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22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

No.508-1：設置許可で示す評価対象部位について，選定理由を含めて整理し説明すること。
（原子炉建屋に要求される機能を担保している屋根スラブ等）

No.508-2：積載荷重（除灰時荷重）の設計上の位置付けを示すこと。

No.508-3：機能を担保している部位の状態を明示し，計算書上どういう評価方針とするかを示すこと。

(2) 回答

No.508-1：評価対象部位は，以下の理由から主トラスと屋根スラブを選定する。（P3 参照）

- 主要な部位のうち，梁間方向に配されている主トラス，屋根スラブが主体構造として，降下火砕物の鉛直荷重に抵抗しているため。
- 原子炉建屋の屋根スラブは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）の安全機能を担保しているため。

No.508-2：積載荷重（除灰時荷重）を設計上考慮する。（P3,4参照）

No.508-3：各建屋の要求機能と機能を担保する部位を記載し，各部位に対して設定する許容限界を超えないことを評価する。（P5,6参照）

次頁以降で，評価内容及び評価結果を示す。

【評価内容及び評価結果について

①評価対象部位及び評価方針

No.508-1回答

・評価対象部位は，以下の理由から屋根スラブと主トラスを選定する。

a. 主要な部位のうち，梁間方向に配されている主トラスと，屋根スラブが主体構造として，降下火砕物の鉛直荷重に対して抵抗しているため。

b. 原子炉建屋の屋根スラブは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）の安全機能を担保しているため。

・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，発生する応力が屋根スラブについては「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（日本建築学会）」（以下RC規準という。），主トラスについては 「鋼構造設計規準－許容応力度設計法－（日本建築学会）」（以下S規準という。）を参考に，各々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）・・・固定荷重を表1に示す。

表1　固定荷重（DL）

建屋	固定荷重
原子炉建屋	5,364N／m²
タービン建屋	4,669N／m²

No.508-2回答

・積載荷重（LL）・・・積載荷重を表2に示す。

表2　積載荷重（LL）

建屋	積載荷重※
原子炉建屋	1,000N／m²
タービン建屋	

※「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980N/m²を包絡するよう，除灰時の人員荷重として1000 N/m²を設定。

（原子炉建屋頂部の場合，約100kgの人員が約1,800人，1m²毎に配置されているのと同様な荷重状態）

・積雪荷重（SNL）・・・積雪荷重を表3に示す。

表3　積雪荷重（SNL）

建屋	積雪荷重※1
原子炉建屋	210N／m²
タービン建屋	

※1 建築基準法の考え方を参考とした東海村における平均的な積雪量10.5cm及び積雪量1cm当たり20N／m²から算出

・降下火砕物堆積荷重（VAL）・・・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	降下火砕物堆積荷重※2
原子炉建屋	7,355N／m²
タービン建屋	

※2 堆積厚50cm，密度1.5g／cm³（湿潤状態）及び重力加速度9.80665m／s²から算出

No.508-2回答

・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＋LL＋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6,7に示す。

No.508-3回答

【許容限界 設定方針（原子炉建屋）】

構造強度の観点から，終局耐力※1を許容限界とする。

気密性及び遮蔽性維持の観点から，屋根スラブは短期許容応力度を許容限界とする。

表6　原子炉建屋 応力解析評価における許容限界

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
―	構造強度を有すること	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※1
		主トラス		終局耐力※2
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

※1 「RC規準」の短期許容応力度（曲げ）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（弾性限耐力）

※2 「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（弾性限耐力）

※3 「RC規準」の短期許容応力度

以上から，原子炉建屋については，屋根スラブは短期許容応力度，主トラスは「S規準」の短期許容応力度の評価式にF値×1.1（弾性限耐力）を用いて，評価を行う。

No.508-3回答

【許容限界 設定方針（タービン建屋）】

タービン建屋に内包するクラス2設備に波及的影響を及ぼさない観点から，タービン建屋は崩壊しないことを許容限界とする。許容限界の評価フローを図1に示す。

表7　タービン建屋 応力解析評価における許容限界

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
－	上位クラス設備に波及的影響を及ぼさないこと	屋根スラブ	落下しないことを確認	終局耐力※1
		主トラス	崩壊機構を形成しないことを確認	崩壊機構を形成しないこと

