

本資料のうち、枠囲みの内容は、商業機密あるい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-093 改4
提出年月日	平成30年3月22日

V-3-別添2 火山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 2-1	火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針
V-3-別添 2-1-1	残留熱除去系海水系ポンプの強度計算書
V-3-別添 2-1-2	ディーゼル発電機用海水ポンプの強度計算書
V-3-別添 2-1-3	残留熱除去系海水系ストレーナの強度計算書
V-3-別添 2-1-4	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 2-1-5	ディーゼル発電機吸気フィルタの強度計算書
V-3-別添 2-1-6	建屋の強度計算書
V-3-別添 2-2	防護対策施設の強度計算の方針
V-3-別添 2-2-1	防護対策施設の強度計算書

V-3-別添 2-1-6 : 今回ご説明分

V-3-別添 2-1-6 建屋の強度計算書

目次

1. 概要	1
2. 基本方針	2
2.1 位置	2
2.2 構造概要	3
2.3 評価方針	9
2.4 適用規格	11
3. 強度評価方法及び評価条件	12
3.1 評価対象部位	12
3.2 荷重及び荷重の組合せ	12
3.3 許容限界	19
3.4 評価方法	23
4. 強度評価結果	48
4.1 屋根に対する評価結果	48
4.2 耐震壁に対する評価結果	54

1. 概要

本資料は、V-3-別添 2-1「火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、原子炉建屋、タービン建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋が降下火砕物及び積雪の堆積時において、内包する防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないことを考慮して、建屋全体又は建屋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。

また、原子炉建屋原子炉棟については、上記に加え、MS-1（放射性物質の閉じ込め機能、放射線の遮蔽及び放出低減機能）及び MS-2（放射性物質放出の防止機能）の安全機能を維持するよう建屋全体又は建屋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

原子炉建屋，タービン建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋は，V-3-別添 2-1「火山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，**本資料では**，各建屋の「2.1 位置」，「2.2 構造概要」，「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

2.1 位置

原子炉建屋，タービン建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋は，V-3-別添 2-1「火山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」に示す位置に設置する。原子炉建屋，タービン建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋の配置を図 2-1 に示す。

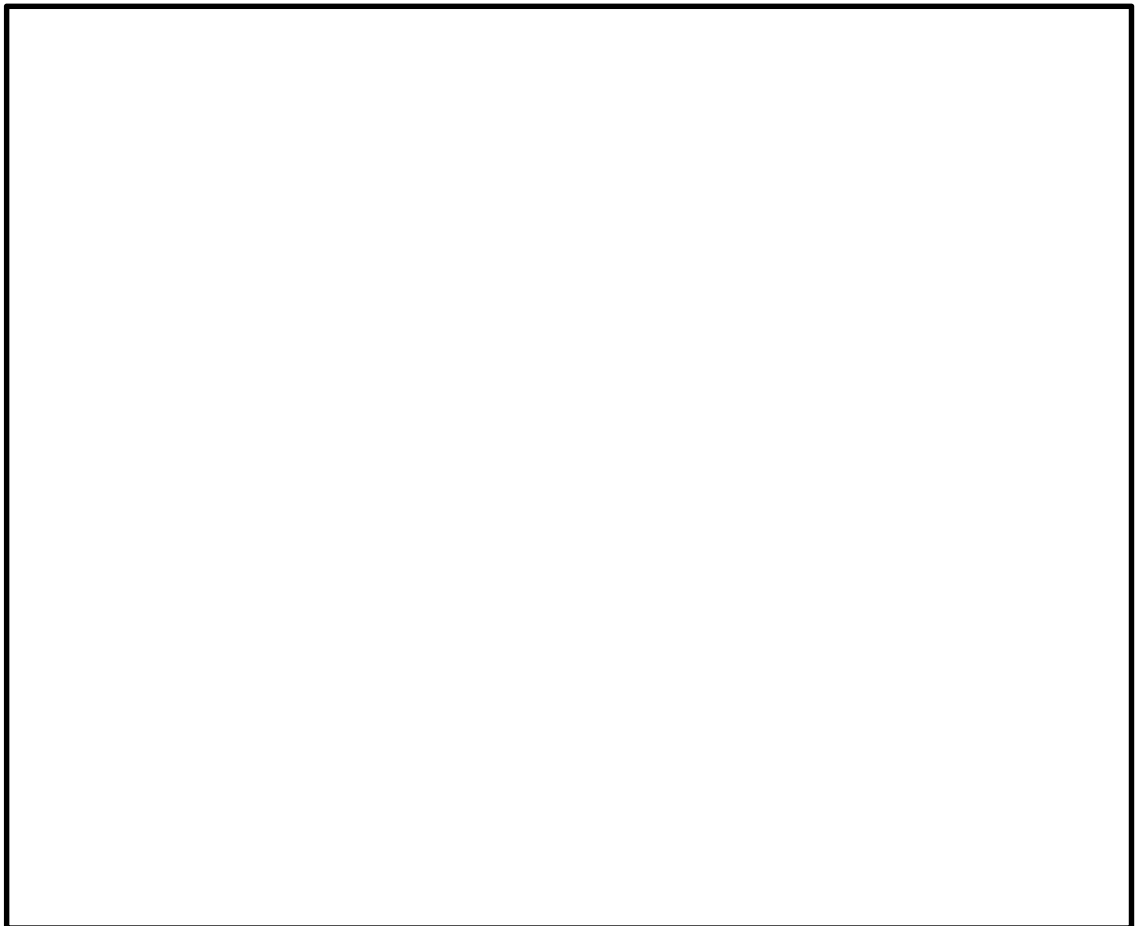


図 2-1 建屋の配置図

2.2 構造概要

原子炉建屋、タービン建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋は、V-3-別添 2-1「火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえて、構造を設定する。

原子炉建屋は、主体構造が鉄筋コンクリート造で、鉄骨造陸屋根をもつ地下2階、地上6階の建物である。中央部には、平面が45.5 m(南北方向)×42.5 m(東西方向)の原子炉建屋原子炉棟(以下「原子炉棟」という。)があり、その周囲には、平面が南北方向68.5 m、東西方向68.25 mの原子炉建屋附属棟(以下「附属棟」という。)を配置している。陸屋根を支える屋根トラスの平面形状は45.5 m(南北方向)×42.5 m(東西方向)の長方形であり、6階面(EL. 46.5 m)からの高さは17.58 mである。

タービン建屋は、平面が71.0m(南北方向)×105.5m(東西方向)で、主体構造が鉄筋コンクリート造で鉄骨造陸屋根をもつ地上2階、地下1階の建物である。陸屋根を支える屋根トラスの平面形状は39.0 m(南北方向)×105.5 m(東西方向)の長方形であり、2階面(EL. 18.0 m)からの高さは22.45 mである。

使用済燃料乾式貯蔵建屋は、平面が53.8 m(南北方向)×26.0 m(東西方向)で、主体構造が鉄筋コンクリート造で鉄骨造陸屋根をもつ地上1階の建物である。

原子炉建屋の概略平面図及び概略断面図を図2-2及び図2-3に、タービン建屋の概略平面図及び概略断面図を図2-4及び図2-5に、使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略平面図及び概略断面図を図2-6及び図2-7に示す。

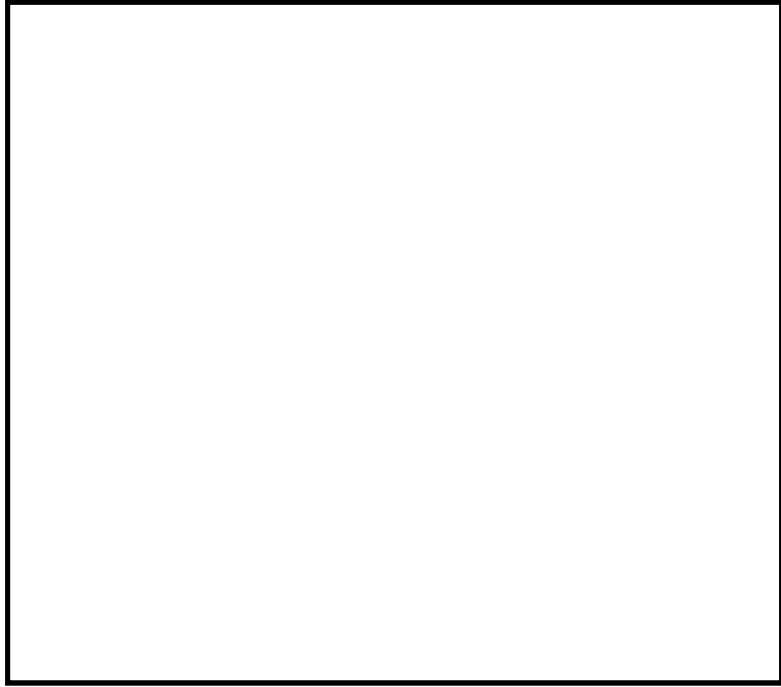


図 2-2 (1/2) 原子炉建屋の概略平面図 (EL. 46.5 m)

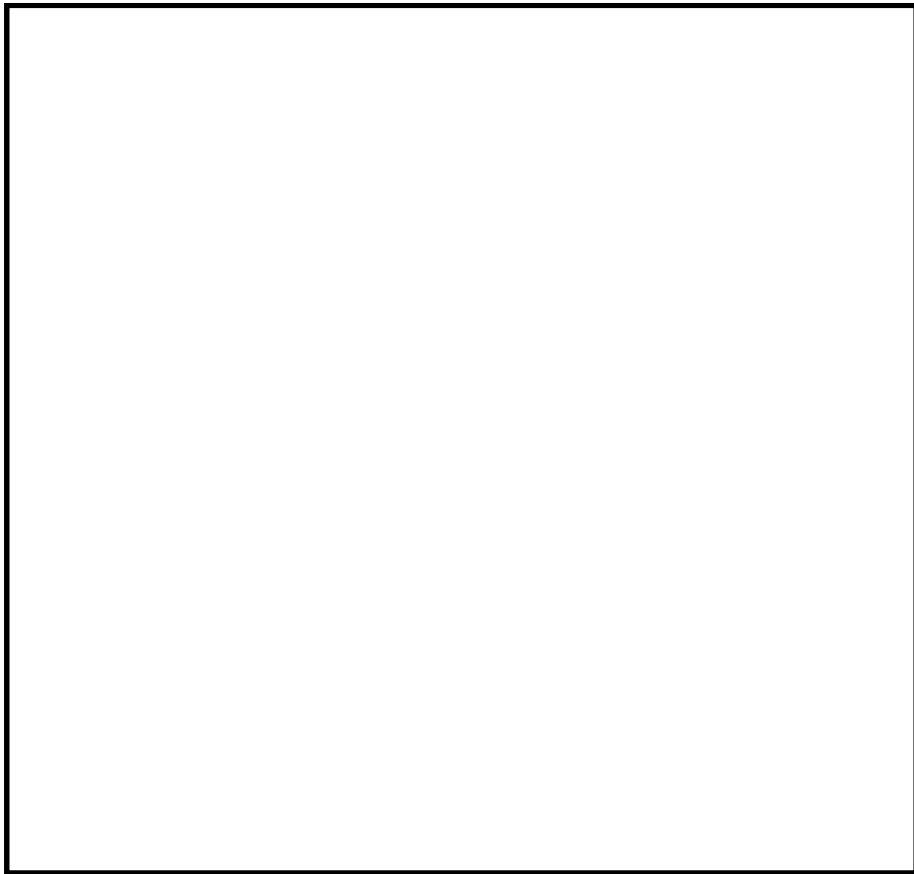


図 2-2 (2/2) 原子炉建屋の概略平面図 (EL. -4.0 m)

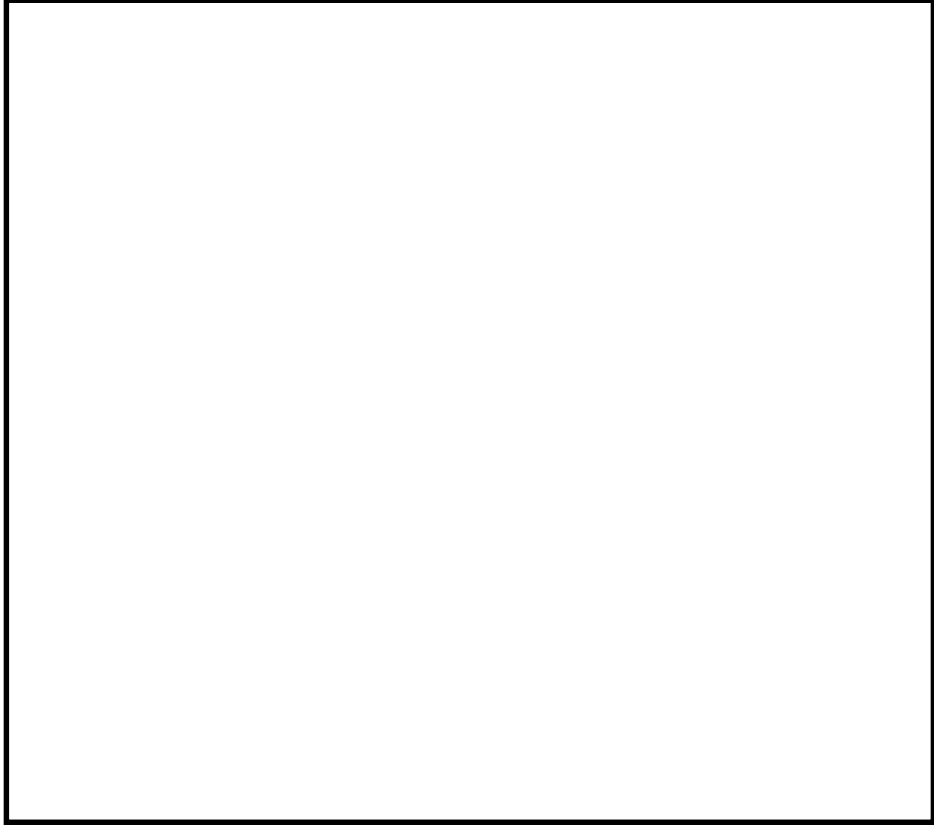


図 2-3 (1/2) 原子炉建屋の概略断面図 (A-A 断面)

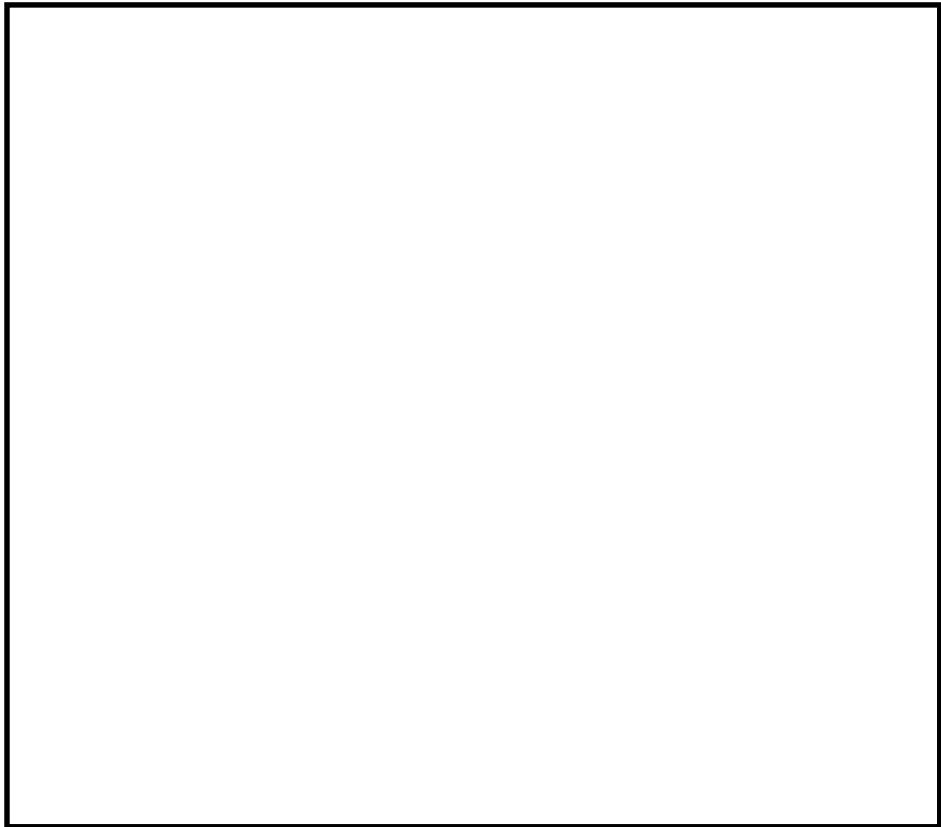


図 2-3 (2/2) 原子炉建屋の概略断面図 (B-B 断面)

