

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-19-0610-4_改0
提出年月日	2021年2月22日

補足-610-4 【原子炉建屋原子炉棟（二次格納施設）の耐震性についての
計算書に関する補足説明資料】

1. 工事計画添付書類に係る補足説明資料

添付書類「VI-2-9-3-1 原子炉建屋原子炉棟（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。

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 原子炉建屋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1-2 原子炉建屋屋根トラスの補強概要

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4 大物搬入口の耐震性についての計算書に関する補足説明資料

別紙 4-1 地震応答解析におけるモデル化方針

別紙 4-2 地震応答解析における耐震壁のスケルトンカーブの設定

別紙 4-3 地震応答解析における材料物性の不確かさに関する検討

別紙 4-3-1 材料物性の不確かさを考慮した検討に用いる地震動の選定について

別紙 4-3-2 材料物性の不確かさを考慮した地震応答解析結果

別紙 4-4 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 4-5 地震荷重の入力方法

別紙 4-6 応力解析における断面の評価部位の選定

今回ご提示資料

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

1. 概要

本資料は、原子炉建屋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

原子炉建屋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解析モデル及び手法は、平成元年 6 月 8 日付け元資庁第 2015 号にて認可された工事計画の添付資料「IV-2-6-1 原子炉建屋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（原子炉建屋屋根トラス）

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 FEM 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		・SD	・fappase	(2)
モデル	材料物性	検討時の各規準に基づき設定 ・コンクリートのヤング係数： $E = 2.65 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ (SI 換算) ・コンクリートのポアソン比： $\nu = 0.167$ ・鋼材のヤング係数： $E = 2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ (SI 換算) ・鋼材のポアソン比： $\nu = 0.3$	質点系地震応答解析モデルに基づき設定 ・耐震壁のコンクリートのヤング係数： $E = 7.94 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ (NS 方向) $E = 1.32 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ (EW 方向) ・屋根スラブのヤング係数： $E = 2.65 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ・コンクリートのポアソン比： $\nu = 0.167$ ・鋼材のヤング係数： $E = 2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ・鋼材のポアソン比： $\nu = 0.3$	(3) (4) (5)
	減衰	—	剛性比例型減衰 ・コンクリート：5% ・鋼材：2%	—
	要素分割	・はり要素：主トラスの上下弦材，柱，はり ・トラス要素：主トラスの斜材，束材 ・シェル要素：壁	・はり要素：主トラス及びサブトラスの上下弦材，母屋，柱，はり ・トラス要素：主トラス及びサブトラスの斜材・束材，方杖，壁面補強ブレース ・シェル要素：耐震壁，間仕切壁，スラブ	—
	境界条件	・各通りに，2次元平面トラスと建屋フレームを一体としてモデル化 ・1階スラブ上端との接点は固定端，プール壁との接点ではプール壁の回転を考慮しばね支持 ・トラスの上下弦材は剛接合 ・トラスの斜材，束材はピン接合	・3階 (O.P. 33.2m) より上部を3次元 FEM モデルとしてモデル化 ・3階を剛床とし，3階柱の柱脚は同変位条件で固定端とする ・主トラスの上下弦材，サブトラスの端部を除く下弦材は剛接合 ・主トラス及びサブトラスの上弦材・斜材・束材，サブトラスの下弦材の端部，母屋，方杖はピン接合	—
	非線形特性	・考慮せず	・考慮する (主トラス及びサブトラスの斜材・束材，方杖は修正若林モデルで座屈を考慮)	(2)
地震荷重との組合せ		$V L + C L + S_A$ DL : 固定荷重 LL : 積載荷重 PL : 配管荷重 CL : クレーン荷重 EL : 機器荷重 S_A : 地震荷重	$G + P + S_s$ G : 固定荷重 (クレーン荷重を含む) P : 積載荷重 (配管荷重及び機器荷重を含む) S_s : S_s 地震荷重	—
荷重の設定	鉛直荷重	・構造物の自重，配管，機器荷重及び積載荷重	・構造物の自重，配管，機器荷重及び積載荷重 (耐震強化工事による重量変動を反映)	—
	クレーン荷重	・クレーン自重及びホイスト重量	・同左	—
	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	・短期：発生応力が短期許容応力度を超えないことを確認	・基準地震動 S_s 時：3次元 FEM モデルの時刻歴地震応答解析により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) を超えないこと及び塑性化部材では破断しないことを確認	(5) (6)

【主要な差異】（表の備考欄に対応）

- (1) 原子炉建屋屋根トラスが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弾塑性領域に入る可能性があるため、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。考慮した弾塑性特性の詳細については別紙 1-1 に示す。
- (3) 耐震壁のコンクリートのヤング係数及びせん断弾性係数については、質点系の地震応答解析モデルと同様に初期剛性の低下を考慮する。
- (4) 鋼材のヤング係数については、「日本建築学会 2005 年 鋼構造設計基準 一許容応力度設計法一」に基づき設定する。
- (5) 弾性部材は、「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）」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。
- (6) 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，127-136，1995 年 3 月）に基づき評価する。

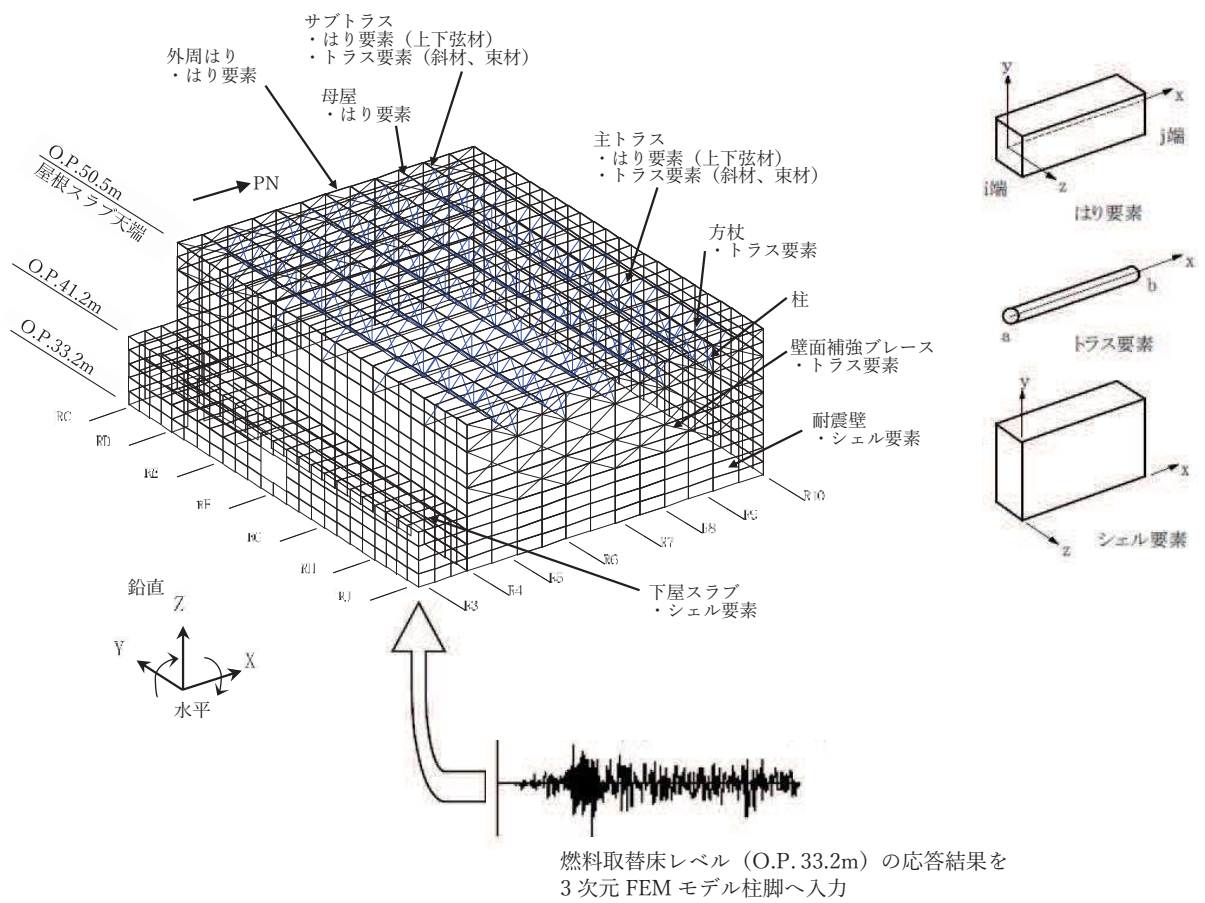


図 2-1 応力解析モデル図

別紙 1-1 原子炉建屋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. 原子炉建屋屋根トラスについて	別紙 1-1- 1
2.1 原子炉建屋屋根トラスの概要	別紙 1-1- 1
2.2 原子炉建屋屋根スラブの概要	別紙 1-1- 5
3. 原子炉建屋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- 6
3.1 解析モデルの概要	別紙 1-1- 6
3.2 鉄骨部材の弾塑性評価	別紙 1-1- 8
3.3 耐震壁，屋根スラブの剛性補正	別紙 1-1- 8
3.4 入力地震動，材料減衰	別紙 1-1- 9
3.5 要求機能に対する設計方針（設計クライテリア）	別紙 1-1-10
4. 弾塑性解析の採用について	別紙 1-1-11
4.1 弾塑性解析を採用することの目的	別紙 1-1-11
4.2 弾塑性特性の設定の妥当性・適用性について	別紙 1-1-13
5. 各部材のクライテリアについて	別紙 1-1-18
6. 原子炉建屋屋根トラスの評価に関するまとめ	別紙 1-1-19

別紙 1-1-1 原子炉建屋屋根トラスの地震時シミュレーション

別紙 1-1-2 剛性比例型減衰の妥当性について

別紙 1-1-3 屋根トラスの入力地震動及び固有振動数・固有モードについて

別紙 1-1-4 屋根トラスの入力地震動に係る影響検討について

1. 概要

鉄骨構造部の詳細評価モデルを構築して評価を実施している原子炉建屋屋根トラスの地震応答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。

本資料では、屋根トラスが二次格納施設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。

2. 原子炉建屋屋根トラスについて

2.1 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. 33.2 m)からの高さは17.3mである。屋根トラスの概要を図2-1に示す。表2-1に屋根トラスの諸元のうち、主トラス材、サブトラス材、母屋材について例示する。なお、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。

表2-2に屋根トラスの各部材の要求機能を示す。

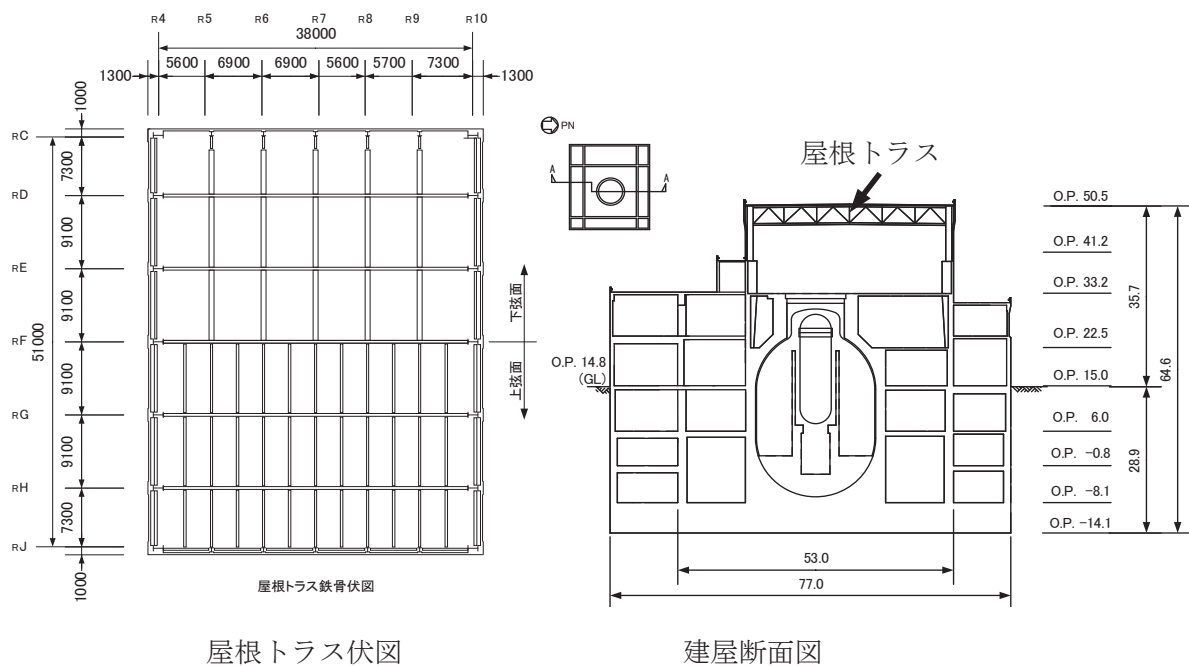


図2-1 原子炉建屋屋根トラスの概要

表 2-1(1) 屋根トラスの主な部材諸元 (1/2)

(a) 主トラス (RF 通り)

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

(b) サブトラス (R5, R6, R8, R9 通り)

部位	使用部材	
	補強前	補強後
上弦材	H-250×250×9×14	同左
下弦材	CT-170×250×9×14	PL-19×601+PL-25×550 +2PLs-16×344
		CT-170×250×9×14 +BT-280×250×9×12 +2PLs-16×350
斜材	2Ls-130×130×9	2Ls-130×130×9 +2Ls-150×90×12
		2Ls-130×130×9 +2Ls-150×150×15
	2Ls-90×90×10	2Ls-90×90×10 +2Ls-250×90×10×15
束材	—	4Ls-90×90×6

表 2-1(2) 屋根トラスの主な部材諸元 (2/2)

(c) サブトラス (R7 通り)

