

東海第二発電所
外部からの衝撃による損傷の防止(火山)
(審査会合における指摘事項への回答)

平成29年9月14日
日本原子力発電株式会社

本資料のうち、の内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません。

(1) 指摘事項

平成12年建設省告示第2464号（JIS適合品については、材料強度を1.1倍以下の数値をとることが可能である）は、積雪荷重に対する評価に適用可能なこと及び適用事例があれば示すこと。また、指針類に同様の扱いがあるか確認すること。

(2) 回答

降下火砕物の堆積荷重に対するタービン建屋の評価に、材料強度（以下 F値という。）×1.1を適用することが可能であると判断した。判断理由を①及び②に、その詳細を次頁以降に示す。

F値×1.1を適用可能な理由

- ① 降下火砕物の堆積荷重と同種の荷重である極めて稀な積雪荷重に対して、F値×1.1を適用可能なことが、建築基準法等に定められている。
- ② タービン建屋は、内包する安全施設に波及的影響を及ぼさない観点から、天井や壁の構造体又はその一部が崩壊しなければよいが、短期許容応力度にF値×1.1を適用するタービン建屋の評価は、終局強度に対して保守性が確保されている。

① 降下火砕物の堆積荷重と極めて稀な積雪荷重について

- ・積雪荷重は、鉛直方向の短期荷重として各応力度を超えないことを建築基準法にて要求されている。
- ・降下火砕物の堆積荷重は、鉛直方向の短期荷重※¹として各強度を超えないことを確認する。
なお、降下火砕物の荷重条件は表1のとおり。
- ・降下火砕物及び積雪は共に、敷地に一様に数日間、堆積される荷重である。
- ・発電所に50cmの堆積をもたらすような火山事象も極めて稀な事象である。

※¹ 除灰作業を行うことにより、短期荷重として取り扱う。

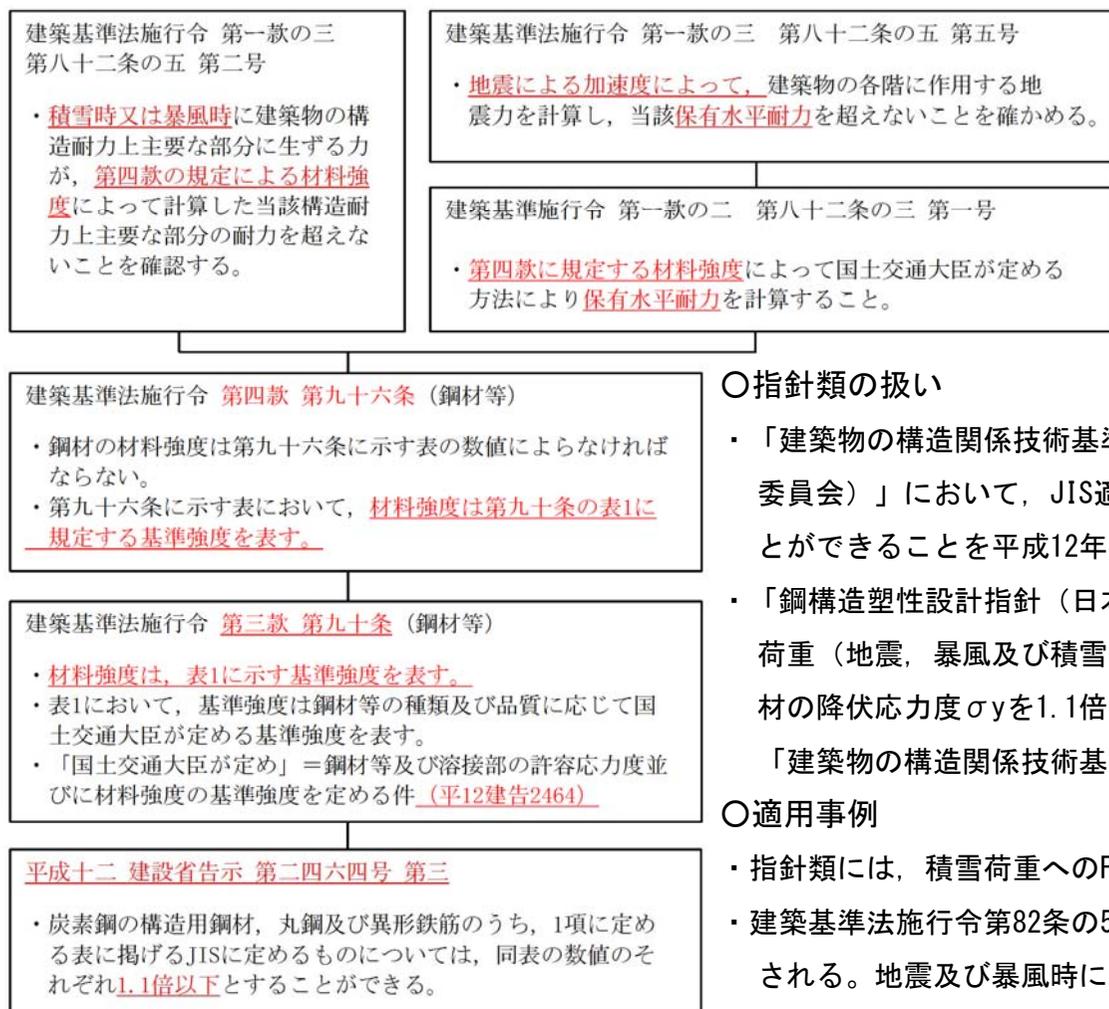
以上から、降下火砕物の堆積荷重と極めて稀な積雪荷重は、同種の荷重であると判断した。建築基準法等において、降下火砕物の堆積荷重は考慮されないため、建築基準法施行令や指針類における積雪荷重に対するF値×1.1の扱いを次頁で示す。

