

VI-3-別添 1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算書

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	1
2.1 評価対象施設	1
2.2 評価方針	2
2.2.1 評価の分類	2
3. 強度設計	6
3.1 構造強度の設計方針	6
3.2 機能維持の方針	11
4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界	61
4.1 荷重及び荷重の組合せ	61
4.2 許容限界	73
4.2.1 建物・構造物	73
4.2.2 機器・配管系	78
5. 強度評価方法	95
5.1 建物・構造物に関する評価式	96
5.1.1 鉄筋コンクリート造構造物	96
5.1.2 排気筒	101
5.1.3 鋼製構造物	102
5.2 機器・配管系に関する評価式	105
5.2.1 衝突評価が必要な機器	105
5.2.2 原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ	106
5.2.3 原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナ	115
5.2.4 原子炉補機海水系配管及び弁, 高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁, 非常用ディーゼル発電設備(燃料移送系)配管及び弁, 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備(燃料移送系)配管及び弁並びに非常用ガス処理系配管及び弁	118
5.2.5 非常用ディーゼル発電設備A-ディーゼル燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ	123
5.2.6 ダンパ	125
5.2.7 角ダクト	130
5.2.8 丸ダクト	134
5.2.9 隔離弁	138
5.2.10 送風機	143
5.2.11 処理装置	145
5.2.12 排気消音器	147

5.2.13 排気管及びベント管	152
6. 適用規格・基準等	157

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」に基づき、竜巻の影響を考慮する施設が、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-1-1-3-3-1「竜巻への配慮に関する基本方針」に示す適用規格・基準等を用いて実施する。

なお、竜巻防護対策設備の設計方針については、VI-3-別添 1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」に示し、具体的な計算の方法及び結果は、VI-3-別添 1-4「竜巻防護ネットの強度計算書」、VI-3-別添 1-5「竜巻防護鋼板の強度計算書」及びVI-3-別添 1-6「架構の強度計算書」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 1-15「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 1-7「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 1-14「波及的影響を及ぼす可能性がある施設の強度計算書」に示す。

2. 強度評価の基本方針

強度評価は、「2.1 評価対象施設」に示す施設を対象として、「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に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」に示す方法を使用し、「6. 適用規格・基準等」に示す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（建物等）

設計竜巻荷重及びそれと組み合わせる荷重に対し構造強度を保持する必要がある屋外の外部事象防護対象施設のうち、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（建物等）とする。

- (2) 屋外の外部事象防護対象施設（建物等を除く）
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保持する必要がある屋外の外部事象防護対象施設（建物等を除く）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保持する必要がある，外気と繋がっている屋内の外部事象防護対象施設とする。
- (4) 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設
設計竜巻荷重及びそれと組み合わせる荷重に対し構造強度を保持する必要がある，外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，「構造強度評価」の方針及び「動的機能維持評価」の方針に分類でき，評価対象施設はこれらの評価を実施する。

外部事象防護対象施設及び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竜巻防護対策設備，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，最初に竜巻防護対策設備，竜巻より防護すべき施設を内包する施設について示し，次に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. 建物・構造物

- (a) 貫通
- (b) ひずみ

b. 機器・配管系

(a) 貫入

(2) 構造強度評価

構造強度評価は、竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重により生じる応力等に対し、評価対象施設及びその支持構造物が、当該施設の機能を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. 建物・構造物

建物・構造物の強度評価のうち、鉄筋コンクリート造構造物と鋼製構造物は、その構造を踏まえた評価項目を抽出する。

(a) 鉄筋コンクリート造構造物

- イ. 裏面剥離
- ロ. 転倒及び脱落
- ハ. 変形

(b) 鋼製構造物

- イ. 転倒及び脱落
- ロ. 変形

(c) 排気筒

- イ. 変形角

b. 機器・配管系

- (a) 原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ
- (b) 原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナ
- (c) 非常用ディーゼル発電設備A-ディーゼル燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ
- (d) 原子炉補機海水系配管及び弁、高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁、非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁
- (e) ダンパ（換気空調設備）
- (f) 角ダクト（換気空調設備）及び丸ダクト（換気空調設備）
- (g) 隔離弁（換気空調設備）
- (h) 送風機（換気空調設備）
- (i) 処理装置（換気空調設備）

- (j) 非常用ガス処理系配管及び弁
- (k) 排気消音器（非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設）
- (l) 排気管及びベント管（非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料貯蔵タンク，ディーゼル燃料デイトンク並びに潤滑油サンプタンクの付属施設）

(3) 動的機能維持評価

動的機能維持評価は，設計竜巻荷重及びそれと組み合わせる荷重に対し，竜巻時及び竜巻通過後において，評価対象施設のうち動的機器が，当該施設の動的機能を保持可能なことを確認する評価とする。

a. 機器・配管系

- (a) 原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ

表 2-1 強度評価における施設分類

強度評価における分類	施設名称
(1) 竜巻より防護すべき施設を内包する施設（建物等）	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建物 ・タービン建物 ・廃棄物処理建物 ・制御室建物 ・ディーゼル燃料貯蔵タンク室 ・B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽
(2) 屋外の外部事象防護対象施設（建物等を除く）	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ ・原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナ ・排気筒 ・原子炉補機海水系配管及び弁，高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁，非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁 ・非常用ディーゼル発電設備A-ディーゼル燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル燃料移送ポンプ
(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"> ・ダンパ（換気空調設備） ・隔離弁（換気空調設備） ・角ダクト（換気空調設備）及び丸ダクト（換気空調設備） ・送風機（換気空調設備） ・処理装置（換気空調設備） ・非常用ガス処理系配管及び弁
<p>(4) 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設</p> <p>a. 機械的影響を与える可能性がある施設</p> <p>b. 機能的影響を与える可能性がある施設</p>	<p>a. 機械的影響を与える可能性がある施設</p> <ul style="list-style-type: none"> ・1号機原子炉建物 ・1号機タービン建物 ・1号機廃棄物処理建物 ・1号機排気筒 <p>b. 機能的影響を与える可能性がある施設</p> <ul style="list-style-type: none"> ・排気筒モニタ室 ・復水貯蔵タンク遮へい壁 <p>b. 機能的影響を与える可能性がある施設</p> <ul style="list-style-type: none"> ・排気消音器（非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設） ・排気管及びベント管（非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料貯蔵タンク，ディーゼル燃料デイタンク並びに潤滑油サンプタンクの付属施設）

3. 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、強度設計の方針を設定する。

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、機能維持の方針において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（建物等）

竜巻より防護すべき施設を内包する施設（建物等）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、以下の設計とする。

原子炉建物，タービン建物，廃棄物処理建物，制御室建物，ディーゼル燃料貯蔵タンク室及びB-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽は，設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し，構造健全性を維持することで，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し，また，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。

(2) 屋外の外部事象防護対象施設（建物等を除く）

屋外の外部事象防護対象施設（建物等を除く）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，以下の設計とする。

a. 原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレー補機海水ポンプ

原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレー補機海水ポンプは，取水槽海水ポンプエリアに設けた基礎に本体を基礎ボルトで固定し，ポンプの機能保持に必要な付属品を本体にボルトで固定し，設計竜巻の風圧力による荷重，気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し，主要な構造部材が海水の送水機能を維持可能な構造強度を有すること及び海水を送水するための動的機能を維持する設計とする。

b. 原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレー補機海水ストレーナ

原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレー補機海水ストレーナは，取水槽循環水ポンプエリアに設けた基礎に支持脚を基礎ボルトで固定し，設計竜巻の風圧力による荷重，気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し，主要な構造部材が海水中の固形

物を除去する機能を保持可能な構造強度を有する設計とする。

- c. 原子炉補機海水系配管及び弁， 高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁， 非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁

原子炉補機海水系配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁は，取水槽床面又は壁面にサポートで支持し，設計竜巻の風圧力による荷重，気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し，主要な構造部材が原子炉補機及び高圧炉心スプレイ系補機を冷却する機能を保持可能な構造強度を有する設計とする。

非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁は，燃料移送ポンプエリア及び配管ダクト床面又は壁面にサポートで支持し，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，主要な構造部材が非常用電源設備に燃料を供給する機能を保持可能な構造強度を有する設計とする。

- d. 非常用ディーゼル発電設備Aーディーゼル燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ

非常用ディーゼル発電設備Aーディーゼル燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプは，燃料移送ポンプエリアに設けた基礎に本体を基礎ボルトで固定し，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，主要な構造部材が非常用電源設備に燃料を供給する機能を保持可能な構造強度を有する設計とする。

- e. 排気筒

排気筒は，設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し，主要な構造部材が流路を確保する機能を保持可能な構造強度を有する設計とする。

(3) 外気と繋がっている屋内の外部事象防護対象施設

外気と繋がっている屋内の外部事象防護対象施設は，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」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，以下の設計とする。

- a. ダンパ（換気空調設備）

ダンパは，原子炉建物の天井面等にサポートにより固定し，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，開閉可能な機能及び閉止性の保持を考慮して主要な構造部材が構造健全性を保持する設計とする。

b. 角ダクト及び丸ダクト（換気空調設備）

角ダクト及び丸ダクトは、原子炉建物の天井面等にサポートで支持し、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、主要な構造部材が換気空調を行う機能を保持可能な構造強度を有する設計とする。

c. 隔離弁（換気空調設備）

隔離弁は、換気空調設備のダクトに固定し、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、開閉可能な機能及び閉止性の保持を考慮して、主要な構造部材が構造健全性を保持する設計とする。

d. 送風機（換気空調設備）

送風機は、原子炉建物の床面等にサポートで支持し、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、主要な構造部材が必要な風量を送風する機能を保持可能な構造強度を有する設計とする。

e. 処理装置（換気空調設備）

処理装置は、原子炉建物の床面等にサポートで支持し、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、主要な構造部材が外気を処理する機能を保持する設計とする。

f. 非常用ガス処理系配管及び弁

非常用ガス処理系配管及び弁は、配管ダクト床面又は壁面にサポートで支持し、設計竜巻の気圧差による荷重及びその他の考慮すべき荷重に対し、主要な構造部材が放射性物質の放出低減機能を保持する設計とする。

「(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。

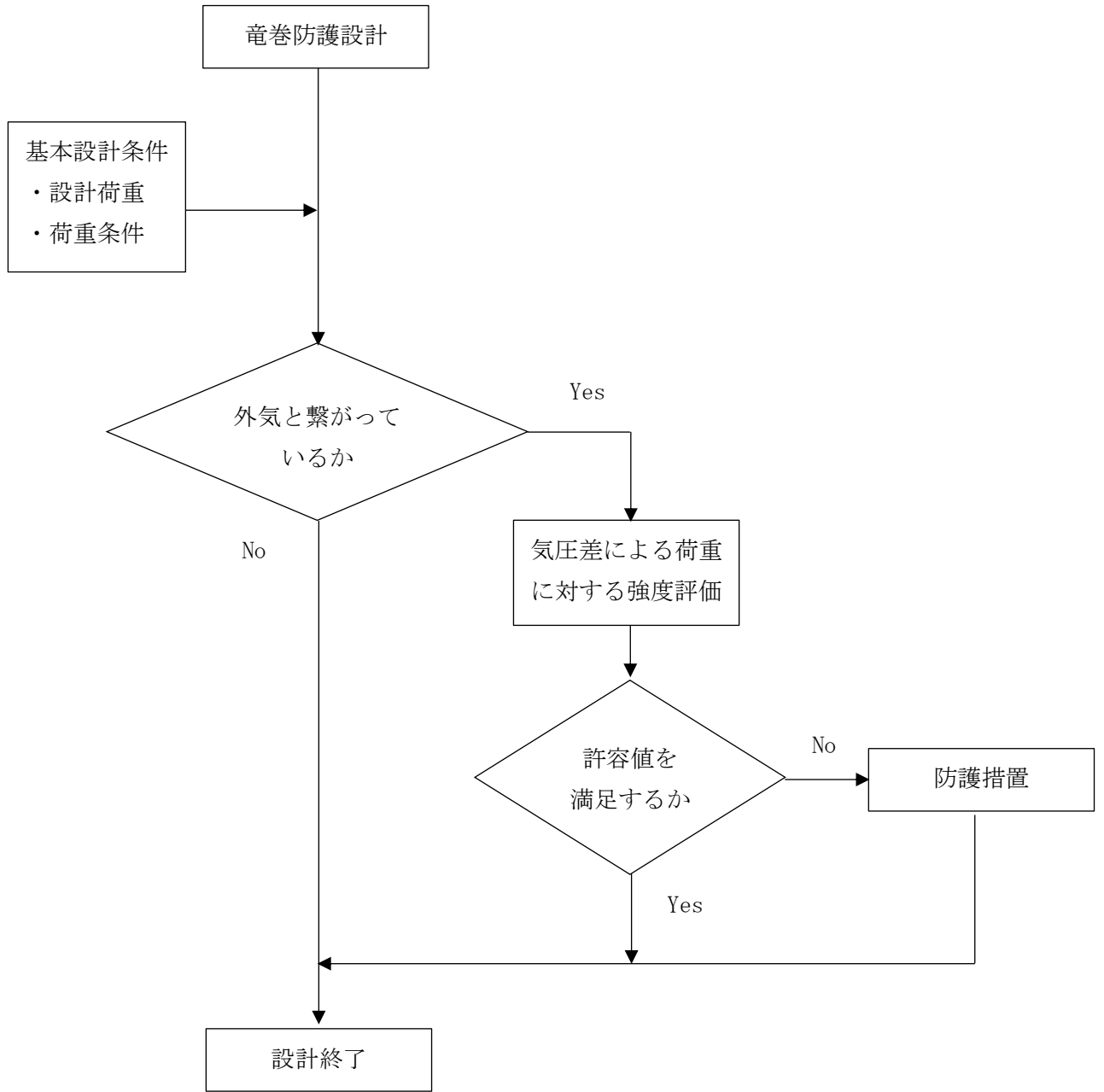


図 3-1 屋内の外部事象防護対象施設的设计フロー

(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

機械的影響を及ぼす可能性がある施設は、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」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、以下の設計とする。

(a) 1号機タービン建物、1号機廃棄物処理建物及び排気筒モニタ室

1号機タービン建物、1号機廃棄物処理建物及び排気筒モニタ室は、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、排気筒並びに竜巻より防護すべき施設を内包するタービン建物、廃棄物処理建物及び制御室建物に接触及び倒壊による影響を及ぼさない設計とする。

(b) 1号機原子炉建物、1号機排気筒及び復水貯蔵タンク遮へい壁

1号機原子炉建物、1号機排気筒及び復水貯蔵タンク遮へい壁は、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タービン建物、制御室建物及びB-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽等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

機能的影響を及ぼす可能性がある施設は、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」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、以下の設計とする。

(a) 排気消音器（非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設）

排気消音器は、原子炉建物にボルトで固定し、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、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) 排気管及びベント管（非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料貯蔵タンク、ディーゼル燃料デイトンク並びに潤滑油サンプタンクの付属施設）

排気管及びベント管は、サポート等により建物に固定し、設計竜巻の風圧力、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、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。

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（建物等）

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. 建物（原子炉建物，タービン建物，廃棄物処理建物，制御室建物）

(a) 構造設計

建物は、「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。

建物に作用する荷重は、外殻を構成する屋根スラブ及び外壁に作用し、建物内に配置された耐震壁等を介し、直接岩盤に支持される基礎スラブへ伝達する構造とする。

建物の構造計画を表 3-1 に示す。

(b) 評価方針

イ. 衝突評価

建物の衝突評価については、設計飛来物が竜巻より防護すべき施設の外殻を構成する部材を貫通しない設計とするために、設計飛来物による衝撃荷重に対し、当該部材が設計飛来物の貫通を生じない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。

竜巻防護対策設備のうち鋼製扉（以下「扉」という。）については、設計飛来物が竜巻より防護すべき施設の外殻を構成する部材を貫通しない設計とするために、設計飛来物による衝撃荷重に対し、当該部材が設計飛来物の貫通を生じない必要最小肉厚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、「5.1.3(3) 強度評価方法」に示す解析による必要最小肉厚と扉の厚さを比較することで評価を行う。

ロ. 構造強度評価

建物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、建物の外殻を構成する部材自体の脱落を生じない設計とするために、外殻となる外壁及び屋根スラブのうち、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外壁及び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。

また、建物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、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、屋根スラブ及び屋根スラブのスタッド並びに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物の地震応答解析モデルを用いて算出したせん断ひずみを基に評価を行う。

扉については、設計竜巻の気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、扉支持部材の破断による転倒及び脱落を生じないことを計算により確認する。

表 3-1 建物の構造計画 (1/6)

施設 分類	施設名称	計画の概要		説明図
		主体構造	支持構造	
建物	【位置】			<p>タービン建物</p> <p>原子炉建物</p> <p>廃棄物処理建物</p> <p>制御室建物</p> <p>PN</p>

S2 補 VI-3-別添 1-1 R0

表 3-1 建物の構造計画 (2/6)

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
原子炉 建物	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。	荷重は建物の外殻を構成する屋根スラブ及び外壁に作用し、建物内に配置された耐震壁を介し、基礎スラブへ伝達する構造とする。	<p>(A-A断面)</p> <p>(B-B断面)</p>

注記* : 「EL」は東京湾平均海面 (T.P.) を基準としたレベルを示す。

表 3-1 建物の構造計画 (3/6)

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
タービン 建物	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。	荷重は建物の外殻を構成する屋根スラブ及び外壁に作用し、建物内に配置された耐震壁及びブレイムを介し、基礎スラブへ伝達する構造とする。	<p>The diagrams show the structural layout of the turbine building. The plan view at the top right shows a rectangular footprint with a north arrow (PN) and a section line A-A. Cross-section A-A (middle) shows a vertical profile with a total height of 41.6m. Key levels are marked: EL 41.6 (roof), EL 32.0 (upper floor), EL 20.6 (middle floor), EL 12.5 (lower floor), EL 5.5 (ground level), EL 2.0 (foundation), and EL 0.0 (base). A scale bar below indicates dimensions of 0.5, 9.4, 7.0, 7.0, 7.0, 6.0, 7.0, 7.0, 0.5, totaling 51.4m. Cross-section B-B (bottom) shows a wider profile with a total height of 41.6m. Key levels are the same as in A-A. A scale bar below indicates dimensions of 0.5, 11.0, 8.0, 12.0, 11.5, 12.0, 11.5, 12.0, 12.5, 9.0, 8.0, 8.0, 10.5, 11.0, 0.5, totaling 138.0m. Both sections label the '蒸気タービンの基礎' (Steam turbine foundation) and 'ブレイム' (Bulb). A north arrow (PN) is also present for section B-B.</p>

S2 補 VI-3-別添 1-1 R0

表 3-1 建物の構造計画 (4/6)

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
廃棄物 処理建物	鉄筋コンクリート造で構成する。	荷重は建物の外殻を構成する屋根スラブ及び外壁に作用し、建物内に配置された耐震壁を介し、基礎スラブへ伝達する構造とする。	<p>(A-A断面)</p> <p>(B-B断面)</p> <p>(単位:m)</p>

表 3-1 建物の構造計画 (5/6)

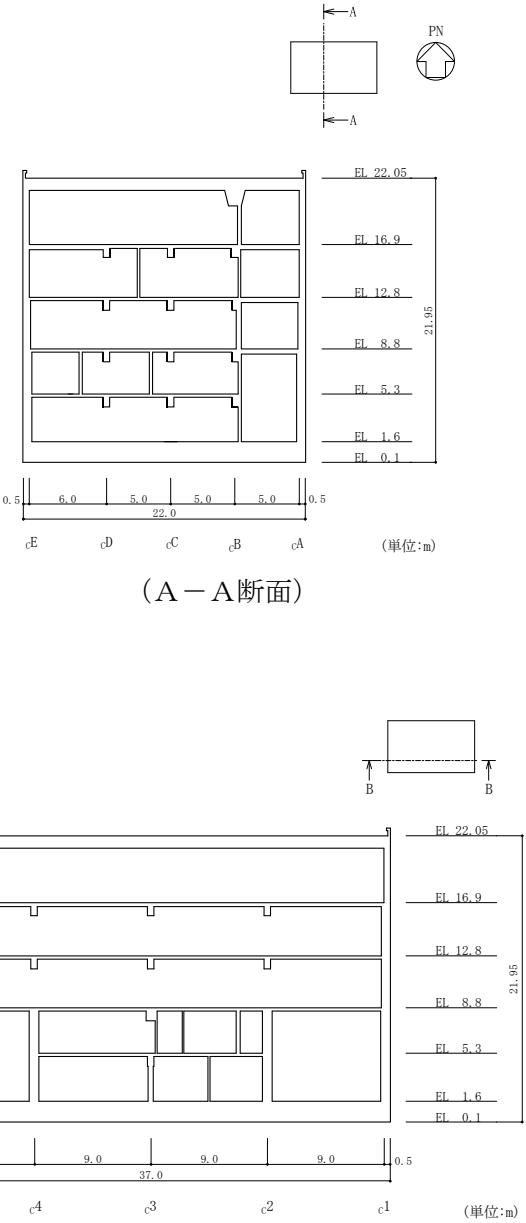
施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
制御室 建物	鉄筋コンクリート造で構成する。	荷重は建物の外殻を構成する屋根スラブ及び外壁に作用し、建物内に配置された耐震壁を介し、基礎スラブへ伝達する構造とする。	 <p>(A-A断面)</p> <p>(B-B断面)</p>

表 3-1 建物の構造計画 (6/6)

施設 分類	施設名称	計画の概要		説明図
		主体構造	支持構造	
原子炉 建物 (扉)				

S2 補 VI-3-別添 1-1 R0

b. 構造物（ディーゼル燃料貯蔵タンク室及びB-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽）

(a) 構造設計

構造物は、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及びV-1-1-3-3-1「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。

構造物は、地下に埋設された鉄筋コンクリート造とし、地上部にはスラブ、開口等が露出し、露出する開口部には鋼製の蓋を設置する構造とする。

構造物に作用する荷重は、地上に露出したスラブ、鋼製蓋等に作用し、鉄筋コンクリート造の躯体を介し、直接岩盤に支持される基礎スラブへ伝達する構造とする。

構造物の構造計画を表 3-2 に示す。

(b) 評価方針

イ. 衝突評価

構造物の衝突評価については、設計飛来物による衝撃荷重に対し、設計飛来物が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しない設計とするために、地上に露出したスラブ及び鋼製蓋が設計飛来物の貫通を生じない最小厚さ以上であることを計算により確認する。評価方法としては、スラブについては、「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、鋼製蓋については、「5.1.3(3) 強度評価方法」に示す解析による必要最小肉厚と鋼製蓋の厚さと比較することで評価を行う。

ロ. 構造強度評価

構造物の構造強度評価については、設計飛来物による衝撃荷重に対し、竜巻より防護すべき施設に波及的影響を与えないよう、構造物の外殻を構成する部材自体の脱落を生じない設計とするために、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。

表 3-2 構造物の構造計画 (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	
構造物	【位置】 ディーゼル燃料貯蔵タンク室 B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽			

表 3-2 構造物の構造計画 (2/3)

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
ディーゼル燃料貯蔵タンク室	<p>地下に埋設された外殻の躯体を鉄筋コンクリート造とし、地上部に露出するスラブは鉄筋コンクリート造、開口部は鋼製蓋により構成する。</p>	<p>荷重は地上に露出した鉄筋コンクリート造のスラブ及び鋼製蓋に作用し、鉄筋コンクリート造の躯体を介し、基礎スラブへ伝達する構造とする。</p>	<p>(平面図)</p> <p>(A-A断面)</p> <p>(単位：m)</p>

S2 補 VI-3-別添 1-1 R0

表 3-2 構造物の構造計画 (3/3)

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽	<p>地下に埋設された外殻の躯体を鉄筋コンクリート造とし、地上部に露出するスラブは鉄筋コンクリート造、開口部は鋼製蓋により構成する。</p>	<p>荷重は地上に露出した鉄筋コンクリート造のスラブ及び鋼製蓋に作用し、鉄筋コンクリート造の躯体を介し、基礎スラブへ伝達する設計とする。</p>	<p>KEY-PLAN</p> <p>(平面図)</p> <p>(A-A断面)</p>

(2) 屋外の外部事象防護対象施設（建物等を除く）

a. 原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ

(a) 構造設計

原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプは、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及び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。

原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプは、鋼製の立形ポンプの上に原動機を取り付け、原動機によりポンプの軸を回転させる構造とする。

原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプはコンクリート基礎に基礎ボルトで固定し、原動機はポンプの上の原動機台にボルトで結合する構造とする。端子箱等のポンプの機能維持に必要な付属品は、原動機にボルトで結合する。また、作用する荷重については、各取付ボルトを介して接続する構造部材に伝達し、基礎ボルトに伝達する構造とする。原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプの構造計画を表 3-3 に示す。

(b) 評価方針

イ. 衝突評価

原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプの衝突評価については、竜巻防護ネットを通過する飛来物が原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプの外殻を構成する部材を貫通しない設計とするために、竜巻防護ネットを通過する飛来物による衝撃荷重に対し、当該部材が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」に示す評価式により算出した厚さを基に評価を行う。

ロ. 構造強度評価

原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプの構造強度評価については、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及び竜巻防護ネットを通過する飛来物による衝撃荷重に対し、原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ及びポンプの機能保持に必要な付属品を支持する基礎ボルト、取付ボルト並びにポンプの機能維持に必要な付属品を支持する原動機フレームに生じる応力が許容応力以下であることを計算により確認する。評価方法としては、「5.2.2(1)c. 強度評価方法」に示すとおり、評価式により算出した応力を基に評価を行う。

ハ. 動的機能維持評価

原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプの動的機能維持評価については、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重、竜巻防護ネットを通過する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、軸受部における発生荷重が、動的機能を維持可能な許容荷重以下であることを計算により確認する。評価方法としては、「5.2.2(1)c. 強度評価方法」に示すとおり、評価式により算出した荷重を基に評価を行う。

表 3-3 原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプの構造計画(1/2)

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】 原子炉補機海水ポンプは屋外の取水槽海水ポンプエリアに設置する設計としている。</p>			
原子炉補機海水ポンプ	鋼製のたて形ポンプ	基礎に基礎ボルトで固定する。	
原子炉補機海水ポンプモータ	鋼製の原動機フレームに付属品が取り付けられた構造	ポンプの上にボルト（原動機取付ボルト）で結合する。付属品は取付ボルトで固定する。	

表 3-3 原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプの構造計画(2/2)

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】</p> <p>高圧炉心スプレイ補機海水ポンプは屋外の取水槽海水ポンプエリアに設置する設計としている。</p>			
高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ	鋼製のたて形ポンプ	基礎に基礎ボルトで固定する。	
高圧炉心スプレイ補機海水ポンプモータ	鋼製の原動機フレームに付属品が取り付けられた構造	ポンプの上にボルト(原動機取付ボルト)で結合する。付属品は取付ボルトで固定する。	

b. 原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナ

(a) 構造設計

原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナは、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及びVI-1-1-3-3-3「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。

原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナは、胴と支持客が鋳物一体となった円筒型の容器を並べて組み合わせ、支持脚をコンクリート基礎に基礎ボルトで固定する構造とする。また、作用する荷重については、支持脚を介して基礎ボルトに伝達する構造とする。原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナの構造計画を表 3-4 に示す。

(a) 評価方針

イ. 構造強度評価

原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナの構造強度評価については、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナを構成する基礎ボルトに生じる応力が許容応力以下であることを計算により確認する。評価方法としては、「5.2.3(1)c. 強度評価方法」に示すとおり、評価式により算出した応力を基に評価を行う。

表 3-4 原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナの構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】</p> <p>原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナは屋外の取水槽循環水ポンプエリアに設置する設計としている。</p>			
原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナ	胴及び支持客が鋳物一体となった円筒形の容器を組み合わせ構成する	支持脚を基礎に基礎ボルトで固定する。	

- c. 原子炉補機海水系配管及び弁，高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁，非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁

(a) 構造設計

原子炉補機海水系配管及び弁，高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁，非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁は，「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及び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。

配管及び弁は，鋼製の配管本体及び弁を主体構造とし，支持構造物により床，壁等に支持する構造とする。また，作用する荷重については，配管本体に作用する構造とする。配管及び弁の構造計画を表 3-5 に示す。

(b) 評価方針

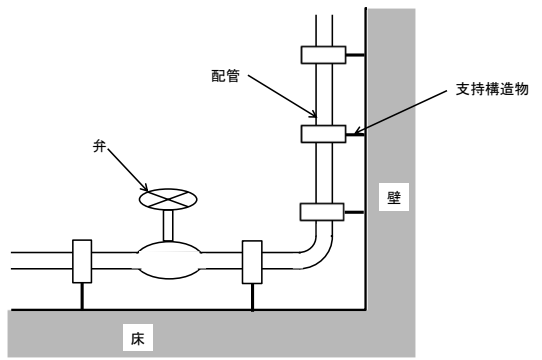
イ. 衝突評価

原子炉補機海水系配管及び弁，高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁，非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁の衝突評価については，竜巻防護ネット等を通る飛来物による衝撃荷重に対し，配管及び弁の外殻を構成する部材が，機能喪失に至る可能性のある変形を生じないことを計算により確認する。評価方法としては，「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貫通限界厚さを基に評価を行う。

ロ. 構造強度評価

原子炉補機海水系配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁の強度評価については，設計竜巻の風圧力による荷重，気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し，配管本体に生じる応力が許容応力以下であることを計算により確認する。非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁の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，「5.2.4(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 原子炉補機海水系配管及び弁， 高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁， 非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁の構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】 原子炉補機海水系配管及び弁， 高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁， 非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁は屋外の取水槽海水ポンプエリア及び燃料移送ポンプエリアに設置する設計としている。</p>			
原子炉補機海水系配管及び弁， 高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁， 非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁	鋼製の配管本体及び弁で構成する。	配管本体及び弁は，支持構造物により床及び壁等から支持する。	

d. 非常用ディーゼル発電設備Aーディーゼル燃料移送ポンプ及び高压炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ

(a) 構造設計

非常用ディーゼル発電設備Aーディーゼル燃料移送ポンプ及び高压炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプは、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及び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。

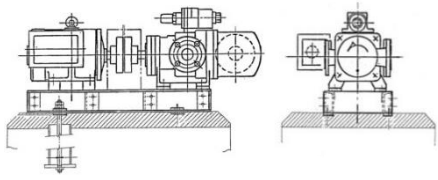
非常用ディーゼル発電設備Aーディーゼル燃料移送ポンプ及び高压炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプは、ポンプ部と原動機部からなる横型ポンプであり、基礎ボルト及び取付ボルトによって固定されている。また、作用する荷重については、燃料移送ポンプの耐圧部に作用する構造とする。非常用ディーゼル発電設備Aーディーゼル燃料移送ポンプ及び高压炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプの構造計画を表3-6に示す。

(b) 評価方針

ロ. 構造強度評価

非常用ディーゼル発電設備Aーディーゼル燃料移送ポンプ及び高压炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプの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、ポンプ耐圧部に生じる応力が許容応力以下であることを計算により確認する。評価方法としては、「5.2.4(3) 強度評価方法」に示すとおり、設計竜巻による荷重に運転時の状態で作用する荷重を加えた応力を基に評価を行う。

表3-6 非常用ディーゼル発電設備Aーディーゼル燃料移送ポンプ及び高压炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプの構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
【位置】 非常用ディーゼル発電設備Aーディーゼル燃料移送ポンプ及び高压炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプは屋外の燃料移送ポンプエリアに設置する設計としている。			
非常用ディーゼル発電設備Aーディーゼル燃料移送ポンプ及び高压炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ	鋼製の横型ポンプに付属品が取り付けられた構造	基礎に基礎ボルト等で固定する。	

e. 排気筒

(a) 構造設計

排気筒は、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及び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。

排気筒は、地盤からの高さ 120m である内径 3.3m の鋼板製筒身（排気筒（空調換気系用））を鋼管四角形鉄塔で支えた鋼製鉄塔支持型排気筒である。また、筒身外部には排気筒（非常用ガス処理系用）が筒身に支持されている。筒身は第 4 支持点位置（EL 113.5m）にて制振装置（粘性ダンパ）を介して鉄塔と接合されている。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。

排気筒の構造計画を表 3-7 に示す。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

排気筒の構造強度評価については、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、排気筒全体が倒壊しない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、FEMを用いた解析により算出した変形角を基に評価を行う。

(3) 外気と繋がっている屋内の外部事象防護対象施設

a. ダンパ（換気空調設備）

(a) 構造設計

ダンパは、「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。

ダンパは鋼製の外板、羽根及びシャフトを主体構造とし、支持構造物で天井面等に支持する構造とする。また、作用する荷重については、外板及び羽根に作用し、羽根を介してシャフトに伝達する構造とする。ダンパの構造計画を表3-8に示す。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

ダンパ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になることを計算により確認する。評価方法としては、「5.2.6(3) 強度評価方法」に示すとおり、評価式により算出した応力を基に評価を行う。

表 3-8 ダンパ（換気空調設備）の構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】</p> <p>ダンパは十分な強度を有する建物（原子炉建物）内に設置する設計としている。</p>			
ダンパ（換気空調設備）	外板、羽根及びシャフトなどの鋼材で構成する。	接続ダクトにより支持する。	

b. 角ダクト（換気空調設備）及び丸ダクト（換気空調設備）

(a) 構造設計

角ダクト及び丸ダクトは、「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。

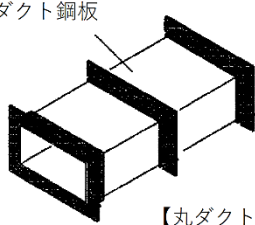
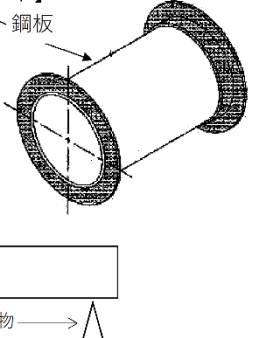
角ダクト及び丸ダクトは、鋼製のダクトを主体構造とし、支持構造物により天井面等に支持する構造とする。また、作用する荷重については、ダクト鋼板に作用する構造とする。角ダクト及び丸ダクトの構造計画を表3-9に示す。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

角ダクト及び丸ダクト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、角ダクト及び丸ダクトを構成する鋼製のダク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、ダクト形状で評価方法を分類し「5.2.7(3) 強度評価方法」及び「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3-9 角ダクト（換気空調設備）及び丸ダクト（換気空調設備）の構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】 角ダクト（換気空調設備）及び丸ダクト（換気空調設備）は十分な強度を有する建物（原子炉建物、制御室建物及び廃棄物処理建物）内に設置する設計としている。</p>			
角ダクト（換気空調設備）及び丸ダクト（換気空調設備）	鋼製のダクトで構成する。	ダクトは、支持構造物により建物壁、床及びはり等から支持する。	<p>【角ダクト】 ダクト鋼板</p>  <p>【丸ダクト】 ダクト鋼板</p>  <p>ダクト</p> <p>← 支持構造物 →</p> <p>建物等、床、壁等</p>

c. 隔離弁（換気空調設備）

(a) 構造設計

隔離弁は、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及び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。

隔離弁は、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。隔離弁の構造計画を表3-10に示す。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

隔離弁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にな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 3-10 隔離弁（換気空調設備）の構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】 隔離弁は十分な強度を有する建物（原子炉建物及び廃棄物処理建物）内に設置する設計としている。</p>			
隔離弁（換気空調設備）	鋳鋼材で構成する。	接続ダクトで支持する。	

d. 送風機（換気空調設備）

(a) 構造設計

送風機は、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及び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。

送風機は、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構成し、床に基礎ボルトで支持する構造とする。送風機の構造計画を表 3-11 に示す。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

送風機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、「5.2.10 (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 送風機（換気空調設備）の構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】 送風機は十分な強度を有する建物（原子炉建物及び廃棄物処理建物）内に設置する設計としている。</p>			
送風機（換気空調設備）	ケーシング及びケーシング内の羽根車及び主軸で構成する。	床に基礎ボルトで支持する。	

e. 処理装置（換気空調設備）

(a) 構造設計

処理装置は、「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。

処理装置は流路を形成するケーシング、ケーシングを固定するはり及び長柱で形成し、床に基礎ボルトで支持する構造とする。処理装置の構造計画を表 3-12 に示す。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

処理装置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、「5.2.11 (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 3-12 処理装置（換気空調設備）の構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】 処理装置は十分な強度を有する建物（原子炉建物及び廃棄物処理建物）内に設置する設計としている。</p>			
処理装置（換気空調設備）	ケーシング及びはり等の鋼材で構成する。	床に基礎ボルトで支持する。	

f. 非常用ガス処理系配管及び弁

(a) 構造設計

非常用ガス処理系配管及び弁は、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及び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。

非常用ガス処理系配管及び弁は鋼製の配管を主体構造とし、支持構造物により床、壁等に支持する構造とする。また、作用する荷重については、配管本体に作用する構造とする。

(b) 評価方針

イ. 構造強度評価

非常用ガス処理系配管及び弁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、「5.2.4(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。

(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) 1号機原子炉建物, 1号機タービン建物, 1号機廃棄物処理建物及び排気筒モニタ室

イ. 構造設計

1号機原子炉建物, 1号機タービン建物, 1号機廃棄物処理建物及び排気筒モニタ室は、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及びV-1-1-3-3-1「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。

1号機原子炉建物, 1号機タービン建物, 1号機廃棄物処理建物及び排気筒モニタ室は、鉄筋コンクリート造（一部鉄骨造）とし、荷重は建物の外殻を構成する屋根スラブ及び外壁に作用し、建物内に配置された耐震壁及びフレームを介し、基礎スラブへ伝達する構造とする。

1号機原子炉建物, 1号機タービン建物, 1号機廃棄物処理建物及び排気筒モニタ室の構造計画を表3-13～表3-16に示す。

ロ. 評価方針

(イ) 構造強度評価

1号機原子炉建物, 1号機タービン建物, 1号機廃棄物処理建物及び排気筒モニタ室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、タービン建物, 廃棄物処理建物, 制御室建物及び排気筒に倒壊による影響を

及ぼさないことを解析により確認する。評価方法としては、各建物の地震応答解析モデルを用いて算出したせん断ひずみ及び層間変形角を基に評価を行う。

また、1号機タービン建物、1号機廃棄物処理建物及び排気筒モニタ室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、タービン建物、廃棄物処理建物、制御室建物及び排気筒に接触する変形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、各建物の地震応答解析モデルを用いて算出した隣接建物との最大相対変位を基に評価を行う。

(b) 復水貯蔵タンク遮へい壁

イ. 強度評価

復水貯蔵タンク遮へい壁は、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及びV-1-1-3-3-1「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。

復水貯蔵タンク遮へい壁は、鉄筋コンクリート造、荷重は遮へい壁に作用し、基礎へ伝達する構造とする。

復水貯蔵タンク遮へい壁の構造計画を表3-17に示す。

ロ. 評価方針

(イ) 構造強度評価

復水貯蔵タンク遮へい壁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、竜巻より防護すべき施設を内包するB-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽に倒壊による影響及ぼさないことを計算等により確認する。評価方法としては、はり要素により算出した断面力を基に評価を行う。

表 3-13 1号機原子炉建物の構造計画 (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	
建物	【位置】			

S2 補 VI-3-別添 1-1 R0

表 3-13 1号機原子炉建物の構造計画 (2/2)

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
1号機 原子炉建物	鉄筋コンクリート造（一部鉄骨造）で構成する。	荷重は建物の外殻を構成する屋根スラブ及び外壁に作用し，建物内に配置された耐震壁及びフレームを介し，基礎スラブへ伝達する構造とする。	<p>(A-A断面)</p> <p>(B-B断面)</p>

表 3-14 1号機タービン建物の構造計画 (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	
建物	【位置】			<p>PN</p> <p>0 250 500 m</p> <p>□ 1号機タービン建物</p>

表 3-14 1号機タービン建物の構造計画 (2/2)

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
1号機タービン建物	鉄筋コンクリート造（一部鉄骨造）で構成する。	荷重は建物の外殻を構成する屋根スラブ及び外壁に作用し、建物内に配置された耐震壁及びフレームを介し、基礎スラブへ伝達する構造とする。	<p>(A-A断面)</p> <p>(B-B断面)</p>

表 3-15 1号機廃棄物処理建物の構造計画 (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	
建物	【位置】			<p>1号機廃棄物処理建物</p>

S2 補 VI-3-別添 1-1 R0

表 3-15 1号機廃棄物処理建物の構造計画 (2/2)

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
1号機 廃棄物 処理建物	鉄筋コンクリート造で構成する。	荷重は建物の外殻を構成する屋根スラブ及び外壁に作用し、建物内に配置された耐震壁を介し、基礎スラブへ伝達する構造とする。	<p>(A-A断面)</p> <p>(B-B断面)</p>

表 3-16 排気筒モニタ室の構造計画 (1/2)

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

S2 補 VI-3-別添 1-1 R0

表 3-16 排気筒モニタ室の構造計画 (2/2)

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
排気筒 モニタ室	鉄筋コンクリート造で構成する。	荷重は建物の外殻を構成する屋根スラブ及び外壁に作用し、建物内に配置された耐震壁を介し、基礎スラブへ伝達する構造とする。	<p>(A-A断面)</p> <p>(B-B断面)</p> <p>(単位:m)</p>

表 3-17 復水貯蔵タンク遮へい壁の構造計画 (1/2)

施設 分類	施設名称	計画の概要		説明図
		主体構造	支持構造	
構造物	<p>【位置】</p> <p>復水貯蔵タンク遮へい壁</p>			

表 3-17 復水貯蔵タンク遮へい壁の構造計画 (2/2)

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
復水貯蔵タンク遮へい壁	鉄筋コンクリート造で構成する。	荷重は遮へい壁に作用し、基礎へ伝達する構造とする。	<p>PN</p> <p>遮へい壁</p> <p>基礎</p> <p>(平面図)</p> <p>遮へい壁</p> <p>基礎</p> <p>(A-A断面)</p>

(d) 1号機排気筒

イ. 構造設計

1号機排気筒は、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及びV-1-1-3-3-1「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。

1号機排気筒は、地盤からの高さ120mである内径2.8mの鋼板製筒身を鋼管四角形鉄塔で支えた鋼製鉄塔支持型排気筒である。筒身は支持点位置(EL 37.5m, EL 59.5m, EL 89.5m 及び EL 113.5m)にて鉄塔と接合されている。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。

1号機排気筒の構造計画を表3-18に示す。

ロ. 評価方針

(イ) 構造強度評価

1号機排気筒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、1号機排気筒が原子炉建物、タービン建物等に倒壊による影響を及ぼさないことを解析により確認する。評価方法としては、「5.2.1(3) 強度評価方法」に示すとおり、FEMを用いた解析により算出した変形角を基に評価を行う。

b. 機能的影響を及ぼす施設

- (a) 排気消音器（非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設）

イ. 構造設計

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。

排気消音器は、鋼製の胴板を主体構造とし、原子炉建物屋上に本体を基礎ボルト及び結合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、排気消音器を介し、基礎ボルト及び結合ボルトに伝達する構造とする。排気消音器の構造計画を表3-19に示す。

ロ. 評価方針

(イ) 構造強度評価

排気消音器の強度評価については、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、基礎ボルト及び結合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、「5.2.12(3) 強度評価方法」に示すとおり、評価式により算出した応力を基に評価を行う。

表 3-19 排気消音器（非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設）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】			
排気消音器は、原子炉建物屋上に設置する設計としている。			
排気消音器	鋼製の胴板で構成する。	原子炉建物屋上に設けた基礎に本体を基礎ボルト及び取付ボルトで固定する。	

- (b) 排気管及びベント管（非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料貯蔵タンク，ディーゼル燃料デイトンク並びに潤滑油サンプタンクの付属施設）

イ. 構造設計

排気管及びベント管は，「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。

排気管及びベント管は，鋼製の配管を主体構造とし，サポート等により建物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。

排気管及びベント管の構造計画を表3-20に示す。

ロ. 評価方針

(イ) 構造強度評価

排気管及びベント管の強度評価については，設計竜巻の風圧力による荷重，気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し，排気管及びベント管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，「5.2.13(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 3-20 排気管（非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設）及びベント管（非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料貯蔵タンク，ディーゼル燃料デイトンク並びに潤滑油サンプタンクの付属施設）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】 排気管は，原子炉建物屋上に設置する設計としている。</p>			
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物等に固定する。	
ベント管			

「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 3-21 に示すとおり評価対象部位を設定する。

表 3-21 竜巻の影響を考慮する施設 強度評価対象部位 (1/6)

分類	施設名称	評価対象部位	評価項目	評価項目分類	選定理由
竜巻より防護すべき施設を内包する施設 (建物等)	原子炉建物 タービン建物 廃棄物処理建物 制御室建物	屋根スラブ(デッキプレートを含む) スタッド 外壁 構造躯体	衝突	貫通	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外壁を評価対象部位として選定する。
			構造強度	裏面剥離	竜巻より防護すべき施設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外壁を評価対象部位として選定する。
				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竜巻による荷重の作用を考慮し、当該部の転倒及び脱落が生じないことを確認するため、構造躯体、屋根スラブ及び屋根スラブを固定するスタッドを評価対象部位として選定する。
	扉	衝突	貫通	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竜巻の影響に対する防護を期待する扉の扉板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郭となる部分への竜巻の気圧差による荷重の作用を考慮し、当該部の転倒及び脱落が生じないことを確認するため、竜巻の影響に対する防護を期待する扉の扉板を固定する部位(カンヌキ)を評価対象部位として選定する。
	ディーゼル燃料 貯蔵タンク室 B-ディーゼル 燃料貯蔵タンク 格納槽	スラブ	衝突	貫通	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、外部に露出している部位であるスラブを評価対象部位として選定する。
			構造強度	裏面剥離	竜巻より防護すべき施設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、外部に露出している部位であるスラブを評価対象部位として選定する。
		鋼製蓋	衝突	貫通	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竜巻の影響に対する防護を期待する鋼製蓋を評価対象部位として選定する。

表 3-21 竜巻の影響を考慮する施設 構造強度評価対象部位 (2/6)

分類	施設名称	評価対象部位	評価項目	評価項目分類	選定理由
屋外の外部事象防護対象施設（建物等を除く）	原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ	外殻を構成する部材	衝突	貫入	ポンプ据付面より上部の全方向からの飛来物を考慮し、外殻に面する部材に貫通が生じないことを確認するため、ポンプを構成する部材のうち外殻に面する部材を評価対象部位として選定する。
		基礎ボルト 取付ボルト	構造強度	立形ポンプ	竜巻の風圧力による荷重の影響を受けるポンプ据付面より上部の各部位のうち、支持断面積の小さな部位に大きな応力が生じるため、基礎ボルト、各部取付ボルト及び原動機フレームを評価対象部位として選定する。
		原動機フレーム			
	軸受部	機能維持	立形ポンプ	外殻に面する部分への竜巻による荷重の作用を考慮し、施設の外殻を構成する部材の変形によって、ポンプの動作に影響がないことを確認するため、動的機能維持に必要な軸受部を評価対象部位として選定する。	
	原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナ	基礎ボルト	構造強度	一体 casting の容器	設計竜巻による荷重は、胴及び支持脚を介して、基礎ボルトに作用する。これらのうち、胴及び支持脚と比較し、断面積が小さく、発生応力が大きくなる基礎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 A-ディーゼル燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ	耐圧部	構造強度	横型ポンプ	非常用ディーゼル発電設備 A-ディーゼル燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプは、竜巻防護対策設備内に設置していることから、竜巻の風圧力による荷重は直接受けませんが、竜巻の気圧差による荷重が耐圧部に作用するため、非常用ディーゼル発電設備 A-ディーゼル燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプの耐圧部を評価対象部位として選定する。

表 3-21 竜巻の影響を考慮する施設 構造強度評価対象部位 (3/6)

分類	施設名称	評価対象部位	評価項目	評価項目分類	選定理由
屋外の外部事象防護対象施設（建物等を除く）	原子炉補機海水系配管及び弁，高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁，非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁	外殻を構成する部材	衝突	貫入	配管の全方向からの飛来物を考慮し，貫入により施設の機能が喪失する可能性がある箇所として配管の最小肉厚部を選定する。
		配管本体	構造強度	配管及び弁	竜巻の風圧力による荷重及び気圧差による荷重は，配管仕様と支持間隔による受圧面積に応じて配管本体に作用するため，配管本体を評価対象部位として選定する。
	排気筒	筒身及び鉄塔	構造強度	変形角	設計竜巻による荷重は，筒身及び鉄塔に作用するため，筒身及び鉄塔を評価対象部位として選定する。

表 3-21 竜巻の影響を考慮する施設 構造強度評価対象部位 (4/6)

分類	施設名称	評価対象部位	評価項目	評価項目分類	選定理由
外気と繋がっている屋内の外部事象防護対象施設	ダンパ (換気空調設備)	外板 羽根 シャフト	構造強度	ダンパ	換気空調設備のダンパは建物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によって風路である外板に作用する。また、閉止しているダンパには羽根及びシャフトに対しても気圧差による荷重が作用することから、外板、羽根及びシャフトを評価対象部位として選定する。
	角ダクト(換気空調設備)及び丸ダクト(換気空調設備)	ダクト鋼板	構造強度	ダクト	換気空調設備のダクトは、建物内に設置していることから竜巻の風圧力による荷重は直接受けないが、竜巻の気圧差による荷重が考えられるため、ダクト本体の鋼板部を評価対象部位として選定する。
	隔離弁 (換気空調設備)	弁箱 弁体 弁棒	構造強度	隔離弁	換気空調設備の隔離弁は、建物内に設置し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、隔離弁の閉止性を確認するため耐圧部を評価対象部位として選定する。
	送風機 (換気空調設備)	ケーシング	構造強度	送風機	換気空調設備の送風機は、建物内に設置し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、ケーシングを評価対象部位として選定する。
	処理装置 (換気空調設備)	ケーシング	構造強度	処理装置	換気空調設備の処理装置は、建物内に設置し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、ケーシングを評価対象部位として選定する。
	非常用ガス処理系配管及び弁	配管本体	構造強度	配管及び弁	非常用ガス処理系配管及び弁は、建物内に設置し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。

表 3-21 竜巻の影響を考慮する施設 構造強度評価対象部位 (5/6)

分類	施設名称	評価対象部位	評価項目	評価項目 分類	選定理由
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	1号機原子炉建物	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倒壊による波及的影響を考慮し、1号機原子炉建物の構造躯体である耐震壁及び鉄骨フレームを評価対象部位として選定する。
	1号機タービン建物	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倒壊及び接触による波及的影響を考慮し、1号機タービン建物の構造躯体である耐震壁を評価対象部位として選定する。
	1号機廃棄物処理建物	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倒壊及び接触による波及的影響を考慮し、1号機廃棄物処理建物の構造躯体である耐震壁を評価対象部位として選定する。
	排気筒モニタ室	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倒壊及び接触による波及的影響を考慮し、排気筒モニタ室の構造躯体である耐震壁を評価対象部位として選定する。
	1号機排気筒	筒身及び鉄塔	構造強度	変形角	竜巻より防護すべき施設を内包する施設への倒壊及び接触による波及的影響を考慮し、設計竜巻による荷重は、筒身及び鉄塔に作用するため、筒身及び鉄塔を評価対象部位として選定する。
	復水貯蔵タンク遮へい壁	構造躯体	構造強度	断面力	竜巻より防護すべき施設を内包する施設への倒壊及び接触による波及的影響を考慮し、復水貯蔵タンク遮へい壁の構造躯体である遮へい壁を評価対象部位として選定する。

表 3-21 竜巻の影響を考慮する施設 構造強度評価対象部位 (6/6)

分類	施設名称	評価対象部位	評価項目	評価項目分類	選定理由
外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性のある施設	排気消音器(非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の附属施設)	結合ボルト 基礎ボルト	構造強度	消音器	消音器に竜巻の風圧力による荷重が作用した際に、本体及び架台を支持するための主要な支持部材である結合ボルト及び基礎ボルトを評価対象部位として選定とする。
	排気管及びベント管(非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料貯蔵タンク、ディーゼル燃料デイタンク及びディーゼル潤滑油サンプタンクの附属施設)	配管本体	構造強度	排気管及びベント管	排気管及びベント管の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とする。

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. 設計竜巻による荷重 (W_T)

設計竜巻による荷重は、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}) (N/m^2)

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

ρ : 空気密度 (kg/m^3)

V_{Rm} : 竜巻の最大接線風速 (m/s)

- ・ 竜巻の最大接線風速 (V_{Rm}) (m/s)

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

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) (m/s)

$$V_T = 0.15 \cdot V_D$$

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	7500

(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した設計とする。

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

ガスト影響係数 (G) は設計竜巻の風速が最大瞬間風速をベースとしていること等から、施設の形状によらず竜巻影響評価ガイドを参照して、 $G=1.0$ とする。

空気密度 (ρ) は「REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADOMISSILES 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 $q=5188\text{N/m}^2$ と設定する。

(b) 気圧差による荷重 (W_P)

外気と隔離されている区画の境界部など、気圧差による圧力影響を受ける設備及び竜巻より防護すべき施設を内包する施設の建物の外壁、屋根等においては、竜巻による気圧低下によって生じる施設等の内外の気圧差による荷重が発生する。

閉じた施設(通気がない施設)については、この圧力差により閉じた施設の隔壁に外向きに作用する圧力が生じるとみなし設定することを基本とする。

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

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

最大気圧低下量 (ΔP_{\max}) は空気密度及び最大接線風速から、 $\Delta P_{\max} = 7500\text{N/m}^2$ とする。

(c) 設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)

設計飛来物である鋼製材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。

衝突評価においては、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。

竜巻防護ネット等を設置している箇所には、竜巻防護ネット等を設置していること、また、発電所構内においては、資機材等について、適切に管理する運用とすることから、ネットの網目寸法相当等の砂利を飛来物として選定する。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

	鋼製材	砂 利
寸 法 (m)	4.2×0.3×0.2	0.04×0.04×0.04
質 量 (kg)	135	0.20
水平方向の 飛来速度 (m/s)	51	54
鉛直方向の 飛来速度 (m/s)	34	36

c. 運転時に作用する荷重 (F_p)

運転時に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 (1/4))

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 (2/4))

原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ、原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナ並びに原子炉補機海水系配管及び弁、高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁に関しては、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び常時作用する荷重の組合せを基本とする。

原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ、原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナ並びに原子炉補機海水系配管及び弁、高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁には運転時にスラスト荷重や内圧等が作用するため、運転時に作用する荷重も考慮する。

非常用ディーゼル発電設備 A-ディーゼル燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ並びに非常用ディーゼル発電設備 (燃料移送系) 配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備 (燃料移送系) 配管及び弁に関しては、気圧差による荷重、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 A-ディーゼル燃料移送

ポンプ及び高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ並びに非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁には、運転時に内圧が作用するため、運転時に作用する荷重も考慮する。

竜巻防護ネット又は竜巻防護鋼板（穴あき）により防護される原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ、非常用ディーゼル発電設備Aーディーゼル燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ、原子炉補機海水系配管及び弁、高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁、非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁に関しては、竜巻防護ネット等を通過する飛来物による衝撃荷重も考慮する。

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。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。運転時に作用する荷重については、気圧差同様考慮しない。筒身及び排気筒（非常用ガス処理系用）に関しては、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮しても、閉塞することはなく、飛来物の衝突により貫通した場合は速やかに補修する運用としていることから、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重に衝撃荷重を考慮しない。

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（3/4））

外気と繋がっている屋内の施設である換気空調設備のダンパ、角ダクト、丸ダクト、隔離弁、送風機及び処理装置は建物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。

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、運転時に作用する荷重を組み合わせる。なお、ダンパ及び隔離弁については閉止していることから、運転時に作用する荷重は考慮しない。また、送風機の自重は内圧荷重に比べ十分小さく、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（4/4））

機械的影響を及ぼす可能性がある施設のうち、1号機原子炉建物、1号機タービン建物、1号機廃棄物処理建物、復水貯蔵タンク遮へい壁及び排気筒モニタ室に関しては、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。運転時に作用する荷重については作用しないため考慮しない。

1号機排気筒に関しては、屋外施設であり閉じた施設ではないため、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。運転時に作用する荷重については作用しないため、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である排気消音器(非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設)、排気管(非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設)及びベント管(非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料貯蔵タンク、ディーゼル燃料デイタンク及び潤滑油サンプタンクの付属施設)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。

排気消音器(非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設)、排気管(非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設)及びベント管(非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料貯蔵タンク、ディーゼル燃料デイタンク及び潤滑油サンプタンクの付属施設)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り貫通しても、その貫通箇所又は本来の排気箇所から排気されるため、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重に衝撃荷重を考慮しない。

また、排気消音器(非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設)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。

排気管(非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設)及びベント管(非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料貯蔵タンク、ディーゼル燃料デイタンク及び潤滑油サンプタンクの付属施設)は、運転時に内圧が作用するため、運転時に作用する荷重も考慮する。

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 (1/4)

分類	強度評価の対象施設	評価項目	荷 重						
			常時作用する荷重 (F _d)			風圧力による荷重 (W _w)	気圧差による荷重 (W _P)	飛来物による衝撃荷重 (W _M)	運転時に作用する荷重 (F _p)
			自重	水頭圧	上載荷重				
竜巻より防護すべき施設を内包する施設	原子炉建物	衝突	○*1	—	○*1	○*1	○*1	○	—
	タービン建物								
	廃棄物処理建物	構造強度	○*2	—	○*2	○*2	○*2	○	—
	制御室建物								
	ディーゼル燃料貯蔵タンク室	衝突	—	—	—	—	—	○	—
	B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽	構造強度	—	—	—	—	—	○	—

(○：考慮する荷重を示す。)

注記*1：「設計飛来物の貫通を生じない最小厚さであること」の確認においては考慮しない。

*2：「設計飛来物の裏面剥離を生じない最小厚さであること」の確認においては考慮しない。

表 4-3 竜巻の影響を考慮する施設の荷重の組合せ (2/4)

分類	強度評価の対象施設	評価項目	荷 重						
			常時作用する荷重 (F _d)			風圧力による荷重 (W _w)	気圧差による荷重 (W _P)	飛来物による衝撃荷重 (W _M)	運転時に作用する荷重 (F _p)
			自重	水頭圧	上載荷重				
屋外の外部事象防護対象施設	原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ	衝突	—	—	—	—	—	○	—
		構造強度	○	—	—	○	○	—	○
		機能維持	—	—	—	○	○	—	○
	原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナ	構造強度	○	—	—	○	○	—	○
	原子炉補機海水系配管及び弁, 高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁, 非常用ディーゼル発電設備 (燃料移送系) 配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備 (燃料移送系) 配管及び弁	衝突	—	—	—	—	—	○	—
		構造強度	○	—	—	○	○	—	○
	非常用ディーゼル発電設備 A-ディーゼル燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ	構造強度	—	—	—	—	○	—	○
	排気筒	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 (3/4)

分類	強度評価の対象施設	評価項目	荷 重						
			常時作用する荷重 (F _d)			風圧力による荷重 (W _w)	気圧差による荷重 (W _p)	飛来物による衝撃荷重 (W _M)	運転時に作用する荷重 (F _p)
			自重	水頭圧	上載荷重				
外気と繋がっている屋内の外部事象防護対象施設	ダンパ (換気空調設備)	構造強度	○	—	—	—	○	—	—
	角ダクト (換気空調設備)	構造強度	○	—	—	—	○	—	○
	丸ダクト (換気空調設備)	構造強度	○	—	—	—	○	—	○
	隔離弁 (換気空調設備)	構造強度	○	—	—	—	○	—	—
	送風機 (換気空調設備)	構造強度	—	—	—	—	○	—	○
	処理装置 (換気空調設備)	構造強度	—	—	—	—	○	—	○
	非常用ガス処理系配管及び弁	構造強度	—	—	—	—	○	—	○

(○：考慮する荷重を示す。)

表 4-3 竜巻の影響を考慮する施設の荷重の組合せ (4/4)

分類	強度評価の対象施設	評価項目	荷 重							
			常時作用する荷重 (F _d)				風圧力による荷重 (W _w)	気圧差による荷重 (W _P)	飛来物による衝撃荷重 (W _M)	運転時に作用する荷重 (F _p)
			自重	水頭圧	上載荷重	土圧				
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	1号機原子炉建物 1号機タービン建物 1号機廃棄物処理建物 復水貯蔵タンク遮へい壁 排気筒モニタ室	構造強度	○	—	○	—	○	○	○	—
	1号機排気筒	構造強度	○	—	○	—	○	—	○	—
	消音器	構造強度	○	—	—	—	○	—	—	—
	排気管及びベント管	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 /m	施設の受圧面積
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
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
ΔP_{max}	N/m ²	最大気圧低下量
q	N/m ²	設計用速度圧
V _D	m/s	設計竜巻の風速
V _{Rm}	m/s	設計竜巻の最大接線風速
W _M	N	設計飛来物による衝撃荷重
W _P	N	設計竜巻の気圧差による荷重
W _W	N	設計竜巻の風圧力による荷重
ρ	kg/m ³	空気密度

b. 自重による荷重の算出

自重による荷重は以下のとおり計算する。

$$H = m \cdot g$$

c. 竜巻による荷重の算出

(a) 風圧力による荷重 (W_w)

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

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

ここで、

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

(b) 気圧差による荷重 (W_P)

気圧差による荷重は、次式のとおり算出する。

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

ここで、

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

(c) 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

V_D (m/s)	ρ (kg/m ³)	G (-)	q (N/m ²)	V_{Rm} (m/s)	ΔP_{max} (N/m ²)
92	1.226	1.0	5188	78	7500

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、個別計算書で評価対象部位の損傷モードを踏まえ評価項目を選定し、評価項目ごとに許容限界を定める。

「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984」（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。）を準用できる施設については、J E A G 4 6 0 1 に基づき「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 J S M E S N C 1 -2005/2007」（日本機械学会）（以下「J S M E」という。）の付録材料図表及び J I S の材料物性値により許容限界を算出している。その他施設や衝撃荷重のみを考慮する施設については、J S M E や既往の実験式に基づき許容限界を設定する。

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

4.2.1 建物・構造物

(1) 許容限界の設定

a. 衝突評価

(a) 貫通（表 4-8（1/7））

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。

鋼製構造物の衝突による貫通評価においては、設計飛来物に対する必要最小肉厚が部材の厚さに収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、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（1/7））

建物・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物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、鉄筋の破断ひずみを許容限界として設定する。鉄筋の破断ひずみは、J I S規格値 / T F (T F = 2.0) を許容限界とする。

b. 構造強度評価

(a) 裏面剥離 (表 4-8 (1/7))

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とするために、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じない最小厚さ以上であることを計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、施設の最小部材厚さを許容限界として設定する。また、許容限界を超えた場合は、裏面剥離に至るようなひずみを生じないことを解析により確認する評価方針としていることを踏まえ、鉄筋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 = 2.0) を許容限界とする。

(b) 転倒及び脱落 (表 4-8 (1/7), (2/7))

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

扉の転倒及び脱落の評価については、設計竜巻の気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、施設の外殻を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とするために、扉支持部材の破断による転倒及び脱落が生じないことを計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、「鋼構造設計規準 —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て設定する。

(c) 構造躯体の変形 (表 4-8 (6/7))

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、1号機原子炉建物、1号機タービン建物、1号機廃棄物処理建物及び排気筒モニタ室が倒壊し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、耐震壁についてはコンクリートの終局点に対応するせん断ひずみ、鉄骨フレームについては「建築基準法施行令第82条の2(層間変形角)」に基づく制限値を許容限界として設定する。制限値は、耐震壁についてはJ E A G 4 6 0 1に基づき 4.0×10^{-3} 、鉄骨フレームについては「建築基準法施行令第82条の2(層間変形角)」に基づき1/120とする。

また、1号機タービン、1号機廃棄物処理建物、及び排気筒モニタ室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、隣接する竜巻より防護すべき施設を内包する建物等に接触する変形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、各建物との離隔距離を許容限界として設定する。

(d) 変形角 (表 4-8 (4/7, 6/7))

排気筒の構造強度評価においては、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、排気筒全体が倒壊し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、「建築基準法施行令第82条の2(層間変形角)」に基づく制限値を許容限界として設定する。

また、1号機排気筒の構造強度評価においては、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、1号機排気筒が原子炉建物、タービン建物等に倒壊による影響を及ぼさ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、「建築基準法施行令第82条の2(層間変形角)」に基づく制限値を許容限界として設定する。

(e) 壁の曲げ、せん断 (表 4-8 (6/7))

復水貯蔵タンク遮へい壁の構造強度評価においては、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、復水貯蔵タンク遮へい壁全体が倒壊し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、「コンクリート標準示方書(2012)」に基づく設計断面耐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 4-6 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
f_n	N/mm^2	コンクリートの支圧強度
p_a	kN	スタッド 1 本当たりの許容引張力
p_{a1}	kN	スタッド鋼材の降伏により定まる場合のスタッド 1 本当たりの許容引張力
p_{a2}	kN	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 本当たりの許容引張力
p_{a3}	kN	コンクリートの支圧破壊により定まるスタッド 1 本当たりの許容引張力
$c \sigma_t$	N/mm^2	コーン状破壊に対するコンクリートの引張強度
$s \sigma_{p a}$	N/mm^2	スタッドの引張強度
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、「各種合成構造設計指針 同解説（（社）日本建築学会，2010 年改定）」に基づき、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} 及び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、

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

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

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

4.2.2 機器・配管系

(1) 許容限界の設定

a. 衝突評価

(a) 貫入

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、外殻を構成する部材が、機能喪失に至る可能性のある変形を生じないことを計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、部材厚さを許容限界として設定する。

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引いた残りの厚さを許容限界として設定する。

b. 構造強度評価

(a) 原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ

原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプの構造強度評価においては、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及び竜巻防護ネット等を通ずる飛来物の衝撃荷重に対し、原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ、原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプの機能維持に必要な付属品を支持する取付ボルト並びにポンプの機能保持に必要な付属品を支持する原動機フレームが、おおむね弾性域に収まることにより、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等に準じて供用状態Ⅲ_ASの許容応力を許容限界として設定する。

(b) 原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナ

原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナの構造強度評価においては、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナを支持する基礎ボルトが、おおむね弾性状態に留まることにより、その施設の安全機能に影響を及ぼすことのないことを計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、J E A G 4 6 0 1等に準じて許容応力状態Ⅲ_ASの許容応力を許容限界として設定する。

- (c) 原子炉補機海水系配管及び弁， 高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁， 非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁， 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに非常用ガス処理系配管及び弁

原子炉補機海水系配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁の構造強度評価においては，設計竜巻の風圧力による荷重，気圧差による荷重，竜巻防護ネットを通過する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，配管本体が，おおむね弾性域に収まることにより，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 等に準じて供用状態Ⅲ A S の許容応力を許容限界として設定する。

非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに非常用ガス処理系配管及び弁の構造強度評価においては，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，おおむね弾性域に収まることにより，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 等に準じて供用状態Ⅲ A S の許容応力を許容限界として設定する。

- (d) 非常用ディーゼル発電設備 A-ディーゼル燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ

非常用ディーゼル発電設備 A-ディーゼル燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ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，非常用ディーゼル発電設備 A-ディーゼル燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプの耐圧部が，燃料を供給する機能を維持することを確認する評価方針としていることを踏まえ，ポンプの耐圧試験圧力を許容限界として設定する。

- (e) ダンパ

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，ダンパを構成する外板，羽根及びシャフトが，おおむね弾性域に収まることにより，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 等に準じて供用状態Ⅲ A S の許容応力を許容限界として設定する。

(f) ダクト

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、おおむね弾性域に収まることにより、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等に準じて供用状態ⅢA S及び座屈に対する評価式を満足する許容応力又はクリッピング座屈及び弾性座屈曲げ応力に応じた許容応力を許容限界として設定する。

(g) 隔離弁

隔離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及びその他考慮すべき荷重に対し、隔離弁が、おおむね弾性域に収まることにより、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等に準じて供用状態ⅢA Sの許容応力又はクリッピング座屈に応じた許容応力を許容限界として設定する。

(h) 送風機

送風機の構造強度評価においては、設計竜巻の気圧差及びその他考慮すべき荷重に対し、送風機のケーシングが、おおむね弾性域に収まることにより、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、クリッピング座屈に応じた許容応力を許容限界として設定する。

(i) 処理装置

処理装置の構造強度評価においては、設計竜巻の気圧差及びその他考慮すべき荷重に対し、処理装置のケーシングが、おおむね弾性域に収まることにより、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等に準じて供用状態ⅢA Sの許容値を許容限界として設定する。

(j) 排気消音器(非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び高圧炉心スプレィ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設)

排気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、排気消音器を構成する結合ボルト及び基礎ボルトが、おおむね弾性域に収まることにより、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等に準じて供用状態ⅢA Sの許容応力を許容限界として設定す

る。

- (k) 排気管(非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設)及びベント管(非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料貯蔵タンク,ディーゼル燃料デイトank及び潤滑油サンプタンクの付属施設)

排気管及びベン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,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,おおむね弾性域に収まることにより,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,JEAG 4601等に準じて供用状態ⅢASの許容応力を許容限界として設定する。

c. 動的機能維持評価

- (a) 原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ

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

(2) 許容限界設定方法

a. 記号の定義

許容限界式に使用する記号を表 4-7 に示す。

表 4-7 許容限界式に用いる記号 (1/2)

記号	単位	定義
b	mm	ケーシング外半径
d_1	mm	ダクト内径
d_2	mm	ダクト外径
E	MPa	縦弾性係数
f_1	N	曲げモーメントによる圧縮荷重
f_2	N	最大気圧低下量及び通常運転圧力による圧縮荷重
f_t	MPa	J S M E SSB-3121.1 又は 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	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
k_p	—	座屈係数
L	mm	評価対象板の長さ
L_1	mm	弁箱の面間寸法
M_{cr}	kN・mm	弾性座屈曲げモーメント
n	—	座屈モードの次数
P_m	N	限界荷重
R	mm	内半径
r_m	mm	平均半径
t	mm	板厚
Z	mm ³	断面係数
Z_c	—	形状係数
β	—	補正係数
ν	—	ポアソン比
σ_{cr1}	MPa	クリッピング座屈が発生する際に生じる応力
σ_{cr2}	MPa	弾性座屈曲げ応力

表 4-7 許容限界式に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
σ_b	MPa	自重による発生応力
σ_{pb}	MPa	設計竜巻による気圧差及び内圧による発生応力
σ_y	MPa	降伏応力
σ_θ	MPa	ダクトに作用する圧力により軸直角方向に生じる応力
τ	MPa	せん断応力

b. 許容限界式

(a) 支持構造物の許容限界式

イ. ボルト

引張力とせん断力を同時に受けるボルトの許容引張り応力 f_{ts} は、次式で算出される。

$$\begin{cases} f_{ts} = 1.4(1.5f_t) - 1.6\sigma \\ f_{ts} \leq 1.5f_t \end{cases}$$

許容引張り応力は f_{ts} 上記 2 式の smaller 値をとるものとする。

(b) 角ダクトの許容限界式

イ. 軸方向の荷重に対する許容限界

ダクト自重による圧縮荷重 f_1 と設計竜巻による気圧差及び内圧による圧縮荷重 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、設計竜巻による気圧差及び内圧による圧縮荷重 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、これらの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、

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

(c) 丸ダクトの許容限界式

イ. 軸直角方向の荷重により生じる応力に対する許容限界

ダクトに作用する圧力により軸直角方向の荷重が生じ、この荷重により生じる応力 σ_θ が、クリップリング座屈が発生する際に生じる応力 (座屈応力) σ_{cr1} を超えないことを確認する。クリップリング座屈が発生する際に生じる応力 σ_{cr1} は、円筒殻の座屈応力の式より算出する。

$$\sigma_\theta \leq \sigma_{cr1}$$

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

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

$$\beta = \frac{L \cdot n}{\pi \cdot r_m}$$

$$z_c = \frac{L^2}{r_m \cdot t} \sqrt{1 - \nu^2}$$

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. 軸方向の荷重により生じる応力に対する許容限界

ダクト自重による軸方向圧縮荷重により生じる曲げ応力 σ_b と設計竜巻による気圧差及び内圧により生じ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。

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

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

$$M_{cr} = \frac{\beta \cdot E \cdot R \cdot t^2}{(1 - \nu^2)}, \quad \beta = 0.72$$

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

(d) 隔離弁の許容限界式

イ. 弁箱に対する許容応力

隔離弁に作用する圧力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。

隔離弁に作用する圧力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。

$$\sigma_{cr1} = \frac{k_p \cdot \pi^2 \cdot E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{L_1} \right)^2$$

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

$$\beta = \frac{L_1 \cdot n}{\pi \cdot R}$$

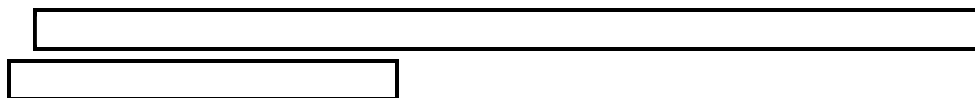
$$z_c = \frac{L_1^2}{R \cdot t} \sqrt{1 - \nu^2}$$

(e) 送風機の許容限界式

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） 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。



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

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

$$\beta = \frac{L \cdot n}{\pi \cdot b}, \quad z_c = \frac{L^2}{b \cdot t} \sqrt{1-\nu^2}$$

表 4-8 施設ごとの許容限界 (1/7)

施設分類	施設名称	荷重の組合せ	評価対象部位	評価項目	機能損傷モード		許容限界
					応力等の状態	限界状態	
竜巻より防護すべき施設を内包する施設	原子炉建物 タービン建物 廃棄物処理建物 制御室建物	W_M	屋根スラブ 外壁	衝突	変形	貫通	施設の最小部材厚さが貫通限界厚さ以上とする。
		$F_d + W_T (W_w, W_M)$	屋根スラブ		変形	貫通	鉄筋の発生ひずみが J I S 規格値 / T F (T F = 2.0) を考慮した値以下とする。
		W_M	屋根スラブ 外壁	構造 強度	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。
		$F_d + W_T (W_w, W_M)$	屋根スラブ 外壁		変形	裏面剥離によるコンクリート片の飛散	鉄筋及びデッキプレートの発生ひずみが J I S 規格値 / T F (T F = 2.0) を考慮した値以下とする。
		$F_d + W_T (W_w, W_P)$	屋根スラブ		曲げ, せん断	部材の破断による転倒及び脱落	「鉄筋コンクリート構造設計規準・同解説－許容応力度設計法－」に基づく短期許容応力度以下とする。
		$F_d + W_T (W_w, W_P)$	スタッド		引張り	部材の破断による転倒及び脱落	「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。
		$F_d + W_T (W_w, W_P, W_M)$	耐震壁		変形	部材の破断による転倒及び脱落	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。
	ディーゼル燃料 貯蔵タンク室 B-ディーゼル 燃料貯蔵タンク 格納槽	W_M	スラブ	衝突	変形	貫通	施設の最小部材厚さが貫通限界厚さ以上とする。
			鋼製蓋				施設の最小部材厚さが必要最小肉厚以上とする。
		W_M	スラブ	構造 強度	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。

表 4-8 施設ごとの許容限界 (2/7)

施設分類	施設名称	荷重の組合せ	評価対象部位	評価項目	機能損傷モード		許容限界
					応力等の状態	限界状態	
竜巻より防護すべき施設を内包する施設	原子炉建物	W _M	扉（扉板）	衝突	変形	貫通	施設の最小部材厚さが必要最小肉厚以上とする。
		W _P	扉（カンヌキ）	構造強度	曲げ，せん断	部材の降伏	「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以下とする。

表 4-8 施設ごとの許容限界 (3/7)

施設分類	施設名称	荷重の組合せ	評価対象部位	評価項目	機能損傷モード		許容限界
					応力等の状態	限界状態	
屋外の外部事象防護対象施設	原子炉補機海水海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ	$F_d + W_T$ (W_W, W_P, W_M) + F_P	外殻を構成する部材	衝突	変形	送水機能の喪失	評価式により算定した貫通限界厚さが、外殻を構成する部材の厚さ未満とする。
			基礎ボルト 取付ボルト	構造強度	引張り, せん断	部材が弾性域に留まらず塑性域に入る状態	「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987」等に準じて許容応力状態ⅢAS*の許容応力以下とする。
			原動機フレーム	構造強度	曲げ		
			軸受部	機能維持	接触	軸と軸受が接触する	軸受荷重が接触面圧の許容荷重以下とする。
	原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナ	$F_d + W_T$ (W_W, W_P) + F_P	基礎ボルト	構造強度	引張り, せん断	部材が弾性域に留まらず塑性域に入る状態	「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987」等に準じて許容応力状態ⅢAS*の許容応力以下とする。
	非常用ディーゼル発電設備A-ディーゼル燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ	$W_P + F_P$	耐圧部	構造強度	一次応力	部材が弾性域に留まらず塑性域に入る状態	耐圧試験圧力以下とする。

注記* : JEAG 4601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応力を準用する。

表 4-8 施設ごとの許容限界 (4/7)

施設分類	施設名称	荷重の組合せ	評価対象部位	評価項目	機能損傷モード		許容限界
					応力等の状態	限界状態	
屋外の外部事象防護対象施設	原子炉補機海水系配管及び弁, 高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁, 非常用ディーゼル発電設備(燃料移送系)配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備(燃料移送系)配管及び弁	$F_d + W_T$ (W_W, W_P, W_M) + F_P	外殻を構成する部材	衝突	変形	流路を確保する機能の喪失	評価式により算定した貫通限界厚さが, 外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ未滿とする。
	配管本体		構造強度	曲げ, 一次一般膜	部材が弾性域に留まらず塑性域に入る状態	「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987」等に準じて許容応力状態ⅢAS*の許容応力値以下とする。	
	排気筒	$F_d + W_T$ (W_W, W_M)	筒身及び鉄塔	構造強度	変形	部材の損傷による転倒	変形が「建築基準法施行令第 82 条の 2 (層間変形角)」に基づく層間変形角以下とする。

注記* : JEAG 4601を基に, 表 4-10 クラス 2, 3 配管の許容応力を準用する。

表 4-8 施設ごとの許容限界 (5/7)

施設分類	施設名称	荷重の組合せ	評価対象部位	評価項目	機能損傷モード		許容限界
					応力等の状態	限界状態	
外気と繋がっている屋外の外部事象防護対象施設	ダンパ (換気空調設備)	$F_d + W_P$	外板 羽根 シャフト	構造強度	曲げ, せん断	部材が弾性域に留まらず塑性域に入る状態	「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987」等に基づく許容応力状態Ⅲ _A S ^{*1} に応じた許容応力値以下とする。
	角ダクト (換気空調設備) 及び丸ダクト (換気空調設備)	$F_d + W_P + F_P$	ダクト鋼板 (本体)	構造強度	曲げ, 座屈	部材が弾性域に留まらず塑性域に入る状態	「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987」等に準じて許容応力状態Ⅲ _A S ^{*1} , 座屈に対する評価式を満足する許容応力以下又はクリッピング座屈に応じた許容応力以下とする。
	隔離弁 (換気空調設備)	$F_d + W_P$	弁箱 弁体 弁棒	構造強度	変形	部材が弾性域に留まらず塑性域に入る状態	呼び圧力以下とする。
	送風機 (換気空調設備)	$W_P + F_P$	ケーシング	構造強度	曲げ	部材が弾性域に留まらず塑性域に入る状態	「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987」等に基づく許容応力状態Ⅲ _A S ^{*1} に応じた許容応力値以下とする。
	処理装置 (換気空調設備)	$W_P + F_P$	ケーシング	構造強度	曲げ	部材が弾性域に留まらず塑性域に入る状態	「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987」等に基づく許容応力状態Ⅲ _A S ^{*1} に応じた許容応力値以下とする。
	非常用ガス処理系配管及び弁	$W_P + F_P$	配管本体	構造強度	一次一般膜	部材が弾性域に留まらず塑性域に入る状態	「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987」等に基づく許容応力状態Ⅲ _A S ^{*2} に応じた許容応力値以下とする。

注記*1: JEAG 4601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応力を準用する。

*2: JEAG 4601を基に, 表 4-10 クラス2, 3配管の許容応力を準用する。

表 4-8 施設ごとの許容限界 (6/7)

施設分類	施設名称	荷重の組合せ	評価対象部位		評価項目	機能損傷モード		許容限界
						応力等の状態	限界状態	
外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	1号機原子炉建物	$F_d + W_T (W_w, W_P, W_M)$	構造躯体	耐震壁	構造強度	変形	倒壊	変形がコンクリートの終局せん断ひずみに基づく制限値以下とする。
				鉄骨フレーム				変形が「建築基準法施行令第82条の2(層間変形角)」に基づく層間変形角以下とする。
	1号機タービン建物	$F_d + W_T (W_w, W_P, W_M)$	構造躯体		構造強度	変形	接触	隣接する建物との相対変位が、各建物との離隔距離以下とする。
	1号機廃棄物処理建物							
	排気筒モニタ室							
	1号機排気筒	$F_d + W_T (W_w, W_M)$	筒身及び鉄塔		構造強度	変形	部材の損傷による転倒	変形が「建築基準法施行令第82条の2(層間変形角)」に基づく層間変形角以下とする。
復水貯蔵タンク遮へい壁	$F_d + W_T (W_w, W_P, W_M)$	壁		構造強度	曲げ, せん断	倒壊	「コンクリート標準示方書(2012)」に基づく設計断面耐力以下とする。	

表 4-8 施設ごとの許容限界 (7/7)

施設分類	施設名称	荷重の組合せ	評価対象部位	評価項目	機能損傷モード		許容限界
					応力等の状態	限界状態	
外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設	消音器	$F_d + W_T (W_w, W_P)$	結合ボルト 基礎ボルト	構造強度	引張り, せん断	部材が弾性域に留まらず塑性域に入る状態	「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987」等に基づく許容応力状態ⅢAS* ¹ に応じた許容応力値以下とする。
	排気管及びベント管	$F_d + W_T (W_w, W_P) + F_P$	配管本体	構造強度	曲げ	部材が弾性域に留まらず塑性域に入る状態	「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987」等に基づく許容応力状態ⅢAS* ² に応じた許容応力値以下とする。

注記*1: JEAG 4601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応力を準用する。

*2: JEAG 4601を基に, 表 4-10 クラス2, 3配管の許容応力を準用する。

表 4-9 クラス 1・クラス 2, 3・その他の支持構造物の許容応力

許容 応力 状態	許容応力*1, *2, *3 (ボルト以外)				許容応力*2 (ボルト等)	
	一 次 応 力				一 次 応 力	
	引張り	せん断	圧 縮	曲 げ	引張り	せん断
Ⅲ _A S	$1.5 \cdot f_t$	$1.5 \cdot f_s$	$1.5 \cdot f_c$	$1.5 \cdot f_b$	$1.5 \cdot f_t$	$1.5 \cdot f_s$

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

*2: 応力の組合せが考えられる場合には, 組合せ応力に対しても評価を行う。

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

表 4-10 クラス 2, 3 配管の許容応力

許容 応力 状態	許 容 応 力	
	一次一般膜応力	一次応力 (膜+曲げ)
Ⅲ _A S	$\text{Min} [S_y, 0.6 S_u]$ ただし, オーステナイト系ステン レス鋼及び高ニッケル合金につい ては $1.2 S$ としてもよい。	S_y

5. 強度評価方法

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

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

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

設計竜巻の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。設計竜巻荷重が作用する場合に強度評価を行う施設のうち、強度評価方法としてポンプ、容器及び建物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 建物・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、NE I 07-13 に示されている D e g e n 式を用いて算定する。D e g e n 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 N D R C 式を用いて算定する。
- b. 裏面剥離限界厚さは、NE I 07-13 に示されている C h a n g 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

施設名称	評価対象部位	評価内容
<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建物 ・タービン建物 ・廃棄物処理建物 ・制御室建物 	屋根スラブ 外壁 構造躯体 スタッド	貫通 裏面剥離 転倒及び脱落
<ul style="list-style-type: none"> ・ディーゼル燃料貯蔵タンク室 ・B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽 	スラブ	貫通 裏面剥離
<ul style="list-style-type: none"> ・1号機原子炉建物 ・1号機タービン建物 ・1号機廃棄物処理建物 ・排気筒モニタ室 	構造躯体	変形
<ul style="list-style-type: none"> ・復水貯蔵タンク遮へい壁 	構造躯体	断面力

(3) 強度評価方法

a. 記号の定義

D e g e n 式による貫通限界厚さの算定に用いる記号を表 5-2 に、C h a n g 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 D e g e n 式による鉄筋コンクリート部の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 C h a n g 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(1/3) 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
(荷重算定用)

記号	単位	定義
W _M	N	設計飛来物による衝撃荷重
m	kg	設計飛来物質量
V	m/s	設計飛来物の衝突速度 (水平)
Δt	s	設計飛来物と被衝突体の接触時間
L ₁	m	設計飛来物の最も短い辺の全長

表 5-4(2/3) 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
(屋根スラブ)

記号	単位	定義
L	m	屋根スラブの支持スパン
M	kN・m	設計竜巻による単位幅当たりの曲げモーメント
Q	kN	屋根スラブに生じる単位幅当たりのせん断力
ω_d	kN/m	常時作用する荷重による単位幅当たりの荷重
ω_T	kN/m	設計竜巻による単位幅当たりの荷重 (=Max { ω_{T1} , ω_{T2} })
ω_{T1}	kN/m	複合荷重 W_{T1} による単位幅当たりの荷重
ω_{T2}	kN/m	複合荷重 W_{T2} による単位幅当たりの荷重 (設計飛来物による 衝撃荷重 W_M は考慮しない)

表 5-4(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
(スタッド)

記号	単位	定義
L	m	屋根スラブの支持スパン
p	mm	スタッドの間隔
Q	kN	屋根スラブに生じる単位幅当たりのせん断力
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当たりの荷重 (=Max { ω_{T1} , ω_{T2} })
ω_{T1}	kN/m	複合荷重 W_{T1} による単位幅当たりの荷重
ω_{T2}	kN/m	複合荷重 W_{T2} による単位幅当たりの荷重 (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) D e g e n 式による裏面剥離限界厚さの算定

D e g e n 式を以下に示す。

1.52 ≤ X / d ≤ 13.42 の場合

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

X / d ≤ 1.52 の場合

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

修正 N D R C 式を以下に示す。

X / d ≤ 2.0 の場合

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

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) C h a n g 式による貫通限界厚さの算定

C h a n g 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の算定

イ. 設計飛来物による衝撃荷重

$$W_M = m \cdot V / \Delta t = m \cdot V^2 / L_1$$

ロ. 屋根スラブに発生する単位幅当たりの曲げモーメント

$$M = \text{M a x} \{ M_1, M_2 \}$$

ここで,

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

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

ハ. 屋根スラブに発生する単位幅当たりのせん断力

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

二. スタッド 1 本当たりの発生引張力

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

ここで, $Q = \frac{\omega_T \cdot L}{2}$

n : スタッドの本数 (本)

5.1.2 排気筒

(1) 評価条件

- a. 排気筒は筒身と鉄塔が一体となって構成されるため，施設全体で風圧力による一様な荷重を受けるモデルとして評価を行う。この際，排気筒の主要な支持機能を有する鉄塔部材に対して，設計竜巻による設計飛来物が衝突するものとする。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

施設名称	評価対象部位	評価内容
<ul style="list-style-type: none"> ・ 排気筒 ・ 1号機排気筒 	筒身及び鉄塔	<ul style="list-style-type: none"> ・ 変形角

(3) 強度評価方法

- a. 解析モデル

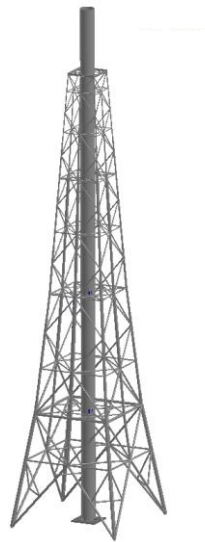


図5-1 排気筒のモデル図

- b. 評価方法

排気筒について，3次元FEMモデルによる変形評価を実施し，頂部最大変位を排気筒高さで除した全体変形角が許容限界を超えないことを確認する。

5.1.3 鋼製構造物

(1) 評価条件

- a. 設計飛来物が外部事象防護対象施設に衝突する場合の必要最小肉厚を，衝突解析により求める。
- b. 荷重及び応力は力学における標準式を用いて算定する。
- 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 5-6 に示す。

表 5-6 評価対象部位及び評価内容

施設名称	評価対象部位	評価内容
・原子炉建物	扉	貫通 転倒及び脱落
・ディーゼル燃料貯蔵タンク室 ・B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽	鋼製蓋	貫通

(3) 強度評価方法

a. 記号の定義

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 5-7 に示す。

表 5-7 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
(扉)

記号	単位	定義
A_1	m^2	表面鋼板の受圧面積
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	N	設計竜巻の気圧差による荷重
ΔP_{max}	N/m^2	最大気圧低下量
Z	mm^3	カンヌキの断面係数
σ_b	N/mm^2	曲げ応力度
τ	N/mm^2	せん断応力度

b. 評価方法

(a) 解析による必要最小肉厚の算定

解析における被衝突物の破断ひずみは、JISに規定されている伸びの下限値を基に設定するが、「NEI 07-13」において、TF（多軸性係数）を考慮することが推奨されていることを踏まえ、安全余裕として二軸引張状態で $TF = 2.0$ を考慮して設定する。

(b) 力学における標準式による荷重の算定

イ. 扉支持部材（カンヌキ）に生じる荷重

次式により算定する設計竜巻の気圧差による荷重による反力から、各部材に発生する荷重を算定する。扉のカンヌキに生じる荷重の例を図5-2に示す。

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

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



(a) 平面図



(b) 正面図

図5-2 カンヌキに生じる荷重の例

カンヌキの詳細図を図5-3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 5-3 カンヌキの詳細図

ロ. カンヌキ 1 本当たりに生じる曲げ応力度

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

ハ. カンヌキ 1 本当たりに生じるせん断応力度

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

5.2 機器・配管系に関する評価式

5.2.1 衝突評価が必要な機器

(1) 評価条件

衝突評価を行う場合，以下の条件に従うものとする。

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

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表 5-8 に示す。

表 5-8 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	応力等の状態
飛来物が衝突する可能性がある部位のうち，最小肉厚部等，貫通によって当該施設が機能喪失する可能性がある箇所	衝突による貫通力

(3) 強度評価方法

a. 記号の定義

衝突評価に用いる記号を表 5-9 に示す。

表 5-9 衝突評価に用いる記号

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

b. 評価方法

(a) 貫通限界厚さの算出

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

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

5.2.2 原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ

a. 評価条件

- (a) 計算モデルは1質点系モデルとし、ポンプ部は全高の1/2の位置に、原動機部は重心位置に複合荷重が作用することとする。また、設計竜巻による風荷重はそれぞれの評価対象部位に対して発生応力が大きくなる方向から当たるものとする。

原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプの強度評価対象部位を図5-4に示す。また、ポンプ部及び原動機部の応力計算モデル図を図5-5に示す。

- (b) 原動機フレームのたわみ量計算においては、ポンプ据付面から原動機台上端まで(ポンプ部)と、原動機台上端から原動機上部軸受部まで(原動機部)の片持ちはりと考える。ポンプ部については、ポンプ部の断面性能は原動機台が最も小さいことから、原動機台の断面性能を一様に有する単純円筒形モデルとして評価する。原動機部については、原動機フレームの断面性能を用いて評価する。このため、計算モデルは違う断面性能の一軸中空形モデルとして考え、荷重は全高の半分の位置に作用することとする。

たわみ量計算モデル図を図5-5に示す。

ポンプ据付面より上部の静止体(原動機フレーム等)は、水平方向の複合荷重により、ポンプ据付面を固定端として一方向に変形する。一方、回転体(ポンプ軸及び原動機軸)は、風荷重を受けないため、変形せず、原動機上部から鉛直方向に吊り下げられた状態を維持する。原動機フレーム等の変形により、軸受反力が許容荷重を超えないことを確認する。

- (c) 計算に用いる寸法は公称値を使用する。

b. 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-10に示す。

表5-10 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	応力等の状態
基礎ボルト, 取付ボルト	引張 せん断
原動機フレーム	引張
エンドカバー取付ボルト	せん断

c. 強度評価方法

(a) 記号の定義

原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプの強度評価に用いる記号を表 5-11 に示す。

表 5-11 原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプの構造強度評価及び動的機能維持評価に用いる記号 (1/3)

記号	単位	定義
a	mm	部材間の長さ
a ₁	mm	ポンプ据付面からの原動機台上端までの長さ
a ₂	mm	原動機台上端から原動機下部軸受までの長さ
a ₃	mm	原動機台から荷重作用点までの長さ
A	m ²	受圧面積（風向に垂直な面に投影した面積）
A ₁	m ²	四角形状の部分の受圧面積
A ₂	m ²	円形状の部分の受圧面積
A _b	mm ²	各ボルトの軸断面積
C	-	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
C ₁	-	四角形状の部分に対する建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
C ₂	-	円形状の部分に対する建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
C _p	-	ポンプ振動による震度
d	mm	回転子コア径
D	mm	各ボルトのピッチ円直径
D _m	mm	原動機フレーム外径
d _m	mm	原動機フレーム内径
D _p	mm	原動機台外径
d _p	mm	原動機台内径
E	MPa	縦弾性係数
E _m	MPa	原動機フレームの縦弾性係数
E _p	MPa	原動機台の縦弾性係数
E _m '	MPa	回転子の縦弾性係数

表 5-11 原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプの構造強度評価及び動的機能維持評価に用いる記号 (2/3)

記号	単位	定義
F	MPa	J S M E SSB-3121.1(1)により規定される値
F _b	N	各ボルトに対する引張力
f _s	MPa	J S M E SSB-3131により規定される供用状態A及びBでの許容せん断応力
f _t	MPa	J S M E SSB-3121.1又は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 _i	N	転倒支点からL _i の距離にあるボルトに対する引張力
F _H	N	水平方向に作用する荷重
G	-	ガスト影響係数
g	m/s ²	重力加速度
h	mm	基準面から荷重作用点までの距離
h ₁ '	mm	ポンプ据付面から荷重作用点までの距離
h ₂ '	mm	原動機下部軸受から荷重作用点までの距離
h ₃ '	mm	荷重作用点から荷重作用点までの距離
h _g	mm	基準面から重心位置までの距離
h _w	mm	すみ肉溶接高さ
I	mm ⁴	断面二次モーメント
I _m	mm ⁴	原動機フレームの断面二次モーメント
I _m '	mm ⁴	回転子の断面二次モーメント
I _p	mm ⁴	原動機台の断面二次モーメント
L _g	mm	重心からボルト間の距離
L _i	mm	転倒支点からボルトの距離
m	kg	質量
M	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
M _a	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
M _b	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
M _c	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
M _{Cp}	N・mm	ポンプ振動による転倒モーメント
M _p	N・mm	ポンプの回転によるモーメント
N	rpm	回転数 (原動機の同期回転数)
n	-	各ボルトの本数
n _f	-	引張力を受ける各ボルトの本数
Q _b	N	各ボルトに対するせん断力
P	kW	原動機出力
ΔP	N/m ²	設計竜巻の気圧低下量
q	N/m ²	設計用速度圧
S _u	MPa	J S M E 付録材料図表 Part5 表 9 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 表 8 にて規定される設計降伏点

表 5-11 原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプの構造強度評価及び動的機能維持評価に用いる記号 (3/3)

記号	単位	定義
S_y (RT)	MPa	J S M E 付録材料図表 Part5 表 8 にて規定される 40℃における設計降伏点
W	N	自重
W'	N	たわみ量及び発生荷重計算において設計竜巻による風圧を受ける面それぞれの W_{T2} の合計の複合荷重
W''	N	発生荷重
W_M	N	設計竜巻による飛来物の衝撃荷重
W_P	N	設計竜巻による気圧差による荷重
W_T	N	設計竜巻による複合荷重
W_{T1}, W_{T2}	N	設計竜巻による複合荷重
W_w	N	設計竜巻による風圧力による荷重
x	mm	荷重作用点から評価対象部位までの距離
x'	mm	評価対象部位から支点までの距離
x_a'	mm	ポンプグランド部から原動機下部軸受部までの距離
x_b'	mm	原動機下部軸受部から原動機上部軸受部までの距離
y	mm	たわみ量
y_1	mm	ポンプ据付面から原動機台上端部のたわみ量
y_2	mm	原動機台上端部から原動機下部軸受部のたわみ量
y_3	mm	原動機台上端部から荷重作用点のたわみ量
y_4	mm	荷重作用点のたわみ量
y_5	mm	荷重作用点から原動機上部軸受部のたわみ量
y_a	mm	原動機下部案内軸受部のたわみ量
y_b	mm	原動機上部案内軸のたわみ量
σ_b	MPa	各ボルトに生じる引張応力
σ_w	MPa	原動機フレームに生じる引張応力
τ	MPa	各ボルトに生じるせん断応力
θ	rad	傾斜
θ_1	rad	ポンプ据付面から原動機台上端部の傾斜
θ_3	rad	原動機台上端部から荷重作用点の傾斜
θ_4	rad	荷重作用点の傾斜
δ	mm	フレーム変位量
δ_a	mm	ポンプ据付面から原動機下部軸受部までのフレーム変位量
δ_b	mm	原動機下部軸受部から電動機上部軸受部までのフレーム変位量

(b) 計算モデル

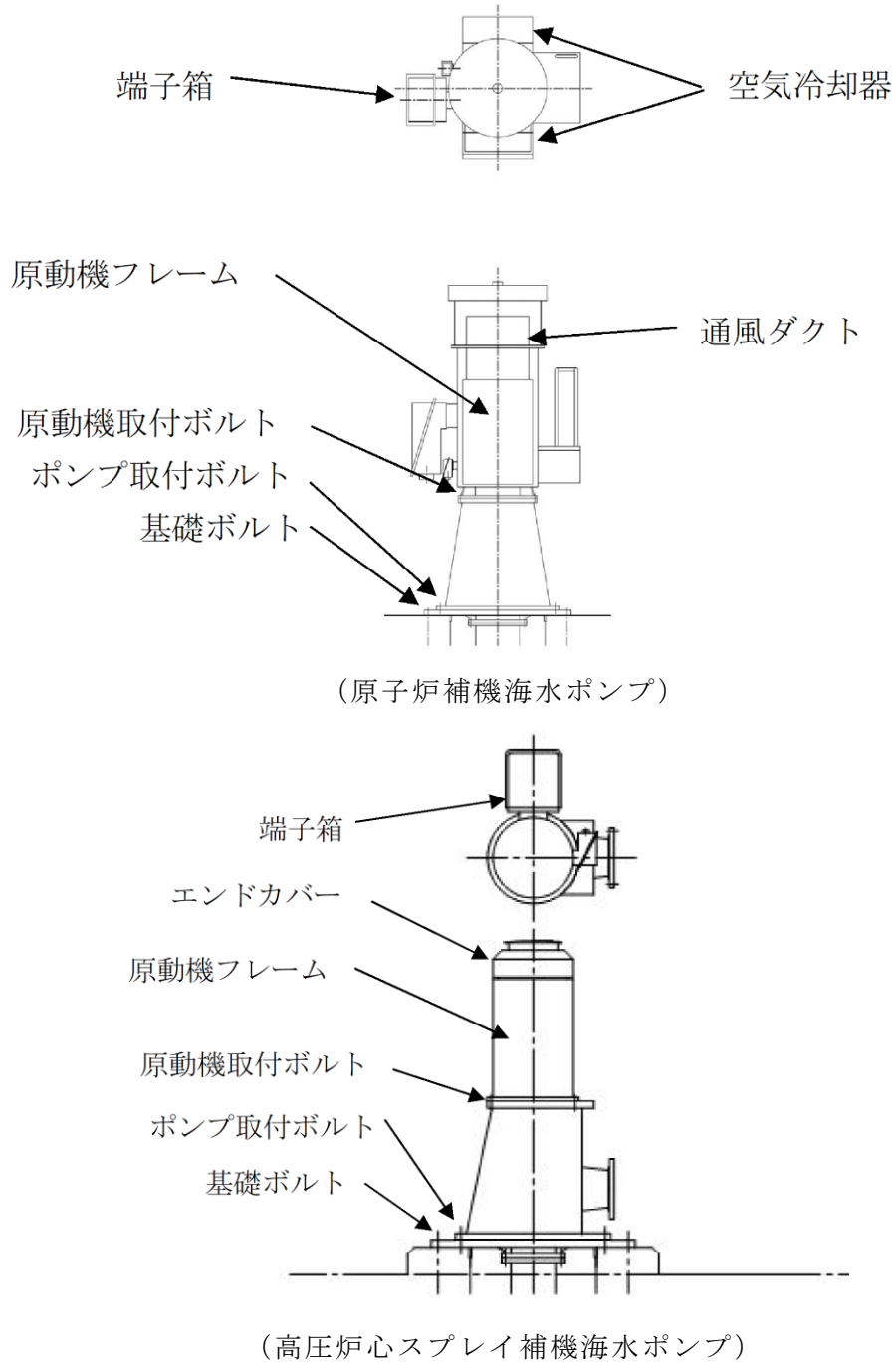
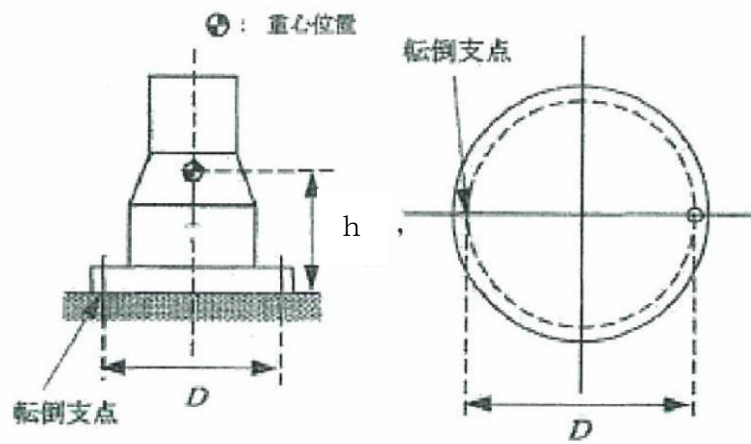
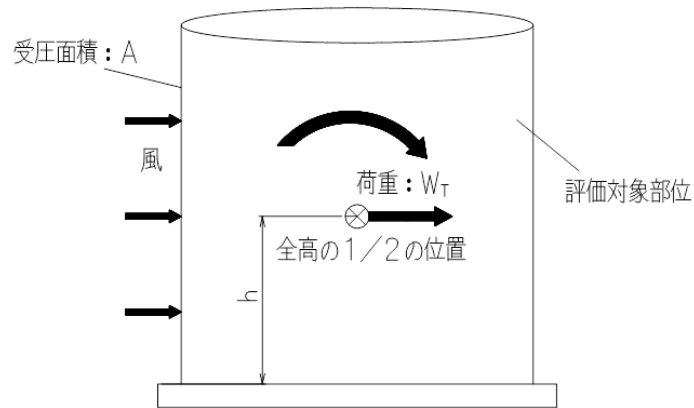


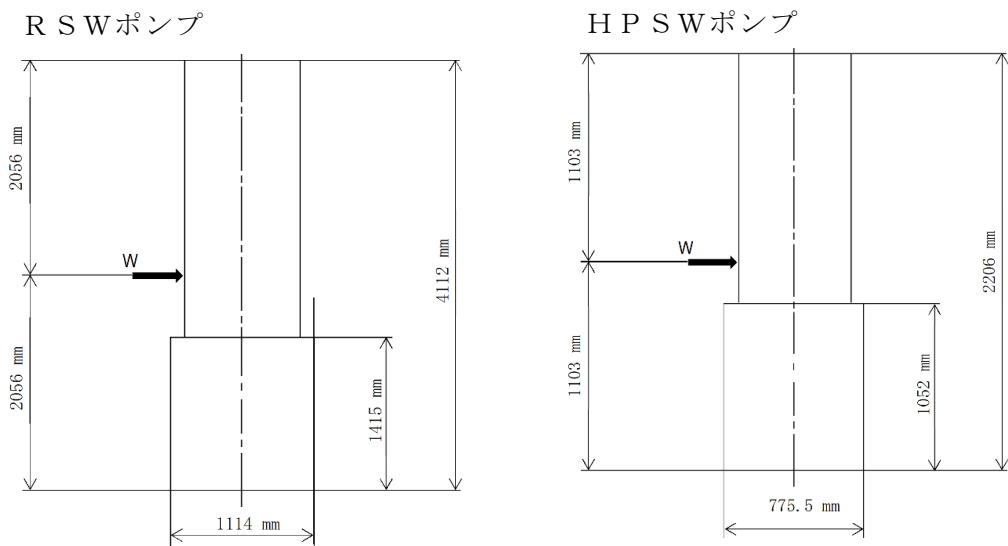
図 5-4 原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプの評価対象部位



(ポンプ部)



(原動機部)



(たわみ量計算モデル)

図 5-5 応力計算モデル図

(c) 評価方法

イ. 応力の算出

(イ) ポンプ部 (ボルト部)

・引張力 σ_{bt}

$$F_b = \frac{W_T \cdot h + M_{C_p} + ((m \cdot g \cdot D)/2) \cdot (C_p - 1)}{3/8 \cdot D \cdot n_f}$$

ただし, $F_b \leq 0$ ならば引張力は発生しない。

$F_b > 0$ ならば引張力は作用しているので, 以下の引張応力の計算を行う。

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

・せん断応力 τ

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

(ロ) 原動機部

・原動機フレーム部 (R S Wポンプ) (H P S Wポンプ)

原動機フレームの応力算出方法を以下に示す。

設計竜巻により作用する転倒モーメント M

$$M = W_T \cdot h_g$$

引張応力 σ_w

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

・端子箱取付ボルト部 (R S Wポンプ) (H P S Wポンプ)

端子箱取付ボルトの応力算出方法を以下に示す。

設計竜巻により作用するモーメント M

$$M = W_T \cdot L_g$$

引張応力 σ_b

$$F_b = \frac{M + W \cdot h_g}{L_1 \cdot n_f}$$

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

せん断応力 τ

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

ここで,

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

- ・通風ダクト取付ボルト部，空気冷却器取付ボルト部

通風ダクト取付ボルト部，空気冷却器取付ボルト部の応力算出方法を示す。

設計竜巻によって生じる転倒荷重が，通風ダクト等に作用した際の各取付ボルトに生じる際の引張応力を算出し評価する。なお，通風ダクトは上部軸受ブラケットとの接続もあるが，空気冷却器とのみ接続されているとして，評価する。（評価上厳しい条件）

風による転倒モーメントM

$$M = W_T \cdot h_g$$

引張応力 σ_b

$$M = \sum_{i=1}^8 F_i \cdot L_i \cdot \dots \textcircled{1}$$

$$\frac{F_i}{L_i} = \text{一定} \cdot \dots \textcircled{2}$$

①，②式より，

$$F_b = \frac{F_1}{n_f} = \frac{M}{n_f \cdot \sum_{i=1}^8 L_i^2} L_1$$

よって，

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

せん断応力 τ

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

- ・エンドカバー取付ボルト（HP SWポンプ）

竜巻によって生じる転倒荷重が，エンドカバーに作用した際の取付ボルトに生じる引張応力を算出し評価する。

(i) ポンプ回転によるモーメント

$$M_p = \frac{60}{2 \cdot \pi \cdot N} \cdot 10^6 \cdot P$$

(ii) せん断応力

$$\tau = \frac{W_T + 2 \cdot \frac{M_p}{D}}{n \cdot A_b}$$

ロ. 発生荷重の計算

(イ) たわみ量の算出

たわみ量の算出において、竜巻による風圧力を受ける面（原動機台，原動機フレーム，端子箱，通風ダクト及び空気冷却器）のそれぞれの W_{T2} の合計を複合荷重 W' とする。

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

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

ミオソテスの方法

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

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

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

(ロ) 発生荷重の算出

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

δ = 評価対象部位の変位量 - 支点の変位量

また、発生荷重は

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

より

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

5.2.3 原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナ

(1) 評価条件

原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナの強度評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

- a. 設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重、有効運転質量を考慮した荷重が作用する 1 質点系モデルとして計算を行う。ここで、荷重の作用点は評価上高さの 1/2 より高いストレーナの重心位置とする。原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナの応力の計算モデル図を図 5-6 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 5-12 に示す。

表 5-12 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	応力等の状態
基礎ボルト	引張 せん断

(3) 強度評価方法

a. 記号の定義

原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナの強度評価に用いる記号を表 5-13 に示す。

表 5-13 原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナの強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A	m ²	受圧面積
A _b	mm ²	基礎ボルトの軸断面積
C	-	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
d	mm	基礎ボルト呼び径
F	MPa	J SME SSB-3121.1(1)により規定される値
F _b	N	基礎ボルトに対する引張力
f _s	MPa	J SME SSB-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
f _t	MPa	J SME SSB-3131 により規定される供用状態A及びBでの許容引張応力
G	-	ガスト影響係数
g	m/s ²	重力加速度
h	mm	ストレーナ重心高さ
l	mm	重心から基礎ボルト間の水平距離
m	kg	容器の有効運転質量
N	-	基礎ボルトの本数
n _f	-	引張力を受ける基礎ボルトの本数
Q _b	N	基礎ボルトに対するせん断力
q	N/m ²	設計用速度圧
S _u	MPa	J SME 付録材料図表 Part5 表 9 にて規定される設計引張強さ
S _y	MPa	J SME 付録材料図表 Part5 表 8 にて規定される設計降伏点
W	N	自重
W _P	N	設計竜巻による気圧差による荷重
W _T	N	設計竜巻による複合荷重
W _{T1} , W _{T2}	N	設計竜巻による複合荷重
W _w	N	設計竜巻による風圧力による荷重
ΔP	N/m ²	設計竜巻の気圧低下量
σ _b	MPa	基礎ボルトに生じる引張応力
ρ	kg/m ³	空気密度
τ	MPa	基礎ボルトに生じるせん断応力

b. 計算モデル

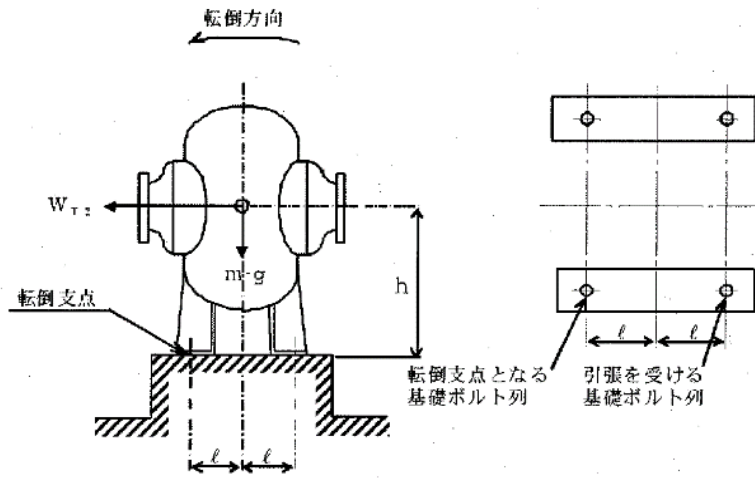


図 5-6 海水ストレーナのモデル図

c. 評価方法

(a) 引張応力

基礎ボルトに対する引張力は最も厳しい条件として、図 5-6 で基礎ボルトを支点とする転倒を考え、これを片側の基礎ボルトで受けるものとして計算する。

引張力

$$F_b = \frac{W_{T2} \cdot h - m \cdot g \cdot l}{n_f \cdot 2 \cdot l}$$

引張応力

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

ここで、基礎ボルトの軸断面積 A_b は

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

(b) せん断応力

基礎ボルトに対するせん断力は、基礎ボルト全本数で受けるものとして計算する。

せん断力

$$Q_b = W_{T2}$$

せん断応力

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

5.2.4 原子炉補機海水系配管及び弁，高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁，非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに非常用ガス処理系配管及び弁

(1) 評価条件

配管及び弁の強度評価を行う場合，以下の条件に従うものとする。

- a. 配管は一定距離ごとにサポートにより支持されているため，風圧力による一様な荷重を受ける単純支持はりとして評価を行う。評価に用いる支持間隔は，管外径，材質ごとにサポートの支持間隔が最長となる箇所を選定する。保温材を使用している配管については，保温材を含めた受圧面積を考慮して評価を行う。弁を設置している場合はサポート支持間隔が短くなるため，弁を設置している場合の受圧面積は最大支持間隔での受圧面積に包絡される。配管のモデル図を図5-7に示す。
- b. 非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに非常用ガス処理系配管及び弁は建物内等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（燃料移送系）配管及び弁，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに非常用ガス処理系配管及び弁のモデル図を図5-8に示す。
- c. 計算に用いる寸法は公称値を用いる。

(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
配管本体	一次応力

(3) 強度評価方法

a. 記号の定義

配管及び弁の強度評価に用いる記号を表 5-15 に示す。

表 5-15 配管及び弁の強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A	m ² /m	単位長さ当たりの受圧面積（風向に垂直な面に投影した面積）
C	-	風力係数
D	mm	管外径
g	m/s ²	重力加速度
G	-	ガスト影響係数
L	m	支持間隔
m	kg/m	単位長さ当たりの質量
M	N・m	風圧力により作用する曲げモーメント
P ₁	MPa	内圧
P _b	MPa	配管に作用する圧力
ΔP	N/m ²	気圧低下量
q	N/m ²	設計用速度圧
r _m	mm	平均半径
S _y	MPa	J S M E 付録材料図表 Part5 の表 8 にて規定される設計降伏点
t	mm	配管の厚さ
V _D	m/s	竜巻の最大風速
W _P	N/m	単位長さ当たりの気圧差による荷重
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	m ³	断面係数
σ	MPa	最大発生応力
σ ₁	MPa	管に生じる応力
σ ₂	MPa	管に生じる応力
σ _{WT1} , σ _{WT2}	MPa	複合荷重により生じる応力
σ _{WP}	MPa	気圧差により生じる応力
σ _{WW}	MPa	風圧力により生じる応力
σ _{自重}	MPa	自重により生じる応力
σ _{内圧}	MPa	内圧により生じる応力
σ _θ	MPa	管に生じる周方向応力
ρ	kg/m ³	空気密度

- b. 原子炉補機海水系配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁
 (a) 計算モデル

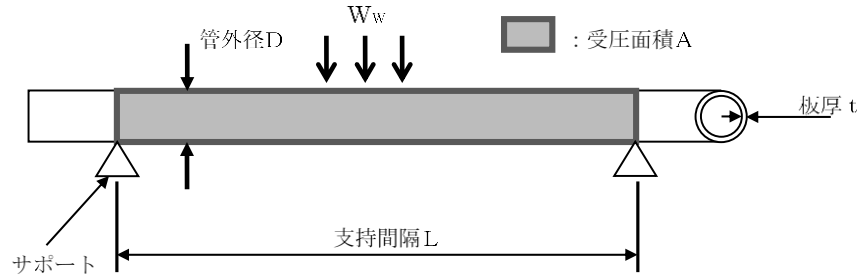


図 5-7 配管のモデル図

- (b) 評価方法

イ. 竜巻による応力計算

(イ) 風圧力により生じる応力

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

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

ここで、

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

(ロ) 気圧差により生じる応力

気圧差により生じる応力は、気圧が低下した分、内圧により生じる一次一般膜応力が増加すると考えて、その応力増加分を以下の式により算定する。

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

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

$$\sigma_{WT1} = \sigma_{wp}$$

$$\sigma_{WT2} = \sigma_{ww} + 0.5 \cdot \sigma_{wp}$$

ロ. 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による荷重を考慮する。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。

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

$$\sigma_{\text{内圧}} = \frac{P_1 \cdot D}{4t}$$

したがって、自重及び風圧力により生じる曲げ応力と気圧差及び内圧により生じる一次一般膜応力を足し合わせ、配管に生じる応力として以下の式により σ_1 及び σ_2 を算出する。

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

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

- c. 非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに非常用ガス処理系配管及び弁

(a) 計算モデル

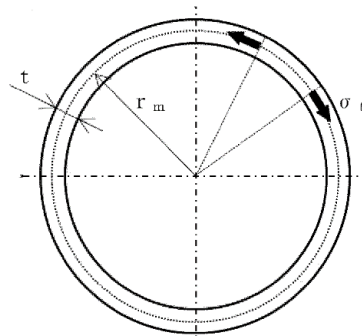


図 5-8 非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに非常用ガス処理系配管及び弁のモデル図

(b) 計算方法

イ. 配管に作用する圧力により生じる周方向応力

配管に作用する圧力は、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、

$$P_b = \Delta P + P_1$$

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

ただし、

$$r_m = \frac{D - t}{2}$$

5.2.5 非常用ディーゼル発電設備Aーディーゼル燃料移送ポンプ及び高压炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ

(1) 評価条件

非常用ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ及び高压炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプの強度評価を行う場合,以下の条件に従うものとする。

- a. 気圧差による荷重は,非常用ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ及び高压炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプの耐圧部に作用する。非常用ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ及び高压炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプの概要図を図5-9に示す。

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-16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
耐圧部	一次応力

(3) 強度評価方法

a. 記号の定義

非常用ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ及び高压炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプの強度評価に用いる記号を表5-17に示す。

表5-17 非常用ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ及び高压炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプの強度評価に用いる記号(1/2)

記号	単位	定義
ΔP	MPa	設計竜巻の気圧低下量
P	MPa	設計竜巻により発生する圧力
P ₁	MPa	最高使用圧力

b. 計算モデル

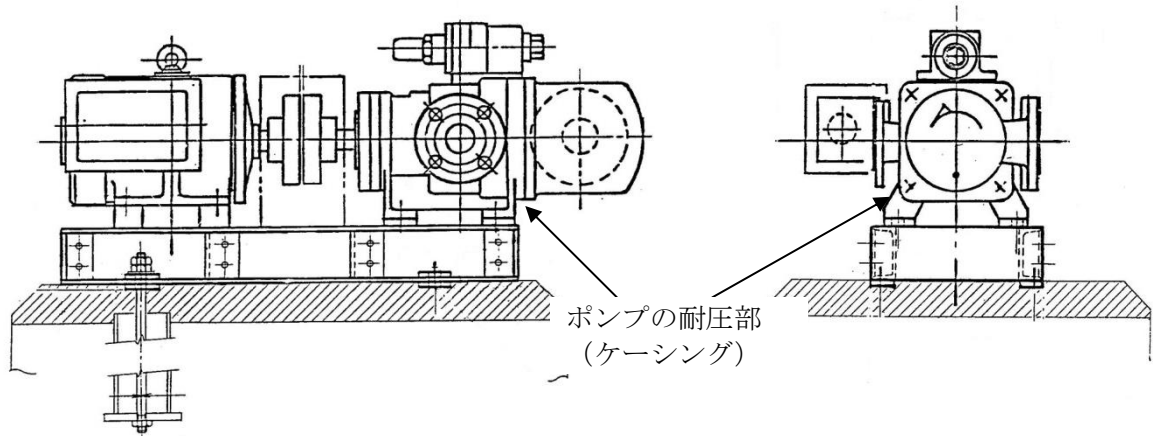


図 5-9 非常用ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプの概要図

c. 評価方法

評価方法は、運転時に作用する内圧に設計竜巻による気圧差を加え、これと燃料移送ポンプの耐圧試験圧力との比較を行う。運転時に作用する内圧として、燃料移送ポンプの最高使用圧力 P_1 を考慮する。

設計竜巻により発生する圧力は以下のとおり。

$$P = \Delta P + P_1$$

5.2.6 ダンパ

a. 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) 外板は、外板を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はりとして計算を行う。外板のモデル図を図5-10に示す。
- (b) 羽根は、4辺支持長方形板に等分布荷重がかかるものとし、曲げ応力による評価を行う。羽根のモデル図を図5-11に示す。
- (c) シャフトは、ダンパに作用する圧力及び自重により発生する荷重が両端のシャフトに均等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評価を行う。シャフトのモデル図を図5-12に示す。
- (d) 計算に用いる寸法は公称値を使用する。

b. 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 評価対象位及び評価内容

評価対象部位	応力等の状態
外板	曲げ
羽根	曲げ
シャフト	せん断

c. 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 5-19 に示す。

表 5-19 ダンパの強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
a	mm	評価対象板の短辺
A	mm ²	シャフト断面積
b	mm	評価対象板の長辺
D	mm	シャフト直径
e	mm	外板における断面の重心高さ
F ₁	N/mm	気圧低下による分布荷重
F ₂	N/mm	自重による分布荷重
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 _s	MPa	J S M E SSB-3121.1 により規定される供用状態 A 及び B での許容せん断応力
f _b	MPa	J S M E SSB-3121.1 により規定される供用状態 A 及び B での許容曲げ応力
g	m/s ²	重力加速度
h	mm	羽根厚さ
H	mm	外板高さ
E	MPa	縦弾性係数
I	mm ⁴	断面二次モーメント
L	mm	面間寸法
m	kg	羽根質量
M ₁	kg	外板質量
M ₂	kg	上流側フランジ質量
M ₃	kg	下流側フランジ質量
M _x	N・mm	外板に作用する曲げモーメント
P	MPa	ダンパに作用する圧力
ΔP	MPa	最大気圧低下量
W	mm	外板幅
Z	mm ³	断面係数
ν	—	ポアソン比
ω _{max}	mm	羽根の最大変位量
σ _{max}	MPa	羽根に生じる面外方向の荷重による最大応力
σ _{bmax}	MPa	外板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

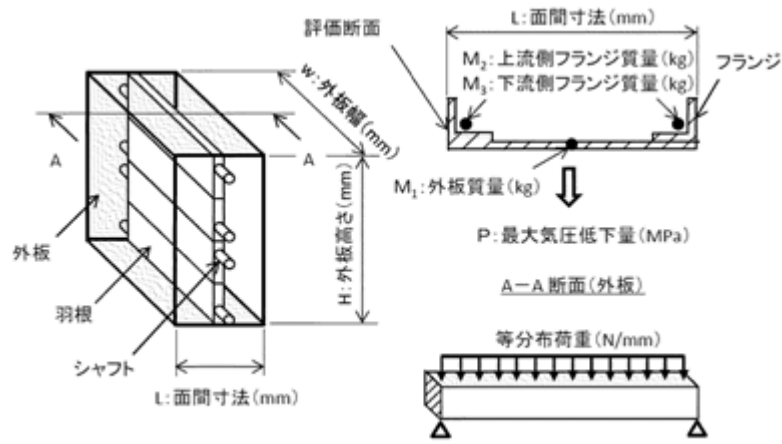


図 5-10 外板モデル図

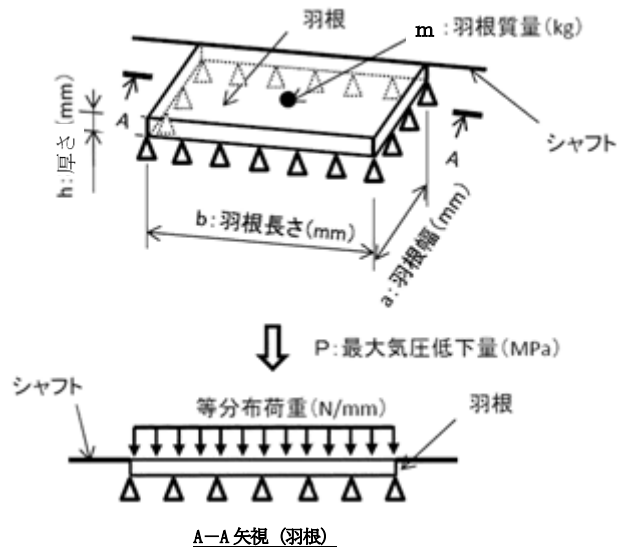


図 5-11 羽根モデル図

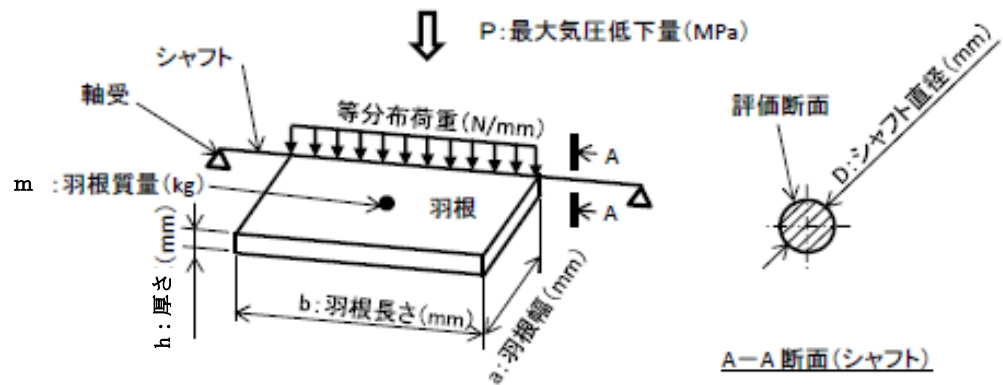


図 5-12 シャフトモデル図

(c) 評価方法

ダンパに作用する圧力は、設計竜巻の気圧差によって発生する。

$$P = \Delta P$$

イ. 外板

外板に作用する最大曲げモーメント

$$M_x = \frac{\text{MAX}(W, H) \times (F_1 + F_2)}{8}$$

ここで、

$$F_1 = P \times L$$

$$F_2 = \frac{(M_1 + M_2 + M_3) \times 9.80665}{\text{MAX}(W, H)}$$

外板に生じる最大曲げ応力

$$\sigma_{b \max} = \frac{M_x}{Z}$$

ここで、

$$Z = \frac{I}{e}$$

ロ. 羽根

羽根に生じる応力は、4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、ダンパに作用する圧力及び自重による面外荷重により生じる最大応力 σ_{\max} とその面外荷重による羽根の最大変位量 ω_{\max} との関係は、以下の式で表される。

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

$$\sigma_{\max} = \frac{\pi^2 E \omega_{\max}}{8(1-\nu^2)} \left\{ \frac{(2-\nu^2)\omega_{\max} + 4h}{b^2} + \frac{\nu(\omega_{\max} + 4h)}{a^2} \right\} \dots \textcircled{3}$$

$$\frac{256(1-\nu^2)(F_1 + F_2)}{\pi^6 E h^4} = \frac{4}{3} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 \frac{\omega_{\max}}{h} + \left\{ \frac{4\nu}{a^2 b^2} + (3-\nu^2) \left(\frac{1}{a^4} + \frac{1}{b^4} \right) \right\} \left(\frac{\omega_{\max}}{h} \right)^3 \dots \textcircled{4}$$

式④で得られる ω_{\max} の値を式③に代入し、 σ_{\max} を算出する。

ここで、

$$F_1 = P$$

$$F_2 = \frac{m \cdot g}{a \cdot b}$$

ハ. シャフト

シャフトに生じる最大せん断応力

$$\sigma_{s \max} = \frac{F_1 + F_2}{A}$$

ここで,

$$F_1 = P \cdot a \cdot b$$

$$F_2 = m \cdot g$$

$$A = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

5.2.7 角ダクト

(1) 評価条件

角ダクトの強度評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

- 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）を補強材・フランジで支持された長方形の板とみなすことができる。そのため、鋼板を補強部材と両サイドのウェブで支持された4辺単純支持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5-13、図5-14に示す。
- b. 計算に用いる寸法は公称値を使用する。

(a) 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

機器形状	評価対象部位	応力等の状態
角ダクト	ダクト（本体）	曲げ 座屈

(b) 強度評価方法

イ. 記号の定義

角ダクトの強度評価に用いる記号を表5-21に示す。

表 5-21 角ダクトの強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
a	mm	評価対象板の短辺
b	mm	評価対象板の長辺
c	mm	ダクト支持間隔
E	MPa	縦弾性係数
f_1	N	曲げモーメントによる圧縮荷重
f_2	N	最大気圧低下量及び通常運転圧力による圧縮荷重
f_t	MPa	J S M E S S B - 3 1 2 1 . 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
H	mm	ダクト高さ
M	N·mm	自重による曲げモーメント
ΔP	Pa	最大気圧低下量
P	Pa	ダクトに作用する圧力
P_1	Pa	通常運転圧力
P_m	N	限界荷重
t	mm	ダクト厚さ
W	mm	ダクト幅
w_1	N/mm	ダクト単位長さ当たりの荷重
w_2	N/mm ²	ダクト単位面積当たりの荷重
ν	—	ポアソン比
ω_{max}	mm	軸直角方向の荷重によるダクトの最大変位量
σ_{max}	MPa	軸直角方向の荷重により生じる最大応力
σ_y	MPa	降伏応力

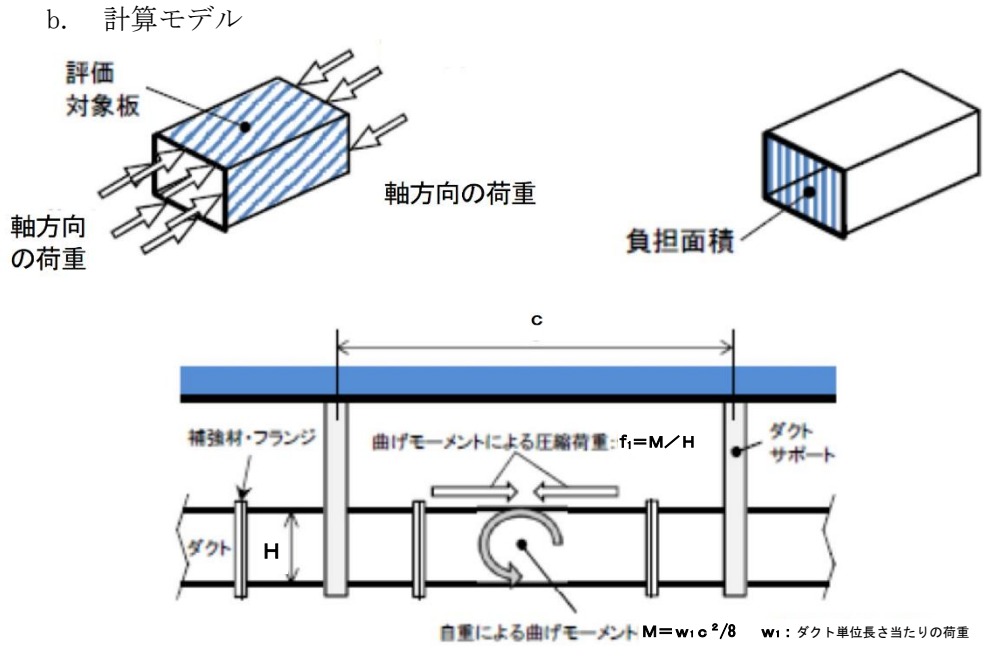


図 5-13 角ダクトの軸方向の荷重のモデル図

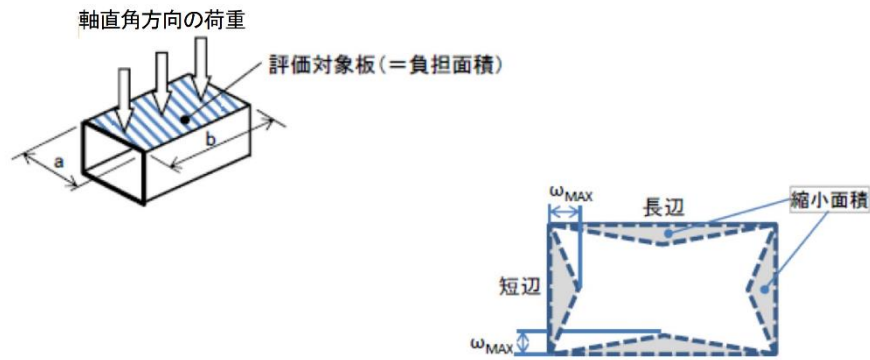


図 5-14 角ダクトの軸直角方向の荷重のモデル図

c. 評価方法

ダクトに作用する圧力は、設計竜巻の気圧差及び内圧が影響するので、

$$P = \Delta P + P_1$$

(a) 軸直角方向の荷重による発生応力

4 辺単純支持（周辺で水平、垂直方向の変位拘束、たわみ角は自由）の長方形板が等分布荷重を受ける場合において、ダクトに作用する圧力及び自重による軸直角方向の荷重により生じる最大応力 σ_{max} とその軸直角方向の荷重によるダクト鋼板の最大変位量 δ_{max} との関係は、以下の式で表される。

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

$$\sigma_{max} = \frac{\pi^2 E \omega_{max}}{8(1-\nu^2)} \left\{ \frac{(2-\nu^2)\omega_{max} + 4t}{b^2} + \frac{\nu(\omega_{max} + 4t)}{a^2} \right\} \dots \textcircled{5}$$

$$\frac{256(1-\nu^2)(P+w_2)}{\pi^6 E t^4} = \frac{4}{3} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 \frac{\omega_{max}}{t}$$

$$+ \left\{ \frac{4\nu}{a^2 b^2} + (3 - \nu^2) \left(\frac{1}{a^4} + \frac{1}{b^4} \right) \right\} \left(\frac{\omega_{\max}}{t} \right)^3 \quad \dots \textcircled{6}$$

式⑥より得られる ω_{\max} の値を式⑤へ代入し、 σ_{\max} を算出する。

(b) 軸方向の荷重による発生応力

イ. 自重による圧縮荷重

ダクトの自重により発生する曲げモーメントによる軸方向の圧縮荷重は、以下の式により算出する。

$$f_1 = \frac{M}{H}$$

ここで、

$$M = \frac{w_1 \cdot c^2}{8}$$

ロ. ダクトに作用する圧力による圧縮荷重

ダクトが軸方向に受ける設計竜巻の気圧差と内圧による圧縮荷重は、以下の式により算出する。

$$f_2 = \frac{(W + 2 \cdot t) \cdot (H + 2 \cdot t) \cdot P}{10^6}$$

5.2.8 丸ダクト

(1) 評価条件

丸ダクトの強度評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

- a. 丸ダクトは両端を補強部材で支持された円筒のはりともみなし計算を行う。
丸ダクトのモデル図を図5-15, 図5-16に示す。
- b. 計算に用いる寸法は公称値を使用する。

(a) 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

機器形状	評価対象部位	応力等の状態
丸ダクト	ダクト (本体)	曲げ 座屈

(b) 強度評価方法

イ. 記号の定義

丸ダクトの強度評価に用いる記号を表5-23に示す。

表 5-23 丸ダクトの強度評価に用いる記号

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
c	mm	ダクト支持間隔
d_1	mm	ダクト内径
d_2	mm	ダクト外径
E	MPa	縦弾性係数
k_p	—	座屈係数
M	$\text{N}\cdot\text{mm}$	自重による曲げモーメント
M_{cr}	$\text{N}\cdot\text{mm}$	弾性座屈曲げモーメント
L	mm	ダクト板の長さ
n	—	座屈モードの次数
P	MPa	ダクトに作用する圧力
ΔP	MPa	最大気圧低下量
P_1	MPa	通常運転圧力
R	mm	内半径
r_m	mm	平均半径
t	mm	ダクト厚さ
ν	—	ポアソン比
w	N/mm	ダクト単位長さ当たりの荷重
Z	mm^3	断面係数
z_c	—	形状係数
β	—	補正係数
σ_b	MPa	自重による発生応力
σ_{pb}	MPa	設計竜巻による気圧差及び内圧による発生応力
σ_{cr1}	MPa	クリップリング座屈が発生する際に生じる応力
σ_{cr2}	MPa	弾性座屈曲げ応力
σ_P	MPa	ダクトに作用する圧力による発生応力
σ_θ	MPa	ダクトに作用する圧力により軸直角方向に生じる応力

ロ. 計算モデル

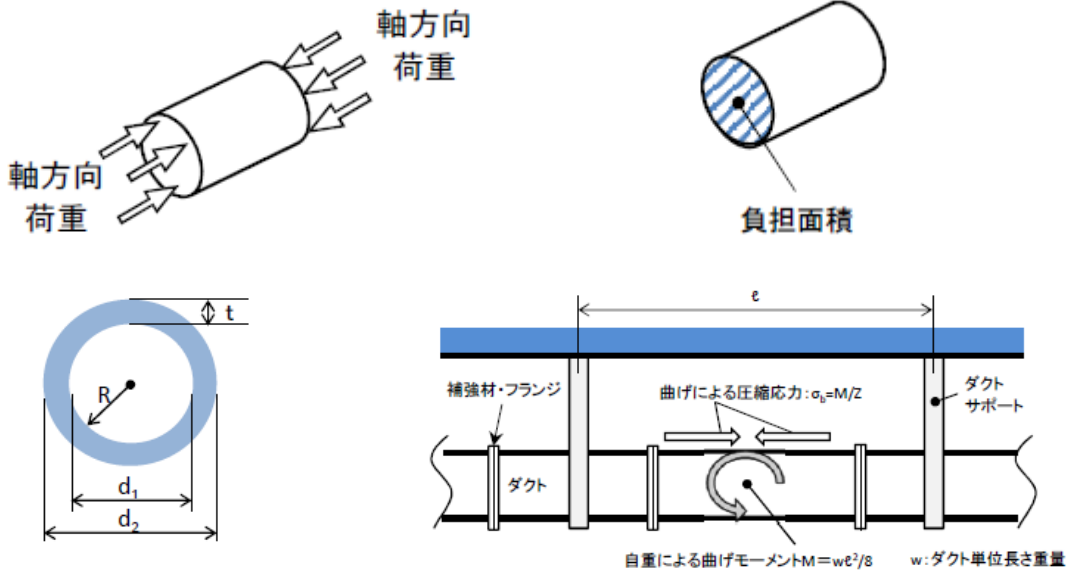


図 5-15 丸ダクトの軸方向荷重のモデル図



図 5-16 丸ダクトの軸方向荷重のモデル図

ハ. 評価方法

ダクトに作用する圧力は、設計竜巻の気圧差及び内圧が影響する。

$$P = \Delta P + P_1$$

(イ) ダクトに作用する圧力により生じる周方向応力

$$\sigma_{\theta} = -\frac{r_m P}{t}$$

(ロ) 面内荷重による発生応力

(i) 自重による発生応力

ダクトが軸方向に受ける自重による曲げ応力は、以下の式により算出する。

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

ここで,

$$M = \frac{w c^2}{8}$$
$$Z = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{d_2^4 - d_1^4}{d_2}$$

(ii) ダクトに作用する圧力による発生応力

ダクトが軸方向に受ける設計竜巻の気圧差と内圧による圧縮応力は、以下の式により算出する。

$$\sigma_P = P \times \frac{A_1}{A_2}$$

ここで,

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

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

5.2.9 隔離弁

(1) 評価条件

隔離弁の強度評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

- a. 弁箱は、両端を補強部材で支持された円筒のはりとみなし、計算を行う。弁箱のモデル図を図 5-17 に示す。
- b. 弁体は、円形の弁体面積に受ける荷重を長方形の評価面積に作用するとみなし、弁体評価面積の断面と同等の断面性能を持つ単純はりとして、曲げ応力による計算を行う。弁体のモデル図を図 5-18 に示す。
- c. 弁棒は、内部圧力及び自重により発生する荷重が両端の弁棒に作用するものとし、弁棒断面についてせん断応力による計算を行う。弁棒のモデル図を図 5-19 に示す。
- d. 計算に用いる寸法は公称値を使用する。

(a) 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

機器形状	評価対象部位	応力等の状態
隔離弁	弁箱	座屈
	弁体	曲げ
	弁棒	せん断

(b) 強度評価方法

イ. 記号の定義

隔離弁の強度評価に用いる記号を表 5-25 に示す。

表 5-25 隔離弁の強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A	mm ²	弁棒断面積
D	mm	弁棒直径
e	mm	主軸から断面最端点までの距離
E	MPa	縦弾性係数
f_s	MPa	J S M E SSB-3121. 1 により規定される供用状態 A 及び B での許容せん断応力
f_b	MPa	J S M E SSB-3121. 1 により規定される供用状態 A 及び B での許容曲げ応力
F ₁	N	最大気圧低下量による荷重
F ₂	N	自重による荷重
g	m/s ²	重力加速度
h	mm	弁体厚さ
H	mm	弁体幅
I	mm ⁴	断面二次モーメント
k _p	—	座屈係数
ℓ	mm	弁体評価面の長さ
L ₁	mm	弁箱の面間寸法
L ₂	mm	弁体長さ
M	kg	弁体質量
M _x	N・mm	弁体に作用する曲げモーメント
n	—	座屈モードの次数
P	MPa	隔離弁に作用する圧力
ΔP	MPa	最大気圧低下量
R	mm	内半径
r _m	mm	平均半径
t	mm	弁箱厚さ
w	mm	弁体評価面の幅
β	—	補正係数
ν	—	ポアソン比
Z _c	—	形状係数
Z	mm ³	断面係数
σ _{max}	MPa	弁箱に生じる周方向応力
σ _{b max}	MPa	弁体に生じる最大曲げ応力
σ _{s max}	MPa	弁棒に生じる最大せん断応力
σ _{cr1}	MPa	クリップリング座屈が発生する際に生じる周方向応力

(c) 計算モデル

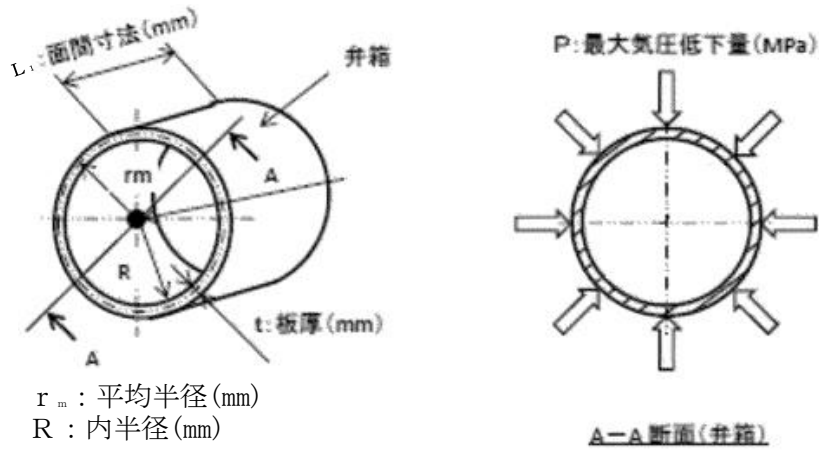


図 5-17 弁箱モデル図

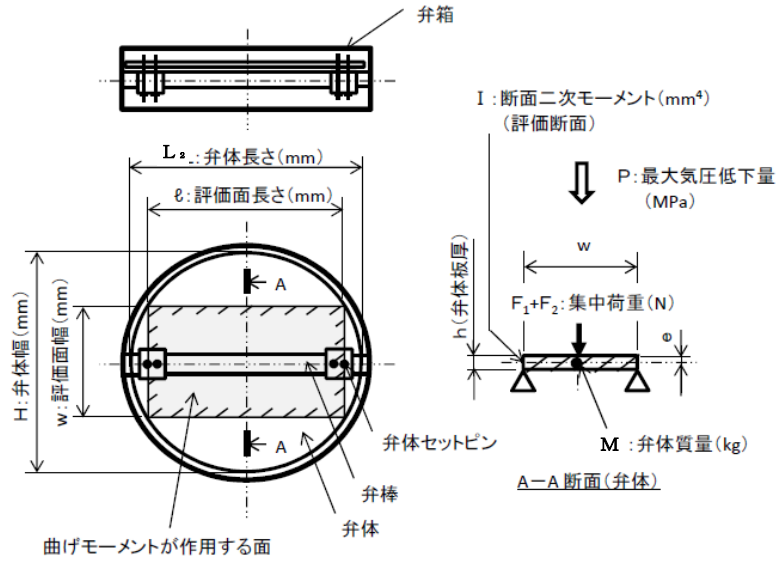


図 5-18 弁体モデル図

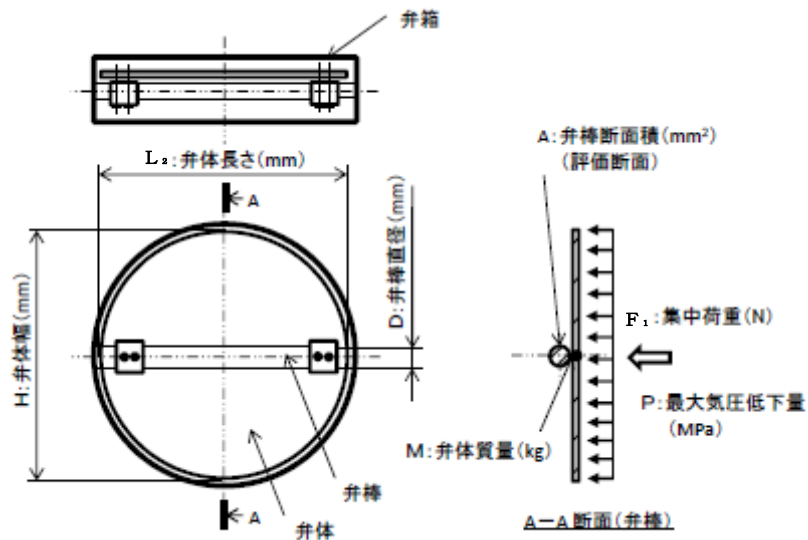


図 5-19 弁棒モデル図

(d) 評価方法

隔離弁に作用する圧力は、設計竜巻の気圧差によって発生する。

$$P = \Delta P$$

イ. 弁箱

弁箱に生じる周方向応力

$$\sigma_{\max} = \frac{r_m \times P}{t}$$

ロ. 弁体

弁体に作用する曲げモーメント

$$M_x = (F_1 + F_2) \times \frac{1}{4}$$

ここで、

$$F_1 = P \times \left(\pi \times \left(\frac{H}{2} \right)^2 \right)$$

$$F_2 = M \cdot g$$

弁体に生じる最大曲げ応力

$$\sigma_{b \max} = \frac{M_x}{Z}$$

ここで、

$$Z = \frac{I}{e}$$

$$I = \frac{\rho}{12} \times (w h^3)$$

ハ. 弁棒

シャフトに生じる最大せん断応力

$$\sigma_{s \max} = \frac{F_1 + F_2}{A}$$

ここで、

$$F_1 = P \times \left\{ \pi \cdot \left(\frac{L_2}{2} \right)^2 \right\}$$

$$F_2 = M \cdot g$$

$$A = \pi \times \left(\frac{D}{2} \right)^2$$

5.2.10 送風機

(1) 評価条件

送風機の強度評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

- a. 送風機は両端を補強部材で支持された円筒のはりとみなし、計算を行う。送風機のモデル図を図 5-20 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 5-26 に示す。

表 5-26 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

送風機の強度評価に用いる記号を表 5-27 に示す。

表 5-27 送風機の強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
a	mm	ケーシング内半径
b	mm	ケーシング外半径
E	MPa	縦弾性係数
k_p	—	座屈係数
L	mm	ケーシングの軸方向長さ
n	—	座屈モードの次数
P	MPa	送風機に作用する圧力
ΔP	MPa	最大気圧低下量
P_1	MPa	通常運転圧力
t	mm	ケーシングの肉厚
z_c	—	形状係数
β	—	補正係数
ν	—	ポアソン比
σ	MPa	送風機に作用する圧力により生じる周方向応力
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

b. 計算モデル

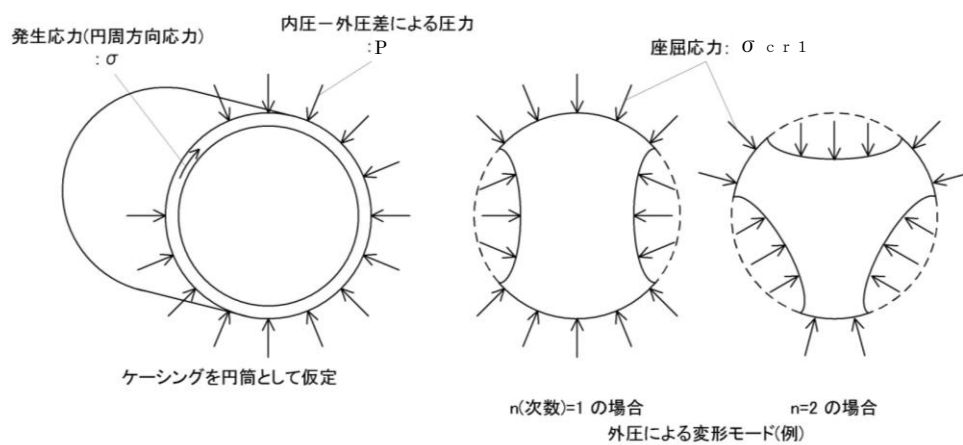


図 5-20 ケーシングのモデル図

c. 評価方法

送風機に作用する圧力は、設計竜巻の気圧差及び内圧が影響する。

$$P = \Delta P + P_1$$

(a) 送風機に作用する圧力により生じる周方向応力

$$\sigma = \frac{2b^2}{b^2 - a^2} P$$

5.2.11 処理装置

(1) 評価条件

- a. 処理装置のケーシングは両サイドを補強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、ケーシングの両サイドを補強部材で支持された4辺単純支持長方形板とし、評価を行う。処理装置のモデル図を図5-21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5-28に示す。

表5-28 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

処理装置の強度評価に用いる記号を表5-29に示す。

表5-29 処理装置の強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
a	mm	長方形板の短辺
b	mm	長方形板の長辺
E	MPa	縦弾性係数
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
P	MPa	処理装置に作用する圧力
ΔP	MPa	最大気圧低下量
P_1	MPa	通常運転圧力
t	mm	ケーシング板厚
ν	—	ポアソン比
ω_{max}	mm	面外荷重によるケーシングの最大変位量
σ_{max}	MPa	面外荷重により生じる最大応力

b. 計算モデル

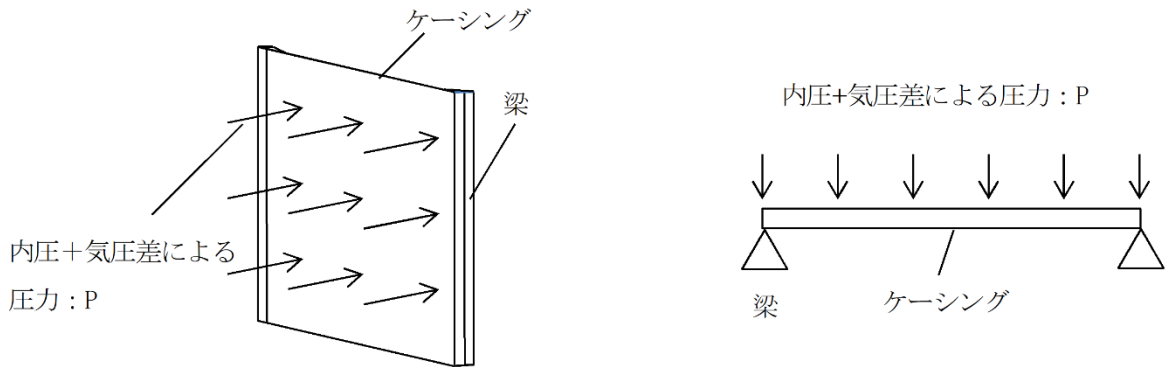


図 5-21 処理装置のモデル図

c. 評価方法

処理装置に作用する圧力は，設計竜巻により発生する気圧差及び内圧が影響する。

$$P = \Delta P + P_1$$

イ. ケーシングの変形

4 辺単純支持（周辺で水平，垂直方向の変位拘束，たわみ角は自由）の長方形板が等分布荷重を受ける場合において，処理装置に作用する圧力及び自重による面外荷重により生じる最大応力 σ_{max} とその面外荷重によるケーシングの最大変位量 ω_{max} との関係は，以下の式で表される。

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

$$\sigma_{max} = \frac{\pi^2 E \omega_{max}}{8(1-\nu^2)} \left\{ \frac{(2-\nu^2)\omega_{max} + 4t}{b^2} + \frac{\nu(\omega_{max} + 4t)}{a^2} \right\} \dots \textcircled{7}$$

$$\frac{256(1-\nu^2)P}{\pi^6 E t^4} = \frac{4}{3} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 \frac{\omega_{max}}{t} + \left\{ \frac{4\nu}{a^2 b^2} + (3-\nu^2) \left(\frac{1}{a^4} + \frac{1}{b^4} \right) \right\} \left(\frac{\omega_{max}}{t} \right)^3 \dots \textcircled{8}$$

式⑧より得られる ω_{max} の値を式⑦へ代入し， σ_{max} を算出する。

5.2.12 排気消音器

(1) 評価条件

消音器の強度評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

- a. 重心位置に風圧力による荷重が作用する 1 質点系モデルとして計算を行う。なお、基礎ボルトに関しては、非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関と高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の排気消音器で取付位置が異なるためそれぞれで評価を行う。消音器のモデル図を図 5-22 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 5-30 に示す。

表 5-30 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	応力等の状態
基礎ボルト 結合ボルト	引張り せん断

(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5-31に示す。

表5-31 消音器の強度評価に用いる記号(1/2)

記号	単位	定義
A	m ²	排気消音器の受圧面積
A _b	mm ²	ボルトの断面積
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
d	mm	ボルト呼び径
F	MPa	J S M E SSB-3121.1(1)により規定される値
F _b	N	ボルトに生じる引張荷重
f _t	MPa	J S M E SSB-3121.1(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 _s	MPa	J S M E SSB-3121.1(2)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
G	—	ガスト影響係数
g	m/s ²	重力加速度
h ₁	mm	取付面から重心までの高さ
h ₂	mm	脚結合部から重心までの高さ
ℓ ₁	mm	軸方向における基礎ボルトと重心の距離
ℓ ₂	mm	軸方向における基礎ボルトと重心の距離
ℓ ₃	mm	軸方向における結合ボルトと重心の距離
ℓ ₄	mm	軸方向における結合ボルトと重心の距離
ℓ ₁ '	mm	軸直角方向における基礎ボルトと重心の距離
ℓ ₂ '	mm	軸直角方向における基礎ボルトと重心の距離
ℓ ₃ '	mm	軸直角方向における結合ボルトと重心の距離
ℓ ₄ '	mm	軸直角方向における結合ボルトと重心の距離
m	kg	排気消音器の質量
n	—	ボルトの本数
n _f	—	引張荷重を受けるボルトの本数
Q _b	N	ボルトに生じるせん断荷重
q	N/m ²	設計用速度圧

表 5-31 消音器の強度評価に用いる記号(2/2)

記号	単位	定義
S_u	MPa	J S M E 付録材料図表 Part5 表 9 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 表 8 にて規定される設計降伏点
V_D	m/s	設計竜巻の最大風速
W_T	MPa	複合荷重
W_w	N	風圧力により作用する荷重
σ_b	MPa	ボルトに生じる引張応力
τ	MPa	ボルトに生じるせん断応力
ρ	kg/m ³	空気密度

b. 計算モデル

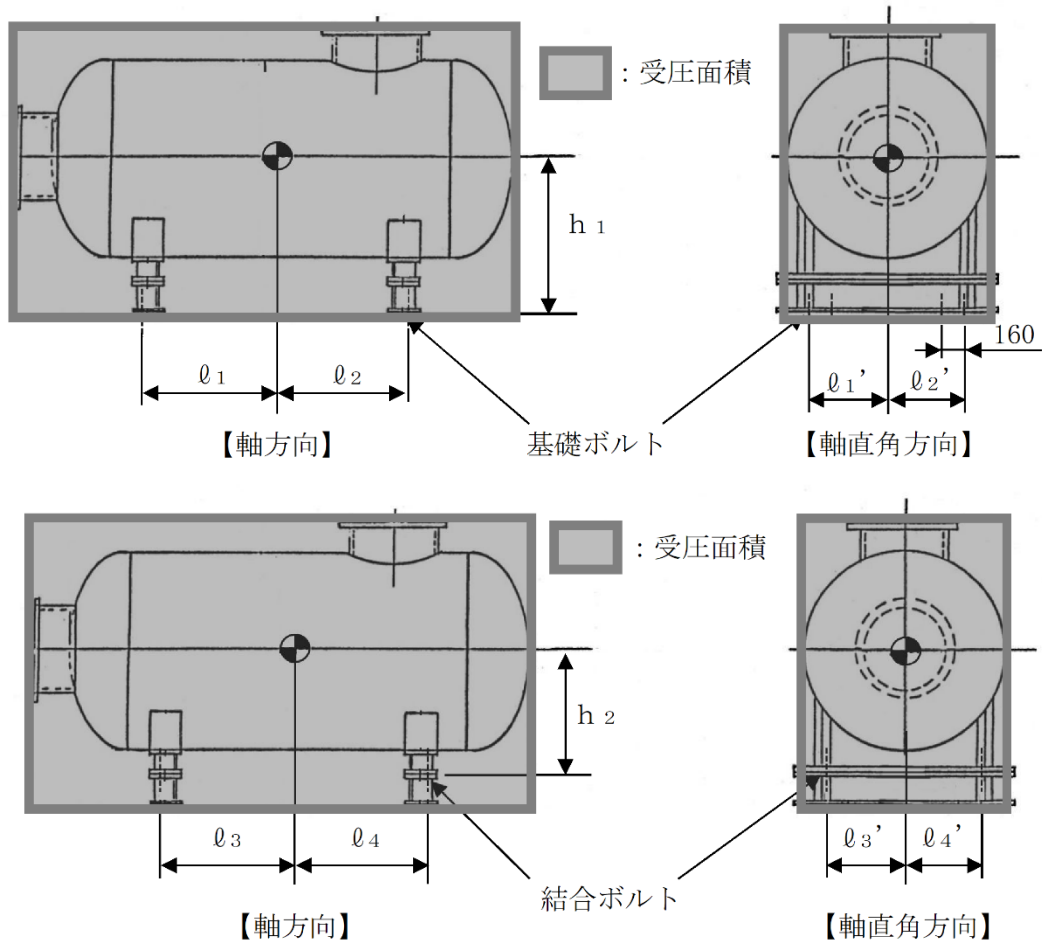


図 5-22 消音器のモデル図

c. 評価方法

(a) 基礎ボルトの引張応力

基礎ボルトに対する引張力は最も厳しい条件として、図 5-22 で基礎ボルトを支点とする転倒を考え、これを片側の基礎ボルトで受けるものとして計算する。なお、軸直角方向と軸方向の各引張応力を比較し、値の大きい値を採用する。

イ. 軸直角方向

(イ) 引張力

$$F_b = \frac{(W_w \cdot h_1 - m \cdot g \cdot \ell_1') \cdot (\ell_1' + \ell_2')}{(\ell_1' + \ell_2')^2 + (\ell_1' + \ell_2' - 160)^2}$$

(ロ) 引張応力

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

ここで、基礎ボルトの軸断面積 A_b は

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

ロ. 軸方向

(イ) 引張力

$$F_b = \frac{W_w \cdot h_1 - m \cdot g \cdot \ell_1}{\ell_1 + \ell_2}$$

(ロ) 引張応力

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

(b) 基礎ボルトのせん断応力

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

イ. せん断力

$$Q_b = W_w$$

ロ. せん断応力

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

(c) 結合ボルトの引張応力

結合ボルトに対する引張力は最も厳しい条件として、図 5-22 で結合ボルトを支点とする転倒を考え、これを片側の結合ボルトで受けるものとして計算する。なお、強度評価においては軸直角方向と軸方向の各引張応力を比較し、値の大きいほうを採用する。

イ. 軸直角方向

(イ) 引張力

$$F_b = \frac{W_w \cdot h_2 - m \cdot g \cdot \ell_3'}{\ell_3' + \ell_4'}$$

(ロ) 引張応力

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

ロ. 軸方向

(イ) 引張力

$$F_b = \frac{W_w \cdot h_2 - m \cdot g \cdot \ell_3}{\ell_3 + \ell_4}$$

(ロ) 引張応力

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

(d) 結合ボルトのせん断応力

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

イ. せん断力

$$Q_b = W_w$$

ロ. せん断応力

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

5.2.13 排気管及びベント管

(1) 評価条件

- 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はりとして評価を行う。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。なお，ベント管は，配管端部が片持ち形状となっていることから，配管端部についても片持ちはりとして評価を行う。排気管及びベント管のモデル図を図 5-23，図 5-24 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 5-32 に示す。

表 5-32 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	応力等の状態
排気管 ベント管	一次応力

(3) 強度評価方法

a. 記号の定義

排気管及びベント管の強度評価に用いる記号を表 5-33 に示す。

表 5-33 排気管及びベント管の強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A	m^2/m	単位長さ当たりの受圧面積（風向に垂直な面を投影した面積）
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
D	mm	配管外径
g	m/s^2	重力加速度
G	—	ガスト影響係数
ℓ	m	受圧部長さ（片持ち部）
L	m	支持間隔
m	kg/m	単位長さ当たりの質量
M	$N \cdot m$	風圧力による曲げモーメント
P	MPa	内圧
ΔP	N/m^2	最大気圧低下量
q	MPa	設計用速度圧
S _y	MPa	J S M E 付録材料図表 Part5表8にて規定される設計降伏点
V D	m/s	設計竜巻の最大風速
t	mm	板厚
W P	N	気圧差による荷重
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	m^3	断面係数
$\sigma 1, \sigma 2$	MPa	配管に生じる応力
$\sigma W P$	MPa	気圧差により生じる応力
$\sigma W T 1, \sigma W T 2$	MPa	複合荷重により生じる応力
$\sigma W W$	MPa	風圧力により生じる応力
σ 自重	MPa	自重により生じる応力
σ 内圧	MPa	内圧により生じる応力
ρ	kg/m^3	空気密度

b. 計算モデル

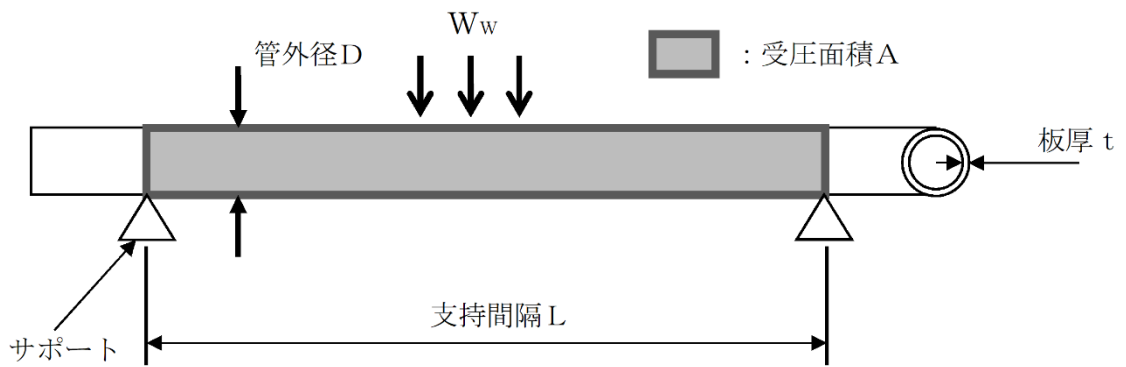


図 5-23 排気管モデル図

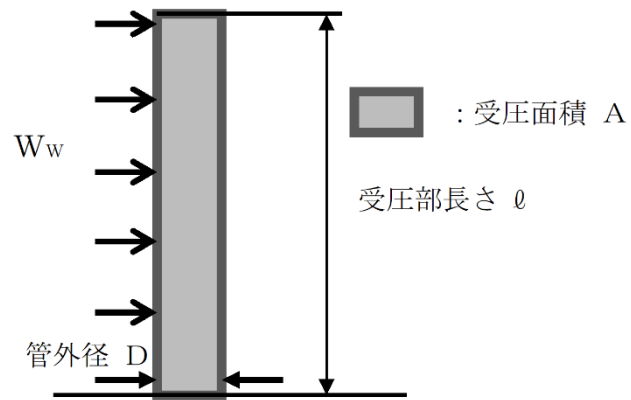


図 5-24 ベント管モデル図

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間隔に等分布荷重として加わり，曲げ応力を発生させるものとして，以下の式により算定する。

(両端支持形状)

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

(片持ち形状)

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

ここで，

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

ロ. 気圧差により生じる応力

気圧差による荷重は，気圧が低下した分，内圧により生じる一次一般膜応力が増加すると考えて，その応力増加分を以下の式により算定する。

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

したがって，イ., ロ. 項の複合荷重により生じる応力 σ_{WT1} 及び σ_{WT2} は以下の式により算出する。

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

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

(b) 組合せ応力

竜巻荷重と組み合わせる荷重として，配管に常時作用する自重及び運転時に作用する内圧を考慮する。自重により生じる曲げ応力及び内圧により生じる一次一般膜応力は，以下の式により算定する。

イ. 自重により生じる応力

(両端支持形状)

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

(片持ち形状)

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

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と気圧差による荷重及び内圧により生じる一次一般膜応力を足し合わせ、配管に生じる応力として以下の式により σ_1 及び σ_2 を算出する。

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

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

6. 適用規格・基準等

(1) 適用規格・基準等

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・基準等は、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
- ・ 建築物荷重指針・同解説（日本建築学会 2004 改定）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針（重要度分類・許容応力編 JEAG 4601・補-1984）（日本電気協会 電気技術基準調査委員会 昭和 59 年 9 月）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG 4601-1987）（日本電気協会 電気技術基準調査委員会 昭和 62 年 8 月）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG 4601・追補版-1991）（日本電気協会 電気技術基準調査委員会 平成 3 年 12 月）
- ・ 発電用原子力設備規格（設計・建設規格 JSME S NC 1-2005（2007 年追補版含む。））（日本機械学会 2007 年 9 月）
- ・ 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）
- ・ 鋼構造設計規準 -許容応力度設計法-（（社）日本建築学会，2005 改定）
- ・ 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 -許容応力度設計法-（（社）日本建築学会，1999 改定）
- ・ 日本産業規格（JIS）
- ・ 各種合成構造設計指針 同解説（（社）日本建築学会，2010 年改定）
- ・ Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs（Nuclear Energy Institute 2011 Rev8P（NEI07-13））
- ・ 理科年表（国立天文台，第 85 冊，2003 年）
- ・ コンクリート標準示方書 設計編（（社）土木学会，2012 改定）
- ・ 原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005 制定）

(2) 参考文献

- ・ Wichman, K. R. et al, :Local Stress in Spherical and Cylindrical Shells due to External Loadings, Welding Research Council bulletin, March 1979 revision of WRC bulletin 107/August 1965.
- ・ Bijlaard, P. P. :Stresses from Radical Loads and External Moments in

Cylindrical Pressure Vessels, The Welding Journal, 34(12), Research Supplement, 1955.

VI-3-別添 1-4 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	7
2.3 評価方針	9
2.4 適用規格・基準等	12
3. 強度評価方法	13
3.1 記号の定義	13
3.2 評価対象部位	18
3.3 荷重及び荷重の組合せ	21
3.4 許容限界	26
3.5 評価方法	34
4. 評価条件	51
4.1 荷重条件	51
4.2 竜巻防護ネット仕様	52
5. 強度評価結果	57
5.1 吸収エネルギー評価	57
5.2 破断評価	60
5.3 たわみ評価	67

1. 概要

本資料は、VI-3-別添 1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」に示すとおり、防護対策施設である竜巻防護ネットが、外部事象防護対象施設の機能喪失に至る可能性のある飛来物（以下「設計飛来物」という。）が外部事象防護対象施設へ衝突することを防止するために、主要な部材が破断せず、たわみを生じても設計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「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」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・基準等」を示す。

2.1 位置

竜巻防護ネットは、海水ポンプエリア、原子炉建物外壁及び廃棄物処理建物外壁に設置する。

竜巻防護ネットの設置位置図を図 2-1 に、各設置位置における竜巻防護ネットの割付図を図 2-2～図 2-4 に示す。

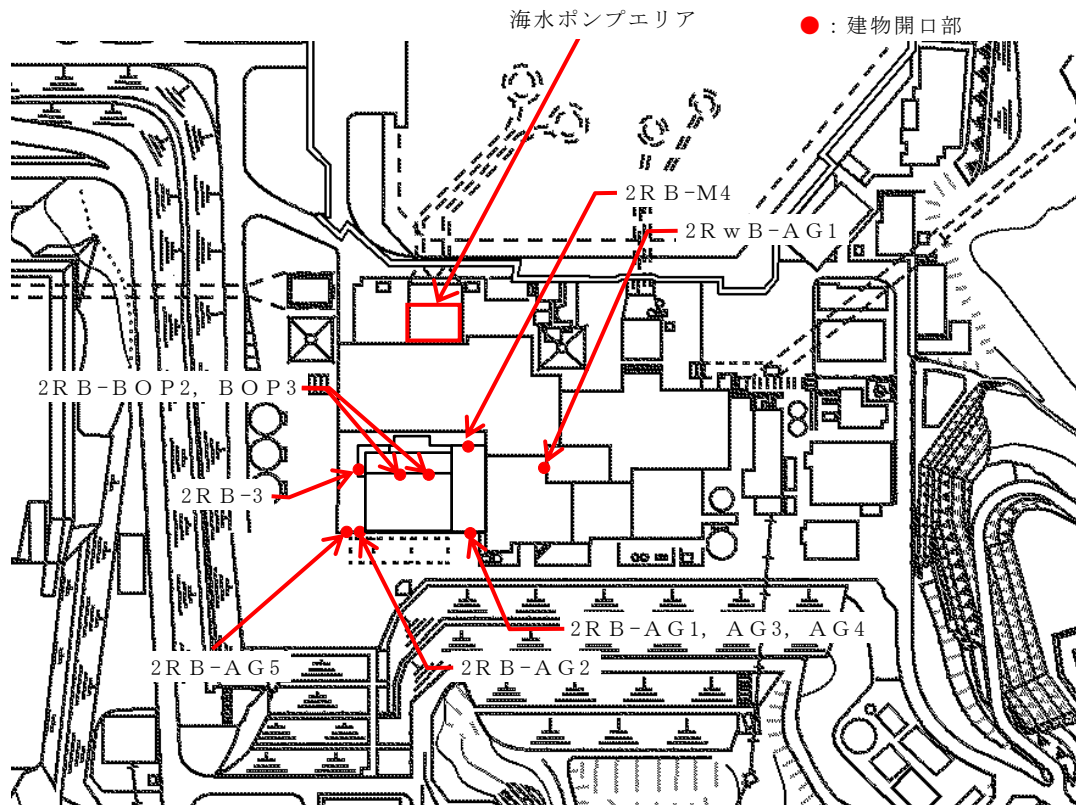
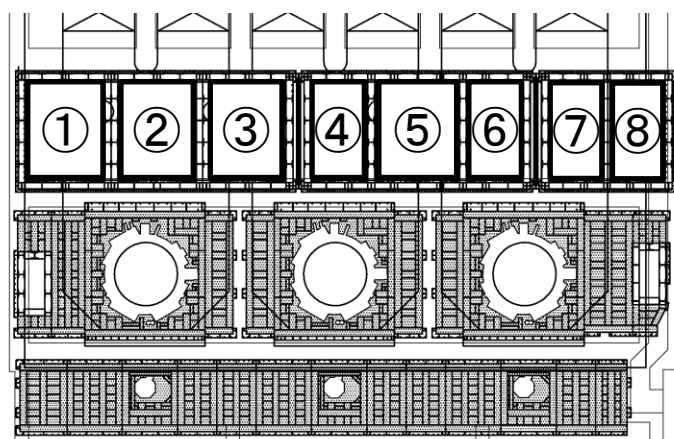
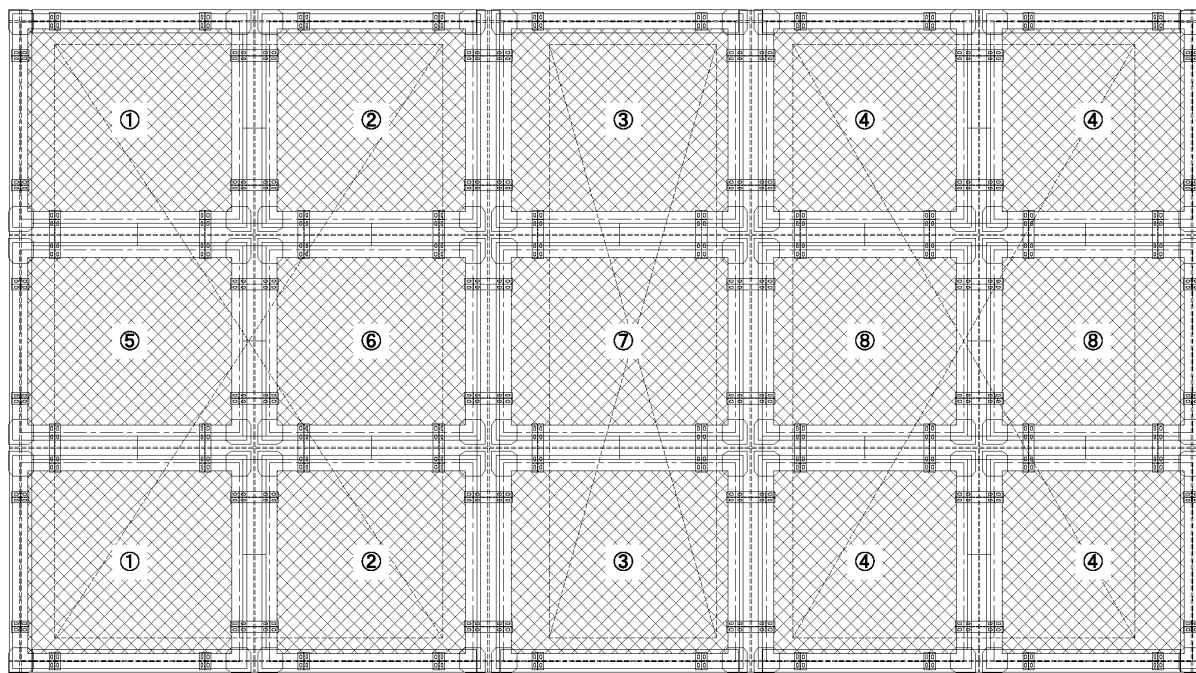


図 2-1 竜巻防護ネットの設置位置図

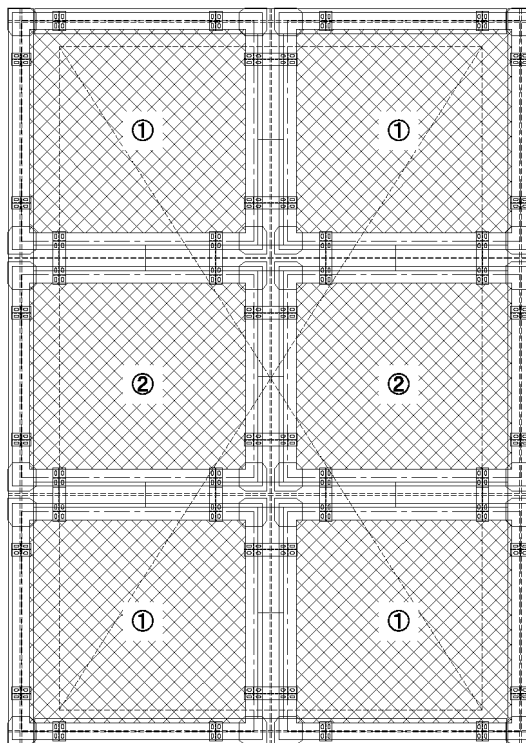


注：ネットの数字は，後段の評価における整理番号
 図 2-2 竜巻防護ネットの割付図（海水ポンプエリア）



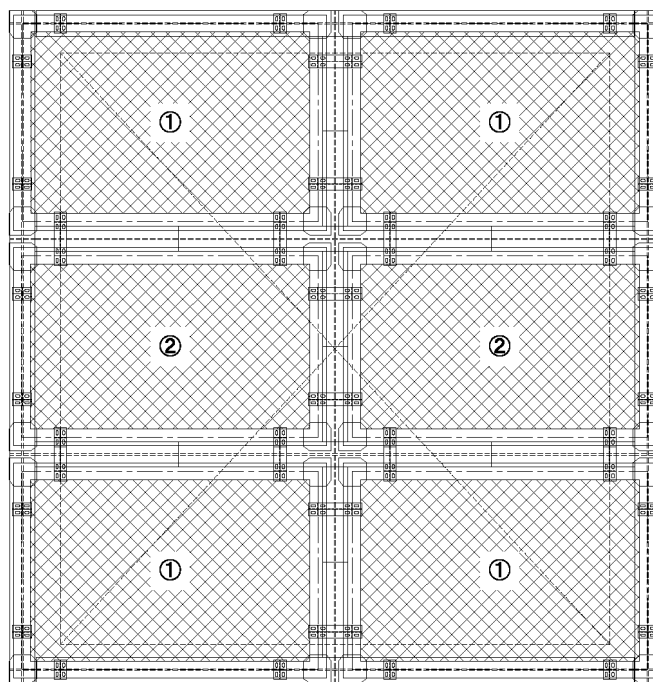
2RB-AG1・AG3・AG4

注：ネットの数字は，後段の評価における整理番号
 図 2-3(1) 竜巻防護ネットの割付図（原子炉建物外壁）



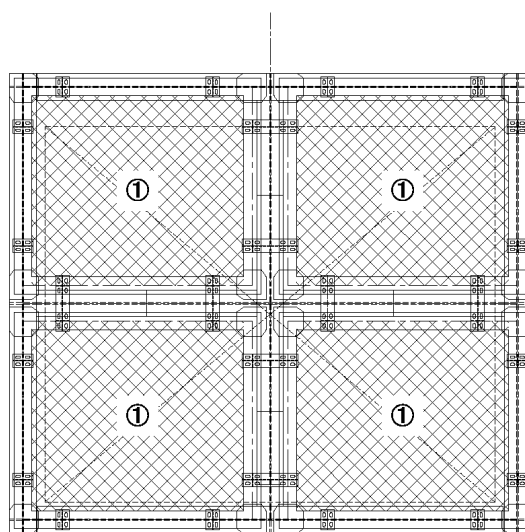
2RB-AG2

注：ネットの数字は、後段の評価における整理番号
図 2-3(2) 竜巻防護ネットの割付図（原子炉建物外壁）



2RB-AG5

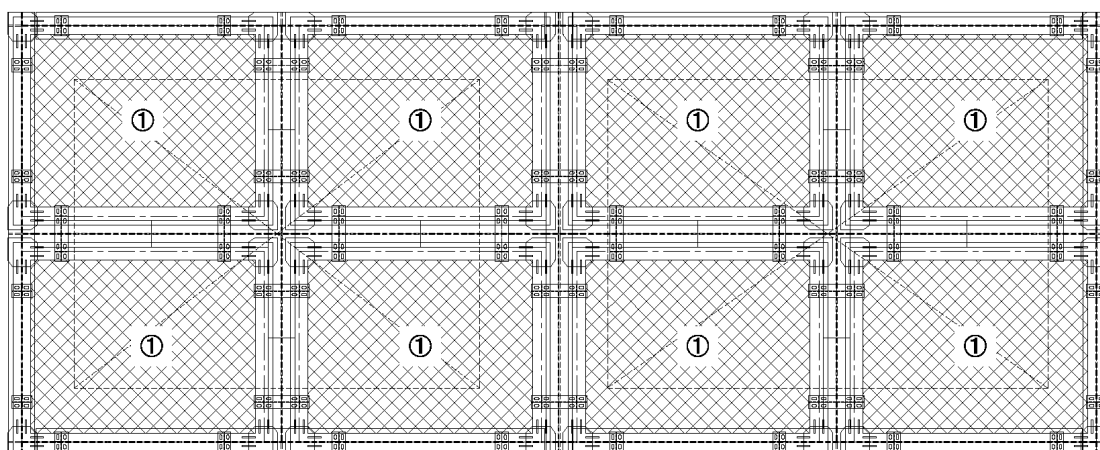
注：ネットの数字は、後段の評価における整理番号
図 2-3(3) 竜巻防護ネットの割付図（原子炉建物外壁）



2RB-3

注：ネットの数字は、後段の評価における整理番号

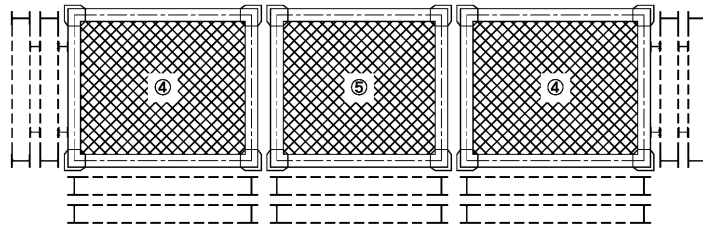
図 2-3(4) 竜巻防護ネットの割付図（原子炉建物外壁）



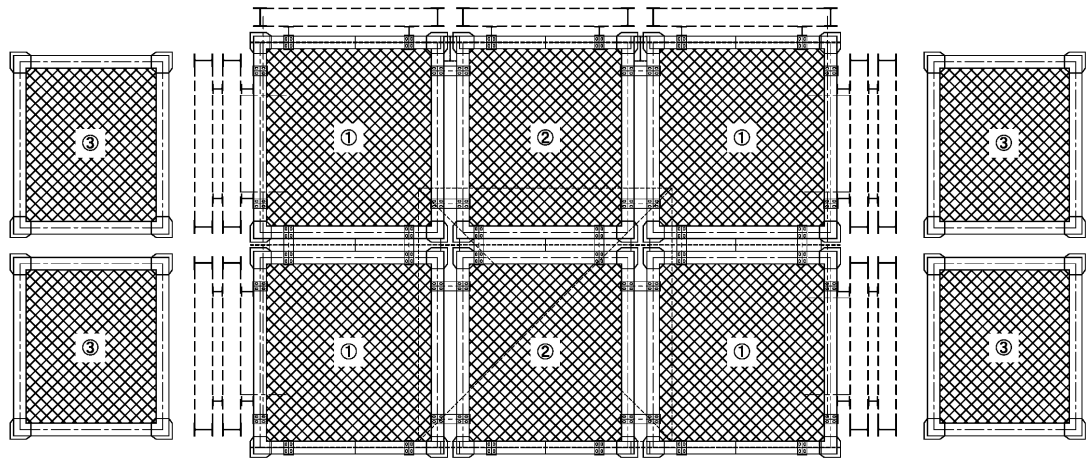
2RB-M4

注：ネットの数字は、後段の評価における整理番号

図 2-3(5) 竜巻防護ネットの割付図（原子炉建物外壁）



平面図



(側面)

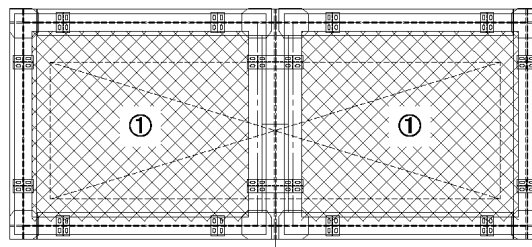
(正面)

(側面)

立面図

2RB-BOP2・BOP3

注：ネットの数字は、後段の評価における整理番号
 図 2-3(6) 竜巻防護ネットの割付図 (原子炉建物外壁)



2RwB-AG1

注：ネットの数字は、後段の評価における整理番号
 図 2-4 竜巻防護ネットの割付図 (廃棄物処理建物外壁)

2.2 構造概要

竜巻防護ネットの構造は、VI-3-別添 1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」の「3.1 竜巻防護ネットの構造設計」に示す構造計画を踏まえ設定する。

竜巻防護ネットは、ネット、ワイヤロープ、接続治具（支持部及び固定部）及び鋼製枠から構成され、海水ポンプエリア、原子炉建物外壁及び廃棄物処理建物外壁に設置する。竜巻防護ネットは、外部事象防護対象施設又は開口部周辺に設置した架構に接続ボルトを用いて取り付けられ、架構は基礎若しくは建物の外壁により支持される。

ネットは、4 辺を縫うように通したワイヤロープにより支持し、ワイヤロープは接続治具（支持部）を介して、鋼製枠に設置した接続治具（固定部）にて支持する構造とする。

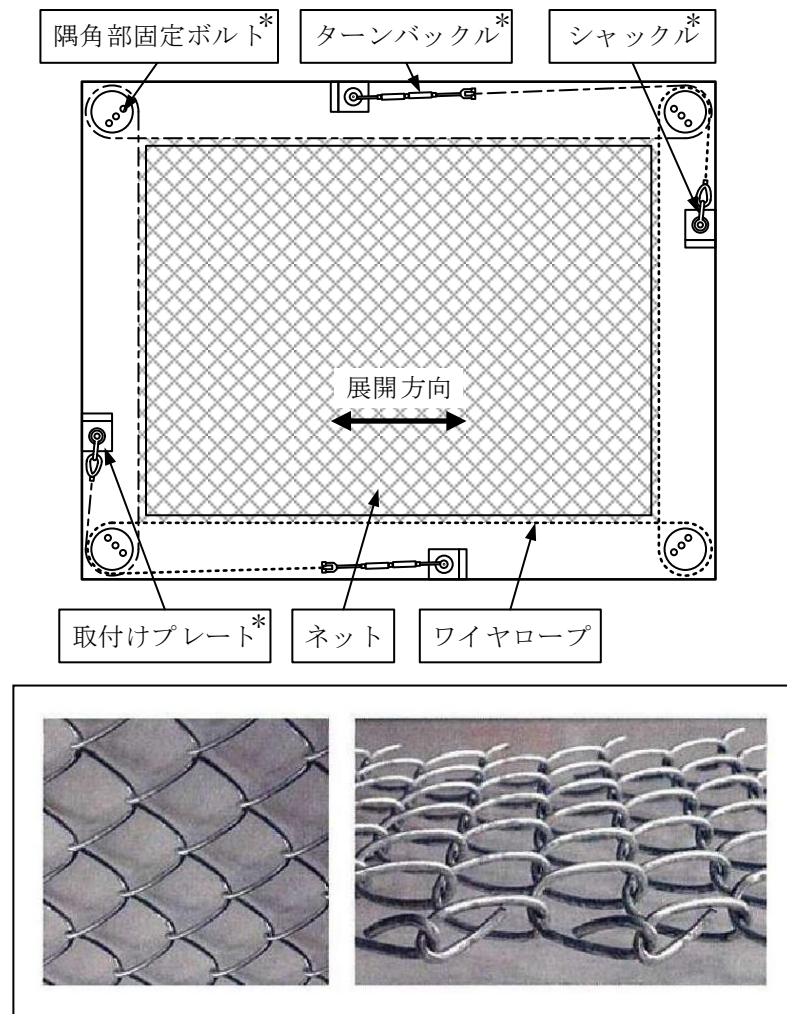
竜巻防護ネットは、ネットに作用する自重、設計飛来物による衝撃荷重及び風圧力による荷重をワイヤロープ並びに接続治具（支持部及び固定部）を介して、鋼製枠に伝達する。

鋼製枠は、ネットに作用する自重、設計飛来物による衝撃荷重及び風圧力による荷重を、接続部を介して架構に伝達する。

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 L 字に張った 2 本のワイヤロープで支持される。

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

竜巻防護ネットの概要図を図 2-5 に示す。



注記*：接続用の治具

図 2-5 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計算は、VI-3-別添 1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」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て、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 2-6 に示す。

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

具体的には、設計荷重に対して、竜巻防護ネットは内側に設置した外部事象防護対象施設の機能喪失に至る可能性のある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。

ネットの破断が生じないことを確認するために、ネットが設計飛来物の持つ運動エネルギーを吸収することが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及び接続治具（支持部及び固定部）に破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を有することを評価する。

評価においては、竜巻防護ネットの形状及び評価条件として、展開方向寸法と展開直角方向寸法の比（以下「アスペクト比」という。）、設計飛来物の衝突位置の影響及びネットの等価剛性の算定方法の影響を考慮する。

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

設計飛来物の衝突位置の影響については、評価において設計飛来物がネット中心に衝突する場合について評価を実施することから、中央位置からずれた位置（以下「オ

フセット位置」という。)に衝突する場合の影響を考慮し、ネット、ワイヤロープ及び接続治具（支持部及び固定部）の破断評価において、評価における係数を設定する。係数の設定については「3.5 評価方法」に示す。

ネットの等価剛性については、電力中央研究所にて複数回実施している衝撃引張試験の結果から算定する。等価剛性の算定の方法を考慮し、ネットの吸収エネルギー評価及び竜巻防護ネットのたわみ評価において、評価における係数を設定する。係数の設定については、「3.4 許容限界」に示す。

ネット評価の考慮事項の選定について、表 2-1 に示す。

竜巻防護ネットを支持し、ネットに作用する荷重が伝達される架構の強度評価は、VI-3-別添 1-6「架構の強度計算書」に示す。

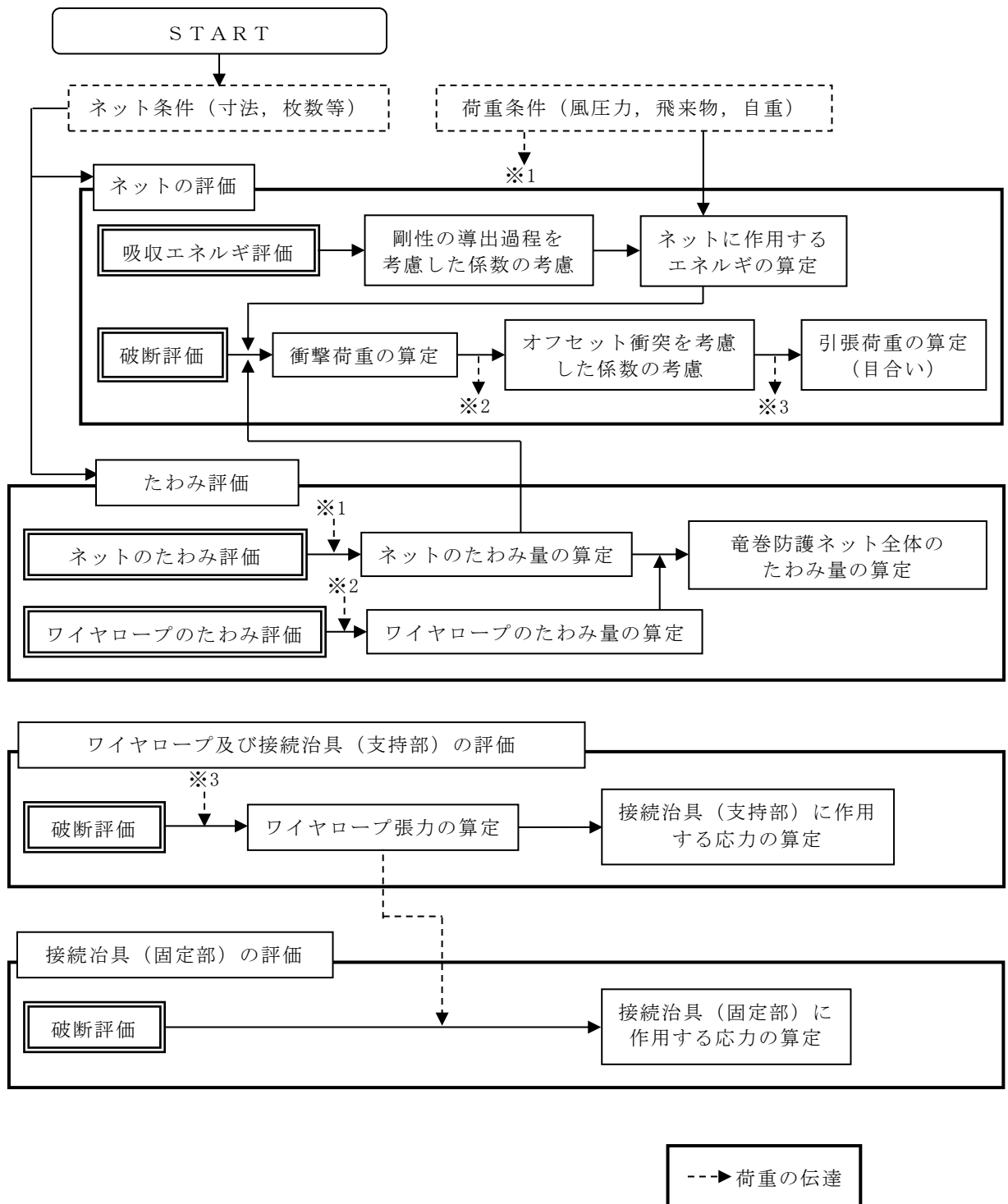


図 2-6 竜巻防護ネットの評価フロー

表 2-1 ネット評価の考慮事項の選定

	吸収エネルギー評価	破断評価	たわみ評価
算定方法	設計飛来物の有する運動エネルギー、自重及び風圧力により生じるエネルギーを算定し、ネットに生じるエネルギーの総量を算定。	自重、設計飛来物によるネットへの衝撃荷重及び風圧力による荷重を算定し、ネットの引張荷重及びワイヤロープの張力、接続治具に発生する応力を算定。	自重、設計飛来物による衝撃荷重及び風圧力による荷重によりネット及びワイヤロープに生じるたわみ量を算定。
アスペクト比	アスペクト比の影響を考慮してネット寸法を設定。	アスペクト比の影響を考慮してネット寸法を設定。	アスペクト比の影響を考慮してネット寸法を設定。
衝突位置	オフセット衝突時のネットの吸収エネルギーは中央衝突と同等であることから、オフセットによる影響はなく考慮不要。	オフセット衝突時の衝撃荷重が中央衝突より増加することを算定荷重に考慮。	ネットの最大たわみ位置である中央位置のたわみ及びオフセット位置のたわみを考慮して、たわみ量を設定。

2.4 適用規格・基準等

適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法・同施行令
- ・ 日本産業規格（J I S）
- ・ 鋼構造設計規準—許容応力度設計法—（（社）日本建築学会，2005 改定）
- ・ 建築物荷重指針・同解説（（社）日本建築学会，2004 改定）
- ・ 小規模吊橋指針・同解説（（社）日本道路協会，平成 20 年 8 月）

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 荷重の算定に用いる記号

記号	単位	定義
A_a	m^2	ネットの面積
C	—	竜巻防護ネットの風力係数
d	m	設計飛来物衝突後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エネルギー
F_a	kN	設計飛来物衝突時にネットが受ける最大衝撃荷重
F_a''	kN	設計飛来物衝突時にネットが受ける衝撃荷重
G	—	ガスト影響係数
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	N/mm^2	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	ネットへの衝突後の設計飛来物の飛来速度
V_1	m/s	ネットへの設計飛来物の衝突速度
V_D	m/s	設計竜巻の最大風速
W_w	kN	風圧力による荷重
δ	m	設計飛来物衝突時のネットの最大たわみ量
ρ	kg/m^3	空気密度
ϕ	—	ネットの充実率

(2) 吸収エネルギー評価

吸収エネルギー評価に用いる記号を表 3-2 に示す。

表 3-2 吸収エネルギー評価に用いる記号

記号	単位	定義
a	mm	ネット 1 目合いの対角寸法
a_s	mm	ネット 1 目合いの破断変位
b	mm	設計飛来物の端面の長辺方向寸法
c	mm	設計飛来物の端面の短辺方向寸法
E_i	kJ	i 番目の列におけるネットの吸収可能なエネルギー
E_{max}	kJ	ネット設置枚数 n を考慮した限界吸収エネルギー
E_{max}'	kJ	等価剛性の導出過程を踏まえた係数及びネット設置枚数 n を考慮した限界吸収エネルギー
E_t	kJ	ネット設置枚数 n を考慮したネットに作用する全エネルギー
E_w	kJ	自重及び風圧力によりネットに作用する外力エネルギー
F_i	kN	設計飛来物衝突時の i 番目の列における作用力
F_w	kN	自重及び風圧力によりネットに作用する荷重
K	kN/m	ネット 1 目合いの等価剛性
K_x'	kN/m	ネット 1 目合いの展開方向の 1 列の等価剛性
K_x	kN/m	ネット設置枚数 n を考慮したネット 1 目合いの展開方向の 1 列の等価剛性
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	—	主金網の枚数
N_x	—	ネット展開方向目合い数
N_y	—	ネット展開直角方向目合い数
P_i	kN	設計飛来物衝突時にネットに発生する i 番目の列における張力
P_w	kN	ネットの自重により作用する荷重
X_i	m	i 列目のネットの伸び
δ_a	m	自重及び風圧力による荷重によるネットのたわみ量
δ_i	m	設計飛来物衝突時の i 番目の列におけるネットのたわみ量
δ_{max}	m	ネットの最大たわみ量
θ_i	deg	i 番目の列におけるネットのたわみ角
θ_{max}	deg	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) 破断評価に用いる記号

記号	単位	定義
a_w	mm	取付けプレート溶接部ののど厚
A_b	mm ²	隅角部固定ボルトの有効断面積
C_c	—	ワイヤグリップ効率
F_1	kN	ネット 1 交点当たりの破断荷重
F_2	kN	ワイヤロープの規格値 (破断荷重)
F_3	kN	ターンバックルの規格値 (保証荷重)
F_4	kN	シャックルの規格値
$F_{a'}$	kN	設計飛来物衝突時にネットが受けるオフセット衝突を加味した最大衝撃荷重
F_P	kN	設計飛来物がネットに衝突する際に 1 本のワイヤロープから隅角部へ作用する合成荷重
$F_{P'}$	kN	設計飛来物がネットに衝突する際に 2 本のワイヤロープから隅角部へ作用する合成荷重
F_x	kN	設計飛来物がネットに衝突する際ワイヤロープから隅角部へ作用する X 方向の合成荷重
F_y	kN	設計飛来物がネットに衝突する際ワイヤロープから隅角部へ作用する Y 方向の合成荷重
L	mm	取付けプレートの面取り長さ
L_{Pw}	mm	取付けプレート溶接部の有効長さ
L_{P1}	mm	取付けプレート長さ (縦方向)
L_{P2}	mm	取付けプレート長さ (横方向)
n_1	—	設計飛来物の衝突位置周辺のネット 1 枚当たりの交点の個数
n_2	—	隅角部固定ボルト本数
S_w	mm	取付けプレート溶接部の溶接脚長
T'	kN	設計飛来物のネットへの衝突によりネットに発生する張力の合計の最大値
T_1'	kN	設計飛来物のネットへの衝突によりワイヤロープ 1 本に作用する張力の最大値
T_1''	kN	設計飛来物のネットへの衝突により補助金網を支持しているワイヤロープ 1 本に作用する張力の最大値

表 3-3(2) 破断評価に用いる記号

記号	単位	定義
T_x	kN	ネット展開方向のワイヤロープから発生するX方向の荷重
T_x'	kN	ネット展開直角方向のワイヤロープから発生するX方向の荷重
T_y	kN	ネット展開方向のワイヤロープから発生するY方向の荷重
T_y'	kN	ネット展開直角方向のワイヤロープから発生するY方向の荷重
δ_{wx}	m	ネット展開方向に平行なワイヤロープの変形後のたわみ量
δ_{wy}	m	ネット展開直角方向に平行なワイヤロープの変形後のたわみ量
θ	deg	設計飛来物衝突時のネットのたわみ角
θ_1	deg	ネット展開方向に平行なワイヤロープの水平投影たわみ角
θ_2	deg	ネット展開直角方向に平行なワイヤロープの水平投影たわみ角
θ_{w1}	deg	ネット展開方向に平行なワイヤロープのたわみ角
θ_{w2}	deg	ネット展開直角方向に平行なワイヤロープのたわみ角
θ_x	deg	ネット展開方向に平行なネットたわみ角
θ_y	deg	ネット展開直角方向に平行なネットたわみ角
τ_s	MPa	隅角部固定ボルトに発生するせん断応力
τ_w	MPa	取付けプレート溶接部に発生するせん断応力

(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_{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_s	m	直線区画のワイヤロープの変形後の長さの合計
L_y'	m	ワイヤロープへの設計飛来物の影響範囲
L_z	m	ワイヤロープの全長
S	m	変形後のワイヤロープ長さ
S_x	m	ネット展開方向と平行に配置したワイヤロープの変形後の長さ
S_y	m	ネット展開方向と直交するワイヤロープの変形後の長さ
S_t	m	ネット展開方向に直交する辺の変形後のワイヤロープ長さ
δ	m	飛来物衝突時のネットの最大たわみ量
δ'	m	設計飛来物衝突時のワイヤロープの変形による伸び量
δ_L	m	直線区間のワイヤロープのたわみ量
δ_t	m	ネットとワイヤロープの合計たわみ量
δ_w	m	ワイヤロープのたわみ量
ε	—	ワイヤロープのひずみ量

3.2 評価対象部位

竜巻防護ネットの評価対象部位は、VI-3-別添 1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」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て、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。竜巻防護ネットの評価対象部位を図 3-1 に示す。

(1) ネット

設計荷重はネットに直接作用するため、設計荷重に対する評価対象部位は、ネットとする。

(2) ワイヤロープ

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

(3) 接続治具（支持部）

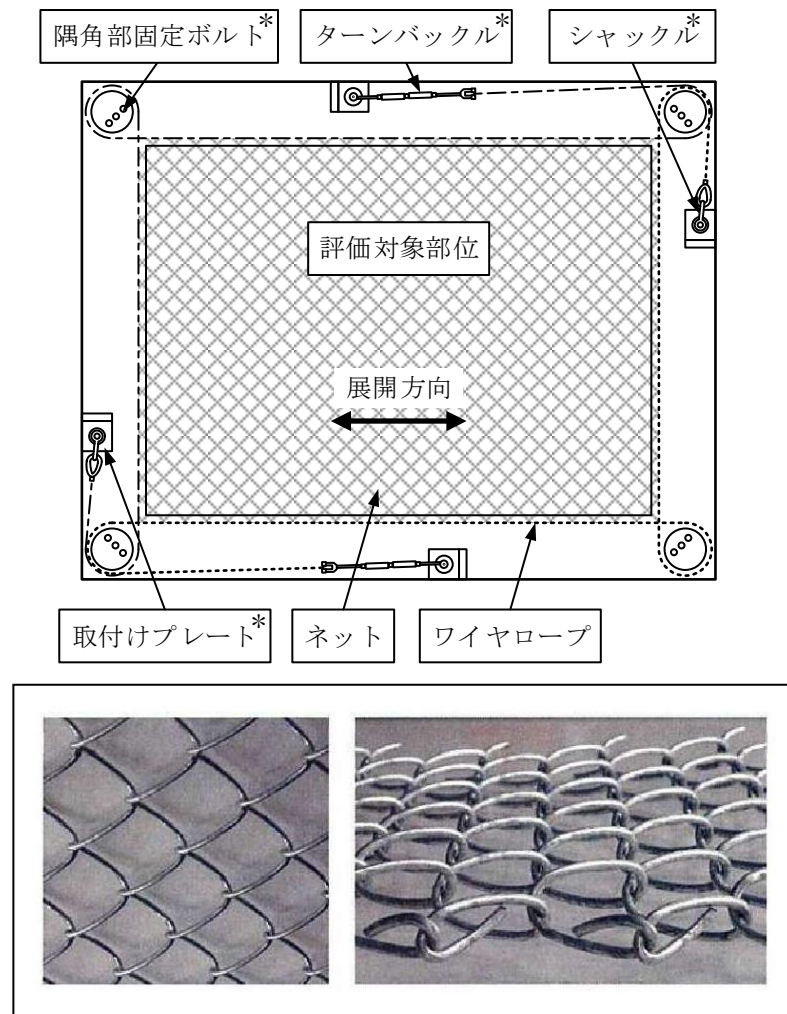
設計荷重はネットに作用し、ワイヤロープを介して接続治具（支持部）に作用するため、設計荷重に対する評価対象部位は、接続治具（支持部）であるターンバックル及びシャックルとする。

(4) 接続治具（固定部）

設計荷重はネットに作用し、ワイヤロープ及び接続治具（支持部）を介して接続治具（固定部）である隅角部固定ボルト及び取付けプレートに作用するため、設計荷重に対する評価対象部位は、隅角部固定ボルト及び取付けプレートとする。

取付けプレートの評価部位は、プレート本体、プレートと鋼製枠及び支持板の溶接部並びに支持板と鋼製枠の溶接部があるが、評価上溶接部が最も短いプレートと鋼製枠及び支持板の溶接部を評価対象部位とする。

隅角部固定ボルトの評価対象部位を図 3-2 に、取付けプレートの評価対象部位を図 3-3 に示す。



注記*：接続用の治具

図 3-1 竜巻防護ネットの評価対象部位

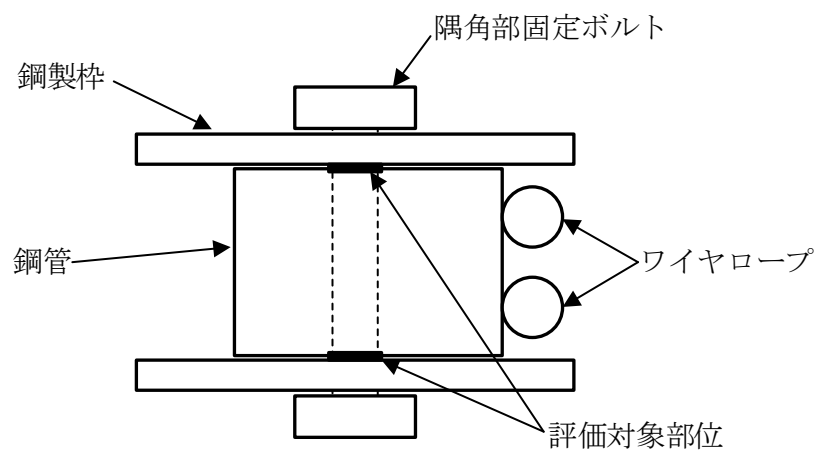


図 3-2 隅角部固定ボルトの評価対象部位

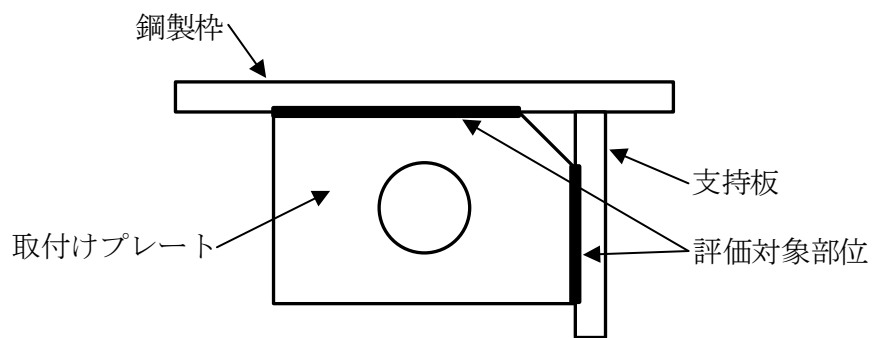


図 3-3 取付けプレートの評価対象部位

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「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」にて設定している荷重の種類を踏まえ設定する。

(1) 荷重の設定

a. 常時作用する荷重

自重を考慮する。また、ワイヤロープ及び接続治具（支持部及び固定部）については、ネットを支持する機能を有していることから、ネットの重量を荷重として考慮する。なお、これらの自重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。

b. 設計竜巻による荷重

風圧力による荷重及び設計飛来物の衝撃荷重を考慮する。なお、竜巻防護ネットは開かれた構造のため、気圧差による荷重は考慮しない。設計飛来物による衝撃荷重としては、衝撃荷重が大きくなる向きで設計飛来物がネットに衝突することを想定する。

強度評価に用いる荷重は、以下の方法により算定する。設計竜巻によ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 設計竜巻による荷重の算定に用いる竜巻の特性値

最大風速 V_D (m/s)	移動速度 V_T (m/s)	最大接線風速 V_{Rm} (m/s)	最大気圧低下量 ΔP_{max} (N/m ²)
92	14	78	7500

(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)

破断評価においては、設計飛来物による衝撃荷重は以下のとおり算定する。

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

$$F_a'' = Q \cdot t \cdots \cdots \cdots (3. 1)$$

したがって、速度 V は式 (3. 1) の衝撃荷重 F_a'' から、以下のとおり算定される。

$$\begin{aligned} V &= -\frac{1}{m} \int_0^t F_a'' \, dt \\ &= -\frac{Q \cdot t^2}{2 \cdot m} + V_1 \cdots \cdots \cdots (3. 2) \end{aligned}$$

さらに、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定される。

$$\begin{aligned} d &= \int_0^t V \, dt \\ &= -\frac{Q \cdot t^3}{6 \cdot m} + V_1 \cdot t \cdots \cdots \cdots (3. 3) \end{aligned}$$

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

$$Q \cdot t_1^2 = 2 \cdot m \cdot V_1 \cdots \cdots \cdots (3. 4)$$

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

上記 2 式を連立し、

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

よって、

$$t_1 = \frac{3 \cdot \delta}{2 \cdot V_1} \cdots \cdots \cdots (3. 5)$$

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 (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、

$$F_a = \frac{4 \cdot m \cdot V_1^2}{3 \cdot \delta} \cdots \cdots \cdots (3. 6)$$

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。

$$E_f = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_1^2 \dots\dots\dots (3. 7)$$

したがって、式(3. 6)及び(3. 7)より、

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

(2) 荷重の組合せ

a. ネット

ネットに作用する荷重として、ネットの自重、設計飛来物がネットに衝突する場合の衝撃荷重及び風圧力による荷重を組み合わせた荷重を設定する。

b. ワイヤロープ及び接続治具（支持部）

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

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

c. 接続治具（固定部）

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

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

吸収エネルギー評価、破断評価及びたわみ評価における、ネット、ワイヤロープ及び接続治具（支持部及び固定部）に作用する荷重及びその組合せを表 3-6～表 3-8 に示す。

表 3-6 吸収エネルギー評価における荷重及びその組合せ

設置エリア		考慮する荷重		
		常時作用する荷重 (自重)	設計飛来物による 衝撃荷重	風圧力による 荷重
・海水ポンプエリア ・原子炉建物外壁 ・廃棄物処理建物外壁	水平	○	○	○
	鉛直	○	○	○

<凡例> ○：考慮する，－：考慮しない

表 3-7 破断評価における荷重及びその組合せ

設置エリア		評価対象部位	考慮する荷重		
			常時作用する荷重	設計飛来物による衝撃荷重	風圧力による荷重
・海水ポンプエリア ・原子炉建物外壁 ・廃棄物処理建物外壁	水平	・ネット	○ (自重)	○	○
		・ワイヤロープ ・ターンバックル ・シャックル ・隅角部固定ボルト ・取付けプレート	○ (ネットの自重)	○	○
	鉛直	・ネット	○ (自重)	○	○
		・ワイヤロープ ・ターンバックル ・シャックル ・隅角部固定ボルト ・取付けプレート	○ (ネットの自重)	○	○

<凡例> ○：考慮する，－：考慮しない

表 3-8 たわみ評価における荷重及びその組合せ

設置エリア		評価対象部位	考慮する荷重		
			常時作用する荷重	設計飛来物による衝撃荷重	風圧力による荷重
・海水ポンプエリア ・原子炉建物外壁 ・廃棄物処理建物外壁	水平	・ネット	○ (自重)	○	○
		・ワイヤロープ	○ (ネットの自重)	○	○
	鉛直	・ネット	○ (自重)	○	○
		・ワイヤロープ	○ (ネットの自重)	○	○

<凡例> ○：考慮する，－：考慮しない

3.4 許容限界

ネットの許容限界は，VI-3-別添 1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」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」にて設定している評価対象部位の機能損傷モードを考慮して設定する。

吸収エネルギー評価，破断評価及びたわみ評価の許容限界を以下に示す。

(1) 吸収エネルギー評価

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

限界吸収エネルギーは，複数枚を重ね合わせたネットを一体として扱ったモデルにて算定する。また，ネットの変形及び吸収エネルギーの分布を考慮したオフセット衝突位置での吸収エネルギー評価の結果，電中研報告書を参照して，ネット最大たわみ時のネットの全長は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，吸収エネルギー評価では中央衝突の場合にて評価を行う。

限界吸収エネルギーは，ネット 1 目合いの展開方向の 1 列の等価剛性，展開方向寸法及びたわみ量から，以下のとおり算定される。吸収エネルギー評価におけるネットの限界吸収エネルギー算定モデル図を図 3-4 に示す。

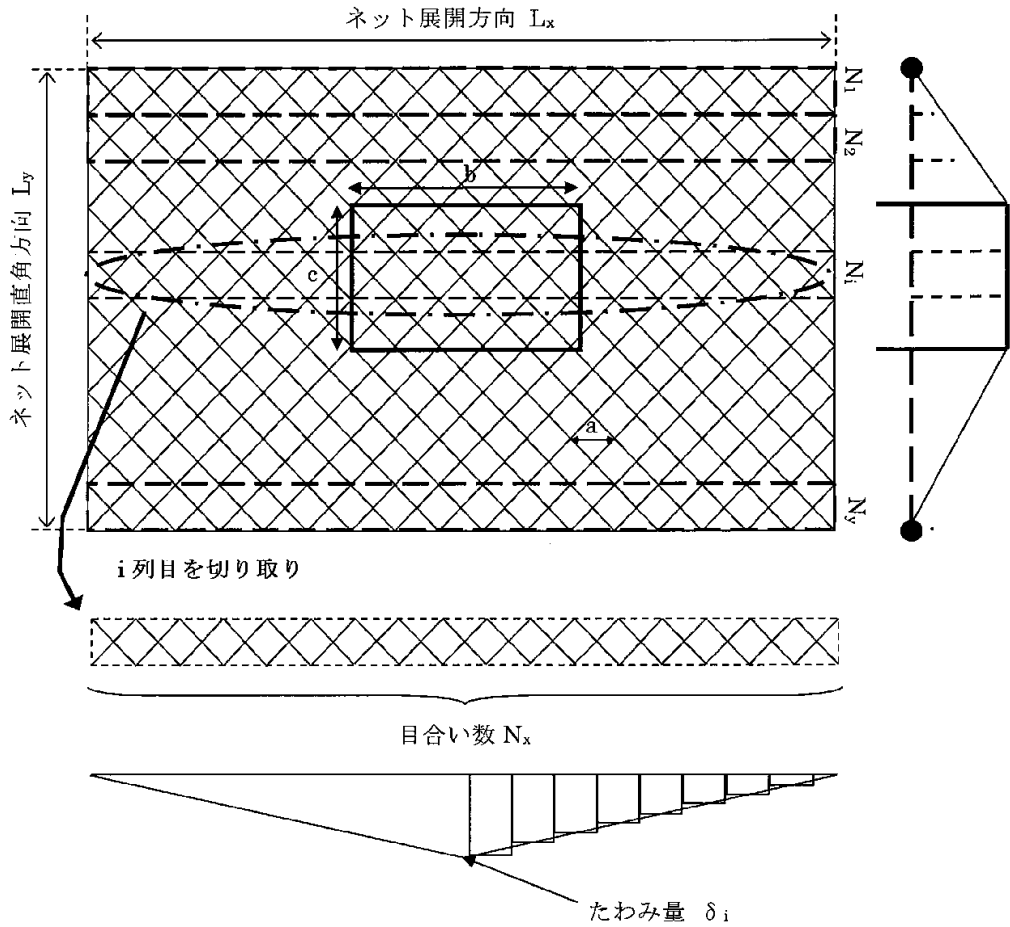


図 3-4 吸収エネルギー評価におけるネットの限界吸収エネルギー算定モデル図

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定し、ネットが吸収可能な限界吸収エネルギーを算定する。

ただし、中央部の最大たわみ量が発生する列数は、設計飛来物の寸法及びネット目合いの対角寸法から算定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対角寸法 a を考慮し、最大たわみが発生する場合のネット展開直角方向目合い列数を以下のとおり算定する。ネットの吸収エネルギーが小さくなるよう、目合い列数の算定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。

