

**女川原子力発電所2号炉
原子炉建屋屋根トラスの
解析モデルへの弾塑性解析の適用**

(第628回審査会合 [平成30年9月25日] 指摘事項に対する回答)

**平成30年11月29日
東北電力株式会社**

審査会合における指摘事項(屋根トラス)

No	審査会合日	項目
95	平成30年9月25日	基準地震動 S_s に対する評価方針において、屋根トラスの保守性を担保するため S_s 未満の地震による屋根スラブの剛性低下を考慮した考え方を提示すること。
96	平成30年9月25日	オペフロ位置に入力する鉛直方向の応答波について、質点系モデルでは屋根スラブが考慮されていないことから、屋根スラブの応答波における影響について確認し提示すること。
97	平成30年9月25日	屋根スラブにおいて合成梁効果を考慮することについて、既工認での実績並びに今回工認での目的、効果、妥当性及び適用性を提示すること。
98	平成30年9月25日	初期剛性比例型減衰を用いることの妥当性について、地盤－建屋連成系の1次固有周期とオペフロ位置における加速度応答スペクトルの卓越周期との関係及び各方向の一次固有振動数の関係を整理して説明を見直すこと。
99	平成30年9月25日	屋根トラスの地震応答解析における耐震壁の剛性低下モデルの考え方について、図に示している K 及び α の意味を提示するとともに、基本ケースと不確かさケースの関係性も踏まえて、考え方を整理して提示すること。
100	平成30年9月25日	屋根トラスの各部材のクライテリアについて、評価方法を具体的に整理するとともに、塑性変形を許容する場合には、機能要求の観点から屋根スラブが主な検討対象であることを明確にした上で検討すること。
101	平成30年9月25日	屋根スラブの面外変形に対する機能維持の評価方針について、先行プラントとの差異を確認した上で、構造成立性評価としてどのように機能維持を担保するのかを提示すること。

指摘事項No.95, 97に対する回答

No	審査会合日	項目
95	平成30年9月25日	基準地震動 S_s に対する評価方針において、屋根トラスの保守性を担保するため S_s 未満の地震による屋根スラブの剛性低下を考慮した考え方を提示すること。
97	平成30年9月25日	屋根スラブにおいて合成梁効果を考慮することについて、既工認での実績並びに今回工認での目的、効果、妥当性及び適用性を提示すること。

原子炉建屋屋根トラスの概要

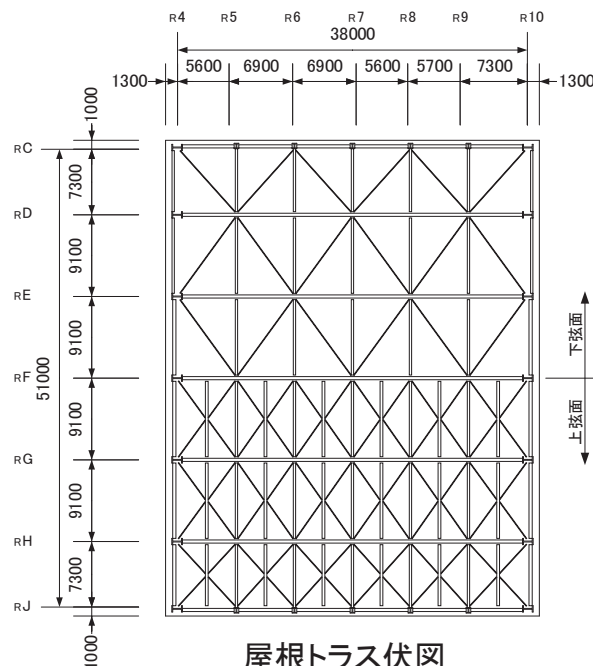
- 原子炉建屋の上部構造は、鉄筋コンクリート造陸屋根をもつ屋根トラスで構成されている。
- 屋根トラスの平面は、38.0m(南北)×51.0m(東西)の長方形をなしており、燃料取替床レベル(O.P.33.2m)からの高さは17.3mである。
- 屋根トラスについては3.11地震後に補強工事を実施している。
- 水平地震荷重は主トラスで負担する設計としている。

RF通り主トラスの部材諸元(RF通り)

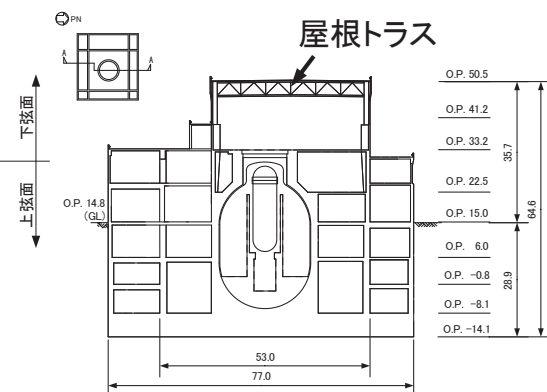
部位	使用部材
上弦材	H-350×350×12×19
下弦材	H-350×350×12×19
斜材	2CTs-175×350×12×19
	2CTs-150×300×10×15
束材	2CTs-100×200×8×12

屋根トラスの各部材の機能

部位	部材	機能
主トラス	上弦材	鉛直荷重の支持 フレームを構成する部材として 水平地震荷重、クレーン荷重の支持
	下弦材	
	束材	
	斜材	
サブトラス	上弦材	鉛直荷重の支持
	下弦材	
	斜材	
母屋	鉛直荷重の支持	
水平ブレース	-(仮設材)	



