

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点や防護上の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-工-B-20-0086_改1
提出年月日	2021年7月2日

VI-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

2021年7月

東北電力株式会社

目 次

1. 鉄筋コンクリート造構造物の強度計算.....	1
1.1 概要.....	1
1.2 基本方針.....	2
1.2.1 位置.....	2
1.2.2 構造概要.....	3
1.2.3 評価方針.....	14
1.2.4 適用規格.....	17
1.3 強度評価方法.....	18
1.3.1 記号の定義.....	18
1.3.2 評価対象部位.....	21
1.3.3 荷重及び荷重の組合せ.....	22
1.3.4 許容限界.....	26
1.3.5 評価方法.....	29
1.4 評価条件.....	58
1.4.1 貫通評価.....	58
1.4.2 裏面剥離評価.....	59
1.4.3 変形評価.....	61
1.5 強度評価結果.....	66
1.5.1 貫通評価.....	66
1.5.2 裏面剥離評価.....	67
1.5.3 変形評価.....	70
2. 鋼製構造物の強度計算.....	71
2.1 概要.....	71
2.2 基本方針.....	72
2.2.1 位置.....	72
2.2.2 構造概要.....	75
2.2.3 評価方針.....	78
2.2.4 適用規格.....	81
2.3 強度評価方法.....	82
2.3.1 記号の定義.....	82
2.3.2 評価対象部位.....	84

2.3.3	荷重及び荷重の組合せ	91
2.3.4	許容限界	93
2.3.5	評価方法	96
2.4	評価条件	108
2.4.1	貫通評価	108
2.4.2	変形評価	108
2.4.3	応力評価	109
2.5	強度評価結果	110
2.5.1	貫通評価	110
2.5.2	変形評価	111
2.5.3	応力評価	114

1. 鉄筋コンクリート造建造物の強度計算

1.1 概要

本章では、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、竜巻より防護すべき施設を内包する施設のうち、鉄筋コンクリート造建造物である原子炉建屋，タービン建屋，制御建屋，軽油タンク室及び軽油タンク室（H）が，設計竜巻による設計飛来物の衝突に加え，風圧力による荷重及び気圧差による荷重に対し，竜巻時及び竜巻通過後においても，竜巻より防護すべき施設の安全機能を損なわないよう，内包する竜巻より防護すべき施設に設計飛来物が衝突することを防止する機能を有すること及び竜巻より防護すべき施設に必要な機能を損なわないことを確認するものである。

1.2 基本方針

添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」を踏まえ、各施設の位置を「1.2.1 位置」に、構造概要を「1.2.2 構造概要」に、評価方針を「1.2.3 評価方針」に、適用規格を「1.2.4 適用規格」に示す。

1.2.1 位置

原子炉建屋，タービン建屋，制御建屋，軽油タンク室及び軽油タンク室（H）の位置を図 1-1 に示す。

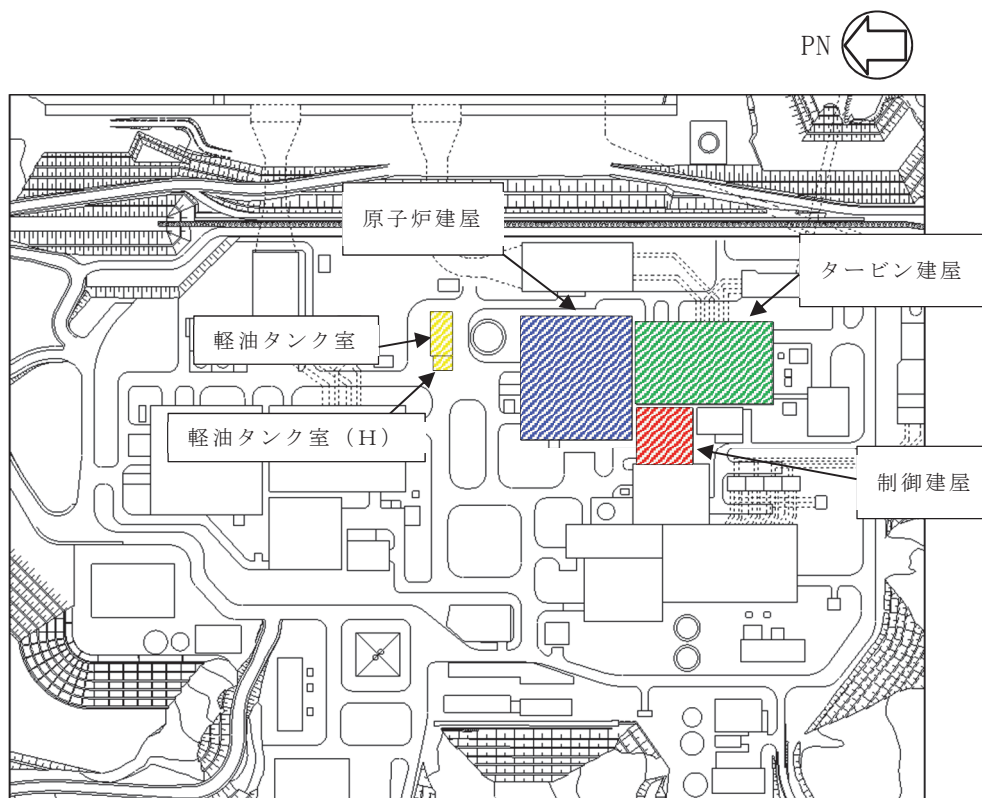


図 1-1 鉄筋コンクリート造構造物の位置図

1.2.2 構造概要

各施設の構造は、添付書類「IV-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画とする。

各施設は、主体構造が鉄筋コンクリート造であり、一部鉄骨鉄筋コンクリート造、または一部鉄骨造を有する構造である。

各施設の概略平面図及び評価対象部位の概略図を図 1-2～図 1-15 に示す。

また、タービン建屋については、隣接建屋と近接しており、外壁への設計飛来物衝突の可能性が極めて低い部位を評価対象外としている。離隔に係る詳細を図 1-6～図 1-8 に示す。

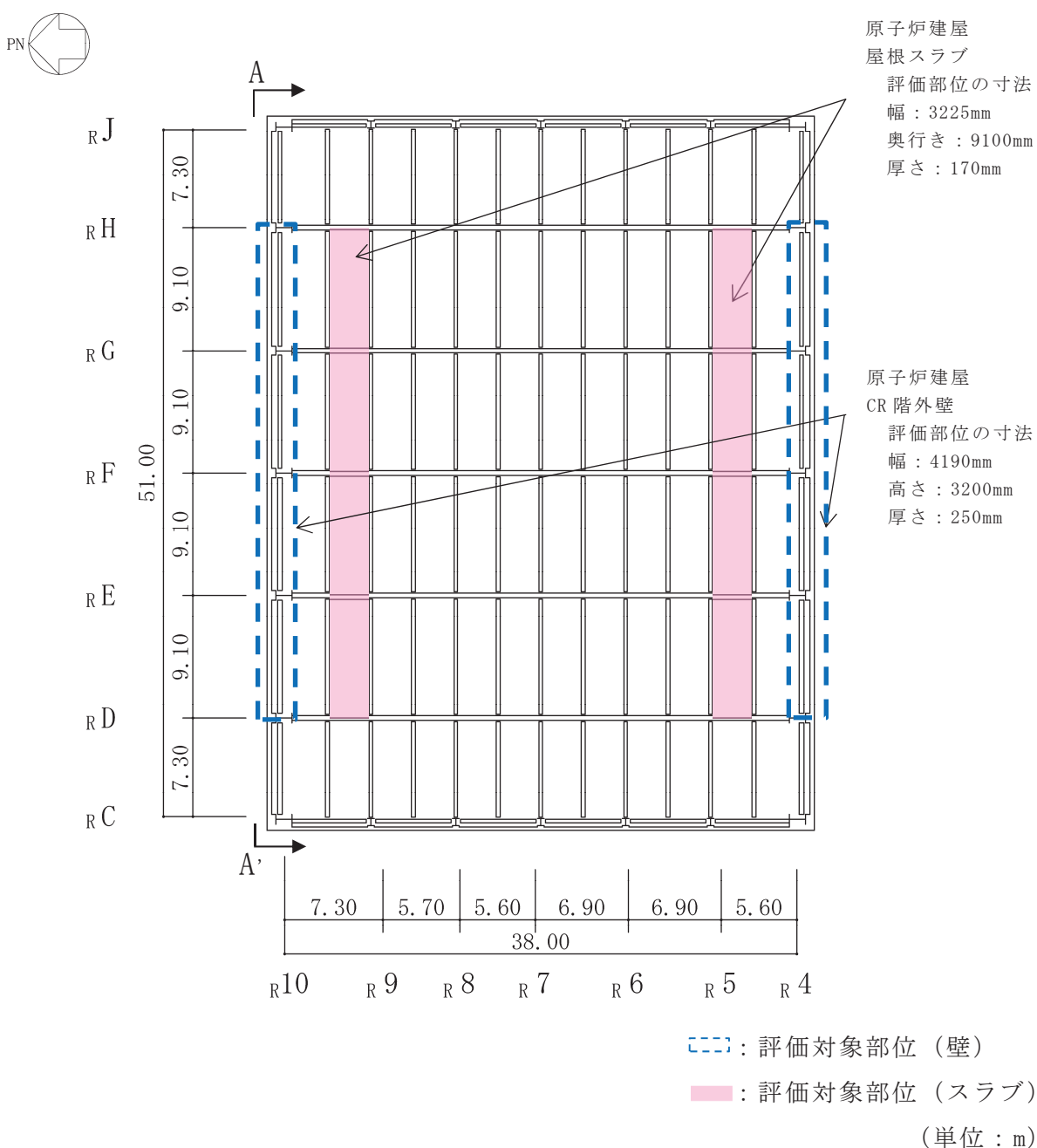


図 1-2 原子炉建屋の概略平面図 (O.P. 50.50m)

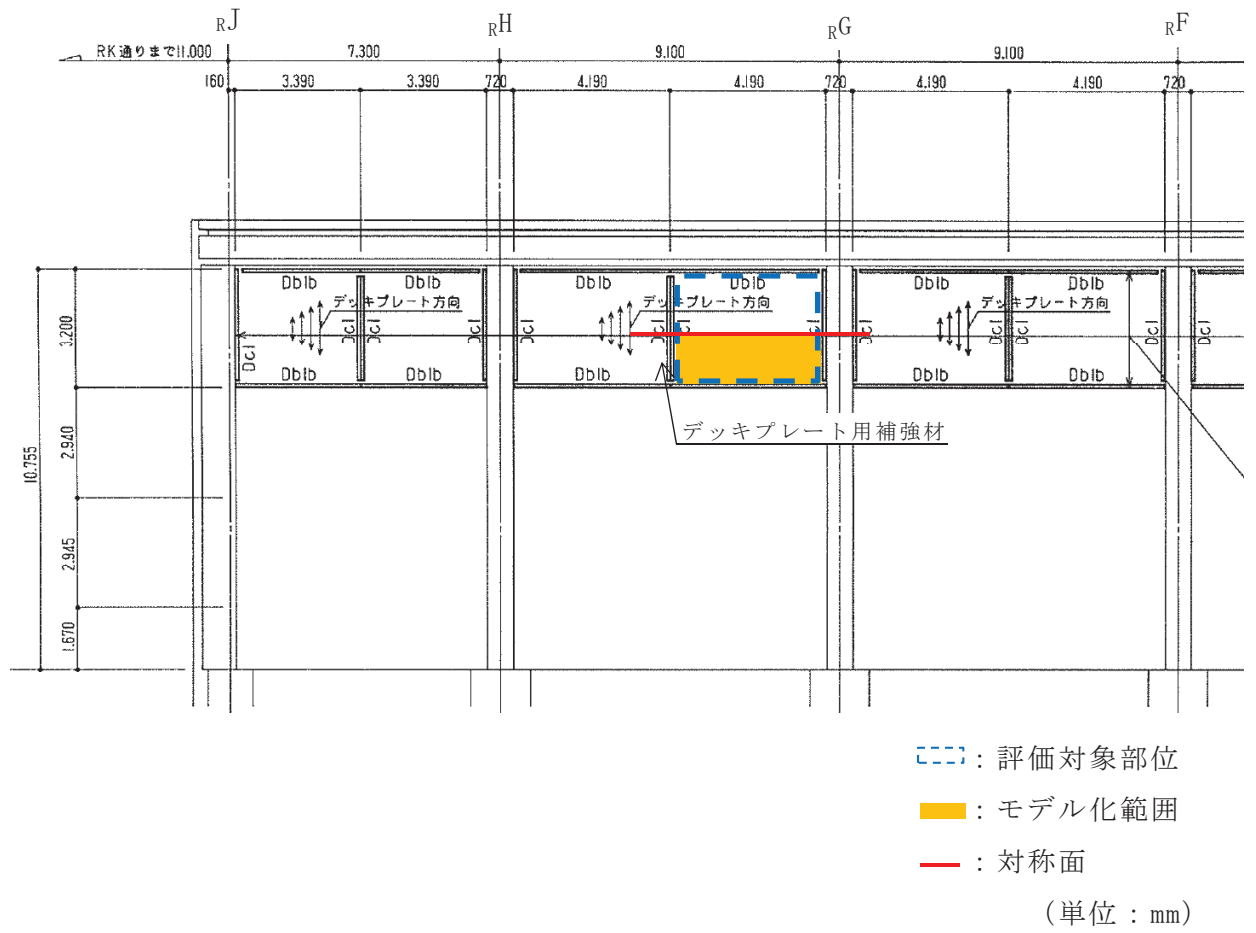
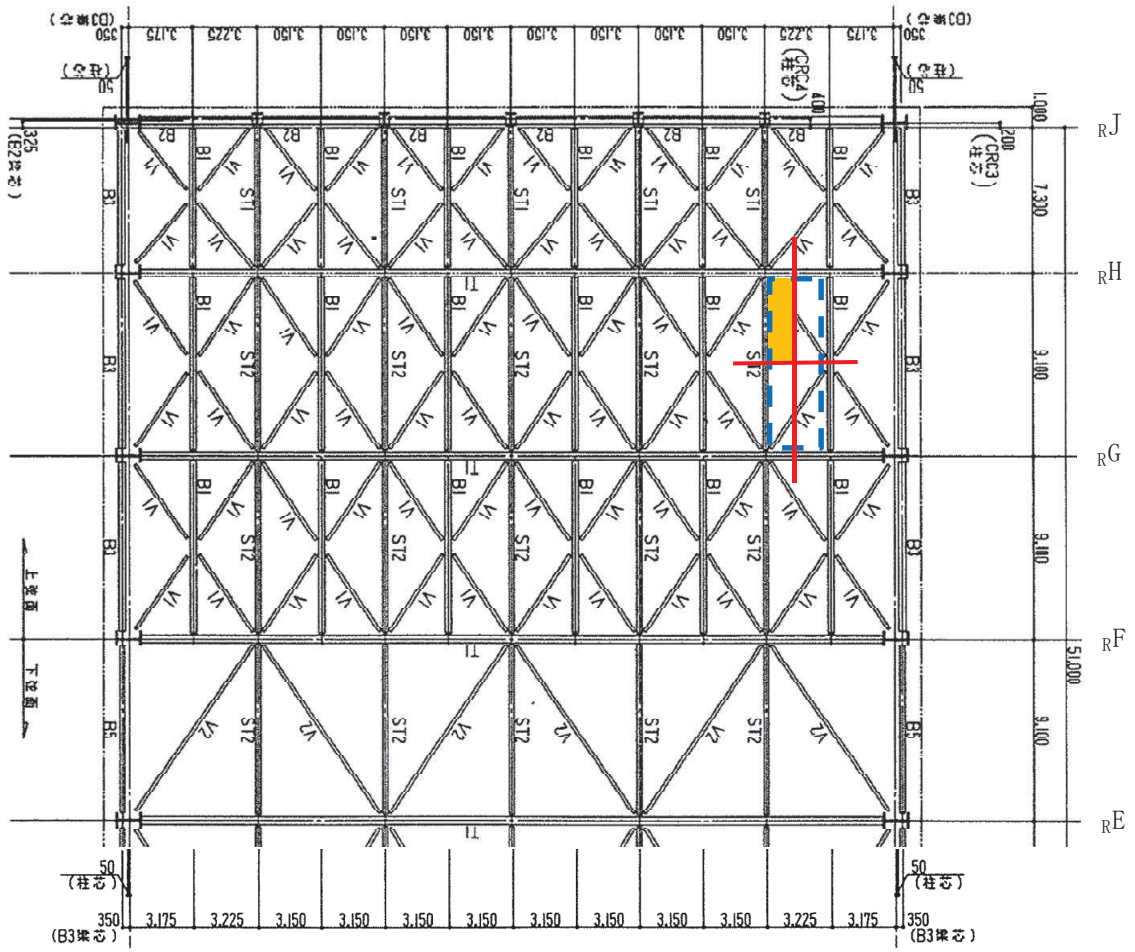


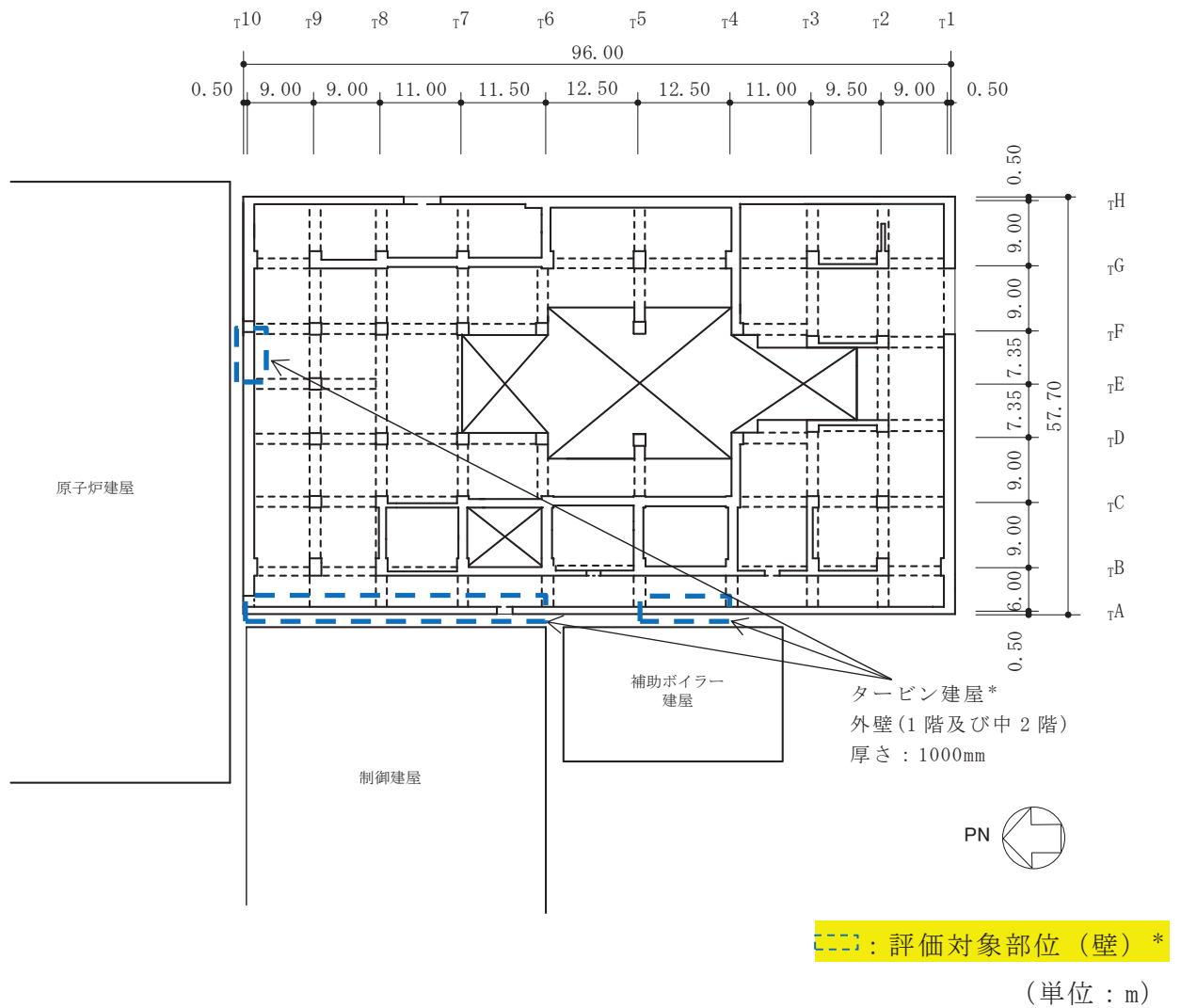
図 1-3 原子炉建屋 CR 階外壁の評価対象部位概略図 (A-A' 矢視図)



- : 評価対象部位
- : モデル化範囲
- : 対称面

(単位 : mm)

図 1-4 原子炉建屋 屋根スラブの評価対象部位概略図



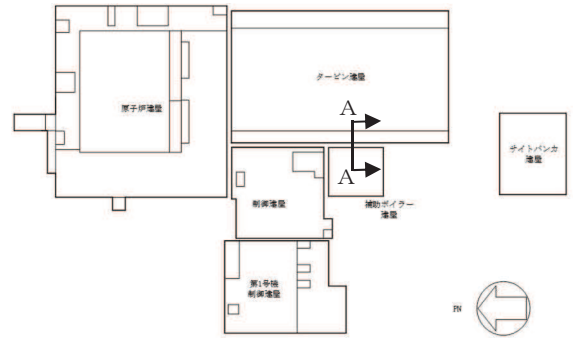
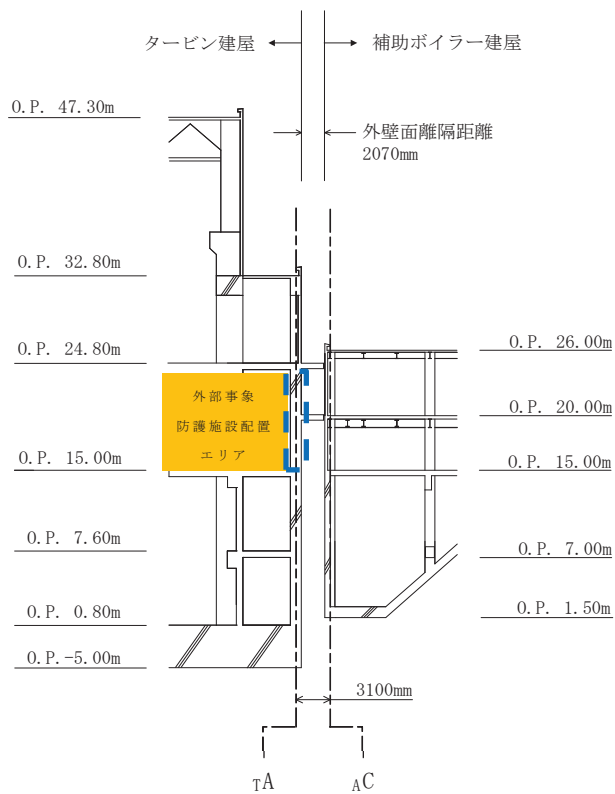
注記* : 隣接建屋と近接しており, 外壁への設計飛来物衝突の可能性が極めて低いことから評価対象外とする。

補助ボイラー建屋との外壁面離隔距離: 2070mm

制御建屋との外壁面離隔距離: 2100mm

原子炉建屋との外壁面離隔距離: 2100mm

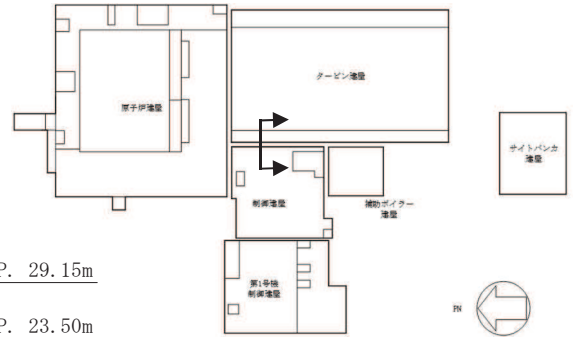
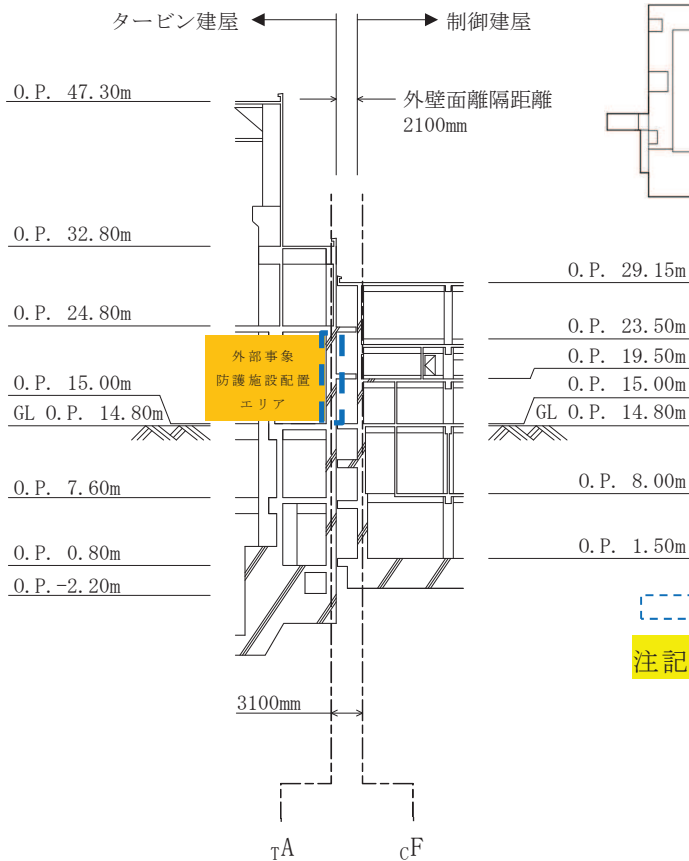
図 1-5 タービン建屋の概略平面図 (O.P. 15.00m)



：評価対象部位（壁）＊

注記＊：隣接建屋と近接しており、外壁への設計飛来物衝突の可能性が極めて低いことから評価対象外とする。

図 1-6 タービン建屋と補助ボイラー建屋の離隔距離（A-A 断面）



：評価対象部位（壁）＊

注記＊：隣接建屋と近接しており、外壁への設計飛来物衝突の可能性が極めて低いことから評価対象外とする。

図 1-7 タービン建屋と制御建屋の離隔距離

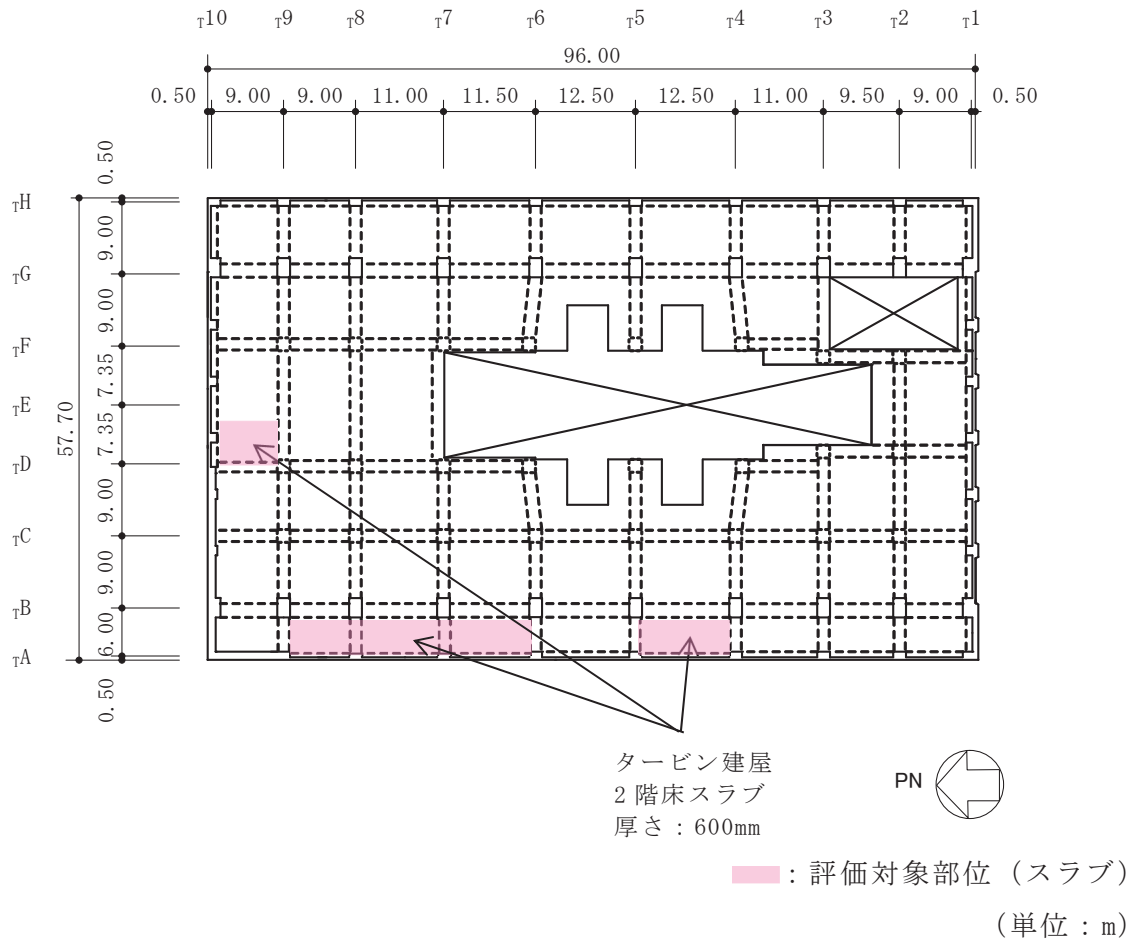


図 1-9 タービン建屋の概略平面図 (0.P. 24. 80m)

