

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-025-01
提出年月日	2022年12月12日

原子炉建物の耐震性についての計算書に関する
補足説明資料

2022年12月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

1. 工事計画添付書類に係る補足説明資料

VI-2-2-3「原子炉建物の耐震性についての計算書」及びVI-2-9-3-1「原子炉建物原子炉棟（二次格納施設）の耐震性についての計算書」の記載内容を補足するための資料を以下に示す。

今回提出範囲：

別紙 1 応力解析における既工認と今回工認の解析モデル及び手法の比較

別紙 1-1 原子炉建物屋根トラスの解析モデルと設計クライテリアについて

別紙 1-1-1 原子炉建物屋根トラスの入力地震動に係る影響検討について

別紙 1-2 原子炉建物屋根トラスの耐震補強について

別紙 1-3 屋根トラス評価モデルにおける減衰について

別紙 2 応力解析におけるモデル化、境界条件及び拘束条件の考え方

別紙 3 応力解析における断面の評価部位の選定

別紙 3-1 屋根スラブ及び床スラブの固有振動数について

別紙 4 原子炉建物の既工認時の設計用地震力と今回工認における静的地震力及び弾性設計用地震力 S_d による地震力の比較

別紙 5 屋根スラブの面外剛性を考慮した影響検討

別紙 1 応力解析における既工認と今回工認の
解析モデル及び手法の比較

目 次

1. 概要 別紙 1-1
2. 応力解析モデル及び手法の比較 別紙 1-2

別紙 1-1 原子炉建物屋根トラスの解析モデルと設計クライテリアについて

別紙 1-1-1 原子炉建物屋根トラスの入力地震動に係る影響検討について

別紙 1-2 原子炉建物屋根トラスの耐震補強について

別紙 1-3 屋根トラス評価モデルにおける減衰について

1. 概要

本資料は、原子炉建物屋根トラスの既工認時及び今回工認時の応力解析モデル及び手法の比較を示すものである。

2. 応力解析モデル及び手法の比較

原子炉建物屋根トラスの応力解析モデル及び手法の比較を表 2-1 に示す。また、今回工認時の応力解析モデルを図 2-1 に示す。

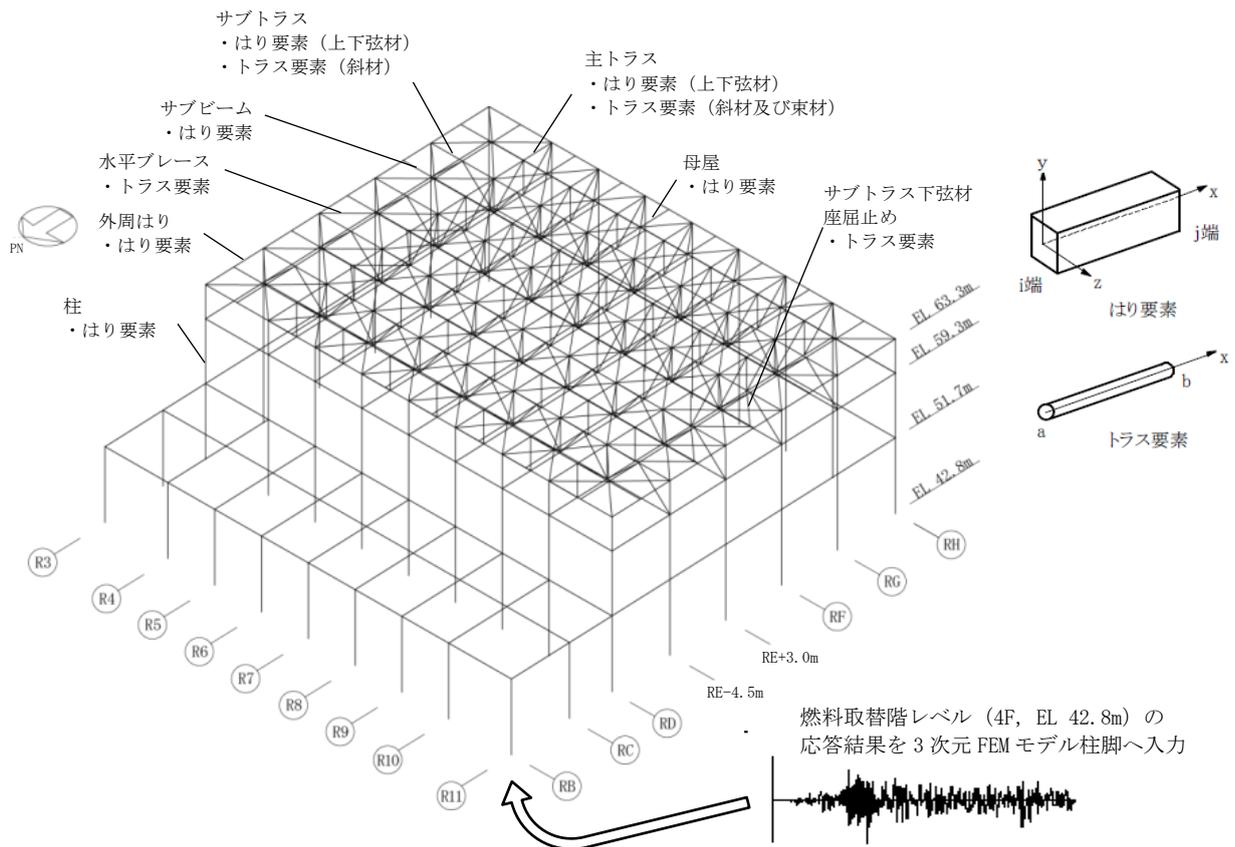
比較に用いる既工認時の応力解析モデル及び手法は、昭和 59 年 2 月 24 日付け 58 資庁第 15180 号にて認可された工事計画の IV-2-4-2 「原子炉建物の耐震性についての計算書」（以下「既工認」という。）のものである。

表 2-1 応力解析モデル及び手法の比較 (原子炉建物屋根トラス)

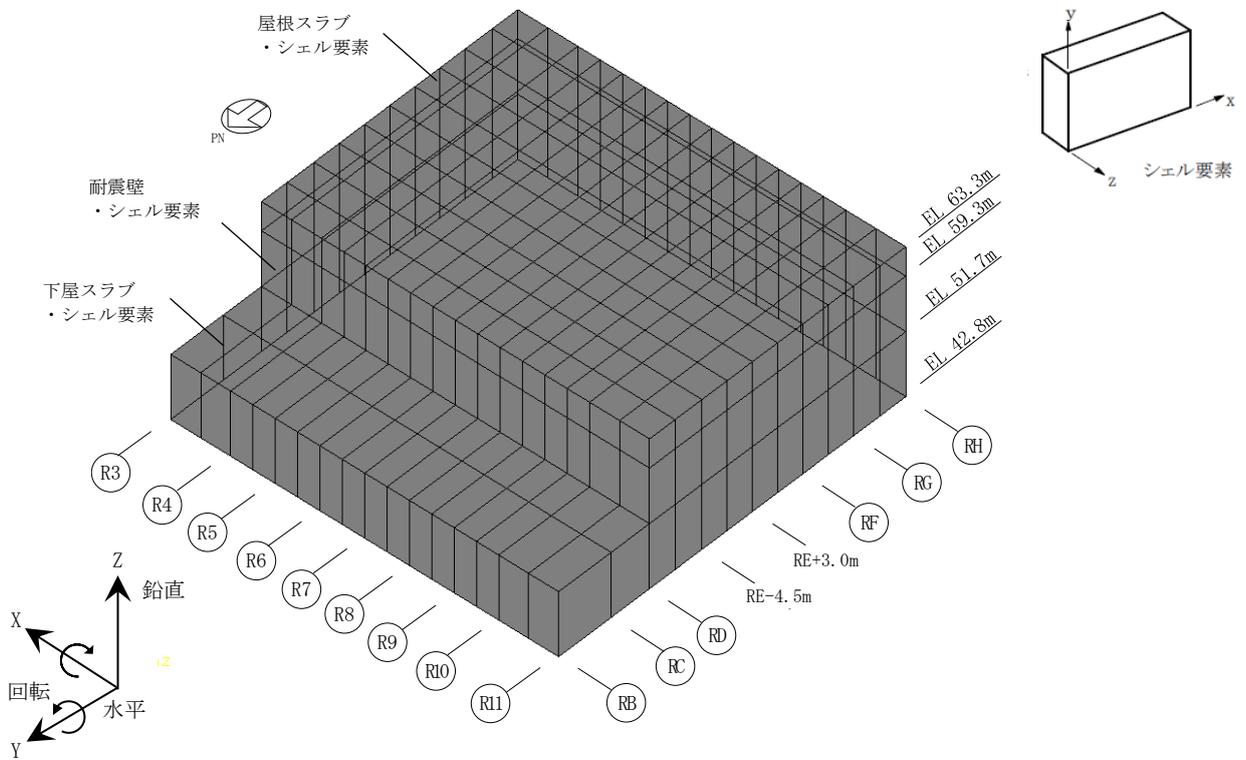
項目	内容	既工認	今回工認	備考
解析手法		2次元フレームモデルを用いた応力解析 (静的弾性解析)	3次元 F E Mモデルを用いた応力解析 (時刻歴弾塑性解析)	①, ②
解析コード		S D	f a p p a s e	②
モデル	材料物性	検討時の規準に基づき設定 ・コンクリートのヤング係数： E = 2.06 × 10 ⁴ N/mm ² (SI換算) ・コンクリートのポアソン比： ν = 0.167 ・鋼材のヤング係数： E = 2.05 × 10 ⁵ N/mm ² (SI換算) ・鋼材のポアソン比： ν = 0.3	適用規準の見直しによる再設定 ・コンクリートのヤング係数： E = 2.25 × 10 ⁴ N/mm ² ・コンクリートのポアソン比： ν = 0.2 ・鋼材のヤング係数： E = 2.05 × 10 ⁵ N/mm ² ・鋼材のポアソン比： ν = 0.3	③, ④
	減衰	—	剛性比例型減衰 ・コンクリート：5% ・鋼材：2%	—
	要素種別	・はり要素：トラスの上下弦材，柱， はり ・トラス要素：トラスの斜材・束材	・はり要素：トラスの上下弦材，サブ ビーム，母屋，柱，はり ・トラス要素：トラスの斜材・束材，水 平ブレース，サブトラス 下弦材座屈止め ・シェル要素：耐震壁，屋根スラブ，下 屋スラブ	—
	境界条件	・燃料取替階 (4F, EL 42.8m) より上部 の各通りを2次元フレームモデルとし てモデル化 ・燃料取替階 (4F, EL 42.8m) の床スラ ブ上端との接点は固定端 ・トラスの上下弦材の端部は剛接合 ・トラスの斜材・束材の端部はピン接合	・燃料取替階 (4F, EL 42.8m) より上部 を3次元 F E Mモデルとしてモデル化 ・燃料取替階 (4F, EL 42.8m) を剛床と し，燃料取替階 (4F, EL 42.8m) の柱 の柱脚は同変位条件で固定端 ・トラスの上下弦材及びサブビームの端 部は剛接合 ・トラスの斜材・束材，水平ブレース， 母屋及びサブトラス下弦材座屈止めの 端部はピン接合	—
	非線形 特性	考慮せず	考慮する (トラスの斜材・束材，水平ブ レース及びサブトラス下弦材座屈止めは 修正若林モデルで座屈を考慮)	②
地震荷重との組合せ		S ₁ 地震時：G + P + S ₁ G：固定荷重 P：積載荷重 S ₁ ：S ₁ 地震荷重	S _s 地震時：G + P + S _{NL} + S _s G：固定荷重 P：積載荷重 S _{NL} ：積雪荷重 S _s ：S _s 地震荷重	⑤
荷重の 設定	固定荷重 及び 積載荷重	躯体自重，クレーン荷重，積載荷重	躯体自重，クレーン荷重，積載荷重 (屋根トラスの耐震補強工事を反映)	⑥
	積雪荷重	地震荷重との組合せは考慮せず	地震荷重との組合せを考慮する	⑤
	地震荷重	基準地震動 S ₁ により算定される地震力 及び静的地震力を包絡した地震力	基準地震動 S _s による地震力	—
評価方法	応力解析	各部材に生じる応力が許容応力度を超え ないことを確認	各部材に生じる応力が弾性限強度 (鋼材 の基準強度に1.1倍を考慮) を超えない ことを確認 (弾性限強度を上回る場合は 破断しないことを確認)	⑦, ⑧, ⑨