屋根トラス伏図

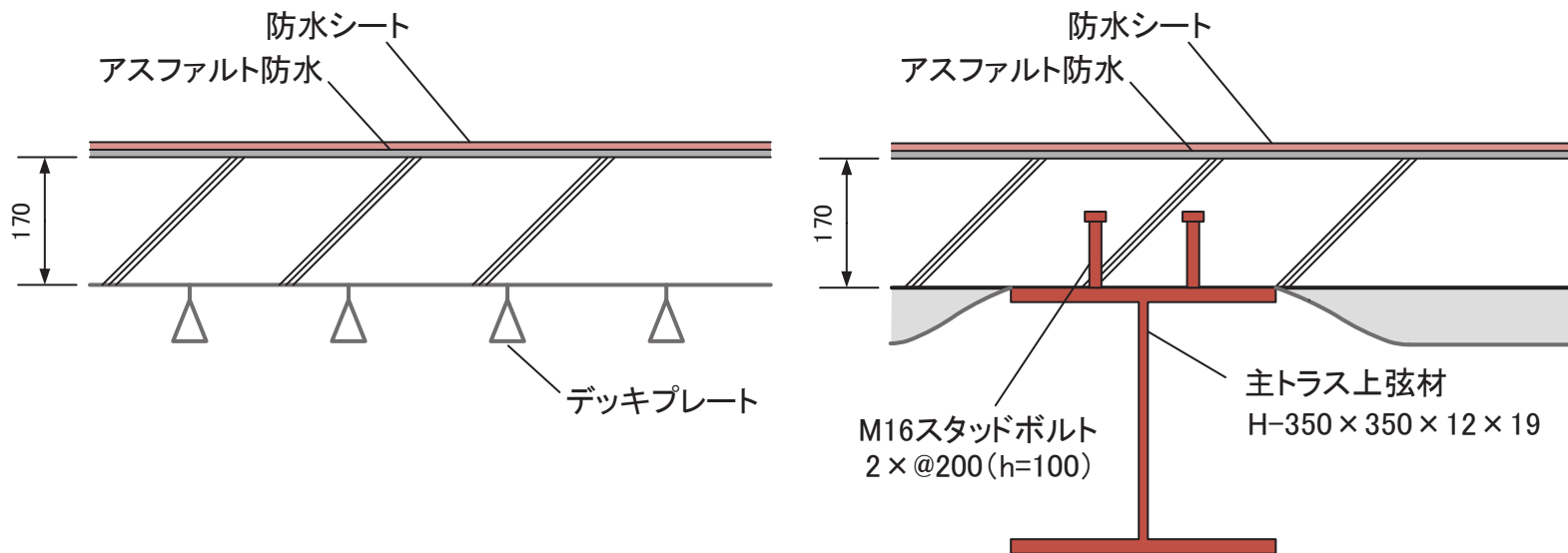


建屋断面図

原子炉建屋屋根トラスの概要

原子炉建屋屋根スラブの概要

- 原子炉建屋の屋根スラブは南北方向40.6m × 東西方向53.0mの平面寸法，厚さ17cmの鉄筋コンクリート構造である。
- 外周部は厚さ25cmの鉄筋コンクリート造の耐震壁で支持されており，南北方向に配置された5構面の主トラス，東西方向の5構面のサブトラスとサブトラスの中間の母屋で支持されている。
- 屋根スラブ下面に取りつく主トラス上弦材，サブトラス上弦材および母屋はH型断面の鋼材であり，屋根トラスはスタッドで屋根スラブと一体化することにより面内および面外に高い剛性を確保している。
- 屋根スラブには気密性の維持機能が要求されるため，換気性能とあいまって維持する方針である。なお，屋上面には防水材を施すことにより，防水性を確保している。



屋根スラブ断面図

解析モデルの概要

➤ 解析手法

- 原子炉建屋屋根トラスは、鉛直方向の地震動の影響を受けやすいと考えられるため、水平方向と鉛直方向の地震力の同時入力による評価を行うために3次元モデルによる地震応答解析を採用する。

➤ 解析モデル

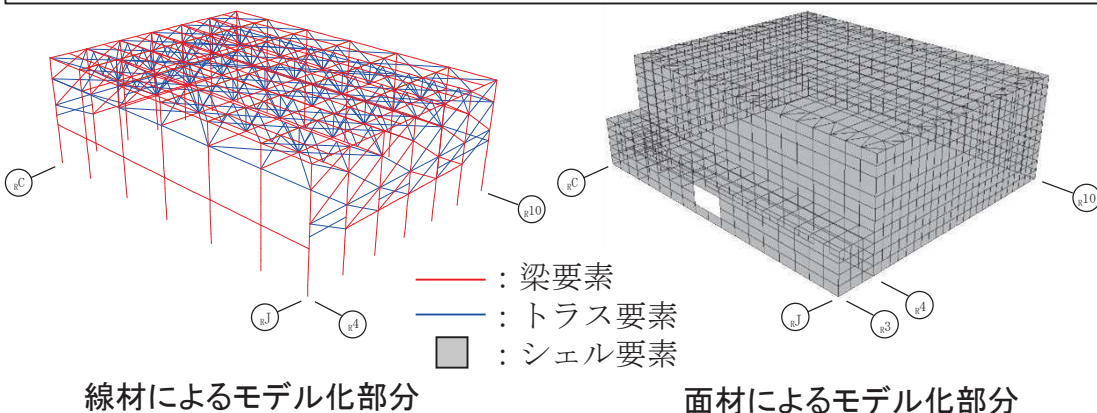
- 地震応答解析モデルは、燃料取替床レベル(O.P. 33.2m)より上部の躯体(屋根鉄骨、柱、梁、耐震壁、屋根スラブ、下屋部屋根スラブ)をモデル化した立体フレームモデルとする。
- 部材に発生する応力を地震応答解析によって直接評価できるモデルとしている。

➤ 屋根トラス部のモデル化

- 屋根トラス部は、主トラス(上下弦材、斜材、束材)、サブトラス(上下弦材、斜材)、母屋、水平ブレース(上下弦面)、外周鉄骨梁をモデル化する。
- 各鉄骨部材は軸、曲げ変形を考慮した梁要素(トラスの上下弦材等)と、軸変形のみを考慮したトラス要素(屋根面水平ブレース、トラスの斜材及び束材等)としてモデル化する。
- 耐震壁及び外周梁は各々シェル要素及び軸、曲げ変形を考慮した梁要素としてモデル化し、耐震壁の開口部についても考慮する。なお、柱脚の条件は固定とする。

