

東海第二発電所  
外部からの衝撃による損傷の防止(火山)  
(審査会合における指摘事項への回答)

平成29年9月28日  
日本原子力発電株式会社

## 1. 前回審査会合からの変更点について(1/2)



降下火砕物が堆積した状態においても安全上問題ないことを確認するために、「降下火砕物の堆積荷重」に対する評価を行い、前回審査会合において、原子炉建屋の主トラスは「短期許容応力度」、タービン建屋の主トラスは「弾性限耐力（ $F$ 値 $\times 1.1$ ）」を満足していることを示した。さらに、除灰運用の成立性を確認するために「除灰時荷重」を加えた評価も示してきたが、前回審査会合での指摘事項である「除灰時荷重の設計上の位置づけを示すこと」や火山事象への対応が除灰を前提としていることを踏まえ、除灰時荷重を設計上の積載荷重と位置付けて評価を実施することとした。

また、屋根部の主体構造として最も評価結果の厳しい主トラスのみを示してきたが、前回審査会合での指摘事項である「評価対象部位について、選定理由を含めて整理し説明すること」、「機能を担保している部位の状態を明示し、計算書上どういう評価方針とするか示すこと」を踏まえ、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屋根スラブについて主トラスと共に評価対象部位として選定し、評価を示すこととした。

さらに、降下火砕物の堆積荷重と同種の荷重である積雪荷重を参考に「短期許容応力度」及び「弾性限耐力（ $F$ 値 $\times 1.1$ ）」を満足することを示してきたが、除灰時荷重を設計上の積載荷重と位置付けたことに伴い発生応力が増大したことから、許容限界について再検討を行い、発生頻度が極めて稀であっても評価対象部位に求められる機能が担保できる許容限界を設定し、評価を示すこととした。

前回審査会合からの変更点を第1.1表に示す。

# 1. 前回審査会合からの変更点について(2/2)

第1.1表 前回審査会合からの変更点

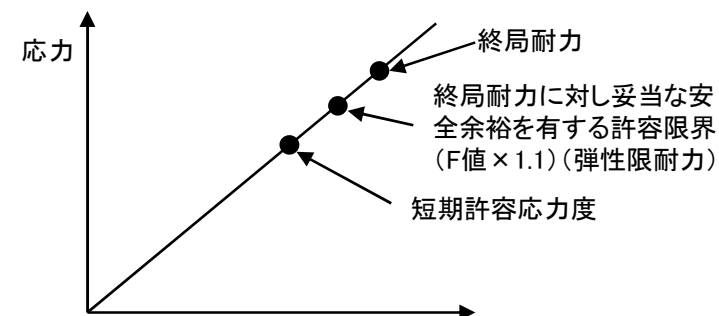
| 変更点            | 前回 審査会合<br>(2017年9月14日)の記載                                                                   | 変更後                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 理由                                              |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 除灰時荷重<br>の位置付け | 運用の成立性確認の位置付け                                                                                | 設計上の積載荷重の位置付け                                                                                                                                                                                                                                                                         | 除灰を前提としているため                                    |
| 荷重及び荷<br>重の組合せ | ●原子炉建屋 : 主トラス<br>●タービン建屋 : 主トラス                                                              | ●原子炉建屋 : 屋根スラブ及び主トラス<br>●タービン建屋 : 屋根スラブ及び主トラス                                                                                                                                                                                                                                         | 建屋に要求される安全機能に対し、<br>必要な部位を評価対象として選定             |
| 許容限界           | ●原子炉建屋<br><br>・主トラス : 短期許容応力度※ <sup>1</sup><br><br>●タービン建屋<br><br>・主トラス : 終局耐力※ <sup>2</sup> | ●原子炉建屋<br>【構造強度】<br>・屋根スラブ : 終局耐力に対し妥当な安全余裕を<br>有する許容限界※ <sup>3</sup><br>・主トラス : 終局耐力に対し妥当な安全余裕を<br>有する許容限界※ <sup>2</sup><br>【安全機能（気密性・遮蔽性）】<br>・屋根スラブ : 短期許容応力度※ <sup>3</sup><br><br>●タービン建屋<br>【上位クラスへの波及的影響】<br>・屋根スラブ : 終局耐力※ <sup>3</sup><br>・主トラス : 崩壊機構が形成されないこと※ <sup>4</sup> | 各部位に要求される機能設計上の許<br>容限界の考え方を整理<br>(詳細はP7, 8を参照) |

※<sup>1</sup> 「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—」（以下S規準という。）の短期許容応力度で評価

※<sup>2</sup> 弾性限耐力として「S規準」の短期許容応力度の評価式に基づきF値×1.1を適用し評価

※<sup>3</sup> 「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。）の短期許容応力度で評価