【具体的な反映事項】（表の備考欄に対応）

- ① 原子炉建物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地震力の同時入力による評価を適切に行うことを目的として3次元FEMモデルによる弾塑性時刻歴応力解析を採用する。
- ② トラスを構成する部材の一部が塑性領域に入ると考えられるため、弾塑性挙動を適切に評価することを目的として採用する。（詳細は別紙1-1「原子炉建物屋根トラスの解析モデルと設計クライテリアについて」に示す。）
- ③ コンクリートのヤング係数及びポアソン比については、「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—（（社）日本建築学会，1999改定）」に基づき再計算する。
- ④ 鋼材のヤング係数及びポアソン比については、「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—（（社）日本建築学会，2005改定）」に基づき設定する。
- ⑤ 積雪荷重との組合せを考慮するケース4においては、積雪荷重を考慮する。
- ⑥ 屋根トラスの応力解析モデルにおいては耐震補強工事の内容を反映する。（屋根トラスへの入力地震動を算定に用いる原子炉建物の質点系モデルでは屋根トラスの耐震補強工事の内容を反映していないため、耐震補強工事の反映が屋根トラスの入力地震動に及ぼす影響については別紙1-1-1「原子炉建物屋根トラスの入力地震動に係る影響検討について」に、耐震補強工事の詳細は別紙1-2「原子炉建物屋根トラスの耐震補強について」に示す。）
- ⑦ 弾性部材は、「平12建告第2464号」に基づきF値に1.1倍の割増しを考慮し、圧縮及び曲げについては座屈強度を用いる。
- ⑧ 塑性化部材は、中込ほか「繰返し力を受けるSM490鋼の疲労性に関する研究」（日本建築学会構造系論文集，第469号，pp.127-136，1995年3月）に基づき評価する。
- ⑨ 解析ステップは自重解析（静的解析），弾塑性時刻歴応答解析の順で行う。



(a) 線材によるモデル化部分



(b) 面材によるモデル化部分

図 2-1 応力解析モデル図

別紙 1-1 原子炉建物屋根トラスの解析モデルと
設計クライテリアについて

目 次

1. 概要	別紙 1-1-1
2. 原子炉建物屋根トラスについて	別紙 1-1-2
2.1 原子炉建物屋根トラスの概要	別紙 1-1-2
2.2 原子炉建物屋根スラブの概要	別紙 1-1-6
3. 原子炉建物屋根トラスの地震応答解析モデルと設計クライテリア	別紙 1-1-7
3.1 解析モデルの概要	別紙 1-1-7
3.2 鉄骨部材の弾塑性評価	別紙 1-1-10
3.3 入力地震動及び材料減衰	別紙 1-1-10
3.4 要求機能に対する設計方針（設計クライテリア）	別紙 1-1-12
4. 弾塑性解析の採用について	別紙 1-1-13
4.1 弾塑性解析を採用することの目的	別紙 1-1-13
4.2 弾塑性特性の設定の妥当性・適用性について	別紙 1-1-15
4.2.1 今回工認で採用する弾塑性特性（修正若林モデル）の概要	別紙 1-1-15
4.2.2 原子炉建物屋根トラスに対する検証例	別紙 1-1-17
4.2.3 原子力発電所鉄骨屋根トラスへの適用性	別紙 1-1-19
5. 各部材のクライテリアについて	別紙 1-1-20
6. まとめ	別紙 1-1-21
7. 参考文献	別紙 1-1-22

1. 概要

原子炉建物屋根トラスの解析モデルについては、既工認では弾性解析を採用しているが、今回工認では弾塑性解析を採用する。

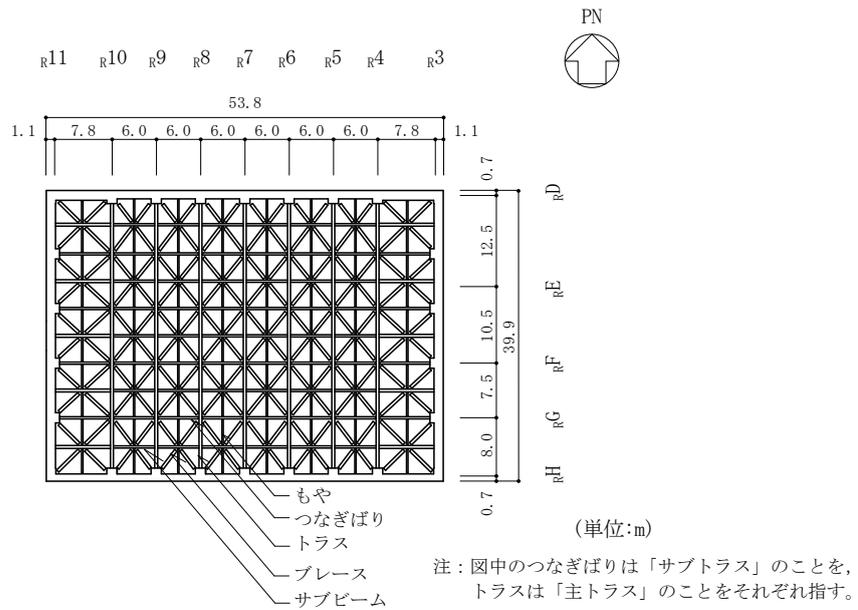
本資料は、屋根トラスが原子炉建物原子炉棟（二次格納施設）（以下「二次格納施設」という。）のバウンダリを構成する屋根スラブの間接支持構造物であることから、屋根トラスの 3次元弾塑性解析の妥当性・適用性について確認し、屋根スラブの二次格納施設としての機能維持評価の方針について説明するものである。

2. 原子炉建物屋根トラスについて

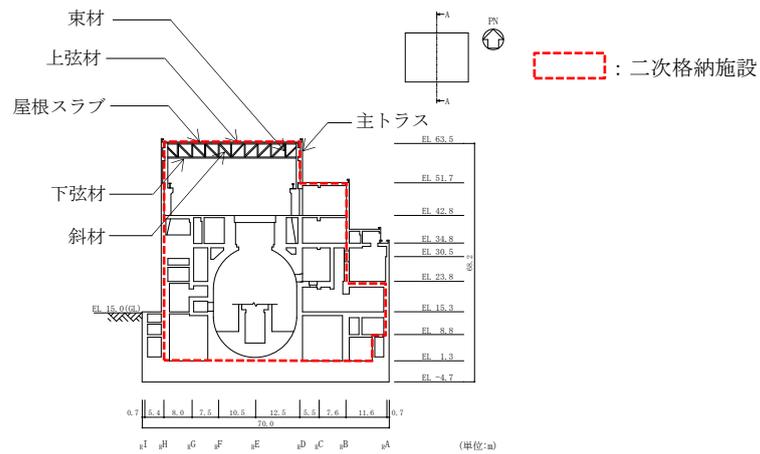
2.1 原子炉建物屋根トラスの概要

原子炉建物の上部構造は、鉄筋コンクリート造陸屋根をもつ鉄骨造の屋根トラスで構成されている。屋根トラスの平面は、38.5m (N S) × 51.6m (E W) の長方形をなしており、燃料取替階 (4F, EL 42.8m) からの高さは 20.7m である。屋根トラスの概要を図 2-1 に、部材リストを表 2-1 に示す。

