

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 17 |
| 提出年月日 | 平成 30 年 5 月 15 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 1-1-1 竜巻より防護すべき施設を内包する施設の
強度計算書

目次

| | | |
|-----|-----------------|----|
| 1. | 概要..... | 1 |
| 2. | 基本方針..... | 1 |
| 2.1 | 位置..... | 1 |
| 2.2 | 構造概要..... | 2 |
| 2.3 | 評価方針..... | 12 |
| 2.4 | 適用規格..... | 14 |
| 3. | 強度評価方法..... | 15 |
| 3.1 | 記号の定義..... | 15 |
| 3.2 | 評価対象部位..... | 16 |
| 3.3 | 荷重及び荷重の組合せ..... | 17 |
| 3.4 | 許容限界..... | 20 |
| 3.5 | 評価方法..... | 23 |
| 4. | 評価条件..... | 45 |
| 4.1 | 貫通評価..... | 45 |
| 4.2 | 裏面剥離評価..... | 47 |
| 4.3 | 変形評価..... | 47 |
| 5. | 強度評価結果..... | 53 |
| 5.1 | 貫通評価..... | 53 |
| 5.2 | 裏面剥離評価..... | 54 |
| 5.3 | 変形評価..... | 55 |

1. 概要

本資料は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、竜巻より防護すべき施設を内包する施設である原子炉建屋、タービン建屋、使用済燃料乾式貯蔵建屋（以下「建屋」という。）及び軽油貯蔵タンクタンク室（以下「構造物」という。）が、設計飛来物（以下「飛来物」という。）の衝突に加え、風圧力及び気圧差に対し、竜巻時及び竜巻通過後においても、竜巻より防護すべき施設の安全機能を損なわないよう、内包する竜巻より防護すべき施設に飛来物が衝突することを防止する機能を有すること及び竜巻より防護すべき施設に必要な機能を損なわないことを確認するものである。

2. 基本方針

建屋及び構造物について、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、建屋及び構造物の「2.1 位置」，「2.2 構造概要」，「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

2.1 位置

建屋及び構造物の配置図を図2-1に示す。

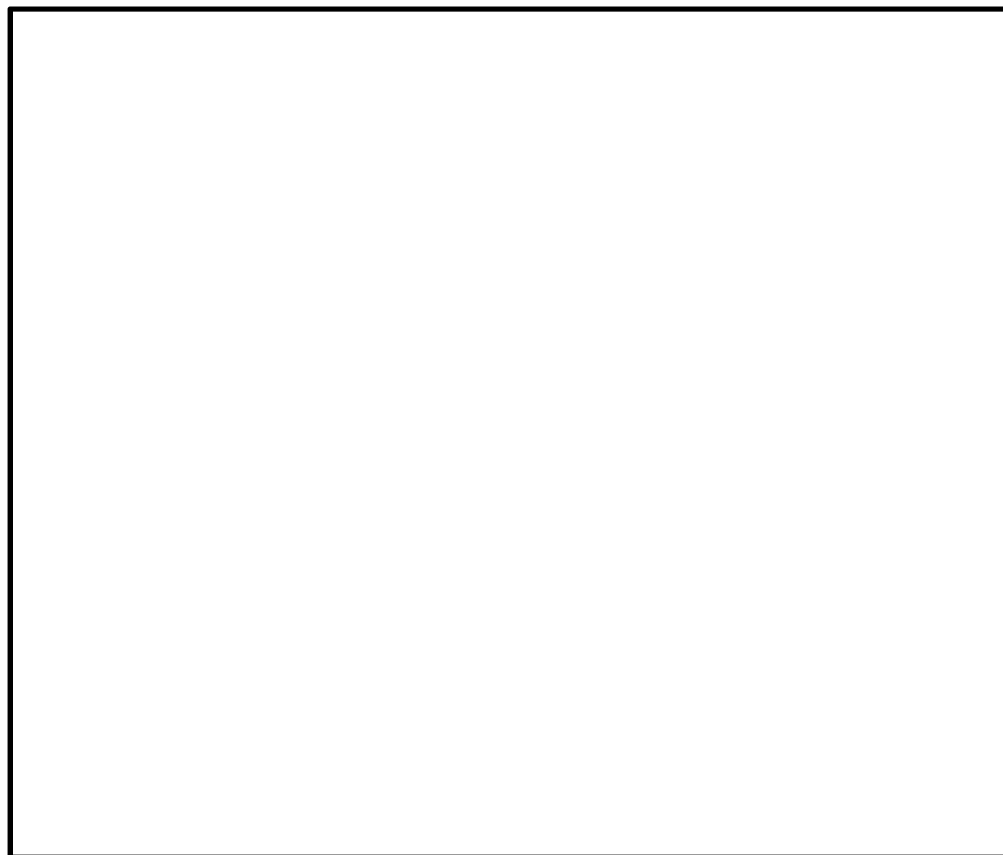


図 2-1 建屋及び構造物の配置図

2.2 構造概要

建屋及び構造物は、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画とする。

建屋は、主体構造が鉄筋コンクリート造で、一部鉄骨造を有する構造である。また、原子炉建屋には、外殻を構成する部材として鋼製の原子炉建屋大物搬入口扉（原子炉建屋原子炉棟水密扉及び機器搬入口内側扉）、原子炉建屋付属棟 1 階電気室搬入口水密扉等の扉が設置されている。

軽油貯蔵タンクタンク室は、地中に埋設された構造物であり、地上部に露出する頂版を含めた外殻の躯体は鉄筋コンクリート造とし、地上部に露出する開口部の蓋は鋼製である。

建屋及び構造物の概略平面図及び概略断面図を図 2-2～図 2-9 に示す。

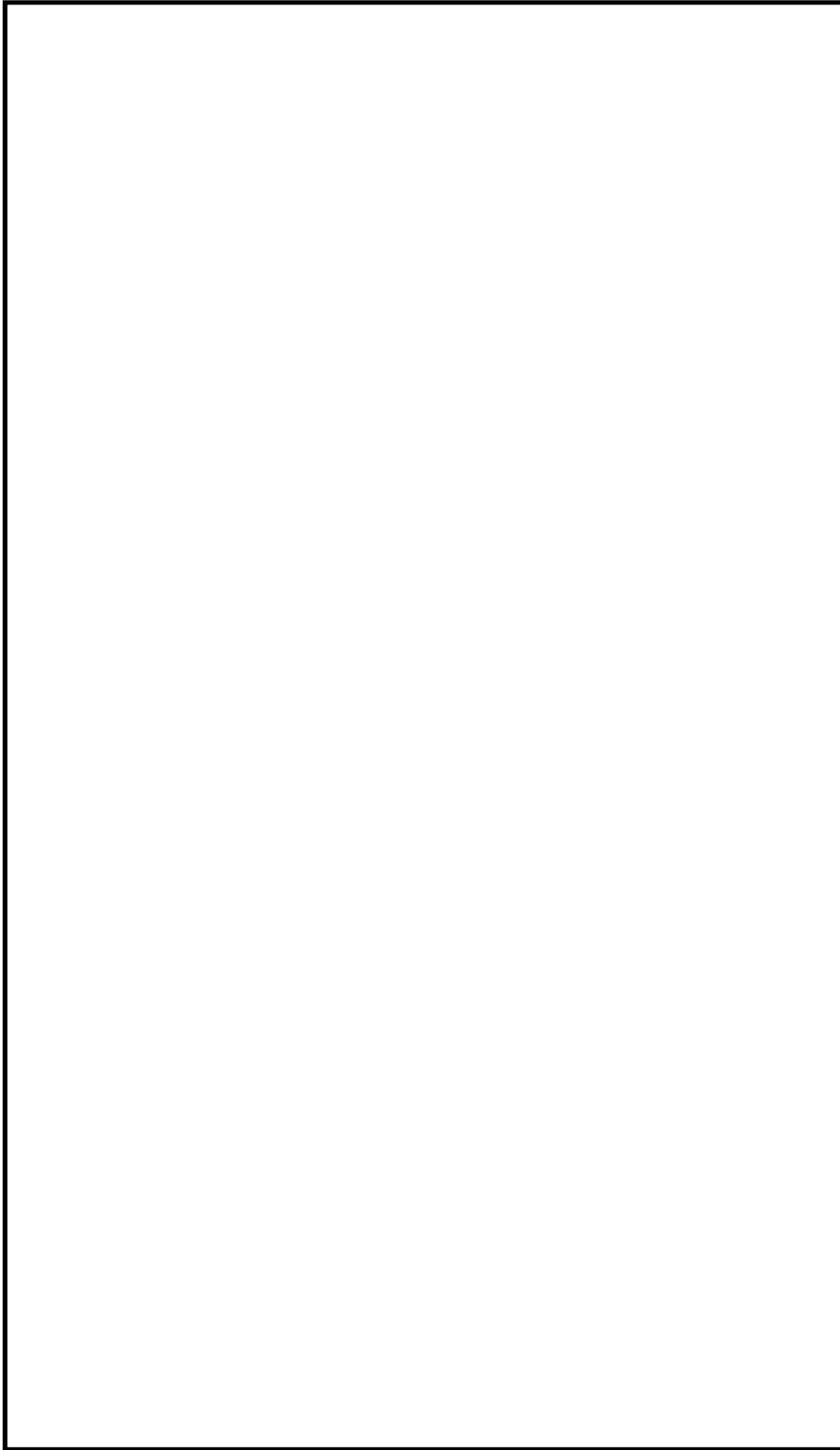


図2-2 原子炉建屋の概略平面図

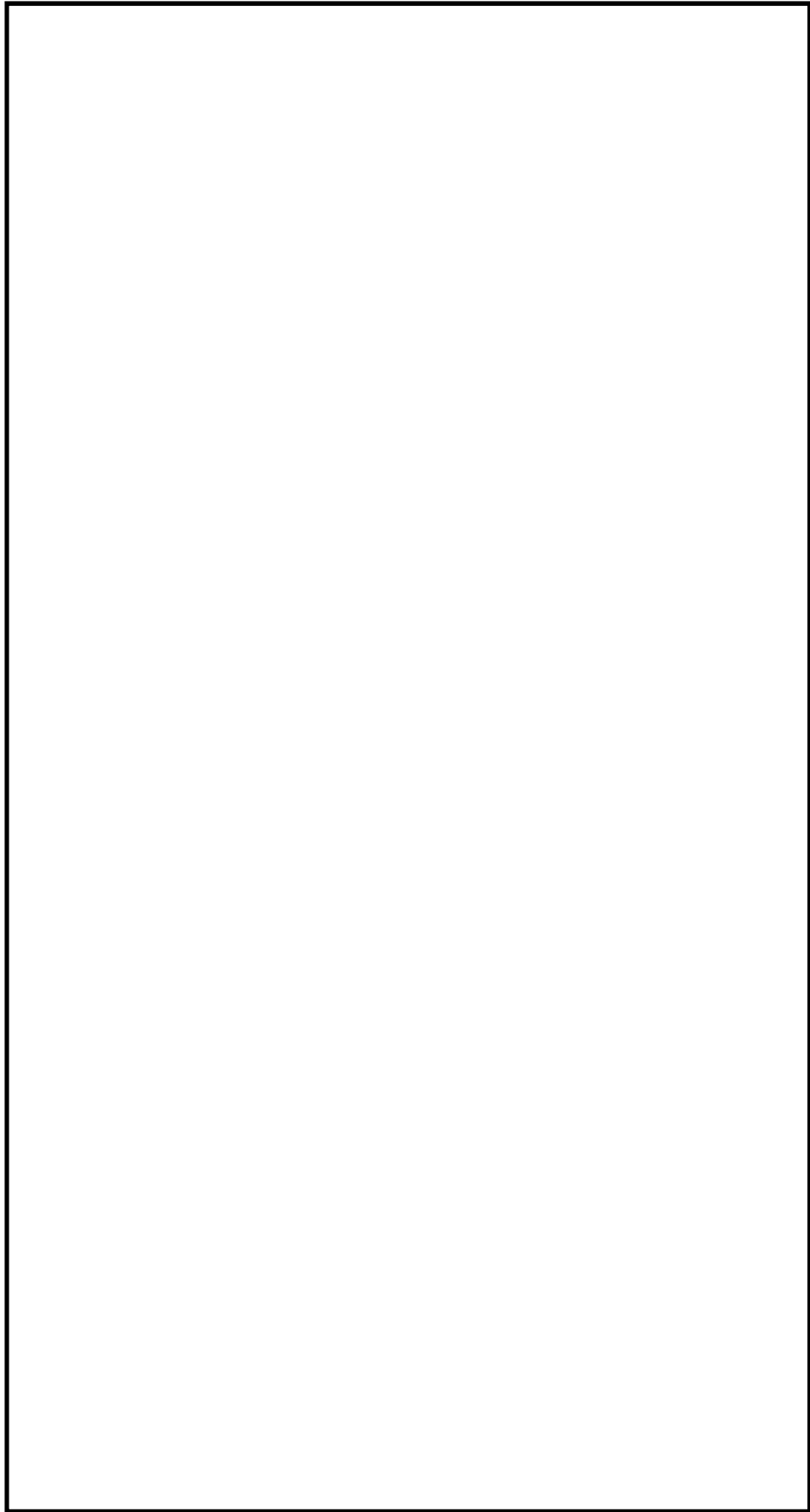


図 2-3 原子炉建屋の概略断面図(1/2)

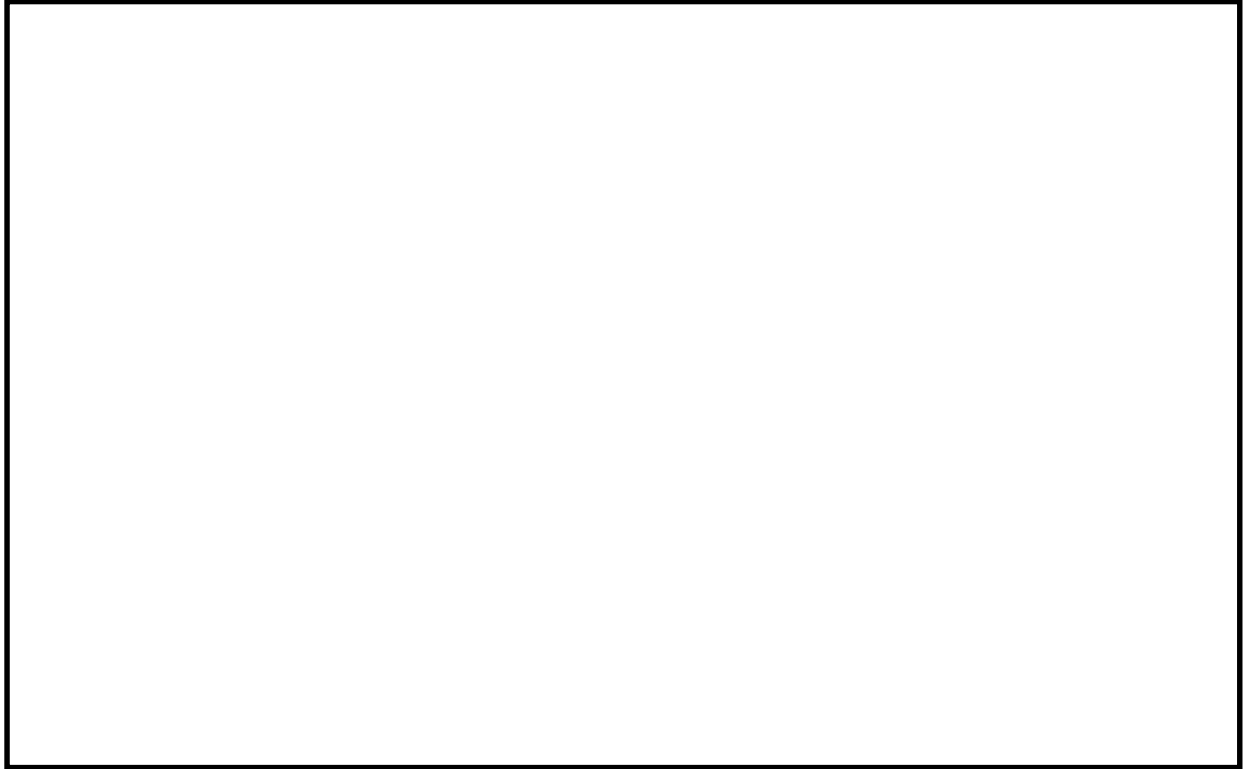


図 2-3 原子炉建屋の概略断面図(2/2 : 鉄骨構造部)