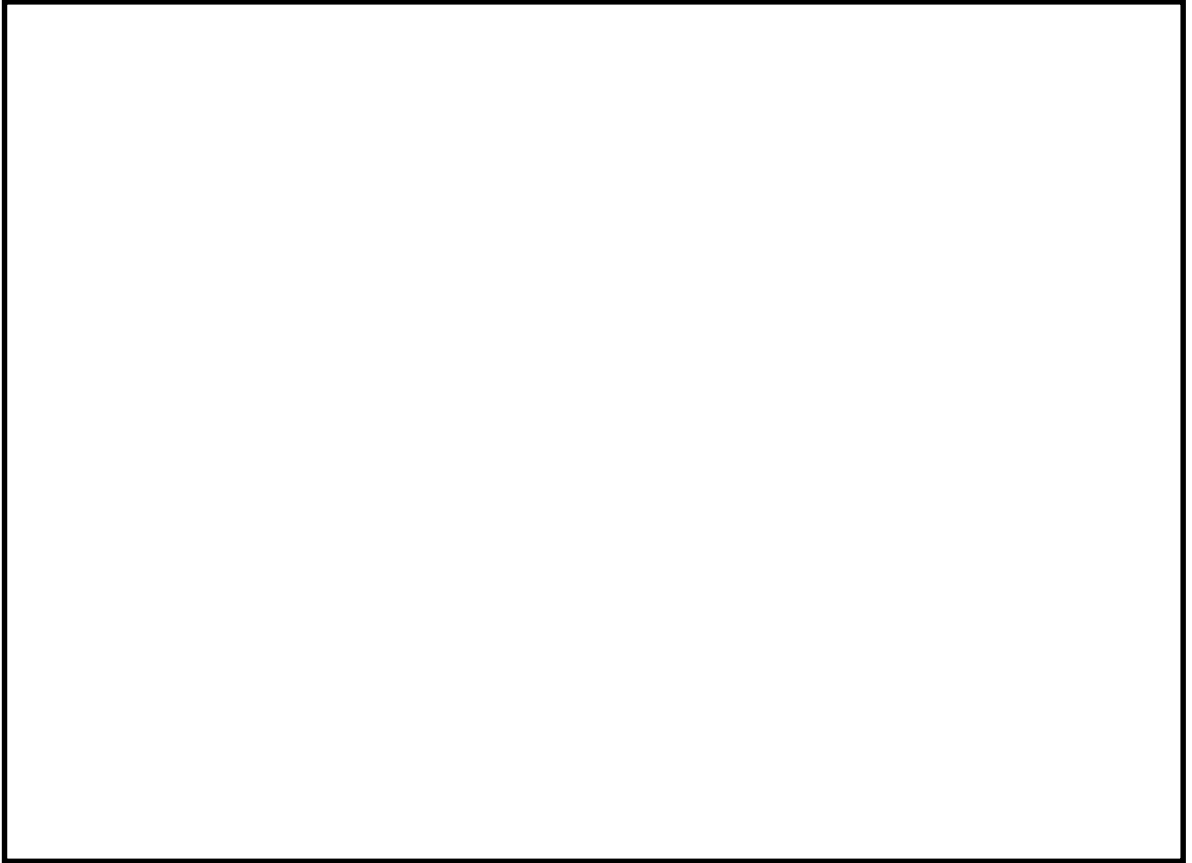


図 2-4 タービン建屋の概略平面図 (EL. 8.2 m)

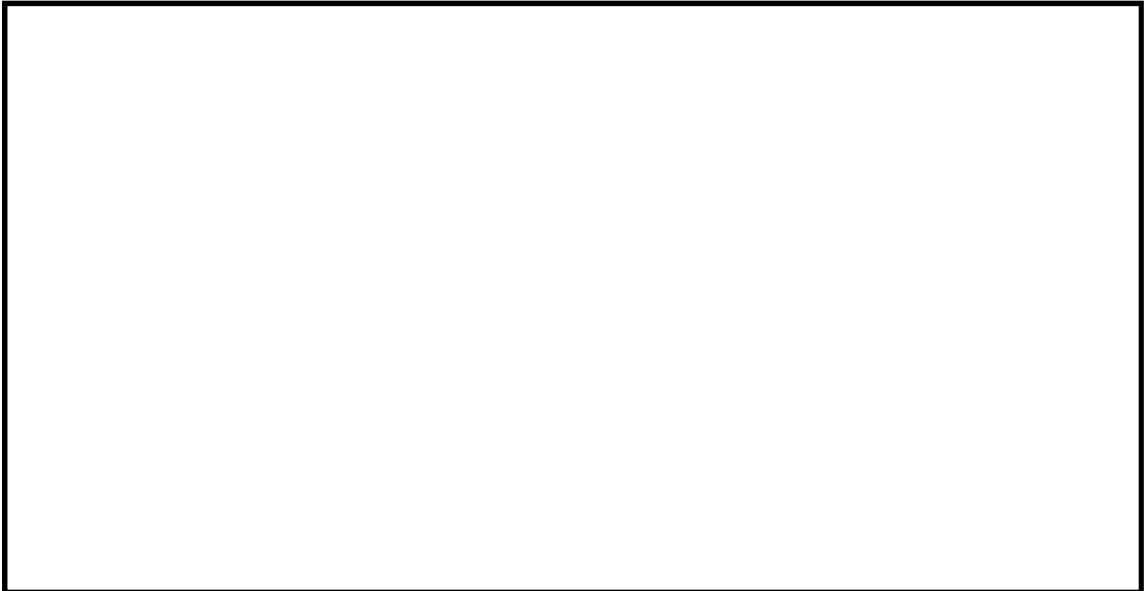


図 2-5 (1/2) タービン建屋の概略断面図 (A-A 断面)

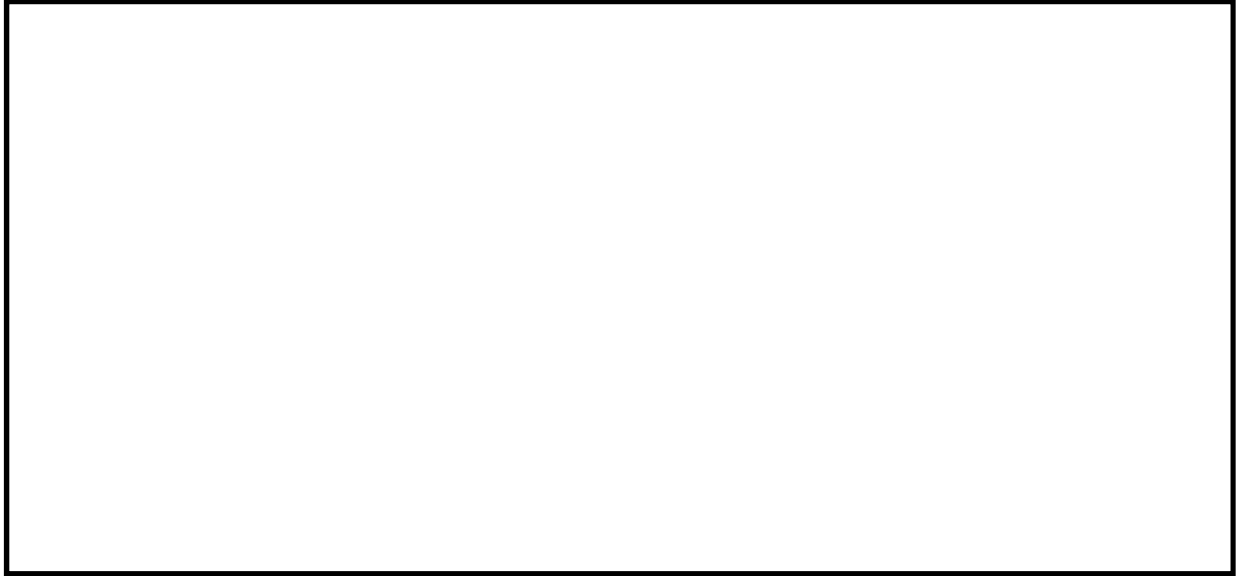


図 2-5 (2/2) タービン建屋の概略断面図 (B-B 断面)

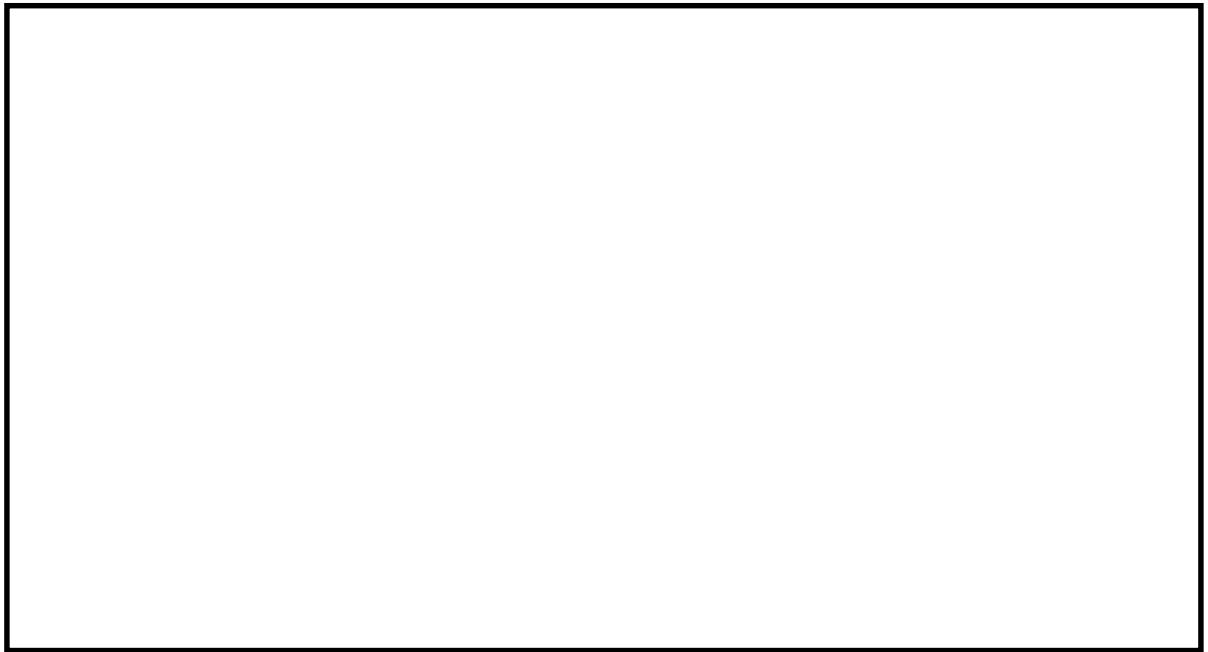


図 2-6 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略平面図 (EL. 8.3 m)

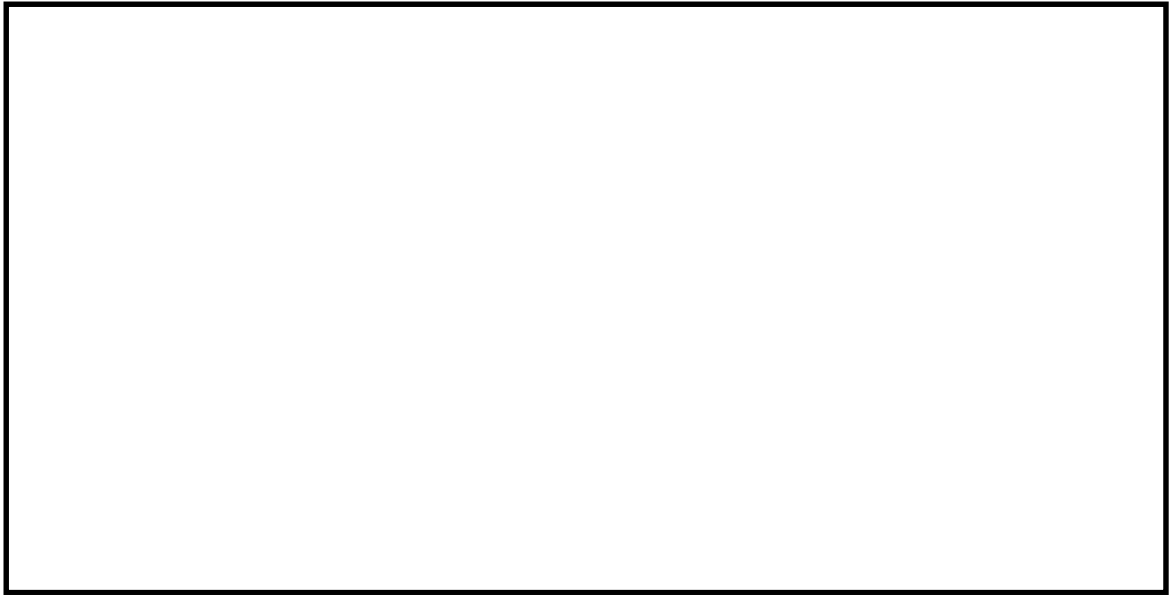


図 2-7 (1/2) 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略断面図 (A-A 断面)

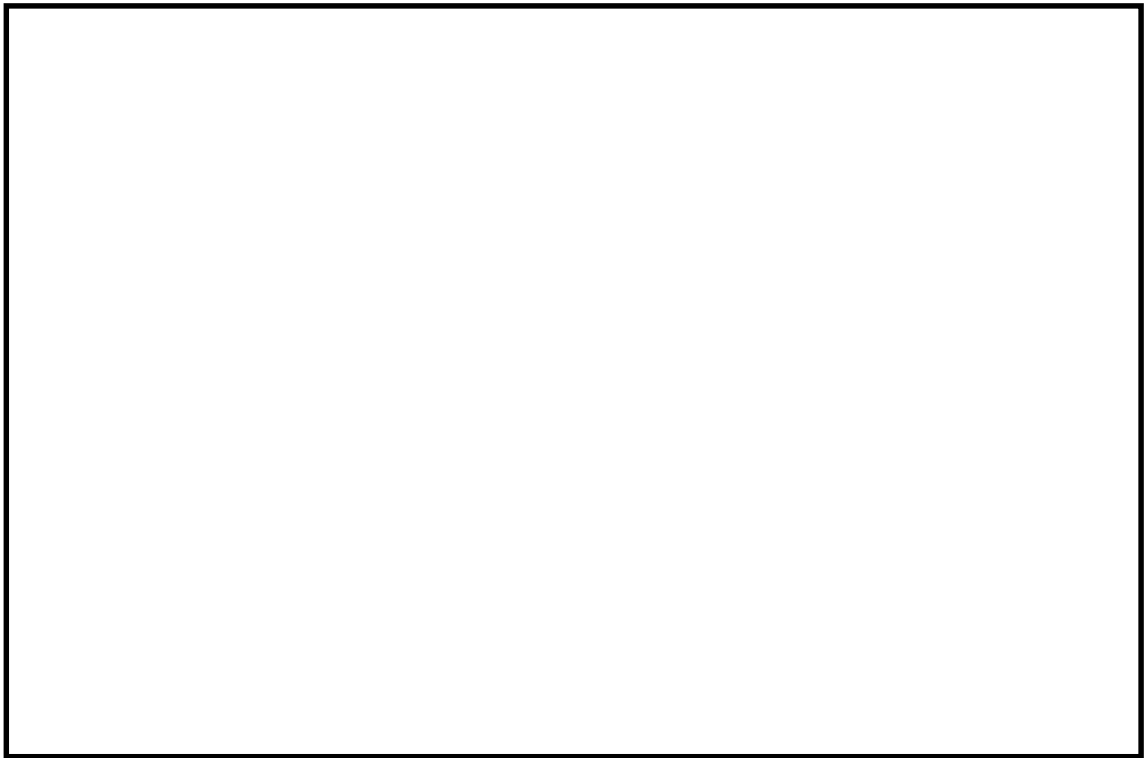


図 2-7 (2/2) 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略断面図 (B-B 断面)

2.3 評価方針

原子炉建屋、タービン建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋の強度評価は、V-3-別添 2-1「火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」のうち「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している荷重、荷重の組合せ及び許容限界を踏まえて、建屋の評価対象部位に発生する応力等が、許容限界に収まることを「3. 強度評価方法及び評価条件」に示す方法及び評価条件を用いて計算し、「4. 強度評価結果」にて確認する。

強度評価フローを図 2-8 に示す。

原子炉建屋、タービン建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋の強度評価においては、その構造を踏まえ降下火砕物堆積による鉛直荷重及びこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を選定する。

各建屋において、降下火砕物堆積による鉛直荷重に対しては、鉛直荷重に抵抗する評価対象部位として以下のとおり選定した。

- ・原子炉建屋原子炉棟：屋根スラブ、主トラス、二次部材（母屋）
- ・原子炉建屋付属棟：屋根スラブ、二次部材（母屋）
- ・タービン建屋：屋根スラブ、主トラス、二次部材（母屋）
- ・使用済燃料乾式貯蔵建屋：屋根スラブ、主トラス、二次部材（サブトラス）

なお、風荷重による水平荷重に対しては、各建屋の耐震壁を評価対象部位とする。

設計荷重は、V-3-別添 2-1「火山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」に従い設定する。

屋根に作用する荷重は、V-3-別添 2-1「火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に従い、応力解析モデルを用いて評価する。

また、鉄筋コンクリート造の耐震壁の変形量は、V-3-別添 2-1「火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に従い、質点系解析モデルを用いて評価する。

許容限界は、V-3-別添 2-1「火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に従い、降下火砕物の堆積に対し、降下火砕物堆積時の機能維持を考慮して、内包する防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないこと及び原子炉棟の MS-1（放射性物質の閉じ込め機能、放射線の遮蔽及び放出低減機能）及び MS-2（放射性物質放出の防止機能）の安全機能を維持することを目的として、建屋全体又は建屋の主要な構造部材が構造健全性を維持するものとする。

