

東海第二発電所

外部からの衝撃による損傷の防止

(火山)

本資料のうち、は商業機密又は核物質防護上の観点から公開できません。



: 今回ご説明範囲

第6条 外部からの衝撃による損傷の防止 (火山)

<目次>

1. 基本方針
 - 1.1 要求事項の整理
 - 1.2 追加要求事項に対する適合性（手順等含む）
 - (1) 位置，構造及び設備
 - (2) 安全設計方針
 - (3) 適合性説明
2. 外部からの衝撃による損傷の防止（火山）
 - 別添資料1 火山影響評価について
3. 運用，手順説明資料
 - 別添資料2 外部からの衝撃による損傷の防止（火山）

東海第二発電所

火山影響評価について

目 次

1. 基本方針
 - 1.1 概要
 - 1.2 火山影響評価の流れ
2. 立地評価
 - 2.1 原子力発電所に影響を及ぼし得る火山の抽出
 - 2.2 抽出された火山の火山活動に関する個別評価
3. 影響評価
 - 3.1 火山事象の影響評価
 - 3.2 火山事象（降下火砕物）に対する設計の基本方針
 - 3.3 火山事象（降下火砕物）から防護する施設
 - 3.4 降下火砕物による影響の選定
 - 3.4.1 降下火砕物の特徴
 - 3.4.2 直接的影響
 - 3.4.3 間接的影響
 - 3.5 設計荷重の設定
 - 3.6 降下火砕物の直接的影響に対する設計方針
 - 3.6.1 降下火砕物による荷重に対する設計方針
 - 3.6.2 降下火砕物による荷重以外に対する設計方針
 - 3.6.3 外気取入口からの降下火砕物の侵入に対する設計方針
 - 3.7 降下火砕物の除去等の対策
 - 3.7.1 降下火砕物に対応するための運用管理
 - 3.7.2 手順
 - 3.8 降下火砕物の間接的影響に対する設計方針
4. まとめ

資料

- － 1 降下火砕物の特徴について
- － 2 評価すべき影響の要因と評価手法
- － 3 直接的影響の評価結果
- － 4 建屋構築物に係る影響評価
- － 5 海水ポンプ（残留熱除去系海水系，ディーゼル発電機海水系）（モータ含む）に係る影響評価
- － 6 海水ストレーナ（残留熱除去系海水系，ディーゼル発電機海水系）（下流設備含む）に係る影響評価
- － 7 海水取水設備に係る影響評価
- － 8 計装制御設備（安全保護系）に係る影響評価
- － 9 換気空調設備に係る影響評価
- － 10 ディーゼル発電機に係る影響評価
- － 11 排気筒（非常用ガス処理系排気配管含む）に係る影響評価
- － 12 間接的影響の評価結果

参考資料

- － 1 原子炉の高温停止及び低温停止に必要な設備について
- － 2 降下火砕物堆積荷重評価への材料強度×1.1の適用について
- － 3 降下火砕物の海水ポンプ（残留熱除去系海水系，ディーゼル発電機海水系）基礎部堆積による影響評価について
- － 4 降下火砕物と積雪の重ね合わせの考え方について
- － 5 原子力発電所で使用する塗料について
- － 6 降下火砕物の金属腐食研究について
- － 7 給水処理設備に係る影響評価について



: 今回ご説明範囲

- － 8 降下火砕物のその他の設備への影響評価について
- － 9 降下火砕物の除去に要する時間及び灰置場について
- － 10 降水による降下火砕物の固結の影響について
- － 11 火山影響評価ガイドとの整合性について
- － 12 原子炉建屋の健全性評価について
- － 13 タービン建屋の健全性評価について
- － 14 防潮堤外部事象に対する津波防護施設，浸水防止設備，及び津波監視設備の防護方針について
- － 15 降下火砕物の偏りによる影響評価について
- － 16 除灰時の人員荷重の考え方について

建屋構築物に係る影響評価

降下火砕物による原子炉建屋，タービン建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋への影響について，以下のとおり評価する。

(1) 評価項目及び内容

① 構築物への静的負荷

降下火砕物の堆積荷重により原子炉建屋，タービン建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋の健全性に影響がないことを評価する。なお，設置許可においては，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）の機能を有する原子炉建屋と建屋自身がクラス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評価結果が厳しくなるタービン建屋を代表として評価概要及び評価結果を示す。

また，工事計画認可においては，原子炉建屋，タービン建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋について屋根スラブ，主トラス及び二次部材の構造的な性能を確認し，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に示す。

② 構築物への化学的影響（腐食）

降下火砕物の構築物への付着や堆積による化学的腐食により，構築物へ影響がないことを評価する。

(2) 評価条件

① 降下火砕物条件

a. 堆積量：50cm

b. 密度：1.5g/cm³（湿潤状態）

$$0.5(\text{m}) \times 1,500(\text{kg/m}^3) \times 9.80665(\text{m/s}^2) = 7,355(\text{N/m}^2)$$

② 積雪条件

a. 堆積量：10.5cm（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）

b. 単位荷重：堆積量1cmごとに20N/m²（建築基準法より）

$$10.5(\text{cm}) \times 20(\text{N/m}^2/\text{cm}) = 210(\text{N/m}^2)$$

③ 固定荷重

a. 原子炉建屋：5,364N/m²

b. タービン建屋：4,669N/m²

④ 積載荷重

「建築構造設計規準の資料（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を包絡するように、除灰時の人員荷重として1,000N/m²とする。

(3) 評価結果

① 構造物への静的負荷

a. 評価対象部位の選定

以下の理由から各建屋の屋根スラブと主トラスを評価対象部位として選定する。

(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、降下火砕物の鉛直方向に対して抵抗している。

(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

b. 許容限界の設定

(a) 原子炉建屋

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}
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	遮蔽生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 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規準」の短期許容応力度で評価

(b) タービン建屋

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	落下しないことを確認 ^{※1}	終局耐力 ^{※3}
		主トラス	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

※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 機能に対しては終局耐力が許容限界となるが、「RC規準」の短期許容応力度で評価

c. 評価方法

(a) 屋根スラブ

「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。）に基づき、評価対象部位に生じる曲げモーメント及び面外せん断応力度が、許容限界を超えないことを確認する。