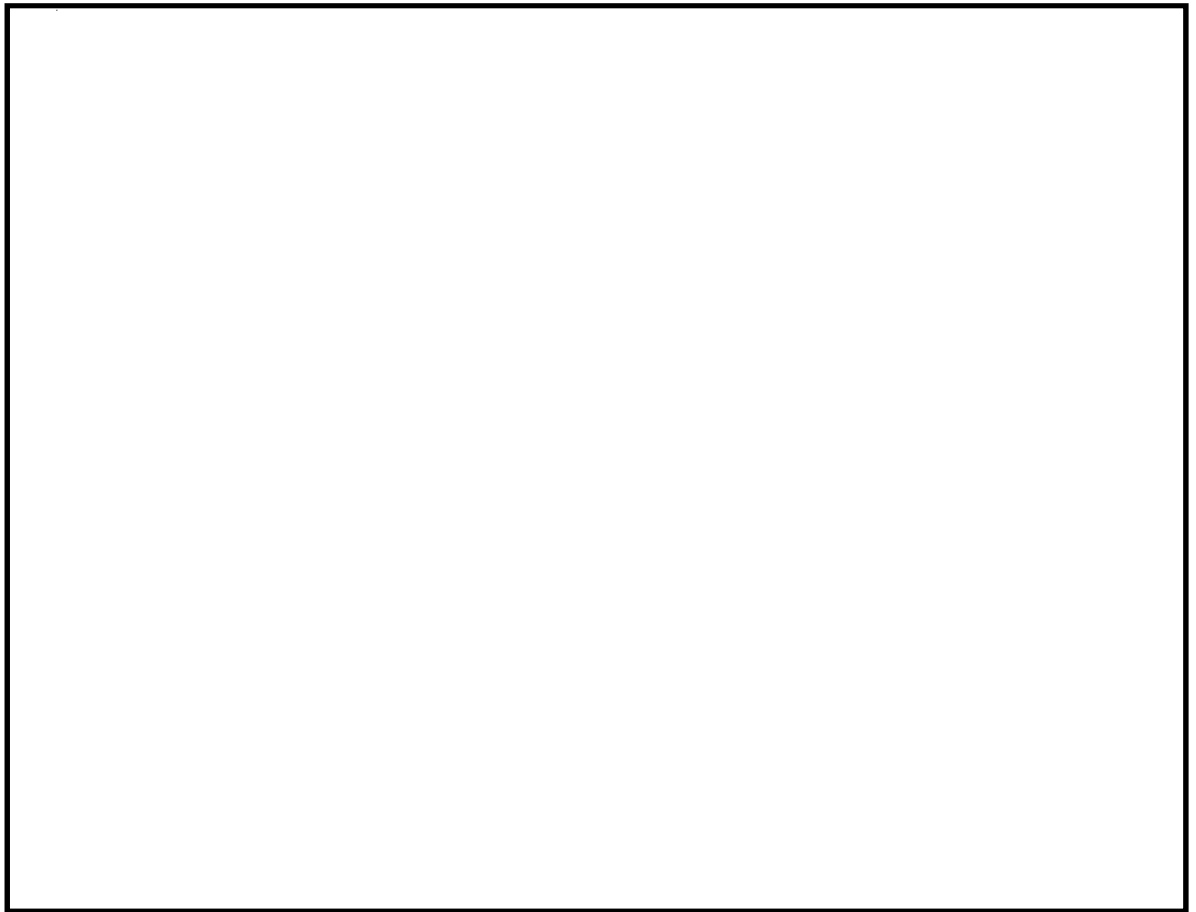


図 2-4 タービン建屋の概略平面図

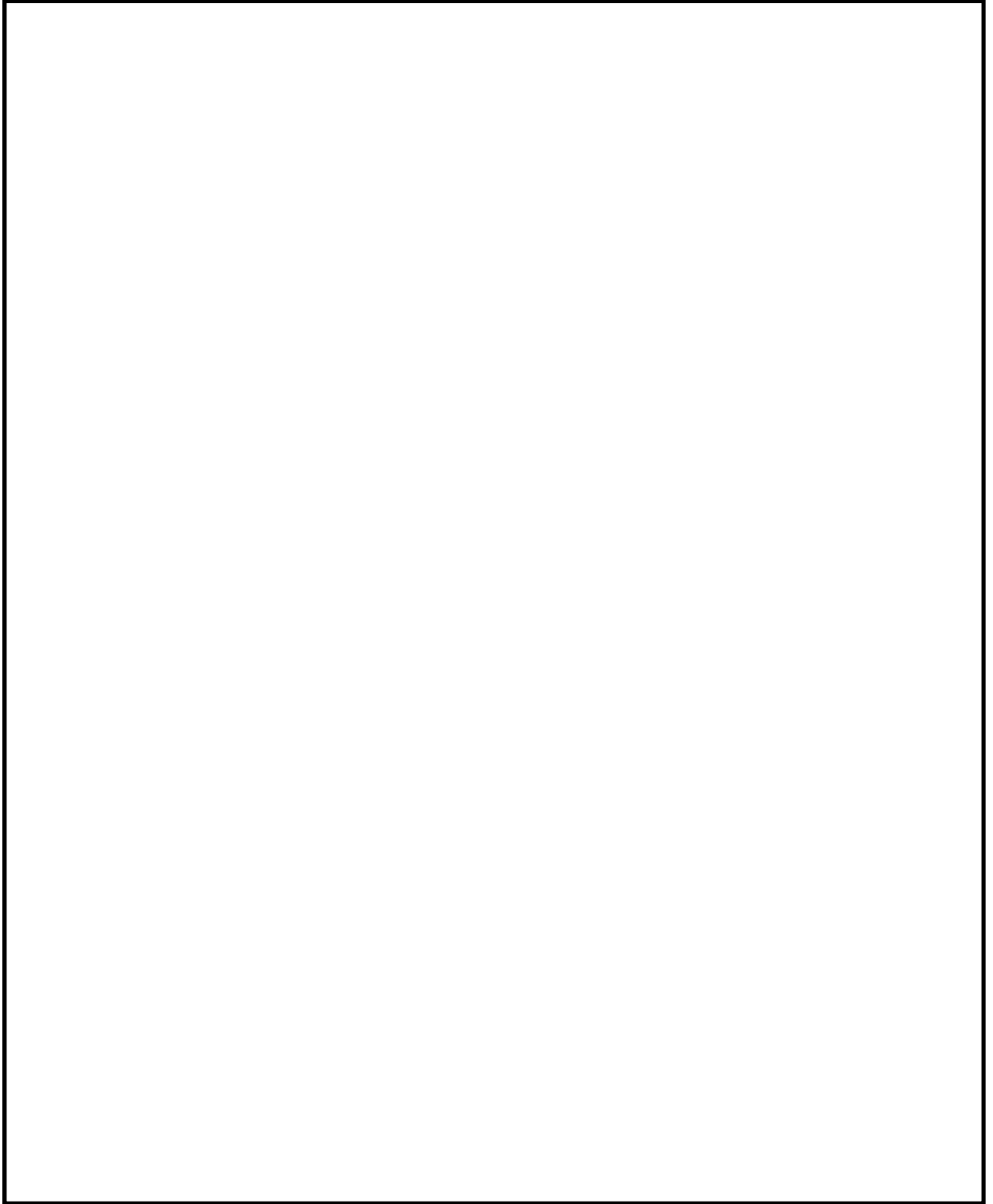


図 2-5 タービン建屋の概略断面図

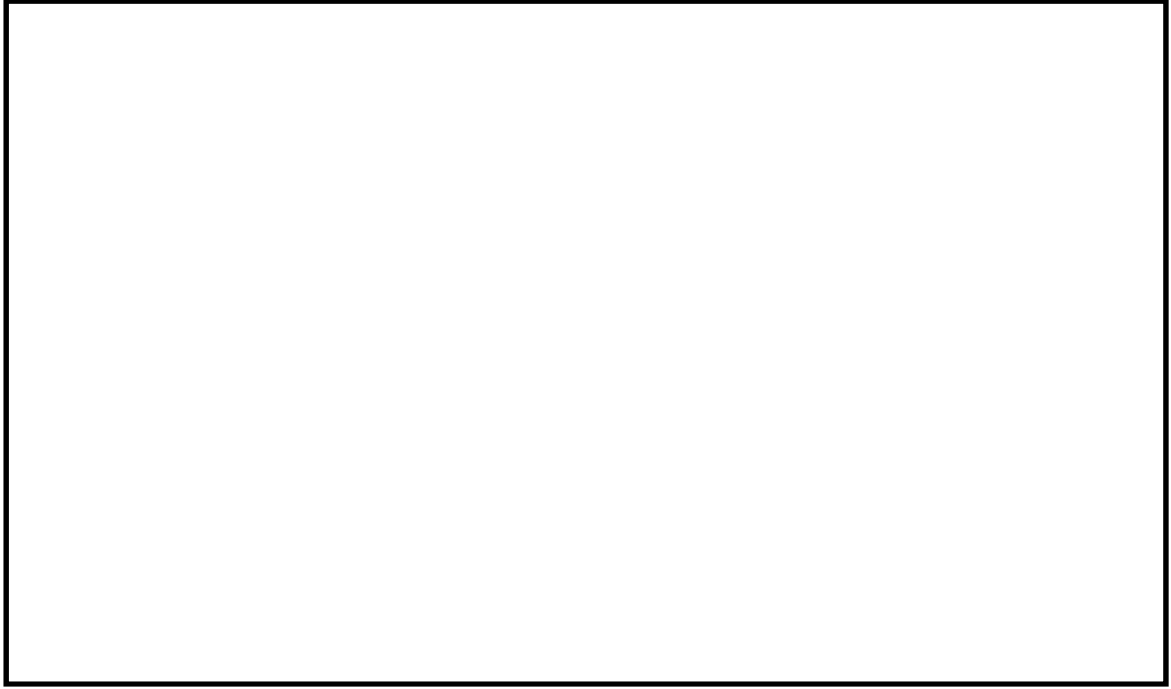


図 2-6 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略平面図

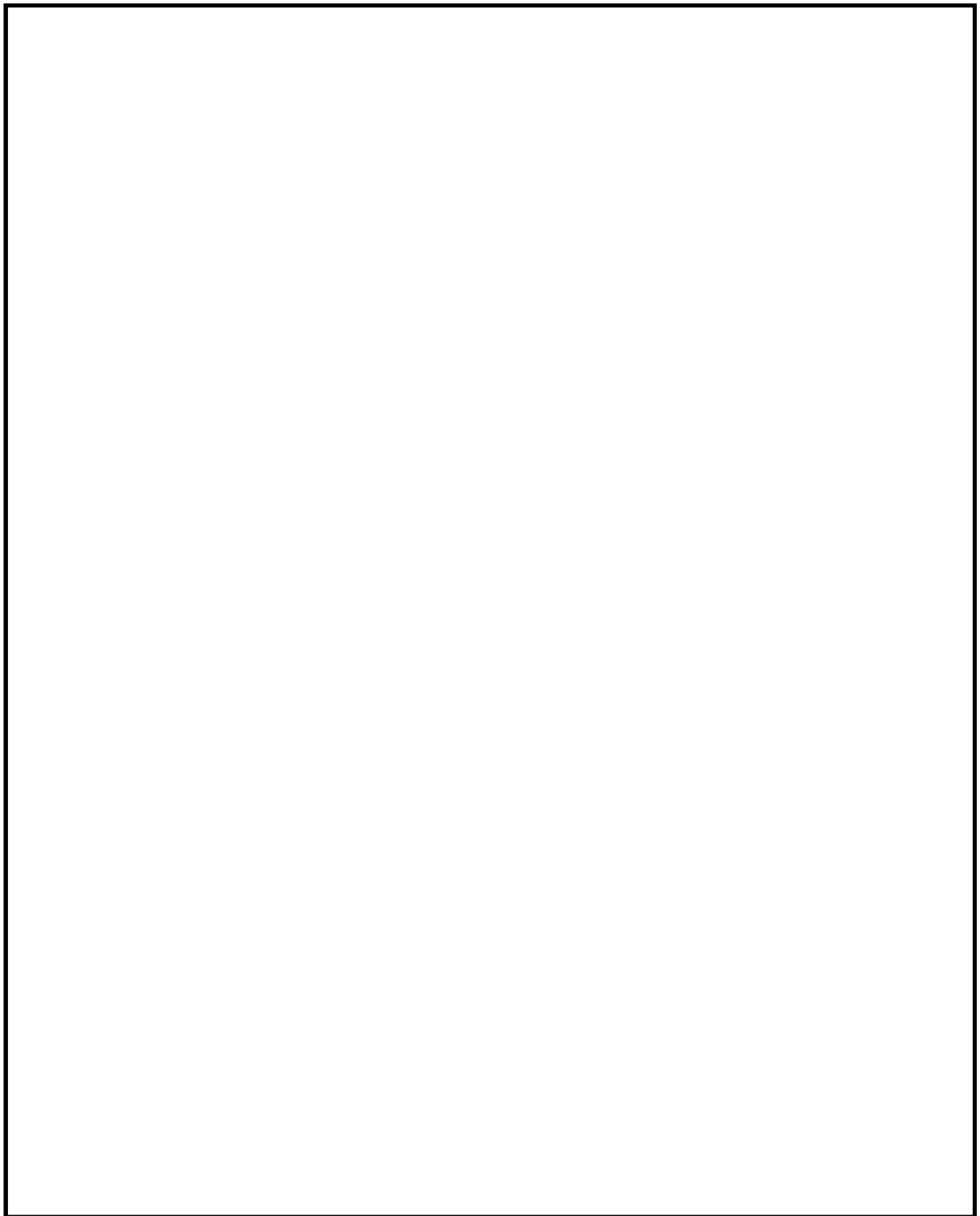


図 2-7 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略断面図



図2-8 軽油貯蔵タンクタンク室の概略平面図

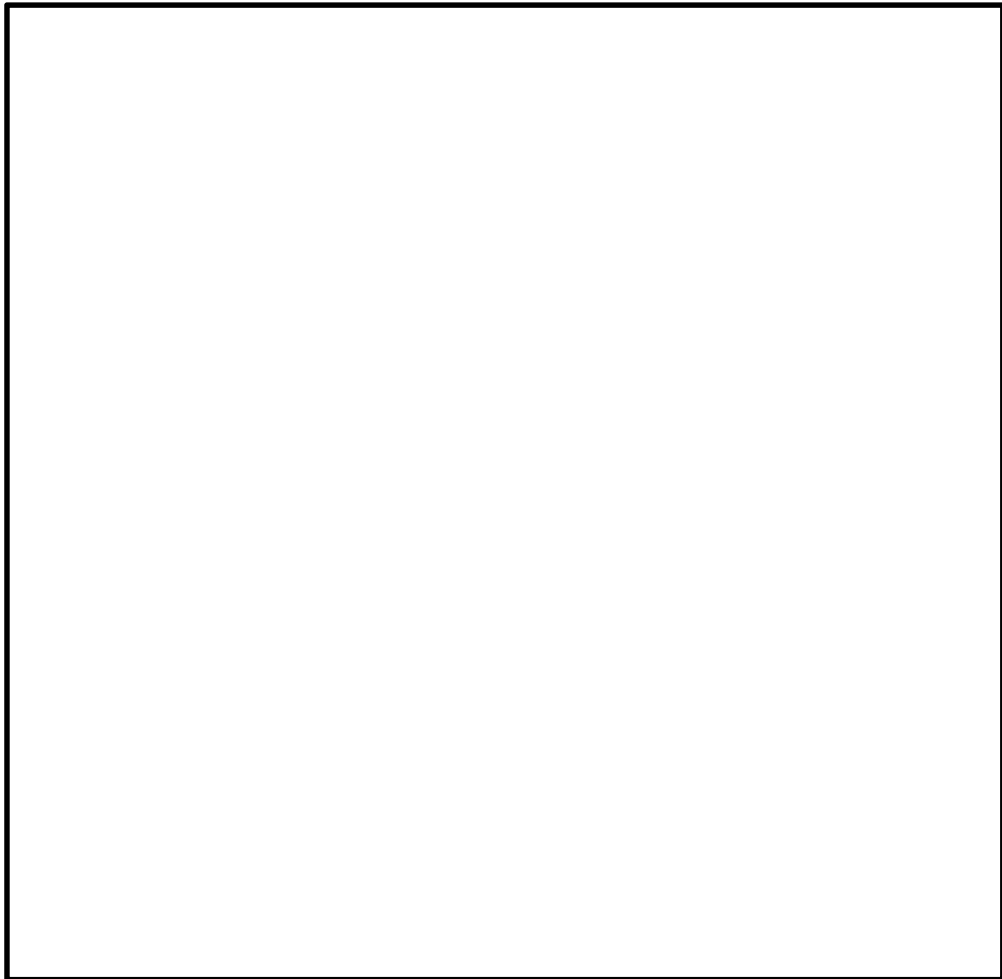


図2-9 軽油貯蔵タンクタンク室の概略断面図

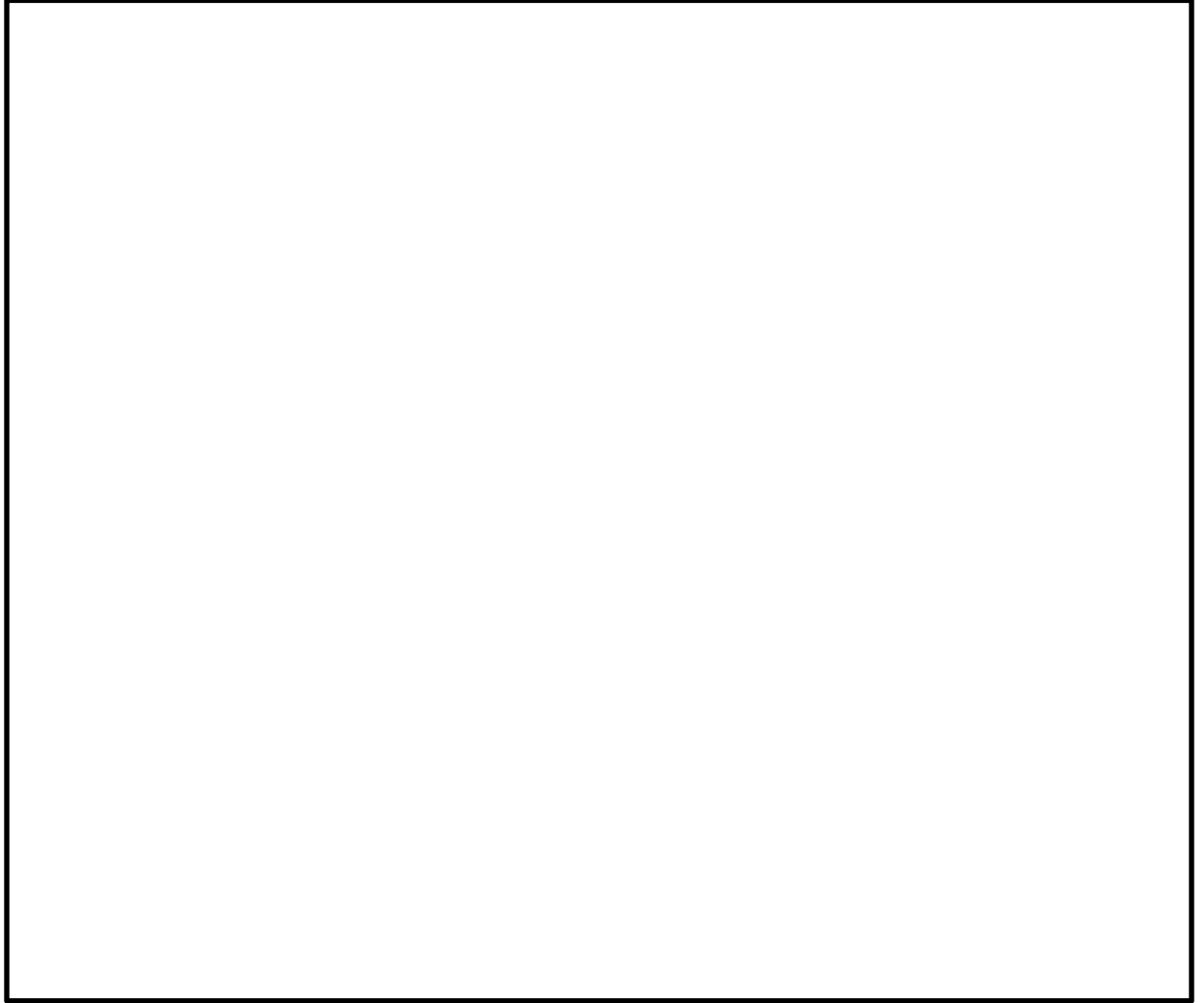


図2-10 緊急時対策所の概略平面図

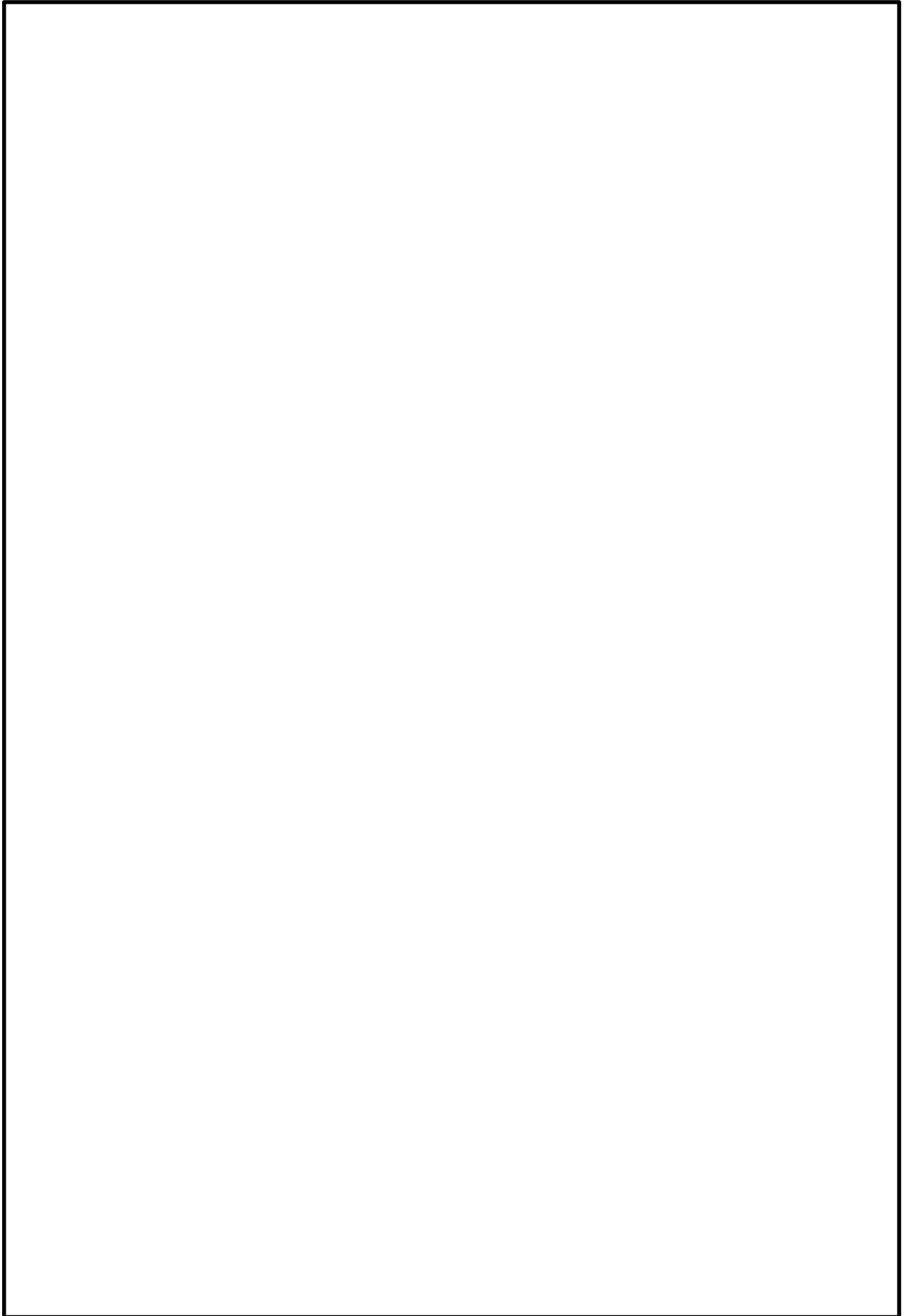


図2-11 緊急時対策所の概略断面図

2.3 評価方針

建屋及び構造物の強度評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」及び「4.2 許容限界」を踏まえ、竜巻より防護すべき施設が安全機能を損なわないことを、「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

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

具体的には、飛来物が竜巻より防護すべき施設に衝突する直接的な影響の評価として、建屋及び構造物の外殻を構成する部材に対する「衝突評価」を行う。また飛来物が竜巻より防護すべき施設に衝突・接触する波及的な影響の評価として、建屋及び構造物の外殻を構成する部材の裏面剥離による飛散の影響並びに建屋及び構造物の外殻を構成する部材の転倒・脱落の影響に対する「構造強度評価」を行う。

2.3.1 貫通評価

飛来物が建屋及び構造物の外殻を構成する部材を貫通しない設計とするために、飛来物による衝撃荷重に対し、防護すべき施設の外殻を構成する部材が設計飛来物の貫通を生じないことを計算若しくは解析により確認する。

具体的には、防護すべき施設の外殻となる区画の屋根、外壁及び内壁、並びに開口部建具並びに構造物の地上露出部が、設計飛来物の貫通を生じない厚さを有していることを、計算により確認する。貫通を生じない厚さを有していることの確認が出来ない場合においては、これらに終局状態に至るようなひずみを生じないことを、解析により確認する。

2.3.2 構造強度評価

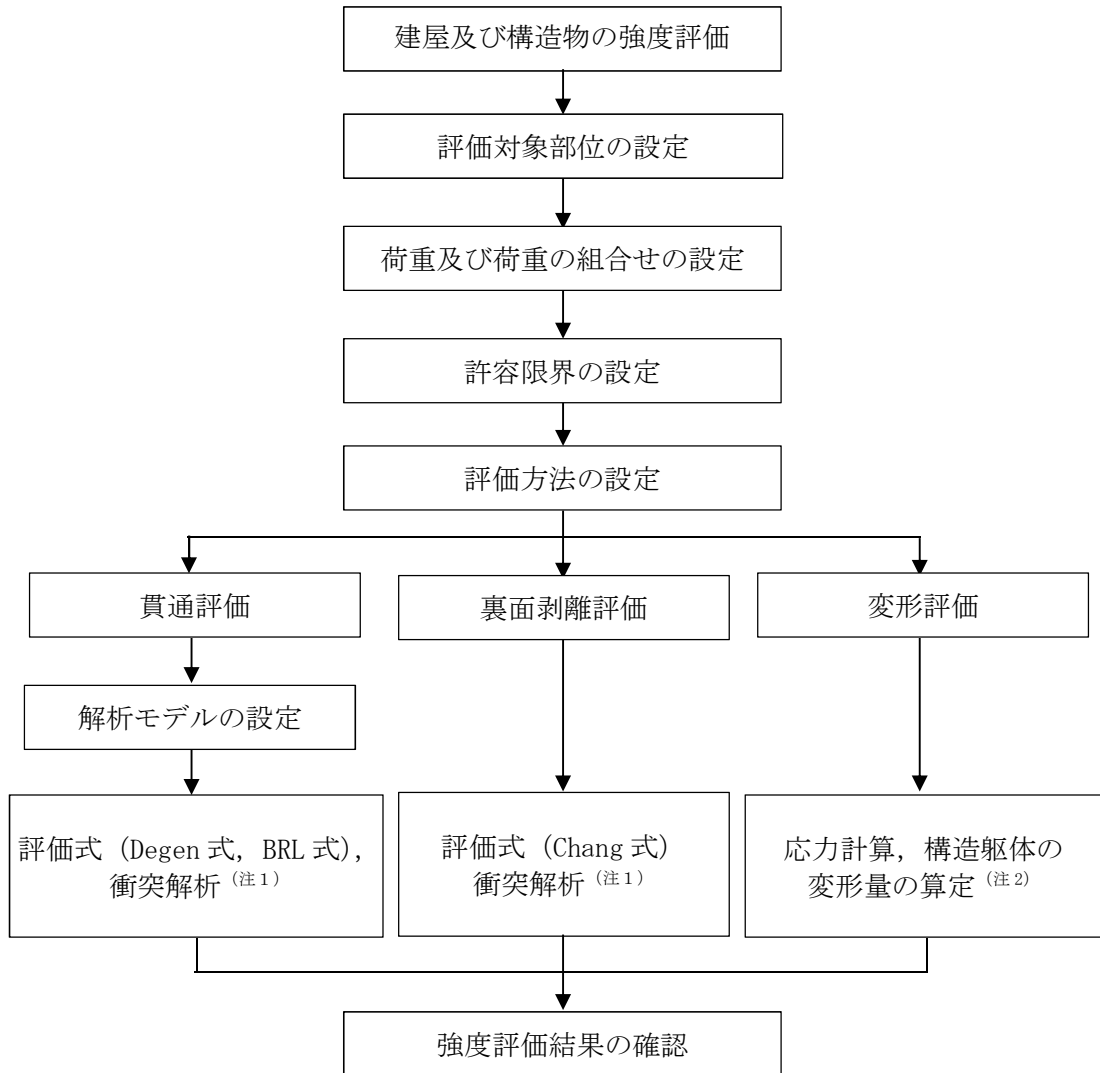
飛来物による衝撃荷重に対し、竜巻より防護すべき施設に波及的影響を与えないよう、防護すべき施設の外殻を構成する部材自体の脱落を生じない設計とするために、これらについて、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じないことを計算により確認する。（以下「裏面剥離評価」という。）

具体的には、RC造の建屋及び構造物について、飛来物による衝撃荷重に対し、施設の外殻を構成する部材自体の脱落を生じない設計とするために、外殻となる屋根スラブ、外壁及び内壁並びに構造物の鉄筋コンクリートが、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じない最小厚さ以上であることを計算により確認する。

外殻を構成する部材で、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じない最小厚さ以上であることの確認ができない場合は、裏面剥離の影響を受ける防護対象施設が当該部位の近傍にないことを確認するか、裏面剥離が生じない構造であることを解析により確認する。

また、外殻を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とするために、設計荷重に対し、外殻となる屋根スラブ、屋根スラブのスタッドボルト、外壁及び内壁に終局状態に至るようなひずみ又は応力が生じないこと、鉄骨架構に終局状態に至るような変形が生

しないことを計算及び解析により確認する。(以下「変形評価」という。)
 建屋及び構造物の設計荷重作用時の強度評価フローを図2-10に示す。



(注1) 3次元FEMモデルを用いた動的評価を実施する。

(注2) 地震応答解析モデルを用いた静的評価を実施する。

図2-10 強度評価フロー

2.4 適用規格

- 鋼構造設計規準 -許容応力度設計法- ((社) 日本建築学会, 2005改定)
- Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev 8P(NEI07-13)) (以下「NEI07-13」という。)
- 建築基準法及び同施行令
- 建築物荷重指針・同解説 ((社) 日本建築学会, 2004改定)
- ISES7607-3「軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査 その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討」 (高温構造安全技術研究組合)
- 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 ((社) 日本建築学会, 2010改定) (以下「RC規準」という。)
- 「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987」 ((社) 日本電気協会)
- 「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」 ((社) 日本電気協会)
- 「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 J S M E S N C 1-2005/2007」 (社) 日本機械学会
- 日本工業規格 (J I S)
- 「各種合成構造設計指針・同解説」 ((社) 日本建築学会, 2010改定) (以下「各種合成指針」という。)
- 建築耐震設計における保有耐力と変形性能 ((社) 日本建築学会, 1990 改定)

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

建屋及び構造物の評価に用いる記号を表3-1～表3-4に示す。

表 3-1 貫通評価に用いる記号 (Degen 式)

| 記号 | 単位 | 定義 | |
|----------------|---------------------|-----------------------|---------------|
| D | kgf/cm ³ | 飛来物直径密度 $D = W / d^3$ | |
| d | cm | 飛来物の (等価) 直径 | |
| e | cm | 貫通限界厚さ (コンクリート) | |
| F _c | kgf/cm ² | コンクリートの設計基準強度 | |
| N | — | 飛来物の形状係数 | |
| V | m/s | 外壁 | 飛来物の衝突速度 (水平) |
| | | 屋根 | 飛来物の衝突速度 (鉛直) |
| W | kgf | 飛来物重量 | |
| X | cm | 貫入深さ | |
| α_e | — | 低減係数 | |

表 3-2 貫通評価に用いる記号 (BRL 式)

| 記号 | 単位 | 定義 |
|----|-----|---------------|
| d | cm | 飛来物の (等価) 直径 |
| k | — | 鋼板の材質に関する係数 |
| M | kg | 飛来物の質量 |
| T | m | 貫通限界厚さ (鋼製部材) |
| V | m/s | 飛来物の衝突速度 (鉛直) |

表 3-3 裏面剥離評価に用いる記号 (Chang 式)

| 記号 | 単位 | 定義 | |
|------------------|---------------------|---------------|---------------|
| d | cm | 飛来物の (等価) 直径 | |
| f _c ' | kgf/cm ² | コンクリートの設計基準強度 | |
| S | cm | 裏面剥離限界厚さ | |
| V | cm/s | 外壁 | 飛来物の衝突速度 (水平) |
| | | 屋根 | 飛来物の衝突速度 (鉛直) |
| V ₀ | cm/s | 飛来物基準速度 | |
| W | kgf | 飛来物重量 | |
| α_s | — | 低減係数 | |

表 3-4 変形評価に用いる記号（水密扉）

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

3.2 評価対象部位

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

3.2.1 貫通評価

(1) 建屋

設計荷重に対して、外殻を構成する部材が飛来物を貫通させないことの確認において、建屋については、屋根スラブ、外壁並びに防護すべき施設の外殻となる建屋内の部位のうちタービン建屋オペレーティングフロア床版、気体廃棄物処理系隔離弁を内包する区画の壁面並びに開口部建具のうち原子炉建屋機器搬入口扉、原子炉建屋附属棟1階電気室搬入口扉、また、重大事故対処施設の環境条件維持に関与する扉を評価対象部位として選定する。

(2) 構造物

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

3.2.2 裏面剥離評価

(1) RC造建屋

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

(2) 構造物

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

3.2.3 変形評価

(1) 建屋

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

(2) 構造物

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

3.3 荷重及び荷重の組合せ

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

3.3.1 荷重の設定

強度評価に用いる荷重を以下に示す。

(1) 風圧力による荷重 (W_w)

風圧力による荷重 W_w は、下式により算定する。

風力係数 C は、「建築基準法及び同施行令」に基づき設定する。

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

(2) 気圧差による荷重 (W_p)

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

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

(3) 飛来物による衝撃荷重 (W_M)

飛来物による衝撃荷重 W_M は、表3-4に示す飛来物の衝突に伴う荷重とするが、この荷重は瞬間的に作用するものであり、またこれら飛来物に対し質量が十分に大きな建物および構造物が評価の対象対象であるため、これらの施設の全体的な挙動に対する評価（変形評価）においては考慮せず、評価対象施設に対する瞬間的且つ局所的な影響の評価（貫通、裏面剥離）時のみ考慮する。

表3-4 飛来物の諸元

| 飛来物 | 寸法 (m) | 質量 (kg) | 水平方向の 飛来速度 (m/s) | 鉛直方向の 飛来速度 (m/s) | 衝突対象 |
|-----|-----------------|------------|------------------------|------------------------|---|
| 鋼製材 | 4.2×0.2× 0.3 | 135 | 51 | 34 | 全ての建屋及び構造物 |
| 車両 | 3.6×2.5× 8.6 | 5000 | 52 | —※ | <ul style="list-style-type: none"> ・使用済燃料乾式貯蔵建屋 ・緊急時対策所 |

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

(4) 常時作用する荷重 (F_d)

常時作用する荷重 F_d として、自重及び上載荷重を考慮する。

3.3.2 荷重の組合せ

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

荷重の組合せを表 3-5 に示す。

表3-5 荷重の組合せ

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

W_M : 風圧力による荷重 W_P : 気圧差による荷重

W_M : 飛来物による衝撃荷重 F_d : 常時作用する荷重

3.4 許容限界

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

3.4.1 貫通評価

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

表3-6 貫通評価の許容限界（式による評価）

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

- ※1：防護すべき施設の外殻となる、タービン建屋オペレーティングフロア床版，気体廃棄物処理系隔離弁を内包する区画の壁面
- ※2：屋上への車両の衝突は評価対象外（表3-4より）
- ※3：地中の構造物のため，側壁は露出していない。
- ※4：複数枚の板が直列の構成となっている，原子炉建屋機器搬入口扉が該当する。