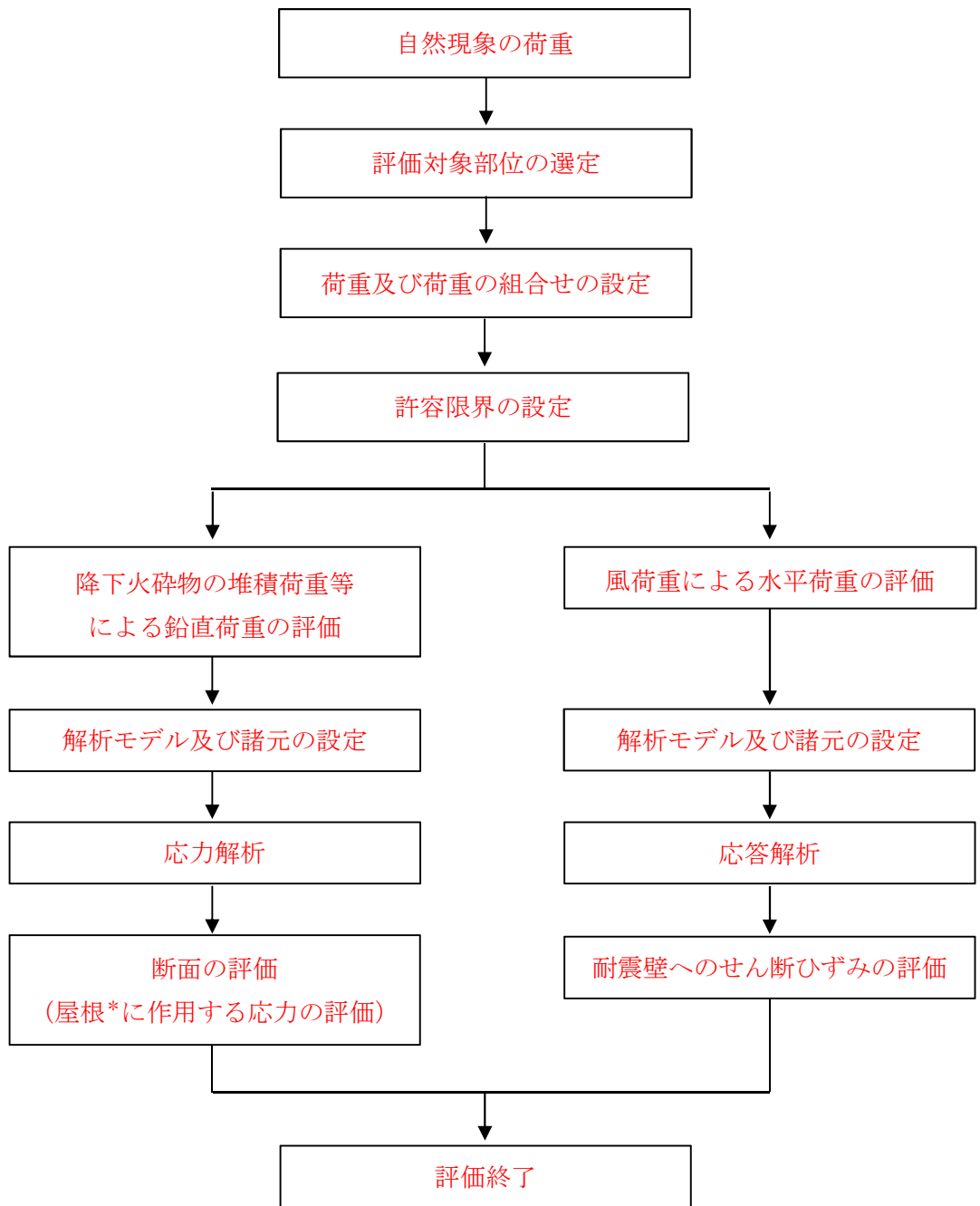


図 2-8 強度評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- (1) 建築基準法及び同施行令
- (2) 茨城県建築基準法等施行細則（昭和 45 年 3 月 9 日茨城県規則第 9 号）
- (3) 鋼構造設計規準－許容応力度設計法－（（社）日本建築学会，2005）（以下「S規準」という。）
- (4) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説－許容応力度設計法－（（社）日本建築学会，1999）（以下「RC規準」という。）
- (5) 原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005）（以下「RC-N規準」という。）
- (6) 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987（（社）日本電気協会）
- (7) 原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG 4601・補-1984（（社）日本電気協会）
- (8) 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1991 追補版（（社）日本電気協会）
- (9) 2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書（国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所 2015）（以下「技術基準解説書」という。）

3. 強度評価方法及び評価条件

3.1 評価対象部位

原子炉建屋、タービン建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋の評価対象部位は、V-3-別添 2-1「火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」のうち「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、各建屋の屋根及び耐震壁とする。

各建屋の屋根において、降下火砕物堆積による鉛直荷重に対しては、鉛直荷重に抵抗する評価対象部位として以下のとおり選定した。

- ・原子炉建屋原子炉棟：屋根スラブ，主トラス，二次部材（母屋）
- ・原子炉建屋付属棟：屋根スラブ，二次部材（母屋）
- ・タービン建屋：屋根スラブ，主トラス，二次部材（母屋）
- ・使用済燃料乾式貯蔵建屋：屋根スラブ，主トラス，二次部材（サブトラス）

なお、風荷重による水平荷重に対しては、各建屋の耐震壁を評価対象部位とする。

3.2 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、V-3-別添 2-1「火山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。

3.2.1 荷重の設定

(1) 固定荷重 (F_d)

a. 屋根スラブ

原子炉建屋、タービン建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋の屋根スラブに作用する固定荷重を表 3-1 に示す。

表 3-1 (1/3) 原子炉建屋原子炉棟の屋根スラブ及び母屋検討用の固定荷重

部 位	仕上げ	固定荷重 (F_d)
屋根スラブ	防水シート	3 kgf/m ²
	アスファルト防水層	37 kgf/m ²
	コンクリート (t=100 mm)	240 kgf/m ²
	デッキプレート部コンクリート	45 kgf/m ²
	デッキプレート	18 kgf/m ²
	合 計	343 kgf/m ² →3370 N/m ²
母屋	(H-390×300×10×16)	1050 N/m

表 3-1 (2/3) タービン建屋の屋根スラブ及び母屋検討用の固定荷重

部 位	仕 上 げ	固定荷重 (F _d)
屋根スラブ	軽量コンクリートブロック	54 kgf/m ²
	空練モルタル敷(貧調合)	60 kgf/m ²
	アスファルト防水層	37 kgf/m ²
	コンクリート (t=100 mm)	240 kgf/m ²
	デッキプレート部コンクリート	45 kgf/m ²
	デッキプレート	18 kgf/m ²
	合 計	454 kgf/m ² →4460 N/m ²
母屋	(H-396×302×12×19)	1250 N/m

表 3-1 (3/3) 使用済燃料乾式貯蔵建屋の屋根スラブ検討用の固定荷重

部 位	仕 上 げ	固定荷重 (F _d)
屋根スラブ	砂利 (t=30 mm)	63 kgf/m ²
	アスファルト防水層	20 kgf/m ²
	スラブ (t=450+34=484 mm)	1162 kgf/m ²
	デッキプレート	29 kgf/m ²
	合 計	1274 kgf/m ² →12500 N/m ²

b. 主トラス

原子炉建屋、タービン建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋の主トラスに作用する固定荷重を表 3-2 に示す。

表 3-2 (1/3) 原子炉建屋の主トラス検討用の固定荷重

部 位	部 材	固定荷重 (F _d)
屋根面 (EL. 64.08 m)	屋根スラブ	343 kgf/m ²
	トラス鋼材	204 kgf/m ²
	合 計	547 kgf/m ² →5370 N/m ²

表 3-2 (2/3) タービン建屋の主トラス検討用の固定荷重

部 位	部 材	固定荷重 (F _d)
屋根面 (EL. 40.45 m)	屋根スラブ	454 kgf/m ²
	トラス鋼材	125 kgf/m ²
	合 計	579 kgf/m ² →5680 N/m ²

表 3-2 (3/3) 使用済燃料貯蔵建屋の主トラス及びサブトラス検討用の固定荷重

部 位	部 材	固定荷重 (F _d)
屋根面 (EL. 29.20 m)	屋根スラブ	1274 kgf/m ²
	トラス鋼材	150 kgf/m ²
	合 計	1424 kgf/m ² →14000N/m ²

(2) 積載荷重 (F₁)

積載荷重は、「建築構造設計基準の資料（国土交通省 平成 27 年版）」における「屋上（通常人が使用しない場合）」の床版計算用積載荷重における 980 N/m² を包絡するように除灰時の人員荷重として 1000 N/m² とする。なお、除灰においては、重機等の大型機器は使用しない。積載荷重を表 3-3 に示す。

表 3-3 積載荷重

積載荷重 (F ₁)
1000 N/m ²

(3) 積雪荷重 (F_s)

積雪荷重は、茨城県建築基準法等施行細則（昭和 45 年 3 月 9 日茨城県規則第 9 号）による東海村の垂直積雪量 30 cm に平均的な積雪荷重*を与えるための係数 0.35 を考慮した 10.5 cm に設定し、積雪量 1 cm ごとに 20 N/m² の積雪荷重が作用することを考慮し設定する。積雪荷重を表 3-4 に示す。

注記 *：建築物荷重指針・解説（2014）

表 3-4 積雪荷重

積雪荷重 (F _s)
210 N/m ²

(4) 降下火砕物堆積による鉛直荷重(F_v)

降下火砕物堆積による単位面積あたりの鉛直荷重は、7355 N/m²とする。降下火砕物堆積による鉛直荷重を表 3-5 に示す。

表 3-5 降下火砕物堆積による鉛直荷重

降下火砕物堆積による鉛直荷重 (F_v)
7355 N/m ²

(5) 風荷重(W)

a. 記号の定義

原子炉建屋、タービン建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋の強度評価において風荷重の算定に用いる記号を表 3-6 に示す。

表 3-6 風荷重の算定に用いる記号

記号	単位	定義
A	m ²	風の受圧面積（風向に垂直な面に投影した面積）
C	—	風力係数
E'	—	建築基準法施行令第87条第2項に規定する数値
E _r	—	建設省告示第1454号第2項の規定によって算出した平均風速の高さ方向の分布を表す係数
G	—	ガスト影響係数
H	m	全高
q	N/m ²	設計用速度圧
V _D	m/s	基準風速
W	N	風荷重
Z _G	m	地表面粗度区分に応じて建設省告示第1454号に掲げる数字
Z _b	m	地表面粗度区分に応じて建設省告示第1454号に掲げる数字
α	—	地表面粗度区分に応じて建設省告示第1454号に掲げる数字

b. 風荷重 (W) の算定

風荷重の算出に用いる基準風速は、30 m/s とする。

風荷重Wは、V-3-別添 2-1「火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1(3)c. 水平荷重」に示す式に従い算出する。全高Hが5 m以上であるため、HがZ_b以上の場合の式を用いる。風荷重Wの算出は、建屋の形状を考慮して算出した風力係数C及び風の受圧面積Aに基づき実施し、風荷重Wの算出に用いる受圧面積の算定に

において、隣接する建屋の遮断効果は、安全側の評価となるよう考慮しない。

$$W = q \cdot C \cdot A$$

ここで

$$q = 0.6 E' \cdot V_D^2$$

$$E' = E_r^2 \cdot G$$

$$E_r = 1.7 \cdot (H/Z_G)^\alpha \quad (H \text{ が } Z_b \text{ を超える場合})$$

$$E_r = 1.7 \cdot (Z_b/Z_G)^\alpha \quad (H \text{ が } Z_G \text{ 以下の場合})$$

風荷重算定に使用する入力条件を表 3-7 及び表 3-8 に示す。

表 3-7 設計風荷重の条件

施設名称	基準風速 V _D (m/s)	全高 H (m)	Z _G (m)	α	ガスト影 響 係数 G	設計用 速度圧 q (N/m ²)
原子炉建屋	30	55.65	350	0.15	2.00	1798
タービン建屋	30	32.64	350	0.15	2.05	1571
使用済燃料乾式 貯蔵建屋	30	21.20	350	0.15	2.13	1430

表 3-8 (1/3) 原子炉建屋の風力係数及び受圧面積

(a) NS 方向

標高 EL. (m)	風力係数 C		受圧面積 A (m ²)	
	風上	風下	風上	風下
63.65 ~ 57.00	0.80	0.4	331	331
57.00 ~ 46.50	0.77	0.4	447	447
46.50 ~ 38.80	0.72	0.4	328	328
38.80 ~ 34.70	0.67	0.4	175	175
34.70 ~ 29.00	0.64	0.4	266	266
29.00 ~ 20.30	0.60	0.4	581	581
20.30 ~ 14.00	0.51	0.4	430	430
14.00 ~ 8.20	0.41	0.4	396	396

(b) EW 方向

標高 EL. (m)	風力係数 C		受圧面積 A (m ²)	
	風上	風下	風上	風下
63.65 ~ 57.00	0.80	0.4	354	354
57.00 ~ 46.50	0.77	0.4	478	478
46.50 ~ 38.80	0.72	0.4	351	351
38.80 ~ 34.70	0.67	0.4	187	187
34.70 ~ 29.00	0.64	0.4	283	283
29.00 ~ 20.30	0.60	0.4	570	570
20.30 ~ 14.00	0.51	0.4	432	432
14.00 ~ 8.20	0.41	0.4	398	398

表 3-8 (2/3) タービン建屋の風力係数及び受圧面積

(a) NS 方向

標高 EL. (m)	風力係数 C		受圧面積 A (m ²)	
	風上	風下	風上	風下
40.64 ~ 28.00	0.80	0.4	1408	1408
28.00 ~ 18.00	0.69	0.4	1129	1129
18.00 ~ 8.20	0.56	0.4	1034	1034

(b) EW 方向

標高 EL. (m)	風力係数 C		受圧面積 A (m ²)	
	風上	風下	風上	風下
40.64 ~ 28.00	0.80	0.4	585	585
28.00 ~ 18.00	0.69	0.4	733	733
18.00 ~ 8.20	0.56	0.4	696	696

表 3-8 (3/3) 使用済燃料乾式貯蔵建屋の風力係数及び受圧面積

(a) NS 方向

標高 EL. (m)	風力係数 C		受圧面積 A (m ²)	
	風上	風下	風上	風下
29.20 ~ 17.75	0.80	0.4	318	318
17.75 ~ 8.30	0.63	0.4	254	254

(b) EW方向

標高 EL. (m)	風力係数 C		受圧面積 A (m ²)	
	風上	風下	風上	風下
29.20 ~ 17.75	0.80	0.4	657	657
17.75 ~ 8.30	0.63	0.4	525	525

3.2.2 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せは、建屋の評価対象部位毎に設定する。建屋に水平方向の風荷重が作用すると、屋根に対し鉛直上向き荷重が働き、鉛直下向き荷重が低減されるため、保守的に考え、風による鉛直方向の荷重は考慮しない。

原子炉建屋、タービン建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋の評価に用いる荷重の組合せを表 3-9 に示す。

表 3-9 荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
建屋	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建屋 ・タービン建屋 ・使用済燃料乾式貯蔵建屋 	屋根	①固定荷重 ②積載荷重 ③積雪荷重 ④降下火砕物堆積による鉛直荷重
		耐震壁	①固定荷重 ②積載荷重 ③積雪荷重 ④降下火砕物堆積による鉛直荷重 ⑤風荷重

3.3 許容限界

原子炉建屋，タービン建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋の許容限界は，V-3-別添 2-1「火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界に従って，「3.1 評価対象部位」にて設定している建屋の評価対象部位ごとに設定する。

常時作用する固定荷重，除灰時の人員荷重としての積載荷重，積雪荷重及び降下火砕物堆積による鉛直荷重に対する屋根の評価において，積雪荷重及び降下火砕物堆積による鉛直荷重は，30 日以内に除雪・除灰することから短期荷重として扱う。

各建屋の評価における許容限界を表 3-10 のとおり設定する。また，鋼材，コンクリート及び鉄筋の許容応力度を表 3-11，表 3-12 及び表 3-13 に示す。

表 3-10(1/3) 原子炉建屋の屋根及び耐震壁の許容限界

要求機能	機能設計上の性能目標	部位		機能維持のための考え方	許容限界 (評価基準値)
—	構造強度を有すること	屋根	屋根 スラブ	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	終局耐力に対し妥当な安全裕度を有する許容限界*1
			主トラス		終局耐力に対し妥当な安全裕度を有する許容限界*2
			母屋 (二次部材)		終局耐力に対し妥当な安全裕度を有する許容限界*2
		耐震壁	最大せん断ひずみが構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	最大せん断ひずみ 2.0×10^{-3}	
気密性	換気性能とあいまって気密機能を維持すること	屋根 スラブ	部材に生じる応力が気密性を維持するための許容限界を超えないことを確認	短期許容応力度*3	
遮蔽性	遮蔽体の損傷により遮蔽機能を損なわないこと	屋根 スラブ	部材に生じる応力が遮蔽性を維持するための許容限界を超えないことを確認	短期許容応力度*3	

注記 *1：構造強度に対しては，「終局耐力に対し妥当な安全裕度を有する許容限界」が許容限界となるが，気密性，遮蔽性において「短期許容応力度」を許容限界としていることから，短期許容応力度で評価

*2：弾性限耐力として「S規準」の短期許容応力度の評価式に平成 12 年建設省告示第 2464 号に基づき F 値×1.1 を適用

*3：「RC-N規準」の短期許容応力度で評価

表 3-10(2/3) タービン建屋の屋根及び耐震壁の許容限界

要求機能	機能設計上の性能目標	部位		機能維持のための考え方	許容限界* ² (評価基準値)
—	内包する防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないこと	屋根	屋根スラブ	内包する防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないために落下しないことを確認* ¹	終局耐力* ³
			主トラス	内包する防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないために崩壊機構が形成されないことを確認	崩壊機構が形成されないこと* ⁴
			母屋 (二次部材)		
		耐震壁	最大せん断ひずみが構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	最大せん断ひずみ 4.0×10^{-3}	

- 注記 *1: 屋根スラブの落下により、内包するクラス2設備を損傷させる可能性があることから、機能維持のために落下しないことを確認
- *2: 複数部材で構成されている屋根において、単一部材である屋根スラブは、部材の終局耐力を許容限界とし、構造体として主トラスが崩壊しないことを許容限界とする。
- *3: 機能維持に対しては終局耐力が許容限界となるが、「RC-N規準」の短期許容応力度の評価式に平成12年建設省告示第2464号に基づきF値×1.1を適用
- *4: 部材の構造健全性評価においては、弾性限耐力*⁵が基本となるが、一部の部材が弾性限耐力を超過した場合は、その部材に対して、修正若林式*^{6,7}及び鋼構造限界状態設計指針・同解説（（社）日本建築学会、2010）による座屈耐力を用い、構造健全性を評価する。なお、適切な裕度を有していることを、荷重増分解析により確認する。
- *5: 弾性限耐力として「S規準」の短期許容応力度の評価式に平成12年建設省告示第2464号に基づきF値×1.1を適用
- *6: 鉄骨X型ブレース架構の復元力特性に関する研究、日本建築学会構造工学論文集、Vol. 37B, pp. 303-316, 1991（谷口元，加藤勉ほか）
- *7: 原子力発電所鉄骨屋根トラスの終局限界に関する研究、日本建築学会構造系論文集第76巻 第661号, pp571-580, 2011（鈴木琢也，貫井泰ほか）

表 3-10(3/3) 使用済燃料乾式貯蔵建屋の屋根及び耐震壁の許容限界

要求機能	機能設計上の性能目標	部位		機能維持のための考え方	許容限界*2 (評価基準値)
—	内包する防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないこと	屋根	屋根スラブ	内包する防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないために落下しないことを確認*1	終局耐力*3
			主トラス	内包する防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないために崩壊機構が形成されないことを確認	崩壊機構が形成されないこと*4
			サブトラス (二次部材)		
		耐震壁	最大せん断ひずみが構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	最大せん断ひずみ 4.0×10^{-3}	