(b) 主トラス

「鋼構造設計規準－許容応力度設計法（日本建学会）」（S 規準という。）に基づき、評価対象部位に生じる軸力及び曲げモーメントが、許容限界を超えないことを確認する。

d. 評価結果

降下火砕物の堆積荷重に対して、各建屋の許容限界を超えることはない。評価結果を表 1～7 に示す。なお、一部の部材について座屈耐力で評価したタービン建屋については、工事計画認可において荷重増分解析を実施し、改めて屋根部が崩壊しないことを確認する。

表 1 原子炉建屋 屋根スラブ（曲げモーメント）評価結果
（検定：短期許容応力度）

部位	設計配筋量 (mm ²)		発生曲げモーメント (kN・m)		必要鉄筋量 (mm ²)		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
EL 64.08 (S1-2)	705.6	705.6	3.52	1.98	220.2	123.9	0.32	0.18

表 2 原子炉建屋 屋根スラブ（せん断力）評価結果
（検定：短期許容応力度）

部位	発生せん断力 (KN)	せん断応力度 (N/mm ²)	検定比
EL 64.08 (S1-1)	13.67	0.295	0.28
EL 64.08 (S1-2)	9.21	0.199	0.19

表 3 原子炉建屋 主トラス評価結果（検定：弾性限耐力）

部材	発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容値 (N/mm ²)	検定値
上弦材 (H-400×400×13×21)	(圧縮)	112.7	257.3	0.60
	(曲げ)	40.3	255.4	
下弦材 (H-400×400×13×21)	(圧縮)	157.6	258.5	0.79
	(曲げ)	44.9	195.9	
斜材 (2Ls-150×150×15)	(引張)	207.8	258.5	0.81
束材 (2Ls-150×150×15)	(圧縮)	152.0	158.2	0.97

表 4 タービン建屋 屋根スラブ（曲げモーメント）評価結果
（検定：短期許容応力度）

部位	設計配筋量 (mm ²)		発生曲げモーメント (kN・m)		必要鉄筋量 (mm ²)		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

表 5 タービン建屋 屋根スラブ（せん断力）評価結果
（検定：短期許容応力度）

部位	発生せん断力 (KN)	せん断応力度 (N/mm ²)	検定比
EL 40.65	17.69	0.381	0.36

表 6 タービン建屋 主トラス評価結果（検定：弾性限耐力）

部材	発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容値 (N/mm ²)	検定値
上弦材 (H-428×407×20×35)	(圧縮)	179.9	250.0	0.96
	(曲げ)	59.9	258.0	
下弦材 (H-428×407×20×35)	(圧縮)	55.2	152.0	1.04 ^{※1}
	(曲げ)	162.1	241.0	
斜材 (2Ls-200×200×20)	(引張)	201.7	258.0	0.70
束材 (2Ls-200×200×15)	(圧縮)	184.7	184.7	0.88

※1 検定値を超過した下弦材は、終局耐力に対して評価を行う。

表 7 タービン建屋 主トラス評価結果（検定：終局耐力）

部材	発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容値 (N/mm ²)	検定値
下弦材 (H-428×407×20×35)	(圧縮)	55.2	152.0	0.94
	(曲げ)	162.1	241.0	

評価の詳細は、参考資料－1 2 「原子炉建屋の健全性評価について」及び参考資料－1 3 「タービン建屋の健全性評価について」を参照。

② 構造物への化学的影響（腐食）

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外壁塗装及び屋上防水がなされていることから，降下火砕物による化学的腐食により短期的に影響を及ぼすことはない。

また，降下火砕物堆積後の長期的な腐食の影響については，堆積した降下火砕物を除去し，除去後の点検等において，必要に応じて補修作業を実施する。

(4) 個別評価から除外した直接的影響の要因

個別評価から除外した直接的影響の要因及び理由を表 8 に示す。

表 8 個別評価から除外した直接的影響の要因及び理由

直接的影響の要因	理由
水循環系の閉塞	水循環系の機能と直接関連がない
水循環系の内部における摩擦	水循環系の機能と直接関連がない
換気系，電気系及び計装制御系に対する機械的影響	屋外に面した換気系，電気系及び計装制御系の機能と直接関連がない
換気系，電気系及び計装制御系に対する化学的影響	屋外に面した換気系，電気系及び計装制御系の機能と直接関連がない
発電所の大気汚染	中央制御室の居住性と直接関連がない
絶縁低下	絶縁低下と直接関連がない

原子炉建屋の建屋健全性評価について

1. 基本方針

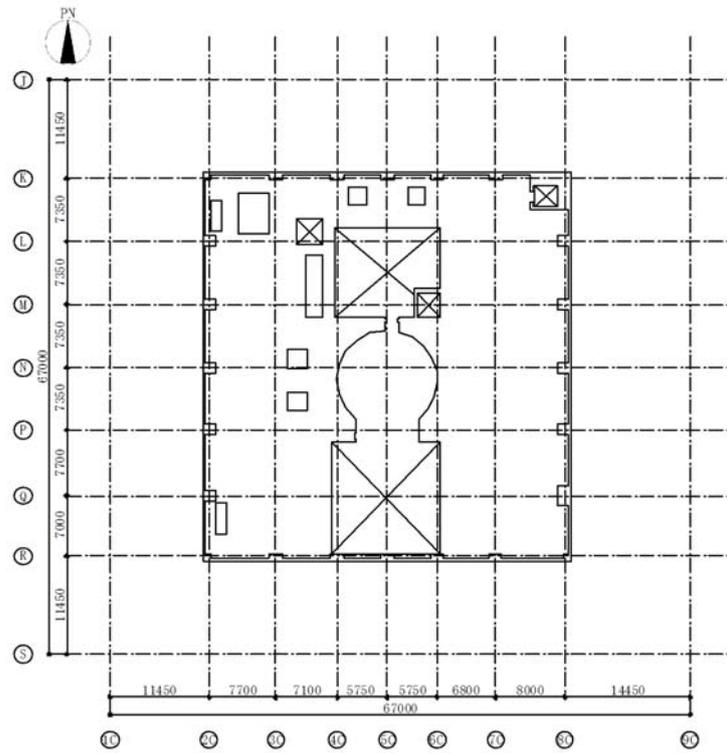
(1) 概要

降下火砕物の堆積荷重に対して各建屋が健全性を有することを、応力解析による評価によって確認する。設置許可においては、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）の安全機能を有する原子炉建屋と、自身がクラス1及び2施設に該当しない建屋のうち、構造的にもスパンが長い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。工事計画認可においては、屋根スラブ，主トラス及び二次部材の構造性能を確認し，建屋に求められる機能設計上の性能目標を満足していることを示す。参考資料－ 1 2では，原子炉建屋について評価内容及び評価結果を示す。