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

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定されるよう、三角形モデルとして評価を実施する。

吸収エネルギー評価の許容限界の評価フローを図 3-5 に示す。

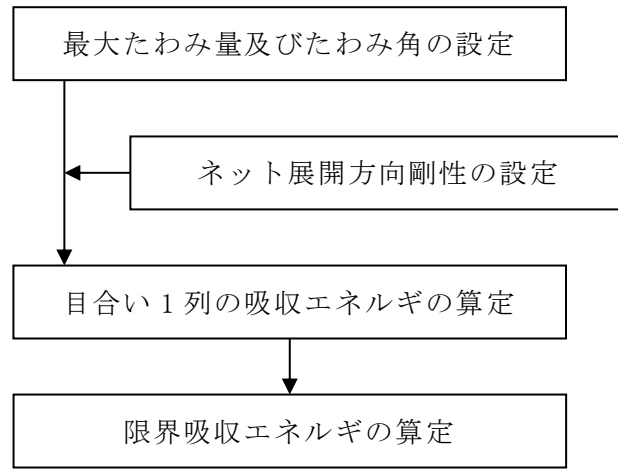
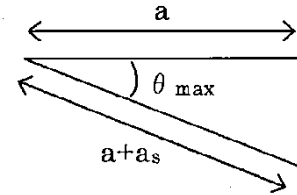


図 3-5 吸収エネルギー評価の許容限界の評価フロー

電中研報告書のネット 1 目合いの引張試験から 1 目合いの破断変位を設定する。ネット 1 目合いの破断変位から算定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_{max} は次式により算定される。

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

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



ネットを構成するネットの展開方向の目合い数 N_x は，ネット展開方向寸法 L_x 及びネット 1 目合いの対角寸法 a から，また，展開直角方向の目合い数 N_y は，ネット展開直角方向寸法 L_y 及びネット 1 目合いの対角寸法 a から次式により算定される。

$$N_x = \frac{1000 \cdot L_x}{a}$$

$$N_y = \frac{1000 \cdot L_y}{a}$$

ただし， N_x ， N_y の算定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。

ネットを構成する 1 目合いはそれぞれ K の等価剛性を持っているため，1 目合い当たりばね定数 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 列当たりの剛性 K_x' は次式により算定される。

$$K_x' = \frac{K}{N_x}$$

なお、電中研報告書によると補助金網は主金網 0.5 枚相当の吸収エネルギー能力を有していることが確認されていることから、補助金網を主金網 0.5 枚として考慮し、ネット設置枚数を考慮したネット展開方向剛性 K_x は、次式により算定される。

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

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_{max} からネット端部のたわみ量 0 までの間を、非接触の列の数の分だけ段階的に減少していくと考える。ネットの最大たわみ量と最大たわみ角を図 3-6 に示す。

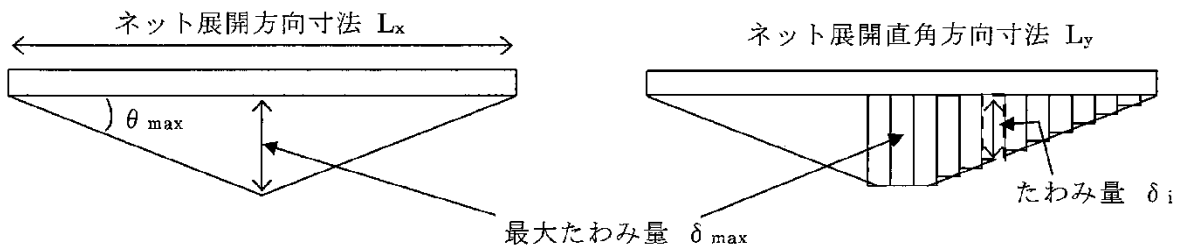


図 3-6 最大たわみ量と最大たわみ角

ネットに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定する。ネットに作用する力のつり合いを図 3-7 に示す。

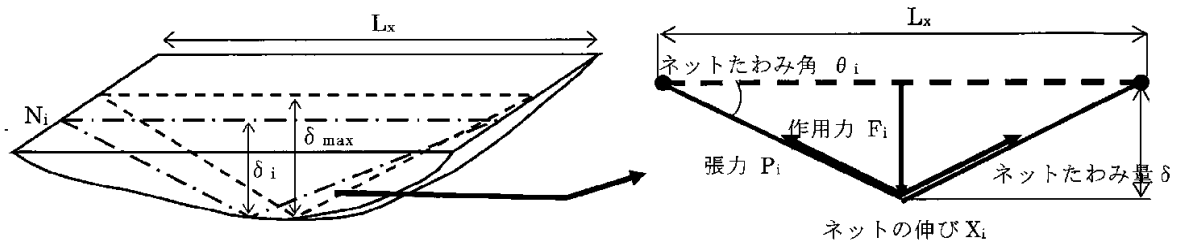


図 3-7 ネットに作用する力のつり合い

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、

$$P_i = 2 \cdot K_x \cdot \frac{X_i}{2}$$

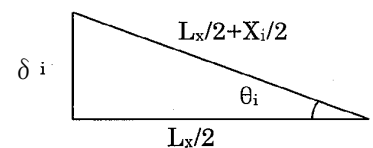
$$= K_x \cdot X_i$$

となる。また、作用力 F_i は変位置とたわみ量の関係から、

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

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

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



$$= 4 \cdot K_x \cdot \delta_i \cdot \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2}} \right) \dots \dots \dots (3.9)$$

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得られる、 i 番目の列における吸収エネルギー E_i を次式に示す。

$$\begin{aligned}
 E_i &= \int_0^{\delta_i} F_i d\delta_i \\
 &= \int_0^{\delta_i} 4 \cdot K_x \cdot \delta_i \cdot \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2}} \right) d\delta_i \\
 &= 2 \cdot K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x \cdot \left(\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \cdots \cdots \cdots (3. 10)
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 E_{max} &= \sum_{i=1}^{N_y} E_i \\
 &= \sum_{i=1}^{N_y} \left\{ 2 \cdot K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x \cdot \left(\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \right\} \cdots \cdots (3. 11)
 \end{aligned}$$

また、等価剛性の導出過程を踏まえた係数及びネット設置枚数を考慮した限界吸収エネルギーを E_{max}' とする。係数としては、電中研報告書のネット引張試験結果より 1/1.03 と定める。

$$E_{max}' = \frac{1}{1.03} \cdot E_{max} \cdots \cdots \cdots (3. 12)$$

(2) 破断評価

a. ネット

破断評価においては、計算により算定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。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、電中研報告書を参照してネット 1 目合いの引張試験に基づいた 1 交点当たりの破断荷重 F_1 、設計飛来物衝突時の周辺のネット 1 枚当たりの交点数 n_1 及びネットの設置枚数 n から、ネット設置枚数を考慮した許容引張荷重を算定する。

ネットの破断評価の許容限界を表 3-9 に示す。

表 3-9 ネットの破断評価の許容限界

評価対象部位	引張荷重評価
ネット	$F_1 \cdot n_1 \cdot n$

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、J I S に規定されている破断荷重 F_2 に、端部のワイヤグリップの効率 C_c を乗じて設定する。

ワイヤロープの破断評価の許容限界を表 3-10 に示す。

表 3-10 ワイヤロープの破断評価の許容限界

評価対象部位	許容限界	備考
ワイヤロープ	$C_c \cdot F_2$	ワイヤグリップの効率を考慮

c. 接続治具（支持部）

接続治具（支持部）であるターンバックル及びシャックルは、破断しなければネットを設置位置に保持することができ、設計飛来物を捕捉可能である。したがって、ワイヤロープの張力に対し、設計荷重が十分な裕度を有していることを確認する。ターンバックルについては、破断荷重よりも保守的な値である、J I S に規定されている保証荷重 F_3 を 1.5 倍した値を許容限界として設定する。シャックルについては、試験結果を踏まえたメーカー保証値として、規格値 F_4 を 2 倍した値を許容限界として設定する。

接続治具（支持部）の破断評価の許容限界を表 3-11 に示す。

表 3-11 接続治具（支持部）の破断評価の許容限界

評価対象部位	許容限界
ターンバックル	$1.5 \cdot F_3$
シャックル	$2.0 \cdot F_4$

d. 接続治具（固定部）

接続治具（固定部）である隅角部固定ボルト及び取付けプレートの破断評価においては、計算により算定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、隅角部固定ボルト及び取付けプレートの許容限界は、「鋼構造設計規準－許容応力度法－（（社）日本建築学会，2005改定）」に基づいた短期での破断応力度とする。

接続治具（固定部）の破断評価の許容限界を表 3-12 及び表 3-13 に示す。

表 3-12 隅角部固定ボルトの破断評価の許容限界

評価対象部位	強度区分	考慮すべき 損傷モード	短期に生じる力に 対する許容応力度 (MPa)
隅角部固定ボルト	8.8* ¹	せん断	$1.5 \cdot f_s$ * ²

注記*1：材料証明書による。

*2： f_s は下式により算定。

$$\left(f_s = \frac{560}{1.5\sqrt{3}} \right)$$

表 3-13 取付けプレート溶接部の破断評価の許容限界

評価対象部位	材質	考慮すべき 損傷モード	短期に生じる力に 対する許容応力度 (MPa)
取付けプレート溶接部	SS400* ¹	せん断	$1.5 \cdot f_s$ * ²

注記*1：母材であるプレートの材質。

*2： f_s は下式により算定。F値は引張強さとする。

$$\left(f_s = \frac{F}{1.5\sqrt{3}} \right)$$

(3) たわみ評価

竜巻防護ネットのたわみ評価においては、自重、設計飛来物による衝撃荷重及び設計竜巻の風圧力による荷重に対し、計算により算定する竜巻防護ネットの最大たわみ量が、竜巻防護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、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を許容限界 L_{min} として設定する。

竜巻防護ネットのたわみ評価の許容限界を表 3-14 に示す。

表 3-14 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

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

- ・等価剛性に対する係数の考慮

電中研報告書におけるネット引張試験結果のばらつきを考慮し、吸収エネルギー評価においては、等価剛性の算定方法の影響から定められる係数を考慮する。

- ・アスペクト比の取扱い

ネットは展開方向、展開直角方向の2方向で剛性が異なり、それぞれの方向に対して伸び量の制限があるため、展開方向：展開直角方向のアスペクト比が1:1～2:1の範囲を有効な面積として評価する。

- ・設計飛来物の衝突位置の影響

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

吸収エネルギー評価においては、電中研報告書を参照して、ネット最大たわみ時のネットの全長は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と同等となる。したがって、吸収エネルギー評価では中央衝突の場合にて評価を行う。

破断評価においては、中央位置への衝突に対してオフセット位置への衝突では、その移動距離が短くなることから、式(3.8)から中央位置衝突時よりもオフセット位置衝突時の方が作用する荷重が大きくなることを踏まえ、作用する荷重が大きくなるように、中央位置衝突時とオフセット位置衝突時の移動距離を踏まえた係数を作用する荷重に乗じる。ただし、ネット端部近傍に衝突する場合には、設計飛来物は傾き、設計飛来物の側面がネットや架構に接触すると考えられ、衝撃荷重は小さくなる。

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

(1) 吸収エネルギー評価

吸収エネルギー評価においては、電中研報告書の評価式を参照して、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、自重、風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重による外力エネルギーがネットの有する限界吸収エネルギーを下回ることを確認する。

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

式(3. 11)及び(3. 12)より、 E_{max} 及び E_{max}' は以下のとおりである。

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

$$E_{max}' = \frac{1}{1.03} \cdot E_{max}$$

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

評価条件である K_x 及び L_x 並びに自重及び風圧力による荷重から算定する F_w を式(3. 9)に代入して数値計算を実施することにより、自重及び風圧力による荷重によるたわみ量 δ_a が算定される。

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

ただし、 $F_w = P_w + W_w$

上式にて算定した δ_a を式(3. 11)において、展開方向の1列当たりの自重及び風圧力による荷重によりネットが受ける外力エネルギーを列数倍した以下の式に代入することにより、自重及び風圧力による荷重によりネットが受ける外力エネルギー E_w が算定される。

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

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

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

設計飛来物の飛来速度は、ネットの設置方向に応じて、水平設置の場合は鉛直方向の飛来速度、鉛直設置の場合は水平方向の飛来速度にて算定する。なお、斜め方向から衝突した場合の飛来速度の水平方向速度成分及び鉛直速度成分は、評価に用いる水平最大飛来速度及び鉛直最大飛来速度を下回る。また、設計飛来物がネット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衝突するものとし、その飛来速度はネットの設置方向に応じ、水平設置の場合は鉛直最大飛来速度、鉛直設置の場合は水平最大飛来速度を用いる。

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

$$E_t = E_f + E_w \dots\dots\dots (3. 13)$$

(2) 破断評価

破断評価においては、電中研報告書の評価式を参照して、ネットに作用する自重、風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重が竜巻防護ネットを構成する部材の局所的な耐力未満であることを確認する。

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

- ・オフセット衝突を考慮する係数

設計飛来物の移動距離が最も小さくなる場合のオフセット衝突を考えると、中央衝突と比較して δ が0.826倍となることから、中央衝突に比べ衝撃荷重が1.211倍となる。

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

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。ネットに作用する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、最大変位発生時に最大値を示すため、破断評価では最大変位発生時の衝撃荷重を用いる。

最大変位発生時において、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。

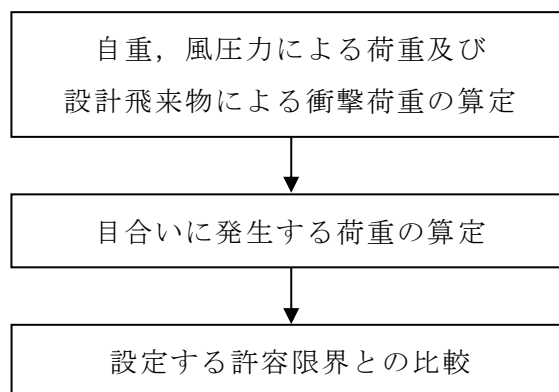


図3-8 ネットの破断評価の評価フロー

(a) 評価モデル

ネットに設計飛来物が衝突した際に生じる衝撃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枚あたり n_1 点となる。破断評価モデルを図3-9に示す。

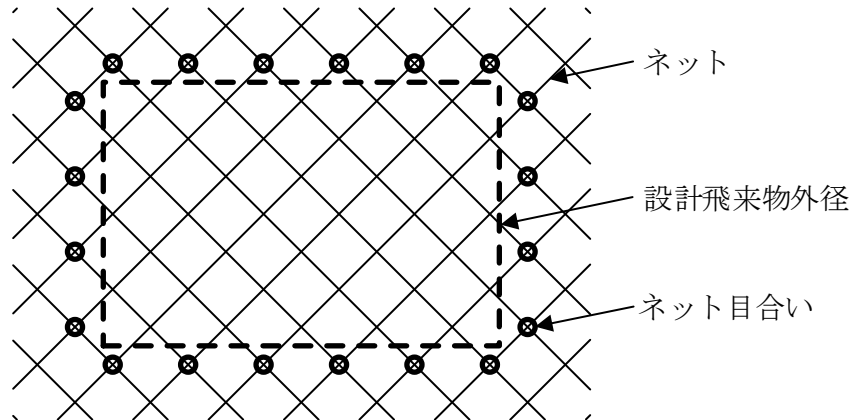


図3-9 破断評価モデル

(b) 評価方法

ネットに設計飛来物が衝突した際に生じる衝撃荷重が、ネットの破断荷重以下であり、ネット目合いに破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を有することを確認する。

ここで、ネットに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」にて算定した式(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定する。

設計飛来物の衝突による荷重に加え、自重及び風圧力による荷重を考慮するため、 E_f を E_t と置き換えて、式(3.8)より、

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

となる。

ここで、オフセット衝突による衝撃荷重の増加分による係数 1.211 を考慮し、衝撃荷重の最大値 F_a' は

$$F_a' = 1.211 \cdot F_a$$

にて算定される。

b. ワイヤロープ

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

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

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

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

ここで、 θ は以下の式で求められる。

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

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

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

と算定される。

さらに、ワイヤロープが支持する補助金網の影響を考慮する。電中研報告書によると、主金網 n 枚及び補助金網 1 枚を重ねて設置する場合、補助金網を設置したネットのワイヤロープに作用する張力は、その他のネットの張力の 1.5 倍となることを考慮すると、主金網 n 枚及び補助金網 1 枚を重ねて設置する場合、1 枚のネットのワイヤロープに発生する張力の最大値 T_1'' は、

$$T_1'' = \frac{T'}{2} \cdot \frac{1.5}{n+0.5} = \frac{F_a'}{4 \cdot \sin \theta} \cdot \frac{1.5}{n+0.5} \dots\dots\dots (3.14)$$

と算定される。

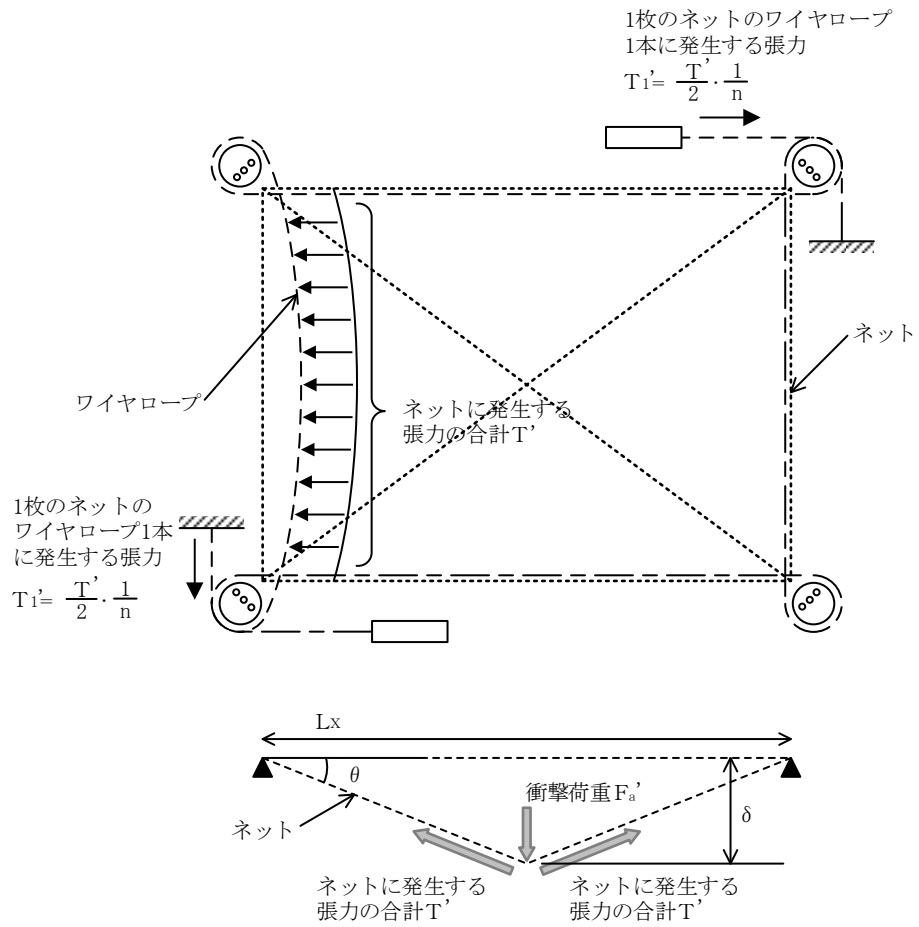


図 3-10 ネット及びワイヤロープに発生する荷重のつり合い (ネット平面図及び断面図)

c. 接続治具（支持部）

(a) ターンバックル

ターンバックルについては、以下の評価を実施する。

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

(b) シャックル

シャックルについては、以下の評価を実施する。

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

d. 接続治具（固定部）

(a) 隅角部固定ボルト

鋼製枠の四隅に設置した隅角部固定ボルトは、ワイヤロープの荷重を鋼管を介して受けることとなる。

ここで、ワイヤロープはたわみにより鋼管に対して θ_{w1} 、 θ_{w2} のたわみ角を有することから、隅角部固定ボルトへ作用する荷重にはこのたわみ角を考慮する。

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

ネットのたわみとワイヤロープのたわみ角の関係を図 3-11 に、隅角部固定ボルトの荷重状態を図 3-12 に示す。

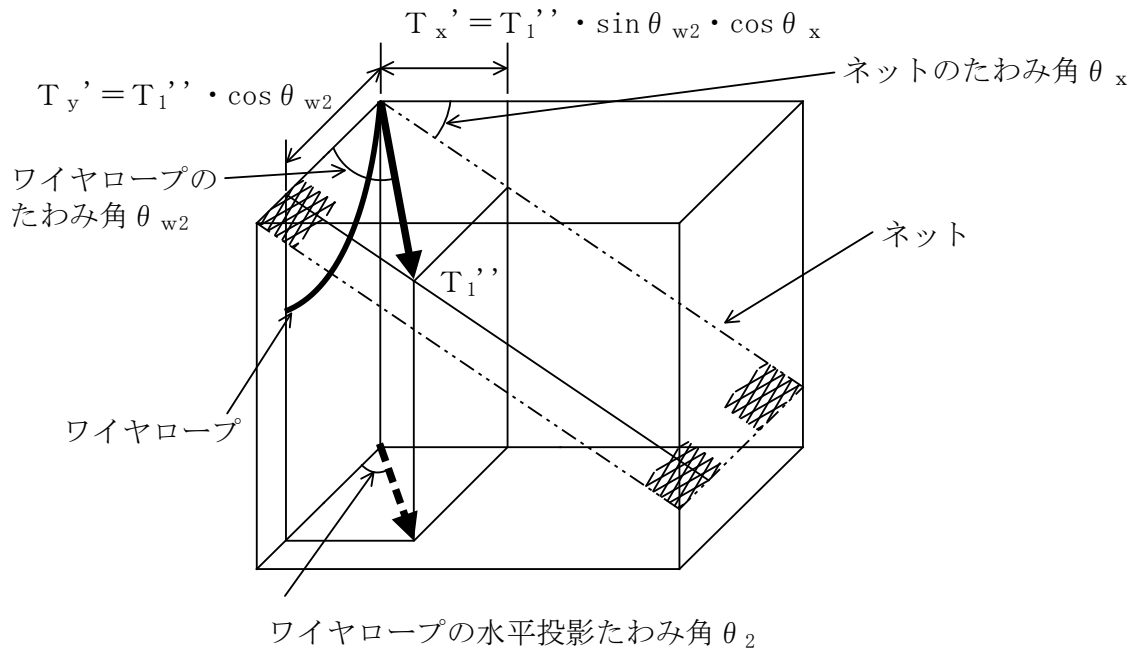
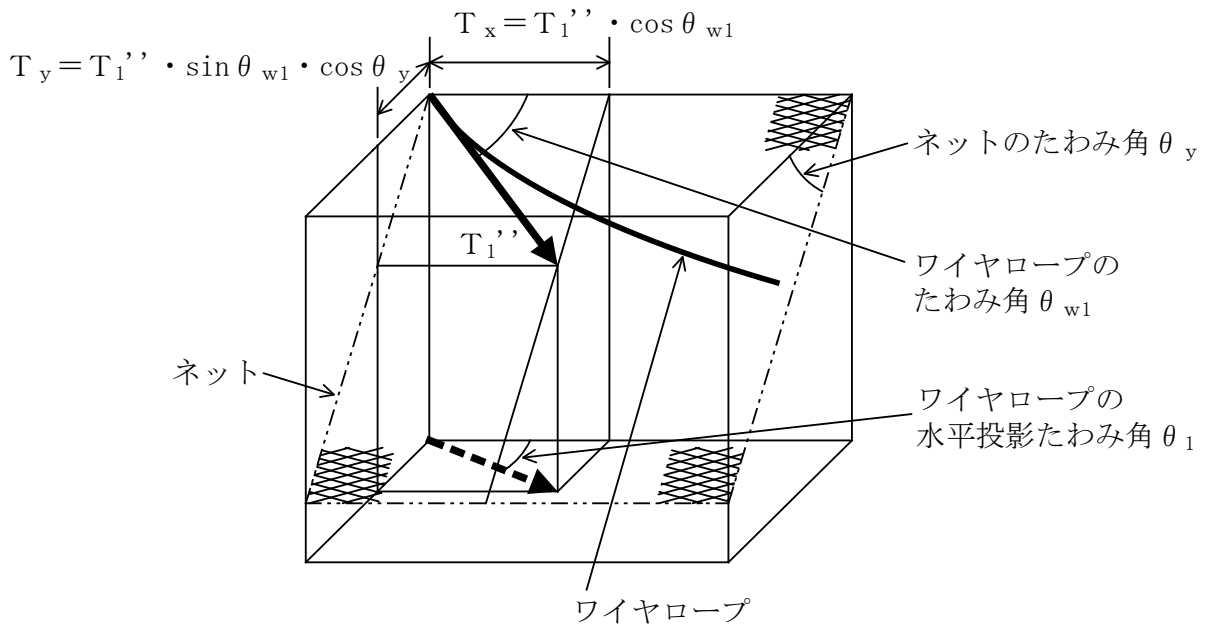


図 3-11 ネットのたわみとワイヤロープのたわみ角の関係

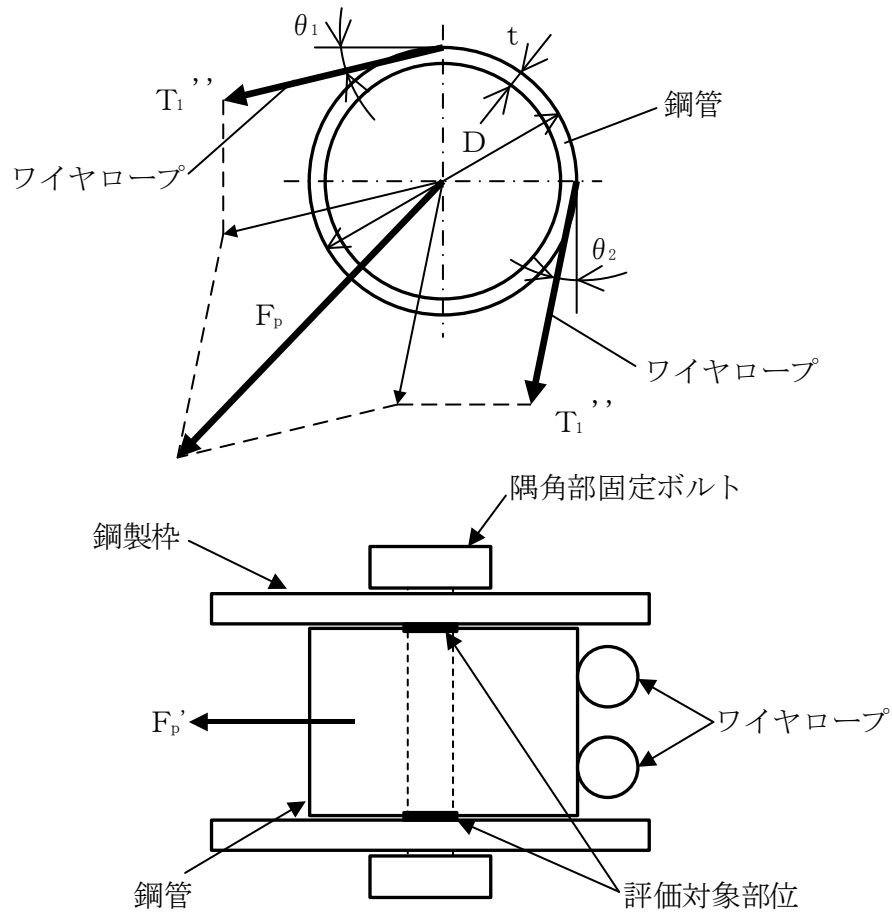


図 3-12 隅角部固定ボルトの荷重状態

隅角部固定ボルトに発生するせん断応力を力のつり合いの関係から以下の評価式を用いて算定する。

ネット展開方向ワイヤロープから発生する各方向の荷重， T_x 及び T_y は，以下のとおりとなる。

$$T_x = T_1'' \cdot \cos \theta_{w1}$$

$$T_y = T_1'' \cdot \sin \theta_{w1} \cdot \cos \theta_y$$

ただし， θ_y 及び θ_{w1} は以下の式で求められる。

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

$$\theta_{w1} = \cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{1 + 16 \cdot \left(\frac{\delta_{wx}}{L_x} \right)^2}}$$

また，ネット展開直角方向ワイヤロープから発生する各方向の荷重， T_x' 及び T_y' は以下の関係となる。

$$T_x' = T_1'' \cdot \sin \theta_{w2} \cdot \cos \theta_x$$

$$T_y' = T_1'' \cdot \cos \theta_{w2}$$

ただし、 θ_x 及び θ_{w2} は以下の式で求められる。

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

$$\theta_{w2} = \cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{1 + 16 \cdot \left(\frac{\delta_{wy}}{L_y} \right)^2}}$$

隅角部へ作用する X 方向及び Y 方向への合成荷重は、

$$F_x = T_x + T_x'$$

$$F_y = T_y + T_y'$$

より求まる。

1 本のワイヤロープから隅角部へ作用する合成荷重は、

$$F_p = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

より求まる。

隅角部には、2 本のワイヤロープが支持されていることから、隅角部へ作用する合成荷重 F_p' は、

$$F_p' = 2 \cdot F_p$$

以上より、隅角部固定ボルトに発生するせん断応力 τ_s は、

$$\tau_s = \frac{F_p'}{2 \cdot n_2 \cdot A_b}$$

(b) 取付けプレート

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

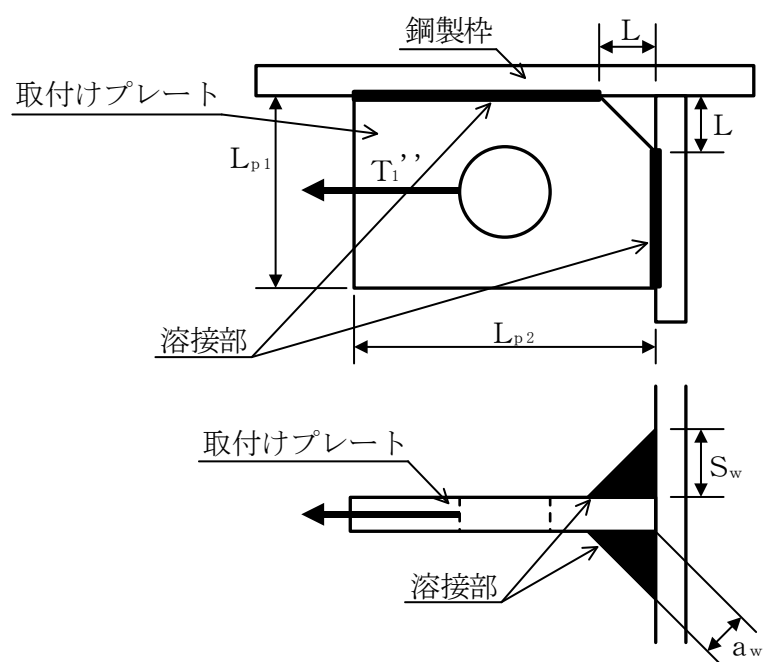


図 3-13 取付けプレートの溶接部

溶接部の有効長さ L_{pw} は、

$$L_{pw} = L_{p1} - L - 2 \cdot S_w + L_{p2} - L - 2 \cdot S_w$$

溶接部に発生するせん断応力 τ_w は、

$$\tau_w = \frac{T_1''}{2 \cdot a_w \cdot L_{pw}}$$

ここで溶接部ののど厚 a_w は以下の式で求められる。

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

(3) たわみ評価

たわみ評価においては，吸収エネルギー算定モデルを用い，設計飛来物の運動エネルギー，風圧力による荷重及び自重によるエネルギーを吸収するために必要となるネットのたわみ量を算定する。また，ワイヤロープ張力に応じたワイヤロープのたわみ量についても算定し，竜巻防護ネット全体のたわみ量が外部事象防護対象施設との離隔距離未満であることを確認する。

たわみ評価の評価フローを図 3-14 に示す。

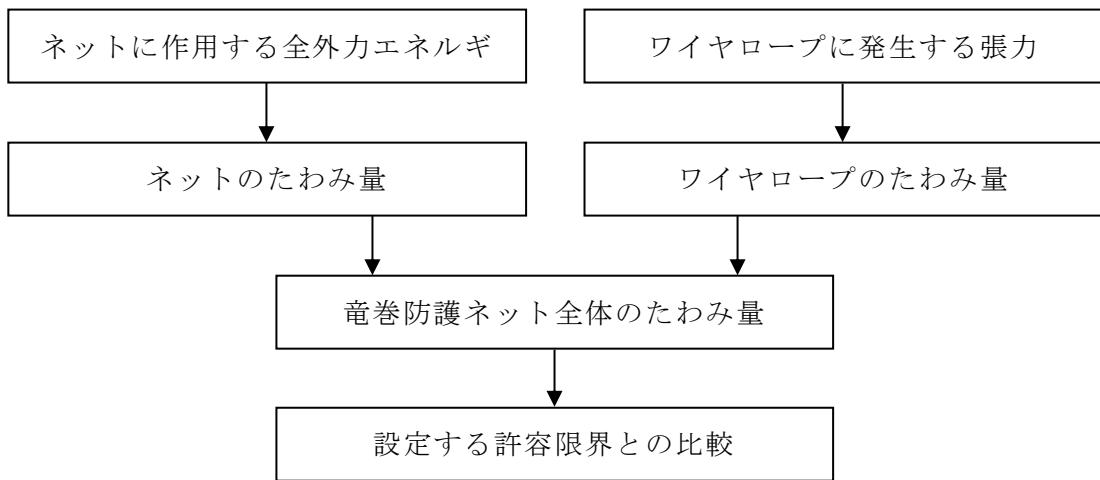


図 3-14 たわみ評価の評価フロー

a. ネット

ネットの変位量と吸収エネルギーとの関係は式(3. 10)のとおり，以下の式にて算定される。

$$E_i = 2 \cdot K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x \cdot \left(\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right)$$

ここで， K_x 及び L_x は定数であるため，

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

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

b. ワイヤロープのたわみ量を含めた竜巻防護ネット全体のたわみ量の算定

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，算定したワイヤロープに発生する張力及びワイヤロープの引張試験結果(荷重-ひずみ曲線)から変形後のワイヤロープ長さを求めることで算定する。

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定におい

て有意ではないため計算上考慮しない。

式(3.14)に示す計算方法を用いて算定されるワイヤロープに発生する張力からワイヤロープのひずみ量 ε が算定される。よって、ワイヤロープの変形による伸び量 δ' は以下のとおり算定される。

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

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

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

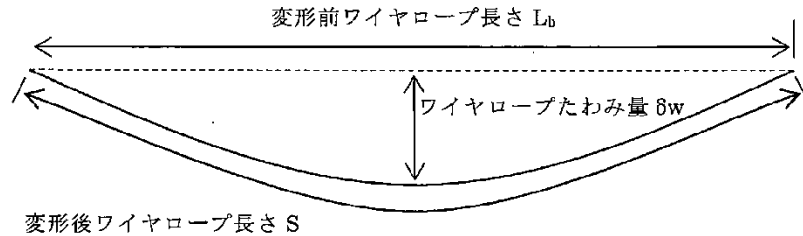


図3-15 ワイヤロープ変形図

ワイヤロープのたわみ量を含めた竜巻防護ネット全体のたわみ量 δ_t の算定を行う。ネット及びワイヤロープ変形図（展開方向が長い場合）を図3-16に、ネット及びワイヤロープ変形図（展開方向が短い場合）を図3-17に示す。

設計飛来物の衝突によるネット及びワイヤロープの変形は、ネットのアスペクト比により設計飛来物衝突の影響範囲が異なることからその変形形状が異なり、「展開方向寸法>展開直角方向寸法」の場合は、設計飛来物の衝突によるネット変形がネット全体に及ぶため図3-16のとおり4辺のワイヤロープが変形する形状となり、「展開方向寸法<展開直角方向寸法」の場合は、ネット変形がネット展開方向寸法の範囲に制限されるため図3-17のとおりネット展開直角方向のワイヤロープのみが変形する形状となる。

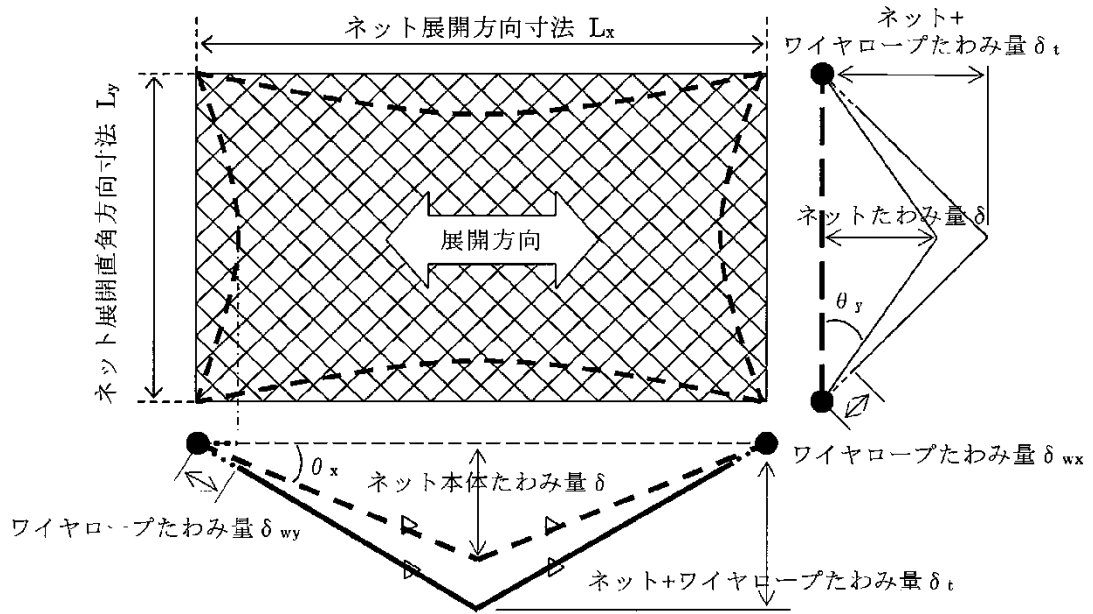


図 3-16 ネット及びワイヤロープ変形図（展開方向が長い場合）

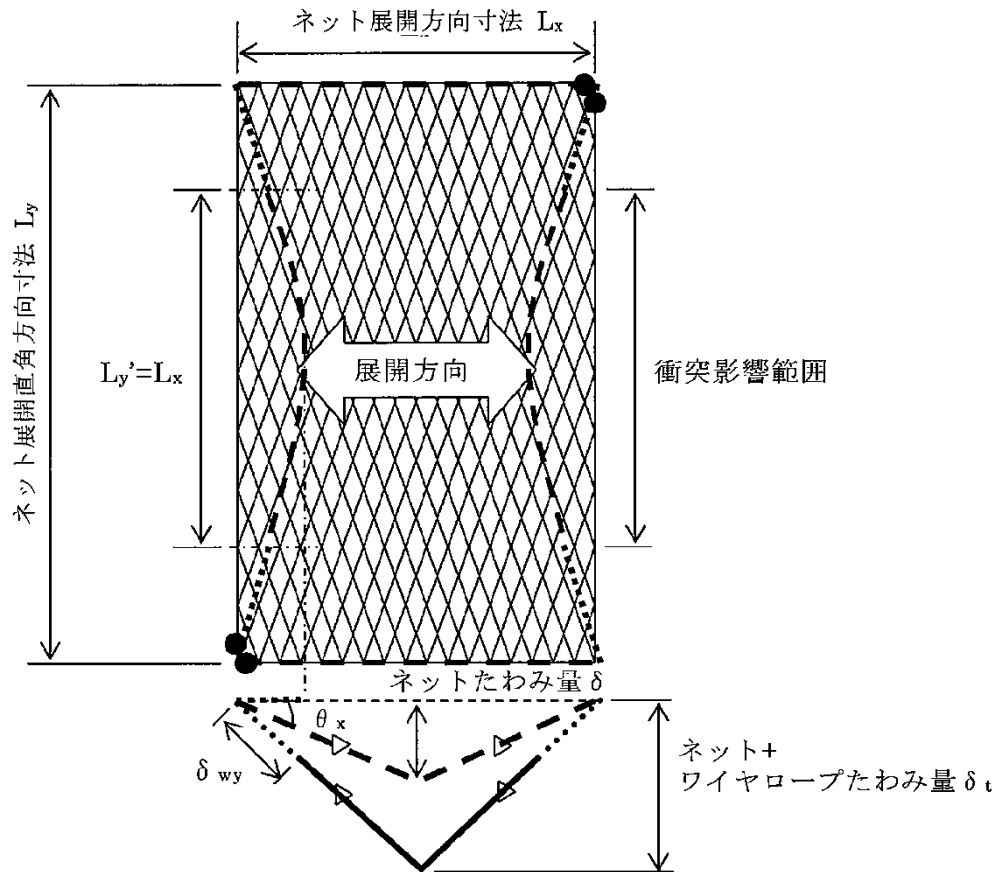


図 3-17 ネット及びワイヤロープ変形図（展開方向が短い場合）

よって、ネットのアスペクト比に応じ、ワイヤロープのたわみ量を含めた竜巻防護ネット全体のたわみ量の算定を行う。

展開方向寸法>展開直角方向寸法の場合、図 3-16 のとおり、ネット展開方向と平行に配置したワイヤロープの変形後の長さを S_x 、ネット展開方向と直交するワイヤロープの変形後の長さを S_y とすると、 S_x 及び S_y はそれぞれ δ_{wx} 、 δ_{wy} の関数であり、ワイヤロープの伸び量 δ' は、

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

と表される。

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

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

と表され、ワイヤロープたわみ量 δ_{wx} 及び δ_{wy} を算定することができる。同時にワイヤロープたわみ量を含めた竜巻防護ネット全体のたわみ量 δ_t が算定される。

ここで、 θ_x 及び θ_y は、「3.5(3)a. ネット」で算定したネットに作用する全外力エネルギー E_t に応じたたわみ量 δ より、以下の式で求められる。

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

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

展開直角方向寸法>展開方向寸法の場合、図 3-17 より、ワイヤロープ伸び量 δ' が、 L_y （展開方向に直交する辺）の範囲に集約されて変形する。

ワイヤロープ全体変形図を図 3-18 に示す。変形形状は図 3-18 のとおり、設計飛来物の影響範囲（ L_y' ）にのみ分布荷重が発生するため放物線状となり、その両端部の接線がそのままネット端部まで延長される形となる。

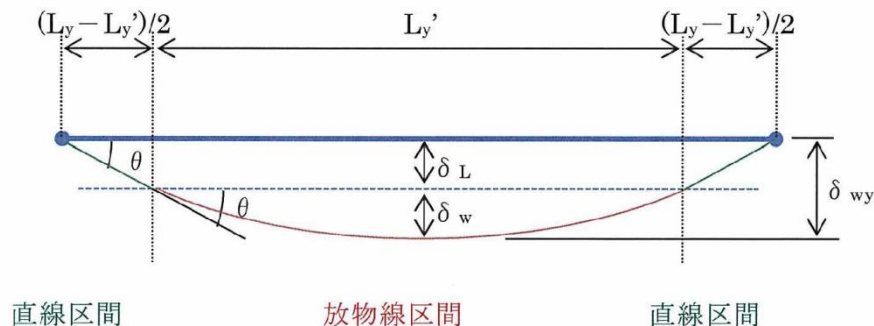


図 3-18 ワイヤロープ全体変形図

放物線区間の変形形状は図 3-18 のとおりであり、ネット展開方向と直交するワイヤロープの変形後の長さを S_y とすると、 S_y は δ_w の関数であり、

$$S_y = S_y(\delta_w)$$

と表される。

また、直線区間のワイヤロープの変形後の長さの合計 L_s は、

$$L_s = \frac{L_y - L_y'}{\cos \theta}$$

と表される。

L_y (展開方向に直交する辺) の変形後のワイヤロープ長さ S_t は、

$$S_t = L_y + \delta'$$

と算定されることから、

$$\begin{aligned} L_y + \delta' &= S_y + L_s \\ &= S_y(\delta_w) + \frac{L_y - L_y'}{\cos \theta} \end{aligned}$$

となり、 L_y 、 L_y' 、 δ' 、 θ は定数であることから、放物線区間のワイヤロープたわみ量 δ_w を算定することができる。

また、直線区間のワイヤロープのたわみ量 δ_L は、

$$\delta_L = \frac{L_y - L_y'}{2} \tan \theta$$

と算定されることから、放物線区間、直線区間を含むワイヤロープ全体のたわみ量が、

$$\delta_{wy} = \delta_w + \delta_L$$

と算定される。

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

より、ワイヤロープたわみ量を含めた竜巻防護ネット全体のたわみ量 δ_t が算定される。

4. 評価条件

4.1 荷重条件

設計飛来物による衝撃荷重の評価条件を表 4-1 に、風圧力による荷重の評価条件を表 4-2 に示す。

表 4-1 設計飛来物による衝撃荷重の評価条件

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

表 4-2 風圧力による荷重の評価条件

C (-)	G (-)	ρ (kg/m ³)	V _D (m/s)
1.2	1.0	1.226	92

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 (J I S G 3 5 4 8)	—
ネット目合い寸法	—	40mm	電中研報告書
ネット 1 目合いの対角寸法	a	56.6mm	
ネット 1 目合いの破断変位	a _s	13.9mm	
ネット素線の直径	d'	4mm	
ネット 1 目合いの破断荷重	F ₁	17.2kN	
ネット 1 目合いの等価剛性	K	1239kN/m	
衝突箇所周辺の ネット 1 枚当たりの目合い数	n ₁	20 個	
ネットの素線の引張強度	σ'	1400MPa	
破断時たわみ角	θ _{max}	36.6deg	
ネットの単位面積当たりの質量	m _N	5.7kg/m ²	
ネットの充実率	φ	0.61 (5 枚* ¹) 0.44 (3 枚* ¹)	計算値* ²

注記*1：補助金網を含む。

$$*2: \phi = 1 - \left\{ \frac{(\text{ネット目合い寸法})^2}{(\text{ネット目合い寸法} + \text{ネット素線直径})^2} \right\}^n$$

(2) 竜巻防護ネット構成

海水ポンプエリア，原子炉建物外壁及び廃棄物処理建物外壁の竜巻防護ネットの構成を表 4-4～表 4-6 に示す。

表 4-4 海水ポンプエリアの竜巻防護ネットの構成

No.	ネットサイズ (m)		設置方向	ネット枚数
	L_x	L_y^{*2}		
1	3.570	× 4.770	水平	2 枚 (1 枚) *1
2	3.520	× 4.770	水平	
3	3.420	× 4.770	水平	
4	2.395	× 4.770	水平	
5	3.870	× 4.770	水平	
6	2.395	× 4.770	水平	
7	2.295	× 4.770	水平	
8	2.295	× 4.770	水平	

注記*1：() 内は補助金網

注記*2：展開方向：展開直行方向のアスペクト比が 1:1 より小さいため， $L_y = L_x$ として評価する。

表 4-5(1) 原子炉建物外壁 (2RB-AG1, AG3, AG4) の竜巻防護ネットの構成

No.	ネットサイズ (m)		設置方向	ネット枚数
	L_x	L_y		
1	2.705	× 2.430	鉛直	4 枚 (1 枚) *
2	2.505	× 2.430	鉛直	
3	2.880	× 2.430	鉛直	
4	2.430	× 2.430	鉛直	
5	2.705	× 2.230	鉛直	
6	2.505	× 2.230	鉛直	
7	2.880	× 2.230	鉛直	
8	2.430	× 2.230	鉛直	

注記*：() 内は補助金網

表 4-5(2) 原子炉建物外壁 (2R B-A G2) の竜巻防護ネットの構成

No.	ネットサイズ (m)		設置方向	ネット枚数
	L _x	L _y		
1	2.580	2.430	鉛直	4枚
2	2.580	2.230	鉛直	(1枚)*

注記* : () 内は補助金網

表 4-5(3) 原子炉建物外壁 (2R B-A G5) の竜巻防護ネットの構成

No.	ネットサイズ (m)		設置方向	ネット枚数
	L _x	L _y		
1	3.330	2.180	鉛直	4枚
2	3.330	1.980	鉛直	(1枚)*

注記* : () 内は補助金網

表 4-5(4) 原子炉建物外壁 (2R B-3) の竜巻防護ネットの構成

No.	ネットサイズ (m)		設置方向	ネット枚数
	L _x	L _y		
1	2.430	2.080	鉛直	4枚 (1枚)*

注記* : () 内は補助金網

表 4-5(5) 原子炉建物外壁 (2R B-M4) の竜巻防護ネットの構成

No.	ネットサイズ (m)		設置方向	ネット枚数
	L _x	L _y		
1	2.580	1.990	鉛直	4枚 (1枚)*

注記* : () 内は補助金網

表 4-5(6) 原子炉建物外壁 (2RB-BOP2, BOP3) の竜巻防護ネットの構成

No.	ネットサイズ (m)		設置方向	ネット枚数
	L_x	L_y		
1	2.830	2.630	鉛直	4枚 (1枚)*
2	2.830	2.430	鉛直	
3	2.460	2.080	鉛直	
4	2.630	2.130	水平	2枚
5	2.430	2.130	水平	(1枚)*

注記* : () 内は補助金網

表 4-6 廃棄物処理建物外壁 (2RwB-AG1) の竜巻防護ネットの構成

No.	ネットサイズ (m)		設置方向	ネット枚数
	L_x	L_y		
1	2.480	2.130	鉛直	4枚 (1枚)*

注記* : () 内は補助金網

(3) ワイヤロープ

ワイヤロープの仕様を表 4-7 に示す。

表 4-7 ワイヤロープの仕様

評価対象部位	仕様	径	破断荷重 F_2 (kN)	ワイヤグリップ効率 C_c
ワイヤロープ	7×7	$\phi 16$	165* ¹	0.8* ²

注記*1 : J I S G 3 5 4 9 の破断荷重

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

(4) 接続治具（支持部）

a. ターンバックル

ターンバックルの仕様を表 4-8 に示す。

表 4-8 ターンバックルの仕様

評価対象部位	規格値 F_3 (kN)	許容限界 (kN)
ターンバックル	86.8*	130

注記*：J I S A 5 5 4 0 の保証荷重

b. シャックル

シャックルの仕様を表 4-9 に示す。

表 4-9 シャックルの仕様

評価対象部位	規格値 F_4 (kN)	許容限界 (kN)
シャックル	78.4	156*

注記*：試験結果に基づくメーカー保証値

(5) 接続治具（固定部）

a. 隅角部固定ボルト

隅角部固定ボルトの評価条件を表 4-10 に示す。

表 4-10 隅角部固定ボルトの評価条件

評価対象部位	ボルト径	強度区分	ボルト本数 n_2
隅角部固定ボルト	M27	8.8	3

b. 取付けプレート

取付けプレートの評価条件を表 4-11 に示す。

表 4-11 取付けプレートの評価条件

評価対象部位	取付けプレート 母材	プレート長さ		面取り長さ L (mm)	溶接脚長 S_w (mm)
		L_{p1} (mm)	L_{p2} (mm)		
取付けプレート	SS400	90	130	20	7

5. 強度評価結果

5.1 吸収エネルギー評価

竜巻による設計飛来物衝突時の吸収エネルギー評価結果を表 5-1～表 5-3 に示す。

全ての竜巻防護ネットにおいて、作用する全外力エネルギー 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。

(1) 海水ポンプエリア竜巻防護ネット

表 5-1 海水ポンプエリア竜巻防護ネットの吸収エネルギー評価結果

No.	E_t (kJ)	許容限界 (kJ)
1	83.0	244.3
2	82.9	253.2
3	82.6	239.6
4	80.3	120.3
5	83.9	304.6
6	80.3	120.3
7	80.1	110.9
8	80.1	110.9

(2) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット

表 5-2(1) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット (2RB-AG1, AG3, AG4) の吸収エネルギー評価結果

No.	E_t (kJ)	許容限界 (kJ)
1	177.1	247.3
2	176.9	226.4
3	177.3	264.0
4	176.8	222.9
5	177.0	207.7
6	176.8	190.2
7	177.2	221.7
8	176.7	187.2

表 5-2(2) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット (2RB-AG2) の
吸収エネルギー評価結果

No.	E_t (kJ)	許容限界 (kJ)
1	177.0	235.2
2	176.8	197.5

表 5-2(3) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット (2RB-AG5) の
吸収エネルギー評価結果

No.	E_t (kJ)	許容限界 (kJ)
1	177.8	279.9
2	177.6	253.9

表 5-2(4) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット (2RB-3) の
吸収エネルギー評価結果

No.	E_t (kJ)	許容限界 (kJ)
1	176.6	194.4

表 5-2(5) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット (2RB-M4) の
吸収エネルギー評価結果

No.	E_t (kJ)	許容限界 (kJ)
1	176.7	177.1

表 5-2(6) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット (2RB-BOP2, BOP3) の
吸収エネルギー評価結果

No.	E_t (kJ)	許容限界 (kJ)
1	177.4	282.6
2	177.3	260.5
3	176.6	194.6
4	79.1	106.0
5	78.9	98.6

(3) 廃棄物処理建物外壁竜巻防護ネット

表 5-3 廃棄物処理建物外壁竜巻防護ネット (2R w B-A G1) の
吸収エネルギー評価結果

No.	E_t (kJ)	許容限界 (kJ)
1	176.7	181.0

5.2 破断評価

(1) ネット

竜巻による設計飛来物衝突時の破断評価結果を表 5-4～表 5-6 に示す。

全ての竜巻防護ネットにおいて、設計飛来物による衝撃荷重 $F_{a'}$ は、ネットの許容荷重を下回っている。

a. 海水ポンプエリア竜巻防護ネット

表 5-4 海水ポンプエリア竜巻防護ネットの
破断評価結果

No.	$F_{a'}$ (kN)	許容限界 (kN)
1	276	688
2	282	
3	286	
4	330	
5	273	
6	330	
7	336	
8	336	

b. 原子炉建物外壁竜巻防護ネット

表 5-5(1) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット (2RB-AG1, AG3, AG4) の

破断評価結果

No.	$F_{a'}$ (kN)	許容限界 (kN)
1	630	1376
2	663	
3	603	
4	680	
5	600	
6	632	
7	575	
8	649	

表 5-5(2) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット (2RB-AG2) の
破断評価結果

No.	F _a ' (kN)	許容限界 (kN)
1	651	1376
2	620	

表 5-5(3) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット (2RB-AG5) の
破断評価結果

No.	F _a ' (kN)	許容限界 (kN)
1	531	1376
2	516	

表 5-5(4) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット (2RB-3) の
破断評価結果

No.	F _a ' (kN)	許容限界 (kN)
1	655	1376

表 5-5(5) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット (2RB-M4) の
破断評価結果

No.	F _a ' (kN)	許容限界 (kN)
1	602	1376

表 5-5(6) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット (2RB-BOP2, BOP3) の
破断評価結果

No.	F _a ' (kN)	許容限界 (kN)
1	625	1376
2	611	
3	648	
4	286	688
5	303	

c. 廃棄物処理建物外壁竜巻防護ネット

表 5-6 廃棄物処理建物外壁竜巻防護ネット (2R w B-A G1) の

破断評価結果

No.	$F_{a'}$ (kN)	許容限界 (kN)
1	630	1376

(2) ワイヤロープ

竜巻による設計飛来物衝突時の強度評価結果を表 5-7～表 5-9 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を下回っている。

a. 海水ポンプエリア竜巻防護ネット

表 5-7 海水ポンプエリア竜巻防護ネットの

ワイヤロープ強度評価結果

No.	$T_{1''}$ (kN)	許容限界 (kN)
1	87	132
2	90	
3	90	
4	91	
5	90	
6	91	
7	91	
8	91	

b. 原子炉建物外壁竜巻防護ネット

表 5-8(1) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット (2RB-AG1, AG3, AG4) の

ワイヤロープ強度評価結果

No.	$T_{1''}$ (kN)	許容限界 (kN)
1	94	132
2	98	
3	92	
4	100	
5	87	
6	91	
7	85	
8	93	

表 5-8(2) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット (2RB-AG2) の

ワイヤロープ強度評価結果

No.	$T_{1''}$ (kN)	許容限界 (kN)
1	97	132
2	89	

表 5-8(3) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット (2RB-AG5) の

ワイヤロープ強度評価結果

No.	$T_{1''}$ (kN)	許容限界 (kN)
1	82	132
2	78	

表 5-8(4) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット (2RB-3) の

ワイヤロープ強度評価結果

No.	$T_{1''}$ (kN)	許容限界 (kN)
1	94	132

表 5-8(5) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット (2RB-M4) の
ワイヤロープ強度評価結果

No.	T_1'' (kN)	許容限界 (kN)
1	85	132

表 5-8(6) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット (2RB-BOP2, BOP3) の
ワイヤロープ強度評価結果

No.	T_1'' (kN)	許容限界 (kN)
1	96	132
2	93	
3	93	
4	77	
5	80	

c. 廃棄物処理建物外壁竜巻防護ネット

表 5-9 廃棄物処理建物外壁竜巻防護ネット (2RwB-AG1) の
ワイヤロープ強度評価結果

No.	T_1'' (kN)	許容限界 (kN)
1	89	132

(3) 接続治具 (支持部)

a. ターンバックル

竜巻による設計飛来物衝突時の強度評価結果を表 5-10 に示す。

発生荷重は、ターンバックルの許容限界を下回っている。

表 5-10 ターンバックルの強度評価結果

評価対象部位	発生荷重* (kN)	許容限界 (kN)
ターンバックル	100	130

注記* : ワイヤロープの張力が最大である, 原子炉建物外壁竜巻防護ネット
(2RB-AG1, AG3, AG4) の T_1'' の値を示す。

b. シャックル

竜巻による設計飛来物衝突時の強度評価結果を表 5-11 に示す。

発生荷重は、シャックルの許容限界を下回っている。

表 5-11 シャックルの強度評価結果

評価対象部位	発生荷重* (kN)	許容限界 (kN)
シャックル	100	156

注記*：ワイヤロープの張力が最大である，原子炉建物外壁竜巻防護ネット
(2RB-AG1, AG3, AG4) の T_1'' の値を示す。

(4) 接続治具 (固定部)

a. 隅角部固定ボルト

接続治具 (固定部) のうち，隅角部固定ボルトの竜巻による設計飛来物衝突時の強度評価結果を表 5-12 に示す。

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

表 5-12 隅角部固定ボルトの強度評価結果

評価対象部位	発生応力* (MPa)	許容限界 (MPa)
隅角部固定ボルト	117	323

注記*：ワイヤロープの張力が最大である，原子炉建物外壁竜巻防護ネット
(2RB-AG1, AG3, AG4) の値を示す。

b. 取付けプレート

取付けプレート溶接部の竜巻による設計飛来物衝突時の強度評価結果を表 5-13 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，取付けプレート溶接部の許容限界を下回っている。

表 5-13 取付けプレート溶接部の強度評価結果

評価対象部位	発生応力* (MPa)	許容限界 (MPa)
取付けプレート溶接部	101	135

注記* : ワイヤロープの張力が最大である，原子炉建物外壁竜巻防護ネット
(2RB-AG1, AG3, AG4) の値を示す。

5.3 たわみ評価

竜巻による設計飛来物衝突時のたわみ評価結果を表 5-14～表 5-16 に示す。

全ての竜巻防護ネットにおいて、設計飛来物の衝突による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。

(1) 海水ポンプエリア竜巻防護ネット

表 5-14 海水ポンプエリア竜巻防護ネットの
たわみ評価結果

No.	最大たわみ量 δ_t (m)	最小離隔距離 L_{min} (m)
1	1.78	2.85
2	1.78	
3	1.79	
4	2.00	
5	1.71	
6	2.00	
7	2.02	
8	2.02	

(2) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット

表 5-15(1) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット (2RB-AG1, AG3, AG4) の

たわみ評価結果

No.	最大たわみ量 δ_t (m)	最小離隔距離 L_{min} (m)
1	1.11	1.51
2	1.06	
3	1.15	
4	1.03	
5	1.13	
6	1.08	
7	1.17	
8	1.05	

表 5-15(2) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット (2RB-AG2) の

たわみ評価結果

No.	最大たわみ量 δ_t (m)	最小離隔距離 L_{min} (m)
1	1.07	1.51
2	1.09	

表 5-15(3) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット (2RB-AG5) の

たわみ評価結果

No.	最大たわみ量 δ_t (m)	最小離隔距離 L_{min} (m)
1	1.26	1.51
2	1.27	

表 5-15(4) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット (2RB-3) の
たわみ評価結果

No.	最大たわみ量 δ_t (m)	最小離隔距離 L_{min} (m)
1	1.04	1.51

表 5-15(5) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット (2RB-M4) の
たわみ評価結果

No.	最大たわみ量 δ_t (m)	最小離隔距離 L_{min} (m)
1	1.10	1.26

表 5-15(6) 原子炉建物外壁竜巻防護ネット (2RB-BOP2, BOP3) の
たわみ評価結果

No.	最大たわみ量 δ_t (m)	最小離隔距離 L_{min} (m)
1	1.13	3.11
2	1.14	
3	1.05	3.16
4	1.05	2.69
5	1.00	

(3) 廃物処理建物外壁竜巻防護ネット

表 5-16 廃物処理建物外壁竜巻防護ネット (2R w B-A G 1) の
たわみ評価結果

N o .	最大たわみ量 δ_t (m)	最小離隔距離 L_{min} (m)
1	1.07	1.51

VI-3-別添 1-5 竜巻防護鋼板の強度計算書

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	8
2.4 適用規格・基準等	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	15
3.5 評価方法	18
4. 評価条件	19
5. 強度評価結果	20

1. 概要

本資料は、VI-3-別添 1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」に示すとおり、竜巻防護対策設備のうち、取水槽海水ポンプエリア、取水槽循環水ポンプエリア、燃料移送ポンプエリア及び建物開口部に設置する竜巻防護鋼板が、竜巻時及び竜巻通過後においても構造健全性を保持し、外部事象防護対象施設の安全機能を維持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「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」,「3.2 竜巻防護鋼板の構造設計」及び「5. 許容限界」を踏まえて,竜巻防護鋼板の「2.1 位置」,「2.2 構造概要」,「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格・基準等」を示す。

2.1 位置

竜巻防護鋼板は,取水槽(取水槽海水ポンプエリア,取水槽循環水ポンプエリア),燃料移送ポンプエリア及び建物開口部に設置する。竜巻防護鋼板の位置図を図 2-1 に示す。

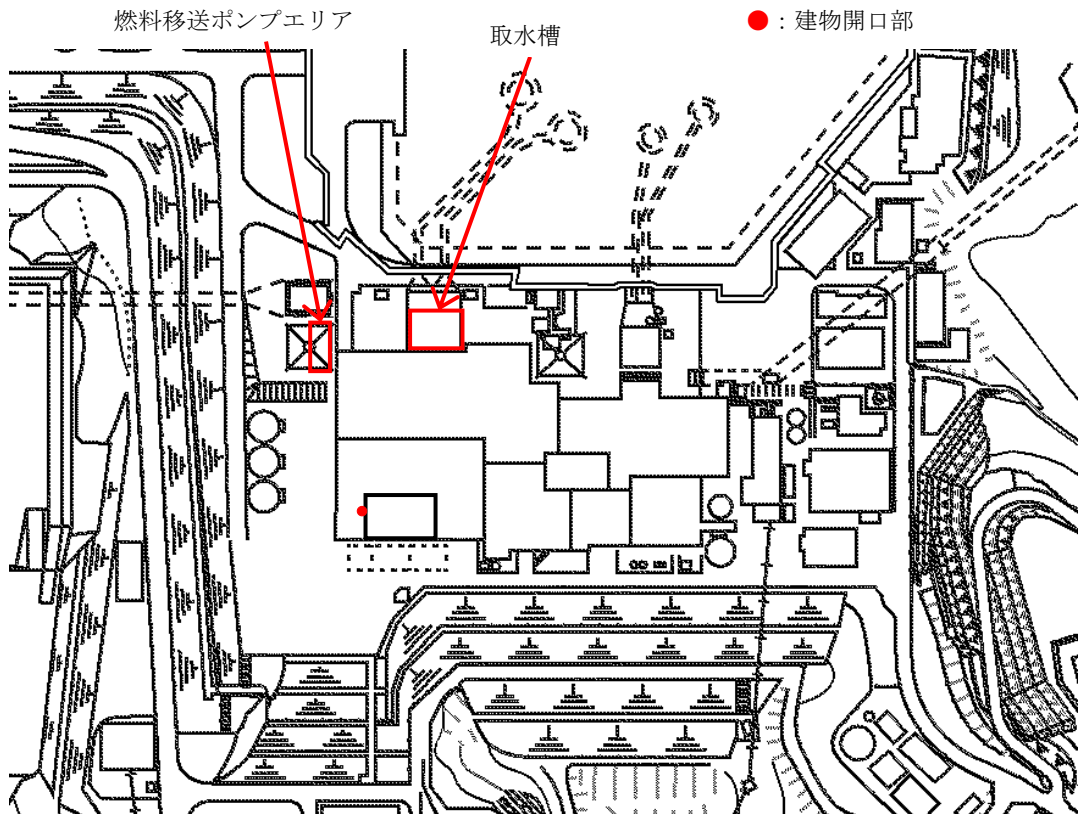


図 2-1 竜巻防護鋼板の位置図

2.2 構造概要

VI-3-別添 1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」の「3.2 竜巻防護鋼板の構造設計」に示す構造設計を踏まえて、竜巻防護鋼板の構造を設定する。

取水槽海水ポンプエリア、取水槽循環水ポンプエリア、燃料移送ポンプエリア及び建物開口部の竜巻防護鋼板は、鋼板で構成する鋼製構造物である。

(1) 取水槽海水ポンプエリア竜巻防護鋼板

取水槽海水ポンプエリア竜巻防護鋼板は、当該竜巻防護対策設備の架構に取り付けられ外部事象防護対象施設の外殻となる。取水槽海水ポンプエリア竜巻防護対策設備の平面図を図2-2、断面図を図2-3に示す。

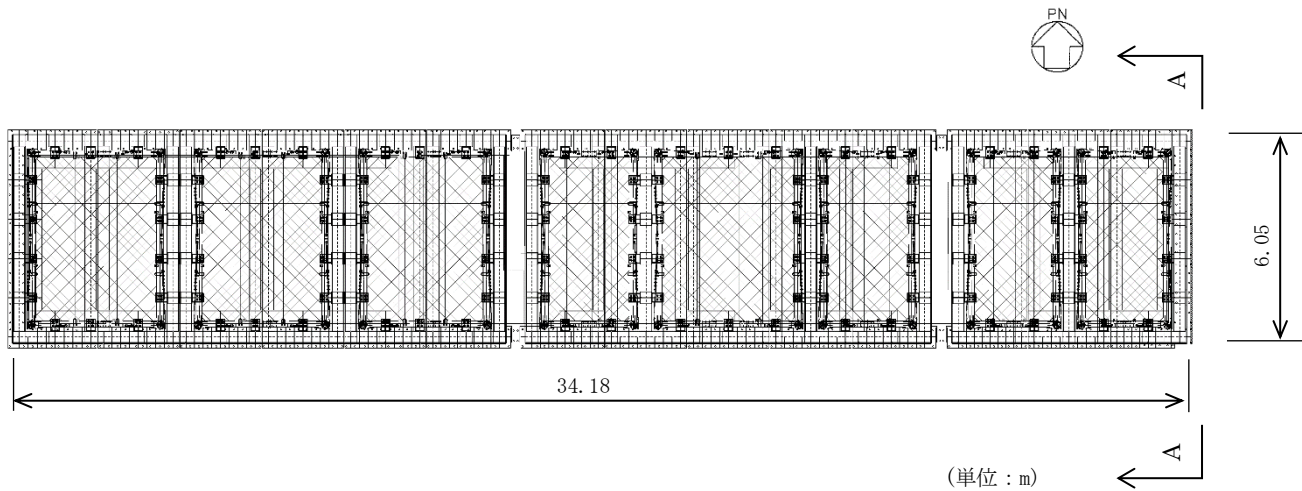
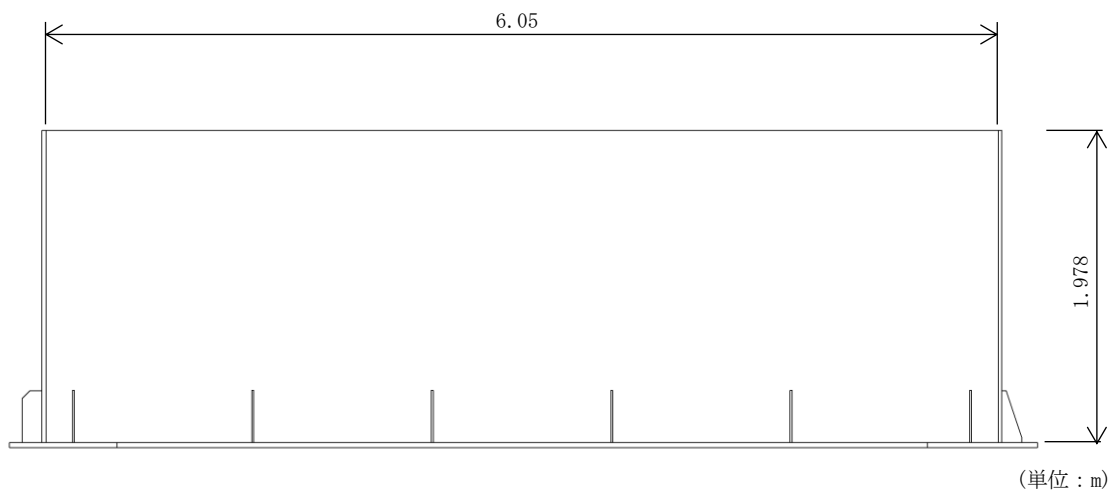


図2-2 取水槽海水ポンプエリア竜巻防護対策設備の平面図



A-A断面図

図2-3 取水槽海水ポンプエリア竜巻防護対策設備の断面図

(2) 取水槽循環水ポンプエリア竜巻防護鋼板

取水槽循環水ポンプエリア竜巻防護鋼板は、当該竜巻防護対策設備の架構に取り付けられ外部事象防護対象施設の外殻となる。取水槽循環水ポンプエリア竜巻防護対策設備の平面図を図 2-4、断面図を図 2-5 に示す。

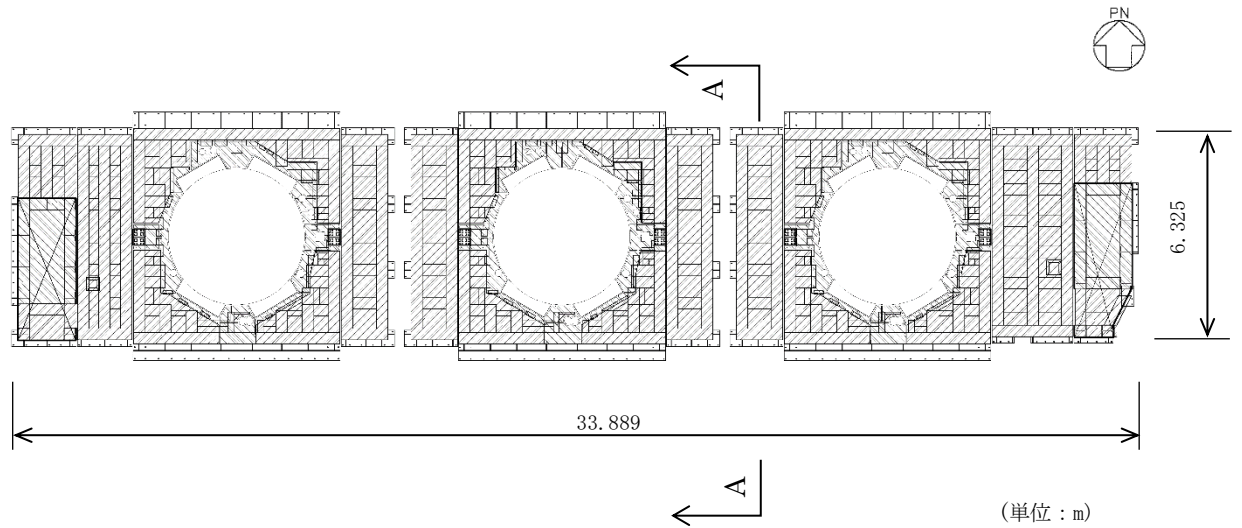


図 2-4 取水槽循環水ポンプエリア竜巻防護対策設備の平面図

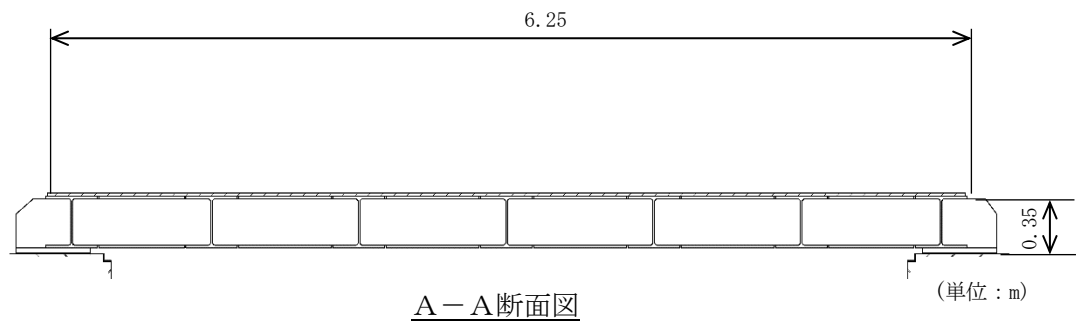


図 2-5 取水槽循環水ポンプエリア竜巻防護対策設備の断面図

(3) 燃料移送ポンプエリア竜巻防護鋼板

燃料移送ポンプエリア竜巻防護鋼板は、当該竜巻防護対策設備の架構に取り付けられ外部事象防護対象施設の外殻となる。燃料移送ポンプエリア竜巻防護対策設備の平面図を図2-6、断面図を図2-7に示す。

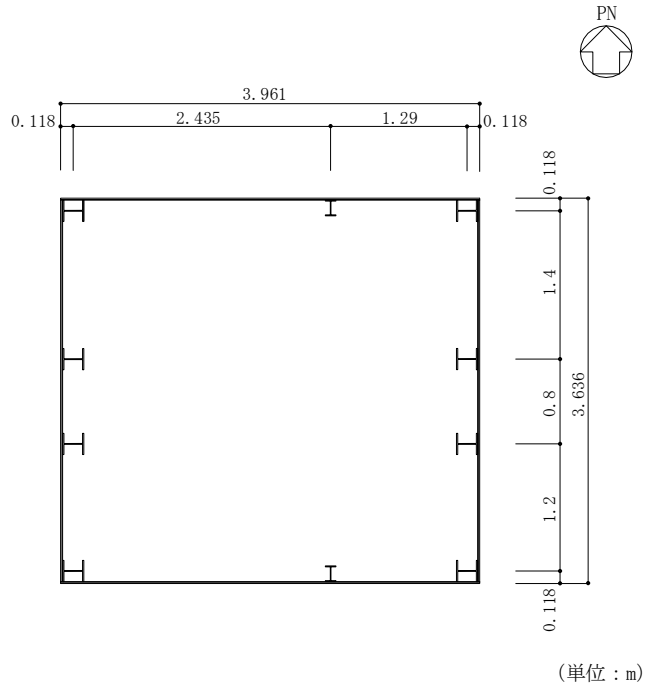


図2-6 燃料移送ポンプエリア竜巻防護対策設備の平面図

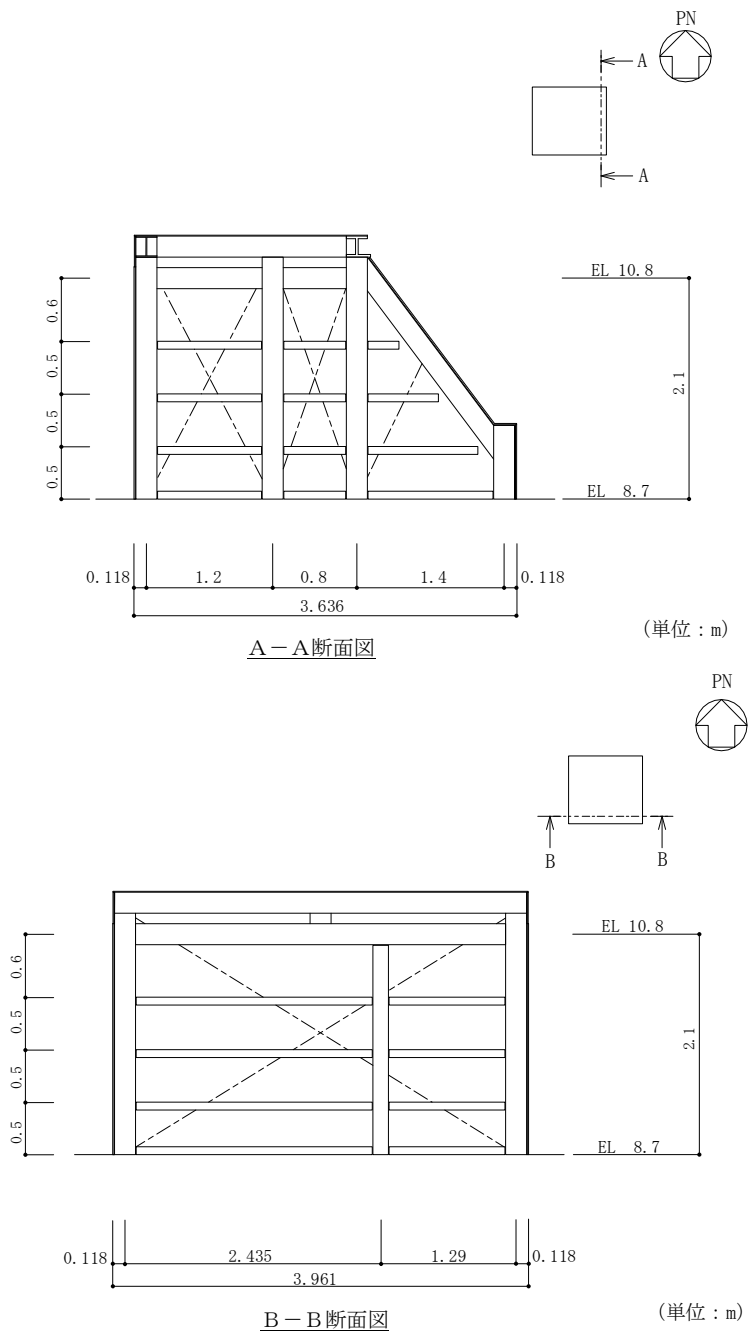


図 2-7 燃料移送ポンプエリア竜巻防護対策設備の断面図

(4) 建物開口部竜巻防護鋼板

建物開口部竜巻防護鋼板は、当該竜巻防護対策設備の架構に取り付けられ外部事象防護対象施設の外殻となる。建物開口部竜巻防護対策設備の概要図を図 2-8 に示す。

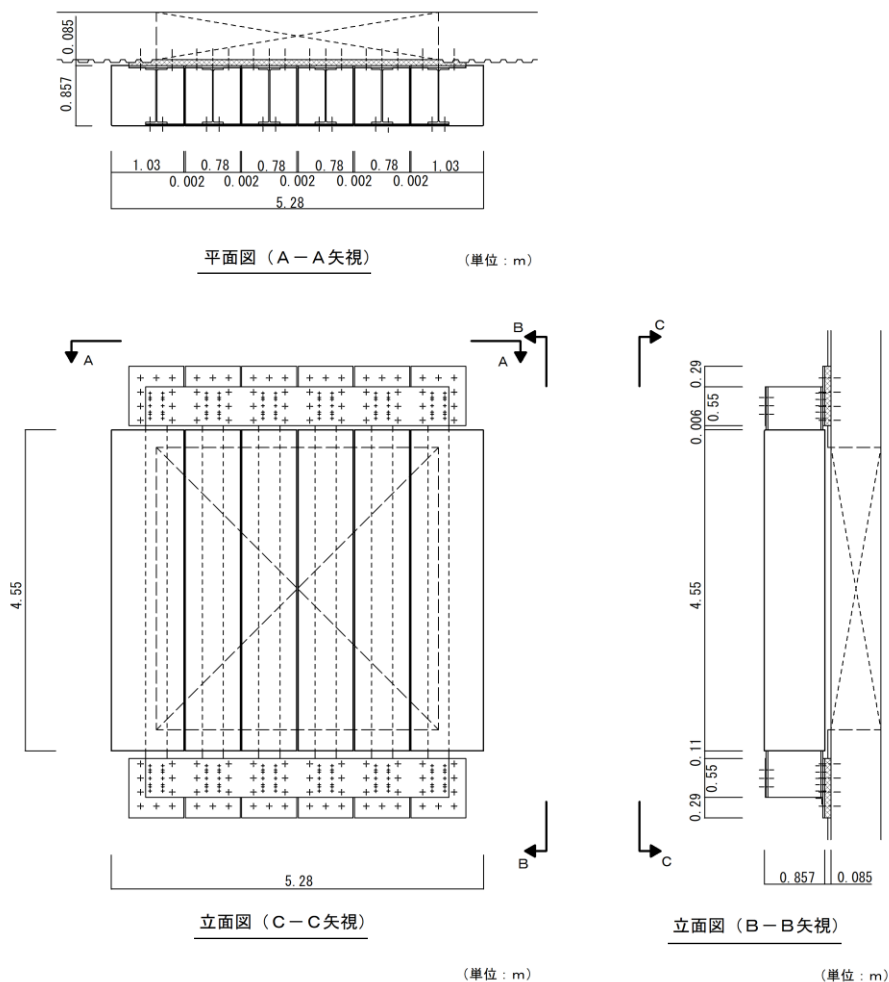


図 2-8 建物開口部竜巻防護対策設備の概要図

2.3 評価方針

竜巻防護鋼板の強度評価は、VI-3-別添 1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」及び「5. 許容限界」を踏まえ、竜巻防護鋼板の評価対象部位生じ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」に示す条件を用いて計算し、その結果を「5. 強度評価結果」に示す。

評価対象部位は、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、選定する。

(1) 衝突評価の方針

設計飛来物が竜巻防護鋼板に衝突した場合に、設計飛来物が鋼板を貫通しない最小肉厚（必要最小肉厚）に対し、竜巻防護鋼板が十分な厚さを有していることを確認する。

竜巻防護鋼板の衝突評価フローを図 2-9 に示す。

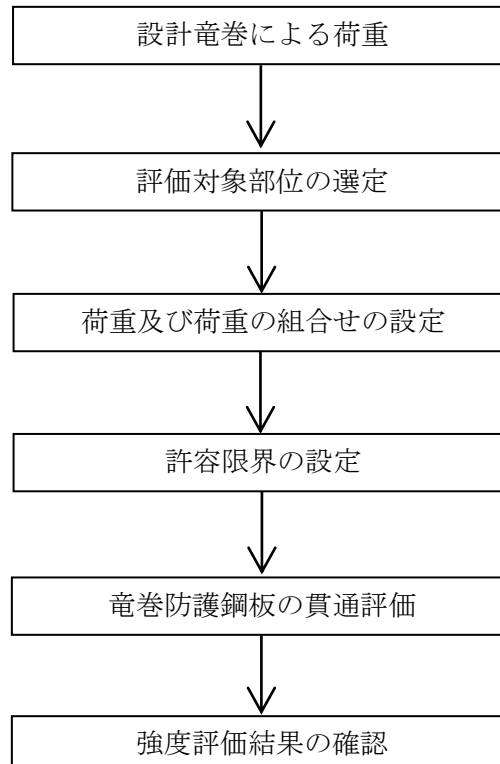


図 2-9 竜巻防護鋼板の衝突評価フロー

2.4 適用規格・基準等

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」((社) 日本機械学会)
- ・日本産業規格(J I S) (以下「J I S」という。)
- ・「建築物荷重指針・同解説」((社) 日本建築学会, 2004 改定)
- ・Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8(NEI 07-13))
- ・動的繰返し変形をうける溶接鋼構造物の脆性破壊性能評価法 (WES2808 : 2003) ((社) 日本溶接協会)

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 衝突評価の記号の定義

衝突評価に用いる記号を表 3-1 に示す。

表 3-1 衝突評価に用いる記号

記号	単位	定義
E	MPa	縦弾性係数
E'	MPa	塑性硬化係数
G	—	ガスト影響係数
T	°C	想定するひずみ速度時の温度
T_0	°C	基準ひずみ速度時の温度
W_M	N	設計飛来物による衝撃荷重
$\dot{\varepsilon}$	—	想定するひずみ速度
ε'	—	破断ひずみ
$\dot{\varepsilon}_0$	—	基準ひずみ速度
σ_T	MPa	想定するひずみ速度時の引張強さ
σ_{T0}	MPa	基準ひずみ速度時の引張強さ
σ_Y	MPa	想定するひずみ速度時の降伏応力
σ_{Y0}	MPa	基準ひずみ速度時の降伏応力








3.2 評価対象部位

衝突評価として、「2.3 評価方針」に示すとおり、竜巻防護対策設備の外殻を構成する竜巻防護鋼板を対象とする。

(1) 衝突評価の評価対象部位

竜巻防護鋼板を評価対象として選定する。評価対象の仕様を表 3-2 に、評価対象部位を図 3-1～図 3-4 に示す。

表 3-2 竜巻防護鋼板の仕様

評価対象	材質	厚さ (mm)
取水槽海水ポンプエリア竜巻防護鋼板	SS400	
取水槽循環水ポンプエリア竜巻防護鋼板	SS400	
燃料移送ポンプエリア竜巻防護鋼板		
燃料移送ポンプエリア竜巻防護鋼板 (穴あき)		
建物開口部竜巻防護鋼板	SS400	

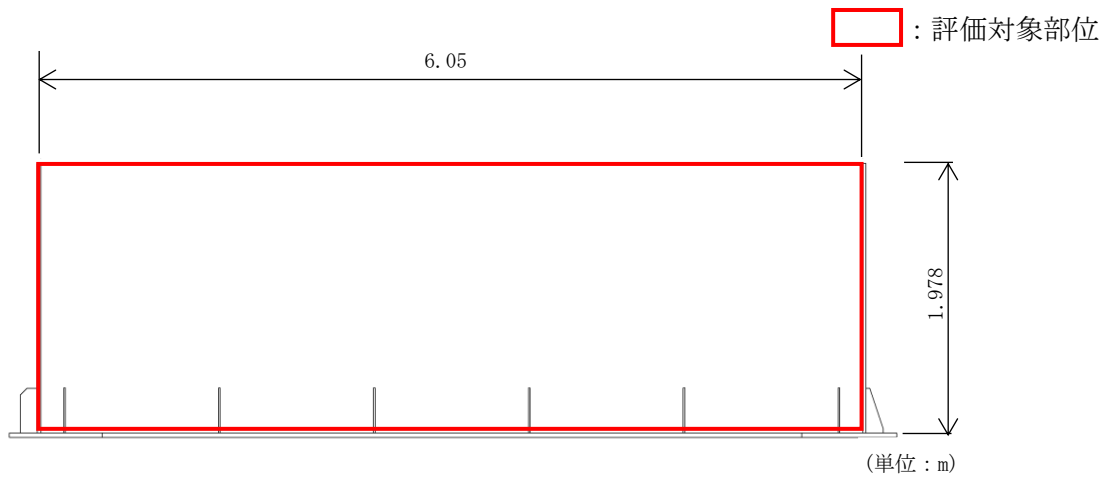


図 3-1 評価対象部位 (取水槽海水ポンプエリア竜巻防護鋼板)

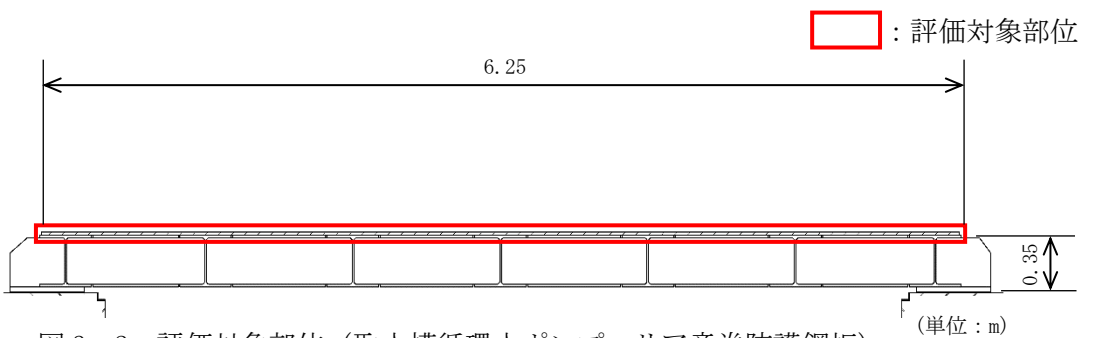


図 3-2 評価対象部位 (取水槽循環水ポンプエリア竜巻防護鋼板)

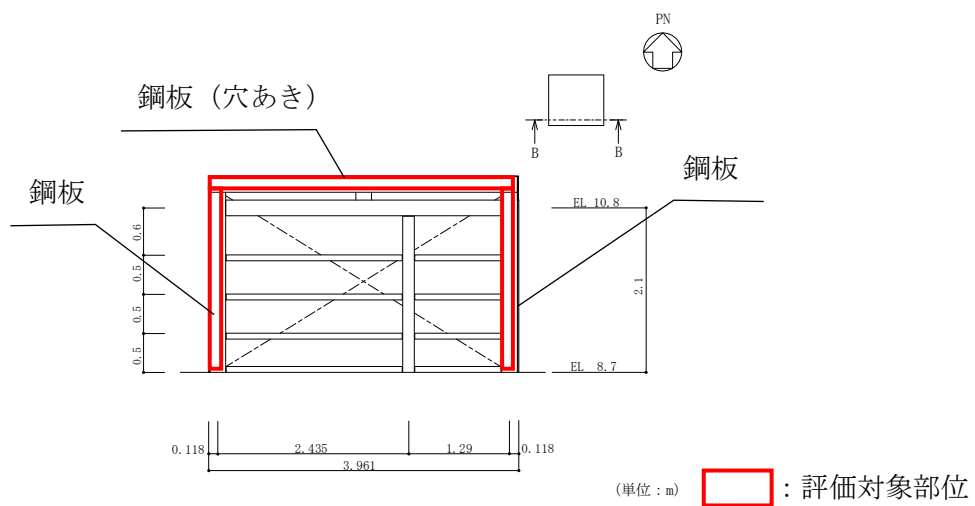
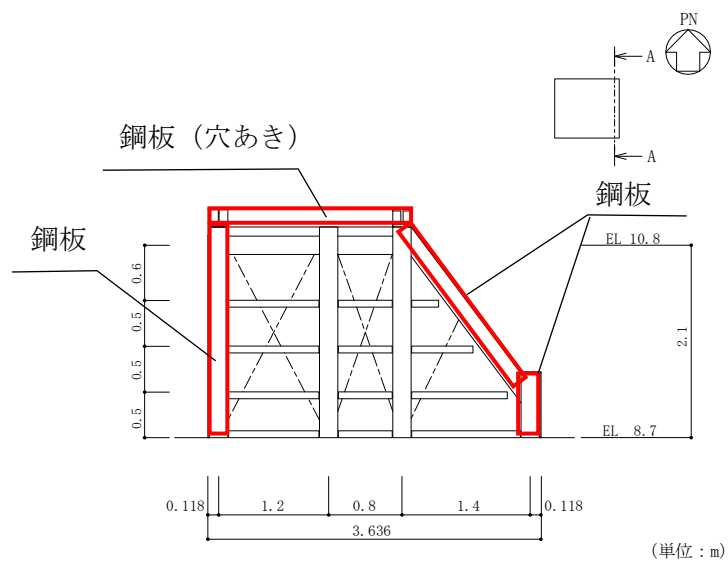
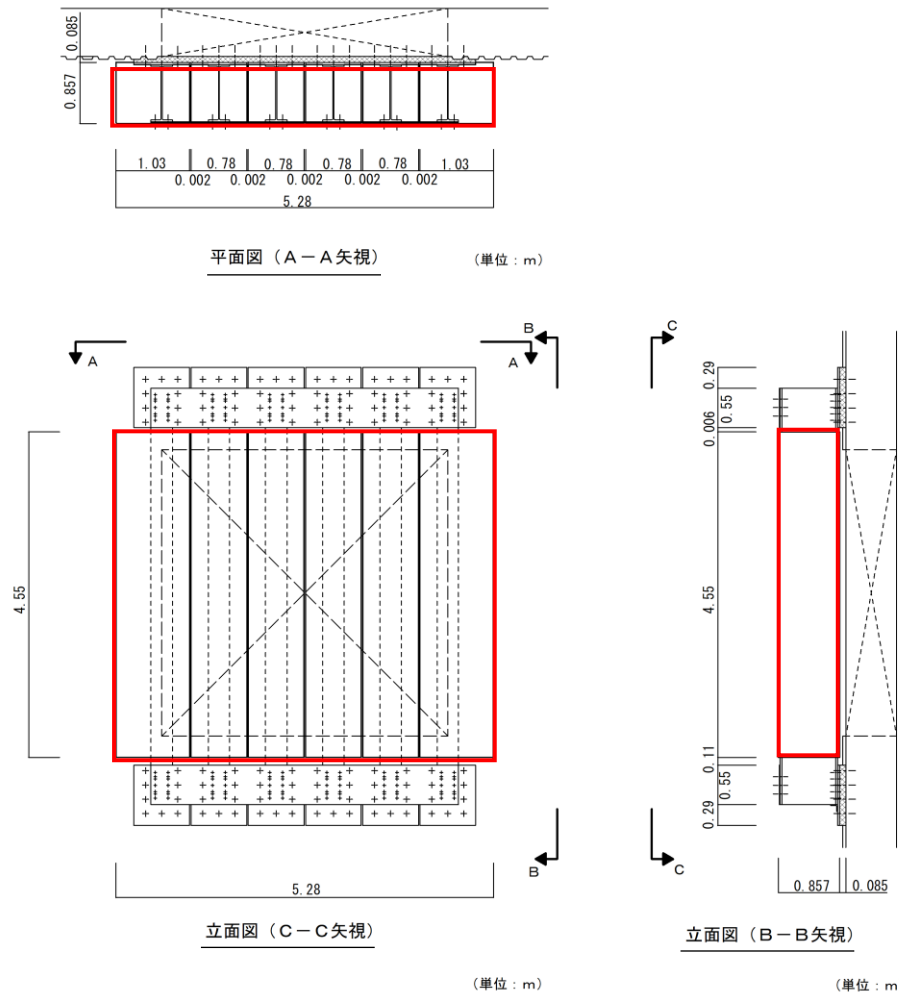


図 3-3 評価対象部位 (燃料移送ポンプエリア竜巻防護鋼板)



□ : 評価対象部位

図 3-4 評価対象部位 (建物開口部竜巻防護鋼板)

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「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」を踏まえて設定する。

(1) 衝突評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の設定

衝突評価に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)は、表 3-3 に示す設計飛来物の衝突に伴う荷重とする。

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)
鋼製材	4.2×0.3×0.2	135	51	34

b. 荷重の組合せ

貫通評価に用いる荷重の組合せは、VI-3-別添 1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」の「2.3 荷重と荷重の組合せ」のとおり、設計飛来物による衝撃荷重を考慮する。竜巻防護対策設備は外殻に面する部材に気圧差は生じないことから、気圧差による荷重は考慮しない。また、衝突評価においては、自重及び風圧力による荷重は有意ではないため、考慮しない。

評価において考慮する荷重の組合せを表 3-4 に示す。

表 3-4 荷重の組合せ

評価内容	荷重の組合せ
貫通評価	W_M

3.4 許容限界

竜巻防護鋼板の許容限界は、VI-3-別添 1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」の「5. 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえて、「3.2 評価対象部位」にて設定している部位における機能損傷モードを考慮して、設定する。

(1) 衝突評価の許容限界

衝突解析により求めた必要最小肉厚を許容限界として設定する。以下に、解析条件及び許容限界を示す。

a. 解析条件

(a) 解析モデル及び諸元

設計飛来物の衝突による竜巻防護鋼板の貫通は、設計飛来物の運動エネルギーを竜巻防護鋼板の変形によるひずみエネルギーにより吸収しきれない場合に生じると考え、必要最小肉厚を安全側に評価するために、被衝突物の寸法は、鋼製材の断面寸法(0.3m×0.2m)に0.1mの固定代を考慮して、0.5m×0.4mとする。

設計飛来物及び被衝突物の衝突解析モデルを図 3-5、境界条件を表 3-5 に示す。

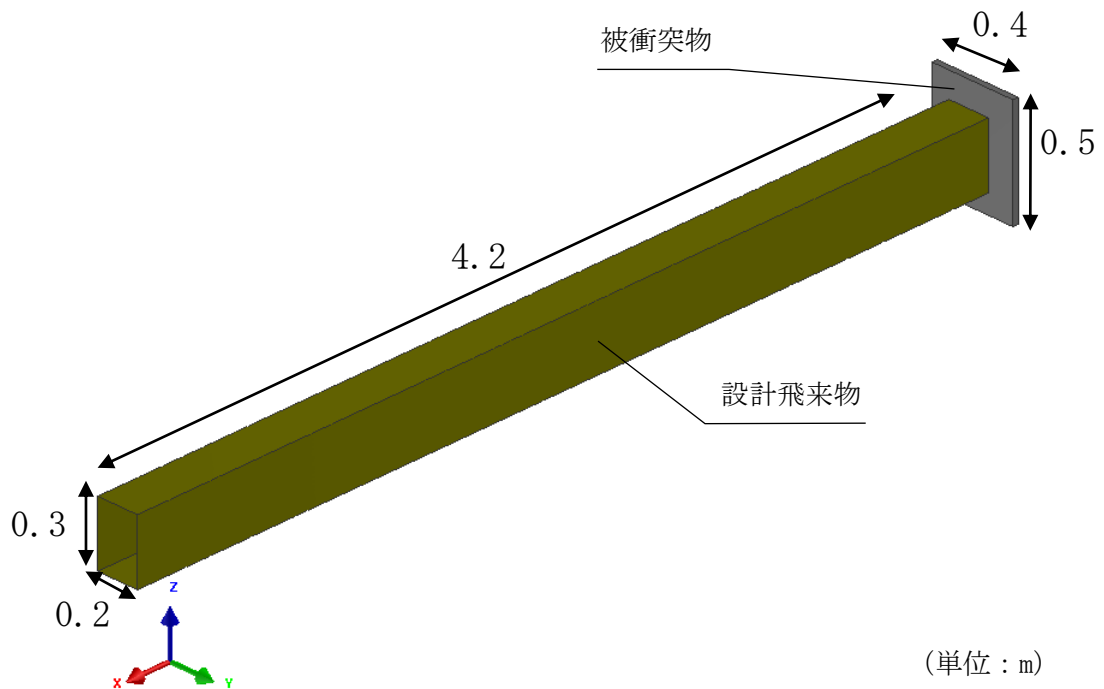


図 3-5 設計飛来物及び被衝突物の衝突解析モデル図

表 3-5 解析モデルの境界条件

項目	境界条件
設計飛来物	X, Y, Z 方向並進拘束
被衝突物	4 辺固定

イ. 解析コード

衝突解析には、解析コード「Virtual Performance Solution」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、VI-5-43「計算プログラム（解析コード）の概要・Virtual Performance Solution」に示す。

ロ. 材料仕様

構成する材料仕様については、「3.2 評価対象部位」に示すとおり設定する。

(b) 材料定数

使用材料の材料定数を「鋼構造設計基準—許容応力度設計法—」, J I S等に基づき設定し、表 3-6 に示す。

表 3-6 使用材料の材料定数

分類	材質	厚さ (mm)	降伏応力 σ_{Y0} (MPa)	縦弾性係数 E (MPa)	引張強さ σ_{T0} (MPa)	破断ひずみ ϵ' (-)	塑性硬化係数 E' (MPa)
竜巻 防護 鋼板	SS400			2.06×10^5	400		
				2.06×10^5	400		
				2.06×10^5	400		

(c) 材料モデル

イ. 材料の応力—ひずみの関係

材料モデルでは、竜巻防護鋼板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次係数E'）を表 3-6 に示す。材料に適用するバイリニア型の応力—ひずみの関係を図 3-6 に示す。

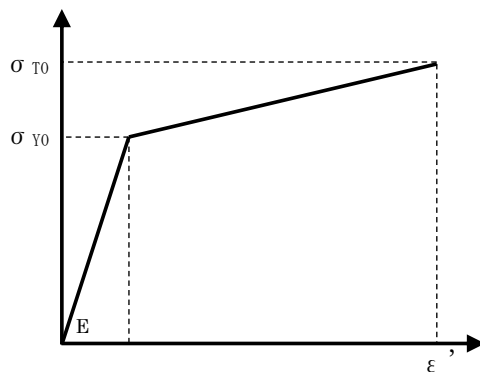


図 3-6 竜巻防護鋼板及び設計飛来物（鋼製材）の応力—ひずみ線図

ロ. ひずみ速度効果

衝突現象による鋼板の変形速度は速いため、ひずみ速度効果を考慮することとし、以下に示す日本溶接協会の推定式（以下、WES 式）から得られる動的増大効果を線形補間し設定する。

$$\sigma_Y = \sigma_{Y0}(T_0) \cdot \exp \left\{ 8 \times 10^{-4} \cdot T_0 \cdot \left(\frac{\sigma_{Y0}(T_0)}{E} \right)^{-1.5} \cdot \frac{1}{T \cdot \ln(10^8 / \dot{\epsilon})} - \frac{1}{T_0 \cdot \ln(10^8 / \dot{\epsilon}_0)} \right\}$$

$$\sigma_T = \sigma_{T0}(T_0) \cdot \exp \left\{ 8 \times 10^{-4} \cdot T_0 \cdot \left(\frac{\sigma_{T0}(T_0)}{E} \right)^{-1.5} \cdot \frac{1}{T \cdot \ln(10^9 / \dot{\epsilon})} - \frac{1}{T_0 \cdot \ln(10^9 / \dot{\epsilon}_0)} \right\}$$

ハ. 破断ひずみ

破断ひずみは、J I S 又はメーカー試験値に規定されている伸びの下限值を基に設定する。また、「NEI 07-13」において T F（多軸性係数）を 2.0 とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕として T F = 2.0 を考慮する。T F については、竜巻防護鋼板のみ 2.0 とする。

なお、安全側の評価として、竜巻防護鋼板の破断ひずみを超えた要素は削除することとし、鋼製材の破断ひずみを超えた要素は削除せず、荷重を伝達するものとする。

b. 許容限界

「3.4(1)a. 解析条件」を基に解析により求めた必要最小肉厚を表 3-7 に示す。

表 3-7 許容限界（貫通評価）

評価対象	材質	衝突方向	必要最小肉厚 (mm)
取水槽海水ポンプエリア竜巻防護鋼板	SS400	水平	16
取水槽循環水ポンプエリア竜巻防護鋼板	SS400	鉛直	16
燃料移送ポンプエリア竜巻防護鋼板			
燃料移送ポンプエリア竜巻防護鋼板（穴あき）			
建物開口部竜巻防護鋼板	SS400	水平	16

3.5 評価方法

(1) 衝突評価の評価方法

竜巻防護鋼板の厚さが「3.4 許容限界」で定めた必要最小肉厚を上回っていることを確認する。

4. 評価条件

(1) 衝突評価

評価条件については、「3. 強度評価方法」に示すとおり設定する。

5. 強度評価結果

(1) 衝突評価

衝突評価結果を表 5-1 に示す。竜巻防護鋼板の厚さは必要最小肉厚を上回っており設計飛来物は竜巻防護鋼板を貫通しない。

表 5-1 評価結果

評価箇所	材質	衝突方向	必要最小肉厚 (mm)	厚さ (mm)	結果
取水槽海水ポンプエリア 竜巻防護鋼板	SS400	水平	16		貫通しない
取水槽循環水ポンプエリア 竜巻防護鋼板	SS400	鉛直	16		貫通しない
燃料移送ポンプエリア 竜巻防護鋼板					貫通しない
燃料移送ポンプエリア 竜巻防護鋼板 (穴あき)					貫通しない
建物開口部竜巻防護鋼板	SS400	水平	16		貫通しない

VI-3-別添 1-6 架構の強度計算書

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	10
2.4 適用規格・基準等	12
3. 強度評価方法	13
3.1 記号の定義	13
3.2 評価対象部位	14
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	21
4. 評価条件	23
5. 強度評価結果	25
5.1 構造強度評価	25

1. 概要

本資料は、VI-3-別添 1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」に示すとおり、竜巻防護対策設備のうち竜巻防護ネット及び竜巻防護鋼板を支持する架構が、竜巻時及び竜巻通過後においても構造健全性を保持し、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維持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「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」,「3.3 架構の構造設計」及び「5. 許容限界」を踏まえて,竜巻防護対策設備架構の「2.1 位置」,「2.2 構造概要」,「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格・基準等」を示す。

2.1 位置

竜巻防護対策設備架構は,取水槽(取水槽海水ポンプエリア,取水槽循環水ポンプエリア),燃料移送ポンプエリア及び建物開口部に設置する。架構の位置図を図2-1に示す。

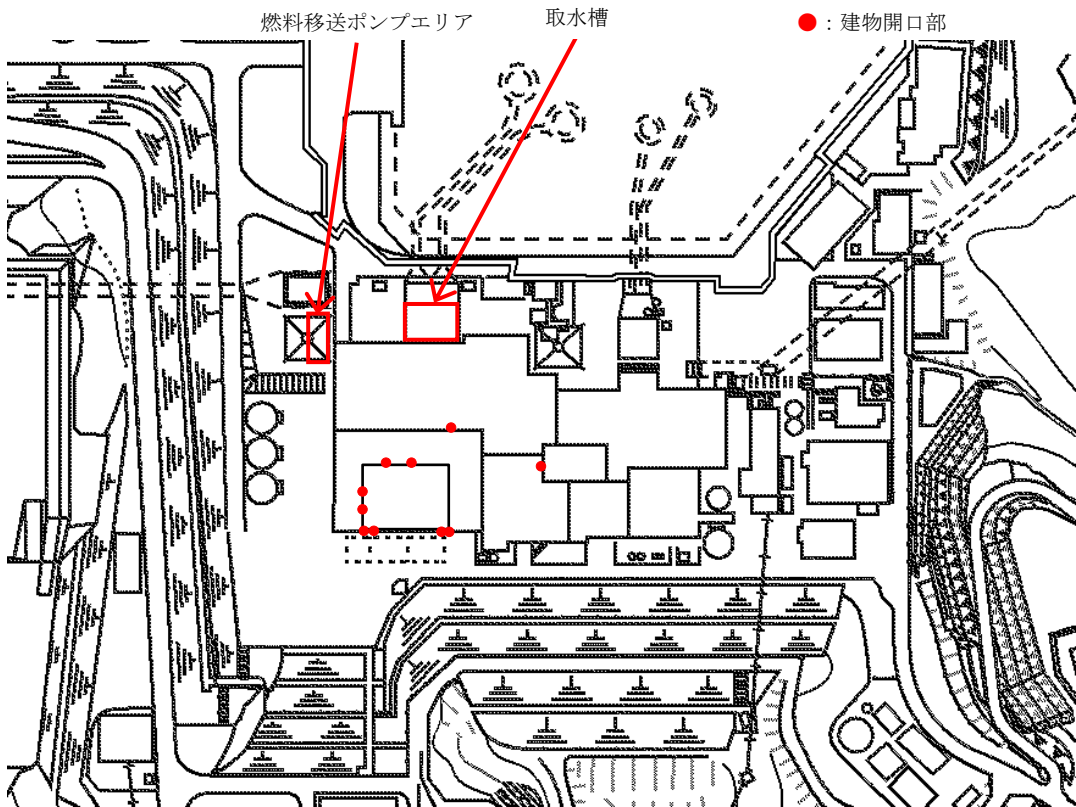


図2-1 架構の位置図

2.2 構造概要

VI-3-別添 1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」の「3.3 架構の構造設計」に示す構造計画を踏まえて、竜巻防護対策設備架構の構造を設定する。

(1) 取水槽海水ポンプエリア架構

取水槽海水ポンプエリア架構は、竜巻防護ネット及び竜巻防護鋼板を設置するための鉄骨構造であり、柱、はり等により構成される。取水槽海水ポンプエリア竜巻防護対策設備の平面図を図 2-2、断面図を図 2-3 に示す。

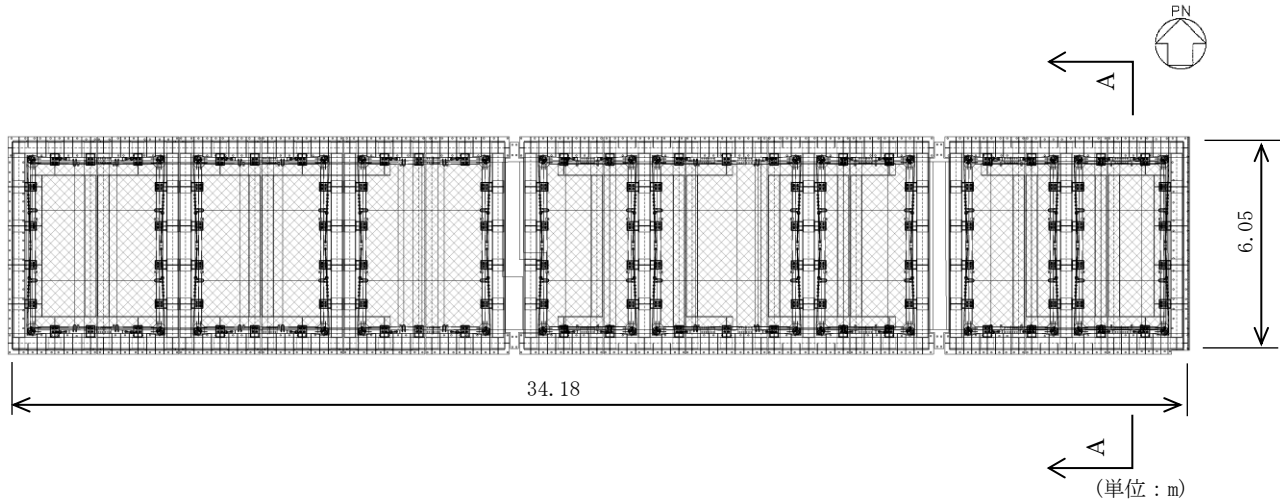
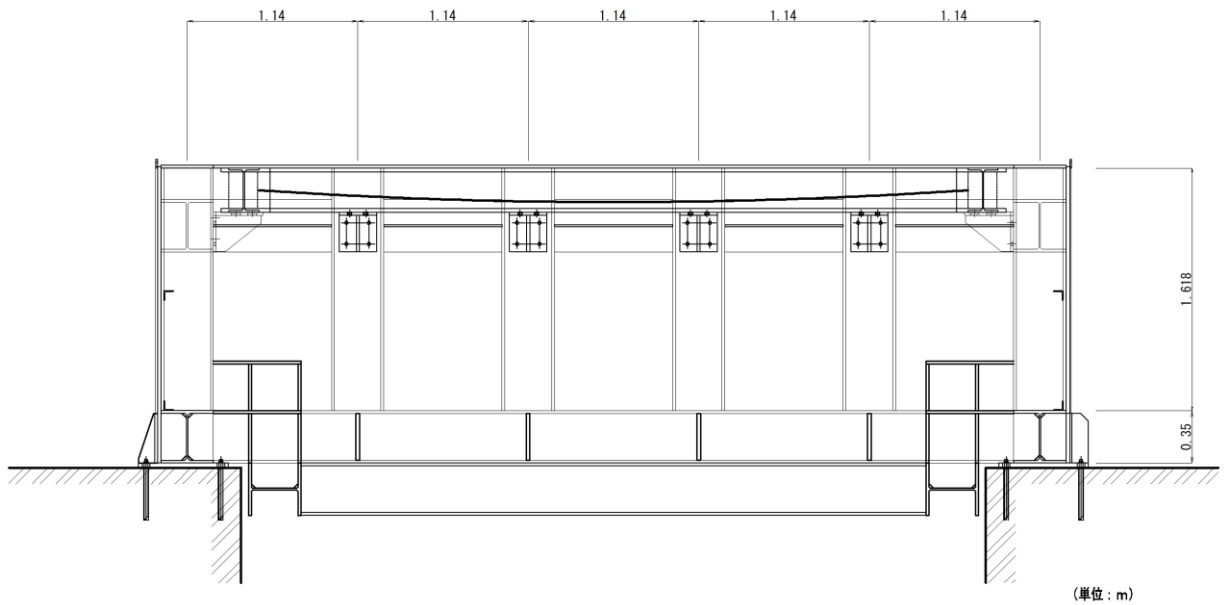


図 2-2 取水槽海水ポンプエリア竜巻防護対策設備の平面図



A-A断面図

図 2-3 取水槽海水ポンプエリア竜巻防護対策設備の断面図

(2) 取水槽循環水ポンプエリア架構

取水槽循環水ポンプエリア架構は、竜巻防護鋼板を設置するための鉄骨構造であり、柱、はり等により構成される。取水槽循環水ポンプエリア竜巻防護対策設備の平面図を図 2-4、断面図を図 2-5 に示す。

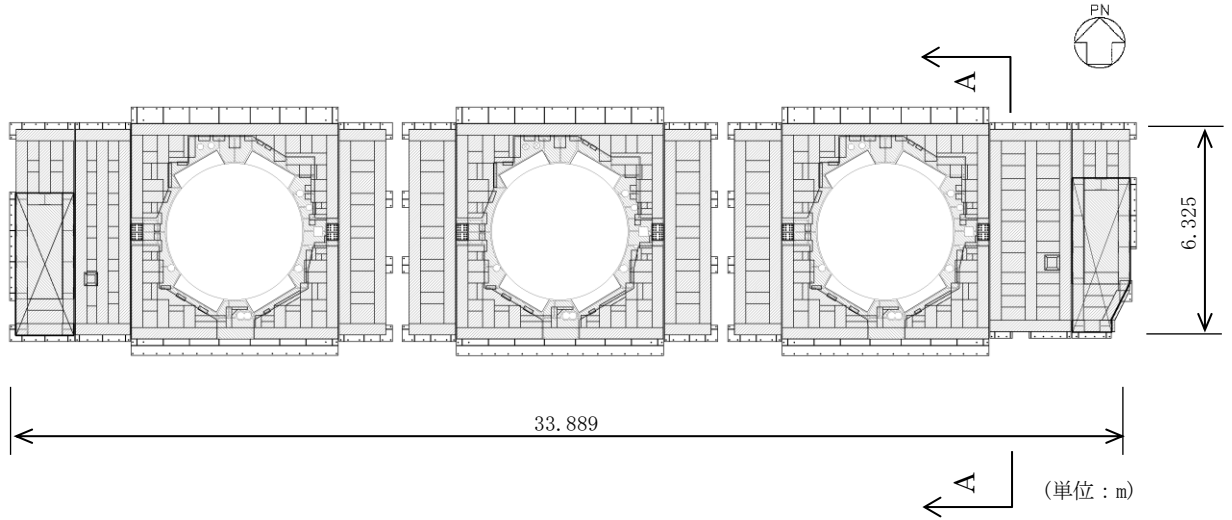


図 2-4 取水槽循環水ポンプエリア竜巻防護対策設備の平面図

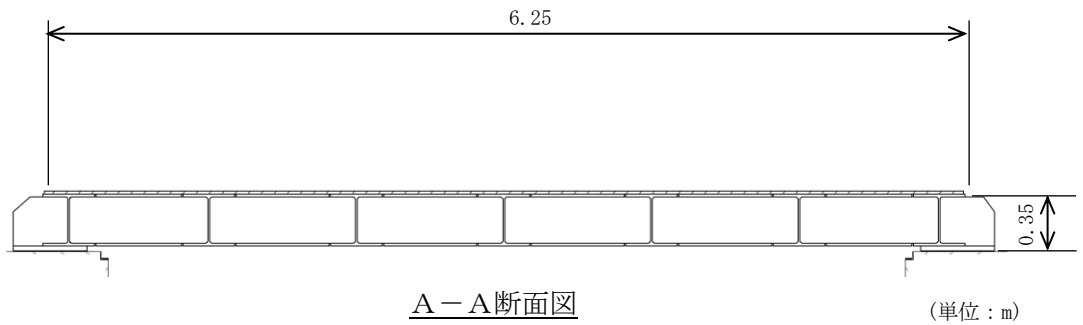


図 2-5 取水槽循環水ポンプエリア竜巻防護対策設備の断面図

(3) 燃料移送ポンプエリア架構

燃料移送ポンプエリア架構は、竜巻防護鋼板を設置するための鉄骨構造であり、柱、はり等により構成される。燃料移送ポンプエリア竜巻防護対策設備の平面図を図 2-6、断面図を図 2-7 に示す。

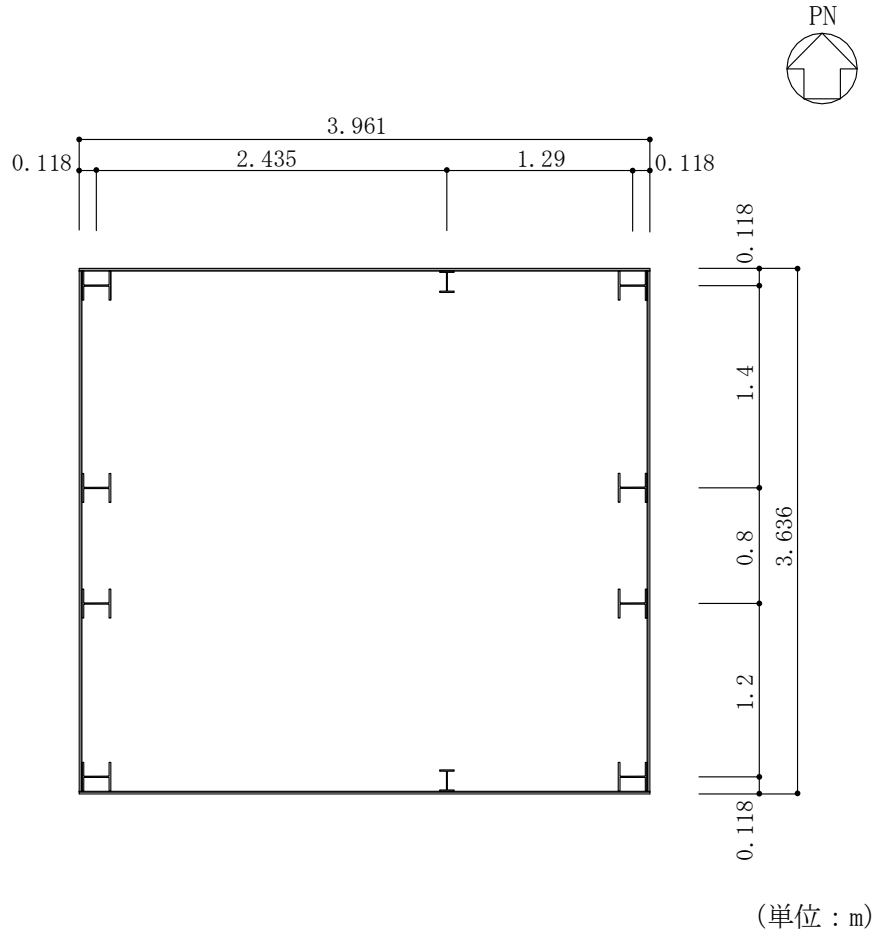
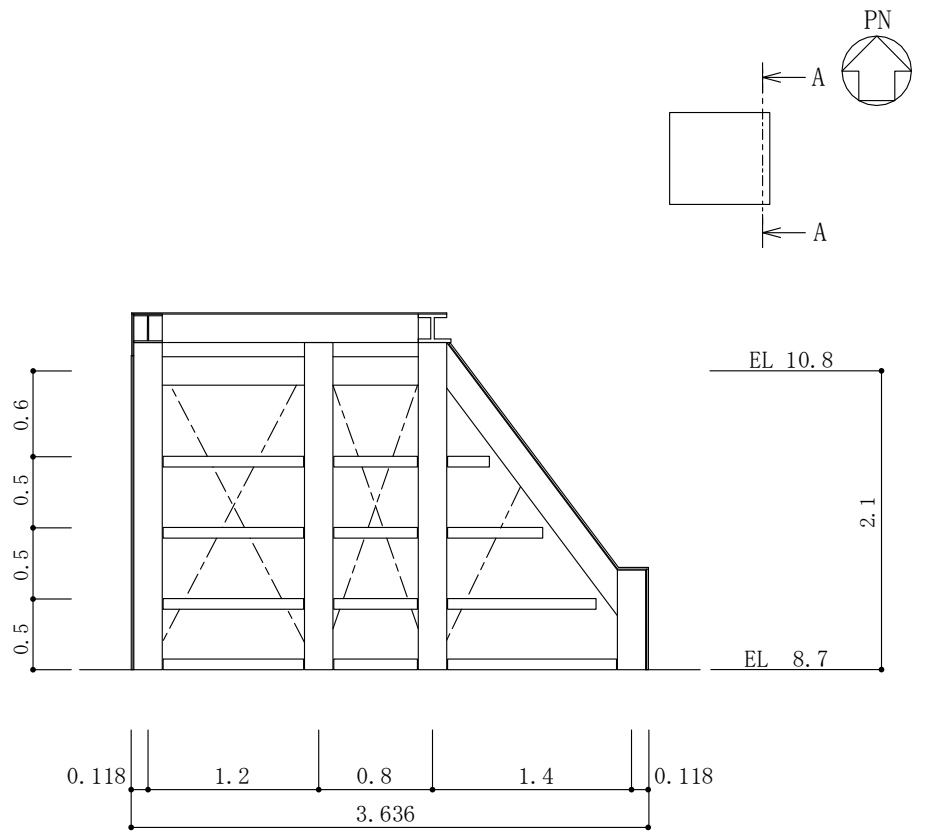
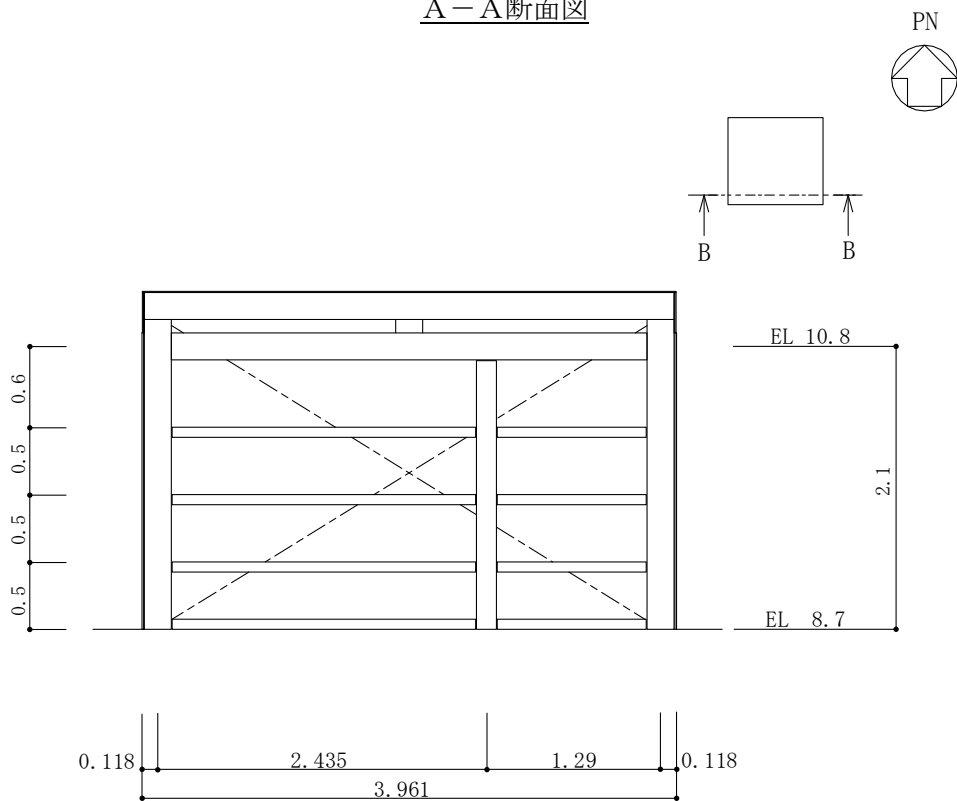


図 2-6 燃料移送ポンプエリア竜巻防護対策設備の平面図



A-A断面図

(単位：m)



B-B断面図

(単位：m)

図 2-7 燃料移送ポンプエリア竜巻防護対策設備の断面図

(4) 建物開口部架構

建物開口部架構は、鉄筋コンクリート造の原子炉建物又は廃棄物処理建物に竜巻防護ネット又は竜巻防護鋼板を設置するための鉄骨構造であり、柱、はり等により構成される。建物開口部竜巻防護対策設備の概要図を図2-8～図2-10に示す。

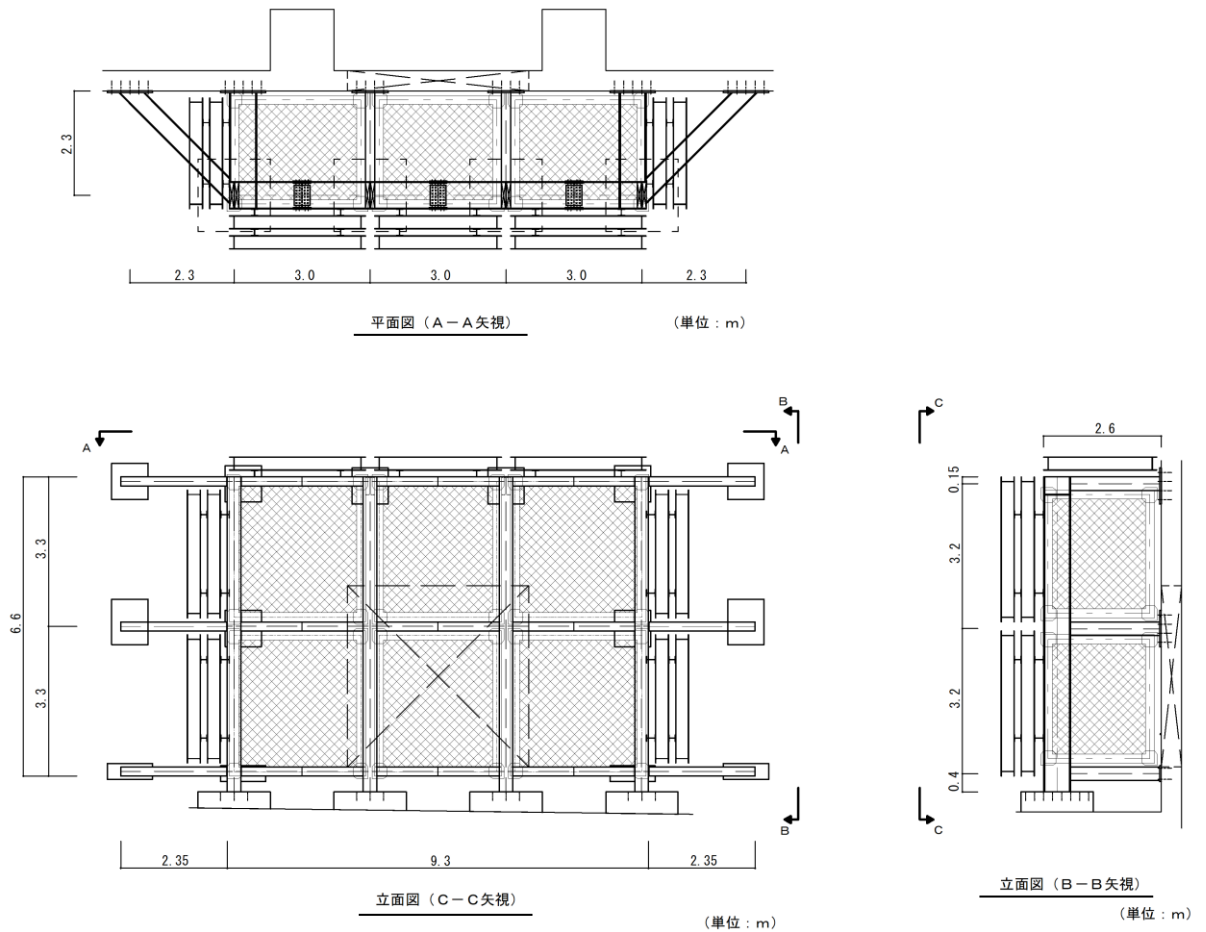
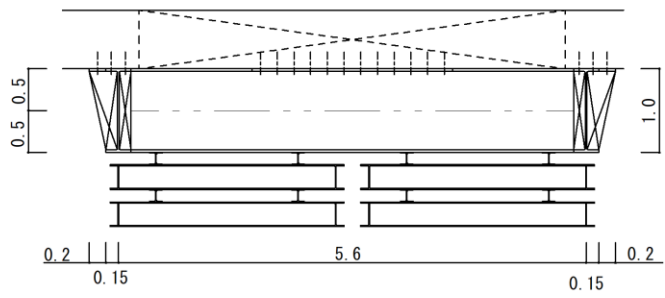
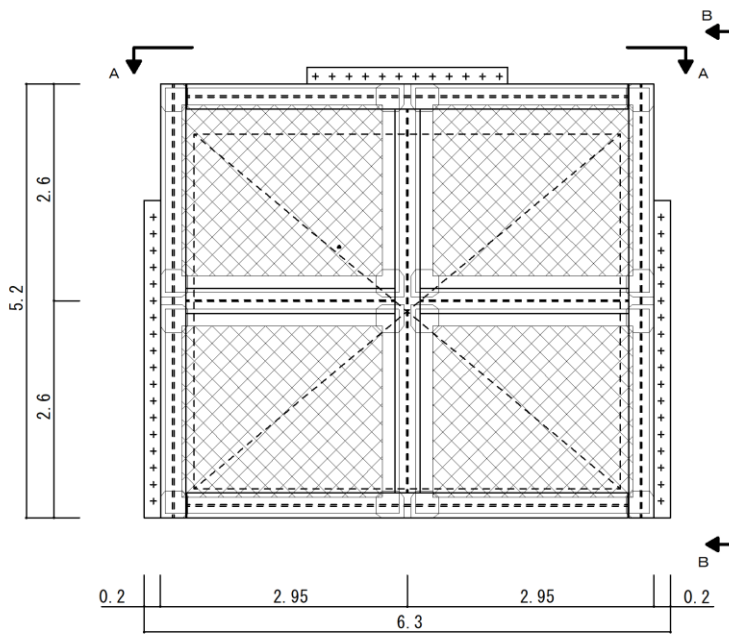


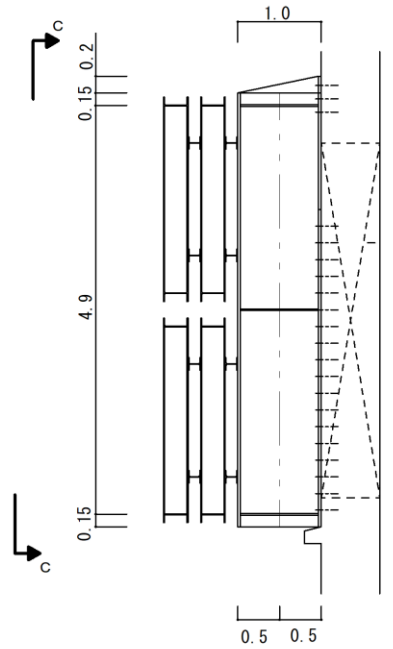
図2-8 建物開口部竜巻防護対策設備の概要図



平面図 (A-A 矢視) (単位: m)



立面図 (C-C 矢視) (単位: m)



立面図 (B-B 矢視) (単位: m)

図 2-9 建物開口部竜巻防護対策設備の概要図

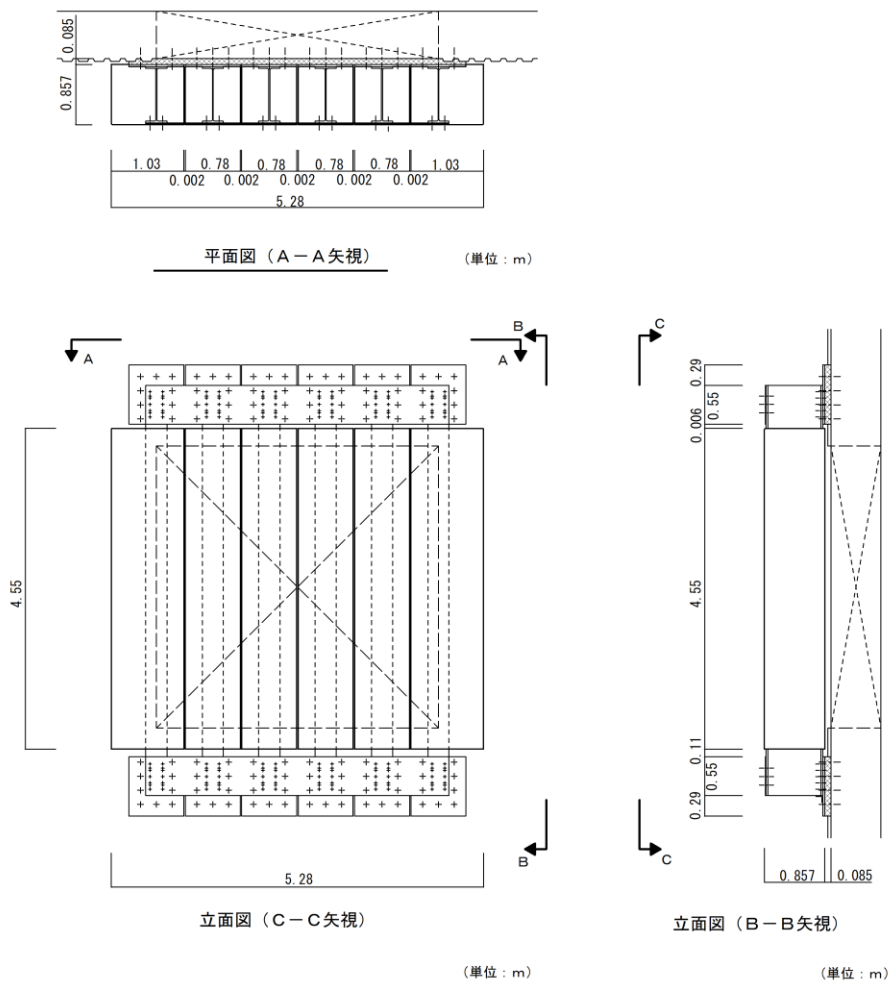


図 2-10 建物開口部竜巻防護対策設備の概要図

2.3 評価方針

竜巻防護対策設備架構の強度評価は、VI-3-別添 1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」及び「5. 許容限界」を踏まえて、架構の評価対象部位に生じ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」に示す条件を用いて計算し、その結果を「5. 強度評価結果」に示す。

評価対象部位は、その構造を踏まえて、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、選定する。

(1) 構造強度評価の方針

架構の構造強度評価の方針を以下に、構造強度評価フローを図 2-11 に示す。

- ・設計荷重に対して、架構を構成する部材に転倒及び脱落を生じない設計とするために、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。）
- ・架構の外側には竜巻防護ネット又は竜巻防護鋼板が設置されており、設計飛来物が直接衝突することはないことから、設計飛来物による架構の貫通は考慮しない。

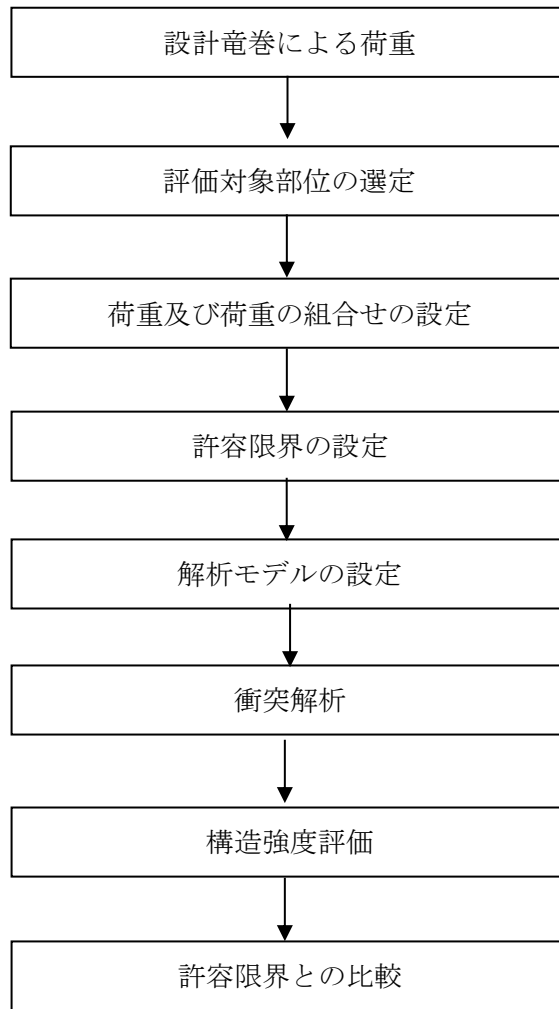


図 2-11 架構の衝突評価フロー

2.4 適用規格・基準等

適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・「鋼構造設計基準－許容応力度設計法－」((社) 日本建築学会 (2005))
- ・建築基準法及び同施行令
- ・「建築物荷重指針・同解説」((社) 日本建築学会 (2004))
- ・「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」原子力規制委員会制定
- ・Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8(NEI 07-13))
- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 J S M E S N C 1-2005/2007」((社) 日本機械学会)
- ・日本産業規格(J I S) (以下「J I S」という。)
- ・動的繰返し変形をうける溶接鋼構造物の脆性破壊性能評価法 (WES2808 : 2003) ((社) 日本溶接協会)

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 変形評価の記号の定義

変形評価に用いる記号を表 3-1 に示す。

表 3-1 変形評価に用いる記号

記号	単位	定義
A	m ²	受圧面積
C	—	風力係数
E	MPa	縦弾性係数
E'	MPa	塑性硬化係数
F _d	N	常時作用する荷重
G	—	ガスト影響係数
ΔP	N/m ²	最大気圧低下量
q	N/m ²	設計用速度圧
T	°C	想定するひずみ速度時の温度
T ₀	°C	基準ひずみ速度時の温度
V _D	m/s	設計竜巻の最大風速
V _{Rm}	m/s	最大接線風速
V _T	m/s	移動速度
W _M	N	設計飛来物による衝撃荷重
W _w	N	風圧力による荷重
ρ	kg/m ³	空気密度
$\dot{\varepsilon}$	—	想定するひずみ速度
ε'	—	破断ひずみ
$\dot{\varepsilon}_0$	—	基準ひずみ速度
σ _T	MPa	想定するひずみ速度時の引張強さ
σ _{T0}	MPa	基準ひずみ速度時の引張強さ
σ _Y	MPa	想定するひずみ速度時の降伏応力
σ _{Y0}	MPa	基準ひずみ速度時の降伏応力

3.2 評価対象部位

竜巻防護対策設備架構の評価対象部位は、VI-3-別添 1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」の「5.3 架構の許容限界」に示す評価対象部位を踏まえ、選定する。

(1) 変形評価の評価対象部位

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いほどたわみ量が大きくなる傾向にある。このため、竜巻防護ネット又は竜巻防護鋼板を支持する架構部材の支持間隔が最長となる箇所を選定する。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。

・取水槽海水ポンプエリア架構

竜巻防護ネット及び竜巻防護鋼板を架構により支持する構造であり、設計飛来物の衝突位置は、部材に生じる曲げモーメントが最大となる鋼板を支持する架構の中央を選定する。取水槽海水ポンプエリア架構の評価対象部位を図 3-1 に示す。

・取水槽循環水ポンプエリア架構

竜巻防護鋼板を架構により支持する構造であり、設計飛来物の衝突位置は、部材に生じる曲げモーメントが最大となる架構部材の中央を選定する。取水槽循環水ポンプエリア架構の評価対象部位を図 3-2 に示す。

・燃料移送ポンプエリア架構

竜巻防護鋼板を架構により支持する構造であり、設計飛来物の衝突位置は、部材に生じる曲げモーメントが最大となる架構部材の中央を選定する。燃料移送ポンプエリア架構の評価対象部位を図 3-3 に示す。

・建物開口部架構

竜巻防護ネット又は竜巻防護鋼板を建物外壁に接した架構により支持する構造である。竜巻防護ネット又は竜巻防護鋼板に作用する設計飛来物による衝撃荷重は、架構を介して建物外壁に伝達され（図 3-4 参照）、架構に有意な変形は生じないため、建物開口部架構は変形評価の対象としない。

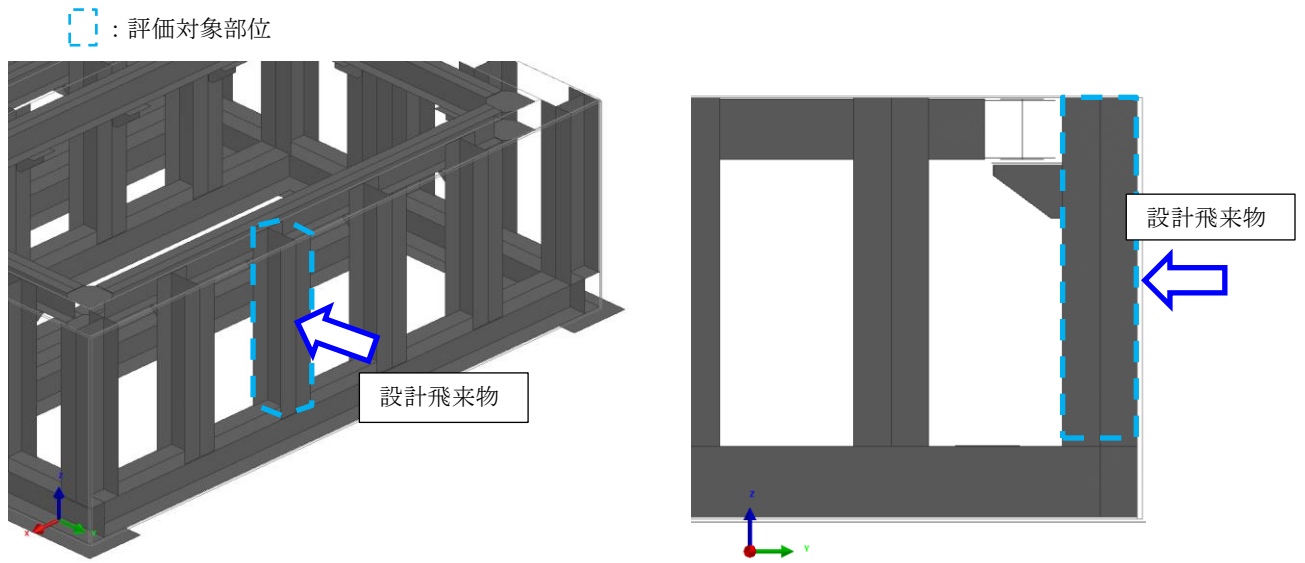


図 3-1 変形評価の評価対象部位（取水槽海水ポンプエリア竜巻防護対策設備）

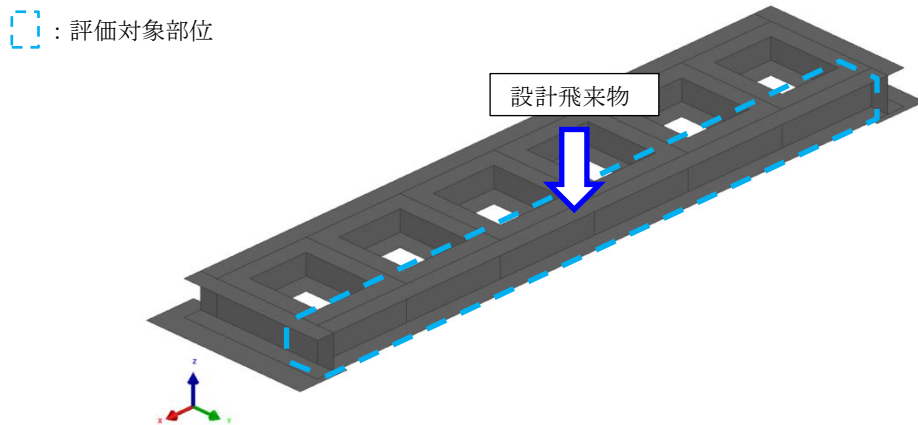


図 3-2 変形評価の評価対象部位（取水槽循環水ポンプエリア竜巻防護対策設備）

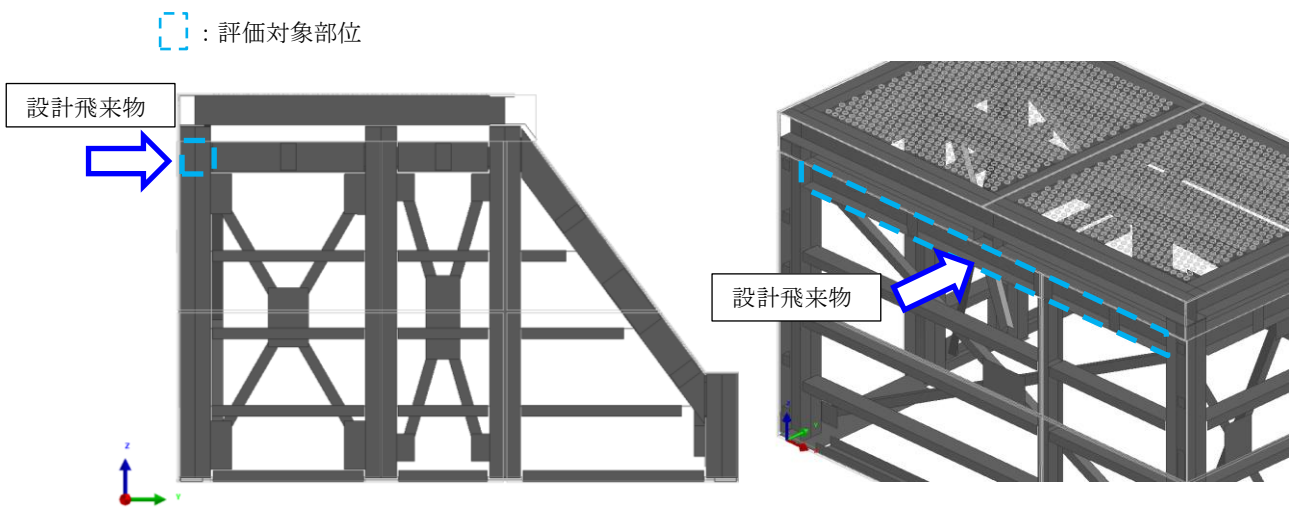


図 3-3 変形評価の評価対象部位（燃料移送ポンプエリア竜巻防護対策設備）

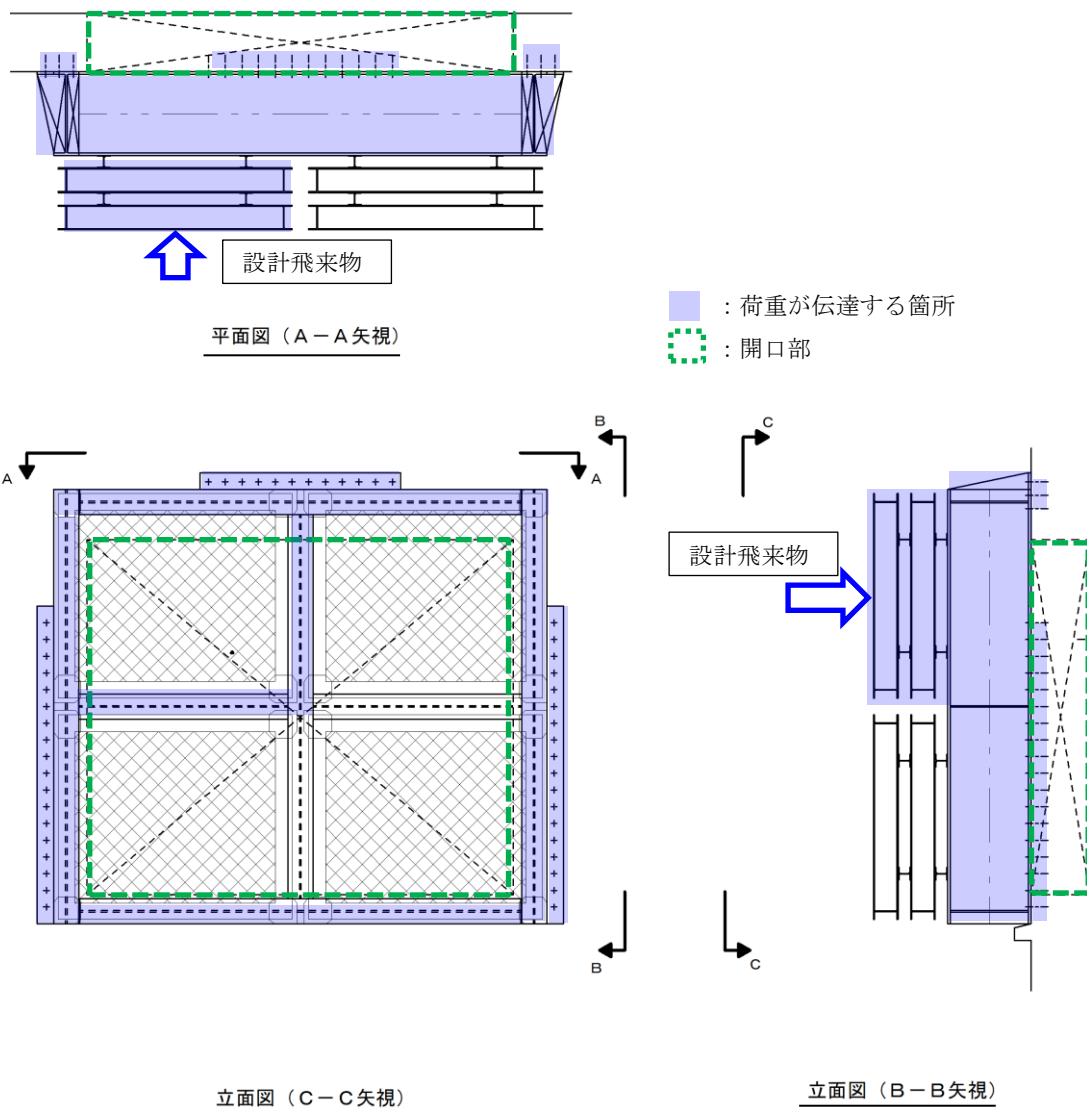


図 3-4 建物開口部竜巻防護対策設備における設計飛来物による衝撃荷重の伝達箇所

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「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」を踏まえて設定する。

(1) 構造強度評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の設定

衝突評価には以下の荷重を用いる。荷重の算定に用いる竜巻の特性値を表 3-2 に示す。

表 3-2 荷重算定に用いる竜巻の特性値

V_D (m/s)	V_T (m/s)	V_{Rm} (m/s)	ΔP (N/m ²)
92	14	78	7500

(a) 竜巻による荷重

イ. 風圧力による荷重 (W_w)

風圧力による荷重 (W_w) は、次式により算定する。

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

設計用速度圧 q は、次式により算定する。

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

ロ. 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。

表 3-3 設計飛来物の諸元

設計飛来物	サイズ 長さ×幅×奥行き (m)	水平方向の 飛来速度 (m/s)	鉛直方向の 飛来速度 (m/s)	質量 (kg)
鋼製材	4.2×0.3×0.2	51	34	135

表 3-4 設計飛来物の材料定数

設計飛来物	σ_{Y0} (MPa)	E (MPa)	ポアソン比
鋼製材	245	2.06×10^5	0.3

(b) 常時作用する荷重 (F_d)

常時作用する荷重 (F_d) としては、架構部材の自重、架構に取り付く竜巻防護ネット及び竜巻防護鋼板の上載荷重を考慮する。

b. 荷重の組合せ

衝突評価に用いる荷重の組合せは、VI-3-別添 1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」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。

衝突評価において考慮する荷重の組合せを表 3-5 に示す。

表 3-5 荷重の組合せ

評価内容	荷重の組合せ
支持機能評価	$W_w + W_M + F_d$
波及的影響評価	

3.4 許容限界

竜巻防護対策設備架構の許容限界は、VI-3-別添1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」の「5. 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえて、「3.2 評価対象部位」にて設定している部位における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

構造強度評価にて選定する架構の材料及び寸法の仕様を表3-6に示す。

表3-6 評価対象部位の材料仕様

設置エリア	仕様	材質
取水槽海水ポンプエリア		SS400
取水槽循環水ポンプエリア		SS400
燃料移送ポンプエリア		SS400

(2) 評価対象部位の材料定数

使用材料の材料定数を表3-7に示す。材料定数は、JIS及び「鋼構造設計基準—許容応力度設計法—」に基づき設定する。

表3-7 評価対象部位の材料定数

材質	厚さ (mm)	σ_{Y0} (MPa)	E (MPa)	σ_{T0} (MPa)	ε' (—)	E' (MPa)
SS400			2.06×10^5	400		
			2.06×10^5	400		
			2.06×10^5	400		

(3) 構造強度評価の許容限界

設計飛来物が架構及び竜巻防護鋼板に衝突する場合は、衝突部において貫通が防止できても、架構部材端部が曲げ等により破断し架構の支持機能が保持されないことが考えられることから、架構部材端部及びその近傍の曲げによる破断が生じないことを確認する。

許容限界としては、材料の破断ひずみを設定する。破断ひずみについては、「4.(3)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、「NEI 07-13 : Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs」(以下「NEI 07-13」という。)においてT F (多軸性係数)を2.0とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕として2軸引張状態でT F =2.0を考慮して設定する。

最大ひずみが破断ひずみを超える場合には、破断ひずみを超える範囲が全断面に発生しないことを確認する。

設定した許容限界を表3-8に示す。

表3-8 許容限界 (支持機能評価及び波及的影響評価)

材質	J I S規格値	破断ひずみ (T F =2.0 のとき)
SS400		
SS400		
SS400		

3.5 評価方法

(1) 構造強度評価

竜巻防護対策設備架構の強度評価は、架構又は竜巻防護鋼板に設計飛来物が衝突した場合の支持機能評価及び波及的影響評価においては、解析コード「Virtual Performance Solution」を用いて3次元FEMによりモデル化し評価を実施する。

取水槽海水ポンプエリア竜巻防護対策設備、取水槽循環水ポンプエリア竜巻防護対策設備及び燃料移送ポンプエリア竜巻防護対策設備の衝突解析モデル並びに設計飛来物の解析モデルを図3-5～図3-8に示す。これらの解析モデルを用いて、設計飛来物が架構に衝突する場合に、架構端部に発生するひずみ量を算出し、架構部材端部に破断が生じないことを確認する。

最大ひずみが破断ひずみを超える場合には、破断箇所を確認し全断面に発生しないことを確認する。

なお、評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5-43「計算プログラム（解析コード）の概要・Virtual Performance Solution」に示す。

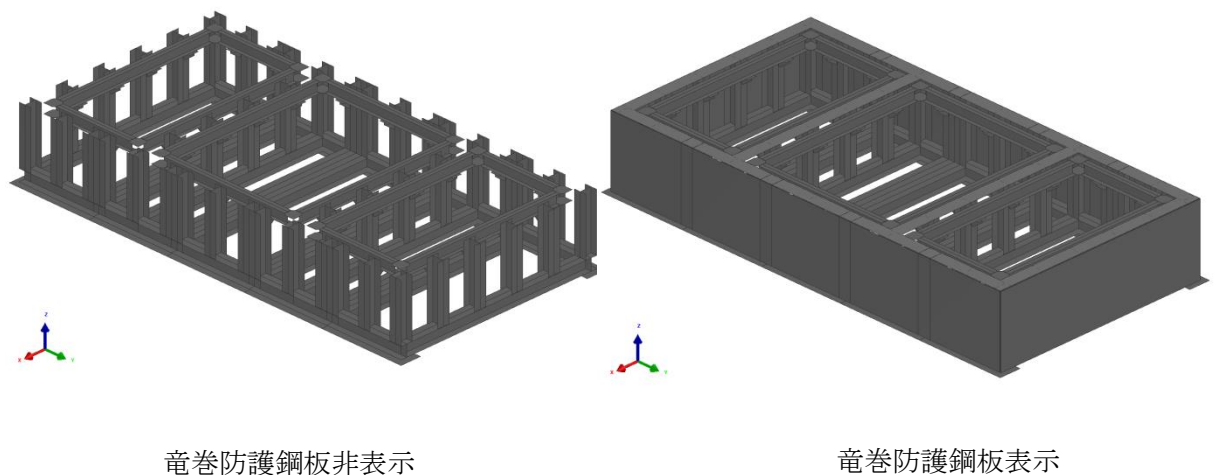


図3-5 取水槽海水ポンプエリア竜巻防護対策設備の衝突解析モデル

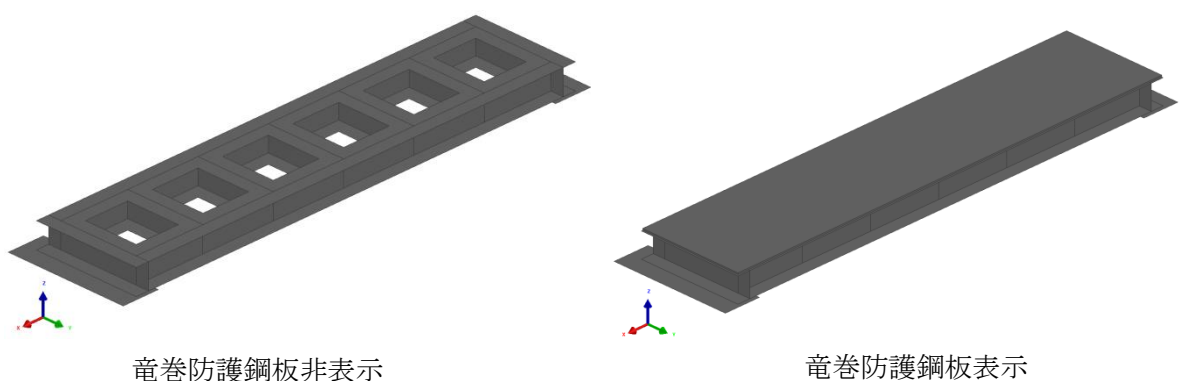


図3-6 取水槽循環水ポンプエリア竜巻防護対策設備の衝突解析モデル

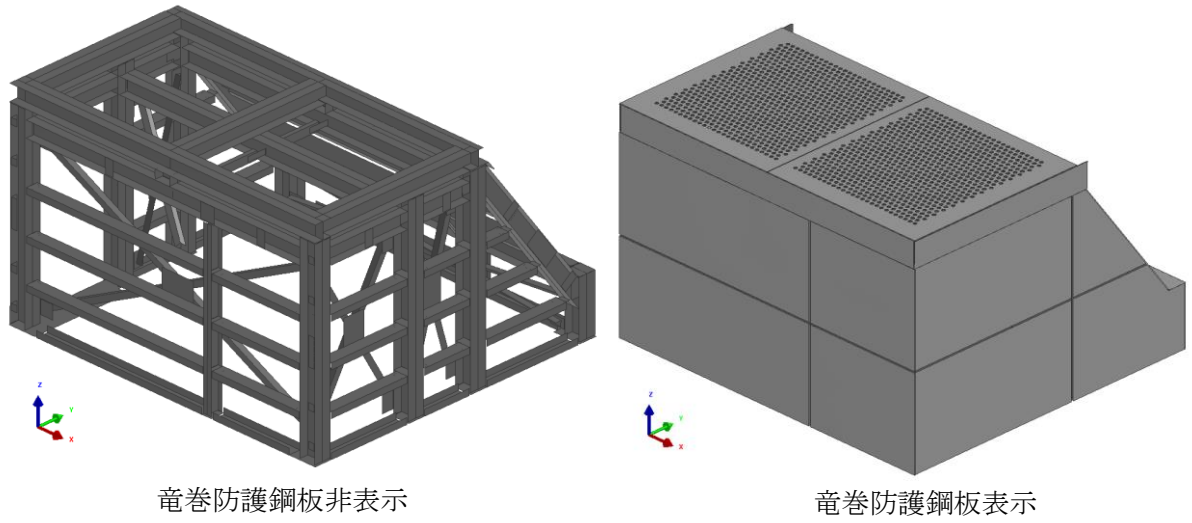


図 3-7 燃料移送ポンプエリア竜巻防護対策設備の衝突解析モデル

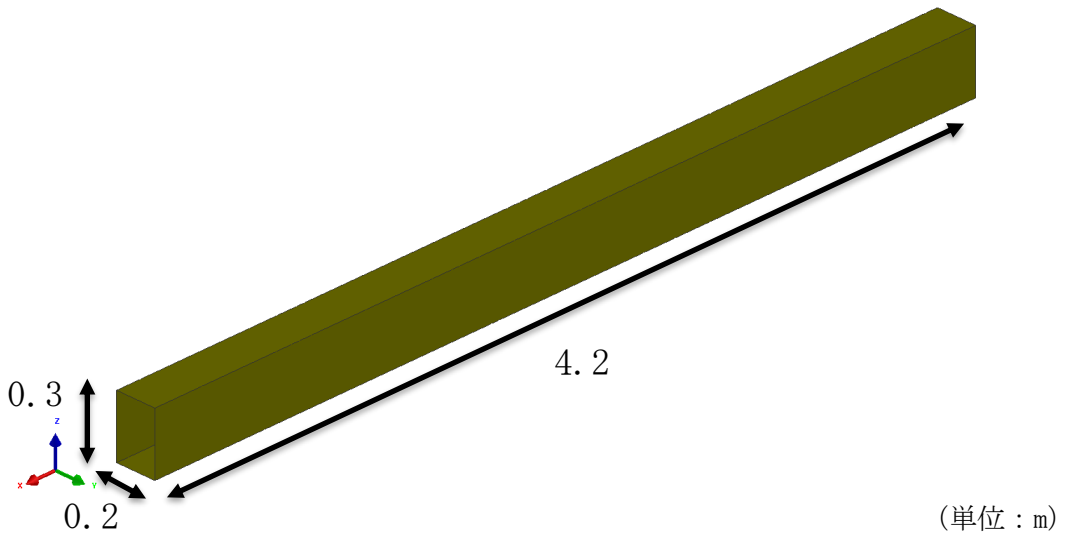


図 3-8 設計飛来物（鋼製材）の解析モデル

4. 評価条件

(1) 使用材料及び寸法

支持機能評価及び波及的影響評価にて選定する架構の材料及び寸法の仕様については、「3.4(1) 評価対象部位の材料仕様」に示すとおり設定する。

(2) 材料定数

架構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。

(3) 材料の非線形特性

a. 材料の応力－ひずみの関係

材料モデルでは、架構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次係数E'）は、表3-7に示す値とする。材料に適用するバイリニア型の応力－ひずみの関係を図4-1に示す。

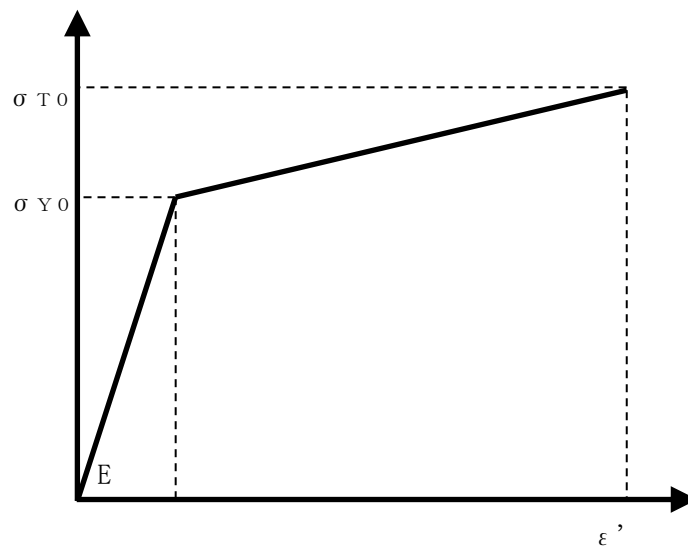


図4-1 架構及び設計飛来物（鋼製材）の応力－ひずみ線図

b. ひずみ速度効果

竜巻による飛来物に対する解析は、衝撃問題で変形速度が大きいいため、ひずみ速度効果を考慮することとし、以下に示す日本溶接協会の推定式（以下、WES式）から得られる動的増大効果を線形補間し設定する。

$$\sigma_Y = \sigma_{Y0}(T_0) \cdot \exp \left\{ 8 \times 10^{-4} \cdot T_0 \cdot \left(\frac{\sigma_{Y0}(T_0)}{E} \right)^{-1.5} \cdot \frac{1}{T \cdot \ln(10^8 / \dot{\epsilon})} - \frac{1}{T_0 \cdot \ln(10^8 / \dot{\epsilon}_0)} \right\}$$

$$\sigma_T = \sigma_{T0}(T_0) \cdot \exp \left\{ 8 \times 10^{-4} \cdot T_0 \cdot \left(\frac{\sigma_{T0}(T_0)}{E} \right)^{-1.5} \cdot \frac{1}{T \cdot \ln(10^9 / \dot{\epsilon})} - \frac{1}{T_0 \cdot \ln(10^9 / \dot{\epsilon}_0)} \right\}$$

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、「NEI 07-13」においてT F（多軸性係数）を2.0とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕として2軸引張状態でT F=2.0を考慮する。T Fについては、架構のみ2.0とする。

なお、安全側の評価として、架構の破断ひずみを超えた要素は削除することとし、鋼製材の破断ひずみを超えた要素は削除せず、荷重を伝達するものとする。

材料ごとの破断ひずみを表4-1に示す。

表4-1 架構の破断ひずみ

種別	材質	J I S規格値	T F	破断ひずみ
架構	SS400		2.0	
	SS400		2.0	
	SS400		2.0	

5. 強度評価結果

5.1 構造強度評価

(1) 取水槽海水ポンプエリア架構

設計飛来物の架構への衝突時の構造強度評価結果を表 5-1、図 5-1 及び図 5-2 に示す。架構を構成する部材の最大ひずみは、破断ひずみを超えず、架構を構成する部材に転倒及び脱落は生じない。

表 5-1 構造強度評価結果

評価対象	最大ひずみ	破断ひずみ
取水槽海水ポンプエリア架構		

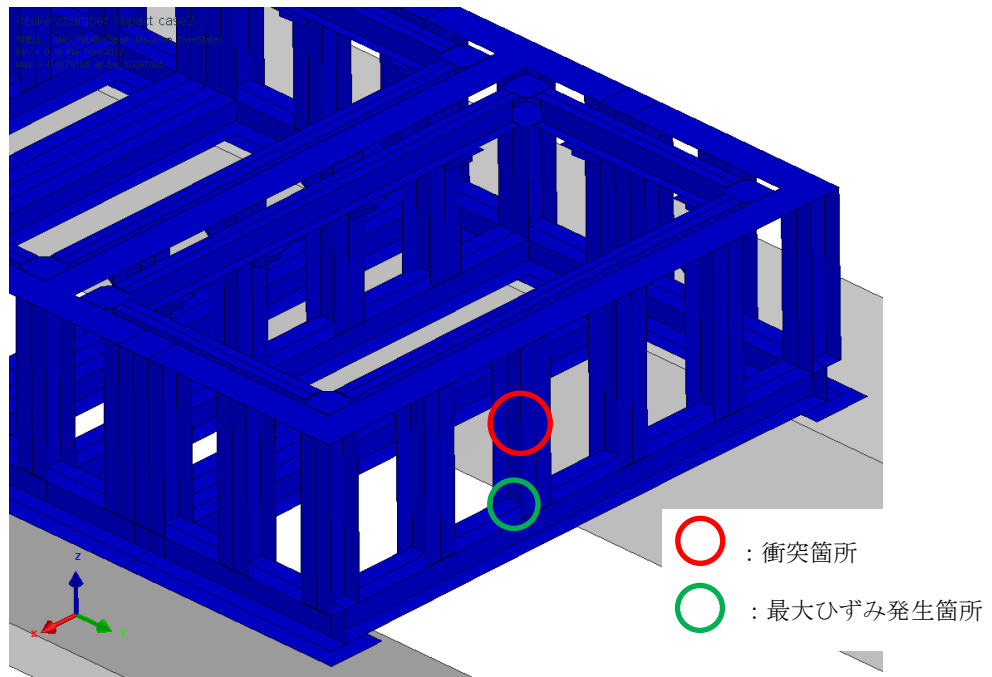


図 5-1 ひずみ分布図（部材変位最大時）

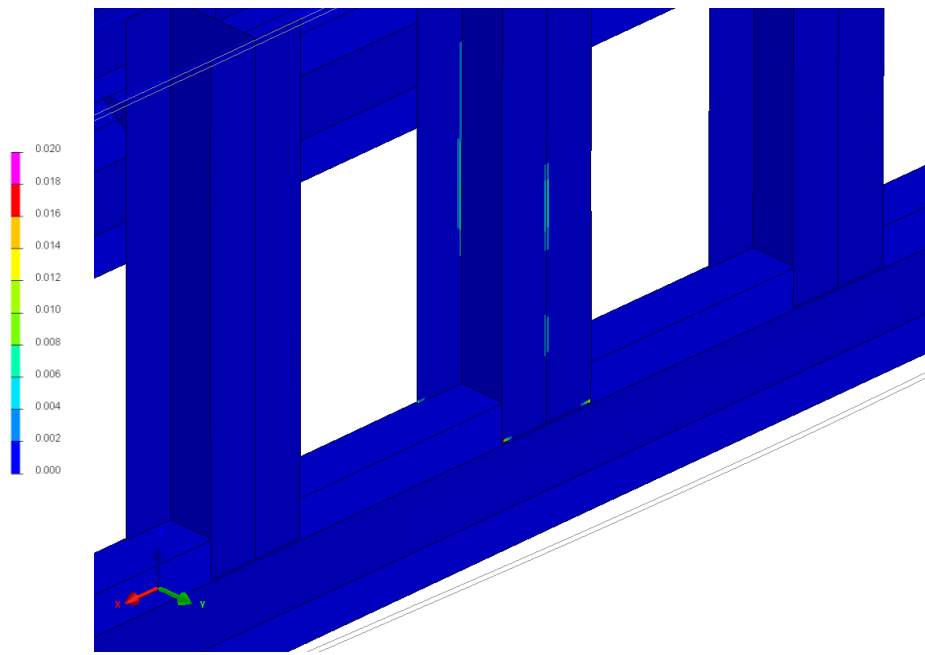


図 5-2 ひずみ分布図 (最大ひずみ発生箇所拡大図)

(2) 取水槽循環水ポンプエリア架構

設計飛来物の架構への衝突時の構造強度評価結果を表 5-2、図 5-3 及び図 5-4 に示す。架構を構成する部材の最大ひずみは、破断ひずみを超えず、架構を構成する部材に転倒及び脱落は生じない。

表 5-2 構造強度評価結果

評価対象	最大ひずみ	破断ひずみ
取水槽循環水ポンプエリア架構		

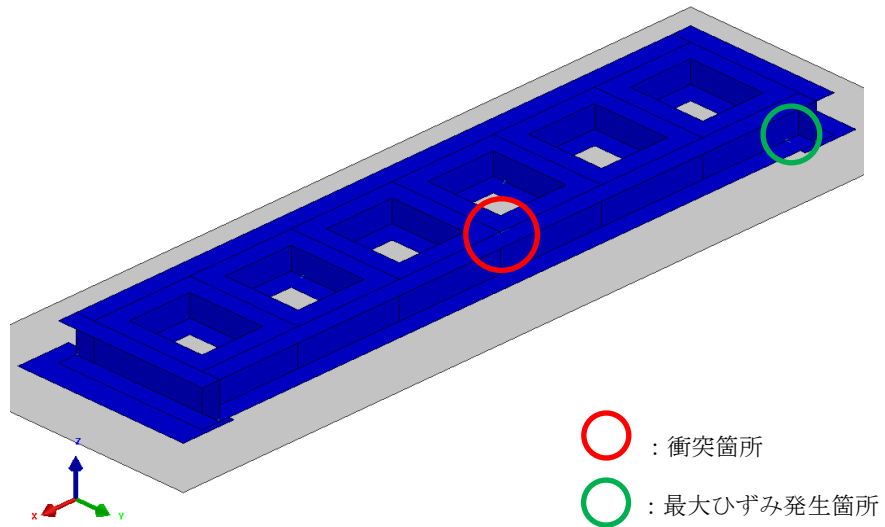


図 5-3 ひずみ分布図 (部材変位最大時)

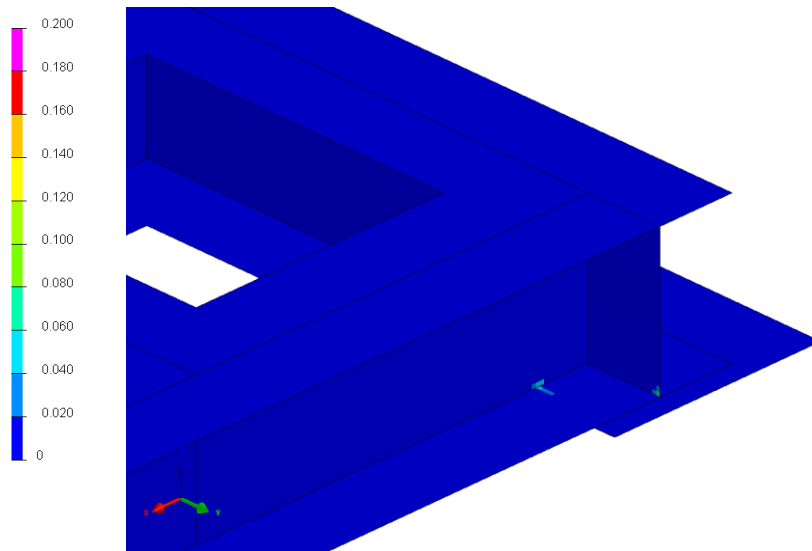


図 5-4 ひずみ分布図 (最大ひずみ発生箇所拡大図)

(3) 燃料移送ポンプエリア架構

設計飛来物の架構への衝突時の構造強度評価結果を表 5-3、図 5-5 及び図 5-6 に示す。架構を構成する部材の最大ひずみは、破断ひずみを超えるが、その範囲は局所的であり、架構を構成する部材に転倒及び脱落は生じない。

表 5-3 構造強度評価結果

評価対象	最大ひずみ	破断ひずみ
燃料移送ポンプエリア架構		

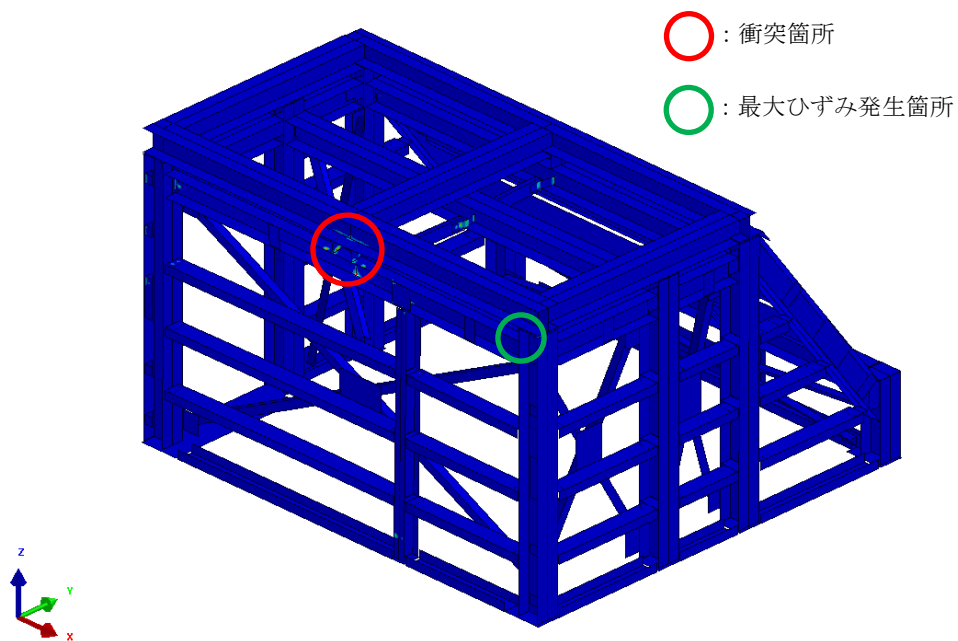


図 5-5 ひずみ分布図 (部材変位最大時)

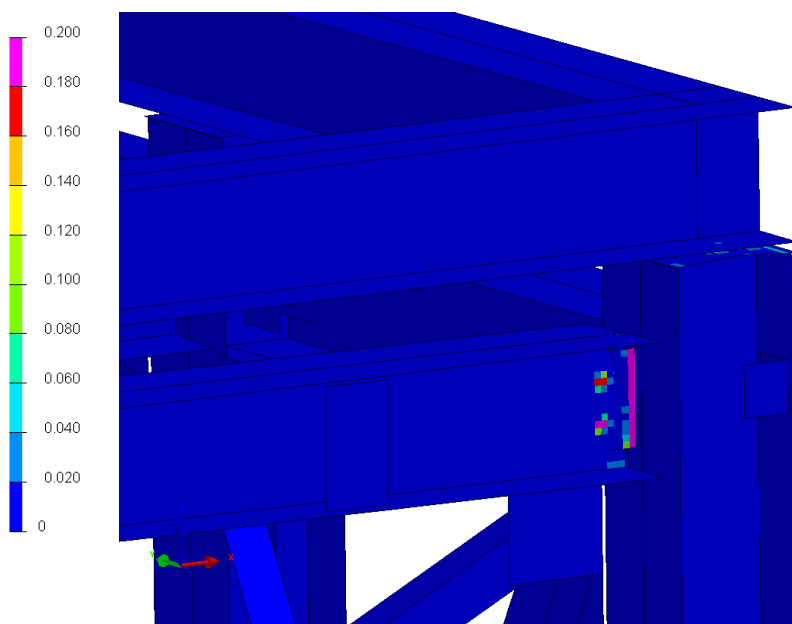


図 5-6 ひずみ分布図 (最大ひずみ発生箇所拡大図)

VI-3-別添 1-7 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	2
2.3	評価方針	12
2.3.1	衝突評価	12
2.3.2	構造強度評価	13
2.4	適用規格・基準等	15
3.	強度評価方法	16
3.1	記号の定義	16
3.2	評価対象部位	21
3.2.1	貫通評価	21
3.2.2	裏面剥離評価	21
3.2.3	変形評価	22
3.2.4	応力評価	22
3.3	荷重及び荷重の組合せ	24
3.3.1	荷重の設定	24
3.3.2	荷重の組合せ	25
3.4	許容限界	27
3.4.1	貫通評価	27
3.4.2	裏面剥離評価	28
3.4.3	変形評価	30
3.4.4	応力評価	30
3.5	評価方法	32
3.5.1	貫通評価	32
3.5.2	裏面剥離評価	40
3.5.3	変形評価	42
3.5.4	応力評価	64
4.	評価条件	66
4.1	貫通評価	66
4.1.1	式による評価（鉄筋コンクリート部）	66
4.1.2	タービン建物屋根スラブに対する衝突解析	67
4.1.3	扉及び鋼製蓋	67
4.2	裏面剥離評価	68

4.2.1	式による評価	68
4.2.2	タービン建物外壁に対する衝突解析	68
4.2.3	タービン建物屋根スラブに対する衝突解析	69
4.3	変形評価	70
4.3.1	耐震壁	70
4.3.2	屋根スラブ	73
4.4	応力評価	76
5.	強度評価結果	77
5.1	貫通評価	77
5.2	裏面剥離評価	79
5.3	変形評価	82
5.3.1	耐震壁	82
5.3.2	屋根スラブ	82
5.4	応力評価	83

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物（竜巻防護対策設備である鋼製扉を含む）、タービン建物、廃棄物処理建物及び制御室建物（以下「建物」という。）、ディーゼル燃料貯蔵タンク室及びB-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽（以下「地中構造物」という。）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。

また、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、竜巻防護対策設備のうち、原子炉建物鋼製扉（以下「扉」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、外部事象防護対象施設の安全機能を考慮して、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 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」を踏まえ、各施設及び扉の「2.1 位置」, 「2.2 構造概要」, 「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格・基準等」を示す。

2.1 位置

建物及び地中構造物の設置位置を図 2-1 に示す。

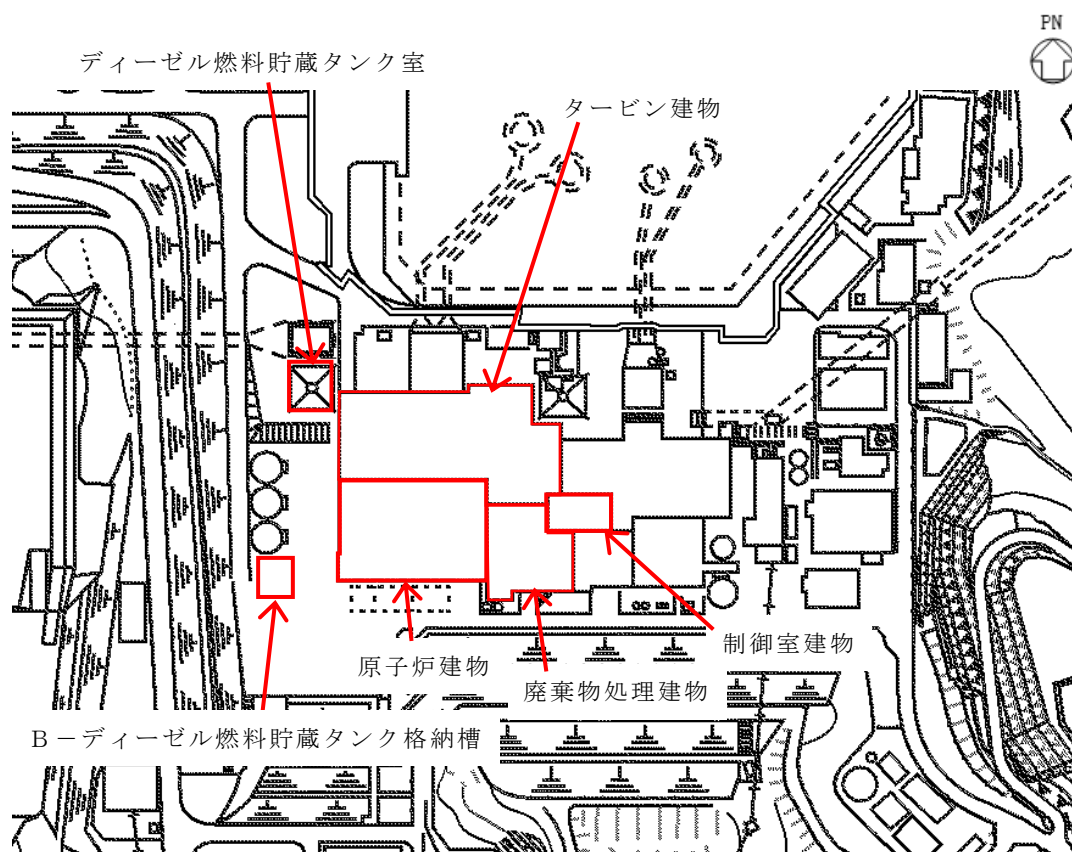


図 2-1 建物及び地中構造物の設置位置

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。

建物は、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。地中構造物は、地中に埋設された構造物であり、外殻の躯体は鉄筋コンクリート造、地上部に露出する開口部の蓋は鋼製である。また、原子炉建物には、竜巻防護対策設備である扉が設置されている。

扉は、表面鋼板、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物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。

各施設の概略平面図及び概略図を図 2-2～図 2-7 に，扉の位置図を図 2-8 に，扉の構造図を図 2-9 に示す。

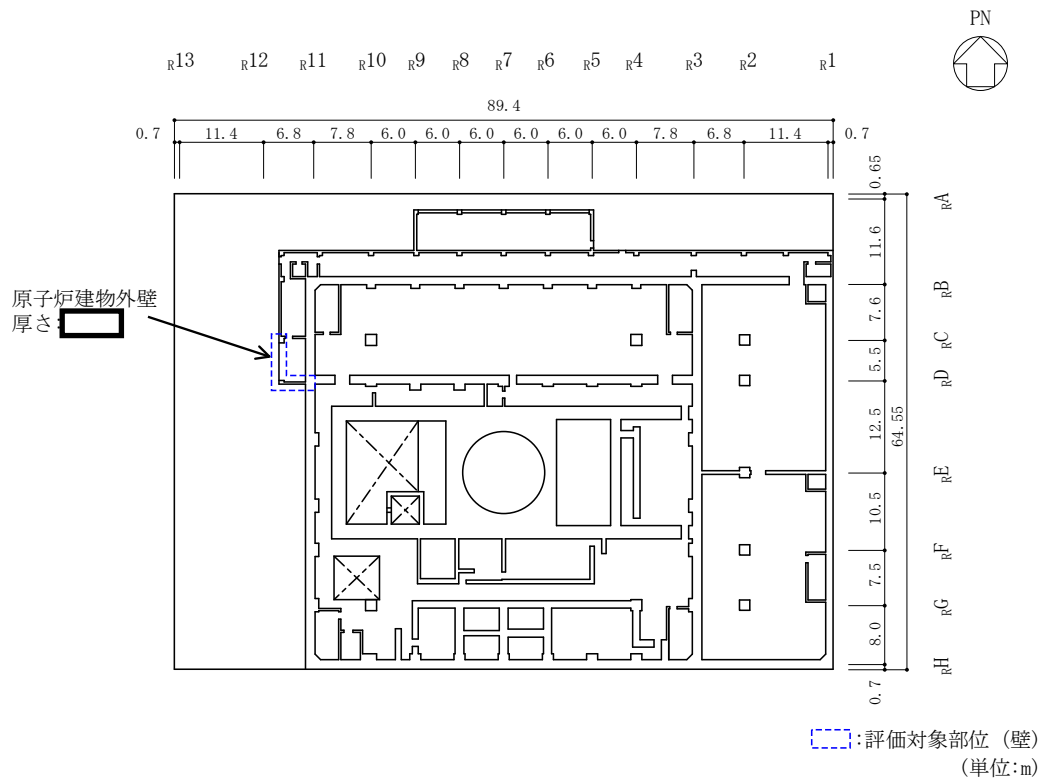


図 2-2(1) 原子炉建物の概略平面図 (EL 34.8m*)

注記* : 「EL」は東京湾平均海面 (T.P.) を基準としたレベルを示す。

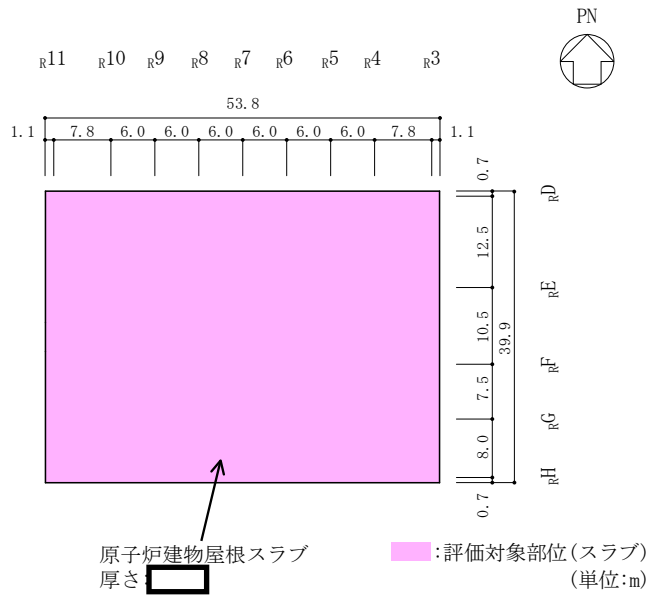


図 2-2(2) 原子炉建物の概略平面図 (EL 63.5m)

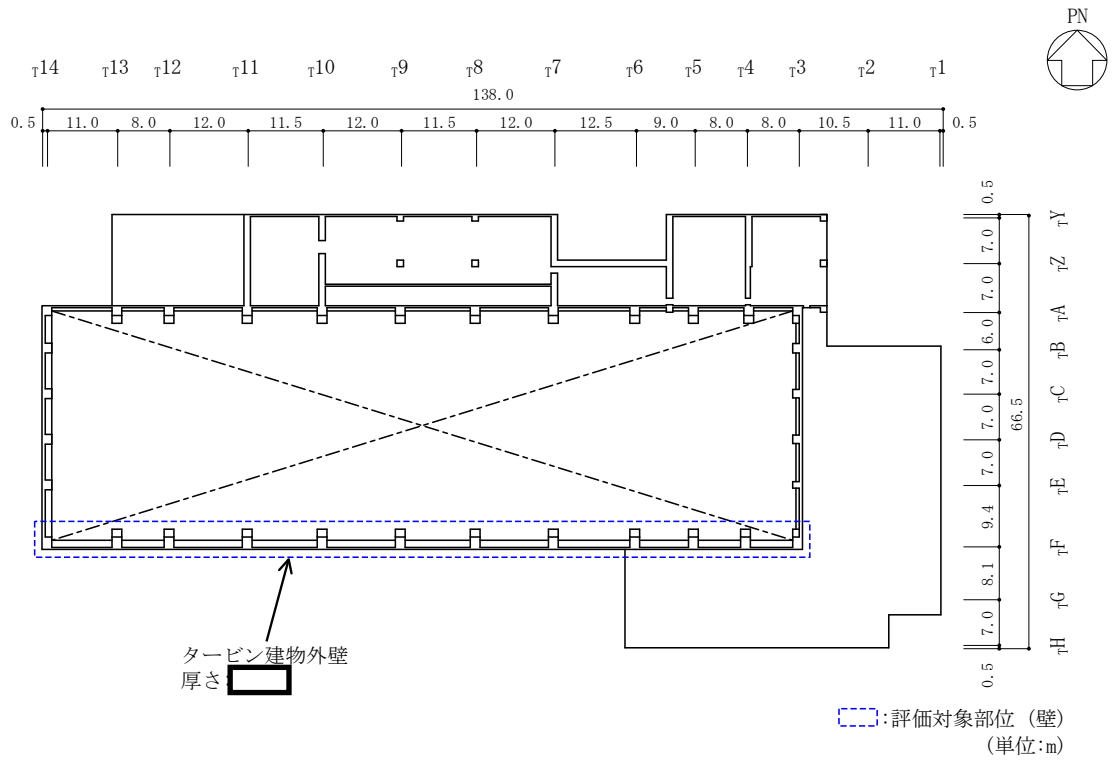


図 2-3(1) タービン建物の概略平面図 (EL 32.0m)

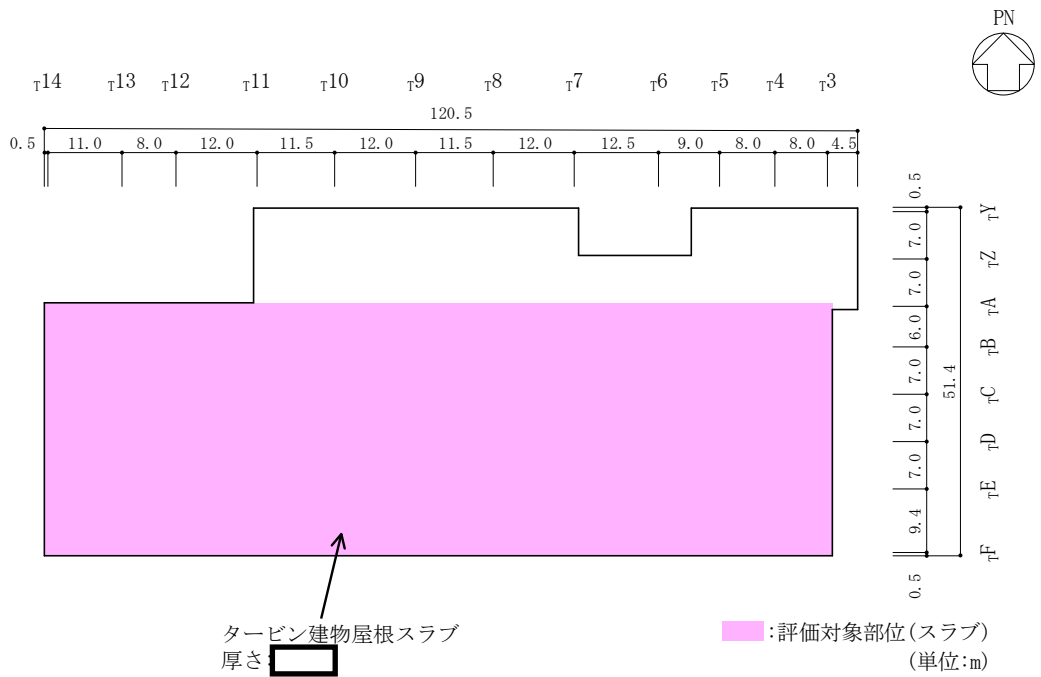


図 2-3(2) タービン建物の概略平面図 (EL 41.6m)

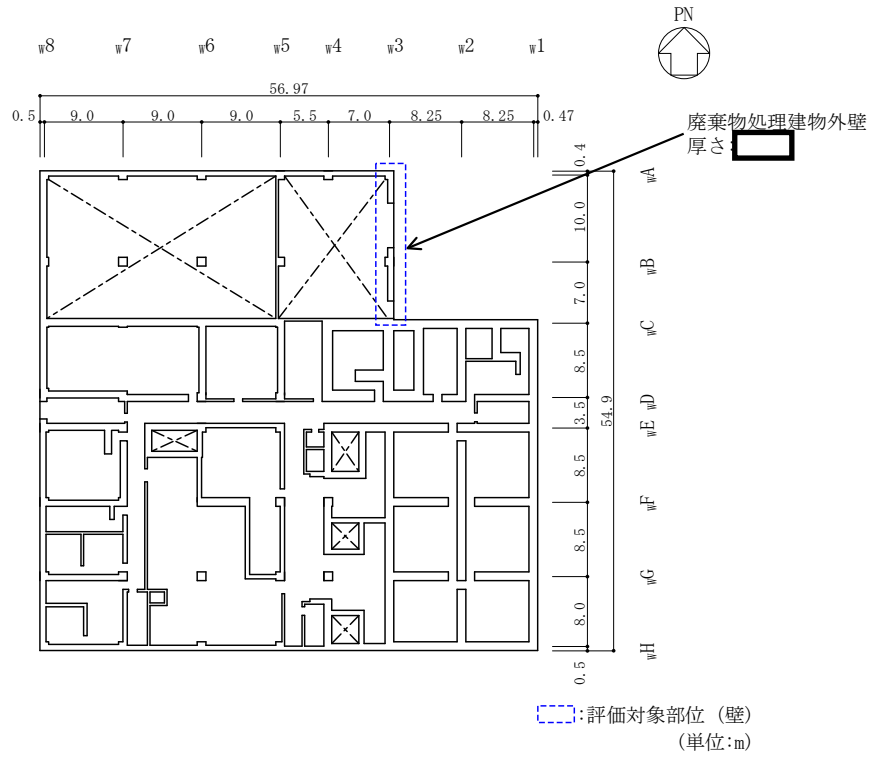


図 2-4(1) 廃棄物処理建物の概略平面図 (EL 26.7m)

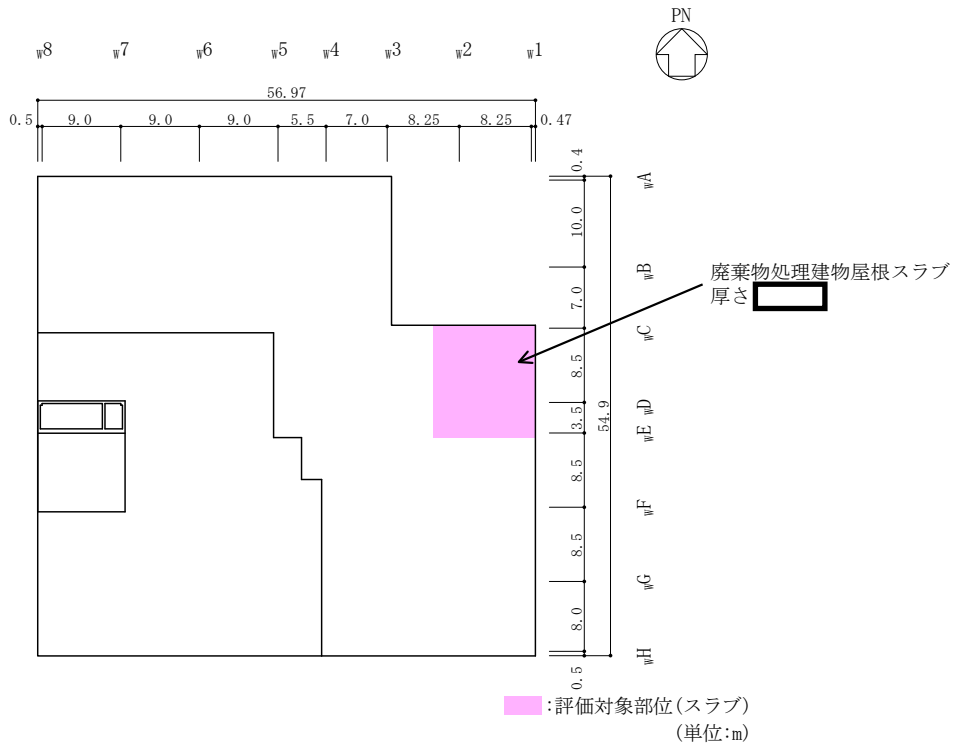


図 2-4(2) 廃棄物処理建物の概略平面図 (EL 42.0m)

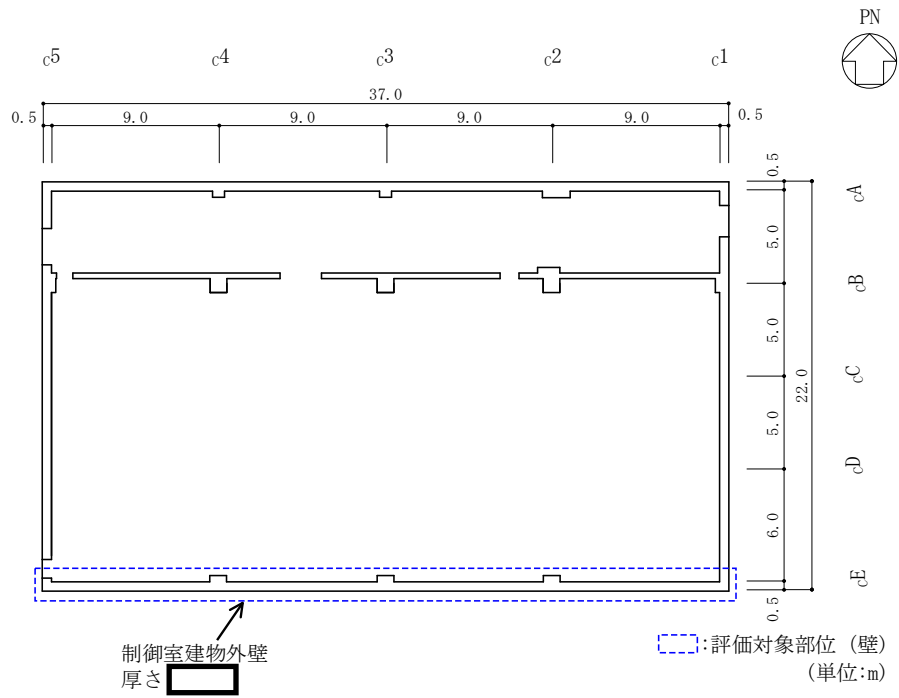


図 2-5(1) 制御室建物の概略平面図 (EL 16.9m)

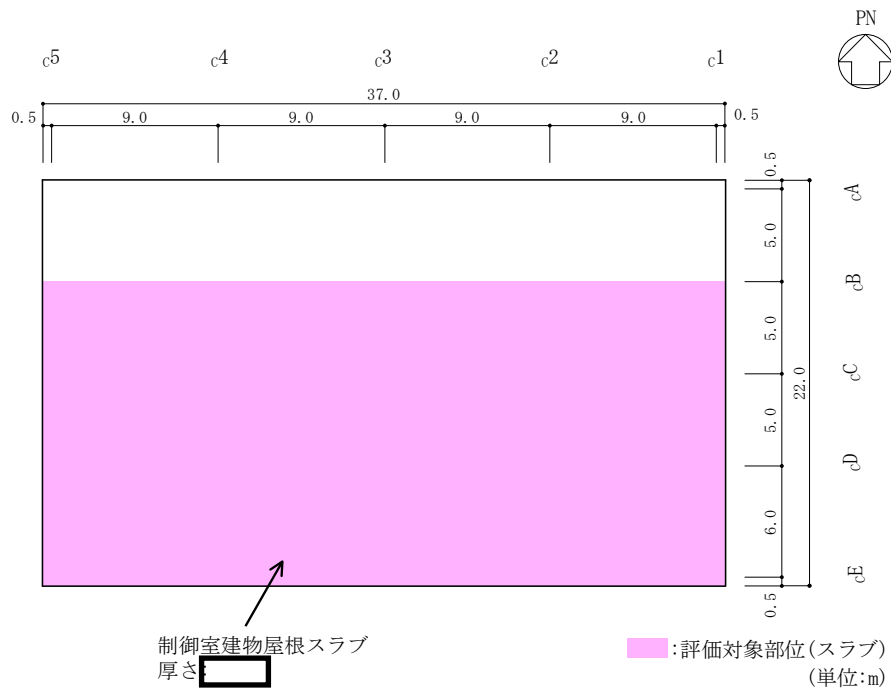
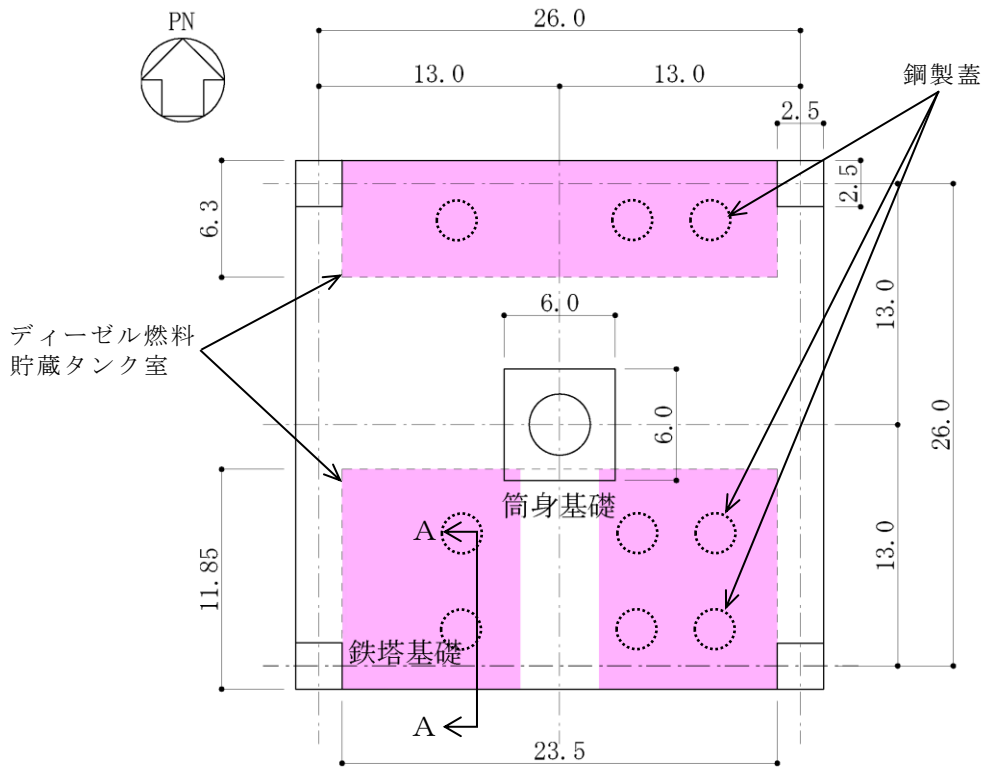
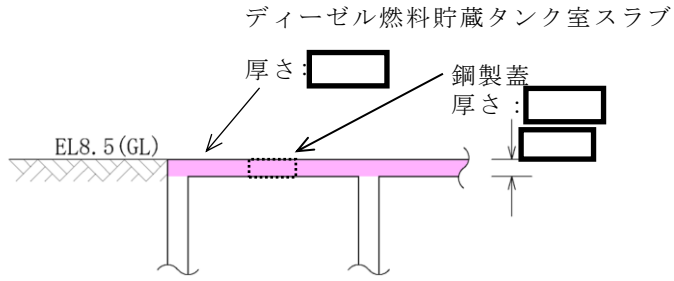


図 2-5(2) 制御室建物の概略平面図 (EL 22.05m)



(a) 平面図



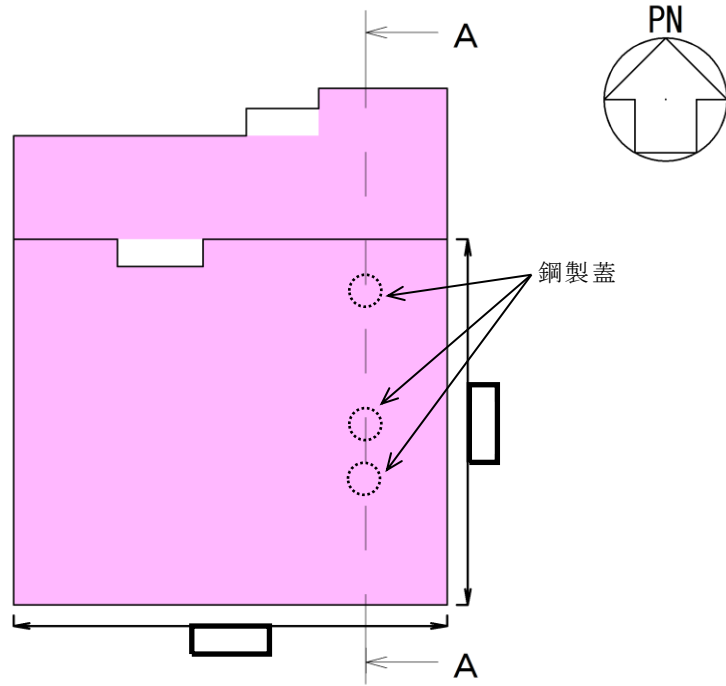
(b) 断面図 (A-A断面)

■:評価対象部位(スラブ)

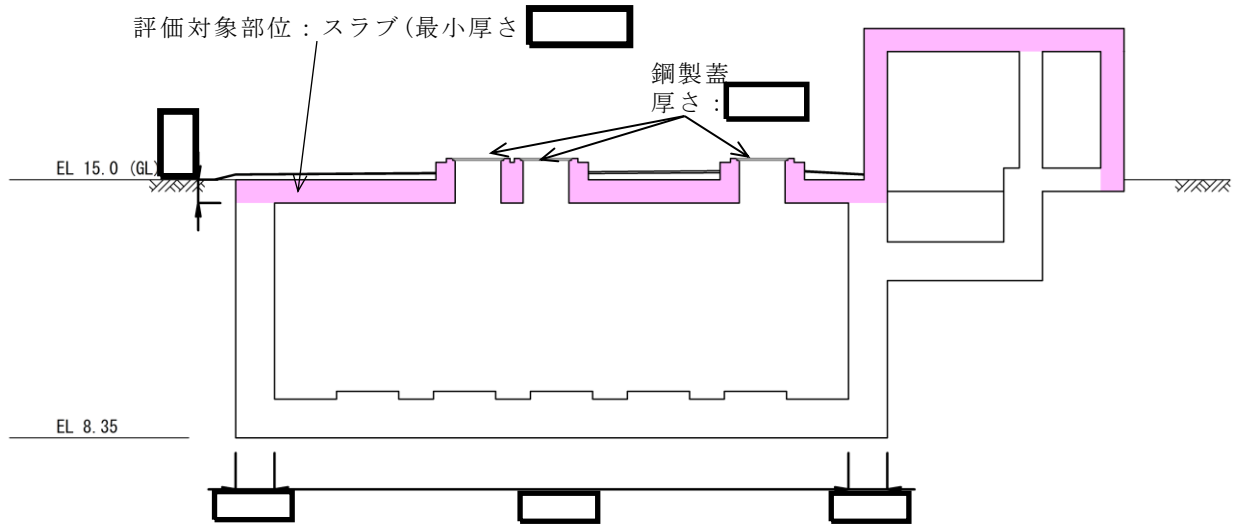
(単位:m)

図 2-6 ディーゼル燃料貯蔵タンク室の概略図

KEY-PLAN



(a) 平面図



(b) 断面図 (A-A断面)

(単位：m)

図 2-7 B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽の概略図

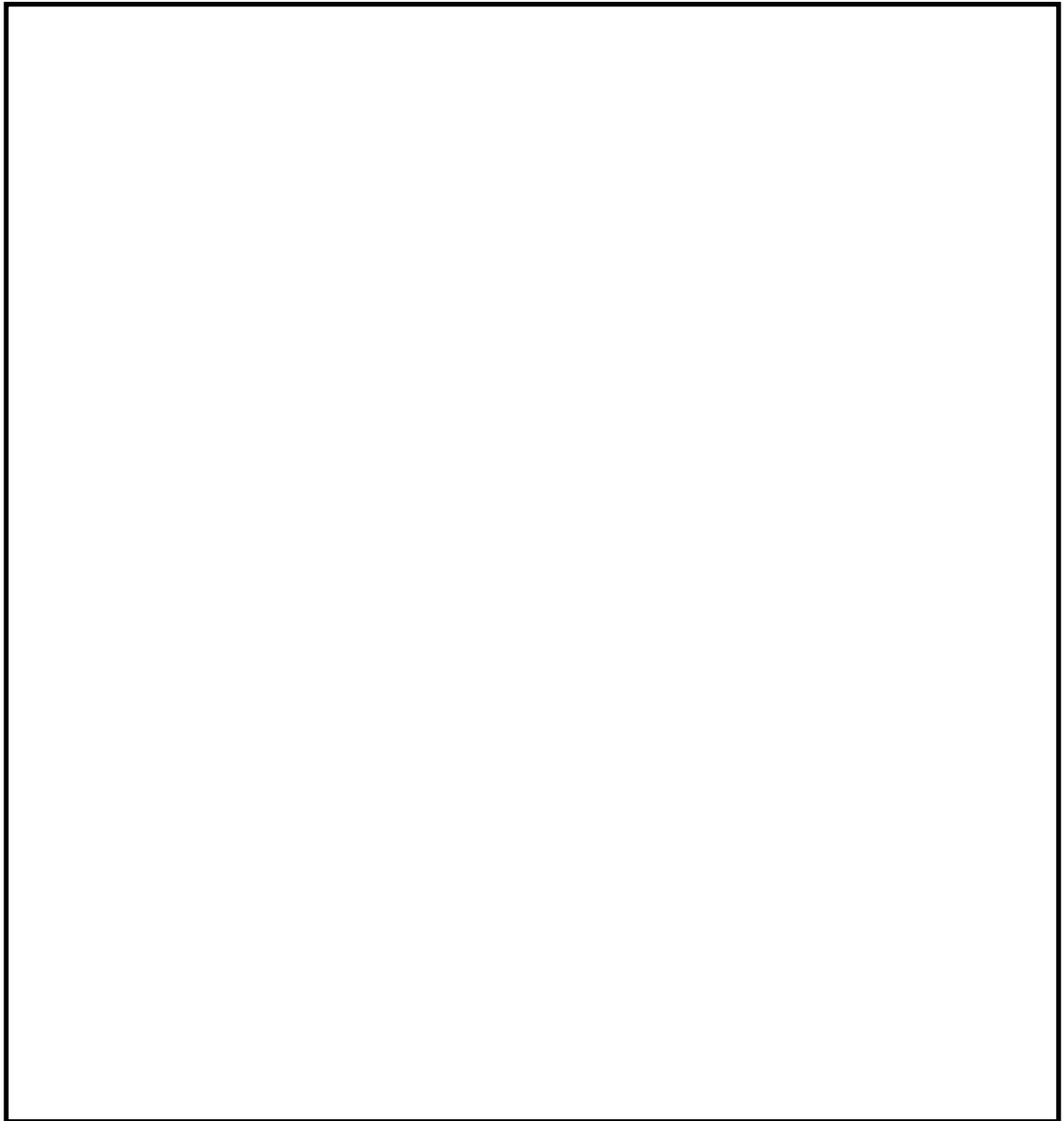


図 2-8 扉の位置図

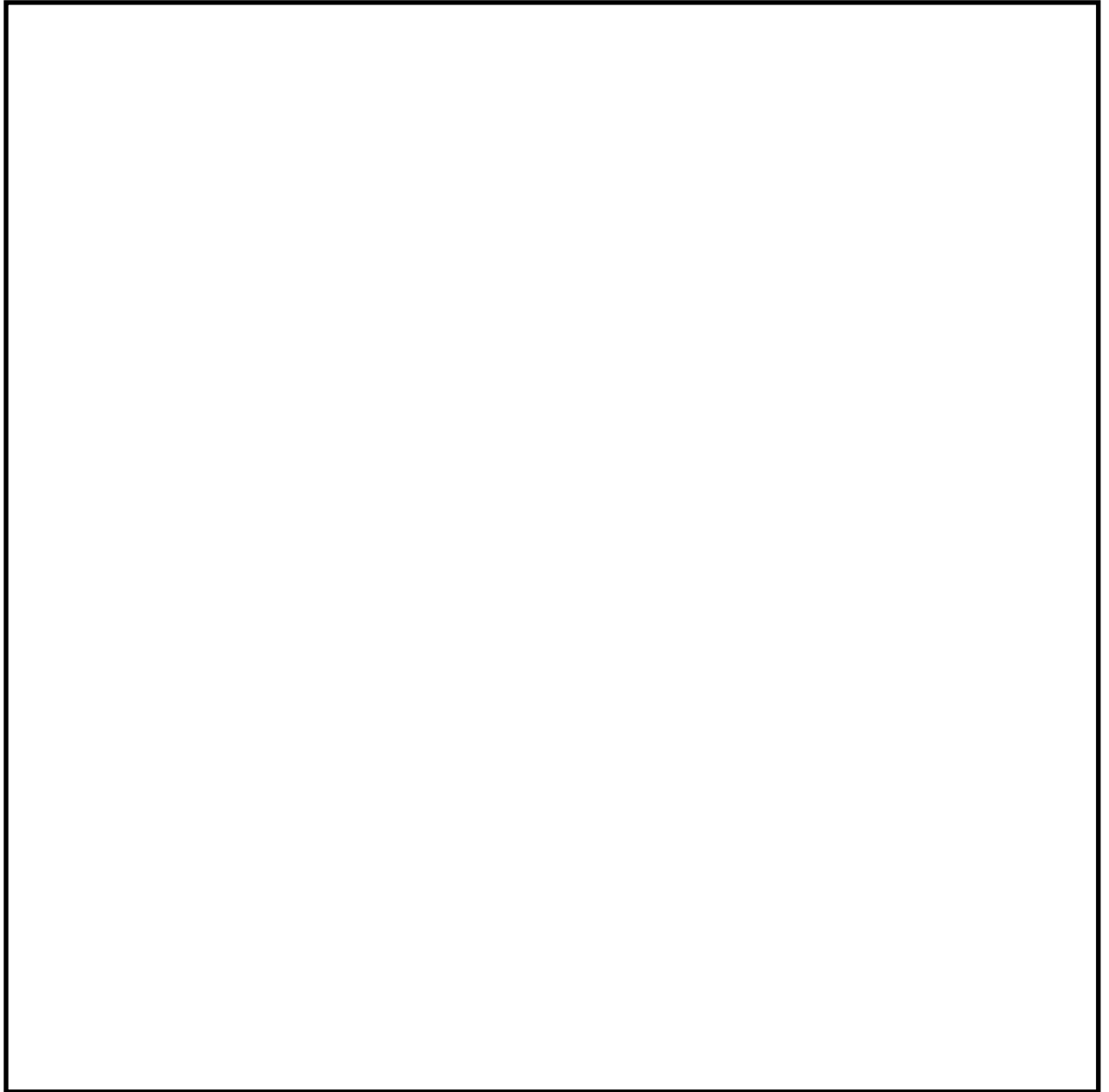


図 2-9 扉の構造図

(例：原子炉建物 1 階 RCW 熱交換器室南側鋼製扉)

