

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11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. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.492-1)(1/4)



(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

平成12年建設省告示第2464号は、次頁に示すとおり積雪荷重に対する評価に適用可能であることを確認した。また、降下火砕物の堆積荷重は、積雪荷重と同様に鉛直方向に対して評価する荷重であり、降下火砕物の堆積荷重に対する評価においても、F値の1.1倍を適用可能であると判断した。

なお、F値の1.1倍を適用した場合の保守性については、本資料の4ページで示す。

○降下火砕物の堆積荷重と積雪荷重について

- ・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※として各応力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。

※ 降灰作業を行うことにより、短期荷重として取り扱う。

- ・降下火砕物及び積雪は共に、敷地に一様に堆積される荷重である。

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）

1. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.492-1)(2/4)



○積雪荷重へのF値の1.1倍適用について

- ・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2464号第3が導かれることから、積雪荷重に対して材料強度の1.1倍を適用可能と判断した。

建築基準法施行令 第一款の三 第八十二条の五 第二号

- ・積雪時又は暴風時に建築物の構造耐力上主要な部分に生ずる力が、第四款の規定による材料強度によって計算した当該構造耐力上主要な部分の耐力を超えないことを確認する。

建築基準法施行令 第一款の三 第八十二条の五 第五号

- ・地震による加速度によって、建築物の各階に作用する地震力を計算し、当該保有水平耐力を超えないことを確かめる。

建築基準法施行令 第一款の二 第八十二条の三 第一号

- ・第四款に規定する材料強度によって国土交通大臣が定める方法により保有水平耐力を計算すること。

○指針類の扱い

- ・「建築物の構造関係技術基準解説書（建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会）」において、JIS適合品は、材料強度の数値を1.1倍以下の数値をとることができることを平成12年建設省告示2464号の解説として記載している。

建築基準法施行令 第四款 第九十六条（鋼材等）

- ・鋼材の材料強度は第九十六条に示す表の数値によらなければならない。
- ・第九十六条に示す表において、材料強度は第九十条の表1に規定する基準強度を表す。

建築基準法施行令 第三款 第九十条（鋼材等）

- ・材料強度は、表1に示す基準強度を表す。
- ・表1において、基準強度は鋼材等の種類及び品質に応じて国土交通大臣が定める基準強度を表す。
- ・「国土交通大臣が定め」＝鋼材等及び溶接部の許容応力度並びに材料強度の基準強度を定める件 (平12建告2464)

平成十二 建設省告示 第二四六四号 第三

- ・炭素鋼の構造用鋼材、丸鋼及び異形鉄筋のうち、1項に定める表に掲げるJISに定めるものについては、同表の数値のそれぞれ1.1倍以下とすることができる。

- ・「鋼構造塑性設計指針（日本建築学会）」において、構造設計に用いる終局荷重（地震、暴風及び積雪の終局荷重の組合せ）に対して、主要な構造用鋼材の降伏応力度 σ_y を1.1倍することができる」と記載があり、参考文献として「建築物の構造関係技術基準解説書」を挙げている。

○適用事例

- ・指針類には、積雪荷重へのF値の1.1倍を使用した事例は確認できなかった。
- ・建築基準法施行令第82条の5は極めて稀である地震、積雪時又は暴風時に適用される。地震及び暴風時に該当する事例として、既許可プラントの耐震評価及び竜巻影響評価において、材料強度の1.1倍を適用していることを確認している。

1. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.492-1) (3/4)



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

タービン建屋の屋根トラスの部材終局強度に対する評価において、F値の1.1倍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、以下のとおり確認した。

・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）レベルの一例を図1に示す。

A：鋼構造設計基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：鋼構造設計基準に記載される設計式にF値の1.1倍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（終局強度）：修正若林モデル※