※1 「RC規準」の短期許容応力度（曲げ）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（弾性限耐力）

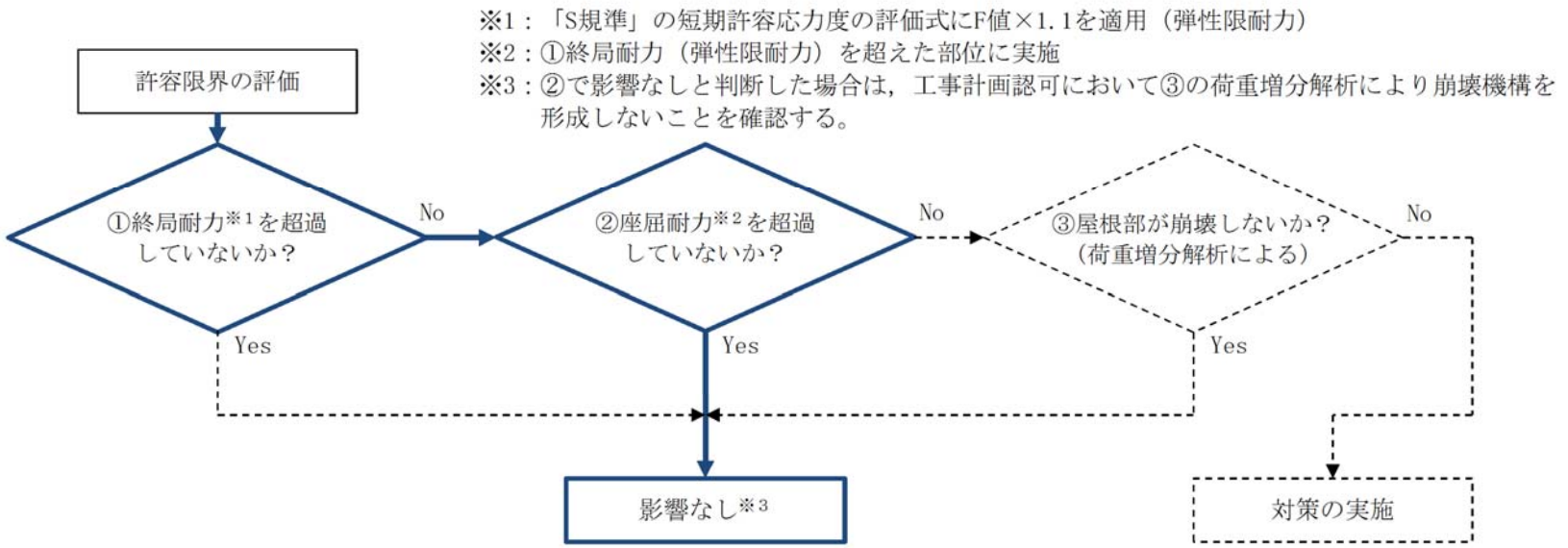


図1　タービン建屋 主トラス許容限界評価フロー

・鋼材，コンクリート及び鉄筋の基準強度及び評価基準値を表8，9，10に示す。

表8　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／mm²）	評価基準値（N／mm²）	
				引張	圧縮及び曲げ
原子炉建屋	SS400（SS41）	t≦40	235	258.5	258.5
タービン建屋					

