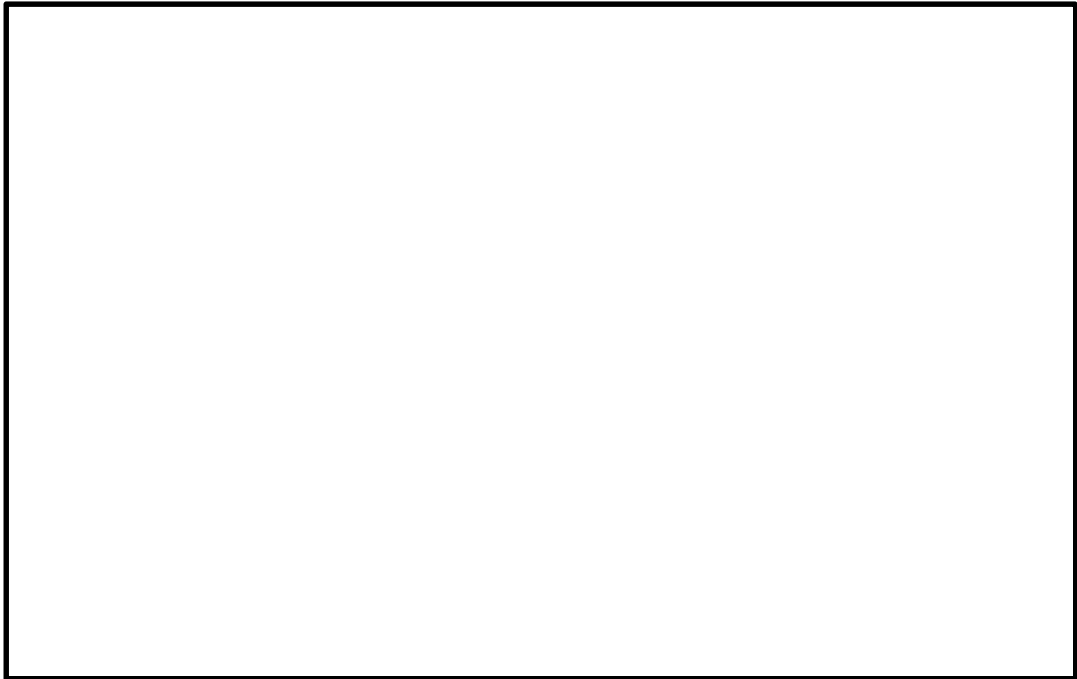


図 5-2 防護鋼板のひずみ分布図
(非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 ((C)/ユニット 3))

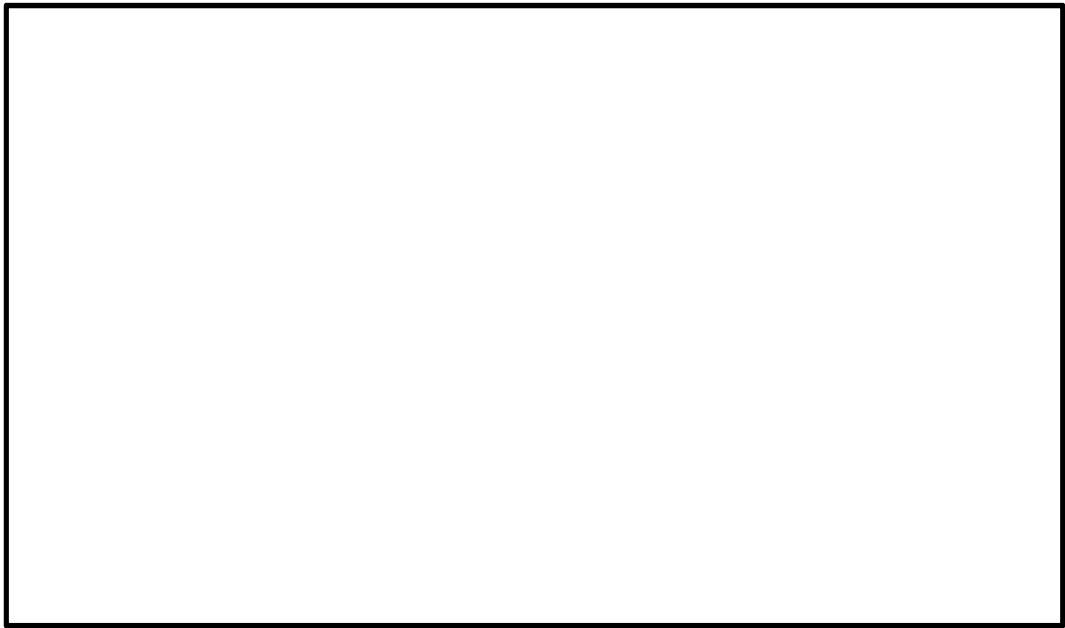


図 5-3 防護鋼板のひずみ分布図
(非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 (B)/ユニット 3))

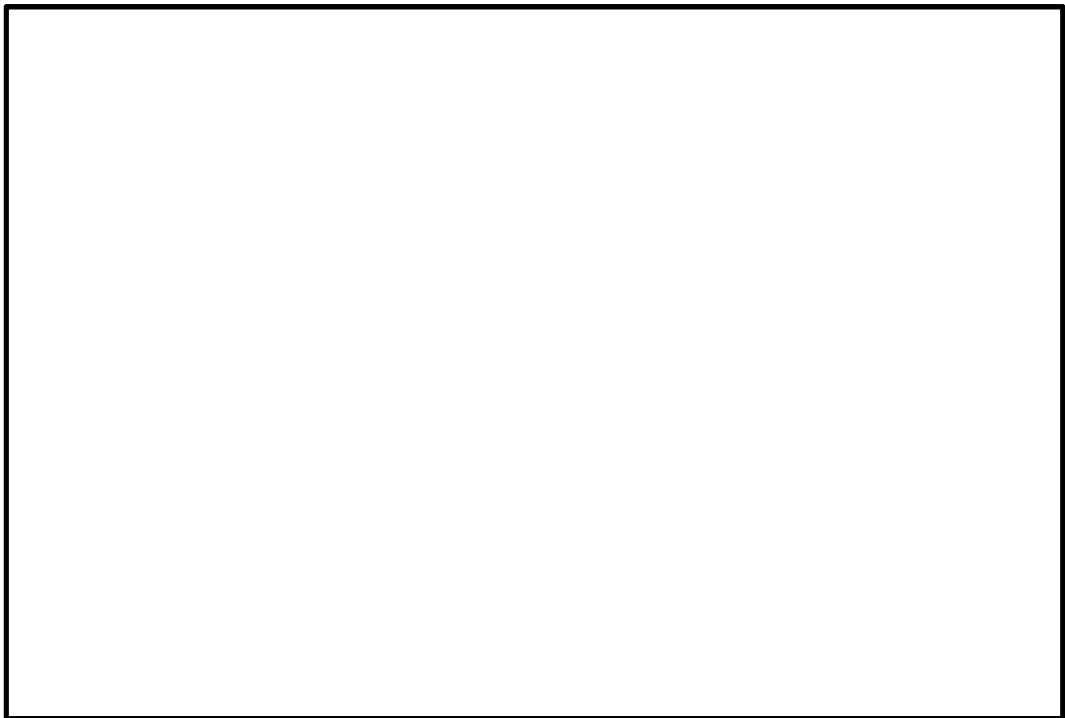


図 5-4 防護鋼板のひずみ分布図
(非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 (ドレンノズル(B)))

5.2 変形評価

評価結果を表 5-2 並びに図 5-5 から図 5-12 に示す。

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板に生じるひずみは許容限界を超えない。

表 5-2 衝突解析結果

評価項目	評価対象部位		評価結果	許容限界*
ひずみ	(C)/ユニット 1-2	防護鋼板		
		架構		
	(C)/ユニット 3	防護鋼板		
		架構		
	(B)/ユニット 3	防護鋼板		
		架構		
	ドレンノズル(B)	防護鋼板		
		架構		

注記*：真ひずみ換算値

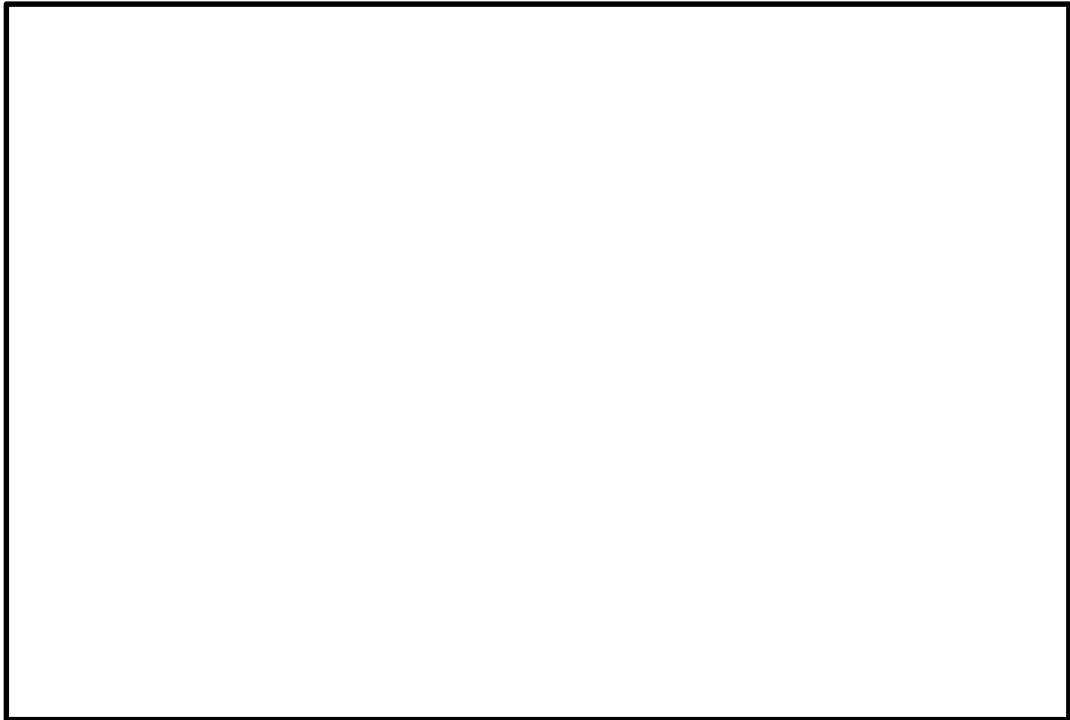


図 5-5 防護鋼板のひずみ分布図
(非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 ((C)/ユニット 1-2))

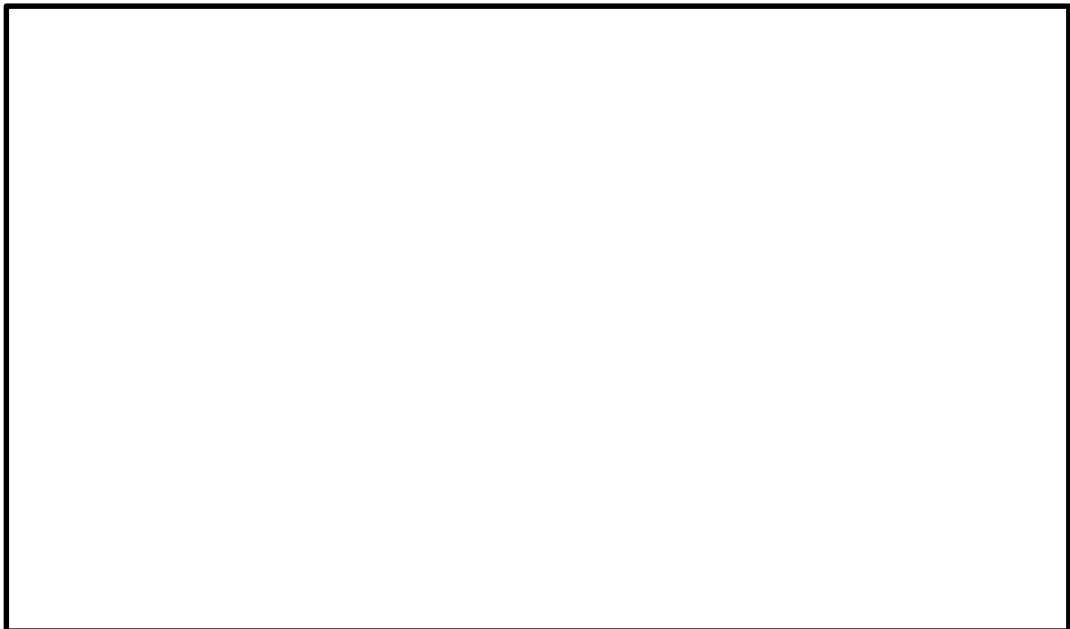


図 5-6 架構のひずみ分布図
(非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 ((C)/ユニット 1-2))

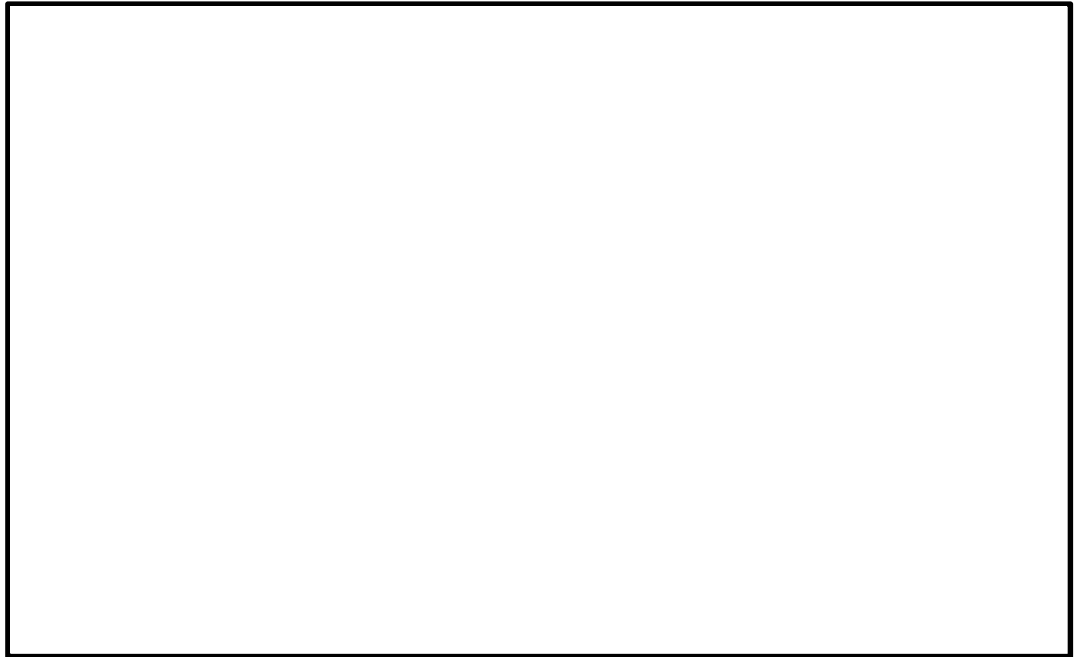


図 5-7 防護鋼板のひずみ分布図
(非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 ((C)/ユニット 3))

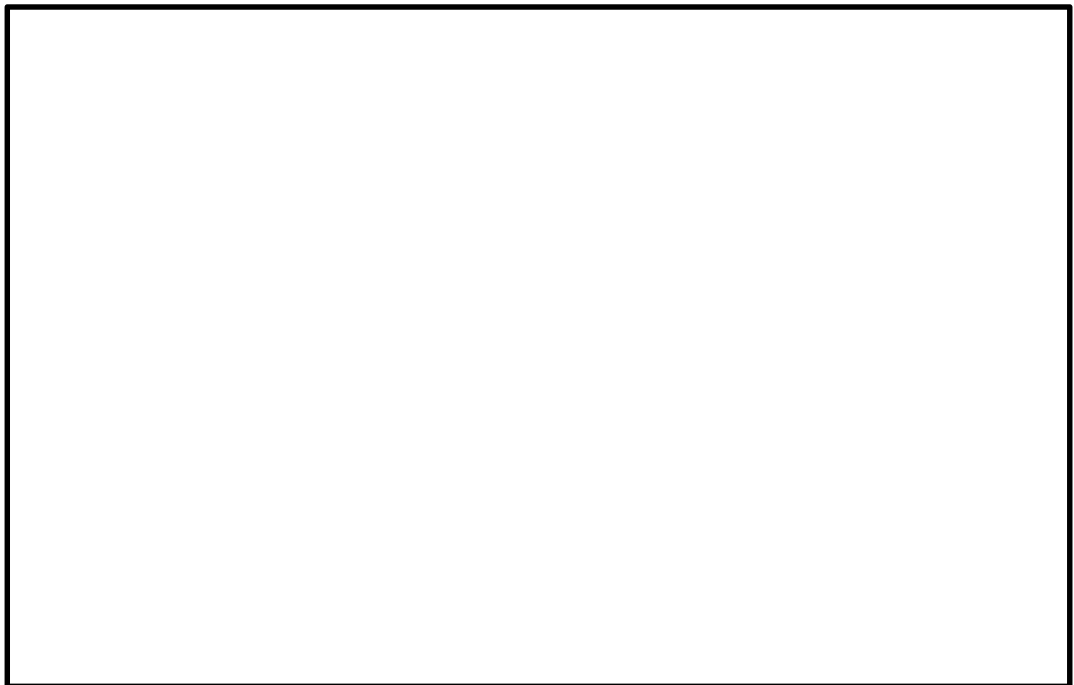


図 5-8 架構のひずみ分布図
(非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 ((C)/ユニット 3))

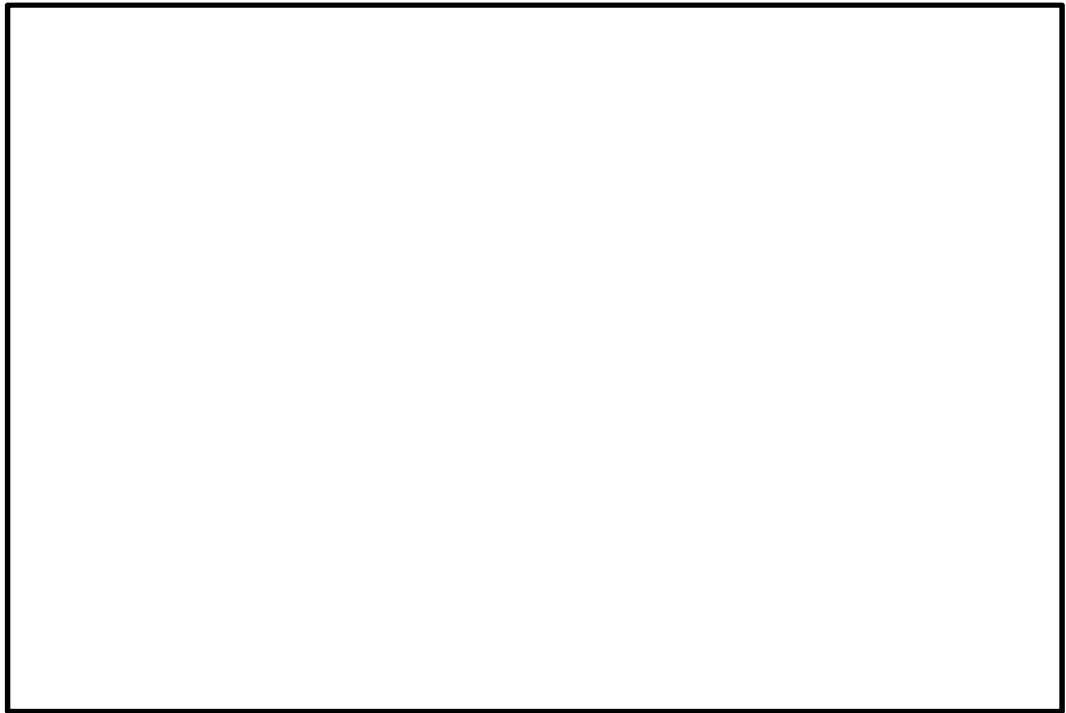


図 5-9 防護鋼板のひずみ分布図
(非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 (B)/ユニット 3))

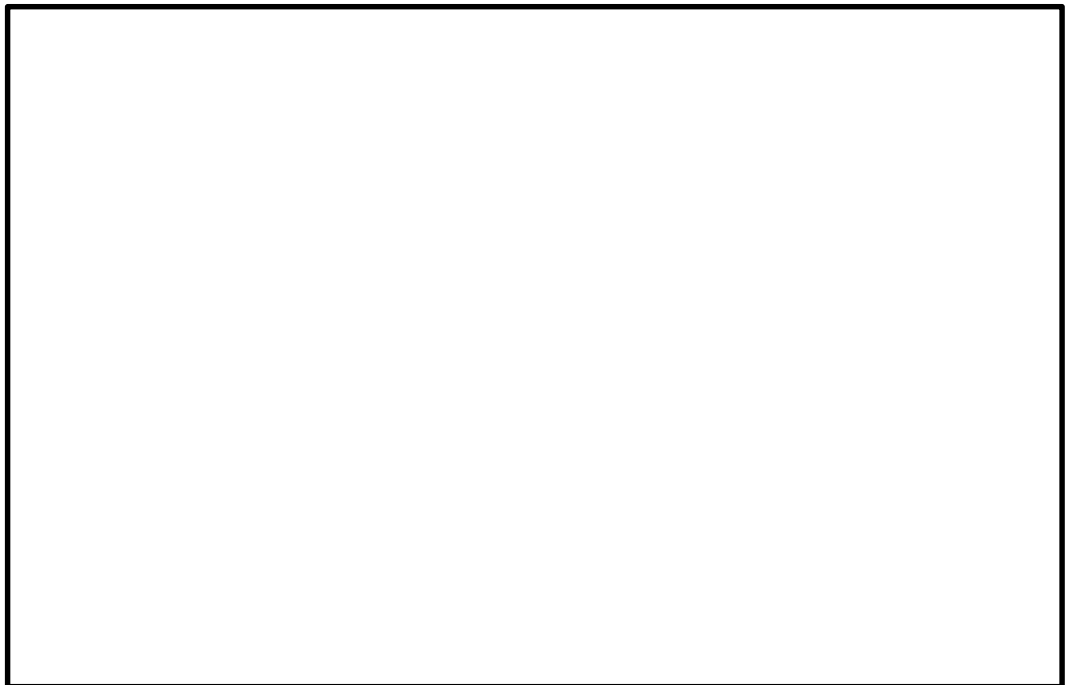


図 5-10 架構のひずみ分布図
(非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 (B)/ユニット 3))

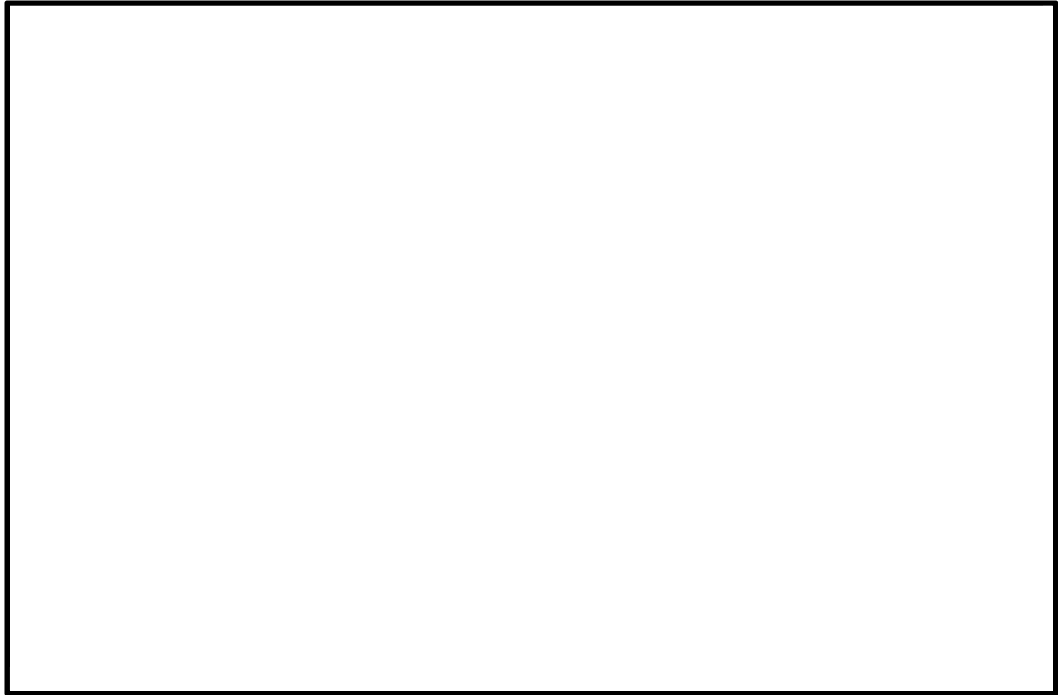


図 5-11 防護鋼板のひずみ分布図
(非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 (ドレンノズル(B)))

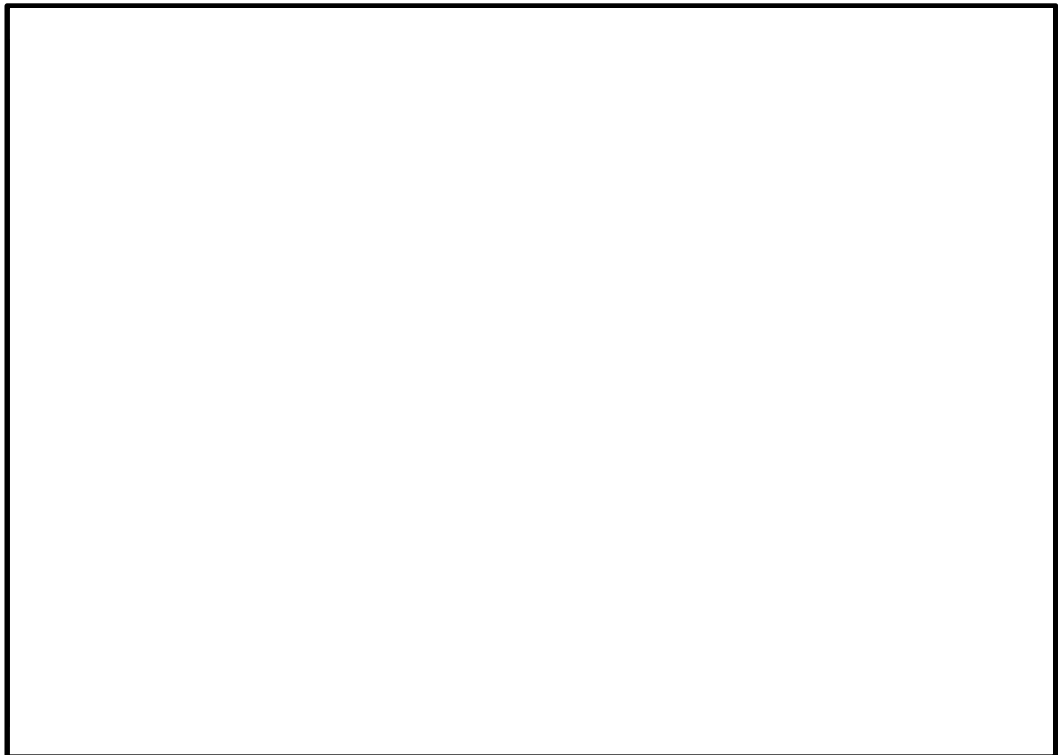


図 5-12 架構のひずみ分布図
(非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板 (ドレンノズル(B)))

VI-3-別添 1-4-6 建屋内防護壁の強度計算書

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	2
2.1 位置	2
2.2 構造概要	7
2.3 評価方針	16
2.4 適用規格	19
3. 強度評価方法	20
3.1 記号の定義	20
3.2 評価対象部位	21
3.3 荷重及び荷重の組合せ	28
3.4 許容限界	30
3.5 評価方法	34
4. 評価条件	44
4.1 貫通評価	44
4.2 変形評価	47
5. 強度評価結果	53
5.1 貫通評価	53
5.2 変形評価	56

1. 概要

本資料は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」のとおり、防護対策施設のうち、原子炉補機冷却海水系配管防護壁、換気空調系ダクト防護壁及び竜巻防護ネット（防護鋼板部）が、設計竜巻による設計飛来物の衝突に対し、竜巻時及び竜巻通過後においても、外部事象防護対象施設に設計飛来物を衝突させず、また、機械的な波及的影響を与えず、外部事象防護対象施設の安全機能を考慮して、原子炉補機冷却海水系配管防護壁、換気空調系ダクト防護壁及び竜巻防護ネット（防護鋼板部）を構成する防護鋼板及び架構が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」を踏まえ、原子炉補機冷却海水系配管防護壁、換気空調系ダクト防護壁及び竜巻防護ネット（防護鋼板部）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

(1) 原子炉補機冷却海水系配管防護壁

原子炉補機冷却海水系配管防護壁は、タービン建屋海水熱交換器区域に設置する。

原子炉補機冷却海水系配管防護壁の設置位置を図 2-1 に示す。

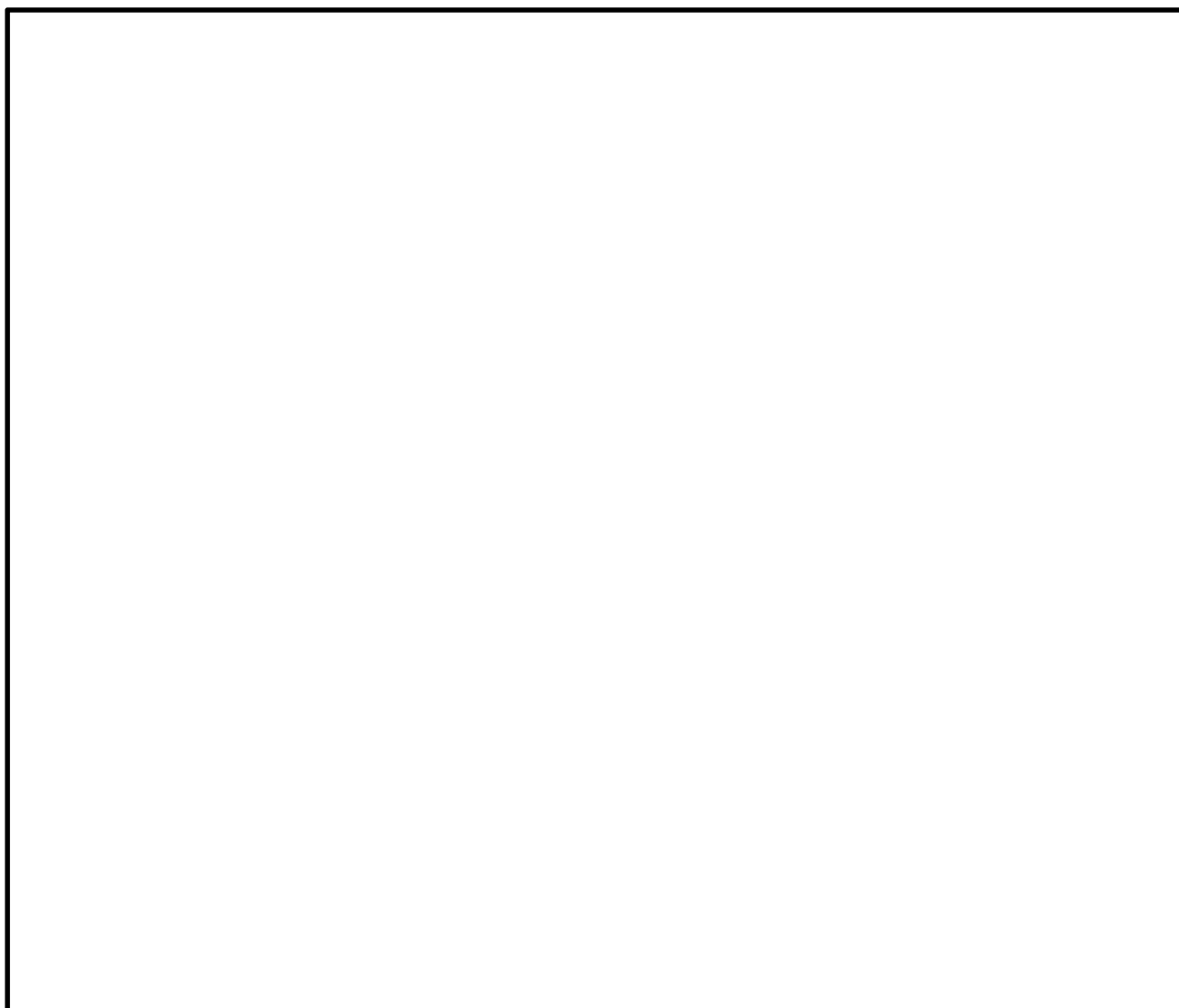


図 2-1 原子炉補機冷却海水系配管防護壁の位置図

(2) 換気空調系ダクト防護壁

換気空調系ダクト防護壁は、タービン建屋及びコントロール建屋に設置する。

換気空調系ダクト防護壁の設置位置を図 2-2 に示す。

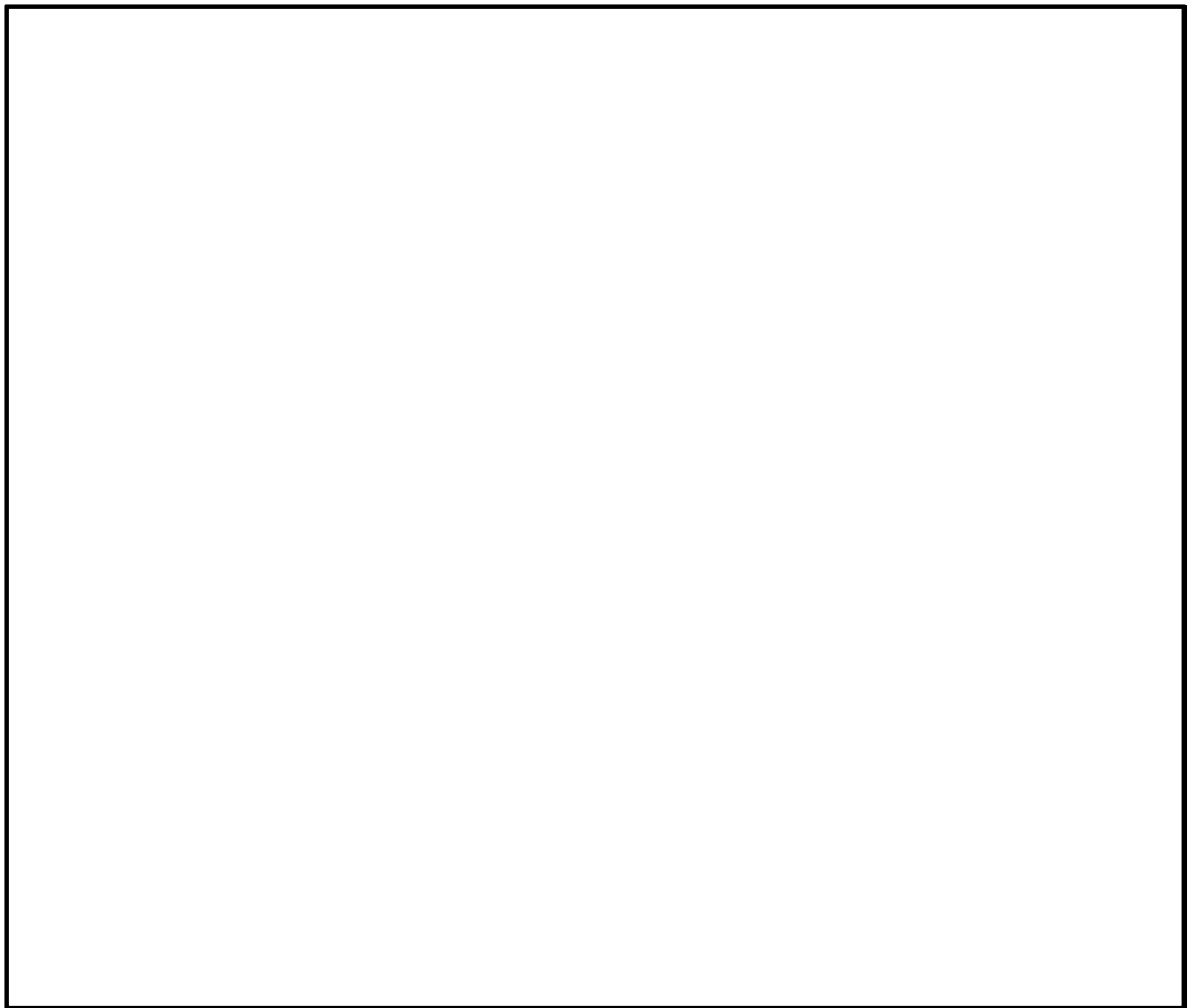


図 2-2 (1/3) 換気空調系ダクト防護壁の位置図



図 2-2 (2/3) 換気空調系ダクト防護壁の位置図

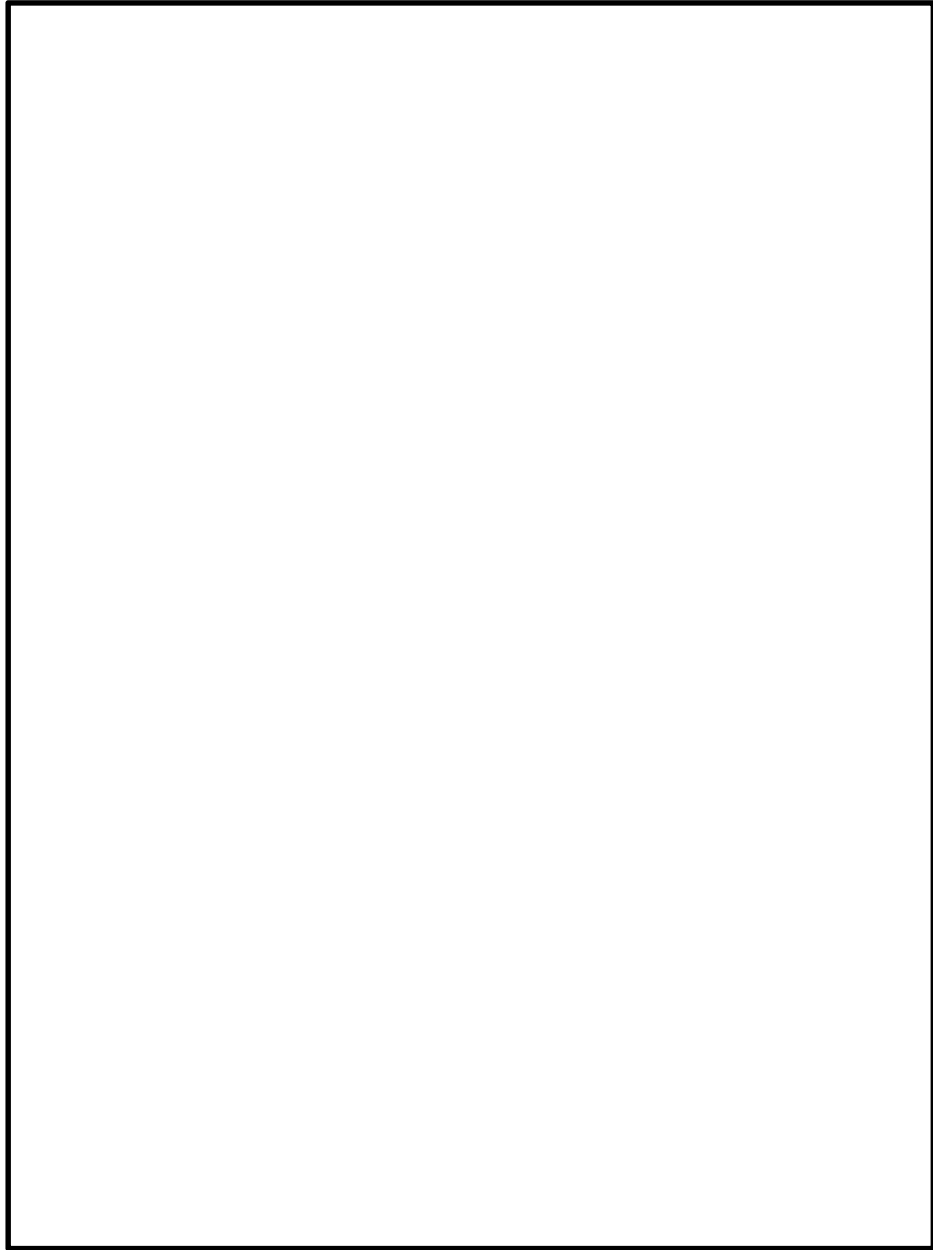


図 2-2 (3/3) 換気空調系ダクト防護壁の位置図

(3) 竜巻防護ネット（防護鋼板部）

竜巻防護ネット（防護鋼板部）は，原子炉建屋に設置する。

竜巻防護ネット（防護鋼板部）の設置位置を図 2-3 に示す。

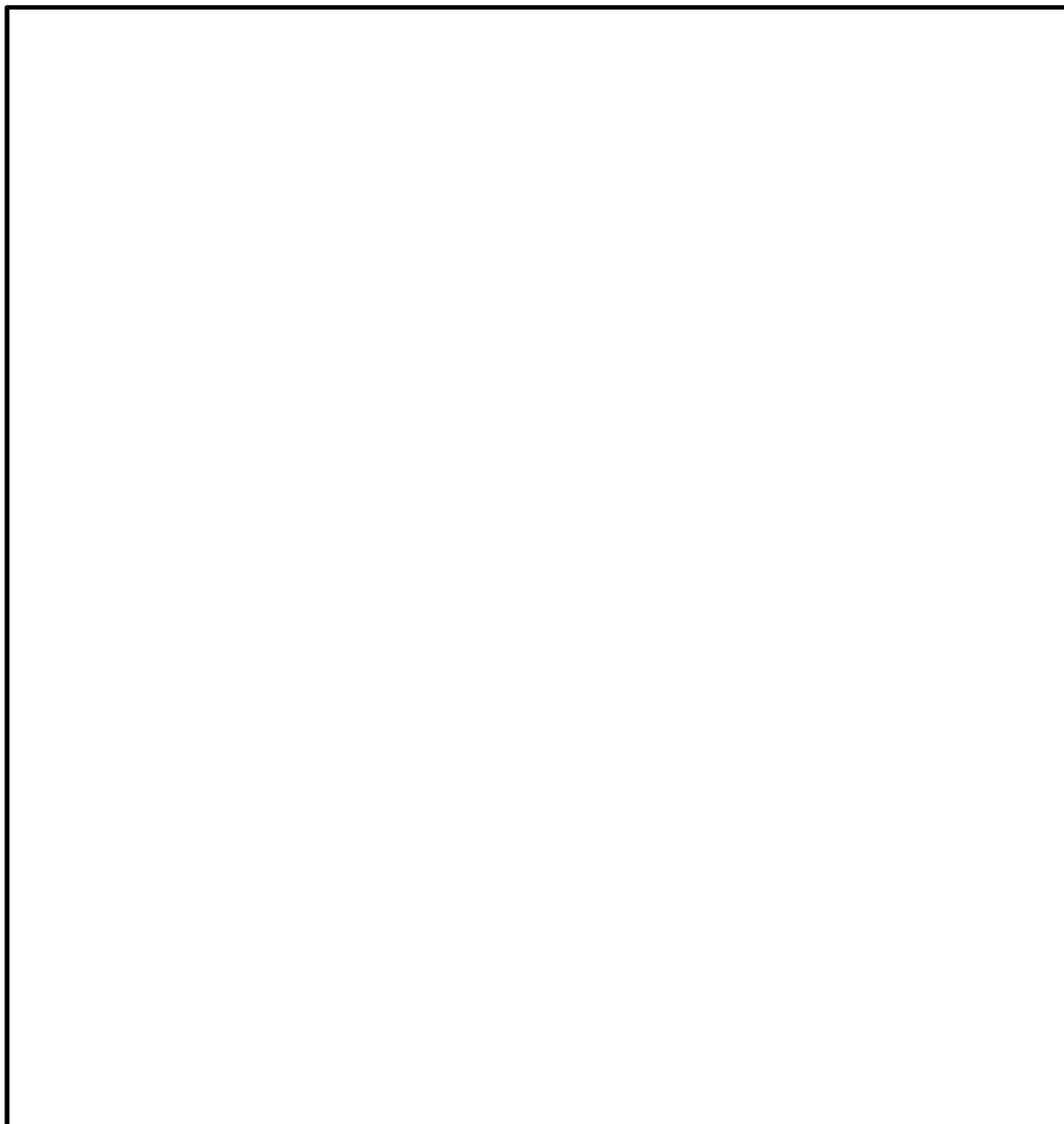


図 2-3 竜巻防護ネット（防護鋼板部）の位置図

2.2 構造概要

(1) 原子炉補機冷却海水系配管防護壁

原子炉補機冷却海水系配管防護壁の構造は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「3.5.1 原子炉補機冷却海水系配管防護壁の構造設計」に示す構造設計を踏まえ、設定する。

原子炉補機冷却海水系配管防護壁は、鋼板等で構成する鋼製構造物である。

原子炉補機冷却海水系配管防護壁の構造図を図 2-4 に示す。

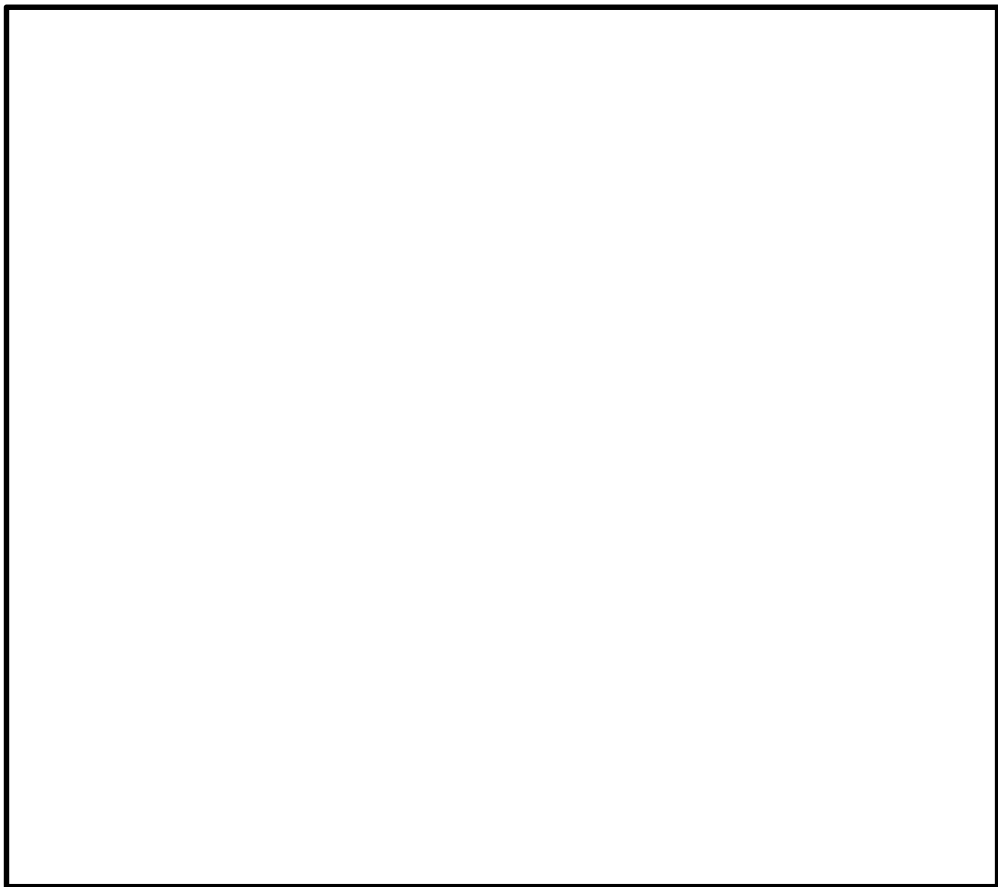


図 2-4 原子炉補機冷却海水系配管防護壁の構造図

(2) 換気空調系ダクト防護壁

換気空調系ダクト防護壁の構造は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「3.5.2 換気空調系ダクト防護壁の構造設計」に示す構造設計を踏まえ、設定する。

換気空調系ダクト防護壁は、鋼板等で構成する鋼製構造物である。

換気空調系ダクト防護壁の構造図を図 2-5 に示す。

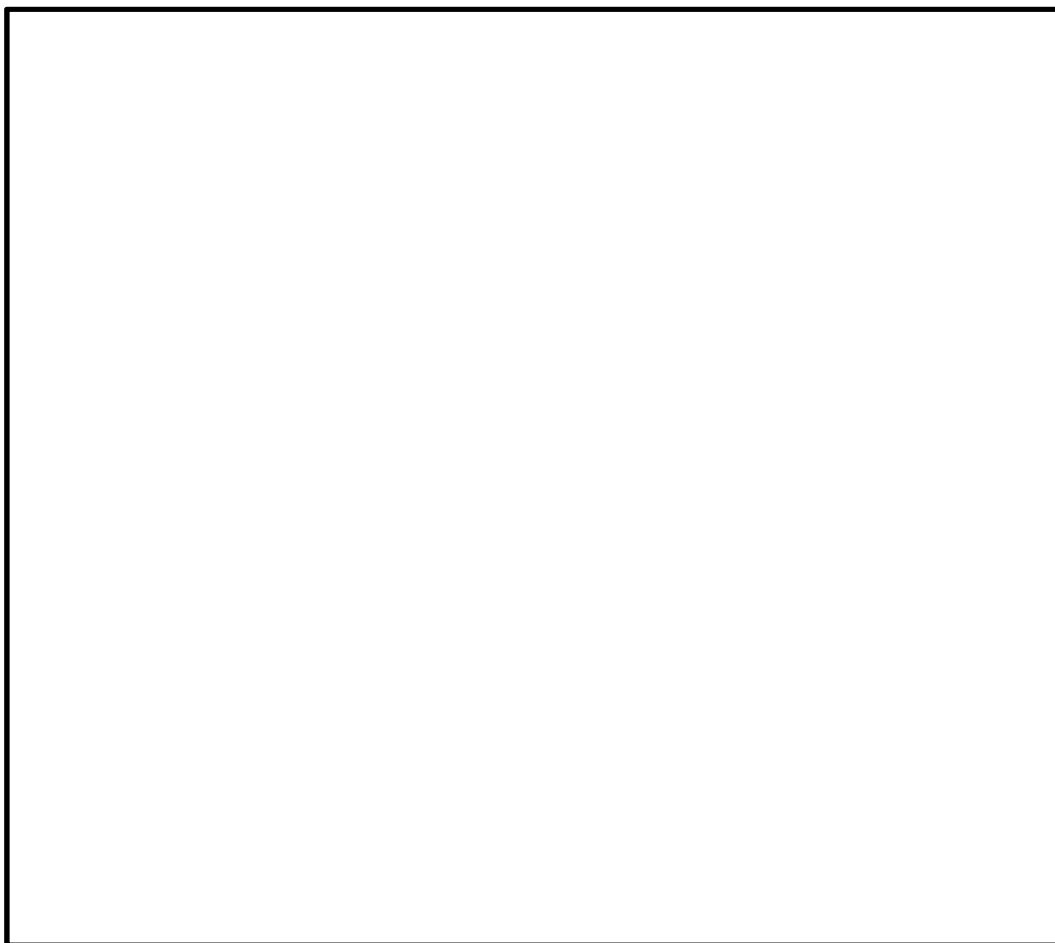


図 2-5 (1/4) 換気空調系ダクト防護壁 (No. 55) の構造図

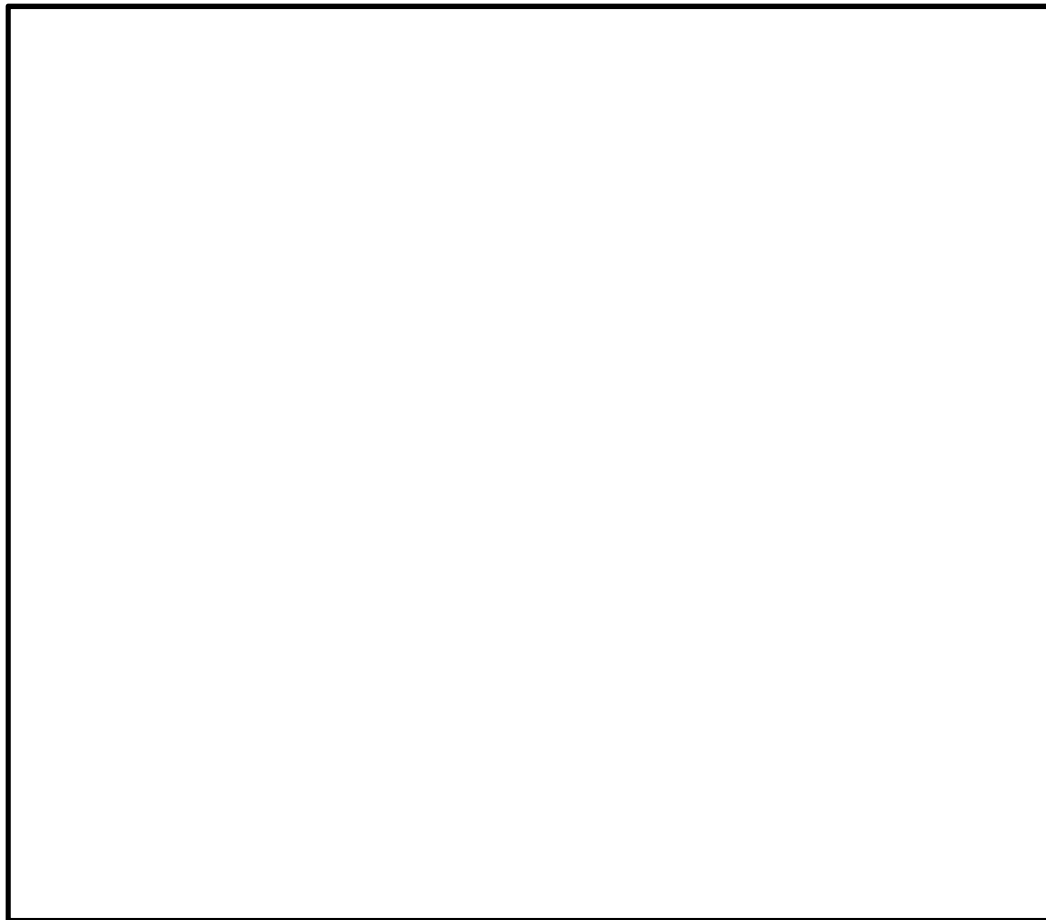


図 2-5 (2/4) 換気空調系ダクト防護壁 (No. 50) の構造図

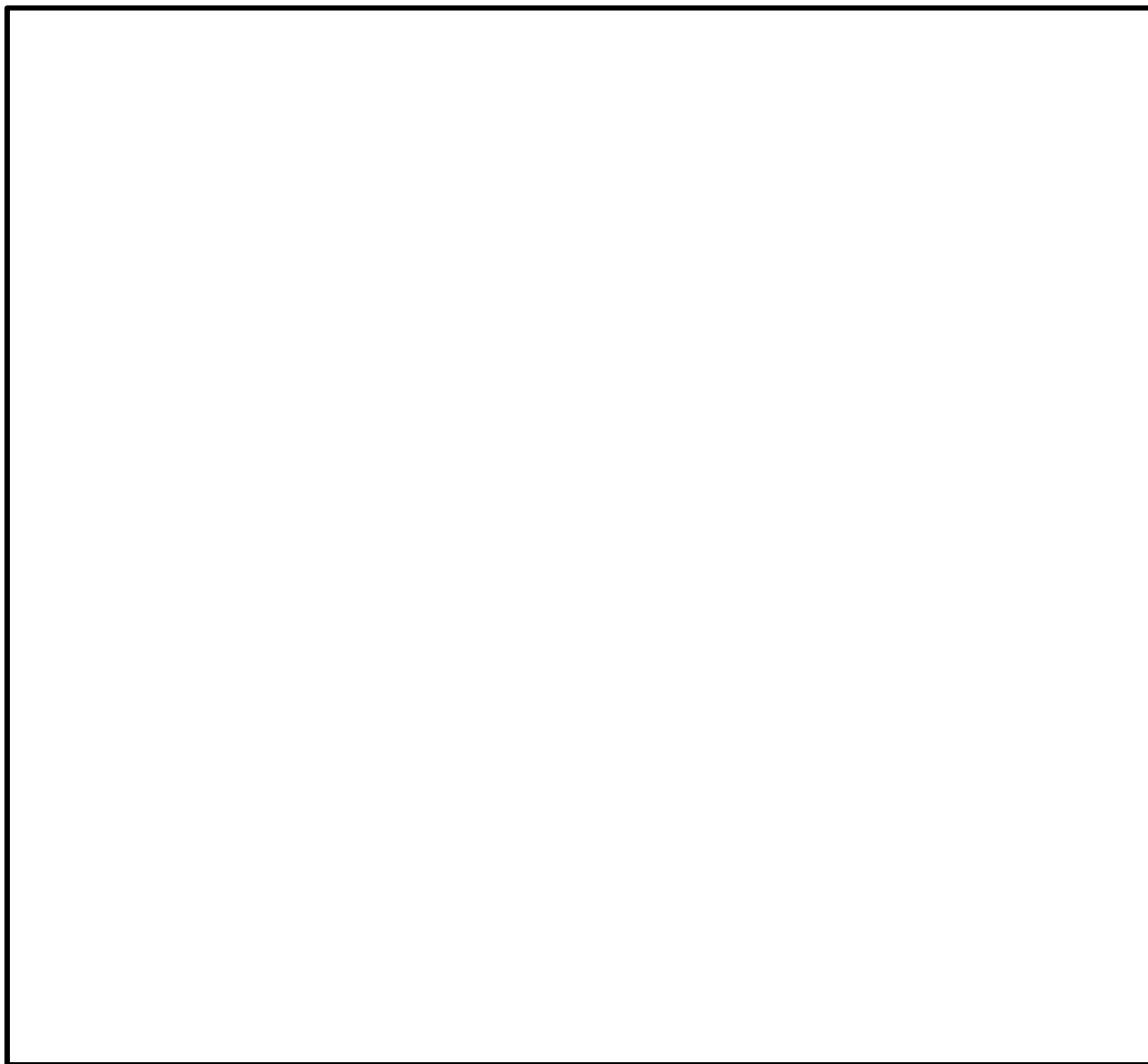


図 2-5 (3/4) 換気空調系ダクト防護壁 (No. 11) の構造図

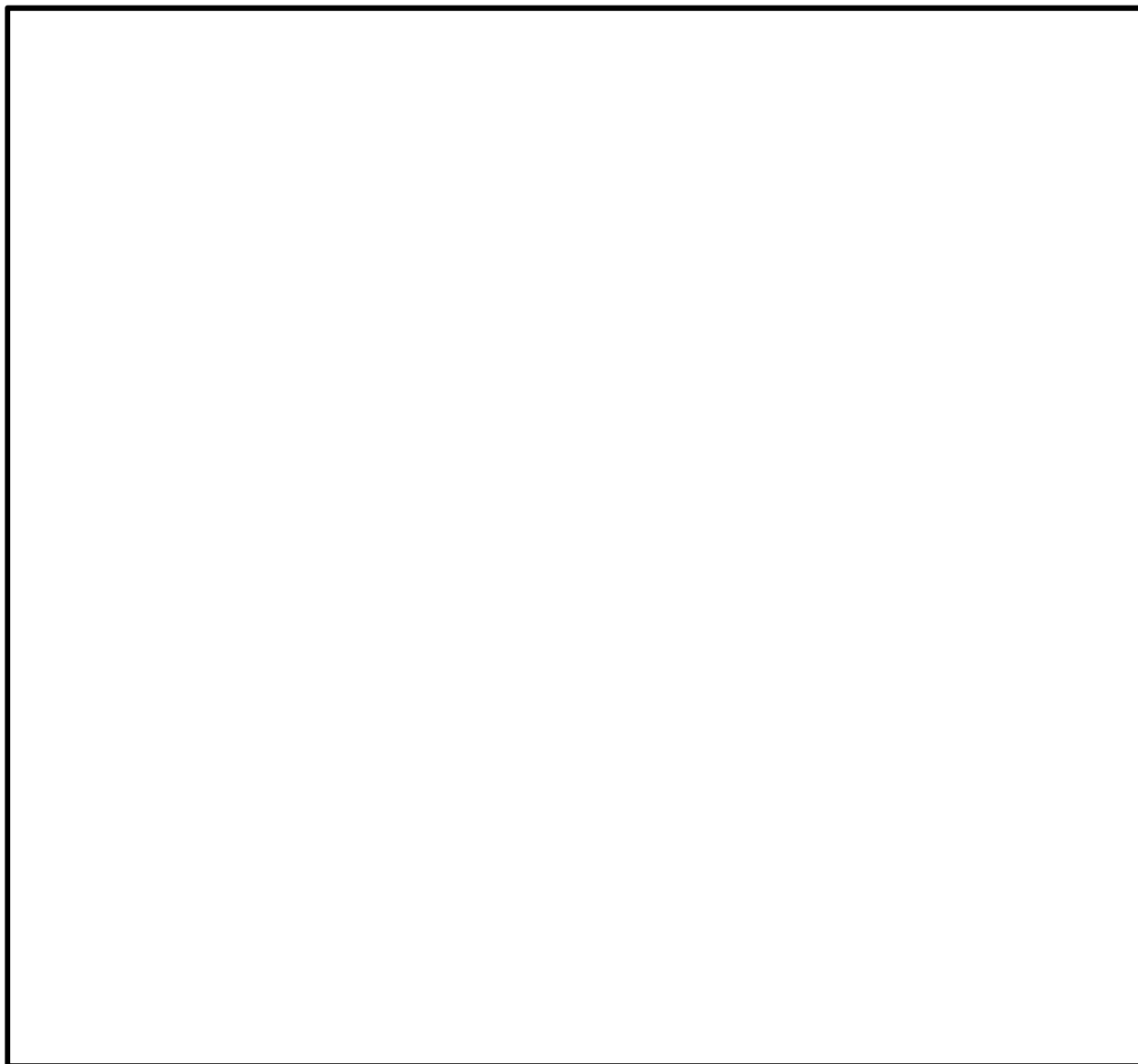


図 2-5 (4/4) 換気空調系ダクト防護壁 (No. 12) の構造図

(3) 竜巻防護ネット（防護鋼板部）

竜巻防護ネット（防護鋼板部）の構造は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「3.5.3 竜巻防護ネット（防護鋼板部）の構造設計」に示す構造設計を踏まえ、設定する。