表1 降下火砕物の荷重条件

項目	設定条件
堆積厚さ	50cm
密度	1.5g/cm ³ (湿潤状態)

○建築基準法施行令及び指針類におけるF値×1.1の適用について

- ・極めて稀な積雪時の評価において記載されている建築基準法施行令第82条の5第2号から、平成12年建設省告示第2464号第3が導かれることから、極めて稀な積雪荷重に対してF値×1.1を適用可能と判断した。



② タービン建屋の終局強度に対して算定する強度 (F値×1.1を適用した場合) の保守性

タービン建屋の評価において、短期許容応力度にF値×1.1を適用し算定した強度が、座屈耐力に対して、一定の保守性が確保されていることを、タービン建屋において最も検定値が厳しくなる鉄骨部材の各圧縮強度 (許容応力度～終局強度) レベルを比較して、図1に示す。

A: 鋼構造設計規準に記載される設計式から算定した強度 ⇒ 短期許容応力度に対する評価で使用

B: 鋼構造設計規準に記載される設計式にF値×1.1を適用し算定した強度

⇒ タービン建屋の終局強度に対する評価で使用

C: 座屈耐力 (修正若林モデル※) ⇒ 終局強度

※: 日本建築学会大会学術講演梗概集「原子力発電所建屋の鉄骨架構の復元力特性に関する研究」

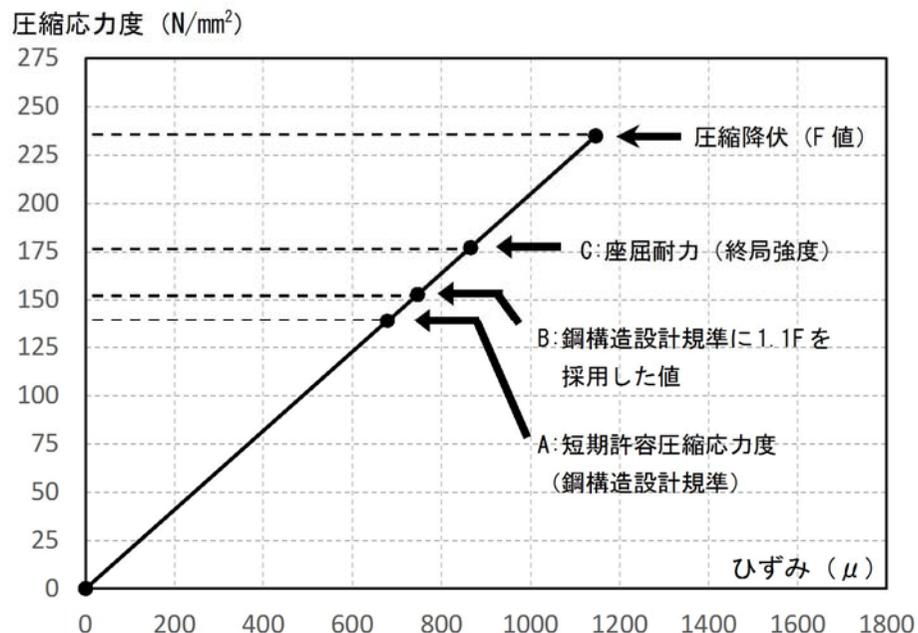


図1 F値×1.1を適用し算定した強度と座屈耐力の比較

・各圧縮強度の算出方法

図1に示した各圧縮強度の算出方法を以下に示す。

A : 鋼構造設計規準から求めた短期許容圧縮応力度

以下の式※1を用いて算出

$$f_c = \frac{\left\{1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2\right\} \times F}{\nu} \quad (\lambda \leq \Lambda \text{ のとき}) \quad \nu = \frac{3}{2} + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2$$

f_c : 許容圧縮応力度 λ : 圧縮材の細長比
 Λ : 限界細長比 ν : 安全率

※1 : 短期許容応力度は、 f_c を1.5倍した強度

B : 鋼構造設計規準にF値×1.1倍を適用して求めた圧縮強度

⇒タービン建屋の終局強度に対する評価で使用・・・上記 Aの 式※2に対して、**F値のみを1.1倍**する。

$$f_c' = \frac{\left\{1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2\right\} \times 1.1F}{\nu} \quad (\lambda \leq \Lambda \text{ のとき}) \quad \nu = \frac{3}{2} + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2$$

f_c' : 圧縮強度 λ : 圧縮材の細長比
 Λ : 限界細長比 ν : 安全率

※2 : タービン建屋の終局強度に対する評価で算定する圧縮強度は、 f_c' を1.5倍する。

C : 座屈耐力として求めた圧縮強度

初期座屈耐力を求める式において、Aで使用した式※において、分母に記載されている **$\nu=1$** とした式と同様。

$$n_0 = 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2 \quad (\lambda \leq \Lambda \text{ のとき}) \quad n_0 : \text{無次元化初期座屈耐力}$$

