

本資料のうち、枠囲みの内容は、営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

| | |
|------------------|------------------|
| 東海第二発電所 工事計画審査資料 | |
| 資料番号 | 工認-091 改 18 |
| 提出年月日 | 平成 30 年 5 月 18 日 |

V-3-別添 1 竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書

目次

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

: 今回ご説明分

V-3-別添 1-1-2 残留熱除去系海水系ポンプの強度計算書

目次

| | |
|---------------------|----|
| 1. 概要..... | 1 |
| 2. 基本方針..... | 1 |
| 2.1 位置..... | 1 |
| 2.2 構造概要..... | 2 |
| 2.3 評価方針..... | 2 |
| 2.4 適用規格..... | 5 |
| 3. 強度評価方法..... | 6 |
| 3.1 記号の定義..... | 6 |
| 3.2 評価対象部位..... | 10 |
| 3.3 荷重及び荷重の組合せ..... | 13 |
| 3.4 許容限界..... | 15 |
| 3.5 評価方法..... | 17 |
| 4. 評価条件..... | 31 |
| 5. 強度評価結果..... | 35 |

1. 概要

本資料は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、残留熱除去系海水系ポンプが竜巻時及び竜巻通過後においても、送水機能の維持を考慮して、主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

残留熱除去系海水系ポンプについて、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、残留熱除去系海水系ポンプの「2.1 位置」、「2.2 構造概要」、「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

2.1 位置

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

海水ポンプ室の位置図を図2-1に示す。

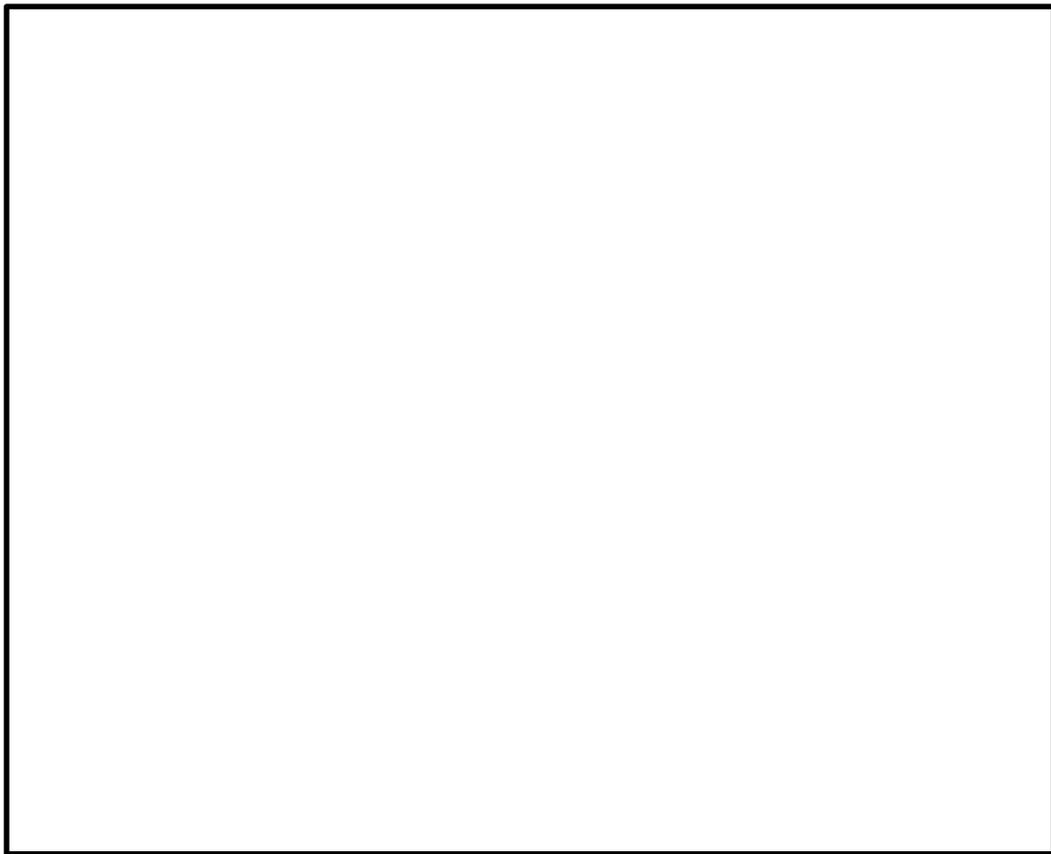


図 2-1 海水ポンプ室の位置図

2.2 構造概要

残留熱除去系海水系ポンプについて、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、残留熱除去系海水系ポンプの構造を示す。

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

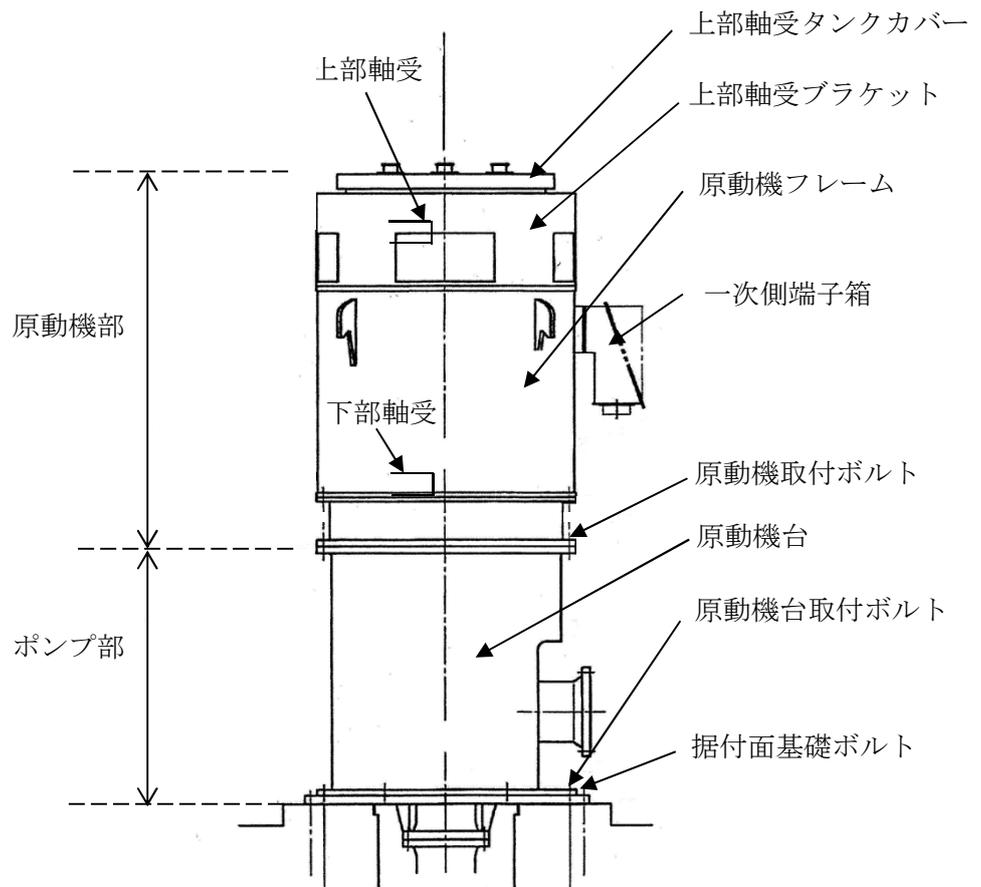


図2-2 残留熱除去系海水系ポンプの概要図

2.3 評価方針

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

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

(1) 衝突評価の評価方針

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

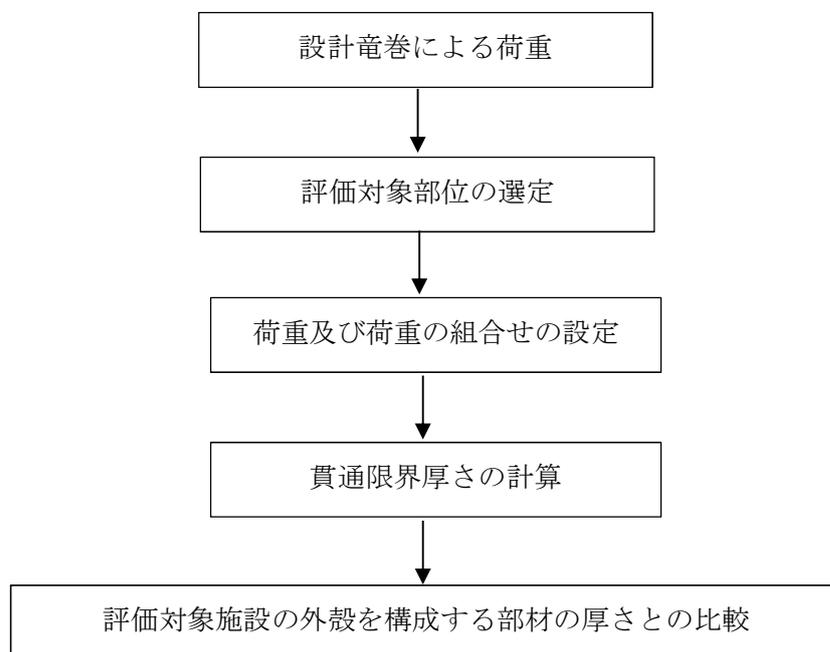


図2-3 残留熱除去系海水系ポンプの衝突評価フロー

(2) 構造強度評価の評価方針

残留熱除去系海水系ポンプの強度評価フローを図2-4に示す。強度評価においては、残留熱除去系海水系ポンプに対して、設計竜巻の風圧力による荷重及び気圧差による荷重に運転時の状態で作用する荷重及び自重を加えた応力が許容応力以下であることを確認する。各部材の強度評価において、その部材に対して応力が大きくなる方向から風が当たることを想定する。各部材の強度評価には、設計竜巻による荷重は水平方向より作用する外荷重という観点で地震荷重と同様なものであると考え、「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1・補-1984」（（社）日本電気協会）、「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987」（（社）日本電気協会）及び「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」（（社）日本電気協会）（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）における1質点系モデルによる評価方法を準用し、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す立

形ポンプの評価式を用いる。

残留熱除去系海水系ポンプの強度評価における許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、J E A G 4 6 0 1 の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

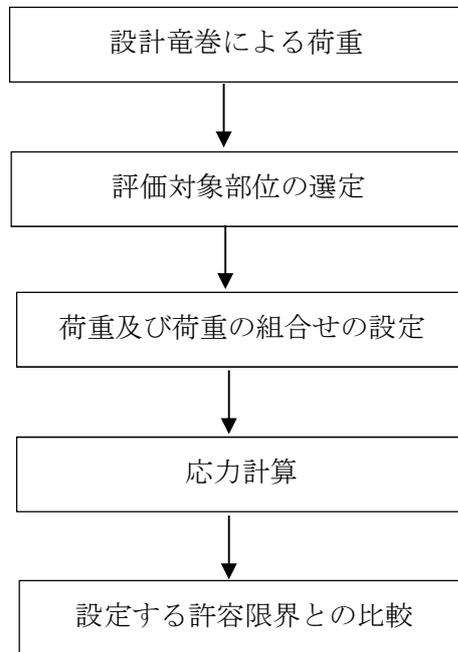


図2-4 残留熱除去系海水系ポンプの構造強度評価フロー

(3) 動的機能維持評価の評価方針

残留熱除去系海水系ポンプの動的機能維持評価フローを図2-5に示す。残留熱除去系海水系ポンプは動的機器であるため、構造強度評価に加え、軸受部の動的機能維持評価を行う。動的機能維持評価においては、ポンプ据付面から上部の受圧面積が大きくなる方向から風が当たるとを想定し、設計竜巻の風圧力による荷重を受けた際のフレーム変位により生じる軸受荷重が接触面圧の許容荷重以下であることを確認する。動的機能維持評価では、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す立形ポンプの評価式を用いる。海水ポンプの動的機能維持評価における許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、軸受部の接触面圧の許容荷重とする。

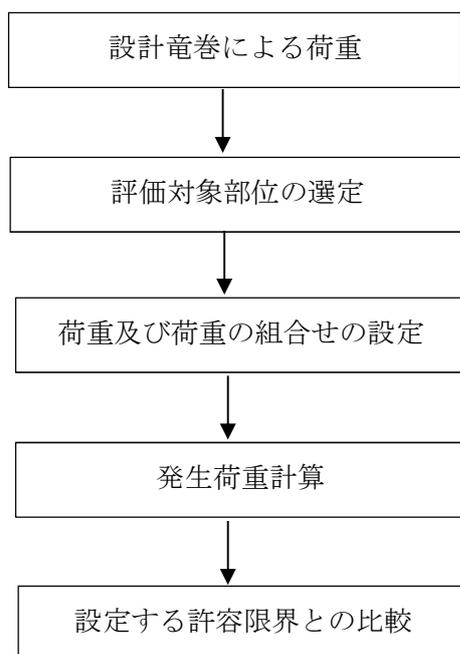


図2-5 残留熱除去系海水系ポンプの動的機能維持評価フロー

2.4 適用規格

- ・「タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日 原子炉安全専門審査会）」
- ・「建築物荷重指針・同解説」（（社）日本建築学会，2004改定）
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984」（社）日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987」（社）日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」（社）日本電気協会
- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 J S M E S N C 1 -2005/2007」（社）日本機械学会（以下「J S M E」という。）

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 衝突評価の記号の定義

残留熱除去系海水系ポンプの衝突評価に用いる記号を表3-1に示す。

表3-1 衝突評価に用いる記号

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

(2) 構造強度評価及び動的機能維持評価の記号の定義

残留熱除去系海水系ポンプの構造強度評価及び動的機能維持評価に用いる記号を表3-2及び表3-3に示す。

表3-2 構造強度評価に用いる記号 (1/2)

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

表3-2 構造強度評価に用いる記号 (2/2)

| 記号 | 単位 | 定義 |
|----------------|------------------|--|
| h | mm | 基準面からの重心距離 |
| h_u | mm | 基準面から上端カバー上端までの高さ |
| h_w | mm | 原動機フレーム溶接部高さ |
| L | mm | 重心と支点間の距離 |
| L_H | mm | 重心と支点間の距離 |
| L_i | mm | 各ボルト間の距離 |
| $L_1 \sim L_8$ | mm | 支点と評価ボルト間の距離 |
| M | N・mm | 設計竜巻により作用するモーメント |
| m | kg | 質量 |
| N | — | ボルトの本数 |
| q | N/m ² | 設計用速度圧 |
| S_y | MPa | J S ME 付録材料図表Part5の表にて規定される設計降伏点 |
| S_u | MPa | J S ME 付録材料図表Part5の表にて規定される設計引張強さ |
| W_T | N | 設計竜巻による複合荷重 |
| W_{T1} | N | 設計竜巻による複合荷重 ($W_{T1} = W_P$) |
| W_{T2} | N | 設計竜巻による複合荷重 ($W_{T2} = W_W + 0.5 \cdot W_P + W_M$) |
| W_M | N | 設計竜巻による飛来物の衝撃荷重 |
| W_P | N | 設計竜巻の気圧差による荷重 |
| W_W | N | 設計竜巻の風圧力による荷重 |
| ΔP | N/m ² | 設計竜巻の気圧低下量 |
| π | — | 円周率 |
| σ_{mt} | MPa | 原動機フレームの引張応力 |
| σ_{bt} | MPa | ボルトの引張応力 |
| τ | MPa | せん断応力 |

表3-3 動的機能維持評価に用いる記号 (1/2)

| 記号 | 単位 | 定義 |
|------------------|------------------|---|
| A | m ² | 受圧面積 (風向に垂直な面に投影した面積) |
| a | mm | 部材間の長さ |
| a ₁ | mm | ポンプ据付面から原動機台上端までの長さ |
| a ₂ | mm | 原動機台上端から原動機下部軸受までの長さ |
| a ₃ | mm | 原動機台上端から荷重作用点までの長さ |
| C | — | 建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数 |
| E | MPa | 縦弾性係数 |
| E _m | MPa | 原動機フレームの縦弾性係数 |
| E _p | MPa | 原動機台の縦弾性係数 |
| E _m ' | MPa | 回転子の縦弾性係数 |
| G | — | ガスト影響係数 |
| h' | mm | 基準点から作用点までの距離 |
| h ₁ ' | mm | ポンプ据付面から荷重作用点までの距離 |
| h ₂ ' | mm | 原動機下部軸受から荷重作用点までの距離 |
| h ₃ ' | mm | 荷重作用点から荷重作用点までの距離 |
| I | mm ⁴ | 断面二次モーメント |
| I _m | mm ⁴ | 原動機フレームの断面二次モーメント |
| I _m ' | mm ⁴ | 回転子の断面二次モーメント |
| I _p | mm ⁴ | 原動機台の断面二次モーメント |
| i | rad | 傾斜 |
| i ₁ | rad | ポンプ据付面から原動機台上端部の傾斜 |
| i ₃ | rad | 原動機台上端部から荷重作用点の傾斜 |
| i ₄ | rad | 荷重作用点の傾斜 |
| M | N・mm | 設計竜巻により作用するモーメント |
| M _a | N・mm | 設計竜巻により作用するモーメント |
| M _b | N・mm | 設計竜巻により作用するモーメント |
| M _c | N・mm | 設計竜巻により作用するモーメント |
| q | N/m ² | 設計用速度圧 |
| W _T | N | 設計竜巻による複合荷重 |
| W _{T2} | N | 設計竜巻による複合荷重 (W _{T2} = W _w + 0.5・W _p + W _M) |
| W' | N | たわみ量及び発生荷重計算において設計竜巻による風圧を受ける面それぞれのW _{T2} の合計の複合荷重 |
| W'' | N | 発生荷重 |
| W _M | N | 設計竜巻による飛来物の衝撃荷重 |

表3-3 動的機能維持評価に用いる記号 (2/2)

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

3.2 評価対象部位

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

(1) 衝突評価の評価対象部位

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

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

残留熱除去系海水系ポンプの衝突評価における評価対象部位を図3-1に示す。

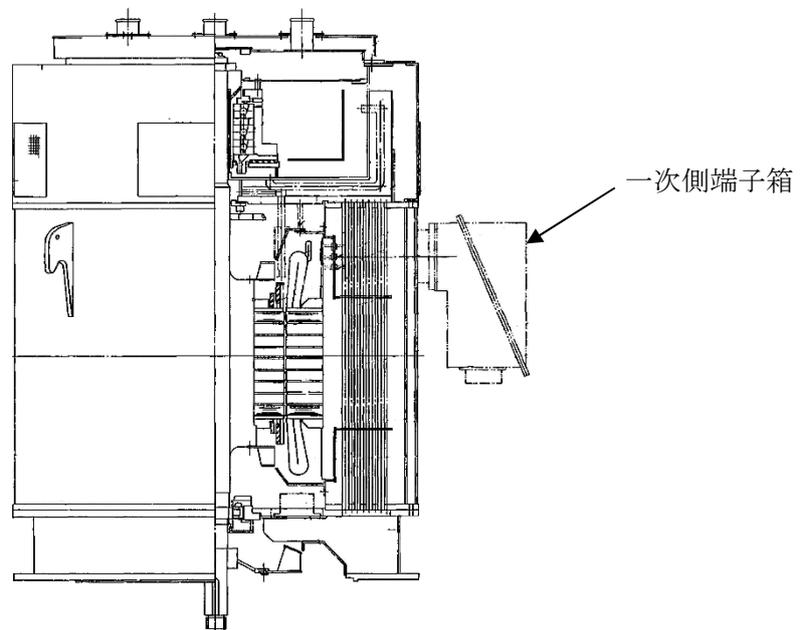


図3-1 残留熱除去系海水系ポンプの評価対象部位（衝突評価）

(2) 構造強度評価の評価対象部位

a. ポンプ部

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

このことから、以下の部位を強度評価の評価対象部位として選定する。

- ・原動機取付ボルト
- ・原動機台取付ボルト
- ・据付面基礎ボルト

b. 原動機部

原動機部について、原動機部等に作用する風圧力による荷重及び気圧差による荷重は、原動機フレーム及び付属品に作用し、原動機フレーム及び付属品を介して、付属品の取付部を固定するボルトに作用する。

このことから、以下の部位を強度評価の評価対象部位として選定する。

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

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

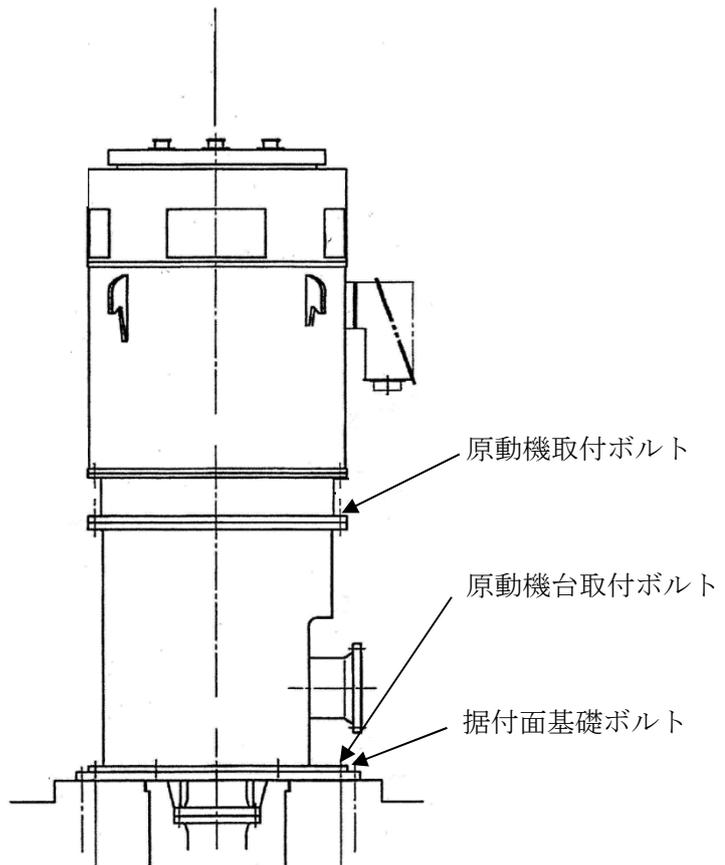


図3-2 残留熱除去系海水系ポンプ評価部位概略図（ポンプ部）

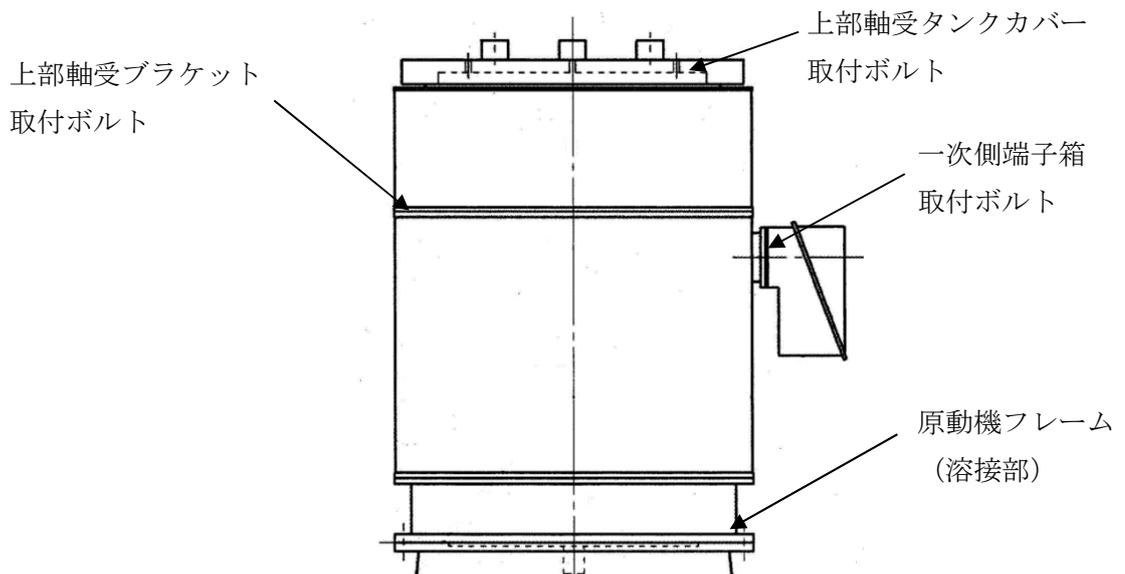


図 3-3 残留熱除去系海水系ポンプ評価対象部位概略図（原動機部）

(3) 動的機能維持評価の評価対象部位

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

- ・原動機下部軸受部
- ・原動機上部軸受部

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

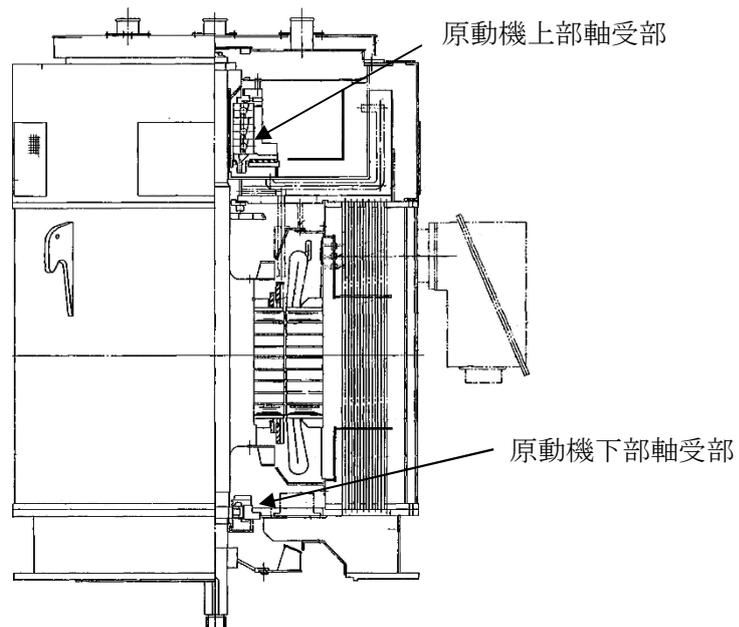


図 3-4 残留熱除去系海水系ポンプ動的機能維持評価対象部位概略図

3.3 荷重及び荷重の組合せ

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

(1) 衝突評価の荷重及び荷重の組合せ

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

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

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

表3-4 砂利の諸元

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

表3-5 残留熱除去系海水系ポンプの衝突評価に用いる荷重

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

(2) 構造強度評価及び動的機能維持評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の設定

強度評価に用いる荷重を以下に示す。

(a) 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、持続的に生じる荷重である自重を考慮する。

自重による荷重は以下のとおり計算する。

$$H = m \cdot g$$

(b) 設計竜巻による荷重

風圧力による荷重及び気圧差による荷重を考慮する。防護ネット及び防護鋼板等による風圧力の低減は無いものとして保守的な評価を行う。

イ. 風圧力による荷重(W_w)

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

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

ロ. 気圧差による荷重(W_p)

気圧差による荷重 W_p はV-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の

方針」の「4.1(3)c. (b) 気圧差による荷重」に示す式に従い、算出する。

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

ハ. 荷重の組合せ

設計竜巻による複合荷重 $W_T(W_{T1}, W_{T2})$ はV-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1(2) 荷重の組合せ」に示す式に従い、算出する。なお、残留熱除去系海水系ポンプは気圧差が生じ難い構造であるため、複合荷重の選定において、 W_{T2} としては気圧差を考慮するが、 W_{T1} の評価は実施しない。

$$W_{T1} = W_P$$

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

(c) 運転時の状態で作用する荷重

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

b. 荷重の組合せ

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

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

なお、防護対策として、竜巻防護ネットを設置する施設については、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、竜巻防護ネットを通過する小さな飛来物による衝撃荷重は、衝突される機器へ伝わる加速度が小さく、機器へ作用する荷重は強度に影響を与えないので $W_M=0$ とする。

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

表 3-6 荷重の組合せ

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

3.4 許容限界

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

(1) 衝突評価における許容限界

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

表3-7 残留熱除去系海水系ポンプの外殻を構成する部材の厚さ

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

(2) 構造強度評価における許容限界

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

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

表3-8 残留熱除去系海水系ポンプの強度評価における許容限界

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

(3) 動的機能維持評価における許容限界

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

軸受の接触面圧の許容荷重を表3-9に示す。

表3-9 軸受の接触面圧の許容荷重

| 評価対象部位 | 許容荷重 (N) |
|----------|----------|
| 原動機上部軸受部 | |
| 原動機下部軸受部 | |

3.5 評価方法

(1) 衝突評価の評価方法

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

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

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

(2) 構造強度評価及び動的機能維持評価の評価方法

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

a. 計算モデル

(a) 構造強度評価

計算モデルは1質点系モデルとし、ポンプ部は全高の1/2の位置に、原動機部は風圧力による荷重の作用中心と同等、あるいはより高い重心作用位置に複合荷重が作用することとする。また、設計竜巻による風荷重はそれぞれの評価対象部位に対して発生応力が大きくなる方向から当たるものとする。ポンプ部及び原動機部の応力の計算モデル図を図3-5及び図3-6に示す。

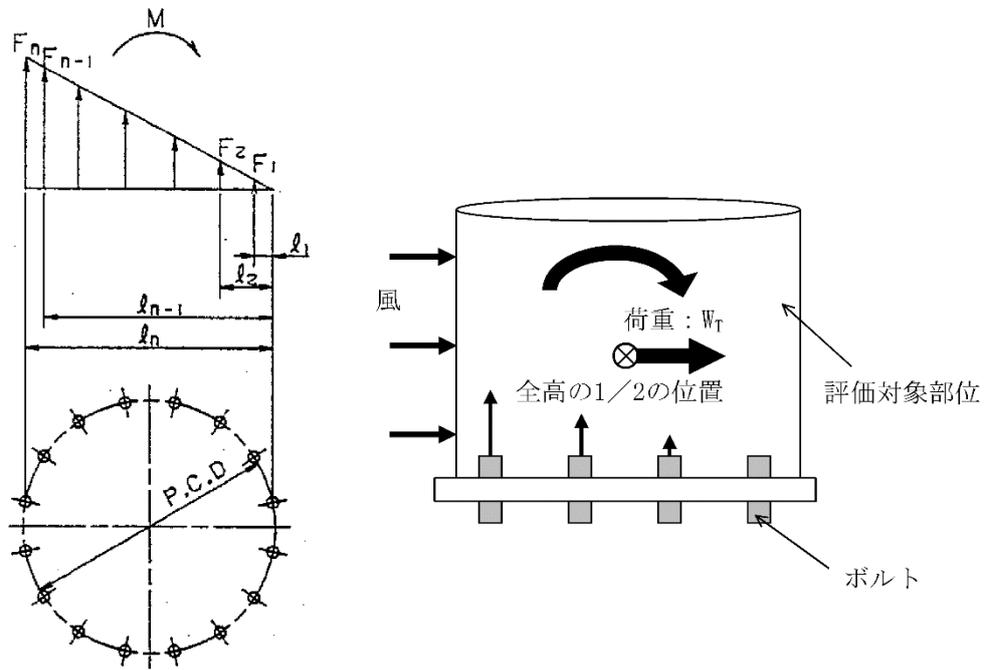


図 3-5 応力の計算モデル図 (ポンプ部)

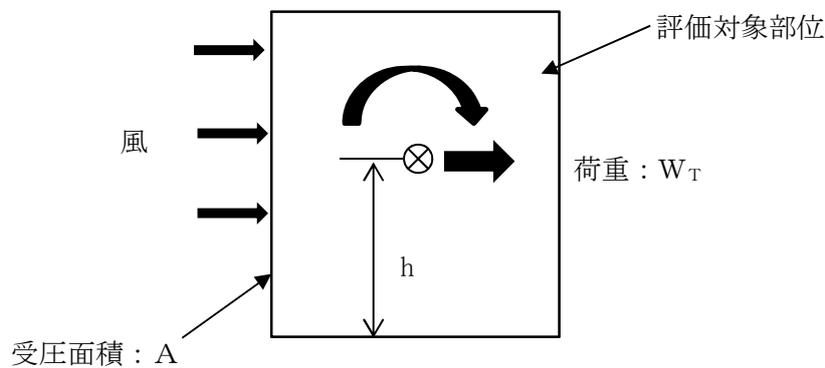


図 3-6 応力の計算モデル図 (原動機部)

(b) 動的機能維持評価

動的機能維持評価の際の原動機フレームのたわみ量計算において、ポンプ据付面から原動機台上端まで（ポンプ部）と、原動機台上端から原動機まで（原動機部）の片持ち梁と考え、違う断面性能の一軸中空形モデルで、荷重が全高の半分の位置に作用することとする。ポンプ部の断面性能は電動台が最も小さいことから、原動機部の断面性能を一様に有する単純円筒形モデルとして評価する。原動機部については原動機フレームの断面性能を用いて評価する。たわみ量計算モデル図を図3-7に示す。

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

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

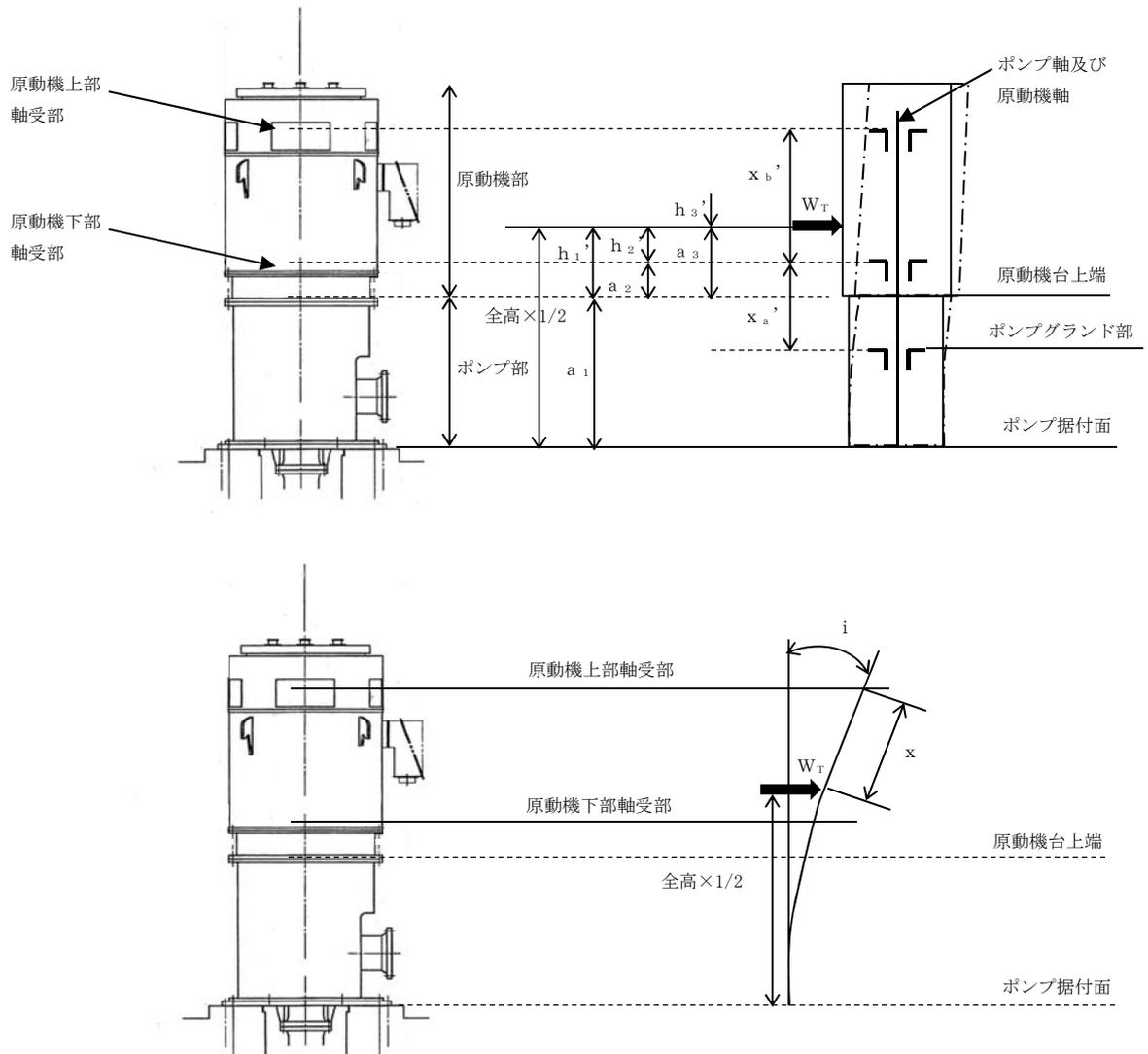


図 3-7 残留熱除去系海水系ポンプのたわみ量計算モデル図

b. 計算方法

(a) 応力の算出

イ. ポンプ部 (ボルト部)

