

放射性物質分析・研究施設第2棟における
鉄セル遮蔽体の耐震評価に係る
指摘事項に対するご回答

2023年9月11日

東京電力ホールディングス株式会社
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

コメントリスト

| No. | 実施日 | 指摘事項 | 回答内容 |
|-----|-------------------|--|--|
| 1 | 2023.3.6 技術会合 | <ul style="list-style-type: none"> 鉄セル遮蔽体の波及的影響の評価について、評価で使用している式（Chang式、Degen式等）は、通常ミサイル系に使用するものであるため、本評価のように面的に衝突する場合の適用性を示すこと。 | <p>【2023.6.19 技術会合】</p> <ul style="list-style-type: none"> 鉄セル遮蔽体のSs900に対する耐震評価について説明した。 |
| 2 | | <ul style="list-style-type: none"> 建屋の静的地震力（3.0Ci）を用いた評価結果について、検定比1.0を超過した部材がコンクリートセル部に波及的影響を及ぼさないことを示すこと。 | <p>【2023.6.19 技術会合】</p> <ul style="list-style-type: none"> 検定比1.0を超えた部材については、全てコンクリートセル部を支持しない部材であり、検定比1.0を超えた部材を含む層のせん断力が保有水平耐力に至らないことを確認できたため、コンクリートセル部への波及的影響はないことを説明した。 |
| 3 | 2023.6.19 技術会合 | <ul style="list-style-type: none"> 鉄セル遮蔽体の耐震評価について、基礎ボルトが耐震評価上、最も厳しい点であることを示すこと。 | <p>【2023.9.11 技術会合】（今回説明）</p> <ul style="list-style-type: none"> 基礎ボルト部が、全体の部材の中で発生荷重が大きく、また、断面積が小さい部位であることを説明する。 |
| 4 | | <ul style="list-style-type: none"> 鉄セル遮蔽体の基礎ボルトを定着しているコンクリートのコーン破壊について確認すること。 | <p>【2023.9.11 技術会合】（今回説明）</p> <ul style="list-style-type: none"> 基礎ボルトを定着しているコンクリートのコーン破壊（アンカー部評価）について説明する。 |

1. 概要

第11回技術会合における指摘事項：

- 鉄セル遮蔽体の耐震評価について、基礎ボルトが耐震評価上、最も厳しい点であることを示すこと。
- 鉄セル遮蔽体の基礎ボルトを定着しているコンクリートのコーン破壊について確認すること。