部位	使用部材	
	補強前	補強後
上弦材	H-250×250×9×14	同左
下弦材	CT-170×250×9×14	PL-19×601+PL-25×550 +2PLs-19×344
		CT-170×250×9×14 +BT-280×250×9×12 +2PLs-16×350
斜材	2Ls-130×130×9	2Ls-130×130×9 +2Ls-150×90×12
		2Ls-130×130×9 +2Ls-150×150×15
		2Ls-130×130×9 +2Ls-250×90×12×16
	2Ls-90×90×10	2Ls-90×90×10 +2Ls-250×90×10×15
2Ls-90×90×10 +2Ls-300×90×11×16		
束材	—	4Ls-90×90×6

(d) 母屋

部位	使用部材	
	補強前	補強後
上弦面	H-390×300×10×16	同左

表 2-2 屋根トラスの各部材の要求機能

部位	部材	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

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、サブトラス上弦材及び母屋は H 型断面の鋼材であり、スタッド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。

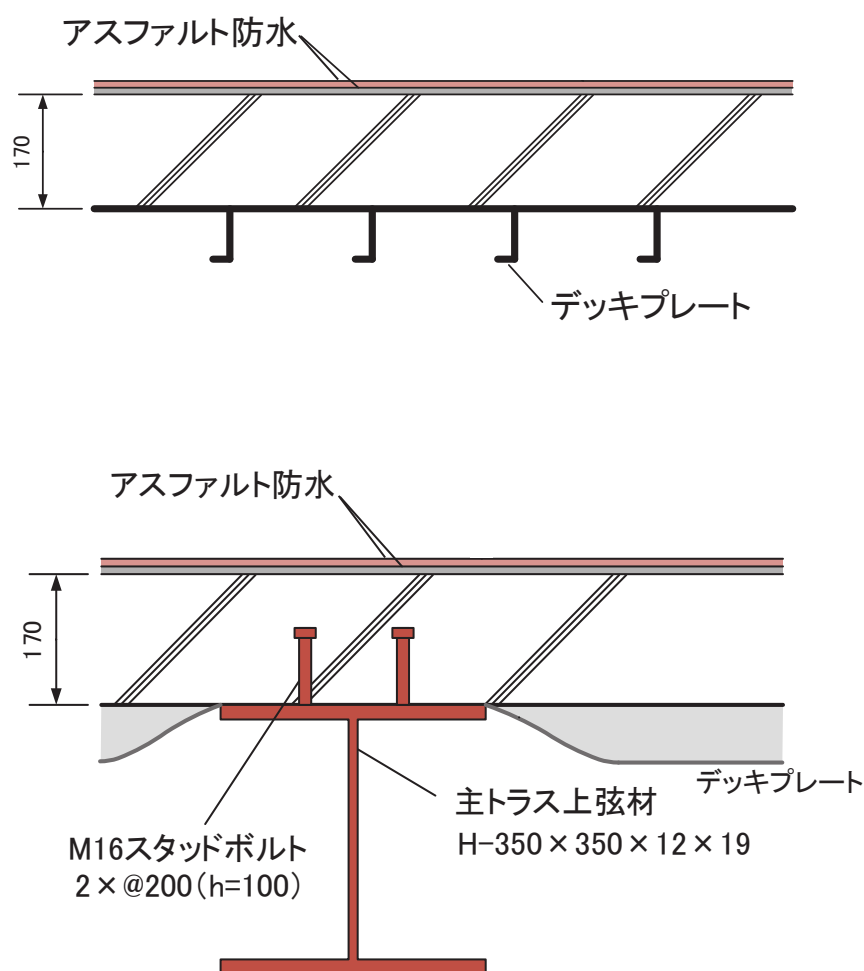


図 2-2 屋根スラブ断面図

3. 原子炉建屋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。

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。解析モデルの概要を図 3-1 に示す。

屋根トラス部は, 主トラス (上下弦材, 斜材及び束材), サブトラス (上下弦材, 斜材等), 母屋, 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) と軸変形のみを考慮したトラス要素 (トラスの斜材, 束材等) としてモデル化する。また, 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。また, 解析に用いる材料の物性値を表 3-1 に示す。

また, 屋根トラスは屋根スラブとスタッド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。

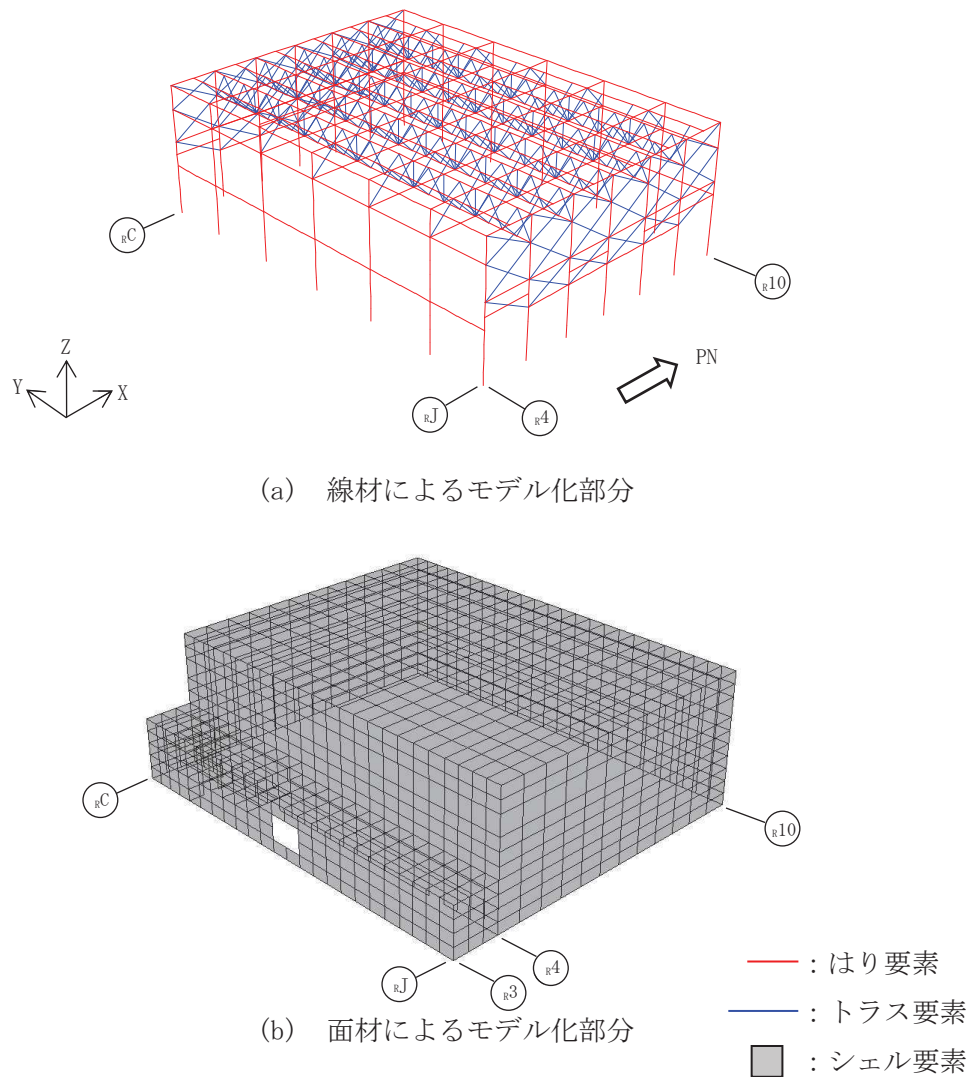


図 3-1 屋根トラスの解析モデルの概要

表 3-1 解析に用いる材料定数

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*	26500	11400	5
鉄骨	205000	79000	2

注記* : 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。その考え方については図 3-2 及び図 3-3 に示す。

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、トラス材としてモデル化した部材の一部については塑性域に入る可能性を考慮して、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採用している。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 耐震壁，屋根スラブの剛性補正

耐震壁及びスラブのシェル要素については、弾性モデルとしている。

耐震壁のモデル化に当たっては、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。壁剛性の補正の考え方を図 3-2 に示す。

屋根スラブについて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（補足 620-1 別紙 5 参照）ことから設計剛性を基本ケースとする。なお、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。屋根スラブの剛性の考え方を図 3-3 に示す。

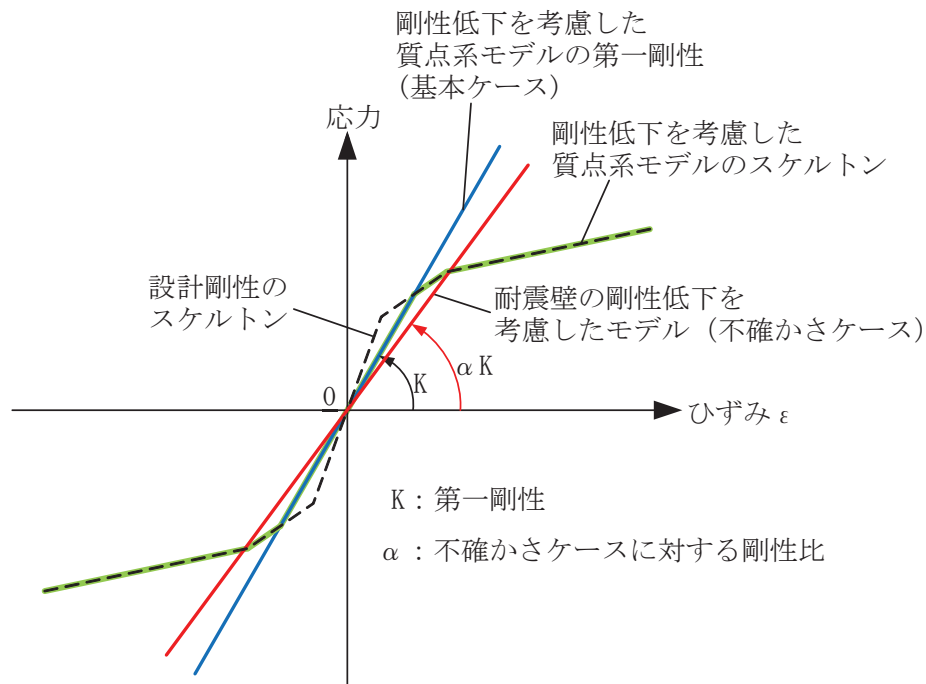


図 3-2 耐震壁の剛性の考え方

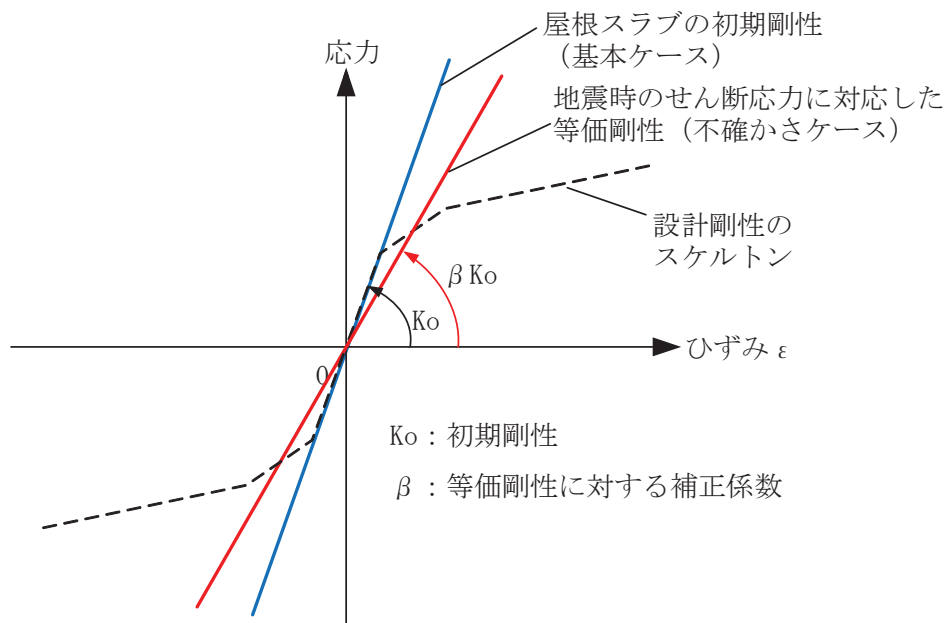


図 3-3 屋根スラブの剛性の考え方

3.4 入力地震動，材料減衰

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（0. 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。また，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. 60Hz）に対して，鉄骨造部分の減衰定数が 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%とする剛性比例型内部粘性減衰（各部別）とする。

3.5 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 S_s 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，影響検討として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。

また，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が，屋根トラスのモデルによる応答性状と比較した上で，必要に応じオペフロ上部の耐震壁のせん断ひずみ等の評価に反映する。

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，屋根トラスの機能維持の評価方針を示す。

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，クレーン階より上部の耐震壁にも，建屋内部側にデッキプレートが存在する。これらは気密性に対し有効な機能を有すると考えられるが，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。

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	(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 。(鉄筋が降伏する場合は別途詳細検討)
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：漏えい量の算定にあたっては，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 1.1 倍を超えないこと

*3：屋根スラブについては，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可能性を考慮して、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した。

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。

今回工認で採用した屋根トラス部材の弾塑性特性を表 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。当該モデルについては、先行審査にて採用実績があり、モデルの妥当性自体に大きな論点はないと考えられるものの、原子炉建屋屋根トラス部材の評価への適用性については、十分に確認する必要があると考えられる。

以下では、修正若林モデルの概要を確認した上で、原子炉建屋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		考慮しない（弾性）
	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		考慮しない（弾性）
	斜材	トラス要素	弾塑性（修正若林モデル）
	束材		
母屋	上弦面	はり要素	考慮しない（弾性）
方杖	—	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 今回工認で採用予定の弾塑性特性（修正若林モデル）の概要

原子炉建屋屋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、原子力発電所建屋（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、式(1)により評価される。

