

## 建屋の強度計算書（火山） 応力解析モデル 補足資料（審査会合コメント回答）

## 1. 概要

本資料は、審査会合「東海第二発電所 工認計画認可申請に係る論点整理（平成30年4月5日）」の内、外部事象No.6（降下火砕物に対する建屋の健全性）における指摘事項「3D-FEMモデルにおける鉄骨材とスラブの拘束条件、実際のスラブの応力、鉄骨材とスラブの接合部の状態を示すこと。」への回答を説明するものである。また、3D-FEMモデルによる応力解析において、屋根スラブの剛性を考慮した場合においても、屋根スラブの構造健全性が確保されていることを確認したものである。

なお、V-3-別添2-1-6「建屋の強度計算書」の補足説明については、別途、補足-460「火山への配慮が必要な施設の強度に関する説明書に係る補足説明資料」に示す。

## 2. 3D-FEMモデルの概要

## (1) モデル化範囲

降下火砕物に対する屋根の健全性を評価するための3D-FEMモデルにおけるモデル化範囲は、原子炉建屋原子炉棟のEL.46.5mより上部を設定する。モデル化の範囲を図1に示す。

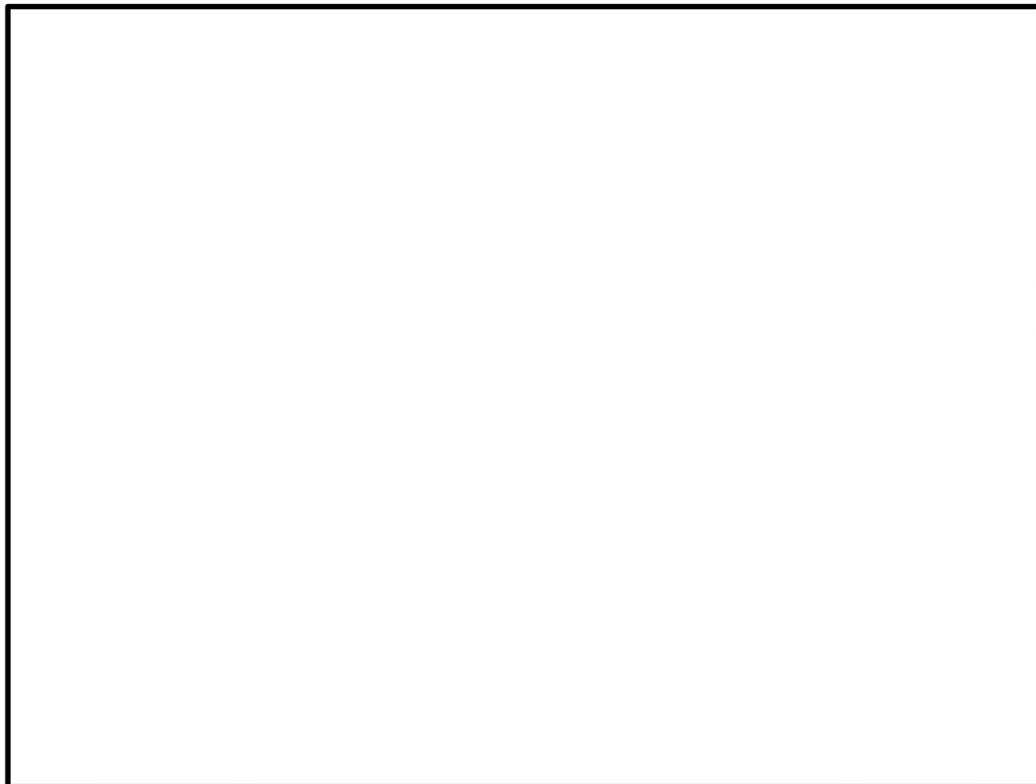


図1 降下火砕物に対する屋根の健全性評価モデルにおけるモデル化範囲

(2) 使用要素

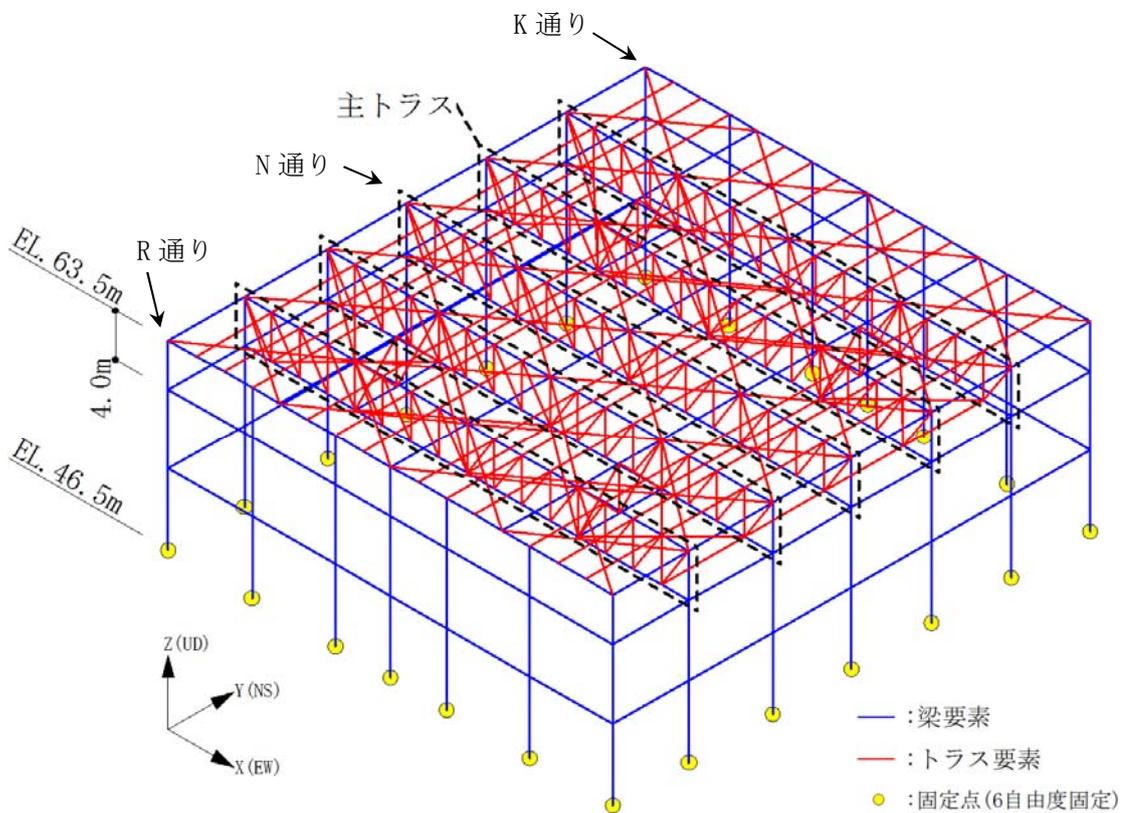
本解析で用いる使用要素を表 1 に示す。また、梁・トラス要素及びシェルを加えた全要素の解析モデル概要を図 2 に示す。