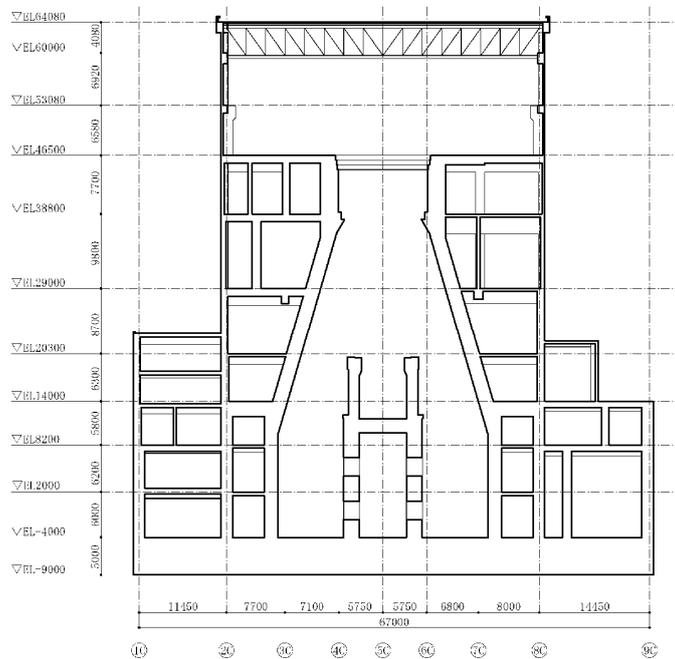
(2) 構造概要

原子炉建屋は，地上6階，地下2階建てで，平面が約67 m（南北方向）×約67 m（東西方向）の鉄筋コンクリート造（一部鉄骨造）の建物である。

原子炉建屋の概略平面図を第1-1図に，概略断面図を第1-2図に示す



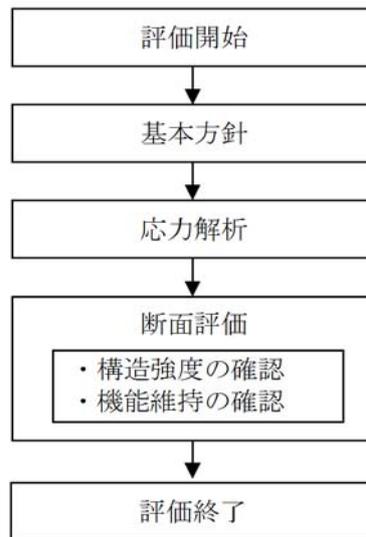
第 1-1 図 原子炉建屋の概略平面図 (EL. +46.5 m)



第 1-2 図 原子炉建屋の概略断面図 (E W方向)

(3) 評価方針

降下火砕物の堆積荷重に対して、応力解析による断面の評価を行うことで、建物の構造強度及び機能維持の確認を行う。第 1-3 図に評価フローを示す。



第 1-3 図 建屋の評価フロー

(4) 適用規格・基準等

本評価において、準拠する規格基準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法・同施行令
- ・ 平成 12 年建設省告示第 2464 号
- ・ 鋼構造設計規準－許容応力度設計法－（日本建築学会）
- ・ 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（日本建築学会）
- ・ 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）

2. 応力解析による評価方法

原子炉建屋の応力解析による評価対象部位は屋根スラブ及び主トラスとする。

(1) 評価対象部位及び評価方針

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。

- ・ 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。
- ・ 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」（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—」（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

a. 荷重

(a) 固定荷重 (DL)

固定荷重を第 2-1 表に示す。

第 2-1 表 固定荷重

固定荷重 (DL)
5,364N/m ²

(b) 積載荷重 (LL)

積載荷重を第 2-2 表に示す。

第 2-2 表 積載荷重 (LL)

積載荷重 (LL)
$1,000\text{N}/\text{m}^2$

(c) 積雪荷重 (SNL)

積雪荷重を第 2-3 表に示す。

第 2-3 表 積雪荷重 (SNL)

積雪荷重 (SNL)
$210\text{N}/\text{m}^2$

(d) 降下火砕物の堆積荷重 (VAL)

降下火砕物の堆積荷重を第 2-4 表に示す。

第 2-4 表 降下火砕物の堆積荷重 (VAL)

降下火砕物の堆積荷重 (VAL)
$7,355\text{N}/\text{m}^2$

(e) 荷重の組合せ

荷重の組合せを第 2-5 表に示す。

第 2-5 表 荷重の組合せ

荷重の組合せ
DL+LL+SNL+VAL

(3) 許容限界

応力解析による評価における原子炉建屋の許容限界を第 2-6 表に示す。
 また、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第 2-7、
 2-8、2-9 表に示す。

第 2-6 表 応力評価解析における許容限界

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}
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射影機能を損なわないこと	屋根トラス	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 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 規準」の短期許容応力度で評価

以上より、屋根スラブは短期許容応力度、主トラスは終局耐力に対し妥当な安全裕度を有する許容限界（以下、弾性限耐力という。）を用いて評価を行う。

第 2-7 表 鋼材の基準強度及び評価基準値

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
SS400 (SS41)	t ≤ 40	235	258.5	258.5