➤ 屋根スラブのモデル化

- 屋根トラスは屋根スラブとスタッドにより一体化されていることにより高い剛性を確保しているため、屋根トラスの地震応答解析モデルにおいても屋根スラブの面内剛性を考慮することとする。なお、屋根トラス部材の応力評価に対する保守性を考慮し、屋根スラブの面外剛性は考慮しないこととする。
- 屋根スラブのシェル要素は主トラス、サブトラス、母屋の各交点で節点を共有するようにモデル化する。



解析に用いる材料定数

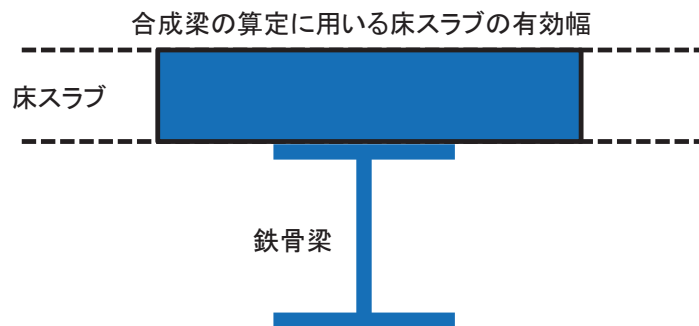
部位	材料	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン 比	減衰 定数
屋根トラス	鉄骨	2.05×10^5	0.3	0.02
躯体	コンクリート	2.51×10^4 ※1	0.2	0.05

※1: 地震応答解析モデルと同様の初期剛性低下については、地震観測記録の分析等を踏まえて、その影響を考慮することとする。

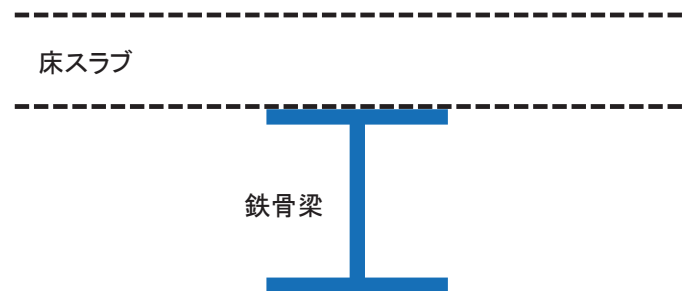
合成梁効果の扱い

- 屋根トラスは屋根スラブとスタッドにより一体化されていることにより面内および面外に高い剛性を確保しているが、既工認における屋根トラスの設計においては、この効果を安全側に無視していた。
- 一方、東北地方太平洋沖地震(3.11地震)に対するシミュレーション解析では、既工認ベースの屋根トラスモデルによる評価結果は、実被害※に比べ過大な応答になったため、屋根スラブの合成梁効果を取り入れたモデルによって再検討を行っている。しかし、再検討結果においても応答は過大で、十分低減されていない結果となった。
- 今回工認においては、シミュレーション解析結果を踏まえ、合成梁効果を考慮したモデルを採用する方針であったが、その効果はあまり大きいものではないことを踏まえ、**屋根スラブの面外剛性はモデル上考慮しないものに見直すこと**によって保守性を確保する。

※地震力を負担する主トラスに被害はなかった。地震力を負担しないサブトラスでは、JASS6の許容値未満の変形および高力ボルトの緩みを確認した。



合成梁を考慮する場合の概念図



合成梁を考慮しない場合の概念図

鉄骨梁と床スラブを緊結することにより、床スラブの一部が梁の上フランジとして有効に働くことを合成効果として考慮。

合成梁断面が全塑性モーメントを発揮するまで頭付きスタッドが損傷しないように設計されたものを完全合成梁といい、設計曲げモーメントを伝えるに十分なだけの頭付きスタッドを配置したものを不完全合成梁という。

(各種合成構造設計指針・同解説[日本建築学会])

今回工認モデルと3.11地震シミュレーションモデルとの比較

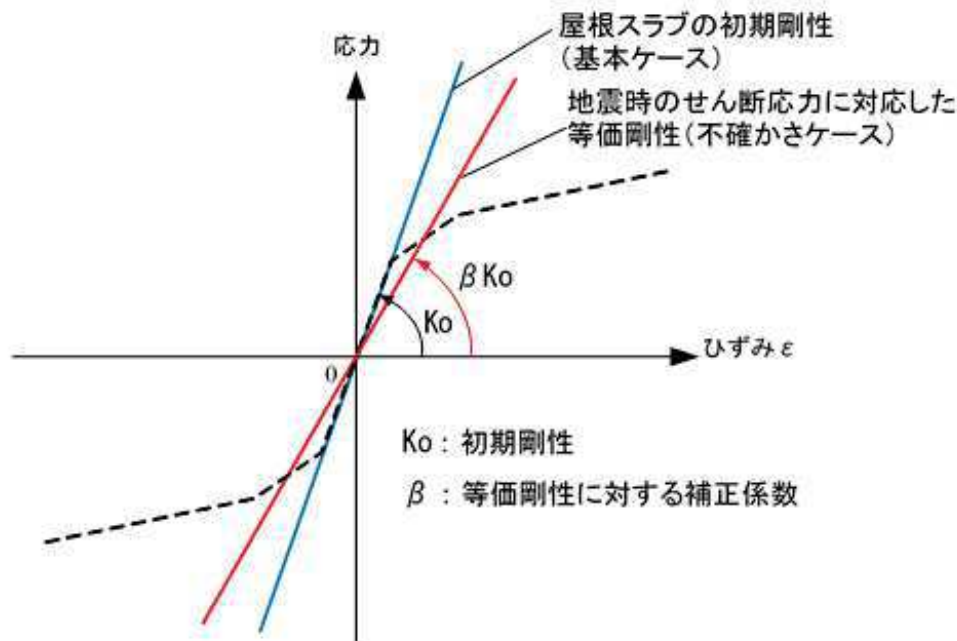
- 今回工認の屋根トラスの解析モデルにおいては、屋根トラスに対する保守性を考慮した設計的観点および東北地方太平洋沖地震(3.11地震)後に実施した補強工事等を考慮して、表に示す項目を、3.11地震のシミュレーション解析モデルから変更している。