式による評価を満足せず，解析による評価を行う場合における許容限界を，表3-7に示す。

表3-7 貫通評価の許容限界（解析による評価）

| 評価内容 | 評価対象部位 | 破断ひずみ |
|-------------------|--------|-------|
| 貫通評価 (解析による評価) | 鉄筋 | 0.081 |

3.4.2 裏面剥離評価

裏面剥離評価において、式による評価を行う場合においては表3-8に示す最小部材厚さとする。

表3-8 裏面剥離評価の許容限界（式による評価）

| 評価内容 | 評価対象部位 | | 最少部材厚さ(mm) | |
|--------------------|------------|-------------|-------------------|--------------------|
| | | | 鉛直方向 | 水平方向 |
| 裏面剥離評価 (式による評価) | コンク リート | 原子炉建屋 | 100 | 300 |
| | | タービン建屋 | 800 ^{※1} | 1300 ^{※1} |
| | | 使用済燃料乾式貯蔵建屋 | 450 ^{※2} | 450 |
| | | 軽油貯蔵タンクタンク室 | 2000 | — ^{※3} |
| | | 緊急時対策所 | 600 ^{※2} | 1000 |

※1：防護すべき施設の外殻となる，タービン建屋オペレーティングフロア床版，気体廃棄物処理系隔離弁を内包する区画の壁面

※2：屋上への車両の衝突は評価対象外（表3-4より）。

※3：地中の構造物のため，側壁は露出していない。

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

表3-9 裏面剥離評価の許容限界（解析による評価）

| 評価内容 | 評価対象部位 | | 破断ひずみ |
|---------------------|----------------------------------|-------|-------|
| 裏面剥離評価 (解析による評価) | 裏面に内張材（ライナ若しくはデッキプレート）が無いコンクリート版 | 下層の鉄筋 | |
| | 裏面に内張材（ライナ若しくはデッキプレート）があるコンクリート版 | 内張材 | |

3.4.3 変形評価

屋根スラブ及びスタッドボルトの変形評価の許容限界は、それぞれ RC 規準及び各種合成指針に基づく強度とし、RC 造の建屋全体の変形評価の許容限界は、耐震壁のせん断ひずみに関する許容限界に基づく 2000μ とする。

変形評価の許容限界を表 3-10 に示す。

表3-10 変形評価の許容限界

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

3.5 評価方法

3.5.1 貫通評価

(1) 鉄筋コンクリート造部分

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

$1.52 \leq X/d \leq 13.42$ の場合、

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

$X/d \leq 1.52$ の場合、

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

ここで、貫入深さ X は、

$X/d \leq 2.0$ の場合、

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

$2.0 \leq X/d$ の場合、

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

(2) 鋼製部

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

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

(3) 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブに対する衝突解析

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

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

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

a. 解析モデル

(a) 屋根スラブ

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

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

屋根スラブの解析モデルを図3-2，解析モデルの境界条件を表3-8に示す。

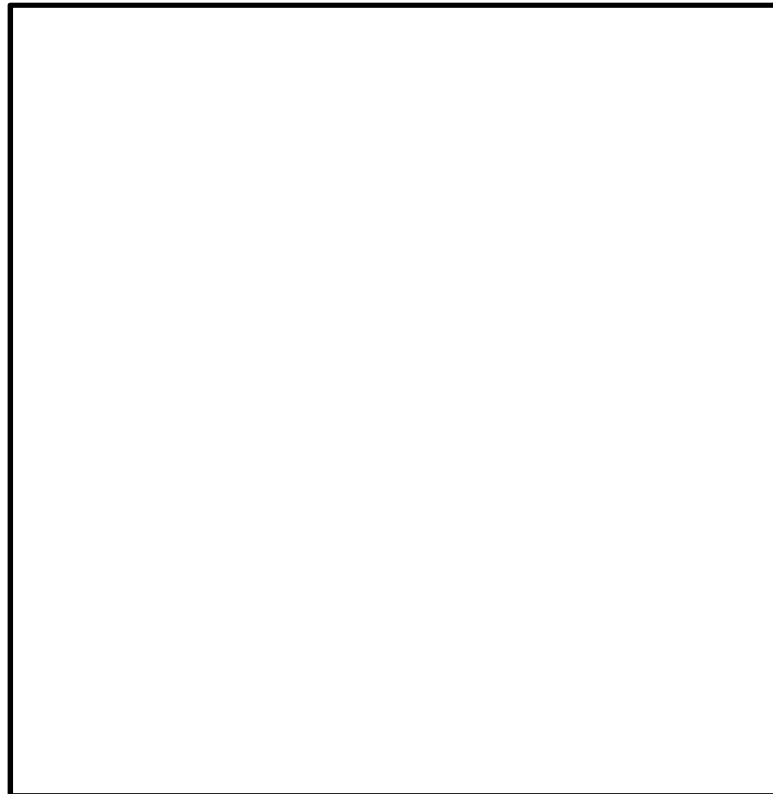


図3-1 原子炉建屋搭屋部屋根スラブモデル化範囲

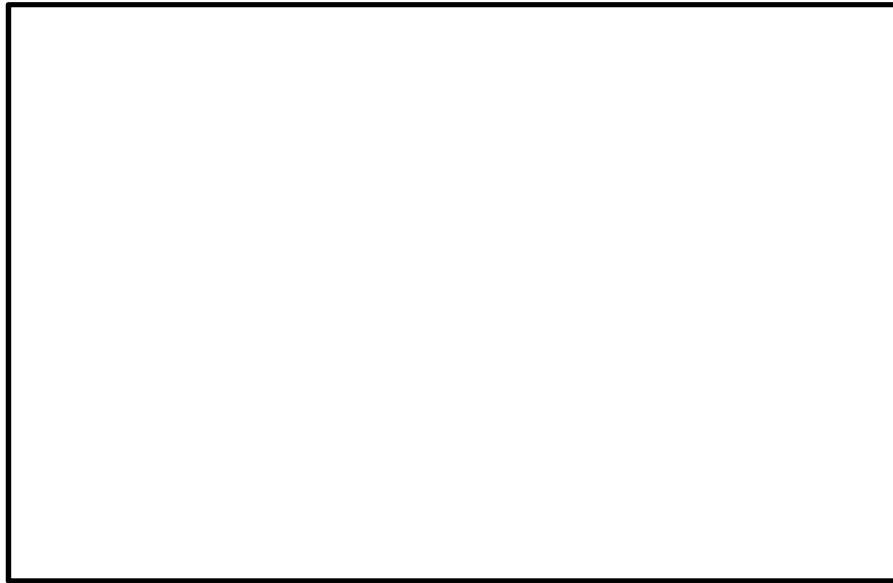


図3-2 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの解析モデル

(c) 飛来物

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

飛来物の解析モデル図を図3-3に示す。

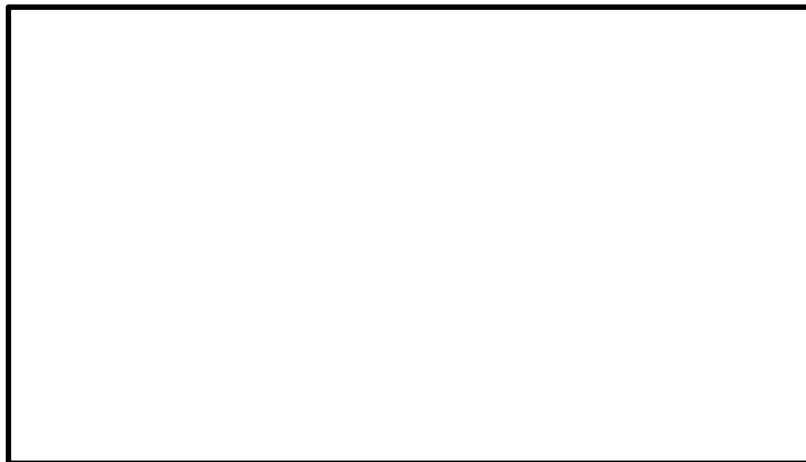


図3-5 飛来物の解析モデル図

b. 解析モデル

(a) 屋根スラブ及び外壁

コンクリートの材料定数を表3-11，鉄筋の材料定数を表3-12に示す。

表3-11 コンクリートの材料定数

| コンクリート 種類 | 設計基準強度 F_c (N/mm ²) | ヤング係数 E (N/mm ²) | ポアソン比 ν | 単位体積重量 ρ (kN/m ³) |
|--------------|---|--------------------------------------|----------------|--|
| | | | | |

表3-12 鉄筋の材料定数

| 鉄筋 種類 | 降伏強度 F_y (N/mm ²) | ヤング係数 E (N/mm ²) | ポアソン比 ν | 単位体積重量 ρ (kN/m ³) |
|----------|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------|--|
| | | | | |

(b) 飛来物

飛来物の仕様について表3-13に示す。

表3-12 飛来物の仕様

| 飛来物 | サイズ 長さ×幅×奥行き (m) | 質量 (kg) | 材質 |
|-----|------------------------|------------|-------|
| 鋼製材 | 4.2×0.3×0.2 | 135 | SS400 |

c. 材料の非線形特性

(a) 材料の応力-ひずみ関係

コンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮側が圧縮強度に到達後もその応力を保持するバイリニア型とする。

鉄筋の応力-ひずみ関係はバイリニア型とする。

コンクリートの応力-ひずみ関係を図3-6に、鋼製材の応力-ひずみ関係を図3-7に示す。

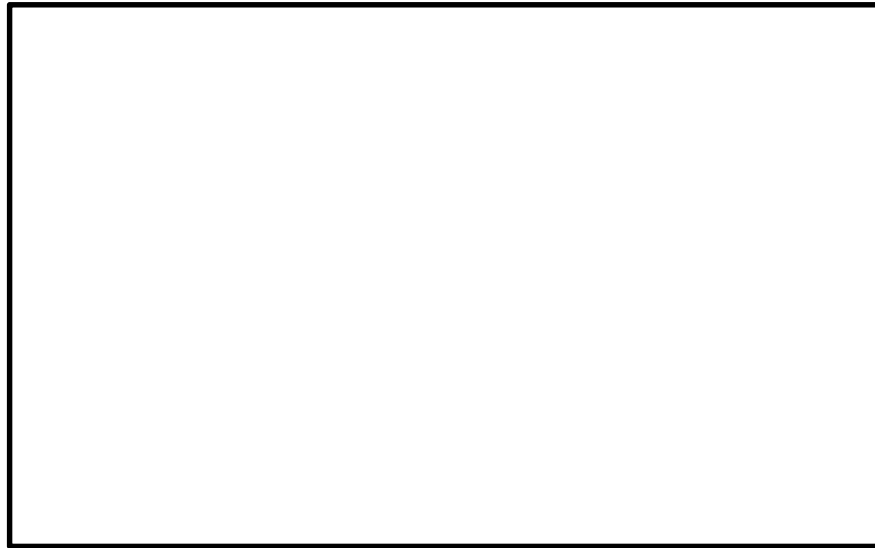


図3-6 真応力-真ひずみ関係 (コンクリート)



図3-7 応力-ひずみ関係 (鉄筋)

(b) ひずみ速度効果

竜巻による飛来物に対する解析は、衝撃問題で変形速度が大きいため、ひずみ速度効果を考慮することとし、このひずみ速度効果として、NEI07-13で規定された割増係数（鉄筋：1.10（降伏応力）、1.05（引張強度）、デッキプレート・飛来物：1.29（降伏応力）、1.10（引張強度））を考慮する。

(c) 破断ひずみ

金属材料の破断ひずみは、JISに規定されている伸びの下限値を基に設定する。また、NEI 07-13においてTF（多軸性係数）を とすることが推奨されている

ことを踏まえ、安全余裕としてTF=を考慮する。TFについては、鉄筋のみとする。鋼製材は保守的に破断ひずみを超えても荷重を負担するものとする。鉄筋の破断ひずみを表3-13に示す。

表3-13 鉄筋の破断ひずみ

| 材質 | JIS規格値 (下限値) | TF | 破断ひずみ |
|----|-----------------|----|-------|
| | | | |

3.5.2 裏面剥離評価

裏面剥離限界厚さSを、別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に基づき、以下に示すChang式を用いて算定し、許容限界を超えないことを確認する。

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

Chang式による限界厚さを満足しない箇所については、3次元FEMモデルを用いた衝突解析を行い、鉄筋に発生するひずみが表3-9に示す許容限界を超えないことを確認する。

なお、評価の結果、裏面剥離の発生が想定され防護対象施設への影響が想定される場合には、内面に鋼板のライナを取り付ける補強を実施するとともに、3次元FEMモデルを用いた衝突解析を行い、当該ライナに発生するひずみが表3-9に示す許容限界を超えないことを確認する。FEM評価の対象となる箇所の構造及び解析モデルを図3-8に示す。

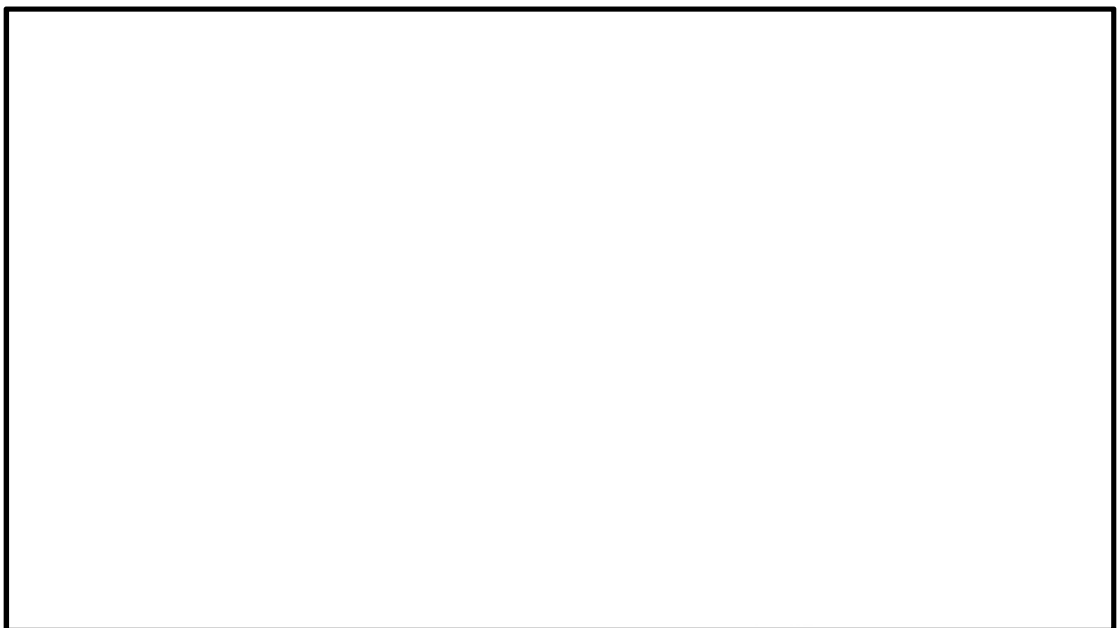


図3-8 裏面剥離評価に関するFEM解析対象箇所の構造 (1/2)

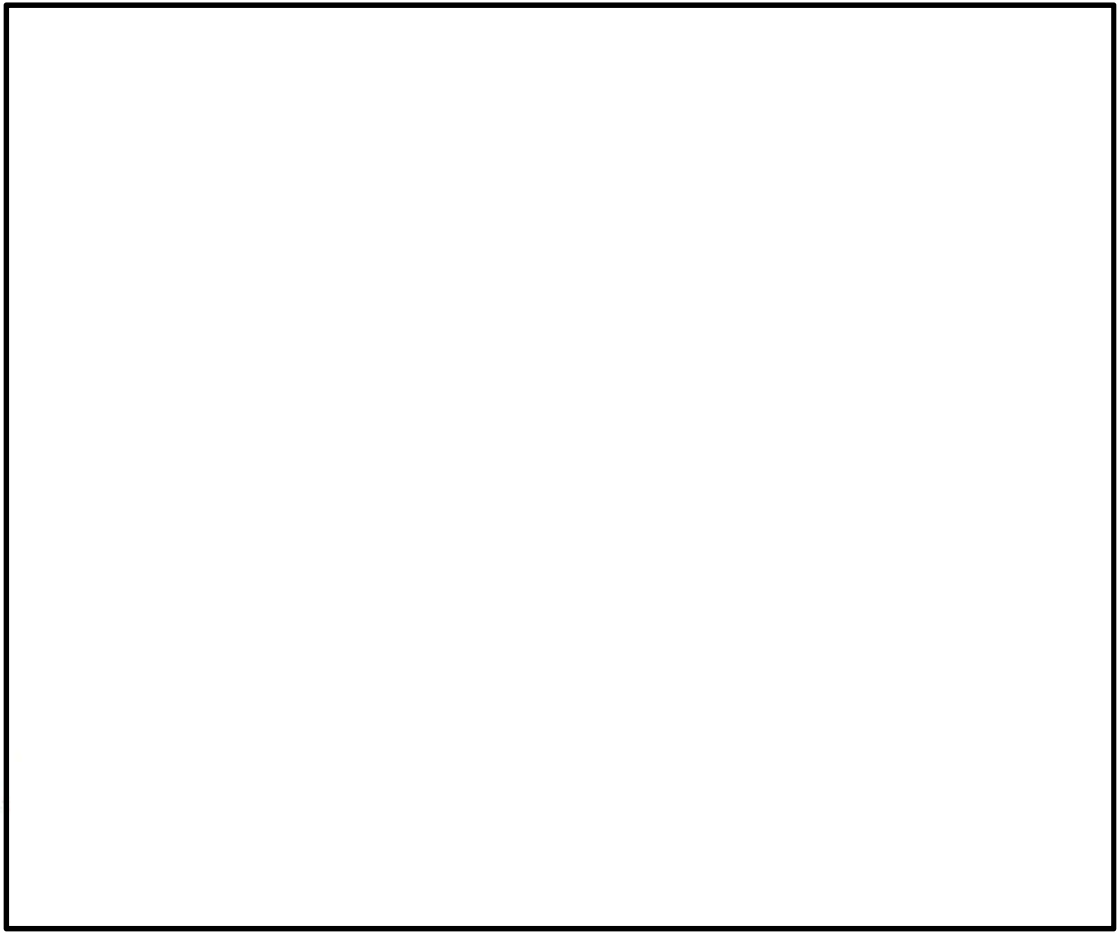


図3-8 裏面剥離評価に関するFEM解析対象箇所の構造 (2/2)

材料物性については、コンクリートは貫通評価と同じものとなる。鉄筋の物性については、表3-14及び表3-15に示す。

表3-14 鉄筋の材料定数 (裏面剥離評価)

| 鉄筋 種類 | 降伏強度 F_y (N/mm ²) | ヤング係数 E (N/mm ²) | ポアソン比 ν | 単位体積重量 ρ (kN/m ³) |
|----------|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------|--|
| | | | | |

表3-15 鉄筋の破断ひずみ (裏面剥離評価)

| 材質 | JIS規格値 (下限値) | T F | 破断ひずみ |
|----|-----------------|-----|-------|
| | | | |

3.5.3 変形評価

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

原子炉建屋（RC構造部），タービン建屋，使用済燃料乾式貯蔵建屋及び緊急時対策所建屋の変位は，設計荷重による建屋の層せん断力及び各部材のせん断力-せん断ひずみ関係（ $Q-\gamma$ ）関係より算定する。

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

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

原子炉建屋，タービン建屋，使用済燃料乾式貯蔵建屋及び緊急時対策所建屋の地震応答解析モデルを図3-9から図3-11に， $Q-\gamma$ 関係を表3-16から表3-19に示す。