鉄骨部では、主トラス弦材及び上弦面つなぎ梁は梁要素を、主トラス斜材、束材、母屋及び上弦面水平ブレースはトラス要素を用いる。

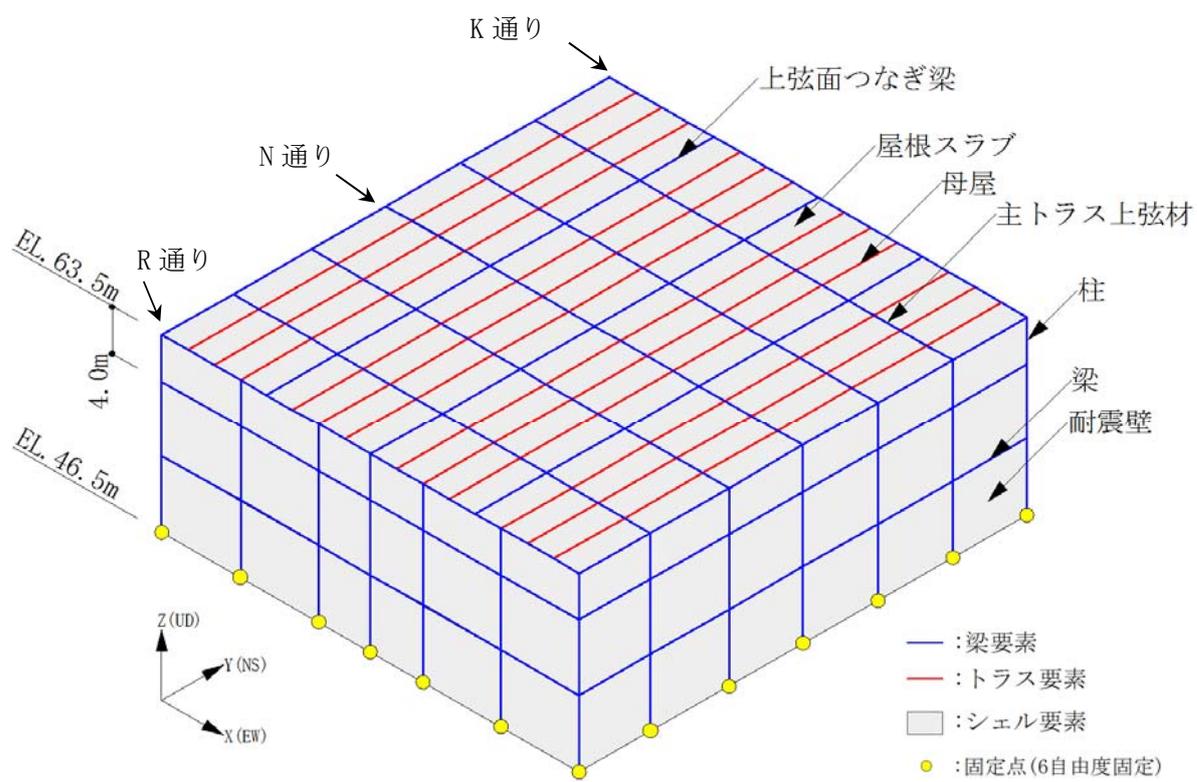
鉄筋コンクリート部では、耐震壁及び屋根スラブはシェル要素を、柱及び梁については梁要素を用いる。

表 1 本解析で用いる使用要素

鉄骨部	主トラス弦材	梁要素
	上弦面つなぎ梁	
	主トラス斜材・束材	トラス要素
	母屋	
	上弦面水平ブレース	
鉄筋コンクリート部	耐震壁	シェル要素
	屋根スラブ	
	柱・梁	梁要素



(a) 梁要素・トラス要素



(b) 全要素

図2 解析モデルの概要

(3) 境界条件及び拘束条件

主トラス各部材の接続条件を図3，検討部材の形状・寸法を表2に示す。

本解析モデルの境界条件及び拘束条件について，EL. 46.5mに位置するモデル下端の全節点の拘束条件は，固定とする。また，部材の接続条件について，主トラスの上下弦材の端部の接合条件は，主トラス上弦材と柱では剛接合を仮定し，主トラス下弦材と柱ではピン接合を仮定している。主トラスの斜材・束材と上下弦材では，ピン接合を仮定している。