竜巻防護ネット（防護鋼板部）は、鋼板等で構成する鋼製構造物である。

竜巻防護ネット（防護鋼板部）の構造図を図 2-6 に示す。

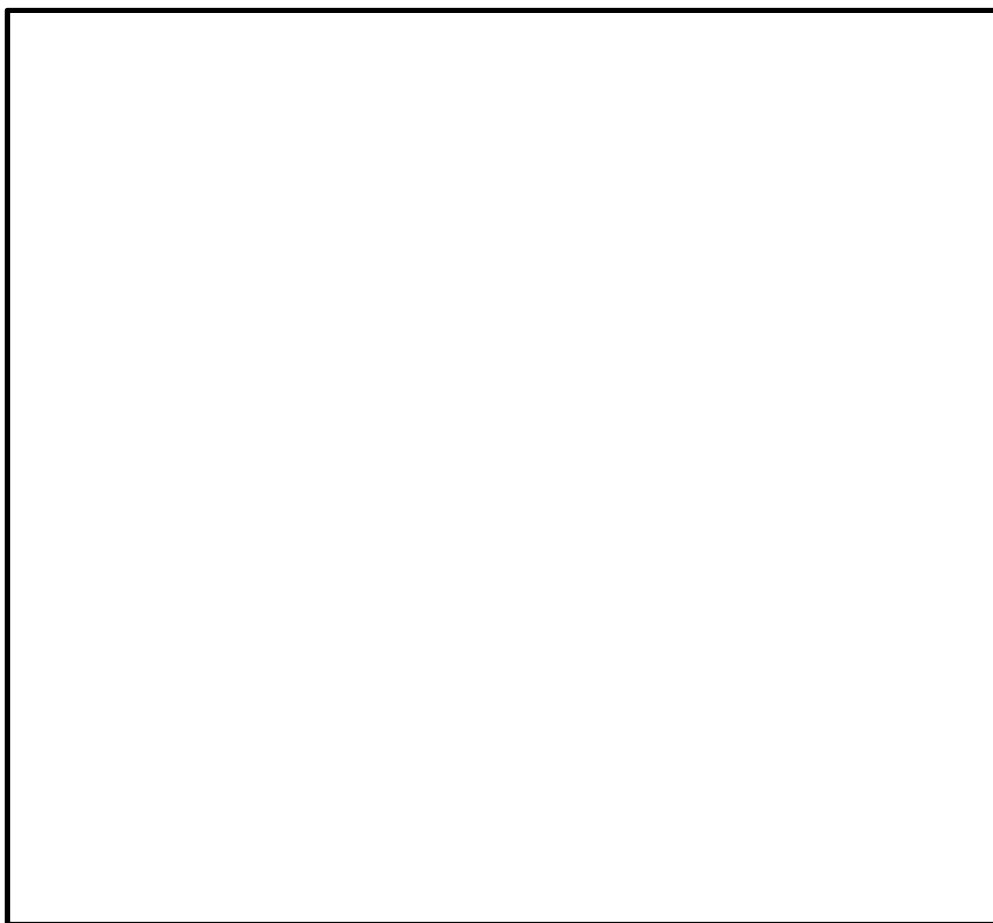


図 2-6 (1/4) 竜巻防護ネット（防護鋼板部）(No. 77)の構造図

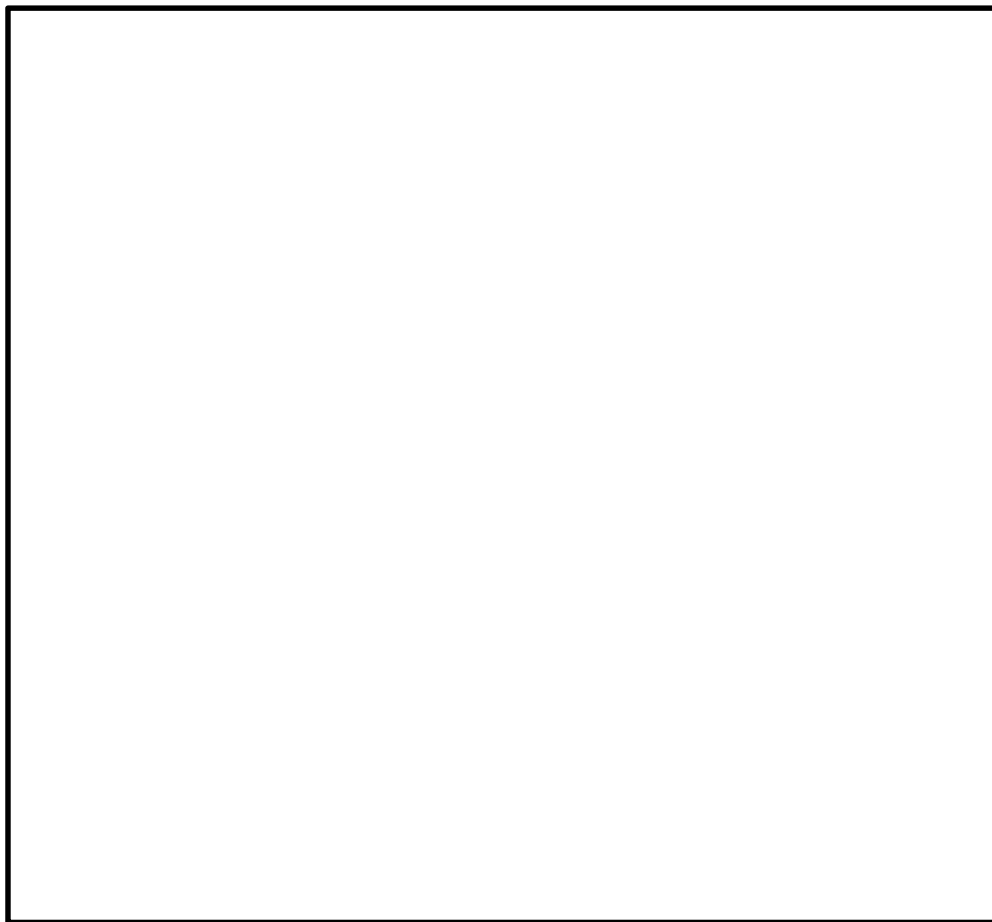


図 2-6 (2/4) 竜巻防護ネット (防護鋼板部) (No. 78) の構造図

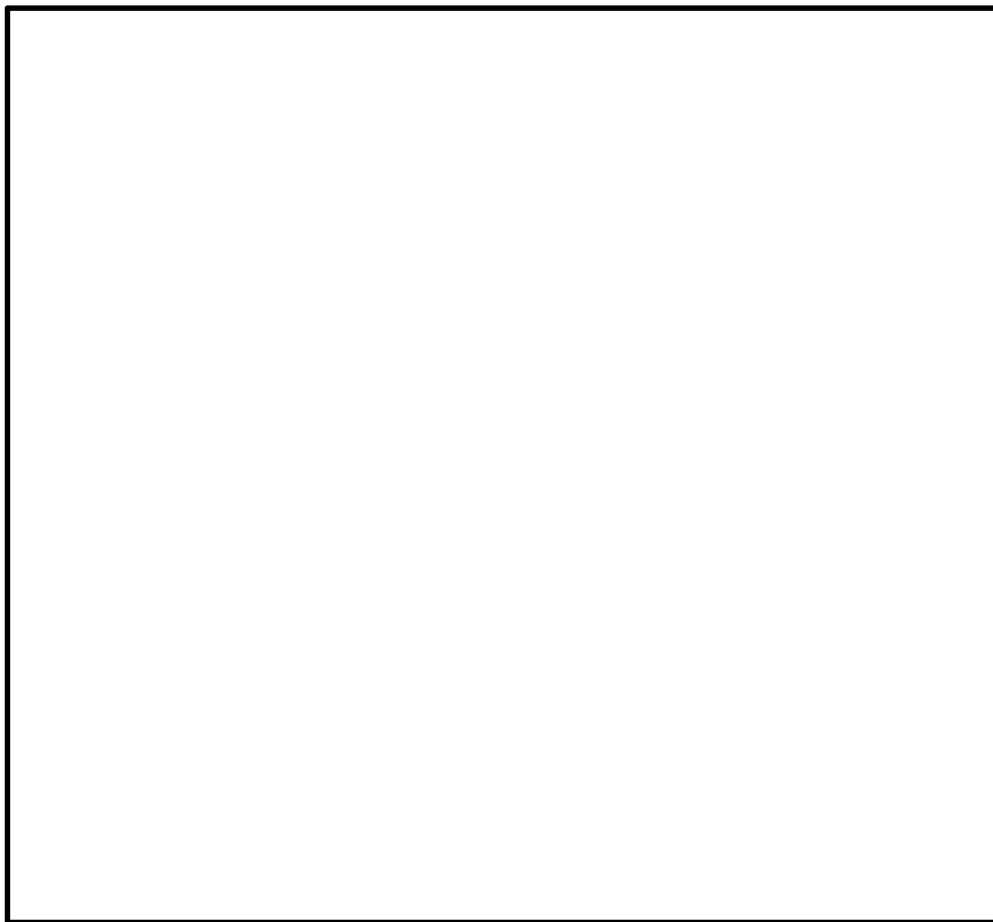


図 2-6 (3/4) 竜巻防護ネット (防護鋼板部) (No. 79) の構造図

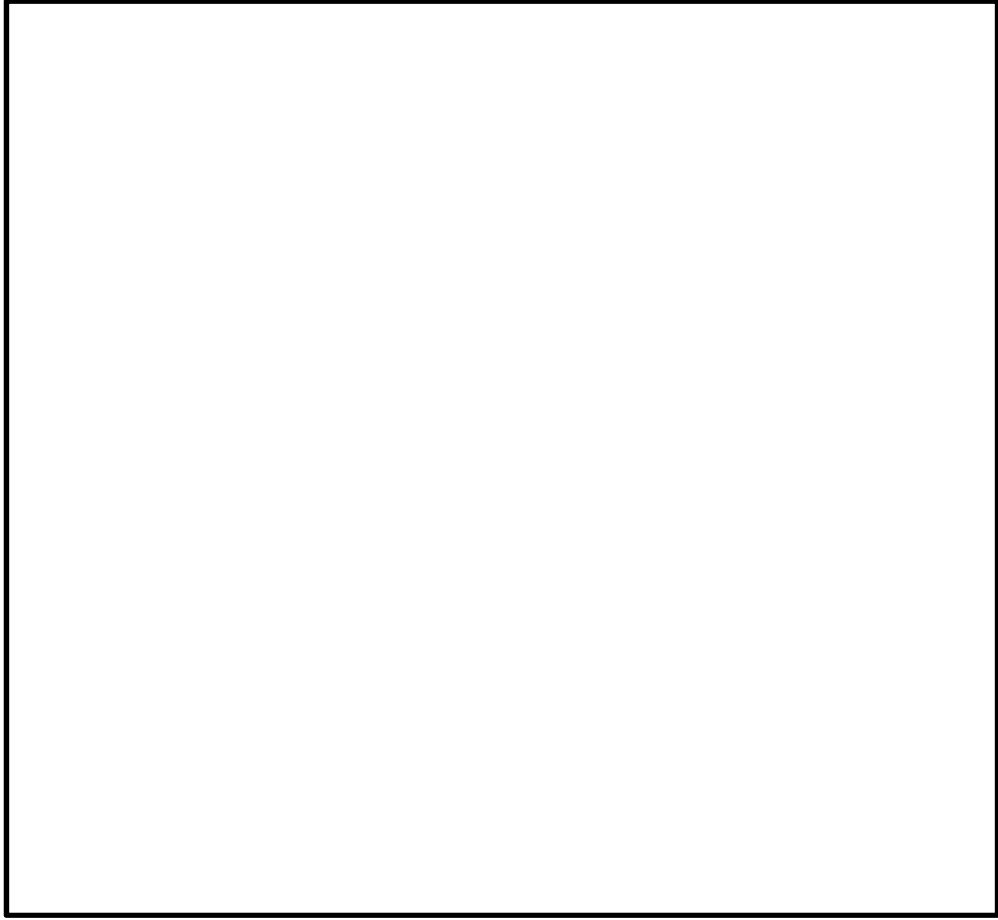


図 2-6 (4/4) 竜巻防護ネット (防護鋼板部) (No. 80) の構造図

2.3 評価方針

原子炉補機冷却海水系配管防護壁, 換気空調系ダクト防護壁及び竜巻防護ネット(防護鋼板部)の強度評価は, VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」及び「5.5 建屋内防護壁の許容限界」にて設定している荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ, 原子炉補機冷却海水系配管防護壁, 換気空調系ダクト防護壁及び竜巻防護ネット(防護鋼板部)の評価対象部位に作用する変形等が, 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。

原子炉補機冷却海水系配管防護壁, 換気空調系ダクト防護壁及び竜巻防護ネット(防護鋼板部)の評価フローを図 2-7 に示す。

原子炉補機冷却海水系配管防護壁, 換気空調系ダクト防護壁及び竜巻防護ネット(防護鋼板部)の強度評価においては, その構造を踏まえ, 設計竜巻荷重とこれに組み合わせる荷重(以下「設計荷重」という。)の作用方向及び伝達過程を考慮し, 評価対象部位を設定する。

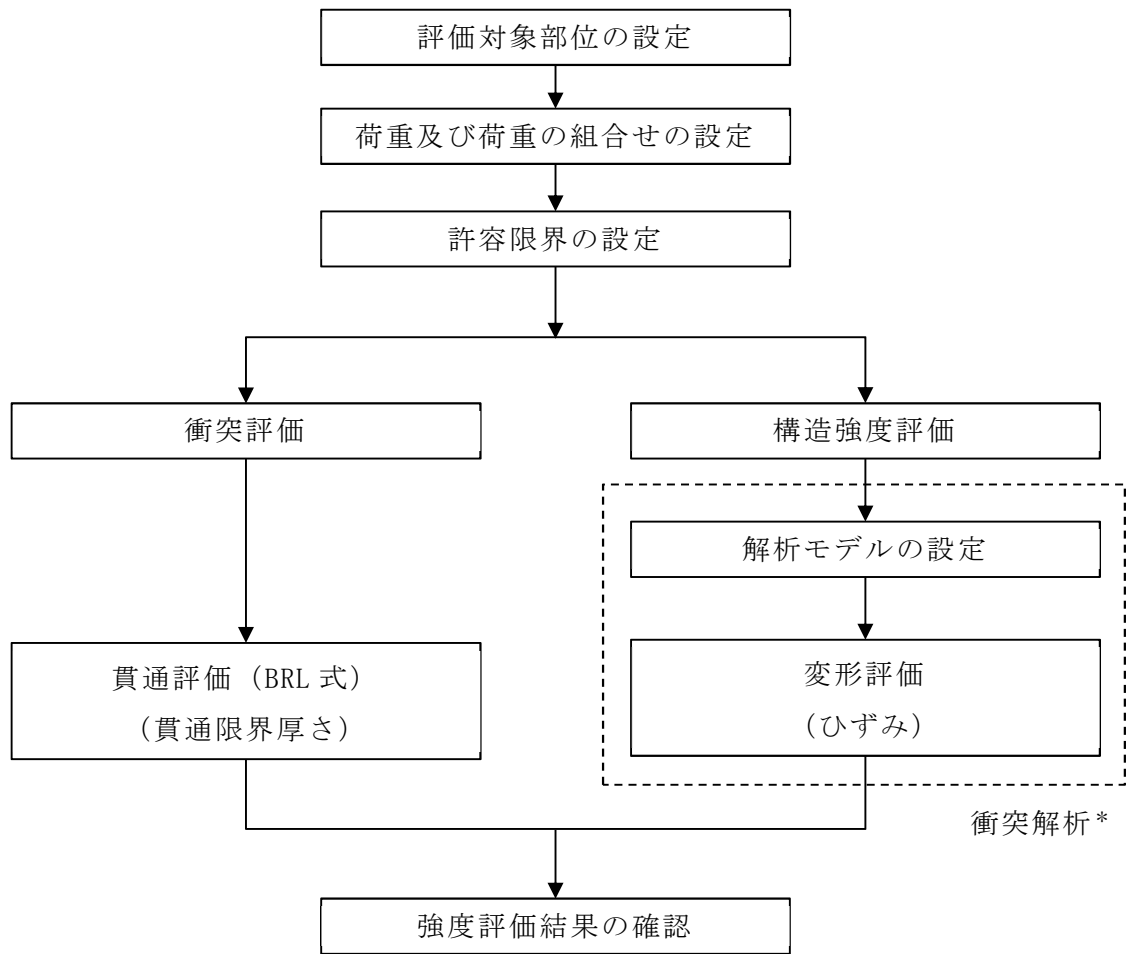
具体的には, 設計飛来物が外部事象防護対象施設に衝突する直接的な影響の評価として, 防護対策施設を構成する部材に対する衝突評価, 及び, 防護対策施設自体が外部事象防護対象施設に衝突・接触する波及的な影響の評価として, 防護対策施設を構成する部位の転倒及び脱落に対する構造強度評価を行う。

(1) 衝突評価

原子炉補機冷却海水系配管防護壁, 換気空調系ダクト防護壁 (No. 55 及び No. 50) 及び竜巻防護ネット(防護鋼板部)については, 設計荷重に対し, 設計飛来物が施設を構成する部材を貫通しない設計とするために, 防護鋼板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。(以下「貫通評価」という。)衝突評価には, VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「6.5 建屋内防護壁の強度評価」に示す評価式を用いる。また, 換気空調系ダクト防護壁 (No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B)) については, 貫通評価として, 設計荷重に対し, 防護鋼板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。

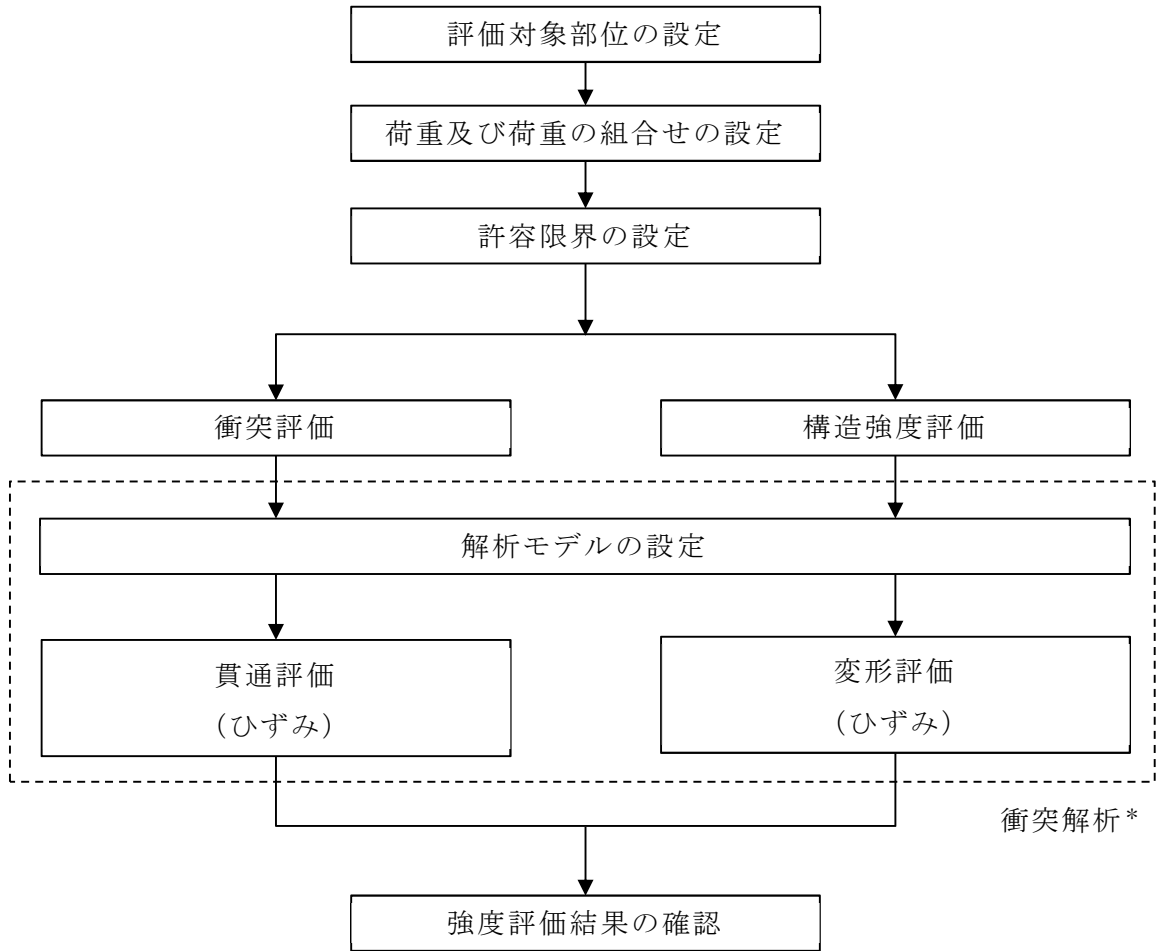
(2) 構造強度評価

設計荷重に対し, 施設を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とするために, 防護鋼板及び架構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。(以下「変形評価」という。)



注記*：衝突解析については、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、防護鋼板及び架構について評価を実施する。

図 2-7 (1/2) 原子炉補機冷却海水系配管防護壁，換気空調系ダクト防護壁 (No. 55 及び No. 50) 及び竜巻防護ネット (防護鋼板部) の評価フロー



注記*：衝突解析については、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、防護鋼板及び架構について評価を実施する。

図 2-7 (2/2) 換気空調系ダクト防護壁 (No. 11, No. 12(A)及び No. 12(B)) 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。

- 建築基準法及び同施行令
- 「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC 1-2005/2007」（日本機械学会）
- ISE7607-3「軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査 その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討」（昭和51年10月高温構造安全技術研究組合）
- タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日原子炉安全専門審査会）
- U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision1, March 2007
- Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8 (NEI 07-13))
- 「建築物荷重指針・同解説」（日本建築学会，2004改定）
- 日本産業規格（JIS）
- 「鋼構造設計規準－許容応力度設計法－」（日本建築学会，2005改定）

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

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
d	m	設計飛来物が衝突する衝突断面の等価直径
F_d	N	常時作用する荷重
K	—	鋼板の材質に関する係数
M	kg	設計飛来物の質量
T	m	貫通限界厚さ
V	m/s	設計飛来物の飛来速度
W_M	N	設計飛来物による衝撃荷重

3.2 評価対象部位

原子炉補機冷却海水系配管防護壁の評価対象部位は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.5 建屋内防護壁の許容限界」に示す評価対象部位を踏まえ、設定する。

- (1) 原子炉補機冷却海水系配管防護壁，換気空調系ダクト防護壁（No. 55 及び No. 50）及び竜巻防護ネット（防護鋼板部）


a. 貫通評価

設計荷重に対し，設計飛来物が施設を構成する部材を貫通しない設計とするために，防護鋼板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。

施設を構成する部材が設計飛来物を貫通させないことの確認においては，外殻を構成する防護鋼板を評価対象部位として設定する。

b. 変形評価

設計荷重に対し，施設を構成する部材自体が，転倒及び脱落により外部事象防護対象施設へ接触等の影響を与えない設計とするために，防護鋼板及び架構に終局状態に至るようなひずみが生じないことを解析により確認する。

設計飛来物の衝突を考慮する場合，建屋開口部の位置から設計飛来物の衝突方向を考慮し，運動エネルギーが最大となる水平方向衝突の鋼製足場板を設定する。また，被衝突物の支持間隔が長く，厚さが薄いほどたわみ量が大きくなる傾向にある。したがって，変形評価としては，評価対象となる防護鋼板の支持間隔が長く，厚さが薄い箇所を選定する。なお，防護鋼板の設計においては，厚さを一律  とすることから，支持間隔が最長となる箇所が代表となる。衝突位置については，たわみ量が大きくなるよう部材の中央とする。

評価対象部位を図 3-1 から図 3-4 に示す。

なお，竜巻防護ネット（防護鋼板部）（No. 77，No. 78，No. 79，No. 80）は同形状のため，竜巻防護ネット（防護鋼板部）（No. 77）を代表として評価する。

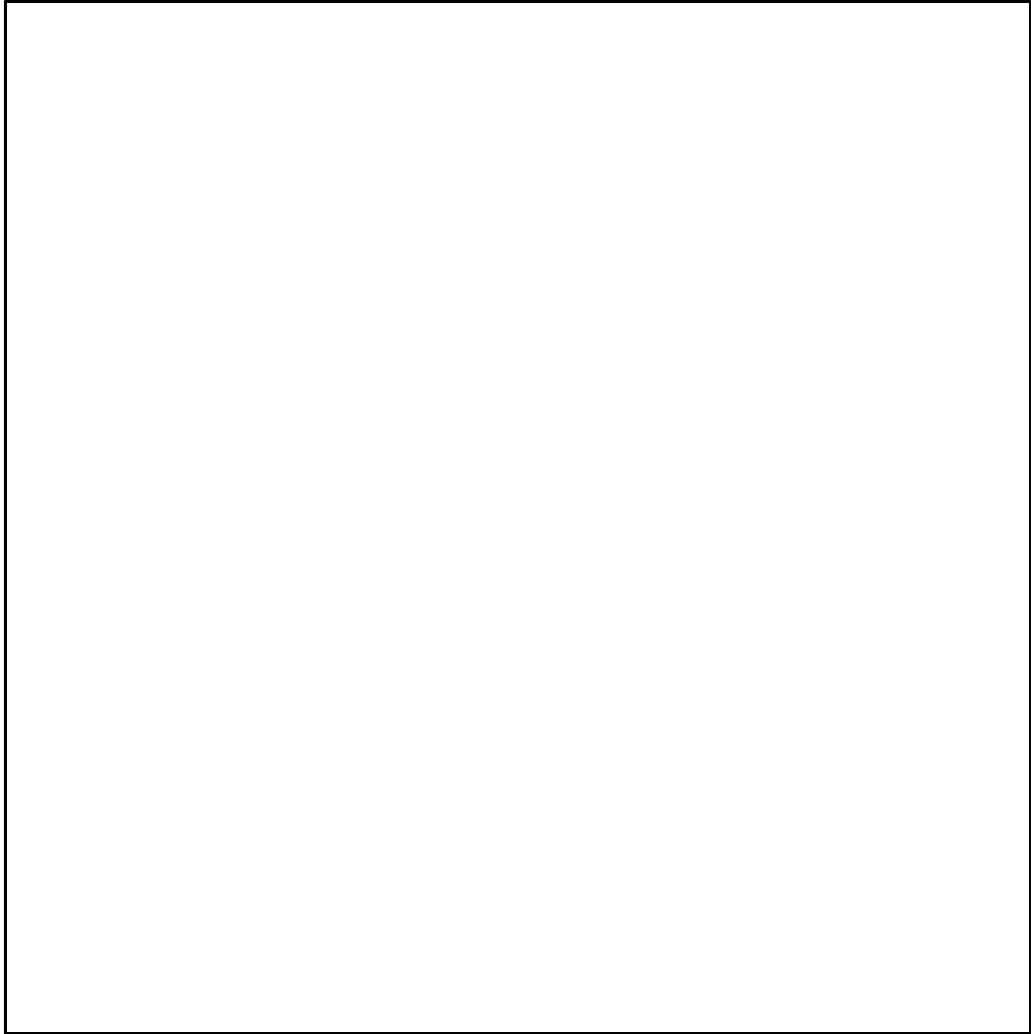


図 3-1 原子炉補機冷却海水系配管防護壁の評価位置図

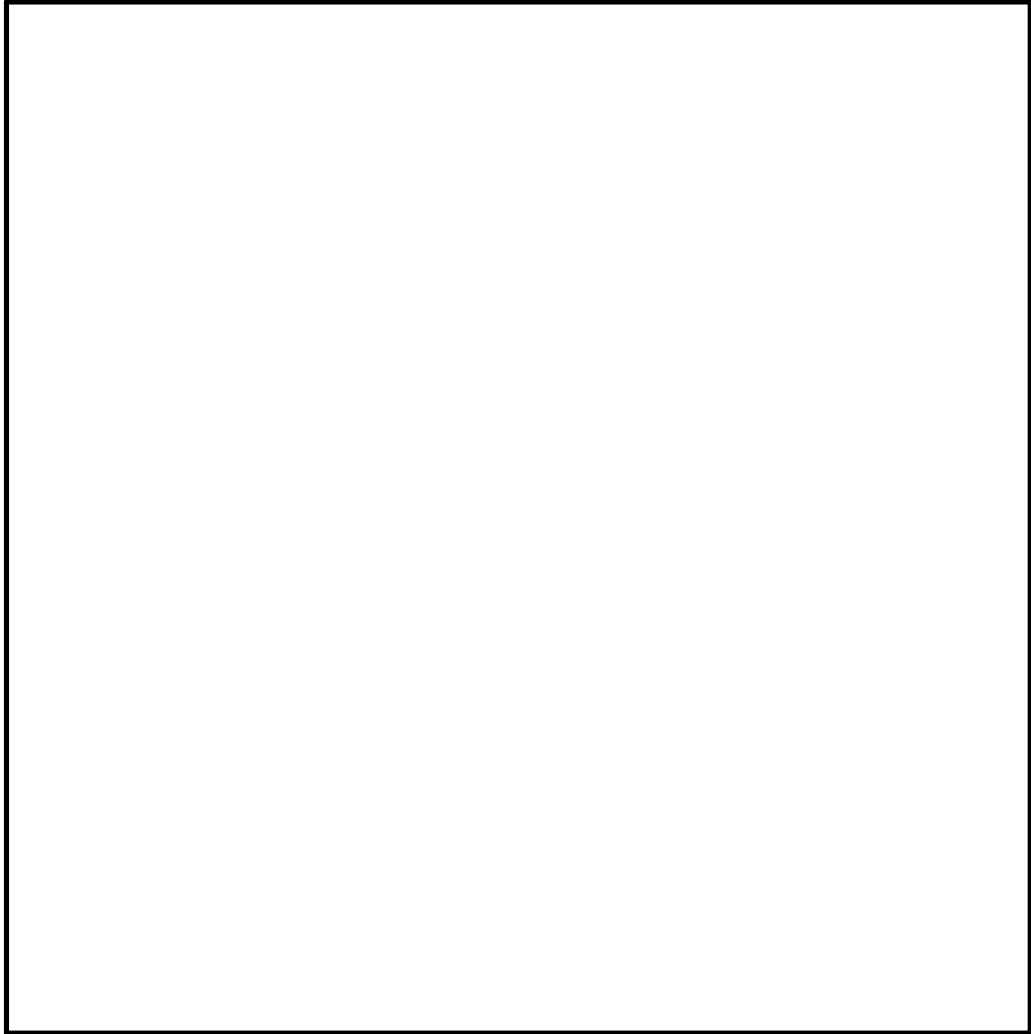


図 3-2 換気空調系ダクト防護壁 (No. 55) の評価位置図

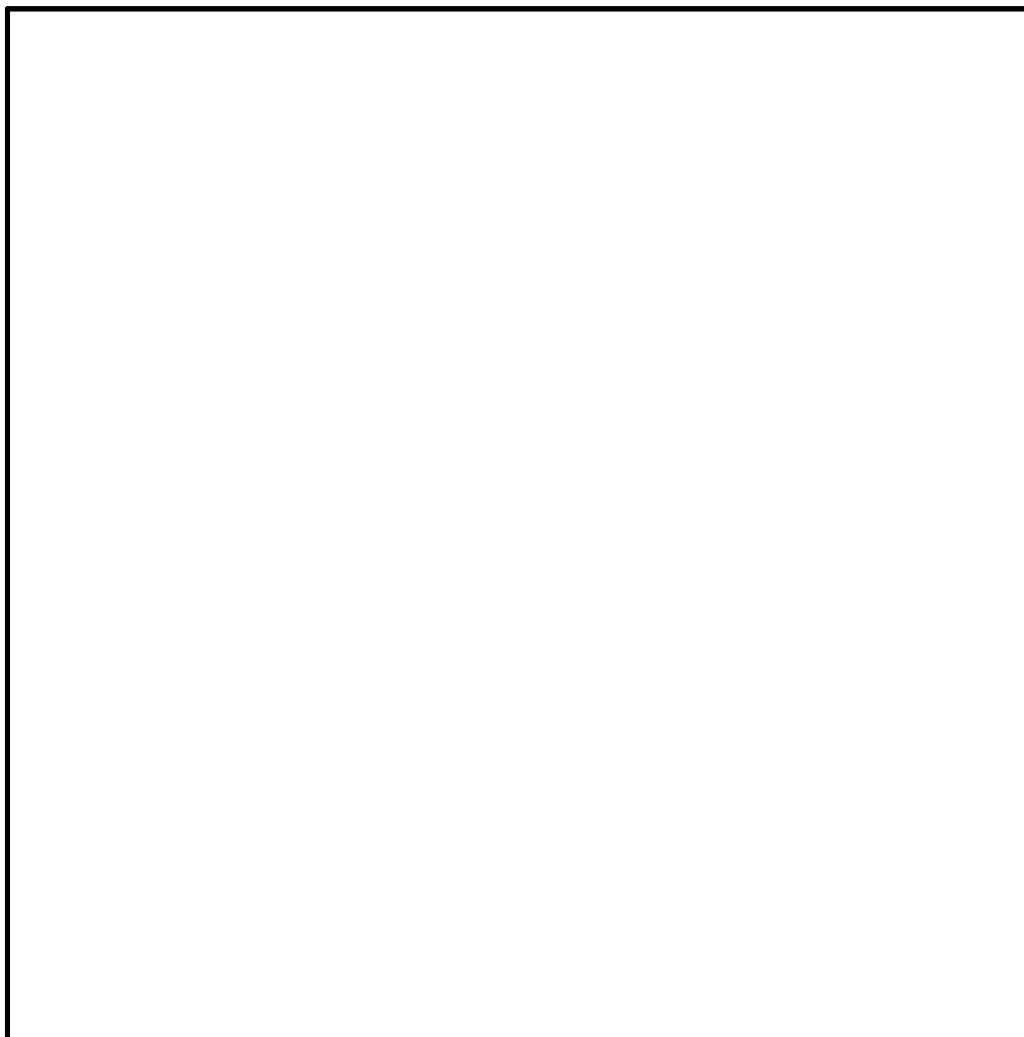


図 3-3 換気空調系ダクト防護壁 (No. 50) の評価位置図

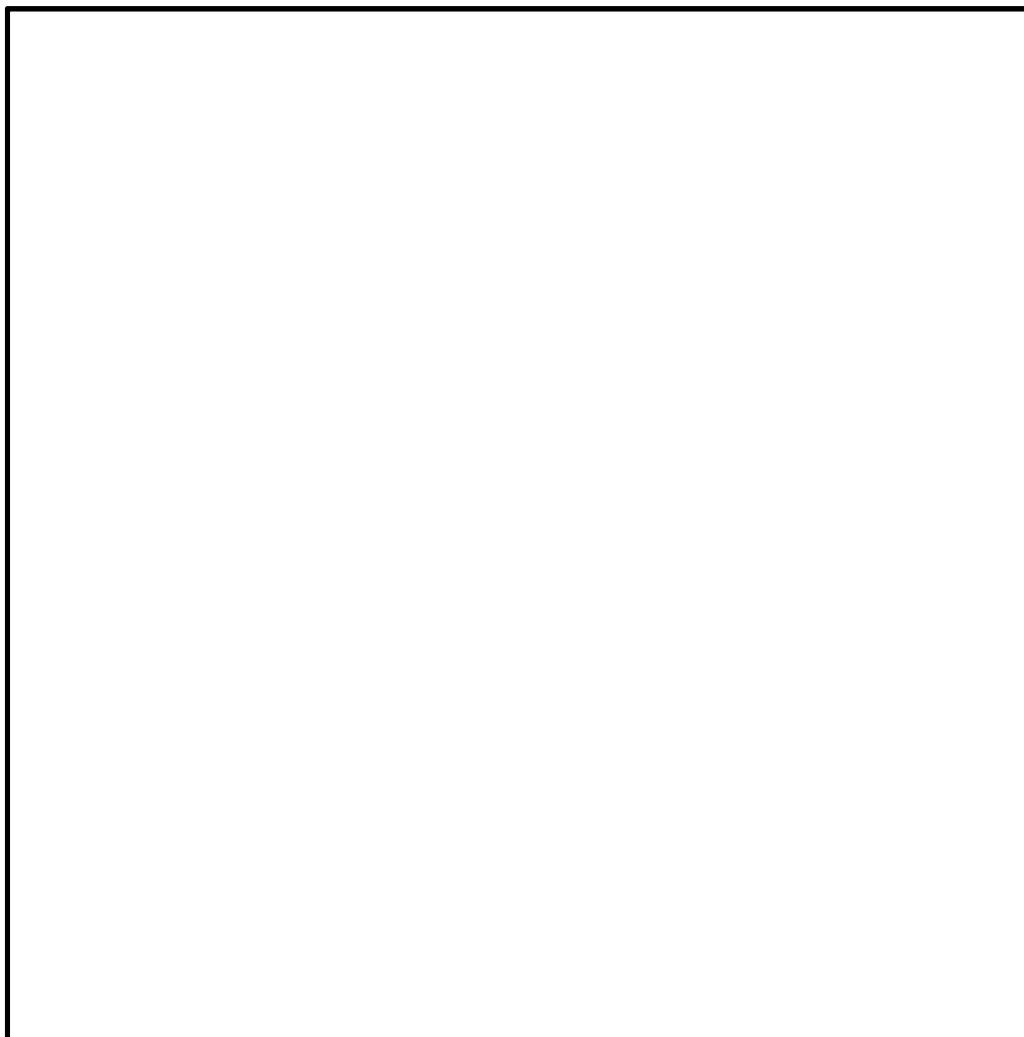


図 3-4 竜巻防護ネット（防護鋼板部）の評価位置図

(2) 換気空調系ダクト防護壁 (No. 11, No. 12(A)及び No. 12(B))

a. 貫通評価

設計荷重に対し、設計飛来物が施設を構成する部材を貫通しない設計とするために、防護鋼板に終局状態に至るようなひずみが生じないことを解析により確認する。

設計飛来物の衝突を考慮する場合、建屋開口部の位置から設計飛来物の衝突方向について換気空調系ダクト防護壁 (No. 11) は鉛直方向、換気空調系ダクト防護壁 (No. 12(A)及び No. 12(B)) は水平方向とし、衝突断面積あたりの運動エネルギーが最大となる足場パイプを設定する。また、被衝突物の支持間隔が長く、厚さが薄いほどたわみ量が大きくなる傾向にある。したがって、貫通評価としては、評価対象となる防護鋼板の支持間隔が長く、厚さが薄い箇所を選定する。なお、防護鋼板の設計においては、厚さを設備毎に一律 とすることから、支持間隔が最長となる箇所が代表となる。衝突位置については、たわみ量が大きくなるよう部材の中央とする。

評価対象部位を図 3-5 から図 3-7 に示す。

b. 変形評価

設計荷重に対し、施設を構成する部材自体が、転倒及び脱落により外部事象防護対象施設へ接触等の影響を与えない設計とするために、防護鋼板及び架構に終局状態に至るようなひずみが生じないことを解析により確認する。

変形評価の評価対象部位は貫通評価と同じである。



図 3-5 換気空調系ダクト防護壁 (No. 11) の評価位置図

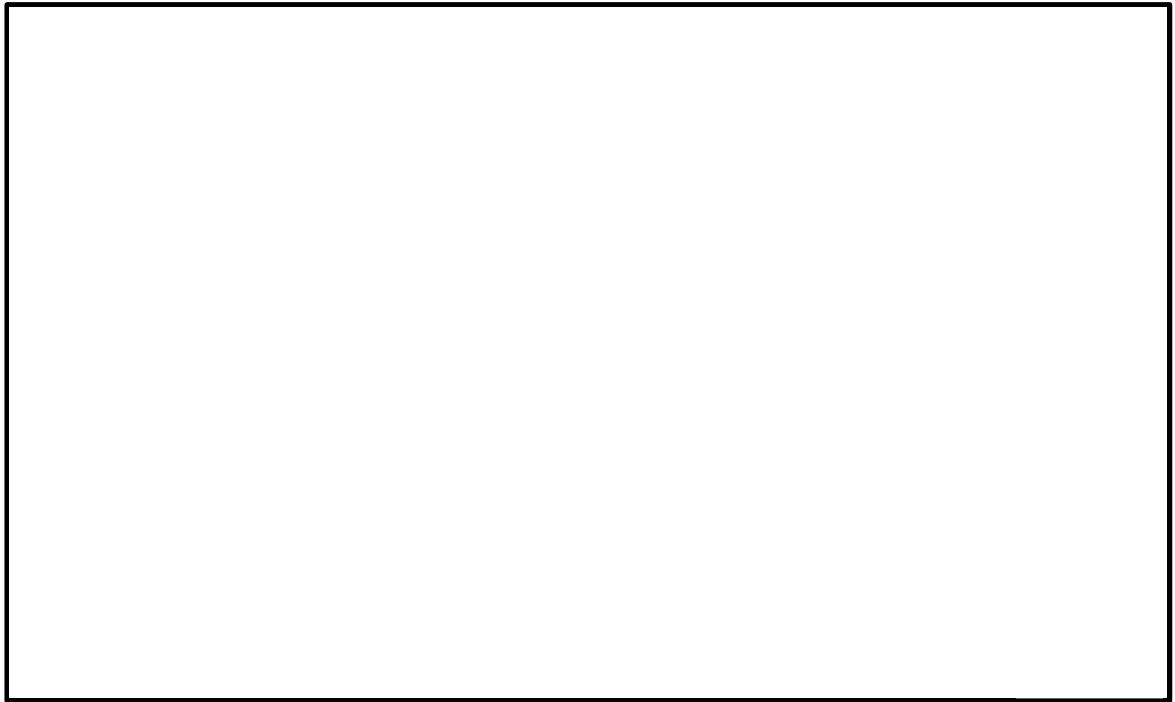


図 3-6 換気空調系ダクト防護壁 (No. 12(A)) の評価位置図

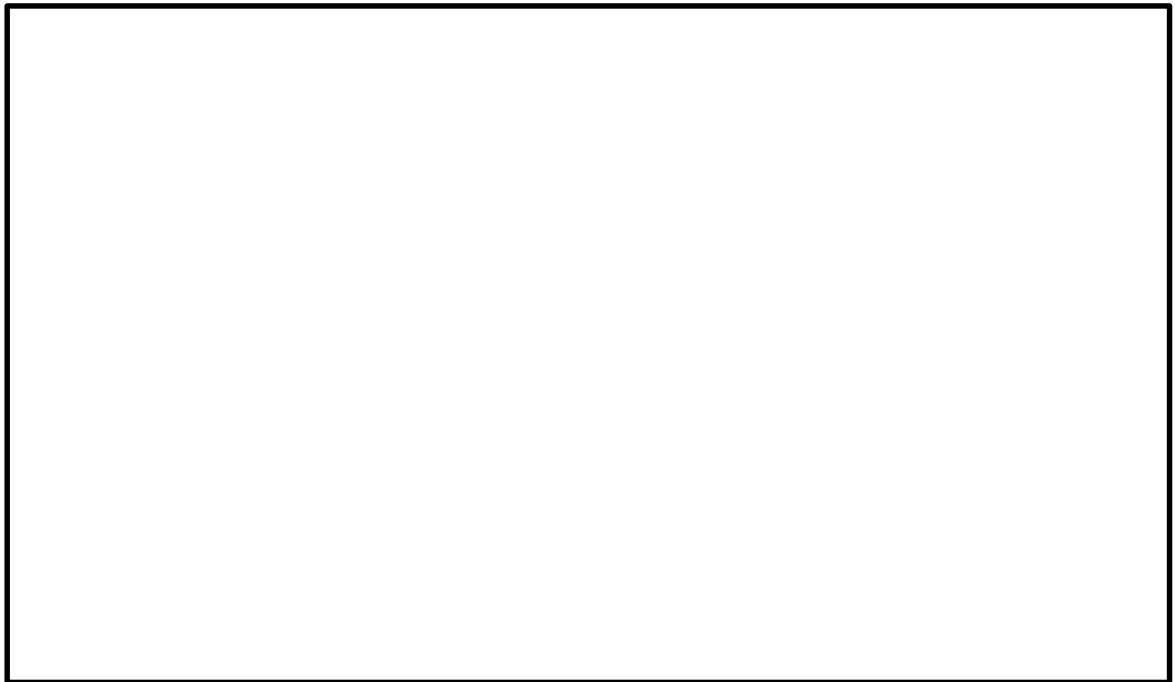


図 3-7 換気空調系ダクト防護壁 (No. 12(B)) の評価位置図

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

(1) 荷重の設定

強度評価に用いる荷重は以下の荷重を用いる。

a. 設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)

設計飛来物による衝撃荷重 (W_M) については、表 3-2 に諸元を示す設計飛来物の衝突に伴う荷重とする。また、設計飛来物の材料定数を表 3-3 に示す。

貫通評価においては、考慮する設計飛来物として衝突断面積あたりの運動エネルギーが最大となる足場パイプを設定し、足場パイプの衝撃荷重を考慮する。

変形評価においては、考慮する設計飛来物として運動エネルギーが最大となるように設定し、衝撃荷重を考慮する。運動エネルギーは、水平方向衝突の場合は鋼製足場板が最大であり、鉛直方向衝突の場合は足場パイプが最大となる。

表 3-2 設計飛来物の諸元*

設計飛来物	寸法 長さ×幅×奥行き (m)	質量 (kg)	水平方向の 飛来速度 (m/s)	鉛直方向の 飛来速度 (m/s)	運動エネルギー (kJ)		衝突断面積あたりの 運動エネルギー (kJ/mm ²)	
					水平方向	鉛直方向	水平方向	鉛直方向
足場パイプ	4×0.05×0.05	11	42	38	10	8	0.0279	0.0223
鋼製足場板	4×0.25×0.04	14	55	18	21	3	0.0021	0.0003

注記*：衝突解析においては、竜巻風速 100m/s 時の足場パイプ（水平方向の飛来速度 46m/s，鉛直方向の飛来速度 38m/s），鋼製足場板（水平方向の飛来速度 59m/s，鉛直方向の飛来速度 18m/s）の諸元を適用する。

表 3-3 設計飛来物の材料定数

設計飛来物	降伏応力 σ_y (MPa)	縦弾性係数 E (MPa)	ポアソン比
足場パイプ	355	201667	0.3
鋼製足場板	245	201667	0.3

b. 常時作用する荷重 (F_d)

常時作用する荷重 (F_d) は、部材の自重とする。

(2) 荷重の組合せ

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

荷重の組合せを表 3-4 及び表 3-5 に示す。

表 3-4 荷重の組合せ（原子炉補機冷却海水系配管防護壁，換気空調系ダクト防護壁（No. 55 及び No. 50）及び竜巻防護ネット（防護鋼板部））

評価内容	設計飛来物による 衝撃荷重 (W_M)	常時作用する荷重 (F_d)	荷重の組合せ
貫通評価	○	—	W_M
変形評価	○	○	$W_M + F_d$

表 3-5 荷重の組合せ（換気空調系ダクト防護壁（No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B)））

評価内容	設計飛来物による 衝撃荷重 (W_M)	常時作用する荷重 (F_d)	荷重の組合せ
貫通評価及び 変形評価	○	○	$W_M + F_d$

3.4 許容限界

原子炉補機冷却海水系配管防護壁, 換気空調系ダクト防護壁及び竜巻防護ネット(防護鋼板部)の許容限界は, VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.5 建屋内防護壁の許容限界」にて設定している許容限界を踏まえて, 「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位の機能損傷モードを考慮して設定する。

(1) 評価対象部位の材料仕様

原子炉補機冷却海水系配管防護壁, 換気空調系ダクト防護壁及び竜巻防護ネット(防護鋼板部)の材料仕様を表 3-6 から表 3-9 に示す。

表 3-6 評価対象部位の材料仕様 (原子炉補機冷却海水系配管防護壁)

分類	仕様	材質
防護鋼板		SS400
架構		SS400

表 3-7 評価対象部位の材料仕様 (換気空調系ダクト防護壁 (No. 55 及び No. 50))

分類	仕様	材質
防護鋼板		SS400
架構		SM490A
		SS400
		SS400

表 3-8 評価対象部位の材料仕様 (換気空調系ダクト防護壁 (No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B)))

分類	仕様	材質
防護鋼板		SUS304
架構		SUS304

表 3-9 評価対象部位の材料仕様(竜巻防護ネット (防護鋼板部))