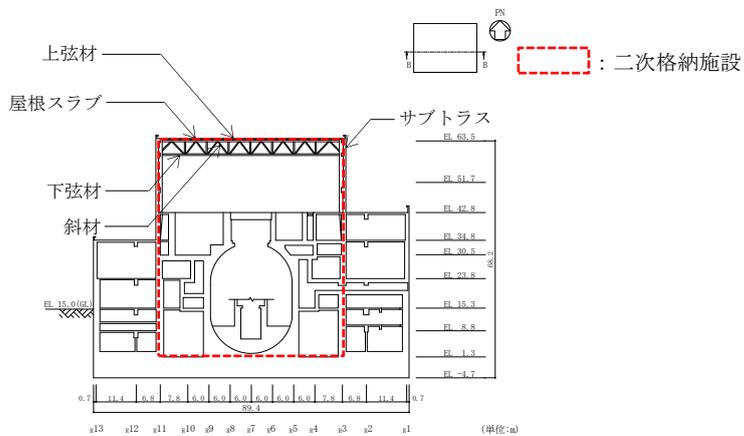
屋根トラス各部材の主な要求機能は、屋根スラブからの鉛直荷重の支持機能であり、主トラスについては、既工認と同様に水平地震荷重及びクレーン荷重についても支持する設計とし、水平ブレースについては、既工認と同様に水平地震荷重の伝達が可能な設計としている。表 2-2 に屋根トラスの各部材の要求機能を示す。



(a) 建物平面図 (EL 63.5m)



(b) 建物断面図 (A-A断面, NS方向)



(c) 建物断面図 (B-B断面, EW方向)

図 2-1 原子炉建物屋根トラスの概要

表 2-1 部材リスト

部位		使用部材	材質	断面積 ($\times 10^2 \text{mm}^2$)	断面二次 モーメント ($\times 10^4 \text{mm}^4$)	
主トラス	上弦材	H-400 \times 400 \times 13 \times 21	SM50A (SM490A 相当)	218.7	66600	
	下弦材	H-400 \times 400 \times 13 \times 21	SM50A (SM490A 相当) SN490B	218.7	66600	
		BH-400 \times 400 \times 19 \times 35		342.7	99230	
		BH-400 \times 400 \times 19 \times 35 +2PLs-16 \times 330*		448.3	108800	
	斜材	2CTs-175 \times 350 \times 12 \times 19	SS41 (SS400 相当) SS400	173.9	—	
		2CTs-150 \times 300 \times 10 \times 15		119.8		
		2CTs-150 \times 300 \times 10 \times 15 +4Ls-90 \times 90 \times 10*		187.8		
		2CTs-125 \times 250 \times 9 \times 14 +4Ls-90 \times 90 \times 10*		160.2		
	束材	2CTs-175 \times 350 \times 12 \times 19	SS41 (SS400 相当)	173.9	—	
		2CTs-150 \times 300 \times 10 \times 15		119.8		
		2CTs-125 \times 250 \times 9 \times 14		92.20		
	サブ トラス	上弦材 下弦材	H-390 \times 300 \times 10 \times 16	SS41 (SS400 相当)	136.0	38700
		斜材	2CTs-125 \times 250 \times 9 \times 14	SS41 (SS400 相当) SS400	92.20	—
2CTs-125 \times 250 \times 9 \times 14 +4Ls-65 \times 65 \times 6*			122.3			
水平ブレース		H-400 \times 408 \times 21 \times 21	SS41 (SS400 相当)	250.7	—	
		H-400 \times 400 \times 13 \times 21		218.7		
		H-394 \times 398 \times 11 \times 18		186.8		
サブビーム		H-400 \times 400 \times 13 \times 21	SS41	218.7	66600	
		H-390 \times 300 \times 10 \times 16	(SS400 相当)	136.0	38700	
母屋		H-244 \times 175 \times 7 \times 11	SS41	56.24	6120	
		H-294 \times 200 \times 8 \times 12	(SS400 相当)	72.38	11300	
サブトラス下弦材 座屈止め		2[s-150 \times 75 \times 9 \times 12.5*	SS400	61.20	—	

注記*：補強工事で追加した部材

表 2-2 屋根トラスの各部材の要求機能

部位		要求機能*
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 水平地震荷重及びクレーン荷重の支持
	下弦材	
	斜材	
	東材	
サブトラス	上弦材	鉛直荷重の支持
	下弦材	
	斜材	
水平ブレース		水平地震荷重の伝達
サブビーム		鉛直荷重の支持
母屋		鉛直荷重の支持
サブトラス下弦材 座屈止め		サブトラス下弦材の座屈防止

注記*：主な機能を示しており基準地震動 S_s に対する発生応力の負担も考慮する。

2.2 原子炉建物屋根スラブの概要

原子炉建物の屋根スラブは、平面寸法 39.9m (NS) × 53.8m (EW), 厚さ の鉄筋コンクリート構造である。外周部は厚さ (東西面) 及び (南北面) の鉄筋コンクリート造の耐震壁並びに鉄骨鉄筋コンクリート造の柱で支持されており、NS方向に配置された7構面の主トラスと主トラスの中間の母屋、東西方向の4構面のサブトラスとサブトラスの中間のサブビームで支持されている。屋根スラブ下面に取りつく主トラス上弦材及びサブトラス上弦材はH型断面の鋼材であり、スタッドボルトで屋根スラブと一体化することにより面内及び面外に高い剛性を確保している。屋根スラブの断面図を図2-2に示す。

屋根スラブには気密性の機能維持が要求されるため、換気性能とあいまって機能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。

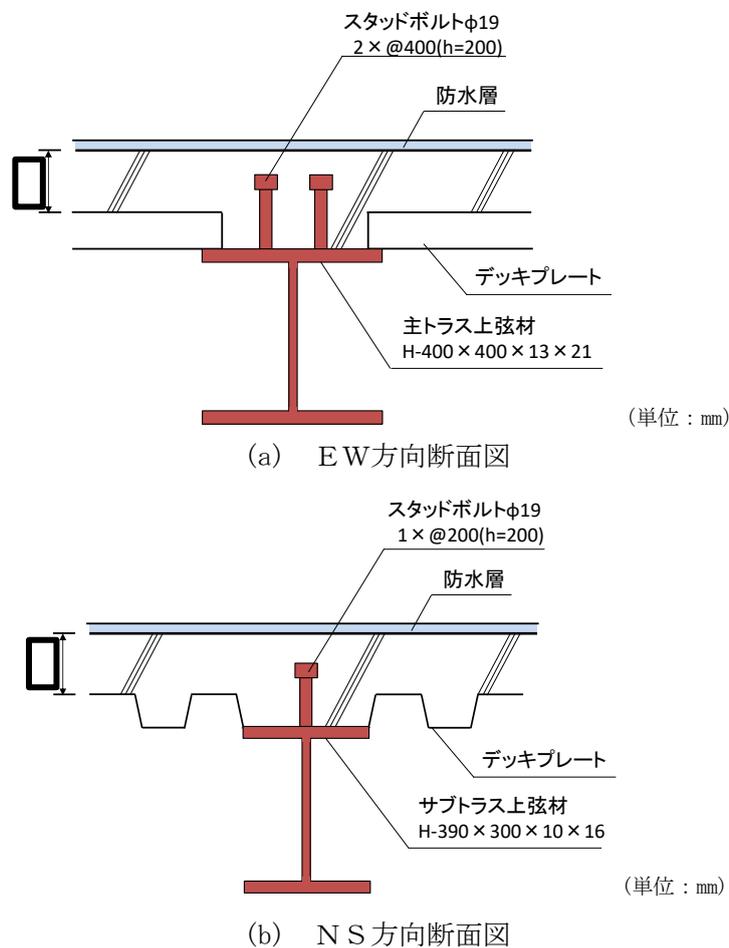


図2-2 屋根スラブ断面図

3. 原子炉建物屋根トラスの地震応答解析モデルと設計クライテリア

3.1 解析モデルの概要

原子炉建物屋根トラスは、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地震力の同時入力による評価を行うために 3 次元 FEM モデルによる地震応答解析を採用する。

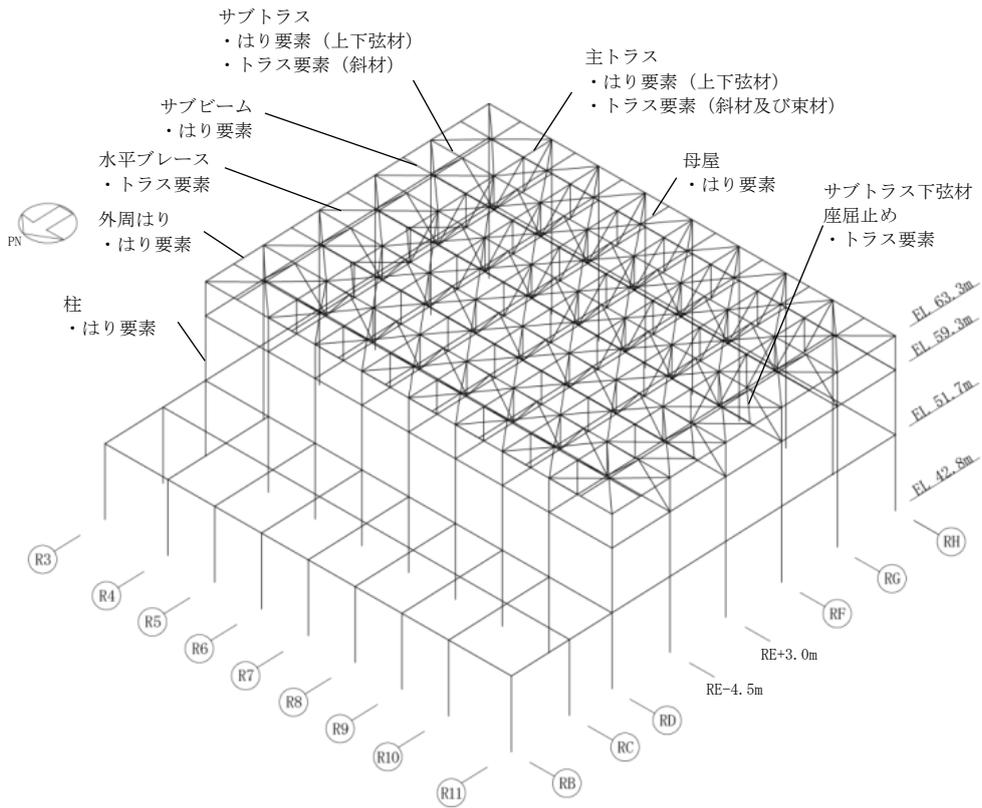
屋根トラスの地震応答解析モデルは、燃料取替階（4F, EL 42.8m）より上部の鉄筋コンクリート造（一部鉄骨鉄筋コンクリート造）の柱、はり、耐震壁及び屋根スラブ並びに鉄骨造の屋根トラスを線材及び面材により立体的にモデル化した 3 次元 FEM モデルとし、部材に発生する応力を地震応答解析によって直接評価できるモデルとしている。