シェル要素と梁要素及びトラス要素の同一座標における節点は，同一節点を用いてモデル化し，鉄骨材とスラブは完全に固着しているものとして解析を実施している。

なお，3D-FEMモデルの各部材の寸法は施工図を基に設定している。施工図と解析モデル図（梁要素及びトラス要素）を添付-1に示す。

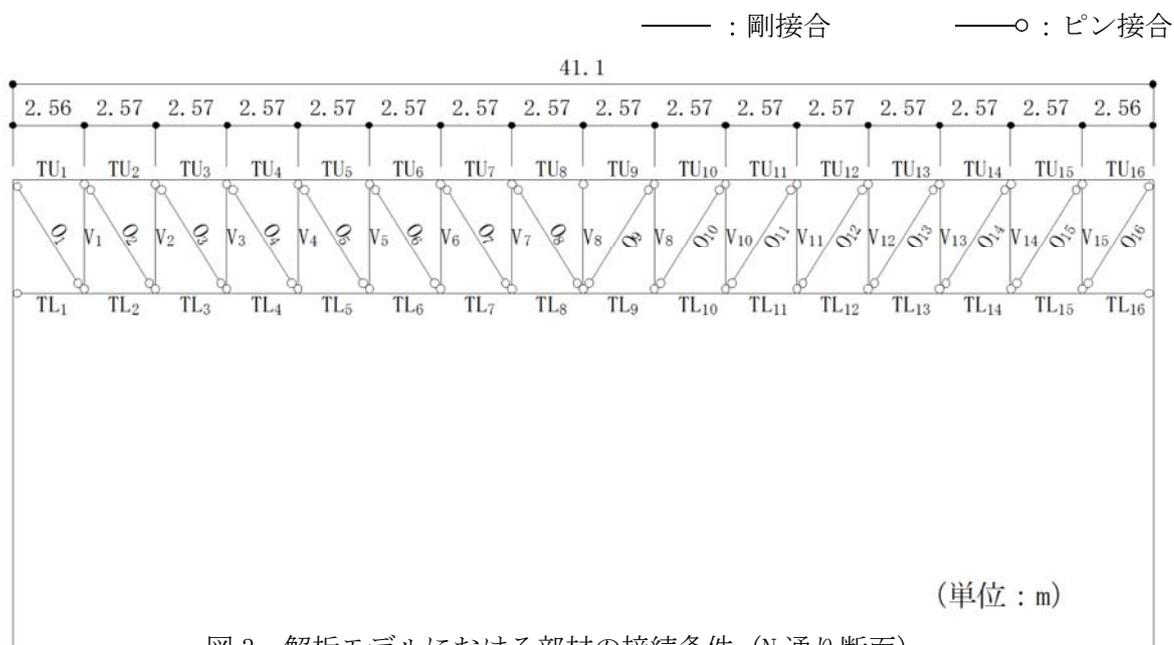


図3 解析モデルにおける部材の接続条件（N通り断面）

表2 検討部材の形状・寸法

部位	部材番号	形状寸法	材質
上弦材	TU <sub>1</sub> ～TU <sub>16</sub>	H-400×400×13×21	SS400 (SS41)
下弦材	TL <sub>1</sub> ～TL <sub>16</sub>	H-400×400×13×21	
斜材	O <sub>1</sub> , O <sub>2</sub> , O <sub>15</sub> , O <sub>16</sub>	2Ls-200×200×15	
	O <sub>3</sub> , O <sub>4</sub> , O <sub>13</sub> , O <sub>14</sub>	2Ls-150×150×15	
	O <sub>5</sub> ～O <sub>12</sub>	2Ls-150×100×12	
束材	V <sub>1</sub> , V <sub>2</sub> , V <sub>14</sub> , V <sub>15</sub>	2Ls-200×200×15	
	V <sub>3</sub> , V <sub>4</sub> , V <sub>12</sub> , V <sub>13</sub>	2Ls-150×150×15	
	V <sub>5</sub> ～V <sub>7</sub> , V <sub>8</sub> , V <sub>9</sub> ～V <sub>11</sub>	2Ls-150×150×12	

(4) 荷重の入力方法

屋根に作用する鉛直荷重を表3に、荷重の入力方法の概要を図4に示す。屋根に作用する鉛直荷重は、応力解析において屋根面全体に等分布の面荷重として作用させる。その他の鉛直荷重（梁、壁等の重量）は、外周梁に等分布の線荷重として作用させる。

表3 屋根に作用させる鉛直荷重

固定荷重	屋根スラブ	343 kgf/m <sup>2</sup>
	トラス鋼材	204 kgf/m <sup>2</sup>
	合計	547 kgf/m <sup>2</sup> ⇒ 5370 N/m <sup>2</sup>
積載荷重		1000 N/m <sup>2</sup>
積雪荷重		210 N/m <sup>2</sup>
降下火砕物堆積による鉛直荷重		7355 N/m <sup>2</sup>