項目		シミュレーション 解析モデル	今回工認モデル
目的		地震観測記録の再現	保守性を考慮した設計
モデル化	合成梁	主トラス上弦材,サブトラス上弦材,母屋,外周鉄骨梁を合成梁として考慮	考慮しない
	屋根面のシェル要素	面内剛性,面外剛性を考慮	面内剛性のみ考慮
	燃料取替床上部 耐震補強工事	工事前の状態(補強なし)	工事後の追設部材をモデル化
	積載荷重	実状を勘案し,屋根面の積載荷重は考慮しない	設計として屋根面の積載荷重を考慮

屋根スラブの剛性補正

- 屋根スラブのシェル要素については、解析コード上の制限により弾性モデルとなっている。
- 屋根スラブは面内剛性のみ考慮するものとするが、耐震壁に比べて生じる面内せん断ひずみは小さい※ことから設計剛性を基本ケースとする。詳細設計段階では、地震時の応答を踏まえて剛性低減を等価剛性(不確かさケース)として考慮したモデルについても検討する。

※第628回審査会合 資料1-1-3 別紙11添付3-3 3次元FEM等価線形モデルによるシミュレーション解析(原子炉建屋)



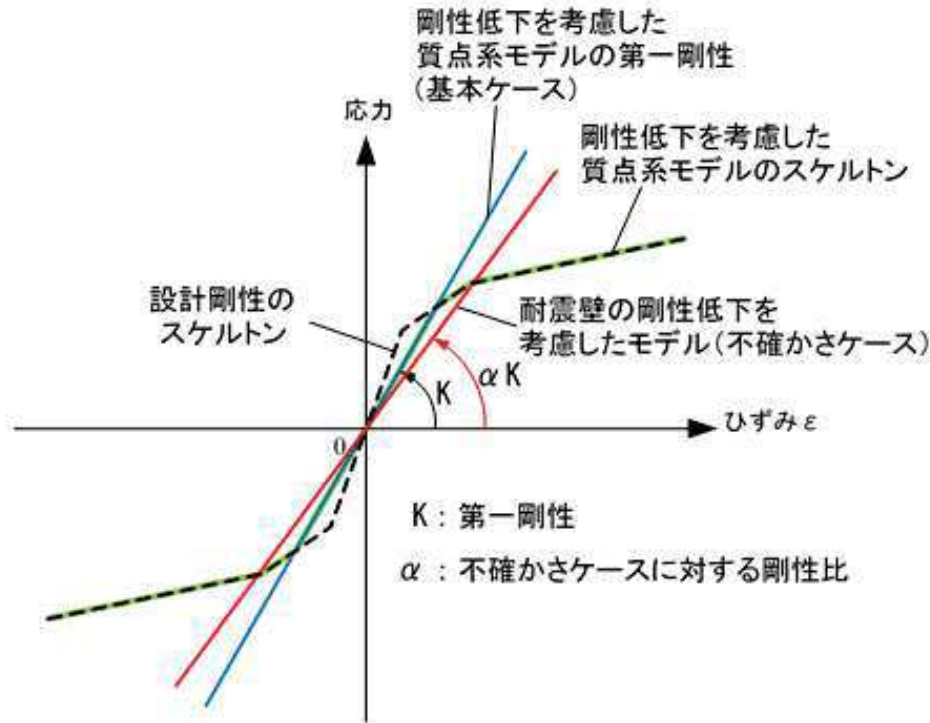
屋根スラブの面内剛性の考え方

指摘事項No.99に対する回答

No	審査会合日	項目
99	平成30年9月25日	屋根トラスの地震応答解析における耐震壁の剛性低下モデルの考え方について、図に示しているK及び α の意味を提示するとともに、基本ケースと不確かさケースの関係性も踏まえて、考え方を整理して提示すること。

耐震壁の剛性補正

- 耐震壁のシェル要素については、解析コード上の制限により弾性モデルとなっている。
- 耐震壁のモデル化にあたっては、質点系モデルにおける上部耐震壁の初期剛性低下に整合するよう剛性を補正する方針とする。また、基準地震動 S_s に対しては、質点系モデルにおける耐震壁の復元力特性モデルに基づく剛性低下(非線形化)が生じることから、質点系モデルの非線形化後と同等の剛性低下も考慮する。



耐震壁の剛性補正の考え方

指摘事項No.98に対する回答

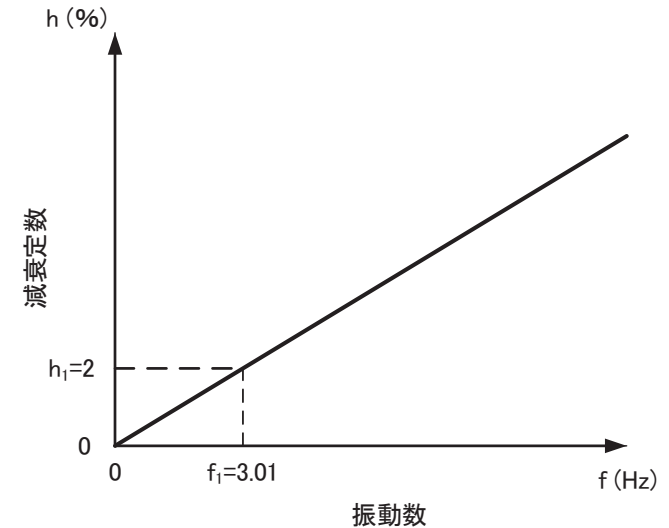
No	審査会合日	項目
98	平成30年9月25日	初期剛性比例型減衰を用いることの妥当性について、地盤－建屋連成系の1次固有周期とオペフロ位置における加速度応答スペクトルの卓越周期との関係及び各方向の一次固有振動数の関係を整理して説明を見直すこと。