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

(イ) 風による転倒モーメントM

$$M = W_T \cdot \text{全高} / 2$$

(ロ) 引張応力 σ_{bt}

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

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

(3.1) (3.2) 式より,

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

よって,

$$\sigma_{b \ t} = \frac{F_n}{A_b}$$

(ハ) せん断応力 τ

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

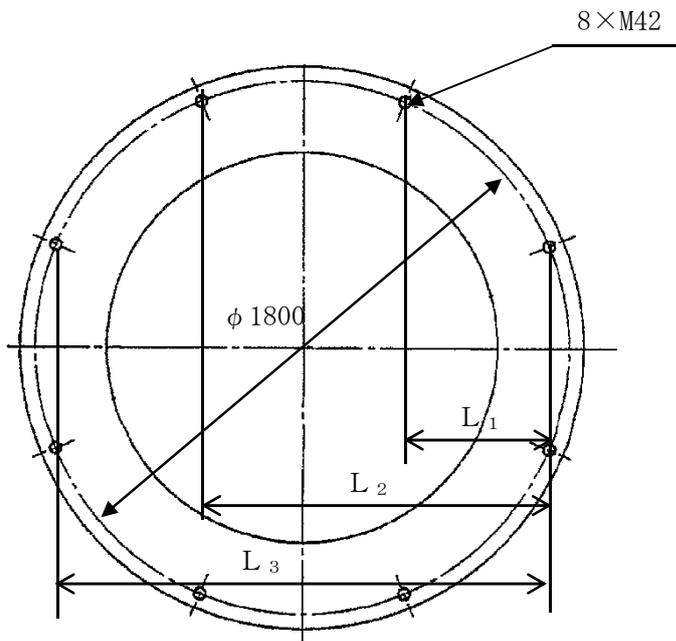


図 3-8 原動機取付ボルトの各ボルト間寸法の配置図

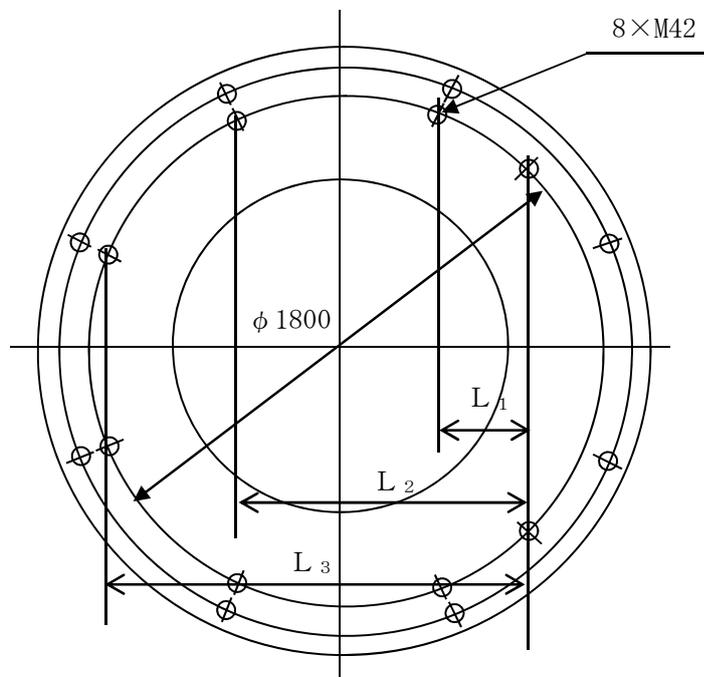


図 3-9 原動機台取付ボルトの各ボルト間寸法の配置図

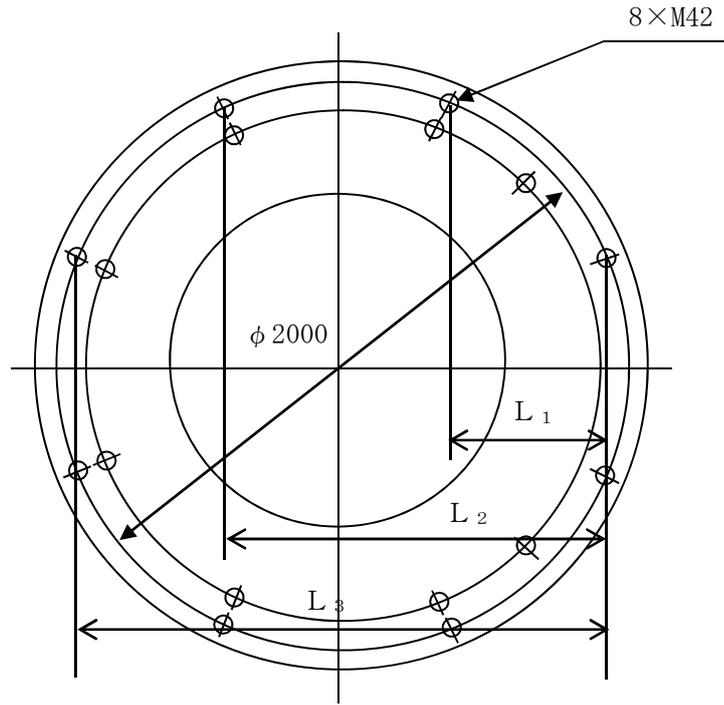


図 3-10 据付面基礎ボルトの各ボルト間寸法の配置図

ロ. 原動機部

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

(イ) 風による転倒モーメントM

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

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

(ロ) 原動機フレーム溶接部

原動機フレーム溶接部の応力算出方法を以下に示す。

・引張応力

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

・せん断応力

$$\tau = \frac{W_T}{A_w}$$

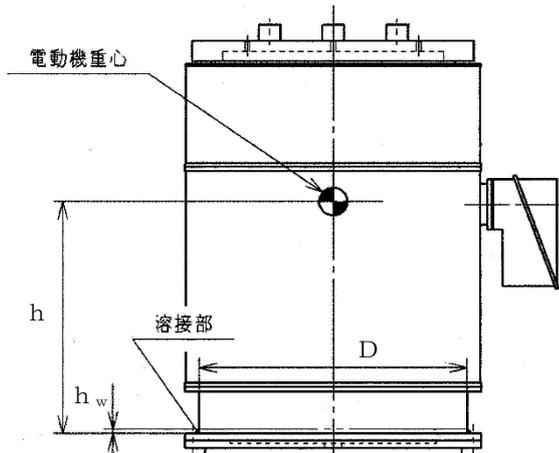


図 3-11 原動機フレーム溶接部詳細図

(ハ) 一次側端子箱ボルト部

一次側端子箱ボルト部の応力算出方法を以下に示す。

・引張応力

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

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

・せん断応力

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

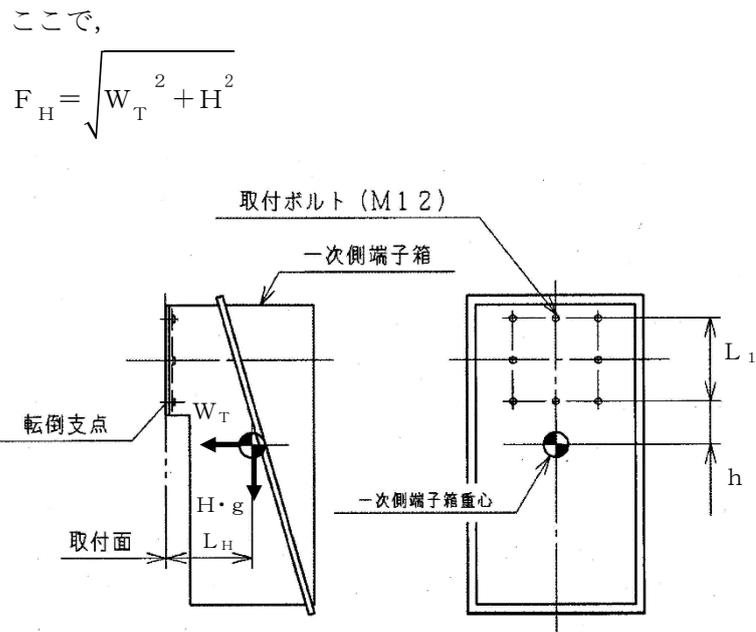


図 3-12 一次側端子箱詳細図

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

・引張応力

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

(i) 風による転倒モーメントM

$$M = W_T \cdot h_u$$

(ii) 引張応力 σ_{bt}

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

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

(3.1) (3.2) 式より,

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

よって,

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

(iii) せん断応力 τ

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

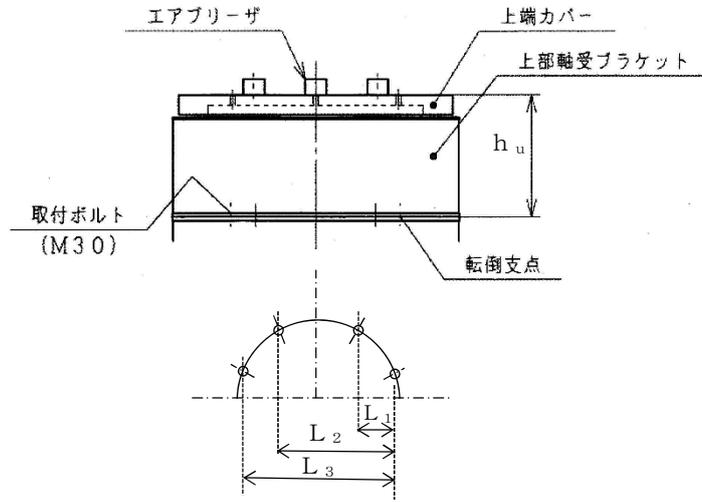


図 3-13 上部軸受ブラケット詳細図

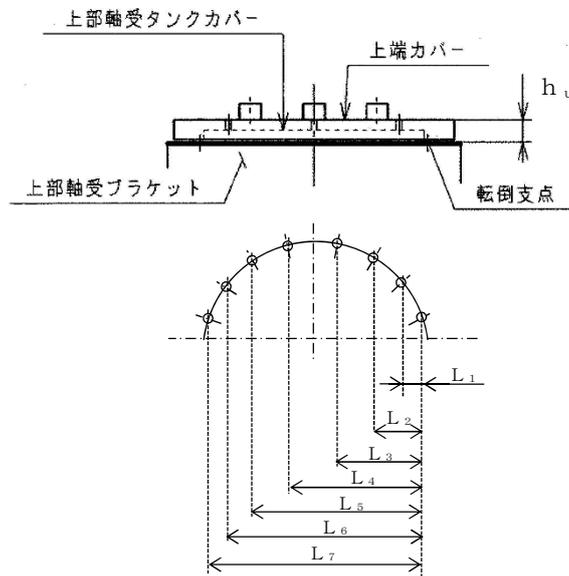


図 3-14 上部軸受タンクカバー詳細図

(b) 発生荷重の計算

イ. たわみ量の計算

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

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

各部位の受圧部図を図3-15～図3-19に示す。

(単位：mm)

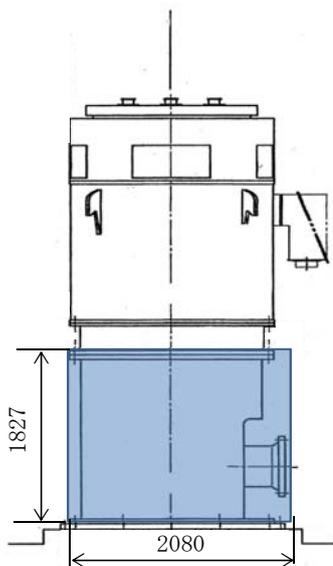


図3-15 原動機台の受圧部図

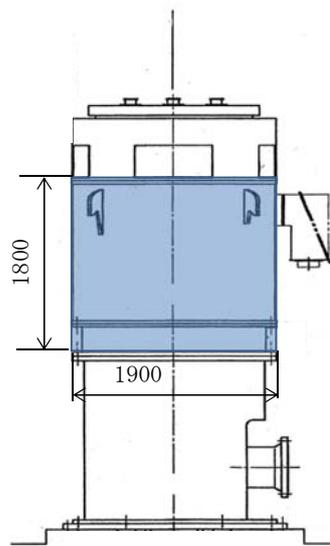


図3-16 原動機フレームの受圧部図

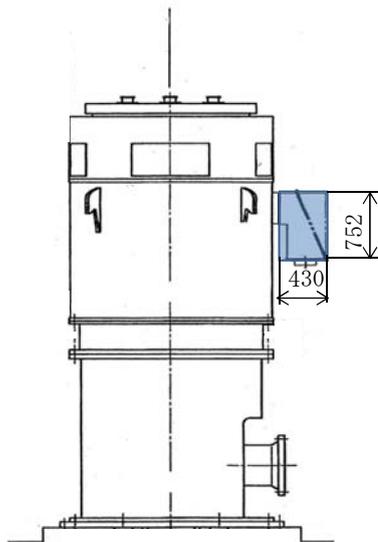


図3-17 一次側端子箱の受圧部図

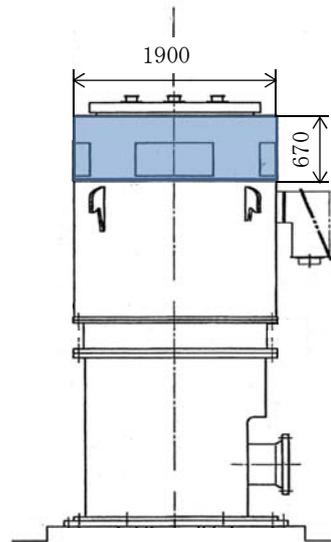


図3-18 上部軸受ブラケットの受圧部図

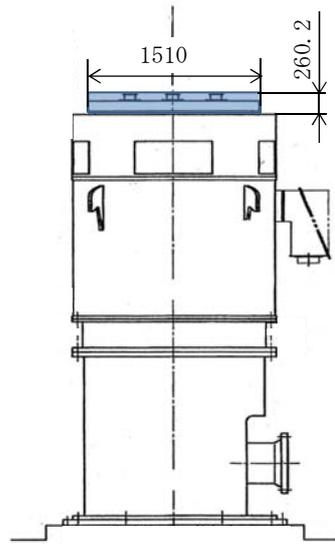


図3-19 上部軸受タンクカバーの受圧部図

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

ミオソテスの方法

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

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

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

(イ) 原動機下部軸受部

・ポンプ据付面から原動機台上端部のたわみ量 y_1 、傾斜 i_1

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

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

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

ここで、原動機台の断面図を図3-20に示す。

(単位：mm)

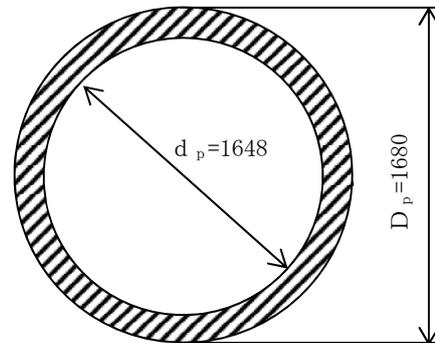


図3-20 原動機台の断面図

円筒形であるため、断面二次モーメントは以下のとおり算出する。

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

・原動機台上端部から原動機下部軸受部のたわみ量 y_2

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

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

ここで、原動機フレームの断面図を図3-21に示す。

(単位：mm)

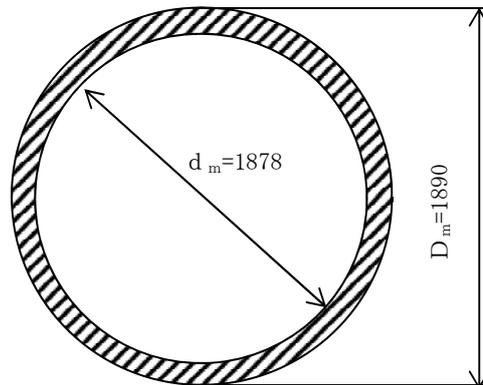


図3-21 原動機フレームの断面図

円筒形であるため、断面二次モーメントは以下のとおり算出する。

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

よって、原動機下部軸受部のたわみ量は

$$y_a = y_1 + y_2$$

(ロ) 原動機上部軸受部

・原動機台上端部から荷重作用点のたわみ量 y_3 ，傾斜 i_3

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

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

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

よって、荷重作用点のたわみ量 y_4 ，傾斜 i_4

$$y_4 = y_1 + y_3$$

$$i_4 = i_1 + i_3$$

荷重作用点から原動機上部軸受部のたわみ量 y_5

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

以上より、原動機上部軸受部のたわみ量は

$$y_b = y_4 + y_5$$

ロ. 発生荷重の算出

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

発生荷重 W'' は次式より計算する。

δ = 評価対象部位の変位量 - 支点の変位量

また、発生荷重は

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

より

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

(イ) 原動機下部軸受部の発生荷重

$$W''_m = \frac{3 \cdot E'_m \cdot I'_m \cdot \delta_a}{x_a^3}$$

ここで、 $\delta_a = y_a$

回転子（原動機部）の断面図を図3-22に示す。

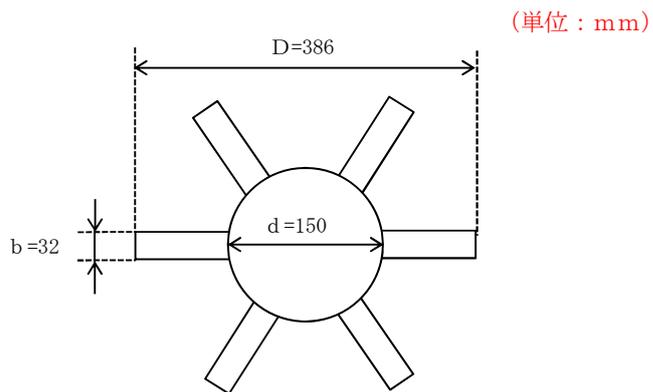


図3-22 回転子（原動機部）の断面図

回転子の断面二次モーメントは以下のとおり算出する。

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

(ロ) 原動機上部軸受部の発生荷重

$$W''_m = \frac{3 \cdot E'_m \cdot I'_m \cdot \delta_b}{x_b^3}$$

ここで、 $\delta_b = y_b - y_a$

4. 評価条件

(1) 構造強度評価の評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-1～表 4-14 に示す。

表 4-1 許容応力評価に用いる条件

| 評価対象部位 | 材料 | 温度条件 (°C) | S_y (MPa) | S_u (MPa) | F (MPa) | $1.5 f_t$ (MPa) | $1.5 f_s$ (MPa) |
|-----------------|--------|--------------|----------------|----------------|------------|--------------------|--------------------|
| 原動機取付ボルト | SUS304 | 50*1 | 198 | 504 | 205 | 153 | 118 |
| 原動機台取付ボルト | SUS304 | 50*1 | 198 | 504 | 205 | 153 | 118 |
| 据付面基礎ボルト | S22C | 50*1 | 260 | 430 | 260 | 195 | 150 |
| 原動機フレーム | SS400 | 60*2 | 237 | 389 | 106 | 106 | 61 |
| 一次側端子箱取付ボルト | SS400 | 90*2 | 225 | 376 | 225 | 168 | 129 |
| 上部軸受ブラケット取付ボルト | SUS304 | 60*2 | 192 | 489 | 205 | 153 | 118 |
| 上部軸受タンクカバー取付ボルト | SUS304 | 90*2 | 175 | 451 | 205 | 153 | 118 |

注記 *1：周囲環境温度

*2：最高使用温度

表 4-2 評価条件

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

表 4-3 評価条件 (原動機取付ボルト)

| L_1 (mm) | L_2 (mm) | L_3 (mm) | C (-) | 全高 (m) | A (m ²) |
|---------------|---------------|---------------|----------|-----------|------------------------|
| 487.1 | 1175.9 | 1663.0 | 1.2 | 2.73 | 8.354 |

| ボルト サイズ | N (-) | A_b (mm ²) |
|------------|----------|-----------------------------|
| M42 | 8 | 1385 |

表 4-4 評価条件（原動機台取付ボルト）

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

| ボルト サイズ | N (-) | A_b (mm^2) |
|------------|----------|---------------------|
| M42 | 8 | 1385 |

表 4-5 評価条件（据付面基礎ボルト）

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

| ボルト サイズ | N (-) | A_b (mm^2) |
|------------|----------|---------------------|
| M42 | 8 | 1385 |

表 4-6 評価条件（原動機フレーム）

| C (-) | h (mm) | A (m^2) | D (mm) | h_w (mm) |
|----------|-----------|----------------|-----------|---------------|
| 1.2 | 1365 | 8.354 | 1720 | 6 |

表 4-7 評価条件（一次側端子箱取付ボルト）

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

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

注記 * : () 内の数字は引張応力計算の際に考慮したボルトの本数

表 4-8 評価条件（上部軸受ブラケット取付ボルト）

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

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

表 4-9 評価条件（上部軸受タンクカバー取付ボルト）

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

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

| |
|------------------------|
| h _u (mm) |
| 260.2 |

(2) 動的機能維持評価の評価条件

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

表 4-10 評価条件（たわみ量の算出）

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

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

表 4-11 評価条件（原動機下部軸受部（たわみ量の算出））

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

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

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

表 4-12 評価条件（原動機下部軸受部（発生荷重の算出））

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

表 4-13 評価条件（原動機上部軸受部（たわみ量の算出））

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

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

表 4-14 評価条件（原動機上部軸受部（発生荷重の算出））

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

5. 強度評価結果

(1) 衝突評価結果

竜巻発生時の砂利の貫通限界厚さを表 5-1 に示す。

表 5-1 砂利の貫通限界厚さ

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

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

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

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

(2) 構造強度評価結果

a. 原動機取付ボルト

竜巻発生時の強度評価結果を表 5-1 に示す。

原動機取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-1 評価結果 (原動機取付ボルト)

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

b. 原動機台取付ボルト

竜巻発生時の強度評価結果を表 5-2 に示す。

原動機台取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-2 評価結果（原動機台取付ボルト）

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

c. 据付面基礎ボルト

竜巻発生時の強度評価結果を表 5-3 に示す。

据付面基礎ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-3 評価結果（据付面基礎ボルト）

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

d. 原動機フレーム

竜巻発生時の強度評価結果を表 5-4 に示す。

原動機フレームに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-4 評価結果（原動機フレーム）

| 応力分類 | 複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa) | 許容限界 (MPa) |
|------|------------------------------|---------------|
| 引張 | 14 | 106 |
| せん断 | 4 | 61 |
| 組合せ | 16 | 106 |

e. 一次側端子箱取付ボルト

竜巻発生時の強度評価結果を表 5-5 に示す。

一次側端子箱取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-5 評価結果（一次側端子箱取付ボルト）

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

f. 上部軸受ブラケット取付ボルト

竜巻発生時の強度評価結果を表 5-6 に示す。

上部軸受ブラケット取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-6 評価結果（上部軸受ブラケット取付ボルト）

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

g. 上部軸受タンクカバー取付ボルト

竜巻発生時の強度評価結果を表 5-7 に示す。

上部軸受タンクカバー取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-7 評価結果（上部軸受タンクカバー取付ボルト）

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

(3) 動的機能維持評価結果

a. 原動機下部軸受部

竜巻発生時の動的機能維持評価結果を表 5-8 に示す。

原動機下部軸受部の発生荷重は、許容荷重以下である。

表 5-8 評価結果（原動機下部軸受部）

| 発生荷重 W'' (N) | 許容荷重 (N) |
|-------------------|-------------|
| 6770 | |

b. 原動機上部軸受部

竜巻発生時の動的機能維持評価結果を表 5-9 に示す。

原動機上部軸受部の発生荷重は，許容荷重以下である。

表 5-9 評価結果（原動機上部軸受部）

| 発生荷重 W'' (N) | 許容荷重 (N) |
|-------------------|-------------|
| 2148 | |

V-3-別添 1-1-6 ディーゼル発電機用海水ポンプの強度計算書

目次

| | |
|---------------------|----|
| 1. 概要..... | 1 |
| 2. 基本方針..... | 1 |
| 2.1 位置..... | 1 |
| 2.2 構造概要..... | 2 |
| 2.3 評価方針..... | 2 |
| 2.4 適用規格..... | 5 |
| 3. 強度評価方法..... | 6 |
| 3.1 記号の定義..... | 6 |
| 3.2 評価対象部位..... | 10 |
| 3.3 荷重及び荷重の組合せ..... | 13 |
| 3.4 許容限界..... | 15 |
| 3.5 評価方法..... | 17 |
| 4. 評価条件..... | 30 |
| 5. 強度評価結果..... | 34 |

1. 概要

本資料は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプ（以下「ディーゼル発電機用海水ポンプ」という。）が竜巻時及び竜巻通過後においても、送水機能の維持を考慮して、主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

ディーゼル発電機用海水ポンプについて、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、ディーゼル発電機用海水ポンプの「2.1 位置」、「2.2 構造概要」、「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

2.1 位置

ディーゼル発電機用海水ポンプは、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示すとおり、屋外の海水ポンプ室に設置する。

海水ポンプ室の位置図を図2-1に示す。

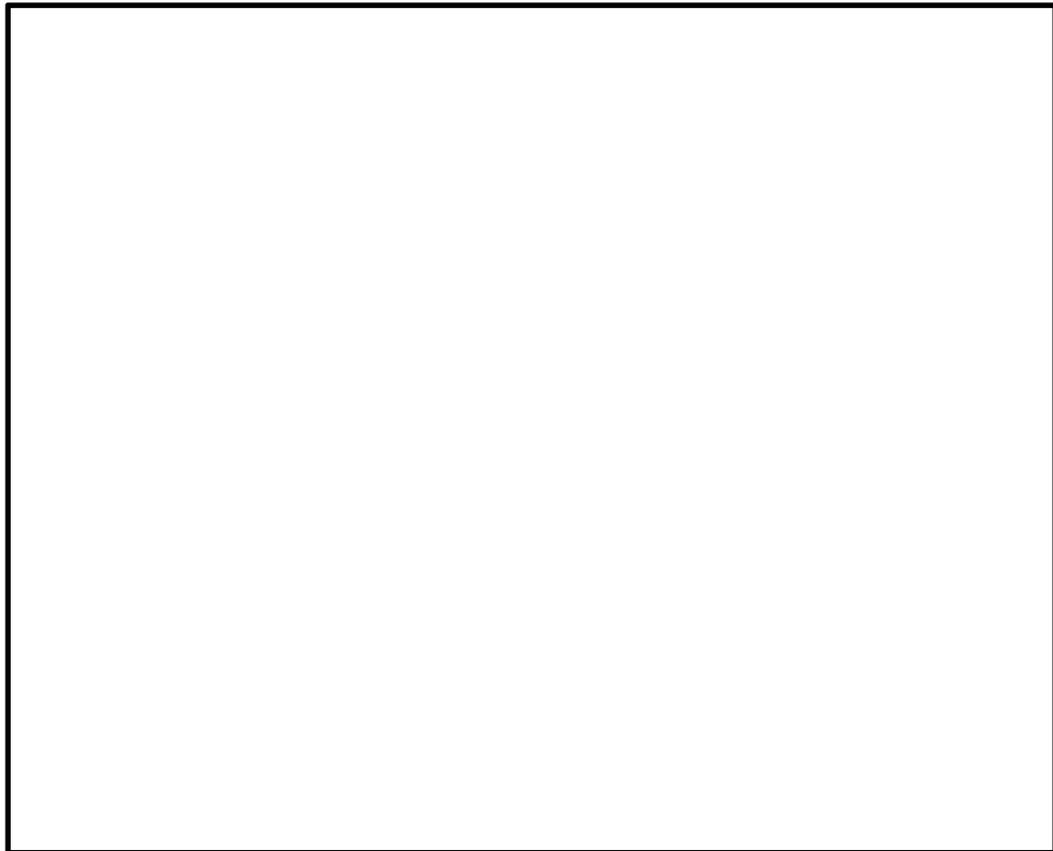


図 2-1 海水ポンプ室の位置図

2.2 構造概要

ディーゼル発電機用海水ポンプについて、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、ディーゼル発電機用海水ポンプの構造を示す。

ディーゼル発電機用海水ポンプは、ポンプ据付面から原動機台までのポンプ部と、原動機台より上部の原動機部からなる立形ポンプであり、同一設計のディーゼル発電機用海水ポンプを3台設置している。ディーゼル発電機用海水ポンプの概要図を図2-2に示す。

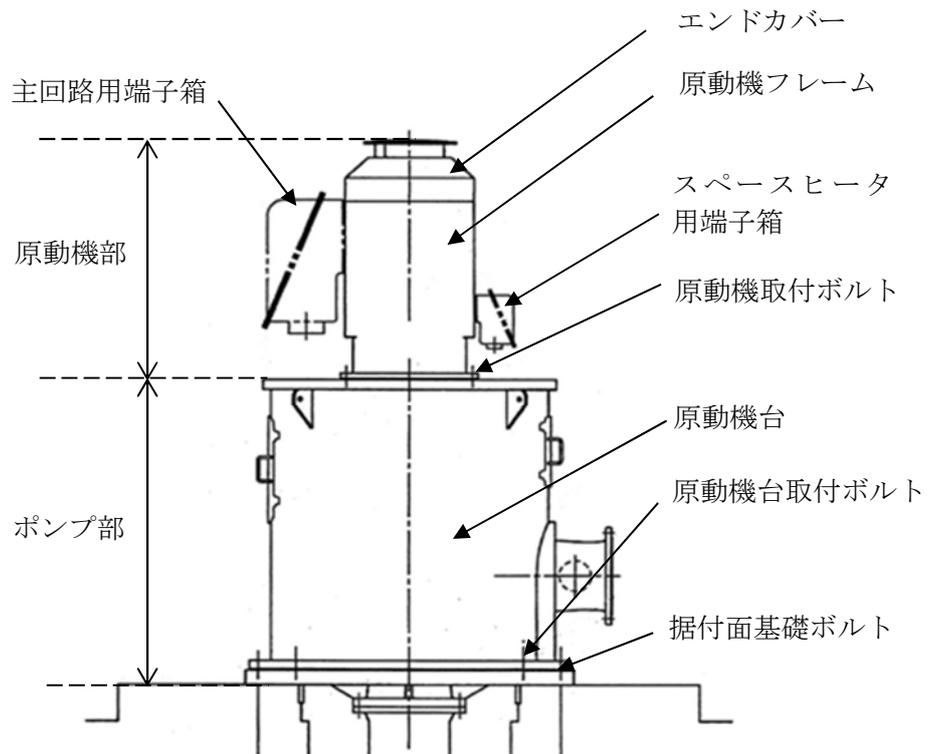


図2-2 ディーゼル発電機用海水ポンプの概要図

2.3 評価方針

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

ディーゼル発電機用海水ポンプの強度評価においては、その構造を踏まえ、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を選定する。

(1) 衝突評価の評価方針

ディーゼル発電機用海水ポンプの衝突評価フローを図2-3に示す。衝突評価においては、竜巻防護ネットを設置する場合に考慮する飛来物である砂利の貫通限界厚さが外壳を構成す

る部材の厚さ未満であることを確認する。衝突評価では、「タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日原子炉安全専門審査会）」で用いられている式を準用し、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 強度評価方法」に示す衝突評価が必要な機器の評価式を用いる。ディーゼル発電機用海水ポンプの衝突評価における許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 許容限界」に示す許容限界である、外殻を構成する部材の厚さとする。

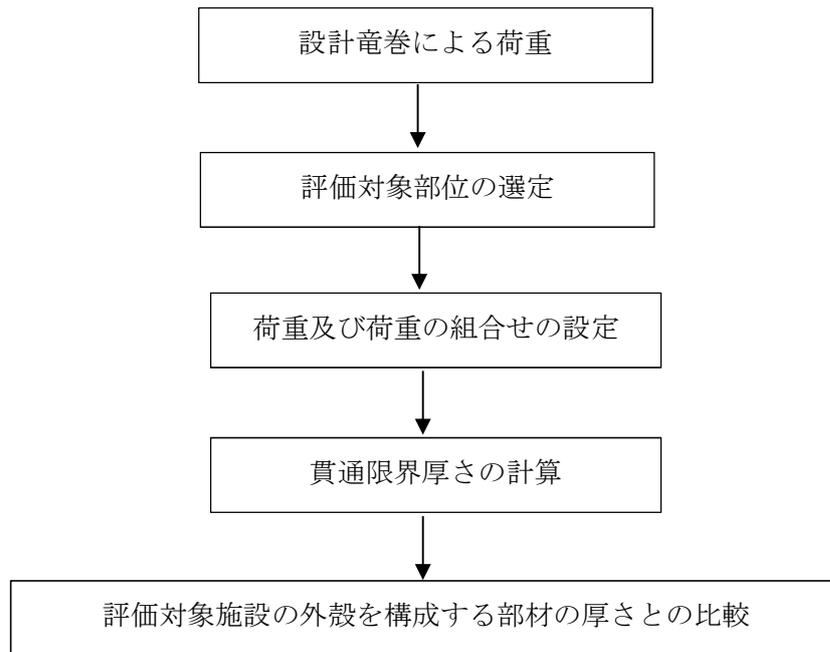


図2-3 ディーゼル発電機用海水ポンプの衝突評価フロー

(2) 構造強度評価の評価方針

ディーゼル発電機用海水ポンプの強度評価フローを図2-4に示す。強度評価においては、ディーゼル発電機用海水ポンプに対して、設計竜巻の風圧力による荷重及び気圧差による荷重に運転時の状態で作用する荷重及び自重を加えた応力が許容応力以下であることを確認する。各部材の強度評価において、その部材に対して応力が大きくなる方向から風が当たることを想定する。各部材の強度評価には、設計竜巻による荷重は水平方向より作用する外荷重という観点で地震荷重と同様なものと考え、「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1・補-1984」（（社）日本電気協会）、「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987」（（社）日本電気協会）及び「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」（（社）日本電気協会）（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）における1質点系モデルによる評価方法を準用し、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す立形ポンプの評価式を用いる。

ディーゼル発電機用海水ポンプの強度評価における許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、J E A G

4601の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

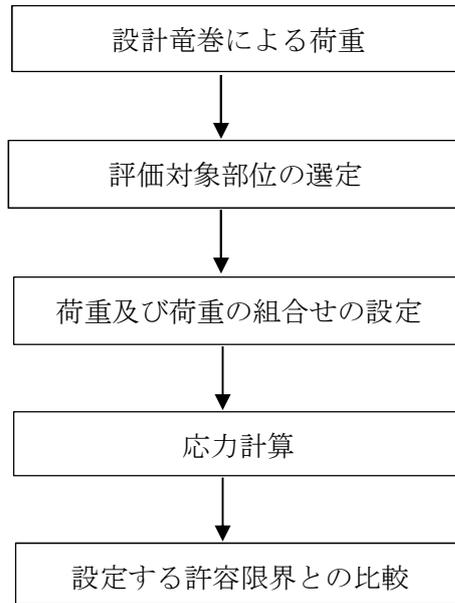


図2-4 ディーゼル発電機用海水ポンプの構造強度評価フロー

(3) 動的機能維持評価の評価方針

ディーゼル発電機用海水ポンプの動的機能維持評価フローを図2-5に示す。残留熱除去系海水系ポンプは動的機器であるため、構造強度評価に加え、軸受部の動的機能維持評価を行う。動的機能維持評価においては、ポンプ据付面から上部の受圧面積が大きくなる方向から風が当たることを想定し、設計竜巻の風圧力による荷重を受けた際のフレーム変位により生じる軸受荷重が接触面圧の許容荷重以下であることを確認する。動的機能維持評価では、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す立形ポンプの評価式を用いる。海水ポンプの動的機能維持評価における許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、軸受部の接触面圧の許容荷重とする。

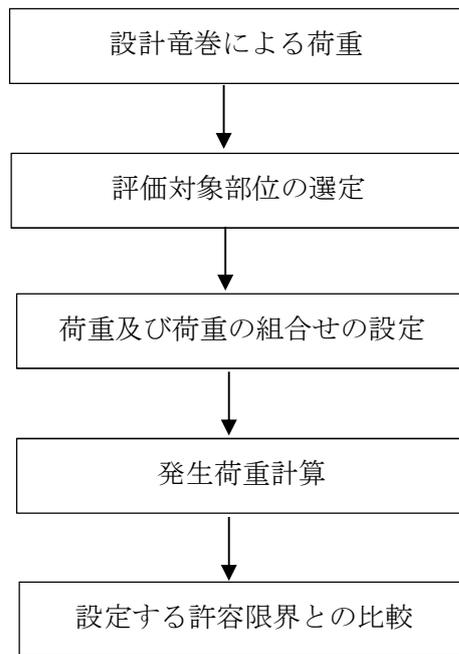


図2-5 ディーゼル発電機用海水ポンプの動的機能維持評価フロー

2.4 適用規格

- ・「タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日 原子炉安全専門審査会）」
- ・「建築物荷重指針・同解説」（（社）日本建築学会，2004改定）
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984」（社）日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987」（社）日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」（社）日本電気協会
- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 J S M E S N C 1 -2005/2007」（社）日本機械学会（以下「J S M E」という。）

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 衝突評価の記号の定義

ディーゼル発電機用海水ポンプの衝突評価に用いる記号を表3-1に示す。

表3-1 衝突評価に用いる記号

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

(2) 構造強度評価及び動的機能維持評価の記号の定義

ディーゼル発電機用海水ポンプの構造強度評価及び動的機能維持評価に用いる記号を表3-2及び表3-3に示す。

表3-2 構造強度評価に用いる記号(1/2)

| 記号 | 単位 | 定義 |
|----------------|------------------|---|
| A | m ² | 受圧面積（風向に垂直な面に投影した面積） |
| A _b | mm ² | ボルトの断面積 |
| A _w | mm ² | 原動機フレーム溶接部の断面積 |
| A ₁ | m ² | 主回路端子箱側面の受圧面積 |
| A ₂ | m ² | 主回路端子箱上面の受圧面積 |
| A ₃ | m ² | 原動機フレームの受圧面積 |
| C | — | 建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数 |
| D | mm | 原動機フレーム外寸 |
| F | MPa | J S M E SSB-3121.1(1)により規定される値 |
| F _b | N | ボルトに作用する引張力 |
| F _H | N | ボルトに作用するせん断力 |
| F _i | N | 各ボルトに作用する引張力 |
| f _s | MPa | J S M E SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容せん断応力 |
| f _t | MPa | J S M E SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容引張応力 |
| G | — | ガスト影響係数 |
| g | m/s ² | 重力加速度 |