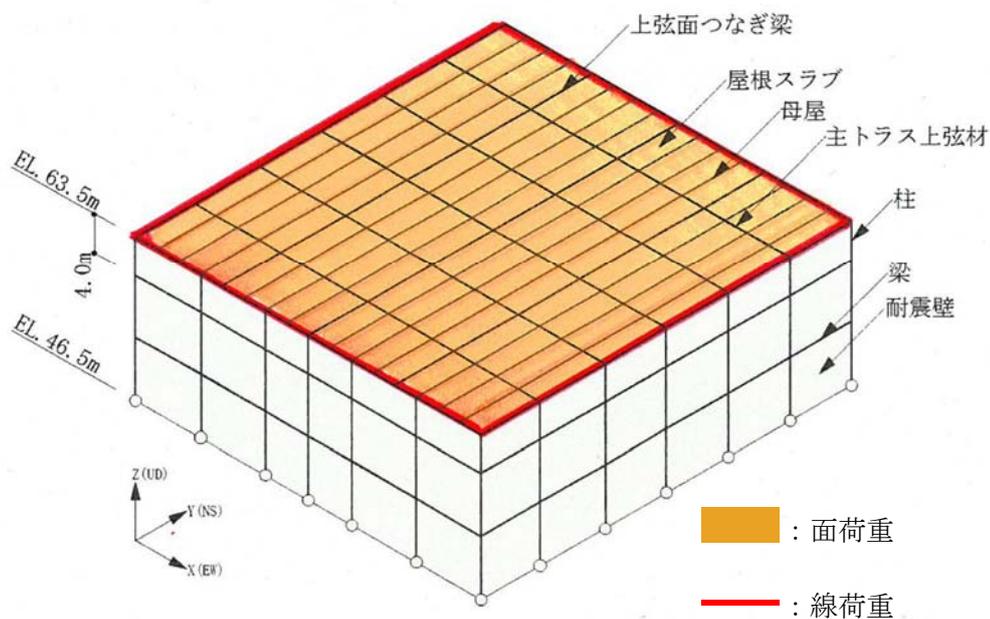


図4 荷重の入力方法の概要

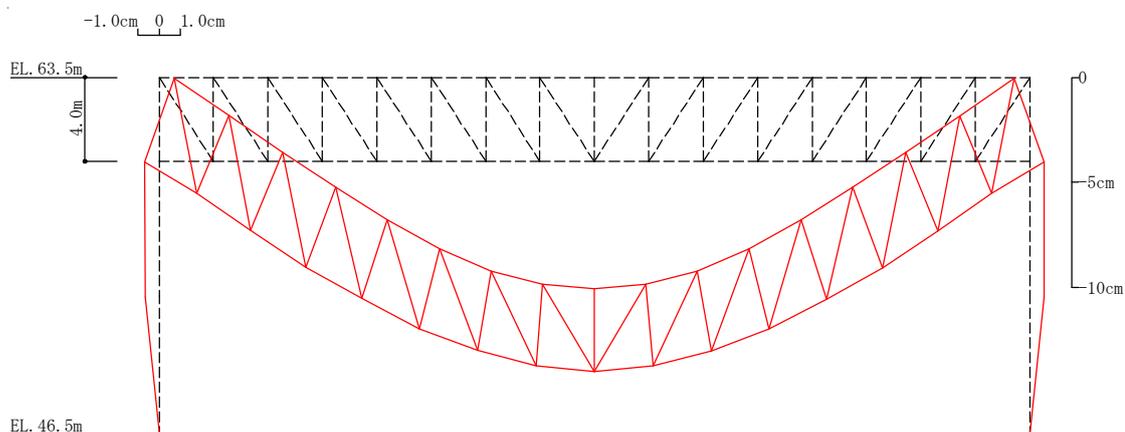
### 3. 鉛直荷重による主トラスの変形状態及び応力状態について

ここでは、屋根スラブの剛性を考慮した場合と剛性を考慮しない場合の主トラス架構の変形状態及び各応力状態を比較することにより、屋根スラブの剛性を考慮したことによる主トラスへの応力負担の軽減について確認する。

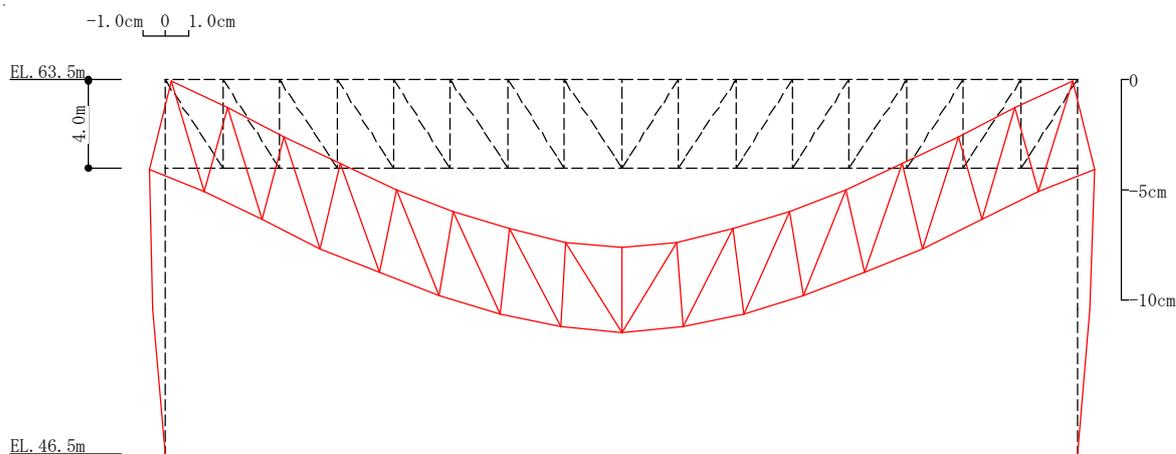
#### (1) 屋根トラスの変形

降下火砕物の堆積荷重によって発生する主トラス（N通り）の変形を図5に示す。

屋根面に作用する鉛直荷重によって、主トラス端部には曲げモーメントが発生し、主トラスを受ける柱に曲げが生じる。さらに、柱の曲げによって、主トラス上弦材は建屋内側に向けて変形する。そのため、主トラスの上弦材及び屋根スラブには圧縮軸力が作用することになる。また、屋根スラブの剛性を考慮することにより、主トラスの中央部の変形（撓み）が減少し、主トラス上弦材の端部節点の内側への移動が減少する。



(a) 屋根スラブ剛性無視



(b) 屋根スラブ剛性考慮

図5 主トラス（N通り）の変形図\* \*：変形を100倍に拡大

## (2) 主トラスの軸力分布

屋根スラブの剛性を考慮した場合と考慮しない場合の主トラスの軸力分布の比較を表4に示す。

屋根スラブの剛性を考慮した場合の主トラスの材軸方向に発生する応力状態を見ると、主トラス上弦材は、中央部の圧縮軸力が最大で、端部にかけて次第に圧縮軸力が減少している。一方、下弦材では、端部で圧縮軸力が発生し、中央部にかけて圧縮軸力が減少し、引張軸力に転じている。主トラス端部の上下弦材の応力レベルを比較すると、上弦材よりも下弦材の方が、圧縮軸力レベルは大きくなっており、差異が見られる。また、主トラス中央部では、上弦材の圧縮軸力よりも下弦材の引張軸力のレベルの方が大きくなっており、引張軸力が支配的である。

屋根スラブの剛性考慮の有無で比較すると、屋根スラブの剛性を考慮することによって、上弦材の圧縮軸力が顕著に減少していることが分かる。

表4 主トラス (N通り) の軸力分布の比較

— : 引張 (正)

— : 引張 (正)

— : 圧縮 (負)