材料減衰

- 地震応答解析における減衰評価は、水平材の応答に影響の大きい鉛直方向1次固有振動数(3.01Hz)に対して鉄骨造部分の減衰定数は2%、鉄筋コンクリート造及び鉄骨鉄筋コンクリート造部分の減衰定数は5%とし、NS、EW方向の短い方の1次周期に対して減衰定数を設定する。
- 今回工認では、原子炉建屋屋根トラスの地震応答解析における減衰評価について、鉄骨造の構造物に対して一般的に適用しており、先行サイトで実績のある剛性比例型としている。
- 剛性比例型減衰の特徴として高次モードの減衰を大きくとることになるが、高次モードが屋根トラスの応答へ及ぼす影響は小さいため、剛性比例型減衰の採用が屋根トラスの応答へ与える影響は小さいと考える。

原子炉建屋屋根トラスの暫定固有値解析結果

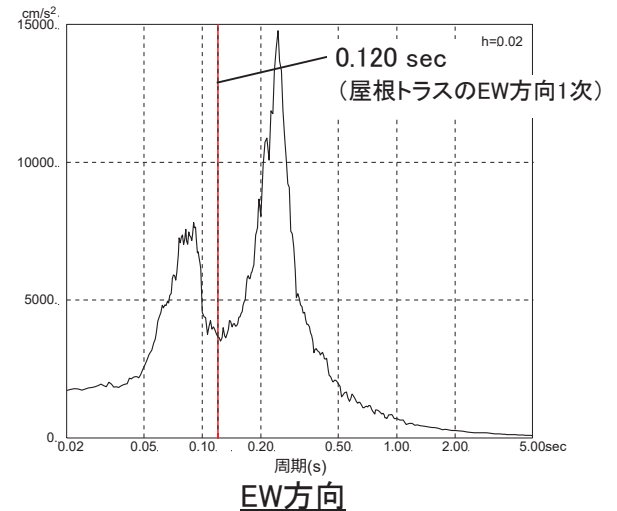
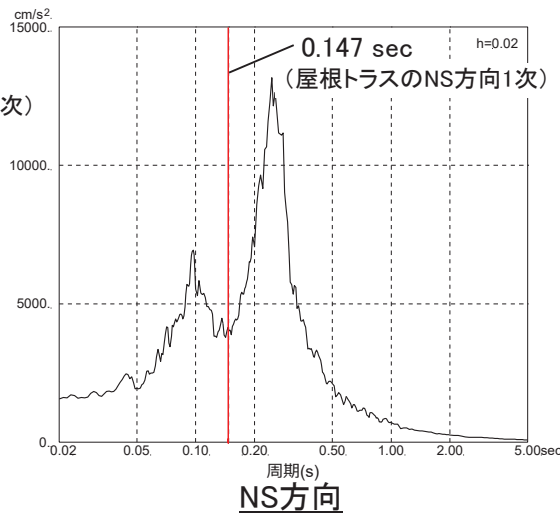
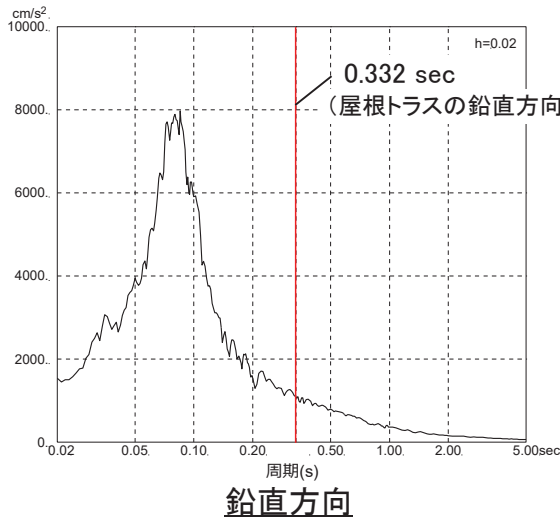
次数	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	刺激係数			備考
			NS方向 (X)	EW方向 (Y)	鉛直方向 (Z)	
1	3.01	0.332	0.036	0.008	2.272	鉛直方向1次
46	5.19	0.193	-0.010	0.140	1.350	鉛直方向2次
78	6.80	0.147	2.802	0.417	0.039	N S 方向1次
102	8.34	0.120	0.759	-7.982	0.320	E W 方向1次



剛性比例型減衰による
減衰定数と振動数の関係

剛性比例型減衰の妥当性

- 原子炉建屋の地盤-建屋連成系の水平方向の1次固有振動数はNS方向4.21Hz(0.237sec), EW方向4.36Hz(0.230sec)である。鉛直方向については、地盤-建屋相互作用系の1次固有振動数は9.96Hz(0.100sec)である。
- これらの1次固有振動数から屋根トラスの応答に影響が大きい成分を判断することは難しい。屋根トラスの構造面からは、鉛直方向の振動の影響が大きいと判断されるため、剛性比例型減衰の設定は鉛直方向の1次固有振動数に対して設定することとする。
- また、参考として屋根トラスの各方向の固有周期と解析モデルへの入力地震動の加速度応答スペクトルの関係を確認すると、入力地震動の応答スペクトルの卓越周期は原子炉建屋の地盤-建屋連成系の各方向の1次周期に概ね対応しており、いずれの方向についても赤線で示す屋根トラスの1次固有周期とは離れた周期となっている。
- 以上のことから、屋根トラスの応答は、建屋の各方向の1次固有振動数(固有周期)との関連性が小さいため減衰を過大に評価することが無く、屋根トラスモデルの固有振動数のうち、応答性状に支配的と考えられる鉛直の1次固有振動数(3.01Hz)に対して減衰定数が2%となる剛性比例型減衰を設定することは妥当であると考えられる。
- 詳細設計段階においては、剛性比例型減衰を採用することの検証として、剛性比例型以外の減衰(例えば鉛直1次と2次で規定したレイリー減衰)を用いて、高次モードの影響を確認することとする。