- 注記 *1: 屋根スラブの落下により、内包するクラス2設備を損傷させる可能性があることから、機能維持のために落下しないことを確認
- *2: 複数部材で構成されている屋根において、単一部材である屋根スラブは、部材の終局耐力を許容限界とし、構造体として主トラスが崩壊しないことを許容限界とする。
- *3: 機能維持に対しては終局耐力が許容限界となるが、「RC-N規準」の短期許容応力度で評価
- *4: 部材の構造健全性評価においては、弾性限耐力*5が基本となるが、一部の部材が弾性限耐力を超過した場合は、その部材に対して、修正若林式*6,*7及び鋼構造限界状態設計指針・同解説（（社）日本建築学会，2010）による座屈耐力を用い、構造健全性を評価する。
- *5: 弾性限耐力として「S規準」の短期許容応力度の評価式に平成12年建設省告示第2464号に基づきF値×1.1を適用
- *6: 鉄骨X型ブレース架構の復元力特性に関する研究，日本建築学会構造工学論文集，Vol. 37B, pp. 303-316, 1991（谷口元，加藤勉ほか）
- *7: 原子力発電所鉄骨屋根トラスの終局限界に関する研究，日本建築学会構造系論文集第76巻 第661号, pp571-580, 2011（鈴木琢也，貫井泰ほか）

表 3-11 鋼材の許容応力度

建屋	種類		F 値 (N/mm ²)	短期		
				引張 (N/mm ²)	圧縮及び曲げ (N/mm ²)	せん断 (N/mm ²)
原子炉建屋 タービン建屋	SS400* ¹	t ≤ 40 (mm)	235	235	235* ²	135
使用済燃料 乾式貯蔵建屋	SS400 SM400A	t ≤ 40 (mm)	235	235	235* ²	135

注記 *1：建設当時の鋼材の種類は SS41 であるが、現在の規格（SS400）に読み替えた許容応力度を示す。

*2：上限値であり、座屈長さ等を勘案して設定する。

表 3-12 コンクリートの許容応力度

建屋	設計基準強度 (N/mm ²)	短期	
		圧縮 (N/mm ²)	せん断 (N/mm ²)
原子炉建屋 タービン建屋	22.1	14.7	1.06
使用済燃料 乾式貯蔵建屋	23.5	15.6	1.08

表 3-13 鉄筋の許容応力度

建屋	種類	短期	
		引張及び圧縮 (N/mm ²)	面外せん断補強 (N/mm ²)
原子炉建屋 タービン建屋	SD345*	345	345
使用済燃料 乾式貯蔵建屋	SD345	345	345

注記 *：建設当時の鉄筋の種類は SD35 であるが、現在の規格（SD345）に読み替えた許容応力度を示す。

3.4 評価方法

3.4.1 屋根に対する評価

3.4.1.1 原子炉建屋

(1) 屋根スラブ

曲げモーメントによる鉄筋応力度及び面外せん断応力度を算定し、各許容値を超えないことを確認する。なお、評価においては、表 3-10(1/3)に示すように、機能設計上の性能目標の構造強度に対する許容限界は、終局限界に対し妥当な安全裕度を有する許容限界となるが、気密性、遮蔽性において、短期許容応力度を許容限界としていることから、屋根スラブについては、短期許容応力度で評価する。

a. 応力解析モデル及び諸元

屋根スラブは母屋で支持された 1 方向スラブとして単位幅を取り出し、等分布荷重を受ける両端固定梁として応力を算定する。屋根スラブの検討は、支持スパンの長い屋根スラブを対象に実施する。

屋根スラブの解析モデルを図 3-1 に、屋根スラブ評価部材の位置を図 3-2 に、屋根スラブ検討条件を表 3-14 に示す。

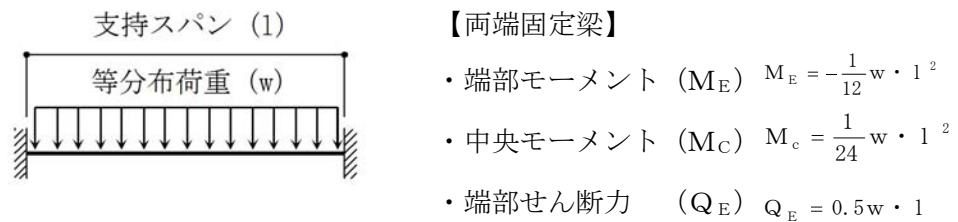


図 3-1 原子炉建屋 屋根スラブの解析モデル(両端固定梁)

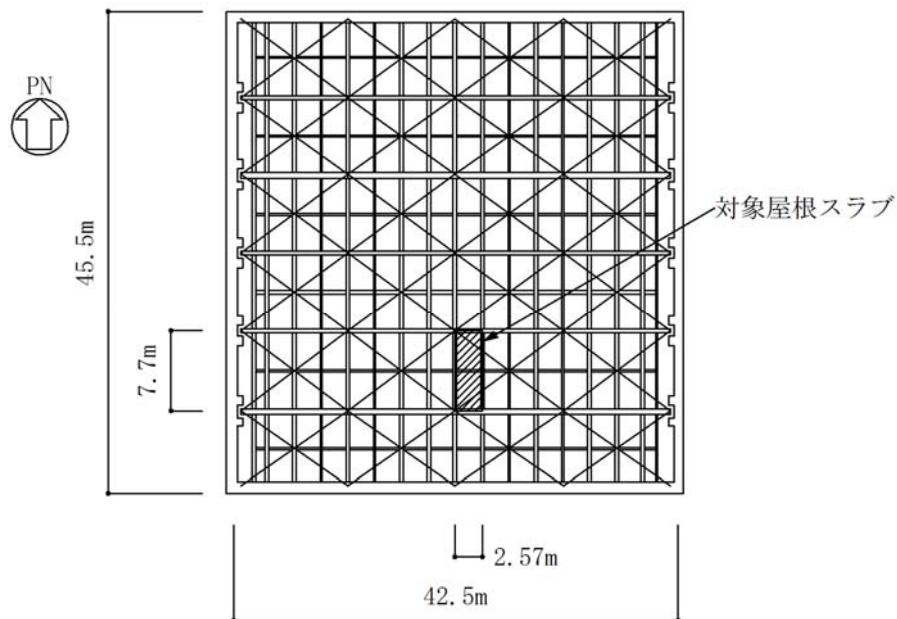


図 3-2 (1/2) 原子炉建屋 屋根スラブ評価部材の位置 (EL. 64.08m)

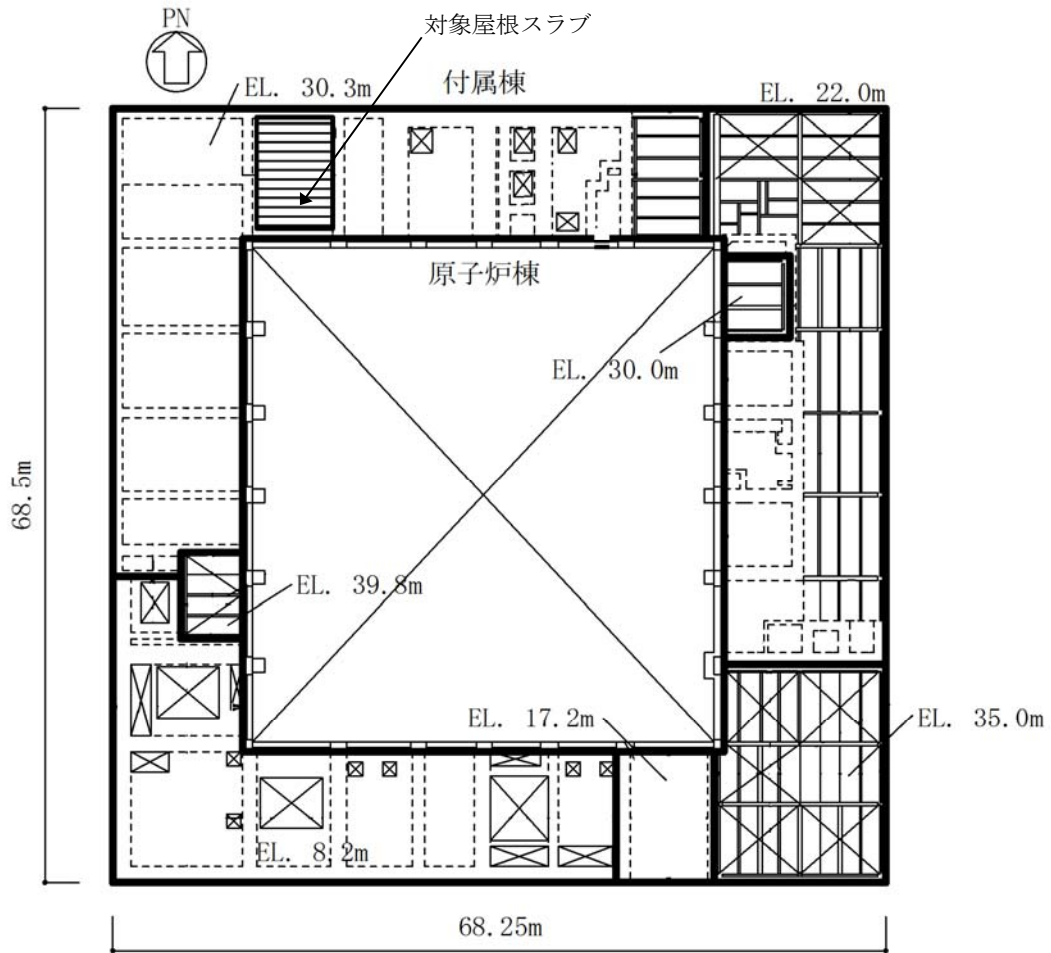


図 3-2 (2/2) 原子炉建屋 屋根スラブ評価部材の位置 (EL. 39.8m ~ EL. 8.2m)

表 3-14 原子炉建屋 屋根スラブの検討条件

評価対象部位*	スラブ厚 (mm)	有効せい (mm)	支持スパン (m)	配筋	配筋量 (片側) (mm ² /m)
原子炉棟 (EL. 64.08 m)	100	50	2.27	D13@180	703.9
付属棟 (EL. 30.30 m)	400	349	7.05 (短辺) 10.6 (長辺)	D19@200 (短辺) D19@200 (長辺)	1432.5 (短辺) 1432.5 (長辺)

注記 * : 支持スパンの長いスラブを選定

b. 曲げモーメントに対する屋根スラブ断面の評価方法

曲げモーメントに対する断面の評価は，RC-N規準に基づき，次式をもとに計算した評価対象部位に生じる曲げモーメントによる鉄筋応力度が，許容限界を超えないことを確認する。

$$\sigma_t = \frac{M}{a_t \cdot j}$$

ここで，

σ_t : 鉄筋の引張応力度 (N/mm²)

M : 曲げモーメント (N・mm)

a_t : 引張鉄筋断面積 (mm²)

j : 断面の応力中心間距離で，断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

c. 面外せん断力に対する屋根スラブ断面の評価方法

面外せん断力に対する断面の評価は，RC-N規準に基づき，評価対象部位に生じる面外せん断応力度が，次式をもとに計算した許容限界を超えないことを確認する。

$$Q_A = b \cdot j \cdot \alpha \cdot f_s$$

ここで，

Q_A : 許容面外せん断力 (N)

b : 断面の幅 (mm)

j : 断面の応力中心間距離で，断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

α : 許容せん断力の割り増し係数

(2 を超える場合は 2, 1 未満の場合は 1 とする。)

$$\alpha = \frac{4}{M / (Q \cdot d) + 1}$$

ここで，

M : 曲げモーメント (N・mm)

Q : せん断力 (N)

d : 断面の有効せい (mm)

f_s : コンクリートの短期許容せん断応力度 (N/mm²)

(2) 主トラス

主トラスは、3次元フレームモデルによる応力解析より主トラスの応力度を算定し、各許容限界を超えないことを確認する。

応力解析は、3次元フレームモデルを用いた弾性応力解析を実施する。解析には、原子炉建屋については解析コード「DYNA2E Version.8.0.4」を用いる。なお、解析コードの検証及び妥当性確認などの概要については、別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

a. 応力解析モデル及び諸元

応力解析モデルは、原子炉建屋についてはEL. 46.5mより上部の耐震壁、柱、梁、主トラス及び屋根スラブをモデル化した解析モデルを用いる。

解析モデルを図3-3に、主トラスの部材リストを表3-15に、材料物性値を表3-16に示す。

解析モデルに使用する要素は、シェル要素、梁要素及びトラス要素とする。また、解析モデルの脚部は固定とする。

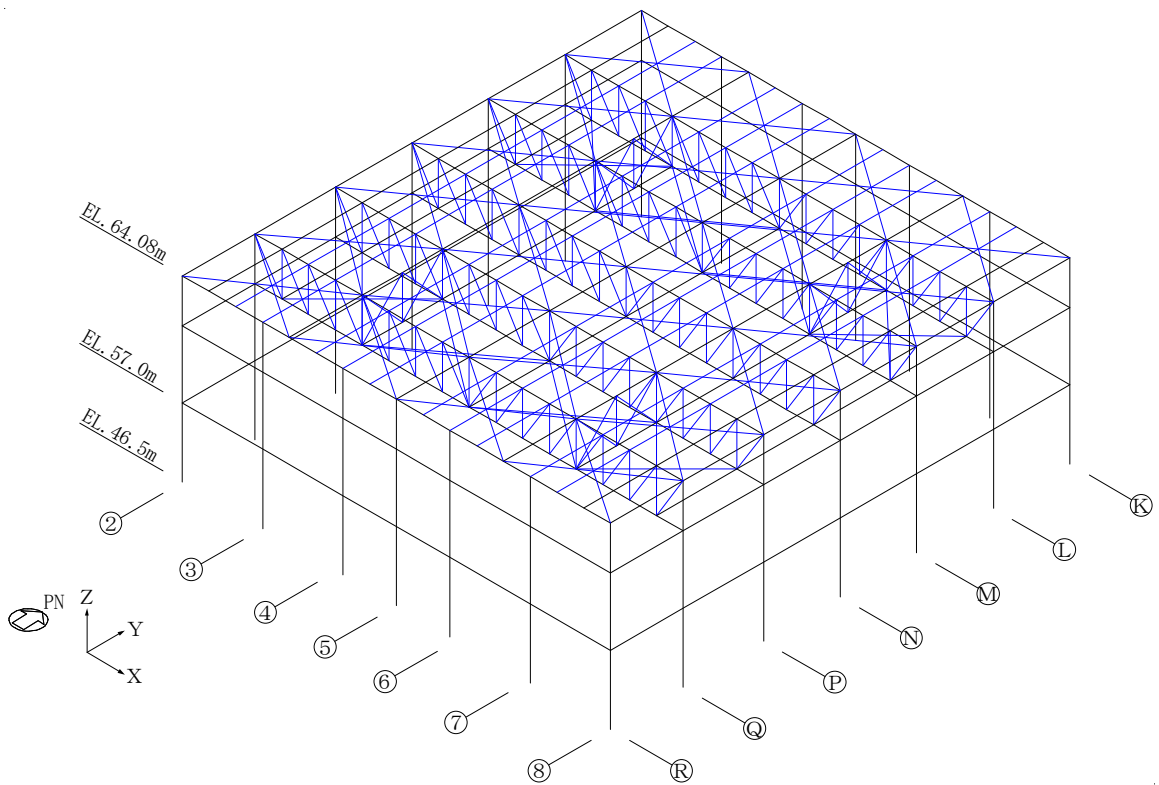


図3-3 原子炉建屋 主トラス解析モデル

表 3-15 原子炉建屋 主トラス部材リスト

部 材	断面積 A (cm^2)	断面 2 次モーメント I (cm^4)
H-400×400×13×21	218.7	66600
2L _s -200×200×15+2F B _s -9×150	142.5	—
2L _s -200×200×15	115.5	—
2L _s -150×150×15	85.48	—
2L _s -150×100×12	57.12	—
2L _s -100×100×10	38.00	—
H-390×300×10×16	136.0	38700
H-582×300×12×17	174.5	103000
H-250×250×9×14	92.18	10800
2C T _s -200×400×13×21	218.6	—
C T-300×200×11×17	67.21	—
2L _s -90×90×10	34.00	—

表 3-16 原子炉建屋 材料物性値

使用材料	ヤング係数 E (N/mm^2)	せん断弾性係数 G (N/mm^2)
鉄筋コンクリート : F _c 22.1	2.21×10^4	9.21×10^3
鉄 骨 : SS400*	2.05×10^5	7.9×10^4

注記 * : 建設当時の鋼材の種類は SS41 であるが、現在の規格 (SS400) に読み替え

b. 鋼材断面の評価法

断面の評価は、S規準に基づき、次式をもとに計算した評価対象部位に生じる軸力及び曲げモーメントによる応力度が許容限界を超えないことを確認する。

なお、許容限界については、表 3-10(1/3)に示すように、終局耐力に対し妥当な安全裕度を有する許容限界を設定し、その許容限界は、弾性限耐力としてS規準の短期許容応力度の評価式に平成 12 年建設省告示第 2464 号に基づきF値×1.1を適用する。

(圧縮)

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1.0$$

ただし、

$$\sigma_c = \frac{N_c}{A}$$

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

ここで、

N_c : 圧縮軸力 (N)

A : 部材の軸断面積 (mm^2)

M : 曲げモーメント ($\text{N}\cdot\text{mm}$)

Z : 部材の断面係数 (mm^3)

f_c : 鋼材の弾性限圧縮応力度 (N/mm^2)

f_b : 鋼材の弾性限曲げ応力度 (N/mm^2)

(引張)

$$\frac{\sigma_t + \sigma_b}{f_t} \leq 1.0$$

ただし、

$$\sigma_t = \frac{N_t}{A}$$

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

ここで、

N_t : 引張軸力 (N)

A : 部材の軸断面積 (mm^2)

M : 曲げモーメント ($\text{N}\cdot\text{mm}$)

Z : 部材の断面係数 (mm^3)

f_t : 鋼材の弾性限引張応力度 (N/mm^2)