	屋根スラブ剛性無視	屋根スラブ剛性考慮
上弦材		
下弦材		

(3) 主トラスの曲げモーメント分布

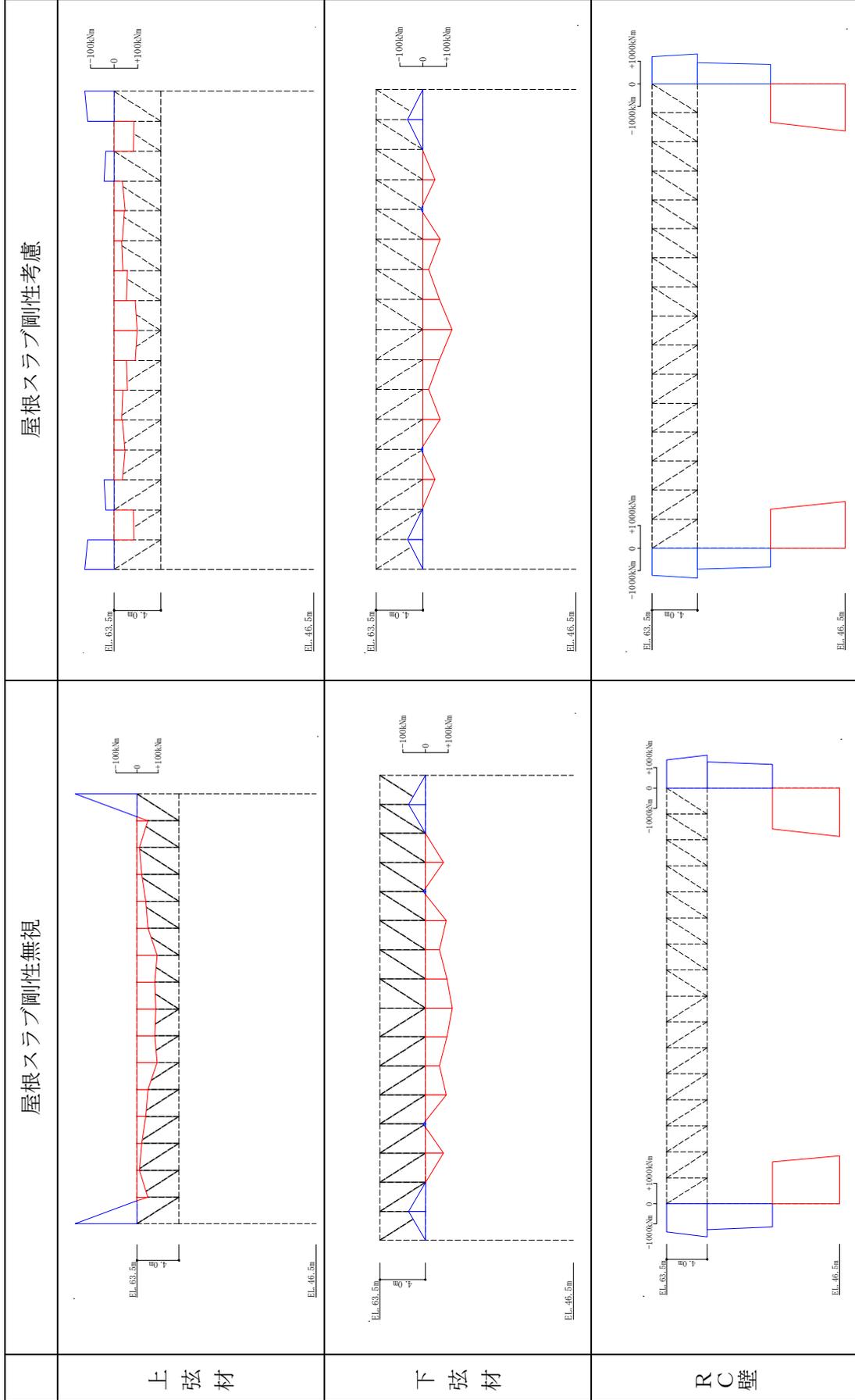
屋根スラブの剛性を考慮した場合と考慮しない場合の主トラスの曲げモーメント力分布の比較を表5に示す。

屋根スラブの剛性を考慮しない場合は、上弦材の端部で顕著に負の曲げモーメント作用し、屋根スラブの剛性を考慮する場合は、曲げモーメントが減少していることが分かる。また、上下弦の中央部については、双方で顕著な差異は見られない。

(2)、(3)における屋根スラブ剛性考慮の有無による軸力及び曲げモーメント分布の比較から、屋根スラブの剛性を考慮したことにより、主トラスへの負担が軽減されていることが確認された。

表5 主トラス (N通り) の曲げモーメント分布の比較

— : 正曲げ    — : 負曲げ



#### 4. 鉛直荷重による屋根スラブの影響について

##### (1) 応力解析結果

3D-FEM モデルによる応力解析から算出される原子炉建屋原子炉棟の屋根スラブに発生する軸応力\*を図6に示す。屋根スラブに発生する軸応力は、ほぼ全域で圧縮軸力が作用する結果 (-364 kN/m ~ 5 kN/m) となっている。