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

$n = N/N_y$ N :軸力 N_y :降伏軸力

n_0 :無次元化初期座屈耐力 $\bar{\zeta}$:無次元化圧縮側累積塑性歪

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

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捉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。

なお、本弾塑性特性については、前述のとおり、川内原子力発電所タービン建屋の解析で考慮したブレースの弾塑性特性として採用されており、認可実績がある。

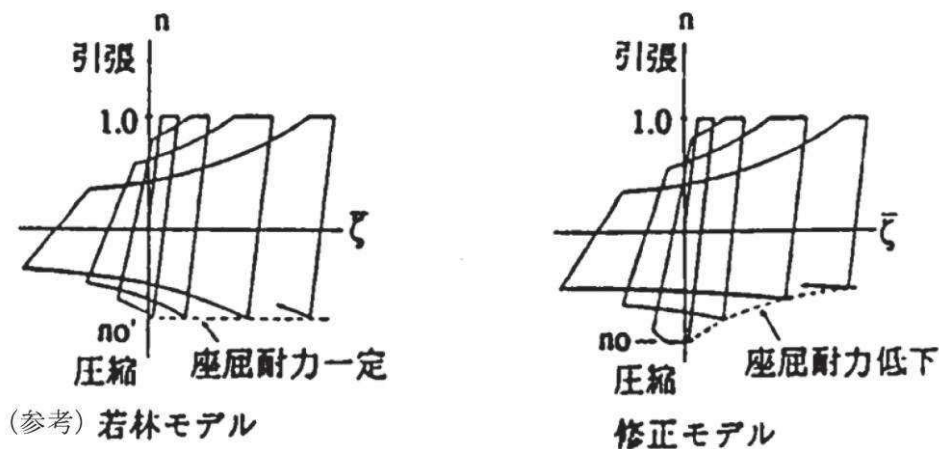


図4-1 修正若林モデルの弾塑性特性（[1]より引用，一部加筆）

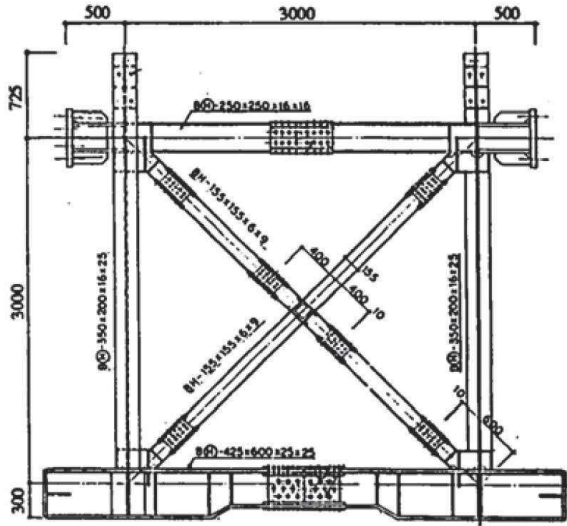
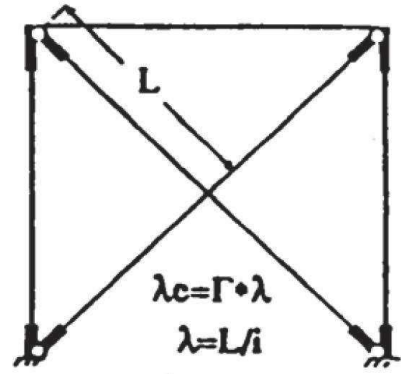
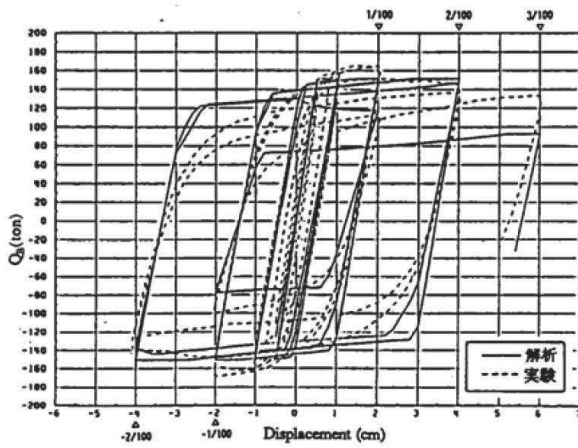


図 4-2 試験体の概要 ([1]より引用)

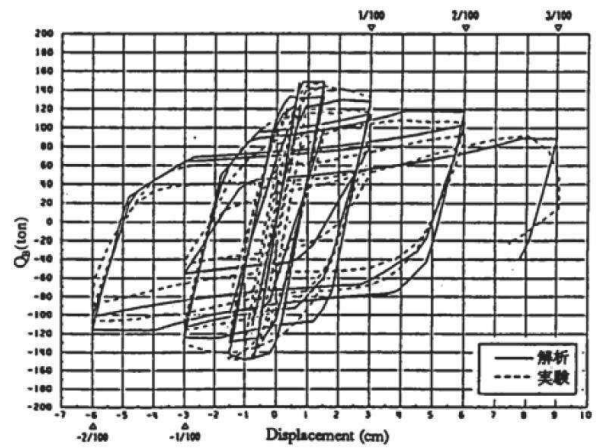


Γ ; 等価座屈長さ係数
 λ_e ; 有効細長比
 λ ; 細長比(芯々)

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 原子炉建屋屋根トラスに対する検証例

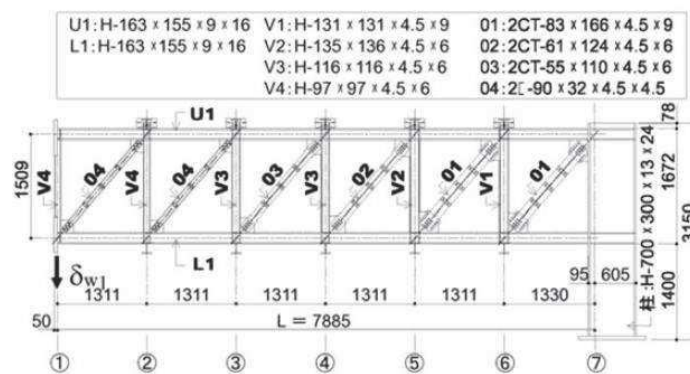
谷口らの研究^[1]は、X型ブレース架構を対象としたものであったが、原子炉建屋屋根トラスに対して本弾塑性特性を適用した検討例として、鈴木らの研究^[3]がある。

この研究は、原子炉建屋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。

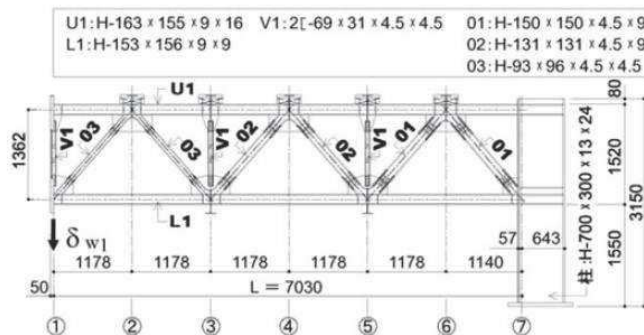
鈴木らの研究^[3]では、終局耐力を検討するに当たり原子炉建屋屋根トラスを模擬した縮小試験体を製作し、トラスの崩壊挙動に与える影響が大きい鉛直動的荷重を模擬した静的載荷試験により、その弾塑性挙動を確認している。なお、試験に当たっては、原子力発電所鉄骨屋根トラスがプラット形とワーレン形の2種類に分類されることを踏まえ、この2種類のトラス形式についての試験体を製作している。原子炉建屋屋根トラスはこのうち、ワーレン形に該当する。試験体の概要を図4-5に示す。

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型ブレース材に加えて、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)

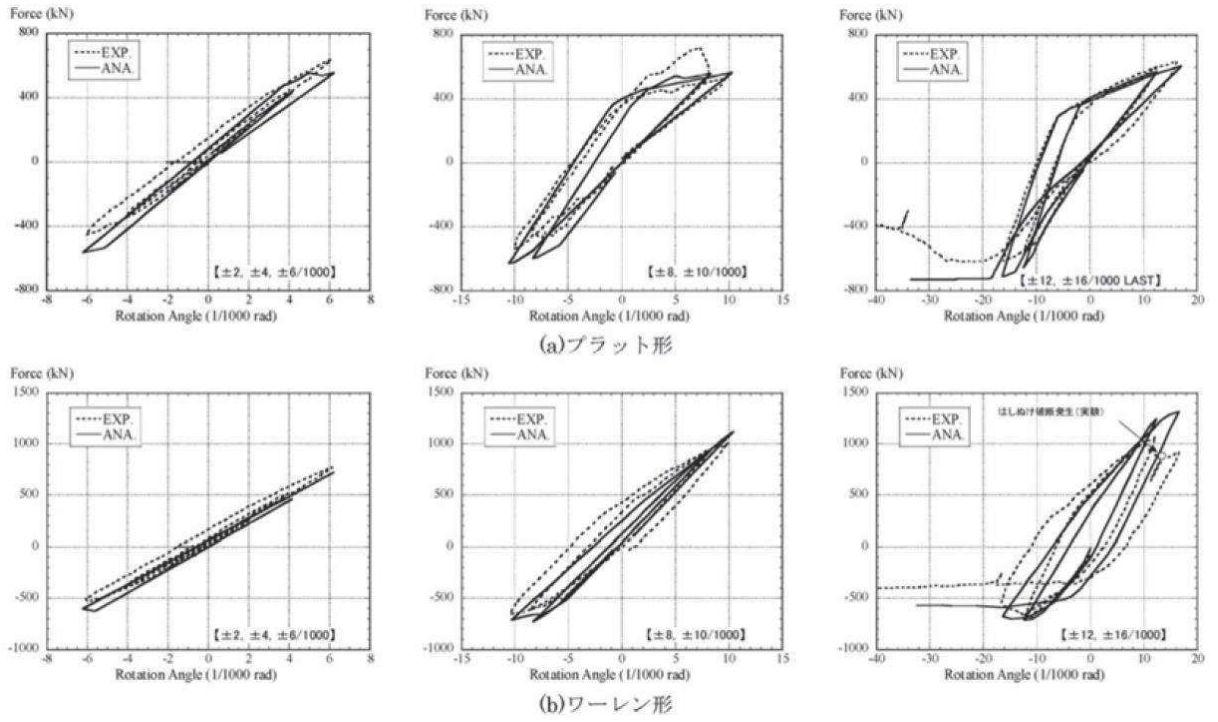


図 4-6 実験のシミュレーション解析結果 ([3]より引用)

4.2.3 原子力発電所鉄骨屋根トラスへの適用性

今回採用した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、原子炉建屋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。これより、原子炉建屋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域に入る可能性を考慮して、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）を下回っていること等を確認する。この手法は先行審査（川内原子力発電所タービン建屋）でも認可実績のある手法であることから、手法自体に技術的な論点はないものと考えられる。

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
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* ²
	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			
母屋		鉛直荷重の支持	考慮しない（弾性）	

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 1.1 倍を超えないこと。

6. 原子炉建屋屋根トラスの評価に関するまとめ

今回工認では、原子炉建屋屋根トラスの評価に当たって、3次元フレーム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（原子炉建屋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鉄骨部材のクライテリアについて整理した。

以上より、今回工認において原子炉建屋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、弾塑性解析の結果を踏まえ、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、原子炉建屋屋根トラスは、原子炉建屋の地震応答解析結果に基づく燃料取替床（地上3階）レベル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（建屋応答の不確かさ）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。

【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, pp303-316
- [2] 柴田ほか: 鉄骨筋違の履歴特性の定式化, 日本建築学会構造系論文集第 316 号, 昭和 57 年 6 月, pp18-24
- [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. 76No. 661, 2011 年 3 月, P571-580
- [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, 127-136, 1995. 3

別紙 1-1-1 原子炉建屋屋根トラスの地震時シミュレーション

原子炉建屋の屋根トラスのモデル化の妥当性を確認するために、地震観測記録を用いてシミュレーション解析を実施している。検討対象地震は、3.11地震の観測記録とし、燃料取替床（地上3階）の観測記録を入力地震動として、屋上の地震観測記録のシミュレーション解析を実施している。解析結果は補足 620-1 別紙 7 に示す。

屋上位置のシミュレーション解析と観測記録の加速度応答スペクトルを比較すると、各方向ともおおむね整合する結果となっている。

このことから、オペフロ上部の耐震壁に対する補強工事（鉄骨ブレースの設置や鉄筋コンクリート壁の増設等）前において屋根トラスのモデルについては妥当と考えられる。

なお、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及び 3.11 地震後に実施した補強工事等を考慮して、表 1 に示す項目を、このシミュレーションモデルから変更している。

表 1 シミュレーション解析モデルと今回工認モデルの比較

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
	オペフロ上部耐震補強工事	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

別紙 1-1-2 剛性比例型減衰の妥当性について

1. はじめに

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いる剛性比例型としている。

表 1-1 に原子炉建屋屋根トラスの固有値解析結果を、図 1-1 に剛性比例型減衰による減衰定数と振動数の関係を示す。

鉄骨造の屋根トラスは、水平材として鉛直方向の挙動が卓越すると考えられるため、水平材の応答に影響の大きい鉛直方向 1 次固有振動数 (3.60Hz) に対して減衰定数が 2%となる剛性比例型減衰を与えている。図 1-1 より、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。

表 1-1 原子炉建屋屋根トラスの固有値解析結果

次数	固有振動数 (Hz)	固有周期 (s)	刺激係数			備考
			NS方向 (X)	EW方向 (Y)	鉛直方向 (Z)	
1	3.60	0.278	0.011	0.005	1.567	鉛直方向1次
4	6.16	0.162	-0.055	-1.527	0.012	EW方向1次
9	6.64	0.151	-3.310	0.227	-0.036	NS方向1次