表3-1 構造強度評価に用いる記号 (2/2)

| 記号 | 単位 | 定義 |
|----------------|------------------|--|
| H | N | 自重による荷重 |
| h | mm | 基準面からの重心距離 |
| h_u | mm | 基準面から上端カバー上端までの高さ |
| h_w | mm | 原動機フレーム溶接部高さ |
| L | mm | 重心と支点間の距離 |
| L_H | mm | 重心と支点間の距離 |
| $L_1 \sim L_4$ | mm | 支点と評価ボルト間の距離 |
| L_i | mm | 各ボルト間の距離 |
| M | N・mm | 設計竜巻により作用するモーメント |
| m | kg | 質量 |
| N | — | ボルトの本数 |
| q | N/m ² | 設計用速度圧 |
| S_y | MPa | J SME 付録材料図表Part5の表にて規定される設計降伏点 |
| S_u | MPa | J SME 付録材料図表Part5の表にて規定される設計引張強さ |
| W_T | N | 設計竜巻による複合荷重 |
| W_{T1} | N | 設計竜巻による複合荷重 ($W_{T1} = W_P$) |
| W_{T2} | N | 設計竜巻による複合荷重 ($W_{T2} = W_W + 0.5 \cdot W_P + W_M$) |
| W_M | N | 設計竜巻による飛来物の衝撃荷重 |
| W_P | N | 設計竜巻の気圧差による荷重 |
| W_W | N | 設計竜巻の風圧力による荷重 |
| ΔP | N/m ² | 設計竜巻の気圧低下量 |
| π | — | 円周率 |
| σ_{mt} | MPa | 原動機フレームの引張応力 |
| σ_{bt} | MPa | ボルトの引張応力 |
| τ | MPa | せん断応力 |

表3-2 動的機能維持評価に用いる記号 (1/2)

| 記号 | 単位 | 定義 |
|------------------|------------------|---|
| A | m ² | 受圧面積 (風向に垂直な面に投影した面積) |
| a | mm | 部材間の長さ |
| a ₁ | mm | ポンプ据付面から荷重作用点までの長さ |
| C | — | 建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数 |
| E | MPa | 縦弾性係数 |
| E _p | MPa | 原動機台の縦弾性係数 |
| E _m ' | MPa | 回転子の縦弾性係数 |
| G | — | ガスト影響係数 |
| h' | mm | 基準点から作用点までの距離 |
| h ₁ ' | mm | 荷重作用点から荷重作用点までの距離 |
| I | mm ⁴ | 断面二次モーメント |
| I _m ' | mm ⁴ | 回転子の断面二次モーメント |
| I _p | mm ⁴ | 原動機台の断面二次モーメント |
| i | rad | 傾斜 |
| i ₁ | rad | ポンプ据付面から荷重作用点の傾斜 |
| M | N・mm | 設計竜巻により作用するモーメント |
| M _a | N・mm | 設計竜巻により作用するモーメント |
| q | N/m ² | 設計用速度圧 |
| W _T | N | 設計竜巻による複合荷重 |
| W _{T2} | N | 設計竜巻による複合荷重 (W _{T2} = W _w + 0.5・W _p + W _M) |
| W' | N | たわみ量及び発生荷重計算において設計竜巻による風圧を受ける面それぞれのW _{T2} の合計の複合荷重 |
| W'' | N | 発生荷重 |
| W _M | N | 設計竜巻による飛来物の衝撃荷重 |
| W _p | N | 設計竜巻の気圧差による荷重 |
| W _w | N | 設計竜巻の風圧力による荷重 |
| x ₁ | mm | 荷重作用点から原動機下部軸受部までの距離 |
| x ₂ | mm | 原動機下部軸受部から原動機上部軸受部までの距離 |
| x' | mm | 評価対象部から支点までの距離 |
| y | mm | たわみ量 |
| y ₁ | mm | ポンプ据付面から荷重作用点のたわみ量 |
| y ₂ | mm | 荷重作用点から原動機下部軸受部のたわみ量 |
| y ₃ | mm | 原動機下部軸受部から原動機上部軸受部のたわみ量 |

表3-2 動的機能維持評価に用いる記号 (2/2)

| 記号 | 単位 | 定義 |
|------------|------------------|-----------------|
| y_a | mm | 原動機下部案内軸受部のたわみ量 |
| y_b | mm | 原動機上部案内軸受部のたわみ量 |
| δ | mm | フレーム変位量 |
| ΔP | N/m ² | 設計竜巻の気圧低下量 |

3.2 評価対象部位

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

(1) 衝突評価の評価対象部位

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

ディーゼル発電機用海水ポンプ地上部の全方向からの飛来物を考慮し、貫入により施設の機能が喪失する可能性がある箇所として最薄部となる主回路端子箱、スペースヒーター用端子箱を選定する。

ディーゼル発電機用海水ポンプの衝突評価における評価対象部位を図3-1に示す。

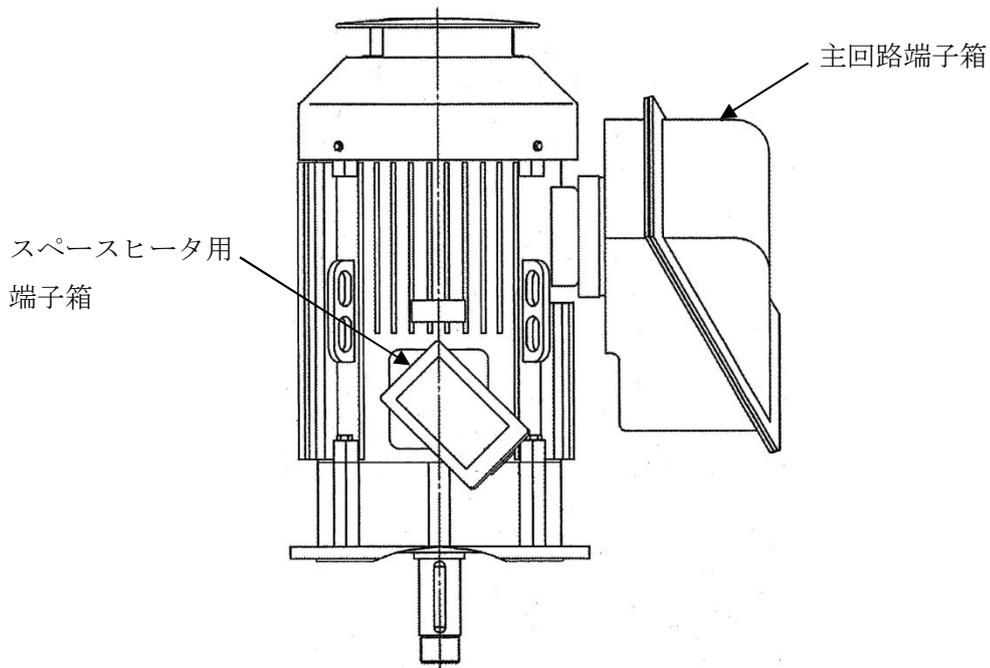


図3-1 ディーゼル発電機用海水ポンプの評価対象部位（衝突評価）

(2) 構造強度評価の評価対象部位

a. ポンプ部

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

このことから、以下の部位を強度評価の評価対象部位として選定する。

- ・原動機取付ボルト
- ・原動機台取付ボルト
- ・据付面基礎ボルト

b. 原動機部

原動機部について、原動機部等に作用する風圧力による荷重及び気圧差による荷重は、原動機フレーム及び付属品に作用し、原動機フレーム及び付属品を介して、付属品の取付部を固定するボルトに作用する。

このことから、以下の部位を強度評価の評価対象部位として選定する。

- ・原動機フレーム
- ・主回路端子箱取付ボルト
- ・スペースヒータ用端子箱取付ボルト
- ・エンドカバー取付ボルト

ディーゼル発電機用海水ポンプの強度評価における評価対象部位を図3-2、図3-3に示す。

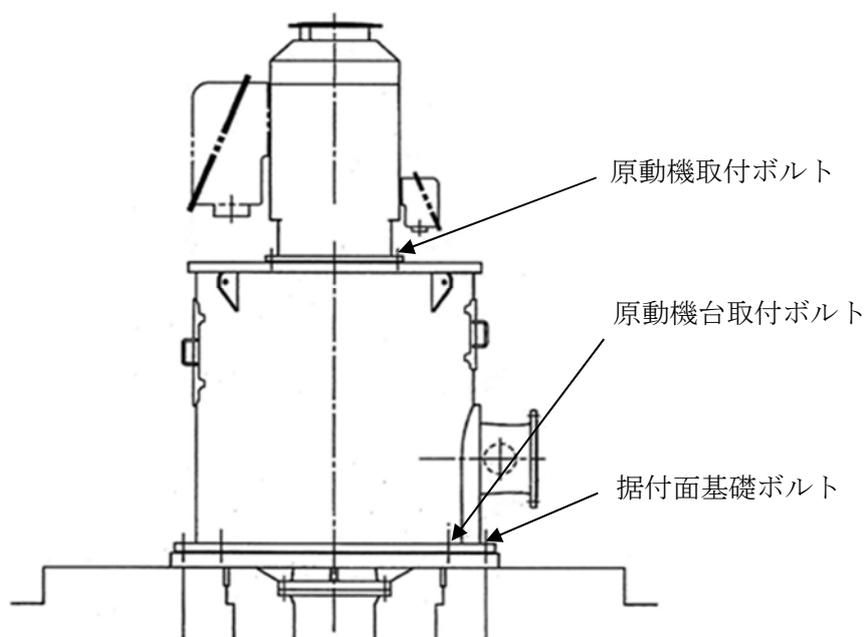


図3-2 ディーゼル発電機用海水ポンプ評価部位概略図（ポンプ部）

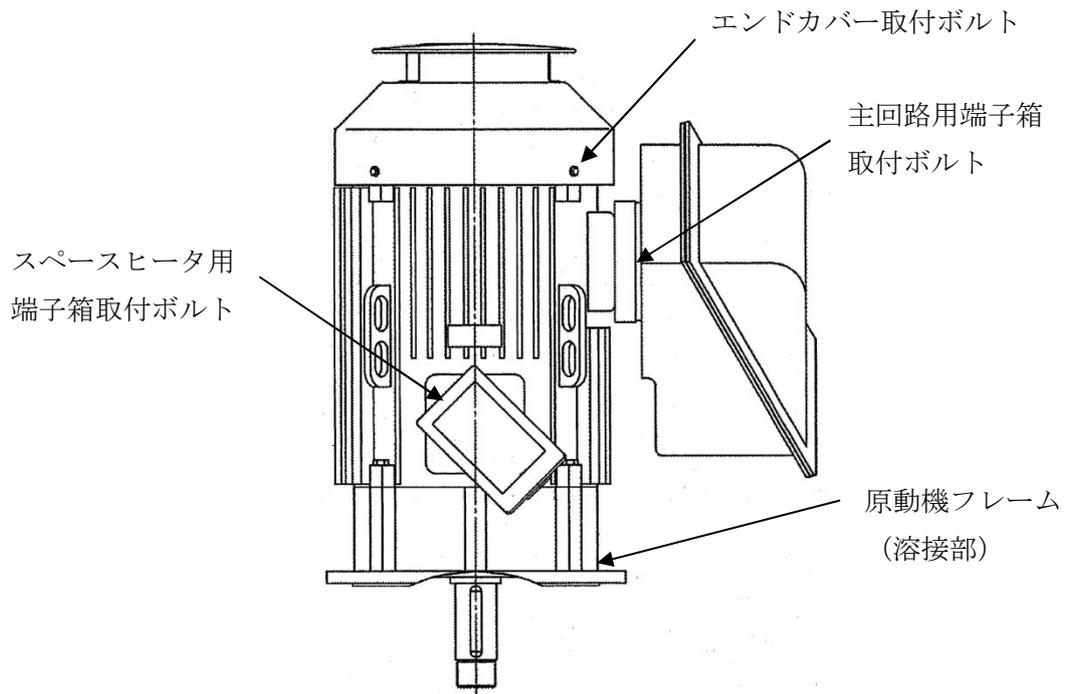


図 3-3 ディーゼル発電機用海水ポンプ評価対象部位概略図（原動機部）

(3) 動的機能維持評価の評価対象部位

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

- ・原動機下部軸受部
- ・原動機上部軸受部

ディーゼル発電機用海水ポンプの動的機能維持評価における評価対象部位を図 3-4 に示す。

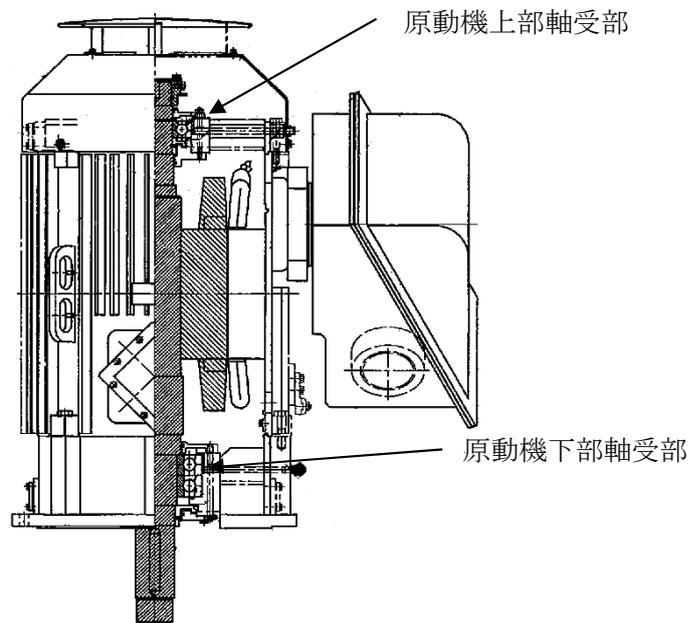


図 3-4 ディーゼル発電機用海水ポンプ動的機能維持評価対象部位概略図

3.3 荷重及び荷重の組合せ

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

(1) 衝突評価の荷重及び荷重の組合せ

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

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

砂利の諸元を表3-4、ディーゼル発電機用海水ポンプの衝突評価に用いる荷重を表3-5に示す。

表3-4 砂利の諸元

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

表3-5 ディーゼル発電機用海水ポンプの衝突評価に用いる荷重

| 施設分類 | 施設名称 | 評価対象部位 | 荷重 |
|-----------|--------------------|-------------------------|----------------|
| 屋外の防護対象施設 | ディーゼル発電機用 海水ポンプ | ・主回路端子箱 ・スペースヒータ用端子箱 | 飛来物による 衝撃荷重 |

(2) 構造強度評価及び動的機能維持評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の設定

強度評価に用いる荷重を以下に示す。

(a) 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、持続的に生じる荷重である自重を考慮する。

自重による荷重は以下のとおり計算する。

$$H = m \cdot g$$

(b) 設計竜巻による荷重

風圧力による荷重及び気圧差による荷重を考慮する。防護ネット及び防護鋼板等による風圧力の低減は無いものとして保守的な評価を行う。

イ. 風圧力による荷重(W_w)

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

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

ロ. 気圧差による荷重(W_p)

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

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

ハ. 荷重の組合せ

設計竜巻による複合荷重 W_T (W_{T1} , W_{T2})はV-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1(2) 荷重の組合せ」に示す式に従い、算出する。なお、ディーゼル発電機用海水ポンプは気圧差が生じ難い構造であるため、複合荷重の選定において、 W_{T2} としては気圧差を考慮するが、 W_{T1} の評価は実施しない。

$$W_{T1} = W_p$$

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

(c) 運転時の状態で作用する荷重

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

b. 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せは、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」にて設定している荷重の組合せを踏まえ、ディーゼル発電機用海水ポンプの評価対象部位ごとに設定する。

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

なお、防護対策として、竜巻防護ネットを設置する施設については、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、竜巻防護ネットを通過する小さな飛来物による衝撃荷重は、衝突される機器へ伝わる加速度が小さく、機器へ作用する荷重は強度に影響を与えないので $W_M=0$ とする。

ディーゼル発電機用海水ポンプの評価対象部位に作用する荷重及び強度評価にて考慮する荷重の組合せを表 3-6 に示す。

表 3-6 荷重の組合せ

| 施設分類 | 施設名称 | 評価対象部位 | | 荷重 |
|-------------------|--------------------|--------|------------------|----------------------------------|
| 屋外の外部事象 防護対象施設 | ディーゼル発電 機用海水ポンプ | ポンプ部 | 原動機取付ボルト | ①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重 |
| | | | 原動機台取付ボルト | ①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重 |
| | | | 据付面基礎ボルト | ①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重 |
| | | 原動機部 | 原動機フレーム | ①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重 |
| | | | 主回路用端子箱取付ボルト | ①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重 ③端子箱自重 |
| | | | スペースヒータ用端子箱取付ボルト | ①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重 ③端子箱自重 |
| | | | エンドカバー取付ボルト | ①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重 |

3.4 許容限界

ディーゼル発電機用海水ポンプの許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界に従って、「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、J E A G 4 6 0 1 に基づく許容応力状態Ⅲ_ASの許容応力の許容荷重を用いる。

(1) 衝突評価における許容限界

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

表3-7 ディーゼル発電機用海水ポンプの外殻を構成する部材の厚さ

| 防護対象施設 | 外殻を構成する部材の厚さ |
|----------------|--------------------------------|
| ディーゼル発電機用海水ポンプ | 2.3mm (主回路端子箱, スペースヒータ用端子箱) |

(2) 構造強度評価における許容限界

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

ディーゼル発電機用海水ポンプの強度評価における許容限界について、表3-8に示す。

表3-8 ディーゼル発電機用海水ポンプの強度評価における許容限界

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

(3) 動的機能維持評価における許容限界

動的機能維持評価における許容限界は、設計荷重により原動機フレームが変形する場合においてもディーゼル発電機用海水ポンプの運転継続が可能であるように、軸受の接触面圧の許容荷重を許容限界とする。

軸受の接触面圧の許容荷重を表3-9に示す。

表3-9 軸受の接触面圧の許容荷重

| 評価対象部位 | 許容荷重 (N) |
|----------|-------------|
| 原動機上部軸受部 | □ |
| 原動機下部軸受部 | □ |

3.5 評価方法

(1) 衝突評価の評価方法

ディーゼル発電機用海水ポンプの衝突評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 強度評価方法」にて設定している衝突評価が必要な機器の評価式を用いる。

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

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

(2) 構造強度評価及び動的機能維持評価の評価方法

ディーゼル発電機用海水ポンプの構造強度評価及び動的機能維持評価は、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」にて設定している立形ポンプの評価式を用いる。

a. 計算モデル

(a) 構造強度評価

計算モデルは1質点系モデルとし、ポンプ部は全高の1/2の位置に、原動機部は風圧力による荷重の作用中心と同等、あるいはより高い重心作用位置に複合荷重が作用することとする。また、設計竜巻による風荷重はそれぞれの評価対象部位に対して発生応力が大きくなる方向から当たるものとする。ポンプ部及び原動機部の応力の計算モデル図を図3-5及び図3-6に示す。

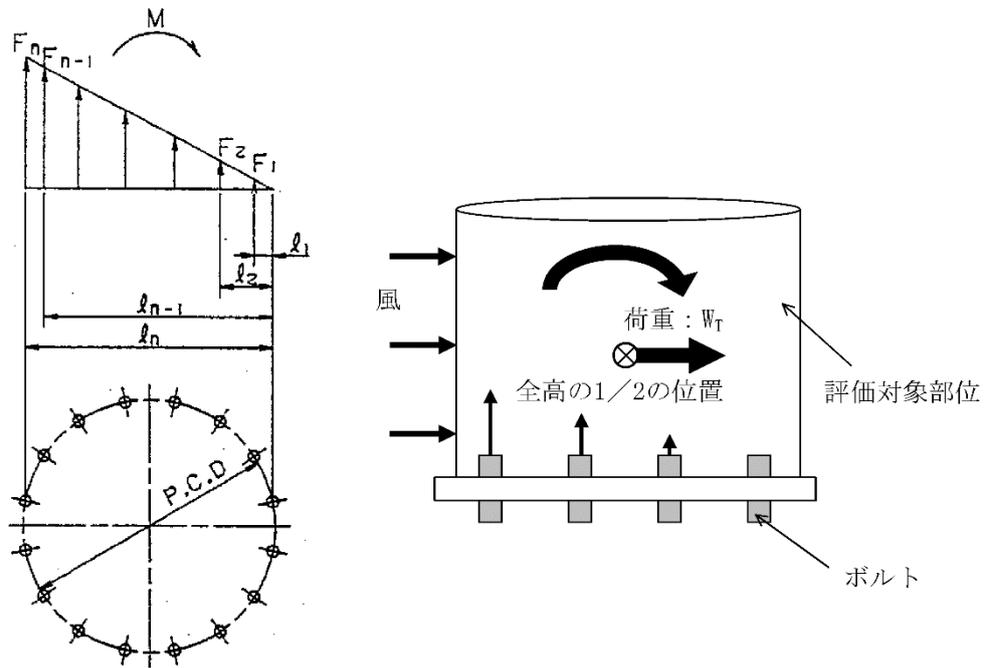


図 3-5 応力の計算モデル図 (ポンプ部)

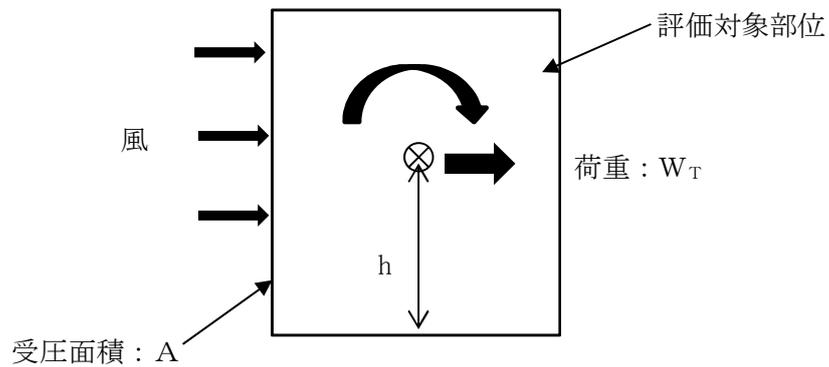


図 3-6 応力の計算モデル図 (原動機部)

(b) 動的機能維持評価

動的機能維持評価の際の原動機フレームのたわみ量計算において、ポンプ据付面から原動機台上端まで（ポンプ部）と、原動機台上端から原動機まで（原動機部）の片持ち梁と考え、違う断面性能の一軸中空形モデルで、荷重が全高の半分の位置に作用することとする。ポンプ部の断面性能は電動台が最も小さいことから、原動機台の断面性能を一様に有する単純円筒形モデルとして評価する。原動機部については原動機フレームの断面性能を用いて評価する。たわみ量計算モデル図を図3-6に示す。

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

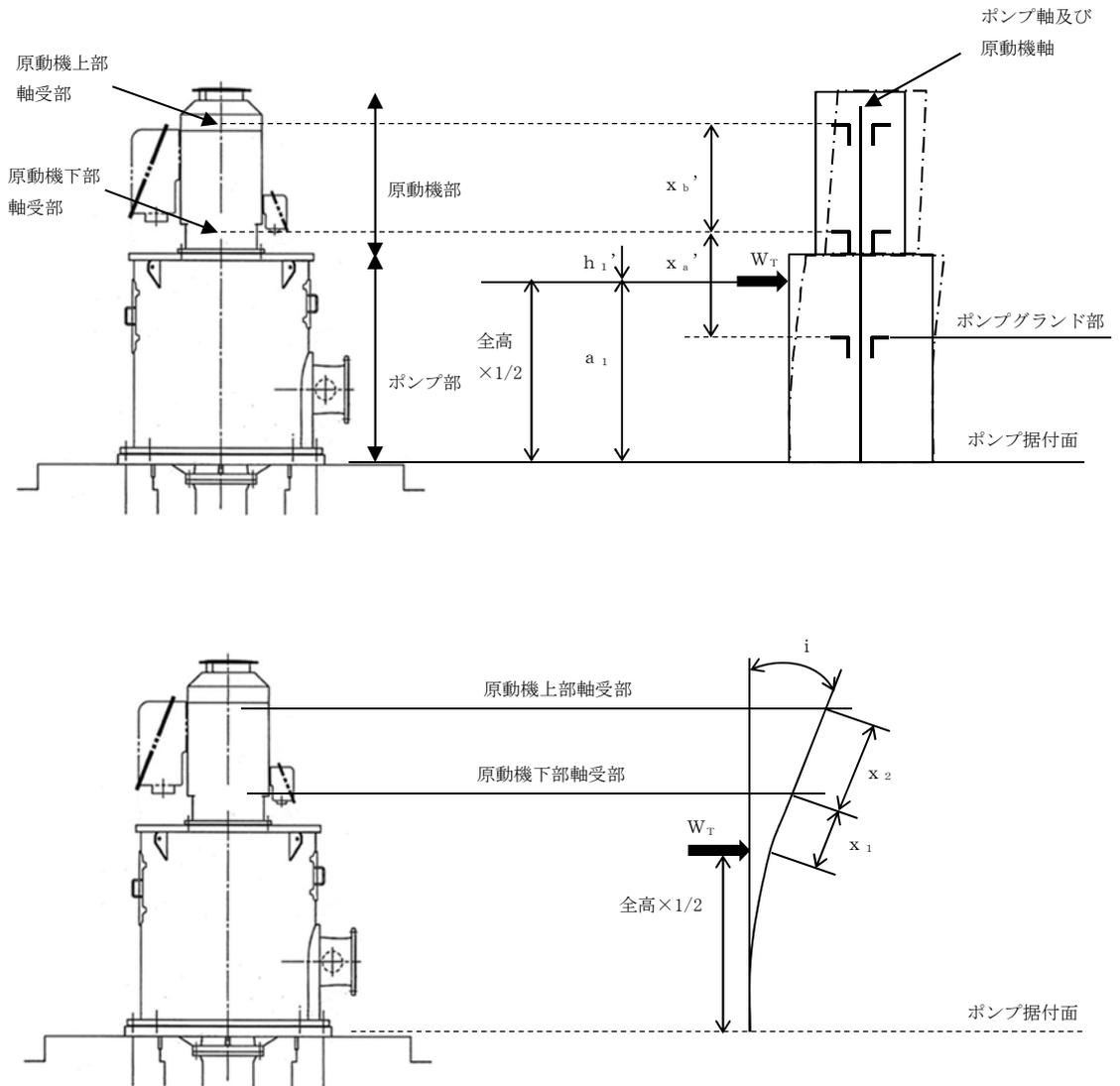


図 3-7 ディーゼル発電機用海水ポンプのたわみ量計算モデル図

b. 計算方法

(a) 応力の算出

イ. ポンプ部 (ボルト部)

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

(イ) 風による転倒モーメントM

$$M = W_T \cdot \text{全高} / 2$$

(ロ) 引張応力 σ_{bt}

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

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

(3.1) (3.2) 式より,

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

よって,

$$\sigma_{b \ t} = \frac{F_n}{A_b}$$

(ハ) せん断応力 τ

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

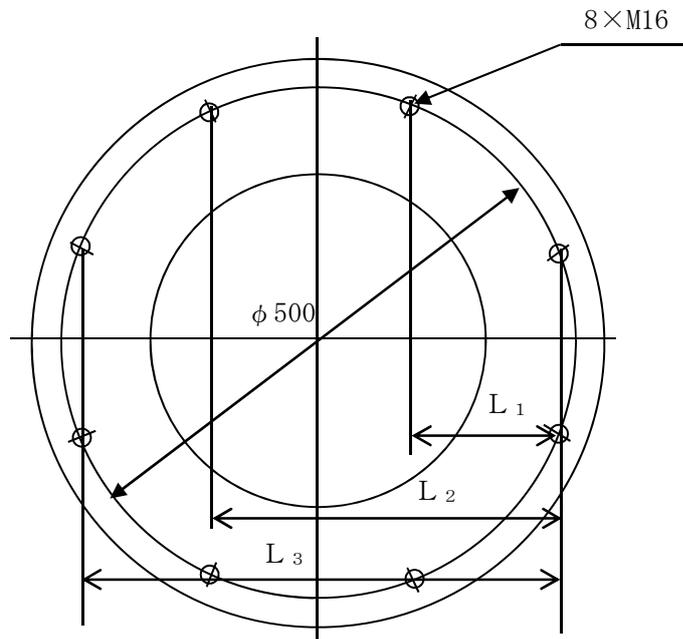


図 3-8 原動機取付ボルトの各ボルト間寸法の配置図

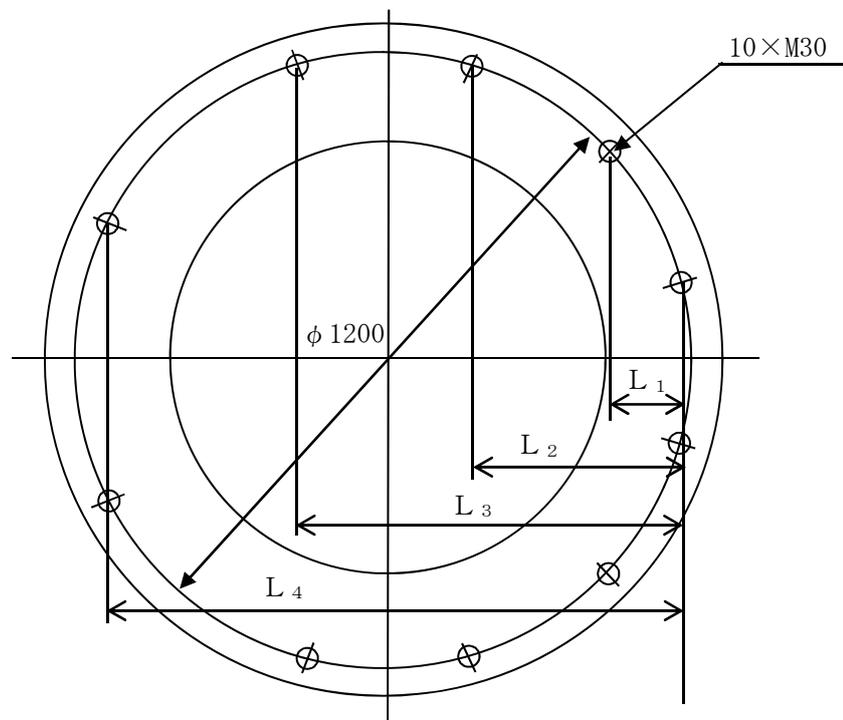


図 3-9 原動機台取付ボルトの各ボルト間寸法の配置図

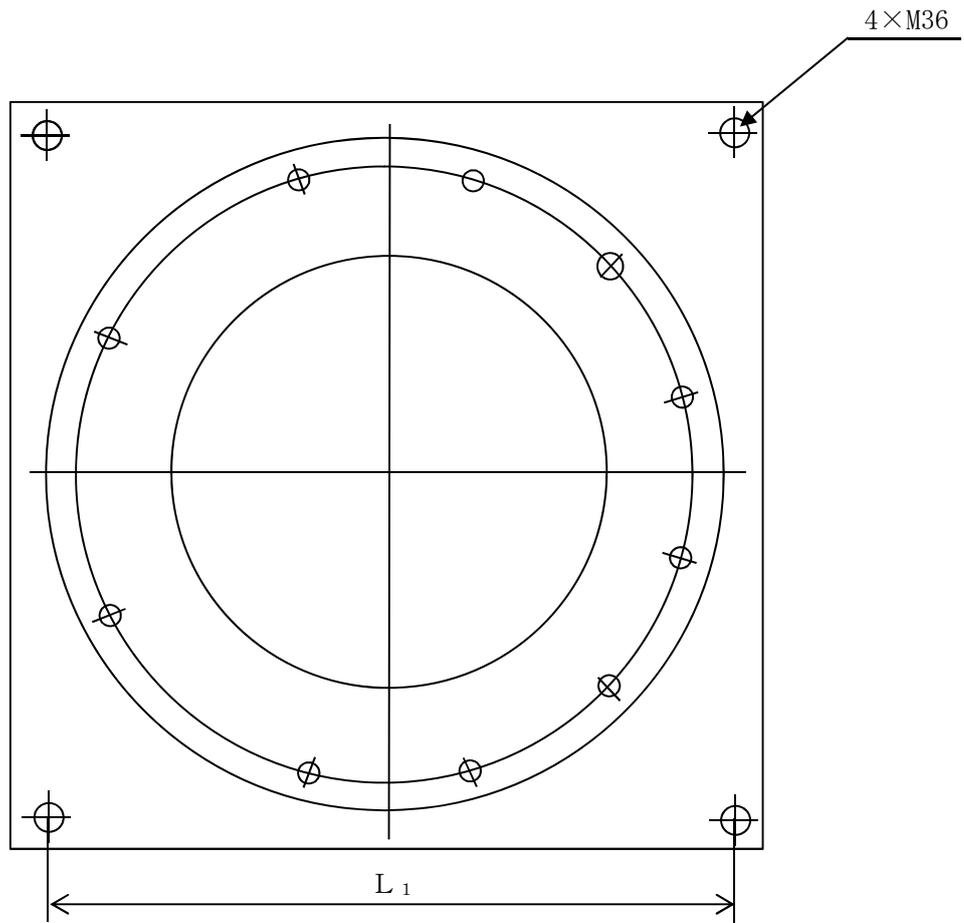


図 3-10 据付面基礎ボルトの各ボルト間寸法の配置図

ロ. 原動機部

原動機フレーム溶接部，主回路用端子箱ボルト部，スペースヒータ用端子箱ボルト部，エンドカバー取付ボルト部の詳細図を図3-11～図3-14に示す。

(イ) 風による転倒モーメントM

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

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

(ロ) 原動機フレーム溶接部

原動機フレーム溶接部の応力算出方法を以下に示す。

・引張応力

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

・せん断応力

$$\tau = \frac{W_T}{A_w}$$

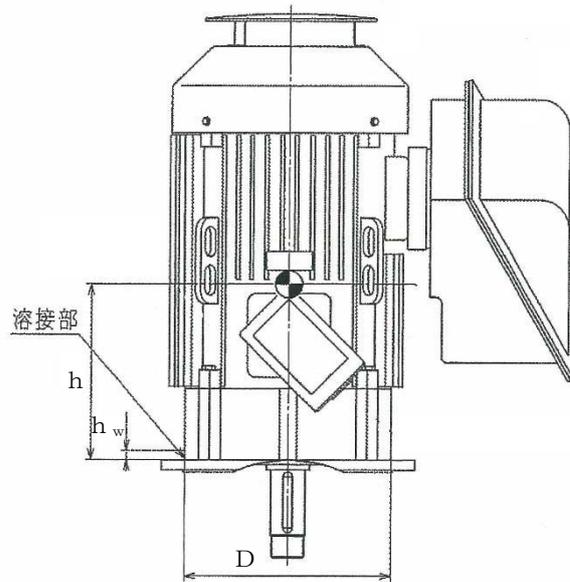


図 3-11 原動機フレーム溶接部詳細図

(ハ) 主回路用端子箱ボルト部，スペースヒータ用端子箱ボルト部

主回路用端子箱ボルト部，スペースヒータ用端子箱ボルト部の応力算出方法を以下に示す。

・引張応力

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

$$\sigma_{b t} = \frac{F_b}{A_b}$$

・せん断応力

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

ここで,

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

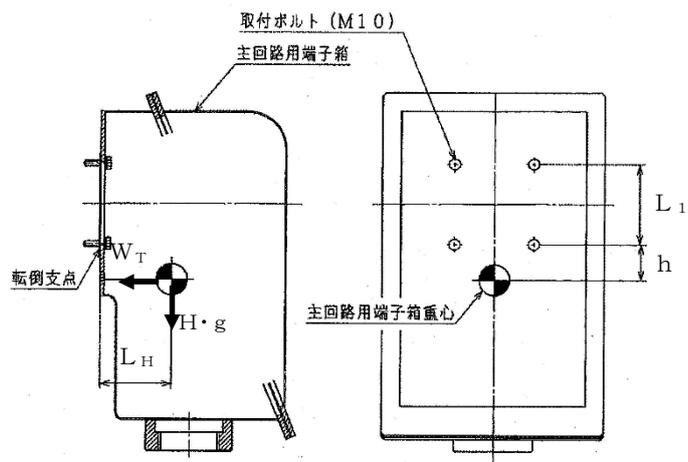


図 3-12 主回路用端子箱ボルト部詳細図

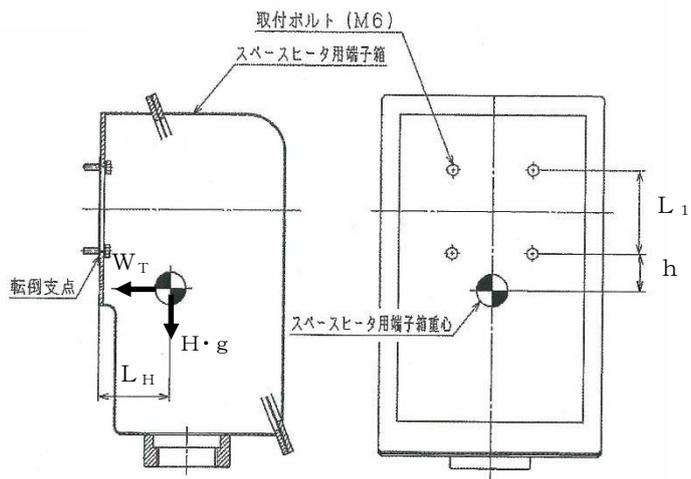


図 3-13 スペースヒータ用端子箱ボルト部詳細図

(二) エンドカバー取付ボルト部

エンドカバー取付ボルト部の応力算出方法を以下に示す。

・引張応力

竜巻によって生じる転倒荷重が、エンドカバーの上端（評価上厳しい条件）に作

用した際の、エンドカバー取付ボルトに生じる引張応力を算出し評価する。

(i) 風による転倒モーメントM

$$M = W_T \cdot h_u$$

(ii) 引張応力 σ_{bt}

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

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

(3.1) (3.2) 式より,

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

よって,

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

(iii) せん断応力 τ

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

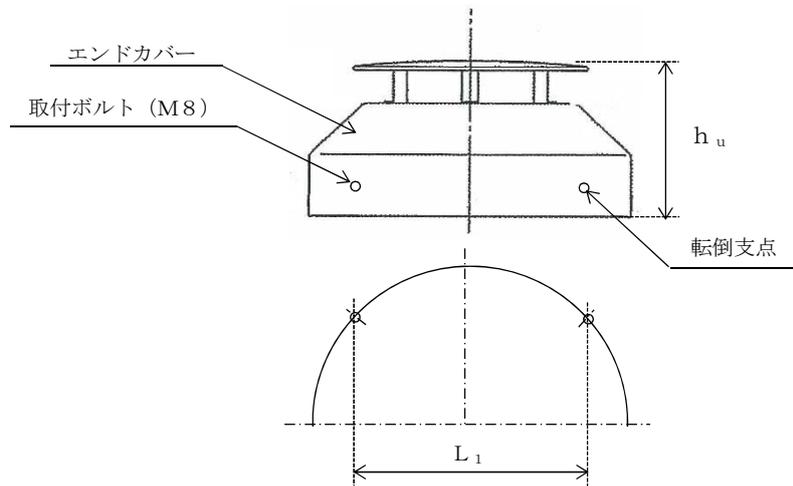


図 3-14 エンドカバー取付ボルト部詳細図

(b) 発生荷重の計算

イ. たわみ量の計算

たわみ量の算出において、竜巻による風圧力を受ける面（原動機台、原動機フレーム、主回路用端子箱、エンドカバー）のそれぞれの W_{T2} の合計を複合荷重 W' とする。