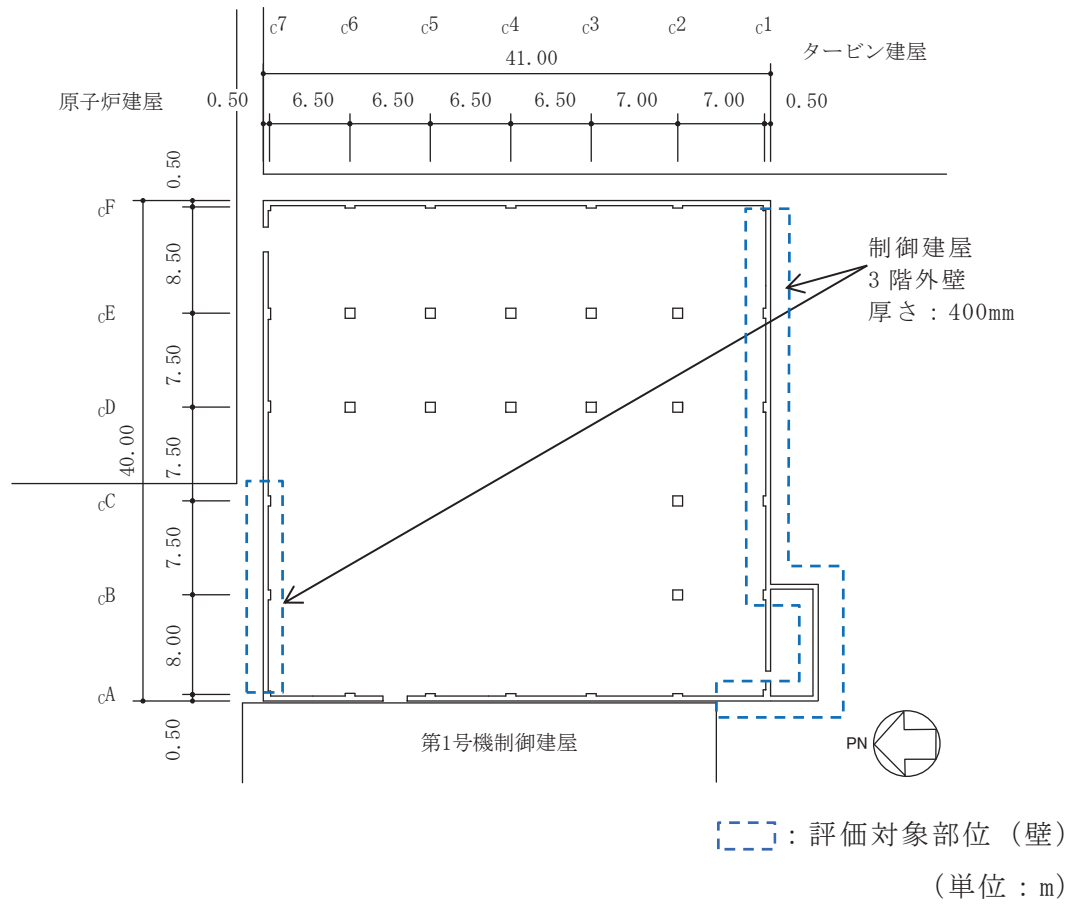


図 1-10 制御建屋の概略平面図 (0. P. 22. 95m)

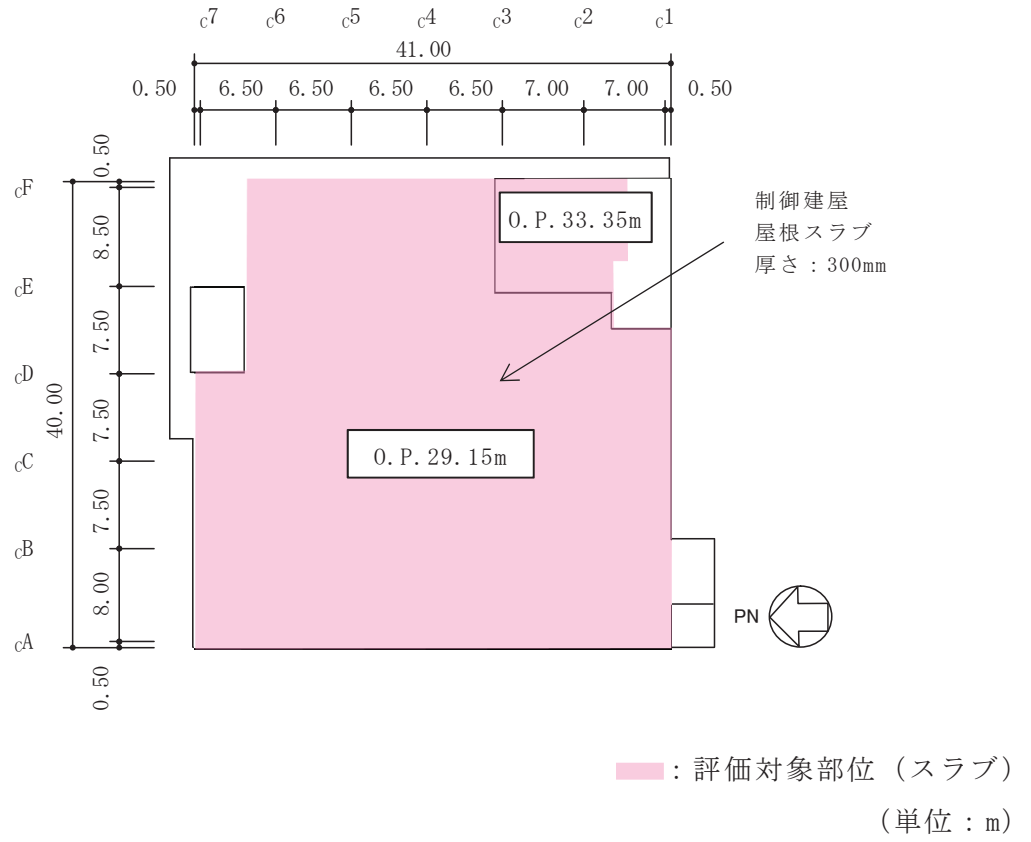
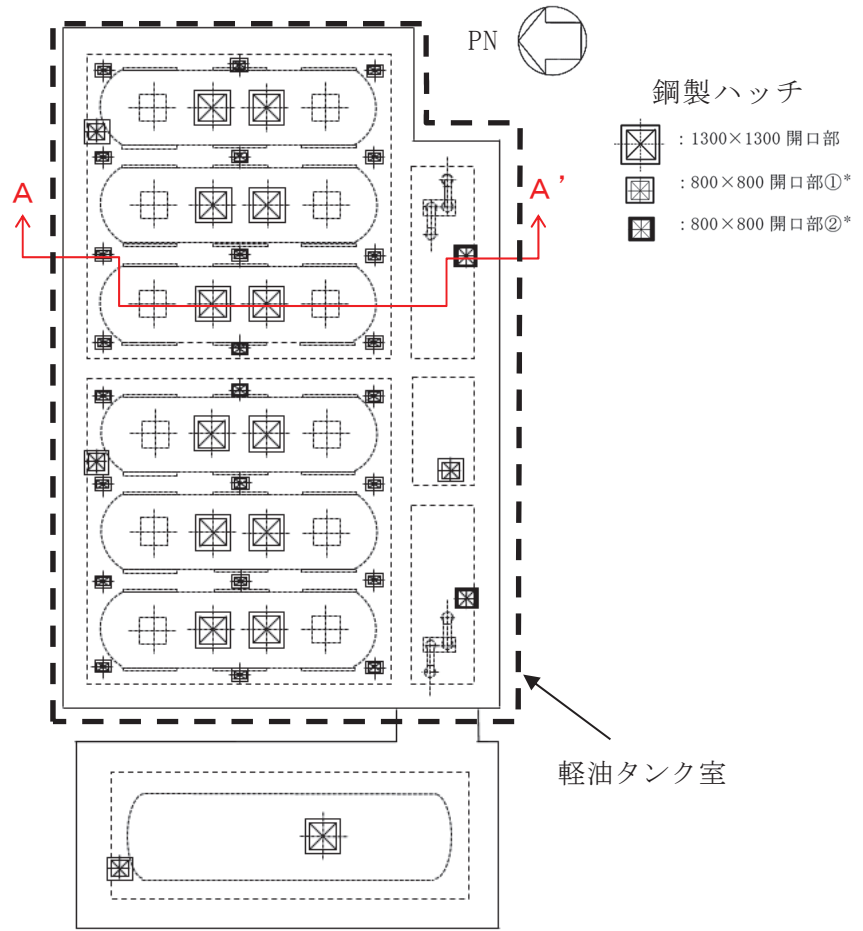


図 1-11 制御建屋の概略平面図 (O.P. 29.15m 及び O.P. 33.35m)



注記* : 800×800開口部には2種類の形状の上蓋の鋼製ハッチを適用

図 1-12 軽油タンク室の概略平面図 (O.P. 14.80m)

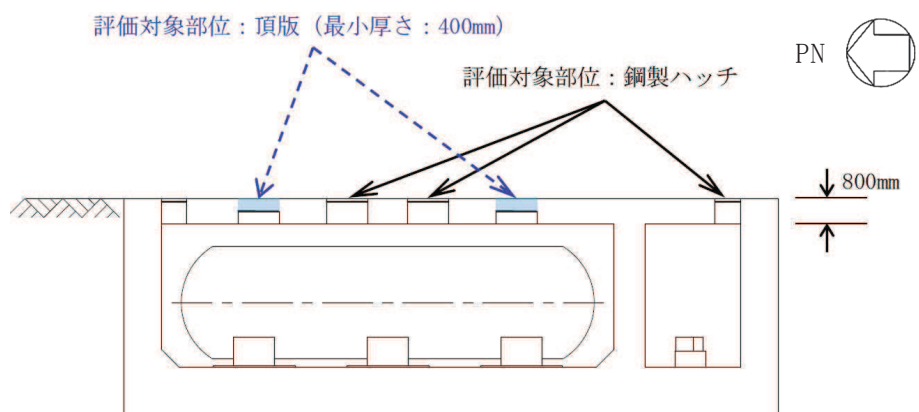


図 1-13 軽油タンク室の概略断面図 (A-A' 断面)

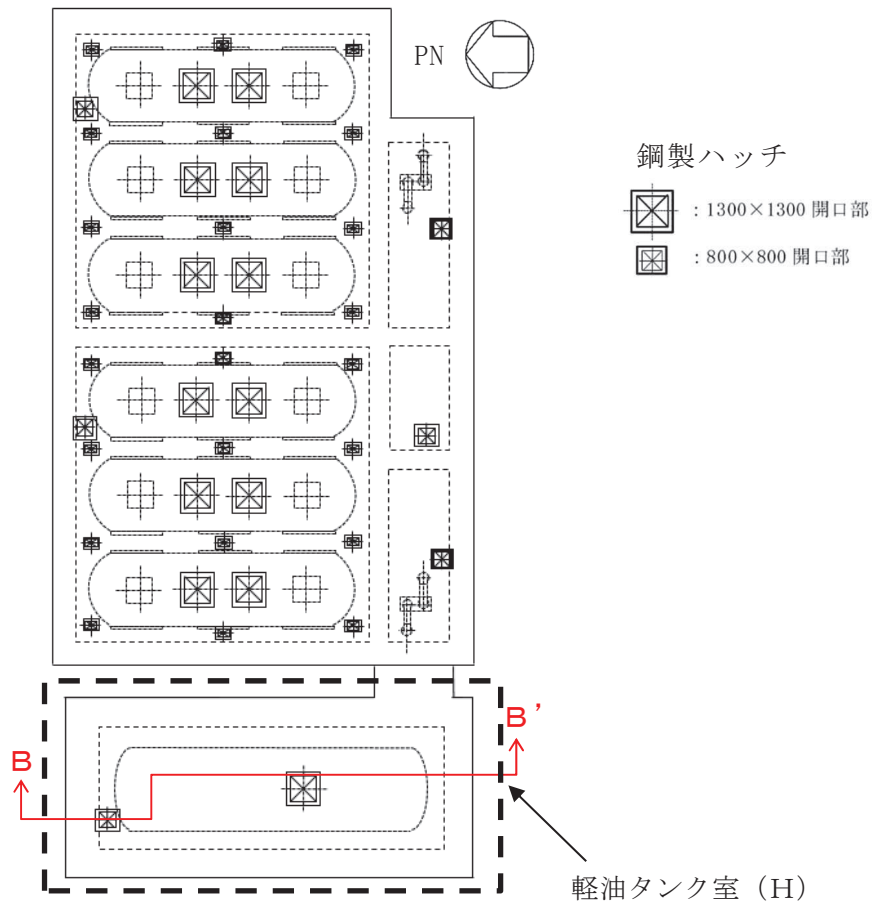


図 1-14 軽油タンク室 (H) の概略平面図 (O.P. 14.80m)

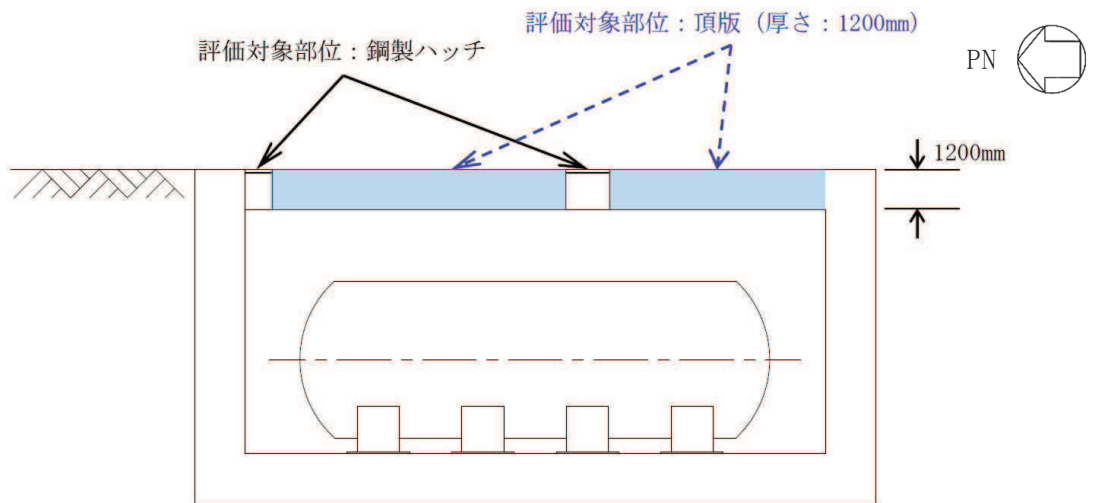


図 1-15 軽油タンク室 (H) の概略断面図 (B-B' 断面)

1.2.3 評価方針

各施設の強度評価は、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」及び「4.2 許容限界」を踏まえ、竜巻より防護すべき施設が安全機能を損なわないことを、「1.3 強度評価方法」に示す方法により、「1.4 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「1.5 強度評価結果」にて確認する。

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

具体的には、設計飛来物が竜巻より防護すべき施設に衝突する直接的な影響の評価として、施設の外殻を構成する部材に対する衝突評価を行う。また設計飛来物が竜巻より防護すべき施設に衝突もしくは接触する波及的な影響の構造強度評価として、施設の外殻を構成する部材の裏面剥離による飛散の影響評価及び施設の外殻を構成する部材の転倒及び脱落並びに施設の変形の影響評価を行う。

各施設の強度評価フローを図 1-16 に示す。

(1) 衝突評価

設計荷重に対し、設計飛来物が施設の外殻を構成する部材を貫通しない設計とするために、竜巻より防護すべき施設を内包する施設の外殻を構成する部材である建屋の壁及びスラブ、並びにタンク室の頂版が、設計飛来物の貫通を生じない最小厚さ以上であることを計算により確認する。

評価には、「Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8)」(以下「NEI07-13」という。)及び「タービンミサイル評価について(昭和 52 年 7 月 20 日 原子力委員会原子炉安全専門審査会)」で用いられている式を準用し、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価式を用いる。

(2) 構造強度評価

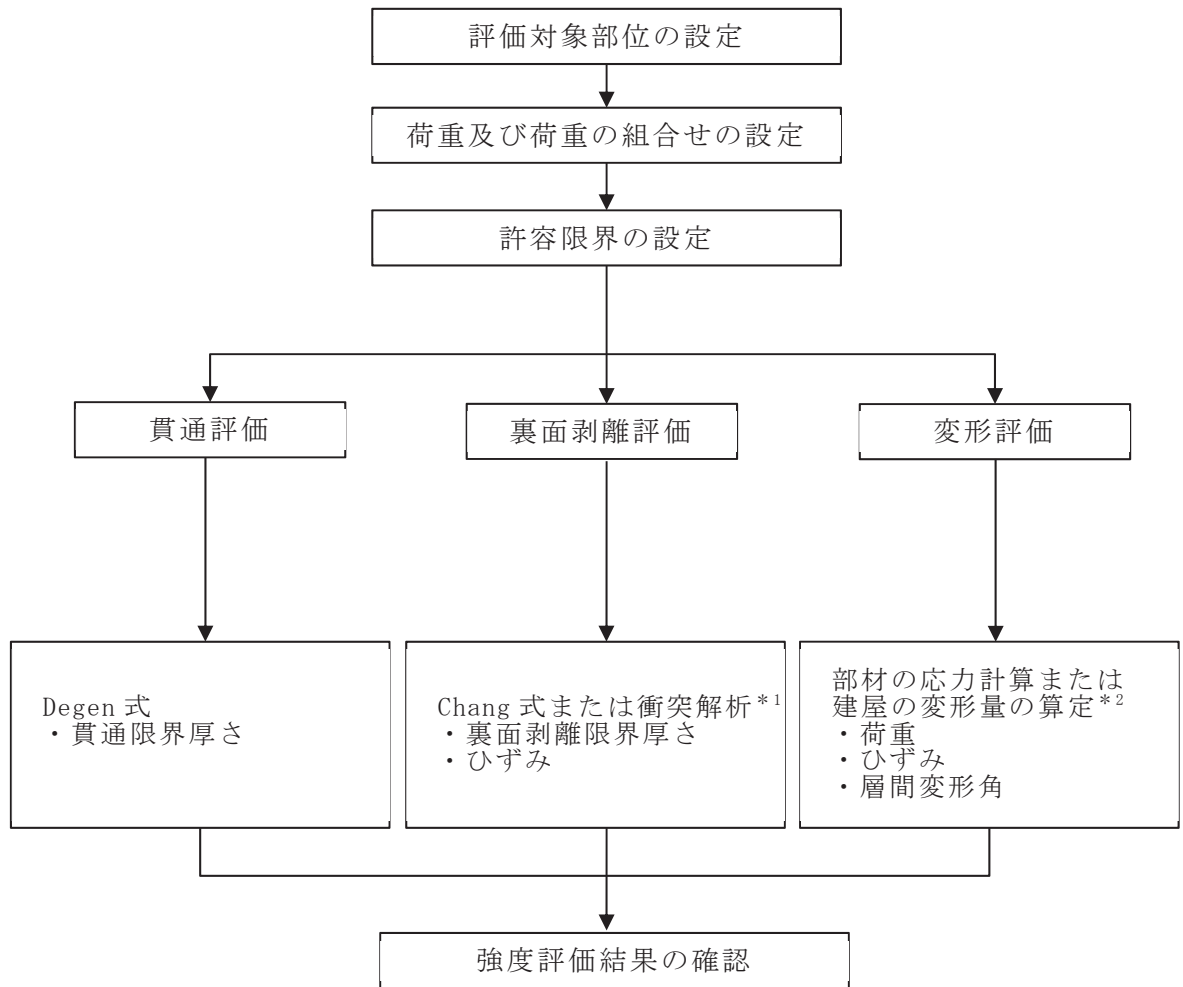
設計荷重に対し、施設の外殻を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とするために、竜巻より防護すべき施設を内包する施設の外殻を構成する部材である建屋の壁及びスラブ、並びにタンク室の頂版が、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じない最小厚さ以上であることを計算により確認する。

評価には、NEI07-13 にて示されている式を準用し、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価式を用いる。

なお、施設の外殻を構成する部材のうち、裏面剥離によるコンクリート片の飛散を生じない最小厚さ以上であることの確認が出来ない壁及びスラブにおいては、当該部材が裏面剥離に至るようなひずみを生じないことを解析により確認する。

(以下「裏面剥離評価」という。)

また、建屋の外殻を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とするために、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、屋根スラブのスタッド(以下「スタッド」という。)、耐震壁、鉄骨鉄筋コンクリート架構及び鉄骨架構に終局状態に至るようなひずみ、変形または応力が生じないことを計算により確認する。(以下「変形評価」という。)



注記*1 : 衝突解析については、解析コード「ABAQUS」により、評価対象部位を3次元FEMモデルによりモデル化し評価を実施する。

*2 : 地震応答解析モデルを用いた静的評価を実施する。

図 1-16 強度評価フロー

1.2.4 適用規格

適用する規格，規準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法（昭和 25 年 5 月 24 日法律第 201 号）
- ・ 建築基準法施行令（昭和 25 年 11 月 16 日政令第 338 号）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針重要度分類・許容応力編（J E A G 4 6 0 1・補-1984）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針（J E A G 4 6 0 1-1987）
- ・ 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）
- ・ ISES7607-3 軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査 その 3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討（昭和 51 年 10 月高温構造安全技術研究組合）
- ・ タービンミサイル評価について（昭和 52 年 7 月 20 日 原子力委員会原子炉安全専門審査会）
- ・ U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION:REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision1, March 2007
- ・ Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs（Nuclear Energy Institute 2011 Rev8（NEI07-13））
- ・ 日本建築学会 2004 年 建築物荷重指針・同解説
- ・ 日本建築学会 2005 年 鋼構造設計規準 -許容応力度設計法-
- ・ 日本建築学会 2010 年 各種合成構造設計指針・同解説
- ・ 日本建築学会 1999 年 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 -許容応力度設計法-
- ・ 2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書（国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所）
- ・ 日本機械学会 1987 年 新版機械工学便覧
- ・ 日本溶接協会 2003 年「動的繰返し大変形を受ける溶接鋼構造物の脆性破壊性能評価方法，WES2808」

1.3 強度評価方法

1.3.1 記号の定義

Degen 式による貫通限界厚さの算定に用いる記号を表 1-1 に、Chang 式による裏面剥離限界厚さの算定に用いる記号を表 1-2 に、力学における標準式による荷重及び応力の算定に用いる記号を表 1-3 に示す。

表 1-1 Degen 式による貫通限界厚さの算定に用いる記号

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

表 1-2 Chang 式による裏面剥離限界厚さの算定に用いる記号

記号	単位	定義	
d	cm	設計飛来物直径	
f_c'	kgf/cm ²	コンクリートの設計基準強度	
S	cm	裏面剥離限界厚さ	
V	m/s	壁面	設計飛来物の衝突速度 (水平)
		スラブ, 頂版	設計飛来物の衝突速度 (鉛直)
V_0	m/s	設計飛来物基準速度	
W	kgf	設計飛来物重量	
α_s	—	低減係数	

表 1-3 力学における標準式による荷重及び応力の算定に用いる記号 (1/2)
(荷重算定用)

記号	単位	定義
A	m ²	受圧面積
C	—	風力係数
G	—	ガスト影響係数
q	N/m ²	設計用速度圧
V _D	m/s	設計竜巻の風速
W _M	kN	設計飛来物による衝撃荷重
W _P	kN	気圧差による荷重
W _w	kN	風圧力による荷重
ρ	kg/m ³	空気密度
Δ P	N/m ²	最大気圧低下量
m	kg	設計飛来物質量
V	m/s	設計飛来物の衝突速度 (水平)
Δ t	s	設計飛来物と被衝突体の接触時間
L ₁	m	設計飛来物の最も短い辺の全長

表 1-3 力学における標準式による荷重及び応力の算定に用いる記号 (2/2)
(スタッド評価用)

記号	単位	定義
A_c	mm^2	コーン状破壊面の有効投影面積
A_0	mm^2	スタッド頭部の支圧面積
a_{ca}	mm^2	スタッドの断面積で、軸部断面積とねじ部有効断面積の smaller 方の値
D	mm	スタッドの頭部直径
d	mm	スタッドの軸部直径
F_c	N/mm^2	コンクリートの設計基準強度
f_n	N/mm^2	コンクリートの支圧強度
l_e	mm	スタッドのコンクリート内への有効埋込み長さ
l_{ce}	mm	スタッドの強度計算用埋込み長さ ($l_{ce} = l_e$)
p_a	kN	スタッド1本あたりの許容引張力
p_{a1}	kN	スタッド鋼材の降伏により定まる場合のスタッド1本あたりの許容引張力
p_{a2}	kN	定着したコンクリート躯体のコーン状破壊により定まる場合のスタッド1本あたりの許容引張力
p_{a3}	kN	コンクリートの支圧破壊により定まるスタッド1本あたりの許容引張力
$c\sigma_t$	N/mm^2	コーン状破壊に対するコンクリートの引張強度
$s\sigma_{pa}$	N/mm^2	スタッドの引張強度
$s\sigma_y$	N/mm^2	スタッドの規格降伏点強度
Φ_1	—	低減係数
Φ_2	—	低減係数
L	m	デッキプレートの支持スパン
p	mm	スタッドの間隔
Q	kN/m	デッキプレートに生じる単位幅のせん断力
T	kN	スタッドに生じる引張力
ω_T	kN/m^2	設計竜巻による荷重

1.3.2 評価対象部位

各施設の評価対象部位は、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す評価対象部位を踏まえて設定する。

評価対象部位は図 1-2～図 1-15 に示す通りとする。

(1) 貫通評価

設計荷重に対し、設計飛来物が施設の外殻を構成する部材を貫通しない設計とするために、外部事象防護対象施設を内包する区画のうち外殻を構成する部材及び、施設屋外からの設計飛来物の侵入を考慮した各施設の屋内の床スラブ、内壁の中から最も厚みが薄い箇所のうち部材長さ（支持スパン）が最長となる部位を評価対象部位として設定することとし、原子炉建屋については CR 階外壁及び屋根スラブを、タービン建屋については 2 階床スラブを、制御建屋については 3 階外壁及び屋根スラブを、軽油タンク室及び軽油タンク室（H）については頂版を評価対象部位として設定する。なお、タービン建屋外壁については、評価対象エリアの外壁に隣接建屋が近接していることにより、設計飛来物の衝突の可能性が極めて低いことから評価対象外とする。

評価においては、各施設施設の評価対象部位の最小厚さが、設計飛来物の貫通を生じない貫通限界厚さを上回ることを計算により確認する。

(2) 裏面剥離評価

設計荷重に対し、施設の外殻を構成する部材自体が、脱落により竜巻より防護すべき施設に波及的影響を与えない設計とするために、外殻を構成する部材及び、施設屋外からの設計飛来物の侵入を考慮した各施設の屋内の床スラブ、内壁の中から最も厚みが薄い箇所のうち部材長さ（支持スパン）が最長となる部位を評価対象部位として設定することとし、原子炉建屋については CR 階外壁及び屋根スラブを、タービン建屋については 2 階床スラブを、制御建屋については 3 階外壁及び屋根スラブを、軽油タンク室及び軽油タンク室（H）については頂版を評価対象部位として設定する。なお、タービン建屋外壁については、評価対象エリアの外壁に隣接建屋が近接していることにより、飛来物衝突の可能性が低いことから評価対象外とする。

評価においては、各施設の評価対象部位の最小厚さが、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じない裏面剥離限界厚さを上回ることを計算により確認する。

なお、評価対象部位のうち、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じない裏面剥離限界厚さを上回る旨を計算で確認出来ない原子炉建屋 CR 階外壁及び屋根スラブについては、衝突解析により評価を行う。

(3) 変形評価

設計荷重に対して、外殻を構成する部材自体が外部事象防護対象施設へ衝突等の影響を与える変形に至らないことの確認において、設計荷重が直接作用し、防護すべき施設の外殻となる壁及び屋根スラブを評価する。

壁については、原子炉建屋、タービン建屋及び制御建屋の耐震壁を評価対象部位として設定し、タービン建屋については鉄骨架構及び鉄骨鉄筋コンクリート架構も評価対象部位とする。

スラブについては、気圧差による荷重がスラブに作用しスタッドに伝達されることを踏まえて、屋根スラブにスタッドを用いる構造である原子炉建屋、タービン建屋及び制御建屋の屋根スラブのスタッドを評価対象部位とする。

なお、軽油タンク室及び軽油タンク室（H）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。

1.3.3 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、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」を踏まえて設定する。

(1) 荷重の設定

強度評価に用いる荷重は以下の荷重を用いる。荷重の算定に用いる竜巻の特性値を表 1-4 に示す。

表 1-4 荷重の算定に用いる竜巻の特性値

最大風速 V_D (m/s)	移動速度 V_T (m/s)	最大接線風速 V_{Rm} (m/s)	最大気圧低下量 ΔP (N/m ²)
100	15	85	7600

a. 常時作用する荷重 (F_d)

常時作用する荷重 (F_d) には、部材の自重とする。

b. 風圧力による荷重 (W_w)

風圧力による荷重は、「建築基準法（昭和 25 年 5 月 24 日法律第 201 号），建築基準法施行令（昭和 25 年 11 月 16 日政令第 338 号）」及び「日本建築学会 2004 年 建築物荷重指針・同解説」に準拠して，次式のとおり算出する。

$$W_w = q \cdot G \cdot C \cdot A / 1000$$

ここで，

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

c. 気圧差による荷重 (W_p)

気圧差による荷重は，次式のとおり算出する。

$$W_p = \Delta P \cdot A / 1000$$

d. 設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)

設計飛来物による衝撃荷重 (W_M) は，表 1-5 に諸元を示す設計飛来物の衝突に伴う荷重とする。設計飛来物の材料定数を表 1-6 に示す。

なお，評価対象部位に設計飛来物が衝突した際に跳ね返らず，貫入する物として評価する。

表 1-5 設計飛来物の諸元

設計飛来物	寸法 長さ×幅×奥行き (m)	質量 (kg)	水平方向の 飛来速度 (m/s)	鉛直方向の 飛来速度 (m/s)
鋼製材	4.2×0.3×0.2	135	46.6	16.7*1 32.9*2

注記*1 : 原子炉建屋，制御建屋，軽油タンク室及び軽油タンク室（H）における速度

*2 : タービン建屋における速度

表 1-6 設計飛来物の材料定数

設計飛来物	降伏応力 σ_y (N/mm ²)	縦弾性係数 E (N/mm ²)	塑性硬化係数 E' (N/mm ²)	ポアソン比
鋼製材	245	206000	1260	0.3

(2) 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せについては、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」のとおり、設計飛来物による衝撃荷重，風圧力による荷重，気圧差による荷重及び常時作用する荷重を組み合わせる。荷重の組合せを表 1-7 に示す。

表 1-7 荷重の組合せ

評価内容	評価対象部位		設計飛来物の 衝突方向	荷重の組合せ*
貫通評価	Degen 式による評価			
	原子炉建屋	CR 階外壁	水平	W_M
		屋根スラブ	鉛直	
	タービン建屋	2 階床スラブ	鉛直	
	制御建屋	3 階外壁	水平	
		屋根スラブ	鉛直	
	軽油タンク室	頂版	鉛直	
軽油タンク室 (H)	頂版	鉛直		
裏面剥離評価	Chang 式による評価			
	タービン建屋	2 階床スラブ	鉛直	W_M
	制御建屋	3 階外壁	水平	
		屋根スラブ	鉛直	
	軽油タンク室	頂版	鉛直	
	軽油タンク室 (H)	頂版	鉛直	
	解析による評価			
	原子炉建屋	CR 階外壁	水平	$W_W + W_M + F_d$
屋根スラブ		鉛直	$W_M + F_d$	
変形評価	力学における標準式による評価			
	原子炉建屋 タービン建屋 制御建屋	屋根スラブの スタッド	-	$W_W + 0.5W_P + F_d$
	地震応答解析モデルを用いた静的評価			
	原子炉建屋	耐震壁	水平	$W_W + 0.5W_P + W_M$
	タービン建屋	耐震壁	水平	
		鉄骨架構	水平	
		鉄骨鉄筋 コンクリート架構	水平	
		制御建屋	耐震壁	