(1) 指摘事項

許容堆積荷重の算定は実質的に応力評価なので評価内容を説明すること。また、設置許可、工事計画認可それぞれのフェーズで示す内容について整理して示すこと。

(2) 回答

【設置許可、工事計画認可それぞれのフェーズで示す内容について】

- ・設置許可においては、鉛直荷重が伝達される屋根部の主体構造となる主トラスを選定し、原子炉建屋とタービン建屋を代表として評価概要と成立性を示す。
- ・工事計画認可においては、原子炉建屋及びタービン建屋に加え、使用済燃料乾式貯蔵建屋について、主トラス、屋根スラブ及び二次部材の構造性能を確認し、各建屋に求められる機能設計上の性能目標を確保していることを計算書として示す。なお、タービン建屋については、荷重増分解析を実施し、屋根部が崩壊しないことを確認する。

【応力評価の評価内容について】

評価対象施設である原子炉建屋、タービン建屋、使用済燃料乾式貯蔵建屋を図2に示す建屋健全性評価の考え方に従い評価を行う。これらの建屋のうち、原子炉建屋とタービン建屋を代表として、評価内容及び評価結果を示す。各々を代表建屋として選定した理由を以下に示す。

- ・原子炉建屋 ⇒ 自身が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）の機能を有し、短期許容応力度に対して耐力を評価する建屋
- ・タービン建屋 ⇒ 自身がクラス1、2施設に該当しない建屋のうち、構造的にもスパンが長く、終局強度に対して耐力を評価する建屋

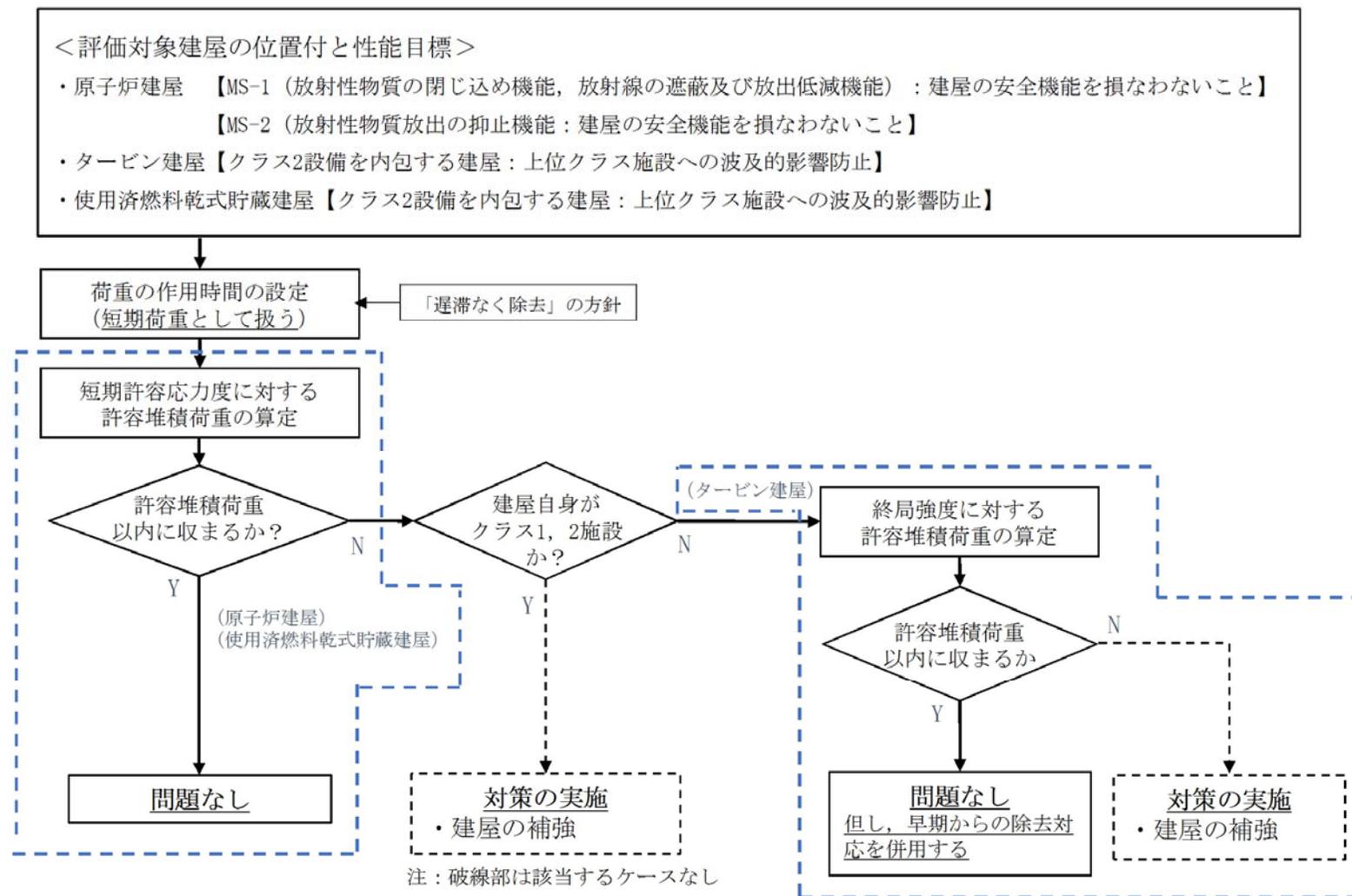


図2 建屋健全性評価の考え方

2. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.492-2) (3/13)