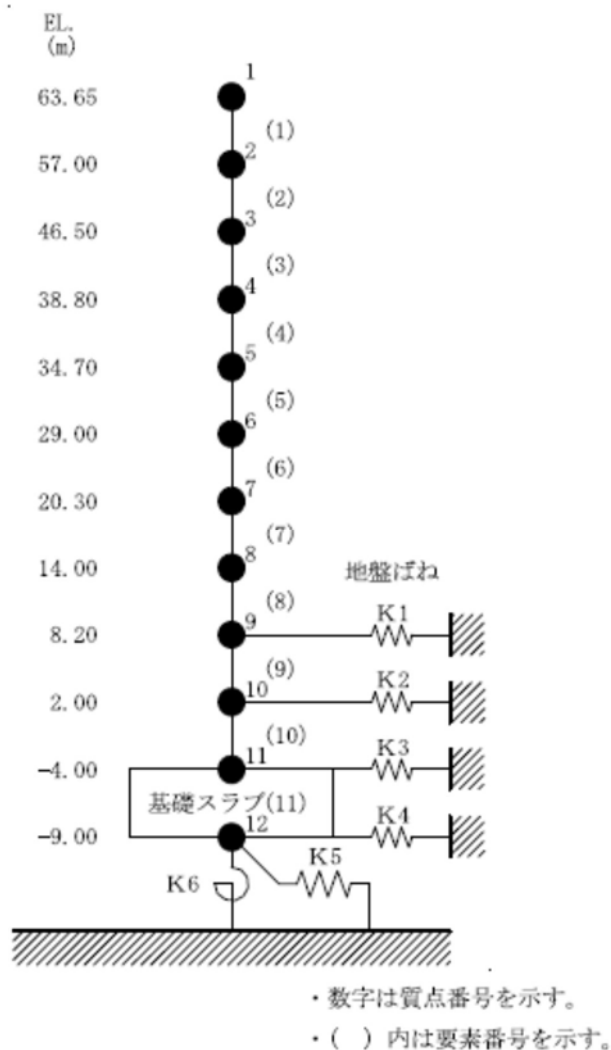


図3-9 原子炉建屋の地震応答解析モデル

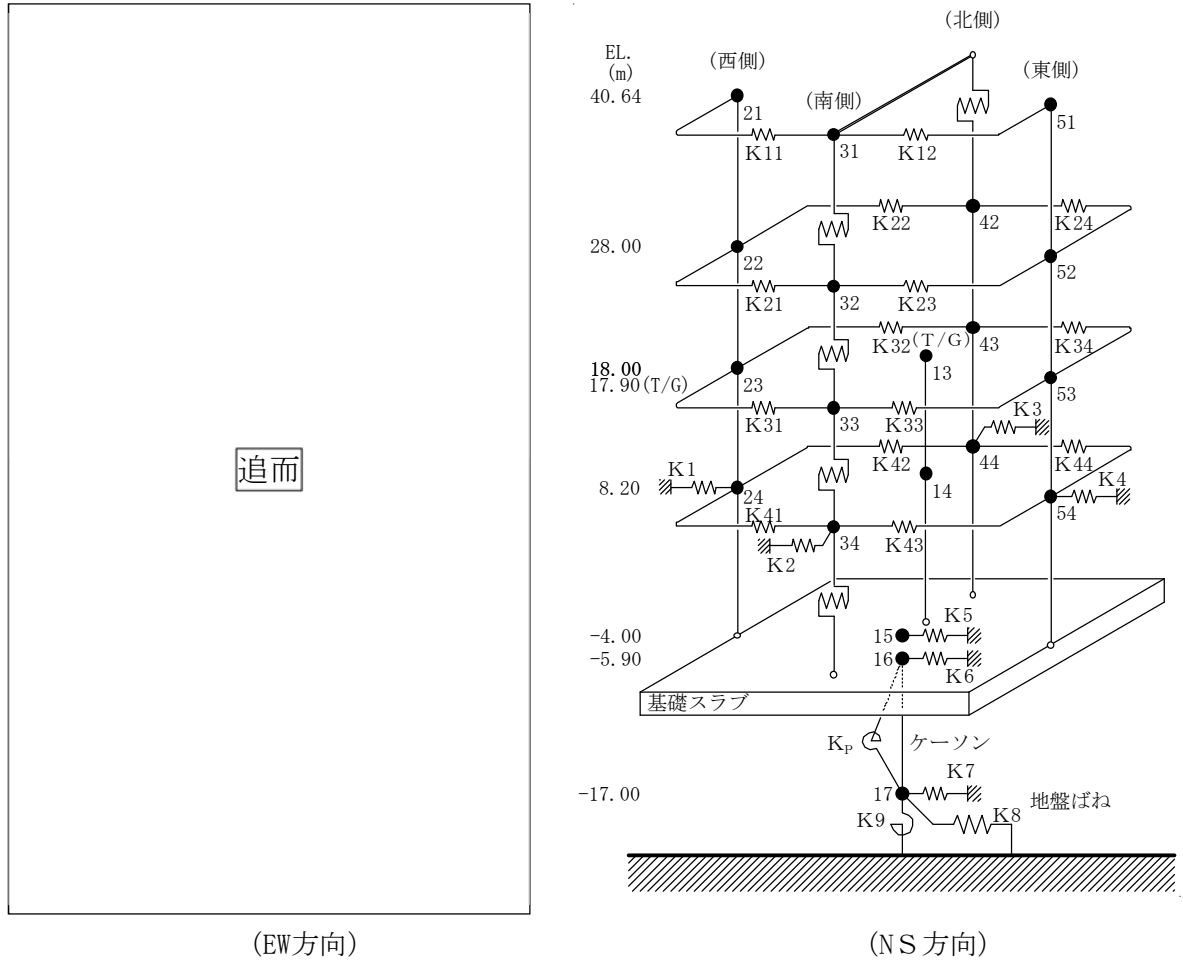


図3-10 タービン建屋の地震応答解析モデル

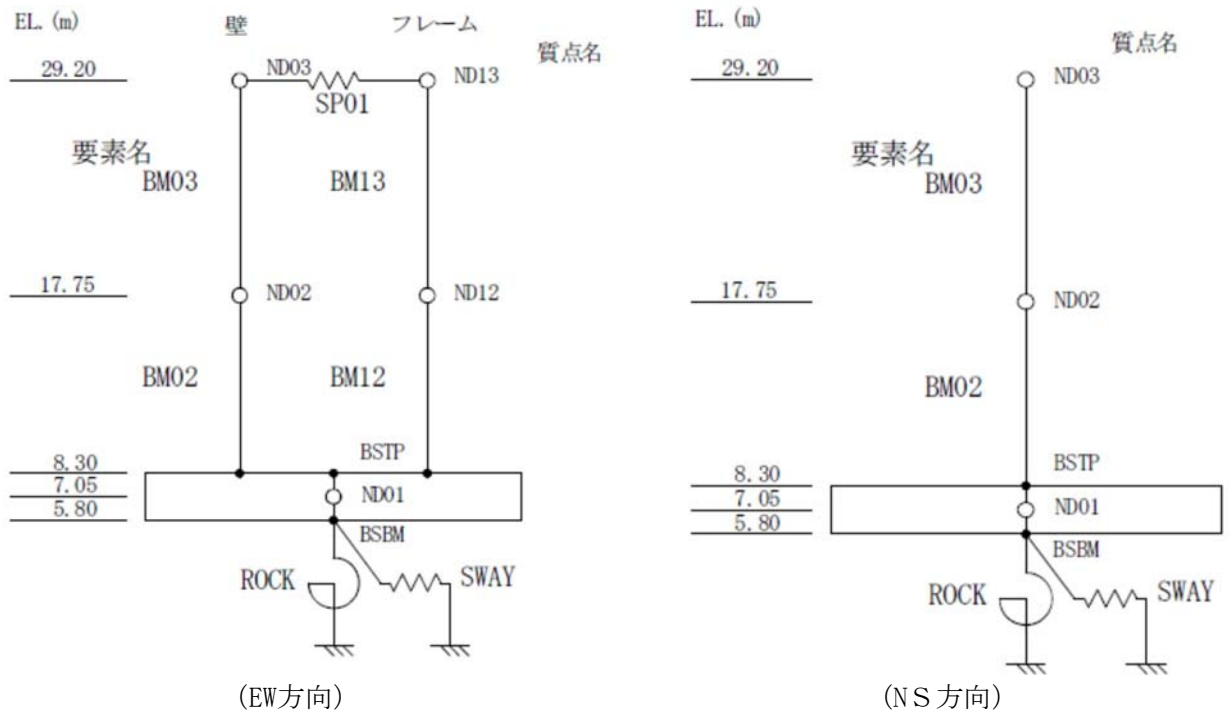


図3-11 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデル

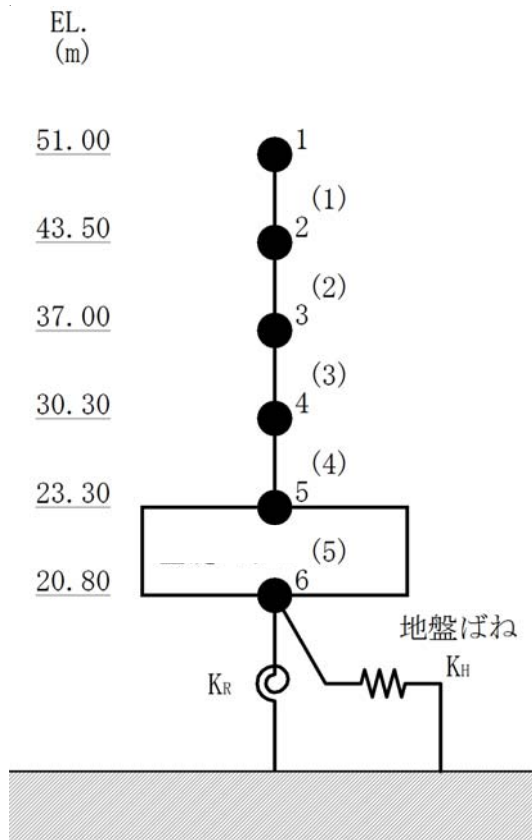


図3-12 緊急時対策所建屋の地震応答解析モデル

表3-16 原子炉建屋のQ- γ 関係

(a) NS方向

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

(b) EW方向

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

表3-17 タービン建屋のQ-γ関係

(a) NS方向

| 高さ EL. | 要素 番号 | 第1折点 Q ₁ | 第2折点 Q ₂ | 終局点 Q ₃ | 第1折点 γ ₁ | 第2折点 γ ₂ | 終局点 γ ₃ |
|---------------|----------|------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|
| (m) | - | (kN) | | | (×10 ⁻³ (-)) | | |
| 40.64 ~ 28.00 | 1 | 6.32E+04 | 8.54E+04 | 1.18E+05 | 0.176 | 0.528 | 4.000 |
| 28.00 ~ 18.00 | 2 | 1.84E+05 | 2.51E+05 | 3.21E+05 | 0.228 | 0.684 | 4.000 |
| 18.00 ~ 8.20 | 3 | 4.54E+05 | 6.26E+05 | 8.18E+05 | 0.233 | 0.699 | 4.000 |

(b) EW方向

| 高さ EL. | 要素 番号 | 第1折点 Q ₁ | 第2折点 Q ₂ | 終局点 Q ₃ | 第1折点 γ ₁ | 第2折点 γ ₂ | 終局点 γ ₃ |
|---------------|----------|------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|
| (m) | - | (kN) | | | (×10 ⁻³ (-)) | | |
| 40.64 ~ 28.00 | 1 | 1.03E+05 | 1.39E+05 | 2.37E+05 | 0.176 | 0.528 | 4.000 |
| 28.00 ~ 18.00 | 2 | 2.09E+05 | 2.91E+05 | 4.39E+05 | 0.213 | 0.639 | 4.000 |
| 18.00 ~ 8.20 | 3 | 3.82E+05 | 5.24E+05 | 7.58E+05 | 0.230 | 0.690 | 4.000 |

表3-18 使用済燃料乾式貯蔵建屋のQ-γ関係

(a) NS方向

| 高さ EL. | 要素 番号 | 第1折点 Q ₁ | 第2折点 Q ₂ | 終局点 Q ₃ | 第1折点 γ ₁ | 第2折点 γ ₂ | 終局点 γ ₃ |
|---------------|----------|------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|
| (m) | - | (kN) | | | (×10 ⁻³ (-)) | | |
| 29.20 ~ 17.75 | BM03 | 4.50E+04 | 6.07E+04 | 1.36E+05 | 0.198 | 0.594 | 4.0 |
| 17.75 ~ 8.30 | BM02 | 6.05E+04 | 8.15E+04 | 1.56E+05 | 0.214 | 0.642 | 4.0 |

(b) EW方向

| 高さ EL. | 要素 番号 | 第1折点 Q ₁ | 第2折点 Q ₂ | 終局点 Q ₃ | 第1折点 γ ₁ | 第2折点 γ ₂ | 終局点 γ ₃ |
|---------------|----------|------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|
| (m) | - | (kN) | | | (×10 ⁻³ (-)) | | |
| 29.20 ~ 17.75 | BM03 | 4.19E+04 | 5.66E+04 | 1.14E+05 | 0.191 | 0.573 | 4.0 |
| 17.75 ~ 8.30 | BM02 | 6.19E+04 | 8.37E+04 | 1.62E+05 | 0.197 | 0.590 | 4.0 |

表3-19 緊急時対策所建屋のQ- γ 関係

(a) NS方向

| 高さ EL. | 要素 番号 | 第1折点 Q_1 | 第2折点 Q_2 | 終局点 Q_3 | 第1折点 γ_1 | 第2折点 γ_2 | 終局点 γ_3 |
|---------------|----------|---------------|---------------|--------------|------------------------|--------------------|-------------------|
| (m) | - | (kN) | | | $(\times 10^{-3} (-))$ | | |
| 43.50 ~ 51.00 | 1 | 1.18E+05 | 1.59E+05 | 2.96E+05 | 0.177 | 0.530 | 4.000 |
| 37.00 ~ 43.50 | 2 | 3.23E+05 | 4.35E+05 | 7.75E+05 | 0.181 | 0.542 | 4.000 |
| 30.30 ~ 37.00 | 3 | 3.29E+05 | 4.44E+05 | 7.56E+05 | 0.193 | 0.579 | 4.000 |
| 23.30 ~ 30.30 | 4 | 3.77E+05 | 5.10E+05 | 8.44E+05 | 0.205 | 0.614 | 4.000 |

(b) EW方向

| 高さ EL. | 要素 番号 | 第1折点 Q_1 | 第2折点 Q_2 | 終局点 Q_3 | 第1折点 γ_1 | 第2折点 γ_2 | 終局点 γ_3 |
|---------------|----------|---------------|---------------|--------------|------------------------|--------------------|-------------------|
| (m) | - | (kN) | | | $(\times 10^{-3} (-))$ | | |
| 43.50 ~ 51.00 | 1 | 8.43E+04 | 1.14E+05 | 1.89E+05 | 0.177 | 0.530 | 4.000 |
| 37.00 ~ 43.50 | 2 | 2.57E+05 | 3.46E+05 | 6.04E+05 | 0.179 | 0.538 | 4.000 |
| 30.30 ~ 37.00 | 3 | 2.69E+05 | 3.62E+05 | 6.05E+05 | 0.192 | 0.577 | 4.000 |
| 23.30 ~ 30.30 | 4 | 3.21E+05 | 4.34E+05 | 7.11E+05 | 0.204 | 0.613 | 4.000 |

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

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

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

(2) 原子炉建屋（鉄骨構造部）

原子炉建屋（鉄骨構造部）については、[図3-13](#)に示す附属棟東部のモデルの様に、原子炉建屋原子炉棟との接合部をピン支持とした3次元フレームモデルについて、風圧力による荷重 W_w 、気圧差による荷重 W_p 及び常時作用する荷重 F_d により部材に発生する応力度を計算し、許容限界を超えないことを確認する。

飛来物による衝撃荷重 W_M については、飛来物の衝突により柱若しくははりの一本を喪失したモデルに置き換えたモデルとして考慮する。

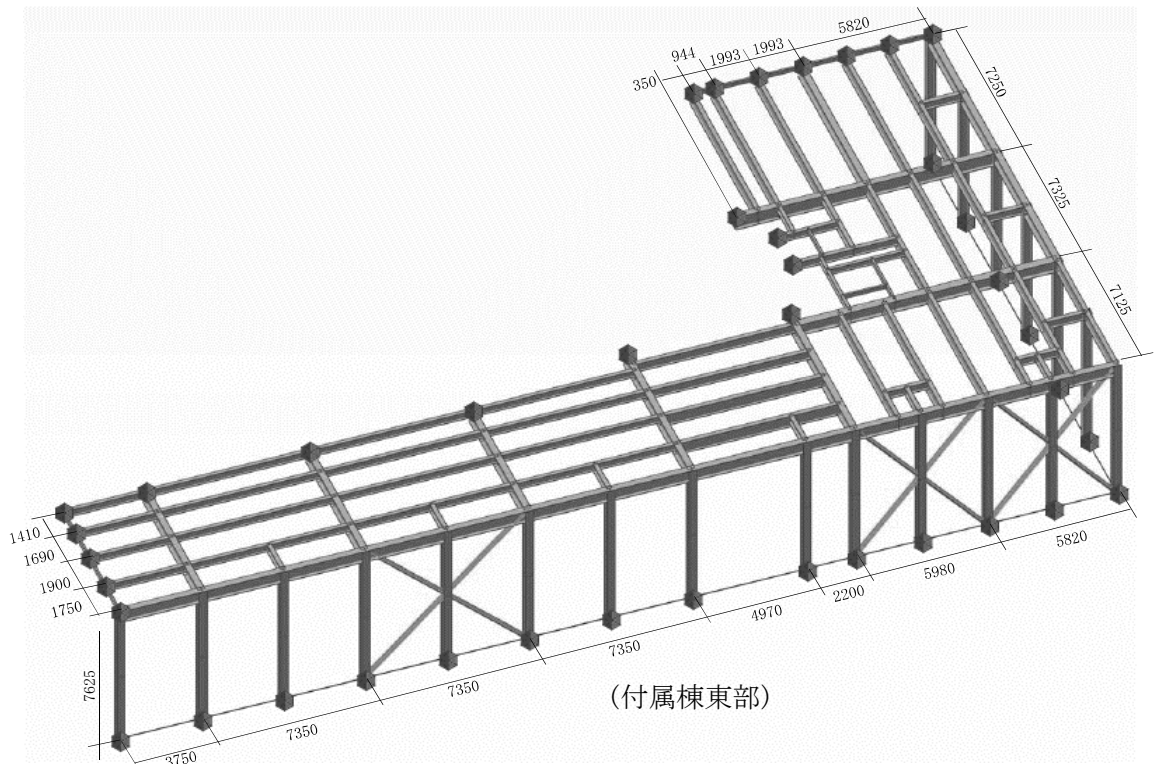


図3-13 原子炉建屋（鉄骨構造部）の解析モデル

(3) 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ

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

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

屋根スラブの発生曲げモーメント M 及び発生せん断力 Q 並びにスタッドの発生引張力 T の算定式を以下に示す。また、屋根スラブに作用する荷重の概要を図3-13に示す。

単位幅の屋根スラブにおける発生モーメント

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

単位幅の屋根スラブにおける発生せん断力

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

スタッド1本あたりの発生引張力

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

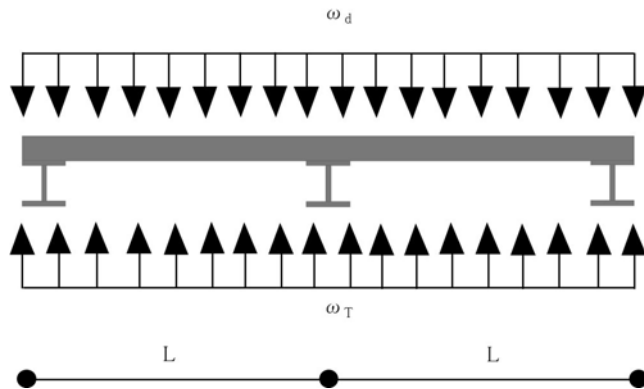


図3-14 屋根スラブに作用する荷重の概要

許容限界である終局強度については、「RC規準」に基づき算定する。

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

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

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

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

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

(4) 扉

扉のカンヌキ部（カンヌキ、カンヌキ受けピン及びカンヌキ受けボルト）等、扉の閉状態を維持する部材について、気圧差による荷重 W_p により発生する応力を算出し、許容限界を超えないことを確認する。

a. 応力評価

下記の扉を評価対象とする。

- ・原子炉建屋大物搬入口扉のうち原子炉建屋原子炉棟水密扉
- ・原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉
- ・原子炉建屋原子炉棟水密扉（潜戸）
- ・原子炉建屋付属棟南側水密扉
- ・ベイラー室脇水密扉
- ・原子炉建屋付属棟南側水密扉
- ・原子炉建屋付属棟2階東側機器搬入口扉

- ・原子炉建屋付属棟 2階サンプルタンク室連絡通路扉
- ・原子炉建屋付属棟南東側機器搬入口扉
- ・原子炉建屋付属棟西側非常用階段連絡口扉

原子炉建屋大物搬入口扉のうち原子炉建屋原子炉棟水密扉，原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉及び原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)についての，カンヌキ部（カンヌキ，カンヌキ受けピン及びカンヌキ受けボルト）に作用する荷重，発生曲げモーメントM，発生せん断力Q及び発生引張力Tの算定式を以下に示す。その他の扉についても，扉留め部に掛かる曲げ，せん断及び引張荷重をモデル化し，評価を行う。

(a) カンヌキ部に生じる荷重

カンヌキ部に生じる荷重は気圧差による荷重 W_p をカンヌキ部 n 箇所で負担した場合に発生する反力 R_p から算定する。カンヌキ部に生じる荷重を図3-14に示す。

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

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

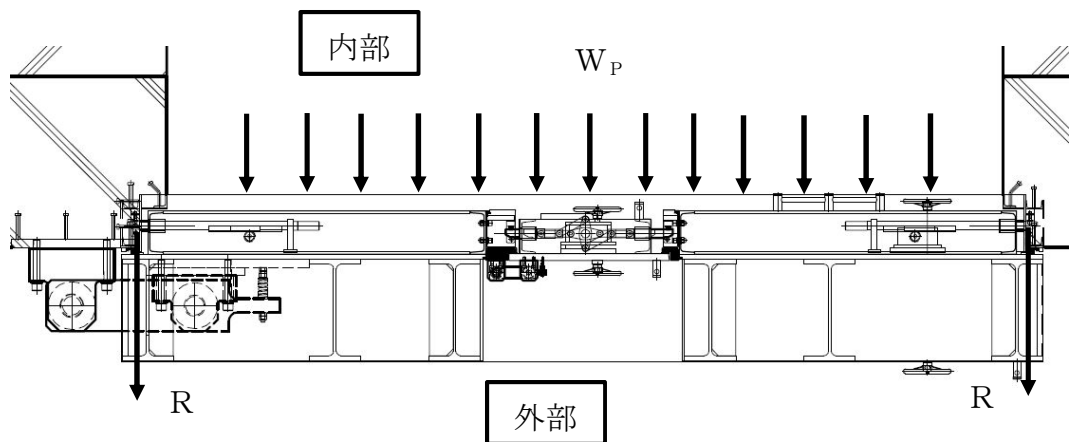


図3-15 カンヌキ部に生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉)

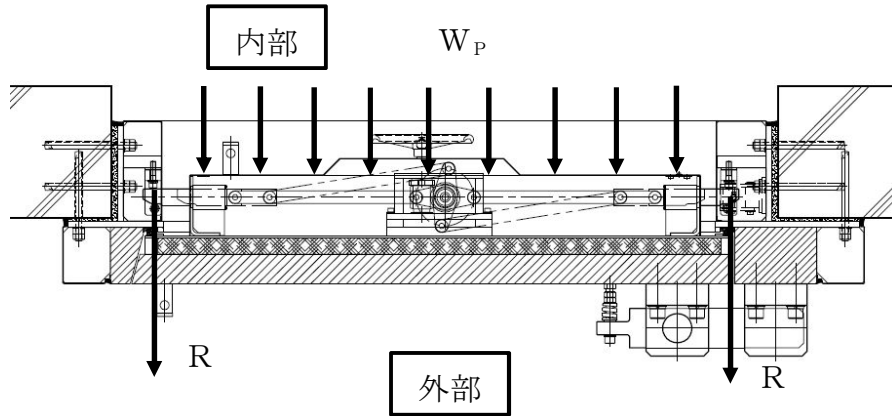


図3-16 カンヌキ部に生じる荷重(電気室搬入口水密扉)

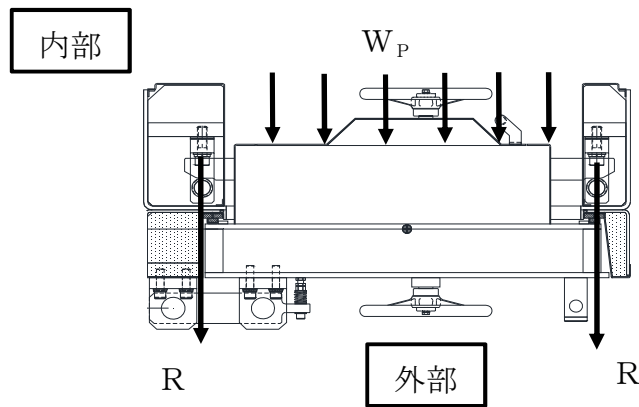


図3-17 カンヌキ部に生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸))

イ. カンヌキ

カンヌキに生じる曲げモーメント M_k 及びせん断力 Q_k は次式により算定する。
カンヌキに生じる荷重を図3-18～図3-20に示す。

$$M_k = R \cdot L_k$$

$$Q_k = R$$

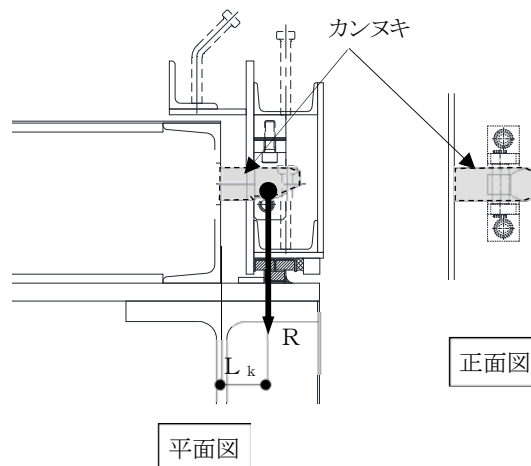


図3-18 カンヌキに生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉)

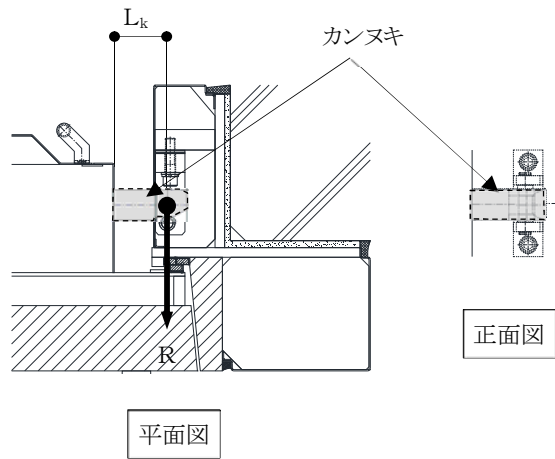


図3-19 カンヌキに生じる荷重(電気室搬入口水密扉)

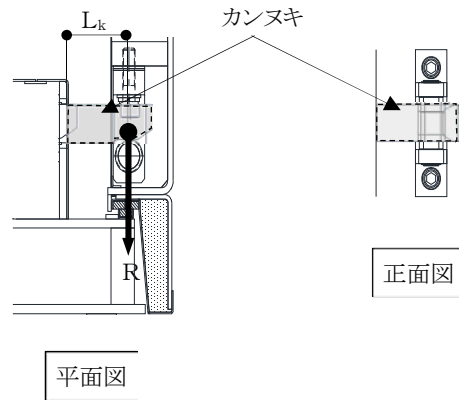


図3-20 カンヌキに生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸))

ロ. カンヌキ受けピン

カンヌキ受けピンに生じる曲げモーメント M_p とせん断力 Q_p は次式により算定する。カンヌキ受けピンに生じる荷重を図3-21～図3-23に示す。

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

$$Q_p = R$$

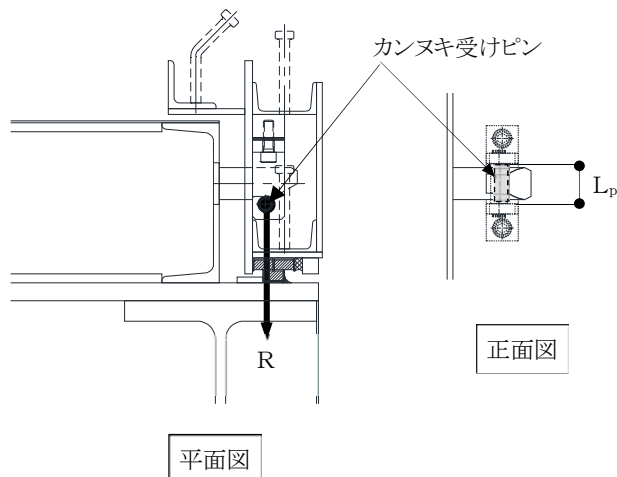


図3-21 カンヌキ受けピンに生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉)

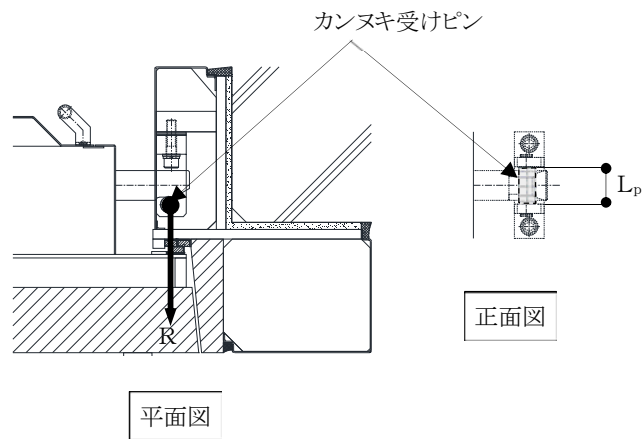


図3-22 カンヌキ受けピンに生じる荷重(電気室搬入口水密扉)

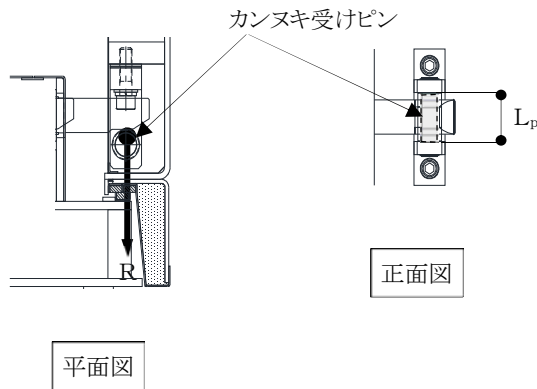


図3-23 カンヌキ受けピンに生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸))

ハ. カンヌキ受けボルト

カンヌキ受けボルトに生じる引張力Tは次式により算定する。カンヌキ受けボルトに生じる荷重を図3-24～図3-26に示す。

$$T = R$$

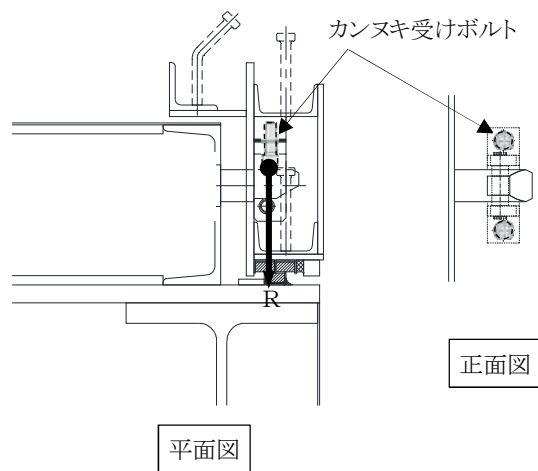


図3-24 カンヌキ受けボルトに生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉)

カンヌキ受けボルト

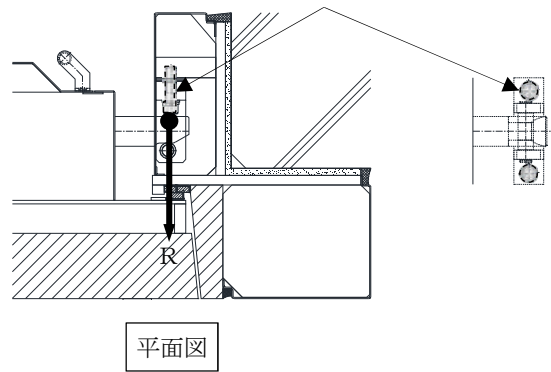


図3-25 カンヌキ受けボルトに生じる荷重(電気室搬入口水密扉)