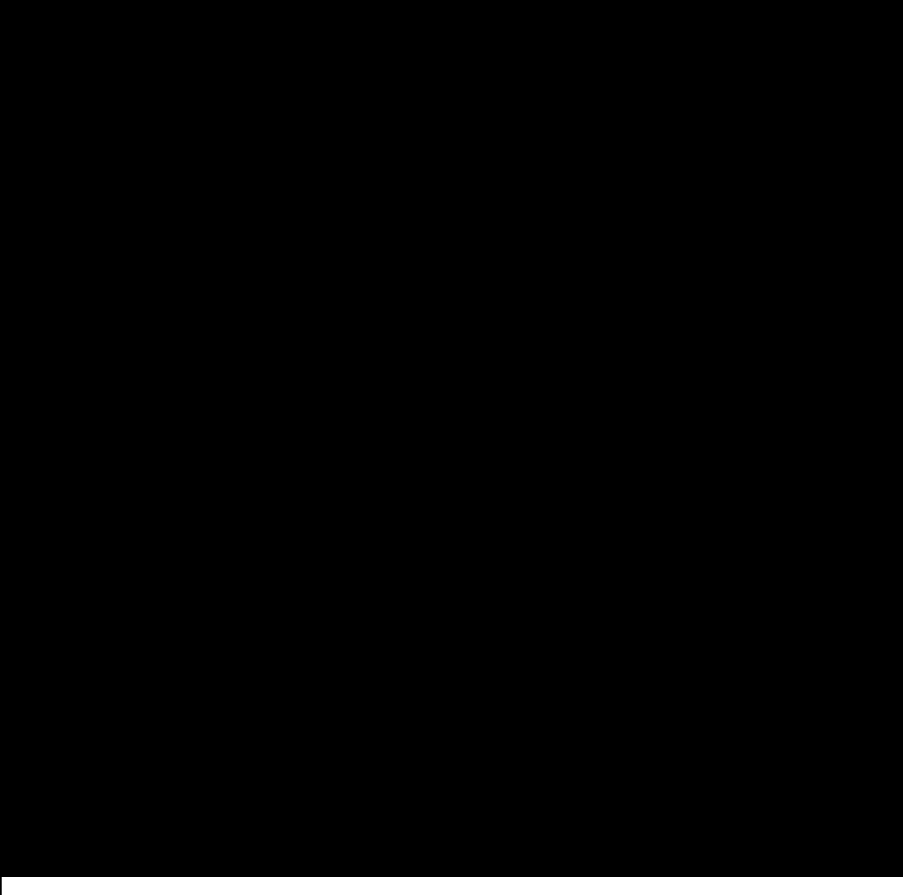
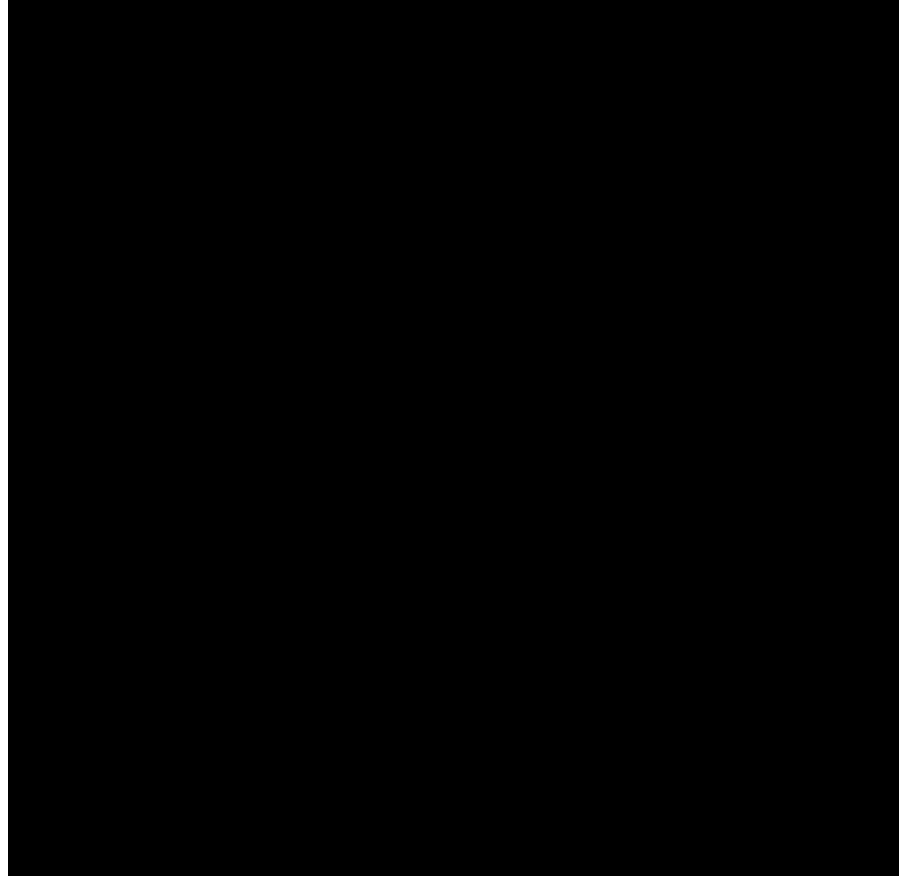
◆指摘事項の経緯

- コンクリートセル（耐震Sクラス）に隣接して設置される鉄セル遮蔽体（耐震B+クラス）は重量物であり、Ss900の地震が発生し損傷した場合に、上位クラスであるコンクリートセルに波及的影響を及ぼすことが懸念された。
- **コンクリートセルへの波及的影響を及ぼさないことを確認するため、鉄セル遮蔽体に対してSs900に対する耐震性を有していることを確認**することとした。
- 第11回特定原子力施設の実施計画の審査等に係る技術会合（以下「第11回技術会合」という。）において、「基礎ボルトが最弱部であること」及び「基礎ボルトを定着しているコンクリートのコーン破壊」について説明するようご指摘いただいたため、今回その説明を行う。