①評価方針及び評価対象部位

- ・ 降下火砕物に対する評価は、降下火砕物の堆積荷重と堆積荷重以外の荷重の組合せの結果、発生する応力が「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—」を参考に設定した許容限界を超えないことを確認する。
- ・ 評価対象部位は、主要な部材のうち、本構造物では、梁間方向に主トラスが配されており、これが主体構造として降下火砕物等の鉛直荷重に対して抵抗しているため、主トラス（上下弦材，斜材，束材）を選定した。

②荷重及び荷重の組合せ

- ・ 固定荷重（DL）・・・屋根トラスに作用する固定荷重を表2に示す。

表2 固定荷重（屋根トラス）

建屋	固定荷重
原子炉建屋	5,364N/m ²
タービン建屋	4,669N/m ²

- ・ 積雪荷重（SNL）・・・屋根トラスに作用する積雪荷重を表3に示す。

表3 積雪荷重（SNL）

建屋	積雪荷重
原子炉建屋	210N/m ²
タービン建屋	

2. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.492-2) (4/13)



- ・ 降下火砕物堆積荷重 (VAL) . . . 屋根トラスに作用する降下火砕物堆積荷重を表4に示す。

表4 降下火砕物の堆積荷重 (VAL)

建屋	降下火砕物の堆積荷重
原子炉建屋	7,355N/m ²
タービン建屋	

- ・ 荷重の組合せ . . . 荷重の組合せを表5に示す。

表5 荷重の組合せ

建屋	組合せ
原子炉建屋	DL + SNL + VAL
タービン建屋	

③許容限界

- ・ 応力解析による評価における原子炉建屋及びタービン建屋の許容限界を表6に示す。また、鋼材の基準強度及び評価基準値を表7に示す。

表6 応力解析評価における許容限界

建屋	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
原子炉建屋	原子炉建屋の安全機能を損なわないこと	主トラス	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	「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—」における短期許容応力度
タービン建屋	タービン建屋が内包するクラス2設備に波及的影響を及ぼさないこと			終局強度※

※：平成12年建設省告示第2464号に基づきF値の1.1倍 10

表7 鋼材の基準強度及び評価基準値

建屋	鋼材種類	板厚 (mm)	基準強度F (N/mm ²)	評価基準値 (N/mm ²)	
				引張	圧縮及び曲げ
原子炉建屋	SS400 (SS41)	t ≤ 40	235	235	235
タービン建屋				258	258

④モデル化の基本方針

○基本方針

- ・主なトラス弦材は、軸・曲げ・せん断剛性のある梁要素、斜材と束材は軸剛性のみ考慮されたトラス要素とする。
- ・各部材長さは部材芯位置でモデル化する。
- ・原子炉建屋はオペレーティングフロアより上部構造を3次元の立体構造でモデル化する。解析には、解析コード「DYNA2E Ver.8.0」を用いる。解析モデルを図3に、屋根トラスの部材リストを表8に示す。
- ・タービン建屋はオペレーティングフロアより上部構造のうち、最も応力が厳しくなる中央部の1構面を取り出した2次元モデルとする。解析には、解析コード「FAP3 Ver.5.0」を用いる。解析モデルを図3に、屋根トラスの部材リストを表9に示す。