第 2-8 表 コンクリートの基準強度及び評価基準値

Fc (N/mm ²)	評価基準値 (N/mm ²)	
	圧縮	せん断
22.1	14.7	1.06

第 2-9 表 鉄筋の基準強度及び評価基準値

鉄筋種類	評価基準値 (N/mm ²)	
	引張及び圧縮	面外せん断補強
SD345 (SD35)	345	345

3. 解析モデル及び緒元

屋根スラブ及び主トラスの解析モデル及び緒元を以下に示す。

(1) 屋根スラブ モデル化の基本方針

「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第 3-1 表、使用材料の物性値を第 3-2 表に示す。

第 3-1 表 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			
				短辺		長辺	
				端部	中央部	端部	中央部
EL 64.08m (S1-1)	100	2.27	7.30	D13@180	D13@180	D13@200	D13@200
EL 64.08m (S1-2)	100	1.53	7.30	D13@180	D13@180	D13@200	D13@200

位置	配筋量			
	短辺		長辺	
	端部 (mm ²)	中央部 (mm ²)	端部 (mm ²)	中央部 (mm ²)
EL 64.08m (S1-1)	705.6	705.6	635.0	635.0
EL 64.08m (S1-2)	705.6	705.6	635.0	635.0

第 3-2 表 使用材料の物性値

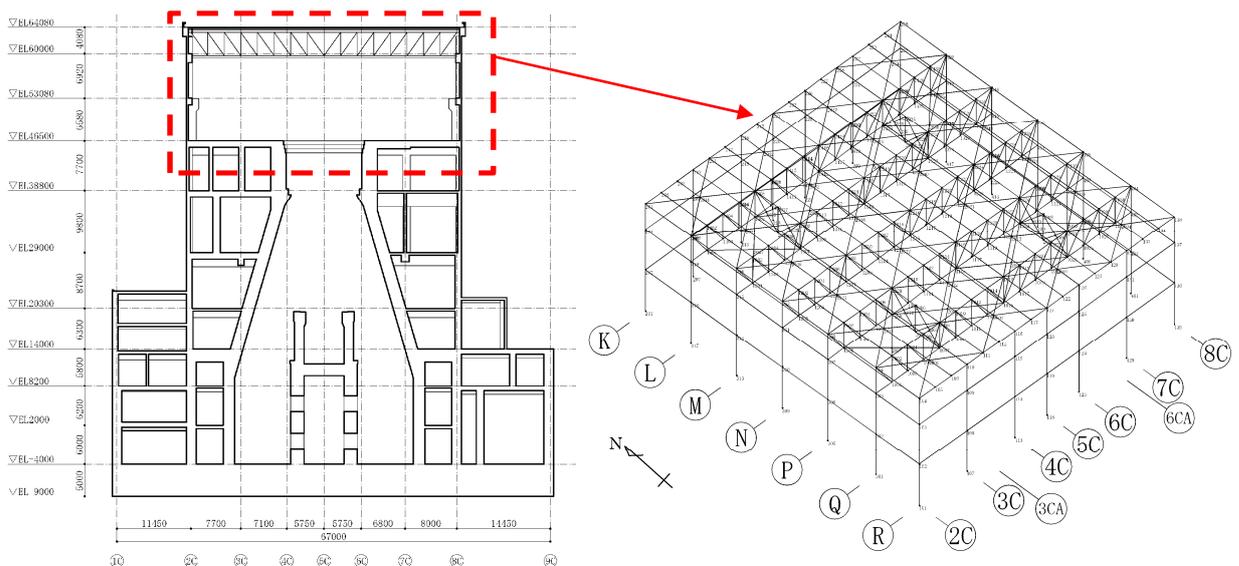
使用材料	単位体積重量 γ	ヤング係数 E	せん断弾性係数 G	ポアソン比
鉄筋 コンクリート	24.0kN/m ³	22.1kN/mm ²	9.21kN/mm ²	0.2

(2) 主トラス モデル化の基本方針

a. 応力解析モデルの概要

- ・主トラス上・下弦材は，軸・曲げ・せん断剛性のある梁要素，斜材と束材は軸剛性だけのトラス要素とする。
- ・各部材長さは部材芯位置でモデル化する。
- ・オペレーティングフロアより上部構造を3次元の立体架構でモデルする。

原子炉建屋断面図と屋根トラスの検討モデルを第3-1図に示す。



第3-1図 原子炉建屋断面図（E W側）及び立体架構モデル

b. 解析コード

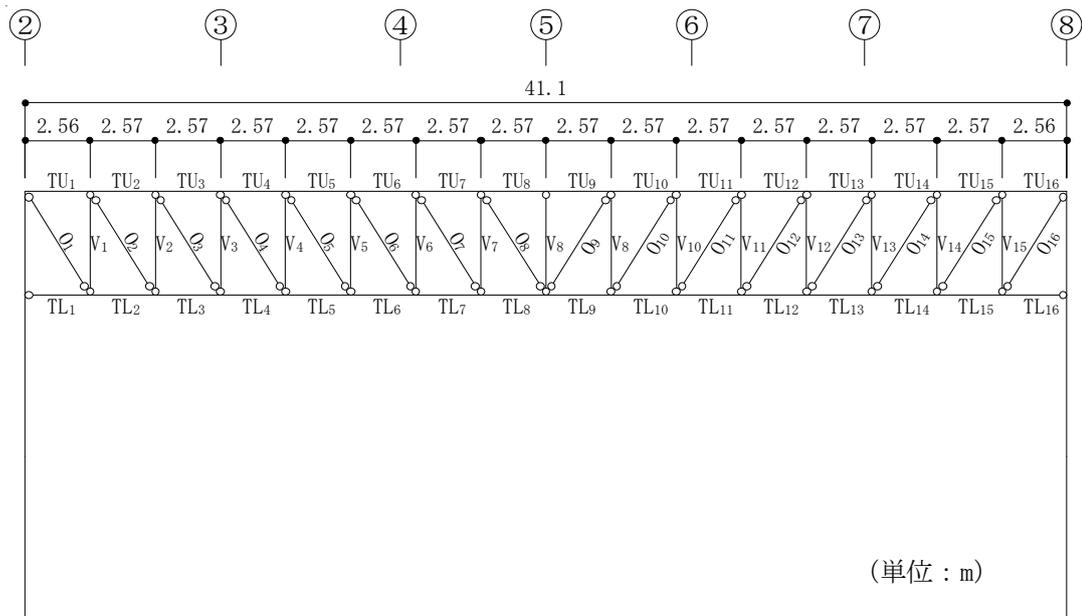
D Y N A 2 E Ver. 8. 0

c. 検討部材の形状・寸法

検討部材の形状と寸法を第3-1表に示す。また、部材位置を第3-2図に示す。

第3-1表 検討部材の形状・寸法

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	



第3-2図 部材位置図

6条(火山)-1-参考12-10

d. 使用材料の物性値

使用材料の物性値を第 3-2 表に示す。

第 3-2 表 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

(3) 評価方法

a. 屋根スラブの評価方法

「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

また、「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, $\alpha = \frac{4}{\frac{M}{Qd} + 1} \quad 1 \leq \alpha \leq 2$