※：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」

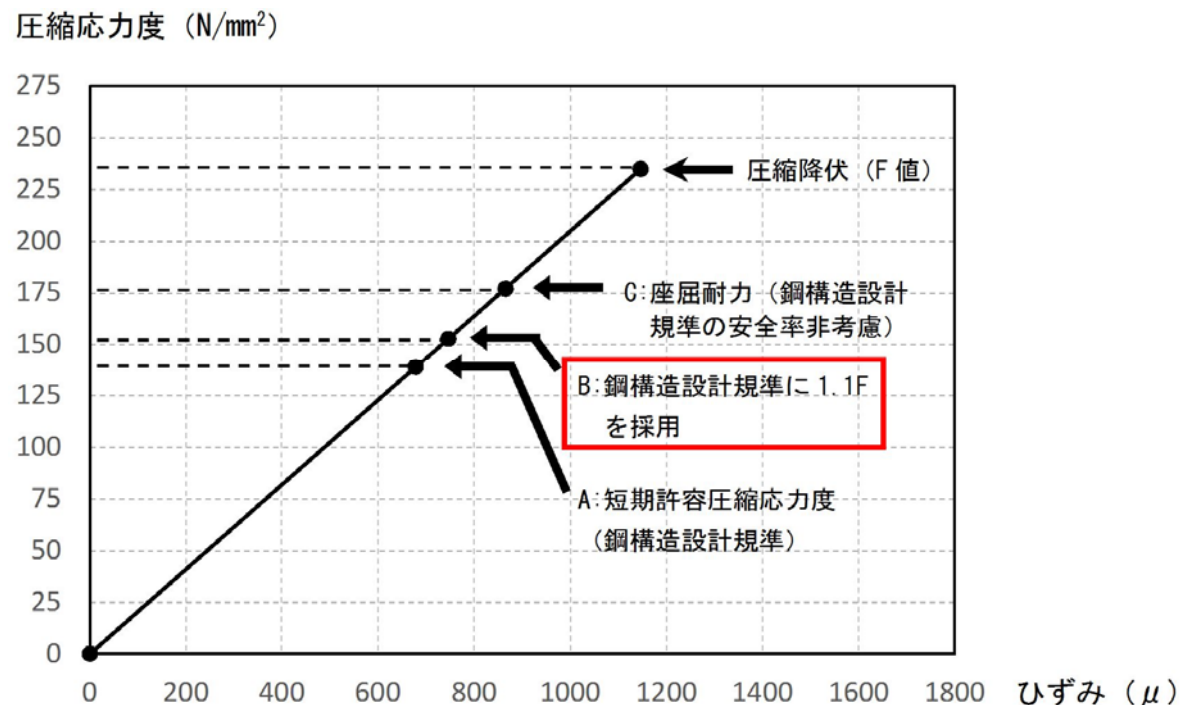


図1 F 値の1.1倍を適用し算定した強度と座屈耐力の比較

1. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.492-1)(4/4)



・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※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 : 圧縮応力度 λ : 圧縮材の細長比
 Λ : 限界細長比 ν : 安全率

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

Aで使用した式※に対して、**F値を1.1倍**するのみ。

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

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

C：座屈耐力として求めた圧縮応力度

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。

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

n_0 : 無次元初期座屈耐力

※：短期許容応力度は、 f_c を1.5倍し、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も f_c' を1.5倍する。 5

(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、原子炉建屋とタービン建屋に加え、使用済燃料乾式貯蔵建屋も含めた主トラス部の評価を計算書として示す。

【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、原子炉耐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）の機能を有し、短期許容応力度に対して耐力を確認する建屋
- ・タービン建屋 ⇒ 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確認する建屋