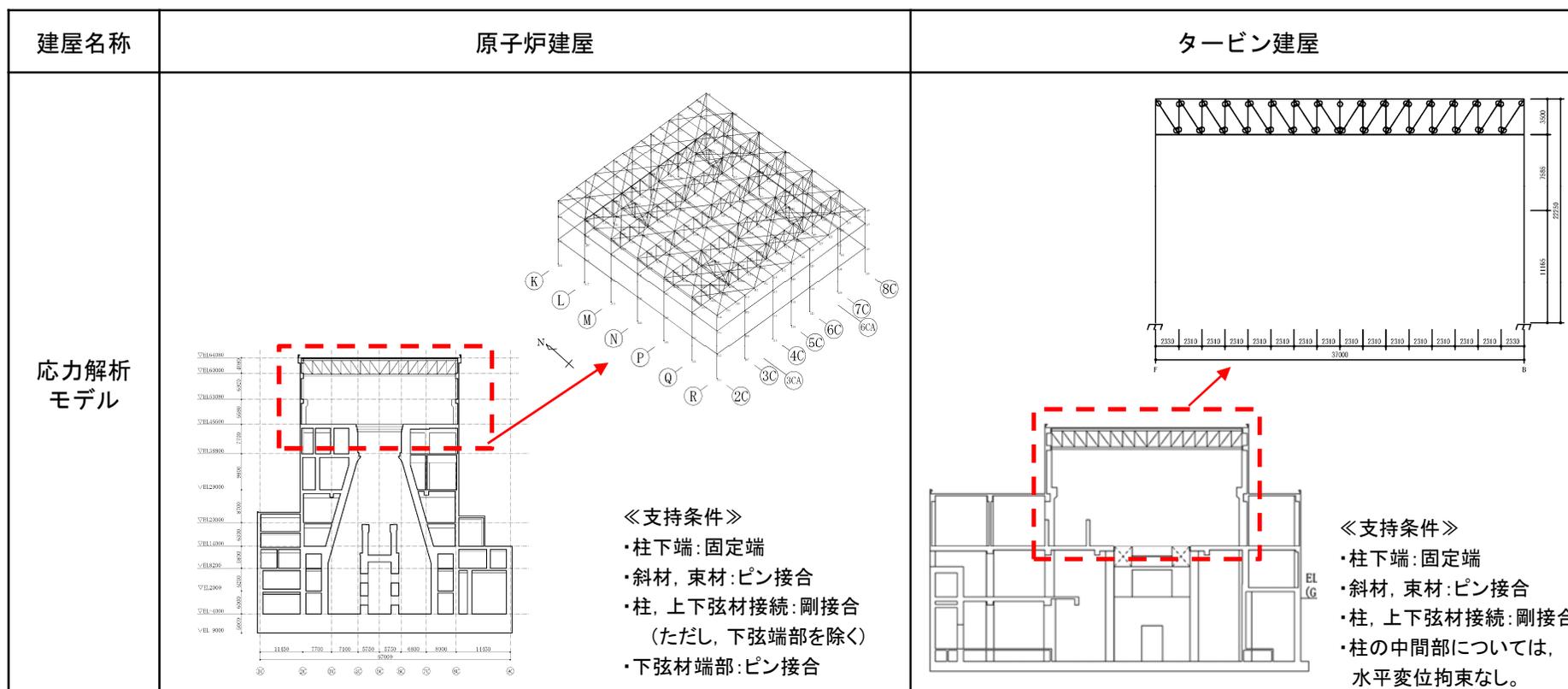


図3 解析モデル (屋根トラス)

2. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.492-2) (7/13)



表8 部材リスト (原子炉建屋)

部位	部材符号	形状寸法	材質
上弦材	TU ₁ ~TU ₁₆	H-400×400×13×21	SS400 (SS41)
下弦材	TL ₁ ~TL ₁₆	H-400×400×13×21	
斜材	O ₁ , O ₂ , O ₁₅ , O ₁₆	2Ls-200×200×15	
	O ₃ , O ₄ , O ₁₃ , O ₁₄	2Ls-150×150×15	
	O ₅ ~O ₁₂	2Ls-150×100×12	
束材	V ₁ , V ₂ , V ₁₄ , V ₁₅	2Ls-200×200×15	
	V ₃ , V ₁₃	2Ls-150×150×15	
	V ₄ , V ₁₂	2Ls-150×150×15	
	V ₅ ~V ₇ , V ₉ ~V ₁₁	2Ls-150×100×12	
	V ₈	2Ls-150×100×12	

表9 部材リスト (タービン建屋)

部位	部材符号	形状寸法	材質
上弦材	U ₁ ~U ₁₆	H-428×407×20×35	SS400 (SS41)
下弦材	L ₁ ~L ₁₆	H-428×407×20×35	
斜材	D ₁ ~D ₃ , D ₁₄ ~D ₁₆	2Ls-200×200×20	
	D ₄ , D ₅ , D ₁₂ , D ₁₃	2Ls-150×150×19	
	D ₆ , D ₁₁	2Ls-130×130×12	
	D ₇ , D ₈ , D ₉ , D ₁₀	2Ls-100×100×10	
束材	V ₁ , V ₂ , V ₁₄ , V ₁₅	2Ls-200×200×20	
	V ₃ , V ₄ , V ₁₂ , V ₁₃	2Ls-200×200×15	
	V ₅ , V ₆ , V ₁₀ , V ₁₁	2Ls-150×150×15	
	V ₇ ~V ₉	2Ls-130×130×9	

○解析諸元

- ・使用材料の物性値を表10に示す

表10 使用材料の物性値

項目	物性値
単位体積重量	77.0kN/m ³
ヤング係数	205.0kN/mm ²
せん断弾性係数	79.0kN/mm ²

⑤評価方法

「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—」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応力度を超えないことを確認する。

・軸力のみを負担する部材の評価方法

軸力のみを負担するトラス要素（斜材，束材等）に発生する軸応力度 σ_c 、 σ_t が、以下の式により応力度比が1以下となることを確認する。

$$\max\left(\frac{\sigma_c}{f_c}, \frac{\sigma_t}{f_t}\right) \leq 1$$

f_c 、 f_t は以下の式により求める。タービン建屋においてはF値×1.1とする。

また、以下の式は長期許容応力度の算出式であり、短期許容応力度は長期許容応力度の1.5倍とする

$$f_t = \frac{F}{1.5}$$

$$f_c = \frac{\left\{1 - 0.4\left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2\right\}F}{\nu} \quad (\lambda \leq \Lambda \text{ のとき})$$

$$f_c = \frac{0.277F}{\left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2} \quad (\lambda > \Lambda \text{ のとき})$$

f_c : 許容圧縮応力度 (N/mm²)

f_t : 許容引張応力度 (N/mm²)

λ : 圧縮材の細長比

Λ : 限界細長比 $\Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6F}}$

E : ヤング係数

$$\nu = \frac{3}{2} + \frac{2}{3}\left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2$$

2. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.492-2) (9/13)