b : 幅	f_s : コンクリートの短期許容せん断応力度
j : 応力中心間距離(7/8) d	$_w f_t$: せん断補強筋の短期許容引張応力度
d : 有効せい	α : せん断スパン比 $\frac{M}{Qd}$ による割増係数
p_w : せん断補強筋比 $p_w = \frac{a_w}{bx}$	M : 設計する梁の最大曲げモーメント
a_w : せん断補強筋の断面積	Q : 設計する梁の最大せん断力
x : せん断補強筋の間隔	

b. 主トラスの評価方法

「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応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。

(a) 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）に発生する応力度 σ_c 、 σ_t が、以下の式による応力度比は 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。

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

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

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

$$f_c : \text{許容圧縮応力度 (N/mm}^2\text{)} \quad \Lambda : \text{限界細長比} \quad \Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6F}}$$

$$f_t : \text{許容引張応力度 (N/mm}^2\text{)} \quad E : \text{ヤング係数}$$

$$\lambda : \text{圧縮材の細長比} \quad \nu = \frac{3}{2} + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2$$

(b) 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。

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

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

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

ここに,

$$\lambda_b = \sqrt{\frac{M_y}{M_e}} \quad _e \lambda_b = \frac{1}{\sqrt{0.6}}$$

i) 補剛区間内で曲げモーメントが直線的に変化する場合

$$_p \lambda_b = 0.6 + 0.3 \left(\frac{M_2}{M_1} \right) \quad C = 1.75 + 1.05 \left(\frac{M_2}{M_1} \right) + 0.3 \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^2 \leq 2.3$$

ii) 補剛区間内で曲げモーメントが最大となる場合

$$M_e = C \sqrt{\frac{\pi^4 EI_Y \cdot EI_w}{l_b^4} + \frac{\pi^2 EI_Y \cdot GJ}{l_b^2}}$$

- 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 ($F \cdot Z$)

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

4. 評価結果

屋根スラブの評価結果を第 4-1, 4-2 表, 主トラスの評価結果を第 4-3 表に示す。降下火砕物の堆積時において, 発生応力度が検定値を超えないことを確認した。

第 4-1 表 屋根スラブ (曲げモーメント) 評価結果
(短期許容応力度)

部位	設計配筋量 (mm^2)		発生曲げモーメント ($\text{kN} \cdot \text{m}$)		必要鉄筋量 (mm^2)		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
EL 64.08 (S1-2)	705.6	705.6	3.52	1.98	220.2	123.9	0.32	0.18

第 4-2 表 屋根スラブ (せん断力) 評価結果
(短期許容度応力度)

部位	発生せん断力 (KN)	せん断応力度 (N/mm^2)	検定比
EL 64.08 (S1-1)	13.67	0.295	0.28
EL 64.08 (S1-2)	9.21	0.199	0.19

第 4-3 表 主トラス 評価結果

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)	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

タービン建屋の建屋健全性評価について

1. 基本方針

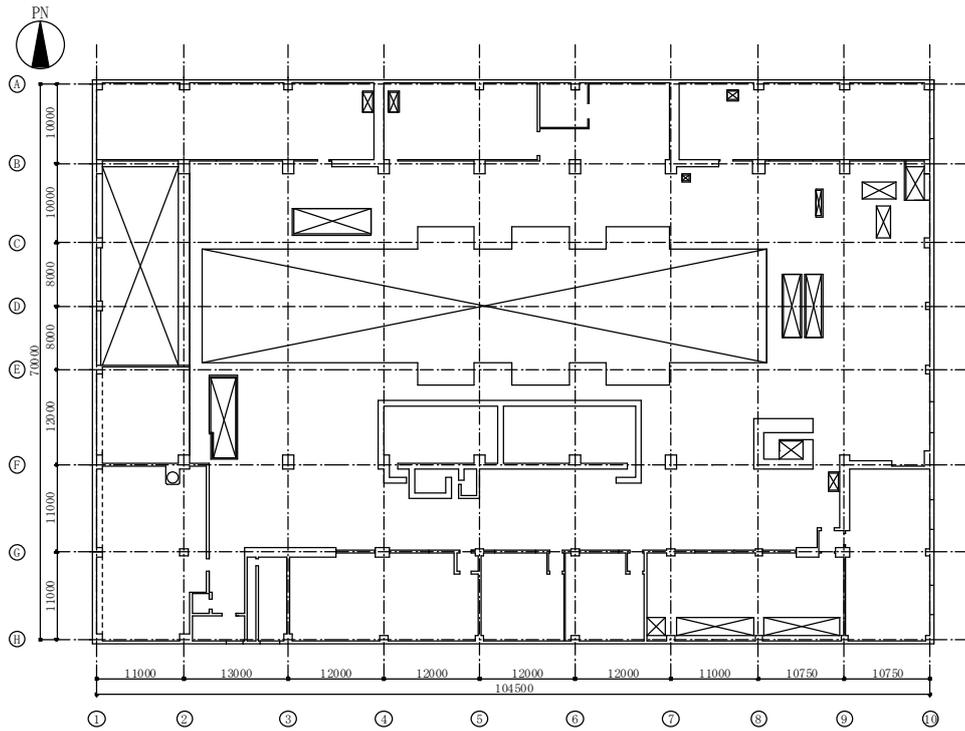
(1) 概要

降下火砕物の堆積荷重に対して各建屋が健全性を有することを、応力解析による評価によって確認する。設置許可においては、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）の安全機能を有する原子炉建屋と，自身がクラス1及び2施設に該当しない建屋のうち，構造的にもスパンが長い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。工事計画認可においては，屋根スラブ，主トラス及び二次部材の構造性能を確認し，建屋に求められる機能設計上の性能目標を満足していることを示す。参考資料－ 1 3では，タービン建屋について評価内容及び評価結果を示す。