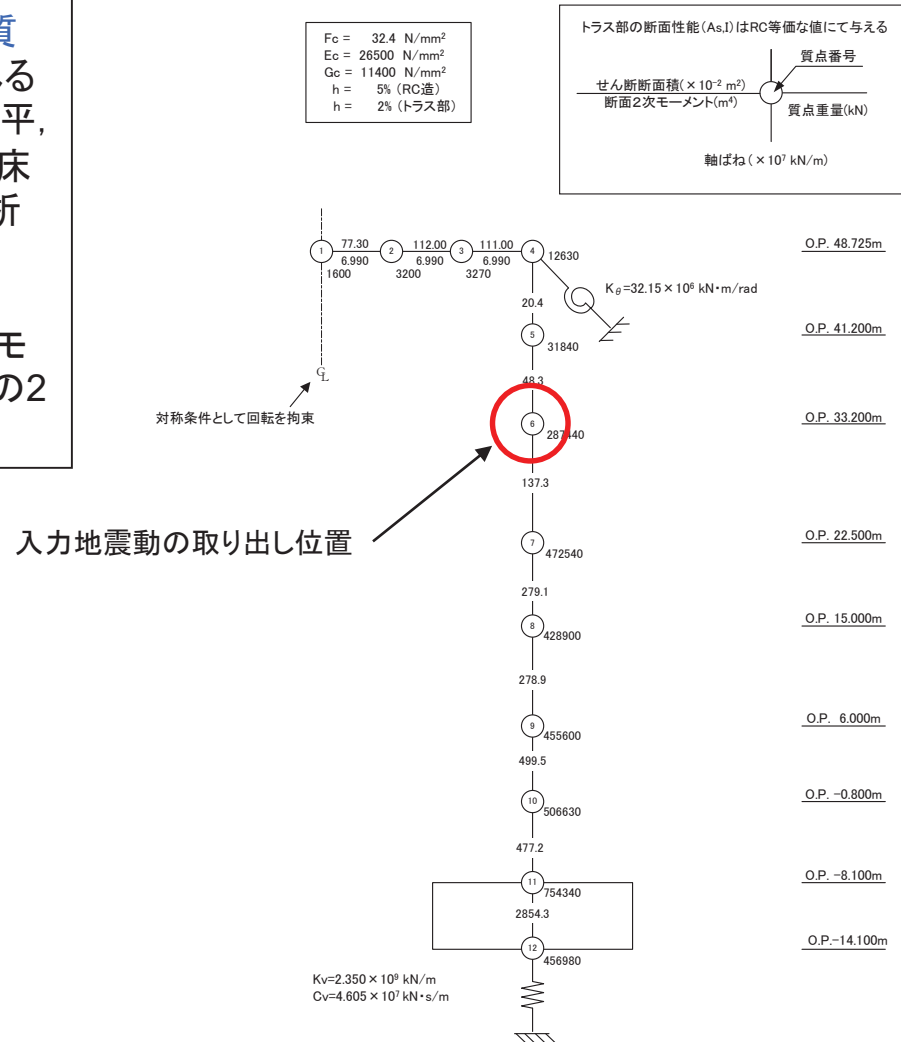
屋根トラスの固有周期と入力地震動の加速度応答スペクトルの関係

指摘事項No.96に対する回答

No	審査会合日	項目
96	平成30年9月25日	オペフロ位置に入力する鉛直方向の応答波について、質点系モデルでは屋根スラブが考慮されていないことから、屋根スラブの応答波における影響について確認し提示すること。