表9　コンクリートの基準強度及び評価基準値

建屋	Fc（N／mm²）	評価基準値（N／mm²）	
		圧縮	せん断
原子炉建屋	22.1	14.7	1.06
タービン建屋			

表10　鉄筋の基準強度及び評価基準値

建屋	鉄筋種類	評価基準値（N／mm²）	
		引張及び圧縮	面外せん断補強
原子炉建屋	SD345（SD35）	345	345
タービン建屋			

④モデル化の基本方針

〇屋根スラブ

・「RC規準」に基づいて，合成デッキスラブは一方向版として曲げモーメント及びせん断力を算出し，応力比を算出する。

・屋根スラブの検討条件を表11，表12に示す。

表11　原子炉建屋　屋根スラブの検討条件

位置	厚さ (mm)	短辺長さ (m)	長辺長さ (m)	配筋				配筋量			
				短辺		長辺		短辺		長辺	
				端部	中央部	端部	中央部	端部 (mm²)	中央部 (mm²)	端部 (mm²)	中央部 (mm²)
EL 64.08m (S1-1)	100	2.27	7.30	D13@180	D13@180	D13@200	D13@200	705.6	705.6	635.0	635.0
EL 64.08m (S1-2)	100	1.53	7.30	D13@180	D13@180	D13@200	D13@200	705.6	705.6	635.0	635.0

表12　タービン建屋　屋根スラブの検討条件

位置	厚さ (mm)	短辺長さ (m)	長辺長さ (m)	配筋				配筋量			
				短辺		長辺		短辺		長辺	
				端部	中央部	端部	中央部	端部 (mm²)	中央部 (mm²)	端部 (mm²)	中央部 (mm²)
EL 40.65m	100	2.08	11.60	D13@200	D13@200	D13@200	D13@200	635.0	635.0	635.0	635.0

表13 使用材料の物性値

使用材料	単位体積重量 γ	ヤング係数 E	せん断弾性係数 G	ポアソン比
鉄筋コンクリート	24.0kN／m³	22.1kN／mm²	9.21kN／mm²	0.2

○主トラス

・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，主トラスの部材リストを表14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，主トラスの部材リストを表15に示す。

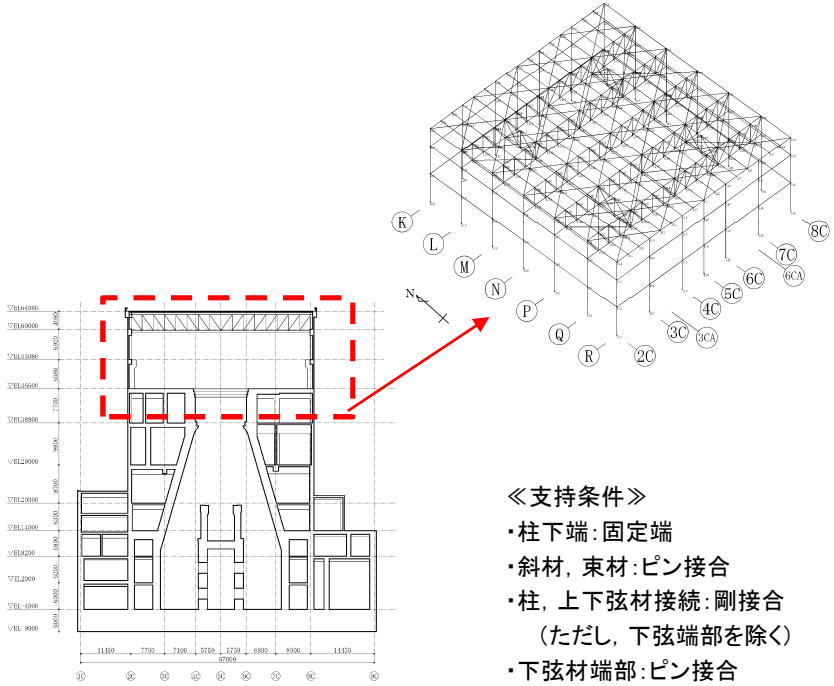
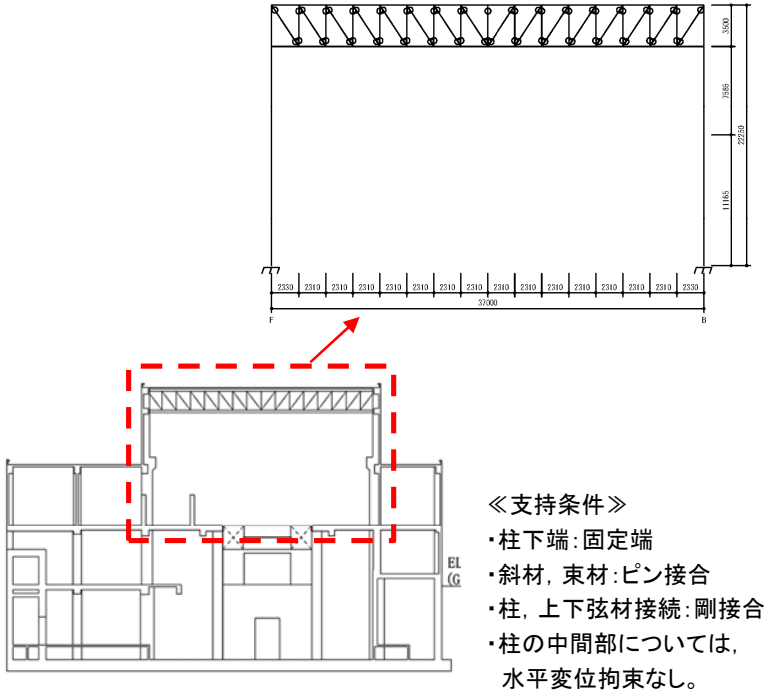
建屋名称	原子炉建屋	タービン建屋
応力解析モデル	 ≪支持条件≫ ・柱下端：固定端 ・斜材，束材：ピン接合 ・柱，上下弦材接続：剛接合 （ただし，下弦端部を除く） ・下弦材端部：ピン接合	 ≪支持条件≫ ・柱下端：固定端 ・斜材，束材：ピン接合 ・柱，上下弦材接続：剛接合 ・柱の中間部については，水平変位拘束なし。