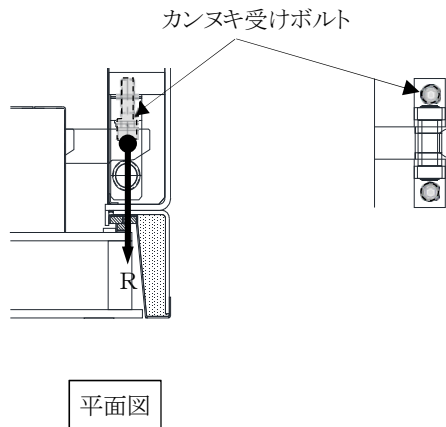


図3-26 カンヌキ受けボルトに生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸))

b. 断面検定

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

評価対象部位の許容限界を表3-20に示す。

(a) カンヌキ

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

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

(b) カンヌキ受けピン

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

$$\sigma_b = M_p / Z_p$$
$$\tau = Q_p / 2 \cdot A_p$$

(C) カンヌキ受けボルト

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

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

表3-20 評価対象部位の許容限界

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

4. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を、以下に示す。

4.1 貫通評価

4.1.1 鉄筋コンクリート造部

鉄筋コンクリート造部の貫通評価に用いる条件を表4-1に示す。

表4-1 貫通評価に用いる入力値（鉄筋コンクリート造部）

| 記号 | 記号の説明 | | 数値 | | 単位 |
|------------|-----------------|-----|-----------------------|-----|---------------------|
| α_e | 低減係数 | 鋼製材 | 1.0 | | — |
| | | 車両 | 0.65 | | — |
| d | 飛来物直径 | 鋼製材 | 27.6 | | cm |
| | | 車両 | 338.5 | | cm |
| F_c | コンクリートの設計基準強度 | | 原子炉建屋 | 225 | kgf/cm ² |
| | | | タービン建屋 | 225 | |
| | | | 使用済燃料 乾式貯蔵建屋 | 240 | |
| | | | 緊急時対策所建屋 | 300 | |
| N | 飛来物の形状係数 | 鋼製材 | 1.14 | | — |
| | | 車両 | 0.72 | | — |
| D | 飛来物直径密度 W/d^3 | 鋼製材 | 6.42×10^{-3} | | kgf/cm ³ |
| | | 車両 | 1.29×10^{-4} | | kgf/cm ³ |
| W | 飛来物重量 | 鋼製材 | 135 | | kgf |
| | | 車両 | 5000 | | kgf |
| V | 飛来物の衝突速度 | 鋼製材 | 水平 | 51 | m/s |
| | | | 鉛直 | 34 | |
| | | 車両 | 水平 | 52 | m/s |
| | | | 鉛直 | —※ | |

※：表3-4を参照

4.1.2 鋼製部

鋼製部の貫通評価に用いる条件を表4-2に示す。

表4-2 貫通評価に用いる入力値（鋼製部）

| 記号 | 記号の説明 | | 数値 | 単位 |
|----|-------|-----|------|----|
| d | 飛来物直径 | 鋼製材 | 7.90 | cm |

| | | | | |
|---|-------------|-----|-----|----|
| k | 鋼板の材質に関する係数 | | 1 | — |
| M | 飛来物重量 | 鋼製材 | 135 | kg |
| V | 飛来物の衝突速度 | 鋼製材 | 水平 | 51 |
| | | | 鉛直 | 34 |
| | | | m/s | |

4.1.3 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ

原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの変形評価における、「3. 強度評価方法」に用いる「LS-DYNA」によるFEM解析の解析ケースを以下に示す。

飛来物の衝突位置は、衝突時間が長く、被衝突部材に伝達するエネルギーが大きくなるように部材長さ（支持スパン）が最大となる位置（中央部）とする。飛来物の衝突方向は鉛直とし、衝突位置のスパンに合わせて、屋根に対して最小断面積で衝突する場合（縦衝突）とする。

解析ケースを表4-3に、解析ケース図を図4-1に示す。

表4-5 解析ケース

| 評価対象 | 飛来物 | 衝突箇所 | 飛来物の衝突方向 | 対象部材 |
|------------------------|-----|------|----------|------|
| 原子炉建屋 原子炉棟 屋根スラブ | 鋼製材 | 中央部 | 鉛直：縦 | |

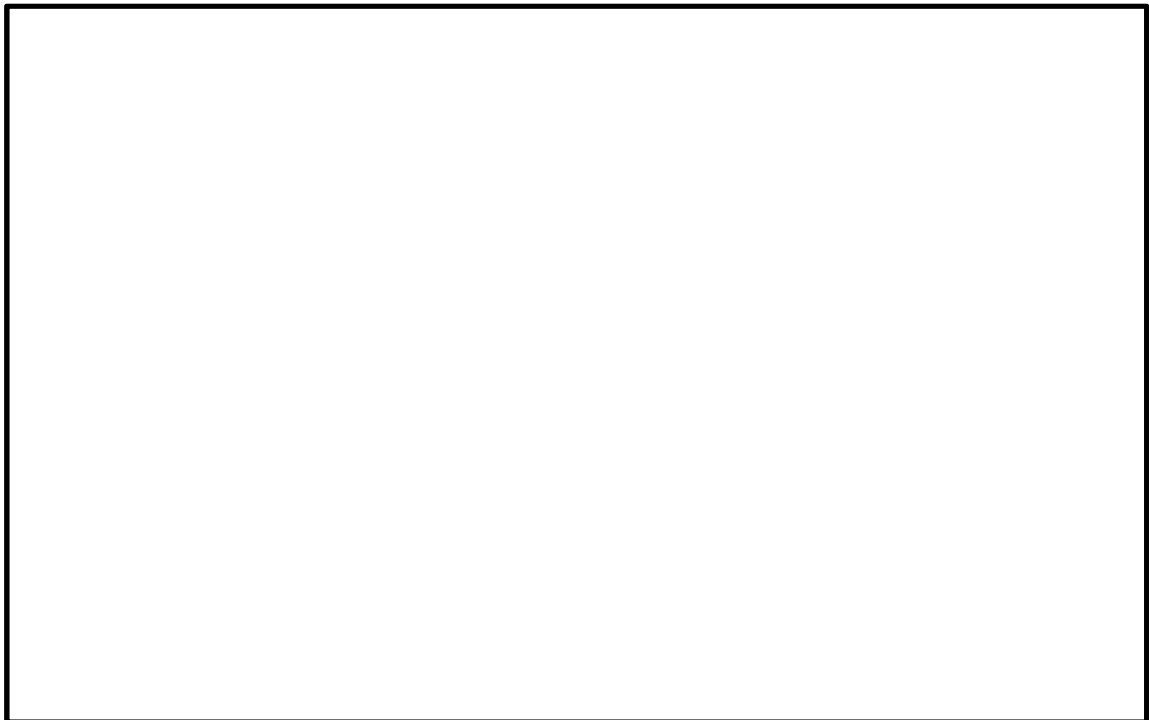


図4-1 解析ケース図

4.2 裏面剥離評価

裏面剥離評価に用いる条件を表 4-3 に示す。

表4-3 屋根スラブの裏面剥離評価式に用いる入力値

| 記号 | 記号の説明 | | 数値 | | 単位 |
|------------|---------------|-----|-----------------|-----|---------------------|
| α_s | 低減係数 | 鋼製材 | 1.0 | | — |
| | | 車両 | 0.6 | | |
| V_o | 飛来物基準速度 | 鋼製材 | 60.96 | | m/s |
| | | 車両 | 60.96 | | |
| d | 飛来物直径 | 鋼製材 | 27.6 | | cm |
| | | 車両 | 338.5 | | |
| f_c' | コンクリートの設計基準強度 | | 原子炉建屋 | 225 | kgf/cm ² |
| | | | タービン建屋 | 225 | |
| | | | 使用済燃料 乾式貯蔵建屋 | 240 | |
| | | | 緊急時対策所建屋 | 300 | |
| W | 飛来物重量 | 鋼製材 | 135 | | kgf |
| | | 車両 | 5000 | | |
| V | 飛来物の衝突速度 | 鋼製材 | 水平 | 51 | m/s |
| | | | 鉛直 | 34 | |
| | | 車両 | 水平 | 52 | |
| | | | 鉛直 | —* | |

※：表3-4を参照

4.3 変形評価

(1) 外壁

原子炉建屋，タービン建屋，使用済燃料乾式貯蔵建屋及び緊急時対策所の変形評価に用いる条件を表4-4から表4-7に示す。

表4-4 原子炉建屋変形評価の評価条件 (1/2) (RC構造部)

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

※1：風下側の係数は、風上側と同じ向きを正とする。

s

表4-4 原子炉建屋変形評価の評価条件 (2/2) (鉄骨造部分)

| 区画 | 高さ | 位置 | 風力係数 ^{※1} | 受圧面積 | |
|-----------|-------------------------------|----|--------------------|-----------------|-------|
| | | | | N-S方向 | E-W方向 |
| 付属棟 南東 | E. L. 22.0 ～ E. L. 35.0 | 風上 | 0.8 | 153 | 250 |
| | | 風下 | 0.4 | | |
| 付属棟 東側 | E. L. 14.0 ～ E. L. 22.0 | 風上 | 0.8 | — ^{※2} | 370 |
| | | 風下 | 0.4 | | |
| 隔離弁室 ① | E. L. 22.0 ～ E. L. 30.0 | 風上 | 0.8 | 45 | 50 |
| | | 風下 | 0.4 | | |
| 隔離弁室 ② | E. L. 22.0 ～ E. L. 30.0 | 風上 | 0.8 | 8.4 | 91 |
| | | 風下 | 0.4 | | |

※1：風下側の係数は、風上側と同じ向きを正とする。

※2：構造上、N-S方向に対し見附面を有しない。

表4-5 タービン建屋変形評価の評価条件

| 質点 | 高さ | 位置 | 風力係数 ^{※1} | 受圧面積 | |
|----|-------|----|--------------------|-------|-------|
| | | | | N-S方向 | E-W方向 |
| 1 | 40.64 | 風上 | 0.8 | 1408 | 585 |
| | | 風下 | 0.4 | | |
| 2 | 28.00 | 風上 | 0.8 | 1129 | 733 |
| | | 風下 | 0.4 | | |
| 3 | 18.00 | 風上 | 0.8 | 1034 | 696 |
| | | 風下 | 0.4 | | |

※1：風下側の係数は、風上側と同じ向きを正とする。

表4-6 使用済燃料乾式貯蔵建屋変形評価の評価条件

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

※1：風下側の係数は、風上側と同じ向きを正とする。

表4-7 緊急時対策所建屋変形評価の評価条件

| 質点 | 高さ | 位置 | 風力係数 | 受圧面積 | |
|----|-------|----|------|-------|-------|
| | | | | N-S方向 | E-W方向 |
| 1 | 51.00 | 風上 | 0.8 | 154 | 228 |
| | | 風下 | 0.4 | | |
| 2 | 43.50 | 風上 | 0.8 | 256 | 251 |
| | | 風下 | 0.4 | | |
| 3 | 37.00 | 風上 | 0.8 | 283 | 305 |
| | | 風下 | 0.4 | | |
| 4 | 30.30 | 風上 | 0.8 | 275 | 318 |
| | | 風下 | 0.4 | | |

(2) 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ

原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの変形評価に用いる条件を表4-8に示す。

表4-8 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ変形評価の評価条件

| 記号 | 記号の説明 | 数値 | 単位 |
|-----------------|---|---------------------|-------------------|
| q | 設計用速度圧 | 6100 | N/m ² |
| C | 風力係数 | 1.6 | — |
| G | ガスト影響係数 | 1 | — |
| ΔP | 最大気圧低下量 | 8900 | N/m ² |
| A_c | コーン状破壊面の有効投影面積 | 33123 | mm ² |
| A_0 | 頭付きアンカーボルト頭部の支圧面積 | 442.3 | mm ² |
| $s_c a$ | 頭付きアンカーボルトの断面積で、軸部断面積とねじ部有効断面積の小なる方の値 | 284 | mm ² |
| b | 部材幅 | 1000 | mm |
| d' | 部材の有効せい | 47 | mm |
| L | 屋根スラブの支持スパン | 1530 | mm |
| p | 頭付きアンカーボルトの間隔 | 360 | mm |
| D | 頭付きアンカーボルト頭部の直径 | 30.4 | mm |
| d | 頭付きアンカーボルト軸部の直径 | 19 | mm |
| F_c | コンクリートの設計基準強度 | 22.1 | N/mm ² |
| f_n | コンクリートの支圧強度 | 132.6 | N/mm ² |
| f_s | コンクリートの許容せん断応力度 | 1.07 | N/mm ² |
| f_t | 鉄筋の許容引張応力度 | 324.5 | N/mm ² |
| a_t | 引張鉄筋断面積 | 705 | mm ² |
| j | 応力中心間距離 ($j = (7/8) \cdot d'$) | 41.1 | mm |
| l_{ce} | 頭付きアンカーボルトの強度計算用埋込み長さ ($l_{ce} = l_e$) | 88.6 | mm |
| l_e | 頭付きアンカーボルトのコンクリート内への有効埋込み長さ | 88.6 | mm |
| $c \sigma_t$ | コーン状破壊に対するコンクリートの引張強度 | 6.851 | N/mm ² |
| $s \sigma_{pa}$ | 頭付きアンカーボルトの引張強度 | 235 | N/mm ² |
| $s \sigma_y$ | 頭付きアンカーボルトの規格降伏点強度 | 235 | N/mm ² |
| ϕ_1 | 低減係数 | 1 | — |
| ϕ_2 | 低減係数 | 0.67 | — |
| ωd | 常時作用する荷重による単位幅あたりの荷重 | 3.472 | kN/m |
| $\omega T1$ | 評価に用いる竜巻の荷重 W_{T1} による単位幅あたりの荷重 | -8.9 [*] | kN/m |
| $\omega T2$ | 評価に用いる竜巻の荷重 W_{T2} による単位幅あたりの荷重 | -14.21 [*] | kN/m |

※：下向きの荷重を正の値とする。

- (3) 原子炉建屋大物搬入口扉のうち原子炉建屋原子炉棟水密扉
 原子炉建屋原子炉棟水密扉の変形評価に用いる条件を表4-8に示す。

表4-8 原子炉建屋原子炉棟水密扉の変形評価の評価条件

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

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

表4-9 原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉の変形評価の評価条件

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

(5) その他の外殻となる扉

a. 原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)

原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)の変形評価に用いる条件を表4-10に示す。

表4-10 原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)の変形評価の評価条件

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

5. 強度評価結果

5.1 貫通評価

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

表5-1 貫通評価結果(1/2) (式による評価)

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

※：表5-2(2/2)により内包する防護すべき施設への影響がないことを確認

表5-1 貫通評価結果(2/2) (解析による評価)

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

5.2 裏面剥離評価

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

表 5-2 裏面剥離評価結果(1/2) (式による評価)

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

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

表5-2 裏面剥離評価結果(2/2) (解析による評価)

| 評価項目 | | 部位 | 飛来物 | 評価結果 (-) | 許容限界 (-) |
|------------|-------|-------|-----|-------------|-------------|
| 評価 裏面剥離 | 原子炉建屋 | 屋根スラブ | 鋼製材 | 追而 | |
| | | 外壁 | 鋼製材 | | |

5.3 変形評価

(1) 外壁

建屋に生じるせん断ひずみと許容限界の比較を表5-3に示す。建屋に生じるひずみが許容限界を超えないことを確認した。

表 5-3 変形評価結果（建屋）

| 評価項目 | 評価結果 | 評価結果 | 許容限界 |
|---------------|-------------|------|------|
| 建屋の せん断ひずみ | 原子炉建屋 | 追而 | |
| | タービン建屋 | | |
| | 使用済燃料乾式貯蔵建屋 | | |
| | 緊急時対策所 | | |

(2) 原子炉建屋（鉄骨構造部）

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

| 評価項目 | 評価結果 | 許容限界 |
|------|------|------|
| | 追而 | |

(3) 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ

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

表5-4 変形評価結果（原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ）

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

(3) 扉

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

表5-5 変形評価結果

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

(注1) 曲げ及びせん断のうち評価結果が厳しい方の値を記載

V-3-別添 1-2-1-3 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 | 38 |
| 5. | 強度評価結果 | 42 |
| 5.1 | 貫通評価 | 42 |
| 5.2 | 支持機能評価 | 42 |

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。

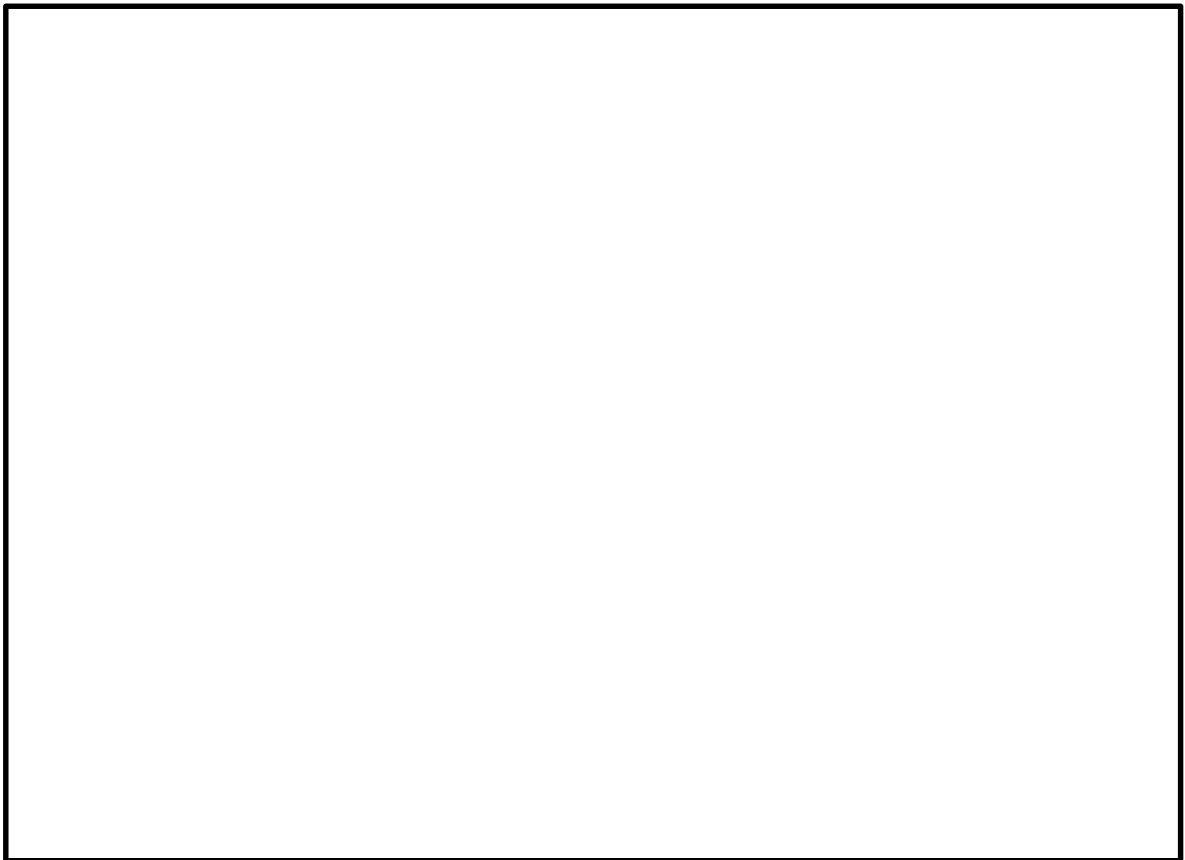


図 2-1 架構の設置位置図

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。

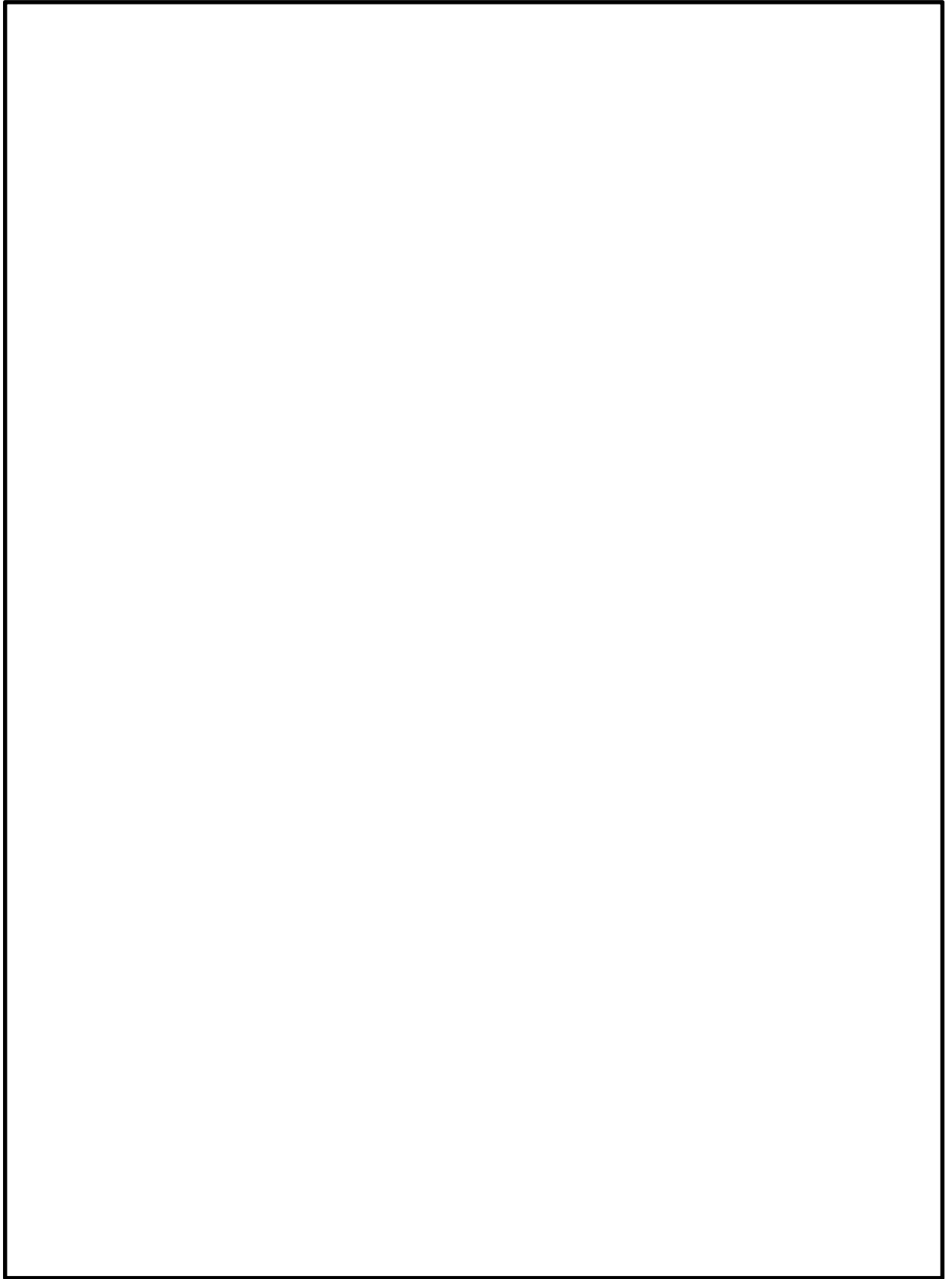


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造図(1/4)
(2 C 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

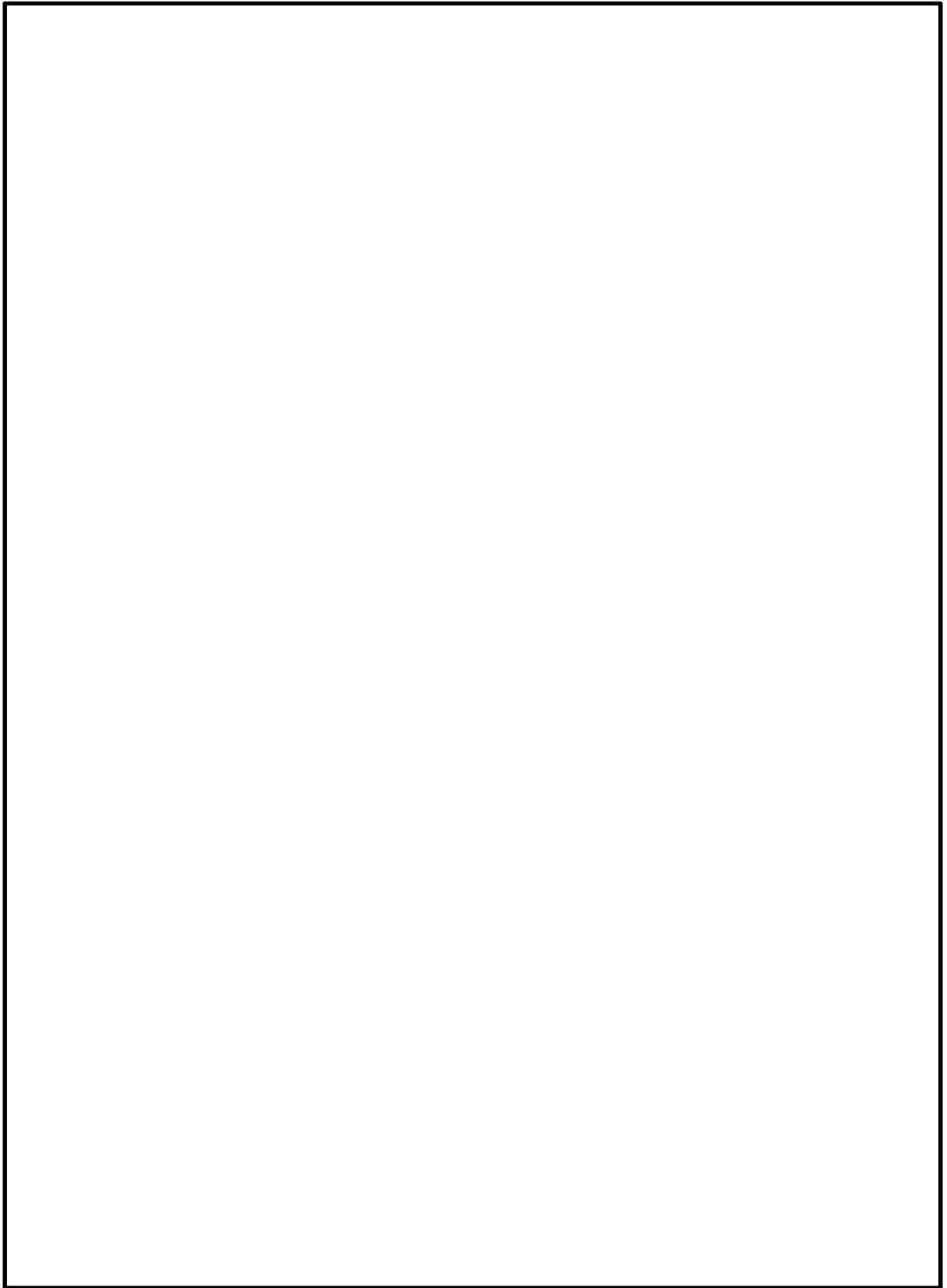


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造図(2/4)
(2D非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設(1/2))