屋根トラスは、主トラス、サブトラス、水平ブレース、サブビーム、母屋及びサブトラス下弦材座屈止めをモデル化する。各鉄骨部材は軸、曲げ変形を考慮したはり要素（トラスの上下弦材、サブビーム及び母屋）と軸変形のみを考慮したトラス要素（トラスの斜材、束材、水平ブレース及びサブトラス下弦材座屈止め）としてモデル化する。また、屋根トラスについては、主トラス及びサブトラスの補強工事の内容を解析モデルに反映している。

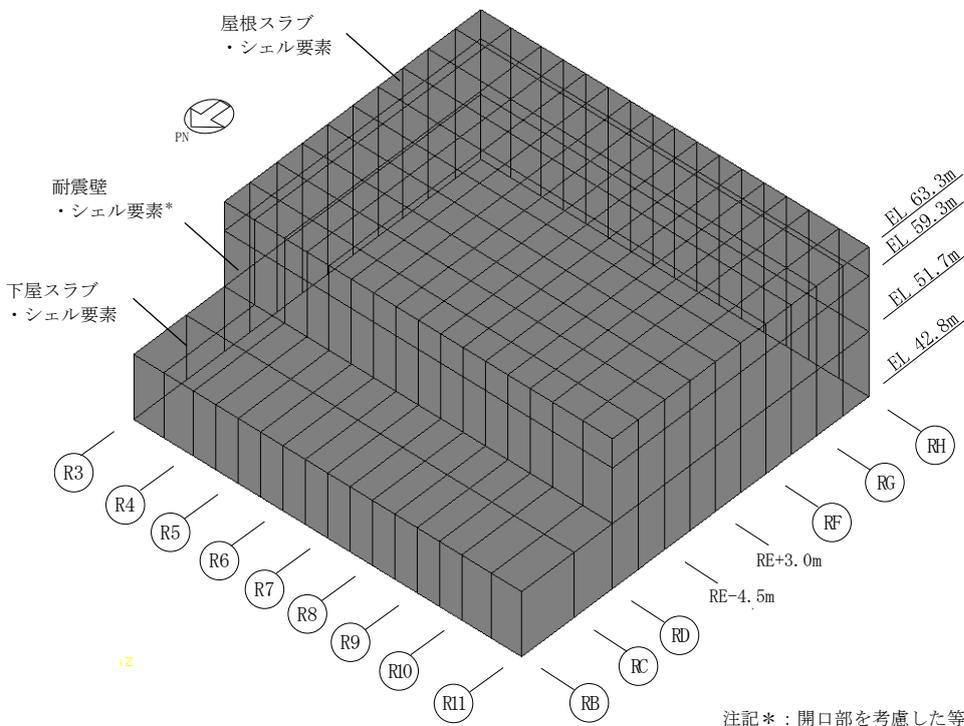
屋根トラスは屋根スラブとスタッドボルトで一体化されていることにより、高い剛性を確保しているため、屋根トラスの地震応答解析モデルにおいても屋根スラブをシェル要素でモデル化し、面内剛性を考慮することとする。なお、屋根トラス部材の応力評価に対する保守性を考慮し、屋根スラブの面外剛性は考慮しないこととする。屋根スラブのシェル要素は主トラス及びサブトラスの各交点、並びに主トラス及びサブトラスと母屋、サブビームの各交点で節点を共有するようにモデル化する。

耐震壁はシェル要素、柱及び外周はりは軸、曲げ変形を考慮したはり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。

解析モデルの概要を図 3-1 に、解析に用いる材料の物性値を表 3-1 に示す。



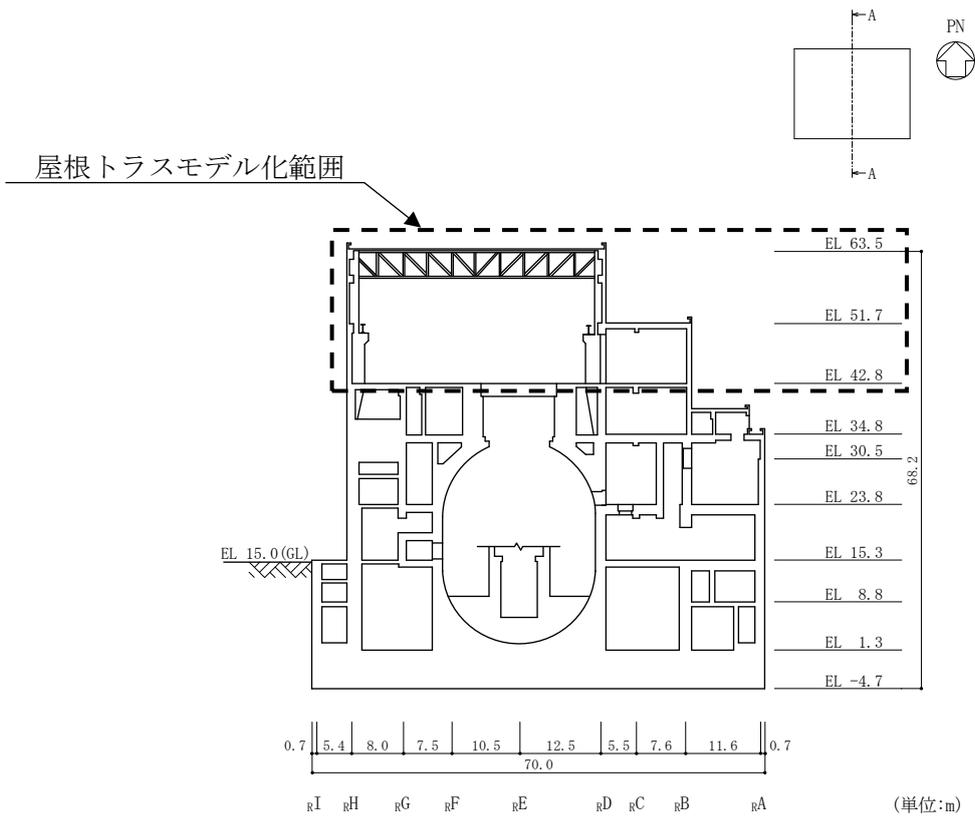
(a) 線材によるモデル化部分



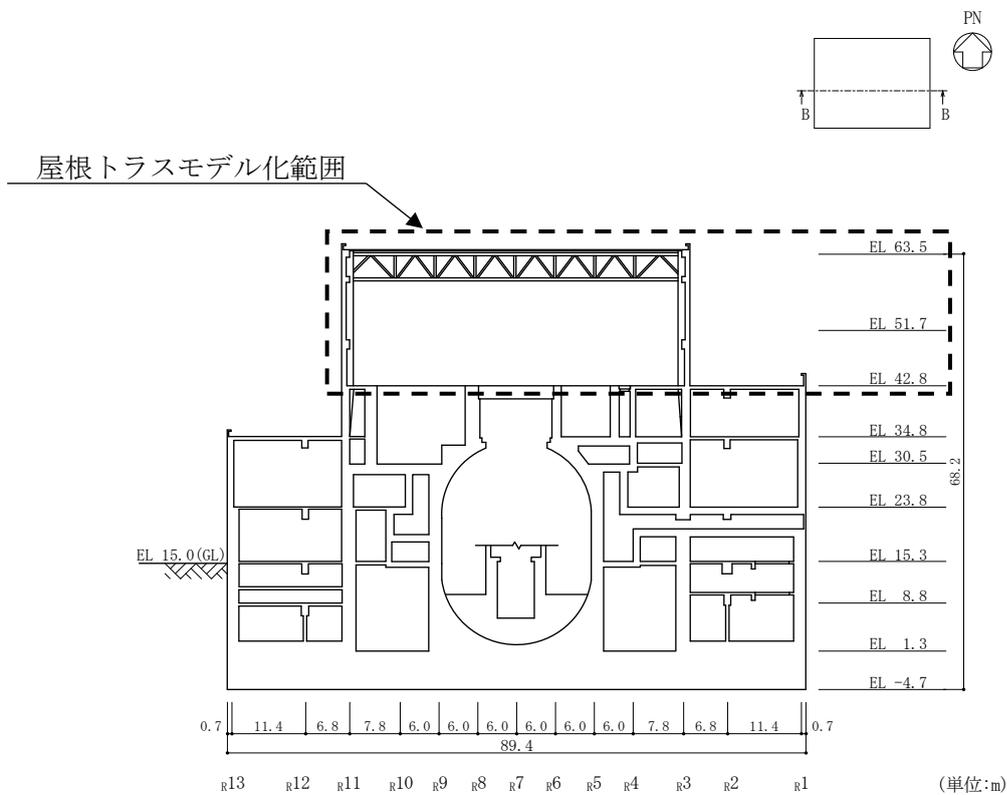
注記*: 開口部を考慮した等価厚さによりモデル化

(b) 面材によるモデル化部分

図 3-1(1) 解析モデルの概要



(c) NS方向断面図 (A-A断面)



(d) EW方向断面図 (B-B断面)

図 3-1(2) 解析モデルの概要

表 3-1 解析に用いる材料の物性値

使用材料	ヤング係数 E (N/mm ²)	せん断弾性係数 G (N/mm ²)	減衰定数 h (%)
鉄筋コンクリート	2.25×10 ⁴	9.38×10 ³	5
鉄骨	2.05×10 ⁵	7.90×10 ⁴	2