図2　屋根トラスの解析モデル

表14 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15 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16に示す。

表16 使用材料の物性値

使用材料	単位体積重量 γ	ヤング係数 E	せん断弾性係数 G
鋼材部	77.0kN／m³	205.0kN／mm²	79.0kN／mm²

⑤評価方法

〇屋根スラブ

・「RC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，許容応力度を超えないことを確認する。

$$M = a_t f_t j$$

M ：許容曲げモーメント

a_t ：引張鉄筋断面積

j ：応力中心間距離（7/8）d

d ：有効せい

f_t ：鉄筋の短期許容引張応力度

・「RC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面外せん断応力度が，許容面外せん断応力度を超えないことを確認する。

$$Q_A = bj\{\alpha f_s + 0.5_w f_t (p_w - 0.002)\}$$

ただし，$\alpha = \dfrac{4}{\dfrac{M}{Qd}+1}$　$1 \leqq \alpha \leqq 2$

b ：幅

j ：応力中心間距離7/8）d

d ：有効せい

p_w ：せん断補強筋比 $p_w = \dfrac{a_w}{bx}$

a_w ：せん断補強筋の断面積

x ：せん断補強筋の間隔

f_s ：コンクリートの短期許容せん断応力度

$_w f_t$ ：せん断補強筋の短期許容引張応力度

α ：せん断スパン比 $\dfrac{M}{Qd}$ による割増係数

M ：設計する梁の最大曲げモーメント

Q ：設計する梁の最大せん断力

○主トラス

「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。

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

f_c，f_tは以下の式により求める。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

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

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

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

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　$\Lambda=\sqrt{\frac{\pi^2E}{0.6F}}$

E ：ヤング係数

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

・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】

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

【引張りと曲げにより生じる応力度の確認】

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

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。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

$$f_b=\frac{F}{\nu}\qquad (\lambda_b \leqq {}_p\lambda_b)$$

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

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

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 ：サンブナンのねじり定数

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（$F\cdot Z$）

ここに，

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

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

⑥応力解析による評価結果

〇屋根スラブ

・原子炉建屋の評価結果を表17に，タービン建屋の評価結果を表18に示す。

・降下火砕物の堆積時において，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が許容値を超えないことを確認した。

表17　原子炉建屋 屋根スラブ評価結果

部位	曲げモーメント								せん断力		
	設計配筋量（mm²）		発生曲げモーメント（kN・m）		必要鉄筋量※1（mm²）		検定比		発生せん断力（KN）	せん断応力度（N／mm²）	検定比
	端部	中央	端部	中央	端部	中央	端部	中央			
EL 64.08（S1-1）	705.6	705.6	5.17	2.59	323.1	161.6	0.46	0.23	13.67	0.295	0.28
EL 64.08（S1-2）	705.6	705.6	3.52	1.98	220.2	123.9	0.32	0.18	9.21	0.199	0.19