(3) 母屋（二次部材）

母屋（二次部材）における曲げモーメント及びせん断力による応力度を算定し、許容限界を超えないことを確認する。

a. 応力解析モデル及び諸元

母屋は主トラスで支持されたスパンの支配幅を取り出し、等分布荷重を受ける単純梁（両端ピン支持の梁）として応力を算定する。

母屋の解析モデルを図 3-4 に、母屋の評価部材の位置を図 3-5 に、母屋の検討条件を表 3-17 に示す。

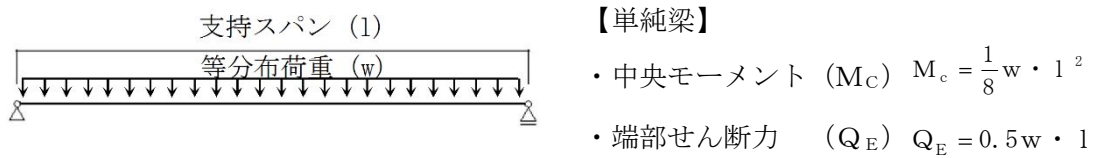


図 3-4 原子炉建屋 母屋（二次部材）の解析モデル(単純梁)

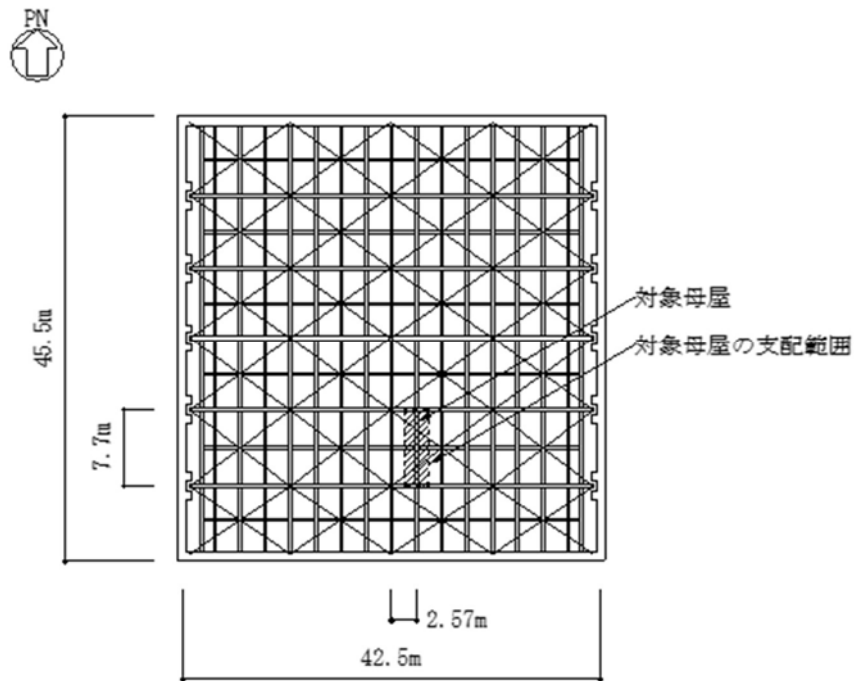


図 3-5 原子炉建屋 母屋（二次部材）の評価部材の位置 (EL. 64.08m)

表 3-17 原子炉建屋 母屋（二次部材）の検討条件

評価対象部位		支配幅 (m)	支持 スパン (m)	断面 係数 (cm ³)	せん断 断面積 (mm ²)
原子炉棟	H-390×300×10×16	2.57	7.7	1980	3580
付属棟	H-300×150×6.5×9	1.94	6.6	481	1833

b. 曲げモーメントに対する断面の評価方法

断面の評価は、次式をもとに計算した評価対象部位に生じる曲げモーメントによる応力度が許容限界を超えないことを確認する。

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

ここで、

- σ_b : 曲げ応力度 (N/mm²)
- M : 曲げモーメント (N・mm)
- Z : 部材の断面係数 (mm³)

c. せん断力に対する断面の評価方法

断面の評価は、次式をもとに計算した評価対象部位に生じるせん断応力度が許容限界を超えないことを確認する。

$$\tau = \frac{Q}{A_s}$$

ここで、

- τ : せん断応力度 (N/mm²)
- Q : せん断力 (N)
- A_s : 部材のせん断断面積 (mm²)

3.4.1.2 タービン建屋

(1) 屋根スラブ

曲げモーメントによる鉄筋応力度及び面外せん断応力度を算定し、各許容値を超えないことを確認する。なお、評価においては、表 3-10(2/3)に示すように、屋根スラブの落下により内包するクラス 2 設備を損傷させる可能性があることから、機能設計上の性能目標の内包する防護すべき施設に波及的影響をおよぼさないことに対する許容限界は、終局耐力となるが、本評価では、屋根スラブについて、RC-N規準の短期許容応力度で評価する。

a. 応力解析モデル及び諸元

屋根スラブは母屋で支持された 1 方向スラブとして単位幅を取り出し、等分布荷重を受ける両端固定梁として応力を算定する。屋根スラブの検討は、支持スパンの長い屋根スラブを対象に実施する。

屋根スラブの解析モデルを図 3-6 に、屋根スラブ評価部材の位置を図 3-7 に、屋根スラブ検討条件を表 3-18 に示す。

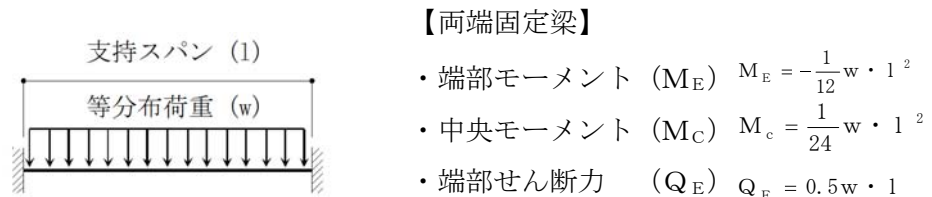


図 3-6 タービン建屋 屋根スラブの解析モデル(両端固定梁)

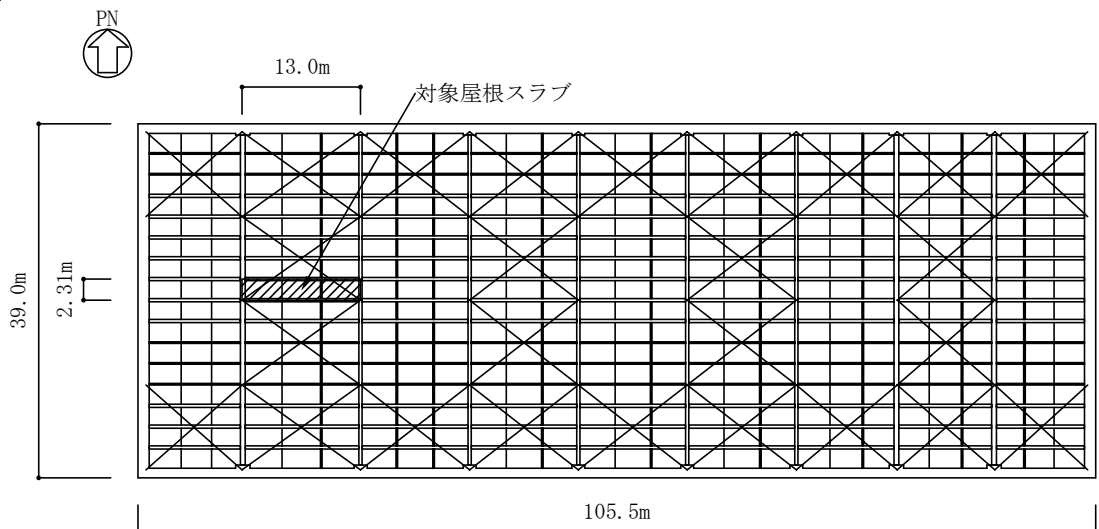


図 3-7 (1/2) タービン建屋 屋根スラブ評価部材の位置 (EL. 40.45 m)

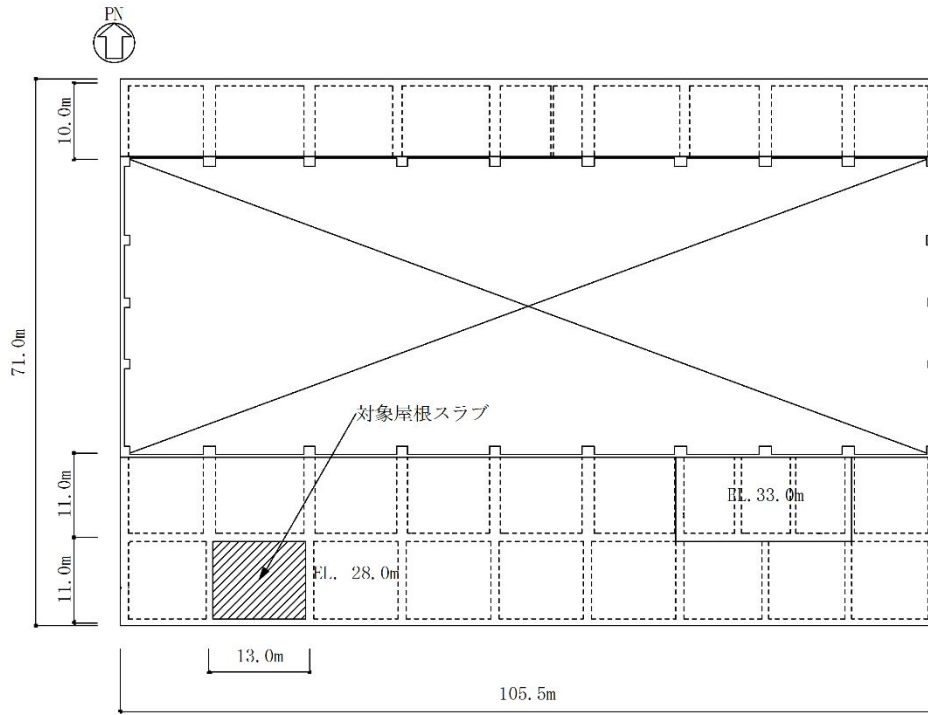


図 3-7 (2/2) タービン建屋 屋根スラブ評価部材の位置 (EL. 28.0 m)

表 3-18 タービン建屋 屋根スラブの検討条件

評価対象部位*	スラブ厚 (mm)	有効せい (mm)	支持スパン (m)	配筋	配筋量 (片側) (mm ² /m)
EL. 45.05 m	100	50	2.08	D13@200	633.5
EL. 28.0 m	350	299	10.0 (短辺) 12.0 (長辺)	D19@200 (短辺) D19@200 (長辺)	1432.5 (短辺) 1432.5 (長辺)

注記 * : 支持スパンの長いスラブを選定

b. 曲げモーメントに対する屋根スラブ断面の評価方法

曲げモーメントに対する断面の評価は、RC-N規準に基づき、次式をもとに計算した評価対象部位に生じる曲げモーメントによる鉄筋応力度が、許容限界を超えないことを確認する。

$$\sigma_t = \frac{M}{a_t \cdot j}$$

ここで、

σ_t : 鉄筋の引張応力度 (N/mm²)

M : 曲げモーメント (N・mm)

a_t : 引張鉄筋断面積 (mm²)

j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの7/8倍の値 (mm)

c. 面外せん断力に対する屋根スラブ断面の評価方法

面外せん断力に対する断面の評価は、RC-N規準に基づき、評価対象部位に生じる面外せん断応力度が、次式をもとに計算した許容限界を超えないことを確認する。

$$Q_A = b \cdot j \cdot \alpha \cdot f_s$$

ここで、

Q_A : 許容面外せん断力 (N)

b : 断面の幅 (mm)

j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの7/8倍の値 (mm)

α : 許容せん断力の割り増し係数

(2を超える場合は2, 1未満の場合は1とする。)

$$\alpha = \frac{4}{M / (Q \cdot d) + 1}$$

ここで、

M : 曲げモーメント (N・mm)

Q : せん断力 (N)

d : 断面の有効せい (mm)

f_s : コンクリートの短期許容せん断応力度 (N/mm²)

(2) 主トラス

主トラスは、3次元フレームモデルによる応力解析より主トラスの応力度を算定し、各許容値を超えないことを確認する。

応力解析は、3次元フレームモデルを用いた弾性応力解析を実施する。解析には、タービン建屋については解析コード「DYNA2E Version. 8.0.4」を用いる。なお、解析コードの検証及び妥当性確認などの概要については、別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

a. 応力解析モデル及び諸元

応力解析モデルは、タービン建屋についてはEL. 18.0mより上部の耐震壁、柱、梁、主トラス及び屋根スラブをモデル化した解析モデルを用いる。

解析モデルを図3-8に、主トラスの部材リストを表3-19に、材料物性値を表3-20に示す。

解析モデルに使用する要素は、シェル要素、梁要素及びトラス要素とする。また、解析モデルの脚部は固定とする。

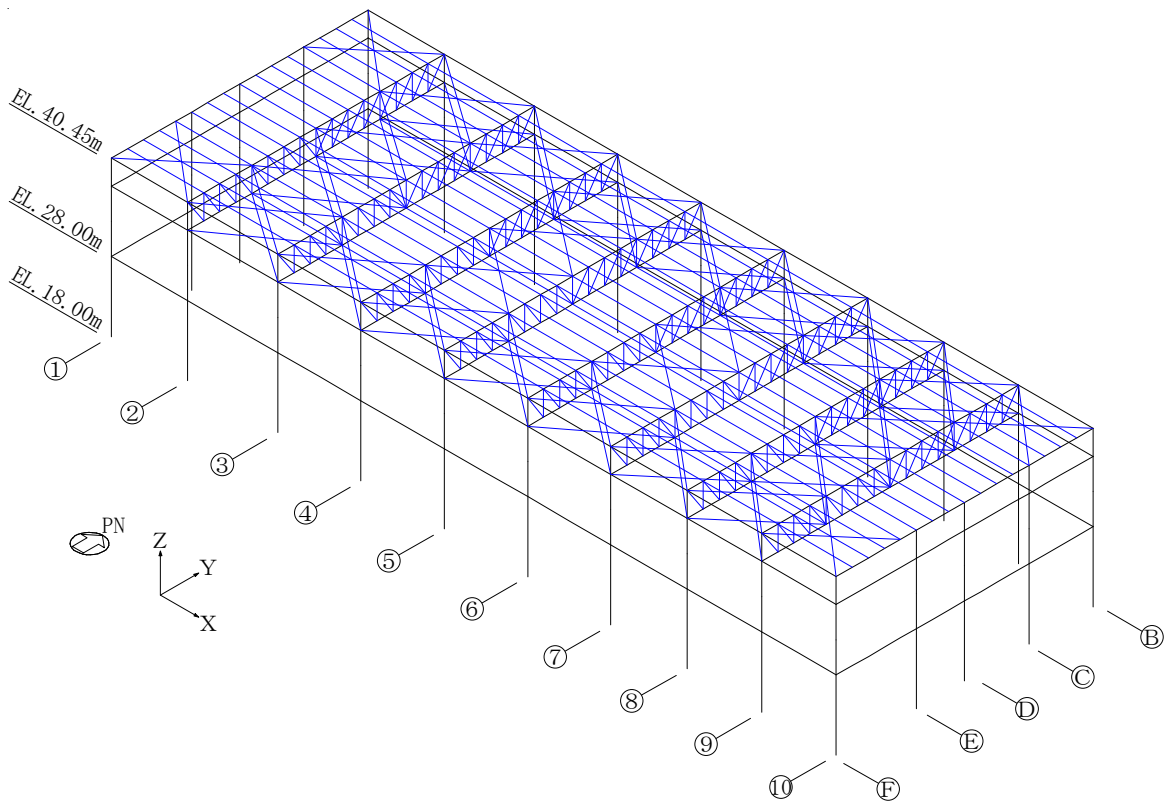


図 3-8 タービン建屋 主トラス解析モデル

表 3-19 タービン建屋 主トラス部材リスト

部 材	断面積 A (cm ²)	断面 2 次モーメント I (cm ⁴)
H-428×407×20×35	360.7	119000
2L _s -200×200×20	152.0	—
2L _s -200×200×15	115.5	—
2L _s -150×150×19	106.8	—
2L _s -150×150×15	85.48	—
2L _s -130×130×12	59.52	—
2L _s -100×100×10	38.00	—
2L _s -130×130×9	45.48	—
H-396×302×12×19	161.9	46700
H-248×249×8×13	84.70	9930
CT-175×175×7×11	31.57	—

表 3-20 タービン建屋 材料物性値

使用材料	ヤング係数 E (N/mm ²)	せん断弾性係数 G (N/mm ²)
鉄筋コンクリート : F _c 22.1	2.21×10^4	9.21×10^3
鉄 骨 : SS400*	2.05×10^5	7.9×10^4

注記 * : 建設当時の鋼材の種類は SS41 であるが現在の規格 (SS400) に読み替え

b. 鋼材断面の評価法

断面の評価は、S 規準に基づき、次式をもとに計算した評価対象部位に生じる軸力及び曲げモーメントによる応力度が許容限界を超えないことを確認する。

なお、許容限界については、表 3-10(2/3)に示すように、内包する防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないために崩壊機構が形成されないことを確認する。各部材の構造健全性評価においては、弾性限耐力*¹が基本となるが、一部の部材が弾性限耐力を超過した場合は、その部材に対して、修正若林式*²、*³及び鋼構造限界状態設計指針・同解説（（社）日本建築学会，2010）による座屈耐力を用い、構造健全性を評価する。

- 注記 *1：弾性限耐力として、S規準の短期許容応力度の評価式に平成12年建設省告示第2464号に基づきF値×1.1を適用する。
- *2：鉄骨X型ブレース架構の復元力特性に関する研究，日本建築学会構造工学論文集，Vol. 37B, pp. 303-316, 1991（谷口元，加藤勉ほか）
- *3：原子力発電所鉄骨屋根トラスの終局限界に関する研究，日本建築学会構造系論文集 第76巻 第661号, pp571-580, 2011（鈴木琢也，貫井泰ほか）

(圧縮)

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1.0$$

ただし，

$$\sigma_c = \frac{N_c}{A}$$

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

ここで，

N_c : 圧縮軸力 (N)

A : 部材の軸断面積 (mm^2)

M : 曲げモーメント ($\text{N}\cdot\text{mm}$)

Z : 部材の断面係数 (mm^3)

f_c : 鋼材の弾性限圧縮応力度 (N/mm^2)

f_b : 鋼材の弾性限曲げ応力度 (N/mm^2)

(引張)

$$\frac{\sigma_t + \sigma_b}{f_t} \leq 1.0$$

ただし，

$$\sigma_t = \frac{N_t}{A}$$

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

ここで，

N_t : 引張軸力 (N)