注記* : W_W : 風圧力による荷重

W_P : 気圧差による荷重

W_M : 設計飛来物による衝撃荷重

F_d : 常時作用する荷重

1.3.4 許容限界

竜巻より防護すべき施設を内包する施設の許容限界は、「1.3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位ごとに、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界及び機能損傷モードを踏まえて設定する。

(1) 貫通評価

貫通評価のうち、式による評価の許容限界は評価対象部位の最小厚さとする。

表 1-8 に設定した許容限界を示す。

表 1-8 貫通評価の許容限界（式による評価）

評価対象部位		許容限界 (cm)
原子炉建屋	CR 階外壁	25
	屋根スラブ	17
タービン建屋	2 階床スラブ	60
制御建屋	3 階外壁	40
	屋根スラブ	30
軽油タンク室	頂版	40
軽油タンク室 (H)	頂版	120

(2) 裏面剥離評価

裏面剥離評価の許容限界のうち、式による評価の許容限界は、貫通評価の許容限界である表 1-8 と同じとする。

裏面剥離評価のうち、式により算定する裏面剥離限界厚さが最小部材厚さを上回る場合における、解析による裏面剥離評価の許容限界を表 1-9 に示す。

設計飛来物が CR 階外壁及び屋根スラブへ直接衝突する場合の裏面剥離評価における許容限界は、デッキプレートの破断ひずみを基本として設定する。破断ひずみについては、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2.1(1) 許容限界の設定」に示すとおり、J I S に規定されている伸びの下限値を基に設定するが、NEI07-13 において TF (多軸性係数) を とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕として TF = を考慮して設定する。

表 1-9 裏面剥離評価の許容限界 (解析による評価)

評価対象部位		材質	許容限界
			鋼材の破断ひずみ
原子炉建屋	CR 階外壁 デッキプレート	SS400	<input type="text"/>
	屋根スラブ デッキプレート	SS400	

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(3) 変形評価

変形評価の許容限界を表 1-10 に示す。

表 1-10 変形評価の許容限界

評価対象部位		許容限界	
		項目	数値
原子炉建屋	屋根スラブ スタッド	「日本建築学会 2010 年 各種合成構造設計指針・同 解説」に基づく許容耐力	40.3 (kN/本) *2
タービン建屋	屋根スラブ スタッド	「日本建築学会 2010 年 各種合成構造設計指針・同 解説」に基づく許容耐力	39.9 (kN/本) *2
制御建屋	屋根スラブ スタッド	「日本建築学会 2010 年 各種合成構造設計指針・同 解説」に基づく許容耐力	41.0 (kN/本) *2
原子炉建屋	耐震壁	最大せん断ひずみ	2.0×10^{-3}
タービン建屋	耐震壁	最大せん断ひずみ	2.0×10^{-3}
	鉄骨鉄筋 コンクリート架構	最大層間変形角 *1	1/200
	鉄骨架構	最大層間変形角 *1	1/120
制御建屋	耐震壁	最大せん断ひずみ	2.0×10^{-3}

注記*1 : 2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書（国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所）（以下「技術基準解説書」という。）により設定。

*2 : 各建屋スタッド設置部に生じる引張力の許容限界は、スタッド鋼材の降伏及びコンクリート躯体のコーン状破壊のうち、定着したコンクリート躯体のコーン状破壊により定まる。建屋ごとのスタッドの諸元は同一であるが、スタッドの配列状況が異なり、有効水平投影範囲が重なり合うことで、許容限界に参入する有効水平投影面積に差異が生じ、許容限界にばらつきが生じている。

1.3.5 評価方法

竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度評価は、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」を踏まえて、衝突評価として貫通評価を実施し、構造強度評価として裏面剥離評価及び変形評価を実施する。

(1) 貫通評価

a. 式による評価

設計飛来物が各施設に衝突する場合の貫通限界厚さを、NEI07-13 に示されている Degen 式を用いて算定する。Degen 式における貫入深さは、「タービンミサイル評価について（昭和 52 年 7 月 20 日 原子力委員会原子炉安全専門審査会）」で用いられている修正 NDRC 式を用いて算定する。

Degen 式を以下に示す。

1.52 ≤ X / d ≤ 13.42 の場合

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

X / d ≤ 1.52 の場合

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

修正 NDRC 式を以下に示す。

X / d ≤ 2.0 の場合

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

X / d ≥ 2.0 の場合

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

(2) 裏面剥離評価

a. 式による評価

設計飛来物が各施設に衝突する場合の裏面剥離限界厚さを、NEI07-13 に示されている Chang 式を用いて算定する。

Chang 式を以下に示す。

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

b. 外壁及び屋根スラブに対する衝突解析

設計飛来物に対して，Chang 式による裏面剥離限界厚さを満足しない原子炉建屋 CR 階外壁及び屋根スラブについては，設計飛来物による衝撃荷重 W_M を考慮し，3次元 FEM モデルを用いた衝突解析により外壁及び屋根スラブのデッキプレートに生じるひずみを算出し，許容限界を超えないことを確認する。

衝突位置については，部材曲げによる変形量が最大になると考えられる中央部を選定した。衝突方向は，部材面に対して垂直とし，局所的な変形によって部材に生じるひずみが最も大きくなるように，飛来物の面積が最小の面（0.3m×0.2m）が衝突するケースを選定した。

なお，気圧差による荷重 W_P については，衝撃荷重と逆方向に作用するため，保守的に考慮しない。

衝突解析には，解析コード「ABAQUS」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，添付書類「VI-5 計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

(a) 解析モデル及び諸元

イ. 原子炉建屋 CR 階外壁

原子炉建屋 CR 階外壁のモデル化範囲は，想定する荷重の伝達を考慮し，外壁を構成する鉄筋コンクリート及びデッキプレートとする。解析モデルは対称性を考慮して 1/2 モデルとする。コンクリートはソリッド要素，鉄筋は棒要素，デッキプレートはシェル要素でモデル化する。なお，デッキプレートはコンクリートと固着とする。原子炉建屋 CR 階外壁の解析モデルの境界条件を表 1-11 及び図 1-17 に，解析モデル図を図 1-18 に示す。

表 1-11 原子炉建屋 CR 階外壁の解析モデルの境界条件

項目		境界条件
原子炉建屋 CR 階外壁	外壁端部	対称境界部：対称境界 長辺：X 軸回転方向のみ自由 短辺：Y 軸回転方向のみ自由 隅角部：完全拘束

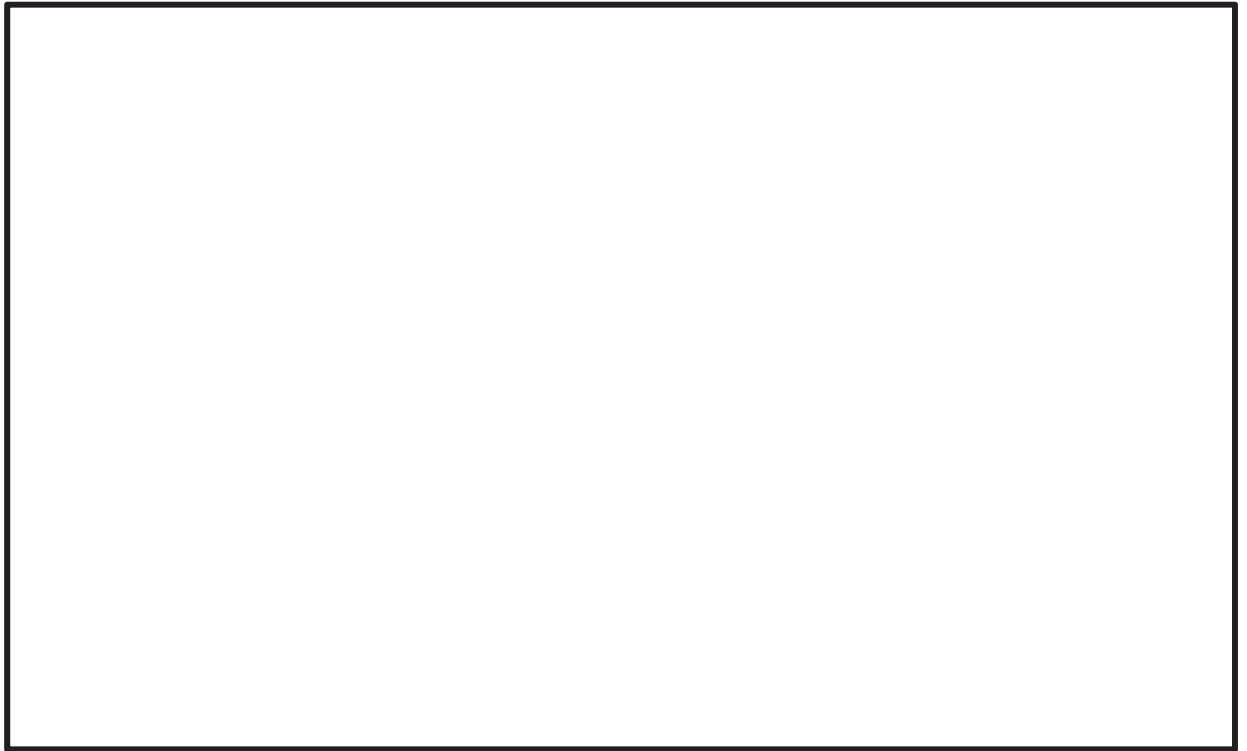


図 1-17 原子炉建屋 CR 階外壁の解析モデルの境界条件



図 1-18 原子炉建屋 CR 階外壁の解析モデル図 (1/3)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



(単位：mm)

注記* : 要素のメッシュを細分化している範囲について、試解析を複数回実施し、変形やひずみが大きくなる範囲を設定している。

図 1-18 原子炉建屋 CR 階外壁の解析モデル図 (2/3)



(単位：mm)

図 1-18 原子炉建屋 CR 階外壁の解析モデル図 (3/3)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

ロ. 原子炉建屋屋根スラブ

原子炉建屋屋根スラブのモデル化範囲は、想定する荷重の伝達を考慮し、スラブを構成する鉄筋コンクリート及びデッキプレートとする。解析モデルは対称性を考慮して1/4モデルとする。コンクリートはソリッド要素、鉄筋は棒要素、デッキプレートはシェル要素でモデル化する。なお、デッキプレートはコンクリートと固着とする。原子炉建屋屋根スラブの解析モデルの境界条件を表1-12及び図1-19に、解析モデル図を図1-20に示す。

表 1-12 原子炉建屋屋根スラブの解析モデルの境界条件

項目		境界条件
原子炉建屋 屋根スラブ	屋根スラブ端部	対称境界部：対称境界 短辺：X軸回転方向のみ自由 長辺：Y軸回転方向のみ自由 隅角部：完全拘束

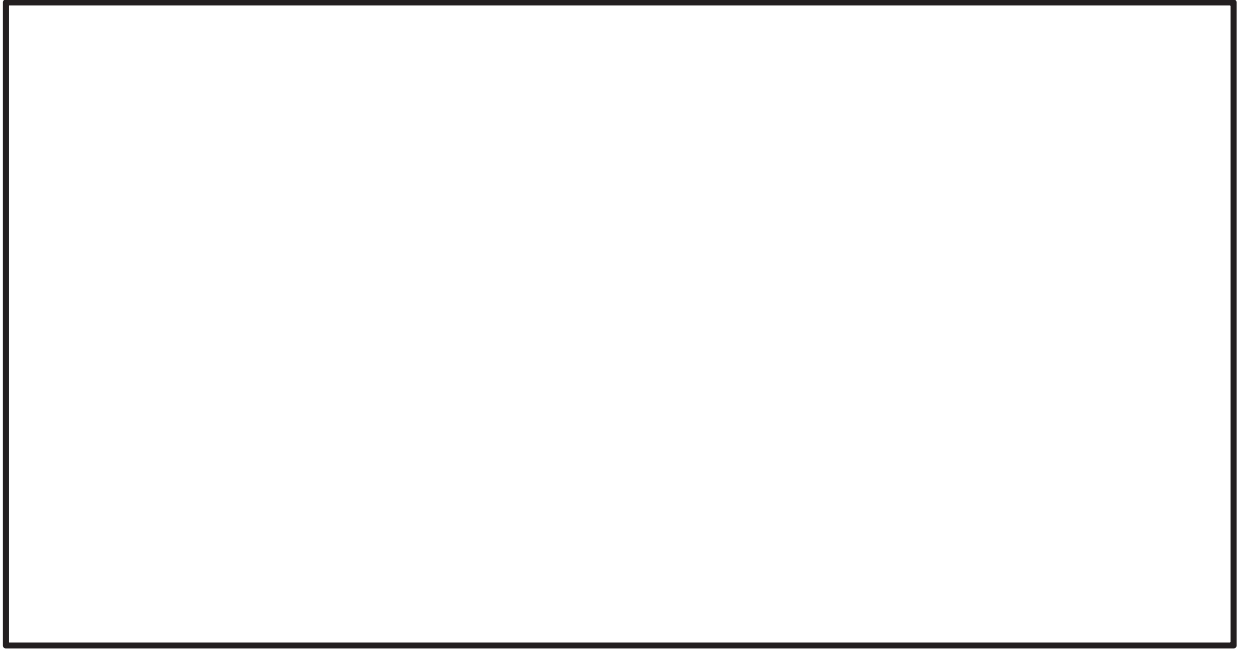
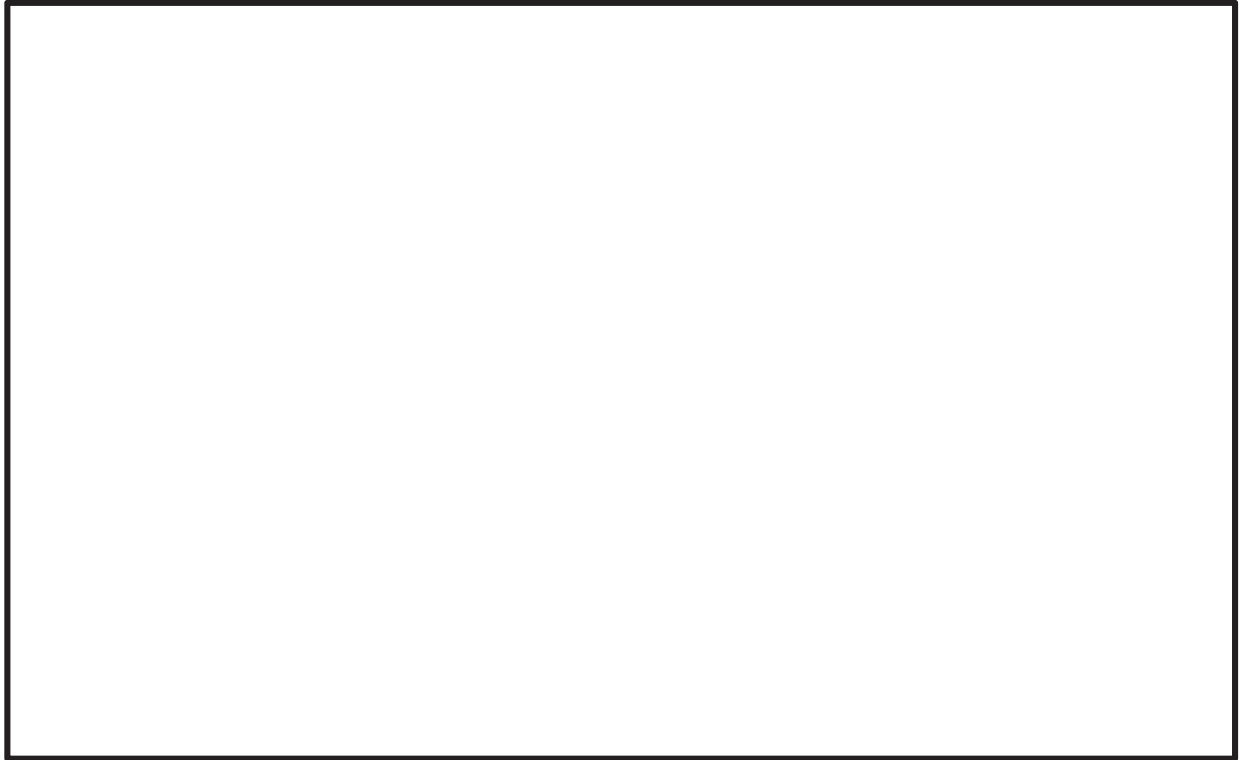


図 1-19 原子炉建屋屋根スラブの解析モデルの境界条件



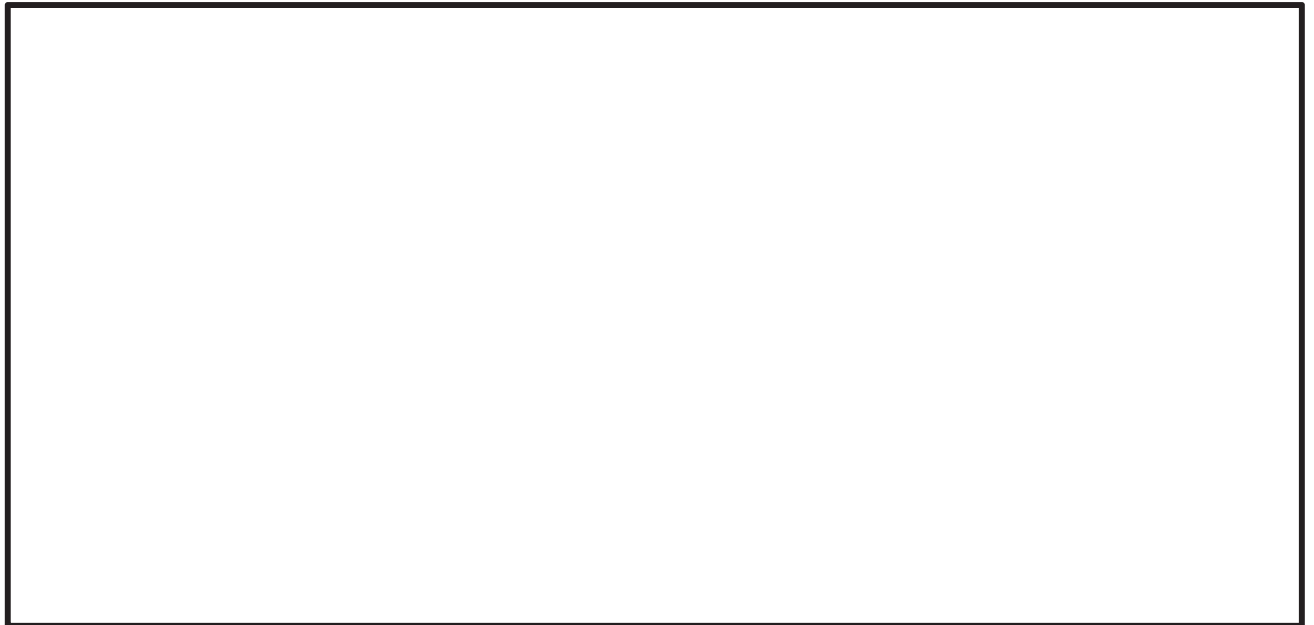
図 1-20 原子炉建屋屋根スラブの解析モデル図 (1/3)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



(単位：mm)

図 1-20 原子炉建屋屋根スラブの解析モデル図 (2/3)



(単位：mm)

注記* : 要素のメッシュを細分化している範囲について、試解析を複数回実施し、変形やひずみが大きくなる範囲を設定している。

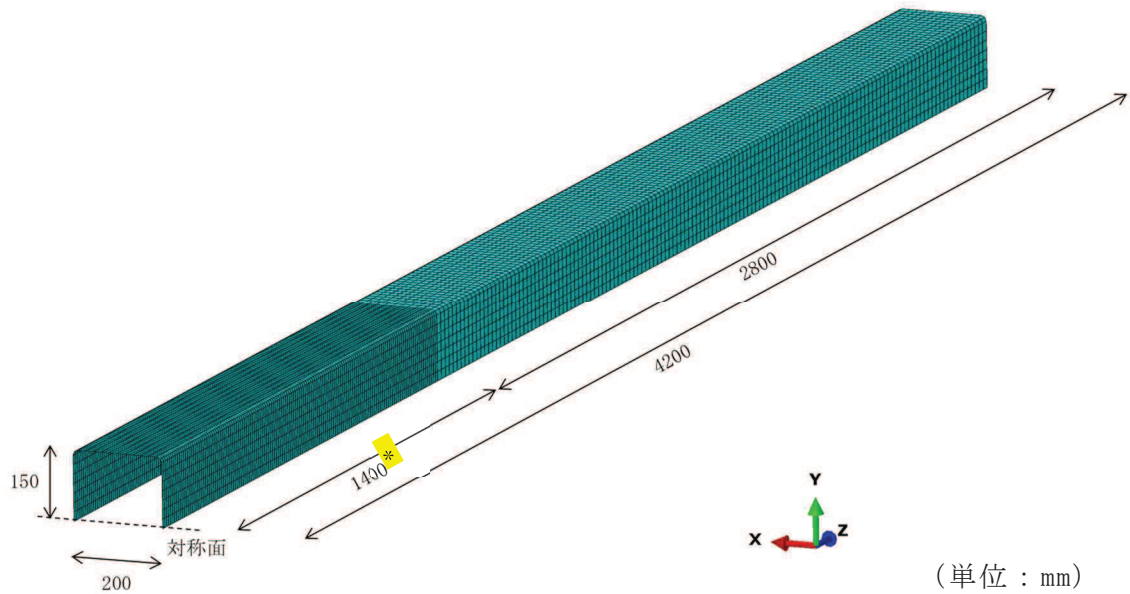
図 1-20 原子炉建屋屋根スラブの解析モデル図 (3/3)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

ハ. 設計飛来物

設計飛来物である鋼製材はシェル要素でモデル化する。衝突面側 1.4m の部分は要素サイズ 10mm を基本とし，以降の 2.8m は 20mm を基本としてモデル化する。

原子炉建屋 CR 階外壁用 1/2 モデルの設計飛来物モデルを図 1-21 に示す。



注記* : 要素のメッシュを細分化している範囲について，試解析を複数回実施し，変形やひずみが大きくなる範囲を設定している。

図 1-21 設計飛来物の解析モデル図 (1/2 モデル)

(b) 材料定数

コンクリート，鉄筋及びデッキプレートの材料定数を表 1-13～表 1-15 に示す。設計飛来物の材料定数については，「1.3.3 荷重及び荷重の組合せ」の表 1-6 に示すとおり設定する。

表 1-13 コンクリートの材料定数

評価対象部位	設計基準強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)
原子炉建屋 CR 階外壁	32.4	25100	0.2	23
原子炉建屋 屋根スラブ				

表 1-14 鉄筋の材料定数

評価対象部位	種類	降伏応力 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)
原子炉建屋 CR 階外壁	SD345	345	205000	0.3	77.0
原子炉建屋 屋根スラブ					

表 1-15 デッキプレートの材料定数

評価対象部位	種類	降伏応力 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)
原子炉建屋 CR 階外壁	SS400	245	205000	0.3	77.0
原子炉建屋 屋根スラブ					

(c) 材料の非線形特性

コンクリートの応力-ひずみ関係は、コンクリートの特性を踏まえて圧縮側を 3 折れ線、引張側を 2 折れ線で近似する。コンクリートの圧縮強度には、NEI07-13 に基づき、動的増加率 1.25 を考慮する。コンクリートの圧縮強度及び引張強度を表 1-16 に示す。

鉄筋の応力-ひずみ関係は、第 1 折れ点を「降伏応力-降伏ひずみ」、第 2 折れ点を「引張強度-破断ひずみ」とするトリリニア型とする。鉄筋の破断ひずみは、J I S に規定されている伸びの下限値を基に設定する。降伏応力及び引張強度には、NEI07-13 に基づき、動的増加率（降伏応力：1.10、引張強度：1.05）を考慮する。TF（多軸性係数）については、鉄筋が一軸の部材であることを踏まえて□とする。

デッキプレートの応力-ひずみ関係は、第 1 折れ点を「降伏応力-降伏ひずみ」、第 2 折れ点を「引張強度-破断ひずみ」とするトリリニア型とする。降伏応力及び引張強度には、NEI07-13 に基づき、動的増加率（降伏応力：1.29、引張強度：1.10）を考慮する。デッキプレートの破断ひずみは、J I S に規定されている伸びの下限値を基に設定する。TF（多軸性係数）については、デッキプレートが薄板で構成される部材であることを踏まえて、NEI07-13 に基づき□とする。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

飛来物である鋼製材の応力-ひずみ関係は、第1折れ点を「降伏応力-降伏ひずみ」、第2折れ点を「引張強度-破断ひずみ」とするトリリニア型とする。鋼製材の破断ひずみは、JISに規定されている伸びの下限値を基に設定する。鋼製材については変形速度が大きいいため、時々刻々と変化するひずみ速度の効果を考慮し、次に示すCowper-Symondsの式を適用する。

$$\sigma_D = \sigma_S \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right\}$$

ここで、 σ_D は動的応力、 σ_S は静的応力、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度、C及びPはひずみ速度依存性パラメータを表す。

鉄筋、デッキプレート及び鋼製材の降伏強度及び引張強度を表1-17に示す。コンクリートの圧縮応力-圧縮ひずみ関係及び引張応力-ひび割れ幅関係並びに、鉄筋、デッキプレート及び鋼製材の応力-ひずみ関係をそれぞれ図1-22～図1-25に示す。

また、鋼製材のひずみ速度依存性パラメータを表1-18に示す。

表 1-16 コンクリートの圧縮強度及び引張強度

評価対象部位	設計基準強度 (N/mm ²)	材料モデル	
		圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
原子炉建屋 CR階外壁	32.4	40.5	3.24
原子炉建屋 屋根スラブ			

表 1-17 鉄筋、デッキプレート及び鋼製材の降伏強度及び引張強度

種別	材質	規格値（公称応力）		材料モデル（真応力，真ひずみ）		
		降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	破断 塑性ひずみ (-)
鉄筋	SD345	345	490	380	606	
デッキ プレート	SS400	245	400	316	485	
鋼製材	SS400	245	400	245	483	

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

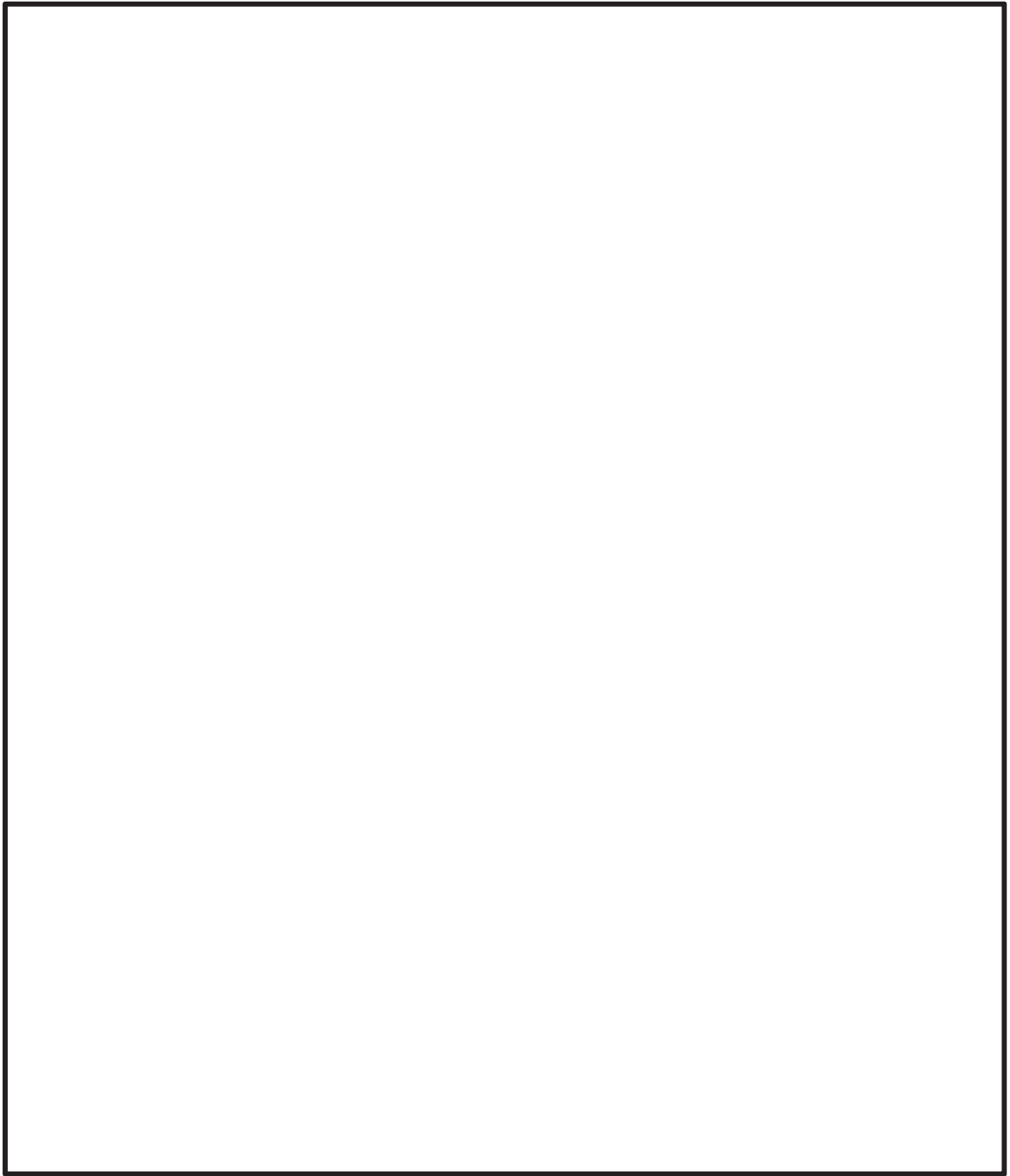


図 1-22 圧縮応力-圧縮ひずみ及び引張応力-ひび割れ幅関係 (コンクリート)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