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 2-10 に示す。

2.3.1 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物の外壁、扉及び屋根スラブ並びに地中構造物のスラブ及び鋼製蓋が、設計飛来物の貫通を生じない最小厚さ以上であることを確認する。

建物の外壁、屋根スラブ及び地中構造物のスラブの評価には、「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でき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。

扉及び鋼製蓋の評価には、VI-3-別添 1-5「竜巻防護鋼板の強度計算書」に示す解析により求めた必要最小肉厚（設計荷重が作用した場合の鋼板が貫通しない最小肉厚）に対し、扉及び鋼製蓋が十分な厚さを有していることを確認する。（以下「貫通評価」という。）

2.3.2 構造強度評価

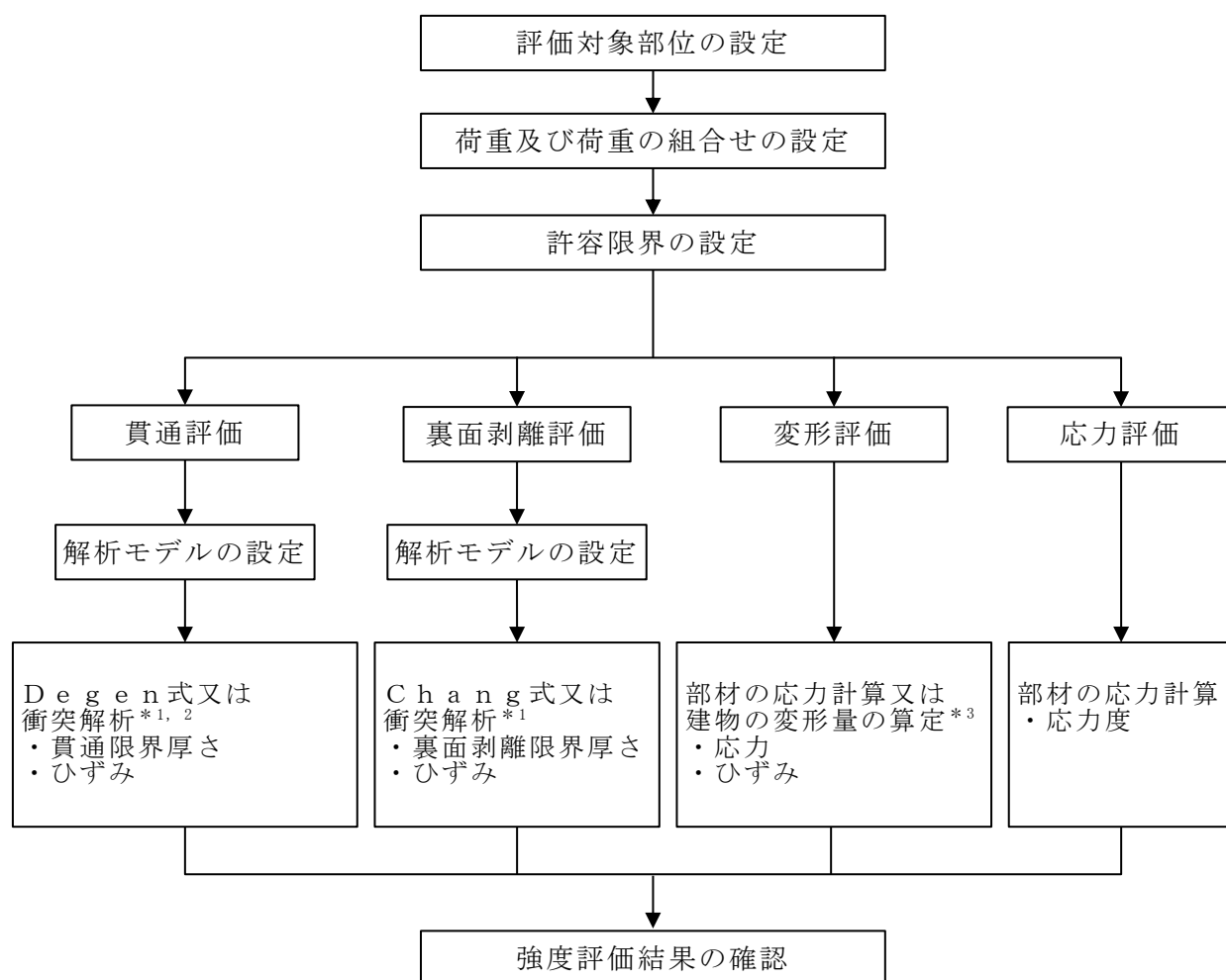
設計荷重に対し、施設の外殻を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とするために、竜巻より防護すべき施設を内包する施設の外殻を構成する部材である建物の外壁及び屋根スラブ並びに地中構造物のスラブが、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じない最小厚さ以上であることを確認する。

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できない壁及び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、建物及び地中構造物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ボルト（以下「スタッド」という。）及び耐震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を計算及び解析により確認する。（以下「変形評価」という。）

扉については、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、設計荷重に対し、扉のカンヌキに生じる応力度が「鋼構造設計規準－許容応力度設計法－（（社）日本建築学会，2005改定）」及びJIS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及び応力の算定により確認する。（以下「応力評価」という。）



注記*1：屋根スラブ及び外壁の衝突解析については、解析コード「LS-DYNA」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：扉及び鋼製蓋については、VI-3-別添 1-5「竜巻防護鋼板の強度計算書」に示す解析により求めた必要最小肉厚に対し、扉及び鋼製蓋が十分な厚さを有していることを確認する。

*3：地震応答解析モデルを用いた静的評価を実施する。

図 2-10 強度評価フロー

2.4 適用規格・基準等

適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8P (NEI07-13))
- ・建築基準法・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 ((社) 日本電気協会)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 ((社) 日本電気協会)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版 ((社) 日本電気協会)
- ・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
- ・建築物荷重指針・同解説 ((社) 日本建築学会, 2004 改定)
- ・鋼構造設計規準 ー許容応力度設計法ー ((社) 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 ー許容応力度設計法ー ((社) 日本建築学会, 1999 改定)
- ・日本産業規格 (J I S)
- ・各種合成構造設計指針 同解説 ((社) 日本建築学会, 2010 年改定)
- ・理科年表 (国立天文台, 第 85 冊, 2003 年)
- ・コンクリート標準示方書 設計編 ((社) 土木学会, 2012 改定)
- ・原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 ((社) 日本建築学会, 2005 制定)

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

D e g e n式による鉄筋コンクリート部の貫通限界厚さの算定に用いる記号を表 3-1 に、C h a n g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，スタッド及び扉の評価に用いる記号を表 3-3 に示す。

表 3-1 D e g e n式による鉄筋コンクリート部の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 C h a n g 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(1) 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
(荷重算定用)

記号	単位	定義	
A	m ²	受圧面積	
C	—	風力係数	
G	—	ガスト影響係数	
q	N/m ²	設計用速度圧	
V_D	m/s	設計竜巻の最大風速	
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	
ΔP_{max}	N/m ²	最大気圧低下量	
m	kg	設計飛来物質量	
V	m/s	設計飛来物の衝突速度（水平）	
Δt	s	設計飛来物と被衝突体の接触時間	
L_1	m	設計飛来物の最も短い辺の全長	

表 3-3(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
(屋根スラブ)

記号	単位	定義
L	m	屋根スラブの支持スパン
M	kN・m	設計竜巻による単位幅当たりの曲げモーメント
Q	kN	屋根スラブに生じる単位幅当たりのせん断力
f_t	N/mm ²	鉄筋の許容引張応力度
f_s	N/mm ²	コンクリートの許容せん断応力度
a_t	mm ²	引張鉄筋の断面積
b	mm	屋根スラブの幅
d'	mm	屋根スラブの有効せい
j	mm	屋根スラブの応力中心間距離 ($j = (7/8) \cdot d'$)
M_a	kN・m	屋根スラブの許容曲げモーメント
Q_a	kN	屋根スラブの許容せん断力
ω_d	kN/m	常時作用する荷重による単位幅当たりの荷重
ω_T	kN/m	設計竜巻による単位幅当たりの荷重 ($= \text{Max} \{ \omega_{T1}, \omega_{T2} \}$)
ω_{T1}	kN/m	複合荷重 W_{T1} による単位幅当たりの荷重
ω_{T2}	kN/m	複合荷重 W_{T2} による単位幅当たりの荷重 (設計飛来物による 衝撃荷重 W_M は考慮しない)

表 3-3(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
(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_{ca}	mm^2	スタッド断面積で、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_{ce}	mm	スタッドの強度計算用埋込み長さ ($l_{ce} = l_e$)
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	kN	スタッド 1 本当たりの許容引張力
p_{a1}	kN	スタッド鋼材の降伏により定まる場合のスタッド 1 本当たりの許容引張力
p_{a2}	kN	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 本当たりの許容引張力
p_{a3}	kN	コンクリートの支圧破壊により定まるスタッド 1 本当たりの許容引張力
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
$s\sigma_{pa}$	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	屋根スラブの支持スパン
p	mm	スタッドの間隔
Q	kN	屋根スラブに生じる単位幅当たりのせん断力
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当たりの荷重 ($= \text{Max} \{ \omega_{T1}, \omega_{T2} \}$)
ω_{T1}	kN/m	複合荷重 W_{T1} による単位幅当たりの荷重
ω_{T2}	kN/m	複合荷重 W_{T2} による単位幅当たりの荷重 (設計飛来物による衝撃荷重 W_M は考慮しない)

表 3-3(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
(扉)

記号	単位	定義
A_1	m^2	表面鋼板の受圧面積
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	N	気圧差による荷重
ΔP_{max}	N/m^2	最大気圧低下量
Z	mm^3	カンヌキの断面係数
σ_b	N/mm^2	曲げ応力度
τ	N/mm^2	せん断応力度

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 2-9 のとおり。

3.2.1 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の中から最も厚みが小さい箇所を評価対象部位として設定することとし、原子炉建物については屋根スラブ及び外壁（EL 34.8m）並びに鋼製扉を、タービン建物については屋根スラブ及び外壁（EL 32.0m）を、廃棄物処理建物については屋根スラブ及び外壁（EL 26.7m）を、制御室建物については屋根スラブ及び外壁（EL 16.9m）を、ディーゼル燃料貯蔵タンク室及びB-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽については地表面に露出するスラブ及び開口部の鋼製蓋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ことが確認できない原子炉建物屋根スラブ及びタービン建物屋根スラブについては、衝突解析により評価を行う。

3.2.2 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の中から最も厚みが小さい箇所を評価対象部位として設定することとし、原子炉建物については屋根スラブ及び外壁（EL 34.8m）を、タービン建物については屋根スラブ及び外壁（EL 32.0m）を、廃棄物処理建物については屋根スラブ及び外壁（EL 26.7m）を、制御室建物については屋根スラブ及び外壁（EL 16.9m）を、ディーゼル燃料貯蔵タンク室及びB-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽については地表面に露出するスラブ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ことが確認できない原子炉建物屋根スラブ及び外壁並びにタービン建物屋根スラブ及び外壁については、衝突解析により評価を行う。

3.2.3 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壁を評価することとし、屋根スラブについては、代表として部材厚が最も小さいタービン建物の屋根スラブを評価対象部位として設定する。

また、風圧力及び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物屋根スラブ及びタービン建物屋根スラブについて評価を行う。

壁については、原子炉建物、タービン建物、廃棄物処理建物及び制御室建物の耐震壁を評価対象部位として設定する。

なお、ディーゼル燃料貯蔵タンク室及びB-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽については、地中に埋設され竜巻の風荷重を受け難い構造であることから評価は不要とする。

3.2.4 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、カンヌキに生じる応力度が「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—（社）日本建築学会，2005 改定）」及びJIS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，表面鋼板に作用し，ヒンジ，カンヌキ及びアンカーボルトにより固定された扉枠を介して建物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，表面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物躯体と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を評価対象部位として設定する。

ここで，カンヌキに作用する荷重は「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本当たりの表面鋼板の負担面積が最大となる扉を代表として評価するものとし，原子炉建物 1階 RCW熱交換器室南側鋼製扉を評価対象とする。評価の対象とする扉の選定結果として，カンヌキ1本当たりの表面鋼板の負担面積の一覧を表3-4に示す。

表 3-4 評価の対象とする扉の選定結果

評価対象の扉	表面鋼板の仕様			カンヌキの本数 (本)	カンヌキ 1 本当たりの 表面鋼板の負担面積 (m ²)	評価対象
	幅 (mm)	高さ (mm)	面積 (m ²)			
原子炉建物 1 階 RCW 熱交換器室北側鋼製扉	2375	5125	12.18	7	1.74	
原子炉建物 1 階 RCW 熱交換器室南側鋼製扉	4950	5125	25.37	9	2.82	○
原子炉建物 1 階 RCW 熱交換器室南側鋼製扉 くぐり戸	859.5	2085	1.80	4	0.45	
原子炉建物 1 階 PLR ポンプ MG セット室南側鋼製扉	4900	5045	24.73	9	2.75	
原子炉建物 1 階 PLR ポンプ MG セット室南側鋼製扉 くぐり戸	859.5	2085	1.80	4	0.45	

3.3 荷重及び荷重の組合せ

各施設の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。

3.3.1 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	7500

(1) 常時作用する荷重 (F_d)

常時作用する荷重は、部材の自重とする。

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

(3) 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。

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

(4) 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、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。

なお、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。

表 3-6 設計飛来物の諸元

設計飛来物	寸法 (m)	質量 (kg)	最大水平速度 (m/s)	最大鉛直速度 (m/s)
鋼製材	4.2×0.3×0.2	135	51	34

表 3-7 設計飛来物の材料定数

設計飛来物	降伏応力 σ_y (N/mm ²)	ヤング係数 E (N/mm ²)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)
鋼製材	245	2.06×10^5	0.3	77

3.3.2 荷重の組合せ

各施設の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	D e g e n 式による評価			
	原子炉建物	外壁 (EL 34.8m)	水平	W_M
	タービン建物	外壁 (EL 32.0m)	水平	
	廃棄物処理建物	外壁 (EL 26.7m)	水平	
		屋根スラブ	鉛直	
	制御室建物	外壁 (EL 16.9m)	水平	
		屋根スラブ	鉛直	
	ディーゼル燃料貯蔵タンク室	スラブ	鉛直	
	B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽	スラブ	鉛直	
	必要最小肉厚と部材厚の比較による評価			
	原子炉建物	鋼製扉	水平	W_M
	ディーゼル燃料貯蔵タンク室	鋼製蓋	鉛直	
	B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽	鋼製蓋	鉛直	
	解析による評価			
原子炉建物	屋根スラブ	鉛直	$W_W + 0.5W_P + W_M + F_d$	
タービン建物	屋根スラブ	鉛直		
裏面剥離評価	C h a n g 式による評価			
	廃棄物処理建物	外壁 (EL 26.7m)	水平	W_M
		屋根スラブ	鉛直	
	制御室建物	外壁 (EL 16.9m)	水平	
		屋根スラブ	鉛直	
	ディーゼル燃料貯蔵タンク室	スラブ	鉛直	
	B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽	スラブ	鉛直	
	解析による評価			
	原子炉建物	外壁 (EL 34.8m)	水平	$W_W + 0.5W_P + W_M + F_d$
		屋根スラブ	鉛直	
タービン建物	外壁 (EL 32.0m)	水平		
	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			
	原子炉建物	屋根スラブのスタッド	—	複合荷重 $W_{T1} : W_P$ 複合荷重 $W_{T2} : W_W + 0.5W_P$
	タービン建物	屋根スラブのスタッド	—	
		屋根スラブ	—	複合荷重 $W_{T1} : W_P + F_d$ 複合荷重 $W_{T2} : W_W + 0.5W_P + F_d$
	地震応答解析モデルを用いた静的解析			
	原子炉建物	耐震壁	水平	複合荷重 $W_{T1} : W_P + F_d$ 複合荷重 $W_{T2} : W_W + 0.5W_P + W_M + F_d$
	タービン建物	耐震壁	水平	
	廃棄物処理建物	耐震壁	水平	
制御室建物	耐震壁	水平		
応力評価	力学における標準式による評価			
	扉	カンヌキ	—	W_P

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、式又は必要最小肉厚との比較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（式又は必要最小肉厚との比較による評価）

評価対象部位		許容限界 (cm)
原子炉建物	外壁 (EL 34.8m)	
	扉	
タービン建物	外壁 (EL 32.0m)	
廃棄物処理建物	外壁 (EL 26.7m)	
	屋根スラブ	
制御室建物	外壁 (EL 16.9m)	
	屋根スラブ	
ディーゼル燃料 貯蔵タンク室	スラブ	
	鋼製蓋	
B-ディーゼル燃料 貯蔵タンク格納槽	スラブ	
	鋼製蓋	

注記*：単位は mm

貫通評価のうち、式又は必要最小肉厚との比較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
タービン建物 屋根スラブ*	鉄筋	SD35 (SD345 相当)	0.084 (塑性ひずみ)

注記*：設計飛来物に対する裏面剥離限界厚さを満たさない屋根スラブのうち、最も厚さの小さいものとして選定

設計飛来物が屋根スラブへ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T F（多軸性係数）を2.0とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてT F = 2.0を考慮して設定する。

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のとおり。

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
タービン建物 外壁* ¹	鉄筋	SD35 (SD345 相当)	0.084 (塑性ひずみ)
タービン建物 屋根スラブ* ²	デッキ プレート	SPD2	0.080 (塑性ひずみ)

注記*1：設計飛来物に対する裏面剥離限界厚さを満たさない外壁のうち、最も厚さの小さいものとして選定

*2：設計飛来物に対する裏面剥離限界厚さを満たさない屋根スラブのうち、最も厚さの小さいものとして選定

設計飛来物が外壁及び屋根スラブへ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T F（多軸性係数）を2.0とすることが推奨されていることを踏まえ，安全余裕として $T F = 2.0$ を考慮して設定する。

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
原子炉建物	屋根スラブのスタッド	「各種合成構造設計指針 同解説（（社）日本建築学会，2010 年改定）」に基づく許容耐力	59 (kN/本)
タービン建物	屋根スラブのスタッド	「各種合成構造設計指針 同解説（（社）日本建築学会，2010 年改定）」に基づく許容耐力	61 (kN/本)
タービン建物	屋根スラブ	「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 - 許容応力度設計法 -（（社）日本建築学会，1999 改定）」に基づく短期許容応力度	曲げ：23 (kN・m) せん断：85 (kN)
原子炉建物	耐震壁	最大せん断ひずみ	2.0×10^{-3}
タービン建物	耐震壁	最大せん断ひずみ	2.0×10^{-3}
廃棄物処理建物	耐震壁	最大せん断ひずみ	2.0×10^{-3}
制御室建物	耐震壁	最大せん断ひずみ	2.0×10^{-3}

3.4.4 応力評価

(1) 評価対象部位の材料仕様

扉の評価対象部位の材料仕様を表 3-13 に示す。

表 3-13 評価対象部位の材料仕様

評価対象部位	仕様	材質
原子炉建物 1階 RCW 熱交換器室南側鋼製扉 カンヌキ	φ 70	S45C

(2) 許容限界

応力評価の許容限界を表 3-14 に示す。

応力評価におけるカンヌキの評価は、J I S 及び「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—（（社）日本建築学会，2005 改定）」に基づく短期許容応力度を許容限界として設定する。

表 3-14 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 (N/mm ²)	せん断 (N/mm ²)
原子炉建物 1 階 RCW 熱交換器室 南側鋼製扉カンヌキ	S45C	345	199

3.5 評価方法

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「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、変形評価及び応力評価を実施する。

3.5.1 貫通評価

(1) 貫通評価式による評価

a. 鉄筋コンクリート部

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 D e g e n 式を用いて算定する。D e g e n 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 N D R C 式を用いて算定する。

D e g e n 式を以下に示す。

$1.52 \leq X/d \leq 13.42$ の場合

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

$X/d \leq 1.52$ の場合

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

修正 N D R C 式を以下に示す。

$X/d \leq 2.0$ の場合

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

$X/d \geq 2.0$ の場合

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

b. 扉及び鋼製蓋

扉及び鋼製蓋の評価方法としては、VI-3-別添 1-5「竜巻防護鋼板の強度計算書」に示す解析により求めた必要最小肉厚が「3.4 許容限界」で定めた許容限界以下であることを確認する。解析により求めた必要最小肉厚を表 3-15 に示す。

表 3-15 必要最小肉厚

評価対象部位	材質	衝突方向	必要最小肉厚 (mm)
扉	SS400	水平	16
鋼製蓋		鉛直	

(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物屋根スラブ及びタービン建物屋根スラブについては、厚さが最も小さいタービン建物屋根スラブを代表箇所を選定し、設計飛来物による衝撃荷重 W_M 及び常時作用する荷重 F_d を考慮し、3次元FEMモデルを用いた衝突解析により屋根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。

衝突位置については、部材曲げによる変形量が最大になると考えられる中央部を選定した。衝突方向は、部材面に対して垂直とし、局所的な変形によって部材に生じるひずみが最も大きくなるように、飛来物の面積が最小の面(0.3m×0.2m)が衝突するケースを選定した。

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、保守的に考慮しない。

衝突解析には、解析コード「LS-DYNA」を用いる。評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

a. 解析モデル

(a) タービン建物屋根スラブ

タービン建物屋根スラブのモデル化範囲は、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、鉄筋をビーム要素、デッキプレートをシェル要素でモデル化する。

タービン建物屋根スラブの解析モデル及び境界条件を図3-1に示す。

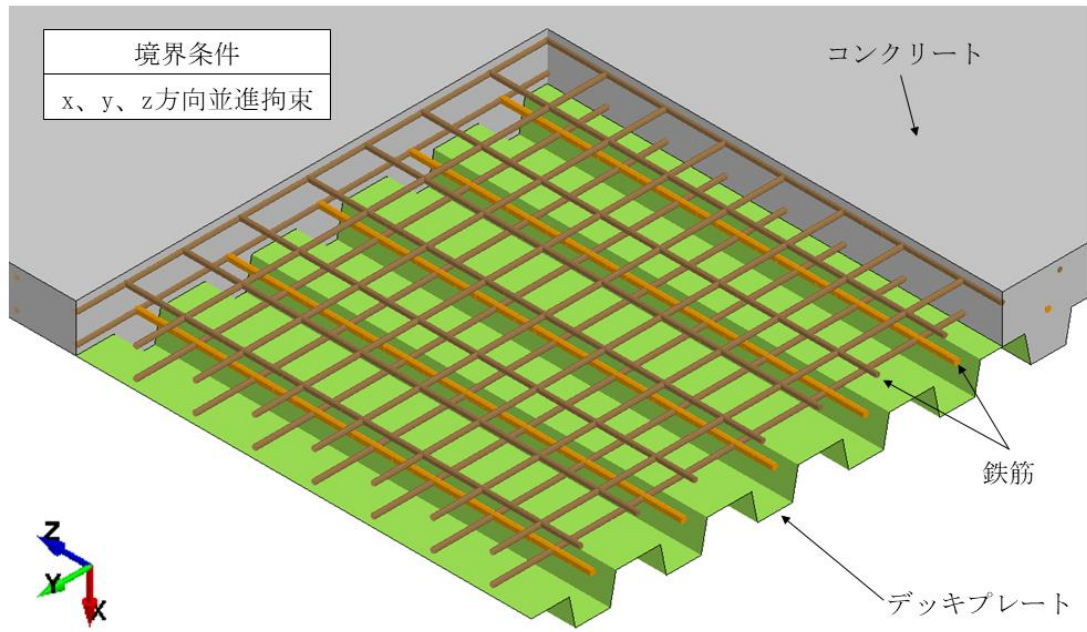
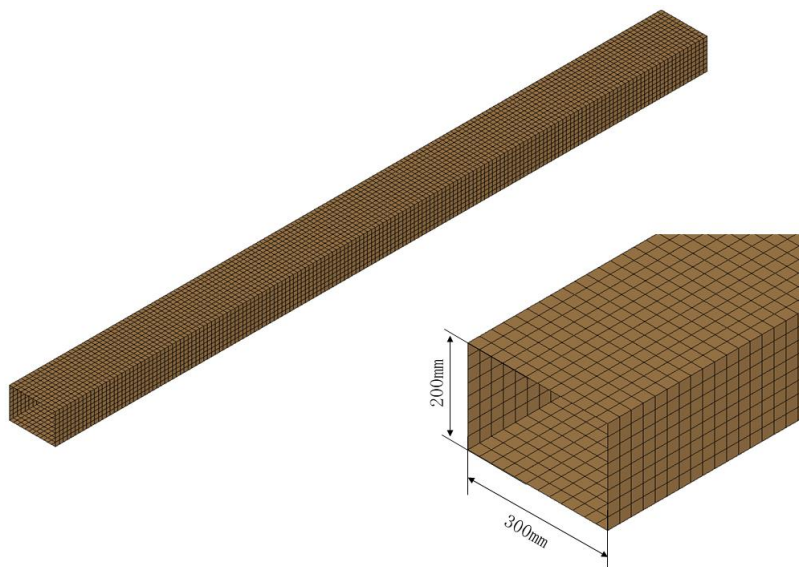


図 3-1 タービン建物屋根スラブの解析モデル及び境界条件

(b) 設計飛来物

設計飛来物である鋼製材は、シェル要素でモデル化し、自重及び竜巻による風圧力による荷重を作用させた状態で衝突させる。

設計飛来物の解析モデルを図 3-2 に示す。



設計飛来物断面：

t4.2 mm×200 mm×300 mm

全長：4.2m

質量：135kg

図 3-2 設計飛来物の解析モデル

b. 材料定数

コンクリート、鉄筋及びデッキプレートの材料定数をそれぞれ表 3-16～表 3-18 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 3-16 コンクリートの材料定数

種類	設計基準強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)
普通 コンクリート	23.5 (240kgf/cm ²)	2.25×10 ⁴	0.2	23

表 3-17 鉄筋の材料定数

種類	降伏応力 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)
SD35 (SD345 相当)	345	2.06×10 ⁵	0.3	77

表 3-18 デッキプレートの材料定数

種類	降伏応力 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)
SDP2	235	2.06×10 ⁵	0.3	77

c. 材料の非線形特性

コンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮側が圧縮強度に到達後もその応力を保持するバイリニアとし、引張側は主応力が引張強度に到達後に引張主応力と直交方向にひび割れが生じるものとして、ひずみに応じて保持応力を低下させる引張軟化特性を与える。圧縮強度は、NEI07-13に従い、設計基準強度に対して動的増加率 1.25 を乗じた値とする。

鋼製部材である鉄筋、デッキプレート及び設計飛来物の応力-ひずみ曲線は、第 1 折れ点を「降伏応力-降伏ひずみ」、第 2 折れ点を「破断相当応力-破断相当ひずみ」とするトリリニア型とする。鉄筋、デッキプレート及び設計飛来物の降伏応力は、降伏応力に動的増加率を乗じた値、破断相当応力は、動的増加率を乗じた降伏応力及び引張強さを結ぶ線のうち、規格値の伸びを「3.4 許容限界」にて示した多軸性係数で除したひずみ（破断相当ひずみ）時に相当する応力とする。

動的増加率は、NEI07-13 に基づく値（鉄筋：1.10（降伏応力）、1.05（引張強度）、デッキプレート・設計飛来物：1.29（降伏応力）、1.10（引張強度））とする。

鉄筋、デッキプレート及び設計飛来物の破断ひずみは、JISに規定されている伸びの下限値を基に設定する。また、NEI07-13においてTF（多軸性係数）を2.0とすることが推奨されていることを踏まえ、鉄筋及びデッキプレートの破断相当ひずみはTF=2.0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かかるよう配慮し、TF=1.0とする。

コンクリート、鉄筋、デッキプレート及び設計飛来物の強度をそれぞれ表 3-19 及び表 3-20 に示す。

表 3-19 コンクリートの圧縮及び引張強度

設計基準強度 (N/mm ²)	材料モデル	
	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
23.5 (240kgf/cm ²)	29.4	2.66

表 3-20 鉄筋，デッキプレート及び設計飛来物の降伏及び破断強度

種別	材質	規格値（公称応力）		材料モデル（真応力，真ひずみ）		
		降伏応力 (N/mm ²)	破断応力 (N/mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)	破断応力 (N/mm ²)	破断相当 塑性ひずみ (-)
鉄筋	SD35 (SD345 相当)	345	490	380	497	0.084
デッキ プレート	SDP2	235	400	303	413	0.080
設計飛来物	SS400	245	400	316	532	0.188

コンクリート，鉄筋，デッキプレート及び設計飛来物の応力－ひずみ関係をそれぞれ図 3-3～図 3-6 に示す。

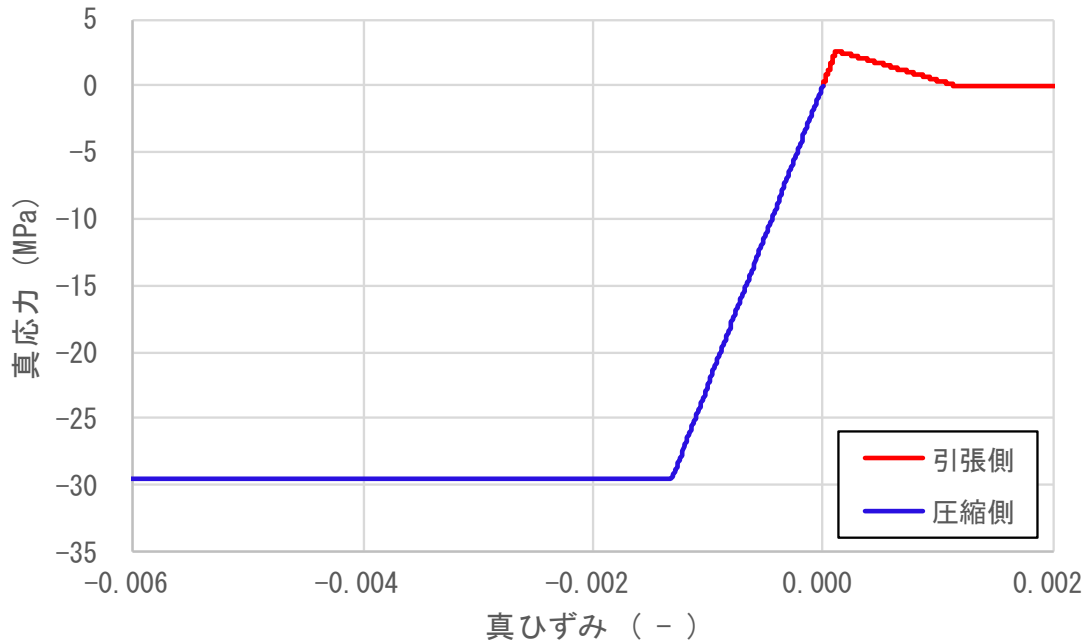


図 3-3 真応力－真ひずみ関係（コンクリート）

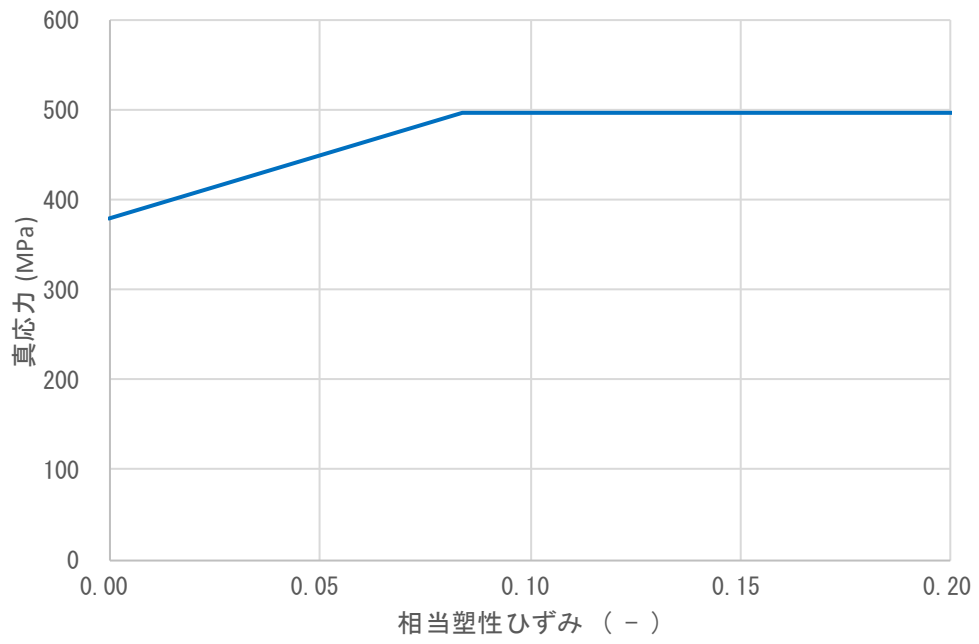


図 3-4 真応力-相当塑性ひずみ関係 (鉄筋)

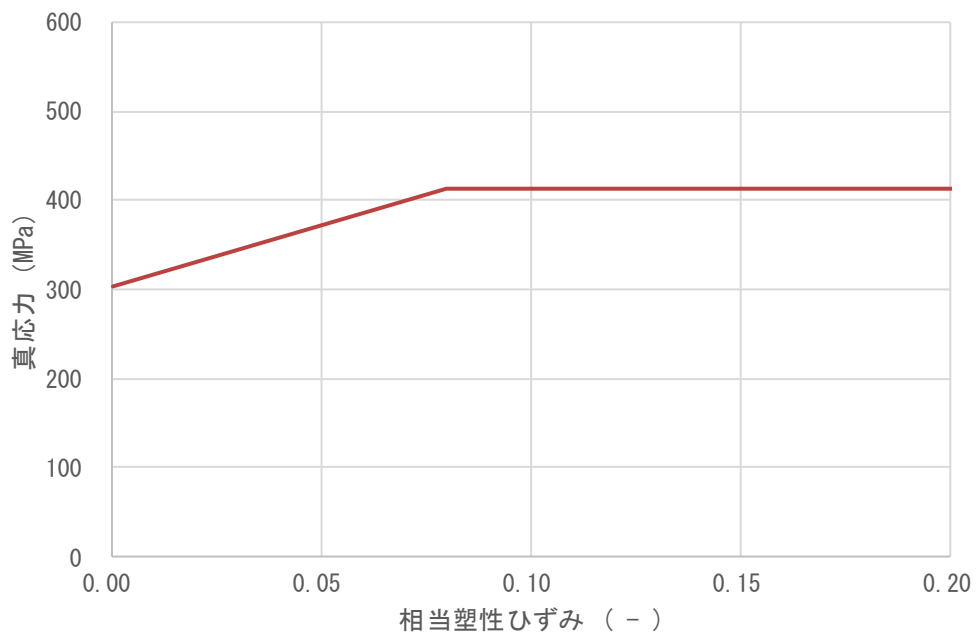


図 3-5 真応力-相当塑性ひずみ関係 (デッキプレート)

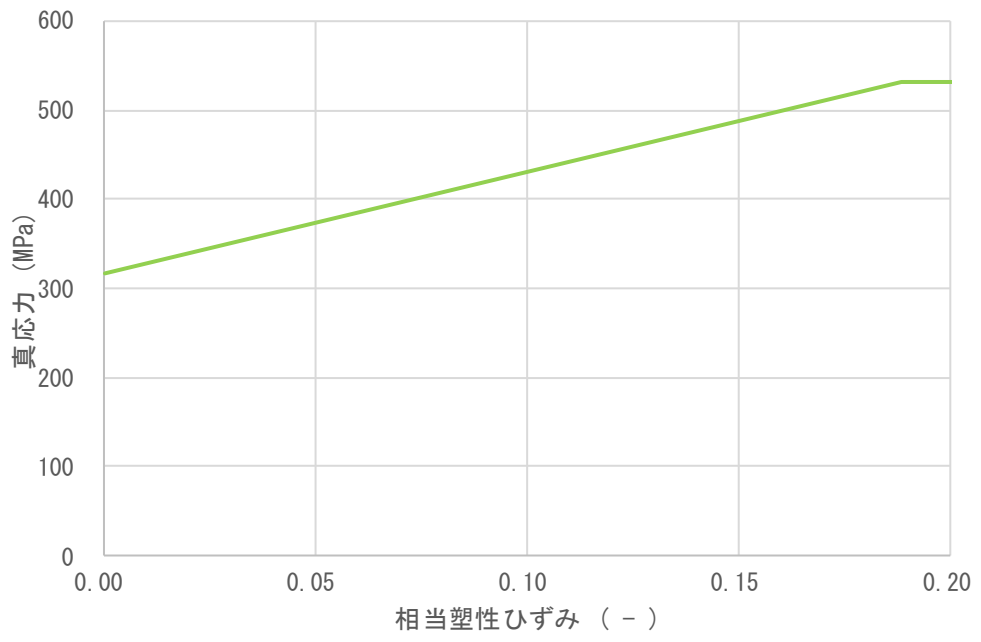


図 3-6 真応力-相当塑性ひずみ関係 (設計飛来物)

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 C h a n g 式を用いて算定する。

C h a n g 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、C h a n g 式による裏面剥離限界厚さを満足しない原子炉建物屋根スラブ及びタービン建物屋根スラブについては、厚さが最も小さいタービン建物屋根スラブを代表箇所を選定し、設計飛来物による衝撃荷重 W_M 及び常時作用する荷重 F_d を考慮し、貫通評価と同じモデルによる衝突解析により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。

衝突位置については、部材曲げによる変形量が最大になると考えられる中央部を選定した。衝突方向は、部材面に対して垂直とし、局所的な変形によって部材に生じるひずみが最も大きくなるように、飛来物の面積が最小の面 (0.3m×0.2m) が衝突するケースを選定した。

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、並びに材料の非線形特性は「3.5.1 貫通評価」における設定に同じ。

(3) 外壁に対する衝突解析

設計飛来物に対して C h a n g 式による裏面剥離限界厚さを満足しない原子炉建物外壁及びタービン建物外壁については、厚さが最も小さいタービン建物外壁を代表箇所を選定し、風圧力による荷重 W_w 、設計飛来物による衝撃荷重 W_M 及び常時作用する荷重 F_d を考慮し、3次元 F E M モデルを用いた衝突解析により裏面側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。

衝突位置については、部材曲げによる変形量が最大になると考えられる中央部を選定した。衝突方向は、部材面に対して垂直とし、局所的な変形によって部材に生じるひずみが最も大きくなるように、飛来物の面積が最小の面 (0.3m×0.2m) が衝突するケースを選定した。

なお、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

守的に考慮しない。

衝突解析には、解析コード「LS-DYNA」を用いる。評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

a. 解析モデル

(a) タービン建物外壁

タービン建物外壁のモデル化範囲は、想定する荷重の伝達を考慮し、外壁を構成するコンクリート及び鉄筋とする。

コンクリートはソリッド要素でモデル化し、鉄筋をビーム要素でモデル化する。

タービン建物外壁の解析モデルを図 3-7 に示す。

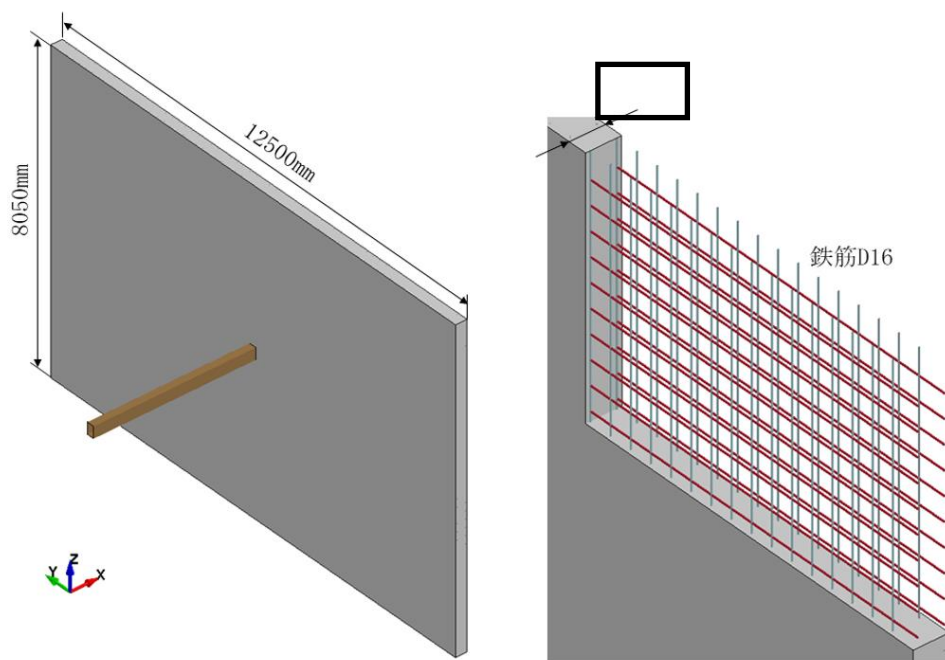


図 3-7 タービン建物外壁の解析モデル

(b) 設計飛来物

設計飛来物は、タービン建物屋根スラブの解析モデルと同じ鋼製材を用いる。

b. 使用材料及び材料定数

コンクリート及び鉄筋の材料物性については、タービン建物屋根スラブの解析に同じ。

3.5.3 変形評価

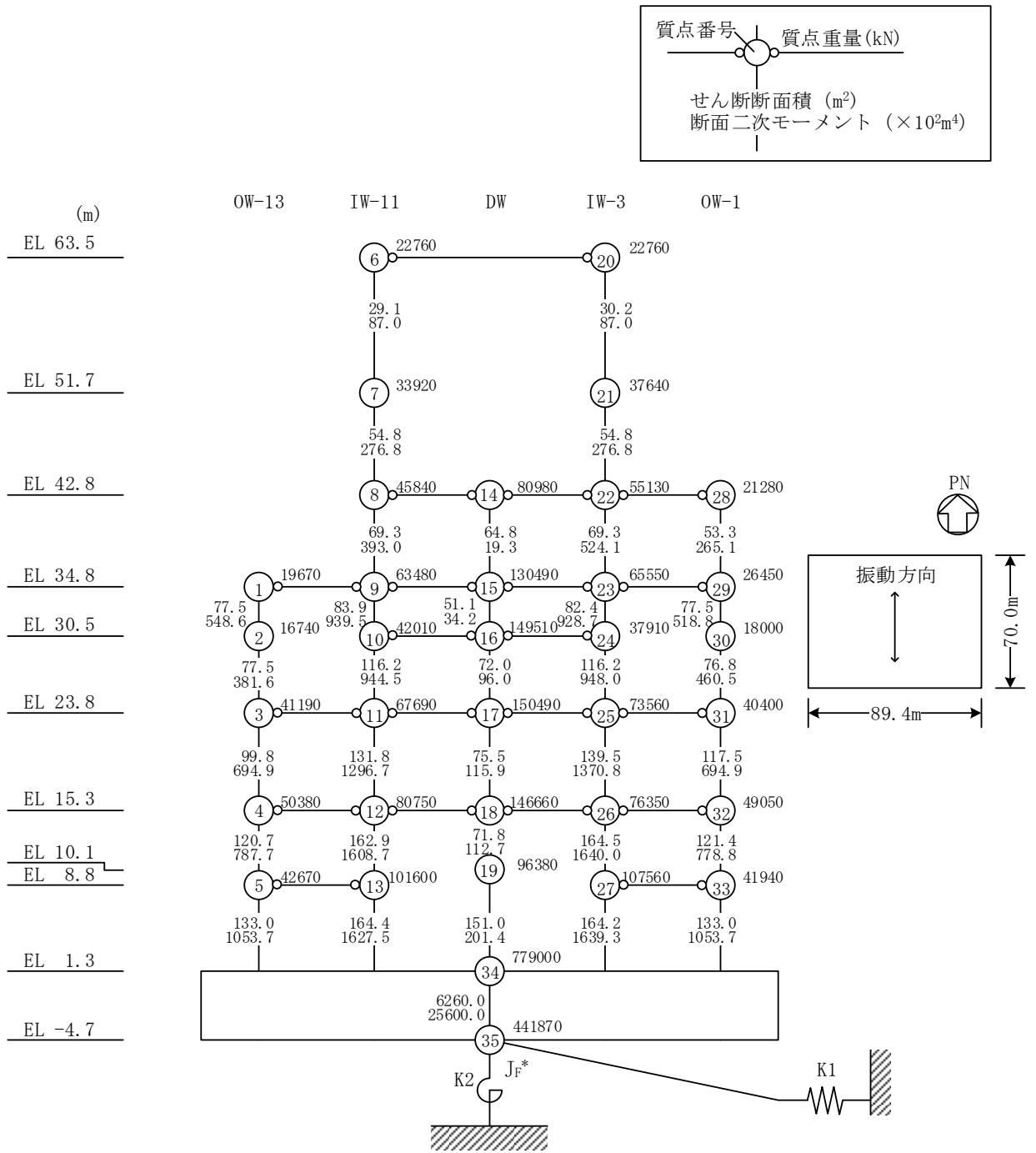
(1) 耐震壁

原子炉建物，タービン建物，廃棄物処理建物及び制御室建物の耐震壁については，設計荷重を考慮し，地震応答解析モデルを用いた静的解析によりせん断ひずみを算出し，許容限界を超えないことを確認する。

原子炉建物，タービン建物，廃棄物処理建物及び制御室建物の地震応答解析モデル図を図3-8～図3-11に， $\tau - \gamma$ 関係を表3-21～表3-28に示す。

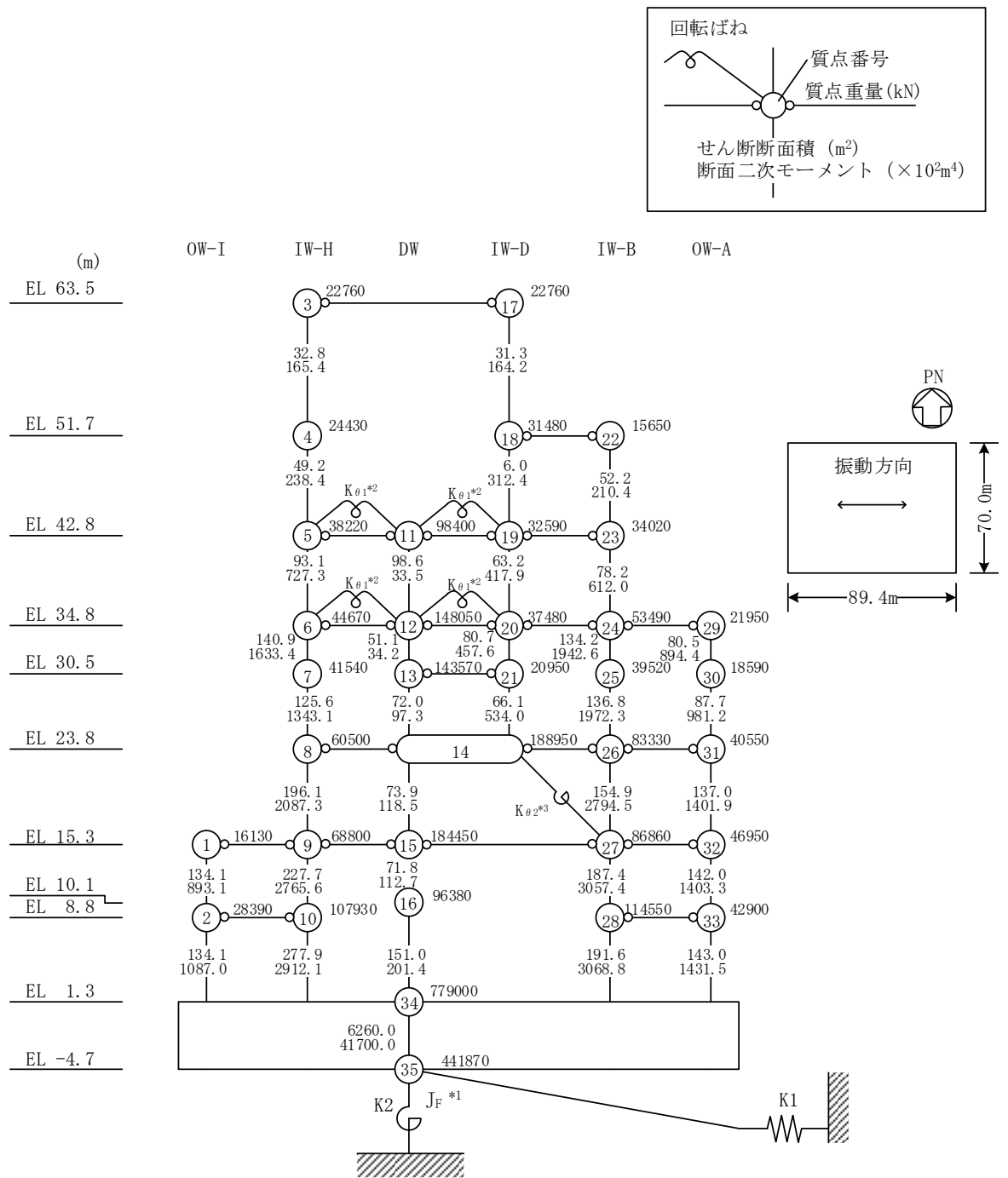
原子炉建物，タービン建物，廃棄物処理建物及び制御室建物の地震応答解析モデル図及び $\tau - \gamma$ 関係は，VI-2-2-2「原子炉建物の地震応答計算書」，VI-2-2-7「タービン建物の地震応答計算書」，VI-2-2-9「廃棄物処理建物の地震応答計算書」及びVI-2-2-5「制御室建物の地震応答計算書」と同じである。

静的解析には，解析コード「NUPP4」を用いる。評価に用いる解析コードの検証，妥当性確認等の概要については，VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。



注記* : 回転慣性重量(12.25×10⁸kN・m²)

図 3-8(1) 原子炉建物の地震応答解析モデル図 (NS 方向)



注記*1：回転慣性重量(20.88×10⁸kN・m²)

*2：燃料プール壁の回転ばね(2.195×10⁹kN・m/rad)

*3：内部ボックス壁の軸抵抗を考慮した回転ばね(135.2×10⁹kN・m/rad)

図 3-8(2) 原子炉建物の地震応答解析モデル図 (EW方向)

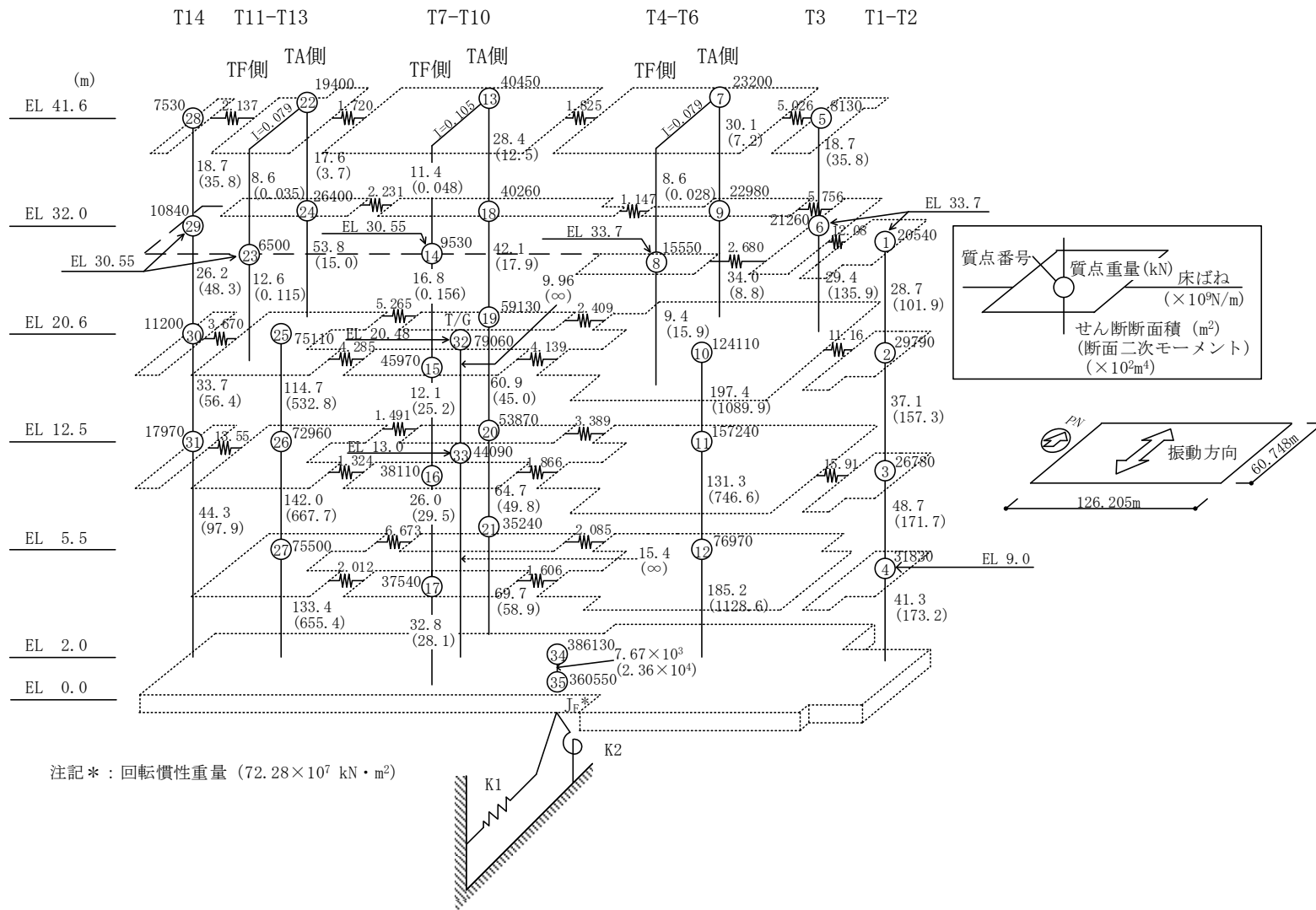
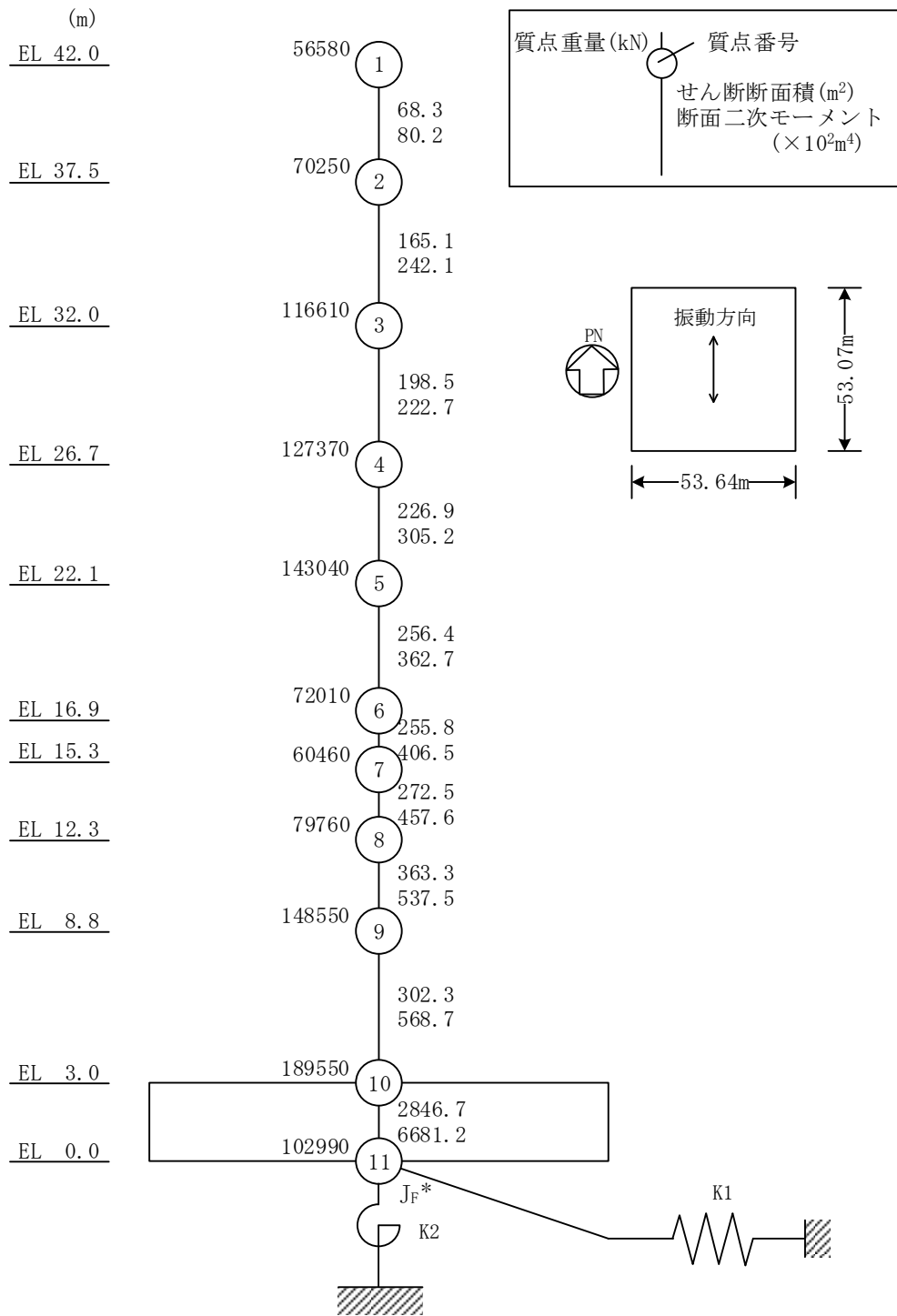
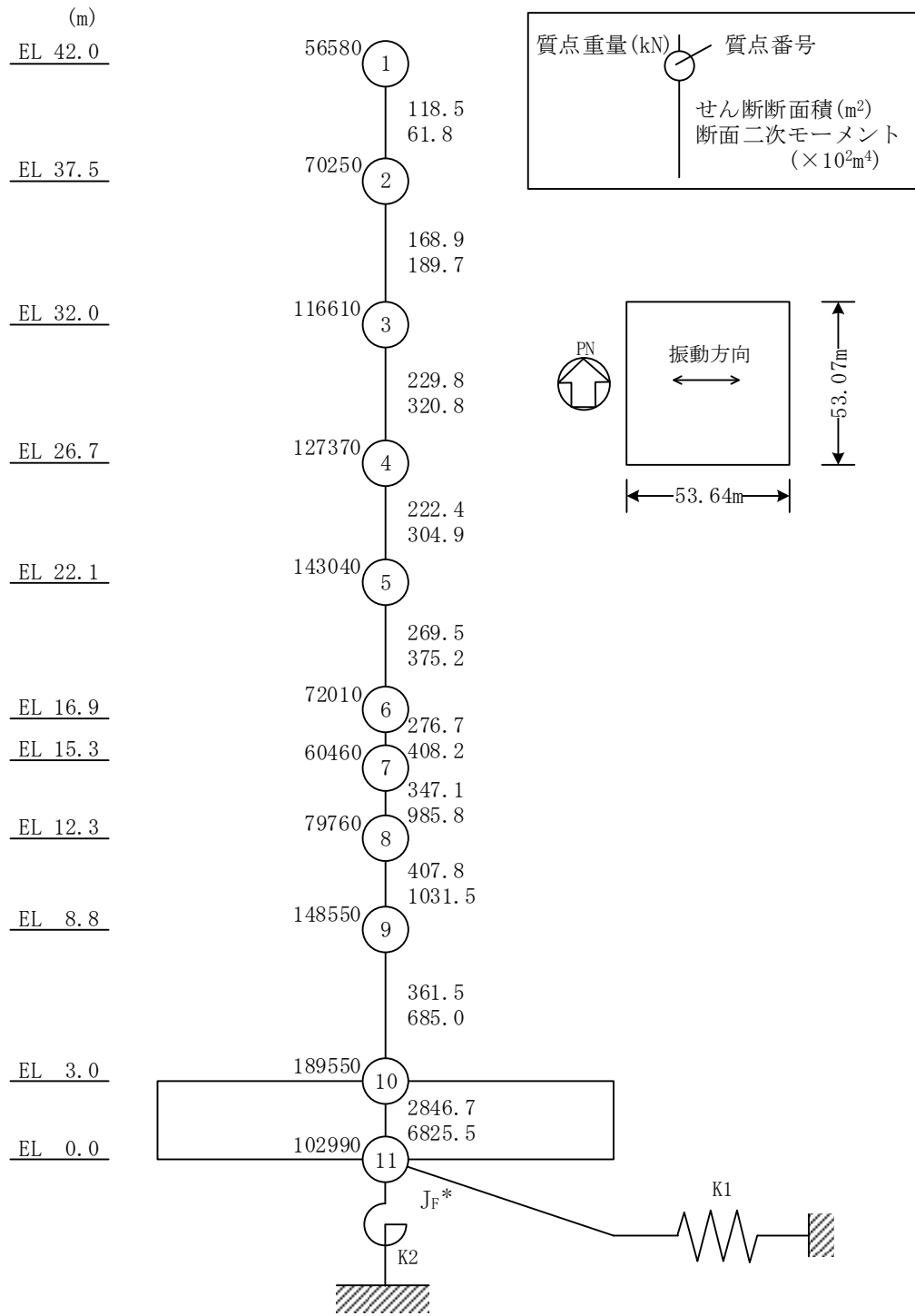


図 3-9(1) タービン建物の地震応答解析モデル図 (NS 方向)



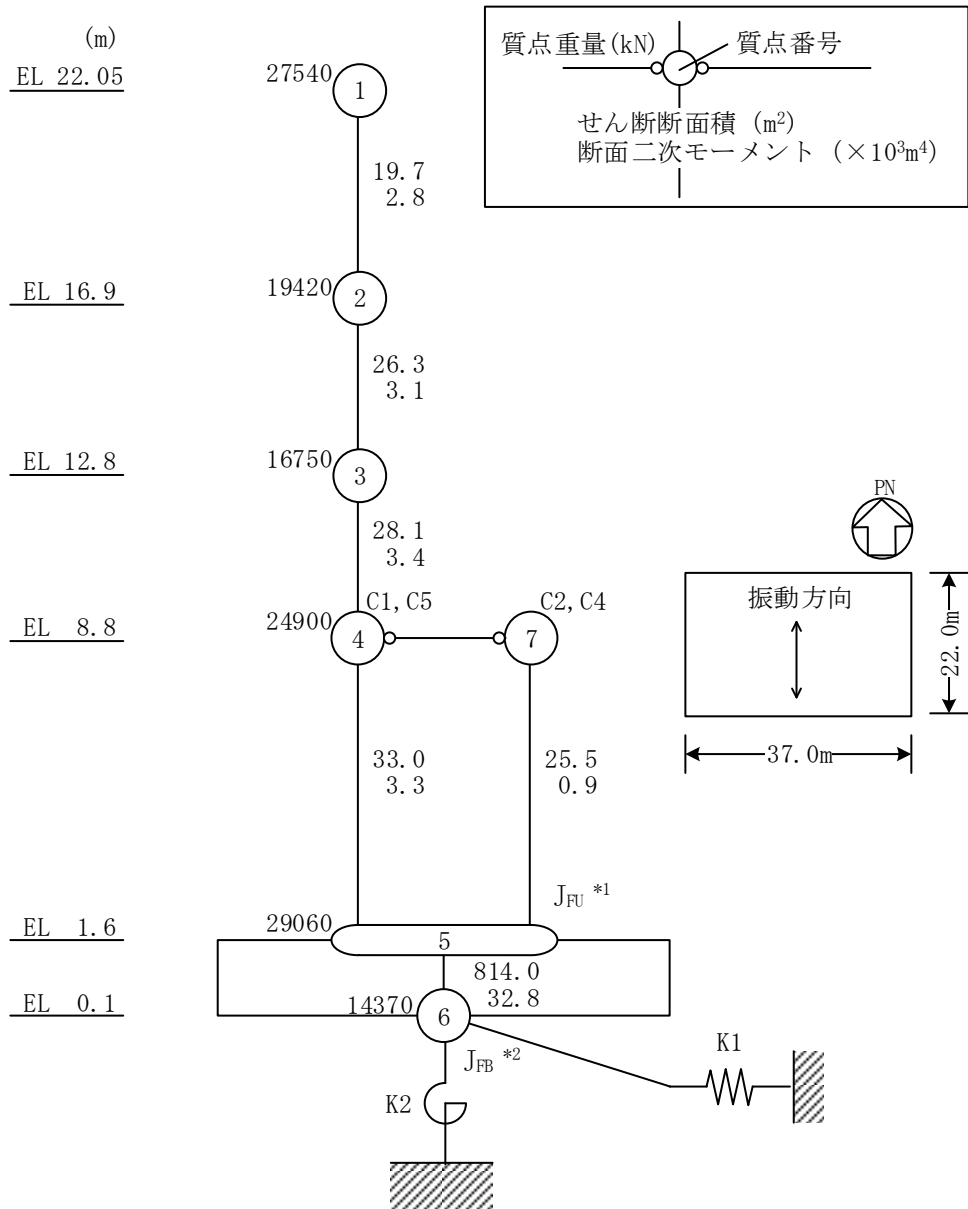
注記* : 回転慣性重量 (29.35 × 10⁷ kN · m²)

図 3-10(1) 廃棄物処理建物の地震応答解析モデル図 (NS 方向)



注記* : 回転慣性重量 (31.61 × 10⁷ kN · m²)

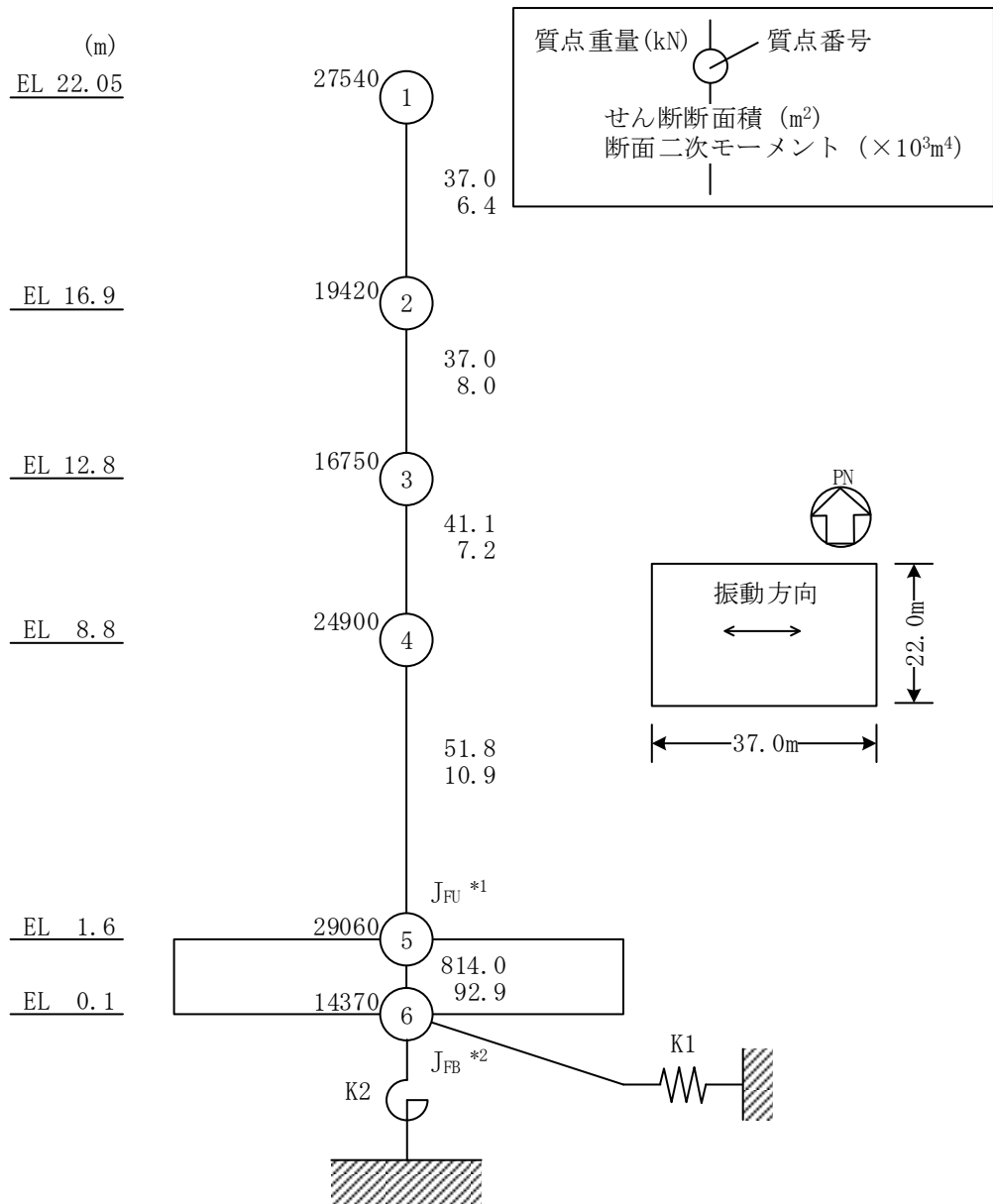
図 3-10(2) 廃棄物処理建物の地震応答解析モデル図 (EW方向)



注記*1：回転慣性重量（基礎スラブ上端）(47.46×10⁵kN・m²)

*2：回転慣性重量（基礎スラブ下端）(5.79×10⁵kN・m²)

図 3-11(1) 制御室建物の地震応答解析モデル図（NS方向）



注記*1: 回転慣性重量 (基礎スラブ上端) ($13.42 \times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}^2$)

*2: 回転慣性重量 (基礎スラブ下端) ($1.64 \times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}^2$)

図 3-11(2) 制御室建物の地震応答解析モデル図 (EW方向)

表 3-21(1) 原子炉建物のせん断スケルトン曲線 ($\tau - \gamma$ 関係) (N S 方向)

OW-13

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
34.8~30.5	1.60	2.15	5.40	0.170	0.510	4.00
30.5~23.8	1.68	2.26	5.44	0.179	0.536	4.00
23.8~15.3	1.74	2.35	5.33	0.185	0.556	4.00
15.3~8.8	1.82	2.46	5.35	0.194	0.582	4.00
8.8~1.3	1.86	2.52	5.40	0.199	0.596	4.00

IW-11

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
63.5~51.7	1.69	2.28	5.20	0.180	0.539	4.00
51.7~42.8	1.73	2.34	5.28	0.185	0.554	4.00
42.8~34.8	1.75	2.36	5.39	0.186	0.558	4.00
34.8~30.5	1.79	2.41	5.43	0.190	0.571	4.00
30.5~23.8	1.94	2.62	5.23	0.207	0.620	4.00
23.8~15.3	1.96	2.65	5.17	0.209	0.627	4.00
15.3~8.8	2.06	2.78	5.22	0.220	0.659	4.00
8.8~1.3	2.12	2.86	5.25	0.226	0.678	4.00

DW

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
42.8~34.8	1.62	2.19	5.68	0.173	0.519	4.00
34.8~30.5	1.83	2.47	5.56	0.195	0.584	4.00
30.5~23.8	2.05	2.76	5.43	0.218	0.655	4.00
23.8~15.3	2.31	3.12	5.91	0.247	0.740	4.00
15.3~10.1	2.44	3.29	6.34	0.260	0.780	4.00
10.1~1.3	2.35	3.18	5.97	0.251	0.753	4.00

表 3-21(2) 原子炉建物のせん断スケルトン曲線 ($\tau - \gamma$ 関係) (N S 方向)

IW-3

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
63.5~51.7	1.68	2.26	5.19	0.179	0.536	4.00
51.7~42.8	1.76	2.37	5.30	0.187	0.561	4.00
42.8~34.8	1.75	2.36	5.39	0.187	0.560	4.00
34.8~30.5	1.91	2.57	5.49	0.203	0.610	4.00
30.5~23.8	1.94	2.62	5.23	0.207	0.620	4.00
23.8~15.3	1.99	2.68	5.20	0.212	0.635	4.00
15.3~8.8	2.04	2.76	5.19	0.218	0.653	4.00
8.8~1.3	2.13	2.87	5.24	0.227	0.681	4.00

OW-1

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
42.8~34.8	1.63	2.21	5.36	0.174	0.523	4.00
34.8~30.5	1.70	2.29	5.45	0.181	0.543	4.00
30.5~23.8	1.78	2.40	5.59	0.190	0.569	4.00
23.8~15.3	1.84	2.48	5.34	0.196	0.587	4.00
15.3~8.8	1.87	2.52	5.29	0.199	0.597	4.00
8.8~1.3	1.91	2.57	5.36	0.203	0.610	4.00

表 3-22(1) 原子炉建物のせん断スケルトン曲線 ($\tau - \gamma$ 関係) (E W方向)

OW-I

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
15.3~8.8	1.58	2.13	5.27	0.168	0.505	4.00
8.8~1.3	1.64	2.22	5.46	0.175	0.526	4.00

IW-H

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
63.5~51.7	1.72	2.32	5.26	0.183	0.549	4.00
51.7~42.8	1.77	2.38	5.34	0.188	0.565	4.00
42.8~34.8	1.78	2.40	5.43	0.189	0.568	4.00
34.8~30.5	1.85	2.49	5.40	0.197	0.590	4.00
30.5~23.8	1.91	2.57	5.43	0.203	0.610	4.00
23.8~15.3	1.91	2.58	5.63	0.203	0.610	4.00
15.3~8.8	1.97	2.66	5.36	0.210	0.630	4.00
8.8~1.3	2.05	2.77	5.36	0.219	0.656	4.00

DW

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
42.8~34.8	1.62	2.19	5.85	0.173	0.519	4.00
34.8~30.5	1.83	2.47	5.92	0.195	0.584	4.00
30.5~23.8	2.05	2.76	5.71	0.218	0.655	4.00
23.8~15.3	2.31	3.12	6.01	0.247	0.740	4.00
15.3~10.1	2.44	3.29	6.34	0.260	0.780	4.00
10.1~1.3	2.35	3.18	5.97	0.251	0.753	4.00

表 3-22(2) 原子炉建物のせん断スケルトン曲線 ($\tau - \gamma$ 関係) (E W 方向)

IW-D

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
63.5~51.7	1.71	2.31	5.25	0.182	0.547	4.00
51.7~42.8	—*					
42.8~34.8	1.81	2.45	5.06	0.193	0.580	4.00
34.8~30.5	1.93	2.61	5.09	0.206	0.619	4.00
30.5~23.8	2.09	2.82	5.37	0.223	0.669	4.00

IW-B

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
51.7~42.8	1.64	2.21	5.39	0.174	0.523	4.00
42.8~34.8	1.74	2.35	5.47	0.185	0.556	4.00
34.8~30.5	1.74	2.35	5.18	0.185	0.556	4.00
30.5~23.8	1.83	2.47	5.22	0.195	0.584	4.00
23.8~15.3	1.90	2.56	5.43	0.202	0.607	4.00
15.3~8.8	2.00	2.70	5.19	0.213	0.640	4.00
8.8~1.3	2.09	2.82	5.20	0.223	0.668	4.00

OW-A

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
34.8~30.5	1.62	2.18	5.24	0.172	0.517	4.00
30.5~23.8	1.68	2.27	5.14	0.179	0.538	4.00
23.8~15.3	1.74	2.35	5.39	0.185	0.556	4.00
15.3~8.8	1.85	2.50	5.33	0.198	0.593	4.00
8.8~1.3	1.95	2.64	5.38	0.208	0.625	4.00

注記* : 線形部材

表 3-23(1) タービン建物のせん断スケルトン曲線 ($\tau - \gamma$ 関係) (NS 方向)

T1-T2

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
33.7~20.6	1.61	2.17	4.66	0.171	0.514	4.00
20.6~12.5	1.69	2.28	4.55	0.180	0.540	4.00
12.5~9.0	1.74	2.35	4.67	0.186	0.557	4.00
9.0~2.0	1.82	2.45	4.60	0.194	0.581	4.00

T3

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
41.6~33.7	1.64	2.21	5.10	0.175	0.524	4.00
33.7~20.6	1.80	2.43	4.88	0.192	0.576	4.00

T4-T6 (TA側)

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
41.6~32.0	1.67	2.25	3.95	0.178	0.534	4.00
32.0~20.6	1.86	2.51	3.73	0.198	0.595	4.00

T4-T6 (TF側)

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
41.6~33.7	—*					
33.7~20.6	1.64	2.21	4.07	0.174	0.523	4.00

T3-T6

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
20.6~12.5	1.74	2.34	4.77	0.185	0.555	4.00
12.5~5.5	1.93	2.60	4.85	0.205	0.616	4.00
5.5~2.0	1.95	2.63	4.84	0.208	0.624	4.00

注記* : 線形部材

表 3-23(2) タービン建物のせん断スケルトン曲線 ($\tau - \gamma$ 関係) (NS 方向)

T7-T10(TA側)

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
41.6~32.0	1.69	2.28	4.06	0.180	0.539	4.00
32.0~20.6	2.00	2.70	4.18	0.213	0.640	4.00
20.6~12.5	1.95	2.64	3.60	0.208	0.625	4.00
12.5~5.5	2.06	2.78	3.69	0.220	0.659	4.00
5.5~2.0	2.14	2.89	3.79	0.228	0.683	4.00

T7-T10(TF側)

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
41.6~30.55	—*					
30.55~20.6	—*					
20.6~12.5	1.56	2.10	4.07	0.166	0.498	4.00
12.5~5.5	1.72	2.32	3.81	0.183	0.549	4.00
5.5~2.0	1.80	2.42	3.61	0.191	0.574	4.00

T11-T13(TA側)

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
41.6~32.0	1.69	2.28	4.17	0.180	0.539	4.00
32.0~20.6	1.68	2.27	3.84	0.179	0.537	4.00

T11-T13(TF側)

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
41.6~30.55	—*					
30.55~20.6	—*					

注記* : 線形部材

表 3-23(3) タービン建物のせん断スケルトン曲線 ($\tau - \gamma$ 関係) (NS 方向)

T11-T13

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
20.6~12.5	1.73	2.33	4.66	0.184	0.552	4.00
12.5~5.5	1.82	2.45	4.46	0.193	0.580	4.00
5.5~2.0	1.96	2.64	4.47	0.209	0.626	4.00

T14

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
41.6~30.55	1.67	2.26	5.01	0.178	0.535	4.00
30.55~20.6	1.78	2.41	4.31	0.190	0.570	4.00
20.6~12.5	1.83	2.48	3.98	0.195	0.586	4.00
12.5~2.0	1.88	2.53	4.50	0.200	0.600	4.00

表 3-24(1) タービン建物のせん断スケルトン曲線 ($\tau - \gamma$ 関係) (EW方向)

TX-TZ

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
41.6~32.0	1.69	2.27	4.95	0.180	0.539	4.00

TX-TZ (T14側)

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
32.0~20.6	1.82	2.46	5.49	0.194	0.583	4.00
20.6~12.5	1.76	2.37	5.00	0.187	0.561	4.00
12.5~5.5	1.84	2.48	4.93	0.196	0.587	4.00

TX-TZ (T1側)

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
32.0~20.6	1.66	2.24	5.14	0.177	0.531	4.00
20.6~8.8	1.90	2.56	4.13	0.202	0.606	4.00
8.8~5.5	2.06	2.78	4.29	0.220	0.659	4.00

TX-TZ

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
5.5~2.0	1.91	2.57	5.09	0.203	0.609	4.00

TA-TC

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
41.6~32.0	1.89	2.55	5.06	0.201	0.604	4.00
32.0~20.6	1.94	2.62	5.25	0.207	0.620	4.00
20.6~12.5	1.94	2.62	5.00	0.207	0.621	4.00

表 3-24(2) タービン建物のせん断スケルトン曲線 ($\tau - \gamma$ 関係) (E W 方向)

TA-TC(T14側)

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
12.5~5.5	2.45	3.31	4.49	0.261	0.783	4.00
5.5~2.0	2.47	3.34	4.54	0.263	0.790	4.00

TA-TC(T1側)

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
12.5~5.5	1.93	2.61	5.07	0.206	0.617	4.00
5.5~2.0	2.03	2.75	4.91	0.217	0.650	4.00

TC-TF

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
41.6~30.55	1.85	2.50	5.04	0.197	0.592	4.00
30.55~20.6	1.89	2.56	5.12	0.202	0.605	4.00
20.6~12.5	1.83	2.48	5.01	0.195	0.586	4.00
12.5~5.5	1.92	2.59	5.11	0.204	0.612	4.00
5.5~2.0	2.18	2.94	5.24	0.232	0.695	4.00

TG-TH

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
33.7~20.6	1.65	2.23	4.91	0.176	0.528	4.00
20.6~12.5	1.71	2.31	4.75	0.182	0.546	4.00
12.5~5.5	1.90	2.56	4.75	0.202	0.607	4.00
5.5~2.0	2.07	2.80	4.80	0.221	0.662	4.00

表 3-25 廃棄物処理建物のせん断スケルトン曲線 ($\tau - \gamma$ 関係) (NS 方向)

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
42.0~37.5	1.62	2.19	4.58	0.173	0.519	4.00
37.5~32.0	1.67	2.26	4.53	0.178	0.535	4.00
32.0~26.7	1.79	2.42	4.31	0.191	0.573	4.00
26.7~22.1	1.89	2.55	4.34	0.201	0.604	4.00
22.1~16.9	1.95	2.63	4.42	0.208	0.624	4.00
16.9~15.3	2.00	2.69	4.43	0.213	0.638	4.00
15.3~12.3	1.99	2.69	4.45	0.212	0.637	4.00
12.3~8.8	1.97	2.67	4.27	0.210	0.631	4.00
8.8~3.0	2.03	2.74	4.17	0.216	0.648	4.00

表 3-26 廃棄物処理建物のせん断スケルトン曲線 ($\tau - \gamma$ 関係) (EW 方向)

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
42.0~37.5	1.61	2.17	4.64	0.171	0.514	4.00
37.5~32.0	1.67	2.26	4.33	0.178	0.535	4.00
32.0~26.7	1.79	2.42	4.30	0.191	0.573	4.00
26.7~22.1	1.89	2.55	4.35	0.202	0.605	4.00
22.1~16.9	1.98	2.67	4.37	0.211	0.633	4.00
16.9~15.3	2.10	2.84	4.43	0.224	0.673	4.00
15.3~12.3	2.03	2.74	4.54	0.216	0.649	4.00
12.3~8.8	1.97	2.66	4.28	0.210	0.629	4.00
8.8~3.0	2.06	2.78	4.34	0.220	0.659	4.00

表 3-27 制御室建物のせん断スケルトン曲線（ $\tau - \gamma$ 関係）（N S 方向）

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
22.05~16.9	1.70	2.29	4.72	0.185	0.554	4.00
16.9~12.8	1.80	2.44	4.83	0.196	0.589	4.00
12.8~8.8	1.88	2.53	4.69	0.204	0.613	4.00
8.8~1.6 (C1, C5)	1.83	2.47	4.16	0.199	0.597	4.00
8.8~1.6 (C2, C4)	1.83	2.47	3.82	0.199	0.597	4.00

表 3-28 制御室建物のせん断スケルトン曲線（ $\tau - \gamma$ 関係）（E W 方向）

EL (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
22.05~16.9	1.70	2.29	4.74	0.185	0.554	4.00
16.9~12.8	1.80	2.44	4.80	0.196	0.589	4.00
12.8~8.8	1.88	2.53	4.83	0.204	0.613	4.00
8.8~1.6	1.83	2.47	4.45	0.199	0.597	4.00

設計荷重のうち、風圧力による荷重 W_w は、建物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、建物の内部から外部に作用し、建物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、各建物の最上部に加える。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材の衝撃荷重 $W_M=1760\text{kN}$ を用いて評価を行う。

$$W_M = m \cdot V / \Delta t = m \cdot V^2 / L_1$$

(2) 屋根スラブ

a. スタッド

原子炉建物屋根スラブ及びタービン建物屋根スラブについて、風圧力による荷重 W_w 及び気圧差による荷重 W_p によって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3-12に示す。

スタッド1本当たりの発生引張力

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

ここで、 $Q = \frac{\omega_T \cdot L}{2}$

n : スタッドの本数 (本)

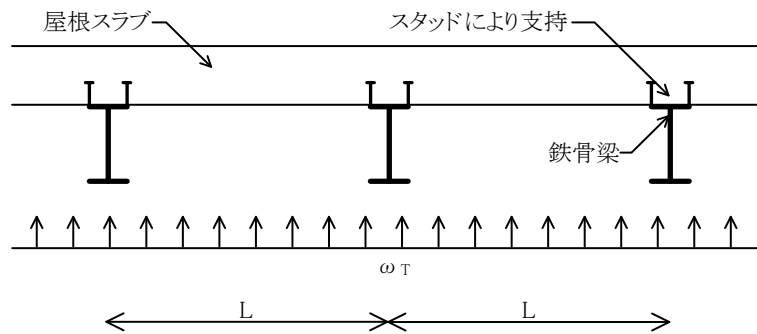


図3-12 屋根スラブの評価方法

スタッドの許容引張力は、「各種合成構造設計指針 同解説（（社）日本建築学会，2010年改定）」に基づき、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} 及び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、

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

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

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

b. 屋根スラブ

タービン建物屋根スラブについて、風圧力による荷重 W_w 、気圧差による荷重 W_p 及び常時作用する荷重 F_d により屋根スラブ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、屋根スラブを支持する梁位置を支持点とした二連梁として行う。屋根スラブ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、屋根スラブに作用する荷重の概要を図3-13に示す。

屋根スラブに発生する単位幅当たりの曲げモーメント

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

ここで、

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

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

屋根スラブに発生する単位幅当たりのせん断力

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

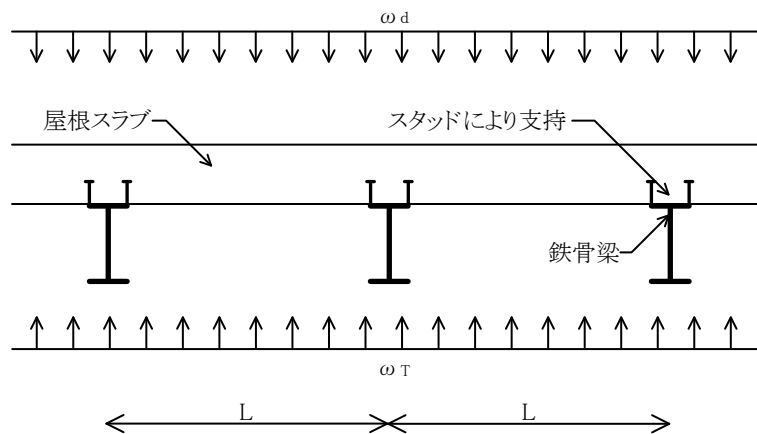


図3-13 屋根スラブの評価方法

許容限界である屋根スラブの短期許容応力度は、「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説－許容応力度設計法－（（社）日本建築学会，1999 改定）」に基づき算出する。

3.5.4 応力評価

気圧差による荷重 (W_p) によりカンヌキ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。

(1) カンヌキに生じる荷重

カンヌキに生じる荷重は気圧差による荷重 (W_p) をカンヌキで負担した場合に発生する反力 R から算定する。

カンヌキに生じる荷重を図 3-14 に示す。

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

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

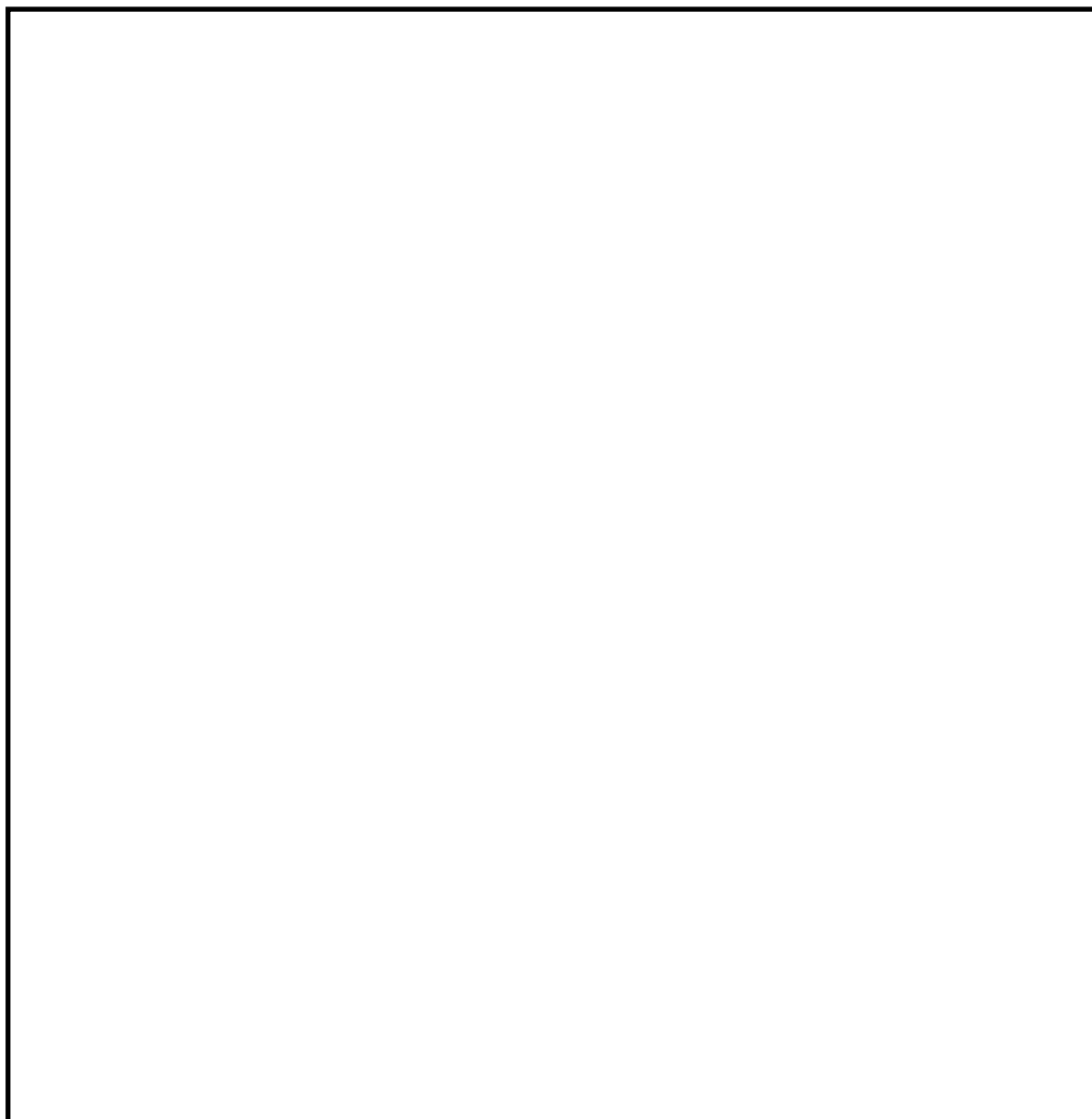


図 3-14 カンヌキに生じる荷重

カンヌキ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 3-15 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。

$$M_k = R \cdot L$$

$$Q_k = R$$

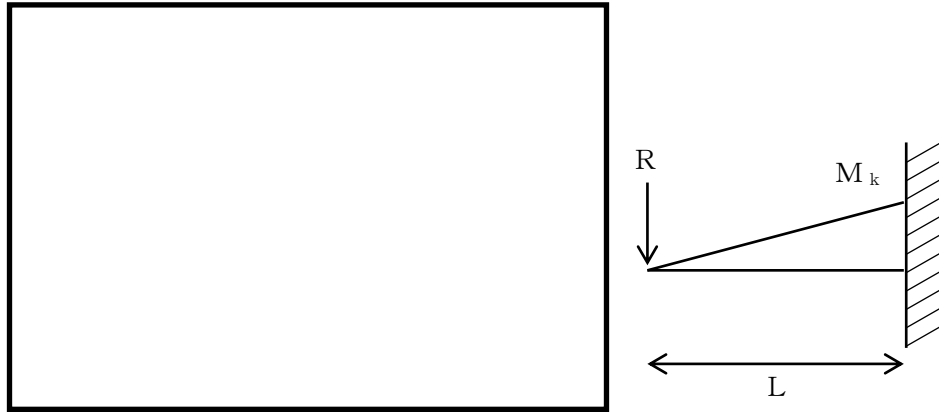


図 3-15 カンヌキの詳細図及びモデルの概念図

(2) 断面検定

カンヌキに生じる応力度が許容限界以下であることを確認する。カンヌキの許容限界は表 3-14 のとおり。

カンヌキ 1 本あたりに生じる曲げ応力度

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

カンヌキ 1 本あたりに生じるせん断応力度

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

4. 評価条件

4.1 貫通評価

4.1.1 式による評価（鉄筋コンクリート部）

貫通評価において，各施設の鉄筋コンクリート部の壁，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 貫通評価式に用いる条件

記号	単位	記号の説明		数値
D	kgf/cm ³	設計飛来物直径密度 ($D = W/d^3$)		6.39×10^{-3}
d	cm	設計飛来物直径		27.6
F _c	kgf/cm ²	コンクリートの設計基準強度		240* ¹
				225* ²
				210* ³
				244* ⁴
N	—	設計飛来物の形状係数		1.14
V	m/s	壁面	設計飛来物の衝突速度（水平）	51
		屋根スラブ	設計飛来物の衝突速度（鉛直）	34
W	kgf	設計飛来物重量		135
α _e	—	低減係数		1.0

注記*1：原子炉建物，タービン建物及び廃棄物処理建物の値

*2：制御室建物の値

*3：ディーゼル燃料貯蔵タンク室の値

*4：B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽の値（コンクリートの設計基準強度 24N/mm² より換算）

4.1.2 タービン建物屋根スラブに対する衝突解析

タービン建物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 に、解析ケース図を図 4-1 に示す。

表 4-2 解析ケース

評価対象	衝突位置	設計飛来物の衝突方向	対象部材
タービン建物 屋根スラブ	中央部	鉛直：縦	躯体コンクリート () 鉄筋上端筋 EW 方向 D13@150, NS 方向 D13@150 鉄筋下端筋 EW 方向 D13@150, NS 方向 D16@230 デッキプレート (t=2.3mm)

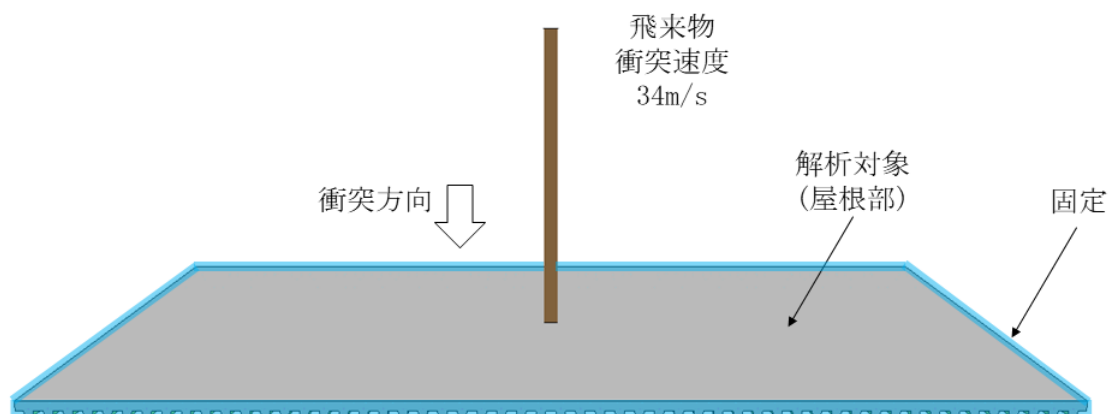


図 4-1 解析ケース図

4.1.3 扉及び鋼製蓋

評価条件については、「3. 強度評価方法」に示すとおり設定する。

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 裏面剥離評価式に用いる条件

記号	単位	記号の説明		数値
d	cm	設計飛来物直径		27.6
f_c'	kgf/cm ²	コンクリートの設計基準強度		240* ¹
				225* ²
				210* ³
				244* ⁴
V	m/s	壁面	設計飛来物の衝突速度（水平）	51
		屋根スラブ	設計飛来物の衝突速度（鉛直）	34
V_0	m/s	飛来物基準速度		60.96
W	kgf	設計飛来物重量		135
α_s	—	低減係数		1.0

注記*1：原子炉建物，タービン建物及び廃棄物処理建物の値

*2：制御室建物の値

*3：ディーゼル燃料貯蔵タンク室の値


*4：B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽の値（コンクリートの設計基準強度 24N/mm²より換算）

4.2.2 タービン建物外壁に対する衝突解析

タービン建物外壁の裏面剥離評価における衝突解析は、外壁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 4-4 に、解析ケース図を図 4-2 に示す。

表 4-4 解析ケース

評価対象	衝突位置	設計飛来物の衝突方向	対象部材
タービン建物 外壁	中央部	水平：縦	躯体コンクリート () 鉄筋 (D16@200)

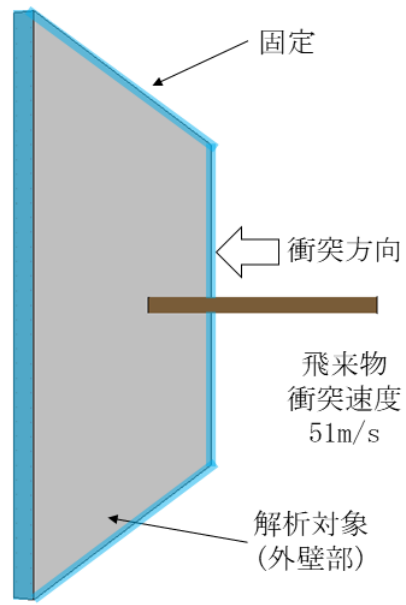


図 4-2 解析ケース図

- 4.2.3 タービン建物屋根スラブに対する衝突解析
解析ケースは貫通評価に同じ。

4.3 変形評価

4.3.1 耐震壁

原子炉建物，タービン建物，廃棄物処理建物及び制御室建物の耐震壁の変形評価に用いる条件を表 4-5～表 4-9 に示す。

表 4-5 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	0.2	m
m	設計飛来物質量	135	kg
V	設計飛来物の衝突速度（水平）	51	m/s

表 4-6 原子炉建物の変形評価の評価条件

EL (m)	位置	風力係数 C	受圧面積 A (m ²)	
			N S 方向	E W 方向
57.60～65.035	風上	0.8	400	297
	風下	0.4		
47.25～57.60	風上	0.8	557	489
	風下	0.4		
38.80～47.25	風上	0.8	610	477
	風下	0.4		
32.65～38.80	風上	0.8	514	391
	風下	0.4		
27.15～32.65	風上	0.8	492	355
	風下	0.4		
19.55～27.15	風上	0.8	679	491
	風下	0.4		
15.00～19.55	風上	0.8	407	296
	風下	0.4		

表 4-7 タービン建物の変形評価の評価条件

EL (m)	位置	風力係数 C	受圧面積 A (m ²)			
			N S 方向		E W 方向	
			北側	南側	東側	西側
36.80~42.96	風上	0.8	741	773	334	334
	風下	0.4				
26.30~36.80	風上	0.8	1405	1405	666	666
	風下	0.4				
16.55~26.30	風上	0.8	1362	1329	691	661
	風下	0.4				
9.00~16.55	風上	0.8	1019	1016	521	544
	風下	0.4				
8.50~9.00	風上	0.8	92	95	28	36
	風下	0.4				

表 4-8 廃棄物処理建物の変形評価の評価条件

EL (m)	位置	風力係数 C	受圧面積 A (m ²)	
			N S 方向	E W 方向
39.75~47.117	風上	0.8	261	231
	風下	0.4		
34.75~39.75	風上	0.8	285	275
	風下	0.4		
29.35~34.75	風上	0.8	308	297
	風下	0.4		
24.40~29.35	風上	0.8	282	272
	風下	0.4		
19.50~24.40	風上	0.8	279	288
	風下	0.4		
16.10~19.50	風上	0.8	194	207
	風下	0.4		
15.00~16.10	風上	0.8	63	67
	風下	0.4		

表 4-9 制御室建物の変形評価の評価条件

EL (m)	位置	風力係数 C	受圧面積 A (m ²)	
			N S 方向	E W 方向
19.475~22.80	風上	0.8	123	73
	風下	0.4		
15.00~19.475	風上	0.8	166	99
	風下	0.4		

4.3.2 屋根スラブ

(1) スタッド

原子炉建物屋根スラブ及びタービン建物屋根スラブのスタッドの変形評価に用いる条件を表 4-10 に示す。

表 4-10(1) スタッドの評価条件
(原子炉建物屋根スラブ)

記号	定義	数値	単位
A_c	コーン状破壊面の有効投影面積	59200	mm^2
A_0	スタッド頭部の支圧面積	520.7	mm^2
$a_c a$	スタッド断面積で、軸部断面積とねじ部有効断面積の smaller の値	284	mm^2
D	スタッドの頭部直径	32	mm
d	スタッドの軸部直径	19	mm
F_c	コンクリートの設計基準強度	23.5	N/mm^2
f_n	コンクリートの支圧強度	141.0	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	200	mm
p_a	スタッド 1 本当たりの許容引張力	59	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 1 本当たりの許容引張力	66	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 本当たりの許容引張力	59	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 本当たりの許容引張力	73	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	1.50	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	—
Φ_2	低減係数	2/3	—
p	スタッドの間隔	200	mm
T	スタッドに生じる引張力	6.705	kN


表 4-10(2) スタッドの評価条件
(タービン建物屋根スラブ)

記号	定義	数値	単位
A_c	コーン状破壊面の有効投影面積	61330	mm^2
A_0	スタッド頭部の支圧面積	520.7	mm^2
$a_c a$	スタッド断面積で、軸部断面積とねじ部有効断面積の smaller の値	284	mm^2
D	スタッドの頭部直径	32	mm
d	スタッドの軸部直径	19	mm
F_c	コンクリートの設計基準強度	23.5	N/mm^2
f_n	コンクリートの支圧強度	141.0	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	150	mm
p_a	スタッド 1 本当たりの許容引張力	61	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 1 本当たりの許容引張力	66	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 本当たりの許容引張力	61	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 本当たりの許容引張力	73	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	1.50	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	—
Φ_2	低減係数	2/3	—
p	スタッドの間隔	460	mm
T	スタッドに生じる引張力	12.34	kN

(2) 屋根スラブ

タービン建物屋根スラブの変形評価に用いる条件を表 4-11 に示す。

表 4-11 屋根スラブの評価条件

記号	定義	数値	単位
L	屋根スラブの支持スパン	6	m
M	設計竜巻による単位幅当たりの曲げモーメント	15.89	kN・m
Q	屋根スラブに生じる単位幅のせん断力	26.48	kN
f_t	鉄筋の許容引張応力度	345	N/mm ²
f_s	コンクリートの許容せん断応力度	1.08	N/mm ²
a_t	引張鉄筋の断面積	863.5	mm ²
b	屋根スラブの幅	1000	mm
d'	屋根スラブの有効せい		mm
j	屋根スラブの応力中心間距離 ($j = (7/8) \cdot d'$)	78.75	mm
M_a	屋根スラブの許容曲げモーメント	23	kN・m
Q_a	屋根スラブの許容せん断力	85	kN
ω_d	常時作用する荷重による単位幅当たりの荷重	5.41	kN/m
ω_T	設計竜巻による単位幅当たりの荷重 ($= \text{Max} \{ \omega_{T1}, \omega_{T2} \}$)	8.94	kN/m
ω_{T1}	複合荷重 W_{T1} による単位幅当たりの荷重	7.5	kN/m
ω_{T2}	複合荷重 W_{T2} による単位幅当たりの荷重 (設計飛来物による衝撃荷重 W_M は考慮しない)	8.94	kN/m

4.4 応力評価

扉の応力評価に用いる条件を表 4-12 に示す。

表 4-12 応力評価に用いる評価条件
(原子炉建物 1 階 RCW 熱交換器室南側鋼製扉)

記号	定義	数値	単位
A_1	表面鋼板の受圧面積	25.37	m^2
A_2	カンヌキの断面積	3848	mm^2
L	カンヌキと扉枠の距離	140	mm
n	カンヌキの本数	9	本
R	カンヌキ 1 本あたりに生じる荷重	21142	N
ΔP_{max}	気圧差による等分布荷重	7500	N/m^2
W_P	気圧差による荷重	190275	N
Z	カンヌキの断面係数	33673	mm^3

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。

式による評価で許容限界を満足しなかった屋根スラブのうち、厚さが最も小さいタービン建物屋根スラブについて、解析による評価の結果を表 5-2 に、鉄筋のひずみ分布図を図 5-1 に示す。

上記結果より、建物の外壁及び屋根スラブ並びに地中構造物のスラブ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）

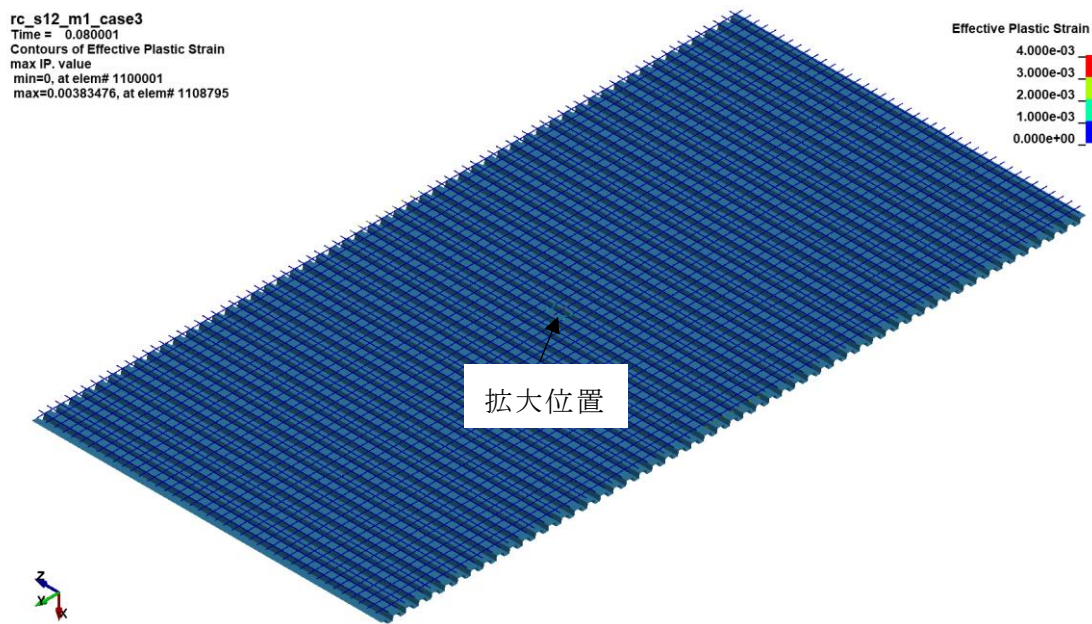
評価対象部位		設計飛来物	評価結果 (cm)	許容限界 (cm)
原子炉建物	外壁	鋼製材	27	
	扉		16*	
タービン建物	外壁		27	
廃棄物処理建物	外壁		27	
	屋根スラブ		19	
制御室建物	外壁		27	
	屋根スラブ		19	
ディーゼル燃料 貯蔵タンク室	スラブ		20	
	鋼製蓋		6*	
B-ディーゼル燃料 貯蔵タンク格納槽	スラブ		19	
	鋼製蓋		6*	

注記*：単位は mm

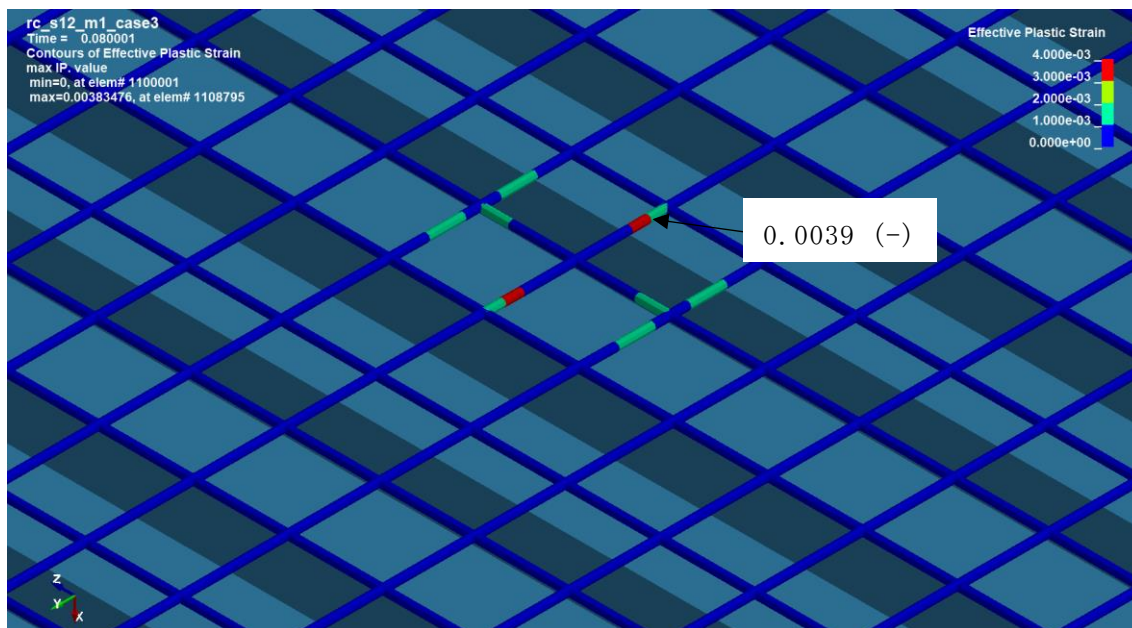
表 5-2 貫通評価結果（解析による評価）

評価対象部位		評価結果	許容限界
タービン建物屋根スラブ*	鉄筋	3.9×10^{-3}	8.4×10^{-2}

注記*：外殻となる屋根スラブの代表箇所（最小版厚部位）



(a) モデル全体



(b) 拡大図

図 5-1 鉄筋のひずみ分布図 (タービン建物屋根スラブ)

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。

式による評価で許容限界を満足しなかった外壁及び屋根スラブのうち、厚さが最も小さいタービン建物外壁及びタービン建物屋根スラブについて、解析による評価の結果を表 5-4 に、鉄筋及びデッキプレートのひずみ分布図を図 5-2 及び図 5-3 に示す。

上記結果より、建物の外壁及び屋根スラブ並びに地中構造物のスラブ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）

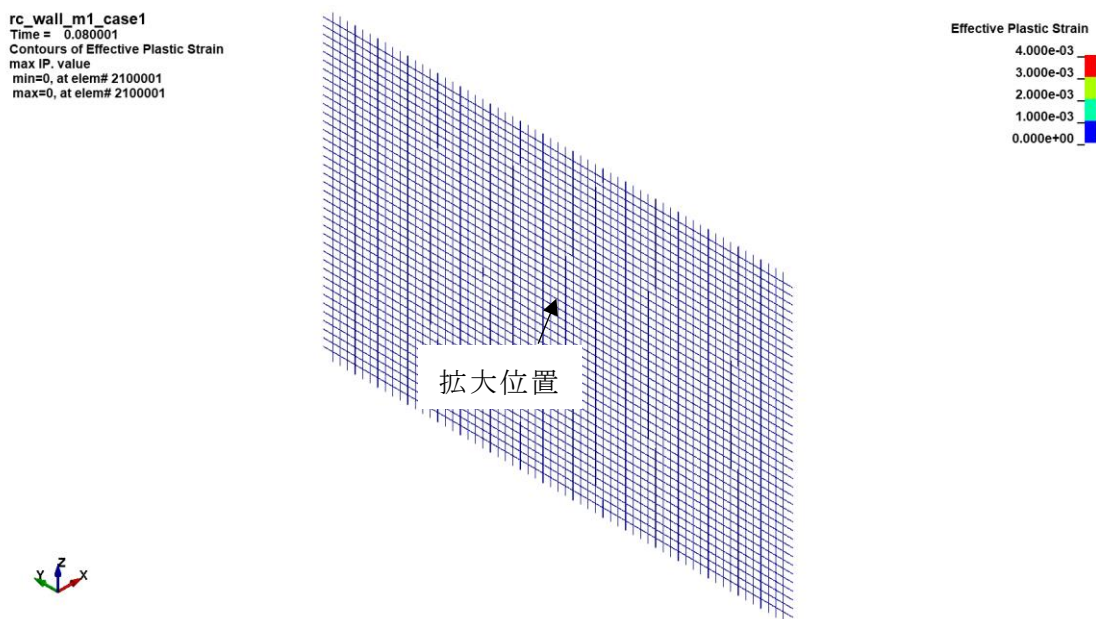
評価対象部位		設計飛来物	評価結果 (cm)	許容限界 (cm)
廃棄物処理建物	外壁	鋼製材	46	
	屋根スラブ		35	
制御室建物	外壁		47	
	屋根スラブ		36	
ディーゼル燃料 貯蔵タンク室	スラブ		37	
B-ディーゼル燃料 貯蔵タンク格納槽	スラブ		35	

表 5-4 裏面剥離評価結果（解析による評価）

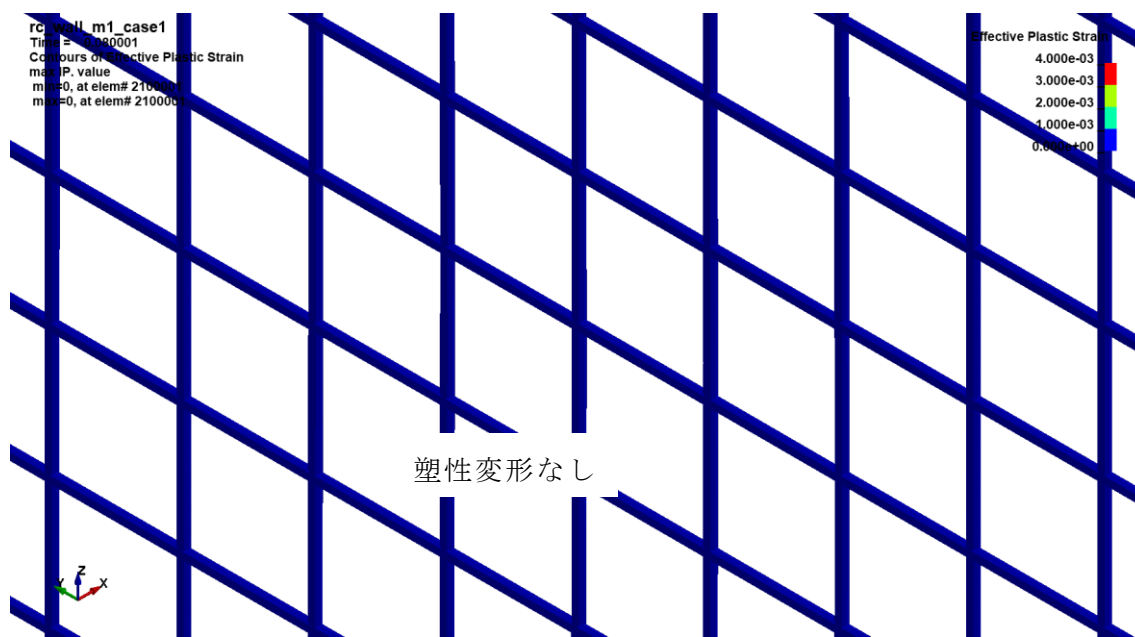
評価対象部位		評価結果	許容限界
タービン建物外壁*1	裏面側鉄筋	塑性ひずみ なし	8.4×10^{-2}
タービン建物屋根スラブ*2	デッキプレート	3.5×10^{-3}	8.0×10^{-2}

注記*1：外殻となる外壁の代表箇所（最小版厚部位）

*2：外殻となる屋根スラブの代表箇所（最小版厚部位）

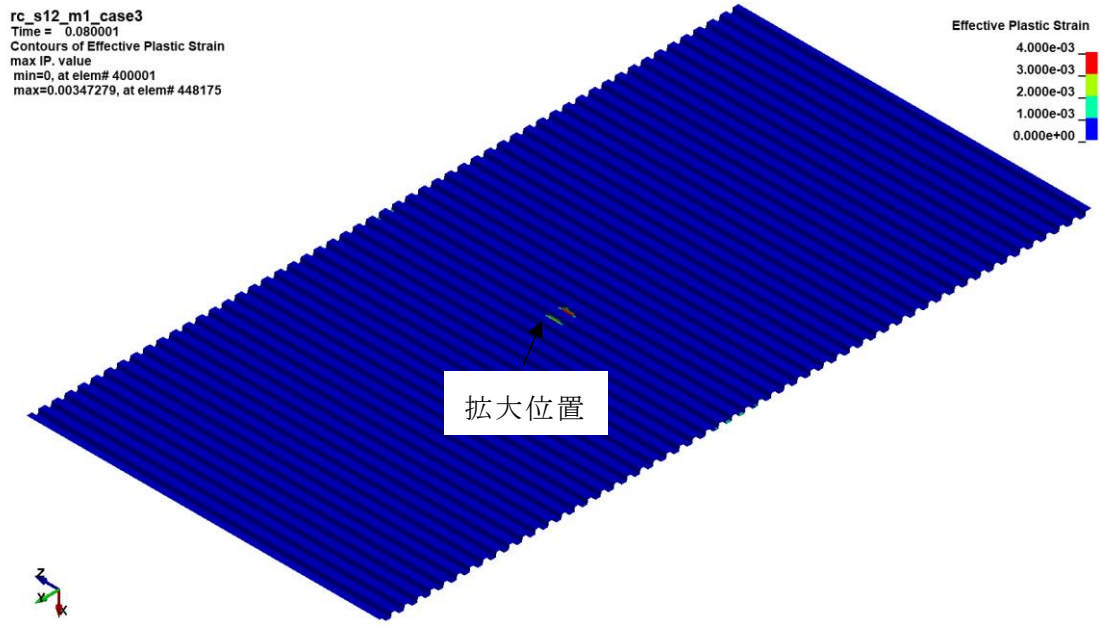


(a) モデル全体

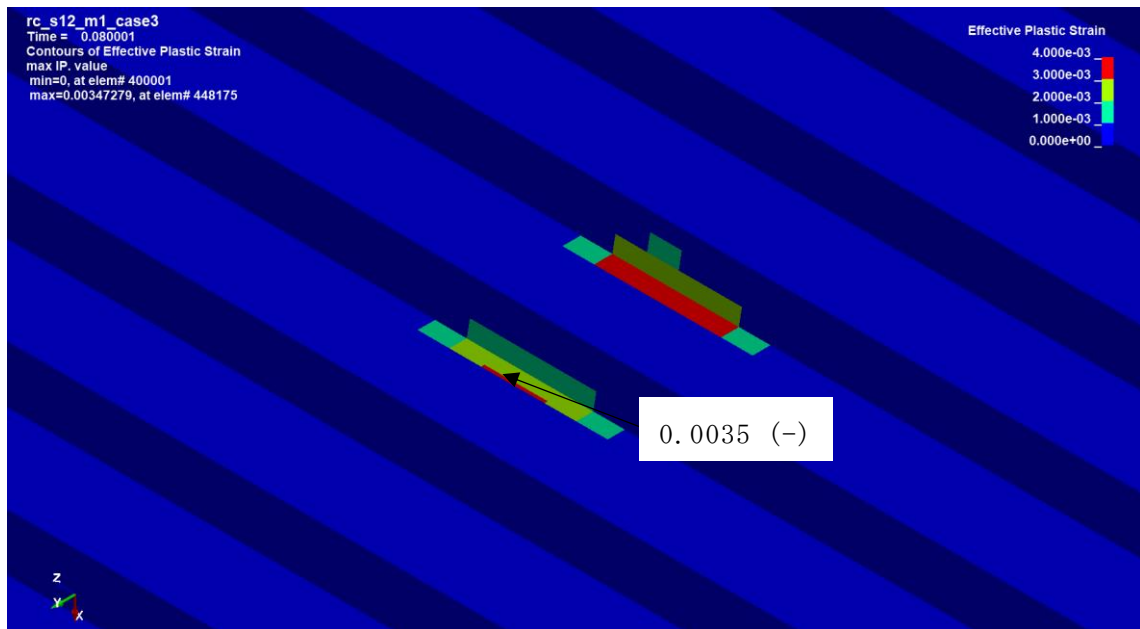


(b) 拡大図

図 5-2 鉄筋のひずみ分布図 (タービン建物外壁)



(a) モデル全体



(b) 拡大図

図 5-3 デッキプレートのひずみ分布図 (タービン建物屋根スラブ)

5.3 変形評価

5.3.1 耐震壁

各施設の耐震壁に生じるせん断ひずみについて、許容限界との比較を表 5-5 に示す。

評価結果より、各施設の耐震壁に生じるひずみが許容限界を超えないことを確認した。

表 5-5 変形評価結果（耐震壁）

評価対象施設		評価結果			許容限界
		項目	W_{T1}	W_{T2}	
原子炉建物	耐震壁	せん断 ひずみ	0.01×10^{-3}	0.02×10^{-3}	2.0×10^{-3}
タービン建物	耐震壁		0.03×10^{-3}	0.03×10^{-3}	2.0×10^{-3}
廃棄物処理建物	耐震壁		0.01×10^{-3}	0.01×10^{-3}	2.0×10^{-3}
制御室建物	耐震壁		0.01×10^{-3}	0.02×10^{-3}	2.0×10^{-3}

注：N S 方向，E W 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

原子炉建物屋根スラブ及びタービン建物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/本)
		項目	数値 (kN/本)	
原子炉建物	屋根スラブ のスタッド	引張力	6.705	59
タービン建物	屋根スラブ のスタッド	引張力	12.34	61

(2) 屋根スラブ

タービン建物屋根スラブに生じる応力と許容限界の比較を表 5-7 に示す。
評価結果より, 屋根スラブに生じる応力が許容限界を超えないことを確認した。

表 5-7 変形評価結果 (屋根スラブ)

評価対象部位		評価結果		許容限界 (kN・m, kN)
		項目	数値 (kN・m, kN)	
タービン建物	屋根スラブ	曲げ	15.89	23
		せん断	26.48	85

5.4 応力評価

扉のカンヌキに生じる応力度と許容限界の比較を表 5-8 に示す。
評価結果より, 扉のカンヌキ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 5-8 評価結果

評価対象の扉	評価結果		許容限界 (N/mm ²)
	項目	数値 (N/mm ²)	
原子炉建物 1階 RCW 熱交換器室 南側鋼製扉	曲げ応力度	88.0	345
	せん断応力度	5.50	199

VI-3-別添 1-8 原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプの強度計算書

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	4
2.4 適用規格・基準等	6
3. 強度評価方法	7
3.1 記号の定義	7
3.2 評価対象部位	10
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	19
4. 評価条件	29
5. 強度評価結果	33

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、原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ（以下「海水ポンプ」という。）が竜巻時及び竜巻通過後においても、主要な構造部材が構造健全性を保持し、送水機能の維持することを確認するものである。

2. 基本方針

海水ポンプについて、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」, 「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」及び「5. 強度評価方法」を踏まえ、海水ポンプの「2.1 位置」, 「2.2 構造概要」, 「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格・基準等」を示す。

2.1 位置

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、海水ポンプは屋外の取水槽海水ポンプエリアに設置する。取水槽海水ポンプエリアの位置図を図2-1に示す。

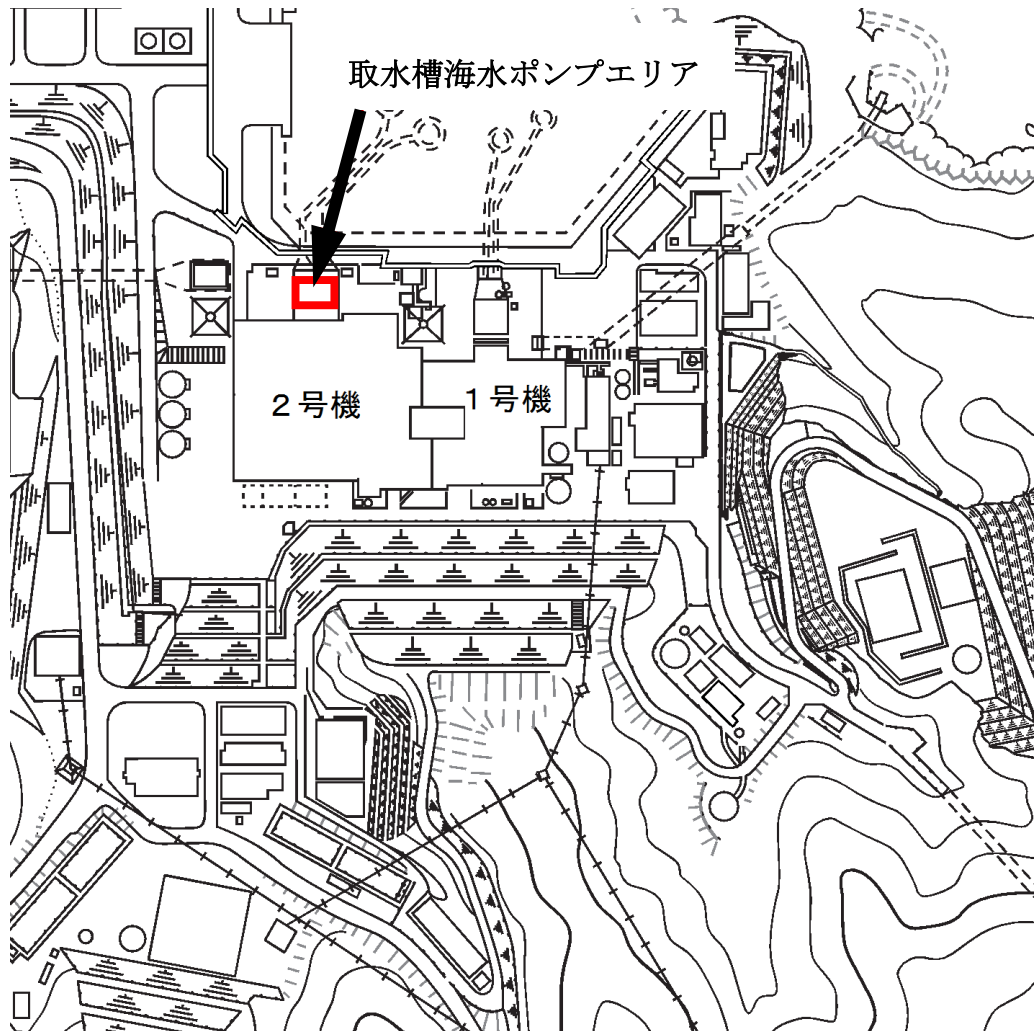


図2-1 取水槽海水ポンプエリアの位置図

2.2 構造概要

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、海水ポンプの構造を設定する。

海水ポンプは、ポンプ据付面から原動機台までのポンプ部と、上部の原動機部からなる鋼製の立形ポンプであり、原子炉補機海水ポンプ（以下「RSWポンプ」という。）は同一設計のポンプを4台、高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ（以下「HPSWポンプ」という。）は1台設置している。RSWポンプの概略構造図を図2-2に、HPSWポンプの概略構造図を図2-3に示す。

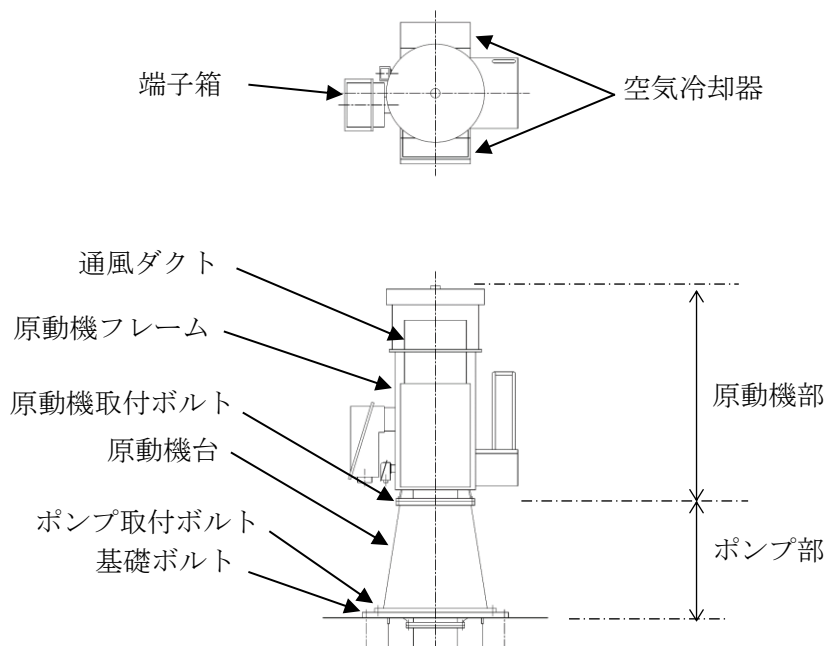


図2-2 RSWポンプの概略構造図

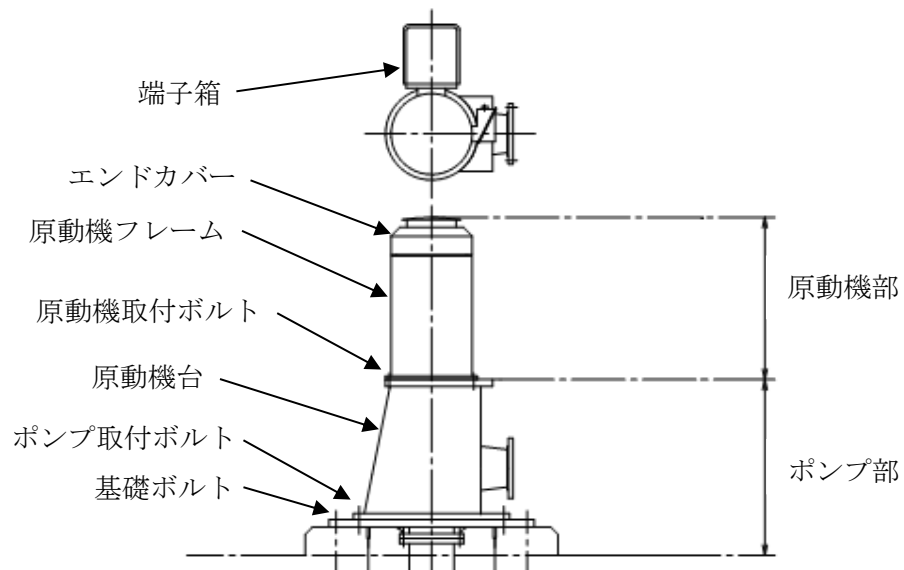


図2-3 HPSWポンプの概略構造図

2.3 評価方針

海水ポンプの強度評価は、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」を踏まえ、海水ポンプの評価対象部位に生じる貫入及び応力等が、許容限界に収まることを「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す条件を用いて計算し、その結果を「5. 強度評価結果」に示す。

評価対象部位は、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、選定する。

(1) 衝突評価の評価方針

海水ポンプの衝突評価の方針を以下に、衝突評価フローを図 2-4 に示す。

- ・ 竜巻防護ネットを設置する場合に考慮する飛来物である砂利の貫通限界厚さが、外殻を構成する部材の厚さ未満であることを確認する。
- ・ 貫通限界厚さは、「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」に示す衝突評価が必要な機器の評価式を用いて、算出する。
- ・ 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、外殻を構成する部材の厚さとする。

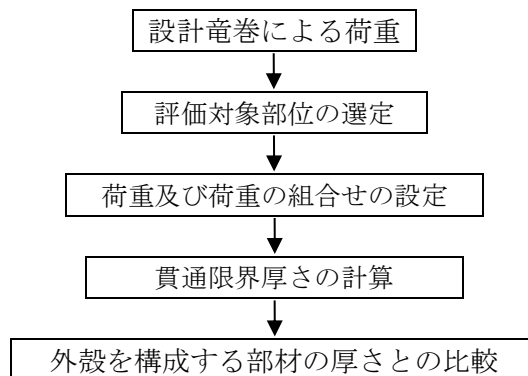


図 2-4 海水ポンプの衝突評価フロー

(2) 構造強度評価の評価方針

海水ポンプの構造強度評価の評価方針を以下に、構造強度評価フローを図 2-5 に示す。

- ・ 海水ポンプに対し、常時作用する荷重、設計竜巻による荷重及び運転時に作用する荷重により生じる応力が許容限界以下であることを確認する。
- ・ その部材に対して応力が大きくなる方向から風が当たることを想定する。
- ・ 設計竜巻による荷重は、水平方向より作用する外荷重という観点で地震荷重と同様なものであるため、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）、原子力発電所耐震設計技術指針（J E A G 4 6 0 1-1987）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）（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）における 1 質点系モデルによる評価方法を準用し、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て、算出する。

- ・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、J E A G 4 6 0 1 の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

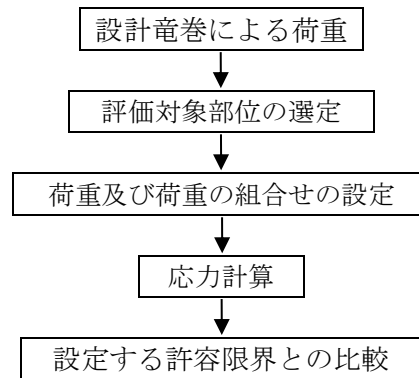


図 2-5 海水ポンプの構造強度評価フロー

(3) 動的機能維持評価の評価方針

海水ポンプは動的機器であるため、構造強度評価に加え、軸受部の動的機能維持評価を行う。海水ポンプの動的機能維持評価の評価方針を以下に、動的機能維持評価フローを図 2-6 に示す。

- ・ポンプ据付面から上部の受圧面積が大きくなる方向から風が当たることを想定し、設計竜巻の風圧力による荷重を受けた際のフレーム変位により生じる軸受荷重が接触面圧の許容限界以下であることを確認する。
- ・発生荷重は、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て、算出する。
- ・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、軸受部の接触面圧の許容荷重とする。

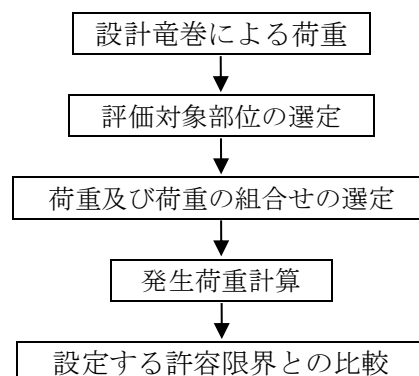


図 2-6 海水ポンプの動的機能維持評価フロー

2.4 適用規格・基準等

適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・「タービンミサイル評価について」(昭和 52 年 7 月 20 日 原子炉安全専門審査会)
- ・建築物荷重指針・同解説 ((社) 日本建築学会, 2004 改定)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 (J E A G 4 6 0 1・補一 1984)
((社) 日本電気協会)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 (J E A G 4 6 0 1 -1987) ((社) 日本電気協会)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 (J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版) ((社) 日本電気協会)
- ・発電用原子力設備規格 (設計・建設規格 J S M E S N C 1 - 2005/2007) ((社) 日本機械学会) (以下「J S M E」という。)
- ・新版機械工学便覧 (1987 年 4 月 日本機械学会編)

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 衝突評価の記号の定義

海水ポンプの衝突評価に用いる記号を表 3-1 に示す。

表 3-1 衝突評価に用いる記号

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

(2) 構造強度評価及び動的機能維持評価の記号の定義

海水ポンプの構造強度評価及び動的機能維持評価に用いる記号を表 3-2 に示す。

表 3-2 構造強度評価及び動的機能維持評価に用いる記号 (1/3)

記号	単位	定義
a	mm	部材間の長さ
a ₁	mm	ポンプ据付面からの原動機台上端までの長さ
a ₂	mm	原動機台上端から原動機下部軸受までの長さ
a ₃	mm	原動機台から荷重作用点までの長さ
A	m ²	受圧面積 (風向に垂直な面に投影した面積)
A ₁	m ²	四角形状の部分の受圧面積
A ₂	m ²	円形状の部分の受圧面積
A _b	mm ²	各ボルトの軸断面積
C	-	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
C ₁	-	四角形状の部分に対する建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
C ₂	-	円形状の部分に対する建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
C _p	-	ポンプ振動による震度
d	mm	回転子コア径
D	mm	各ボルトのピッチ円直径
D _m	mm	原動機フレーム外径
d _m	mm	原動機フレーム内径
D _p	mm	原動機台外径
d _p	mm	原動機台内径
E	MPa	縦弾性係数
E _m	MPa	原動機フレームの縦弾性係数
E _p	MPa	原動機台の縦弾性係数
E _m '	MPa	回転子の縦弾性係数

表 3-2 構造強度評価及び動的機能維持評価に用いる記号 (2/3)

記号	単位	定義
F	MPa	J S ME SSB-3121.1(1)により規定される値
F _b	N	各ボルトに対する引張力
f _s	MPa	J S ME 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
f _t	MPa	J S ME SSB-3121.1又は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 _i	N	転倒支点からL _i の距離にあるボルトに対する引張力
F _H	N	水平方向に作用する荷重
G	-	ガスト影響係数
g	m/s ²	重力加速度
h	mm	基準面から荷重作用点までの距離
h ₁ '	mm	ポンプ据付面から荷重作用点までの距離
h ₂ '	mm	原動機下部軸受から荷重作用点までの距離
h ₃ '	mm	荷重作用点から荷重作用点までの距離
h _g	mm	基準面から重心位置までの距離
h _w	mm	すみ肉溶接高さ
I	mm ⁴	断面二次モーメント
I _m	mm ⁴	原動機フレームの断面二次モーメント
I _m '	mm ⁴	回転子の断面二次モーメント
I _p	mm ⁴	原動機台の断面二次モーメント
L _g	mm	重心からボルト間の距離
L _i	mm	転倒支点からボルトの距離
m	kg	質量
M	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
M _a	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
M _b	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
M _c	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
M _{C_p}	N・mm	ポンプ振動による転倒モーメント
M _p	N・mm	ポンプの回転によるモーメント
N	rpm	回転数 (原動機の同期回転数)
n	-	各ボルトの本数
n _f	-	引張力を受ける各ボルトの本数
Q _b	N	各ボルトに対するせん断力
P	kW	原動機出力
ΔP	N/m ²	設計竜巻の気圧低下量
q	N/m ²	設計用速度圧
S _u	MPa	J S ME 付録材料図表 Part5 表 9 にて規定される設計引張強さ
S _y	MPa	J S ME 付録材料図表 Part5 表 8 にて規定される設計降伏点

表 3-2 構造強度評価及び動的機能維持評価に用いる記号 (3/3)

記号	単位	定義
S_y (RT)	MPa	J S M E 付録材料図表 Part5 表 8 にて規定される 40°Cにおける設計降伏点
W	N	自重
W'	N	たわみ量及び発生荷重計算において設計竜巻による風圧を受ける面それぞれの W_{T2} の合計の複合荷重
W''	N	発生荷重
W_M	N	設計竜巻による飛来物の衝撃荷重
W_P	N	設計竜巻による気圧差による荷重
W_T	N	設計竜巻による複合荷重
W_{T1}, W_{T2}	N	設計竜巻による複合荷重
W_W	N	設計竜巻による風圧力による荷重
x	mm	荷重作用点から評価対象部位までの距離
x'	mm	評価対象部位から支点までの距離
x_a'	mm	ポンプグランド部から原動機下部軸受部までの距離
x_b'	mm	原動機下部軸受部から原動機上部軸受部までの距離
y	mm	たわみ量
y_1	mm	ポンプ据付面から原動機台上端部のたわみ量
y_2	mm	原動機台上端部から原動機下部軸受部のたわみ量
y_3	mm	原動機台上端部から荷重作用点のたわみ量
y_4	mm	荷重作用点のたわみ量
y_5	mm	荷重作用点から原動機上部軸受部のたわみ量
y_a	mm	原動機下部案内軸受部のたわみ量
y_b	mm	原動機上部案内軸のたわみ量
σ_b	MPa	各ボルトに生じる引張応力
σ_w	MPa	原動機フレームに生じる引張応力
τ	MPa	各ボルトに生じるせん断応力
θ	rad	傾斜
θ_1	rad	ポンプ据付面から原動機台上端部の傾斜
θ_3	rad	原動機台上端部から荷重作用点の傾斜
θ_4	rad	荷重作用点の傾斜
δ	mm	フレーム変位量
δ_a	mm	ポンプ据付面から原動機下部軸受部までのフレーム変位量
δ_b	mm	原動機下部軸受部から電動機上部軸受部までのフレーム変位量

3.2 評価対象部位

海水ポンプの評価対象部位は、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「3.2 機能維持の方針」に従い、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し、選定する。

(1) 衝突評価の評価対象部位

飛来物の衝突により、海水ポンプに衝撃荷重が作用し貫入する可能性があるため、貫入により機能を喪失する可能性がある箇所を評価対象部位として選定する。

海水ポンプ地上部の全方向からの飛来物を考慮し、貫入により機能を喪失する可能性がある部位のうち、最薄部として、R SWポンプはスペースヒータ端子箱、HP SWポンプは防滴カバーを選定する。

海水ポンプの衝突評価における評価対象部位を図 3-1 及び図 3-2 に示す。

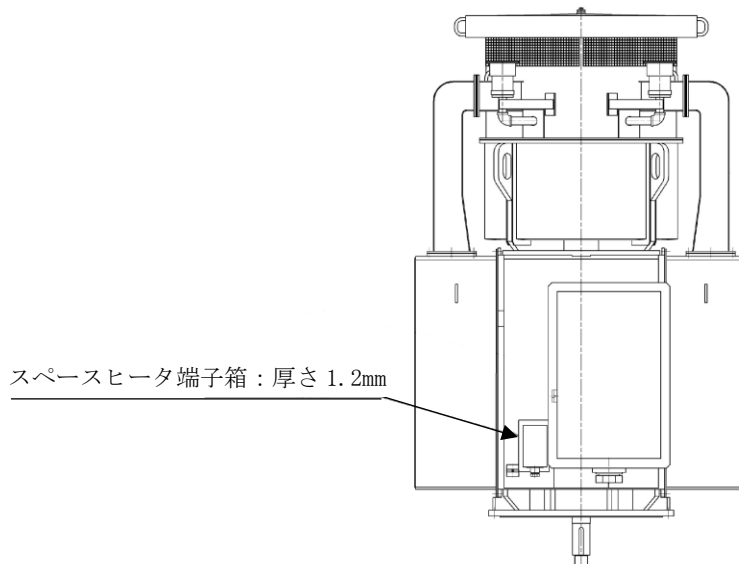


図 3-1 R SWポンプの評価対象部位

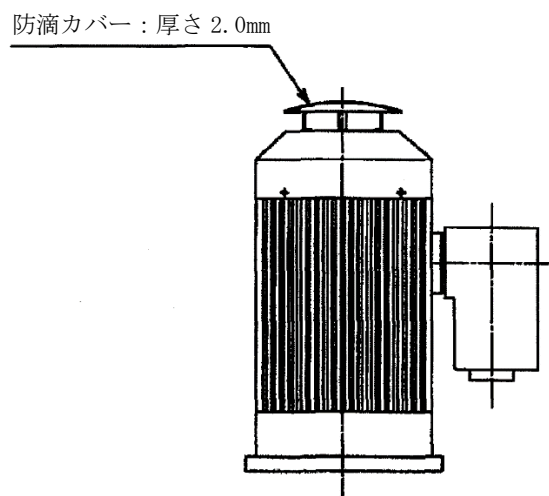


図 3-2 HP SWポンプの評価対象部位

(2) 構造強度評価の評価対象部位

a. ポンプ部

ポンプ部について、原動機部等に作用する設計竜巻による荷重は、原動機フレーム及び原動機台に作用する。このため、ポンプ部及び原動機部を固定しているボルトに作用する。荷重を受ける各部位のうち、支持断面積の小さな部位に大きな応力が生じるため、以下の部位を評価対象部位として選定する。

- ・原動機取付ボルト
- ・ポンプ取付ボルト
- ・基礎ボルト

b. 原動機部

原動機部について、原動機部等に作用する設計竜巻による荷重は、原動機フレーム及び付属品に作用する。このため、付属品を固定する以下の部位を評価対象部位として選定する。

R SWポンプ

- ・原動機フレーム
- ・端子箱取付ボルト
- ・通風ダクト取付ボルト
- ・空気冷却器取付ボルト

H P SWポンプ

- ・原動機フレーム
- ・端子箱取付ボルト
- ・エンドカバー取付ボルト

なお、R SWポンプの上部カバーの取付ボルトについては、受圧面積が小さいため設計竜巻の影響は小さいことから、上部カバーの取付ボルトは評価対象部位として選定しない。海水ポンプの評価対象部位を図3-3及び図3-4に示す。

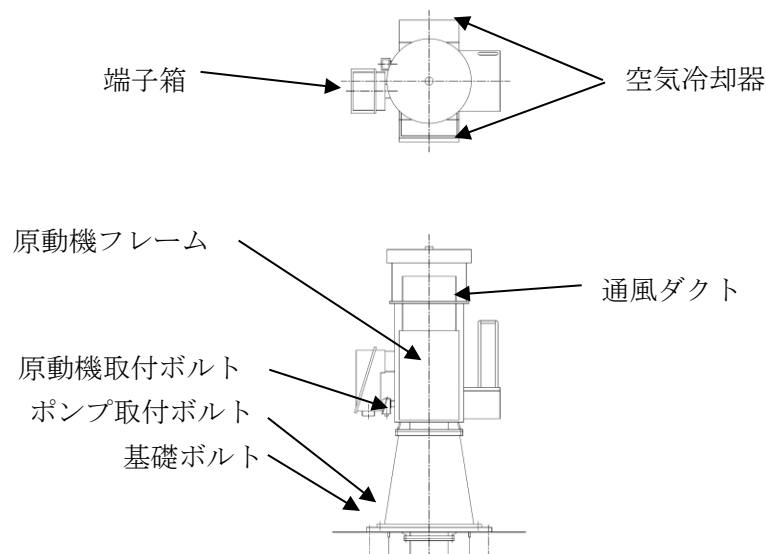


図3-3 R SWポンプの評価対象部位

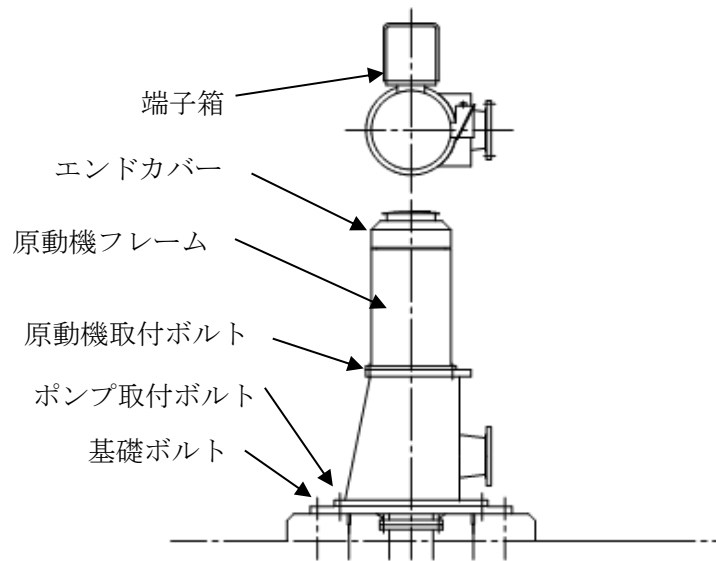


図 3-4 HPSWポンプの評価対象部位

(3) 動的機能維持評価の評価対象部位

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

- ・原動機下部軸受部
- ・原動機上部軸受部

海水ポンプの評価対象部位を図 3-5 及び図 3-6 に示す。

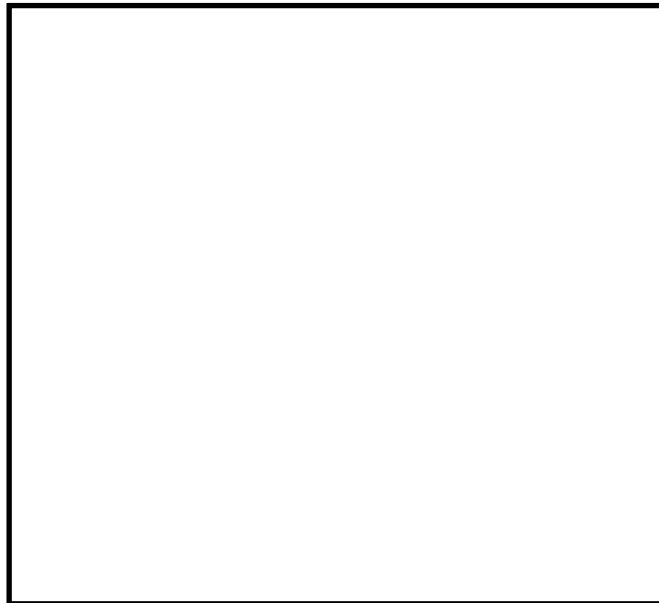


図 3-5 RSWポンプの評価対象部位

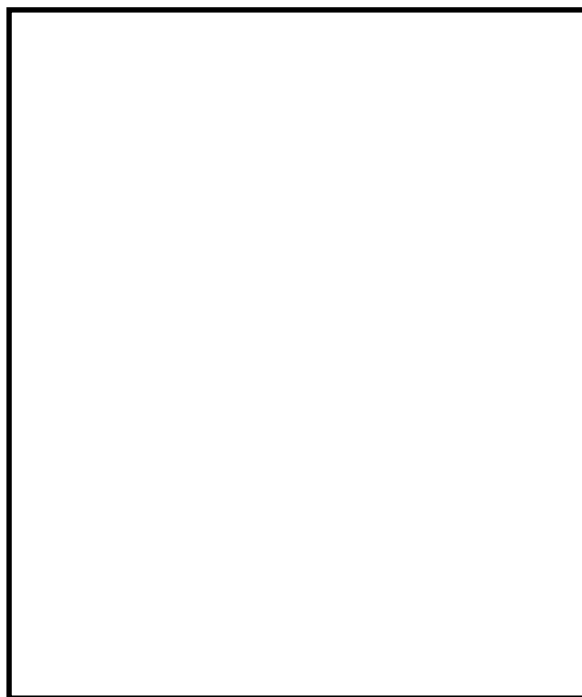


図 3-6 HPSWポンプの評価対象部位

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」にて示す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

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

衝突評価においては、評価対象部位に砂利が衝突した際に跳ね返らず、貫入するものとして評価する。砂利の諸元を表 3-3、海水ポンプの衝突評価に用いる荷重を表 3-4 に示す。

表 3-3 砂利の諸元

飛来物	d (m)	K (-)	M (kg)	v (m/s)	
				水平方向	鉛直方向
砂利	0.04	1	0.2	54	36

表 3-4 海水ポンプの衝突評価に用いる荷重

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
屋外の外部事象 防護対象施設	R S Wポンプ用原動機	スペースヒータ端子箱	飛来物による衝撃荷重
	H P S Wポンプ用原動機	防滴カバー	

(2) 構造強度評価及び動的機能維持評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の設定

構造強度評価及び動的機能維持評価に用いる荷重は、以下の荷重を用いる。

(a) 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、自重を考慮する。

自重は以下のとおり計算する。

$$W = m \cdot g$$

(b) 設計竜巻による荷重

風圧力による荷重及び気圧差による荷重を考慮する。竜巻防護ネット及び竜巻防護鋼板等による風圧力の低減はないものとして保守的な評価を行う。また、竜巻防護ネットをすり抜ける砂利による衝撃荷重は砂利自体の質量が小さく、衝突時間が極めて短いことから、機器へ作用する荷重は構造強度に影響を与えないので設計竜巻による荷重と組み合わせる荷重に衝撃荷重を考慮しない。

イ. 風圧力による荷重 (W_w)

風圧力による荷重は、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(3)c.(a) 風圧力による荷重 (W_w)」に示す式に従い、算出する。

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

ロ. 気圧差による荷重 (W_P)

気圧差による荷重は、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(3)c. (b) 気圧差による荷重 (W_P)」に示す式に従い、算出する。

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

ハ. 荷重の組合せ

設計竜巻による複合荷重 W_T (W_{T1} , W_{T2}) は、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、算出する。なお、海水ポンプは気圧差が生じ難い構造であるため、複合荷重の選定において、 W_{T2} としては気圧差を考慮するが、 W_{T1} の評価は実施しない。

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

(c) 運転時に作用する荷重

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

b. 荷重の組合せ

構造強度評価及び動的機能維持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、海水ポンプの評価対象部位ごとに設定する。

ポンプスラスト荷重が作用する評価対象部位は全て鉛直方向に取り付けられており、ポンプスラスト荷重は鉛直方向下向きに作用し抗力となるため、それぞれの構造強度評価を行う際の荷重としては保守的に考慮しない。海水ポンプの構造強度評価及び動的機能維持評価にて考慮する荷重の組合せを表 3-5 に示す。

表 3-5 荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位		荷重	
屋外の外部 事象防護対 象施設	R S Wポンプ	構造 強度 評価	ポンプ部	原動機取付ボルト	①自重
				ポンプ取付ボルト	②風圧力による荷重
				基礎ボルト	③気圧差による荷重
		構造 強度 評価	原動機部	原動機フレーム	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重
				端子箱取付ボルト	①自重 ②風圧力による荷重 ③気圧差による荷重
				通風ダクト取付ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重
				空気冷却器取付ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重
		動的 機能 維持 評価		原動機上部軸受部	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重
	原動機下部軸受部			①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重	
	H P S Wポンプ	構造 強度 評価	ポンプ部	原動機取付ボルト	①自重
				ポンプ取付ボルト	②風圧力による荷重
				基礎ボルト	③気圧差による荷重
			構造 強度 評価	原動機部	原動機フレーム
		端子箱取付ボルト			①自重 ②風圧力による荷重 ③気圧差による荷重
エンドカバー取付ボルト		①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重			
動的 機能 維持 評価			原動機上部軸受部	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重	
			原動機下部軸受部	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重	

3.4 許容限界

海水ポンプの許容限界は、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」に従い、「3.2 評価対象部位」にて設定した部位における機能損傷モードを考慮し、外殻を構成する部材の厚さ、J E A G 4 6 0 1 に基づく許容応力状態Ⅲ_ASの許容応力及び軸受の接触面圧の許容荷重を用いる。

(1) 衝突評価における許容限界

衝突評価における許容限界は、飛来物による衝撃荷重に対し、外殻を構成する部材が、機能喪失に至る可能性のある変形を生じないことを計算により確認するため、外殻を構成する部材の厚さを許容限界とする。海水ポンプの許容限界を表 3-6 に示す。

表 3-6 海水ポンプの許容限界

施設名称	外殻を構成する部材の厚さ
R S Wポンプ	1.2mm (スペースヒータ端子箱)
H P S Wポンプ	2.0mm (防滴カバー)

(2) 構造強度評価における許容限界

構造強度評価における許容限界は、J E A G 4 6 0 1 を準用し、「クラス 2, 3 支持構造物」の許容限界を適用し、許容応力状態Ⅲ_ASから算出した許容応力とする。材料の設計降伏点は J S M E 付録材料図表 Part5 表 8 より、設計引張強さは J S M E 付録材料図表 Part5 表 9 により算出した値を用いる。周囲環境温度が J S M E 付録材料図表 Part5 表 8 及び表 9 記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算し、小数点第 1 位以下を切り捨てた値を用いるものとする。海水ポンプの許容限界を表 3-7、許容応力を表 3-8 及び表 3-9 に示す。

表 3-7 海水ポンプの許容限界

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

表 3-8 R S Wポンプの許容応力

評価対象 部位	材料	温度条件 (°C)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	$S_y(RT)$ (MPa)	F (MPa)	$1.5 \cdot f_t$ (MPa)	$1.5 \cdot f_s$ (MPa)
原動機 取付ボルト	SUS304	50	198	504	205	205	153	118
ポンプ 取付ボルト	SUS304	40	205	520	205	205	153	118
基礎ボルト	SUS304	50	198	504	205	205	153	118
原動機 フレーム	SM400A	50	103	177	—	103	102	—
端子箱 取付ボルト	SUS304	95	173	446	205	205	153	118
通風ダクト 取付ボルト	SUS304	50	198	504	205	205	153	118
空気冷却器 取付ボルト	SUS304	95	173	446	205	205	153	118

表 3-9 H P S Wポンプの許容応力

評価対象 部位	材料	温度条件 (°C)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	$S_y(RT)$ (MPa)	F (MPa)	$1.5 \cdot f_t$ (MPa)	$1.5 \cdot f_s$ (MPa)
原動機 取付ボルト	SUS304	50	198	504	205	205	153	118
ポンプ 取付ボルト	SUS304	40	205	520	205	205	153	118
基礎ボルト	SUS304	50	198	504	205	205	153	118
原動機 フレーム	SS400	50	211	394	—	211	95	—
端子箱 取付ボルト	SS400	50	211	394	—	211	158	122
エンド カバー 取付ボルト	SS400	50	211	394	—	211	—	122

(3) 動的機能維持評価における許容限界

動的機能維持評価における許容限界は、設計荷重により原動機フレームが変形する場合においても海水ポンプの運転継続が可能であるように、軸受の接触面圧の許容荷重を許容限界とする。軸受の接触面圧の許容荷重を表 3-10 に示す。

表 3-10 軸受の接触面圧の許容荷重

施設名称	評価対象部位	許容荷重 (N)
R S Wポンプ	原動機上部軸受部	
	原動機下部軸受部	
H P S Wポンプ	原動機上部軸受部	
	原動機下部軸受部	

3.5 評価方法

海水ポンプの強度評価は、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」にて設定している強度評価が必要な機器の評価式を用いる。

(1) 衝突評価の評価方法

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

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

(2) 構造強度評価及び動的機能維持評価の評価方法

a. 計算モデル

(a) 構造強度評価

計算モデルは 1 質点系モデルとし、ポンプ部は全高の 1/2 の位置に、原動機部は重心位置に複合荷重が作用することとする。また、設計竜巻による風荷重はそれぞれの評価対象部位に対して発生応力が大きくなる方向から当たるものとする。ポンプ部及び原動機部の応力の計算モデル図を図 3-7 及び図 3-8 に示す。

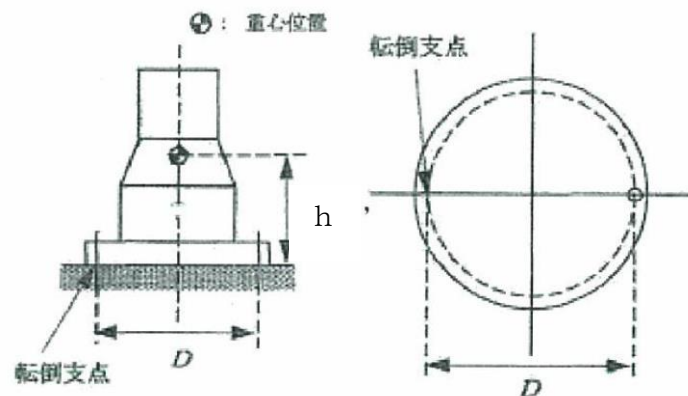


図 3-7 応力の計算モデル図（ポンプ部）

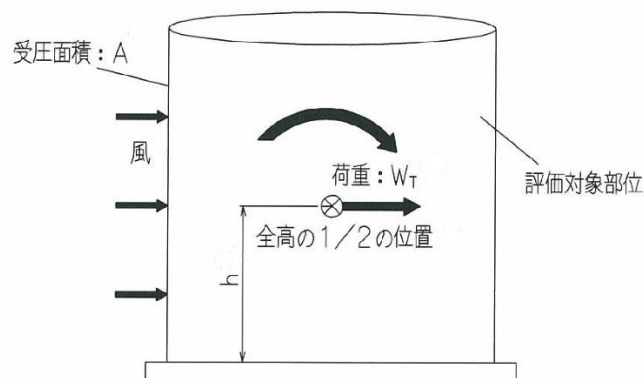


図 3-8 応力の計算モデル図（原動機部）

(b) 動的機能維持評価

原動機フレームのたわみ量計算においては、ポンプ据付面から原動機台上端まで（ポンプ部）と、原動機台上端から原動機上部軸受部まで（原動機部）の片持ち梁と考える。ポンプ部については、ポンプ部の断面性能は原動機台が最も小さいことから、原動機台の断面性能を一様に有する単純円筒形モデルとして評価する。原動機部については、原動機フレームの断面性能を用いて評価する。このため、計算モデルは違う断面性能の一軸中空形モデルとして考え、荷重は全高の半分の位置に作用することとする。たわみ量計算モデル図を図 3-9 に示す。

ポンプ据付面より上部の静止体（原動機フレーム等）は、水平方向の複合荷重により、ポンプ据付面を固定端として一方向に変形する。一方、回転体（ポンプ軸及び原動機軸）は、風荷重を受けないため、変形せず、原動機上部から鉛直方向に吊り下げられた状態を維持する。原動機フレーム等の変形により、軸受反力が許容荷重を超えないことを確認する。

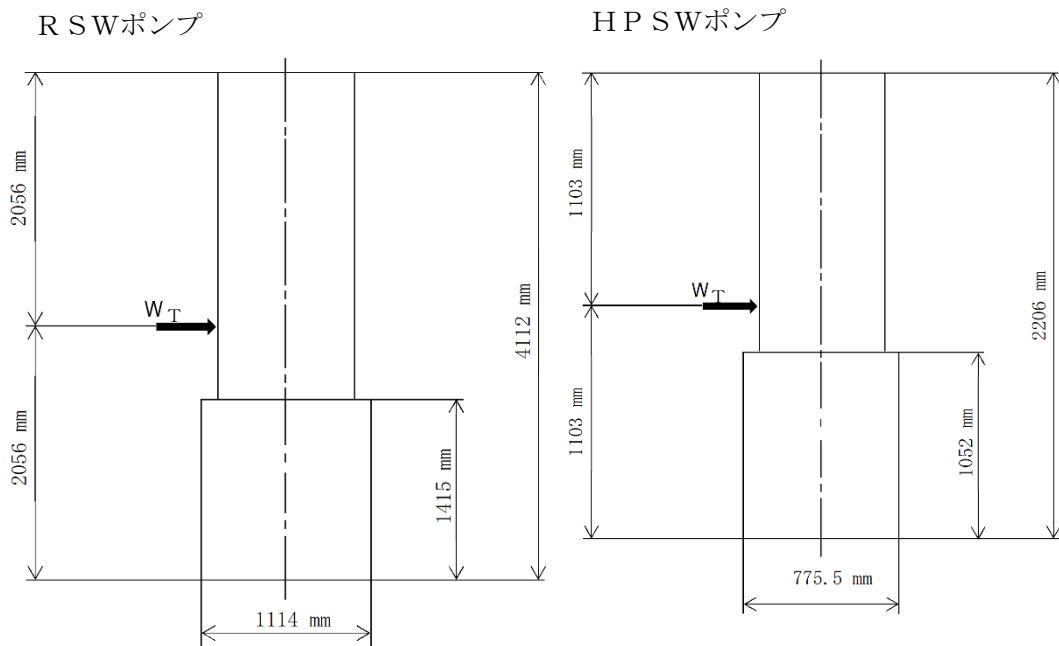


図 3-9 海水ポンプのたわみ量計算モデル図

b. 計算方法

(a) 応力の算出

イ. ポンプ部（ボルト部）

ポンプ部（ボルト部）の応力算出方法を以下に、原動機取付ボルト、ポンプ取付ボルト及び基礎ボルトの各ボルト間寸法の配置図を図 3-10～図 3-12 に示す。

(イ) 設計竜巻により作用するモーメント M

$$M = W_T \cdot h$$

(ロ) 引張応力 σ_{bt}

$$F_b = \frac{W_T \cdot h + M_{C_p} + ((m \cdot g \cdot D)/2) \cdot (C_p - 1)}{3/8 \cdot D \cdot n_f}$$

ただし、 $F_b \leq 0$ ならば引張力は発生しない。

$F_b > 0$ ならば引張力は作用しているので、以下の引張応力の計算を行う。

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

(ハ) せん断応力 τ

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



図 3-10 原動機取付ボルトの配置図

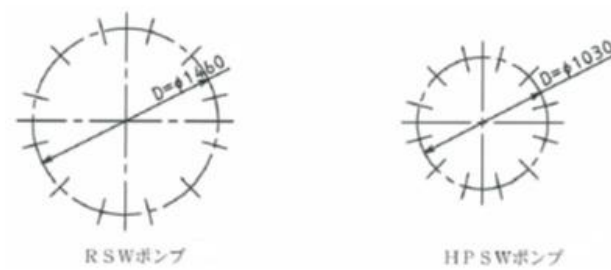


図 3-11 ポンプ取付ボルトの配置図

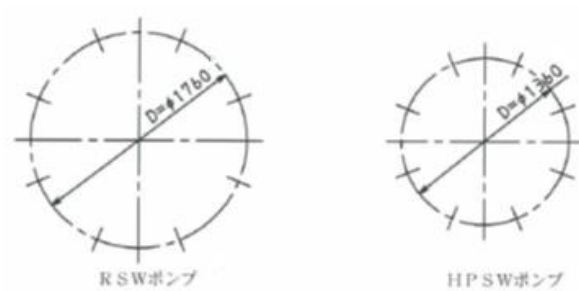


図 3-12 基礎ボルトの配置図

ロ. 原動機部

(イ) 原動機フレーム

原動機フレームの応力算出方法を以下に、原動機フレーム取付部の詳細図を図3-13に示す。

- ・引張応力

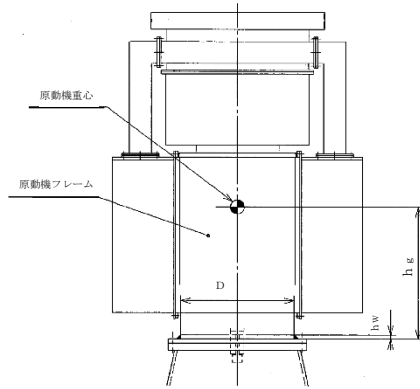
設計竜巻により作用する転倒モーメントM

$$M = W_T \cdot h_g$$

引張応力 σ_w

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

R SWポンプ



H P SWポンプ

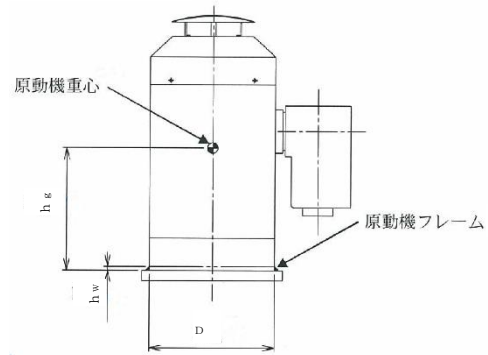


図 3-13 原動機フレーム取付部詳細図

(ロ) 端子箱取付ボルト

端子箱取付ボルトの応力算出方法を以下に、端子箱取付ボルト部の詳細図を図3-14に示す。

- ・引張応力

設計竜巻により作用するモーメントM

$$M = W_T \cdot L_g$$

- ・引張応力 σ_b

$$F_b = \frac{M + W \cdot h_g}{L_1 \cdot n_f}$$

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

- ・せん断応力 τ

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

ここで、

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

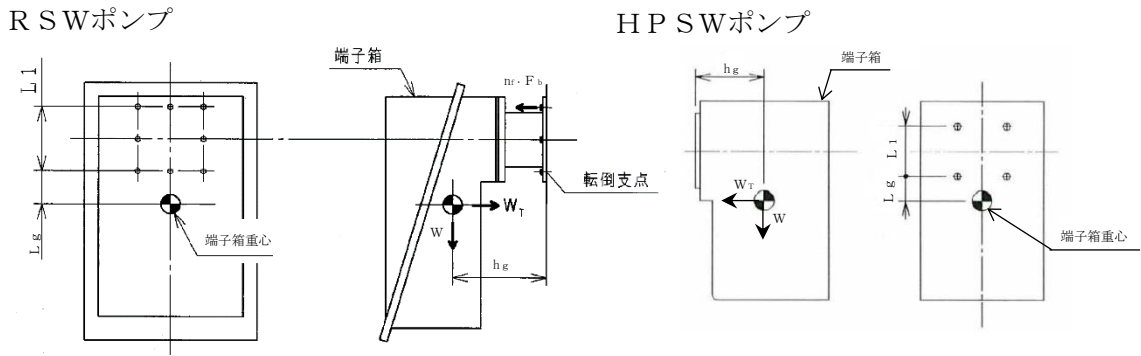


図 3-14 端子箱取付ボルト部詳細図

(ハ) 通風ダクト取付ボルト部及び空気冷却器取付ボルト部

通風ダクト取付ボルト部及び空気冷却器取付ボルト部の応力算出方法を以下に、詳細図を図 3-15 及び図 3-16 に示す。

・引張応力

設計竜巻によって生じる転倒荷重が、通風ダクト等に作用した際の各取付ボルトに生じる際の引張応力を算出し評価する。なお、通風ダクトは上部軸受ブラケットとの接続もあるが、空気冷却器とのみ接続されているとして、評価する。(評価上厳しい条件)

設計竜巻により作用するモーメントM

$$M = W_T \cdot h_g$$

・引張応力 σ_b

$$M = \sum_{i=1}^8 F_i \cdot L_i \quad \dots (3.1)$$

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

(3.1) (3.2) 式より,

$$F_b = \frac{F_1}{n_f} = \frac{M}{n_f \cdot \sum_{i=1}^8 L_i^2} L_1$$

よって,

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

・せん断応力 τ

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

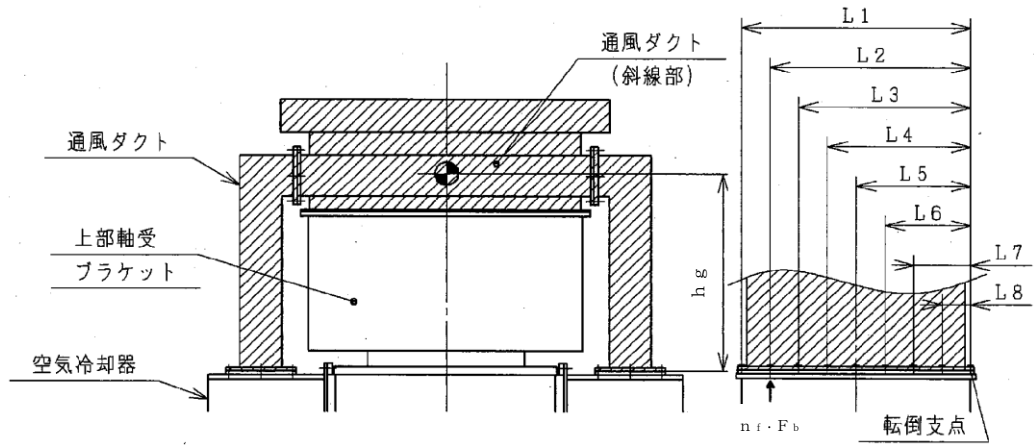


図 3-15 通風ダクト取付ボルト部の詳細図

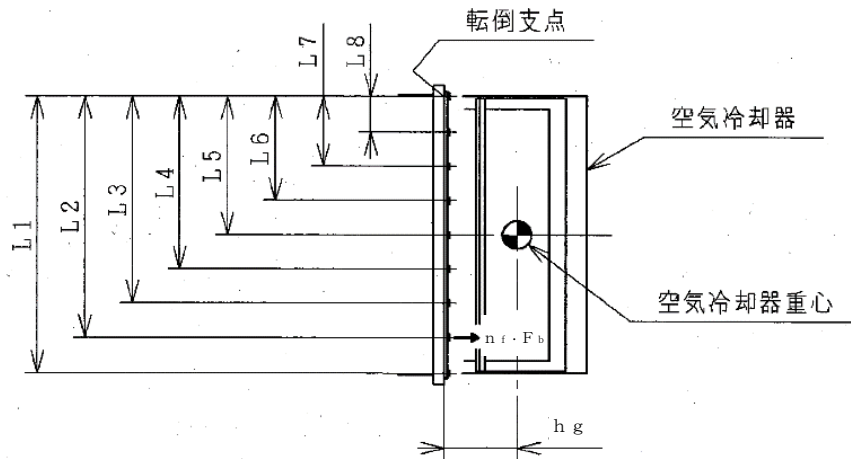


図 3-16 空気冷却器取付ボルト部の詳細図

(二) エンドカバー取付ボルト部

竜巻によって生じる転倒荷重が、エンドカバーに作用した際の取付ボルトに生じる引張応力を算出し評価する。

(i) ポンプ回転によるモーメント

$$M_p = \frac{60}{2 \cdot \pi \cdot N} \cdot 10^6 \cdot P$$

(ii) せん断応力

$$\tau = \frac{W_T + 2 \cdot \frac{M_p}{D}}{n \cdot A_b}$$

(b) 発生荷重の計算

イ. たわみ量の計算

たわみ量の算出において、竜巻による風圧力を受ける面（原動機台，原動機フレーム，端子箱，通風ダクト及び空気冷却器）のそれぞれの W_{T2} の合計を複合荷重 W'

とする。

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

各部位の受圧部図を図 3-17 及び図 3-18 に示す。

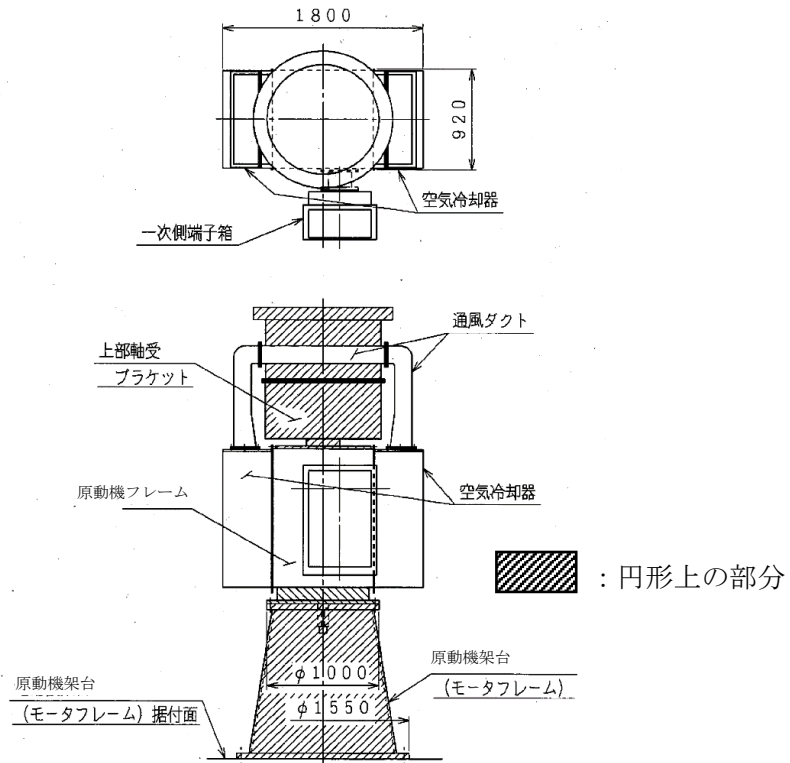


図 3-17 R SWポンプの受圧部図

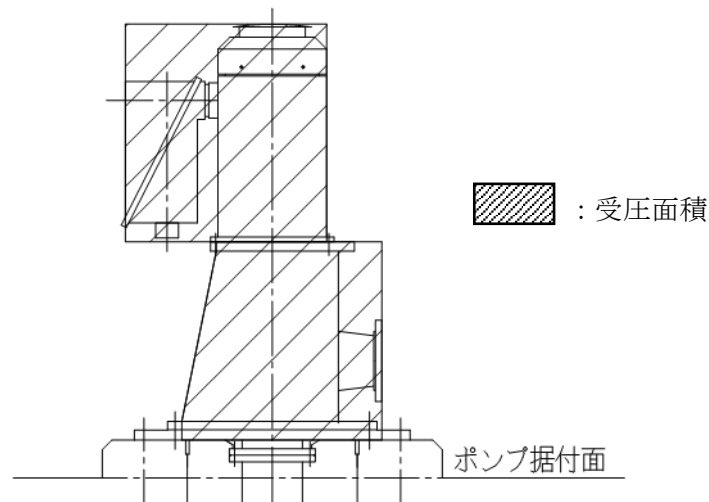


図 3-18 HPSWポンプの受圧面積図

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

ミオソテスの方法

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

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

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

(イ) 原動機下部軸受部

・ポンプ据付面から原動機台上端部のたわみ量 y_1 , 傾斜 θ_1

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

$$\theta_1 = \frac{M_a \cdot a_1}{E_p \cdot I_p} + \frac{W' \cdot a_1^2}{2 \cdot E_p \cdot I_p}$$

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

ここで、原動機台の断面図を図 3-19 に示す。

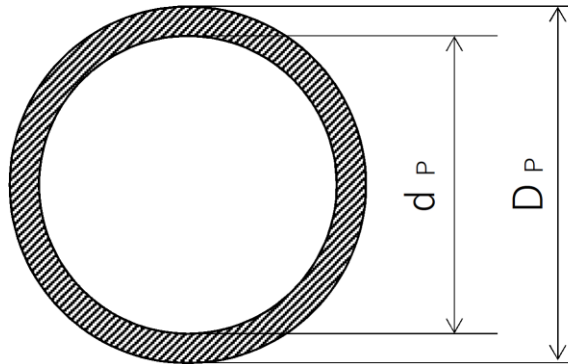


図 3-19 原動機台の断面図

円筒形であるため、断面二次モーメントは以下のとおり算出する。

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

・原動機台上端部から原動機下部軸受部のたわみ量 y_2

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

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

ここで、原動機フレームの断面図を図 3-20 に示す

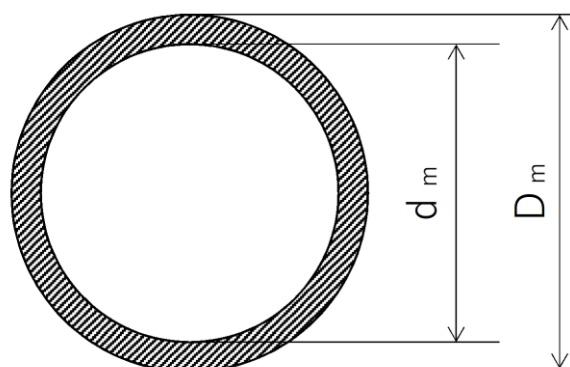


図 3-20 原動機フレームの断面図

円筒形であるため、断面二次モーメントは以下のとおり算出する。

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

よって、原動機下部軸受部のたわみ量は

$$y_a = y_1 + y_2$$

(ロ) 原動機上部軸受部

・原動機台上端部から荷重作用点のたわみ量 y_3 ，傾斜 θ_3

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

$$\theta_3 = \frac{M_c \cdot a_3}{E_m \cdot I_m} + \frac{W' \cdot a_3^2}{2 \cdot E_m \cdot I_m}$$

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

よって、荷重作用点のたわみ量 y_4 ，傾斜 θ_4

$$y_4 = y_1 + y_3$$

$$\theta_4 = \theta_1 + \theta_3$$

荷重作用点から原動機上部軸受部のたわみ量 y_5

$$y_5 = x \cdot \sin(\theta_4)$$

以上より、原動機上部軸受部のたわみ量は

$$y_b = y_4 + y_5$$

ロ. 発生荷重の算出

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

δ = 評価対象部位の変位量 - 支点の変位量

また、発生荷重は

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

より

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

(イ) 原動機下部軸受部の発生荷重

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

ここで、 $\delta_a = y_a$

回転子（原動機部）の断面図を図 3-21 に示す。

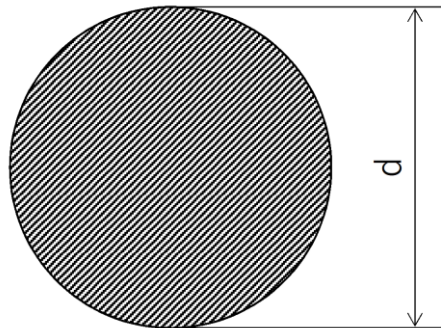


図 3-21 回転子（原動機部）の断面図

回転子の断面二次モーメントは以下のとおり算出する。

$$I_m' = \frac{\pi d^4}{64}$$

(ロ) 原動機上部軸受部の発生荷重

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

ここで、 $\delta_b = y_b - y_a$

4. 評価条件

(1) 構造強度評価の評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-1～表 4-9 に示す。

表 4-1 評価条件

q (N/m ²)	G (-)	Δ P (N/m ²)	W _M (N)
5189	1.0	7500	0

表 4-2 評価条件 (原動機取付ボルト)

施設名称	C (-)	h (mm)	M _{Cp} (N・mm)	m (kg)	D (mm)	C _p (-)
R S Wポンプ	1.2	1348.5	2744820	6400	940	0.06
H P S Wポンプ	1.2	577	271304	963	600	0.06

施設名称	A _b (mm ²)	n _f (-)	n (-)	A (mm ²)	ボルト サイズ
R S Wポンプ	453	8	8	5.6	M24
H P S Wポンプ	315	8	8	1.23	M20

表 4-3 評価条件 (ポンプ取付ボルト)

施設名称	C (-)	h (mm)	M _{Cp} (N・mm)	m (kg)	D (mm)	C _p (-)
R S Wポンプ	1.2	2091	7662173	16.600	1460	0.06
H P S Wポンプ	1.2	1103	1169919	4933	1030	0.06

施設名称	A _b (mm ²)	n _f (-)	n (-)	A (mm ²)	ボルト サイズ
R S Wポンプ	1,018	12	12	7.62	M36
H P S Wポンプ	707	12	12	2.25	M30

表 4-4 評価条件 (基礎ボルト)

施設名称	C (-)	h (mm)	M _{Cp} (N・mm)	m (kg)	D (mm)	C _p (-)
R S Wポンプ	1.2	2091	7372672	17730	1760	0.06
H P S Wポンプ	1.2	1103	1276651	5525	1360	0.06

施設名称	A _b (mm ²)	n _f (-)	n (-)	A (mm ²)	ボルト サイズ
R S Wポンプ	1,018	8	8	7.62	M36
H P S Wポンプ	707	8	8	2.25	M30

表 4-5 評価条件 (原動機フレーム)

施設名称	C ₁ (-)	C ₂ (-)	h _g (mm)	A ₁ (m ²)	A ₂ (m ²)
R S Wポンプ	2.4	1.2	1025	2.793	1.269
H P S Wポンプ	1.2	-	458	1.23	-

施設名称	D (mm)	h _w (mm)
R S Wポンプ	820	10
H P S Wポンプ	500	6

表 4-6 評価条件 (端子箱の取付ボルト)

施設名称	C ₁ (-)	h _g (mm)	L ₁ (mm)	L _g (mm)	A ₁ (m ²)
R S Wポンプ	2.1	356	250	124	0.6593
H P S Wポンプ	2.4	210.5	170	140	0.43

施設名称	A _b (mm ²)	n _f (-)	n (-)	m (kg)	ボルト サイズ
R S Wポンプ	113.1	3	8	144	M12
H P S Wポンプ	201.1	2	4	80	M16

表 4-7 評価条件 (通風ダクトの取付ボルト)

C ₁ (-)	C ₂ (-)	A ₁ (m ²)	A ₂ (m ²)	h _g (mm)	L ₁ (mm)
2.4	1.2	0.5256	0.5495	788	850

L ₂ (mm)	L ₃ (mm)	L ₄ (mm)	L ₅ (mm)	L ₆ (mm)	L ₇ (mm)
743	637	531	425	319	213

L ₈ (mm)	A _b (mm ²)	n _f (-)	n (-)	ボルト サイズ
107	78.5	4	40	M10

表 4-8 評価条件 (空気冷却器の取付ボルト)

C ₁ (-)	C ₂ (-)	A ₁ (m ²)	A ₂ (m ²)	h _g (mm)	L ₁ (mm)
2.1	1.2	0.5657	0	273	890

L ₂ (mm)	L ₃ (mm)	L ₄ (mm)	L ₅ (mm)	L ₆ (mm)	L ₇ (mm)
775	665	555	445	335	225

L ₈ (mm)	A _b (mm ²)	n _f (-)	n (-)	ボルト サイズ
115	78.5	2	40	M10

表 4-9 評価条件 (エンドカバーの取付ボルト)

C (-)	A (mm ²)	N (rpm)	P (kw)	D (mm)	n (-)
1.2	0.1	1200	75	497	2

A _b (mm ²)	ボルト サイズ
50.27	M8

(2) 動的機能維持評価の評価条件

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

表 4-10 評価条件 (たわみ量の算出)

q (N/m ²)	G (-)	ΔP (Pa)	W _M (N)	温度 (°C)
5189	1.0	7500	0	50

表 4-11 評価条件 (原動機下部軸受部 (たわみ量の算出))

施設名称	変位量計算 モデルの材質	h ₁ ' (mm)	h ₂ ' (mm)	a ₁ (mm)	a ₂ (mm)
R S Wポンプ	SM400A	641	491	1415	150
	SM400B				
H P S Wポンプ	SS400	51	99.5	1052	150.5
	SM400B				

施設名称	E _p (MPa)	I _p (mm ⁴)	E _m (MPa)	I _m (mm ⁴)
R S Wポンプ	201000	9.799×10 ⁹	201000	3.837×10 ⁹
H P S Wポンプ	201000	2.429×10 ⁹	201000	5.480×10 ⁸

表 4-12 評価条件（原動機下部軸受部（発生荷重の算出））

施設名称	発生荷重計算 モデルの材質	E_m' (MPa)	I_m' (mm ⁴)	x_a' (mm)	δ_a (mm)
R S Wポンプ	S25C	201000	2.485×10^7	1565	0.06
H P S Wポンプ	S35C	200000	1.553×10^6	1202.5	0.021

表 4-13 評価条件（原動機上部軸受部（たわみ量の算出））

施設名称	変位量計算 モデルの材質	h_3' (mm)	a_3 (mm)	E_m (MPa)	I_m (mm ⁴)
R S Wポンプ	SM400A	0	641	201000	3.837×10^9
H P S Wポンプ	SS400	0	51	201000	5.480×10^8

表 4-14 評価条件（原動機上部軸受部（発生荷重の算出））

施設名称	発生荷重計算 モデルの材質	E_m' (MPa)	I_m' (mm ⁴)	x_b' (mm)	δ_b (mm)
R S Wポンプ	S25C	201000	2.485×10^7	1657	0.113
H P S Wポンプ	S35C	200000	1.553×10^6	762.5	0.023

5. 強度評価結果

(1) 衝突評価結果

竜巻発生時の砂利の貫通限界厚さを表 5-1 に示す。砂利の貫通限界厚さ(1.0mm)と海水ポンプの外殻を構成する部材の厚さとの比較を表 5-2 に示す。砂利の貫通限界厚さは、海水ポンプの外殻を構成する部材の厚さ未満である。

表 5-1 砂利の貫通限界厚さ

飛来物	T (mm)	
	水平方向	鉛直方向
砂利	1.0	1.0

表 5-2 外部事象防護対象施設の衝突評価結果 (砂利)

外部事象防護対象施設	T (mm)	外殻を構成する部材の厚さ (mm)	結果
R SWポンプ (スペースヒータ端子箱)	1.0	1.2	貫通しない
H P SWポンプ (防滴カバー)	1.0	2.0	貫通しない

(2) 構造強度評価結果

a. 原動機取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-3 に示す。

原動機取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-3 評価結果 (原動機取付ボルト)

施設名称	応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
R SWポンプ	引張	40	153
	せん断	16	118
	組合せ	40	153
H P SWポンプ	引張	9	153
	せん断	5	118
	組合せ	9	153

b. ポンプ取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-4 に示す。

ポンプ取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-4 評価結果 (ポンプ取付ボルト)

施設名称	応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
R S Wポンプ	引張	9	153
	せん断	7	118
	組合せ	9	153
H P S Wポンプ	引張	1	153
	せん断	3	118
	組合せ	1	153

c. 基礎ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-5 に示す。

基礎ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-5 評価結果 (基礎ボルト)

施設名称	応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
R S Wポンプ	引張	5	153
	せん断	10	118
	組合せ	5	153
H P S Wポンプ	引張	-	153
	せん断	4	118
	組合せ	-	153

d. 原動機フレーム

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-6 に示す。

原動機フレームに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-6 評価結果 (原動機フレーム)

施設名称	応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
R S Wポンプ	引張	16	102
H P S Wポンプ		7	95

e. 端子箱の取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-7 に示す。

端子箱の取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-7 評価結果（端子箱の取付ボルト）

施設名称	応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
R S Wポンプ	引張	20	153
	せん断	11	118
	組合せ	20	153
H P S Wポンプ	引張	17	158
	せん断	9	122
	組合せ	17	158

f. 通風ダクトの取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-8 に示す。

通風ダクトの取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-8 評価結果（通風ダクトの取付ボルト）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
引張	12	153
せん断	5	118
組合せ	12	153

g. 空気冷却器の取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-9 に示す。

空気冷却器の取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-9 評価結果（空気冷却器の取付ボルト）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
引張	5	153
せん断	3	118
組合せ	5	153

h. エンドカバーの取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-10 に示す。

エンドカバーの取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-10 評価結果（エンドカバーの取付ボルト）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
せん断	34	122

(3) 動的機能維持評価結果

a. 原動機下部軸受部

竜巻発生時の動的機能維持評価結果を表 5-11 に示す。

原動機下部軸受部の発生荷重は、許容荷重以下である。

表 5-11 評価結果（原動機下部軸受部）

施設名称	発生荷重 (N)	許容荷重 (N)
R S Wポンプ	235	
H P S Wポンプ	12	

b. 原動機上部軸受部

竜巻発生時の動的機能維持評価結果を表 5-12 に示す。

原動機上部軸受部の発生荷重は、許容荷重以下である。

表 5-12 評価結果（原動機上部軸受部）

施設名称	発生荷重 (N)	許容荷重 (N)
R S Wポンプ	373	
H P S Wポンプ	48	

VI-3-別添 1-9 海水ストレーナの強度計算書

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
2.1 位置	1
2.2 構造概要	2
2.3 評価方針	3
2.4 適用規格・基準等	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	11

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、原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナ（以下「海水ストレーナ」という。）が竜巻時及び竜巻通過後においても、主要な構造部材が構造健全性を保持し、海水ストレーナの海水中の固形物を除去する機能を維持することを確認するものである。

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」の「3.2 機能維持の方針」, 「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」及び「5. 強度評価方法」を踏まえて、海水ストレーナの「2.1 位置」, 「2.2 構造概要」, 「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格・基準等」を示す。

2.1 位置

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、海水ストレーナは、屋外の取水槽循環水ポンプエリアに設置する。取水槽循環水ポンプエリアの位置図を図2-1に示す。

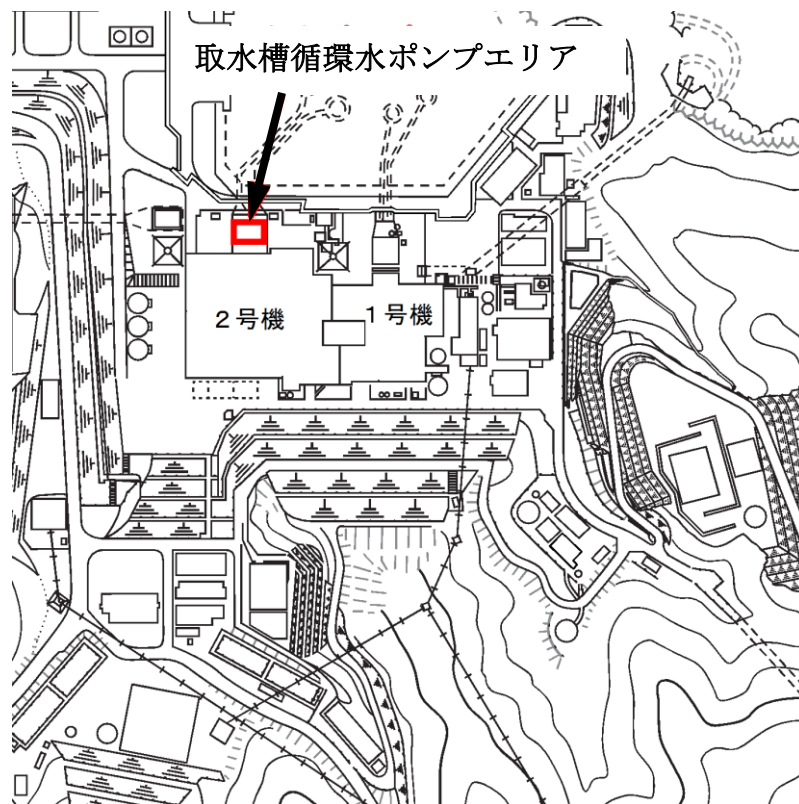


図2-1 取水槽循環水ポンプエリアの位置図

2.2 構造概要

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、海水ストレーナの構造を設定する。

海水ストレーナは、胴及び支持脚が鋳物一体となった円筒形の容器を組み合わせた構造とし、支持脚を基礎に基礎ボルトで固定する。海水ストレーナの概略構造図を図 2-2 に示す。

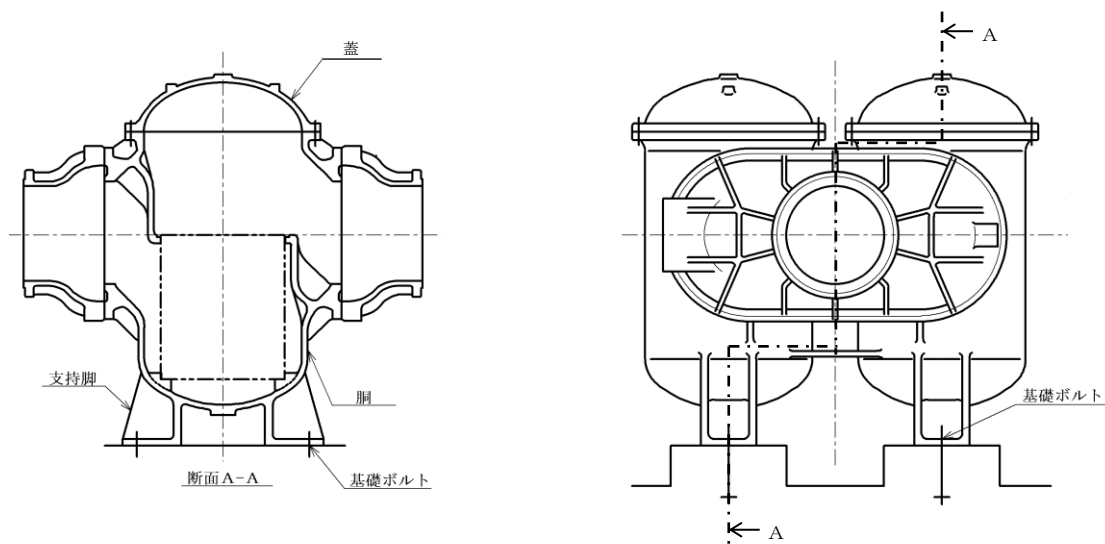


図2-2 海水ストレーナの概略構造図

2.3 評価方針

海水ストレーナの強度評価は、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」を踏まえて、海水ストレーナの評価対象部位に生じる応力等が、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」に示す条件を用いて計算し、その結果を「5. 強度評価結果」に示す。

評価対象部位は、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、選定する。

(1) 構造強度評価の方針

海水ストレーナの構造強度評価の方針を以下に、構造強度評価フローを図 2-3 に示す。

- ・海水ストレーナに対して、設計竜巻による荷重に常時作用する荷重を加えた応力が許容限界以下であることを確認する。
- ・部材に対して応力が大きくなる方向から風が当たることを想定する。
- ・設計竜巻による荷重は、水平方向より作用する外荷重という観点で地震荷重と同等であるため、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）、原子力発電所耐震設計技術指針（J E A G 4 6 0 1-1987）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）（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）における 1 質点系モデルによる評価方法を準用し、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て算出する。
- ・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 J E A G 4 6 0 1 の許容応力状態Ⅲ_AS とする。

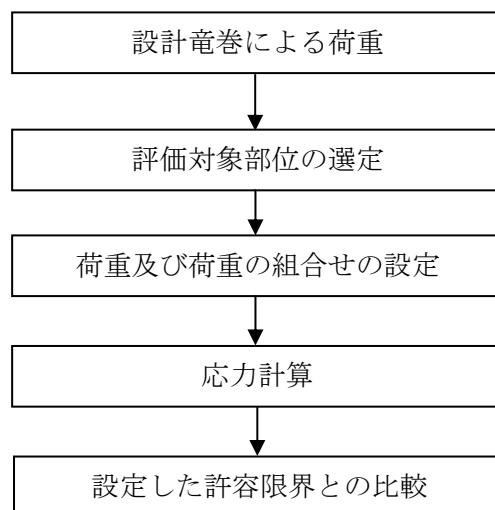


図2-3 海水ストレーナの構造強度評価フロー

2.4 適用規格・基準等

適用する規格・基準等を以下に示す。

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

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 構造強度評価の記号の定義

海水ストレーナの構造強度評価に用いる記号を表3-1に示す。

表3-1 構造強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A	m ²	受圧面積
A _b	mm ²	基礎ボルトの軸断面積
C	-	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
d	mm	基礎ボルト呼び径
F	MPa	J S M E SSB-3121.1(1)により規定される値
F _b	N	基礎ボルトに対する引張力
f_s	MPa	J S M E SSB-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
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
G	-	ガスト影響係数
g	m/s ²	重力加速度
h	mm	ストレーナ重心高さ
l	mm	重心から基礎ボルト間の水平距離
m	kg	容器の有効運転質量
N	-	基礎ボルトの本数
n _f	-	引張力を受ける基礎ボルトの本数
Q _b	N	基礎ボルトに対するせん断力
q	N/m ²	設計用速度圧
S _u	MPa	J S M E 付録材料図表 Part5 表9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 表8にて規定される設計降伏点
W	N	自重
W _P	N	設計竜巻による気圧差による荷重
W _T	N	設計竜巻による複合荷重
W _{T1} , W _{T2}	N	設計竜巻による複合荷重
W _w	N	設計竜巻による風圧力による荷重
ΔP	N/m ²	設計竜巻の気圧低下量
σ _b	MPa	基礎ボルトに生じる引張応力
ρ	kg/m ³	空気密度
τ	MPa	基礎ボルトに生じるせん断応力

3.2 評価対象部位

海水ストレーナの評価対象部位は、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「3.2 機能維持の方針」に従い、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し、選定する。

(1) 構造強度評価の評価対象部位

設計竜巻による荷重は、胴及び支持脚を介して、基礎ボルトに作用する。海水ストレーナの転倒により、海水ストレーナの海水中の固形物を除去する機能に与える影響を考慮し、転倒を防止するための主要な支持部材のうち、胴及び支持脚と比較し断面積が小さく、発生応力が大きくなる基礎ボルトを評価対象部位として選定する。

なお、海水ストレーナの蓋はドーム型形状であること、かつ受圧面積も小さいため設計竜巻の影響は小さいことから、蓋取付ボルトは評価対象部位として選定しない。

海水ストレーナの構造強度評価における評価対象部位を図3-1に示す。

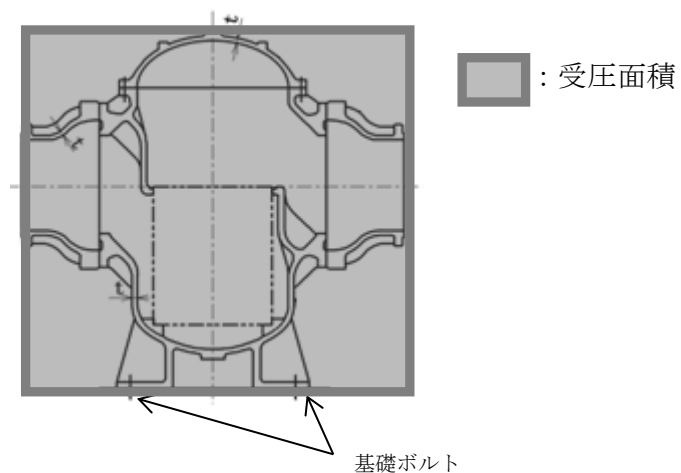


図3-1 海水ストレーナの構造強度評価の評価対象部位

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、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」にて示す荷重及び荷重の組合せを用いる。

(1) 構造強度評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の設定

構造強度評価に用いる荷重は、以下の荷重を用いる。

(a) 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、自重を考慮する。

自重は以下のとおり計算する。

$$W = m \cdot g$$

(b) 設計竜巻による荷重

風圧力による荷重及び気圧差による荷重を考慮する。海水ストレーナは取水槽循環水ポンプエリア天端に設置する竜巻防護鋼板より、防護する設計とすることから、海水ストレーナに対して飛来物の衝突は考慮しないが、保守的に風圧力は考慮することとする。

(イ) 風圧力による荷重 (W_w)

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

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

(ロ) 気圧差による荷重 (W_p)

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

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

(ハ) 荷重の組合せ

設計竜巻による荷重の組合せは、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度評価の方針」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、海水ストレーナの評価対象部位ごとに設定する。なお、評価対象部位は基礎ボルトであり、気圧差による荷重は発生しないため、複合荷重の選定において、 W_{T2} としては気圧差を考慮するが、 W_{T1} の評価は実施しない。

$$W_{T2} = W_w + 0.5 \cdot W_p$$

(c) 運転時に作用する荷重

運転時に作用する荷重として、内包水の荷重を自重に含めて考慮する。

b. 荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重の組合せは、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設定する。

構造強度評価に用いる荷重の組合せを表 3-2 に示す。

表3-2 荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
屋外の外部事象 防護対象施設	原子炉補機 海水ストレーナ	基礎ボルト	① 自重 ② 風圧力による荷重 ③ 気圧差による荷重
	高圧炉心スプレイ 補機海水ストレーナ	基礎ボルト	① 自重 ② 風圧力による荷重 ③ 気圧差による荷重

3.4 許容限界

海水ストレーナの許容限界は、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」に従い、「3.2 評価対象部位」にて設定している部位における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ⅢA Sの許容応力を用いる。

(1) 構造強度評価の許容限界

海水ストレーナの許容限界は、J E A G 4 6 0 1を準用し、「クラス2, 3支持構造物」の許容限界を適用する。設計荷重に対して、当該施設に要求される安全機能を維持できるように弾性設計とするため、許容応力状態ⅢA Sから算出した以下の許容応力を許容限界とする。材料の設計降伏点はJ S M E付録材料図表 Part5 表 8 より、設計引張強さはJ S M E付録材料図表 Part5 表 9 により算出した値を用いる。周囲環境温度がJ S M E付録材料図表 Part5 表 8 及び表 9 記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算し、小数点第1位以下を切り捨てた値を用いるものとする。

海水ストレーナの構造強度評価における許容限界を表 3-3、許容応力を表 3-4 に示す。

表 3-3 海水ストレーナの許容限界

評価対象施設	評価対象部位	許容応力状態	応力の種類		許容限界
			一次応力		
原子炉補機海水ストレーナ	基礎ボルト	ⅢA S	一次応力	引張	$1.5 \cdot f_t$
				せん断	$1.5 \cdot f_s$
				組合せ	$\text{Min}\{1.5 \cdot f_t, (2.1 \cdot f_t - 1.6 \cdot \tau)\}$
高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナ	基礎ボルト	ⅢA S	一次応力	引張	$1.5 \cdot f_t$
				せん断	$1.5 \cdot f_s$
				組合せ	$\text{Min}\{1.5 \cdot f_t, (2.1 \cdot f_t - 1.6 \cdot \tau)\}$

表 3-4 海水ストレーナの許容応力

評価対象施設	評価対象部位	材料	温度条件 (°C)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F (MPa)	1.5・f _t (MPa)	1.5・f _s (MPa)
原子炉補機海水ストレーナ	基礎ボルト	SCM435	40	785	930	651	488	375
高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナ	基礎ボルト	SCM435	40	785	930	651	488	375

3.5 評価方法

(1) 構造強度評価の評価方法

海水ストレーナの構造強度評価は、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」に示す評価式を用いる。

a. 計算モデル

設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重、有効運転質量を考慮した荷重が作用する1質点系モデルとして計算を行う。ここで、荷重の作用点は評価上高さの1/2より高いストレーナの重心位置とする。海水ストレーナのモデル図を図3-3に示す。

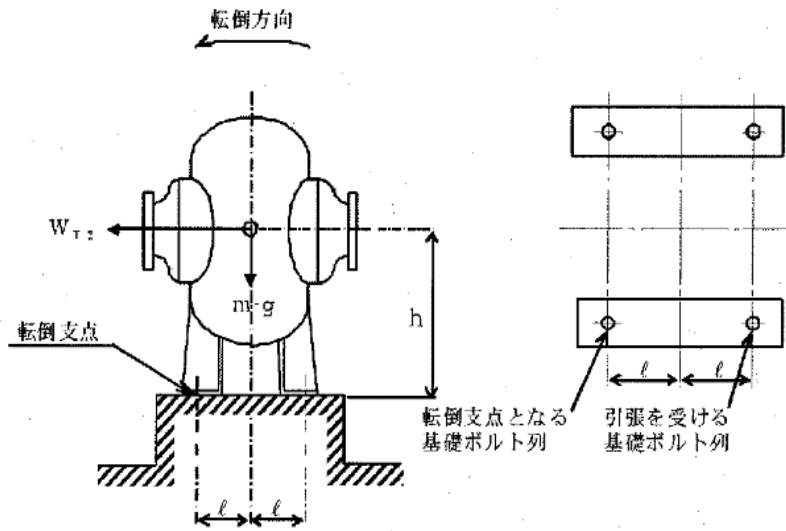


図 3-3 海水ストレーナモデル図

b. 計算方法

(a) 引張応力

基礎ボルトに対する引張力は最も厳しい条件として、図3-3で基礎ボルトを支点とする転倒を考え、これを片側の基礎ボルトで受けるものとして計算する。

イ. 引張力

$$F_b = \frac{W_{T2} \cdot h - m \cdot g \cdot l}{n_f \cdot 2 \cdot l}$$

ロ. 引張応力

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

ここで、基礎ボルトの軸断面積 A_b は

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

(b) せん断応力

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

イ. せん断力

$$Q_b = W_{T2}$$

ロ. せん断応力

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

4. 評価条件

(1) 構造強度評価の評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-1～表 4-3 に示す。

表 4-1 評価条件

q (N/m ²)	G (-)	ΔP (N/m ²)	ρ kg/m ³	C (-)
5189	1.0	7500	1.226	2.4

表 4-2 評価条件 (原子炉補機海水ストレーナ)

A (m ²)	m (kg)	g (m/s ²)	d (mm)	N (-)	n _f (-)
		9.80665		4	2

A _b (mm ²)	l (mm)	h (mm)	W _{T2} (N)
			1.2608 × 10 ⁵

表 4-3 評価条件 (高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナ)

A (m ²)	m (kg)	g (m/s ²)	d (mm)	N (-)	n _f (-)
		9.80665		4	2

A _b (mm ²)	l (mm)	h (mm)	W _{T2} (N)
			2.5213 × 10 ⁴

5. 強度評価結果

(1) 構造強度評価の強度評価結果

海水ストレーナの構造強度評価結果を表5-1に示す。

基礎ボルトに発生する応力は許容限界以下である。

表 5-1 評価結果（基礎ボルト）

評価対象施設	応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
原子炉補機 海水ストレーナ	引張	22	488
	せん断	23	375
	組合せ	22	488
高圧炉心スプレイ補機 海水ストレーナ	引張	35	488
	せん断	21	375
	組合せ	35	488

VI-3-別添 1-10 配管及び弁の強度計算書

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	4
2.4 適用規格・基準等	6
3. 強度評価方法	7
3.1 記号の定義	7
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	12
3.5 評価方法	14
4. 評価条件	17
5. 強度評価結果	18

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、原子炉補機海水系配管及び弁（取水槽）、高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁（取水槽）、非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁（屋外）、高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁（屋外）並びに非常用ガス処理系配管及び弁（以下「配管及び弁」という。）が、竜巻時及び竜巻通過後においても、主要な構造部材が構造健全性を保持し、各配管及び弁の機能を維持することを確認するものである。

2. 基本方針

配管及び弁について、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」,「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」及び「5. 強度評価方法」を踏まえ、配管及び弁の「2.1 位置」,「2.2 構造概要」,「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格・基準等」を示す。

2.1 位置

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、配管及び弁の位置図を図 2-1 に示す。

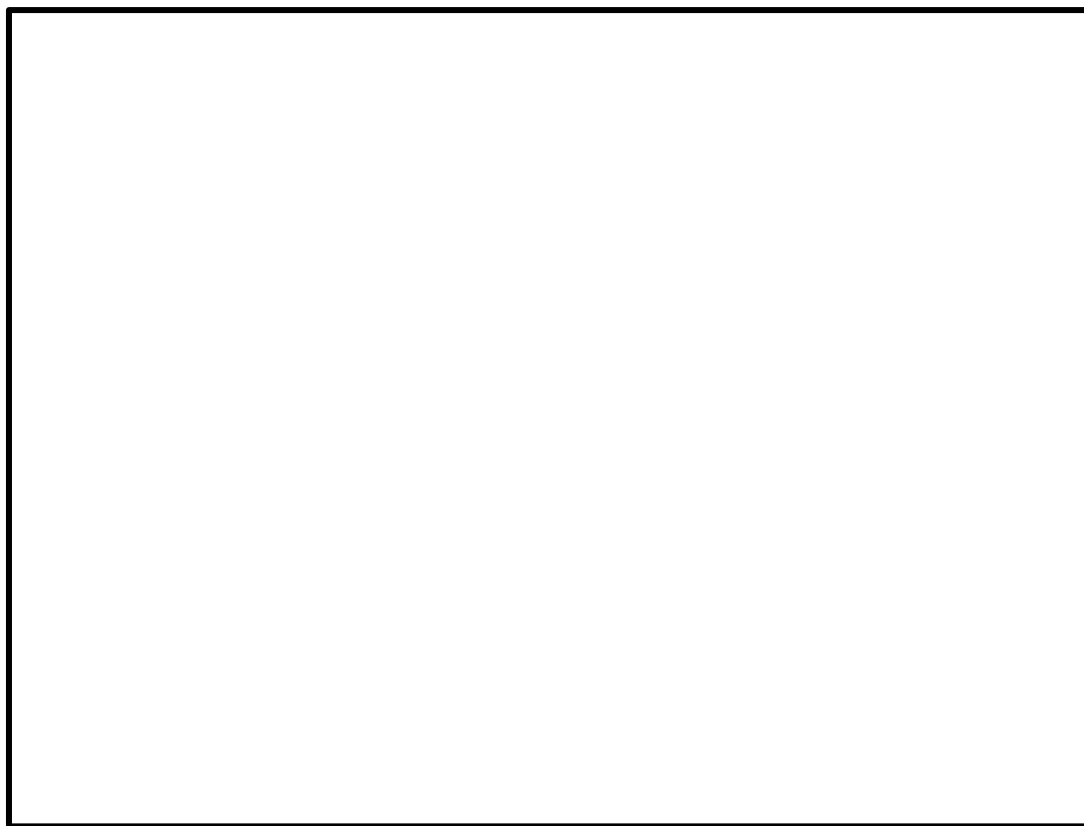


図 2-1 配管及び弁の位置図

2.2 構造概要

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、配管及び弁の構造を設定する。

配管及び弁は、配管本体及び弁で構成され、支持構造物により床、壁等から支持する構造とする。配管及び弁の概略構造図を図 2-2 に、各エリアの配管及び弁の配置図を図 2-3、図 2-4 に示す。

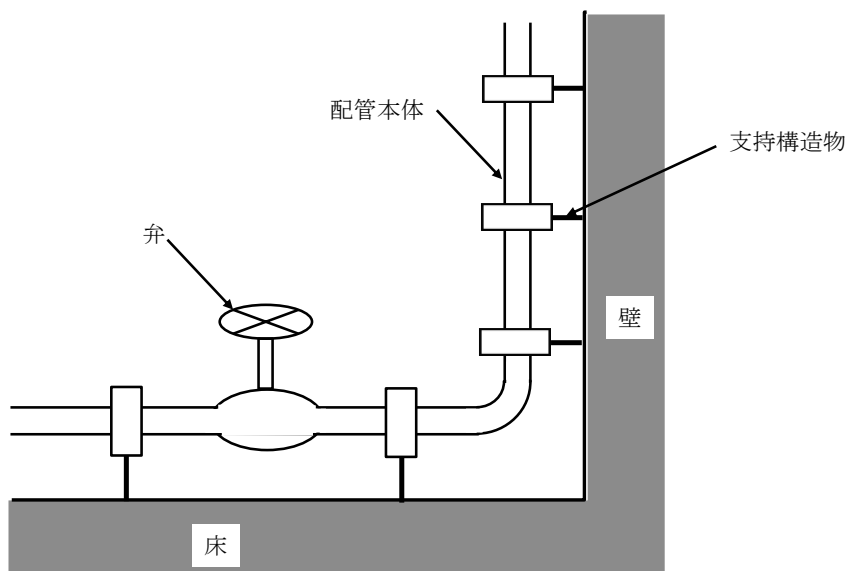


図 2-2 配管及び弁の概略構造図

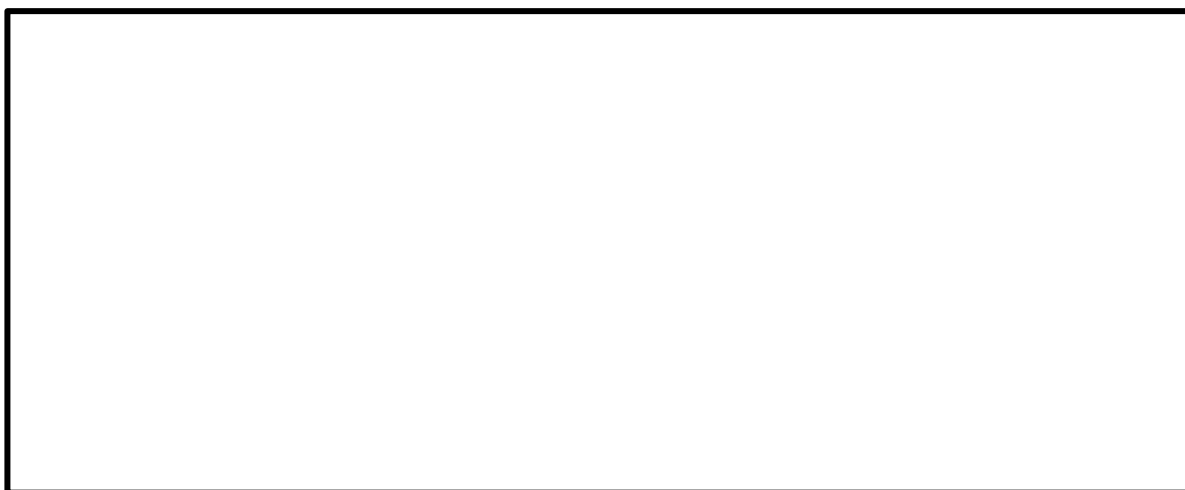


図 2-3 原子炉補機海水系配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁の配置図

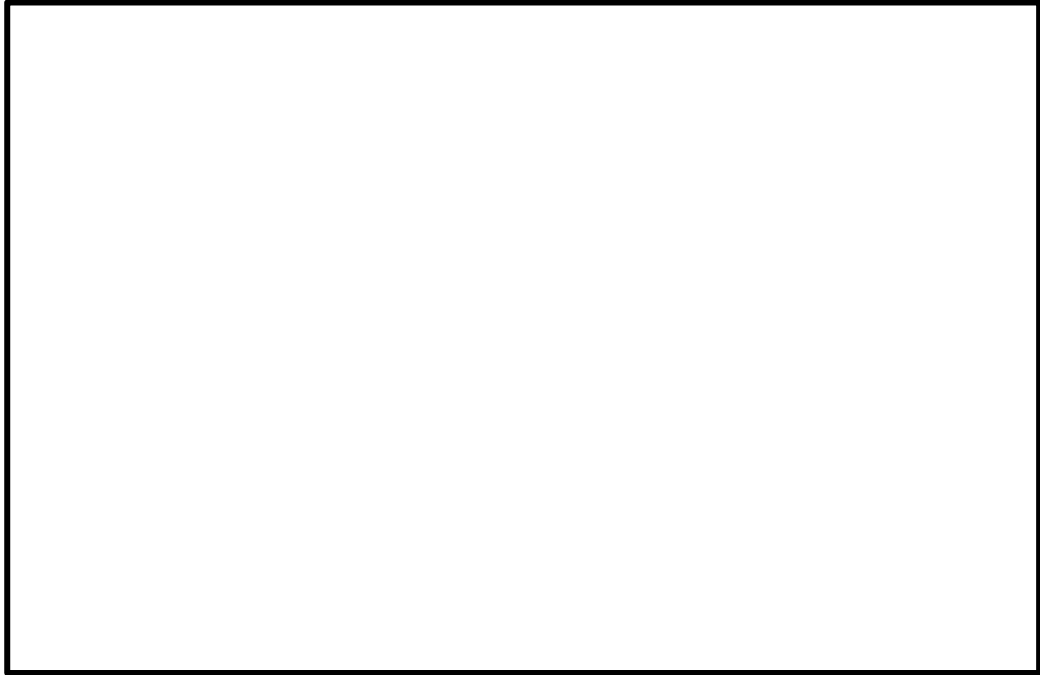


図 2-4 非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに非常用ガス処理系配管及び弁の配置図

2.3 評価方針

配管及び弁の強度評価は，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」を踏まえ，配管及び弁の評価対象部位に生じる貫入及び応力等が，許容限界に収まることを「3. 強度評価方法」に示す方法により，「4. 評価条件」に示す条件を用いて計算し，その結果を「5. 強度評価結果」に示す。