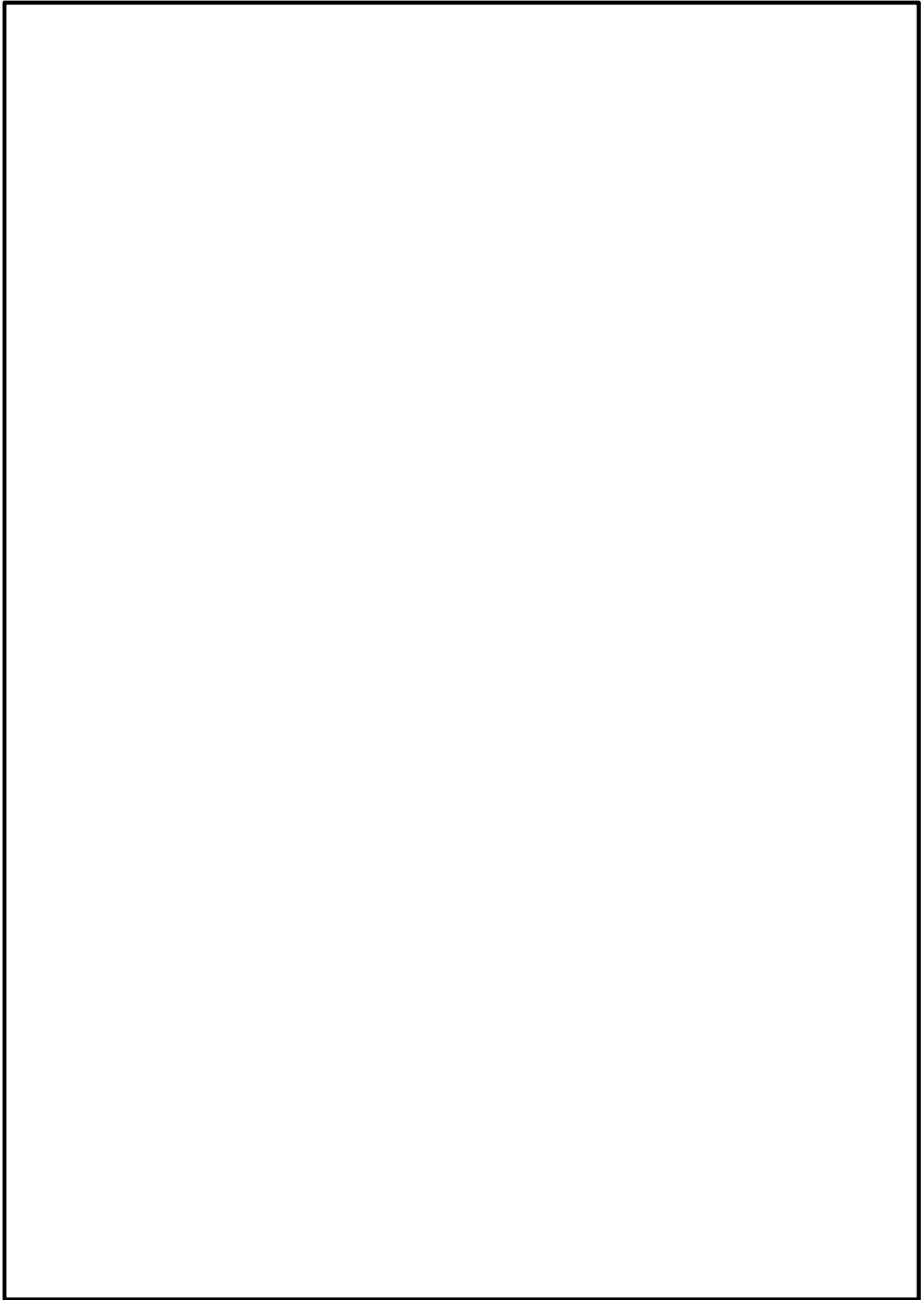


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造図(3/4)
(2 D非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設(2/2))

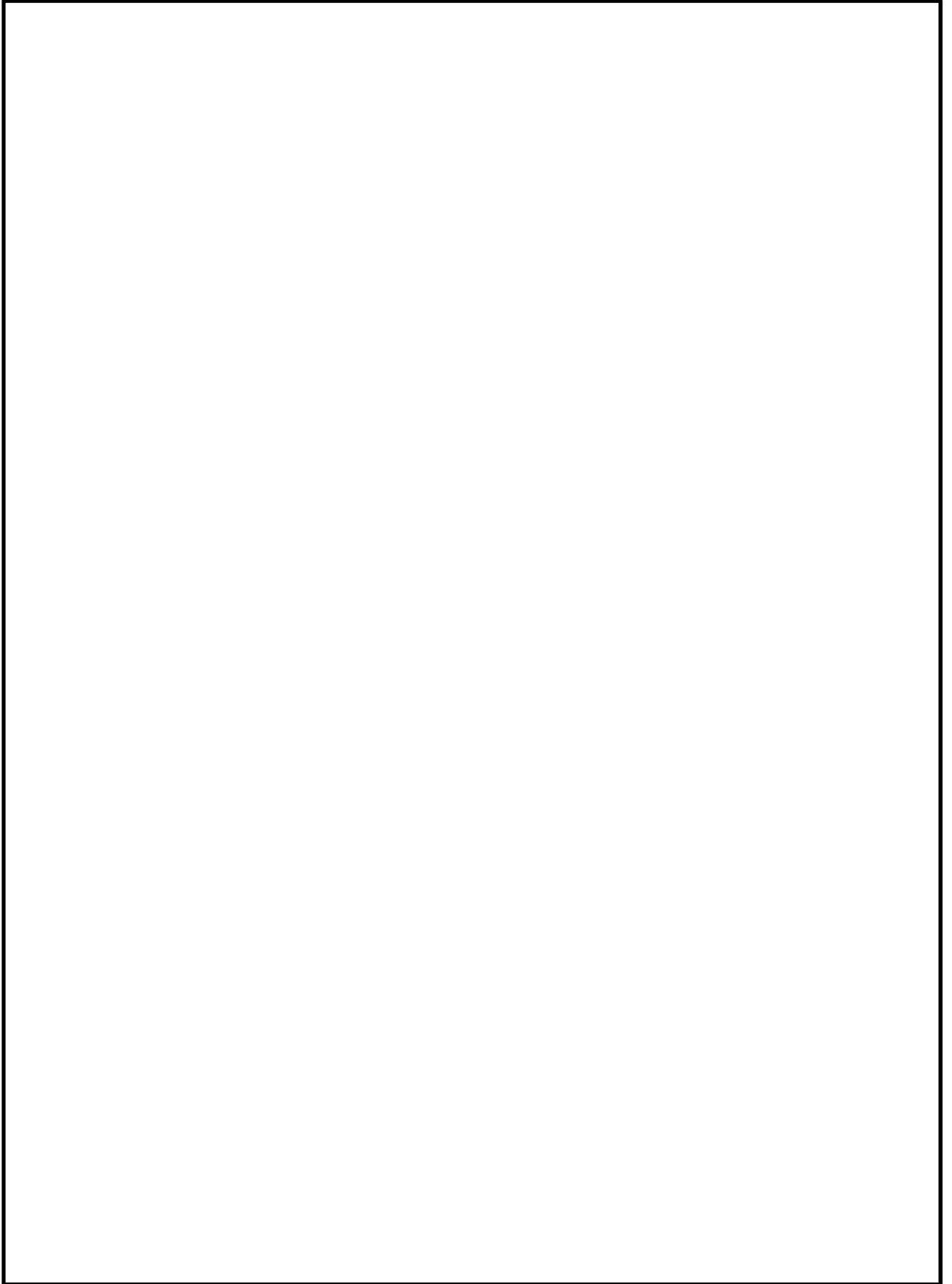


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設架構の構造図(3/4)
(高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設)

(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。

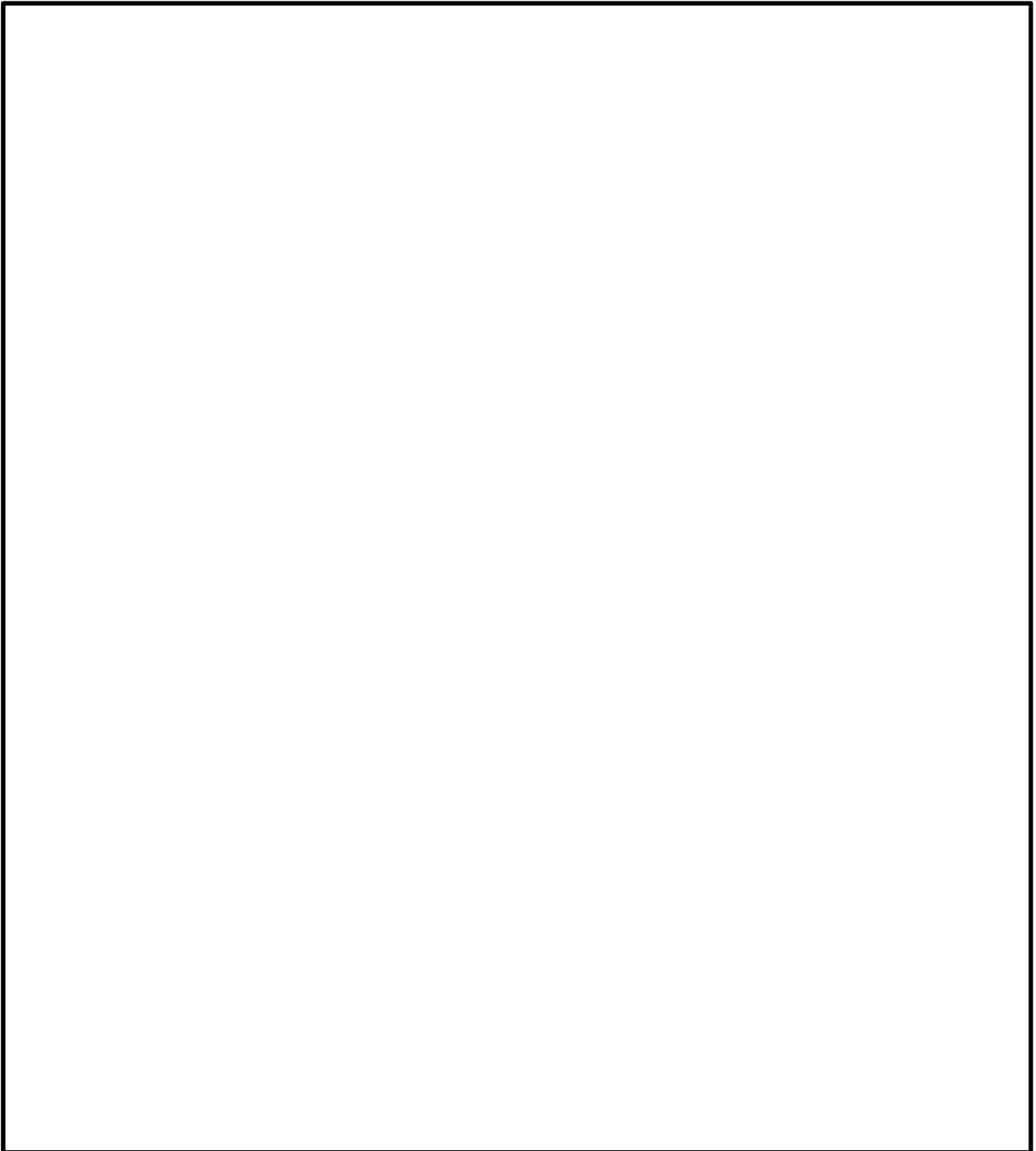


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(1/6)

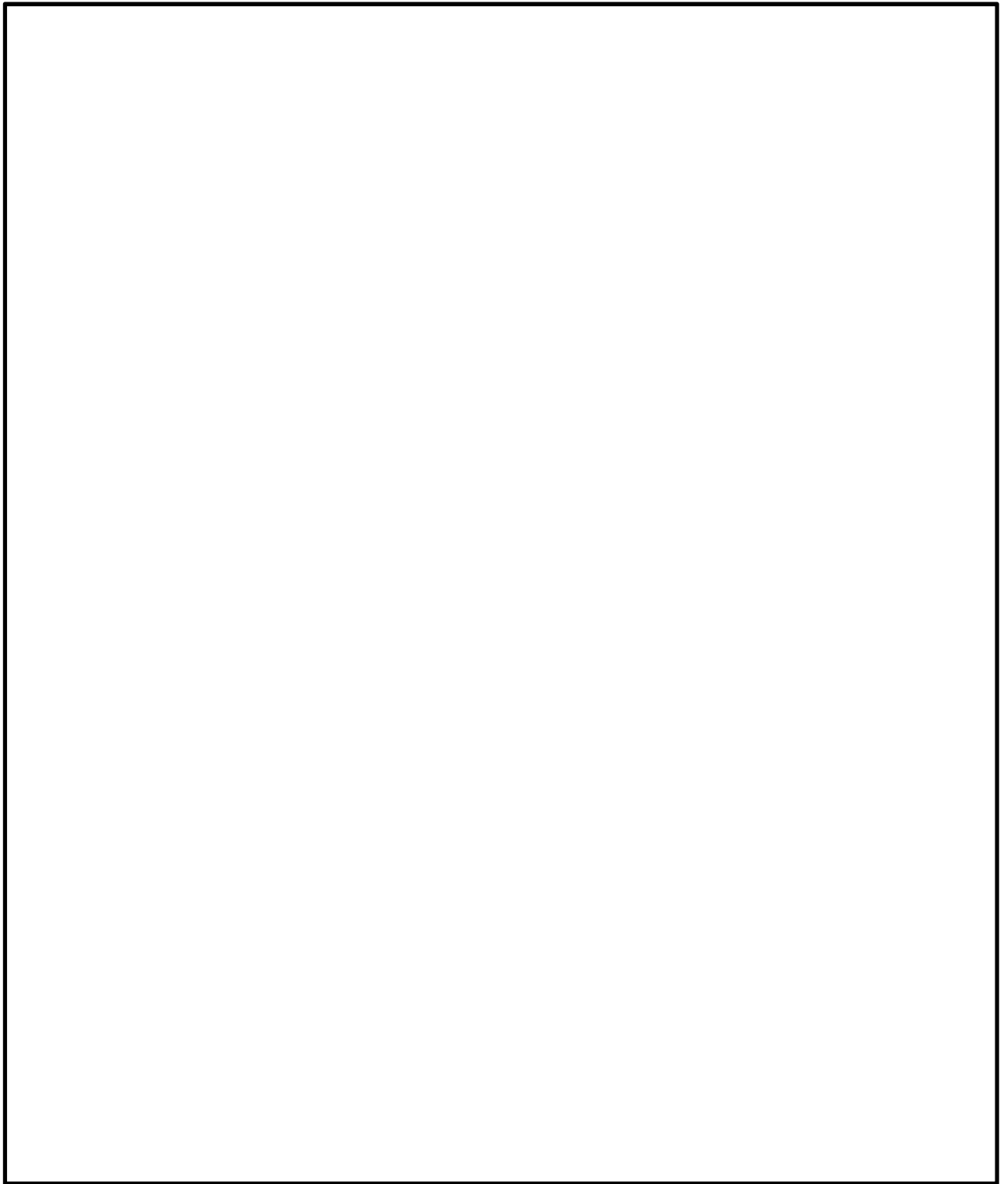


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(2/6)

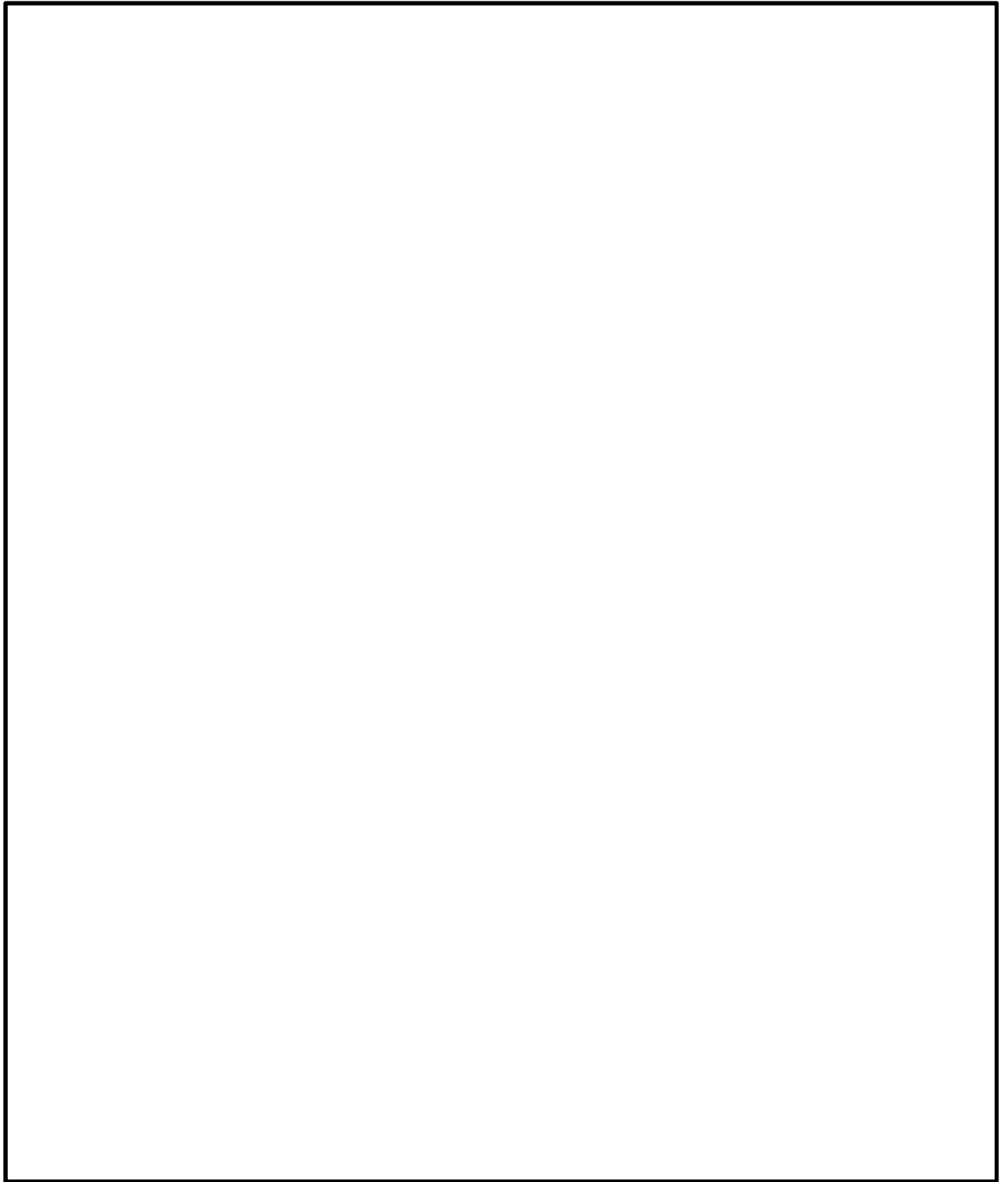


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(3/6)

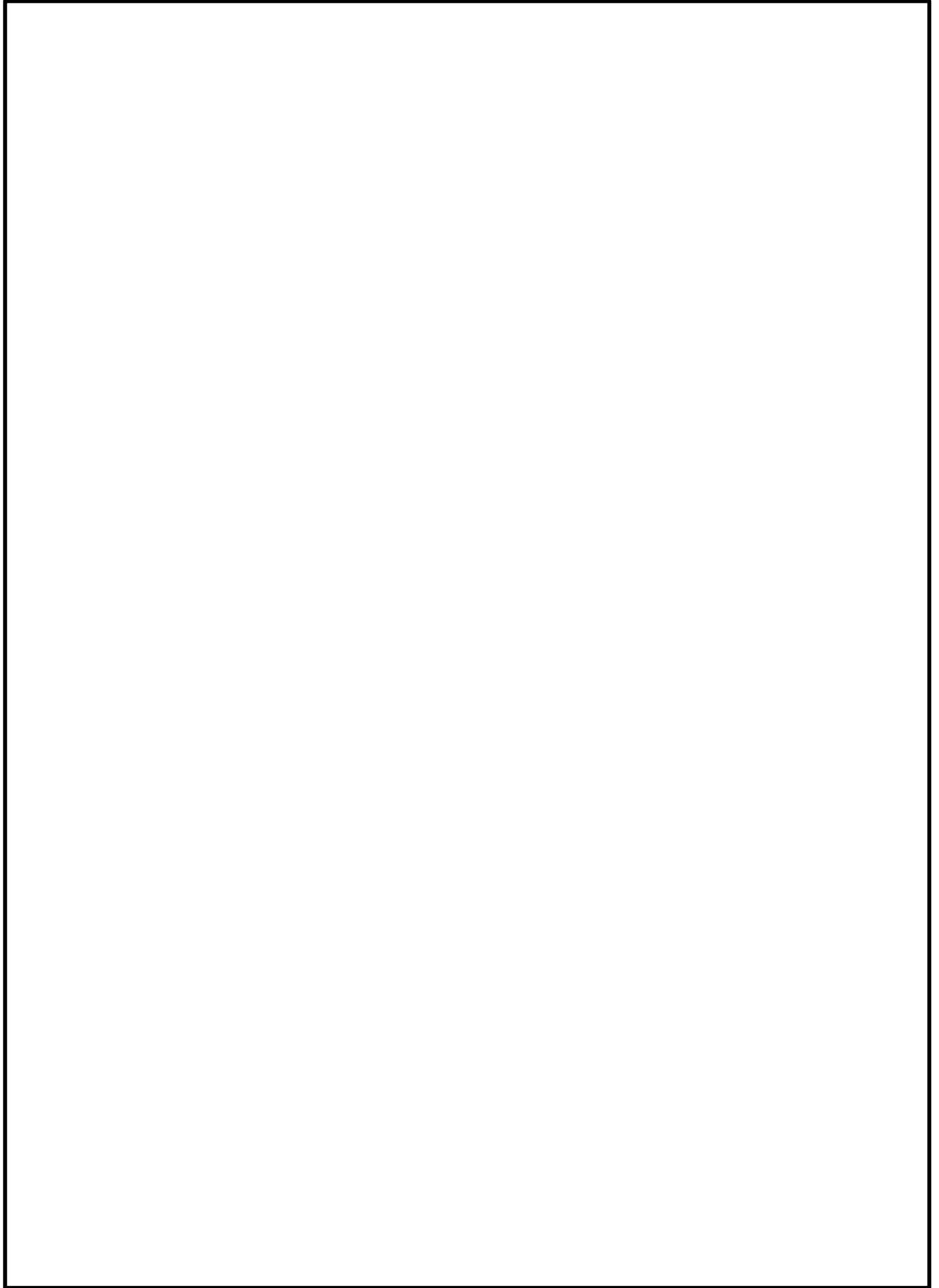


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(4/6)

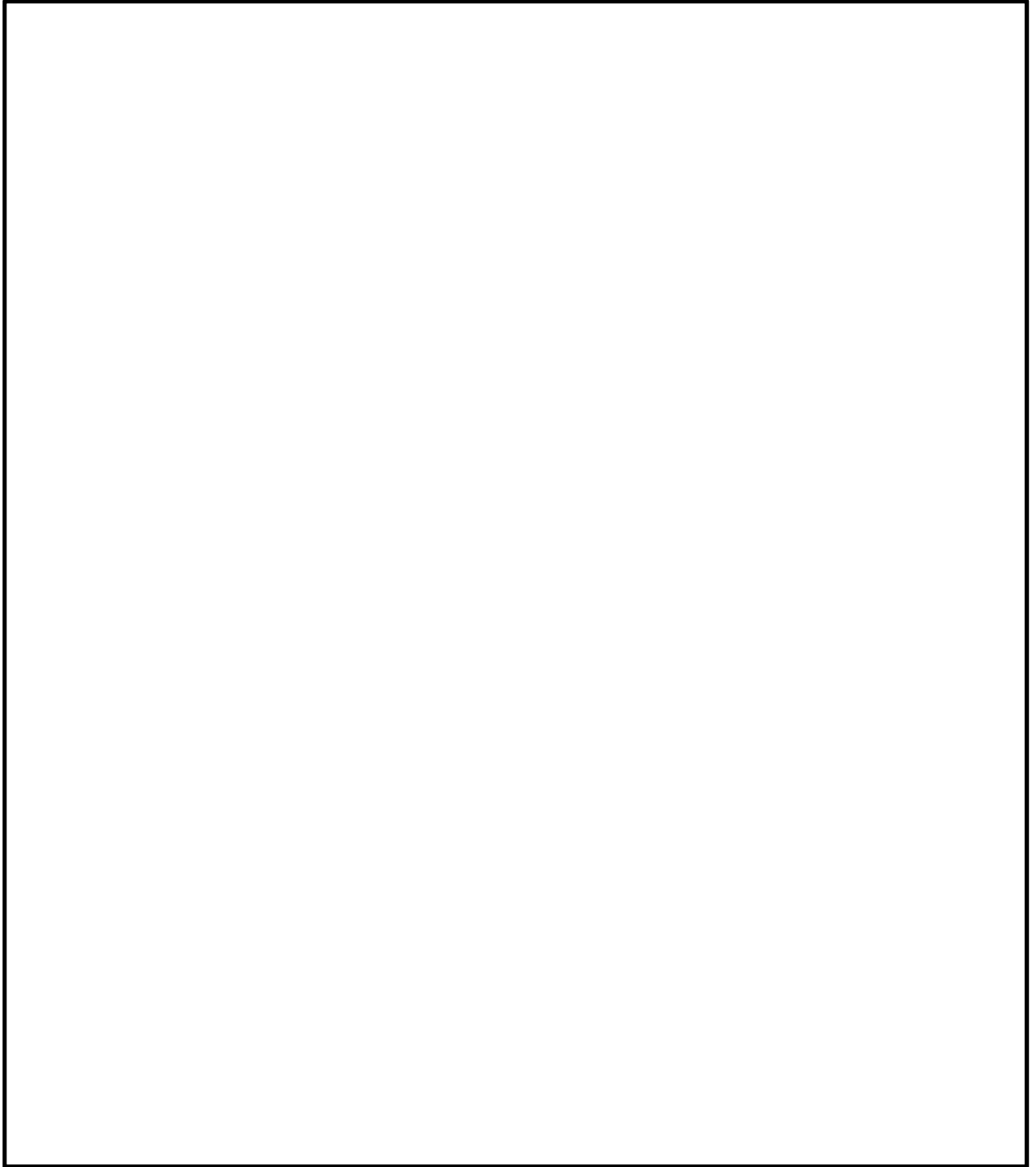


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(5/6)