3.2 鉄骨部材の弾塑性評価

基準地震動 S_s に対する評価を実施する際、トラス要素としてモデル化した部材の一部については、塑性領域に入ると考えられるため、部材座屈後の挙動を模擬できる手法（修正若林モデル）に基づく弾塑性特性を考慮している。考慮した弾塑性特性の詳細については、「4. 弾塑性解析の採用について」に示す。

3.3 入力地震動及び材料減衰

解析モデルへの入力地震動は、原子炉建物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階レベル（4F, EL 42.8m）の応答結果（水平、鉛直及び回転成分）を用いることとし、燃料取替階位置を固定として、水平方向と鉛直方向の同時入力による地震応答解析を実施する。原子炉建物水平方向の質点系モデルは床剛モデルを採用しているため、加速度並進成分は燃料取替階レベルの各質点で同一応答となるが、回転成分は各質点で応答が異なるため、回転成分の入力波は、モデル脚部の 2 質点の平均波を入力する。入力地震動の取出し位置を図 3-2 に示す。

また、地震応答解析における減衰評価には、鉄骨造部分については、水平材の応答に影響の大きい鉛直方向 1 次固有振動数（4.60Hz）に対して減衰定数を 2% とし、鉄筋コンクリート造及び鉄骨鉄筋コンクリート造部分については、水平方向のうち大きい方の 1 次固有振動数（EW 方向 8.12Hz）に対して減衰定数を 5% とした減衰係数を設定する剛性比例型減衰（各部別）とする。なお、剛性比例型減衰を採用することの妥当性については、別紙 1-3 「屋根トラス評価モデルにおける減衰について」に示す。

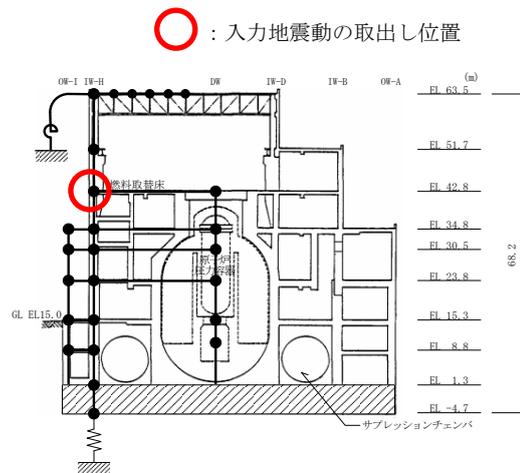
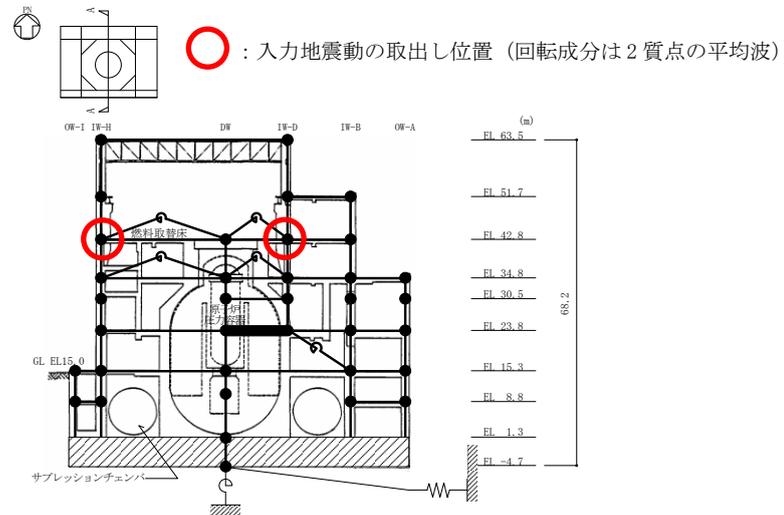
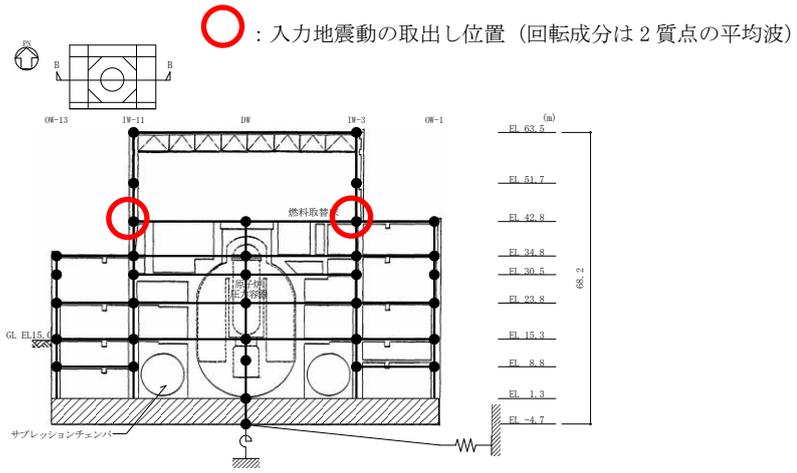


図 3-2 入力地震動の取出し位置

3.4 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、Sクラスである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基準地震動 S_s に対し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、主トラス上弦材、サブトラス上弦材、サブビーム及び母屋に支持されるスラブとして評価する。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、別紙5「屋根スラブの面外剛性を考慮した影響検討」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を確認のうえ機能維持評価を実施する。

屋根トラスの評価方針は、基準地震動 S_s に対して屋根スラブを支持できることを確認する。

なお、二次格納施設のバウンダリを構成する耐震壁の気密性については、質点系モデルによる算定結果を採用する。

表3-2に屋根トラスの解析モデルのうち二次格納施設のバウンダリを構成する屋根スラブ及び屋根トラスの機能維持の評価方針を示す。

表3-2 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*4	(面内) おおむね弾性状態であることを要素毎に算定される応力度より確認する。おおむね弾性状態を超える場合は、要素毎の面内せん断ひずみを踏まえて漏えい量を算定し換気能力を下回ることを確認する*1。 (面外) 面外曲げに対して、鉄筋が降伏しないこと*2を確認する*3。
屋根トラス	間接支持構造物	基準地震動 S_s 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表5-1参照)

注記*1：漏えい量の算定に当たっては、別途算定する耐震壁の漏えい量を考慮する。

*2：鋼材の基準強度 F を「平12 建告第2464号」に基づき1.1倍した耐力を超えないこと。

*3：屋根スラブについては、主トラス上弦材、サブトラス上弦材、サブビーム及び母屋に支持されるスラブとして鉛直方向の震度を考慮する。

*4：構造強度については、気密性に対する評価方針を満足していることを確認することにより、構造強度を確保する方針とする。

4. 弾塑性解析の採用について

4.1 弾塑性解析を採用することの目的

原子炉建物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領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。

原子炉建物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でき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。弾塑性挙動を適切に評価するに当たっては、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。

今回工認で採用する屋根トラス部材の弾塑性特性について、表 4-1 に示す。表 4-1 に示すとおり、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。

以下では、修正若林モデルの概要を確認した上で、原子炉建物屋根トラス部材への適用性を検討する。また、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も検討する。

表 4-1 屋根トラス部材の弾塑性特性について

部位		モデル要素	弾塑性特性
主トラス	上弦材	はり要素	考慮しない (弾性)
	下弦材		
	斜材	トラス要素	弾塑性 (修正若林モデル)
	束材		
サブトラス	上弦材	はり要素	考慮しない (弾性)
	下弦材		
	斜材	トラス要素	弾塑性 (修正若林モデル)
水平ブレース		トラス要素	弾塑性 (修正若林モデル)
サブビーム		はり要素	考慮しない (弾性)
母屋		はり要素	考慮しない (弾性)
サブトラス下弦材 座屈止め		トラス要素	弾塑性 (修正若林モデル)

4.2 弾塑性特性の設定の妥当性・適用性について

4.2.1 今回工認で採用する弾塑性特性（修正若林モデル）の概要

原子炉建物屋根根トラスを構成する部材のうち、軸力のみを負担するトラス要素としてモデル化した部材については、弾塑性特性として修正若林モデルを使用している。

修正若林モデルは、原子力発電所建物（実機）を対象として実施された谷口らの研究⁽¹⁾に示される部材レベルの弾塑性特性である。修正若林モデルは、若林モデル⁽²⁾を基本としているが、谷口らの研究⁽¹⁾で実施された実験のシミュレーション解析を踏まえて、繰返し载荷による初期座屈以降の耐力低下を累積塑性歪の関数で表現し、実験との対応度を向上させた手法であり、(4.1)式により評価される。

$$n/n_0 = 1/(\zeta - Pn)^{1/6} \leq 1 \dots \dots \dots (4.1)$$

$n = N/N_y$ N : 軸力 N_y : 降伏軸力

n_0 : 無次元化初期座屈耐力 ζ : 無次元化圧縮側累積塑性歪

$Pn = (n_E^2/4) - 5$ $n_E = \pi^2 E / (\lambda_e^2 \sigma_y)$ λ_e : 有効細長比

修正若林モデルの弾塑性特性を図4-1に示す。

谷口らの研究⁽¹⁾においては、実機の特徴を反映したX型ブレース架構の静的繰返し実験を実施している。また、修正若林モデルの妥当性を確認するに当たって、ブレース部材の弾塑性特性として修正モデルを適用した解析モデルによる実験のシミュレーション解析を実施しており、解析結果は実験結果をおおむねよくとらえているとしている。試験体の概要を図4-2、解析モデルを図4-3、解析結果と実験結果の比較を図4-4に示す。