分類	仕様	材質
防護鋼板		SM490A
架構		SM490A

(2) 評価対象部位の材料定数

原子炉補機冷却海水系配管防護壁，換気空調系ダクト防護壁及び竜巻防護ネット (防護鋼板部) の材料定数を表 3-10 に示す。

表 3-10 材料定数

材質	厚さ (mm)	降伏応力 σ_y (MPa)	縦弾性係数 E (MPa)	塑性硬化係数 E' (MPa)	ポアソン 比
SS400			201667		0.3
			201667		0.3
SM490A			201667		0.3
			201667		0.3
SUS304	—		193667		0.3

(3) 許容限界

a. 貫通評価

原子炉補機冷却海水系配管防護壁，換気空調系ダクト防護壁及び竜巻防護ネット (防護鋼板部) を構成する防護鋼板の貫通評価の許容限界を表 3-11 から表 3-14 に示す。

ここで，換気空調系ダクト防護壁 (No. 11, No. 12 (A) 及び No. 12 (B)) の許容限界は，鋼材の破断ひずみとする。破断ひずみについては，「3.5(2)e. (c) 破断ひずみ」に示すとおり，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，

「NEI07-13: Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs」(以下「NEI07-13」という。)において T F (多軸性係数) を

とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕として $TF = \text{$ を考慮して設定する。

表 3-11 貫通限界の許容限界（原子炉補機冷却海水系配管防護壁）

評価対象部位		設置方向	厚さ (mm)	材質
原子炉補機冷却海水系配管防護壁	防護	側面	<input type="text"/>	SS400
	鋼板	上面	<input type="text"/>	SS400

表 3-12 貫通限界の許容限界（換気空調系ダクト防護壁（No. 55 及び No. 50））

評価対象部位		設置方向	厚さ (mm)	材質
換気空調系ダクト防護壁 (No. 55 及び No. 50)	防護	側面	<input type="text"/>	SS400
	鋼板	上面	<input type="text"/>	SS400

表 3-13 貫通評価の許容限界（竜巻防護ネット（防護鋼板部））

評価対象部位		設置方向	厚さ (mm)	材質
竜巻防護ネット（防護鋼板部）	防護 鋼板	側面	<input type="text"/>	SM490A

表 3-14 貫通限界の許容限界（換気空調系ダクト防護壁（No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B)））

評価対象部位		材質	破断ひずみ*
換気空調系ダクト防護壁 (No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B))	防護 鋼板	SUS304	<input type="text"/>

注記*：真ひずみ換算値

b. 変形評価

設計飛来物が防護鋼板へ直接衝突する場合の変形評価における許容限界は、鋼材の破断ひずみとする。破断ひずみについては、「3.5(2)e.(c) 破断ひずみ」に示すとおり、JISに規定されている伸びの下限値を基に設定するが、「NEI07-13」において TF （多軸性係数）をとすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕として $TF = \text{$ を考慮して設定する。

設定した許容限界を表 3-15 から表 3-18 に示す。

表 3-15 変形評価の許容限界（原子炉補機冷却海水系配管防護壁）

評価対象部位		材質	破断ひずみ*
原子炉補機冷却海水系配管防護壁	防護鋼板	SS400	
	架構	SS400	

注記*：真ひずみ換算値

表 3-16 変形評価の許容限界（換気空調系ダクト防護壁（No. 55 及び No. 50））

評価対象部位		材質	破断ひずみ*
換気空調系ダクト防護壁 (No. 55 及び No. 50)	防護鋼板	SS400	
	架構	SS400	
		SM490A	

注記*：真ひずみ換算値

表 3-17 変形評価の許容限界（竜巻防護ネット（防護鋼板部））

評価対象部位		材質	破断ひずみ*
竜巻防護ネット（防護鋼板部）	防護鋼板	SM490A	
	架構	SM490A	

注記*：真ひずみ換算値

表 3-18 変形評価の許容限界（換気空調系ダクト防護壁（No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B)））

評価対象部位		材質	破断ひずみ*
換気空調系ダクト防護壁 (No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B))	防護鋼板	SUS304	
	架構	SUS304	

注記*：真ひずみ換算値

3.5 評価方法

原子炉補機冷却海水系配管防護壁, 換気空調系ダクト防護壁及び竜巻防護ネット(防護鋼板部)の強度評価は, VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「4.5 建屋内防護壁の評価方針」を踏まえて, 衝突評価として貫通評価を実施する。また, 構造強度評価として変形評価を実施する。

(1) 貫通評価

設計飛来物が原子炉補機冷却海水系配管防護壁, 換気空調系ダクト防護壁 (No. 55 及び No. 50) 及び竜巻防護ネット (防護鋼板部) の防護鋼板へ直接衝突する場合の貫通限界厚さを, 「タービンミサイル評価について (昭和 52 年 7 月 20 日原子炉安全専門審査会)」で用いられる BRL 式を用いて算出する。

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

設計飛来物が換気空調系ダクト防護壁 (No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B)) の防護鋼板へ直接衝突する場合の貫通評価は, 「(2) 変形評価」に示す方法により評価する。

(2) 変形評価

変形評価に用いる評価対象部位に生じるひずみは, 解析モデル及び材料の非線形特性を用いた衝突解析により評価する。

a. 解析モデル及び諸元

(a) 原子炉補機冷却海水系配管防護壁, 換気空調系ダクト防護壁及び竜巻防護ネット (防護鋼板部)

原子炉補機冷却海水系配管防護壁, 換気空調系ダクト防護壁及び竜巻防護ネット (防護鋼板部) の解析モデル化の範囲は, 想定する荷重の伝達を考慮し, 原子炉補機冷却海水系配管防護壁, 換気空調系ダクト防護壁及び竜巻防護ネット (防護鋼板部) を構成する防護鋼板及び架構とする。防護鋼板及び架構は, シェル要素でモデル化する。原子炉補機冷却海水系配管防護壁, 換気空調系ダクト防護壁及び竜巻防護ネット (防護鋼板部) の解析モデルの境界条件を表 3-19 及び表 3-21 に, 解析モデル図を図 3-8 から図 3-14 に示す。

表 3-19 解析モデルの境界条件（原子炉補機冷却海水系配管防護壁）

項目	境界条件
原子炉補機冷却海水系配管防護壁と タービン建屋壁・床	X, Y, Z 方向並進拘束

表 3-20 解析モデルの境界条件（換気空調系ダクト防護壁）

項目	境界条件
換気空調系ダクト防護壁と タービン建屋又はコントロール建屋の床	X, Y, Z 方向並進拘束

表 3-21 解析モデルの境界条件（竜巻防護ネット（防護鋼板部））

項目	境界条件
竜巻防護ネット（防護鋼板部）と 原子炉建屋壁	X, Y, Z 方向並進拘束

K6 ① VI-3-別添 1-4-6 R0

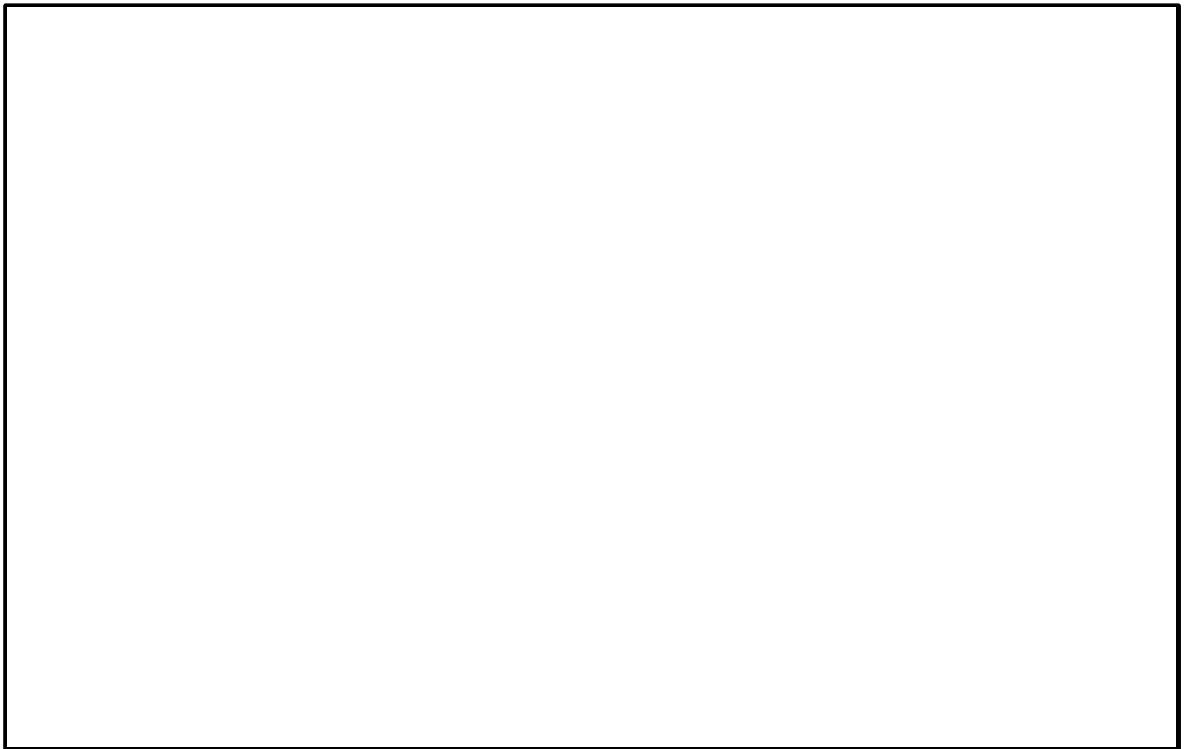


図 3-8 原子炉補機冷却海水系配管防護壁の解析モデル図

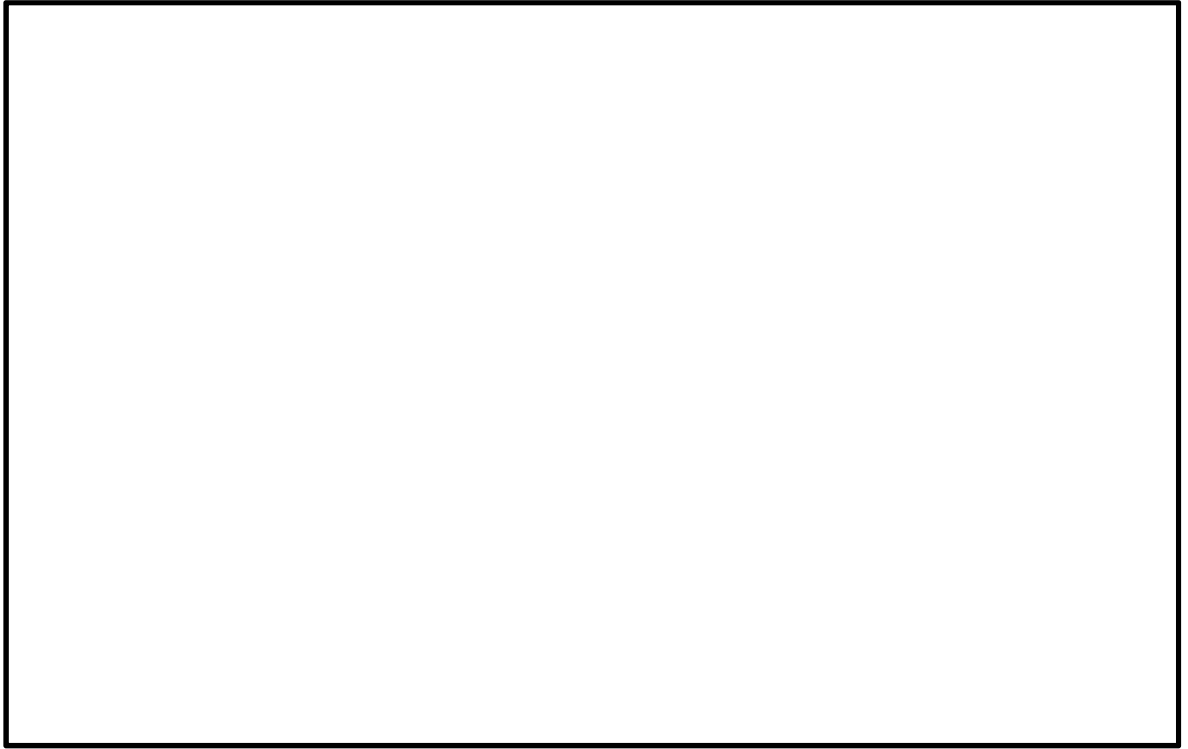


図 3-9 換気空調系ダクト防護壁 (No. 55) の解析モデル図

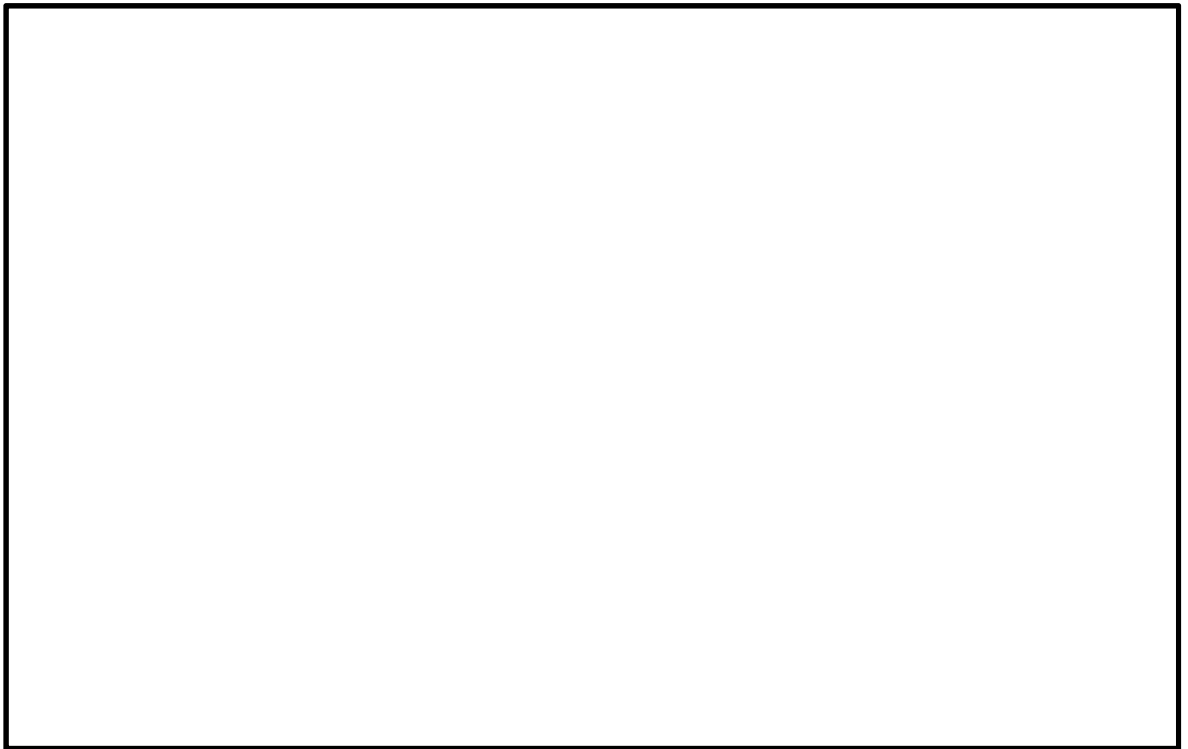


図 3-10 換気空調系ダクト防護壁 (No. 50) の解析モデル図



図 3-11 換気空調系ダクト防護壁 (No. 11) の解析モデル図



図 3-12 換気空調系ダクト防護壁 (No. 12(A)) の解析モデル図

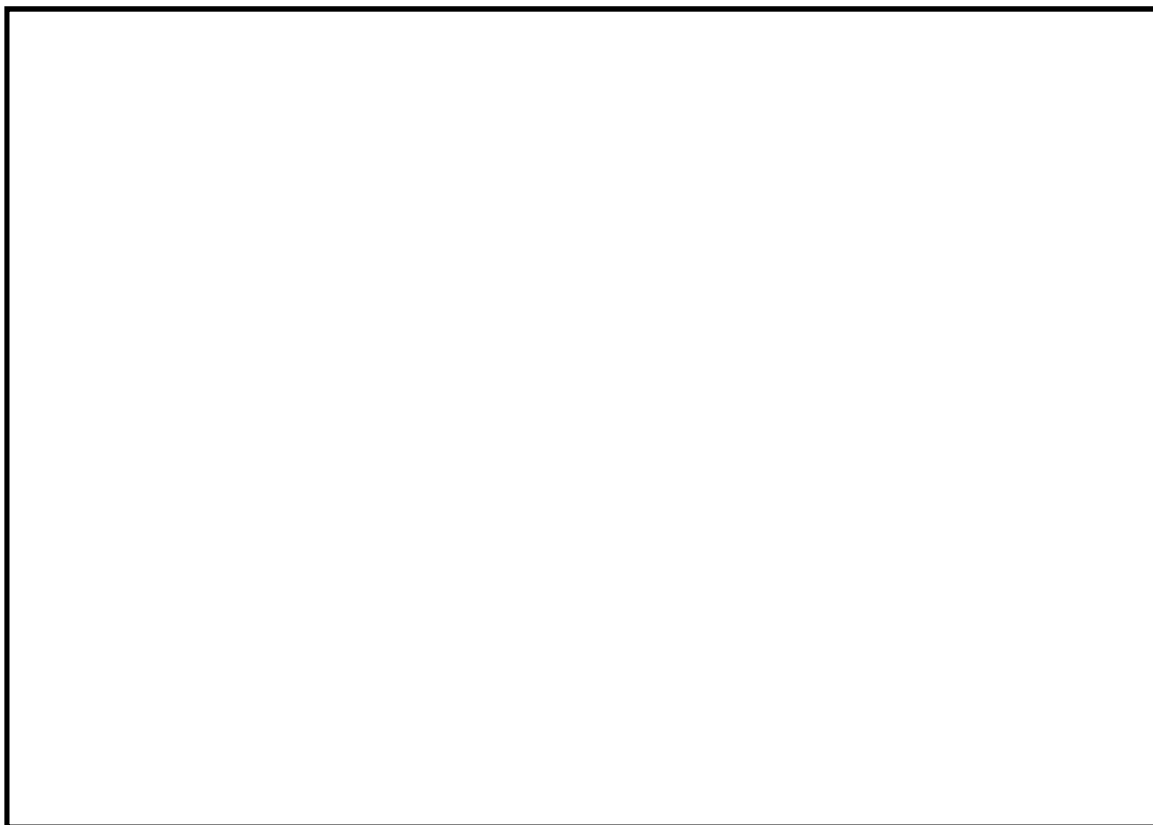


図 3-13 換気空調系ダクト防護壁 (No. 12 (B)) の解析モデル図



図 3-14 竜巻防護ネット (防護鋼板部) の解析モデル図

(b) 設計飛来物

設計飛来物である足場パイプ及び鋼製足場板は、シェル要素でモデル化する。
設計飛来物の解析モデル図を図 3-15 に示す。

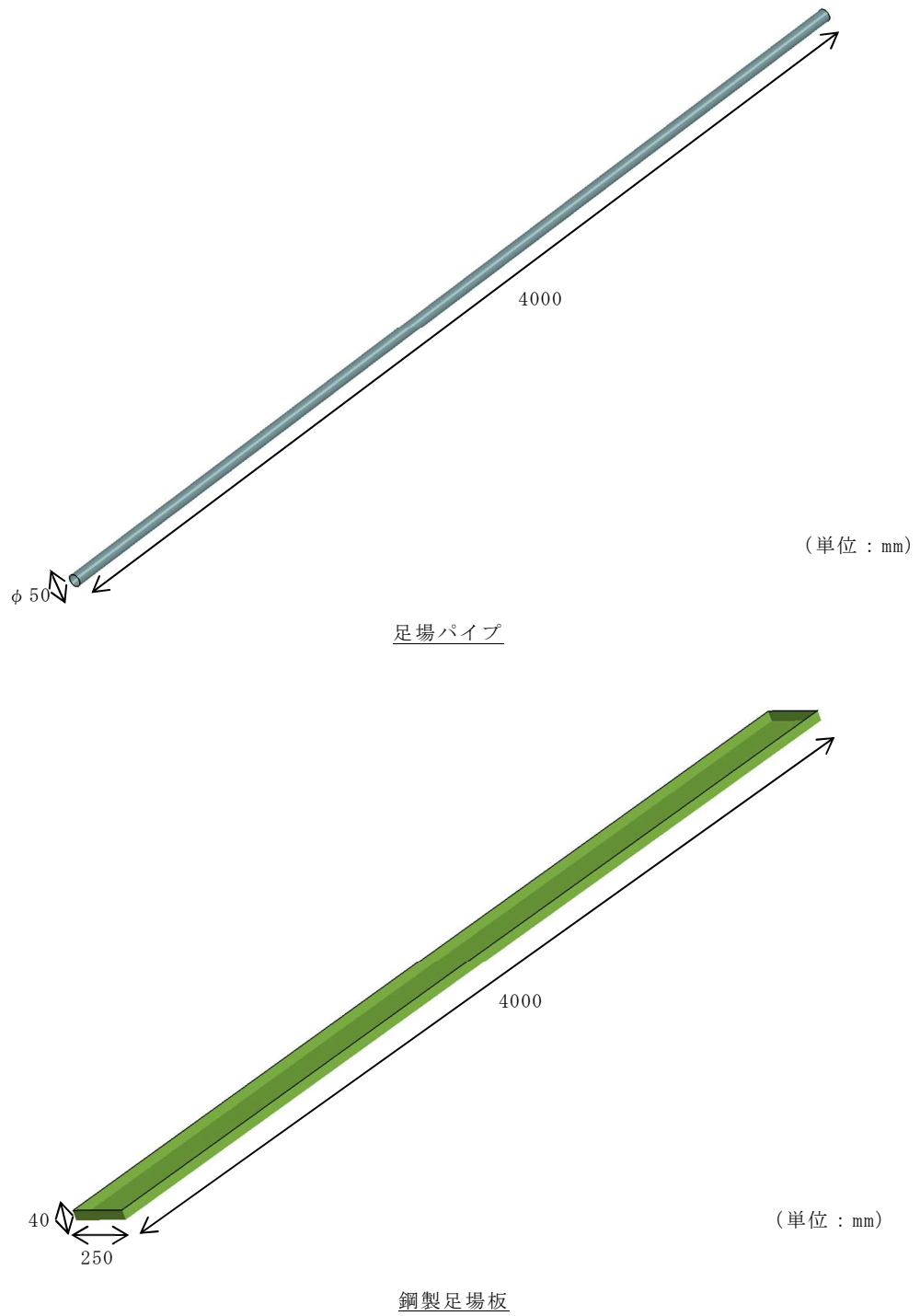


図 3-15 設計飛来物の解析モデル図

b. 解析コード

衝突解析には、解析コード「LS-DYNA」を用いる。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「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

c. 使用材料

構成する材料仕様については、「3.4(1) 評価対象部位の材料仕様」に示すとおり設定する。

d. 材料定数

原子炉補機冷却海水系配管防護壁，換気空調系ダクト防護壁及び竜巻防護ネット（防護鋼板部）に使用する鋼材の材料定数については、「3.4(2) 評価対象部位の材料定数」に示すとおり設定する。

e. 材料の非線形特性

(a) 材料の応力－ひずみ関係

原子炉補機冷却海水系配管防護壁，換気空調系ダクト防護壁及び竜巻防護ネット（防護鋼板部）の材料モデルでは，鋼材の破断ひずみを設定し，破断ひずみを越えた要素が荷重を負担しないことを考慮する。

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

材料に適用する応力－ひずみ関係の概念図を図 3-16 に示す。

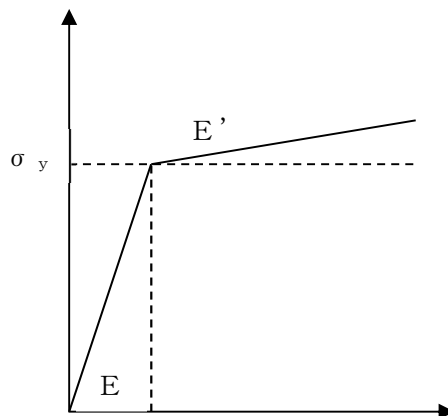


図 3-16 応力－ひずみ関係の概念図

(b) ひずみ速度効果

竜巻による設計飛来物に対する解析は、衝撃問題で変形速度が大きいため、ひずみ速度効果を考慮することとし、以下に示す Cowper-Symonds の式を適用する。

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

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

ひずみ速度依存性パラメータを表 3-22 から表 3-25 に示す。

表 3-22 ひずみ速度依存性パラメータ (原子炉補機冷却海水系配管防護壁)

	鋼製足場板	原子炉補機冷却海水系配管防護壁	
		防護鋼板	架構
材料	SS400	SS400	SS400
C (s ⁻¹)			
P			

表 3-23 ひずみ速度依存性パラメータ (換気空調系ダクト防護壁 (No. 55 及び No. 50))

	鋼製足場板	換気空調系ダクト防護壁 (No. 55 及び No. 50)		
		防護鋼板	架構	
材料	SS400	SS400	SS400	SM490A
C (s ⁻¹)				
P				

表 3-24 ひずみ速度依存性パラメータ (換気空調系ダクト防護壁 (No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B)))

	足場パイプ	鋼製足場板	換気空調系ダクト防護壁 (No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B))	
			防護鋼板	架構
材料	STK500	SS400	SUS304	SUS304
C (s ⁻¹)				
P				

表 3-25 ひずみ速度依存性パラメータ（竜巻防護ネット（防護鋼板部））

	鋼製足場板	竜巻防護ネット（防護鋼板部）	
		防護鋼板	架構
材料	SS400	SM490A	SM490A
C (s ⁻¹)			
P			

(c) 破断ひずみ

破断ひずみは、J I Sに規定されている伸びの下限値を基に設定する。また、「NEI07-13」においてTF（多軸性係数）を□とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF=□を考慮する。TFについては、原子炉補機冷却海水系配管防護壁、換気空調系ダクト防護壁及び竜巻防護ネット（防護鋼板部）のみ□とする。足場パイプ及び鋼製足場板は保守的に破断ひずみを超えても荷重を負担するものとする。

材料モデルにおける破断ひずみを表 3-26 から表 3-29 に示す。

表 3-26 材料モデルにおける破断ひずみ（原子炉補機冷却海水系配管防護壁）

種別	材質	J I S 規格値 (下限値)	T F	破断ひずみ*
防護鋼板	SS400 □	□	□	□
架構	SS400 □	□	□	□

注記*：真ひずみ換算値

表 3-27 材料モデルにおける破断ひずみ（換気空調系ダクト防護壁（No. 55 及び No. 50））

種別	材質	J I S 規格値 (下限値)	T F	破断ひずみ*
防護鋼板	SS400 □	□	□	□
架構	SS400 □	□	□	□
	SM490A □	□	□	□

注記*：真ひずみ換算値

表 3-28 材料モデルにおける破断ひずみ（換気空調系ダクト防護壁（No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B)））

種別	材質	J I S 規格値 (下限値)	T F	破断ひずみ*
防護鋼板	SUS304	0.40		
架構	SUS304	0.40		

注記*：真ひずみ換算値

表 3-29 材料モデルにおける破断ひずみ（竜巻防護ネット（防護鋼板部））

種別	材質	J I S 規格値 (下限値)	T F	破断ひずみ*
防護鋼板	SM490A <input type="text"/>	<input type="text"/>		
架構	SM490A <input type="text"/>	<input type="text"/>		

注記*：真ひずみ換算値

4. 評価条件

4.1 貫通評価

- (1) 原子炉補機冷却海水系配管防護壁，換気空調系ダクト防護壁 (No. 55 及び No. 50) 及び竜巻防護ネット（防護鋼板部）

原子炉補機冷却海水系配管防護壁，換気空調系ダクト防護壁 (No. 55 及び No. 50) 及び竜巻防護ネット（防護鋼板部）の貫通評価において，防護鋼板の貫通評価式に用いる評価条件を表 4-1 に示す。

表 4-1 防護鋼板の貫通評価式に用いる評価条件

評価条件		数値
d (m)		0.021
K		1.0
M (kg)		11
V (m/s)	水平方向	42
	鉛直方向	38

- (2) 換気空調系ダクト防護壁 (No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B))

換気空調系ダクト防護壁 (No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B)) の貫通評価は，図 3-5 から図 3-7 に示す換気空調系ダクト防護壁の最大変形が生じると想定される鋼板中央部に衝突するケースを設定する。

解析ケースを表 4-2 及び図 4-1 から図 4-3 に示す。

表 4-2 解析ケース（換気空調系ダクト防護壁の貫通評価）

評価箇所	衝突箇所	飛来物の 衝突方向	対象部材
換気空調系ダクト防護壁 (No. 11)	防護鋼板	鉛直	
換気空調系ダクト防護壁 (No. 12(A) 及び No. 12(B))	防護鋼板	水平	

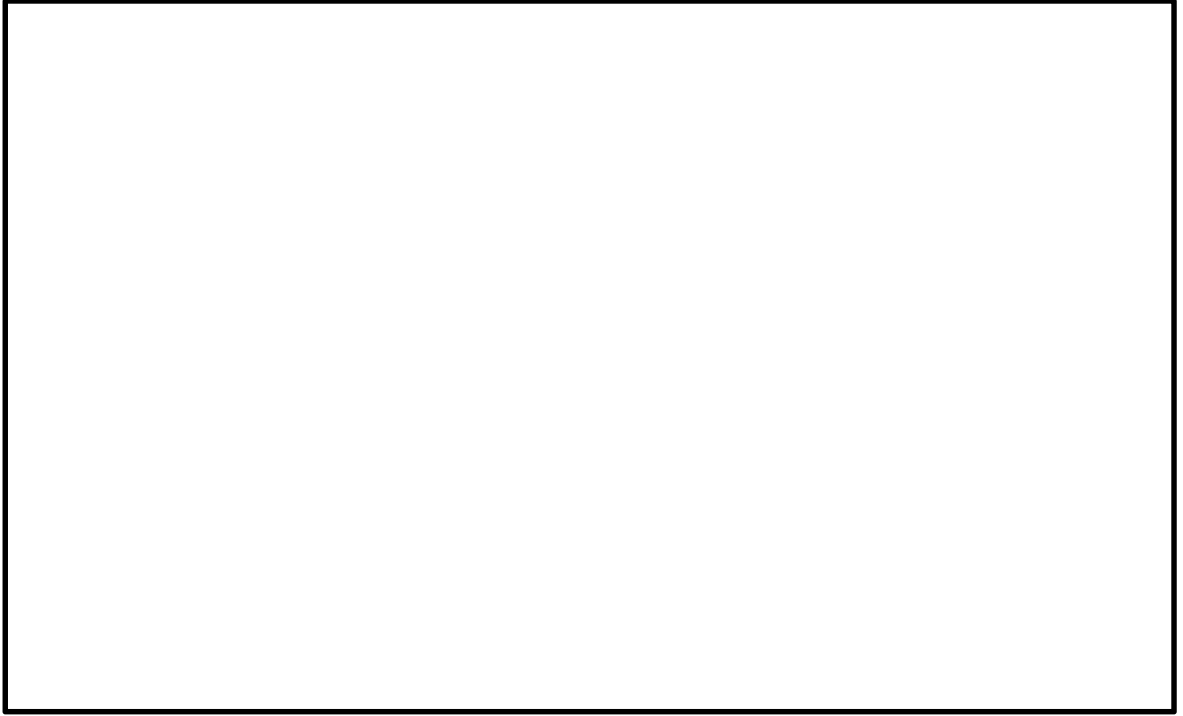


図 4-1 解析ケース（換気空調系ダクト防護壁 (No. 11)）

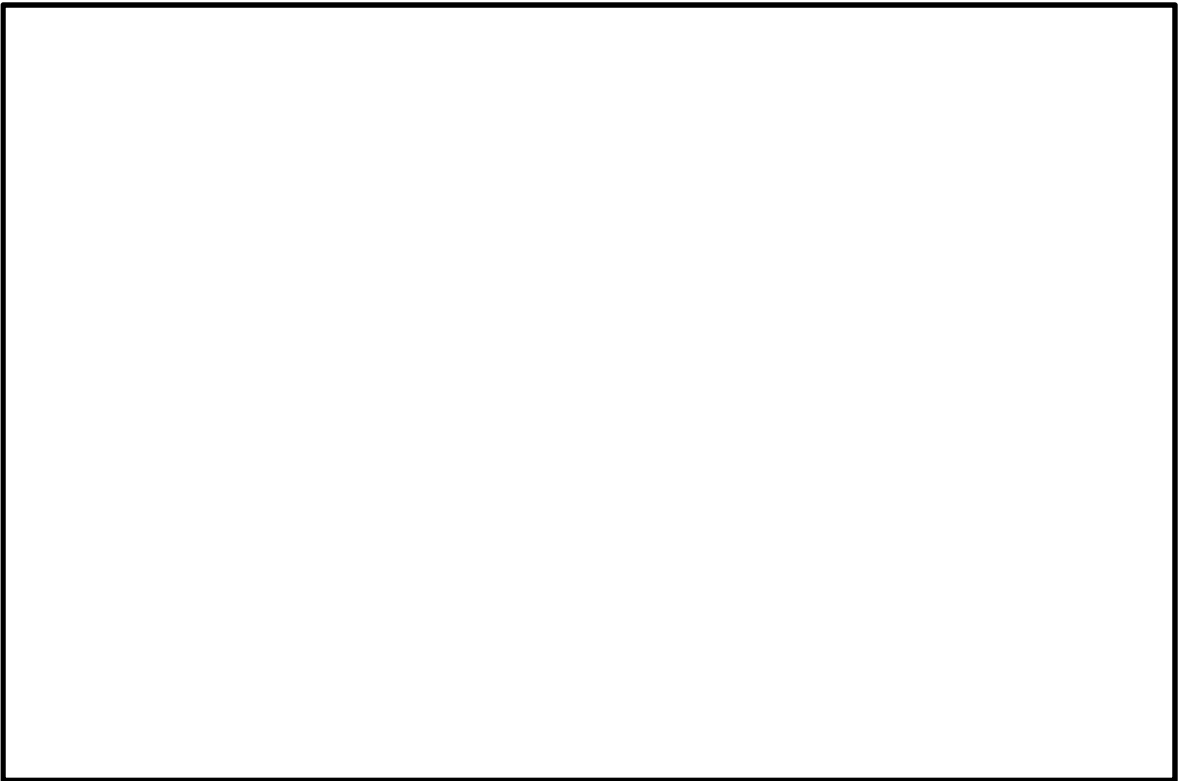


図 4-2 解析ケース（換気空調系ダクト防護壁 (No. 12(A))）

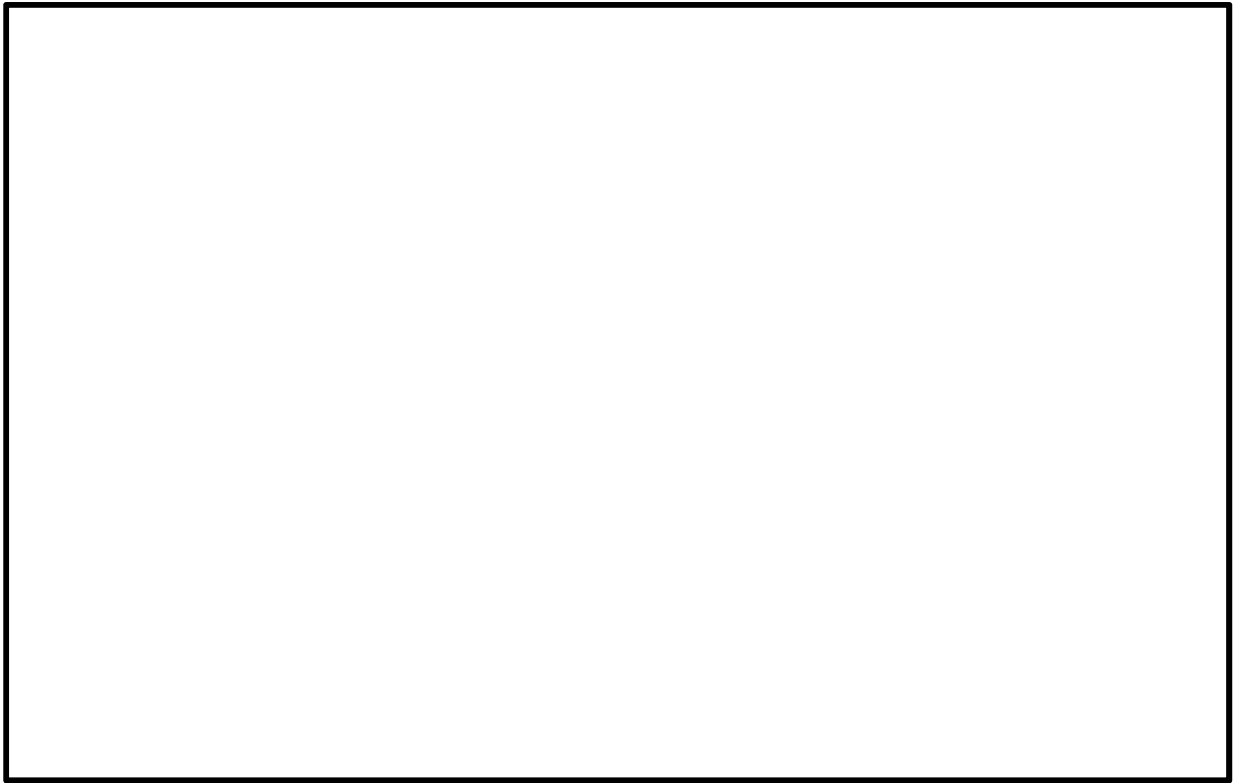


図 4-3 解析ケース（換気空調系ダクト防護壁(No. 12(B))）

4.2 変形評価

(1) 原子炉補機冷却海水系配管防護壁

原子炉補機冷却海水系配管防護壁の変形評価は、図 3-1 に示す原子炉補機冷却海水系配管防護壁の最大変形が生じると想定される鋼板中央部に衝突するケースを設定する。

解析ケースを表 4-3 及び図 4-4 に示す。

表 4-3 解析ケース（原子炉補機冷却海水系配管防護壁の変形評価）

評価箇所	衝突箇所	飛来物の 衝突方向	対象部材
原子炉補機冷却海水系 配管防護壁	防護鋼板	水平	

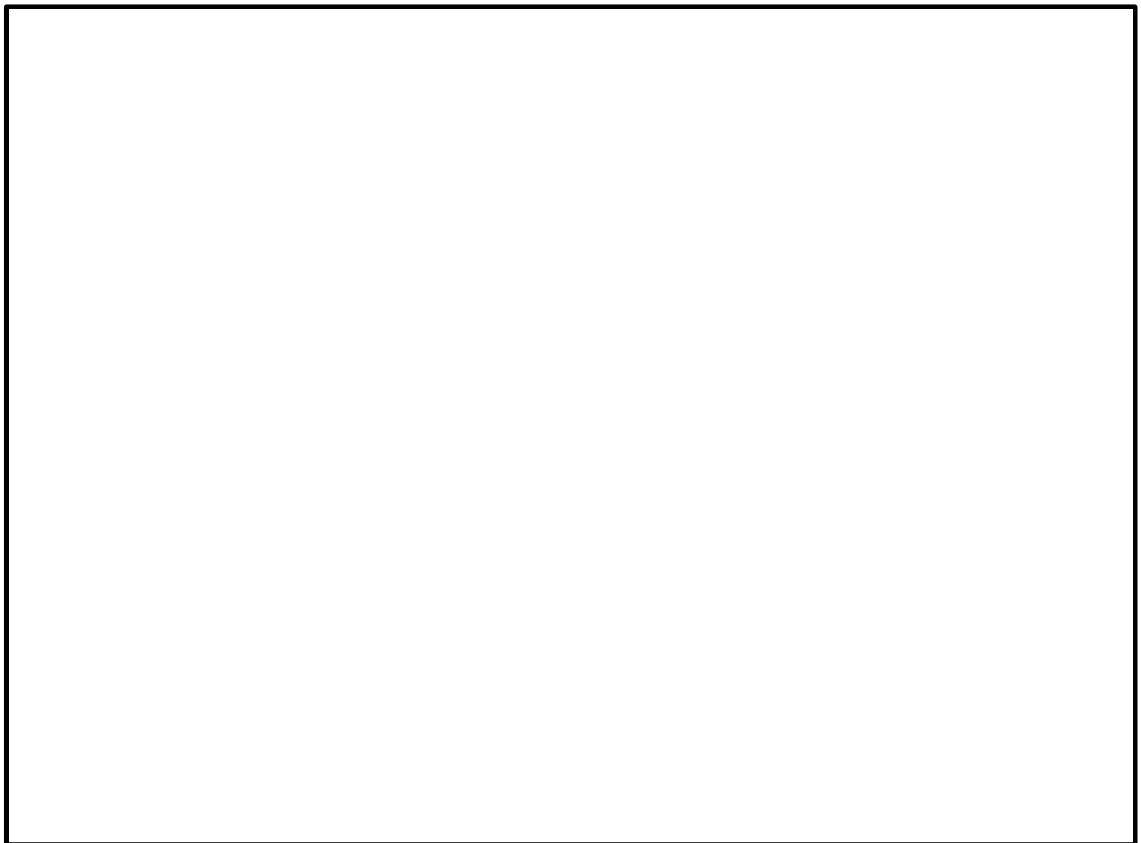


図 4-4 解析ケース（原子炉補機冷却海水系配管防護壁）

(2) 換気空調系ダクト防護壁

換気空調系ダクト防護壁の変形評価は、図 3-2, 図 3-3, 図 3-5 から図 3-7 に示す換気空調系ダクト防護壁の最大変形が生じると想定される鋼板中央部に衝突するケースを設定する。

解析ケースを表 4-4 及び図 4-5 から図 4-9 に示す。

表 4-4 解析ケース（換気空調系ダクト防護壁の変形評価）

評価箇所	衝突箇所	飛来物の 衝突方向	対象部材
換気空調系ダクト防護壁 (No. 55 及び No. 50)	防護鋼板	水平	
換気空調系ダクト防護壁 (No. 11)	防護鋼板	鉛直	
換気空調系ダクト防護壁 (No. 12 (A) 及び No. 12 (B))	防護鋼板	水平	

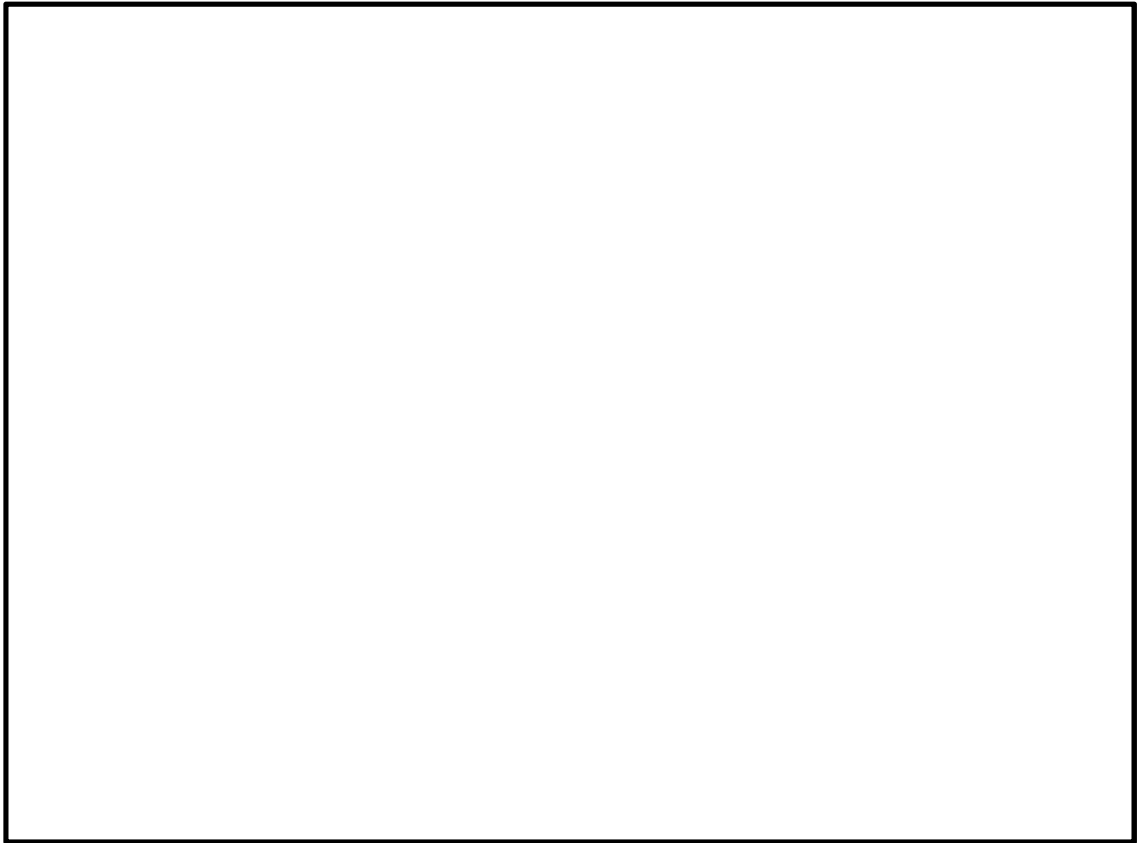


図 4-5 解析ケース（換気空調系ダクト防護壁 (No. 55)）

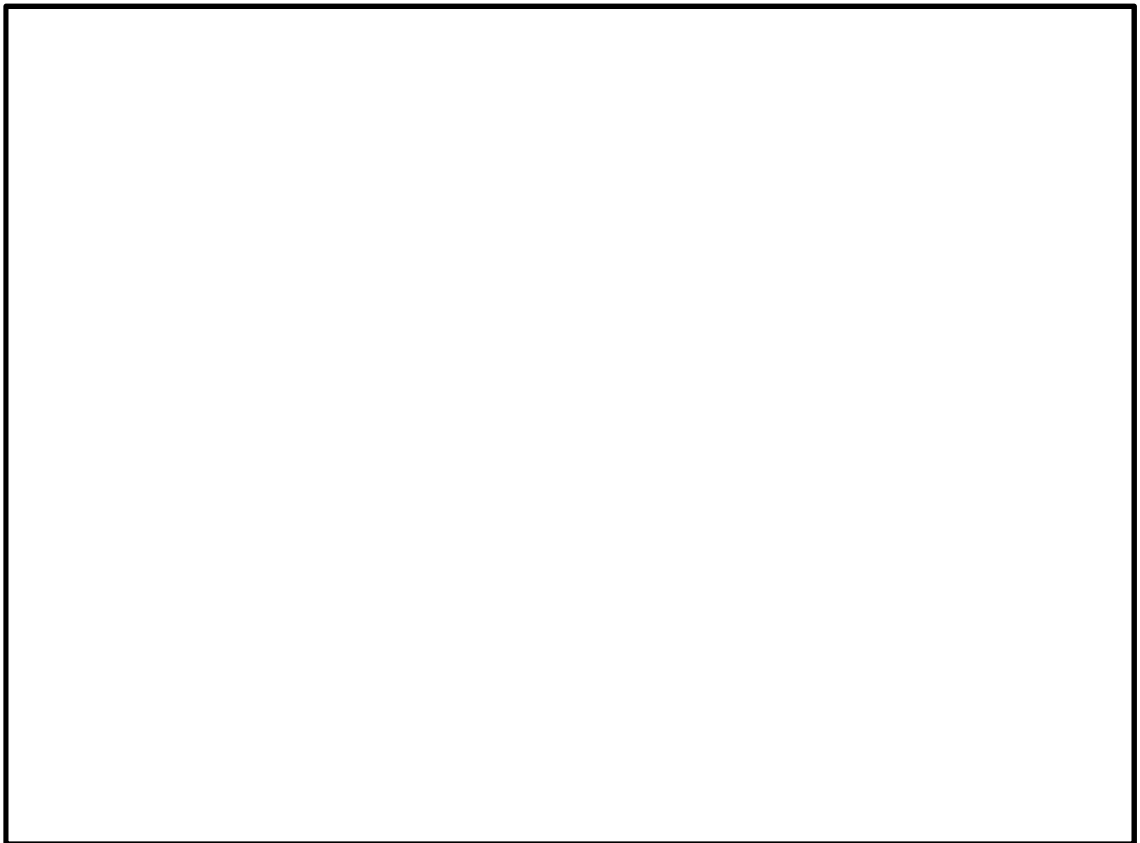


図 4-6 解析ケース（換気空調系ダクト防護壁 (No. 50)）

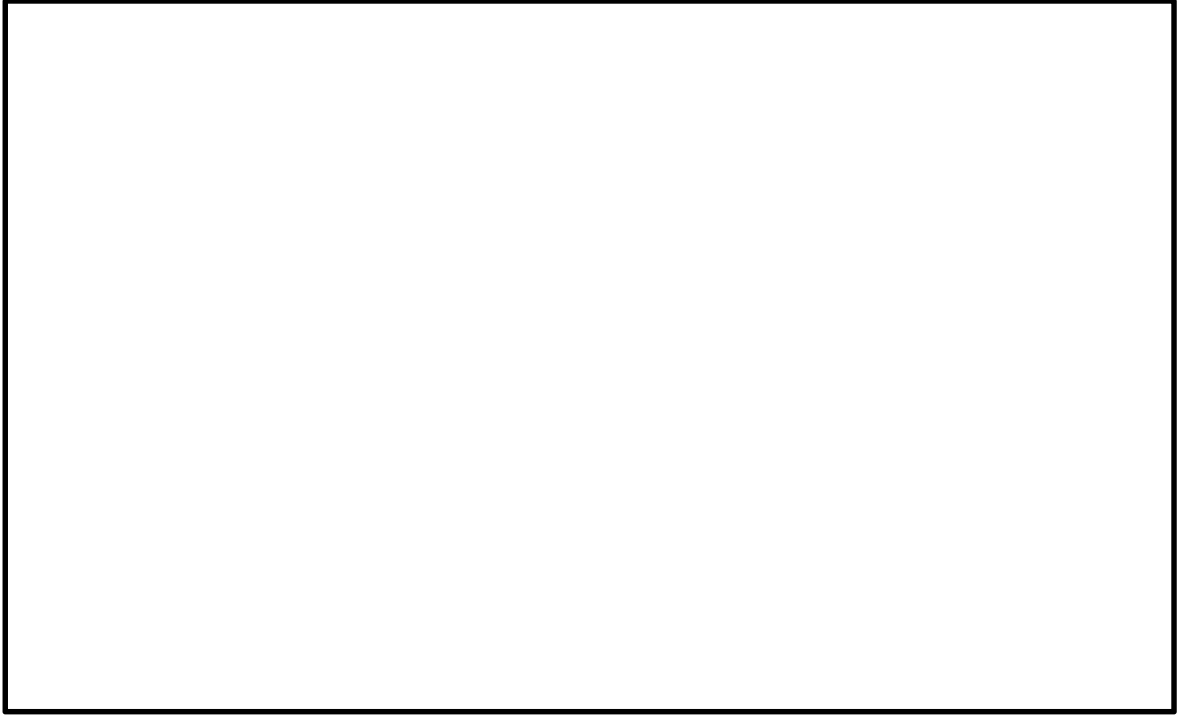


図 4-7 解析ケース（換気空調系ダクト防護壁 (No. 11)）

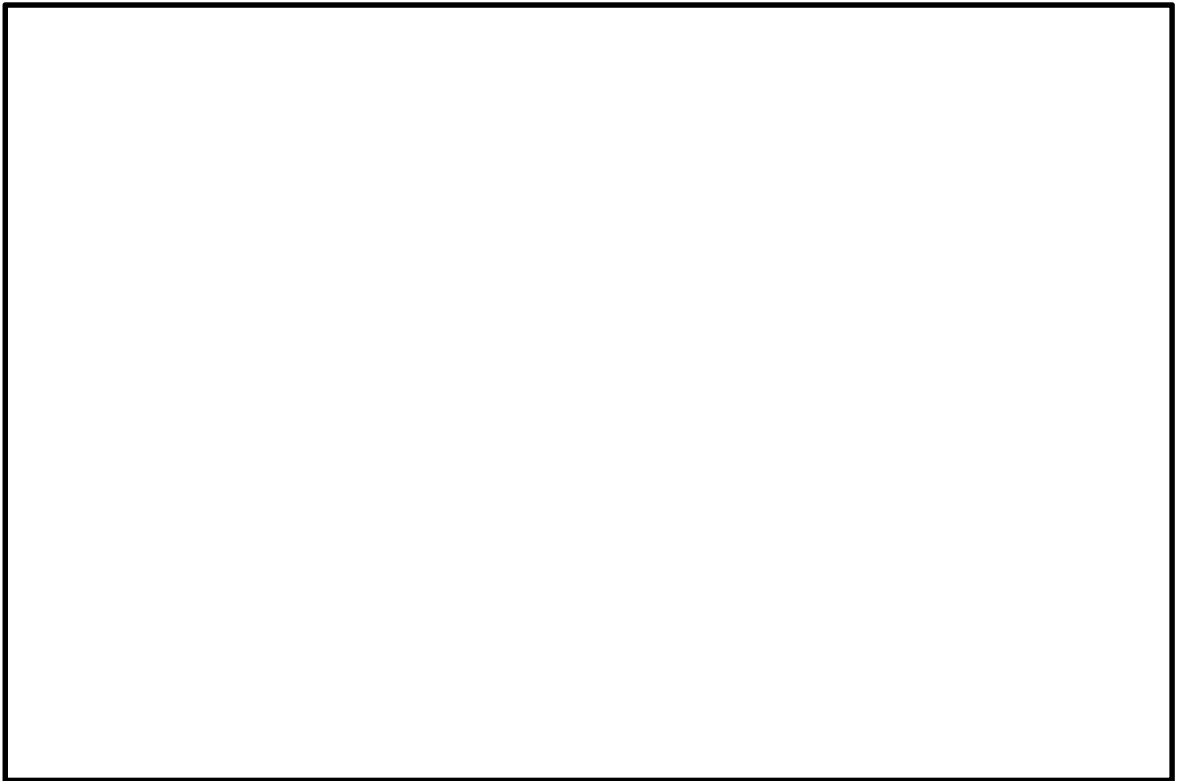


図 4-8 解析ケース（換気空調系ダクト防護壁 (No. 12(A))）

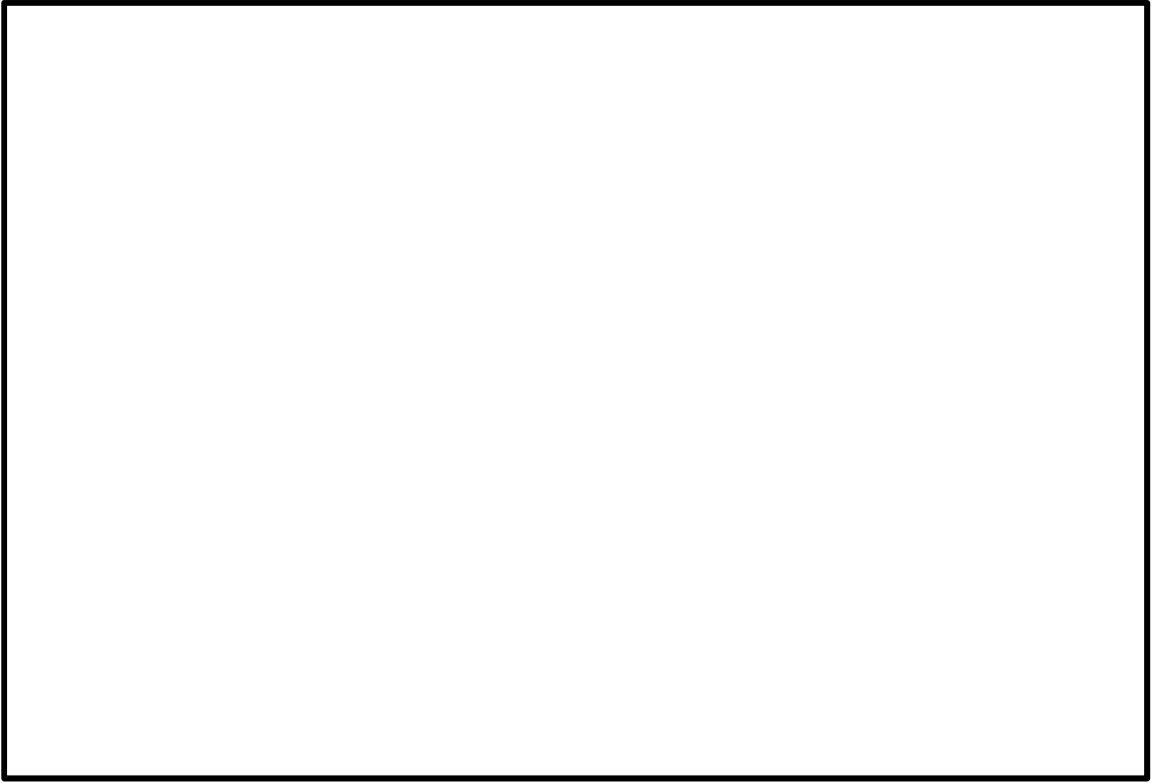


図 4-9 解析ケース（換気空調系ダクト防護壁(No. 12(B))）

(3) 竜巻防護ネット（防護鋼板部）

竜巻防護ネット（防護鋼板部）の変形評価は，図 3-4 に示す竜巻防護ネット（防護鋼板部）の最大変形が生じると想定される鋼板中央部に衝突するケースを設定する。

解析ケースを表 4-5 及び図 4-10 に示す。

表 4-5 解析ケース（竜巻防護ネット（防護鋼板部））

評価箇所	衝突箇所	飛来物の衝突方向	対象部材
竜巻防護ネット（防護鋼板部）	防護鋼板	水平	



図 4-10 解析ケース（竜巻防護ネット（防護鋼板部））

5. 強度評価結果

5.1 貫通評価

防護鋼板の貫通限界厚さを表 5-1 に示す。

表 5-1 足場パイプの貫通限界厚さ

		貫通限界厚さ (mm)
貫通限界厚さ	水平方向	17
	鉛直方向	15

原子炉補機冷却海水系配管防護壁，換気空調系ダクト防護壁 (No. 55 及び No. 50) 及び竜巻防護ネット (防護鋼板部) の貫通評価結果として，貫通限界厚さと許容限界の比較を表 5-2 に示す。