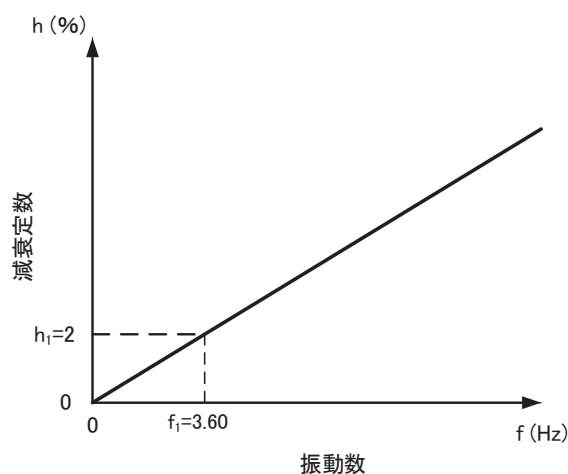


図 1-1 剛性比例型減衰による減衰定数と振動数の関係

2. 剛性比例型減衰設定の妥当性の確認

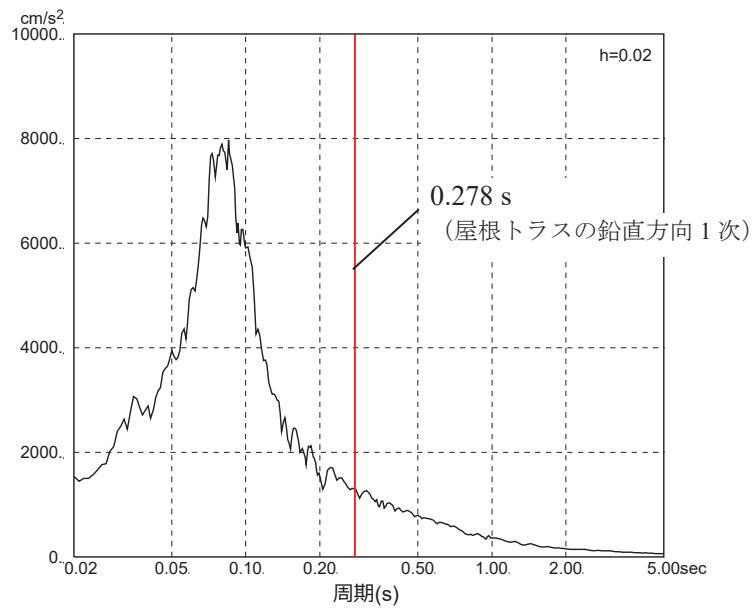
表 1-1 に示すとおり屋根トラスの水平方向の 1 次固有振動数（固有周期）は、NS 方向：6.64Hz（0.151s）、EW 方向：6.16Hz（0.162s）であり、鉛直方向の 1 次固有振動数は、3.60Hz（0.278s）である。剛性比例型減衰の採用にあたっては、上記の振動数のいずれかの振動数を基準に設定することとする。

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（0.237s）、EW 方向 4.36Hz（0.230s）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（0.100s）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。

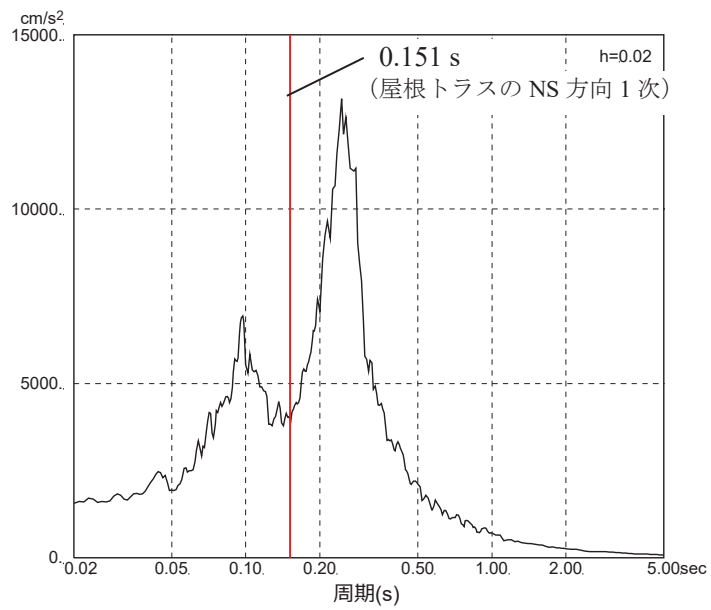
また、参考として屋根トラスの各方向の固有周期と解析モデルへの入力地震動の加速度応答スペクトルの関係を図 2-1 に示す。入力地震動の応答スペクトルの卓越周期は原子炉建屋の地盤-建屋連成系の各方向の 1 次周期におおむね対応しており、いずれの方向についても赤線で示す屋根トラスの 1 次固有周期とは離れた周期となっている。

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（3.60Hz）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。

なお、影響検討として、剛性比例型以外の減衰（例えば鉛直 1 次と主トラス方向である NS 方向の 1 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。

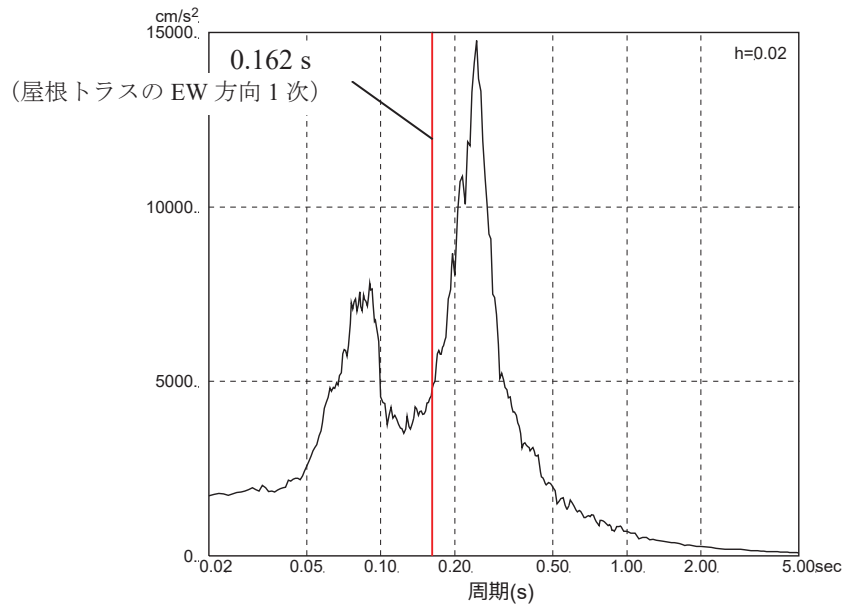


(a) 鉛直方向



(b) NS 方向

図 2-1(1) 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



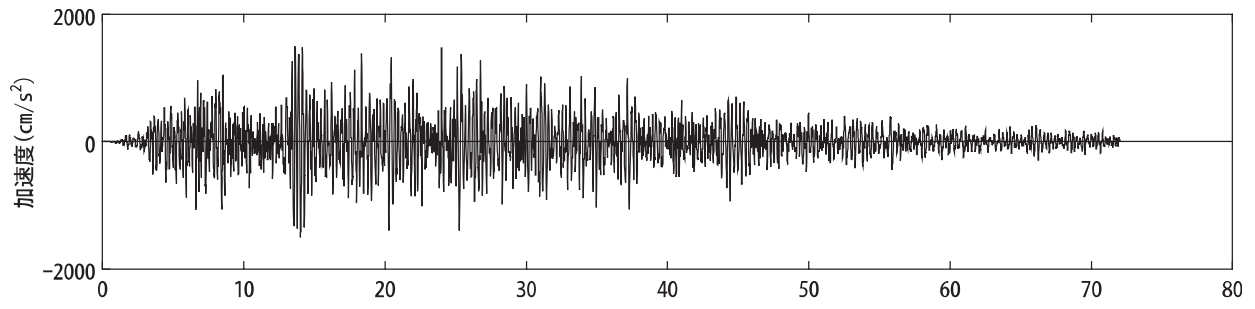
(c) EW方向

図 2-1(2) 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

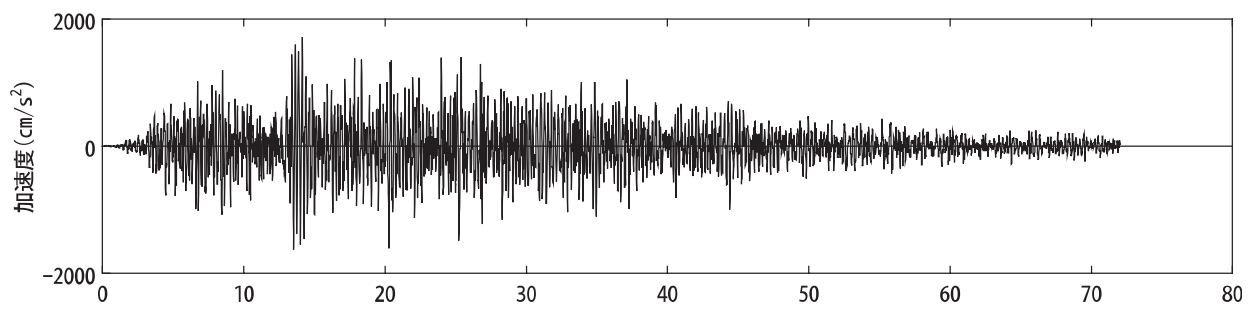
別紙 1-1-3 屋根トラスの入力地震動及び固有振動数・固有モードについて

1. 屋根トラスの入力地震動

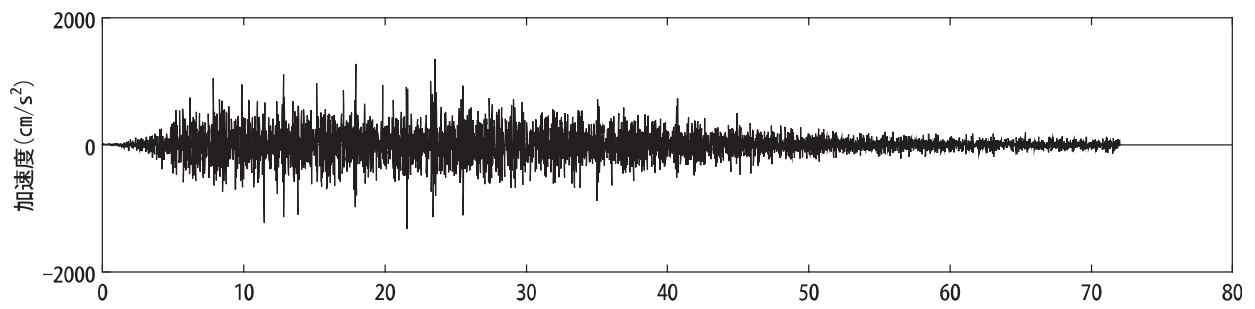
屋根トラスへの入力として用いている入力地震動（原子炉建屋の質点系モデルによる地震応答解析結果から得られる燃料取替床（地上3階）レベルの応答結果）の時刻歴波形について、基準地震動S_{s-D2}を例として図1-1に示す。地震応答解析を実施する際には、水平、鉛直成分は加速度時刻歴波形を、回転成分は回転角加速度時刻歴波形を入力している。



(a) NS 方向

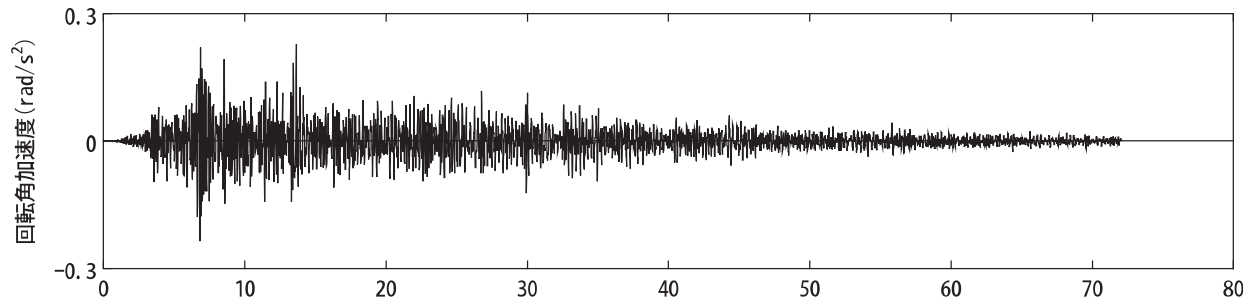


(b) EW 方向

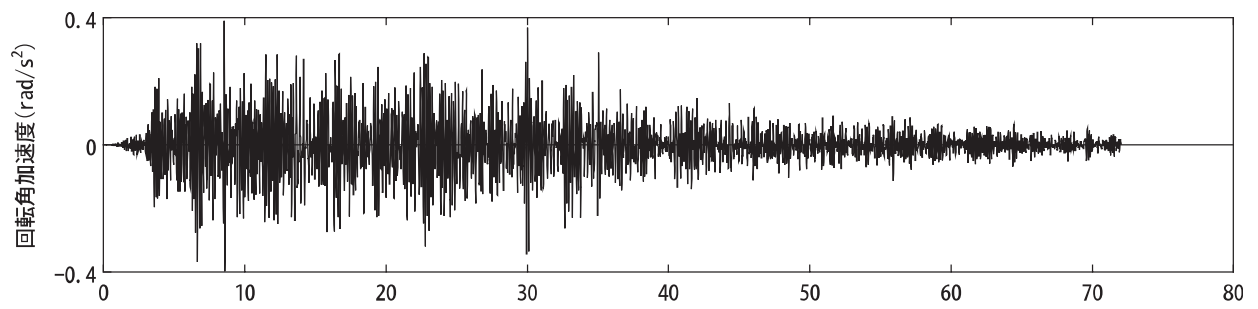


(c) UD 方向

図1-1(1) 入力地震動の時刻歴波形
(加速度, 水平, 鉛直成分)



(a) NS 方向



(b) EW 方向

図1-1(2) 入力地震動の時刻歴波形
(加速度, 回転成分)