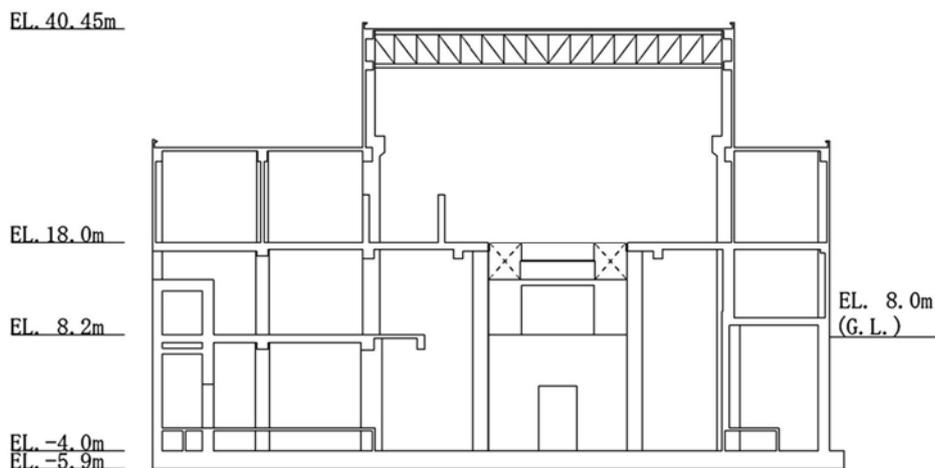
(2) 構造概要

タービン建屋は、地上2階、地下1階建で、平面が約70m（南北方向）×約105m（東西方向）の鉄筋コンクリート造（一部鉄骨造）の建物である。

タービン建屋の概略平面図を第1-1図に、概略断面図を第1-2図に示す



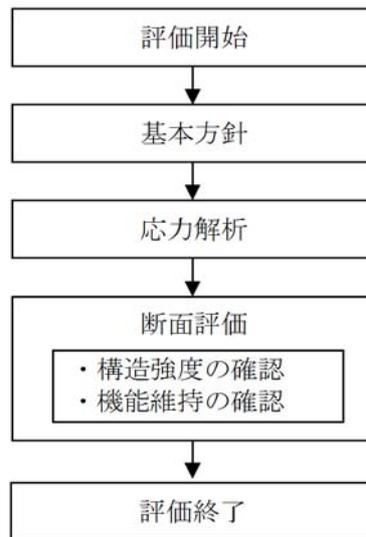
第1-1図 タービン建屋の概略平面図（EL. +18.0 m）



第1-2図 タービン建屋の概略断面図（NS方向）

(3) 評価方針

降下火砕物の堆積荷重に対して、応力解析による断面の評価を行うことで、建物の構造強度及び機能維持（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）の確認を行う。第1-3図に評価フローを示す。



第1-3図 各建屋の評価フロー

(4) 適用規格

本評価において、準拠する規格基準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法・同施行令
- ・ 平成12年建設省告示第2464号
- ・ 鋼構造設計規準－許容応力度設計法－（日本建築学会）
- ・ 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（日本建築学会）
- ・ 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）

2. 応力解析による評価方法

タービン建屋応力解析による評価対象部位は屋根スラブ及び主トラスとする。

(1) 評価対象部位及び評価方針

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。

- ・ 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」（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—」（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

a. 荷重

(a) 固定荷重 (DL)

固定荷重を第 2-1 表に示す。

第 2-1 表 固定荷重

固定荷重 (DL)
4,669N/m ²

(b) 積載荷重 (LL)

積載荷重を第 2-2 表に示す。

第 2-2 表 積載荷重 (LL)

積載荷重 (LL)
1,000N/m ²

(c) 積雪荷重 (SNL)

積雪荷重を第 2-3 表に示す。

第 2-3 表 積雪荷重 (SNL)

積雪荷重 (SNL)
$210\text{N}/\text{m}^2$

(d) 降下火砕物の堆積荷重 (VAL)

降下火砕物の堆積荷重を第 2-4 表に示す。

第 2-4 表 降下火砕物の堆積荷重 (VAL)

降下火砕物の堆積荷重 (VAL)
$7,355\text{N}/\text{m}^2$

(e) 荷重の組合せ

荷重の組合せを第 2-5 表に示す。

第 2-5 表 荷重の組合せ

荷重の組合せ
DL+LL+SNL+VAL

(3) 許容限界

応力解析による評価におけるタービン建屋の許容限界を第 2-6 表に示す。
また、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第 2-7,
2-8, 2-9 表に示す。

第 2-6 表 応力解析評価における許容限界

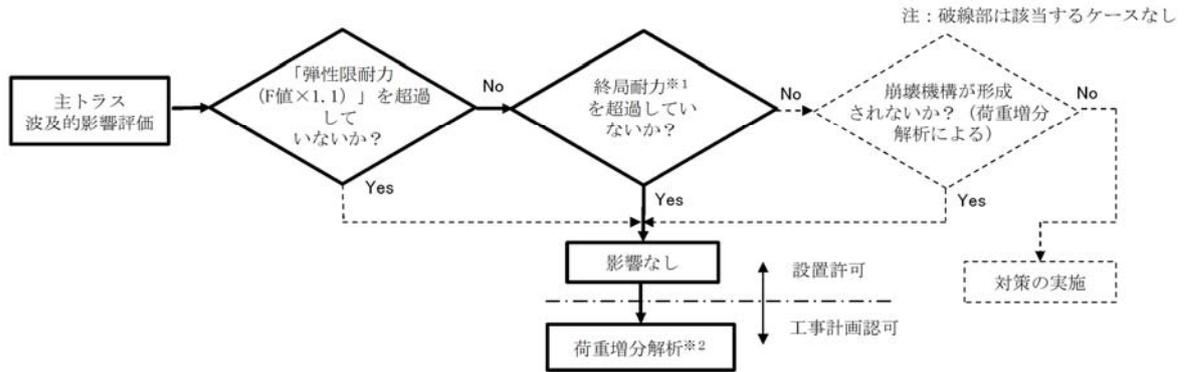
要求機能	機能設計上の性能目標	部位	機能維持のための考え方	許容限界
-	上位クラス設備に波及的影響を及ぼさないこと	屋根スラブ	落下しないことを確認 ^{※1}	終局耐力 ^{※2}
		主トラス	崩壊機構が形成されないことを確認	崩壊機構が形成されないこと ^{※3}