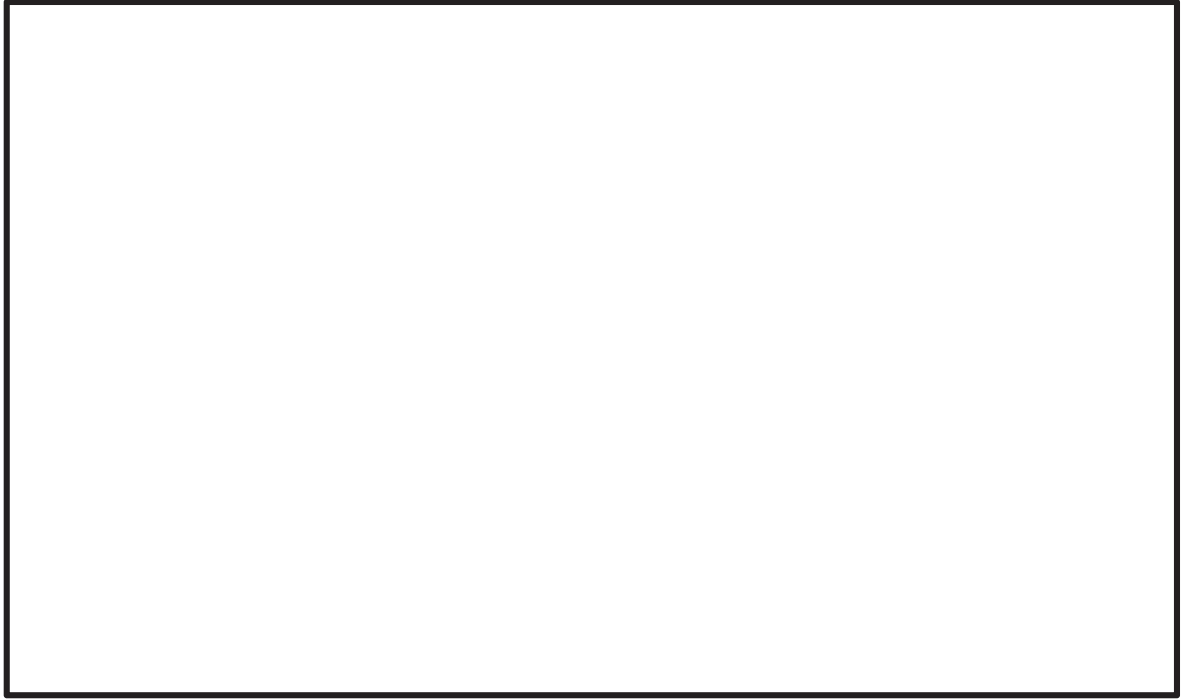


図 1-23 応力-ひずみ関係 (鉄筋)

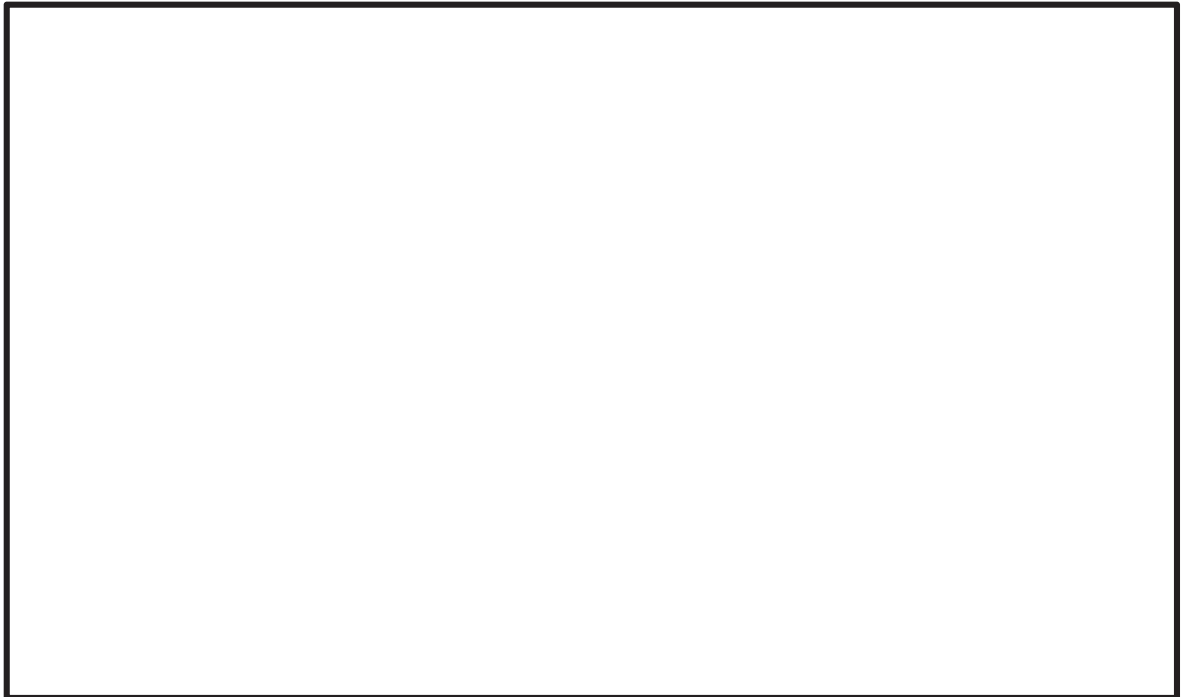


図 1-24 応力-ひずみ関係 (デッキプレート)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

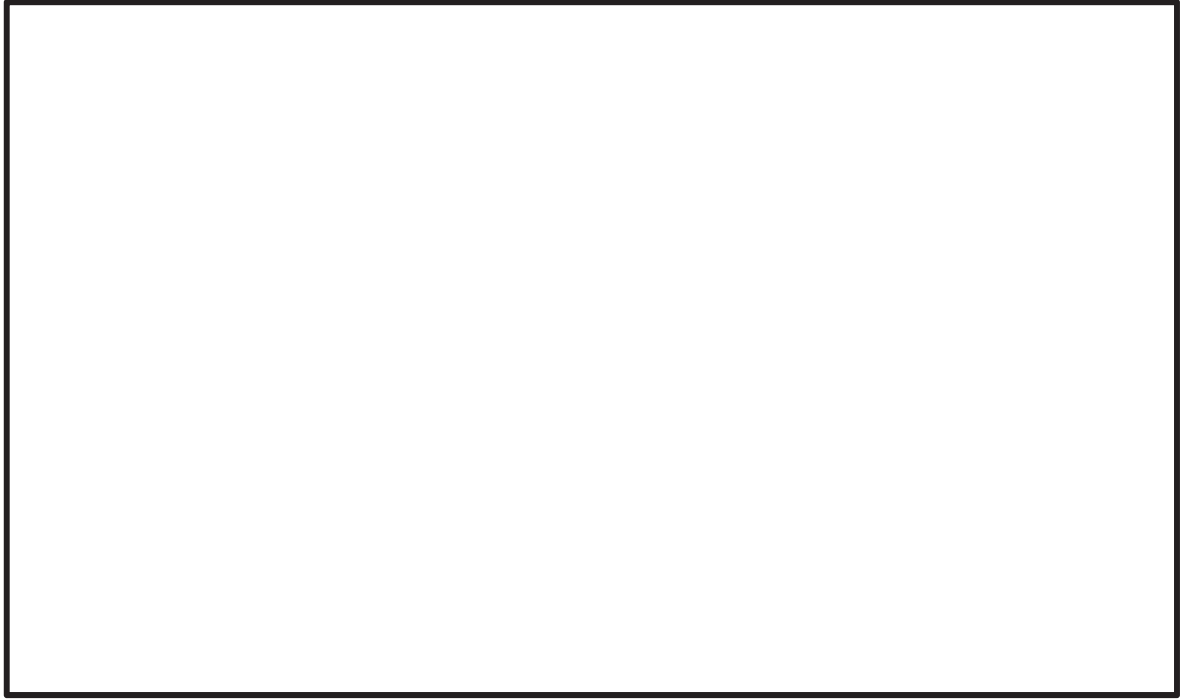


図 1-25 応力-ひずみ関係 (鋼製材)

表 1-18 ひずみ速度依存性パラメータ

	鋼製材
材料	SS400
C (s ⁻¹)	
P	

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(3) 変形評価

a. 耐震壁，鉄骨鉄筋コンクリート架構及び鉄骨架構

原子炉建屋，タービン建屋及び制御建屋の耐震壁に生じるひずみ並びにタービン建屋の鉄骨鉄筋コンクリート架構及び鉄骨架構に生じる変形は，設計荷重による建屋のせん断スケルトン曲線（ $\tau - \gamma$ 関係）を用いて算定する。

原子炉建屋，タービン建屋及び制御建屋の地震応答解析モデル図を図 1-26～図 1-28 に，せん断スケルトン曲線（ $\tau - \gamma$ 関係）を表 1-19～表 1-24 に示す。原子炉建屋，タービン建屋及び制御建屋のせん断スケルトン曲線（ $\tau - \gamma$ 関係）は，添付書類「VI-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」，添付書類「VI-2-11-2-3 タービン建屋の耐震性についての計算書」及び添付書類「VI-2-2-3 制御建屋の地震応答計算書」に示すものを用いる。

ただし，設計荷重による変形量の算定では，地盤と建屋の相互作用の影響は小さいと考えられることから，地盤ばねは考慮せず，1 階床位置で固定と仮定とする。

$E_c = 2.12 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
1.32 × 10 ⁴ N/mm ² (燃料取替床上部)
2.52 × 10 ⁴ N/mm ² (追設耐震壁)
$G_c = 9.10 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$
5.69 × 10 ³ N/mm ² (燃料取替床上部)
1.05 × 10 ⁴ N/mm ² (追設耐震壁)

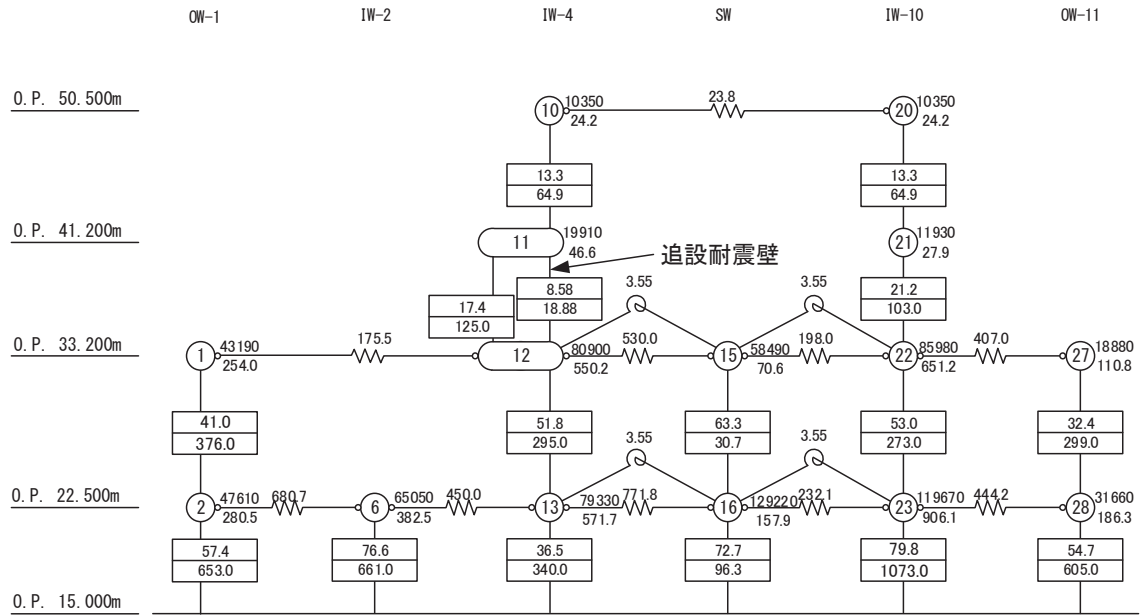
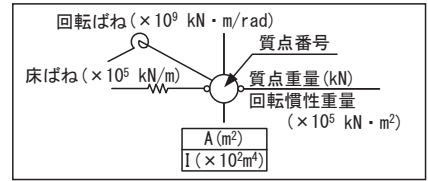


図 1-26 原子炉建屋の地震応答解析モデル図 (EW 方向) (2/2)

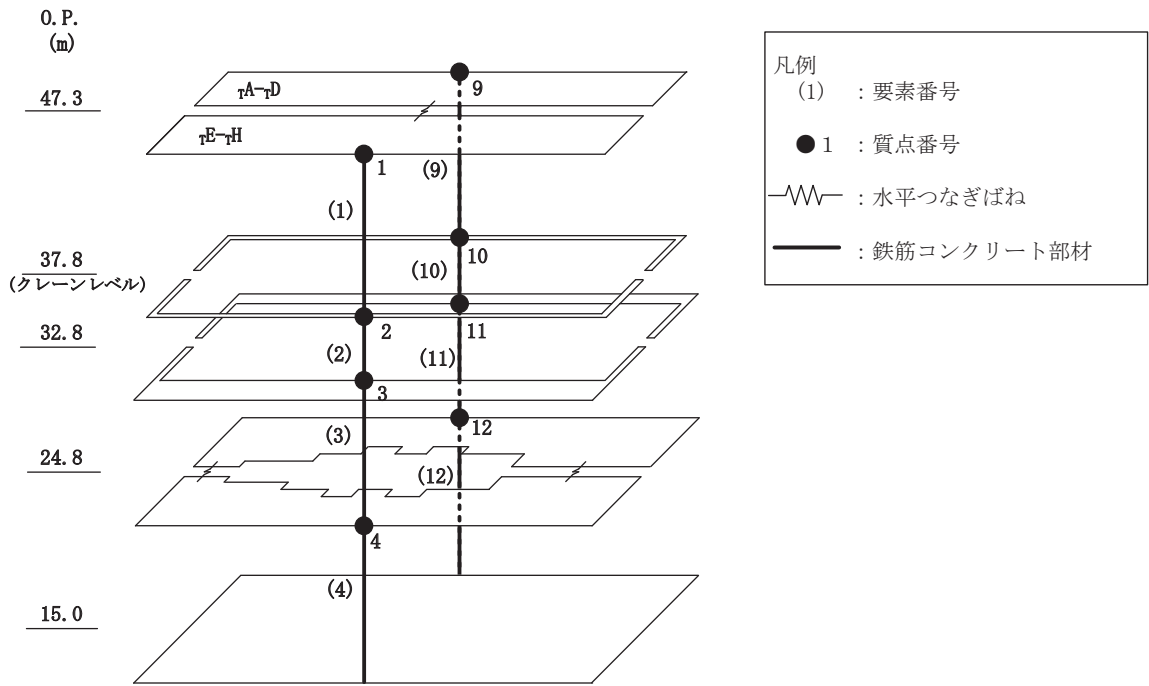


図 1-27 タービン建屋の地震応答解析モデル図 (NS 方向) (1/2)

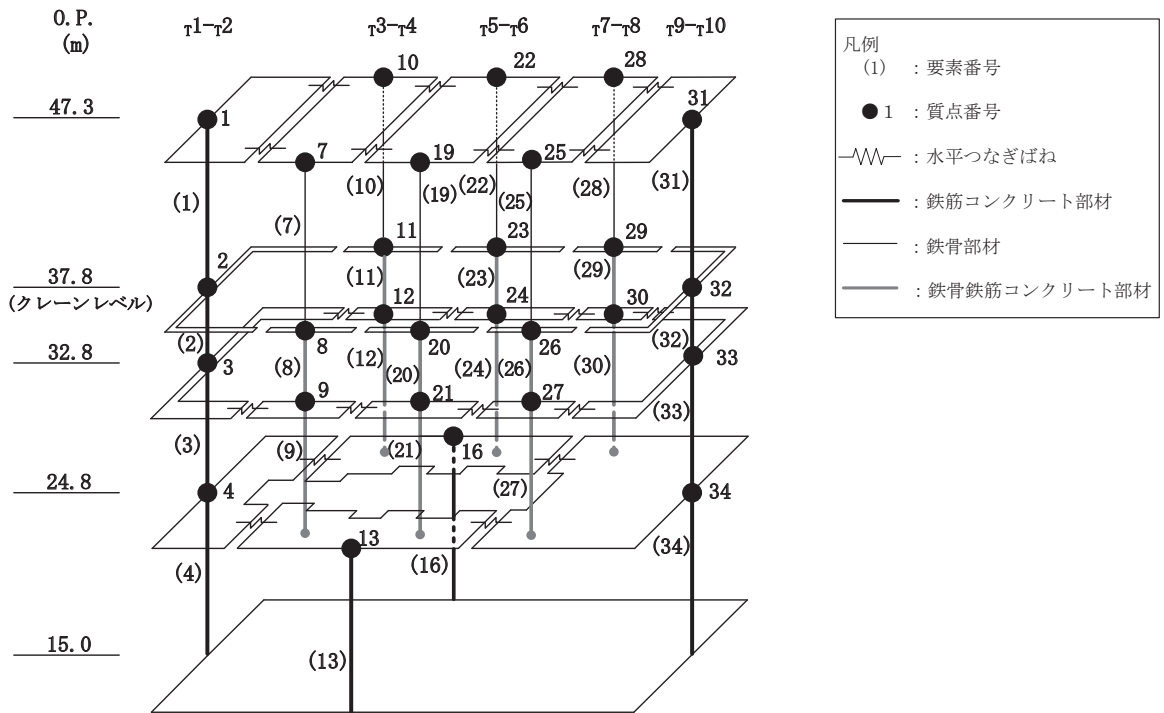


図 1-27 タービン建屋の地震応答解析モデル図 (EW 方向) (2/2)

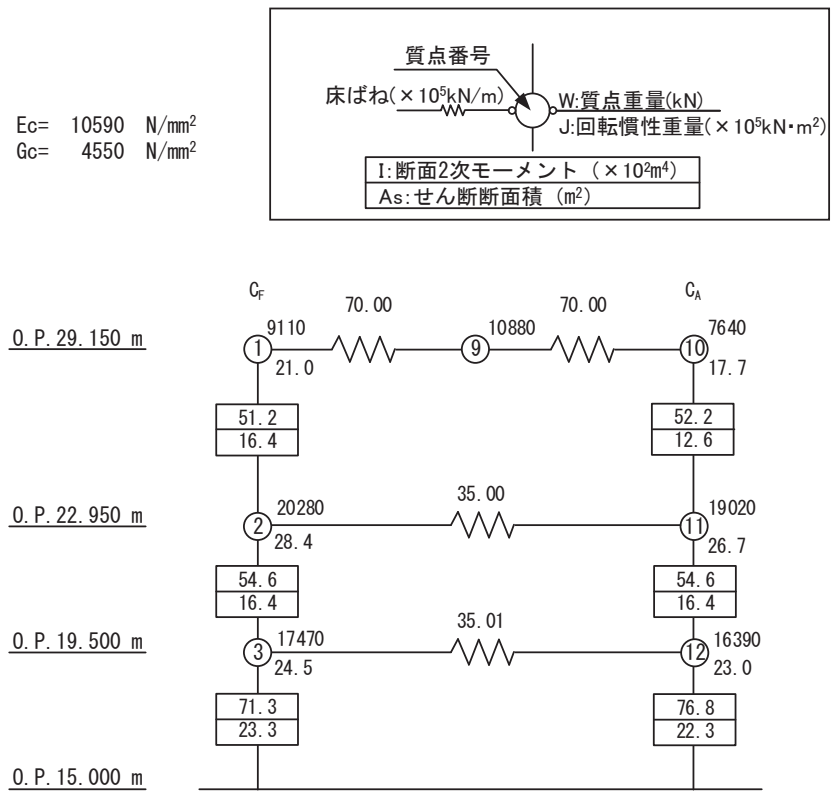


図 1-28 制御建屋の地震応答解析モデル図 (NS 方向) (1/2)

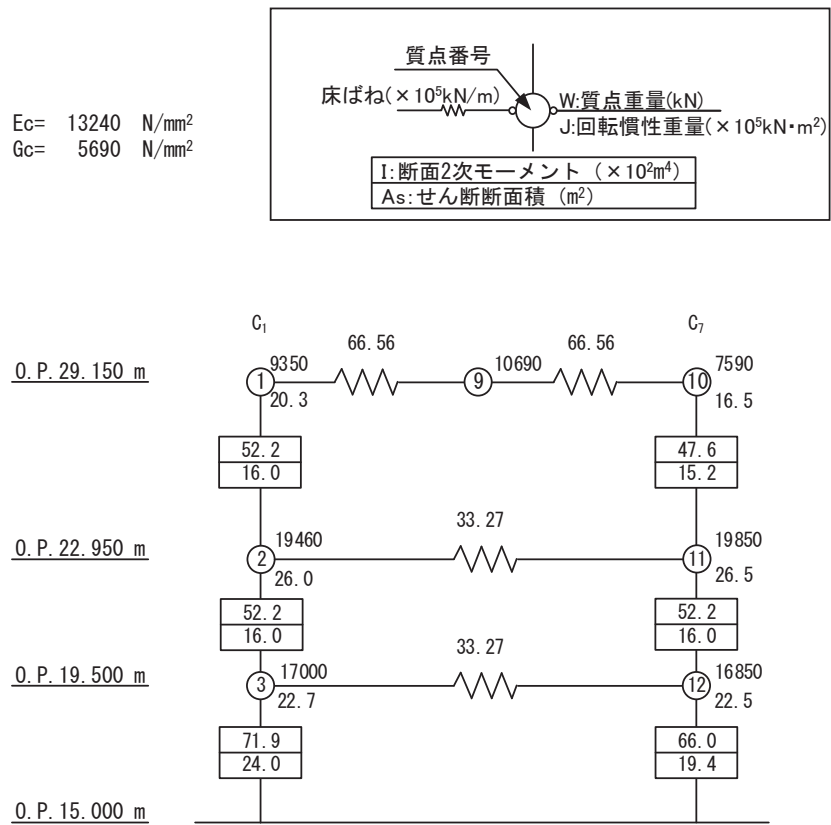


図 1-28 制御建屋の地震応答解析モデル図 (EW 方向) (2/2)

表 1-19 原子炉建屋のせん断スケルトン曲線 ($\tau - \gamma$ 関係) (NS 方向) (1/2)

OW-K

0. P. (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
33.2 ~ 22.5	2.14	2.68	6.44	0.250	0.523	4.00
22.5 ~ 15.0	2.22	2.79	6.44	0.260	0.544	4.00

IW-J

0. P. (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
50.5 ~ 41.2	3.08	—	6.54	0.902	—	4.00
41.2 ~ 33.2 (追設)	1.83	2.47	4.43	0.174	0.523	4.00
41.2 ~ 33.2	3.05	—	6.37	0.894	—	4.00
33.2 ~ 22.5	2.26	2.83	6.46	0.265	0.553	4.00
22.5 ~ 15.0	2.37	2.97	6.53	0.278	0.581	4.00

SW

0. P. (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
33.2 ~ 22.5	2.10	2.63	5.52	0.246	0.513	4.00
22.5 ~ 15.0	2.46	3.08	5.84	0.288	0.602	4.00

表 1-19 原子炉建屋のせん断スケルトン曲線 ($\tau - \gamma$ 関係) (NS 方向) (2/2)

IW-C

O. P. (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
50.5 ~ 41.2	3.08	—	6.54	0.902	—	4.00
41.2 ~ 33.2 (追設)	1.83	2.47	4.43	0.174	0.523	4.00
41.2 ~ 33.2	3.06	—	6.38	0.897	—	4.00
33.2 ~ 22.5	2.30	2.88	6.48	0.269	0.563	4.00
22.5 ~ 15.0	2.48	3.11	6.58	0.291	0.607	4.00

OW-A

O. P. (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
33.2 ~ 22.5	2.19	2.75	6.44	0.257	0.537	4.00
22.5 ~ 15.0	2.31	2.90	6.47	0.271	0.567	4.00

表 1-20 原子炉建屋のせん断スケルトン曲線 ($\tau - \gamma$ 関係) (EW 方向) (1/2)

OW-1

O. P. (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
33.2 ~ 22.5	2.15	2.75	6.21	0.237	0.537	4.00
22.5 ~ 15.0	2.33	2.97	6.47	0.256	0.581	4.00

IW-2

O. P. (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
22.5 ~ 15.0	2.20	2.81	6.65	0.242	0.550	4.00

IW-4

O. P. (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
50.5 ~ 41.2	2.49	2.65	6.28	0.438	0.517	4.00
41.2 ~ 33.2 (追設)	1.83	2.47	4.09	0.175	0.524	4.00
41.2 ~ 33.2	2.51	2.67	6.29	0.442	0.521	4.00
33.2 ~ 22.5	2.27	2.90	6.07	0.249	0.566	4.00
22.5 ~ 15.0	2.56	3.27	5.96	0.281	0.639	4.00

表 1-20 原子炉建屋のせん断スケルトン曲線 ($\tau - \gamma$ 関係) (EW 方向) (2/2)

SW

O. P. (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
33.2 ~ 22.5	2.06	2.63	5.94	0.226	0.513	4.00
22.5 ~ 15.0	2.41	3.08	6.33	0.265	0.602	4.00

IW-10

O. P. (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
50.5 ~ 41.2	2.49	2.65	6.28	0.438	0.517	4.00
41.2 ~ 33.2	2.48	2.64	6.32	0.436	0.515	4.00
33.2 ~ 22.5	2.23	2.85	6.11	0.245	0.557	4.00
22.5 ~ 15.0	2.37	3.04	6.50	0.261	0.593	4.00

OW-11

O. P. (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
33.2 ~ 22.5	2.09	2.67	6.47	0.229	0.521	4.00
22.5 ~ 15.0	2.20	2.81	6.45	0.242	0.550	4.00

表 1-21 タービン建屋のせん断スケルトン曲線 ($\tau - \gamma$ 関係) (NS 方向)

$\tau E - \tau H$

O. P. (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
47.3 ~ 37.8	2.80	—	5.77	0.822	—	4.00
37.8 ~ 32.8	3.47	—	6.49	1.02	—	4.00
32.8 ~ 24.8	2.76	—	5.86	0.810	—	4.00
24.8 ~ 15.0	2.95	—	5.07	0.740	—	4.00

$\tau A - \tau D$

O. P. (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
47.3 ~ 37.8	2.80	—	5.77	0.822	—	4.00
37.8 ~ 32.8	3.47	—	6.49	1.02	—	4.00
32.8 ~ 24.8	2.73	—	5.81	0.799	—	4.00
24.8 ~ 15.0	2.88	—	4.60	0.723	—	4.00

表 1-22 タービン建屋のせん断スケルトン曲線 ($\tau - \gamma$ 関係) (EW 方向)

$\tau 1-\tau 2$

O. P. (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
47.3 ~ 37.8	2.63	—	5.95	0.662	—	4.00
37.8 ~ 32.8	2.96	—	6.44	0.744	—	4.00
32.8 ~ 24.8	2.83	—	6.44	0.710	—	4.00
24.8 ~ 15.0	2.82	—	5.88	0.621	—	4.00

$\tau 3-\tau 6$ (τH 側)

O. P. (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
24.8 ~ 15.0	2.79	—	3.85	0.613	—	4.00

$\tau 3-\tau 6$ (τA 側)

O. P. (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
24.8 ~ 15.0	2.81	—	3.52	0.617	—	4.00

$\tau 9-\tau 10$

O. P. (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
47.3 ~ 37.8	2.63	—	5.95	0.662	—	4.00
37.8 ~ 32.8	2.96	—	6.43	0.743	—	4.00
32.8 ~ 24.8	2.76	—	6.01	0.694	—	4.00
24.8 ~ 15.0	2.87	—	5.49	0.631	—	4.00

表 1-23 制御建屋のせん断スケルトン曲線 ($\tau - \gamma$ 関係) (NS 方向)

CF

O. P. (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
29.15 ~ 22.95	2.65	—	5.68	0.583	—	4.00
22.95 ~ 19.50	2.84	—	6.56	0.623	—	4.00
19.50 ~ 15.00	2.83	—	6.62	0.621	—	4.00

CA

O. P. (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
29.15 ~ 22.95	2.65	—	5.71	0.583	—	4.00
22.95 ~ 19.50	2.84	—	6.56	0.623	—	4.00
19.50 ~ 15.00	2.83	—	6.62	0.621	—	4.00

表 1-24 制御建屋のせん断スケルトン曲線 ($\tau - \gamma$ 関係) (EW 方向)

C1

O. P. (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
29.15 ~ 22.95	2.41	2.56	5.70	0.423	0.500	4.00
22.95 ~ 19.50	2.55	2.71	6.56	0.448	0.529	4.00
19.50 ~ 15.00	2.54	2.70	6.60	0.446	0.527	4.00

C7

O. P. (m)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
29.15 ~ 22.95	2.41	2.56	5.68	0.423	0.500	4.00
22.95 ~ 19.50	2.55	2.71	6.56	0.448	0.529	4.00
19.50 ~ 15.00	2.54	2.70	6.61	0.446	0.527	4.00

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

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

設計飛来物による衝撃荷重 W_M は、各建屋の最上部に作用させる。地震応答解析モデルが多軸の場合には、各軸最上部の質点に W_M を分配して評価する。衝撃荷重は、次式によって算出した運動エネルギーが最大となる鋼製材の衝撃荷重 $W_M=1466\text{kN}$ を用いて評価する。

$$W_M = m \cdot V / \Delta t / 1000 = m \cdot V^2 / L_1 / 1000$$

b. スタッド

原子炉建屋，タービン建屋及び制御建屋の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 によってスタッドに生じる引張力を算定し，許容限界を超えないことを確認する。スタッドに作用する引張力は，単位幅の屋根スラブに生じるせん断力を当該範囲のスタッドが均等に負担するものとして評価する。

スタッドに発生する引張力 T の算定式を以下に示す。また，スタッドに作用する荷重の概要を図 1-29 に示す。

スタッド 1 本あたりの発生引張力

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

ここで， $Q = \omega_T \cdot L$

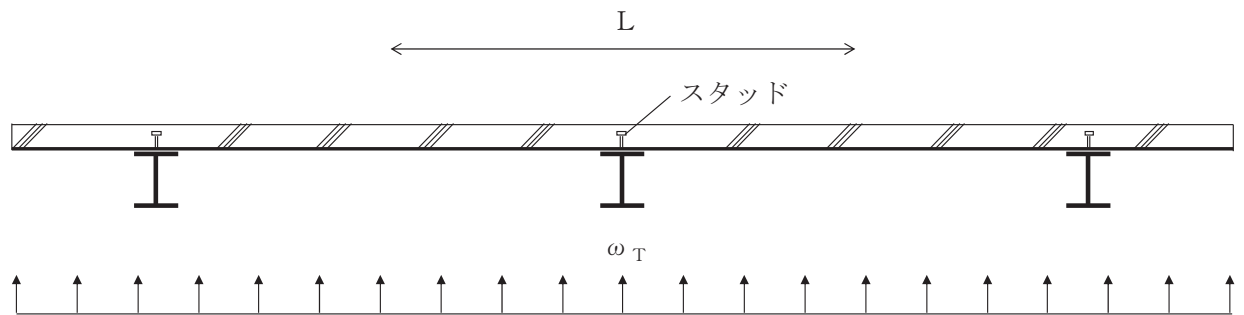


図 1-29 スタッドに作用する荷重の概要

スタッドの許容引張力は「日本建築学会 2010 年 各種合成構造設計指針・同解説」に準拠し，スタッドの降伏により定まる場合の許容引張力 p_{a1} ，定着したコンクリート躯体のコーン状破壊により定まる場合の許容引張力 p_{a2} ，コンクリートの支圧破壊により定まる場合の許容引張力 p_{a3} のうち，最も小さい値とする。スタッドの許容引張力 p_a の算定式を以下に示す。

$$p_a = \text{Min} \{ p_{a1}, p_{a2}, p_{a3} \}$$

ここで， $p_{a1} = \Phi_1 \cdot s \cdot \sigma_{pa} \cdot a_c \cdot a / 1000$

$$p_{a2} = \Phi_2 \cdot c \cdot \sigma_t \cdot A_c / 1000$$

$$p_{a3} = f_n \cdot A_0 / 1000$$

1.4 評価条件

1.4.1 貫通評価

(1) 式による評価

貫通評価において、各施設の壁、スラブ及び頂版の貫通評価に用いる入力値を表 1-25 に示す。

表 1-25 貫通評価に用いる入力値 (1/2)