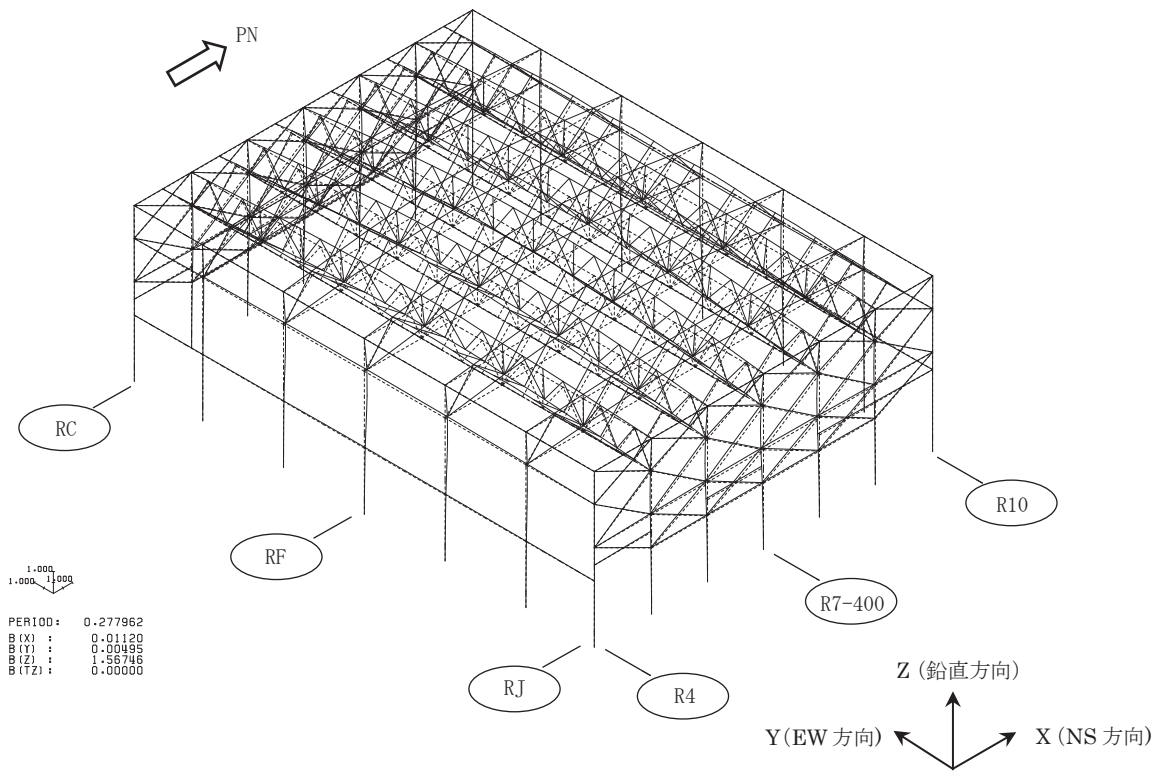
2. 屋根トラスの固有値解析結果

屋根トラスの暫定の固有値解析結果を表 2-1 及び図 2-1 に示す。

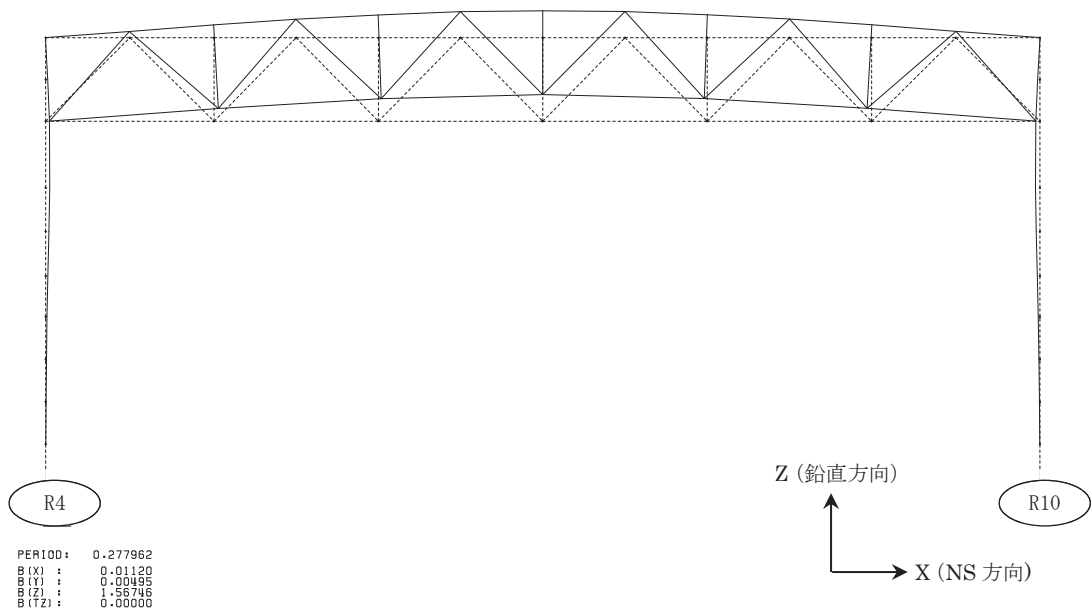
1 次固有振動数は鉛直方向で 3.60Hz，水平方向で 6.64Hz（NS 方向），6.16Hz（EW 方向）となる。

表 2-1 固有値解析結果

次数	固有振動数 (Hz)	固有周期 (s)	刺激係数			備考
			NS方向 (X)	EW方向 (Y)	鉛直方向 (Z)	
1	3.60	0.278	0.011	0.005	1.567	鉛直方向1次
4	6.16	0.162	-0.055	-1.527	0.012	EW方向1次
9	6.64	0.151	-3.310	0.227	-0.036	NS方向1次

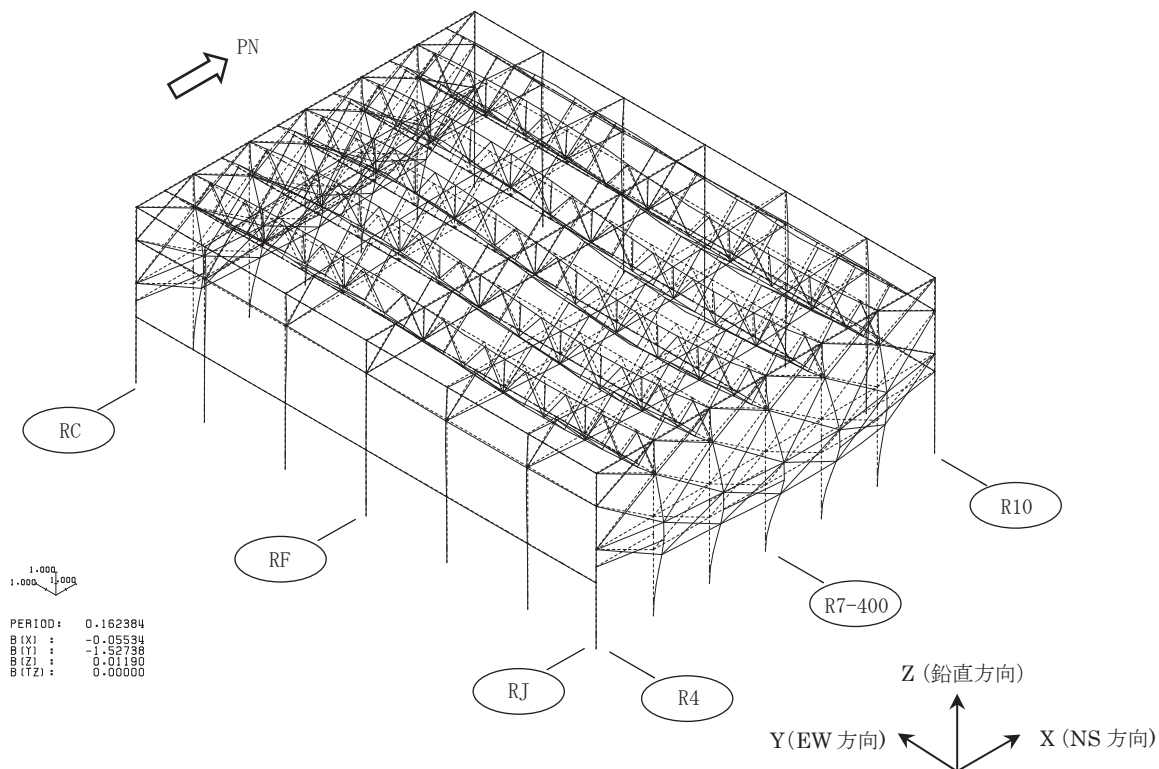


(a) 全体

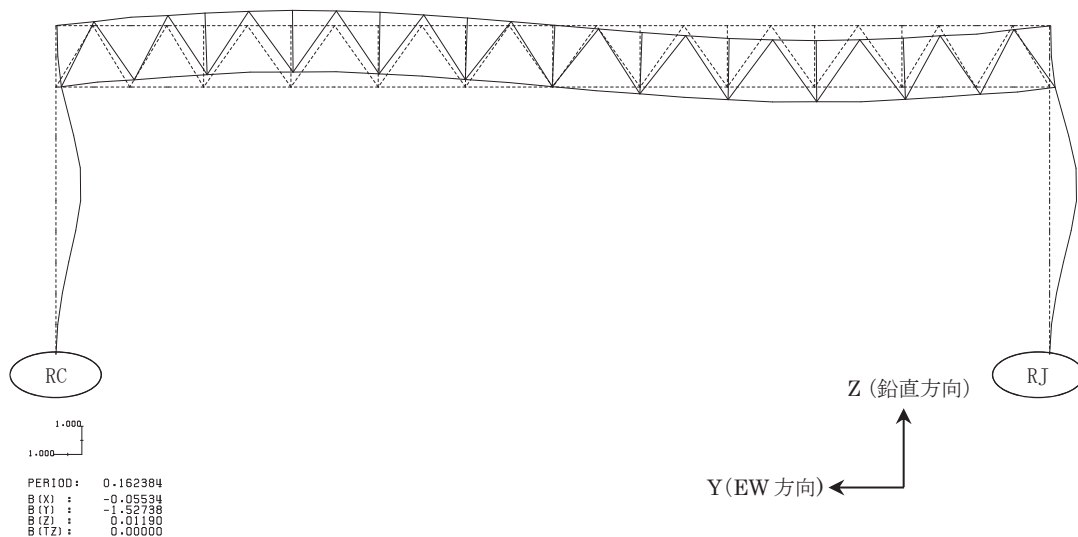


(b) 主トラス構面 (RF 通り)

図 2-1(1) 固有モード図(全体 1 次 : 屋根の鉛直 1 次)

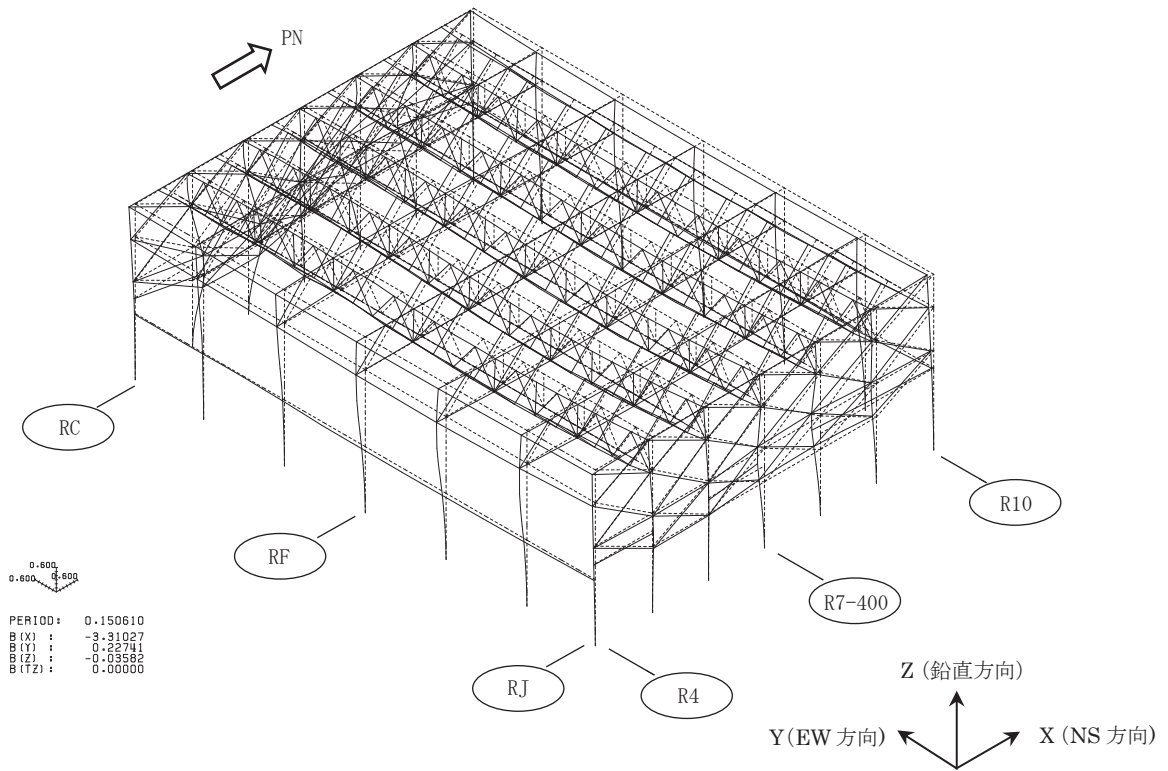


(a) 全体

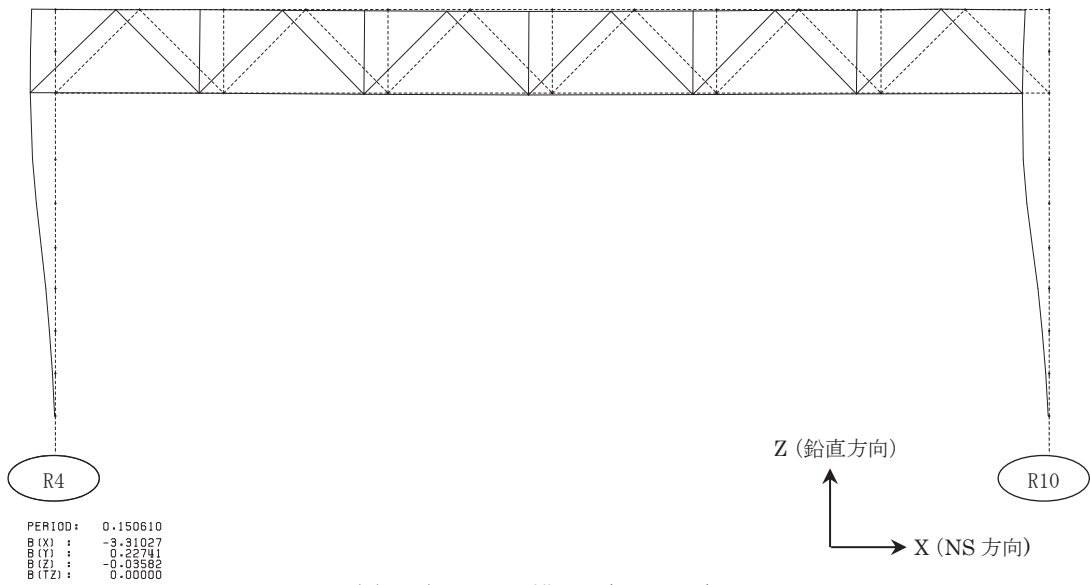


(b) サブトラス構面 (R7-400 通り)