※1　短期許容応力度による必要鉄筋量

表18　タービン建屋 屋根スラブ評価結果

部位	曲げモーメント								せん断力		
	設計配筋量（mm²）		発生曲げモーメント（kN・m）		必要鉄筋量※1（mm²）		検定比		発生せん断力（KN）	せん断応力度（N／mm²）	検定比
	端部	中央	端部	中央	端部	中央	端部	中央			
EL 40.65	635.0	635.0	7.36	4.14	460.0	258.7	0.73	0.41	17.69	0.381	0.36

※1　短期許容応力度による必要鉄筋量

〇主トラス

・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19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20，表21に，評価位置を図4に示す。

表19　原子炉建屋評価結果

部材	発生応力	応力度（N／mm²）	許容値（N／mm²）	検定値	位置
上弦材（H-400×400×13×21）	（圧縮）	112.7	257.3	0.60	P通り TU8，TU9
	（曲げ）	40.3	255.4		
	（引張）	37.7	258.5	0.55	L通り TU1，TU16
	（曲げ）	103.1	256.5		
下弦材（H-400×400×13×21）	（圧縮）	78.9	248.9	0.46	Q通り TL1
	（曲げ）	34.3	256.3		
	（引張）	157.6	258.5	0.79	P通り TL8，TL9
	（曲げ）	44.9	195.9		
斜材（2Ls-150×150×15）	（引張）	207.8	258.5	0.81	L通り 03，014
束材（2Ls-150×150×15）	（圧縮）	152.0	158.2	0.97	P通り V13

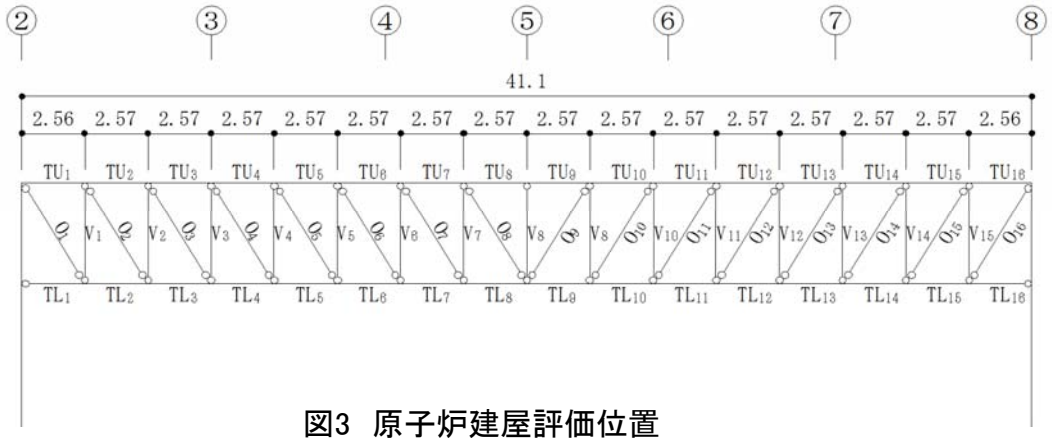


図3　原子炉建屋評価位置

表20　タービン建屋評価結果（終局耐力※1）

部材	発生応力	応力度（N／mm²）	許容値（N／mm²）	検定値	位置
上弦材（H-428×407×20×35）	（圧縮）	179.9	250.0	0.96	U8, U9
	（曲げ）	59.9	258.0		
	（引張）	0※2	258.0	0.53	U1, U16
	（曲げ）	136.0	258.0		
下弦材（H-428×407×20×35）	（圧縮）	55.2	152.0	1.04※3	L1, L16
	（曲げ）	162.1	241.0		
	（引張）	160.3	258.0	0.90	L8, L9
	（曲げ）	70.8	219.0		
斜材（2Ls-200×200×20）	（引張）	201.7	258.0	0.79	D2, D15
束材（2Ls-200×200×15）	（圧縮）	184.7	212.0	0.88	V3, V13