(原子炉建屋，制御建屋，軽油タンク室及び軽油タンク室 (H))

記号	単位	定義		数値
D	kgf/cm ³	設計飛来物直径密度 ($D = W / d^3$)		6.39×10^{-3}
d	cm	設計飛来物直径		27.6
F _c	kgf/cm ²	コンクリートの設計基準強度	壁面，スラブ	330
			頂版	240
N	—	設計飛来物の形状係数		1.14
V	m/s	壁面	設計飛来物の衝突速度 (水平)	46.6
		スラブ，頂版	設計飛来物の衝突速度 (鉛直)	16.7
W	kgf	設計飛来物重量		135
α _e	—	低減係数		1.0

表 1-25 貫通評価に用いる入力値 (2/2)

(タービン建屋)

記号	単位	定義		数値
D	kgf/cm ³	設計飛来物直径密度 ($D = W / d^3$)		6.39×10^{-3}
d	cm	設計飛来物直径		27.6
F _c	kgf/cm ²	コンクリートの設計基準強度	壁面，スラブ	330
N	—	設計飛来物の形状係数		1.14
V	m/s	壁面	設計飛来物の衝突速度 (水平)	46.6
		スラブ	設計飛来物の衝突速度 (鉛直)	32.9
W	kgf	設計飛来物重量		135
α _e	—	低減係数		1.0

1.4.2 裏面剥離評価

(1) 式による評価

裏面剥離評価において、各施設の壁、スラブ及び頂版の裏面剥離評価に用いる入力値を表 1-26 に示す。

表 1-26 裏面剥離評価に用いる入力値 (1/2)
(原子炉建屋, 制御建屋, 軽油タンク室及び軽油タンク室 (H))

記号	単位	定義		数値
d	cm	設計飛来物直径		27.6
f_c'	kgf/cm ²	コンクリートの設計基準強度	壁面, スラブ	330
			頂版	240
V	m/s	壁面	設計飛来物の衝突速度 (水平)	46.6
		スラブ, 頂版	設計飛来物の衝突速度 (鉛直)	16.7
V_0	m/s	飛来物基準速度		60.96
W	kgf	設計飛来物重量		135
α_s	—	低減係数		1.0

表 1-26 裏面剥離評価に用いる入力値 (2/2)
(タービン建屋)

記号	単位	定義		数値
d	cm	設計飛来物直径		27.6
f_c'	kgf/cm ²	コンクリートの設計基準強度	壁面, スラブ	330
			スラブ	設計飛来物の衝突速度 (鉛直)
V	m/s	壁面	設計飛来物の衝突速度 (水平)	46.6
		スラブ	設計飛来物の衝突速度 (鉛直)	32.9
V_0	m/s	飛来物基準速度		60.96
W	kgf	設計飛来物重量		135
α_s	—	低減係数		1.0

(2) 原子炉建屋の CR 階外壁及び屋根スラブに対する衝突解析

原子炉建屋の CR 階外壁及び屋根スラブの裏面剥離評価における衝突解析は、屋根スラブの最大変形が生じると想定される評価対象の中央部に衝突するケースを設定する。

解析ケースを図 1-30 及び図 1-31 に示す。

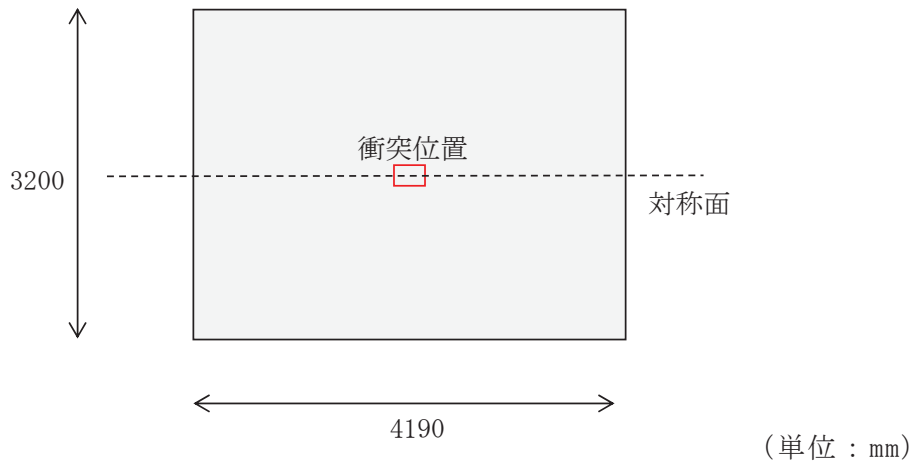


図 1-30 解析ケース (原子炉建屋 CR 階外壁)

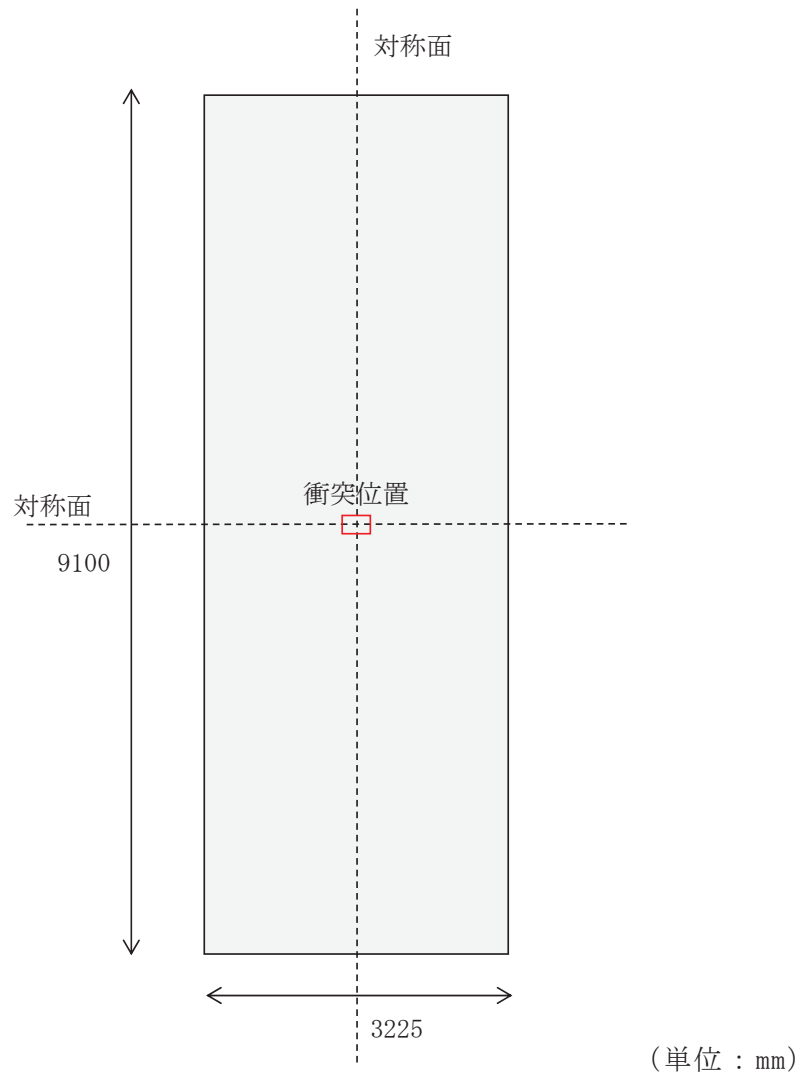


図 1-31 解析ケース (原子炉建屋屋根スラブ)

1.4.3 変形評価

(1) 耐震壁，鉄骨鉄筋コンクリート架構及び鉄骨架構

原子炉建屋，タービン建屋及び制御建屋の耐震壁並びにタービン建屋の鉄骨鉄筋コンクリート架構及び鉄骨架構の変形評価に用いる条件を表 1-27～表 1-30 に示す。

表 1-27 設計飛来物による衝撃荷重の評価条件

記号	定義	数値	単位
L_1	設計飛来物の最も短い辺の全長	0.2	m
m	設計飛来物質量	135	kg
V	設計飛来物の衝突速度（水平）	46.6	m/s

表 1-28 原子炉建屋の変形評価の評価条件

O.P. (m)	位置	風力係数 C^*	受圧面積 A (m^2)	
			NS 方向	EW 方向
50.5～41.2	風上	1.0	559	429
	風下	1.0		
41.2～33.2	風上	1.0	511	361
	風下	1.0		
33.2～22.5	風上	1.0	872	920
	風下	1.0		
22.5～15.0	風上	1.0	665	725
	風下	1.0		

注記* : 風下側の係数は，風上側と同じ向きを正とする。

表 1-29 タービン建屋の変形評価の評価条件

O. P. (m)	位置	風力係数 C *	受圧面積 A (m ²)	
			NS 方向	EW 方向
47.3~37.8	風上	1.0	484	1041
	風下	1.0		
37.8~32.8	風上	1.0	225	483
	風下	1.0		
32.8~24.8	風上	1.0	475	773
	風下	1.0		
24.8~15.0	風上	1.0	578	964
	風下	1.0		

注記* : 風下側の係数は、風上側と同じ向きを正とする。

表 1-30 制御建屋の変形評価の評価条件

O. P. (m)	位置	風力係数 C *	受圧面積 A (m ²)	
			NS 方向	EW 方向
29.15~22.95	風上	1.0	370	411
	風下	1.0		
22.95~19.50	風上	1.0	145	155
	風下	1.0		
19.50~15.00	風上	1.0	189	202
	風下	1.0		

注記* : 風下側の係数は、風上側と同じ向きを正とする。

(2) スタッド

原子炉建屋，タービン建屋及び制御建屋の屋根スラブのスタッドの変形評価に用いる条件を表 1-31 に示す。

表 1-31 スタッドの変形評価の評価条件 (1/3)
(原子炉建屋)

記号	定義	数値	単位
A_c	コーン状破壊面の有効投影面積	34333	mm^2
A_0	スタッド頭部の支圧面積	459	mm^2
$a_c a$	スタッドの断面積で，軸部断面積とねじ部有効断面積の小なる方の値	201	mm^2
D	スタッドの頭部直径	29	mm
d	スタッドの軸部直径	16	mm
F_c	コンクリートの設計基準強度	32.4	N/mm^2
f_n	コンクリートの支圧強度	194	N/mm^2
l_e	スタッドのコンクリート内への有効埋込み長さ	92	mm
p_a	スタッド 1 本あたりの許容引張力	40.3	kN
p_{a1}	スタッド鋼材の降伏により定まる場合のスタッド 1 本あたりの許容引張力	47.2	kN
p_{a2}	定着したコンクリート躯体のコーン状破壊により定まる場合のスタッド 1 本あたりの許容引張力	40.3	kN
p_{a3}	コンクリートの支圧破壊により定まるスタッド 1 本あたりの許容引張力	89.3	kN
$c \sigma_t$	コーン状破壊に対するコンクリート引張強度	1.76	N/mm^2
$s \sigma_{pa}$	スタッドの引張強度	235	N/mm^2
$s \sigma_y$	スタッドの規格降伏点強度	235	N/mm^2
Φ_1	低減係数	1.0	—
Φ_2	低減係数	0.667	—
p	スタッドの間隔	200	mm
T	スタッドに生じる引張力	2.6	kN

表 1-31 スタッドの変形評価の評価条件 (2/3)
(タービン建屋)

記号	定義	数値	単位
A_c	コーン状破壊面の有効投影面積	34014	mm^2
A_0	スタッド頭部の支圧面積	459	mm^2
$a_c a$	スタッドの断面積で、軸部断面積とねじ部有効断面積の小なる方の値	201	mm^2
D	スタッドの頭部直径	29	mm
d	スタッドの軸部直径	16	mm
F_c	コンクリートの設計基準強度	32.4	N/mm^2
f_n	コンクリートの支圧強度	194	N/mm^2
l_e	スタッドのコンクリート内への有効埋込み長さ	92	mm
p_a	スタッド1本あたりの許容引張力	39.9	kN
p_{a1}	スタッド鋼材の降伏により定まる場合のスタッド1本あたりの許容引張力	47.2	kN
p_{a2}	定着したコンクリート躯体のコーン状破壊により定まる場合のスタッド1本あたりの許容引張力	39.9	kN
p_{a3}	コンクリートの支圧破壊により定まるスタッド1本あたりの許容引張力	89.3	kN
$c \sigma_t$	コーン状破壊に対するコンクリート引張強度	1.76	N/mm^2
$s \sigma_{pa}$	スタッドの引張強度	235	N/mm^2
$s \sigma_y$	スタッドの規格降伏点強度	235	N/mm^2
Φ_1	低減係数	1.0	—
Φ_2	低減係数	0.667	—
p	スタッドの間隔	200	mm
T	スタッドに生じる引張力	1.5	kN

表 1-31 スタッドの変形評価の評価条件 (3/3)
(制御建屋)

記号	定義	数値	単位
A_c	コーン状破壊面の有効投影面積	34972	mm^2
A_0	スタッド頭部の支圧面積	459	mm^2
$a_c a$	スタッドの断面積で、軸部断面積とねじ部有効断面積の小なる方の値	201	mm^2
D	スタッドの頭部直径	29	mm
d	スタッドの軸部直径	16	mm
F_c	コンクリートの設計基準強度	32.4	N/mm^2
f_n	コンクリートの支圧強度	194	N/mm^2
l_e	スタッドのコンクリート内への有効埋込み長さ	92	mm
p_a	スタッド1本あたりの許容引張力	41.0	kN
p_{a1}	スタッド鋼材の降伏により定まる場合のスタッド1本あたりの許容引張力	47.2	kN
p_{a2}	定着したコンクリート躯体のコーン状破壊により定まる場合のスタッド1本あたりの許容引張力	41.0	kN
p_{a3}	コンクリートの支圧破壊により定まるスタッド1本あたりの許容引張力	89.3	kN
$c \sigma_t$	コーン状破壊に対するコンクリート引張強度	1.76	N/mm^2
$s \sigma_{pa}$	スタッドの引張強度	235	N/mm^2
$s \sigma_y$	スタッドの規格降伏点強度	235	N/mm^2
Φ_1	低減係数	1.0	—
Φ_2	低減係数	0.667	—
p	スタッドの間隔	570	mm
T	スタッドに生じる引張力	0.5	kN

1.5 強度評価結果

1.5.1 貫通評価

式による評価にて算定した貫通評価結果を表 1-32 に示す。評価結果より、各施設の評価対象部位の許容限界が、設計飛来物による貫通を生じない貫通限界厚さを上回ることを確認した。

表 1-32 貫通評価結果（式による評価）

評価対象部位		設計飛来物	評価結果	許容限界
			(cm)	(cm)
原子炉建屋	CR 階外壁	鋼製材	22.5	25
	屋根スラブ		9.3	17
タービン建屋	2 階床スラブ		16.7	60
制御建屋	3 階外壁		22.5	40
	屋根スラブ		9.3	30
軽油タンク室	頂版		10.0	40
軽油タンク室 (H)	頂版		10.0	120

1.5.2 裏面剥離評価

式による評価にて算定した裏面剥離評価結果を表 1-33 に示す。

評価結果より、各施設の評価対象部位の許容限界が、設計飛来物による裏面剥離を生じない裏面剥離限界厚さを上回ることを確認した。

式による評価にて許容限界を満足しなかった原子炉建屋 CR 階外壁及び原子炉建屋屋根スラブについて、解析による評価の結果を表 1-34 及び図 1-32 に示す。

上記結果より、評価対象部位に設計飛来物による裏面剥離が生じないことを確認した。

表 1-33 裏面剥離評価結果（式による評価）

評価対象部位		設計飛来物	評価結果	許容限界
			(cm)	(cm)
タービン建屋	2 階床スラブ	鋼製材	29.8	60
制御建屋	3 階外壁		37.6	40
	屋上スラブ		18.9	30
軽油タンク室	頂版		21.5	40
軽油タンク室 (H)	頂版		21.5	120

表 1-34 裏面剥離評価結果（解析による評価）

評価対象部位		評価結果	許容限界
			鋼材の破断ひずみ
原子炉建屋 CR 階外壁	デッキプレート		
原子炉建屋 屋根スラブ			

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

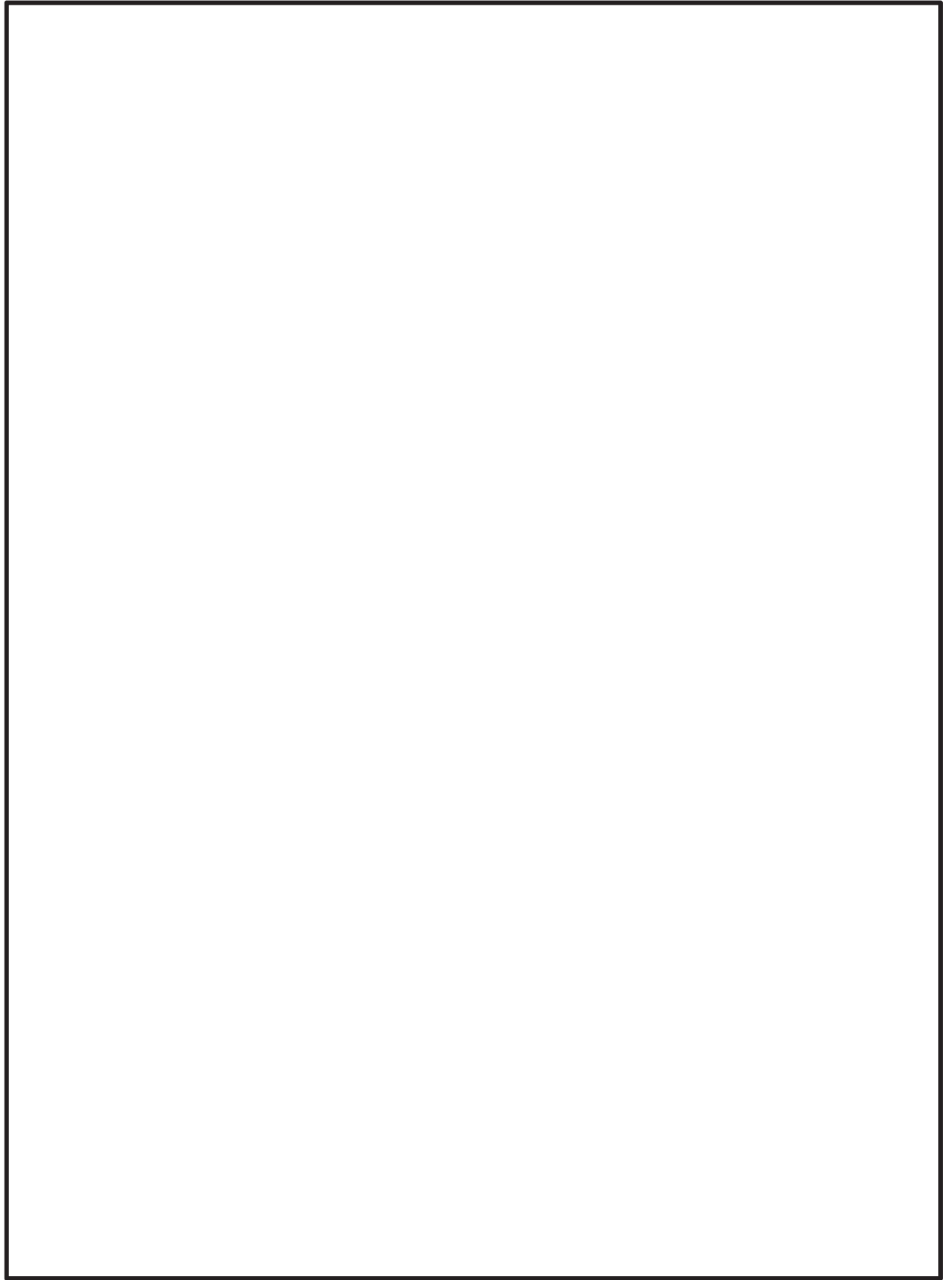


図 1-32 デッキプレートのひずみ分布図（原子炉建屋 CR 階外壁）（1/2）

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

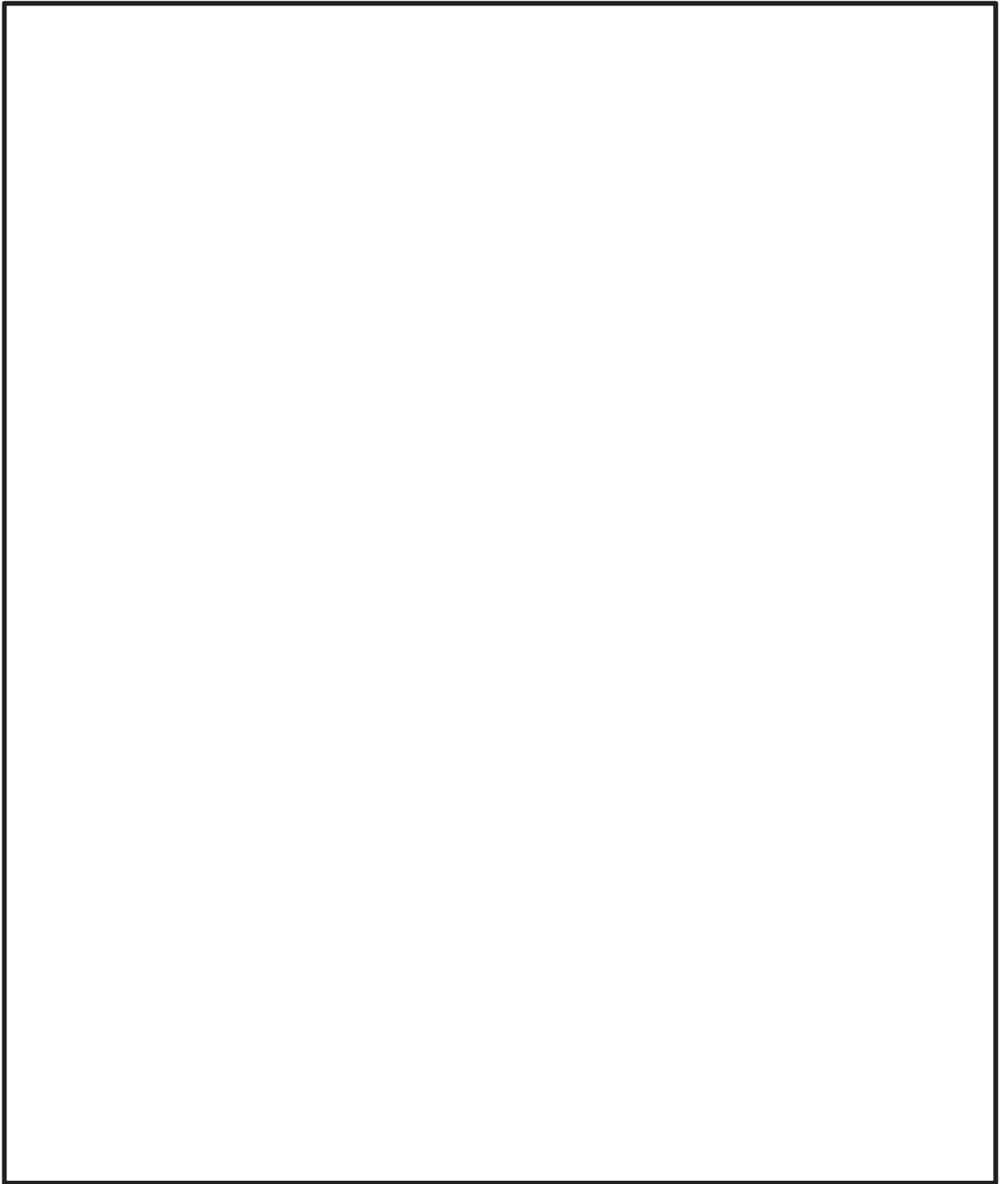


図 1-32 デッキプレートのひずみ分布図（原子炉建屋屋根スラブ）（2/2）

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

1.5.3 変形評価

(1) 耐震壁，鉄骨鉄筋コンクリート架構及び鉄骨架構

原子炉建屋，タービン建屋及び制御建屋の耐震壁に生じるせん断ひずみ並びにタービン建屋の鉄骨鉄筋コンクリート架構及び鉄骨架構に生じる層間変形角について評価した変形評価結果を表 1-35 に示す。

原子炉建屋，タービン建屋及び制御建屋の耐震壁に生じるひずみ並びにタービン建屋の鉄骨鉄筋コンクリート架構及び鉄骨架構に生じる層間変形角が許容限界を超えないことを確認した。

表 1-35 変形評価結果（耐震壁，鉄骨鉄筋コンクリート架構及び鉄骨架構）

評価対象部位		評価結果	許容限界
原子炉建屋	耐震壁	0.07×10^{-3}	2.0×10^{-3}
タービン建屋		0.11×10^{-3}	2.0×10^{-3}
制御建屋		0.04×10^{-3}	2.0×10^{-3}
タービン建屋	鉄骨鉄筋コンクリート架構	1/8772	1/200
	鉄骨架構	1/11494	1/120

注：NS 方向，EW 方向の評価結果のうち，最も厳しい部材の結果を記載する。

(2) スタッド

原子炉建屋，タービン建屋及び制御建屋の屋根スラブのスタッドについて評価した変形評価結果を表 1-36 に示す。

評価結果より，スタッドに生じる引張力が許容限界を超えないことを確認した。

表 1-36 変形評価結果（スタッド）

評価対象部位		評価結果		許容限界 (kN)
		項目	数値 (kN)	
原子炉建屋	屋根スラブ スタッド	引張力	2.6	40.3
タービン建屋	屋根スラブ スタッド	引張力	1.5	39.9
制御建屋	屋根スラブ スタッド	引張力	0.5	41.0

2. 鋼製構造物の強度計算

2.1 概要

本章では、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、竜巻より防護すべき施設を内包する施設のうち、鋼製構造物である原子炉建屋の竜巻の影響に対する防護を期待する扉（以下「扉」という。）並びに軽油タンク室及び軽油タンク室（H）の鋼製ハッチ（以下「鋼製ハッチ」という。）が、設計竜巻による設計飛来物の衝突に加え、風圧力による荷重及び気圧差による荷重に対し、竜巻時及び竜巻通過後においても、竜巻より防護すべき施設の安全機能を損なわないよう、内包する竜巻より防護すべき施設に設計飛来物が衝突することを防止する機能を有すること及び竜巻より防護すべき施設に必要な機能を損なわないことを確認するものである。

2.2 基本方針

添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」を踏まえ、各施設の位置を「2.2.1 位置」に、構造概要を「2.2.2 構造概要」に、評価方針を「2.2.3 評価方針」に、適用規格を「2.2.4 適用規格」に示す。

2.2.1 位置

扉は原子炉建屋に設置する。鋼製ハッチは屋外の軽油タンク室及び軽油タンク室（H）の頂版に設置する。原子炉建屋、軽油タンク室及び軽油タンク室（H）の位置を図 2-1 に、扉及び鋼製ハッチの設置位置を図 2-2、図 2-3 にそれぞれ示す。

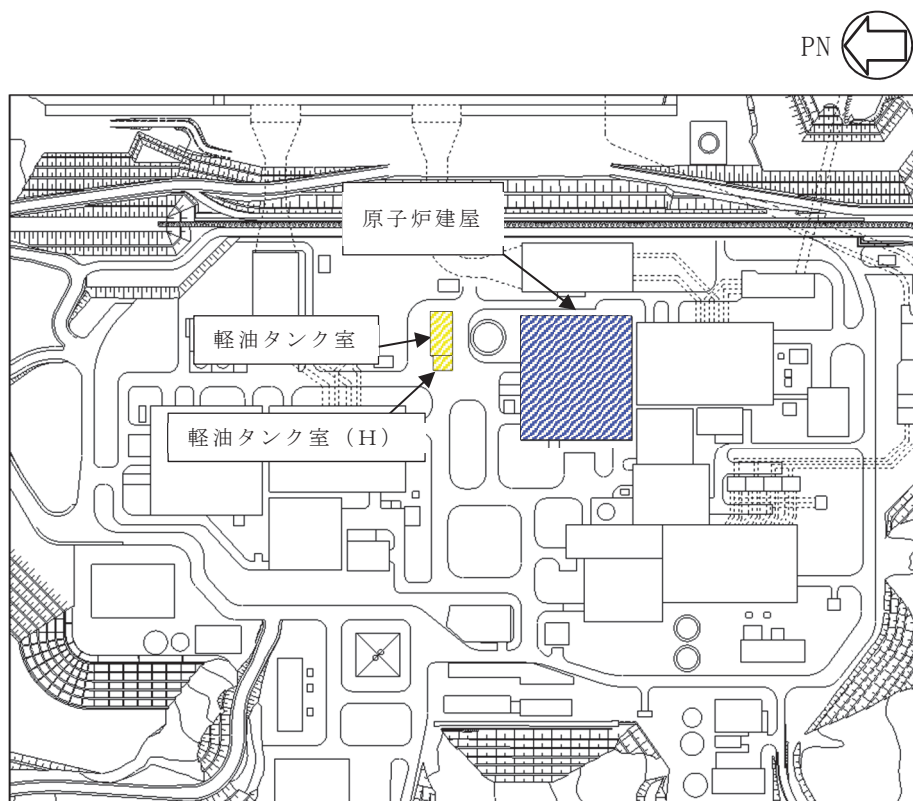


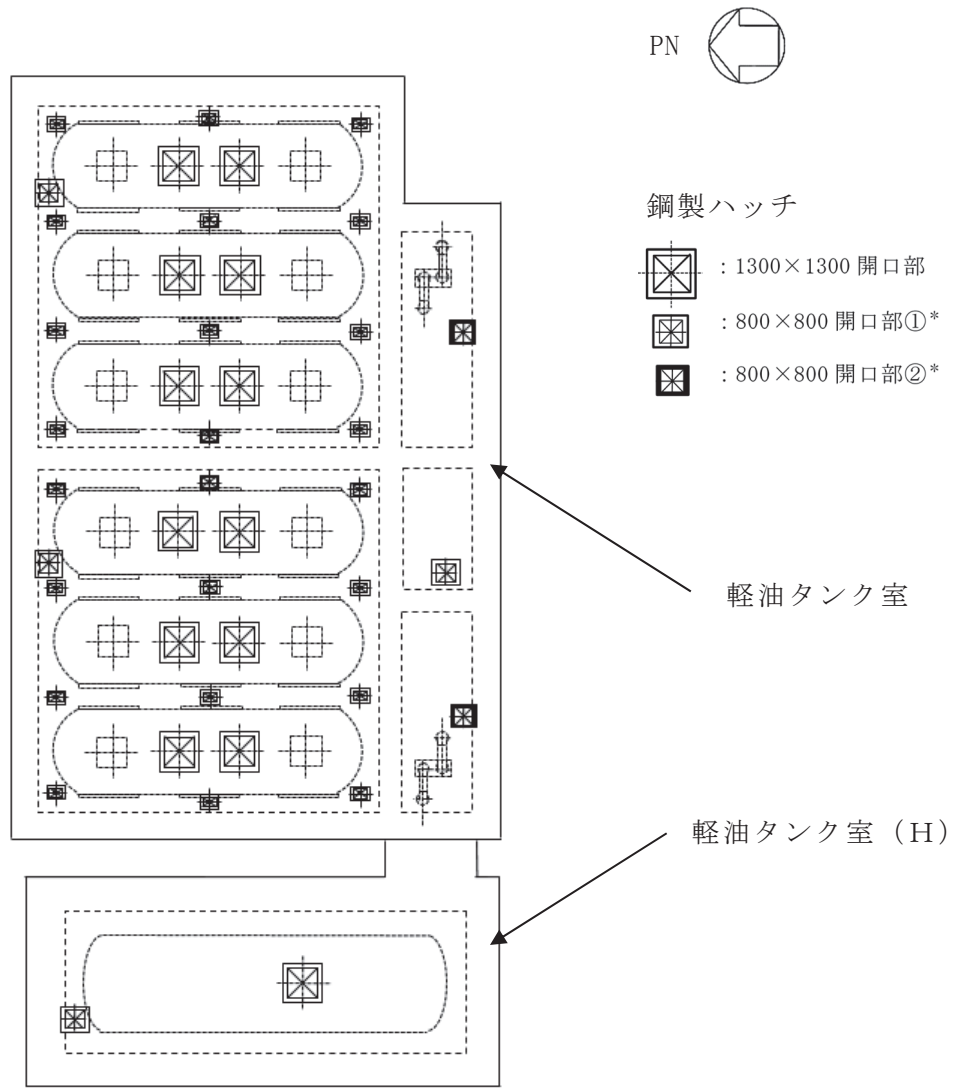
図 2-1 原子炉建屋，軽油タンク室及び軽油タンク室（H）の位置図



原子炉建屋 1 階 (O.P. 15.00m)