図 2-1(2) 固有モード図(全体 4 次 : EW 方向水平 1 次)



(a) 全体



(b) 主トラス構面 (RF 通り)

図 2-1(3) 固有モード図(全体 9 次 : NS 方向水平 1 次)

別紙 1-1-4 屋根トラスの入力地震動に係る影響検討について

1. 概要

原子炉建屋屋根トラスの地震応答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（地上3階）レベルの応答時刻歴波形を用いるが、鉛直動に対する質点系モデルでは、屋根スラブの剛性は考慮していない。

鉛直動に対する質点系モデルにおいて、屋根スラブの剛性を考慮した場合についても解析を実施し、原子炉建屋屋根トラスの地震応答解析モデルへの入力地震動に与える影響を確認する。

2. 検討結果

鉛直動に対する質点系モデルを図 2-1 に、屋根スラブの面外剛性を屋根部分の剛性に考慮したモデルを図 2-2 に示す。

上記2つのモデルによる燃料取替床（地上3階）レベルの応答スペクトル（ $h=2\%$ ）の比較を、基準地震動 S_s-D1 及び S_s-D2 を例に図 2-3 に示す。

全周期帯にわたり、2つのモデルによる応答値の差はほとんど無く、屋根トラスの評価において無視できる範囲である。

設計基準強度 : $F_c = 32.4$ N/mm²
 ヤング係数 : $E_c = 2.65 \times 10^4$ N/mm²
 せん断弾性係数 : $G_c = 1.14 \times 10^4$ N/mm²
 減衰定数 : $h = 5\%$ (RC造)
 : $h = 2\%$ (トラス部)

トラス部の断面性能 (A_s, I) はRC等価な値にて与える

せん断面積(m²)
 断面2次モーメント(m⁴)
 質点重量(kN)
 軸ばね ($\times 10^7$ kN/m)

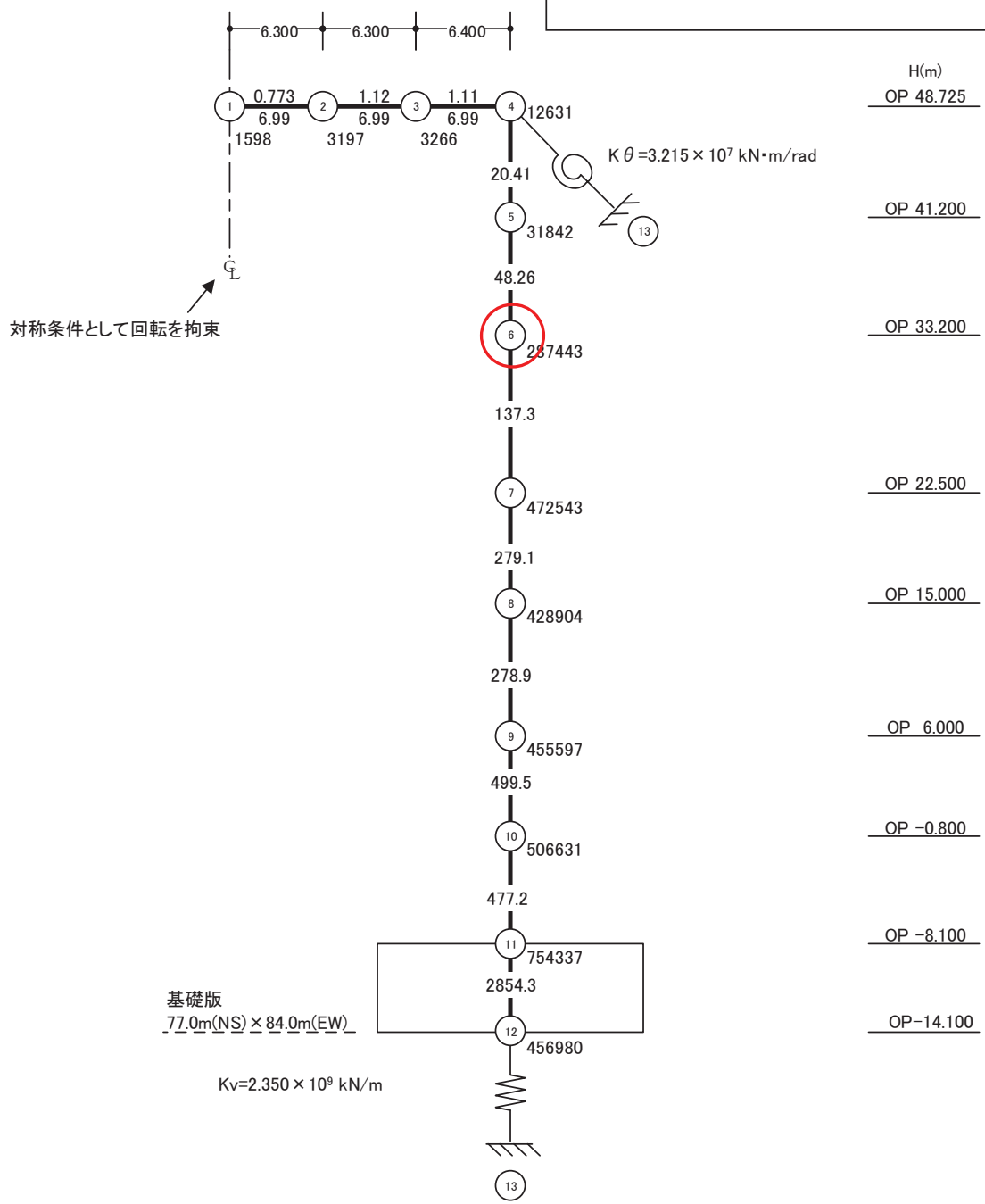


図 2-1 鉛直動に対する質点系モデル
(屋根の面外剛性非考慮)

設計基準強度 : $F_c = 32.4 \text{ N/mm}^2$
 ヤング係数 : $E_c = 2.65 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
 せん断弾性係数 : $G_c = 1.14 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
 減衰定数 : $h = 5\%$ (RC造)
 : $h = 2\%$ (トラス部)

トラス部の断面性能 (A_s, I) はRC等価な値にて与える

せん断面積 (m^2)
 断面2次モーメント (m^4)

No.

質点重量 (kN)

軸ばね ($\times 10^7 \text{ kN/m}$)

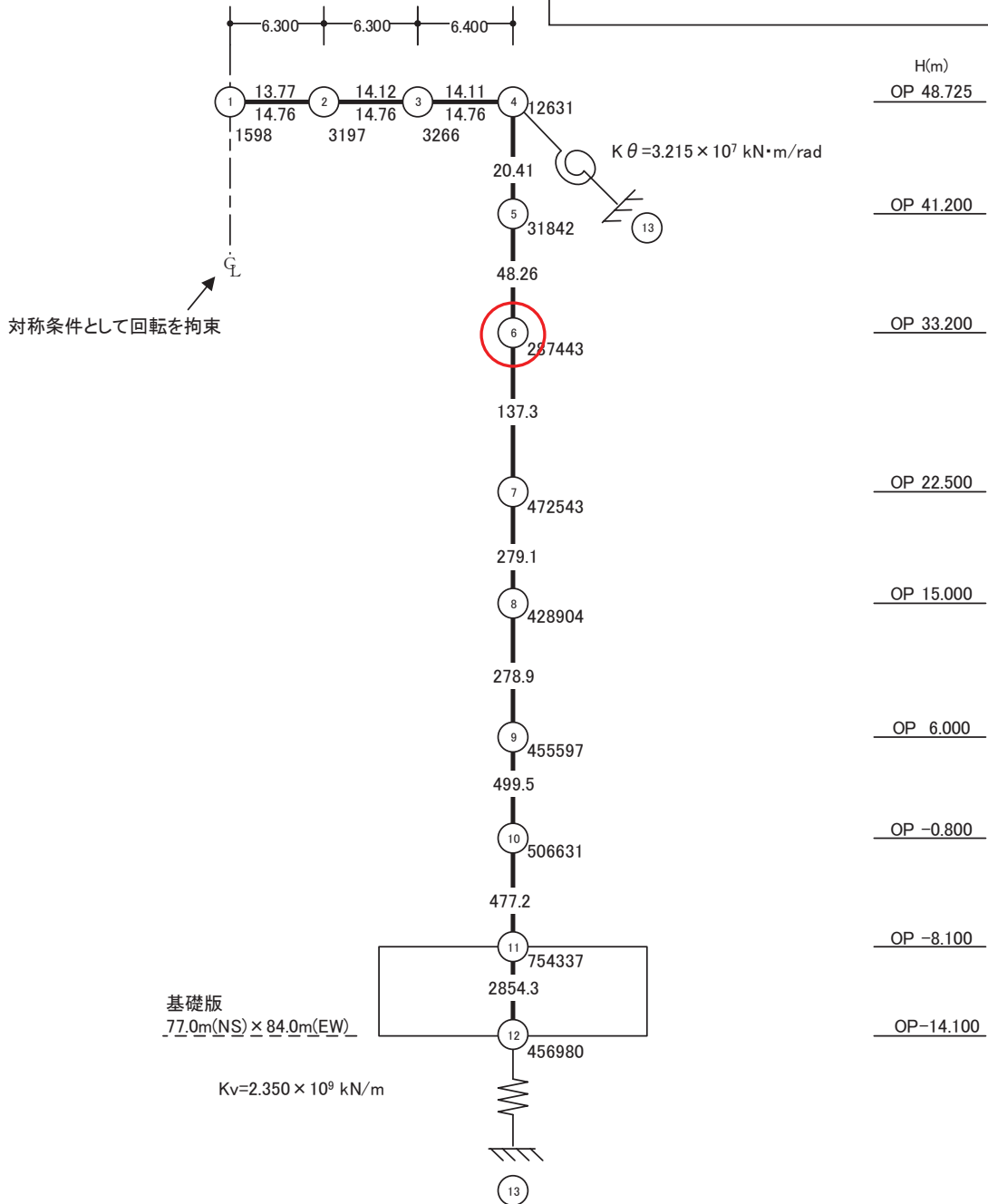
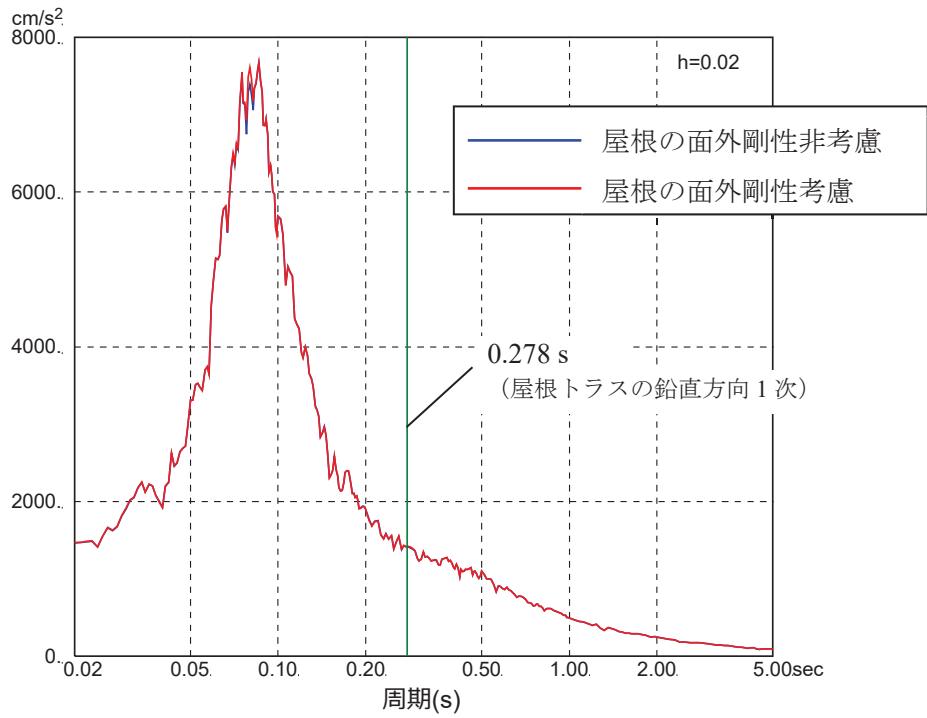
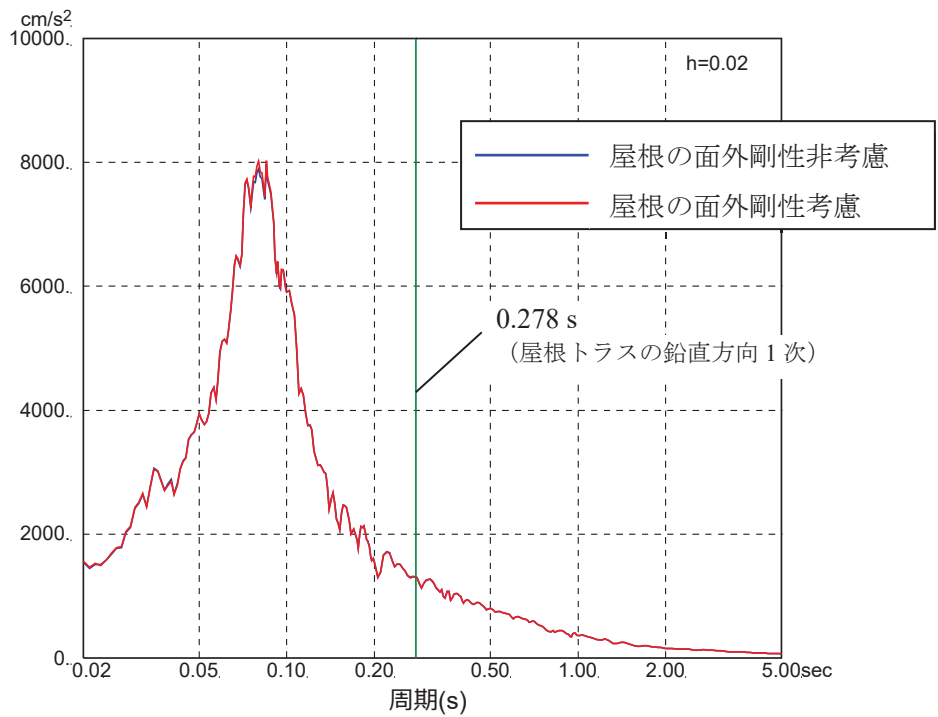