許容限界は，設計飛来物による貫通を生じない貫通限界厚さを上回っており，貫通しない。

表 5-2 防護鋼板の板厚と貫通限界厚さの比較

評価対象部位		設置方向	評価結果 (mm)	許容限界 (mm)
原子炉補機冷却海水系配管防護壁	防護鋼板	側面	17	
		上面	15	
換気空調系ダクト防護壁 (No. 55 及び No. 50)	防護鋼板	側面	17	
		上面	15	
竜巻防護ネット (防護鋼板部)	防護鋼板	側面	17	

また，換気空調系ダクト防護壁 (No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B)) の評価結果を表 5-3 並びに図 5-1 から図 5-3 に示す。

換気空調系ダクト防護壁 (No. 11, No. 12(A) 及び No. 12(B)) に生じるひずみは許容限界を超えないため，貫通しない。

表 5-3 衝突解析結果（換気空調系ダクト防護壁（No. 11, No. 12(A)及びNo. 12(B)））

評価項目	評価対象部位		評価結果	許容限界*
ひずみ	No. 11	防護鋼板		
	No. 12(A)	防護鋼板		
	No. 12(B)	防護鋼板		

注記*：真ひずみ換算値

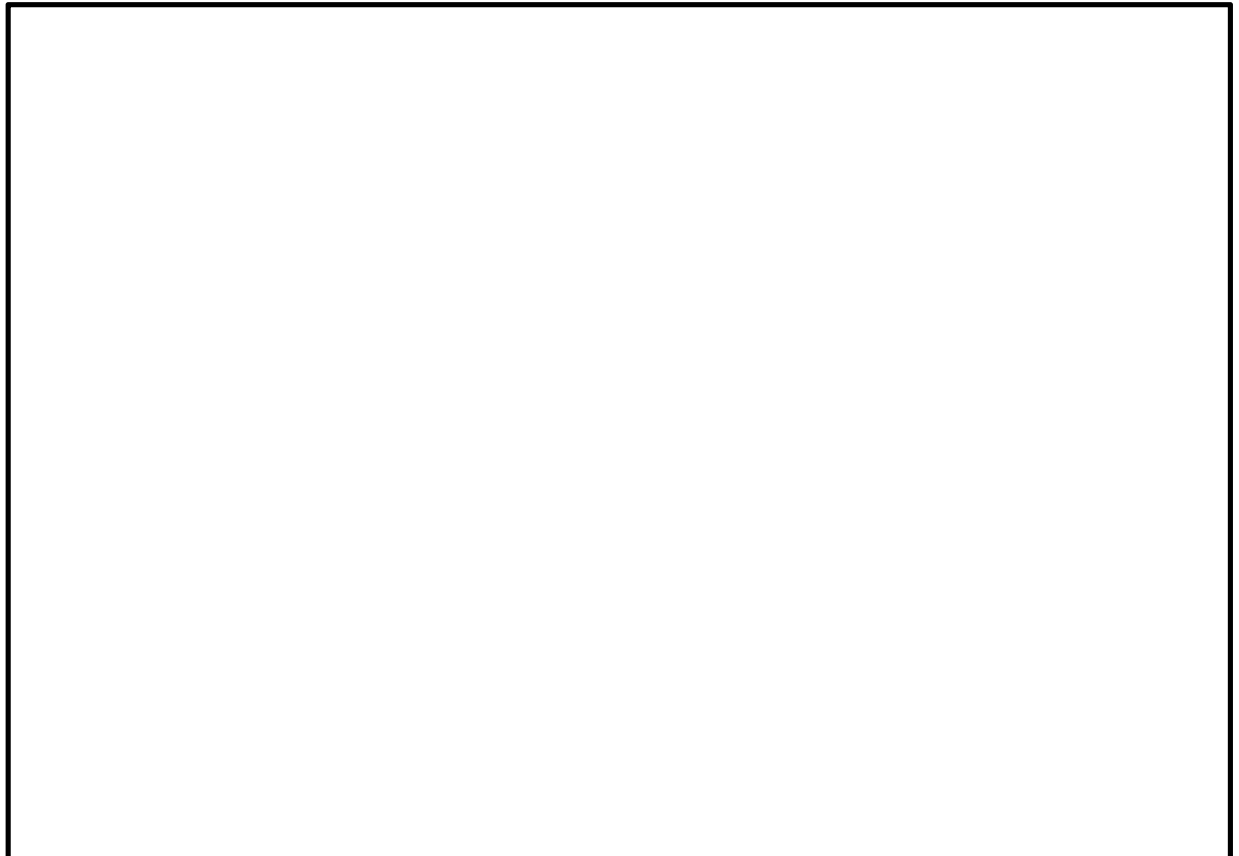


図 5-1 防護鋼板のひずみ分布図（換気空調系ダクト防護壁(No. 11)）

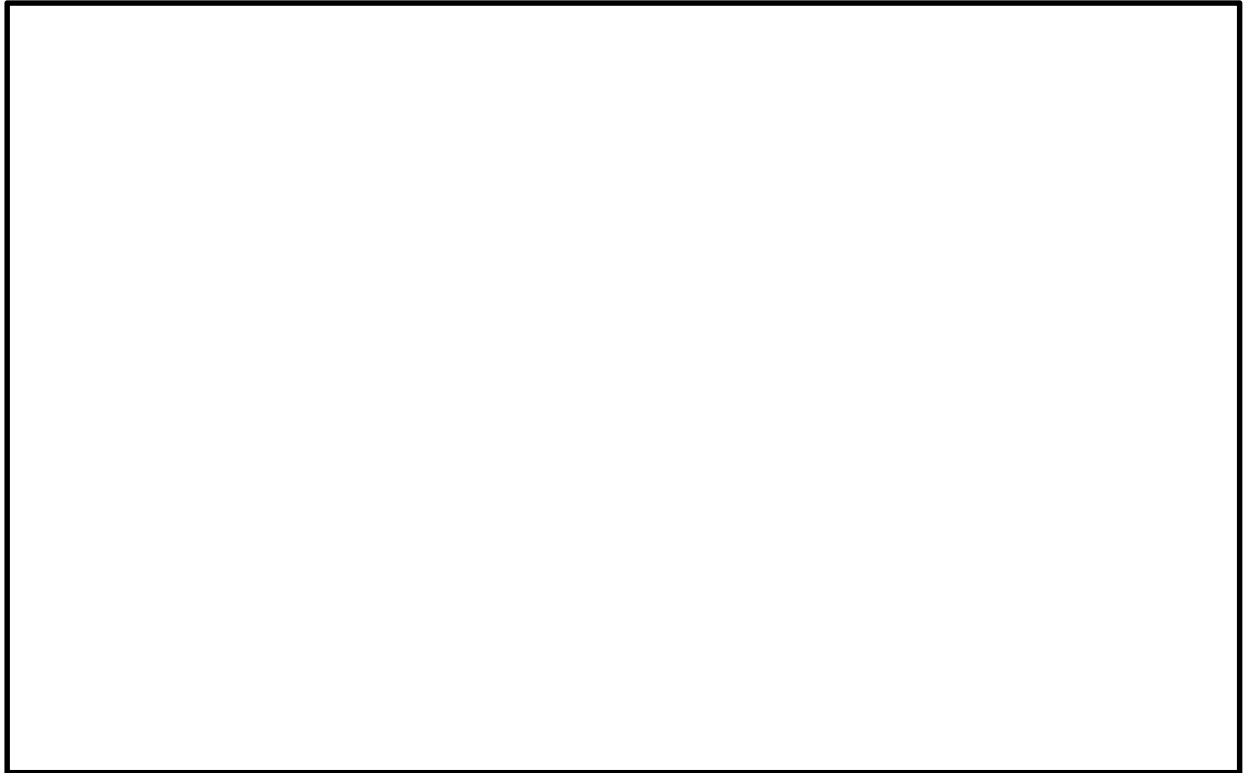


図 5-2 防護鋼板のひずみ分布図 (換気空調系ダクト防護壁 (No. 12 (A)))

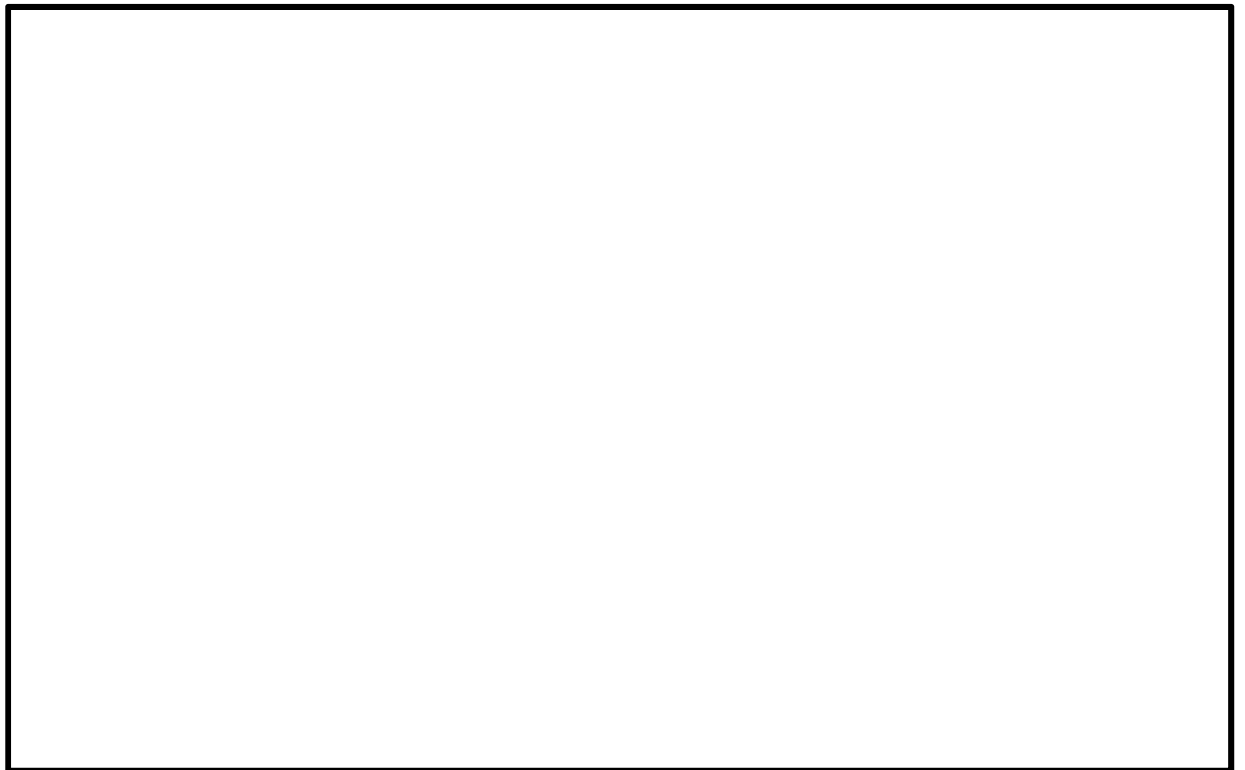


図 5-3 防護鋼板のひずみ分布図 (換気空調系ダクト防護壁 (No. 12 (B)))

5.2 変形評価

(1) 原子炉補機冷却海水系配管防護壁

評価結果を表 5-4 及び図 5-4 に示す。

原子炉補機冷却海水系配管防護壁に生じるひずみは許容限界を超えない。

表 5-4 衝突解析結果（原子炉補機冷却海水系配管防護壁）

評価項目	評価対象部位	評価結果	許容限界*
ひずみ	防護鋼板		
	架構		

注記*：真ひずみ換算値

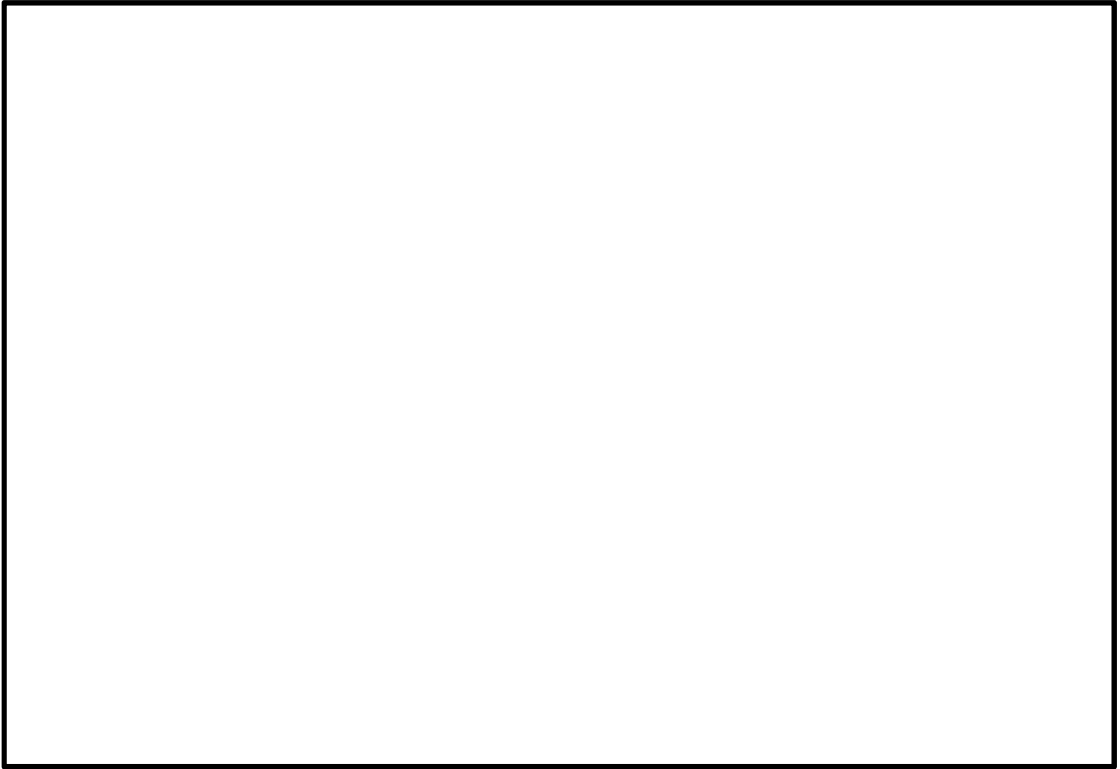


図 5-4 (1/2) 防護鋼板のひずみ分布図 (原子炉補機冷却海水系配管防護壁)

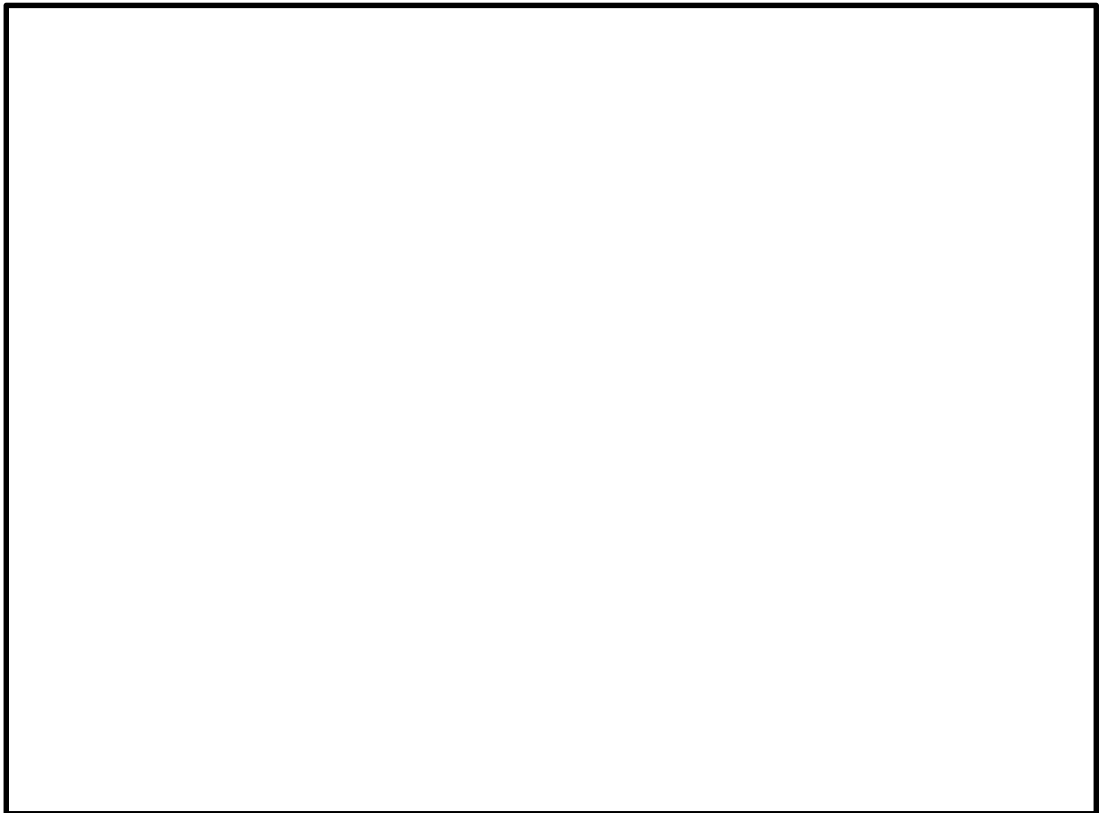


図 5-4 (2/2) 架構のひずみ分布図 (原子炉補機冷却海水系配管防護壁)

(2) 換気空調系ダクト防護壁

評価結果を表 5-5 並びに図 5-5 から図 5-9 に示す。

換気空調系ダクト防護壁に生じるひずみは許容限界を超えない。

表 5-5 衝突解析結果（換気空調系ダクト防護壁）

評価項目	評価対象部位		評価結果	許容限界*
ひずみ	No. 55	防護鋼板		
		架構		
	No. 50	防護鋼板		
		架構		
	No. 11	防護鋼板		
		架構		
	No. 12(A)	防護鋼板		
		架構		
	No. 12(B)	防護鋼板		
		架構		

注記*：真ひずみ換算値



図 5-5 (1/2) 防護鋼板のひずみ分布図 (換気空調系ダクト防護壁 (No. 55))

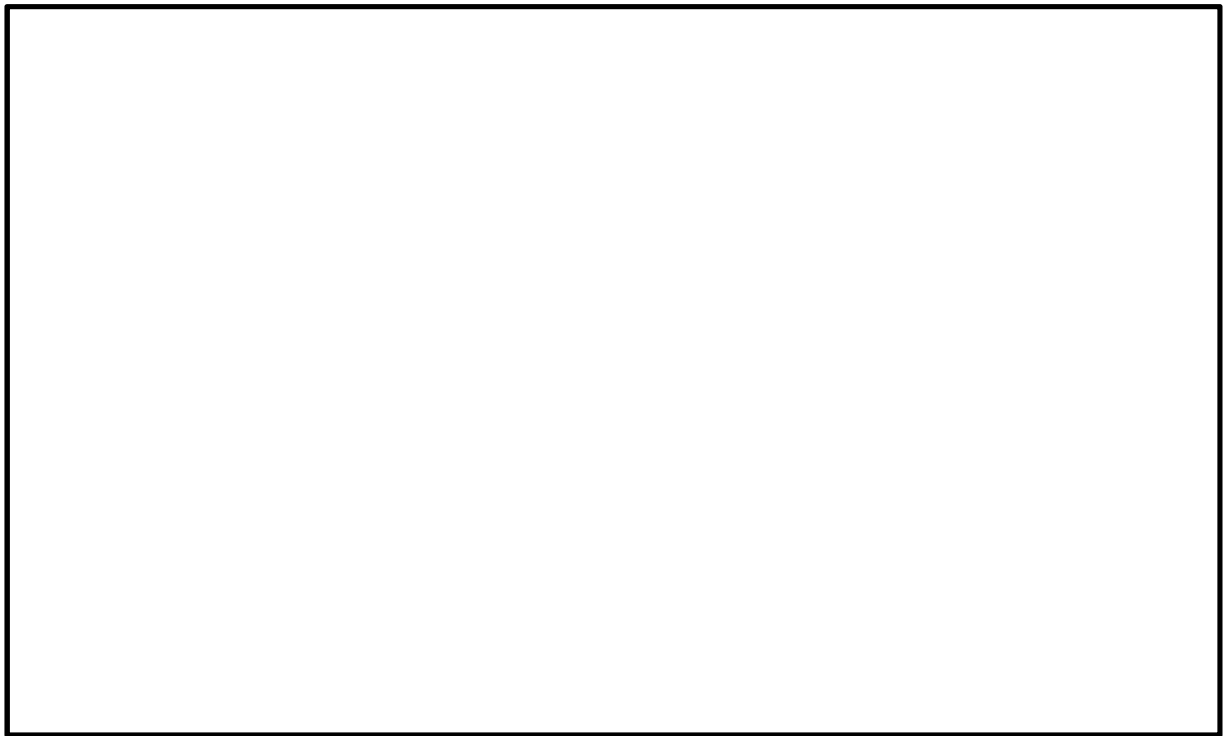


図 5-5 (2/2) 架構のひずみ分布図 (換気空調系ダクト防護壁 (No. 55))



図 5-6 (1/2) 防護鋼板のひずみ分布図 (換気空調系ダクト防護壁 (No. 50))

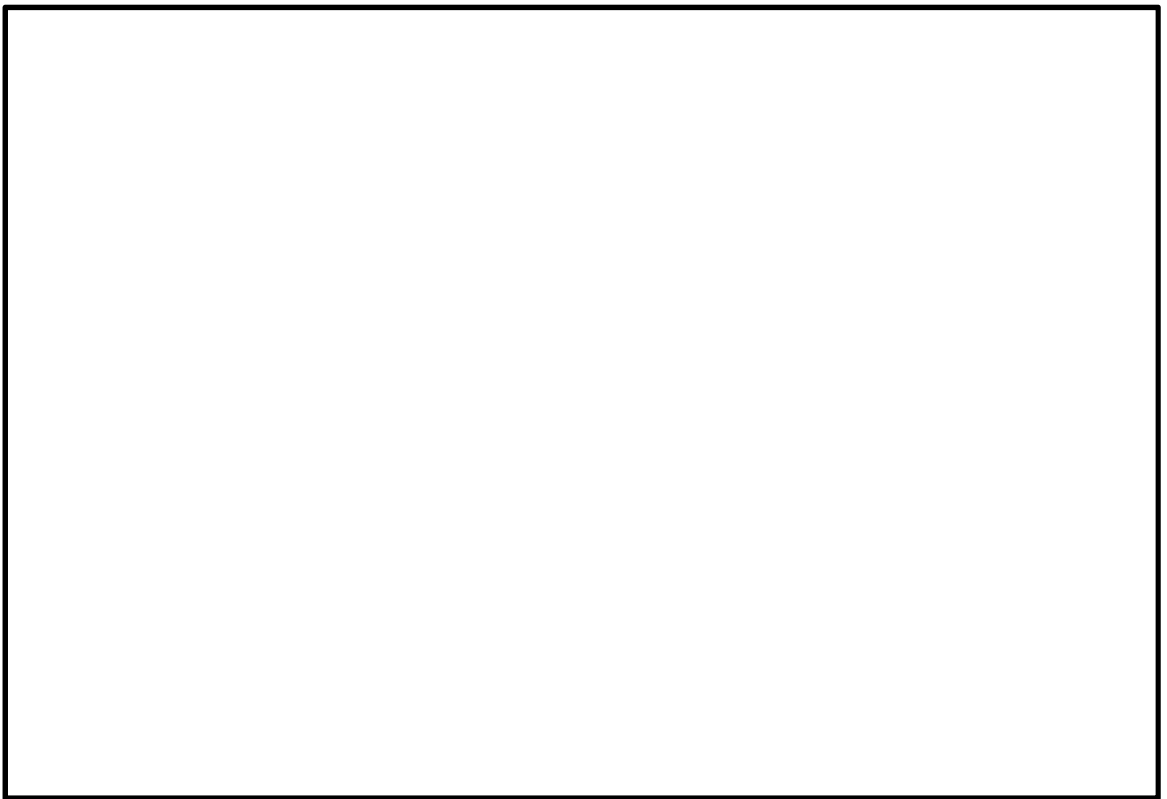


図 5-6 (2/2) 架構のひずみ分布図 (換気空調系ダクト防護壁 (No. 50))

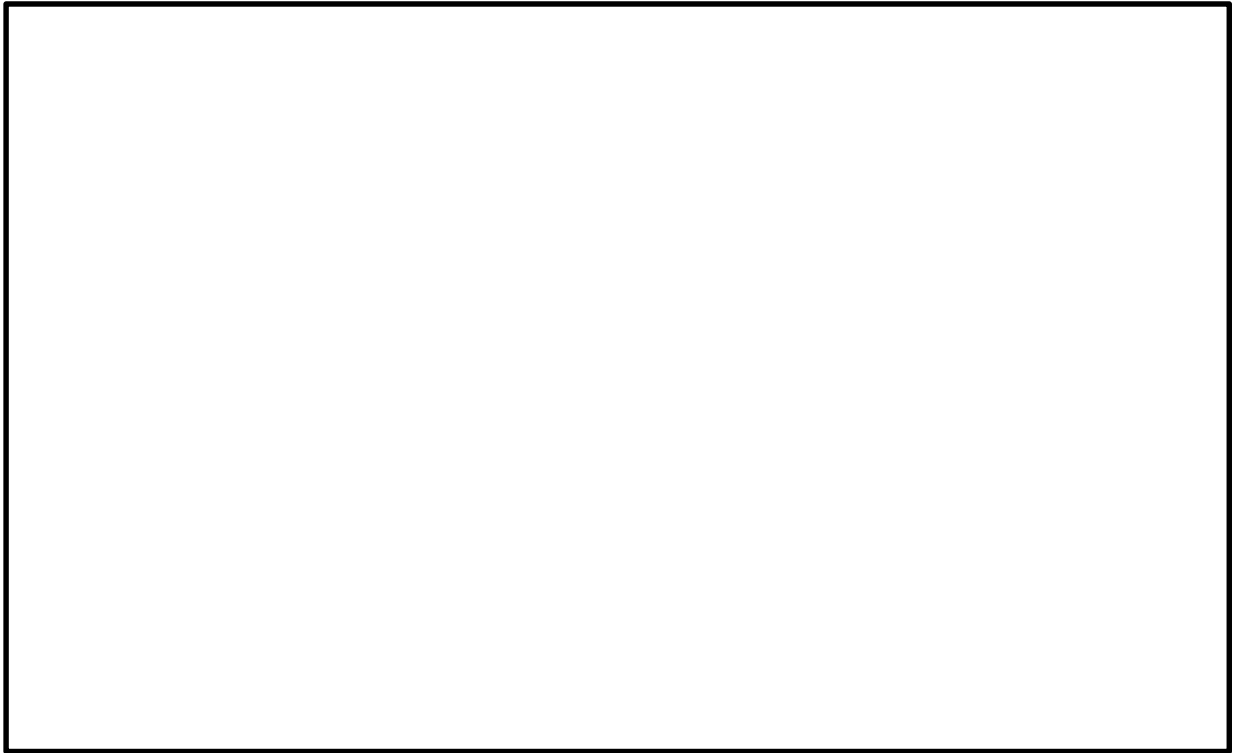


図 5-7 (1/2) 防護鋼板のひずみ分布図 (換気空調系ダクト防護壁 (No. 11))

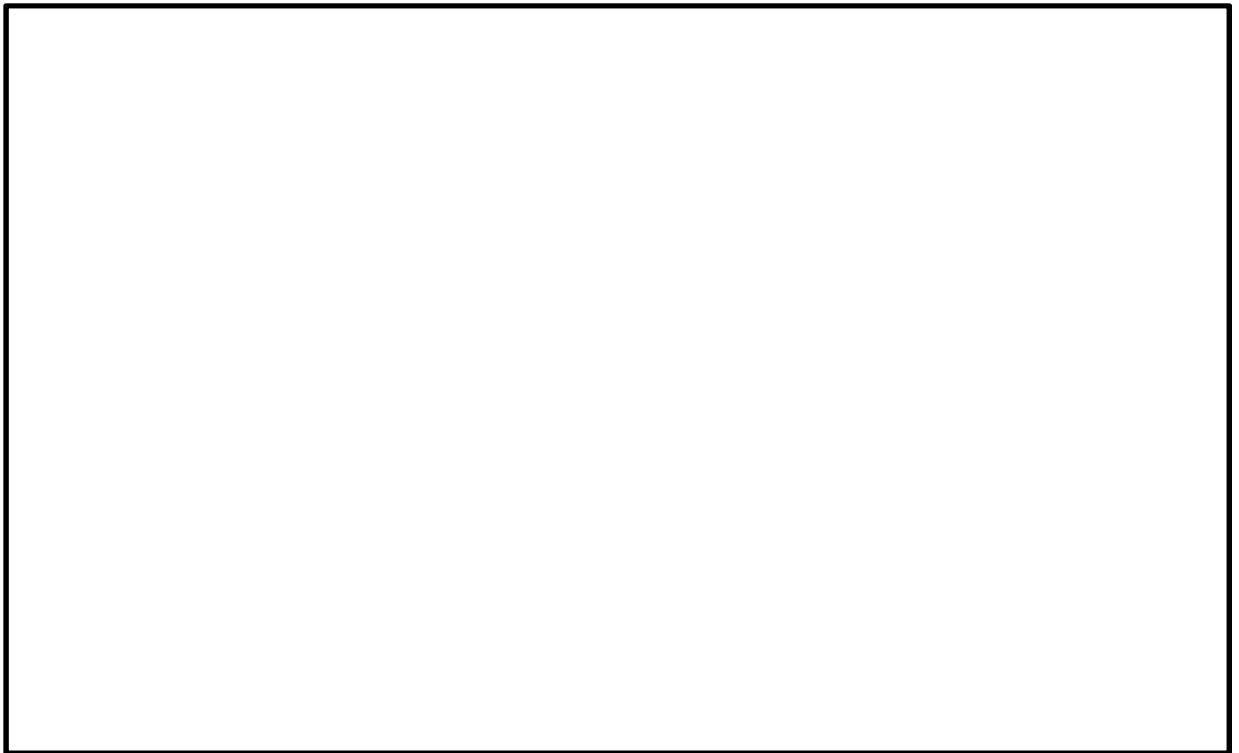


図 5-7 (2/2) 架構のひずみ分布図 (換気空調系ダクト防護壁 (No. 11))

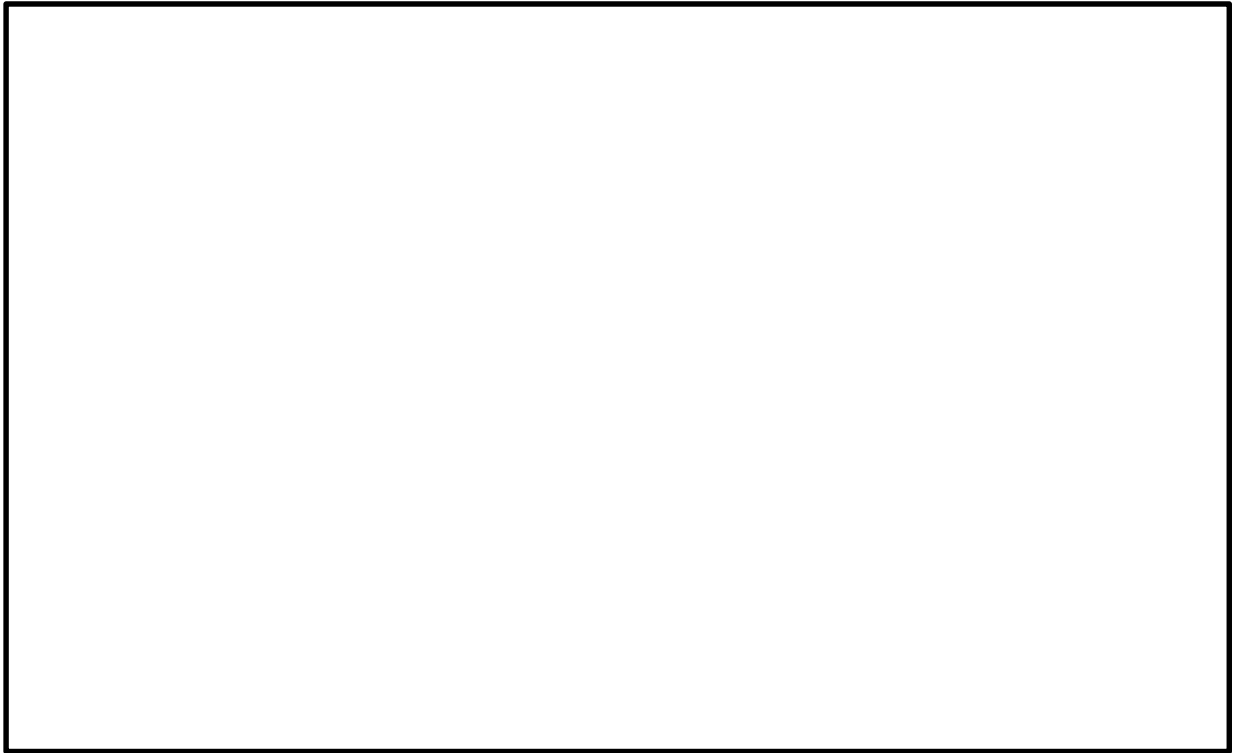


図 5-8 (1/2) 防護鋼板のひずみ分布図 (換気空調系ダクト防護壁 (No. 12(A)))

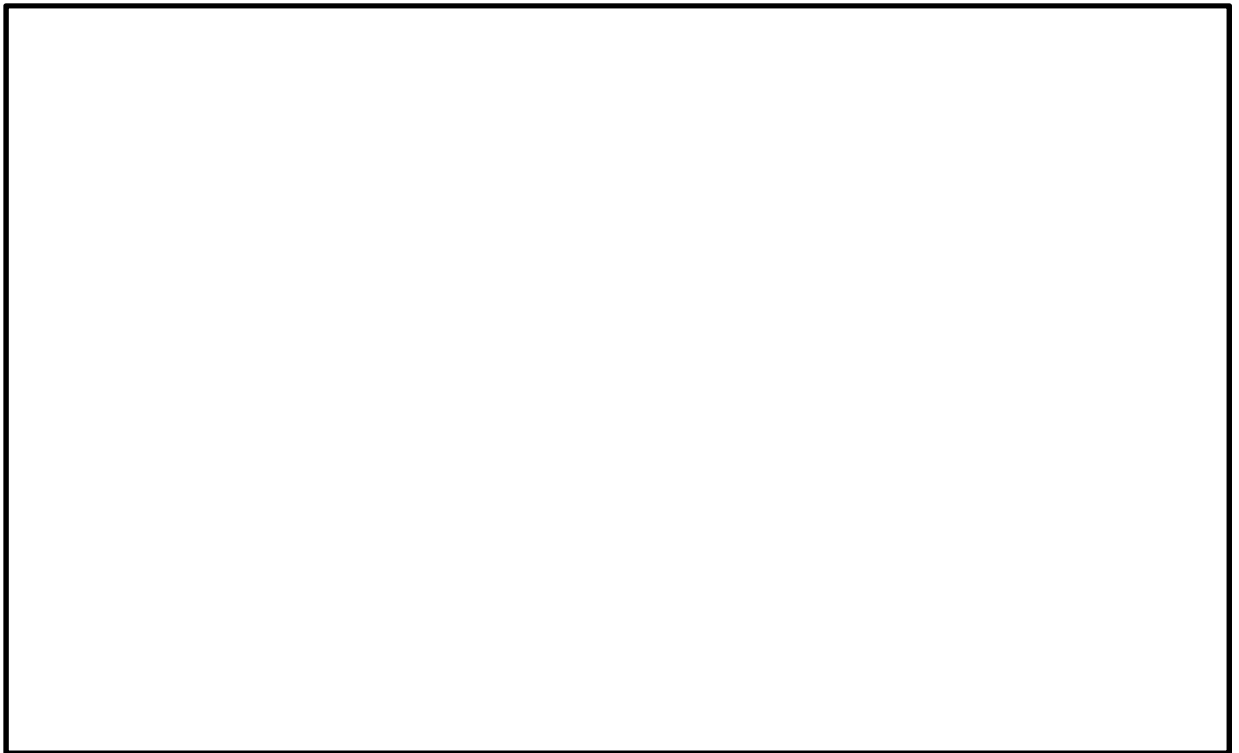


図 5-8 (2/2) 架構のひずみ分布図 (換気空調系ダクト防護壁 (No. 12(A)))

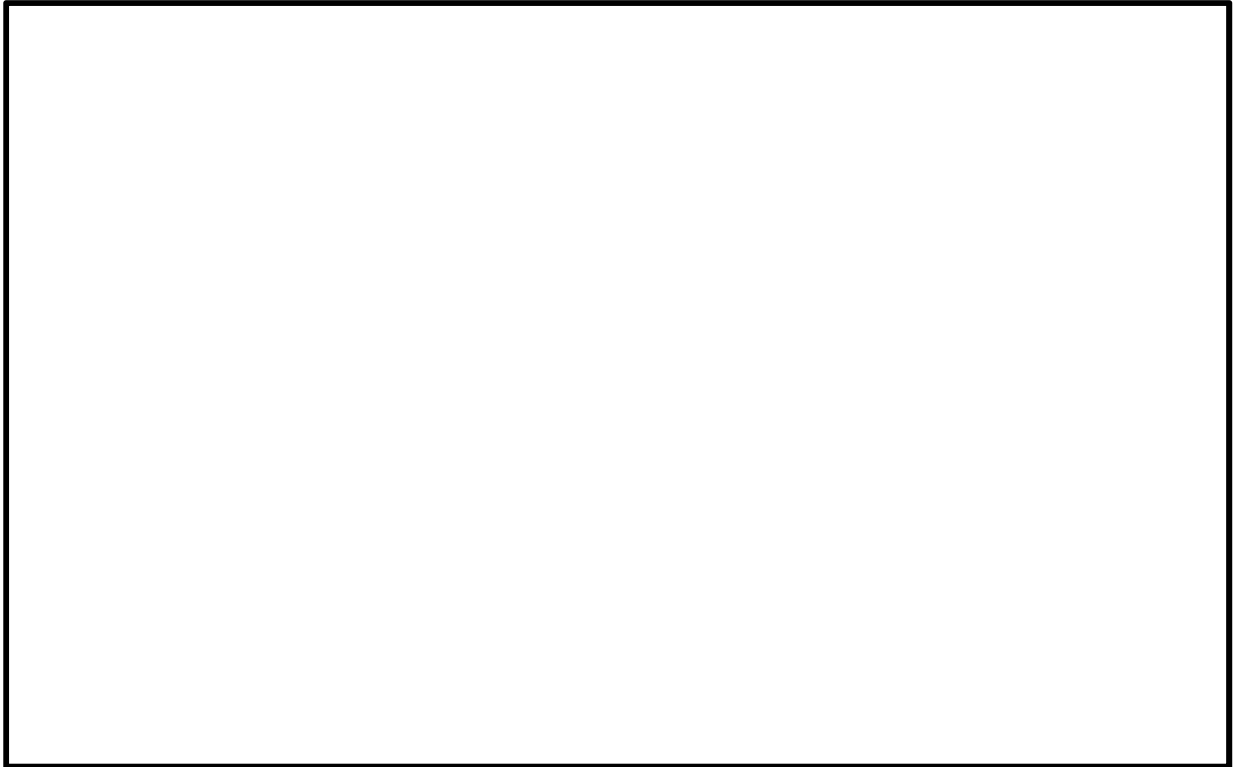


図 5-9 (1/2) 防護鋼板のひずみ分布図 (換気空調系ダクト防護壁 (No. 12(B)))

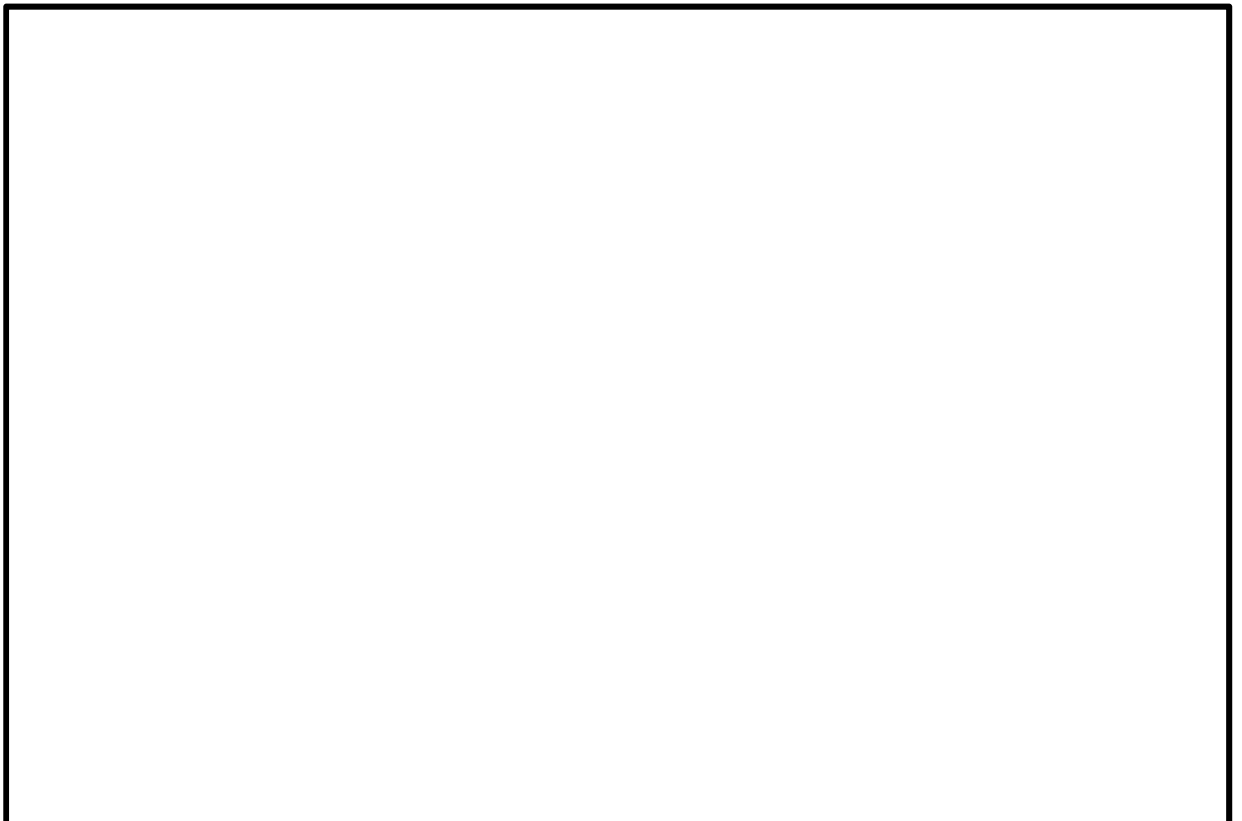


図 5-9 (2/2) 架構のひずみ分布図 (換気空調系ダクト防護壁 (No. 12(B)))

(3) 竜巻防護ネット（防護鋼板部）

評価結果を表 5-6 及び図 5-10 に示す。

竜巻防護ネット（防護鋼板部）に生じるひずみは許容限界を超えない。

表 5-6 衝突解析結果（竜巻防護ネット（防護鋼板部））

評価項目	評価対象部位		評価結果	許容限界*
ひずみ	No. 77	防護鋼板		
		架構		

注記*：真ひずみ換算値

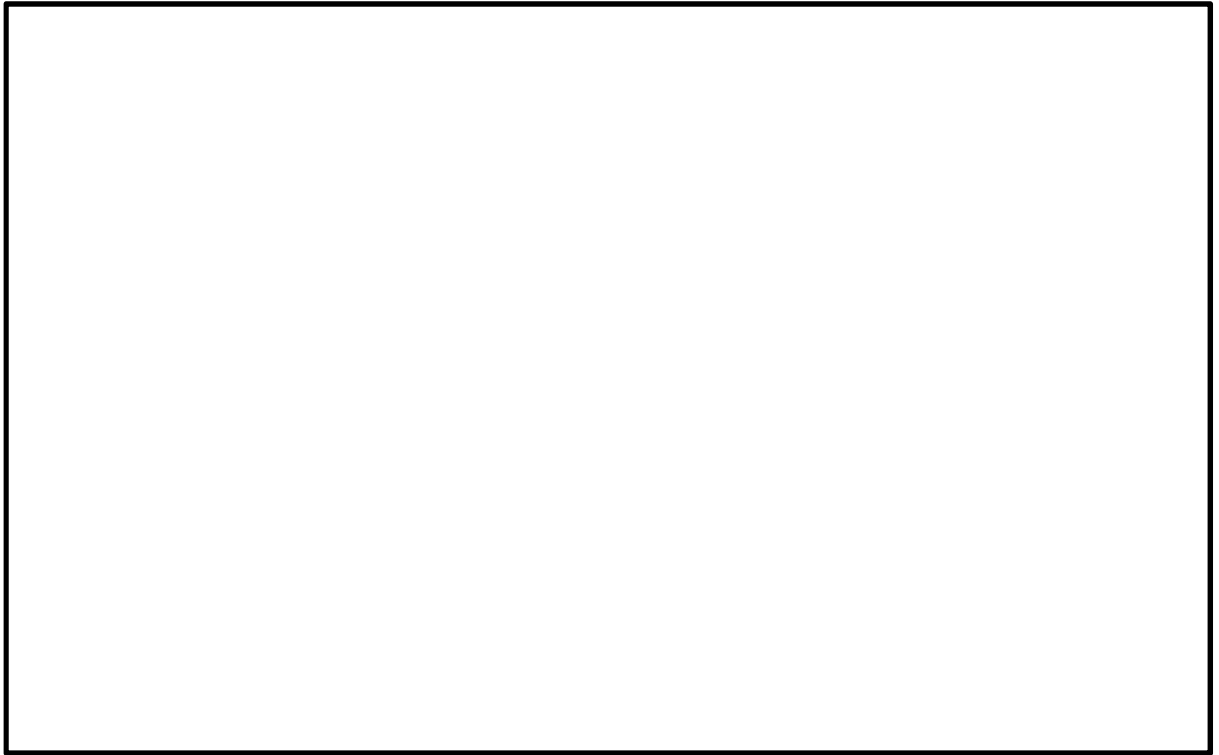


図 5-10 (1/2) 防護鋼板のひずみ分布図 (竜巻防護ネット (防護鋼板部))

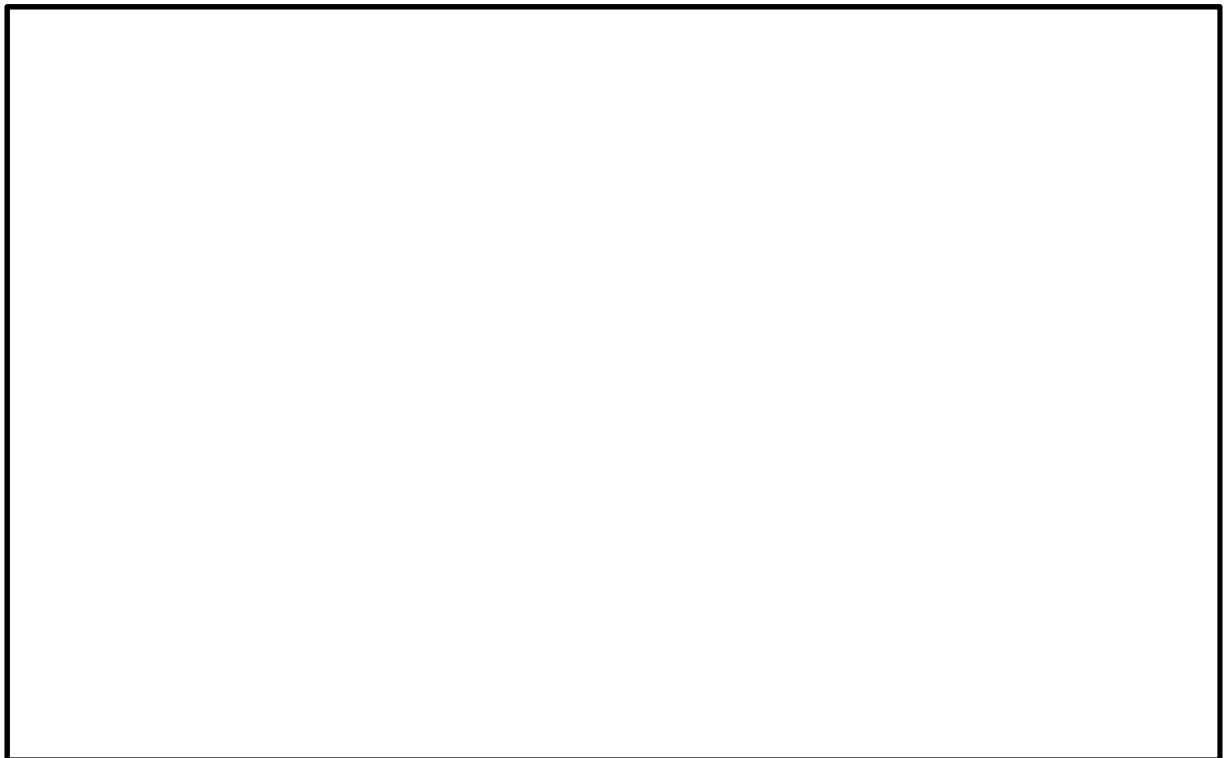


図 5-10 (2/2) 架構のひずみ分布図 (竜巻防護ネット (防護鋼板部))

VI-3-別添 1-4-7 竜巻防護扉の強度計算書

目 次

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

1. 概要

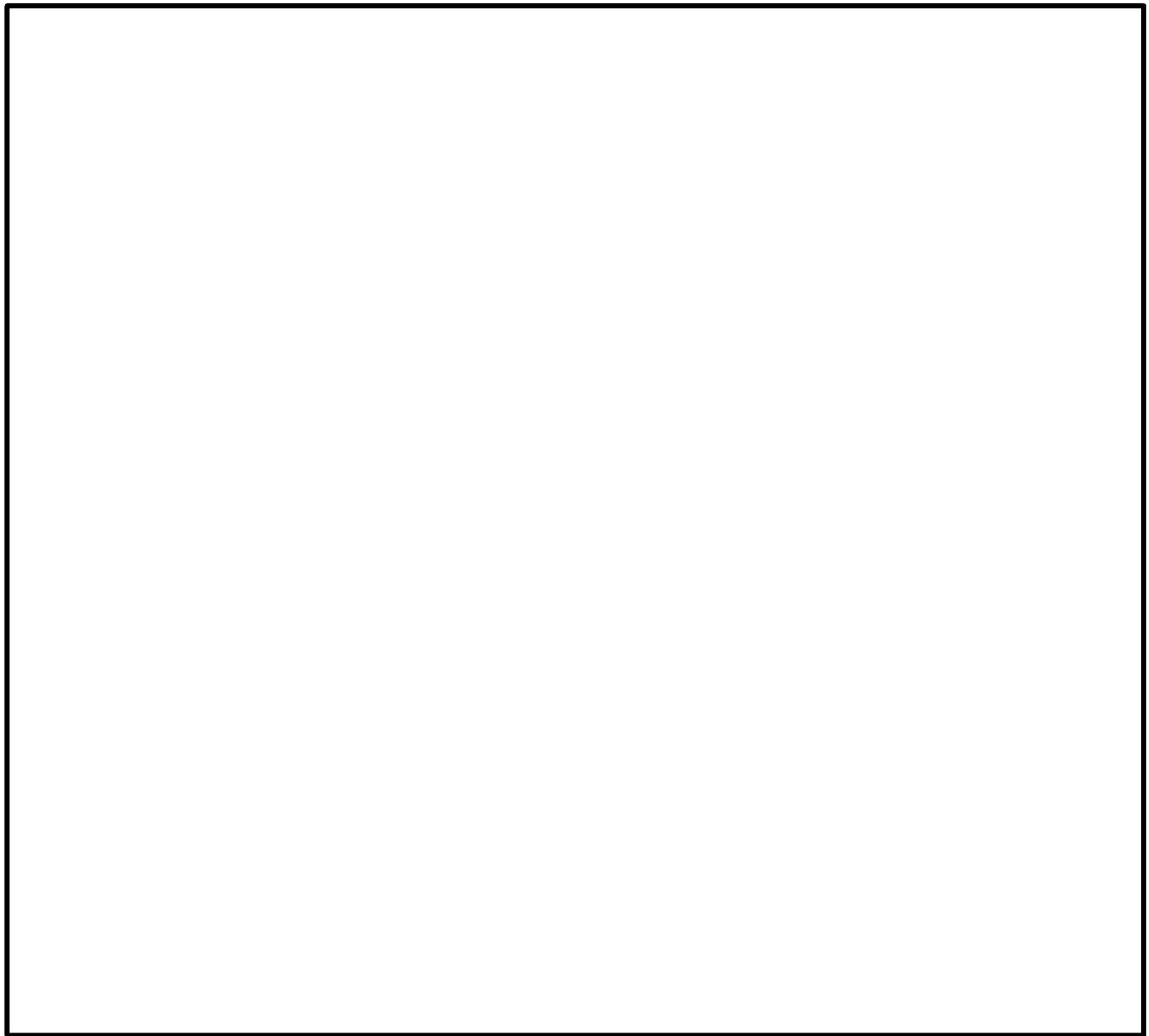
本資料は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」のとおり、防護対策施設のうち、竜巻防護扉が、設計竜巻による設計飛来物の衝突に対し、竜巻時及び竜巻通過後においても、外部事象防護対象施設に設計飛来物を衝突させず、また、機械的な波及的影響を与えず、外部事象防護対象施設の安全機能を考慮して、竜巻防護扉が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