※<sup>4</sup> 「修正若林式及び鋼構造限界状態設計指針・同解説」の終局耐力（座屈耐力）で評価



第1.1図 許容限界の概念

### (1) 指摘事項

No. 508-1 : 設置許可で示す評価対象部位について、選定理由を含めて整理し説明すること。

(原子炉建屋に要求される機能を担保している屋根スラブ等)

No. 508-2 : 積載荷重(除灰時荷重)の設計上の位置付けを示すこと。

No. 508-3 : 機能を担保している部位の状態を明示し、計算書上どういう評価方針とするかを示すこと。

### (2) 回答

No. 508-1 : 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。(P5 参照)

- ・ 主要な部位のうち、屋根スラブ及び主トラスが主体構造として、降下火砕物の鉛直荷重に抵抗しているため。
- ・ 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。

No. 508-2 : 積載荷重(除灰時荷重)を設計上考慮する。(P5, 6参照)

No. 508-3 : 各建屋の要求機能と機能を担保する部位を記載し、各部位に対して設定する許容限界を超えないことを評価する。(P7, 8参照)

次頁以降で、評価内容及び評価結果を示す。

## 2. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.508-1,2,3) (2/19)



### (3) 評価内容及び評価結果

#### ①評価対象部位及び評価方針

No.508-1回答

- ・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。
  - a. 主要な部位のうち、屋根スラブ及び主トラスが主体構造として、降下火砕物の鉛直荷重に対して抵抗しているため。
  - 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。

- ・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「RC規準」、主トラスについては「S規準」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

- ・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（DL）

| 建屋     | 固定荷重                  |
|--------|-----------------------|
| 原子炉建屋  | 5,364N/m <sup>2</sup> |
| タービン建屋 | 4,669N/m <sup>2</sup> |

No.508-2回答

- ・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）

| 建屋     | 積載荷重※                 |
|--------|-----------------------|
| 原子炉建屋  | 1,000N/m <sup>2</sup> |
| タービン建屋 |                       |

※「建築構造設計基準の資料」（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/m<sup>2</sup>を包絡するよう、除灰時の人員荷重として1000N/m<sup>2</sup>を設定。

（原子炉建屋頂部の場合、約100kgの人員が約1,800人が均等に配置されているのと同様な荷重状態）

## 2. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.508-1,2,3) (3/19)



- ・積雪荷重 (SNL) ・ ・ ・ 積雪荷重を表2.3に示す。

表2.3 積雪荷重 (SNL)

| 建屋     | 積雪荷重※1              |
|--------|---------------------|
| 原子炉建屋  | 210N/m <sup>2</sup> |
| タービン建屋 |                     |

※1 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10.5cm及び積雪量1cm当たり20N/m<sup>2</sup>から算出

- ・降下火砕物堆積荷重 (VAL) ・ ・ ・ 降下火砕物堆積荷重を第2.4表に示す。

第2.4表 降下火砕物の堆積荷重 (VAL)

| 建屋     | 降下火砕物堆積荷重※2           |
|--------|-----------------------|
| 原子炉建屋  | 7,355N/m <sup>2</sup> |
| タービン建屋 |                       |

※2 堆積厚50cm, 密度1.5g/cm<sup>3</sup> (湿潤状態) 及び重力加速度9.80665m/s<sup>2</sup>から算出

No.508-2回答

- ・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

| 建屋     | 組合せ           |
|--------|---------------|
| 原子炉建屋  | DL+LL+SNL+VAL |
| タービン建屋 |               |

## 2. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.508-1,2,3) (4/19)



### ③許容限界

・応力解析による評価における原子炉建屋及びタービン建屋の許容限界を第2.6表, 第2.7表に示す。

No. 508-3回答

第2.6表 原子炉建屋 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                                 |
|------|-----------------------|-------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| —    | 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余裕を有する許容限界※ <sup>1</sup> |
|      |                       | 主トラス  |                                     | 終局耐力に対し妥当な安全余裕を有する許容限界※ <sup>2</sup> |
| 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※ <sup>3</sup>                |
| 遮蔽性  | 遮蔽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※ <sup>3</sup>                |

※<sup>1</sup> 構造強度に対しては、「終局耐力に対し妥当な安全余裕を有する許容限界」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

※<sup>2</sup> 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で評価

※<sup>3</sup> 「RC規準」の短期許容応力度で評価

以上から、原子炉建屋については、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余裕を有する許容限界（以下「弾性限耐力」という。）を用いて、評価を行う。

## 2. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.508-1,2,3) (5/19)



No. 508-3回答

第2.7表 タービン建屋 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※4          |
|------|-----------------------|-------|------------------|-----------------|
| —    | 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 |