図 2-2 鉛直動に対する質点系モデル
 (屋根の面外剛性を考慮した場合)



(a) 基準地震動 S s - D 1



(b) 基準地震動 S s - D 2

図 2-3 燃料取替床（地上 3 階）レベルの応答スペクトル (h=2%) の比較

別紙 1-2 原子炉建屋屋根トラスの補強概要

目 次

1. 概要	別紙 1-2-1
2. 補強概要	別紙 1-2-2
2.1 接合部補強	別紙 1-2-2
2.2 サブトラス、母屋の補強	別紙 1-2-3

1. 概要

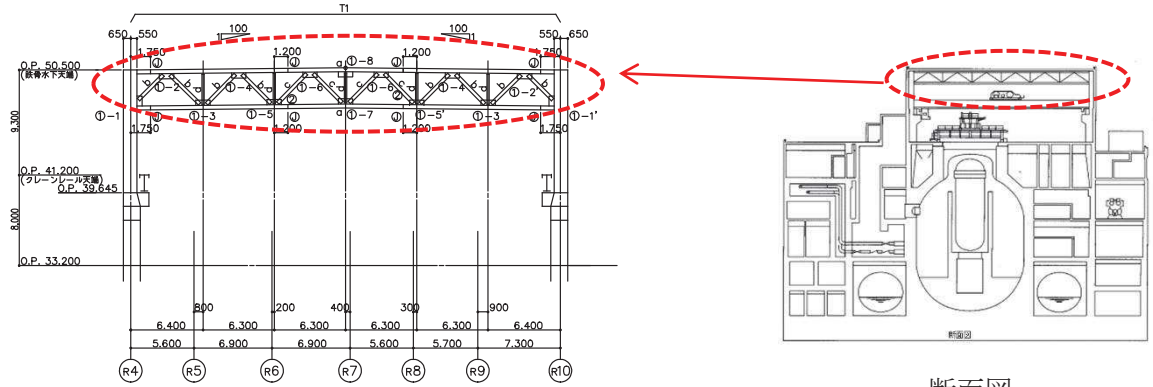
原子炉建屋の屋根トラスは、平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震（以下「3.11 地震」という。）以後に、接合部の補強及びサブトラスと母屋の補強を実施している。なお、建設時に仮設材として設置していた上下弦面の水平ブレースは撤去している。

補強概要を以下に示す。

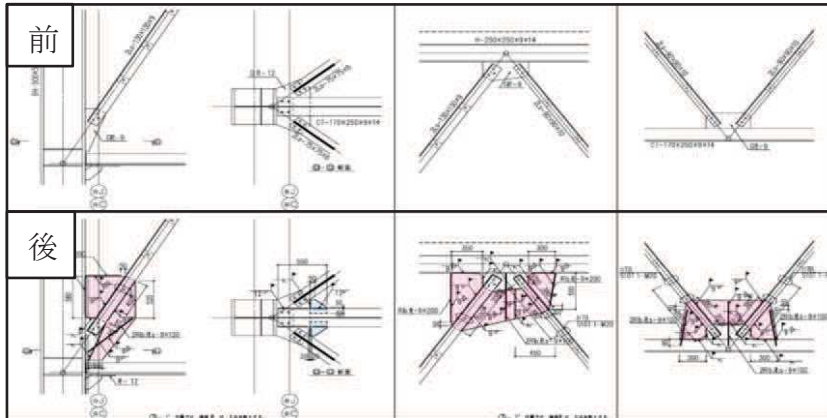
2. 補強概要

2.1 接合部補強

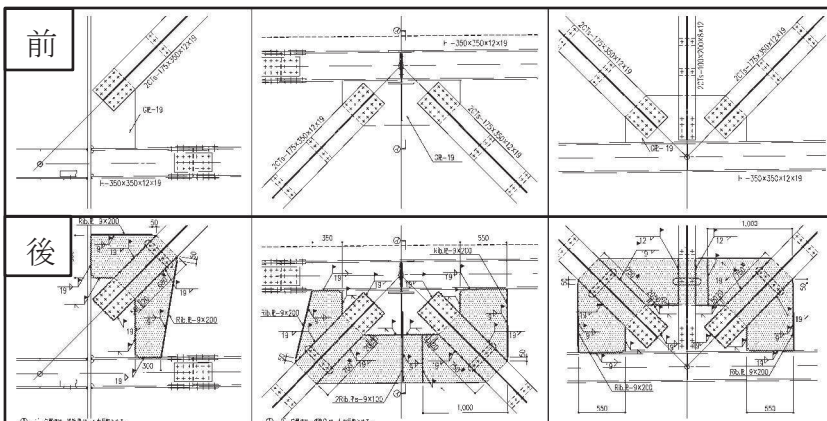
屋根トラスの接合部で破断しないように補強工事を実施した。補強概要を図2-1に示す。



断面図



サブトラス：補強前後



主トラス：補強前後



屋根トラス接合部の補強状況写真

図2-1 原子炉建屋屋根トラス接合部の補強概要

2.2 サブトラス及び母屋の補強

サブトラス及び母屋について、補強工事を実施した。補強概要を図2-2及び図2-3に示す。

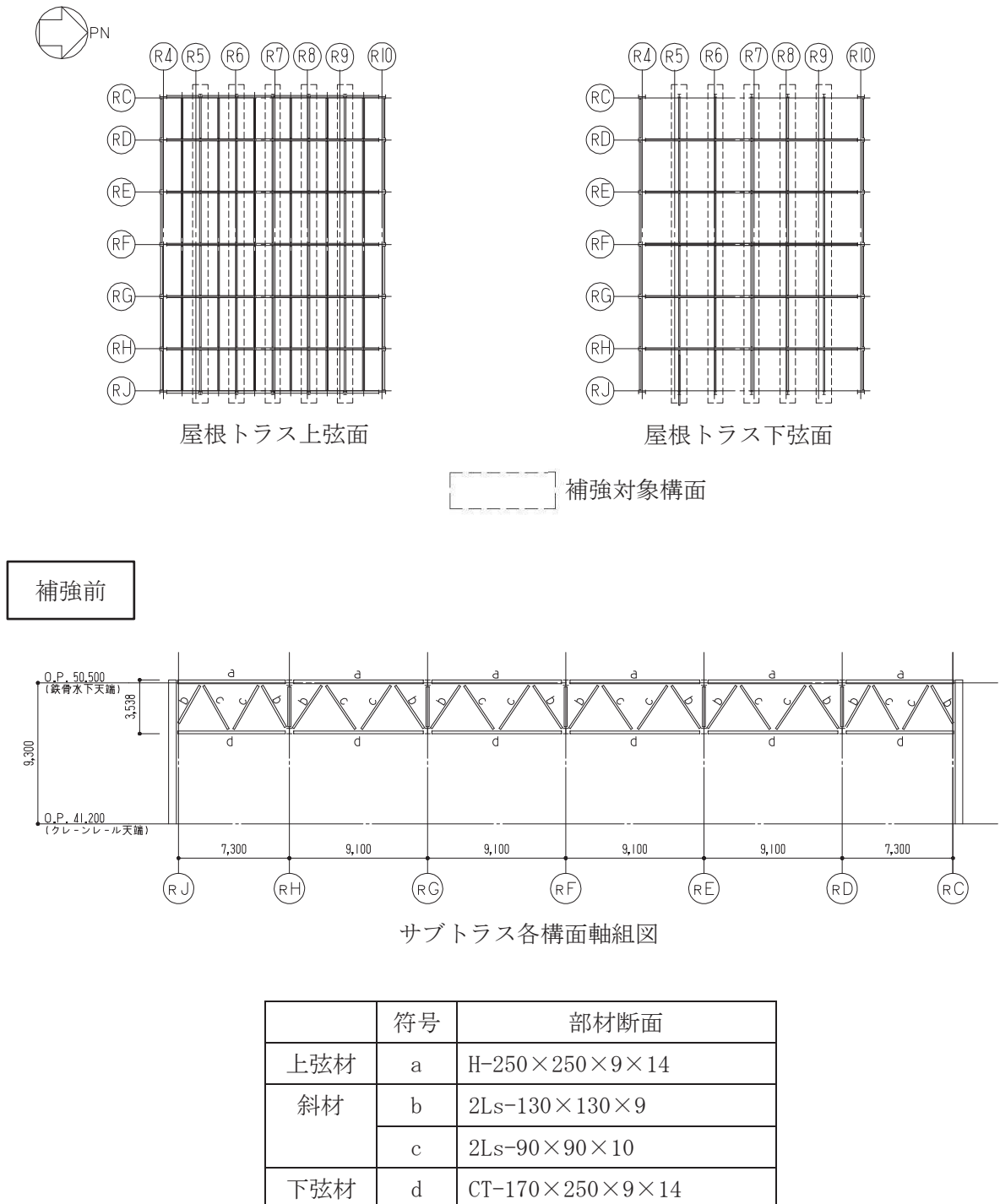
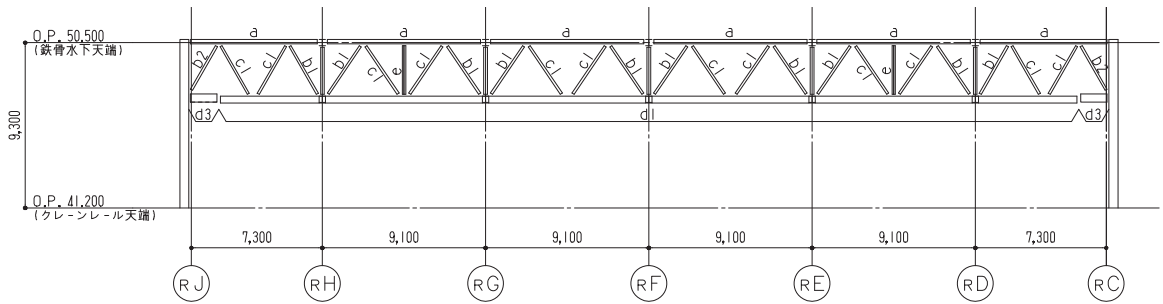
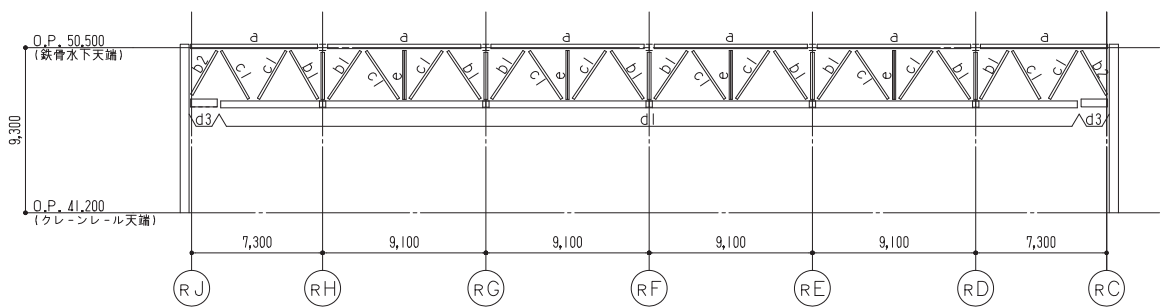