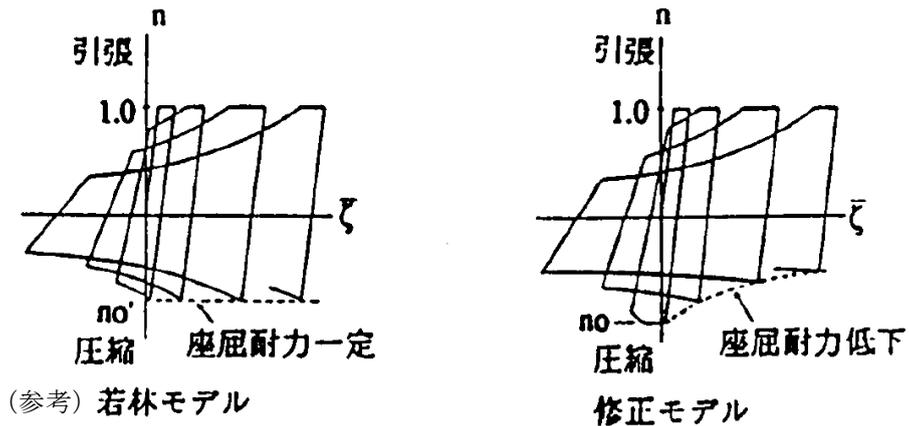


図 4-1 修正若林モデルの弾塑性特性 ((1)より引用, 一部加筆)

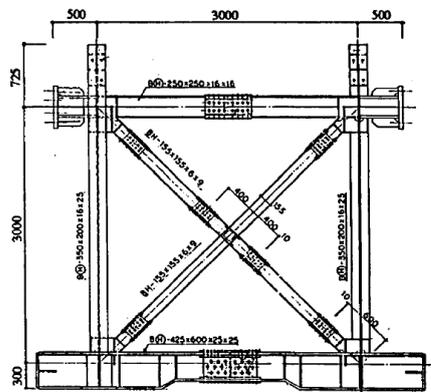
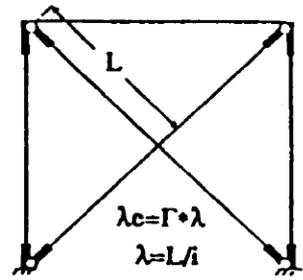
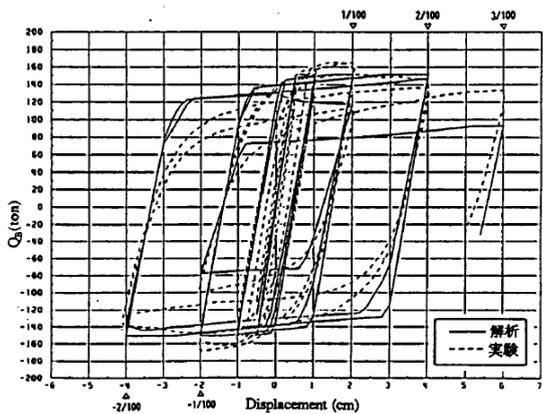


図 4-2 試験体の概要 ((1)より引用)

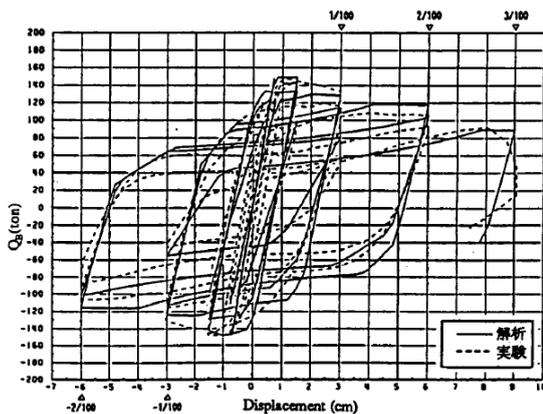


Γ ; 等価座屈長さ係数
 λ_c ; 有効細長比
 λ ; 細長比(芯々)

図 4-3 解析モデル ((1)より引用)



SXII - 40.9 - B



SXIII - 60.9 - B

図 4-4 解析結果と実験結果の比較 ((1)より引用)

4.2.2 原子炉建物屋根トラスに対する検証例

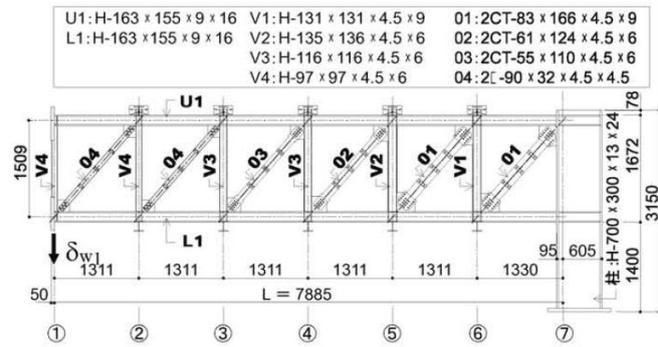
谷口らの研究⁽¹⁾は、X型ブレース架構を対象としたものであったが、原子炉建物屋根トラスに対して本弾塑性特性を適用した検討例として、鈴木らの研究⁽³⁾がある。

この研究は、原子炉建物屋根トラスの終局耐力について検討したものであるが、実験結果を高精度にシミュレーションするために構築したモデルの中で本弾塑性特性が適用されている。

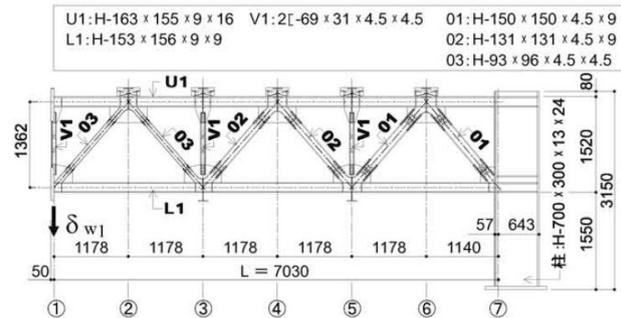
鈴木らの研究⁽³⁾では、終局耐力を検討するに当たり原子炉建物屋根トラスを模擬した縮小試験体を製作し、トラスの崩壊挙動に与える影響が大きい鉛直動的荷重を模擬した静的載荷試験により、その弾塑性挙動を確認している。なお、試験に当たっては、原子力発電所鉄骨屋根トラスがプラット形とワーレン形の2種類に分類されることを踏まえ、この2種類のトラス形式についての試験体を製作している。島根2号機原子炉建物屋根トラスはこのうち、プラット形に該当する。試験体の概要を図4-5に示す。

実験のシミュレーション解析においては、トラス要素としてモデル化した部材の弾塑性特性として修正若林モデルが適用されており、実験結果とシミュレーション解析を比較し、精度良く実験結果を追跡できているとしている。結果の比較を図4-6に示す。

以上のように修正若林モデルは、提案当初のX型ブレース架構に加えて、ワーレン形、プラット形の鉄骨トラスでも実験結果を精度良く追跡できており、幅広い鉄骨架構形式において軸力のみを負担する部材の弾塑性特性として適用可能であると考えられる。



(a) プラット形試験体



(b) ワーレン形試験体

図 4-5 試験体の概要 ((3)より引用)

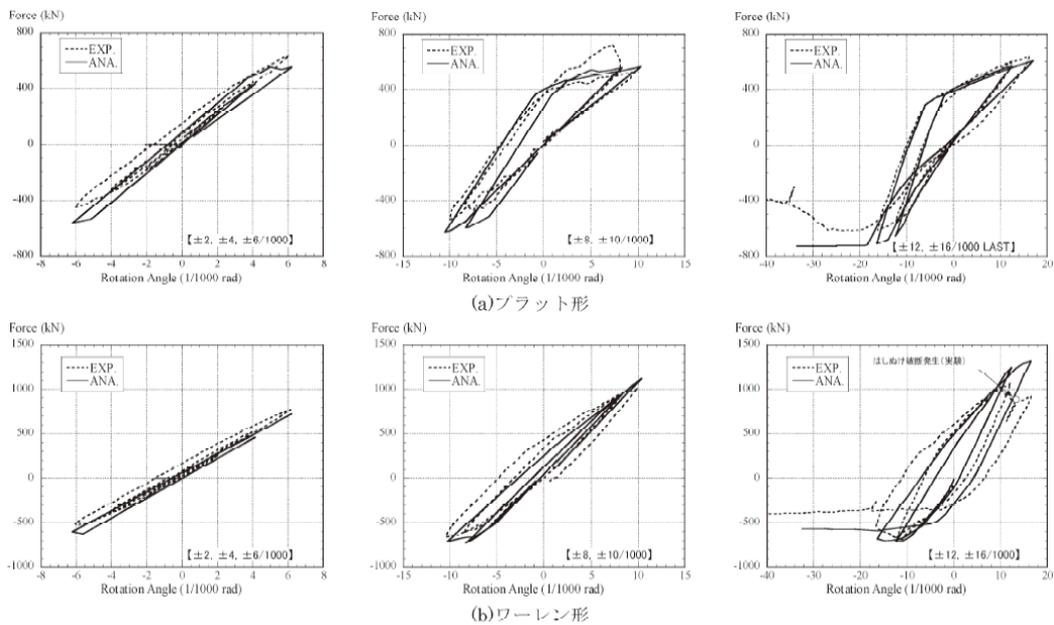


図 4-6 実験のシミュレーション解析結果 ((3)より引用)

4.2.3 原子力発電所鉄骨屋根トラスへの適用性

今回採用する修正若林モデルについては、提案当初より、原子力発電所（実機）を対象として実施された実験により妥当性が検証されており、また、原子炉建物鉄骨屋根トラスを模擬した加力実験のシミュレーション解析においてもその適用性・妥当性が検証されている。

島根2号機原子炉建物屋根トラスのうち、一部の部材における一般化細長比は修正若林モデルの適用範囲より大きくなるが、以下の理由から適用範囲による影響は小さいと判断し、地震応答解析において修正若林モデルを採用している。

- ・部材断面積が適用範囲内の部材と同程度であることから、線形部材又は部材除去としてモデル化するよりも、復元力特性を考慮する方が実現象に近いと考えられる。なお、原子炉建物屋根トラスの応力解析において、塑性領域に入るサブトラスの斜材については、局部集中ひずみの繰返し回数が最大ひずみ度に対する破断寿命（繰返し回数）を十分に下回っており、破断しないことを確認している。