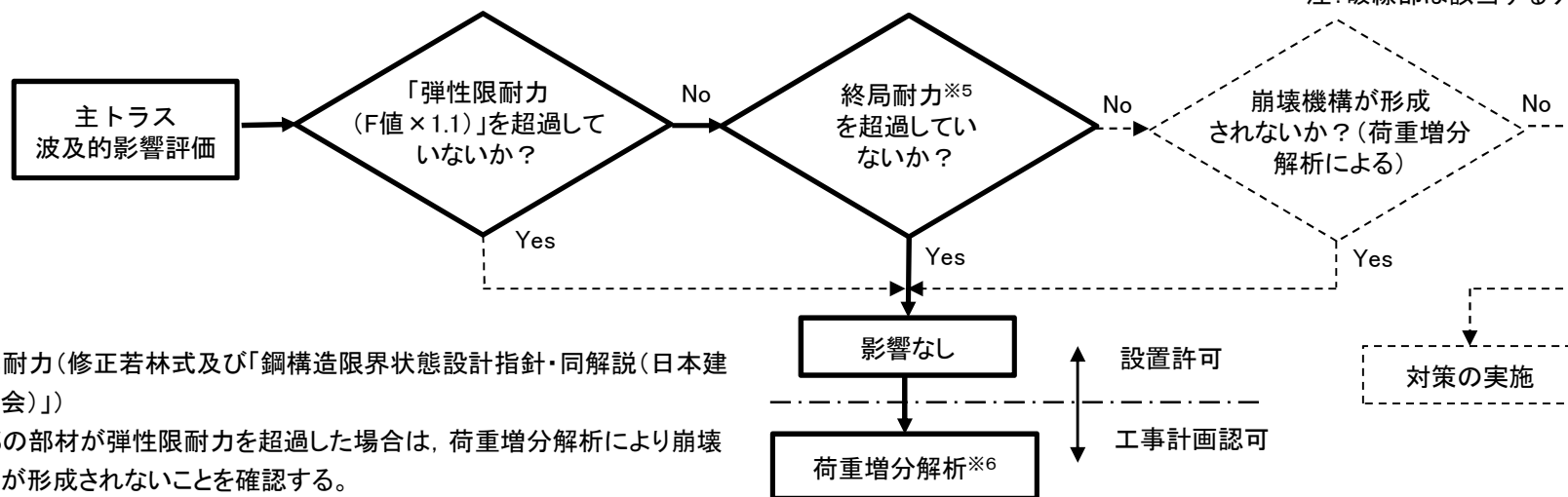
※1 屋根スラブの落下により、内包するクラス2設備を損傷させる可能性があることから、機能維持のために落下しないことを確認

※2 「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、「修正若林式及び鋼構造限界状態設計指針・同解説」の座屈耐力で評価

※4 複数部材で構成されている主トラスは、構造体として主トラスが崩壊しないことを許容限界とする。単一部材である屋根スラブは、部材の終局耐力を許容限界とする。

注: 破線部は該当するケースなし



※5 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)」)

※6 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 タービン建屋 主トラスの波及的影響評価フロー

## 2. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.508-1,2,3) (6/19)



- ・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. 8表, 第2. 9表, 第2. 10表に示す。

第2. 8表 鋼材の基準強度及び評価基準値

| 建屋     | 鋼材種類            | 板厚<br>(mm) | 基準強度F<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 評価基準値 (N/mm <sup>2</sup> ) |        |
|--------|-----------------|------------|-------------------------------|----------------------------|--------|
|        |                 |            |                               | 引張                         | 圧縮及び曲げ |
| 原子炉建屋  | SS400<br>(SS41) | t ≤ 40     | 235                           | 258. 5                     | 258. 5 |
| タービン建屋 |                 |            |                               |                            |        |

第2. 9表 コンクリートの基準強度及び評価基準値

| 建屋     | F <sub>c</sub><br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 評価基準値 (N/mm <sup>2</sup> ) |       |
|--------|----------------------------------------|----------------------------|-------|
|        |                                        | 圧縮                         | せん断   |
| 原子炉建屋  | 22. 1                                  | 14. 7                      | 1. 06 |
| タービン建屋 |                                        |                            |       |

第2. 10表 鉄筋の基準強度及び評価基準値

| 建屋     | 鉄筋種類            | 評価基準値 (N/mm <sup>2</sup> ) |         |
|--------|-----------------|----------------------------|---------|
|        |                 | 引張及び圧縮                     | 面外せん断補強 |
| 原子炉建屋  | SD345<br>(SD35) | 345                        | 345     |
| タービン建屋 |                 |                            |         |