A : 部材の軸断面積 (mm^2)

M : 曲げモーメント ($\text{N}\cdot\text{mm}$)

Z : 部材の断面係数 (mm^3)

f_t : 鋼材の弾性限引張応力度 (N/mm^2)

(座屈耐力)

- ・軸力のみを負担する部材の評価方法

$$n_0 = 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \quad (\lambda \leq \Lambda)$$

ただし,

$$\Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6 F}}$$

ここで,

λ : 圧縮材の細長比

Λ : 限界細長比

E : ヤング係数

【修正若林：圧縮側耐力曲線】

$$\frac{n}{n_0} = \frac{1}{\left(\bar{\zeta} - P_n \right)^{1/6}} \leq 1$$

ただし,

$$n = \frac{N}{N_y}$$

$$P_n = \left(n_E / 4 \right)^{-5}$$

$$n_E = \frac{\pi^2 E}{\lambda_e^2 \sigma_y}$$

ここで,

N : 軸力

N_y : 降伏軸力

$\bar{\zeta}$: 無次元化圧縮側累積塑性歪

- ・軸力のみを負担する部材の評価方法

$$M_c = M_p \quad (\lambda_b \leq_e \lambda_b)$$

$$M_c = \left(1.0 - 0.4 \frac{\lambda_{b-p} \lambda_b}{\lambda_e \lambda_{b-p} \lambda_b} \right) M_p \quad ({}_p \lambda_b < \lambda_b \leq_e \lambda_b)$$

$$M_c = \frac{1}{\lambda_b^2} M_p \quad (\lambda_b <_e \lambda_b)$$

ただし,

$$\lambda_b = \frac{M_p}{M_e}$$

$$_e \lambda_b = \frac{1}{\sqrt{0.6}}$$

$$_p \lambda_b = 0.6 + 0.3 \left(\frac{M_2}{M_1} \right)$$

$$M_e = C_b \sqrt{\frac{\pi^4 E I_y \cdot E I_w}{k l_b^4} + \frac{\pi^2 E I_y \cdot G J}{l_b^2}}$$

$$M_p = F_y \cdot Z_p$$

$$C_b = 1.75 + 1.05 \left(\frac{M_2}{M_1} \right) + \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^2 \leq 2.3$$

ここで,

$E I_y$: 弱軸まわりの曲げ剛性

$E I_w$: 曲げねじり剛性

$G J$: サンプナンねじり剛性

l_b : 材長あるいは横座屈補剛間長さ

$k I_w$: 横座屈長さ

F_y : 降伏強さ

Z_p : 塑性断面係数

(3) 母屋（二次部材）

母屋（二次部材）における曲げモーメント及びせん断力による応力度を算定し、許容限界を超えないことを確認する。

a. 応力解析モデル及び諸元

母屋は主トラスで支持されたスパンの支配幅を取り出し、等分布荷重を受ける単純梁（両端ピン支持の梁）として応力を算定する。

母屋の解析モデルを図 3-9 に、母屋の評価部材の位置を図 3-10 に、母屋の検討条件を表 3-21 に示す。

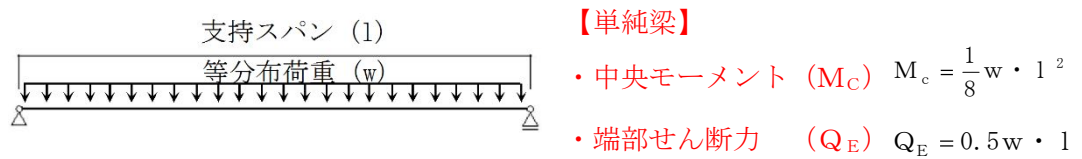


図 3-9 タービン建屋 母屋（二次部材）の解析モデル(単純梁)

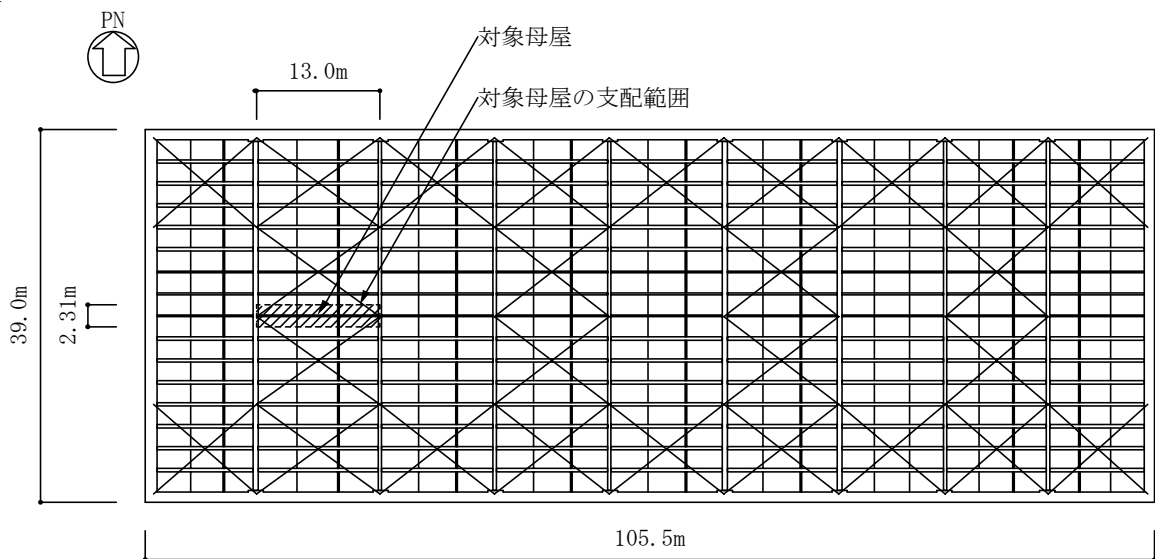


図 3-10 タービン建屋 母屋（二次部材）の評価部材の位置 (EL. 45.05m)

表 3-21 タービン建屋 母屋（二次部材）の検討条件

評価対象部位		支配幅 (m)	支持 スパン (m)	塑性断面 係数 (cm^3)	せん断 断面積 (mm^2)
タービン 建屋	H-396×302×12×19	2.31	13.0	2620	4296

b. 曲げモーメントに対する断面の評価方法

断面の評価は、次式をもとに計算した評価対象部位に生じる曲げモーメントによる応力度が許容限界を超えないことを確認する。

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

ここで、

- σ_b : 曲げ応力度 (N/mm²)
- M : 曲げモーメント (N・mm)
- Z : 部材の断面係数 (mm³)

c. せん断力に対する断面の評価方法

断面の評価は、次式をもとに計算した評価対象部位に生じるせん断応力度が許容限界を超えないことを確認する。

$$\tau = \frac{Q}{A_s}$$

ここで、

- τ : せん断応力度 (N/mm²)
- Q : せん断力 (N)
- A_s : 部材のせん断断面積 (mm²)

3.1.4.3 使用済燃料乾式貯蔵建屋

(1) 屋根スラブ

曲げモーメントによる鉄筋応力度及び面外せん断応力度を算定し、各許容値を超えないことを確認する。なお、評価においては、表 3-10(3/3)に示すように、屋根スラブの落下により内包するクラス 2 設備を損傷させる可能性があることから、機能設計上の性能目標の内包する防護すべき施設に波及的影響をおよぼさないことに対する許容限界は、終局耐力となるが、本評価では、屋根スラブについて、RC-N規準の短期許容応力度で評価する。

a. 応力解析モデル及び諸元

屋根スラブは 1 方向スラブとして単位幅を取り出し、等分布荷重を受ける両端支持梁として応力を算定する。屋根スラブの検討は当該屋根スラブが**同じ厚さ及びスパン**であるため、配筋量の最も少ない部位を対象に実施する。

屋根スラブの解析モデルを図 3-9 に、屋根スラブ評価部材の位置を図 3-10 に、屋根スラブ検討条件を表 3-22 に示す。

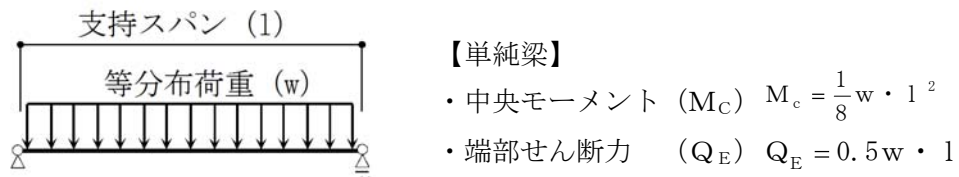
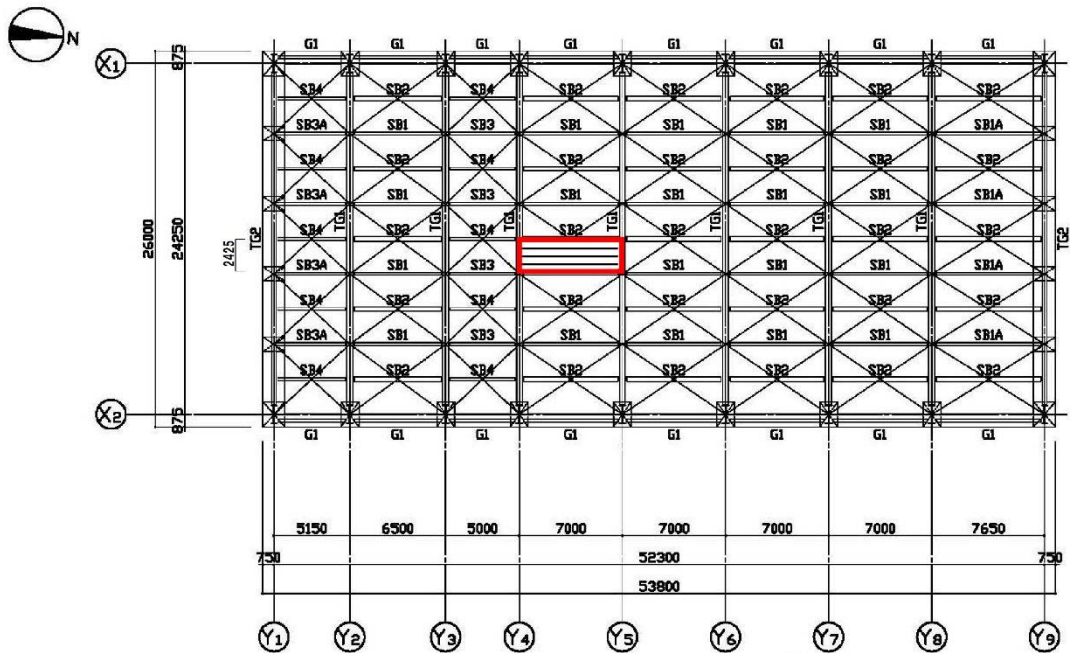


図 3-9 使用済燃料乾式貯蔵建屋 屋根スラブの解析モデル(両端支持梁)



注記 * : 寸法線は軸芯を示す。

図 3-10 使用済燃料乾式貯蔵建屋 屋根スラブ評価部材の位置 (EL. 29.2m)

表 3-22 使用済燃料乾式貯蔵建屋 屋根スラブの検討条件

評価対象部位		スラブ厚 (mm)	有効せい (mm)	支持 スパン (m)	配筋	配筋量 (片側) (mm ² /m)
使用済燃料 乾式料貯蔵建屋	EL. 29.2m	450	368	2.425	D19@250	1148

b. 曲げモーメントに対する屋根スラブ断面の評価方法

曲げモーメントに対する断面の評価は、RC-N規準に基づき、次式をもとに計算した評価対象部位に生じる曲げモーメントによる鉄筋応力度が、許容限界を超えないことを確認する。

$$\sigma_t = \frac{M}{a_t \cdot j}$$

ここで、

σ_t : 鉄筋の引張応力度 (N/mm²)

M : 曲げモーメント (N・mm)

a_t : 引張鉄筋断面積 (mm²)

j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

c. 面外せん断力に対する屋根スラブ断面の評価方法

面外せん断力に対する断面の評価は、RC-N規準に基づき、評価対象部位に生じる面外せん断応力度が、次式をもとに計算した許容限界を超えないことを確認する。

$$Q_A = b \cdot j \cdot \alpha \cdot f_s$$

ここで、

Q_A : 許容面外せん断力 (N)

b : 断面の幅 (mm)

j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

α : 許容せん断力の割り増し係数 (保守側に 1 とする。)

f_s : コンクリートの短期許容せん断応力度 (N/mm²)

(2) 主トラス及びサブトラス（二次部材）

主トラスは、3次元フレームモデルによる応力解析より主トラス及びサブトラス（二次部材）の応力度を算定し、各許容値を超えないことを確認する。

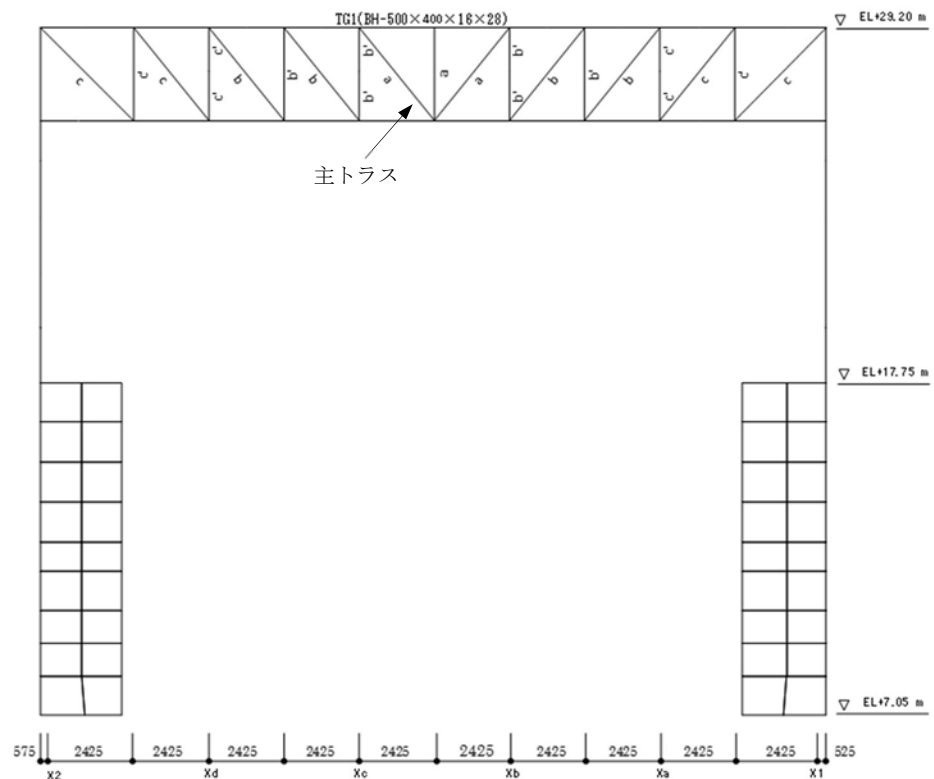
応力解析は、3次元フレームモデルを用いた弾性応力解析を実施する。解析には、使用済燃料乾式貯蔵建屋については解析コード「MSC/NASTRAN(Ver 2008r1)」を用いる。なお、解析コードの検証及び妥当性確認などの概要については、別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

a. 応力解析モデル及び諸元

応力解析モデルは、使用済燃料乾式貯蔵建屋については、EL. 7.05 mより上部の耐震壁、柱、梁、主トラス、サブトラス及び屋根スラブをモデル化した解析モデルを用いる。

解析モデルを図 3-13 に、主トラス及びサブトラスの部材リストを表 3-23 に、材料物性値を表 3-24 に示す。

解析モデルに使用する要素は、シェル要素、梁要素及びトラス要素とする。また、解析モデルの脚部は固定とする。



備考：Xa～Xdはサブトラス識別用の仮設通り名を示す。

図 3-13 (1/2) 使用済燃料乾式貯蔵建屋解析モデル (EW 方向フレーム架構モデル図)

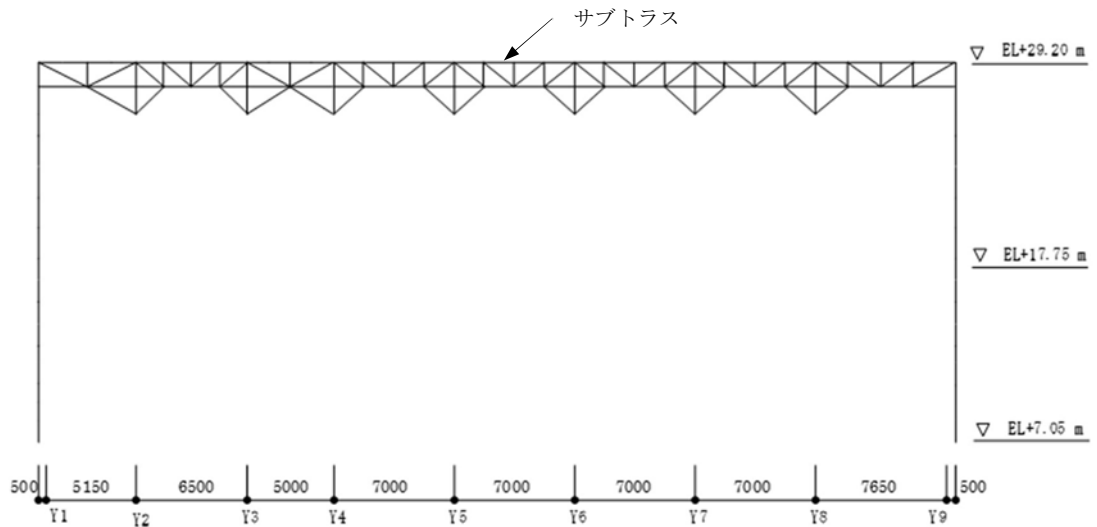


図 3-13 (2/2) 使用済燃料乾式貯蔵建屋解析モデル (NS 方向フレーム架構モデル図)

表 3-23 使用済燃料乾式貯蔵建屋 主トラス及びサブトラス部材リスト

部 材	断面積 A (cm ²)	断面 2 次モーメント I (cm ⁴)
BH-500×400×16×28	295.0	137000
BH-250×250×9×14	92.18	—
BH-300×300×12×16	130.9	—
BH-350×350×12×19	173.9	40300
BH-298×299×9×14	109.5	18600
BH-344×348×10×16	144.0	32800
H-175×175×7.5×11	51.43	2900
CT-75×150×7×10	19.82	—