前項で記載のとおり、降下火砕物等の鉛直荷重によって主トラス上弦材及び主トラスを受ける柱が建屋内側に変形することによって、屋根スラブでは、圧縮軸力が支配的である。

注記\*：単位長さ当たりの軸力。正の値を引張、負の値を圧縮として示す。

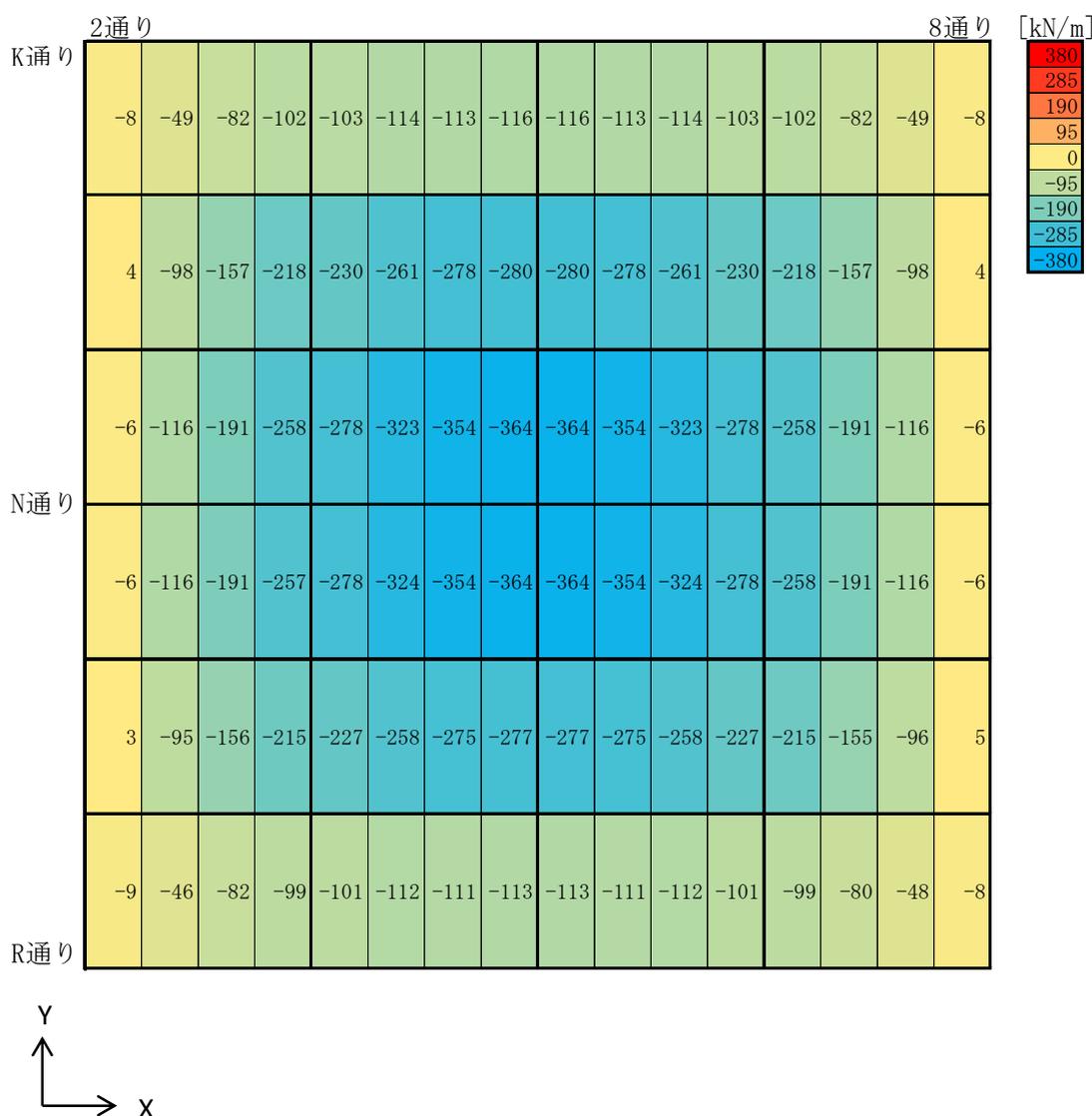


図6 原子炉建屋 屋根スラブの軸応力分布 (Nx/主トラス方向/引張が正)

(2) 発生する軸応力の影響について

強度計算書における屋根スラブの検討に用いた曲げモーメント  $5.1\text{kN}\cdot\text{m}$  から求めたコンクリートの縁応力度は  $\pm 3.06\text{ N/mm}^2$  となる。

一方、3D-FEM モデルによる応力度は  $-3.64\text{ N/mm}^2 \sim 0.05\text{ N/mm}^2$  となり、軸応力を考慮してその応力度を足し合わせると、ほぼ全域で全断面圧縮状態であることがわかり、引張力に対する鉄筋の負担が緩和される。

また、最大の圧縮応力度は  $6.70\text{ N/mm}^2$  であり、コンクリートの長期許容圧縮応力度 ( $7.3\text{ N/mm}^2$ ) に達しないレベルに納まっており、軸応力の影響はない。

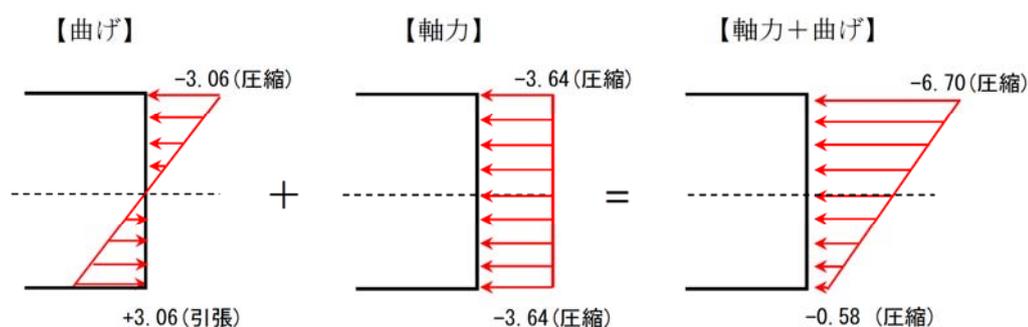


図6 軸力を考慮した場合の応力度

(3) 強度計算書における屋根スラブ検討への影響

強度計算書で実施している屋根スラブの検討では、スラブの軸応力を考慮せず、曲げ応力のみを考慮し評価している。(2)で記載したとおり、3D-FEM モデルの結果としてスラブのほぼ全域で全断面圧縮状態であることを踏まえると、強度計算書に示す曲げ応力のみを考慮した屋根スラブの評価結果 (検定値:  $0.49$ ) から得られる判定に影響はないことが確認できた。参考として、曲げ応力のみを考慮した屋根スラブの評価結果を表7に示す。

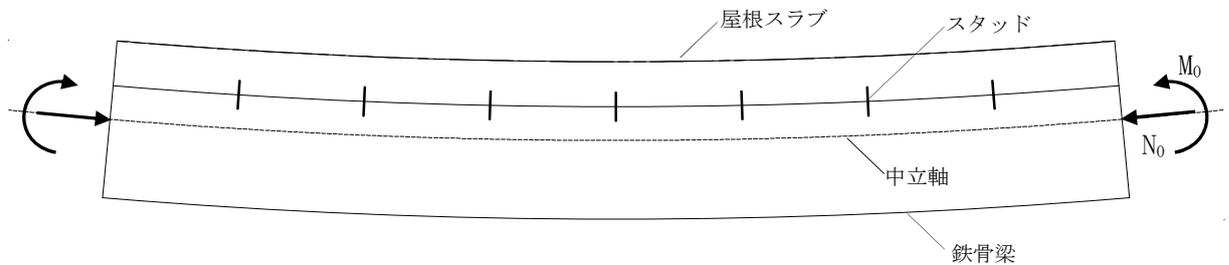
表 7 原子炉建屋原子炉棟 屋根スラブ評価結果

部位		原子炉棟 EL. 64.08 m
厚さ t (mm)		100
有効せい d (mm)		50
配筋 (鉄筋断面積)		D13@180 (703.9 mm <sup>2</sup> )
曲げ モー メント	発生曲げモーメント M (kN・m)	5.1
	鉄筋応力度 $\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	165.7
	許容値 (N/mm <sup>2</sup> )	345
	検定値	0.49
せん 断力	発生せん断力 Q (kN)	13.5
	せん断応力度 $\tau$ (N/mm <sup>2</sup> )	0.309
	せん断スパン比によ る割増し係数 $\alpha$	1.00
	許容値 (N/mm <sup>2</sup> )	1.06
	検定値	0.30
判定		可