## 2. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.508-1,2,3) (7/19)



### ④モデル化の基本方針

#### ○屋根スラブ

- ・「RC規準」に基づいて、屋根スラブは一方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2.11表、第2.12表に示す。

第2.11表 原子炉建屋 屋根スラブの検討条件

| 位置                  | 厚さ<br>(mm) | 短辺長さ<br>(m) | 長辺長さ<br>(m) | 配筋      |         |         |         | 配筋量                      |                           |                          |                           |
|---------------------|------------|-------------|-------------|---------|---------|---------|---------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
|                     |            |             |             | 短辺      |         | 長辺      |         | 短辺                       |                           | 長辺                       |                           |
|                     |            |             |             | 端部      | 中央部     | 端部      | 中央部     | 端部<br>(mm <sup>2</sup> ) | 中央部<br>(mm <sup>2</sup> ) | 端部<br>(mm <sup>2</sup> ) | 中央部<br>(mm <sup>2</sup> ) |
| EL 64.08m<br>(S1-1) | 100        | 2.27        | 7.30        | D13@180 | D13@180 | D13@200 | D13@200 | 705.6                    | 705.6                     | 635.0                    | 635.0                     |
| EL 64.08m<br>(S1-2) | 100        | 1.53        | 7.30        | D13@180 | D13@180 | D13@200 | D13@200 | 705.6                    | 705.6                     | 635.0                    | 635.0                     |

第2.12表 タービン建屋 屋根スラブの検討条件

| 位置        | 厚さ<br>(mm) | 短辺長さ<br>(m) | 長辺長さ<br>(m) | 配筋      |         |         |         | 配筋量                      |                           |                          |                           |
|-----------|------------|-------------|-------------|---------|---------|---------|---------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
|           |            |             |             | 短辺      |         | 長辺      |         | 短辺                       |                           | 長辺                       |                           |
|           |            |             |             | 端部      | 中央部     | 端部      | 中央部     | 端部<br>(mm <sup>2</sup> ) | 中央部<br>(mm <sup>2</sup> ) | 端部<br>(mm <sup>2</sup> ) | 中央部<br>(mm <sup>2</sup> ) |
| EL 40.65m | 100        | 2.08        | 11.60       | D13@200 | D13@200 | D13@200 | D13@200 | 635.0                    | 635.0                     | 635.0                    | 635.0                     |

第2.13表 使用材料の物性値

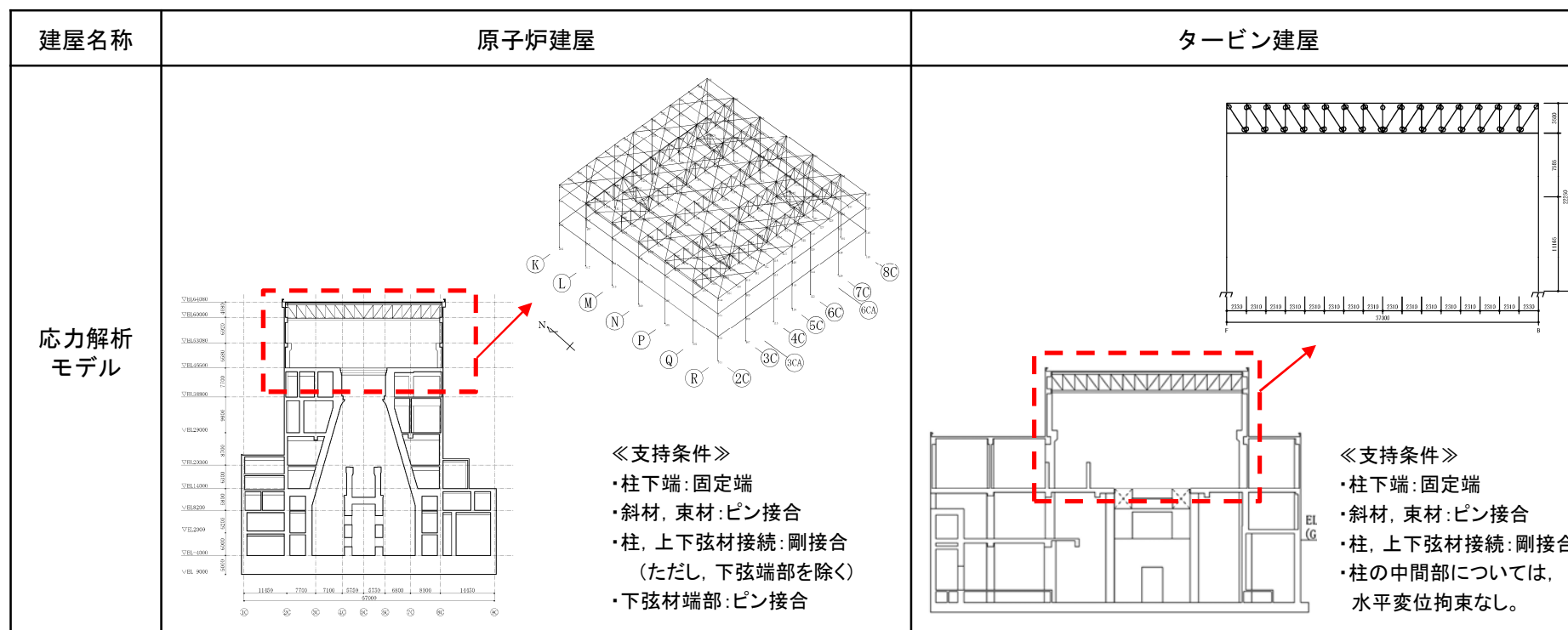
| 使用材料     | 単位体積重量 $\gamma$       | ヤング係数 E                | せん断弾性係数 G              | ポアソン比 |
|----------|-----------------------|------------------------|------------------------|-------|
| 鉄筋コンクリート | 24.0kN/m <sup>3</sup> | 22.1kN/mm <sup>2</sup> | 9.21kN/mm <sup>2</sup> | 0.2   |