以上より、原子炉建物屋根トラスの鉄骨部材のうち、トラス要素としてモデル化した部材の弾塑性特性として、修正若林モデルを採用することは妥当であると考えられる。

5. 各部材のクライテリアについて

入力地震動の増大に伴い鉄骨部材の一部が塑性領域に入ると考えられることから、今回工認においては、弾塑性解析による評価を実施する。

表 5-1 に各部材のクライテリアを示す。

評価方法としては、主要部材が弾性範囲であることを確認する方針とし、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。

注記*：弾塑性特性を考慮してモデル化している部材については、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。検討は、当該部材の履歴ループを参照し、局部集中ひずみの繰返し回数が、中込ほか（1995）⁽⁴⁾に基づき算定される当該部材の最大ひずみ度に対する破断寿命（繰返し回数）を十分に下回っていることを確認する。

表 5-1 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* ¹	弾塑性特性	評価方法* ³
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及びクレール荷重の支持	考慮しない（弾性）	主要部材が弾性範囲であることを確認* ² (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）	
	下弦材		弾塑性 (修正若林モデル)	
	斜材			
水平ブレース		水平地震荷重の伝達	弾塑性 (修正若林モデル)	
サブビーム		鉛直荷重の支持	考慮しない（弾性）	
母屋		鉛直荷重の支持	考慮しない（弾性）	
サブトラス下弦材 座屈止め		サブトラス下弦材の座屈防止	弾塑性 (修正若林モデル)	

注記*1：主な機能を示しており基準地震動 S_s に対する発生応力の負担も考慮する。

*2：鋼材の基準強度 F を「平 12 建告第 2464 号」に基づき 1.1 倍した耐力を超えないこと。

*3：接合部はボルト接合としており、保有耐力接合を基本とする。

6. まとめ

今回工認では、原子炉建物屋根トラスの評価に当たって、3次元FEMモデルによる弾塑性解析（弾塑性特性としては修正若林モデルを考慮）を採用する。修正若林モデルは先行審査で採用実績のある弾塑性特性であるが、X型ブレース架構を対象として検討されたものであったため、既往文献（原子炉建物鉄骨屋根トラスを模擬した加力実験のシミュレーション解析）を参照し、その適用性・妥当性が検証されていることを確認するとともに、原子炉建物屋根トラスにおいて修正若林モデルの適用範囲を超える部材があることに対する影響は小さいことを確認した。また、屋根スラブの要求機能と評価方針を踏まえ、弾塑性特性を考慮する各部材のクライテリアについても検討し、妥当性を確認した。

以上より、今回工認において原子炉建物屋根トラスの評価に弾塑性解析を採用することは妥当であると考えられる。また、弾塑性特性を採用した屋根トラスの評価及び屋根スラブの検討により、屋根スラブの二次格納施設としての機能維持の評価方針を整理した。

なお、原子炉建物屋根トラスは、原子炉建物の地震応答解析結果に基づく燃料取替階レベル（4F, EL 42.8m）の応答を入力地震動として評価を実施しており、入力地震動の不確かさ（建物応答の不確かさ）を踏まえた場合でも許容値を満足することを確認することにより保守性に配慮した設計とする。

7. 参考文献

- (1) 谷口ほか：鉄骨 X 型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 号，1991 年 3 月，pp. 303-316
- (2) 柴田ほか：鉄骨筋違の履歴特性の定式化，日本建築学会論文報告集第 316 号，昭和 57 年 6 月，pp. 18-24
- (3) 鈴木ほか：原子力発電所鉄骨屋根トラスの終局限界に関する研究，日本建築学会構造系論文集 Vol. 76 No. 661，2011 年 3 月，pp. 571-580
- (4) 中込ほか（1995）：繰返し力を受ける SM490 鋼の疲労性に関する研究，日本建築学会構造系論文集 No. 469，1995 年 3 月，pp. 127-136

別紙 1-2 原子炉建物屋根トラスの耐震補強について

目 次

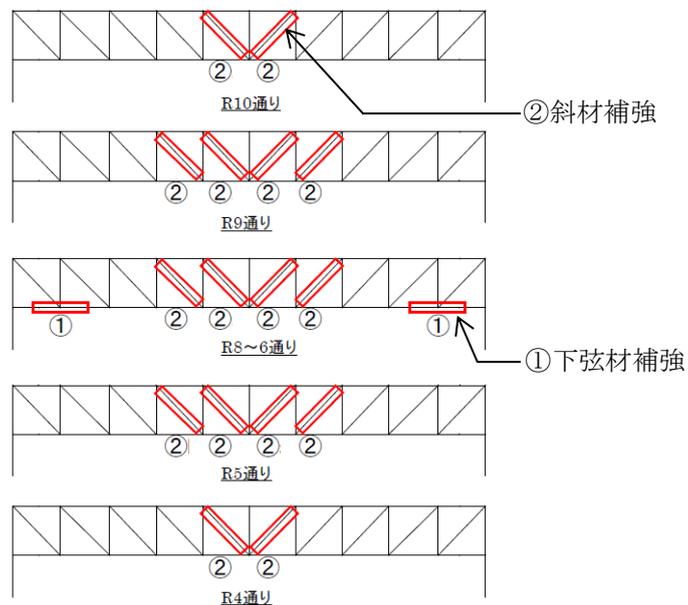
1. 概要	別紙 1-2-1
2. 補強内容	別紙 1-2-2

1. 概要

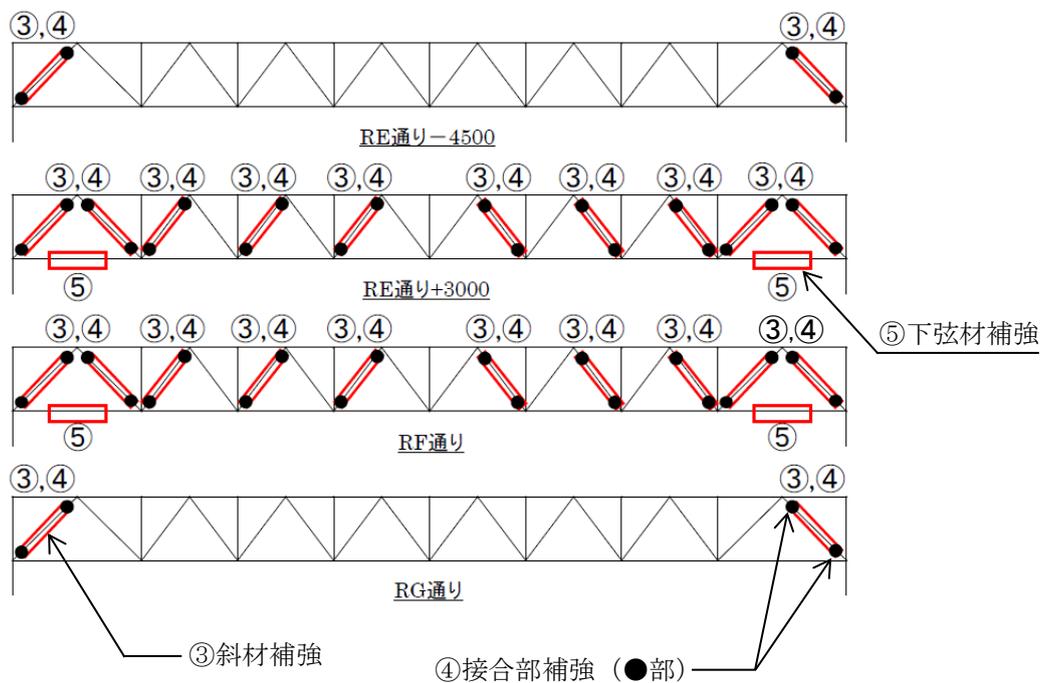
原子炉建物屋根トラスについては耐震補強工事を実施しており，本資料は，当該工事における補強の内容について説明するものである。

2. 補強内容

原子炉建物屋根トラスについては、主トラスやサブトラスの余裕の少ない部材に対して、補強材の追加等による耐震補強工事を実施している。耐震補強箇所を図 2-1 に、補強部材の詳細を表 2-1 に示す（第 8-2-2-1 図「原子炉建物原子炉棟（二次格納施設）構造図（その 18）」参照）。



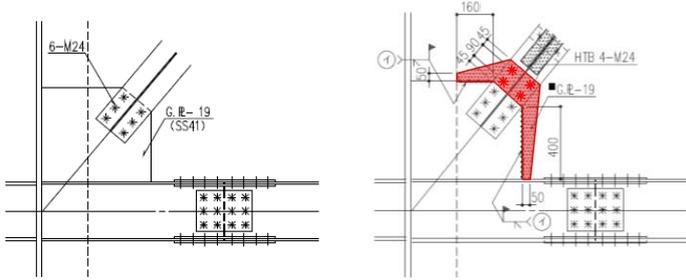
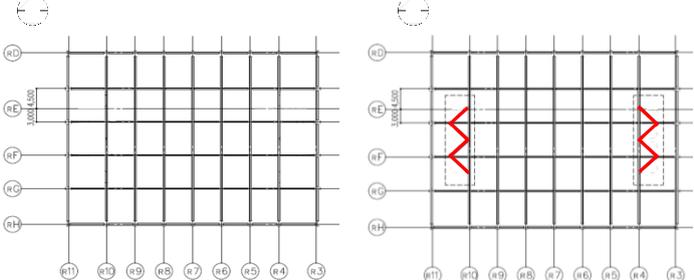
(a) 主トラス断面図