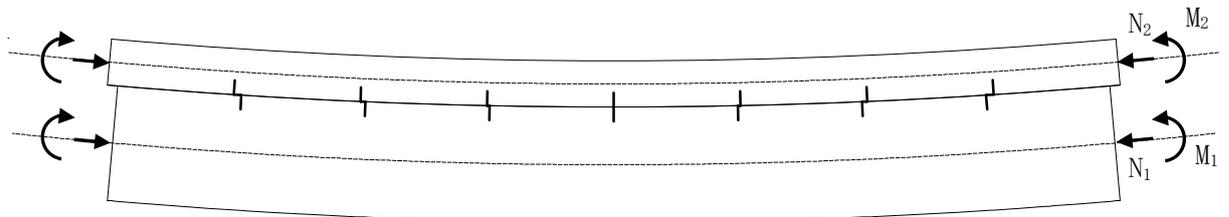
5. 鉄骨材とスラブの接合部状況について

3D-FEM モデルによる応力解析では、トラス架構全体が負担する曲げによる軸力をスラブにも軸力として負担させている。主トラス上弦材と屋根スラブの要素軸芯は同位置でモデル化しているため、両者には偏心に伴い曲げ変形より生じる軸方向変形の差は発生せず、仮にスタッドをモデル化したとしてもスタッドにせん断力は発生しない結果となる。一方、梁上においてコンクリートスラブは連続しており、スラブの軸力は周辺のスラブや外周の躯体に伝達されるため、スラブは軸力を負担し続けることが可能である。図7にスタッドが梁の応力分配に与える影響の概念図を示す。

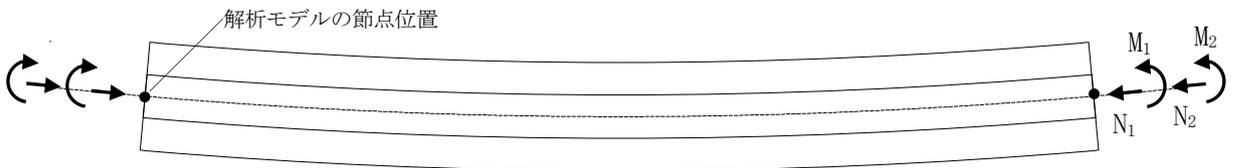
なお、降下火砕物等の鉛直荷重は、鉛直下向きに荷重が作用するため、スタッドの軸方向に引抜きが発生することがないため、降下火砕物等の鉛直荷重を十分支持可能である。



(a) スタッドがせん断力を伝達し、鉄骨梁と屋根スラブが剛性梁を構成する場合



(b) スタッドにせん断変形が生じ、鉄骨梁と屋根スラブが個別に荷重を支持する場合



(c) 解析モデルにおける応力の負担状況

$$N_0 = N_1 + N_2 \quad (E_0 A_0 = E_1 A_1 + E_2 A_2), \quad M_0 = M_1 + M_2 \quad (E_0 I_0 > E_1 I_1 + E_2 I_2)$$

N : 軸力, M : 曲げモーメント, E : ヤング係数, A : 軸断面積, I : 断面 2 次モーメント

図7 スタッドが梁の応力分配に与える影響



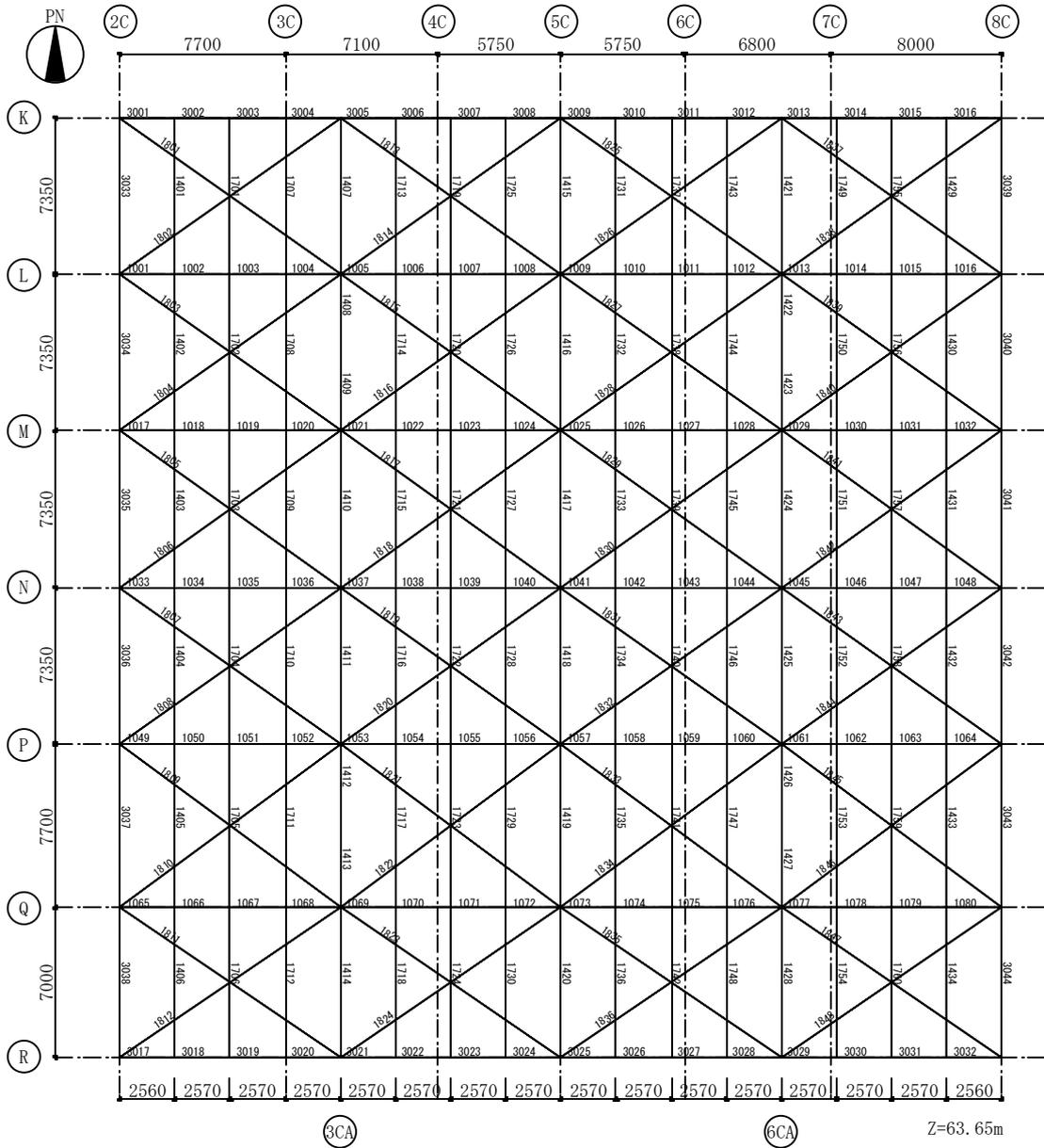


図2 屋根トラス平面 (EL. 63.65m) 解析モデル図 (梁要素及びトラス要素)