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

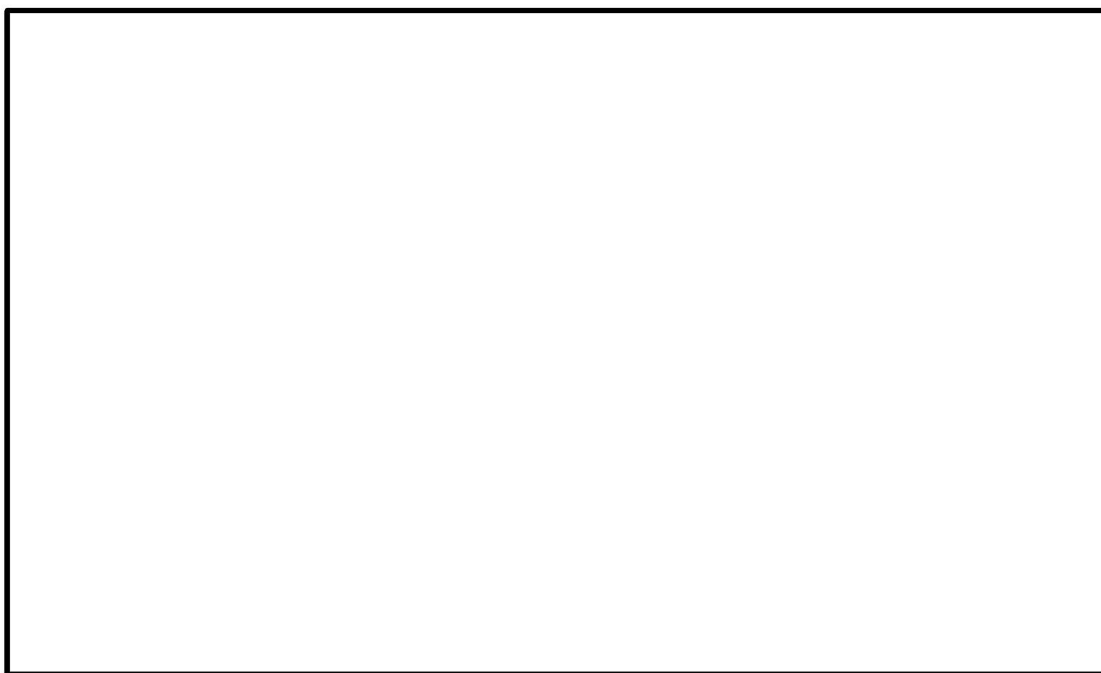
2.1 位置

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



原子炉建屋 T. M. S. L. 12. 3m

図 2-1 竜巻防護扉の位置図（原子炉建屋）（1/2）



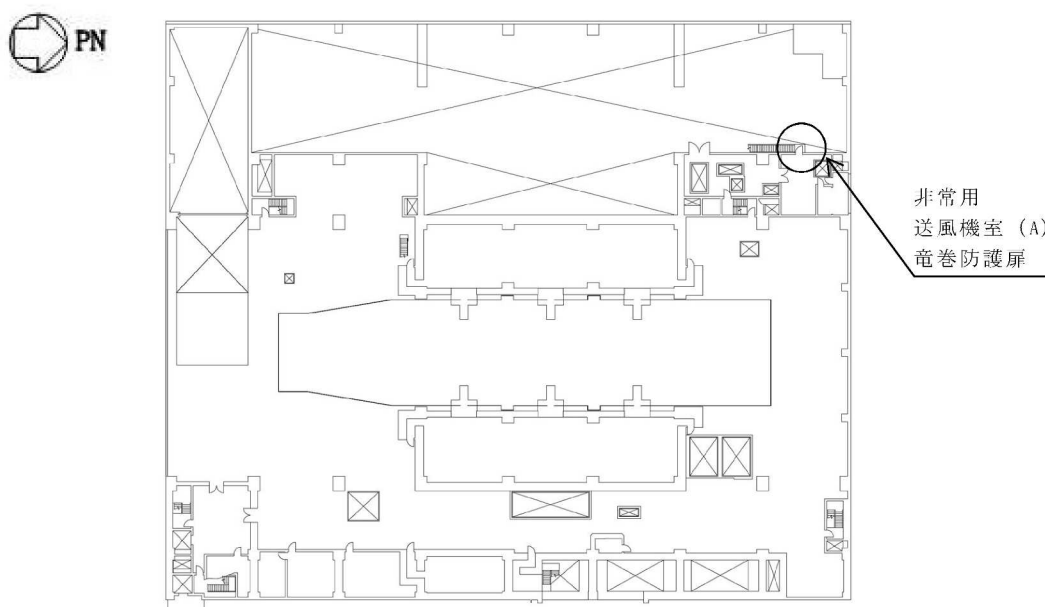
原子炉建屋 T. M. S. L. 34. 5m

図 2-1 竜巻防護屏の位置図（原子炉建屋）（2/2）



タービン建屋 T. M. S. L. 12. 3m

図 2-2 竜巻防護扉の位置図 (タービン建屋) (1/2)



タービン建屋 T. M. S. L. 20. 4m

図 2-2 竜巻防護扉の位置図 (タービン建屋) (2/2)



コントロール建屋 T.M.S.L. 24. 1m

図 2-3 竜巻防護屏の位置図（コントロール建屋）

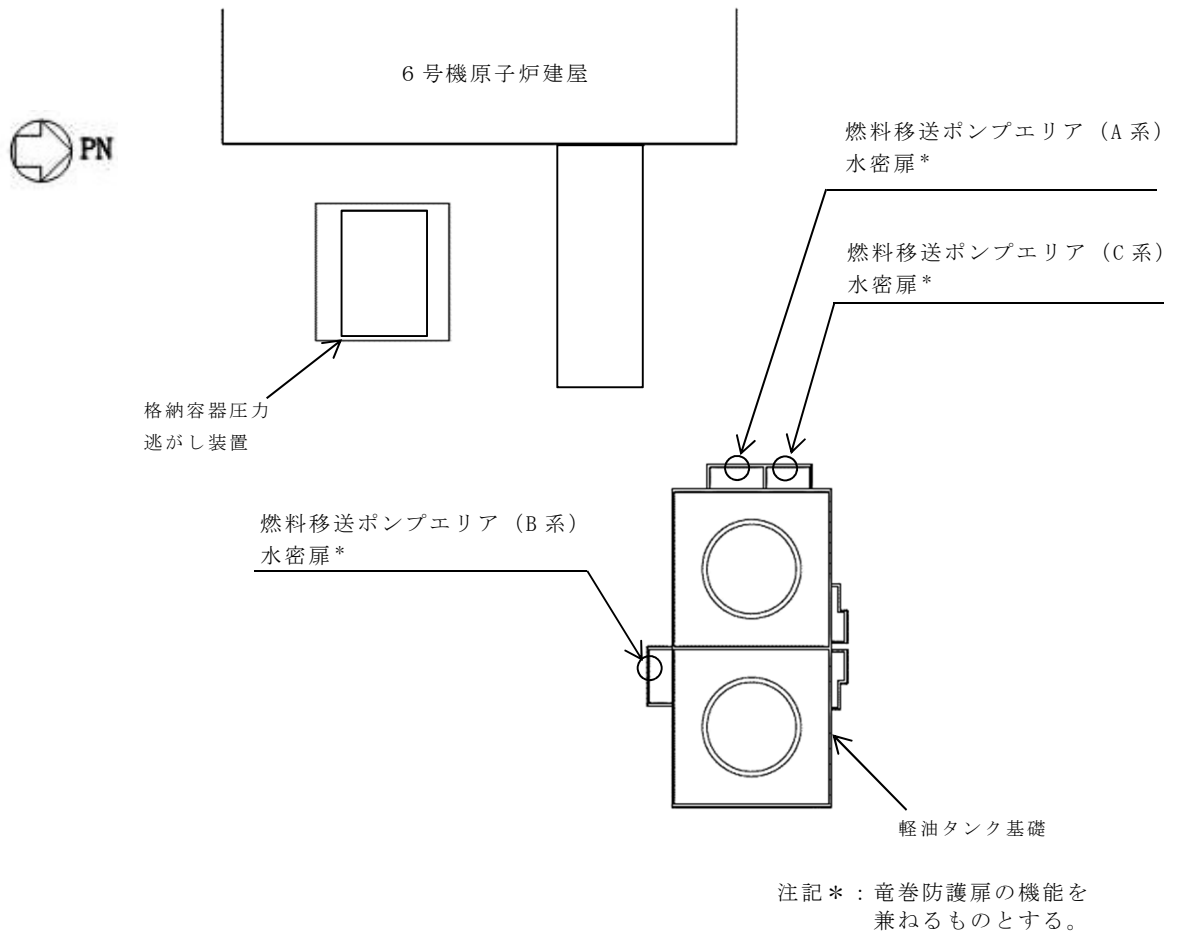


図 2-4 竜巻防護扉の位置図 (燃料移送ポンプエリア)

2.2 構造概要

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

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

竜巻防護扉の構造図を図 2-5 に示す。

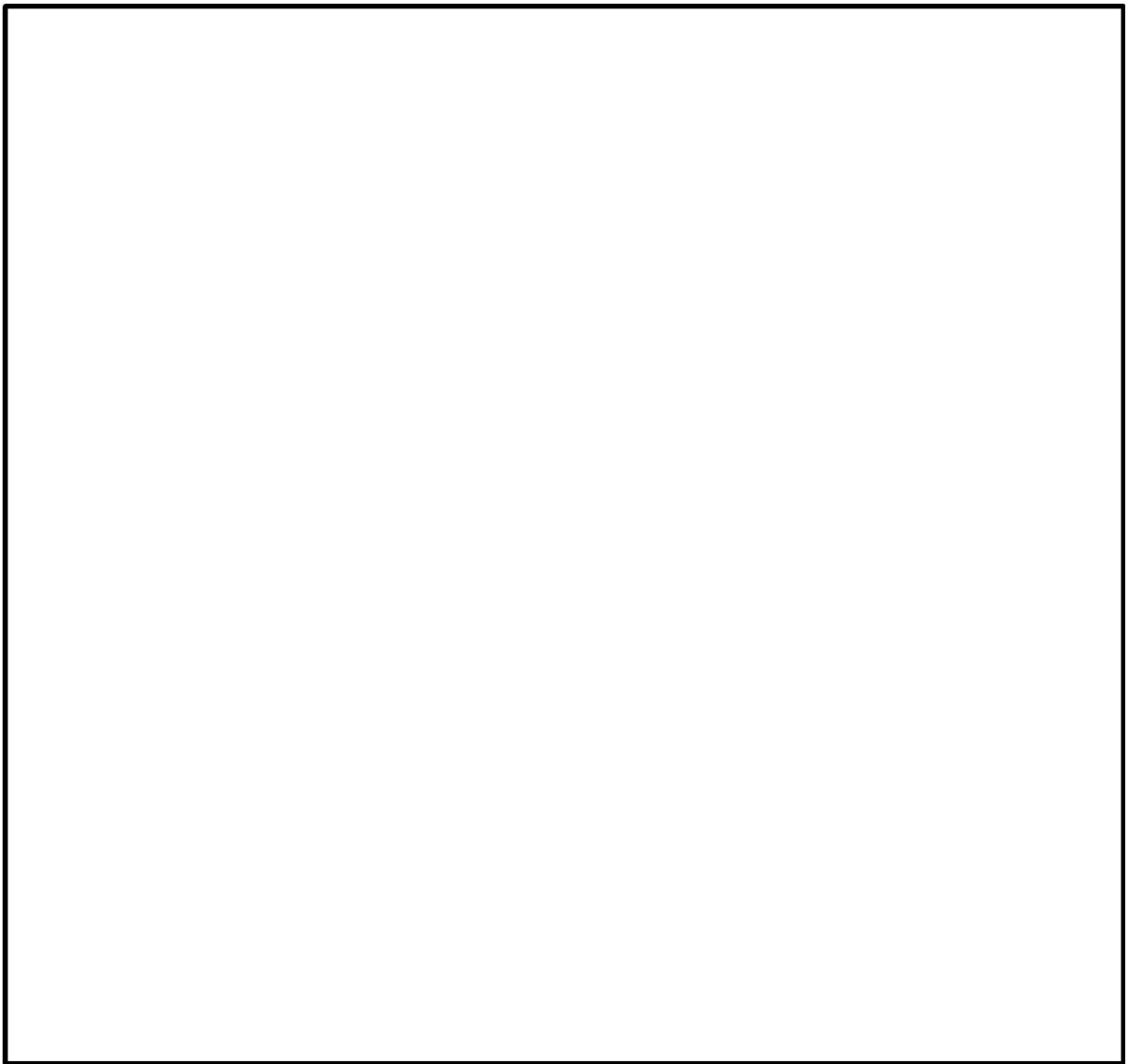


図 2-5 竜巻防護扉の構造図
(例：原子炉建屋機器搬出入口竜巻防護扉)

2.3 評価方針

竜巻防護扉の強度評価は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」及び「5.6 竜巻防護扉の許容限界」にて設定している荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、竜巻防護扉の評価対象部位に生じるひずみ、応力度が許容限界に収まることを「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

竜巻防護扉の評価フローを図 2-6 に示す。

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

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

(1) 衝突評価

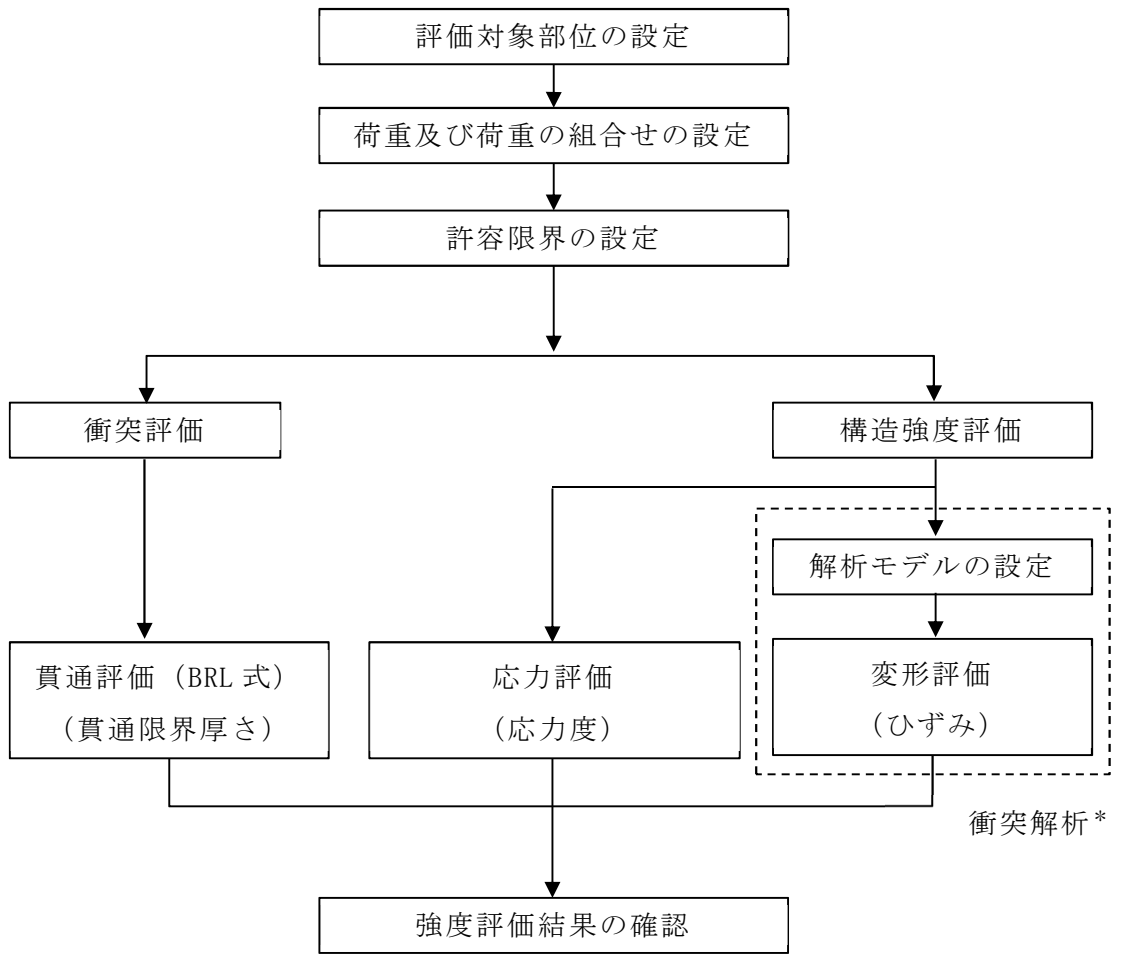
設計荷重に対し、設計飛来物が施設を構成する部材を貫通しない設計とするために、竜巻防護扉の表側鋼板の最小厚さが、設計飛来物の貫通を生じない貫通限界厚さを上回ることを計算により確認する。（以下「貫通評価」という。）

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

(2) 構造強度評価

設計荷重に対し、施設を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とするために、竜巻防護扉の表側鋼板と芯材に終局状態に至るようなひずみが生じないことを衝突解析により確認する。（以下「変形評価」という。）

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



注記*：衝突解析においては、解析コード「LS-DYNA」を用いて3次元FEMモデルによりモデル化し、表側鋼板及び芯材について評価を実施する。

図 2-6 竜巻防護扉の評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，規準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法及び同施行令
- ・ 「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 J S M E S N C 1 -2005/2007」日本機械学会
- ・ ISE7607-3「軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査 その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討」(昭和 51 年 10 月高温構造安全技術研究組合)
- ・ 「タービンミサイル評価について」(昭和 52 年 7 月 20 日 原子炉安全専門審査会)
- ・ U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision1, March 2007
- ・ Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8 (NEI07-13))
- ・ 「建築物荷重指針・同解説」(日本建築学会, 2004 改定)
- ・ 「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—」(日本建築学会, 2005 改定)
- ・ 日本産業規格 (J I S)

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

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

表 3-1 BRL 式による貫通限界厚さの算定に用いる記号

記号	単位	定義
d	m	設計飛来物が衝突する衝突断面の等価直径
K	—	鋼板の材質に関する係数
M	kg	設計飛来物の質量
T	m	鋼板の貫通限界厚さ
V	m/s	設計飛来物の飛来速度

表 3-2 力学における標準式による荷重及び応力の算定に用いる記号

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

3.2 評価対象部位

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

評価対象部位を図 3-1 に示す。

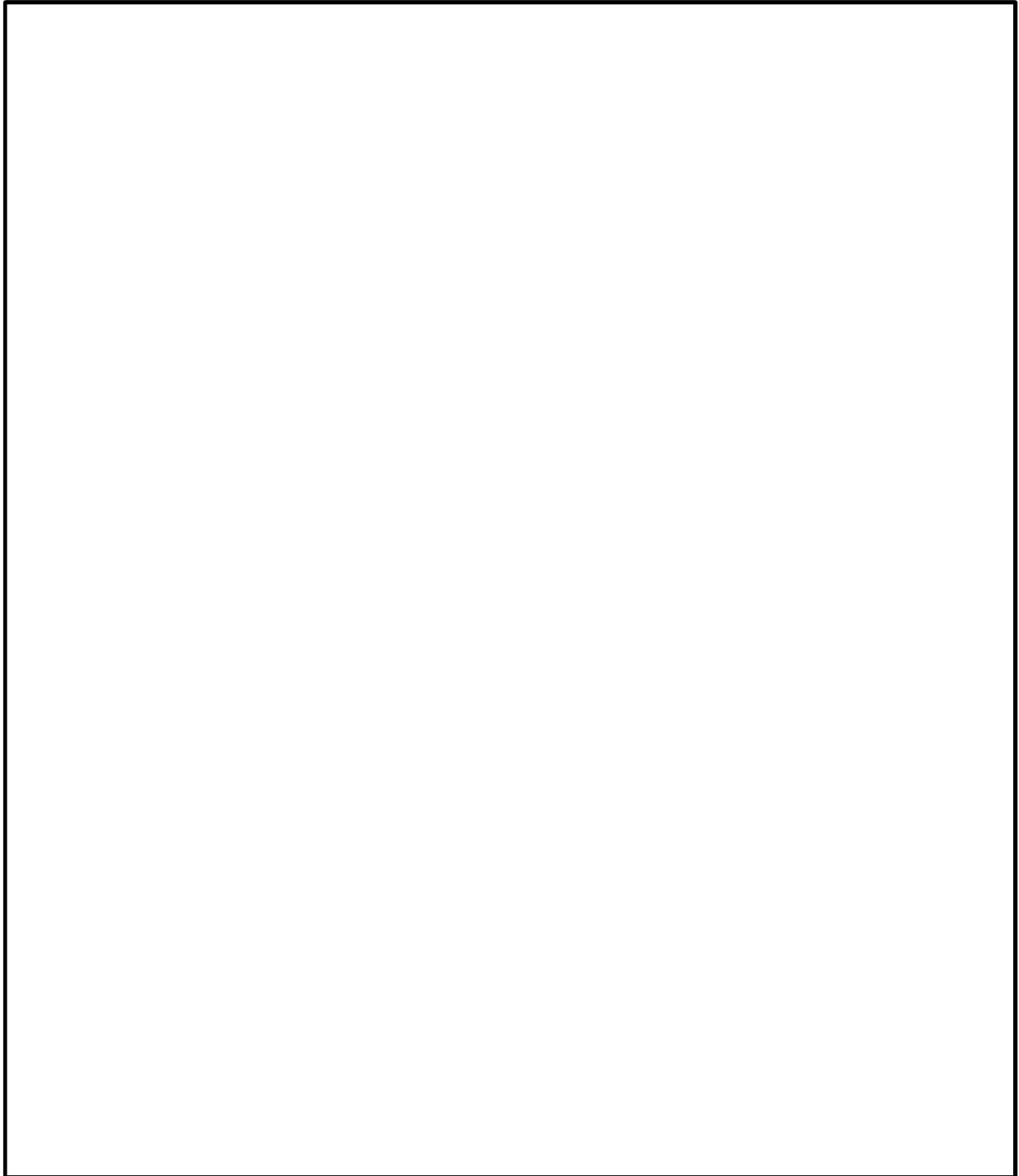


図 3-1 竜巻防護扉の評価位置図

(1) 貫通評価

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

(2) 変形評価

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

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

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

評価の対象とする竜巻防護扉の選定結果として、竜巻防護扉の表側鋼板の最小厚さと面積の一覧を表 3-3 に示す。また、設計飛来物の衝突を考慮する場合、被衝突物の寸法が大きいほどたわみ量が大きくなる傾向にある。したがって、変形評価としては、評価対象となる表側鋼板の部材長さ（支持スパン）が最長となる箇所を選定する。

(3) 応力評価

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

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

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

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

表 3-3 評価の対象とする竜巻防護扉の選定結果

評価対象の竜巻防護扉	表側鋼板の仕様			カンヌキの本数 (本)	カンヌキ1本当たりの 表側鋼板の負担面積 (㎡)	表側鋼板の 最小厚さ (mm)	評価対象		
	幅 (mm)	高さ (mm)	面積 (㎡)				変形評価	応力評価	
非常用ディーゼル発電機 (A) 室 竜巻防護扉1	945	2070	1.96	4	0.49				
非常用ディーゼル発電機 (A) 室 竜巻防護扉2	3800	3610	13.72	12	1.15				
非常用ディーゼル発電機 (B) 室 竜巻防護扉1	945	2070	1.96	4	0.49				
非常用ディーゼル発電機 (B) 室 竜巻防護扉2	3800	3670	13.95	12	1.17				
非常用ディーゼル発電機 (C) 室 竜巻防護扉1	933	2068	1.93	4	0.49				
非常用ディーゼル発電機 (C) 室 竜巻防護扉2	3800	3685	14.00	10	1.41				
可燃性ガス濃度制御系再結合装置室 竜巻防護扉	3400	3870	13.16	12	1.10				
南側ハッチ室 竜巻防護扉	3410	2870	9.79	10	0.98				
南側階段室 竜巻防護扉	945	2010	1.90	4	0.48				
北側ハッチ室 竜巻防護扉	3410	2870	9.79	10	0.98				
原子炉建屋機器搬出入口 竜巻防護扉	5200	5560	28.91	16	1.81			○	
見学者ギャラリー室竜巻防護室扉	扉部	1050	1950	2.05	2		1.03	19	
	鋼板部	—*	—*	—*	—*		—*	19	
非常用電気品室 (A) 竜巻防護扉	2500	2900	7.25	4	1.82				○
TA-TB/T8-T9通り 竜巻防護扉	825	1955	1.61	4	0.41				
非常用送風機室 (A) 竜巻防護扉	830	1920	1.59	2	0.80	35			
計測制御電源盤区域 (B) (C) ・ 常用電気品区域給気ルーバー室 竜巻防護扉	825	2190	1.81	4	0.46				
計測制御電源盤区域 (A) 給気ルーバー室 竜巻防護扉	825	2190	1.81	4	0.46				
燃料移送ポンプエリア (A系) 水密扉	1274	2161	2.75	2	1.38	22			
燃料移送ポンプエリア (B系) 水密扉	1274	2161	2.75	2	1.38	22			
燃料移送ポンプエリア (C系) 水密扉	1274	2161	2.75	2	1.38	22			

注記* : カンヌキが無い為評価対象外とした。

3.3 荷重及び荷重の組合せ

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

(1) 荷重の設定

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

表 3-4 荷重の算定に用いる竜巻の特性値

最大風速 V_D (m/s)	移動速度 V_T (m/s)	最大接線風速 V_{Rm} (m/s)	最大気圧低下量 ΔP_{max} (N/m ²)
92	14	78	6400

a. 風圧力による荷重 (W_w)

風圧力による荷重は、下式により算出する。

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

設計用速度圧 q は、下式により算定する。

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

b. 気圧差による荷重 (W_p)

気圧差による荷重は、次式のとおり算出する。

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

c. 設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)

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

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

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

表 3-5 設計飛来物の諸元

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

表 3-6 設計飛来物の材料定数

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

d. 常時作用する荷重 (F_d)

常時作用する荷重 (F_d) は、部材の自重とする。

(2) 荷重の組合せ

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

荷重の組合せを表 3-7 に示す。

表 3-7 荷重の組合せ

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

3.4 許容限界

竜巻防護扉の許容限界は、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.6 竜巻防護扉の許容限界」にて設定している許容限界を踏まえて、「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位の機能損傷モードを考慮して設定する。

(1) 評価対象部位の材料仕様

竜巻防護扉の材料仕様を表 3-8 及び表 3-9 に示す。

表 3-8 表側鋼板，芯材の材料仕様

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

表 3-9 カンヌキ部の材料仕様

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

(2) 評価対象部位の材料定数

竜巻防護扉の材料定数を表 3-10 に示す。

表 3-10 材料定数

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

(3) 許容限界

a. 貫通評価

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

表 3-11 貫通評価の許容限界

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

b. 変形評価

設計飛来物が竜巻防護扉の表側鋼板へ直接衝突する場合の変形評価における許容限界は、鋼材の破断ひずみを基本として設定する。破断ひずみについては、VI-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.6(2) 構造強度評価」に示すとおり、J I Sに規定されている伸びの下限値を基に設定するが、「NEI07-13: Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs」(以下「NEI07-13」という。)においてTF (多軸性係数)を□とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF=□を考慮して設定する。

設定した許容限界を表 3-12 に示す。

表 3-12 変形評価の許容限界

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

c. 応力評価

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

応力評価におけるカンヌキ部の評価は、J I S 及び「鋼構造設計規準－許容応力度設計法－」に準じた短期許容応力度を許容限界として設定する。

表 3-13 応力評価の許容限界

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

3.5 評価方法

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

(1) 貫通評価

「3.3 荷重及び荷重の組合せ」に記載した通り、貫通評価においては設計飛来物を足場パイプに設定する。ここで、設計飛来物が竜巻防護扉の表側鋼板へ直接衝突する場合の貫通限界厚さを、「タービンミサイル評価について（昭和 52 年 7 月 20 日 原子炉安全専門審査会）」で用いられる BRL 式を用いて算出する。

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

(2) 変形評価

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

a. 解析モデル及び諸元

(a) 竜巻防護扉

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

表 3-14 解析モデルの境界条件

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

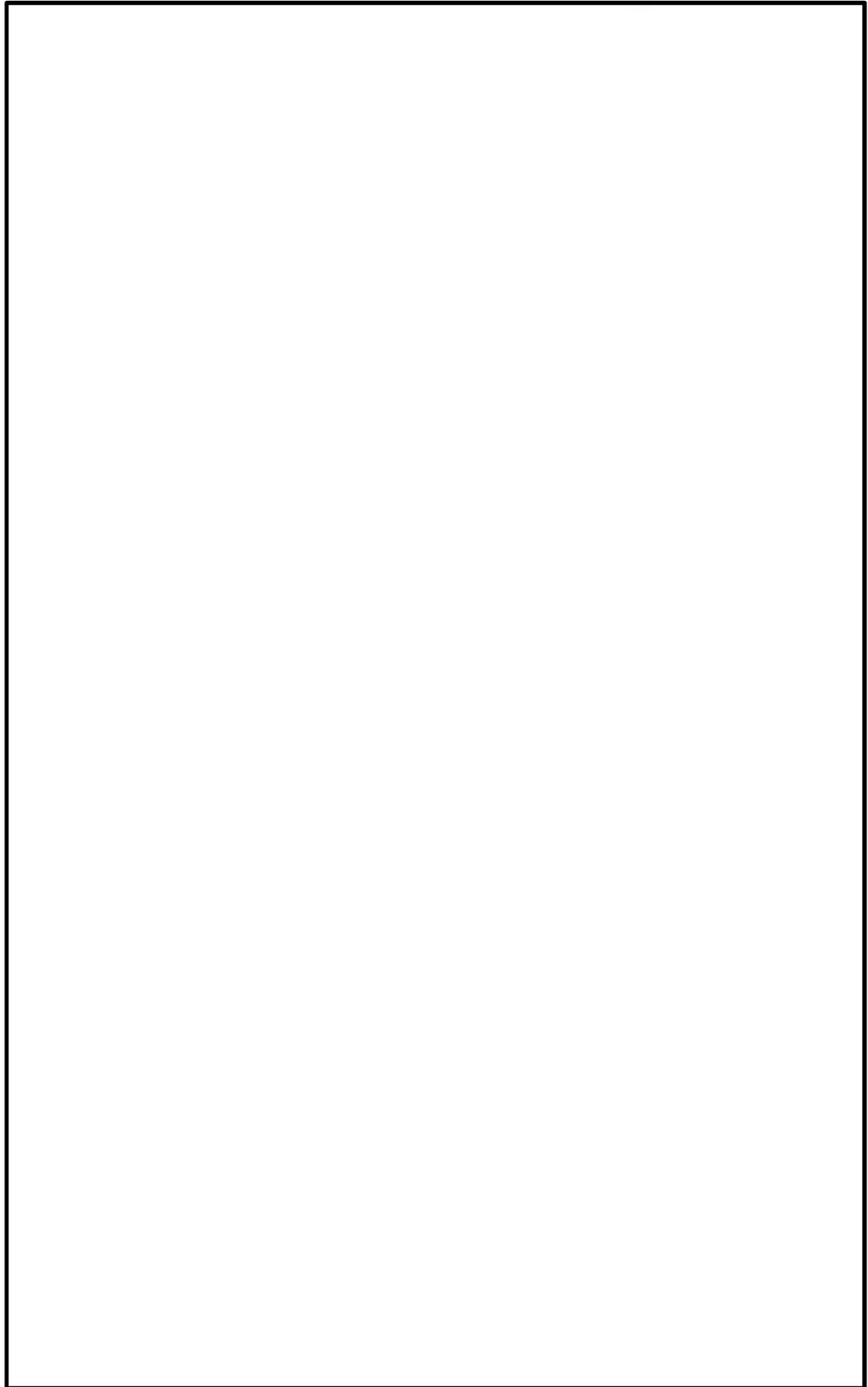


図 3-3 竜巻防護扉の解析モデル図 (1/2)



図 3-3 竜巻防護扉の解析モデル図 (2/2)

(b) 設計飛来物

設計飛来物である鋼製足場板は、シェル要素でモデル化する。

設計飛来物の解析モデル図を図 3-4 に示す。

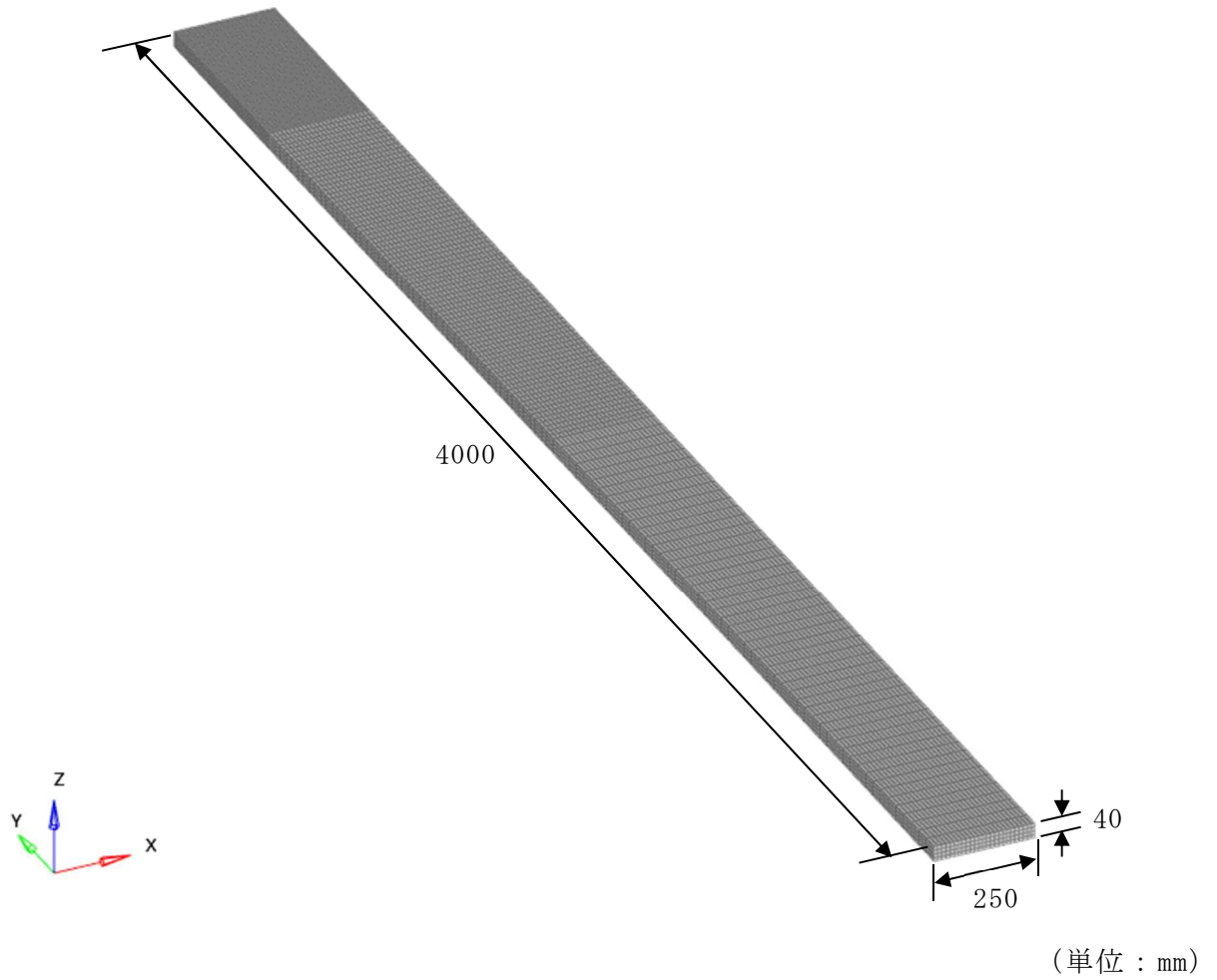


図 3-4 設計飛来物の解析モデル図

b. 解析コード

衝突解析には，解析コード「LS-DYNA」を用いる。

c. 使用材料

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

d. 材料定数

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

e. 材料の非線形特性

(a) 材料の応力－ひずみ関係

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

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

材料に適用する応力－ひずみ関係の概念図を図 3-5 に示す。

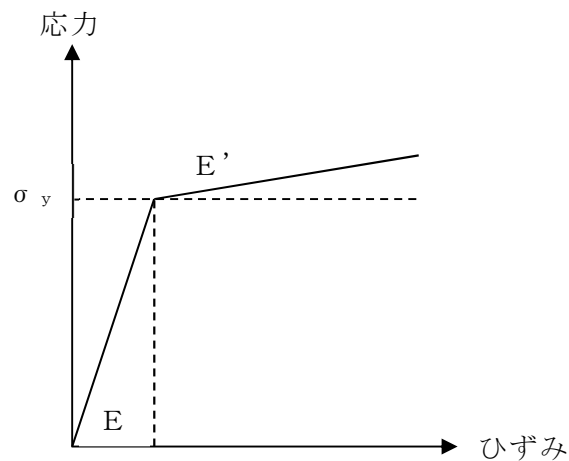


図 3-5 応力－ひずみ関係の概念図

(b) ひずみ速度効果

竜巻による設計飛来物に対する解析は、衝撃問題で変形速度が大きいため、ひずみ速度効果を考慮することとし、以下に示す Cowper-Symonds の式を適用する。

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

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

ひずみ速度依存性パラメータを表 3-15 に示す。

表 3-15 ひずみ速度依存性パラメータ

	鋼製足場板	竜巻防護扉	
		表側鋼板	芯材
材料	SS400	SUS304	SUS304
C (s ⁻¹)			
P			

(c) 破断ひずみ

破断ひずみは、J I Sに規定されている伸びの下限値を基に設定する。また、「NEI07-13」においてTF（多軸性係数）を□とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF=□を考慮する。TFについては、竜巻防護扉のみ□とする。鋼製足場板は保守的に破断ひずみを超えても荷重を負担するものとする。

材料モデルにおける破断ひずみを表 3-16 に示す。

表 3-16 材料モデルにおける破断ひずみ

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

(3) 応力評価

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

a. カンヌキ部に生じる荷重

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

カンヌキ部に生じる荷重を図 3-6 に示す。

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

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

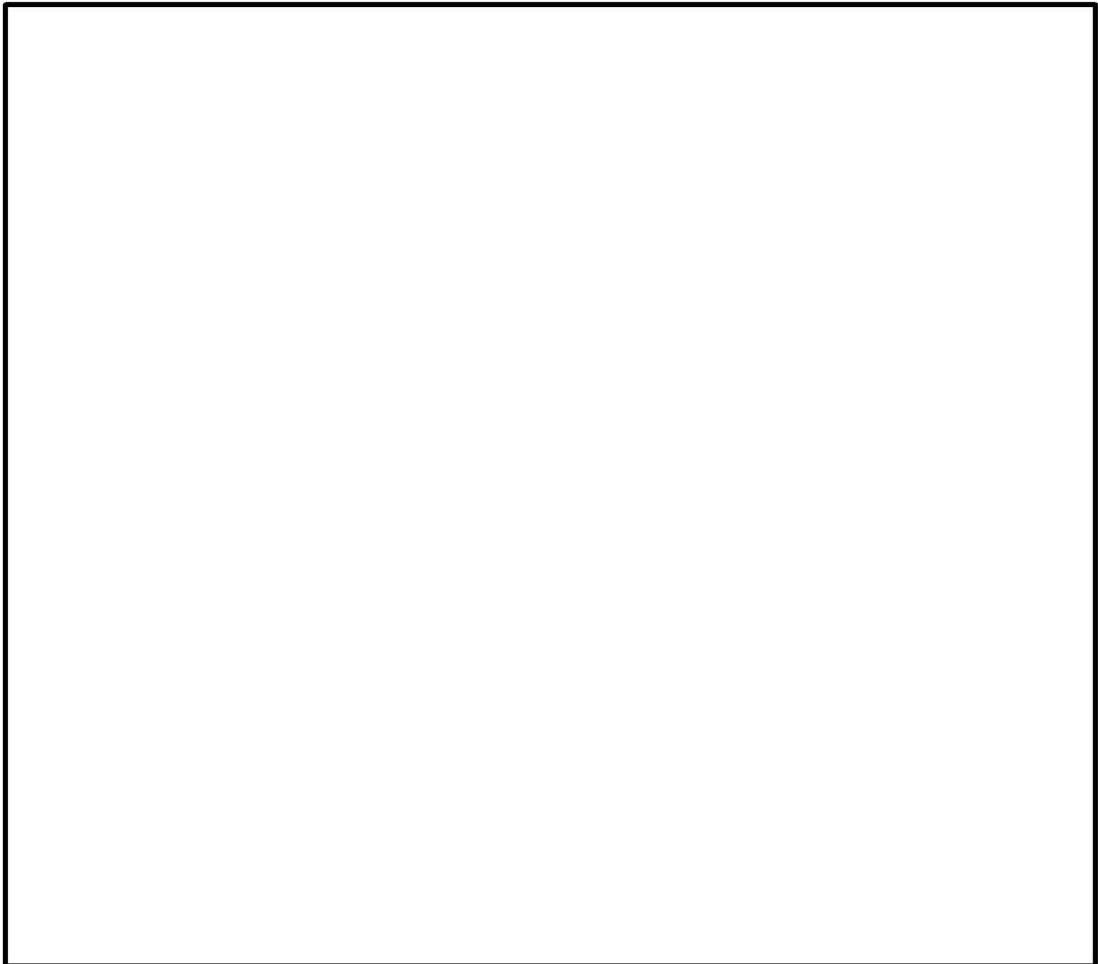


図 3-6 カンヌキ部に生じる荷重

(a) カンヌキ

カンヌキ部の詳細図及びカンヌキの評価に用いるモデルの概念図を図 3-7 に示す。カンヌキに生じる曲げモーメント M_k 及びせん断力 Q_k は次式により算定する。

$$M_k = R \cdot L$$

$$Q_k = R$$



図 3-7 カンヌキ部の詳細図及びモデルの概念図 (A 部)

(b) カンヌキ受けピン

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

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

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

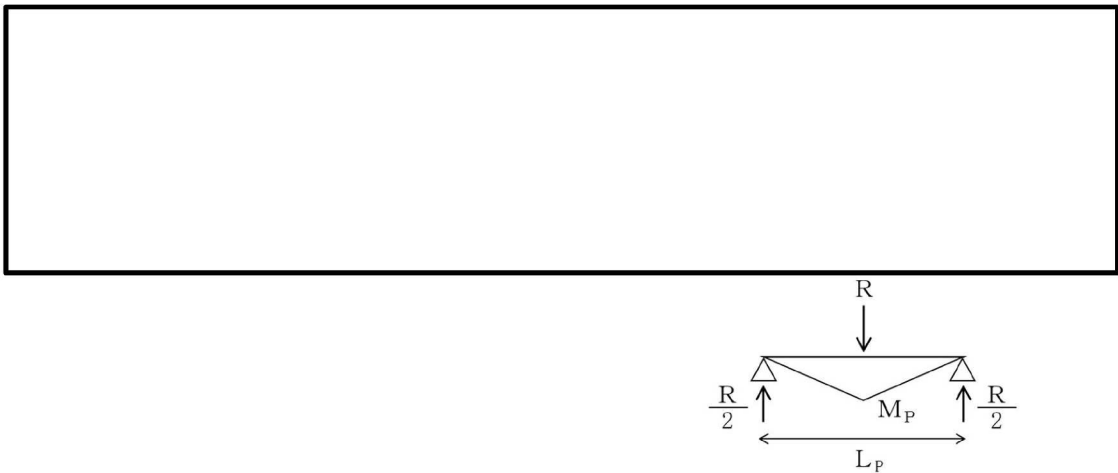


図 3-8 カンヌキ受けピン及びカンヌキ受けボルトの詳細図及びモデルの概念図

(c) カンヌキ受けボルト

カンヌキ受けボルト 1 本あたりに生じる引張力 T は以下のとおり。

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

b. 断面検定

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

(a) カンヌキ 1 本あたりに生じる曲げ応力度

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

カンヌキ 1 本あたりに生じるせん断応力度

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

(b) カンヌキ受けピン 1 本あたりに生じる曲げ応力度

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

カンヌキ受けピン 1 本あたりに生じるせん断応力度

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

(c) カンヌキ受けボルト 1 本あたりに生じる引張応力度

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

4. 評価条件

4.1 貫通評価

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

表 4-1 表側鋼板の貫通評価に用いる評価条件

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

4.2 変形評価

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

解析ケースを表 4-2 表及び図 4-1 に示す。

表 4-2 解析ケース（変形評価）

評価箇所	衝突箇所	設計飛来物の 衝突方向	対象部材
竜巻防護扉	表側鋼板	水平	PL-  H-250×250×9×14 PL-35

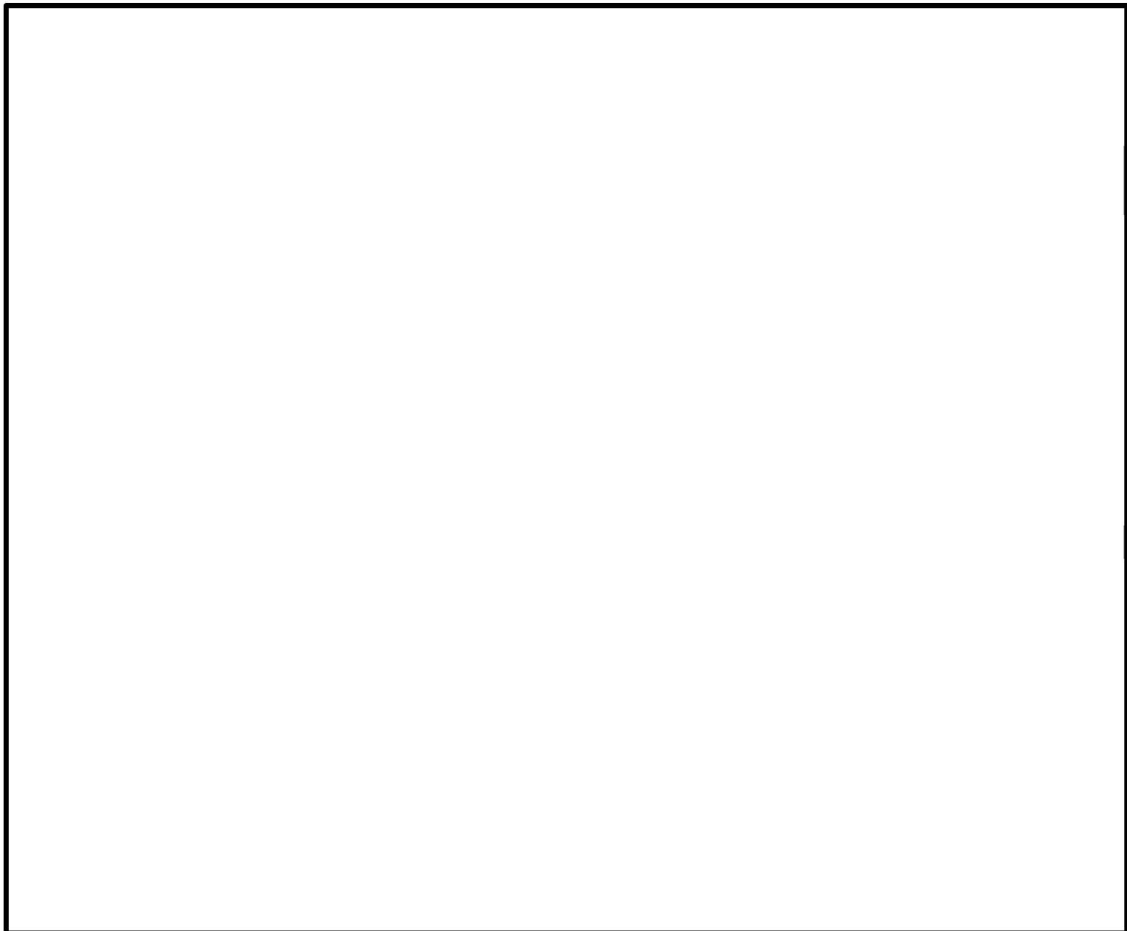


図 4-1 解析ケース（変形評価）

4.3 応力評価

竜巻防護扉の応力評価に用いる条件を表 4-3 に示す。

表 4-3 応力評価に用いる評価条件（非常用電気品室（A）竜巻防護扉）

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

5. 強度評価結果

5.1 貫通評価

竜巻発生時の竜巻防護扉の表側鋼板の貫通限界厚さを表 5-1 に示す。

表 5-1 貫通限界厚さ

評価対象部位		貫通限界厚さ (mm)
竜巻防護扉	表側鋼板	17

竜巻防護扉の貫通評価結果として、貫通限界厚さと許容限界の比較を表 5-2 に示す。

竜巻防護扉の評価対象部位の許容限界が、設計飛来物による貫通を生じない貫通限界厚さを上回ることを確認した。

表 5-2 貫通評価結果

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

5.2 変形評価

評価結果を表 5-3 並びに図 5-1 及び図 5-2 に示す。

竜巻防護扉に生じるひずみが許容限界を超えない。

表 5-3 評価結果

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



図 5-1 表側鋼板のひずみ分布図



図 5-2 芯材のひずみ分布図

5.3 応力評価

評価結果を表 5-4 に示す。

竜巻防護扉のカンヌキ部に生じる応力度は、許容限界を超えない。

表 5-4 評価結果 (単位：MPa)

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

VI-3-別添 1-5 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	2
2.1 位置	2
2.2 構造概要	3
2.3 評価方針	6
2.4 適用規格	9
3. 強度評価方法	10
3.1 記号の定義	10
3.2 評価対象部位	13
3.3 荷重及び荷重の組合せ	15
3.4 許容限界	18
3.4.1 貫通評価	18
3.4.2 裏面剥離評価	19
3.4.3 変形評価	20
3.5 評価方法	20
3.5.1 貫通評価	21
3.5.2 裏面剥離評価	30
3.5.3 変形評価	31
4. 評価条件	40
4.1 貫通評価	40
4.1.1 式による評価	40
4.1.2 屋根スラブに対する衝突解析	40
4.2 裏面剥離評価	42
4.2.1 式による評価	42
4.2.2 屋根スラブに対する衝突解析	42
4.3 変形評価	42
4.3.1 耐震壁及び鉄骨架構	42
4.3.2 屋根スラブ	45
5. 強度評価結果	47
5.1 貫通評価	47
5.2 裏面剥離評価	50
5.3 変形評価	51

5.3.1	耐震壁及び鉄骨架構	51
5.3.2	屋根スラブ	52

1. 概要

本資料は、VI-3-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、タービン建屋海水熱交換器区域が、設計竜巻による設計飛来物の衝突に加え、風圧力による荷重及び気圧差による荷重に対し、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、内包する竜巻より防護すべき施設に設計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。

コントロール建屋及び廃棄物処理建屋の強度に関する評価は、令和 2 年 10 月 14 日付け原規規発第 2010147 号にて認可された柏崎刈羽原子力発電所第 7 号機の設計及び工事の計画の V-3-別添 1-5「竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書」による。

2. 基本方針

VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」を踏まえ、各施設の「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