図 2-2 扉の位置図

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。



注記* : 800×800開口部には2種類の形状の上蓋の鋼製ハッチを適用

軽油タンク室及び軽油タンク室 (H) (O. P. 14. 80m)

図 2-3 鋼製ハッチの位置図

2.2.2 構造概要

扉及び鋼製ハッチの構造は、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.1 構造強度の設計方針」に示す構造設計を踏まえ、設定する。

扉は、表面鋼板、芯材等の鋼材を主構造とし、アンカーボルトによって建屋躯体に固定された扉枠に対し、カンヌキによって扉本体を扉枠と固定することで支持する設計とする。

鋼製ハッチは、地下に埋設された軽油タンク室及び軽油タンク室（H）のうち地上部に露出した開口部に設置する。鋼製ハッチの上蓋は、取付枠を介して頂版上に設置する。

扉の構造図を図 2-4、鋼製ハッチの構造図を図 2-5 にそれぞれ示す。

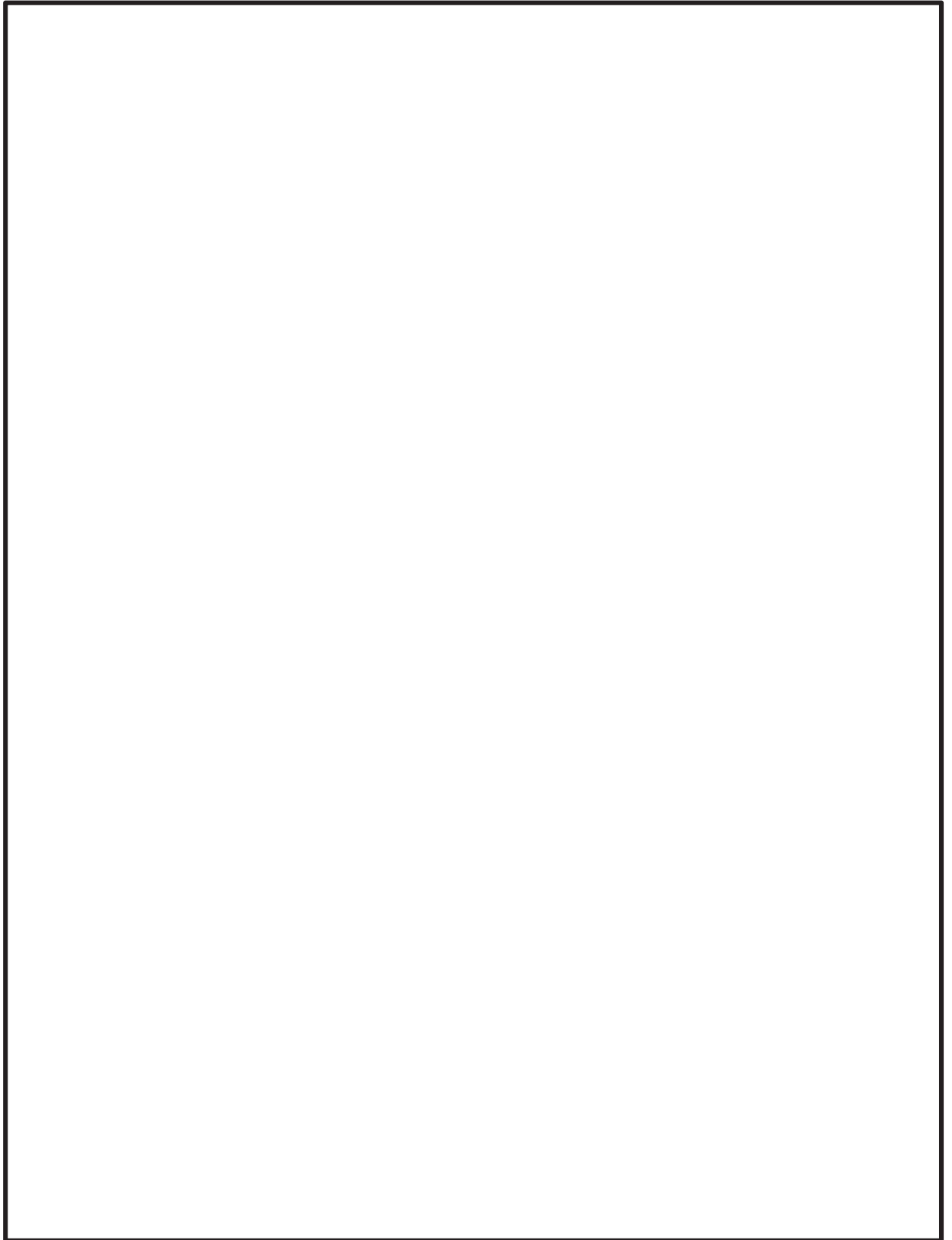


図 2-4 扉の構造図 (1/2)
(例：原子炉建屋大物搬入口の扉)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

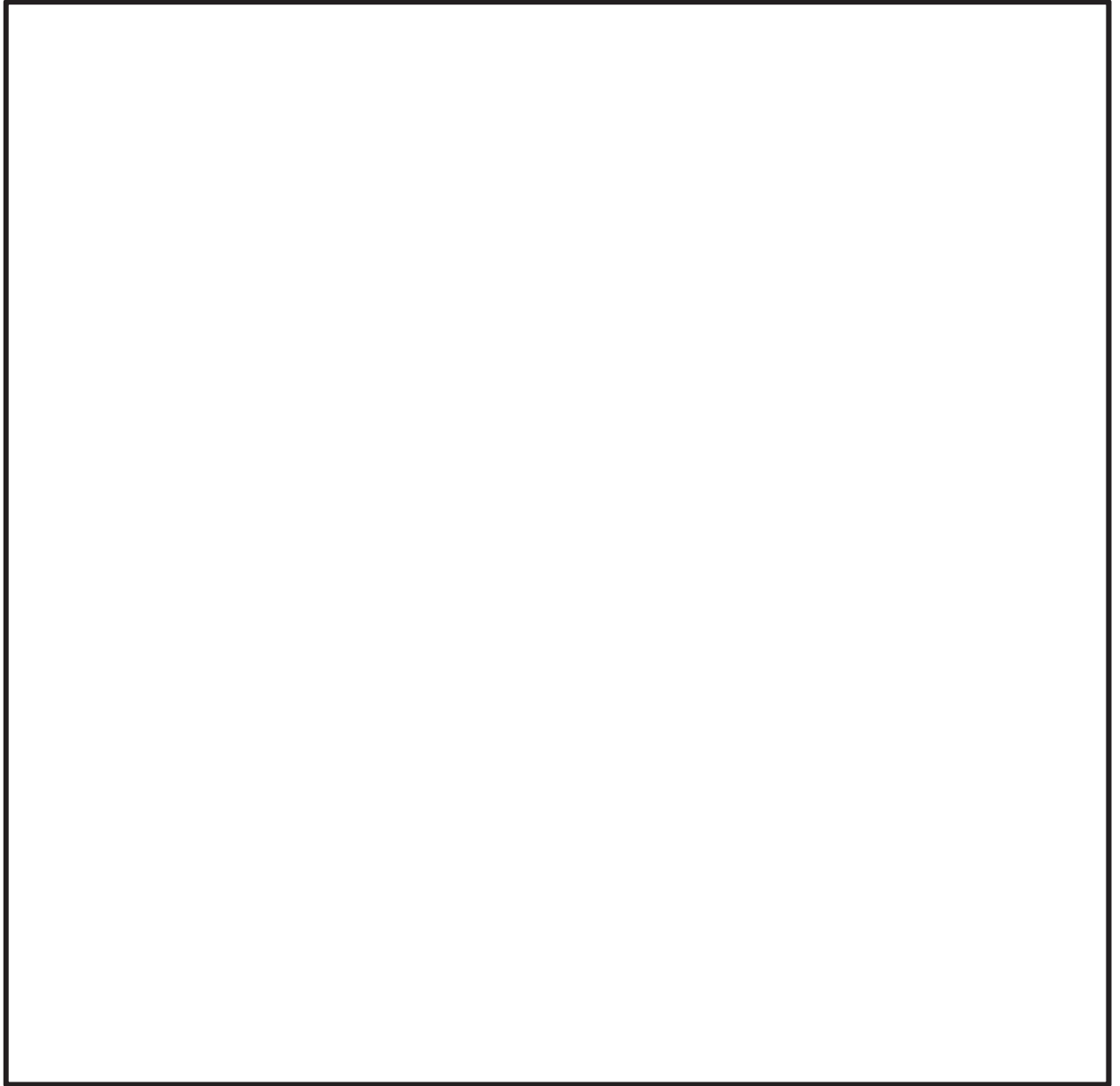


図 2-4 扉の構造図 (2/2)
(例：原子炉建屋大物搬入口の扉)

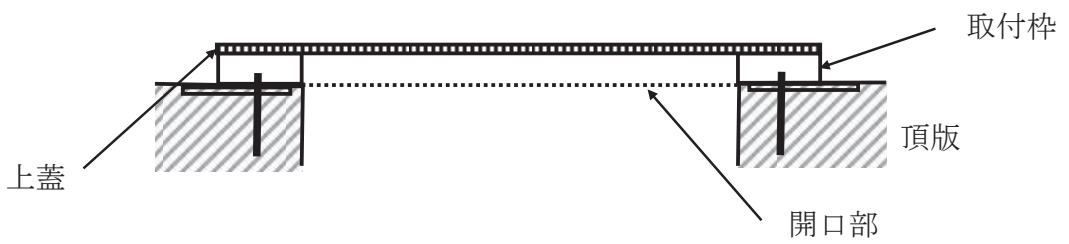


図 2-5 鋼製ハッチの構造図

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

2.2.3 評価方針

扉及び鋼製ハッチの強度評価は、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」及び「4.2 許容限界」を踏まえ、竜巻より防護すべき施設が安全機能を損なわないことを、「2.3 強度評価方法」に示す方法により、「2.4 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「2.5 強度評価結果」にて確認する。

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

具体的には、設計飛来物が外部事象防護対象施設に衝突する直接的な影響の評価として、扉及び鋼製ハッチに対する衝突評価及び扉自体が外部事象防護対象施設に衝突する波及的な影響の評価として扉の転倒及び脱落に対する構造強度評価を行う。扉の評価フローを図 2-6、鋼製ハッチの評価フローを図 2-7 に示す。

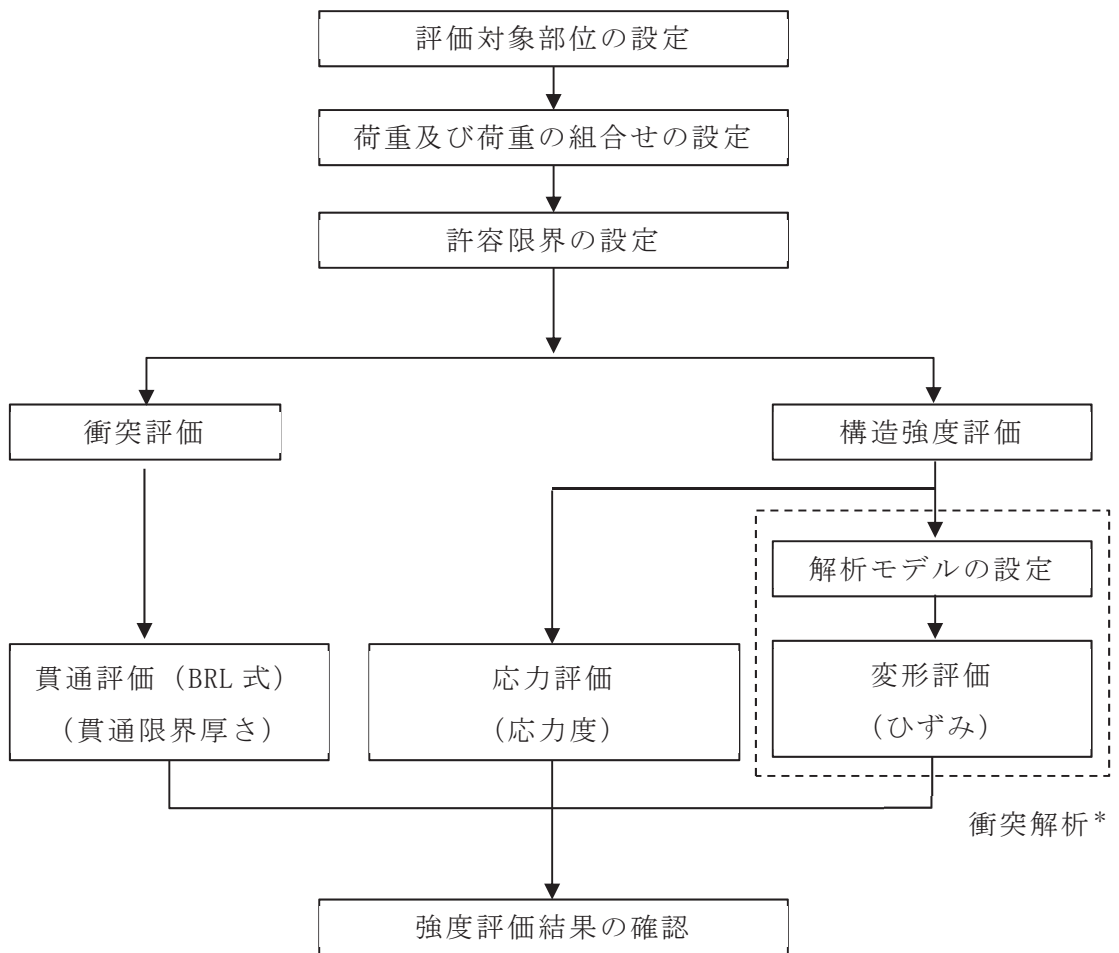
(1) 衝突評価

設計荷重に対し、設計飛来物が施設を構成する部材を貫通しない設計とするために、扉の表面鋼板及び鋼製ハッチの上蓋の最小厚さが、設計飛来物の貫通を生じない貫通限界厚さを上回ることを計算により確認する。衝突評価には、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5.1 建屋構造物に関する評価式」に示す評価式を用いる。（以下「貫通評価」という。）

(2) 構造強度評価

設計荷重に対し，施設を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とするために，扉の表面鋼板と芯材に終局状態に至るようなひずみが生じないことを解析により確認する。(以下「変形評価」という。)

また，カンヌキ，カンヌキ受けピン及びカンヌキ受けボルト（以下「カンヌキ部」という。）及び締付ボルトに生じる応力度が「鋼構造設計規準・同解説－許容応力度設計法－」及び J I S に基づき設定する短期許容応力度を超えないことを，力学における標準式による荷重の算定により確認する。(以下「応力評価」という。)



注記* : 衝突解析においては，解析コード「L S - D Y N A」を用いて 3 次元 FEM モデルによりモデル化し，表面鋼板及び芯材について評価を実施する。

図 2-6 扉の評価フロー

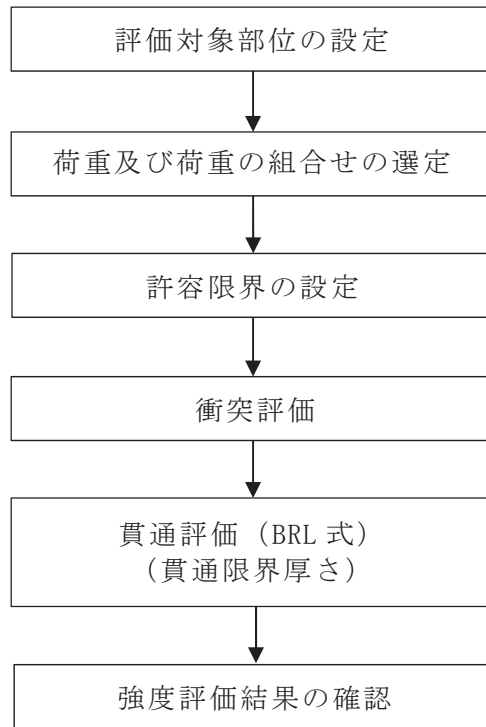


図 2-7 鋼製ハッチの評価フロー

2.2.4 適用規格

適用する規格，規準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法（昭和 25 年 5 月 24 日法律第 201 号）
- ・ 建築基準法施行令（昭和 25 年 11 月 16 日政令第 338 号）
- ・ ISES7607-3 軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査 その 3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討（昭和 51 年 10 月高温構造安全技術研究組合）
- ・ タービンミサイル評価について（昭和 52 年 7 月 20 日 原子力委員会原子炉安全専門審査会）
- ・ U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION:REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision1, March 2007
- ・ Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8 (NEI07-13))
- ・ 日本建築学会 2004 年 建築物荷重指針・同解説
- ・ 日本建築学会 2005 年 鋼構造設計規準 -許容応力度設計法-
- ・ 日本建築学会 2019 年 鋼構造許容応力度設計規準
- ・ 日本溶接協会 2003 年「動的繰返し大変形を受ける溶接鋼構造物の脆性破壊性能評価方法，WES2808」

2.3 強度評価方法

2.3.1 記号の定義

BRL 式による貫通限界厚さの算定に用いる記号を表 2-1 に、力学における標準式による荷重及び応力の算定に用いる記号を表 2-2 に示す。

表 2-1 BRL 式による貫通限界厚さの算定に用いる記号

記号	単位	定義	
d	m	設計飛来物が衝突する衝突断面の等価直径	
K	—	鋼板の材質に関する係数	
M	kg	設計飛来物の質量	
T	m	鋼板の貫通限界厚さ	
V	m/s	扉	設計飛来物の衝突速度（水平）
		鋼製 ハッチ	設計飛来物の衝突速度（鉛直）
π	—	円周率	
A	m	設計飛来物の接触面積	

表 2-2 力学における標準式による荷重及び応力の算定に用いる記号

記号	単位	定義
A_1	m^2	表面表側鋼板（小扉）の受圧面積
A_2	m^2	表面表側鋼板（小扉及びパネル）の受圧面積
A_3	mm^2	カンヌキの断面積
A_4	mm^2	カンヌキ受けピンの断面積
A_5	mm^2	カンヌキ受けボルトの断面積
A_6	mm^2	締付ボルトの断面積
C	—	風力係数
F_d	N	常時作用する荷重
G	—	ガスト影響係数
L	mm	カンヌキと扉枠の距離
L_p	mm	カンヌキ受けピンの軸支持間距離
n	本	カンヌキの本数
n_b	本	カンヌキ受けボルトの本数
n_k	本	締付ボルトの本数
q	Pa	設計用速度圧
R	N	カンヌキ 1 本あたりに生じる荷重
R_b	N	締付ボルト 1 本あたりに生じる荷重
V_D	m/s	設計竜巻の最大風速
W_M	N	設計飛来物による衝撃荷重
ΔP	N/m^2	最大気圧低下量
W_{P1}	N	小扉の気圧差による荷重
W_{P2}	N	小扉及びパネルの気圧差による荷重
W_{W1}	N	小扉の設計竜巻風圧力による荷重
W_{W2}	N	小扉及びパネルの設計竜巻風圧力による荷重
Z	mm^3	断面係数
ρ	kg/m^3	空気密度
σ_b	N/mm^2	曲げ応力度
σ_T	N/mm^2	引張応力度
τ	N/mm^2	せん断応力度

2.3.2 評価対象部位

扉及び鋼製ハッチの評価対象部位は、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す評価対象部位を踏まえて設定する。扉の評価対象部位を図 2-8～図 2-9、鋼製ハッチの評価対象部位を図 2-10 に示す。

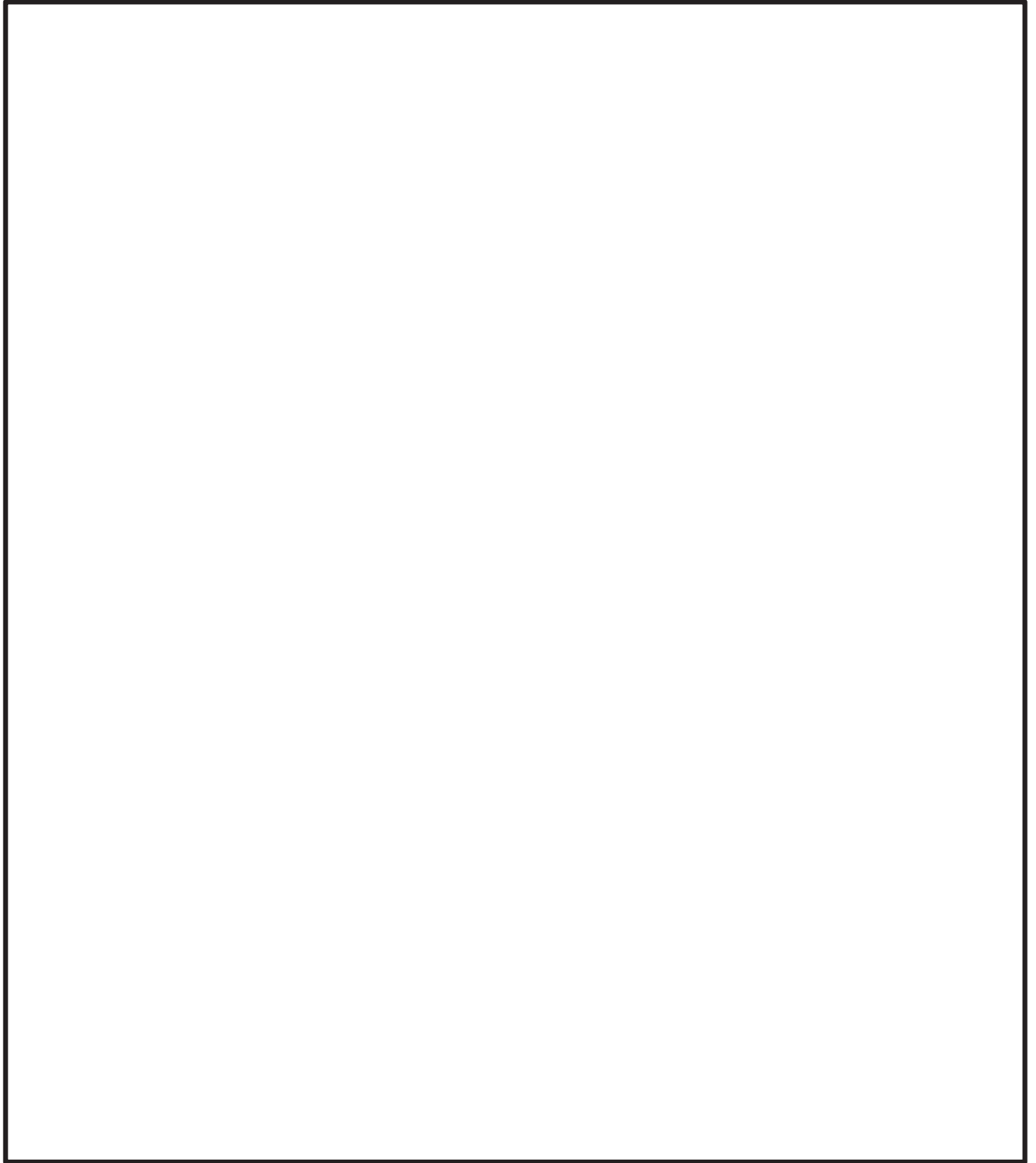


図 2-8 原子炉建屋大物搬入口の評価対象部位 (1/2)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

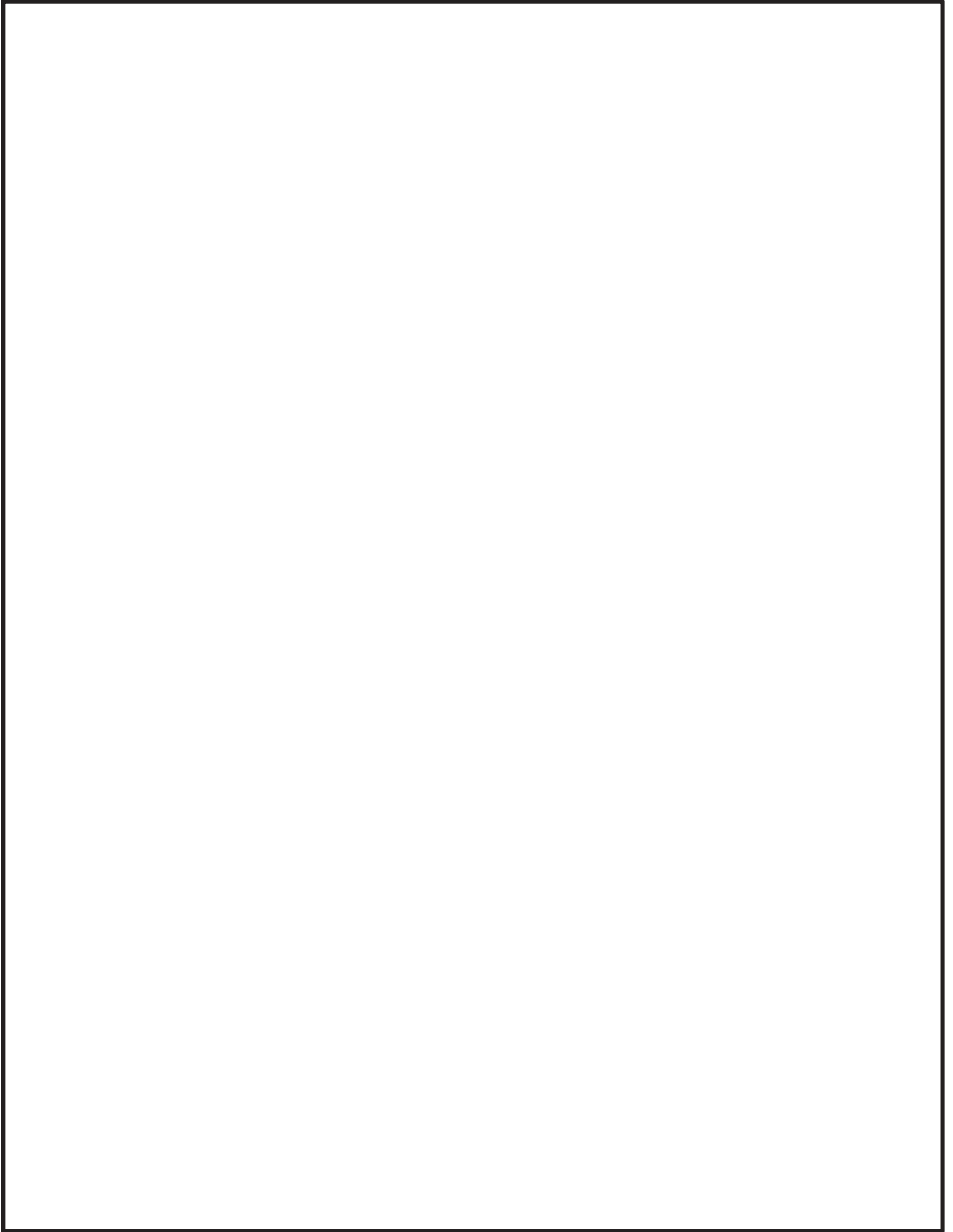


図 2-8 原子炉建屋大物搬入口の評価対象部位 (2/2)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

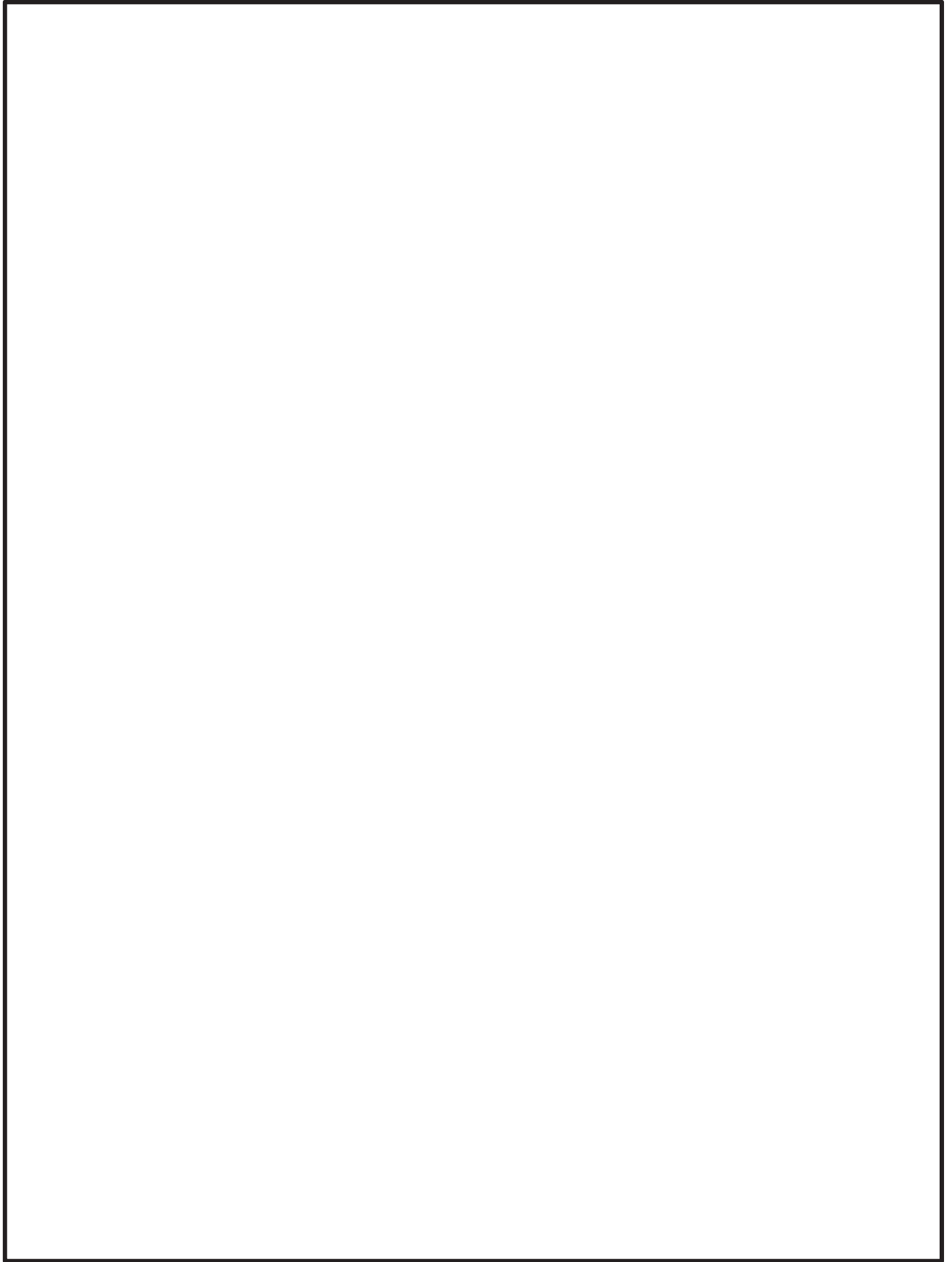


図 2-9 D/G (A)室防護扉の評価対象部位 (1/2)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