## 2. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.508-1,2,3) (8/19)

### ○主トラス

- ・主なトラス弦材は、軸・曲げ・せん断剛性のある梁要素、斜材と束材は軸剛性のみ考慮されたトラス要素とする。
- ・各部材長さは部材芯位置でモデル化する。
- ・原子炉建屋はオペレーティングフロアより上部構造を3次元の立体構造でモデル化する。解析には、解析コード「DYNA2E Ver.8.0」を用いる。解析モデルを第2.2図に、主トラスの部材リストを第2.14表に示す。
- ・原子炉建屋は、屋根スラブの自重を主トラス上弦材に負荷して、主トラスの構造評価を行う。その際、屋根スラブの剛性は保守的に考慮しない。
- ・タービン建屋は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中央部の1構面を取り出した2次元モデル※とする。解析には、解析コード「FAP3 Ver.5.0」を用いる。解析モデルを第2.2図に、主トラスの部材リストを第2.15表に示す。

※ 工事計画認可では、3次元モデルにおいて応力解析及び荷重増分解析を実施する。



第2.2図 屋根トラスの解析モデル

## 2. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.508-1,2,3) (9/19)



第2.14表 部材リスト (原子炉建屋)

| 部位  | 部材符号                                                                | 形状寸法            | 材質              |
|-----|---------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|
| 上弦材 | TU <sub>1</sub> ~TU <sub>16</sub>                                   | H-400×400×13×21 | SS400<br>(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>13</sub>                                    | 2Ls-150×150×15  |                 |
|     | V <sub>4</sub> , V <sub>12</sub>                                    | 2Ls-150×150×15  |                 |
|     | V <sub>5</sub> ~V <sub>7</sub> , V <sub>9</sub> ~V <sub>11</sub>    | 2Ls-150×100×12  |                 |
|     | V <sub>8</sub>                                                      | 2Ls-150×100×12  |                 |

第2.15表 部材リスト (タービン建屋)

| 部位  | 部材符号                                                                | 形状寸法            | 材質              |
|-----|---------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|
| 上弦材 | U <sub>1</sub> ~U <sub>16</sub>                                     | H-428×407×20×35 | SS400<br>(SS41) |
| 下弦材 | L <sub>1</sub> ~L <sub>16</sub>                                     | H-428×407×20×35 |                 |
| 斜材  | D <sub>1</sub> ~D <sub>3</sub> , D <sub>14</sub> ~D <sub>16</sub>   | 2Ls-200×200×20  |                 |
|     | D <sub>4</sub> , D <sub>5</sub> , D <sub>12</sub> , D <sub>13</sub> | 2Ls-150×150×19  |                 |
|     | D <sub>6</sub> , D <sub>11</sub>                                    | 2Ls-130×130×12  |                 |
|     | D <sub>7</sub> , D <sub>8</sub> , D <sub>9</sub> , D <sub>10</sub>  | 2Ls-100×100×10  |                 |
| 束材  | V <sub>1</sub> , V <sub>2</sub> , V <sub>14</sub> , V <sub>15</sub> | 2Ls-200×200×20  |                 |
|     | V <sub>3</sub> , V <sub>4</sub> , V <sub>12</sub> , V <sub>13</sub> | 2Ls-200×200×15  |                 |
|     | V <sub>5</sub> , V <sub>6</sub> , V <sub>10</sub> , V <sub>11</sub> | 2Ls-150×150×15  |                 |
|     | V <sub>7</sub> ~V <sub>9</sub>                                      | 2Ls-130×130×9   |                 |