原子炉建屋、タービン建屋の設置位置を図 2-1 に示す。

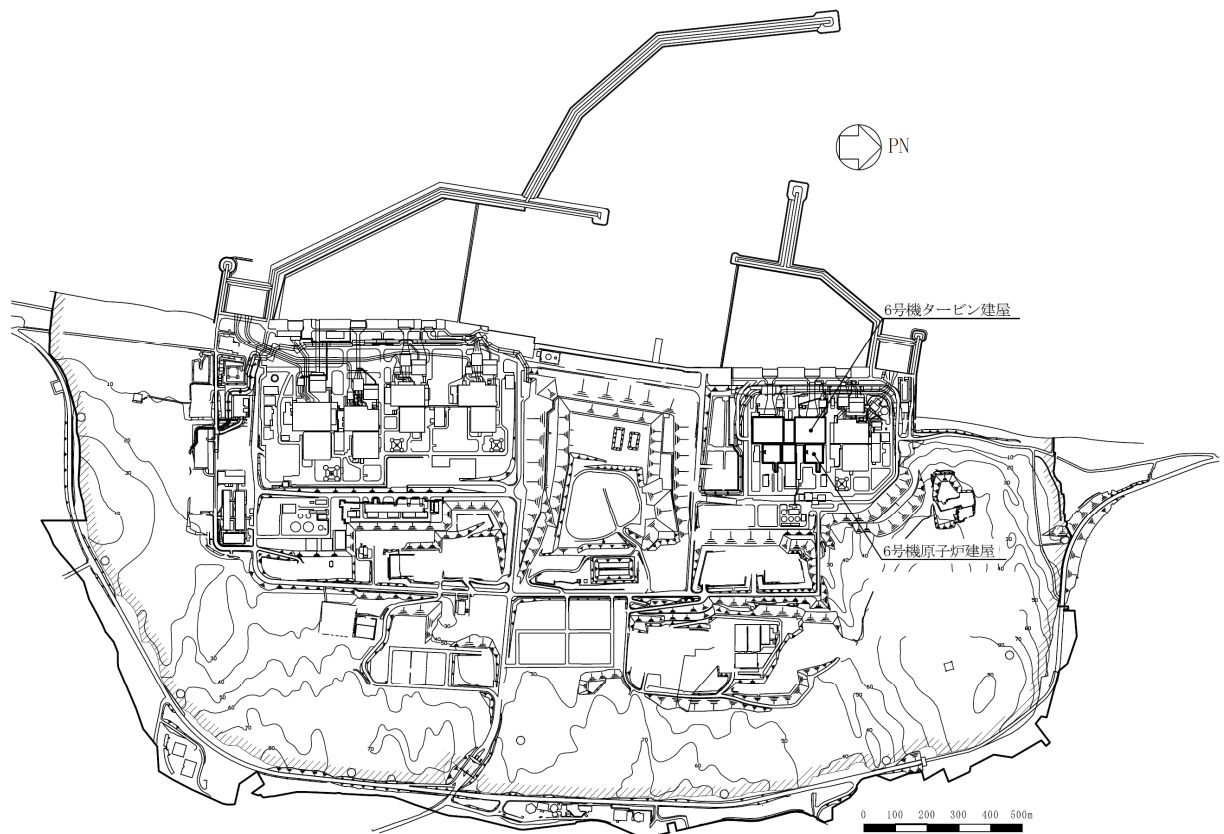


図 2-1 建屋の位置図

2.2 構造概要

各施設の構造は、VI-3-別添 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。

各施設は、主体構造が鉄筋コンクリート造であり、一部鉄骨鉄筋コンクリート造、又は一部鉄骨造を有する構造である。

各施設の概略平面図を図 2-2～図 2-3 に示す。

K6 ① VI-3-別添 1-5 R0

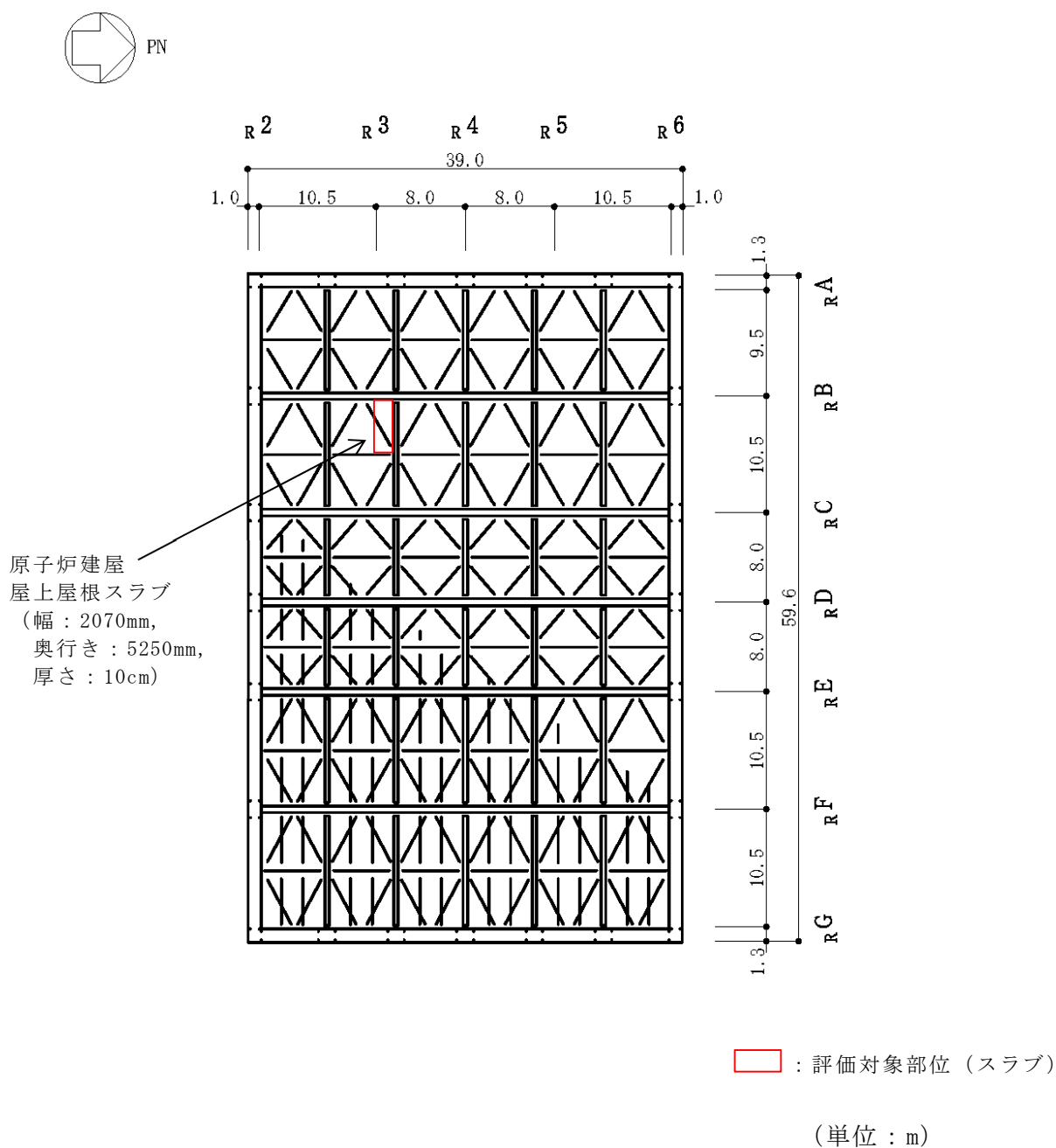


図 2-2 原子炉建屋の概略平面図 (T. M. S. L. 49.7m) (1/2)

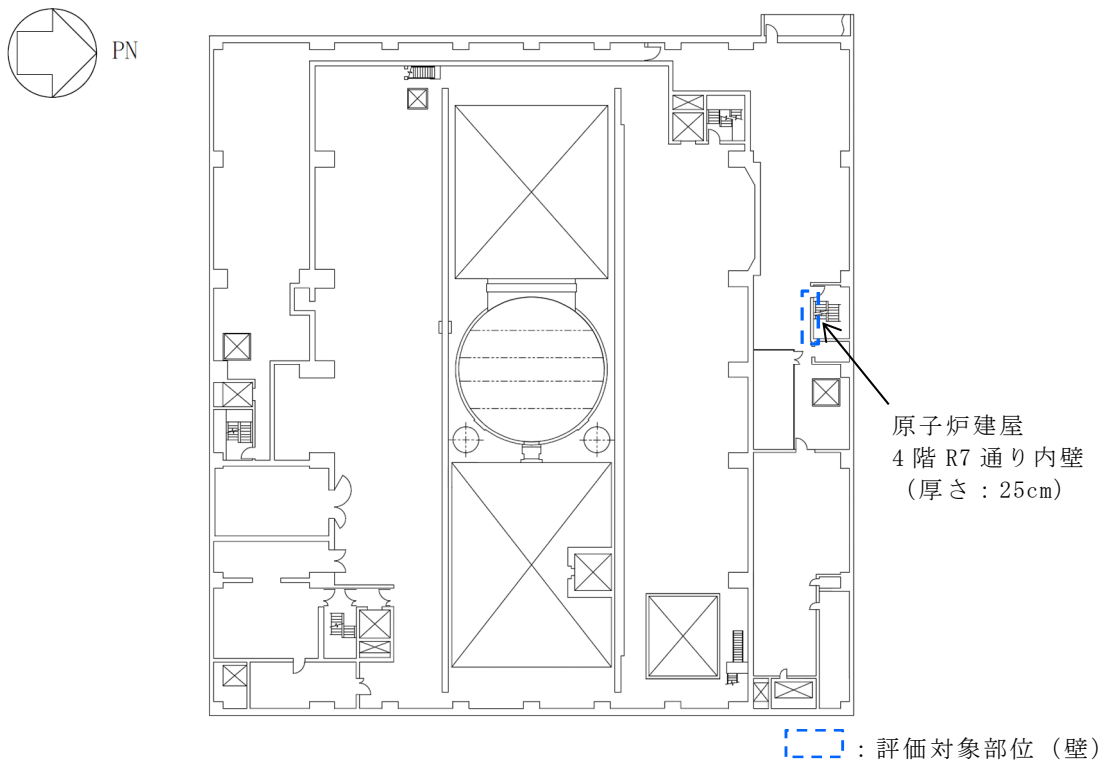


図 2-2 原子炉建屋の概略平面図 (T. M. S. L. 31.7m) (2/2)

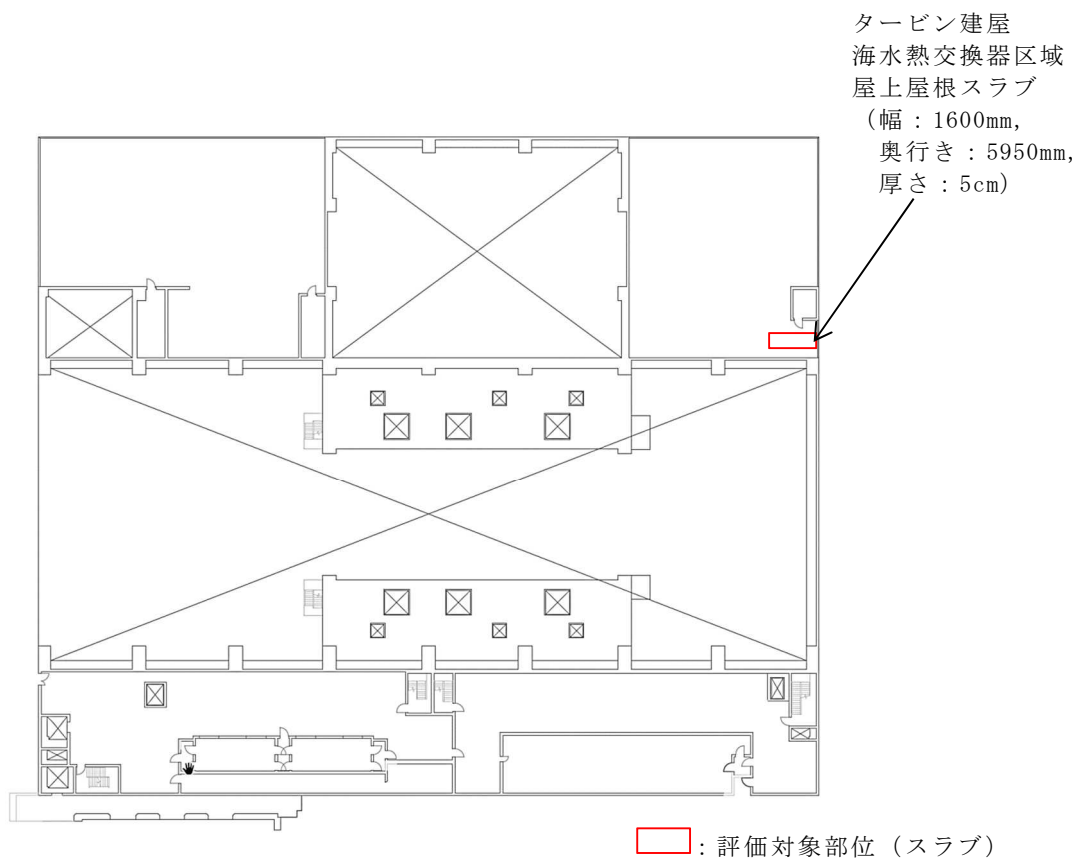


図 2-3 タービン建屋の概略平面図 (T. M. S. L. 30.9m) (1/2)




 : 評価対象部位 (壁)

図 2-3 タービン建屋の概略平面図 (T. M. S. L. 12.3m) (2/2)

2.3 評価方針

各施設の強度評価は、VI-3-別添 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。

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

具体的には、設計飛来物が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、施設の外殻を構成する部材に対する衝突評価を行う。また設計飛来物が竜巻より防護すべき施設に衝突もしくは接触する波及的な影響の構造強度評価として、施設の外殻を構成する部材の裏面剥離による飛散の影響評価及び施設の外殻を構成する部材の転倒及び脱落並びに施設の変形の影響評価を行う。

各施設の強度評価フローを図 2-4 に示す。

(1) 衝突評価

設計荷重に対し、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、竜巻より防護すべき施設を内包する施設の外殻を構成する部材である建屋の外壁及び屋根スラブが、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。

評価には、「NEI07-13:Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs」（以下「NEI07-13」という。）及び「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、VI-3-別添 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。

なお、施設の外殻を構成する部材のうち、設計飛来物の貫通を生じない最小厚さ以上であることの確認が出来ない屋根スラブにおいては、当該部材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。（以下「貫通評価」という。）

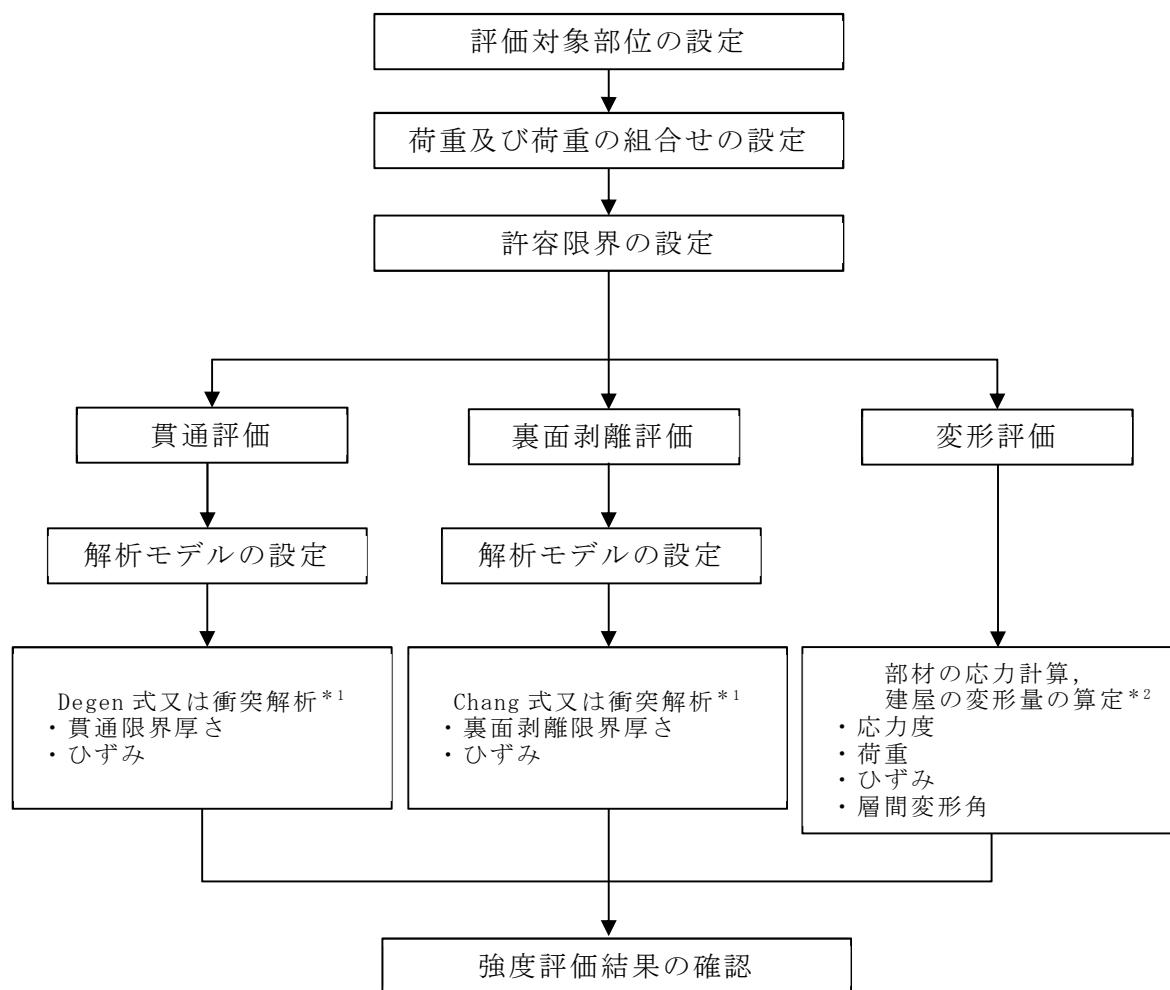
(2) 構造強度評価

設計荷重に対し、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、竜巻より防護すべき施設を内包する施設の外殻を構成する部材である建屋の外壁及び屋根スラブが、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。

評価には、NEI07-13 にて示されている式を準用し、VI-3-別添 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。

なお、施設の外殻を構成する部材のうち、裏面剥離によるコンクリート片の飛散を生じない最小厚さ以上であることの確認が出来ない屋根スラブにおいては、当該部材が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。(以下「裏面剥離評価」という。)

また、建屋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、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(以下「スタッド」という。)及び外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、加えて鉄骨架構に終局状態に至る変形を生じ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。)



注記*1 : 衝突解析については、解析コード「ABAQUS」により、壁、スラブ及び鉄筋を 3次元 FEM モデルによりモデル化し評価を実施する。

*2 : 地震応答解析モデルを用いた静的評価を実施する。

図 2-4 強度評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，規準等を以下に示す。

- 建築基準法及び同施行令
- 「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」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」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」日本電気協会
- ISE7607-3「軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査 その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討」（昭和51年10月高温構造安全技術研究組合）
- タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日 原子炉安全専門審査会）
- U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision1, March 2007
- Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8 (NEI07-13))
- 「建築物荷重指針・同解説」（日本建築学会，2004改定）
- 「鋼構造設計規準－許容応力度設計法－」（日本建築学会，2005改定）
- 「各種合成構造設計指針・同解説」（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」（日本建築学会，2010改定）
- 「鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説－許容応力度設計と保有水平耐力－」（日本建築学会，2001改定（第4次））
- 日本産業規格（J I S）
- 2015年版建築物の構造関係技術基準解説書（国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所）

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

Degen 式による貫通限界厚さの算定に用いる記号を表 3-1 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 3-2 に、力学における標準式による屋根スラブ、スタッドの評価に用いる記号を表 3-3 に示す。

表 3-1 Degen 式による貫通限界厚さの算定に用いる記号

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

表 3-2 Chang 式による裏面剥離限界厚さの算定に用いる記号

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

表 3-3 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 (1/3)
(設計飛来物による衝撃荷重)

記号	単位	定義
F_m	N	設計飛来物による衝撃荷重
L_1	m	設計飛来物の最も短い辺の全長
m	kg	設計飛来物質量
V	m/s	設計飛来物の衝突速度 (水平)
τ	s	設計飛来物と被衝突体の接触時間 ($= L_1 / V$)

表 3-3 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 (2/3)
(屋根スラブのデッキプレート)

記号	単位	定義
L	m	デッキプレートの支持スパン
M	kN・m	設計竜巻による単位幅あたりの曲げモーメント ($= \text{Max} \{M_1, M_2\}$)
M_1	kN・m	支持スパン中央部における 単位幅あたりの曲げモーメント
M_2	kN・m	支持位置における単位幅あたりの曲げモーメント
Q	kN/m	デッキプレートに生じる単位幅のせん断力
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 ($= \text{Max} \{ \omega_{T1}, \omega_{T2} \}$)
ω_{T1}	kN/m	複合荷重 W_{T1} による単位幅あたりの荷重
ω_{T2}	kN/m	複合荷重 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)
t	mm	デッキプレートの厚さ
b	mm	デッキプレートの単位幅

表 3-3 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 (3/3)
(スタッド)

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	スタッド頭部の支圧面積
$a_c a$	mm^2	スタッドの断面積で、軸部断面積とねじ部有効断面積の小さな方の値
D	mm	スタッドの頭部直径
d	mm	スタッドの軸部直径
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
$l_{c e}$	mm	スタッドの強度計算用埋込み長さ ($l_{c e} = l_e$)
l_e	mm	スタッドのコンクリート内への有効埋込み長さ
p_a	N	スタッド1本あたりの許容引張力
p_{a1}	N	スタッド鋼材の降伏により定まる場合のスタッド1本あたりの許容引張力
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スタッド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スタッド1本あたりの許容引張力
π	—	円周率
$c \sigma_t$	N/mm^2	コーン状破壊に対するコンクリートの引張強度
$s \sigma_{p a}$	N/mm^2	スタッドの引張強度
$s \sigma_y$	N/mm^2	スタッドの規格降伏点強度
Φ_1	—	低減係数
Φ_2	—	低減係数
L	m	デッキプレートの支持スパン
p	mm	スタッドの間隔 (鉄骨梁の長さ方向)
p'	mm	スタッドの間隔 (鉄骨梁のフランジ幅方向)
Q	kN/m	デッキプレート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_T	kN/m	設計竜巻による単位幅あたりの荷重 ($=\text{Max} \{ \omega_{T1}, \omega_{T2} \}$)
ω_{T1}	kN/m	複合荷重 W_{T1} による単位幅あたりの荷重
ω_{T2}	kN/m	複合荷重 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)

3.2 評価対象部位

各施設の評価対象部位は、VI-3-別添 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、設定する。

評価対象部位は図 2-2～図 2-4 の通り。

(1) 貫通評価

設計荷重に対し、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、外部事象防護対象施設を内包する区画のうち外殻を構成する部材及び、施設屋外からの設計飛来物の侵入を考慮した各施設の屋内の床スラブ、内壁の中から最も厚みが薄い箇所を評価対象部位として設定することとし、原子炉建屋については屋上屋根スラブ及び 4 階 R7 通り内壁を、タービン建屋については海水熱交換器区域屋上屋根スラブ及び 1 階非常用電気品室南側内壁を評価対象部位として設定する。

評価においては、各施設の評価対象部位の最小厚さが、設計飛来物の貫通を生じない貫通限界厚さを上回ることを計算により確認する。

なお、評価対象部位のうち、設計飛来物の貫通を生じない貫通限界厚さを上回る旨を計算で確認出来ない原子炉建屋屋上屋根スラブ及びタービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブについては、衝突解析により評価を行う。

(2) 裏面剥離評価

設計荷重に対し、施設の外殻を構成する部材自体が、脱落により竜巻より防護すべき施設に波及的影響を与えない設計とするために、外殻を構成する部材及び、施設屋外からの設計飛来物の侵入を考慮した各施設の屋内の床スラブ、内壁のうち最も厚みが薄い箇所を評価対象部位として設定することとし、原子炉建屋については屋上屋根スラブ及び 4 階 R7 通り内壁を、タービン建屋については海水熱交換器区域屋上屋根スラブ及び 1 階非常用電気品室南側内壁を評価対象部位として設定する。

評価においては、各施設の評価対象部位の最小厚さが、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じない裏面剥離限界厚さを上回ることを計算により確認する。

なお、評価対象部位のうち、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じない裏面剥離限界厚さを上回る旨を計算で確認出来ない原子炉建屋屋上屋根スラブ及びタービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブについては、衝突解析により評価を行う。

(3) 変形評価

設計荷重に対して、外殻を構成する部材自体が外部事象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、設計荷重が直接作用し、防護すべき施設の外殻となる屋根スラブ及び外壁を評価することとし、屋根スラブについては、屋根スラブに生じる設計荷重は屋根スラブの自重と逆向きであることから、屋根スラブの自重が最小となる部位を代表とすることとし、タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブを評価対象部位として設定する。

ここで、屋根スラブの自重を表 3-4 に示す。

評価においては、保守的にコンクリートの剛性は考慮せず、デッキプレートのみを評価対象とし断面算定を行う。

また、気圧差による荷重は屋根スラブに作用し、スタッドに伝達されることから、スタッドを評価対象部位として設定するものとし、屋根スラブの支持にスタッドを用いる構造である原子炉建屋屋上屋根スラブについて評価を行う。

外壁については、原子炉建屋、タービン建屋の耐震壁を評価対象部位として設定し、タービン建屋については施設の外殻を構成する鉄骨架構も評価対象部位とする。

表 3-4 屋根スラブの自重

評価対象部位	スラブの厚さ (cm)	スラブの自重 (kN/m ²)
原子炉建屋 屋上屋根スラブ		6.7
タービン建屋 海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ		3.5

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、VI-3-別添 1-1「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」を踏まえて設定する。

(1) 荷重の設定

強度評価に用いる荷重は以下の荷重を用いる。荷重の算定に用いる竜巻の特性値を表 3-5 に示す。

表 3-5 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)
92	14	78	6400

a. 常時作用する荷重 (F_d)

常時作用する荷重 (F_d) は、部材の自重とする。

b. 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」(日本建築学会)に準拠して、次式のとおり算出する。

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

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

c. 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。

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

d. 設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)

設計飛来物による衝撃荷重 (W_M) は、表 3-6 に諸元を示す設計飛来物の衝突に伴う荷重とする。また、設計飛来物の材料定数を表 3-7 に示す。

貫通評価及び裏面剥離評価においては、考慮する設計飛来物として衝突断面あたりの運動エネルギーが最大となるよう、水平方向の衝突として鋼製足場板を、鉛直方向の衝突として足場パイプを設定し、各設計飛来物の衝撃荷重を考慮する。また、評価対象部位に各設計飛来物が衝突した際に跳ね返らず、貫入する物として評価する。

表 3-6 設計飛来物の諸元

設計飛来物	寸法 長さ×幅×奥行き (m)	質量 (kg)	水平方向の 飛来速度 (m/s)	鉛直方向の 飛来速度 (m/s)	運動エネルギー (kJ)	
					水平方向	鉛直方向
足場パイプ	4×0.05×0.05	11	42	38	10	8
鋼製足場板	4×0.25×0.04	14	55	18	21	3

表 3-7 設計飛来物の材料定数

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

(2) 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せについては、VI-3-別添 1-1「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」のとおり、設計飛来物による衝撃荷重，風圧力による荷重，気圧差による荷重及び常時作用する荷重を組み合わせる。荷重の組合せを表 3-8 に示す。

表 3-8 荷重の組合せ

評価内容	評価対象部位		設計飛来物の衝突方向	荷重の組合せ
貫通評価	Degen 式による評価			
	原子炉建屋	4 階 R7 通り内壁	水平	W_M
	タービン建屋	1 階非常用電気品室 南側内壁	水平	
	解析による評価			
	原子炉建屋	屋上屋根スラブ	鉛直	W_M
	タービン建屋	海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ	鉛直	
裏面剥離評価	Chang 式による評価			
	原子炉建屋	4 階 R7 通り内壁	水平	W_M
	タービン建屋	1 階非常用電気品室 南側内壁	水平	
	解析による評価			
	原子炉建屋	屋上屋根スラブ	鉛直	W_M
	タービン建屋	海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ	鉛直	
変形評価	力学における標準式による評価			
	原子炉建屋	屋上屋根スラブの スタッド	—	$W_P + F_d$
	タービン建屋	海水熱交換器区域 屋上屋根スラブの デッキプレート	—	
	地震応答解析モデルを用いた静的解析			
	原子炉建屋	耐震壁	水平	$W_w + 0.5W_P + W_M + F_d$
	タービン建屋	耐震壁	水平	
		鉄骨架構	水平	

注： W_w ：風圧力による荷重

W_P ：気圧差による荷重

W_M ：設計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

竜巻より防護すべき施設を内包する施設の許容限界は、VI-3-別添 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。

3.4.1 貫通評価

貫通評価のうち、式による評価の許容限界は評価対象部位の最小厚さとした。表 3-9 に設定した許容限界を示す。

表 3-9 貫通評価の許容限界（式による評価）

評価対象部位		許容限界 (cm)
原子炉建屋	4階 R7 通り内壁	25
タービン建屋	1階非常用電気品室南側内壁	30

貫通評価のうち、式により算定する貫通限界厚さが最小部材厚さを上回る場合における、解析による評価の許容限界を表 3-10 に示す。

表 3-10 貫通評価の許容限界（解析による評価）

評価対象部位		材質	許容限界
			鋼材の破断ひずみ ($\times 10^{-6}$)
原子炉建屋 屋上屋根スラブ	鉄筋	SD345	
タービン建屋 海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ	デッキプレート	SDP2	

設計飛来物が屋根スラブへ直接衝突する場合の貫通評価における許容限界は、鋼材の破断ひずみを基本として設定する。破断ひずみについては、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2.1(1) 許容限界の設定」に示すとおり、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、NEI07-13においてTF(多軸性係数)を□とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF=□を考慮して設定する。

3.4.2 裏面剥離評価

裏面剥離評価の許容限界のうち、式による評価の許容限界は貫通評価の許容限界と同じであり、表 3-9 の通り。

式により算定する裏面剥離限界厚さが最小部材厚さを上回る場合における、解析による評価の許容限界を表 3-11 に示す。

表 3-11 裏面剥離評価の許容限界（解析による評価）

評価対象部位		材質	許容限界
			鋼材の破断ひずみ ($\times 10^{-6}$)
原子炉建屋 屋上屋根スラブ	デッキプレート	SDP2	□
タービン建屋 海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ	デッキプレート	SDP2	

設計飛来物が屋根スラブへ直接衝突する場合の裏面剥離評価における許容限界は、鋼材の破断ひずみを基本として設定する。破断ひずみについては、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2.1(1) 許容限界の設定」に示すとおり、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、NEI07-13においてTF(多軸性係数)を□とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF=□を考慮して設定する。

3.4.3 変形評価

変形評価の許容限界を表 3-12 に示す。

表 3-12 変形評価の許容限界

評価対象部位		許容限界	
		項目	数値
原子炉建屋 屋上屋根スラブ	スタッド	各種合成構造設計指針 に基づく許容耐力	19.0 (kN)
タービン建屋 海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ	デッキプレート	J I S 及び鋼構造設計 規準に基づく 短期許容応力度	曲げ : 235 (N/mm ²) せん断 : 135 (N/mm ²)
原子炉建屋	耐震壁	最大せん断ひずみ	2.0×10^{-3}
タービン建屋	耐震壁	最大せん断ひずみ	2.0×10^{-3}
	鉄骨架構	最大層間変形角	1/120*

注記* : 2015 年版建築物の構造関係技術基準解説書 (国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所) (以下「技術基準解説書」という。) により設定。

3.5 評価方法

竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度評価は、VI-3-別添 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」を踏まえて、衝突評価として貫通評価を実施し、構造強度評価として裏面剥離評価、変形評価を実施する。

3.5.1 貫通評価

(1) 式による評価

設計飛来物が各施設に衝突する場合の貫通限界厚さを、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。

Degen 式を以下に示す。

$1.52 \leq X/d \leq 13.42$ の場合

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

$X/d \leq 1.52$ の場合

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

修正 NDRC 式を以下に示す。

$X/d \leq 2.0$ の場合

$$X/d = 2 \left\{ \left(12145 / \sqrt{F_c} \right) \cdot N \cdot d^{0.2} \cdot D \cdot (V/1000)^{1.8} \right\}^{0.5}$$

$X/d \geq 2.0$ の場合

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

(2) 屋根スラブに対する衝突解析

設計飛来物に対して、Degen 式による貫通限界厚さを満足しない原子炉建屋屋上屋根スラブ、タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブについては、設計飛来物による衝撃荷重 W_M を考慮し、3次元 FEM モデルを用いた衝突解析により屋根スラブ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。鉄筋が敷設されていないタービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブについては、デッキプレート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。

なお、風圧力による荷重 W_w 及び気圧差による荷重 W_p については、衝撃荷重と逆方向に作用するため、保守的に考慮せず、設計飛来物の衝突により発生する応力に対して、部材の自重による応力は極めて小さいことから常時作用する荷重 F_d は考慮しない。

衝突解析には、解析コード「ABAQUS」を用いる。

a. 解析モデル及び諸元

(a). 原子炉建屋屋上屋根スラブ

原子炉建屋屋上屋根スラブの解析モデル化の範囲は、想定する荷重の伝達を考慮し、スラブを構成するコンクリート、鉄筋及びデッキプレートとする。コンクリートはソリッド要素でモデル化し、鉄筋を棒要素、デッキプレートをシェル要素でモデル化する。なお、デッキプレートはコンクリートと固着とする。原子炉建屋屋上屋根スラブの解析モデルの境界条件を表 3-13 に、解析モデル図を図 3-1 に示す。

表 3-13 解析モデルの境界条件（原子炉建屋屋上屋根スラブ）

項目		境界条件
原子炉建屋屋上屋根スラブ	屋根スラブ 端部	X, Y, Z 方向並進拘束

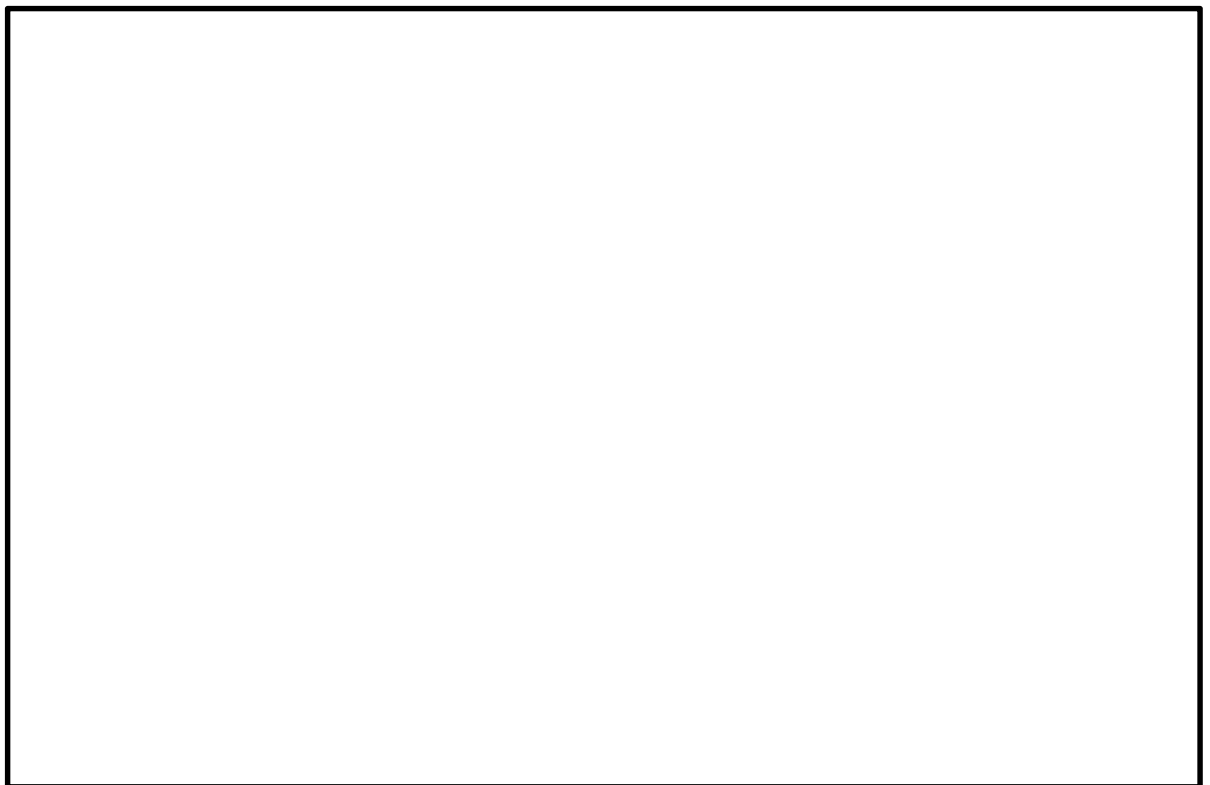


図 3-1 原子炉建屋屋上屋根スラブの解析モデル図

(b). タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブ

タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブの解析モデル化の範囲は、想定する荷重の伝達を考慮し、スラブを構成するコンクリート及びデッキプレートとする。鉄筋は敷設されていないため考慮しない。コンクリートはソリッド要素でモデル化し、デッキプレートはシェル要素でモデル化の上、コンクリートと固着とする。タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブの解析モデルの境界条件を表 3-14 に、解析モデル図を図 3-2 に示す。

表 3-14 解析モデルの境界条件（タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブ）

項目		境界条件
タービン建屋海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ	屋根スラブ 端部	X, Y, Z 方向並進拘束

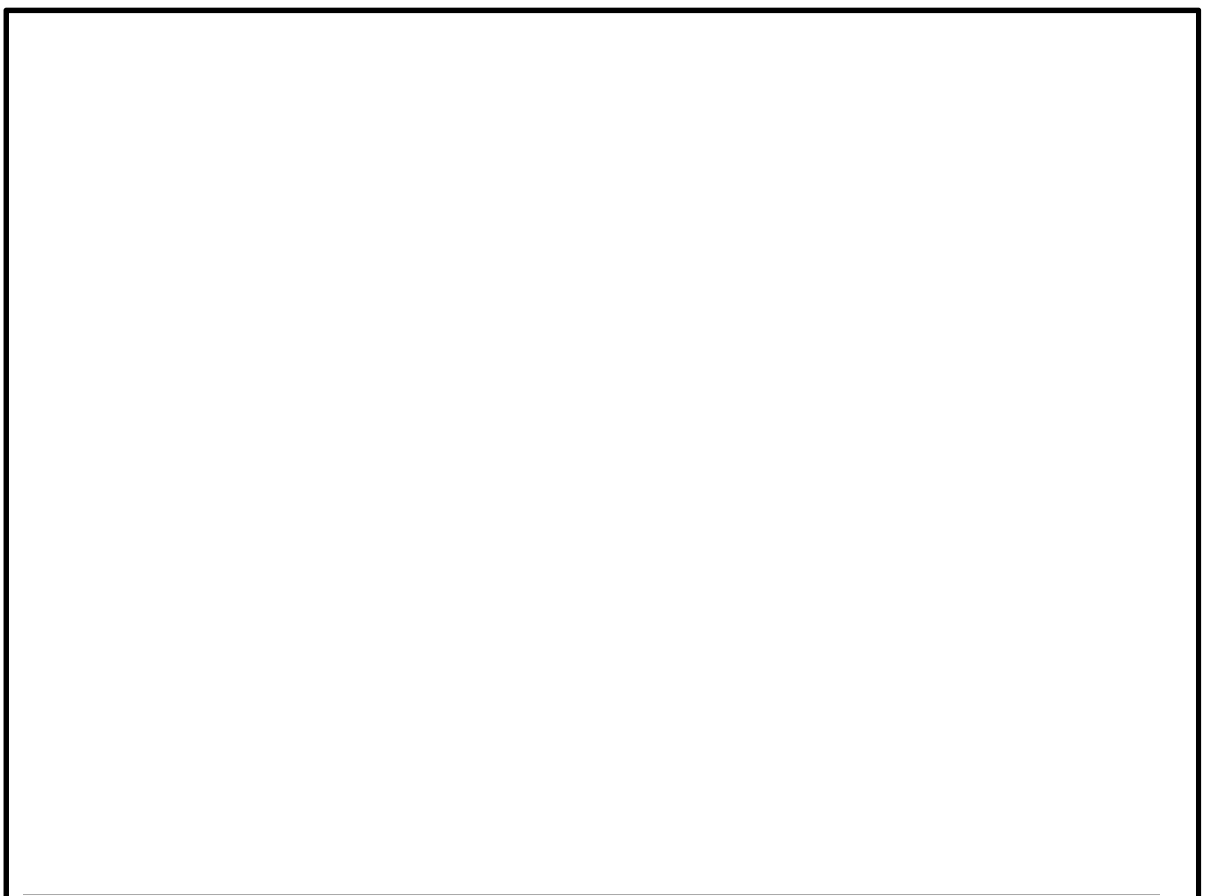


図 3-2 タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブの解析モデル図

(c) 設計飛来物

設計飛来物である足場パイプは、シェル要素でモデル化し、要素サイズ 10mm を基本とし分割する。衝突面から近い部分の要素サイズを細かくし、衝突面から離れた部分の要素サイズを順次粗くする。

設計飛来物の解析モデル図を図 3-3 に示す。

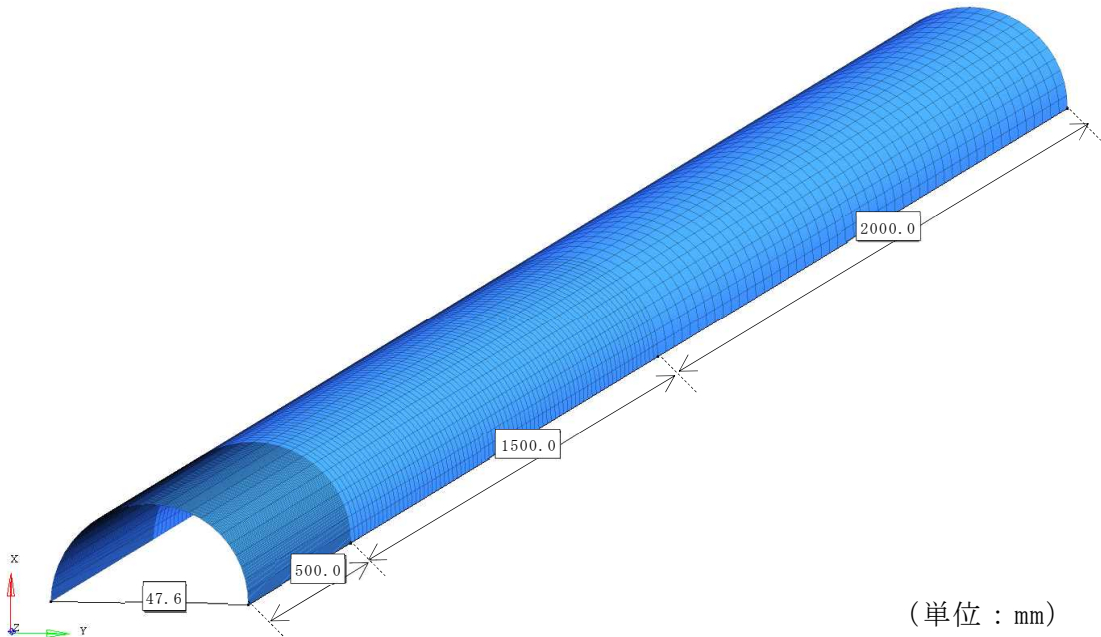


図 3-3 設計飛来物の解析モデル図 (足場パイプ 1/2 モデル)

b. 材料定数

コンクリート、鉄筋、デッキプレートの材料定数をそれぞれ表 3-15～表 3-17 に示す。設計飛来物の材料定数については、「3.3 荷重及び荷重の組合せ」の表 3-7 に示すとおり設定する。

表 3-15 コンクリートの材料定数

種類	評価対象部位	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (MPa)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)
軽量 コンクリート	原子炉建屋 屋上屋根スラブ	22.0	13600	0.2	16.67
	タービン建屋 海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ	13.2	9800	0.2	16.67

表 3-16 鉄筋の材料定数

種類	降伏応力 (N/mm ²)	ヤング係数 (MPa)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)
SD345	345	205000	0.3	77.0

表 3-17 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 (MPa)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)
SDP2	235	205000	0.3	77.0

c. 材料の非線形特性

コンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮強度到達後に普通コンクリートと比較して脆性的な破壊性状を示す軽量コンクリートの特性を踏まえ、圧縮強度以降はヤング係数と同等の負勾配によって線形に軟化をする 2 折れ線近似とする。なお、圧縮強度に動的増加率は考慮しない。

鋼製部材である鉄筋の応力-ひずみ関係は、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「3.4 許容限界」にて示した T F (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。鉄筋の動的増加率は、NEI07-13 に基づく値 (降伏応力: , 引張強度:) とする。なお、デッキプレートについては保守的にひずみ速度効果による耐力上昇は考慮しない。

鉄筋、デッキプレートの破断ひずみは、J I S に規定されている伸びの下限值を基に設定する。また、NEI07-13 において T F (多軸性係数) を とすることが推奨されていることを踏まえ、鉄筋、デッキプレートの破断相当ひずみは $T F = \text{$ とする。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、 $T F = \text{$ 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強度をそれぞれ表 3-18 及び表 3-19 に示す。

表 3-18 コンクリートの圧縮及び引張強度

評価対象部位	設計基準強度 (kgf/cm ²)	材料モデル	
		圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
原子炉建屋 屋上屋根スラブ	225		
タービン建屋 海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ	135		

表 3-19 鉄筋，デッキプレート，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					
デッキ プレート	SDP2					
足場パイプ	STK500					

コンクリートの圧縮応力-ひずみ関係，引張応力-ひび割れ幅関係，鉄筋，デッキプレート及び設計飛来物（足場パイプ）の応力-ひずみ関係をそれぞれ図 3-4～図 3-8 に示す。

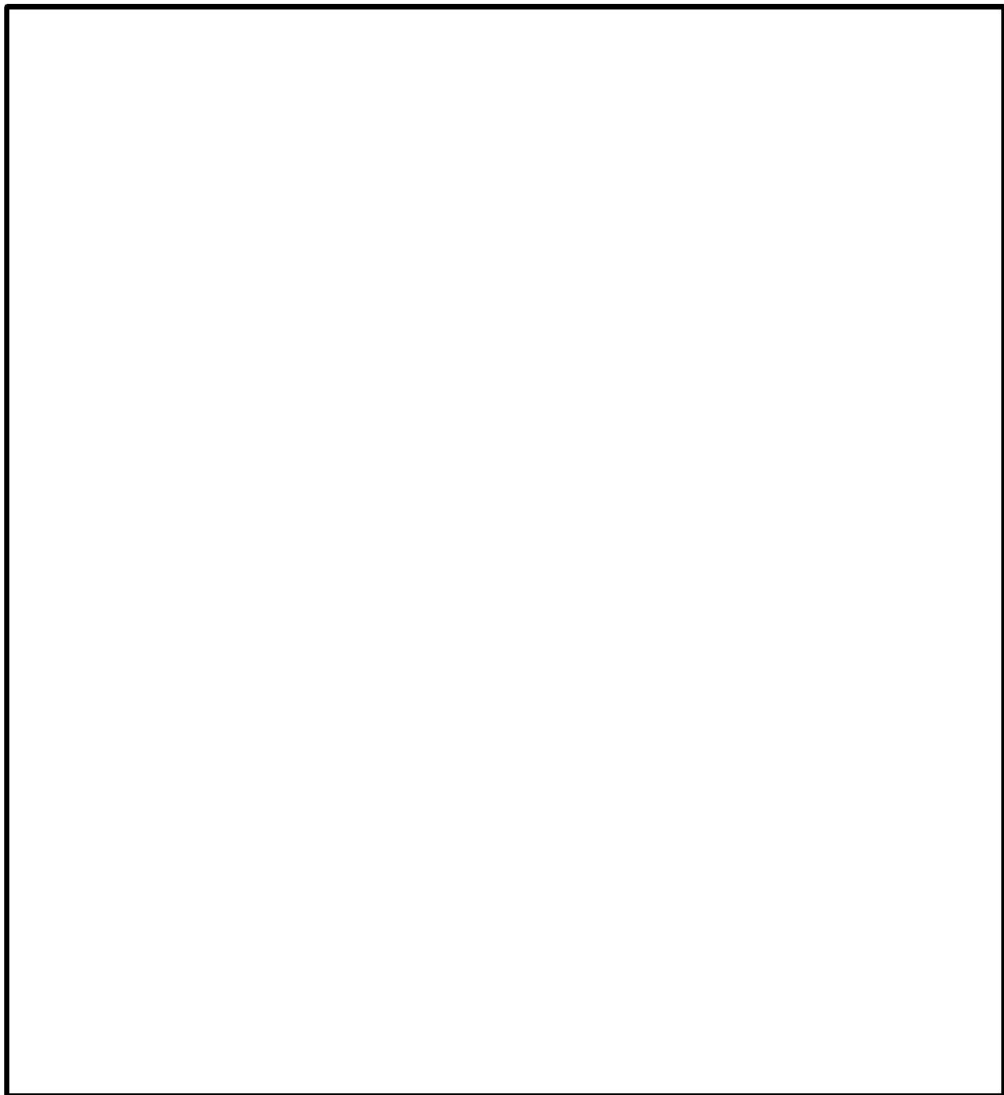


図 3-4 応力-ひずみ/ひび割れ幅関係
(原子炉建屋屋上屋根スラブコンクリート)

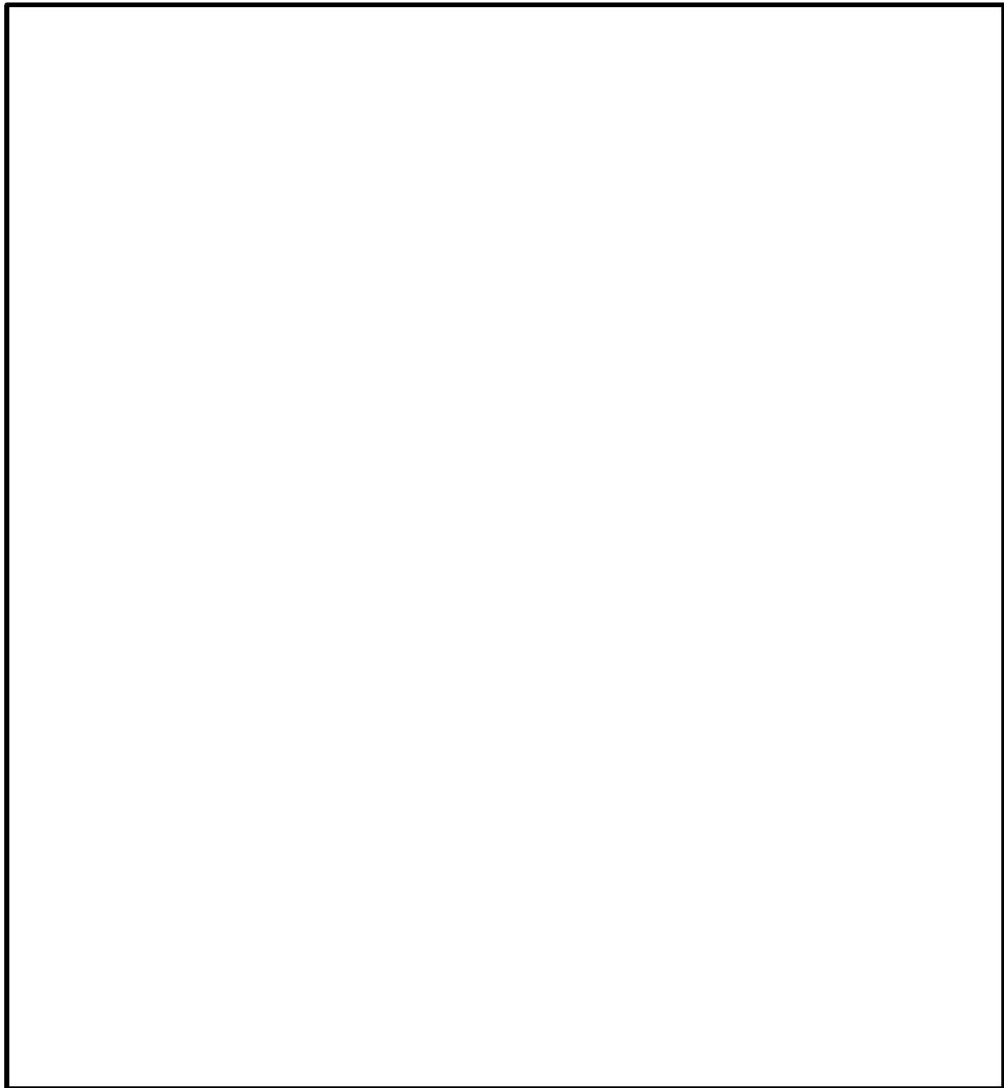


図 3-5 応力-ひずみ/ひび割れ幅関係
(タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブコンクリート)

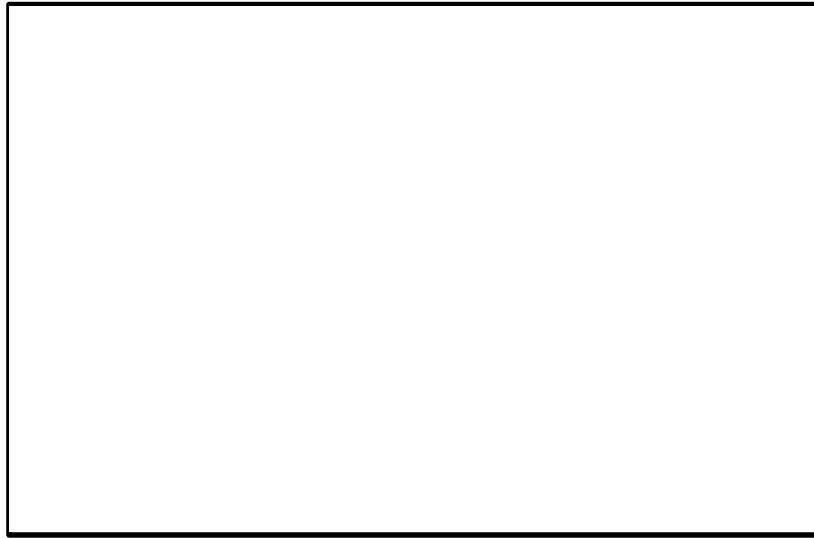


図 3-6 応力-ひずみ関係 (鉄筋)

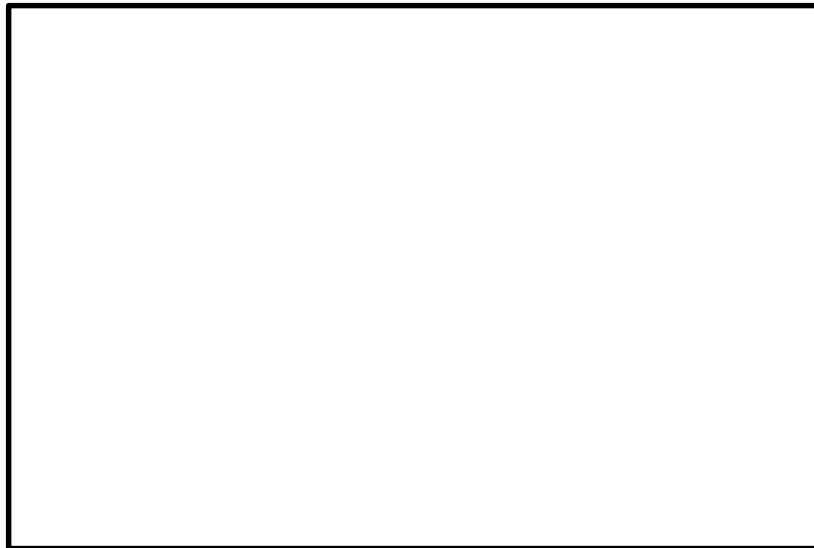


図 3-7 応力-ひずみ関係 (デッキプレート)



図 3-8 応力-ひずみ関係 (足場パイプ)

d. ひずみ速度効果

竜巻による設計飛来物に対する解析は、衝撃問題で変形速度が大きいため、ひずみ速度効果を考慮することとし、以下に示す Cowper-Symonds の式を適用する。

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

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

ひずみ速度依存性パラメータを表 3-20 に示す。

表 3-20 ひずみ速度依存性パラメータ

材料	足場パイプ
材料	STK500
C (s ⁻¹)	<div style="border: 2px solid black; width: 100px; height: 20px;"></div>
P	<div style="border: 2px solid black; width: 100px; height: 20px;"></div>

3.5.2 裏面剥離評価

(1) 式による評価

設計飛来物が各施設に衝突する場合の裏面剥離限界厚さを、NEI07-13 に示されている Chang 式を用いて算定する。

Chang 式を以下に示す。

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

(2) 屋根スラブに対する衝突解析

設計飛来物に対して、Chang 式による裏面剥離限界厚さを満足しない原子炉建屋屋上屋根スラブ、タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブについては、設計飛来物による衝撃荷重 W_M を考慮し、貫通評価と同じ 3 次元 FEM モデルを用

いた衝突解析により屋根スラブのデッキプレート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。

なお、風圧力による荷重 W_w 及び気圧差による荷重 W_p については、衝撃荷重と逆方向に作用するため、保守的に考慮せず、設計飛来物の衝突により発生する応力に対して、部材の自重による応力は極めて小さいことから常時作用する荷重 F_d は考慮しない。