スペースヒータ用端子箱は原動機フレームと受圧面積が重なるため、荷重算出において考慮しない。

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

各部位の受圧部図を図3-15～図3-18に示す

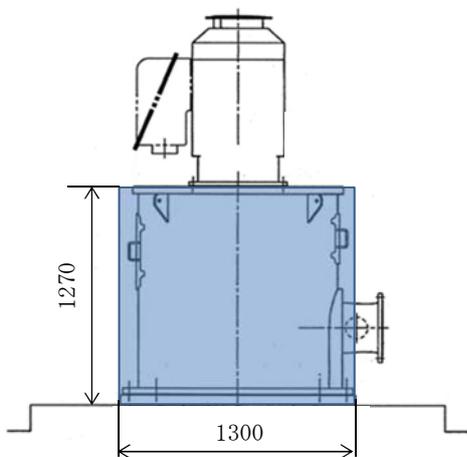


図3-15 原動機台の受圧部図

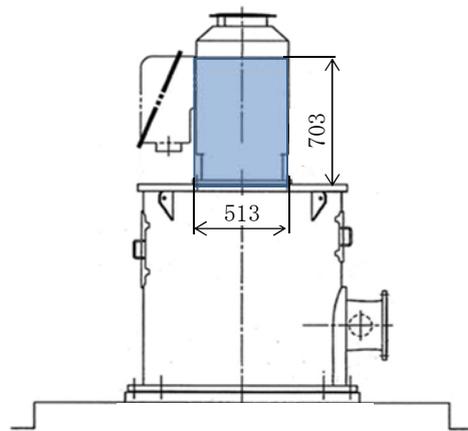


図3-16 原動機フレームの受圧部図

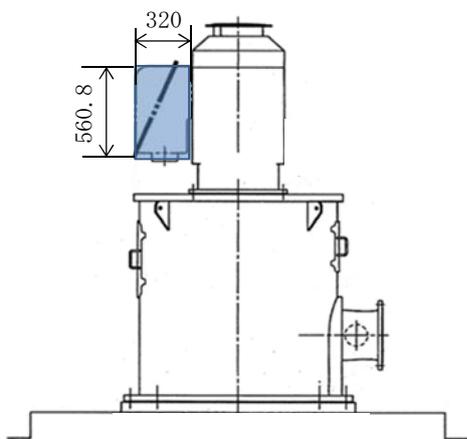


図3-17 主回路用端子箱の受圧部図

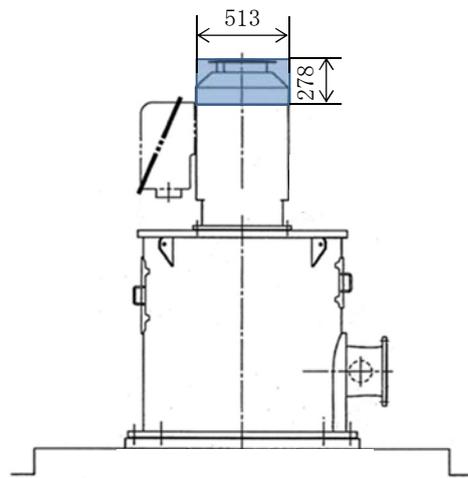


図3-18 エンドカバーの受圧部図

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

ミオソテスの方法

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

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

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

(イ) 原動機下部軸受部

・ポンプ据付面から荷重作用点のたわみ量 y_1 、傾斜 i_1

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

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

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

ここで、原動機台の断面図を図3-19に示す。

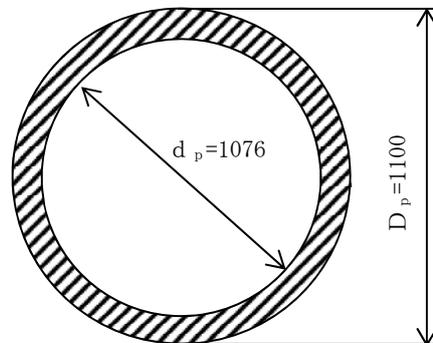


図3-19 原動機台の断面図

円筒形であるため、断面二次モーメントは以下のとおり算出する。

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

・荷重作用点から原動機下部軸受部のたわみ量 y_2

$$y_2 = x_1 \cdot \sin(i_1)$$

以上より、原動機下部軸受部のたわみ量は

$$y_a = y_1 + y_2$$

(ロ) 原動機上部軸受部

- ・原動機下部軸受部から原動機上部軸受部のたわみ量 y_3

$$y_3 = x_2 \cdot \sin(i_1)$$

以上より、原動機上部軸受部のたわみ量は

$$y_b = y_a + y_3$$

- ロ. 発生荷重の算出

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

発生荷重 W'' は次式より計算する。

δ = 評価対象部位の変位量 - 支点の変位量

また、発生荷重は

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

より

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

- (イ) 原動機下部軸受部の発生荷重

$$W''_m = \frac{3 \cdot E'_m \cdot I'_m \cdot \delta_a}{x_a'^3}$$

ここで、 $\delta_a = y_a$

回転子（原動機部）の断面図を図3-20に示す。

(単位 : mm)

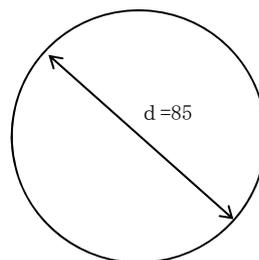


図3-20 回転子（原動機部）の断面図

回転子の断面二次モーメントは以下のとおり算出する。

$$I'_m = \frac{\pi d^4}{64}$$

- (ロ) 原動機上部軸受部の発生荷重

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

ここで, $\delta_b = y_b - y_a$

4. 評価条件

(1) 構造強度評価の評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-1～表 4-9 に示す。

表 4-1 許容応力評価に用いる条件

| 評価対象部位 | 材料 | 温度条件 (°C) | S _y (MPa) | S _u (MPa) | F (MPa) | 1.5 f _t (MPa) | 1.5 f _s (MPa) |
|------------------|--------|-------------------|-------------------------|-------------------------|------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 原動機取付ボルト | SUS304 | 50* ¹ | 198 | 504 | 205 | 153 | 118 |
| 原動機台取付ボルト | SUS304 | 50* ¹ | 198 | 504 | 205 | 153 | 118 |
| 据付面基礎ボルト | S20C | 50* ¹ | 241 | 391 | 241 | 180 | 139 |
| 原動機フレーム | SS400 | 95* ² | 223 | 374 | 100 | 100 | 57 |
| 主回路端子箱取付ボルト | SS400 | 100* ² | 221 | 373 | 221 | 165 | 127 |
| スペースヒータ用端子箱取付ボルト | SS400 | 100* ² | 221 | 373 | 221 | 165 | 127 |
| エンドカバー取付ボルト | SS400 | 50* ¹ | 241 | 394 | 241 | 180 | 139 |

注記 *1：周囲環境温度

*2：最高使用温度

表 4-2 評価条件

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

表 4-3 評価条件 (原動機取付ボルト)

| L ₁ (mm) | L ₂ (mm) | L ₃ (mm) | C (-) | 全高 (m) | A (m ²) |
|------------------------|------------------------|------------------------|----------|-----------|------------------------|
| 135.3 | 326.6 | 461.9 | 1.2 | 0.981 | 1.138 |

| ボルト サイズ | N (-) | A _b (mm ²) |
|------------|----------|--------------------------------------|
| M16 | 8 | 201.1 |

表 4-4 評価条件（原動機台取付ボルト）

| L_1 (mm) | L_2 (mm) | L_3 (mm) | L_4 (mm) | C (-) | 全高 (m) |
|---------------|---------------|---------------|---------------|----------|-----------|
| 155.3 | 424.3 | 734.8 | 1099.2 | 1.2 | 2.251 |

| A (m^2) | ボルト サイズ | N (-) | A_b (mm^2) |
|----------------|------------|----------|---------------------|
| 2.789 | M30 | 10 | 706.9 |

表 4-5 評価条件（据付面基礎ボルト）

| L_1 (mm) | C (-) | 全高 (m) | A (m^2) | ボルト サイズ | N (-) |
|---------------|----------|-----------|----------------|------------|----------|
| 1200 | 1.2 | 2.251 | 2.789 | 36 | 4 |

| A_b (mm^2) |
|---------------------|
| 1018 |

表 4-6 評価条件（原動機フレーム）

| C (-) | h (mm) | A (m^2) | D (mm) | h_w (mm) |
|----------|-----------|----------------|-----------|---------------|
| 1.2 | 490.5 | 1.138 | 449 | 6 |

表 4-7 評価条件（主回路端子箱取付ボルト）

| C (-) | A (m^2) | ボルト サイズ | A_b (mm^2) | m (kg) | g (m/s^2) |
|----------|----------------|------------|---------------------|-----------|------------------|
| 2.4 | 0.2019 | M10 | 78.54 | 25 | 9.80665 |

| N^* (-) | h (mm) | L_H (mm) | L_1 (mm) |
|--------------|-----------|---------------|---------------|
| 4(2) | 57.5 | 109.3 | 130 |

注記 * : () 内の数字は引張応力計算の際に考慮したボルトの本数

表 4-8 評価条件（スペースヒータ用端子箱取付ボルト）

| C (-) | A (m ²) | ボルト サイズ | A _b (mm ²) | m (kg) | g (m/s ²) |
|----------|------------------------|------------|--------------------------------------|-----------|--------------------------|
| 2.4 | 0.0360 | M6 | 28.27 | 3.6 | 9.80665 |

| N* | h (mm) | L _H (mm) | L ₁ (mm) |
|------|-----------|------------------------|------------------------|
| 4(2) | 3.8 | 57.3 | 80 |

注記 * : () 内の数字は引張応力計算の際に考慮したボルトの本数

表 4-9 評価条件（エンドカバー取付ボルト）

| C (-) | A (m ²) | ボルト サイズ | A _b (mm ²) | N (-) | L ₁ (mm) |
|----------|------------------------|------------|--------------------------------------|----------|------------------------|
| 1.2 | 0.1426 | M8 | 50.27 | 4 | 362.7 |

| h (mm) |
|-----------|
| 278 |

(2) 動的機能維持評価の評価条件

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

表 4-10 評価条件（たわみ量の算出）

| 原動機台の 風力係数 C (-) | 原動機フレームの 風力係数 C (-) | 主回路用端子箱の 風力係数 C (-) | エンドカバーの 風力係数 C (-) |
|---------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1.2 | 1.2 | 2.4 | 1.2 |

| 原動機台の 受圧面積 A (m ²) | 原動機フレームの 受圧面積 A (m ²) | 主回路用端子箱の 受圧面積 A (m ²) | エンドカバーの 受圧面積 A (m ²) |
|---|--|--|---|
| 1.651 | 0.3606 | 0.1795 | 0.1426 |

表 4-11 評価条件（原動機下部軸受部（たわみ量の算出））

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

| h ₁ ' (mm) | a ₁ (mm) | E _p (MPa) | I _p (mm ⁴) | x ₁ (mm) | y _a (mm) |
|-----------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|
| 0 | 1126 | 201000 | 6.070×10 ⁹ | 242.5 | 0.01485 |

表 4-12 評価条件（原動機下部軸受部（発生荷重の算出））

| 発生荷重計算モデルの材質 | 温度 (°C) | E _m ' (MPa) | I _m ' (mm ⁴) | x _a ' (mm) |
|--------------|---------|------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| S45C | 50 | 200000 | 2.562×10 ⁶ | 640.5 |

表 4-13 評価条件（原動機上部軸受部（たわみ量の算出））

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

| x ₂ (mm) | y _b (mm) |
|---------------------|---------------------|
| 669.5 | 0.02486 |

表 4-14 評価条件（原動機上部軸受部（発生荷重の算出））

| 発生荷重計算モデルの材質 | 温度 (°C) | E _m ' (MPa) | I _m ' (mm ⁴) | x _b ' (mm) |
|--------------|---------|------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| S45C | 50 | 200000 | 2.562×10 ⁶ | 669.5 |

5. 強度評価結果

(1) 衝突評価結果

竜巻発生時の砂利の貫通限界厚さを表 5-1 に示す。

表 5-1 砂利の貫通限界厚さ

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

砂利の貫通限界厚さ(1.0mm)とディーゼル発電機用海水ポンプの外殻を構成する部材の厚さとの比較を表5-2に示す。

砂利の貫通限界厚さは、ディーゼル発電機用海水ポンプの外殻を構成する部材の厚さ未満である。

| 防護対象施設 | 外殻を構成する部材の厚さ (mm) | 貫通限界厚さ T (mm) | 結果 |
|--------------------|----------------------------------|---------------------|-------|
| ディーゼル発電機用 海水ポンプ | 2.3 (主回路端子箱, スペース ヒータ用端子箱) | 1.0 | 貫通しない |

(2) 構造強度評価結果

a. 原動機取付ボルト

竜巻発生時の強度評価結果を表 5-1 に示す。

原動機取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-1 評価結果 (原動機取付ボルト)

| 応力分類 | 複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa) | 許容限界 (MPa) |
|------|------------------------------|---------------|
| 引張 | 23 | 153 |
| せん断 | 9 | 118 |
| 組合せ | 23 | 153 |

b. 原動機台取付ボルト

竜巻発生時の強度評価結果を表 5-2 に示す。

原動機台取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-2 評価結果（原動機台取付ボルト）

| 応力分類 | 複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa) | 許容限界 (MPa) |
|------|------------------------------|---------------|
| 引張 | 15 | 153 |
| せん断 | 5 | 118 |
| 組合せ | 15 | 153 |

c. 据付面基礎ボルト

竜巻発生時の強度評価結果を表 5-3 に示す。

据付面基礎ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-3 評価結果（据付面基礎ボルト）

| 応力分類 | 複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa) | 許容限界 (MPa) |
|------|------------------------------|---------------|
| 引張 | 16 | 180 |
| せん断 | 9 | 139 |
| 組合せ | 16 | 180 |

d. 原動機フレーム

竜巻発生時の強度評価結果を表 5-4 に示す。

原動機フレームに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-4 評価結果（原動機フレーム）

| 応力分類 | 複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa) | 許容限界 (MPa) |
|------|------------------------------|---------------|
| 引張 | 10 | 100 |
| せん断 | 2 | 57 |
| 組合せ | 11 | 100 |

e. 主回路端子箱取付ボルト

竜巻発生時の強度評価結果を表 5-5 に示す。

主回路端子箱取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-5 評価結果（主回路端子箱取付ボルト）

| 応力分類 | 複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa) | 許容限界 (MPa) |
|------|------------------------------|---------------|
| 引張 | 13 | 165 |
| せん断 | 13 | 127 |
| 組合せ | 13 | 165 |

f. スペースヒータ用端子箱取付ボルト

竜巻発生時の強度評価結果を表 5-6 に示す。

スペースヒータ用端子箱取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-6 評価結果（スペースヒータ用端子箱取付ボルト）

| 応力分類 | 複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa) | 許容限界 (MPa) |
|------|------------------------------|---------------|
| 引張 | 2 | 165 |
| せん断 | 7 | 127 |
| 組合せ | 2 | 165 |

g. エンドカバー取付ボルト

竜巻発生時の強度評価結果を表 5-7 に示す。

エンドカバー取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-7 評価結果（エンドカバー取付ボルト）

| 応力分類 | 複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa) | 許容限界 (MPa) |
|------|------------------------------|---------------|
| 引張 | 13 | 180 |
| せん断 | 9 | 139 |
| 組合せ | 13 | 180 |

(2) 動的機能維持評価結果

a. 原動機下部軸受部

竜巻発生時の動的機能維持評価結果を表 5-8 に示す。

原動機下部軸受部の発生荷重は，許容荷重以下である。

表 5-8 評価結果（原動機下部軸受部）

| 発生荷重 W'' (N) | 許容荷重 (N) |
|-------------------|--|
| 87 | <div style="border: 2px solid black; width: 100px; height: 15px;"></div> |

b. 原動機上部軸受部

竜巻発生時の動的機能維持評価結果を表 5-9 に示す。

原動機上部軸受部の発生荷重は，許容荷重以下である。

表 5-9 評価結果（原動機上部軸受部）

| 発生荷重 W'' (N) | 許容荷重 (N) |
|-------------------|--|
| 52 | <div style="border: 2px solid black; width: 100px; height: 15px;"></div> |

V-3-別添 1-1-10-2 消音器の強度計算書

目次

| | |
|---------------------|----|
| 1. 概要..... | 1 |
| 2. 基本方針..... | 1 |
| 2.1 位置..... | 1 |
| 2.2 構造概要..... | 2 |
| 2.3 評価方針..... | 3 |
| 2.4 適用規格..... | 4 |
| 3. 強度評価方法..... | 5 |
| 3.1 記号の定義..... | 5 |
| 3.2 評価対象部位..... | 7 |
| 3.3 荷重及び荷重の組合せ..... | 8 |
| 3.4 許容限界..... | 9 |
| 3.5 評価方法..... | 10 |
| 4. 評価条件..... | 14 |
| 5. 強度評価結果..... | 17 |

1. 概要

本資料は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、非常用ディーゼル発電機排気消音器及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器（以下「ディーゼル発電機排気消音器」という。）が竜巻時及び竜巻通過後においても、消音器の機能維持を考慮して、主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、ディーゼル発電機排気消音器の「2.1 位置」，「2.2 構造概要」，「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

2.1 位置

ディーゼル発電機排気消音器は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示すとおり、図2-1に示す位置に設置する。

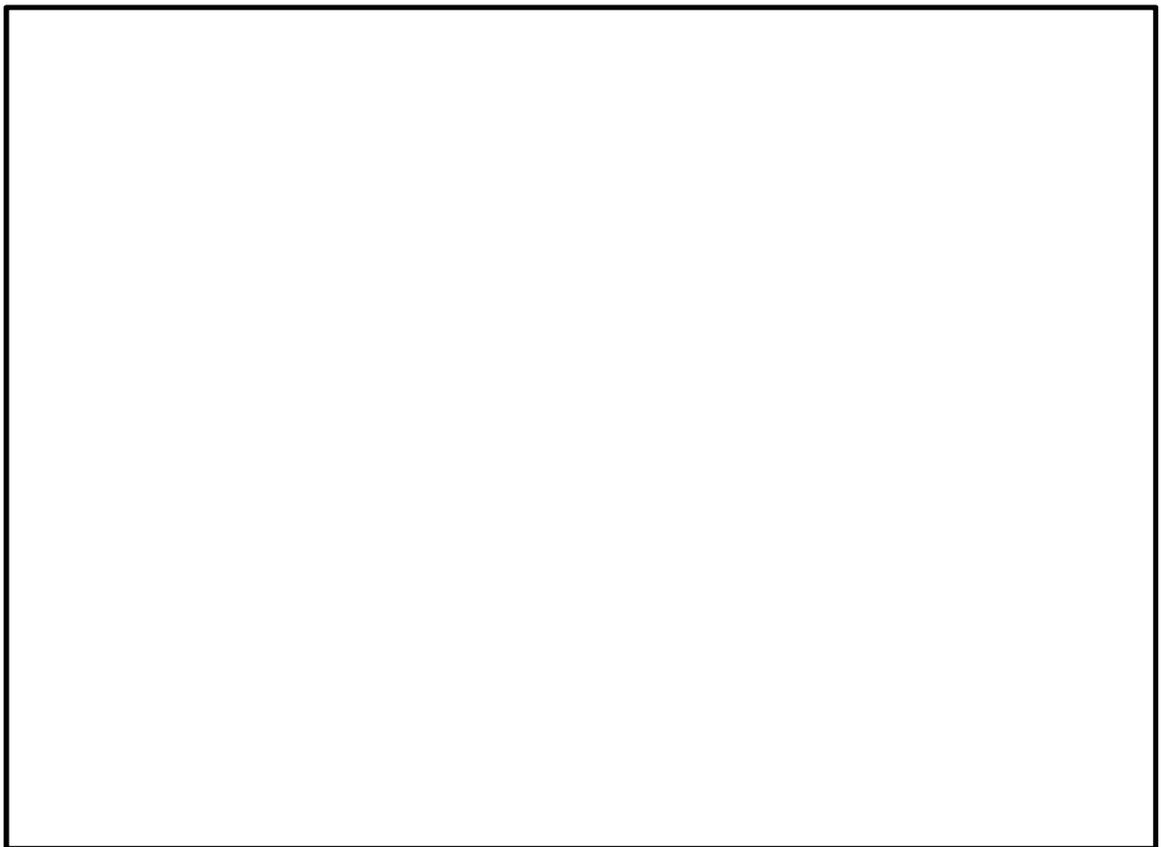


図 2-1 ディーゼル発電機排気消音器の位置図

2.2 構造概要

ディーゼル発電機排気消音器について、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、ディーゼル発電機排気消音器の構造を示す。

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

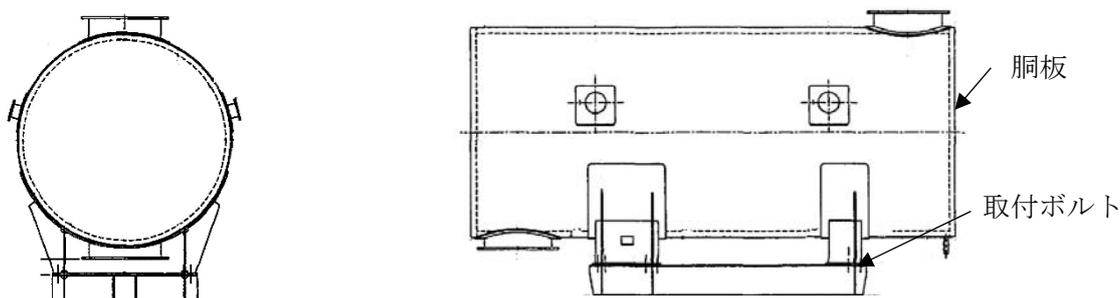


図2-2 ディーゼル発電機排気消音器概要図（非常用ディーゼル発電機2C）

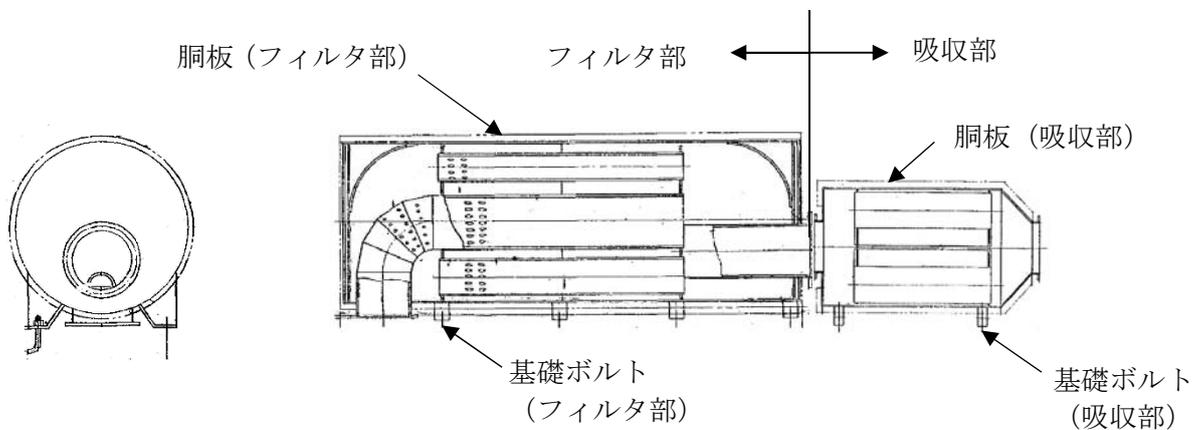


図2-3 ディーゼル発電機排気消音器概要図（非常用ディーゼル発電機2D）

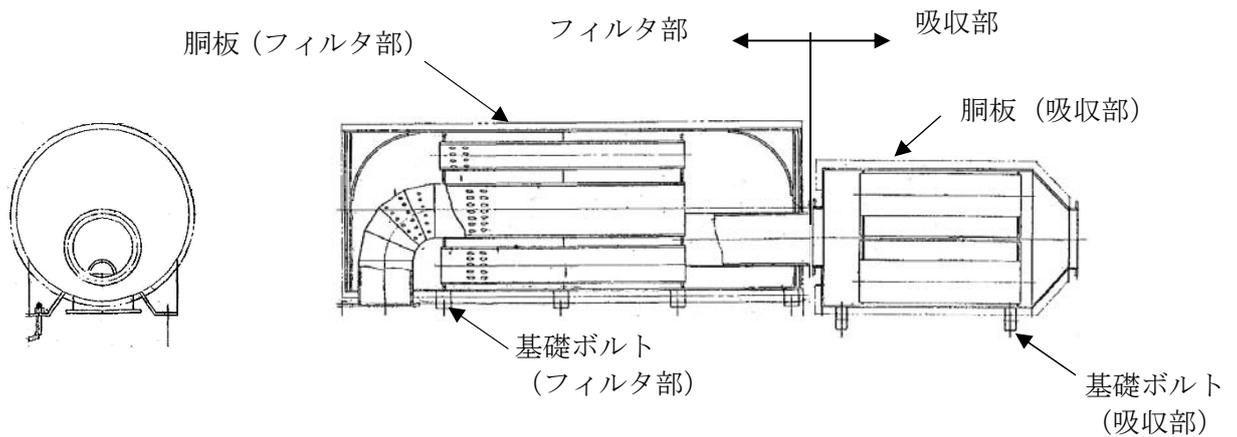


図2-4 ディーゼル発電機排気消音器概要図（高圧炉心スプレー系ディーゼル発電機）

2.3 評価方針

ディーゼル発電機排気消音器の強度評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している、荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、ディーゼル発電機排気消音器の評価対象部位に作用する応力等が許容限界に収まることを「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

ディーゼル発電機排気消音器の強度評価フローを図2-5に示す。ディーゼル発電機排気消音器の強度評価においては、その構造を踏まえ、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を選定する。強度評価においては、ディーゼル発電機排気消音器に対して、設計竜巻の風圧力及び自重を加えた応力が許容応力以下であることを確認する。各部材の強度評価には、設計竜巻による荷重は水平方向より作用する外荷重という観点で地震荷重と同様なものと考え、「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG 4601・補-1984」（（社）日本電気協会）、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987」（（社）日本電気協会）及び「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1991 追補版」（（社）日本電気協会）（以下「JEAG 4601」という。）における1質点系モデルによる評価方法を準用し、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示すよこ置円筒型容器の評価式を用いる。

ディーゼル発電機排気消音器の許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、JEAG 4601の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

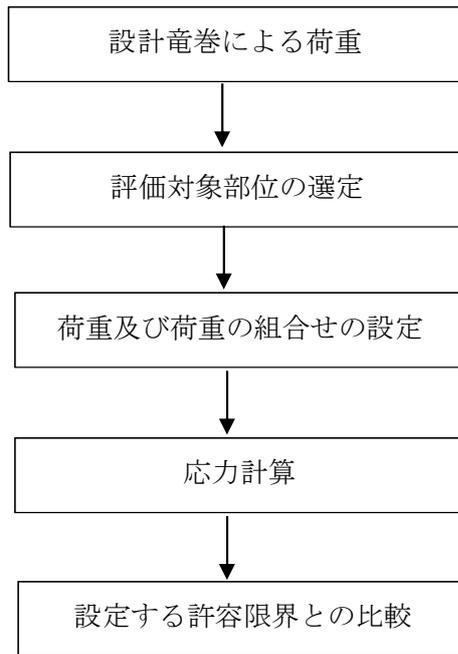


図2-5 ディーゼル発電機排気消音器の強度評価フロー

2.4 適用規格

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

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

ディーゼル発電機排気消音器の強度評価に用いる記号を表3-1に示す。

表3-1 強度評価に用いる記号 (1/2)

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

表3-1 強度評価に用いる記号 (2/2)

| 記号 | 単位 | 定義 |
|---------------|----------|--|
| n_{fA} | — | 軸方向応力評価における引張力を受ける基礎ボルトの本数 |
| n_{fH} | — | 軸直角方向応力評価における引張力を受ける基礎ボルトの本数 |
| Q_b | N | 基礎ボルトに対するせん断力 |
| q | N/m^2 | 設計用速度圧 |
| S_u | MPa | J S M E 付録材料図表Part5の表にて規定される設計引張強さ |
| S_y | MPa | J S M E 付録材料図表Part5の表にて規定される設計降伏点 |
| V_D | m/s | 設計竜巻の最大風速 |
| W | mm | 排気消音器の幅 |
| W_M | N | 設計竜巻による飛来物の衝撃荷重 |
| W_P | N | 設計竜巻による気圧差による荷重 |
| W_T | N | 設計竜巻による複合荷重 |
| W_{T1} | N | 設計竜巻による複合荷重 ($W_{T1} = W_P$) |
| W_{T2} | N | 設計竜巻による複合荷重 ($W_{T2} = W_W + 0.5 \cdot W_P + W_M$) |
| W_{TA} | N | 軸方向応力評価における設計竜巻による複合荷重 (W_{T2}) |
| W_{TH} | N | 軸直角方向応力評価における設計竜巻による複合荷重 (W_{T2}) |
| W_W | N | 設計竜巻の風圧力による荷重 |
| ρ | kg/m^3 | 空気密度 |
| ΔP | N/m^2 | 設計竜巻の気圧低下量 |
| π | — | 円周率 |
| σ_{bA} | MPa | 軸方向応力評価における基礎ボルトに生じる引張応力 |
| σ_{bH} | MPa | 軸直角方向応力評価における基礎ボルトに生じる引張応力 |
| τ | MPa | 基礎ボルトに生じるせん断応力 |

3.2 評価対象部位

ディーゼル発電機排気消音器の評価対象部位は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

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

排気消音器の転倒により、ディーゼル発電機の排気機能を閉塞させる波及的影響を考慮し、**本体を支持するための主要な支持部材である取付ボルト、基礎ボルトを評価対象部位として設定する。**

なお、ディーゼル発電機排気消音器（非常用ディーゼル発電機2D）及びディーゼル発電機排気消音器（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機）は、フィルタ部と吸収部がフランジで結合されているが、おおむね弾性範囲であれば大きな変位は発生せず、**フィルタ部又は吸収部に発生した応力が他方に伝達する影響は小さいため、軸直角方向からの風荷重による応力はフィルタ部と吸収部各々直下の基礎ボルトに発生すると考えられる。また、軸方向からの風荷重による応力はフィルタ部と吸収部各々について風が当たるものとして評価することで保守的な評価となるため、フィルタ部と吸収部に分けて評価を行う。**

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

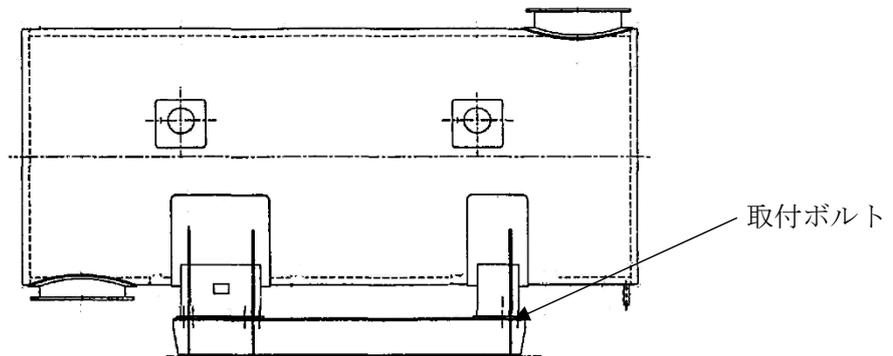


図3-1 ディーゼル発電機排気消音器（非常用ディーゼル発電機2C）の評価対象部位

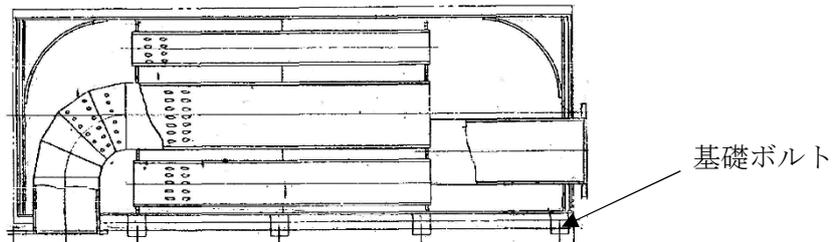


図3-2 ディーゼル発電機排気消音器（非常用ディーゼル発電機2D、高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機）の評価対象部位（フィルタ部）

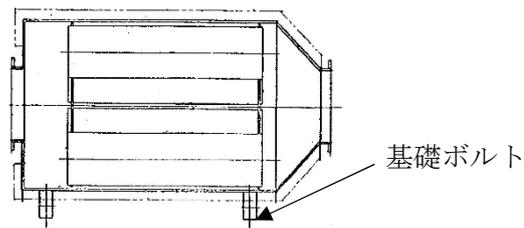


図3-3 ディーゼル発電機排気消音器（非常用ディーゼル発電機 2 D，
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機）の評価対象部位（吸収部）

3.3 荷重及び荷重の組合せ

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

(1) 荷重の設定

構造強度評価に用いる荷重を以下に示す。

a. 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、持続的に生じる荷重である自重を考慮する。

b. 設計竜巻による荷重

屋外の施設であるため風圧力による荷重を考慮する。開放された施設であるため、ディーゼル発電機排気消音器に気圧差は発生しないことから気圧差による荷重は考慮しない。

また、ディーゼル発電機排気消音器が仮に飛来物による衝撃荷重によって貫通しても、その貫通箇所又は本来の排気箇所から排気され、**且つ速やかに補修する方針とするため**、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重に衝撃荷重を考慮しない。

(a) 風圧力による荷重(W_w)

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

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

(2) 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せは、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」にて設定している荷重の組合せを踏まえ、ディーゼル発電機排気消音器の評価対象部位ごとに設定する。

ディーゼル発電機排気消音器の取付ボルト及び基礎ボルトには、自重及び風圧力による荷重が作用する。

強度評価の荷重の組合せを表 3-2 に示す。

表 3-2 荷重の組合せ

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

3.4 許容限界

ディーゼル発電機排気消音器の取付ボルト又は基礎ボルトの許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界に従って、「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、J E A G 4 6 0 1 に基づく許容応力状態Ⅲ_AS の許容応力の許容荷重を用いる。

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

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

表3-3 許容限界

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

3.5 評価方法

ディーゼル発電機排気消音器の強度評価は、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」にて設定しているディーゼル発電機排気消音器の評価式を用いる。