評価対象部位は，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，選定する。

(1) 衝突評価の評価方針

配管及び弁の衝突評価の方針を以下に，衝突評価フローを図 2-5 に示す。

- ・ 竜巻防護ネット等を設置する場合に考慮する飛来物である砂利の貫通限界厚さが外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ未満であることを確認する。
- ・ 貫通限界厚さは，「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」に示す衝突評価が必要な機器の評価式を用いて，算出する。
- ・ 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，外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さとする。

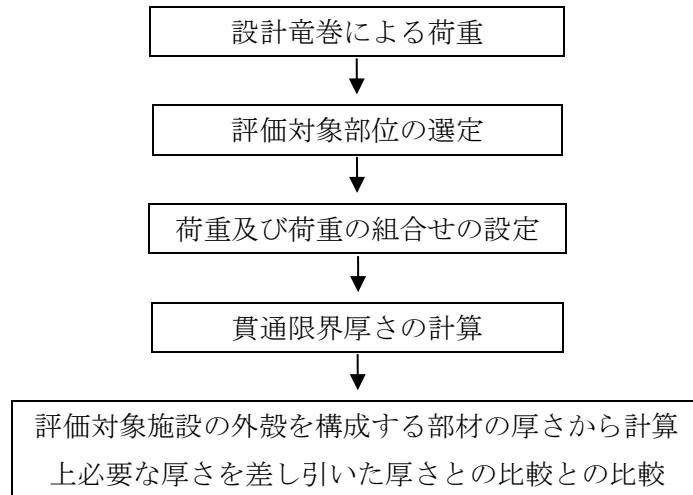


図 2-5 配管及び弁の衝突評価フロー

(2) 構造強度評価の評価方針

配管及び弁の構造強度評価の方針を以下に、構造強度評価フローを図 2-6 に示す。

- ・配管及び弁に対し、運転時に作用する荷重，設計竜巻による荷重及び常時作用す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。
- ・配管及び弁に生じる応力は，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て，算出する。
- ・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，原子力発電所耐震設計技術指針（J E A G 4 6 0 1-1987），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）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）（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。

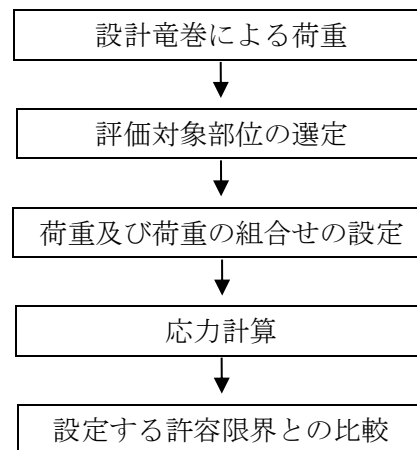


図 2-6 配管及び弁の構造強度評価フロー

2.4 適用規格・基準等

適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・建築物荷重指針・同解説（(社) 日本建築学会 2004 改定）
- ・「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）
- ・発電用原子力設備規格（設計・建設規格 JSME S NC 1-2005（2007 年追補版含む。））（(社) 日本機械学会）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針（重要度分類・許容応力編 JEAG 4 6 0 1・補-1984）（(社) 日本電気協会）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG 4 6 0 1-1987）（(社) 日本電気協会）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG 4 6 0 1-1991 追補版）（(社) 日本電気協会）

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 衝突評価の記号の定義

配管及び弁の衝突評価に用いる記号を表 3-1 に示す。

表 3-1 衝突評価に用いる記号

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

(2) 構造強度評価の記号の定義

配管及び弁の構造強度評価に用いる記号を表 3-2 に示す。

表 3-2 構造強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A	m ² /m	単位長さ当たりの受圧面積（風向に垂直な面に投影した面積）
C	-	風力係数
D	mm	管外径
g	m/s ²	重力加速度
G	-	ガスト影響係数
L	m	支持間隔
m	kg/m	単位長さ当たりの質量
M	N・m	風圧力により作用する曲げモーメント
P _i	MPa	内圧
P _b	MPa	配管に作用する圧力
ΔP	N/m ²	気圧低下量
q	N/m ²	設計用速度圧
r _m	mm	平均半径
S _y	MPa	J S M E 付録材料図表 Part5 の表 8 にて規定される設計降伏点
t	mm	配管の厚さ
V _D	m/s	竜巻の最大風速
W _P	N/m	単位長さ当たりの気圧差による荷重
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	m ³	断面係数
σ	MPa	最大発生応力
σ ₁	MPa	管に生じる応力
σ ₂	MPa	管に生じる応力
σ _{WT1} , σ _{WT2}	MPa	複合荷重により生じる応力
σ _{WP}	MPa	気圧差により生じる応力
σ _{WW}	MPa	風圧力により生じる応力
σ _{自重}	MPa	自重により生じる応力
σ _{内圧}	MPa	内圧により生じる応力
σ _θ	MPa	管に生じる周方向応力
ρ	kg/m ³	空気密度

3.2 評価対象部位

配管及び弁の評価対象部位は、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「3.2 機能維持の方針」に従い、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し選定する。なお、弁の厚さは配管の厚さに比べ厚く、弁の評価は、配管の評価に包絡されるため、配管の評価のみ実施する。

(1) 衝突評価の評価対象部位

評価において考慮する飛来物の衝突により、配管及び弁に衝撃荷重が作用し貫入する可能性があるため、貫入によりその施設の機能が喪失する可能性のある箇所を評価対象部位として選定する。なお、非常用ガス処理系配管及び弁は、建物内に設置しているため、設計飛来物の衝突を考慮しない。

配管及び弁の衝突評価における評価対象部位を図 3-1 に示す。



図 3-1 配管及び弁の衝突評価の評価対象部位

(2) 構造強度評価の評価対象部位

設計竜巻による荷重は配管本体に作用する。サポート（配管支持構造物）については、建物内外にかかわらず地震に対して耐荷重設計がなされており、配管本体に竜巻による荷重が作用した場合でも、作用荷重は耐荷重以下であり、竜巻による荷重に対するサポートの設計は耐震設計に包絡されることから、配管本体を評価対象部位として選定する。

配管及び弁の構造強度評価の評価対象部位を図 3-2 に示す。

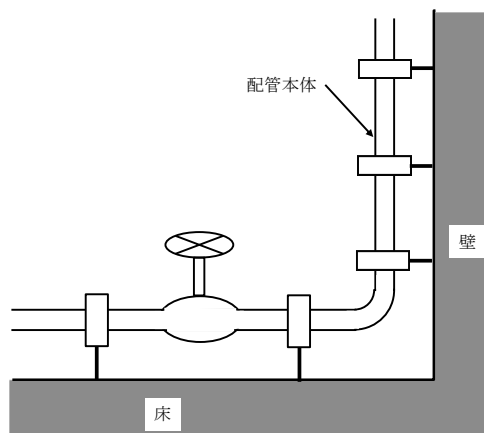


図 3-2 配管及び弁の評価対象部位

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、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」にて示す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

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

衝突評価においては、評価対象部位に砂利が衝突した際に跳ね返らず、貫入するものとして評価する。砂利の諸元を表 3-3、配管及び弁の衝突評価に用いる荷重を表 3-4 に示す。

表 3-3 砂利の諸元

飛来物	d (m)	K (-)	M (kg)	v (m/s)	
				水平方向	鉛直方向
砂利	0.04	1.0	0.2	54	36

表 3-4 配管及び弁の衝突評価に用いる荷重

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
屋外の外部事象防護対象施設	配管及び弁	配管本体	飛来物による衝撃荷重

(2) 構造強度評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の設定

構造強度評価に用いる荷重は、以下の荷重を用いる。

(a) 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、持続的に生じる荷重である自重を考慮する。単位長さ当たりの自重による単位長さ当たりの荷重は以下のとおり計算する。

$$w = m \cdot g$$

(b) 設計竜巻による荷重

風圧力による荷重及び気圧差による荷重を考慮する。竜巻防護ネットによる風圧力の低減はないものとして保守的な評価を行う。なお、非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁、高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに非常用ガス処理系配管及び弁は、竜巻防護対策設備内又は建物内に設置しているため、風圧力による荷重は考慮しない。さらに、竜巻防護ネットをすり抜ける砂利による衝撃荷重は砂利自体の質量が小さく、衝突時間が極めて短いことから、機器へ作用する荷重は構造強度に影響を与えないため、設計竜巻による荷重に組み合わせる荷重に考慮しない。

イ. 風圧力による荷重 (W_w)

風圧力による荷重は、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(3)c. (a) 風圧力による荷重 (W_w)」に示す式に従い、算出する。

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

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

ロ. 気圧差による荷重 (W_P)

気圧差による荷重は、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」に従い、気圧差を見かけ上の配管の内圧増加として考慮する。具体的な計算方法は、「3.5(2) 構造強度評価の評価方法」に示す。

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

(c) 運転時に作用する荷重

運転時に作用する荷重として、内圧による荷重を考慮する。

b. 荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重の組合せは、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、配管及び弁の評価対象部位ごとに設定する。

配管本体には、自重、風圧力、気圧差及び内圧による荷重が作用する。なお、非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁、高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに非常用ガス処理系配管及び弁の自重は内圧による荷重に比べて十分小さいことから、自重を考慮しない。

構造強度評価に用いる荷重の組合せを表 3-5 に示す。

表 3-5 荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
屋外の外部事象防護 対象施設	原子炉補機海水系配管及び弁 高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁	配管本体	①自重 ②風圧力による荷重 ③気圧差による荷重 ④内圧による荷重
	非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁	配管本体	①気圧差による荷重 ②内圧による荷重
外気と繋がっている屋内 の外部事象防護対象施設	非常用ガス処理系配管及び弁	配管本体	①気圧差による荷重 ②内圧による荷重

3.4 許容限界

配管及び弁の許容限界は、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」に従い、「3.2 評価対象部位」にて設定している部位における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の許容応力を用いる。

(1) 衝突評価の許容限界

衝突評価においては、飛来物による衝撃荷重に対し、外殻を構成する部材が、機能喪失に至る可能性のある変形を生じないことを計算により確認する。このため、配管及び弁の外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さを許容限界とし、配管及び弁の計算上必要な厚さは、J S M E PPD-3411に基づき、算出する。

配管及び弁の許容限界を表3-6に示す。

表3-6 配管及び弁の許容限界

外部事象防護対象施設	外殻を構成する部材厚さ (mm)	計算上必要な厚さ (mm)	外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ (mm)
原子炉補機海水系配管及び弁	5.1*	2.2	2.9
高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁	9.3	3.8	5.5
非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁	5.2*	2.7	2.5

注記*：評価対象となる配管のうち外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さが最小となる配管を選定する。

(2) 構造強度評価の許容限界

構造強度評価においては、J E A G 4 6 0 1を準用し、許容応力状態Ⅲ_ASから算出した許容応力とする。材料の設計降伏点はJ S M E付録材料図表Part5表8により算出した値を用いる。周囲環境温度がJ S M E付録材料図表Part5表8記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算し、小数点第1位以下を切り捨てた値を用いるものとする。配管の許容限界を表3-7に、許容応力を表3-8に示す。

表3-7 配管の許容限界

許容応力状態	許容限界
	一次応力
Ⅲ _A S	S_y

表 3-8 配管の許容応力

評価対象配管	D (mm)	材質	S _y (MPa)
原子炉補機海水系配管	711.2	SM41C	215
	508.0	SM41C	215
高圧炉心スプレイ補機海水系配管	267.4	STPT42	245
非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管	76.3	STPT42	245
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管	60.5	STPT42	245
非常用ガス処理系配管	406.4	STPT42	217

3.5 評価方法

配管及び弁の強度評価は、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」にて設定している強度評価が必要な機器の評価式を用いる。

(1) 衝突評価の評価方法

飛来物が外部事象防護対象施設に衝突する場合の貫通限界厚さは、「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 式を用いて算出する。

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

(2) 構造強度評価の評価方法

a. 原子炉補機海水系配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁

(a) 計算モデル

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

配管のモデル図を図 3-3 に示す。

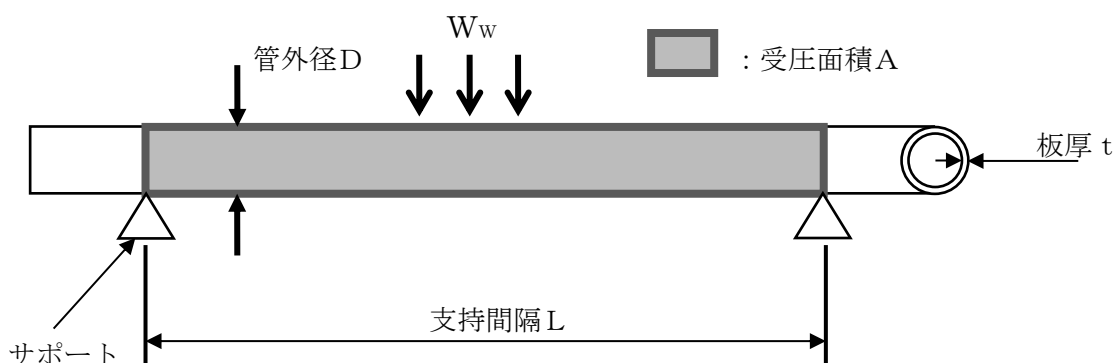


図3-3 配管のモデル図

(b) 計算方法

イ. 竜巻による応力計算

(イ) 風圧力により生じる応力

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

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

ここで、

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

(ロ) 気圧差により生じる応力

気圧差により生じる応力は、気圧が低下した分、内圧により生じる一次一般膜応力が増加すると考えて、その応力増加分を以下の式により算定する。

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

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

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

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

ロ. 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による荷重を考慮する。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。

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

$$\sigma_{内圧} = \frac{P_1 \cdot D}{4t}$$

したがって、自重及び風圧力により生じる曲げ応力と気圧差及び内圧により生じる一次一般膜応力を足し合わせ、配管に生じる応力として以下の式により σ_1 及び σ_2 を算出する。

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

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

- b. 非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁， 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに非常用ガス処理系配管及び弁

(a) 計算モデル

非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁， 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに非常用ガス処理系配管及び弁は建物内等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（燃料移送系）配管及び弁， 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに非常用ガス処理系配管及び弁のモデル図を図 3-4 に示す。

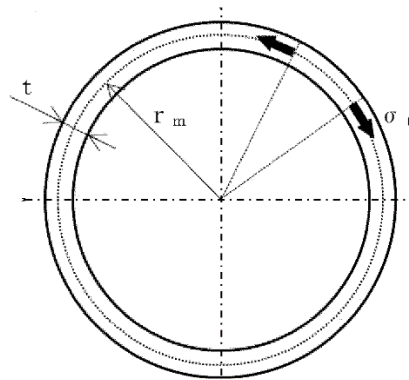


図 3-4 非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁， 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに非常用ガス処理系配管及び弁のモデル図

(b) 計算方法

イ. 配管に作用する圧力により生じる周方向応力

配管に作用する圧力は， 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，

$$P_b = \Delta P + P_1$$

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

ただし，

$$r_m = \frac{D - t}{2}$$

4. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる共通評価条件を表 4-1 に示す。

表 4-1 共通評価条件

V_D (m/s)	C (-)	q (N/m ²)	ΔP (N/m ²)	g (m/s ²)
92	1.2	5189	7500	9.80665

(1) 原子炉補機海水系配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-2, 表 4-3 に示す。

表 4-2 評価条件 (原子炉補機海水系配管及び弁)

D (mm)	材料	L (m)	t (mm)	m (kg/m)	P_1 (MPa)
711.2	SM41C	11.66	9.5	547.1	0.9807
508.0	SM41C	8.49	9.5	309.3	0.9807

表 4-3 評価条件 (高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁)

D (mm)	材料	L (m)	t (mm)	m (kg/m)	P_1 (MPa)
267.4	STPT42	6.20	9.3	110.2	0.9807

(2) 非常用ディーゼル発電設備 (燃料移送系) 配管及び弁, 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備 (燃料移送系) 配管及び弁並びに非常用ガス処理系配管及び弁

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-4, 表 4-5 に示す。

表 4-4 評価条件 (非常用ディーゼル発電設備 (燃料移送系) 配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備 (燃料移送系) 配管及び弁)

D (mm)	材料	r_m (mm)	t (mm)	P_1 (MPa)
76.3	STPT42	35.55	5.2	0.101
60.5	STPT42	27.65	5.5	0.9807

表 4-5 評価条件 (非常用ガス処理系配管及び弁)

D (mm)	材料	r_m (mm)	t (mm)	P_1 (MPa)
406.4	STPT42	198.45	9.5	0.0206

5. 強度評価結果

(1) 衝突評価結果

竜巻発生時の砂利の貫通限界厚さを表 5-1 に示す。砂利の貫通限界厚さ(1.0mm)と配管及び弁の外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さとの比較を表 5-2 に示す。砂利の貫通限界厚さは、配管及び弁の外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ未満である。

表 5-1 砂利の貫通限界厚さ

飛来物	T (mm)	
	水平方向	鉛直方向
砂利	1.0	1.0

表 5-2 配管及び弁の衝突評価結果 (砂利)

外部事象防護対象施設	T (mm)	外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ (mm)	結果
原子炉補機海水系配管及び弁	1.0	2.9 (配管)	貫通しない
高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁	1.0	5.5 (配管)	貫通しない
非常用ディーゼル発電設備(燃料移送系)配管及び弁 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備(燃料移送系)配管及び弁	1.0	2.5 (配管)	貫通しない

(2) 構造強度評価結果

a. 原子炉補機海水系配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁

竜巻発生時の強度評価結果を表 5-3, 表 5-4 に示す。原子炉補機海水系配管及び弁並びに高圧炉心スプレイ補機海水系配管及び弁に発生する応力は、許容応力以下である。また、弁の厚さは配管に比べ厚いため、弁の評価は、配管の評価に包絡される。

表 5-3 評価結果（原子炉補機海水系配管及び弁）

D (mm)	材料	σ (MPa)	許容応力 (MPa)
711.2	SM41C	66	215
508.0	SM41C	46	215

表 5-4 評価結果（高压炉心スプレイ補機海水系配管及び弁）

D (mm)	材料	σ (MPa)	許容応力 (MPa)
267.4	STPT42	39	245

- b. 非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁，高压炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに非常用ガス処理系配管及び弁

竜巻発生時の強度評価結果を表 5-5，表 5-6 に示す。非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁，高压炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに非常用ガス処理系配管及び弁に発生する応力は，許容応力以下である。また，弁の厚さは配管に比べ厚いため，弁の評価は，配管の評価に包絡される。

表 5-5 評価結果（非常用ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁並びに高压炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（燃料移送系）配管及び弁）

D (mm)	材料	σ (MPa)	許容応力 (MPa)
76.3	STPT42	1	245
60.5	STPT42	5	245

表 5-6 評価結果（非常用ガス処理系配管及び弁）

D (mm)	材料	σ (MPa)	許容応力 (MPa)
406.4	STPT42	1	217

VI-3-別添 1-12 空調換気設備の強度計算書

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・基準等	11
3. 強度評価方法	12
3.1 記号の定義	12
3.2 評価対象部位	18
3.3 荷重及び荷重の組合せ	22
3.4 許容限界	24
3.5 評価方法	30
4. 評価条件	41
5. 強度評価結果	45

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、ダンパ、角ダクト、丸ダクト、隔離弁、送風機及び処理装置が竜巻時及び竜巻通過後においても、主要な構造部材が構造健全性を保持し、その施設の機能を維持することを確認するものである。

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」の「3.2 機能維持の方針」, 「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」及び「5. 強度評価方法」に示す構造計画を踏まえ, ダンパ, 角ダクト, 丸ダクト, 隔離弁, 送風機及び処理装置の「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

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, ダンパ, 角ダクト, 丸ダクト, 隔離弁, 送風機及び処理装置は, 図2-1に示す十分な強度を有する原子炉建物及び廃棄物処理建物内に設置する。

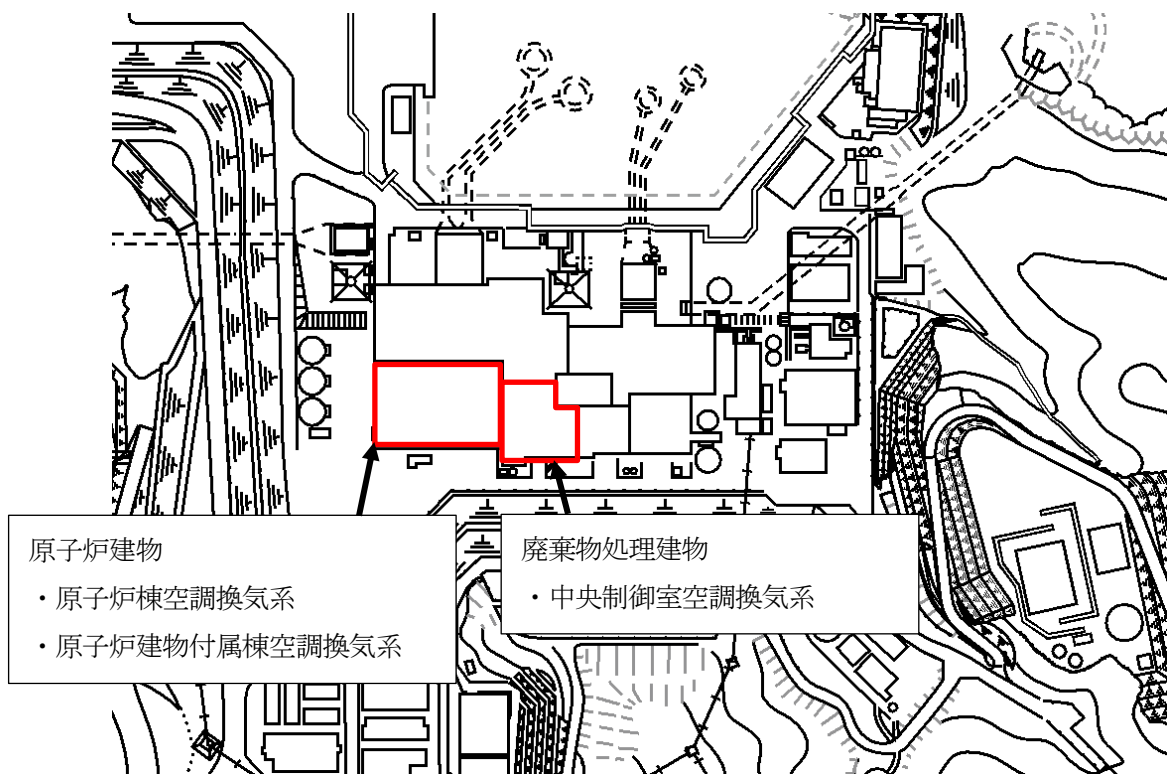


図2-1 ダンパ, 角ダクト, 丸ダクト, 隔離弁, 送風機及び処理装置の位置図

2.2 構造概要

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、換気空調設備の構造を設定する。

ダンパ、角ダクト、丸ダクト、隔離弁、送風機及び処理装置の構造を以下に示す。

(1) ダンパ

ダンパは、外板、羽根及びシャフトで構成され、接続ダクトにより支持する構造とする。ダンパの概略構造図を図 2-2 に示す。

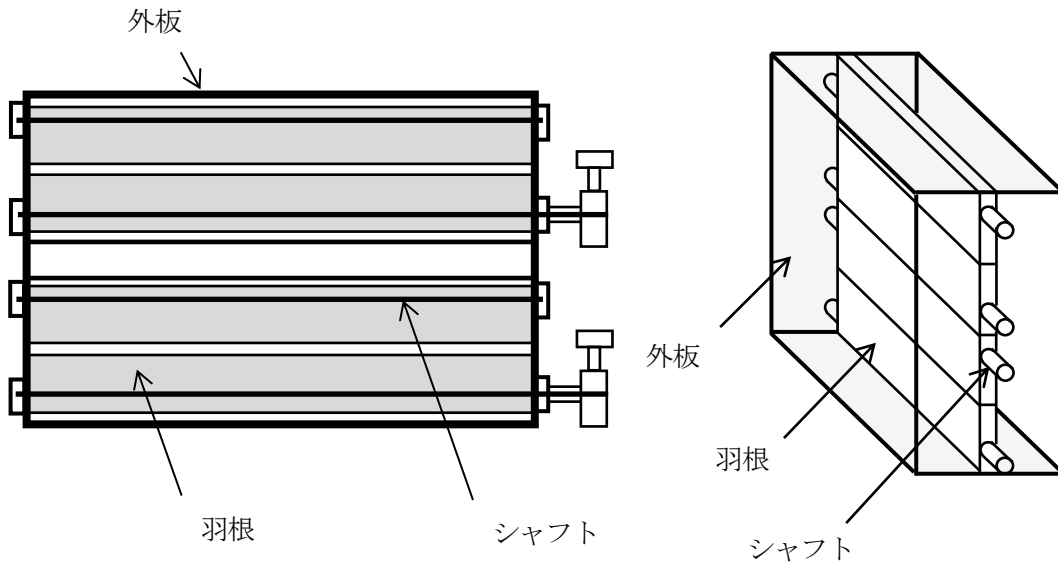


図 2-2 ダンパの概略構造図

(2) 角ダクト及び丸ダクト

角ダクト及び丸ダクトは、ダクト鋼板で構成され、支持構造物により建物壁、床、はり等から支持する構造とする。角ダクトの概略構造図を図 2-3 に、丸ダクトの概略構造図を図 2-4 に示す。

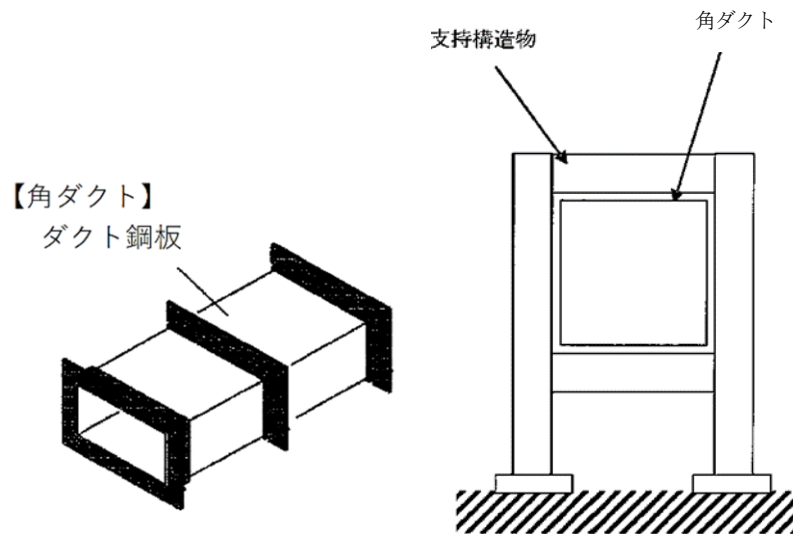


図 2-3 角ダクトの概略構造図

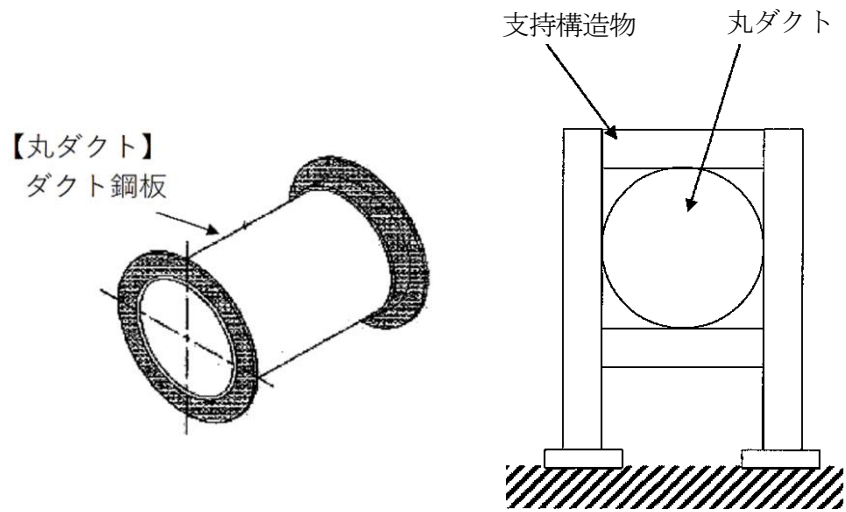


図 2-4 丸ダクトの概略構造図

(3) 隔離弁

隔離弁は、鋼製の弁箱、弁体及び弁棒で構成され、接続ダクトにより支持する構造とする。隔離弁の概略構造図を図 2-5 に示す。

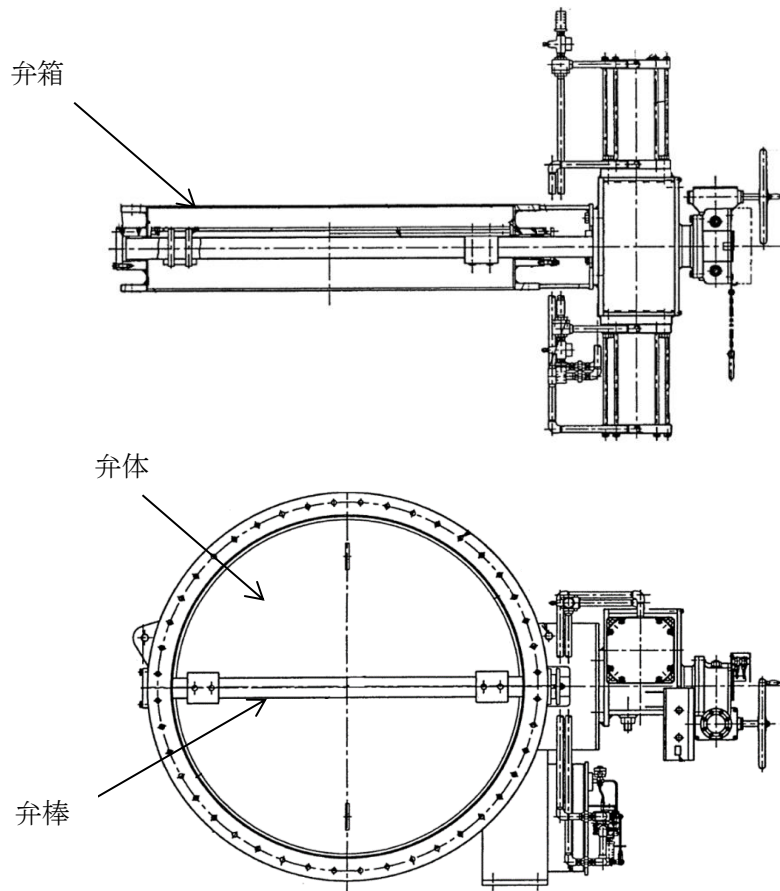


図 2-5 隔離弁の概略構造図

(4) 送風機

送風機は風路を形成するケーシング，空気を送り込む羽根車及び羽根車を支持する主軸で構成され，支持構造物で床面等に支持する構造とする。送風機の概略構造図を図 2-6 に示す。

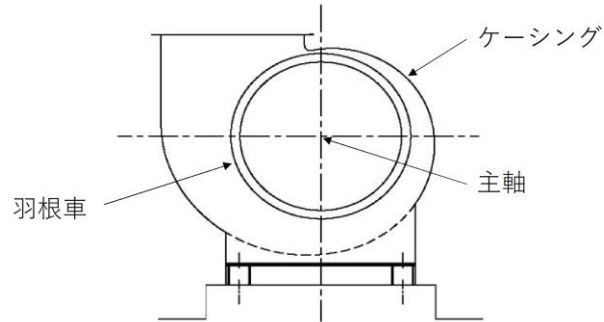


図 2-6 送風機の概略構造図

(5) 処理装置

処理装置は風路を形成するケーシング，ケーシングを固定するはり及び長柱で構成され，支持構造物で床面等に支持する構造とする。処理装置の概要図を図 2-7 に示す。

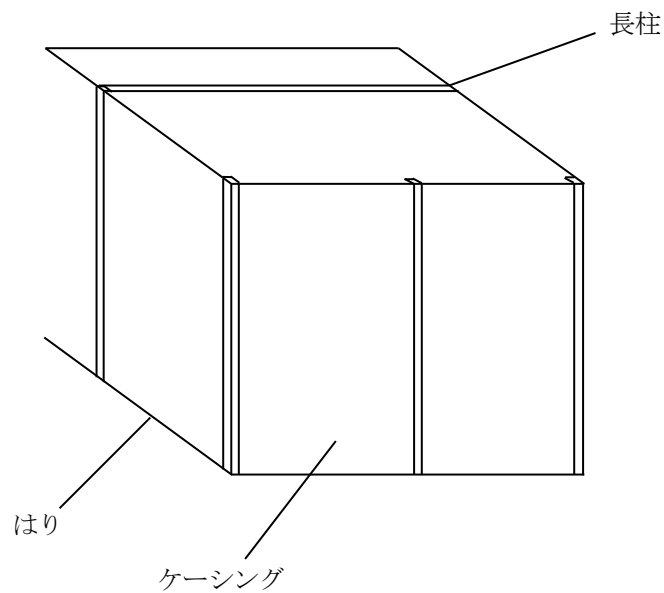


図 2-7 処理装置の概略構造図

2.3 評価方針

換気空調設備の強度評価は、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」を踏まえ、ダンパ、角ダクト、丸ダクト、隔離弁、送風機及び処理装置の評価対象部位に生じ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」に示す条件を用いて計算し、その結果を「5. 強度評価結果」に示す。

評価対象部位は、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、選定する。

(1) 構造強度評価の方針

a. ダンパ

ダンパの構造強度評価の方針を以下に、構造強度評価フローを図 2-8 に示す。

- ・ダンパに対して、設計竜巻による荷重及び常時作用する荷重により生じる応力が許容限界に収まることを確認する。
- ・ダンパに生じる応力は、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て、算出する。
- ・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方針」の「4.2 許容限界」に示す、原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984、原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 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（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。

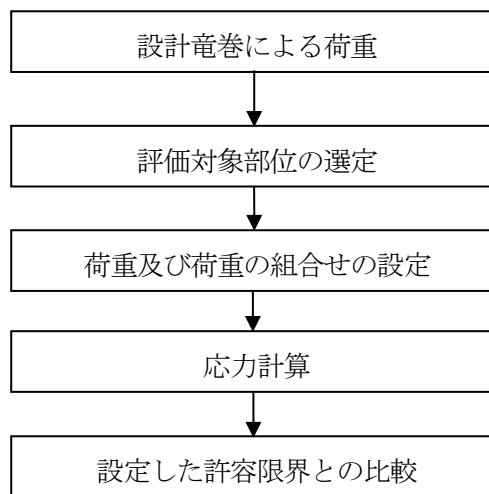


図 2-8 ダンパの構造強度評価フロー

b. 角ダクト及び丸ダクト

角ダクト及び丸ダクトの構造強度評価の方針を以下に、構造強度評価フローを図2-9に示す。

- ・角ダクト及び丸ダクトに対して、設計竜巻による荷重、常時作用する荷重及び運転時に作用する荷重により生じる応力が許容限界に収まることを確認する。
- ・角ダクト及び丸ダクトに生じる応力は、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て、算出する。
- ・角ダクトの許容限界は、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、J E A G 4 6 0 1の許容応力状態ⅢA Sとする。ただし、座屈に対しては評価式を満足することを確認する。
- ・丸ダクトの許容限界は、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、クリップリング座屈及び弾性座屈曲げ応力の式により算出する。

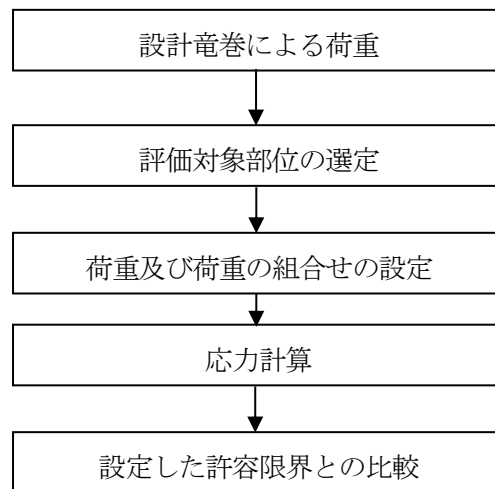


図2-9 角ダクト及び丸ダクトの構造強度評価フロー

c. 隔離弁

隔離弁の構造強度評価の方針を以下に、構造強度評価フローを図2-10に示す。

- ・ 隔離弁に対して、設計竜巻による荷重及び常時作用する荷重により生じる応力が許容限界に収まることを確認する。
- ・ 隔離弁に生じる応力は、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て、算出する。
- ・ 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、J E A G 4 6 0 1 の許容応力状態Ⅲ_ASとする。ただし、弁箱については、クリップリング座屈の式により算出する。

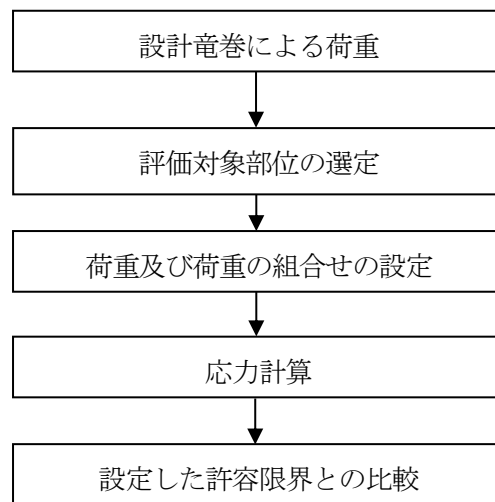


図2-10 隔離弁の構造強度評価フロー

d. 送風機

送風機の構造強度評価の方針を以下に、構造強度評価フローを図2-11に示す。

- ・送風機に対して、設計竜巻による荷重及び運転時に作用する荷重により生じる応力が許容限界に収まることを確認する。
- ・送風機に生じる応力は、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て、算出する。
- ・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、クリッピング座屈の式により算出する。

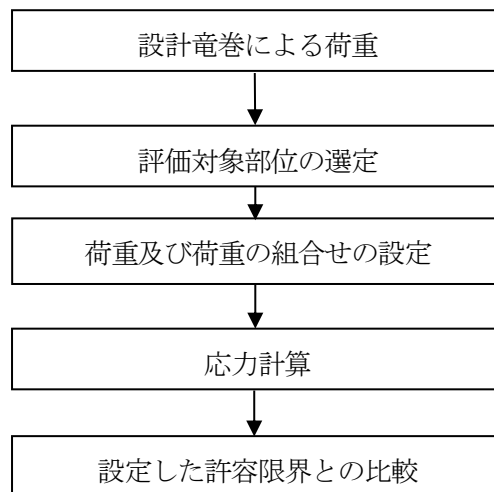


図2-11 送風機の構造強度評価フロー

e. 処理装置

処理装置の構造強度評価の方針を以下に、構造強度評価フローを図2-12に示す。

- ・処理装置に対して、設計竜巻による荷重及び運転時に作用する荷重により生じる応力が許容限界に収まることを確認する。
- ・処理装置に生じる応力は、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て、算出する。
- ・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、J E A G 4 6 0 1の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

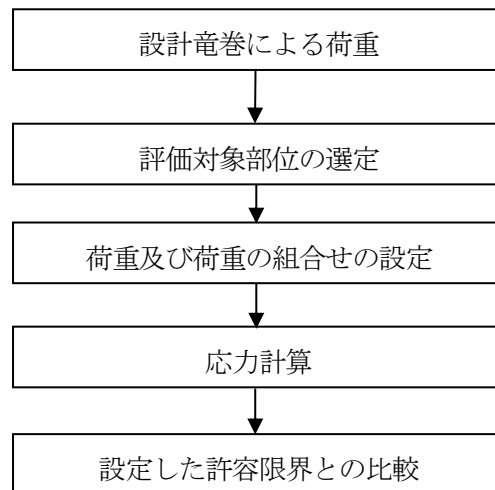


図2-12 処理装置の構造強度評価フロー

2.4 適用規格・基準等

適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・発電用原子力設備規格（設計・建設規格 JSME S NC1-2005（2007年追補版含む。））（（社）日本機械学会）（以下「JSME」という。）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針（重要度分類・許容応力編 JEAG 4601・補-1984）（（社）日本電気協会）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG 4601-1987）（（社）日本電気協会）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG 4601-1991 追補版）（（社）日本電気協会）
- ・日本産業規格（JIS）
- ・機械工学便覧（1987年日本機械学会編）

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 構造強度評価の記号の定義

a. ダンパ

ダンパの構造強度評価に用いる記号を表3-1に示す。

表3-1 ダンパの構造強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
a	mm	評価対象板の短辺
A	mm ²	シャフト断面積
b	mm	評価対象板の長辺
D	mm	シャフト直径
e	mm	外板における断面の重心高さ
F ₁	N/mm	気圧低下による分布荷重
F ₂	N/mm	自重による分布荷重
f_t	MPa	J SME SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容引張応力
f_s	MPa	J SME SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容せん断応力
f_b	MPa	J SME SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容曲げ応力
g	m/s ²	重力加速度
h	mm	羽根厚さ
H	mm	外板高さ
E	MPa	縦弾性係数
I	mm ⁴	断面二次モーメント
L	mm	面間寸法
m	kg	羽根質量
M ₁	kg	外板質量
M ₂	kg	上流側フランジ質量
M ₃	kg	下流側フランジ質量
M _x	N・mm	外板に作用する曲げモーメント
P	MPa	ダンパに作用する圧力
ΔP	MPa	最大気圧低下量
W	mm	外板幅
Z	mm ³	断面係数
ν	—	ポアソン比
ω_{max}	mm	羽根の最大変位量
σ_{max}	MPa	羽根に生じる面外方向の荷重による最大応力
σ_{bmax}	MPa	外板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. 角ダクト

角ダクトの構造強度評価に用いる記号を表 3-2 に示す。

表 3-2 角ダクトの構造強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
a	mm	評価対象板の短辺
b	mm	評価対象板の長辺
c	mm	ダクト支持間隔
E	MPa	縦弾性係数
f_1	N	曲げモーメントによる圧縮荷重
f_2	N	最大気圧低下量及び通常運転圧力による圧縮荷重
f_t	MPa	J SME SSB-3121.1 により規定される供用状態 A 及び B での許容引張応力
H	mm	ダクト高さ
M	N・mm	自重による曲げモーメント
ΔP	Pa	最大気圧低下量
P	Pa	ダクトに作用する圧力
P_1	Pa	通常運転圧力
P_m	N	限界荷重
t	mm	ダクト厚さ
W	mm	ダクト幅
w_1	N/mm	ダクト単位長さ当たりの荷重
w_2	N/mm ²	ダクト単位面積当たりの荷重
ν	—	ポアソン比
ω_{max}	mm	軸直角方向の荷重によるダクトの最大変位量
σ_{max}	MPa	軸直角方向の荷重により生じる最大応力
σ_y	MPa	降伏応力

c. 丸ダクト

丸ダクトの構造強度評価に用いる記号を表 3-3 に示す。

表 3-3 丸ダクトの構造強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A_1	mm^2	ダクト全断面積
A_2	mm^2	ダクト板の断面積
c	mm	ダクト支持間隔
d_1	mm	ダクト内径
d_2	mm	ダクト外径
E	MPa	縦弾性係数
k_p	—	座屈係数
M	$\text{N}\cdot\text{mm}$	自重による曲げモーメント
M_{cr}	$\text{N}\cdot\text{mm}$	弾性座屈曲げモーメント
L	mm	ダクト板の長さ
n	—	座屈モードの次数
P	MPa	ダクトに作用する圧力
ΔP	MPa	最大気圧低下量
P_1	MPa	通常運転圧力
R	mm	内半径
r_m	mm	平均半径
t	mm	ダクト厚さ
ν	—	ポアソン比
w	N/mm	ダクト単位長さ当たりの荷重
Z	mm^3	断面係数
z_c	—	形状係数
β	—	補正係数
σ_b	MPa	自重による発生応力
σ_{Pb}	MPa	設計竜巻による気圧差及び内圧による発生応力
σ_{cr1}	MPa	クリップリング座屈が発生する際に生じる応力
σ_{cr2}	MPa	弾性座屈曲げ応力
σ_P	MPa	ダクトに作用する圧力による発生応力
σ_θ	MPa	ダクトに作用する圧力により軸直角方向に生じる応力

d. 隔離弁

隔離弁の構造強度評価に用いる記号を表3-4に示す。

表3-4 隔離弁の構造強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A	mm ²	弁棒断面積
D	mm	弁棒直径
e	mm	主軸から断面最端点までの距離
E	MPa	縦弾性係数
f_s	MPa	J SME SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容せん断応力
f_b	MPa	J SME SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容曲げ応力
F ₁	N	最大気圧低下量による荷重
F ₂	N	自重による荷重
g	m/s ²	重力加速度
h	mm	弁体厚さ
H	mm	弁体幅
I	mm ⁴	断面二次モーメント
k _p	—	座屈係数
ℓ	mm	弁体評価面の長さ
L ₁	mm	弁箱の面間寸法
L ₂	mm	弁体長さ
M	kg	弁体質量
M _x	N・mm	弁体に作用する曲げモーメント
n	—	座屈モードの次数
P	MPa	隔離弁に作用する圧力
ΔP	MPa	最大気圧低下量
R	mm	内半径
r _m	mm	平均半径
t	mm	弁箱厚さ
w	mm	弁体評価面の幅
β	—	補正係数
ν	—	ポアソン比
Z _c	—	形状係数
Z	mm ³	断面係数
σ _{max}	MPa	弁箱に生じる周方向応力
σ _{bmax}	MPa	弁体に生じる最大曲げ応力
σ _{smax}	MPa	弁棒に生じる最大せん断応力
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

e. 送風機

送風機の構造強度評価に用いる記号を表3-5に示す。

表3-5 送風機の強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
a	mm	ケーシング内半径
b	mm	ケーシング外半径
E	MPa	縦弾性係数
k_p	—	座屈係数
L	mm	ケーシングの軸方向長さ
n	—	座屈モードの次数
P	MPa	送風機に作用する圧力
ΔP	MPa	最大気圧低下量
P_1	MPa	通常運転圧力
t	mm	ケーシングの肉厚
z_c	—	形状係数
β	—	補正係数
ν	—	ポアソン比
σ	MPa	送風機に作用する圧力により生じる周方向応力
σ_{cr1}	MPa	クリップリング座屈が発生する際に生じる周方向応力

f. 処理装置

処理装置の構造強度評価に用いる記号を表 3-6 に示す。

表 3-6 処理装置の構造強度評価に用いる

記号	単位	定義
a	mm	評価対象板の短辺
b	mm	評価対象板の長辺
E	MPa	縦弾性係数
f_t	MPa	J SME SSB-3121.1 により規定される供用状態 A 及び B での許容引張応力
P	MPa	処理装置に作用する圧力
ΔP	MPa	最大気圧低下量
P_1	MPa	通常運転圧力
t	mm	ケーシング厚さ
ν	—	ポアソン比
ω_{max}	mm	面外方向の荷重によるケーシングの最大変位量
σ_{max}	MPa	面外方向の荷重により生じる最大応力

3.2 評価対象部位

(1) 構造強度評価の評価対象部位

ダンパ、角ダクト、丸ダクト、隔離弁、送風機及び処理装置の評価対象部位は、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「3.2 機能維持の方針」にて示している評価対象部位に従い、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し選定する。ダンパ、角ダクト、丸ダクト、隔離弁、送風機及び処理装置の評価対象部位を以下に示す。

a. ダンパ

設計竜巻による荷重は、外板及び羽根に作用し、羽根を介してシャフトに作用する。このことから、外板、羽根及びシャフトを評価対象部位として選定する。ダンパの構造強度評価における評価対象部位を、図 3-1 に示す。

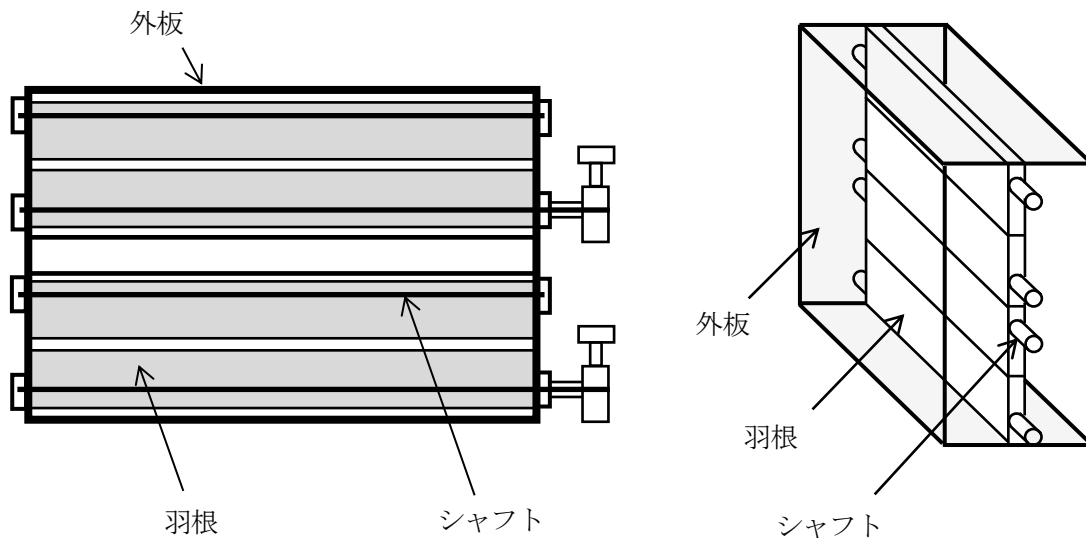


図 3-1 ダンパの評価対象部位

b. 角ダクト

設計竜巻による荷重は、角ダクト本体のダクト鋼板に作用する。このことから、ダクト鋼板を評価対象部位として選定する。角ダクトの構造強度評価における評価対象部位を図3-2に示す。

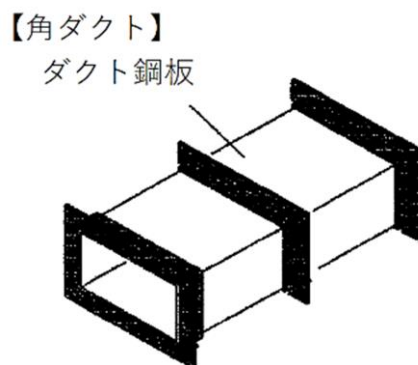


図3-2 角ダクトの評価対象部位

c. 丸ダクト

設計竜巻による荷重は、丸ダクト本体のダクト鋼板に作用する。このことから、ダクト鋼板を評価対象部位として選定する。丸ダクトの構造強度評価における評価対象部位を図3-3に示す。

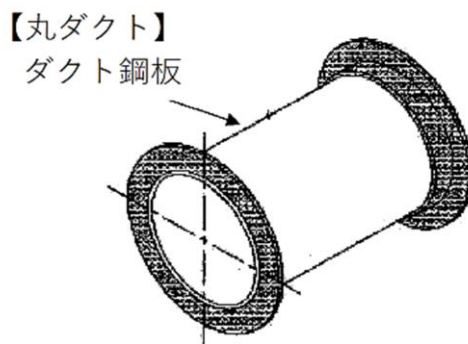


図3-3 丸ダクトの評価対象部位

d. 隔離弁

設計竜巻による荷重は、隔離弁の耐圧部に作用する。このことから、耐圧部である弁箱、弁体、弁棒を評価対象部位として選定する。隔離弁の構造強度評価における評価対象部位を、図3-4に示す。

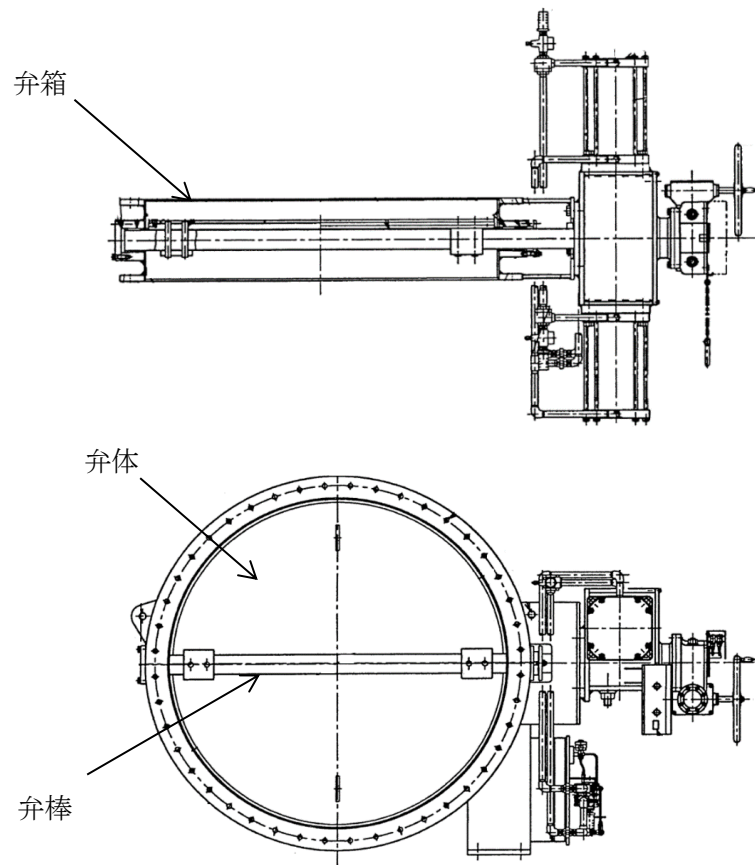


図3-4 隔離弁の評価対象部位

e. 送風機

設計竜巻による荷重は、送風機のケーシングに作用する。このことから、ケーシングを評価対象部位として設定する。送風機の構造強度評価における評価対象部位を図3-5に示す。

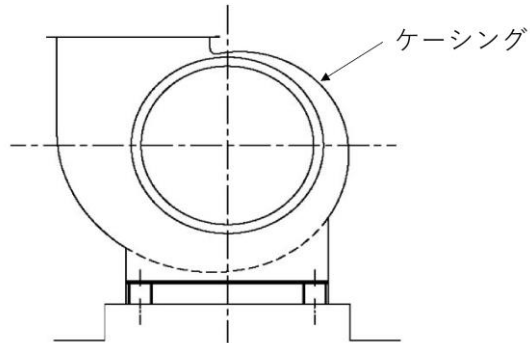


図3-5 送風機の評価対象部位

f. 処理装置

設計竜巻による荷重は、処理装置のケーシングに作用する。このことからケーシングを評価対象部位として設定する。処理装置の構造強度評価における評価対象部位を図3-6に示す。

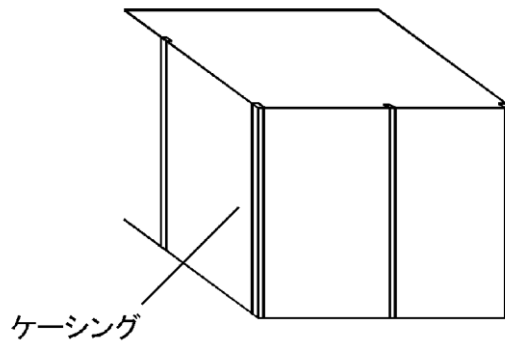


図3-6 処理装置の評価対象部位

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」にて示す荷重及び荷重の組合せを用いる。

(1) 構造強度評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の設定

構造強度評価に用いる荷重は、以下の荷重を用いる。

(a) 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、持続的に生じる荷重である自重を考慮する。自重による荷重は以下のとおり計算する。

$$\text{自重による荷重} = \text{自重} \times \text{重力加速度}$$

(b) 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ため、気圧差による荷重を考慮する。

(c) 運転時に作用する荷重

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、内圧による荷重を考慮する。

b. 荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重の組合せは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、評価対象施設ごとに設定する。なお、ダンパ及び隔離弁については閉止していることから、内圧による荷重は考慮しない。また、隔離弁の弁箱並びに送風機及び処理装置のケーシングの自重は内圧による荷重に比べ十分小さいことから、自重を考慮しない。

構造強度評価の荷重の組合せを表 3-7 に示す。

表 3-7 荷重の組合せ

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 対象施設施設	ダンパ	外板 羽根 シャフト	①自重 ②気圧差による荷重
	角ダクト	ダクト鋼板	①自重 ②気圧差による荷重 ③内圧による荷重
	丸ダクト	ダクト鋼板	①自重 ②気圧差による荷重 ③内圧による荷重
	隔離弁	弁箱	①気圧差による荷重
		弁体 弁棒	①自重 ②気圧差による荷重
	送風機	ケーシング	①気圧差による荷重 ②内圧による荷重
	処理装置	ケーシング	①気圧差による荷重 ②内圧による荷重

3.4 許容限界

(1) 構造強度評価における許容限界

ダンパ、角ダクト、丸ダクト、隔離弁、送風機及び処理装置の許容限界は、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」に従い、「3.2 評価対象部位」にて設定している部位における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ⅢA Sの許容応力を用いる。ダンパ、角ダクト、丸ダクト、隔離弁、送風機及び処理装置の許容限界を以下に示す。

a. ダンパ

ダンパの許容限界は、J E A G 4 6 0 1を準用し、「クラス2，3・その他の支持構造物」の許容限界を適用し、許容応力状態ⅢA Sから算出した許容応力とする。材料の設計降伏点はJ S M E付録材料図表Part5表8により、設計引張強さはJ S M E付録材料図表Part5表9により算出した値を用いる。周囲環境温度がJ S M E付録材料図表Part5表8及び表9記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算し、小数点第1位以下を切り捨てた値を用いるものとする。なお、J S M E付録材料図表Part5の表に記載のない材料を用いている場合はJ I S G 3 1 0 8，3 3 1 3を適用する。

ダンパの許容限界を表3-8，許容応力を表3-9～表3-11に示す。

表3-8 ダンパの許容限界

許容応力状態	許容限界		
	一次応力		
	曲げ	引張	せん断
ⅢA S	$1.5 \cdot f_b$	$1.5 \cdot f_t$	$1.5 \cdot f_s$

表3-9 ダンパの許容応力 (外板)

材料	温度条件 (°C)	$1.5 \cdot f_b$ (MPa)
S E H C	40	218

表3-10 ダンパの許容応力 (羽根)

材料	温度条件 (°C)	$1.5 \cdot f_t$ (MPa)
S E C C	40	189

表3-11 ダンパの許容応力 (シャフト)

材料	温度条件 (°C)	$1.5 \cdot f_s$ (MPa)
S G D 4 1	40	141

b. 角ダクト

角ダクトの許容限界は、J E A G 4 6 0 1 を準用し、「クラス 2, 3・その他の支持構造物」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とする。ただし、妥当な安全余裕を考慮し、座屈を生じないように設定する許容限界は、座屈の評価式により算出した値を設定する。材料の設計降伏点は J S M E 付録材料図表 Part5 表 8 より、及び設計引張強さは J S M E 付録材料図表 Part5 表 9 より算出した値を用いる。周囲環境温度が J S M E 付録材料図表 Part5 表 8 及び表 9 記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算し、小数点第 1 位以下を切り捨てた値を用いるものとする。なお、J S M E 付録材料図表 Part5 の表に記載のない材料を用いている場合は J I S G 3 3 0 2 を適用する。

(a) 軸直角方向の荷重により生じる応力に対する許容限界

軸直角方向の荷重により生じる応力に対する許容限界を表 3-12、許容応力を表 3-13 に示す。

表 3-12 角ダクトの許容限界

許容応力状態	許容限界
	一次応力
	引張
Ⅲ _A S	$1.5 \cdot f_t$

表 3-13 角ダクトの許容応力

材料	温度条件 (°C)	$1.5 \cdot f_t$ (MPa)
S P G C	40	189

(b) 軸方向の荷重に対する許容限界

ダクト自重による圧縮荷重 f_1 と設計竜巻による気圧差及び内圧による圧縮荷重 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、設計竜巻による気圧差及び内圧による圧縮荷重 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、これらの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、

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

c. 丸ダクト

丸ダクトの許容限界は、評価荷重に対して、妥当な安全余裕を考慮し、座屈を生じないこととするため、クリップリング座屈及び弾性座屈曲げ応力の式により算出する。

(a) 軸直角方向の荷重により生じる応力に対する許容限界

ダクトに作用する圧力により軸直角方向の荷重が生じ、この荷重により生じる応力 σ_{θ} が、クリップリング座屈が発生する際に生じる応力（座屈応力） σ_{cr1} を超えないことを確認する。クリップリング座屈が発生する際に生じる応力 σ_{cr1} は、円筒殻の座屈応力の式より算出する。

$$\sigma_{\theta} \leq \sigma_{cr1}$$

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

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

$$\beta = \frac{L \cdot n}{\pi \cdot r_m}$$

$$z_c = \frac{L^2}{r_m \cdot t} \sqrt{1-\nu^2}$$

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。

(b) 軸方向の荷重により生じる応力に対する許容限界

ダクト自重による軸方向圧縮荷重により生じる曲げ応力 σ_b と設計竜巻による気圧差及び内圧により生じ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。

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

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

$$M_{cr} = \frac{\beta \cdot E \cdot R \cdot t^2}{(1-\nu^2)}, \quad \beta = 0.72$$

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

d. 隔離弁

隔離弁の許容限界は、J E A G 4 6 0 1を準用し、「クラス2, 3・その他支持構造物」の許容限界を適用し、許容応力状態Ⅲ_ASから算出した許容応力とする。ただし、妥当な安全余裕を考慮し、座屈を生じないように設定する許容限界は、クリップリング座屈の式により算出した値を設定する。材料の設計降伏点はJ S M E付録材料図表Part5表8より、設計引張強さはJ S M E付録材料図表Part5表9により算出した値を用いる。周囲環境温度がJ S M E付録材料図表Part5表8及び表9記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算する。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。なお、J S M E付録材料図表Part5の表に記載のない材料を用いている場合はJ I S G 3 3 1 3を適用する。

(a) 弁体及び弁棒に対する許容応力

隔離弁に作用する圧力及び自重により生じる応力に対する許容限界を表3-14、許容応力を表3-15、表3-16に示す。

表3-14 隔離弁の許容限界

許容応力状態	許容限界	
	一次応力	
	曲げ	せん断
Ⅲ _A S	$1.5 \cdot f_b$	$1.5 \cdot f_s$

表3-15 隔離弁の許容応力（弁体）

材料	温度条件 (°C)	$1.5 \cdot f_b$ (MPa)
SM4 1 B	40	271

表3-16 隔離弁の許容応力（弁棒）

材料	温度条件 (°C)	$1.5 \cdot f_s$ (MPa)
SUS 3 0 4	40	118

(b) 弁箱に対する許容応力

隔離弁に作用する圧力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。

隔離弁に作用する圧力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。

$$\sigma_{cr1} = \frac{k_p \cdot \pi^2 \cdot E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{L_1} \right)^2$$

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

$$\beta = \frac{L_1 \cdot n}{\pi \cdot R}$$

$$z_c = \frac{L_1^2}{R \cdot t} \sqrt{1-\nu^2}$$

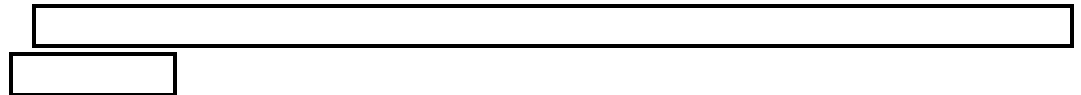
e. 送風機

送風機の許容限界は、評価荷重に対して、妥当な安全余裕を考慮し、座屈を生じないこととするため、クリップリング座屈の式により算出した値とする。

(a) 送風機に作用する圧力に対する許容応力

送風機に作用する圧力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。

送風機に作用する圧力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。



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

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

$$\beta = \frac{L \cdot n}{\pi \cdot b}, \quad z_c = \frac{L^2}{b \cdot t} \sqrt{1-\nu^2}$$

f. 処理装置

処理装置の許容限界は、J E A G 4 6 0 1 を準用し、「クラス 2, 3・その他支持構造物」の許容限界を適用し、許容応力状態Ⅲ_AS から算出した許容応力とする。材料の設計降伏点は J S M E 付録材料図表 Part5 表 8 より、設計引張強さは J S M E 付録材料図表 Part5 表 9 により算出した値を用いる。周囲環境温度が J S M E 付録材料図表 Part5 表 8 及び表 9 記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算する。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。

処理装置の許容限界を表 3-17、許容応力を表 3-18 に示す。

表 3-17 処理装置の許容限界

許容応力状態	許容限界
	一次応力
	引張
Ⅲ _A S	$1.5 \cdot f_t$

表 3-18 処理装置の許容応力

材料	温度条件 (°C)	$1.5 \cdot f_t$ (MPa)
S P G S	40	215

3.5 評価方法

ダンパ、角ダクト、丸ダクト、隔離弁、送風機及び処理装置の構造強度評価は、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) 構造強度評価の評価方法

a. ダンパ

(a) 計算モデル

外板は、外板を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はりとして評価を行う。外板のモデル図を図3-7に示す。

羽根は、4辺支持長方形板に等分布荷重がかかるものとし、曲げ応力による評価を行う。羽根のモデル図を図3-8に示す。

シャフトは、ダンパに作用する圧力及び自重により発生する荷重が両端のシャフトに均等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評価を行う。シャフトのモデル図を図3-9に示す。

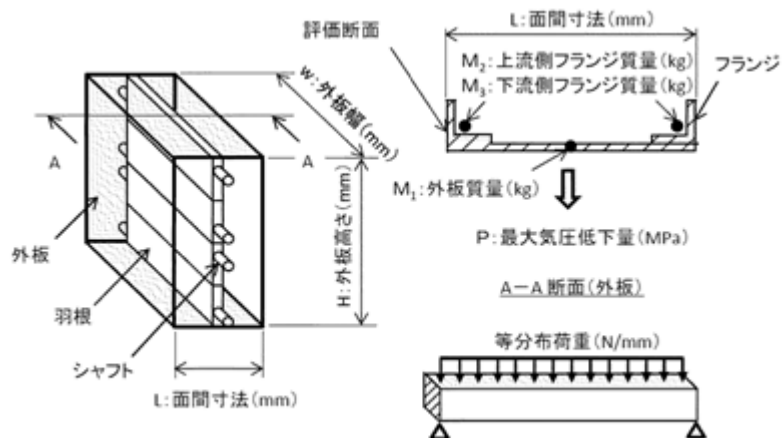


図3-7 外板モデル図

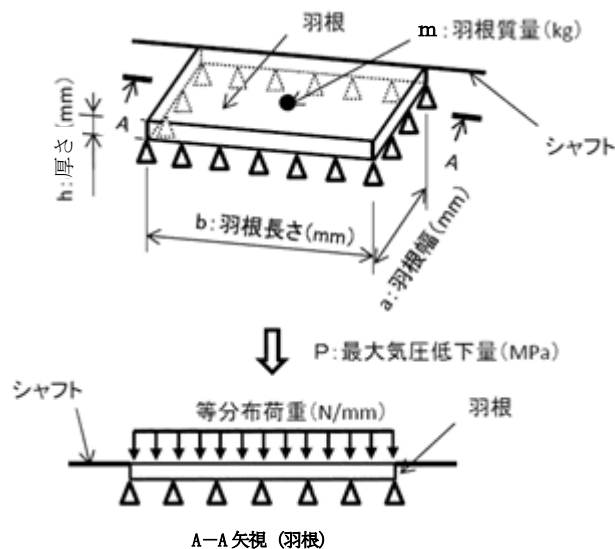


図3-8 羽根モデル図

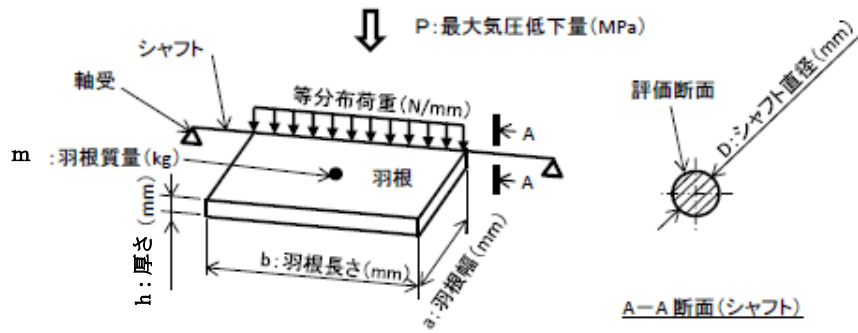


図3-9 シャフトモデル図

(b) 計算方法

ダンパに作用する圧力は、設計竜巻の気圧差によって発生する。

$$P = \Delta P$$

イ. 外板

外板に作用する最大曲げモーメント

$$M_x = \frac{\text{MAX}(W, H) \times (F_1 + F_2)}{8}$$

ここで、

$$F_1 = P \times L$$

$$F_2 = \frac{(M_1 + M_2 + M_3) \times 9.80665}{\text{MAX}(W, H)}$$

外板に生じる最大曲げ応力

$$\sigma_{b \max} = \frac{M_x}{Z}$$

ここで、

$$Z = \frac{I}{e}$$

ロ. 羽根

羽根に生じる応力は、4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、ダンプに作用する圧力及び自重による面外方向の荷重により生じる最大応力 σ_{\max} とその面外方向の荷重による羽根の最大変位量 ω_{\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4辺単純支持の長方形板が等分布荷重を受ける場合の長方形板の大たわみ式を引用する。

$$\sigma_{\max} = \frac{\pi^2 E \omega_{\max}}{8(1-\nu^2)} \left\{ \frac{(2-\nu^2)\omega_{\max} + 4h}{b^2} + \frac{\nu(\omega_{\max} + 4h)}{a^2} \right\} \quad \dots \textcircled{1}$$

$$\frac{256(1-\nu^2)(F_1 + F_2)}{\pi^6 E h^4} = \frac{4}{3} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 \frac{\omega_{\max}}{h} + \left\{ \frac{4\nu}{a^2 b^2} + (3-\nu^2) \left(\frac{1}{a^4} + \frac{1}{b^4} \right) \right\} \left(\frac{\omega_{\max}}{h} \right)^3 \quad \dots \textcircled{2}$$

式②で得られる ω_{\max} の値を式①に代入し、 σ_{\max} を算出する。

ここで、

$$F_1 = P$$

$$F_2 = \frac{m \cdot g}{a \cdot b}$$

ハ. シャフト

シャフトに生じる最大せん断応力

$$\sigma_{s \max} = \frac{F_1 + F_2}{A}$$

ここで、

$$F_1 = P \cdot a \cdot b$$

$$F_2 = m \cdot g$$

$$A = \pi \cdot \left(\frac{D}{2} \right)^2$$

b. 角ダクト

(a) 計算モデル

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）を補強材・フランジ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3-10、図3-11に示す。

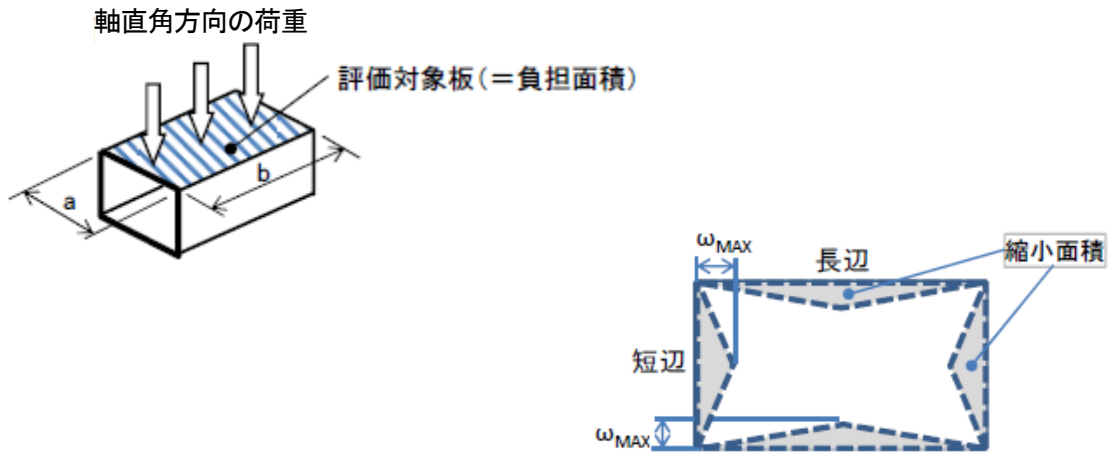


図3-10 角ダクトの軸直角方向の荷重のモデル図

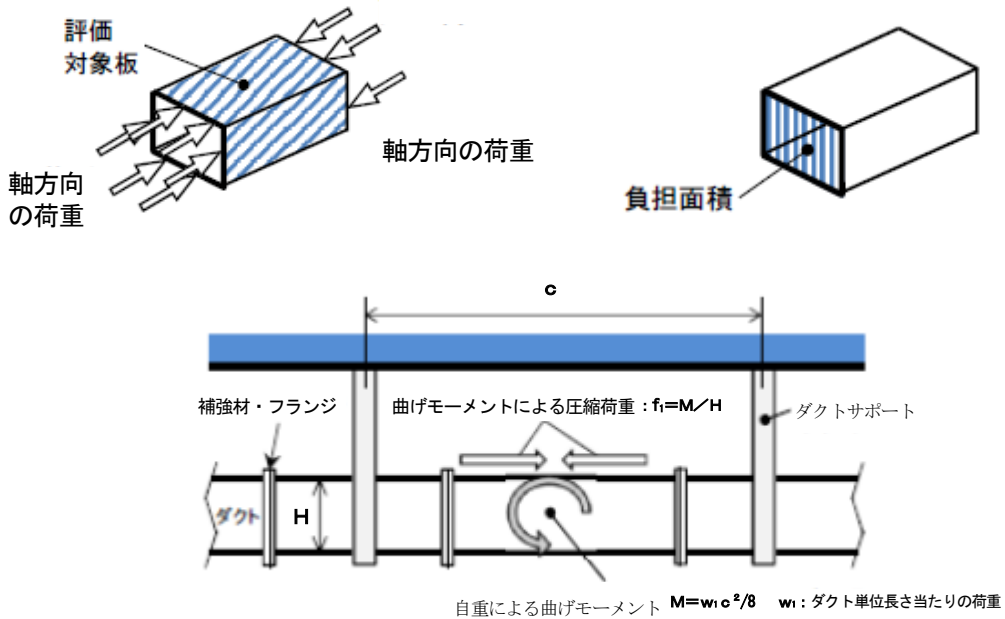


図3-11 角ダクトの軸方向の荷重のモデル図

(b) 評価方法

ダクトに作用する圧力は、設計竜巻の気圧差及び内圧が影響するので、

$$P = \Delta P + P_1$$

イ. 軸直角方向の荷重による発生応力

4 辺単純支持（周辺で水平，垂直方向の変位拘束，たわみ角は自由）の長方形板が等分布荷重を受ける場合において，ダクトに作用する圧力及び自重による軸直角方向の荷重により生じる最大応力 σ_{max} とその軸直角方向の荷重によるダクト鋼板の最大変位量 ω_{max} との関係は，以下の式で表される。

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

$$\sigma_{max} = \frac{\pi^2 E \omega_{max}}{8(1-\nu^2)} \left\{ \frac{(2-\nu^2)\omega_{max} + 4t}{b^2} + \frac{\nu(\omega_{max} + 4t)}{a^2} \right\} \dots \textcircled{3}$$

$$\frac{256(1-\nu^2)(P+w_2)}{\pi^6 E t^4} = \frac{4}{3} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 \frac{\omega_{max}}{t} + \left\{ \frac{4\nu}{a^2 b^2} + (3-\nu^2) \left(\frac{1}{a^4} + \frac{1}{b^4} \right) \right\} \left(\frac{\omega_{max}}{t} \right)^3 \dots \textcircled{4}$$

式④より得られる ω_{max} の値を式③へ代入し， σ_{max} を算出する。

ロ. 軸方向の荷重

(イ) 自重による圧縮荷重

ダクトの自重により発生する曲げモーメントによる軸方向の圧縮荷重は，以下の式により算出する。

$$f_1 = \frac{M}{H}$$

ここで、

$$M = \frac{w_1 \cdot c^2}{8}$$

(ロ) ダクトに作用する圧力による圧縮荷重

ダクトが軸方向に受ける設計竜巻の気圧差と内圧による圧縮荷重は，以下の式により算出する。

$$f_2 = \frac{(W+2 \cdot t) \cdot (H+2 \cdot t) \cdot P}{10^6}$$

b. 丸ダクト

(a) 計算モデル

丸ダクトは、両端を補強部材で支持された円筒のほりとみなし、計算を行う。丸ダクトのモデル図を図3-12、図3-13に示す。

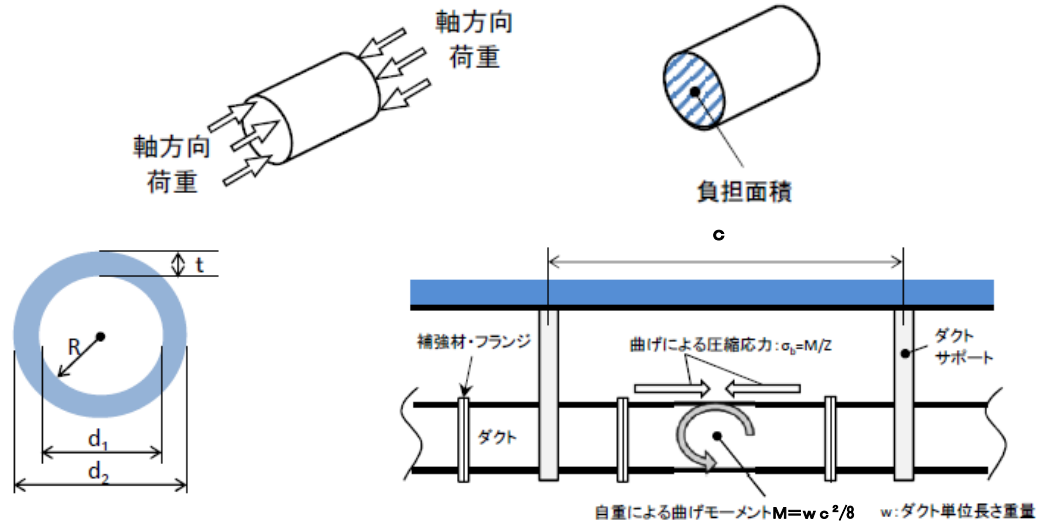


図3-12 丸ダクトの軸方向荷重のモデル図



図3-13 丸ダクトの軸直角方向荷重のモデル図

(b) 計算方法

ダクトに作用する圧力は、設計竜巻の気圧差及び内圧が影響する。

$$P = \Delta P + P_1$$

イ. ダクトが軸直角方向に受ける圧力による応力

$$\sigma_{\theta} = -\frac{r_m P}{t}$$

ロ. 軸方向荷重による発生応力

(イ) 自重による発生応力

ダクトが軸方向に受ける自重による曲げ応力は、以下の式により算出する。

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

ここで、

$$M = \frac{w c^2}{8}$$

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

(ロ) ダクトに作用する圧力による発生荷重

ダクトが軸方向に受ける設計竜巻の気圧差と内圧による圧縮応力は、以下の式により算出する。

$$\sigma_P = P \times \frac{A_1}{A_2}$$

ここで、

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

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

c. 隔離弁

(a) 計算モデル

弁箱は、両端を補強部材で支持された円筒のほりとみなし、計算を行う。弁箱のモデル図を図3-14に示す。

弁体は、円形の弁体面積に受ける荷重を長方形の評価面積に作用するとみなし、弁体評価面積の断面と同等の断面性能を持つ単純梁として、曲げ応力による計算を行う。弁体のモデル図を図3-15に示す。

弁棒は、弁棒に作用する圧力及び自重により発生する荷重が両端の弁棒に均一に作用するとし、弁棒断面についてせん断応力による評価を行う。弁棒のモデル図を図3-16に示す。

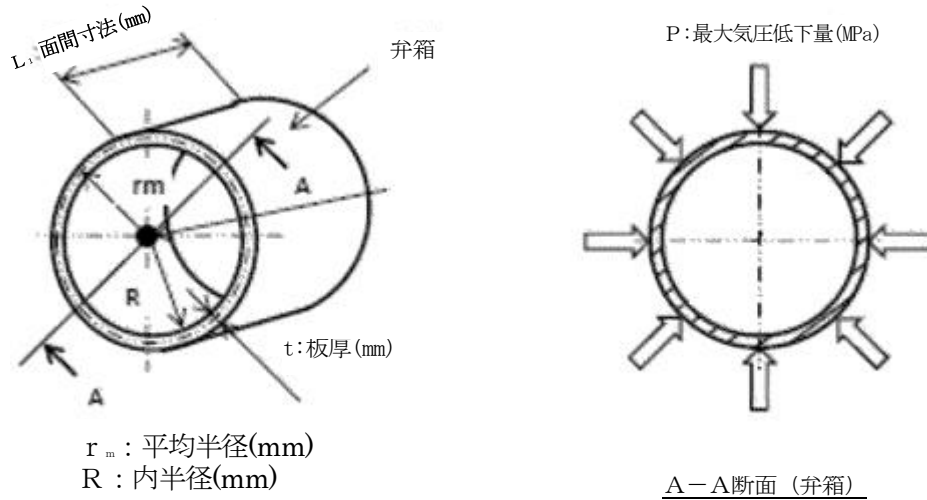


図3-14 弁箱モデル図

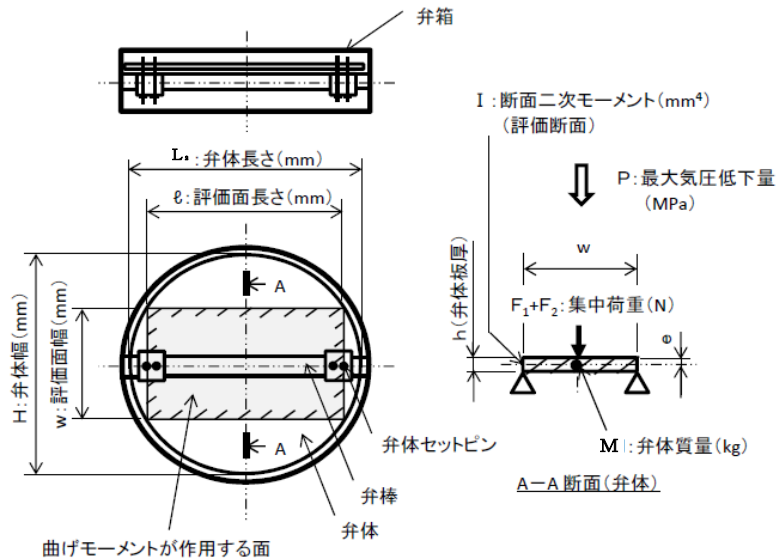


図3-15 弁体モデル図

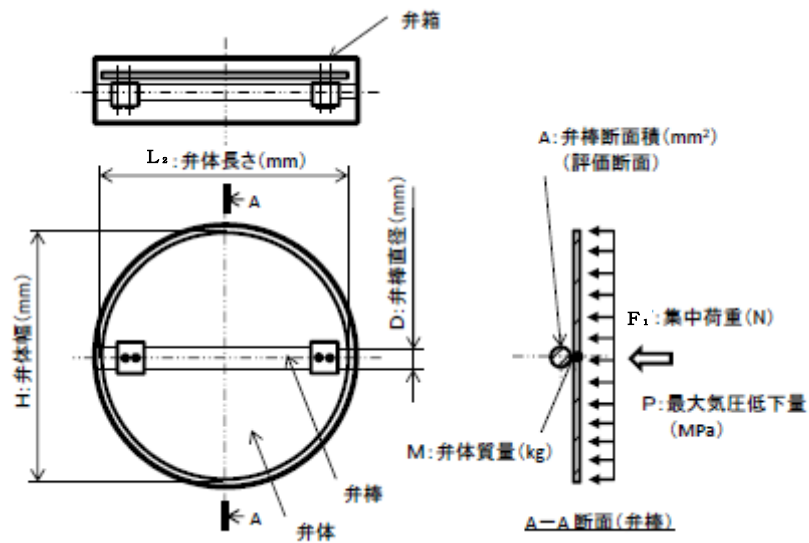


図 3-16 弁棒モデル図

(b) 計算方法

隔離弁に作用する圧力は、設計竜巻の気圧差によって発生する。

$$P = \Delta P$$

イ. 弁箱

弁箱に生じる周方向応力

$$\sigma_{\max} = \frac{r_m \times P}{t}$$

ロ. 弁体

弁体に作用する曲げモーメント

$$M_x = (F_1 + F_2) \times \frac{1}{4}$$

ここで、

$$F_1 = P \times \left(\pi \times \left(\frac{H}{2} \right)^2 \right)$$

$$F_2 = M \cdot g$$

弁体に生じる最大曲げ応力

$$\sigma_{b \max} = \frac{M_x}{Z}$$

ここで、

$$Z = \frac{I}{e}$$

$$I = \frac{\ell}{12} \times (w h^3)$$

ハ. 弁棒

弁棒に生じる最大せん断応力

$$\sigma_{s \max} = \frac{F_1 + F_2}{A}$$

ここで,

$$F_1 = P \times \left\{ \pi \cdot \left(\frac{L_2}{2} \right)^2 \right\}$$

$$F_2 = M \cdot g$$

$$A = \pi \times \left(\frac{D}{2} \right)^2$$

e. 送風機

(a) 計算モデル

送風機は両端を補強部材で支持された円筒のほりとみなし、計算を行う。送風機のモデル図を図3-17に示す。

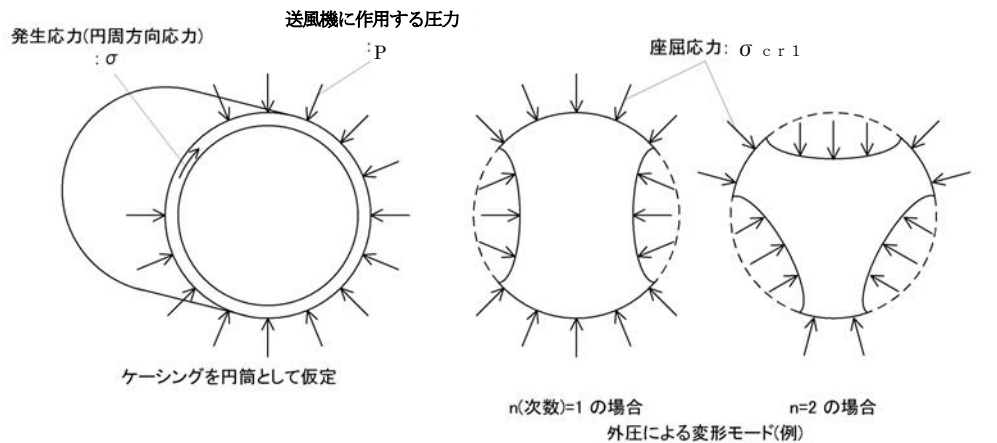


図3-17 送風機のモデル図

(b) 計算方法

送風機に作用する圧力は、設計竜巻の気圧差及び内圧が影響する。

$$P = \Delta P + P_1$$

イ. 送風機に作用する圧力により生じる周方向応力

$$\sigma = \frac{2b^2}{b^2 - a^2} P$$

f. 処理装置

(a) 計算モデル

処理装置のケーシングは両サイドを補強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、ケーシングの両サイドを補強部材で支持された4辺単純支持長方形板とし、評価を行う。

処理装置のモデル図を図3-18に示す。

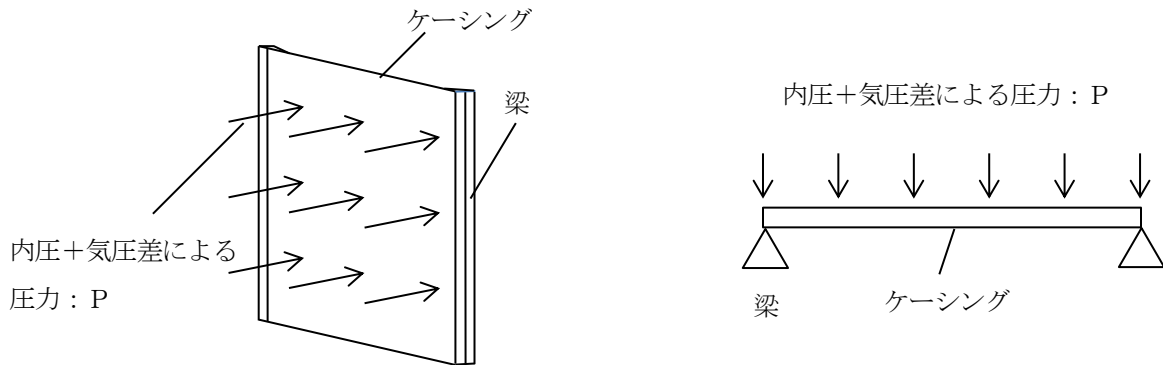


図3-18 処理装置のモデル図

(b) 計算方法

処理装置に作用する圧力は、設計竜巻により発生する気圧差及び内圧が影響する。

$$P = \Delta P + P_1$$

イ. ケーシングの変形

4辺単純支持（周辺で水平、垂直方向の変位拘束、たわみ角は自由）の長方形板が等分布荷重を受ける場合において、処理装置に作用する圧力により生じる最大応力 σ_{max} とその面外方向の荷重によるケーシングの最大変位量 ω_{max} との関係は、以下の式で表される。

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

$$\sigma_{max} = \frac{\pi^2 E \omega_{max}}{8(1-\nu^2)} \left\{ \frac{(2-\nu^2)\omega_{max} + 4t}{b^2} + \frac{\nu(\omega_{max} + 4t)}{a^2} \right\} \dots \textcircled{5}$$

$$\frac{256(1-\nu^2)P}{\pi^6 E t^4} = \frac{4}{3} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 \frac{\omega_{max}}{t} + \left\{ \frac{4\nu}{a^2 b^2} + (3-\nu^2) \left(\frac{1}{a^4} + \frac{1}{b^4} \right) \right\} \left(\frac{\omega_{max}}{t} \right)^3 \dots \textcircled{6}$$

式⑥より得られる ω_{max} の値を式⑤へ代入し、 σ_{max} を算出する。

4. 評価条件

(1) 構造強度評価の評価条件

a. ダンパ

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表4-1～表4-3に示す。

ダンパにおいて、外殻を構成する外板の発生応力比が最も厳しくなる設備のダンパについて記載する。

表4-1 評価条件（外板）

設備名称			
A-非常用ディーゼル電気室送風機吐出逆流防止ダンパ			
ΔP (MPa)	M_1 (kg)	M_2 (kg)	M_3 (kg)
0.0075	12	13	7
L (mm)	MAX(W, H) (mm)	Z (mm ³)	
300	2204.6	113400	

表4-2 評価条件（羽根）

設備名称		
A-非常用ディーゼル電気室送風機吐出逆流防止ダンパ		
ΔP (MPa)	E (MPa)	a (mm)
0.0075	201200	250
b (mm)	h (mm)	m (kg)
2204.6	1.6	7
ν (—)		
0.3		

表4-3 評価条件（シャフト）

設備名称		
A-非常用ディーゼル電気室送風機吐出逆流防止ダンパ		
ΔP (MPa)	D (mm)	m (kg)
0.0075	15	7
a (mm)	b (mm)	
250	2204.6	

b. 角ダクト

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表4-4に示す。角ダクトにおいて、気圧差による発生応力が最も大きくなるものは軸直角方向の荷重による応力であり、その発生応力比が最も厳しくなる系統の角ダクトについて記載する。

表4-4 評価条件

系統			
中央制御室空調換気系			
ΔP (MPa)	a (mm)	b (mm)	c (mm)
0.0075	1050	3000	3000
E (MPa)	H (mm)	t (mm)	P_1 (MPa)
201200	800	1.2	0.002942
W (mm)	w_1 (N/mm)	w_2 (N/mm ²)	ν (—)
3000	1.8565	346.292	0.3
σ_y (MPa)			
189			

c. 丸ダクト

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表4-5に示す。丸ダクトにおいて、気圧差による発生応力が最も大きくなるものは軸直角方向の荷重による応力であり、その発生応力比が最も厳しくなる系統の丸ダクトについて記載する。

表4-5 評価条件

系統				
中央制御室換気空調系				
ΔP (MPa)	P_1 (MPa)	c (mm)	d_1 (mm)	d_2 (mm)
0.0075	0.000981	3000	900	902
E (MPa)	L (mm)	n (—)	t (mm)	R (mm)
201200	1460	7	1.0	450
r_m (mm)	w (N/mm)	δ (—)	ν (—)	
450.5	0.322133	0.5	0.3	

d. 隔離弁

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表4-6～表4-8に示す。隔離弁において、外殻を構成する弁箱の発生応力比が最も厳しくなる隔離弁について記載する。

表4-6 評価条件（弁箱）

系統				
原子炉棟空調換気系				
ΔP (MPa)	t (mm)	L_1 (mm)	R (mm)	r_m (mm)
0.0075	12	600	1000	1006
E (MPa)	ν (—)	δ (—)	n (—)	
201200	0.3	0.5	10	

表4-7 評価条件（弁体）

系統			
原子炉棟空調換気系			
ΔP (MPa)	h (mm)	M (kg)	H (mm)
0.0075	36	1400	1955
L_2 (mm)	\varnothing (mm)	e (mm)	
1955	1555.56	18	

表4-8 評価条件（弁棒）

系統			
原子炉棟空調換気系			
ΔP (MPa)	D (mm)	M (kg)	L_2 (mm)
0.0075	160	1400	1955

e. 送風機

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表4-9に示す。送風機において、発生応力比が最も厳しくなる送風機について記載する。

表4-9 評価条件

設備名称				
高圧炉心スプレイ系ディーゼル室送風機				
ΔP (MPa)	a (mm)	b (mm)	t (mm)	E (MPa)
0.0075	1774	1780	6	201200
ν (—)	n (—)	δ (—)	L (mm)	
0.3	10	0.5	2090	

f. 処理装置

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表4-10に示す。処理装置において、発生応力比が最も厳しくなる処理装置について記載する。

表4-10 評価条件

設備名称			
HPCS電気室外気処理装置			
ΔP (MPa)	P_1 (MPa)	E (MPa)	ν (—)
0.0075	0.0087	201200	0.3
a (mm)	b (mm)	t (mm)	
1800	3500	2.3	

5. 強度評価結果

(1) 構造強度評価の評価結果

a. ダンパ

ダンパの構造強度評価結果を表5-1～表5-3に示す。

外板、羽根及びシャフトに発生する応力は、許容応力以下である。

表5-1 構造強度評価結果（外板）

外板に発生する曲げ応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
13	218

表5-2 構造強度評価結果（羽根）

羽根に発生する引張応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
20	189

表5-3 構造強度評価結果（シャフト）

シャフトに発生するせん断応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
24	141

b. 角ダクト

角ダクトの構造強度評価結果を表 5-4 に示す。

ダクト鋼板の軸直角方向の荷重により発生する応力は、許容応力以下であり、軸方向の荷重による発生荷重も許容値以下である。

表 5-4 構造強度評価結果 (ダクト鋼板)

系統		ダクトサイズ (mm)	
中央制御室空調換気系		3000×800×1.2t	
軸直角方向			
ダクト鋼板に発生する引張応力 (MPa)		許容応力 (MPa)	
146		189	
軸方向			
自重による発生荷重 $4 \times f_1$ (N)	ダクトに作用する圧力 による発生荷重 f_2 (N)	合成発生荷重 $4 \times f_1 + f_2$ (N)	許容値 $4 \times P_m$ (N)
10493	25157	35650	67540

c. 丸ダクト

丸ダクトの構造強度評価結果を表 5-5 に示す。

ダクト鋼板に発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-5 構造強度評価結果 (ダクト鋼板)

系統		ダクトサイズ (mm)	
中央制御室空調換気系		900×1.0t	
軸直角方向			
ダクト鋼板に発生する周方向応力 (MPa)		許容応力 (MPa)	
4		6	
軸方向			
自重による発生応力 (MPa)	ダクトに作用する圧力 による発生応力 (MPa)	合成発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
0.57	2.36	3	112

d. 隔離弁

隔離弁の構造強度評価結果を表 5-6～表 5-8 に示す。

弁箱、弁体及び弁棒に発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-6 構造強度評価結果（弁箱）

弁箱に発生する周方向応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
1	381

表 5-7 構造強度評価結果（弁体）

弁体に発生する曲げ応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
56	271

表 5-8 構造強度評価結果（弁棒）

弁棒に発生するせん断応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
2	118

e. 送風機

送風機の構造強度評価結果を表 5-9 に示す。

ケーシングに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-9 構造強度評価結果

ケーシングに発生する周方向応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
3	10

f. 処理装置

処理装置の構造強度評価結果を表 5-10 に示す。

ケーシングに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-10 構造強度評価結果

ケーシングに発生する引張応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
126	215

VI-3-別添 1-13 非常用発電装置の強度計算書

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	4
2.4 適用規格・基準等	5
3. 強度評価方法	6
3.1 記号の定義	6
3.2 評価対象部位	7
3.3 荷重及び荷重の組合せ	8
3.4 許容限界	9
3.5 評価方法	10
4. 評価条件	11
5. 強度評価結果	12

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Aーディーゼル燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ（以下「燃料移送ポンプ」という。）が竜巻時及び竜巻通過後においても、主要な構造部材が構造健全性を保持し、燃料移送機能を維持することを確認するものである。

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」の「3.2 機能維持の方針」，「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」及び「5. 強度評価方法」を踏まえて，燃料移送ポンプの「2.1 位置」，「2.2 構造概要」，「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格・基準等」を示す。

2.1 位置

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，燃料移送ポンプは燃料移送ポンプエリアに設置する。燃料移送ポンプエリアの位置図を図2-1に示す。

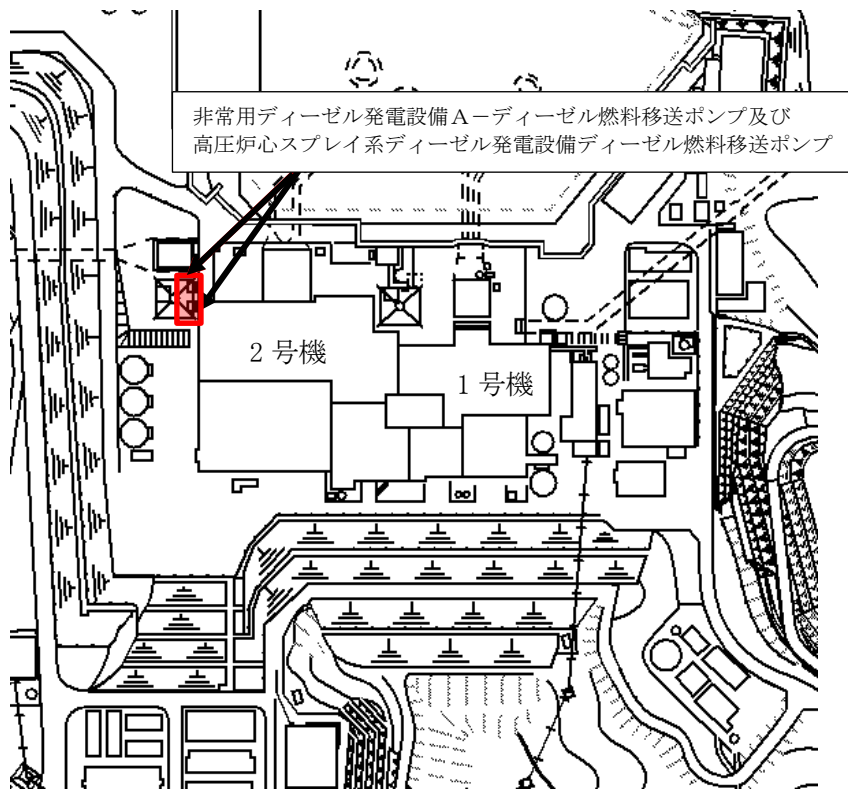


図2-1 燃料移送ポンプエリアの位置図

2.2 構造概要

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、燃料移送ポンプの構造を設定する。

燃料移送ポンプは、ポンプ部と原動機部からなる横型ポンプであり、基礎ボルト及び取付ボルトによって固定されている。燃料移送ポンプは同一設計のものがA系及び高圧炉心スプレイ系に各々1台ずつ設置されている。燃料移送ポンプの概略構造図を図2-2に示す。

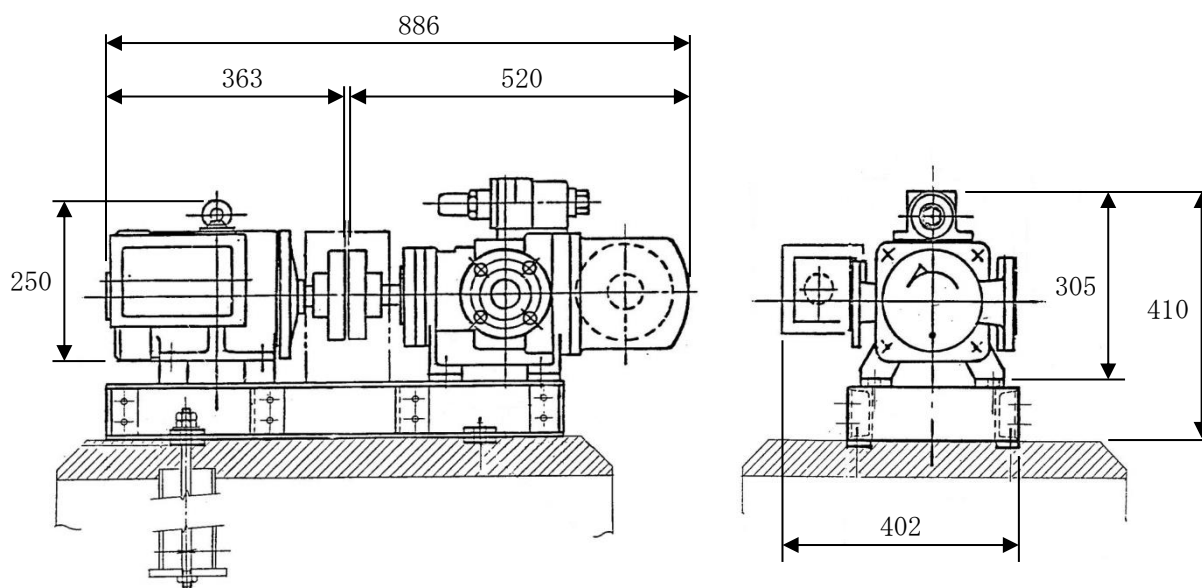


図2-2 燃料移送ポンプの概略構造図

2.3 評価方針

燃料移送ポンプの強度評価は、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」を踏まえ、燃料移送ポンプの評価対象部位に生じる応力等が、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」に示す条件を用いて計算し、その結果を「5. 評価結果」に示す。

評価対象部位は、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、選定する。

(1) 構造強度評価の方針

燃料移送ポンプの構造強度評価の方針を以下に、構造強度評価フローを図2-3に示す。

- ・燃料移送ポンプに対して、設計竜巻による荷重に運転時の状態で作用する荷重を加えた荷重が許容限界以下であることを確認する。
- ・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、耐圧試験圧力とする。

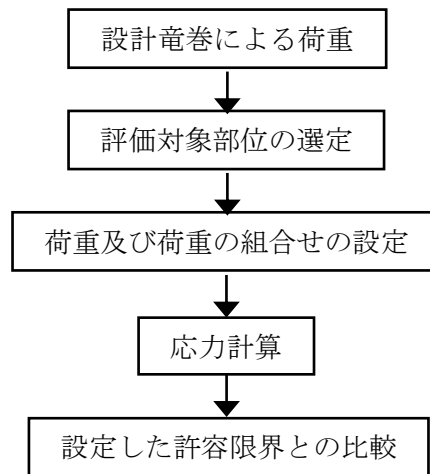


図2-3 構造強度評価フロー

2.4 適用規格・基準等

適用する規格・基準等を以下に示す。

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

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 構造強度評価の記号の定義

燃料移送ポンプ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
ΔP	MPa	設計竜巻の気圧低下量
P	MPa	設計竜巻により発生する圧力
P ₁	MPa	最高使用圧力

3.2 評価対象部位

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」に従い、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、評価荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

(1) 構造強度評価の評価対象部位

気圧差による荷重は、燃料移送ポンプの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。

燃料移送ポンプの構造強度評価における評価対象部位を図3-1に示す。

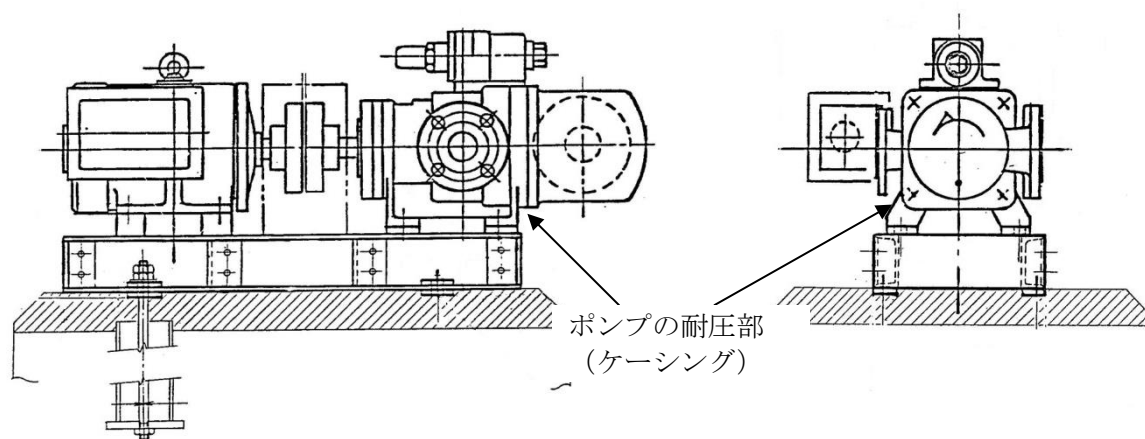


図3-1 燃料移送ポンプの評価対象部位

3.3 荷重及び荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、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」にて示す荷重及び荷重の組合せを用いる。

(1) 構造強度評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の設定

構造強度評価では、以下の荷重を用いる。

(a) 設計竜巻による荷重

設計竜巻の気圧差による荷重を考慮する。

なお、燃料移送ポンプは、竜巻防護対策設備内に設置することから、風圧力による荷重を考慮しない。また、砂利は竜巻防護鋼板（穴あき）を通過するが、燃料移送ポンプに鋼製のカバーを設置することから、砂利の衝突は考慮しない。

(b) 運転時に作用する荷重

運転時の内圧による荷重を考慮する。

b. 荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重の組合せは、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」を踏まえ設定する。

構造強度評価に用いる荷重の組合せを表3-2に示す。

表3-2 荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷 重
屋外の外部事象防護対象施設	燃料移送ポンプ	ケーシング	①気圧差による荷重 ②内圧による荷重

3.4 許容限界

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」に従い、「3.2 評価対象部位」にて設定している部位における機能損傷モードを考慮し、燃料移送ポンプの耐圧試験圧力とする。

3.5 評価方法

燃料移送ポンプの強度評価は、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」にて設定している燃料移送ポンプの評価方法を用いる。

(1) 構造強度評価の評価方法

評価方法は、運転時に作用する内圧に設計竜巻による気圧差を加え、これと燃料移送ポンプの耐圧試験圧力との比較を行う。運転時に作用する内圧として、燃料移送ポンプの最高使用圧力 P_1 を考慮する。

設計竜巻により発生する圧力は以下のとおり。

$$P = \Delta P + P_1$$

4. 評価条件

燃料移送ポンプの構造強度評価に用いる条件を表4-1に示す。

表4-1 評価条件 (ケーシング)

施設名称	P_1 (MPa)	ΔP (MPa)
燃料移送ポンプ	0.98	0.0075

5. 強度評価結果

燃料移送ポンプの構造強度評価結果を表 5-1 に示す。

表 5-1 評価結果 (ケーシング)

施設名称	$P_1 + \Delta P$ (MPa)	許容限界 (MPa)
燃料移送ポンプ	0.9875	1.47

VI-3-別添 1-14 波及的影響を及ぼす可能性がある施設の強度計算書

VI-3-別添 1-14-2 消音器の強度計算書

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	4
2.4 適用規格・基準等	5
3. 強度評価方法	6
3.1 記号の定義	6
3.2 評価対象部位	7
3.3 荷重及び荷重の組合せ	8
3.4 許容限界	9
3.5 評価方法	10
4. 評価条件	13
5. 強度評価結果	15

1. 概要

本資料は、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、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排気消音器（非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設）（以下「排気消音器」という。）が竜巻時及び竜巻通過後においても、主要な構造部材が構造健全性を保持し、排気消音器の機能を維持することを計算により確認するものである。

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」の「3.2 機能維持の方針」、
「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」及び「5. 強度評価方法」を踏まえ、排気消音器
の「2.1 位置」、「2.2 構造概要」、「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格・基準等」を示す。

2.1 位置

VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算」の「3.2 機能維持の方針」に示す
とおり、排気消音器は原子炉建物に設置する。排気消音器の位置図を図2-1に示す。

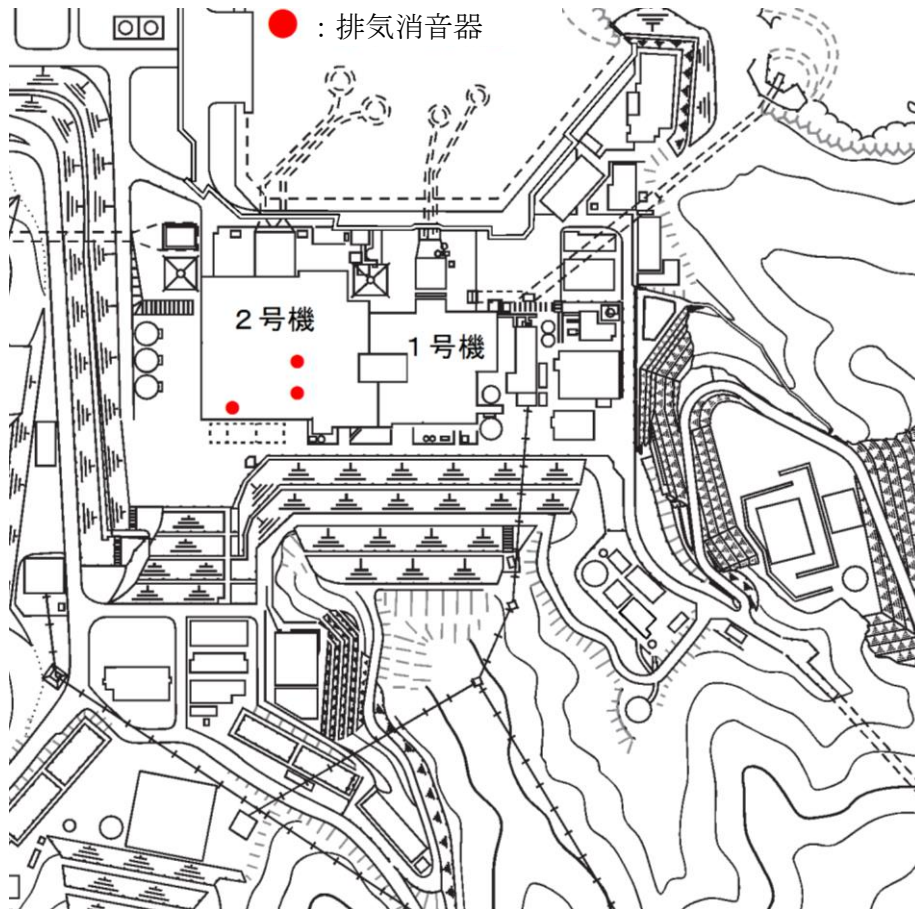


図2-1 排気消音器の位置図

2.2 構造概要

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、排気消音器の構造を設定する。

排気消音器は、鋼製の胴板を主体構造とし、原子炉建物に設けた基礎に本体を結合ボルト及び基礎ボルトで固定する構造とする。排気消音器の概略構造図を図2-2に示す。

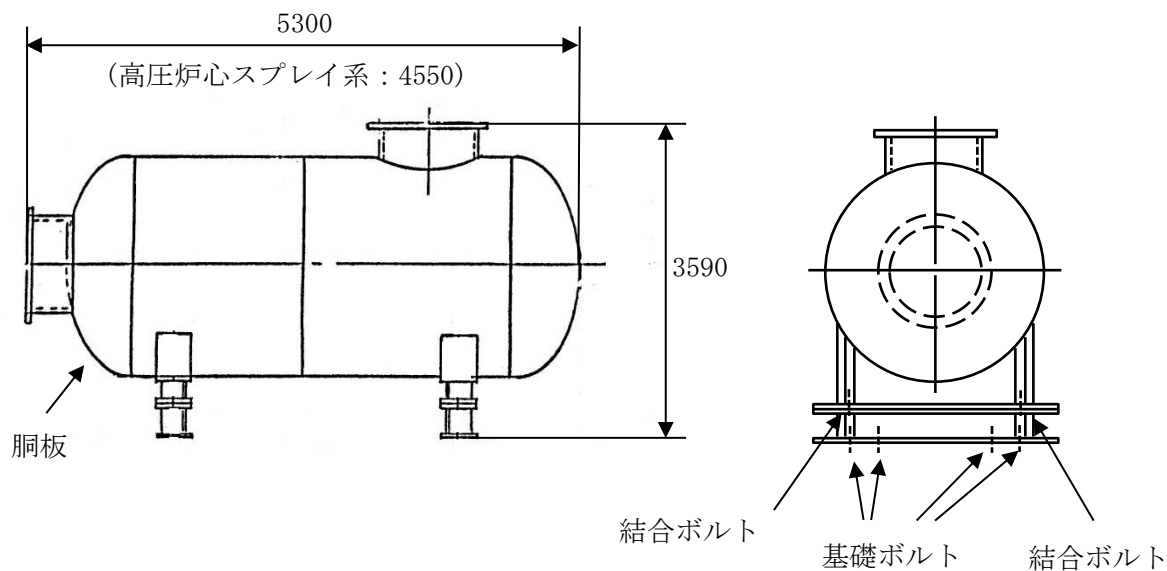


図2-2 排気消音器の概略構造図

2.3 評価方針

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」の「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」を踏まえ、排気消音器の評価対象部位に生じる応力等が、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」に示す条件を用いて計算し、その結果を「5. 強度評価結果」に示す。

評価対象部位は、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、選定する。

(1) 構造強度評価の方針

排気消音器の構造強度評価の方針を以下に、構造強度評価フローを図2-3に示す。

- ・排気消音器に対して、設計竜巻による荷重に常時作用する荷重を加えた応力が許容限界以下であることを確認する。
- ・部材に対して応力が大きくなる方向から風が当たることを想定する。
- ・設計竜巻による荷重は、水平方向より作用する外荷重という観点で地震荷重と同様であるため、原子力発電所耐震設計技術指針（J E A G 4 6 0 1 -1987）、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）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）（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）における1質点系モデルによる評価方法を準用し、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て算出する。
- ・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 J E A G 4 6 0 1 の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

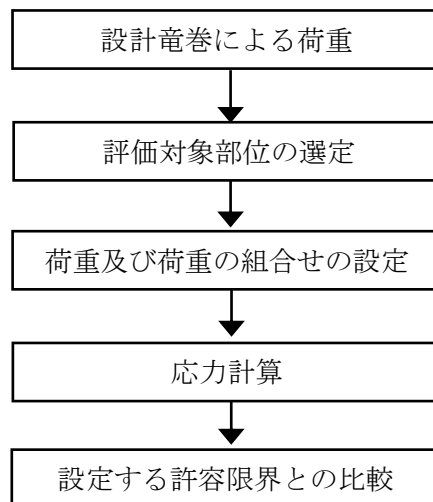


図2-3 構造強度評価フロー

2.4 適用規格・基準等

適用する規格・基準等を以下に示す。

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

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 構造強度評価の記号の定義

排気消音器の構造強度評価に用いる記号を表 3-1 に示す。

表3-1 構造強度評価に用いる記号 (1/2)

記号	単位	定義
A	m ²	排気消音器の受圧面積
A _b	mm ²	ボルトの断面積
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
d	mm	ボルト呼び径
F	MPa	J S M E SSB-3121.1(1)により規定される値
F _b	N	ボルトに生じる引張荷重
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 _s	MPa	J S M E SSB-3131 により規定される供用状態A及びBでの許容せん断応力
G	—	ガスト影響係数
g	m/s ²	重力加速度
h ₁	mm	取付面から重心までの高さ
h ₂	mm	脚結合部から重心までの高さ
ℓ ₁	mm	軸方向における基礎ボルトと重心の距離
ℓ ₂	mm	軸方向における基礎ボルトと重心の距離
ℓ ₃	mm	軸方向における結合ボルトと重心の距離
ℓ ₄	mm	軸方向における結合ボルトと重心の距離
ℓ ₁ '	mm	軸直角方向における基礎ボルトと重心の距離
ℓ ₂ '	mm	軸直角方向における基礎ボルトと重心の距離
ℓ ₃ '	mm	軸直角方向における結合ボルトと重心の距離
ℓ ₄ '	mm	軸直角方向における結合ボルトと重心の距離
m	kg	排気消音器の質量
n	—	ボルトの本数
n _f	—	引張荷重を受けるボルトの本数
Q _b	N	ボルトに生じるせん断荷重
q	N/m ²	設計用速度圧

表 3-1 構造強度評価に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
S_u	MPa	J S M E 付録材料図表 Part5 表 9 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 表 8 にて規定される設計降伏点
V_D	m/s	設計竜巻の最大風速
W_T	N	設計竜巻による荷重
W_w	N	風圧力により作用する荷重
σ_b	MPa	ボルトに生じる引張応力
τ	MPa	ボルトに生じるせん断応力
ρ	kg/m ³	空気密度

3.2 評価対象部位

排気消音器の評価対象部位は、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」に従い、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し、選定する。

(1) 構造強度評価の評価対象部位

設計竜巻による荷重は、排気消音器に作用し、結合ボルトを介して基礎ボルトに作用する。

排気消音器の転倒による閉塞により、非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の排気機能に影響を与える波及的影響を考慮し、転倒を防止するための主要な支持部材のうち、支持断面積が小さいことから、発生する応力が厳しくなる結合ボルト及び基礎ボルトを評価対象部位として選定する。

排気消音器の構造強度評価における評価対象部位を図3-1に示す。

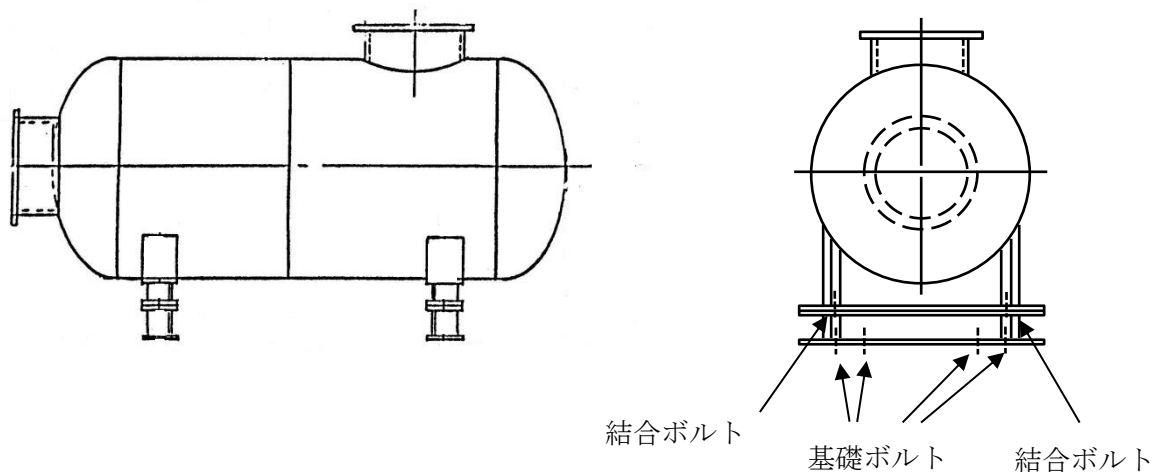


図3-1 排気消音器の評価対象部位

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」にて示す荷重及び荷重の組合せを用いる。

(1) 構造強度評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の設定

構造強度評価では、以下の荷重を用いる。

(a) 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、持続的に生じる荷重である自重を考慮する。

自重による荷重は以下のとおり計算する。

$$\text{自重による荷重} = m \cdot g$$

(b) 設計竜巻による荷重 (W_T)

屋外の設備であるため、風圧力による荷重を考慮する。排気消音器は閉じた施設ではなく、排気消音器に気圧差は発生しないことから、気圧差による荷重は考慮しない。また、排気消音器が、仮に飛来物による衝撃荷重によって貫通しても、その貫通箇所又は本来の排気箇所から排気され、かつ速やかに補修する方針とするため、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重に衝撃荷重を考慮しない。

イ. 風圧力による荷重 (W_w)

風圧力による荷重は、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(1)b.(a) 風圧力による荷重」に示す式に従い、算出する。

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

$$\text{ここで } q = (1/2) \cdot \rho \cdot V_D^2$$

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、排気消音器の評価対象部位ごとに設定する。

排気消音器の基礎ボルト及び結合ボルトには、自重及び風圧力による荷重が作用する。構造強度評価に用いる荷重の組合せを表3-2に示す。

表3-2 荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
波及的影響を及ぼす可能性のある施設	排気消音器	基礎ボルト 結合ボルト	①自重 ②風圧力による荷重

3.4 許容限界

排気消音器の基礎ボルト及び結合ボルトの許容限界は、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」に従い、「3.2 評価対象部位」にて設定している部位における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の許容応力を用いる。

(1) 構造強度評価の許容限界

許容限界はJ E A G 4 6 0 1を準用し、その他支持構造物の許容限界を適用し、許容応力状態Ⅲ_ASから算出した許容応力とする。材料の設計降伏点はJ S M E付録材料図表Part5表8より、設計引張強さはJ S M E付録材料図表Part5表9により算出した値を用いる。周囲環境温度がJ S M E付録材料図表Part5表8及び表9記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算し、小数点第1位以下を切り捨てた値を用いるものとする。

排気消音器の基礎ボルト及び結合ボルトの許容限界を表3-3、許容応力を表3-4及び表3-5に示す。

表3-3 許容限界

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

表3-4 許容応力（非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関排気消音器）

評価対象部位	材料	温度条件 (°C)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F (MPa)	$1.5 \cdot f_t$ (MPa)	$1.5 \cdot f_s$ (MPa)
基礎ボルト	SS400	50	231	394	231	173	133
結合ボルト	SS400	50	231	394	231	173	133

表3-5 許容応力（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関排気消音器）

評価対象部位	材料	温度条件 (°C)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F (MPa)	$1.5 \cdot f_t$ (MPa)	$1.5 \cdot f_s$ (MPa)
基礎ボルト	SS400	50	231	394	231	173	133
結合ボルト	SS400	50	231	394	231	173	133

3.5 評価方法

排気消音器の強度評価は、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」に示す評価式を用いる。

(1) 構造強度評価の評価方法

a. 計算モデル

重心位置に風圧力による荷重が作用する1質点系モデルとして計算を行う。排気消音器の評価モデル図を図3-2及び図3-3に示す。なお、基礎ボルトに関しては、非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関と高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の排気消音器で取付位置が異なるためそれぞれで評価を行う。

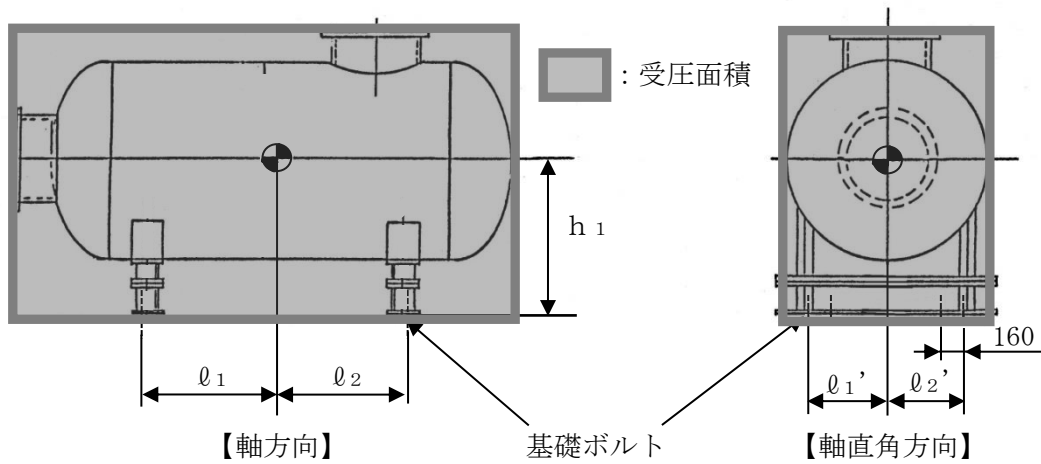


図3-2 排気消音器の基礎ボルトモデル図

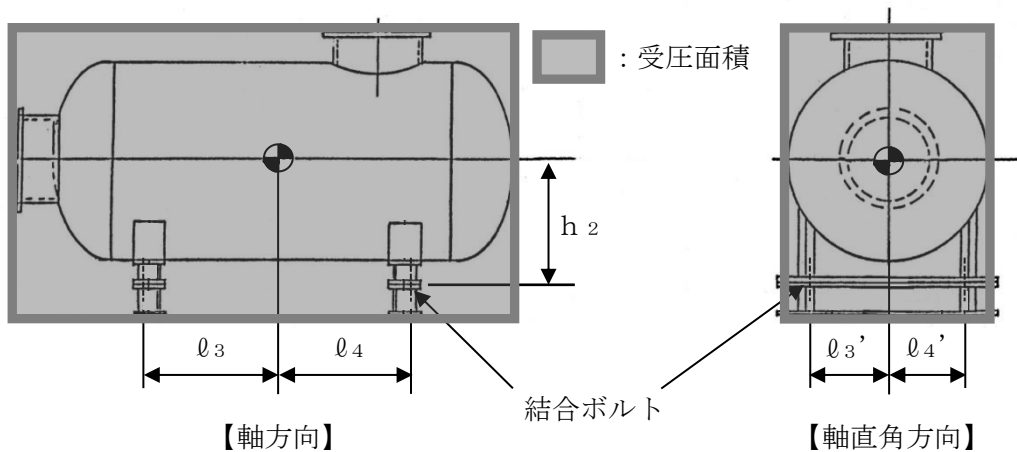


図3-3 排気消音器の結合ボルトモデル図

b. 計算方法

(a) 基礎ボルトの引張応力

基礎ボルトに対する引張力は最も厳しい条件として、図 3-2 で基礎ボルトを支点とする転倒を考え、これを片側の基礎ボルトで受けるものとして計算する。なお、強度評価においては軸直角方向と軸方向の各引張応力を比較し、値の大きいほうを採用する。

イ. 軸直角方向

(イ) 引張力

$$F_b = \frac{(W_w \cdot h_1 - m \cdot g \cdot \ell_1') \cdot (\ell_1' + \ell_2')}{(\ell_1' + \ell_2')^2 + (\ell_1' + \ell_2' - 160)^2}$$

(ロ) 引張応力

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

ここで、基礎ボルトの軸断面積 A_b は

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

ロ. 軸方向

(イ) 引張力

$$F_b = \frac{W_w \cdot h_1 - m \cdot g \cdot \ell_1}{\ell_1 + \ell_2}$$

(ロ) 引張応力

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

(b) 基礎ボルトのせん断応力

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

イ. せん断力

$$Q_b = W_w$$

ロ. せん断応力

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

(c) 結合ボルトの引張応力

結合ボルトに対する引張力は最も厳しい条件として、図 3-3 で結合ボルトを支点とする転倒を考え、これを片側の結合ボルトで受けるものとして計算する。なお、強度評価においては軸直角方向と軸方向の各引張応力を比較し、値の大きいほうを採用する。

イ. 軸直角方向

(イ) 引張力

$$F_b = \frac{W_w \cdot h_2 - m \cdot g \cdot \ell_3'}{\ell_3' + \ell_4'}$$

(ロ) 引張応力

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

ロ. 軸方向

(イ) 引張力

$$F_b = \frac{W_w \cdot h_2 - m \cdot g \cdot \ell_3}{\ell_3 + \ell_4}$$

(ロ) 引張応力

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

(d) 結合ボルトのせん断応力

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

イ. せん断力

$$Q_b = W_w$$

ロ. せん断応力

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

4. 評価条件

(1) 構造強度評価の評価条件

構造強度評価に用いる条件を表4-1～表4-5に示す。

ここでは、受圧面積が大きく、基礎ボルトと重心の水平方向の距離が小さい軸直角方向の条件をまとめる。

表4-1 評価条件

V_D (m/s)	ρ (kg/m ³)	q (N/m ²)	G (-)	C (-)	g (m/s ²)
92	1.226	5189	1.0	1.2	9.80665

表4-2 評価条件（非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関排気消音器基礎ボルト）

A (m ²)	n (-)	n_f (-)	d (mm)	A_b (mm ²)
19.027	8	2	24	452.4

h_1 (mm)	\varnothing_1' (mm)	\varnothing_2' (mm)	m (kg)
2120	977	977	4800

注：軸直角方向の転倒の評価に用いる値を記載

表4-3 評価条件（非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関排気消音器結合ボルト）

A (m ²)	n (-)	n_f (-)	d (mm)	A_b (mm ²)
19.027	12	2	24	452.4

h_2 (mm)	\varnothing_3' (mm)	\varnothing_4' (mm)	m (kg)
1370	977	977	4800

注：軸直角方向の転倒の評価に用いる値を記載

表4-4 評価条件（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関排気消音器基礎ボルト）

A (m ²)	n (-)	n _f (-)	d (mm)	A _b (mm ²)
16.3345	8	2	24	452.4

h ₁ (mm)	ℓ ₁ ' (mm)	ℓ ₂ ' (mm)	m (kg)
2120	977	977	4400

注：軸直角方向の転倒の評価に用いる値を記載

表4-5 評価条件（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関排気消音器結合ボルト）

A (m ²)	n (-)	n _f (-)	d (mm)	A _b (mm ²)
16.3345	12	2	24	452.4

h ₂ (mm)	ℓ ₃ ' (mm)	ℓ ₄ ' (mm)	m (kg)
1370	977	977	4400

注：軸直角方向の転倒の評価に用いる値を記載

5. 強度評価結果

(1) 構造強度評価の強度評価結果

a. 排気消音器（非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設）

竜巻発生時の強度評価結果を表5-1に示す。非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関排気消音器基礎ボルト及び結合ボルトに発生する応力は許容応力以下である。

表5-1 評価結果

評価対象部位	応力の種類	算出応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
基礎ボルト	引張り	110	173
	せん断	53	133
	組合せ	110	158
結合ボルト	引張り	121	173
	せん断	35	133
	組合せ	121	173

b. 排気消音器（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設）

竜巻発生時の強度評価結果を表5-2に示す。高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関排気消音器基礎ボルト及び結合ボルトに発生する応力は許容応力以下である。

表5-2 評価結果

評価対象部位	応力の種類	算出応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
基礎ボルト	引張り	94	173
	せん断	46	133
	組合せ	94	170
結合ボルト	引張り	103	173
	せん断	31	133
	組合せ	103	173

VI-3-別添 1-14-3 排気管及びベント管の強度計算書

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	4
2.4 適用規格・基準等	5
3. 強度評価方法	6
3.1 記号の定義	6
3.2 評価対象部位	7
3.3 荷重及び荷重の組合せ	8
3.4 許容限界	10
3.5 評価方法	11
4. 評価条件	14
5. 強度評価結果	15

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、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排気管（非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設）及びベント管（非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料貯蔵タンク、ディーゼル燃料デイトンク及び潤滑油サンプタンクの付属施設）（以下「排気管及びベント管」という。）が竜巻時及び竜巻通過後においても、主要な構造部材が構造健全性を保持し、排気管及びベント管の機能を維持することを確認するものである。

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」の「3.2 機能維持の方針」，「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」及び「5. 強度評価方法」を踏まえ，排気管及びベント管の「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

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，排気管及びベント管は，図2-1に示す位置に設置する。

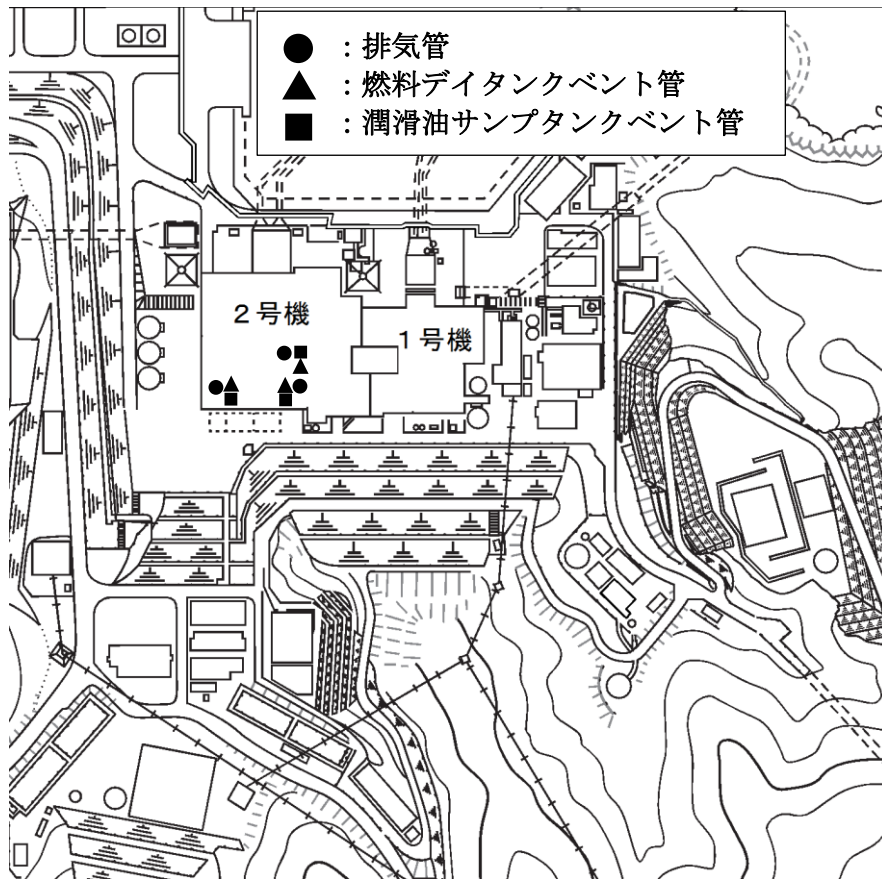


図2-1 排気管及びベント管の位置図

2.2 構造概要

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、排気管及びベント管の構造を設定する。

排気管及びベント管は鋼製の配管で構成される。排気管及びベント管は、原子炉建物に設置する設計とし、支持構造物で床等に固定する構造とする。排気管の概略構造図を図2-2、ベント管の概略構造図を図2-3に示す。

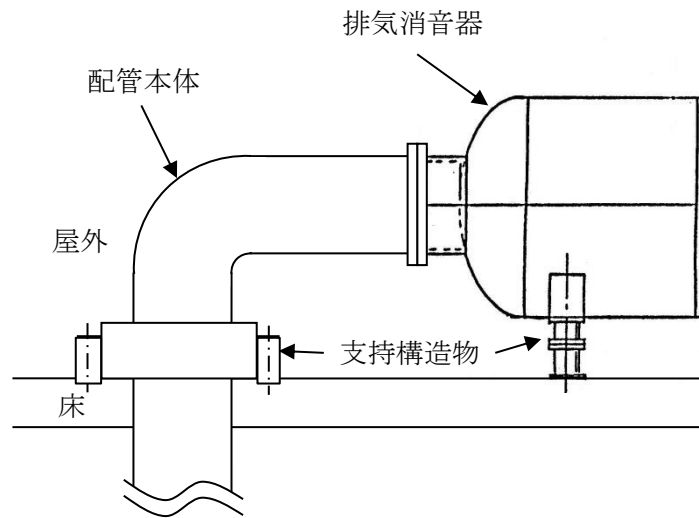


図2-2 排気管の概略構造図

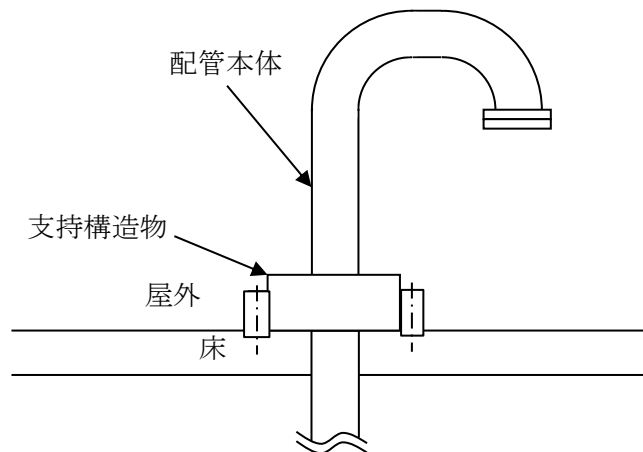


図2-3 ベント管の概略構造図

2.3 評価方針

排気管及びベント管の強度評価は、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」を踏まえ、排気管及びベント管の評価対象部位に生じ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」に示す条件を用いて計算し、その結果を「5. 強度評価結果」に示す。

評価対象部位は、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、選定する。

(1) 構造強度評価の方針

排気管及びベント管の構造強度評価の方針を以下に、構造強度評価フローを図2-4に示す。

- ・排気管及びベント管に対して、常時作用する荷重、設計竜巻による荷重及び運転時に作用する荷重により生じる応力が許容限界に収まることを確認する。
- ・排気管及びベント管に生じる応力は、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て、算出する。
- ・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、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）、原子力発電所耐震設計技術指針（J E A G 4 6 0 1-1987）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）（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。

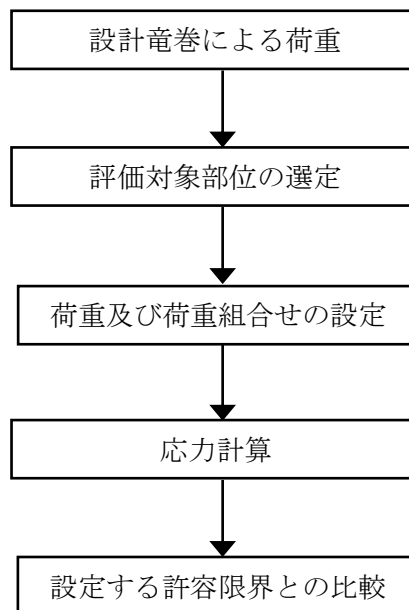


図2-4 排気管及びベント管の構造強度評価フロー

2.4 適用規格・基準等

適用する規格・基準等を以下に示す。

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

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 構造強度評価の記号の定義

排気管及びベント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
A	m ² /m	単位長さ当たりの受圧面積（風向に垂直な面を投影した面積）
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
D	mm	配管外径
g	m/s ²	重力加速度
G	—	ガスト影響係数
ℓ	m	受圧部長さ（片持ち部）
L	m	支持間隔
m	kg/m	単位長さ当たりの質量
M	N・m	風圧力による曲げモーメント
P	MPa	内圧
ΔP	N/m ²	最大気圧低下量
q	MPa	設計用速度圧
S _y	MPa	J S ME 付録材料図表 Part5表8にて規定される設計降伏点
V _D	m/s	設計竜巻の最大風速
t	mm	板厚
W _P	N	気圧差による荷重
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	m ³	断面係数
σ ₁ , σ ₂	MPa	配管に生じる応力
σ _{WP}	MPa	気圧差により生じる応力
σ _{WT1} , σ _{WT2}	MPa	複合荷重により生じる応力
σ _{WW}	MPa	風圧力により生じる応力
σ _{自重}	MPa	自重により生じる応力
σ _{内圧}	MPa	内圧により生じる応力
ρ	kg/m ³	空気密度

3.2 評価対象部位

排気管及びベント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「3.2 機能維持の方針」にて示している評価対象部位に従い、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し選定する。

(1) 構造強度評価の評価対象部位

設計竜巻による荷重は、配管本体及びサポート（配管支持構造物）に作用する。サポート（配管支持構造物）については、建物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（配管支持構造物）の設計は耐震設計に包絡される。このことから、配管本体を評価対象部位として選定する。

排気管の構造強度評価における評価対象部位及びベント管の構造強度評価における評価対象部位を図3-1、図3-2に示す。

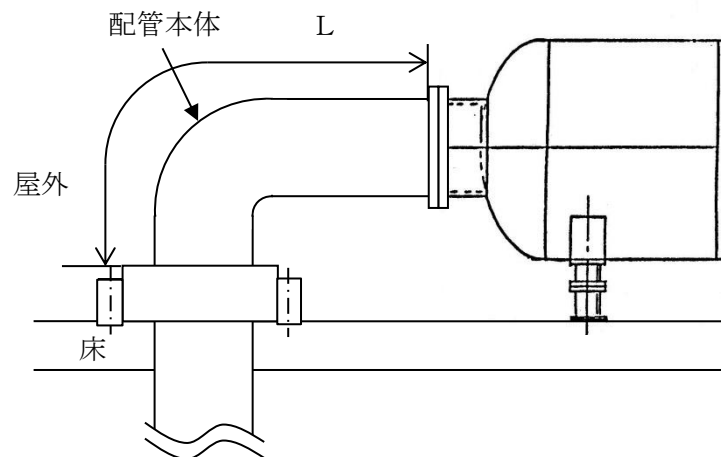


図3-1 排気管の評価対象部位

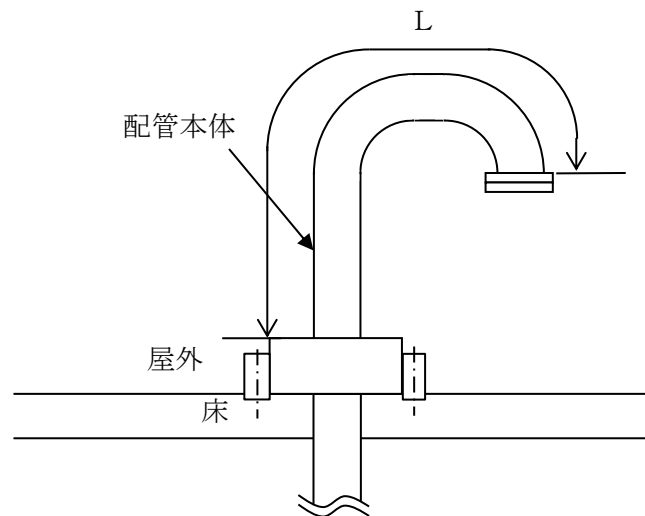


図3-2 ベント管の評価対象部位

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」にて示す荷重及び荷重の組合せを用いる。

(1) 構造強度評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の設定

構造強度評価に用いる荷重は、以下の荷重を用いる。

(a) 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、持続的に生じる荷重である自重を考慮する。

単位長さ当たりの自重による荷重は以下のとおり計算する。

$$w = m \cdot g$$

(b) 設計竜巻による荷重

風圧力による荷重及び気圧差による荷重を考慮する。排気管及びベント管には、運転時に内圧が作用するため、運転時に作用する荷重も考慮する。また、排気管及びベント管が、仮に飛来物による衝撃荷重によって貫通しても、その貫通箇所又は本来の排気箇所から排気又は通気され、かつ速やかに補修する方針とするため、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重に衝撃荷重を考慮しない。

イ. 風圧力による荷重 (W_w)

風圧力による荷重 W_w 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(3)c.(a) 風圧力による荷重 (W_w)」に示す式に従い、算出する。

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

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

ロ. 気圧差による荷重 (W_P)

気圧差による荷重 W_P 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」に示す方法に従い、気圧差を見かけ上の配管の内圧の増加として考慮する。具体的な計算方法を「3.5(1) 構造強度評価の計算方法」に示す。

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

(c) 運転時に作用する荷重

運転時に作用する荷重として、配管に作用する内圧を考慮する。

b. 荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重の組合せは、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、排気管及びベント管の評価対象部位ごとに設定する。

配管本体には、自重、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び内圧が作用する。構造強度評価の荷重の組合せを表 3-2 に示す。

表3-2 荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷 重
波及的影響を及ぼす可能性のある施設	排気管（ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設）	配管本体	①自重 ②風圧力による荷重 ③気圧差による荷重 ④内圧による荷重
	ベント管（非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料貯蔵タンク、ディーゼル燃料デイタンク及び潤滑油サンプタンクの付属施設）		①自重 ②風圧力による荷重 ③気圧差による荷重 ④内圧による荷重

3.4 許容限界

排気管及びベント管の許容限界は、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」に従い、「3.2 評価対象部位」にて設定している部位における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の許容応力を用いる。

(1) 構造強度評価の許容限界

許容限界は、J E A G 4 6 0 1を準用し、「クラス2, 3配管」の許容限界を適用し、許容応力状態Ⅲ_ASから算出した許容応力とする。材料の設計降伏点はJ S M E付録材料図表Part5表8により算出した値を用いる。周囲環境温度がJ S M E付録材料図表Part5表8記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算し、小数点第1位以下を切り捨てた値を用いるものとする。排気管及びベント管の配管本体の許容限界を表3-3、許容応力を表3-4に示す。

表3-3 排気管及びベント管本体の許容限界

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 排気管及びベント管本体の許容応力

評価対象配管	管外径 (mm)	材料	温度条件 (°C)	S _y (MPa)
排気管 (非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設)	914.4	SM400B	450*	143
ベント管 (非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料貯蔵タンク及びディーゼル燃料デイトンクの付属施設)	76.3	STPT410	45*	242
ベント管 (非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備潤滑油サンプタンクの付属施設)	139.8	STPT410	85*	224

注記* : 最高使用温度

3.5 評価方法

(1) 構造強度評価の評価方法

排気管及びベント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。

a. 計算モデル

配管は一定距離ごとにサポートによって支えられているため、風圧力による一様な荷重を受ける単純支持はりとして評価を行う。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。なお、ベント管は、配管端部が片持ち形状となっていることから、配管端部についても片持ちはりとして評価を行う。

両端支持形状の配管モデル図を図 3-3 に、片持ち形状の配管モデルを図 3-4 に示す。

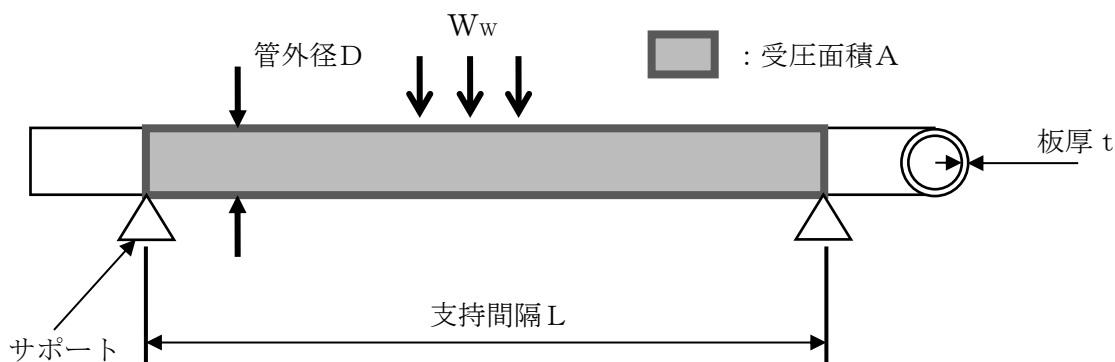


図 3-3 配管モデル図

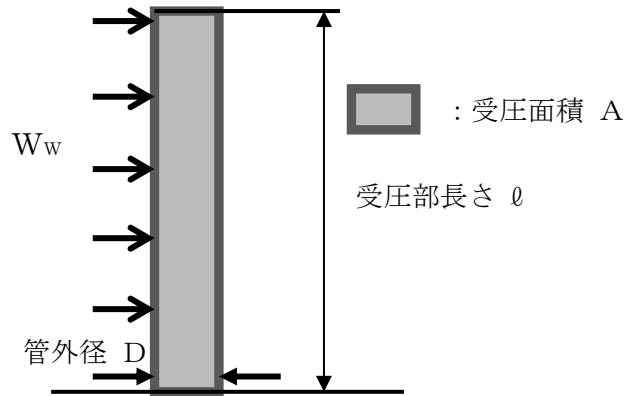


図 3-4 配管モデル図

b. 計算方法

(a) 竜巻による応力計算

イ. 風圧力により生じる応力

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

(両端支持形状)

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

(片持ち形状)

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

ここで、

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

ロ. 気圧差により生じる応力

気圧差による荷重は、気圧が低下した分、内圧により生じる一次一般膜応力が増加すると考えて、その応力増加分を以下の式により算定する。

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

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

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

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

(b) 組合せ応力

竜巻荷重と組み合わせる荷重として、配管に常時作用する自重及び運転時に作用する内圧を考慮する。自重により生じる曲げ応力及び内圧により生じる一次一般膜応力は、以下の式により算定する。

イ. 自重により生じる応力

(両端支持形状)

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

(片持ち形状)

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

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と気圧差による荷重及び内圧により生じる一次一般膜応力を足し合わせ、配管に生じる応力として以下の式により σ_1 及び σ_2 を算出する。

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

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

4. 評価条件

(1) 構造強度評価の評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表4-1～表4-4に示す。

表4-1 評価条件

V_D (m/s)	ρ (kg/m ³)	q (N/m ²)	G (-)	C (-)	g (m/s ²)
92	1.226	5188	1.0	1.2	9.80665

表4-2 評価条件（排気管（非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設））

D (mm)	形状	材料	L (m)	t (mm)	m (kg/m)	A (m ² /m)	P (MPa)
914.4	両端支持	SM400B	5.78	9.5	212.1	0.9144	0.00981

表4-3 評価条件（ベント管（非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料貯蔵タンク及びディーゼル燃料デイトンクの付属施設））

D (mm)	形状	材料	L (m)	t (mm)	m (kg/m)	A (m ² /m)	P (MPa)
76.3	片持ち	STPT410	2.072	5.2	9.2	0.0763	0

表4-4 評価条件（ベント管（非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備潤滑油サンプタンクの付属施設））

D (mm)	形状	材料	L (m)	t (mm)	m (kg/m)	A (m ² /m)	P (MPa)
139.8	片持ち	STPT410	2.072	6.6	21.7	0.1398	0

5. 強度評価結果

(1) 構造強度評価の評価結果

- a. 排気管（非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設）

竜巻発生時の構造強度評価結果を表5-1に示す。

排気管（非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設）に発生する応力は、許容応力以下である。

表5-1 構造強度評価結果

D (mm)	形状	材料	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
914.4	両端支持	SM400B	25	143

- b. ベント管（非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料貯蔵タンク及びディーゼル燃料デイトンクの付属施設）

竜巻発生時の構造強度評価結果を表5-2に示す。

ベント管（非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料貯蔵タンク及びディーゼル燃料デイトンクの付属施設）に発生する応力は、許容応力以下である。

表5-2 構造強度評価結果

D (mm)	形状	材料	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
76.3	片持ち	STPT410	120	242

- c. ベント管（非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備潤滑油サンプタンクの付属施設）

竜巻発生時の構造強度評価結果を表5-3に示す。

ベント管（非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備潤滑油サンプタンクの付属施設）に発生する応力は、許容応力以下である。

表5-3 構造強度評価結果

D (mm)	形状	材料	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
139.8	片持ち	STPT410	50	224

VI-3-別添 2 火山への配慮が必要な施設の強度計算書

VI-3-別添 2-1-8 B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽の
強度計算の方針

目 次

1. 概要	1
2. 強度評価の基本方針	1
2.1 評価対象施設	1
3. 構造強度設計	2
3.1 構造強度の設計方針	2
3.2 機能維持の方針	2
4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界	5
4.1 荷重及び荷重の組合せ	5
4.2 許容限界	8
5. 強度評価条件及び強度評価方法	9
5.1 強度評価条件	9
5.2 強度評価方法	9
6. 適用規格・基準等	10

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-1-1-3-4-3「降下火砕物の影響を考慮する施設の設計方針」（以下「VI-1-1-3-4-3「降下火砕物の影響を考慮する施設の設計方針」」という。）の「4.1 構造物への荷重を考慮する施設」で設定しているB-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽が、降下火砕物に対して構造健全性を維持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-1-1-3-4-1「火山への配慮に関する基本方針」（以下「VI-1-1-3-4-1「火山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。

降下火砕物の影響を考慮する施設のうち、B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽の具体的な計算の方法及び結果は、VI-3-別添 2-9「B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽の強度計算書」に示す。

2. 強度評価の基本方針

強度評価は、「2.1 評価対象施設」に示す評価対象施設を対象として、「4.1 荷重及び荷重の組合せ」で示す降下火砕物による荷重と組み合わせべき他の荷重による組合せ荷重により発生する応力等が、「4.2 許容限界」で示す許容限界を超えないことを、「5. 強度評価条件及び強度評価方法」で示す評価方法及び考え方を使用し、「6. 適用規格」で示す適用規格を用いて確認する。

2.1 評価対象施設

本資料における評価対象施設は、VI-1-1-3-4-3「降下火砕物の影響を考慮する施設の設計方針」の「4. 要求機能及び性能目標」で設定している構造物への荷重を考慮する施設のうち、B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽を強度評価の対象施設とする。

3. 構造強度設計

VI-1-1-3-4-1「火山への配慮に関する基本方針」で設定している降下火砕物特性に対し、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している構造物への荷重を考慮する施設が、構造強度設計上の性能目標を達成するように、VI-1-1-3-4-3「降下火砕物の影響を考慮する施設の設計方針」の「5. 機能設計」で設定しているB-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽が有する機能を踏まえて、構造強度の設計方針を設定する。

また、想定する荷重及び荷重の組合せを設定し、それらの荷重に対し、B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽の構造強度を保持するよう機能維持の方針を設定する。

3.1 構造強度の設計方針

B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽は、VI-1-1-3-4-3「降下火砕物の影響を考慮する施設の設計方針」の「4. 要求機能及び性能目標」の「4.1(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、想定する降下火砕物、積雪及び風（台風）を考慮した荷重に対し、降下火砕物堆積時の機能維持を考慮して、鉄筋コンクリート造の躯体は十分な強度を有する構造とし、十分な支持性能を有する底版により支持する構造とする。降下火砕物及び積雪（以下「降下火砕物等」という。）による荷重を短期荷重とするために、降下火砕物の降灰から30日を目途に降下火砕物を適切に除去すること、また、降灰時には除雪も併せて実施することを保安規定に定める。

3.2 機能維持の方針

VI-1-1-3-4-3「降下火砕物の影響を考慮する施設の設計方針」の「4. 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に、「3.1 構造強度の設計方針」に示す構造を踏まえ、VI-1-1-3-4-1「火山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条件を適切に考慮して、構造設計及びそれを踏まえた評価方針を設定する。

(1) 構造設計

B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽は、地下に埋設された鉄筋コンクリート造とし、地上部には頂版及び側壁の一部が露出する。鉄筋コンクリート造の躯体は適切な強度を有する構造とし、十分な支持性能を有する底版により支持する構造とする。

降下火砕物等の堆積による鉛直荷重に対しては、降下火砕物等が堆積する頂版に作用する構造とする。

B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽の設置位置を図3-1に、構造計画を表3-1に示す。

(2) 評価方針

B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽は、「(1) 構造設計」を踏まえ、以下の評価方針とする。

想定する降下火砕物、積雪及び風（台風）を考慮した荷重に対し、B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽の頂版及び地上に露出した側壁が、「4.2 許容限界」で示す許容限界を超えないことを確認する。

降下火砕物、積雪及び風（台風）を考慮した荷重に対する強度評価を、VI-3-別添 2-9「B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽の強度計算書」に示す。

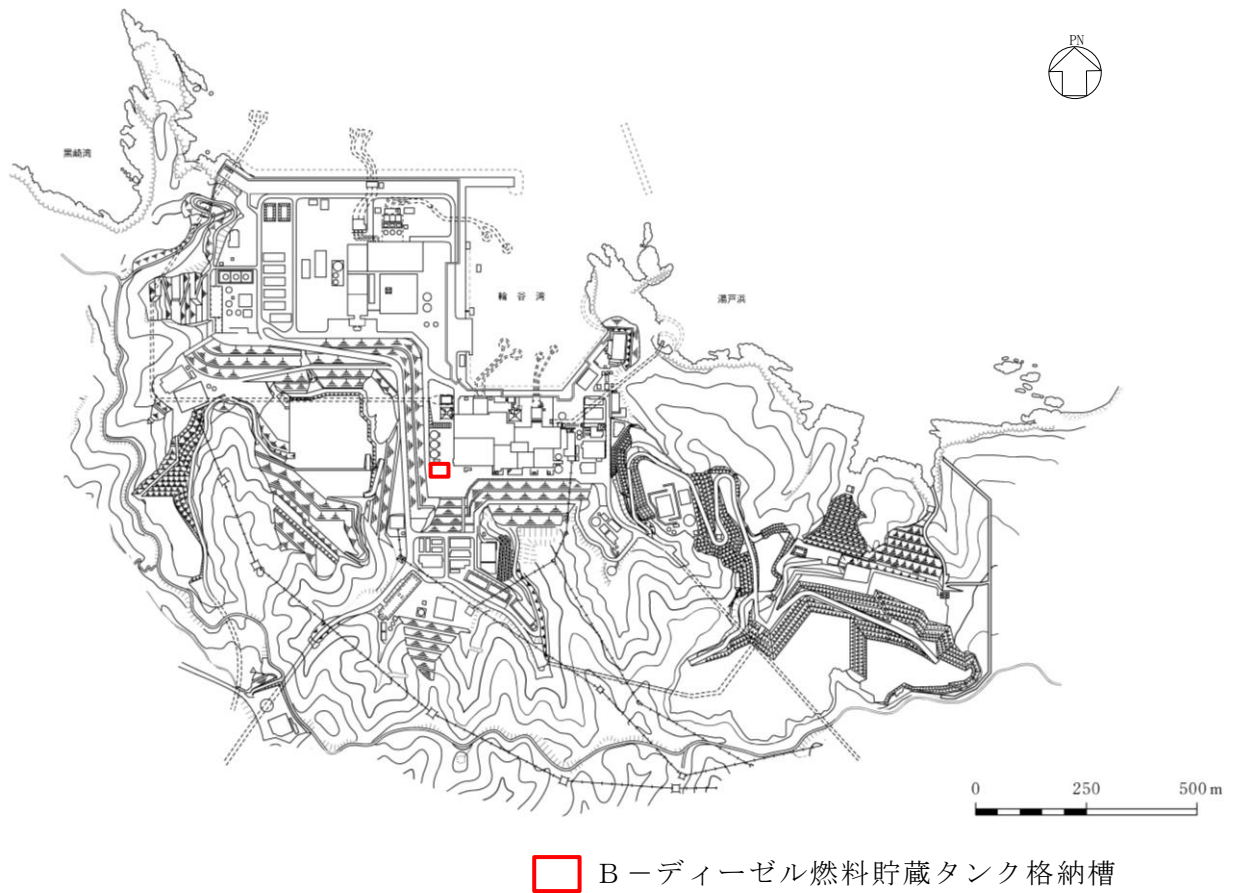


図 3-1 B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽の設置位置

表 3-1 構造計画

計画の概要		説明図
主体構造	支持構造	
<p>鉄筋コンクリート造の躯体で構成する。</p>	<p>荷重は鉄筋コンクリート造の頂版及び地上に露出した側壁に作用する構造とする。</p>	<div style="text-align: center;"> <p>B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽 A-A 断面図 (単位: mm)</p> <p>B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽 B-B 断面図 (単位: mm)</p> </div>

4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界

強度評価に用いる荷重の種類，荷重の組合せ及び荷重の算定方法を「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

強度評価にて考慮する荷重及び荷重の組合せは，VI-1-1-3-4-1「火山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，VI-1-1-3-4-1「火山への配慮に関する基本方針」の「2.1.3(2)a. 荷重の種類」で設定している常時作用する荷重に従って，持続的に生じる荷重である固定荷重及び積載荷重とする。

b. 降下火砕物による荷重 (F_a)

降下火砕物による荷重は，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-1-1-3-1-1「発電用原子炉施設に対する自然現象等による損傷の防止に関する基本方針」（以下「VI-1-1-3-1-1「発電用原子炉施設に対する自然現象等による損傷の防止に関する基本方針」」という。）の「4.1 自然現象の組合せについて」で設定している自然現象の組合せに従って，主荷重として扱うこととし，VI-1-1-3-4-1「火山への配慮に関する基本方針」の「2.1.2 設計に用いる降下火砕物特性」に示す降下火砕物の特性及び「2.1.3(2)a. 荷重の種類」に示す降下火砕物による荷重を踏まえて，湿潤密度 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ の降下火砕物が 56cm 堆積した場合の荷重として堆積量 1cm ごとに $147.1\text{N}/\text{m}^2$ の降下火砕物による荷重が作用することを考慮し設定する。

c. 積雪荷重 (F_s)

積雪荷重は，VI-1-1-3-1-1「発電用原子炉施設に対する自然現象等による損傷の防止に関する基本方針」の「4.1 自然現象の組合せについて」で設定している自然現象の組合せに従って，従荷重として扱うこととし，VI-1-1-3-1-1「発電用原子炉施設に対する自然現象等による損傷の防止に関する基本方針」の「4.1 自然現象の組合せについて」に示す組み合わせる積雪深を踏まえて，発電所敷地に最も近い気象官署である松江地方気象台で観測された観測史上1位の月最深積雪 100cm に平均的な積雪荷重を与えるための係数 0.35 を考慮し 35.0cm とする。積雪荷重については，松江市建築基準法施行細則により，積雪量 1cm ごとに

20N/m²の積雪荷重が作用することを考慮し設定する。

d. 風荷重 (W)

風速は、VI-1-1-3-1-1「発電用原子炉施設に対する自然現象等による損傷の防止に関する基本方針」の「4.1 自然現象の組合せについて」に示す組み合わせる風速を踏まえて、建築基準法施行令に基づく平成 12 年建設省告示第 1 4 5 4 号に定められた松江市の基準風速である 30m/s とする。風荷重については、施設の形状により風力係数等が異なるため、施設ごとに設定する。

(2) 荷重の組合せ

a. 降下火砕物による荷重、積雪荷重及び風荷重の組合せ

降下火砕物による荷重、積雪荷重及び風荷重については、VI-1-1-3-1-1「発電用原子炉施設に対する自然現象等による損傷の防止に関する基本方針」の「4.1 自然現象の組合せについて」を踏まえて、それらの組合せを考慮し、自然現象の荷重として扱う。自然現象の荷重は短期荷重として扱う。

b. 荷重の組合せ

荷重の組合せについては、自然現象の荷重及び常時作用する荷重を組み合わせる。上記を踏まえ、強度評価における荷重の組合せの設定については、施設の設置状況及び構造を考慮し設定する。B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽における荷重の組合せを表 4-1 に示す。

表 4-1 荷重の組合せ

	荷重*				
	常時作用する荷重 (F _d)		主荷重 降下火砕物による荷重 (F _a)	従荷重	
	固定荷重	積載荷重		積雪荷重 (F _s)	風荷重 (W)
考慮する荷重の組合せ	○	○	○	○	○

注記* : ○は考慮する荷重を示す。

(3) 荷重の算定方法

降下火砕物による荷重，積雪荷重及び風荷重の算出式及び算出方法を以下に示す。

a. 記号の定義

荷重の算出に用いる記号を表 4-2 に示す。

表 4-2 荷重の算出に用いる記号

記号	単位	定義
A_1	m^2	風の受圧面積（風向に垂直な面に投影した面積）
C	—	風力係数
E'	—	建築基準法施行令第 87 条第 2 項に規定する数値
E_r	—	建設省告示第 1 4 5 4 号の規定によって算出した平均風速の高さ方向の分布を表す係数
F_a	N/m^2	湿潤状態の降下火砕物による荷重
F_s	N/m^2	従荷重として組み合わせる積雪荷重
F_v'	N/m^2	単位面積当たりの降下火砕物等堆積による鉛直荷重
f'_s	$N/(m^2 \cdot cm)$	建築基準法施行令に基づき設定する積雪の単位荷重
G	—	ガスト影響係数
g	m/s^2	重力加速度
H	m	全高
H_a	cm	降下火砕物の層厚
H_s	cm	組合せ荷重として考慮する積雪深
q	N/m^2	設計用速度圧
V_D	m/s	基準風速
W	N	風荷重
Z_b	m	地表面粗度区分に応じて建設省告示第 1 4 5 4 号に掲げる数値
Z_G	m	地表面粗度区分に応じて建設省告示第 1 4 5 4 号に掲げる数値
α	—	地表面粗度区分に応じて建設省告示第 1 4 5 4 号に掲げる数値
ρ	kg/m^3	降下火砕物の湿潤密度

b. 降下火砕物による荷重及び積雪荷重

湿潤状態の降下火砕物による荷重は、次式のとおり算出する。

$$F_a = \rho \cdot g \cdot H_a \cdot 10^{-2}$$

積雪荷重は、次式のとおり算出する。

$$F_s = f'_s \cdot H_s$$

湿潤状態の降下火砕物に積雪を踏まえた鉛直荷重は、次式のとおり算出する。

$$F_v' = F_a + F_s$$

表 4-3 に入力条件を示す。

表 4-3 入力条件

ρ (kg/m ³)	g (m/s ²)	H_a (cm)	f'_s (N/ (m ² · cm))	H_s (cm)
1500	9.80665	56	20	35

以上を踏まえ、降下火砕物等の堆積による鉛直荷重は、 $F_v' = 8938\text{N/m}^2$ とする。

c. 水平荷重

水平荷重については、風（台風）を考慮する。風速を建築基準法施行令の基準風速に基づき 30m/s に設定し、風荷重については施設の形状により異なるため、施設ごとに算出する。

風荷重の算出式は、建築基準法施行令第 87 条に基づき、以下のとおりである。

$$W = q \cdot C \cdot A_1$$

ここで

$$q = 0.6 \cdot E' \cdot V_D^2$$

$$E' = E_r^2 \cdot G$$

$$E_r = 1.7 \cdot (H / Z_G)^\alpha \quad (H \text{ が } Z_b \text{ を超える場合})$$

$$E_r = 1.7 \cdot (Z_b / Z_G)^\alpha \quad (H \text{ が } Z_b \text{ 以下の場合})$$

4.2 許容限界

許容限界は、VI-1-1-3-4-3 「降下火砕物の影響を考慮する施設の設計方針」の「4. 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、評価対象部位ごとに設定する。

「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踏まえた許容限界を表 4-4 に示す。

構造強度評価においては、降下火砕物、積雪及び風（台風）を考慮した荷重に対し、評価対象部位ごとに求められる機能が担保できる許容限界を設定する。

表 4-4 許容限界

要求機能	機能設計上の性能目標	部位	機能維持のための考え方	許容限界(評価基準値)
—	構造強度を有すること	頂版	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	コンクリート標準示方書[構造性能照査編]に基づく短期許容応力度
		地上に露出した側壁		

5. 強度評価条件及び強度評価方法

5.1 強度評価条件

B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽の強度評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

- (1) 降下火砕物等の堆積による鉛直荷重を短期荷重として評価する。
- (2) 降下火砕物等の堆積による鉛直荷重として $F_v' = 8938 \text{ N/m}^2$ 、風荷重については、基準風速 30m/s を考慮する。
- (3) 風荷重の算出は、構造物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実施し、受圧面積算定において、隣接する建物の遮断効果による面積の低減は考慮しない。

5.2 強度評価方法

2次元有限要素法による解析モデルを用いて、躯体に作用する固定荷重、積載荷重、積雪荷重及び降下火砕物堆積による鉛直荷重及び風荷重により頂版及び地上に露出した側壁に発生する応力を求める。

6. 適用規格・基準等

VI-1-1-3-4-1「火山への配慮に関する基本方針」においては、降下火砕物の影響を考慮する施設の設計に係る適用規格を示している。

これらのうち、B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽の強度評価に用いる規格・基準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法・同施行令
- ・ 松江市建築基準法施行細則（平成17年3月31日松江市規則第234号）
- ・ コンクリート標準示方書[構造性能照査編]（土木学会，2002年制定）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987（（社）日本電気協会）
- ・ 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（土木学会，2005年制定）

VI-3-別添 2-4 原子炉建物の強度計算書

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
2.1 位置	1
2.2 構造概要	2
2.3 評価方針	5
2.4 適用規格・基準等	7
3. 強度評価方法及び評価条件	8
3.1 評価対象部位	8
3.2 荷重及び荷重の組合せ	8
3.2.1 荷重	9
3.2.2 荷重の組合せ	14
3.3 許容限界	15
3.4 解析モデル及び諸元	18
3.4.1 モデル化の基本方針	18
3.4.2 解析諸元	26
3.5 評価方法	27
3.5.1 屋根スラブの評価方法	27
3.5.2 主トラスの評価方法	30
3.5.3 二次部材の評価方法	32
3.5.4 耐震壁の評価方法	35
4. 強度評価結果	36
4.1 屋根スラブの評価結果	36
4.2 主トラスの評価結果	51
4.3 二次部材の評価結果	52
4.4 耐震壁の評価結果	54

1. 概要

本資料は、VI-3-別添 2-1-3「原子炉建物の強度計算の方針」に示すとおり、原子炉建物が降下火砕物及び積雪の堆積時においても、内包する防護すべき施設に降下火砕物を堆積させない機能、放射線の遮蔽機能（以下「遮蔽性」という。）及び放射性物質の閉じ込め機能（以下「気密性」という。）の維持を考慮して、建物全体及び建物の主要な構造部材が構造健全性を維持することを確認するものである。

2. 基本方針

原子炉建物は、VI-3-別添 2-1-3「原子炉建物の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、本資料では、「2.1 位置」、「2.2 構造概要」、「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格・基準等」を示す。

2.1 位置

原子炉建物は、VI-3-別添 2-1-3「原子炉建物の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す位置に設置する。原子炉建物の配置を図 2-1 に示す。

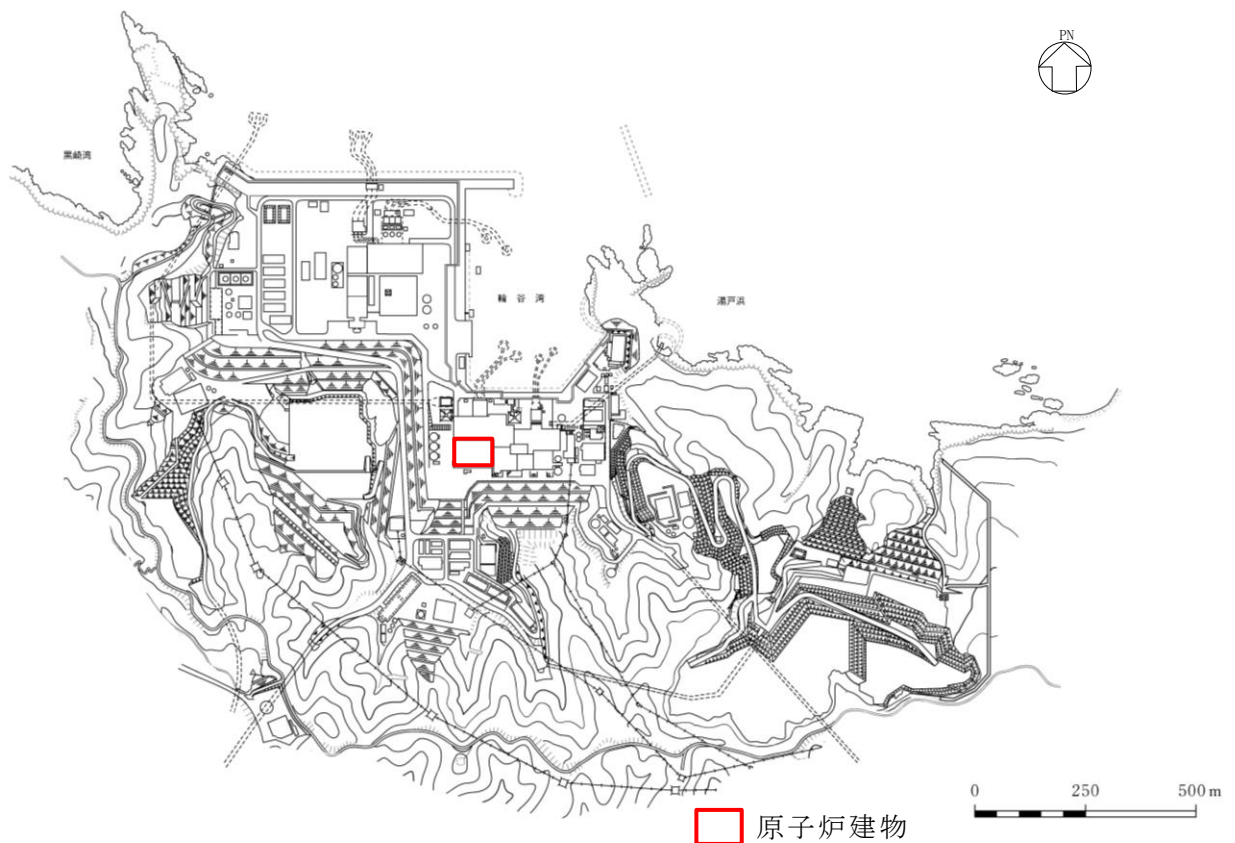


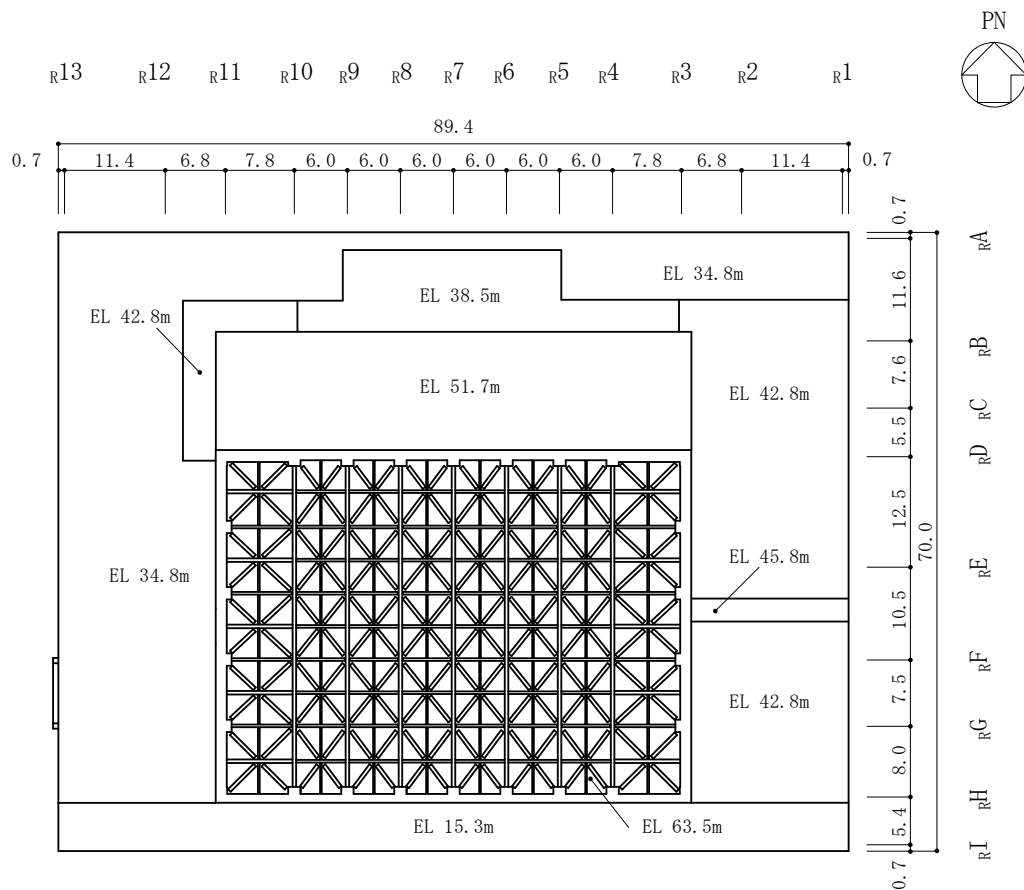
図 2-1 原子炉建物の配置図

2.2 構造概要

原子炉建物は、VI-3-別添 2-1-3「原子炉建物の強度計算の方針」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。

原子炉建物は、中央部に地上 4 階、地下 2 階で平面が 53.8m（東西方向）×53.3m（南北方向）（2 階面）の原子炉建物原子炉棟があり、その周囲に地上 2 階（一部 3 階）、地下 2 階の原子炉建物付属棟を配置した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）の建物である。屋根スラブを支える屋根トラスの平面形状は 51.6m（東西方向）×38.5m（南北方向）の長方形であり、4 階面 (EL 42.8m) からの高さは 20.7m である。

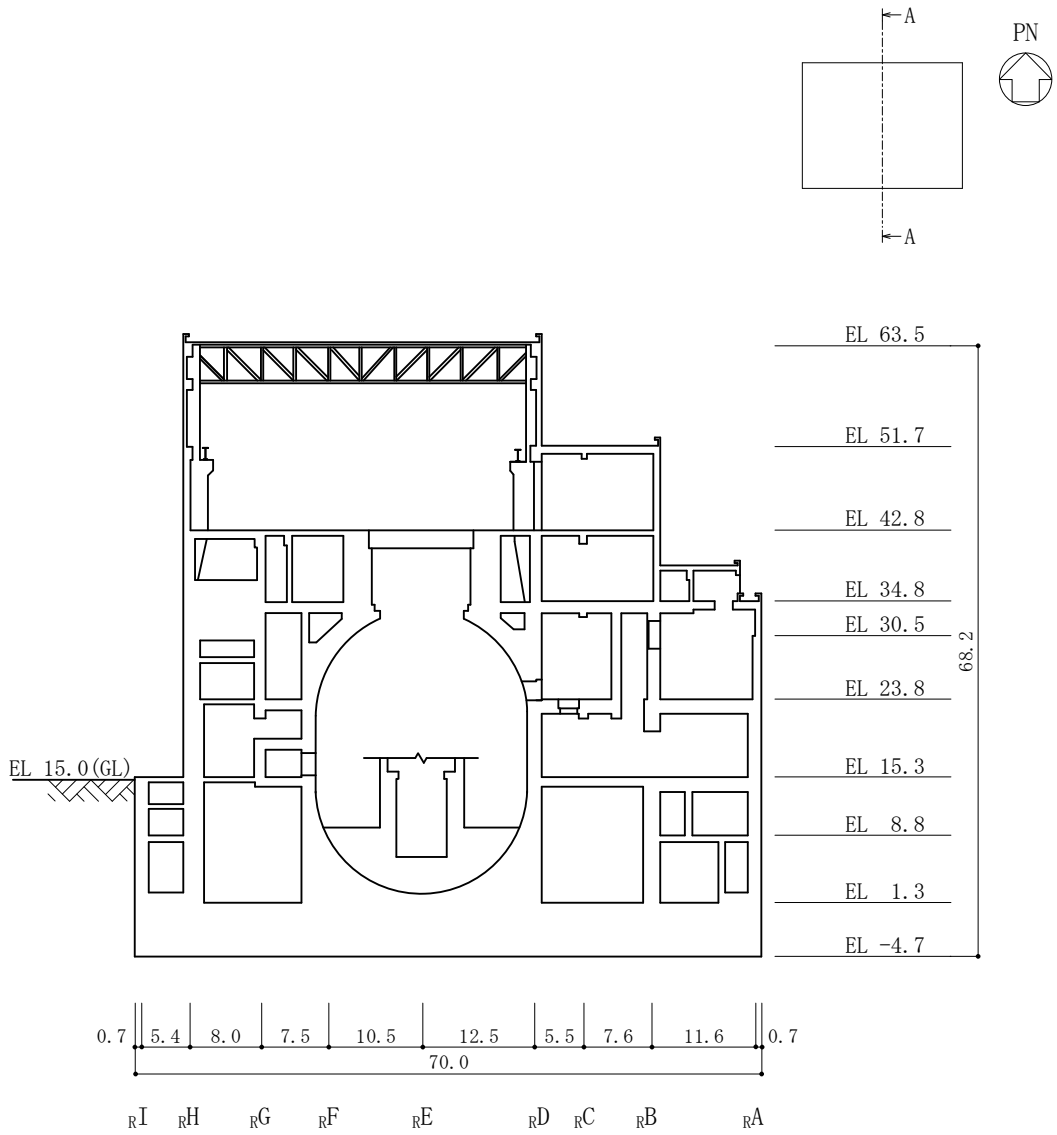
原子炉建物の屋根面の概略平面図を図 2-2 に、概略断面図を図 2-3 に示す。



(単位：m)

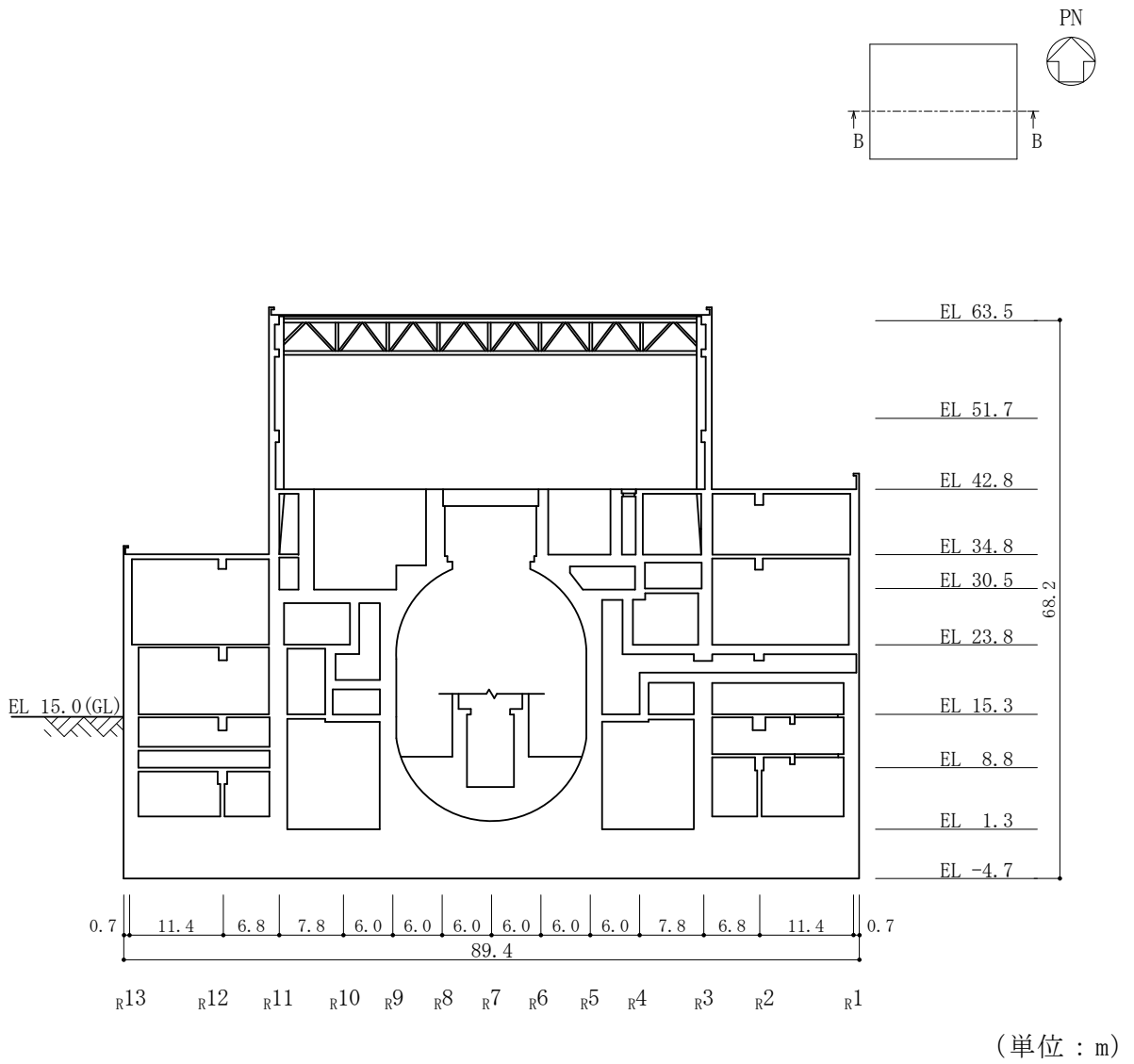
図 2-2 原子炉建物の概略平面図

注：「EL」は東京湾平均海面(T.P.)を基準としたレベルを示す。



(単位 : m)

図 2-3 原子炉建物の概略断面図 (A-A 断面, 南北方向) (1/2)



(単位 : m)

図 2-3 原子炉建物の概略断面図 (B-B 断面, 東西方向) (2/2)

2.3 評価方針

原子炉建物の強度評価は、VI-3-別添 2-1-3「原子炉建物の強度計算の方針」のうち「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、荷重の組合せ及び許容限界を踏まえて、建物の評価対象部位に発生する応力等が許容限界に収まることを「3. 強度評価方法及び評価条件」に示す方法及び評価条件を用いて計算し、「4. 強度評価結果」にて確認する。強度評価フローを図 2-4 に示す。

原子炉建物の強度評価においては、その構造を踏まえて降下火砕物堆積による鉛直荷重及び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。

降下火砕物堆積による鉛直荷重及び設計荷重に対しては、鉛直荷重に抵抗する評価対象部位として屋根スラブ、主トラス及び二次部材を、水平荷重に抵抗する評価対象部位として耐震壁を選定した。

設計荷重は、VI-3-別添 2-1-3「原子炉建物の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に従い設定する。

屋根及び耐震壁に作用する荷重は、VI-3-別添 2-1-3「原子炉建物の強度計算の方針」のうち「5. 強度評価条件及び強度評価方法」に従い、原子炉建物の応力解析モデル及び質点系モデルを用いて評価する。

許容限界は、VI-3-別添 2-1-3「原子炉建物の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に従い設定する。

なお、屋根トラスについては、補強工事を実施しているため、補強内容を反映した評価を実施する。

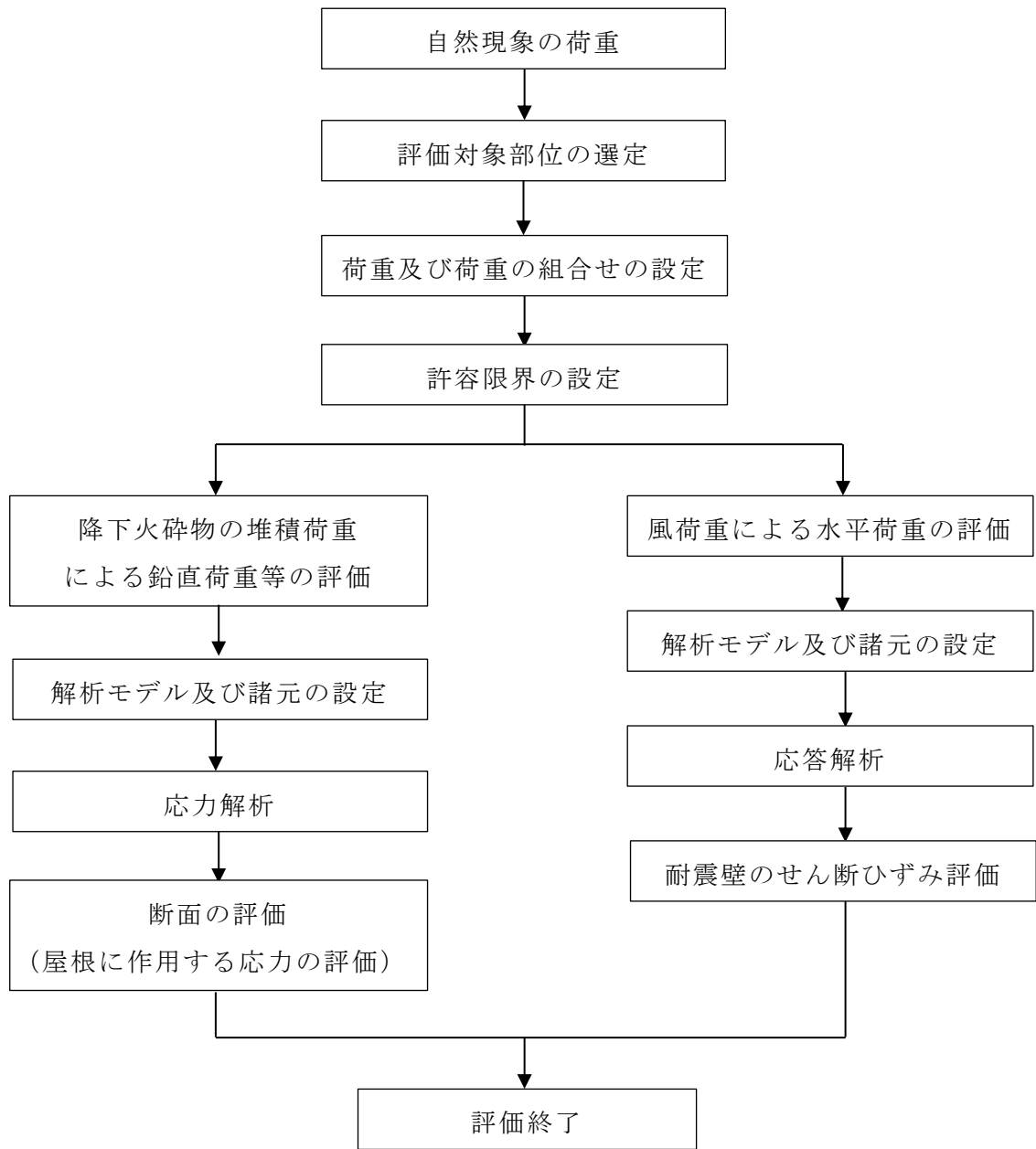


図 2-4 強度評価フロー

2.4 適用規格・基準等

原子炉建物の強度評価に用いる規格・基準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法・同施行令
- ・ 松江市建築基準法施行細則（平成 17 年 3 月 31 日松江市規則第 234 号）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987（（社）日本電気協会）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版（（社）日本電気協会）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984（（社）日本電気協会）
- ・ 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説-許容応力度設計法-（（社）日本建築学会，1999 改定）
- ・ 原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005 制定）
- ・ 鋼構造設計規準-許容応力度設計法-（（社）日本建築学会，2005 改定）

3. 強度評価方法及び評価条件

3.1 評価対象部位

原子炉建物の評価対象部位は、VI-3-別添 2-1-3「原子炉建物の強度計算の方針」のうち「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、屋根スラブ、主トラス、二次部材及び耐震壁とする。

3.2 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 2-1-3「原子炉建物の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

3.2.1 荷重

(1) 屋根スラブ

a. 鉛直荷重

表 3-1～表 3-7 に鉛直荷重の一覧を示す。屋根スラブに考慮する鉛直荷重は、常時作用する荷重 (F_d)、降下火砕物による荷重 (F_a) 及び積雪荷重 (F_s) を考慮する。常時作用する荷重は、固定荷重 (G) 及び積載荷重 (P) とする。降下火砕物による荷重は、湿潤密度 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ の降下火砕物が 56cm 堆積した場合の荷重として考慮する。積雪荷重は、発電所敷地に最も近い気象官署である松江地方気象台で観測された観測史上 1 位の月最深積雪 100cm に平均的な積雪荷重を与えるための係数 0.35 を考慮し 35.0cm とし、積雪量 1cm ごとに $20\text{N}/\text{m}^2$ の積雪荷重が作用することを考慮し設定する。なお、水平方向の風荷重が作用した場合、屋根に対し鉛直上向きの荷重が働き下向き荷重は低減されるため、鉛直荷重に抵抗する部位の評価においては、保守的に水平方向の風荷重は考慮しない。また、原子炉建物内は負圧となっており、屋根スラブに鉛直下向きの圧力荷重が作用しているが、鉛直荷重と比較して $6.28 \times 10^{-2}\text{kN}/\text{m}^2$ と非常に軽微なため考慮しない。

表 3-1 鉛直荷重一覧 (屋根スラブ EL 15.3m, スラブ厚さ $t = \square$)

常時作用する荷重 (F_d)	固定荷重 (G)	$t = \square$	$13.828\text{kN}/\text{m}^2$
		$t = \square$	$17.358\text{kN}/\text{m}^2$
	積載荷重 (P)	$2.942\text{kN}/\text{m}^2$	
降下火砕物による荷重 (F_a)		$8.238\text{kN}/\text{m}^2$	
積雪荷重 (F_s)		$0.7\text{kN}/\text{m}^2$	

表 3-2 鉛直荷重一覧 (屋根スラブ EL 34.8m, スラブ厚さ $t = \square$)

常時作用する荷重 (F_d)	固定荷重 (G)	$t = \square$	$18.829 \sim$ $22.065\text{kN}/\text{m}^2$
		$t = \square$	$39.953\text{kN}/\text{m}^2$
	積載荷重 (P)	$2.942\text{kN}/\text{m}^2$	
降下火砕物による荷重 (F_a)		$8.238\text{kN}/\text{m}^2$	
積雪荷重 (F_s)		$0.7\text{kN}/\text{m}^2$	

表 3-3 鉛直荷重一覧（屋根スラブ EL 38.5m, スラブ厚さ $t = \square$ ）

常時作用する荷重 (F_d)	固定荷重 (G)	$t = \square$	15.005kN/m ²
		$t = \square$	17.358kN/m ²
	積載荷重 (P)	2.942kN/m ²	
降下火砕物による荷重 (F_a)		8.238kN/m ²	
積雪荷重 (F_s)		0.7kN/m ²	

表 3-4 鉛直荷重一覧（屋根スラブ EL 42.8m, スラブ厚さ $t = \square$ ）

常時作用する荷重 (F_d)	固定荷重 (G)	$t = \square$	10.297kN/m ²
		$t = \square$	19.418kN/m ²
	積載荷重 (P)	2.942kN/m ²	
降下火砕物による荷重 (F_a)		8.238kN/m ²	
積雪荷重 (F_s)		0.7kN/m ²	

表 3-5 鉛直荷重一覧（屋根スラブ EL 45.8m, スラブ厚さ $t = \square$ ）

常時作用する荷重 (F_d)	固定荷重 (G)	12.357kN/m ²	
	積載荷重 (P)	2.942kN/m ²	
降下火砕物による荷重 (F_a)		8.238kN/m ²	
積雪荷重 (F_s)		0.7kN/m ²	

表 3-6 鉛直荷重一覧（屋根スラブ EL 51.7m, スラブ厚さ $t = \square$ ）

常時作用する荷重 (F_d)	固定荷重 (G)	17.358kN/m ²	
	積載荷重 (P)	2.942kN/m ²	
降下火砕物による荷重 (F_a)		8.238kN/m ²	
積雪荷重 (F_s)		0.7kN/m ²	

表 3-7 鉛直荷重一覧（屋根スラブ EL 63.5m, スラブ厚さ $t = \square$ ）

常時作用する荷重 (F_d)	固定荷重 (G)	6.130kN/m ²	
	積載荷重 (P)	0.981kN/m ²	
降下火砕物による荷重 (F_a)		8.238kN/m ²	
積雪荷重 (F_s)		0.7kN/m ²	

(2) 主トラス及び二次部材

a. 鉛直荷重

表 3-8 及び表 3-9 に鉛直荷重の一覧を示す。主トラス及び二次部材に考慮する鉛直荷重は、常時作用する荷重 (F_d)、降下火砕物による荷重 (F_a) 及び積雪荷重 (F_s) を考慮する。常時作用する荷重は、固定荷重 (G) 及び積載荷重 (P) とする。また、クレーン荷重の入力する位置は待機位置とする。

降下火砕物による荷重は、湿潤密度 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ の降下火砕物が 56cm 堆積した場合の荷重として考慮する。積雪荷重は、発電所敷地に最も近い気象官署である松江地方気象台で観測された観測史上 1 位の月最深積雪 100cm に平均的な積雪荷重を与えるための係数 0.35 を考慮し 35.0cm とし、積雪量 1cm ごとに $20\text{N}/\text{m}^2$ の積雪荷重が作用することを考慮し設定する。

表 3-8 鉛直荷重一覧 (主トラス)

常時作用する荷重 (F_d)	固定荷重 (G)	屋根スラブ	$6.130\text{kN}/\text{m}^2$
		トラス鋼材	$2.647\text{kN}/\text{m}^3$
		クレーン荷重	3433kN
	積載荷重 (P)		$0.981\text{kN}/\text{m}^2$
降下火砕物による荷重 (F_a)			$8.238\text{kN}/\text{m}^2$
積雪荷重 (F_s)			$0.7\text{kN}/\text{m}^2$

表 3-9 鉛直荷重一覧 (二次部材)

常時作用する荷重 (F_d)	固定荷重 (G)	サブビーム	$7.944\text{kN}/\text{m}^2$
		もや	$6.669\sim 6.767\text{kN}/\text{m}^2$
		つなぎばり	$8.826\text{kN}/\text{m}^2$
	積載荷重 (P)		$0.981\text{kN}/\text{m}^2$
降下火砕物による荷重 (F_a)			$8.238\text{kN}/\text{m}^2$
積雪荷重 (F_s)			$0.7\text{kN}/\text{m}^2$

b. 水平荷重

風荷重の算出に用いる基準風速は、30m/s とする。

風荷重(W)は、VI-3-別添 2-1-3「原子炉建物の強度計算の方針」の「4.1(3)c. 水平荷重」に示す式に従い算出する。全高Hが5mを超えるため、Hが Z_b を超える場合の式を用いる。風荷重(W)の算出は、建物の形状を考慮して算出した風力係数C及び風の受圧面積 A_1 に基づき実施し、風荷重(W)の算出に用いる受圧面積の算定において、隣接する建物の遮断効果は、安全側の評価となるよう考慮しない。

$$W = q \cdot C \cdot A_1$$

ここで、

$$q = 0.6 \cdot E' \cdot V_D^2$$

$$E' = E_r^2 \cdot G$$

$$E_r = 1.7 \cdot (H / Z_G)^\alpha \quad (H \text{ が } Z_b \text{ を超える場合})$$

$$E_r = 1.7 \cdot (Z_b / Z_G)^\alpha \quad (H \text{ が } Z_b \text{ 以下の場合})$$

Z_G , Z_b : 地表面粗度区分に応じて建設省告示第1454号に掲げる数値
風荷重算定に使用する入力条件を表3-10～表3-12に示す。

表3-10 設計風荷重の条件

施設名称	基準風速 V_D (m/s)	全高 H (m)	Z_G (m)	α	ガスト 影響係数 G	設計用 速度圧 q (N/m ²)
原子炉建物	30	50.035	350	0.15	2.0	1742.0

表3-11 原子炉建物の風力係数及び受圧面積

(a) 南北方向

高さ(EL) (m)	風力係数C		受圧面積 A_1 (m ²)	
	風上*	風下	風上	風下
65.035～57.60	0.800	0.4	400	400
57.60～47.25	0.729	0.4	557	557
47.25～38.80	0.670	0.4	610	610
38.80～32.65	0.606	0.4	514	514
32.65～27.15	0.563	0.4	492	492
27.15～19.55	0.475	0.4	679	679
19.55～15.00	0.401	0.4	407	407

注記*: C(風上)は基準階での値を示す。

表 3-12 原子炉建物の風力係数及び受圧面積

(b) 東西方向

高さ (EL) (m)	風力係数 C		受圧面積 A_1 (m ²)	
	風上*	風下	風上	風下
65.035~57.60	0.800	0.4	297	297
57.60~47.25	0.729	0.4	489	489
47.25~38.80	0.670	0.4	477	477
38.80~32.65	0.606	0.4	391	391
32.65~27.15	0.563	0.4	355	355
27.15~19.55	0.475	0.4	491	491
19.55~15.00	0.401	0.4	296	296

注記* : C (風上) は基準階での値を示す。

(3) 耐震壁

a. 水平荷重

水平荷重は、(2) 主トラス及び二次部材 b. 水平荷重と同様である。

3.2.2 荷重の組合せ

荷重の組合せを表 3-13 に示す。

ケース 1 は従荷重として、鉛直荷重と水平荷重を用いて評価するため主トラス及び耐震壁を評価対象とする。ケース 2 は従荷重として積雪荷重を組み合わせ、鉛直荷重のみを用いて評価するため屋根スラブ及び二次部材を評価対象とする。

表 3-13 荷重の組合せ

考慮する 荷重の 組合せ	荷重*				
	常時作用する 荷重 (F_d)		主荷重	従荷重	
	固定 荷重	積載 荷重	降下火砕物に よる荷重 (F_a)	積雪荷重 (F_s)	風荷重 (W)
ケース 1	○	○	○	○	○
ケース 2	○	○	○	○	—

注記*：○は考慮する荷重を示す。

3.3 許容限界

原子炉建物の許容限界は、VI-3-別添 2-1-3「原子炉建物の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界に従って、「3.1 評価対象部位」にて設定している建物の評価対象部位ごとに設定する。

屋根スラブ，主トラス，二次部材及び耐震壁の許容限界を「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005 制定）」（以下「RC-N規準」という。），「鋼構造設計規準-許容応力度設計法-（（社）日本建築学会，2005 改定）」（以下「S規準」という。）及び「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987（（社）日本電気協会）」に基づき表 3-14 に，鋼材の材料強度を表 3-15 に，コンクリート及び鉄筋の短期許容応力度を表 3-16 及び表 3-17 に示す。

表 3-14 許容限界

要求機能	機能設計上の性能目標	部位		機能維持のための考え方	許容限界 (評価基準値)
—	構造強度を有すること	屋根	屋根スラブ	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	「RC-N規準」に基づく短期許容応力度* ¹
			主トラス (上弦材、下弦材、斜材、束材) 二次部材 (もや、つなぎばり、サブビーム)		「S規準」に基づく短期許容応力度* ¹
		耐震壁* ²			最大せん断ひずみが構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認
遮蔽性	遮蔽体の損傷により遮蔽性能を損なわないこと	屋根スラブ		部材に生じる応力が遮蔽性を維持するための許容限界を超えないことを確認	「RC-N規準」に基づく短期許容応力度* ¹
		耐震壁* ² (二次遮蔽壁及び補助遮蔽)		最大せん断ひずみが遮蔽性を維持するための許容限界を超えないことを確認	せん断ひずみ 2.0×10^{-3}
気密性	換気性能とあいまって気密性を維持すること	屋根スラブ		部材に生じる応力が気密性を維持するための許容限界を超えないことを確認	「RC-N規準」に基づく短期許容応力度* ¹
		耐震壁* ³ (原子炉建物原子炉棟 (二次格納施設))		最大せん断ひずみが気密性を維持するための許容限界を超えないことを確認	せん断ひずみ 2.0×10^{-3}

注記*1: 許容限界は終局強度に対し妥当な安全余裕を有したものと設定すること

し、さらなる安全余裕を考慮して短期許容応力度とする。

*2：建物全体としては、水平力を主に耐震壁で負担する構造となっており、柱、はり、間仕切壁等が耐震壁の変形に追従すること、また、全体に剛性の高い構造となっており複数の耐震壁間の相対変形が小さく床スラブの変形が抑えられるため、各層の耐震壁の最大せん断ひずみが許容限界を満足していれば、建物・構築物に要求される機能は維持される。

*3：事故時に換気性能とあいまって気密性を有する設計とする。耐震壁の気密性に対する許容限界の適用性は、VI-2-9-3-1「原子炉建物原子炉棟（二次格納施設）の耐震性についての計算書 別紙 1 原子炉建物原子炉棟の気密性についての計算書」に示す。

表 3-15 鋼材の材料強度

(単位：N/mm²)

材料* ¹	板厚	F 値	材料強度		
			引張り	圧縮 曲げ	せん断
SS41 (SS400 相当) SS400	t ≤ 40mm	235	235	235* ²	135
SM50A (SM490A 相当) SN490B	t ≤ 40mm	325	325	325* ²	187

注記*1：建設当時の鋼材の種類を、現在の規格に読み替えた許容応力度を示す。

*2：上限値であり、座屈長さ等を勘案して設定する。

表 3-16 コンクリートの短期許容応力度

(単位：N/mm²)

設計基準強度 F _c	圧縮	せん断
23.5	15.6	1.08

表 3-17 鉄筋の短期許容応力度

(単位：N/mm²)

種別*	引張り及び圧縮	せん断
SD35 (SD345 相当)	345	345

注記*：建設当時の鋼材の種類を、現在の規格に読み替えた許容応力度を示す。

3.4 解析モデル及び諸元

3.4.1 モデル化の基本方針

(1) 屋根スラブ

EL 63.5m の屋根スラブは、屋根トラスで支持され、厚さが同じでスパンがほぼ均等なスラブが連続しており、その外周がスラブに比べて十分剛性の大きい鉄筋コンクリート造の壁に接合されていることから、支持点の間隔を長さとした両端固定ばりの 1 方向スラブとして評価する。その他のスラブについては、端部の支持状況に応じたモデル化（例えば、四辺固定版）により応力算出を行う。

(2) 主トラス

応力解析は、3次元フレームモデルを用いた弾性応力解析を実施する。解析に使用するコードは、「f a p p a s e」である。なお、解析コードの検証及び妥当性の確認の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

応力解析モデルは、主トラスを含む建物全体の各部材を線材置換した 3次元フレームモデルとする。解析モデル図を図 3-1 に、部材リストを表 3-18 に、補強箇所を図 3-2 に示す。

解析モデルに使用する要素は、はり要素、トラス要素及びシェル要素とする。また、解析モデルの脚部は固定とする。

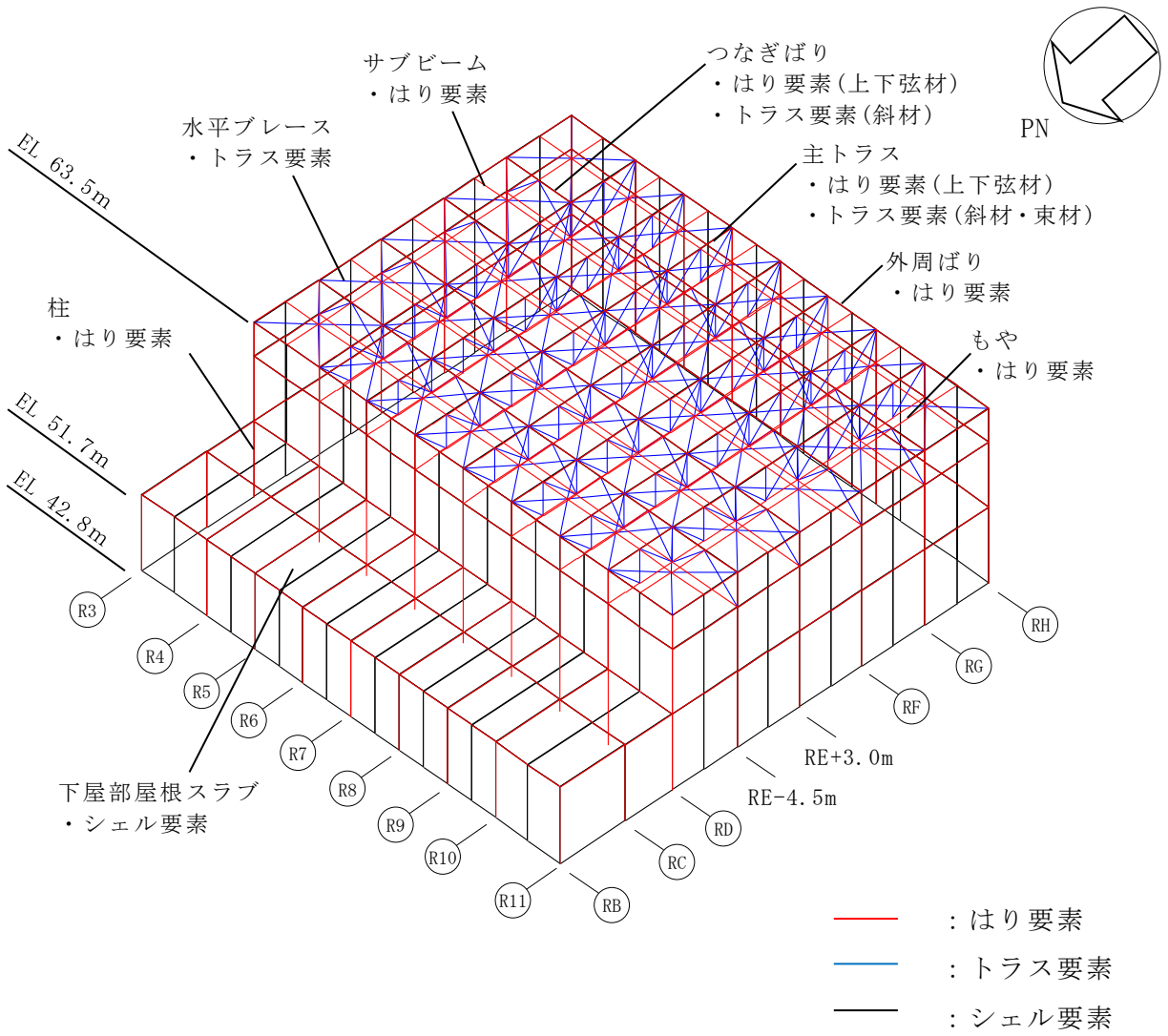


図 3-1 解析モデル図

表 3-18 部材リスト

部位		形状寸法	材質	断面積 ($\times 10^2 \text{mm}^2$)	断面二次 モーメント ($\times 10^4 \text{mm}^4$)
主トラス	上弦材	H-400×400×13×21	SM490A (SM50A)	218.7	66600
	下弦材	BH-400×400×19×35 +2PL _S -16×330*	SM490A (SM50A)	448.3	108800
		BH-400×400×19×35		342.7	99230
		H-400×400×13×21		218.7	66600
	斜材	2CT _S -175×350×12×19	SS400 (SS41)	173.9	—
		2CT _S -150×300×10×15 +4L _S -90×90×10*		187.8	—
		2CT _S -150×300×10×15		119.8	—
		2CT _S -125×250×9×14 +4L _S -90×90×10*		160.2	—
		2CT _S -125×250×9×14		92.18	—
	束材	2CT _S -175×350×12×19	SS400 (SS41)	173.9	—
		2CT _S -150×300×10×15		119.8	—
		2CT _S -125×250×9×14		92.18	—

注記*：補強工事で追加した部材

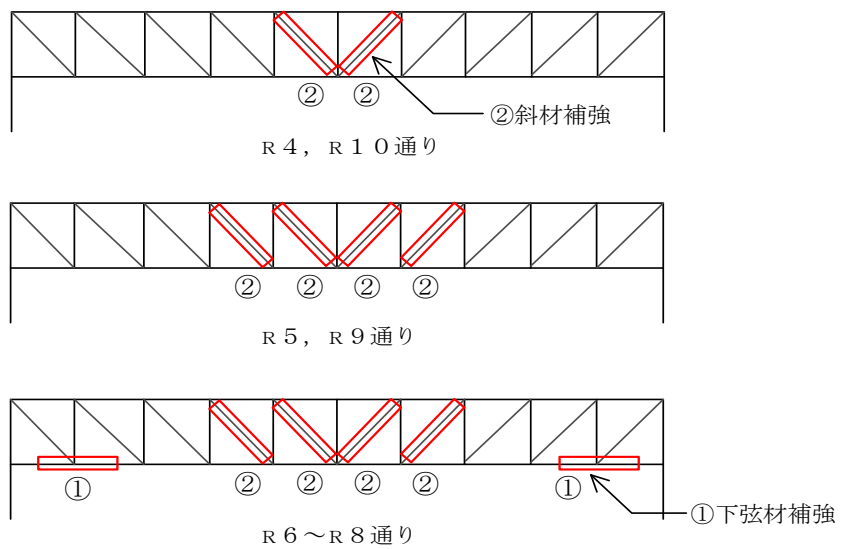


図 3-2 主トラス補強箇所

(3) 二次部材

もやは、支配幅を取り出し、等分布荷重を受ける単純ばり（両端ピン支持のほり）として応力を算定する。検討スパンは、接合部の現況を考慮した有効長さとして評価する。

つなぎばりは、支配幅を取り出し、中央集中荷重を受ける上弦材、下弦材及び斜材からなる単純支持トラス（両端ピン支持）として応力を算定する。検討スパンは、通り芯間距離として評価する。

サブビームは、主トラスで支持された支配幅を取り出し、中央集中荷重を受ける単純ばり（両端ピン支持のほり）として応力を算定する。なお、支持スパンの長い部位を対象に評価を行う。

部材リストを表 3-19 に、つなぎばり補強箇所を図 3-3 に示す。

表 3-19 部材リスト

部位		形状寸法	材質	断面積 ($\times 10^2 \text{mm}^2$)	断面二次 モーメント ($\times 10^4 \text{mm}^4$)
もや		H-294 \times 200 \times 8 \times 12	SS400 (SS41)	72.38	11300
		H-244 \times 175 \times 7 \times 11	SS400 (SS41)	56.24	6120
つなぎ ばり	上弦材	H-390 \times 300 \times 10 \times 16	SS400 (SS41)	136.0	38700
	下弦材	H-390 \times 300 \times 10 \times 16	SS400 (SS41)	136.0	38700
	斜材	2CT _s -125 \times 250 \times 9 \times 14 +4L _s -65 \times 65 \times 6*	SS400 (SS41)	122.3	—
		2CT _s -125 \times 250 \times 9 \times 14	SS400 (SS41)	92.18	—
サブビーム		H-400 \times 400 \times 13 \times 21	SS400 (SS41)	218.7	66600
		H-390 \times 300 \times 10 \times 16	SS400 (SS41)	136.0	38700