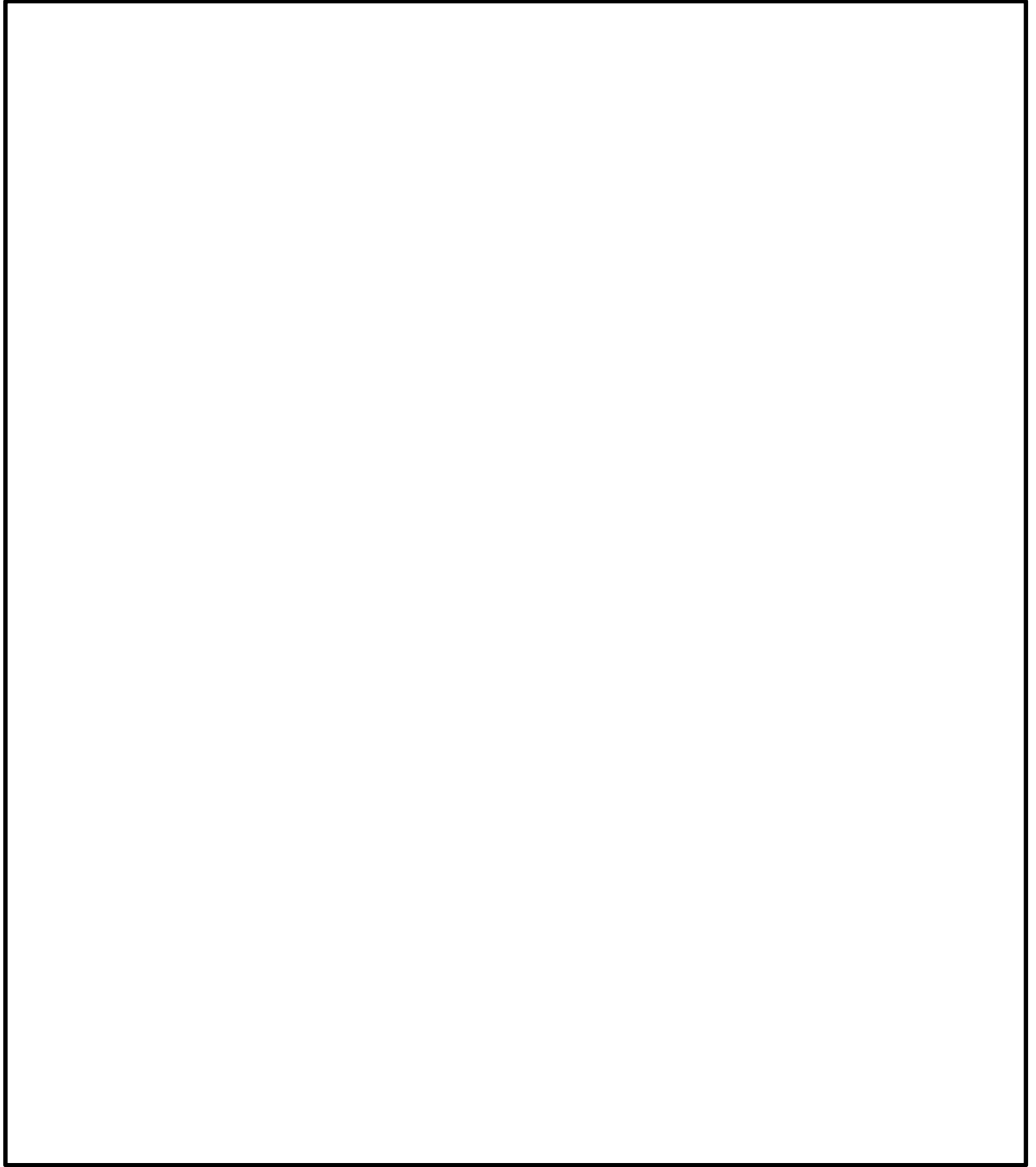


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(6/6)

(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。

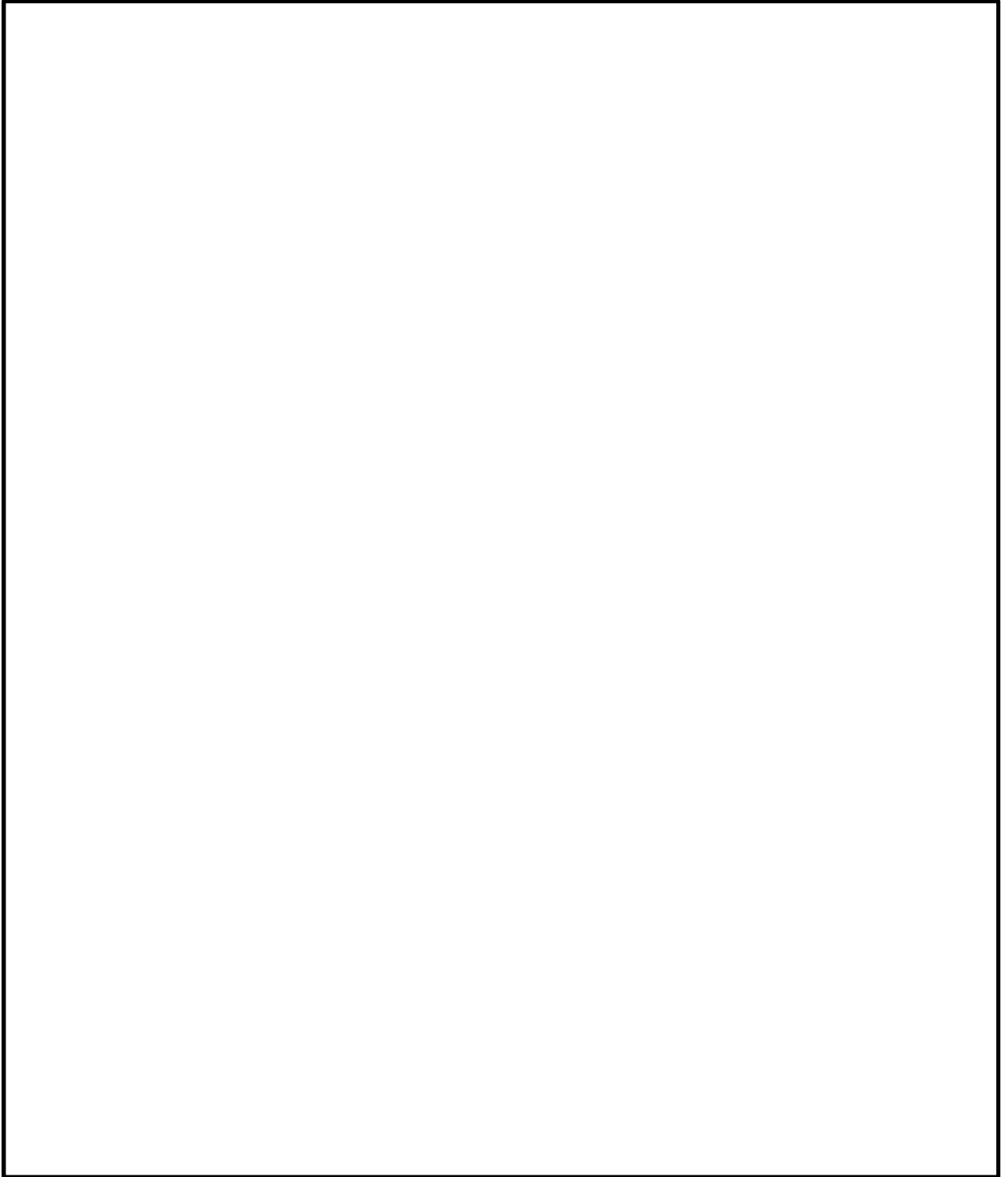


図 2-4 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構の構造図 (1/2) (エリア⑦)

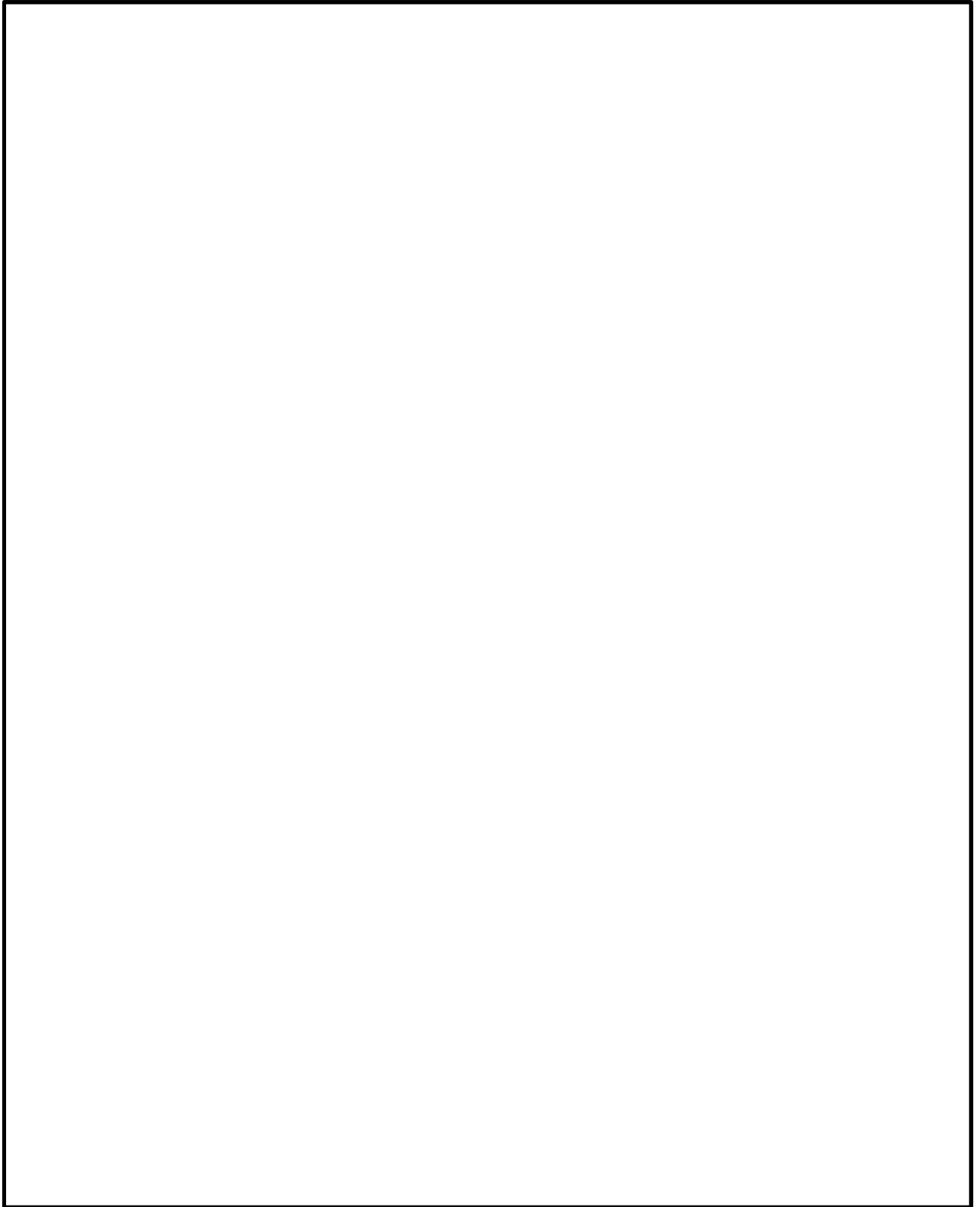


図 2-4 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構の構造図 (2/2) (エリア⑧)

(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。

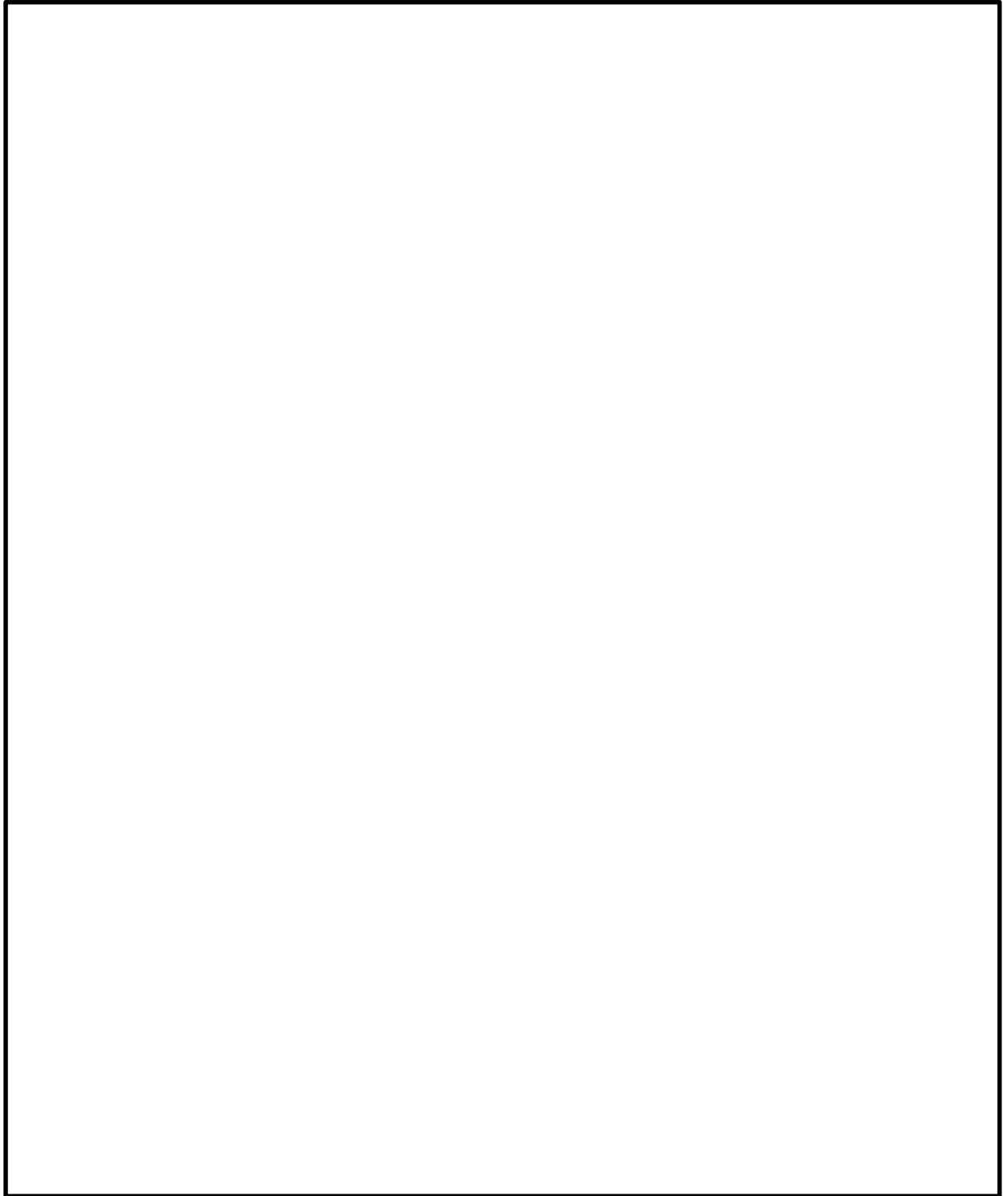


図 2-5 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構の構造図

(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。

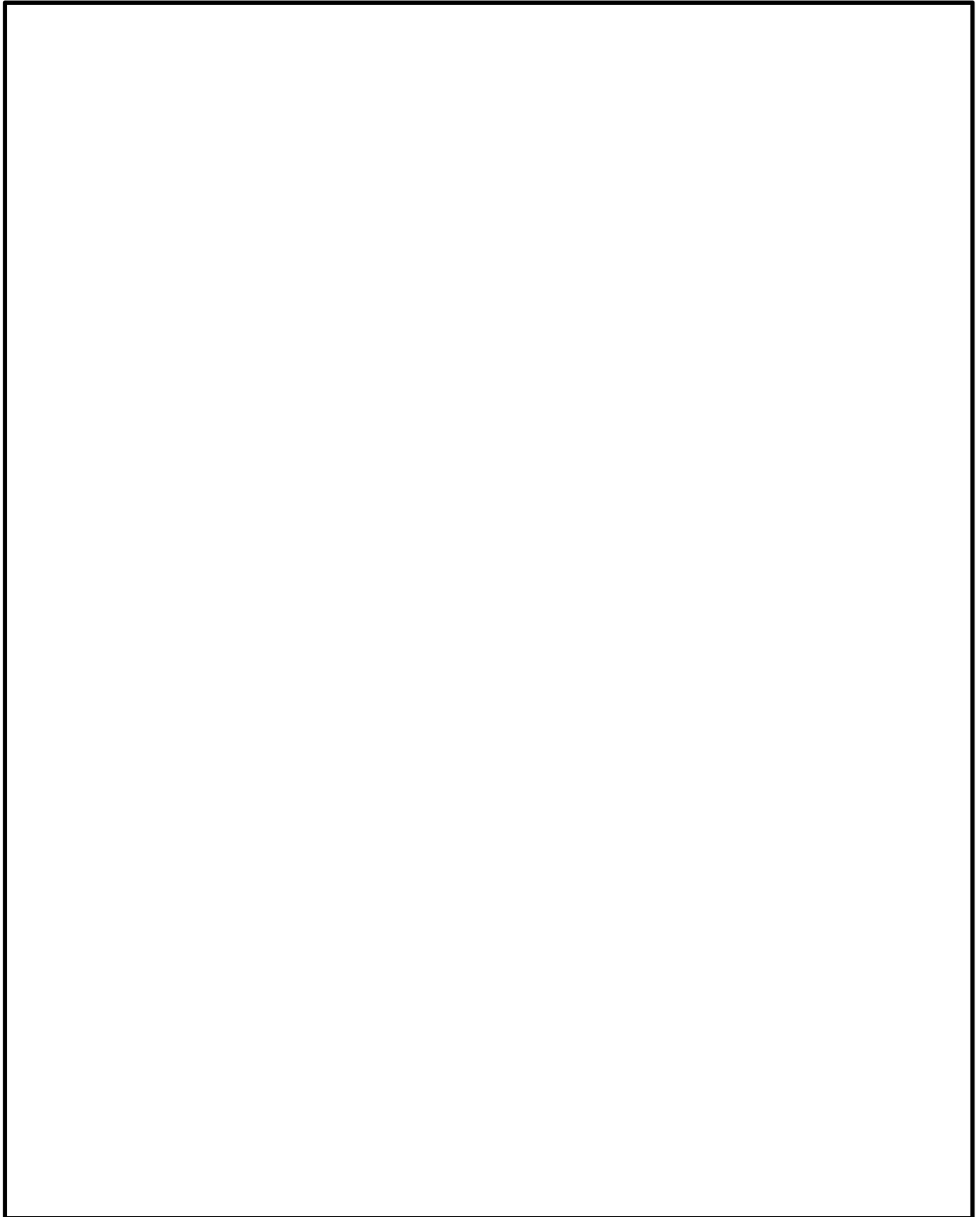


図 2-6 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構の構造図

(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。

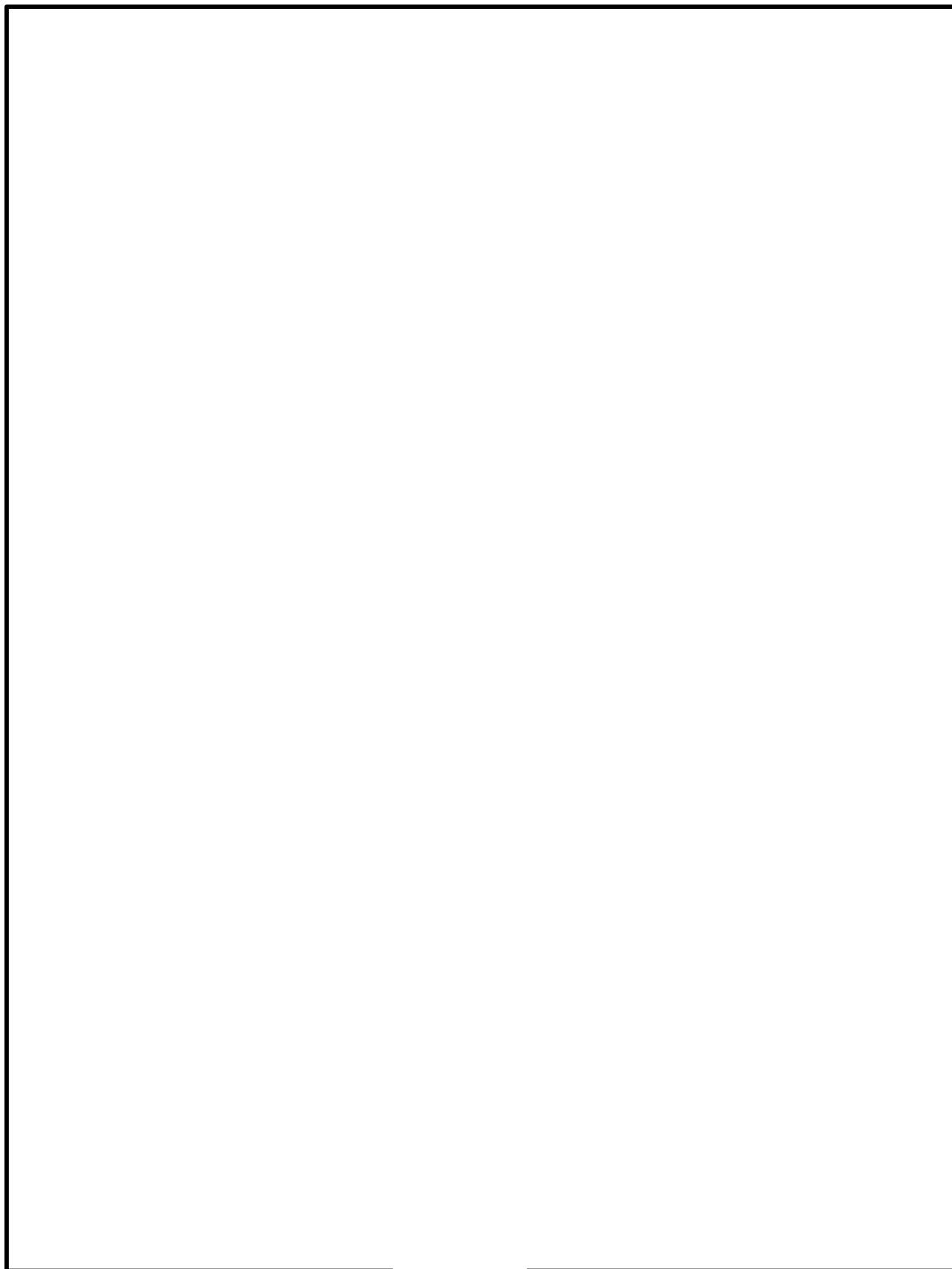


図 2-7 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構の構造図

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、架構部材が全断面欠損に至らないことを確認する。

(2) 支持機能評価

a. 架構部材の支持機能評価

飛来物の架構、防護ネット及び防護鋼板への衝突において、架構部材に破断が生じないよう十分な余裕を持った強度が確保されていることを確認する。

b. 架構全体の支持機能評価

飛来物が衝突した際の衝撃荷重により架構全体に作用する応答加速度に対して、防護対策施設の倒壊に至るような架構の変形が生じないように、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。

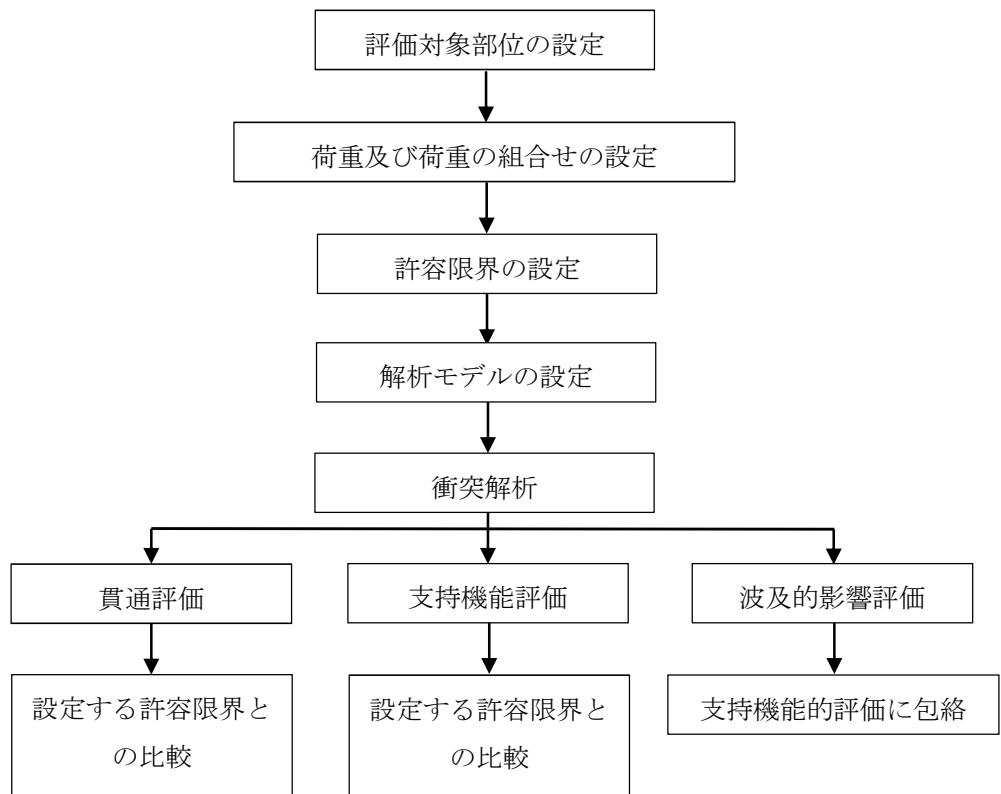


図 2-8 架構の評価フロー

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 J E A G 4 6 0 1 ・ 補 - 1984」 （社）日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987」 （社）日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」 （社）日本電気協会
- ・日本工業規格(J I S)
- ・「建築物荷重指針・同解説」 （（社）日本建築学会，2004 改定）
- ・「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—」 （（社）日本建築学会，2005 改定）
- ・「鋼構造接合部設計指針」 （（社）日本建築学会，2012 改定）
- ・Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8(NEI 07-13))
- ・「伝熱工学資料（改訂第4版）」 （（社）日本機械学会）