屋根トラスの入力地震動

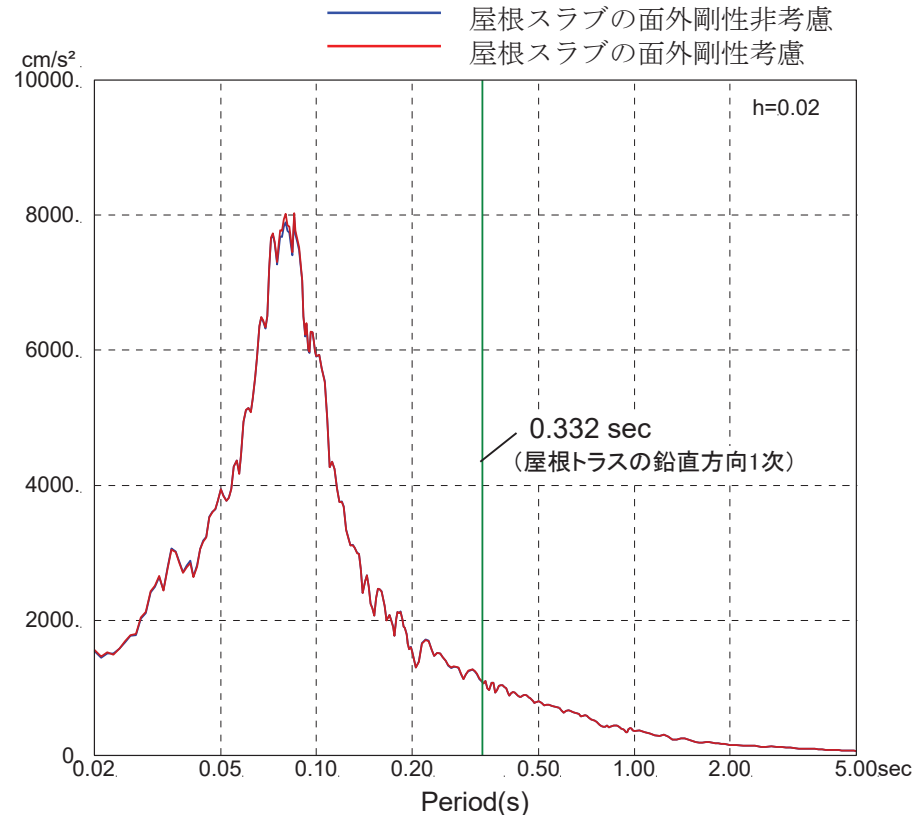
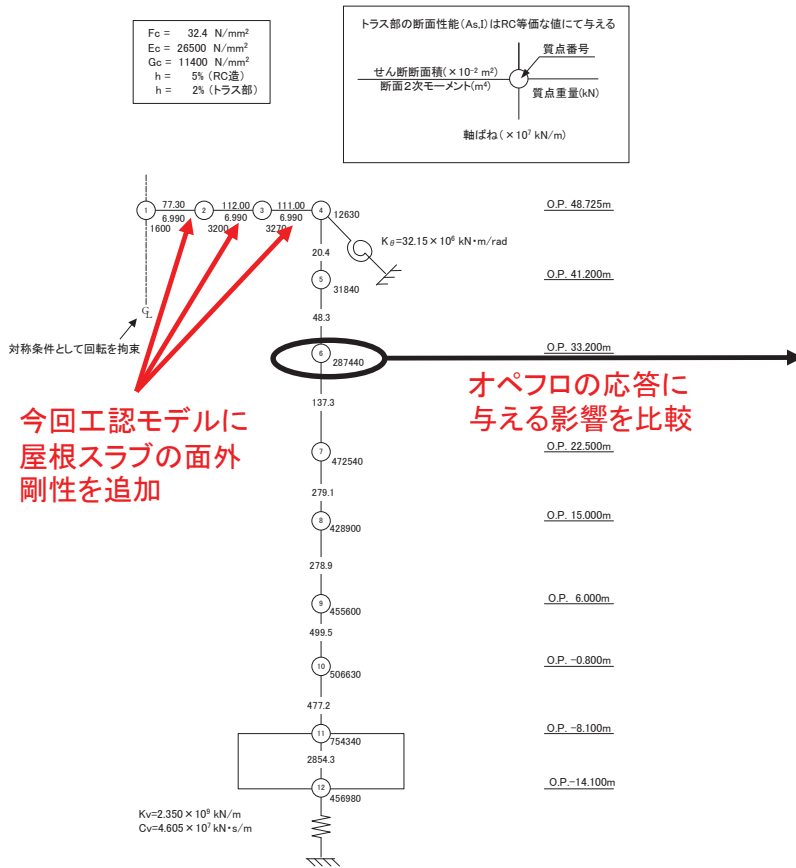
- 解析モデルへの入力地震動は、原子炉建屋の質点系モデルによる地震応答解析結果から得られる燃料取替床レベル(O.P.33.2m)の応答結果(水平、鉛直及び回転成分)を用いることとし、燃料取替床位置を固定として、同時入力による地震応答解析を実施する。
- 原子炉建屋水平方向の質点系モデルは床ばねモデルを採用しているため、入力波はモデル脚部の2質点の平均波を入力する。



入力地震動の取り出し位置
((例)質点系モデル 鉛直方向)

屋根トラスの入力地震動に係る影響検討

- 屋根トラスの解析モデルの入力動としている鉛直方向の質点系モデルによるオペフロの応答算定においては、屋根スラブの面外剛性を考慮していないことから、**屋根スラブの面外剛性の有無によるオペフロの応答への影響**について検討を行った。
- 鉛直方向の質点系モデルについて、今回工認用モデルと、今回工認用モデルに屋根スラブの面外剛性を追加した場合について、オペフロの応答スペクトルを比較した結果、両者はほぼ同じスペクトルであり影響は小さい。



原子炉建屋 鉛直方向 質点系モデル

原子炉建屋 オペフロ 応答スペクトルの比較
(Ss-D2, 鉛直方向)

指摘事項No.100, 101に対する回答

No	審査会合日	項目
100	平成30年9月25日	屋根トラスの各部材のクライテリアについて、評価方法を具体的に整理するとともに、塑性変形を許容する場合には、機能要求の観点から屋根スラブが主な検討対象であることを明確にした上で検討すること。
101	平成30年9月25日	屋根スラブの面外変形に対する機能維持の評価方針について、先行プラントとの差異を確認した上で、構造成立性評価としてどのように機能維持を担保するのかを提示すること。

弾塑性解析を採用することの目的

- 原子炉建屋屋根トラスについては、基準地震動 S_s による地震動の増大に伴い、トラスを構成する部材の一部が塑性域に入ると考えられるが、弾性解析では当該部材の塑性化による影響を考慮できないため、解析と実現象に乖離が生じることになる。
- そこで今回工認では、屋根トラスの弾塑性挙動を適切に評価することを目的として、部材の弾塑性特性を考慮した地震応答解析を採用する予定としている。
- 原子炉建屋屋根トラスの応力解析に弾塑性解析を取り入れることによる利点としては、既工認で採用していた弾性解析では表現出来ないような大入力時の弾塑性挙動を評価できることにある。
- 弾塑性挙動の適切な評価に当たっては、部材の弾塑性特性を適切に設定し解析を実施する必要があると考えられる。
- 今回工認で採用予定の屋根トラス部材の弾塑性特性としては、軸力のみを負担するトラス要素に対してのみ弾塑性特性として修正若林モデルを採用する予定である。
- 修正若林モデルを用いた弾塑性解析を実施することにより、一部部材の塑性化を考慮することとなるため、当該部材のクライテリアについて整理する。