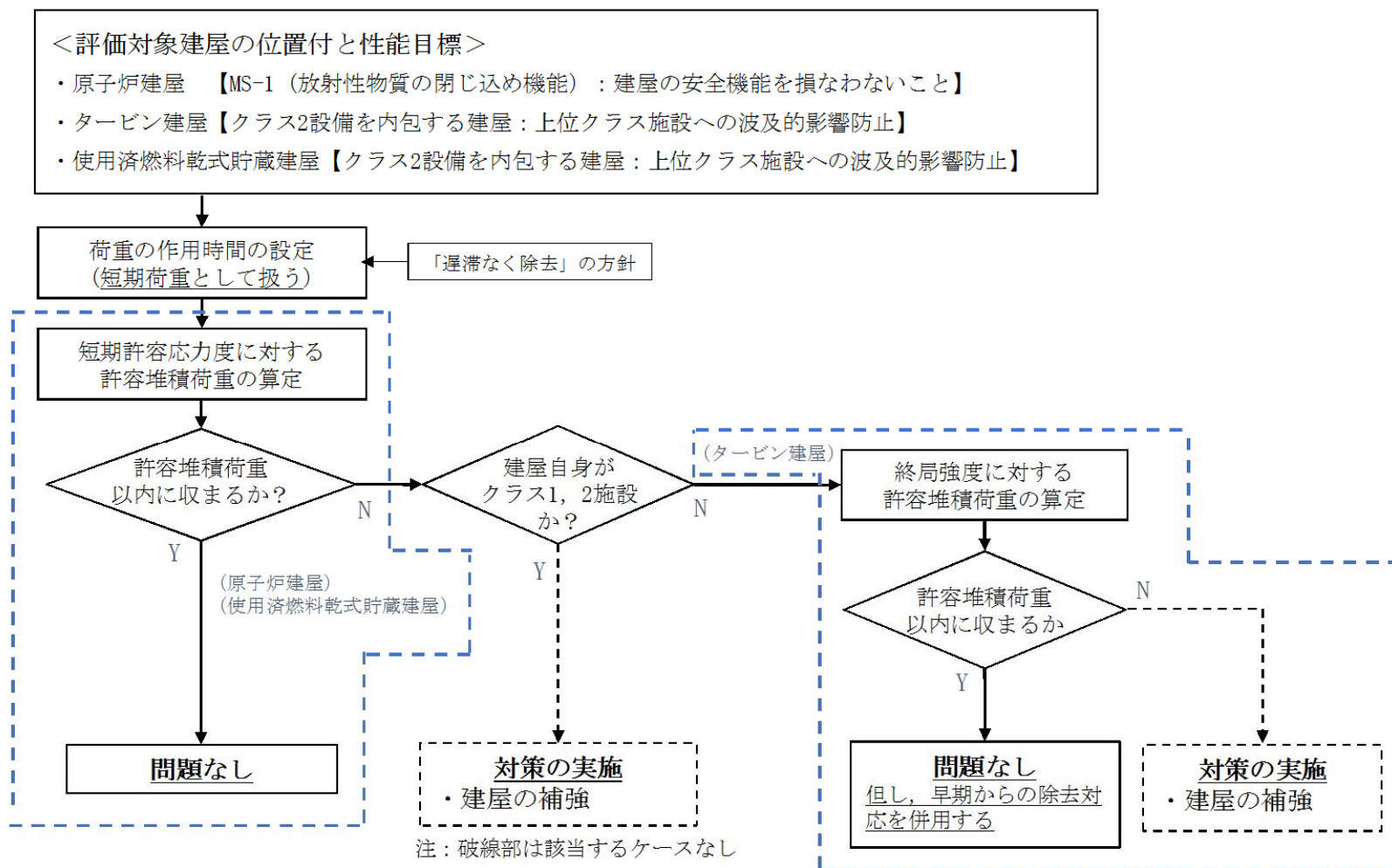


図2 建屋健全性評価の考え方

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

- ・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。
- ・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、「鋼構造設計基準—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。

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	「鋼構造設計基準—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

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2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2に、屋根トラスの部材リストを表9に示す。