### ○解析諸元

- ・使用材料の物性値を第2.16表に示す。

第2.16表 使用材料の物性値

| 使用材料 | 単位体積重量 $\gamma$       | ヤング係数 E                 | せん断弾性係数 G              |
|------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| 鋼材部  | 77.0kN/m <sup>3</sup> | 205.0kN/mm <sup>2</sup> | 79.0kN/mm <sup>2</sup> |

## 2. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.508-1,2,3) (10/19)



### ⑤評価方法

#### ○屋根スラブ

- ・「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

- ・「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。

$$Q_A = bj\{\alpha f_s + 0.5_w f_t (p_w - 0.002)\}$$

$$\text{ただし, } \alpha = \frac{4}{\frac{M}{Qd} + 1} \quad 1 \leq \alpha \leq 2$$

$b$  : 幅

$j$  : 応力中心間距離 (7/8)  $d$

$d$  : 有効せい

$p_w$  : せん断補強筋比  $p_w = \frac{a_w}{bx}$

$a_w$  : せん断補強筋の断面積

$x$  : せん断補強筋の間隔

$f_s$  : コンクリートの短期許容せん断応力度

$_w f_t$  : せん断補強筋の短期許容引張応力度

$\alpha$  : せん断スパン比  $\frac{M}{Qd}$  による割増係数

$M$  : 最大曲げモーメント

$Q$  : 最大せん断力

### ○主トラス

「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。

#### ・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）に発生する軸応力度  $\sigma_c$ 、 $\sigma_t$ が，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。

$$\max\left(\frac{\sigma_c}{f_c}, \frac{\sigma_t}{f_t}\right) \leq 1$$

$f_c$ 、 $f_t$ は以下の式により求める。また，以下の式は長期許容応力度の算出式であり，短期許容応力度は長期許容応力度の1.5倍とする

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

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

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

$f_c$  : 許容圧縮応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$f_t$  : 許容引張応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\lambda$  : 圧縮材の細長比

$\Lambda$  : 限界細長比  $\Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6F}}$

$E$  : ヤング係数

$$\nu = \frac{3}{2} + \frac{2}{3}\left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2$$

## 2. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.508-1,2,3) (12/19)



### ・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  $\sigma_c$ 、 $\sigma_t$  と曲げモーメントにより生じる曲げ応力度  $\sigma_b$  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。また、以下の式は長期許容応力度の算出式であり、短期許容応力度は長期許容応力度の1.5倍とする

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

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

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

$f_b$  : 許容曲げ応力度

$\lambda_b$  : 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

$G$  : セン断弾性係数

$J$  : サンプナンのねじり定数

$M_y$  : 降伏モーメント ( $F \cdot Z$ )

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

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

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

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

## 2. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.508-1,2,3) (13/19)



・終局強度（座屈耐力）による評価式を以下に示す。

・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

$\lambda$  : 圧縮材の細長比

$\Lambda$  : 限界細長比

$$\Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6F}}$$

$E$  : ヤング係数

【修正若林式※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

$$P_n = (n_E / 4) - 5 \quad n_E = \frac{\pi^2 E}{\lambda_e^2 \sigma_y}$$

※1 : 谷口, 加藤, 他「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 (1991年3月)

※2 : 「鋼構造設計規準（日本建築学会, 1973年5月）」

・軸力と曲げを負担する部材の評価方法※3

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

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

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

$$M_e = C_b \sqrt{\frac{\pi^4 EI_y \cdot EI_w}{k l_b^4} + \frac{\pi^2 EI_y \cdot GJ}{l_b^2}}$$

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

$M_c$  : 横座屈限界耐力

$\lambda_b$  : 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

※3 : 「鋼構造限界状態設計指針・同解説」日本建築学会 (2010年02月)

## 2. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.508-1,2,3) (15/19)



### ⑥応力解析による評価結果

#### ○屋根スラブ

- ・原子炉建屋の評価結果を第2. 17表に, タービン建屋の評価結果を第2. 18表に示す。
- ・降下火砕物の堆積時において, 曲げモーメントによる鉄筋応力度及び面外せん断応力度が許容値を超えないことを確認した。