(1) 計算モデル

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

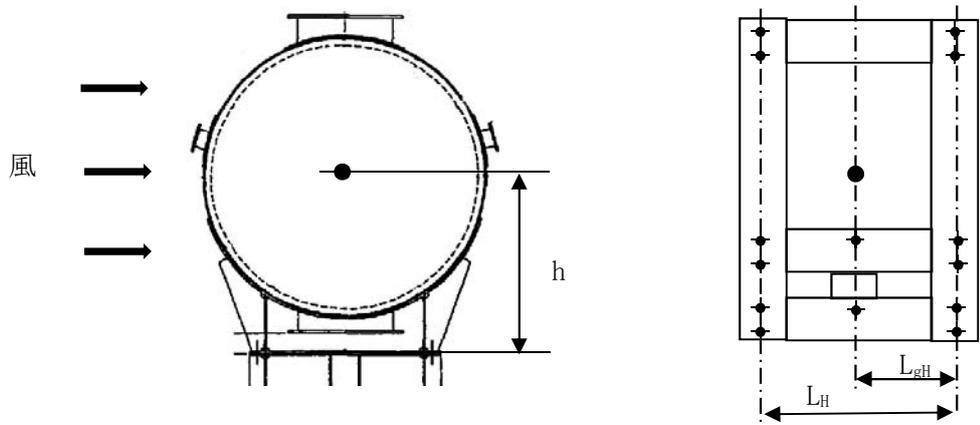


図 3-4 非常用ディーゼル発電機 2 C 排気消音器の評価モデル図（軸直角方向）

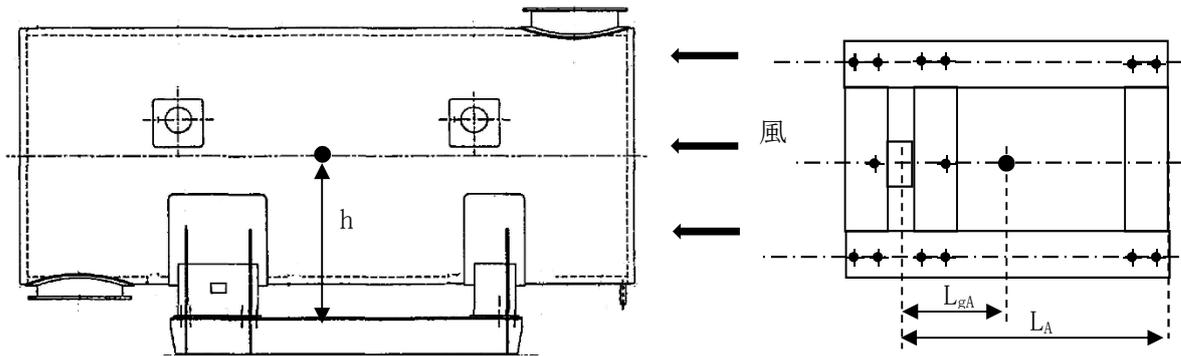


図 3-5 非常用ディーゼル発電機 2 C 排気消音器の評価モデル図（軸方向）

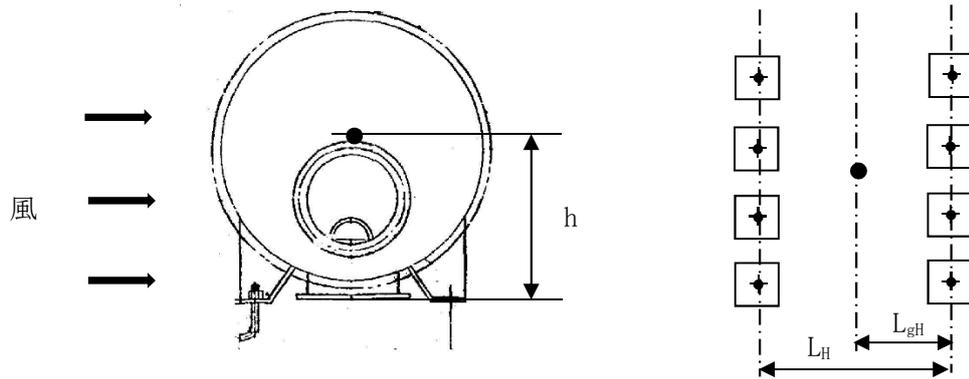


図 3-6 非常用ディーゼル発電機 2D 排気消音器，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器の評価モデル図（フィルタ部軸直角方向）

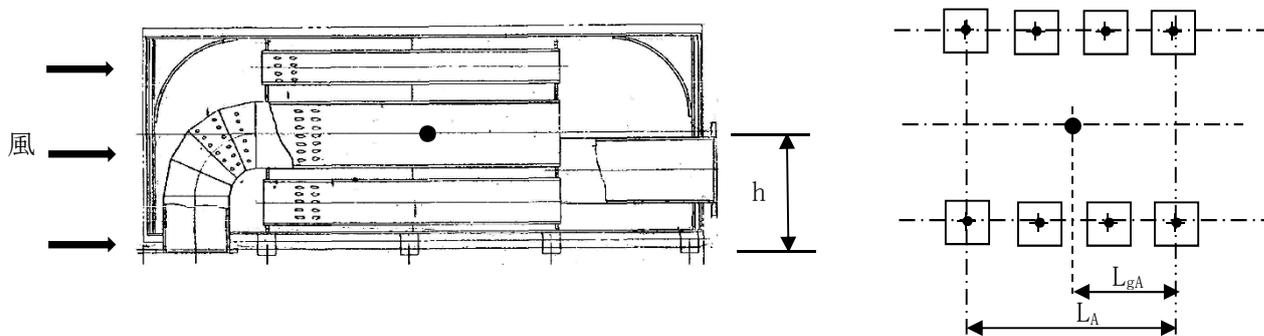


図 3-7 非常用ディーゼル発電機 2D 排気消音器，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器の評価モデル図（フィルタ部軸方向）

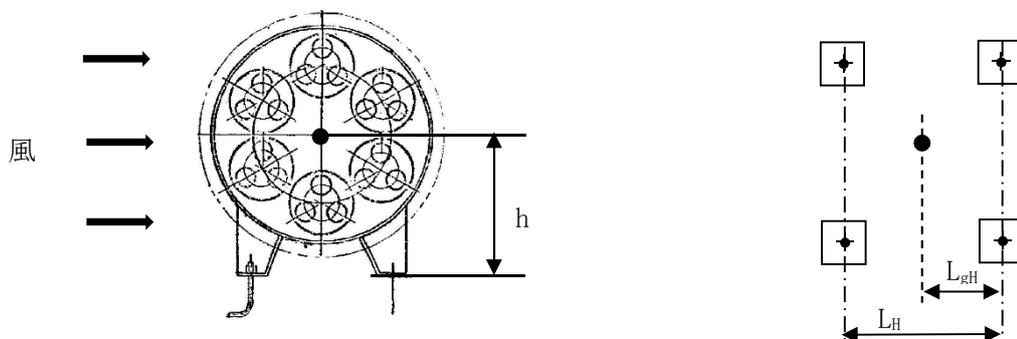


図 3-8 非常用ディーゼル発電機 2D 排気消音器，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器モデル図（吸収部軸直角方向）

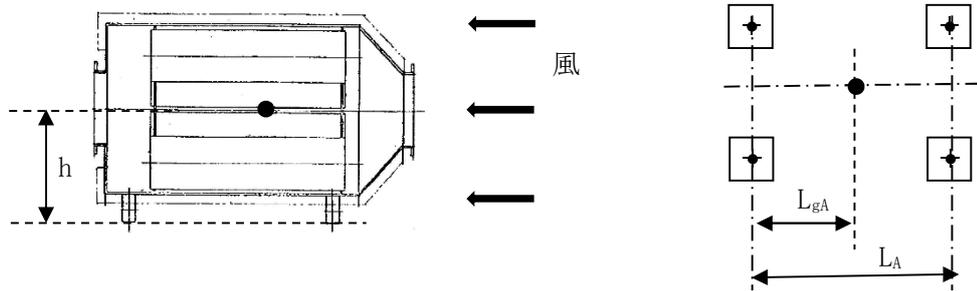


図 3-9 非常用ディーゼル発電機 2D 排気消音器，高圧炉心スプレー系ディーゼル発電機排気消音器の評価モデル図（吸収部軸方向）

(2) 計算方法

a. 引張応力

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

(a) 軸直角方向

イ. 引張力

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

ロ. 引張応力

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

ここで，取付ボルト又は基礎ボルトの軸断面積 A_b は

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

(b) 軸方向

イ. 引張力

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

ロ. 引張応力

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

ここで、取付ボルト又は基礎ボルトの軸断面積 A_b は

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

b. せん断応力

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

(a) せん断力

$$Q_b = W_T$$

(b) せん断応力

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

4. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-1～表 4-8 に示す。

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

| 評価対象部位 | 材料 | 温度条件 (°C) | S_y (MPa) | S_u (MPa) | F (MPa) | $1.5 f_t$ (MPa) | $1.5 f_s$ (MPa) |
|--------|------|--------------|----------------|----------------|------------|--------------------|--------------------|
| 取付ボルト | SNB7 | 50 | 715 | 838 | 586 | 439 | 338 |

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

| 評価対象部位 | 材料 | 温度条件 (°C) | S_y (MPa) | S_u (MPa) | F (MPa) | $1.5 f_t$ (MPa) | $1.5 f_s$ (MPa) |
|--------|-------|--------------|----------------|----------------|------------|--------------------|--------------------|
| 基礎ボルト | SS400 | 50 | 231 | 394 | 231 | 173 | 133 |

表 4-3 評価条件

| q (N/m ²) | G (-) |
|--------------------------|----------|
| 6.1×10^3 | 1.0 |

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

5. 強度評価結果

強度評価結果を表 5-1, 表 5-2 に示す。

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

表 5-1 強度評価結果 (軸直角方向)

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

表 5-2 強度評価結果（軸方向）

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

V-3-別添 1-1-10-3 排気管，放出管及びベント管の強度計算書

目次

| | |
|---------------------|----|
| 1. 概要..... | 1 |
| 2. 基本方針..... | 1 |
| 2.1 位置..... | 1 |
| 2.2 構造概要..... | 2 |
| 2.3 評価方針..... | 3 |
| 2.4 適用規格..... | 4 |
| 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..... | 12 |
| 5. 強度評価結果..... | 14 |

1. 概要

本資料は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算方針」に示すとおり、屋外に設置しているディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側），ディーゼル発電機海水配管（放出側）及びサポート部が竜巻時及び竜巻通過後においても、各配管の機能維持を考慮して、主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側），ディーゼル発電機海水配管（放出側）について、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側），ディーゼル発電機海水配管（放出側）の「2.1 位置」，「2.2 構造概要」，「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

2.1 位置

屋外に設置しているディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側），ディーゼル発電機海水配管（放出側）は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算方針」の「3.2 機能維持の方針」に示すとおり、図2-1に示す位置に設置する。

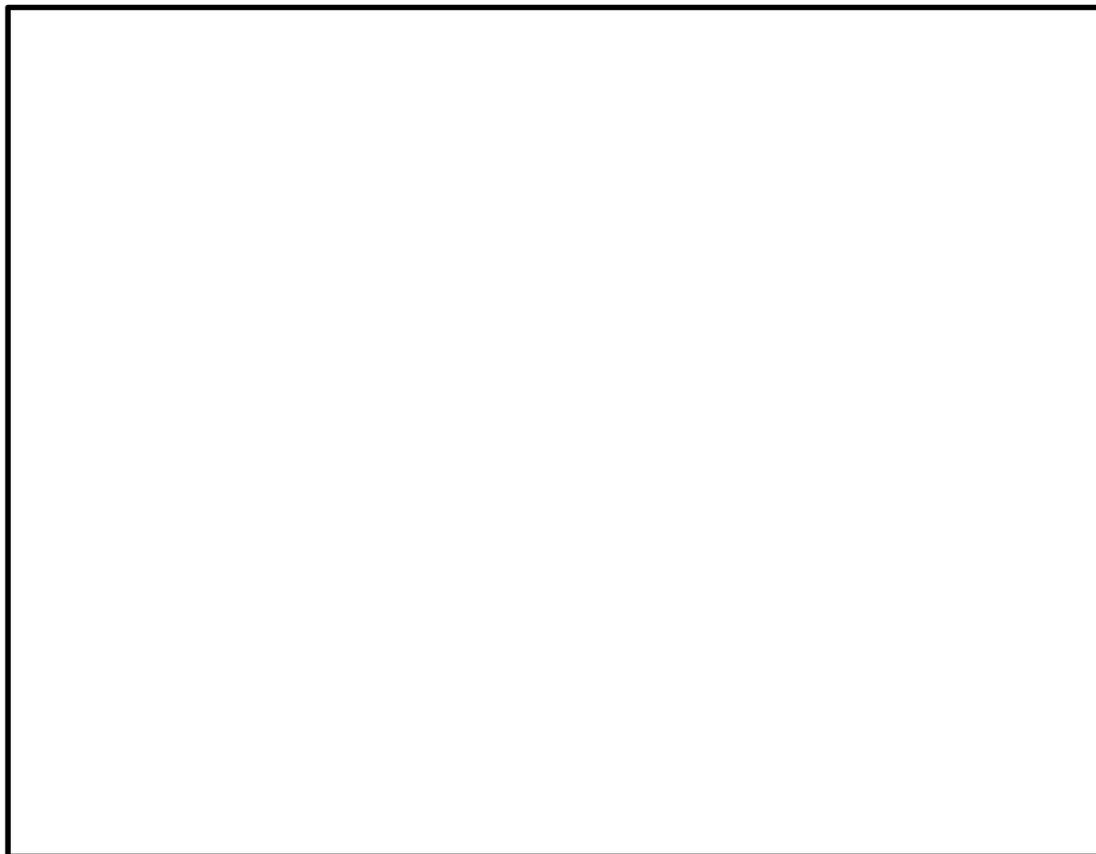


図 2-1 ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側），

ディーゼル発電機海水配管（放出側）の位置図

2.2 構造概要

ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側），ディーゼル発電機海水配管（放出側）について，V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ，各配管の構造を示す。

ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側），ディーゼル発電機海水配管（放出側）は鋼管で構成される。ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管は建屋壁，床等から支持された配管である。

残留熱除去系海水配管（放出側），ディーゼル発電機海水配管（放出側）は，基礎コンクリートにサポートで固定された配管である。ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側），ディーゼル発電機海水配管（放出側）の概要図を図2-2～図2-4に示す。

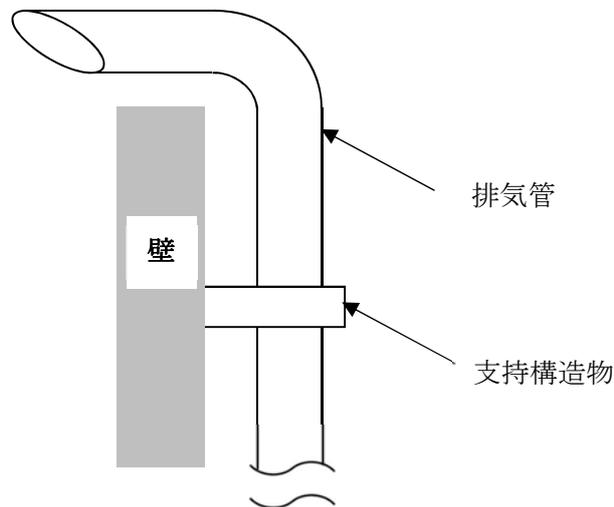


図2-2 ディーゼル発電機付属排気管の概要図

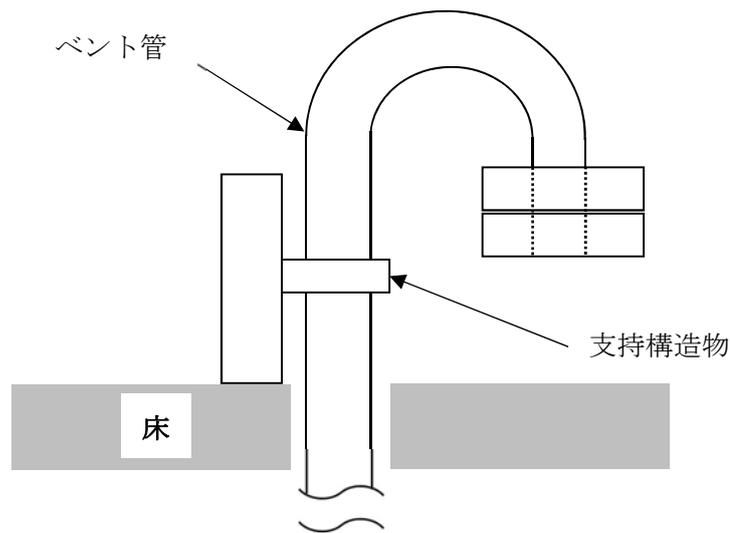


図2-3 ディーゼル発電機付属ベント管の概要図

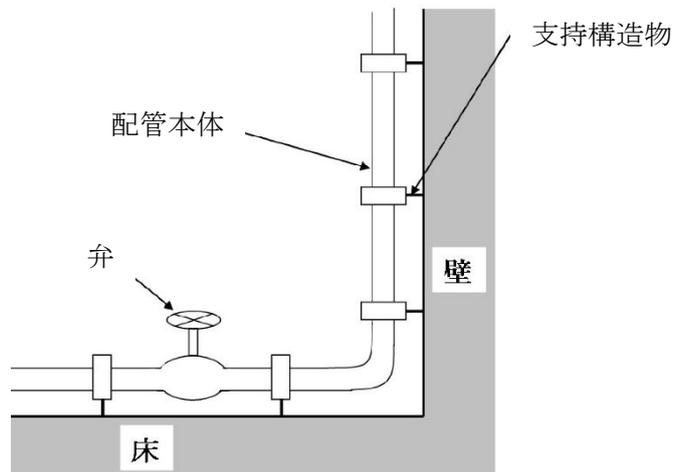


図2-4 配管の概要図

2.3 評価方針

ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側），ディーゼル発電機海水配管（放出側）の強度評価は，V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算方針」の「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している，荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ，ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側），ディーゼル発電機海水配管（放出側）の評価対象部位に作用する応力等が許容限界に収まることを「3. 強度評価方法」に示す方法により，「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し，「5. 強度評価結果」にて確認する。

ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側），ディーゼル発電機海水配管（放出側）の強度評価フローを図2-5に示す。ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側），ディーゼル発電機海水配管（放出側）の強度評価においては，その構造を踏まえ，設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し，評価対象部位を選定す

る。

強度評価において、ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管に対しては、設計竜巻の風圧力による荷重及び自重を加えた応力が許容応力以下であることを確認する。残留熱除去系海水配管（放出側）、ディーゼル発電機海水配管（放出側）に対しては、設計竜巻の風圧力による荷重及び気圧差による荷重に内圧及び自重を加えた応力が許容応力以下であることを確認する。強度評価では、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算方針」の「5. 強度評価方法」に示すディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管、残留熱除去系海水配管（放出側）、ディーゼル発電機海水配管（放出側）の評価式を用いる。ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管、残留熱除去系海水配管（放出側）、ディーゼル発電機海水配管（放出側）の許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984」（（社）日本電気協会）、「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987」（（社）日本電気協会）及び「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」（（社）日本電気協会）（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

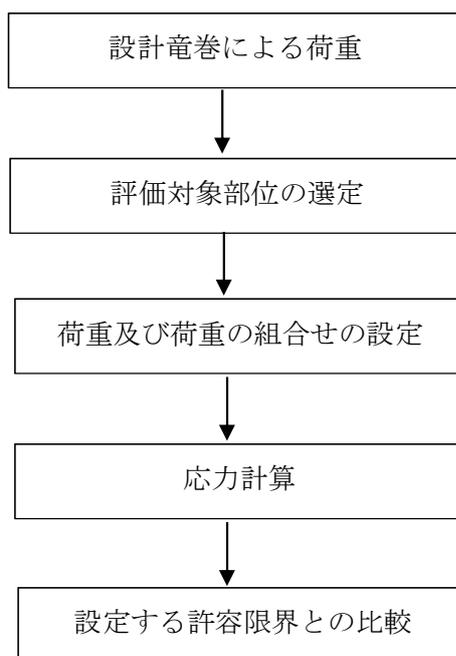


図2-5 ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管、残留熱除去系海水配管（放出側）、ディーゼル発電機海水配管（放出側）の強度評価フロー

2.4 適用規格

- ・「建築物荷重指針・同解説」（（社）日本建築学会，2004改定）
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984」（（社）日本電気協会）
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987」（（社）日本電気協会）
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」（（社）日本電気協会）

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

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側），ディーゼル発電機海水配管（放出側）の強度評価に用いる記号を表3-1に示す。

表3-1 強度評価に用いる記号

| 記号 | 単位 | 定義 |
|-------------------------------------|-------------------|----------------------------------|
| A | m ² /m | 単位長さ当たりの施設の受圧面積（風向に垂直な面に投影した面積） |
| C | — | 建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数 |
| D | mm | 管外径 |
| G | — | ガスト影響係数 |
| g | m/s ² | 重力加速度（g = 9. 80665） |
| L | m | 支持間隔 |
| M | N・m | 風荷重により作用する曲げモーメント |
| m | kg/m | 単位長さ当たりの質量 |
| P | MPa | 内圧 |
| q | N/m ² | 設計用速度圧 |
| S _y | MPa | J S ME 付録材料図表Part5の表にて規定される設計降伏点 |
| t | mm | 板厚 |
| V _D | m/s | 設計竜巻の最大風速 |
| W _w | N/m | 設計竜巻の単位長さ当たりの風圧力による荷重 |
| w | N/m | 単位長さ当たりの自重による荷重 |
| Z | mm ³ | 断面係数 |
| ΔP | N/m ² | 気圧差 |
| ρ | kg/m ³ | 空気密度 |
| σ ₁ , σ ₂ | MPa | 配管に生じる応力 |
| σ _{WP} | MPa | 気圧差により生じる応力 |
| σ _{WT1} , σ _{WT2} | MPa | 複合荷重により生じる応力 |
| σ _{WW} | MPa | 風圧力により生じる応力 |
| σ _{自重} | MPa | 自重により生じる応力 |
| σ _{内圧} | MPa | 内圧により生じる応力 |

3.2 評価対象部位

ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側），ディーゼル発電機海水配管（放出側）の評価対象部位は，V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算方針」の「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って，「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき，設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

風圧力による荷重及び気圧差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，建屋内外にかかわらず地震に対して耐荷重設計がなされており，配管本体に竜巻による荷重が作用した場合でも，作用荷重は耐荷重以下であるため，竜巻による荷重に対するサポートの設計は耐震設計に包絡される。

このことから，配管本体を評価対象部位として選定する。

ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側），ディーゼル発電機海水配管（放出側）の強度評価における評価対象部位を図3-1～図3-3に示す。

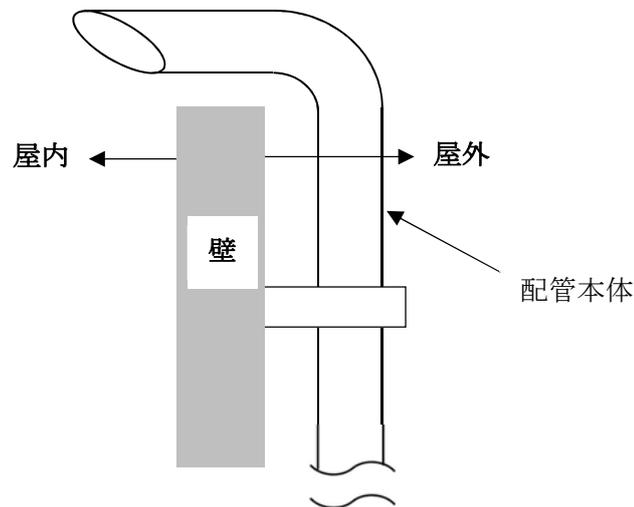


図3-1 ディーゼル発電機付属排気配管の評価対象部位

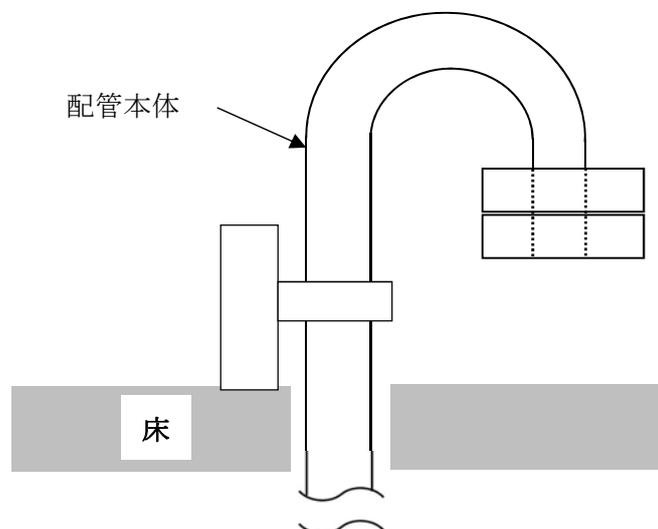


図3-2 ディーゼル発電機付属ベント管の評価対象部位

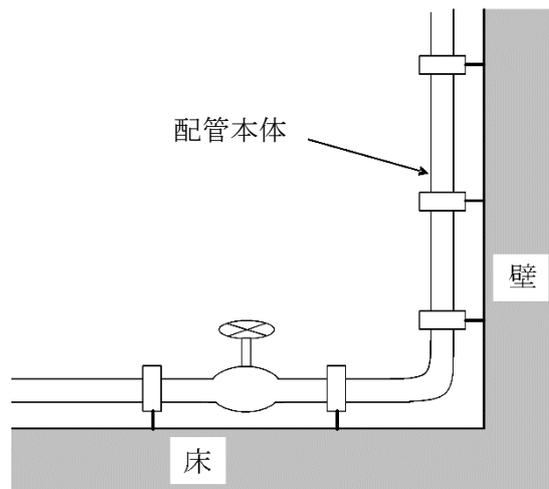


図3-3 残留熱除去系海水配管（放出側）及びディーゼル発電機海水配管（放出側）の評価対象部位

3.3 荷重及び荷重の組合せ

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

(1) 荷重の設定

構造強度評価に用いる荷重を以下に示す。

a. 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、持続的に生じる荷重である自重を考慮する。

b. 設計竜巻による荷重

風圧力による荷重及び気圧差による荷重を考慮する。なお、ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管、残留熱除去系海水配管（放出側）、ディーゼル発電機海水配管（放出側）が仮に飛来物による衝撃荷重によって貫通しても、その貫通箇所又は本来の排気又は排水箇所から排気又は排水され、且つ速やかに補修する方針とするため、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重に衝撃荷重を考慮しない。

(a) 風圧力による荷重(W_w)

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

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

(b) 気圧差による荷重(W_p)

気圧差による荷重 W_p は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価方法に従って、気圧差を見かけ上の配管の内圧の増加として考慮する。具体的な計算方法は、「3.5(2) 計算方法」に示す。

c. 運転時の状態で作用する荷重

運転時の状態で作用する荷重としては、配管に作用する内圧を考慮する。

(2) 荷重の組合せ

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

配管本体には、自重、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び内圧が作用する。

強度評価の荷重の組合せを表 3-2 に示す。

表 3-2 荷重の組合せ

| 施設分類 | 施設名称 | 評価対象部位 | 荷重 |
|-------------------|--|--------|--|
| 波及的影響を及ぼす可能性がある施設 | <ul style="list-style-type: none"> ・ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管 ・残留熱除去系海水配管（放出側） ・ディーゼル発電機海水配管（放出側） | 配管本体 | <ul style="list-style-type: none"> ①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重 ③自重 ④内圧 |

3.4 許容限界

ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管、残留熱除去系海水配管（放出側）、ディーゼル発電機海水配管（放出側）の許容限界は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界に従って、「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、J E A G 4 6 0 1 に基づく許容応力状態Ⅲ_AS の許容応力の許容荷重を用いる。

ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管、残留熱除去系海水配管（放出側）、ディーゼル発電機海水配管（放出側）の許容限界は、J E A G 4 6 0 1 を準用し、「クラス2,3配管」の許容限界を適用し、許容応力状態Ⅲ_AS から算出した許容応力を許容限界とする。J E A G 4 6 0 1 に従い、J S M E 付録材料図表Part5,6の表にて許容応力を計算する際は、評価対象部位の最高使用温度又は周囲環境温度に応じた値をとるものとするが、温度がJ S M E 付録材料図表記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算する。ただし、J S M E 付録材料図表Part5,6で比例法を用いる場合の端数処理は、小数点第1位以下を切り捨てた値を用いるものとする。

配管の強度評価における許容限界について、表3-3に示す。

表3-3 配管の許容限界

| 許容応力状態 | 許容限界 |
|------------------|----------------|
| | 一次応力（膜+曲げ） |
| Ⅲ _A S | S _y |

3.5 評価方法

ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管，残留熱除去系海水配管（放出側），ディーゼル発電機海水配管（放出側）の強度評価は，V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算方針」の「5. 強度評価方法」にて設定している配管及び弁の評価式を用いる。

(1) 計算モデル

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

なお，ディーゼル発電機付属排気配管及びベント配管は，配管端部が片持ち形状となっていることから，配管端部についても評価を行う。

両端支持形状の配管モデル図を図 3-4 に示す。

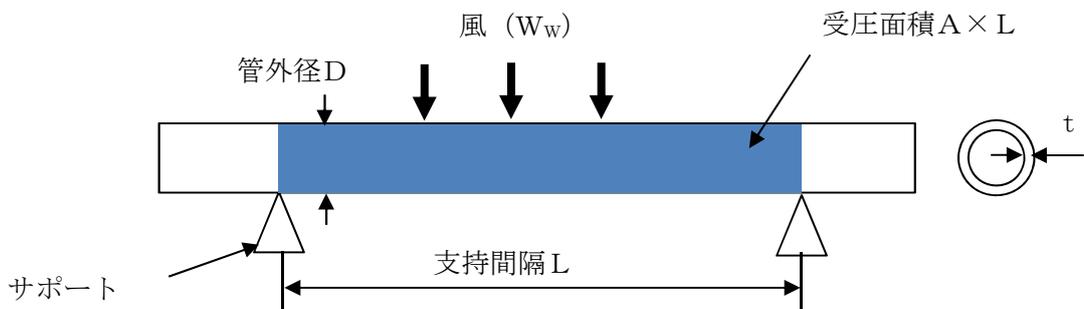


図 3-4 配管モデル図

(2) 計算方法

a. 竜巻による応力計算

(a) 風圧力により生じる応力

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

(両端支持形状)

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

(片持ち支持形状)

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

ここで

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

(b) 気圧差により生じる応力

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

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

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

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

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

b. 組合せ応力

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

(両端支持形状)

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

(片持ち支持形状)

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

$$W = m \cdot g$$

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

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

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

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

4. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-1～表 4-5 に示す。

表 4-1 許容応力計算に用いる条件

| 評価対象配管 | 管外径 (mm) | 材料 | 温度条件 (°C) | S _y (MPa) |
|--------------------|-------------|---------|--------------|-------------------------|
| 非常用ディーゼル発電機付属排気配管 | 660.4 | SM400B | 500 | 143 |
| | 863.6 | SM400B | 500 | 143 |
| 非常用ディーゼル発電機付属ベント配管 | 42.7 | STPT370 | 55 | 206 |
| | 165.2 | STPT370 | 50 | 209 |
| | 216.3 | STPT370 | 50 | 209 |
| 残留熱除去系海水配管（放出側） | 508.0 | SB410 | 66 | 212 |
| ディーゼル発電機海水配管（放出側） | 267.4 | STPT410 | 66 | 226 |

表 4-2 評価条件

| ガスト係数 G (-) | 風力係数 C (-) | 設計用速度圧 q (N/m ²) | 気圧低下量 ΔP (N/m ²) | 重力加速度 g (m/s ²) |
|-------------------|------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 1.2 | 6100 | 8900 | 9.80665 |

表 4-3 評価条件（非常用ディーゼル発電機付属排気配管）

| 管外径 D (mm) | 形状 | 材料 | 支持間隔 L (m) | 板厚 t (mm) | 単位長さ当たりの質量 m (kg/m) | 単位長さ当たりの受圧面積 A (m ² /m) | 内圧 P (kPa) |
|------------------|------|--------|------------------|-----------------|---------------------------|--|------------------|
| 660.4 | 両端支持 | SM400B | 8.500 | 6.0 | 115.9 | 0.8604 | 5 |
| | 片持ち | SM400B | 5.570 | 6.0 | 115.9 | 0.8604 | 5 |
| 863.6 | 両端支持 | SM400B | 9.362 | 6.0 | 151.1 | 1.064 | 5 |
| | 片持ち | SM400B | 7.251 | 6.0 | 151.1 | 1.064 | 5 |

表 4-4 評価条件（非常用ディーゼル発電機付属ベント配管）

| 管外径 D (mm) | 形状 | 材料 | 支持間隔 L (m) | 板厚 t (mm) | 単位長さ当 たりの質量 m (kg/m) | 単位長さ当 たりの受圧面積 A (m ² /m) | 内圧 P (kPa) |
|------------------|------|---------|------------------|-----------------|-------------------------------|--|------------------|
| 42.7 | 両端支持 | STPT370 | 2.440 | 3.6 | 3.470 | 0.04270 | 197 |
| | 片持ち | STPT370 | 0.950 | 3.6 | 7.570 | 0.04270 | 197 |
| 165.2 | 両端支持 | STPT370 | 2.800 | 7.1 | 27.70 | 0.1652 | 5 |
| | 片持ち | STPT370 | 1.378 | 7.1 | 49.30 | 0.1652 | 5 |
| 216.3 | 両端支持 | STPT370 | 2.900 | 8.2 | 42.10 | 0.2163 | 5 |
| | 片持ち | STPT370 | 1.578 | 8.2 | 71.30 | 0.2163 | 5 |

表 4-5 評価条件（残留熱除去系海水配管（放出側））

| 管外径 D (mm) | 材料 | 支持間隔 L (m) | 板厚 t (mm) | 単位長さ当 たりの質量 m (kg/m) | 単位長さ当 たりの受圧面積 A (m ² /m) | 内圧 P (kPa) |
|------------------|-------|------------------|-----------------|-------------------------------|--|------------------|
| 508.0 | SB410 | 13.35 | 15.1 | 362.8 | 0.5080 | 700 |

表 4-6 評価条件（ディーゼル発電機海水配管（放出側））

| 管外径 D (mm) | 材料 | 支持間隔 L (m) | 板厚 t (mm) | 単位長さ当 たりの質量 m (kg/m) | 単位長さ当 たりの受圧面積 A (m ² /m) | 内圧 P (MPa) |
|------------------|---------|------------------|-----------------|-------------------------------|--|------------------|
| 267.4 | STPT410 | 10.00 | 9.3 | 107.8 | 0.2674 | 700 |

5. 強度評価結果

(1) 非常用ディーゼル発電機付属排気配管

強度評価結果を表5-1に示す。

非常用ディーゼル発電機付属排気配管に発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-1 強度評価結果

| 管外径 D (mm) | 形状 | 材料 | σ_1 (MPa) | σ_2 (MPa) | 許容応力 (MPa) |
|------------------|------|--------|---------------------|---------------------|---------------|
| 660.4 | 両端支持 | SM400B | 6 | 34 | 143 |
| | 片持ち | SM400B | 10 | 58 | 143 |
| 863.6 | 両端支持 | SM400B | 6 | 30 | 143 |
| | 片持ち | SM400B | 12 | 72 | 143 |

(2) 非常用ディーゼル発電機付属ベント配管

強度評価結果を表5-2に示す。

非常用ディーゼル発電機付属ベント配管に発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-2 強度評価結果

| 管外径 D (mm) | 形状 | 材料 | σ_1 (MPa) | σ_2 (MPa) | 許容応力 (MPa) |
|------------------|------|---------|---------------------|---------------------|---------------|
| 42.7 | 両端支持 | STPT370 | 7 | 66 | 206 |
| | 片持ち | STPT370 | 10 | 45 | 206 |
| 165.2 | 両端支持 | STPT370 | 3 | 11 | 209 |
| | 片持ち | STPT370 | 4 | 13 | 209 |
| 216.3 | 両端支持 | STPT370 | 2 | 8 | 209 |
| | 片持ち | STPT370 | 4 | 11 | 209 |

(3) 残留熱除去系海水配管（放出側）

強度評価結果を表5-3に示す。

残留熱除去系海水配管（放出側）に発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-3 強度評価結果

| 管外径 D (mm) | 材料 | σ_1 (MPa) | σ_2 (MPa) | 許容応力 (MPa) |
|------------------|-------|---------------------|---------------------|---------------|
| 508.0 | SB410 | 35 | 64 | 212 |

(4) ディーゼル発電機海水配管（放出側）

強度評価結果を表5-4に示す。

ディーゼル発電機海水配管（放出側）に発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-4 強度評価結果

| 管外径 D (mm) | 材料 | σ_1 (MPa) | σ_2 (MPa) | 許容応力 (MPa) |
|------------------|---------|---------------------|---------------------|---------------|
| 267.4 | STPT410 | 34 | 86 | 226 |

V-3-別添 1-2-1-3 架構の強度計算書

目次

| | | |
|-----|------------|----|
| 1. | 概要 | 1 |
| 2. | 基本方針 | 1 |
| 2.1 | 位置 | 1 |
| 2.2 | 構造概要 | 2 |
| 2.3 | 評価方針 | 18 |
| 2.4 | 適用規格 | 20 |
| 3. | 強度評価方法 | 21 |
| 3.1 | 記号の定義 | 21 |
| 3.2 | 評価対象部位 | 21 |
| 3.3 | 荷重及び荷重の組合せ | 22 |
| 3.4 | 許容限界 | 23 |
| 3.5 | 評価方法 | 25 |
| 4. | 評価条件 | 39 |
| 5. | 強度評価結果 | 43 |
| 5.1 | 貫通評価 | 43 |
| 5.2 | 支持機能評価 | 43 |

1. 概要

本資料は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」に示すとおり、防護対策施設である非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設、中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設、海水ポンプエリア竜巻防護対策施設、原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設、中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設、使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の架構が、**設置（変更）許可申請書に示す**設計飛来物（以下「飛来物」という。）の衝突に加え、風圧力に対し、竜巻時及び竜巻通過後においても防護対象施設に飛来物を衝突させず、また、機械的な波及的影響を与えず、防護対象施設の安全機能維持を考慮して、架構の主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」を踏まえ、架構の「2.1 位置」、 「2.2 構造概要」、 「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