表 3-24 使用済燃料乾式貯蔵建屋 材料物性値

使用材料	ヤング係数 E (N/mm ²)	せん断弾性係数 G (N/mm ²)
鉄筋コンクリート : Fc23.5	2.25×10^4	9.38×10^3
鉄 骨 : SS400 SM400A	2.05×10^5	7.90×10^4

b. 鋼材断面の評価法

断面の評価は、S 規準に基づき、次式をもとに計算した評価対象部位に生じる軸力及び曲げモーメントによる応力度が許容限界を超えないことを確認する。

なお、許容限界については、表 3-10(3/3)に示すように、内包する防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないために崩壊機構が形成されないことを確認する。各部材の構造健全性評価においては、弾性限耐力*1が基本となるが、一部の部材が弾性限耐力を超過した場合は、その部材に対して、修正若林式*2、*3 及び鋼構造限界状態設計指針・同解説（（社）日本建築学会，2010）による座屈耐力を用い、構造健全性を評価する。

注記 *1：弾性限耐力として「S 規準」の短期許容応力度の評価式に平成 12 年建設省告示第 2464 号に基づき F 値×1.1 を適用する。

*2：鉄骨 X 型ブレース架構の復元力特性に関する研究，日本建築学会構造工学論文集，Vol. 37B, pp. 303-316, 1991

*3：原子力発電所鉄骨屋根トラスの終局限界に関する研究，日本建築学会構造系論文集 第 76 巻 第 661 号, pp571-580, 2011

(圧縮)

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{c \sigma_b}{f_b} \leq 1.0 \quad \text{かつ} \quad \frac{t \sigma_b - \sigma_c}{f_t} \leq 1.0$$

ただし、

$$\sigma_c = \frac{N_c}{A}$$

$$c \sigma_b = \frac{M}{Z_c}$$

$$t \sigma_b = \frac{M}{Z_t}$$

ここで、

N_c : 圧縮軸力 (N)

A : 部材の軸断面積 (mm^2)

M : 曲げモーメント ($\text{N}\cdot\text{mm}$)

Z_c : 部材の圧縮側断面係数 (mm^3)

Z_b : 部材の引張側断面係数 (mm^3)

f_c : 鋼材の弾性限圧縮応力度 (N/mm^2)

f_b : 鋼材の弾性限曲げ応力度 (N/mm^2)

ただし、 σ_c 、 $c \sigma_b$ 、 $t \sigma_b$ の値は絶対値とする。

(引張)

$$\frac{t \sigma_b - \sigma_c}{f_t} \leq 1.0 \quad \text{かつ} \quad \frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{c \sigma_b}{f_b} \leq 1.0$$

ただし,

$$\sigma_t = \frac{N_t}{A}$$

$$c \sigma_b = \frac{M}{Z_c}$$

$$t \sigma_b = \frac{M}{Z_t}$$

ここで,

N_c : 引張軸力 (N)

A : 部材の軸断面積 (mm^2)

M : 曲げモーメント ($\text{N}\cdot\text{mm}$)

Z_b : 部材の圧縮側断面係数 (mm^3)

Z_t : 部材の引張側断面係数 (mm^3)

f_t : 鋼材の弾性限引張応力度 (N/mm^2)

ただし, σ_c , $c \sigma_b$, $t \sigma_b$ の値は絶対値とする。

3.4.2 耐震壁に対する評価

原子炉建屋，タービン建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋及びについて，建屋の質点系解析モデルを用いて，風荷重により耐震壁に発生するせん断ひずみ度を評価し，許容限界を超えないことを確認する。なお，降下火砕物の各質点系解析モデルの復元力特性の設定においては，降下火砕物堆積による鉛直荷重による軸力を考慮すると第1折れ点の増大が見込まれるため，本評価では保守的に降下火砕物堆積による鉛直荷重を考慮しない。

原子炉建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋の質点系解析モデルの詳細は，V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」，V-2-11-2-11「タービン建屋の耐震計算書」，V-2-2-4「使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答計算書」による。

4. 強度評価結果

4.1 屋根に対する評価結果

4.1.1 原子炉建屋

(1) 屋根スラブ

「3.4 評価方法」に基づいた評価結果を表 4-1 に示す。

降下火砕物堆積による鉛直荷重等によって、曲げモーメントに対する必要鉄筋量を超えないこと、発生する面外せん断力が短期許容応力度を超えないことを確認した。

以降の評価結果は速報値のため、数値確定に伴って、変更の可能性があります。

表 4-1 (1/2) 原子炉建屋 屋根スラブ評価結果

部位	EL. 40.45 m	EL. 30.30 m	
		短辺	長辺
厚さ t (mm)	100	400	400
有効せい d (mm)	50	349	349
配筋 (鉄筋断面積)	D13@180 (703.9 mm ²)	D19@200 (1432.5 mm ²)	D19@200 (1432.5 mm ²)
曲げモーメント	発生曲げモーメント M (kN・m)	5.1	137.6
	鉄筋応力度 σ_t (N/mm ²)	165.7	314.6
	許容値 (N/mm ²)	345	345
	検定値	0.49	0.92
せん断力	発生せん断力 Q (kN)	13.5	145.7
	せん断応力度 τ (N/mm ²)	0.309	0.478
	せん断スパン比による割増し係数 α	1.00	1.08
	許容値 (N/mm ²)	1.06	1.14
	検定値	0.30	0.42
判定	可	可	可

(2) 主トラス

「3.4 評価方法」に基づいた評価結果を表 4-2 に示す。

降下火砕物堆積による鉛直荷重等によって、評価対象部位に生じる軸応力及び曲げモーメントによる応力度が弾性限界耐力*を超えないことを確認した。

表 4-2 原子炉建屋 主トラスの評価結果

部位		発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容値 (N/mm ²)	検定値	判定
原子炉棟 EL. 64.08 m	上弦材	圧縮	33.1	256	0.26	可
		曲げ	31.0	254		
	下弦材	引張	166.3	258	0.77	可
		曲げ	30.1	258		
	斜材	引張	203.7	258	0.79	可
	束材	圧縮	150.1	172	0.88	可

注記 * : 「S 規準」の短期許容応力度の評価式に平成 12 年建設省告示第 2464 号に基づき F 値×1.1 を適用

(3) 母屋

「3.4 評価方法」に基づいた評価結果を表 4-3 に示す。

降下火砕物堆積による鉛直荷重等によって、評価対象部位に生じる曲げモーメント及びせん断による応力度が弾性限界耐力*を超えないことを確認した。

表 4-3 原子炉建屋 母屋の評価結果

部位	発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容値 (N/mm ²)	検定値	判定
原子炉棟 EL. 64.08 m	曲げ	118.8	258	0.47	可
	せん断	34.2	148	0.24	可
付属棟	曲げ	追而			
	せん断				

注記 * : 「S 規準」の短期許容応力度の評価式に平成 12 年建設省告示第 2464 号に基づき F 値×1.1 を適用

4.1.2 タービン建屋

(1) 屋根スラブ

「3.4 評価方法」に基づいた評価結果を表 4-4 に示す。

降下火砕物堆積による鉛直荷重等によって、曲げモーメントに対する必要鉄筋量を超えないこと、発生する面外せん断力が、終局耐力*を超えないことを確認した。

表 4-4 タービン建屋 屋根スラブ評価結果

部位	EL. 40.45 m	EL. 28.00 m	
		短辺	長辺
厚さ t (mm)	100	350	350
有効せい d (mm)	50	299	299
配筋 (鉄筋断面積)	D13@200 (633.5 mm ²)	D19@200 (1432.5 mm ²)	D19@200 (1432.5 mm ²)
曲げモーメント	発生曲げモーメント M (kN・m)	4.7	116.3
	鉄筋応力度 σ_t (N/mm ²)	169.6	310.4
	許容値 (N/mm ²)	345	345
	検定値	0.50	0.90
せん断力	発生せん断力 Q (kN)	13.5	101.4
	せん断応力度 τ (N/mm ²)	0.309	0.388
	せん断スパン比による 割増し係数 α	1.00	1.00
	許容値 (N/mm ²)	1.06	1.06
	検定値	0.30	0.37
判定	可	可	可

注記 * : 「RC-N規準」の短期許容応力度の評価式に平成12年建設省告示第2464号に基づきF値×1.1を適用した弾性限界耐力を超えないことを確認

(2) 主トラス

「3.4 評価方法」に基づいた評価結果を表 4-5 に示す。

降下火砕物堆積による鉛直荷重等によって、評価対象部位に生じる軸応力及び曲げモーメントによる応力度によって崩壊機構が形成されないこと*を確認した。

表 4-5 タービン建屋 主トラスの評価結果

部位		発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容値 (N/mm ²)	検定値	判定
EL. 64.08 m	上弦材	圧縮	43.6	257	0.37	可
		曲げ	50.7	255		
	下弦材	引張	185.1	258	0.92	可
		曲げ	52.1	258		
	斜材	引張	230.6	258	0.90	可
	束材	圧縮	171.6	176	0.98	

注記 * : 「S 規準」の短期許容応力度の評価式に平成 12 年建設省告示第 2464 号に基づき F 値 × 1.1 を適用した弾性限界耐力を超えないことを確認

(3) 母屋

「3.4 評価方法」に基づいた評価結果を表 4-6 に示す。

降下火砕物堆積による鉛直荷重等によって、評価対象部位に生じる曲げモーメント及びせん断による応力度によって崩壊機構が形成されないことを確認した。

表 4-6 タービン建屋 母屋の評価結果

部位	発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容値 (N/mm ²)	検定値	判定
EL. 40.45 m	曲げ	252.7	258	0.98	可
	せん断	47.5	148	0.33	可

4.1.3 使用済燃料乾式貯蔵建屋

(1) 屋根スラブ

「3.4 評価方法」に基づいた評価結果を表 4-7 に示す。

降下火砕物堆積による鉛直荷重等によって、曲げモーメントに対する必要鉄筋量を超えないこと、発生する面外せん断力が終局耐力を超えないこと*を確認した。

表 4-7 使用済燃料乾式貯蔵建屋 屋根スラブ評価結果

部位		EL 29.20 m
厚さ t(mm)		450
有効せい d(mm)		368
配筋 (鉄筋断面積)		D19@250 (1148.0 mm ²)
曲げ モー メント	発生曲げモーメント M(kN・m)	15.6
	鉄筋応力度 σ_t (N/mm ²)	42.3
	許容値 (N/mm ²)	345
	検定値	0.13
せん 断力	発生せん断力 Q(kN)	25.7
	せん断応力度 τ (N/mm ²)	0.799
	せん断スパン比による 割増し係数 α	1.00
	許容値 (N/mm ²)	1.08
	検定値	0.74
判定		可

注記 * : 「RC-N規準」の短期許容応力度を超えないことを確認

(2) 主トラス

「3.4 評価方法」に基づいた評価結果を表 4-8 に示す。

降下火砕物堆積による鉛直荷重等によって、評価対象部位に生じる軸応力及び曲げモーメントによる応力度によって崩壊機構が形成されないこと*を確認した。

表 4-8 使用済燃料乾式貯蔵建屋 主トラスの評価結果

部位		発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容値 (N/mm ²)	検定値	判定
EL. 29.20 m	上弦材	圧縮	1.60	219	0.24	可
		曲げ	53.4	233		
	下弦材	引張	96.7	235	0.54	可
		曲げ	28.6	233		
	斜材	引張	95.3	235	0.41	可
	垂直材	圧縮	90.2	327	0.28	可

注記 * : 「S 規準」の短期許容応力度を超えないことを確認

(3) サブトラス

「3.4 評価方法」に基づいた評価結果を表 4-9 に示す。

降下火砕物堆積による鉛直荷重等によって、評価対象部位に生じる軸応力及び曲げモーメントによる応力度によって崩壊機構が形成されないこと*を確認した。

表 4-9 使用済燃料乾式貯蔵建屋 サブトラスの評価結果

部位		発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容値 (N/mm ²)	検定値	判定
EL. 29.20 m	上弦材	引張	2.13	235	0.12	可
		曲げ	24.5	231		
	下弦材	圧縮	62.8	94	0.78	可
		曲げ	23.6	231		
	斜材	圧縮	89.2	99	0.91	可
	垂直材	圧縮	56.5	181	0.32	可

注記 * : 「S 規準」の短期許容応力度を超えないことを確認

4.2 耐震壁に対する評価結果

4.2.1 原子炉建屋

(1) 耐震壁

「3.4 評価方法」に基づいた評価結果を表 4-10 に示す。

風荷重による水平荷重によって、最大せん断ひずみが許容限界 (2.0×10^{-3}) を超えないことを確認した。

表 4-10 (1/2) 原子炉建屋 耐震壁の評価結果 (NS 方向)

評価項目	要素番号	せん断ひずみ ($\times 10^{-3}$)	許容限界 ($\times 10^{-3}$)	判定
せん断ひずみ	1	0.0028	2.0	可
	2	0.0066	2.0	可
	3	0.0012	2.0	可
	4	0.0022	2.0	可
	5	0.0024	2.0	可
	6	0.0021	2.0	可
	7	0.0022	2.0	可
	8	0.0015	2.0	可

表 4-10 (2/2) 原子炉建屋 耐震壁の評価結果 (EW 方向)

評価項目	要素番号	せん断ひずみ ($\times 10^{-3}$)	許容限界 ($\times 10^{-3}$)	判定
せん断ひずみ	1	0.0033	2.0	可
	2	0.0075	2.0	可
	3	0.0017	2.0	可
	4	0.0022	2.0	可
	5	0.0023	2.0	可
	6	0.0020	2.0	可
	7	0.0025	2.0	可
	8	0.0018	2.0	か

4.2.2 タービン建屋

(1) 耐震壁

「3.4 評価方法」に基づいた評価結果を表 4-11 に示す。

風荷重による水平荷重によって、最大せん断ひずみが許容限界 (4.0×10^{-3}) を超えないことを確認した。

表 4-11 (1/2) タービン建屋 耐震壁の評価結果 (NS 方向)

評価項目	要素番号	せん断ひずみ ($\times 10^{-3}$)	許容限界 ($\times 10^{-3}$)	判定
せん断ひずみ	1	0.0074	4.0	可
	2	0.0056	4.0	可
	3	0.0032	4.0	可

表 4-11 (2/2) タービン建屋 耐震壁の評価結果 (EW 方向)

評価項目	要素番号	せん断ひずみ ($\times 10^{-3}$)	許容限界 ($\times 10^{-3}$)	判定
せん断ひずみ	1	0.0019	4.0	可
	2	0.0024	4.0	可
	3	0.0021	4.0	可

4.2.3 使用済燃料乾式貯蔵建屋

(1) 耐震壁

「3.4 評価方法」に基づいた評価結果を表 4-12 に示す。

風荷重による水平荷重によって、最大せん断ひずみが許容限界 (4.0×10^{-3}) を超えないことを確認した。

表 4-12 (1/2) 使用済燃料乾式貯蔵建屋 耐震壁の評価結果 (NS 方向)

評価項目	要素番号	せん断ひずみ ($\times 10^{-3}$)	許容限界 ($\times 10^{-3}$)	判定
せん断ひずみ	BM03	0.00241	4	可
	BM02	0.00326	4	可

表 4-12 (2/2) 使用済燃料乾式貯蔵建屋 耐震壁の評価結果 (EW 方向)

評価項目	要素番号	せん断ひずみ ($\times 10^{-3}$)	許容限界 ($\times 10^{-3}$)	判定
せん断ひずみ	BM03	0.00515	4	可
	BM02	0.00605	4	可

V-3-別添 2-2-1 防護対策施設の強度計算書

目次

1. 概要	2
2. 基本方針	2
2.1 位置	2
2.2 構造概要	3
2.3 評価方針	3
2.4 適用規格	4
3. 強度評価方法	5
3.1 記号の定義	5
3.2 評価対象部位	6
3.3 荷重及び荷重の組合せ	7
3.4 許容限界	8
3.5 評価方法	9
4. 評価条件	10
5. 強度評価結果	11

1. 概要

本資料は、V-3-別添 2-2 「防護対策施設の強度計算の方針」に示すとおり、非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフベントファン（以下「ディーゼル発電機室ルーフベントファン」という。）並びに中央制御室換気系冷凍機に施す防護対策施設が降下火砕物等堆積時においても、ディーゼル発電機室ルーフベントファン及び中央制御室換気系冷凍機の安全機能維持を考慮して、主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

防護対策施設は、V-3-別添 2-2 「防護対策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、防護対策施設の「2.1 位置」、「2.2 構造概要」、「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

2.1 位置

防護対策施設は、V-3-別添 2-2 「防護対策施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示すとおり、原子炉建屋屋上に設置する。防護対策施設の設置位置図を図 2-1 に示す。