・軸力と曲げを負担する部材の評価方法

軸力と曲げを負担する梁要素（上・下弦材等）は、軸力により生じる軸応力度 σ_c 、 σ_t と曲げモーメントにより生じる曲げ応力度 σ_b の組合せに対して、以下の式により応力度比が1以下となることを確認する。

【圧縮と曲げにより生じる応力度の確認】

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1$$

【引張りと曲げにより生じる応力度の確認】

$$\frac{\sigma_t + \sigma_b}{f_t} \leq 1$$

f_c 、 f_t は軸力を負担する場合と同じ。 f_b は以下の式により求める。タービン建屋においてはF値の1.1倍とする。

また、以下の式は長期許容応力度の算出式であり、短期許容応力度は長期許容応力度の1.5倍とする

$$f_b = \frac{F}{\nu} \quad (\lambda_b \leq_p \lambda_b)$$

$$f_b = \frac{\left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda_b -_p \lambda_b}{_e \lambda_b -_p \lambda_b} \right) \right\}}{\nu} F \quad (_p \lambda_b < \lambda_b \leq_e \lambda_b)$$

$$f_b = \frac{1}{2.17 \lambda_b^2} F \quad (_e \lambda_b < \lambda_b)$$

ここに、

$$\lambda_b = \sqrt{\frac{M_y}{M_e}} \quad _e \lambda_b = \frac{1}{\sqrt{0.6}} \quad _p \lambda_b = 0.6 + 0.3 \left(\frac{M_2}{M_1} \right) \quad \nu = \frac{3}{2} + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda_b}{_e \lambda_b} \right)^2$$

$$C = 1.75 + 1.05 \left(\frac{M_2}{M_1} \right) + 0.3 \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^2 \leq 2.3 \quad M_e = C \sqrt{\frac{\pi^4 EI_Y \cdot EI_w}{l_b^4} + \frac{\pi^2 EI_Y \cdot GJ}{l_b^2}}$$

f_b : 許容曲げ応力度

l_b : 圧縮フランジの支点間距離

$_p \lambda_b$: 塑性限界細長比

M_e : 弾性横座屈モーメント

I_Y : 弱軸まわりの断面2次モーメント

I_w : 曲げねじり定数

J : サンプナンのねじり定数

λ_b : 曲げ部材の細長比

$_e \lambda_b$: 弾性限界細長比

C : 許容曲げ応力度の補正係数

Z : 断面係数

G : せん断弾性係数

M_y : 降伏モーメント ($F \cdot Z$)

2. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.492-2) (10/13)



⑥ 応力解析による評価結果

- ・断面の評価結果は、検定値が最大となる要素を選定し、原子炉建屋の評価結果を表11に、評価位置を図3に示す。また、タービン建屋の評価結果を表12に、評価位置を図4に示す。
- ・降下火砕物の堆積時において、発生応力度が許容値を超えないことを確認した。

表11 評価結果 (原子炉建屋)

部材	発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容値 (N/mm ²)	検定値	位置
上弦材 (H-400×400×13×21)	(圧縮)	105	234	0.62	P通り TU8, TU9
	(曲げ)	38	232		
	(引張)	35	235	0.56	L通り TU1, TU16
	(曲げ)	96	233		
下弦材 (H-400×400×13×21)	(圧縮)	73	226	0.46	Q通り TL1
	(曲げ)	32	233		
	(引張)	147	235	0.81	P通り TL8, TL9
	(曲げ)	42	178		
斜材 (2Ls-150×150×15)	(引張)	192	235	0.82	Q通り O14
束材 (2Ls-150×150×15)	(圧縮)	141	144	0.98	P通り V13

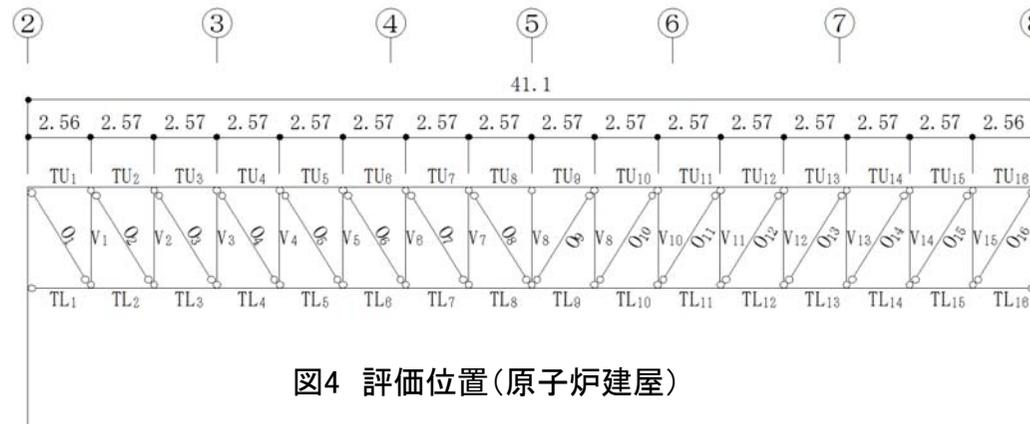


図4 評価位置 (原子炉建屋)

2. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.492-2)(11/13)



表12 評価結果 (タービン建屋)