衝突解析に使用する解析コード、解析モデル及び諸元、材料定数、材料の非線形特性、ひずみ速度効果は貫通評価における設定に同じ。

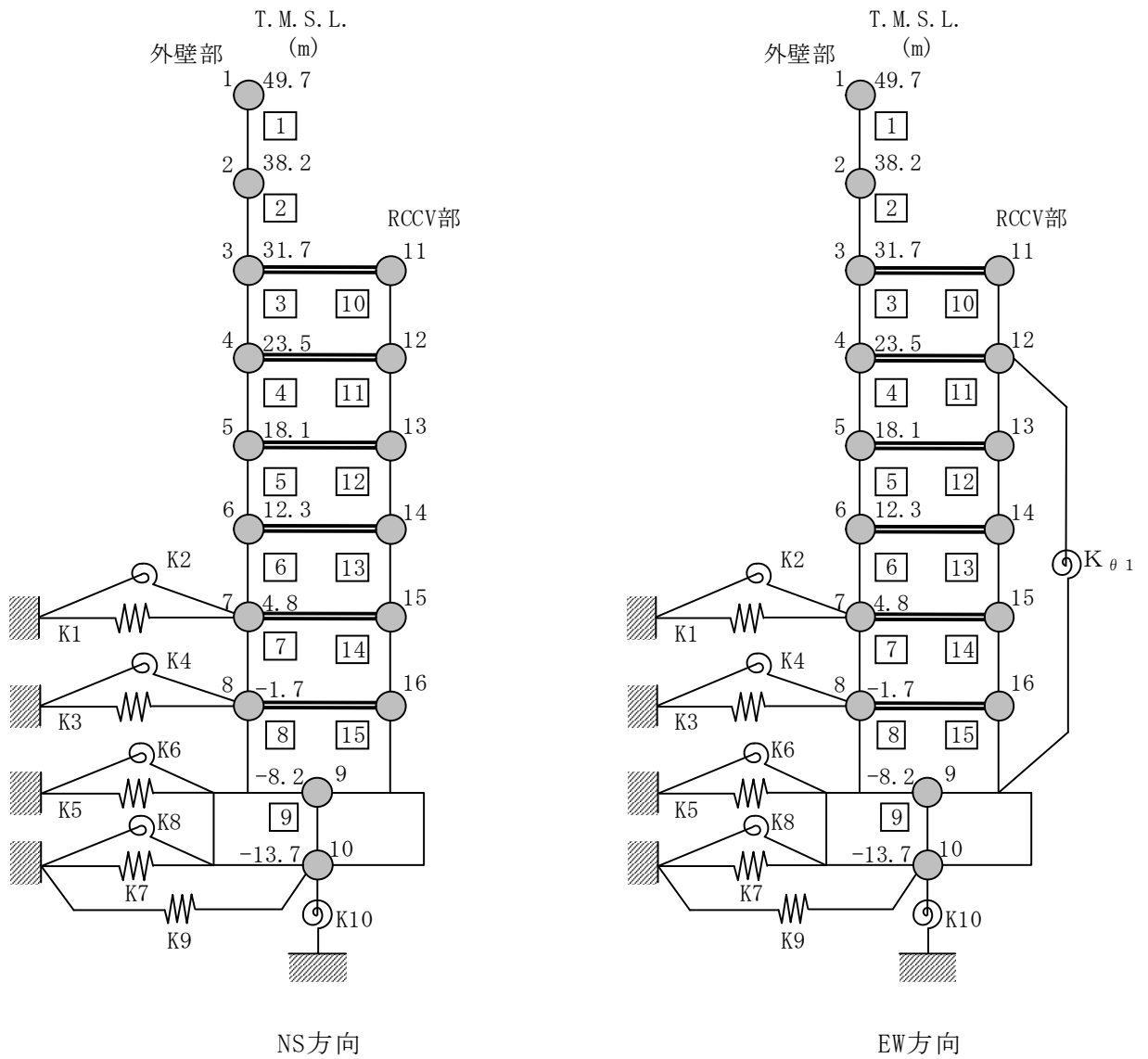
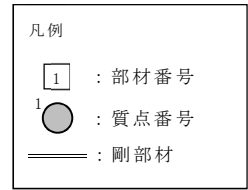
3.5.3 変形評価

(1) 耐震壁及び鉄骨架構

原子炉建屋、タービン建屋の耐震壁に生じるひずみとタービン建屋の鉄骨架構に生じる変形は、設計荷重による建屋のせん断スケルトン曲線（ $\tau - \gamma$ 関係）を用いて算定する。

原子炉建屋、タービン建屋の地震応答解析モデル図を図3-9～図3-10に、 $\tau - \gamma$ 関係を表3-21～表3-24に示す。

原子炉建屋、タービン建屋の地震応答解析モデル図及び $\tau - \gamma$ 関係はVI-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」、VI-2-2-5「タービン建屋の地震応答計算書」に示すとおり。



注：K $_{\theta 1}$ は RCCV 回転ばねを示す。

図 3-9 原子炉建屋の地震応答解析モデル図
(VI-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」より抜粋)

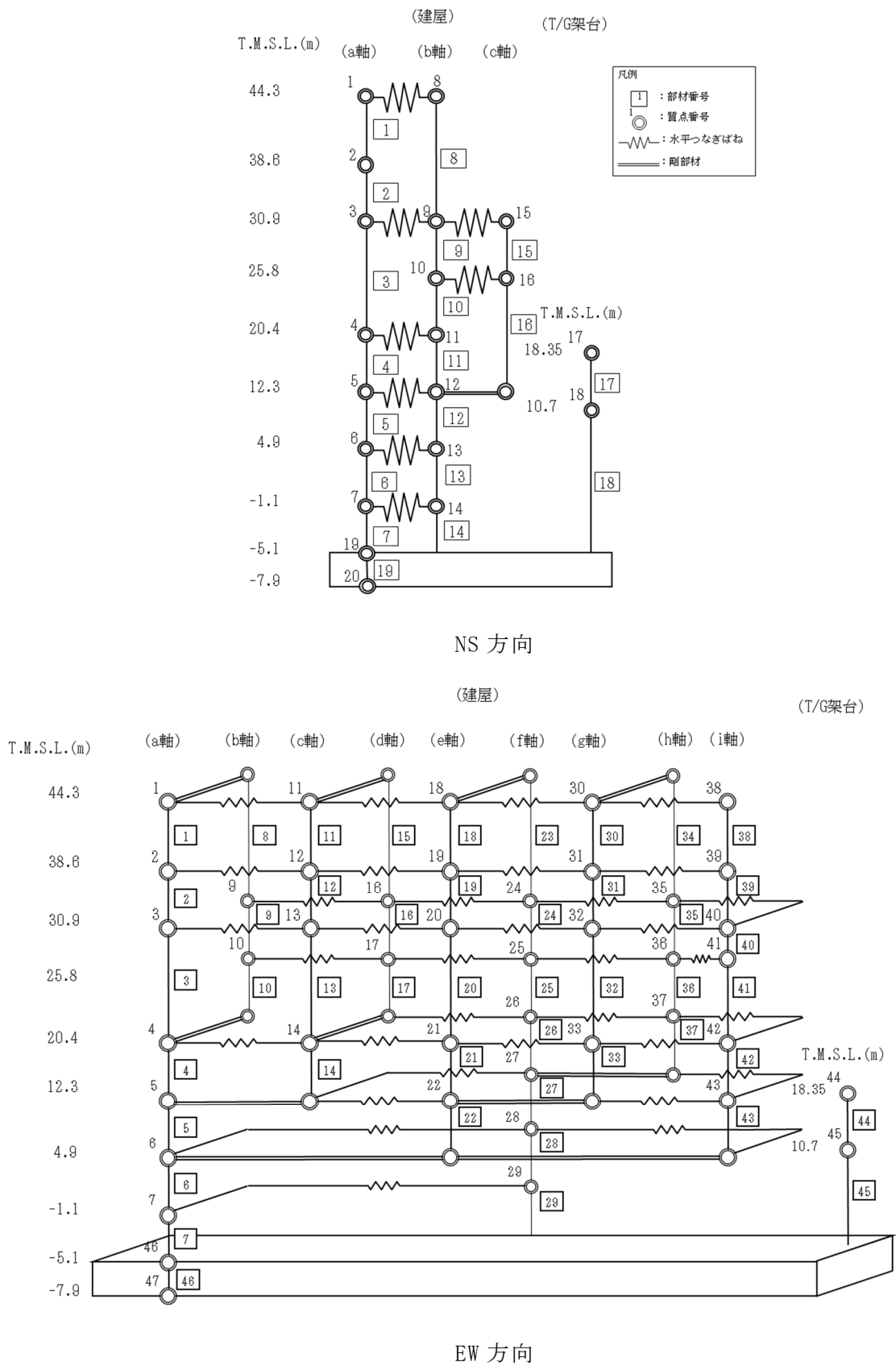


図 3-10 タービン建屋の地震応答解析モデル図
(VI-2-2-5「タービン建屋の地震応答計算書」より抜粋)

表 3-21 原子炉建屋のせん断スケルトン曲線 ($\tau - \gamma$ 関係) (NS 方向)

部材 番号	第1折点		第2折点		終局点	
	τ_1 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	τ_2 (N/mm ²)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	τ_3 (N/mm ²)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
1	2.38	0.198	3.21	0.597	6.87	4.00
2	2.35	0.196	3.17	0.589	6.46	4.00
3	2.33	0.194	2.87	0.605	4.89	4.00
4	2.45	0.204	3.26	0.621	6.70	4.00
5	2.44	0.204	3.14	0.632	6.35	4.00
6	2.57	0.214	3.40	0.655	6.93	4.00
7	2.66	0.222	3.55	0.674	7.34	4.00
8	2.66	0.222	3.48	0.689	6.99	4.00

表 3-22 原子炉建屋のせん断スケルトン曲線 ($\tau - \gamma$ 関係) (EW 方向)

部材 番号	第1折点		第2折点		終局点	
	τ_1 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	τ_2 (N/mm ²)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	τ_3 (N/mm ²)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
1	2.44	0.203	3.29	0.611	6.54	4.00
2	2.40	0.200	3.24	0.601	6.65	4.00
3	2.49	0.208	3.35	0.627	6.53	4.00
4	2.40	0.200	3.14	0.611	6.26	4.00
5	2.41	0.201	3.14	0.616	6.50	4.00
6	2.49	0.207	3.28	0.633	6.89	4.00
7	2.56	0.213	3.38	0.653	7.09	4.00
8	2.56	0.213	3.29	0.670	6.61	4.00

表 3-23 タービン建屋のせん断スケルトン曲線 ($\tau - \gamma$ 関係) (NS 方向)

部材 番号	第1折点		第2折点		終局点	
	τ_1 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	τ_2 (N/mm ²)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	τ_3 (N/mm ²)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
3	2.31	0.192	3.02	0.550	3.97	4.00
4	2.15	0.180	2.72	0.552	3.84	4.00
5	2.56	0.213	3.38	0.559	4.87	4.00
6	2.55	0.213	3.29	0.587	4.60	4.00
7	2.50	0.208	3.23	0.516	4.61	4.00
9	2.77	0.231	3.74	0.530	5.00	4.00
10	2.34	0.195	3.16	0.535	4.48	4.00
11	1.90	0.159	2.57	0.537	3.26	4.00
12	2.58	0.215	3.47	0.542	5.38	4.00
13	2.57	0.214	3.41	0.568	4.80	4.00
14	2.57	0.214	3.32	0.584	3.77	4.00

表 3-24 タービン建屋のせん断スケルトン曲線 ($\tau - \gamma$ 関係) (EW 方向)

部材 番号	第1折点		第2折点		終局点	
	τ_1 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	τ_2 (N/mm ²)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	τ_3 (N/mm ²)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
3	2.40	0.200	3.24	0.564	4.70	4.00
4	2.26	0.189	3.06	0.566	6.19	4.00
5	2.45	0.204	3.11	0.538	4.80	4.00
6	2.41	0.201	3.03	0.598	4.52	4.00
7	2.44	0.204	3.05	0.613	4.29	4.00
9	2.31	0.193	3.12	0.534	4.92	4.00
10	2.50	0.209	3.38	0.546	6.73	4.00
13	2.61	0.217	3.47	0.555	4.03	4.00
14	2.47	0.205	3.33	0.548	4.49	4.00
16	3.27	0.273	4.42	0.529	5.52	4.00
17	2.70	0.225	2.71	0.675	2.75	4.00
20	1.73	0.144	2.15	0.556	2.15	4.00
21	2.39	0.199	2.44	0.576	2.44	4.00
22	2.83	0.236	3.17	0.565	3.17	4.00
24	1.87	0.156	2.53	0.531	4.00	4.00
25	2.05	0.171	2.77	0.545	3.49	4.00
26	1.96	0.163	2.64	0.554	2.94	4.00
27	2.47	0.206	3.33	0.540	4.36	4.00
28	2.70	0.225	3.62	0.549	4.34	4.00
29	3.22	0.268	4.35	0.583	4.99	4.00
32	1.44	0.120	1.73	0.547	1.76	4.00
33	3.34	0.278	3.75	0.639	3.75	4.00
35	1.87	0.156	2.52	0.529	4.00	4.00
36	2.03	0.169	2.74	0.545	3.49	4.00
37	2.95	0.246	3.99	0.554	4.52	4.00
40	2.66	0.222	3.52	0.549	6.46	4.00
41	2.16	0.180	2.87	0.533	5.12	4.00
42	2.36	0.197	3.04	0.526	5.03	4.00
43	2.42	0.201	3.07	0.600	5.42	4.00

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、建屋の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。

また、設計飛来物による衝撃荷重 W_M は、各建屋の最上部に加える。ここで、地震応答解析モデルが多軸モデルの場合には、各軸の最上部の質点に W_M を加え評価を行うものとし、次式の設計飛来物による衝撃荷重の算定式によって算出した運動エネルギーが最大となる鋼製足場板の衝撃荷重 $W_M=1100\text{kN}$ を用いて評価を行う。

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

(2) 屋根スラブ

a. スタッド

原子炉建屋屋上屋根スラブについて、気圧差による荷重 W_P によりスタッドに生じる引張力を算定し、許容限界を超えないことを確認する。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。

スタッドに発生する引張力 T の算定式を以下に示す。また、スタッドに作用する荷重の概要を図 3-11 に示す。

スタッド 1 本あたりの発生引張力

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

ここで、 $Q = \frac{\omega_T \cdot L}{2}$

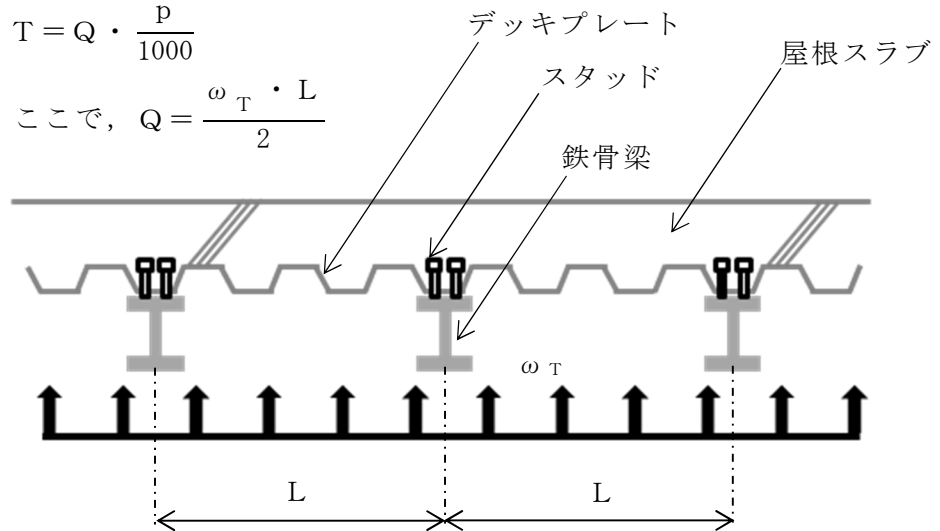


図 3-11 スタッドに作用する荷重の概要

スタッドの許容引張力は、各種合成構造設計指針・同解説に準拠し、スタッドの降伏により定まる場合の許容引張力 p_{a1} 、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許容引張力 p_{a2} 、コンクリートの支圧破壊により定まる場合の許容引張力 p_{a3} のうち、最も小さい値とする。スタッドの許容引張力 p_a の算定式を以下に示す。

$$p_a = \text{Min} \{ p_{a1}, p_{a2}, p_{a3} \}$$

ここで、

$$p_{a1} = \Phi_1 \cdot s \cdot \sigma_{pa} \cdot a_c a$$

$$p_{a2} = \Phi_2 \cdot c \cdot \sigma_t \cdot A_c$$

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

b. デッキプレート

タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブについて、気圧差による荷重 W_p 及び常時作用する荷重 F_d によりデッキプレートに発生する曲げモーメント及びせん断力を算定し、許容限界を超えないことを確認する。評価は、デッキプレートを支持する梁位置を支持点とした二連梁として行う。デッキプレートに発生する曲げモーメント M 及びせん断力 Q の算定式を以下に示す。また、デッキプレートに作用する荷重の概要を図 3-12 に示す。

デッキプレートに発生する単位幅あたりの曲げモーメント

$$M = \text{Max} \{ M_1, M_2 \}$$

ここで、

$$M_1 = \frac{9}{128} (\omega_T - \omega_d) \cdot L^2$$

$$M_2 = \frac{1}{8} (\omega_T - \omega_d) \cdot L^2$$

デッキプレートに発生する単位幅あたりのせん断力

$$Q = \frac{5}{4} (\omega_T - \omega_d) \cdot L$$

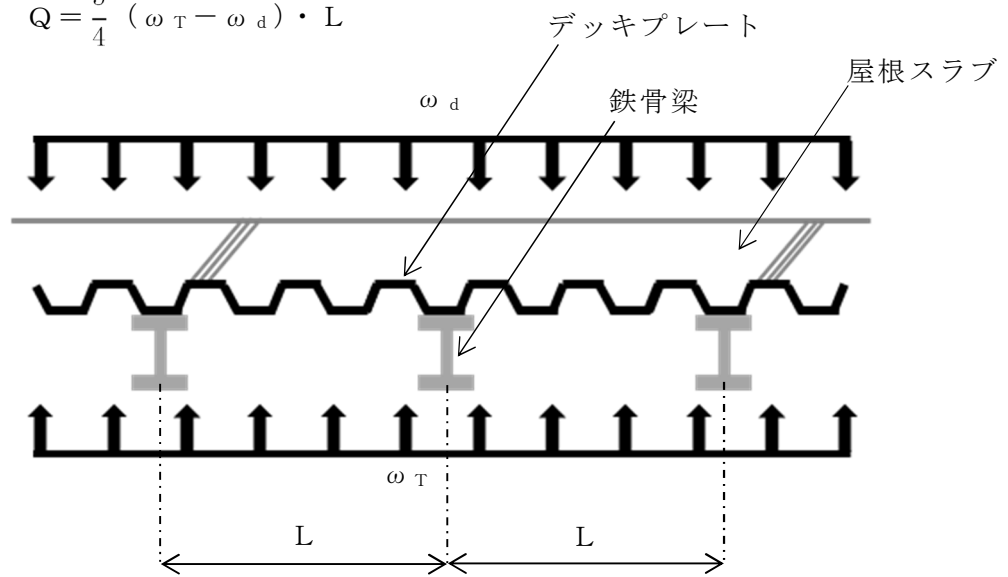


図 3-12 デッキプレートに作用する荷重の概要

許容限界であるデッキプレートの短期許容応力度は、JIS及び鋼構造設計規準に基づき算定する。

4. 評価条件

4.1 貫通評価

4.1.1 式による評価

貫通評価において、各施設の壁，スラブの貫通評価式に用いる条件を表 4-1 に示す。

表 4-1 貫通評価に用いる入力値

記号	単位	定義		数値
D	kgf/cm ³	設計飛来物直径密度 ($D = W / d^3$)		鋼製足場板 : 9.75×10^{-3} 足場パイプ : 8.80×10^{-2}
d	cm	設計飛来物直径		鋼製足場板 : 11.28 足場パイプ : 5.00
F _c	kgf/cm ²	コンクリートの設計基準強度		330
N	—	設計飛来物の形状係数		鋼製足場板 : 1.14 足場パイプ : 1.14
V	m/s	壁面	設計飛来物の衝突速度 (水平)	55* ¹
		屋根	設計飛来物の衝突速度 (鉛直)	38* ²
W	kgf	設計飛来物重量		鋼製足場板 : 14 足場パイプ : 11
α _e	—	低減係数		1.0

注記*1 : 水平方向の貫通限界厚さが大きくなる鋼製足場板の衝突速度。

*2 : 鉛直方向の貫通限界厚さが大きくなる足場パイプの衝突速度。

4.1.2 屋根スラブに対する衝突解析

屋根スラブの貫通評価における衝突解析は、屋根スラブの最大変形が生じると想定される評価対象の中央部に衝突するケースを設定する。

解析ケースを表 4-2 及び図 4-1～図 4-2 に示す。

表 4-2 解析ケース

評価対象	設計飛来物	衝突箇所	設計飛来物の衝突方向	対象部材
原子炉建屋 屋上屋根スラブ	足場 パイプ	中央部	鉛直	コンクリート (厚さ <input type="text"/>) 鉄筋 (D13@100)
タービン建屋 海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ	足場 パイプ	中央部	鉛直	コンクリート (厚さ <input type="text"/>)

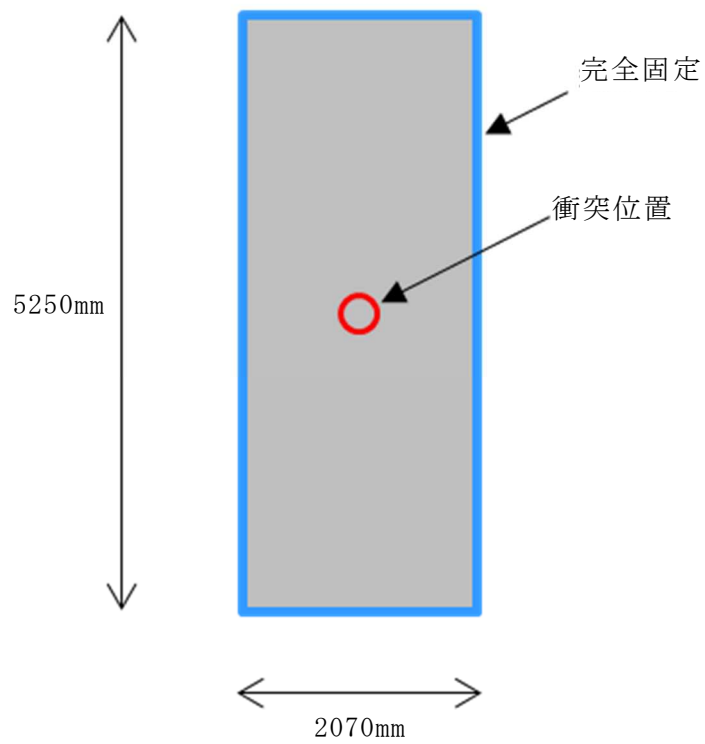


図 4-1 解析ケース (原子炉建屋屋上屋根スラブ)

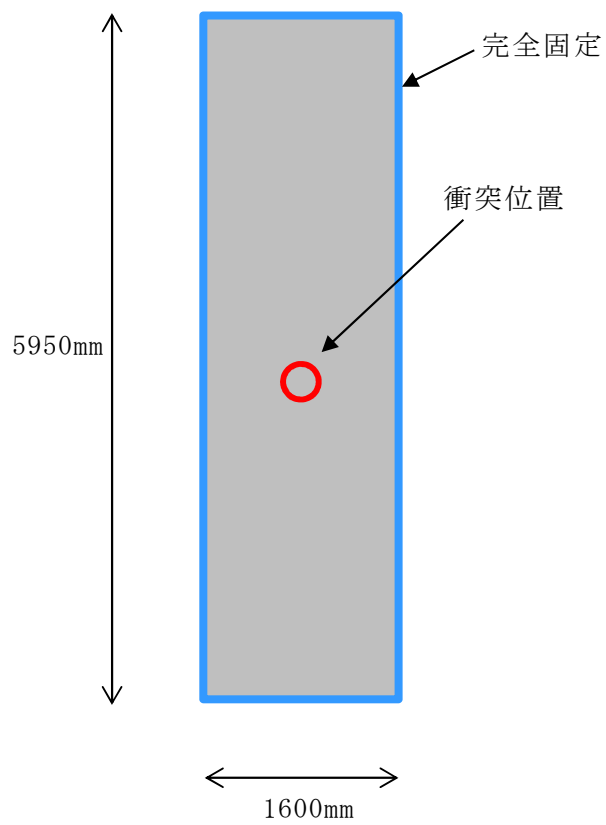


図 4-2 解析ケース (タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブ)

4.2 裏面剥離評価

4.2.1 式による評価

裏面剥離評価において、各施設の壁、スラブの裏面剥離評価式に用いる条件を表 4-3 に示す。

表 4-3 裏面剥離評価に用いる入力値

記号	定義		数値	単位
d	設計飛来物直径		鋼製足場板：11.28 足場パイプ：5.00	cm
f_c'	コンクリートの設計基準強度		330	kgf/cm ²
V	壁面	設計飛来物の衝突速度（水平）	55* ¹	m/s
	屋根	設計飛来物の衝突速度（鉛直）	38* ²	
V_0	飛来物基準速度		鋼製足場板：60.96 足場パイプ：60.96	m/s
W	設計飛来物重量		鋼製足場板：14 足場パイプ：11	kgf
α_s	低減係数		1.0	—

注記*1：水平方向の裏面剥離限界厚さが大きくなる鋼製足場板の衝突速度。

*2：鉛直方向の裏面剥離限界厚さが大きくなる足場パイプの衝突速度。

4.2.2 屋根スラブに対する衝突解析

屋根スラブの裏面剥離評価における衝突解析は、屋根スラブの最大変形が生じると想定される評価対象の中央部に衝突するケースを設定する。

解析ケースは貫通評価と同じであり、表 4-2 及び図 4-1、図 4-2 の通り。

4.3 変形評価

4.3.1 耐震壁及び鉄骨架構

原子炉建屋、タービン建屋の耐震壁及びタービン建屋の鉄骨架構の変形評価に用いる条件を表 4-4～表 4-6 に示す。

なお、風力係数は風上、風下の質点の差異に関わらず、保守的に同じ値を用いるものとし、風力係数の設定方針の概念を図 4-3 に示す。

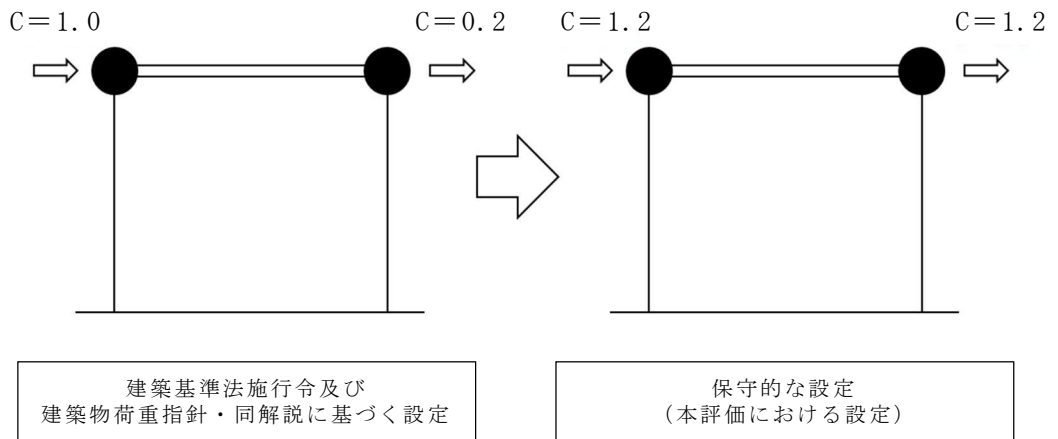


図 4-3 風力係数の設定方針の概念

表 4-4 設計飛来物による衝撃荷重の評価条件

記号	定義	数値	単位
L_1	設計飛来物の最も短い辺の全長	0.04	m
m	設計飛来物質量	14	kg
V	設計飛来物の衝突速度 (水平)	55	m/s

表 4-5 原子炉建屋の変形評価の評価条件

T. M. S. L. (m)	位置	風力係数 C	受圧面積 A (m^2)	
			NS 方向	EW 方向
43.95~50.89	風上	1.2	414	271
	風下	1.2		
34.95~43.95	風上	1.2	538	474
	風下	1.2		
27.60~34.95	風上	1.2	446	421
	風下	1.2		
20.80~27.60	風上	1.2	411	406
	風下	1.2		
15.20~20.80	風上	1.2	369	366
	風下	1.2		
12.00~15.20	風上	1.2	211	209
	風下	1.2		

表 4-6 タービン建屋の変形評価の評価条件

T. M. S. L. (m)	位置	風力係数 C	受圧面積 A (m ²)	
			NS 方向	EW 方向
41.45～45.98	風上	1.2	262	452
	風下	1.2		
34.75～41.45	風上	1.2	380	650
	風下	1.2		
28.35～34.75	風上	1.2	500	621
	風下	1.2		
23.10～28.35	風上	1.2	433	509
	風下	1.2		
16.35～23.10	風上	1.2	570	657
	風下	1.2		
12.00～16.35	風上	1.2	375	427
	風下	1.2		

4.3.2 屋根スラブ

(1) スタッド

原子炉建屋屋上屋根スラブのスタッドの変形評価に用いる条件を表 4-7 に示す。

表 4-7 スタッドの評価条件

記号	定義	数値	単位
A_c	コーン状破壊面の有効投影面積	21771	mm^2
A_o	スタッド頭部の支圧面積	459	mm^2
$a_c a$	スタッドの断面積で、 軸部断面積とねじ部有効断面積の小なる方の値	201	mm^2
D	スタッドの頭部直径	29	mm
d	スタッドの軸部直径	16	mm
F_c	コンクリートの設計基準強度	22.0	N/mm^2
f_n	コンクリートの支圧強度	132	N/mm^2
l_e	スタッドのコンクリート内への有効埋込み長さ	70	mm
p_a	スタッド 1 本あたりの許容引張力	19.0	kN
p_{a1}	スタッド鋼材の降伏により定まる場合の スタッド一本あたりの許容引張力	47.2	kN
p_{a2}	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 スタッド 1 本あたりの許容引張力	19.0	kN
p_{a3}	コンクリートの支圧破壊により定まる スタッド 1 本あたりの許容引張力	60.6	kN
$c \sigma_t$	コーン状破壊に対するコンクリートの引張強度	1.31	N/mm^2
$s \sigma_{pa}$	スタッドの引張強度	235	N/mm^2
$s \sigma_y$	スタッドの規格降伏点強度	235	N/mm^2
Φ_1	低減係数	1.0	—
Φ_2	低減係数	0.667	—
p	スタッドの間隔（鉄骨梁の長さ方向）	300	mm
p'	スタッドの間隔（鉄骨梁のフランジ幅方向）	180	mm
T	スタッドに生じる引張力	2.1	kN

(2) デッキプレート

タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブのデッキプレートの変形評価に用いる条件を表 4-8 に示す。

表 4-8 デッキプレートの評価条件

記号	定義	数値	単位
L	デッキプレートの支持スパン	1.6	m
M	設計竜巻による単位幅あたりの曲げモーメント (=Max{ M_1 , M_2 })	0.93	kN・m
M_1	支持スパン中央部における 単位幅あたりの曲げモーメント	0.52	kN・m
M_2	支持位置における 単位幅あたりの曲げモーメント	0.93	kN・m
Q	デッキプレートに生じる 単位幅のせん断力	5.80	kN/m
ω_d	常時作用する荷重による 単位幅あたりの荷重	3.5	kN/m
ω_T	設計竜巻による単位幅あたりの荷重 (=Max{ ω_{T1} , ω_{T2} })	6.4	kN/m
ω_{T1}	複合荷重 W_{T1} による 単位幅あたりの荷重	6.4	kN/m
ω_{T2}	複合荷重 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)	3.9	kN/m
t	デッキプレートの厚さ	2.3	mm
b	デッキプレートの単位幅	1000	mm

5. 強度評価結果

5.1 貫通評価

式による評価にて算定した貫通限界厚さと許容限界の比較を表 5-1 に示す。評価結果より、各施設の評価対象部位の許容限界が、設計飛来物による貫通を生じない貫通限界厚さを上回ることを確認した。

式による評価にて許容限界を満足しなかった原子炉建屋屋上屋根スラブ及びタービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブについて、解析による評価結果を表 5-2 及び図 5-1, 図 5-2 に示す。

上記結果より、評価対象部位に設計飛来物による貫通が生じないことを確認した。

表 5-1 貫通評価結果（式による評価）

評価対象部位		設計飛来物	評価結果 (cm)	許容限界 (cm)
原子炉建屋	4階R7通り内壁	鋼製足場板	12	25
タービン建屋	1階非常用電気品室南側内壁	鋼製足場板	12	30

表 5-2 貫通評価結果（解析による評価）

評価対象部位		評価結果 ($\times 10^{-6}$)	許容限界
			鋼材の破断ひずみ ($\times 10^{-6}$)
原子炉建屋 屋上屋根スラブ	鉄筋	43700	□
タービン建屋 海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ	デッキプレート	70900	

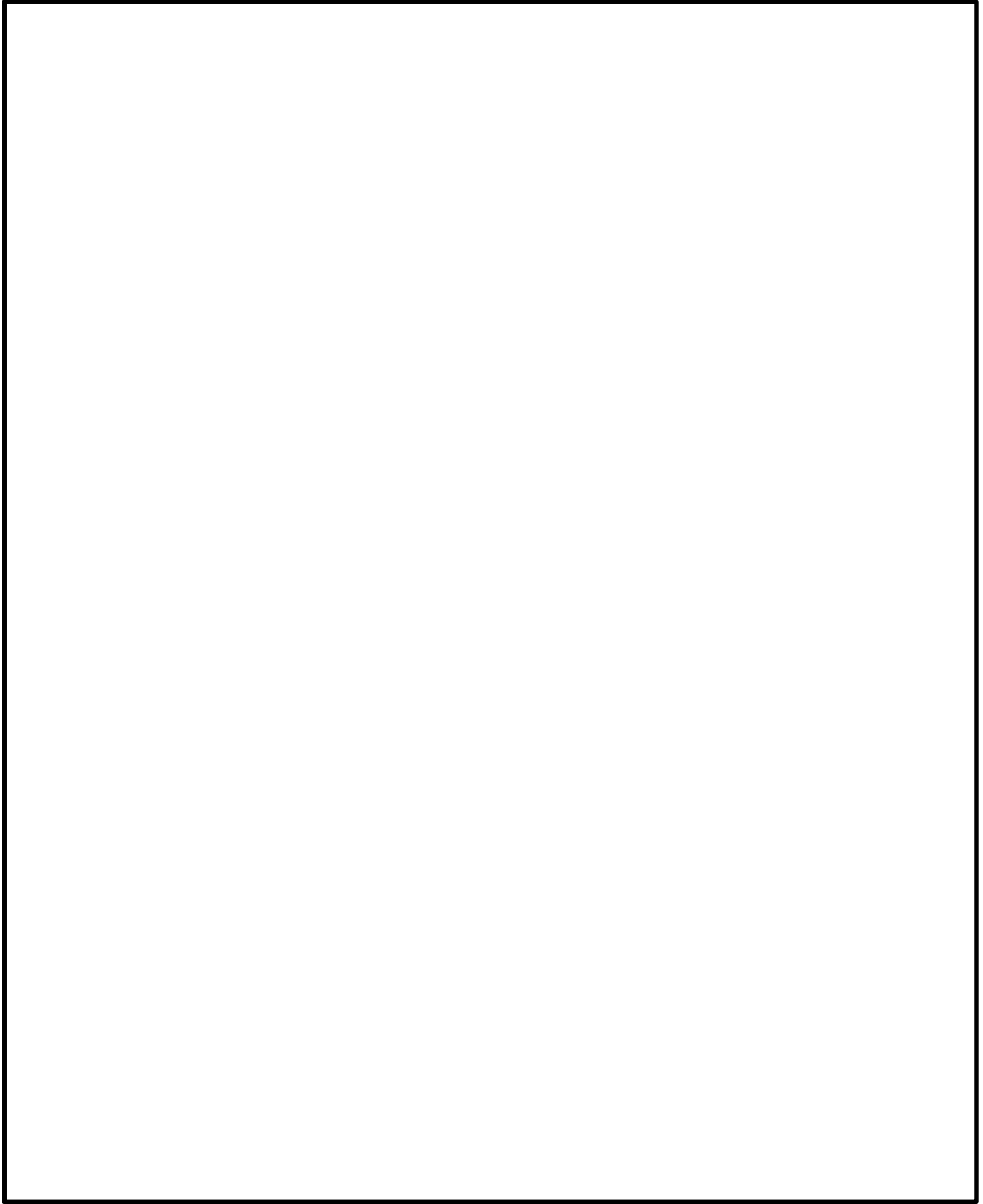


図 5-1 鉄筋のひずみ分布図（原子炉建屋屋上屋根スラブ）

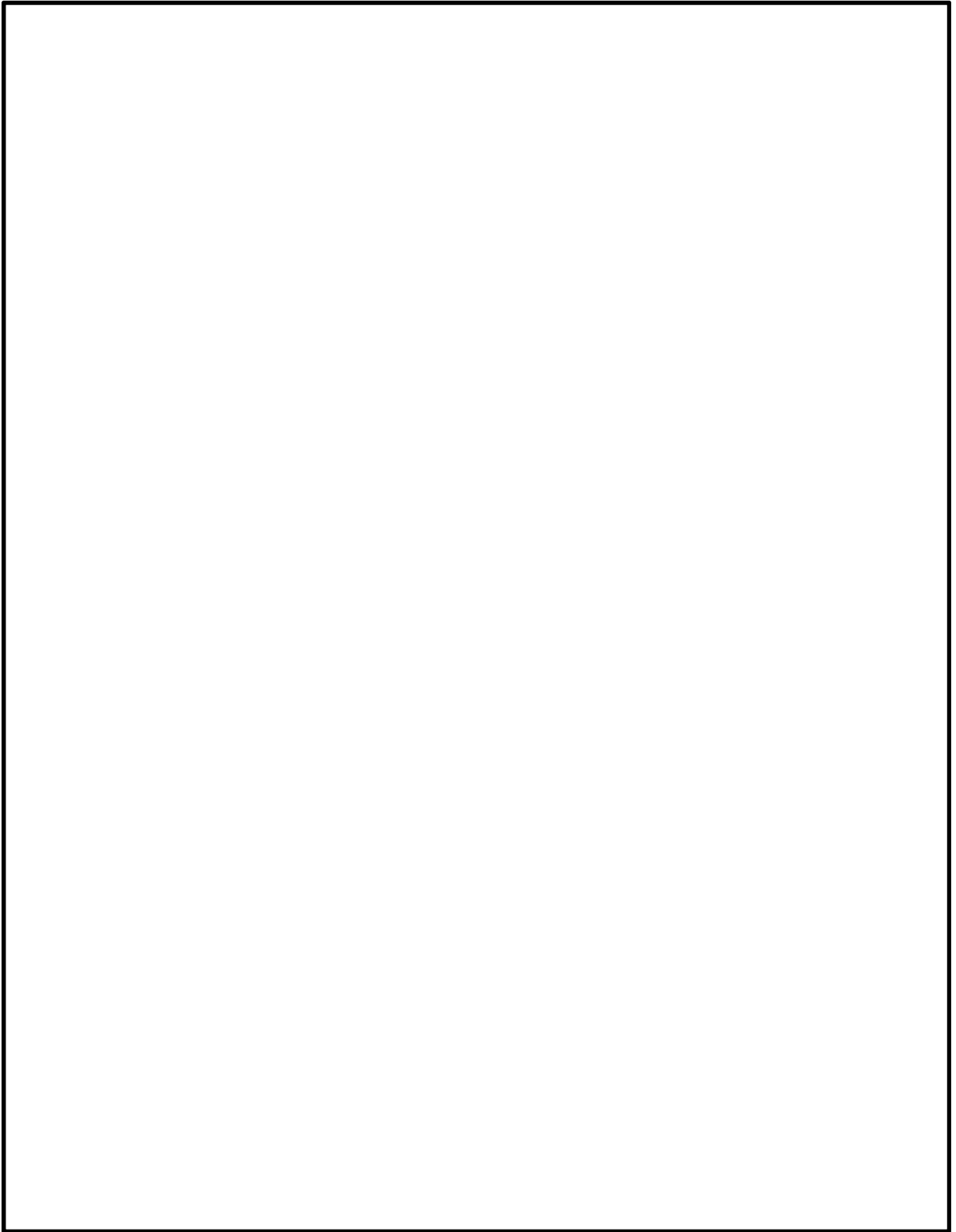


図 5-2 デッキプレートのひずみ分布図 (タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブ)

5.2 裏面剥離評価

式による評価にて算定した裏面剥離限界厚さと許容限界の比較を表 5-3 に示す。評価結果より、各施設の評価対象部位の許容限界が、設計飛来物による裏面剥離を生じない裏面剥離限界厚さを上回ることを確認した。

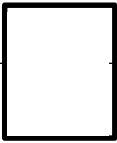
式による評価にて許容限界を満足しなかった原子炉建屋屋上屋根スラブ及びタービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブについて、解析による評価結果を表 5-4 及び図 5-3 に示す。タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブのデッキプレートの解析結果は貫通評価の評価結果と同じであることから、図 5-2 の通り。

上記結果より、評価対象部位に設計飛来物による裏面剥離が生じないことを確認した。

表 5-3 裏面剥離評価結果（式による評価）

評価対象部位		設計飛来物	評価結果 (cm)	許容限界 (cm)
原子炉建屋	4階R7通り内壁	鋼製足場板	21	25
タービン建屋	1階非常用電気品室南側内壁	鋼製足場板	21	30

表 5-4 裏面剥離評価結果（解析による評価）

評価対象部位		評価結果 ($\times 10^{-6}$)	許容限界
			鋼材の破断ひずみ ($\times 10^{-6}$)
原子炉建屋 屋上屋根スラブ	デッキプレート	45100	
タービン建屋 海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ	デッキプレート	70900	

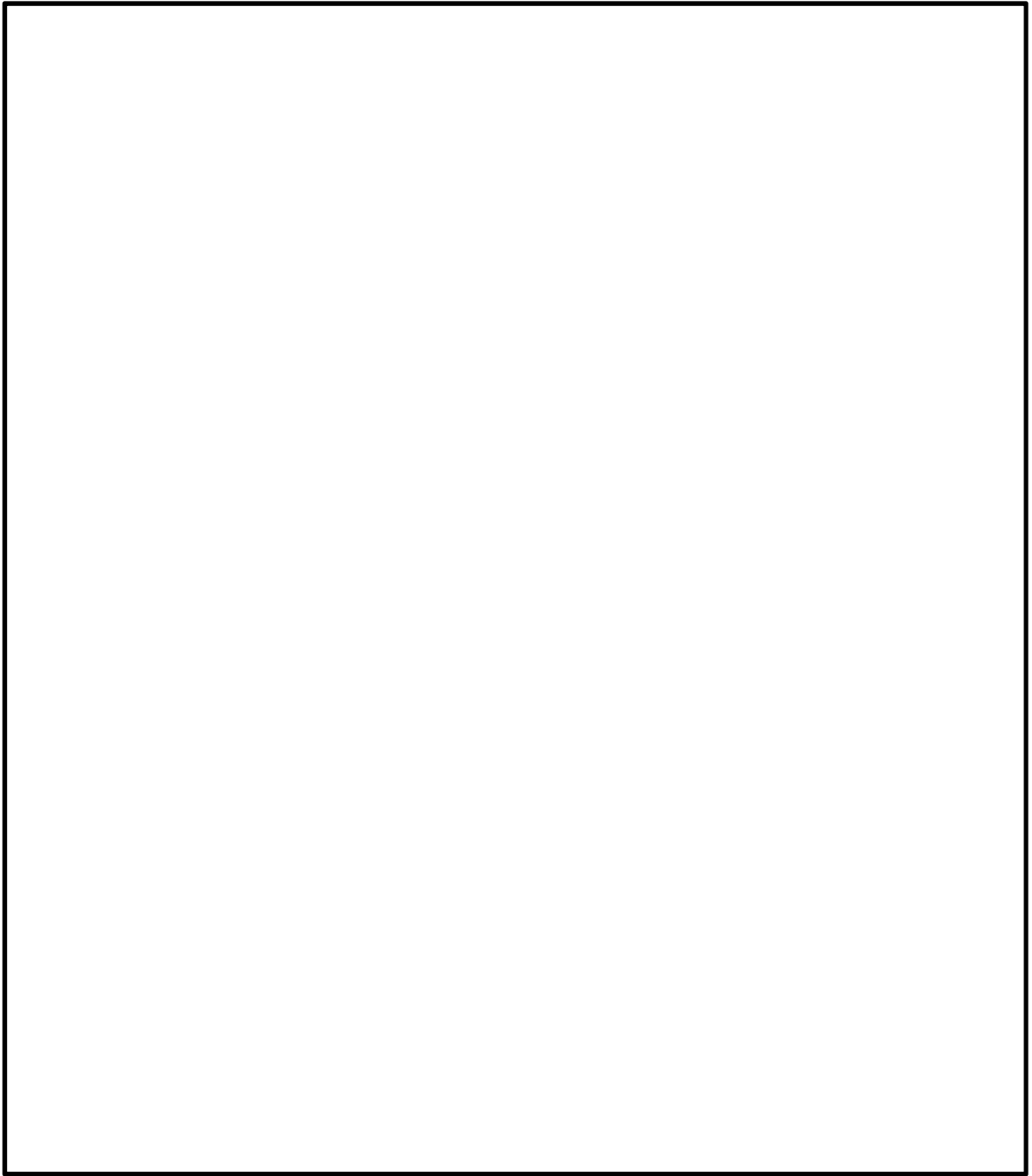


図 5-3 デッキプレートのひずみ分布図（原子炉建屋屋上屋根スラブ）

5.3 変形評価

5.3.1 耐震壁及び鉄骨架構

各施設の耐震壁に生じるせん断ひずみと，各施設の鉄骨架構に生じる層間変形角について，許容限界との比較を表 5-5 に示す。

各施設の耐震壁に生じるひずみ及び各施設の鉄骨架構に生じる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 変形評価結果（耐震壁及び鉄骨架構）

評価対象部位		評価結果	許容限界
耐震壁	原子炉建屋	0.01×10^{-3}	2.0×10^{-3}
	タービン建屋	0.04×10^{-3}	2.0×10^{-3}
鉄骨架構	タービン建屋	1/2119	1/120

注：NS 方向，EW 方向の評価結果のうち，最も評価結果が厳しい部材について評価結果を記載するものとする

5.3.2 屋根スラブ

(1) スタッド

原子炉建屋屋上屋根スラブのスタッドに生じる引張力と許容限界の比較を表 5-6 に示す。

評価結果より，スタッドに生じる引張力が許容限界を超えないことを確認した。

表 5-6 変形評価結果（スタッド）

評価対象部位		評価結果		許容限界 (kN)
		項目	数値 (kN)	
原子炉建屋 屋上屋根スラブ	スタッド	引張力	2.1	19.0

(2) デッキプレート

タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブのデッキプレートに生じる応力度と許容限界の比較を表 5-7 に示す。

評価結果より，デッキプレートに生じる応力度が許容限界を超えないことを確認した。

表 5-7 変形評価結果（デッキプレート）

評価対象部位		評価結果		許容限界 (N/mm ²)
		項目	数値 (N/mm ²)	
タービン建屋 海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ	デッキプレート	曲げ	13.2	235
		せん断	2.53	135

VI-3-別添 1-6 軽油タンクの強度計算書

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	9
3.3 荷重及び荷重の組合せ	10
3.4 許容限界	13
3.5 評価方法	15
3.5.1 衝突評価	15
3.5.2 構造強度評価	20
4. 評価条件	25
4.1 衝突評価	25
4.2 構造強度評価	26
5. 強度評価結果	27
5.1 衝突評価	27
5.2 構造強度評価	29

1. 概要

本資料は、VI-3-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、軽油タンクが竜巻時及び竜巻通過後においても、非常用所内母線へ7日間の電源供給が継続できるよう燃料を保有する機能を維持するために、主要な構造部材が健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

軽油タンクについて、VI-3-別添 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、軽油タンクの「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

軽油タンクは、VI-3-別添 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、屋外の軽油タンクエリアに設置する。

軽油タンクエリアの位置図を図2-1に示す。

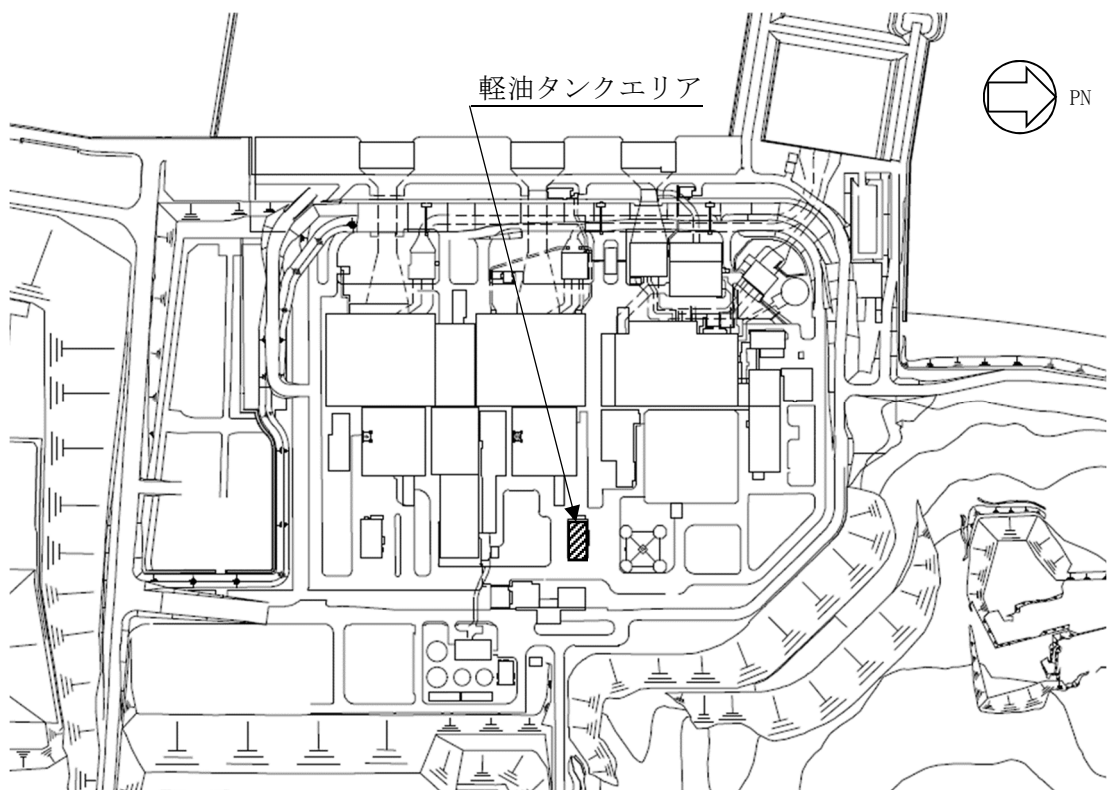


図2-1 軽油タンクエリアの位置図

2.2 構造概要

軽油タンクについて、VI-3-別添 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、軽油タンクの構造を示す。

軽油タンクは、円筒形の胴板と屋根板より構成され、基礎ボルトによりコンクリート基礎に固定された平底たて置円筒形容器である。タンクは外気と繋がっているため、タンク内圧は大気圧となっている。軽油タンクの概要図を図 2-2 に示す。

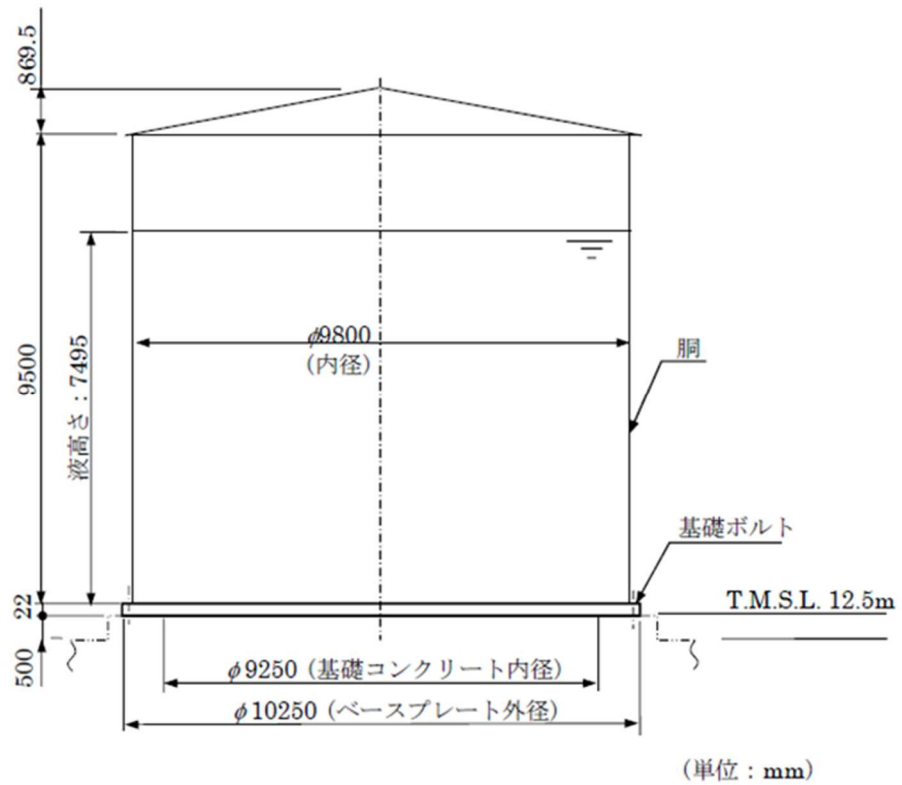


図 2-2 軽油タンクの概要図

2.3 評価方針

軽油タンクの強度評価は、VI-3-別添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、軽油タンクの評価対象部位に作用するひずみ、応力等が、許容限界に留まることを「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。

軽油タンクの強度評価フローを図2-3に示す。軽油タンクの強度評価においては、その構造を踏まえ、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を選定する。

強度評価の評価方針は、衝突評価及び構造強度評価に分類でき、軽油タンクはこれらの評価を実施する。

(1) 衝突評価の評価方針

衝突評価は、設計飛来物の衝突に対する直接的な影響の評価として、軽油タンクの外殻を構成する部材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、また、終局状態に至るようなひずみを生じないことを計算及び解析により確認する。

(2) 構造強度評価の評価方針

軽油タンクの構造強度評価については、設計荷重に対し、軽油タンクを構成する胴板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。ただし、座屈評価においては、評価式を満足することを確認する。また、自重については、設計荷重の抗力として作用する場合は質量が小さい方が安全側の評価となることから、満油時及び空油時の質量を考慮した評価を実施する。各部材の構造強度評価には、設計荷重は水平方向より作用する荷重という観点で地震荷重と同様なものと考え、「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG 4601・補-1984」（日本電気協会）、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987」（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」（日本電気協会）（以下「JEAG 4601」という。）の平底たて置円筒形容器の評価方法を準用し、VI-3-別添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」に示す軽油タンクの評価式を用いる。軽油タンクの許容限界は、VI-3-別添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。

「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC 1-2005/2007」（日本機械学会）（以下「JSME」という。）付録材料図表 part5,6 の表にて許容応力を計算する際は、機器本体については最高使用温度、ボルトについては周囲環境温度に応じた値をとるものとするが、温度がJSME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。