第2. 17表 原子炉建屋 屋根スラブ評価結果 (検定：短期許容応力度)

| 部位                 | 曲げモーメント                     |       |                     |      |                                           |       | せん断力 |      |                |                                |      |
|--------------------|-----------------------------|-------|---------------------|------|-------------------------------------------|-------|------|------|----------------|--------------------------------|------|
|                    | 設計配筋量<br>(mm <sup>2</sup> ) |       | 発生曲げモーメント<br>(kN・m) |      | 必要鉄筋量※ <sup>1</sup><br>(mm <sup>2</sup> ) |       | 検定値  |      | 発生せん断力<br>(kN) | せん断応力度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 検定値  |
|                    | 端部                          | 中央    | 端部                  | 中央   | 端部                                        | 中央    | 端部   | 中央   |                |                                |      |
| EL 64.08<br>(S1-1) | 705.6                       | 705.6 | 5.17                | 2.59 | 323.1                                     | 161.6 | 0.46 | 0.23 | 13.67          | 0.295                          | 0.28 |
| EL 64.08<br>(S1-2) | 705.6                       | 705.6 | 3.52                | 1.98 | 220.2                                     | 123.9 | 0.32 | 0.18 | 9.21           | 0.199                          | 0.19 |

※1 短期許容応力度による必要鉄筋量

第2. 18表 タービン建屋 屋根スラブ評価結果 (検定：短期許容応力度)

| 部位       | 曲げモーメント                     |       |                     |      |                                           |       | せん断力 |      |                |                                |      |
|----------|-----------------------------|-------|---------------------|------|-------------------------------------------|-------|------|------|----------------|--------------------------------|------|
|          | 設計配筋量<br>(mm <sup>2</sup> ) |       | 発生曲げモーメント<br>(kN・m) |      | 必要鉄筋量※ <sup>1</sup><br>(mm <sup>2</sup> ) |       | 検定値  |      | 発生せん断力<br>(kN) | せん断応力度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 検定値  |
|          | 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 | 17.69          | 0.381                          | 0.36 |

※1 短期許容応力度による必要鉄筋量

## 2. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.508-1,2,3) (16/19)



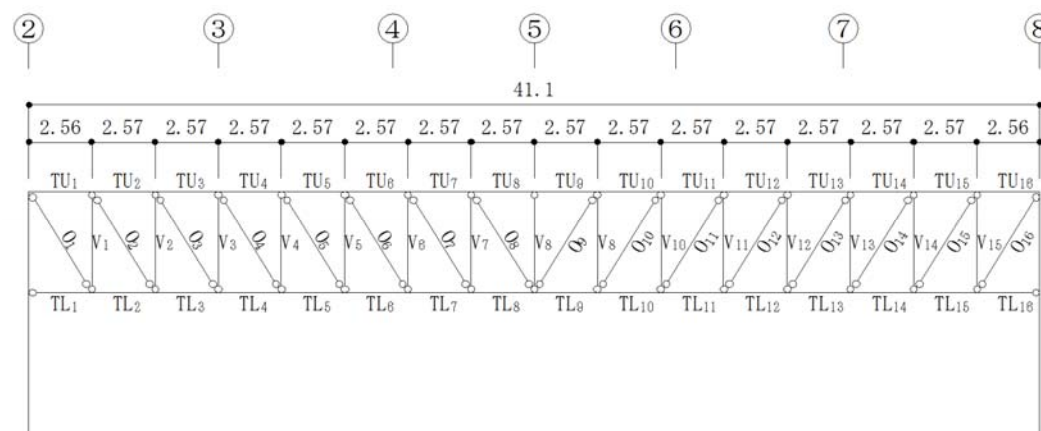
### ○主トラス

- ・断面の評価結果は、検定値が最大となる要素を選定し、原子炉建屋の評価結果を第2. 19表に、評価位置を第2.3図に示す。また、タービン建屋の評価結果を第2. 20表，第2. 21表に、評価位置を第2.4図に示す。

第2. 19表 原子炉建屋 主トラス評価結果※<sup>1</sup> (検定：弾性限耐力)

| 部材                    | 発生応力 | 応力度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 許容値 (N/mm <sup>2</sup> ) | 検定値   | 位置              |
|-----------------------|------|--------------------------|--------------------------|-------|-----------------|
| 上弦材 (H-400×400×13×21) | (圧縮) | 112. 7                   | 257. 3                   | 0. 60 | P通り<br>TU8, TU9 |
|                       | (曲げ) | 40. 3                    | 255. 4                   |       |                 |
| 下弦材 (H-400×400×13×21) | (引張) | 157. 6                   | 258. 5                   | 0. 79 | P通り<br>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<br>03, 014  |
| 束材 (2Ls-150×150×15)   | (圧縮) | 152. 0                   | 158. 2                   | 0. 97 | P通り<br>V13      |

※<sup>1</sup> 各部材のうち、最も検定値が高い箇所を示す。



第2.3図 原子炉建屋評価位置

## 2. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.508-1,2,3) (17/19)



第2.20表 タービン建屋 主トラス評価結果※<sup>1</sup> (検定：弾性限耐力)

| 部材                    | 発生応力 | 応力度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 許容値 (N/mm <sup>2</sup> ) | 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                    |                    |         |
| 下弦材 (H-428×407×20×35) | (圧縮) | 55.2                     | 152.0                    | 1.04※ <sup>2</sup> | L1, L16 |
|                       | (曲げ) | 162.1                    | 241.0                    |                    |         |
| 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 |