2.1 位置

架構は、原子炉建屋（ディーゼル発電機室屋上、原子炉棟外壁及び付属棟屋上並びに外壁）、海水ポンプ室周り及び使用済燃料乾式貯蔵建屋外壁に設置する。

架構の設置位置図を図 2-1 に示す。



図 2-1 架構の設置位置図

2.2 構造概要

架構の構造は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「3.3 架構の構造設計」に示す構造計画を踏まえて設定する。

(1) 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構

非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設の架構は、防護ネット及び防護鋼板を設置するための鉄骨構造であり、防護対象施設であるディーゼル発電機室ルーフベントファンを内包する施設として、柱、はり等により構成される。

非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造を図 2-2 に示す。

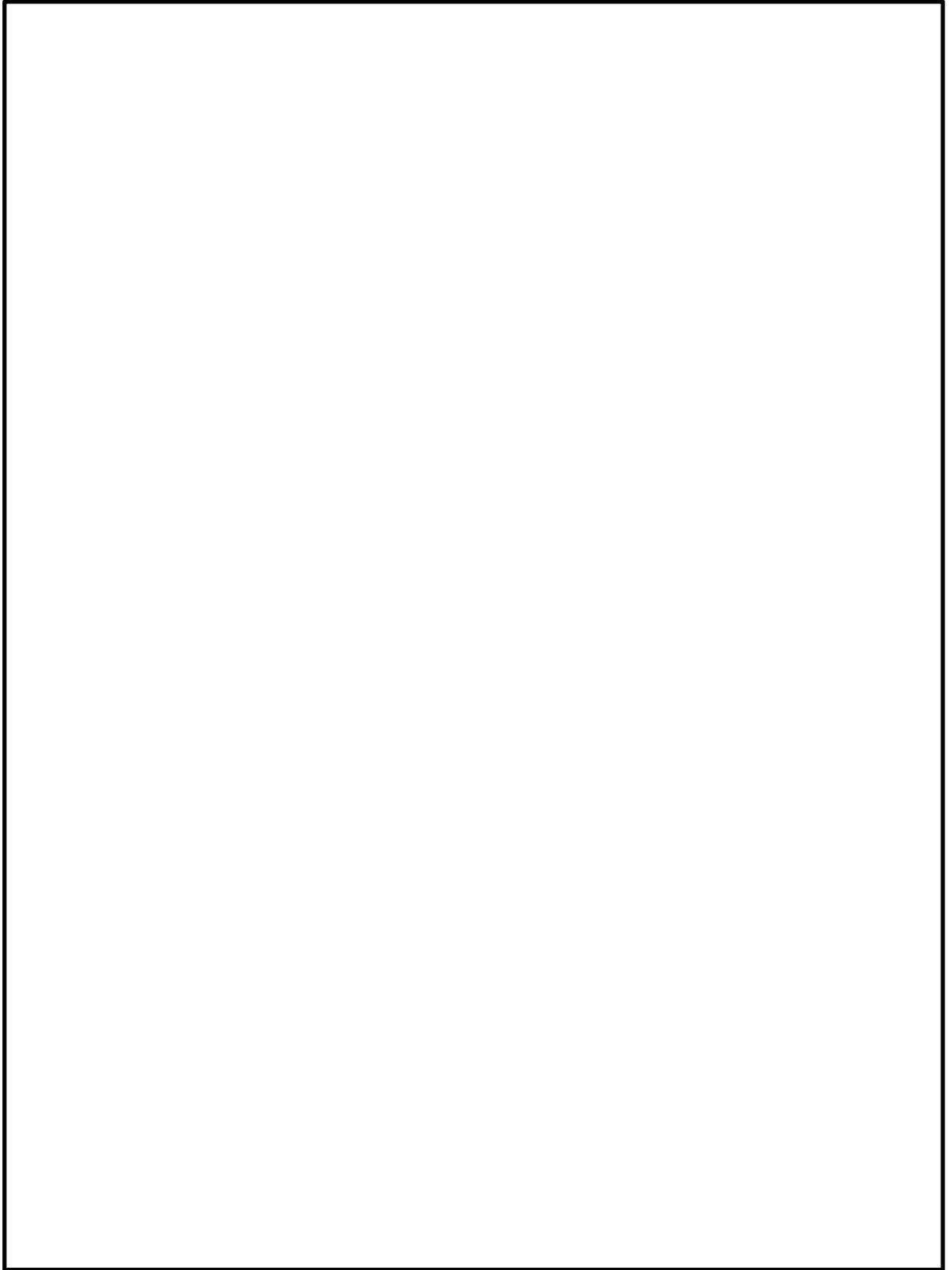


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造図(1/4)
(2 C 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

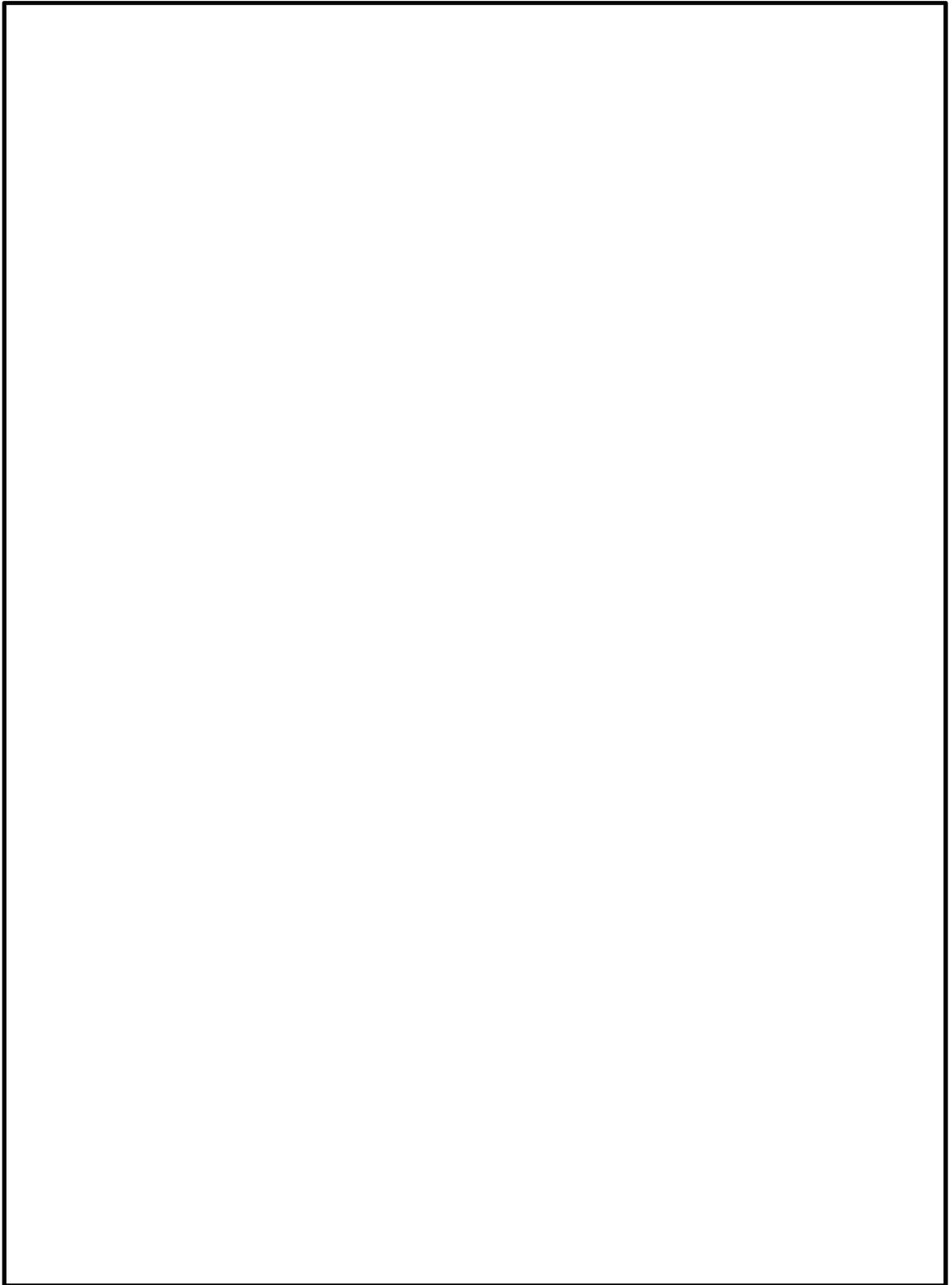


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造図(2/4)
(2D非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設(1/2))

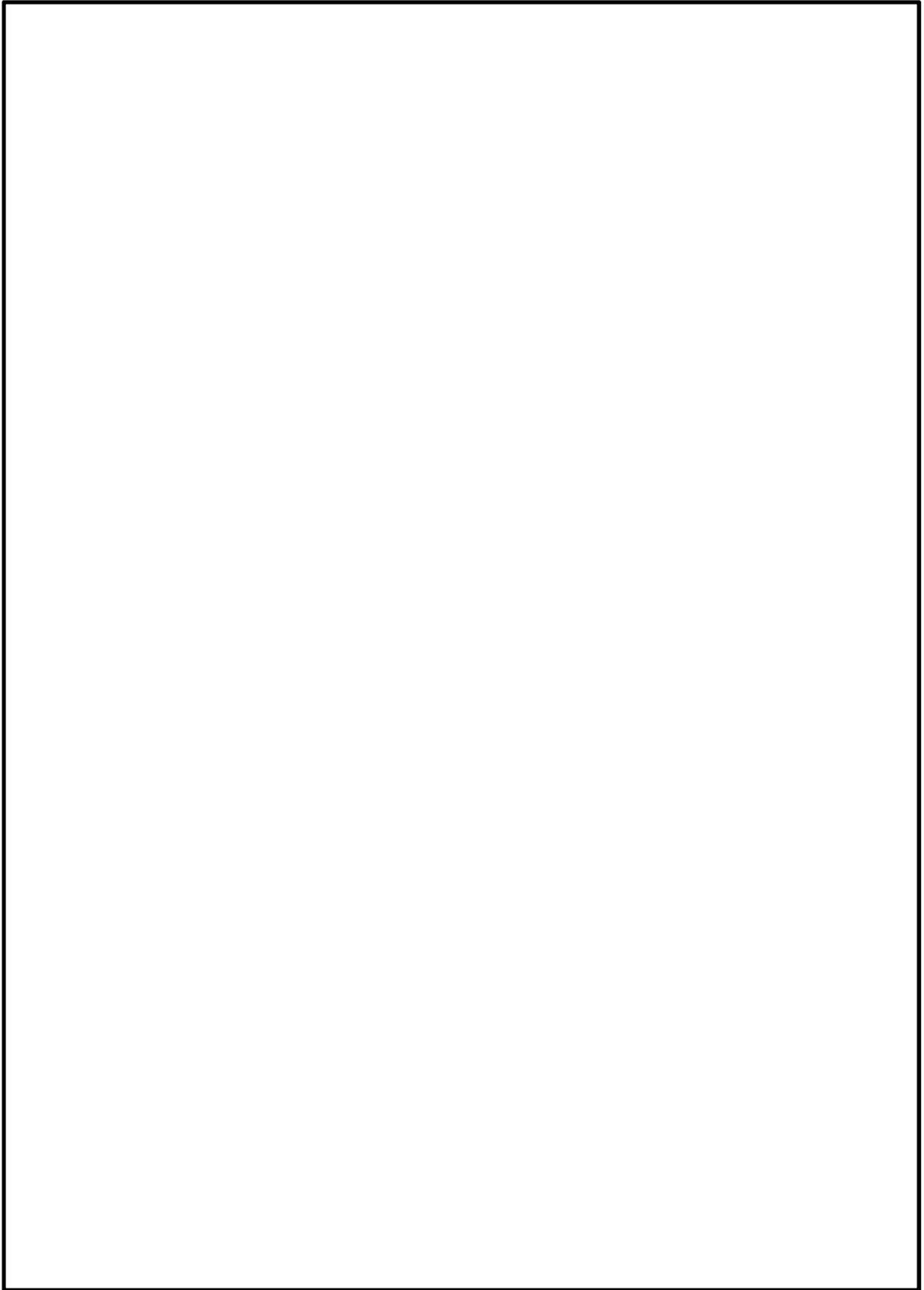


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造図(3/4)
(2 D非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設(2/2))

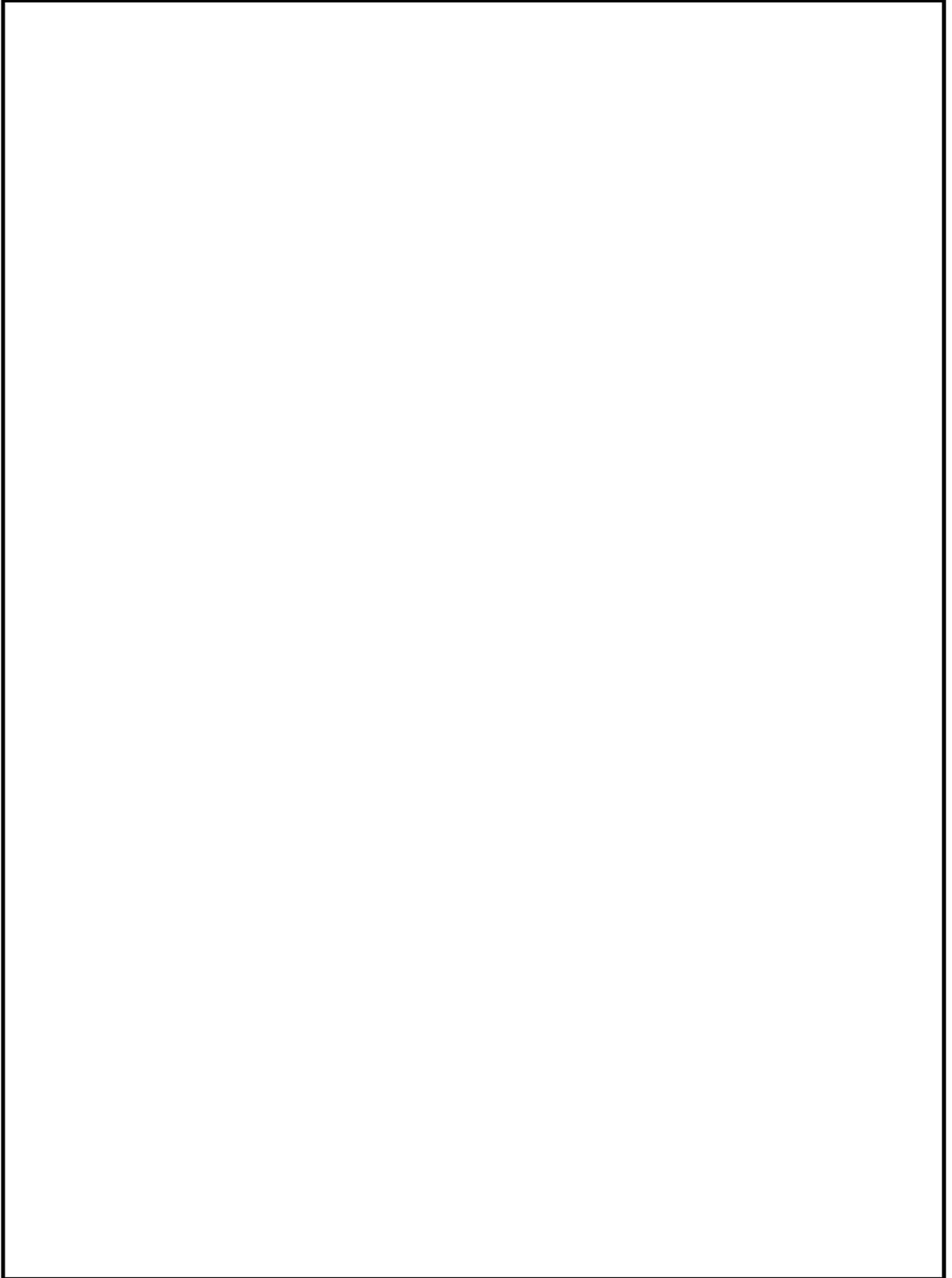


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設架構の構造図(3/4)
(高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設)

(2) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構

中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設の架構は、防護ネット及び防護鋼板を設置するための鉄骨構造であり、防護対象施設である中央制御室換気系冷凍機を内包する施設として、柱、はり等により構成される。

中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造を図 2-3 に示す。

中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図を図 2-3 に示す。

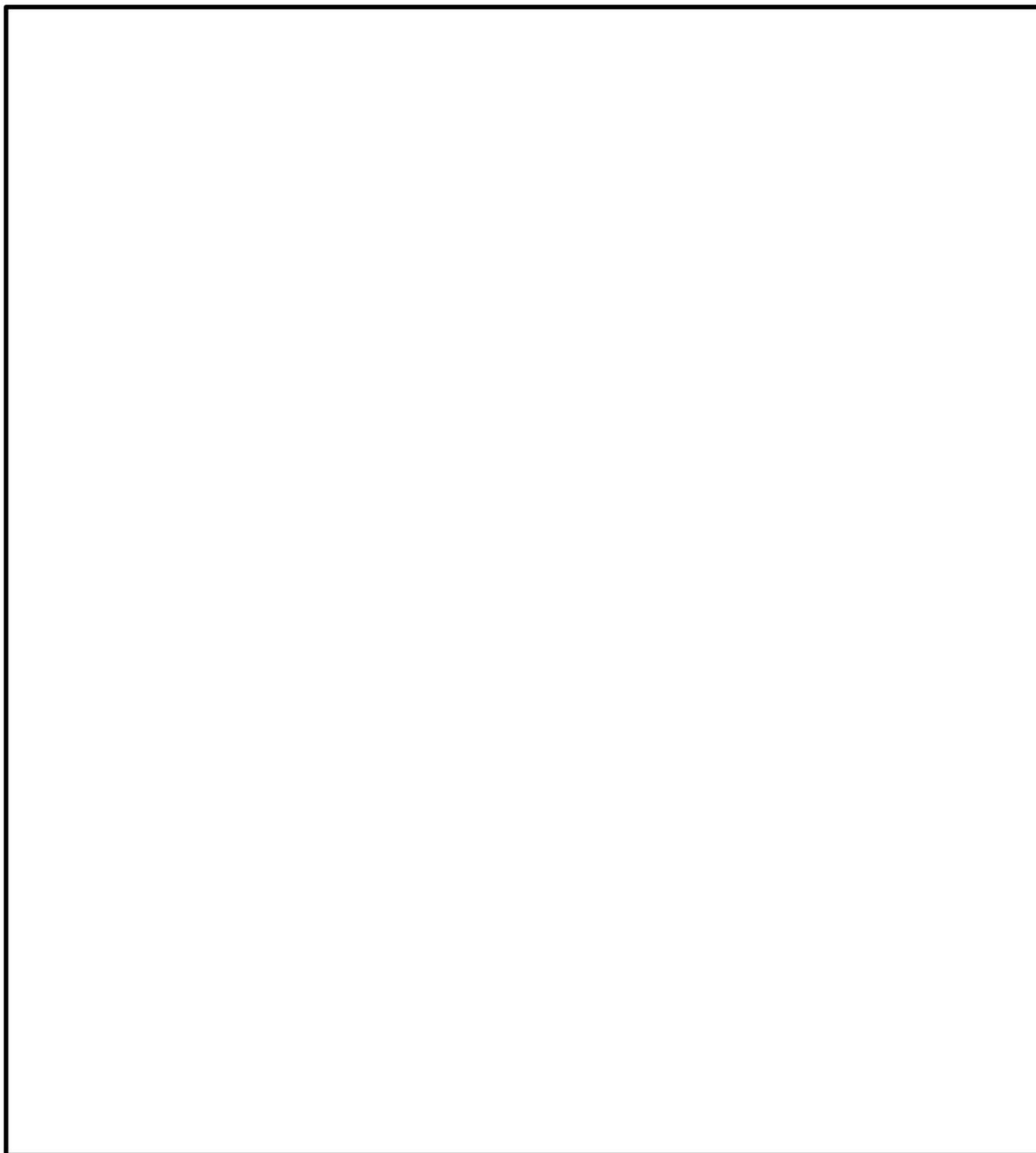


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(1/6)

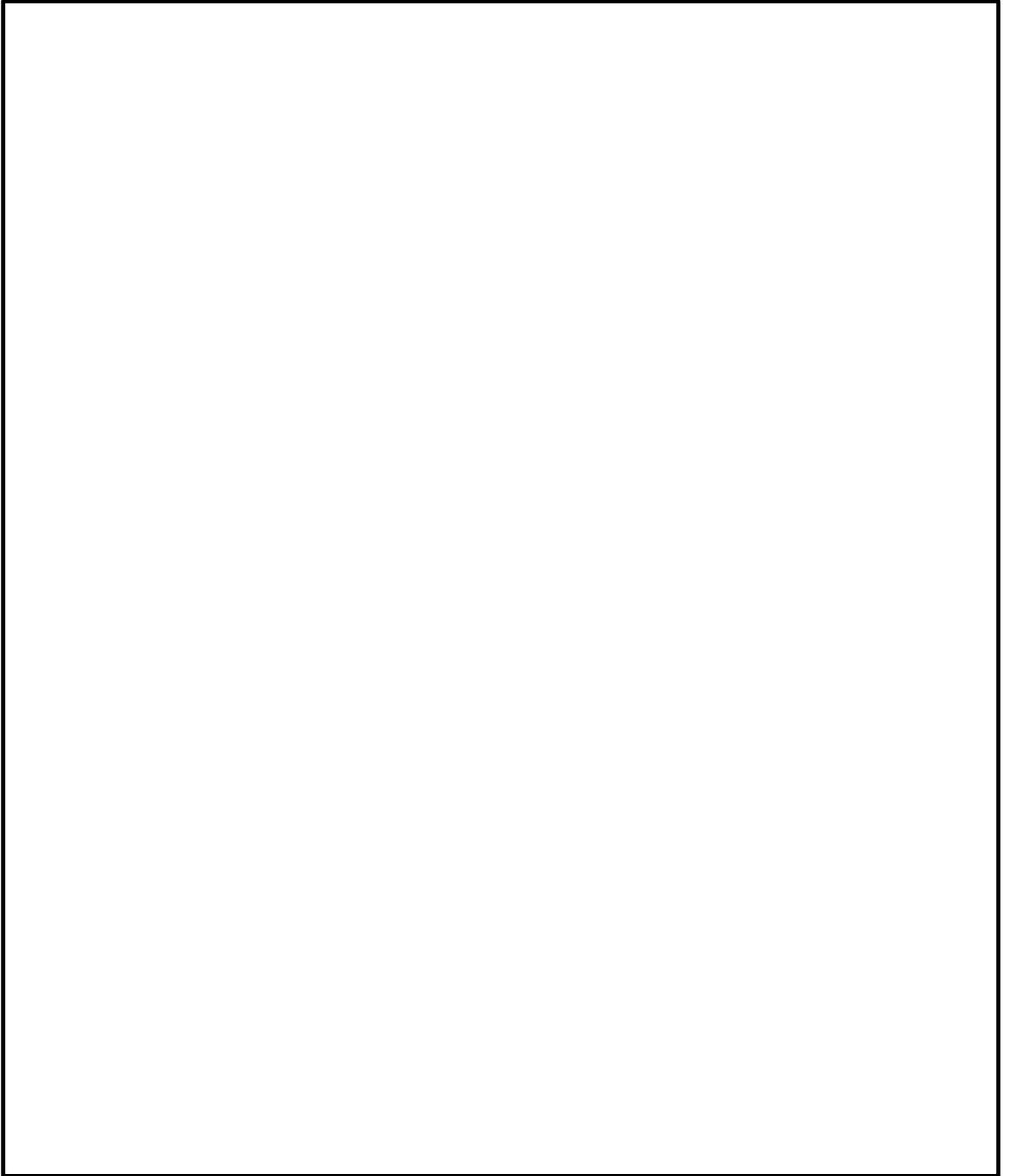


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(2/6)

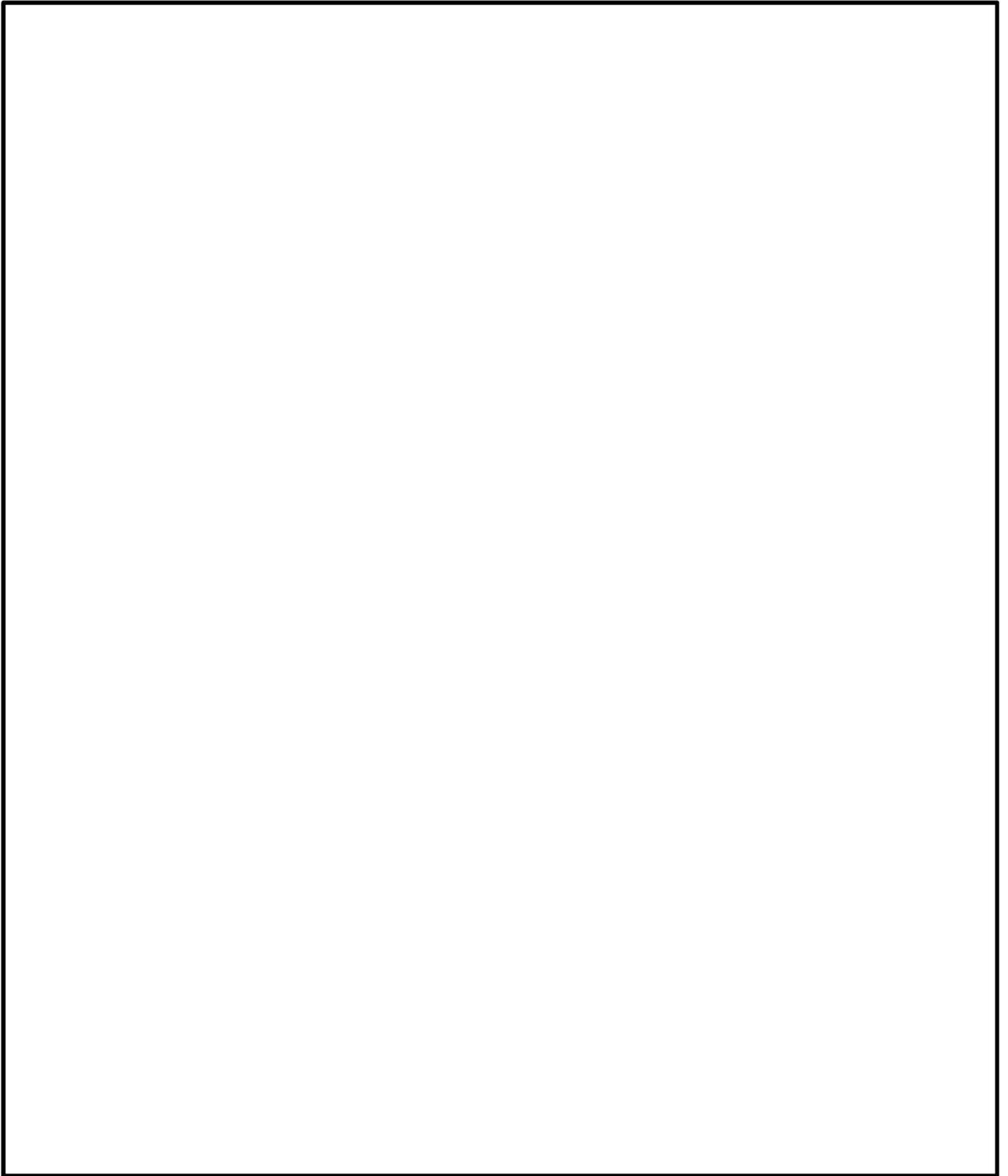


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(3/6)

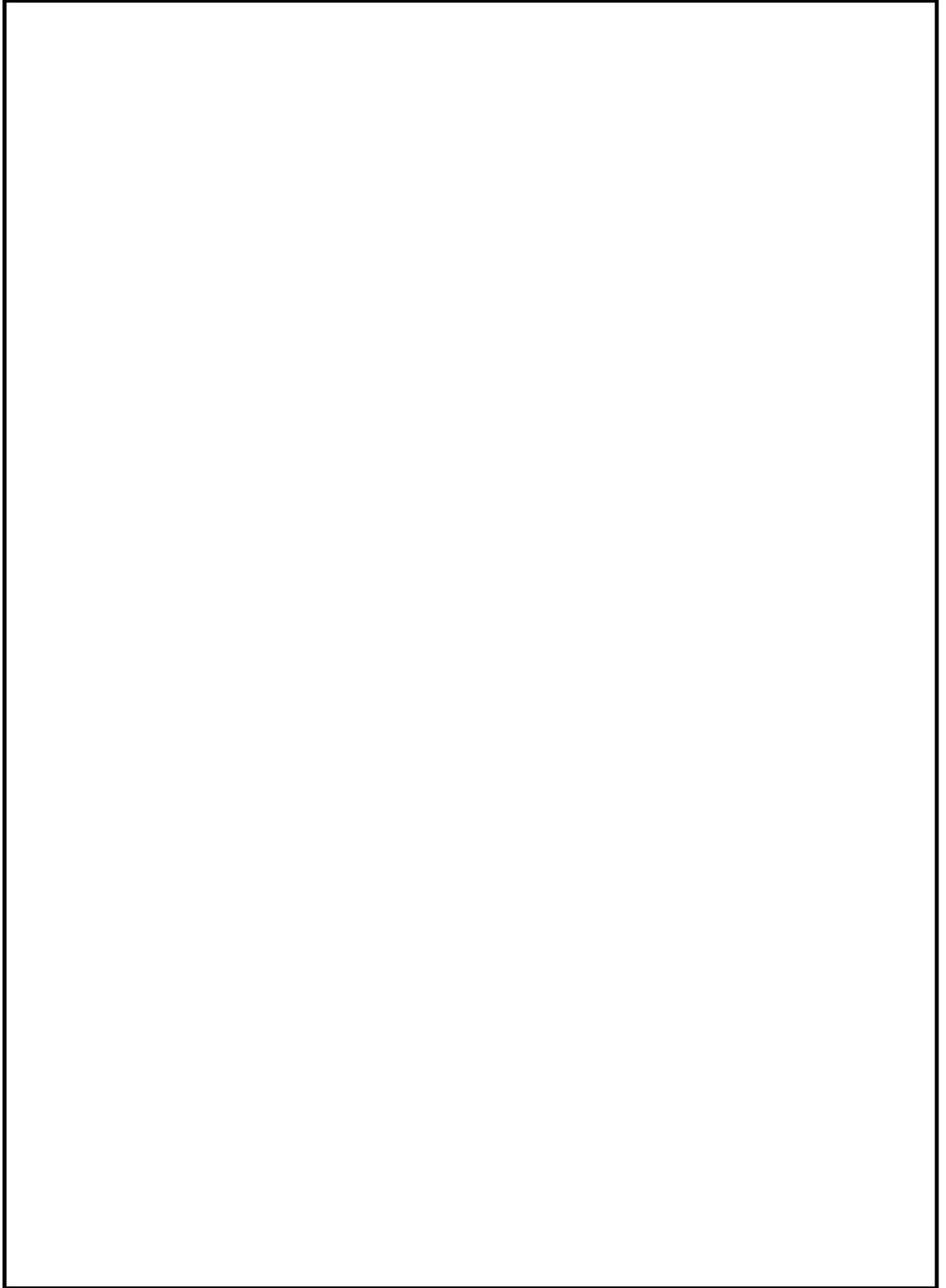


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(4/6)

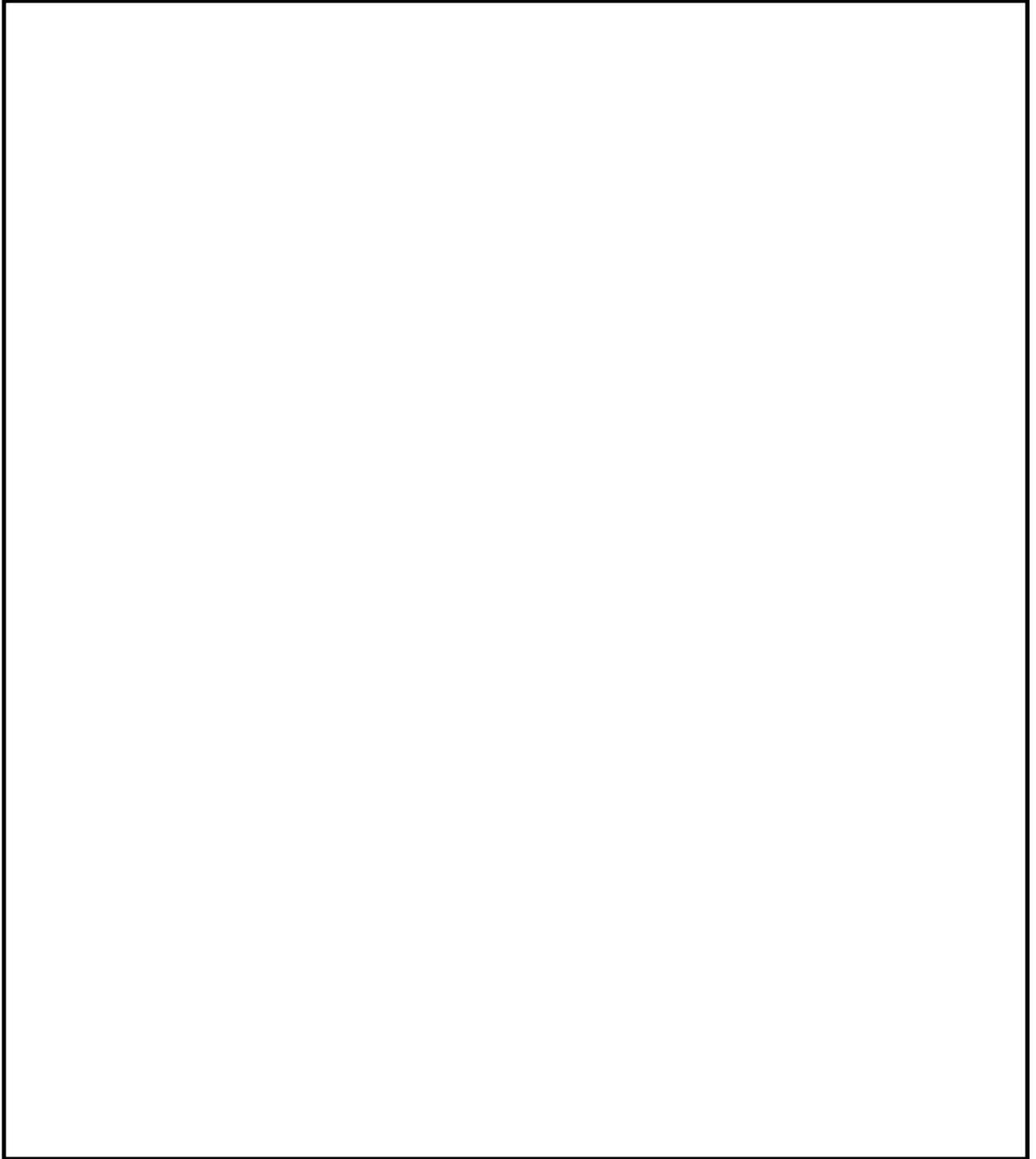


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(5/6)

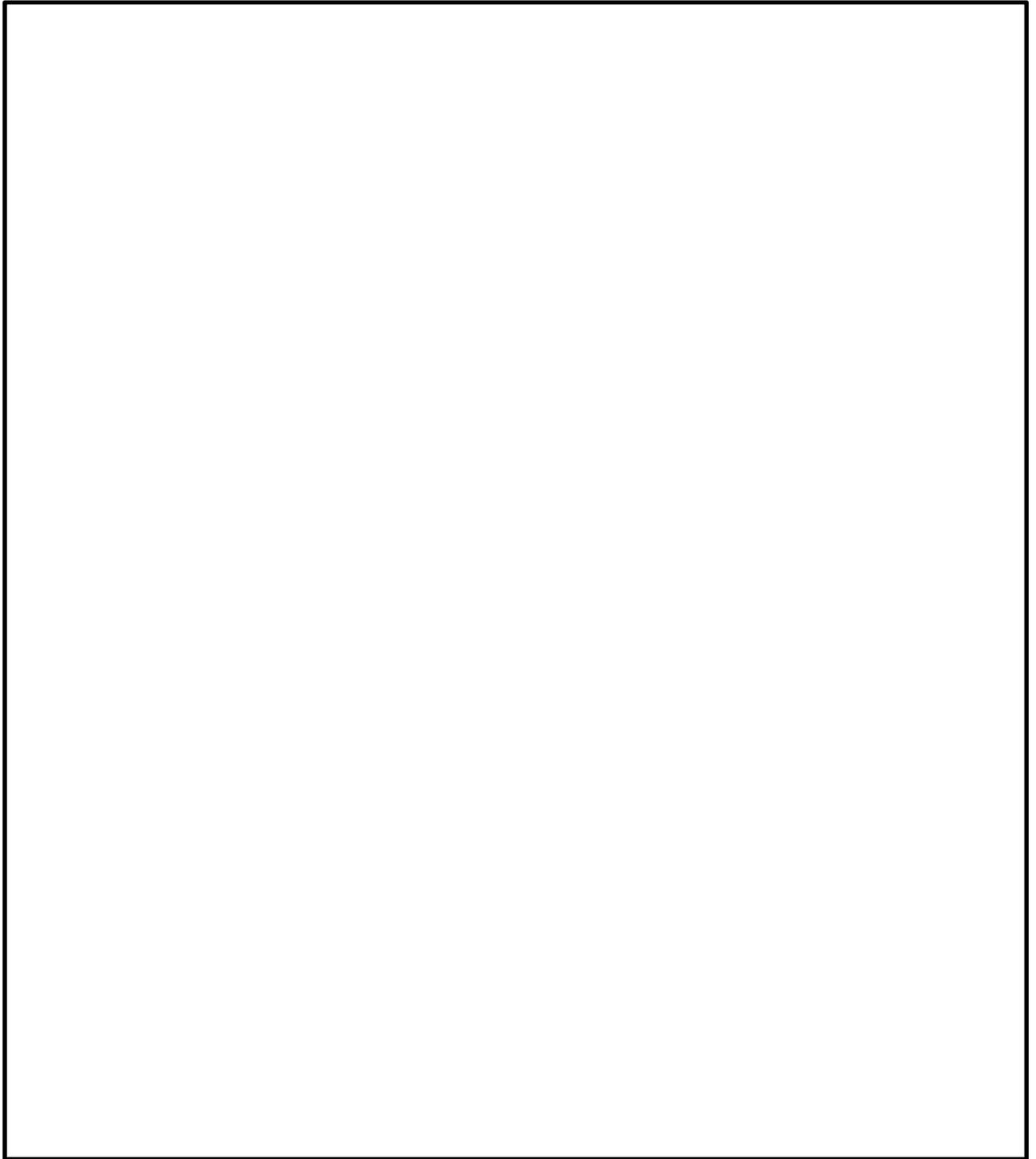


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(6/6)