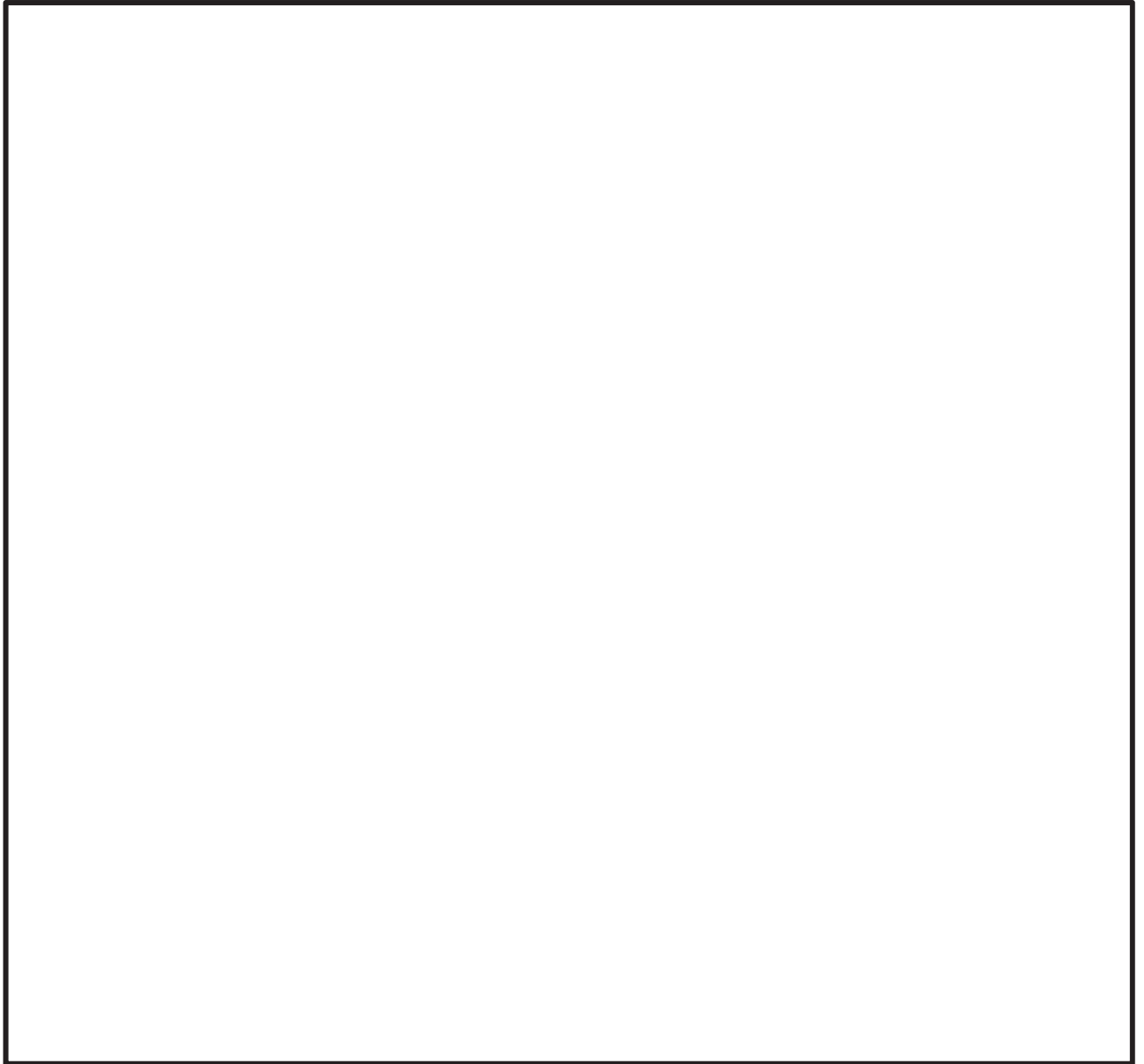


図 2-9 D/G (A)室防護扉の評価対象部位 (2/2)

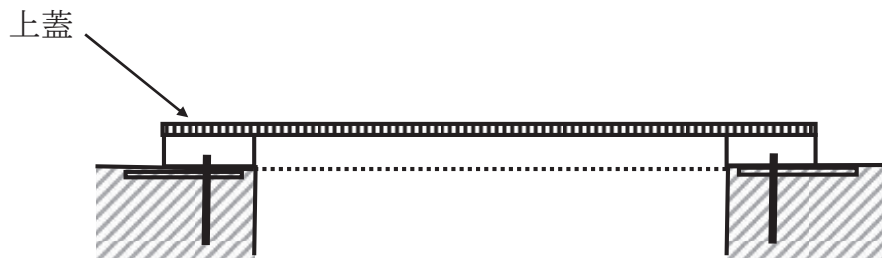


図 2-10 鋼製ハッチの評価対象部位

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(1) 貫通評価

設計荷重に対し、設計飛来物が施設を構成する部材を貫通しない設計とするために、扉の表面鋼板及び鋼製ハッチの上蓋の最小厚さが、設計飛来物の貫通を生じない貫通限界厚さを上回ることを計算により確認するものとし、扉の表面鋼板及び鋼製ハッチの上蓋を評価対象部位として設定する。

(2) 変形評価

設計荷重に対し、施設を構成する部材自体が、転倒及び脱落により外部事象防護対象施設へ接触等の影響を与えない設計とするために、扉の表面鋼板と芯材に終局状態に至るようなひずみが生じないことを解析により確認する。施設を構成する表面鋼板に作用する設計荷重は、芯材、ヒンジ、カンヌキ部及び締付ボルトに伝わりアンカーボルトにより固定された扉枠を介して建屋躯体に伝達されることから、これらの部材が評価対象部位として抽出される。

このうち、ヒンジ、カンヌキ部、締付ボルト及びアンカーボルトについては、外部から作用する設計荷重に対して直接的な伝達経路とならないこと、扉枠についてはアンカーボルトの大半が損傷しない限り転倒・脱落は生じないことから、表面鋼板、芯材を評価対象部位として設定する。

ここで、評価対象とする扉は、表面鋼板の厚みが最も薄いもののうち、表面鋼板の面積が最大となる扉を代表として評価するものとし、原子炉建屋大物搬入口とする。

評価の対象とする扉の選定結果として、扉の表面鋼板の最小厚さと面積の一覧を表 2-3 に示す。

また、設計飛来物の衝突を考慮する場合、被衝突物の寸法が大きいほどたわみ量が大きくなる傾向にある。したがって、変形評価としては、評価対象となる表面鋼板の部材長さ（支持スパン）が最長となる扉中央部を選定する。

(3) 応力評価

設計荷重に対し、施設を構成する部材自体が、転倒及び脱落により外部事象防護対象施設へ接触等の影響を与えない設計とするために、カンヌキ部に生じる応力度が「鋼構造設計規準・同解説－許容応力度設計法－」及び J I S に基づき設定する短期許容応力度を超えないことを、力学における標準式による荷重の算定により確認する。

室内側から作用する荷重が芯材，表面鋼板に作用し，ヒンジ，カンヌキ部及びアンカーボルトにより固定された扉枠を介して建屋躯体に伝達されることから，これらの部材が評価対象部位として抽出される。

このうち，表面鋼板は対貫通性を考慮した厚板であり，またヒンジ，芯材については評価上期待しないこと，アンカーボルトにより固定された扉枠は建屋躯体に埋め込まれて一体化していることから，扉の閉止状態を維持するための支持部材であるカンヌキ部（カンヌキ及びカンヌキに作用する荷重を負担するカンヌキ受けピン，カンヌキ受けボルト）を評価対象部位として設定する。

また，パネル付きの扉については，パネル（表面鋼板）の閉止状態を維持するための支持部材である締付ボルトも評価対象部位として設定する。

ここで，評価対象とする扉は，結果が厳しい評価対象部位を有する扉を代表として評価するものとし，D/G(A)室防護扉とする。

評価の対象とする扉の選定結果を表 2-3 に示す。

表 2-3 評価の対象とする扉の選定結果

評価対象の扉		表面鋼板の仕様			カンヌキ の 本数 (本)	表面鋼板 の最小厚 さ (mm)	評価対象	
		幅 (mm)	高さ (mm)	面積 (m ²)			変形 評価	応力 評価
D/G (A) 室 防護扉	パネル	3190	5130	16.36	48*	32		○
	小扉	1135	1960	2.22	4	32		○
東側共通通路 防護扉 (No. 1)		4950	4600	22.77	8	36		
東側共通通路 防護扉 (No. 2)		1129	1880	2.12	4	36		
D/G (H P C S) 室 防護扉		5230	5470	28.60	12	32		
D/G (B) 室 防護扉		5230	5470	28.60	12	32		
原子炉建屋大物搬入口		6920	6230	43.11	14	32	○	

注記* : 締付ボルトの本数を示す

2.3.3 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、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」を踏まえて設定する。

(1) 荷重の設定

強度評価に用いる荷重は以下の荷重を用いる。荷重の算定に用いる竜巻の特性値を表 2-4 に示す。

表 2-4 荷重の算定に用いる竜巻の特性値

最大風速 V_D (m/s)	移動速度 V_T (m/s)	最大接線風速 V_{Rm} (m/s)	最大気圧低下量 ΔP (N/m ²)
100	15	85	7600

a. 風圧力による荷重 (W_W)

風圧力による荷重は、下式により算出する。

$$W_{W1} = q \cdot G \cdot C \cdot A_1 \quad \text{または} \quad W_{W2} = q \cdot G \cdot C \cdot A_2$$

設計用速度圧 q は、下式により算定する。

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

b. 気圧差による荷重 (W_P)

気圧差による荷重は、次式のとおり算出する。

$$W_{P1} = \Delta P \cdot A_1 \quad \text{または} \quad W_{P2} = \Delta P \cdot A_2$$

c. 設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)

設計飛来物による衝撃荷重 (W_M) は、表 2-5 に諸元を示す設計飛来物の衝突に伴う荷重とする。ここで設計飛来物の衝突方向は、設備構造を踏まえて設定する。また、設計飛来物の材料定数を表 2-6 に示す。

表 2-5 設計飛来物の諸元

設計飛来物	寸法 長さ×幅×奥行き (m)	質量 (kg)	水平方向の 飛来速度 (m/s)	鉛直方向の 飛来速度 (m/s)
鋼製材	4.2×0.3×0.2	135	46.6	16.7

表 2-6 設計飛来物の材料定数

設計飛来物	降伏応力 σ_y (N/mm ²)	縦弾性係数 E (N/mm ²)	塑性硬化係数 E' (N/mm ²)	ポアソン比
鋼製材	245	206000	1260	0.3

d. 常時作用する荷重 (F_d)

常時作用する荷重 (F_d) は、部材の自重とする。

(2) 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せについては、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」のとおり、風圧力による荷重、気圧差による荷重、設計飛来物による衝撃荷重及び常時作用する荷重を組み合わせる。荷重の組合せを表 2-7 に示す。

表 2-7 荷重の組合せ

評価内容	風圧力 による荷重 (W_w)	気圧差 による荷重 (W_p)	設計飛来物 による衝撃 荷重 (W_M)	常時作用 する荷重 (F_d)	荷重の組合せ
貫通評価	—	—	○	—	W_M
変形評価	○	—	○	○	$W_M + W_w + F_d$
応力評価	—	○	—	—	W_p

2.3.4 許容限界

扉及び鋼製ハッチの許容限界は、「2.3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位ごとに、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界及び機能損傷モードを踏まえて設定する。

(1) 評価対象部位の材料仕様

扉の材料仕様を表 2-8 に、鋼製ハッチの上蓋の材料仕様を表 2-9 にそれぞれ示す。

表 2-8 扉の材料仕様

評価対象部位	材質	仕様
表面鋼板	SS400	PL-32
芯材	SM490	[-600×300×25×36 H-600×300×25×36
カンヌキ	SUS304	φ 50
カンヌキ受けピン	S45C	φ 25
カンヌキ受けボルト	SCM435	M16
締付ボルト	SCM435	M20

表 2-9 鋼製ハッチの上蓋の材料仕様

開口部大きさ	材質	長辺 (mm)	短辺 (mm)	厚さ (mm)	
1300×1300	SUS304	1806	1530	16	
800×800	①	SUS304	1336	1030	16
	②	SUS304	1336	1070	16

- (2) 評価対象部位の材料定数
扉の材料定数を表 2-10 に示す。

表 2-10 材料定数

材質	降伏応力 σ_y (N/mm ²)	縦弾性係数 E (N/mm ²)	塑性硬化係数 E' (N/mm ²)	ポアソン比
SS400	235	206000	2094	0.3
SM490	315	206000	2298	0.3

- (3) 許容限界
a. 貫通評価
扉の表面鋼板及び鋼製ハッチの上蓋の最小厚さを貫通評価の許容限界とする。
表 2-11 に設定した許容限界を示す。

表 2-11 貫通評価の許容限界

評価対象部位		許容限界 (mm)	材質
扉	表面鋼板	32	SS400
鋼製ハッチ	上蓋	16	SUS304

b. 変形評価

設計飛来物が扉の表面鋼板へ直接衝突する場合の変形評価における許容限界は、鋼材の破断ひずみを基本として設定する。破断ひずみについては、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1.2 (1) 許容限界の設定」に示すとおり、J I Sに規定されている伸びの下限値を基に設定するが、NEI07-13においてTF(多軸性係数)を□とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF=□を考慮して設定する。

設定した許容限界を表 2-12 に示す。

表 2-12 変形評価の許容限界

評価対象部位	材質	破断ひずみ*
表面鋼板	SS400	
芯材	SM490	

注記* : 真ひずみ換算値

c. 応力評価

応力評価の許容限界を表 2-13 に示す。評価対象部位の材料仕様は表 2-8 に示すとおりとする。

応力評価におけるカンヌキ部の評価は、J I S及び「鋼構造設計規準-許容応力度設計法-」に準じた短期許容応力度を許容限界として設定する。

表 2-13 応力評価の許容限界

評価対象部位	材質	短期許容応力度	
		曲げ・引張 (N/mm ²)	せん断 (N/mm ²)
カンヌキ	SUS304	205	118
カンヌキ受けピン	S45C	345	199
カンヌキ受けボルト	SCM435	854	—
締付ボルト	SCM435	728	—

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

2.3.5 評価方法

扉の強度評価は、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.1 構造強度の設計方針」を踏まえて、衝突評価として貫通評価を実施し、構造強度評価として変形評価及び応力評価を実施する。

また、鋼製ハッチの強度評価は、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.1 構造強度の設計方針」を踏まえて、衝突評価として貫通評価を実施する。

(1) 貫通評価

設計飛来物が扉の表面鋼板及び鋼製ハッチの上蓋へ直接衝突する場合の貫通限界厚さを、「タービンミサイル評価について（昭和 52 年 7 月 20 日 原子力委員会原子炉安全専門審査会）」で用いられる BRL 式を用いて算出する。

BRL 式を以下に示す。

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

ここで等価直径 d は下式の通りとする。

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

(2) 変形評価

変形評価に用いる評価対象部位に生じるひずみは、解析モデル及び材料の非線形特性を用いた衝突解析により評価する。

a. 解析モデル及び諸元

(a) 扉

扉の解析モデル化の範囲は、想定する荷重の伝達を考慮し、扉を構成する表面鋼板及び芯材とする。各部位はシェル要素でモデル化する。扉の解析モデルの境界条件を表 2-14 に、解析モデル図を図 2-11 に示す。

表 2-14 解析モデルの境界条件

項目		境界条件
扉	扉部材と建屋躯体	X 方向並進拘束
	扉部材とヒンジ	X, Y, Z 方向並進拘束

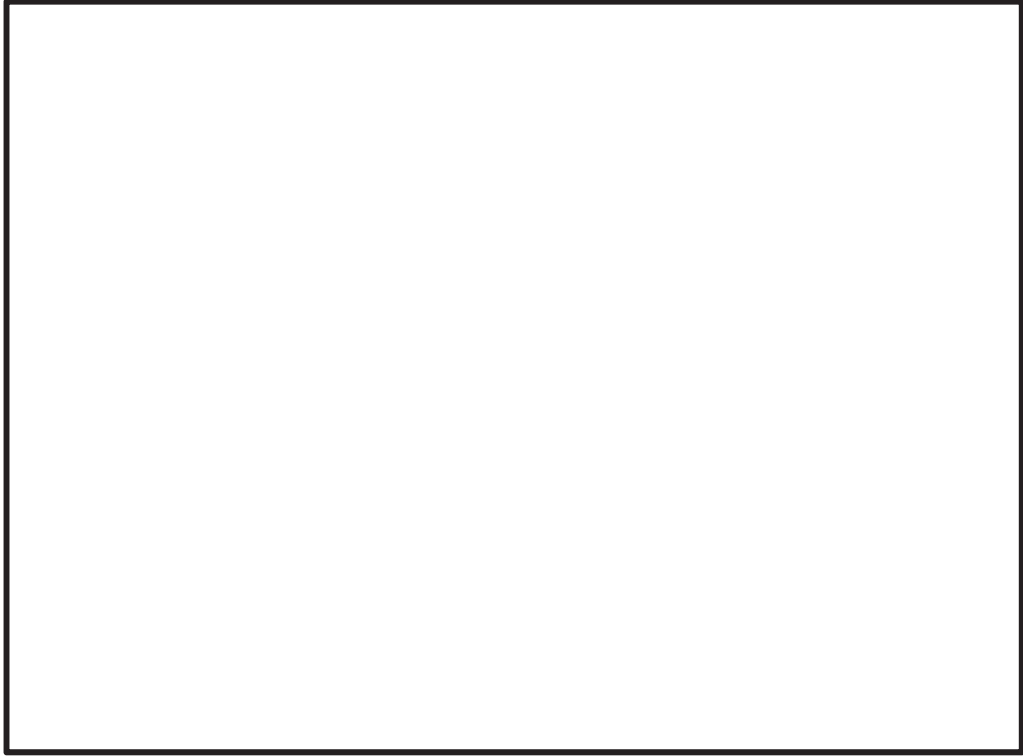


図 2-11 扉の解析モデル図（屋外側）（1/3）

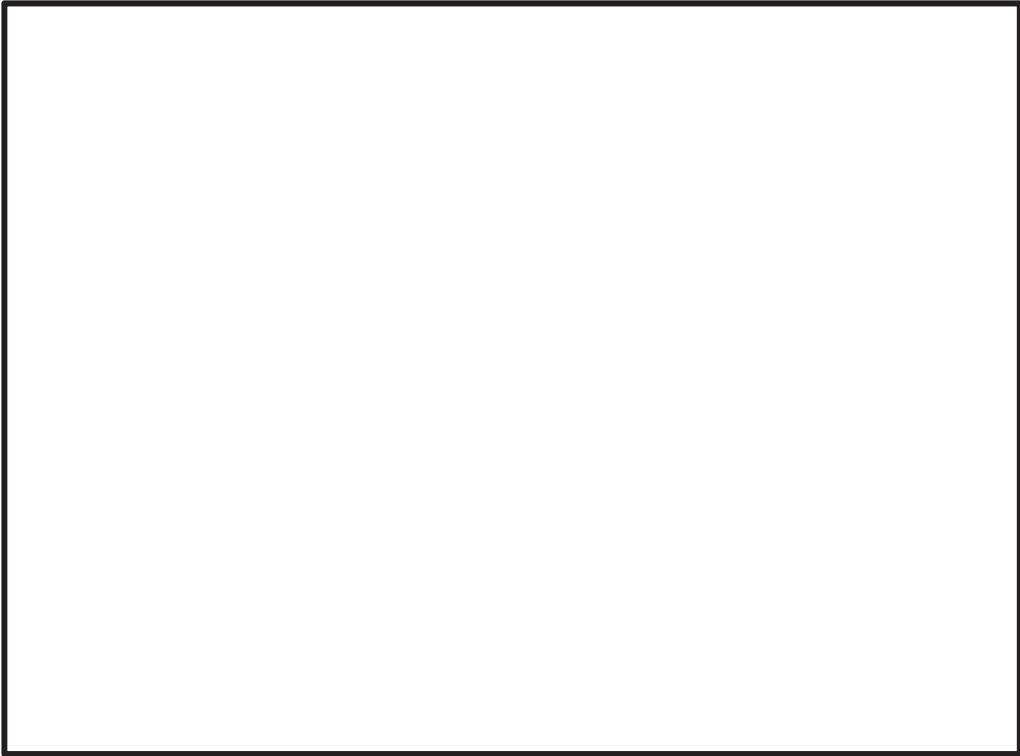
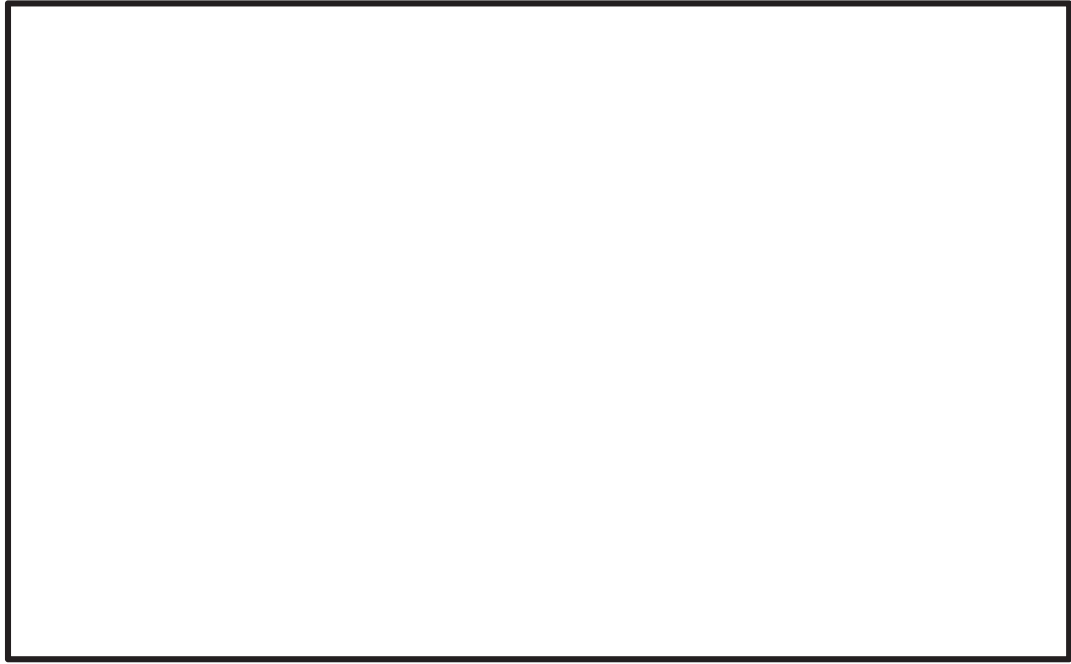


図 2-11 扉の解析モデル図（屋内側）（2/3）

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



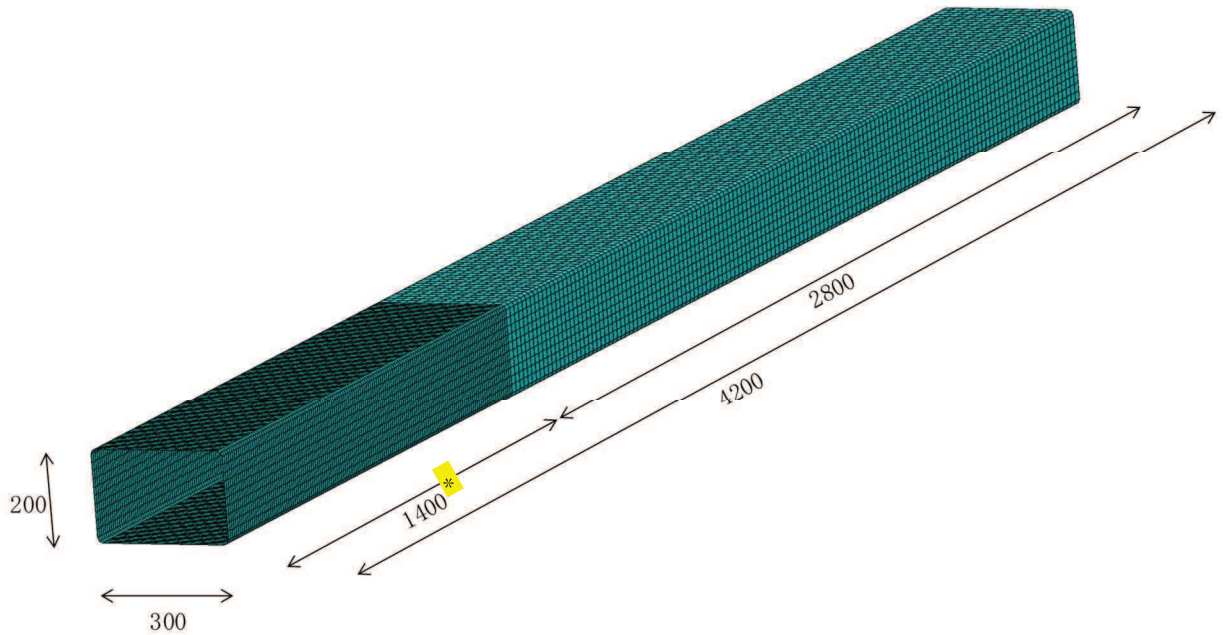
(単位：mm)

図 2-11 扉の解析モデル図 (衝突部) (3/3)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(b) 設計飛来物

設計飛来物である鋼製材は、シェル要素でモデル化する。
 設計飛来物の解析モデル図を図 2-12 に示す。



(単位：mm)

注記* : 要素のメッシュを細分化している範囲について、試解析を複数回実施し、変形やひずみが大きくなる範囲を設定している。

図 2-12 設計飛来物の解析モデル図

b. 解析コード

衝突解析には、解析コード「LS-DYNA」を用いる。解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、添付書類「VI-5 計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

c. 使用材料

扉に使用する鋼材の仕様については、「2.3.4(1) 評価対象部位の材料仕様」に示すとおり設定する。

d. 材料定数

扉に使用する鋼材の材料定数については、「2.3.4(2) 評価対象部位の材料定数」に示すとおり設定する。

e. 材料の非線形特性

(a) 材料の応力－ひずみ関係

扉の材料モデルでは，鋼材の破断ひずみを設定し，破断ひずみを越えた要素が荷重を負担しないことを考慮する。

材料の応力－ひずみ関係はバイリニア型とし，降伏後の塑性硬化係数（2次勾配 E' ）は，表 2-10 に示す値とする。材料に適用する応力－ひずみ関係の概念図を図 2-13 に示す。

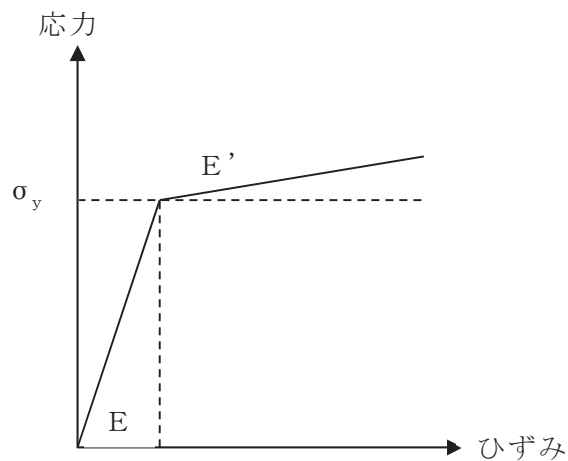


図 2-13 応力－ひずみ関係の概念図

(b) ひずみ速度効果

竜巻による設計飛来物に対する解析は、衝撃問題で変形速度が大きいため、ひずみ速度効果を考慮することとし、以下に示す Cowper-Symonds の式を適用する。

$$\sigma_D = \sigma_S \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right\}$$

ここで、 σ_D は動的応力、 σ_S は静的応力、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度、 C 及び P はひずみ速度依存性パラメータを表す。

ひずみ速度依存性パラメータを表 2-15 に示す。

表 2-15 ひずみ速度依存性パラメータ

	設計飛来物 鋼製材	扉	
		表面鋼板	芯材
材料	SS400	SS400	SM490
C (s ⁻¹)			
P			

(c) 破断ひずみ

破断ひずみは、J I Sに規定されている伸びの下限値を基に設定する。また、NEI07-13においてTF(多軸性係数)を□とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF=□を考慮して設定する。設計飛来物の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。