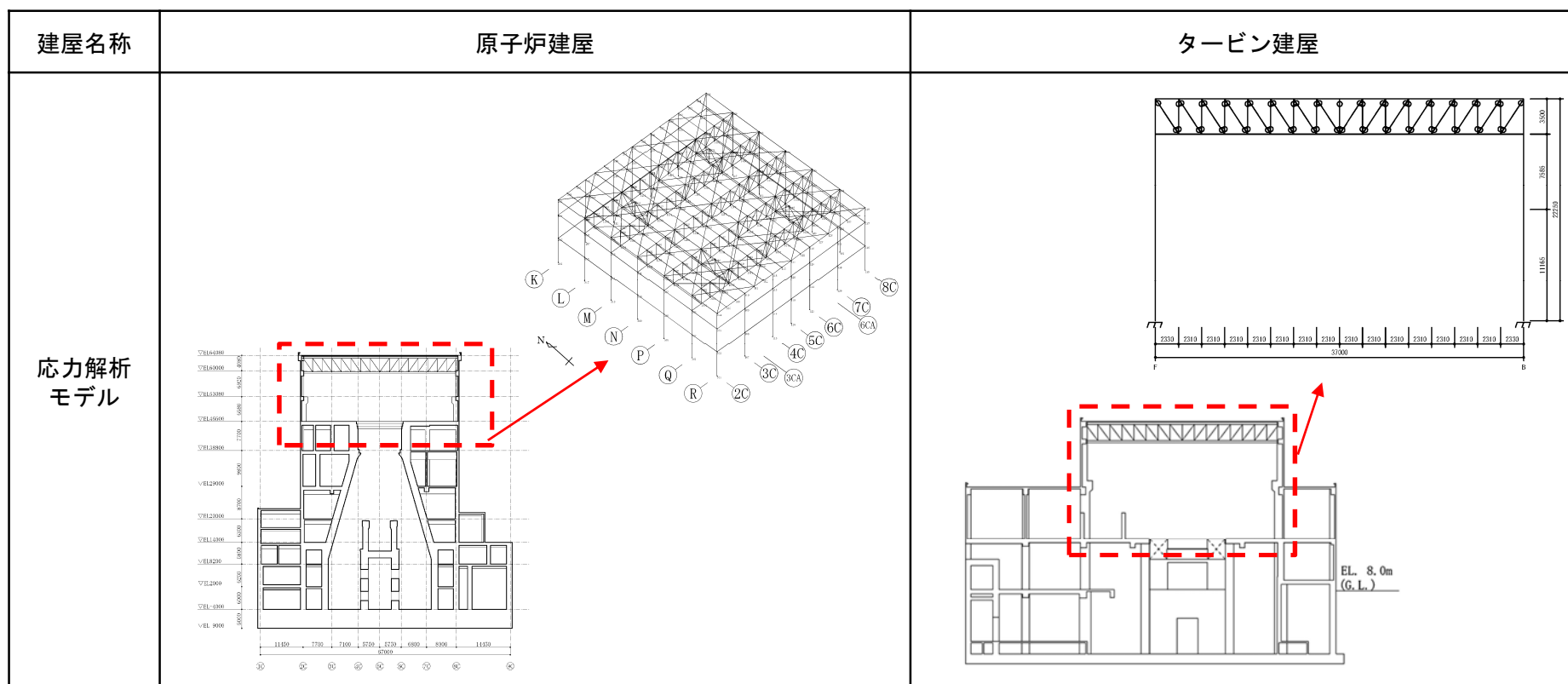


図2 解析モデル（屋根トラス）

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

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

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

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

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、

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

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

f_b : 許容曲げ応力度

λ_b : 曲げ部材の細長比

l_b : 圧縮フランジの支点間距離

$_e \lambda_b$: 弾性限界細長比

$_p \lambda_b$: 塑性限界細長比

C : 許容曲げ応力度の補正係数

M_e : 弾性横座屈モーメント

Z : 断面係数

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

G : せん断弾性係数

J : サンプナンのねじり定数

M_y : 降伏モーメント ($F \cdot Z$)

$$\nu = \frac{3}{2} + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda_b}{_e \lambda_b} \right)^2$$

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

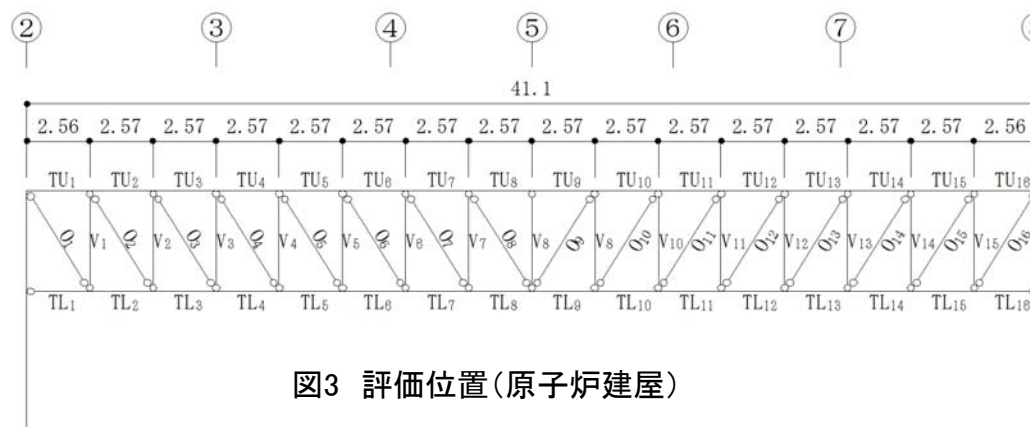


図3 評価位置 (原子炉建屋)