(3) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構

海水ポンプエリア竜巻防護対策施設の架構は、防護ネット及び防護鋼板を設置するための鉄骨構造であり、防護対象施設である残留熱除去系海水系配管等を内包する施設として、柱、はり等により構成される。

海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構の構造図を図 2-4 に示す。

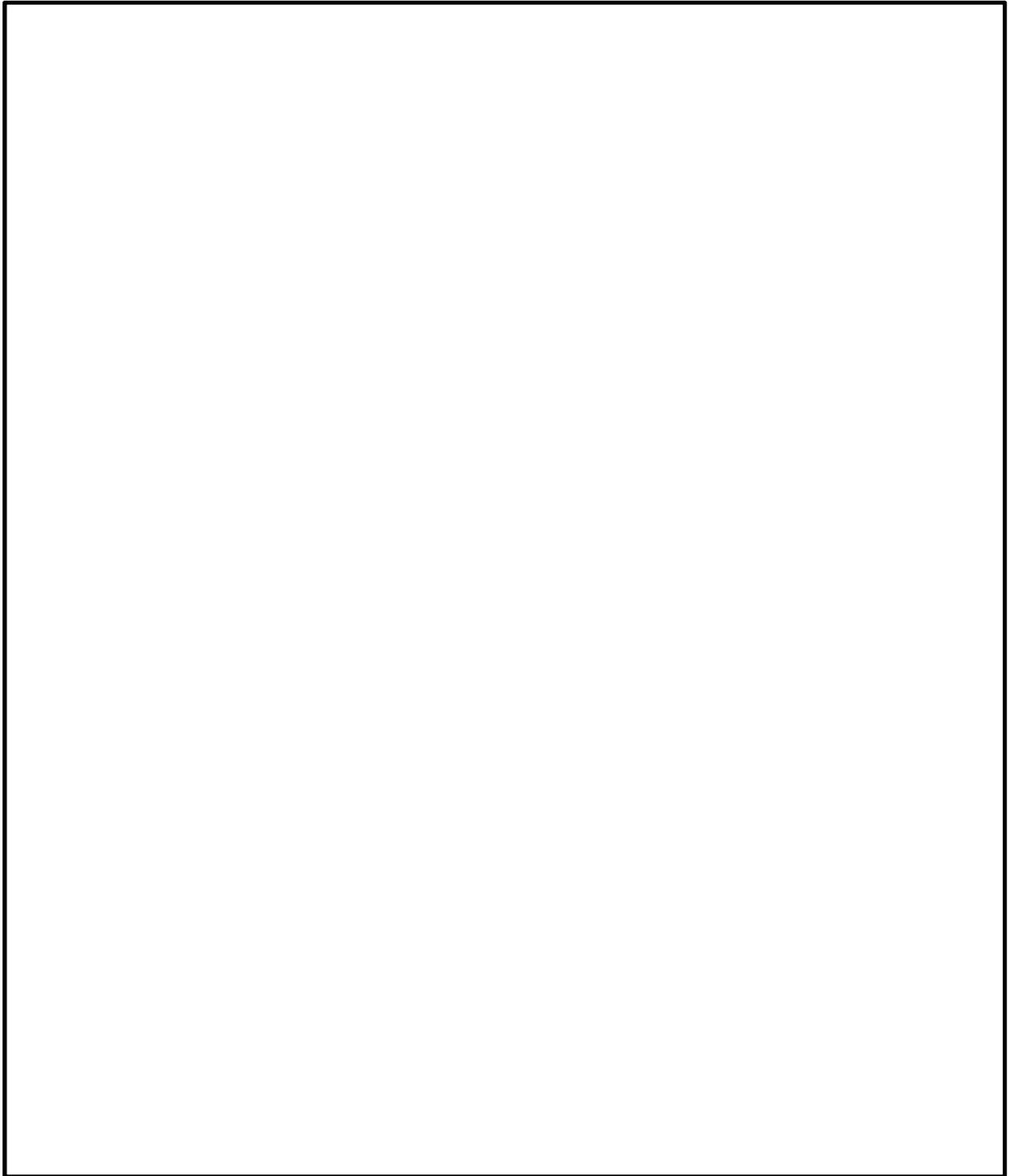


図 2-4 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構の構造図 (1/2) (エリア⑦)

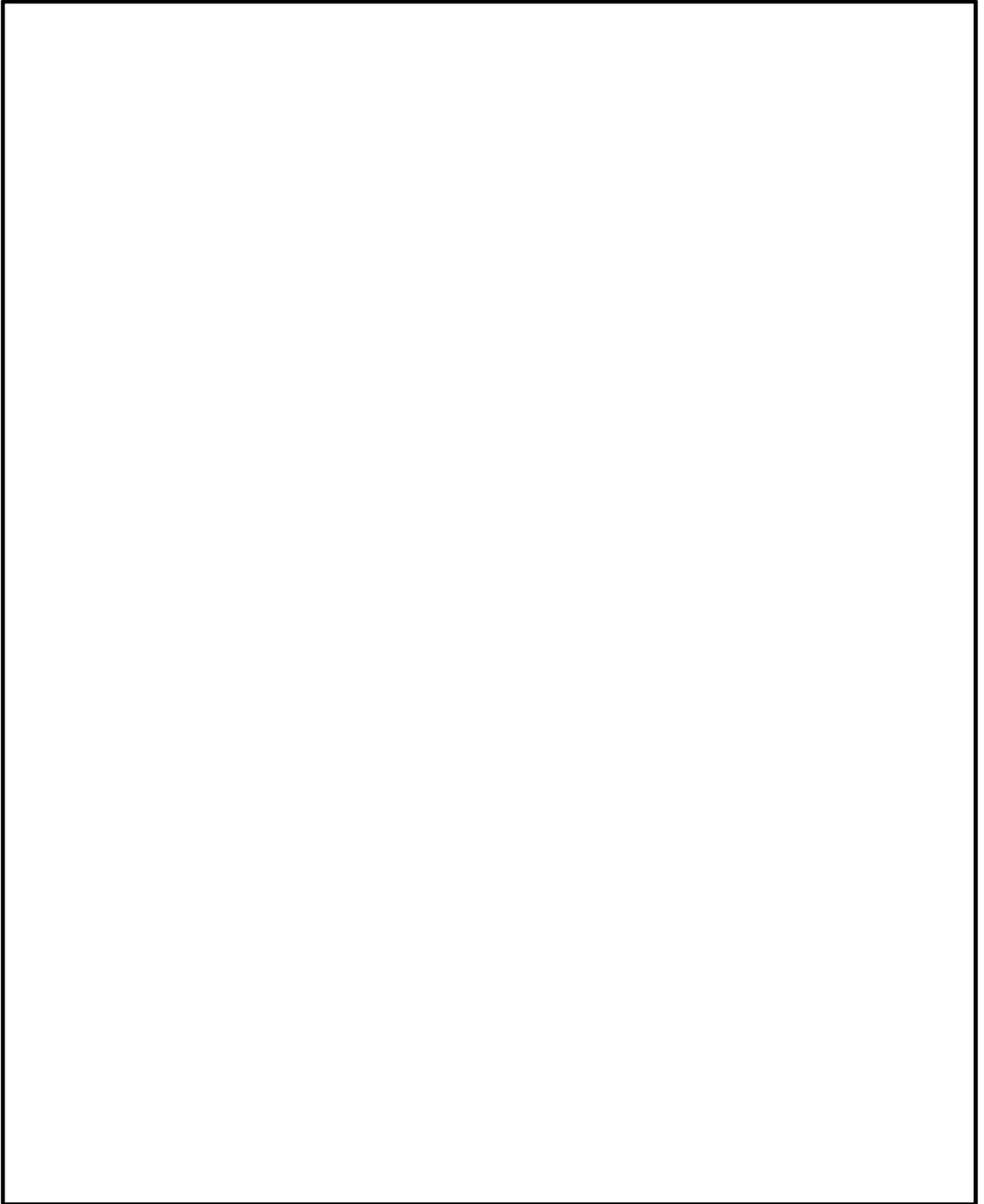


図 2-4 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構の構造図 (2/2) (エリア⑧)

(4) 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構

原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構は、防護ネット及び防護鋼板を設置するための鉄骨構造であり、防護対象施設である原子炉建屋外側ブローアウトパネル及び原子炉建屋原子炉棟 6 階設置設備（使用済燃料プール及び燃料プール冷却浄化系真空破壊弁）を内包する施設として柱、はり等により構成される。

原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構の構造を図 2-5 に示す。

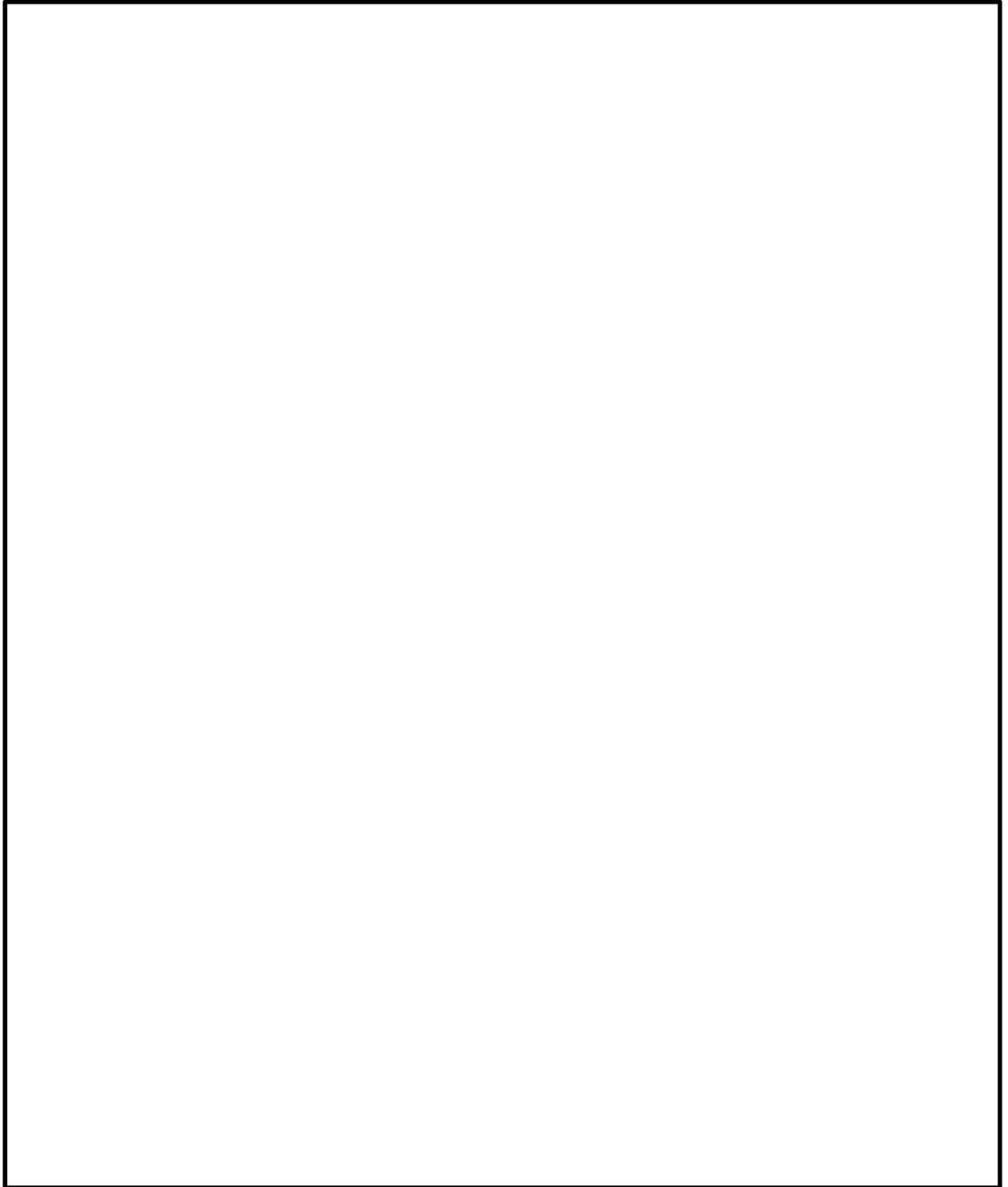


図 2-5 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構の構造図

(5) 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構

中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構は、防護鋼板を設置するための鉄骨構造であり、防護対象施設である中央制御室換気系ファン等を内包する施設として柱、はり等により構成される。

中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構の構造を図 2-6 に示す。

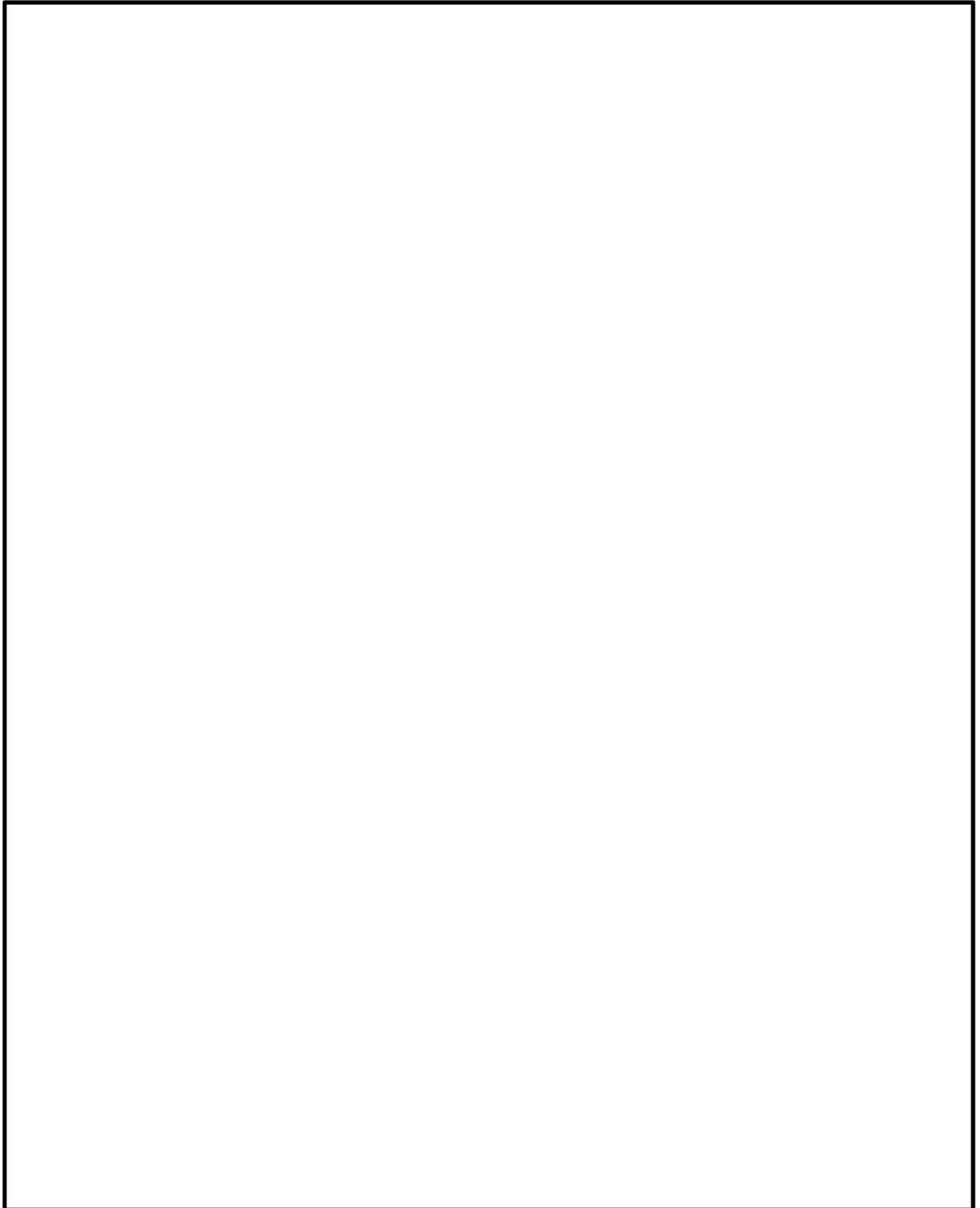


図 2-6 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構の構造図

(6) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構

使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構は、車両防止柵としての機能を有する鉄骨構造であり、柱、はり等により構成される。

使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構の構造を図 2-7 に示す。

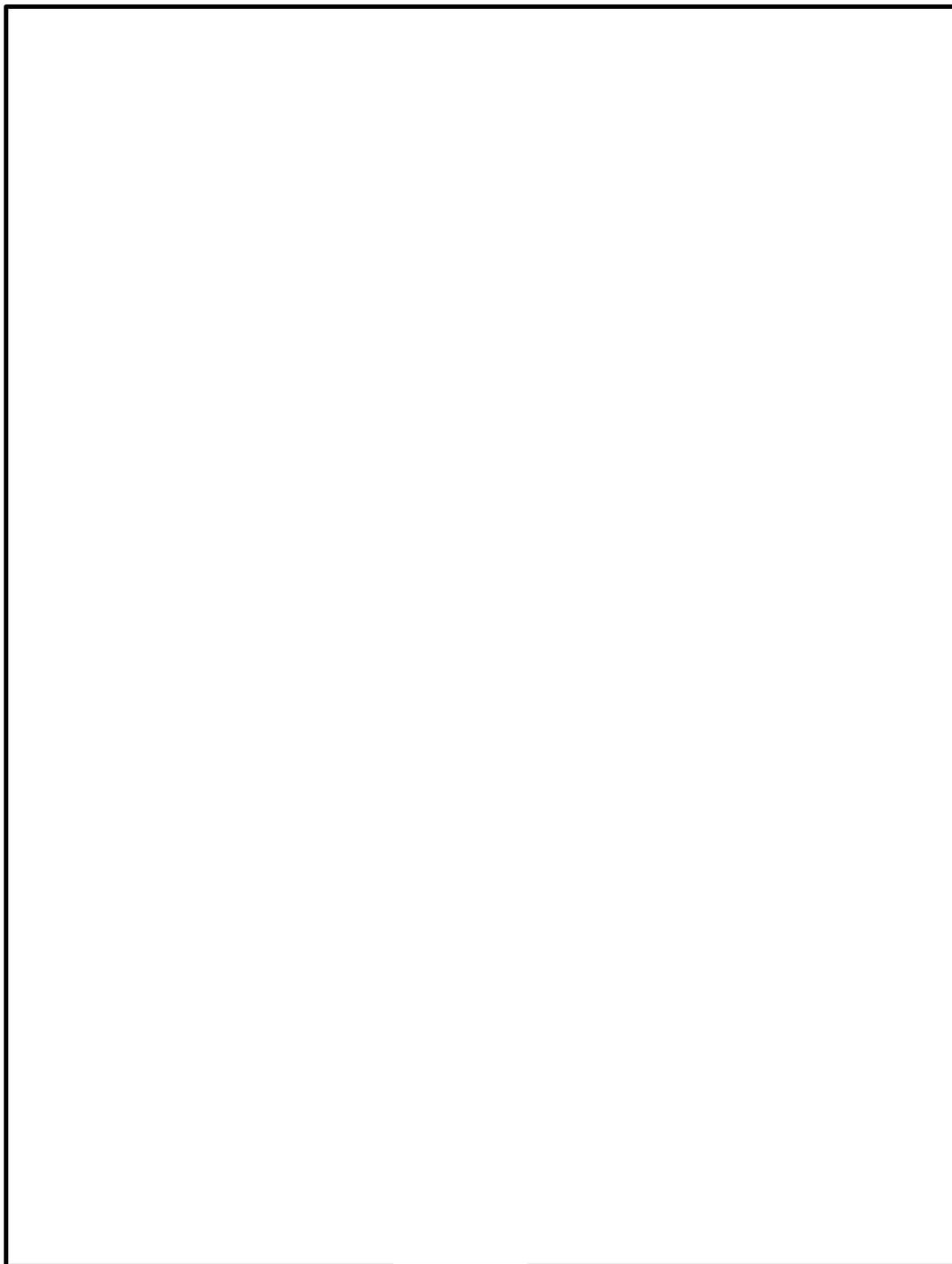


図 2-7 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構の構造図

2.3 評価方針

架構の強度計算は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」及び「5. 許容限界」にて設定している荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえて、架構の評価対象部位に作用する応力等が許容限界に収まることを「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

架構の評価フローを図 2-8 に示す。

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

具体的には、設計荷重に対して、防護対象施設の機能喪失に至る可能性のある飛来物が架構を構成する柱、はり等の部材（以下「架構部材」という。）を貫通し防護対象施設へ衝突しないことを確認するための、架構部材に対する貫通評価を実施する。また、架構に上載する防護ネット及び防護鋼板を支持する機能を保持可能な構造強度を有することを確認するための、架構部材及び架構全体に対する支持機能評価を実施する。

さらに、設計竜巻の風圧力による荷重及び飛来物による衝撃荷重並びにその他の荷重に対し、架構が倒壊し防護対象施設に機械的な波及的影響を与えないことを確認するための、波及的影響評価を実施する。

以下に、これらの評価にて確認する評価項目を示す。

(1) 貫通評価

飛来物の架構への直接衝突により、架構部材（母材部）を飛来物が貫通しないことを確認する。

(2) 支持機能評価

a. 架構部材の支持機能評価

飛来物の架構、防護ネット及び防護鋼板への衝突において、架構部材（母材部）に全断面欠損に至るようなひずみが生じないように、十分な余裕を持った強度が確保されていることを確認する。

b. 架構全体の支持機能評価

飛来物が衝突した際の衝撃荷重により架構全体に作用する応答加速度に対して、防護対策施設の倒壊に至るような架構の変形が生じないように、架構及び架構と建屋等の接合部に十分な余裕を持った強度が確保されていることを確認する。

(3) 波及的影響評価

波及的影響評価については、「2.3(2) 支持機能評価」の評価に同じ。

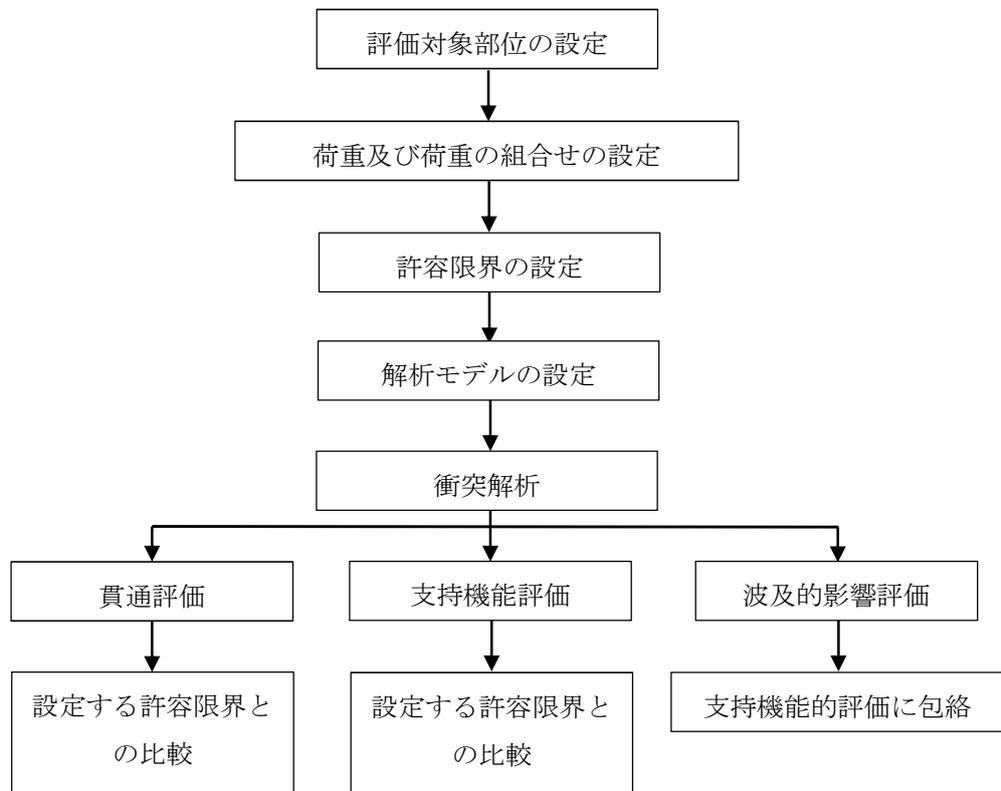


図 2-8 架構の評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準，指針等を以下に示す。

- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1-2005/2007」
（（社）日本機械学会（以下「JSME」という。））
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 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
- ・日本工業規格（JIS）
- ・「建築物荷重指針・同解説」（（社）日本建築学会，2004 改定）
- ・「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—」（（社）日本建築学会，2005 改定）
- ・「鋼構造接合部設計指針」（（社）日本建築学会，2012 改定）
- ・Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8(NEI 07-13))
- ・「伝熱工学資料（改訂第4版）」（（社）日本機械学会）

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

3.1.1 荷重の設定

荷重の設定に用いる記号を表 3-1 に示す。

表 3-1 荷重の設定に用いる記号

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

3.2 評価対象部位

3.2.1 貫通評価

(1) 車両に対する評価

車両防止柵の部材に対する車両の衝突は局部的な事象ではなく、貫通という損傷モードは考慮しない。（「3.2.2 支持機能評価」の中で、曲げに対する破断の有無を評価する）

(2) 鋼製材に対する評価

鋼製材の衝突を想定する架構部材の貫通評価として、飛来物が架構部材に直接衝突した場合についての解析を行う。架構部材の変形が最も大きくなるよう、架構部材のうち、部材厚さが薄く、長さが最短となるものを代表として抽出し解析を行う。

3.2.2 支持機能評価

架構全体の支持機能評価として、飛来物が防護対策設備に衝突した場合の架構全体の支持機能についての評価を行う。

本評価は、バネー質点系でモデル化した飛来物及び防護設備の応答解析結果より算出した、飛来物が衝突した際の衝撃荷重により架構全体に作用する応答加速度を用いた静的解析を行う。

この評価においては、各防護対象施設の架構及びアンカーボルトを評価対象部位として選定する。

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重は、別添 1-2 「防護対策施設の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」を踏まえて設定する。

3.3.1 荷重の設定

強度評価には以下の荷重を用いる。荷重の算定に用いる竜巻の特性値を表 3-2 に示す。

表 3-2 荷重の算定に用いる竜巻の特性値

| 最大風速 V_D (m/s) | 移動速度 V_T (m/s) | 最大接線風速 V_{Rm} (m/s) | 最大気圧低下量 ΔP_{max} (N/m^2) |
|------------------------|------------------------|-----------------------------|--|
| 100 | 15 | 85 | 8900 |

(1) 風圧力による荷重(W_w)

風圧力による荷重 W_w は、次式により算定する。

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

設計用速度圧 q は、次式により算定する。

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

(2) 飛来物による衝撃荷重(W_M)

飛来物による衝撃荷重(W_M)は、表 3-3 及び表 3-4 に示す飛来物の衝突に伴う荷重とする。

また、架構全体の支持機能評価に用いる衝撃荷重は、飛来物の衝突により施設に発生する応答加速度から算出する。応答加速度の算出方法及び結果については、「3.5(2)b.(c) 応答加速度の算出」に示す。

表 3-3 飛来物の諸元

| 飛来物 | 寸法 (m) | 質量 (kg) | 水平方向の 飛来速度 (m/s) | 鉛直方向の 飛来速度 (m/s) | 衝突対象 |
|-----|-------------|------------|------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| 車両 | 3.6×2.5×8.6 | 5000 | 52 | —※ | 使用済燃料乾式貯蔵容器 竜巻防護対策施設のうち、 車両防止柵 |
| 鋼製材 | 4.2×0.2×0.3 | 135 | 51 | 34 | 上記以外の防護対策施設 |

※：建屋排気口からの侵入は、構造上水平方向のみを考慮すれば良い。

表 3-4 飛来物の特性値

| 飛来物 | ヤング係数 (N/mm ²) | ポアソン比 | 剛性 (N/m) |
|-----|-------------------------------|-------|--------------------|
| 車両 | — | — | 2.94×10^3 |
| 鋼製材 | 2.05×10^5 | 0.3 | — |

(3) 常時作用する荷重(F_d)

架構部材の自重，架構に取り付く防護ネット及び防護鋼板等の荷重を考慮する。

3.3.2 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せは，V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」のとおり，風圧力による荷重，飛来物による衝撃荷重及び常時作用する荷重を組み合わせる。

荷重の組合せを表 3-5 に示す。

表 3-5 荷重の組合せ

| 評価内容 | | 荷重の組合せ |
|--------|------|-------------------|
| 貫通評価 | | $W_w + W_M + F_d$ |
| 支持機能評価 | 架構部材 | |
| | 架構全体 | |

3.4 許容限界

架構の許容限界は，V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5. 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえて，「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位の機能損傷モードを考慮して設定する。

貫通評価及び支持機能評価の許容限界を以下に示す。

(1) 貫通評価

飛来物である鋼製材の貫通防止を満足する許容限界として，部材が破断しない飛来物の貫入深さを設定する。架構部材のうちH形鋼はフランジ面を防護施設に対して外向きとして設定していることから，部材せいを貫入深さの許容限界とする。

貫通評価において許容限界とする部材せい位置を図 3-1 に示す。

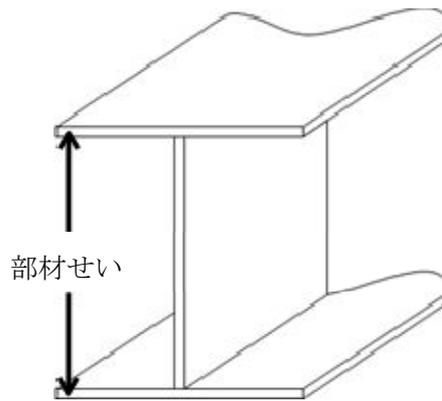


図 3-1 貫通評価における許容限界とする部材せい

(2) 支持機能評価

a. 架構部材の支持機能評価

飛来物が架構及び防護鋼板に衝突する場合は、衝突部において貫通が防止できても、架構部材が曲げ等により破断し架構の支持機能が保持されないことが考えられることから、その様な架構部材の破断が生じないことを確認する。

許容限界としては、FEM 解析を実施しない部材（使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設のうち、車両防止柵）については、発生する応力により判断し、FEM 解析を実施した部材については、鋼材の破断ひずみを基本として設定する。

車両防止柵の応力については、接触する部材をはりと見なしたモデルに基づき、弾性限界を許容限界として設定する。破断ひずみについては、「4. (1)c. (c) 破断ひずみ」に示すとおり、JIS に規定されている伸びの下限値を基に設定するが、「NEI 07-13 : Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs」（以下「NEI 07-13」という。）においてTF（多軸性係数）を とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF= を考慮して設定する。

最大ひずみが破断ひずみを超える場合には、破断箇所を確認し全断面に発生しないことを確認する。

設定した許容限界を表 3-6 に示す。

表 3-6 許容限界(架構部材の支持機能評価)

| 材質 | 許容限界 | 対象 |
|----|------|----|
| | | |

b. 架構全体の支持機能評価

飛来物が架構又は防護鋼板に衝突する場合、衝撃荷重により架構は衝突方向に変位するが、架構の終局耐力以上の荷重が作用した場合は、変位が止まらず倒壊に至る。防護対策施設の倒壊により防護対象施設に影響を与えないという観点で、許容限界を以下のとおり設定する。

鋼製材もしくは車両の衝突により塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が微小なレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有することを確認するため、JIS 規格及び建築学会「鋼構造設計規準」，「各種合成構造設計指針・同解説」に基づき設定した架構の許容応力を表 3-7 に、使用材料の許容応力を表 3-8 に示す。

表 3-7 許容応力(その他の支持構造物)

| 許容限界 (ボルト以外) | | | | 許容限界 (ボルト等) | |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|----------------|-----------|
| 一次応力 | | | | 一次応力 | |
| 引張 | せん断 | 圧縮 | 曲げ | 引張 | せん断 |
| $1.5 f_t$ | $1.5 f_s$ | $1.5 f_c$ | $1.5 f_b$ | $1.5 f_t$ | $1.5 f_s$ |

(注) 応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対しても評価を行う。

表 3-8 使用材料の許容応力(単位：MPa)

| 評価箇所 | 材料 | 評価用 温度 (°C) | S_y | S_u | 許容応力 | | | |
|-------------|------------------------------|-------------------|-------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | | | $1.5 f_t^*$ | $1.5 f_s^*$ | $1.5 f_c^*$ | $1.5 f_b^*$ |
| 架構 | SM400 ($5 < t \leq 16$) | 40 | 245 | 400 | 245 | 141 | (注 1) | (注 2) |
| | SM490 ($5 < t \leq 16$) | 40 | 325 | 490 | 325 | 187 | (注 1) | (注 2) |
| アンカー ボルト | SS400 | 40 | 235 | 400 | (注 3) | | | |

(注 1) 規定に基づき算出する。

(注 2) 規定に基づき算出する。

(注 3) 据付状況に応じ、適切な規定に基づき算出する。

3.5 評価方法

(1) 車両に対する評価

車両防止柵の強度評価は、架構全体の支持機能評価においては、解析コード「MSC/NASTRAN」を用いて、3次元 FEM モデルによりモデル化し評価を実施する。

(2) 鋼製材に対する評価

鋼製材の衝突を想定する架構の強度評価は、貫通評価及び架構部材の支持機能評価において

は、解析コード「LS-DYNA」を用いて 3 次元 FEM モデルによりモデル化し、架構全体の支持機能評価においては、非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構、中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構、中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構及び原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構においては、解析コード「MSC/NASTRAN」を、海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構は「Engineer's Studio」を用いて、3 次元 FEM モデルによりモデル化し評価を実施する。

なお、評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、別紙 1「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

(1) 貫通評価

飛来物の衝突による衝突箇所の衝突評価においては、架構の主要部材に飛来物を直接衝突させた解析を行うことで評価する。この評価では、図 3-2 に示すとおり、架構部材の解析モデルの評価対象部位に設計飛来物の解析モデルを衝突させた解析を行う。

飛来物による衝撃荷重は、架構部材の変形が最大となるよう、部材の中央に作用させることを基本とする。

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

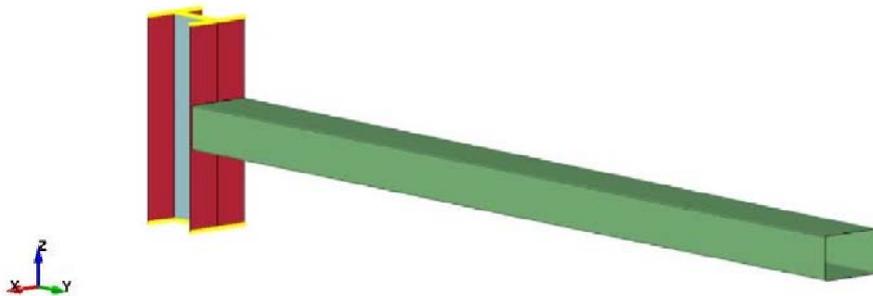


図 3-2 貫通評価モデル図(代表部材モデルと飛来物)

(2) 支持機能評価

a. 架構部材の支持機能評価

飛来物が架構部材に衝突する場合については、「3.5(1) 衝突評価」で評価した解析モデルにおいて、飛来物が架構部材に衝突する場合の架構部材端部に発生するひずみ量を算出し、架構部材端部に破断が生じないことを確認する。飛来物が架構部材に衝突場合に架構部材端部に破断が生じないことを確認することにより、その部材の近傍の部材についても、破断が生じないことを確認する。

最大ひずみが破断ひずみを超える場合には、破断箇所を確認し全断面に発生しないことを確認する。

b. 架構全体の支持機能評価

非常用ディーゼル発電機室ルーベントファン竜巻防護対策施設架構、中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構及び中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構、海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構、原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構及び使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構においては、架構全体の支持機能評価においては、飛来物が衝突した際の応答加速度を3次元FEMモデルの質点に入力し、設計竜巻の風圧力による荷重及び自重も考慮した静的解析を実施する。