注記* : 補強工事で追加した部材

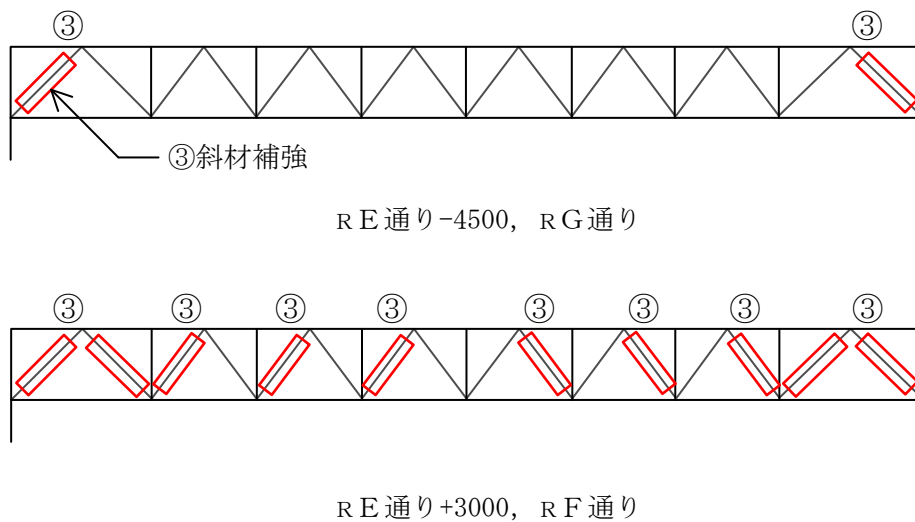
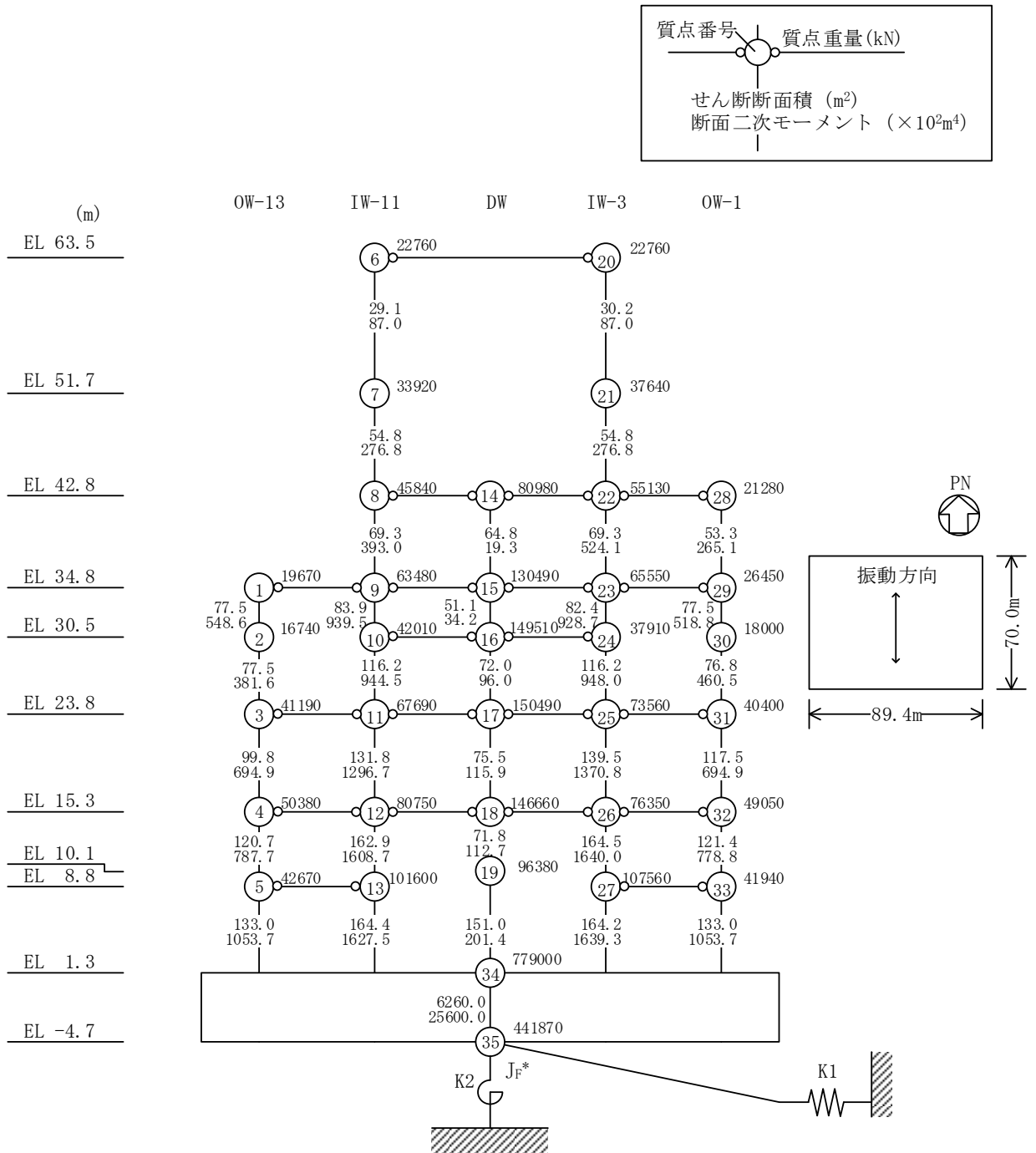


図 3-3 つなぎばり補強箇所

(4) 耐震壁

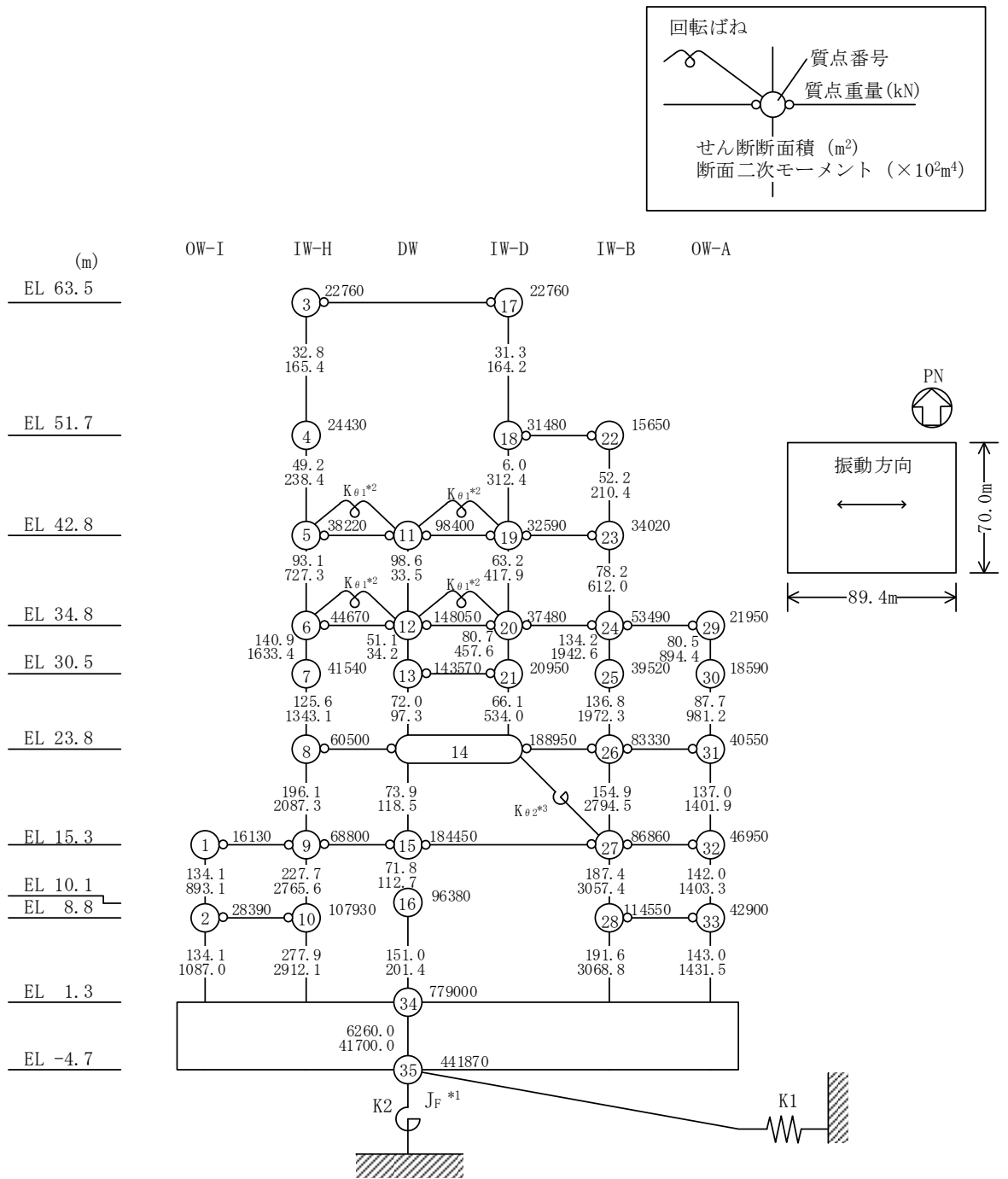
耐震壁は、VI-2-2-2「原子炉建物の地震応答計算書」に示す地震応答解析モデルを用いて評価する。解析に使用するコードは、「NUPP4」である。なお、解析コードの検証及び妥当性の確認の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。地震応答解析モデルを図3-4に示す。



注記* : 回転慣性重量(12.25×10⁸kN・m²)

(南北方向)

図 3-4 地震応答解析モデル (水平方向) (1/2)



注記*1：回転慣性重量 ($20.88 \times 10^8 \text{kN} \cdot \text{m}^2$)

*2：燃料プール壁の回転ばね ($2.195 \times 10^9 \text{kN} \cdot \text{m/rad}$)

*3：内部ボックス壁の軸抵抗を考慮した回転ばね ($135.2 \times 10^9 \text{kN} \cdot \text{m/rad}$)

(東西方向)

図 3-4 地震応答解析モデル (水平方向) (2/2)

3.4.2 解析諸元

使用材料の物性値を表 3-20 に示す。

表 3-20 使用材料の物性値

使用材料	ヤング係数 E (N/mm ²)	せん断弾性係数 G (N/mm ²)
鉄筋コンクリート	2.25×10^4	9.38×10^3
鉄骨	2.05×10^5	7.90×10^4

3.5 評価方法

3.5.1 屋根スラブの評価方法

(1) 応力解析方法

a. 荷重ケース

降下火砕物堆積時の応力は、単独荷重による応力を組み合わせて求める。
単独荷重の記号を以下に示す。

F_d : 常時作用する荷重

F_a : 降下火砕物による荷重

F_s : 積雪荷重

b. 荷重の組合せケース

荷重の組合せケースを表 3-21 に示す。

表 3-21 荷重の組合せケース

組合せケース	荷重の組合せ
ケース 2	$F_d + F_a + F_s$

c. 応力算出方法

等分布荷重を受ける両端固定ばり及び四辺固定版の曲げモーメント及びせん断力は下式により求める。

(両端固定ばり)

・ 端部曲げモーメント (M_E)

$$M_E = -\frac{1}{12} w \cdot l^2$$

・ 中央部曲げモーメント (M_C)

$$M_C = \frac{1}{24} w \cdot l^2$$

・ せん断力 (Q_E)

$$Q_E = \frac{1}{2} w \cdot l$$

ここで、

w : 等分布荷重 (N/m)

l : 有効スパン (m)

(四辺固定版)

- 短辺方向の端部曲げモーメント (M_{x1})

$$M_{x1} = -\frac{1}{12} w_x \cdot l_x^2$$

- 短辺方向の中央部曲げモーメント (M_{x2})

$$M_{x2} = \frac{1}{18} w_x \cdot l_x^2$$

- 長辺方向の端部曲げモーメント (M_{y1})

$$M_{y1} = -\frac{1}{24} w \cdot l_x^2$$

- 長辺方向の中央部曲げモーメント (M_{y2})

$$M_{y2} = \frac{1}{36} w \cdot l_x^2$$

- せん断力 (Q)

$$Q = \beta \cdot w \cdot l_x$$

ここで,

l_x : 短辺有効スパン (m)

l_y : 長辺有効スパン (m)

w : 単位面積あたりの荷重 (N/m²)

β : スラブの辺長比 (l_y/l_x) により定まる係数

$$w_x = \frac{l_y^4}{l_x^4 + l_y^4} w$$

(2) 断面の評価方法

断面の評価は以下の方法で行う。

屋根スラブについては、曲げモーメントによる鉄筋の引張り応力度及び面外せん断力を算定し、各許容限界を超えないことを確認する。

a. 曲げモーメントに対する断面の評価方法

断面の評価は、「RC-N規準」に基づき、次式をもとに計算した評価対象箇所が生じる曲げモーメントによる鉄筋の引張り応力度が、短期許容応力度を超えないことを確認する。

$$\sigma_t = \frac{M}{a_t \cdot j}$$

ここで,

σ_t : 鉄筋の引張り応力度 (N/mm²)

- M : 曲げモーメント (N・mm)
 a_t : 引張り鉄筋断面積 (mm²)
j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

b. 面外せん断力に対する断面の評価方法

断面の評価は、「RC-N規準」に基づき、評価対象箇所に生じる面外せん断力が、次式をもとに計算した許容面外せん断力を超えないことを確認する。

$$Q_A = b \cdot j \cdot \left\{ \alpha \cdot f_s + 0.5 \cdot {}_w f_t \cdot (p_w - 0.002) \right\}$$

ここで、

- Q_A : 許容面外せん断力 (N)
b : 断面の幅 (mm)
j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)
 α : 許容せん断力の割増し係数で、次式による。
(2 を超える場合は 2, 1 未満の場合は 1 とする。)

$$\alpha = \frac{4}{M / (Q \cdot d) + 1}$$

- M : 曲げモーメント (N・mm)
Q : せん断力 (N)
d : 断面の有効せい (mm)
 f_s : コンクリートの短期許容せん断応力度 (N/mm²)
 ${}_w f_t$: せん断補強筋の短期許容引張り応力度 (N/mm²)
 p_w : せん断補強筋比で、次式による。(0.002 以上とする。*)

$$p_w = \frac{a_w}{b \cdot x}$$

- a_w : せん断補強筋の断面積 (mm²)
x : せん断補強筋の間隔 (mm)

注記* : せん断補強筋がない領域については、第 2 項を 0 とする。

3.5.2 主トラスの評価方法

(1) 応力解析方法

主トラスについては，3次元フレームモデルを用いた弾性応力解析により得られた部材の応力を評価する。

a. 荷重ケース

降下火砕物堆積時の応力は，次の荷重を3次元フレームモデルに入力して求める。荷重の記号を以下に示す。

F_d : 常時作用する荷重

F_a : 降下火砕物による荷重

F_s : 積雪荷重

W : 風荷重

b. 荷重の組合せケース

荷重の組合せケースを表 3-22 に示す。

表 3-22 荷重の組合せケース

組合せケース	荷重の組合せ
ケース 1	$F_d + F_a + F_s + W$

c. 荷重の入力方法

固定荷重及び積雪荷重は，対応する部材及び節点に分布荷重及び集中荷重として入力する。

(2) 断面の評価方法

主トラスの評価は、3次元フレームモデルを用いた弾性応力解析により評価対象部位に生じる軸力及び曲げモーメントによる応力度が許容限界を超えないことを確認する。

なお、許容限界については、「S規準」に基づく短期許容応力度とする。ただし、斜材及び束材は軸応力度のみ評価する。

(圧縮)

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1.0$$

ただし、

$$\sigma_c = \frac{N_c}{A}$$

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

ここで、

σ_c : 圧縮応力度 (N/mm²) σ_b : 曲げ応力度 (N/mm²)

N_c : 圧縮軸力 (N) A : 軸断面積 (mm²)

M : 曲げモーメント (N・mm) Z : 断面係数 (mm³)

f_c : 圧縮応力に関する評価基準値 (N/mm²)

f_b : 曲げ応力に関する評価基準値 (N/mm²)

(引張り)

$$\frac{\sigma_t}{f_t} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1.0$$

ただし、

$$\sigma_t = \frac{N_t}{A}$$

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

ここで、

σ_t : 引張り応力度 (N/mm²) σ_b : 曲げ応力度 (N/mm²)

N_t : 引張り軸力 (N) A : 軸断面積 (mm²)

M : 曲げモーメント (N・mm) Z : 断面係数 (mm³)

f_t : 引張り応力に関する評価基準値 (N/mm²)

f_b : 曲げ応力に関する評価基準値 (N/mm²)

3.5.3 二次部材の評価方法

(1) 応力解析方法

a. 荷重ケース

降下火砕物堆積時の応力は、単独荷重による応力を組み合わせて求める。
単独荷重の記号を以下に示す。

F_d : 常時作用する荷重

F_a : 降下火砕物による荷重

F_s : 積雪荷重

b. 荷重の組合せケース

荷重の組合せケースを表 3-23 に示す。

表 3-23 荷重の組合せケース

組合せケース	荷重の組合せ
ケース 2	$F_d + F_a + F_s$

c. 応力算出方法

集中荷重（サブビーム）あるいは、分布荷重（もや）を受ける両端ピン支持
ばりの曲げモーメント及びせん断力は下式により求める。

つなぎばりについては、中央集中荷重を受ける上弦材、下弦材及び斜材から
なる単純支持トラス（両端ピン支持）として上弦材、下弦材及び斜材に生じる
軸力を求める。

1) 集中荷重（サブビーム）の場合

（中央曲げモーメント）

$$M = \frac{1}{4} P \cdot l$$

ここで、

P : 集中荷重 (N)

l : スパン (m)

（端部せん断力）

$$Q = \frac{1}{2} P$$

2) 分布荷重（もや）の場合

（中央曲げモーメント）

$$M = \frac{1}{8} w \cdot l^2$$

ここで、

w : 等分布荷重 (N/m)

l : スパン (m)

(端部せん断力)

$$Q = \frac{1}{2} w \cdot l$$

(2) 断面の評価方法

断面の評価は以下の方法で行う。

二次部材における曲げモーメント、せん断力及び軸力による応力度を算定し、各許容限界を超えないことを確認する。

a. 曲げモーメントに対する断面の評価方法

断面の評価は、「S 規準」に基づき、次式をもとに計算した評価対象箇所に生じる曲げモーメントによる応力度が、短期許容応力度を超えないことを確認する。

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

ここで、

σ_b : 曲げ応力度 (N/mm²)

M : 曲げモーメント (N・mm)

Z : 断面係数 (mm³)

b. せん断力に対する断面の評価方法

断面の評価は、「S 規準」に基づき、次式をもとに計算した評価対象箇所に生じるせん断応力度が、短期許容応力度を超えないことを確認する。

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

ここで、

τ : せん断応力度 (N/mm²)

Q : せん断力 (N)

A_s : せん断断面積 (mm²)

c. 軸力に対する断面の評価方法

断面の評価は、「S規準」に基づき、次式をもとに計算した評価対象箇所に生じる圧縮応力度又は引張り応力度が、短期許容応力度を超えないことを確認する。

(圧縮)

$$\sigma_c = \frac{N_c}{A}$$

ここで、

σ_c : 圧縮応力度 (N/mm²)

N_c : 圧縮軸力 (N)

A : 軸断面積 (mm²)

(引張り)

$$\sigma_t = \frac{N_t}{A}$$

ここで、

σ_t : 引張り応力度 (N/mm²)

N_t : 引張り軸力 (N)

A : 軸断面積 (mm²)

3.5.4 耐震壁の評価方法

耐震壁の評価は、風荷重による耐震壁に発生するせん断ひずみが許容限界を超えないことを確認する。なお、耐震壁の応力計算には、地震応答解析モデルを用い、耐震壁の復元力特性の設定においては、鉛直荷重の増加による軸力を考慮すると第1折れ点の増大が見込まれるため、本評価では保守的に降下火砕物等堆積による鉛直荷重は考慮しない。

4. 強度評価結果

4.1 屋根スラブの評価結果

屋根スラブの評価対象箇所は、EL 15.3m（一部 EL 15.15m）、EL 34.8m、EL 38.5m、EL 42.8m、EL 45.8m、EL 51.7m 及び EL 63.5m のそれぞれについて、各断面の検定値が最も大きい箇所とし、図 4-1～図 4-6 に示す。また、評価結果を表 4-1～表 4-9 に示す。

降下火砕物堆積による鉛直荷重等によって発生する曲げモーメントに対する鉄筋の引張り応力度が許容限界を超えないこと及び発生する面外せん断力が許容限界を超えないことを確認した。

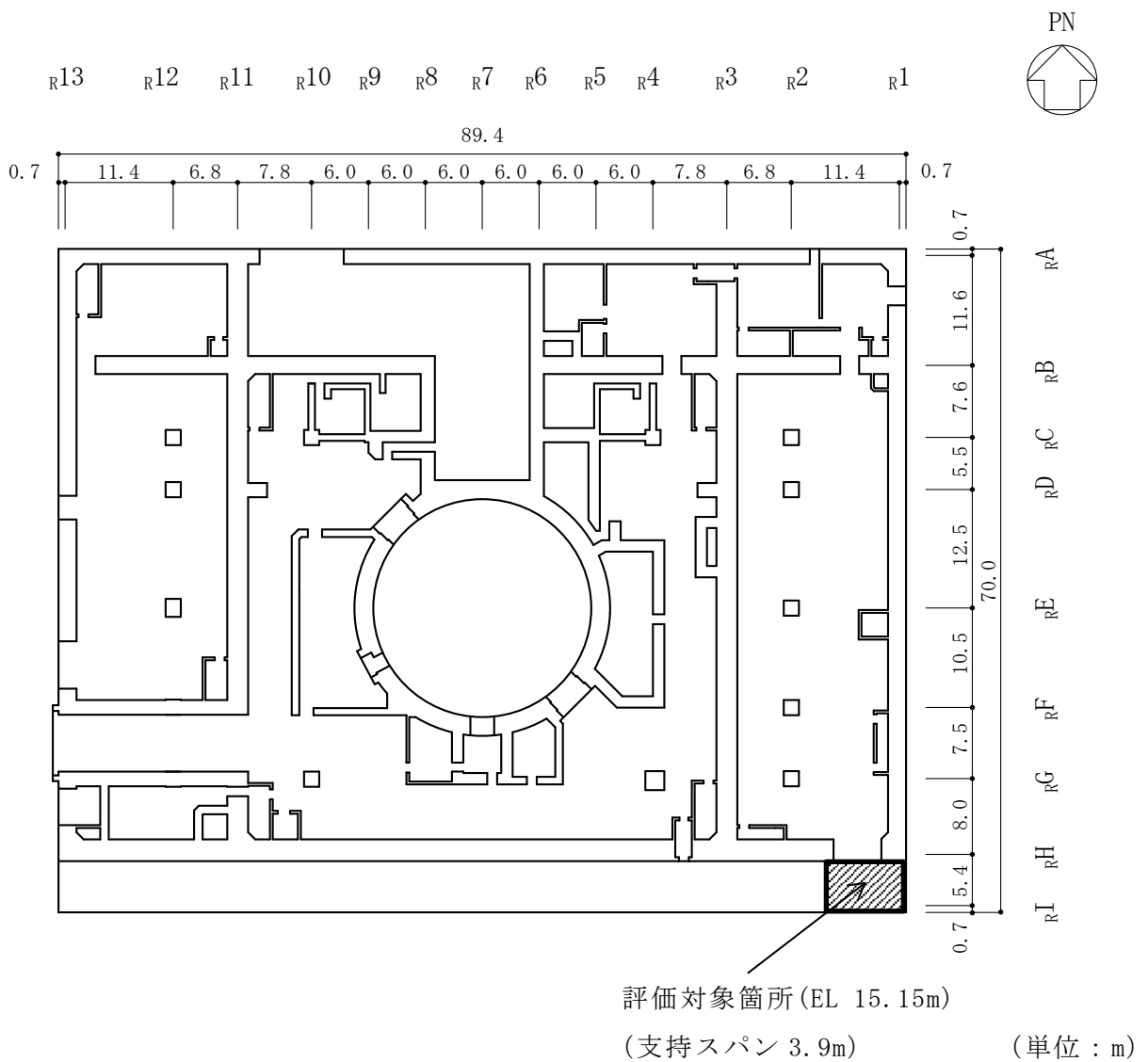
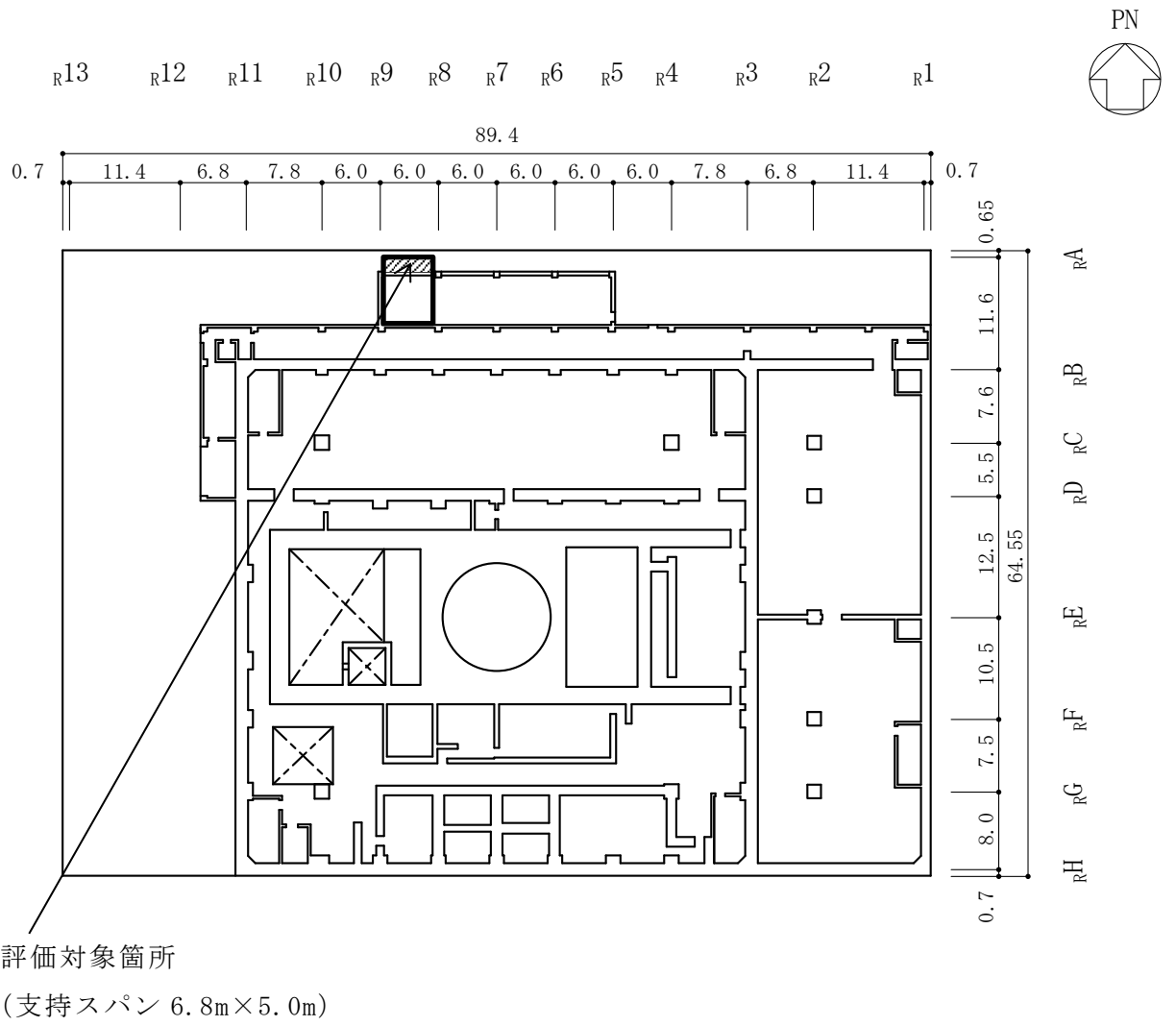
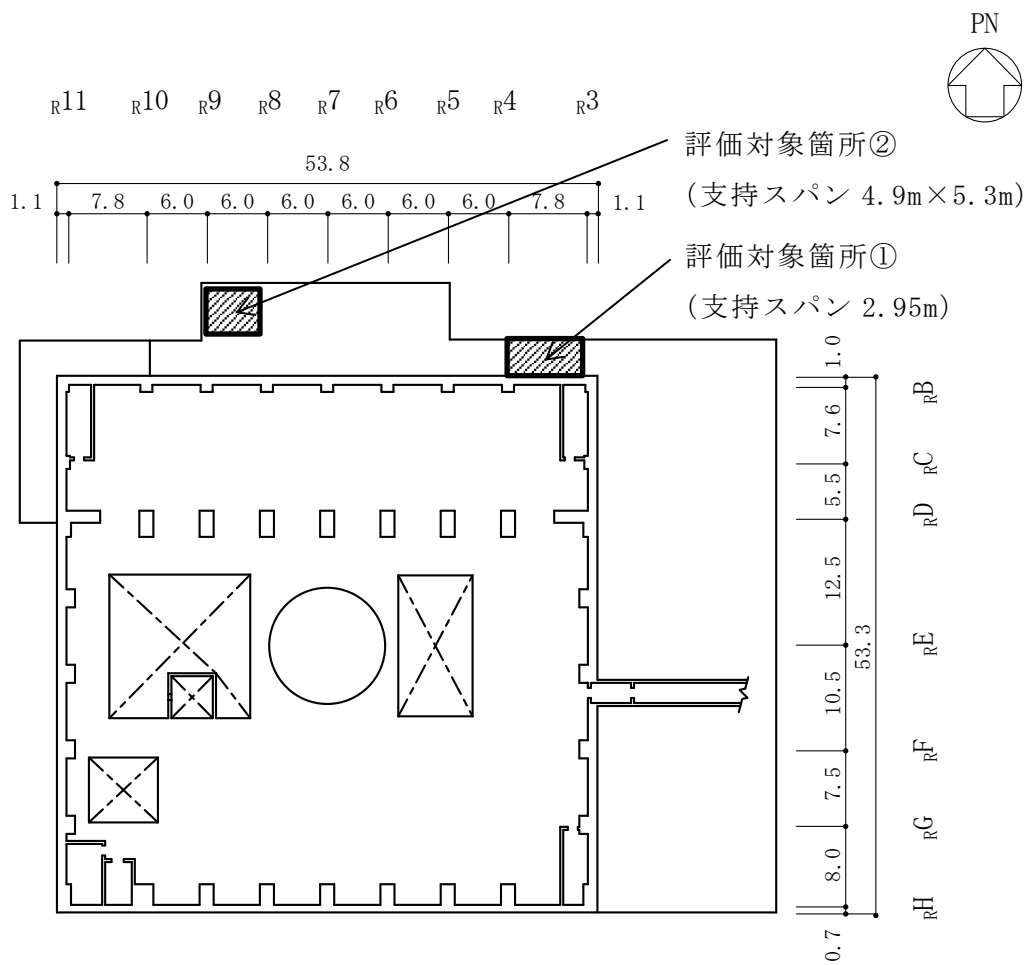


図 4-1 評価対象箇所（屋根スラブ，EL 15.3m（一部 EL 15.15m））



(単位 : m)

図 4-2 評価対象箇所 (屋根スラブ, EL 34.8m)



(単位：m)

図 4-3 評価対象箇所 (屋根スラブ, EL 38.5m)

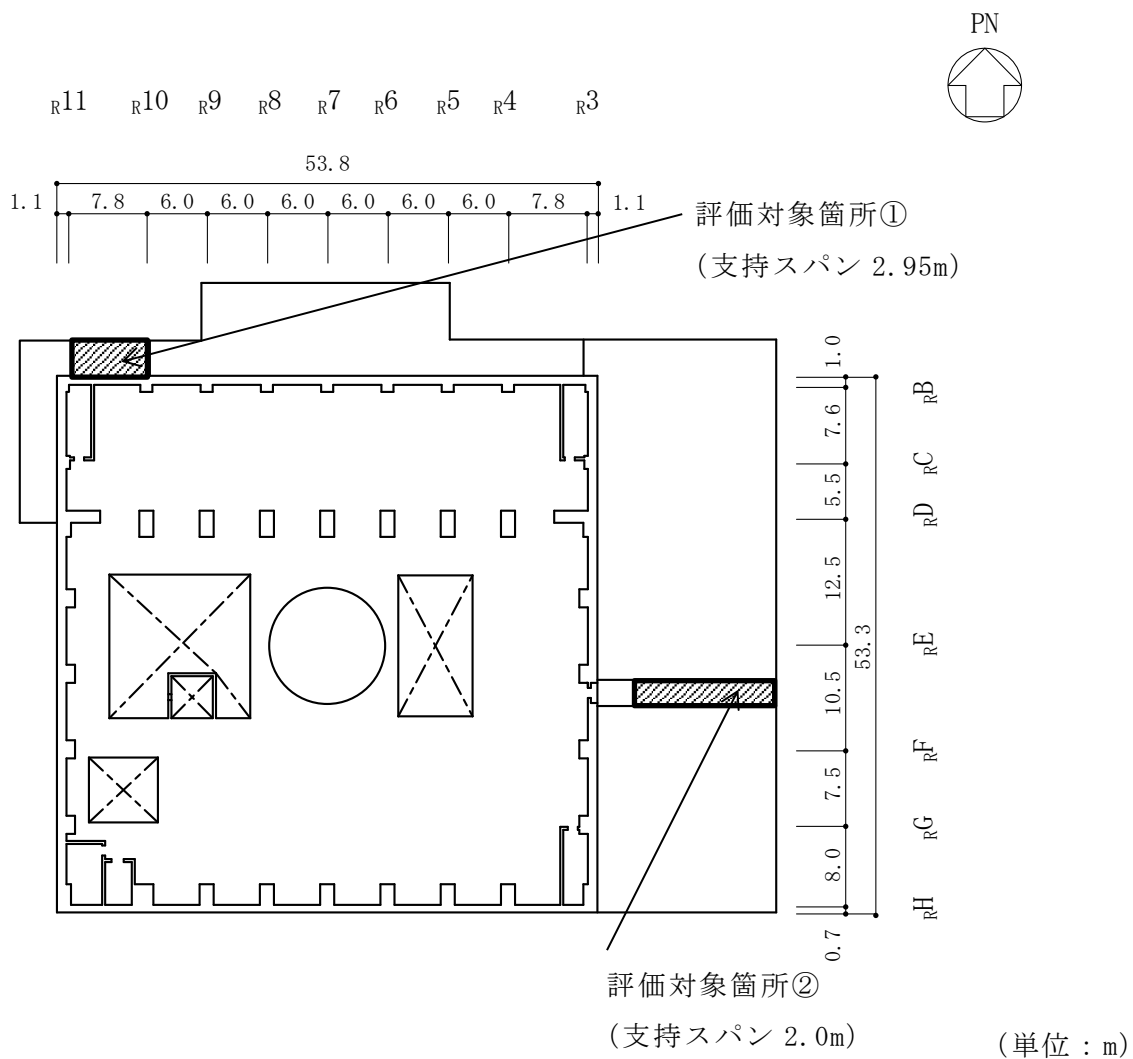


図 4-4 評価対象箇所 (屋根スラブ, EL 42.8m, EL 45.8m)

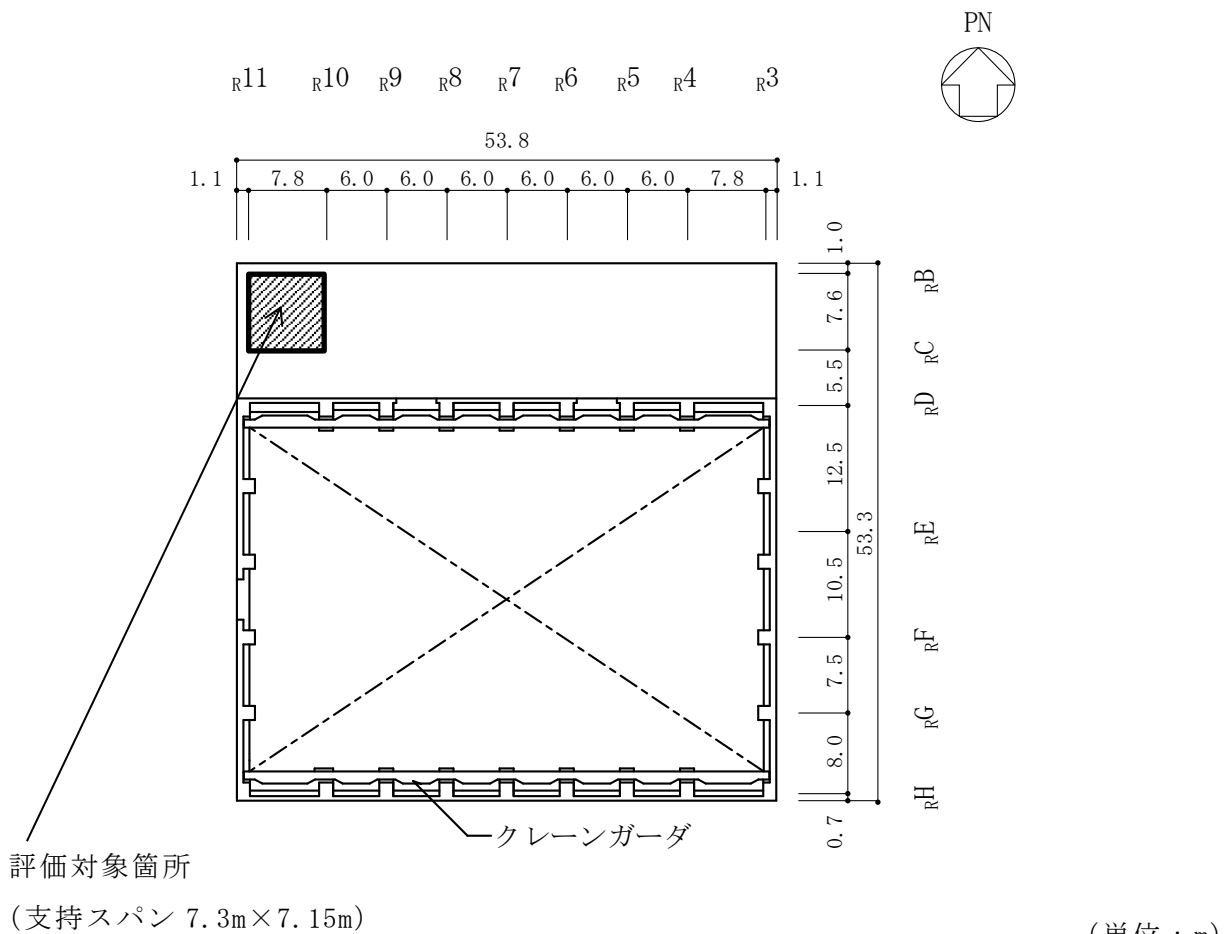
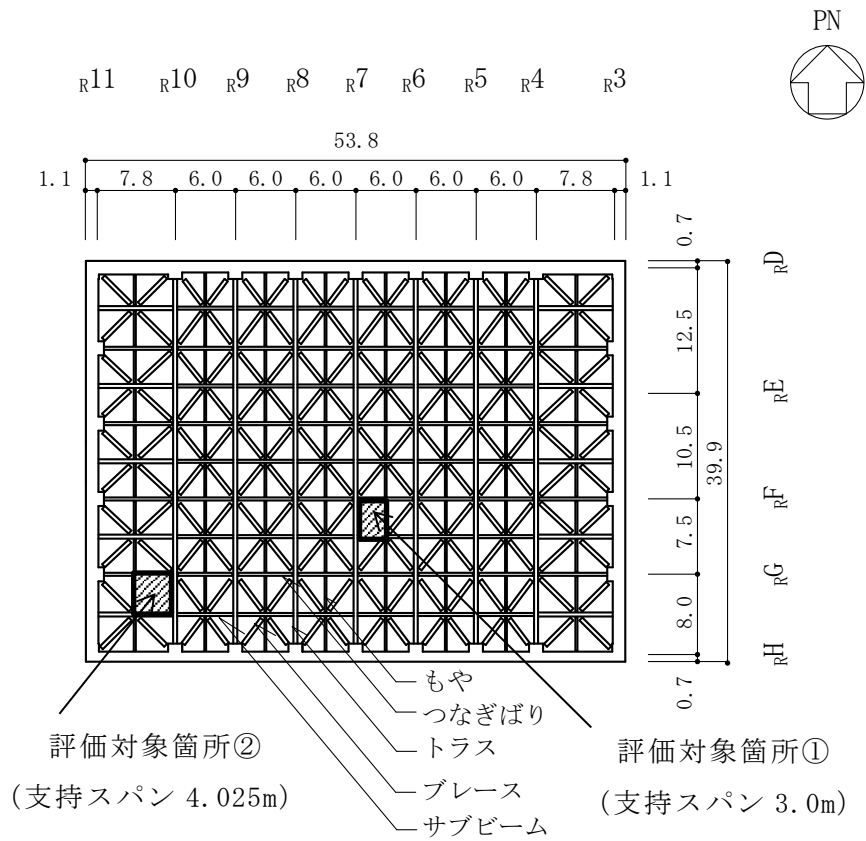


図 4-5 評価対象箇所（屋根スラブ，EL 51.7m）



(単位 : m)

図 4-6 評価対象箇所 (屋根スラブ, EL 63.5m)

表 4-1 屋根スラブの評価結果 (EL 15.3m (一部 EL 15.15m))

EL (m)		15.15
厚さ t (mm)		<input type="text"/>
有効せい d (mm)		<input type="text"/>
配筋 (鉄筋断面積)		D25@200 (2535mm ² /m)
曲 げ モー メント	発生曲げモーメント M (kN・m/m)	32.6
	鉄筋の引張り応力度 σ_t (N/mm ²)	40.9
	許容限界 (N/mm ²)	345
	検定値	0.12
面 外 せん 断 力	発生せん断力 Q (kN/m)	50.2
	せん断応力度 (N/mm ²)	0.16
	許容限界 (N/mm ²)	1.08
	検定値	0.15

表 4-2 屋根スラブの評価結果(EL 34.8m)

EL (m)		34.8
厚さ t (mm)		<input type="text"/>
有効せい d (mm)		<input type="text"/>
配筋 (鉄筋断面積)		D29@200 (3210mm ² /m)
曲 げ モー メント	発生曲げモーメント M (kN・m/m)	194.5
	鉄筋の引張り応力度 σ_t (N/mm ²)	93.6
	許容限界 (N/mm ²)	345
	検定値	0.28
面 外 せん 断 力	発生せん断力 Q (kN/m)	190.9
	せん断応力度 (N/mm ²)	0.30
	許容限界 (N/mm ²)	1.08
	検定値	0.28

表 4-3 屋根スラブの評価結果 (EL 38.5m) (評価対象箇所①)

EL (m)		38.5
厚さ t (mm)		<input type="text"/>
有効せい d (mm)		<input type="text"/>
配筋 (鉄筋断面積)		D19@200 (1435mm ² /m)
曲 げ モー メント	発生曲げモーメント M (kN・m/m)	19.6
	鉄筋の引張り応力度 σ_t (N/mm ²)	74.4
	許容限界 (N/mm ²)	345
	検定値	0.22
面 外 せん 断 力	発生せん断力 Q (kN/m)	39.7
	せん断応力度 (N/mm ²)	0.22
	許容限界 (N/mm ²)	1.08
	検定値	0.21

表 4-4 屋根スラブの評価結果 (EL 38.5m) (評価対象箇所②)

EL (m)		38.5
厚さ t (mm)		<input type="text"/>
有効せい d (mm)		<input type="text"/>
配筋 (鉄筋断面積)		D25@200 (2535mm ² /m)
曲 げ モー メント	発生曲げモーメント M (kN・m/m)	33.8
	鉄筋の引張り応力度 σ_t (N/mm ²)	49.2
	許容限界 (N/mm ²)	345
	検定値	0.15
面 外 せん 断 力	発生せん断力 Q (kN/m)	66.0
	せん断応力度 (N/mm ²)	0.25
	許容限界 (N/mm ²)	1.08
	検定値	0.24

表 4-5 屋根スラブの評価結果 (EL 42.8m) (評価対象箇所①)

EL (m)		42.8
厚さ t (mm)		<input type="text"/>
有効せい d (mm)		<input type="text"/>
配筋 (鉄筋断面積)		D19@200 (1435mm ² /m)
曲 げ モー メント	発生曲げモーメント M (kN・m/m)	16.1
	鉄筋の引張り応力度 σ_t (N/mm ²)	61.1
	許容限界 (N/mm ²)	345
	検定値	0.18
面 外 せん 断 力	発生せん断力 Q (kN/m)	32.7
	せん断応力度 (N/mm ²)	0.18
	許容限界 (N/mm ²)	1.08
	検定値	0.17

表 4-6 屋根スラブの評価結果 (EL 45.8m) (評価対象箇所②)

EL (m)		45.8
厚さ t (mm)		<input type="text"/>
有効せい d (mm)		<input type="text"/>
配筋 (鉄筋断面積)		D13@200 (635mm ² /m)
曲 げ モー メント	発生曲げモーメント M (kN・m/m)	8.1
	鉄筋の引張り応力度 σ_t (N/mm ²)	69.5
	許容限界 (N/mm ²)	345
	検定値	0.21
面 外 せん 断 力	発生せん断力 Q (kN/m)	24.3
	せん断応力度 (N/mm ²)	0.14
	許容限界 (N/mm ²)	1.08
	検定値	0.13

表 4-7 屋根スラブの評価結果(EL 51.7m)

EL (m)		51.7
厚さ t (mm)		<input type="text"/>
有効せい d (mm)		<input type="text"/>
配筋 (鉄筋断面積)		D29@200 (3210mm ² /m)
曲 げ モー メント	発生曲げモーメント M (kN・m/m)	62.3
	鉄筋の引張り応力度 σ_t (N/mm ²)	43.5
	許容限界 (N/mm ²)	345
	検定値	0.13
面 外 せん 断 力	発生せん断力 Q (kN/m)	94.1
	せん断応力度 (N/mm ²)	0.22
	許容限界 (N/mm ²)	1.08
	検定値	0.21

表 4-8 屋根スラブの評価結果 (EL 63.5m) (評価対象箇所①)

EL (m)		63.5
厚さ t (mm)		<input type="text"/>
有効せい d (mm)		<input type="text"/>
配筋 (鉄筋断面積)		D13@200 (635mm ² /m)
曲 げ モー メント	発生曲げモーメント M (kN・m/m)	12.1
	鉄筋の引張り応力度 σ_t (N/mm ²)	181.5
	許容限界 (N/mm ²)	345
	検定値	0.53
面 外 せん 断 力	発生せん断力 Q (kN/m)	24.2
	せん断応力度 (N/mm ²)	0.24
	許容限界 (N/mm ²)	1.08
	検定値	0.23

表 4-9 屋根スラブの評価結果 (EL 63.5m) (評価対象箇所②)

EL (m)		63.5
厚さ t (mm)		<input type="text"/>
有効せい d (mm)		<input type="text"/>
配筋 (鉄筋断面積)		D13@100 (1270mm ² /m)
曲 げ モー メント	発生曲げモーメント M (kN・m/m)	21.7
	鉄筋の引張り応力度 σ_t (N/mm ²)	162.8
	許容限界 (N/mm ²)	345
	検定値	0.48
面 外 せん 断 力	発生せん断力 Q (kN/m)	32.4
	せん断応力度 (N/mm ²)	0.31
	許容限界 (N/mm ²)	1.08
	検定値	0.29

4.2 主トラスの評価結果

「3.5 評価方法」に基づいた評価結果を表 4-10 に示す。また、評価対象部位において複数の部材がある場合は、検定値が最大となる部材の値を示す。評価位置を図 4-7 に示す。

降下火砕物堆積による鉛直荷重等によって、評価対象部位に生じる軸力及び曲げモーメントによる応力度が許容限界を超えないことを確認した。

表 4-10 主トラスの短期許容応力度に基づく評価結果 (EL 63.5m)

評価対象部位	No.	発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容限界 (N/mm ²)	検定値
上弦材	1	圧縮	49.09	325	0.37
		曲げ	71.03	325	
下弦材	2	圧縮	85.56	217	0.60
		曲げ	61.17	304	
束材	3	圧縮	102.71	176	0.59
斜材	4	引張り	169.66	235	0.73

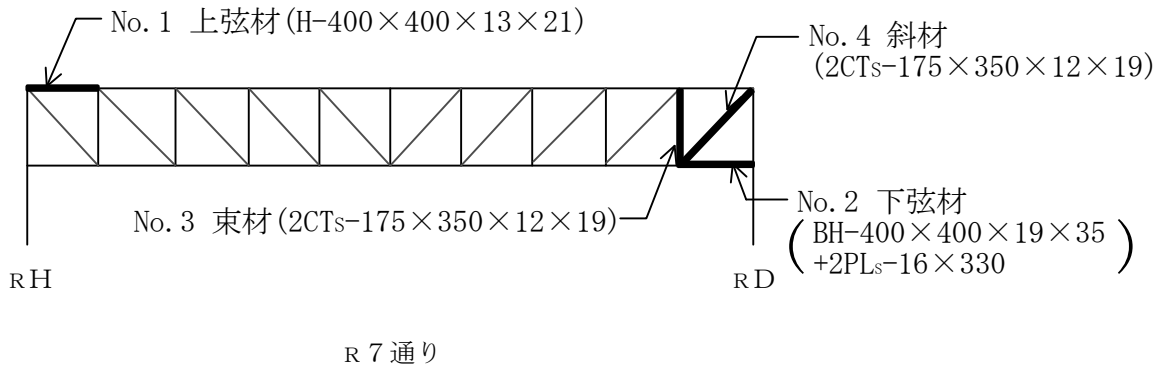
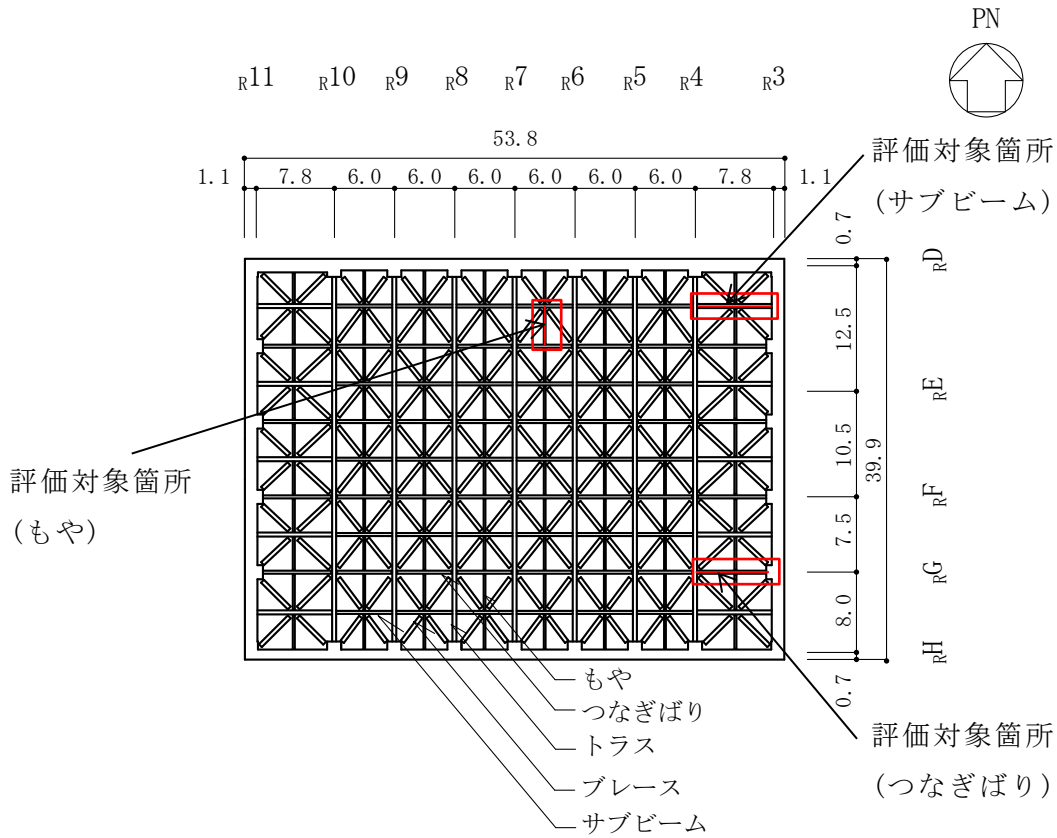


図 4-7 部材評価位置

4.3 二次部材の評価結果

「3.5 評価方法」に基づいた評価結果を表 4-11 に示す。二次部材の評価対象箇所は、各断面の検定値が最も大きい箇所とし、図 4-8 に示す。

降下火砕物堆積による鉛直荷重等によって、評価対象部位に生じる軸力、曲げモーメント及びせん断による応力度が許容限界を超えないことを確認した。



(単位 : m)

図 4-8 評価対象箇所 (二次部材, EL 63.5m)

表 4-11 二次部材の短期許容応力度に基づく評価結果(EL 63.5m)

評価対象部位		発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容限界 (N/mm ²)	検定値
もや		曲げ	122.7	181	0.68
		せん断	49.9	135	0.37
つなぎばり	上弦材	圧縮	21.7	226	0.10
	下弦材	引張り	46.3	235	0.20
	斜材	圧縮	45.0	79	0.57
		引張り	53.3	235	0.23
サブビーム		曲げ	173.7	220	0.79
		せん断	30.9	135	0.23

4.4 耐震壁の評価結果

「3.5 評価方法」に基づいた評価結果を表 4-12 に示す。なお、各方向において最大せん断ひずみが生じる部材のみを示す。

水平荷重等によって、評価対象部位に生じるせん断ひずみが許容限界を超えないことを確認した。

表 4-12 耐震壁の評価結果

検討ケース	評価項目	方向	高さ(EL) (m)	せん断ひずみ ($\times 10^{-3}$)	許容限界 ($\times 10^{-3}$)
ケース 1	せん断 ひずみ	南北方向	51.7~42.8 (IW-3)	0.00190	2.0
		東西方向	51.7~42.8 (IW-B)	0.00159	2.0

VI-3-別添 2-5 タービン建物の強度計算書

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
2.1 位置	1
2.2 構造概要	2
2.3 評価方針	4
2.4 適用規格・基準等	6
3. 強度評価方法及び評価条件	7
3.1 評価対象部位	7
3.2 荷重及び荷重の組合せ	7
3.2.1 荷重	7
3.2.2 荷重の組合せ	11
3.3 許容限界	12
3.4 解析モデル及び諸元	15
3.4.1 モデル化の基本方針	15
3.4.2 解析諸元	25
3.5 評価方法	26
3.5.1 屋根スラブの評価方法	26
3.5.2 主トラスの評価方法	29
3.5.3 二次部材の評価方法	31
3.5.4 耐震壁の評価方法	34
4. 強度評価結果	35
4.1 屋根スラブの評価結果	35
4.2 主トラスの評価結果	43
4.3 二次部材の評価結果	44
4.4 耐震壁の評価結果	46

1. 概要

本資料は、VI-3-別添 2-1-4「タービン建物の強度計算の方針」に示すとおり、タービン建物が降下火砕物及び積雪の堆積時においても、内包する防護すべき施設に降下火砕物を堆積させない機能の維持を考慮して、建物全体及び建物の主要な構造部材が構造健全性を維持することを確認するものである。

2. 基本方針

タービン建物は、VI-3-別添 2-1-4「タービン建物の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、本資料では、「2.1 位置」、「2.2 構造概要」、「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格・基準等」を示す。

2.1 位置

タービン建物は、VI-3-別添 2-1-4「タービン建物の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す位置に設置する。タービン建物の配置を図 2-1 に示す。

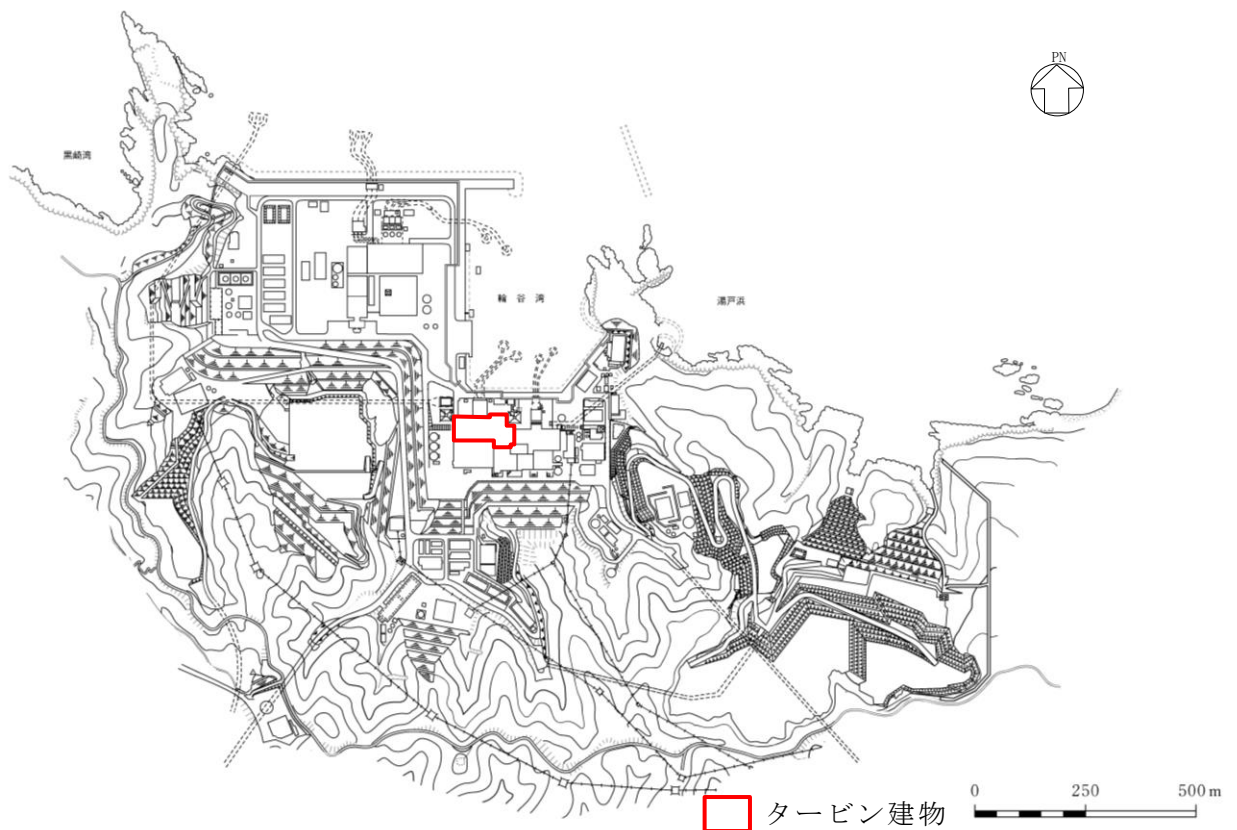


図 2-1 タービン建物の配置図

2.2 構造概要

タービン建物は、VI-3-別添 2-1-4「タービン建物の強度計算の方針」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。

タービン建物は、主体構造が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）で地上3階（一部4階）、地下1階の建物である。建物の平面は138.0m（東西方向）×72.0m（一部51.4m）（南北方向）となっている。屋根スラブを支える屋根トラスの平面形状は116.75m（東西方向）×37.4m（南北方向）の長方形であり、4階面(EL 32.0m)からの高さは9.6mである。

タービン建物の屋根面の概略平面図を図2-2に、概略断面図を図2-3に示す。

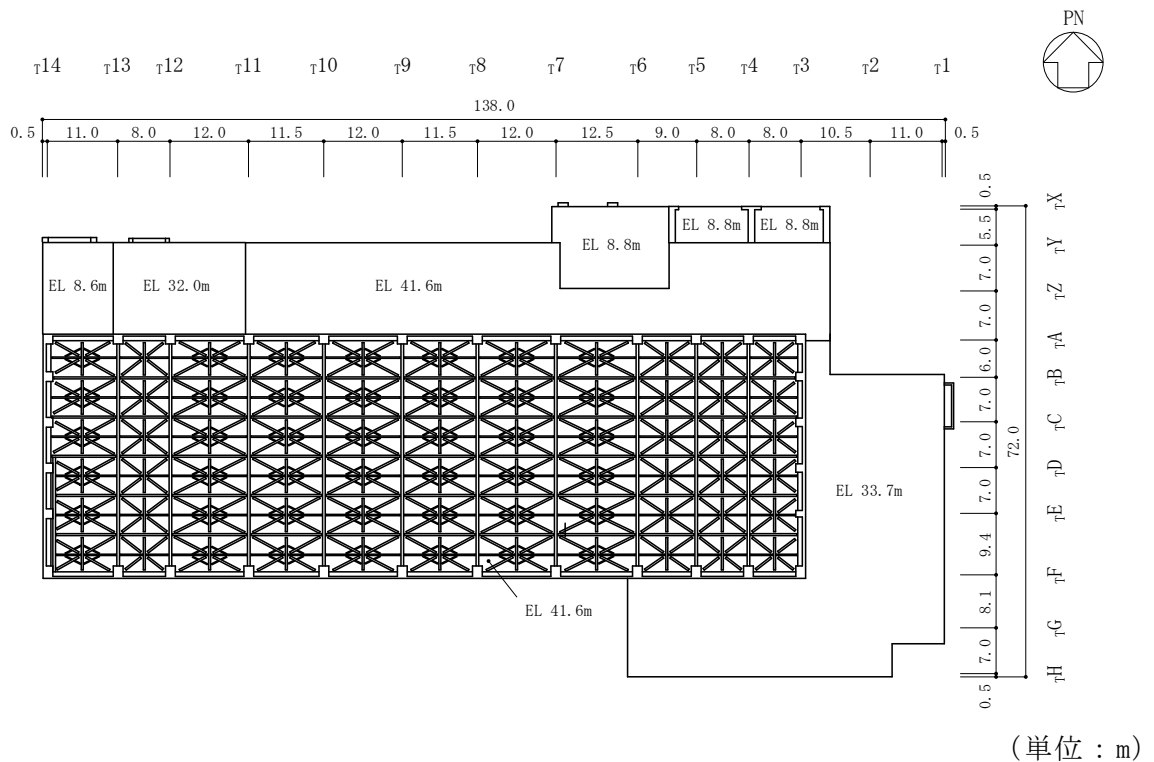
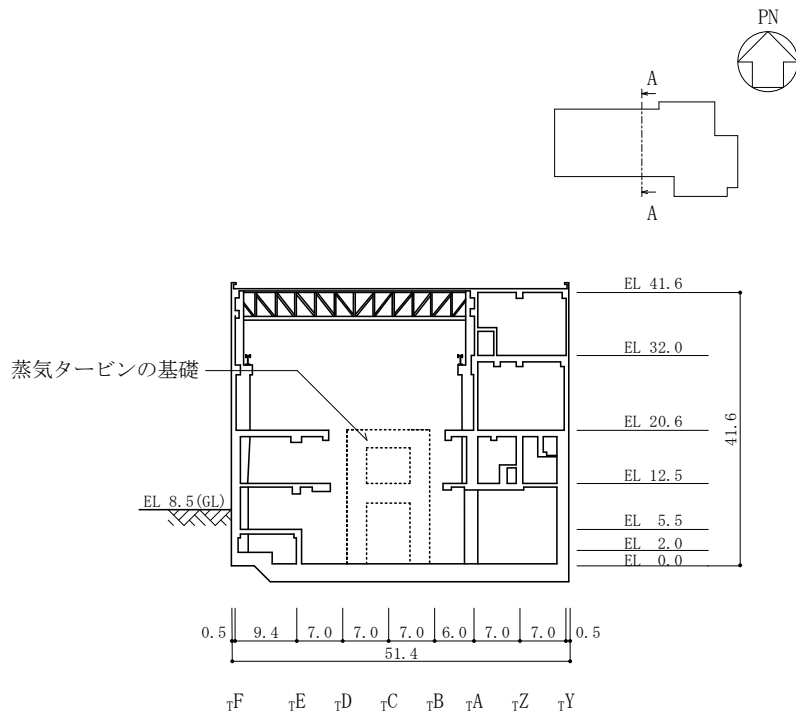


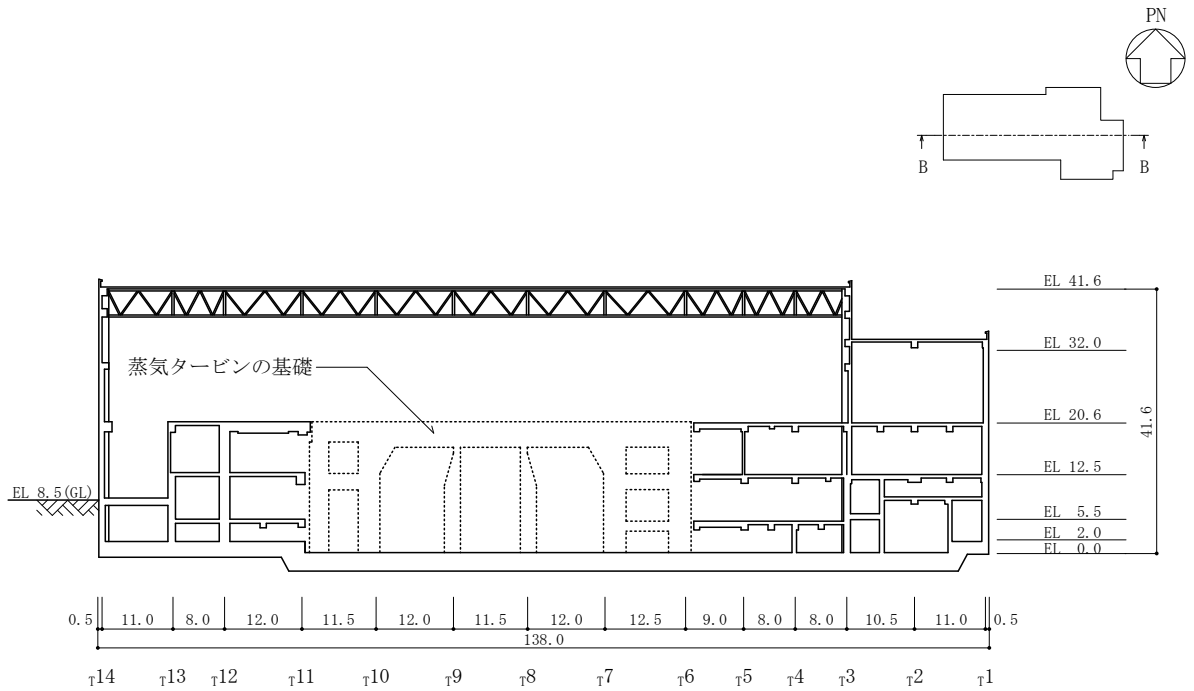
図2-2 タービン建物の概略平面図

注：「EL」は東京湾平均海面(T.P.)を基準としたレベルを示す。



(単位 : m)

図 2-3 タービン建物の概略断面図 (A-A 断面, 南北方向) (1/2)



(単位 : m)

図 2-3 タービン建物の概略断面図 (B-B 断面, 東西方向) (2/2)

2.3 評価方針

タービン建物の強度評価は、VI-3-別添 2-1-4「タービン建物の強度計算の方針」のうち「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、荷重の組合せ及び許容限界を踏まえて、建物の評価対象部位に発生する応力等が許容限界に収まることを「3. 強度評価方法及び評価条件」に示す方法及び評価条件を用いて計算し、「4. 強度評価結果」にて確認する。強度評価フローを図 2-4 に示す。

タービン建物の強度評価においては、その構造を踏まえて降下火砕物堆積による鉛直荷重及び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。

降下火砕物堆積による鉛直荷重及び設計荷重に対しては、鉛直荷重に抵抗する評価対象部位として屋根スラブ、主トラス及び二次部材を、水平荷重に抵抗する評価対象部位として耐震壁を選定した。

設計荷重は、VI-3-別添 2-1-4「タービン建物の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に従い設定する。

屋根及び耐震壁に作用する荷重は、VI-3-別添 2-1-4「タービン建物の強度計算の方針」のうち「5. 強度評価条件及び強度評価方法」に従い、タービン建物の応力解析モデル及び質点系モデルを用いて評価する。

許容限界は、VI-3-別添 2-1-4「タービン建物の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に従い設定する。

なお、屋根トラスについては、補強工事を実施しているため、補強内容を反映した評価を実施する。

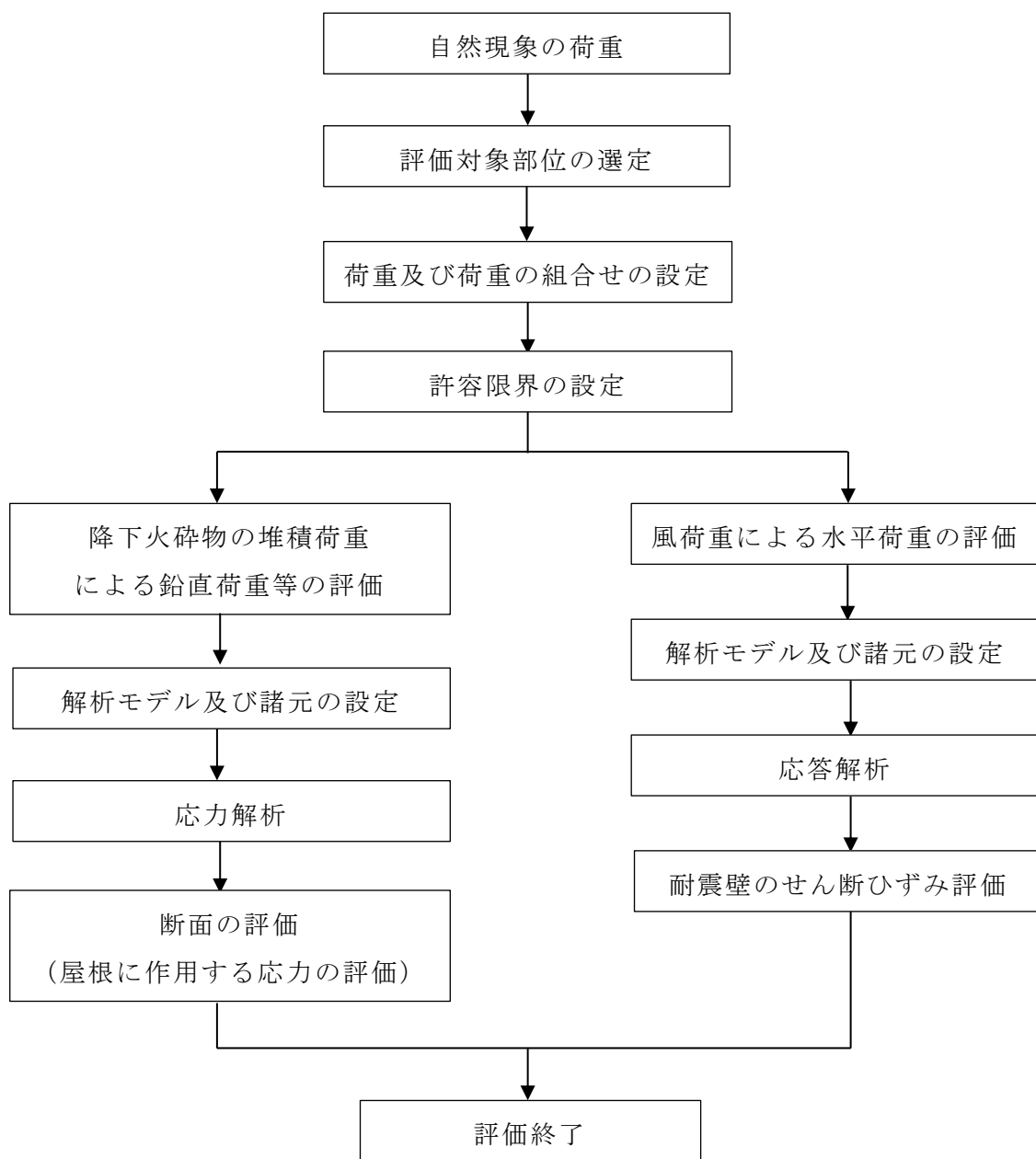


図 2-4 強度評価フロー

2.4 適用規格・基準等

タービン建物の強度評価に用いる規格・基準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法・同施行令
- ・ 松江市建築基準法施行細則（平成 17 年 3 月 31 日松江市規則第 234 号）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987（（社）日本電気協会）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版（（社）日本電気協会）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984（（社）日本電気協会）
- ・ 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説-許容応力度設計法-（（社）日本建築学会，1999 改定）
- ・ 原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005 制定）
- ・ 鋼構造設計規準-許容応力度設計法-（（社）日本建築学会，2005 改定）

3. 強度評価方法及び評価条件

3.1 評価対象部位

タービン建物の評価対象部位は、VI-3-別添 2-1-4「タービン建物の強度計算の方針」のうち「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、屋根スラブ、主トラス、二次部材及び耐震壁とする。

3.2 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 2-1-4「タービン建物の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

3.2.1 荷重

(1) 屋根スラブ

a. 鉛直荷重

表 3-1～表 3-5 に鉛直荷重の一覧を示す。屋根スラブに考慮する鉛直荷重は、常時作用する荷重 (F_d)、降下火砕物による荷重 (F_a) 及び積雪荷重 (F_s) を考慮する。常時作用する荷重は、固定荷重 (G) 及び積載荷重 (P) とする。降下火砕物による荷重は、湿潤密度 1.5g/cm^3 の降下火砕物が 56cm 堆積した場合の荷重として考慮する。積雪荷重は、発電所敷地に最も近い気象官署である松江地方気象台で観測された観測史上 1 位の月最深積雪 100cm に平均的な積雪荷重を与えるための係数 0.35 を考慮し 35.0cm とし、積雪量 1cm ごとに 20N/m^2 の積雪荷重が作用することを考慮し設定する。なお、水平方向の風荷重が作用した場合、屋根に対し鉛直上向きの荷重が働き下向き荷重は低減されるため、鉛直荷重に抵抗する部位の評価においては、保守的に水平方向の風荷重は考慮しない。

表 3-1 鉛直荷重一覧 (屋根スラブ EL 8.6m, スラブ厚さ $t=$)

常時作用する荷重 (F_d)	固定荷重 (G)	35.501kN/m^2
	積載荷重 (P)	9.807kN/m^2
降下火砕物による荷重 (F_a)		8.238kN/m^2
積雪荷重 (F_s)		0.7kN/m^2

表 3-2 鉛直荷重一覧 (屋根スラブ EL 8.8m, スラブ厚さ $t = \square$)

常時作用する荷重 (F_d)	固定荷重 (G)	$t = \square$	27.498~ 63.587kN/m ²
		$t = \square$	30.636~ 33.578kN/m ²
	積載荷重 (P)	9.807kN/m ²	
降下火砕物による荷重 (F_a)		8.238kN/m ²	
積雪荷重 (F_s)		0.7kN/m ²	

表 3-3 鉛直荷重一覧 (屋根スラブ EL 32.0m, スラブ厚さ $t = \square$)

常時作用する荷重 (F_d)	固定荷重 (G)	$t = \square$	12.259kN/m ²
		$t = \square$	26.773~ 27.753kN/m ²
	積載荷重 (P)	0.981kN/m ²	
降下火砕物による荷重 (F_a)		8.238kN/m ²	
積雪荷重 (F_s)		0.7kN/m ²	

表 3-4 鉛直荷重一覧 (屋根スラブ EL 33.7m, スラブ厚さ $t = \square$)

常時作用する荷重 (F_d)	固定荷重 (G)	$t = \square$	10.297~ 12.357kN/m ²
		$t = \square$	22.065kN/m ²
	積載荷重 (P)	0.981kN/m ²	
降下火砕物による荷重 (F_a)		8.238kN/m ²	
積雪荷重 (F_s)		0.7kN/m ²	

表 3-5 鉛直荷重一覧 (屋根スラブ EL 41.6m, スラブ厚さ $t = \square$)

常時作用する荷重 (F_d)	固定荷重 (G)	$t = \square$	8.238kN/m ²
		$t = \square$	12.357~ 14.318kN/m ²
	積載荷重 (P)	0.981kN/m ²	
降下火砕物による荷重 (F_a)		8.238kN/m ²	
積雪荷重 (F_s)		0.7kN/m ²	

(2) 主トラス及び二次部材

a. 鉛直荷重

表 3-6 及び表 3-7 に鉛直荷重の一覧を示す。主トラス及び二次部材に考慮する鉛直荷重は、常時作用する荷重 (F_d)、降下火砕物による荷重 (F_a) 及び積雪荷重 (F_s) を考慮する。常時作用する荷重は、固定荷重 (G) 及び積載荷重 (P) とする。

降下火砕物による荷重は、湿潤密度 1.5g/cm^3 の降下火砕物が 56cm 堆積した場合の荷重として考慮する。積雪荷重は、発電所敷地に最も近い気象官署である松江地方気象台で観測された観測史上 1 位の月最深積雪 100cm に平均的な積雪荷重を与えるための係数 0.35 を考慮し 35.0cm とし、積雪量 1cm ごとに 20N/m^2 の積雪荷重が作用することを考慮し設定する。

表 3-6 鉛直荷重一覧 (主トラス)

常時作用する荷重 (F_d)	固定荷重 (G)	屋根スラブ	5.590kN/m^2
		トラス鋼材	2.648kN/m^2
		クレーン荷重	2001kN
	積載荷重 (P)		0.981kN/m^2
降下火砕物による荷重 (F_a)			8.238kN/m^2
積雪荷重 (F_s)			0.7kN/m^2

表 3-7 鉛直荷重一覧 (二次部材)

常時作用する荷重 (F_d)	固定荷重 (G)	サブビーム	7.169kN/m^2
		もや	5.698kN/m^2
		つなぎばり	7.169kN/m^2
	積載荷重 (P)		0.981kN/m^2
降下火砕物による荷重 (F_a)			8.238kN/m^2
積雪荷重 (F_s)			0.7kN/m^2

b. 水平荷重

風荷重の算出に用いる基準風速は、30m/s とする。

風荷重(W)は、VI-3-別添 2-1-4「タービン建物の強度計算の方針」の「4.1(3)c. 水平荷重」に示す式に従い算出する。全高Hが5mを超えるため、HがZ_bを超える場合の式を用いる。風荷重(W)の算出は、建物の形状を考慮して算出した風力係数C及び風の受圧面積A₁に基づき実施し、風荷重(W)の算出に用いる受圧面積の算定において、隣接する建物の遮断効果は、安全側の評価となるよう考慮しない。

$$W = q \cdot C \cdot A_1$$

ここで、

$$q = 0.6 \cdot E' \cdot V_D^2$$

$$E' = E_r^2 \cdot G$$

$$E_r = 1.7 \cdot (H / Z_G)^\alpha \quad (H \text{ が } Z_b \text{ を超える場合})$$

$$E_r = 1.7 \cdot (Z_b / Z_G)^\alpha \quad (H \text{ が } Z_b \text{ 以下の場合})$$

Z_G, Z_b: 地表面粗度区分に応じて建設省告示第1454号に掲げる数値
風荷重算定に使用する入力条件を表3-8～表3-10に示す。

表3-8 設計風荷重の条件

施設名称	基準風速 V _D (m/s)	全高 H (m)	Z _G (m)	α	ガスト 影響係数 G	設計用 速度圧 q (N/m ²)
タービン建物	30	34.460	350	0.15	2.037	1586.5

表3-9 タービン建物の風力係数及び受圧面積

(a) 南北方向

高さ(EL) (m)	風力係数C		受圧面積A ₁ (m ²)	
	風上* ²	風下	北側	南側
42.96* ¹ ~36.80	0.800	0.4	741	773
36.80* ¹ ~26.30	0.714	0.4	1405	1405
26.30* ¹ ~16.55	0.585	0.4	1362	1329
16.55* ¹ ~9.00	0.448	0.4	1019	1016
9.00* ¹ ~8.50	0.448	0.4	92	95

注記*1: 代表高さを示す。

*2: C(風上)は基準階での値を示す。

表 3-10 タービン建物の風力係数及び受圧面積

(b) 東西方向

高さ(EL) (m)	風力係数 C		受圧面積 A_1 (m ²)	
	風上* ²	風下	東側	西側
42.96* ¹ ~36.80	0.800	0.4	334	334
36.80* ¹ ~26.30	0.714	0.4	666	666
26.30* ¹ ~16.55	0.585	0.4	691	661
16.55* ¹ ~9.00	0.448	0.4	521	544
9.00* ¹ ~8.50	0.448	0.4	28	36

注記*1：代表高さを示す。

*2：C（風上）は基準階での値を示す。

(3) 耐震壁

a. 水平荷重

水平荷重は、(2) 主トラス及び二次部材 b. 水平荷重と同様である。

3.2.2 荷重の組合せ

荷重の組合せを表 3-11 に示す。

ケース 1 は従荷重として、鉛直荷重と水平荷重を用いて評価するため主トラス及び耐震壁を評価対象とする。ケース 2 は従荷重として積雪荷重を組み合わせ、鉛直荷重のみを用いて評価するため屋根スラブ及び二次部材を評価対象とする。

表 3-11 荷重の組合せ

考慮する 荷重の 組合せ	荷重*				
	常時作用する 荷重 (F _d)		主荷重 降下火砕物に よる荷重 (F _a)	従荷重	
	固定 荷重	積載 荷重		積雪荷重 (F _s)	風荷重 (W)
ケース 1	○	○	○	○	○
ケース 2	○	○	○	○	—

注記*：○は考慮する荷重を示す。

3.3 許容限界

タービン建物の許容限界は、VI-3-別添 2-1-4「タービン建物の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界に従って、「3.1 評価対象部位」にて設定している建物の評価対象部位ごとに設定する。

屋根スラブ，主トラス，二次部材及び耐震壁の許容限界を「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005 制定）」（以下「RC-N規準」という。），「鋼構造設計規準-許容応力度設計法-（（社）日本建築学会，2005 改定）」（以下「S規準」という。）及び「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987（（社）日本電気協会）」に基づき表 3-12 に，鋼材の材料強度を表 3-13 に，コンクリート及び鉄筋の短期許容応力度を表 3-14 及び表 3-15 に示す。

表 3-12 許容限界

要求機能	機能設計上の性能目標	部位		機能維持のための考え方	許容限界 (評価基準値)
—	内包する防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないこと	屋根	屋根スラブ	内包する防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないために落下しないことを確認	「RC-N規準」に基づく短期許容応力度* ¹
			屋根トラス		「S規準」に基づく短期許容応力度* ¹
		耐震壁* ²			最大せん断ひずみが波及的影響を及ぼさないための許容限界を超えないことを確認

注記*1：許容限界は終局強度に対し妥当な安全余裕を有したものとして設定することとし、さらなる安全余裕を考慮して短期許容応力度とする。

*2：建物全体としては、水平力を主に耐震壁で負担する構造となっており、柱、はり、間仕切壁等が耐震壁の変形に追従すること、また、全体に剛性の高い構造となっており複数の耐震壁間の相対変形が小さく床スラブの変形が抑えられるため、各層の耐震壁の最大せん断ひずみが許容限界を満足していれば、建物・構築物に要求される機能は維持される。

表 3-13 鋼材の材料強度

(単位：N/mm²)

材料* ¹	板厚	F 値	材料強度		
			引張り	圧縮 曲げ	せん断
SS41 (SS400 相当) SS400 SN400B	t ≤ 40mm	235	235	235* ²	135
SM50A (SM490A 相当)	t ≤ 40mm	325	325	325* ²	187

注記*1：建設当時の鋼材の種類を、現在の規格に読み替えた許容応力度を示す。

*2：上限値であり、座屈長さ等を勘案して設定する。

表 3-14 コンクリートの短期許容応力度

(単位：N/mm²)

設計基準強度 F _c	圧縮	せん断
23.5	15.6	1.08

表 3-15 鉄筋の短期許容応力度

(単位：N/mm²)

種別*	引張り及び圧縮	せん断
SD35 (SD345 相当)	345	345

注記*：建設当時の鋼材の種類を、現在の規格に読み替えた許容応力度を示す。

3.4 解析モデル及び諸元

3.4.1 モデル化の基本方針

(1) 屋根スラブ

EL 41.6m の屋根スラブは、屋根トラスで支持され、厚さが同じでスパンがほぼ均等なスラブが連続しており、その外周がスラブに比べて十分剛性の大きい鉄筋コンクリート造の壁に接合されていることから、支持点の間隔を長さとした両端固定ばりの 1 方向スラブとして評価する。その他のスラブについては、端部の支持状況に応じたモデル化（例えば、四辺固定版）により応力算出を行う。

(2) 主トラス

応力解析は、2次元フレームモデルを用いた弾性応力解析を実施する。解析に使用するコードは、「SD」である。なお、解析コードの検証及び妥当性の確認の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。モデル化範囲は、主トラス部材の中で最も応力度比が大きくなる部材を含む構面(T5, T7 フレーム) とする。

応力解析モデルは、主トラスを含む建物全体の各部材を線材置換した 2次元フレームモデルとする。解析モデル図を図 3-1 に、部材リストを表 3-16 に、補強箇所を図 3-2 に示す。

解析モデルに使用する要素は、はり要素、トラス要素及び壁エレメント要素とする。また、解析モデルの脚部は固定とする。

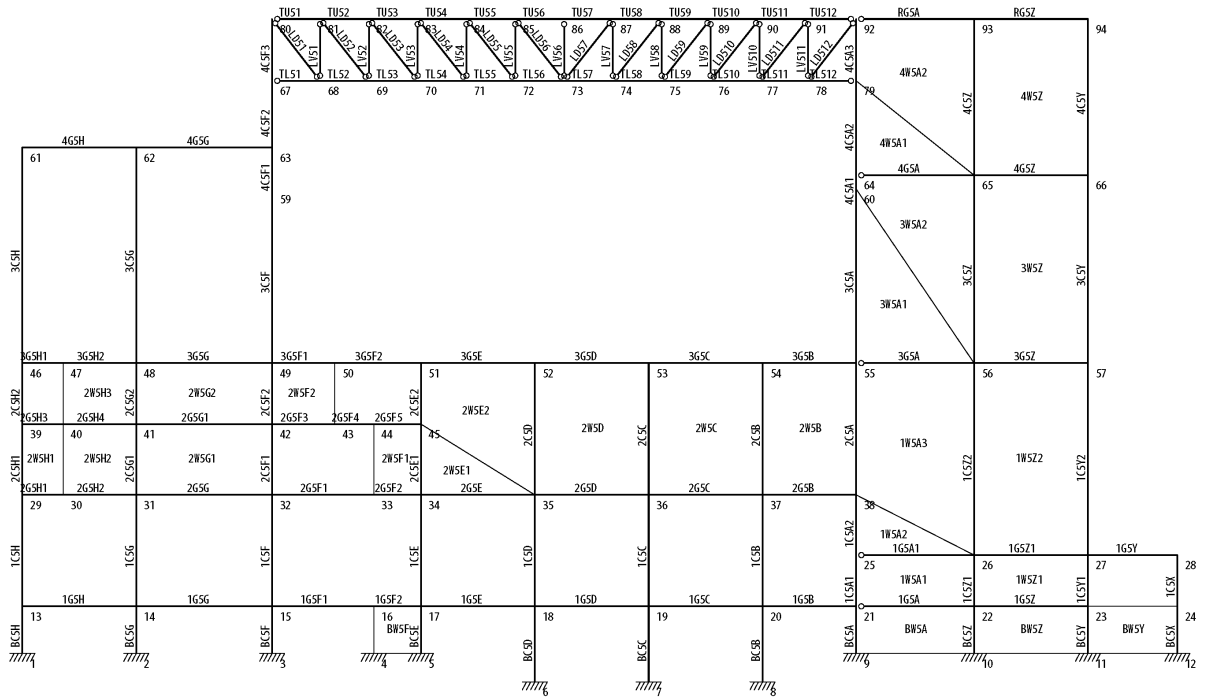


図 3-1 解析モデル図 (T5 フレーム) (1/2)

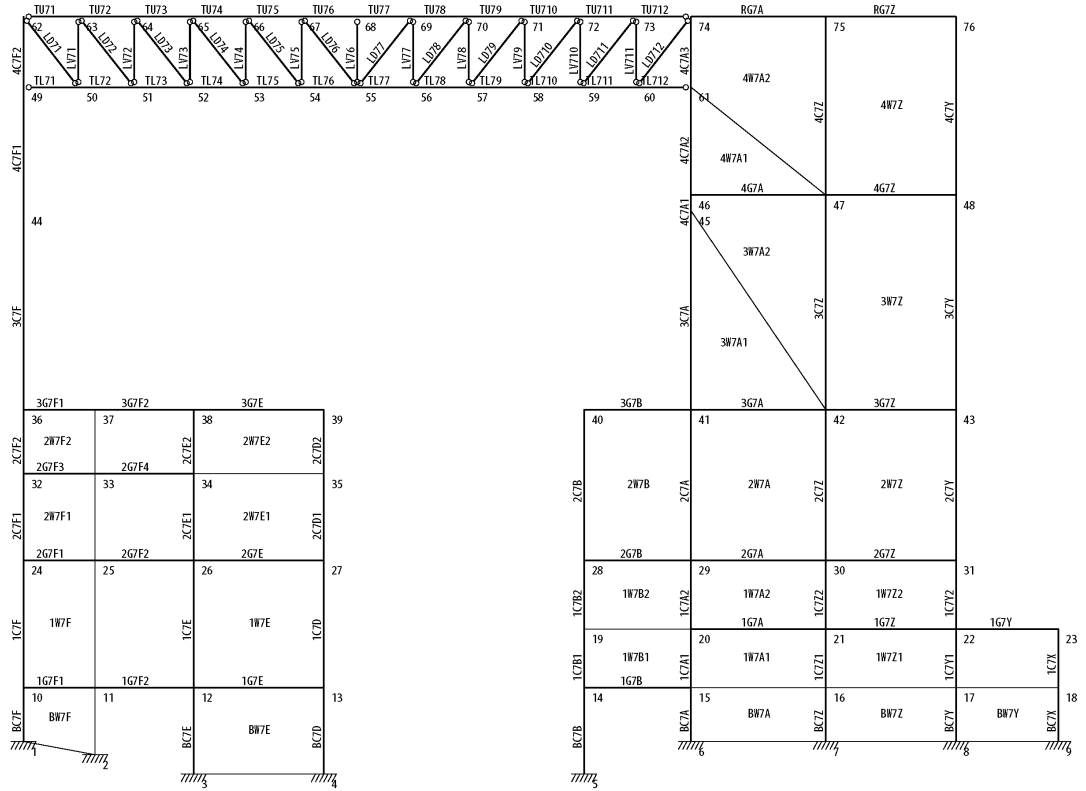


図 3-1 解析モデル図 (T7 フレーム) (2/2)

表 3-16 部材リスト

部位		形状寸法	材質	断面積 ($\times 10^2 \text{mm}^2$)	断面二次 モーメント ($\times 10^4 \text{mm}^4$)
主トラス	上弦材	H-428 \times 407 \times 20 \times 35	SS400 (SS41)	360.7	119000
		BH-428 \times 400 \times 19 \times 28	SS400 (SS41)	294.7	97900
	下弦材	BH-428 \times 407 \times 32 \times 40 +2B _S -386 \times 100 \times 19 \times 19*	SS400 (SS41)	645.2	173200
		BH-428 \times 407 \times 32 \times 40	SS400 (SS41)	437.0	134200
		H-428 \times 407 \times 20 \times 35	SS400 (SS41)	360.7	119000
		BH-428 \times 400 \times 25 \times 35	SS400 (SS41)	369.5	118000
		BH-428 \times 400 \times 19 \times 28	SS400 (SS41)	294.7	97900
		斜材	2CT _S -175 \times 350 \times 12 \times 19 +2PL _S -12 \times 200*	SS400 (SS41)	221.9
	2CT _S -175 \times 350 \times 12 \times 19		173.9		—
	2CT _S -150 \times 300 \times 10 \times 15 +2PL _S -12 \times 200*		167.8		—
	2CT _S -150 \times 300 \times 10 \times 15		119.8		—
	2BCT _S -175 \times 350 \times 22 \times 22 +2PL _S -12 \times 200*		269.3		—
	2BCT _S -175 \times 350 \times 22 \times 22		221.3		—
	束材	2CT _S -175 \times 350 \times 12 \times 19 +2PL _S -12 \times 200*	SS400 (SS41)	221.9	—
		2CT _S -175 \times 350 \times 12 \times 19		173.9	—
		2CT _S -150 \times 300 \times 10 \times 15 +2PL _S -12 \times 200*		167.8	—
		2CT _S -150 \times 300 \times 10 \times 15		119.8	—
		2BCT _S -175 \times 350 \times 22 \times 22		221.3	—

注記*：補強工事で追加した部材

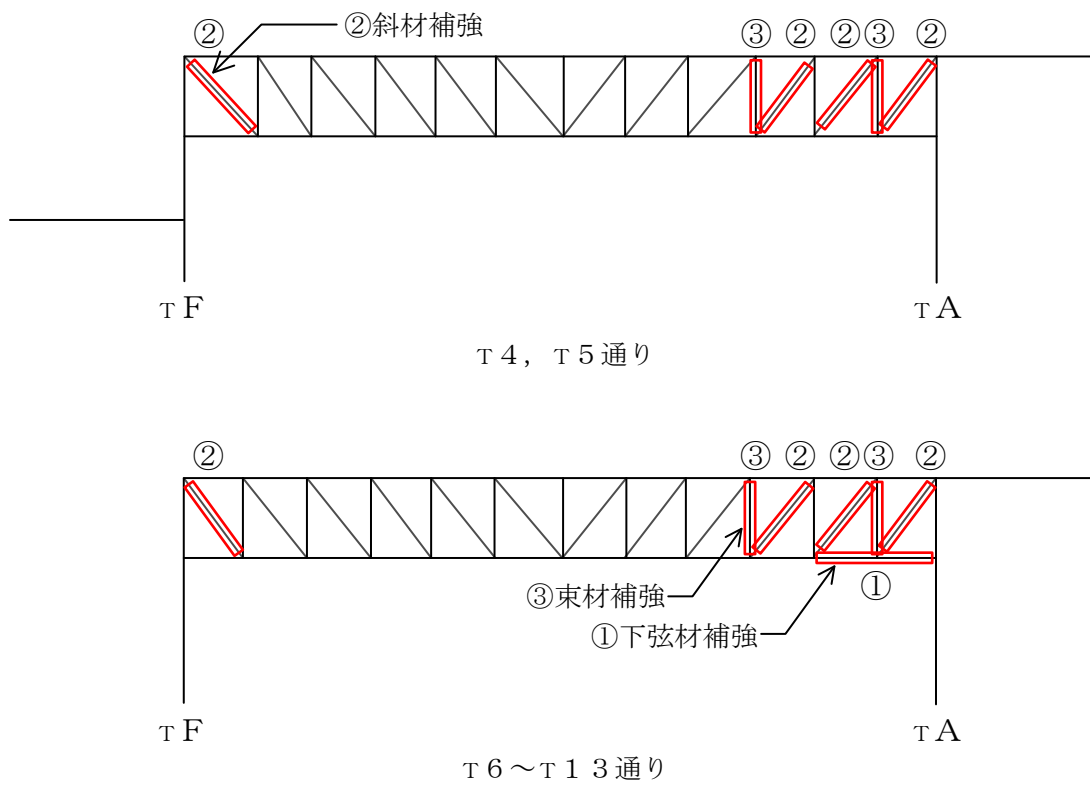


図 3-2 主トラス補強箇所

(3) 二次部材

もやは、支配幅を取り出し、等分布荷重を受ける単純ばり（両端ピン支持のほり）として応力を算定する。検討スパンは、接合部の現況を考慮した有効長さとして評価する。

つなぎばりは、支配幅を取り出し、上弦材、下弦材及び斜材からなる単純支持トラス（両端ピン支持）として応力解析により応力を算定する。検討スパンは、通り芯間距離として評価する。解析に使用するコードは、「SD」である。なお、解析コードの検証及び妥当性の確認の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。解析モデル図を図3-3に示す。

サブビームは、主トラスで支持された支配幅を取り出し、中央集中荷重を受ける単純ばり（両端ピン支持のほり）として応力を算定する。なお、支持スパンの長い部位を対象に評価を行う。

部材リストを表3-17に、もや補強箇所を図3-4に示す。

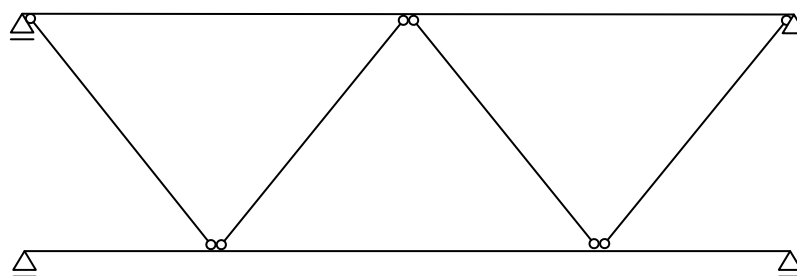


図3-3 つなぎばり解析モデル図

表 3-17 部材リスト

部位		形状寸法	材質	断面積 ($\times 10^2 \text{mm}^2$)	断面二次 モーメント ($\times 10^4 \text{mm}^4$)
もや		H-400 \times 200 \times 8 \times 13 +CT-175 \times 175 \times 7 \times 11*	SS400 (SS41)	115.6	50580
		H-400 \times 200 \times 8 \times 13	SS400 (SS41)	84.12	23700
つなぎ ばり	上弦材	BH-428 \times 300 \times 12 \times 19	SS400 (SS41)	160.8	53600
	下弦材	H-250 \times 250 \times 9 \times 14	SS400 (SS41)	92.18	10800
		BH-428 \times 300 \times 12 \times 19	SS400 (SS41)	160.8	53600
	斜材	2CT _S -100 \times 204 \times 12 \times 12	SS400 (SS41)	71.53	—
		2CT _S -125 \times 250 \times 9 \times 14	SS400 (SS41)	92.18	—
サブビーム		BH-428 \times 300 \times 12 \times 19	SS400 (SS41)	160.8	53600

注記*：補強工事で追加した部材

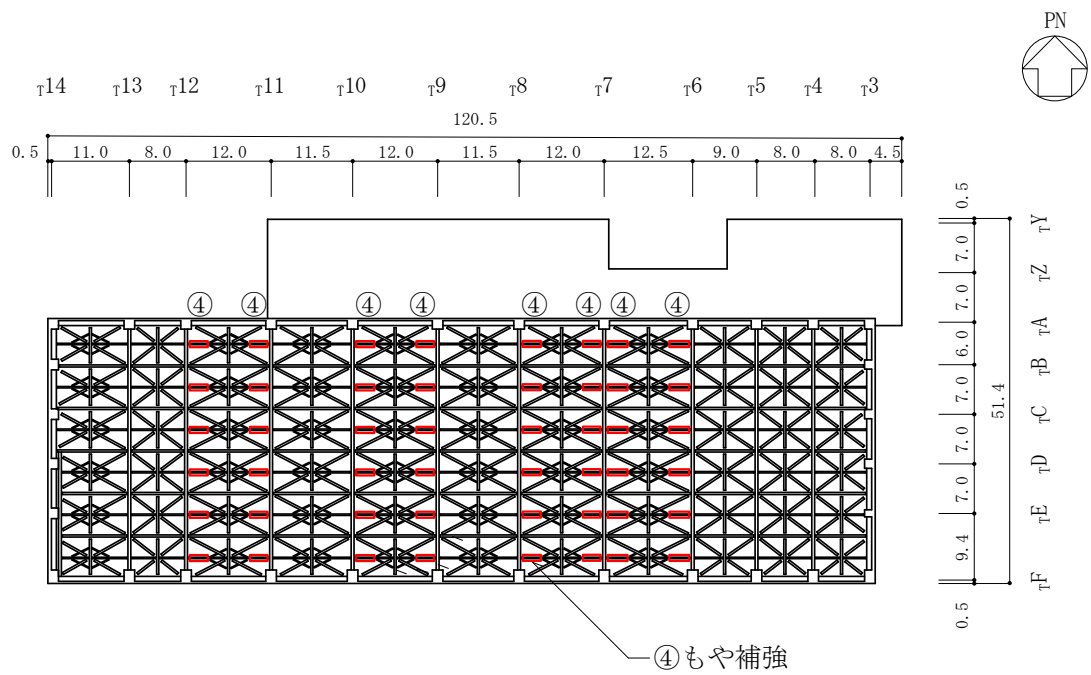
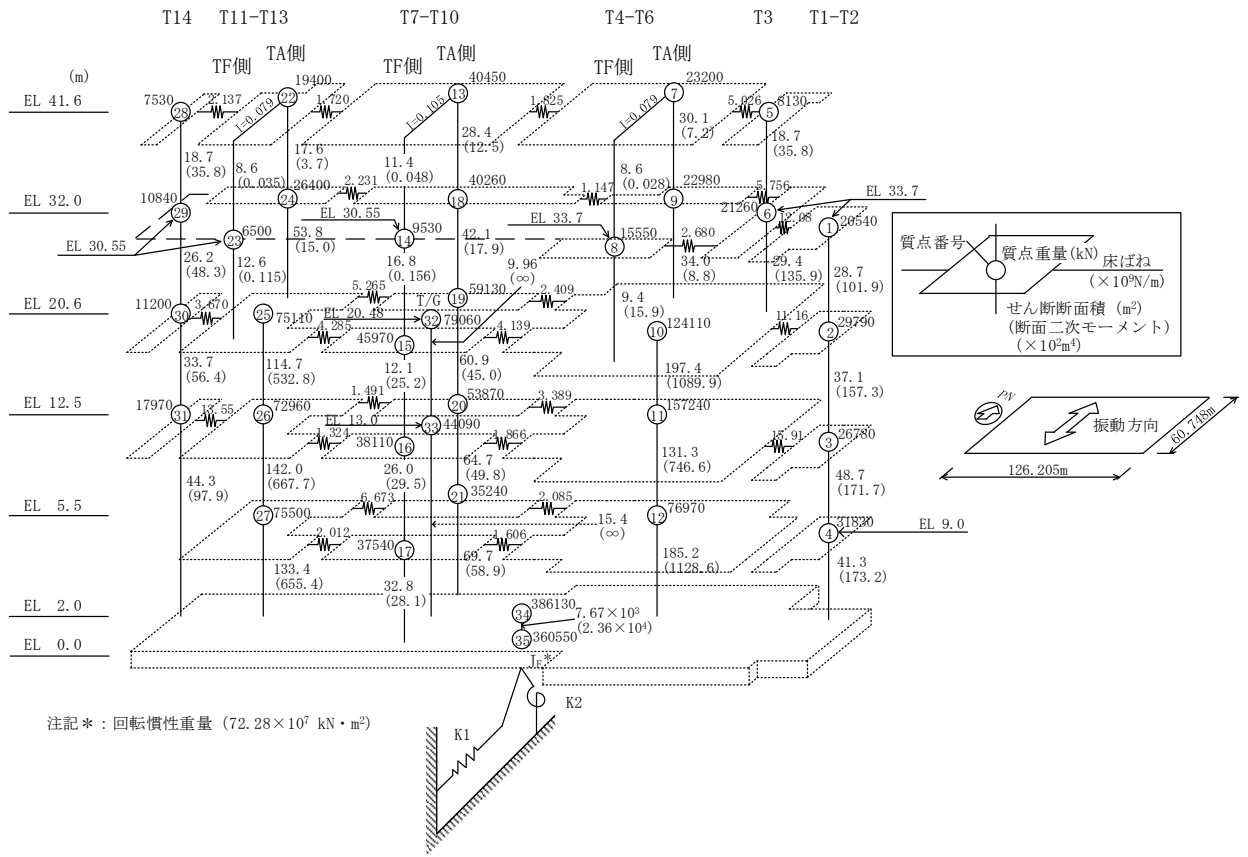


図 3-4 もや補強箇所 (EL 41.6m)

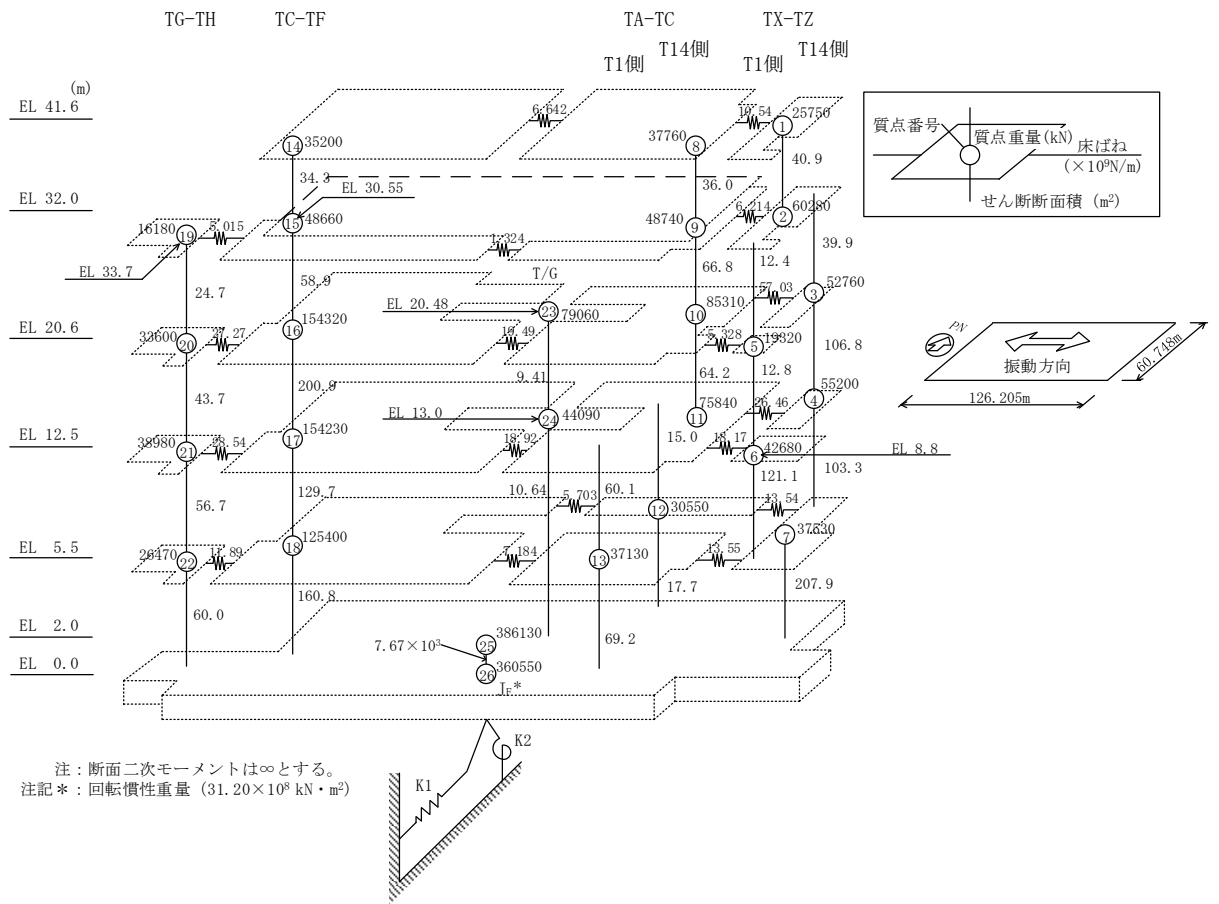
(4) 耐震壁

耐震壁は、VI-2-2-7「タービン建物の地震応答計算書」に示す地震応答解析モデルを用いて評価する。解析に使用するコードは、「NUPP4」である。なお、解析コードの検証及び妥当性の確認の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。地震応答解析モデルを図3-5に示す。



(南北方向)

図3-5 地震応答解析モデル（水平方向）（1/2）



(東西方向)

図 3-5 地震応答解析モデル (水平方向) (2/2)

3.4.2 解析諸元

使用材料の物性値を表 3-18 に示す。

表 3-18 使用材料の物性値

使用材料	ヤング係数 E (N/mm ²)	せん断弾性係数 G (N/mm ²)
鉄筋コンクリート	2.25×10^4	9.38×10^3
鉄骨	2.05×10^5	7.90×10^4

3.5 評価方法

3.5.1 屋根スラブの評価方法

(1) 応力解析方法

a. 荷重ケース

降下火砕物堆積時の応力は、単独荷重による応力を組み合わせて求める。
単独荷重の記号を以下に示す。

F_d : 常時作用する荷重

F_a : 降下火砕物による荷重

F_s : 積雪荷重

b. 荷重の組合せケース

荷重の組合せケースを表 3-19 に示す。

表 3-19 荷重の組合せケース

組合せケース	荷重の組合せ
ケース 2	$F_d + F_a + F_s$

c. 応力算出方法

等分布荷重を受ける両端固定ばり及び四辺固定版の曲げモーメント及びせん断力は下式により求める。

(両端固定ばり)

・ 端部曲げモーメント (M_E)

$$M_E = -\frac{1}{12} w \cdot l^2$$

・ 中央部曲げモーメント (M_C)

$$M_C = \frac{1}{24} w \cdot l^2$$

・ せん断力 (Q_E)

$$Q_E = \frac{1}{2} w \cdot l$$

ここで、

w : 等分布荷重 (N/m)

l : 有効スパン (m)

(四辺固定版)

- 短辺方向の端部曲げモーメント (M_{x1})

$$M_{x1} = -\frac{1}{12} w_x \cdot l_x^2$$

- 短辺方向の中央部曲げモーメント (M_{x2})

$$M_{x2} = \frac{1}{18} w_x \cdot l_x^2$$

- 長辺方向の端部曲げモーメント (M_{y1})

$$M_{y1} = -\frac{1}{24} w \cdot l_x^2$$

- 長辺方向の中央部曲げモーメント (M_{y2})

$$M_{y2} = \frac{1}{36} w \cdot l_x^2$$

- せん断力 (Q)

$$Q = \beta \cdot w \cdot l_x$$

ここで,

l_x : 短辺有効スパン (m)

l_y : 長辺有効スパン (m)

w : 単位面積あたりの荷重 (N/m²)

β : スラブの辺長比 (l_y/l_x) により定まる係数

$$w_x = \frac{l_y^4}{l_x^4 + l_y^4} w$$

(2) 断面の評価方法

断面の評価は以下の方法で行う。

屋根スラブについては、曲げモーメントによる鉄筋の引張り応力度及び面外せん断力を算定し、各許容限界を超えないことを確認する。

a. 曲げモーメントに対する断面の評価方法

断面の評価は、「RC-N規準」に基づき、次式をもとに計算した評価対象箇所が生じる曲げモーメントによる鉄筋の引張り応力度が、短期許容応力度を超えないことを確認する。

$$\sigma_t = \frac{M}{a_t \cdot j}$$

ここで,

σ_t : 鉄筋の引張り応力度 (N/mm²)

- M : 曲げモーメント (N・mm)
 a_t : 引張り鉄筋断面積 (mm²)
j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

b. 面外せん断力に対する断面の評価方法

断面の評価は、「RC-N規準」に基づき、評価対象箇所に生じる面外せん断力が、次式をもとに計算した許容面外せん断力を超えないことを確認する。

$$Q_A = b \cdot j \cdot \left\{ \alpha \cdot f_s + 0.5 \cdot {}_w f_t \cdot (p_w - 0.002) \right\}$$

ここで、

- Q_A : 許容面外せん断力 (N)
b : 断面の幅 (mm)
j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)
 α : 許容せん断力の割増し係数で、次式による。

(2 を超える場合は 2, 1 未満の場合は 1 とする。)

$$\alpha = \frac{4}{M / (Q \cdot d) + 1}$$

ここで、

- M : 曲げモーメント (N・mm)
Q : せん断力 (N)
d : 断面の有効せい (mm)
 f_s : コンクリートの短期許容せん断応力度 (N/mm²)
 ${}_w f_t$: せん断補強筋の短期許容引張り応力度 (N/mm²)
 p_w : せん断補強筋比で、次式による。(0.002 以上とする。*)

$$p_w = \frac{a_w}{b \cdot x}$$

- a_w : せん断補強筋の断面積 (mm²)
x : せん断補強筋の間隔 (mm)

注記* : せん断補強筋がない領域については、第 2 項を 0 とする。

3.5.2 主トラスの評価方法

(1) 応力解析方法

主トラスについては，2次元フレームモデルを用いた弾性応力解析により得られた部材の応力を評価する。

a. 荷重ケース

降下火砕物堆積時の応力は，次の荷重を2次元フレームモデルに入力して求める。荷重の記号を以下に示す。

F_d : 常時作用する荷重

F_a : 降下火砕物による荷重

F_s : 積雪荷重

W : 風荷重

b. 荷重の組合せケース

荷重の組合せケースを表 3-20 に示す。

表 3-20 荷重の組合せケース

組合せケース	荷重の組合せ
ケース 1	$F_d + F_a + F_s + W$

c. 荷重の入力方法

固定荷重及び積雪荷重は，対応する部材及び節点に分布荷重及び集中荷重として入力する。

(2) 断面の評価方法

主トラスの評価は、2次元フレームモデルを用いた弾性応力解析により評価対象部位に生じる軸力及び曲げモーメントによる応力度が許容限界を超えないことを確認する。

なお、許容限界については、「S規準」に基づく短期許容応力度とする。ただし、斜材及び束材は軸応力度のみ評価する。

(圧縮)

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1.0$$

ただし、

$$\sigma_c = \frac{N_c}{A}$$

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

ここで、

σ_c : 圧縮応力度 (N/mm²) σ_b : 曲げ応力度 (N/mm²)

N_c : 圧縮軸力 (N) A : 軸断面積 (mm²)

M : 曲げモーメント (N・mm) Z : 断面係数 (mm³)

f_c : 圧縮応力に関する評価基準値 (N/mm²)

f_b : 曲げ応力に関する評価基準値 (N/mm²)

(引張り)

$$\frac{\sigma_t}{f_t} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1.0$$

ただし、

$$\sigma_t = \frac{N_t}{A}$$

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

ここで、

σ_t : 引張り応力度 (N/mm²) σ_b : 曲げ応力度 (N/mm²)

N_t : 引張り軸力 (N) A : 軸断面積 (mm²)

M : 曲げモーメント (N・mm) Z : 断面係数 (mm³)

f_t : 引張り応力に関する評価基準値 (N/mm²)

f_b : 曲げ応力に関する評価基準値 (N/mm²)

3.5.3 二次部材の評価方法

(1) 応力解析方法

a. 荷重ケース

降下火砕物堆積時の応力は、単独荷重による応力を組み合わせて求める。
単独荷重の記号を以下に示す。

F_d : 常時作用する荷重

F_a : 降下火砕物による荷重

F_s : 積雪荷重

b. 荷重の組合せケース

荷重の組合せケースを表 3-21 に示す。

表 3-21 荷重の組合せケース

組合せケース	荷重の組合せ
ケース 2	$F_d + F_a + F_s$

c. 応力算出方法

集中荷重（サブビーム）あるいは、分布荷重（もや）を受ける両端ピン支持ばりの曲げモーメント及びせん断力は下式により求める。

つなぎばりについては、図 3-3 に示す解析モデルにより上弦材及び下弦材に生じる曲げモーメント及び軸力、並びに斜材に生じる軸力を求める。

1) 集中荷重（サブビーム）の場合 （最大曲げモーメント）

$$M = \frac{1}{l} P \cdot l_a \cdot l_b$$

ここで、

P : 集中荷重 (N)

l : スパン (m) で次式による。

$$l = l_a + l_b \quad (l_a \geq l_b \text{ の場合})$$

（端部せん断力）

$$Q = \frac{1}{l} P \cdot l_a$$

2) 分布荷重（もや）の場合 （中央曲げモーメント）

$$M = \frac{1}{8} w \cdot l^2$$

ここで、

w : 等分布荷重 (N/m)

l : スパン (m)

(端部せん断力)

$$Q = \frac{1}{2} w \cdot l$$

(2) 断面の評価方法

断面の評価は以下の方法で行う。

a. もや及びサブビームの評価方法

断面の評価は、「S規準」に基づき、次式をもとに計算した評価対象箇所に生じる曲げモーメントによる応力度及びせん断応力度が、短期許容応力度を超えないことを確認する。

(曲げ)

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

ここで、

σ_b : 曲げ応力度 (N/mm²)

M : 曲げモーメント (N・mm)

Z : 断面係数 (mm³)

(せん断)

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

ここで、

τ : せん断応力度 (N/mm²)

Q : せん断力 (N)

A_s : せん断断面積 (mm²)

b. つなぎばりの評価方法

断面の評価は、次式をもとに計算した評価対象箇所に生じる軸力による応力度及び曲げモーメントによる応力度が短期許容応力度を超えないことを確認する。

(圧縮)

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1.0$$

ただし,

$$\sigma_c = \frac{N_c}{A}$$

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

ここで,

- | | |
|--|---|
| σ_c : 圧縮応力度 (N/mm ²) | σ_b : 曲げ応力度 (N/mm ²) |
| N_c : 圧縮軸力 (N) | A : 軸断面積 (mm ²) |
| M : 曲げモーメント (N・mm) | Z : 断面係数 (mm ³) |
| f_c : 圧縮応力に関する評価基準値 (N/mm ²) | |
| f_b : 曲げ応力に関する評価基準値 (N/mm ²) | |

(引張り)

$$\frac{\sigma_t}{f_t} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1.0$$

ただし,

$$\sigma_t = \frac{N_t}{A}$$

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

ここで,

- | | |
|---|---|
| σ_t : 引張り応力度 (N/mm ²) | σ_b : 曲げ応力度 (N/mm ²) |
| N_t : 引張り軸力 (N) | A : 軸断面積 (mm ²) |
| M : 曲げモーメント (N・mm) | Z : 断面係数 (mm ³) |
| f_t : 引張り応力に関する評価基準値 (N/mm ²) | |
| f_b : 曲げ応力に関する評価基準値 (N/mm ²) | |

3.5.4 耐震壁の評価方法

耐震壁の評価は、風荷重による耐震壁に発生するせん断ひずみが許容限界を超えないことを確認する。なお、耐震壁の応力計算には、地震応答解析モデルを用い、耐震壁の復元力特性の設定においては、鉛直荷重の増加による軸力を考慮すると第1折れ点の増大が見込まれるため、本評価では保守的に降下火砕物等堆積による鉛直荷重は考慮しない。

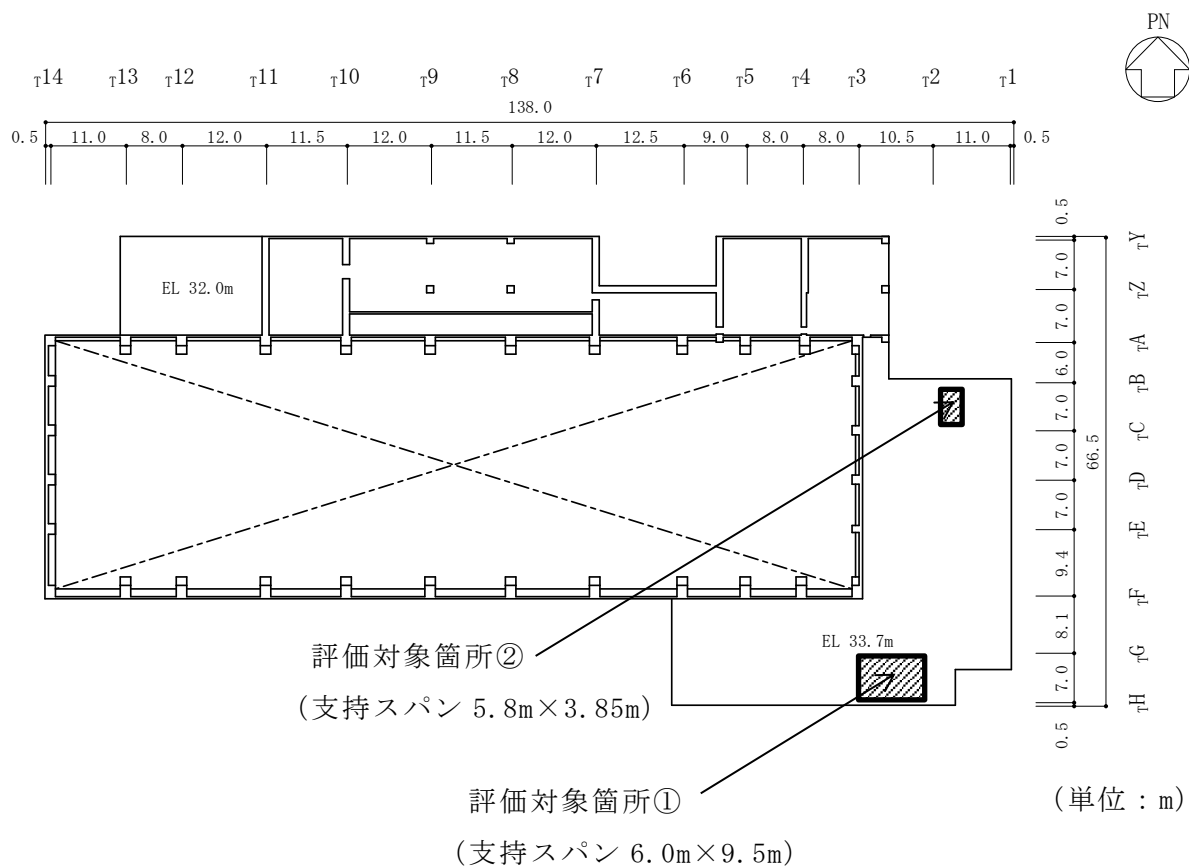


図 4-2 評価対象箇所 (屋根スラブ, EL 33.7m)

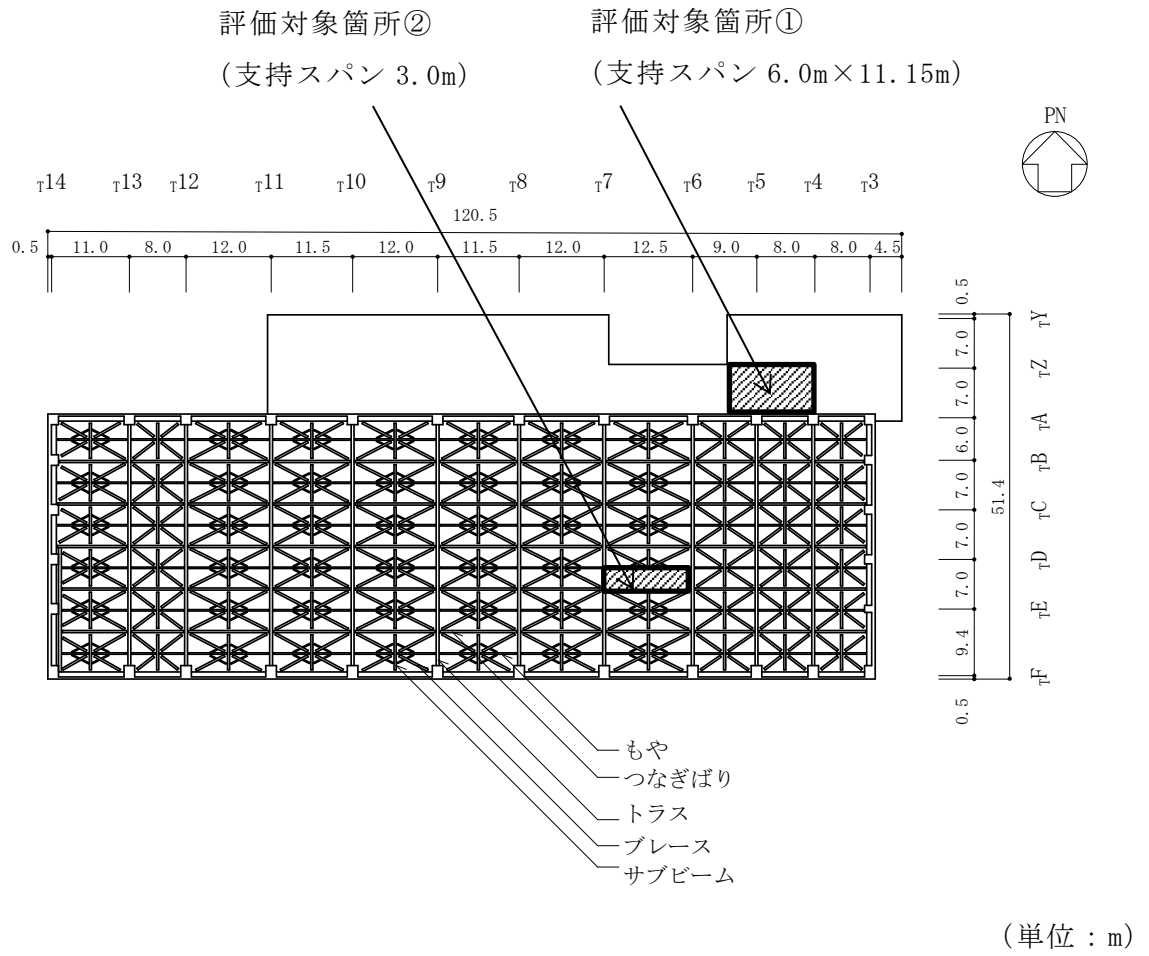


図 4-3 評価対象箇所 (屋根スラブ, EL 41.6m)

表 4-1 屋根スラブの評価結果 (EL 8.8m)

EL (m)		8.8
厚さ t (mm)		<input type="text"/>
有効せい d (mm)		<input type="text"/>
配筋 (鉄筋断面積)		D22@200 (1935mm ² /m)
曲 げ モー メント	発生曲げモーメント M (kN・m/m)	152.8
	鉄筋の引張り応力度 σ_t (N/mm ²)	177.0
	許容限界 (N/mm ²)	345
	検定値	0.52
面 外 せん 断 力	発生せん断力 Q (kN/m)	205.9
	せん断応力度 (N/mm ²)	0.47
	許容限界 (N/mm ²)	1.08
	検定値	0.44

表 4-2 屋根スラブの評価結果 (EL 33.7m) (評価対象箇所①)

EL (m)		33.7
厚さ t (mm)		<input type="text"/>
有効せい d (mm)		<input type="text"/>
配筋 (鉄筋断面積)		D19@200 (1435mm ² /m)
曲 げ モー メント	発生曲げモーメント M (kN・m/m)	57.4
	鉄筋の引張り応力度 σ_t (N/mm ²)	217.7
	許容限界 (N/mm ²)	345
	検定値	0.64
面 外 せん 断 力	発生せん断力 Q (kN/m)	69.2
	せん断応力度 (N/mm ²)	0.38
	許容限界 (N/mm ²)	1.08
	検定値	0.36

表 4-3 屋根スラブの評価結果 (EL 33.7m) (評価対象箇所②)

EL (m)		33.7
厚さ t (mm)		<input type="text"/>
有効せい d (mm)		<input type="text"/>
配筋 (鉄筋断面積)		D25@200 (2535mm ² /m)
曲 げ モー メント	発生曲げモーメント M (kN・m/m)	268.3
	鉄筋の引張り応力度 σ_t (N/mm ²)	163.5
	許容限界 (N/mm ²)	345
	検定値	0.48
面 外 せん 断 力	発生せん断力 Q (kN/m)	347
	せん断応力度 (N/mm ²)	0.54
	許容限界 (N/mm ²)	1.08
	検定値	0.50

表 4-4 屋根スラブの評価結果 (EL 41.6m) (評価対象箇所①)

EL (m)		41.6
厚さ t (mm)		<input type="text"/>
有効せい d (mm)		<input type="text"/>
配筋 (鉄筋断面積)		D22@200 (1935mm ² /m)
曲 げ モー メント	発生曲げモーメント M (kN・m/m)	67.1
	鉄筋の引張り応力度 σ_t (N/mm ²)	188.8
	許容限界 (N/mm ²)	345
	検定値	0.55
面 外 せん 断 力	発生せん断力 Q (kN/m)	75.7
	せん断応力度 (N/mm ²)	0.42
	許容限界 (N/mm ²)	1.08
	検定値	0.39

表 4-5 屋根スラブの評価結果 (EL 41.6m) (評価対象箇所②)

EL (m)		41.6
厚さ t (mm)		<input type="text"/>
有効せい d (mm)		<input type="text"/>
配筋 (鉄筋断面積)		D13@150 (847mm ² /m)
曲 げ モー メント	発生曲げモーメント M (kN・m/m)	13.7
	鉄筋の引張り応力度 σ_t (N/mm ²)	205.4
	許容限界 (N/mm ²)	345
	検定値	0.60
面 外 せん 断 力	発生せん断力 Q (kN/m)	27.3
	せん断応力度 (N/mm ²)	0.35
	許容限界 (N/mm ²)	1.08
	検定値	0.33

4.2 主トラスの評価結果

「3.5 評価方法」に基づいた評価結果を表 4-6 に示す。また、評価対象部位において複数の部材がある場合は、検定値が最大となる部材の値を示す。評価位置を図 4-4 に示す。

降下火砕物堆積による鉛直荷重等によって、評価対象部位に生じる軸力及び曲げモーメントによる応力度が許容限界を超えないことを確認した。

表 4-6 主トラスの短期許容応力度に基づく評価結果 (EL 41.6m)

評価対象部位	No.	発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容限界 (N/mm ²)	検定値
上弦材	1	圧縮	127.7	223	0.73
		曲げ	35.8	231	
下弦材	2	圧縮	151.1	201	0.86
		曲げ	24.1	232	
束材	3	圧縮	134.0	154	0.88
斜材	4	引張り	208.4	235	0.89

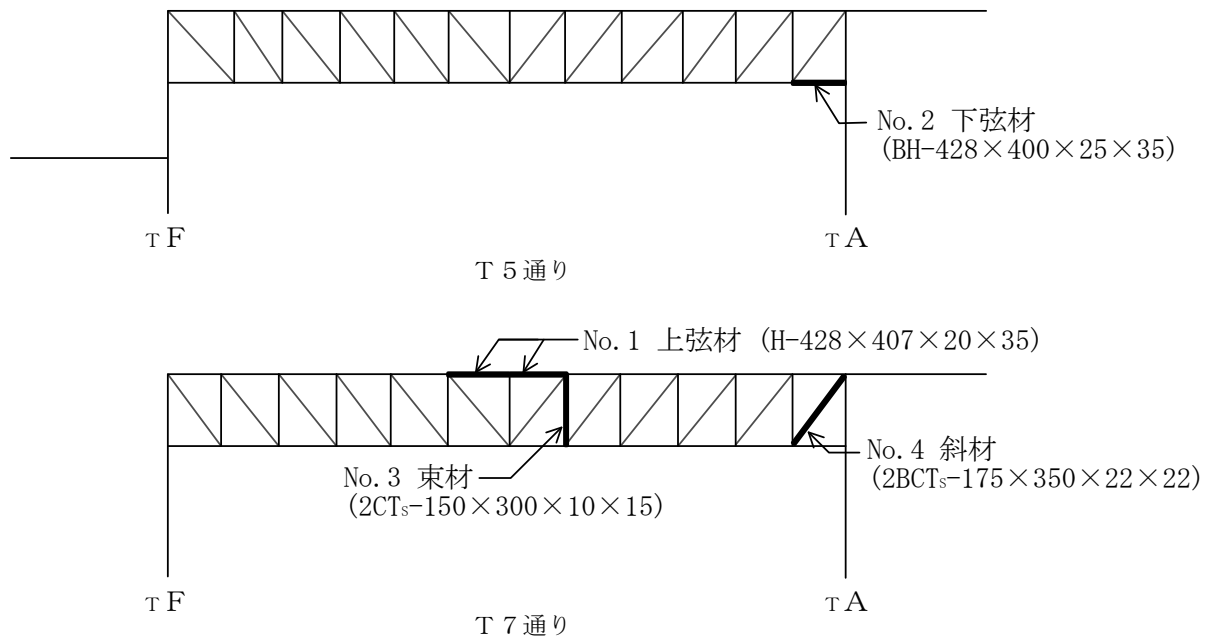


図 4-4 部材評価位置

4.3 二次部材の評価結果

「3.5 評価方法」に基づいた評価結果を表 4-7 に示す。二次部材の評価対象箇所は、各断面の検定値が最も大きい箇所とし、図 4-5 に示す。

降下火砕物堆積による鉛直荷重等によって、評価対象部位に生じる軸力、曲げモーメント及びせん断による応力度が許容限界を超えないことを確認した。

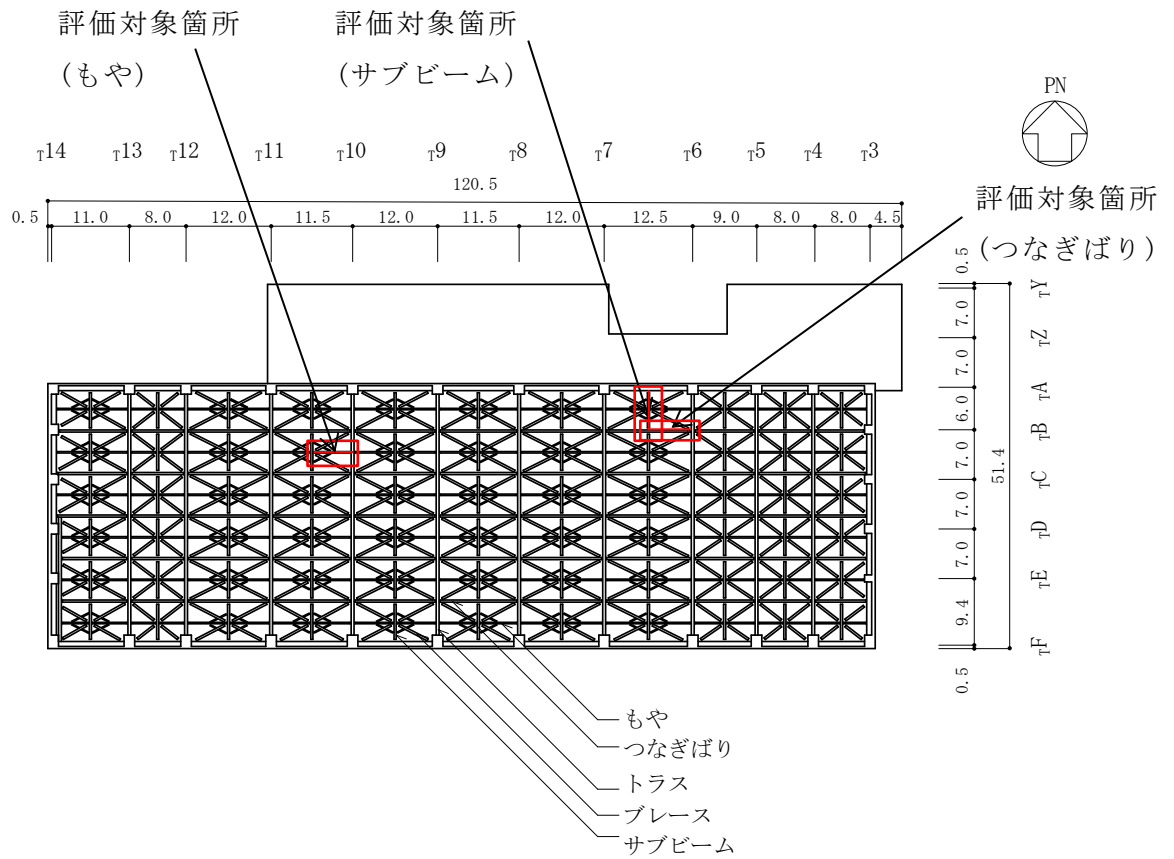


図 4-5 評価対象箇所（二次部材，EL 41.6m）

表 4-7 二次部材の短期許容応力度に基づく評価結果 (EL 41.6m)

評価対象部位		発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容限界 (N/mm ²)	検定値
もや		曲げ	169.3	193	0.88
		せん断	60.0	135	0.45
つなぎばり	上弦材	圧縮	18.0	150	0.60
		曲げ	80.9	172	
	下弦材	引張り	62.9	235	0.31
		曲げ	6.8	165	
	斜材	圧縮	64.9	86	0.76
		引張り	77.8	235	0.34
サブビーム		曲げ	200.7	232	0.87
		せん断	45.9	135	0.34

4.4 耐震壁の評価結果

「3.5 評価方法」に基づいた評価結果を表 4-8 に示す。なお、各方向において最大せん断ひずみが生じる部材のみを示す。

水平荷重等によって、評価対象部位に生じるせん断ひずみが許容限界を超えないことを確認した。

表 4-8 耐震壁の評価結果

検討ケース	評価項目	方向	高さ (EL) (m)	せん断ひずみ ($\times 10^{-3}$)	許容限界 ($\times 10^{-3}$)
ケース 1	せん断 ひずみ	南北方向	20.6~12.5 (7-10)F 側	0.00374	4.0
		東西方向	20.6~8.8 (X~Z)1 側	0.00140	4.0

VI-3-別添 2-6 制御室建物の強度計算書

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
2.1 位置	1
2.2 構造概要	2
2.3 評価方針	5
2.4 適用規格・基準等	7
3. 強度評価方法及び評価条件	8
3.1 評価対象部位	8
3.2 荷重及び荷重の組合せ	8
3.2.1 荷重	8
3.2.2 荷重の組合せ	10
3.3 許容限界	11
3.4 解析モデル及び諸元	13
3.4.1 モデル化の基本方針	13
3.4.2 解析諸元	16
3.5 評価方法	17
3.5.1 屋根スラブの評価方法	17
3.5.2 耐震壁の評価方法	19
4. 強度評価結果	20
4.1 屋根スラブの評価結果	20
4.2 耐震壁の評価結果	22

1. 概要

本資料は、VI-3-別添 2-1-5「制御室建物の強度計算の方針」に示すとおり、制御室建物が降下火砕物及び積雪の堆積時においても、内包する防護すべき施設に降下火砕物を堆積させない機能の維持を考慮して、建物全体及び建物の主要な構造部材が構造健全性を維持することを確認するものである。

2. 基本方針

制御室建物は、VI-3-別添 2-1-5「制御室建物の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、本資料では、「2.1 位置」、「2.2 構造概要」、「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格・基準等」を示す。

2.1 位置

制御室建物は、VI-3-別添 2-1-5「制御室建物の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す位置に設置する。制御室建物の配置を図 2-1 に示す。

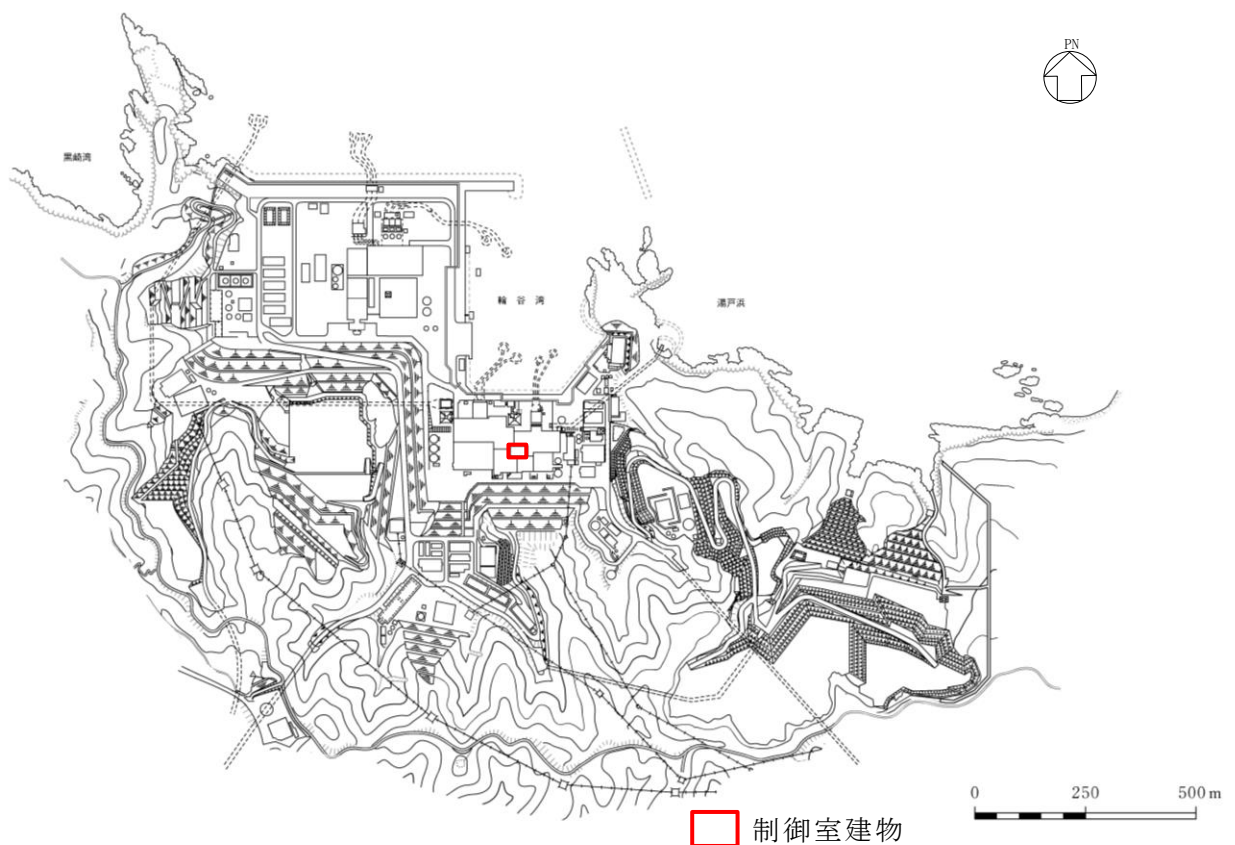


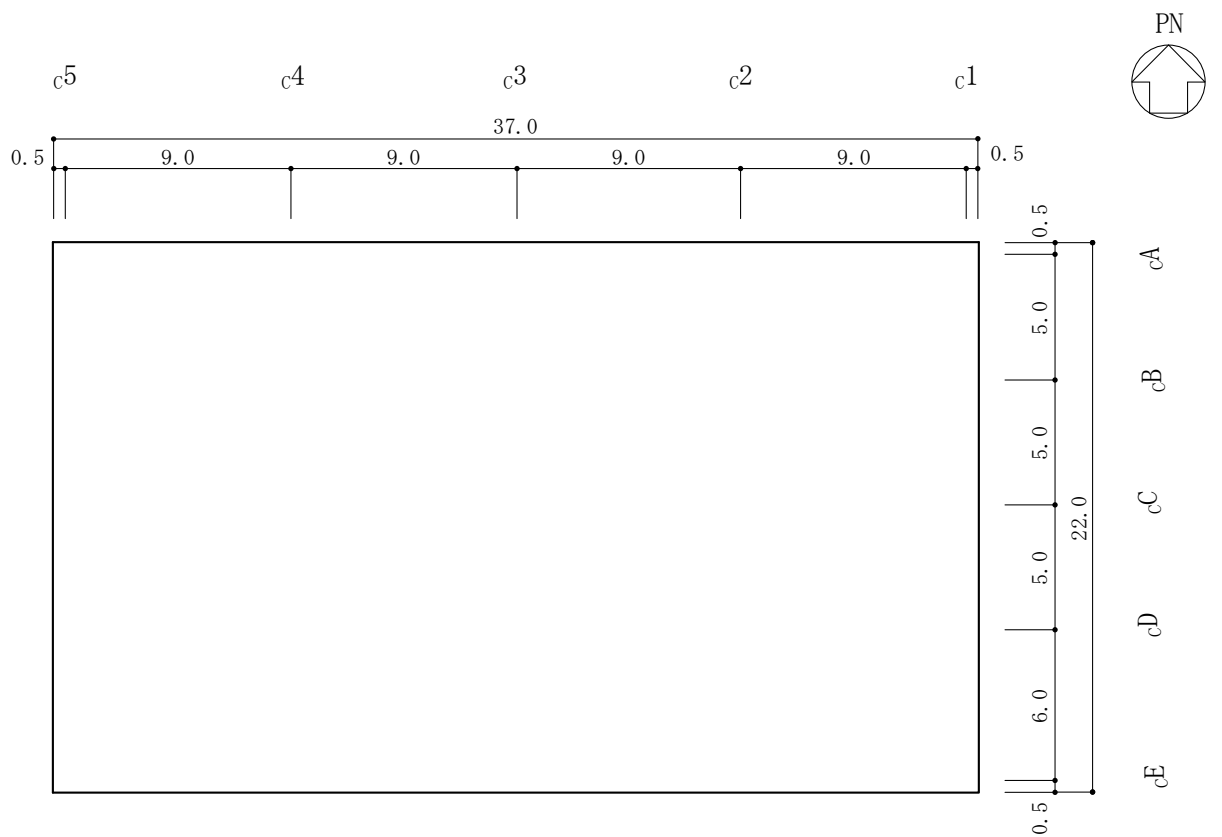
図 2-1 制御室建物の配置図

2.2 構造概要

制御室建物は、VI-3-別添 2-1-5「制御室建物の強度計算の方針」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。

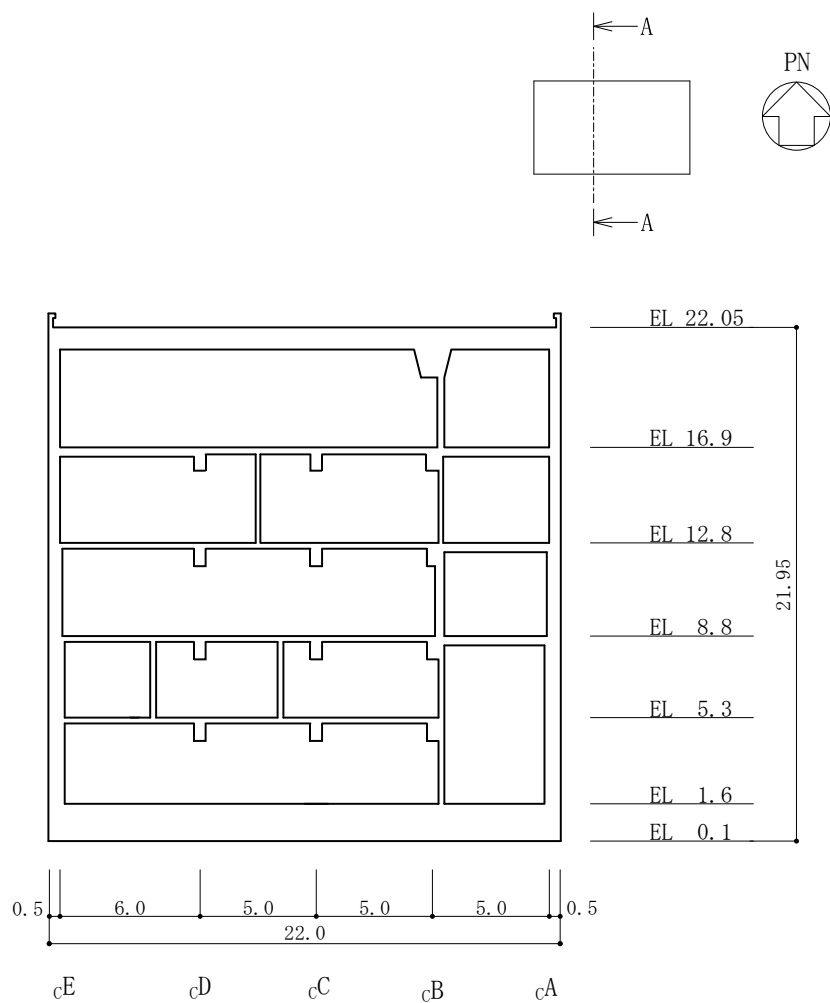
制御室建物は、主体構造が鉄筋コンクリート造で、高さ 21.95m、地上 4 階建の建物である。建物の平面は 22.0m（南北方向）×37.0m（東西方向）である。

制御室建物の屋根面の概略平面図を図 2-2 に、概略断面図を図 2-3 に示す。



(単位：m)

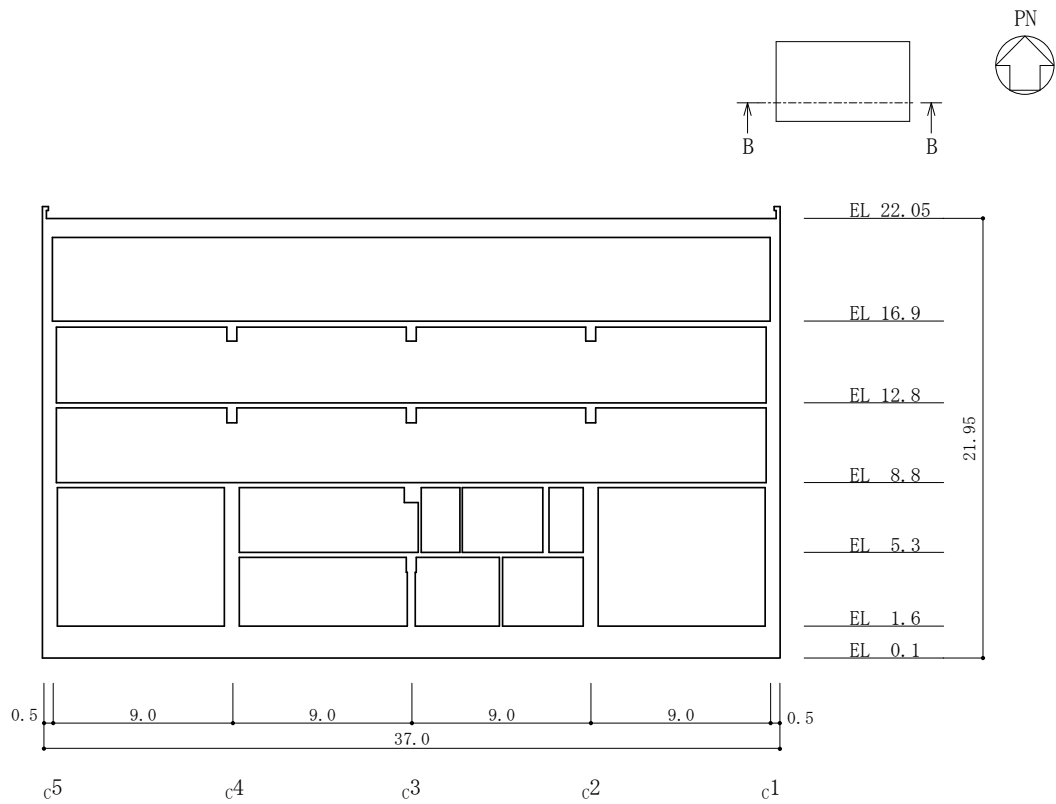
図 2-2 制御室建物の概略平面図



(単位：m)

図 2-3 制御室建物の概略断面図 (A-A 断面, 南北方向) (1/2)

注：「EL」は東京湾平均海面(T.P.)を基準としたレベルを示す。



(単位 : m)

図 2-3 制御室建物の概略断面図 (B-B 断面, 東西方向) (2/2)

2.3 評価方針

制御室建物の強度評価は、VI-3-別添 2-1-5「制御室建物の強度計算の方針」のうち「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，荷重の組合せ及び許容限界を踏まえて，建物の評価対象部位に発生する応力等が許容限界に収まることを「3. 強度評価方法及び評価条件」に示す方法及び評価条件を用いて計算し，「4. 強度評価結果」にて確認する。強度評価フローを図 2-4 に示す。

制御室建物の強度評価においては，その構造を踏まえて降下火砕物堆積による鉛直荷重及び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。

降下火砕物堆積による鉛直荷重及び設計荷重に対しては，鉛直荷重に抵抗する評価対象部位として屋根スラブを，水平荷重に抵抗する評価対象部位として耐震壁を選定した。

設計荷重は，VI-3-別添 2-1-5「制御室建物の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に従い設定する。

屋根及び耐震壁に作用する荷重は，VI-3-別添 2-1-5「制御室建物の強度計算の方針」のうち「5. 強度評価条件及び強度評価方法」に従い，制御室建物の応力解析モデル及び質点系モデルを用いて評価する。

許容限界は，VI-3-別添 2-1-5「制御室建物の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に従い設定する。

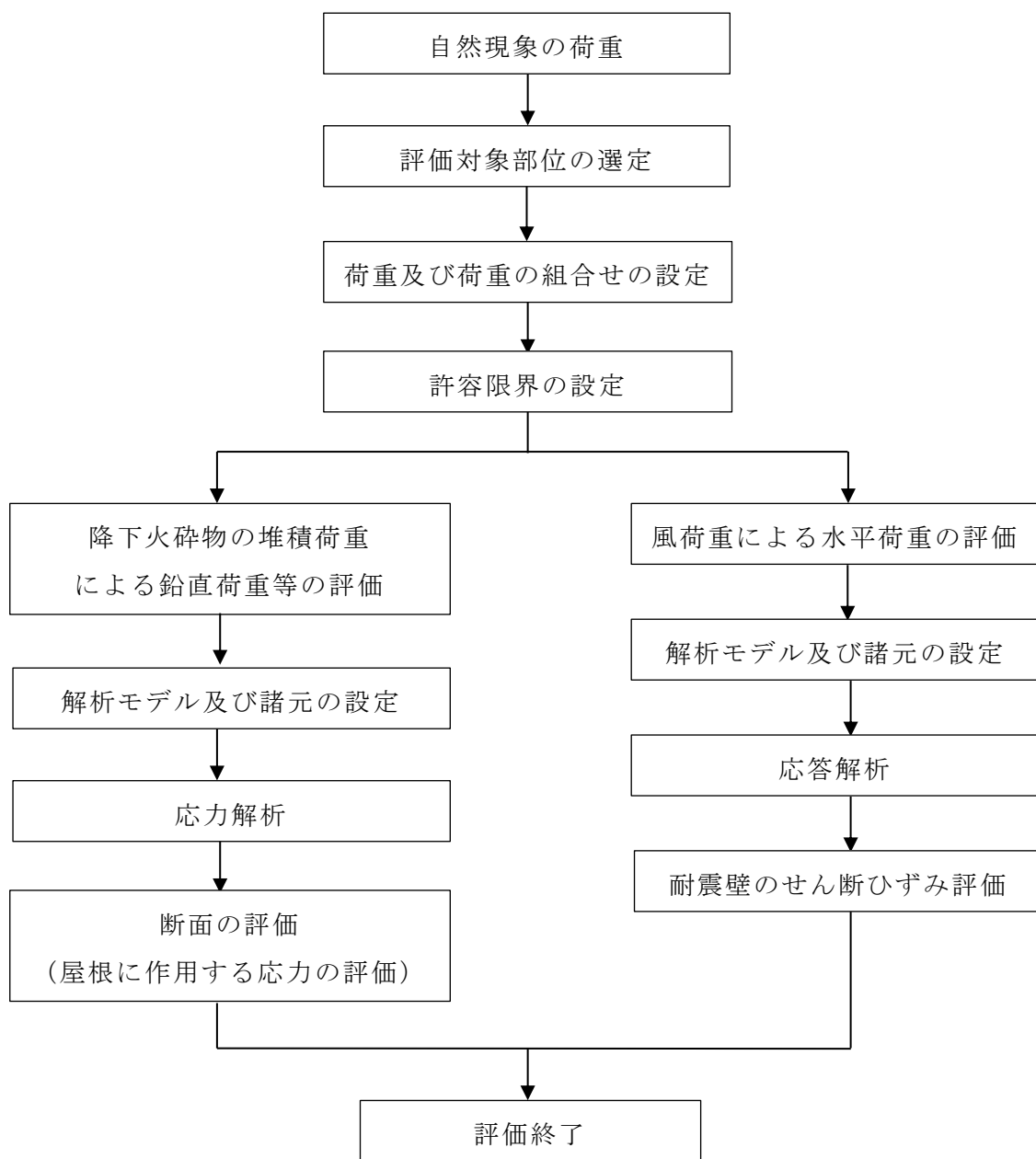


図 2-4 強度評価フロー

2.4 適用規格・基準等

制御室建物の強度評価に用いる規格・基準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法・同施行令
- ・ 松江市建築基準法施行細則（平成 17 年 3 月 31 日松江市規則第 234 号）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987（（社）日本電気協会）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版（（社）日本電気協会）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984（（社）日本電気協会）
- ・ 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説-許容応力度設計法-（（社）日本建築学会，1999 改定）
- ・ 原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005 制定）

3. 強度評価方法及び評価条件

3.1 評価対象部位

制御室建物の評価対象部位は、VI-3-別添 2-1-5「制御室建物の強度計算の方針」のうち「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、屋根スラブ及び耐震壁とする。

3.2 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 2-1-5「制御室建物の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

3.2.1 荷重

(1) 屋根スラブ

a. 鉛直荷重

表 3-1 に鉛直荷重の一覧を示す。屋根スラブに考慮する鉛直荷重は、常時作用する荷重 (F_d)、降下火砕物による荷重 (F_a) 及び積雪荷重 (F_s) を考慮する。常時作用する荷重は、固定荷重 (G) 及び積載荷重 (P) とする。降下火砕物による荷重は、湿潤密度 1.5g/cm^3 の降下火砕物が 56cm 堆積した場合の荷重として考慮する。積雪荷重は、発電所敷地に最も近い気象官署である松江地方気象台で観測された観測史上 1 位の月最深積雪 100cm に平均的な積雪荷重を与えるための係数 0.35 を考慮し 35.0cm とし、積雪量 1cm ごとに 20N/m^2 の積雪荷重が作用することを考慮し設定する。なお、水平方向の風荷重が作用した場合、屋根に対し鉛直上向きの荷重が働き下向き荷重は低減されるため、鉛直荷重に抵抗する部位の評価においては、保守的に水平方向の風荷重は考慮しない。

表 3-1 鉛直荷重一覧 (屋根スラブ EL 22.05m, スラブ厚さ $t = \square$)

常時作用する荷重 (F_d)	固定荷重 (G)	29.009kN/m^2
	積載荷重 (P)	0.981kN/m^2
降下火砕物による荷重 (F_a)		8.238kN/m^2
積雪荷重 (F_s)		0.7kN/m^2

(2) 耐震壁

風荷重の算出に用いる基準風速は、30m/s とする。

風荷重 (W) は、VI-3-別添 2-1-5「制御室建物の強度計算の方針」の「4.1(3)c. 水平荷重」に示す式に従い算出する。全高Hが5mを超えるため、Hが Z_b を超える場合の式を用いる。風荷重 (W) の算出は、建物の形状を考慮して算出した風力係数C及び風の受圧面積 A_1 に基づき実施し、風荷重 (W) の算出に用いる受圧面積の算定において、隣接する建物の遮断効果は、安全側の評価となるよう考慮しない。

$$W = q \cdot C \cdot A_1$$

ここで

$$q = 0.6 \cdot E' \cdot V_D^2$$

$$E' = E_r^2 \cdot G$$

$$E_r = 1.7 \cdot (H / Z_G)^\alpha \quad (H \text{ が } Z_b \text{ を超える場合})$$

$$E_r = 1.7 \cdot (Z_b / Z_G)^\alpha \quad (H \text{ が } Z_b \text{ 以下の場合})$$

Z_G , Z_b : 地表面粗度区分に応じて建設省告示第1454号に掲げる数値
風荷重算定に使用する入力条件を表3-2及び表3-3に示す。

表3-2 設計風荷重の条件

施設名称	基準風速 V_D (m/s)	全高 H (m)	Z_G (m)	α	ガスト 影響係数 G	設計用 速度圧 q (N/m ²)
制御室建物	30	7.8	350	0.15	2.20	1097.3

表3-3 制御室建物の風力係数及び受圧面積

(a) 南北方向

高さ (EL) (m)	風力係数 C		受圧面積 A_1 (m ²)	
	風上*	風下	風上	風下
22.80~19.475	0.800	0.4	123	123
19.475~15.00	0.700	0.4	166	166

注記* : C (風上) は基準階での値を示す。

(b) 東西方向

高さ(EL) (m)	風力係数 C		受圧面積 A_1 (m ²)	
	風上*	風下	風上	風下
22.80~19.475	0.800	0.4	73	73
19.475~15.00	0.700	0.4	99	99

注記* : C (風上) は基準階での値を示す。

3.2.2 荷重の組合せ

荷重の組合せを表 3-4 に示す。

ケース 1 は従荷重として、鉛直荷重と水平荷重を用いて評価するため耐震壁を評価対象とする。ケース 2 は従荷重として積雪荷重を組み合わせ、鉛直荷重のみを用いて評価するため屋根スラブを評価対象とする。

表 3-4 荷重の組合せ

考慮する 荷重の 組合せ	荷重*				
	常時作用する 荷重 (F_d)		主荷重	従荷重	
	固定 荷重	積載 荷重	降下火砕物に よる荷重 (F_a)	積雪荷重 (F_s)	風荷重 (W)
ケース 1	○	○	○	○	○
ケース 2	○	○	○	○	—

注記* : ○は考慮する荷重を示す。

3.3 許容限界

制御室建物の許容限界は、VI-3-別添 2-1-5「制御室建物の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界に従って、「3.1 評価対象部位」にて設定している建物の評価対象部位ごとに設定する。

屋根スラブ及び耐震壁の許容限界を「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005 制定）」（以下「RC-N規準」という。）及び「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987（（社）日本電気協会）」に基づき表 3-5 に、コンクリート及び鉄筋の短期許容応力度を表 3-6 及び表 3-7 に示す。

表 3-5 許容限界

要求機能	機能設計上の性能目標	部位	機能維持のための考え方	許容限界（評価基準値）
—	構造強度を有すること	屋根スラブ	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	「RC-N規準」に基づく短期許容応力度* ¹
		耐震壁* ²	最大せん断ひずみが構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	せん断ひずみ 2.0×10^{-3}
遮蔽性	遮蔽体の損傷により遮蔽性能を損なわないこと	屋根スラブ	部材に生じる応力が遮蔽性を維持するための許容限界を超えないことを確認	「RC-N規準」に基づく短期許容応力度* ¹
		耐震壁* ² (中央制御室遮蔽及び補助遮蔽)	最大せん断ひずみが遮蔽性を維持するための許容限界を超えないことを確認	せん断ひずみ 2.0×10^{-3}

注記*¹：許容限界は終局強度に対し妥当な安全余裕を有したものととして設定することとし、さらなる安全余裕を考慮して短期許容応力度とする。

*²：建物全体としては、水平力を主に耐震壁で負担する構造となっており、柱、はり、間仕切壁等が耐震壁の変形に追従すること、また、全体に剛性の高い構造となっており複数の耐震壁間の相対変形が小さく床スラブの変形が抑えられるため、各層の耐震壁の最大せん断ひずみが許容限界を満足していれば、建物・構築物に要求される機能は維持される。

表 3-6 コンクリートの短期許容応力度

(単位 : N/mm²)

設計基準強度 F _c	圧縮	せん断
22.1	14.6	1.06

表 3-7 鉄筋の短期許容応力度

(単位 : N/mm²)

種別*	引張り及び圧縮	せん断
SD35 (SD345 相当)	345	345

注記* : 建設当時の鋼材の種類を, 現在の規格に読み替えた許容応力度を示す。

3.4 解析モデル及び諸元

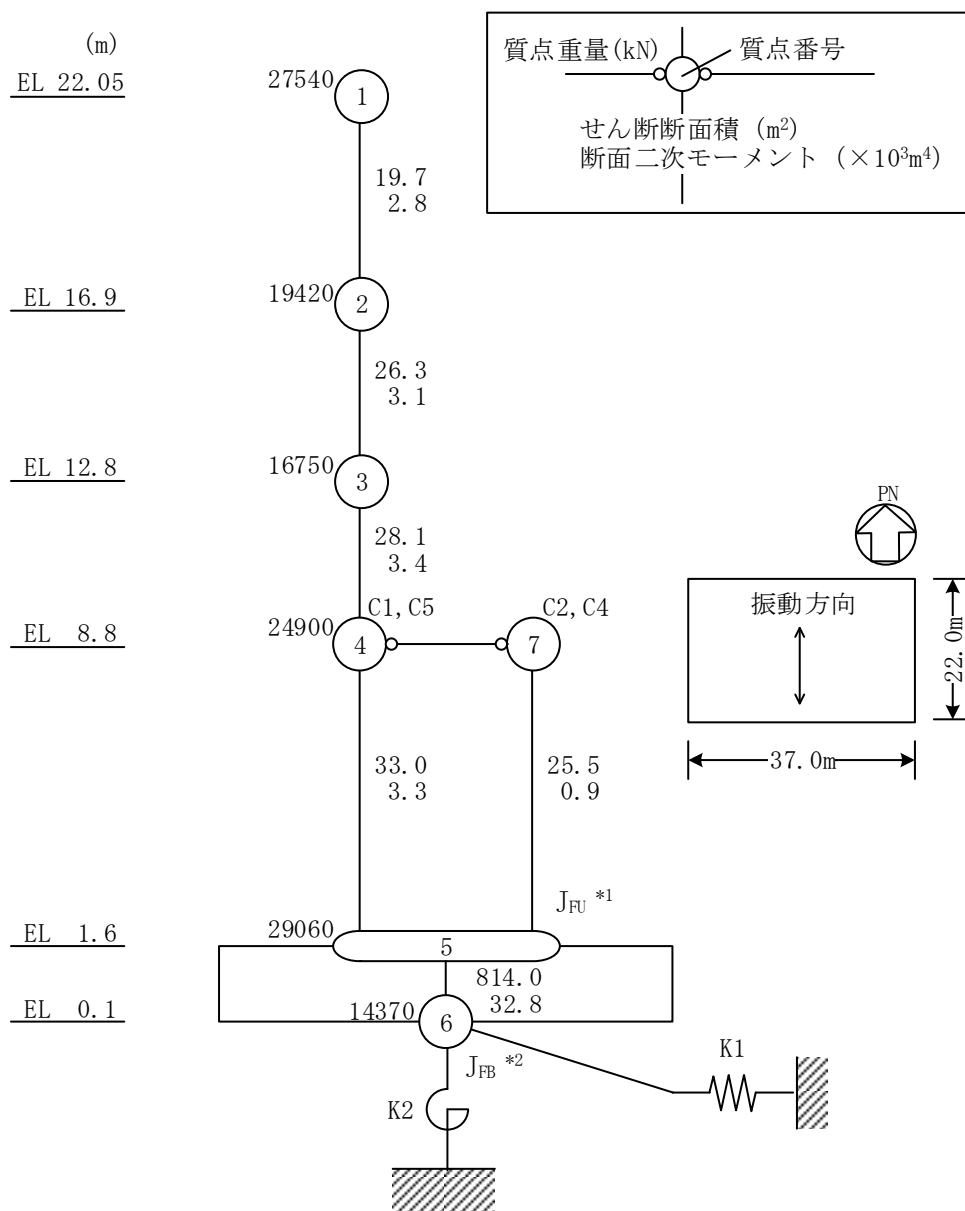
3.4.1 モデル化の基本方針

(1) 屋根スラブ

屋根スラブは、両端固定ばりの1方向スラブとして評価する。

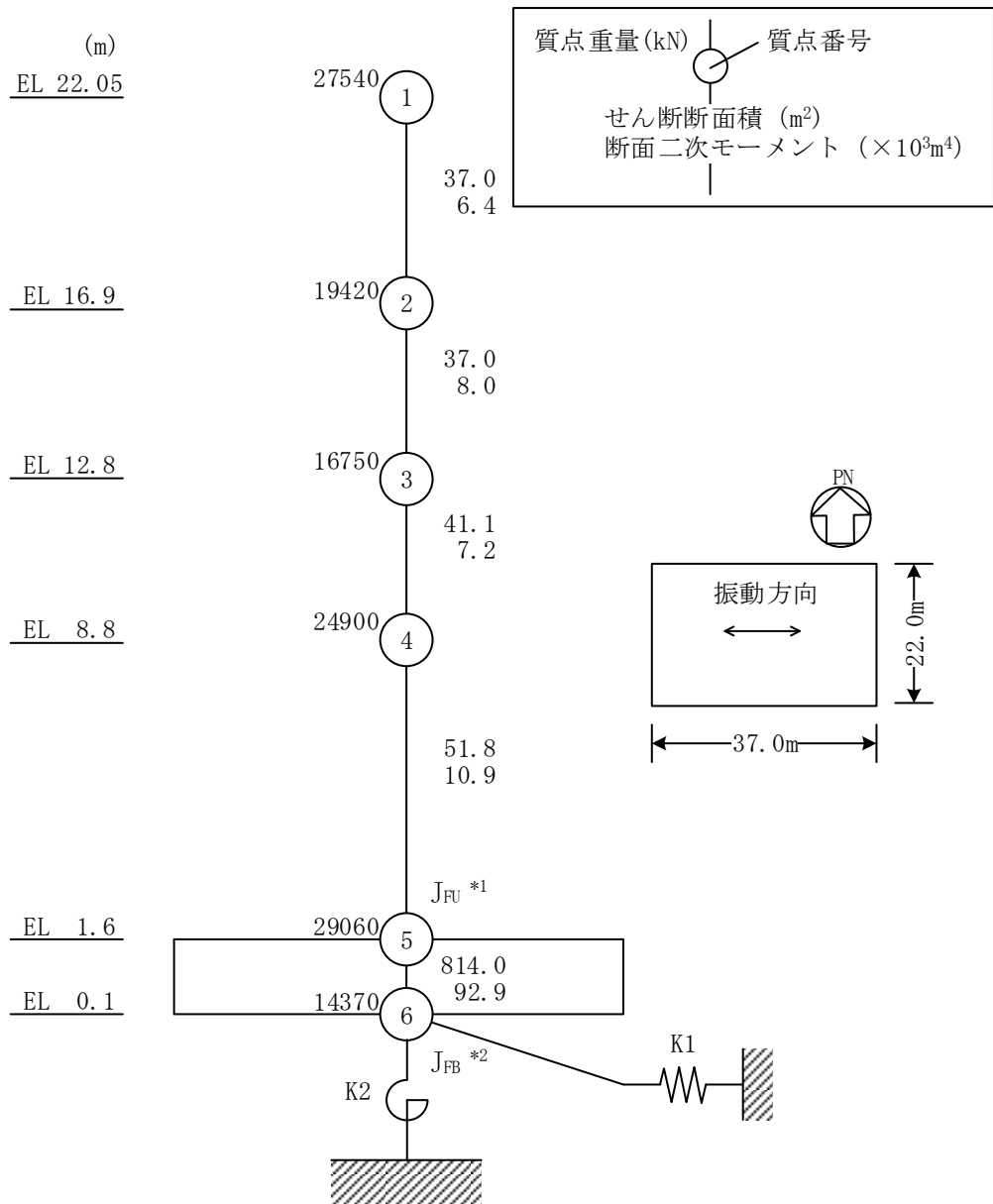
(2) 耐震壁

耐震壁は、VI-2-2-5「制御室建物の地震応答計算書」に示す地震応答解析モデルを用いて評価する。解析に使用するコードは、「NUPP4」である。なお、解析コードの検証及び妥当性の確認の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。地震応答解析モデルを図3-1に示す。



注記*1 : 回転慣性重量 (基礎スラブ上端) ($47.46 \times 10^5 \text{kN} \cdot \text{m}^2$)
 *2 : 回転慣性重量 (基礎スラブ下端) ($5.79 \times 10^5 \text{kN} \cdot \text{m}^2$)

(南北方向)
 図 3-1 地震応答解析モデル (水平方向) (1/2)



注記 *1 : 回転慣性重量 (基礎スラブ上端) ($13.42 \times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}^2$)

*2 : 回転慣性重量 (基礎スラブ下端) ($1.64 \times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}^2$)

(東西方向)

図 3-1 地震応答解析モデル (水平方向) (2/2)

3.4.2 解析諸元

使用材料の物性値を表 3-8 に示す。

表 3-8 使用材料の物性値

使用材料	ヤング係数 E (N/mm ²)	せん断弾性係数 G (N/mm ²)
鉄筋コンクリート	2.20×10^4	9.18×10^3

3.5 評価方法

3.5.1 屋根スラブの評価方法

(1) 応力解析方法

a. 荷重ケース

降下火砕物堆積時の応力は、単独荷重による応力を組み合わせて求める。
単独荷重の記号を以下に示す。

F_d : 常時作用する荷重

F_a : 降下火砕物による荷重

F_s : 積雪荷重

b. 荷重の組合せケース

荷重の組合せケースを表 3-9 に示す。

表 3-9 荷重の組合せケース

組合せケース	荷重の組合せ
ケース 2	$F_d + F_a + F_s$

c. 応力算出方法

等分布荷重を受ける両端固定ばりの曲げモーメント及びせん断力は下式により求める。

(両端固定ばり)

・ 端部曲げモーメント (M_E)

$$M_E = -\frac{1}{12} w \cdot l^2$$

・ 中央部曲げモーメント (M_C)

$$M_C = \frac{1}{24} w \cdot l^2$$

・ せん断力 (Q_E)

$$Q_E = \frac{1}{2} w \cdot l$$

ここで、

w : 等分布荷重 (N/m)

l : 有効スパン (m)

(2) 断面の評価方法

断面の評価は以下の方法で行う。

屋根スラブについては、曲げモーメントによる鉄筋の引張り応力度及び面外せん断力を算定し、各許容限界を超えないことを確認する。

a. 曲げモーメントに対する断面の評価方法

断面の評価は、「RC-N規準」に基づき、次式をもとに計算した評価対象箇所が生じる曲げモーメントによる鉄筋の引張り応力度が、短期許容応力度を超えないことを確認する。

$$\sigma_t = \frac{M}{a_t \cdot j}$$

ここで、

σ_t : 鉄筋の引張り応力度 (N/mm²)

M : 曲げモーメント (N・mm)

a_t : 引張り鉄筋断面積 (mm²)

j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

b. 面外せん断力に対する断面の評価方法

断面の評価は、「RC-N規準」に基づき、評価対象箇所が生じる面外せん断力が、次式をもとに計算した許容面外せん断力を超えないことを確認する。

$$Q_A = b \cdot j \cdot \{ \alpha \cdot f_s + 0.5 \cdot w_f \cdot f_t \cdot (p_w - 0.002) \}$$

ここで、

Q_A : 許容面外せん断力 (N)

b : 断面の幅 (mm)

j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

α : 許容せん断力の割増し係数で、次式による。

(2 を超える場合は 2, 1 未満の場合は 1 とする。)

$$\alpha = \frac{4}{M / (Q \cdot d) + 1}$$

M : 曲げモーメント (N・mm)

Q : せん断力 (N)

d : 断面の有効せい (mm)

f_s : コンクリートの短期許容せん断応力度 (N/mm²)

$w_f \cdot f_t$: せん断補強筋の短期許容引張り応力度 (N/mm²)

p_w : せん断補強筋比で、次式による。(0.002 以上とする*)

$$p_w = \frac{a_w}{b \cdot x}$$

a_w : せん断補強筋の断面積 (mm²)

x : せん断補強筋の間隔 (mm)

注記* : せん断補強筋がない領域については、第2項を0とする。

3.5.2 耐震壁の評価方法

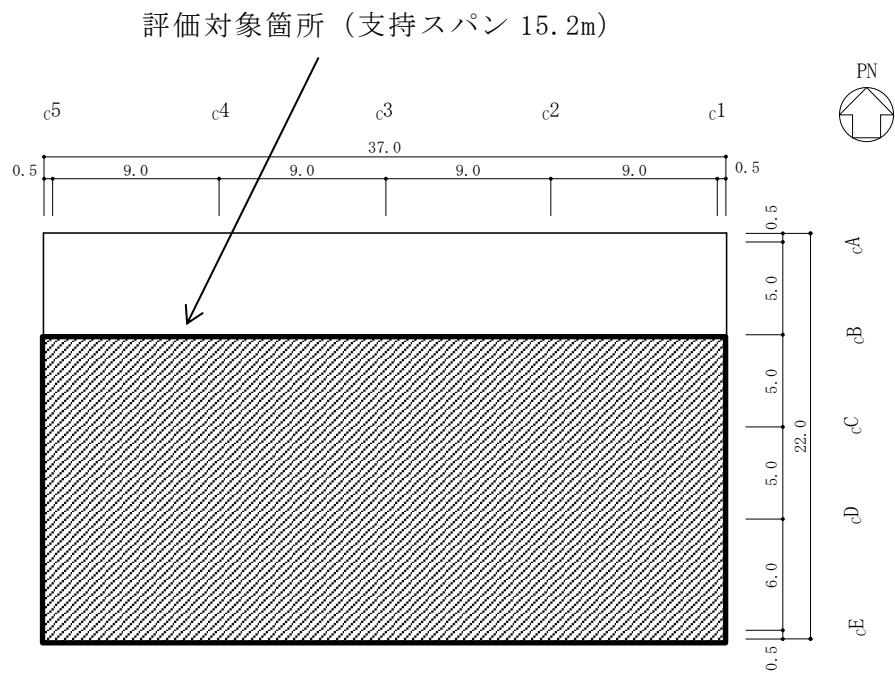
耐震壁の評価は、風荷重による耐震壁に発生するせん断ひずみが許容限界を超えないことを確認する。なお、耐震壁の応力計算には、地震応答解析モデルを用い、耐震壁の復元力特性の設定においては、鉛直荷重の増加による軸力を考慮すると第1折れ点の増大が見込まれるため、本評価では保守的に降下火砕物等堆積による鉛直荷重は考慮しない。

4. 強度評価結果

4.1 屋根スラブの評価結果

屋根スラブの評価対象箇所は、各断面の検定値が最も大きい箇所とし、図 4-1 に示す。また、評価結果を表 4-1 に示す。

降下火砕物堆積による鉛直荷重等によって発生する曲げモーメントに対する鉄筋の引張り応力度が許容限界を超えないこと及び発生する面外せん断力が許容限界を超えないことを確認した。



(単位：m)

図 4-1 評価対象箇所（屋根スラブ，EL 22.05m）

表 4-1 屋根スラブの評価結果 (EL 22.05m)

EL (m)		22.05
厚さ t (mm)		<input type="text"/>
有効せい d (mm)		<input type="text"/>
配筋 (鉄筋断面積)	上端筋	D29@150 (4280mm ² /m)
	下端筋	D29@100 (6420mm ² /m)
曲げモーメント	発生曲げモーメント M (kN・m/m)	749.5
	鉄筋の引張り応力度 σ_t (N/mm ²)	224.9
	許容限界 (N/mm ²)	345
	検定値	0.66
面外せん断力	発生せん断力 Q (kN/m)	295.8
	せん断応力度 (N/mm ²)	0.38
	許容限界 (N/mm ²)	1.06
	検定値	0.36

4.2 耐震壁の評価結果

「3.5 評価方法」に基づいた評価結果を表4-2に示す。なお、各方向において最大せん断ひずみが生じる部材のみを示す。

水平荷重等によって、評価対象部位に生じるせん断ひずみが許容限界を超えないことを確認した。

表4-2 耐震壁の評価結果

検討ケース	評価項目	方向	高さ(EL) (m)	せん断ひずみ ($\times 10^{-3}$)	許容限界 ($\times 10^{-3}$)
ケース1	せん断 ひずみ	南北方向	16.9~12.8	0.00150	2.0
		東西方向	16.9~12.8	0.000634	2.0

VI-3-別添 2-7 廃棄物処理建物の強度計算書

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
2.1 位置	1
2.2 構造概要	2
2.3 評価方針	5
2.4 適用規格・基準等	7
3. 強度評価方法及び評価条件	8
3.1 評価対象部位	8
3.2 荷重及び荷重の組合せ	8
3.2.1 荷重	8
3.2.2 荷重の組合せ	12
3.3 許容限界	12
3.4 解析モデル及び諸元	14
3.4.1 モデル化の基本方針	14
3.4.2 解析諸元	17
3.5 評価方法	18
3.5.1 屋根スラブの評価方法	18
3.5.2 耐震壁の評価方法	21
4. 強度評価結果	22
4.1 屋根スラブの評価結果	22
4.2 耐震壁の評価結果	27

1. 概要

本資料は、VI-3-別添 2-1-6「廃棄物処理建物の強度計算の方針」に示すとおり、廃棄物処理建物が降下火砕物及び積雪の堆積時においても、内包する防護すべき施設に降下火砕物を堆積させない機能の維持を考慮して、建物全体及び建物の主要な構造部材が構造健全性を維持することを確認するものである。

2. 基本方針

廃棄物処理建物は、VI-3-別添 2-1-6「廃棄物処理建物の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、本資料では、「2.1 位置」、「2.2 構造概要」、「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格・基準等」を示す。

2.1 位置

廃棄物処理建物は、VI-3-別添 2-1-6「廃棄物処理建物の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す位置に設置する。廃棄物処理建物の配置を図 2-1 に示す。

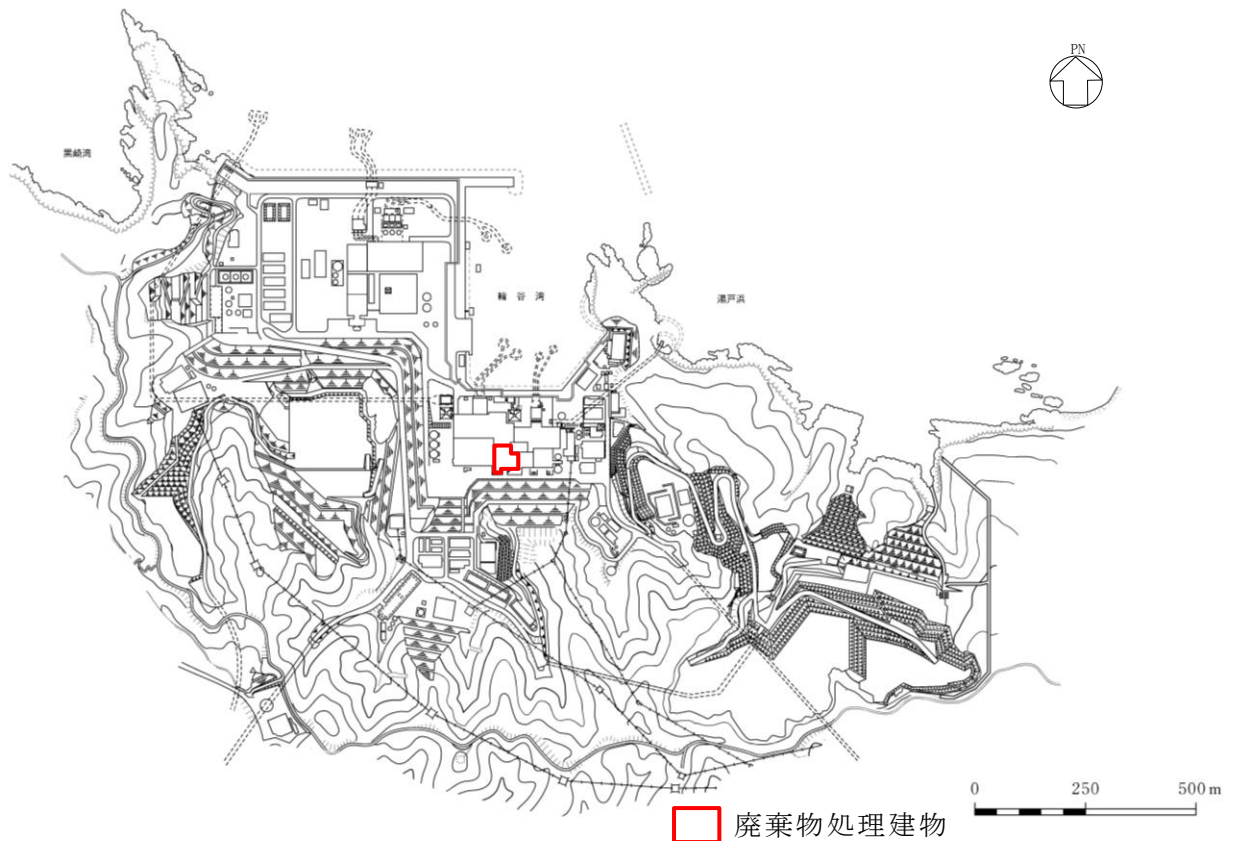


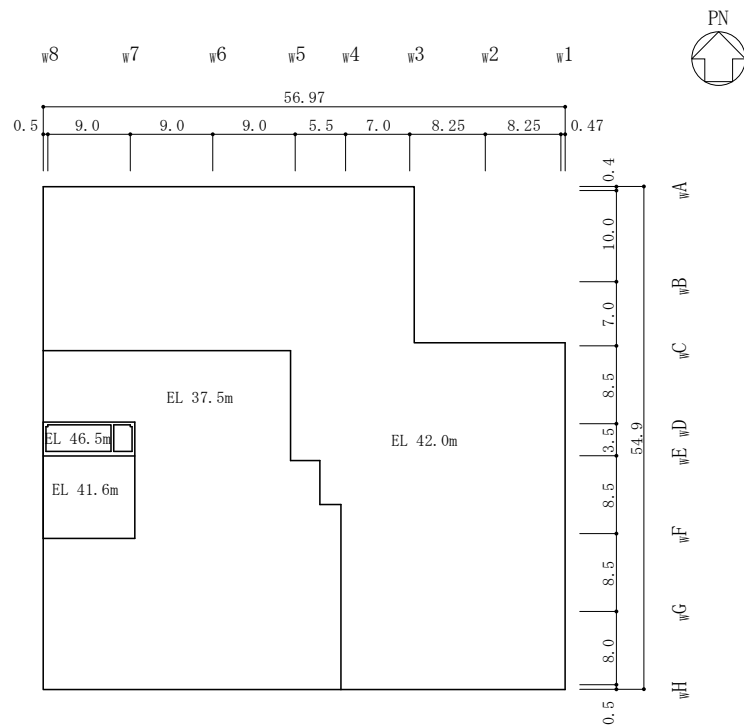
図 2-1 廃棄物処理建物の配置図

2.2 構造概要

廃棄物処理建物は、VI-3-別添 2-1-6「廃棄物処理建物の強度計算の方針」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。

廃棄物処理建物は、主体構造が鉄筋コンクリート造で、高さ 42.0m、地上 5 階、地下 2 階建の建物である。建物の平面は 54.9m（南北方向）×56.97m（東西方向）となっている。

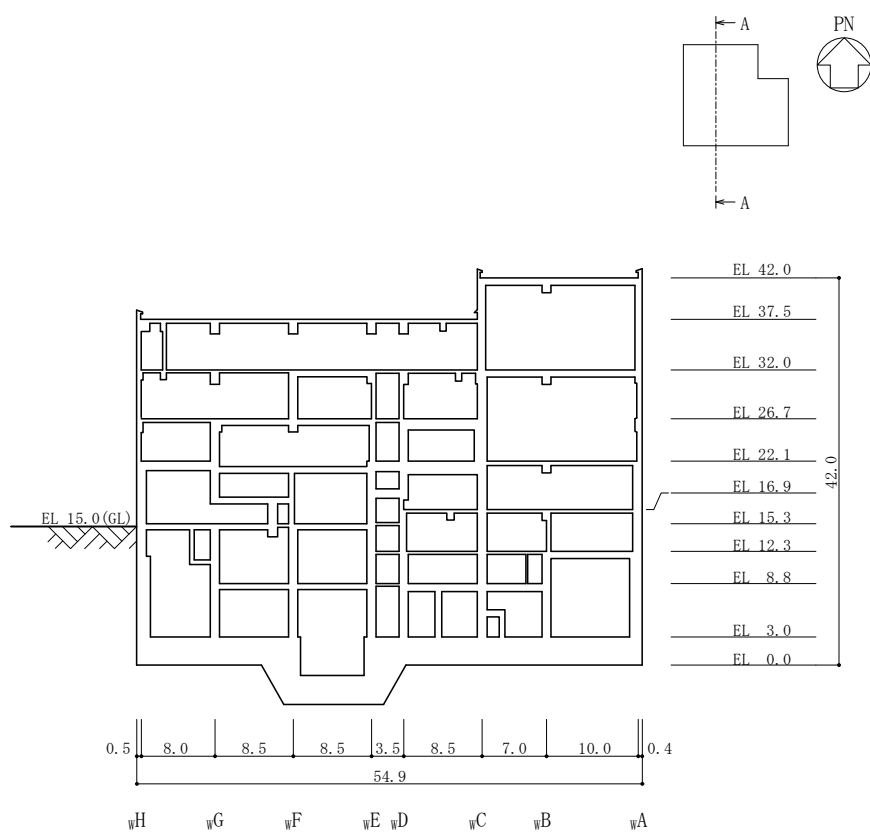
廃棄物処理建物の屋根面の概略平面図を図 2-2 に、概略断面図を図 2-3 に示す。



(単位：m)

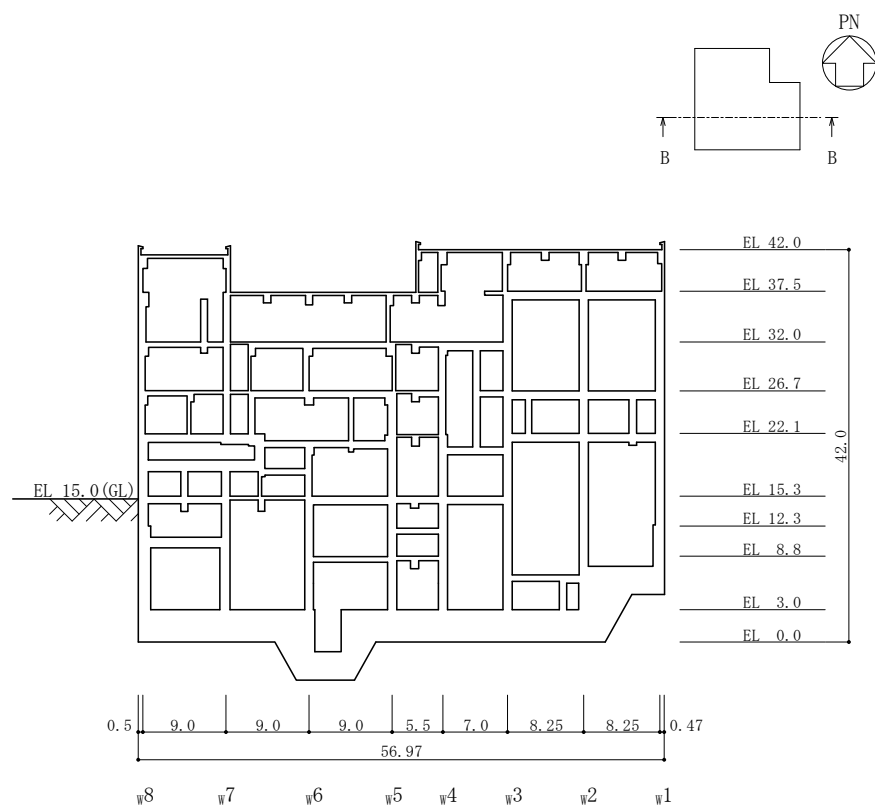
図 2-2 廃棄物処理建物の概略平面図

注：「EL」は東京湾平均海面(T.P.)を基準としたレベルを示す。



(単位 : m)

図 2-3 廃棄物処理建物の概略断面図 (A-A 断面, 南北方向) (1/2)



(単位 : m)

図 2-3 廃棄物処理建物の概略断面図 (B-B 断面, 東西方向) (2/2)

2.3 評価方針

廃棄物処理建物の強度評価は、VI-3-別添 2-1-6「廃棄物処理建物の強度計算の方針」のうち「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，荷重の組合せ及び許容限界を踏まえて，建物の評価対象部位に発生する応力等が許容限界に収まることを「3. 強度評価方法及び評価条件」に示す方法及び評価条件を用いて計算し，「4. 強度評価結果」にて確認する。強度評価フローを図 2-4 に示す。

廃棄物処理建物の強度評価においては，その構造を踏まえて降下火砕物堆積による鉛直荷重及び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。

降下火砕物堆積による鉛直荷重及び設計荷重に対しては，鉛直荷重に抵抗する評価対象部位として屋根スラブを，水平荷重に抵抗する評価対象部位として耐震壁を選定した。

設計荷重は，VI-3-別添 2-1-6「廃棄物処理建物の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に従い設定する。

屋根及び耐震壁に作用する荷重は，VI-3-別添 2-1-6「廃棄物処理建物の強度計算の方針」のうち「5. 強度評価条件及び強度評価方法」に従い，廃棄物処理建物の応力解析モデル及び質点系モデルを用いて評価する。

許容限界は，VI-3-別添 2-1-6「廃棄物処理建物の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に従い設定する。

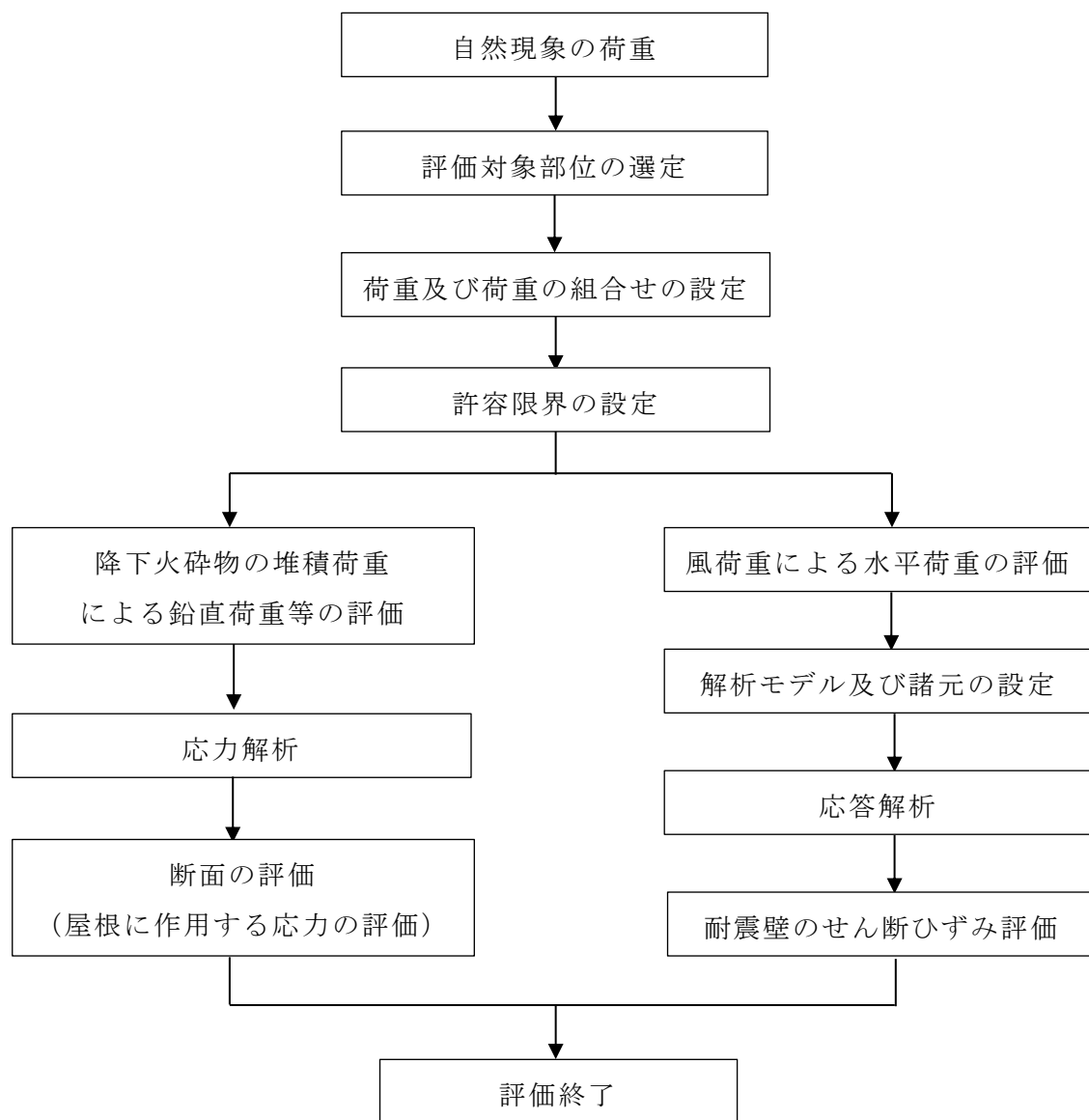


図 2-4 強度評価フロー

2.4 適用規格・基準等

廃棄物処理建物の強度評価に用いる規格・基準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法・同施行令
- ・ 松江市建築基準法施行細則（平成 17 年 3 月 31 日松江市規則第 234 号）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987（（社）日本電気協会）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版（（社）日本電気協会）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984（（社）日本電気協会）
- ・ 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説-許容応力度設計法-（（社）日本建築学会，1999 改定）
- ・ 原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005 制定）

3. 強度評価方法及び評価条件

3.1 評価対象部位

廃棄物処理建物の評価対象部位は、VI-3-別添 2-1-6「廃棄物処理建物の強度計算の方針」のうち「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、屋根スラブ及び耐震壁とする。

3.2 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 2-1-6「廃棄物処理建物の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

3.2.1 荷重

(1) 屋根スラブ

a. 鉛直荷重

表 3-1～表 3-4 に鉛直荷重の一覧を示す。屋根スラブに考慮する鉛直荷重は、常時作用する荷重 (F_d)、降下火砕物による荷重 (F_a) 及び積雪荷重 (F_s) を考慮する。常時作用する荷重は、固定荷重 (G) 及び積載荷重 (P) とする。降下火砕物による荷重は、湿潤密度 1.5g/cm^3 の降下火砕物が 56cm 堆積した場合の荷重として考慮する。積雪荷重は、発電所敷地に最も近い気象官署である松江地方気象台で観測された観測史上 1 位の月最深積雪 100cm に平均的な積雪荷重を与えるための係数 0.35 を考慮し 35.0cm とし、積雪量 1cm ごとに 20N/m^2 の積雪荷重が作用することを考慮し設定する。なお、水平方向の風荷重が作用した場合、屋根に対し鉛直上向きの荷重が働き下向き荷重は低減されるため、鉛直荷重に抵抗する部位の評価においては、保守的に水平方向の風荷重は考慮しない。

表 3-1 鉛直荷重一覧 (屋根スラブ EL 37.5m, スラブ厚さ t=)

常時作用する荷重 (F _d)	固定荷重 (G)	t= <input type="text"/>	11.278kN/m ²
		t= <input type="text"/>	13.632kN/m ²
積載荷重 (P)		0.981kN/m ²	
降下火砕物による荷重 (F _a)		8.238kN/m ²	
積雪荷重 (F _s)		0.7kN/m ²	

表 3-2 鉛直荷重一覧 (屋根スラブ EL 41.6m, スラブ厚さ t=)

常時作用する荷重 (F _d)	固定荷重 (G)	15.985kN/m ²
	積載荷重 (P)	0.981kN/m ²
降下火砕物による荷重 (F _a)		8.238kN/m ²
積雪荷重 (F _s)		0.7kN/m ²

表 3-3 鉛直荷重一覧 (屋根スラブ EL 42.0m, スラブ厚さ t=
)

常時作用する荷重 (F _d)	固定荷重 (G)	t= <input type="text"/>	11.278kN/m ²
		t= <input type="text"/>	15.985kN/m ²
		t= <input type="text"/>	17.162kN/m ²
		t= <input type="text"/>	20.693kN/m ²
		t= <input type="text"/>	39.521kN/m ²
積載荷重 (P)		0.981kN/m ²	
降下火砕物による荷重 (F _a)		8.238kN/m ²	
積雪荷重 (F _s)		0.7kN/m ²	

表 3-4 鉛直荷重一覧 (屋根スラブ EL 46.5m, スラブ厚さ t=)

常時作用する荷重 (F _d)	固定荷重 (G)	11.278kN/m ²
	積載荷重 (P)	0.981kN/m ²
降下火砕物による荷重 (F _a)		8.238kN/m ²
積雪荷重 (F _s)		0.7kN/m ²

(2) 耐震壁

風荷重の算出に用いる基準風速は、30m/s とする。

風荷重(W)は、VI-3-別添 2-1-6「廃棄物処理建物の強度計算の方針」の「4.1(3)c. 水平荷重」に示す式に従い算出する。全高Hが5mを超えるため、Hが Z_b を超える場合の式を用いる。風荷重(W)の算出は、建物の形状を考慮して算出した風力係数C及び風の受圧面積 A_1 に基づき実施し、風荷重(W)の算出に用いる受圧面積の算定において、隣接する建物の遮断効果は、安全側の評価となるよう考慮しない。

$$W = q \cdot C \cdot A_1$$

ここで

$$q = 0.6 \cdot E' \cdot V_D^2$$

$$E' = E_r^2 \cdot G$$

$$E_r = 1.7 \cdot (H / Z_G)^\alpha \quad (H \text{ が } Z_b \text{ を超える場合})$$

$$E_r = 1.7 \cdot (Z_b / Z_G)^\alpha \quad (H \text{ が } Z_b \text{ 以下の場合})$$

Z_G , Z_b : 地表面粗度区分に応じて建設省告示第1454号に掲げる数値
風荷重算定に使用する入力条件を表3-5及び表3-6に示す。

表 3-5 設計風荷重の条件

施設名称	基準風速 V_D (m/s)	全高 H (m)	Z_G (m)	α	ガスト 影響係数 G	設計用 速度圧 q (N/m ²)
廃棄物処理建物	30	32.1	350	0.15	2.05	1564.4

表 3-6 廃棄物処理建物の風力係数及び受圧面積

(a) 南北方向

高さ (EL) (m)	風力係数 C		受圧面積 A ₁ (m ²)	
	風上*	風下	風上	風下
47.177~39.75	0.800	0.4	261	261
39.75~34.75	0.719	0.4	285	285
34.75~29.35	0.661	0.4	308	308
29.35~24.40	0.591	0.4	282	282
24.40~19.50	0.509	0.4	279	279
19.50~16.10	0.458	0.4	194	194
16.10~15.00	0.458	0.4	63	63

注記* : C (風上) は基準階での値を示す。

(b) 東西方向

高さ (EL) (m)	風力係数 C		受圧面積 A ₁ (m ²)	
	風上*	風下	風上	風下
47.177~39.75	0.800	0.4	231	231
39.75~34.75	0.719	0.4	275	275
34.75~29.35	0.661	0.4	297	297
29.35~24.40	0.591	0.4	272	272
24.40~19.50	0.509	0.4	288	288
19.50~16.10	0.458	0.4	207	207
16.10~15.00	0.458	0.4	67	67

注記* : C (風上) は基準階での値を示す。

3.2.2 荷重の組合せ

荷重の組合せを表 3-7 に示す。

ケース 1 は従荷重として、鉛直荷重と水平荷重を用いて評価するため耐震壁を評価対象とする。ケース 2 は従荷重として積雪荷重を組み合わせ、鉛直荷重のみを用いて評価するため屋根スラブを評価対象とする。

表 3-7 荷重の組合せ

考慮する 荷重の 組合せ	荷重*				
	常時作用する 荷重 (F_d)		主荷重	従荷重	
	固定 荷重	積載 荷重	降下火砕物に よる荷重 (F_a)	積雪荷重 (F_s)	風荷重 (W)
ケース 1	○	○	○	○	○
ケース 2	○	○	○	○	—

注記*：○は考慮する荷重を示す。

3.3 許容限界

廃棄物処理建物の許容限界は、VI-3-別添 2-1-6「廃棄物処理建物の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界に従って、「3.1 評価対象部位」にて設定している建物の評価対象部位ごとに設定する。

屋根スラブ及び耐震壁の許容限界を「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005 制定）」（以下「RC-N規準」という。）及び「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987（（社）日本電気協会）」に基づき表 3-8 に、コンクリート及び鉄筋の短期許容応力度を表 3-9 及び表 3-10 に示す。

表 3-8 許容限界

要求機能	機能設計上の性能目標	部位	機能維持のための考え方	許容限界 (評価基準値)
-	内包する防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないこと	屋根スラブ	内包する防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないために落下しないことを確認	「RC-N規準」に基づく短期許容応力度*1
		耐震壁*2	最大せん断ひずみが波及的影響を及ぼさないための許容限界を超えないことを確認	せん断ひずみ 4.0×10^{-3}

注記*1：許容限界は終局強度に対し妥当な安全余裕を有したものと設定することとし、さらなる安全余裕を考慮して短期許容応力度とする。

*2：建物全体としては、水平力を主に耐震壁で負担する構造となっており、柱、はり、間仕切壁等が耐震壁の変形に追従すること、また、全体に剛性の高い構造となっており複数の耐震壁間の相対変形が小さく床スラブの変形が抑えられるため、各層の耐震壁の最大せん断ひずみが許容限界を満足していれば、建物・構築物に要求される機能は維持される。

表 3-9 コンクリートの短期許容応力度

(単位：N/mm²)

設計基準強度 F _c	圧縮	せん断
23.5	15.6	1.08

表 3-10 鉄筋の短期許容応力度

(単位：N/mm²)

種別*	引張り及び圧縮	せん断
SD35 (SD345 相当)	345	345

注記*：建設当時の鋼材の種類を、現在の規格に読み替えた許容応力度を示す。

3.4 解析モデル及び諸元

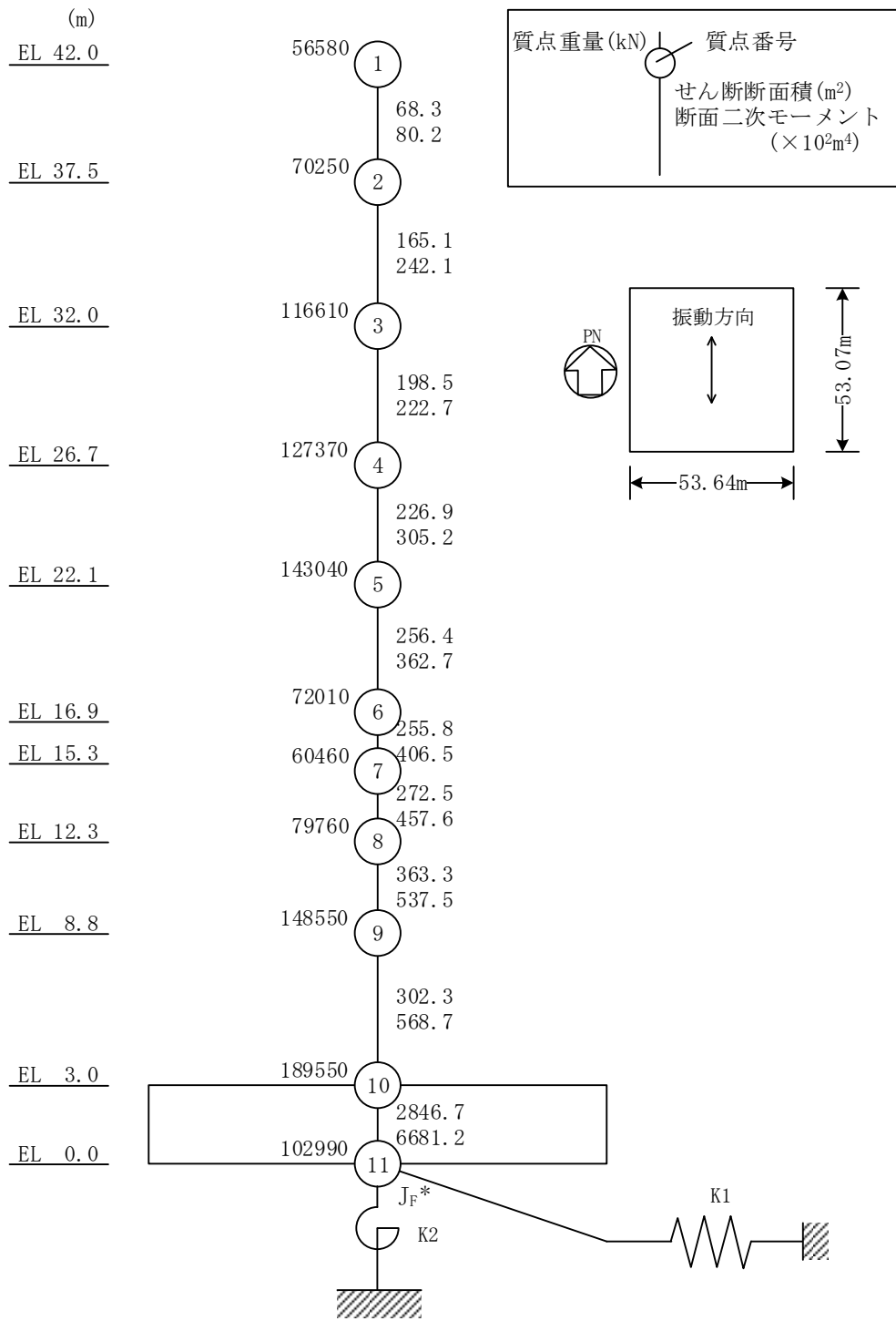
3.4.1 モデル化の基本方針

(1) 屋根スラブ

屋根スラブは、端部の支持状況に応じたモデル化により応力算出を行う。

(2) 耐震壁

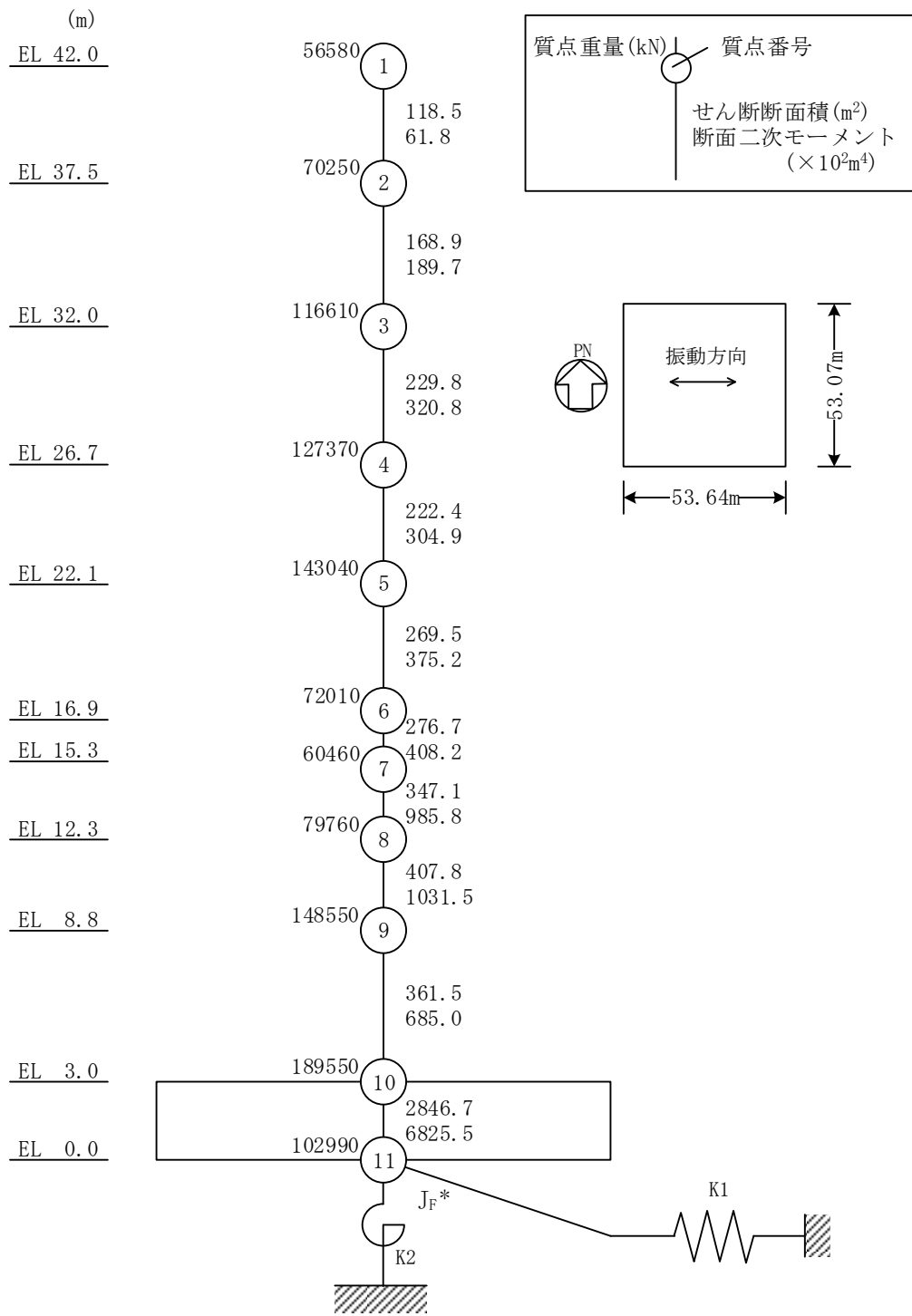
耐震壁は、VI-2-2-9「廃棄物処理建物の地震応答計算書」に示す地震応答解析モデルを用いて評価する。解析に使用するコードは、「NUPP4」である。なお、解析コードの検証及び妥当性の確認の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。地震応答解析モデルを図3-1に示す。



注記* : 回転慣性重量 ($29.35 \times 10^7 \text{kN} \cdot \text{m}^2$)

(南北方向)

図 3-1 地震応答解析モデル (水平方向) (1/2)



注記* : 回転慣性重量 ($31.61 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$)

(東西方向)

図 3-1 地震応答解析モデル (水平方向) (2/2)

3.4.2 解析諸元

使用材料の物性値を表 3-11 に示す。

表 3-11 使用材料の物性値

使用材料	ヤング係数 E (N/mm ²)	せん断弾性係数 G (N/mm ²)
鉄筋コンクリート	2.25×10^4	9.38×10^3

3.5 評価方法

3.5.1 屋根スラブの評価方法

(1) 応力解析方法

a. 荷重ケース

降下火砕物堆積時の応力は、単独荷重による応力を組み合わせて求める。
単独荷重の記号を以下に示す。

F_d : 常時作用する荷重

F_a : 降下火砕物による荷重

F_s : 積雪荷重

b. 荷重の組合せケース

荷重の組合せケースを表 3-12 に示す。

表 3-12 荷重の組合せケース

組合せケース	荷重の組合せ
ケース 2	$F_d + F_a + F_s$

c. 応力算出方法

等分布荷重を受ける両端固定ばり及び四辺固定版の曲げモーメント及びせん断力は下式により求める。

(両端固定ばり)

・ 端部曲げモーメント (M_E)

$$M_E = -\frac{1}{12} w \cdot l^2$$

・ 中央部曲げモーメント (M_C)

$$M_C = \frac{1}{24} w \cdot l^2$$

・ せん断力 (Q_E)

$$Q_E = \frac{1}{2} w \cdot l$$

ここで、

w : 等分布荷重 (N/m)

l : 有効スパン (m)

(四辺固定版)

- 短辺方向の端部曲げモーメント (M_{x1})

$$M_{x1} = -\frac{1}{12} w_x \cdot l_x^2$$

- 短辺方向の中央部曲げモーメント (M_{x2})

$$M_{x2} = \frac{1}{18} w_x \cdot l_x^2$$

- 長辺方向の端部曲げモーメント (M_{y1})

$$M_{y1} = -\frac{1}{24} w \cdot l_x^2$$

- 長辺方向の中央部曲げモーメント (M_{y2})

$$M_{y2} = \frac{1}{36} w \cdot l_x^2$$

- せん断力 (Q)

$$Q = \beta \cdot w \cdot l_x$$

ここで,

l_x : 短辺有効スパン (m)

l_y : 長辺有効スパン (m)

w : 単位面積あたりの荷重 (kN/m²)