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

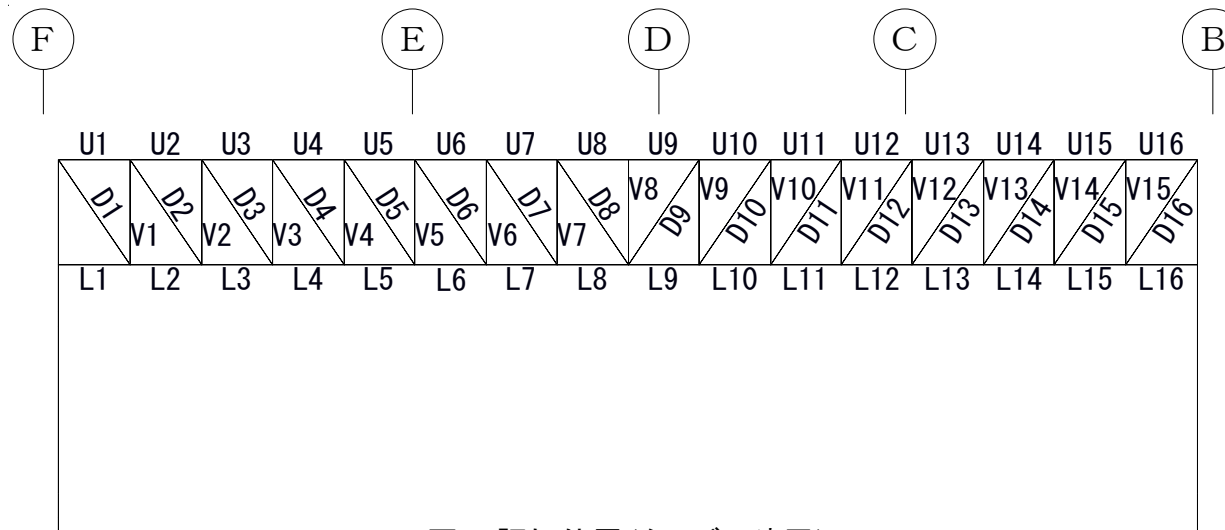


図4 評価位置 (タービン建屋)

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



⑦原子炉建屋(トラス部)及びタービン建屋(トラス部)の除灰について

原子炉建屋(トラス部)及びタービン建屋(トラス部)について、強度に余裕を持たせるため、降灰時に除灰を行う場合について評価を実施。

<評価条件>

- ・降下火砕物は、50cmの降灰を想定。
- ・原子炉建屋(トラス部)及びタービン建屋(トラス部)について、降灰初期から24時間3交代で除灰を実施。
- ・近隣火山に噴火兆候(噴火警報「レベル4(避難準備)」以上)が確認された時点から除雪を行うこととし、積雪荷重は考慮しない。
- ・除灰時の人員荷重については、100kg(981N)を単位荷重として評価する。

表13のとおり、除灰人員による積載荷重を考慮した場合において、原子炉建屋(トラス部)は4cm分、タービン建屋(トラス部)は11cm分を降灰初期より除灰を行うことで、総荷重は建屋トラス部の許容荷重を超えることはない。

表13 荷重評価

項目	①人員荷重 (N/m ²)	②降下火砕物荷重 (N/m ²)	③総荷重①+② (N/m ²)	許容荷重※1 (N/m ²)
原子炉建屋 (トラス部)	981	6,767 (46cm堆積時)	7,748	7,780
タービン建屋 (トラス部)	981	5,737 (39cm堆積時)	6,718	6,845

※1:短期許容応力度に達する荷重

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



・表14のとおり、原子炉建屋(トラス部)4cm、タービン建屋(トラス部)11cmの降下火砕物を24時間で除灰するには、**1直あたり77人、24時間で231人の動員を行うことで除灰が可能。**

表14 降下火砕物の除去に要する作業量の評価結果

項目	①堆積面積 (m ²)	②除去厚さ (m)	③除去量＝ ①×②(m ³)	④1m ³ 当たりの 作業人工※ ¹ (人/日)	作業量＝ ③×④	1直当たりの 作業量※ ²
原子炉建屋 (トラス部)	約1,820	0.04	73	0.39	29人日	10人
タービン建屋 (トラス部)	約3,980	0.11	438		171人日	57人

※1:「国土交通省土木工事積算基準(H24)」における人力掘削での人工

※2:降灰中の作業環境を考慮し、連絡要員及び補助員として1直あたり10人を加える。