※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 機能に対しては終局耐力が許容限界となるが「RC 規準」の短期許容応力度で評価

※3 第 2-1 図のフローに基づき評価

主トラスの波及的影響評価のフローを第 2-1 図に示す。



※1 座屈耐力（修正若林式及び「鋼構造限界状態設計指針・同解説（日本建築学会）」

※2 一部の部材が弾性限耐力を超過した場合は、荷重増分解析により崩壊機構が形成されないことを確認する。

第 2-1 図 主トラス波及的影響評価フロー

第 2-7 表 鋼材の基準強度及び評価基準値

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
SS400 (SS41)	t ≤ 40	235	258.5	258.5

第 2-8 表 コンクリートの基準強度及び評価基準値

Fc (N/mm ²)	評価基準値 (N/mm ²)	
	圧縮	せん断
22.1	14.7	1.06

第 2-9 表 鉄筋の基準強度及び評価基準値

鉄筋種類	評価基準値 (N/mm ²)	
	引張及び圧縮	面外せん断補強
SD345 (SD35)	345	345

3. 応力解析モデル及び緒元

屋根スラブ及び主トラスの解析モデル及び緒元を以下に示す。

(1) 屋根スラブ モデル化の基本方針

「RC 規準」に基づいて、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第 3-1 表、使用材料の物性値を第 3-2 表に示す。

第 3-1 表 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			
				短辺		長辺	
				端部	中央部	端部	中央部
EL 40.65m	100	2.08	11.60	D13@200	D13@200	D13@200	D13@200

位置	配筋量			
	短辺		長辺	
	端部 (mm ²)	中央部 (mm ²)	端部 (mm ²)	中央部 (mm ²)
EL 40.65m	635.0	635.0	635.0	635.0

第 3-2 表 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/m ³	22.1kN/mm ²	9.21kN/mm ²	0.2

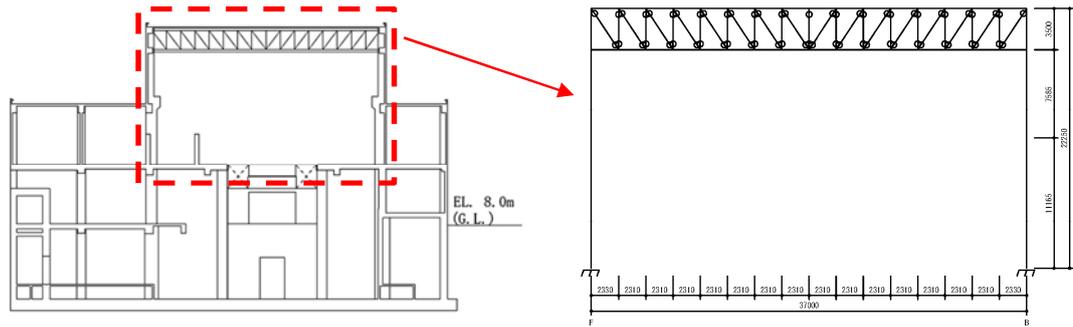
(2) 主トラス モデル化の基本方針

a. 応力解析モデルの概要

- ・主トラス上・下弦材は、軸・曲げ・せん断剛性のある梁要素，斜材，束材は軸剛性だけのトラス要素とする。
- ・各部材長さは部材芯位置でモデル化する。
- ・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 1 構面を取り出した 2 次元モデル*とする。

* 荷重増分解析を実施する場合は，3 次元モデルで実施する。

タービン建屋断面図と屋根トラスの検討モデルを第 3-1 図に示す。



第 3-1 図 タービン建屋断面図（NS 側）及び屋根トラス検討モデル

b. 解析コード

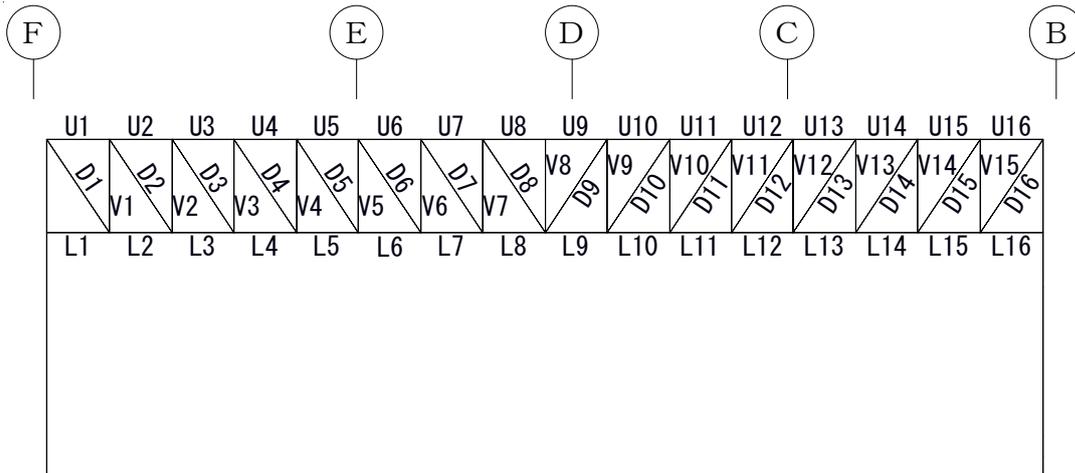
F A P 3 Ver. 5.0

c. 検討部材の形状・寸法

検討部材の形状と寸法を第 3-1 表に示す。また、部材位置を第 3-2 図に示す。

第 3-1 表 検討部材の形状・寸法

部位	部材符号	形状寸法	材質
上弦材	$U_1 \sim U_{16}$	H-428×407×20×35	SS400 (SS41)
下弦材	$L_1 \sim L_{16}$	H-428×407×20×35	
斜材	$D_1 \sim D_3$ $D_{14} \sim D_{16}$	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	
	$V_7 \sim V_9$	2Ls-130×130×9	