β : スラブの辺長比 (l_y/l_x) により定まる係数

$$w_x = \frac{l_y^4}{l_x^4 + l_y^4} w$$

(2) 断面の評価方法

断面の評価は以下の方法で行う。

屋根スラブについては、曲げモーメントによる鉄筋の引張り応力度及び面外せん断力を算定し、各許容限界を超えないことを確認する。

a. 曲げモーメントに対する断面の評価方法

断面の評価は、「RC-N規準」に基づき、次式をもとに計算した評価対象箇所に生じる曲げモーメントによる鉄筋の引張り応力度が、短期許容応力度を超えないことを確認する。

$$\sigma_t = \frac{M}{a_t \cdot j}$$

ここで,

σ_t : 鉄筋の引張り応力度 (N/mm²)

- M : 曲げモーメント (N・mm)
 a_t : 引張鉄筋断面積 (mm²)
j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

b. 面外せん断力に対する断面の評価方法

断面の評価は、「RC-N規準」に基づき、評価対象箇所に生じる面外せん断力が、次式をもとに計算した許容面外せん断力を超えないことを確認する。

$$Q_A = b \cdot j \cdot \{ \alpha \cdot f_s + 0.5 \cdot w f_t \cdot (p_w - 0.002) \}$$

ここで、

- Q_A : 許容面外せん断力 (N)
b : 断面の幅 (mm)
j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)
 α : 許容せん断力の割増し係数で、次式による。

(2 を超える場合は 2, 1 未満の場合は 1 とする。)

$$\alpha = \frac{4}{M / (Q \cdot d) + 1}$$

- M : 曲げモーメント (N・mm)
Q : せん断力 (N)
d : 断面の有効せい (mm)
 f_s : コンクリートの短期許容せん断応力度 (N/mm²)
 $w f_t$: せん断補強筋の短期許容引張り応力度 (N/mm²)
 p_w : せん断補強筋比で、次式による。(0.002 以上とする*)

$$p_w = \frac{a_w}{b \cdot x}$$

- a_w : せん断補強筋の断面積 (mm²)
x : せん断補強筋の間隔 (mm)

注記* : せん断補強筋がない領域については、第 2 項を 0 とする。

3.5.2 耐震壁の評価方法

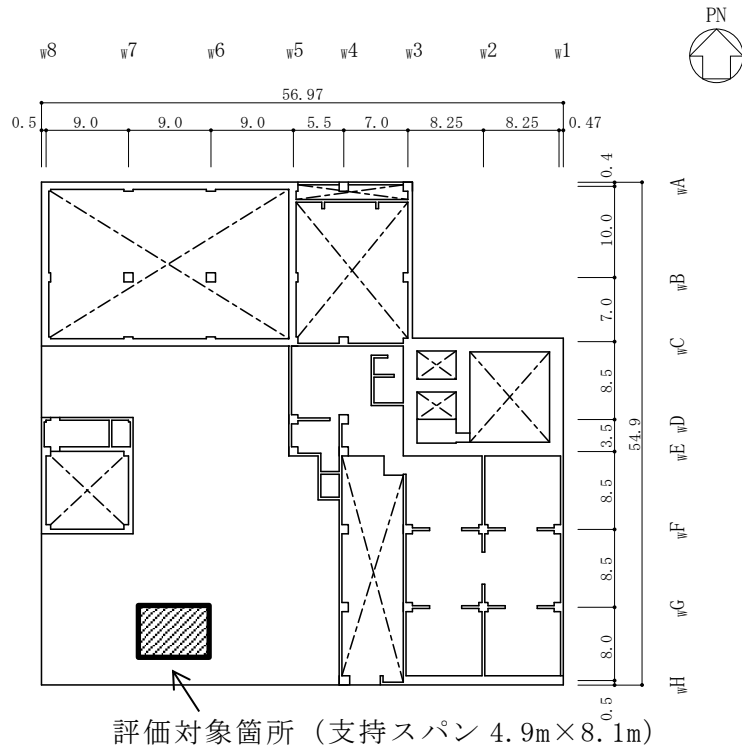
耐震壁の評価は、風荷重による耐震壁に発生するせん断ひずみが許容限界を超えないことを確認する。なお、耐震壁の応力計算には、地震応答解析モデルを用い、耐震壁の復元力特性の設定においては、鉛直荷重の増加による軸力を考慮すると第1折れ点の増大が見込まれるため、本評価では保守的に降下火砕物等堆積による鉛直荷重は考慮しない。

4. 強度評価結果

4.1 屋根スラブの評価結果

屋根スラブの評価対象箇所は、各断面の検定値が最も大きい箇所とし、図 4-1 及び図 4-2 に示す。また、評価結果を表 4-1～表 4-3 に示す。

降下火砕物堆積による鉛直荷重等によって発生する曲げモーメントに対する鉄筋の引張り応力度が許容限界を超えないこと及び発生する面外せん断力が許容限界を超えないことを確認した。



(単位：m)

図 4-1 評価対象箇所 (屋根スラブ, EL 37.5m)

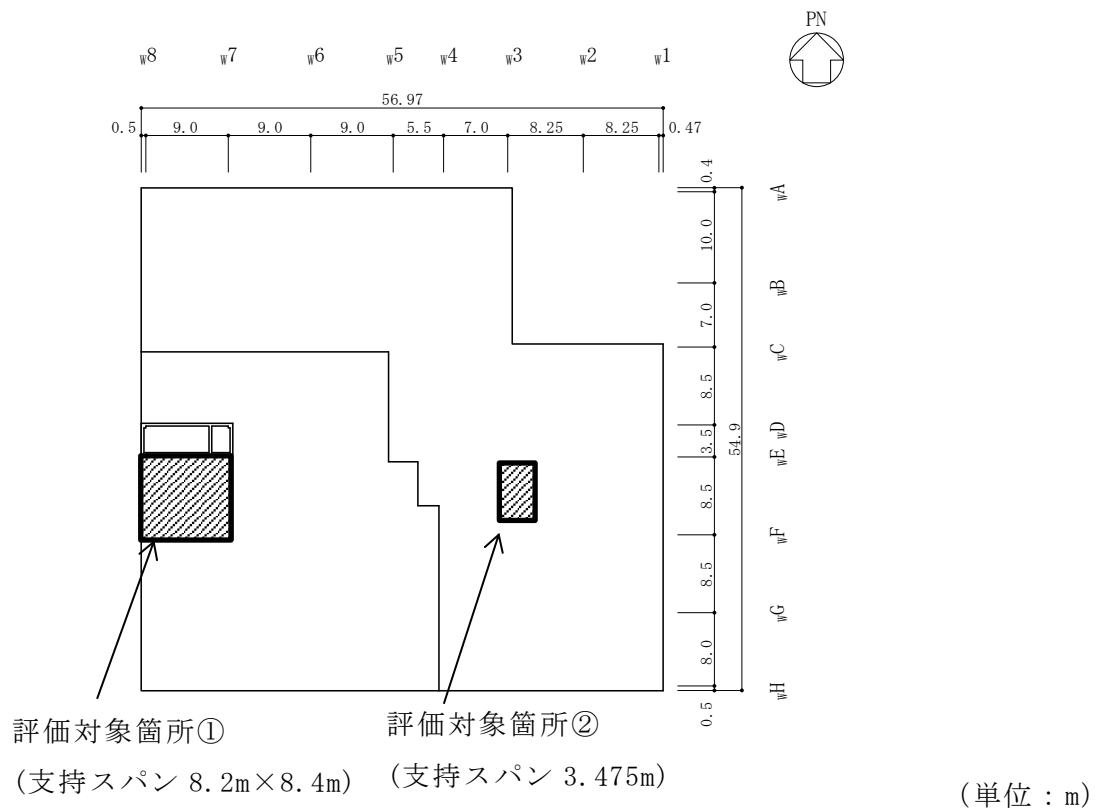


図 4-2 評価対象箇所 (屋根スラブ, EL 41.6m, EL 42.0m)

表 4-1 屋根スラブの評価結果(EL 37.5m)

EL (m)		37.5
厚さ t (mm)		<input type="text"/>
有効せい d (mm)		<input type="text"/>
配筋 (鉄筋断面積)		D13@200 (635mm ² /m)
曲 げ モー メント	発生曲げモーメント M (kN・m/m)	37.4
	鉄筋の引張り応力度 σ_t (N/mm ²)	281.7
	許容限界 (N/mm ²)	345
	検定値	0.82
面 外 せん 断 力	発生せん断力 Q (kN/m)	54.0
	せん断応力度 (N/mm ²)	0.26
	許容限界 (N/mm ²)	1.08
	検定値	0.25

表 4-2 屋根スラブの評価結果 (EL 41.6m) (評価対象箇所①)

EL (m)		41.6
厚さ t (mm)		<input type="text"/>
有効せい d (mm)		<input type="text"/>
配筋 (鉄筋断面積)		D25@200 (2535mm ² /m)
曲 げ モー メント	発生曲げモーメント M (kN・m/m)	76.1
	鉄筋の引張り応力度 σ_t (N/mm ²)	82.1
	許容限界 (N/mm ²)	345
	検定値	0.24
面 外 せん 断 力	発生せん断力 Q (kN/m)	93.5
	せん断応力度 (N/mm ²)	0.26
	許容限界 (N/mm ²)	1.08
	検定値	0.25

表 4-3 屋根スラブの評価結果 (EL 42.0m) (評価対象箇所②)

EL (m)		42.0
厚さ t (mm)		<input type="text"/>
有効せい d (mm)		<input type="text"/>
配筋 (鉄筋断面積)		D13@200 (635mm ² /m)
曲 げ モー メント	発生曲げモーメント M (kN・m/m)	21.4
	鉄筋の引張り応力度 σ_t (N/mm ²)	152.3
	許容限界 (N/mm ²)	345
	検定値	0.45
面 外 せん 断 力	発生せん断力 Q (kN/m)	36.9
	せん断応力度 (N/mm ²)	0.17
	許容限界 (N/mm ²)	1.08
	検定値	0.16

4.2 耐震壁の評価結果

「3.5 評価方法」に基づいた評価結果を表 4-4 に示す。なお、各方向において最大せん断ひずみが生じる部材のみを示す。

水平荷重等によって、評価対象部位に生じるせん断ひずみが許容限界を超えないことを確認した。

表 4-4 耐震壁の評価結果

検討ケース	評価項目	方向	高さ(EL) (m)	せん断ひずみ ($\times 10^{-3}$)	許容限界 ($\times 10^{-3}$)
ケース 1	せん断 ひずみ	南北方向	16.9~15.3	0.00108	4.0
		東西方向	16.9~15.3	0.000970	4.0

VI-3-別添 2-8 排気筒モニタ室の強度計算書

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 評価方法	4
2.4 適用規格・基準等	6
3. 強度評価方法及び評価条件	7
3.1 評価対象部位	7
3.2 荷重及び荷重の組合せ	7
3.2.1 荷重	7
3.2.2 荷重の組合せ	10
3.3 許容限界	11
3.4 解析モデル及び諸元	13
3.4.1 モデル化の基本方針	13
3.4.2 解析諸元	15
3.5 評価方法	16
3.5.1 屋根スラブの評価方法	16
3.5.2 はりの評価方法	18
3.5.3 支持柱の評価方法	20
3.5.4 耐震壁の評価方法	21
4. 強度評価結果	22
4.1 屋根スラブの評価結果	22
4.2 小ばりの評価結果	24
4.3 大ばりの評価結果	26
4.4 支持柱の評価結果	28
4.5 耐震壁の評価結果	29

1. 概要

本資料は、VI-3-別添 2-1-7「排気筒モニタ室の強度計算の方針」に示すとおり、排気筒モニタ室が降下火砕物及び積雪の堆積時においても、内包する防護すべき施設に降下火砕物を堆積させない機能の維持を考慮して、建物全体及び建物の主要な構造部材が構造健全性を維持することを確認するものである。

2. 基本方針

排気筒モニタ室は、VI-3-別添 2-1-7「排気筒モニタ室の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、本資料では、「2.1 位置」、「2.2 構造概要」、「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格・基準等」を示す。

2.1 位置

排気筒モニタ室は、VI-3-別添 2-1-7「排気筒モニタ室の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す位置に設置する。排気筒モニタ室の配置を図 2-1 に示す。

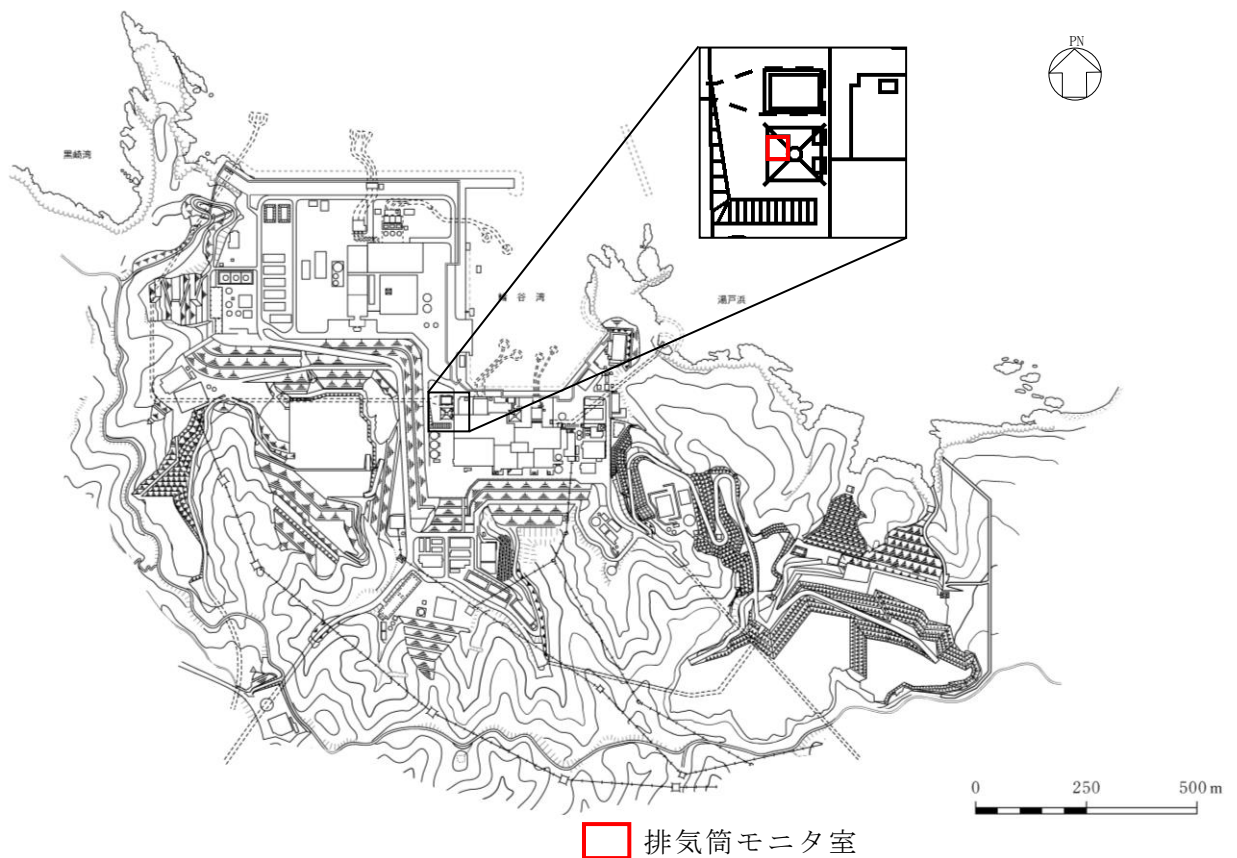


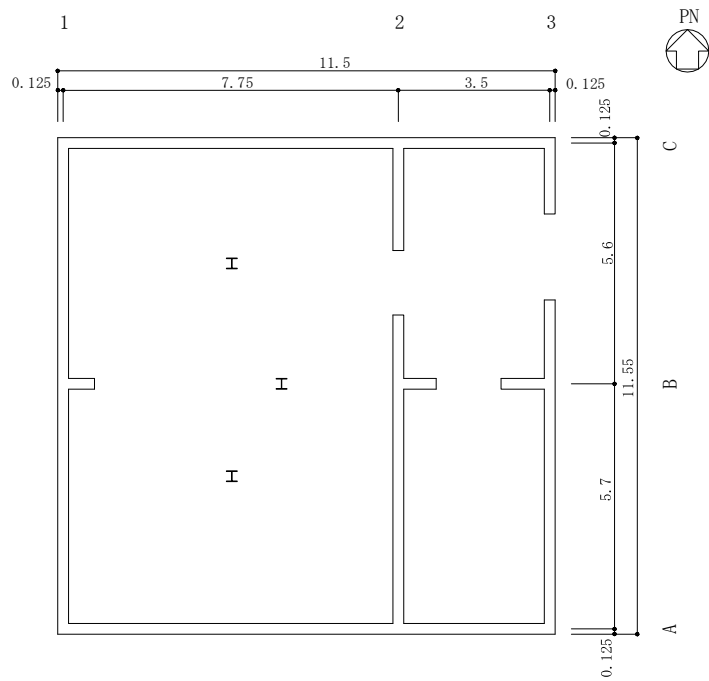
図 2-1 排気筒モニタ室の配置図

2.2 構造概要

排気筒モニタ室は、VI-3-別添 2-1-7「排気筒モニタ室の強度計算の方針」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。

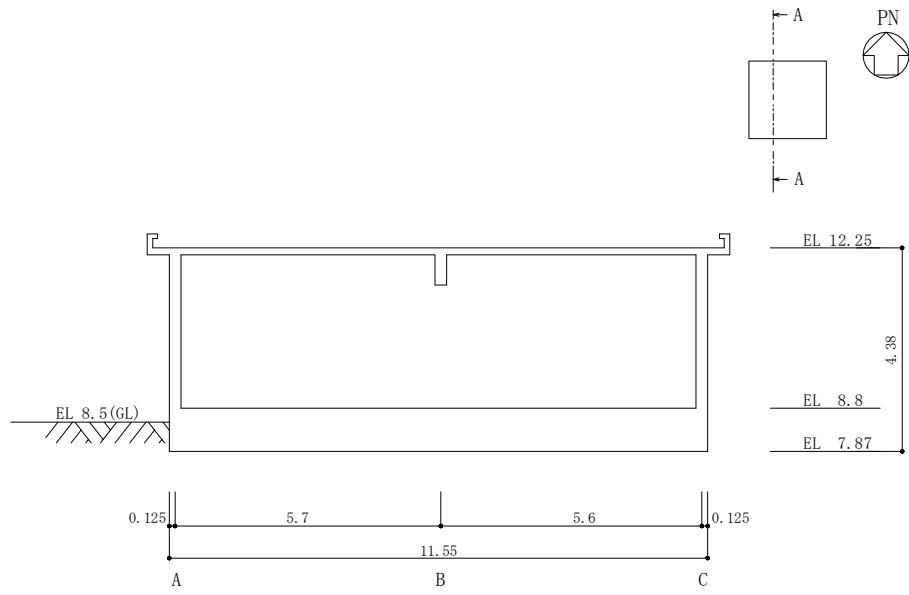
排気筒モニタ室は、高さ 4.38m の平屋で、平面が 11.55m（南北方向）×11.5m（東西方向）の鉄筋コンクリート造の建物である。

排気筒モニタ室の概略平面図を図 2-2 に、概略断面図を図 2-3 に示す。



(単位：m)

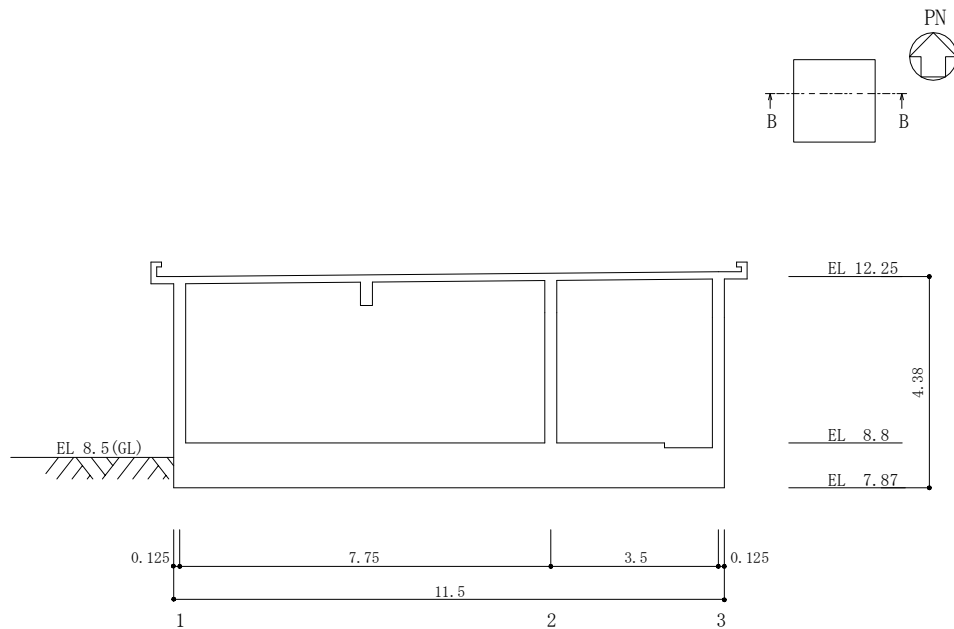
図 2-2 排気筒モニタ室 概略平面図



(単位：m)

図 2-3 排気筒モニタ室 概略断面図 (A-A 断面, 南北方向) (1/2)

注：「EL」は東京湾平均海面 (T.P.) を基準としたレベルを示す。



(単位：m)

図 2-3 排気筒モニタ室 概略断面図 (B-B 断面, 東西方向) (2/2)

2.3 評価方法

排気筒モニタ室の強度評価は、VI-3-別添 2-1-7「排気筒モニタ室の強度計算の方針」のうち「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，荷重の組合せ及び許容限界を踏まえて，建物の評価対象部位に発生する応力等が許容限界に収まることを「3. 強度評価方法及び評価条件」に示す方法及び評価条件を用いて計算し，「4. 強度評価結果」にて確認する。強度評価フローを図 2-4 に示す。

排気筒モニタ室の強度評価においては，その構造を踏まえて降下火砕物堆積による鉛直荷重及び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。

降下火砕物堆積による鉛直荷重及び設計荷重に対しては，鉛直荷重に抵抗する評価対象部位として屋根スラブを，水平荷重に抵抗する評価対象部位として耐震壁を選定した。

設計荷重は，VI-3-別添 2-1-7「排気筒モニタ室の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に従い設定する。

屋根及び耐震壁に作用する荷重は，VI-3-別添 2-1-7「排気筒モニタ室の強度計算の方針」のうち「5. 強度評価条件及び強度評価方法」に従い，評価する。

許容限界は，VI-3-別添 2-1-7「排気筒モニタ室の強度計算の方針」のうち「4.2 許容限界」に従い設定する。

なお，排気筒モニタ室は降下火砕物による荷重に対して，健全性を確保するために補強工事を実施することから，補強内容を反映した評価を実施することとし，補強により対応することとしたはり及び補強部材である支持柱を評価対象部位に加える。

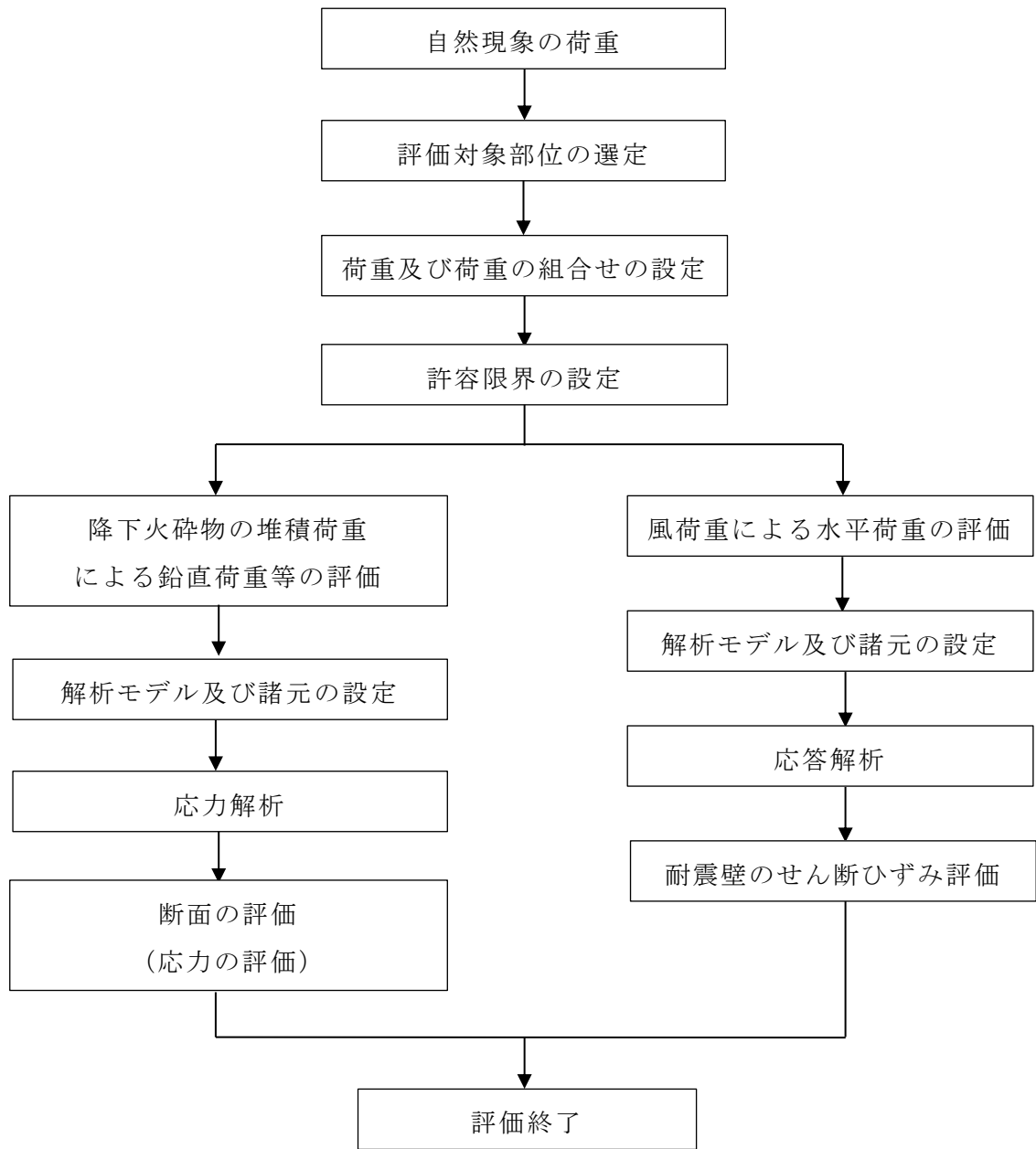


図 2-4 強度評価フロー

2.4 適用規格・基準等

排気筒モニタ室の強度評価に用いる規格・基準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法・同施行令
- ・ 松江市建築基準法施行細則（平成 17 年 3 月 31 日松江市規則第 234 号）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987（（社）日本電気協会）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版（（社）日本電気協会）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984（（社）日本電気協会）
- ・ 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説-許容応力度設計法-（（社）日本建築学会，1999 改定）
- ・ 原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005 制定）
- ・ 鋼構造設計規準-許容応力度設計法-（（社）日本建築学会，2005 改定）

3. 強度評価方法及び評価条件

3.1 評価対象部位

排気筒モニタ室の評価対象部位は、VI-3-別添 2-1-7「排気筒モニタ室の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、屋根スラブ及び耐震壁とする。また、降下火砕物による荷重に対し補強により対応することとしたはり及び補強部材である支持柱についても評価対象部位とする。

3.2 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 2-1-7「排気筒モニタ室の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

3.2.1 荷重

(1) 屋根スラブ

a. 鉛直荷重

表 3-1 に鉛直荷重の一覧を示す。屋根スラブに考慮する鉛直荷重は、常時作用する荷重 (F_d)、降下火砕物による荷重 (F_a) 及び積雪荷重 (F_s) を考慮する。常時作用する荷重は、固定荷重 (G) 及び積載荷重 (P) とする。降下火砕物による荷重は、湿潤密度 1.5g/cm^3 の降下火砕物が 56cm 堆積した場合の荷重として考慮する。積雪荷重は、発電所敷地に最も近い気象官署である松江地方気象台で観測された観測史上 1 位の月最深積雪 100cm に平均的な積雪荷重を与えるための係数 0.35 を考慮し 35.0cm とし、積雪量 1cm ごとに 20N/m^2 の積雪荷重が作用することを考慮し設定する。なお、水平方向の風荷重が作用した場合、屋根に対し鉛直上向きの荷重が働き下向き荷重は低減されるため、鉛直荷重に抵抗する部位の評価においては、保守的に水平方向の風荷重は考慮しない。

表 3-1 鉛直荷重一覧 (屋根スラブ)

常時作用する荷重 (F_d)	固定荷重 (G)	5.4kN/m^2
	積載荷重 (P)	0.981kN/m^2
降下火砕物による荷重 (F_a)		8.238kN/m^2
積雪荷重 (F_s)		0.7kN/m^2

(2) はり

a. 鉛直荷重

表 3-2 及び表 3-3 に鉛直荷重の一覧を示す。小はり及び大はりに考慮する鉛直荷重は、常時作用する荷重 (F_d)、降下火砕物による荷重 (F_a) 及び積雪荷重 (F_s) を考慮する。常時作用する荷重は、固定荷重 (G) 及び積載荷重 (P) とする。

降下火砕物による荷重は、湿潤密度 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ の降下火砕物が 56cm 堆積した場合の荷重として考慮する。積雪荷重は、設計基準積雪量 100cm に平均的な積雪荷重を与えるための係数 0.35 を考慮し 35.0cm とし、積雪量 1cm ごとに $20\text{N}/\text{m}^2$ の積雪荷重が作用することを考慮し設定する。

表 3-2 鉛直荷重一覧 (小はり)

常時作用する荷重 (F_d)	固定荷重 (G)	4.05kN/m
	積載荷重 (P)	0.981kN/m ²
降下火砕物による荷重 (F_a)		8.238kN/m ²
積雪荷重 (F_s)		0.7kN/m ²

表 3-3 鉛直荷重一覧 (大はり)

常時作用する荷重 (F_d)	固定荷重 (G)	5.25kN/m
	積載荷重 (P)	0.981kN/m ²
降下火砕物による荷重 (F_a)		8.238kN/m ²
積雪荷重 (F_s)		0.7kN/m ²

(3) 支持柱

a. 鉛直荷重

表 3-4 に鉛直荷重の一覧を示す。支持柱に考慮する鉛直荷重は、常時作用する荷重 (F_d)、降下火砕物による荷重 (F_a) 及び積雪荷重 (F_s) を考慮する。常時作用する荷重は、固定荷重 (G) 及び積載荷重 (P) とする。

降下火砕物による荷重は、湿潤密度 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ の降下火砕物が 56cm 堆積した場合の荷重として考慮する。積雪荷重は、設計基準積雪量 100cm に平均的な積雪荷重を与えるための係数 0.35 を考慮し 35.0cm とし、積雪量 1cm ごとに $20\text{N}/\text{m}^2$ の積雪荷重が作用することを考慮し設定する。

表 3-4 鉛直荷重一覧 (支持柱)

常時作用する荷重 (F_d)	固定荷重 (G)	$0.705\text{kN}/\text{m}^2$
	積載荷重 (P)	$0.981\text{kN}/\text{m}^2$
降下火砕物による荷重 (F_a)		$8.238\text{kN}/\text{m}^2$
積雪荷重 (F_s)		$0.7\text{kN}/\text{m}^2$

(4) 耐震壁

風荷重の算出に用いる基準風速は、 $30\text{m}/\text{s}$ とする。

風荷重 (W) は、VI-3-別添 2-1-7「排気筒モニタ室の強度計算の方針」の「4.1(3)c 水平荷重」に示す式に従い算出する。全高 H が 5m 以下であるため、 H が Z_b 以下の場合の式を用いる。風荷重 (W) の算出は、建物の形状を考慮して算出した風力係数 C 及び風の受圧面積 A_1 に基づき実施する。

$$W = q \cdot C \cdot A_1$$

ここで

$$q = 0.6 \cdot E' \cdot V_D^2$$

$$E' = E_r^2 \cdot G$$

$$E_r = 1.7 \cdot (H/Z_G)^\alpha \quad (H \text{ が } Z_b \text{ を超える場合})$$

$$E_r = 1.7 \cdot (Z_b/Z_G)^\alpha \quad (H \text{ が } Z_b \text{ 以下の場合})$$

Z_G , Z_b : 地表面粗度区分に応じて建設省告示第 1454 号に掲げる数値
風荷重算定に使用する入力条件を表 3-5 及び表 3-6 に示す。

表 3-5 設計風荷重の条件

施設名称	基準風速 V_D (m/s)	全高 H (m)	Z_G (m)	α	ガスト 影響係数 G	設計用 速度圧 q (N/m ²)
排気筒モニタ室	30	4.15	350	0.15	2.20	960.1

表 3-6 排気筒モニタ室の風力係数及び受圧面積

(a) 南北方向

高さ (EL) (m)	風力係数 C		受圧面積 A_1 (m ²)	
	風上	風下	風上	風下
12.25~8.8	0.800	0.4	48	48

(b) 東西方向

高さ (EL) (m)	風力係数 C		受圧面積 A_1 (m ²)	
	風上	風下	風上	風下
12.25~8.8	0.800	0.4	49	49

3.2.2 荷重の組合せ

荷重の組合せを表 3-7 に示す。

表 3-7 荷重の組合せ

考慮する 荷重の 組合せ	荷重*				
	常時作用する 荷重 (F_d)		主荷重 降下火砕物に よる荷重 (F_a)	従荷重	
	固定 荷重	積載 荷重		積雪荷重 (F_s)	風荷重 (W)
ケース 1	○	○	○	○	○
ケース 2	○	○	○	○	—

注記* : ○は考慮する荷重を示す。

3.3 許容限界

排気筒モニタ室の許容限界は、VI-3-別添 2-1-7「排気筒モニタ室の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界に従って、「3.1 評価対象部位」にて設定している建物の評価対象部位ごとに設定する。

屋根スラブ，はり，支持柱及び耐震壁の許容限界を「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005 制定）」（以下「RC-N規準」という。），「鋼構造設計規準-許容応力度設計法-（（社）日本建築学会，2005 改定）」（以下「S規準」という。）及び「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987（（社）日本電気協会）」に基づき表 3-8 に，鋼材の材料強度を表 3-9 に，コンクリート及び鉄筋の短期許容応力度を表 3-10 及び表 3-11 に示す。

表 3-8 許容限界

要求機能	機能設計上の性能目標	部位	機能維持のための考え方	許容限界（評価基準値）
—	内包する防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないこと	屋根スラブ はり	内包する防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないために落下しないことを確認	「RC-N規準」に基づく短期許容応力度*1
		支持柱	内包する防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないための許容限界を超えないことを確認	「S規準」に基づく短期許容応力度*1
		耐震壁*2	最大せん断ひずみが波及的影響を及ぼさないための許容限界を超えないことを確認	せん断ひずみ 4.0×10^{-3}

注記*1：許容限界は終局強度に対し妥当な安全余裕を有したものとして設定することとし，さらなる安全余裕を考慮して短期許容応力度とする。

*2：建物全体としては，水平力を主に耐震壁で負担する構造となっており，柱，はり，間仕切壁等が耐震壁の変形に追従すること，また，全体に剛性の高い構造となっており複数の耐震壁間の相対変形が小さく床スラブの変形が抑えられるため，耐震壁の最大せん断ひずみが許容限界を満足していれば，建物・構築物に要求される機能は維持される。

表 3-9 鋼材の材料強度

(単位：N/mm²)

材料	板厚	F 値	材料強度		
			引張り	圧縮 曲げ	せん断
SS400	t ≤ 40mm	235	235	235*	135

注記*：上限値であり，座屈長さ等を勘案して設定する。

表 3-10 コンクリートの短期許容応力度

(単位：N/mm²)

設計基準強度 Fc	圧縮	せん断
20.6	13.6	1.02

表 3-11 鉄筋の短期許容応力度

(単位：N/mm²)

種別*	引張り及び圧縮	せん断
SD35 (SD345 相当)	345	345

注記*：建設当時の鋼材の種類を，現在の規格に読み替えた許容応力度を示す。

3.4 解析モデル及び諸元

3.4.1 モデル化の基本方針

(1) 屋根スラブ

屋根スラブは、四辺固定版として応力算出を行う。

(2) はり

応力解析は、小ばり及び大ばりを線材でモデル化した交差はりモデルを用いて実施する。解析に使用するコードは、「KANSAS2」である。なお、解析コードの検証及び妥当性の確認の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

解析モデル図を図 3-1 に、部材リストを表 3-12 に示す。

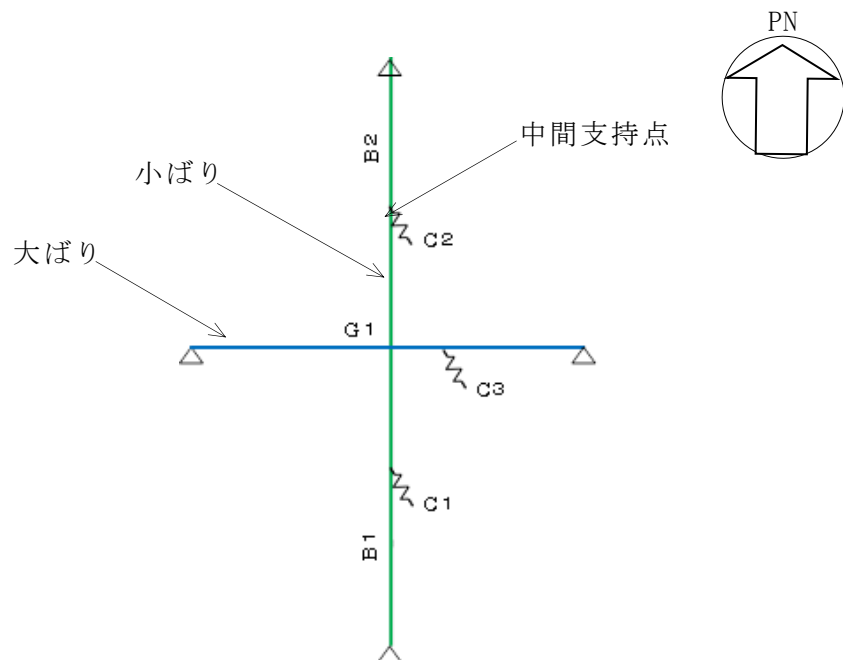


図 3-1 解析モデル図

表 3-12 部材リスト (はり)

部材		断面寸法 (mm)	設計配筋：SD345 (SD35)	
			主筋 (上端・下端共)	せん断補強筋
小ばり	B1	250×600	2-D22	D13@200
	B2			
大ばり	G1	250×800	4-D22	D13@200

(3) 支持柱

部材リストを表 3-13 に示す。

表 3-13 部材リスト (支持柱)

部材	鋼材断面	部材長 (mm)
C1, C2, C3	H-250×250×9×14 (SS400)	2850

(4) 耐震壁

耐震壁は、VI-2-11-2-1-6「排気筒モニタ室の耐震性についての計算書」に示す地震応答解析モデルを用いて評価する。解析に使用するコードは、「NUPP4」である。なお、解析コードの検証及び妥当性の確認の概要については、VI-5「計算機プログラム (解析コード) の概要」に示す。地震応答解析モデルを図 3-2 に示す。

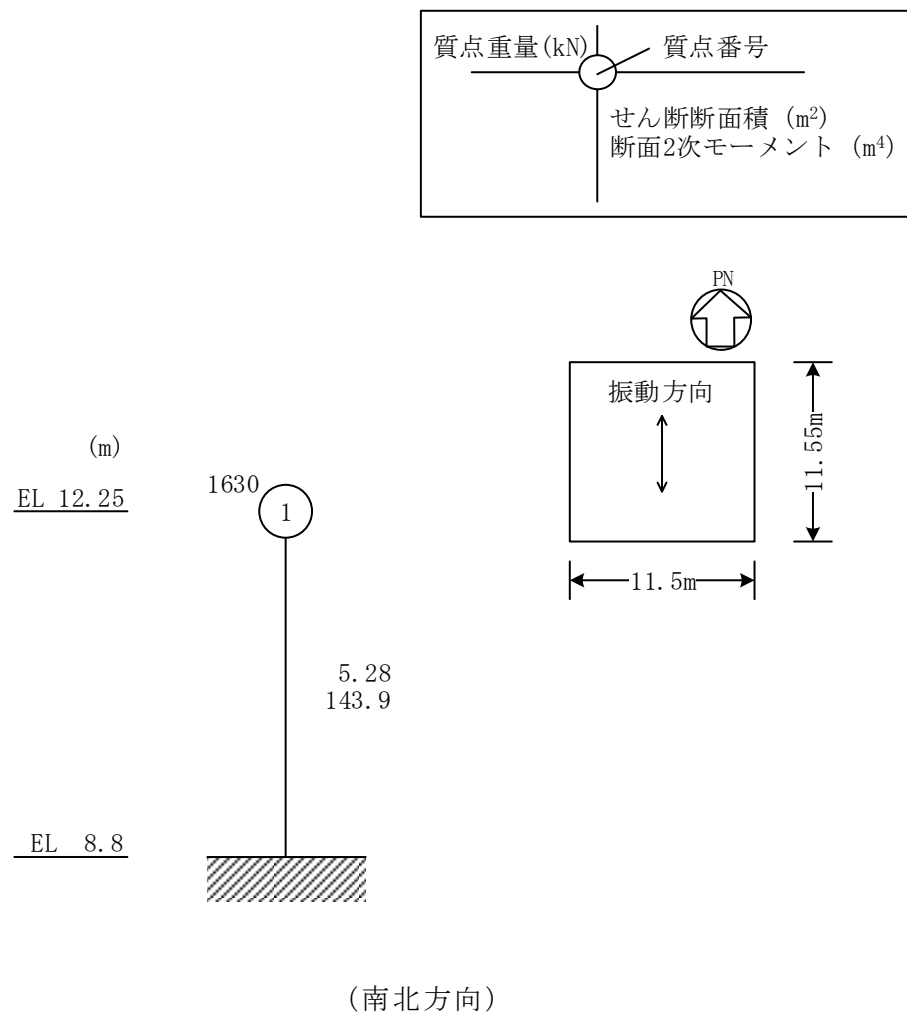


図 3-2 地震応答解析モデル (水平方向) (1/2)

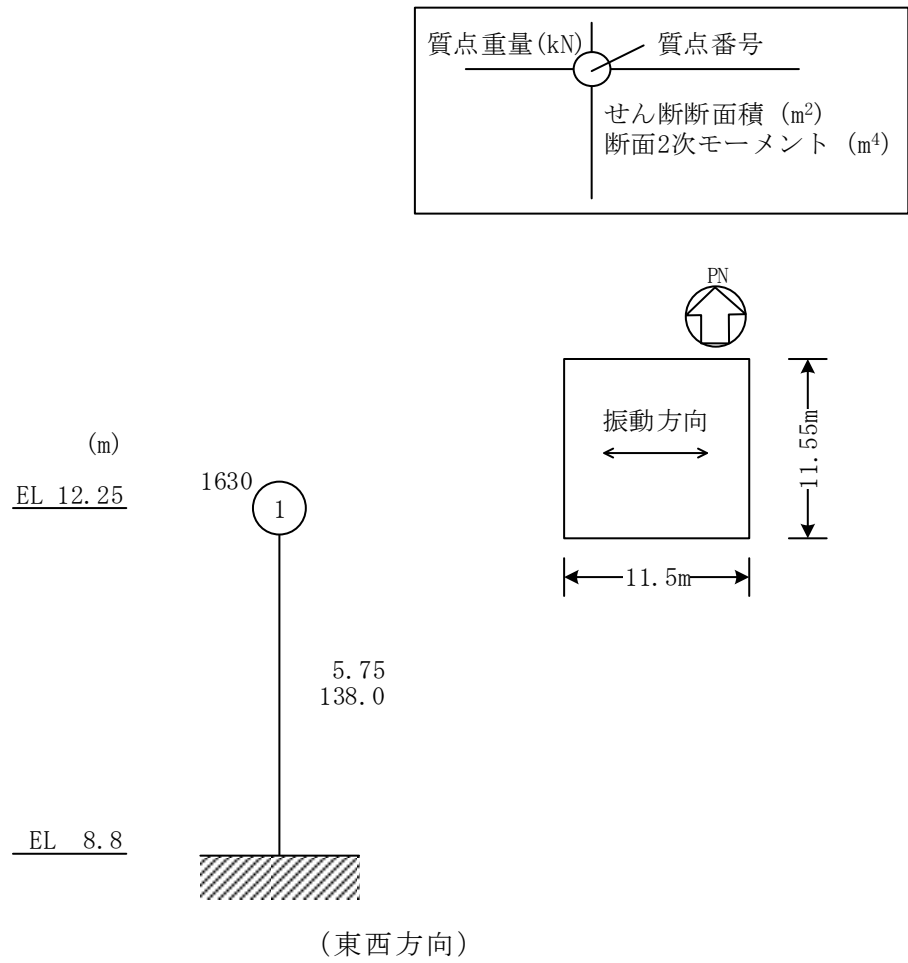


図 3-2 地震応答解析モデル（水平方向）（2/2）

3.4.2 解析諸元

使用材料の物性値を表 3-14 に示す。

表 3-14 使用材料の物性値

使用材料	ヤング係数 E (N/mm ²)	せん断弾性係数 G (N/mm ²)
鉄筋コンクリート	2.15×10^4	8.98×10^3
鉄骨	2.05×10^5	7.90×10^4

3.5 評価方法

3.5.1 屋根スラブの評価方法

(1) 応力解析方法

a. 荷重ケース

降下火砕物堆積時の応力は，単独荷重による応力を組み合わせて求める。
単独荷重の記号を以下に示す。

F_d : 常時作用する荷重

F_a : 降下火砕物による荷重

F_s : 積雪荷重

b. 荷重の組合せケース

荷重の組合せケースを表 3-15 に示す。

表 3-15 荷重の組合せケース

組合せケース	荷重の組合せ
ケース 2	$F_d + F_a + F_s$

c. 応力算出方法

等分布荷重を受ける四辺固定版の曲げモーメント及びせん断力は下式により求める。

(四辺固定版)

- ・ 短辺方向の端部曲げモーメント (M_{x1})

$$M_{x1} = -\frac{1}{12} w_x \cdot l_x^2$$

- ・ 短辺方向の中央部曲げモーメント (M_{x2})

$$M_{x2} = \frac{1}{18} w_x \cdot l_x^2$$

- ・ 長辺方向の端部曲げモーメント (M_{y1})

$$M_{y1} = -\frac{1}{24} w \cdot l_x^2$$

- ・ 長辺方向の中央部曲げモーメント (M_{y2})

$$M_{y2} = \frac{1}{36} w \cdot l_x^2$$

- ・ せん断力 (Q)

$$Q = \beta \cdot w \cdot l_x$$

ここで、

l_x : 短辺有効スパン (m)

l_y : 長辺有効スパン (m)

w : 単位面積あたりの荷重 (kN/m²)

β : スラブの辺長比 (l_y/l_x) により定まる係数

$$w_x = \frac{l_y^4}{l_x^4 + l_y^4} w$$

(2) 断面の評価方法

断面の評価は以下の方法で行う。

屋根スラブについては、曲げモーメントによる鉄筋の引張り応力度及び面外せん断力を算定し、各許容限界を超えないことを確認する。

a. 曲げモーメントに対する断面の評価方法

断面の評価は、「RC-N規準」に基づき、次式をもとに計算した評価対象箇所が生じる曲げモーメントによる鉄筋の引張り応力度が、短期許容応力度を超えないことを確認する。

$$\sigma_t = \frac{M}{a_t \cdot j}$$

ここで、

σ_t : 鉄筋の引張り応力度 (N/mm²)

M : 曲げモーメント (N・mm)

a_t : 引張り鉄筋断面積 (mm²)

j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

b. 面外せん断力に対する断面の評価方法

断面の評価は、「RC-N規準」に基づき、評価対象箇所が生じる面外せん断力が、次式をもとに計算した許容面外せん断力を超えないことを確認する。

$$Q_A = b \cdot j \cdot \left\{ \alpha \cdot f_s + 0.5 \cdot w f_t \cdot (p_w - 0.002) \right\}$$

ここで、

Q_A : 許容面外せん断力 (N)

b : 断面の幅 (mm)

j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

α : 許容せん断力の割増し係数で、次式による。

(2 を超える場合は 2, 1 未満の場合は 1 とする。)

$$\alpha = \frac{4}{M / (Q \cdot d) + 1}$$

M : 曲げモーメント (N・mm)

Q : せん断力 (N)

d : 断面の有効せい (mm)

f_s : コンクリートの短期許容せん断応力度 (N/mm²)

f_t : せん断補強筋の短期許容引張り応力度 (N/mm²)

p_w : せん断補強筋比で、次式による。(0.002 以上とする。*)

$$p_w = \frac{a_w}{b \cdot x}$$

a_w : せん断補強筋の断面積 (mm²)

x : せん断補強筋の間隔 (mm)

注記* : せん断補強筋がない領域については、第 2 項を 0 とする。

3.5.2 はりの評価方法

(1) 応力解析方法

a. 荷重ケース

降下火砕物堆積時の応力は、単独荷重による応力を組み合わせて求める。
単独荷重による記号を以下に示す。

F_d : 常時作用する荷重

F_a : 降下火砕物による荷重

F_s : 積雪荷重

b. 荷重の組合せケース

荷重の組合せケースを表 3-16 に示す。

表 3-16 荷重の組合せケース

組合せケース	荷重の組合せ
ケース 2	$F_d + F_a + F_s$

c. 応力算出方法

小ばり及び大ばりを線材でモデル化した交差はりモデルとし、曲げモーメント及びせん断力を算出する。なお、はり（小ばり・大ばり）と壁との取り合い部は、壁厚が 250mm であることから境界条件はピン設定とする。また、支持柱は軸ばねとして評価する。

(2) 断面の評価方法

断面の評価は以下の方法で行う。

はりについては、曲げモーメントによる鉄筋の引張り応力度及び面外せん断力を算定し、各許容限界を超えないことを確認する。

a. 曲げモーメントに対する断面の評価方法

断面の評価は、「RC-N規準」に基づき、次式をもとに計算した評価対象箇所が生じる曲げモーメントによる鉄筋の引張り応力度が、短期許容応力度を超えないことを確認する。

$$\sigma_t = \frac{M}{a_t \cdot j}$$

ここで、

σ_t : 鉄筋の引張り応力度 (N/mm²)

M : 曲げモーメント (N・mm)

a_t : 引張り鉄筋断面積 (mm²)

j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

b. 面外せん断力に対する断面の評価方法

断面の評価は、「RC-N規準」に基づき、評価対象箇所に生じる面外せん断力が、次式をもとに計算した許容面外せん断力を超えないことを確認する。

$$Q_A = b \cdot j \cdot \{ \alpha \cdot f_s + 0.5 \cdot {}_w f_t \cdot (p_w - 0.002) \}$$

ここで、

Q_A : 許容面外せん断力 (N)

b : 断面の幅 (mm)

j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

α : 許容せん断力の割増し係数で、次式による。

(2 を超える場合は 2, 1 未満の場合は 1 とする。)

$$\alpha = \frac{4}{M / (Q \cdot d) + 1}$$

M : 曲げモーメント (N・mm)

Q : せん断力 (N)

d : 断面の有効せい (mm)

f_s : コンクリートの短期許容せん断応力度 (N/mm²)

${}_w f_t$: せん断補強筋の短期許容引張り応力度 (N/mm²)

p_w : せん断補強筋比で、次式による。(0.002以上とする。*)

$$p_w = \frac{a_w}{b \cdot x}$$

a_w : せん断補強筋の断面積(mm²)

x : せん断補強筋の間隔(mm)

注記* : せん断補強筋がない領域については、第2項を0とする。

3.5.3 支持柱の評価方法

(1) 応力解析方法

a. 荷重ケース

降下火砕物堆積時の応力は、単独荷重による応力を組み合わせて求める。
単独荷重による記号を以下に示す。

F_d : 常時作用する荷重

F_a : 降下火砕物による荷重

F_s : 積雪荷重

b. 荷重の組合せケース

荷重の組合せケースを表3-17に示す。

表3-17 荷重の組合せケース

組合せケース	荷重の組合せ
ケース2	$F_d + F_a + F_s$

c. 応力算出方法

はりの応力解析において中間支持点の反力として得られる荷重を、はりから伝達される荷重として考慮する。

(2) 断面の評価方法

断面の評価は「S規準」に基づき、以下の方法で行う。

支持柱については、次式により軸力による圧縮応力度を算定し、許容限界を超えないことを確認する。

$$\sigma_c = N / A$$

ここで、

σ_c : 圧縮応力度(N/mm²)

- N : 軸力 (N)
 A : 鋼材断面積 (mm²)

鋼材の許容応力度 f_c は次式により求める。 ($\lambda \leq \Lambda$)

$$f_c = \frac{\left\{1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2\right\} F}{\nu} \quad (\lambda \leq \Lambda)$$

$$f_c = \frac{0.277F}{\left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2} \quad (\lambda \leq \Lambda)$$

- f_c : 許容圧縮応力度 (N/mm²)
 λ : 圧縮材の細長比
 Λ : 限界細長比

$$\Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6F}}$$

- F : 基準強度 F 値 (N/mm²)
 E : ヤング係数 (N/mm²)

$$\nu = \frac{3}{2} + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2$$

3.5.4 耐震壁の評価方法

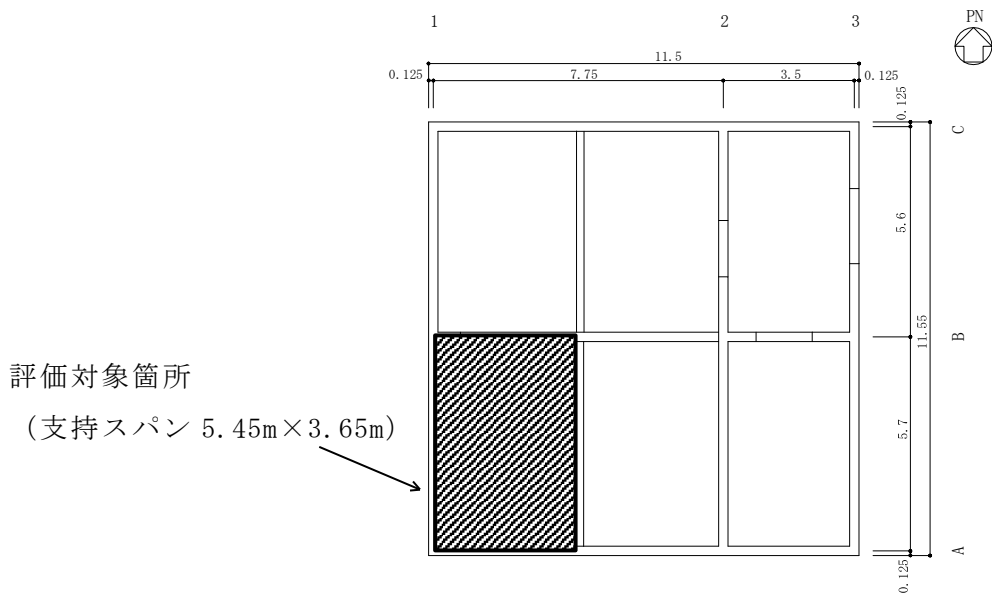
耐震壁の評価は、風荷重による耐震壁に発生するせん断ひずみが許容限界を超えないことを確認する。なお、耐震壁の応力計算には、地震応答解析モデルを用い、耐震壁の復元力特性の設定においては、鉛直荷重の増加による軸力を考慮すると第1折れ点の増大が見込まれるため、本評価では保守的に降下火砕物等堆積による鉛直荷重は考慮しない。

4. 強度評価結果

4.1 屋根スラブの評価結果

屋根スラブの評価対象箇所は、各断面の検定値が最も大きい箇所とし、図 4-1 に示す。また、評価結果を表 4-1 に示す。

降下火砕物堆積による鉛直荷重等によって発生する曲げモーメントに対する鉄筋の引張り応力度が許容限界を超えないこと及び発生する面外せん断力が許容限界を超えないことを確認した。



(単位：m)

図 4-1 検討対象箇所（屋根スラブ，EL 12.25m）

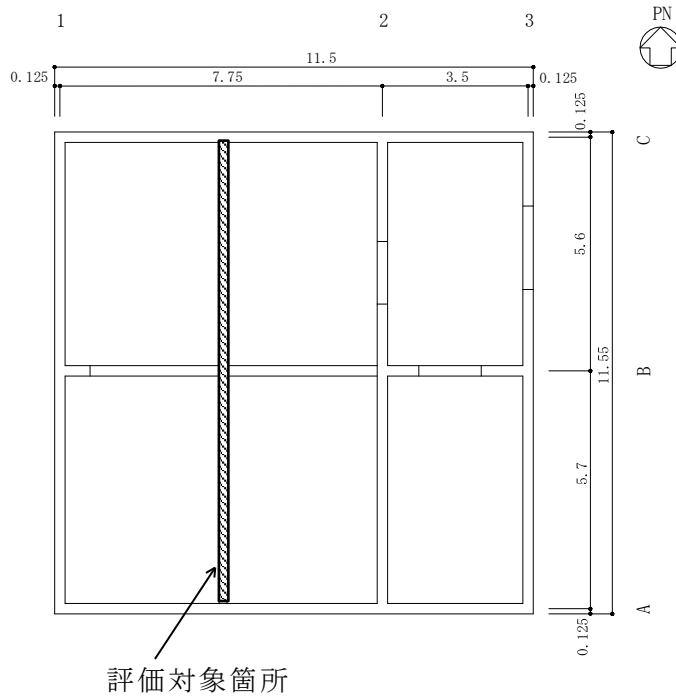
表 4-1 屋根スラブの評価結果 (EL 12.25m)

EL (m)		12.25
厚さ t (mm)		150
有効せい d (mm)		90
配筋 (鉄筋断面積)		D13@200 (635mm ² /m)
曲 げ モー メント	発生曲げモーメント M (kN・m/m)	14.2
	鉄筋の引張り応力度 σ_t (N/mm ²)	284.0
	許容限界 (N/mm ²)	345
	検定値	0.83
面 外 せん 断 力	発生せん断力 Q (kN/m)	28.7
	せん断応力度 (N/mm ²)	0.37
	許容限界 (N/mm ²)	1.02
	検定値	0.37

4.2 小ばりの評価結果

小ばりの評価対象箇所は、各断面の検定値が最も大きい箇所とし、図 4-2 に示す。また、評価結果を表 4-2 に示す。

降下火砕物堆積による鉛直荷重等によって発生する曲げモーメントに対する鉄筋の引張り応力度が許容限界を超えないこと及び発生する面外せん断力が許容限界を超えないことを確認した。



(単位：m)

図 4-2 検討対象箇所（小ばり）

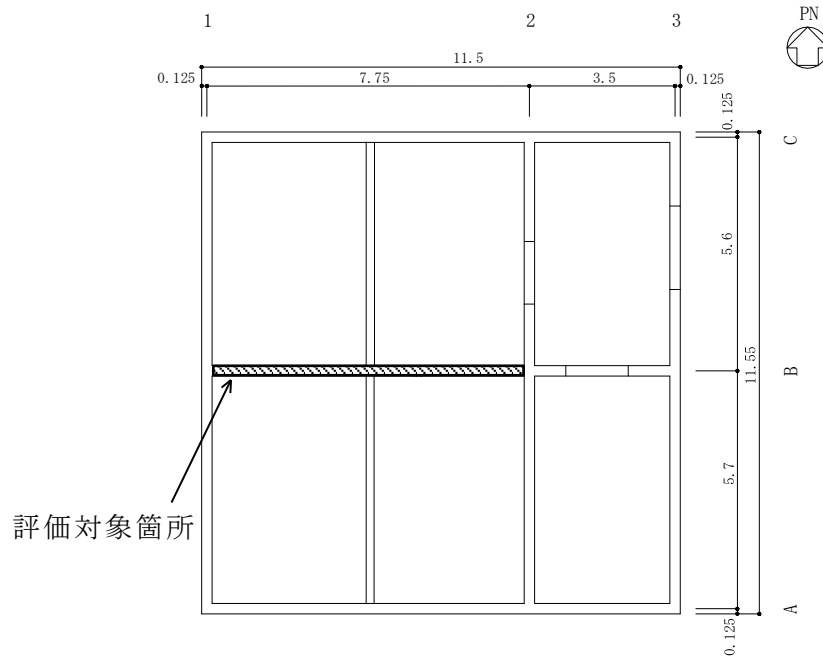
表 4-2 小ばりの評価結果 (EL 12.25m)

断面 (mm)		250×600
有効せい d (mm)		530
配筋 (鉄筋断面積)	主筋 (上端・下端共)	2-D22 (774mm ²)
	せん断補強筋	D13@200
曲 げ モ ー メ ン ト	発生曲げモーメント M (kN・m/m)	64.6
	鉄筋の引張り応力度 σ_t (N/mm ²)	180.0
	許容限界 (N/mm ²)	345
	検定値	0.53
面 外 せん 断 力	発生せん断力 Q (kN/m)	117.9
	せん断スパン比による 割増し係数 α	1.96
	許容限界 (kN/m)	231.7
	検定値	0.51

4.3 大ばりの評価結果

大ばりの評価対象箇所は、各断面の検定値が最も大きい箇所とし、図 4-3 に示す。また、評価結果を表 4-3 に示す。

降下火砕物堆積による鉛直荷重等によって発生する曲げモーメントに対する鉄筋の引張り応力度が許容限界を超えないこと及び発生する面外せん断力が許容限界を超えないことを確認した。



(単位：m)

図 4-3 検討対象箇所（大ばり）

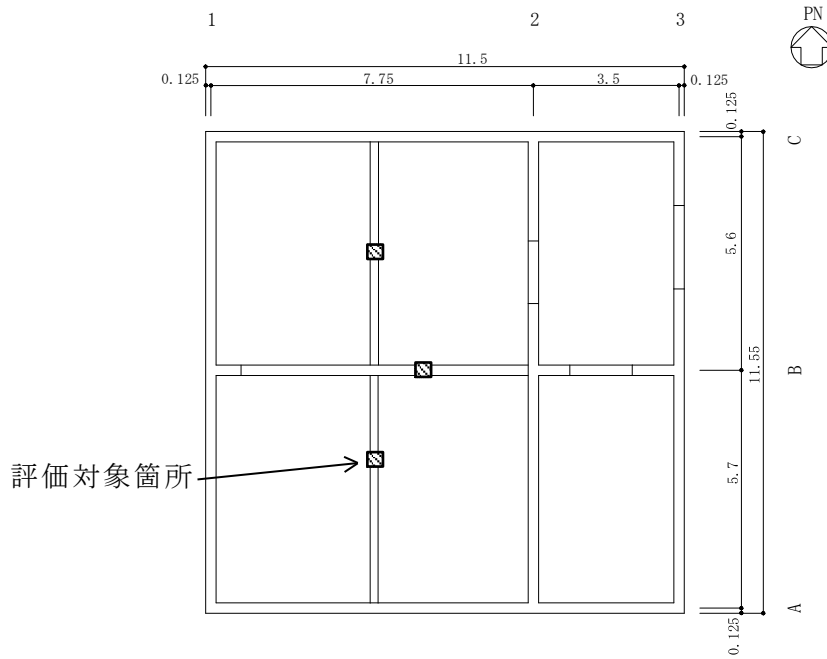
表 4-3 大ばりの評価結果 (EL 12.25m)

断面 (mm)		250×800
有効せい d (mm)		700
配筋 (鉄筋断面積)	主筋 (上端・下端共)	4-D22 (1548mm ²)
	せん断補強筋	D13@200
曲 げ モ ー メ ン ト	発生曲げモーメント M (kN・m/m)	92.0
	鉄筋の引張り応力度 σ_t (N/mm ²)	97.1
	許容限界 (N/mm ²)	345
	検定値	0.29
面 外 せん 断 力	発生せん断力 Q (kN/m)	95.0
	せん断スパン比による 割増し係数 α	1.93
	許容限界 (kN/m)	301.4
	検定値	0.32

4.4 支持柱の評価結果

支持柱の評価対象箇所は、ばね反力が最大となる箇所とし、図 4-4 に示す。また、評価結果を表 4-4 に示す。

降下火砕物堆積による鉛直荷重等によって発生する圧縮応力度が鋼材の許容限界を超えないことを確認した。



(単位 : m)

図 4-4 検討対象箇所（支持柱）

表 4-4 支持柱の評価結果

断面 (mm)	H-250×250×9×14
部材長 (mm)	2850
軸力 N (kN)	206.3
軸応力度 σ_c (N/mm ²)	22.8
許容限界 (N/mm ²)	209.1
検定値	0.11

4.5 耐震壁の評価結果

「3.5 評価方法」に基づいた評価結果を表 4-5 に示す。

水平荷重等によって、評価対象部位に生じるせん断ひずみが許容限界を超えないことを確認した。

表 4-5 耐震壁の評価結果

検討ケース	評価項目	方向	高さ(EL) (m)	せん断ひずみ ($\times 10^{-3}$)	許容限界 ($\times 10^{-3}$)
ケース 1	せん断 ひずみ	南北方向	12.25~8.8	0.00116	4.0
		東西方向	12.25~8.8	0.00109	4.0

VI-3-別添 6 炉心支持構造物の強度に関する説明書

VI-3-別添 6-1 炉心支持構造物の強度計算書

目 次

1. 概要	1
2. 炉心支持構造物の強度評価の基本方針	2
3. 炉心支持構造物の強度評価方法	3
3.1 確認内容	3
4. 強度評価結果	7
5. シュラウドサポートの強度計算	8
5.1 一般事項	8
5.2 適用基準	8
5.3 記号の説明	9
5.4 計算精度と数値の丸め方	11
5.5 形状・寸法・材料	11
5.6 解析範囲	11
5.7 計算結果の概要	11
5.8 計算条件	15
5.8.1 評価対象機器	15
5.8.2 設計条件	15
5.8.3 運転条件	15
5.8.4 材料	15
5.8.5 物性値	15
5.8.6 解析モデルの物性値補正	16
5.8.7 荷重の組合せ及び供用状態	16
5.8.8 荷重の組合せ及び応力評価	17
5.8.9 許容応力	17
5.8.10 許容応力評価条件	17
5.8.11 溶接部の継手効率	18
5.8.12 応力の記号と方向	18
5.9 応力解析の手順	19
5.9.1 温度分布計算	19
5.9.2 応力計算	20
5.10 応力強さの評価	21
5.10.1 主応力	21
5.10.2 応力強さ	21
5.10.3 一次一般膜応力強さの評価	21
5.10.4 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価	21

5.10.5	一次＋二次応力強さの評価	22
5.11	繰返し荷重の評価	22
5.11.1	疲労解析	22
5.12	特別な応力の評価	23
5.12.1	座屈に対する評価	23
5.13	引用文献	27
5.14	参照図書	27
6.	燃料支持金具の強度計算	96
6.1	一般事項	96
6.2	適用基準	96
6.3	記号の説明	97
6.4	計算精度と数値の丸め方	98
6.5	形状・寸法・材料	98
6.6	解析範囲	98
6.7	計算結果の概要	98
6.8	計算条件	102
6.8.1	評価対象機器	102
6.8.2	設計条件	102
6.8.3	運転条件	102
6.8.4	材料	102
6.8.5	荷重の組合せ及び運転状態	102
6.8.6	荷重の組合せ及び応力評価	103
6.8.7	許容応力	103
6.8.8	許容応力評価条件	103
6.8.9	溶接部の継手効率	103
6.8.10	応力の記号と方向	104
6.9	応力評価の手順	104
6.9.1	温度分布計算	104
6.9.2	応力の評価	104
6.9.3	繰返し荷重の評価	105
6.10	応力計算	106
6.10.1	応力評価点	106
6.10.2	差圧による応力	106
6.10.3	外荷重による応力	107
6.10.4	熱応力	108
6.11	応力強さの評価	109

6.11.1	一次一般膜応力強さの評価	109
6.11.2	一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価	109
6.11.3	一次＋二次応力強さの評価	109
6.12	繰返し荷重の評価	110
6.12.1	告示第96条第1項第3号についての検討	110
6.12.2	疲労解析	110
6.13	引用文献	111
6.14	参照図書	111
添付1	熱伝達率の計算	125
添付2	応力集中係数の計算	128

図 表 目 次

図 5-1	形状・寸法・材料・応力評価点	12
図 5-2	応力解析の手順	28
図 5-3	温度分布及び応力計算のモデル	29
図 5-4	温度遷移図	37
図 5-5	温度分布図	43
図 5-6	応力差の変動	71
図 6-1	形状・寸法・材料・応力評価点	99
図 6-2	応力評価の手順	112
図 6-3	中央燃料支持金具の差圧による応力計算モデル	113
図 6-4	中央燃料支持金具の外荷重による応力計算モデル	113
表 3-1	重大事故等事象に対する荷重の整理表	4
表 3-2	設計基準事故事象に対する事故時荷重	6
表 5-1	表示する数値の丸め方	11
表 5-2	計算結果の概要	13
表 5-3	外荷重	30
表 5-4	温度分布計算及び応力計算に使用する材料の物性値	31
表 5-5	繰返し荷重の評価に使用する材料の物性値	31
表 5-6	流体の物性値	32
表 5-7	荷重の組合せ及び供用状態	33
表 5-8	荷重の組合せ	33
表 5-9	繰返しピーク応力強さの割増し方法	34
表 5-10	許容応力	35
表 5-11	許容応力評価条件	35
表 5-12	溶接部の継手効率	36
表 5-13	熱伝達率の計算	75
表 5-14	応力集中係数	90
表 5-15	一次一般膜応力強さの評価のまとめ	91
表 5-16	一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ	92
表 5-17	一次＋二次応力強さの評価のまとめ	93
表 5-18	疲労累積係数の評価のまとめ	94
表 5-19	座屈に対する評価	95
表 6-1	表示する数値の丸め方	98
表 6-2	計算結果の概要	101

表 6-3	各運転状態における差圧	114
表 6-4	外荷重	115
表 6-5	荷重の組合せ及び運転状態	116
表 6-6	荷重の組合せ	117
表 6-7	許容応力	118
表 6-8	許容応力評価条件	119
表 6-9	溶接部の継手効率	120
表 6-10	断面性状	121
表 6-11	一次一般膜応力強さの評価のまとめ	122
表 6-12	一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ	123
表 6-13	一次＋二次応力強さの評価のまとめ	124

1. 概要

本計算書は、「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」（平成25年6月28日 原子力規制委員会規則第六号）（以下「技術基準規則」という。）第50条、第51条、第52条、第54条、第59条、第60条、第62条及び第63条において、重大事故等時に流路としての機能が要求される原子炉压力容器内の炉心支持構造物が、十分な強度を有することを説明するものである。

2. 炉心支持構造物の強度評価の基本方針

重大事故等時における炉心支持構造物の評価は、重大事故等時の評価条件が設計基準事故時の評価条件に包絡されており、燃料支持金具を除き、既に認可された工事計画の添付資料（以下「既工認」という。）における評価結果があるため、材料、構造及び強度の要求は同じであることから、その評価の適用性を確認し、既工認の確認による評価を実施する。

なお、シュラウドサポートについては、既工認における評価結果はあるが、シュラウドサポートの耐震計算書との整合性を考慮し、最新の知見を反映した解析モデルを用いて発電用原子力設備規格 設計・建設規格（（社）日本機械学会，2005/2007）による評価を5章で実施する。また、燃料支持金具については、既工認における評価結果がないため、施設時に適用された規格である通商産業省告示第501号「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」による評価を6章で実施する。

3. 炉心支持構造物の強度評価方法

炉心支持構造物の強度評価について、シュラウドサポート及び燃料支持金具を除き、以下の3.1節に示す確認内容のとおり、既工認における評価結果の確認による評価を実施する。

3.1 確認内容

重大事故等事象は、運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故事象に対して原子炉の安全性を損なうことがないように設計することが求められる構造物、系統及び機器の安全機能が喪失した場合に発生する又は発生する可能性があるものである。

重大事故等時の事故時荷重を表3-1に、設計基準時の事故時荷重を表3-2に示す。両表に示すとおり、起因となる運転状態Ⅲ及び運転状態Ⅳの事故時荷重は、重大事故等時の事故時荷重を包絡している。

表 3-1 重大事故等事象に対する荷重の整理表

重大事故等時			運転状態Ⅲ及びⅣの評価（表3-2）との関係	
事故シーケンスグループ	重要事故シーケンス	事故時荷重*1	事故時荷重の包絡性	ピーク差圧の包絡性
高圧・低圧注水機能喪失（給水喪失）	給水喪失＋低圧原子炉代替注水系（常設）＋原子炉格納容器除熱（代替スプレイ/ベント）			
高圧注水・減圧機能喪失（給水喪失）	給水喪失＋残留熱除去系（低圧注水モード）＋原子炉格納容器除熱（残留熱除去系）			
全交流動力電源喪失（長期TB）	全交流動力電源喪失＋原子炉隔離時冷却系停止＋低圧原子炉代替注水系（可搬型）＋残留熱除去系（低圧注水モード）＋原子炉格納容器除熱（代替スプレイ/残留熱除去系）			
全交流動力電源喪失（TBD, TBU）	全交流動力電源喪失/全電源喪失＋高圧原子炉代替注水＋低圧原子炉代替注水系（可搬型）＋残留熱除去系（低圧注水モード）＋原子炉格納容器除熱（代替スプレイ/残留熱除去系）			
全交流動力電源喪失（TBP）	全交流動力電源喪失＋原子炉隔離時冷却系停止＋低圧原子炉代替注水系（可搬型）＋残留熱除去系（低圧注水モード）＋原子炉格納容器除熱（代替スプレイ/残留熱除去系）			

(続き)

崩壊熱除去機能喪失 (取水機能喪失)	給水喪失＋全交流動力電源喪失＋原子炉 隔離時冷却系停止＋残留熱除去系（低圧 注水モード）＋原子炉格納容器除熱（残 留熱除去系）	
崩壊熱除去機能喪失 (RHR機能喪失)	給水喪失＋原子炉隔離時冷却系停止＋低 圧原子炉代替注水系（常設）＋原子炉格 納容器除熱（代替スプレイ/ベント）	
原子炉停止機能喪失	主蒸気隔離弁誤閉止＋スクラム失敗	
LOCA時注水機能 喪失（中小破断）	中小LOCA＋外部電源喪失＋低圧原子 炉代替注水系（常設）＋原子炉格納容器 除熱（代替スプレイ/ベント）	
格納容器バイパス	インターフェースシステムLOCA（残 留熱除去系（低圧注水モード）の破断）	
大破断LOCA	大LOCA＋低圧原子炉代替注水系（常 設）＋原子炉格納容器除熱（代替スプレ イ/残留熱代替除去系）	

注記*1：事故時に発生する機械的荷重

*2：

表 3-2 設計基準事象に対する事故時荷重

事象		事故時荷重*	強度評価上の取扱い	備考
運転状態Ⅲ	過大圧力			
運転状態Ⅳ	冷却材喪失事故			

注記*：事故時に発生する機械的荷重

4. 強度評価結果

本計算書は、炉心支持構造物の重大事故等対処設備としての応力評価結果を示すものであるが、シュラウドサポート及び燃料支持金具を除く機器は、設計基準対象施設としての使用条件を超えないことから、炉心シュラウドの評価結果については、平成 16 年 7 月 1 日付け電原運第 24 号にて届出した既工認の添付書類Ⅳ-3-1-1「炉心シュラウドの応力計算書」、上部格子板、炉心支持板及び制御棒案内管の評価結果については、昭和 60 年 12 月 25 日付け 60 資庁第 11431 号にて認可された既工認の添付書類Ⅳ-2-2-3「炉心支持構造物の耐震性についての計算書」による。

シュラウドサポートについては、評価結果を 5 章に、燃料支持金具については、評価結果を 6 章に示す。

5. シュラウドサポートの強度計算

5.1 一般事項

本章は、シュラウドサポート（炉心シュラウド下部胴とシュラウドサポートシリンダとの接合部を含む。）の応力計算について示すものである。

注1：以下、シュラウドサポートレグ、シュラウドサポートシリンダ、シュラウドサポートプレート及び炉心シュラウド下部胴を、それぞれ「レグ」、「シリンダ」、「プレート」及び「下部胴」という。

注2：図表は、原則として巻末に示す。

5.2 適用基準

適用基準を以下に示す。

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

注記*：本章において、設計・建設規格の条項は「設計・建設規格 ○○○-△△△△(◇)a. (a)」として示す。

5.3 記号の説明

本章において、以下の記号を使用する。ただし、本章に別途記載ある場合は、この限りでない。

記号	記号の説明	単位
A	レグ1本当たりの断面積	mm ²
B	レグの幅	mm
C	部材両端の拘束条件に対する座屈長さの係数	—
E	縦弾性係数	MPa
F	設計・建設規格 SSB-3121.1(1)に定める値	MPa
f_c	許容応力 設計・建設規格 SSB-3121.1(3)に定める値	MPa
H	水平力	N
I	座屈軸についての断面二次モーメント	mm ⁴
i	座屈軸についての断面二次半径	mm
l	レグの長さ	mm
l_k	座屈長さ	mm
M	モーメント	N・mm
N_a	$S_{l'}$ に対応する許容繰返し回数	回
N_c	実際の繰返し回数	回
P_b	一次曲げ応力	MPa
P_m	一次一般膜応力	MPa
S	10 ¹¹ 回に対応する許容繰返しピーク応力強さ	MPa
S_{12}	主応力差 $\sigma_1 - \sigma_2$	MPa
S_{23}	主応力差 $\sigma_2 - \sigma_3$	MPa
S_{31}	主応力差 $\sigma_3 - \sigma_1$	MPa
S_l	繰返しピーク応力強さ	MPa
$S_{l'}$	補正繰返しピーク応力強さ	MPa
S_m	設計応力強さ 設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表1に定める値	MPa
S_n	供用状態A及びBにおける一次+二次応力の応力差最大範囲	MPa
$S_{n'}$	S_n のうち熱曲げ応力を除く一次+二次応力の応力差最大範囲	MPa
S_p	一次+二次+ピーク応力の応力差範囲	MPa
S_u	設計引張強さ 設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表9に定める値	MPa
S_y	設計降伏点 設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める値	MPa
$S_y (RT)$	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8 に定める材料の40°Cにおける設計降伏点	MPa

記号	記号の説明	単位
T	レグの板厚	mm
V	鉛直力	N
η	溶接部の継手効率	—
Λ	限界細長比	—
λ	有効細長比	—
ν	設計・建設規格 SSB-3121.1(3)a.における ν	—
σ_1	主応力	MPa
σ_2	主応力	MPa
σ_3	主応力	MPa
σ_l	軸方向応力	MPa
σ_r	半径方向応力	MPa
σ_t	周方向応力	MPa
τ_{lr}	せん断応力	MPa
τ_{rt}	せん断応力	MPa
τ_{tl}	せん断応力	MPa

5.4 計算精度と数値の丸め方

精度は、有効数字 6 桁以上を確保する。

表示する数値の丸め方は表 5-1 に示すとおりとする。

表 5-1 表示する数値の丸め方

数値の種類	単位	処理桁	処理方法	表示桁
応力	MPa	小数点以下第 1 位	四捨五入	整数位
応力強さ	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位
許容応力*	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数位
疲労累積係数	—	小数点以下第 4 位	切上げ	小数点以下第 3 位

注記*：設計・建設規格 付録材料図表に記載された温度の中間における設計応力強さ，設計降伏点及び設計引張強さは，比例法により補間した値の小数点以下第 2 位を切捨て，小数点以下第 1 位までの値として算出する。許容応力として得られた値の小数点以下第 1 位を切捨てて整数化する。

5.5 形状・寸法・材料

本章で解析する箇所形状・寸法・材料を図 5-1 に示す。

5.6 解析範囲

解析範囲を図 5-1 に示す。

5.7 計算結果の概要

計算結果の概要を表 5-2 に示す。

なお，応力評価点の選定に当たっては，形状不連続部，溶接部及び厳しい荷重作用点に着目し，応力評価上厳しくなる代表的な評価点を記載する。

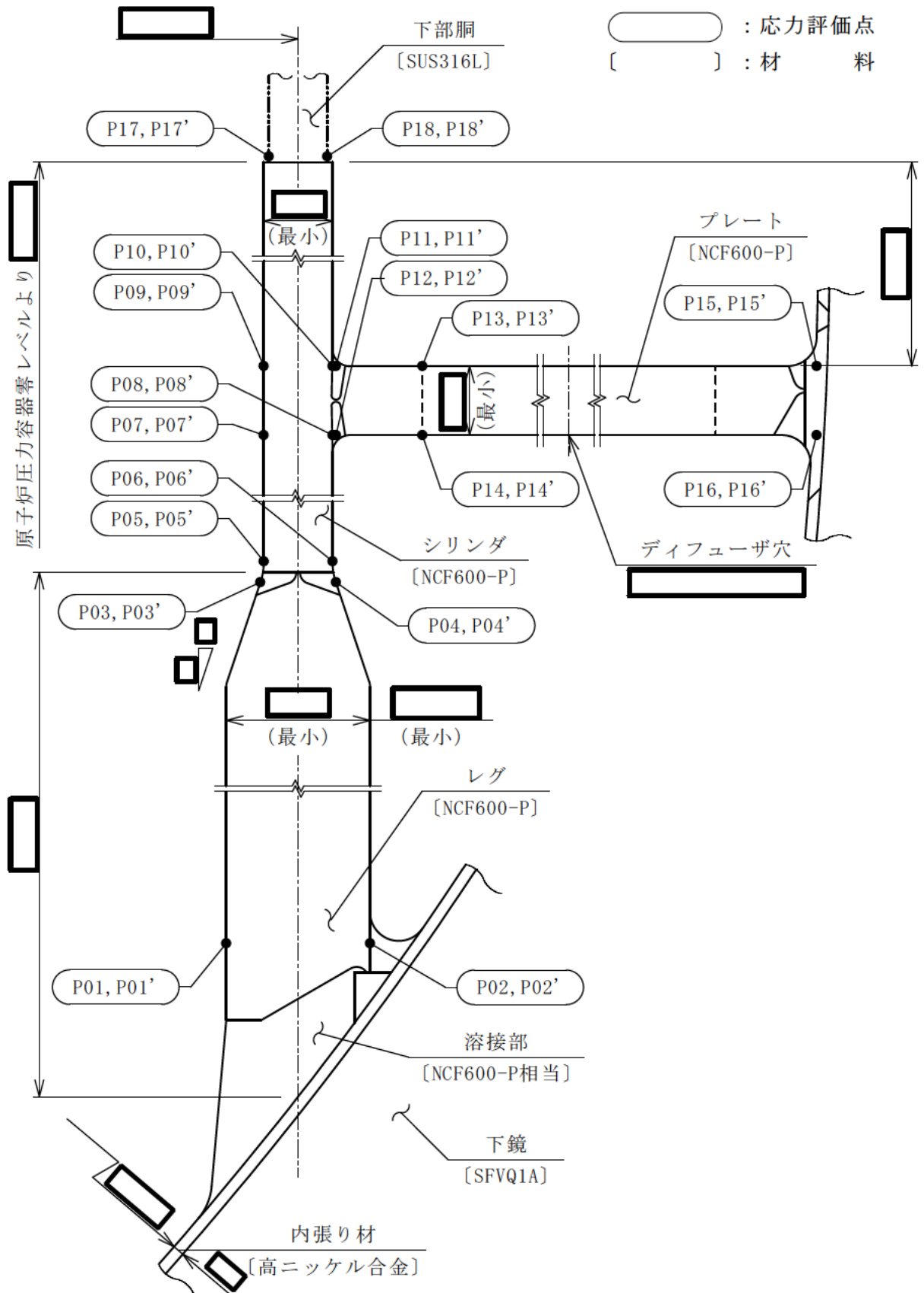


図 5-1 形状・寸法・材料・応力評価点 (単位: mm)

表5-2(1) 計算結果の概要

部分及び材料	供用状態	一次一般膜応力 (MPa)			一次一般膜+一次曲げ応力 (MPa)			一次+二次応力 (MPa)			疲労解析			
		応力強さ	許容応力	応力評価面	応力強さ	許容応力	応力評価面	応力強さ	許容応力	応力評価点	疲労累積係数	許容値	応力評価点	
レダ	設計条件	108	164	P03 - P04	108	246	P03 - P04	---	---	---	---	---	---	
	C	18	246	P03 - P04	18	369	P03 - P04	---	---	---	---	---	---	
	D	20	334	P03 - P04	20	501	P03 - P04	---	---	---	---	---	---	
NCF600-P	A, B	---	---	---	---	---	---	142	492	P03	0.000	1.0	P03	
	設計条件	50	164	P07 - P08	50	246	P07 - P08	---	---	---	---	---	---	
	C	9	246	P05 - P06	9	369	P05 - P06	---	---	---	---	---	---	
NCF600-P	D	10	334	P09 - P10	10	501	P09 - P10	---	---	---	---	---	---	
	A, B	---	---	---	---	---	---	476	492	P07	0.001	1.0	P07	
	設計条件	17	147*1	P11' - P12'	17	221*1	P11' - P12'	---	---	---	---	---	---	
プレート	C	6	221*1	P11 - P12	6	332*1	P11 - P12	---	---	---	---	---	---	
	D	6	300*1	P11 - P12	6	450*1	P11 - P12	---	---	---	---	---	---	
	A, B	---	---	---	---	---	---	314	442*1	P12	0.013	1.0	P14	
下部胴	設計条件	71	85*1	P17 - P18	71	127*1	P17 - P18	---	---	---	---	---	---	
	C	18	127*1	P17 - P18	18	190*1	P17 - P18	---	---	---	---	---	---	
	D	19	208*1	P17 - P18	19	312*1	P17 - P18	---	---	---	---	---	---	
SUS316L	A, B	---	---	---	---	---	307*2	260*1	P17	0.019	1.0	P17		

注記*1：継手効率 を乗じた値を示す。

*2：許容値 $\eta \cdot 3 \cdot S_m$ を超えるが設計・建設規格 CSS-3300の簡易弾塑性解析の規定を満足する。

表 5-2(2) 計算結果の概要

(単位：MPa)

部分及び材料	供用状態	座屈に対する評価	
		圧縮応力	許容応力
レグ NCF600-P	A, B	4	155
	C	4	233
	D	5	249

5.8 計算条件

5.8.1 評価対象機器

応力評価を行う機器は、次のとおりである。（図 5-1 参照）

機器名称	評価対象				
	供用状態に対する評価				
	設計条件	A, B	C	D	重大事故等時
シュラウドサポート	○	○	○	○	—

注：「○」は評価対象を示す。

5.8.2 設計条件

原子炉圧力容器の最高使用圧力：8.62 MPa

設計差圧： MPa

最高使用温度：302℃

設計機械的荷重：表 5-3 に示す。

5.8.3 運転条件

運転条件及び記号は、参照図書(1)a.に定めるとおりである。

シュラウドサポートの応力評価において考慮する差圧は、参照図書(1)a.に定める差圧 P_{12} であり、考慮する外荷重の値は表 5-3 に示すとおりである。

5.8.4 材料

各部の材料を図 5-1 に示す。

5.8.5 物性値

温度分布計算、応力計算及び繰返し荷重の評価に使用する材料の物性値は、以下のとおりである。

(1) 材料の物性値

材料の物性値は、次のように定める。

- a. 縦弾性係数 E 及び熱膨張係数 α は、設計・建設規格 付録材料図表 Part6 表 1 及び表 2 に定められたものによる。
また、熱伝導率 λ 及び温度伝導率 a は、引用文献(1)に定められたものによる。
- b. 機械的荷重による応力計算に使用する物性値は、最高使用温度（302℃）に対する値を用いる。温度分布計算及び熱応力計算に使用する物性値は、その

温度依存性を考慮する。

なお、常温は 20℃とする。

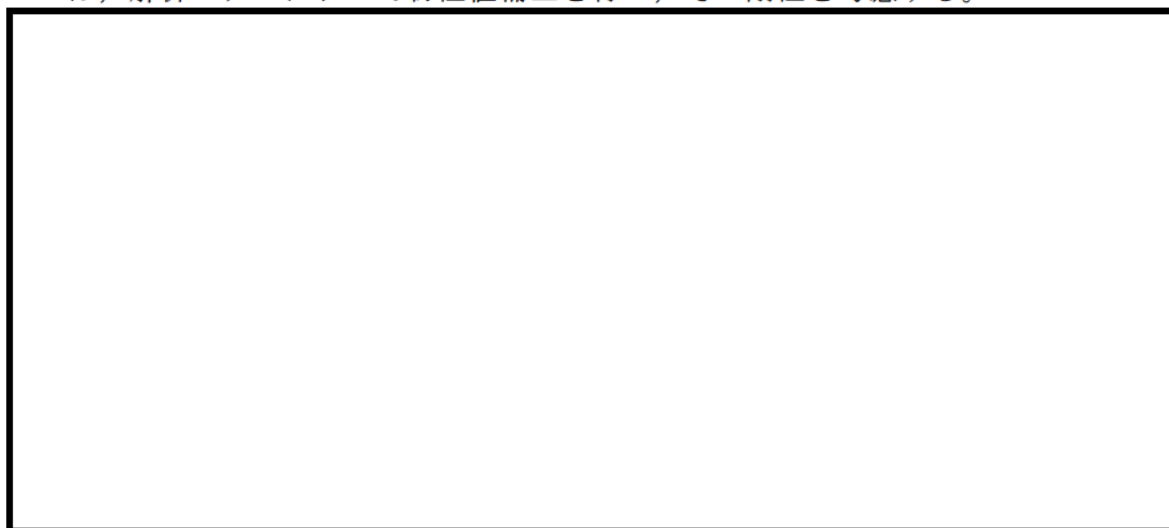
- c. 繰返し荷重の評価に使用する物性値は、運転温度 (℃ : 定格出力運転時の蒸気温度) に対する値を用いる。
- d. 主な温度における材料の物性値を表 5-4 に示す。
繰返し荷重の評価に使用する物性値を表 5-5 に示す。

(2) 流体の物性値

温度分布計算に使用する流体の物性値は、引用文献(2) (改訂第4版) の表に定められたものによる。主な温度における物性値を表 5-6 に示す。

5.8.6 解析モデルの物性値補正

シュラウドサポートの応力計算には、軸対称モデルを用い、次の部位については、解析モデルにおいて物性値補正を行い、その剛性を考慮する。



5.8.7 荷重の組合せ及び供用状態

荷重の組合せ及び供用状態を表 5-7 に示す。

なお、本章において、設計・建設規格 GNR-2120(1) の規定による最高使用圧力 (供用状態 A を定義する運転状態において機器が受ける最高の圧力以上の圧力であって、設計上定めるものをいう。) を「設計差圧」と呼び、設計差圧と設計機械的荷重を組み合わせた条件を「設計条件」という。

5.8.8 荷重の組合せ及び応力評価

荷重の組合せ及び応力評価項目の対応を表 5-8 に示す。本章において、荷重の種類と記号は以下のとおりである。

荷重	記号
(1) 原子炉圧力容器の内圧	[L01]
(2) 差圧	[L02]
(3) 設計機械的荷重	[L03]
(4) 死荷重	[L04]
(5) ジェット反力	[L09]
(6) 熱負荷	[L10]

5.8.9 許容応力

シュラウドサポートの許容応力は、設計・建設規格 CSS-3100 に基づき表 5-10 に示す。

5.8.10 許容応力評価条件

- (1) 許容応力評価において、設計応力強さ S_m 、設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u は、それぞれ設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 1、表 8 及び表 9 に定められたものを使用する。
- (2) 設計条件の評価には、最高使用温度（302℃）に対する許容応力を用いる。供用状態 A 及び B、供用状態 C 並びに供用状態 D の一次応力の評価には、各供用状態を定義する運転状態における流体の最高温度（運転状態 I 及び II：℃，運転状態 III：℃，運転状態 IV：℃）に対する許容応力を用いる。供用状態 A 及び B の一次＋二次応力及び繰返し荷重の評価には、運転温度（℃：定格出力運転時の蒸気温度）に対する許容応力を用いる。
- (3) シュラウドサポートの許容応力評価条件を表 5-11 に示す。

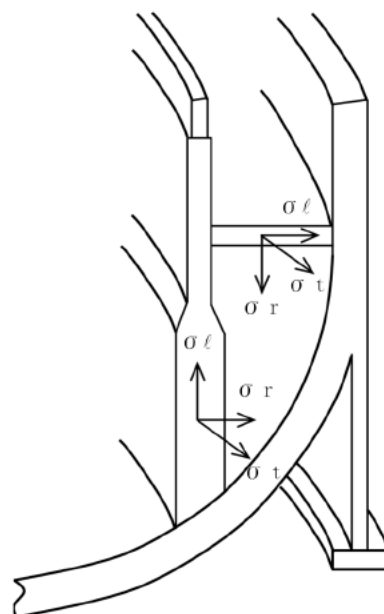
5.8.11 溶接部の継手効率

- (1) 溶接部の継手効率は，継手の種類と分類及び継手に適用する検査の種類により，設計・建設規格 CSS-3150 に従って定める。溶接部の継手効率を表 5-12 に示す。
- (2) 溶接部の許容応力は，材料の許容応力に継手効率を乗じたものとする。

5.8.12 応力の記号と方向

応力の記号とその方向は，以下のとおりとする。

- σ_t : 周方向応力
- σ_l : 軸方向応力
- σ_r : 半径方向応力



5.9 応力解析の手順

応力解析の手順について述べる。

応力解析の概要を図 5-2 に示す。

5.9.1 温度分布計算

(1) 境界の熱伝達率

温度分布計算に使用する容器内面，容器外面及びシュラウドサポート外面の熱伝達率の計算条件と計算結果を表 5-13 に示す。

(2) 温度分布の計算

a. 荷重条件

参照図書(1)a.に定める運転条件に基づいて計算する。

b. 計算方法

温度分布計算は，二次元軸対称の有限要素でモデル化し，計算機コード「TACF」により行う。なお，評価に用いる計算機コードの検証及び妥当性確認等の概要については，VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

温度分布計算のモデルを図 5-3 に示す。

境界における熱伝達率は，5.9.1 項の計算結果を用いる。

c. 温度遷移図

温度分布計算を行った運転条件について，評価断面における熱応力が厳しくなる時点を検出するため，あらかじめ指定した数点の温度の時間的変化を図 5-4 に示す。

シュラウドサポート，下部胴及び下鏡内に指定した 2 点間の温度差が極値となる時点を図 5-4 に記号で示す。

なお，同図において，その差が極値をとった時点を熱応力が厳しくなるものとする。

d. 温度分布図

5.9.1 項(2)c.で選定した 2 点間の温度差が極値となる時点の温度分布を図 5-5 に示す。

(3) 熱応力の計算時点

熱応力計算は、5.9.1 項(2)c. で選定した 2 点間の温度差が極値となる時点、圧力ピークとなる時点 [C10-01, C20-01, C20-03 及び C20-05] 及び定格出力運転 [C12-01] (計算時点を図 5-4 中に示す。) 並びに耐圧試験 [C02-01] に対して行う。

5.9.2 応力計算

(1) 応力評価点

応力評価点の位置を図 5-1 に示す。

応力集中が生じる箇所の応力集中係数を表 5-14 に示す。

(2) 内圧及び差圧による応力

a. 荷重条件 (L01 及び L02)

各運転条件における内圧及び差圧を 5.8.2 項及び 5.8.3 項に示す。

b. 計算方法

内圧及び差圧による応力の計算は、二次元軸対称の有限要素でモデル化し、計算機コード「ASHSD2-B」により行う。なお、評価に用いる計算機コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム(解析コード)の概要」に示す。

応力計算のモデル及び仮定した境界条件(拘束条件)を図 5-3 に示す。

なお、各供用状態での内圧及び差圧による応力は、最高使用圧力及び設計差圧での応力を用いて、圧力の比により(比倍して)計算する。

(3) 外荷重による応力

a. 荷重条件 (L03, L04 及び L09)

シュラウドサポートに作用する外荷重を表 5-3 に示す。

b. 計算方法

外荷重による応力の計算は、二次元軸対称の有限要素でモデル化し、計算機コード「ASHSD2-B」により行う。

応力計算のモデル及び仮定した境界条件(拘束条件)を図 5-3 に示す。

なお、各荷重での応力は、単位荷重(鉛直力、水平力等)での応力を用いて、荷重(鉛直力、水平力等)の比により(比倍して)計算する。

(4) 熱応力

a. 荷重条件 (L10)

熱応力計算には、5.9.1項で求めた温度分布を用いる。

b. 計算方法

熱応力の計算は、二次元軸対称の有限要素でモデル化し、計算機コード「ASHSD2-B」により行う。

応力計算のモデル及び仮定した境界条件（拘束条件）を図5-3に示す。

5.10 応力強さの評価

5.10.1 主応力

計算した応力は、応力の分類ごとに重ね合わせ、組合せ応力を求める。

組合せ応力は、一般に σ_t 、 σ_l 、 σ_r 、 τ_{tl} 、 τ_{lr} 、 τ_{rt} の6成分を持つが、主応力 σ は、引用文献(4)の1・3・6項により、次式を満足する3根 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 として計算する。

$$\begin{aligned} & \sigma^3 - (\sigma_t + \sigma_l + \sigma_r) \cdot \sigma^2 + (\sigma_t \cdot \sigma_l + \sigma_l \cdot \sigma_r + \sigma_r \cdot \sigma_t - \tau_{tl}^2 \\ & - \tau_{lr}^2 - \tau_{rt}^2) \cdot \sigma - \sigma_t \cdot \sigma_l \cdot \sigma_r + \sigma_t \cdot \tau_{lr}^2 + \sigma_l \cdot \tau_{rt}^2 \\ & + \sigma_r \cdot \tau_{tl}^2 - 2 \cdot \tau_{tl} \cdot \tau_{lr} \cdot \tau_{rt} = 0 \end{aligned}$$

上式により主応力を求める。

5.10.2 応力強さ

以下の3つの主応力差の絶対値で最大のものを応力強さとする。

$$S_{12} = \sigma_1 - \sigma_2$$

$$S_{23} = \sigma_2 - \sigma_3$$

$$S_{31} = \sigma_3 - \sigma_1$$

5.10.3 一次一般膜応力強さの評価

各供用状態における評価をまとめて、表5-15に示す。

表5-15より、各供用状態の一次一般膜応力強さは、5.8.9項に示す許容応力を満足する。

5.10.4 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価

各供用状態における評価をまとめて、表5-16に示す。

表5-16より、各供用状態の一次一般膜＋一次曲げ応力強さは、5.8.9項に示す許容応力を満足する。

5.10.5 一次＋二次応力強さの評価

供用状態 A 及び B における評価をまとめて、表 5-17 に示す。

表 5-17 より、以下の評価点を除くすべての評価点において一次＋二次応力の応力差最大範囲は、 $\eta \cdot 3 \cdot S_m$ 以下であり、5.8.9 項に示す許容応力を満足する。

P17, P17' , P18 及び P18'

一次＋二次応力の応力差最大範囲が $\eta \cdot 3 \cdot S_m$ を超える上記の評価点にあつては、5.11 節で簡易弾塑性解析の方法を適用する。

5.11 繰返し荷重の評価

5.11.1 疲労解析

シュラウドサポートの応力評価点について、詳細な繰返し荷重の評価を行う。

(1) 設計・建設規格 CSS-3300 の適用性の検討

一次＋二次応力強さの最大範囲が $\eta \cdot 3 \cdot S_m$ を超える応力評価点については、以下に示すとおり、設計・建設規格 CSS-3300 による簡易弾塑性解析の方法を適用する。

- a. 材料の最小降伏点と最小引張強さの比は、以下に示すとおり、0.8 以下である。（設計・建設規格 CSS-3311）

応力評価点	材 料	最小降伏点 (MPa)	最小引張強さ (MPa)	最小降伏点と 最小引張強さの比
P17, P17' P18, P18'	SUS316L	175	480	0.37

- b. 原子炉圧力容器の運転温度は、430℃以下である。（設計・建設規格 CSS-3312）
- c. 熱応力のうち曲げ応力を除く一次＋二次応力の評価結果を表 5-17 に示す。表 5-17 より、一次＋二次応力（熱曲げを除く。）の応力差の最大範囲（ $S_{n'}$ ）は、 $\eta \cdot 3 \cdot S_m$ を超えない。（設計・建設規格 CSS-3313）
- d. 計算された繰返しピーク応力強さ（ $S_{l'}$ ）に対する許容繰返し回数（ N_a ）は、10 回以上である。（設計・建設規格 CSS-3314）
- e. 繰返しピーク応力強さは、表 5-9 に示す方法により割増ししたものを使用する。（設計・建設規格 CSS-3320）

(2) 考慮する運転条件

疲労解析に考慮する運転条件及び回数の組合せを図 5-6 に示す。

(3) 疲労累積係数

各応力評価点における疲労累積係数をまとめて、表 5-18 に示す。

表 5-18 より、各応力評価点において疲労累積係数は 1.0 以下であり、許容値を満足する。

5.12 特別な応力の評価

5.12.1 座屈に対する評価

レグには、シュラウドサポートに作用する鉛直力及びモーメントにより、圧縮応力が生じる。したがって、これらの荷重の組合せにより発生する圧縮応力の評価を行う。

(1) 計算データ

a. 座屈長さ ℓ_k

$$\ell_k = C \cdot \ell = 0.7 \times \boxed{} = \boxed{} \text{ mm}$$

ここで、 $C = 0.7$

$$\ell : \text{レグの長さ} = \boxed{} \text{ mm}$$

b. 座屈軸についての断面二次半径 i

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\boxed{}} = \boxed{} \text{ mm}$$

ここで、 I : 座屈軸についての断面二次モーメント

$$= \frac{1}{12} T^3 \cdot B = \boxed{} \text{ mm}^4$$

$$T : \text{レグの板厚} = \boxed{} \text{ mm}$$

$$B : \text{レグの幅} = \boxed{} \text{ mm}$$

A : レグ 1 本当たりの断面積

$$= T \cdot B = \boxed{} \text{ mm}^2$$

c. 有効細長比 λ

$$\lambda = \frac{\ell_k}{i} = \boxed{} = \boxed{}$$

(2) 圧縮荷重

シュラウドサポートに作用する鉛直力及びモーメントを表 5-3 に示す。

(3) 圧縮応力

各供用状態においてレグに発生する圧縮応力を表 5-19 に示す。

レグに発生する圧縮応力は、応力評価面 P03'-P04' での一次一般膜応力 (σ_t) を示す。

(4) 許容応力

各供用状態における許容応力の計算は、設計・建設規格 SSB-3121 を準用して計算する。

a. 供用状態 A 及び B

供用状態 A 及び B における許容応力度 F は、以下の 3 つの値のうち小さい方を用いる。

$$1.35 \cdot S_y = \boxed{} \text{ MPa} \quad (\boxed{}^\circ\text{C} \text{ における値})$$

$$0.7 \cdot S_u = \boxed{} \text{ MPa} \quad (\boxed{}^\circ\text{C} \text{ における値})$$

$$S_y = \boxed{} \text{ MPa} \quad (\boxed{} \text{ における値})$$

したがって、許容応力度 $F = \boxed{} \text{ MPa}$ とする。

供用状態 A 及び B における許容圧縮応力 f_c は、 $F = \boxed{} \text{ MPa}$ に対して次のように得られる。

$$\begin{aligned} \text{限界細長比} : \Lambda &= \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{0.6 \cdot F}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \times \boxed{}}{0.6 \times \boxed{}}} \\ &= \boxed{} \end{aligned}$$

ここで、 E : 縦弾性係数 = $\boxed{} \text{ MPa}$ ($\boxed{}^\circ\text{C}$ における値)

ゆえに、 $\lambda < \Lambda$ なので f_c は、

$$\begin{aligned} f_c &= \left\{ 1 - 0.4 \cdot \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \cdot \frac{F}{\nu} \\ &= \left\{ 1 - 0.4 \times \left(\boxed{} \right)^2 \right\} \times \boxed{} = 155 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\text{ここで、} \nu = 1.5 + \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

$$= 1.5 + \frac{2}{3} \times \left(\boxed{} \right)^2 = \boxed{}$$

b. 供用状態 C

供用状態 C における許容応力度 F は、以下の 3 つの値のうち小さい方を用いる。

$$1.35 \cdot S_y = \boxed{} \text{ MPa} \quad (\boxed{}^\circ\text{C} \text{ における値})$$

$$0.7 \cdot S_u = \boxed{} \text{ MPa} \quad (\boxed{}^\circ\text{C} \text{ における値})$$

$$S_y = \boxed{} \text{ MPa} \quad (\boxed{} \text{ における値})$$

したがって、許容応力度 $F = \square$ MPa とする。

供用状態 C における許容圧縮応力 f_c は、 $F = \square$ MPa に対して次のように得られる。

$$\begin{aligned} \text{限界細長比} : \Lambda &= \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{0.6 \cdot F}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \times \square}{0.6 \times \square}} \\ &= \square \end{aligned}$$

ここで、 E : 縦弾性係数 = \square MPa (\square °C における値)

ゆえに、 $\lambda < \Lambda$ なので f_c は、

$$\begin{aligned} f_c &= 1.5 \cdot \left\{ 1 - 0.4 \cdot \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \cdot \frac{F}{\nu} \\ &= 1.5 \times \left\{ 1 - 0.4 \times \left(\frac{\square}{\square} \right)^2 \right\} \times \square = 233 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\text{ここで、} \nu = 1.5 + \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

$$= 1.5 + \frac{2}{3} \times \left(\frac{\square}{\square} \right)^2 = \square$$

c. 供用状態 D

供用状態 D における許容応力度 F は、以下の 3 つの値のうち小さい方を用いる。

$$1.35 \cdot S_y = \square \text{ MPa} \quad (\square \text{°C における値})$$

$$0.7 \cdot S_u = \square \text{ MPa} \quad (\square \text{°C における値})$$

$$1.2 \cdot S_y = \square \text{ MPa} \quad (\square \text{°C における値})$$

したがって、許容応力度 $F = \square$ MPa とする。

供用状態 D における許容圧縮応力 f_c は、 $F = \square$ MPa に対して次のように得られる。

$$\begin{aligned} \text{限界細長比} : \Lambda &= \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{0.6 \cdot F}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \times \square}{0.6 \times \square}} \\ &= \square \end{aligned}$$

ここで、 E : 縦弾性係数 = \square MPa (\square °C における値)

ゆえに、 $\lambda < \Lambda$ なので f_c は、

$$f_c = 1.5 \cdot \left\{ 1 - 0.4 \cdot \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \cdot \frac{F}{\nu}$$

$$= 1.5 \times \left\{ 1 - 0.4 \times \left(\boxed{} \right)^2 \right\} \times \boxed{} = 249 \text{ MPa}$$

ここで、 $\nu = 1.5 + \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$

$$= 1.5 + \frac{2}{3} \times \left(\boxed{} \right)^2 = \boxed{}$$

(5) 座屈に対する評価

各供用状態における座屈に対する評価を表 5-19 に示す。

表 5-19 より、各供用状態における圧縮応力は、許容応力を満足するため、座屈は発生しない。

5.13 引用文献

文献番号は、本章において共通である。

- (1) ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE SEC. II PART D, MATERIALS (2015 Edition)
- (2) 伝熱工学資料 (日本機械学会 改訂第3版及び改訂第4版)
- (3) March 1979 Revision of WRC Bulletin 107/August 1965 「Local Stresses in Spherical and Cylindrical Shells due to External Loadings」
- (4) 機械工学便覧 基礎編 $\alpha 3$ (日本機械学会)
- (5) 「伝熱概論」 甲藤好郎著, 養賢堂発行
- (6) WARREN H. GIEDT 「基礎伝熱工学」 横堀進, 久我修共訳, 丸善
- (7) Journal of Engineering for Industry, 「Effective Elastic Constants for Thick Perforated Plates With Square and Triangular Penetration Patterns」 (T. SLOT, W. J. O' DONNELL)

5.14 参照図書

- (1) 島根原子力発電所第2号機 第5回工事計画認可申請書 添付書類
 - a. IV-2-2-3(1) 炉心支持構造物の応力解析の方針
 - b. IV-2-2-3(2)b シュラウドサポートの応力計算書
 - c. IV-3-1-1-1 原子炉圧力容器の応力解析の方針

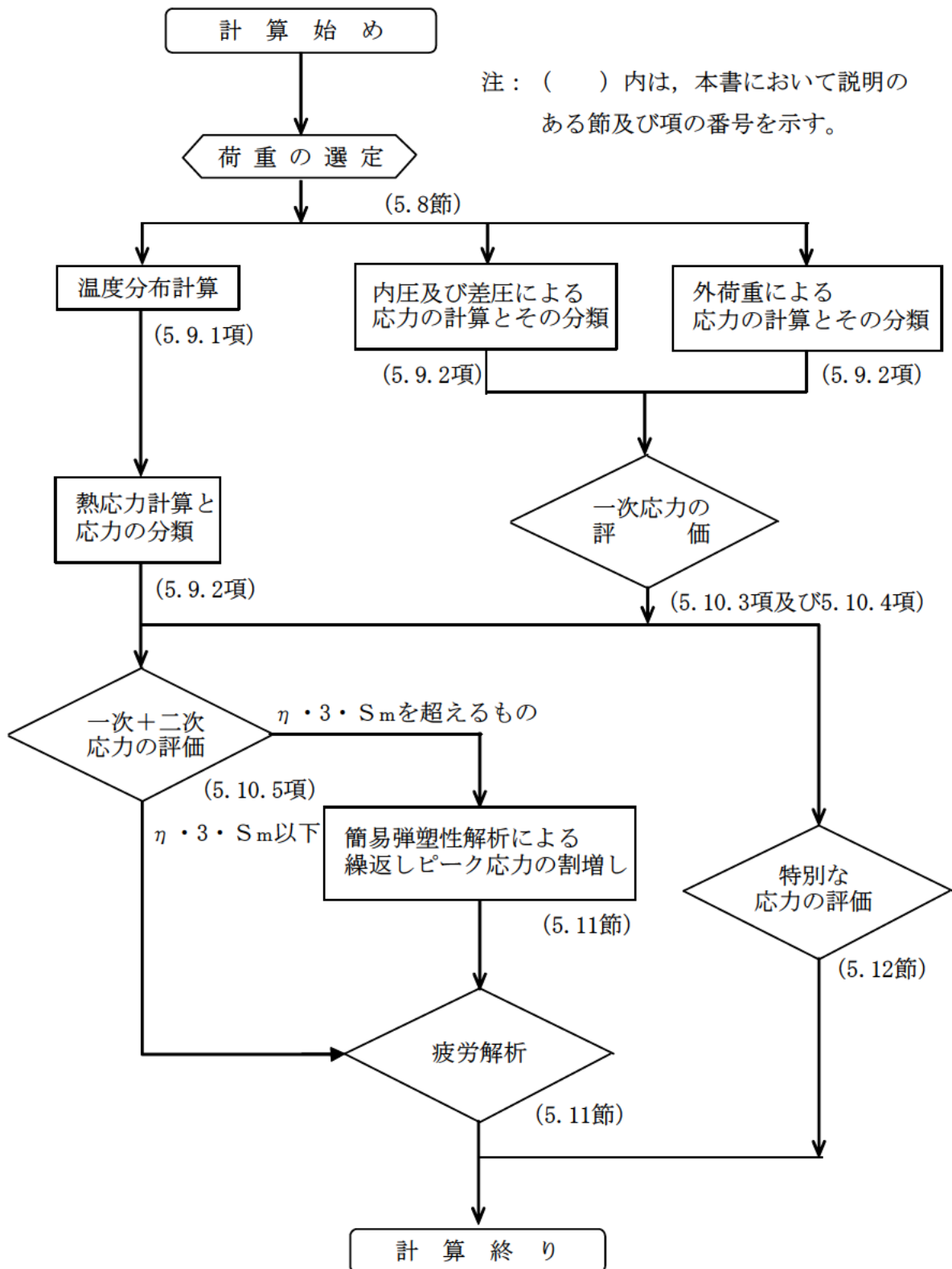


図 5-2 応力解析の手順

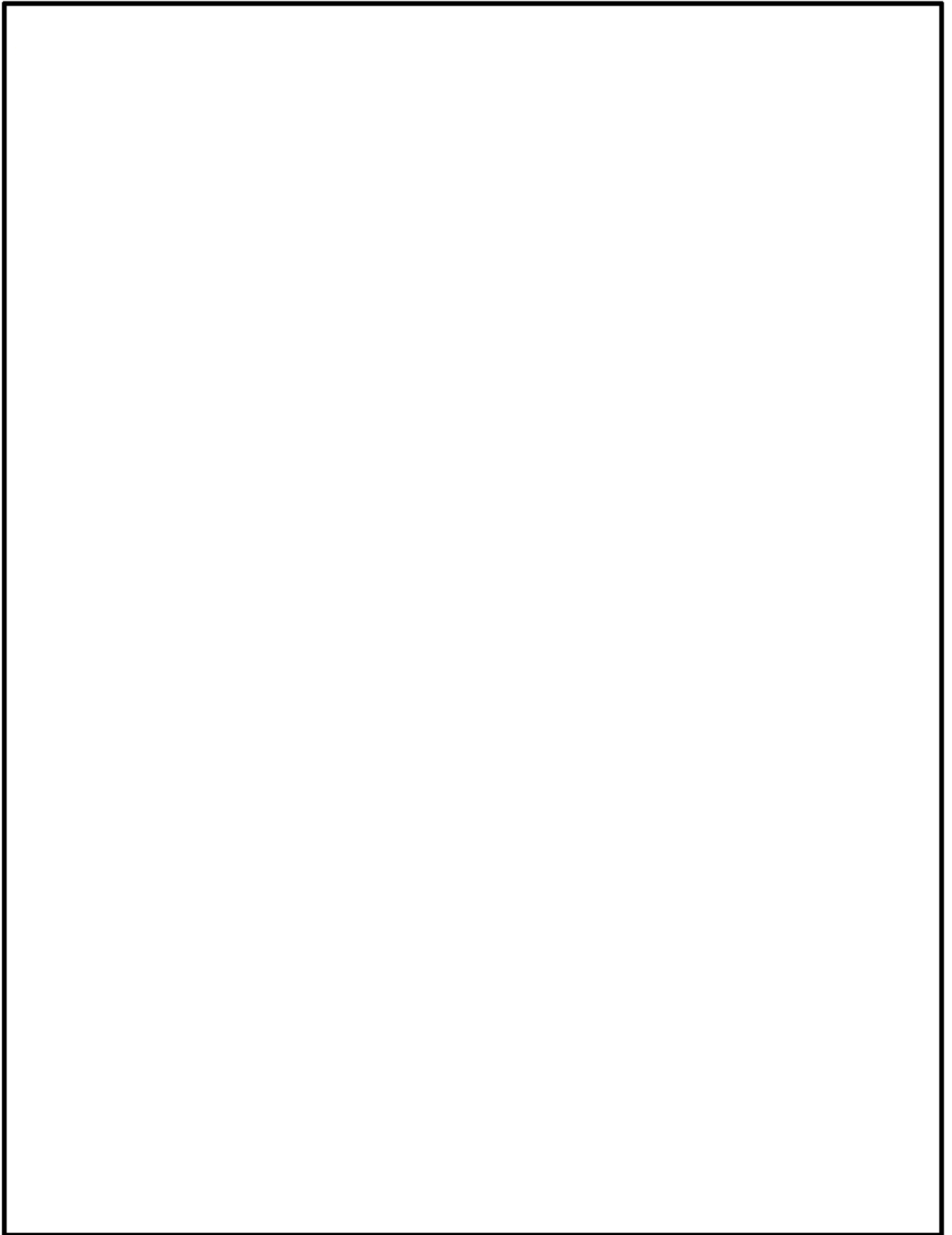


図 5-3 温度分布及び応力計算のモデル

表 5-3 外荷重

記号	荷重名称	鉛直力	水平力	モーメント
		V (kN)	H (kN)	M (kN・m)
L03	設計機械的荷重			
L04	死荷重			
L09	ジェット反力			

--	--	--	--	--

表 5-4 温度分布計算及び応力計算に使用する材料の物性値

材料	温度 (°C)	E ×10 ⁵ (MPa)	α ×10 ⁻⁶ (mm/(mm・°C))	λ (W/(m・K))	a ×10 ⁻⁶ (m ² /s)	ν
SFVQ1A						
SUS316L						
NCF600-P						

注 1 : α は 20°C より表記の温度までの平均熱膨張係数

注 2 : 温度分布計算及び熱応力計算においては、5.8.5 項に示す物性値の出典に基づき、設計・建設規格 付録材料図表 Part6 表 1 及び表 2 に示される温度に対する物性値を算出し、さらに、これらの値から直線補間により任意の温度における物性値を算出し計算に用いる。

表 5-5 繰返し荷重の評価に使用する材料の物性値

材料	E ×10 ⁵ (MPa)	α ×10 ⁻⁶ (mm/(mm・°C))	S (MPa)	E ₀ ×10 ⁵ (MPa)	q	A ₀	B ₀
SUS316L					3.1	0.7	2.15
NCF600-P					3.1	0.7	2.15

注 :

- E : 運転温度 (°C) に対する縦弾性係数
- α : 運転温度 (°C) に対する瞬時熱膨張係数
- S : 設計・建設規格 表 添付 4-2-2 の曲線 C の 10¹¹ 回に対する繰返しピーク応力強さ
- E₀ : 設計・建設規格 添付 4-2 に記載された縦弾性係数
- q, A₀, B₀ : 設計・建設規格 表 PVB-3315-1 に示された簡易弾塑性解析に使用する係数の値

表 5-6 流体の物性値

種類	温度 (°C)	λ (W/(m·K))	C_p (J/(kg·K))	ρ (kg/m ³)	ν_0 (m ² /s)	Pr
水	20					
	160					
	300					

注：温度分布計算及び熱応力計算においては，5.8.5項に示す物性値の出典に基づき，設計・建設規格 付録材料図表 Part6 表1に示される温度に対する物性値を算出し，さらに，これらの値から直線補間により任意の温度における物性値を算出し計算に用いる。

表 5-7 荷重の組合せ及び供用状態

区分	荷重の組合せ
	各運転状態による荷重
設計条件	設計条件による荷重
供用状態 A	運転状態Ⅰによる荷重
供用状態 B	運転状態Ⅱによる荷重
供用状態 C	運転状態Ⅲによる荷重
供用状態 D	運転状態Ⅳ（L）による荷重 *1
	運転状態Ⅳ（S）による荷重 *2

注記*1：運転状態Ⅳ（L）による荷重とは、運転状態Ⅳによる荷重のうち長期荷重を表す。

*2：運転状態Ⅳ（S）による荷重とは、運転状態Ⅳによる荷重のうち短期荷重を表す。

表 5-8 荷重の組合せ

条件	荷重の組合せ	応力評価
設計条件	L02+L03	P_m $P_m + P_b$
供用状態 A 及び B	L01+L02+L04+L10	$P_m + P_b + Q$ 疲労解析
供用状態 C	L02+L04	P_m $P_m + P_b$
供用状態 D	L02+L04+L09	P_m $P_m + P_b$

表5-9 繰返しピーク応力強さの割増し方法

S _n	S _ℓ
3・S _m 未満	$S_{\ell} = \frac{S_p}{2}$
3・S _m 以上	<p data-bbox="464 443 655 510">$S_{\ell} = \frac{K_e \cdot S_p}{2}$</p> <p data-bbox="464 533 927 566">K_eは、次の手順により計算する。</p> <p data-bbox="499 584 679 618">(1) K < B₀</p> <p data-bbox="539 629 1465 757">① $\frac{S_n}{3 \cdot S_m} < \frac{\left(q + \frac{A_0}{K} - 1\right) - \sqrt{\left(q + \frac{A_0}{K} - 1\right)^2 - 4 \cdot A_0 (q - 1)}}{2 \cdot A_0}$</p> <p data-bbox="619 768 1046 846">$K_e = 1 + A_0 \cdot \left(\frac{S_n}{3 \cdot S_m} - \frac{1}{K}\right)$</p> <p data-bbox="539 891 1465 1025">② $\frac{S_n}{3 \cdot S_m} \geq \frac{\left(q + \frac{A_0}{K} - 1\right) - \sqrt{\left(q + \frac{A_0}{K} - 1\right)^2 - 4 \cdot A_0 (q - 1)}}{2 \cdot A_0}$</p> <p data-bbox="619 1037 1070 1115">$K_e = 1 + (q - 1) \cdot \left(1 - \frac{3 \cdot S_m}{S_n}\right)$</p> <p data-bbox="499 1182 679 1216">(2) K ≥ B₀</p> <p data-bbox="539 1227 1246 1361">① $\frac{S_n}{3 \cdot S_m} < \frac{(q - 1) - \sqrt{A_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right) \cdot (q - 1)}}{a}$</p> <p data-bbox="619 1373 1214 1451">$K_e = a \cdot \frac{S_n}{3 \cdot S_m} + A_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right) + 1 - a$</p> <p data-bbox="539 1496 1246 1630">② $\frac{S_n}{3 \cdot S_m} \geq \frac{(q - 1) - \sqrt{A_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right) \cdot (q - 1)}}{a}$</p> <p data-bbox="619 1641 1070 1720">$K_e = 1 + (q - 1) \cdot \left(1 - \frac{3 \cdot S_m}{S_n}\right)$</p> <p data-bbox="464 1753 568 1787">ここで、</p> <p data-bbox="496 1798 619 1865">$K = \frac{S_p}{S_n}$</p> <p data-bbox="496 1877 1337 1966">$a = A_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right) + (q - 1) - 2 \cdot \sqrt{A_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right) \cdot (q - 1)}$</p>

注：q, A₀, B₀は、表5-5に示す。

表5-10 許容応力

供用状態	許容限界	
	一次一般膜応力	一次一般膜+一次曲げ応力
設計条件	S_m	$1.5 \cdot S_m$
A, B	—	—
C	$1.5 \cdot S_m$	$2.25 \cdot S_m$
D	$\text{Min}(2.4 \cdot S_m, 2/3 \cdot S_u)$	$\text{Min}(3.6 \cdot S_m, S_u)$
		$3 \cdot S_m$
		—
		—

表5-11 許容応力評価条件

評価部位	材料	温度条件 (°C)	S_m (MPa)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	S_y (R,T) (MPa)	
シュラウド サポート	SUS316L	流体の最高温度 (運転状態Ⅳ) 及び定格 出力運転時の蒸気温度					
		最高使用温度	302	94	104	373	
	オーステナイト系 ステンレス鋼及び 高ニッケル合金	流体の最高温度 (運転状態Ⅲ)					
		流体の最高温度 (運転状態Ⅳ) 及び定格 出力運転時の蒸気温度					
	NCF600-P	最高使用温度	302	164	193	501	
		流体の最高温度 (運転状態Ⅲ)				—	

表5-12 溶接部の継手効率

継手の箇所	継手の分類	継手の種類	対応する応力評価面	検査の種類*	継手効率 η
炉心シュラウドと シリンダの溶接継手	胴と胴の周継手	シリンダとプレート の継手			
	プレートと原子炉圧力容器の周継手				
シュラウドサポート	シリンダとレグの継手	レグと原子炉圧力容器の継手			
	レグと原子炉圧力容器の継手				

注記*：検査の種類を示す記号は次のとおりである。

P T + R T : 設計・建設規格 CSS-3150に規定するAの検査

P P T : 設計・建設規格 CSS-3150に規定するCの検査

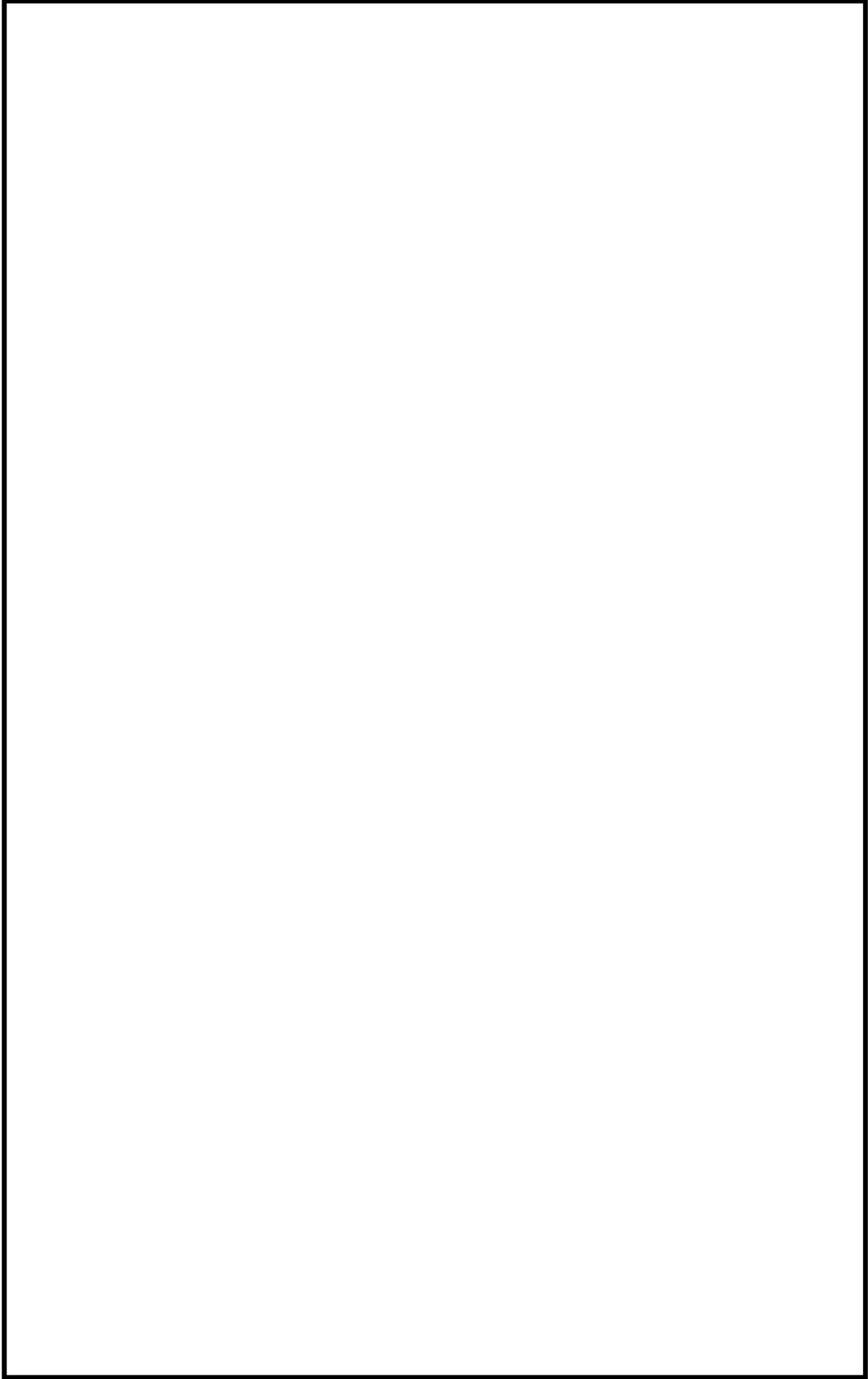


図5-4(1) 温度遷移図



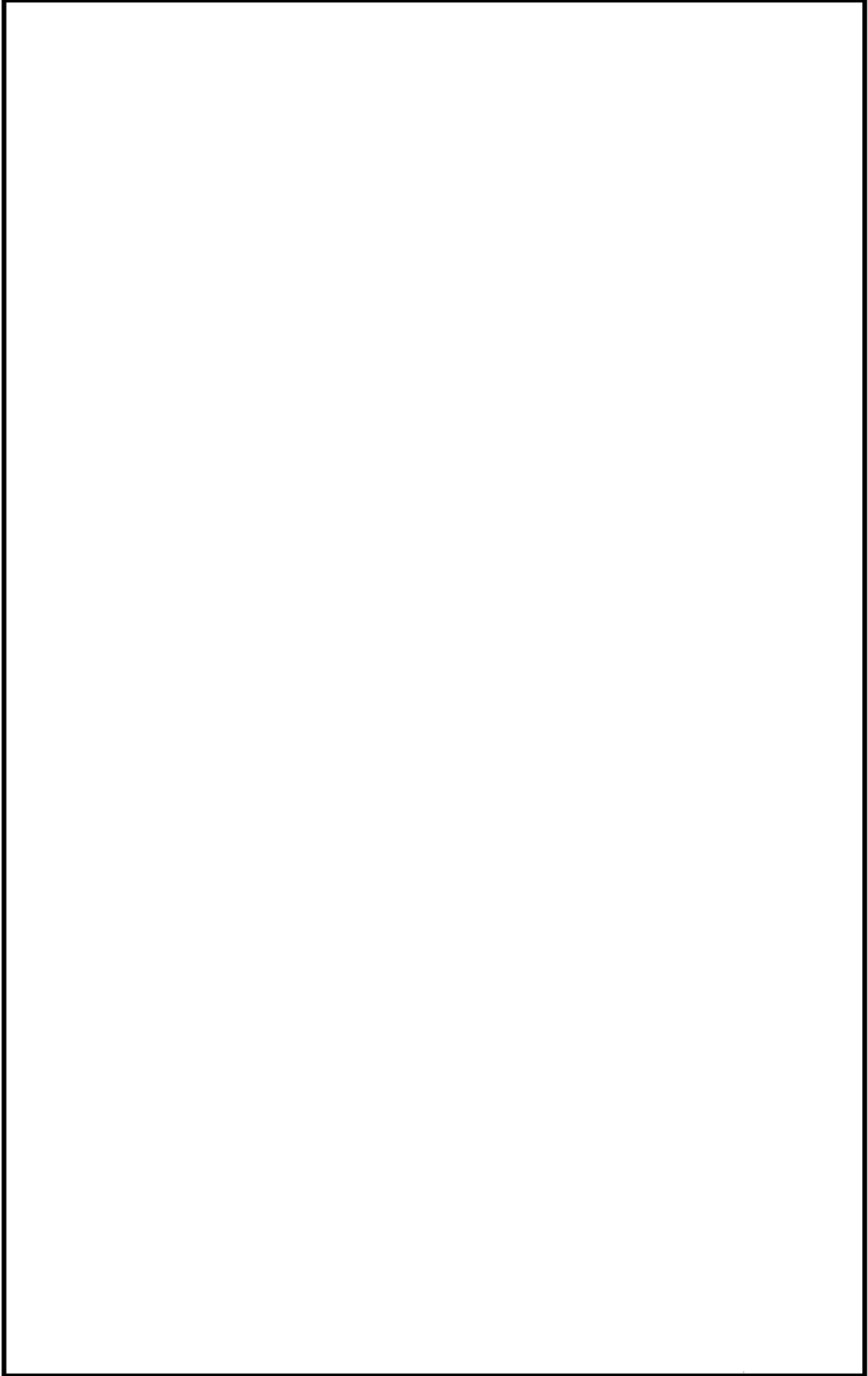



図5-4(2) 温度遷移図 

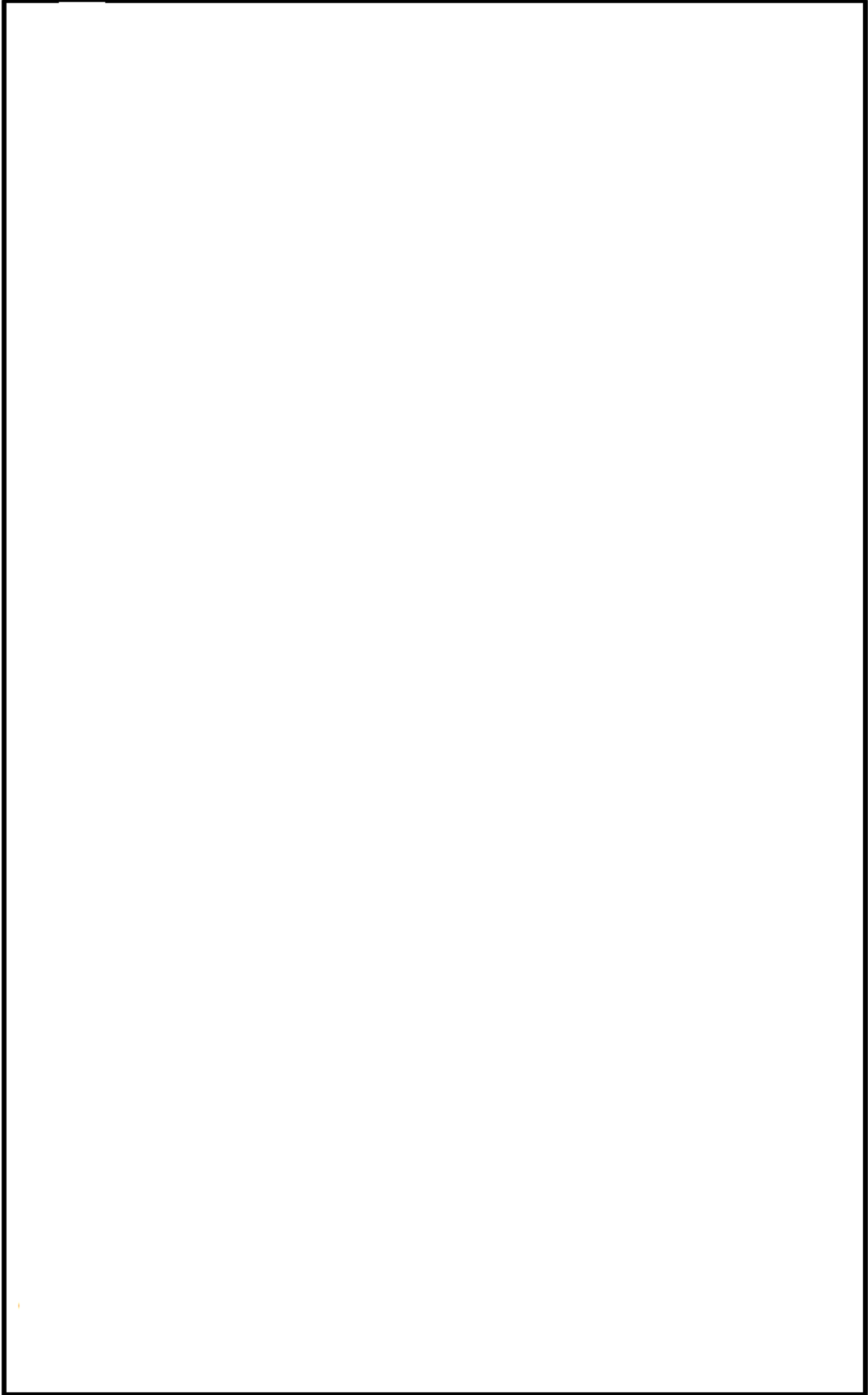


図5-4(3) 温度遷移図 

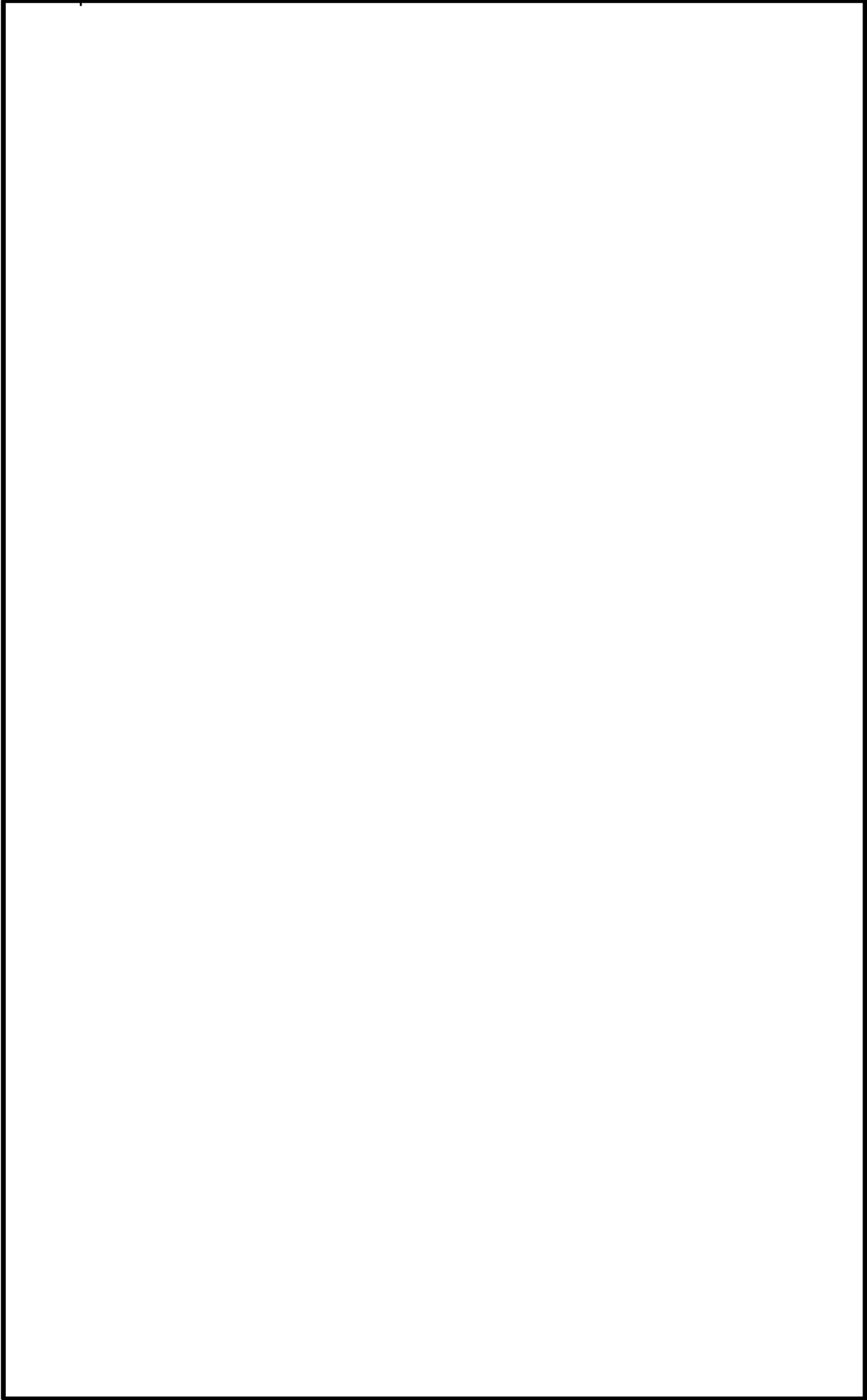


図5-4(4) 温度遷移図

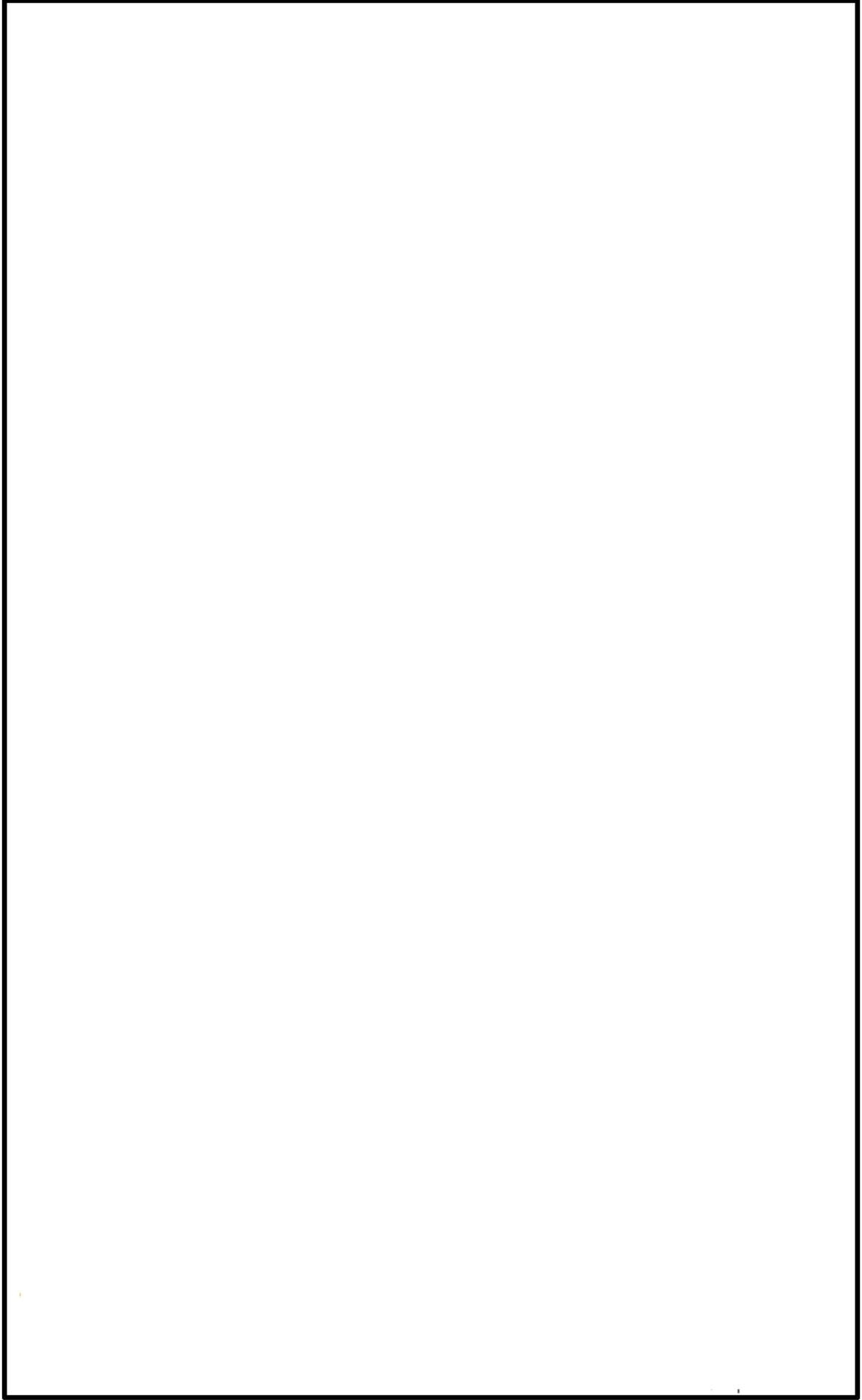


図5-4(5) 温度遷移図 

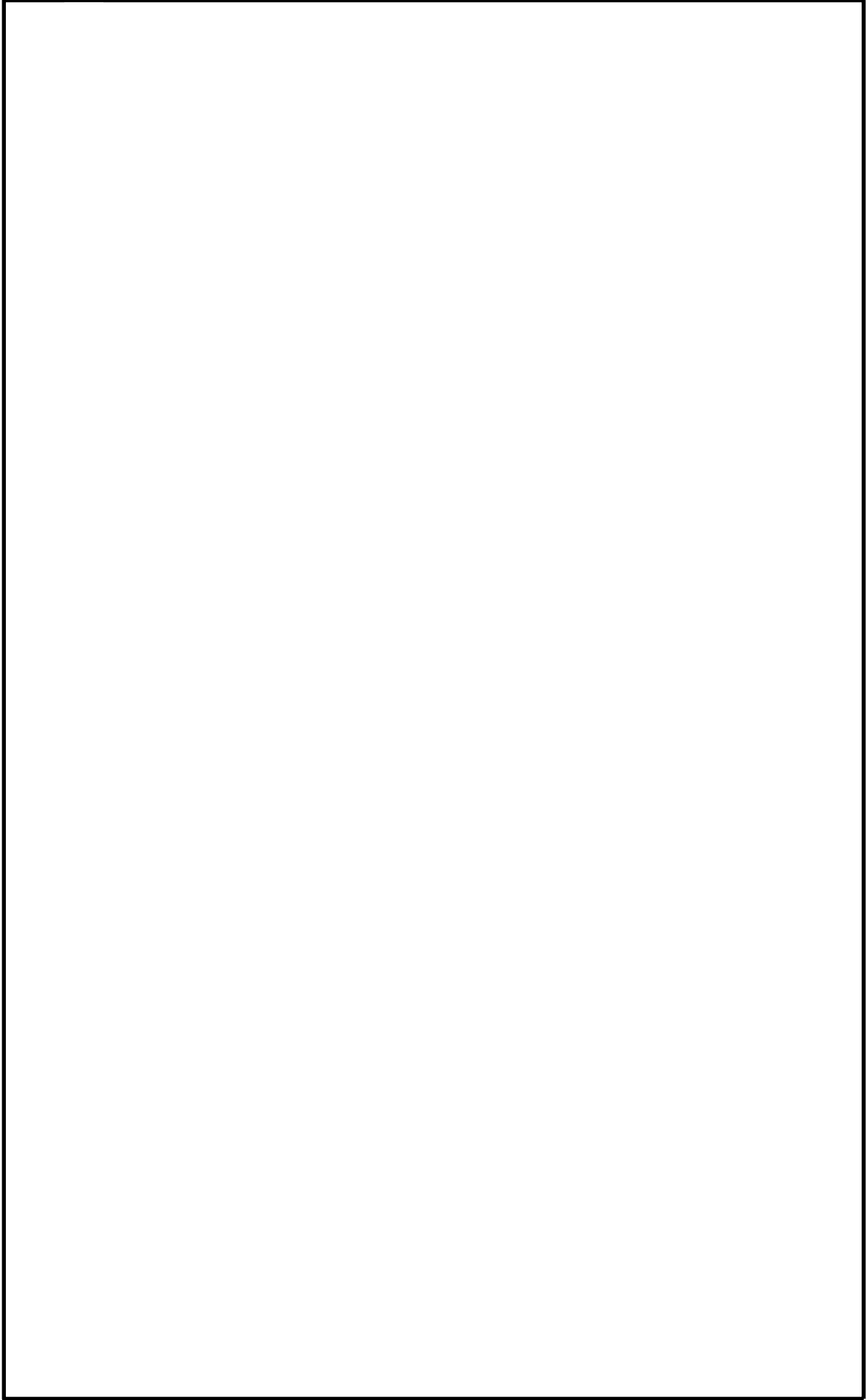



図5-4(6) 温度遷移図 

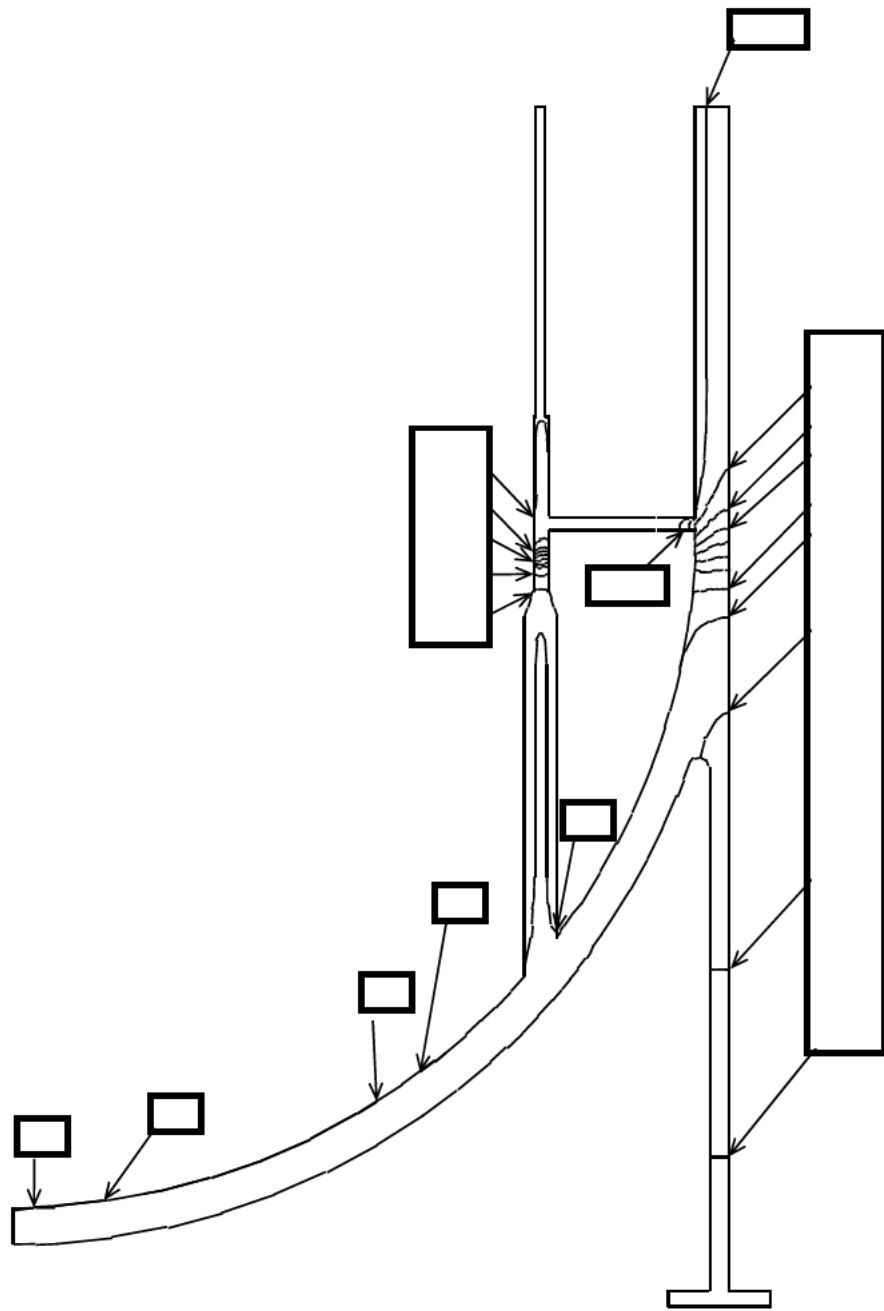


図5-5(1) 温度分布図 (単位: °C)

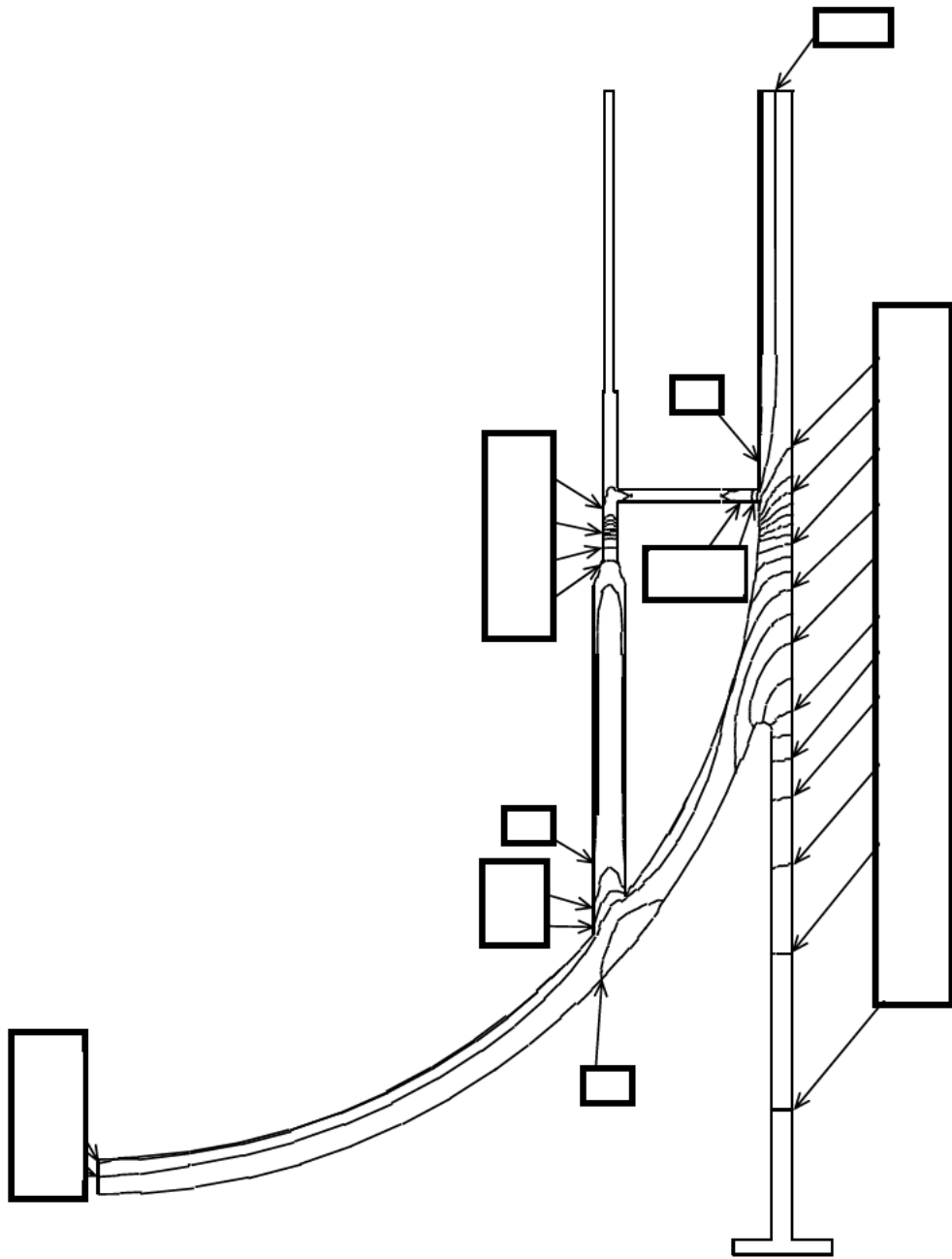


図5-5(2) 温度分布図 (単位: °C)

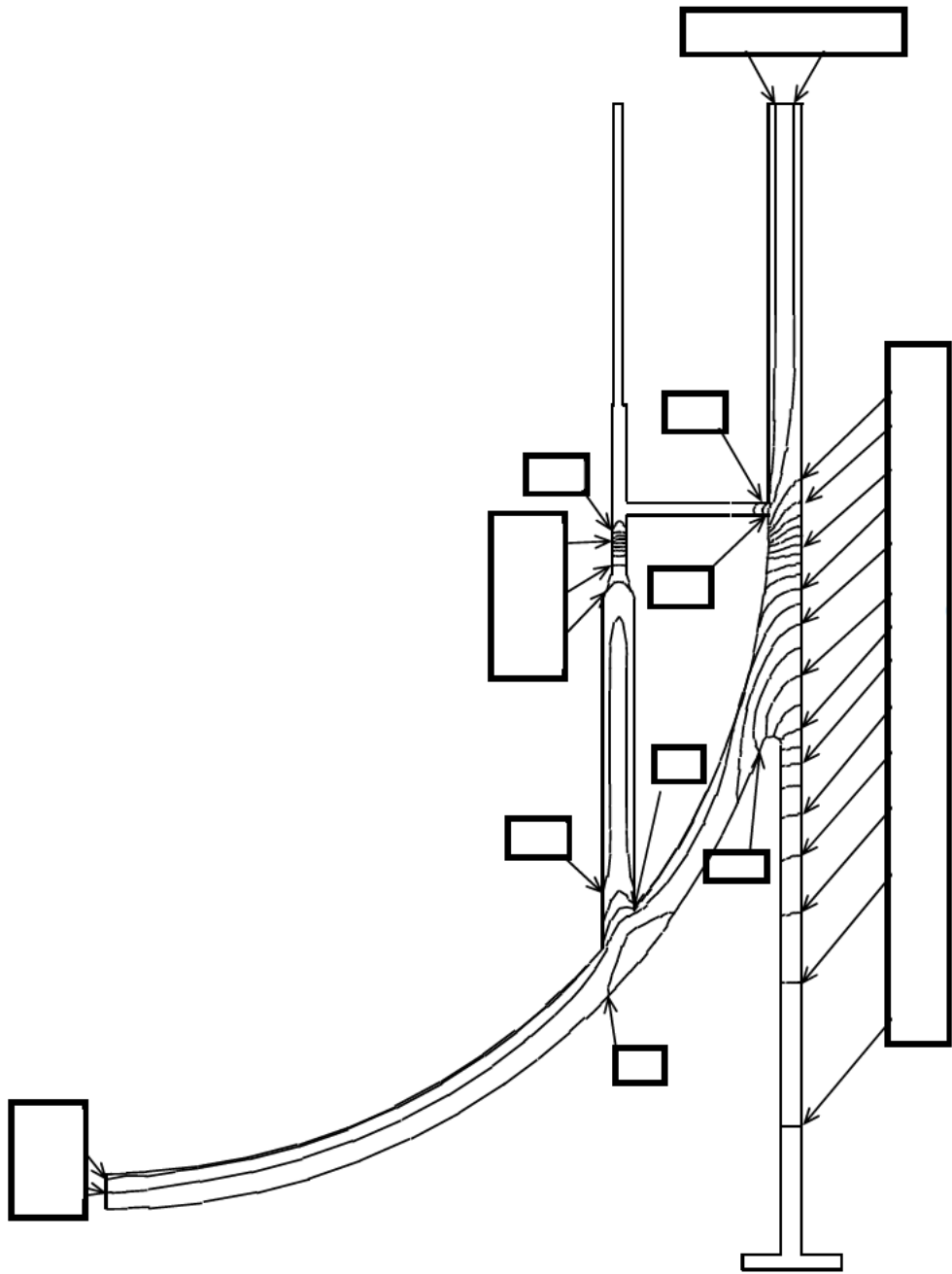


図5-5(3) 温度分布図 (単位: °C)

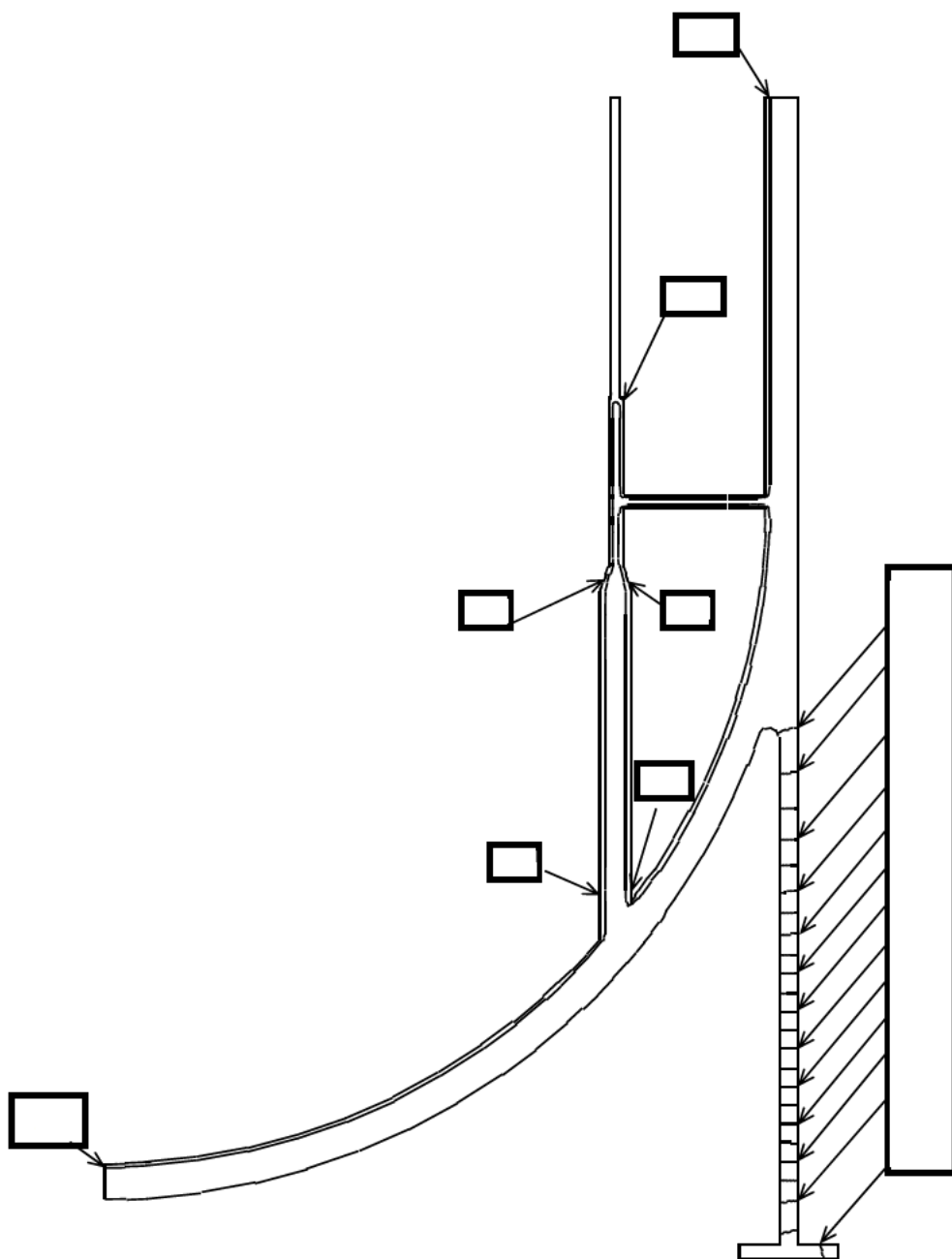


図5-5(4) 温度分布図 (単位: °C)

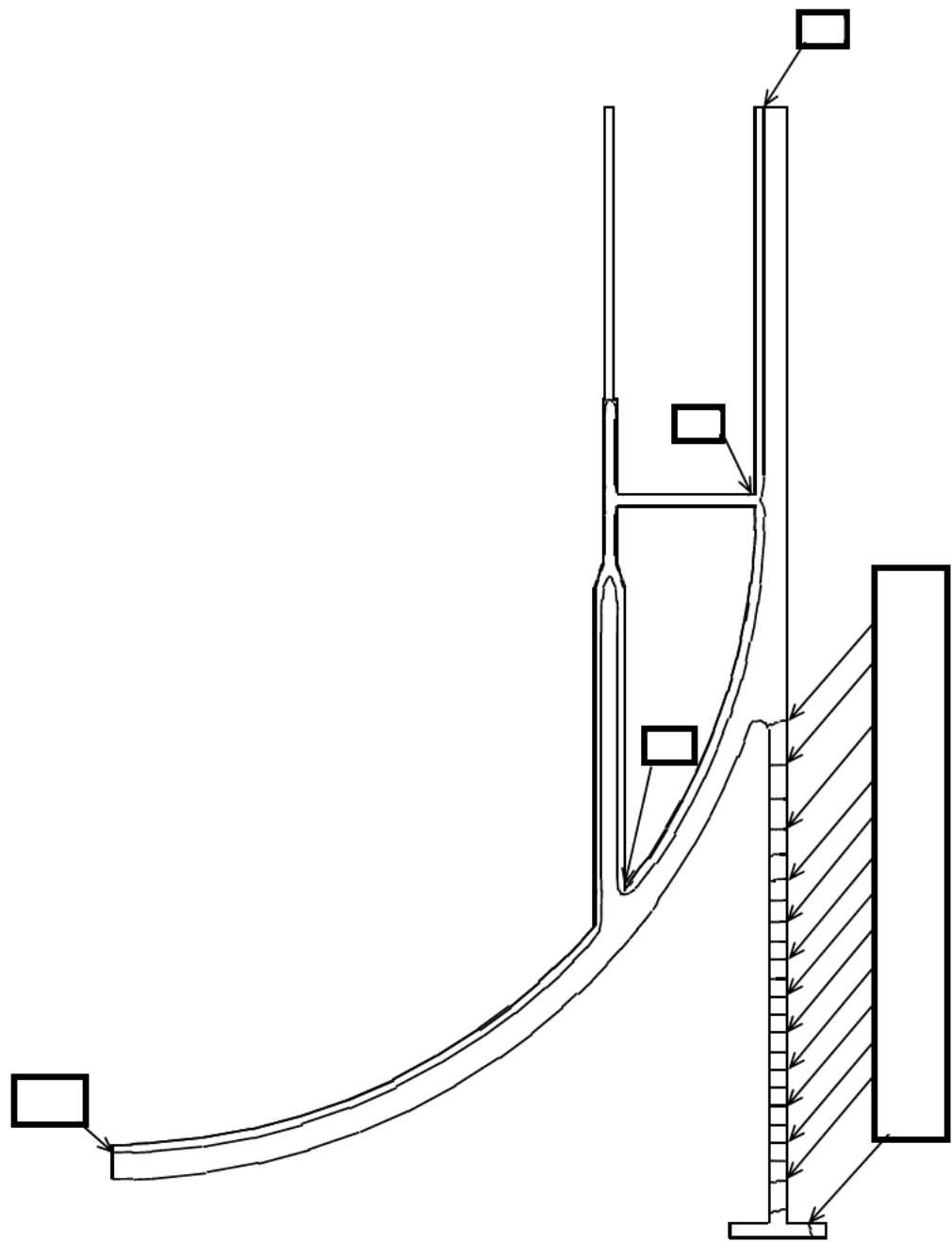


図5-5(5) 温度分布図  (単位：℃)

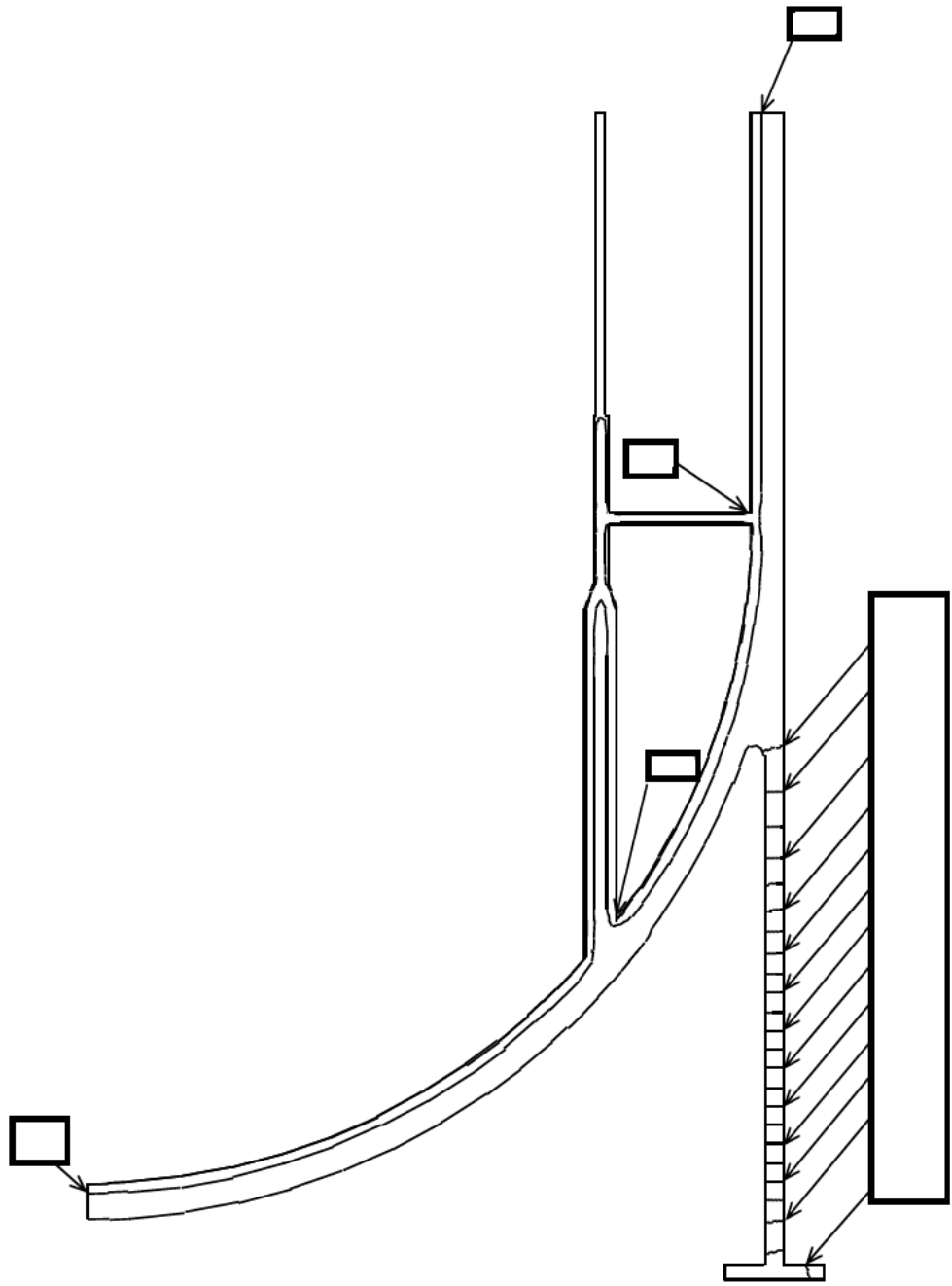


図5-5(6) 温度分布図  (単位：℃)

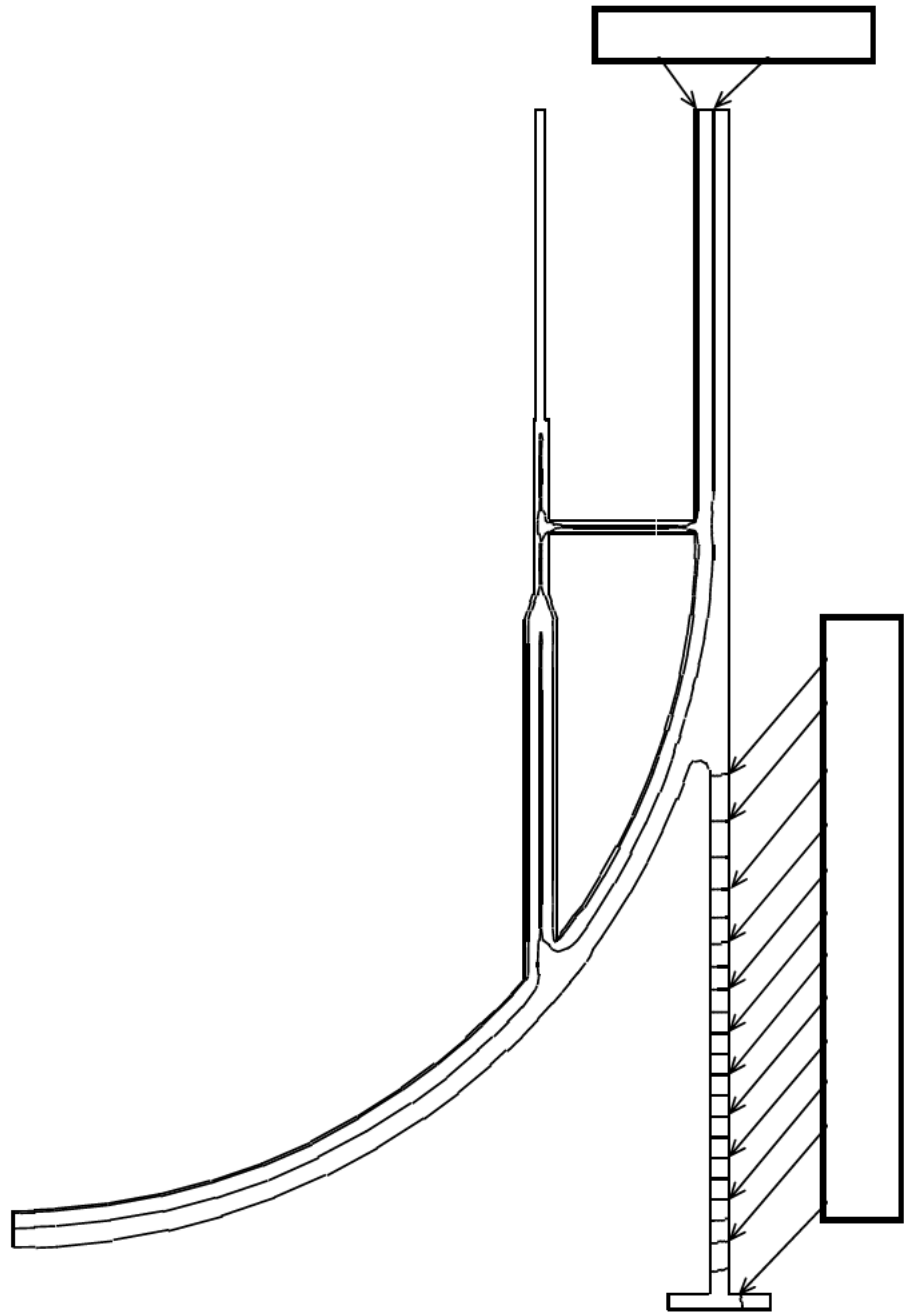


図5-5(7) 温度分布図 (単位: °C)

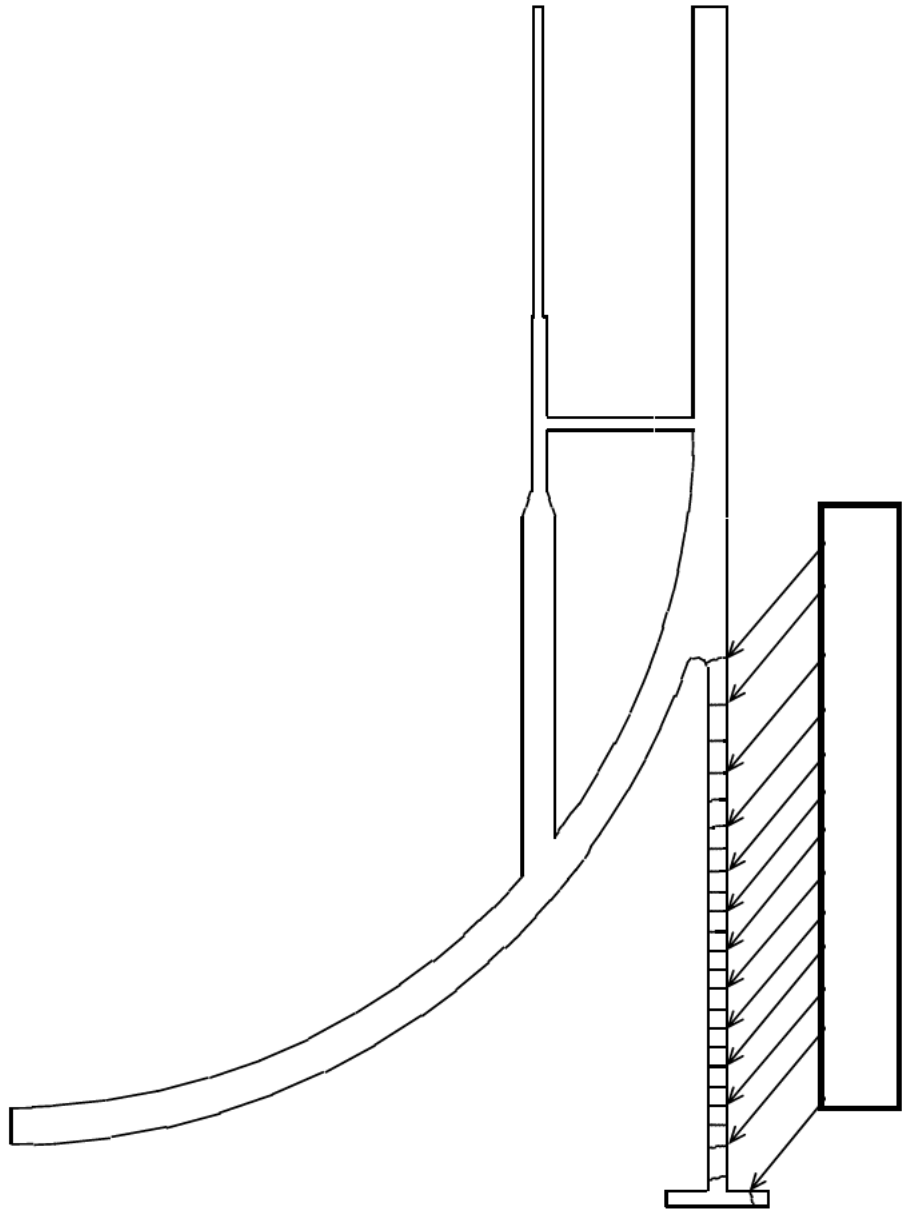


図5-5(8) 温度分布図 (単位: °C)

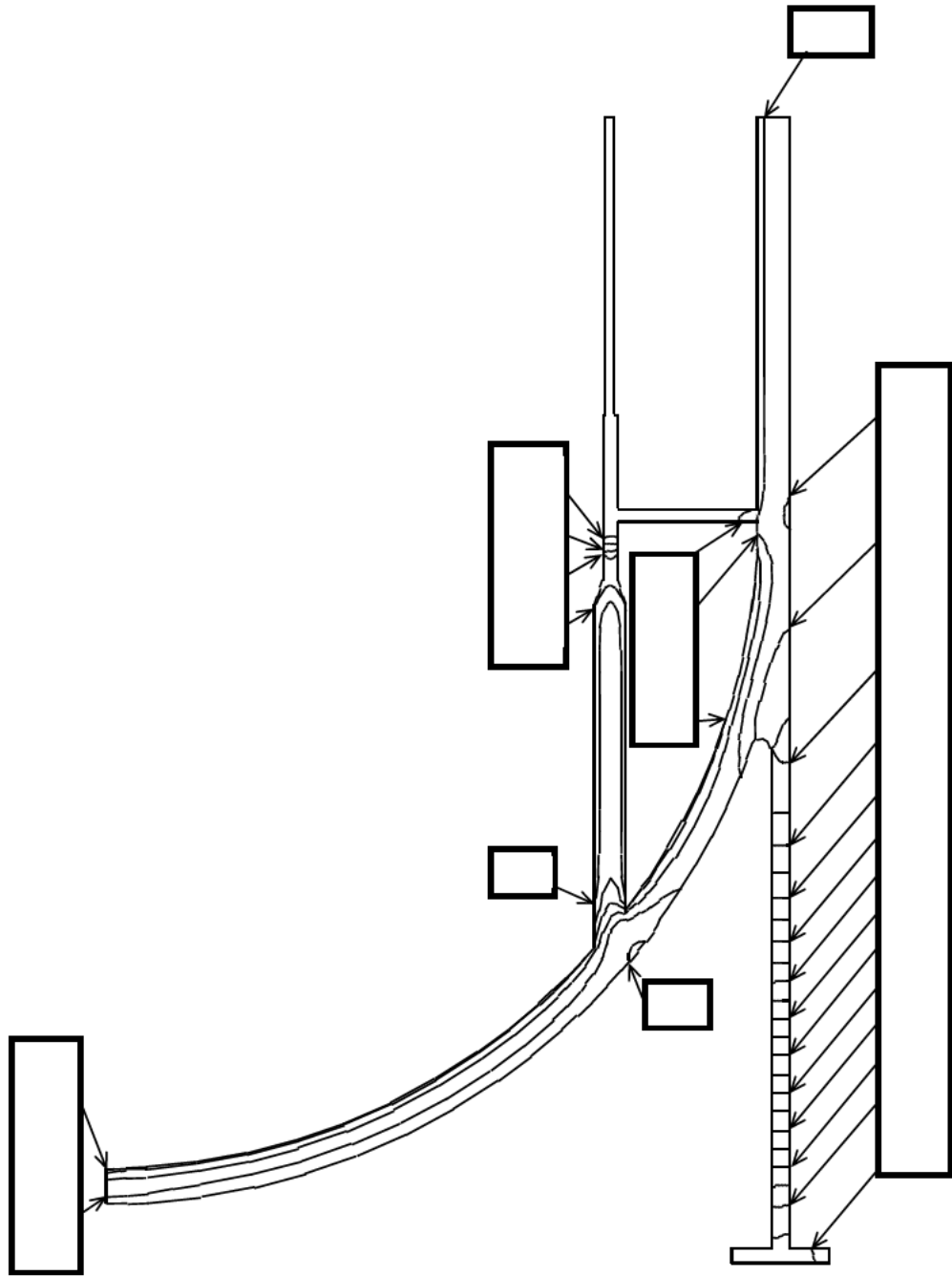


図5-5(9) 温度分布図 (単位: °C)

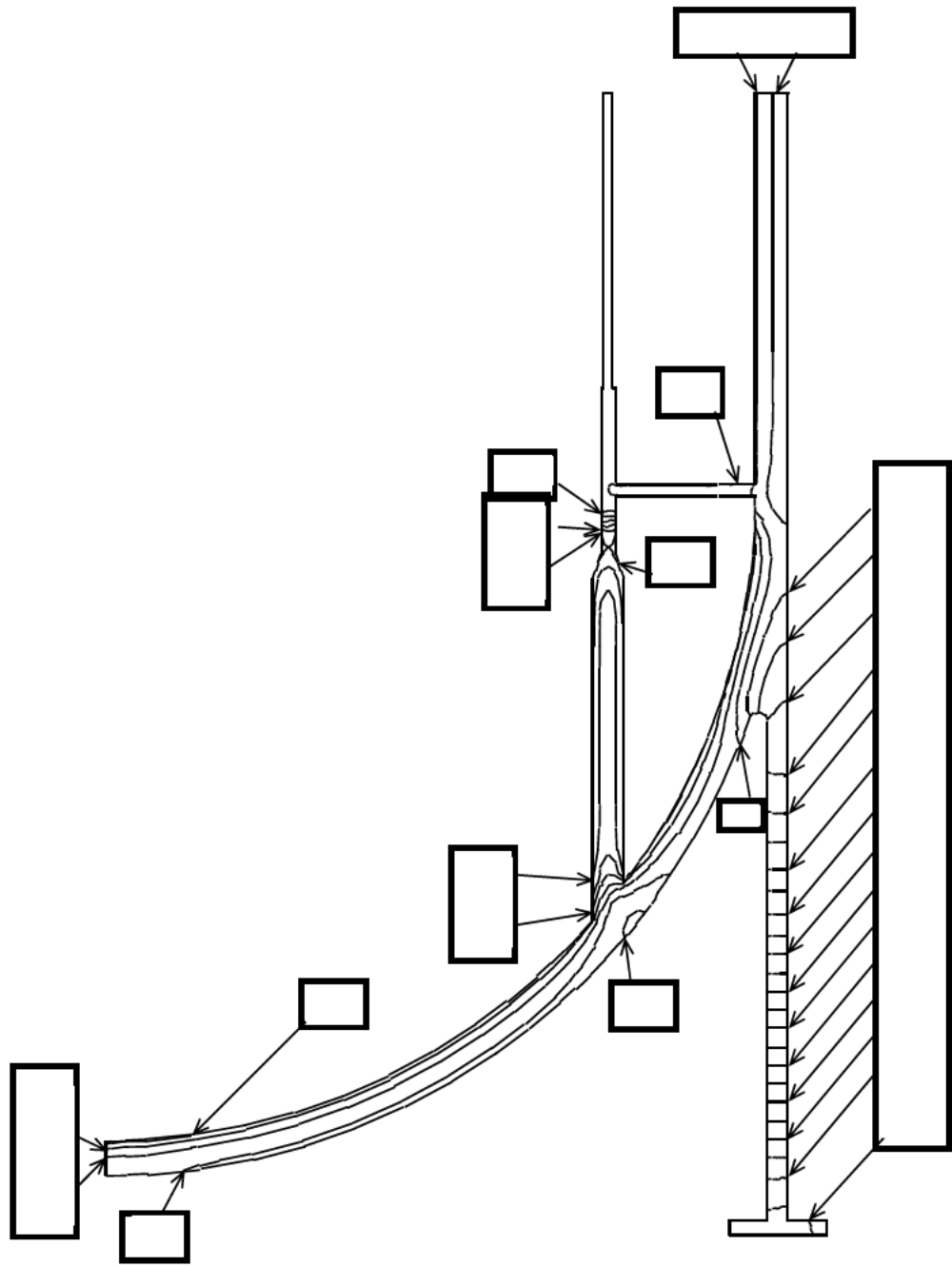



図5-5(10) 温度分布図  (単位 : °C)

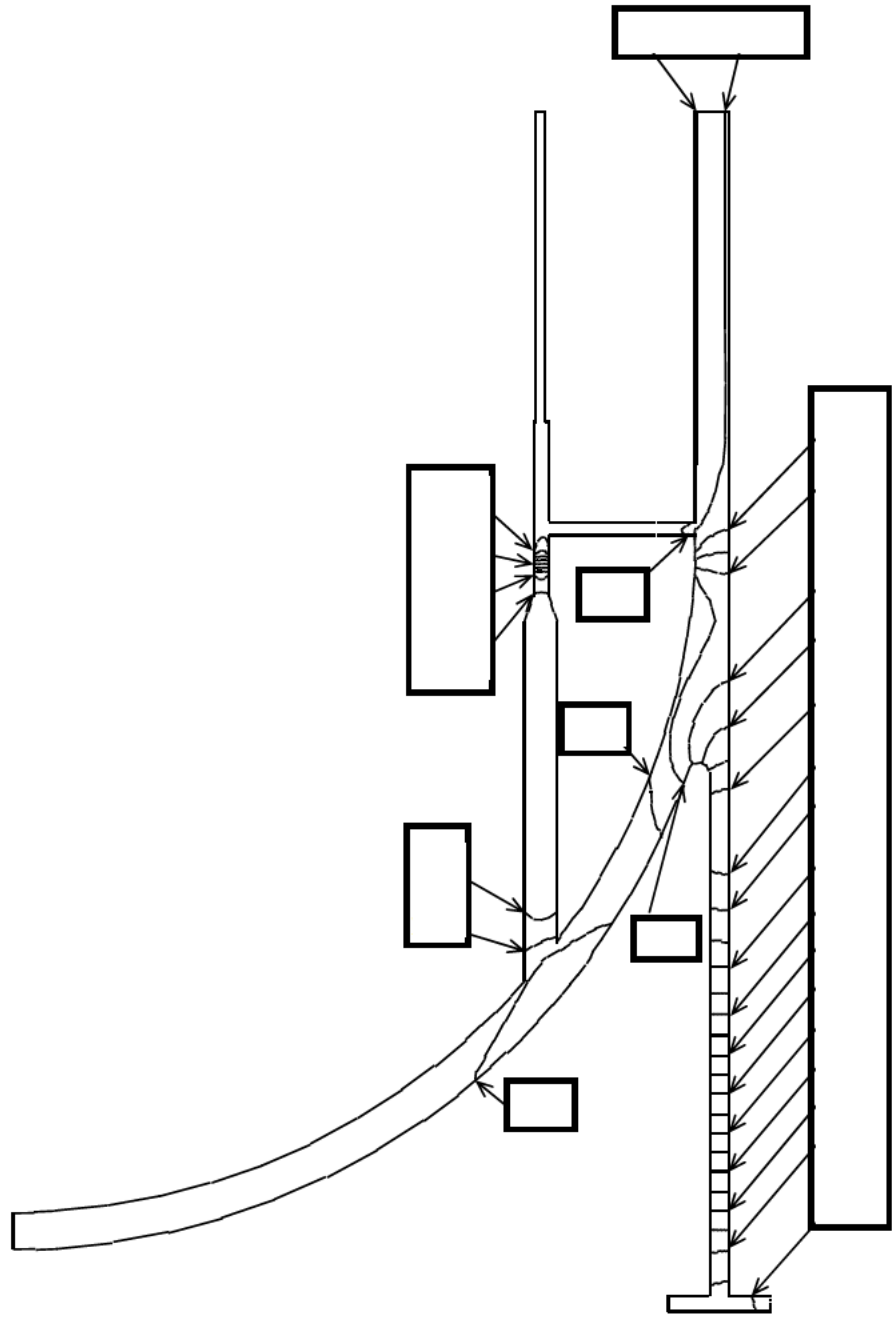



図5-5(11) 温度分布図  (単位：℃)

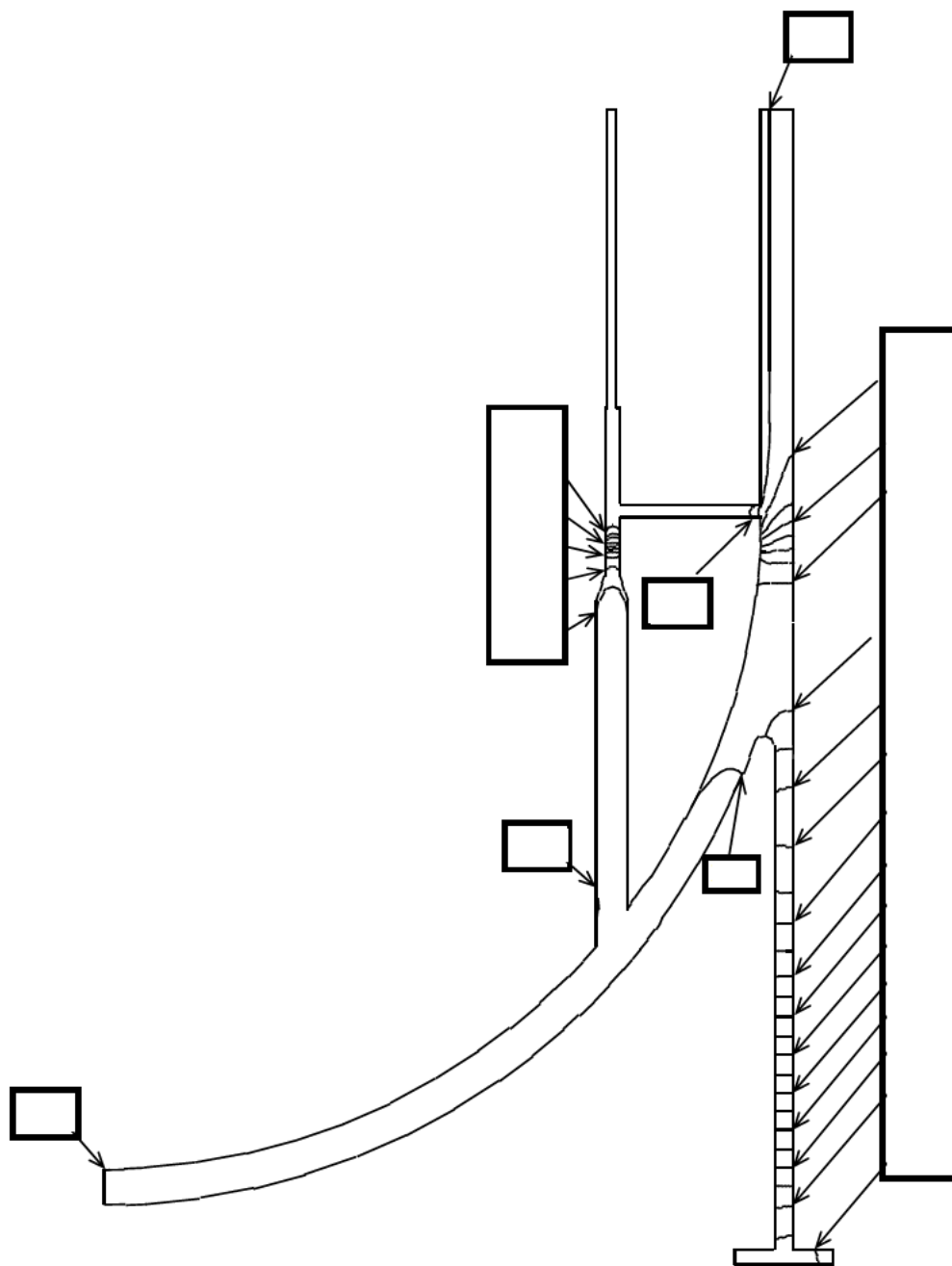



図5-5(12) 温度分布図  (単位：℃)

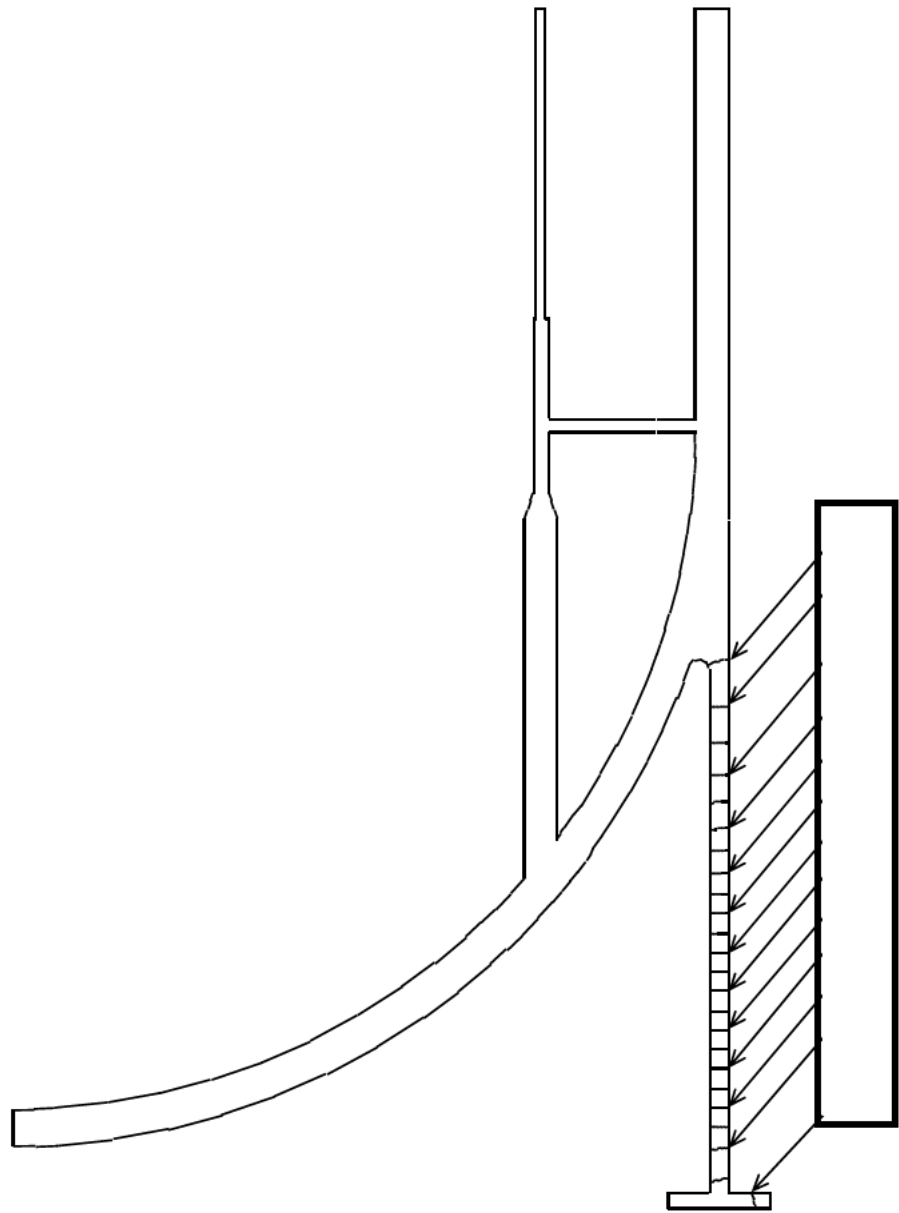


図5-5(13) 温度分布図 (単位: °C)

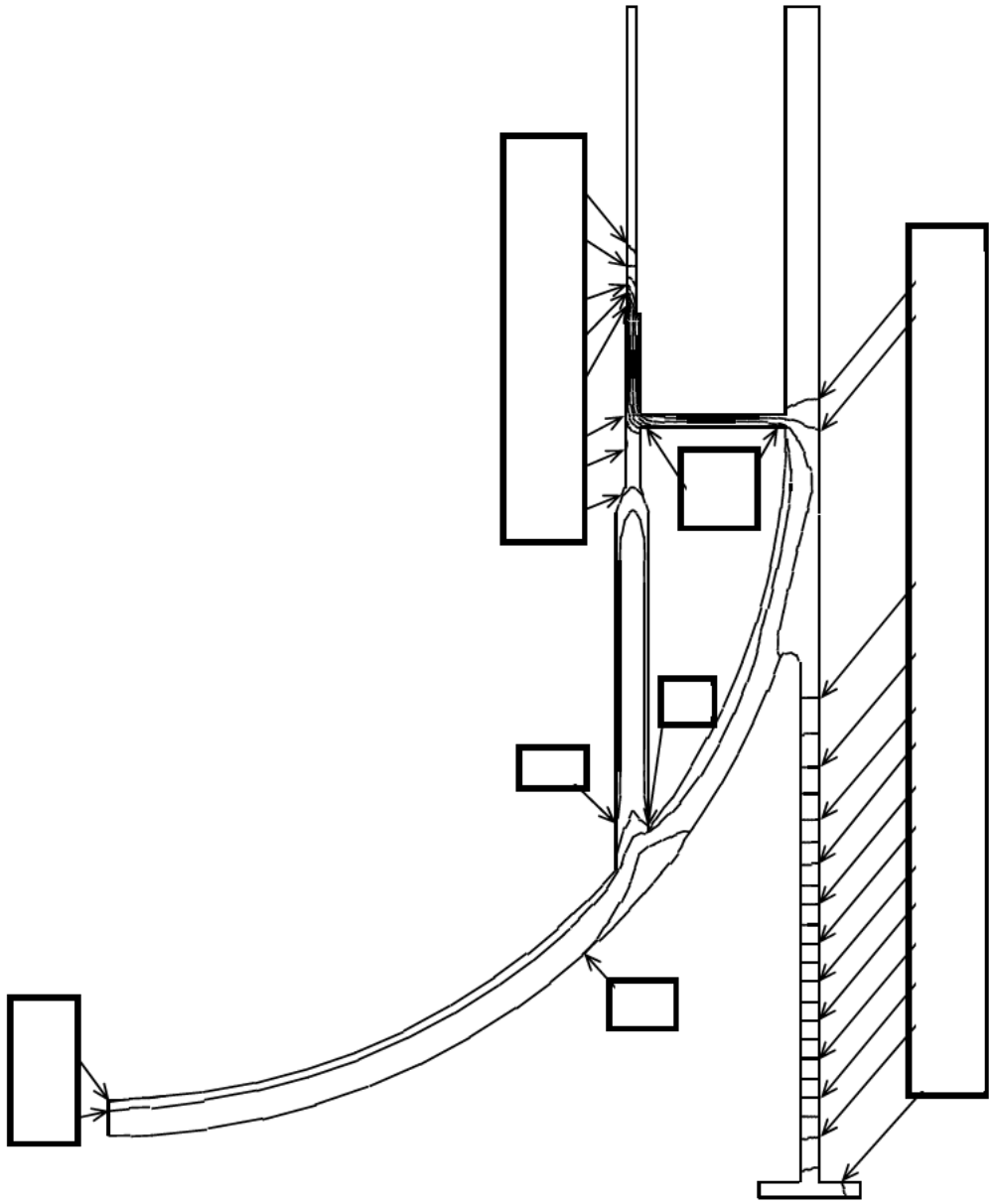


図5-5(14) 温度分布図  (単位：℃)

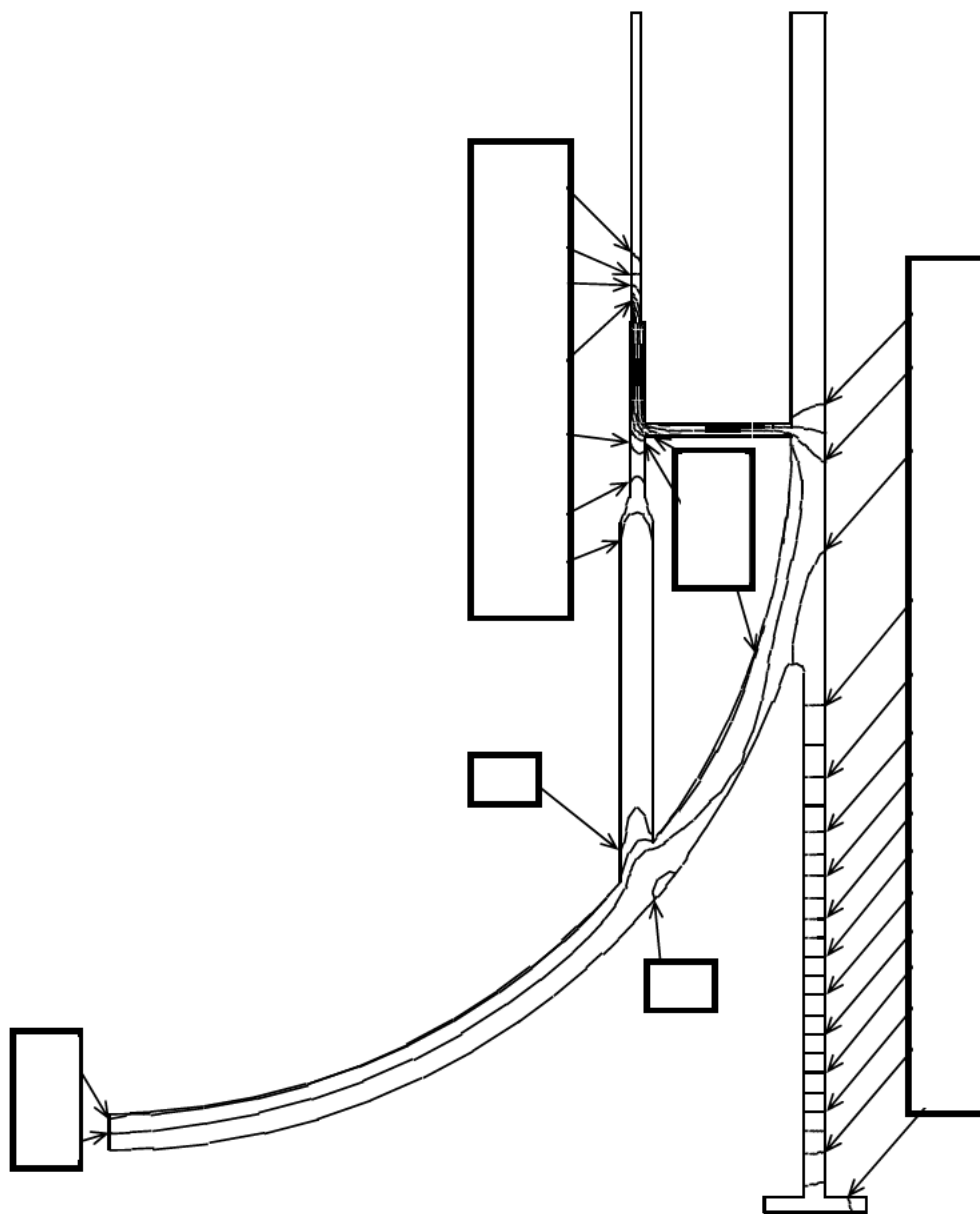


図5-5(15) 温度分布図 (単位: °C)

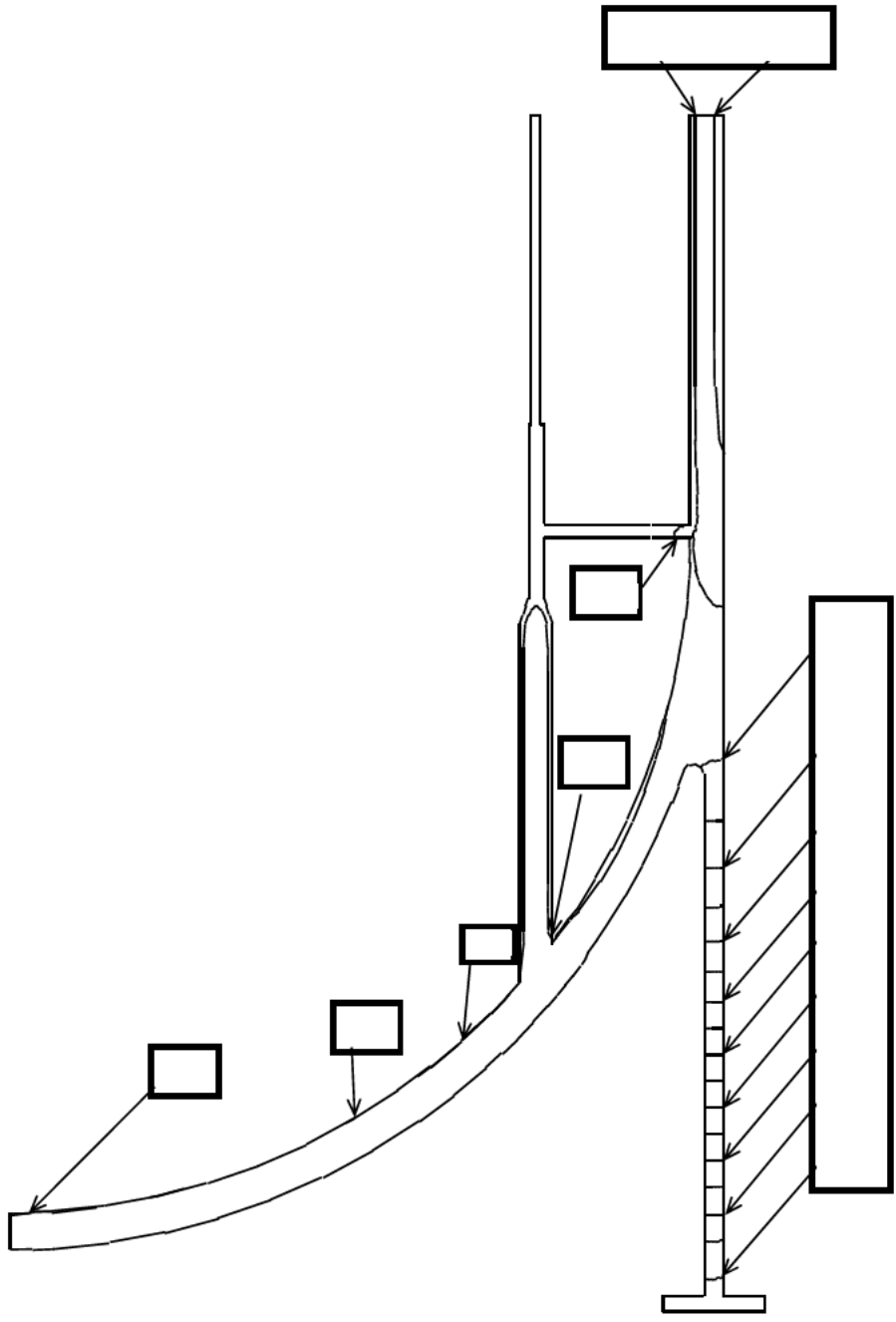


図5-5(16) 温度分布図 (単位: °C)

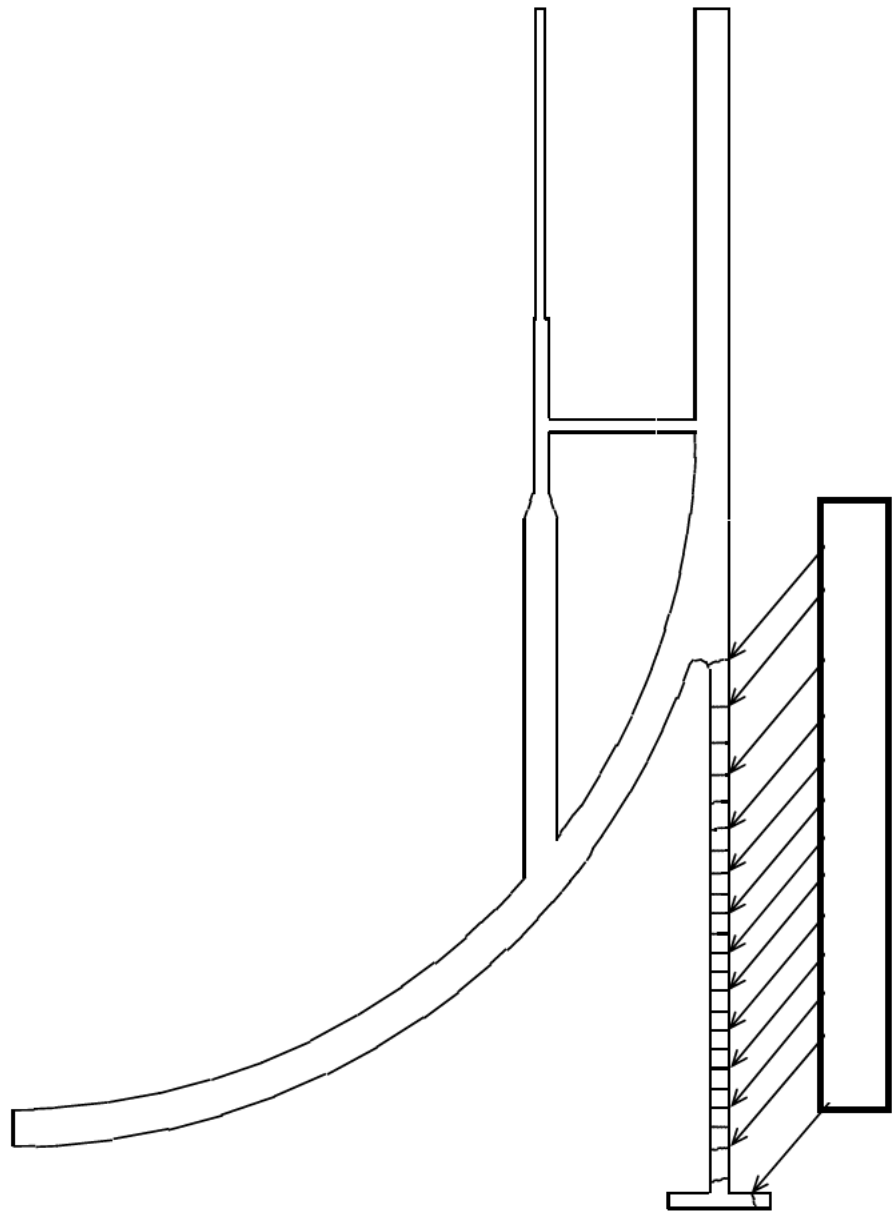



図5-5(17) 温度分布図  (単位 : °C)

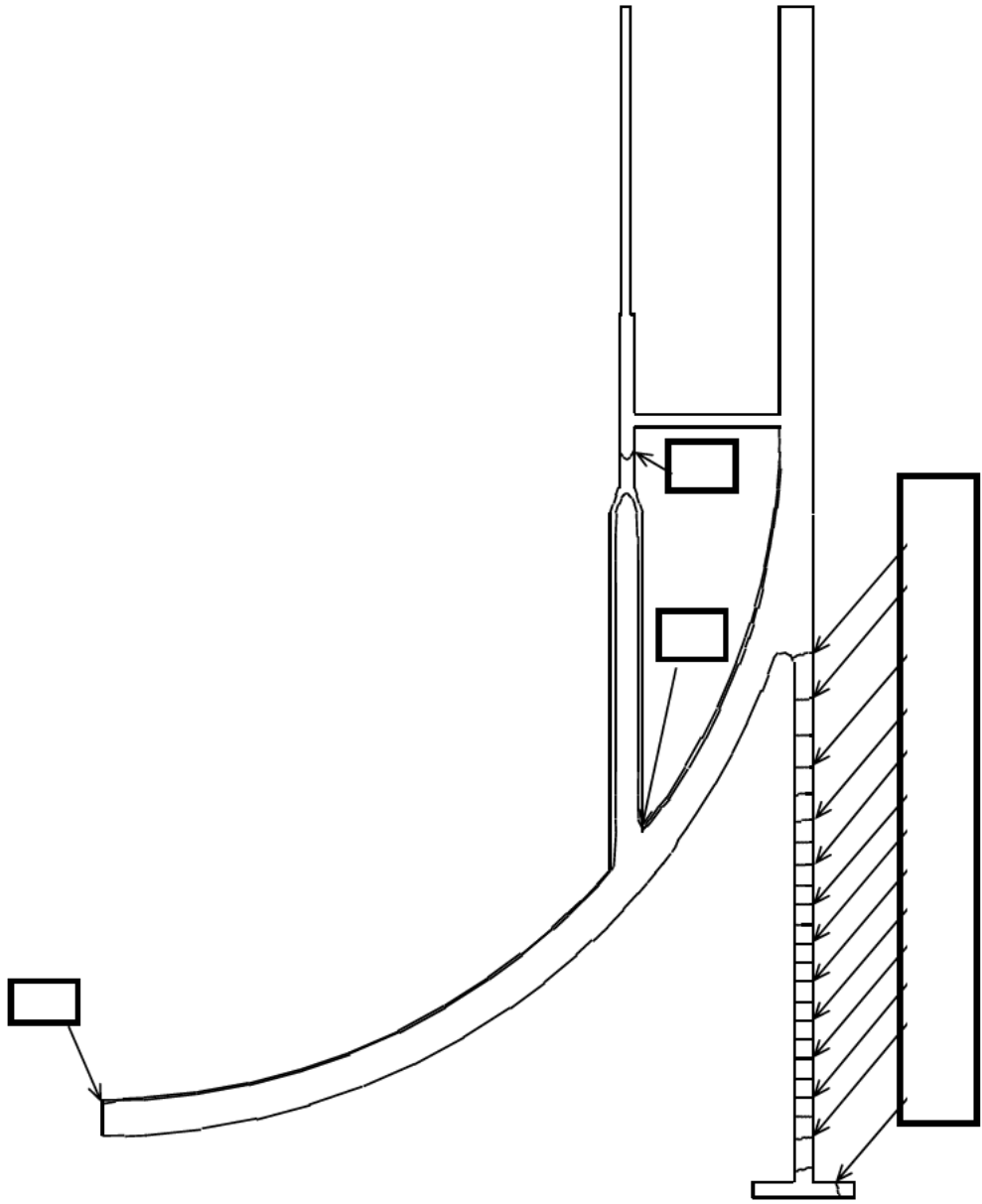


図5-5(18) 温度分布図 (単位: °C)

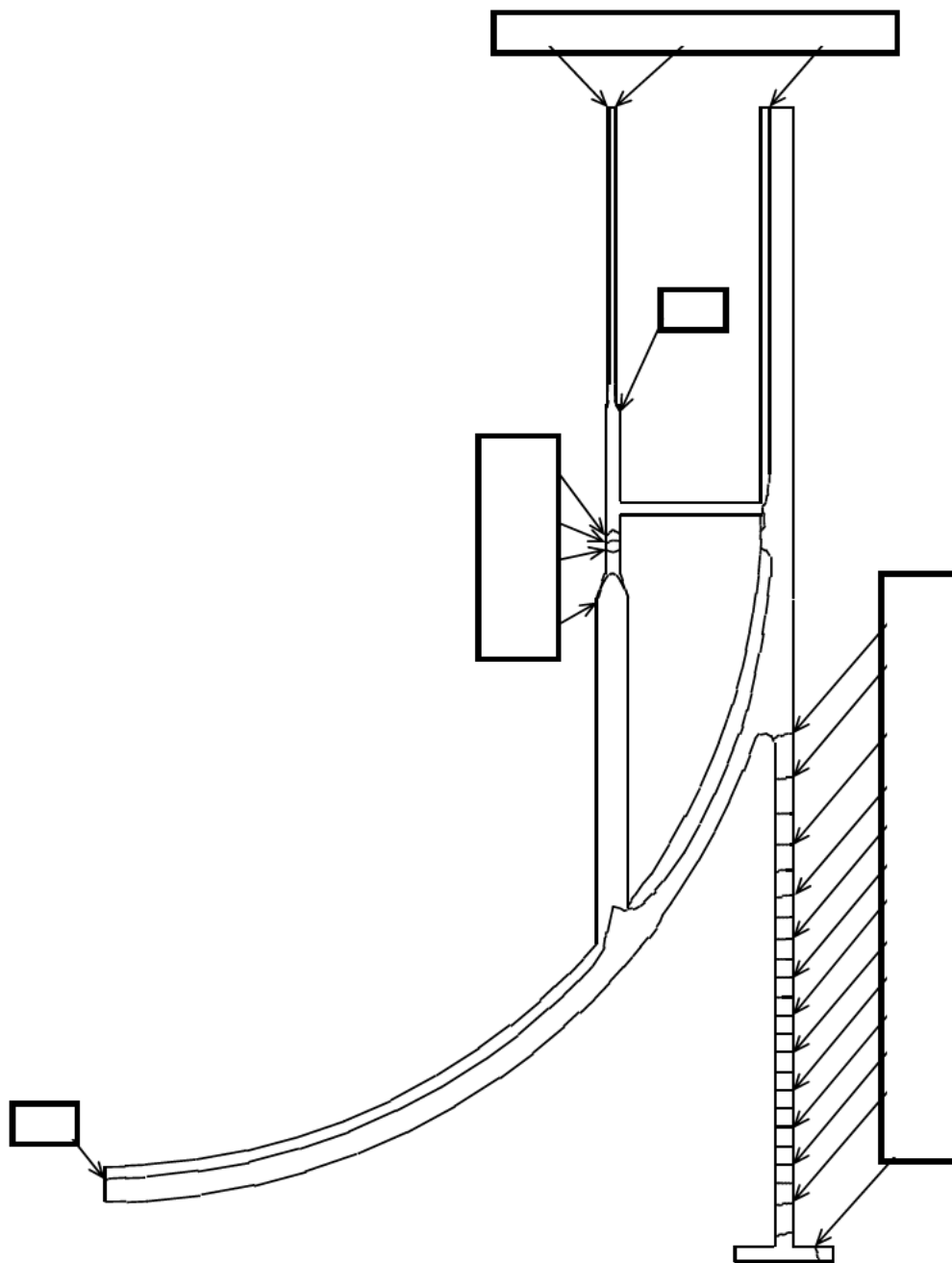


図5-5(19) 温度分布図 (単位 : °C)