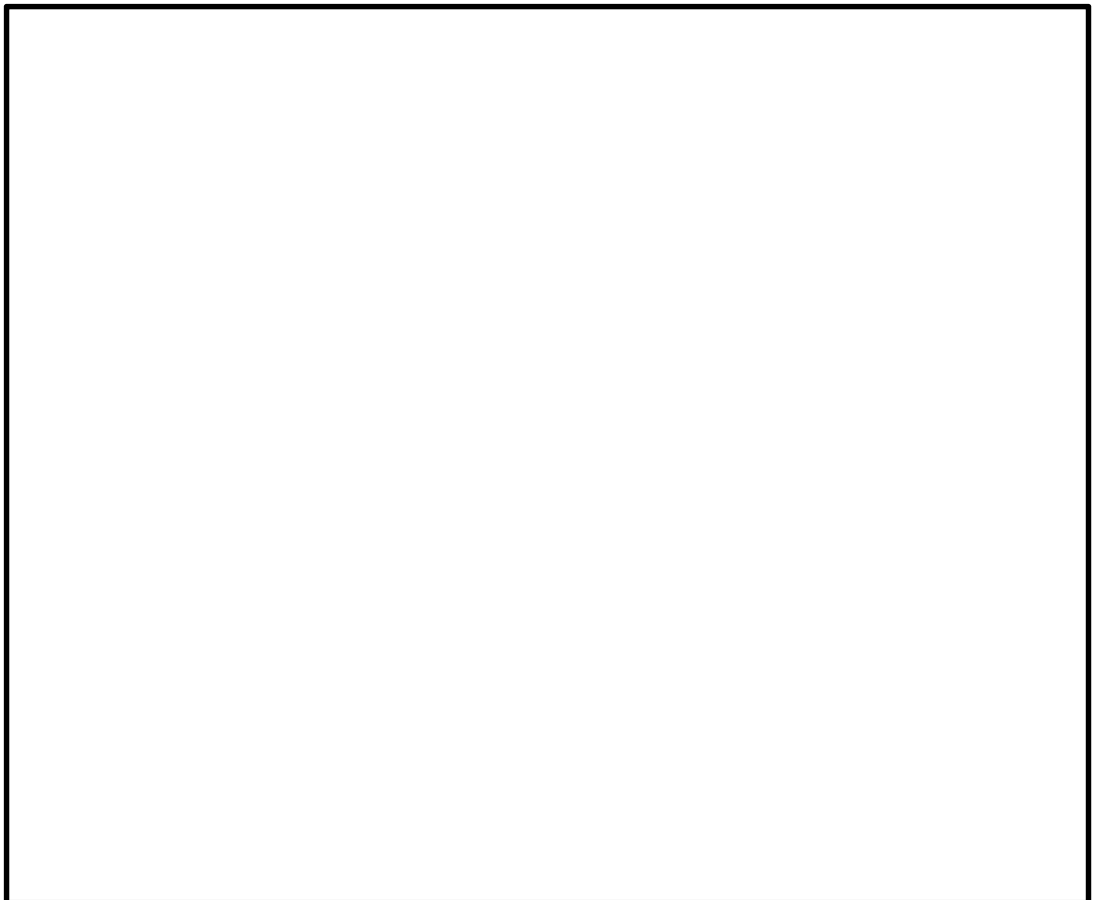


図 2-1 防護対策施設の設置位置図

2.2 構造概要

防護対策設備は、V-3-別添 2-2「防護対策施設の強度計算の方針」に示す構造計画を踏まえて、構造を設定する。

防護対策施設は、ディーゼル発電機室ルーフベントファン及び中央制御室換気系冷凍機へ降下火砕物が堆積することを防止する防護鋼板と、防護鋼板を支持する架構から構成される。

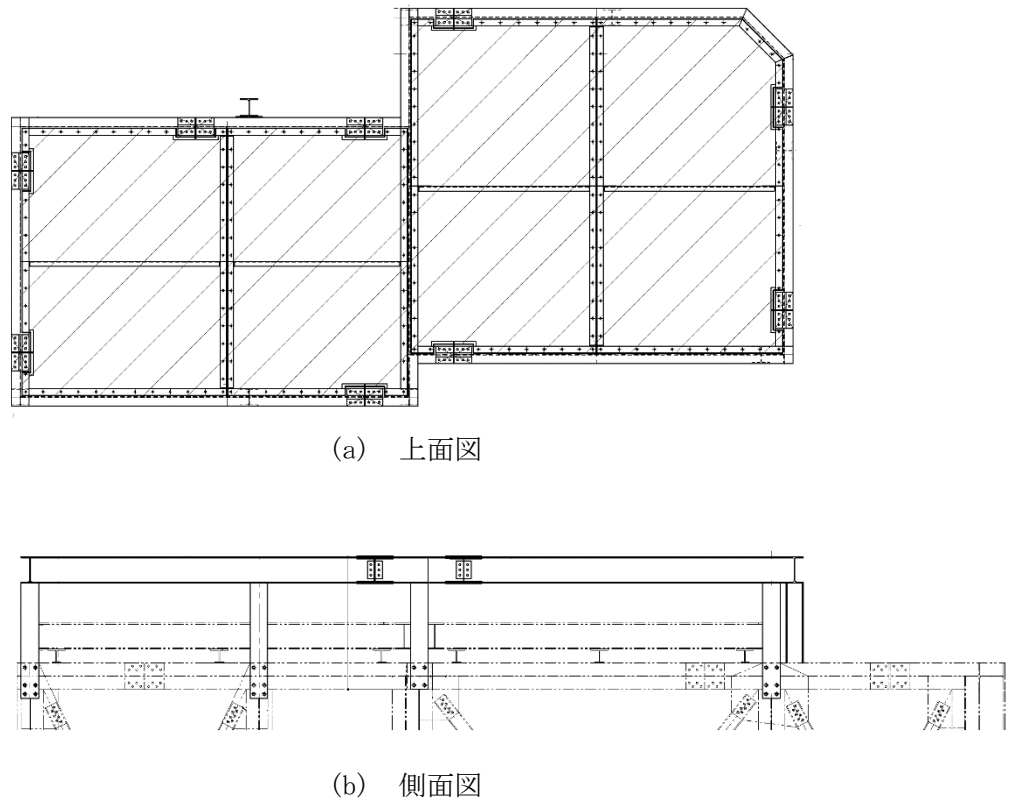


図 2-2 防護対策施設の概要図

2.3 評価方針

防護対策施設の強度評価は、V-3-別添2-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している、荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえて、防護対策施設の評価対象部位に作用する応力が、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。

防護対策施設の強度評価フローを図2-3に示す。防護対策施設の強度評価においては、その構造を踏まえ、降下火砕物等堆積による鉛直荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を選定する。

降下火砕物等堆積による鉛直荷重については、防護鋼板の水平投影面積に対し降下火砕物等の層厚より上載質量を算出し入力荷重として設定する。水平荷重については、架構に対し風荷重を算出し入力荷重として設定する。これらの荷重による強度評価においては、構成部材に対してFEMによる応力解析を用いる。

防護対策施設の許容限界は、V-3-別添2-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、J E A G 4 6 0 1の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

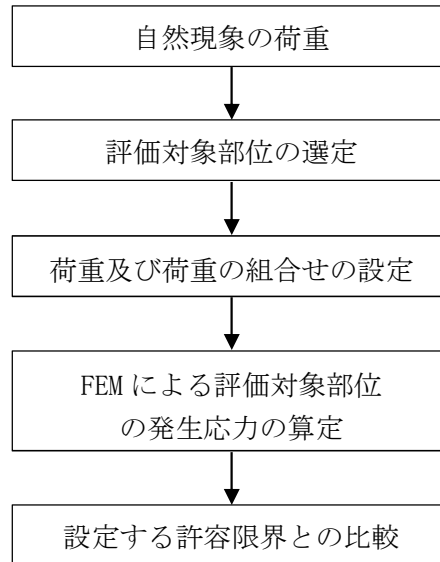


図2-3 防護対策施設の強度評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準，指針等を以下に示す。

- (1) 茨城県建築基準法等施行細則（昭和45年3月9日茨城県規則第9号）
- (2) 鋼構造設計規準－許容応力度設計法－（（社）日本建築学会，2005）
- (3) 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）
- (4) 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 ・ 捕-1984
（（社）日本電気協会）
- (5) 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）
- (6) 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）

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 防護鋼板、鋼板中間梁の強度評価に用いる記号を表 3-1 に示す。

表 3-1 防護鋼板及び鋼板中間梁の強度評価に用いる記号

記号	定義	単位
A	鋼材（架構）の断面積	mm^2
A_b	ボルトの断面積	mm^2
A_{p1}	防護鋼板（t6-1-1）の受圧面積	mm^2
A_{p2}	防護鋼板（t6-1-2）の受圧面積	mm^2
A_{p3}	防護鋼板（t6-1-3）の受圧面積	mm^2
A_{s_y}	Y軸方向のせん断断面積	mm^2
A_{s_z}	Z軸方向のせん断断面積	mm^2
F_{b_x}	ボルトに生じるX軸方向の引張力	N
F_{b_y}	ボルトに生じるY軸方向のせん断力	N
F_{b_z}	ボルトに生じるZ軸方向のせん断力	N
M_y	Y軸まわりの曲げモーメント	$\text{N} \cdot \text{mm}$
M_z	Z軸まわりの曲げモーメント	$\text{N} \cdot \text{mm}$
N_t	引張り側の軸力	N
N_c	圧縮側の軸力	N
Q_y	Y軸方向のせん断力	N
Q_z	Z軸方向のせん断力	N
t	防護鋼板の厚さ	mm
Z_y	Y軸周りのせん断力	N
Z_z	Z軸周りのせん断力	N
σ_{b_y}	Y軸方向の曲げ応力	MPa
σ_{b_z}	Z軸方向の曲げ応力	MPa
σ_c	架構に生じる圧縮応力	MPa
σ_t	架構に生じる引張り応力	MPa
σ_{t_b}	ボルトに生じる引張り応力	MPa
τ_y	Y軸方向のせん断力	MPa
τ_z	Z軸方向のせん断力	MPa
τ_b	ボルトに生じるせん断応力	MPa

(2) 架構及び基礎ボルトの強度評価に用いる記号を表 3-2 に示す。

表 3-1 防護鋼板及び鋼板中間梁の強度評価に用いる記号

記号	定義	単位
A	鋼材（架構）の断面積	mm^2
A_b	ボルトの断面積	mm^2
A_{p1}	防護鋼板（t6-1-1）の受圧面積	mm^2
A_{p2}	防護鋼板（t6-1-2）の受圧面積	mm^2
A_{p3}	防護鋼板（t6-1-3）の受圧面積	mm^2
A_{s_y}	Y 軸方向のせん断断面積	mm^2
A_{s_z}	Z 軸方向のせん断断面積	mm^2
F_{b_x}	ボルトに生じる X 軸方向の引張力	N
F_{b_y}	ボルトに生じる Y 軸方向のせん断力	N
F_{b_z}	ボルトに生じる Z 軸方向のせん断力	N
M_y	Y 軸まわりの曲げモーメント	$\text{N} \cdot \text{mm}$
M_z	Z 軸まわりの曲げモーメント	$\text{N} \cdot \text{mm}$
N_t	引張り側の軸力	N
N_c	圧縮側の軸力	N
Q_y	Y 軸方向のせん断力	N
Q_z	Z 軸方向のせん断力	N
t	防護鋼板の厚さ	mm
Z_y	Y 軸周りのせん断力	N
Z_z	Z 軸周りのせん断力	N
σ_{b_y}	Y 軸方向の曲げ応力	MPa
σ_{b_z}	Z 軸方向の曲げ応力	MPa
σ_c	架構に生じる圧縮応力	MPa
σ_t	架構に生じる引張り応力	MPa
σ_{t_b}	ボルトに生じる引張り応力	MPa
τ_y	Y 軸方向のせん断力	MPa
τ_z	Z 軸方向のせん断力	MPa
τ_b	ボルトに生じるせん断応力	MPa

3.2 評価対象部位

防護対策施設の評価対象部位は V-3-別添 2-2 「防護対策施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、防護鋼板、鋼板中間梁、架構及び基礎ボルトとする。

評価対象部位は「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及

び伝達過程を考慮して設定している。

降下火砕物等堆積による鉛直荷重は，降下火砕物が堆積する防護鋼板に作用し，防護鋼板を支持する鋼板中間梁，架構及び基礎ボルトを介して床面に伝達する。また，風荷重については，架構に作用し，架構及び基礎ボルトを介して床面に伝達する。

このことから，防護鋼板，鋼板中間梁，架構及び基礎ボルトを評価対象部位として選定している。防護対策施設の強度評価における評価対象部位を図 3-1 に示す。

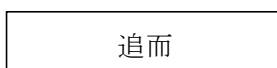


図 3-1 防護対策施設の評価対象部位

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは，V-3-別添 2-2「防護対策施設の強度評価の方針」の「3.1 荷重及び荷重の組合せ」に示している，荷重及び荷重の組合せを用いる。

(1) 荷重の設定

防護対策施設の強度評価に用いる荷重を以下に示す。

a. 常時作用する荷重 (F_d)

常時作用する荷重としては，自重及び上載荷重を考慮する。

b. 降下火砕物による荷重 (F_v)

単位面積当たりの降下火砕物による鉛直荷重は 7355 N/m^2 とする。

c. 積雪による荷重 (F_s)

単位面積当たりの積雪による鉛直荷重は 210 N/m^2 とする。

d. 風荷重 (W)

風荷重は，基準風速 30 m/s に基づき算定する。

風荷重 W は V-3-別添 2-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「4.1(3)c. 水平荷重」に示す式に従い，算出する。全高 H が 5m 以上であるため， H が Z_b を超える場合の式を用いる。

$$W = q \cdot C \cdot A$$

ここで

$$q = 0.6 \cdot E' \cdot V_D^2$$

$$E' = E_r^2 \cdot G$$

$$E_r = 1.7 \cdot (H/Z_G)^\alpha$$

e. 運転時に作用する荷重 (F_p)

運転時の状態で作用する荷重は，配管等に作用する内圧等であり，防護対策施設には作

用しないため考慮しない。

(2) 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せは、防護対策施設の評価対象部位ごとに設定する。

防護対策施設の防護鋼板及び中間梁には、自重、積雪荷重及び降下火砕物堆積による鉛直荷重が作用する。また、水平方向の風荷重が作用すると、防護鋼板に対し、鉛直上向きの荷重が働き、鉛直した下向きの荷重が低減されるため、保守的に風荷重は考慮しない。

架構及び支持脚には、自重、積雪荷重及び降下火砕物堆積による鉛直荷重並びに風荷重による荷重が作用する。

防護対策施設の評価にて考慮する荷重の組合せを表 3-2 に示す。

表 3-2 荷重の組合せ

施設分類	評価対象部位	荷重
防護対策施設	防護鋼板	①自重 ②積雪荷重 ③降下火砕物堆積による荷重
	鋼板中間梁	①自重 ②積雪荷重 ③降下火砕物堆積による荷重
	架構	①自重 ②積雪荷重 ③降下火砕物堆積による荷重 ④風荷重
	基礎ボルト	①自重 ②積雪荷重 ③降下火砕物堆積による荷重 ④風荷重

3.4 許容限界

防護対策施設は、V-3-別添 2-2 「防護対策施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界に従って、「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、許容応力状態Ⅲ_ASの許容応力を用いる。

防護対策施設の許容限界値は、J E A G 4 6 0 1を準用し、支持構造物の許容限界を適用する。設計荷重に対して、当該施設に要求される安全機能を維持できるようにおおむね弾性状態に留まる設計とするため、J E A G 4 6 0 1に基づき許容応力状態Ⅲ_ASから算出した以下の許容応力を許容限界値とする。

防護対策施設の許容限界について、表 3-3 に示す。

表 3-3 防護対策施設の許容限界

許容応力 状態	温度条件 (°C)	許容限界			
		圧縮	曲げ	引張	せん断
III _A S	40*	1.5 f _c	1.5 f _b	1.5 f _t	1.5 f _s

注記 * : 周囲環境温度

引張力とせん断力を同時に受ける基礎ボルトの許容引張り応力 f_{ts} に対する評価を行う。
ここで、

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

$$f_{ts} < 1.5 f_t$$

許容引張応力 f_{ts} は上記 2 式の小なる値をとるものとする。

3.5 評価方法

FEM解析による評価を行う。FEM解析に使用するコードは「MSC NASTRAN Ver. 2012.2.0」(以下「NASTRAN」という。)である。なお、解析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、付録「計算機プログラム(解析コード)の概要」に示す。

(1) 荷重条件

荷重条件を表 3-6 に示す。

水平方向の風荷重が作用した場合、防護鋼板に対し鉛直上向きの荷重が働き下向き荷重は低減されるため、保守的に水平方向の風荷重による上向き荷重は考慮しない。自重、積雪荷重及び降下火砕物堆積による鉛直荷重を入力荷重として設定する。

表 3-6 防護対策施設の荷重条件

荷重条件	入力荷重 (MPa)
積雪荷重	0.21×10^{-3}
降下火砕物による堆積荷重	7.36×10^{-3}

(2) 計算モデル及び諸元

防護鋼板は、支持梁上を覆うように取付けられるため、周辺支持条件を 4 辺固定とした長方形平板をシェル要素でモデル化して評価を行う。中間梁、架構は、はり要素でモデル化して評価を行う。

防護対策施設の FEM解析に用いるモデル図を図 3-2 に、諸元を表 3-7 に示す。

追而

図 3-2 FEM解析に用いるモデル図

表 3-7 諸元

部材	材料	最高使用温度 (°C)	縦弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 ν (-)
防護鋼板	追而			
中間架構				
架構				

4. 評価条件

強度評価に使用する入力条件を表 4-1, 表 4-2, 表 4-3 に示す。

表 4-1 入力条件 (防護鋼板)

追而				

表 4-2 入力条件 (中間梁)

追而				

表 4-3 入力条件 (架構)

追而				

5. 強度評価結果

強度評価結果を表 5-1, 表 5-2, 表 5-3 に示す。

表 5-1 評価結果 (防護鋼板)

モデル	最大発生応力 (N/mm ²)	許容応力 (N/mm ²)	検定値
t 6-1-1	追而		
t6-1-2			
t6-1-3			

表 5-2 評価結果 (中間梁)

モデル	応力	発生応力 (N/mm ²)	許容応力 (N/mm ²)	検定値
t 6-1-1	せん断	追而		
	曲げ			
	合成			
t6-1-2	せん断			
	曲げ			
	合成			
t6-1-3	せん断			
	曲げ			
	合成			

表 5-3 評価結果（架構）

対象設備	応力	発生応力 (N/mm ²)	許容応力 (N/mm ²)	検定値
2D D/G ルーフベントフ アン	圧縮+曲げ	追而		
	引張り+曲げ			
	曲げ+せん断			
HPCS ルーフベントフ アン	圧縮+曲げ			
	引張り+曲げ			
	曲げ+せん断			
2D D/G ルーフベントフ アン	圧縮+曲げ			
	引張り+曲げ			
	曲げ+せん断			
中央制御室 換気系冷凍機	圧縮+曲げ			
	引張り+曲げ			
	曲げ+せん断			

表 5-4 評価結果（基礎ボルト）

対象設備	応力	発生応力 (N/mm ²)	許容応力 (N/mm ²)	検定値
2D D/G ルーフベントフ アン	引張	追而		
	せん断			
	組合せ			
HPCS ルーフベントフ アン	引張			
	せん断			
	組合せ			
2D D/G ルーフベントフ アン	引張			
	せん断			
	組合せ			
中央制御室 換気系冷凍機	引張			
	せん断			
	組合せ			