部材	発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容値 (N/mm ²)	検定値	位置
上弦材 (H-428×407×20×35)	(圧縮)	167	250	0.89	U8, U9
	(曲げ)	56	258		
	(引張)	0	258	0.50	U1, U16
	(曲げ)	127	258		
下弦材 (H-428×407×20×35)	(圧縮)	52	153	0.97	L1, L16
	(曲げ)	151	241		
	(引張)	149	258	0.84	L8, L9
	(曲げ)	66	219		
斜材 (2Ls-200×200×20)	(引張)	188	258	0.73	D2, D15
束材 (2Ls-200×200×15)	(圧縮)	172	212	0.82	V3, V13

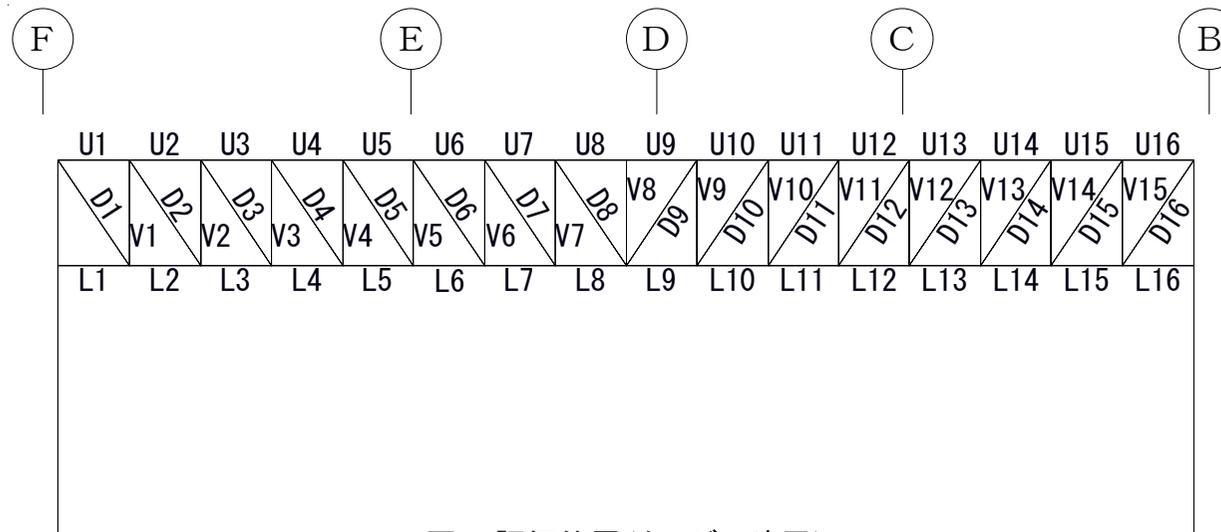


図5 評価位置 (タービン建屋)

2. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.492-2) (12/13)



○原子炉建屋 屋根トラスの応力評価(除灰時の人員荷重を考慮)

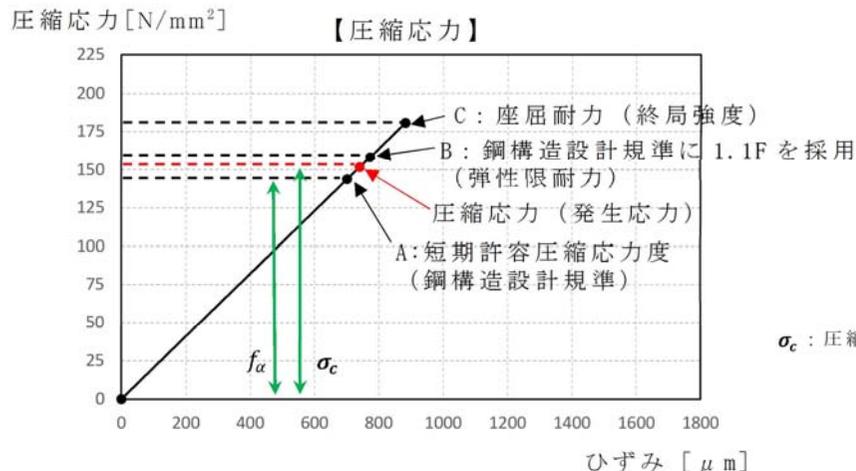
- 除灰作業時, 降下火砕物による荷重に加え, 原子炉建屋 屋根トラスに除灰人員の荷重を保守的に負荷した場合においても, 原子炉建屋の安全機能に影響がないことを評価する。

【評価条件】

・降下火砕物堆積: 50cm(7, 355N/m²) ・積雪: 10. 5cm(210N/m²) ・除灰人員荷重※: 1000N/m²

※: 除灰人員荷重は, 「建築構造設計基準の資料」(国土交通省)における「屋上(通常人が使用しない場合)」の積載荷重の600N/m²に余裕を考慮し1000N/m²に設定。

- 原子炉建屋に求められる安全機能は, 「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(MS-1)」及び「燃料集合体落下時放射能放出を低減する機能(MS-2)」及び波及的影響であり, **安全機能に影響を及ぼす損傷が発生する恐れがないことを確認する。**
- 評価結果: 最も検定値が厳しくなる部材強度は, 短期許容応力度をベースとした検定比を5%程度上回るが, F値の1.1倍を用いた弾性限耐力に対して, 全ての検定比は1.0以下で, 本部材の検定比は4%程度の余裕を有している。
以上のことから, 短期許容圧縮応力度を若干上回る結果となったが, 屋根トラスとして弾性限耐力の範囲にあることから, **安全機能である「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「燃料集合体落下時放射能放出を低減する機能」及び波及的影響に影響を与えることはない。**



$$\ll \text{検定式} \gg$$

$$\frac{\sigma_c}{f_a} \leq 1.0$$

表13 評価結果 (原子炉建屋屋根トラス)