材料モデルにおける破断ひずみを表 2-16 に示す。

表 2-16 材料モデルにおける破断ひずみ

種別	材質	J I S 規格値 (下限値)	TF	破断ひずみ*
表面鋼板	SS400	0.21		
芯材	SM490	0.21		

注記* : 真ひずみの換算値

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(3) 応力評価

気圧差による荷重 (W_p) によりカンヌキ部及び締付ボルトに発生する応力度を算出し、許容限界を超えないことを確認する。

a. カンヌキ部に生じる荷重

カンヌキ部に生じる荷重は気圧差による荷重 (W_p) をカンヌキ部で負担した場合に生じる荷重 R から算定する。

カンヌキ部に生じる荷重を図 2-14 に示す。

$$W_{P1} = \Delta P \cdot A_1$$

$$R = \frac{W_{P1}}{n}$$

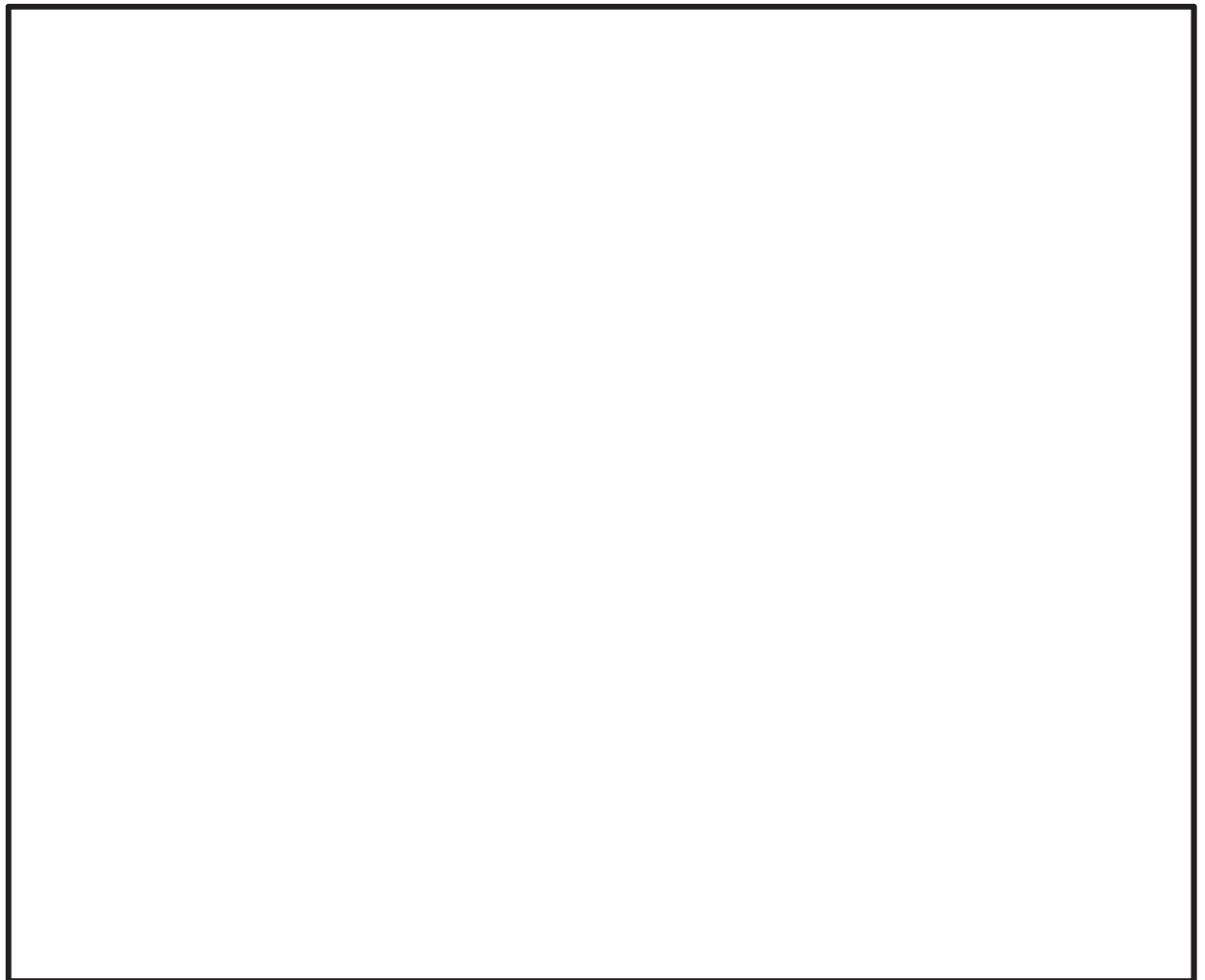


図 2-14 カンヌキ部に生じる荷重

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(a) カンヌキ

カンヌキ部の詳細図及びカンヌキの評価に用いるモデルの概念図を図 2-15 に示す。カンヌキに生じる曲げモーメント M_k 及びせん断力 Q_k は次式により算定する。

$$M_k = R \cdot L$$

$$Q_k = R$$



図 2-15 カンヌキ部の詳細図及びモデルの概念図 (A部)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(b) カンヌキ受けピン

カンヌキ受けピン，カンヌキ受けボルトの詳細図及びカンヌキ受けピンの評価に用いるモデルの概念図を図 2-16 に示す。カンヌキ受けピンに生じる曲げモーメント M_P 及びせん断力 Q_P は次式により算定する。

$$M_P = \frac{R \cdot L_P}{4}$$

$$Q_P = \frac{R}{2}$$

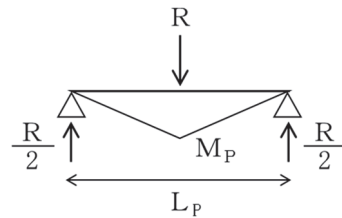


図 2-16 カンヌキ受けピン，カンヌキ受けボルトの詳細図及びモデルの概念図

(c) カンヌキ受けボルト

カンヌキ受けボルト 1 本あたりに生じる引張力 T は次式により算定する。

$$T = \frac{R}{n_b}$$

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

b. 締付ボルトに生じる荷重

締付ボルト 1 本あたりに生じる荷重は気圧差による荷重 (W_p) を締付ボルトに作用する反力 R_b から算定する。

締付ボルトに生じる荷重を図 2-17 に示す。

$$W_{P2} = \Delta P \cdot A_2$$

$$R_b = \frac{W_{P2}}{n_k}$$

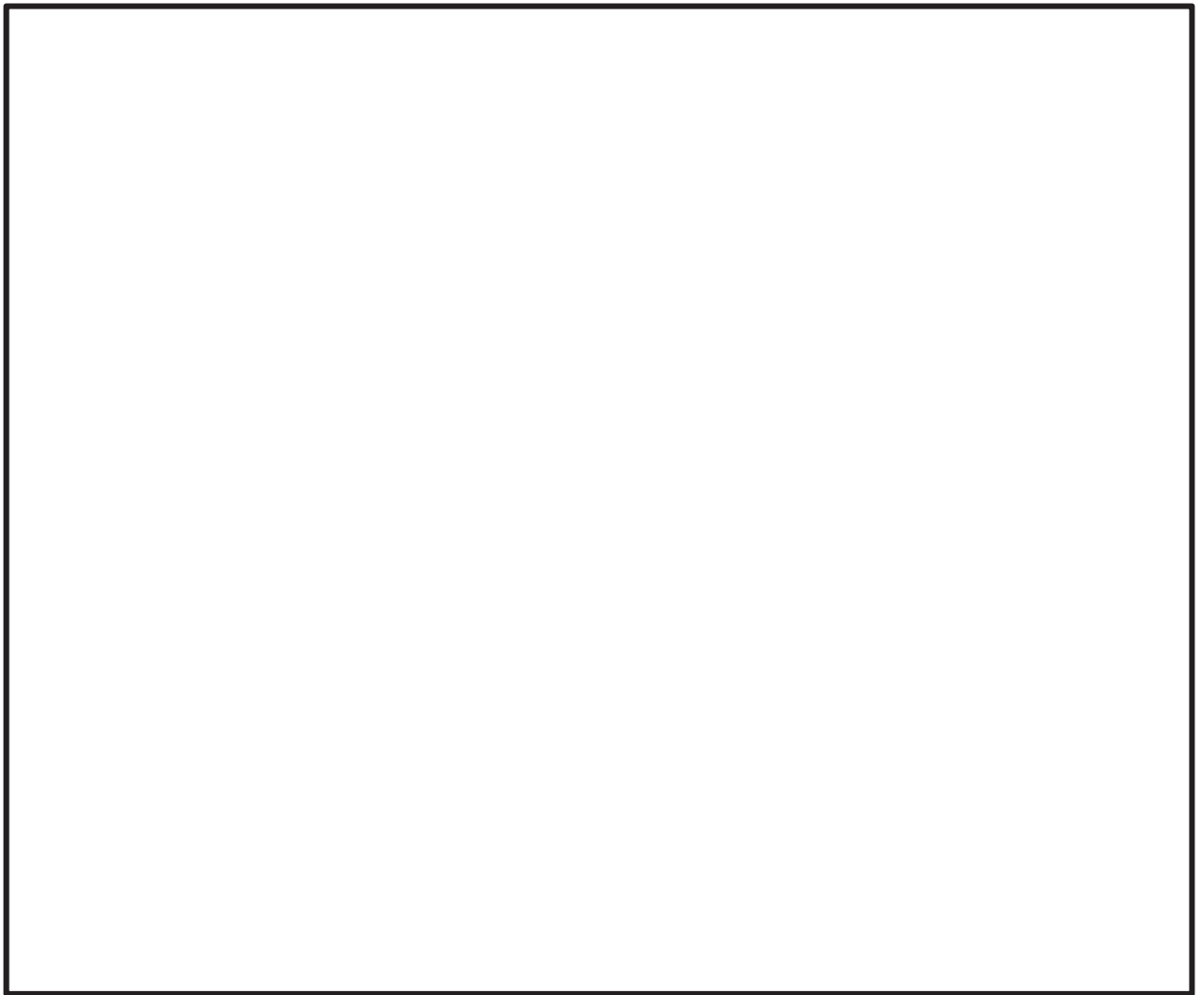


図 2-17 締付ボルトに生じる荷重

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

締付ボルトの詳細図を図 2-18 に示す。

締付ボルトに生じる引張力 T は次式により算定する。

$$T = R_b$$

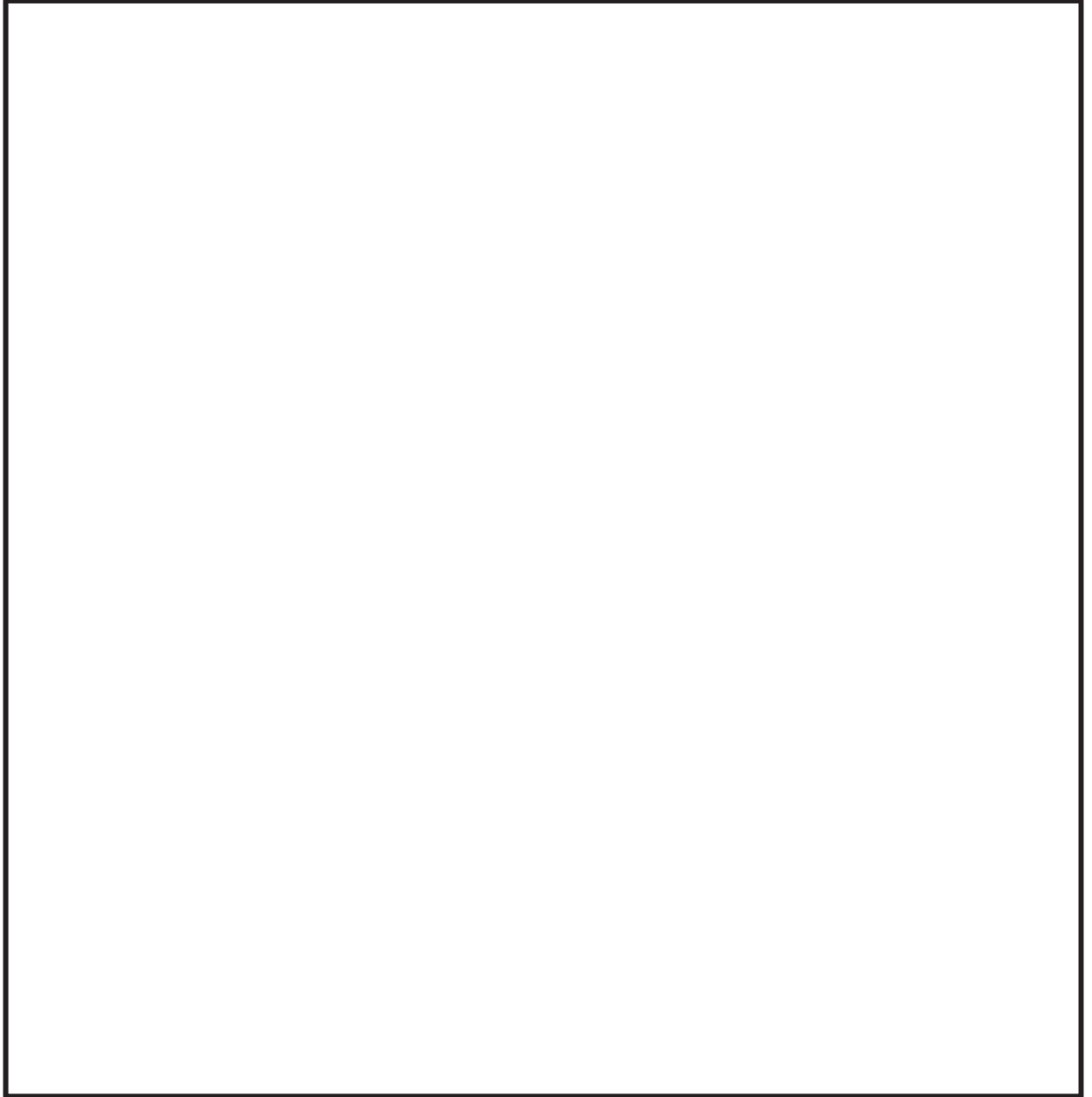


図 2-18 締付ボルトの詳細図

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

c. 断面検定

カンヌキ部及び締付ボルトに生じる応力度が許容限界以下であることを確認する。カンヌキ部及び締付ボルトの許容限界を表 2-13 に示す。

(a) カンヌキ 1 本あたりに生じる曲げ応力度

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

カンヌキ 1 本あたりに生じるせん断応力度

$$\tau = \frac{Q_k}{A_3}$$

(b) カンヌキ受けピン 1 本あたりに生じる曲げ応力度

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

カンヌキ受けピン 1 本あたりに生じるせん断応力度

$$\tau = \frac{Q_p}{A_4}$$

(c) カンヌキ受けボルト 1 本あたりに生じる引張応力度

$$\sigma_T = \frac{T}{A_5}$$

(d) 締付ボルト 1 本あたりに生じる引張応力度

$$\sigma_T = \frac{T}{A_6}$$

2.4 評価条件

2.4.1 貫通評価

貫通評価において、扉の表面鋼板及び鋼製ハッチの上蓋の貫通評価式に用いる評価条件を表 2-17 に示す。

表 2-17 扉の表面鋼板及び鋼製ハッチの上蓋の貫通評価に用いる評価条件

評価条件		数値
d (m)		0.07367
K		1.0
M (kg)		135
V (m/s)	水平方向	46.6
	鉛直方向	16.7

2.4.2 変形評価

扉の変形評価では、図 2-8 に示す扉に対して、最大変形が生じると想定される表面鋼板中央部に設計飛来物が衝突するケースを評価する。

解析ケースを表 2-18 に、設計飛来物の衝突イメージを図 2-19 に示す。

表 2-18 解析ケース（変形評価）

評価箇所	衝突箇所	設計飛来物の衝突方向	評価対象部材
扉	表面鋼板	水平	PL-32 [-600×300×25×36 H-600×300×25×36



図 2-19 設計飛来物の衝突イメージ

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

2.4.3 応力評価

扉の応力評価に用いる条件を表 2-19 に示す。

表 2-19 応力評価に用いる評価条件 (D/G (A)防護扉)

記号	定義	数値	単位	
A ₁	表面鋼板 (小扉) の受圧面積	2.22	m ²	
A ₂	表面鋼板 (小扉及びパネル) の受圧面積	16.36	mm ²	
A ₃	カンヌキの断面積	1963	mm ²	
A ₄	カンヌキ受けピンの断面積	490.9	mm ²	
A ₅	カンヌキ受けボルトの断面積	157	mm ²	
A ₆	締付ボルトの断面積	245	mm ²	
L	カンヌキと扉枠の距離	91	mm	
L _P	カンヌキ受けピンの軸支持間距離	72	mm	
n	カンヌキの本数	4	本	
n _b	カンヌキ受けボルトの本数	2	本	
n _k	締付ボルトの本数	48	本	
R	カンヌキ 1 本あたりに作用する荷重	4227	N	
R _b	締付ボルト 1 本あたりに作用する荷重	2591	N	
ΔP	最大気圧低下量	7600	N/m ²	
W _{P1}	小扉に作用する気圧差荷重 (ΔP・A ₁)	16907	N	
W _{P2}	小扉及びパネルに作用する気圧差荷重 (ΔP・A ₂)	124372	N	
Z	断面係数	カンヌキ	12270	mm ³
		カンヌキ受けピン	1534	mm ³

2.5 強度評価結果

2.5.1 貫通評価

竜巻発生時の扉の表面鋼板及び鋼製ハッチの上蓋の貫通限界厚さを表 2-20 に示す。

表 2-20 貫通限界厚さ

評価対象部位		貫通限界厚さ (mm)	備考
扉	表面鋼板	29.6	水平方向の飛来速度 46.6m/s の場合
鋼製ハッチ	上蓋	7.54	鉛直方向の飛来速度 16.7m/s の場合

扉及び鋼製ハッチの貫通評価結果として、貫通限界厚さと許容限界の比較を表 2-21 に示す。扉及び鋼製ハッチの評価対象部位の許容限界が、設計飛来物による貫通を生じない貫通限界厚さを上回ることを確認した。

表 2-21 貫通評価結果

評価対象部位		評価結果 (mm)	許容限界 (mm)
D/G (A) 室 防護扉	パネル	29.6	32
	小扉	29.6	32
東側共通通路 防護扉 (No. 1)		表面鋼板 29.6	36
東側共通通路 防護扉 (No. 2)		表面鋼板 29.6	36
D/G (H P C S) 室 防護扉		表面鋼板 29.6	32
D/G (B) 室 防護扉		表面鋼板 29.6	32
原子炉建屋 大物搬入口		表面鋼板 29.6	32
軽油タンク室及び 軽油タンク室 (H) 鋼製ハッチ		上蓋 7.54	16

2.5.2 変形評価

評価結果を表 2-22 並びに図 2-20 及び図 2-21 に示す。扉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 2-22 評価結果

評価対象部位		評価結果	許容限界
扉	表面鋼板		
	芯材		

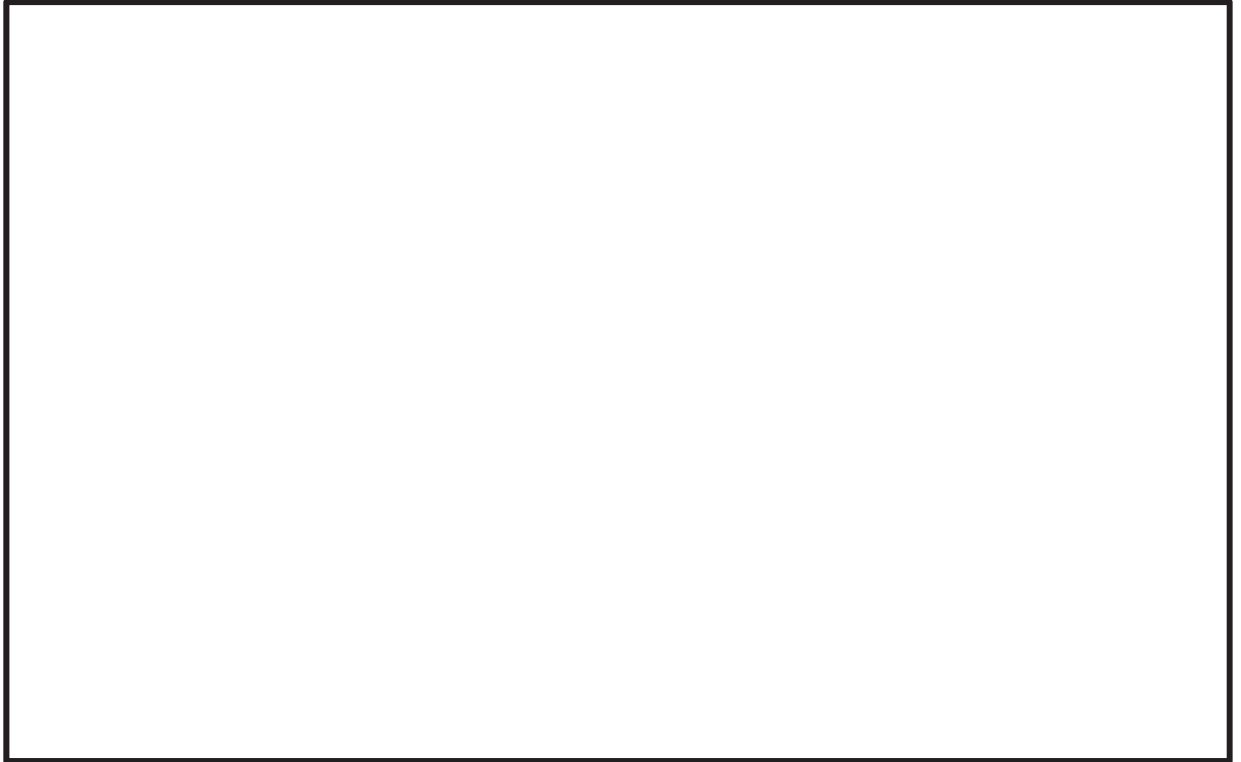


図 2-20 表面鋼板のひずみ分布図 (1/2)

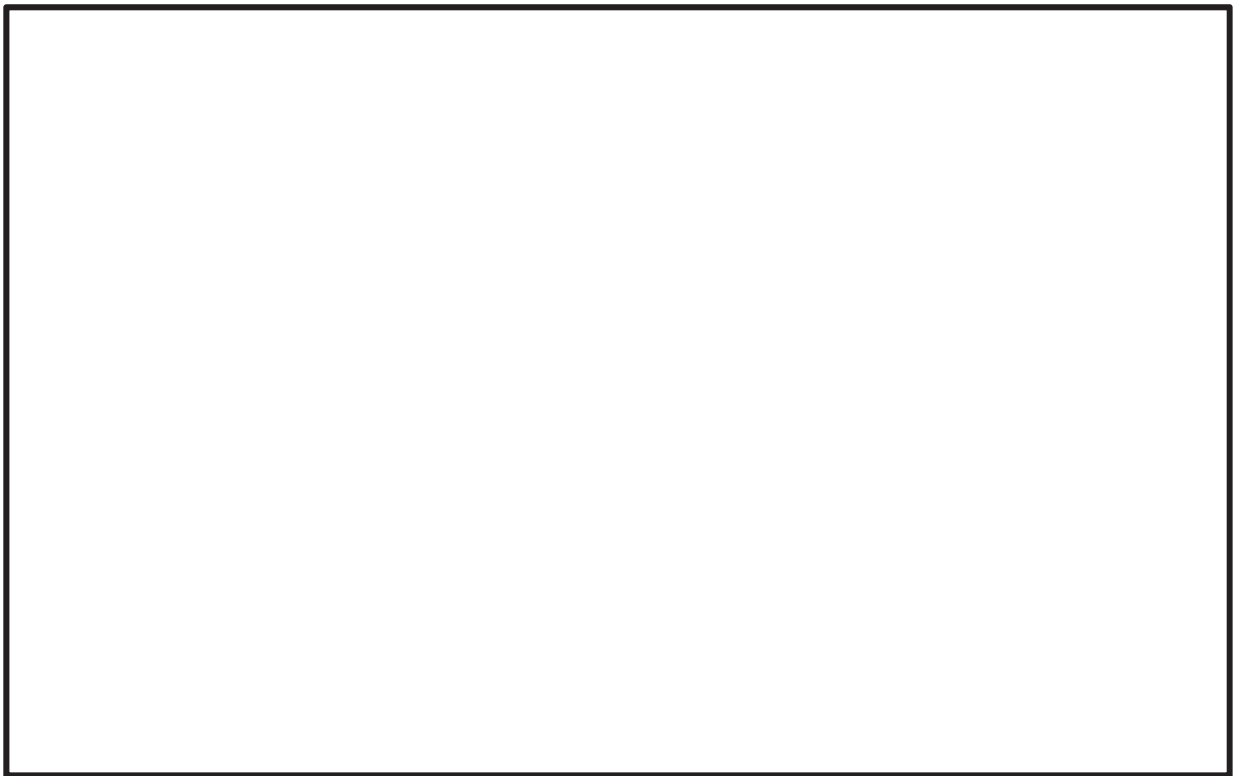


図 2-20 表面鋼板のひずみ分布図 (2/2)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

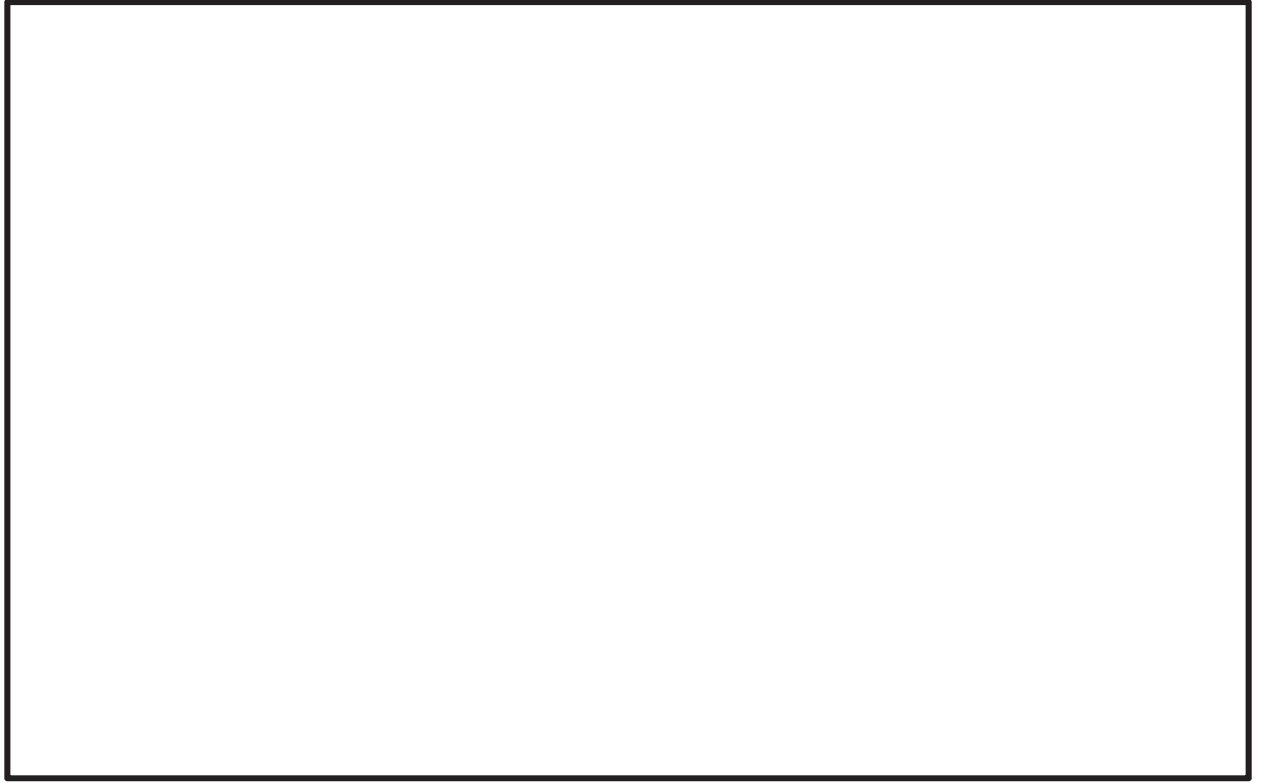


図 2-21 芯材のひずみ分布図 (1/2)

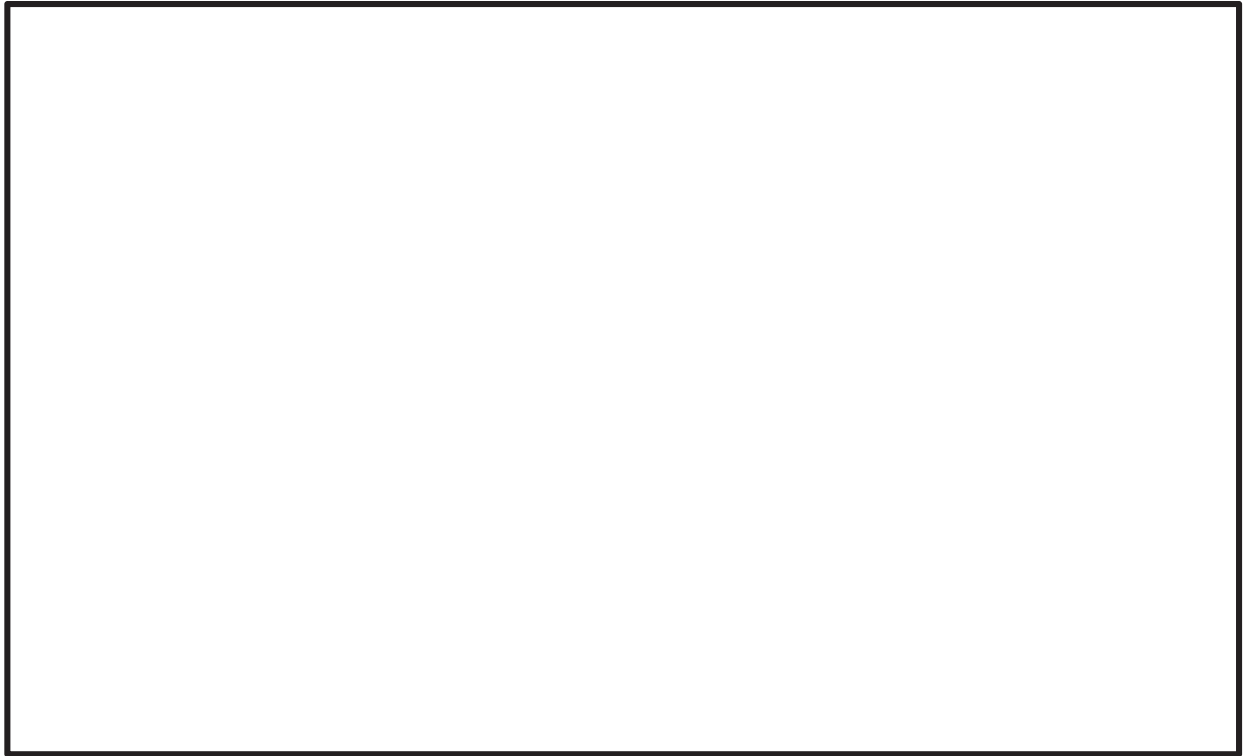


図 2-21 芯材のひずみ分布図 (2/2)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

2.5.3 応力評価

評価結果を表 2-23 に示す。扉のカンヌキ部及び締付ボルトに生じる応力度は、許容限界を超えないことを確認した。

表 2-23 評価結果

(単位：N/mm²)

評価対象の扉 (D/G(A)室防護扉)	評価結果		許容限界
	項目	数値	
カンヌキ	曲げ応力度	32	205
	せん断応力度	3	118
カンヌキ受けピン	曲げ応力度	50	345
	せん断応力度	5	199
カンヌキ受けボルト	引張応力度	14	854
締付ボルト	引張応力度	11	728