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

3.1.1 荷重の設定

荷重の設定に用いる記号を表 3-1 に示す。

表 3-1 荷重の設定に用いる記号

| 記号 | 単位 | 定 |
|-------------------|-------------------|------------|
| 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。

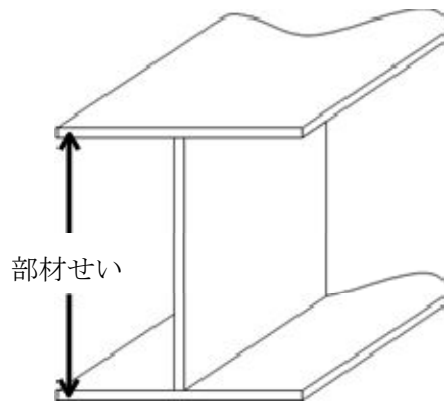


図 3-1 貫通評価における許容限界とする部材せい

(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。

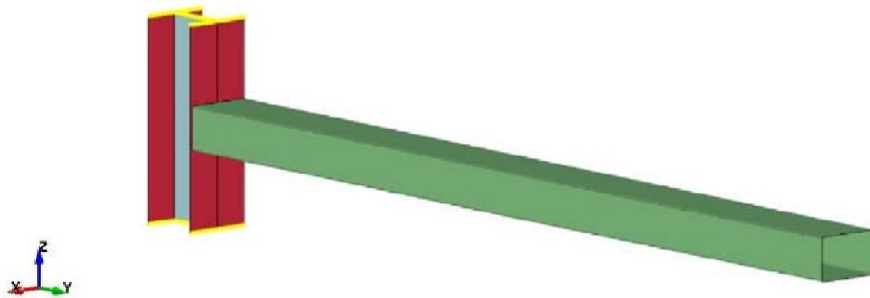


図 3-2 貫通評価モデル図(代表部材モデルと飛来物)

(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の場合に架構部材端部に破断が生じないことを確認することにより、その部材の近傍の部材についても、破断が生じないことを確認する。

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

b. 架構全体の支持機能評価

非常用ディーゼル発電機室ルーフ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。

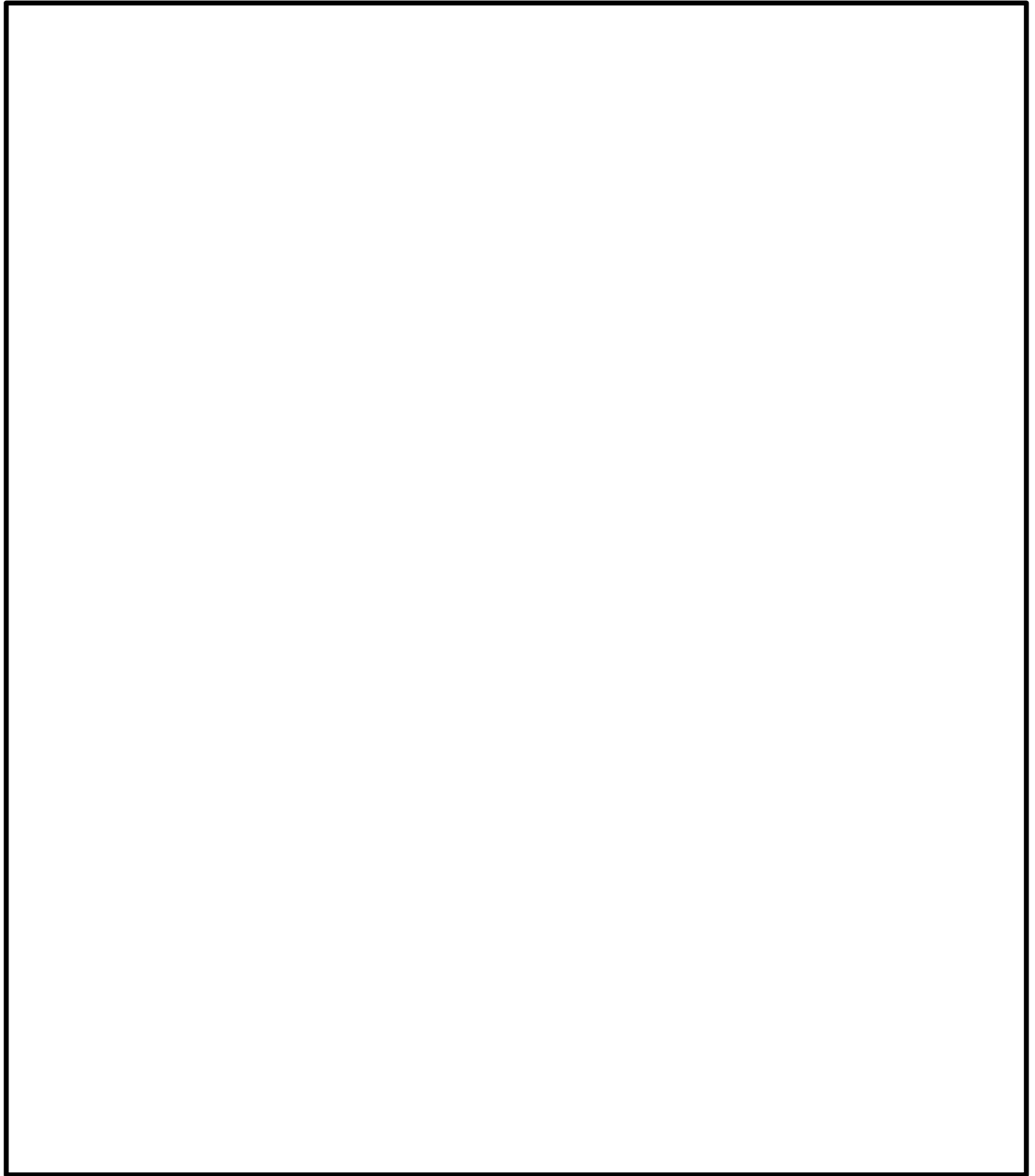


図 3-3 解析モデル図(非常用ディーゼル発電機室ーフベントファン竜巻防護対策施設架構)

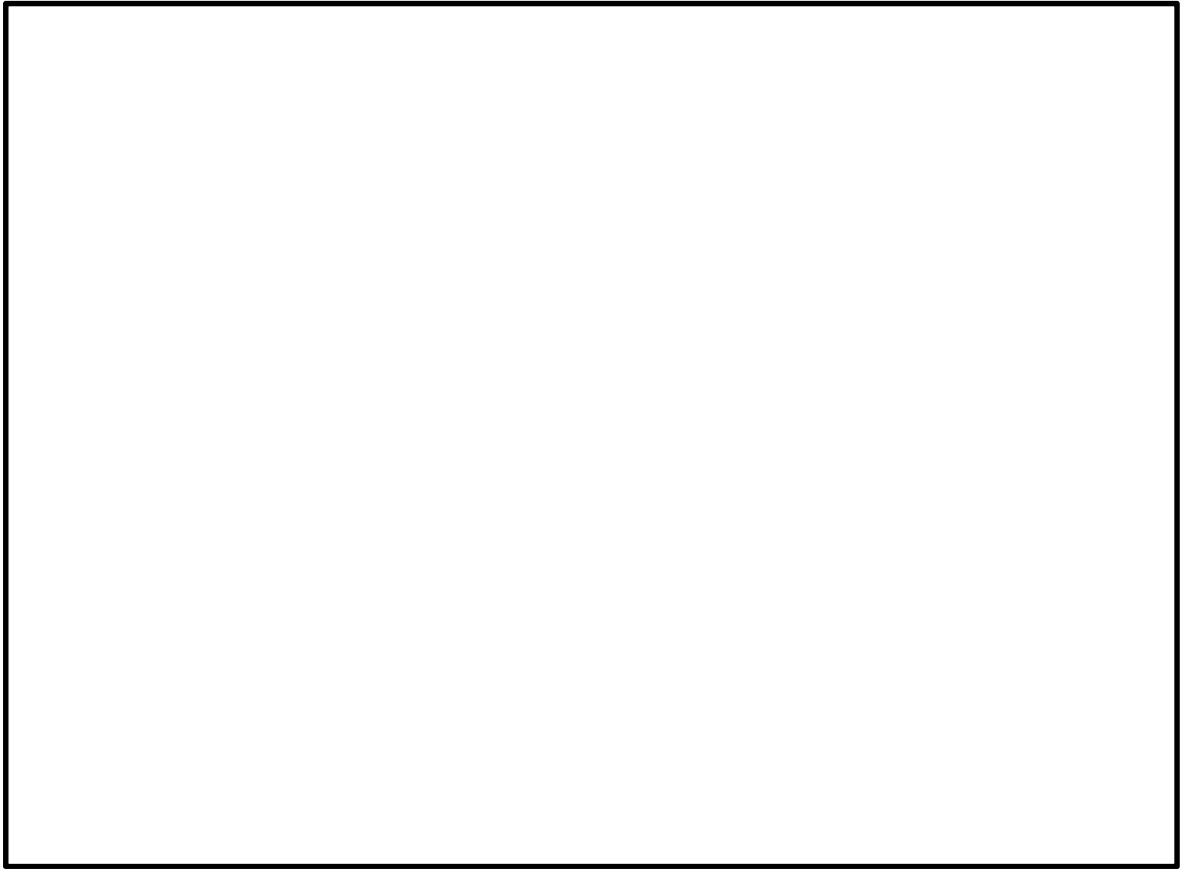


図 3-4 解析モデル図(中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構)

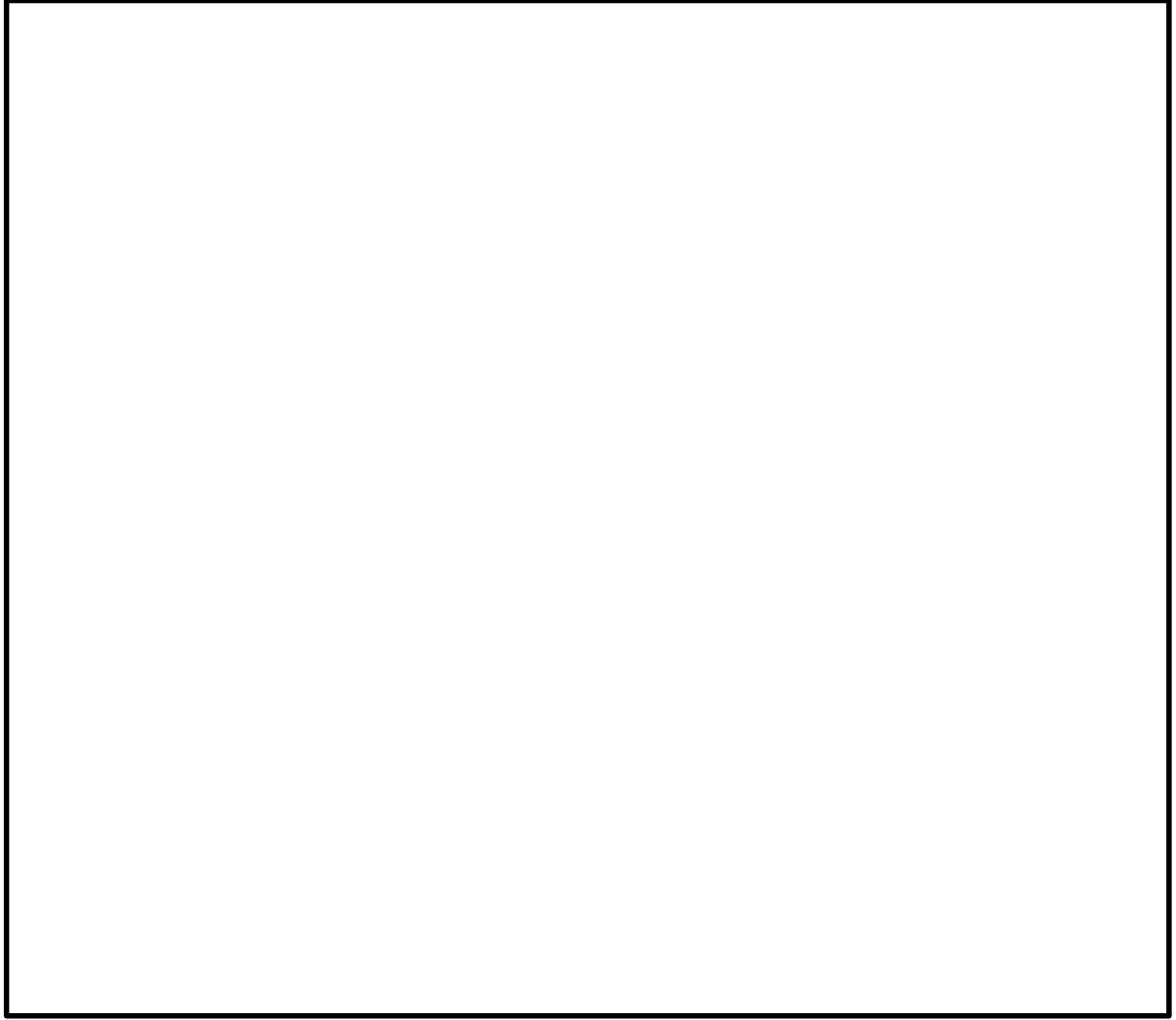


図 3-5 解析モデル図(海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構)

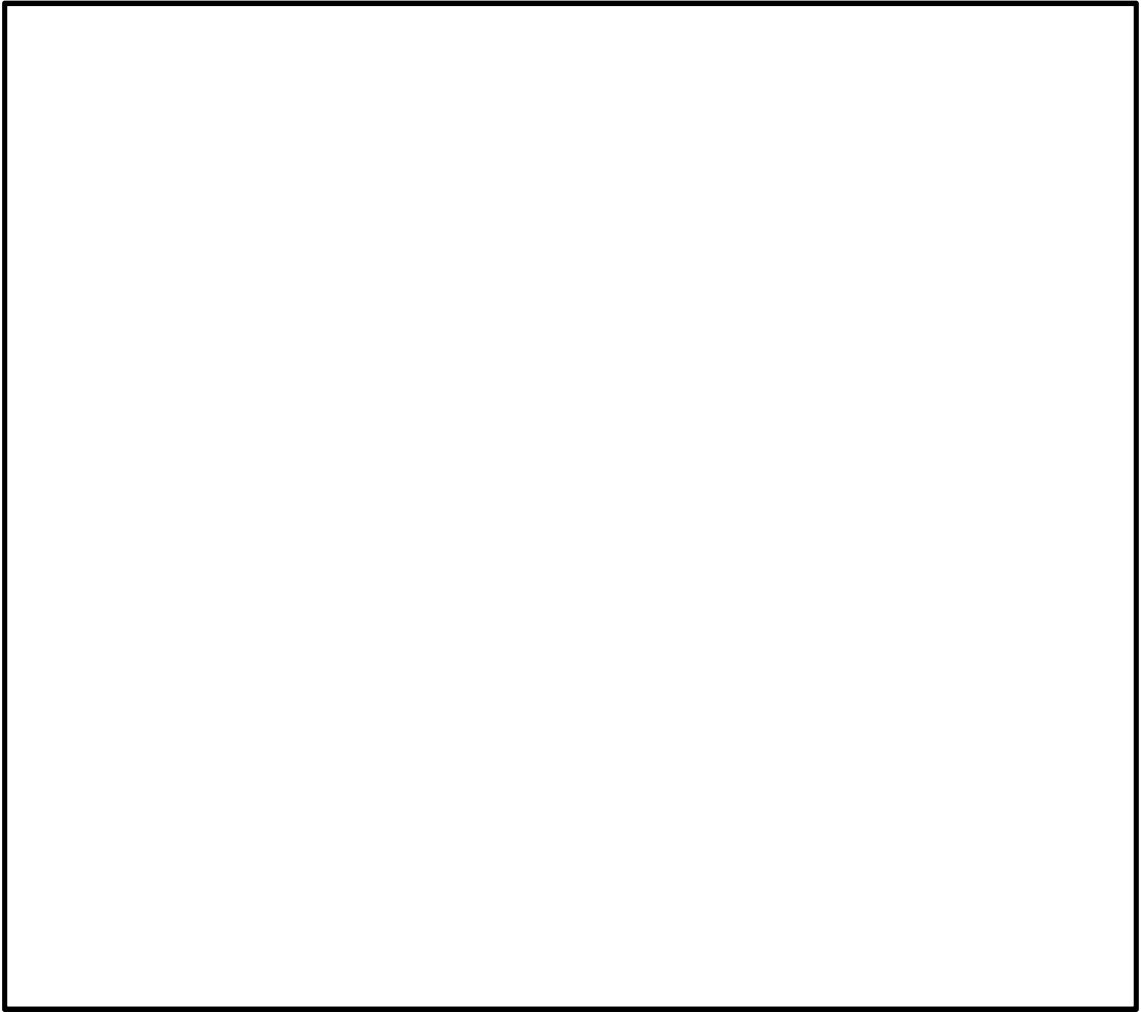


図 3-6 解析モデル図(原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構)

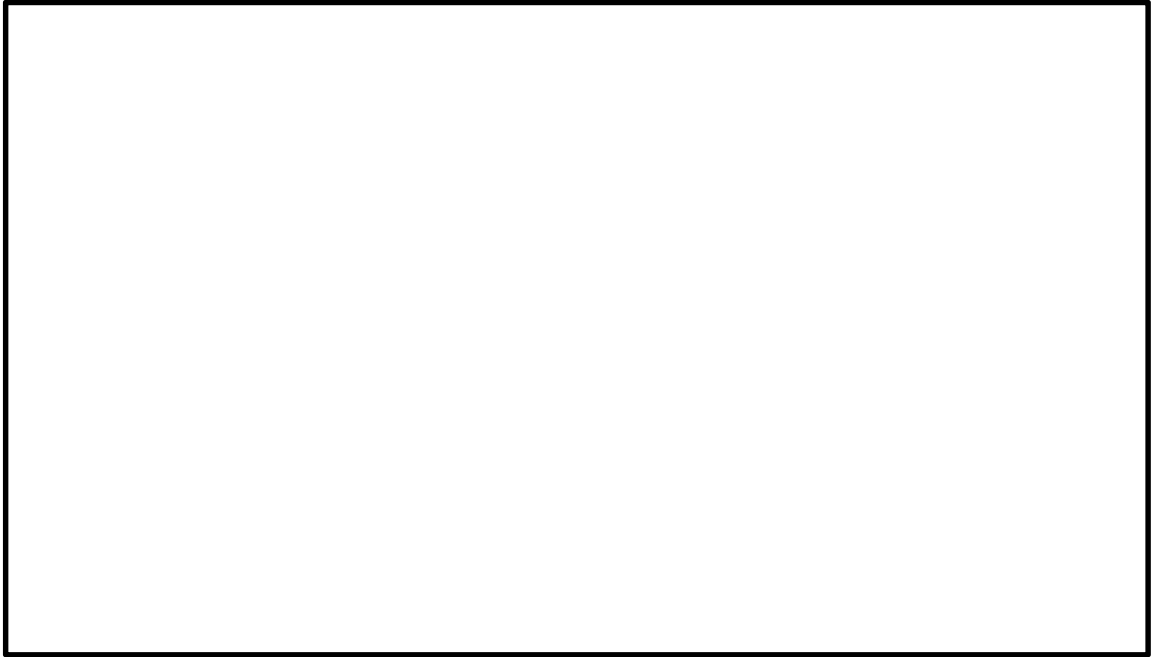


図 3-7 解析モデル図(中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構)

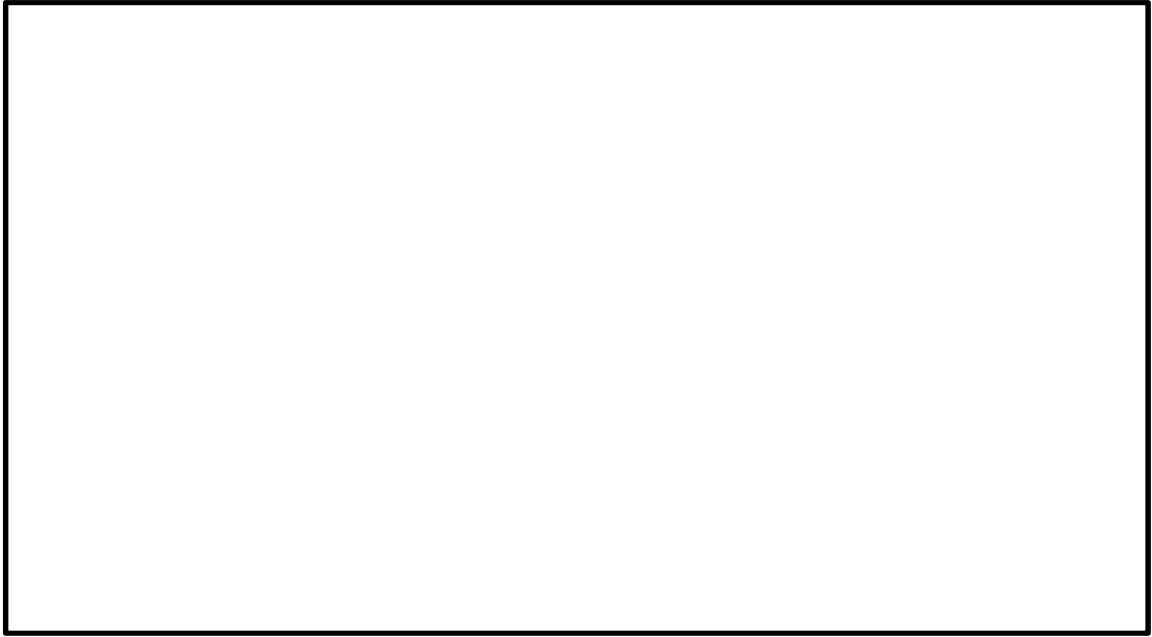


図 3-8 解析モデル図(使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構)

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

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。

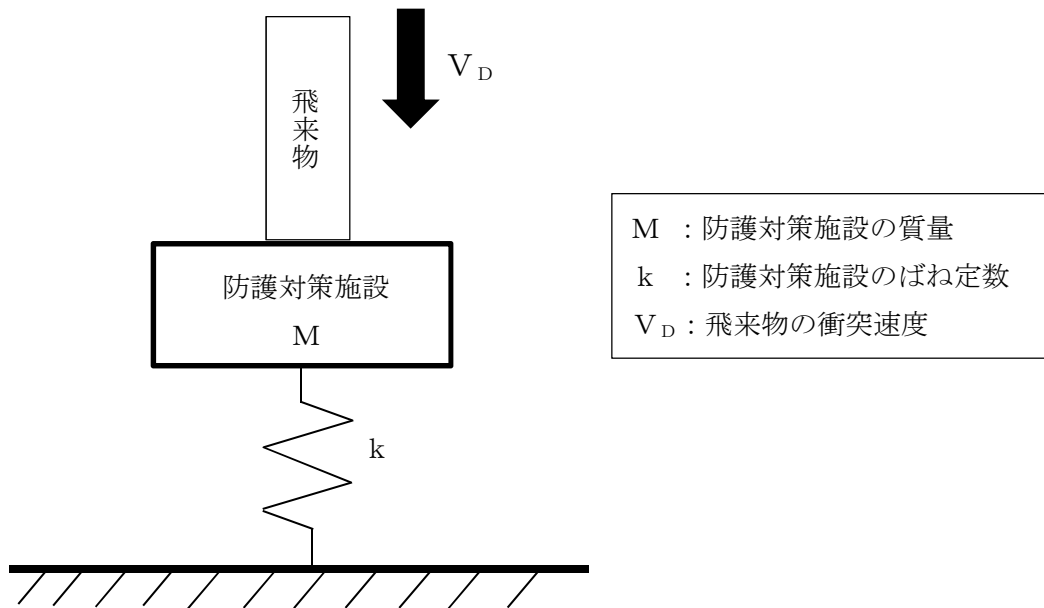


図 3-12 応答加速度評価モデル

(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。

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

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。

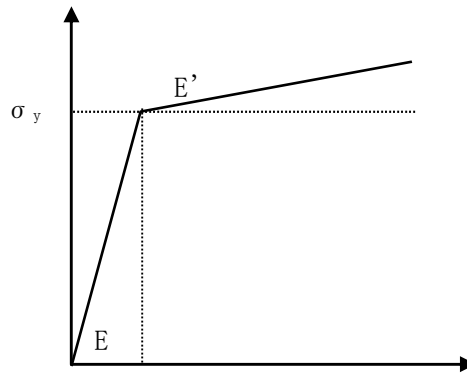


図 4-1 バイリニア型応力-ひずみ関係の概念図

(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 | |
| | 追而 | | | | | | Z 方向 |
| | | | | | | | X 方向 |
| | | | | | | | Y 方向 |

表 3-16 固有振動数(中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構)

| 次数 | 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 3-17 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 | |
| | 追而 | | | | | | Z 方向 |
| | | | | | | | X 方向 |
| | | | | | | | Y 方向 |

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

| 次数 | 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 3-19 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 | | 水平 | X | 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 | | | | | | | | 水平 | X | | | |
| | | | | | | | | | Y | | | |
| | 鉛直 | Z | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構 | 追而 | | | | 水平 | X | 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 | | | | | 水平 | X | | | | | | |
| | | | | | | Y | | | | | | |
| | 鉛直 | Z | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構 | | | | | 水平 | X | | | | | | |
| | | | | | | Y | | | | | | |
| | | | 鉛直 | Z | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構 | | | 追而 | | 水平 | X | | | | 追而 | | |
| | | | | | | Y | | | | | | |
| | 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