(b) サブトラス断面図

図 2-1 原子炉建物屋根トラスの補強箇所

表 2-1 補強部材の詳細

No	補強箇所及び補強方法	
①	主トラス下弦材 補強材追加	 <p data-bbox="1129 481 1284 510">補強材 PL-16</p> <p data-bbox="798 521 885 551">補強前</p> <p data-bbox="1173 521 1257 551">補強後</p>
②	主トラス斜材 補強材追加	 <p data-bbox="1077 772 1353 801">補強材 4Ls-90×90×10</p> <p data-bbox="798 813 885 842">補強前</p> <p data-bbox="1173 813 1257 842">補強後</p>
③	サブトラス斜材 補強材追加	 <p data-bbox="1085 1064 1353 1093">補強材 4Ls-65×65×6</p> <p data-bbox="798 1104 885 1133">補強前</p> <p data-bbox="1173 1104 1257 1133">補強後</p>
④	サブトラス斜材 接合部補強	 <p data-bbox="1045 1467 1356 1496">接合部補強 (PL-19, ボルト)</p> <p data-bbox="798 1507 885 1536">補強前</p> <p data-bbox="1173 1507 1257 1536">補強後</p>
⑤	サブトラス下弦材 補強材追加	 <p data-bbox="1045 1848 1364 1877">補強材 2Cs-150×75×9×12.5</p> <p data-bbox="798 1888 885 1917">補強前</p> <p data-bbox="1173 1888 1257 1917">補強後</p>

別紙2 応力解析におけるモデル化, 境界条件
及び拘束条件の考え方

目 次

- | | |
|-----------------------------------|--------|
| 1. 概要 | 別紙 2-1 |
| 2. 応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件 | 別紙 2-2 |

1. 概要

本資料は、原子炉建物屋根トラスの応力解析におけるモデル化、境界条件及び拘束条件についての概要を示すものである。

2. 応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件

原子炉建物屋根トラスの応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件を表 2-1 に示す。

有限要素法を用いた解析モデルにおける要素分割の考え方*については，以下のとおり。

- ・トラス要素

トラス要素は要素内応力が一定であるため，部材長さに合わせて分割する。

- ・はり要素

はり要素の場合は，曲げの変位関数が 3 次で精度が高いため，基本的に要素分割の細分化は不要であるが，部材の接合点間で変位情報出力や荷重入力がある場合には複数要素に細分し，曲線部材がある場合は，その曲線が直線近似できる程度の分割にすることが一般的である。また，分布荷重がある場合や分布質量が関係する自重荷重などの計算では，要素分割することにより質量分布がより正確になり，解析結果の精度が向上する。さらに，要素分割の細分化により，変形図やモード図で構造物の変形状態を容易に把握することが可能となる。

注記*：構造解析のための有限要素法実践ハンドブック（非線形 CAE 協会，2006 年）

表 2-1(1) モデル化, 境界条件及び拘束条件

モデル概要

○モデル化範囲

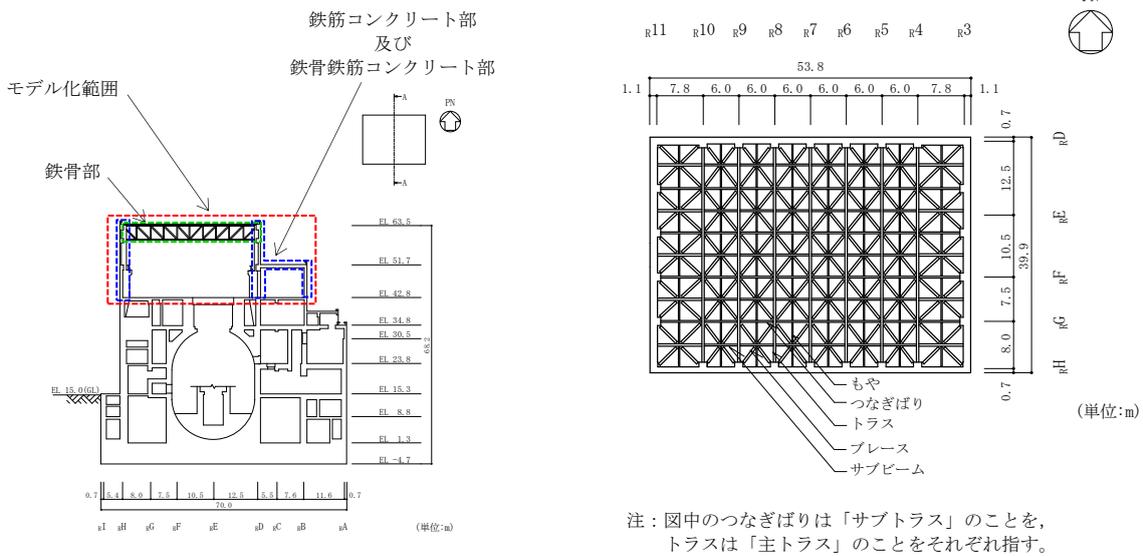
- ・燃料取替階 (4F, EL 42.8m) より上部の鉄筋コンクリート造, 鉄骨鉄筋コンクリート造及び鉄骨造部分をモデル化する。

○使用要素

- ・鉄筋コンクリート部：はり要素 (柱, はり), シェル要素 (耐震壁, 屋根スラブ, 下屋スラブ)
- ・鉄骨鉄筋コンクリート部：はり要素 (柱, はり)
- ・鉄骨部：はり要素 (主トラス及びサブトラスの上下弦材, サブビーム, 母屋), トラス要素 (主トラス及びサブトラスの斜材・束材, 水平ブレース, サブトラス下弦材座屈止め)

○要素分割

- ・評価対象である鉄骨部の部材長さに合わせて分割する。



概略断面図 (A-A断面, NS方向)

概略平面図 (EL 63.5m)

モデル化範囲

表 2-1(2) モデル化, 境界条件及び拘束条件

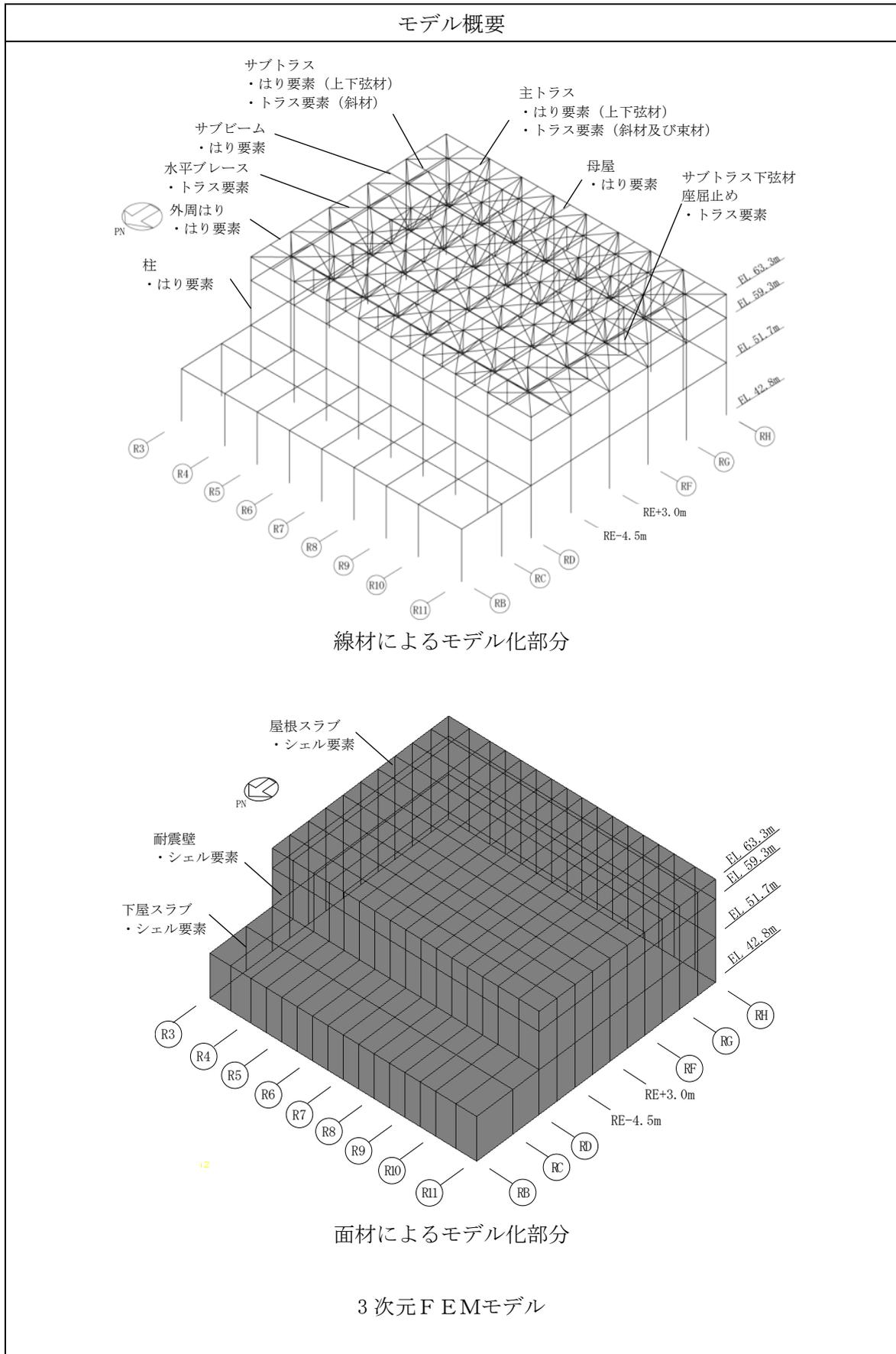


表 2-1(3) モデル化, 境界条件及び拘束条件

境界条件及び拘束条件	
モデル下端の境界	
○境界条件	<ul style="list-style-type: none"> モデル下端の境界条件は, 燃料取替階 (4F, EL 42.8m) 位置について固定とする。
○荷重の入力条件	<ul style="list-style-type: none"> 長期荷重は, 全体下向きの重力加速度を作用させること及び節点に集中荷重を作用させることを入力する。 地震荷重は, 質点系地震応答解析結果の燃料取替階レベル (4F, EL 42.8m) の質点の応答時刻歴 (水平, 鉛直, 回転: 回転中心は基礎スラブ中心) を入力する。