部材強度レベル	検定比
終局強度をベースとした検定値	0.840
弾性限耐力をベースとした検定値	0.959
短期許容応力度をベースとした検定値 (本評価)	1.055

図6 圧縮応力と座屈耐力の比較

2. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.492-2) (13/13)



○タービン建屋屋根トラスの応力評価(除灰時の人員荷重を考慮)

➤除灰作業時、降下火砕物による荷重に加え、タービン建屋 屋根トラスに除灰人員の荷重を保守的に負荷した場合においても、タービン建屋の安全機能に影響がないことを評価する。

【評価条件】

・降下火砕物堆積: 50cm(7, 355N/m²) ・積雪: 10. 5cm(210N/m²) ・除灰人員荷重※: 1000N/m²

※: 除灰人員荷重は、「建築構造設計基準の資料」(国土交通省)における「屋上(通常人が使用しない場合)」の積載荷重の600N/m²に余裕を考慮し1000N/m²に設定。

➤タービン建屋に求められる安全機能は安全施設への波及的影響の防止であり、安全施設に影響を及ぼさないことを確認する。

➤評価結果：最も検定値が厳しくなるトラス下弦部材の強度は、F値の1.1倍を用いた弾性限耐力をベースの検定比を3%程度上回る結果となったが、主トラス構造全体において、本部材以外は検定比1.0以下であり、本部材に配置された斜材検定比は0.78程度であるため、斜材の降伏には至らない。また、終局強度に対して本部材の検定比は1.0以下であり、6%程度の余裕を有していた。

以上のことから、弾性限耐力を若干上回る結果となるものの、**構造物としての終局強度には至らず、安全施設に影響を及ぼすことはない。**

≪検定式(曲げ・圧縮)≫

$$\frac{\sigma_c}{f_\alpha} + \frac{\sigma_b}{f_\beta} \leq 1$$

σ_c : 圧縮応力 σ_b : 曲げ応力
 f_α : 各圧縮強度 f_β : 各曲げ強度

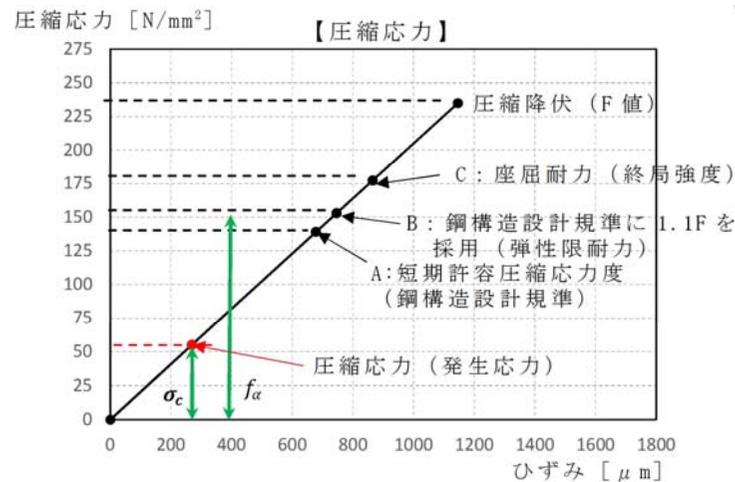


図7 圧縮応力と座屈耐力の比較

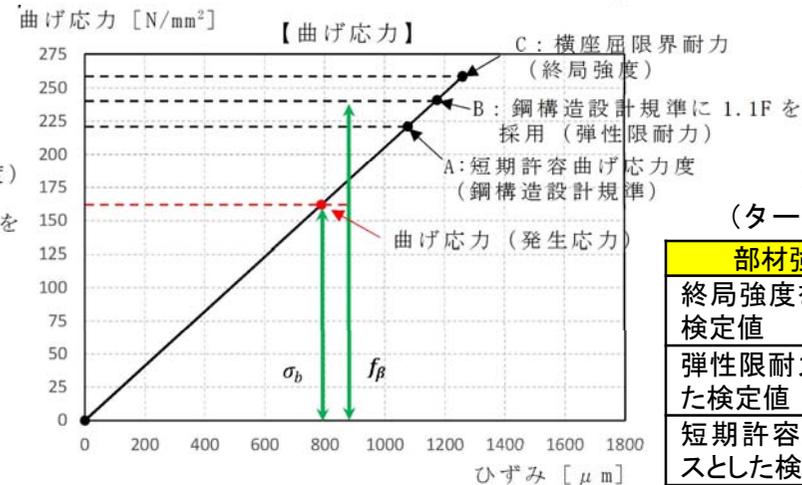


図8 曲げ応力と限界耐力の比較

表14 評価結果
(タービン建屋屋根トラス)

部材強度レベル	検定比
終局強度をベースとした検定値	0.937
弾性限耐力をベースとした検定値(本評価)	1.032
短期許容応力度をベースとした検定値	1.129