※<sup>1</sup> 各部材のうち、最も検定値が高い箇所を示す。

※<sup>2</sup> 検定値を超過した下弦材 (L1, L16) は終局耐力に対して評価を行う。

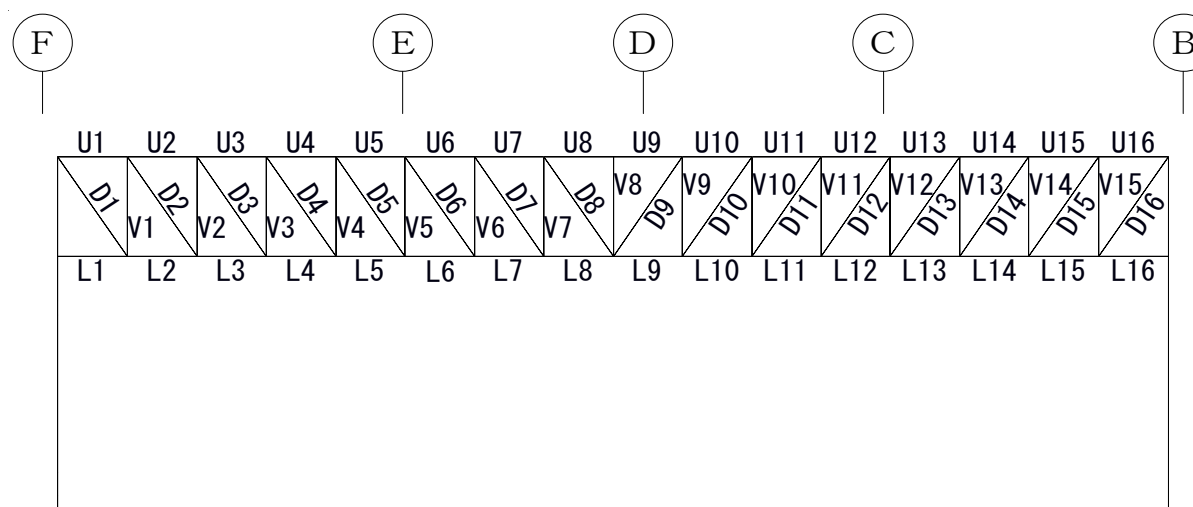
## 2. 審査会合における指摘事項に対する回答 (No.508-1,2,3) (18/19)



第2.21表 タービン建屋 主トラス評価結果※1 (検定：終局耐力)

| 部材                    | 発生応力 | 応力度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 許容値 (N/mm <sup>2</sup> ) | 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                    |      |         |

※1 弾性限耐力を超過した下弦材 L1及びL16を評価



第2.4図 タービン建屋評価位置

### 【原子炉建屋】

- ・ 屋根スラブは、短期許容応力度に対して全ての検定値は1.0以下である。
- ・ 主トラスは、弾性限耐力に対し、全ての検定値は1.0以下である。

### 【タービン建屋】

- ・ 屋根スラブは、短期許容応力度に対して全ての検定値は1.0 以下である。
- ・ 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、当該部材は終局耐力に対して検定値は1.0以下である。

評価の結果、降下火砕物及び積雪の堆積荷重に加え、積載荷重（除灰時荷重）を設計上の荷重として考慮した場合においても、原子炉建屋の安全機能は損なわれず、タービン建屋は内包するクラス2設備に波及的影響を及ぼさないことを確認した。

### 3. 設置許可，工事計画認可の内容について(1/1)



設置許可，工事計画認可それぞれのフェーズで示す内容については以下のとおり。

#### 【設置許可】

設置許可においては，評価対象施設である原子炉建屋，タービン建屋，使用済燃料乾式貯蔵建屋のうち，原子炉建屋と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（今回示した内容が該当）。各々を代表建屋として選定した理由を以下に示す。

##### ○原子炉建屋

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）の機能を有する建屋

##### ○タービン建屋

自身がクラス1，2施設に該当しない建屋のうち，構造的にスパンが長い建屋

#### 【工事計画認可】

工事計画認可においては，原子炉建屋及びタービン建屋に加え，使用済燃料乾式貯蔵建屋について，主トラス，屋根スラブ及び二次部材の構造性能を確認し，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として示す。

なお，タービン建屋については，3次元モデルにおいて応力解析及び荷重増分解析を実施することで，屋根部が崩壊しないことを確認する。