図2-2(1) サブトラス補強概要

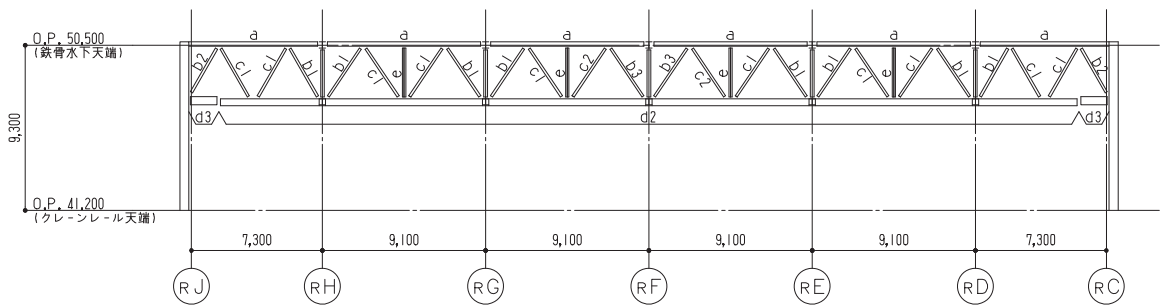
補強後



サブトラス (R5), (R9) 通り軸組図



サブトラス (R6), (R8) 通り軸組図



サブトラス (R7) 通り軸組図

図 2-2 (2) サブトラス補強概要

	符号	部材断面	備考
上弦材	a	(H-250×250×9×14)	
斜材	b1	(2Ls-130×130×9)+2Ls-150×90×12	
	b2	(2Ls-130×130×9)+2Ls-150×150×15	
	b3	(2Ls-130×130×9)+2Ls-250×90×12×16	
	c1	(2Ls-90×90×10)+2Ls-250×90×10×15	
	c2	(2Ls-90×90×10)+2Ls-300×90×11×16	
下弦材	d1	PL-19×601+ PL-25×550+ 2PLs-16×344	下図参照
	d2	PL-19×601+ PL-25×550+ 2PLs-19×344	下図参照
	d3	(CT-170×250×9×14)+BT-280×250×9×12+2PLs-16×350	下図参照
東材	e	4Ls-90×90×6	

()内は既存部材を示す

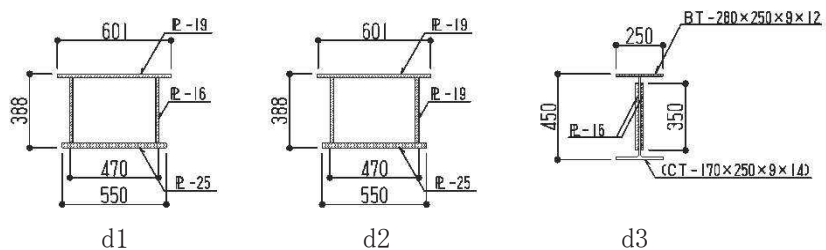
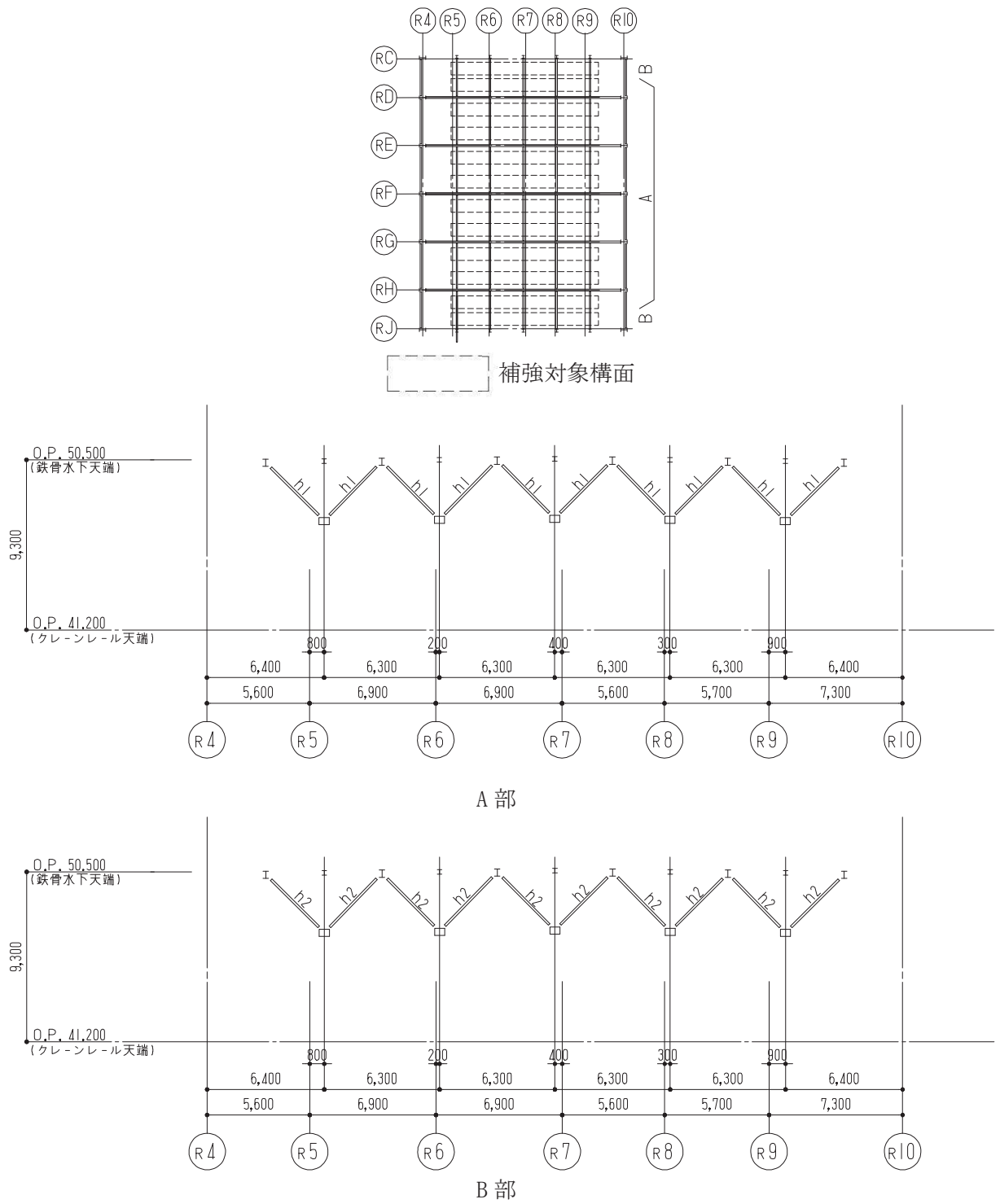


図 2-2(3) サブトラス補強概要



	符号	部材断面
方杖	h1	2Ls-130×130×9
	h2	2Ls-90×90×10

図 2-3 母屋補強概要 (方杖追加)

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の考え方 別紙 2-2

1. 概要

本資料は、原子炉建屋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

原子炉建屋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。更に，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，2008 年）

表 2-1(1) 原子炉建屋（屋根トラス）

モデル概要

○モデル化範囲

- ・燃料取替床レベル（3F, O.P. 33.2m）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）
- ・鉄骨部：はり要素（主トラス及びサブトラスの上下弦材，母屋），トラス要素（主トラス及びサブトラスの斜材・束材，方杖）

○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。

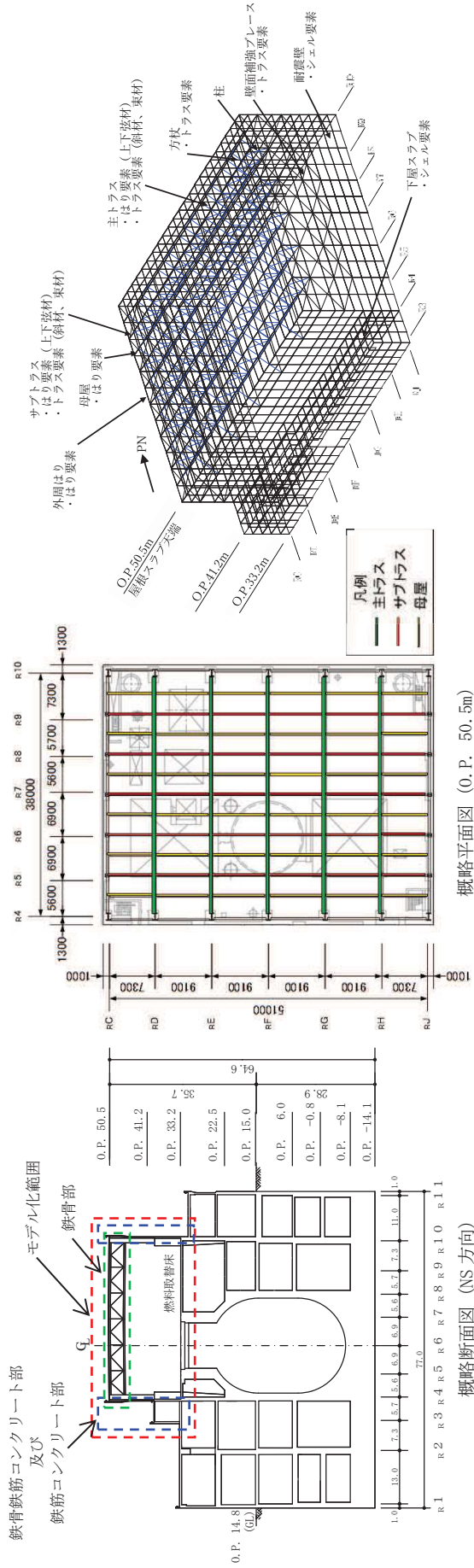


図 1 モデル化範囲

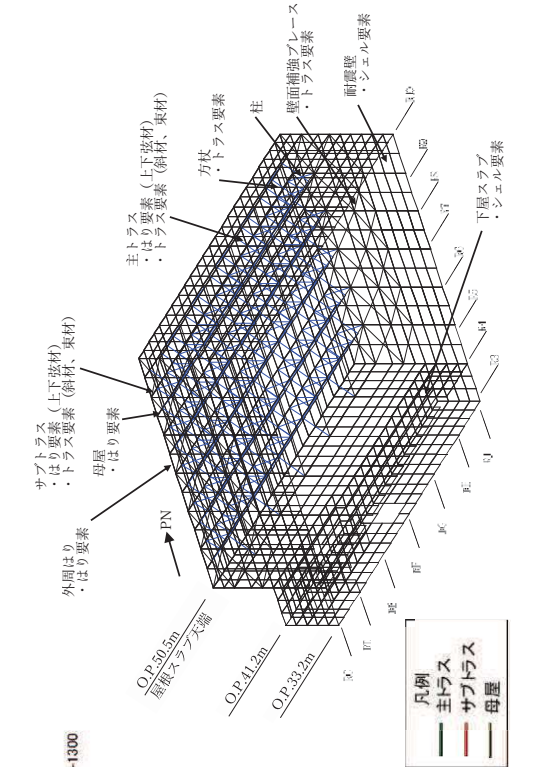


図 2 3次元FEMモデル

表 2-1(2) 応力解析モデル及び手法の比較 (原子炉建屋屋根トラス)

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、燃料取替床レベル (3F, O.P. 33.2m) 位置について固定とする。
○荷重の入力方法	<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床レベル (3F, O.P. 33.2m) 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。

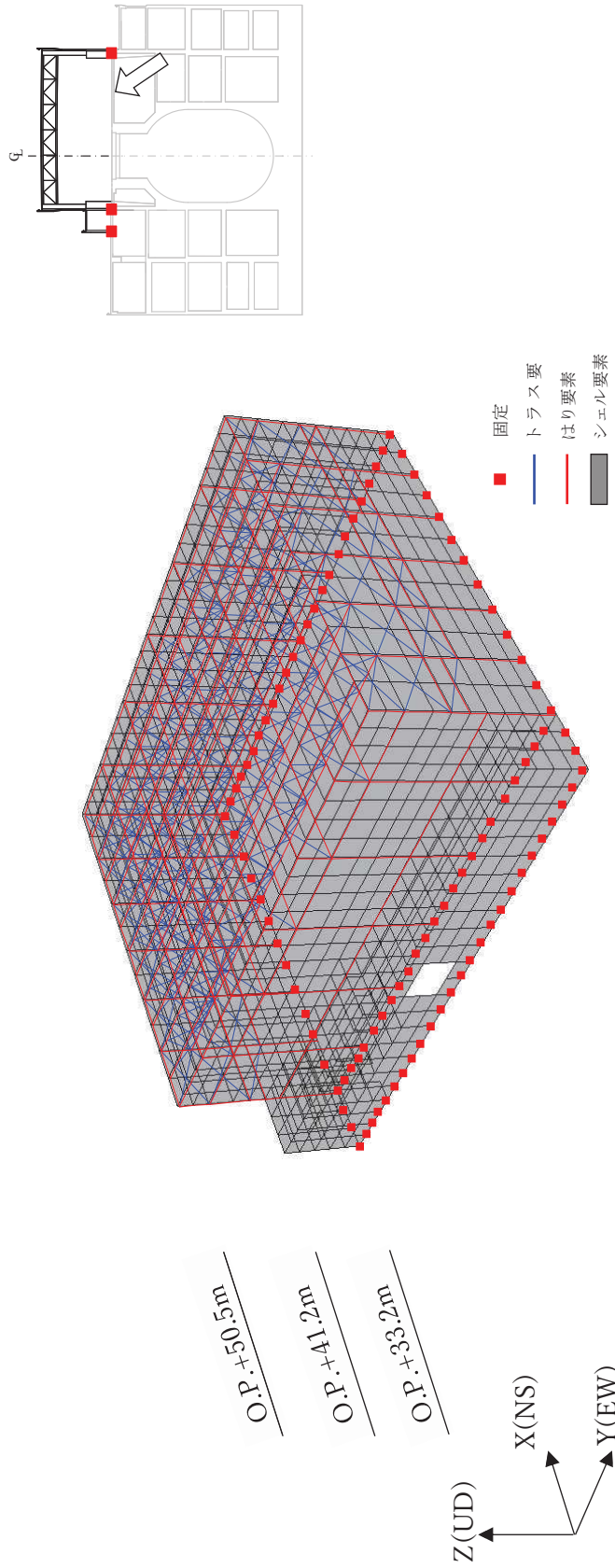


図 3 境界条件 (下方からの見上げ図)