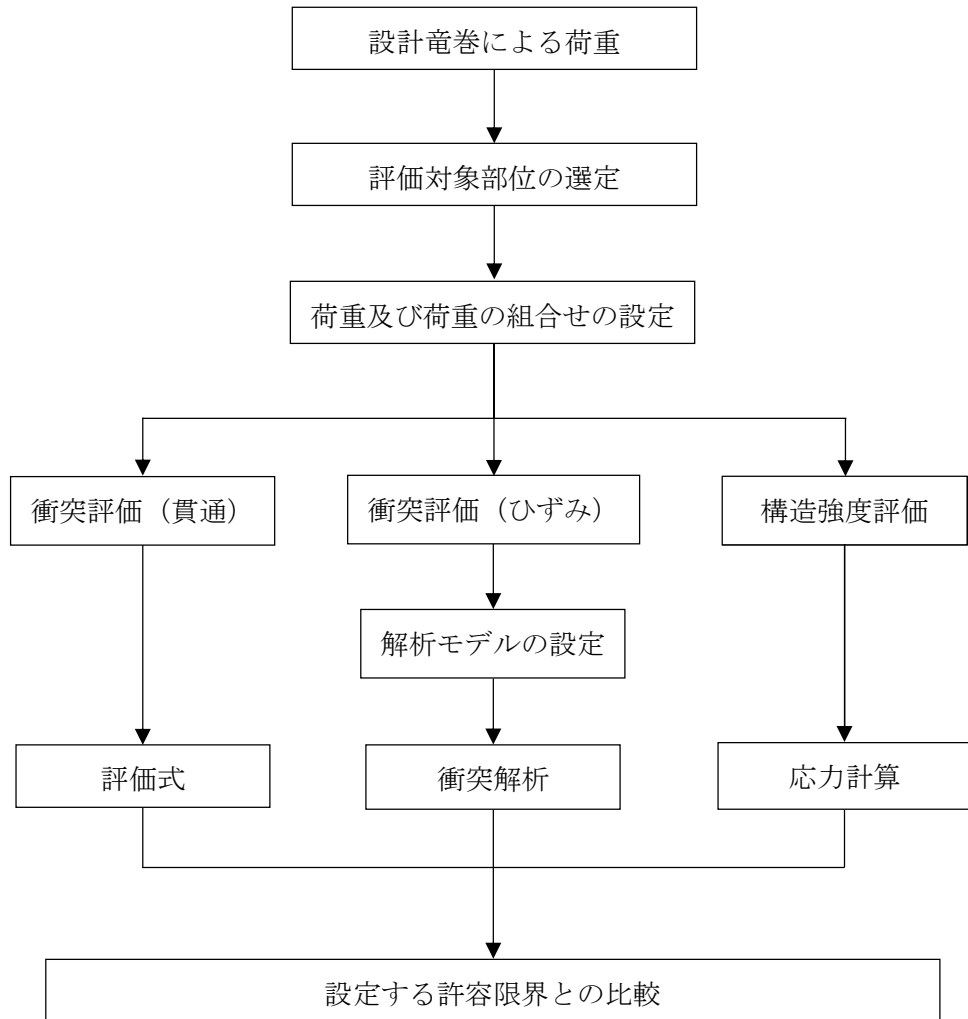


図 2-3 軽油タンクの強度評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 J S M E S N C 1-2005/2007」(日本機械学会)
- ・「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」(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」(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」(日本電気協会)
- ・日本産業規格 (J I S)
- ・Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8 (NEI07-13))
- ・「建築物荷重指針・同解説」(日本建築学会，2004 改定)
- ・「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—」(日本建築学会，2005 改定)
- ・ISE7607-3「軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査 その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討」(昭和 51 年 10 月 高温構造安全技術研究組合)
- ・タービンミサイル評価について (昭和 52 年 7 月 20 日 原子炉安全専門審査会)

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

軽油タンクの評価に用いる記号を表 3-1 及び表 3-2 に示す。

表 3-1 BRL 式による貫通限界厚さの算定に用いる記号

記号	単位	定義
d	m	設計飛来物が衝突する衝突断面の等価直径
K	—	鋼板の材質に関する係数
m	kg	設計飛来物の質量
T	m	貫通限界厚さ
v	m/s	設計飛来物の衝突速度

表 3-2 平底たて置円筒形容器の強度評価に用いる記号 (1/3)

記号	単位	定義
A	m ²	受圧面積
A _b	mm ²	基礎ボルト呼び径断面積
C	—	風力係数
C _c	—	基礎ボルト計算における係数
C _t	—	基礎ボルト計算における係数
D _{b i}	mm	ベースプレート内径
D _{b o}	mm	ベースプレート外径
D _c	mm	基礎ボルト中心円直径
D _d	mm	コンプレッションリング外径
D _i	mm	胴内径
E	MPa	ヤング率
e	—	基礎ボルト計算における係数
F	MPa	J SME SSB-3121.1(1)により規定される値
F _c	N	基礎に作用する圧縮力
F _t	N	基礎ボルトに作用する引張力
f _b	MPa	曲げモーメントにより生じる座屈応力
f _c	MPa	軸圧縮荷重により生じる座屈応力
f _s	MPa	J SME SSB-3131 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

表 3-2 平底たて置円筒形容器の強度評価に用いる記号 (2/3)

記号	単位	定義
f_t	MPa	J S M E SSB-3131 により規定される供用状態 A 及び B での許容引張応力
f_{ts}	MPa	引張力とせん断力を同時に受ける基礎ボルトの許容引張応力
G	—	ガスト影響係数
g	m/s ²	重力加速度
H	mm	容器高さ
H _h	mm	液面高さ
k	—	基礎ボルト計算における中立軸の荷重係数
L ₁	m	設計飛来物の最も短い辺の全長
l_g	mm	胴板高さの 1/2 + 底板
l_M	mm	胴板最上部の高さ
l_1, l_2	mm	基礎ボルト計算における中立軸から荷重作用点までの距離
M _{T2}	N・mm	設計竜巻による複合荷重により作用するモーメント
m	kg	設計飛来物質量
m _e	kg	空質量
n	—	基礎ボルト本数
q	N/m ²	設計用速度圧
R _B	mm	胴平均半径
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
s	—	基礎ボルトと基礎の縦弾性係数比
t	mm	胴板厚
t ₁	mm	基礎ボルト面積相当板幅
t ₂	mm	圧縮側基礎相当幅
V	m/s	設計飛来物の衝突速度 (水平)
W _M	N	設計飛来物による衝撃荷重
W _W	N	設計竜巻の風圧力による荷重
W _{T2}	N	設計竜巻による複合荷重 (W _{T2} = W _W + W _M)
z	—	基礎ボルト計算における係数

表 3-2 平底たて置円筒形容器の強度評価に用いる記号 (3/3)

記号	単位	定義
α_1	—	安全率
α_2	rad	基礎ボルト計算における中立軸を定める角度
Δt	s	設計飛来物の被衝突体の接触時間
η_B	—	R_B / t
η_1	—	$1200 \cdot g / F$
η_2	—	$8000 \cdot g / F$
η_3	—	$9600 \cdot g / F$
π	—	円周率
ρ	—	軽油の比重
σ_1	MPa	胴に生じる組合せ一次応力
σ_b	MPa	基礎ボルトに生じる引張応力
σ_c	MPa	基礎に生じる圧縮応力
σ_x	MPa	胴に生じる軸方向応力の和
σ_{x2}	MPa	自重（空質量）により胴に生じる軸方向応力
σ_{x4}	MPa	設計竜巻による胴に生じる軸方向応力
σ_{xb}	MPa	曲げモーメントにより生じる圧縮応力
σ_{xc}	MPa	軸圧縮荷重により生じる圧縮応力
σ_ϕ	MPa	胴に生じる周方向応力の和
$\sigma_{\phi 1}$	MPa	水頭圧により胴に生じる周方向応力
τ	MPa	設計竜巻により胴に生じるせん断応力
τ_b	MPa	基礎ボルトに生じるせん断応力
ϕ_b	MPa	座屈応力 f_b を算出する際の関数
ϕ_c	MPa	座屈応力 f_c を算出する際の関数

3.2 評価対象部位

軽油タンクの評価対象部位は、VI-3-別添 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設定する。

(1) 衝突評価の評価対象部位

軽油タンクの胴板及び屋根板への設計飛来物の衝突を考慮し、軽油タンク胴板及び屋根板が貫通を生じないこと、また、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、胴板及び屋根板を評価対象部位として選定する。

設計飛来物の衝突を考慮する場合、被衝突物の寸法が大きいほどたわみ量が大きくなる傾向にある。したがって、ひずみ評価における設計飛来物の衝突位置は、胴板及び屋根板の部材長さ（支持スパン）を踏まえ、胴板中央及び屋根板頂部とし、衝突方向は、胴板は水平方向、屋根板は鉛直方向とする。

(2) 構造強度評価の評価対象部位

設計竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重は、胴板に作用し胴板を介して基礎ボルトに作用する。このことから、胴板及び基礎ボルトを評価対象部位とする。

軽油タンクの強度評価における評価対象部位を図 3-1 に示す。

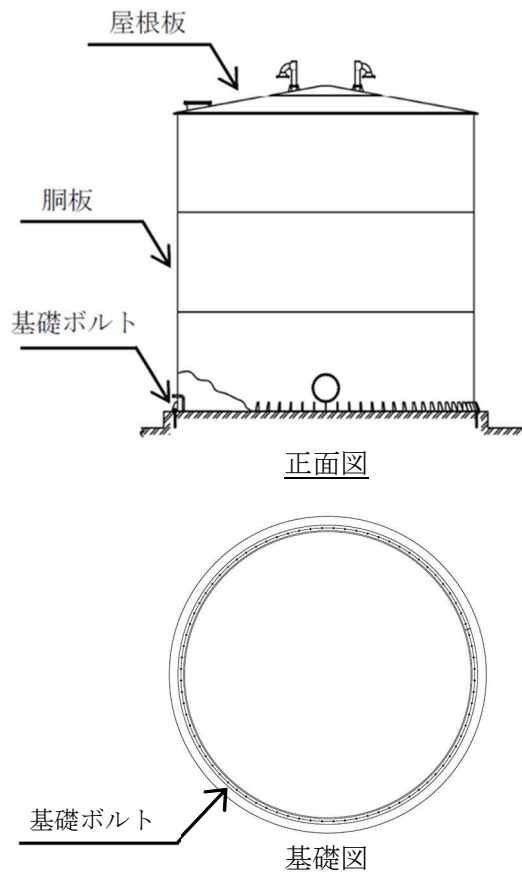


図 3-1 軽油タンクの評価対象部位

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、VI-3-別添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、設計飛来物である足場パイプ及び鋼製足場板の衝突による影響が大きくなる向きで軽油タンクに衝突した場合の衝撃荷重を考慮する。

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

衝突評価（ひずみ）においては、考慮する設計飛来物として運動エネルギーが最大となるように設定し、衝撃荷重を考慮する。運動エネルギーは、水平方向衝突の場合は鋼製足場板が最大であり、鉛直方向衝突の場合は足場パイプが最大となる。

設計飛来物の諸元を表3-3に、衝突評価の荷重の組合せを表3-4に示す。

表3-3 設計飛来物の諸元

設計飛来物の種類		足場パイプ	鋼製足場板
サイズ(m) 長さ×幅×奥行き		4×0.05×0.05	4×0.25×0.04
質量(kg)		11	14
最大水平速度(m/s)		42	55
最大鉛直速度(m/s)		38	18
運動エネルギー(kJ)	水平	10	21
	鉛直	8	3
衝突断面積あたりの 運動エネルギー(kJ/mm ²)	水平	0.0279	0.0021
	鉛直	0.0223	0.0003

表3-4 衝突評価の荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重の組合せ
屋外の外部事象 防護対象施設	軽油タンク	胴板 屋根板	設計飛来物の 衝撃荷重

(2) 構造強度評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の種類

(a) 常時作用する荷重 (F_d)

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及び水頭圧を考慮する。た

だし，基礎ボルトの構造強度評価時には内溶液（軽油）の荷重は考慮せず，空容器での評価とする。

(b) 設計竜巻による荷重 (W_T)

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設計飛来物による衝撃荷重とする。

イ. 風圧力による荷重 (W_W)

風圧力による荷重は，竜巻の風速による荷重であり，VI-3-別添 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(1)b. (a) 風圧力による荷重」に従い，次式により算出する。

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

ここで，

$$A = H \cdot D_d$$

ロ. 気圧差による荷重 (W_P)

軽油タンクは大気開放タンクであり気圧差による荷重は発生しないため，気圧差による荷重は考慮しない。

ハ. 設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)

構造強度評価においては，次式の設計飛来物による衝撃荷重の算定式によって算出した運動エネルギーが最大となる鋼製足場板の衝撃荷重 $W_M = 1100\text{kN}$ を用いて評価を行う。

$$W_M = m \cdot V / \Delta t = m \cdot V^2 / L_1$$

ニ. 荷重の組合せ

設計竜巻による複合荷重 W_{T2} は，VI-3-別添 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，次式により算出する。

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

(c) 運転時に作用する荷重 (F_p)

配管にかかる内圧等の運転時荷重は考慮しない。

b. 荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重の組合せは，VI-3-別添 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，軽油タンクの評価対象部位に対して設定する。

軽油タンクの胴板及び基礎ボルトには、自重、水頭圧、風圧力による荷重、及び設計飛来物による衝撃荷重が作用する。

構造強度評価の荷重の組合せを表 3-5 に示す。

表 3-5 構造強度評価の荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重の組合せ
屋外の外部事象 防護対象施設	軽油タンク	胴板	①自重、水頭圧 ②風圧力による荷重 ③設計飛来物による衝撃荷重
		基礎ボルト	①自重 ②風圧力による荷重 ③設計飛来物による衝撃荷重

3.4 許容限界

軽油タンクの許容限界は、VI-3-別添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」にて設定している評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、評価内容ごとに評価対象部位に応じて設定する。

(1) 衝突評価の許容限界

a. 貫通

貫通評価における許容限界は、評価対象部位の公称板厚から設計上の必要最小板厚を差し引いた厚さとする。

設定した許容限界を表 3-6 に示す。

表 3-6 貫通評価の許容限界

		公称板厚 (mm)	設計上の 必要最小 板厚(mm)	許容限界
				公称板厚から設計上の 必要最小板厚を 差し引いた厚さ(mm)
軽油タンク	胴板	□	□	□
	屋根板		—	

b. ひずみ

ひずみ評価における許容限界は、鋼材の破断ひずみを設定する。破断ひずみについては、「3.5.1(2)d. 材料の非線形特性」に示すとおり、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、「NEI07-13 : Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs」(以下「NEI07-13」という。)においてTF (多軸性係数) を□とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF=□を考慮して設定する。

設定した許容限界を表 3-7 に示す。

表 3-7 ひずみ評価の許容限界

評価対象部位	材質	破断ひずみ*
胴板, 屋根板	□	□

注記* : 真ひずみ換算値

(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、胴板については「クラス 2, 3 容器」、基礎ボルトについては「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。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算出する際は、機器本体については最高使用温度、基礎ボルトについて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。

軽油タンクの許容限界について、胴板の許容限界を表 3-8 に、基礎ボルトの許容限界を表 3-9 に示す。

表 3-8 胴板の許容限界

許容 応力 状態	温度 条件 (°C)	許容限界		
		一次一般膜	組合せ一次	座屈
Ⅲ _A S	66*	$\text{Min}[S_y, 0.6 S_u]$	左欄に同じ	$\frac{\alpha_1 \cdot \sigma_{xc}}{f_c} + \frac{\alpha_1 \cdot \sigma_{xb}}{f_b} \leq 1$

注記* : 最高使用温度

表 3-9 基礎ボルトの許容限界

許容 応力 状態	温度 条件 (°C)	許容限界	
		一次応力	
		引張	せん断
Ⅲ _A S	40*	$1.5 f_t$	$1.5 f_s$

注記* : 周囲環境温度

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

$$f_{ts} = \text{Min} \{ 1.4 (1.5 f_t) - 1.6 \tau, 1.5 f_t \}$$

3.5 評価方法

3.5.1 衝突評価

(1) 貫通

軽油タンクの貫通評価は、VI-3-別添 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。

設計飛来物が軽油タンク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) ひずみ

軽油タンクのひずみ評価は、解析モデル及び材料の非線形特性を用いた衝突解析により評価する。なお、設計飛来物の短辺衝突による評価を実施する。

a. 解析モデル

(a) 設計飛来物

設計飛来物である足場パイプ及び鋼製足場板は、シェル要素でモデル化する。

設計飛来物の解析モデル図を図 3-2 に示す。

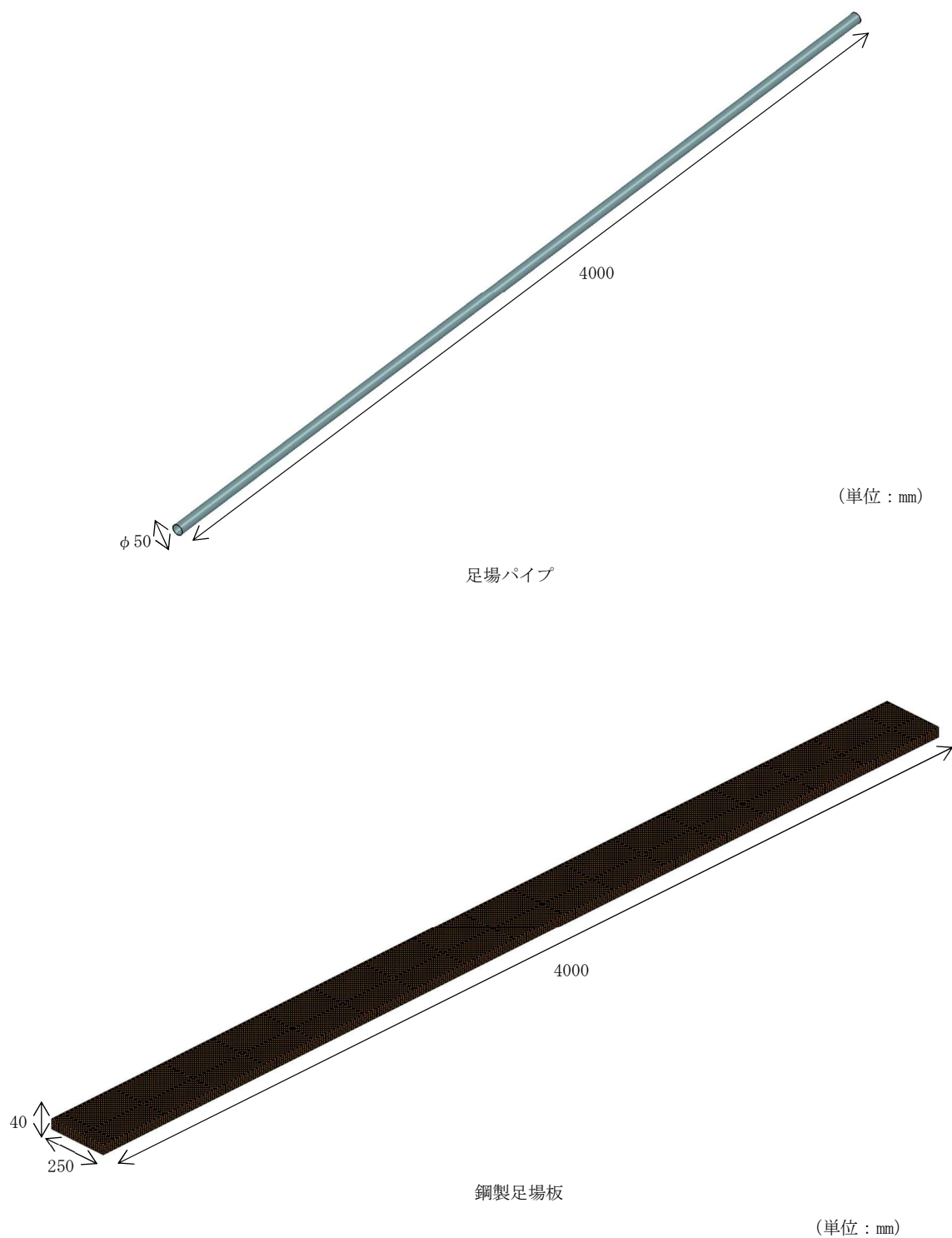


図 3-2 設計飛来物の解析モデル図

(b) 軽油タンク

軽油タンクの解析モデル化の範囲は、軽油タンクを構成する胴板、屋根板、コンプレッションリング、底板、アニュラー板、ラフタ、屋根板補強リング、補強材等をシェル要素でモデル化する。軽油タンクの解析モデルの境界条件を表 3-10 に、軽油タンクの解析モデル図を図 3-3 に示す。

表 3-10 解析モデルの境界条件

項目	境界条件
軽油タンクと軽油タンク基礎	X, Y, Z 方向並進拘束

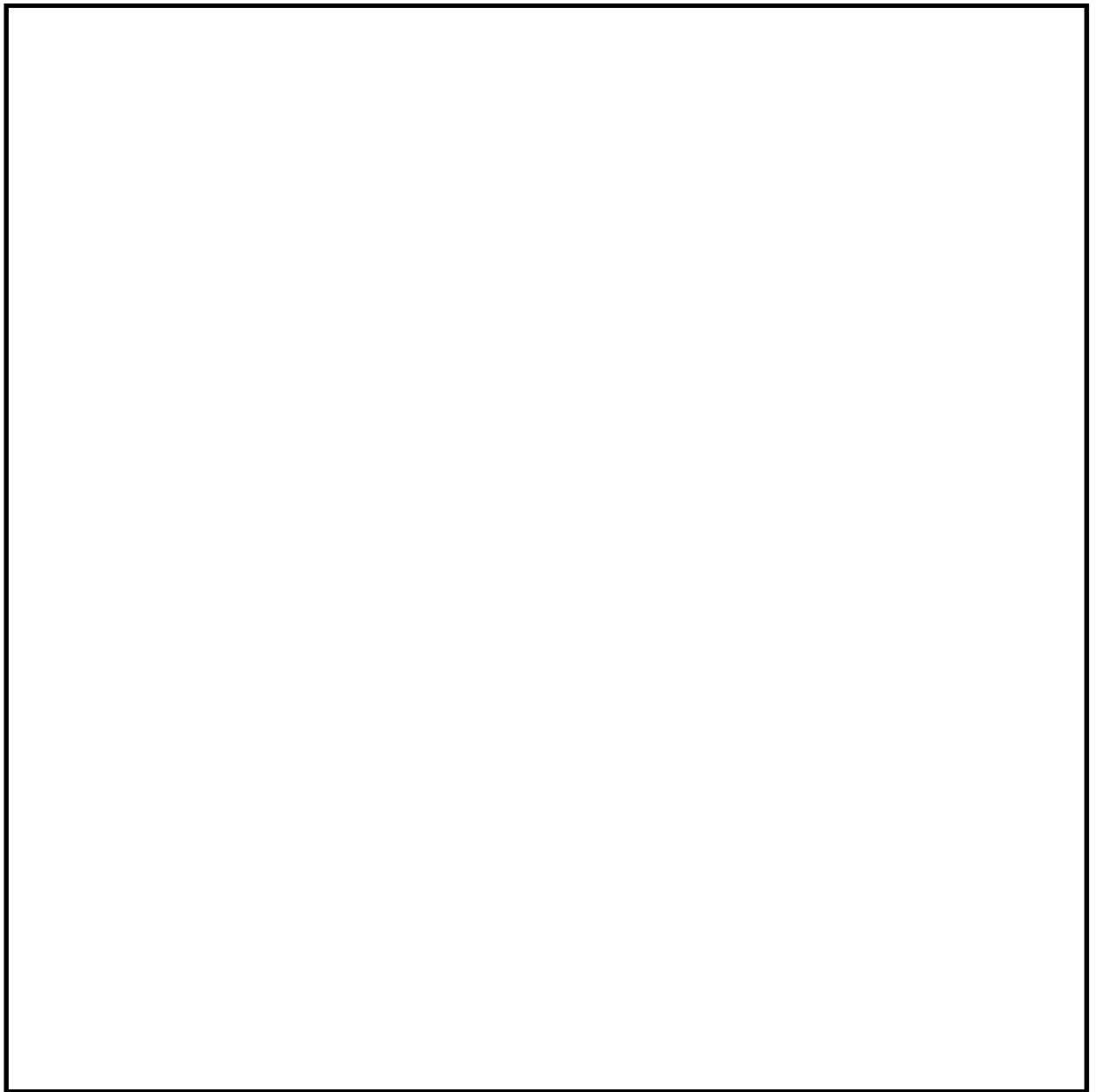


図 3-3 軽油タンクの解析モデル図

b. 解析コード

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「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

c. 材料定数

軽油タンクのマテリアル定数を表3-11に示す。

表3-11 軽油タンクのマテリアル定数

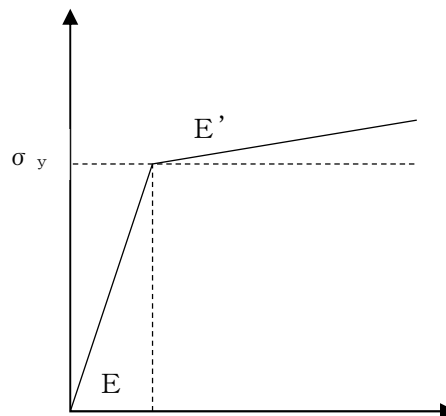
		材質	降伏応力 σ_y (MPa)	縦弾性係数 E (MPa)	塑性硬化係数 E' (MPa)	ポアソン 比
軽油 タンク	胴板, 屋根板, コンプレッ ションリング					
	底板, 屋根板補 強リング					
	アニュラー板					
	ラフタ					
	補強材					

d. 材料の非線形特性

(a) 材料の応力-ひずみ関係

材料の応力-ひずみ関係は、バイリニア型とする。

材料に適用する応力-ひずみ関係の概念図を図3-4に示す。



(b) ひずみ速度効果

竜巻による設計飛来物に対する解析は、衝撃問題で変形速度が大きいいため、衝突時のひずみ速度による影響を Cowper-Symonds 式により考慮する。

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

ここで、 σ_D は動的応力、 σ_s は静的応力、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度、C及びpはひずみ速度依存性のパラメータである。

ひずみ速度依存性パラメータを表 3-12 に示す。

表 3-12 ひずみ速度依存性パラメータ

	足場 パイプ	鋼製 足場板	軽油タンク				
			胴板, 屋根 板, コンブ レッション リング	底板, 屋根 板補強リン グ	アニュラー 板	ラフタ, 補強材	補強材
材質	STK500	SS400 (t ≤ 5)					
C (1/s)							
p							

(c) 破断ひずみ

胴板及び屋根板の破断ひずみは、J I S に規定されている伸びの下限値を基に設定する。また、NEI07-13 において T F (多軸性係数) を とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕として T F = を考慮する。

胴板及び屋根板の破断ひずみを表 3-13 に示す。

表 3-13 破断ひずみ

評価対象部位	材質	J I S 規格値 (下限値)	T F	破断ひずみ*
胴板, 屋根板				

注記* : 真ひずみ換算値

3.5.2 構造強度評価

軽油タンクの構造強度評価は、VI-3-別添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

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，水頭圧及び自重に対する，胴板及び基礎ボルトの構造強度を1質点系モデルとして計算を行う。ここで，風荷重の作用点は胴板高さの1/2とし，設計飛来物による衝撃荷重に対しては，胴板頂部を作用点として考慮する。軽油タンクのモデル図を図3-5に示す。

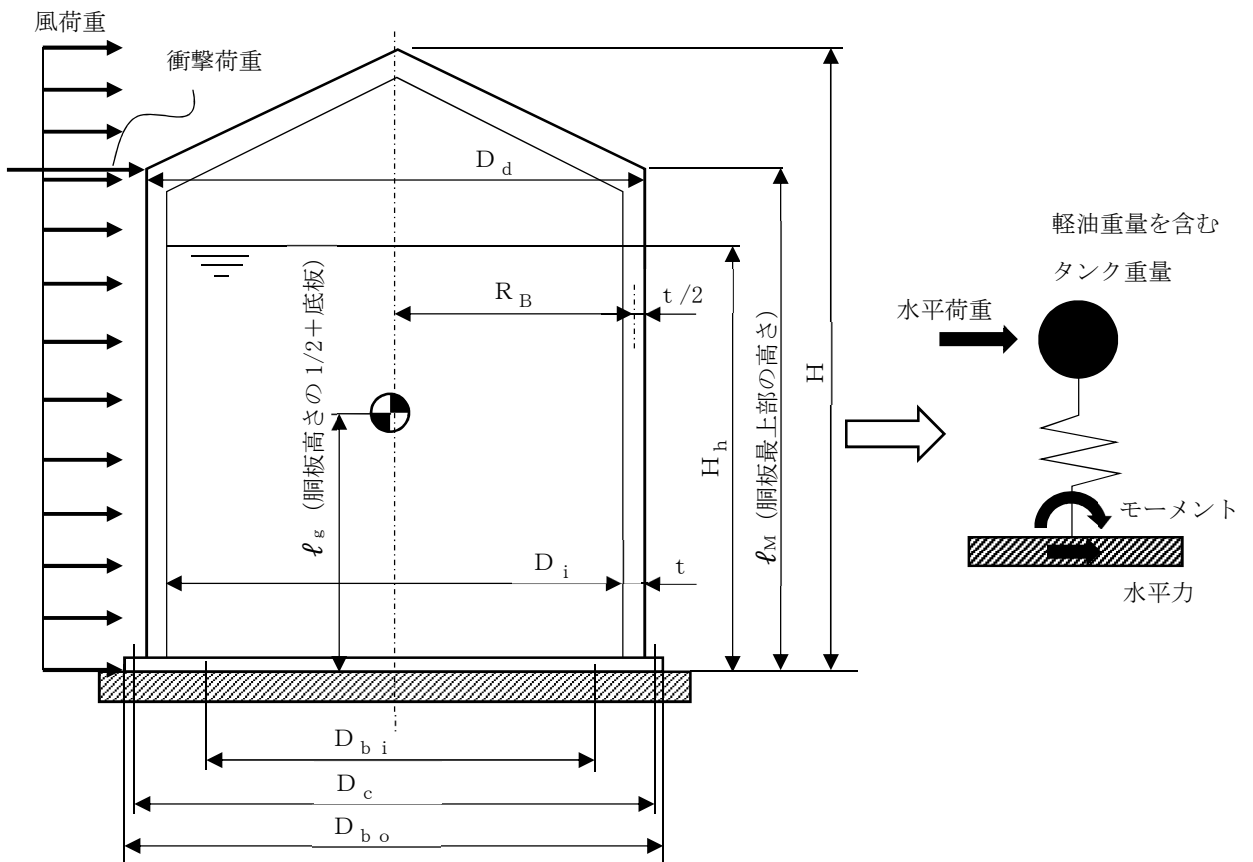


図3-5 軽油タンクモデル図

(2) 計算方法

- a. 設計竜巻により発生するモーメント

設計竜巻により作用するモーメント M_{T2} は以下のようにして計算する。

$$M_{T2} = W_W \cdot \ell_g + W_M \cdot \ell_M$$

- b. 胴に生じる応力

- (a) 水頭圧により胴に生じる周方向応力

$$\sigma_{\phi 1} = \frac{10^{-6} \cdot g \cdot \rho \cdot H_h \cdot D_i}{2t}$$

- (b) 胴の自重（空重量）により胴に生じる軸方向応力

$$\sigma_{x2} = \frac{m_e \cdot g}{\pi (D_i + t) \cdot t}$$

- (c) 設計竜巻により胴に生じる応力

設計竜巻により胴に生じる軸方向応力

$$\sigma_{x4} = \frac{4M_{T2}}{\pi (D_i + t)^2 \cdot t}$$

設計竜巻により胴に生じるせん断応力

$$\tau = \frac{2W_{T2}}{\pi (D_i + t) \cdot t}$$

- (d) 組合せ応力

胴に生じる周方向応力の和

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

胴に生じる軸方向応力の和

$$\sigma_x = \sigma_{x2} + \sigma_{x4}$$

胴に生じる組合せ一次応力

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \left\{ (\sigma_x + \sigma_{\phi}) + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_{\phi})^2 + 4\tau^2} \right\}$$

- (e) 軸圧縮荷重及び曲げモーメントにより生じる圧縮応力
軸圧縮荷重により生じる圧縮応力

$$\sigma_{xc} = \sigma_{x2}$$

曲げモーメントにより生じる圧縮応力

$$\sigma_{xb} = \sigma_{x4}$$

- c. 胴板の座屈評価

胴板について、以下の式にて座屈評価を行う。

$$\frac{\alpha_1 \cdot \sigma_{xc}}{f_c} + \frac{\alpha_1 \cdot \sigma_{xb}}{f_b} \leq 1$$

- (a) 軸圧縮荷重により生じる座屈応力 f_c

$$f_c = \begin{cases} F & (\eta_B \leq \eta_1) \\ F \left[1 - \frac{1}{6800 \cdot g} \{ F - \phi_c(\eta_2) \} (\eta_B - \eta_1) \right] & (\eta_1 < \eta_B < \eta_2) \\ \phi_c(\eta_B) & (\eta_2 \leq \eta_B \leq 800) \end{cases}$$

$$\text{ここで、} \phi_c(\eta_B) = 0.6 \frac{E}{\eta_B} \left[1 - 0.901 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{1}{16} \sqrt{\eta_B}\right) \right\} \right]$$

- (b) 曲げモーメントにより生じる座屈応力 f_b

$$f_b = \begin{cases} F & (\eta_B \leq \eta_1) \\ F \left[1 - \frac{1}{8400 \cdot g} \{ F - \phi_b(\eta_3) \} (\eta_B - \eta_1) \right] & (\eta_1 < \eta_B < \eta_3) \\ \phi_b(\eta_B) & (\eta_3 \leq \eta_B \leq 800) \end{cases}$$

$$\text{ここで、} \phi_b(\eta_B) = 0.6 \frac{E}{\eta_B} \left[1 - 0.731 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{1}{16} \sqrt{\eta_B}\right) \right\} \right]$$

- (c) 安全率 α_1

安全率は、各荷重の組合せに対して

$$\alpha_1 = \begin{cases} 1.0 & (\eta_B \leq \eta_1) \\ 1.0 + \frac{F}{13600 \cdot g} (\eta_B - \eta_1) & (\eta_1 < \eta_B < \eta_2) \\ 1.5 & (\eta_2 \leq \eta_B) \end{cases}$$

$$\text{ここで、} \eta_B = \frac{R_B}{t}, \quad \eta_1 = 1200 \cdot g / F,$$

$$\eta_2 = 8000 \cdot g / F, \quad \eta_3 = 9600 \cdot g / F$$

d. 基礎ボルト評価

(a) 基礎ボルトに生じるせん断応力

$$\tau_b = \frac{W_{T2}}{n \cdot A_b}$$

(b) 基礎ボルトに生じる引張応力

基礎ボルトに引張力が発生しないのは、 α_2 が π に等しくなったときであり、 α_2 を π に近づけた場合の値 $e=0.75$ 及び $z=0.25$ を F_t を求める式に代入し、得られる F_t の値によって引張力の有無を次のように判断する。

- ・ $F_t \leq 0$ ならば、引張力は作用しない。
- ・ $F_t > 0$ ならば、引張力は作用しているので以降の計算を行う。

転倒モーメント M_{T2} が作用した場合に生じる基礎ボルトの引張荷重と基礎部の圧縮荷重については、荷重と変位量の釣り合い条件を考慮することにより求める。基礎の荷重説明図を図3-6に示す。

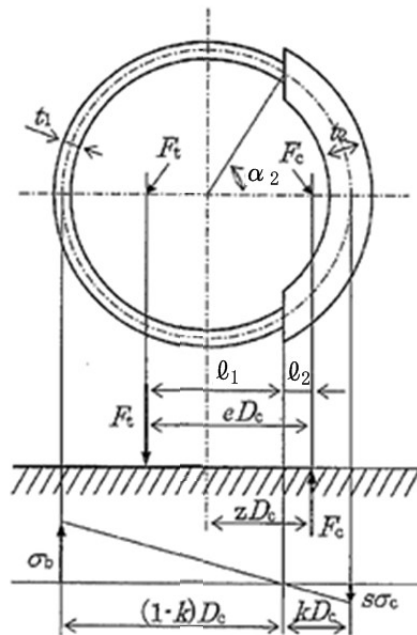


図3-6 基礎の荷重説明図 (J E A G 4 6 0 1-1987 より抜粋)

イ. σ_b , σ_c を仮定して係数 k を求める。

$$k = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_b}{s \cdot \sigma_c}}$$

ロ. α_2 を求める。

$$\alpha_2 = \cos^{-1}(1-2k)$$

ハ. 各定数 e , z , C_t 及び C_c を求める。

$$e = \frac{1}{2} \left\{ \frac{(\pi - \alpha_2) \cos^2 \alpha_2 + \frac{1}{2}(\pi - \alpha_2) + \frac{3}{2} \sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2}{(\pi - \alpha_2) \cos \alpha_2 + \sin \alpha_2} \right\} \\ + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\frac{1}{2} \alpha_2 - \frac{3}{2} \sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2 + \alpha_2 \cdot \cos^2 \alpha_2}{\sin \alpha_2 - \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2} \right\}$$

$$z = \frac{1}{2} \left\{ \cos \alpha_2 + \frac{\frac{1}{2} \alpha_2 - \frac{3}{2} \sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2 + \alpha_2 \cdot \cos^2 \alpha_2}{\sin \alpha_2 - \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2} \right\}$$

$$C_t = \frac{2 \{ (\pi - \alpha_2) \cos \alpha_2 + \sin \alpha_2 \}}{1 + \cos \alpha_2}$$

$$C_c = \frac{2 (\sin \alpha_2 - \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2)}{1 - \cos \alpha_2}$$

ニ. 各定数を用いて F_t , F_c を求める。

$$F_t = \frac{M_{T2} - m_e \cdot g \cdot z \cdot D_c}{e \cdot D_c}$$

$$F_c = F_t + m_e \cdot g$$

ホ. σ_b , σ_c を求める。

$$\sigma_b = \frac{2F_t}{t_1 \cdot D_c \cdot C_t}$$

$$\sigma_c = \frac{2F_c}{(t_2 + s \cdot t_1) D_c \cdot C_c}$$

ここで,

$$t_1 = \frac{n \cdot A_b}{\pi \cdot D_c}$$

$$t_2 = \frac{1}{2} (D_{b_o} - D_{b_i}) - t_1$$

4. 評価条件

4.1 衝突評価

(1) 貫通

「3. 強度評価方法」のうち，貫通評価に用いる評価条件を表 4-1 に示す。

表 4-1 貫通評価に用いる評価条件

d (m)	K (—)	m (kg)	v (m/s)	
			水平方向	鉛直方向
0.021	1.0	11	42	38

(2) ひずみ

軽油タンクのひずみ評価は，軽油タンクの最大変形が生じると想定される胴板中央，屋根板頂部に衝突するケースを設定する。

解析ケースを表 4-2 及び図 4-1 に示す。

表 4-2 解析ケース

衝突箇所		設計飛来物	衝突方向
軽油タンク	胴板中央	鋼製足場板	水平方向
	屋根板頂部	足場パイプ	鉛直方向

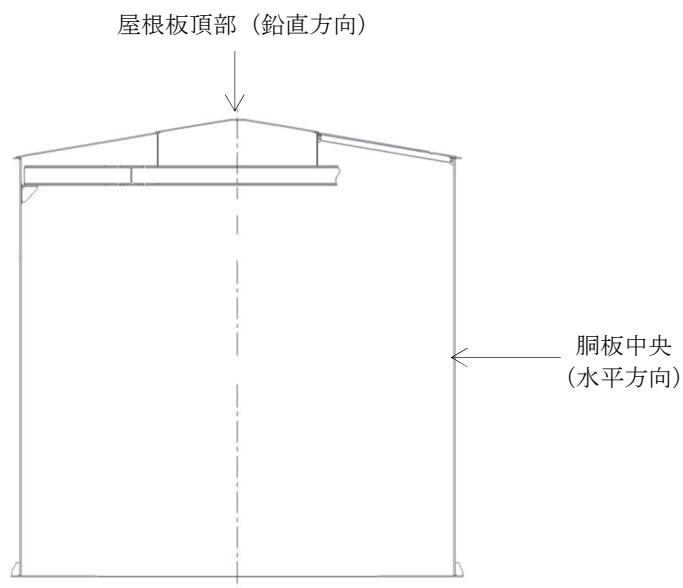


図 4-1 解析ケース

4.2 構造強度評価

「3. 強度評価方法」のうち、構造強度評価に用いる評価条件を表 4-3 及び表 4-4 に示す。

表 4-3 許容応力に用いる評価条件

材料	温度 (°C)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	F (MPa)	$1.5f_t$ (MPa)	$1.5f_s$ (MPa)
□ (胴板)	66	□	□	□	—	—
□ (基礎ボルト)	40	□	□	□	□	□

表 4-4 評価条件

据付場所及び 床面高さ (m)*	構造概要	最高使用圧力	ρ (—)	g (m/s)
屋外 T. M. S. L. 12.5	平底たて置 円筒形	大気圧	0.86	9.80665

q (N/m ²)	G (—)	C (—)	H (mm)	D _d (mm)
5188.43	1.0	1.2	10391.5	10144

W_w (N)	W_M (N)	W_{T2} (N)
6.56×10^5	1.10×10^6	1.76×10^6

m_e (kg)	D _i (mm)	t (mm)	ℓ_g (mm)	ℓ_M (mm)	H _h (mm)
□	9800	□	4922	9522	7495

α_1 (—)	R _B (mm)	E (N/mm ²)	n (本)	ボルト サイズ	A _b (mm ²)
1.142	4918	□	□	□	□

s (—)	D _c (mm)	D _{bo} (mm)	D _{bi} (mm)
9	10050	10250	9250

注記*：基準床レベルを示す。

5. 強度評価結果

5.1 衝突評価

(1) 貫通

貫通の評価結果を表 5-1 に示す。

胴板及び屋根板の許容限界は、設計飛来物による貫通を生じない貫通限界厚さを上回っており、貫通しない。

表 5-1 貫通評価結果

評価部位	衝突方向	評価結果 (mm)	許容限界 (mm)
胴板	水平	17	
屋根板	鉛直	15	

(2) ひずみ

ひずみの評価結果を表 5-2 及び図 5-1, 図 5-2 に示す。

胴板及び屋根板に発生するひずみは許容限界を超えない。

表 5-2 ひずみ評価結果

評価部位	衝突位置	ひずみ	
		評価結果	許容限界
胴板	胴板中央		
屋根板	屋根板頂部		



図 5-1 軽油タンクのひずみ分布図（胴板）



図 5-2 軽油タンクのひずみ分布図（屋根板）

5.2 構造強度評価

構造強度評価結果を表 5-3 に示す。

胴板、基礎ボルトに発生する応力は許容限界以下であり、また、座屈の評価の条件式を満足している。

表 5-3 構造強度評価結果

評価部材	材料	応力	発生応力	許容限界
胴板	□	一次一般膜	11 MPa	□ MPa
		組合せ一次	11 MPa	□ MPa
		圧縮と曲げの組合せ (座屈の評価)	0.0346	1.0
基礎ボルト	□	引張	14 MPa	□ MPa
		せん断	11 MPa	□ MPa
		組合せ	14 MPa	□ MPa

VI-3-別添 1-7 非常用ディーゼル発電設備吸気配管の強度計算書

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	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	6
3.3 荷重及び荷重の組合せ	7
3.4 許容限界	8
3.5 評価方法	9
4. 評価条件	10
5. 強度評価結果	10

1. 概要

本資料は、VI-3-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設備吸気配管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

非常用ディーゼル発電設備吸気配管について、VI-3-別添 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、非常用ディーゼル発電設備吸気配管の「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

非常用ディーゼル発電設備吸気配管は、VI-3-別添 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。

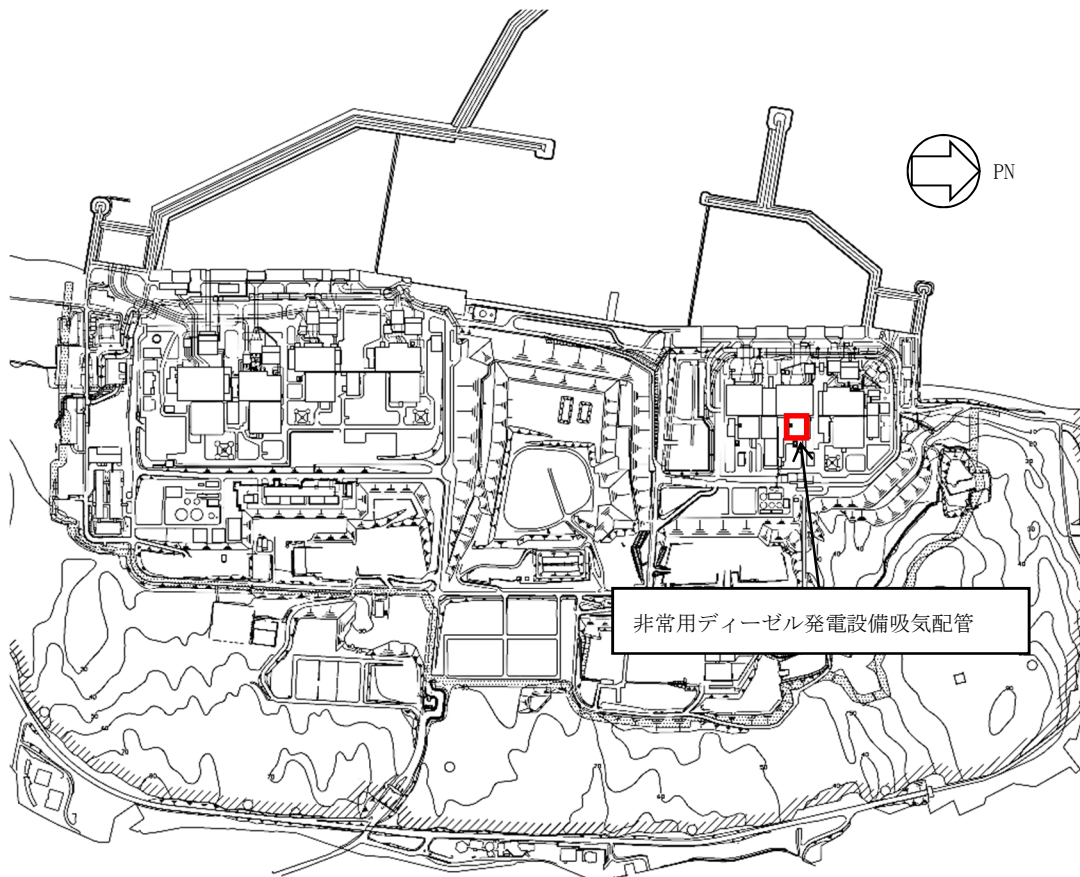


図 2-1 非常用ディーゼル発電設備吸気配管の位置図

2.2 構造概要

非常用ディーゼル発電設備吸気配管について、VI-3-別添 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、構造を設定する。

非常用ディーゼル発電設備吸気配管は鋼製の配管で構成される。非常用ディーゼル発電設備吸気配管は原子炉建屋の屋内に設置する設計とし、サポートによる支持構造物で床面等に支持する構造とする。非常用ディーゼル発電設備吸気配管の概要図を図 2-2 に示す。

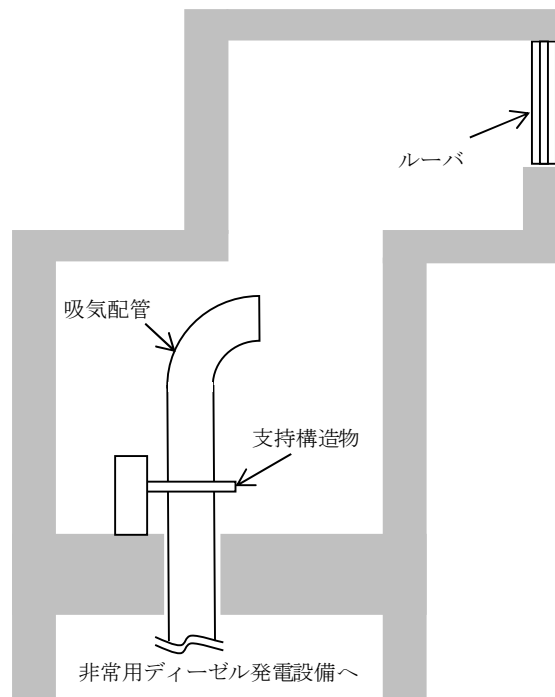


図 2-2 非常用ディーゼル発電設備吸気配管の概要図

2.3 評価方針

非常用ディーゼル発電設備吸気配管の強度評価は、VI-3-別添 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、非常用ディーゼル発電設備吸気配管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。

非常用ディーゼル発電設備吸気配管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。

非常用ディーゼル発電設備吸気配管の構造強度評価フローを図 2-3 に示す。外気と繋がっている屋内の施設である非常用ディーゼル発電設備吸気配管は、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施設に作用する気圧差による荷重と常時作用する荷重の組合せを考慮する。構造強度評価においては、非常用ディーゼル発電設備吸気配管に対し、運転時に内圧が作用するため、運転時の状態で作用する内圧荷重及び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、VI-3-別添 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。非常用ディーゼル発電設備吸気配管の許容限界は、VI-3-別添 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 J E A G 4 6 0 1・補-1984」（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」（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」（日本電気協会）（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

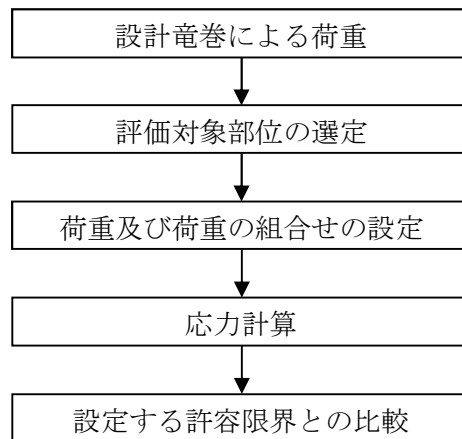


図 2-3 非常用ディーゼル発電設備吸気配管の構造強度評価フロー

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」
(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」(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」(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」(日本機械学会)

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

非常用ディーゼル発電設備吸気配管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
D	mm	管外径
P_1	Pa	運転圧
P_b	Pa	配管に作用する圧力
ΔP	N/m ²	設計竜巻の気圧低下量
r_m	mm	平均半径
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	管厚さ
σ_θ	MPa	周方向応力

3.2 評価対象部位

非常用ディーゼル発電設備吸気配管の評価対象部位は、VI-3-別添 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。

非常用ディーゼル発電設備吸気配管は、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ことから、配管本体を評価対象部位として選定する。

非常用ディーゼル発電設備吸気配管の構造強度評価における評価対象部位を図 3-1 に示す。

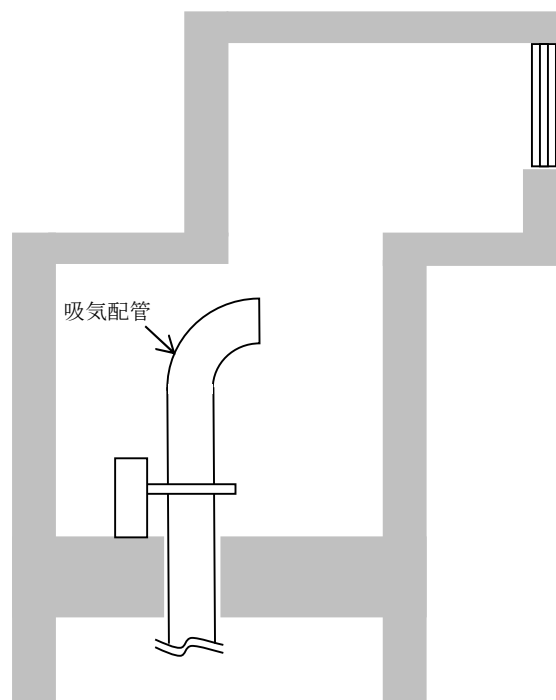


図 3-1 非常用ディーゼル発電設備吸気配管の評価対象部位

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、VI-3-別添 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. 設計竜巻による荷重

外気と繋がっている屋内の施設である非常用ディーゼル発電設備吸気配管は、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考慮する。

(a) 気圧差による荷重

VI-3-別添 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」にて示している気圧差による荷重により、竜巻による最大気圧低下量 (ΔP_{max}) は圧力ポアソン方程式から、 $\Delta P_{max} = 6400 \text{ N/m}^2$ とする。

b. 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

強度評価に用いる荷重の組合せは、VI-3-別添 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、非常用ディーゼル発電設備吸気配管の評価対象部位に対して設定する。

配管本体には、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
外気と繋がっている屋内の 外部事象防護対象施設	非常用ディーゼル発電 設備吸気配管	配管本体	①気圧差による荷重 ②内圧

3.4 許容限界

非常用ディーゼル発電設備吸気配管の許容限界値は、VI-3-別添 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」にて設定している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、「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 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。但し、J S M E 付録材料図表 Part5 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。

非常用ディーゼル発電設備吸気配管の配管本体の許容限界を表 3-3 に、許容応力を表 3-4 に示す。

表 3-3 吸気配管本体の許容限界

許容応力状態	許容限界
	一次応力 (膜+曲げ)
Ⅲ _A S	S _y

表 3-4 配管の許容応力

評価対象配管	管外径 D (mm)	材料	温度条件* (°C)	S _y (MPa)
非常用ディーゼル発電設備吸気配管	609.6	SM400B	45	243
	457.2	SM400B	45	243
	406.4	SM400B	45	243

注記*：最高使用温度

3.5 評価方法

非常用ディーゼル発電設備吸気配管の構造強度評価は、VI-3-別添 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

吸気配管は建屋内に設置されているため、気圧差による荷重を配管内部に受けるものとして計算を行う。非常用ディーゼル発電設備吸気配管のモデル図を図 3-2 に示す。

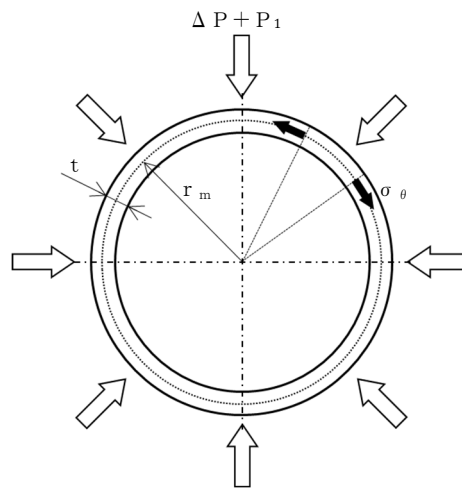


図 3-2 非常用ディーゼル発電設備吸気配管のモデル図

(2) 計算方法

配管にかかる外圧は、設計竜巻により発生する気圧差及び運転圧が影響するので、

$$P_b = \Delta P + P_1$$

a. 外圧により生じる周方向応力

$$\sigma_\theta = \frac{P_b \cdot r_m}{t}$$

$$\text{ただし } r_m = \frac{D - t}{2}$$

なお、非常用ディーゼル発電設備吸気配管の自重は内圧荷重に比べて十分小さいことから、自重を考慮しない。

4. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-1 に示す。

表 4-1 評価条件

管外径 D (mm)	材料	t (mm)	r _m (mm)	P ₁ (Pa)	ΔP (N/m ²)
609.6	SM400B	6.4	301.6	1961.33	6400
457.2	SM400B	6	225.6	1961.33	6400
457.2	SM400B	6.5	225.35	1961.33	6400
406.4	SM400B	6	200.2	1961.33	6400

5. 強度評価結果

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設備吸気配管に発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-1 強度評価結果

管外径 D (mm)	材料	σ _θ (MPa)	許容応力 (MPa)
609.6	SM400B	1	243
457.2 ^{*1}	SM400B	1	243
457.2 ^{*2}	SM400B	1	243
406.4	SM400B	1	243

注記*1：管厚さ 6mm

*2：管厚さ 6.5mm