既工認と今回工認における解析モデルの比較

項目	既工認	今回工認
解析手法	・静的応力解析	・時刻歴応力解析（弾塑性解析）
解析コード	・SD（鹿島建設所有）	・fappase（鹿島建設所有）
モデル化	・2次元フレームモデル	・3次元フレームモデル
要素分割	梁要素：主トラスの上下弦材，鉄骨柱，RC柱 トラス要素：主トラスの斜材，束材	梁要素：主トラスおよびサブトラスの上下弦材，母屋，外周鉄骨梁，鉄骨柱，RC柱 トラス要素：主トラスの斜材，束材，サブトラスの斜材，水平ブレース シェル要素：耐震壁，屋根スラブ
材料物性	・鉄骨のヤング係数 $E = 2.1 \times 10^7$ (t/m ²) ・コンクリートのヤング係数 $E = 2.7 \times 10^6$ (t/m ²) ・コンクリートのポアソン比 $\nu = 0.167$	・鉄骨のヤング係数 $E = 2.05 \times 10^5$ (N/mm ²) ・コンクリートのヤング係数 $E = 2.51 \times 10^4$ (N/mm ²) ※1 ・コンクリートのポアソン比 $\nu = 0.2$ ※2
評価方法	・S1地震および静的地震力に対して短期許容応力度設計	・Ss地震に対し主トラスの各部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認 ・弾塑性特性（修正若林モデル）を適用する部材※3が過度な塑性化はしないことを確認
地震荷重	・水平：原子炉建屋の質点系モデルの地震応答解析結果に基づく荷重（変位）を静的に考慮 ・鉛直：静的震度を鉛直力として入力	・水平および鉛直：モデル脚部に原子炉建屋の質点系モデルの地震応答解析による応答を同時入力

※1：コンクリートのヤング係数としては，日本建築学会「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」（1999）による計算式により算定した数値を用いる。

※2：適用基準を日本建築学会「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」（1999）に見直したことによる。

※3：軸力のみを負担するトラス要素でモデル化した部材に弾塑性特性を考慮する。

要求機能に対する設計方針(設計クライテリア)

- 屋根トラスの要求機能は屋根スラブの間接支持構造物であり、基準地震動Ssに対し二次格納施設のバウンダリを構成する屋根スラブの要求機能である気密性が確保されるように屋根トラスの設計を行う。
- 屋根スラブの評価方針は、面内方向については屋根トラスの地震応答解析モデルにおいて屋根スラブの面内剛性を考慮しているため、屋根スラブに発生する面内応力を対象に機能維持評価を実施する。面外方向については、質点系モデルの屋根面に対応する鉛直方向震度を用いて、サブトラス上弦材と母屋に支持される一方向版として評価する。また、屋根トラスの地震応答解析モデルにおいては屋根スラブの面外剛性は考慮していないが、詳細設計段階では面外剛性を考慮した解析により、屋根スラブの応答性状や応力分布などの確認を行う。
- 屋根トラスの評価方針については、基準地震動Ssに対して屋根スラブを支持できることを確認する。
- なお、屋根スラブにはひび割れに対して追従性のある防水材を全面に施工することにより、防水性を確保している。また、屋根スラブには防水材の他に下部の全面にデッキプレートを敷設しており、これらは気密性に対し有効な機能を及ぼすと考えられるが、今回の気密性の検討においては、特にその性能は考慮しない。

機能維持の評価方針

部位	要求機能	評価方針
屋根スラブ	気密性	<p>(面内) 概ね弾性範囲内であることを算定される応力度より確認する。弾性範囲を超える場合は、面内せん断ひずみの許容値である最大せん断ひずみ (2.0×10^{-3}) での漏えい量を算定し換気能力を下回ることを確認する。</p> <p>(面外) 辺長比を考慮して、サブトラス上弦材と母屋に支持される一方向版として、鉛直方向の震度を考慮して、面外曲げに対して、鉄筋が降伏しないこと※¹を確認する。(鉄筋が降伏する場合は別途詳細検討)</p>
屋根トラス	間接支持構造物	<p>基準地震動Ssに対して屋根スラブを支持できること。 (各部材のクライテリアは「各部材のクライテリアについて」参照)</p>

※1 鋼材の基準強度1.1倍を超えないこと

各部材のクライテリアについて

- 弾性部材としてモデル化している上弦材，下弦材，母屋については，**主要部材が弾性範囲であることを確認する方針とする。**
- 弾塑性特性を考慮してモデル化している斜材，束材については，**過度な塑性化はしないことを確認する方針とする。**ただし，**主トラスの斜材，束材については，既工認時から地震力を負担する部材として取り扱われており，既工認と同様に主要部材が弾性範囲であることを確認する方針とする。**
- 弾性範囲であることを確認する部材について，弾性範囲を上回る応答が生じた場合は別途詳細な検討を行う。
- 過度な塑性化はしないことの確認に当たっては，各部材の累積塑性変形倍率を整理した上で，累積塑性変形倍率が最も大きい部材について，破断の可能性がないことを検討する。

今回工認における屋根トラス各部材のクライテリア

評価部位		要求機能	弾塑性特性	評価方法
主トラス	上弦材	鉛直荷重の支持， フレームを構成する部材として水平地震荷重，クレーン荷重の支持	考慮しない（弾性）	主要部材が弾性範囲であることを確認※1 （弾性範囲を上回る場合は別途詳細検討）
	下弦材		弾塑性（修正若林モデル）	
	斜材			
	束材			
サブトラス	上弦材	鉛直荷重の支持	考慮しない（弾性）	主要部材が弾性範囲であることを確認※1 （弾性範囲を上回る場合は別途詳細検討）
	下弦材			
	斜材		弾塑性（修正若林モデル）	過度な塑性化はしないことを確認
母屋		鉛直荷重の支持	考慮しない（弾性）	主要部材が弾性範囲であることを確認※1 （弾性範囲を上回る場合は別途詳細検討）
水平 ブレース	上弦面	-（仮設材）	弾塑性（修正若林モデル）	仮設材のため評価対象外
	下弦面	-（仮設材）		仮設材のため評価対象外

※1 鋼材の基準強度1.1倍を超えないこと