第 3-2 図 部材位置図

d. 使用材料の物性値

使用材料の物性値を第 3-2 表に示す。

第 3-2 表 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

(3) 評価方法

a. 屋根スラブの評価方法

「RC 規準」に基づき、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。また、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。

評価式は、参考資料－ 1 2 「原子炉建屋の建屋健全性評価について」に記載と同様。

b. 主トラスの評価方法

「S 規準」に基づき、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許容応力度を超えないことを確認する。

評価式は、参考資料－12「原子炉建屋の建屋健全性評価について」に記載と同様。また、主トラスの崩壊機構が形成されないことを確認する終局耐力の評価は以下の式を用いる。

・軸力のみを負担する部材の評価方法

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

n_o : 無次元初期座屈耐力
 λ : 圧縮材の細長比
 Λ : 限界細長比 $\Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6F}}$ ※2
 E : ヤング係数

【修正若林力※1 : 圧縮側耐力曲線】

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

$n = N / N_y$ N : 軸力 N_y : 降伏軸力
 n_o : 無次元化初期座屈耐力※2
 $\bar{\zeta}$: 無次元化圧縮側累積塑性歪
 $P_n = (n_E / 4) - 5$ $n_E = \frac{\pi^2 E}{\lambda_e^2 \sigma_y}$

・軸力と曲げを負担する部材の評価方法※3

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

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

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

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

$$C_b = 1.75 + 1.05 \left(\frac{M_2}{M_1} \right) + 0.3 \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^2 \leq 2.3$$

M_c : 横座屈限界耐力
 λ_b : 横座屈細長比 $\lambda_b = \frac{M_p}{M_e}$
 ${}_e\lambda_b$: 弾性限界細長比 ${}_e\lambda_b = 1/\sqrt{0.6}$
 ${}_p\lambda_b$: 塑性限界細長比 ${}_p\lambda_b = 0.6 + 0.3 \left(\frac{M_2}{M_1} \right)$
 M_e : 弾性横座屈モーメント
 EI_y : 弱軸まわりの曲げ剛性
 EI_w : 曲げねじり剛性
 GJ : 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
 ${}_k l_b$: 横座屈長さ
 M_p : 全塑性モーメント $M_p = F_y \cdot Z_p$
 F_y : 降伏強さ
 Z_p : 塑性断面係数

- ※1 谷口，加藤，他「鉄骨 X 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(1991年3月)
 ※2 「鋼構造設計規準（日本建築学会：1973年5月）」
 ※3 「鋼構造限界状態設計指針・同解説（日本建築学会：2010年2月）」

4. 評価結果

屋根スラブの評価結果を第 4-1, 4-2 表, 主トラスの評価結果を第 4-3 表に示す。主トラスは, 弾性限耐力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。

第 4-1 表 屋根スラブ（曲げモーメント）評価結果
 （検定：短期許容応力度）

部位	設計配筋量 (mm ²)		発生曲げモーメント (kN・m)		必要鉄筋量* (mm ²)		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

第 4-3 表 屋根スラブ（曲げモーメント）評価結果
 （検定短期許容応力度）

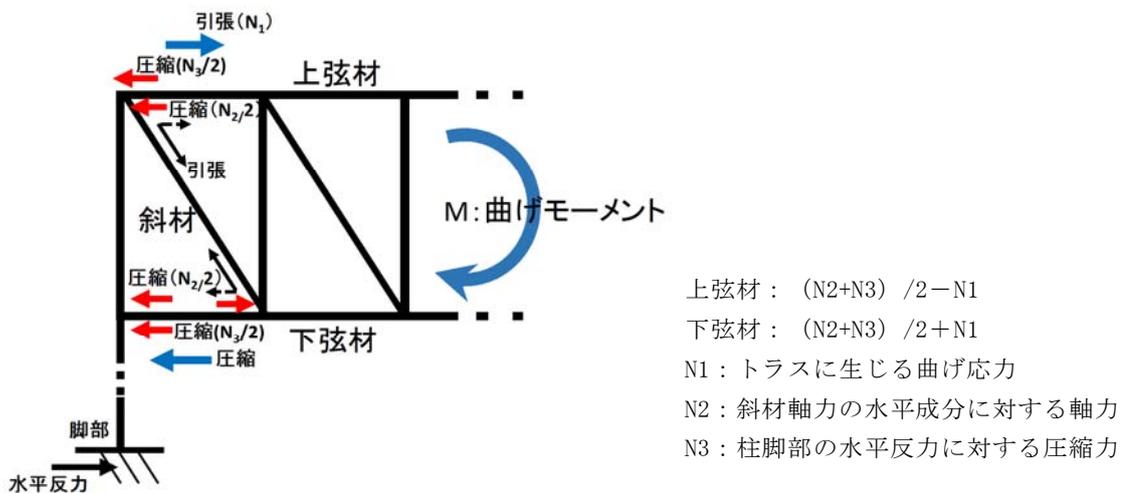
部位	発生せん断力 (KN)	せん断応力度 (N/mm ²)	検定比
EL 40.65	17.69	0.381	0.36

第4-2表 主トラスの評価結果（検定：弾性限耐力）

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)	179.9	250.0	0.96	U8, U9
	(曲げ)	59.9	258.0		
	(引張)	0 ^{*1}	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 ^{*2}	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 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。（概略を第4-1図に示す）

※2 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。



第4-1図 発生応力の概略図

第 4-3 表 主トラスの評価結果（検定：弾性限耐力）

部材	発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容値 (N/mm ²)	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		