※1　「S規準」の短期許容応力度の評価式にF値×1.1を適用（弾性限耐力）

※2　屋根トラスに作用する曲げモーメントは，上下弦材の軸力に置換され，トラス端部では上弦材に引張軸力が作用する。また，斜材に生じる引張軸力に対して釣り合うため，上弦材には圧縮軸力が作用し，門型フレーム脚部の水平反力に対して上弦材には圧縮軸力が作用する。従って，上弦材に生じる軸力は，曲げによる引張よりも圧縮が支配的となり，引張が0となる。

※3　検定値を超過した下弦材（L1，L16）は座屈耐力に対して評価を行う。

表21　タービン建屋評価結果（座屈耐力※4）

部材	発生応力	応力度（N／mm²）	許容値（N／mm²）	検定値	位置
下弦材（H-428×407×20×35）	（圧縮）	55.2	177.3	0.94	L1, L16
	（曲げ）	162.1	258.5		

※4 終局耐力※1を超過した下弦材 L1及びL16を評価

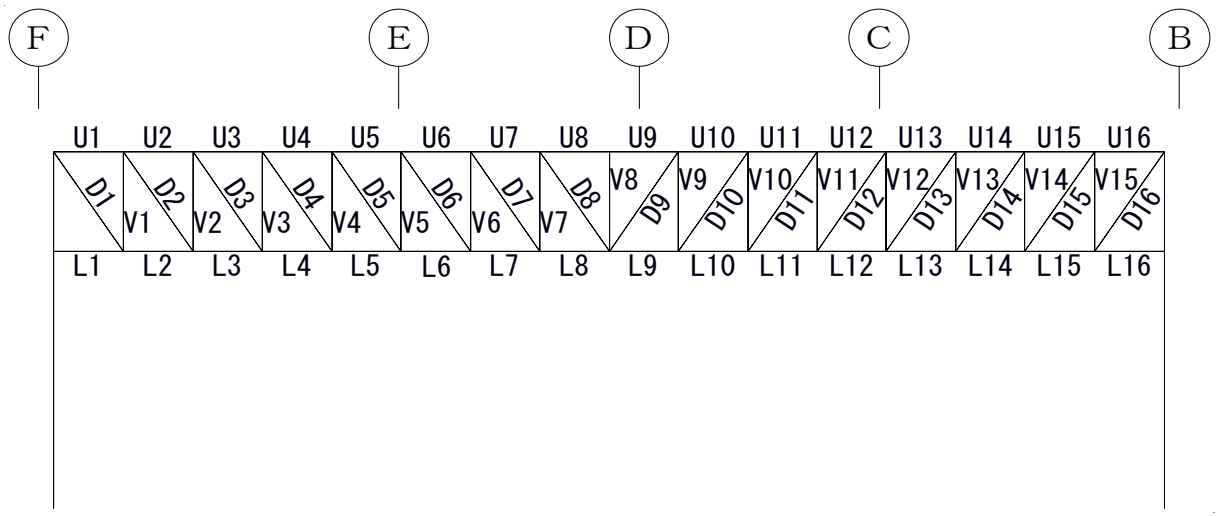


図4　タービン建屋評価位置

【原子炉建屋】

・屋根スラブは，短期許容応力度に対して全ての検定値は1.0以下である。

・主トラスは，F値×1.1を適用した終局耐力に対して全ての検定比は1.0以下である。

【タービン建屋】

・屋根スラブは，短期許容応力度に対して全ての検定値は1.0 以下である。

・主トラスは，F値×1.1を適用した評価において，一部の部材が検定値1.0を上回る結果となったが，当該部材は座屈耐力に対して検定値は1.0以下であり，構造体が崩壊することはない。

評価の結果，降下火砕物及び積雪の堆積荷重に加え，積載荷重（除灰時荷重）を考慮した場合においても，原子炉建屋の安全機能は損なわれず，タービン建屋は内包するクラス2設備に波及的影響を及ぼさないことを確認した。