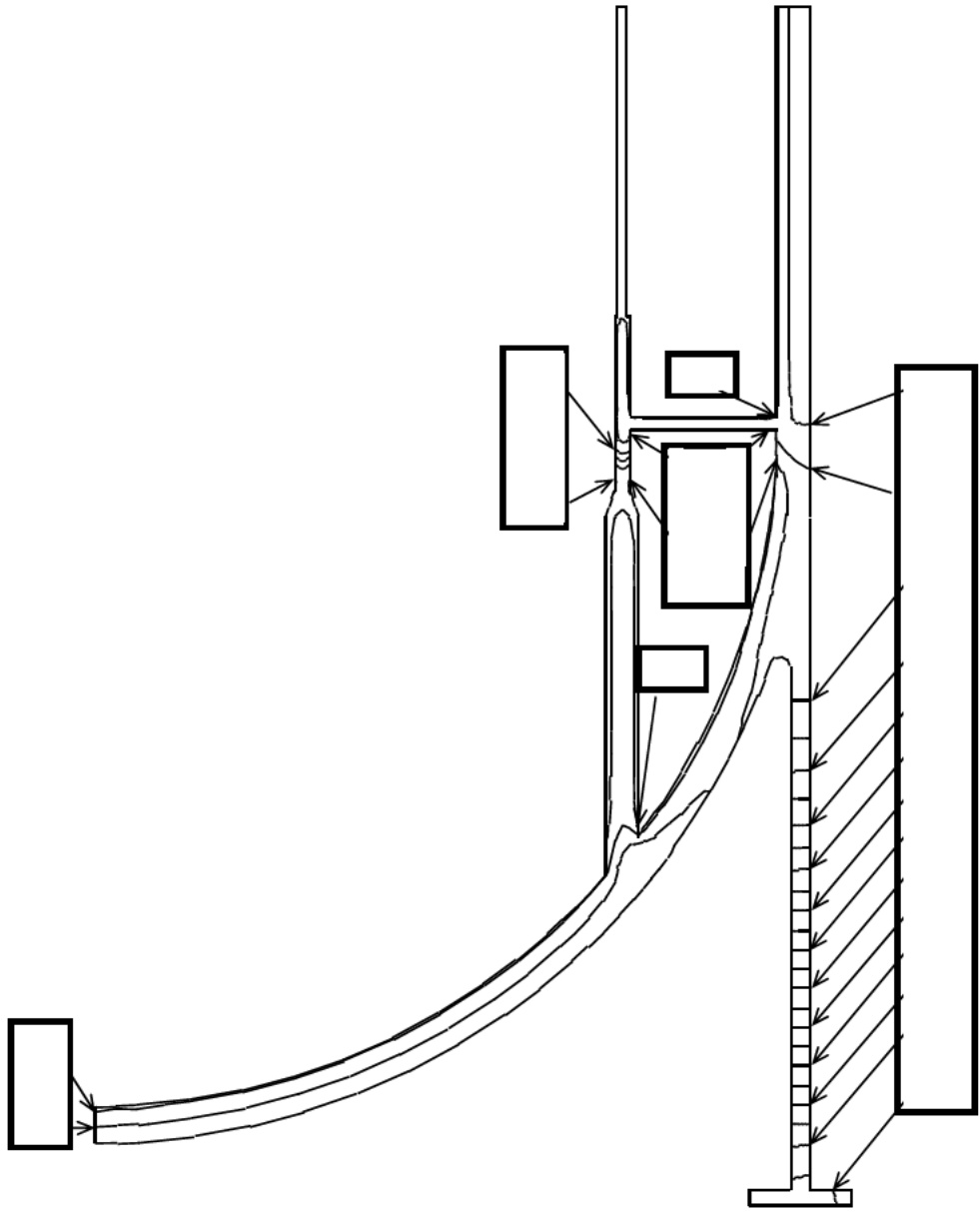


図5-5(20) 温度分布図 (単位: °C)

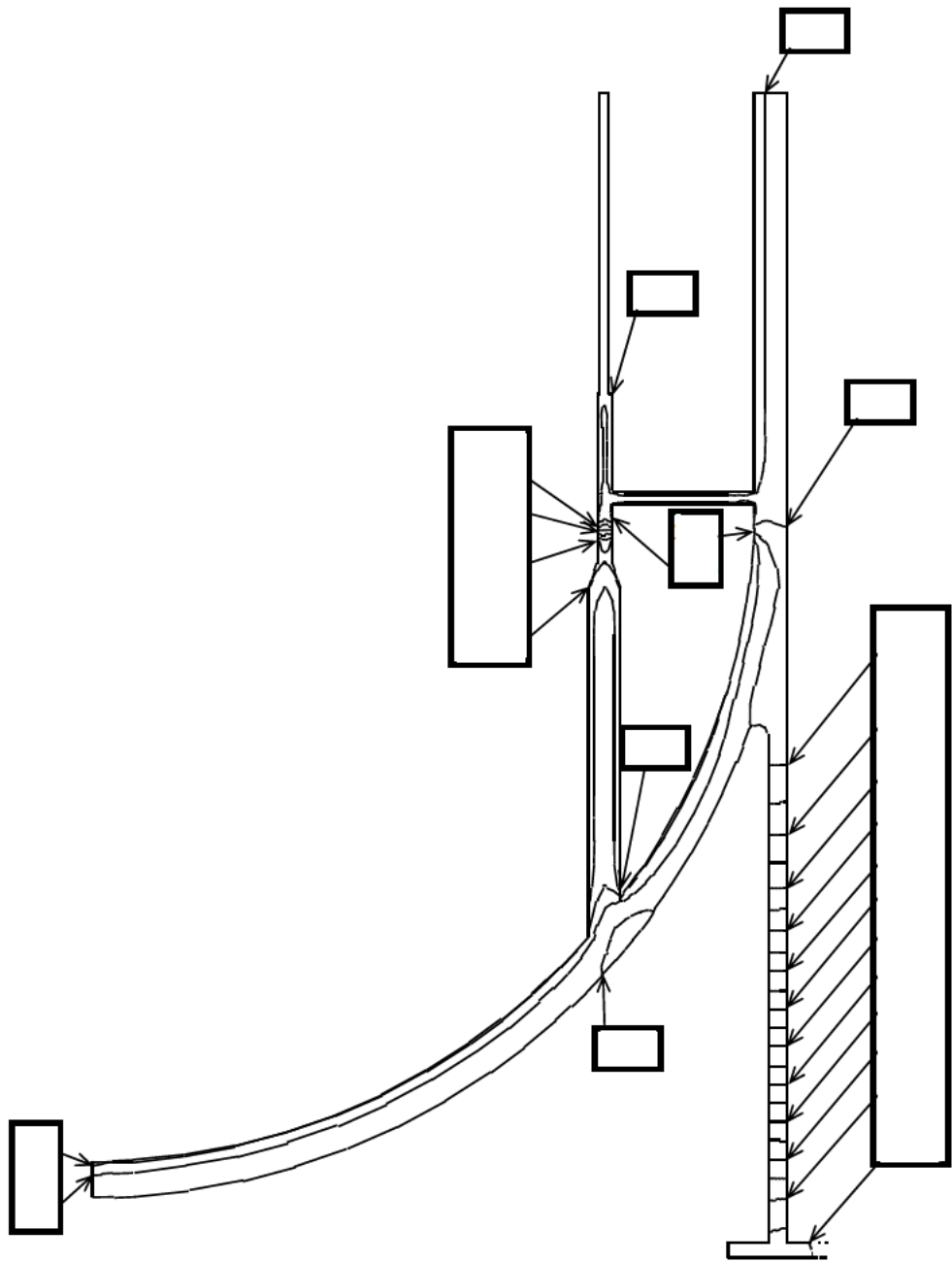


図5-5(21) 温度分布図  (単位: °C)

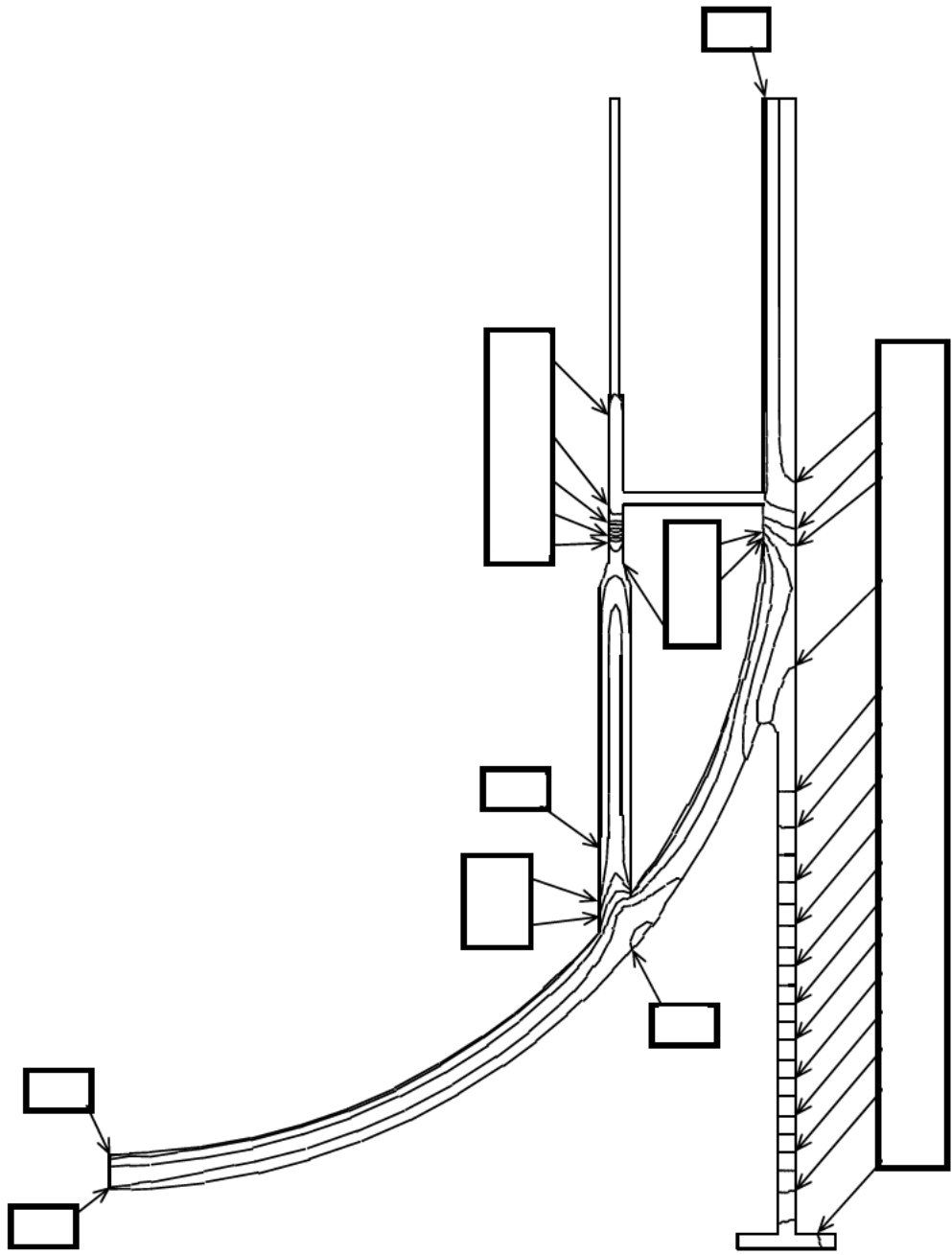


図5-5(22) 温度分布図 (単位: °C)

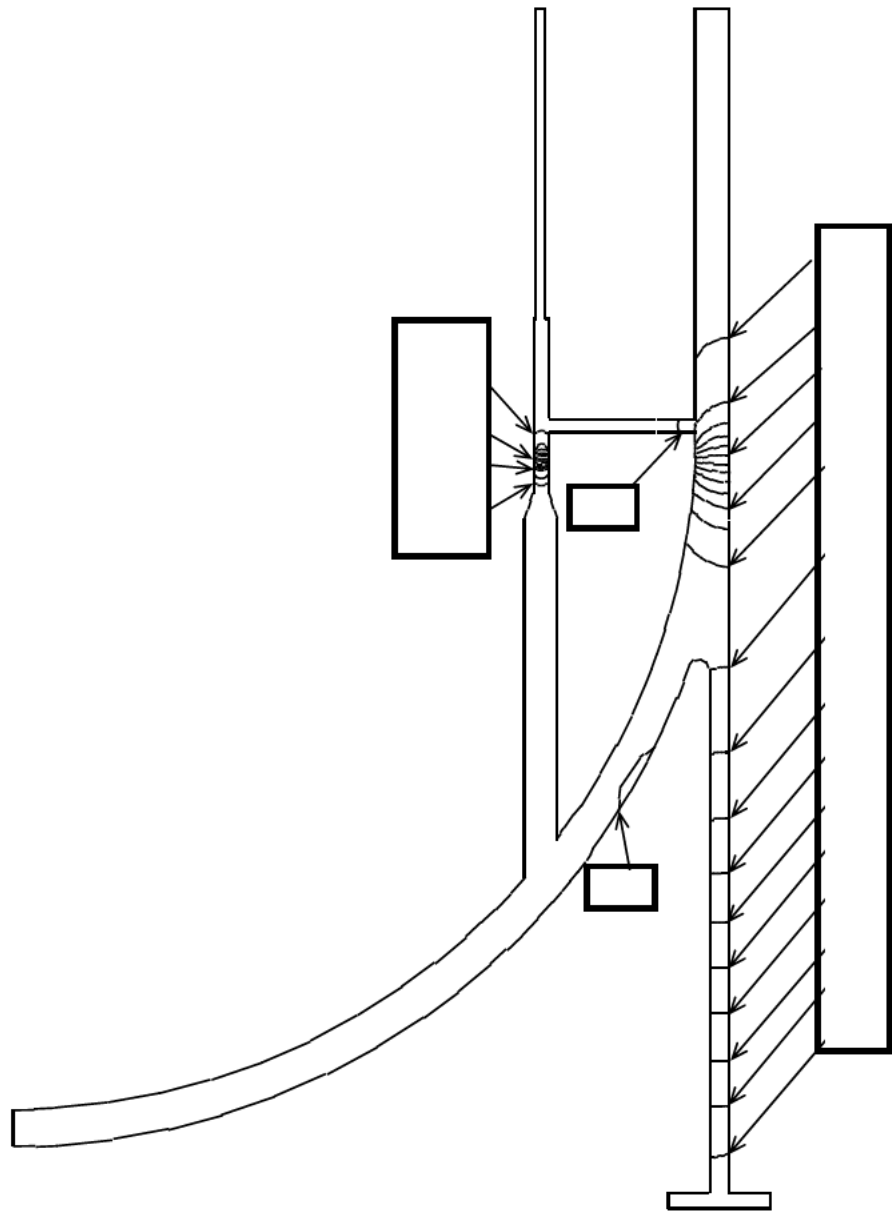


図5-5(23) 温度分布図 (単位: °C)

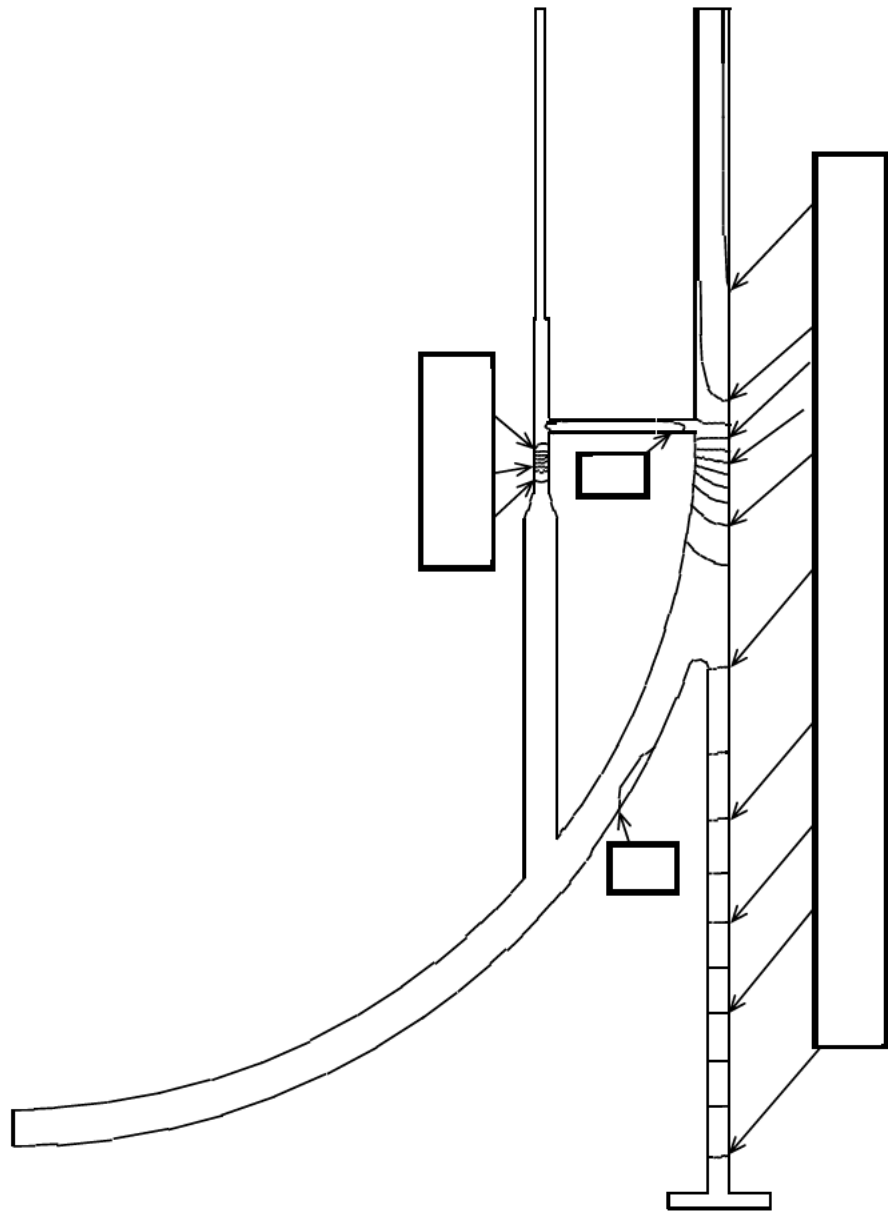



図5-5(24) 温度分布図  (単位：℃)

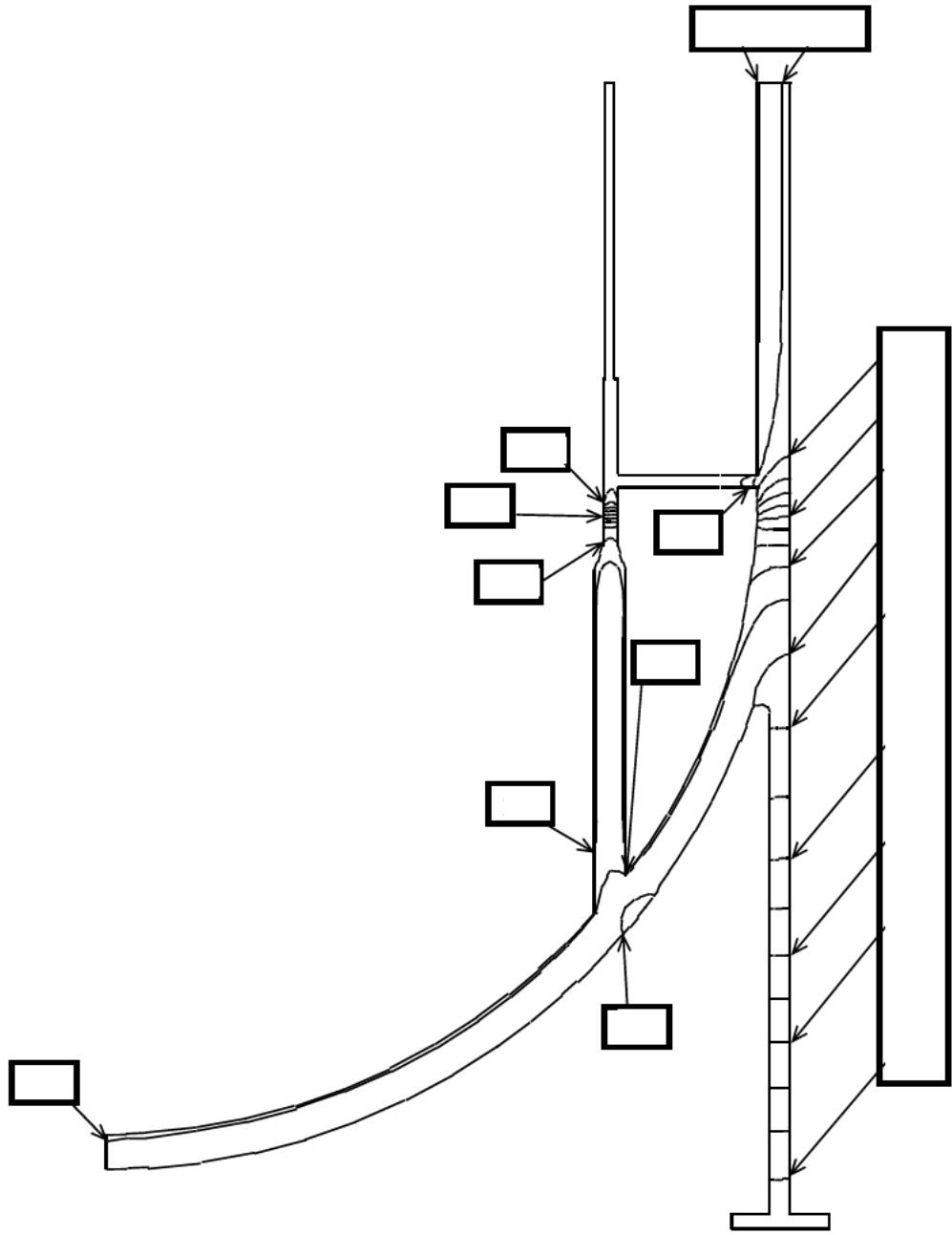


図5-5(25) 温度分布図 (単位: °C)

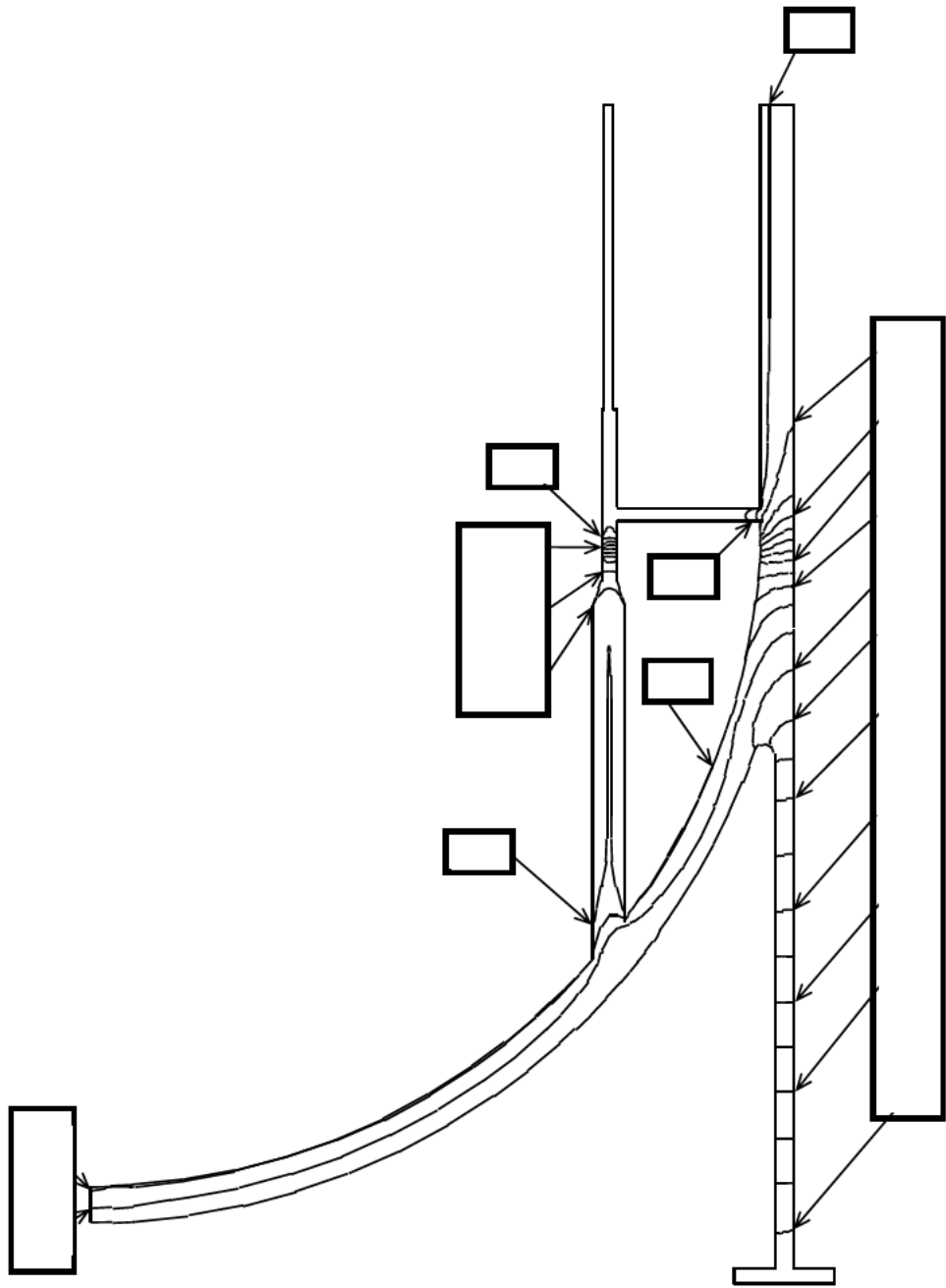


図5-5(26) 温度分布図 (単位: °C)

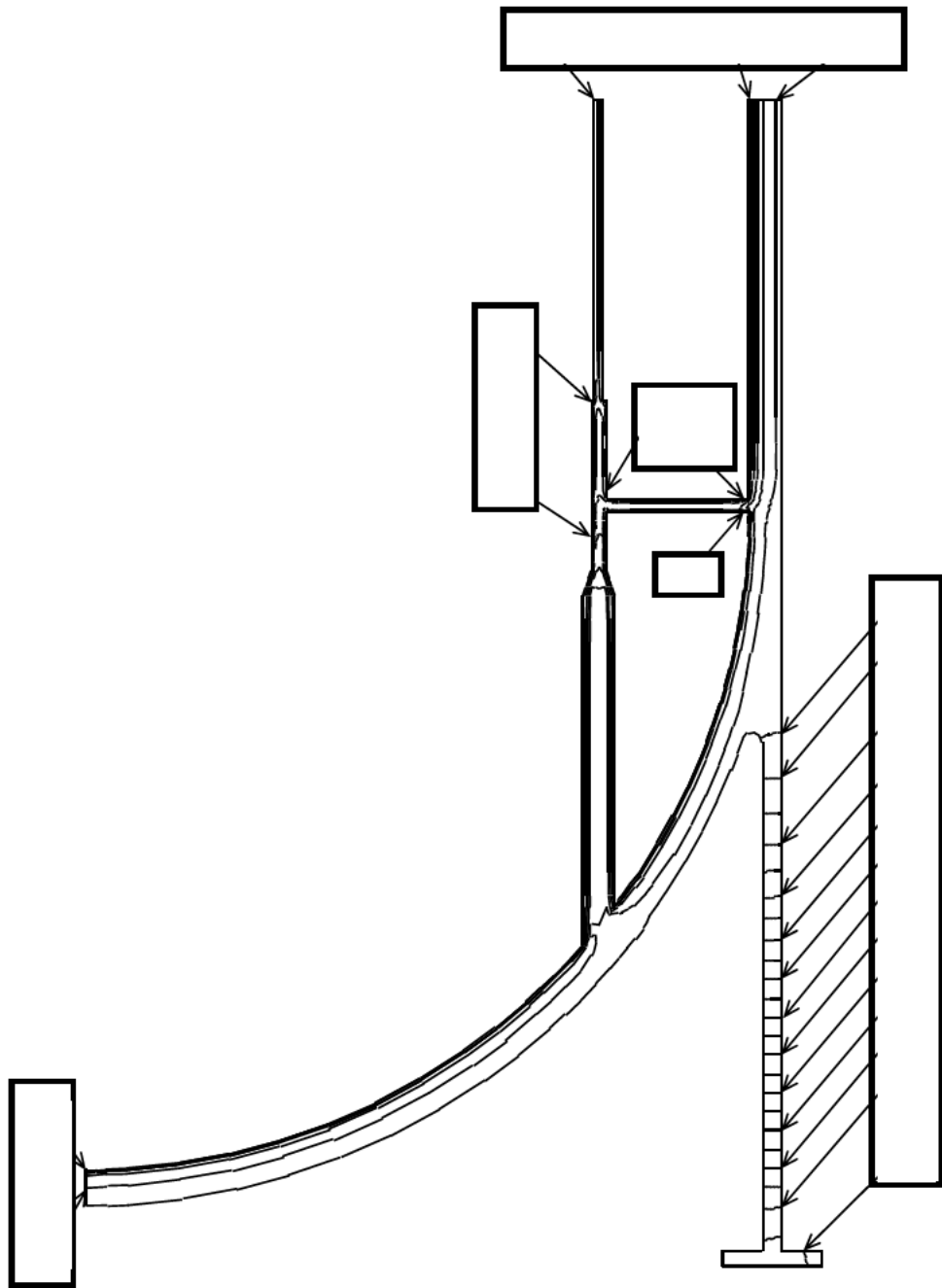



図5-5(27) 温度分布図  (単位：℃)

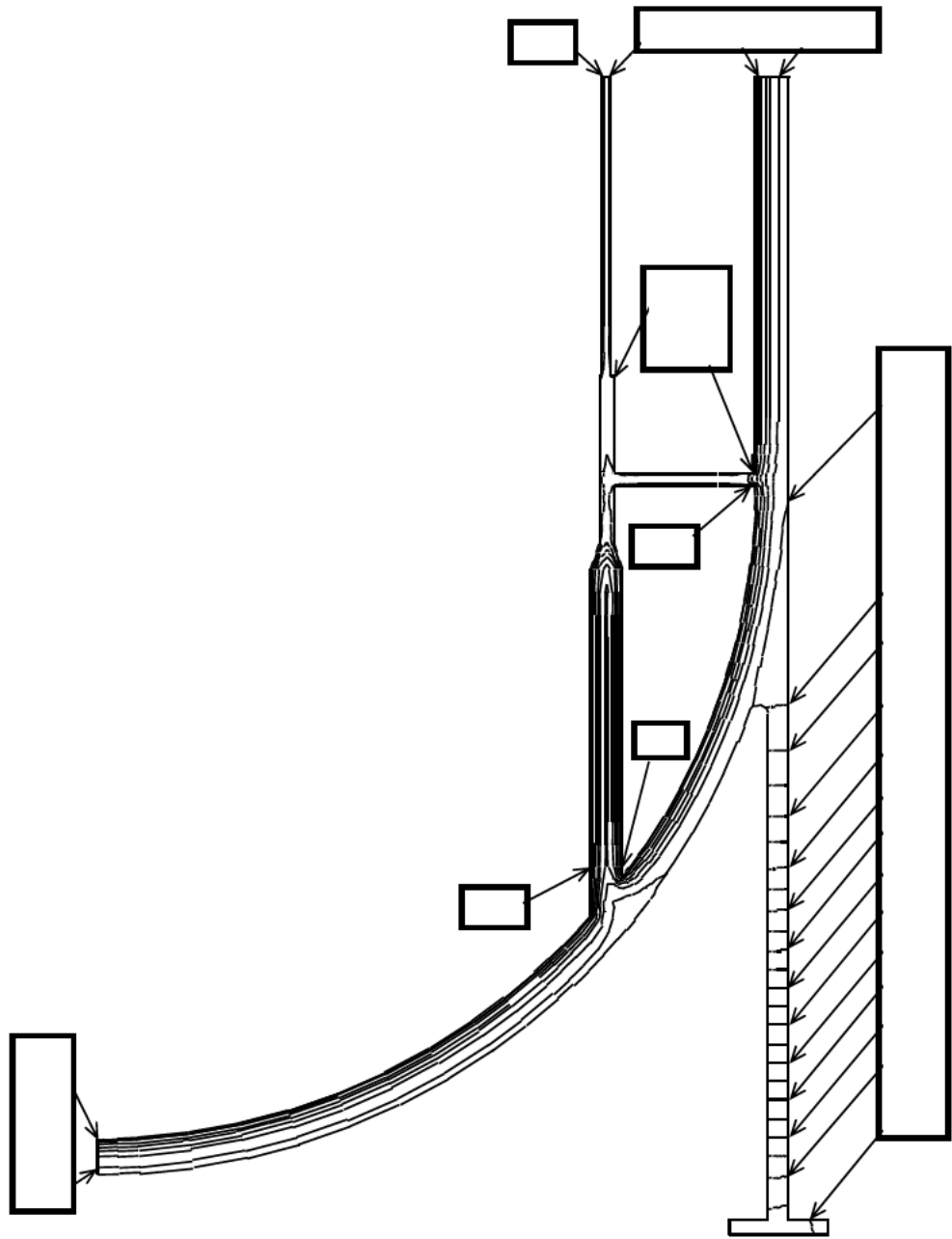
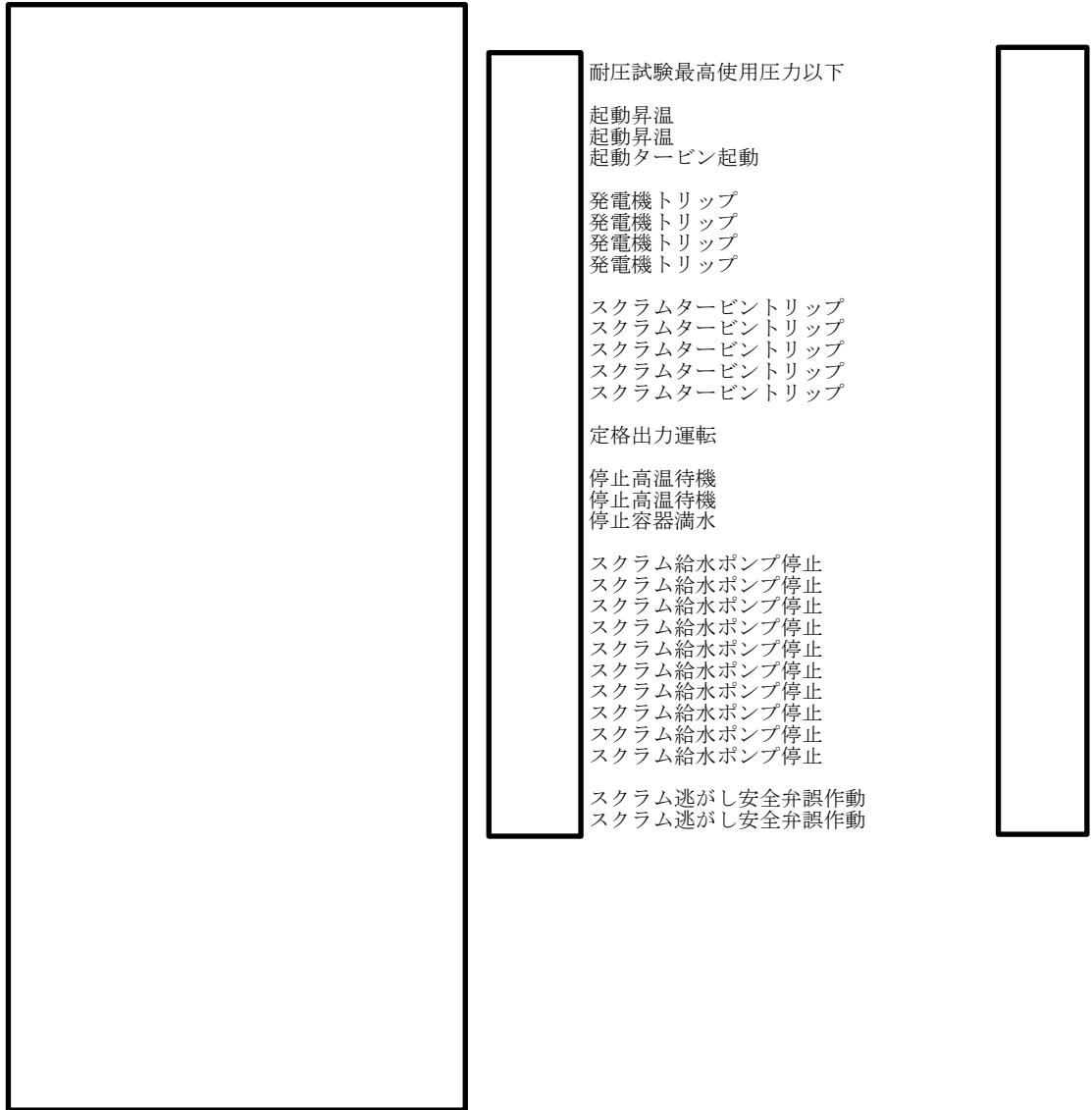


図5-5(28) 温度分布図 (単位: °C)



耐圧試験最高使用圧力以下

起動昇温
 起動昇温
 起動タービン起動

発電機トリップ
 発電機トリップ
 発電機トリップ
 発電機トリップ

スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ

定格出力運転

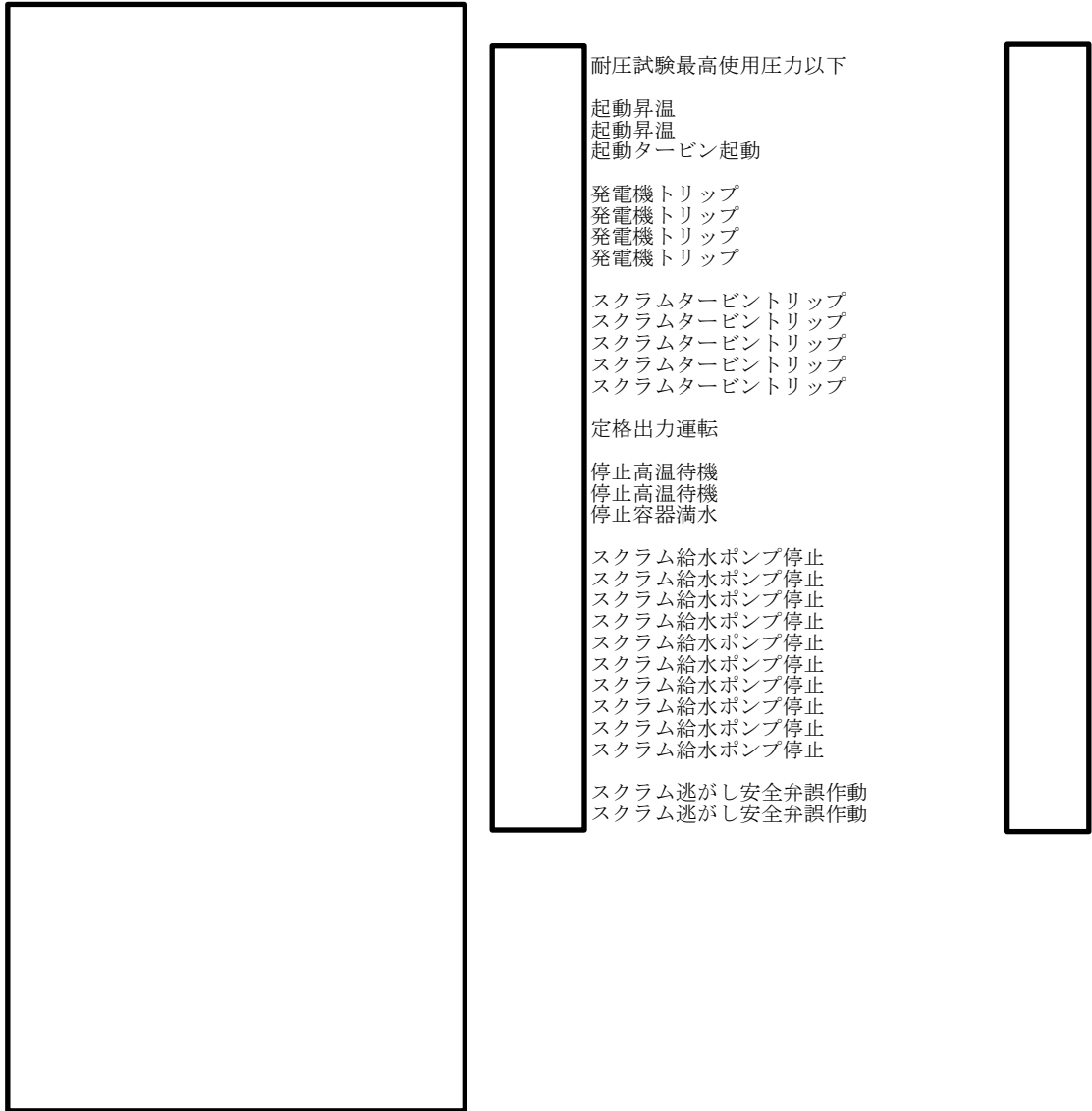
停止高温待機
 停止高温待機
 停止容器満水

スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止

スクラム逃がし安全弁誤作動
 スクラム逃がし安全弁誤作動

No.	運転条件	運転条件	S p
1			

図5-6(1) 応力差の変動(P03, S 2 3)



耐圧試験最高使用圧力以下

起動昇温
 起動昇温
 起動タービン起動

発電機トリップ
 発電機トリップ
 発電機トリップ
 発電機トリップ

スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ

定格出力運転

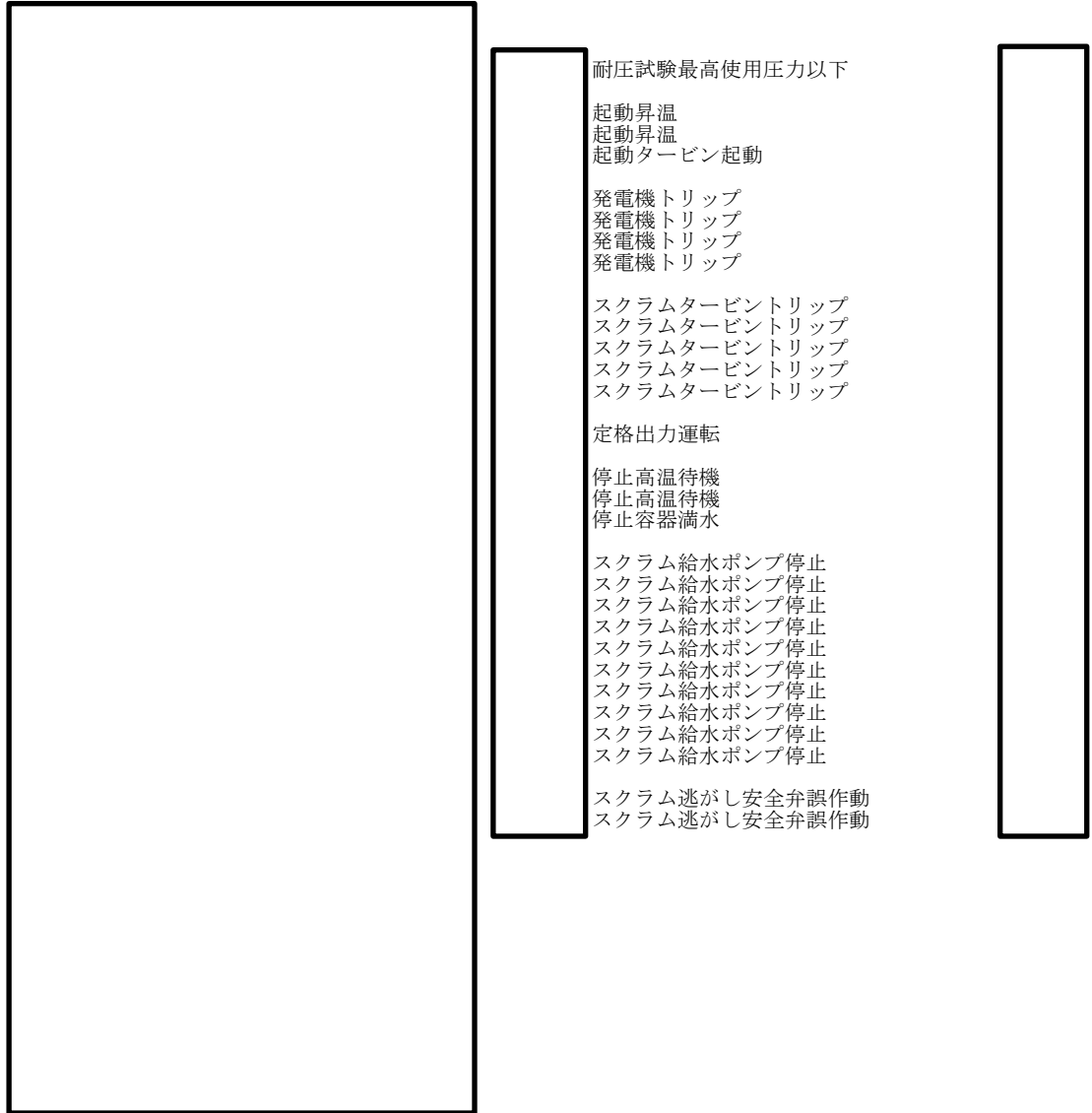
停止高温待機
 停止高温待機
 停止容器満水

スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止

スクラム逃がし安全弁誤作動
 スクラム逃がし安全弁誤作動

No.	運転条件	運転条件	S p
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			

図5-6(2) 応力差の変動(P07, S 1 2)



耐圧試験最高使用圧力以下

起動昇温
 起動昇温
 起動タービン起動

発電機トリップ
 発電機トリップ
 発電機トリップ
 発電機トリップ

スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ

定格出力運転

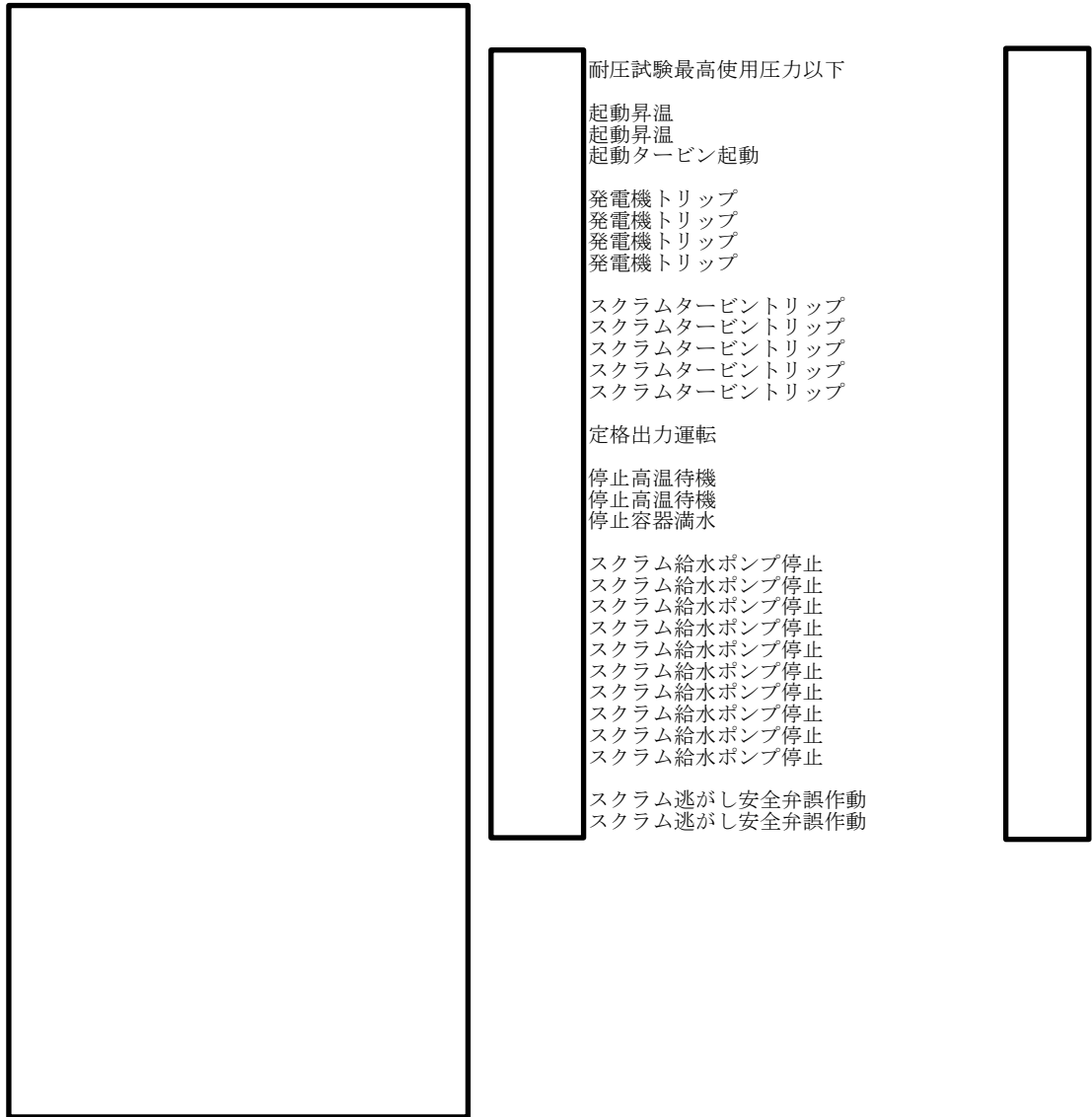
停止高温待機
 停止高温待機
 停止容器満水

スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止

スクラム逃がし安全弁誤作動
 スクラム逃がし安全弁誤作動

No.	運転条件	運転条件	S p
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

図5-6(3) 応力差の変動(P14, S 3 1)



耐圧試験最高使用圧力以下

起動昇温
 起動昇温
 起動タービン起動

発電機トリップ
 発電機トリップ
 発電機トリップ
 発電機トリップ

スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ

定格出力運転

停止高温待機
 停止高温待機
 停止容器満水

スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止

スクラム逃がし安全弁誤作動
 スクラム逃がし安全弁誤作動

No.	運転条件	運転条件	S p
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			

図5-6(4) 応力差の変動(P17, S 2 3)

表5-13(1) 熱伝達率の計算

--

流体	温度 T _f (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイノルズ数 Re (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。

注2：100%流量 = m³/h

注3：流路断面積 = m² (円筒胴とシリンダ間の断面積)

注4：代表長さ L = m

表5-13(2) 熱伝達率の計算



流体	温度 T_f (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイノルズ数 Re (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
水					

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。

注2：100%流量 = m³/h

注3：流路断面積 = m² (円筒胴とシリンダ間の断面積)

注4：代表長さ L = m

表5-13(3) 熱伝達率の計算

--

流体	温度 T_f (°C)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイレー数 * R_a (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
水				
水				
水				
水				
水				
水				
水				
水				
水				
水				
水				

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。
 注2：垂直接流体層の高さ $L = \square$ m
 注記*：温度差 $\Delta T = \square$ °Cに対する値を示す。

表5-13(4) 熱伝達率の計算

--

流体	温度 T _f (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイノルズ数 Re (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。

注2：100%流量 = m³/h × 20

注3：流路断面積 = m² (円筒胴とシリンダ間の断面積)

注4：代表長さ L = m

表5-13(5) 熱伝達率の計算

--

流体	温度 T _f (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイノルズ数 Re (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
水					
水					
水					

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。

注2：100%流量 = m³/h × 20

注3：流路断面積 = m² (円筒胴とシリンダ間の断面積)

注4：代表長さ L = m

表5-13(6) 熱伝達率の計算



流体	温度 T _f (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイノルズ数 Re (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。

注2：100%流量 = m³/h × 20

注3：流路断面積 = m² (円筒胴とシリンダ間の断面積)

注4：代表長さ L = m

表5-13(7) 熱伝達率の計算

--

流体	温度 T _f (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイノルズ数 Re (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
水					
水					
水					
水					

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。

注2：100%流量 = m³/h × 20

注3：流路断面積 = m² (円筒胴とシリンダ間の断面積)

注4：代表長さ L = m

表5-13(8) 熱伝達率の計算

--

流体	温度 T _f (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイノルズ数 Re (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。

注2：100%流量 = m³/h × 20

注3：流路断面積 = m² (円筒胴とシリンダ間の断面積)

注4：代表長さ L = m

表5-13(9) 熱伝達率の計算

--

流体	温度 T _f (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイノルズ数 Re (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
水					
水					
水					
水					

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。

注2：100%流量 = m³/h × 20

注3：流路断面積 = m² (円筒胴とシリンダ間の断面積)

注4：代表長さ L = m

表5-13(10) 熱伝達率の計算

--

流体	温度 T _f (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイノルズ数 Re (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。

注2：100%流量 = m³/h × 20

注3：流路断面積 = m² (シリンダ内面の断面積)

注4：代表長さ L = m

表5-13(11) 熱伝達率の計算



流体	温度 T _f (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイノルズ数 Re (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
水					

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。

注2：100%流量 = m³/h × 20

注3：流路断面積 = m² (シリンダ内面の断面積)

注4：代表長さ L = m

表5-13(12) 熱伝達率の計算



流体	温度 T _f (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイノルズ数 Re (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。

注2：100%流量 = m³/h × 20

注3：流路断面積 = m² (シリンダ内面の断面積)

注4：代表長さ L = m

表5-13(13) 熱伝達率の計算



流体	温度 T _f (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイノルズ数 Re (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
水					

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。

注2：100%流量 = m³/h × 20

注3：流路断面積 = m² (シリンダ内面の断面積)

注4：代表長さ L = m

表5-13(14) 熱伝達率の計算



流体	温度 T_f (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイノルズ数 Re (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
空気					

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。

注2：100%流量 = m³/h

注3：流路断面積 = m² (ダクト総断面積)

注4：代表長さ L = m

表5-13(15) 熱伝達率の計算



流体	温度 T_m (K)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	エアギャップ の距離 l (m)	形態係数 F (—)	対面金属のふく射率 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
空気						

注： 計算方法及び記号の説明は、添付1による。

表 5-14 応力集中係数

応力評価点	デ ー タ				K _n (引張り)	K _b (曲げ)
	T (mm)	t (mm)	r (mm)	θ (°)		
P01, P01'					1.4	1.2
P02, P02'					2.0	1.6
P03, P03'					1.3	1.1
P04, P04'					1.3	1.1
P05, P05'					1.3	1.1
P06, P06'					1.3	1.1
P08, P08'					2.3	1.8
P10, P10'					2.3	1.8
P11, P11'					1.8	1.5
P12, P12'					1.8	1.5
P13, P13'					3.0 ^{*2}	3.0 ^{*2}
P14, P14'					3.0 ^{*2}	3.0 ^{*2}
P15, P15'					1.8	1.5
P16, P16'					1.8	1.5
P17, P17'					2.0 ^{*3}	2.0 ^{*3}
P18, P18'					2.0 ^{*3}	2.0 ^{*3}

注：計算方法及び記号の説明は、添付 2 による。

注記*1：Tを無限大として計算した。

*2：西田正孝著「応力集中」による。

*3：設計・建設規格 CSS-3140 の完全溶け込み溶接部に対する値

表 5-15 一次一般膜応力強さの評価のまとめ

(単位：MPa)

応力評価面	設計条件		供用状態C		供用状態D	
	応力強さ	許容応力	応力強さ	許容応力	応力強さ	許容応力
P01						
P02	59	147*	10	221*	11	300*
P01'						
P02'	51	147*	10	221*	9	300*
P03						
P04	108	164	18	246	20	334
P03'						
P04'	91	164	18	246	16	334
P05						
P06	47	164	9	246	9	334
P05'						
P06'	39	164	9	246	8	334
P07						
P08	50	164	7	246	8	334
P07'						
P08'	44	164	7	246	6	334
P09						
P10	41	164	8	246	10	334
P09'						
P10'	34	164	8	246	9	334
P11						
P12	16	147*	6	221*	6	300*
P11'						
P12'	17	147*	6	221*	6	300*
P13						
P14	7	164	6	246	6	334
P13'						
P14'	10	164	6	246	5	334
P15						
P16	9	147*	5	221*	5	300*
P15'						
P16'	7	147*	5	221*	6	300*
P17						
P18	71	85*	18	127*	19	208*
P17'						
P18'	63	85*	18	127*	19	208*

注記*：継手効率 を乗じた値を示す。

表 5-16 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ

(単位：MPa)

応力評価面	設計条件		供用状態C		供用状態D	
	応力強さ	許容応力	応力強さ	許容応力	応力強さ	許容応力
P01						
P02	59	221*	10	332*	11	450*
P01'						
P02'	51	221*	10	332*	9	450*
P03						
P04	108	246	18	369	20	501
P03'						
P04'	91	246	18	369	16	501
P05						
P06	47	246	9	369	9	501
P05'						
P06'	39	246	9	369	8	501
P07						
P08	50	246	7	369	8	501
P07'						
P08'	44	246	7	369	6	501
P09						
P10	41	246	8	369	10	501
P09'						
P10'	34	246	8	369	9	501
P11						
P12	16	221*	6	332*	6	450*
P11'						
P12'	17	221*	6	332*	6	450*
P13						
P14	7	246	6	369	6	501
P13'						
P14'	10	246	6	369	5	501
P15						
P16	9	221*	5	332*	5	450*
P15'						
P16'	7	221*	5	332*	6	450*
P17						
P18	71	127*	18	190*	19	312*
P17'						
P18'	63	127*	18	190*	19	312*

注記*：継手効率 を乗じた値を示す。

表 5-17 一次+二次応力強さの評価のまとめ
(単位：MPa)

応力評価点	一次+二次応力差最大範囲 ($P_m + P_b + Q$)		
	^{*1} S_n	^{*2} S_n'	許容応力 $\eta \cdot 3 \cdot S_m$
P01	109	—	442 ^{*3}
P01'	109	—	442 ^{*3}
P02	111	—	442 ^{*3}
P02'	111	—	442 ^{*3}
P03	142	—	492
P03'	142	—	492
P04	115	—	492
P04'	115	—	492
P05	214	—	492
P05'	214	—	492
P06	235	—	492
P06'	235	—	492
P07	476	—	492
P07'	476	—	492
P08	330	—	492
P08'	330	—	492
P09	369	—	492
P09'	369	—	492
P10	246	—	492
P10'	246	—	492
P11	254	—	442 ^{*3}
P11'	254	—	442 ^{*3}
P12	314	—	442 ^{*3}
P12'	314	—	442 ^{*3}
P13	277	—	492
P13'	277	—	492
P14	310	—	492
P14'	310	—	492
P15	205	—	442 ^{*3}
P15'	205	—	442 ^{*3}
P16	177	—	442 ^{*3}
P16'	177	—	442 ^{*3}
P17	307 ^{*4}	137	260 ^{*3}
P17'	307 ^{*4}	137	260 ^{*3}
P18	292 ^{*4}	111	260 ^{*3}
P18'	292 ^{*4}	111	260 ^{*3}

注記*1： S_n は供用状態A及びBによる一次+二次応力差の最大範囲を示す。
 *2： S_n' は S_n のうち熱曲げを除く一次+二次応力差の最大範囲を示す。
 *3：継手効率 を乗じた値を示す。
 *4：簡易弾塑性解析により安全性を示す。

表 5-18 疲労累積係数の評価のまとめ

応力評価点	疲労累積係数	
	U_n	許容値
P01	0.000	1.0
P01'	0.000	1.0
P02	0.000	1.0
P02'	0.000	1.0
P03	0.000	1.0
P03'	0.000	1.0
P04	0.000	1.0
P04'	0.000	1.0
P05	0.000	1.0
P05'	0.000	1.0
P06	0.000	1.0
P06'	0.000	1.0
P07	0.001	1.0
P07'	0.001	1.0
P08	0.000	1.0
P08'	0.000	1.0
P09	0.000	1.0
P09'	0.000	1.0
P10	0.000	1.0
P10'	0.000	1.0
P11	0.000	1.0
P11'	0.000	1.0
P12	0.000	1.0
P12'	0.000	1.0
P13	0.005	1.0
P13'	0.005	1.0
P14	0.013	1.0
P14'	0.013	1.0
P15	0.000	1.0
P15'	0.000	1.0
P16	0.000	1.0
P16'	0.000	1.0
P17	0.019	1.0
P17'	0.019	1.0
P18	0.011	1.0
P18'	0.011	1.0

表 5-19 座屈に対する評価

(単位：MPa)

応力評価面	供用状態	圧縮応力	許容応力
P03'-P04'	A, B	4	155
	C	4	233
	D	5	249

6. 燃料支持金具の強度計算

6.1 一般事項

本章は、燃料支持金具（中央燃料支持金具及び周辺燃料支持金具）の応力計算について示すものである。

注：図表は、原則として巻末に示す。

6.2 適用基準

適用基準を以下に示す。

- (1) 通商産業省告示第501号「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」（以下「告示」という。）

注：本章において、告示の条項は「告示第○条第△項第◇号」として示す。

6.3 記号の説明

本章において、以下の記号を使用する。ただし、本章に別途記載ある場合は、この限りでない。

記号	記号の説明	単位
A	断面積	mm ²
D _i	内径	mm
D _o	外径	mm
I	断面二次モーメント	mm ⁴
P _b	一次曲げ応力	MPa
P _m	一次一般膜応力	MPa
Q	二次応力	MPa
S ₁₂	主応力差 $\sigma_1 - \sigma_2$	MPa
S ₂₃	主応力差 $\sigma_2 - \sigma_3$	MPa
S ₃₁	主応力差 $\sigma_3 - \sigma_1$	MPa
S _m	設計応力強さ 告示 別表第 2 に定める値	MPa
S _u	設計引張強さ 告示 別表第 10 に定める値	MPa
S _y	設計降伏点 告示 別表第 9 に定める値	MPa
S _y (R T)	室温における設計降伏点 告示 別表第 9 に定める値	MPa
t	厚さ	mm
V	鉛直力	N
η	溶接部の継手効率	—
σ_1	主応力	MPa
σ_2	主応力	MPa
σ_3	主応力	MPa
σ_l	軸方向応力	MPa
σ_r	半径方向応力	MPa
σ_t	周方向応力	MPa
τ_{lr}	せん断応力	MPa
τ_{rt}	せん断応力	MPa
τ_{tl}	せん断応力	MPa

6.4 計算精度と数値の丸め方

精度は、有効数字 6 桁以上を確保する。

表示する数値の丸め方は表 6-1 に示すとおりとする。

表 6-1 表示する数値の丸め方

数値の種類	単位	処理桁	処理方法	表示桁
応力	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位
応力強さ	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位
許容応力*	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数位

注記*：告示別表に記載された許容引張応力及び設計引張強さは、各温度の値を SI 単位に換算し、SI 単位に換算した値の小数点以下第 1 位を四捨五入して、整数位までの値とする。

6.5 形状・寸法・材料

本章で解析する箇所形状・寸法・材料を図 6-1 に示す。

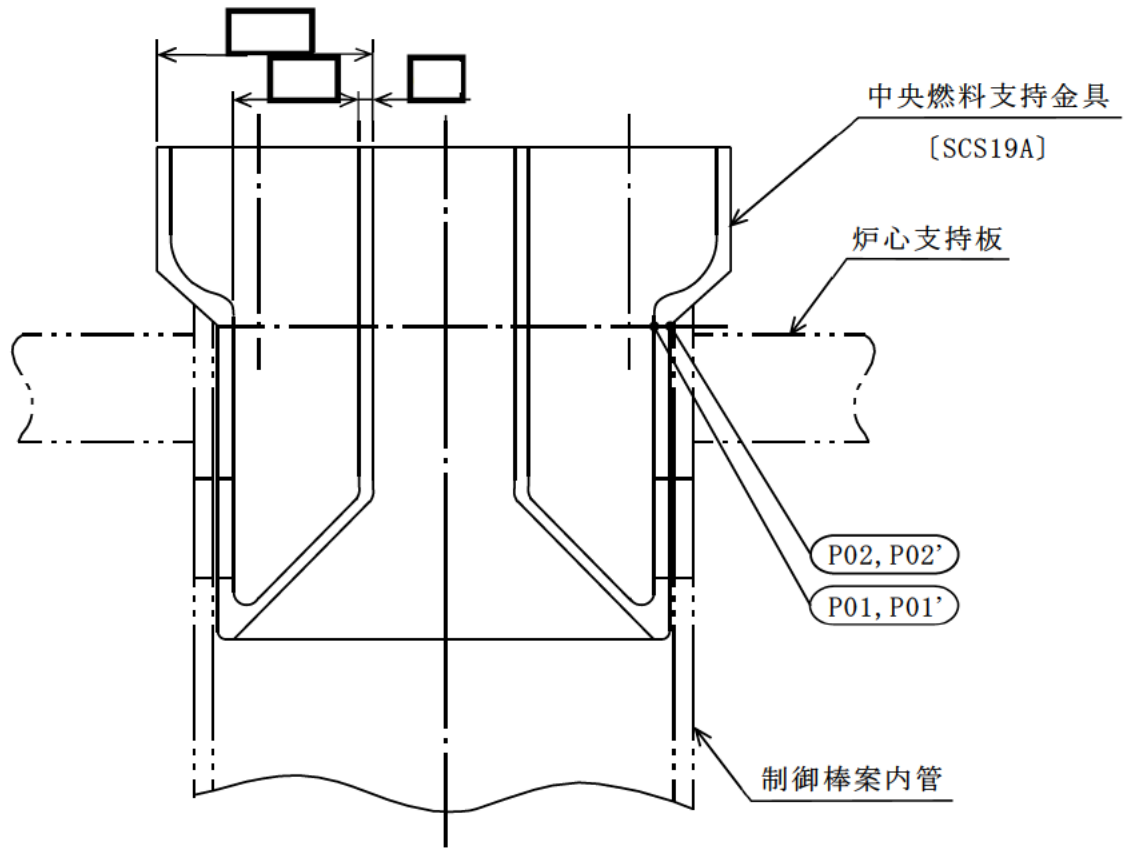
6.6 解析範囲

解析範囲を図 6-1 に示す。

6.7 計算結果の概要

計算結果の概要を表 6-2 に示す。

なお、応力評価点の選定に当たっては、形状不連続部、溶接部及び厳しい荷重作用点に着目し、応力評価上厳しくなる代表的な評価点を記載する。



○ : 応力評価点
[] : 材 料

図6-1(1) 形状・寸法・材料・応力評価点 (単位: mm)

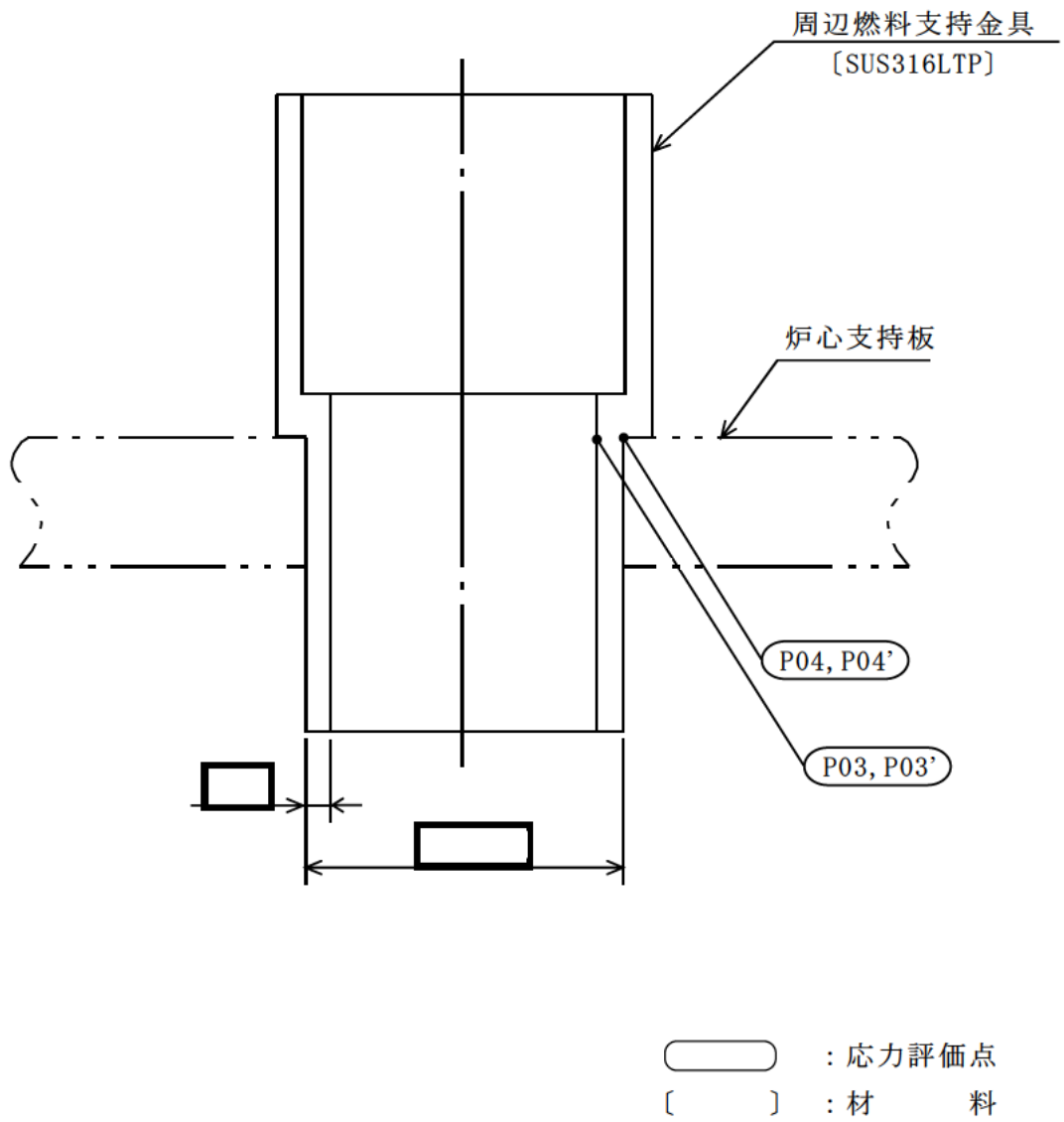


図6-1(2) 形状・寸法・材料・応力評価点 (単位: mm)

表 6-2 計算結果の概要

部分及び材料	運転状態	一次一般膜 応力強さ (MPa)			一次一般膜＋一次曲げ 応力強さ (MPa)			一次＋二次 応力強さ (MPa)			疲労解析		
		応力 強さ	許容 応力	応力 評価面	応力 強さ	許容 応力	応力 評価面	応力 強さ	許容 応力	応力 評価点	疲労 累積 係数	許容値	応力 評価点
中央燃料 支持金具 SCS19A	設計条件	3	108	P01-P02	3	163	P01-P02	—	—	—	—	—	—
	Ⅲ	3	162	P01-P02	3	244	P01-P02	—	—	—	—	—	—
	Ⅳ	3	247	P01-P02	3	371	P01-P02	—	—	—	—	—	—
	重大事故等時	3	247	P01-P02	3	370	P01-P02	—	—	—	—	—	—
	Ⅰ, Ⅱ	—	—	—	—	—	—	3	330	P01	—*1	—*1	—*1
周辺燃料 支持金具 SUS316LTP	設計条件	2	37*2	P03-P04	2	56*2	P03-P04	—	—	—	—	—	—
	Ⅲ	2	56*2	P03-P04	2	84*2	P03-P04	—	—	—	—	—	—
	Ⅳ	2	92*2	P03-P04	2	138*2	P03-P04	—	—	—	—	—	—
	重大事故等時	2	90*2	P03-P04	2	135*2	P03-P04	—	—	—	—	—	—
	Ⅰ, Ⅱ	—	—	—	—	—	—	2	115*2	P03	—*1	—*1	—*1

注記*1：疲労解析は、告示第96条第1項第3号により不要である。

*2：継手効率 を乗じた値を示す。

6.8 計算条件

6.8.1 評価対象機器

応力評価を行う機器は、次のとおりである。（図 6-1 参照）

機器名称	評価対象				
	運転状態に対する評価				
	設計条件	I, II	III	IV	重大事故等時
燃料支持金具	○	○	○	○	○

注：「○」は評価対象を示す。

6.8.2 設計条件

設計差圧 : 表 6-3 に示す。

最高使用温度 : 302℃

設計機械的荷重 : 表 6-4 に示す。

6.8.3 運転条件

運転条件及び記号は、参照図書(1)a. に定めるとおりである。

なお、重大事故等時の条件は以下のとおりである。

温度条件 : 運転状態Ⅲと同じ。

差圧条件 : 運転状態Ⅳと同じ。

燃料支持金具の応力評価において考慮する差圧は、表 6-3 に示す参照図書(1)a. に定める差圧 P_{13} であり、考慮する外荷重の値は表 6-4 に示すとおりである。

6.8.4 材料

各部の材料を図 6-1 に示す。

6.8.5 荷重の組合せ及び運転状態

荷重の組合せ及び運転状態を表 6-5 に示す。

なお、本章において、告示第 96 条第 1 項第 1 号イの規定による最高使用圧力を「設計差圧」と呼び、設計差圧と設計機械的荷重を組み合わせた条件を「設計条件」という。

6.8.6 荷重の組合せ及び応力評価

荷重の組合せ及び応力評価項目の対応を表 6-6 に示す。本章において、荷重の種類と記号は以下のとおりである。

荷重	記号
(1) 差圧	[L02]
(2) 設計機械的荷重	[L03]
(3) 死荷重	[L04]

6.8.7 許容応力

燃料支持金具の許容応力は、告示第 96 条第 1 項第 1 号に基づき表 6-7 に示す。

6.8.8 許容応力評価条件

- (1) 許容応力評価において、設計応力強さ S_m 及び設計引張強さ S_u は、それぞれ告示別表第 2 及び第 10 に定められたものを使用する。
- (2) 設計条件の評価には、最高使用温度 (302℃) に対する許容応力を用いる。運転状態Ⅲ及び運転状態Ⅳの一次応力の評価には、各運転状態における流体の最高温度 (運転状態Ⅲ : ℃, Ⅳ : ℃) に対する許容応力を用いる。運転状態Ⅰ及びⅡの一次+二次応力及び繰返し荷重の評価には、運転温度 (℃ : 定格出力運転時の流体温度) に対する許容応力を用いる。
- (3) 重大事故等時の一次応力の評価には、重大事故等時における流体の最高温度 (℃) を上回る運転状態Ⅲにおける流体の最高温度 (℃) に対する許容応力を用いる。
- (4) 燃料支持金具の許容応力評価条件を表 6-8 に示す。

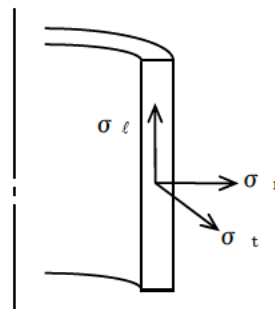
6.8.9 溶接部の継手効率

- (1) 中央燃料支持金具の応力評価点は、溶接部でないため $\eta = 1.00$ を用いる。
- (2) 周辺燃料支持金具の溶接部の継手効率は、継手の種類と分類及び継手に適用する検査の種類により、告示第 99 条第 4 項に従って定める。溶接部の継手効率を表 6-9 に示す。
- (3) 溶接部の許容応力は、材料の許容応力に継手効率を乗じたものとする。

6.8.10 応力の記号と方向

応力の記号とその方向は、以下のとおりとする。

- σ_t : 周方向応力
 σ_ℓ : 軸方向応力
 σ_r : 半径方向応力



6.9 応力評価の手順

応力評価の手順について述べる。

応力評価の概要を図 6-2 に示す。

6.9.1 温度分布計算

燃料支持金具は、参照図書(1)a. に示すとおり、同一温度領域内（領域 B）にあること、また、薄肉構造で材料の異なる部分はなく温度勾配は無視し得ることから温度分布計算を行わない。

6.9.2 応力の評価

(1) 主応力

計算した応力は、応力の分類ごとに重ね合わせ、組合せ応力を求める。

組合せ応力は、一般に σ_t , σ_ℓ , σ_r , $\tau_{t\ell}$, $\tau_{\ell r}$, τ_{rt} の 6 成分を持つが、主応力 σ は、引用文献(1)の 1・3・6 項により、次式を満足する 3 根 σ_1 , σ_2 , σ_3 として計算する。

$$\begin{aligned} & \sigma^3 - (\sigma_t + \sigma_\ell + \sigma_r) \cdot \sigma^2 + (\sigma_t \cdot \sigma_\ell + \sigma_\ell \cdot \sigma_r + \sigma_r \cdot \sigma_t - \tau_{t\ell}^2 \\ & - \tau_{\ell r}^2 - \tau_{rt}^2) \cdot \sigma - \sigma_t \cdot \sigma_\ell \cdot \sigma_r + \sigma_t \cdot \tau_{\ell r}^2 + \sigma_\ell \cdot \tau_{rt}^2 \\ & + \sigma_r \cdot \tau_{t\ell}^2 - 2 \cdot \tau_{t\ell} \cdot \tau_{\ell r} \cdot \tau_{rt} = 0 \end{aligned}$$

上式により主応力を求める。

(2) 応力強さ

以下の3つの主応力差の絶対値で最大のものを応力強さとする。

$$S_{12} = \sigma_1 - \sigma_2$$

$$S_{23} = \sigma_2 - \sigma_3$$

$$S_{31} = \sigma_3 - \sigma_1$$

(3) 一次応力強さ

設計条件，運転状態Ⅲ，運転状態Ⅳ及び重大事故等時において生じる一次一般膜応力及び一次一般膜＋一次曲げ応力の応力強さが，6.8.7項に示す許容応力を満足することを示す。

(4) 一次＋二次応力強さ

運転状態Ⅰ及びⅡにおいて生じる一次＋二次応力の応力差最大範囲(S_n)が，6.8.7項に示す許容応力を満足することを示す。

6.9.3 繰返し荷重の評価

繰返し荷重の評価は，運転状態Ⅰ及びⅡによる荷重を用いて，告示第96条第1項第3号に従い疲労解析（詳細な繰返し荷重の評価）の必要性の検討を行い，疲労解析が不要であることを示す。

6.10 応力計算

6.10.1 応力評価点

応力評価点の位置を図 6-1 に示す。

なお、各応力評価点の断面性状は、表 6-10 に示すとおりである。

6.10.2 差圧による応力

(1) 荷重条件 (L02)

各運転状態による差圧を表 6-3 に示す。

(2) 計算方法

中央燃料支持金具の差圧による応力は、応力評価点の位置における断面で、外径を mm とし、かつ、厚さが最小となる円筒を考え、内圧を受ける円筒にモデル化し、計算する。

中央燃料支持金具の差圧による応力計算のモデルを図 6-3 に示す。

周辺燃料支持金具の差圧による応力は、応力評価点の位置における断面の円筒を考え計算する。

a. 一次一般膜応力

差圧 P_{13} による一次一般膜応力は、次式で求める。

$$\sigma_t = \frac{1}{Y-1} \cdot P_{13}$$

$$\sigma_l = \frac{1}{Y^2-1} \cdot P_{13}$$

$$\sigma_r = -\frac{1}{Y+1} \cdot P_{13}$$

ここで、 $Y = \frac{D_o}{D_i}$

b. 一次一般膜＋一次曲げ応力

差圧による一次曲げ応力は存在しない。したがって、一次一般膜＋一次曲げ応力は、一次一般膜応力と同じである。

c. 一次＋二次応力

差圧 P_{13} による一次＋二次応力は、次式で求める。

$$\sigma_t = \frac{1+K^2}{Y^2-1} \cdot P_{13}$$

$$\sigma_\ell = \frac{1}{Y^2-1} \cdot P_{13}$$

$$\sigma_r = \frac{1-K^2}{Y^2-1} \cdot P_{13}$$

ここで、 $K = Y$ (内表面)

$K = 1$ (外表面)

6.10.3 外荷重による応力

(1) 荷重条件 (L03 及び L04)

外荷重を表 6-4 に示す。

(2) 計算方法

中央燃料支持金具の外荷重による応力は、応力評価点の位置における断面で、その断面の最小幅を内径とし、かつ、厚さが最小となる円筒を考え計算する。

中央燃料支持金具の外荷重による応力計算のモデルを、図 6-4 に示す。

周辺燃料支持金具の外荷重による応力は、応力評価点の位置における断面の円筒を考え計算する。

a. 一次一般膜応力

外荷重による一次一般膜応力は，外荷重と各応力評価断面の断面性状により次式で求める。

$$\sigma_{\ell} = \frac{V}{A}$$

b. 一次一般膜＋一次曲げ応力

外荷重による一次曲げ応力は，存在しない。したがって，一次一般膜＋一次曲げ応力は，一次一般膜応力と同じである。

c. 一次＋二次応力

外荷重による二次応力は，存在しない。したがって，一次＋二次応力は，一次一般膜＋一次曲げ応力と同じである。

6.10.4 熱応力

6.9.1 項に示すとおり熱応力は無視できる。

6.11 応力強さの評価

6.11.1 一次一般膜応力強さの評価

各運転状態における評価を表 6-11 に示す。

表 6-11 より，各運転状態の一次一般膜応力強さは，6.8.7 項及び 6.8.9 項に示す許容応力を満足する。

6.11.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価

各運転状態における評価を表 6-12 に示す。

表 6-12 より，各運転状態の一次一般膜＋一次曲げ応力強さは，6.8.7 項及び 6.8.9 項に示す許容応力を満足する。

6.11.3 一次＋二次応力強さの評価

運転状態 I 及び II における評価を表 6-13 に示す。

表 6-13 より，運転状態 I 及び II の一次＋二次応力強さは，6.8.7 項及び 6.8.9 項に示す許容応力を満足する。

6.12 繰返し荷重の評価

6.12.1 告示第 96 条第 1 項第 3 号についての検討

燃料支持金具について，告示第 96 条第 1 項第 3 号により疲労解析が不要となることを以下の(1)から(4)に示す。

(1) 告示第 96 条第 1 項第 3 号イ及び同号ロ

6.9.1 項で述べたように，燃料支持金具の温度差は無視し得るので，告示第 96 条第 1 項第 3 号イ及び同号ロの検討は不要である。

(2) 告示第 96 条第 1 項第 3 号ハ（異なる材料よりなる部分の温度変動）

燃料支持金具には，縦弾性係数又は熱膨張係数の異なる材料よりなる部分は存在しない。

(3) 告示第 96 条第 1 項第 3 号ニ（機械的荷重変動）

機械的荷重により生じる応力の全振幅が，荷重変動回数 10^6 回に対応する繰返しピーク応力強さを超えないことを確認する。

告示別図第 2 より求めた 10^6 回に対応する繰返しピーク応力強さ : $S = 178 \text{ MPa}$

機械的荷重変動による応力の全振幅 : $\Delta \sigma$

全応力評価点の機械的荷重変動（死荷重）による一次＋二次応力のうち，応力の全振幅が最大となる応力評価点 P01 での一次＋二次応力は以下である。

$$\Delta \sigma = \square \text{ MPa}$$

したがって， $S > \Delta \sigma$ であり，条件を満足する。

(4) 検討結果

以上(1)から(3)より燃料支持金具は，告示第 96 条第 1 項第 3 号の要求をすべて満足している。

6.12.2 疲労解析

6.12.1 項に示すように，燃料支持金具は，疲労解析は不要である。

6.13 引用文献

- (1) 機械工学便覧 基礎編 α 3 (日本機械学会)

6.14 参照図書

- (1) 島根原子力発電所第2号機 炉心シュラウド修理工事 工事計画届出書 添付書類
 - a. IV-3-1-1 炉心シュラウドの応力計算書

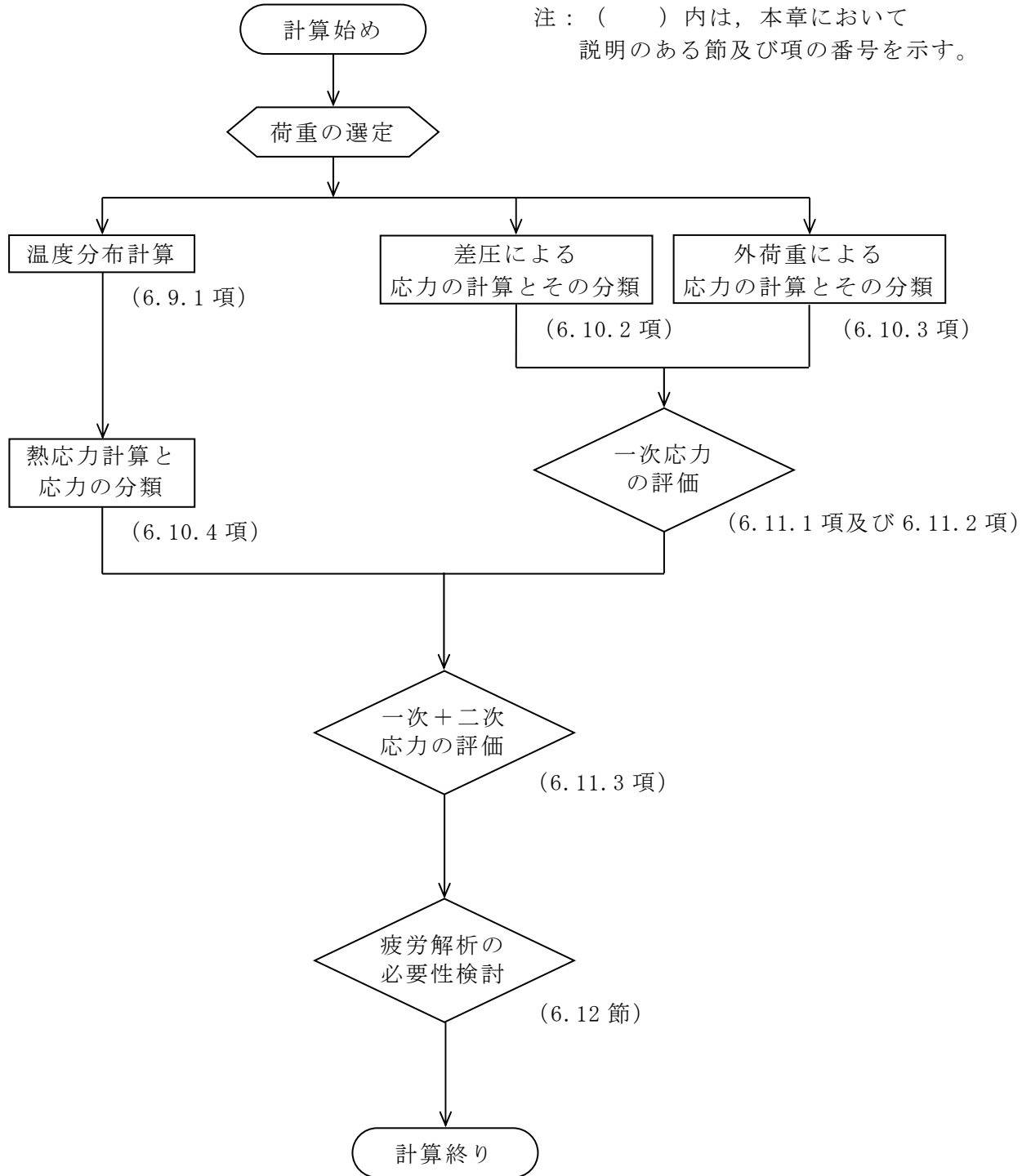


図 6-2 応力評価の手順

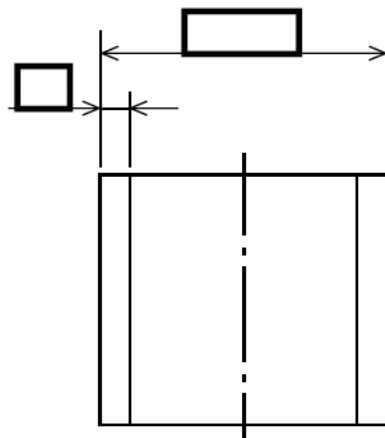


図 6-3 中央燃料支持金具の差圧による応力計算モデル (単位 : mm)

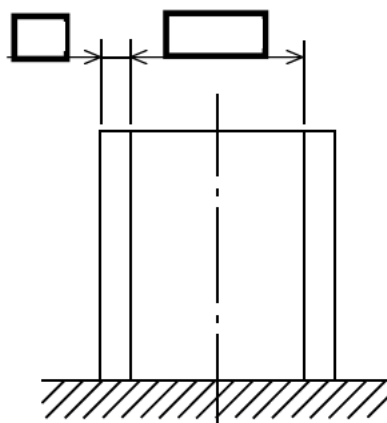


図 6-4 中央燃料支持金具の外荷重による応力計算モデル (単位 : mm)

表 6-3 各運転状態における差圧

(単位：MPa)

運転状態	差圧 P ₁₃
設計条件	
I, II	
III	
IV	
重大事故等時	

表 6 4 外荷重

記号	荷重名称	荷重 作用点*	鉛直力
			V (kN)
L03	設計機械的荷重		
L04	死荷重		

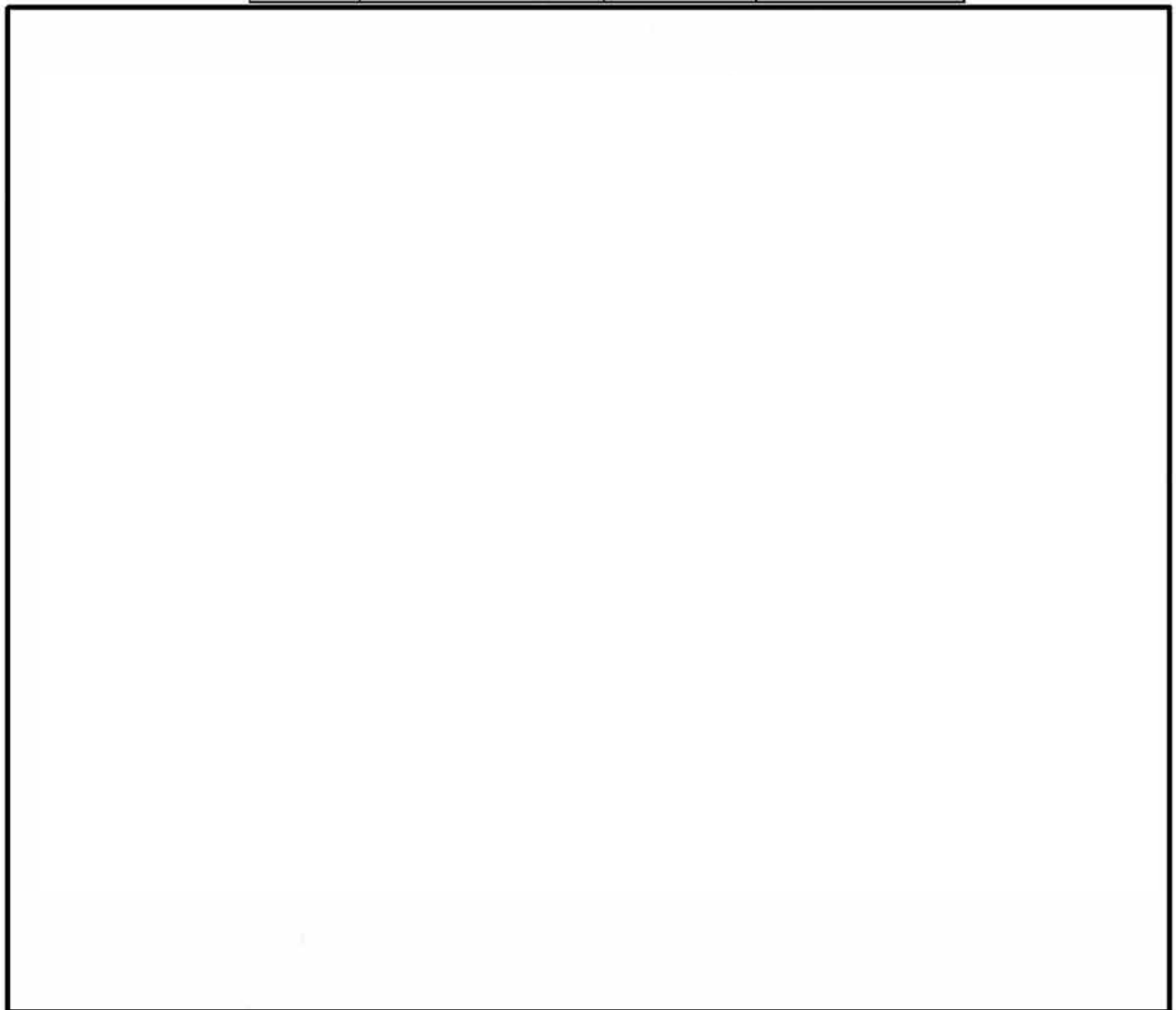


表 6-5 荷重の組合せ及び運転状態

運転状態	荷重の組合せ
	各運転状態による荷重
設計条件	設計条件による荷重
I	運転状態 I による荷重
II	運転状態 II による荷重
III	運転状態 III による荷重
IV	運転状態 IV による荷重
重大事故等時	重大事故等時による荷重

表 6-6 荷重の組合せ

運転状態	荷重の組合せ	応力評価
設計条件	L02+L03	P_m $P_m + P_b$
I, II	L02+L04	$P_m + P_b + Q$ 疲労解析
III	L02+L04	P_m $P_m + P_b$
IV	L02+L04	P_m $P_m + P_b$
重大事故等時	L02+L04	P_m $P_m + P_b$

表 6-7 許容応力

運転状態	許容限界		
	一次一般膜応力	一次一般膜+一次曲げ応力	一次+二次応力
設計条件	S_m	$1.5 \cdot S_m$	—
I, II	—	—	$3 \cdot S_m$
III	$1.5 \cdot S_m$	$2.25 \cdot S_m$	—
IV	$\text{Min}(2.4 \cdot S_m, 2/3 \cdot S_u)$	$\text{Min}(3.6 \cdot S_m, S_u)$	—
重大事故等時*	$\text{Min}(2.4 \cdot S_m, 2/3 \cdot S_u)$	$\text{Min}(3.6 \cdot S_m, S_u)$	—

注記*：重大事故等時の許容限界として運転状態IVの許容限界を用いる。

表 6-9 溶接部の継手効率

継手の箇所	継手の分類	継手の種類	検査の種類*	継手効率 η
燃料支持金具	周辺燃料支持金具と 炉心支持板の継手			

注記*：検査の種類を示す記号は次のとおりである。

P T：告示第 99 条第 4 項に定めるホの検査

表 6-10 断面性状

応力評価点	t (mm)	D _o (mm)	D _i (mm)	A (mm ²)	I (mm ⁴)
P01, P02*					
P03, P04					

注記*：上段は差圧による応力計算モデルの断面性状を示し，下段は外荷重による応力計算モデルの断面性状を示す。

表 6-11 一次一般膜応力強さの評価のまとめ

(単位 : MPa)

応力評価面	設計条件		運転状態Ⅲ		運転状態Ⅳ		重大事故等時	
	応力強さ	許容応力	応力強さ	許容応力	応力強さ	許容応力	応力強さ	許容応力
P01 P02	3	108	3	162	3	247	3	247
P01' P02'	3	108	3	162	3	247	3	247
P03 P04	2	37*	2	56*	2	92*	2	90*
P03' P04'	2	37*	2	56*	2	92*	2	90*

注記* : 継手効率 を乗じた値を示す。

表 6-12 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ

(単位：MPa)

応力評価面	設計条件		運転状態Ⅲ		運転状態Ⅳ		重大事故等時	
	応力強さ	許容応力	応力強さ	許容応力	応力強さ	許容応力	応力強さ	許容応力
P01 P02	3	163	3	244	3	371	3	370
P01' P02'	3	163	3	244	3	371	3	370
P03 P04	2	56*	2	84*	2	138*	2	135*
P03' P04'	2	56*	2	84*	2	138*	2	135*

注記*：継手効率 を乗じた値を示す。

表 6-13 一次+二次応力強さの評価のまとめ

(単位：MPa)

分類	一次+二次応力差最大範囲 ($P_m + P_b + Q$)	
応力評価点	S_n^{*1}	許容値 $\eta \cdot 3 \cdot S_m$
P01	3	330
P01'	3	330
P02	3	330
P02'	3	330
P03	2	115 ^{*2}
P03'	2	115 ^{*2}
P04	2	115 ^{*2}
P04'	2	115 ^{*2}

注記*1： S_n は運転状態Ⅰ及びⅡによる一次+二次応力差の最大範囲を示す。

*2：継手効率 を乗じた値を示す。

添付 1 熱伝達率の計算

1. 熱伝達率の計算式

熱伝達率の計算は、以下の式を用いて計算する。

(1) 強制対流による平板の層流熱伝達

a. 計算式の出典

5.13 節の引用文献(2) (改訂第 4 版) の P46 の(8)式

b. 計算式

$$h = 0.664 \cdot P_r^{1/3} \cdot R_{e x}^{1/2} \cdot \frac{\lambda}{L} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 L : 代表長さ(m)

$R_{e x}$: レイノルズ数 ($= v \cdot x / \nu_0$) ($x = L$)

v : 流体の流速(m/s)

λ : 流体の熱伝導率(W/(m・K))

c. 使用基準

$$R_e \leq 3.2 \times 10^5$$

ここで、 R_e : レイノルズ数 ($= v \cdot L / \nu_0$)

(2) 強制対流による平板の乱流熱伝達

a. 計算式の出典

5.13 節の引用文献(5) の P122 の(6・46)式

b. 計算式

$$h = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L h_x \cdot dx \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{ここで、 } h_x = \frac{0.0296 \cdot R_{e x}^{0.8} \cdot P_r}{1 + 1.54 \cdot P_r^{-1/4} \cdot R_{e x}^{-0.1} \cdot (P_r - 1)} \cdot \frac{\lambda}{x}$$

L : 代表長さ(m)

$R_{e x}$: レイノルズ数 ($= v \cdot x / \nu_0$) ($0 \leq x \leq L$)

v : 流体の流速(m/s)

λ : 流体の熱伝導率(W/(m・K))

c. 使用基準

$$R_e > 3.2 \times 10^5$$

ここで、 R_e : レイノルズ数 ($= v \cdot L / \nu_0$)

(3) 自然対流による熱伝達

a. 計算式の出典

5.13 節の引用文献(2) (改訂第 3 版) の P113 の(1), (2)及び(4)式

b. 計算式

$$\left. \begin{aligned} h &= \frac{\lambda}{L} && (R_a < 10^3) \\ h &= 0.28 \cdot R_a^{1/4} \cdot (L/D)^{-1/4} \cdot \frac{\lambda}{L} && (10^3 \leq R_a < 10^7) \\ h &= 0.0516 \cdot R_a^{1/3} \cdot \frac{\lambda}{L} && (10^7 \leq R_a) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで, D : 流体層の厚さ(m) G_r : グラスホフ数 ($=g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3 / \nu \rho^2$) g : 重力加速度 (m/s^2) L : 垂直流体層の高さ(m) R_a : レーレー数 ($=G_r \cdot P_r$) ΔT : 流体とそれに接する物体の温度差(K) β : 体膨張係数 ($1/K$) λ : 流体の熱伝導率 ($W/(m \cdot K)$)

(4) エアギャップの熱伝達

a. 計算式の出典

5.13 節の引用文献(2) (改訂第 4 版) 及び引用文献(6)

b. 計算式

$$h = \frac{\lambda}{\ell} + \frac{4 \cdot \sigma \cdot T_m^3}{\frac{1}{F} + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right) + \frac{A_1}{A_2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \dots\dots\dots (4)$$

ここで, A_1 : 対面金属の表面積 (m^2) A_2 : 対面金属の表面積 (m^2) F : 形態係数 ℓ : エアギャップの距離(m) T_m : 対面金属表面温度の平均温度(K) ε_1 : 対面金属のふく射率 ε_2 : 対面金属のふく射率 λ : 空気の熱伝導率 ($W/(m \cdot K)$) σ : ステファンボルツマン定数 ($=5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$)

2. 計算方法

熱伝達率の計算は，流体の種類，流体温度（ T_f ），流量（ Q ）及び代表長さ（ L ）を用いて行う。

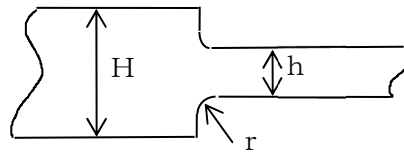
熱伝達率の表においては，計算に用いた熱伝達形態のほか，次のものを記載する。

流体	:	流体の種類
F	:	形態係数（エアギャップの熱伝達の場合）
h	:	熱伝達率
L	:	代表長さ
l	:	エアギャップの距離（エアギャップの熱伝達の場合）
Q	:	流量
R_a	:	ラーレー数（自然対流による熱伝達の場合）
R_e	:	レイノルズ数
T_f	:	流体温度
T_m	:	対面金属表面温度の平均温度（エアギャップの熱伝達の場合）
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$:	対面金属のふく射率（エアギャップの熱伝達の場合）

添付 2 応力集中係数の計算

1. 応力集中係数の計算式

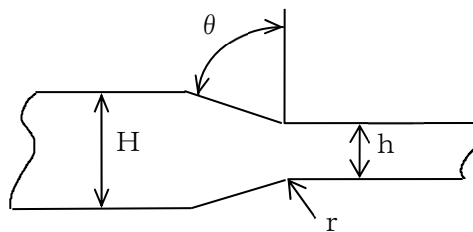
- (1) 板厚が変化する部分の応力集中係数は、5.13 節の引用文献(3)の Appendix B に示された手法によって求める。
- (2) この手法の概要は、次のとおりである。
- a. 以下のような、ステップ状のはりの応力集中係数を求める実験式 (Heywood による。) を用いる。



$$K_n = 1 + \left\{ \frac{\frac{H}{h} - 1}{4 \cdot \left(1.4 \cdot \frac{H}{h} - 1\right)} \cdot \frac{h}{r} \right\}^{0.65} \dots \dots \dots (1)$$

$$K_b = 1 + \left\{ \frac{\frac{H}{h} - 1}{2 \cdot \left(5.37 \cdot \frac{H}{h} - 4.8\right)} \cdot \frac{h}{r} \right\}^{0.85} \dots \dots \dots (2)$$

- b. 隅部にテーパのあるときは、次のように補正する。



(1)式, (2)式で求めた応力集中係数を K_0 , 補正した係数を K' として

$$2 \cdot r \leq H - h \text{ のとき} \quad \frac{K' - 1}{K_0 - 1} = 1 - \left(\frac{\theta}{90}\right)^n$$

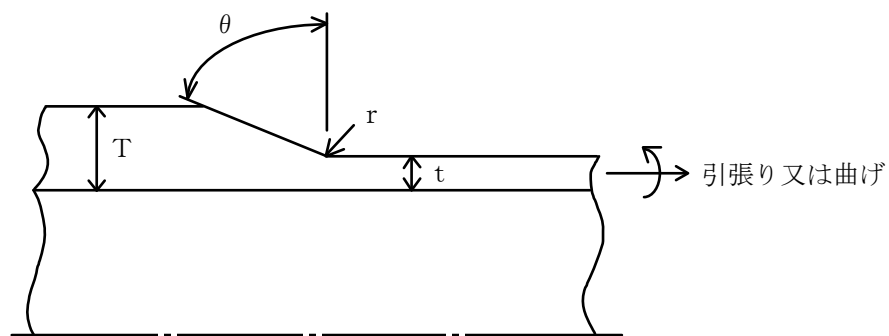
$$2 \cdot r > H - h \text{ のとき} \quad \frac{K' - 1}{K_0 - 1} = 1 - \left(\frac{\theta - \alpha}{90 - \alpha}\right)^n$$

ただし,

$$n = 1 + 2.4 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot r}{H - h}}$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left(1 - \frac{H - h}{2 \cdot r} \right)$$

- c. 円筒部については, a 項及び b 項の式の H , h を $H = 2 \cdot T$, $h = 2 \cdot t$ とする。
 なお, T 及び t は, 下図に示す寸法を用いるものとする。



2. 計算方法

応力集中係数の計算は, T , t , r 及び θ を用いて行う。
 応力集中係数の表においては, 次のものを記載する。

- T : 大きい方の板厚 ($= H / 2$)
 t : 小さい方の板厚 ($= h / 2$)
 r : 隅部の半径
 θ : テーパー角度
 K_n : 引張に対する応力集中係数
 K_b : 曲げに対する応力集中係数

VI-5 計算機プログラム（解析コード）の概要

目 次

- VI-5-1 計算機プログラム (解析コード) の概要・L i F a
- VI-5-2 計算機プログラム (解析コード) の概要・T O N B O S
- VI-5-3 計算機プログラム (解析コード) の概要・T o w e r C a b l e R e s p
- VI-5-4 計算機プログラム (解析コード) の概要・S H A K E
- VI-5-5 計算機プログラム (解析コード) の概要・T D A P I I I
- VI-5-6 計算機プログラム (解析コード) の概要・N A S T R A N
- VI-5-7 計算機プログラム (解析コード) の概要・F l u e n t
- VI-5-8 計算機プログラム (解析コード) の概要・S C A L E
- VI-5-9 計算機プログラム (解析コード) の概要・D O R T
- VI-5-10 計算機プログラム (解析コード) の概要・N O P S
- VI-5-11 計算機プログラム (解析コード) の概要・Q A D - C G G P 2 R
- VI-5-12 計算機プログラム (解析コード) の概要・O R I G E N 2
- VI-5-13 計算機プログラム (解析コード) の概要・A N I S N
- VI-5-14 計算機プログラム (解析コード) の概要・G 3 3 - G P 2 R
- VI-5-15 計算機プログラム (解析コード) の概要・H I S A P
- VI-5-16 計算機プログラム (解析コード) の概要・A B A Q U S
- VI-5-17 計算機プログラム (解析コード) の概要・G O T H I C
- VI-5-18 計算機プログラム (解析コード) の概要・M A A P
- VI-5-19 計算機プログラム (解析コード) の概要・F R E M I N G
- VI-5-20 計算機プログラム (解析コード) の概要・S e i s m i c A n a l y s i s
S y s t e m (S A S)
- VI-5-21 計算機プログラム (解析コード) の概要・D Y N A 2 E
- VI-5-22 計算機プログラム (解析コード) の概要・S u p e r F L U S H / 2 D
- VI-5-23 計算機プログラム (解析コード) の概要・A D M I T H F
- VI-5-24 計算機プログラム (解析コード) の概要・N U P P 4
- VI-5-25 計算機プログラム (解析コード) の概要・N A P I S O S
- VI-5-26 計算機プログラム (解析コード) の概要・M S C N A S T R A N
- VI-5-27 計算機プログラム (解析コード) の概要・K A N S A S 2
- VI-5-28 計算機プログラム (解析コード) の概要・S N A P - L E
- VI-5-29 計算機プログラム (解析コード) の概要・S L A P
- VI-5-30 計算機プログラム (解析コード) の概要・m i c r o S H A K E / 3 D
- VI-5-31 計算機プログラム (解析コード) の概要・A N S Y S

- VI-5-32 計算機プログラム（解析コード）の概要・FURST
- VI-5-33 計算機プログラム（解析コード）の概要・BSPAN2
- VI-5-34 計算機プログラム（解析コード）の概要・ASHSD2-B
- VI-5-35 計算機プログラム（解析コード）の概要・TACF
- VI-5-36 計算機プログラム（解析コード）の概要・SAP-IV
- VI-5-37 計算機プログラム（解析コード）の概要・PRIME
- VI-5-38 計算機プログラム（解析コード）の概要・Simcenter Nastran
- VI-5-39 計算機プログラム（解析コード）の概要・fapase
- VI-5-40 計算機プログラム（解析コード）の概要・FLIP
- VI-5-41 計算機プログラム（解析コード）の概要・NX NASTRAN
- VI-5-42 計算機プログラム（解析コード）の概要・MSAP
- VI-5-43 計算機プログラム（解析コード）の概要・Virtual Performance Solution
- VI-5-44 計算機プログラム（解析コード）の概要・LS-DYNA
- VI-5-45 計算機プログラム（解析コード）の概要・SD
- VI-5-46 計算機プログラム（解析コード）の概要・SHAKE
- VI-5-47 計算機プログラム（解析コード）の概要・SHAKE
- VI-5-48 計算機プログラム（解析コード）の概要・CARO
- VI-5-49 計算機プログラム（解析コード）の概要・mk_FRS

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（1/15）

目録番号	目録名称	適用コード名						
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	資料番号	VI-5-2					
		コード名	TONBOS					
VI-1-1-7-別添1	可搬型重大事故等対処設備の保管場所及びアクセスルート	資料番号	VI-5-1	VI-5-3	VI-5-19	VI-5-47		
		コード名	LiFa	Tower Cable Resp	FREMING	SHAKE		
VI-1-1-9-3	溢水評価条件の設定	資料番号	VI-5-7	VI-5-15				
		コード名	Fluent	HISAP				
VI-1-1-9-4	溢水影響に関する評価	資料番号	VI-5-7					
		コード名	Fluent					
VI-1-2-1	原子炉本体の基礎に関する説明書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-1-2-2	原子炉圧力容器の脆性破壊防止に関する説明書	資料番号	VI-5-9	VI-5-10	VI-5-34			
		コード名	DORT	NOPS	ASHSD2-B			
VI-1-3-2	燃料取扱設備, 新燃料貯蔵設備及び使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書	資料番号	VI-5-8					
		コード名	SCALE					
VI-1-3-4	使用済燃料貯蔵槽の冷却能力に関する説明書	資料番号	VI-5-12					
		コード名	ORIGEN2					
VI-1-3-5	使用済燃料貯蔵槽の水深の遮蔽能力に関する説明書	資料番号	VI-5-11	VI-5-12	VI-5-15			
		コード名	QAD-CGGP2R	ORIGEN2	HISAP			
VI-1-7-3	中央制御室の居住性に関する説明書	資料番号	VI-5-11	VI-5-12	VI-5-13	VI-5-14	VI-5-18	
		コード名	QAD-CGGP2R	ORIGEN2	ANISN	G33-GP2R	MAAP	
VI-1-8-1	原子炉格納施設的设计条件に関する説明書	資料番号	VI-5-11	VI-5-12	VI-5-13	VI-5-14	VI-5-16	VI-5-18
		コード名	QAD-CGGP2R	ORIGEN2	ANISN	G33-GP2R	ABAQUS	MAAP

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（2/15）

目録番号	目録名称	適用コード名						
VI-1-8-2	原子炉格納施設の 水素濃度低減 性能に関する説 明書	資料番号	VI-5-17	VI-5-18				
		コード名	GOTHIC	MAAP				
VI-1-9-3-2	緊急時対策所の 居住性に関する 説明書	資料番号	VI-5-11	VI-5-12	VI-5-13	VI-5-14		
		コード名	QAD-CGGP2R	ORIGEN2	ANISN	G33-GP2R		
VI-2-1-7	設計用床応答ス ペクトルの作成 方針	資料番号	VI-5-20					
		コード名	Seismic Analysis System(SAS)					
VI-2-2-1	炉心，原子炉圧 力容器及び原子 炉内部構造物並 びに原子炉本体 の基礎の地震応 答計算書	資料番号	VI-5-21					
		コード名	DYNA2E					
VI-2-2-2	原子炉建物の地 震応答計算書	資料番号	VI-5-4	VI-5-22	VI-5-23	VI-5-24		
		コード名	SHAKE	Super FLUSH/2D	ADMITHF	NUPP4		
VI-2-2-5	制御室建物の地 震応答計算書	資料番号	VI-5-4	VI-5-22	VI-5-23	VI-5-24		
		コード名	SHAKE	Super FLUSH/2D	ADMITHF	NUPP4		
VI-2-2-7	タービン建物の 地震応答計算書	資料番号	VI-5-4	VI-5-23	VI-5-24			
		コード名	SHAKE	ADMITHF	NUPP4			
VI-2-2-9	廃棄物処理建物 の地震応答計算 書	資料番号	VI-5-4	VI-5-23	VI-5-24	VI-5-25		
		コード名	SHAKE	ADMITHF	NUPP4	NAPISOS		
VI-2-2-11	緊急時対策所の 地震応答計算書	資料番号	VI-5-4	VI-5-23	VI-5-24			
		コード名	SHAKE	ADMITHF	NUPP4			
VI-2-2-13	排気筒の地震応 答計算書	資料番号	VI-5-4	VI-5-23	VI-5-28			
		コード名	SHAKE	ADMITHF	SNAP-LE			
VI-2-2-16	ガスタービン発 電機建物の地震 応答計算書	資料番号	VI-5-4	VI-5-23	VI-5-24			
		コード名	SHAKE	ADMITHF	NUPP4			
VI-2-2-18	取水槽の地震応 答計算書	資料番号	VI-5-5	VI-5-30				
		コード名	TDAPIII	micro SHAKE/3D				

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（3/15）

目録番号	目録名称	適用コード名						
		資料番号	VI-5-29	VI-5-46				
VI-2-2-20	屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の地震応答計算書	資料番号	VI-5-29	VI-5-46				
		コード名	SLAP	SHAKE				
VI-2-2-30	第1ベントフィルタ格納槽の地震応答計算書	資料番号	VI-5-5	VI-5-30	VI-5-47			
		コード名	TDAPIII	micro SHAKE/3D	SHAKE			
VI-2-2-32	低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽の地震応答計算書	資料番号	VI-5-5	VI-5-30	VI-5-47			
		コード名	TDAPIII	micro SHAKE/3D	SHAKE			
VI-2-2-37	屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）の地震応答計算書	資料番号	VI-5-5	VI-5-30	VI-5-47			
		コード名	TDAPIII	micro SHAKE/3D	SHAKE			
VI-2-3-2-1	燃料集合体の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-31	VI-5-32	VI-5-33	VI-5-37	VI-5-48	
		コード名	ANSYS	FURST	BSPAN2	PRIME	CARO	
VI-2-3-2-2-3	シュラウドサポートの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-34					
		コード名	ASHSD2-B					
VI-2-3-3-1-2	原子炉圧力容器の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-34					
		コード名	ASHSD2-B					
VI-2-3-3-2-2	原子炉格納容器スタビライザの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-2-3-3-2-4	ジェットポンプ計測配管貫通部シールの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-16					
		コード名	ABAQUS					
VI-2-3-3-3-4	シュラウドヘッドの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-16					
		コード名	ABAQUS					
VI-2-3-3-3-11	原子炉中性子計装案内管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-2-4-2-2	使用済燃料貯蔵ラックの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-36					
		コード名	SAP-IV					
VI-2-4-3-1-1	燃料プール冷却系熱交換器の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-38					
		コード名	Simcenter Nastran					

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（4/15）

目録番号	目録名称	適用コード名						
		資料番号	コード名					
VI-2-4-3-1-3	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-2-4-3-2-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-2-5-2-1-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-2-5-3-1-2	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-2-5-3-2-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-2-5-4-1-1	残留熱除去系熱交換器の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-38					
		コード名	Simcenter Nastran					
VI-2-5-4-1-2	残留熱除去ポンプの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-2-5-4-1-3	残留熱除去系ストレーナの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-2-5-4-1-4	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-2-5-4-1-5	ストレーナ部テーパーの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-2-5-4-1-6	残留熱除去系ストレーナ取付部コネクタの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-2-5-4-1-7	残留熱除去系ストレーナ取付部サポートの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-2-5-5-1-1	高圧炉心スプレイポンプの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（5/15）

目録番号	目録名称	適用コード名						
		資料番号	VI-5-15					
VI-2-5-5-1-3	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-2-5-5-2-1	低圧炉心スプレイポンプの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-2-5-5-2-3	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-2-5-5-3-2	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-2-5-5-4-1	原子炉隔離時冷却系ストレナの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-2-5-5-5-2	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-2-5-6-1-3	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-2-5-6-1-4	ストレナ部テーパーの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-2-5-7-1-1	原子炉補機冷却系熱交換器の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-38					
		コード名	Simcenter Nastran					
VI-2-5-7-1-3	原子炉補機海水ポンプの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-2-5-7-1-6	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-2-5-7-2-1	高圧炉心スプレイ補機冷却系熱交換器の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-38					
		コード名	Simcenter Nastran					
VI-2-5-7-2-3	高圧炉心スプレイ補機海水ポンプの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（6/15）

目録番号	目録名称	適用コード名						
		資料番号	コード名					
VI-2-5-7-2-6	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-2-5-7-3-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-2-5-8-1-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-2-6-3-2-1-1	水圧制御ユニットの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-36					
		コード名	SAP-IV					
VI-2-6-3-2-1-2	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-2-6-4-1-3	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-2-6-5-1	中性子源領域計装／中間領域計装の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-2-6-5-2	出力領域計装の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-38					
		コード名	Simcenter Nastran					
VI-2-6-6-1-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-2-7-2-1-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-2-7-3-1-1	管の耐震性に関する説明書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-2-8-3-2-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-2-8-3-3-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（7/15）

目録番号	目録名称	適用コード名						
		資料番号	VI-5-6					
VI-2-9-2-2	サブレスジョン チェンバの耐震 性についての計 算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-2-9-2-3	ベント管の耐震 性についての計 算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-2-9-2-4	サブレスジョン チェンバサポ ートの耐震性につ いての計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-2-9-2-11	配管貫通部の耐 震性についての 計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-2-9-2-12	電気配線貫通部 の耐震性につい ての計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-2-9-4-2	ダウンカマの耐 震性についての 計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-2-9-4-3	ベントヘッドの 耐震性につい ての計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI -2-9-4-4-1-1	ドライウェルス プレイ管の耐震 性についての計 算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI -2-9-4-4-1-2	サブレスジョン チェンバスプレ イ管の耐震性につ いての計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI -2-9-4-4-2-1	管の耐震性につ いての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI -2-9-4-4-3-1	管の耐震性につ いての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI -2-9-4-4-4-2	管の耐震性につ いての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI -2-9-4-5-1-1	管の耐震性につ いての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（8/15）

目録番号	目録名称	適用コード名						
		資料番号	VI-5-41					
VI -2-9-4-5-1-4	ブローアウトパネル閉止装置の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-41					
		コード名	NX NASTRAN					
VI -2-9-4-5-2-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI -2-9-4-5-4-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI -2-9-4-6-1-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI -2-9-4-7-1-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI -2-10-1-2-1-4	非常用ディーゼル発電設備ディーゼル燃料デイトランクの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-16					
		コード名	ABAQUS					
VI -2-10-1-2-1-7	非常用ディーゼル発電設備Aーディーゼル燃料貯蔵タンクの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-16					
		コード名	ABAQUS					
VI -2-10-1-2-1-8	非常用ディーゼル発電設備Bーディーゼル燃料貯蔵タンクの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-36					
		コード名	SAP-IV					
VI -2-10-1-2-1-9	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI -2-10-1-2-2-4	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料デイトランクの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-16					
		コード名	ABAQUS					
VI -2-10-1-2-2-6	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料貯蔵タンクの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-16					
		コード名	ABAQUS					
VI -2-10-1-2-2-7	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（9/15）

目録番号	目録名称	適用コード名						
		資料番号	コード名					
VI -2-10-1-2-3-1	ガスタービン発電機ガスタービン機関及び発電機の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-26					
		コード名	MSC NASTRAN					
VI -2-10-1-2-3-2	ガスタービン発電機励磁装置及び保護継電装置の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-26					
		コード名	MSC NASTRAN					
VI -2-10-1-2-3-6	管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI -2-10-1-4-26	緊急時対策所空気浄化装置接続盤の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-41					
		コード名	NX NASTRAN					
VI -2-10-1-4-27	緊急時対策所空気浄化装置操作盤の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-41					
		コード名	NX NASTRAN					
VI-2-10-2-11	隔離弁、機器・配管の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-2-11-2-1-1	1号機原子炉建物の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-4	VI-5-22	VI-5-25			
		コード名	SHAKE	Super FLUSH/2D	NAPISOS			
VI-2-11-2-1-2	1号機タービン建物の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-4	VI-5-23	VI-5-24			
		コード名	SHAKE	ADMITHF	NUPP4			
VI-2-11-2-1-3	1号機廃棄物処理建物の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-4	VI-5-23	VI-5-24			
		コード名	SHAKE	ADMITHF	NUPP4			
VI-2-11-2-1-4	サイトバンカ建物の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-23	VI-5-24				
		コード名	ADMITHF	NUPP4				
VI-2-11-2-1-5	サイトバンカ建物（増築部）の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-24					
		コード名	NUPP4					
VI-2-11-2-1-6	排気筒モニタ室の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-24					
		コード名	NUPP4					
VI-2-11-2-2	1号機排気筒の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-4	VI-5-23	VI-5-39			
		コード名	SHAKE	ADMITHF	fappase			

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（10/15）

目録番号	目録名称	適用コード名						
		資料番号	コード名					
VI -2-11-2-6-1	燃料移送ポンプ エリア竜巻防護 対策設備の耐震 性についての計 算書	資料番号	VI-5-24					
		コード名	NUPP4					
VI -2-11-2-6-2	建物開口部竜巻 防護対策設備の 耐震性について の計算書	資料番号	VI-5-27					
		コード名	KANSAS2					
VI -2-11-2-7-1	原子炉建物天井 クレーンの耐震 性についての計 算書	資料番号	VI-5-16					
		コード名	ABAQUS					
VI -2-11-2-7-2	燃料取替機の耐 震性についての 計算書	資料番号	VI-5-16					
		コード名	ABAQUS					
VI -2-11-2-7-3	チャンネル着脱 装置の耐震性に ついての計算書	資料番号	VI-5-36					
		コード名	SAP-IV					
VI -2-11-2-7-5	制御棒貯蔵ハン ガの耐震性につ いての計算書	資料番号	VI-5-36					
		コード名	SAP-IV					
VI -2-11-2-7-7	原子炉浄化系補 助熱交換器の耐 震性についての 計算書	資料番号	VI-5-36					
		コード名	SAP-IV					
VI -2-11-2-7-14	取水槽ガントリ クレーンの耐震 性についての計 算書	資料番号	VI-5-16					
		コード名	ABAQUS					
VI-2-11-2-8	管の耐震性につ いての計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-2-11-2-10	耐火障壁の耐震 性についての計 算書	資料番号	VI-5-41					
		コード名	NX NASTRAN					
VI-2-別添 1-3-2	選択弁の耐震性 についての計算 書	資料番号	VI-5-42					
		コード名	MSAP					
VI-2-別添 1-3-4	配管の耐震性に ついての計算書	資料番号	VI-5-42					
		コード名	MSAP					
VI-2-別添 3-2	可搬型重大事故 等対処設備の保 管エリア等にお ける入力地震動	資料番号	VI-5-5	VI-5-47	VI-5-49			
		コード名	TDAPIII	SHAKE	mk_FRS			

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（11/15）

目録番号	目録名称	適用コード名						
VI-2-別添 3-4-1	逃がし安全弁用窒素ガスボンベラックの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-16					
		コード名	ABAQUS					
VI-2-別添 3-4-2	中央制御室待避室正圧化装置空気ボンベラックの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-16					
		コード名	ABAQUS					
VI-2-別添 3-4-3	緊急時対策所換気空調系空気ボンベ加圧設備空気ボンベカードルの耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-16					
		コード名	ABAQUS					
VI-2-別添 3-5	可搬型重大事故等対処設備のうち可搬型空気浄化設備の耐震性についての計算書	資料番号	VI-5-26					
		コード名	MSC NASTRAN					
VI -3-3-2-2-1-4-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI -3-3-2-2-2-3-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI -3-3-3-1-1-1-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI -3-3-3-2-1-2-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI -3-3-3-2-2-1-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-3-3-3-3-1-3	残留熱除去系ストレーナの強度計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-3-3-3-3-1-4	ストレーナ部ティーの応力計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-3-3-3-3-1-5	残留熱除去系ストレーナ取付部コネクタの強度計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（12/15）

目録番号	目録名称	適用コード名						
VI-3-3-3-3-1-6	残留熱除去系ストレーナ取付部サポートの強度計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-3-3-3-1-8-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-3-3-4-1-6-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-3-3-4-2-6-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-3-3-4-3-3-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-3-3-4-4-1	原子炉隔離時冷却系ストレーナの強度計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-3-3-4-4-2	ストレーナ部テーパーの応力計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-3-3-4-5-2-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-3-3-5-1-3-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-3-3-6-1-6-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-3-3-6-2-6-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-3-3-6-3-5-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-3-3-7-1-1-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（13/15）

目録番号	目録名称	適用コード名						
		資料番号	VI-5-15					
VI-3-3-4-2-1-3-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-3-3-4-3-1-3-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-3-3-4-4-1-2-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-3-3-6-1-2-2-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-3-3-6-1-3-2-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-3-3-7-1-3	サプレッション チェンバの強度 計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-3-3-7-1-5	ベント管の強度 計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-3-3-7-1-17	配管貫通部の強 度計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-3-3-7-1-20	電気配線貫通部 の強度計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-3-3-7-2-1-1	ベントヘッド及 びダウンカマの 強度計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-3-3-7-2-2-1-1	ドライウェルス プレイ管の強度 計算書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI-3-3-7-2-2-1-3	サプレッション チェンバプレイ 管の強度計算 書	資料番号	VI-5-6					
		コード名	NASTRAN					
VI -3-3-7-2-2-2-1-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（14/15）

目録番号	目録名称	適用コード名						
		資料番号	VI-5-15					
VI -3-3-7-2-2-3-1-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI -3-3-7-2-2-4-3-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-3-3-7-3-1-1-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-3-3-7-3-2-1-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-3-3-7-4-1-2-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-3-3-7-5-1-2-2	管の応力計算書	資料番号	VI-5-15					
		コード名	HISAP					
VI-3-別添 1-5	竜巻防護鋼板の 強度計算書	資料番号	VI-5-43					
		コード名	Virtual Performance Solution					
VI-3-別添 1-6	架構の強度計算 書	資料番号	VI-5-43					
		コード名	Virtual Performance Solution					
VI-3-別添 1-7	竜巻より防護す べき施設を内包 する施設の強度 計算書	資料番号	VI-5-24	VI-5-44				
		コード名	NUPP4	LS-DYNA				
VI-3-別添 1-11	排気筒の強度計 算書	資料番号	VI-5-43					
		コード名	Virtual Performance Solution					
VI-3-別添 1-14-4	1号機排気筒の 強度計算書	資料番号	VI-5-43					
		コード名	Virtual Performance Solution					
VI-3-別添 2-4	原子炉建物の強 度計算書	資料番号	VI-5-24	VI-5-39				
		コード名	NUPP4	fappase				
VI-3-別添 2-5	タービン建物の 強度計算書	資料番号	VI-5-24	VI-5-45				
		コード名	NUPP4	SD				

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（15/15）

目録番号	目録名称	適用コード名						
		資料番号	VI-5-24					
VI-3-別添 2-6	制御室建物の強度計算書	資料番号	VI-5-24					
		コード名	NUPP4					
VI-3-別添 2-7	廃棄物処理建物の強度計算書	資料番号	VI-5-24					
		コード名	NUPP4					
VI-3-別添 2-8	排気筒モニタ室の強度計算書	資料番号	VI-5-24	VI-5-27				
		コード名	NUPP4	KANSAS2				
VI-3-別添 6-1	炉心支持構造物の強度計算書	資料番号	VI-5-34	VI-5-35				
		コード名	ASHSD2-B	TACF				
VI-4-2-3	屋外配管ダクト（ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）の生体遮蔽装置の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書	資料番号	VI-5-11					
		コード名	QAD-CGGP2R					

VI-5-1 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ L i F a

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
2.1 LiFa Ver. 210	3
3. 解析手法	4
3.1 一般事項	4
3.2 解析コードの特徴	4
3.3 解析手法	5
3.4 解析フローチャート	8
3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)	9
3.5.1 検証	9
3.5.2 妥当性確認	11
3.5.3 評価結果	13

1. はじめに

本資料は、VI-1-1-7-別添1「可搬型重大事故等対処設備の保管場所及びアクセスルート」において使用した計算機プログラム（解析コード）LiFaについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-1-1-7-別添1	可搬型重大事故等対処設備の保管場所及びアクセスルート	Ver. 210

2. 解析コードの概要

2.1 LiFa Ver. 210

コード名	LiFa
項目	
使用目的	1次元地震応答解析による入力地震動の算定
開発機関	株式会社マイダスアイティ
開発時期	2013年
使用したバージョン	Ver. 210
コードの概要	<p>LiFa（以下「本解析コード」という。）は、米国カリフォルニア大学から発表されたSHAKEを基本に開発されたもので、1次元重複反射理論に基づく地盤の伝達関数や時刻歴波形を算出するプログラムである。</p> <p>地盤の非線形性は、ひずみ依存特性を用いて等価線形法により考慮することができ、また、鉛直動はS波速度V_sをP波速度V_pとして定義することで、各層における加速度、応力度、ひずみ等の伝達関数、応答波形等を求めることが可能である。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証(Verification)】 本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードによる弾性地盤の増幅特性の解析結果が公開文献*の理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、動作環境を満足する計算機にインストールして使用していることを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・汎用コードである「microSHAKE/3D for Windows Ver.2.3.1（発売元 地震工学研究所）」と本解析コードによる解析解を比較した結果、双方の解がおおむね一致していることを確認している。 ・本工事計画における構造に対して行う地震応答解析の使用目的に対し、使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。 <p>注記*：最新耐震構造解析 柴田明德著 231頁, 232頁 森北出版株式会社 第3版</p>

3. 解析手法

3.1 一般事項

本資料は、解析コード LiFa Ver. 210（以下「本解析コード」という。）の概要である。

本解析コードは、重複反射理論に基づく地震応答解析を行うことが可能であり、1次元地震応答解析（震度算定）に使用している。

3.2 解析コードの特徴

本解析コードにおける地盤の非線形性は、ひずみ依存特性を用いて等価線形法により考慮することができる。

本解析コードの主な特徴として、①～③を挙げることができる。

- ① 1次元重複反射理論に基づくプログラムである。
- ② 地盤の非線形性は、ひずみ依存特性を用いて等価線形法により考慮できる。
- ③ 鉛直動は、S波速度 V_s をP波速度 V_p として定義することで対応が可能である。

3.3 解析手法

1次元等価線形解析は線形粘弾性領域を通るせん断波の鉛直伝播による地盤応答を求める解析であり、解析地盤は図3-1のように水平方向に無限の多数の地層と半無限の領域である底層に構成される。

それぞれの地層は均一であり、等方性材料の特性を持つと仮定する。解析モデルで振動はモデル地盤を鉛直方向に透過及び反射させて伝達されるせん断波により発生し、変位は水平方向のみ発生する。したがって、全ての地層で波動方程式である式(3.1)を満足しなければならない。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2\xi G \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad (3.1)$$

- u : 水平変位
- ρ : 質量密度
- G : せん断弾性係数
- ξ : 履歴減衰係数 (hysteretic damping ratio)

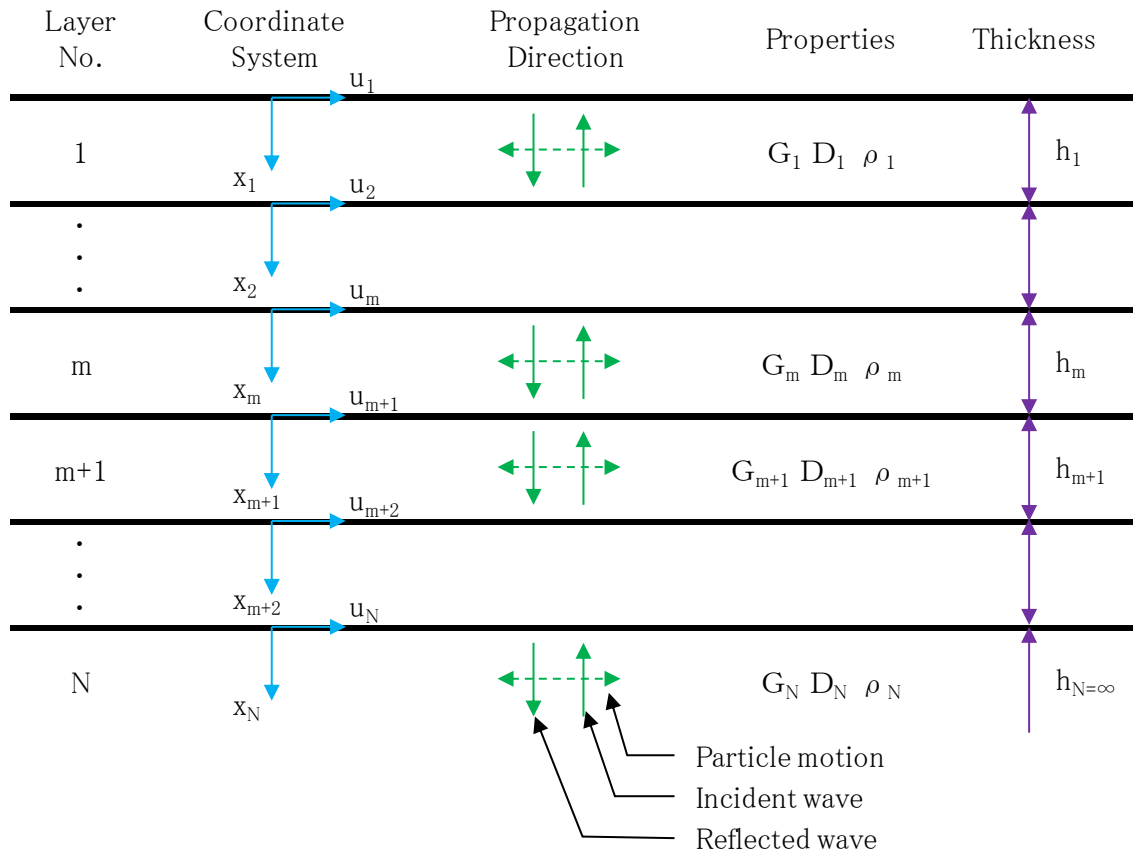


図3-1 1次元地盤モデル

変位関数を式(3.2)のような関数に示し、式(3.1)を振動数領域に変換すると式(3.3)のような支配方程式になり、応力-変位関係式は式(3.4)のようになる。

$$u(x, t) = u(x, \omega)e^{i\omega t} \quad (3.2)$$

$$G^* \frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x, \omega) - \rho\omega^2 u(x, \omega) = 0 \quad (3.3)$$

$$\tau(x, \omega) = G^* \frac{\partial}{\partial x} u(x, \omega) \quad (3.4)$$

$\tau(x, \omega)$: 振動数領域でのせん断応力

G^* : 複素せん断弾性係数

上の複素せん断弾性係数はUdakaが提案した次の式を使用する。

Udaka, Takekazu. (1975). Analysis of Response of Large Embankments to traveling Base Motions, Department of Civil and Environmental Engineering. Berkeley: University of California, p346

$$G^* = G(1 - 2\xi^2 + i2\xi\sqrt{1 - \xi^2}) \quad (3.5)$$

一般的に1次元波動伝達方程式の解を求めるために自由場地盤モデルを図3-1のように示すことができる。層境界の一連番号を地表面から与えて地表面からm番目層の応答を u_m に表現すると、この応答はm番目層の上段から深さ x_m の関数で次のように表せる。

$$u_m(x_m, \omega) = A_m(\omega)e^{ik_m^*x_m} + B_m(\omega)e^{-ik_m^*x_m} \quad (3.6)$$

$$\tau_m(x_m, \omega) = ik_m^* G_m^* (A_m(\omega)e^{ik_m^*x_m} - B_m(\omega)e^{-ik_m^*x_m}) \quad (3.7)$$

k_m^* : m番目層の波数(wave number)

A_m : m番目層の上向に伝達される弾性波の層応答係数

B_m : m番目層の下向に伝達される弾性波の層応答係数

隣接する層境界では次のような適合条件と力の平衡条件を満足しなければならない。

$$\left\{ \begin{array}{l} u_m(x_m = h_m) = u_{m+1}(x_{m+1} = 0) \\ \tau_m(x_m = h_m) = \tau_{m+1}(x_{m+1} = 0) \end{array} \right\} m = 1, 2, \dots (N - 1) \quad (3.8)$$

式(3.6)及び式(3.7)を式(3.8)に代入すると係数間の関係式を次のように表せる。

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{m+1} + B_{m+1} = A_m e^{ik_m^* h_m} + B_m e^{-ik_m^* h_m} \\ A_{m+1} - B_{m+1} = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} (A_m e^{ik_m^* h_m} - B_m e^{-ik_m^* h_m}) \end{array} \right\}, m = 1, 2, \dots (N-1) \quad (3.9)$$

これを整理して隣接する地盤層の応答係数間の関係を誘導すると次の式(3.10)のように表せる。

$$\begin{aligned} A_{m+1} &= \frac{1}{2} A_m (1 + \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} B_m (1 - \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \\ B_{m+1} &= \frac{1}{2} A_m (1 - \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} B_m (1 + \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \end{aligned} \quad (3.10)$$

h_m : m 番目層の厚さ

α_m^* : 隣接する層間の動的剛性比

ここで、隣接する層間の動的剛性比は次のように示す。

$$\alpha_m^* = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} \quad (3.11)$$

地表面ではせん断応力が常に0であるので式(3.7)から $A_1 = B_1$ であることが分かる。したがって、 m 番目層の応答係数は1番目層から m 番目層まで式(3.10)より求めることができる。

$$\begin{aligned} A_m(\omega) &= a_m(\omega) A_1(\omega) \\ B_m(\omega) &= b_m(\omega) B_1(\omega) \end{aligned} \quad (3.12)$$

ここで、 $a_1 = b_1 = 1$ であることが分かる。層境界 i と層境界 j 間の伝達係数 $H_{ij}(\omega)$ は下式のように求めることができる。

$$H_{ij}(\omega) = \frac{u_i(\omega)}{u_j(\omega)} = \frac{a_i(\omega) + b_i(\omega)}{a_j(\omega) + b_j(\omega)} \quad (3.13)$$

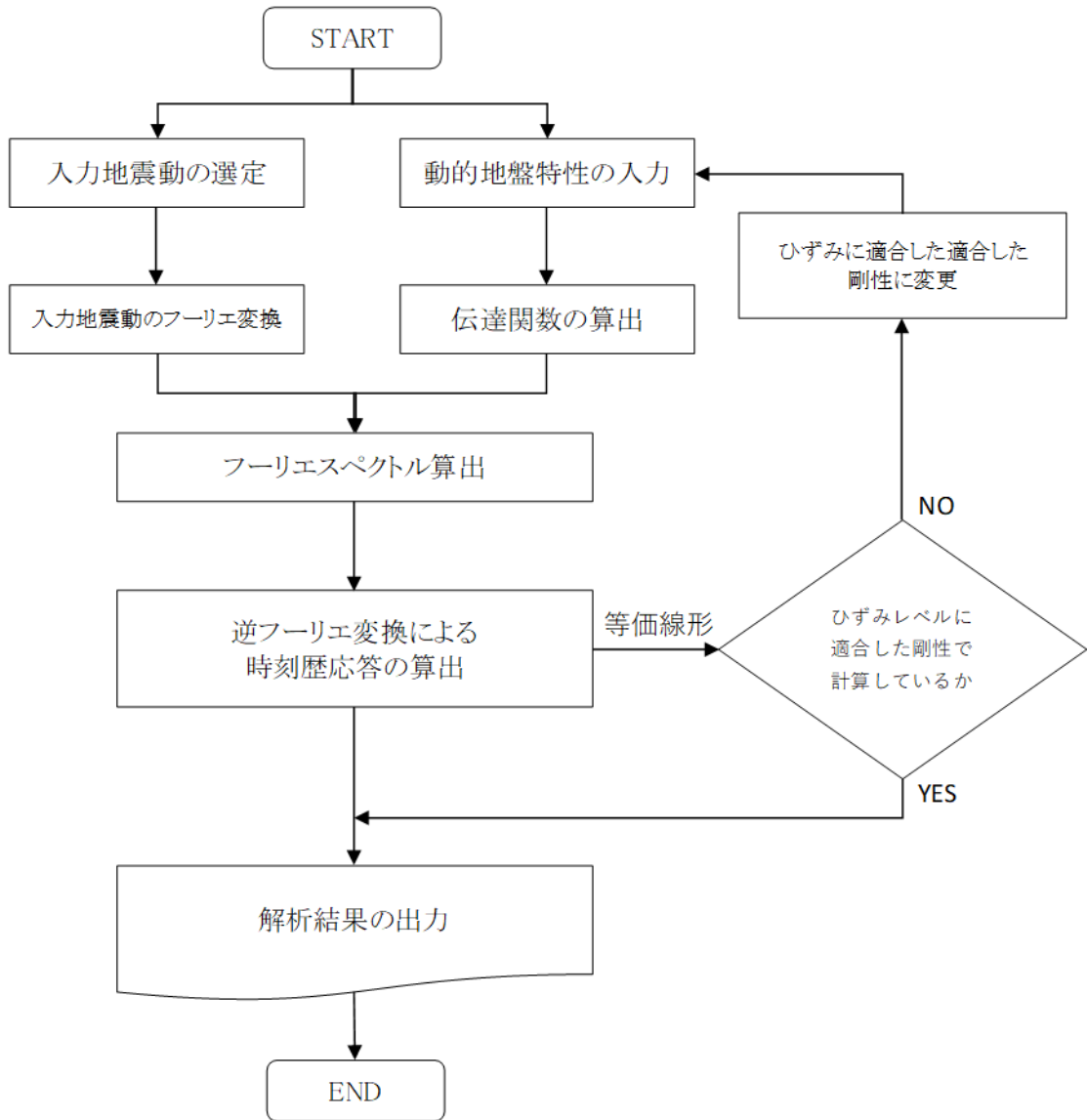
伝達関数 $H_{ij}(\omega)$ が決まって層境界 j で応答 $u_j(\omega)$ が与えられると、層境界 i から応答 $u_i(\omega)$ は次のように求められる。

$$u_i(\omega) = H_{ij}(\omega) u_j(\omega) \quad (3.14)$$

さらに、時間領域での応答はFFT (fast Fourier transform) 方法を利用して時間領域に逆変換して求められる。

3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図3-2に示す。



注： 入力データとして単位体積重量，せん断弾性係数及び等価線形法に用いる $G-\gamma$ 関係を選定する。

図3-2 解析フローチャート

3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)

本解析コードを用いるにあたり，検証として理論解との比較を実施した。妥当性確認として類似プログラムとの比較を実施した。その詳細な内容については下記のとおりとする。

3.5.1 検証

(1) 検証方法

2層の弾性モデル地盤を対象として，本解析コードによる解析解と理論解*による結果が一致することを確認する。

注記*：最新耐震構造解析 柴田明德著 231頁，232頁 森北出版株式会社 第3版【参考資料】参照

(2) 解析条件

解析条件及び解析モデルを図3-3に示す。地盤減衰は，履歴減衰として0%と5%の2種とする。

(3) 検証結果

本解析コードによる加速度伝達関数を，理論解による加速度伝達関数と比較して図3-4に示す。本解析コードと理論解の解析結果は同一条件，同一手法による結果であり，両者はおおむね一致していることから，本解析コードが正しく評価していることが確認できる。

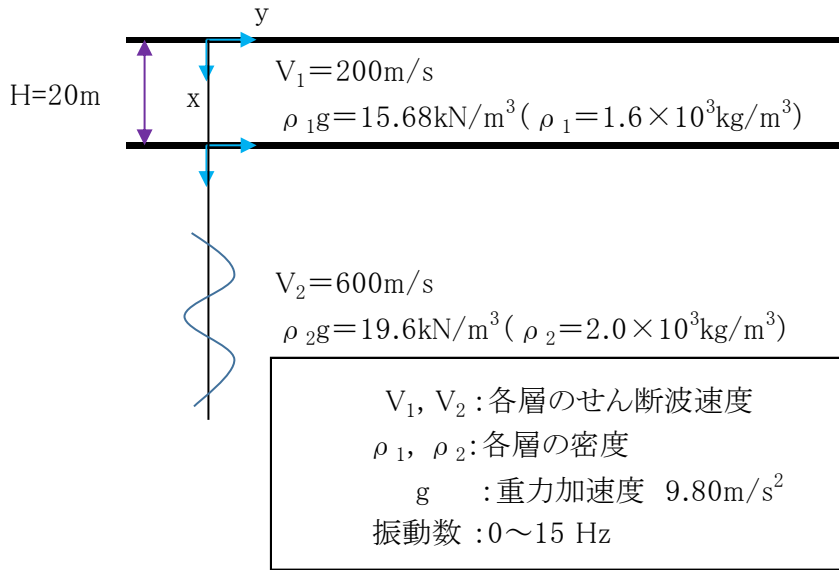


図3-3 解析条件及び解析モデル

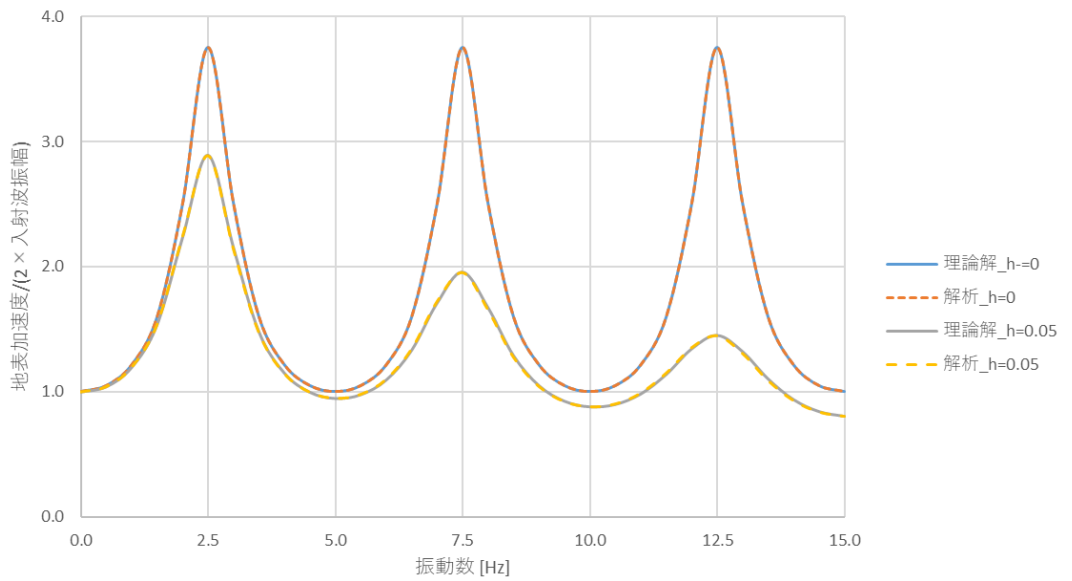


図3-4 本解析コードと理論解による加速度伝達関数の比較

3.5.2 妥当性確認

(1) 妥当性確認方法

水平成層の弾性モデルを対象として、本解析コードによる解析解と類似解析コードであるmicroSHAKE/3D*による結果が一致することを確認する。

注記*：microSHAKE/3D for Windows Ver.2.3.1（発売元 地震工学研究所）

(2) 解析条件

解析の諸条件については、地盤モデル諸元を表3-1、入力地震動を図3-5に示す。

(3) 妥当性確認結果

本解析コードとmicroSHAKE/3Dによる解析結果のうち、地盤の最大加速度分布を図3-6、相対変位分布を図3-7、せん断ひずみ分布を図3-8、せん断応力分布を図3-9に示す。

本解析コードとmicroSHAKE/3Dの解析結果は同一条件、同一手法による結果であり、両者はおおむね一致していることから、本解析コードが正しく評価していることが確認できる。

表3-1 地盤モデル諸元

層No.	上端EL (m)	下端EL (m)	層厚み (m)	Vs (m/s)	単位体積重量 (kN/m ³)	動ポアソン比 (-)	減衰定数 (-)
1	50	30	20	900	23	0.388	0.03
2	30	11	19	900	23	0.388	0.03
3	11	-16	27	1600	24.5	0.377	0.03
4	-16	-75	59	1950	24.5	0.344	0.03
5	-75	-215	140	2350	27.9	0.355	0.03
6	-215	-315	100	2350	27.9	0.355	0.03

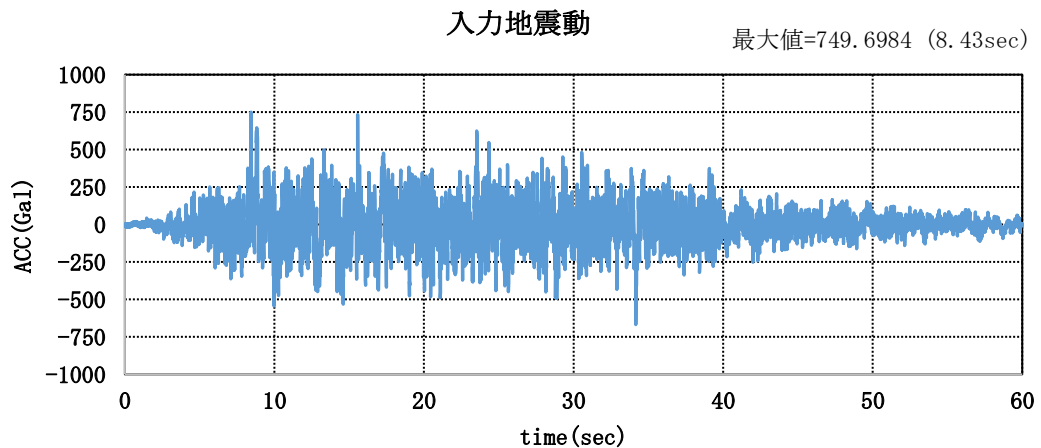


図3-5 入力地震動

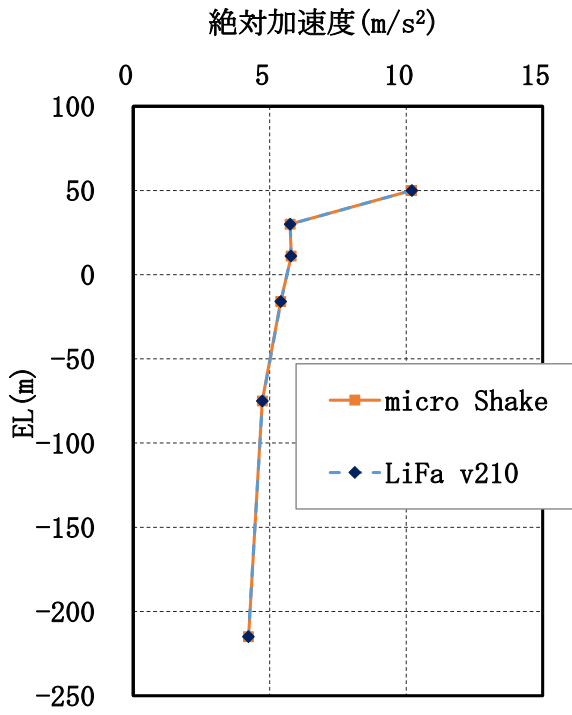


図3-6 最大加速度分布

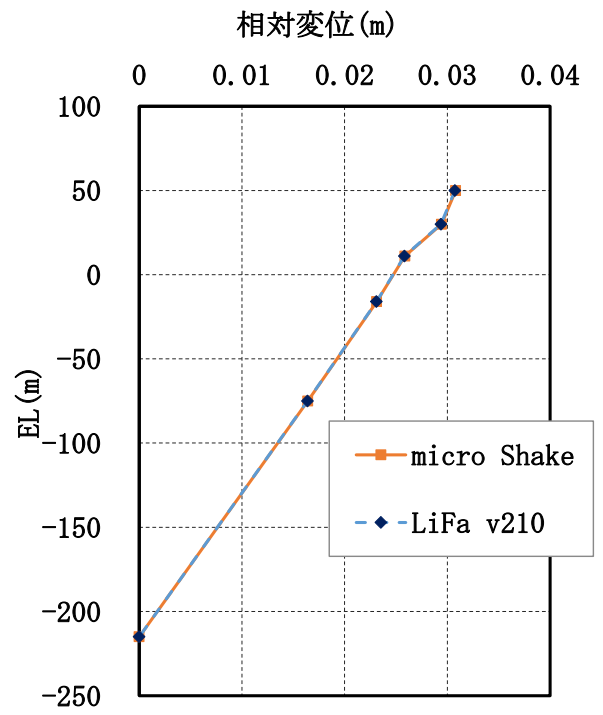


図3-7 相対変位分布

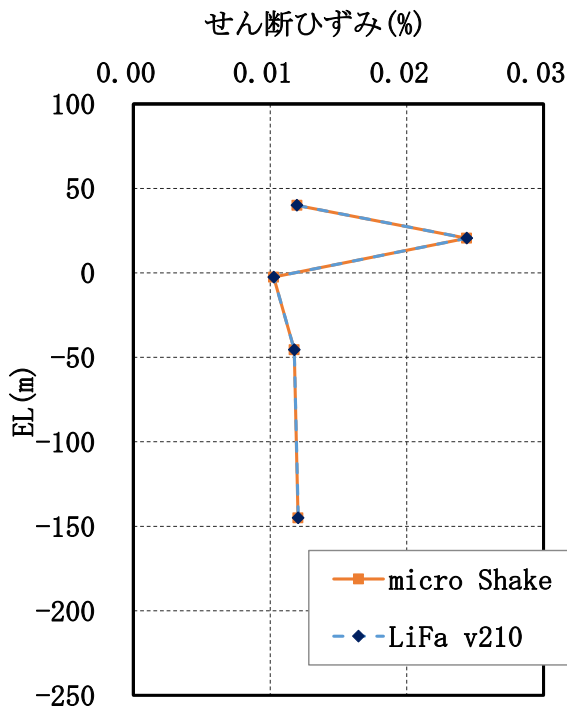


図3-8 せん断ひずみ分布

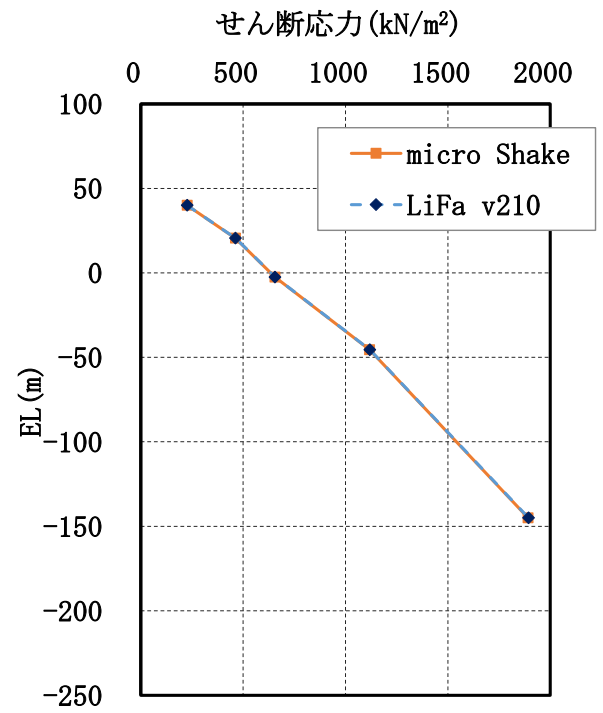


図3-9 せん断応力分布

3.5.3 評価結果

本解析コードの解析結果と理論解を比較し，理論解と解析解が一致していることを確認した。また，類似解析コードであるmicroSHAKE/3Dと比較し，解析解が一致していることを確認した。したがって，本解析に本解析コードを使用することは妥当である。

VI-5-2 計算機プログラム（解析コード）の概要・TONBOS

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、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」において使用した計算機プログラム（解析コード）TONBOSについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
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	Ver.3

2. 解析コードの概要

項目	コード名
項目	TONBOS
使用目的	竜巻により発生する飛来物の速度及び飛散距離等の評価
開発機関	一般財団法人 電力中央研究所
開発時期	2014 年
使用したバージョン	Ver. 3
コードの概要	<p>本解析コードは、一般財団法人電力中央研究所にて開発・保守されているプログラムである。</p> <p>空気中の物体が受ける抗力、揚力による運動を計算することで、竜巻による風速場の中での飛来物の軌跡を解析することができる解析コードであり、飛来物の速度、飛散距離及び飛散高さ等の算出が実施できる。</p> <p>仮定する風速場は、地面付近の風速場をよく表現できているフジタモデル DBT-77 (DBT:Design Basis Tornado) とする。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>TONBOS は、竜巻により発生する飛来物の速度及び飛散距離等の評価に使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・自動車飛散解析において、フジタスケールの各スケールに対応する被災状況と概ね合致した結果が得られた。 ・パイプ飛散解析において、Grand Gulf 原子力発電所への竜巻襲来事例と概ね合致した結果が得られた。 ・自動車やトラックの飛散解析において、佐呂間竜巻での車両飛散事例と概ね一致した結果を得られた。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、竜巻により発生する飛来物の速度、飛散距離及び飛散高さ等の評価を目的に開発されたコードであり、使用目的が合致している。 ・今回の評価における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

VI-5-3 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ TowerCableResp

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
2.1 TowerCableResp Ver. 1.311c	3

1. はじめに

本資料は、VI-1-1-7-別添1 可搬型重大事故等対処設備の保管場所及びアクセスルートにおいて使用した計算機プログラム(解析コード) TowerCableRespについて説明するものである。本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-1-1-7-別添1	可搬型重大事故等対処設備の保管場所及びアクセスルート	Ver. 1.311c

2. 解析コードの概要

2.1 TowerCableResp Ver. 1.311c

項目	コード名 TowerCableResp
使用目的	送電鉄塔の固有値解析及び時刻歴応答解析
開発機関	日本鉄塔工業株式会社
開発時期	2006年
使用したバージョン	Ver. 1.311c
コードの概要	<p>TowerCableRespは日本鉄塔工業株式会社が開発している、鉄塔一架渉線連成系の有限要素法解析コードである。</p> <p>複数の有限要素モデルファイル形式や同社の設計データファイルを読み込み鉄塔構造をモデル化し、また架渉線入力情報を基に自動的に鉄塔一架渉線連成系をモデル化する。</p> <p>静的釣合解析，固有値解析，周波数応答関数計算，周波数応答解析，時刻歴応答解析が可能であり，また架渉線の幾何剛性を考慮した線形解析及び幾何学的非線形解析が可能である。</p> <p>特に風荷重の設定が容易であり，節点間の変動風速の相関を考慮したパワースペクトルや時刻歴風速の設定が可能である。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>TowerCableRespは日本鉄塔工業株式会社が開発しており，鉄塔や架渉線の固有値解析及び時刻歴応答解析に使用している。</p> <p>本解析コードの検証の内容は，次のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> 鉄塔モデルでは，単純トラスモデルによる固有値解析及び調和加振の時刻歴応答解析を行い，理論値の固有周波数及び変位と比較している。理論値と解析値の固有周波数は一致し，本解析コード固有値解析の機能は十分な精度を持つと考えられる。また計算機コードの結果と他の汎用有限要素法解析コードRESP-T（株式会社構造計画研究所）の結果とも良く一致している。 架渉線モデルでは，自重荷重による固有値解析と分布荷重を斜め方向に載荷した大変形解析を行い，理論値及びRESP-Tの変位と固有周波数と比較している。高次モードほど理論値との誤差率は大きくなっているが，鉄塔の固有周波数となる約1Hzの4次モードで誤差率は約0.7%でありほぼ一致している。またRESP-Tとは同じ解析値となっており，解析コードの有限要素法の計算手法は正しいものと考えられる。 実証の例として，複数ケースの台風観測にて，観測値を基にした風速場による動的風応答解析の最大応答変位と，観測から得られた塔頂最大変位とが概ね一致している。 開発環境から提示された動作環境を満足する計算機にインストールして用いている。

<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードを鉄塔や架渉線の固有値解析及び時刻歴応答解析に使用することは、次のとおり妥当である。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・送電鉄塔を模擬したトラスモデル、架渉線のカテナリー形状モデル及び鉄塔・架渉線の連成系モデルを用いたモデルにて検証を行い、解析コード使用時にはこの検証に用いた要素を用いてモデルを設定している。また使用目的である固有値解析と時刻歴応答解析が、検証内容に含まれることから妥当である。 ・本コードの適用制限について、梁要素及び棒要素の形状は剛性算定上の制限は特に無く、また時刻歴応答解析の適切なステップ時間間隔はモデルの固有周波数に依存するが、検証済みのモデルと同じ設定にて使用しているため妥当である。
--	--

VI-5-4 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ S H A K E

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、VI-2-2-2「原子炉建物の地震応答計算書」等において使用した計算機プログラム（解析コード）SHAKEについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-2-2	原子炉建物の地震応答計算書	Ver. 1.5.1, Ver. 1.6.3, Ver. 1.6.4, Ver. 1.6.6, Ver. 1.6.9
VI-2-2-5	制御室建物の地震応答計算書	Ver. 1.5.1, Ver. 1.6.3, Ver. 1.6.4, Ver. 1.6.6, Ver. 1.6.9
VI-2-2-7	タービン建物の地震応答計算書	Ver. 1.5.1, Ver. 1.6.3, Ver. 1.6.4, Ver. 1.6.9, Ver. 1.6.10
VI-2-2-9	廃棄物処理建物の地震応答計算書	Ver. 1.5.1, Ver. 1.6.3, Ver. 1.6.4, Ver. 1.6.9, Ver. 1.6.10
VI-2-2-11	緊急時対策所の地震応答計算書	Ver. 1.6.5, Ver. 1.6.9
VI-2-2-13	排気筒の地震応答計算書	Ver. 1.5.1, Ver. 1.6.3, Ver. 1.6.4, Ver. 1.6.9, Ver. 1.6.10
VI-2-2-16	ガスタービン発電機建物の地震応答計算書	Ver. 1.6.3, Ver. 1.6.4, Ver. 1.6.9
VI-2-11-2-1-1	1号機原子炉建物の耐震性についての計算書	Ver. 1.5.1, Ver. 1.6.9
VI-2-11-2-1-2	1号機タービン建物の耐震性についての計算書	Ver. 1.5.1, Ver. 1.6.2, Ver. 1.6.8, Ver. 1.6.9
VI-2-11-2-1-3	1号機廃棄物処理建物の耐震性についての計算書	Ver. 1.5.1, Ver. 1.6.2, Ver. 1.6.8, Ver. 1.6.9
VI-2-11-2-2	1号機排気筒の耐震性についての計算書	Ver. 1.5.1, Ver. 1.6.2, Ver. 1.6.5, Ver. 1.6.9

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	SHAKE
使用目的	入力地震動の策定
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	1971年
使用したバージョン	Ver. 1.5.1, Ver. 1.6.2, Ver. 1.6.3, Ver. 1.6.4, Ver. 1.6.5, Ver. 1.6.6, Ver. 1.6.8, Ver. 1.6.9, Ver. 1.6.10
コードの概要	<p>SHAKE（以下「本解析コード」という。）は、米国カリフォルニア大学から発表されたSHAKEを基本に開発されたもので、1次元重複反射理論に某づく地盤の伝達関数や時刻歴波形を算出するプログラムである。</p> <p>地盤の非線形性はひずみ依存特性を用いて等価線形化法により考慮することができ、また、鉛直動はS波速度V_sをP波速度V_pとして定義することで、各層における加速度、応力度、ひずみ度等の伝達関数、応答波形等を求めることが可能である。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証(Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードによる弾性地盤の増幅特性の解析結果と公開文献*の理論解を比較し、両者が一致することを確認している。 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用していることを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証の体系と本工事計画で使用する体系が同等であることから、本解析コードの解析結果と公開文献*の理論解の一致をもって、解析機能の妥当性も確認している。 ・本工事計画における弾性地盤の応答評価の用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。 ・本工事計画において使用するバージョンのうちVer. 1.6.9は、他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。 ・本工事計画において使用するバージョンのうちVer. 1.5.1, Ver. 1.6.2, Ver. 1.6.3, Ver. 1.6.4, Ver. 1.6.5, Ver. 1.6.6, Ver. 1.6.8, Ver. 1.6.10は、他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが、バージョンの変更において解析機能に影響のある変更が行われていないことを確認している。

注記*：最新耐震構造解析 柴田明德著 231, 232頁 森北出版株式会社 第3版

VI-5-5 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ T D A P III

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
2.1 TDAPIII Ver. 3.04, Ver. 3.08	3

1. はじめに

本資料は、VI-2-30「第1ベントフィルタ格納槽の地震応答計算書」等において使用した計算機プログラム（解析コード）TDAPⅢについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-2-30	第1 ベントフィルタ格納槽の地震応答計算書	Ver. 3.04
VI-2-2-32	低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽の地震応答計算書	Ver. 3.04
VI-2-2-37	屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）の地震応答計算書	Ver. 3.04
VI-2-2-18	取水槽の地震応答計算書	Ver. 3.08
VI-2-別添3-2	可搬型重大事故等対処設備の保管エリア等における入力地震動	Ver. 3.04

2. 解析コードの概要

2.1 TDAPⅢ Ver. 3.04, Ver. 3.08

項目	コード名
項目	TDAPⅢ
使用目的	2次元有限要素法による地震応答解析
開発機関	大成建設株式会社 株式会社アーク情報システム
開発時期	1994年
使用したバージョン	Ver. 3.04, Ver. 3.08
コードの概要	<p>TDAPⅢ（以下「本解析コード」）は、2次元及び3次元有限要素解析の汎用プログラムである。</p> <p>主として、地盤～構造物連成系の地震応答解析を行うものである。</p> <p>また、土木・建築分野に特化した要素群、材料非線形モデルを数多くサポートしており、日本国内では、建設部門を中心として、官公庁、大学、民間問わず、多くの利用実績がある。</p> <p>本解析の主な特徴は、以下のとおりである。</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 2次元及び3次元有限要素プログラムである。 ② 地盤～構造物連成系モデルの相互作用解析が可能である。 ③ 線形要素、平面要素、立体要素等を用いることができる。 ④ 静的解析を引き継いだ動的解析を行うことができる。 ⑤ 地盤及び構造物の非線形性を考慮できる。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証(Verification)】 本解析コードの検証内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・橋梁、橋脚、地盤～構造物連成、地中構造物等をはじめとする多数の解析において本解析コードが使用されており、十分な使用実績があるため、信頼性があると判断できる。 ・関西電力株式会社高浜発電所第3号機において、海水ポンプ室、海水管トレンチ、海水取水トンネル、燃料油貯油そう基礎の2次元有限要素法解析による地震応答解析に本解析コード(Ver. 3.05)が使用された実績がある。 ・本工事計画において使用するバージョンは、高浜発電所第3号機の既工事計画において使用されているものと異なるが、バージョン変更において解析機能に影響のある変更が行われていないことを確認している。 ・本工事計画における構造に対して行う地震応答解析の使用目的に対し、使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

VI-5-6 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ N A S T R A N

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
2.1 MSC NASTRAN Ver. 2013	3
2.2 MSC NASTRAN Ver. 2005	4
2.3 MSC NASTRAN Ver. 2019FP1	5
2.4 MSC NASTRAN Ver. 2006r1	6
2.5 MSC NASTRAN Ver. 2018. 2. 1	7

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）MSC NASTRAN について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

	使用添付書類	バージョン
VI-1-2-1	原子炉本体の基礎に関する説明書	Ver. 2013
VI-2-3-3-2-2	原子炉格納容器スタビライザの耐震性についての計算書	Ver. 2005
VI-2-3-3-3-11	原子炉中性子計装案内管の耐震性についての計算書	Ver. 2019FP1
VI-2-5-4-1-2	残留熱除去ポンプの耐震性についての計算書	Ver. 2006r1
VI-2-5-4-1-3	残留熱除去系ストレーナの耐震性についての計算書	Ver. 2005
		Ver. 2019FP1
VI-2-5-4-1-5	ストレーナ部ティーの耐震性についての計算書	Ver. 2019FP1
VI-2-5-4-1-6	残留熱除去系ストレーナ取付部コネクタの耐震性についての計算書	Ver. 2019FP1
VI-2-5-4-1-7	残留熱除去系ストレーナ取付部サポートの耐震性についての計算書	Ver. 2019FP1
VI-2-5-5-1-1	高圧炉心スプレイポンプの耐震性についての計算書	Ver. 2006r1
		Ver. 2018. 2. 1
VI-2-5-5-2-1	低圧炉心スプレイポンプの耐震性についての計算書	Ver. 2006r1
VI-2-5-5-4-1	原子炉隔離時冷却系ストレーナの耐震性についての計算書	Ver. 2005
VI-2-5-6-1-4	ストレーナ部ティーの耐震性についての計算書	Ver. 2005
VI-2-5-7-1-3	原子炉補機海水ポンプの耐震性についての計算書	Ver. 2018. 2. 1
VI-2-5-7-2-3	高圧炉心スプレイ補機海水ポンプの耐震性についての計算書	Ver. 2018. 2. 1
VI-2-6-5-1	中性子源領域計装／中間領域計装の耐震性についての計算書	Ver. 2005
VI-2-9-2-2	サブプレッションチェンバの耐震性についての計算書	Ver. 2019FP1
VI-2-9-2-3	ベント管の耐震性についての計算書	Ver. 2019FP1
VI-2-9-2-4	サブプレッションチェンバサポートの耐震性についての計算書	Ver. 2019FP1
VI-2-9-2-11	配管貫通部の耐震性についての計算書	Ver. 2005
VI-2-9-2-12	電気配線貫通部の耐震性についての計算書	Ver. 2005
VI-2-9-4-2	ダウンカマの耐震性についての計算書	Ver. 2019FP1
VI-2-9-4-3	ベントヘッドの耐震性についての計算書	Ver. 2019FP1
VI-2-9-4-4-1-1	ドライウェルススプレイ管の耐震性についての計算書	Ver. 2005
VI-2-9-4-4-1-2	サブプレッションチェンバスプレイ管の耐震性についての計算書	Ver. 2019FP1
VI-2-10-2-11	隔離弁、機器・配管の耐震性についての計算書	Ver. 2018. 2. 1
VI-3-3-3-3-1-3	残留熱除去系ストレーナの強度計算書	Ver. 2005
		Ver. 2019FP1
VI-3-3-3-3-1-4	ストレーナ部ティーの応力計算書	Ver. 2019FP1
VI-3-3-3-3-1-5	残留熱除去系ストレーナ取付部コネクタの強度計算書	Ver. 2019FP1
VI-3-3-3-3-1-6	残留熱除去系ストレーナ取付部サポートの強度計算書	Ver. 2019FP1
VI-3-3-3-4-4-1	原子炉隔離時冷却系ストレーナの強度計算書	Ver. 2005
VI-3-3-3-4-4-2	ストレーナ部ティーの応力計算書	Ver. 2005
VI-3-3-7-1-3	サブプレッションチェンバの強度計算書	Ver. 2019FP1
VI-3-3-7-1-5	ベント管の強度計算書	Ver. 2019FP1
VI-3-3-7-1-17	配管貫通部の強度計算書	Ver. 2005
VI-3-3-7-1-20	電気配線貫通部の強度計算書	Ver. 2005
VI-3-3-7-2-1-1	ベントヘッド及びダウンカマの強度計算書	Ver. 2019FP1
VI-3-3-7-2-2-1-1	ドライウェルススプレイ管の強度計算書	Ver. 2005
VI-3-3-7-2-2-1-3	サブプレッションチェンバスプレイ管の強度計算書	Ver. 2013

2. 解析コードの概要

2.1 MSC NASTRAN Ver. 2013

項目	コード名 MSC NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法（はりモデル及びシェルモデル）による応力解析
開発機関	MSC Software Corporation
開発時期	1971年（一般商業用リリース）
使用したバージョン	Ver. 2013
コードの概要	本解析コードは、航空機の機体強度解析を目的として開発された、有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。適用モデル（主にはり要素、シェル要素、ソリッド要素）に対して、静的解析（線形、非線形）、動的解析（過渡応答解析、周波数応答解析）、固有値解析、伝熱解析（温度分布解析）、熱応力解析、線形座屈解析等の機能を有している。数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等様々な分野の構造解析に使用されている。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について、本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから、検証結果を持って、解析機能の妥当性も確認できる。 ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

2.2 MSC NASTRAN Ver. 2005

項目 \ コード名	MSC NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法（はりモデル及びシェルモデル）による固有値解析，地震応答解析，応力解析
開発機関	MSC Software Corporation
開発時期	1971年（一般商業用リリース）
使用したバージョン	Ver. 2005
コードの概要	本解析コードは，航空機の機体強度解析を目的として開発された，有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。適用モデル（主にはり要素，シェル要素，ソリッド要素）に対して，静的解析（線形，非線形），動的解析（過渡応答解析，周波数応答解析），固有値解析，伝熱解析（温度分布解析），熱応力解析，線形座屈解析等の機能を有している。数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木等様々な分野の構造解析に使用されている。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について，本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木等様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。 ・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから，検証結果を持って，解析機能の妥当性も確認できる。 ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

2.3 MSC NASTRAN Ver. 2019FP1

項目	コード名 MSC NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法（はりモデル及びシェルモデル）による固有値解析，地震応答解析，応力解析
開発機関	MSC Software Corporation
開発時期	1971年（一般商業用リリース）
使用したバージョン	Ver. 2019FP1
コードの概要	本解析コードは，航空機の機体強度解析を目的として開発された，有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。適用モデル（主にはり要素，シェル要素，ソリッド要素）に対して，静的解析（線形，非線形），動的解析（過渡応答解析，周波数応答解析），固有値解析，伝熱解析（温度分布解析），熱応力解析，線形座屈解析等の機能を有している。数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木等様々な分野の構造解析に使用されている。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について，本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木等様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。 ・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから，検証結果を持って，解析機能の妥当性も確認できる。 ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

2.4 MSC NASTRAN Ver. 2006r1

項目 \ コード名	MSC NASTRAN
使用目的	はりモデルによる固有値解析及び地震応答解析
開発機関	MSC Software Corporation
開発時期	1971年（一般商業用リリース）
使用したバージョン	Ver. 2006r1
コードの概要	本解析コードは、航空機の機体強度解析を目的として開発された、有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。適用モデル（主にはり要素、シェル要素、ソリッド要素）に対して、静的解析（線形、非線形）、動的解析（過渡応答解析、周波数応答解析）、固有値解析、伝熱解析（温度分布解析）、熱応力解析、線形座屈解析等の機能を有している。数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木など様々な分野の構造解析に使用されている。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について、本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、土木及び建築などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから、検証結果をもって、解析機能の妥当性も確認できる。 ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

2.5 MSC NASTRAN Ver. 2018. 2. 1

項目 \ コード名	MSC NASTRAN
使用目的	はりモデルによる固有値解析及び地震応答解析
開発機関	MSC Software Corporation
開発時期	1971年（一般商業用リリース）
使用したバージョン	Ver. 2018. 2. 1
コードの概要	本解析コードは、航空機の機体強度解析を目的として開発された、有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。適用モデル（主にはり要素、シェル要素、ソリッド要素）に対して、静的解析（線形、非線形）、動的解析（過渡応答解析、周波数応答解析）、固有値解析、伝熱解析（温度分布解析）、熱応力解析、線形座屈解析等の機能を有している。数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木など様々な分野の構造解析に使用されている。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について、本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、土木及び建築などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから、検証結果をもって、解析機能の妥当性も確認できる。 ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

VI-5-7 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ F l u e n t

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
2.1 Fluent Ver. 18.1.0	3
2.2 Fluent Ver. 18.2.0	4
2.3 Fluent Ver. 2020R1	5

1. はじめに

本資料は、VI-1-1-9-3において使用した計算機プログラム（解析コード）Fluentについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-1-1-9-3	溢水評価条件の設定	Ver. 18. 1. 0
VI-1-1-9-4	溢水影響に関する評価	Ver. 18. 2. 0 Ver. 2020R1

2. 解析コードの概要

2.1 Fluent Ver. 18.1.0

項目 \ コード名	Fluent
使用目的	流体解析（燃料プール，原子炉ウェル，気水分離器・蒸気乾燥器ピットのスロッシング）
開発機関	ANSYS Inc（アメリカ）
開発時期	2017年（初版開発時期 1983年）
使用したバージョン	Ver. 18.1.0
コードの概要	<p>本解析コードは，CFD解析の初心者からエキスパートまで，幅広い要求に応える使いやすさと多くの機能を備える。有限体積法をベースとした非構造格子に対応するソルバを搭載しており，化学反応，燃焼，混相流等が取り扱える。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証内容は，以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは有限体積法を用いた汎用流体解析プログラムであり，数多くの研究機関や企業において，様々な分野の流体解析に広く利用されている。 ・矩形水槽を用いて正弦波加振によるスロッシング試験を実施し，溢水量と液面変動の試験結果と解析結果がよく一致することを確認している。 ・本解析コードの製品開発，テスト，メンテナンス，サポートの各プロセスは，United States Nuclear Regulatory Commission（アメリカ合衆国原子力規制委員会）の品質要件を満たしている。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は，以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは，航空宇宙，自動車，化学等の様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。

2.2 Fluent Ver. 18.2.0

項目	コード名 Fluent
使用目的	流体解析（輪谷貯水槽（東側）のスロッシング，溢水伝播挙動評価）
開発機関	ANSYS Inc（アメリカ）
開発時期	2017年（初版開発時期 1983年）
使用したバージョン	Ver. 18.2.0
コードの概要	<p>本解析コードは，CFD解析の初心者からエキスパートまで，幅広い要求に応える使いやすさと多くの機能を備える。有限体積法をベースとした非構造格子に対応するソルバを搭載しており，化学反応，燃焼，混相流等が取り扱える。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証内容は，以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは有限体積法を用いた汎用流体解析プログラムであり，数多くの研究機関や企業において，様々な分野の流体解析に広く利用されている。 ・2次元ダムブレイク問題の解析結果と他の数値解法による結果を比較し，よく一致することを確認している。 ・本解析コードの製品開発，テスト，メンテナンス，サポートの各プロセスは，United States Nuclear Regulatory Commission（アメリカ合衆国原子力規制委員会）の品質要件を満たしている。 ・使用する解析モデルは，工事計画認可申請書を基に作成した評価モデルを採用していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は，以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは，航空宇宙，自動車，化学等の様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。 ・2次元ダムブレイク問題の解析結果と実験結果とを比較し，よく一致することを確認している。

2.3 Fluent Ver.2020R1

項目 \ コード名	Fluent
使用目的	流体解析（サイトバンカ貯蔵プールのスロッシング）
開発機関	ANSYS Inc（アメリカ）
開発時期	2020年（初版開発時期 1983年）
使用したバージョン	Ver.2020R1
コードの概要	<p>本解析コードは、CFD解析の初心者からエキスパートまで、幅広い要求に応える使いやすさと多くの機能を備える。有限体積法をベースとした非構造格子に対応するソルバを搭載しており、化学反応、燃焼、混相流等が取り扱える。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは有限体積法を用いた汎用流体解析プログラムであり、数多くの研究機関や企業において、様々な分野の流体解析に広く利用されている。 ・2次元ダムブレイク問題の解析結果と他の数値解法による結果を比較し、よく一致することを確認している。 ・本解析コードの製品開発、テスト、メンテナンス、サポートの各プロセスは、United States Nuclear Regulatory Commission（アメリカ合衆国原子力規制委員会）の品質要件を満たしている。 ・使用する解析モデルは、工事計画認可申請書を基に作成した評価モデルを採用していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、航空宇宙、自動車、化学等の様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・2次元ダムブレイク問題の解析結果と実験結果とを比較し、よく一致することを確認している。

VI-5-8 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ S C A L E

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）SCALE について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-1-3-2	燃料取扱設備、新燃料貯蔵設備及び使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書	6.0

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	SCALE
使用目的	使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価
開発機関	米国オークリッジ国立研究所 (ORNL)
開発時期	2009年
使用したバージョン	6.0
コードの概要	<p>本解析コードは、核燃料物質、構造材等の幾何形状等を入力とし、中性子の飛程を乱数を使用して確率的に計算し、各中性子が吸収されて消滅するか、体系外に漏れるまでの反応過程で発生する核分裂中性子数を計算し、これらの比から実効増倍率を求めるものである。このため、計算体系が3次元の複雑な形状でも精度の高い計算ができる。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 本解析コードに附属のサンプル入力ファイルを用いて計算を実行し、計算結果があらかじめ用意された参照解を再現することを確認した。 ・ 本解析コードをインストールする計算機の環境が、指定の要件を満たしていることを確認した。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <p>米国 PNL (Pacific Northwest National Laboratory) で行われた臨界実験を対象としたベンチマーク解析を実施し、計算精度を検証した。</p> <p>具体的には、上記臨界試験体系のうち、 について、本解析コードを用いて実効増倍率を算出し、当該データをヒストグラム化後統計処理することで、平均値、バイアス、σ_{95-95} 等を得た。各実効増倍率の結果は臨界時実効増倍率 ($k_{eff}=1$) におおむね等しいことから、臨界試験を適切に再現しており、本解析コードを燃料貯蔵設備の未臨界性評価に適用することは妥当であるといえる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ バイアス：実験値と計算値の平均的なずれ ・ σ_{95-95}：95%信頼度－95%確率の計算の不確かさ <p>ベンチマーク解析について</p> <p>ベンチマーク解析の対象とした PNL-3602 臨界実験は、国内</p>

	<p>BWR の燃料貯蔵設備と同様に、中性子吸収材、板厚、水ギャップ幅、燃料対減速材比及び燃料濃縮度など、臨界解析で重要と考えられる要因に関し、数種類の異なる体系で実施されている。また、臨界実験に用いられた燃料仕様は、金属キャスクや燃料ラックの臨界評価に用いている燃料仕様と同程度であり、ベンチマーク試験として妥当と考えられる。</p> <p>なお、本検証については、米国オークリッジ国立研究所で行われたベンチマーク解析*が参考になる。</p>
--	--

注記* : J. J. Lichtenwalter, S. M. Bowman, M. D. DeHart, and C. M. Hopper, “Criticality Benchmark Guide for Light-Water-Reactor Fuel in Transportation and Storage Packages” , NUREG/CR-6361 ORNL/TM-13211, 1997 年 3 月

VI-5-9 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ D O R T

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）DORTについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-1-2-2	原子炉圧力容器の脆性破壊防止に関する説明書	D00RS3.2a版 DORT

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	DORT
使用目的	遮蔽解析（原子炉圧力容器における中性子の放射線束分布解析）
開発機関	米国オークリッジ国立研究所（（財）高度情報科学技術研究機構）
開発時期	1988年
使用したバージョン	D00RS3. 2a版DORT
コードの概要	<p>本解析コードは、米国オークリッジ国立研究所で開発された、2次元多群輸送方程式を離散座標Sn法で解く計算プログラムである。</p> <p>本解析コードの計算形状は、2次元形状（平板（X-Y体系）、円柱（R-Z体系、R-θ体系））であり、中性子及びガンマ線の輸送問題等を解くことができる。</p> <p>本解析コードでは、計算形状内での中性子及びガンマ線の線束が計算され、線量率換算係数又はカーマ係数を乗じることにより、線量率又は発熱量を算出することができる。</p>
検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）	<p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・2次元輸送計算コードDORTとJENDL-3.2の組合せによる計算値については、JNDC(Japanese Nuclear Data Committee)においてベンチマーク実験との比較検証*が実施されており、鉄、クロム、ナトリウム等の透過放射線測定において、計算値が実験値と良く再現することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 ・本解析では断面積ライブラリセットにJSSTDLを使用しており、JSSTDLは評価済み核データライブラリJENDL-3.2から作成された中性子100群・ガンマ線40群の断面積セットである。

	<p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none">・本解析コードは、原子力施設の遮蔽計算に広く用いられており、通常運転時の原子炉周り遮蔽計算等の豊富な実績がある。・本解析コードは、中性子及びガンマ線の放射線束、線量率及び発熱量を算出することができるコードであり、計算に必要な主な条件は線源条件、幾何形状条件である。これら評価条件が与えられれば評価が可能であり、本解析コードは原子炉压力容器における中性子の放射線束分布解析に適用可能であることを確認している。
--	--

注記* : Yamano N. et al., Integral Test of JENDL-3.3 with Shielding Benchmarks, J. Nucl. Sci. Technol., Supplement 2, p. 841-846 (Aug. 2002)

VI-5-10 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ N O P S

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）NOPSについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-1-2-2	原子炉圧力容器の脆性破壊防止に関する説明書	Ver.0

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	NOPS
使用目的	シェル理論及びはり理論による応力計算
開発機関	バブコック日立株式会社
開発時期	1983年
使用したバージョン	Ver. 0
コードの概要	<p>本解析コードは、原子炉圧力容器に対する評価を目的として、円筒殻及び球殻の構造不連続による効果を含まない一次応力を、シェル理論又ははり理論に基づいて計算するプログラムである。</p> <p>荷重は、内圧、外圧及び外荷重を考慮できる。</p> <p>原子炉圧力容器の円筒殻、球殻及びノズル等に内圧及び外圧によって生じる一次一般膜応力並びに外荷重によって生じる一次一般膜応力及び一次膜＋一次曲げ応力の計算を行う。</p> <p>原子力の分野における使用実績を有している。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 代表的な検証用モデルに対し、本解析コードで計算される解析解が理論解と一致することを確認している。 ・ 本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 本解析コードのマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用する応力計算に、本解析コードが適用できることを確認している。 ・ 本解析コードは、これまで多くの既工事計画で使用実績を有しており、妥当性は十分確認されている。

VI-5-11 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ QAD-CGGP2R

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）QAD-CGGP2Rについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-1-3-5	使用済燃料貯蔵槽の水深の遮蔽能力に関する説明書	1.04
VI-1-7-3	中央制御室の居住性に関する説明書	1.04
VI-1-8-1	原子炉格納施設の設計条件に関する説明書	1.04
VI-1-9-3-2	緊急時対策所の居住性に関する説明書	1.04
VI-4-2-3	屋外配管ダクト（ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）の生体遮蔽装置の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書	1.04

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	QAD-CGGP2R
使用目的	燃料プール水深の遮蔽計算 中央制御室及び緊急時対策所の居住性に係る被ばく評価 格納容器ベント実施に伴う現場作業の被ばく評価 屋外配管ダクト（ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）の 生体遮蔽装置の遮蔽計算
開発機関	日本原子力研究開発機構（（財）高度情報科学研究機構）
開発時期	2001年（初版開発時期 1967年）
使用したバージョン	1.04
コードの概要	<p>QAD-CGGP2R（以下「本解析コード」という。）は、米国ロスアラモス国立研究所で開発されたガンマ線の物質透過を計算するための点減衰核積分コード「QAD」をベースとし、旧日本原子力研究所がICRP 1990年勧告の国内関連法令・規則への取入れに合わせて、実効線量を計算できるように改良した最新バージョンである。</p> <p>本解析コードは、線源を直方体、円筒、球の形状に構成でき、任意の遮蔽体で構成される体系のガンマ線実効線量率を計算する。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 ・本解析コードは、線量率評価を実施するコードであり、計算に必要な主な条件は線源条件、遮蔽体条件である。これら評価条件が与えられれば線量率評価は可能であり、使用目的に記載する評価に適用可能である。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・JRR-4散乱実験室でのコンクリート透過実験の実験値（「原子力第1船遮蔽効果確認実験報告書」JNS-4（日本原子力船開発

	<p>事業団，1967)) と計算値を比較した。実験孔からのガンマ線を遮蔽体に入射させ，遮蔽体透過後のガンマ線の線量率の実験値と本解析コードによる計算値を比較している。</p> <ul style="list-style-type: none">・実験値と計算値を比較した結果，概ね一致していることを確認している。・上記妥当性確認では，実験孔からのガンマ線を遮蔽体に入射させ，遮蔽体透過後のガンマ線の線量率の実験値と本解析コードによる計算値を比較している。・今回の燃料プール水深の遮蔽計算では，上記妥当性確認における実験体系と同様に，ガンマ線の遮蔽体透過後の線量率を計算する。・今回の燃料プール水深の遮蔽計算は上記妥当性確認内容と合致している。・また，原子力発電所放射線遮蔽設計規程（J E A C 4 6 1 5 -2020）（日本電気協会 原子力規格委員会 令和2(2020)年1月）では，点減衰核積分コードによるガンマ線の遮蔽体透過後の線量率計算例として，Q A Dコードが挙げられている。
--	---

VI-5-12 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ORIGEN2

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）ORIGEN 2 について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-1-3-4	使用済燃料貯蔵槽の冷却能力に関する説明書	2.2
VI-1-3-5	使用済燃料貯蔵槽の水深の遮蔽能力に関する説明書	2.2
VI-1-7-3	中央制御室の居住性に関する説明書	2.2
VI-1-8-1	原子炉格納施設的设计条件に関する説明書	2.2
VI-1-9-3-2	緊急時対策所の居住性に関する説明書	2.2

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	O R I G E N 2
使用目的	使用済燃料の崩壊熱評価 使用済制御棒の線源強度計算 中央制御室及び緊急時対策所の居住性に係る被ばく評価 格納容器ベント実施に伴う現場作業の被ばく評価
開発機関	米国オークリッジ国立研究所 (ORNL)
開発時期	1980年
使用したバージョン	2.2
コードの概要	<p>O R I G E N 2 (以下「本解析コード」という。)は、使用済燃料等の核種生成量、崩壊熱量並びに中性子及びガンマ線の線源強度を評価するためにORNLで開発され公開された燃焼計算コードであり、原子力発電所施設、再処理施設、廃棄物処理施設等幅広く設計に利用されている。</p> <p>また、国内の最新の使用済燃料についての評価精度向上を目指し、日本原子力研究所シグマ委員会核種生成量評価ワーキンググループにおいてJENDL核データセットに基づく本解析コード用ライブラリが作成され、公開されている。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は次のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 計算機能が適正であることは、コード配布時に同梱されたサンプル問題の再現により確認している。 ・ 本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 ・ 本解析コードは、燃焼計算によって得られた核種生成量から炉心内蔵量等の評価するコードであり、計算に必要な主な条件は組成、照射条件、核データライブラリである。 <p>これら評価条件が与えられれば評価は可能であり、本解析コードは使用目的に記載する評価に適用可能である。</p> <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は次のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 米国原子力学会 (ANS) のNuclear Technology vol.62 (1983年9月) の「ORIGEN2 :A Versatile Computer Code for

	<p>Calculating the Nuclide Compositions and Characteristic of Nuclear Materials」において、ANS標準崩壊熱との比較及び使用済燃料中のウラン、プルトニウム、アメリシウムなどの組成の実測値との比較により妥当性の確認を行っている。</p> <ul style="list-style-type: none">• 日本原子力研究所シグマ委員会にて開発されたORLIBJライブラリについては、「JENDL-3.3に基づくORIGEN2用ライブラリ：ORLIBJ33」 JAERI-Data/Code 2004-015（2004年11月）等において、核種生成量について照射後試験結果と、本解析コードによる計算値を比較することで妥当性の確認を行っている。• 今回の使用目的に記載する評価は上記妥当性確認内容と合致しており、本解析コードの使用は妥当である。
--	---

VI-5-13 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ANISN

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）ANISNについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-1-7-3	中央制御室の居住性に関する説明書	ANISN-JR
VI-1-8-1	原子炉格納施設的设计条件に関する説明書	ANISN-JR
VI-1-9-3-2	緊急時対策所の居住性に関する説明書	ANISN-JR

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	ANISN
使用目的	中央制御室及び緊急時対策所の居住性に係る被ばく評価 格納容器ベント実施に伴う現場作業の被ばく
開発機関	米国オークリッジ国立研究所（（財）高度情報科学研究機構）
開発時期	1977年（初版開発時期1967年）
使用したバージョン	ANISN-JR
コードの概要	ANISN（以下「本解析コード」という。）は、米国オークリッジ国立研究所で開発された、1次元多群輸送方程式を離散座標Sn法で解く計算プログラムである。本解析コードの計算形状は、1次元形状（球、無限平板、無限円筒）であり、中性子及びガンマ線の輸送問題等を解くことができる。本解析コードでは、計算形状内での中性子及びガンマ線の線束が計算され、線量率換算係数又はカーマ係数を乗じることにより、線量率又は発熱量を算出することができる。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 ・本解析コードは、線量率評価を実施するコードであり、計算に必要な主な条件は線源条件、幾何形状条件である。これら評価条件が与えられれば線量率評価は可能であり、使用目的に記載する評価に適用可能である。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・スカイシャインガンマ線について、固体廃棄物貯蔵庫を線源とした線量評価が、本解析コードとG33コードの結合計算法によって実施されている。 ・この固体廃棄物貯蔵庫での測定値と計算値の比較の詳細が、原子力施設散乱放射線挙動専門委員会の成果報告会（昭和54年9月、財団法人 原子力安全研究協会）*に示されている。

	<ul style="list-style-type: none"> ・測定値と計算値を比較した結果、概ね一致していることを確認している。 ・今回の重大事故等時における中央制御室のスカイシャインガンマ線線量評価は、上記妥当性確認内容と合致している。 ・また、原子力発電所放射線遮蔽設計規程（J E A C 4 6 1 5 -2020）（日本電気協会 原子力規格委員会 令和2(2020)年1月）では、事故時の中央制御室遮蔽のための輸送計算コードとして、本解析コードが挙げられている。
--	--

注記＊：「ガンマ線スカイシャインの線量評価に関する研究」成果報告会・予稿集
（昭和54年9月 財団法人 原子力安全研究協会）

VI-5-14 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ G 3 3 - G P 2 R

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）G 3 3 - G P 2 R について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-1-7-3	中央制御室の居住性に関する説明書	1.00
VI-1-8-1	原子炉格納施設の設計条件に関する説明書	1.00
VI-1-9-3-2	緊急時対策所の居住性に関する説明書	1.00

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	G 3 3 - G P 2 R
使用目的	中央制御室及び緊急時対策所の居住性に係る被ばく評価格納容器ベント実施に伴う現場作業の被ばく
開発機関	日本原子力研究開発機構（（財）高度情報科学研究機構）
開発時期	2001年（初版開発時期 1964年）
使用したバージョン	1.00
コードの概要	<p>G 3 3 - G P 2 R（以下「本解析コード」という。）は、米ロスアラモス国立研究所で開発されたガンマ線多群散乱計算プログラム「G 3 3」をベースとし、旧日本原子力研究所が I C R P 1990年勧告の国内関連法令・規則への取入れに合わせて、実効線量を計算できるように改良した最新バージョンである。</p> <p>本解析コードは、点等方線源からの一回散乱を計算する。散乱は、クライナー仁科の式に基づき計算する。散乱が起こる領域は直角、球、円筒座標により指定し、遮蔽体は平板、球、円筒又は二次曲面により入力することができる。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 ・本解析コードは、線量率評価を実施するコードであり、計算に必要な主な条件は線源条件、幾何形状条件である。これら評価条件が与えられれば線量率評価は可能であり、使用目的に記載する評価に適用可能である。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・スカイシャインガンマ線について、米国Radiation Research Associates (RRA) が1977年に米国カンザス州立大学において⁶⁰Co線源を用いたベンチマーク試験を実施している。 ・このRRAでの実験値と計算値を比較の詳細が、ガンマ線遮蔽設計ハンドブック（1988年1月、社団法人 日本原子力学会）

	<p>に示されている。</p> <ul style="list-style-type: none">• その結果は、天井遮蔽がないケースでは計算値は実験値とよい一致を示しているが、天井遮蔽があるケースでは、計算値は実験値を過小評価となっている。• この原因は、本解析コードが天井透過中の散乱成分を考慮してないためであり、この成分を考慮するため、天井遮蔽までをANISNコードで計算することを推奨している。今回の重大事故等時における中央制御室のスカイシャインガンマ線線量評価では、この計算手法を採用している。• 今回の重大事故等時における中央制御室のスカイシャインガンマ線線量評価は、上記妥当性確認内容と合致している。• また、原子力発電所放射線遮蔽設計規程（JEAC4615-2020）（日本電気協会 原子力規格委員会 令和2(2020)年1月）では、事故時の中央制御室遮蔽のための点減衰核積分コード／散乱線計算コードとして、QADコード／G33コードが挙げられている。
--	--

VI-5-15 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ H I S A P

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	4

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）HISAP について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-1-1-9-3	溢水評価条件の設定	Ver. 52
VI-1-3-5	使用済燃料貯蔵槽の水深の遮蔽能力に関する説明書	Ver. 52
VI-2-4-3-1-3	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-4-3-2-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-5-2-1-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-5-3-1-2	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-5-3-2-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-5-4-1-4	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-5-5-1-3	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-5-5-2-3	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-5-5-3-2	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-5-5-5-2	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-5-6-1-3	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-5-7-1-6	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-5-7-2-6	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-5-7-3-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-5-8-1-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-6-3-2-1-2	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-6-4-1-3	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-6-6-1-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-7-2-1-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-7-3-1-1	管の耐震性に関する説明書	Ver. 52
VI-2-8-3-2-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-8-3-3-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-9-4-4-2-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-9-4-4-3-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-9-4-4-4-2	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-9-4-5-1-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-9-4-5-2-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-9-4-5-4-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-9-4-6-1-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-9-4-7-1-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-10-1-2-1-9	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-10-1-2-2-7	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-10-1-2-3-6	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-2-11-2-8	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
VI-3-3-2-2-1-4-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-2-2-2-3-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-3-1-1-1-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-3-2-1-2-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-3-2-2-1-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-3-3-1-8-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-3-4-1-6-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-3-4-2-6-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-3-4-3-3-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-3-4-5-2-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-3-5-1-3-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-3-6-1-6-2	管の応力計算書	Ver. 52

使用添付書類		バージョン
VI-3-3-3-6-2-6-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-3-6-3-5-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-3-7-1-1-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-4-2-1-3-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-4-3-1-3-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-4-4-1-2-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-6-1-2-2-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-6-1-3-2-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-7-2-2-2-1-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-7-2-2-3-1-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-7-2-2-4-3-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-7-3-1-1-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-7-3-2-1-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-7-4-1-2-2	管の応力計算書	Ver. 52
VI-3-3-7-5-1-2-2	管の応力計算書	Ver. 52

2. 解析コードの概要

項目 \ 項目	コード名 HISAP
使用目的	3次元有限要素法（はりモデル）による管の固有値解析及び応力解析
開発機関	株式会社日立製作所
開発時期	1978年
使用したバージョン	Ver. 52
コードの概要	<p>本解析コードは、配管の強度解析を目的として開発された計算機プログラムである。本解析コードは、汎用構造解析コード <input type="text"/> <input type="text"/> をメインプログラムとし、応力評価プログラム及びそれらのインターフェイスプログラムのサブプログラムから成る。</p> <p>任意の1次元、2次元あるいは3次元形状に対し、静的解析、動的解析を行うことが可能で、反力・モーメント・応力、固有値・刺激係数等の算出が可能である。</p> <p>原子力の分野における使用実績を有している。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <div style="border: 1px solid black; height: 150px; width: 100%;"></div> <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <div style="border: 1px solid black; height: 100px; width: 100%;"></div>

--	--

注記*1：日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」

*2：原子力発電所耐震設計技術指針

VI-5-16 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ A B A Q U S

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
2.1 ABAQUS Ver. 6.4-4	3
2.2 ABAQUS Ver. 6.11-1	4
2.3 ABAQUS Ver. 6.11-2	5
2.4 ABAQUS Ver. 6.14-1	6

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）ABAQUS について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

	使用添付書類	バージョン
VI-2-3-3-2-4	ジェットポンプ計測配管貫通部シールの耐震性についての計算書	Ver. 6. 4-4
VI-2-3-3-3-4	シュラウドヘッドの耐震性についての計算書	Ver. 6. 4-4
VI-1-8-1	原子炉格納施設の設計条件に関する説明書	Ver. 6. 11-1
VI-2-10-1-2-1-4	非常用ディーゼル発電設備ディーゼル燃料デイトンクの耐震性についての計算書	Ver. 6. 11-1
VI-2-10-1-2-1-7	非常用ディーゼル発電設備Aーディーゼル燃料貯蔵タンクの耐震性についての計算書	Ver. 6. 11-1
VI-2-10-1-2-2-4	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料デイトンクの耐震性についての計算書	Ver. 6. 11-1
VI-2-10-1-2-2-6	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料貯蔵タンクの耐震性についての計算書	Ver. 6. 11-1
VI-2-11-2-7-1	原子炉建物天井クレーンの耐震性についての計算書	Ver. 6. 11-1
VI-2-別添3-4-1	逃がし安全弁用窒素ガスボンベラックの耐震性についての計算書	Ver. 6. 11-1
VI-2-別添3-4-2	中央制御室待避室正圧化装置 空気ボンベラックの耐震性についての計算書	Ver. 6. 11-1
VI-2-別添3-4-3	緊急時対策所換気空調系空気ボンベ加圧設備 空気ボンベカードルの耐震性についての計算書	Ver. 6. 11-1
VI-1-8-1	原子炉格納施設の設計条件に関する説明書	Ver. 6. 11-2
VI-2-11-2-7-2	燃料取替機の耐震性についての計算書	Ver. 6. 14-1
VI-2-11-2-7-14	取水槽ガントリクレーンの耐震性についての計算書	Ver. 6. 14-1

2. 解析コードの概要

2.1 ABAQUS Ver. 6.4-4

項目 \ コード名	ABAQUS
使用目的	3次元有限要素法（ソリッド要素）による応力解析
開発機関	Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc
開発時期	1978年
使用したバージョン	Ver. 6.4-4
コードの概要	<p>本解析コードは、米国 Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc（HKS社）で開発された有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機コードである。</p> <p>適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素、連続体要素について取り扱うことが可能であり、静的応力解析、動的応力解析、熱応力解析、伝熱解析、座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり、境界条件として、熱流束、温度、集中荷重、分布荷重、加速度等を取り扱うことができる。</p> <p>数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等の様々な分野で利用されている実績を持つ。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・今回使用する適用要素（ソリッド要素）について、解析結果が理論モデルによる理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等の様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・使用する解析モデルは、既工事計画及び耐震評価にて実績のある関連規格及び文献を基に作成した評価モデルを採用していることを確認している。 ・開発機関が提示するマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（ソリッド要素）による応力解析に本解析コードが適用できることを確認している。

2.2 ABAQUS Ver. 6.11-1

項目 \ コード名	ABAQUS
使用目的	2次元有限要素法（軸対称モデル）による温度分布計算 3次元有限要素法（シェル要素，はり要素）による固有値解析及び応力解析
開発機関	ダッソー・システムズ株式会社
開発時期	1978年（Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc） 2005年（ダッソー・システムズ株式会社）
使用したバージョン	Ver. 6.11-1
コードの概要	<p>本解析コードは，米国 Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc（HKS社）で開発され，ダッソー・システムズ社に引き継がれた有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機コードである。</p> <p>適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素，連続体要素について取り扱うことが可能であり，静的応力解析，動的応力解析，熱応力解析，伝熱解析，座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり，境界条件として，熱流束，温度，集中荷重，分布荷重，加速度等を取り扱うことができる。</p> <p>数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野で利用されている実績を持つ。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・今回使用する適用要素（ソリッド要素，シェル要素及びはり要素）について，本解析コードを用いた解析結果が理論モデルによる理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは，数多くの研究機関や企業において，様々な分野の構造解析に広く利用されていることを確認している。 ・本解析コードは，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。 ・使用する解析モデルは，既工事計画及び耐震評価にて実績のある関連規格及び文献を基に作成した評価モデルを採用していることを確認している。 ・開発機関が提示するマニュアルにより，今回の工事計画認可申請で使用する2次元有限要素法（軸対称モデル）による温度分布解析及び3次元有限要素法（シェル要素及びはり要素）による固有値解析及び応力解析に，本解析コードが適用できることを確認している。

2.3 ABAQUS Ver. 6.11-2

項目	コード名 ABAQUS
使用目的	3次元有限要素法（ソリッド要素及びシェル要素）による弾塑性解析
開発機関	ダッソー・システムズ株式会社
開発時期	1978年（Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc） 2005年（ダッソー・システムズ株式会社）
使用したバージョン	Ver. 6.11-2
コードの概要	<p>本解析コードは、米国Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc（HKS社）で開発され、ダッソー・システムズ社に引き継がれた有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機プログラムである。</p> <p>適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素，連続体要素について取り扱うことが可能であり，静的応力解析，動的応力解析，熱応力解析，伝熱解析，座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり，境界条件として，熱流束，温度，集中荷重，分布荷重，加速度等を取り扱うことができる。</p> <p>数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木等の様々な分野で利用されている実績を持つ。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木等様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。 ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。 ・開発機関が提示するマニュアルにより，今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（ソリッド要素及びシェル要素）による弾塑性解析に，本解析コードが適用できることを確認している。

2.4 ABAQUS Ver. 6.14-1

項目	コード名 ABAQUS
使用目的	はり要素による固有値解析及び地震応答解析
開発機関	ダッソー・システムズ社
開発時期	1978年 (Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc) 2005年 (ダッソー・システムズ社)
使用したバージョン	Ver. 6.14-1
コードの概要	<p>本解析コードは、米国Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc (HKS社)で開発され、ダッソー・システムズ社に引き継がれた有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機プログラムである。</p> <p>適用モデルは、1次元～3次元の任意形状の構造要素、連続体要素について取り扱うことが可能であり、静的応力解析、動的応力解析、熱応力解析、伝熱解析、座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり、境界条件として、熱流束、温度、集中荷重、分布荷重、加速度等を取り扱うことができる。</p> <p>数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等の様々な分野で利用されている実績を持つ。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードによる地震応答計算結果と振動試験結果の比較による検証*が実施され、本解析コードが検証されたものであることを確認している。 ・使用する適用要素（はり要素）について、解析結果が理論モデルによる理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、数多くの研究機関や企業において、様々な分野の構造解析に広く利用されていることを確認している。 ・本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等の様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・使用する解析モデルは、既工事計画及び耐震評価にて実績のある関連規格及び文献を基に作成した評価モデルを採用していることを確認している。 ・開発機関が提示するマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用するはり要素による固有値解析及び地震応答解析に、本解析コードが適用できることを確認している。

注記*：独立行政法人 原子力安全基盤機構「平成19年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査」動的上下動耐震試験（クレーン類）に係る報告書

VI-5-17 計算機プログラム（解析コード）の概要

・ G O T H I C

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）GOTHIC について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-1-8-2	原子炉格納施設の水素濃度低減性能に関する説明書	Ver. 8.1

2. 解析コードの概要

項目	コード名
使用目的	シビアアクシデント解析 (シビアアクシデント時の原子炉建物原子炉棟における水素分布評価及び水素処理設備による水素濃度低減性能解析)
開発機関	Electric Power Research Institute, Inc. (EPRI) 及び Numerical Applications, Inc. (NAI)
開発時期	1989年
使用したバージョン	Ver. 8.1
コードの概要	<p>本解析コードは、EPRI/NAI により開発された汎用熱流体解析コードであり、気相、液体連続相及び液体分散相（液滴）の3相について、各々、質量、運動量及びエネルギーの3保存式を解く、完全3流体（9保存式）解析コードである。</p> <p>各相間の質量、運動量及びエネルギーの移動は、構成式で表され、これにより、凝縮・沸騰現象や、凝縮した液体によって随伴される気相の流れ等、複雑な混相流現象を模擬することができる。また、ファン・水素再結合器等の機器モデルが組み込まれており、これらの機器の作動及び制御を模擬できる。</p> <p>このような基本構成により、原子炉建物原子炉棟内における気液混相の熱流動を取り扱うことができる。本解析コードは、主に米国において設計基準事故を想定した原子炉格納容器の設計や環境条件、シビアアクシデント時の水素分布解析などに豊富な使用実績がある。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>今回の解析は、シビアアクシデント時の原子炉建物原子炉棟内における静的触媒式水素処理装置の水素濃度低減性能評価に使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コードのサンプル問題を実行し、ユーザーマニュアルに示される同一問題の結果と比較を行い、解析解がそれを再現していることを確認している。 ・1次元熱伝導の理論解に対する解析解が再現していることを確認している。 ・本解析コードの適用制限について、蒸気表・各種相関式・物性範囲及び数値計算手法上の制約に対し問題ないことを確認している。

	<p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none">・ 実機プラントに対する上記の目的に対しては、検証内容が事故時の状況、機器設備の作動状況、物理現象の模擬などに対し適用可能な範囲にあることを確認している。・ 静的触媒式水素処理装置作動時に見られる重要な物理現象の個別効果及び、それらを重ね合わせた総合効果の再現性を確認している。・ NUPEC 試験など、実機解析の再現能力、適用範囲と不確かさを考慮した上で、上記目的に対する保守性を有している。
--	---

VI-5-18 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ M A A P

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）Modular Accident Analysis Program(MAAP)について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-1-7-3	中央制御室の居住性に関する説明書	Ver. 4
VI-1-8-1	原子炉格納施設的设计条件に関する説明書	Ver. 4
VI-1-8-2	原子炉格納施設の水素濃度低減性能に関する説明書	Ver. 4

2. 解析コードの概要

項目	コード名
	Modular Accident Analysis Program(MAAP)
使用目的	シビアアクシデント解析（ソースターム解析，コリウムシールド設計のための侵食量解析及び格納容器フィルタベント系による水素排出性能解析）
開発機関	Electric Power Research Institute, Inc. (EPRI)
開発時期	1983年
使用したバージョン	Ver. 4
コードの概要	<p>本解析コードは、米国産業界が実施した Industry Degraded Core Rulemaking (IDCOR) プログラムにおいて、1980年代の初めに米国 Fauske & Associates, LLC. (FAI 社) によって開発されたコードであり、プログラムの完了に伴い、所有権が米国 EPRI に移管され、EPRI を中心とした MAAP User's Group (MUG) のもとで保守及び改良が進められている。</p> <p>本解析コードは、軽水炉のシビアアクシデント時の原子炉圧力容器、原子炉格納容器及び原子炉建物内の熱水力／核分裂生成物 (FP) の放出・移行挙動を同時に一貫して解析できることに特徴があり、確率論的リスク評価やシビアアクシデントマネジメントの策定等において、米国を始め、世界的に広く利用されている。</p> <p>本解析コードは、シビアアクシデントの事象進展の各段階を網羅し、炉心、原子炉圧力容器、原子炉格納容器内で起こると考えられる重要な事故時の物理現象をモデル化するとともに、工学的安全施設や炉心損傷防止対策あるいは格納容器破損防止対策で想定する各種の機器についてのモデルを備えている。また、FPに関する物理現象をモデル化しており、事故時に炉心溶融に伴って原子炉圧力容器や原子炉格納容器内に放出されるFPの挙動についても取り扱うことが可能である。このように、広範囲の物理現象を取り扱うことが可能な総合解析コードであり、シビアアクシデントで想定される種々の事故シーケンスについて、起因事象から安定した状態、あるいは過圧・過温により原子炉格納容器健全性が失われる状態まで計算が可能であることが特徴である。</p> <p>本解析コードはシビアアクシデントを評価するための総合システム解析コンピュータ・コードであり、原子炉圧力容器、再循環ポンプ等を含む原子炉冷却材圧力バウンダリ全体及び原子炉格納容器における水、水蒸気、水素、FP、溶融炉心等の挙動の評価並</p>

	<p>びに格納容器フィルタベント系による水素排出評価に使用している。</p>
<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 米国プラントの全交流動力喪失事象に関するユーザーズマニュアルの例題を実施して、解析解が開発元の結果を再現していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 炉心損傷事象に関する国際的な標準問題であるスリーマイル島原子力発電所事故を模擬した解析結果が事故データと比較し、おおむね一致するため、シビアアクシデント時の発電用原子炉内の挙動や運転員操作を含む現象モデル全般が妥当であることを確認している。 ・ Heiss Dampf Reaktor (HDR) 炉における実機スケール水素混合実験に対する実機解析を実施し、実機データとおおむね一致するため、原子炉格納容器内の伝熱、流動（水素ガス挙動を含む）に関する現象モデルが妥当であることを確認している。 ・ 熔融燃料あるいは融体金属とコンクリートの相互作用に関する Advanced Containment Experiments (ACE) 実験及び Sustained Uranium-Concrete Interactions (SURC) 実験を模擬した実験解析を実施し、熔融炉心の温度とコンクリート侵食深さの時間変化について、実験データとおおむね一致している結果が得られることを確認している。 ・ シビアアクシデント時の全体挙動、原子炉格納容器内の水素ガスの挙動、熔融炉心とコンクリートの相互作用による水素発生の妥当性を確認しているため、本解析コードは水素濃度評価へ適用できる。 ・ 米国原子力規制委員会で整備された NUREG-1465 における原子炉格納容器内ソースタームと本解析コードにおける解析結果の比較を行い、NUREG-1465 のソースタームとほぼ同等であることを確認しているため、本解析コードはソースターム評価へ適用できる。

VI-5-19 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ F R E M I N G

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
2.1 FREMING Ver. 14. 1B	3

1. はじめに

本資料は、VI-1-1-7-別添1「可搬型重大事故等対処設備の保管場所及びアクセスルート」において使用した計算機プログラム（解析コード）FREMINGについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

	使用添付書類	バージョン
VI-1-1-7-別添1	可搬型重大事故等対処設備の保管場所及びアクセスルート	Ver. 14. 1B

2. 解析コードの概要

2.1 FREMING Ver. 14.1B

項目	コード名 FREMING
使用目的	平面骨組解析による断面力算定
開発機関	富士通Japan株式会社（旧：富士通エフ・アイ・ピー株式会社）
開発時期	1995年
使用したバージョン	Ver. 14.1B
コードの概要	<p>FREMING（以下「本解析コード」という。）は、富士通エフ・アイ・ピー株式会社によって開発された、平面骨組構造解析の汎用市販コードである。</p> <p>本解析コードは、平面骨組計算プログラムであり、平面構造物にモデル化できる構造物はすべて計算が可能である。</p> <p>適用範囲として、橋梁、鉄塔、トンネル、共同溝等の土木構造物から、ビル、建屋等建築構造物の設計計算に利用可能である。</p> <p>また、面内荷重及び面外荷重において、線形及び非線形解析が可能である。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材料力学分野における一般的知見によって解を求めることができる体系について、平面骨組解析モデルによる解析解（断面力）と理論解と比較し、解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、国内の土木建築分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・日本原子力発電株式会社東海第二発電所において、緊急用海水ポンプピット及び防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））並びに貯留堰の平面骨組解析（断面力算出）に本解析コード（Ver. 14.1B）が使用された実績がある。 ・本工事計画における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