(a) 解析モデル及び諸元

解析モデルは、防護壁を構成する架構部材をはり要素にてモデル化した3次元FEMモデルとする。

解析モデルを図3-3～図3-11に、用いられる部材の諸元を表3-14に示す。

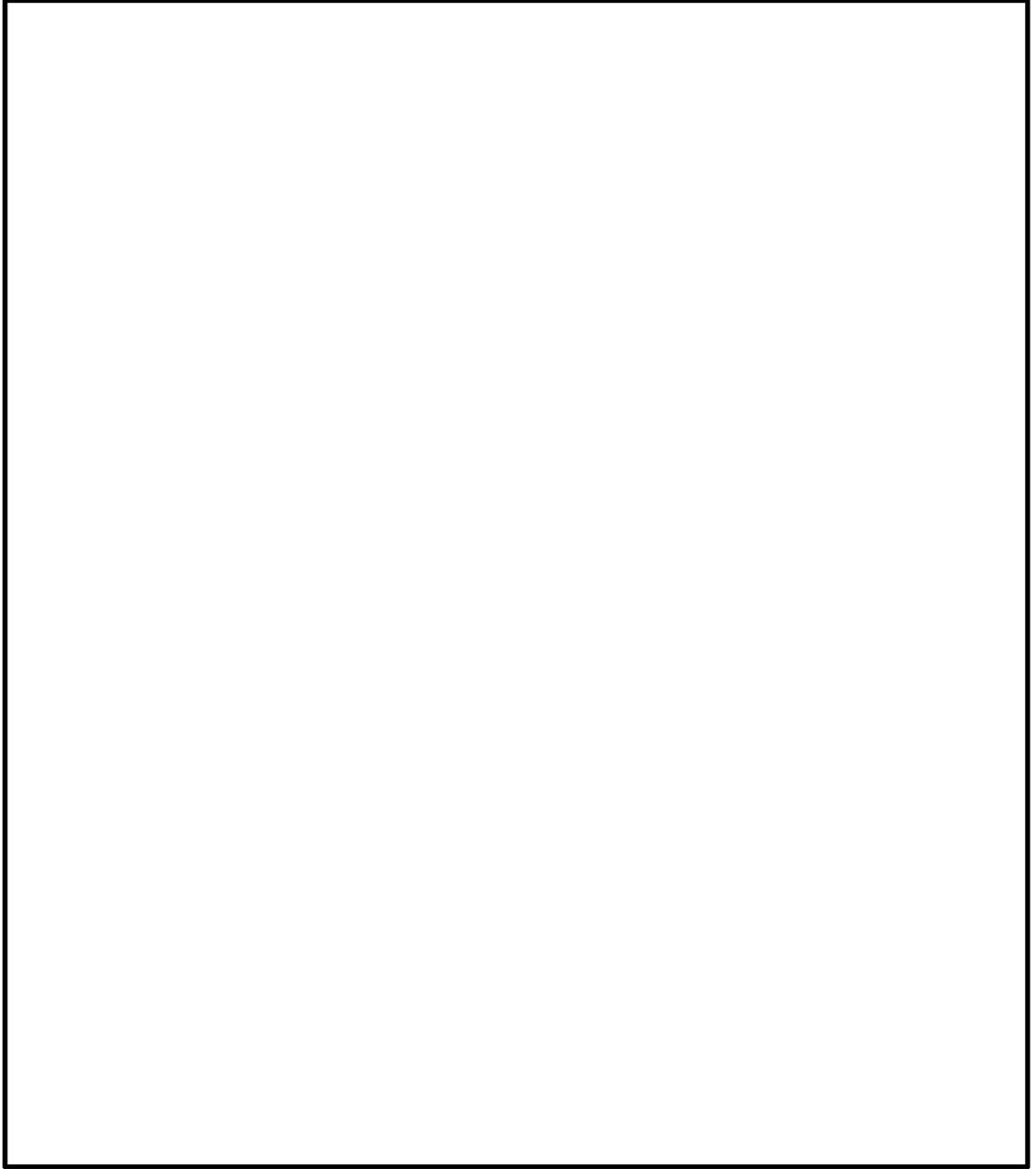


図 3-3 解析モデル図(非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設架構)



図 3-4 解析モデル図(中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構)

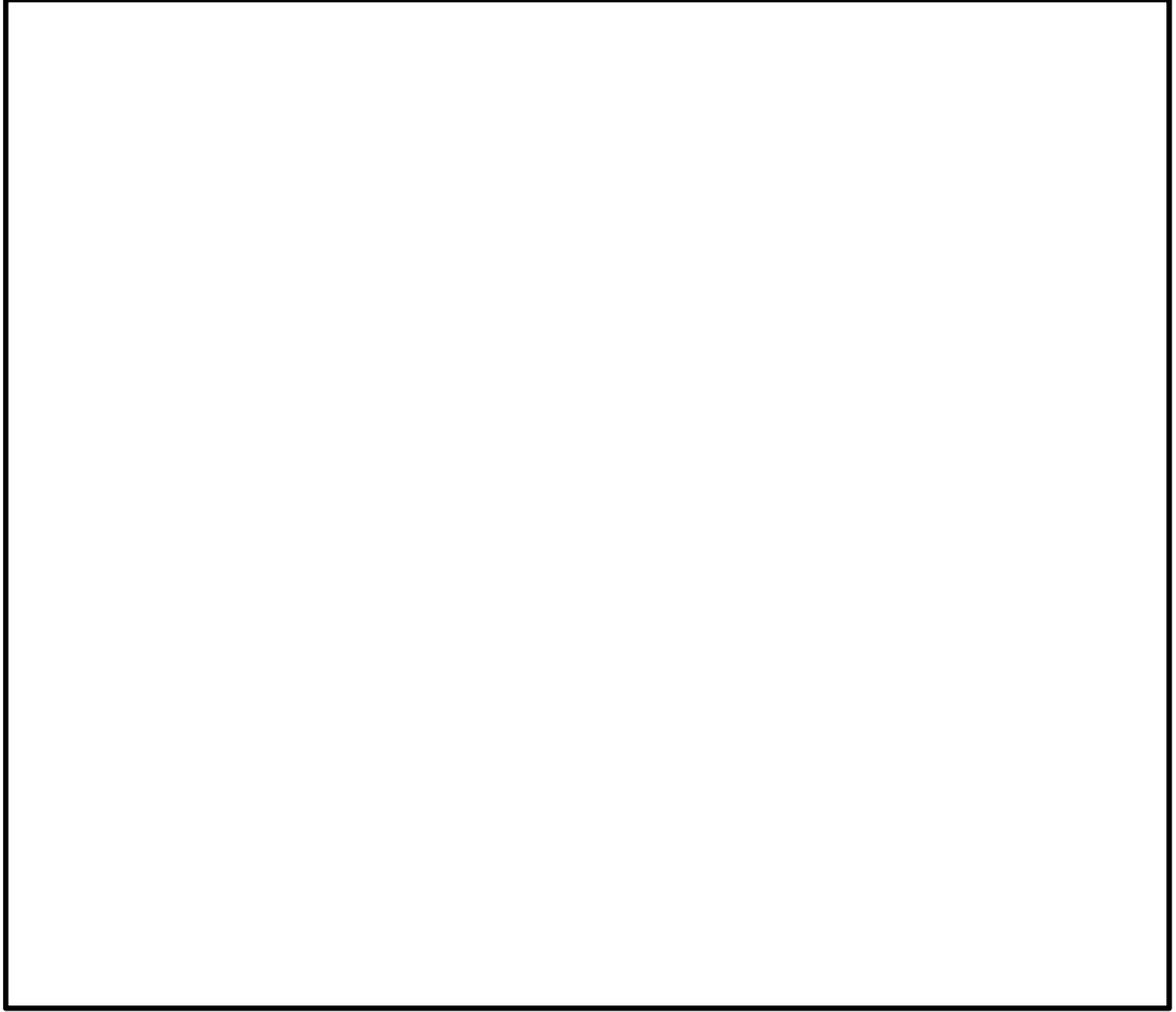


図 3-5 解析モデル図(海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構)

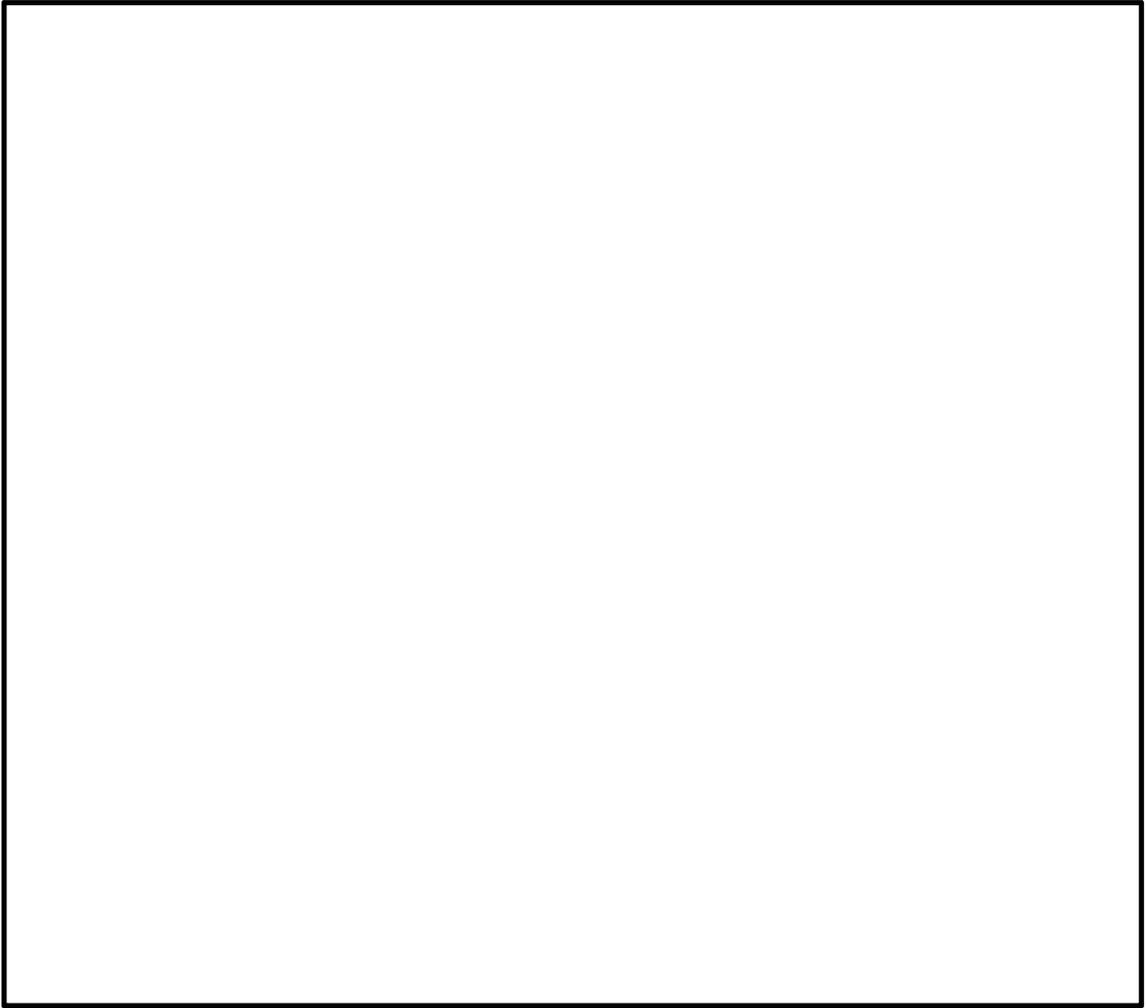


図 3-6 解析モデル図(原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構)

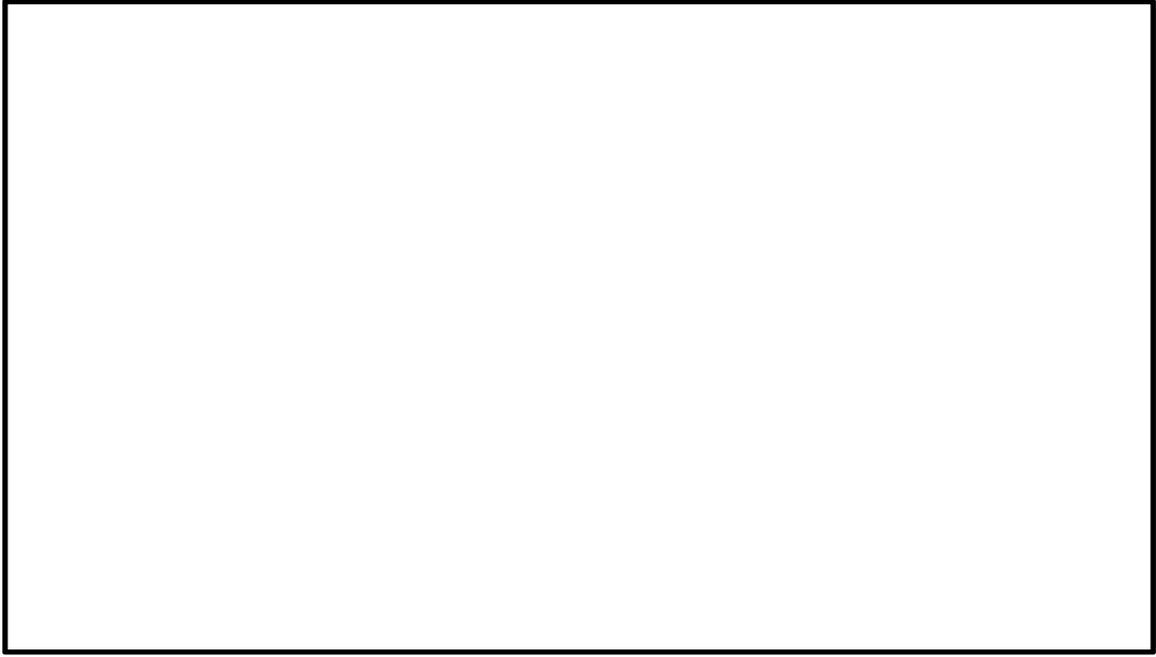


図 3-7 解析モデル図(中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構)

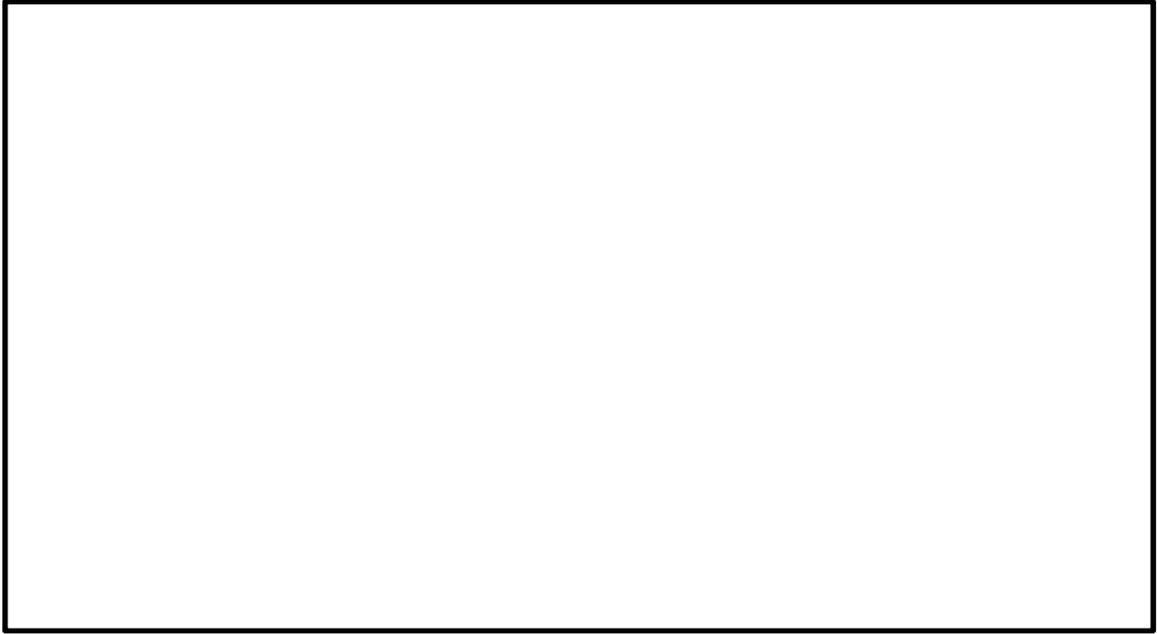


図 3-8 解析モデル図(使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構)

表 3-14 部材の諸元

| 項目 | 記号 | 単位 | 入力値 |
|-----------------|-------|-----|--------------------|
| 材質 | - | - | SM400, SM400 |
| 温度条件 (雰囲気温度) | T | °C | 40 |
| 縦弾性係数 | E | MPa | 2.05×10^5 |
| ポアソン比 | ν | - | 0.3 |

(b) 固有値解析

図 3-3～図 3-7 の解析モデルに対し、非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構、中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構、中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構及び原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構においては、解析コード「MSC/NASTRAN」を、海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構は「Engineer's Studio」を用いて、固有値解析結果を行う。

(c) 応答加速度の算出

設計 飛来物の衝突による防護対策施設の応答加速度は、解析コード「LS-DYNA」を用いて、飛来物を FEM モデル、防護対策施設を 1 自由度のバネ-質点系でモデル化し、両者の応答を連成させた評価により算出する。飛来物の衝突速度については、水平方向のバネ定数については水平方向の飛来速度を、鉛直方向のバネ定数については鉛直方向の飛来速度を用いる。なお、飛来物の解析モデル及び材料特性等は「3.5(1) 衝突評価」と同様である。

防護対策施設のバネ定数 k は、「3.5(2)b. (b) 固有値解析結果」にて算出した固有振動数 f と防護対策施設の質量 M を用いて以下の式で求める。

$$k = M(2\pi f)^2$$

ここで、固有振動数 f については、各方向において最も刺激係数が大きいモード振動次数のものを選定する。また、防護施設の質量 M については、応答加速度はバネ定数が大きい方が大きくなる傾向であることを踏まえ、防護施設の全体質量とする。

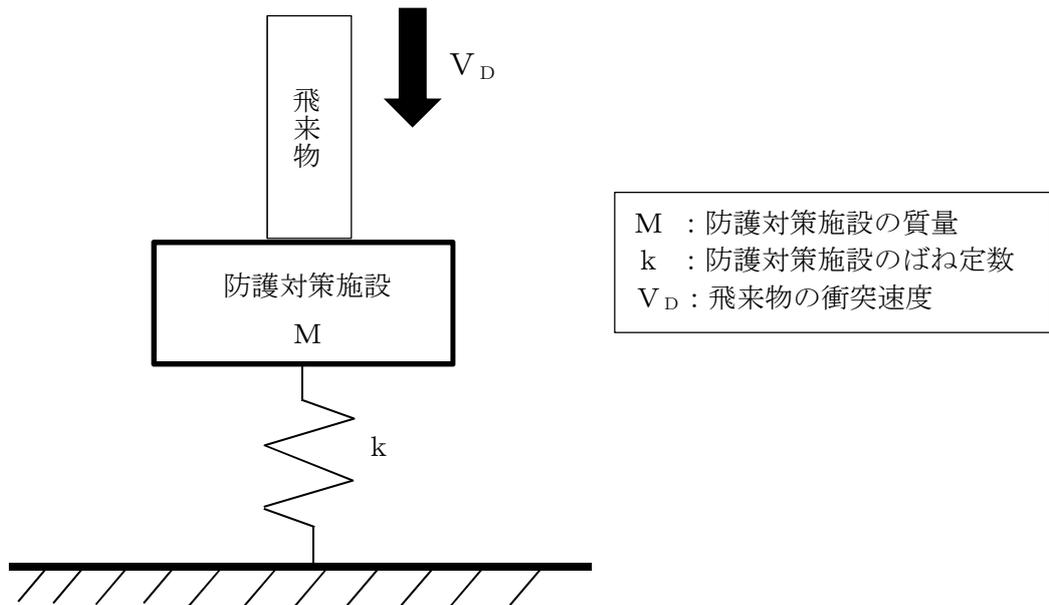


図 3-12 応答加速度評価モデル

車両の衝突による防護対策施設の応答加速度は、図 3-●に示す 2 自由度系のバネ質点モデルでモデル化し、両者の応答を連成させた評価により算出する。排気ガラルの位置で衝突する車両の衝突速度については、水平方向の飛来速度を用いる。

防護対策施設に作用する加速度 \ddot{x}_1 は、以下の式で求められる。

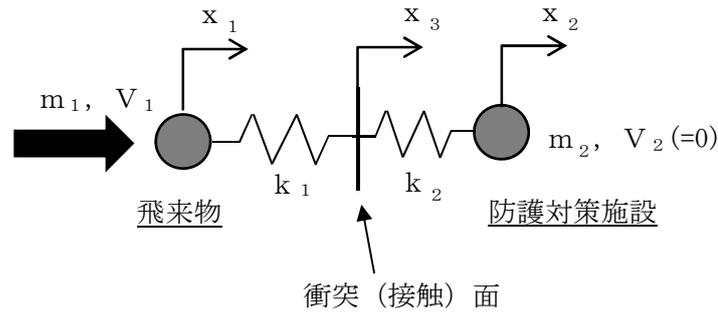
$$\ddot{x}_1 = \frac{m_n(v_2 - v_1)}{m_1} \omega \sin \omega t$$

ここで、

$$m_n = \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)}$$

$$\omega = \sqrt{k_n / m_n}$$

$$k_n = \frac{k_1 k_2}{(k_1 + k_2)}$$



m : 質量
 k : ばね定数
 x : (衝突時の) 初期位置からの変位
 V : (衝突時の) 初期速度

図 3-13 2 自由度系のバネ質点モデル

(d) 各部材の発生応力の算出

非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構，中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構及び中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構，海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構，原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構及び使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構においては，架構全体の支持機能評価においては，「3.5(2)b.(c) 応答加速度の算出」で算出した飛来物が衝突した際の応答加速度を図 3-3～図 3-7 に示す 3 次元 FEM モデルの各質点に入力し，設計竜巻の風圧力による荷重及び自重も考慮した静的解析により，各部材に生じる曲げモーメント，せん断力及び軸力を算出し，評価対象部位の発生応力を求め，許容限界に収まっていることを確認する。架構の応力計算式を表 3-25 に，アンカーボルトの応力計算式を表 3-26 に示す。

表 3-25 架構の応力計算式

| 応力の種類 | | 単位 | 応力計算式 |
|---------------------------------|--------|-----|--|
| 引張応力 σ_t | | MPa | $\frac{N_t}{A}$ |
| 圧縮応力 σ_c | | MPa | $\frac{N_c}{A}$ |
| 曲げ応力 σ_{by}, σ_{bz} | | MPa | $\frac{M_y}{Z_y}, \frac{M_z}{Z_z}$ |
| せん断応力 τ_y, τ_z | | MPa | $\frac{Q_y}{A_{s_y}}, \frac{Q_z}{A_{s_z}}$ |
| 組合せ 応力 | 圧縮+曲げ | - | $\max \left(\frac{\sigma_c}{1.5 f_c^*} + \frac{\sigma_{bz} + \sigma_{by}}{1.5 f_b^*}, \frac{\sigma_{bz} + \sigma_{by} - \sigma_c}{1.5 f_t^*} \right)$ |
| | 引張+曲げ | - | $\max \left(\frac{\sigma_t + \sigma_{bz} + \sigma_{by}}{1.5 f_t^*}, \frac{\sigma_{bz} + \sigma_{by} - \sigma_t}{1.5 f_b^*} \right)$ |
| | 曲げ+せん断 | - | $\max \left(\frac{\sigma_t + \sigma_{bz} + \sigma_{by}}{1.5 f_t^*}, \frac{\sigma_{bz} + \sigma_{by} - \sigma_t}{1.5 f_b^*} \right)$ |

ここで、

- A : 断面積 (mm)
- Z_y, Z_z : 断面係数 (Y, Z 軸回り) (mm)
- A_{s_y}, A_{s_z} : せん断断面積 (Y, Z) (mm)
- N_t, N_c : 軸力 (引張, 圧縮) (N)
- M_y, M_z : 曲げモーメント (Y, Z 軸回り) (N・mm)
- Q_y, Q_z : せん断力 (Y, Z 軸) (N)

表 3-26 ボルトの応力計算

| 応力の種類 | | 単位 | 応力計算式 |
|-----------------|--------|-----|------------------------------------|
| 引張応力 σ_b | | MPa | $\frac{F_x}{A_b}$ |
| せん断応力 τ_b | | MPa | $\frac{\sqrt{F_y^2 + F_z^2}}{A_b}$ |
| 組合せ 応力 | せん断+引張 | MPa | $\frac{F_x}{A_b}$ |

ここで

F_x, F_y, F_z : 引張力(X軸), せん断力(Y軸, Z軸) (N)

A_b : ボルトの断面積(mm²)

4. 評価条件

(1) 衝突評価及び架構部材の支持機能評価

a. 使用材料及び寸法

衝突評価の代表として選定する架構部材の仕様を表 4-1 に、飛来物の仕様を表 4-2 に示す。

表 4-1 架構部材の仕様

| 評価対象 | 評価部材番号 | 仕様 | | 材質 |
|---|--------|----------------------------|----------------------|-------|
| <ul style="list-style-type: none"> ・ 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構 ・ 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構 ・ 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構 ・ 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構 | ①-1 | H-300×300×10×15 長さ：900 | 部材破断評価 (部材せい：300) | SM490 |
| | ①-2 | H-300×300×10×15 長さ：6050 | たわみ評価 | |
| <ul style="list-style-type: none"> ・ 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構 | ②-1 | H-294×200×8×12 長さ：1250 | 部材破断評価 (部材せい：294) | SM400 |
| | ②-2 | H-294×200×8×12 長さ：8915 | たわみ評価 | |
| | ②-3 | H-294×200×8×12 長さ：8915 | | |

表 4-2 飛来物の仕様

| 飛来物 | サイズ 長さ×幅×高さ (m) | 質量 (kg) | 材質 |
|-----|-----------------------|------------|----|
| 鋼製材 | 4.2×0.3×0.2 | 135 | |

b. 材料定数

飛来物及び架構部材に使用する鋼材の材料定数を表 4-3 に示す。

材料定数は、JIS 及び「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—（社）日本建築学会（2005 改定）」に基づき設定する。

表 4-3 使用材料の材料定数

| | 材質 | 厚さ (mm) | 降伏応力 σ_y (MPa) | ヤング係数 E (MPa) | ポアソン比 |
|----------|-------|-----------------|--------------------------|--------------------|-------|
| 鋼製材 | SS400 | 5 を超え 16 以下 | 245 | 2.05×10^5 | 0.3 |
| 架構 部材 | SM400 | 5 を超え 16 以下 | 235 | 2.05×10^5 | 0.3 |
| | SM490 | 5 を超え 16 以下 | 245 | 2.05×10^5 | 0.3 |
| | | 16 を超え 40 以下 | 235 | 2.05×10^5 | 0.3 |

c. 動的解析における鋼製材料の非線形特性

飛来物の衝突に対する動的解析を行う場合は、衝撃問題で変形速度が大きいため、ひずみ速度効果を考慮する。

(a) 材料の応力—ひずみ関係

以下に示す Cowper—Symonds の式を適用する。

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

ここで、 $\sigma_{e q}$ は動的応力、A は降伏応力、B は硬化係数、 $\varepsilon_{p l}$ は相当塑性ひずみ、 $\dot{\varepsilon}_{p l}$ は無次元相当塑性ひずみ速度、n は硬化指数、D 及び q はひずみ速度係数を表す。ひこれらのパラメータを表 4-4 に示す。

表 4-4 Cowper-Symonds 式への入力パラメータ

| | | |
|----------------------|--------------|------|
| | 飛来物 (鋼製材) | 架構部材 |
| 材料 | | |
| B | | |
| n | | |
| D (s ⁻¹) | | |
| q | | |

材料の応力-ひずみ関係はバイリニア型とする。

バイリニア型応力-ひずみ関係の概念図を第 4-1 図に示す。

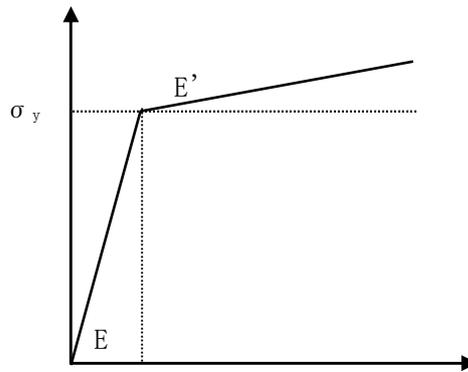


図 4-1 バイリニア型応力-ひずみ関係の概念図

(b) 破断ひずみ

破断ひずみは、JIS に規定されている伸びの下限値を基に設定する。また、「NEI 07-13」において T F (多軸性係数) を 2.0 とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕として T F=2.0 を考慮する。T F については、架構のみ 2.0 とする。

なお鋼製材は、保守的に破断ひずみを超えても要素を削除せず、荷重を負担するものとする。

材料ごとの破断ひずみを表 4-5 に示す。

表 4-5 架構部材の破断ひずみ

| ケース | 材質 | JIS 規格値 (伸び) | T F | 破断ひずみ※ |
|-----|----|-----------------|-----|--------|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |

※：真ひずみ換算値

(2) 架構全体の支持機能評価

a. 使用材料及び寸法

各架構に用いられる材料及び寸法は、表 4-1 で評価した部材の条件から逸脱しない様に選定する。

なお、衝突評価を実施しない、使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構については、表 4-6 のとおりとする。

表 4-6 架構の使用材料及び寸法の仕様

| 評価対象 | 評価部材番号 | | 材質 |
|---------------------------|--------|-----------------|-------|
| 使用済燃料乾式貯蔵容器 竜巻防護対策施設架構 | ③-1 | H-600×200×11×17 | SM490 |

b. 材料定数

架構の使用材料の材料定数を表 4-7 に示す。

表 4-7 架構の使用材料の材料定数

| 材料 | 単位体積重量 (kg/m ³) | ヤング係数 (N/mm ²) | ポアソン比 |
|----|--------------------------------|-------------------------------|-------|
| | | | |

5. 強度評価結果

5.1 貫通評価

飛来物の架構への貫通評価結果を表 5-1 に示す。

評価部材のすべてのケースにおいて貫入深さが部材せいを下回っており、架構部材の全断面喪失は発生しないため、飛来物が架構部材を貫通し、防護対策施設の内側に侵入することはない。

表 5-1 飛来物の架構部材への衝突評価結果

| 評価対象 | 評価部材番号 | 飛来物 | 貫入深さ (mm) | 許容限界 (mm) |
|------|--------|-----|--------------|--------------|
| 追而 | | | | |

5.2 支持機能評価

5.2.1 部材の支持機能評価

(1) 架構への衝突時の支持機能評価

飛来物の架構への衝突時の支持機能評価結果を表 5-2 に示す。架構部材端部に生じる最大ひずみは破断ひずみを下回っているため、架構部材端部で破断が生じることなく部材は支持される。また、部材の最大ひずみが破断ひずみを下回っていることから、荷重が作用する箇所の近傍の部材についても破断に至ることはない。

表 5-2 支持機能評価(架構部材への衝突時)

| 評価対象 | 評価部材番号 | 飛来物 | 最大ひずみ | 破断ひずみ (許容限界) |
|---|--------|-----|-------|-----------------|
| <ul style="list-style-type: none"> ・非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設架構 ・中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構 ・中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構 ・原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構 | | 追而 | | |
| 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構 | | | | |
| 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構 | | | | |

5.2.2 架構全体の支持機能評価

(1) 固有値解析

図 3-3～図 3-11 の解析モデルによる固有値解析結果を表 5-15～表 3-22 に示す。

表 3-15 固有振動数(非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構)

| 次数 | 質量 (kg) | 固有振動 数 (Hz) | 固有周期 (sec) | 刺激係数 | | | 卓越方向 |
|----|------------|-------------------|---------------|------|------|------|------|
| | | | | X 方向 | Y 方向 | Z 方向 | |
| | | | | | | | Z 方向 |
| | | | | | | | X 方向 |
| | | | | | | | Y 方向 |

表 3-16 固有振動数(中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構)

| 次数 | 質量 (kg) | 固有振動 数 (Hz) | 固有周期 (sec) | 刺激係数 | | | 卓越方向 |
|----|------------|-------------------|---------------|------|------|------|------|
| | | | | X 方向 | Y 方向 | Z 方向 | |
| | | | | | | | Z 方向 |
| | | | | | | | X 方向 |
| | | | | | | | Y 方向 |

表 3-17 固有振動数(海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構)

| 次数 | 質量 (kg) | 固有振動 数 (Hz) | 固有周期 (sec) | 刺激係数 | | | 卓越方向 |
|----|------------|-------------------|---------------|------|------|------|------|
| | | | | X 方向 | Y 方向 | Z 方向 | |
| | | | | | | | Z 方向 |
| | | | | | | | X 方向 |
| | | | | | | | Y 方向 |

表 3-18 固有振動数(原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構)

| 次数 | 質量 (kg) | 固有振動 数 (Hz) | 固有周期 (sec) | 刺激係数 | | | 卓越方向 |
|----|------------|-------------------|---------------|------|------|------|------|
| | | | | X 方向 | Y 方向 | Z 方向 | |
| | | | | | | | Z 方向 |
| | | | | | | | X 方向 |
| | | | | | | | Y 方向 |

表 3-19 固有振動数(中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構)

| 次数 | 質量 (kg) | 固有振動 数 (Hz) | 固有周期 (sec) | 刺激係数 | | | 卓越方向 |
|----|------------|-------------------|---------------|------|------|------|------|
| | | | | X 方向 | Y 方向 | Z 方向 | |
| | 追而 | | | | | | Z 方向 |
| | | | | | | | X 方向 |
| | | | | | | | Y 方向 |

表 3-20 固有振動数(使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構)

| 次数 | 質量 (kg) | 固有振動 数 (Hz) | 固有周期 (sec) | 刺激係数 | | | 卓越方向 |
|----|------------|-------------------|---------------|------|------|------|------|
| | | | | X 方向 | Y 方向 | Z 方向 | |
| | 追而 | | | | | | Z 方向 |
| | | | | | | | X 方向 |
| | | | | | | | Y 方向 |

(2) 応答加速度解析

図 3-防護対策施設の固有振動数を踏まえたバネ定数及び応答加速度の算出結果を表 3-23 に示す。

表 3-23 防護対策施設のバネ定数及び応答加速度

| | 全体質量 | | 方向 | | 固有振動数 | バネ定数 | 応答 | | | | | |
|-------------------------------|------|------|----|----|-------|-------|---------------------|----|----|----|----|----|
| | M | (kg) | | | f | k | 加速度 | | | | | |
| | | | | | (Hz) | (N/m) | (m/s ²) | | | | | |
| 非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設架構 | 追而 | 追而 | 水平 | X | 追而 | 追而 | 追而 | | | | | |
| | | | | Y | | | | | | | | |
| | | | 鉛直 | Z | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構 | | | 追而 | 追而 | | | | 水平 | X | 追而 | 追而 | 追而 |
| | | | | | | | | | Y | | | |
| | 鉛直 | Z | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構 | 追而 | 追而 | | | 水平 | X | 追而 | 追而 | 追而 | | | |
| | | | | | | Y | | | | | | |
| | | | 鉛直 | Z | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構 | | | 追而 | 追而 | 水平 | X | | | | 追而 | 追而 | 追而 |
| | | | | | | Y | | | | | | |
| | 鉛直 | Z | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構 | 追而 | 追而 | | | 水平 | X | 追而 | 追而 | 追而 | | | |
| | | | | | | Y | | | | | | |
| | | | 鉛直 | Z | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構 | | | 追而 | 追而 | 水平 | X | | | | 追而 | 追而 | 追而 |
| | | | | | | Y | | | | | | |
| | 鉛直 | Z | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| 水平 | Y | 追而 | | | 追而 | | | | | | | |
| | 鉛直 | | | | | Z | | | | | | |

注：太枠線は評価に用いる応答加速度を示す。

(3) 各部材の発生応力の算出

架構各部材に発生する応力の算出結果を表 5-3 に示す。

なお、評価結果は許容応力に対する発生応力の裕度が最も小さいものを記載している。

表 5-3 架構全体の支持機能評価結果

| | 評価部位 | 応力分類 | 発生応力 (MPa) | 許容限界 (MPa) | 備考 |
|--|-------------|------|---------------|---------------|----|
| 非常用ディーゼル発電機室 ルーベントファン竜巻防 護対策施設架構 | 架構 | | | | 追而 |
| | アンカー ボルト | | | | |
| 中央制御室換気系冷凍機竜 巻防護対策施設架構 | 架構 | | | | |
| | アンカー ボルト | | | | |
| 中央制御室換気系開口部竜 巻防護対策施設架構 | 架構 | | | | |
| | アンカー ボルト | | | | |
| 海水ポンプエリア竜巻防護 対策施設架構 | 架構 | | | | |
| | アンカー ボルト | | | | |
| 原子炉建屋外側ブローアウ トパネル竜巻防護対策施設 架構 | 架構 | | | | |
| | アンカー ボルト | | | | |
| 使用済燃料乾式貯蔵容器竜 巻防護対策施設架構 | 架構 | | | | |
| | アンカー ボルト | | | | |

(注) ボルトの引張応力とせん断応力との組合せ応力 f_{ts} の評価基準値は以下の通り。

$$f_{ts} = 1.4 \times 1.5 f_t^* - 1.6 \tau$$

且つ

$$f_{ts} \leq 1.5 f_t^*$$

ここで、

τ : ボルトに作用するせん断応力