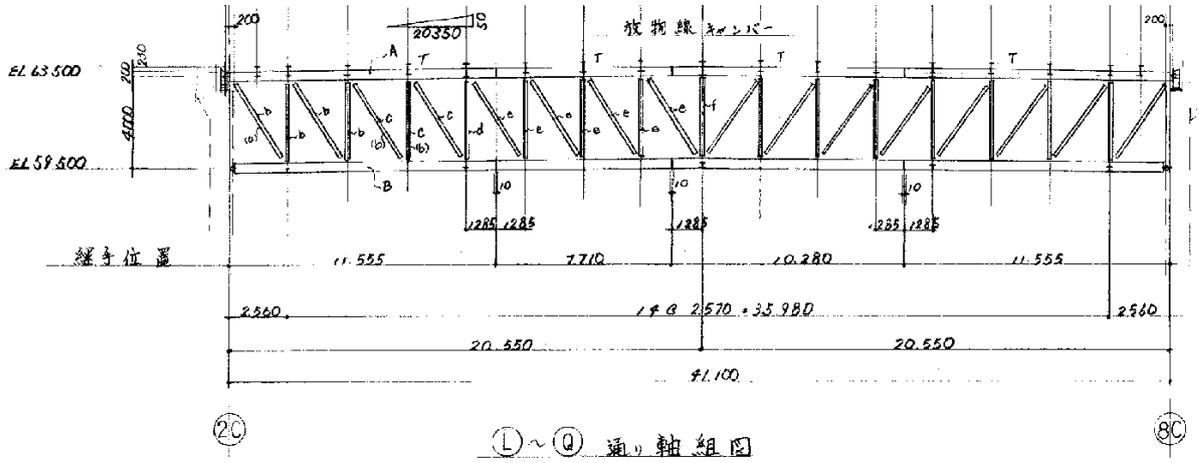


図3 屋根トラス断面 (N通り) 施工図

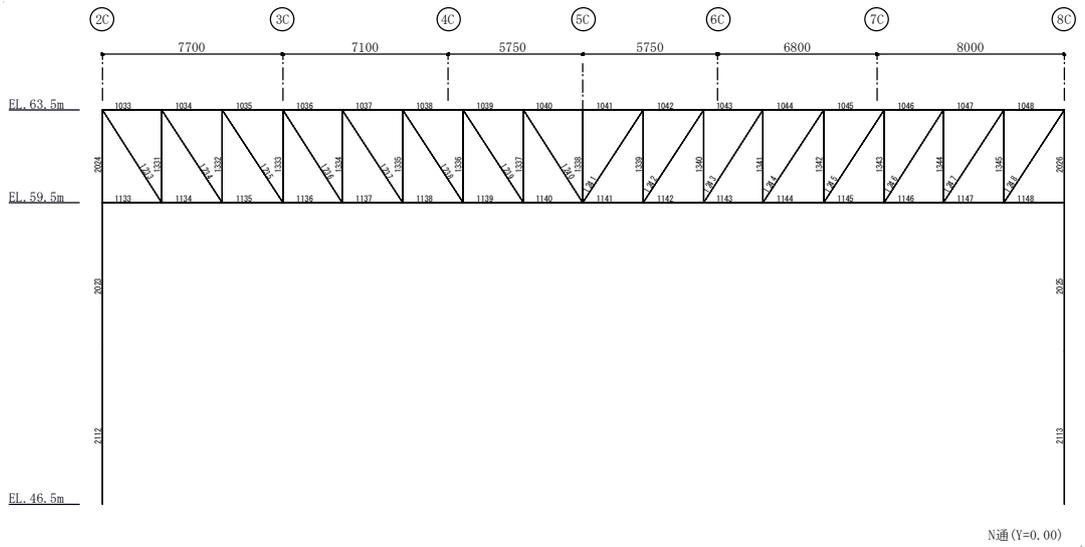


図4 屋根トラス断面 (N通り) 解析モデル図 (梁要素及びトラス要素)

## 【論点一6】 降下火砕物に対する建屋の健全性

### 1. 概要

降下火砕物に対する建屋の健全性評価において、屋根スラブの剛性を考慮することにより、現実的な状態をもとにした評価結果を確認する。

### 2. 確認事項

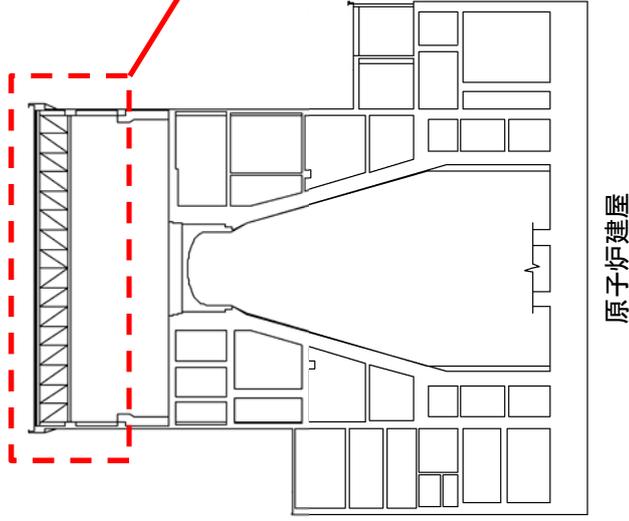
原子炉建屋の主トラスについて、発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。

### 3. 確認結果

降下火砕物の堆積厚さ50cmの条件下、主トラスに対する発生応力が許容限界を超えないことを確認した。

原子炉建屋の主トラスの評価結果

部位	発生応力	検定値 スラブ剛性考慮	検定値 スラブ剛性考慮なし
上弦材	圧縮・曲げ	0.26	0.60
下弦材	引張・曲げ	0.76	0.79
斜材	引張	0.80	0.81
束材	圧縮	0.88	0.97



主トラスの各部位

なお、原子炉建屋の屋根スラブ並びにタービン建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋の主トラス及び屋根スラブに発生する応力が許容限界を超えないことも確認済