VI-5-20 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ S e i s m i c A n a l y s i s
S y s t e m (S A S)

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
2.1 Seismic Analysis System(SAS) Ver.6.1.0	3
2.2 Seismic Analysis System(SAS) Ver.7.1.0	5

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）SASについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-1-7	設計用床応答スペクトルの作成方針	Ver. 6. 1. 0 Ver. 7. 1. 0

2. 解析コードの概要

2.1 Seismic Analysis System(SAS) Ver. 6.1.0

項目	コード名 Seismic Analysis System (SAS)
使用目的	設計用床応答スペクトルの作成
開発機関	日立GEニュークリア・エナジー株式会社
開発時期	2009年
使用したバージョン	Ver. 6.1.0
コードの概要	Seismic Analysis System(SAS) (以下、「本解析コード」という。)は、耐震設計に使用する条件を作成することを目的に、地震波時刻歴データの波形書式の変換機能、地震波時刻歴データから応答スペクトルを計算する機能、応答分布図や振動モード図の作成機能等、耐震解析プログラムを統合したシステムである。このうち応答スペクトル作成機能を、建物床応答時刻歴から設計用床応答スペクトルを作成するために使用する。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・別解析コードDYNA2Eによる応答スペクトルと本解析コードで作成した応答スペクトルを比較し、一致していることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・今回の工事計画認可申請で使用する機能は応答スペクトルの作成機能であるため、同一の入力条件に対する1自由度系の最大応答加速度を固有周期ごとに算定し、別解析コードDYNA2Eと本解析コードの結果を比較することで、妥当性を確認している。 ・設計用床応答スペクトルを作成する際、入力とする時刻歴データの時間刻み幅、データの形式は、上述の妥当性を確認している範囲内での使用であることを確認している。 ・周期軸方向の拡幅率 (±10%)、時刻歴波の時間刻みは J E A G 4 6 0 1 -1987に従っており、固有周期計算間隔

	<p>は J E A G 4 6 0 1 -1987及びREGULATORY GUIDE 1.122記載の値より概ね細かい値を設定しているため、妥当性に問題はない。</p> <ul style="list-style-type: none">• 今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは、他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。• 今回の工事計画認可申請における応答スペクトル、時刻歴データに対し、用途及び方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	---

2.2 Seismic Analysis System(SAS) Ver. 7.1.0

項目	コード名 Seismic Analysis System (SAS)
使用目的	設計用床応答スペクトルの作成
開発機関	日立GEニュークリア・エナジー株式会社
開発時期	2009年
使用したバージョン	Ver. 7.1.0
コードの概要	Seismic Analysis System(SAS) (以下、「本解析コード」という。)は、耐震設計に使用する条件を作成することを目的に、地震波時刻歴データの波形書式の変換機能、地震波時刻歴データから応答スペクトルを計算する機能、応答分布図や振動モード図の作成機能等、耐震解析プログラムを統合したシステムである。このうち応答スペクトル作成機能を、建物床応答時刻歴から設計用床応答スペクトルを作成するために使用する。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析で使用した Seismic Analysis System(SAS) Ver. 7.1.0 に対し、使用実績のある Ver. 6.1.0 からのバージョンアップにおいて、応答スペクトルに差が生じないことをバージョンの検証記録より確認している。 ・本解析コードの運用環境について、動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・今回の工事計画認可申請で使用する機能は応答スペクトルの作成機能であるため、検証内容のとおり、バージョンの検証記録により妥当性を確認している。 ・設計用床応答スペクトルを作成する際、入力とする時刻歴データの時間刻み幅、データの形式は、上述の妥当性を確認している範囲内での使用であることを確認している。 ・周期軸方向の拡幅率 (±10%)、時刻歴波の時間刻みは J E A G 4 6 0 1 -1987に従っており、固有周期計算間隔

	<p>は J E A G 4 6 0 1 -1987及びREGULATORY GUIDE 1.122記載の値より概ね細かい値を設定しているため、妥当性に問題はない。</p> <ul style="list-style-type: none">• 今回の工事計画認可申請における応答スペクトル, 時刻歴データに対し, 用途及び方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	--

VI-5-21 计算机プログラム（解析コード）の概要
・ D Y N A 2 E

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
2.1 DYNA2E Ver. 7.2.48	3
2.2 DYNA2E Ver. 8.1.0	5

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）DYNA2Eについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-2-1	炉心，原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに 原子炉本体の基礎の地震応答計算書	Ver.7.2.48 Ver.8.1.0

2. 解析コードの概要

2.1 DYNA2E Ver. 7.2.48

項目	コード名 DYNA2E
使用目的	固有値解析, 応答解析
開発機関	伊藤忠テクノソリューションズ株式会社
開発時期	1972年 (センチュリリサーチセンタ株式会社) 2007年 (伊藤忠テクノソリューションズ株式会社)
使用したバージョン	Ver. 7.2.48
コードの概要	<p>本解析コードは, 土木・建築分野における骨組構造*を対象として開発された2次元/3次元応答解析コードであり, 市販されている汎用構造計算機プログラムである。固有値解析並びに静的解析(線形)及び動的解析(線形, 非線形)による応答解析が可能である。以下に示す構造に対し, 3種類の解析を行うことができる。</p> <p><構造></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 2次元骨組構造 2. 3次元骨組構造 <p><解析></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 固有値解析 2. 静的解析(線形) 3. 動的解析(線形, 非線形)
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・一本棒の曲げせん断型モデルについて, 本解析コード及び別解析コード MSC NASTRAN Ver. 2008r1 を用いて得られた固有値解析結果及び応答解析結果を比較して検討し, 本解析コードによる解析結果が妥当であることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について, 開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証内容のとおり, 固有値解析及び応答解析について検証していることから, 解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

	<ul style="list-style-type: none"> ・日本原子力発電株式会社東海第二発電所工事計画認可申請書のV-2-3-2「炉心，原子炉圧力容器及び圧力容器内部構造物並びに原子炉本体の基礎の地震応答計算書」，東京電力ホールディングス株式会社柏崎刈羽原子力発電所第7号機工事計画認可申請書のV-2-2-4「原子炉本体の基礎の地震応答計算書」及びV-2-3-1「炉心，原子炉圧力容器及び圧力容器内部構造物の地震応答計算書」において，固有値解析及び応答解析に使用された実績がある。 ・今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する固有値解析及び応答解析の使用目的に対し，使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	---

注記*：本解析コードでは，主に曲げせん断はり要素を適用する構造のことをいう。

2.2 DYNA2E Ver. 8.1.0

<p>項目</p>	<p>コード名 DYNA2E</p>
<p>使用目的</p>	<p>固有値解析, 応答解析</p>
<p>開発機関</p>	<p>伊藤忠テクノソリューションズ株式会社</p>
<p>開発時期</p>	<p>1972年 (センチュリリサーチセンタ株式会社) 2007年 (伊藤忠テクノソリューションズ株式会社)</p>
<p>使用したバージョン</p>	<p>Ver. 8.1.0</p>
<p>コードの概要</p>	<p>本解析コードは、土木・建築分野における骨組構造*を対象として開発された2次元/3次元応答解析コードであり、市販されている汎用構造計算機プログラムである。固有値解析並びに静的解析（線形）及び動的解析（線形、非線形）による応答解析が可能である。以下に示す構造に対し、3種類の解析を行うことができる。</p> <p><構造></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 2次元骨組構造 2. 3次元骨組構造 <p><解析></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 固有値解析 2. 静的解析（線形） 3. 動的解析（線形、非線形）
<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。 ・本解析で使用したDYNA2E Ver. 8.1.0に対し、使用実績のあるVer. 7.2.48からのバージョンアップにおいて、本解析で使用するコマンドに関し解析結果に影響を及ぼす変更がないことをバージョンのリリースノートより確認している。 ・実績のある解析モデルデータでの固有値解析結果及び動的解析結果より、バージョンアップにより解析結果に相違が生じないことを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</p> <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p>

	<ul style="list-style-type: none"> ・検証内容のとおり，固有値解析及び応答解析について検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。 ・今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する固有値解析及び応答解析の使用目的に対し，使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	--

注記＊：本解析コードでは，主に曲げせん断はり要素を適用する構造のことをいう。

VI-5-22 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ S u p e r F L U S H / 2 D

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、VI-2-2-2「原子炉建物の地震応答計算書」等において使用した計算機プログラム（解析コード）SuperFLUSH/2Dについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-2-2	原子炉建物の地震応答計算書	Ver. 5.1, Ver. 6.1
VI-2-2-5	制御室建物の地震応答計算書	Ver. 5.1, Ver. 6.1
VI-2-11-2-1-1	1号機原子炉建物の耐震性についての計算書	Ver. 5.1, Ver. 6.1

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	SuperFLUSH/2D
使用目的	2次元有限要素法による地震応答解析
開発機関	株式会社地震工学研究所, 株式会社構造計画研究所
開発時期	1983年
使用したバージョン	Ver. 5.1, Ver. 6.1
コードの概要	<p>SuperFLUSH/2D (以下「本解析コード」という。)は、地盤-構造物系の地震応答解析の汎用コードである。</p> <p>複素応答に基づいた有限要素法を用いた本解析コードは、1974年のLUSH及び1975年に米国カリフォルニア大学から発表されたFLUSHの改良版である。</p> <p>本解析コードは、数多くの研究機関や企業において、建築、土木等の構造物の地盤と構造物の地震応答解析に広く利用されている。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証(Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本工事計画で使用する地震応答解析機能の検証として、水平成層地盤の側方にエネルギー伝達境界を設けたモデルによる地震応答解析結果が、側方半無限性を仮定した1次元重複反射理論に基づく別コードSHAKEによる地震応答解析結果と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、国内の建築・土木分野において使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・九州電力株式会社玄海原子力発電所第3号機の取水管路の地震応答解析に本解析コード (Ver. 6.0) が使用された実績がある。 ・開発機関が提示するマニュアルにより、本工事計画で使用する2次元有限要素法による地震応答解析に、本解析コードが適用できることを確認している。 ・本工事計画で行う2次元有限要素法による地震応答解析の用途、適用範囲が、上述の妥当性確認の範囲内にあることを確認している。 ・本工事計画において使用するバージョンは、他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが、バージョンの変更において、本解析の使用範囲の結果に影響の無いことを確認している。

VI-5-23 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ A D M I T H F

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、VI-2-2-2「原子炉建物の地震応答計算書」等において使用した計算機プログラム（解析コード）ADMITHFについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-2-2	原子炉建物の地震応答計算書	Ver. 1. 3. 1
VI-2-2-5	制御室建物の地震応答計算書	Ver. 1. 3. 1
VI-2-2-7	タービン建物の地震応答計算書	Ver. 1. 3. 1
VI-2-2-9	廃棄物処理建物の地震応答計算書	Ver. 1. 3. 1
VI-2-2-11	緊急時対策所の地震応答計算書	Ver. 1. 3. 1
VI-2-2-13	排気筒の地震応答計算書	Ver. 1. 1, Ver. 1. 3. 1
VI-2-2-16	ガスタービン発電機建物の地震応答計算書	Ver. 1. 2. 1, Ver. 1. 3. 1
VI-2-11-2-1-2	1号機タービン建物の耐震性についての計算書	Ver. 1. 3. 1
VI-2-11-2-1-3	1号機廃棄物処理建物の耐震性についての計算書	Ver. 1. 3. 1
VI-2-11-2-1-4	サイトバンカ建物の耐震性についての計算書	Ver. 1. 3. 1
VI-2-11-2-2	1号機排気筒の耐震性についての計算書	Ver. 1. 2. 1, Ver. 1. 3. 1

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	ADMITHF
使用目的	質点系地震応答解析モデルにおける基礎底面地盤ばね算定
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	1982年
使用したバージョン	Ver. 1. 1, Ver. 1. 2. 1, Ver. 1. 3. 1
コードの概要	ADMITHF（以下「本解析コード」という。）は，振動アドミッタンス理論により，矩形基礎の水平動，鉛直動及び回転動に対する地盤の複素ばね剛性を半無限地盤に対する点加振解から，振動数領域で計算する計算機プログラムであり，地震応答解析モデル及び応力解析モデルにおける基礎底面地盤ばねの算定に用いている。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証(Verification)】 本解析コードの検証の内容は，以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの計算機能が適正であることは，後述する妥当性確認の中で確認している。 ・本解析コードの運用環境について，動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは日本国内の原子力施設で多数の工事計画に使用されており，十分な使用実績があるため信頼性がある。 ・本解析コードによる解析結果と日本建築学会「入門・建物と地盤との動的相互作用」の中で公開されているダイナミカル・グランド・コンプライアンス（DGC）解と比較し，その妥当性を確認している。 ・本工事計画における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。 ・本工事計画において使用するバージョンのうちVer. 1. 3. 1は，他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。 ・本工事計画において使用するバージョンのうちVer. 1. 1, Ver. 1. 2. 1は，他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが，バージョンの変更において解析機能に影響のある変更が行われていないことを確認している。

VI-5-24 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ N U P P 4

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、VI-2-2-2「原子炉建物の地震応答計算書」等において使用した計算機プログラム（解析コード）NUPP4について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-2-2	原子炉建物の地震応答計算書	Ver. 1. 3. 20, Ver. 1. 4. 2, Ver. 1. 4. 7, Ver. 1. 4. 10, Ver. 1. 4. 11, Ver. 1. 4. 13
VI-2-2-5	制御室建物の地震応答計算書	Ver. 1. 4. 2, Ver. 1. 4. 3, Ver. 1. 4. 7, Ver. 1. 4. 10, Ver. 1. 4. 11, Ver. 1. 4. 13
VI-2-2-7	タービン建物の地震応答計算書	Ver. 1. 4. 2, Ver. 1. 4. 7, Ver. 1. 4. 11, Ver. 1. 4. 13
VI-2-2-9	廃棄物処理建物の地震応答計算書	Ver. 1. 4. 2, Ver. 1. 4. 7, Ver. 1. 4. 10, Ver. 1. 4. 13
VI-2-2-11	緊急時対策所の地震応答計算書	Ver. 1. 4. 7, Ver. 1. 4. 10, Ver. 1. 4. 13
VI-2-2-16	ガスタービン発電機建物の地震応答計算書	Ver. 1. 4. 7, Ver. 1. 4. 11, Ver. 1. 4. 13
VI-2-11-2-1-2	1号機タービン建物の耐震性についての計算書	Ver. 1. 4. 2, Ver. 1. 4. 13
VI-2-11-2-1-3	1号機廃棄物処理建物の耐震性についての計算書	Ver. 1. 4. 9, Ver. 1. 4. 10, Ver. 1. 4. 11, Ver. 1. 4. 13
VI-2-11-2-1-4	サイトバンカ建物の耐震性についての計算書	Ver. 1. 4. 2, Ver. 1. 4. 12
VI-2-11-2-1-5	サイトバンカ建物（増築部）の耐震性についての計算書	Ver. 1. 4. 2, Ver. 1. 4. 12, Ver. 1. 4. 13
VI-2-11-2-1-6	排気筒モニタ室の耐震性についての計算書	Ver. 1. 4. 12, Ver. 1. 4. 13
VI-2-11-2-6-1	燃料移送ポンプエリア竜巻防護対策設備の耐震性についての計算書	Ver. 1. 4. 13
VI-3-別添1-7	竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書	Ver. 1. 4. 13
VI-3-別添2-4	原子炉建物の強度計算書	Ver. 1. 4. 13
VI-3-別添2-5	タービン建物の強度計算書	Ver. 1. 4. 13
VI-3-別添2-6	制御室建物の強度計算書	Ver. 1. 4. 13
VI-3-別添2-7	廃棄物処理建物の強度計算書	Ver. 1. 4. 13
VI-3-別添2-8	排気筒モニタ室の強度計算書	Ver. 1. 4. 13

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	NUPP4
使用目的	固有値解析, 地震応答解析
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	1967年
使用したバージョン	Ver. 1. 3. 20, Ver. 1. 4. 2, Ver. 1. 4. 3, Ver. 1. 4. 7, Ver. 1. 4. 9, Ver. 1. 4. 10, Ver. 1. 4. 11, Ver. 1. 4. 12, Ver. 1. 4. 13
コードの概要	<p>NUPP4 (以下「本解析コード」という。)は, 原子力発電所建屋の地震応答解析用として開発された質点系モデルによる解析計算機コードである。</p> <p>静荷重 (節点荷重), 固有値解析, スペクトルモーダル解析及び動荷重 (節点加振力, 地震入力) を扱うことができる。</p> <p>地震応答解析は, 線形解析及び非線形解析を時間領域における数値積分により行うほか, 線形解析を周波数領域で行うことが可能である。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は, 以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの計算機能が適正であることは, 後述する妥当性確認の中で確認している。 ・本解析コードの運用環境について, 動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの適用は, 以下のとおり妥当である。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの前バージョンであるNUPP及びNUPP II (以下「旧バージョン」という。)は, 日本国内の原子力施設における建築物の地震応答解析において数多くの工事計画に使用されており, 十分な使用実績がある。本解析コードは使用計算機 (OS) の変更に伴うカスタマイズを施したものであり解析に係る部分は旧バージョンから変更していないため, 旧バージョン同様, 信頼性があると判断できる。 ・固有値解析, 弾性地震応答解析については, 一般産業界において多数の解析で使用実績のあるDYNA2E*¹を用いて, 同一諸元による解析を行い, 本解析コードによる解析結果とおおむね一致することを確認している。 ・弾塑性地震応答解析については, 既工事計画において確認している (財)原子力発電技術機構の報告書*²による解析結果とおおむね一致することを確認している。 ・本工事計画における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・本工事計画において使用するバージョンのうちVer. 1. 4. 10は、他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。 ・本工事計画において使用するバージョンのうちVer. 1. 3. 20, Ver. 1. 4. 2, Ver. 1. 4. 3, Ver. 1. 4. 7, Ver. 1. 4. 9, Ver. 1. 4. 11, Ver. 1. 4. 12, Ver. 1. 4. 13は、他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが、バージョンの変更において解析機能に影響のある変更が行われていないことを確認している。
--	---

注記*1：DYNA2E 販売元 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

*2：質点系モデル解析コードSANLUMの保守に関する報告書 平成10年3月（財）原子力発電技術機構原子力安全解析所

VI-5-25 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ N A P I S O S

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、VI-2-2-9「廃棄物処理建物の地震応答計算書」等において使用した計算機プログラム（解析コード）NAPISOSについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-2-9	廃棄物処理建物の地震応答計算書	Ver. 2.0
VI-2-11-2-1-1	1号機原子炉建物の耐震性についての計算書	Ver. 2.0

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	NAPISOS
使用目的	地震応答解析
開発機関	電力中央研究所，株式会社竹中工務店
開発時期	1996年（使用開始時期）
使用したバージョン	Ver. 2.0
コードの概要	<p>NAPISOS（以下「本解析コード」という。）は，地盤をソリッド要素で，建物を非線形積層シェル要素や非線形ビーム要素でモデル化することにより，原子力発電所建物の地盤建物連成系3次元非線形地震応答解析が可能である。また，建物基礎と地盤モデル間に，ジョイント要素を設置することにより，基礎浮上り性状を評価することができる。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・理論解との比較 ・他コードとの比較 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証の内容のとおり，地盤（FEM）－建物（多質点）を連成した地震応答について検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。 ・本工事計画において使用するVer. 2.0は，他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。

VI-5-26 計算機プログラム（解析コード）の概要
・MSC NASTRAN

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
2.1 MSC NASTRAN Ver. 2008.0.4	3
2.2 MSC NASTRAN Ver. 2011.1	4
2.3 MSC NASTRAN Ver. 2008.0.0	5

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）MSC NASTRAN について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-10-1-2-3-1	ガスタービン発電機ガスタービン機関及び発電機の耐震性についての計算書	Ver. 2008.0.4 Ver. 2011.1
VI-2-10-1-2-3-2	ガスタービン発電機励磁装置及び保護継電装置の耐震性についての計算書	Ver. 2008.0.4
VI-2-別添3-5	可搬型重大事故等対処設備のうち可搬型空気浄化設備の耐震性についての計算書	Ver. 2008.0.0

2. 解析コードの概要

2.1 MSC NASTRAN Ver. 2008. 0. 4

項目 \ コード名	MSC NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法（3次元シェル及び梁モデル）による固有値解析
開発機関	MSC. Software Corporation
開発時期	1971年（一般商業用リリース）
使用したバージョン	Ver. 2008. 0. 4
コードの概要	<p>本解析コードは、航空機の機体強度解析を目的として開発された、有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。適用モデル（主にはり要素、シェル要素、ソリッド要素）に対して、静的解析（線形、非線形）、動的解析（過渡応答解析、周波数応答解析）、固有値解析、伝熱解析（温度分布解析）、熱応力解析、線形座屈解析等の機能を有している。数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証(Verification)】 本解析コードの検証の内容は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> 材料力学分野における一般的な知見により解を求めることができる体系について、3次元有限要素法（3次元シェルまたは梁モデル）による固有値解析について理論モデルによる理論解との比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。 本コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> 本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 開発機関が提示するマニュアルにより、本工事計画で使用する3次元有限要素法（3次元シェル及び梁モデル）による固有値解析に本解析コードが適用できることを確認している。 本工事計画で行う3次元有限要素法（3次元シェル及び梁モデル）による固有値解析の用途、適用範囲が、上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。

2.2 MSC NASTRAN Ver. 2011.1

項目 \ コード名	MSC NASTRAN
使用目的	1次元有限要素法（梁モデル）による変位量算出
開発機関	MSC Software Corporation
開発時期	1971年（一般商業用リリース）
使用したバージョン	Ver. 2011.1
コードの概要	<p>本解析コードは、航空機の機体強度解析を目的として開発された、有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。適用モデル（主にはり要素、シェル要素、ソリッド要素）に対して、静的解析（線形、非線形）、動的解析（過渡応答解析、周波数応答解析）、固有値解析、伝熱解析（温度分布解析）、熱応力解析、線形座屈解析等の機能を有している。数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証(Verification)】 本解析コードの検証の内容は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> 材料力学分野における一般的な知見により解を求めることができる体系について、1次元有限要素法（梁モデル）による変位量算出について理論モデルによる理論解との比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。 本コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> 本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 開発機関が提示するマニュアルにより、本工事計画で使用する1次元有限要素法（梁モデル）による変位量算出に本解析コードが適用できることを確認している。 本工事計画で行う1次元有限要素法（梁モデル）による変位量算出の用途、適用範囲が、上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。

2.3 MSC NASTRAN Ver. 2008. 0. 0

項目 \ コード名	MSC NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法（はり要素及びシェル要素）による固有値解析
開発機関	MSC Software Corporation
開発時期	1971年（一般商業用リリース）
使用したバージョン	Ver. 2008. 0. 0
コードの概要	<p>本解析コードは、航空機の機体強度解析を目的として開発された、有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。適用モデル（主にはり要素、シェル要素、ソリッド要素）に対して、静的解析（線形、非線形）、動的解析（過渡応答解析、周波数応答解析）、固有値解析、伝熱解析（温度分布解析）、熱応力解析、線形座屈解析等の機能を有している。数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。 ・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について、本解析コードを用いた3次元有限要素法による解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</p> <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。 ・本解析コードは、自動車、航空機、土木、造船、海洋油田、工業設備、化学技術、光学、政府調査等の様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分確認されている。 ・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから、解析解と理論解の一致をもって解析機能の妥当性も確認している。</p>

VI-5-27 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ K A N S A S 2

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は，VI-2-11-2-6-2「建物開口部竜巻防護対策設備の耐震性についての計算書」等において使用した計算機プログラム（解析コード）KANSAS2について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-11-2-6-2	建物開口部竜巻防護対策設備の耐震性についての計算書	Ver. 6.01
VI-3-別添2-8	排気筒モニタ室の強度計算書	Ver. 6.01

2. 解析コードの概要

項目 \ 項目	コード名 KANSAS2
使用目的	応力解析
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	2004年
使用したバージョン	Ver. 6. 01
コードの概要	<p>KANSAS2（以下「本解析コード」という。）は、鹿島建設株式会社により開発された3次元応力解析（FEM要素含む。）の解析計算機コードである。</p> <p>本解析コードは、微小変位理論による変位法を用いて、3次元骨組（FEM要素含む。）の断面力・変位を算出するための構造解析プログラムである。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・本解析コードの運用環境について、動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、一般建築分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・はり要素を用いた応力解析について、本解析コードによる解析結果と文献*による一般構造力学による理論解の比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本工事計画における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。 ・本工事計画において使用するバージョンのうちVer. 6. 01は、他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。

注記*：成岡昌夫，服部正他 コンピュータによる構造工学講座Ⅱ-1-B，日本鋼構造協会編，骨組構造解析，培風館，昭和46年6月，pp. 20～33

VI-5-28 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ S N A P - L E

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、VI-2-2-13「排気筒の地震応答計算書」において使用した計算機プログラム（解析コード）SNAP-LEについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-2-13	排気筒の地震応答計算書	Ver. 6.0.0.4

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	SNAP-LE
使用目的	立体架構モデルによる地震応答解析及び応力解析
開発機関	株式会社構造システム
開発時期	1999年（一般商業用リリース）
使用したバージョン	Ver. 6. 0. 0. 4
コードの概要	<p>SNAP-LE（以下「本解析コード」という。）は、任意形状の構造物に対する静的及び動的応答解析を目的として開発された、構造解析用の汎用計算機プログラムである。</p> <p>適用モデル（ビーム要素）に対して、静的線形解析、動的応答解析（弾性、部材レベルの弾塑性）、荷重増分解析等の機能を有している。</p> <p>数多くの研究機関や企業において、主に建築分野の構造解析に使用されている。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について、本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。 ・ 本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 本解析コードは、主に建築分野において使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・ 検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから、検証結果を持って、解析機能の妥当性も確認できる。 ・ 本工事計画における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。 ・ 島根2号機排気筒の耐震裕度向上を目的とした工事計画届において、排気筒に対する地震応答解析に本解析コード（Ver. 6. 0. 0. 4）が使用された実績がある。

VI-5-29 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ S L A P

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
2.1 SLAP Ver. 6. 62	3
3. 解析手法	4
3.1 一般事項	4
3.2 解析コードの特徴	4
3.3 解析手法	5
3.3.1 支配方程式	5
3.3.2 静的解析	6
3.3.3 時刻歴応答解析	6
3.4 解析フローチャート	7
3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)	8
3.5.1 検証	8
3.5.2 妥当性確認	10
3.5.3 評価結果	17

1. はじめに

本資料は、VI-2-20「屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の地震応答計算書」において使用した計算機プログラム（解析コード）SLAP について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-2-20	屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の地震応答計算書	Ver. 6.62

2. 解析コードの概要

2.1 SLAP Ver. 6.62

項目	コード名 SLAP
使用目的	2次元有限要素法による地震応答解析
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	1998年
使用したバージョン	Ver. 6.62
コードの概要	<p>SLAP(以下「本解析コード」という。)は2次元, 3次元問題に適用可能で, 静荷重, 動荷重の取り扱いができる構造解析の汎用コードである。</p> <p>動的解析においては, 線形弾性解析及び材料非線形解析等を時間領域における数値積分により行うことができる。</p> <p>本解析コードは, 土木・建築分野において使用される要素群, 材料非線形解析モデルを数多くサポートしており, 日本国内において, 官公庁, 民間問わず, 多くの利用実績がある。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証の内容は, 以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる問題について, 本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い, 解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について, 開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は, 以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは, 国内の土木・建築分野における使用実績を有しており, 十分に妥当性が確認されている。 ・屋外重要土木構造物を模した実験体を用いた大型振動台実験結果と地震応答解析結果がおおむね一致していることを確認している。 ・本工事計画において, 本解析コード (Ver. 6.62) は2次元有限要素法による地震応答解析に適用性があることを確認している。 ・開発機関が提示するマニュアルにより, 本工事計画で使用する2次元有限要素法による地震応答解析に本解析コードが適用できることを確認している。 ・検証の体系と本工事計画で使用する体系が同等であることから, 検証の結果をもって, 解析機能の妥当性も確認できる。 ・本工事計画で使用する2次元有限要素法による地震応答解析の用途, 適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

3. 解析手法

3.1 一般事項

本資料は、解析コード SLAP Ver. 6.62 (以下「本解析コード」という。)の概要である。本解析コードは、2次元及び3次元問題に適用可能で、静荷重、動荷重の取り扱いができる汎用コードである。地盤-構造物連成系の相互作用解析を行う2次元及び3次元地震応答解析が可能であり、屋外重要構造物に対する地震応答解析に使用している。

3.2 解析コードの特徴

本解析コードは、複合非線形(材料非線形と幾何学的非線形)を考慮できる静的・動的解析システムである。主な特徴を以下に示す。

- ・ 2次元及び3次元有限要素解析プログラムである。
- ・ 3次元ソリッド要素, 2次元ソリッド要素, 平板要素, はり要素, バネ・マス・ダンパー要素, 剛体要素を用いることができる。
- ・ 2次元及び3次元の応力解析を行うことができる。
- ・ 地盤-構造物の連成による相互作用を考慮した地震応答解析を行うことができる。
- ・ 静的解析を引き継いだ動的解析ができる。
- ・ 地盤及び構造物の非線形性を考慮した解析を行うことができる。
- ・ 鉄筋コンクリートの非線形性については, コンクリート及び鉄筋の材料非線形を考慮したファイバー要素, 非線形平板要素等が使用できる。

3.3 解析手法

3.3.1 支配方程式

多自由度系の非線形支配方程式は次式で表される。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + \{F\} = \{R\} \quad (3.1)$$

ここで、

$[M]$: 質量マトリックス

$[C]$: 減衰マトリックス

$\{F\}$: 要素内力ベクトル

剛性マトリックス $[K]$ が線形の場合 $\{F\} = [K]\{u\}$

$[K]$: 剛性マトリックス

$\{\ddot{u}\}$: 相対加速度ベクトル

$\{\dot{u}\}$: 相対速度ベクトル

$\{u\}$: 相対変位ベクトル

$\{R\}$: 外力ベクトル

$$\{R\} = -\sum_{i=1}^n [M]\{v_i\}\ddot{\alpha}_i + \{R_f\}$$

$\ddot{\alpha}_i$: i 方向の入力地震加速度

n : 入力地震動作用方向数

$\{v_i\}$: i 方向に対応する自由度に 1 を立てた入力地震動方向ベクトル

$\{R_f\}$: 入力地震加速度以外の外力ベクトル

なお、静的解析の場合は、 $[M]=0$ $[C]=0$ であり、 $\{u\}$ は絶対変位となる。

3.3.2 静的解析

式 (3.1) より、荷重ステップ t から荷重ステップ $t+\Delta t$ の増分ステップにおける支配方程式は次式となる。

$$\begin{aligned}
 [{}^{t+\Delta t}\mathbf{K}^{(i-1)}]\{\Delta\mathbf{u}^{(i)}\} &= \{{}^{t+\Delta t}\mathbf{R}\} - \{{}^{t+\Delta t}\mathbf{F}^{(i-1)}\} \\
 \{{}^{t+\Delta t}\mathbf{u}^{(i)}\} &= \{{}^{t+\Delta t}\mathbf{u}^{(i-1)}\} + \{\Delta\mathbf{u}^{(i)}\} \\
 \{{}^{t+\Delta t}\mathbf{u}^{(0)}\} &= \{{}^t\mathbf{u}\} \\
 \{{}^{t+\Delta t}\mathbf{F}^{(0)}\} &= \{{}^t\mathbf{F}^{(0)}\}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

ここで、 Δt は増分インデックス、 (i) は収束計算回数を示す。

これを用い、式 (3.1) を満足するようにニュートンラプソン法により収束計算を行う。

3.3.3 時刻歴応答解析

時刻歴応答解析には、ニューマーク β 法 ($\beta=1/4$) による直接積分法を用いる。式 (3.1) より、収束計算で用いる時刻 $t+\Delta t$ における支配方程式は次式となる。

$$\begin{aligned}
 [M]\{{}^{t+\Delta t}\ddot{\mathbf{u}}^{(i)}\} + [C]\{{}^{t+\Delta t}\dot{\mathbf{u}}^{(i)}\} + [{}^{t+\Delta t}K^{(i-1)}]\{\Delta\mathbf{u}^{(i)}\} &= \{{}^{t+\Delta t}\mathbf{R}\} - \{{}^{t+\Delta t}\mathbf{F}^{(i-1)}\} \\
 \{{}^{t+\Delta t}\mathbf{u}^{(i)}\} &= \{{}^{t+\Delta t}\mathbf{u}^{(i-1)}\} + \{\Delta\mathbf{u}^{(i)}\} \\
 \{{}^{t+\Delta t}\ddot{\mathbf{u}}^{(i)}\} &= \frac{4}{\Delta t^2}(\{{}^{t+\Delta t}\mathbf{u}^{(i-1)}\} - \{{}^t\mathbf{u}\} + \{\Delta\mathbf{u}^{(i)}\}) - \frac{4}{\Delta t}\{{}^t\dot{\mathbf{u}}\} - \{{}^t\ddot{\mathbf{u}}\} \\
 \{{}^{t+\Delta t}\dot{\mathbf{u}}^{(i)}\} &= \{{}^t\dot{\mathbf{u}}\} + \frac{\Delta t}{2}(\{{}^t\ddot{\mathbf{u}}\} + \{{}^{t+\Delta t}\ddot{\mathbf{u}}^{(i)}\}) \\
 \{{}^{t+\Delta t}\mathbf{u}^{(i)}\} &= \{{}^{t+\Delta t}\mathbf{u}^{(i-1)}\} + \{\Delta\mathbf{u}^{(i)}\} \\
 \{{}^{t+\Delta t}\mathbf{u}^{(0)}\} &= \{{}^t\mathbf{u}\} \\
 \{{}^{t+\Delta t}\mathbf{F}^{(0)}\} &= \{{}^t\mathbf{F}^{(0)}\}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

ここで、 Δt は時間きざみ、 (i) は収束計算回数を示す。

これを用い、式 (3.1) を満足するようにニュートンラプソン法により収束計算を行う。

3.4 解析フローチャート

静的解析及び地震応答解析の解析フローチャートを図3-1に示す。

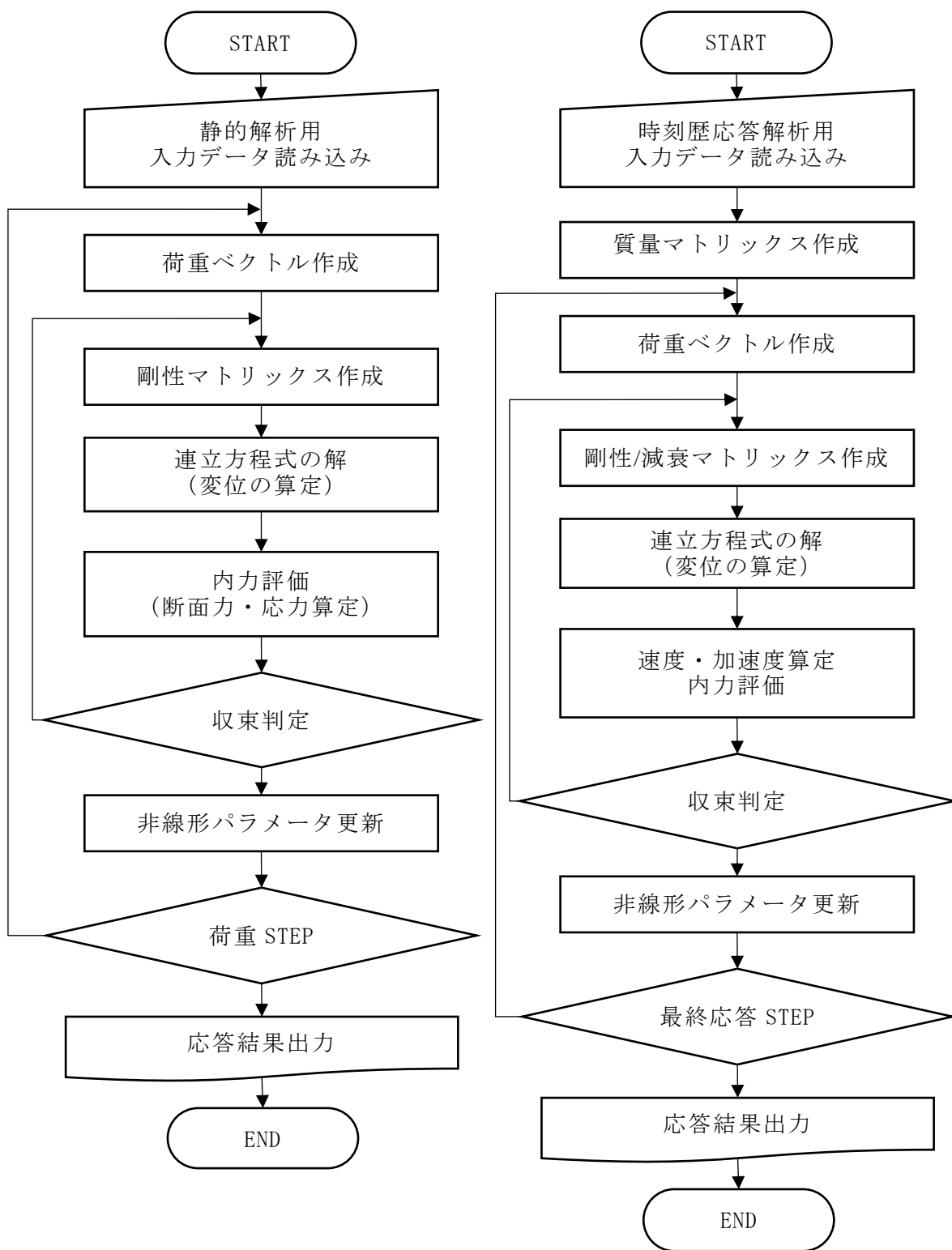


図3-1 解析フローチャート（左：静的解析，右：地震応答解析）

3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)

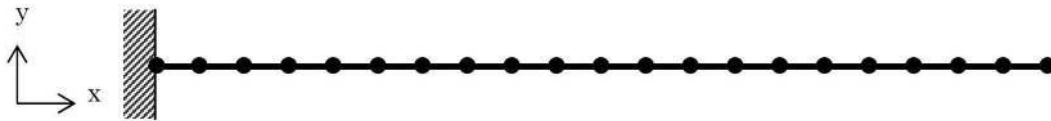
本解析コードを本解析に用いるにあたり，検証として例題を解析し，理論解との比較を実施した。妥当性確認として本解析コードによる解析解と，実証実験結果との比較を実施した。その詳細な内容については下記のとおりとする。

3.5.1 検証

例題の解析解と，本解析コードによる解析解の比較を実施し，解析解と本解析コードによる解析解がおおむね一致していることを確認した。

(1) 片持ちばりの曲げ振動

解析モデルと材料定数を図 3-2 に示す。



断面積(A) sectional area	ヤング率(E) Young's modulus	質量密度(ρ) mass density	断面 2 次モーメント (I) moment of inertia of area	せん断断面係数 shearing section modulus	部材長(L) length
0.000004m ²	2.06×10 ¹¹ N/m ²	7.85×10 ³ kg/m ³	1.3333×10 ⁻¹² m ⁴	0	0.4 m

図 3-2 解析モデル (上) と材料特性 (下)

表 3-1 に理論解及び本解析コードによる解析解を示す。理論解と本解析コードによる解析解がおおむね一致することを確認した。

表 3-1 理論解と解析解の比較

モード次数	固有振動数 (Hz)	
	理論解	SLAP 解析解
1 次	10.34	10.344
2 次	64.83	64.822
3 次	181.48	181.500
4 次	355.69	355.650
5 次	587.98	587.930

(2) 有孔円盤の応力

解析モデルと材料定数を図 3-3 に示す。

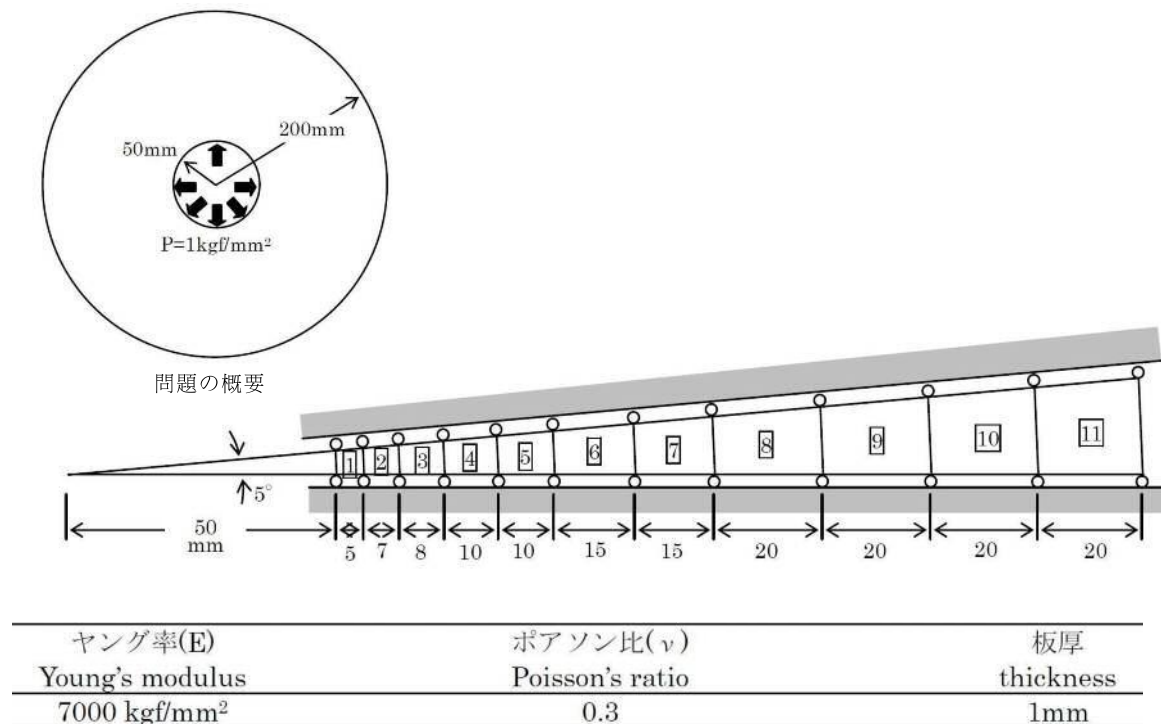


図 3-3 解析モデル (上) と材料特性 (下)

表 3-2 に理論解及び本解析コードによる解析解を示す。理論解と本解析コードによる解析解がおおむね一致することを確認した。

表 3-2 理論解と解析解の比較

要素番号	σ_r (kg f /mm ²)		σ_θ (kg f /mm ²)	
	理論解	SLAP 解析解	理論解	SLAP 解析解
1	-0.90080	-0.90160	1.03420	1.03300
2	-0.71250	-0.71330	0.84590	0.84620
3	-0.54550	-0.54610	0.67890	0.67910
4	-0.40740	-0.40790	0.54070	0.54140
5	-0.30240	-0.30280	0.43580	0.43580
6	-0.21380	-0.21420	0.34720	0.34810
7	-0.14400	-0.14420	0.27740	0.27770
8	-0.09112	-0.09121	0.22450	0.22510
9	-0.05185	-0.05186	0.18520	0.18550
10	-0.02560	-0.02558	0.15890	0.15910
11	-0.00720	-0.00717	0.14050	0.14060

3.5.2 妥当性確認

屋外重要土木構造物を対象とした埋設地中構造物の大規模加振実験の実験結果と本解析コードによる解析解を比較し、地盤-構造物の連成挙動への適用の妥当性を確認した。

(1) 大規模加振実験の概要

大規模加振実験では、図 3-4 に示すように RC 2 連ボックスカルバート試験体を、せん断土槽体に完全に固定し、乾燥した珪砂にて埋設した。加振時に用いられた入力加速度波形には、1995 年兵庫県南部地震における神戸大学観測波（NS 成分）に基づき、時間縮尺を 1/2 とし、最大加速度振幅を 1000Gal 程度に調整したものをを用いた。RC 供試体の寸法及び配筋を図 3-5 に示す。

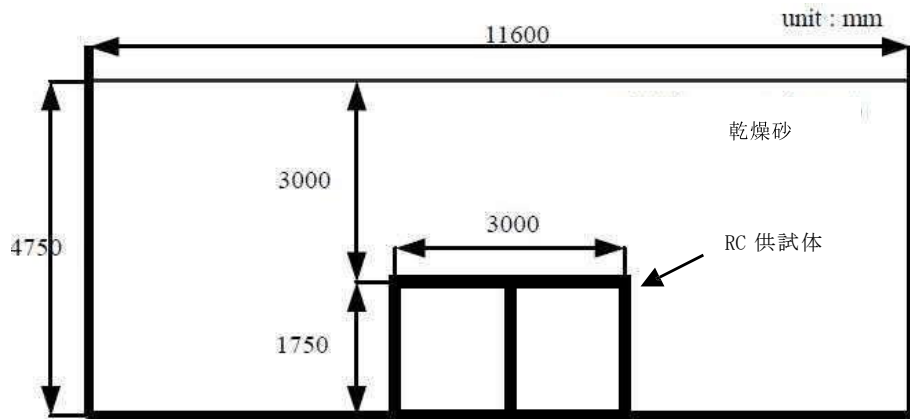
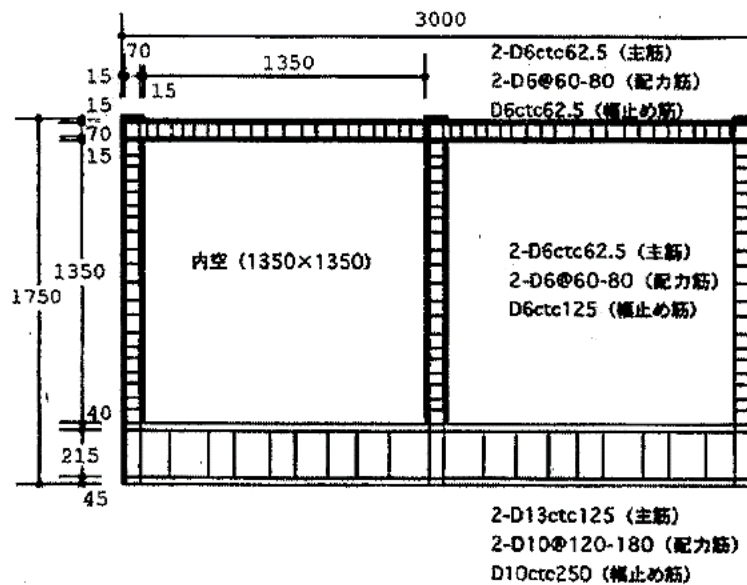


図 3-4 振動台実験の概要



単位: mm

図 3-5 RC 供試体の寸法及び配筋

(2) 解析条件

a. 解析モデルの構成

解析に用いた2次元有限要素分割図を図3-6に示す。モデルは、せん断土槽の寸法（幅 11.6m, 高さ 4.75m）とし、地盤の側方境界には、動の実験時に生じる土槽枠の慣性力の影響を考慮した単位奥行き長さ相当の質量を付加した。側方境界部では、同じ深度にある左右の境界節点の水平・鉛直変位が等しくなるように制御した。

構造物と地盤の境界にはジョイント要素を設ける。

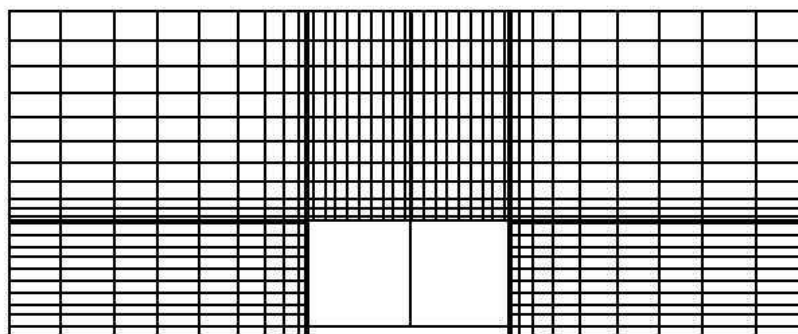


図 3-6 2次元有限要素分割図

b. 地盤のモデル化

地盤はダイレタンシーを考慮しない全応力・履歴依存型の修正 HD モデルを用いた。

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + \frac{G_0 \gamma}{\tau_m}} \quad (3.4)$$

$$\tau_m = G_0 \gamma_m \quad (3.5)$$

ここに、

- τ : せん断応力
- γ : せん断ひずみ
- G_0 : 初期せん断弾性係数
- τ_m : せん断強度
- γ_m : 基準ひずみ

地盤の中空ねじり試験と修正 HD モデルで計算した G/G_0 , h - γ の関係を図 3-7 に示す。

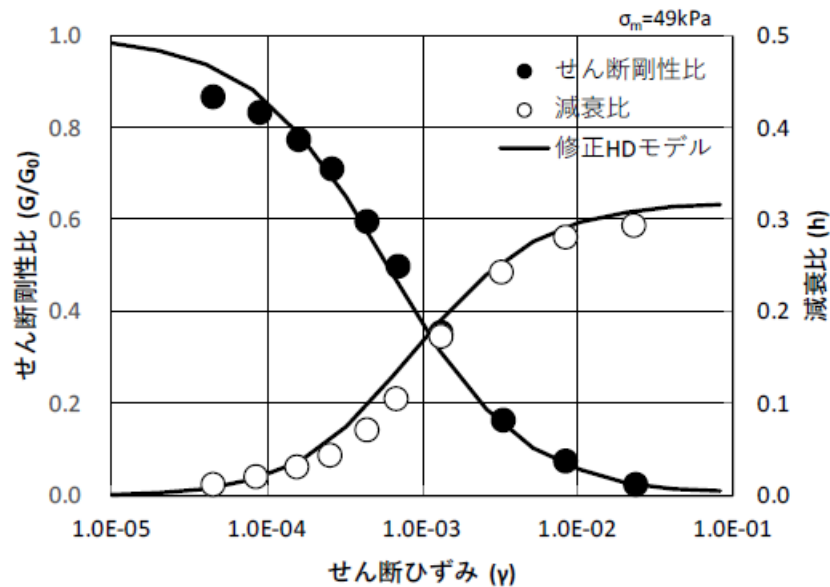


図 3-7 地盤の動的変形特性と修正 HD モデル

c. RC 部材のモデル化

RC 部材はファイバーモデルの非線形はり要素でモデル化する。ファイバーモデルは、図 3-8 に示すように線材要素の断面を層状に分割し、各層（ファイバー）が平面保持をして変形し、分割した個々のファイバー内では応力・ひずみが一定である。各ファイバーは当該材料の非線形性を考慮することができる。

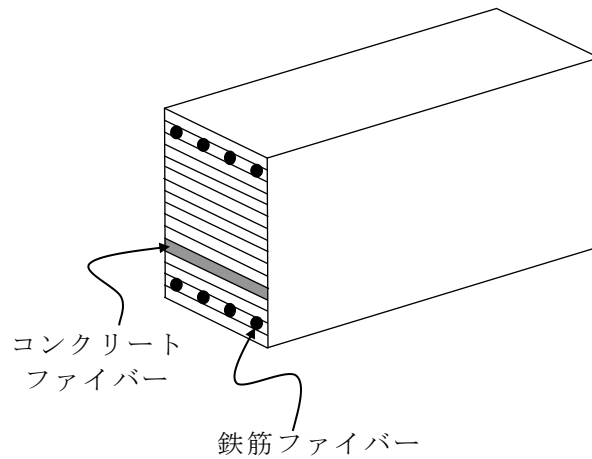


図 3-8 ファイバーモデルによる部材のモデル化

(3) 実験と解析の比較

a. 地盤-構造物全体系の変形挙動

地盤の側方境界における最大水平変位の深度分布を図3-9に示す。本解析コードによる解析解は実験値とおおむね一致している。

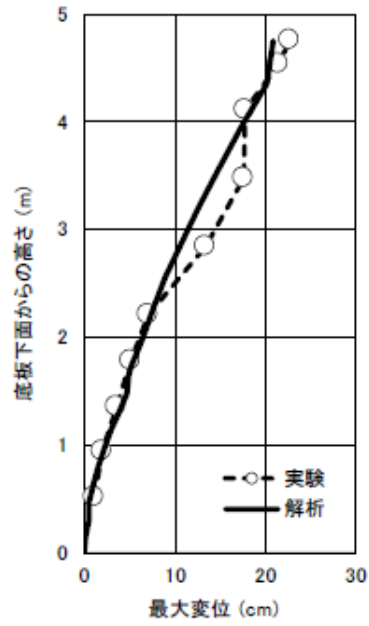


図3-9 水平方向最大変位の深度分布

b. 層間変位

構造物の内空空間の確保を直接照査する層間変位について、その時刻歴の比較を図 3-10 に示す。本解析コードによる解析解は実験値とおおむね一致している。

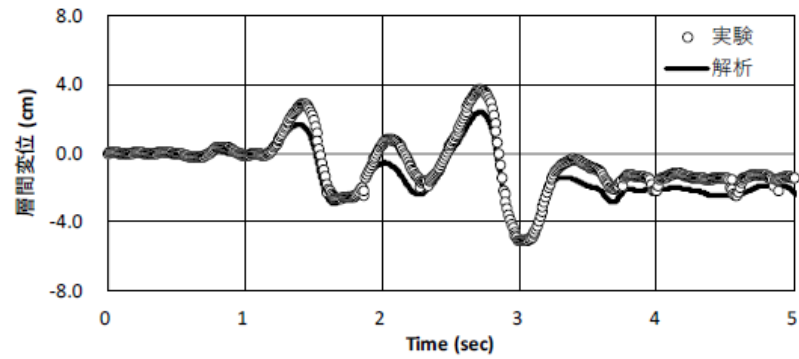


図 3-10 時刻歴層間変位

c. 応答加速度

構造物頂版中央部の時刻歴応答加速度の比較を図 3-11 に示す。本解析コードによる解析解は実験値とおおむね一致している。

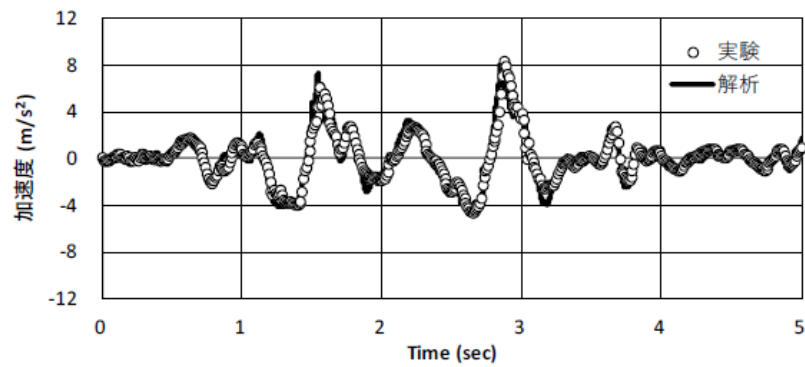


図 3-11 構造物頂版中央部の時刻歴応答加速度

d. せん断力

構造物頂版左方部に生じる時刻歴応答せん断力の比較を図 3-12 に示す。本解析コードによる解析解は実験値とおおむね一致している。

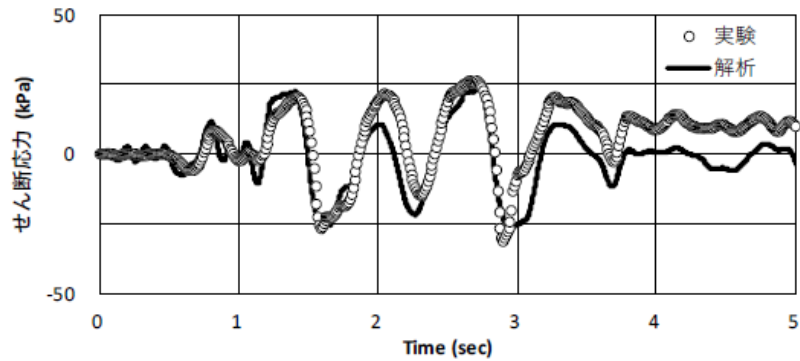


図 3-12 構造物頂版左方部に生じる時刻歴せん断力

参考文献

- 1) 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針<技術資料>Ⅱ, 土木学会原子力土木委員会, 2002年5月
- 2) 鉄筋コンクリート製地中構造物の耐震性能照査法の高度化(その1)ー地中構造物の塑性変形挙動に関する実験的検討ー, 電力中央研究所報告, 平成14年2月
- 3) 鉄筋コンクリート製地中構造物の耐震性能照査法の高度化(その2)ー密な乾燥砂地盤・構造物連成系解析における地盤非線形モデルの適用性評価ー, 電力中央研究所報告, 平成15年1月
- 4) 鉄筋コンクリート製地中構造物の耐震性能照査法の高度化(その3)ー部材非線形モデルを用いた地盤-構造物連成系解析手法の適用性の検証ー, 電力中央研究所報告, 平成15年1月

3.5.3 評価結果

本解析コードで例題を解析し，理論解と解析解が一致していることを確認した。また，実証実験結果と比較し，本解析コードの解析結果は，地盤－構造物全体系の変形挙動，層間変位，加速度及びせん断力においておおむね実験値と一致することを確認した。したがって，本解析に本解析コードを使用することは妥当である。

VI-5-30 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ m i c r o S H A K E / 3 D

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
2.1 microSHAKE/3D Ver. 2. 2. 3. 311	3
2.2 microSHAKE/3D Ver. 2. 3. 1	4

1. はじめに

本資料は、VI-2-2-18「取水槽の地震応答計算書」等において使用した計算機プログラム（解析コード）microSHAKE/3Dについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-2-18	取水槽の地震応答計算書	Ver. 2. 2. 3. 311
VI-2-2-30	第 1 ベントフィルタ格納槽の地震応答計算書	Ver. 2. 3. 1
VI-2-2-32	低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽の地震応答計算書	Ver. 2. 3. 1
VI-2-2-37	屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）の地震応答計算書	Ver. 2. 3. 1

2. 解析コードの概要

2.1 microSHAKE/3D Ver. 2. 2. 3. 311

項目	コード名 microSHAKE/3D
使用目的	1次元地震応答解析による入力地震動算定
開発機関	株式会社地震工学研究所
開発時期	2011年
使用したバージョン	Ver. 2. 2. 3. 311
コードの概要	<p>microSHAKE/3D（1次元波動伝播解析コード）は、1次元重複反射理論に基づく地盤の地震応答解析を行うことが可能であり、地盤の非線形性はひずみ依存性を用いて等価線形法により考慮することができる。</p> <p>本解析コードの主な特徴は、以下のとおりである。</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 1次元重複反射理論に基づくプログラムである。 ② 地盤の非線形性はひずみ依存特性を用いて等価線形法により考慮することができる。 ③ 鉛直動は、S波速度 V_s をP波速度 V_p として定義することで対応が可能である。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証(Verification)】 本解析コードの検証内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードについて、2層のモデル地盤において地震応答解析を行った解析解と、1次元重複反射理論に基づく理論解が一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証の内容のとおり、地盤の応答解析について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。 ・原子力産業界において、原子力発電所の土木構造物評価をはじめとする多数の解析に本解析コードが使用されており、十分な使用実績があるため、信頼性があると判断できる。 ・日本原子力発電株式会社東海第二発電所において、常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備等の1次元地震応答解析（入力地震動算定）で本解析コード（Ver. 2. 2. 3. 311）が使用された実績がある。 ・本工事計画における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

2.2 microSHAKE/3D Ver. 2.3.1

項目	コード名 microSHAKE/3D
使用目的	1次元地震応答解析による入力地震動算定
開発機関	株式会社地震工学研究所
開発時期	2011年
使用したバージョン	Ver. 2.3.1
コードの概要	<p>microSHAKE/3D（1次元波動伝播解析コード）は、1次元重複反射理論に基づく地盤の地震応答解析を行うことが可能であり、地盤の非線形性はひずみ依存性を用いて等価線形法により考慮することができる。</p> <p>本解析コードの主な特徴は、以下のとおりである。</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 1次元重複反射理論に基づくプログラムである。 ② 地盤の非線形性はひずみ依存特性を用いて等価線形法により考慮することができる。 ③ 鉛直動は、S波速度 V_s をP波速度 V_p として定義することで対応が可能である。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証(Verification)】 本解析コードの検証内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードについて、2層のモデル地盤において地震応答解析を行った解析解と、1次元重複反射理論に基づく理論解が一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された内容を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証の内容のとおり、地盤の応答解析について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。 ・原子力産業界において、原子力発電所の土木構造物評価をはじめとする多数の解析に本解析コードが使用されており、十分な使用実績があるため、信頼性があると判断できる。 ・日本原子力発電株式会社東海第二原子力発電所において、常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備等の1次元地震応答解析（入力地震動算定）で本解析コード（Ver. 2.2.3.311）が使用された実績がある。 ・今回の工認申請において使用するバージョンは、既工認において使用されているものと異なるが、バージョンの変更において解析機能に影響のある変更が行われていないことを確認している。 ・本工事における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

VI-5-31 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ A N S Y S

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
2.1 ANSYS Ver. 13.0	3
2.2 ANSYS Ver. 14.0	4

1. はじめに

本資料は、VI-2-3-2-1において使用した計算機プログラム（解析コード）ANSYSについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-3-2-1	燃料集合体の耐震性についての計算書	Ver. 13.0, Ver. 14.0

2. 解析コードの概要

2.1 ANSYS Ver. 13.0

項目	コード名 ANSYS
使用目的	有限要素法による下部端栓溶接部応力評価
開発機関	ANSYS Inc.
開発時期	1970年
使用したバージョン	Ver. 13.0
コードの概要	<p>ANSYS (以下「本解析コード」という。) は、スワンソン・アナリシス・システムズ (現、ANSYS Inc.) により開発された有限要素法による計算機プログラムである。</p> <p>本解析コードは、広範囲にわたる多目的有限要素法による計算機プログラムである。本解析コードは、伝熱、構造、マルチフィジックス、流体、陽解法による動的、電磁界及び流体力学のシミュレーション並びに解析を実施するものである。</p> <p>本解析コードは、ISO9001及びASME NQA-1の認証を受けた品質保証システムのもとで開発され、アメリカ合衆国原子力規制委員会による10CFR50並びに10CFR21の要求を満たしており、数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、機械、建築、土木等の様々な分野の構造解析に広く利用されている。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、開発元のリリースノートの例題集において、多くの解析例に対する理論解と解析結果との比較により両者が一致することで検証されている。 ・本解析コードの運用環境について、開発元から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、機械、建築、土木等の様々な分野の構造解析に広く利用されていることを確認している。 ・本解析コードは、原子力分野では、原子炉設置 (変更) 許可申請書における応力解析等、これまで多くの構造解析に対し使用実績があり、9×9燃料 (B型) の原子炉設置 (変更) 許可申請書や燃料体設計認可申請書における下部端栓溶接部の応力評価に対し使用実績があることを確認している。

2.2 ANSYS Ver. 14.0

項目	コード名 ANSYS
使用目的	有限要素法による下部端栓溶接部応力評価
開発機関	ANSYS Inc.
開発時期	1970年
使用したバージョン	Ver. 14.0
コードの概要	<p>ANSYS (以下「本解析コード」という。) は、スワンソン・アナリシス・システムズ (現, ANSYS Inc.) により開発された有限要素法による計算機プログラムである。</p> <p>本解析コードは、広範囲にわたる多目的有限要素法による計算機プログラムである。本解析コードは、伝熱、構造、マルチフィジクス、流体、陽解法による動的、電磁界及び流体力学のシミュレーション並びに解析を実施するものである。</p> <p>本解析コードは、ISO9001及びASME NQA-1の認証を受けた品質保証システムのもとで開発され、アメリカ合衆国原子力規制委員会による10CFR50並びに10CFR21の要求を満たしており、数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、機械、建築、土木等の様々な分野の構造解析に広く利用されている。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、開発元のリリースノートの例題集において、多くの解析例に対する理論解と解析結果との比較により両者が一致することで検証されている。 ・本コード配布時に同梱されたANSYS Mechanical APDL Verification Testing Packageを入力とした解析により、上記例題集の検証を再現できることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発元から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、機械、建築、土木等の様々な分野の構造解析に広く利用されていることを確認している。 ・本解析コードは、原子力分野では、原子炉設置 (変更) 許可申請書における応力解析等、これまで多くの構造解析に対し使用実績があり、9×9燃料 (B型) の原子炉設置 (変更) 許可申請書や燃料体設計認可申請書における下部端栓溶接部の応力評価に対し使用実績があることを確認している。

<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 本解析コードは、既認可の下部端栓溶接部応力解析において使用実績のあるMARCと応力評価モデルは同一であり、同等な解析条件（有限要素モデル、ペレットやジルカロイ被覆管の物性値、荷重条件及び境界モデル）を設定可能なこと、MARCと本解析コードとで同等な解析が可能であることを確認している。
--	--

VI-5-32 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ F U R S T

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、VI-2-3-2-1において使用した計算機プログラム（解析コード）FURSTについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-3-2-1	燃料集合体の耐震性についての計算書	Ver. 5

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	FURST
使用目的	弾性解析による被覆管応力解析
開発機関	ゼネラル・エレクトリック社
開発時期	1978年
使用したバージョン	Ver. 5
コードの概要	<p>FURST（以下「本解析コード」という。）は、ゼネラル・エレクトリック社により開発された被覆管応力解析コードである。</p> <p>本解析コードは、燃料被覆管温度、燃料棒内圧、炉心条件、燃料棒寸法及び許容応力の統計的分布を考慮し、被覆管の支持格子間及び支持格子接触部の応力評価をモンテカルロ法により統計的に実施する。</p> <p>地震時には、通常運転時及び過渡時に被覆管に発生する応力の他に、水平及び鉛直地震加速度により被覆管に発生する応力を考慮する。</p> <p>本解析コードは、高燃焼度 8×8 燃料、9×9 燃料及びMOX燃料の設計・許認可解析に適用された実績がある。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・被覆管の応力計算式（厚肉円筒）がコードに正しく組み込まれていることを、本解析コードによる解析結果が別法計算による解析結果と一致していることにより確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コード検討会等規制機関による確認^{*1, *2, *3}が実施されていることを確認している。

注記*1：沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について（平成10年2月 株式会社日立製作所 HLR-033訂1）

*2：沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について（平成10年1月 株式会社東芝TLR-045改訂1）

*3：原子炉安全基準専門部会報告書，発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について（昭和63年5月12日 原子力安全委員会了承）

VI-5-33 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ B S P A N 2

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、VI-2-3-2-1において使用した計算機プログラム（解析コード）BSPAN2について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-3-2-1	燃料集合体の耐震性についての計算書	Ver. 2.2

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	BSPAN2
使用目的	弾性解析による被覆管応力解析
開発機関	原子燃料工業株式会社
開発時期	2011年
使用したバージョン	Ver. 2.2
コードの概要	<p>BSPAN2（以下「本解析コード」という。）は、原子燃料工業株式会社により開発された被覆管応力解析コードである。</p> <p>本解析コードは、軽水炉向け燃料棒について燃焼中に被覆管に発生する応力を評価し、設計比及び運転モードの変化により発生する応力振幅をモンテカルロ法により評価する解析コードBSPANに、耐震解析用の機能等を統合した改良コードである。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・組み込み式は、実験値、文献等の根拠に基づくものであり、当該式の使用が適切であることを確認し、理論解と解析結果が一致していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・改良前のBSPANコードを電力合同プログラム点検にて確認している。 ・組み込み式が正しく反映されることを理論解と解析結果が一致していることで確認している。 ・解析コードのバージョンアップ前後の比較により、燃料被覆管応力解析において既許認可の結果を再現できることを確認している。

VI-5-34 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ A S H S D 2 - B

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）ASHSD2-B について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-1-2-2	原子炉圧力容器の脆性破壊防止に関する説明書	Ver.0
VI-2-3-2-2-3	シュラウドサポートの耐震性についての計算書	Ver.0
VI-2-3-3-1-2	原子炉圧力容器の耐震性についての計算書	Ver.0
VI-3-別添6-1	炉心支持構造物の強度計算書	Ver.0

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	ASHSD2-B
使用目的	2次元有限要素法（軸対称モデル）による応力解析
開発機関	米国カリフォルニア大学及びバブコック日立株式会社
開発時期	1979年
使用したバージョン	Ver. 0
コードの概要	<p>本解析コードは、原子炉圧力容器に対する評価を目的として、有限要素法により軸対称構造物の軸対称及び非軸対称荷重に対する応力を計算する汎用プログラムである。</p> <p>荷重条件としては、内圧、差圧、軸力等の軸対称荷重のほか、水平力、曲げモーメント等非軸対称荷重を扱うことができる。</p> <p>要素としてシェル要素、三角形要素及び四角形要素があり、任意の組合せで構造物をモデル化できる。</p> <p>熱応力計算に当たっては、温度分布解析用解析コード（TACF）の結果をファイルを介して自動的に取り込むことができる。</p> <p>原子力の分野における使用実績を有している。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・内圧を受ける厚肉円筒の弾性解析と、理論解との比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードのマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用する応力解析に、本解析コードが適用できることを確認している。 ・本解析コードは、これまで多くの既工事計画で使用実績を有しており、妥当性は十分確認されている。

VI-5-35 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ T A C F

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）TACF について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-3-別添6-1	炉心支持構造物の強度計算書	Ver.0

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	TACF
使用目的	2次元有限要素法（軸対称モデル）による応力解析
開発機関	バブコック日立株式会社
開発時期	1982年
使用したバージョン	Ver. 0
コードの概要	<p>本解析コードは、原子炉圧力容器に対する評価を目的として、有限要素法により平面及び軸対称構造物の定常及び非定常温度分布を計算するプログラムである。</p> <p>温度分布計算は、領域を小さなメッシュに分割し、各メッシュについての熱平衡方程式をたて、定常問題は弛緩法*により、非定常問題は微小時間でステップごとの温度分布を順次求める方法による。</p> <p>境界条件としては、強制対流熱伝達のほか、自然対流熱伝達、輻射熱伝達等の非線型熱伝達も扱うことができる。</p> <p>要素として三角形要素及び四角形要素があり、任意の組合せで構造物をモデル化できる。</p> <p>原子力の分野における使用実績を有している。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・平板の1次元熱伝導の温度分布解析と、理論解との比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードのマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用する応力解析に、本解析コードが適用できることを確認している。 ・本解析コードは、これまで多くの既工事計画で使用実績を有しており、妥当性は十分確認されている。

注記*：エネルギー最小化原理に基づく解法の一つで反復法ともいう。近似解を仮定し、それを修正する計算を反復することによって、真の解に収束させる手法である。

VI-5-36 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ S A P - I V

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）SAP-IVについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-4-2-2	使用済燃料貯蔵ラックの耐震性についての計算書	CNDYN Ver. 4.1
VI-2-6-3-2-1-1	水圧制御ユニットの耐震性についての計算書	CNDYN Ver. 4.1
VI-2-10-1-2-1-8	非常用ディーゼル発電設備Bーディーゼル燃料貯蔵タンクの耐震性についての計算書	CNDYN Ver. 4.1
VI-2-11-2-7-3	チャンネル着脱装置の耐震性についての計算書	CNDYN Ver. 4.1
VI-2-11-2-7-5	制御棒貯蔵ハンガの耐震性についての計算書	CNDYN Ver. 4.1
VI-2-11-2-7-7	原子炉浄化系補助熱交換器の耐震性についての計算書	CNDYN Ver. 4.1

2. 解析コードの概要

項目	コード名 SAP-IV
使用目的	3次元有限要素法（シェルモデル）による固有値解析及び応力解析 3次元有限要素法（はりモデル）による固有値解析及び地震応答解析
開発機関	米国カリフォルニア大学 [redacted]
開発時期	1973年（米国カリフォルニア大学） [redacted]
使用したバージョン	CNDYN Ver. 4.1
コードの概要	<p>本解析コードは、カリフォルニア大学が開発したSAP-IVをベースに、 [redacted] [redacted]である。任意形状の3次元モデル（主にはり要素及びシェル要素）に対して、有限要素法を用いて静的解析及び動的解析を行うもので、主として、機器の固有値計算並びに自重、運転時荷重及び地震力による応力計算等に用いる。</p> <p>本解析コードは、機械工学、土木工学、航空工学等の分野において、多くの実績を有している。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・両持ちはりの単純支持円筒モデルについて、本解析コードによる解析結果と理論解とを比較して検討し、解析解と理論解が一致していることを確認している。 ・平板のモデルについて、シェルモデルによる固有値解析及び応力解析を行い、本解析コードによる解析結果と理論解とを比較して検討し、解析解と理論解が一致していることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、機械工学、土木工学、航空工学等の分野において、多くの実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・本解析コードのマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（シェルモデル）による固有値解析及び応力解析並びに3次元有限要素法（はりモデル）による固有値解析及び地震応答解析に、本解析コードが適用できることを確認している。 ・今回の工事計画認可申請における構造に対して使用する要素及び解析については、既工事計画において使用された実績がある。 ・今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは、既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。

VI-5-37 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ P R I M E

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、VI-2-3-2-1において使用した計算機プログラム（解析コード）PRIMEについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-3-2-1	燃料集合体の耐震性についての計算書	Ver. 1

2. 解析コードの概要

項目	コード名 PRIME
使用目的	燃料棒の熱的挙動及び機械的挙動の評価
開発機関	ゼネラル・エレクトリック社，株式会社東芝，株式会社日立製作所（メーカー共同開発）
開発時期	1985年
使用したバージョン	Ver. 1
コードの概要	<p>PRIME（以下「本解析コード」という。）は，ゼネラル・エレクトリック社，株式会社東芝，株式会社日立製作所で共同開発された燃料棒熱・機械設計コードである。</p> <p>本解析コードは，出力履歴に対応したペレット-被覆管のギャップ幅変化とガスの熱伝導率をもとにペレットと被覆管のギャップ熱伝達係数を求め，燃料棒の熱的挙動を評価すると同時に，軸対称有限要素法(FEM)により，ペレットと被覆管の相互作用等の機械的挙動を評価する。</p> <p>本解析コードは，高燃焼度8×8燃料，9×9燃料及びMOX燃料の設計・許認可解析に適用された実績がある。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は，以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ハルデン炉の試験燃料データ，商業炉燃料棒の照射後試験データ等に基づいてペレット中心温度，核分裂生成ガス放出率，燃料棒内圧及び被覆管直径変化を対象とした計算値と測定値の比較^{*1, *2}が実施され，コードに組み込まれた個々の解析モデルが正しく機能していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ハルデン炉の試験燃料データ等との比較における計算値と測定値のばらつきがコード予測の不確かさとして考慮^{*1, *2}されていることを確認している。 ・コード検討会等規制機関による確認^{*1, *2, *3}が実施されていることを確認している。

注記*1：沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について（平成10年2月 株式会社日立製作所 HLR-033訂1）

*2：沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について（平成10年1月 株式会社東芝TLR-045改訂1）

*3：原子炉安全基準専門部会報告書，発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について（昭和63年5月12日 原子力安全委員会了承）

VI-5-38 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ S i m c e n t e r N a s t r a n

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
2.1 Simcenter Nastran Ver. 1859.0018	3
2.2 Simcenter Nastran Ver. 1915.0004	4
3. 解析手法	5
3.1 一般事項	5
3.2 解析コードの特徴	5
3.3 解析手法	5
3.3.1 固有値解析	5
3.3.2 静的解析	6
3.4 解析フローチャート	8
3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)	9
3.5.1 検証	9
3.5.2 妥当性確認	16
3.5.3 評価結果	16

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）Simcenter Nastranについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-4-3-1-1	燃料プール冷却系熱交換器の耐震性についての計算書	Ver. 1915.0004
VI-2-5-4-1-1	残留熱除去系熱交換器の耐震性についての計算書	Ver. 1915.0004
VI-2-5-7-1-1	原子炉補機冷却系熱交換器の耐震性についての計算書	Ver. 1915.0004
VI-2-5-7-2-1	高圧炉心スプレイ補機冷却系熱交換器の耐震性についての計算書	Ver. 1915.0004
VI-2-6-5-2	出力領域計装の耐震性についての計算書	Ver. 1859.0018

2. 解析コードの概要

2.1 Simcenter Nastran Ver.1859.0018

コード名	Simcenter Nastran
項目	
使用目的	3次元有限要素法による固有値解析及び静的解析
開発機関	Siemens PLM Software
開発時期	1971年（一般商用リリース）
使用したバージョン	Ver.1859.0018
コードの概要	<p>本解析コードは、航空・宇宙関係の機体強度解析を目的として開発された有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。</p> <p>適用モデル（主にはり要素、シェル要素及びソリッド要素）に対して、静的解析（線形及び非線形）、動的解析（過度応答解析及び周波数応答解析）、固有値解析、伝熱解析（温度分布解析）、熱応力解析、線形座屈解析等の機能を有している。</p> <p>数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等の様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について、本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い、解析解が理論解と概ね一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等の様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから、検証結果によって解析機能の妥当性も確認できる。 ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

2.2 Simcenter Nastran Ver. 1915.0004

項目 \ コード名	Simcenter Nastran
使用目的	3次元有限要素法による固有値解析及び静的解析
開発機関	Siemens PLM Software
開発時期	1971年（一般商用リリース）
使用したバージョン	Ver. 1915.0004
コードの概要	<p>本解析コードは、航空・宇宙関係の機体強度解析を目的として開発された有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。</p> <p>適用モデル（主には要素、シェル要素及びソリッド要素）に対して、静的解析（線形及び非線形）、動的解析（過度応答解析及び周波数応答解析）、固有値解析、伝熱解析（温度分布解析）、熱応力解析、線形座屈解析等の機能を有している。</p> <p>数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等の様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・他のバージョンにおいて、構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について、本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い、解析解が理論解と概ね一致することを確認している。 ・バージョンの変更において、解析機能に影響のある変更が行われていないことを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等の様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから、検証結果によって解析機能の妥当性も確認できる。 ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

3. 解析手法

3.1 一般事項

本解析コードは、米国 NASA (National Aeronautics and Space Administration) により初期開発され、その後 MSC Software 社が商用コードとして開発し、現在 Siemens PLM Software が販売している有限要素法 (FEM) による構造解析汎用計算機コードである。

以降では、Simcenter Nastran Ver. 1859.0018 を代表として説明する。

3.2 解析コードの特徴

- (1) 多くの要素が用意されており、様々な種類の機器及び構造物の解析を行うことができる。
- (2) 多自由度を有する大規模問題を効率良く解析することができる。
- (3) 入力データを簡略化できるため、大規模問題を取り扱い易い。
- (4) モデルの確認及び解析結果の確認を図化したデータにより行うことができる。
- (5) 解析における座標系及び拘束条件は、取り扱う問題に応じて選択できる。

3.3 解析手法

3.3.1 固有値解析

構造体の動的な挙動は、時間 t 、質量 M 、減衰 C の要素を考慮した、式(3.1)で示す運動方程式で表される。

$$[M] \frac{d^2}{dt^2} \{\delta\} + [C] \frac{d}{dt} \{\delta\} + [K] \{\delta\} = \{F\} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

$[M]$: 全体質量マトリックス

$[C]$: 全体減衰マトリックス

$[K]$: 全体剛性マトリックス

$\{\delta\}$: 全体節点変位ベクトル

$\{F\}$: 全体荷重ベクトル

固有値解析では式(3.1)に対し、減衰無し $[C]=0$ 、荷重無し $\{F\}=0$ の自由振動状態を想定する。これを式に表すと、式(3.2)となる。

$$[M] \frac{d^2}{dt^2} \{\delta\} + [K] \{\delta\} = 0 \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

式(3.2)の解 $\{\delta\}$ は単純な調和振動となることが予測できるので、 $\{\delta\}$ を式(3.3)のように置き換える。

$$\{\delta\} = \{\phi\} e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

$\{\phi\}$: 全体変位ベクトル

i : 虚数

ω : 角速度

式(3.3)を時間 t で1階微分, 2階微分を行うと, 式(3.4)及び式(3.5)となる。

$$\frac{d}{dt}\{\delta\} = i\omega\{\phi\}e^{i\omega t} \dots\dots\dots (3.4)$$

$$\frac{d^2}{dt^2}\{\delta\} = -\omega^2\{\phi\}e^{i\omega t} \dots\dots\dots (3.5)$$

式(3.3)及び式(3.5)を式(3.2)に代入すると, 式(3.6)となる。

$$-\omega^2[M]\{\phi\}e^{i\omega t} + [K]\{\phi\}e^{i\omega t} = 0 \dots\dots\dots (3.6)$$

式(3.6)の両辺を $e^{i\omega t}$ で除して整理すると, 式(3.7)のとおりとなる。

$$([K] - \omega^2[M])\{\phi\} = 0 \dots\dots\dots (3.7)$$

式(3.7)は数学的に一般固有値問題となる。この式を満たす ω^2 と $\{\phi\}$ を求めることが固有値解析となる。ここで ω^2 は固有値, $\{\phi\}$ は固有ベクトルと呼ばれ, 自由度の数だけ存在する。 $[K]$ 及び $[M]$ が $n \times n$ のマトリックスであった場合, 固有値及び固有ベクトルの数は n 個となる。 ω は角速度なので, 振動数 f に変換するには式(3.8)を用いる。

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \dots\dots\dots (3.8)$$

3.3.2 静的解析

要素内の変位を仮定し, 節点変位を使って式(3.9)に示すとおり要素内任意点の変位を表現する。

$$\{U\} = [N]\{\delta^e\} \dots\dots\dots (3.9)$$

$\{U\}$: 要素内任意点の変位ベクトル

$[N]$: 形状関数マトリックス

$\{\delta^e\}$: 節点変位ベクトル

上記の変位を微分して, 要素内任意点のひずみを節点変位ベクトルで表すと, 式(3.10)のとおりとなる。

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\delta^e\} \dots\dots\dots (3.10)$$

$\{\varepsilon\}$: 要素内任意点のひずみベクトル

$[B]$: ひずみ-変位マトリックス

材料物性から求められる応力-ひずみの関係式から式(3.11)により応力が求められる。

式(3.11)にひずみの式(3.10)を代入すると, 式(3.12)となるため, 応力は要素節点変位から計算される。

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \dots\dots\dots (3.11)$$

$$\{\sigma\} = [D][B]\{\delta^e\} = [S]\{\delta^e\} \dots\dots\dots (3.12)$$

$\{\sigma\}$: 要素内任意点の応力ベクトル

$[D]$: 材料応力-ひずみマトリックス

$[B]$: ひずみ-変位マトリックス

[S] : 応力マトリックス

物体が力を受けた時の釣り合いを表す仮想仕事の原理は、式(3.13)により表される。

$$\iiint_V \{\delta \varepsilon\}^T \{\sigma\} dv - \iiint_V \{\delta U\}^T \{\bar{G}\} dv - \iint_{S_0} \{\delta U\}^T \{\bar{T}\} ds = 0 \cdots \cdots (3.13)$$

$\{\delta \varepsilon\}$: 仮想ひずみベクトル

$\{\delta U\}$: 仮想変位ベクトル

$\{\bar{G}\}$: \bar{X} , \bar{Y} の行ベクトル

\bar{X} , \bar{Y} : X, Y 方向の物体力

$\{\bar{T}\}$: 表面 S_0 での表面力ベクトル

式(3.13)の第1項は内部の変形による内部仕事、第2項及び第3項は外力による外部仕事であり、各々全体積 V 又は表面積 S_0 について積分した仕事釣り合うことを表している。

ひずみ-変位関係式(3.10)及び応力-ひずみ関係式(3.11)を仮想仕事の式(3.13)に代入し、要素剛性マトリックスの式(3.14)を導く。

$$[k^e] = \int [B]^T [D] [B] dv \cdots \cdots (3.14)$$

$[k^e]$: 要素剛性マトリックス

静的な構造全体の剛性方程式は、要素剛性方程式を全要素について重ね合わせた式(3.15)で与えられる。

$$[K] \{\delta\} = \{F\} \cdots \cdots (3.15)$$

全体剛性マトリックスは、要素剛性マトリックスをその節点に対応するマトリックスの位置に足し合わせることによって計算される。要素数を n_e とし、形式的に表現して式(3.16)及び式(3.17)となる。

$$[K] = \sum_{i=1}^{n_e} [k^e] \cdots \cdots (3.16)$$

$$\{F\} = \sum_{i=1}^{n_e} [F^e] \cdots \cdots (3.17)$$

$[F^e]$: 要素荷重マトリックス

式(3.15)に拘束条件を適用して連立方程式を解けば、節点変位 $\{\delta\}$ は式(3.18)のように求まる。ここでは形式的に $[K]^{-1}$ と表すが、連立方程式を解くことを意味しており、逆行列を計算する必要はない。

$$\{\delta\} = [K]^{-1} \{F\} \cdots \cdots (3.18)$$

全体節点変位ベクトル $\{\delta\}$ から要素の節点変位 $\{\delta^e\}$ を抽出して式(3.12)に代入すると、要素応力が計算される。

3.4 解析フローチャート

本コードの解析フローチャートを各解析別に，図 3-1 及び図 3-2 に示す。

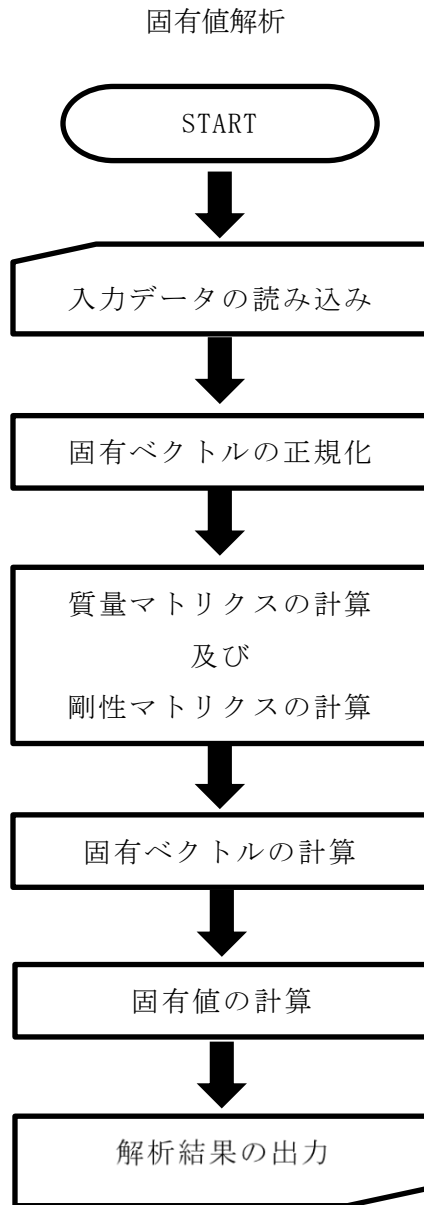


図 3-1 フローチャート（固有値解析）

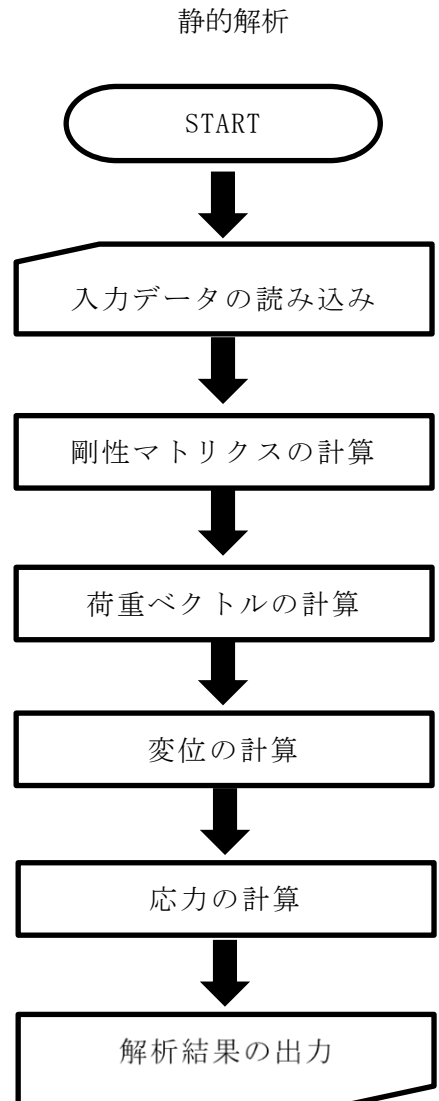


図 3-2 フローチャート（静的解析）

3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)

3.5.1 検証

(1) 両端固定はりの固有値解析

両端固定はりの固有値解析を行い、解析結果を理論解と比較する。はりの解析用物性値と寸法を表3-1及び図3-3に示す。また、はりの断面形状を図3-4に示す。

表 3-1 両端固定はりの物性値と断面特性・寸法

縦弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 ν	密度 ρ (t/mm ³)	断面積 A (mm ²)	断面二次 モーメント I (mm ⁴)	長さ l (mm)
2×10^5	0.3	7.9×10^{-9}	60	180	1000

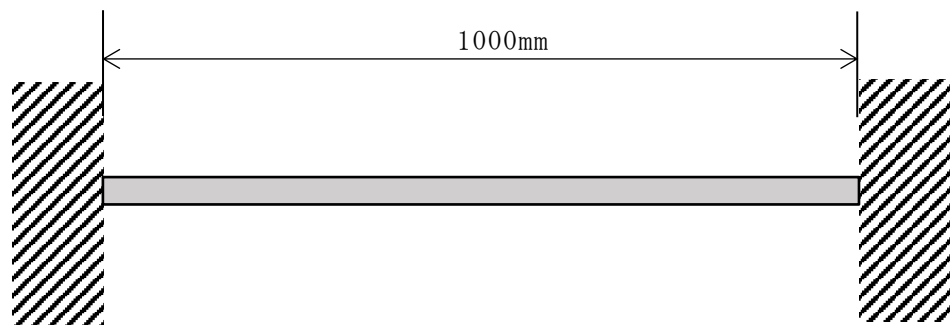


図 3-3 両端固定はりの寸法

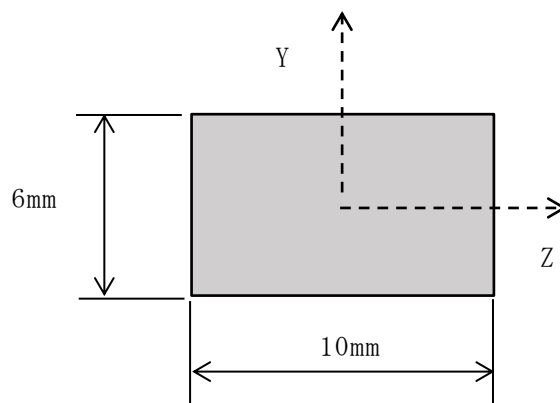


図 3-4 両端固定はりの断面形状

両端固定はりの横振動数の理論解は、式(3.19)により求める。

$$f_n = \frac{\lambda_n^2}{2\pi \cdot \ell^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho \cdot A}} \dots\dots\dots (3.19)$$

n : モード次数, n = 1, 2, 3

A : 断面積

I : 断面二次モーメント

E : 縦弾性係数

λ_n : 振動次数パラメータ

ρ : 密度 (単位体積当たりの質量)

ℓ : 長さ

表3-2に振動次数パラメータ λ_n の値を示す。

表 3-2 λ_n の値

支持条件	λ_1 (1次)	λ_2 (2次)	λ_3 (3次)
支持-支持	π	2π	3π
固定-自由	1.875	4.694	7.855
固定-支持	3.927	7.069	10.210
自由-自由	4.730	7.853	10.996
固定-固定	4.730	7.853	10.996

出典：機械工学便覧

両端固定はりの1次横振動数の理論解は、式(3.20)のように求まる。

$$f_1 = \frac{\lambda_n^2}{2\pi \cdot \ell^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho \cdot A}}$$

$$= \frac{4.730^2}{2\pi \cdot 1000^2} \sqrt{\frac{2 \times 10^5 \times 180}{7.9 \times 10^{-9} \times 60}} = 31.0 \text{ (Hz)} \dots\dots\dots (3.20)$$

表3-3に固有振動数の理論解と解析結果の比較を示す。両端固定はりの解析モデルを図3-5に示す。解析モデルには、はり要素を使用し、長さ方向に40要素に分割した。図3-6に固有値解析結果を示す。表3-3に示すとおり、解析結果と理論解は一致しており、本解析コードの妥当性が確認された。

表 3-3 固有振動数の解析結果と理論解の比較 (両端固定はり)

次数	固有振動数 (Hz)	
	理論解	解析結果
1次	31.0	31.0

節点 : 41
要素 : 40

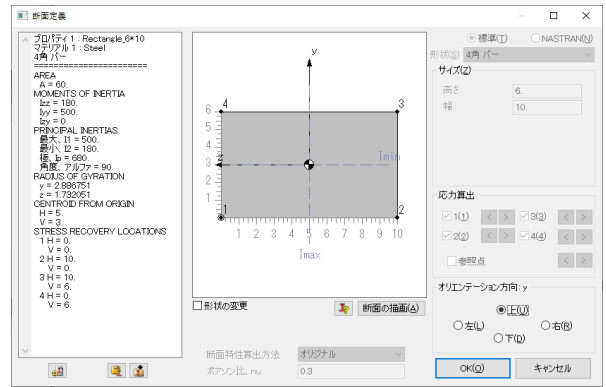
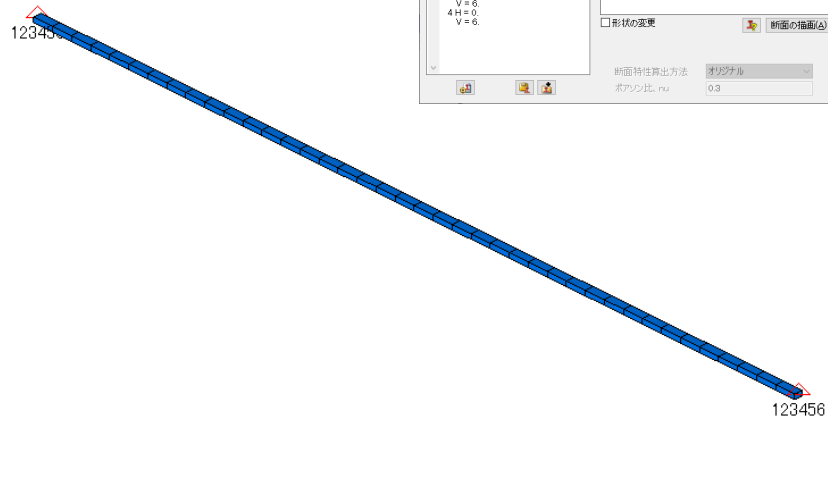
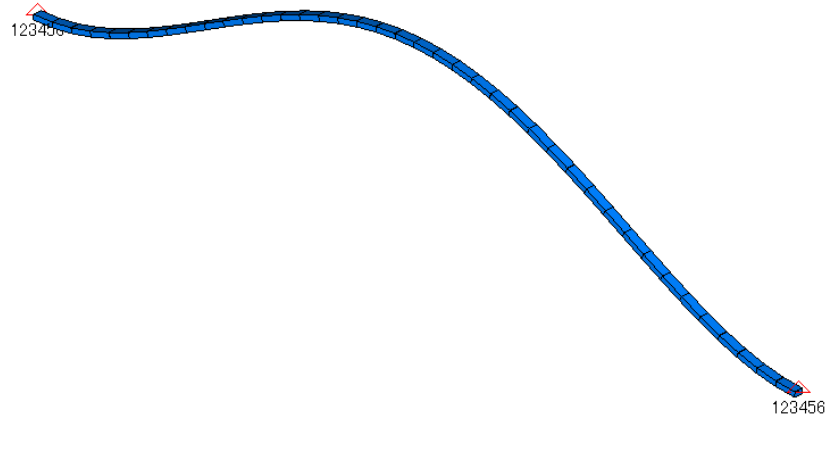


図 3-5 両端固定はりの解析モデル

1 次固有振動数 (f_1) = 31.0 (Hz)



アウトプットセット: Mode 1, 31.02511 Hz
変形(72.94): Total Translation

図 3-6 両端固定はりの固有値解析結果

(2) 片持ちはりの自由端への集中荷重解析

片持ちはりの自由端への集中荷重Fによる静的解析を行い、たわみと曲げ応力について理論解と比較する。はりの計算用物性値と断面特性及び寸法を、表3-4及び図3-7に示す。また、はりの断面形状を図3-8に示す。荷重の種類と値を表3-5に示す。

表 3-4 片持ちはりの物性値と断面特性・寸法

縦弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 ν	密度 ρ (t/mm ³)	断面積 A (mm ²)	断面二次 モーメント I (mm ⁴)	断面係数 Z (mm ³)	はりの長さ l (mm)
2×10^5	0.3	7.9×10^{-9}	480	16000	1600	800

表 3-5 荷重

集中荷重 F (N)
100

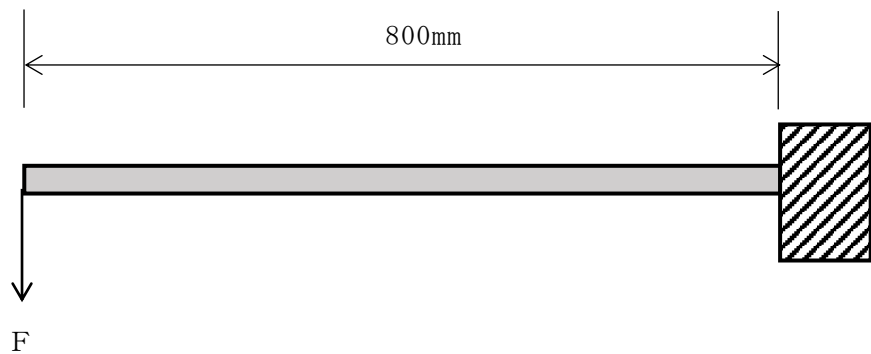


図 3-7 片持ちはりの寸法

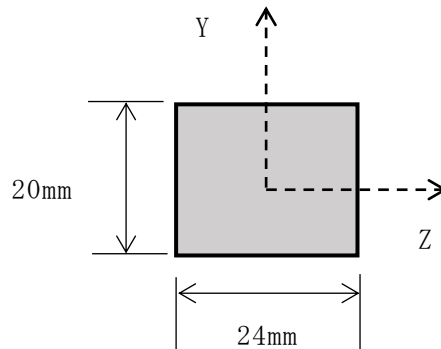


図 3-8 片持ちはりの断面形状

片持ちはりのたわみ δ の理論解は、式(3.21)により求める。

$$\delta = \frac{F \cdot \ell^3}{3E \cdot I} \cdots \cdots \cdots (3.21)$$

F : 荷重

l : 長さ

E : 縦弾性係数

I : 断面二次モーメント

本解析モデルのたわみの理論解は、式(3.22)のとおり求まる。

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{F \cdot \ell^3}{3E \cdot I} \\ &= \frac{100 \cdot 800^3}{3 \cdot 2.0 \times 10^5 \cdot 16000} = 5.33 \text{ (mm)} \cdots \cdots \cdots (3.22) \end{aligned}$$

片持ちはりの曲げ応力 σ_M の理論解は、式(3.23)及び式(3.24)により求める。

$$M = F \cdot \ell \cdots \cdots \cdots (3.23)$$

M : 曲げモーメント

$$\sigma_M = \frac{M}{Z} \cdots \cdots \cdots (3.24)$$

σ_M : 曲げ応力

Z : 断面係数

本解析モデルの固定端の曲げ応力の理論解は、式(3.25)及び式(3.26)のとおり求まる。

$$\begin{aligned} M &= F \cdot \ell \\ &= 100 \cdot 800 = 80000 \text{ (N} \cdot \text{mm)} \cdots \cdots \cdots (3.25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_M &= \frac{M}{Z} \\ &= \frac{80000}{1600} = 50 \text{ (MPa)} \cdots \cdots \cdots (3.26) \end{aligned}$$

理論解と解析結果の比較について、たわみの比較を表3-6に、曲げ応力の比較を表3-7に示す。片持ちはりの解析モデルを図3-9に示す。解析モデルには、はり要素を使用し、長さ方向に40要素に分割した。図3-10及び図3-11に解析結果を示す。表3-6及び表3-7に示すとおり、解析結果と理論解は概ね一致しており、本解析コードの妥当性が確認された。

表 3-6 たわみの解析結果と理論解の比較 (片持ちはり)

自由端からの 軸方向距離 (mm)	たわみ δ (mm)	
	理論解	解析結果
0	5.33	5.34

表 3-7 曲げ応力の解析結果と理論解の比較 (片持ちはり)

自由端からの 軸方向距離 (mm)	応力 σ_M (MPa)	
	理論解	解析結果
800	50.0	50.0

節点 : 41
要素 : 40

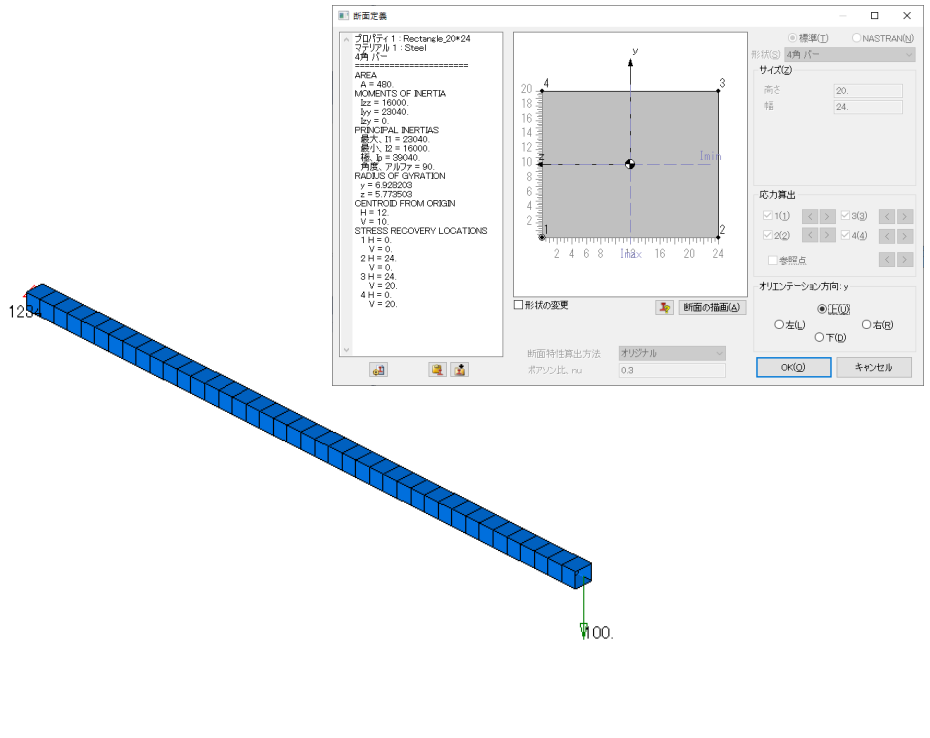


図 3-9 片持ちはりの解析モデル

最大たわみ (Z 方向) = -5.34 (mm)

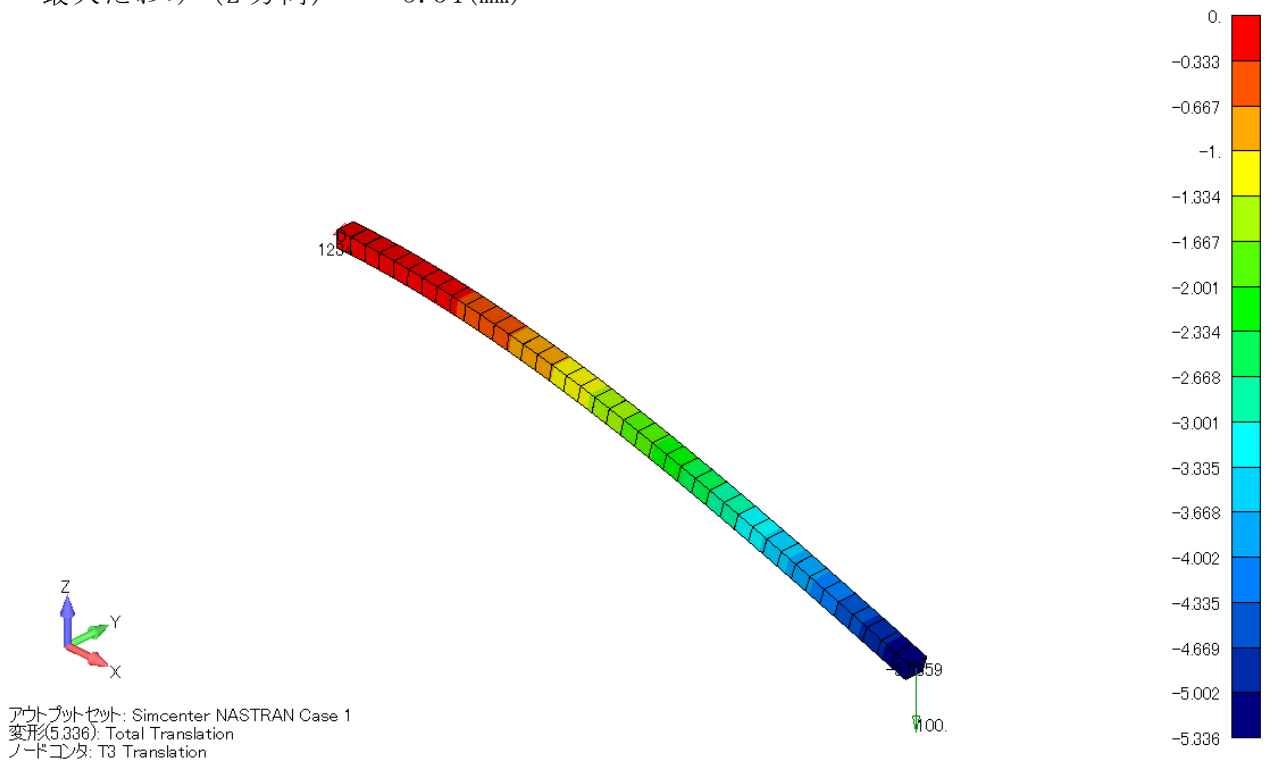


図 3-10 片持ちはりの解析結果 (たわみ)

最大曲げ応力 = 50 (MPa)

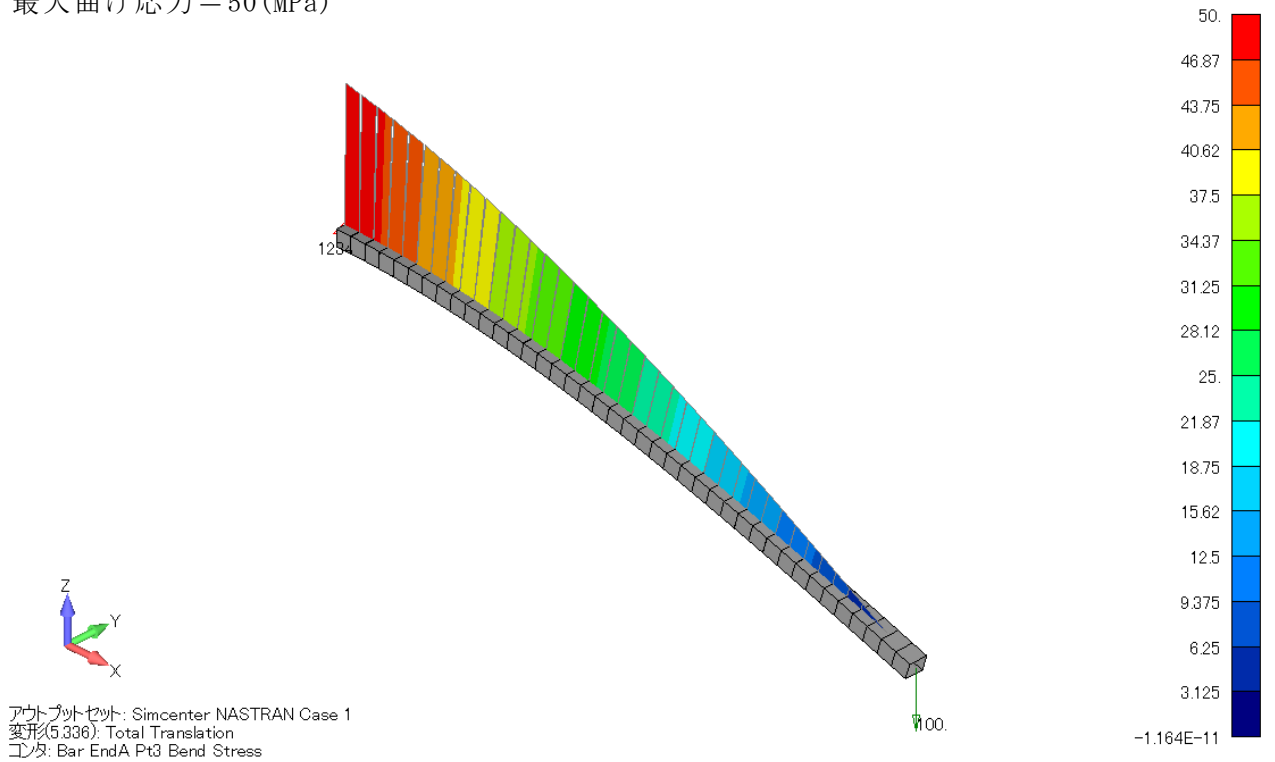


図 3-11 片持ちはりの解析結果 (曲げ応力)

3.5.2 妥当性確認

本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等の様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。また、検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから、検証結果によって解析機能の妥当性も確認できる。なお、今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

3.5.3 評価結果

検証及び妥当性確認の内容から、本解析コードを使用状況一覧に示す使用添付書類の解析に用いることは妥当である。

VI-5-39 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ f a p p a s e

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、VI-2-11-2-2「1号機排気筒の耐震性についての計算書」等において使用した計算機プログラム（解析コード）fappaseについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-11-2-2	1号機排気筒の耐震性についての計算書	Ver. 1.62
VI-3-別添2-4	原子炉建物の強度計算書	Ver. 1.63

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	fappase
使用目的	地震応答解析
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	2002年
使用したバージョン	Ver. 1. 62, Ver. 1. 63
コードの概要	<p>fappase（以下「本解析コード」という。）は、超高層建物の非線形地震応答解析用として開発された有限要素を含む汎用解析コードである。</p> <p>材料非線形モデルを数多くサポートしており超高層建物や免震建物の非線形地震応答解析に使用実績がある。</p> <p>固有値解析, 動的解析及び静的解析による応力等の算定が可能である。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・本解析コードの運用環境について、動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・各部別内部粘性型減衰を用いた地震応答解析を別途検証済解析コードNUPP4による等価なダッシュポットを用いた解析と比較し、同一の解析結果が得られることを確認している。 ・既往文献*に示される1層1スパンX型ブレース（筋違）架構の載荷実験のシミュレーション解析を、本解析コードを用いて同様に実施し、既往文献*におけるシミュレーション解析とおおむね一致することを確認している。 ・免震構造に用いられる鉛入り積層ゴムのMSS (Multiple Shear Spring) モデルのせん断力-変位関係と一方向ばね要素のせん断力-変位関係を本解析コードにより解析し、同様の関係が得られることを確認している。 ・本工事計画における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。 ・本工事計画において使用するバージョンのうちVer. 1. 63は、他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。

<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・本工事計画において使用するバージョンのうちVer. 1.62は、他プランの既工事計画において使用されているものと異なるが、バージョンの変更において解析機能に影響のある変更が行われていないことを確認している。
--	--

注記*：谷口ほか 鉄骨X型ブレース架構の復元力特性に関する研究 日本建築学会構造工学論文集 37B号 1991年3月

VI-5-40 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ F L I P

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
2.1 FLIP Ver. 7.1.9	3

1. はじめに

本資料は、VI-1-1-7-別添1「可搬型重大事故等対処設備の保管場所及びアクセスルート」において使用した計算機プログラム（解析コード）FLIPについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

	使用添付書類	バージョン
VI-1-1-7-別添1	可搬型重大事故等対処設備の保管場所及びアクセスルート	Ver. 7.1.9

2. 解析コードの概要

2.1 FLIP Ver. 7.1.9

項目	コード名
項目	FLIP
使用目的	2次元有限要素法による地震応答解析（有効応力法）
開発機関	FLIPコンソーシアム
開発時期	1988年
使用したバージョン	Ver. 7.1.9
コードの概要	<p>FLIP (Finite element analysis of Liquefaction Program) (以下「本解析コード」という。)は、1988年に運輸省港湾技術研究所(現：港湾空港技術研究所)において開発された平面ひずみ状態を対象とする有効応力解析法に基づく、2次元地震応答解析プログラムである。</p> <p>本解析コードの主な特徴は、以下のとおりである。</p> <ol style="list-style-type: none"> ①有限要素法に基づくプログラムである。 ②平面ひずみ状態を解析対象とする。 ③地盤の有効応力の変化を考慮した地震応答解析を行い、部材の断面力や変形量を計算する。 ④土の応力-ひずみモデルとしてマルチスプリングモデルを採用している。 ⑤有効応力の変化は有効応力法により考慮する。そのために必要な過剰間隙水圧算定モデルとして井合モデルを用いている。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・マニュアルに記載された例題の提示解と本解析コードによる解析解との比較を実施し、解析解が提示解と一致することが確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは港湾施設の設計に用いられる「港湾施設の技術上の基準・同解説(2007)(社団法人日本港湾協会)」において、港湾施設に対して適用性が確認されている解析コードとして扱われており、今回の解析に使用することは妥当である。 ・日本原子力発電株式会社東海第二発電所において、防潮堤、防潮扉、可搬型重大事故等対処設備の保管場所及びアクセスルート、取水構造物等の地震応答解析に本解析コード(Ver. 7.3.0_2)が使用された実績がある。 ・本工事計画で使用するバージョンは、東海第二発電所の既工事計画において使用されているものと異なるが、バージョン変更において解析機能に影響のある変更が行われていないことを確認している。 ・本工事計画における構造に対し使用する地震応答解析の使用目的について、使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

VI-5-41 計算機プログラム（解析コード）の概要
・NX N A S T R A N

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
2.1 NX NASTRAN Ver. 5mp1	3
2.2 NX NASTRAN Ver. 7.1	4

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）NX NASTRANについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-9-4-5-1-4	ブローアウトパネル閉止装置の耐震性についての計算書	Ver. 5mp1
VI-2-10-1-4-26	緊急時対策所 空気浄化装置接続盤の耐震性についての計算書	Ver. 7.1
VI-2-10-1-4-27	緊急時対策所 空気浄化装置操作盤の耐震性についての計算書	Ver. 7.1
VI-2-11-2-10	耐火障壁の耐震性についての計算書	Ver. 7.1

2. 解析コードの概要

2.1 NX NASTRAN Ver. 5mp1

項目	コード名 NX NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法（はりモデル）による固有値解析
開発機関	Siemens PLM (Product Lifecycle Management) Software Inc.
開発時期	1971年 (The MacNeal-Schwendler Corporation) 2005年 (Siemens PLM Software Inc.)
使用したバージョン	Ver. 5mp1
コードの概要	<p>本解析コードは、航空機の機体強度解析を目的としてThe MacNeal-Schwendler Corporationにより開発され、Siemens PLM Software Inc.に引き継がれた有限要素法による構造解析用の汎用プログラムであり、MSC NASTRANと同じ機能を持つ。</p> <p>適用モデル（主にはり要素、シェル要素、ソリッド要素）に対して、静的解析（線形、非線形）、動的解析（過渡応答解析、周波数応答解析）、固有値解析、伝熱解析（温度分布解析）、熱応力解析、線形座屈解析等の機能を有している。</p> <p>数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・固有値解析 3次元骨組構造物について、質点及び質量の無い弾性メンバーからなる等価な解析モデルを設定し、解析結果が公開文書*により求めた理論値（以下「理論解」という。）及び別コード (SOLVER) による解析結果とNX NASTRANによる解析結果とが同等であることを確認している。 ・応力解析 固有値解析で作成した二層ラーメン構造の解析モデルを使用して自重及び水平1Gを考慮した応力解析を行い、計算された部材応力と支点反力について別コード (SOLVER) による解析結果とNX NASTRANによる解析結果とが同等であることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、土木及び建築等の様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・開発機関が提示するマニュアルにより、本工事計画で使用する3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析に本解析コードが適用できることを確認している。 ・検証の体系と本工事計画で使用する体系が同等であることから、解析解と理論解の一致をもって、解析機能の妥当性を確認している。 ・本工事計画で行う3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析の用途、適用範囲が、上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

注記*：「振動及び応答解析入門」（川井忠彦，藤谷義信共著 179頁 培風館）

2.2 NX NASTRAN Ver. 7.1

項目 \ コード名	NX NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析，地震応答解析
開発機関	Siemens PLM (Product Lifecycle Management) Software Inc.
開発時期	1971年 (The MacNeal-Schwendler Corporation) 2005年 (Siemens PLM Software Inc.)
使用したバージョン	Ver. 7.1
コードの概要	<p>本解析コードは，航空機の機体強度解析を目的としてThe MacNeal-Schwendler Corporationにより開発され，Siemens PLM Software Inc. に引き継がれた有限要素法による構造解析用の汎用プログラムであり，MSC NASTRANと同じ機能を持つ。</p> <p>適用モデル（主にはり要素，シェル要素，ソリッド要素）に対して，静的解析（線形，非線形），動的解析（過渡応答解析，周波数応答解析），固有値解析，伝熱解析（温度分布解析），熱応力解析，線形座屈解析等の機能を有している。</p> <p>数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木等様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証の内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材料力学分野における一般的な知見により解を求めることができる体系について，3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析，地震応答解析を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは，自動車，航空宇宙，防衛，重機，造船等様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。 ・開発機関が提示するマニュアルにより，本工事計画で使用する3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析，地震応答解析に本解析コードが適用できることを確認している。 ・検証の体系と本工事計画で使用する体系が同等であることから，解析解と理論解の一致をもって，解析機能の妥当性を確認している。 ・本工事計画で行う3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析，地震応答解析の用途，適用範囲が，上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。 ・本工事計画において使用するバージョンは，他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。

VI-5-42 計算機プログラム（解析コード）の概要
・MSAP

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
2.1 MSAP 	3

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）MSAPについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-別添1-3-2	選択弁の耐震性についての計算書	<div style="border: 2px solid black; width: 100px; height: 60px; margin: 0 auto;"></div>
VI-2-別添1-3-4	配管の耐震性についての計算書	

2. 解析コードの概要

2.1 MSAP

項目 \ コード名	MSAP
使用目的	3次元有限要素法（はり要素）による 固有値解析，地震応答解析，構造解析及び応力算出
開発機関	三菱重工業株式会社
開発時期	
使用したバージョン	
コードの概要	<p>強度及び耐震計算で使用している解析コードMSAPは，</p> <div style="border: 1px solid black; height: 60px; width: 100%;"></div> <p>対話方式による入力及び構造解析の出力データを基に規格基準の算出式に従った評価が可能である。</p> <div style="border: 1px solid black; height: 30px; width: 100%;"></div>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 150px; height: 15px;"></div> 開発元より発行されている例題集の中で，モデル要素ごとに静的及び動的解析の例題に対して，解析結果と理論モデルによる理論解又は他の計算機プログラムでの計算結果と概ね一致していることを確認している。また，サンプルモデルに対する固有値解析結果が，手計算と一致することを確認している。 <ul style="list-style-type: none"> ・対話方式により入力されたデータはインプットファイルとして出力され，入力データと一致していることを確認している。 ・入力データが正しく構造解析に受け渡されていること，構造解析データが正しく規格計算に受け渡されていることをそれぞれ確認している。

- ・構造解析結果として出力されたデータを規格基準に従い、発生応力、疲労累積係数を算出しており、その過程が理論解を再現できることを確認している。
- ・地震動の組合せ処理は、本解析コード内で処理しており、アウトプットファイルと手計算結果が一致することを確認している。
- ・本解析コードの適用制限として使用節点数・要素数があるが、適用範囲内であることを確認している。
- ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。

【妥当性確認 (Validation)】

本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。

- ・本解析コードは日本国内の原子力施設で工事計画認可申請に使用されており、十分な実績があるため信頼性がある。
- ・本設計及び工事の計画において使用するバージョンは、他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。
- ・J E A G 4 6 0 1 -1987 6.5.2項の加圧水型原子力発電設備における1次冷却ループの多質点3次元はりモデルによる解析の妥当性確認として、

	<ul style="list-style-type: none">・ 上記妥当性確認を行ったのは加圧水型原子力発電設備における1次冷却ループの3次元はりモデルであるが、1次冷却ループに含まれる1次冷却材管は今回解析する配管と幾何学的に類似しており、同様の3次元はりモデルを用いてモデル化している。・ 今回の工認申請で行う3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析，地震応答解析，構造解析，応力算出の用途，適用範囲が，上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。
--	---

VI-5-43 計算機プログラム（解析コード）の概要

• V i r t u a l P e r f o r m a n c e S o l u t i o n

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、VI-3-別添 1-5「竜巻防護鋼板の強度計算書」、VI-3-別添 1-6「架構の強度計算書」、VI-3-別添 1-11「排気筒の強度計算書」及びVI-3-別添 1-14-4「1号機排気筒の強度計算書」において使用した計算機プログラム（解析コード）Virtual Performance Solution について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-3-別添 1-5	竜巻防護鋼板の強度計算書	2013
VI-3-別添 1-6	架構の強度計算書	2013
VI-3-別添 1-11	排気筒の強度計算書	2013
VI-3-別添 1-14-4	1号機排気筒の強度計算書	2013

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	Virtual Performance Solution
使用目的	3次元有限要素法による衝突解析（竜巻飛来物影響評価）
開発機関	ESI Group
開発時期	2002年
使用したバージョン	2013
コードの概要	Virtual Performance Solution（以下「VPS」という。）は、ESI Groupにより開発・公開された、構造解析用の汎用市販コードであり、衝撃・衝突現象を含めた、強い非線形性（幾何学的／材料／接触）を伴う現象についても、動的陽解法有限要素法を用いた高速・高精度な解析が可能である。
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>VPSは、動的物性値の設定に用いるパラメータの保守性の確認において、竜巻飛来物に対する竜巻防護鋼板への衝突試験結果と比較するための、3次元有限要素法による衝突解析の計算値の算出に使用している。</p> <p>【検証（Verification）】</p> <p>今回の使用目的（衝突解析）を踏まえた、本解析コードの検証の内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・下記の文献に示されている衝突事象について、VPSによる解析を実施し、解析結果が文献に記載された理論値と一致することを確認した。 <ul style="list-style-type: none"> ➤ Ferdinand Beer 他，Vector Mechanics for Engineers: Dynamics, 7th edition ・下記の文献において、衝突試験時の損傷状況とVPSによる解析結果が精度よく一致すると報告されていることを確認した。 <ul style="list-style-type: none"> ➤ 翁長他，3Dスポット溶接モデルの適用による衝突CAEの精度向上 ・本コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、国内外の宇宙航空、自動車、機械、建築、土木などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・開発機関が提示するマニュアルにより、本解析コードの適正な用途適用範囲を確認している。

	<ul style="list-style-type: none">• 本工事計画で行う 3 次元有限要素法 (はり要素, シェル要素, ソリッド要素) による動的解析 (衝突解析) の用途, 適用範囲が上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。• 本工事計画における構造に対し使用する要素, 3 次元有限要素法による衝突解析 (竜巻飛来物影響評価) の使用目的に対し, 使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	--

VI-5-44 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ L S - D Y N A

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、VI-3-別添1-7「竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書」において使用した計算機プログラム（解析コード）LS-DYNAについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-3-別添1-7	竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書	Ver. 971

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	LS-DYNA
使用目的	3次元有限要素法による衝突解析（竜巻飛来物影響評価）
開発機関	Livermore Software Technology Corporation
開発時期	1987年
使用したバージョン	Ver. 971
コードの概要	<p>LS-DYNA（以下「本解析コード」という。）は、Lawrence Livermore 研究所により開発・公開された陽解法有限要素法DYNA3Dを基に開発された構造解析用の汎用市販コードである。</p> <p>機械・土木建築その他広範な分野に及ぶ要素群、非線形モデルを多数サポートしており、国内外の宇宙航空、自動車、機械、建築、土木等の様々な分野において多くの利用実績があり、陽的時間積分を用いていることから、衝突問題等、短時間の動的現象のシミュレーションに適している。また、大変形の非線形問題への適用が容易である点に特徴がある。</p> <p>衝突問題や動的荷重を受ける構造物の応力、ひずみや加速度応答等を算出する。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・開発機関マニュアルにおいて提示している3次元有限要素法による衝突解析に関する例題解析を実施し、解析結果がマニュアルに記載された結果と一致することを確認している。 ・Norwegian University of Science and Technologyにより、シェル要素及びソリッド要素を用いた薄板鋼管の軸方向圧縮破壊試験のシミュレーション解析が行われており、解析結果と実験結果がおおむね一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、国内外の宇宙航空、自動車、機械、建築、土木等の様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・開発機関が提示するマニュアルにより、本解析コードの適正な用途、適用範囲を確認している。 ・本工事計画で行う3次元有限要素法（はり要素、シェル要素、ソリッド要素）による動的解析（衝突解析）の用途、適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内にあることを確認している。 ・本工事計画において使用するVer. 971は、他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。

<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・本工事計画における構造に対し使用する要素, 3次元有限要素法による衝突解析 (竜巻飛来物影響評価) の使用目的に対し, 使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	---

VI-5-45 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ S D

目 次

1. はじめに.....	1
1.1 使用状況一覧.....	2
2. 解析コードの概要.....	3

1. はじめに

本資料は, VI-3-別添 2-5「タービン建物の強度計算書」において使用した計算機プログラム(解析コード) SD について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧, 解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-3-別添2-5	タービン建物の強度計算書	Ver. 2.1.0 Ver. 3.2.2

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	SD
使用目的	フレームの応力解析
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	1971年
使用したバージョン	Ver. 2. 1. 0, Ver. 3. 2. 2
コードの概要	<p>SD（以下「本解析コード」という。）は、鹿島建設により開発された平面骨組応力解析（平面要素含む。）の解析計算機コードである。</p> <p>本解析コードは、微小変位理論による変位法を用いて、2次元平面骨組（平面要素含む。）の応力・変位を算出するための構造解析プログラムである。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・本解析コードの運用環境について、動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、島根原子力発電所第2号機の既工事計画認可申請（昭和59年2月24日付け58資庁第15180号にて認可された工事計画の添付書類IV-2-4-2「原子炉建物の耐震性についての計算書」及び昭和59年9月17日付け59資庁第8283号にて認可された工事計画の添付書類IV-2-7「タービン建物の耐震性についての計算書」等）他において、フレームの応力解析に使用された実績がある。 ・本解析コードは、建築分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・はり要素を用いた応力解析について、本解析コードによる解析結果と文献*による一般構造力学による理論解の比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本工事計画における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。 ・本工事計画において使用するバージョンである Ver. 2. 1. 0 及び Ver. 3. 2. 2 は、プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが、バージョンの変更において解析機能に影響のある変更が行われていないことを確認している。

注記*：成岡昌夫，服部正他：コンピュータによる構造工学講座Ⅱ-1-B，日本鋼構造協会編，骨組構造解析，培風館，昭和46年6月，pp. 20～33

VI-5-46 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ S H A K E

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
2.1 SHAKE Ver. 1.6	3
3. 解析手法	4
3.1 一般事項	4
3.2 解析コードの特徴	4
3.3 解析手法	5
3.4 解析フローチャート	8
3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)	9
3.5.1 検証	9
3.5.2 妥当性確認	11
3.5.3 評価結果	18

1. はじめに

本資料は、VI-2-20「屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の地震応答計算書」において使用した計算機プログラム（解析コード）SHAKE について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-2-20	屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の地震応答計算書	Ver. 1.6

2. 解析コードの概要

2.1 SHAKE Ver. 1.6

項目	コード名 SHAKE
使用目的	1次元地震応答解析による入力地震動算定
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	1971年
使用したバージョン	Ver. 1.6
コードの概要	<p>SHAKE（以下「本解析コード」という。）は、米国カリフォルニア大学から発表された SHAKE を基本に開発されたもので、1次元重複反射理論に基づく地盤の伝達関数や時刻歴波形を算出するプログラムである。</p> <p>地盤の非線形性は、ひずみ依存特性を用いて等価線形化法により考慮することができ、また、鉛直動はS波速度 V_s をP波速度 V_p として定義することで、各層における加速度、応力度、ひずみ度等の伝達関数、応答波形等を求めることが可能である。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証(Verification)】 本解析コードの検証内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コード (Ver. 1.6) について、2層のモデル地盤において地震応答解析を行った解析解と、1次元重複反射理論に基づく理論解が一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、動作環境を満足する計算機にインストールして使用していることを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・入力地震動算定に対して、原子力産業界において1次元重複反射理論に基づく地震応答解析は他プラントの既工事計画において実績があり、同じ理論に基づく解析コードである shake-91 を用いた1次元地震応答解析を行った解析解と、本解析コードによる解析解を比較したコードベンチマーキングを行った結果、双方の解がおおむね一致していることを確認している。 ・本工事計画における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

3. 解析手法

3.1 一般事項

本資料は、解析コード SHAKE Ver. 1.6 (以下「本解析コード」という。)の概要である。

本解析コードは、重複反射理論に基づく地震応答解析を行うことが可能であり、1次元地震応答解析(入力地震動算定)に使用している。

3.2 解析コードの特徴

本解析コードにおける地盤の非線形性はひずみ依存特性を用いて等価線形法により考慮することができる。

本解析コードの主な特徴として、①～③を挙げることができる。

- ① 1次元重複反射理論に基づくプログラムである。
- ② 地盤の非線形性は、ひずみ依存特性を用いて等価線形法により考慮できる。
- ③ 鉛直動は、S波速度 V_s をP波速度 V_p として定義することで対応が可能である。

3.3 解析手法

図3-1に示す線形粘弾性系を通過するせん断波による応答を考える。線形粘弾性系は、均質、等方性であり、厚さが h 、密度が ρ 、せん断弾性係数が G 、臨界減衰比が β で定義されているとする。せん断波の伝播は水平変位 $u = u(x,t)$ のみによる。これは、次の波動方程式を満足しなければならない。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad (3.1)$$

波動方程式(3.1)の解は、振動数 ω に対し、次式で与えられる。

$$u(x,t) = E e^{i(kx+\omega t)} + F e^{-i(kx-\omega t)} \quad (3.2)$$

ここに、

$$k^2 = \frac{\rho \cdot \omega^2}{G + i\omega \cdot \eta} = \frac{\rho \cdot \omega^2}{G^*} \quad (3.3)$$

である。式(3.2)の第1項は、 X のマイナス方向(上向き)に伝わる入射波を示し、第2項は X のプラス方向(下向き)に伝わる反射波を示している。また、水平方向におけるせん断応力度の定義は次式で与えられる。

$$\tau(x,t) = G \frac{\partial u}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} = G^* \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.4)$$

式(3.4)に式(3.2)を代入すると、

$$\tau(x,t) = ikG^*(E \cdot e^{ikx} - F \cdot e^{-ikx}) \cdot e^{i\omega t} \quad (3.5)$$

となる。

式(3.1)は図3-1の各層にて成り立つ。各層の局所座標系 X で表される第 m 層の最上部 $X=0$ 及び最下部 $X=h_m$ における変位は、第 m 層における厚さを h_m 、密度を ρ_m 、せん断弾性係数を G_m 、臨界減衰比を β_m で定義すると、それぞれ次のように表せる。

$$u_m(0,t) = (E_m + F_m) e^{i\omega t} \quad (3.6)$$

$$u_m(h_m,t) = (E_m \cdot e^{ik_m h_m} + F_m \cdot e^{-ik_m h_m}) e^{i\omega t} \quad (3.7)$$

ここで、任意の m 層と $m+1$ 層の変位及びせん断応力との連続性を考慮すると次の循環公式が求まる。

$$E_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 + \alpha_m) \cdot e^{ik_m h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 - \alpha_m) \cdot e^{-ik_m h_m} \quad (3.8)$$

$$F_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 - \alpha_m) \cdot e^{ik_m h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 + \alpha_m) \cdot e^{-ik_m h_m} \quad (3.9)$$

ここに、 α_m は複素インピーダンス比と呼ばれる定数で、次式で定義されている。

$$\alpha_m = \frac{k_m G_m^*}{k_{m+1} G_{m+1}^*} = \left(\frac{\rho_m G_m^*}{\rho_{m+1} G_{m+1}^*} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.10)$$

この複素インピーダンス比 α_m は、周期に対して独立である。自由面におけるせん断応力度 $\tau = 0$ と式(3.7)より $E_1 = F_1$ が得られる。循環公式(3.8)，(3.9)を繰り返し用いて、次のような m 層と表層の振幅の関係を導き出すことができる。

$$E_m = e_m(\omega) E_1 \quad (3.11)$$

$$F_m = f_m(\omega) F_1 \quad (3.12)$$

伝達関数 e_m 及び f_m は、単なる $E_1 = F_1 = 1$ に対する倍率であり、 $E_1 = F_1 = 1$ を上式に代入して解けば求まる。

他の伝達関数は e_m 、 f_m から簡単に得られる。 n 層及び m 層表面での変位を関係づける伝達関数 $A_{n,m}(\omega)$ を次のように定義する。

$$A_{n,m}(\omega) = \frac{u_m}{u_n} \quad (3.13)$$

式(3.13)に式(3.4)，式(3.11)及び式(3.12)を代入して整理すると次式を得る。

$$A_{n,m}(\omega) = \frac{e_m(\omega) + f_m(\omega)}{e_n(\omega) + f_n(\omega)} \quad (3.14)$$

これらの式より、伝達関数 $A(\omega)$ は、系のいかなる2つの層の間においても定められる。故に、任意の層の動的変位が判れば、他の層の動的変位も計算できる。式(3.2)より、加速度 $\ddot{u}(x,t)$ 、ひずみ $\gamma(x,t)$ は次のように得られる。

$$\ddot{u}(x,t) = \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = -\omega^2 (E e^{i(kx+\omega t)} + F e^{-i(kx-\omega t)}) \quad (3.15)$$

$$\gamma(x,t) = \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = ik (E e^{i(kx+\omega t)} - F e^{-i(kx-\omega t)}) \quad (3.16)$$

振幅 E 及び F は、系全体の層において求めることができるので、加速度及びひずみも求めることができる。

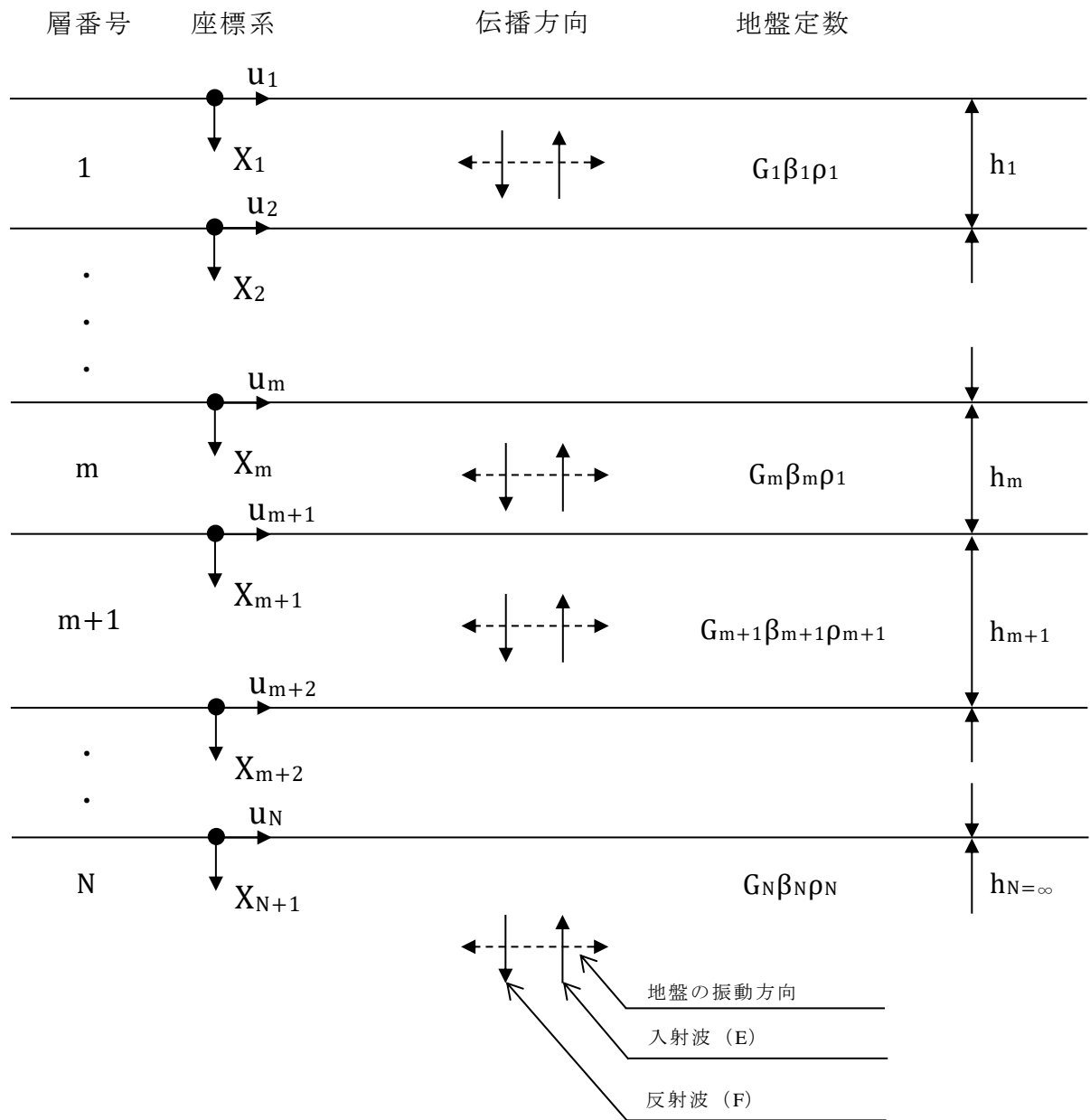
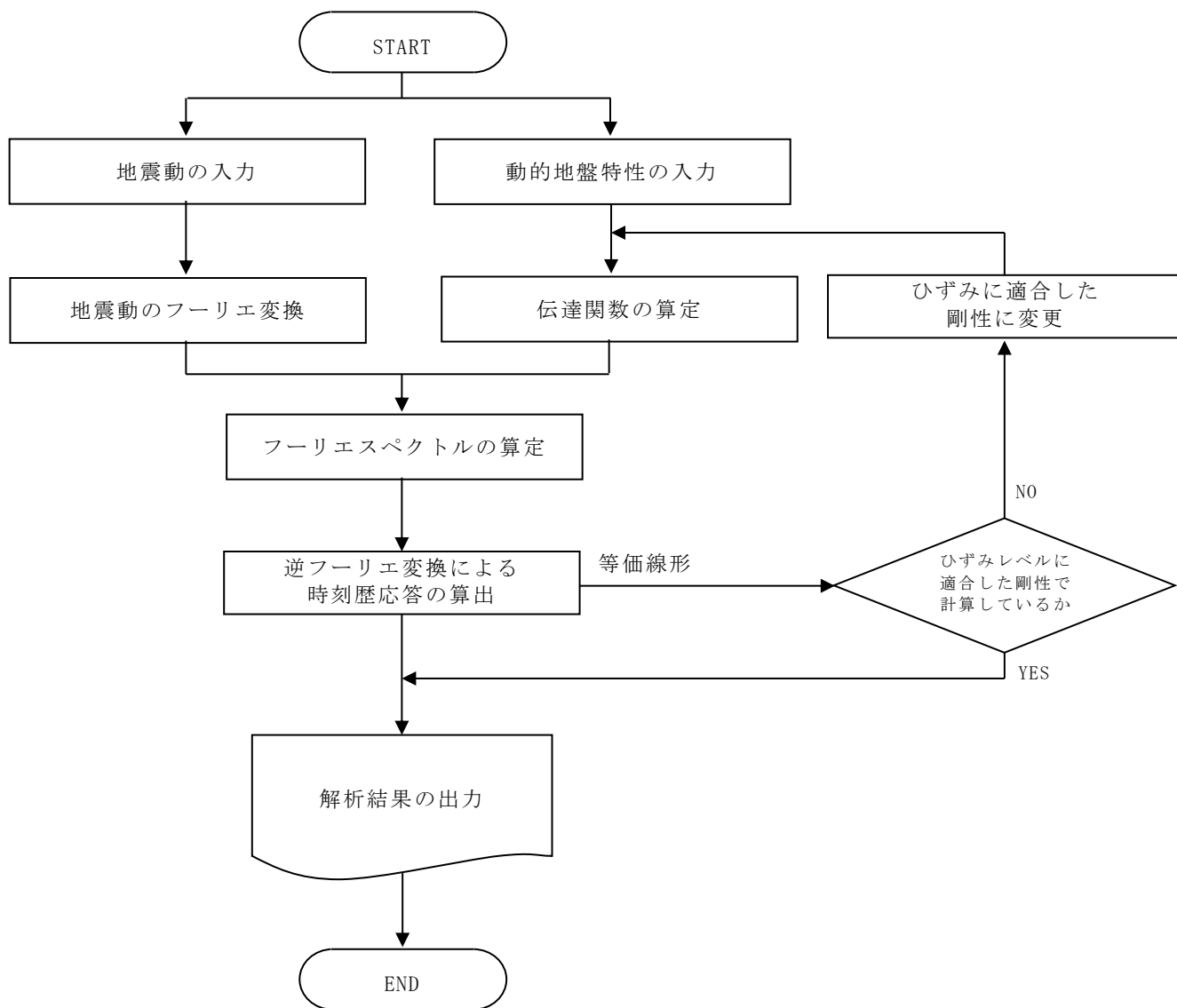


図 3-1 1次元地盤モデル

3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図 3-2 に示す。



S2-補 VI-5-46 R0

図 3-2 解析フローチャート

3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)

本解析コードを本解析に用いるにあたり，検証として理論解との比較を実施した。妥当性確認として類似プログラムとの比較を実施した。その詳細な内容については下記のとおりとする。

3.5.1 検証

2層のモデル地盤において，1次元重複反射理論に基づく伝達関数の理論解との比較を行った。

(1) 検証モデル及び検討条件

図3-3に検討地盤モデルを示す。

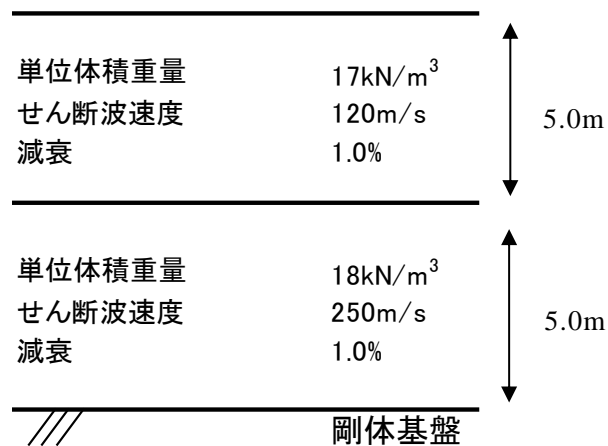


図3-3 地盤モデル諸元

< 検討条件 >

- ・重力加速度は 9.80m/s^2 とする。
- ・検討する振動数は $0\sim 20\text{Hz}$ までとする。

(2) 比較結果

伝達関数の比較結果を図 3-4 に示す。

図より、本解析コードと理論解の結果は一致していることが確認できる。

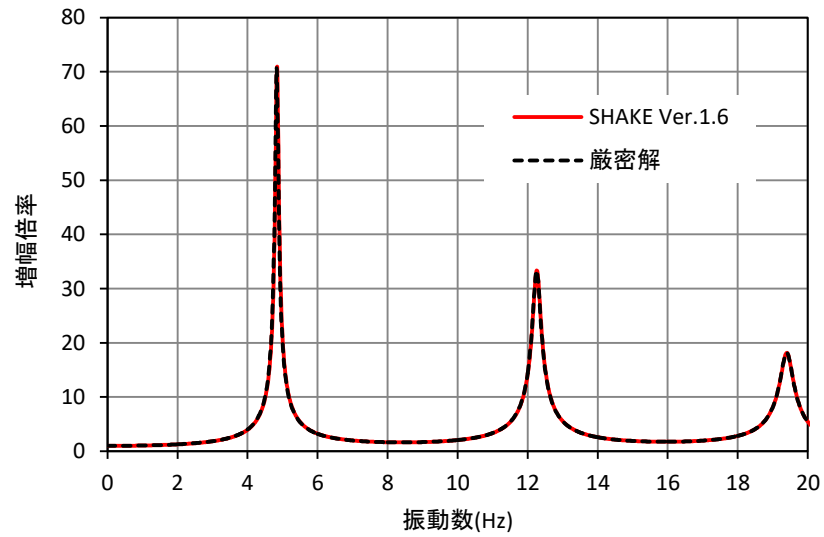


図 3-4 理論解との伝達関数の比較

3.5.2 妥当性確認

カルフォルニア大学バークレー校が有償配布している1次元地盤の等価線形解析プログラム shake-91 との比較を実施した。

(1) 検証モデル

表 3-1 に検討地盤モデルを示し、図 3-5～図 3-10 にひずみ依存特性を示す。

表 3-1 地盤モデル諸元

区分	層厚 (m)	分割 (m)	深度 (m)	湿潤単位 体積重量 γ_t (kN/m ³)	動的せん断 弾性係数 Gd (kN/m ²)	せん断波速度 Vs (m/s)	減衰定数 h
第1粘性土層	4.00	1.00	1.00	17	21000	110	0.030
		1.00	2.00	17	21000	110	0.030
		1.00	3.00	17	21000	110	0.030
		1.00	4.00	17	21000	110	0.030
第2粘性土層	10.80	1.20	5.20	16	25000	124	0.020
		1.20	6.40	16	25000	124	0.020
		1.20	7.60	16	25000	124	0.020
		1.20	8.80	16	25000	124	0.020
		1.20	10.00	16	25000	124	0.020
		1.20	11.20	16	25000	124	0.020
		1.20	12.40	16	25000	124	0.020
		1.20	13.60	16	25000	124	0.020
第3粘性土層	9.60	1.60	16.40	16	43000	162	0.020
		1.60	18.00	16	43000	162	0.020
		1.60	19.60	16	43000	162	0.020
		1.60	21.20	16	43000	162	0.020
		1.60	22.80	16	43000	162	0.020
		1.60	24.40	16	43000	162	0.020
第1砂質土層	1.20	1.20	25.60	19	159000	286	0.020
第4粘性土層	8.00	2.00	27.60	17	110000	252	0.020
		2.00	29.60	17	110000	252	0.020
		2.00	31.60	17	110000	252	0.020
		2.00	33.60	17	110000	252	0.020
第2砂質土層	2.00	2.00	35.60	19	273000	375	0.010
礫層(基盤)				20	398000	442	0.010

せん断有効歪 (%)	G/G0	減衰 (%)
0.0001	1.000	2.00
0.0002	0.985	2.30
0.0005	0.930	2.80
0.001	0.880	3.20
0.002	0.819	3.60
0.005	0.729	4.40
0.01	0.648	5.10
0.02	0.578	5.70
0.05	0.459	7.30
0.1	0.381	9.20
0.2	0.300	11.00
0.5	0.198	14.00
1	0.129	16.10
2	0.078	17.60
5	0.028	19.20
10	0.014	20.00

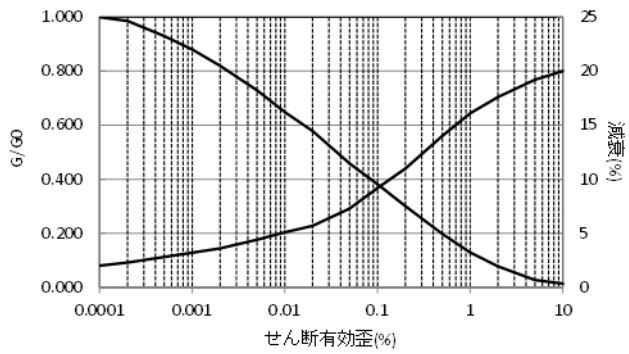


図 3-5 ひずみ依存特性 (第1粘性土層)

せん断有効歪 (%)	G/G0	減衰 (%)
0.0001	1.000	2.00
0.0002	0.989	2.30
0.0005	0.952	2.80
0.001	0.916	3.20
0.002	0.874	3.60
0.005	0.811	4.40
0.01	0.752	5.10
0.02	0.698	5.70
0.05	0.601	7.30
0.1	0.500	9.20
0.2	0.394	11.00
0.5	0.259	14.00
1	0.170	16.10
2	0.102	17.60
5	0.036	19.20
10	0.018	20.00

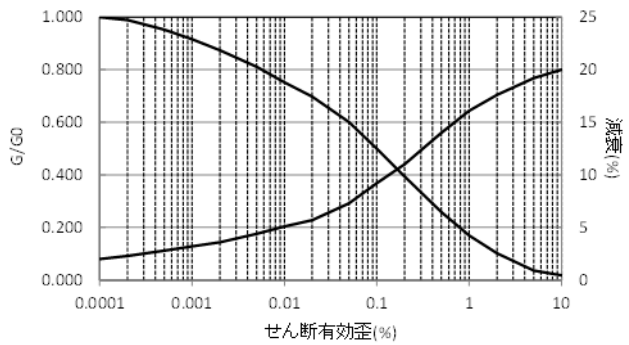


図 3-6 ひずみ依存特性 (第2粘性土層)

せん断有効歪 (%)	G/G0	減衰 (%)
0.0001	1.000	2.00
0.0002	0.991	2.30
0.0005	0.963	2.80
0.001	0.934	3.20
0.002	0.902	3.60
0.005	0.853	4.40
0.01	0.807	5.10
0.02	0.764	5.70
0.05	0.684	7.30
0.1	0.569	9.20
0.2	0.448	11.00
0.5	0.295	14.00
1	0.193	16.10
2	0.116	17.60
5	0.041	19.20
10	0.021	20.00

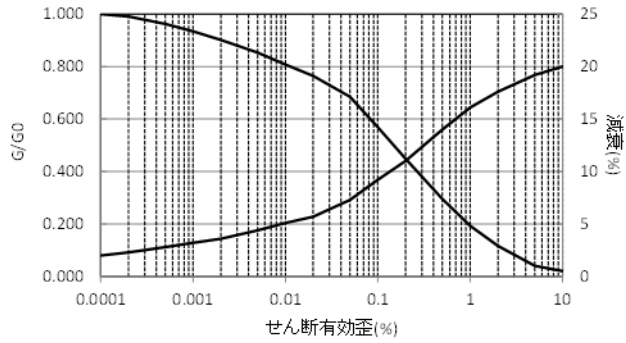


図 3-7 ひずみ依存特性 (第3粘性土層)

せん断有効歪 (%)	G/G0	減衰 (%)
0.0001	1.000	2.00
0.0002	0.991	2.30
0.0005	0.980	2.80
0.001	0.962	3.20
0.002	0.933	3.60
0.003	0.910	4.40
0.005	0.873	5.10
0.01	0.797	5.70
0.02	0.699	7.30
0.03	0.616	9.20
0.05	0.512	11.00
0.1	0.367	14.00
0.2	0.237	16.10
0.3	0.177	17.60
0.5	0.113	19.20
1	0.061	20.00

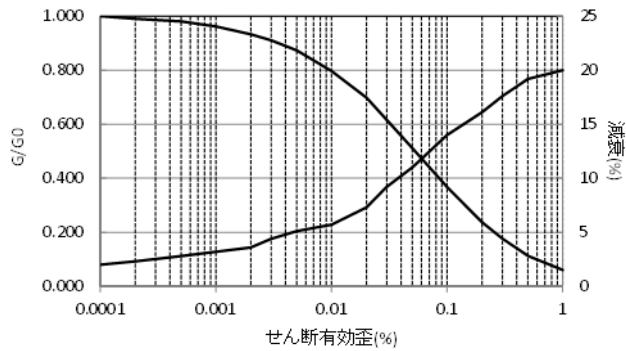


図 3-8 ひずみ依存特性 (第1砂質土層)

せん断有効歪 (%)	G/G0	減衰 (%)
0.0001	1.000	0.700
0.0002	0.990	0.900
0.0005	0.970	1.300
0.001	0.950	1.600
0.002	0.928	1.900
0.003	0.908	2.300
0.005	0.880	2.800
0.01	0.834	3.700
0.02	0.769	5.000
0.03	0.715	6.300
0.05	0.627	8.400
0.07	0.563	9.900
0.1	0.491	11.900
0.15	0.415	14.200
0.2	0.362	15.800
0.3	0.288	18.300
0.5	0.200	21.700
0.7	0.145	23.300
1	0.085	26.400

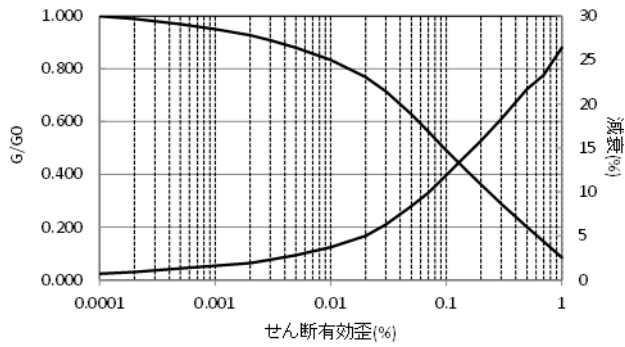


図 3-9 ひずみ依存特性 (第4粘性土層)

せん断有効歪 (%)	G/G0	減衰 (%)
0.0001	1.000	0.00
0.0002	0.997	0.08
0.0005	0.991	0.28
0.001	0.977	0.70
0.002	0.953	1.41
0.003	0.932	2.04
0.005	0.899	3.02
0.01	0.832	5.03
0.02	0.740	7.79
0.03	0.661	10.16
0.05	0.563	13.10
0.1	0.418	17.46
0.2	0.277	21.70
0.3	0.209	23.73
0.5	0.134	25.97
1	0.072	27.83

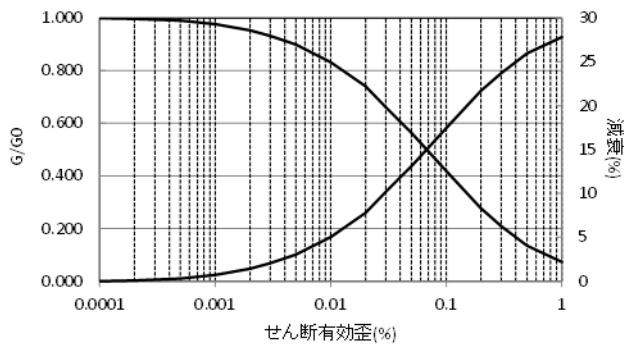


図 3-10 ひずみ依存特性 (第2砂質土層)

(2) 検討条件

以下に，検討条件を示す。

- ・重力加速度は 9.80m/s^2 とする。
- ・等価線形解析とする。
- ・検討する振動数は $0\sim 20\text{Hz}$ までとする。

(3) 入力地震動

入力波は水平 1 方向に入力する。図 3-11 に入力地震動（2E 波）の加速度時刻歴を示す。

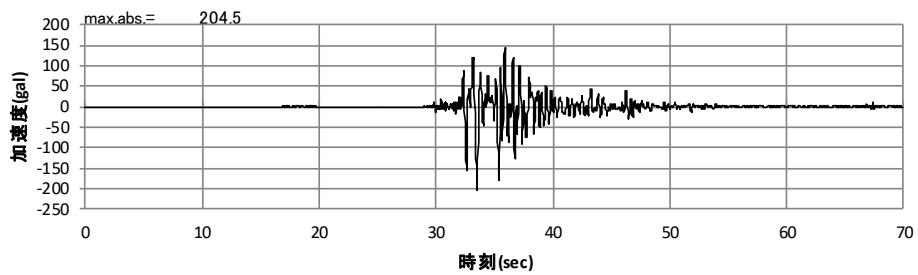


図 3-11 入力地震動加速度時刻歴

(4) 検討結果比較

伝達関数及び加速度の解析解の比較を図 3-12～図 3-15 に示す。各図より、伝達関数及び加速度の解析解は、一致していることが確認できる。

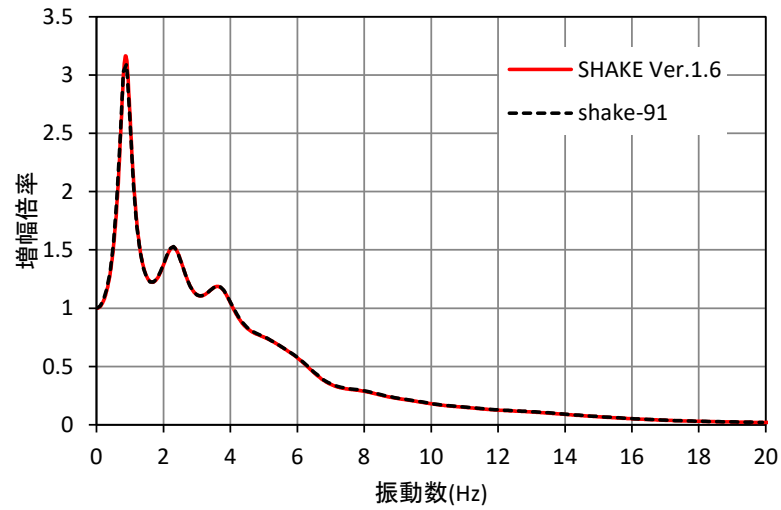


図 3-12 地表面伝達関数比較

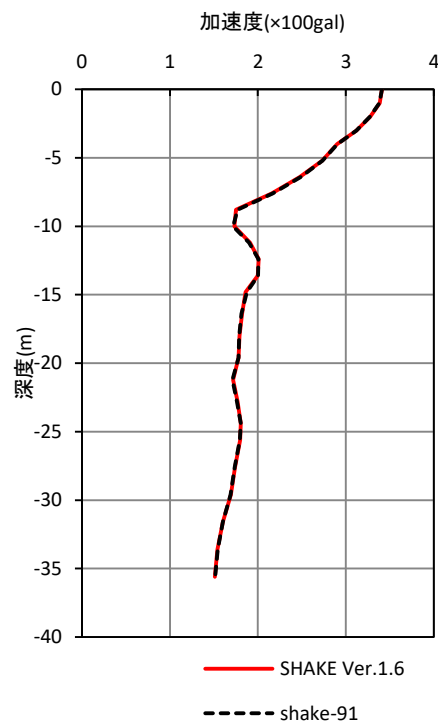


図 3-13 加速度最大分布比較

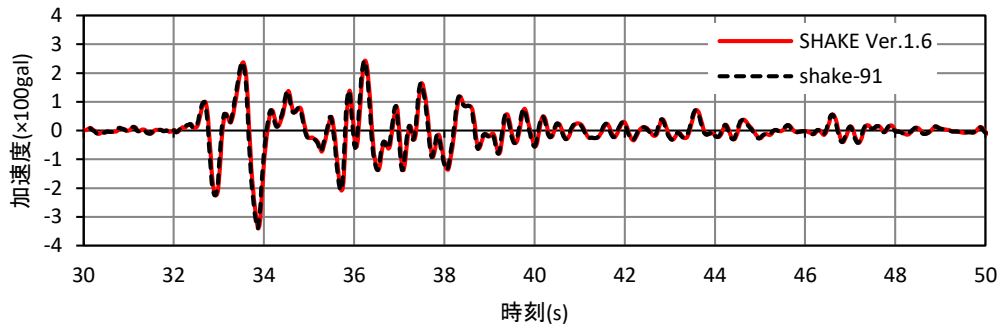


図 3-14 地表面加速度時刻歴比較

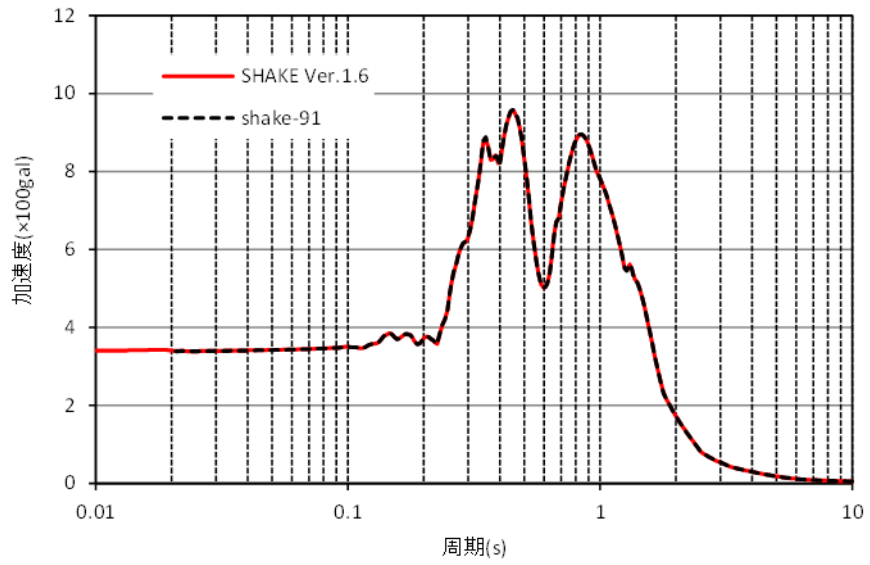


図 3-15 地表面加速度応答スペクトル比較

3.5.3 評価結果

本解析コードの解析結果と理論解を比較し，理論解と解析解が一致していることを確認した。また，類似解析コードである shake-91 と比較し，解析解が一致していることを確認した。したがって，本解析に本解析コードを使用することは妥当である。

VI-5-47 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ S H A K E

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
2.1 SHAKE Ver. 2.0	3
3. 解析手法	4
3.1 一般事項	4
3.2 解析コードの特徴	4
3.3 解析手法	5
3.4 解析フローチャート	8
3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)	9
3.5.1 検証	9
3.5.2 妥当性確認	11
3.5.3 評価結果	17

1. はじめに

本資料は、VI-2-30「第1ベントフィルタ格納槽の地震応答計算書」等において使用した計算機プログラム（解析コード）SHAKEについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-2-30	第1 ベントフィルタ格納槽の地震応答計算書	Ver. 2.0
VI-2-2-32	低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽の地震応答計算書	Ver. 2.0
VI-2-2-37	屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）の地震応答計算書	Ver. 2.0
VI-1-1-7-別添1	可搬型重大事故等対処設備の保管場所及びアクセスルート	Ver. 2.0
VI-2-別添3-2	可搬型重大事故等対処設備の保管エリア等における入力地震動	Ver. 2.0

2. 解析コードの概要

2.1 SHAKE Ver. 2.0

コード名	SHAKE
項目	
使用目的	1次元地震応答解析による入力地震動の算定
開発機関	中電技術コンサルタント株式会社
開発時期	2008年
使用したバージョン	Ver. 2.0
コードの概要	<p>SHAKE（以下「本解析コード」という。）は、米国カリフォルニア大学から発表された SHAKE を基本に開発されたもので、1次元重複反射理論に基づく地盤の伝達関数や時刻歴波形を算出するプログラムである。</p> <p>地盤の非線形性は、ひずみ依存特性を用いて等価線形化法により考慮することができ、また、鉛直動はS波速度 V_s をP波速度 V_p として定義することで、各層における加速度、応力度、ひずみ度等の伝達関数、応答波形等を求めることが可能である。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コード (Ver. 2.0) について、2層のモデル地盤において地震応答解析を行った解析解と、1次元重複反射理論に基づく理論解がおおむね一致していることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、動作環境を満足する計算機にインストールして使用していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・入力地震動算定に対して、原子力産業界において1次元重複反射理論に基づく地震応答解析は他プラントの既工事計画において実績があり、同じ理論に基づく解析コードであるshake-91を用いた1次元地震応答解析を行った解析解と、本解析コードによる解析解を比較したコードベンチマーキングを行った結果、双方の解がおおむね一致していることを確認している。 ・本工事計画における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

3. 解析手法

3.1 一般事項

本資料は、解析コード SHAKE Ver. 2.0 (以下「本解析コード」という。)の概要である。

本解析コードは、重複反射理論に基づく地震応答解析を行うことが可能であり、1次元地震応答解析(入力地震動算定)に使用している。

3.2 解析コードの特徴

本解析コードにおける地盤の非線形性は、ひずみ依存特性を用いて等価線形法により考慮することができる。

本解析コードの主な特徴として、①～③を挙げることができる。

- ① 1次元重複反射理論に基づくプログラムである。
- ② 地盤の非線形性は、ひずみ依存特性を用いて等価線形法により考慮できる。
- ③ 鉛直動は、S波速度 V_s をP波速度 V_p として定義することで対応が可能である。

3.3 解析手法

図 3-1 に示す線形粘弾性系を通過するせん断波による応答を考える。線形粘弾性系は、均質、等方性であり、厚さが h 、密度が ρ 、せん断弾性係数が G 、臨界減衰比が β で定義されているとする。せん断波の伝播は水平変位 $u=u(x, t)$ のみによる。これは、次の波動方程式を満足しなければならない。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad (3.1)$$

波動方程式(3.1)の解は、振動数 ω に対し、次式で与えられる。

$$u(x, t) = E e^{i(kx + \omega t)} + F e^{-i(kx - \omega t)} \quad (3.2)$$

ここに、

$$k^2 = \frac{\rho \cdot \omega^2}{G + i \omega \cdot \eta} = \frac{\rho \cdot \omega^2}{G^*} \quad (3.3)$$

である。式(3.2)の第1項は、 X のマイナス方向(上向き)に伝わる入射波を示し、第2項は X のプラス方向(下向き)に伝わる反射波を示している。また、水平方向におけるせん断応力度の定義は次式で与えられる。

$$\tau(x, t) = G \frac{\partial u}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} = G^* \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.4)$$

式(3.4)に式(3.2)を代入すると、

$$\tau(x, t) = ikG^* (E \cdot e^{ikx} - F \cdot e^{-ikx}) \cdot e^{i\omega t} \quad (3.5)$$

となる。

式(3.1)は図3-1の各層にて成り立つ。各層の局所座標系 X で表される m 層の最上部 $x=0$ 及び最下部 $x=h_m$ における変位は、第 m 層における厚さ h_m 、密度を ρ_m 、せん断弾性係数を G_m 、臨界減衰比を β_m で定義すると、それぞれ次のように表せる。

$$u_m(0, t) = (E_m + F_m) e^{i\omega t} \quad (3.6)$$

$$u_m(h_m, t) = (E_m \cdot e^{ik_m h_m} + F_m \cdot e^{-ik_m h_m}) e^{i\omega t} \quad (3.7)$$

ここで、任意の m 層と $m+1$ 層の変位及びせん断応力との連続性を考慮すると次の循環公式が求まる。

$$E_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 + \alpha_m) \cdot e^{ik_m h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 - \alpha_m) \cdot e^{-ik_m h_m} \quad (3.8)$$

$$F_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 - \alpha_m) \cdot e^{ik_m h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 + \alpha_m) \cdot e^{-ik_m h_m} \quad (3.9)$$

ここに、 α_m は複素インピーダンス比と呼ばれる定義で、次式で定義されている。

$$\alpha_m = \frac{k_m G_m^*}{k_{m+1} G_{m+1}^*} = \left(\frac{\rho_m G_m^*}{\rho_{m+1} G_{m+1}^*} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.10)$$

この複素インピーダンス比 α_m は、周期に対して独立である。自由面におけるせん断応力度 $\tau=0$ と式(3.7)より $E_1=F_1$ が得られる。循環公式(3.8)、(3.9)を繰り返し用いて、次のような層と表層の振幅の関係を導き出すことができる。

$$E_m = e_m(\omega) E_1 \quad (3.11)$$

$$F_m = f_m(\omega) F_1 \quad (3.12)$$

伝達関数 e_m 及び f_m は、単なる $E_1=F_1=1$ に対する倍率であり、 $E_1=F_1=1$ を上式に代入して解けば求まる。

他の伝達関数は e_m f_m から簡単に得られる。n 層及び m 層表面での変位を関係づける伝達関数 $A_{n,m}(\omega)$ を次のように定義する。

$$A_{n,m}(\omega) = \frac{u_m}{u_n} \quad (3.13)$$

式(3.13)に式(3.4)、式(3.11)及び(3.12)を代入して整理すると次式を得る。

$$A_{n,m}(\omega) = \frac{e_m(\omega) + f_m(\omega)}{e_n(\omega) + f_n(\omega)} \quad (3.14)$$

これらの式より、伝達関数 $A(\omega)$ は、系のいかなる 2 つの層の間においても定められる。

故に、任意の層の動的変位が判れば、他の層の動的変位も計算できる。式(3.2)より、加速度 $\ddot{u}(x, t)$ 、ひずみ $\gamma(x, t)$ は次のように得られる。

$$\ddot{u}(x, t) = \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} = -\omega^2 \left(E e^{i(kx + \omega t)} + F e^{-i(kx - \omega t)} \right) \quad (3.15)$$

$$\gamma(x, t) = \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = ik \left(E e^{i(kx + \omega t)} - F e^{-i(kx - \omega t)} \right) \quad (3.16)$$

振幅 E 及び F は、系全体の層において求めることができるので、加速度及びひずみも求めることができる。

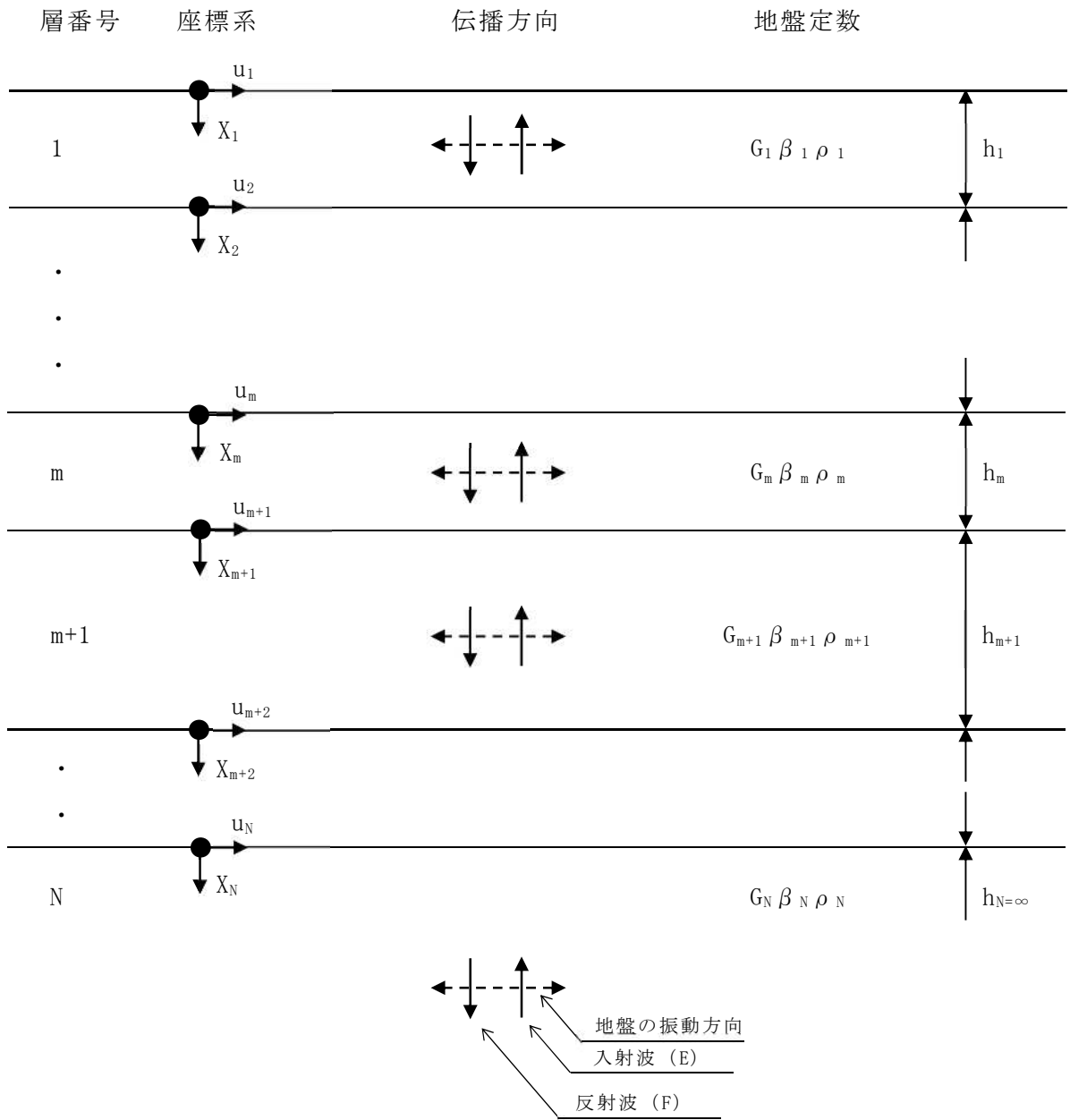


図 3-1 1次元地盤モデル

3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図3-2に示す。

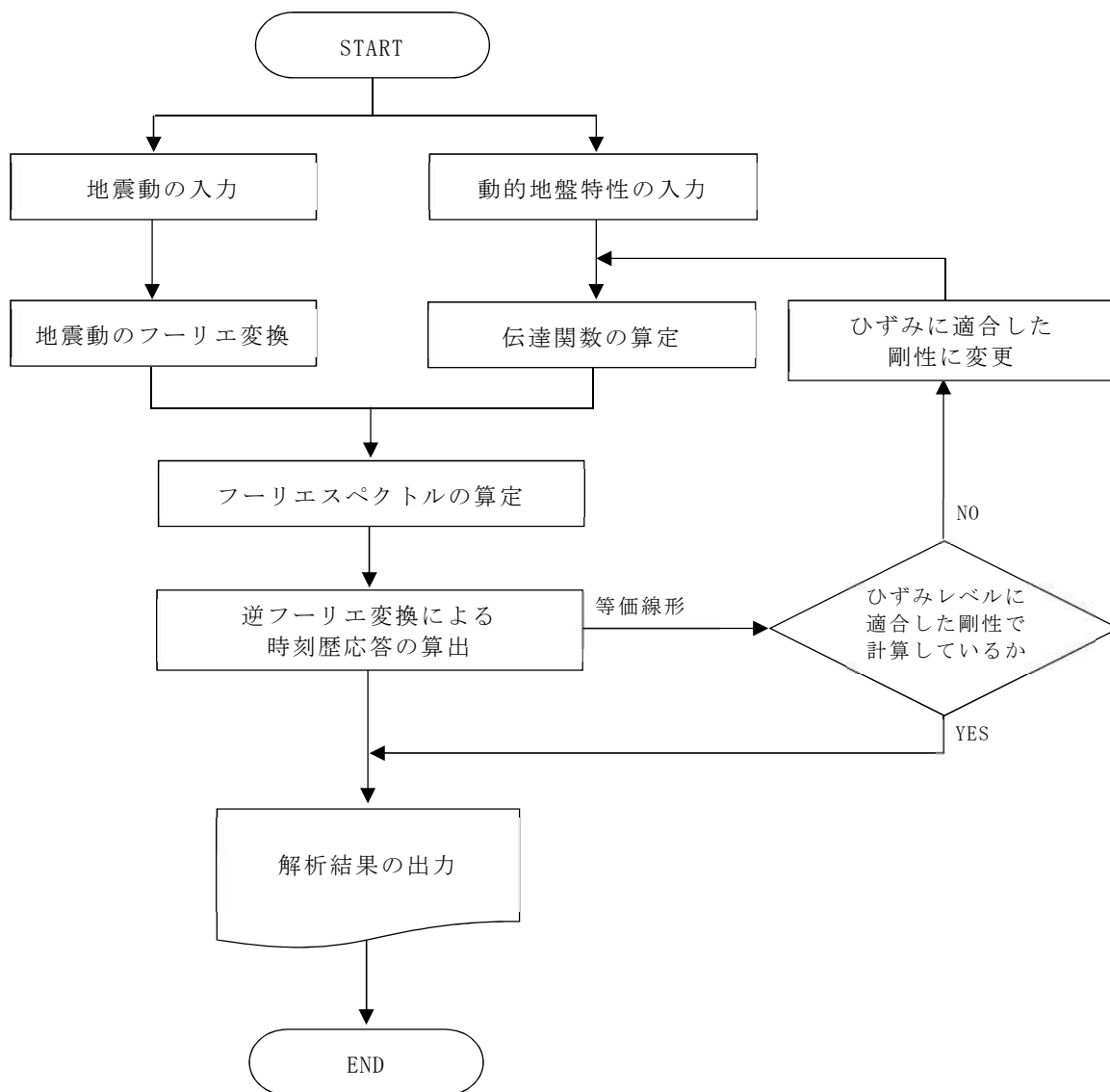


図3-2 解析フローチャート

3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)

本解析コードを本解析に用いるにあたり、検証として理論解との比較を実施した。妥当性確認として類似プログラムとの比較を実施した。その詳細な内容については下記のとおりとする。

3.5.1 検証

2層のモデル地盤において、1次元重複反射理論に基づく伝達関数の理論解との比較を行った。

a. 検証モデル及び検討条件

図3-3に検討地盤モデルを示す。

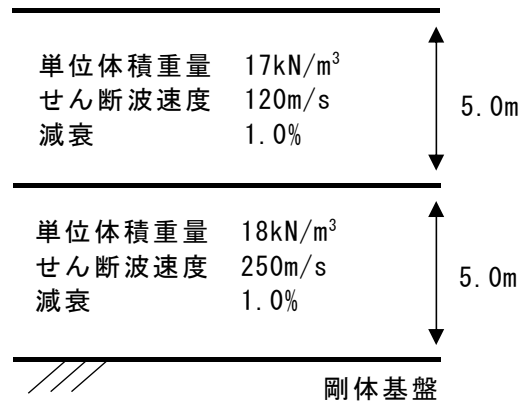


図3-3 地盤モデル諸元

<検討条件>

- ・重量加速度は 9.80m/s^2 とする。
- ・検討する振動数は $0\sim 20\text{Hz}$ までとする。

b. 比較結果

伝達関数の比較結果を図3-4に示す。

図より、本解析コードと理論解の結果は一致していることが確認できる。

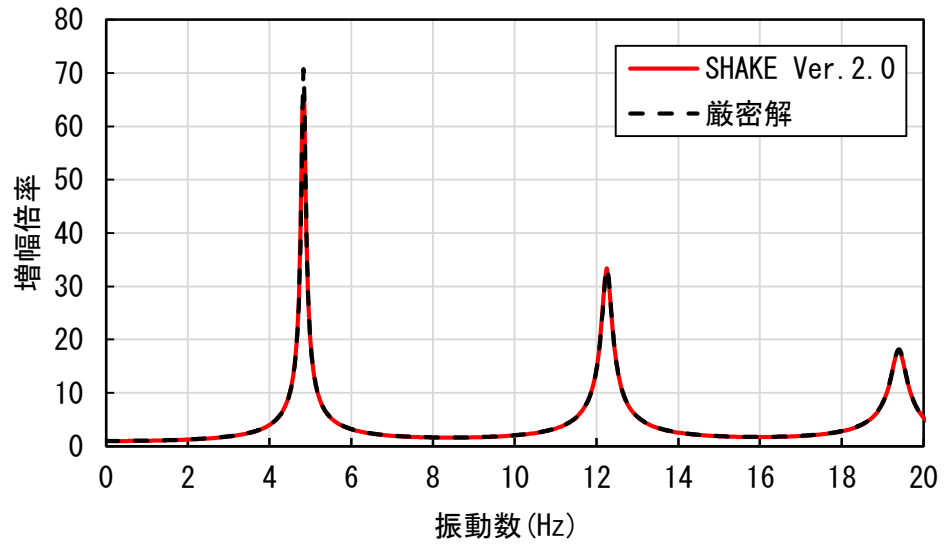


図3-4 理論解との伝達関数の比較

3.5.2 妥当性確認

カリフォルニア大学バークレー校が有償配布している1次元地盤の等価線形解析プログラム shake-91 との比較を実施した。

a. 検証モデル及び検討条件

表3-1に検討地盤モデルを示し、図3-5～図3-10にひずみ依存特性を示す。

表3-1 地盤モデル諸元

区分	層厚 (m)	分割 (m)	深度 (m)	湿潤単位 体積重量 γ_t (kN/m^3)	動的せん断 弾性係数 Gd (kN/m^2)	せん断 波速度 Vs (m/s)	減衰定数 h
第1粘性土層	4.00	1.00	1.00	17	21000	110	0.030
		1.00	2.00	17	21000	110	0.030
		1.00	3.00	17	21000	110	0.030
		1.00	4.00	17	21000	110	0.030
第2粘性土層	10.80	1.20	5.20	16	25000	124	0.020
		1.20	6.40	16	25000	124	0.020
		1.20	7.60	16	25000	124	0.020
		1.20	8.80	16	25000	124	0.020
		1.20	10.00	16	25000	124	0.020
		1.20	11.20	16	25000	124	0.020
		1.20	12.40	16	25000	124	0.020
		1.20	13.60	16	25000	124	0.020
第3粘性土層	9.60	1.60	16.40	16	43000	162	0.020
		1.60	18.00	16	43000	162	0.020
		1.60	19.60	16	43000	162	0.020
		1.60	21.20	16	43000	162	0.020
		1.60	22.80	16	43000	162	0.020
		1.60	24.40	16	43000	162	0.020
第1砂質土層	1.20	1.20	25.60	19	159000	286	0.020
第4粘性土層	8.00	2.00	27.60	17	110000	252	0.020
		2.00	29.60	17	110000	252	0.020
		2.00	31.60	17	110000	252	0.020
		2.00	33.60	17	110000	252	0.020
第2砂質土層	2.00	2.00	35.60	19	273000	375	0.010
礫層(基盤)				20	398000	442	0.010

せん断有効歪 (%)	G/G0	減衰 (%)
0.0001	1.000	2.00
0.0002	0.985	2.30
0.0005	0.930	2.80
0.001	0.880	3.20
0.002	0.819	3.60
0.005	0.729	4.40
0.01	0.648	5.10
0.02	0.578	5.70
0.05	0.459	7.30
0.1	0.381	9.20
0.2	0.300	11.00
0.5	0.198	14.00
1	0.129	16.10
2	0.078	17.60
5	0.028	19.20
10	0.014	20.00

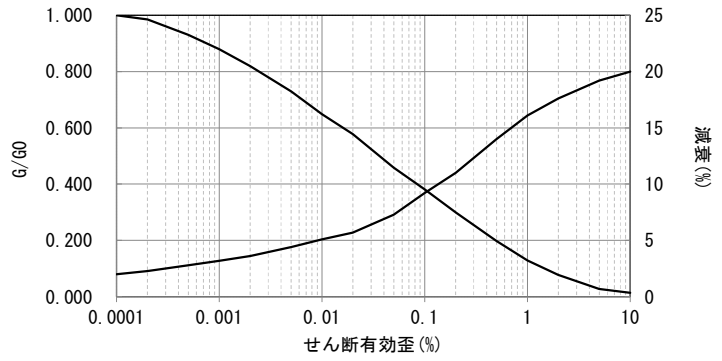


図 3-5 ひずみ依存特性 (第 1 粘性土層)

せん断有効歪 (%)	G/G0	減衰 (%)
0.0001	1.000	2.00
0.0002	0.989	2.30
0.0005	0.952	2.80
0.001	0.916	3.20
0.002	0.874	3.60
0.005	0.811	4.40
0.01	0.752	5.10
0.02	0.698	5.70
0.05	0.601	7.30
0.1	0.500	9.20
0.2	0.394	11.00
0.5	0.259	14.00
1	0.170	16.10
2	0.102	17.60
5	0.036	19.20
10	0.018	20.00

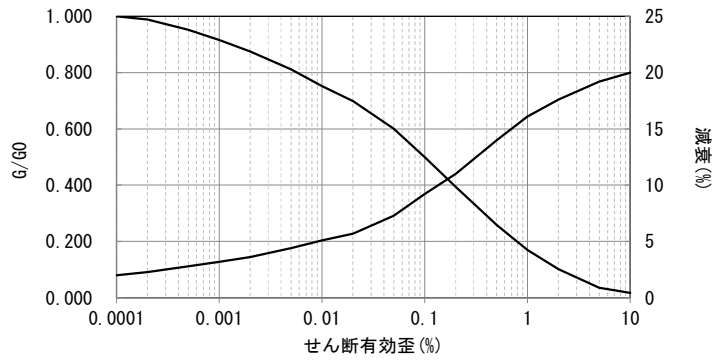


図 3-6 ひずみ依存特性 (第 2 粘性土層)

せん断有効歪 (%)	G/G0	減衰 (%)
0.0001	1.000	2.00
0.0002	0.991	2.30
0.0005	0.963	2.80
0.001	0.934	3.20
0.002	0.902	3.60
0.005	0.853	4.40
0.01	0.807	5.10
0.02	0.764	5.70
0.05	0.684	7.30
0.1	0.569	9.20
0.2	0.448	11.00
0.5	0.295	14.00
1	0.193	16.10
2	0.116	17.60
5	0.041	19.20
10	0.021	20.00

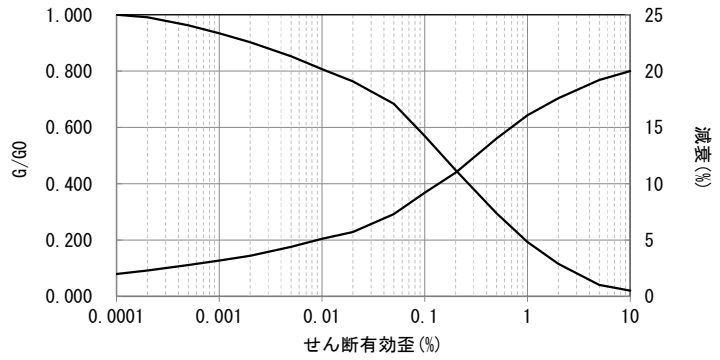


図 3-7 ひずみ依存特性 (第3粘性土層)

せん断有効歪 (%)	G/G0	減衰 (%)
0.0001	1.000	2.00
0.0002	0.991	2.30
0.0005	0.980	2.80
0.001	0.962	3.20
0.002	0.933	3.60
0.003	0.910	4.40
0.005	0.873	5.10
0.01	0.797	5.70
0.02	0.699	7.30
0.03	0.616	9.20
0.05	0.512	11.00
0.1	0.367	14.00
0.2	0.237	16.10
0.3	0.177	17.60
0.5	0.113	19.20
1	0.061	20.00

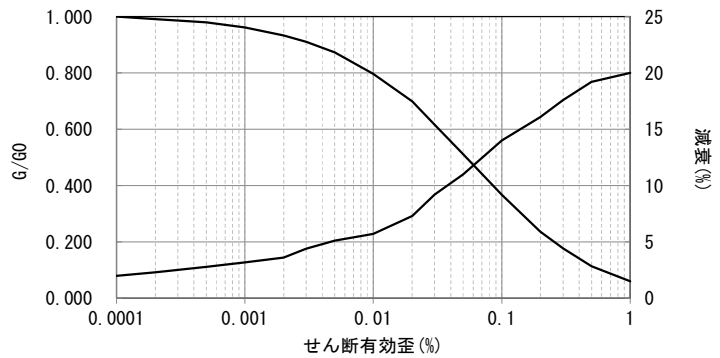


図 3-8 ひずみ依存特性 (第1砂質土層)

せん断有効歪 (%)	G/G0	減衰 (%)
0.0001	1.000	0.700
0.0002	0.990	0.900
0.0005	0.970	1.300
0.001	0.950	1.600
0.002	0.928	1.900
0.003	0.908	2.300
0.005	0.880	2.800
0.01	0.834	3.700
0.02	0.769	5.000
0.03	0.715	6.300
0.05	0.627	8.400
0.07	0.563	9.900
0.1	0.491	11.900
0.15	0.415	14.200
0.2	0.362	15.800
0.3	0.288	18.300
0.5	0.200	21.700
0.7	0.145	23.300
1	0.085	26.400

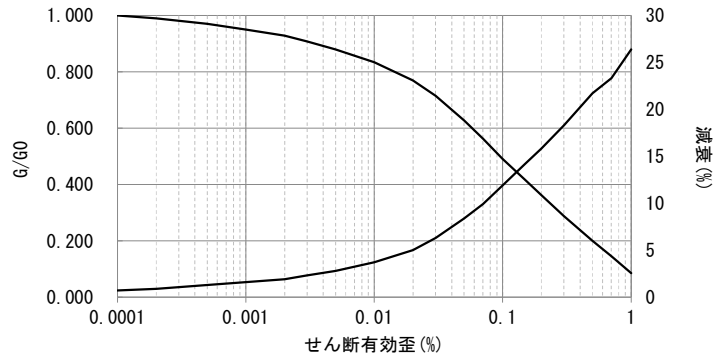


図 3-9 ひずみ依存特性 (第 4 粘性土層)

せん断有効歪 (%)	G/G0	減衰 (%)
0.0001	1.000	0.00
0.0002	0.997	0.08
0.0005	0.991	0.28
0.001	0.977	0.70
0.002	0.953	1.41
0.003	0.932	2.04
0.005	0.899	3.02
0.01	0.832	5.03
0.02	0.740	7.79
0.03	0.661	10.16
0.05	0.563	13.10
0.1	0.418	17.46
0.2	0.277	21.70
0.3	0.209	23.73
0.5	0.134	25.97
1	0.072	27.83

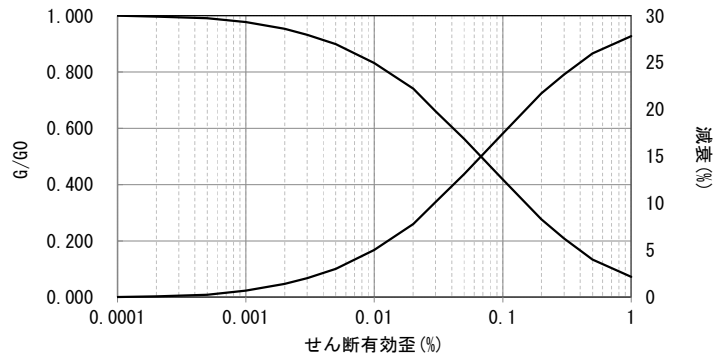


図 3-10 ひずみ依存特性 (第 2 砂質土層)

b. 検討条件

以下に、検討条件を示す。

- ・重力加速度は 9.80m/s^2
- ・等価線形解析とする。
- ・検討する振動数は $0\sim 20\text{Hz}$ までとする。

c. 入力地震動

入力波は水平 1 方向に入力する。図 3-11 に入力地震動（2E 波）の加速度時刻歴を示す。

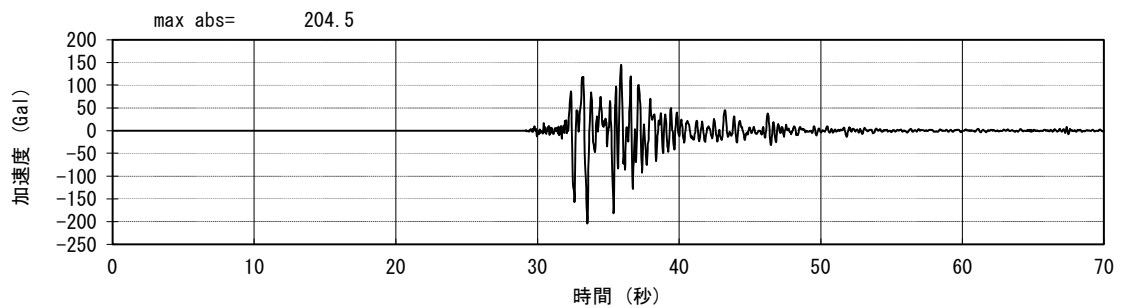


図 3-11 入力地震動加速度時刻歴

d. 検討結果比較

伝達関数及び加速度の解析解の比較を図 3-12～図 3-15 に示す。各図より、伝達関数及び加速度の解析解は、一致していることが確認できる。

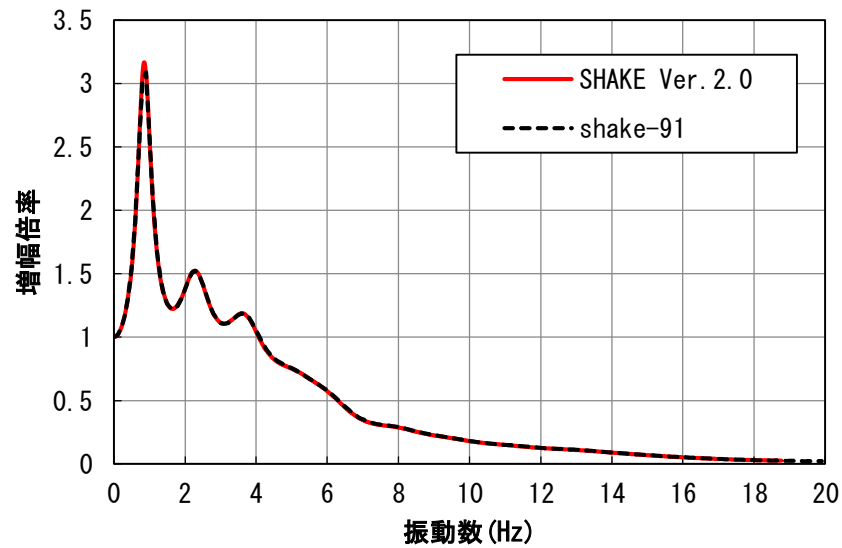


図 3-12 地表面伝達関数比較

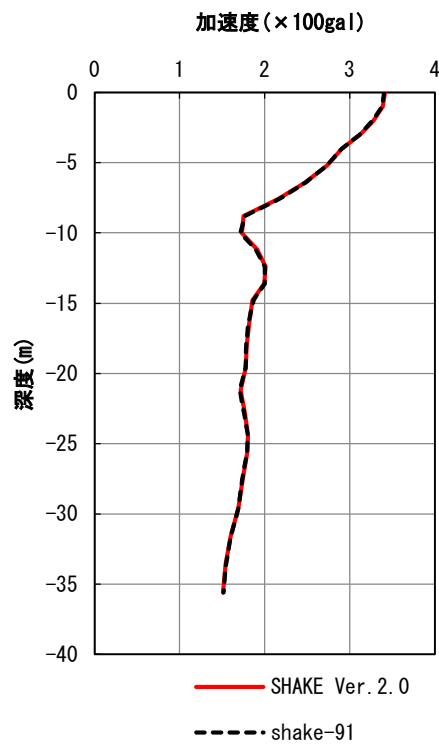


図 3-13 加速度最大分布図

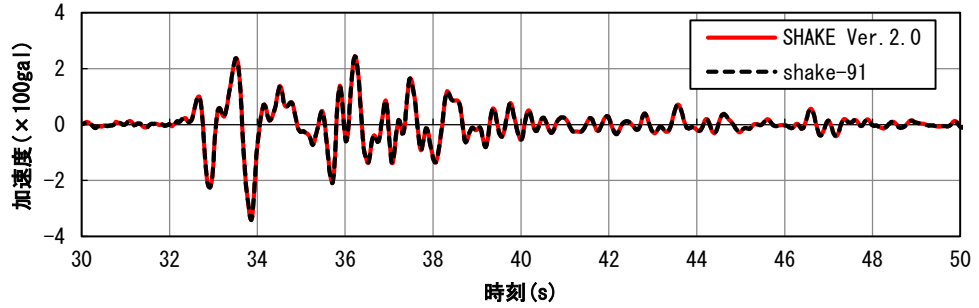


図 3-14 地表面加速度時刻歴比較

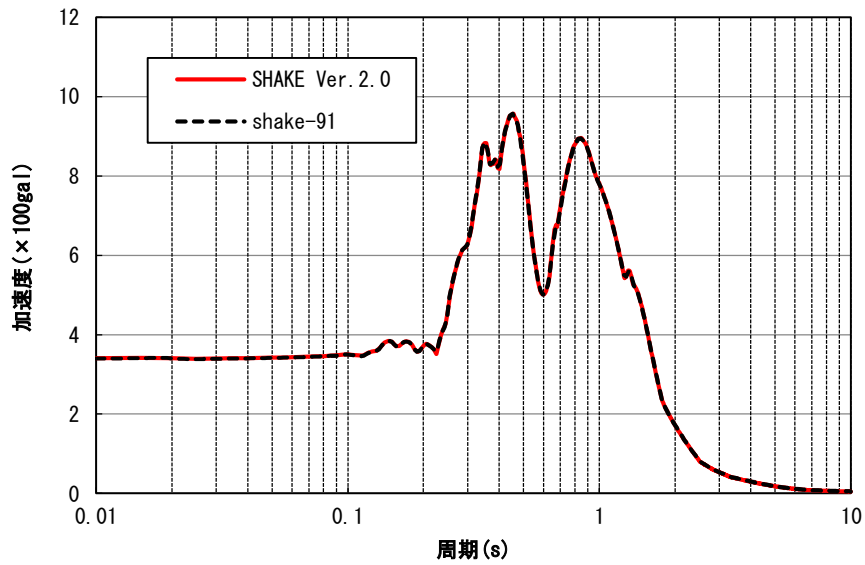


図 3-15 地表面加速度応答スペクトル比較

3.5.3 評価結果

本解析コードの解析結果と理論解を比較し、理論解と解析解が一致していることを確認した。また、類似解析コードである shake-91 と比較し、解析解が一致していることを確認した。したがって、本解析に本解析コードを使用することは妥当である。

VI-5-48 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ C A R O

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、VI-2-3-2-1において使用した計算機プログラム（解析コード）CAROについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-3-2-1	燃料集合体の耐震性についての計算書	Ver. 1

2. 解析コードの概要

項目	コード名 CARO
使用目的	燃料棒の熱的挙動及び機械的挙動の評価
開発機関	Kraftwerk Union社
開発時期	1981年
使用したバージョン	Ver. 1
コードの概要	<p>CARO (以下「本解析コード」という。) は、Kraftwerk Union社により開発された燃料棒熱・機械設計コードである。</p> <p>本解析コードは、出力履歴に対応したペレット-被覆管のギャップ幅変化とガスの熱伝導率をもとにペレットと被覆管のギャップ熱伝達係数を求め、燃料棒の熱的挙動を評価すると同時に、軸対称有限要素法(FEM)により、ペレットと被覆管の相互作用等の機械的挙動を評価する。</p> <p>本解析コードは、高燃焼度8×8燃料及び9×9燃料の設計・許認可解析に適用された実績がある。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ハルデン炉の試験燃料データ、商業炉燃料棒の照射後試験データ等に基づいてペレット中心温度、核分裂生成ガス放出率、燃料棒内圧及び被覆管直径変化を対象とした計算値と測定値の比較*1が実施され、コードに組み込まれた個々の解析モデルが正しく機能していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ハルデン炉の試験燃料データ等との比較における計算値と測定値のばらつきがコード予測の不確かさとして考慮*1されていることを確認している。 ・コード検討会等規制機関による確認*1、*2 が実施されていることを確認している。

注記*1：沸騰水型軽水炉用燃料の設計手法について（昭和62年12月 原子燃料工業株式会社
NLR-14）

*2：原子炉安全基準専門部会報告書，発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について（昭和63年5月12日 原子力安全委員会了承）

VI-5-49 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ m k _ F R S

目 次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
2.1 mk_FRS Ver. 8.1	3
3. 解析手法	4
3.1 一般事項	4
3.2 解析コードの特徴	4
3.3 解析手法	4
3.4 解析フローチャート	6
3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)	7
3.5.1 検証	7
3.5.2 妥当性確認	10
3.5.3 評価結果	10

1. はじめに

本資料は、VI-2-別添3-2において使用した計算機プログラム（解析コード）mk_FRSについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-別添3-2	可搬型重大事故等対処設備の保管エリア等における入力地震動	Ver. 8.1

2. 解析コードの概要

2.1 mk_FRS Ver. 8.1

項目 \ コード名	mk_FRS
使用目的	床応答スペクトルの作成
開発機関	中電技術コンサルタント株式会社
開発時期	2021年
使用したバージョン	Ver. 8.1
コードの概要	<p>本解析コードは、耐震設計に使用する床応答スペクトルを作成することを目的としており、加速度応答時刻歴から応答スペクトルを計算する機能、複数の応答スペクトルの包絡値を求める機能を有する。</p>
検証(Verification) 及び 妥当性確認(Validation)	<p>【検証(Verification)】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・別解析コードISCEFによる応答スペクトルと本解析コードで作成した応答スペクトルを比較し、一致していることを確認している。 ・包絡機能については、手計算により包絡した床応答スペクトルと、本解析コードで作成した算出値を比較し、一致していることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・今回の工事計画認可申請で使用する機能は応答スペクトルの作成機能であるため、同一の入力条件に対する1自由度系の最大応答加速度を固有周期ごとに算定し、別解析コードISCEFと本解析コードの結果を比較することで、妥当性を確認している。 ・応答スペクトルを作成する際、入力とする加速度応答時刻歴の時間刻み幅、データの形式は、上述の妥当性を確認している範囲内での使用であることを確認している。 ・加速度応答時刻歴の時間刻み、固有周期計算間隔は J E A G 4 6 0 1 -1987に従っており、妥当性に問題ない。 ・今回の工事計画認可申請における床応答スペクトル、加速度応答時刻歴に対し、使用用途及び方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

3. 解析手法

3.1 一般事項

本書は、建物・構築物の地震応答解析から算出される加速度応答時刻歴から応答スペクトルを作成する解析コードである mk_FRS (以下、「本解析コード」という)の説明書である。

本解析コードは、一定の固有周期及び減衰定数を有する 1 質点系の与えられた加速度応答時刻歴に対する最大応答加速度を計算し、応答スペクトルを求める。また、固有周期と減衰定数が同一の系で計算された複数の応答スペクトルの包絡値を求めて、床応答スペクトルの作成を行う。

3.2 解析コードの特徴

解析コードの主な特徴を以下に示す。

- ・ 加速度応答時刻歴から固有周期及び減衰定数に応じた応答スペクトルの算出
(最大応答加速度の計算においては、1自由度系(1質点)の運動方程式の解を数値積分法により求める。本解析コードでは、数値積分法としてニガム法を用いる。)
- ・ 複数の応答スペクトルを包絡した床応答スペクトルの作成

3.3 解析手法

質点の相対変位を x ，固有円振動数を ω ，減衰定数を h ，地動の加速度時刻歴を $\ddot{y}(t)$ としたとき，系の運動方程式は，

$$\ddot{x} + 2 \cdot h \cdot \omega \cdot \dot{x} + \omega^2 \cdot x = -\ddot{y}(t) \quad (3.1)$$

と表される。 t は一定時間間隔 Δt ごとに与えられて、 \ddot{y}_i と \ddot{y}_{i+1} の間を直線によって補間し、 t_i を原点とする区間 $t_i \sim t_{i+1}$ 内の局所的な時間を τ ， $\Delta \ddot{y} = \ddot{y}_{i+1} - \ddot{y}_i$ とすれば，

$$\ddot{y}(t) = \frac{\Delta \ddot{y}}{\Delta t} \cdot \tau + \ddot{y}_i \quad 0 \leq \tau \leq \Delta t$$

と表される。(3.1)式は区間的に

$$\ddot{x}(\tau) + 2 \cdot h \cdot \omega \cdot \dot{x}(\tau) + \omega^2 \cdot x(\tau) = -\frac{\Delta \ddot{y}}{\Delta t} \cdot \tau - \ddot{y}_i \quad 0 \leq \tau \leq \Delta t$$

となる。

この非同時微分方程式を解いて、区間のはじめ時刻 t_i における初期条件

$$\tau = 0 : x = x_i, \dot{x} = \dot{x}_i$$

を与えれば、区間の終わり $\tau = \Delta t$ (時刻 $t_{i+1} = t_i + \Delta t$) における相対変位応答及び相対速度応答は次のような形で求まる。

$$x_{i+1} = A_{11} \cdot x_i + A_{12} \cdot \dot{x}_i + B_{11} \cdot \ddot{y}_i + B_{12} \cdot \ddot{y}_{i+1} \quad (3.2)$$

$$\dot{x}_{i+1} = A_{21} \cdot x_i + A_{22} \cdot \dot{x}_i + B_{21} \cdot \ddot{y}_i + B_{22} \cdot \ddot{y}_{i+1}$$

ここで、 A, B は $\omega, h, \Delta t$ が定まれば一意に定まる係数である。 x_{i+1}, \dot{x}_{i+1} が定まれば、絶対加速度応答は(3.1)式より

$$(\ddot{x} + \ddot{y})_{i+1} = -(2 \cdot h \cdot \omega \cdot \dot{x}_{i+1} + \omega^2 \cdot x_{i+1}) \quad (3.3)$$

によって求められる。したがって、 $t=0$ における応答の初期値 $x_1 = 0$

$$\dot{x}_1 = -\ddot{y}_1 \cdot \Delta t$$

$$(\ddot{x} + \ddot{y})_1 = 2 \cdot h \cdot \omega \cdot \ddot{y}_1 \cdot \Delta t$$

を与えれば、後は(3.2)式と(3.3)式によって応答値が算出される。

3.4 解析フローチャート

本解析コードを用いて行う解析フローチャートを図3.4-1に示す。

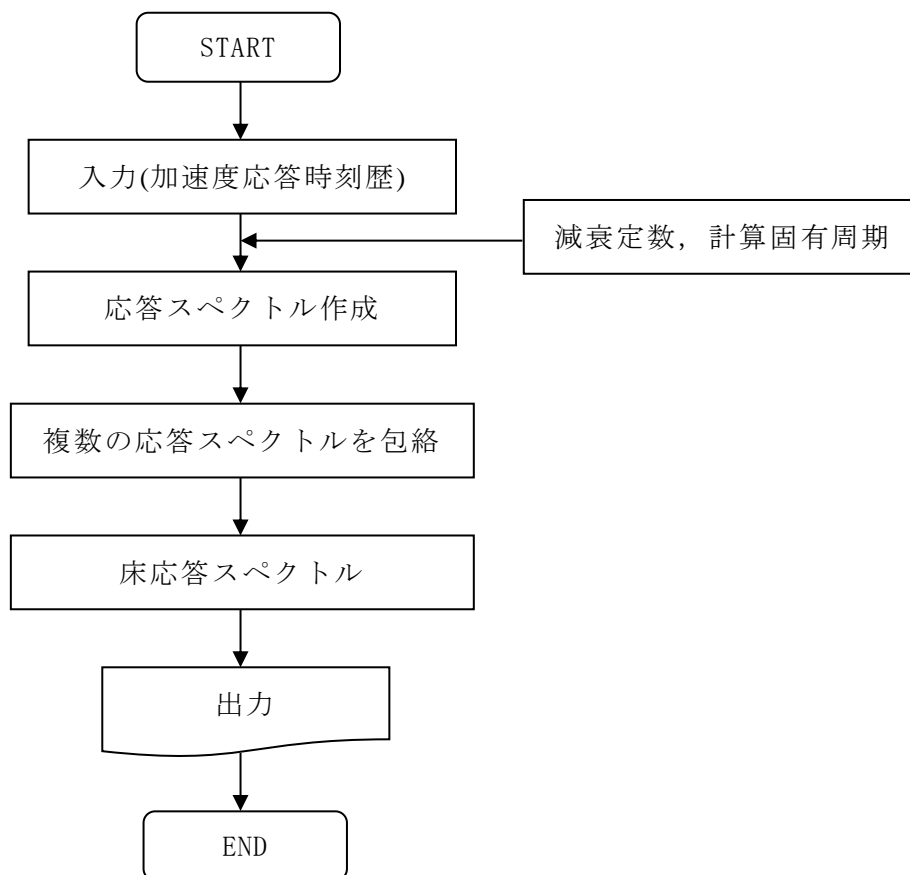


図3.4-1 解析コード「mk_FRS」を用いた解析フローチャート

3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)

3.5.1 検証

(1) 応答スペクトル作成機能

別解析コードISCEFによる応答スペクトルと本解析コードで作成した応答スペクトルを比較することで、本解析コードの検証を行った。

検証に用いた加速度応答時刻歴を図3.5-1に示す。また、別解析コードと本解析コードで作成した応答スペクトルを比較したものを図3.5-2に示す。図3.5-2より、本解析コードの結果は、別解析コードの結果と、よく一致していることが分かる。

(2) 包絡機能

包絡は、同一の計算固有周期で算定された複数の応答スペクトルに対して、各計算固有周期の最大値を選定して作成する。本解析コードの包絡機能は、2つの応答スペクトルをプロットした図を確認して選定した手計算値と、本解析コードで作成した算出値の比較により検証した。図3.5-3に本解析コードによる包絡結果を示すように、正しく包絡されていることが分かる。

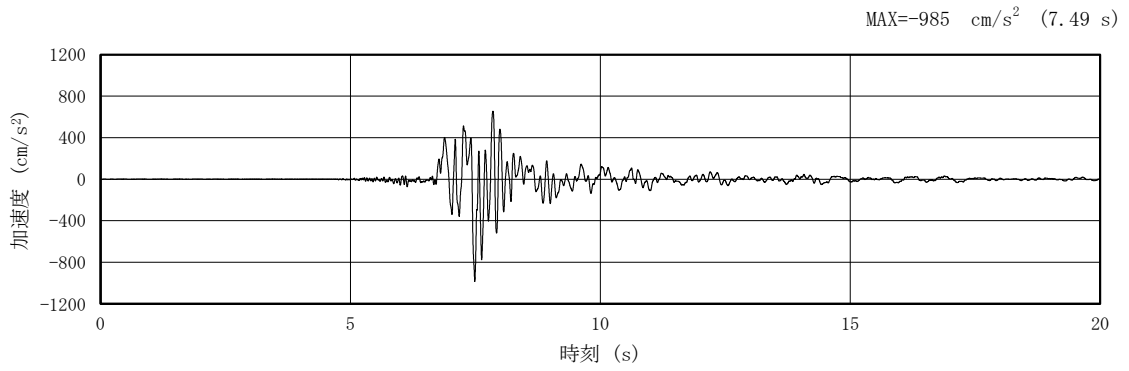


図3.5-1 検証に用いた加速度応答時刻歴の波形

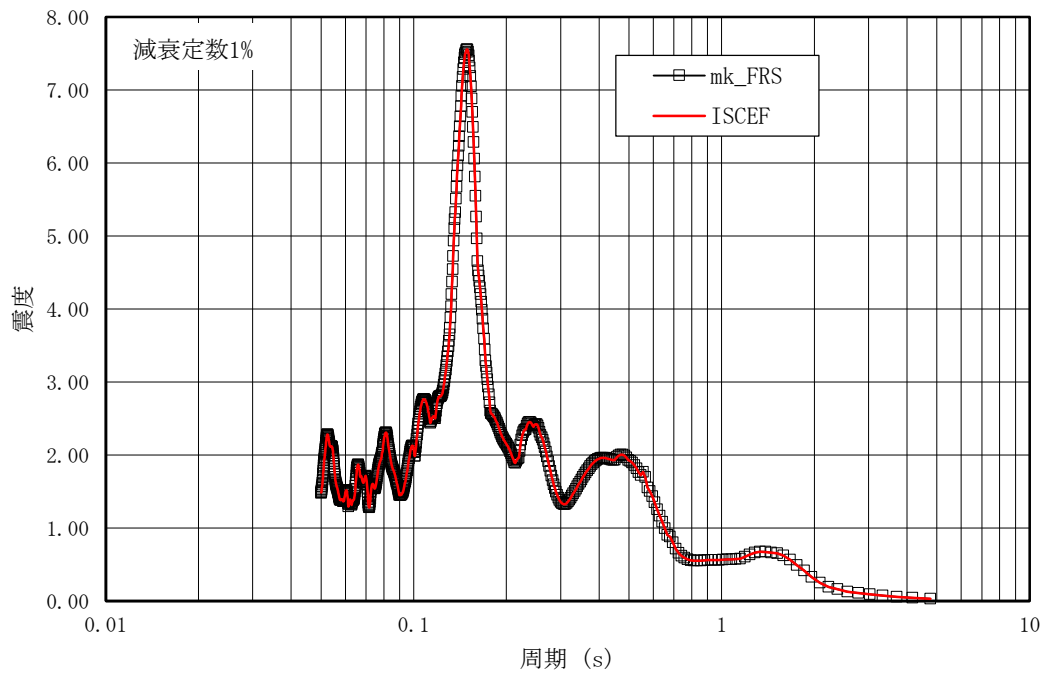


図3.5-2 応答スペクトルの解析結果比較

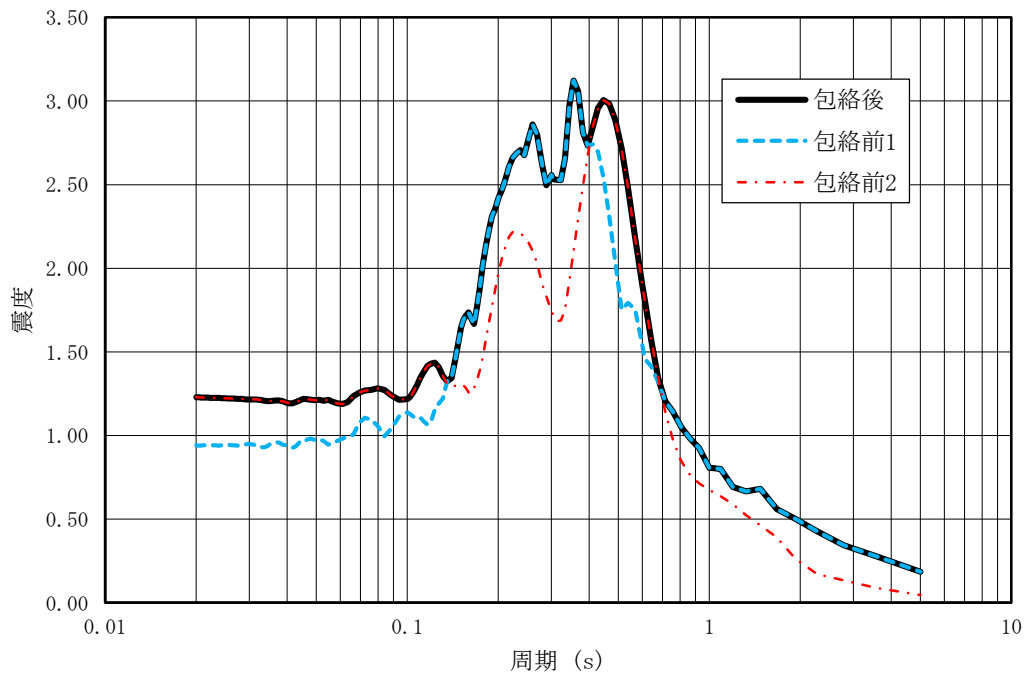


图3.5-3 包絡結果

3.5.2 妥当性確認

本解析コードの妥当性確認内容は、以下のとおりである。

- ・今回の工事計画認可申請で使用する機能は、応答スペクトルの作成機能であるため、同一の入力条件に対する1自由度系の最大応答加速度を固有周期ごとに算定し、別解析コードであるISCEFと本解析コードの結果を比較することで、妥当性を確認している。
- ・応答スペクトルを作成する際、入力とする加速度応答時刻歴の時間刻み幅、データの形式は、上述の妥当性を確認している範囲内での使用であることを確認している。
- ・加速度応答時刻歴の時間刻み、固有周期計算間隔はJ E A G 4 6 0 1 -1987に従っており、妥当性に問題ない。
- ・今回の工事計画認可申請における床応答スペクトル、加速度応答時刻歴に対し、使用用途及び方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

3.5.3 評価結果

3.5.1及び3.5.2より、本解析コードを使用目的に示す床応答スペクトルの作成に用いることは妥当である。