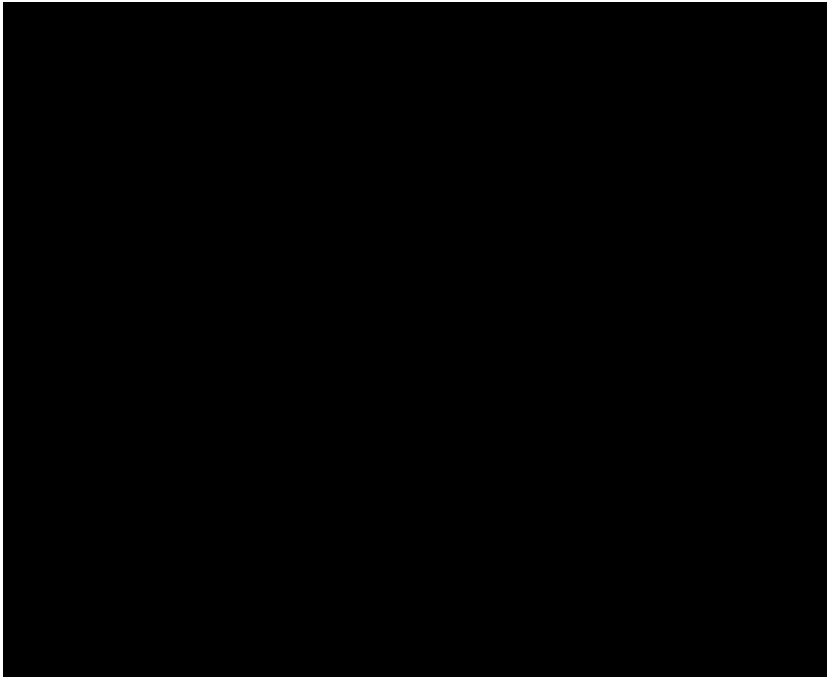
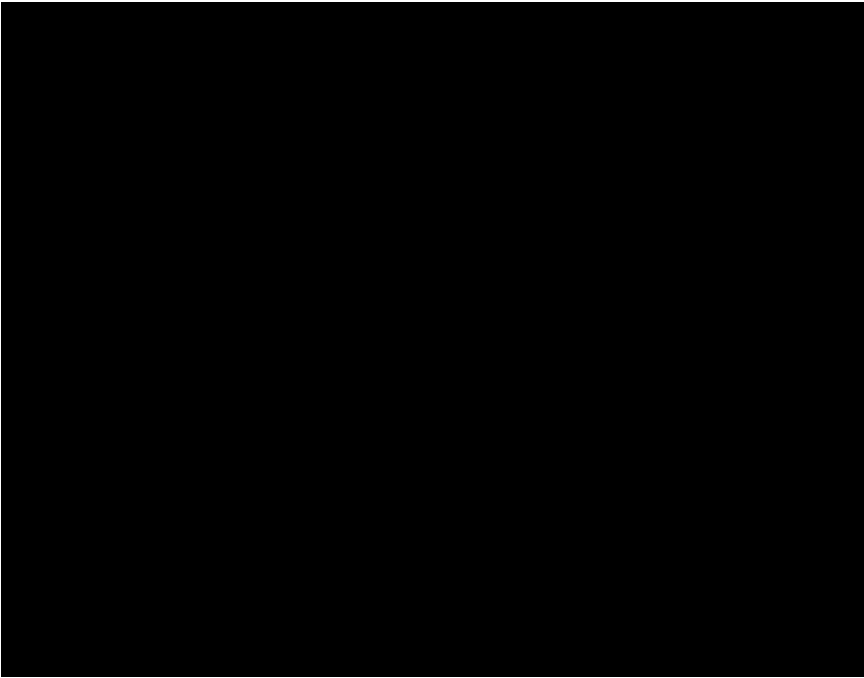
◆説明内容の概要

- 第11回技術会合時点では、応力評価のみが完了しており、並行してアンカー部評価を進めていた。
- **アンカー部評価を実施したところ、評価上厳しい箇所（補足資料参照）が存在したため、鉄セル遮蔽体の基礎ボルト部の設計を一部見直した。**
- 本資料では、**基礎ボルト部の設計を一部見直したモデルでの固有値解析、応力評価及びアンカー部評価の結果（基礎ボルトが最弱部であることの説明含む。）**をご説明する。

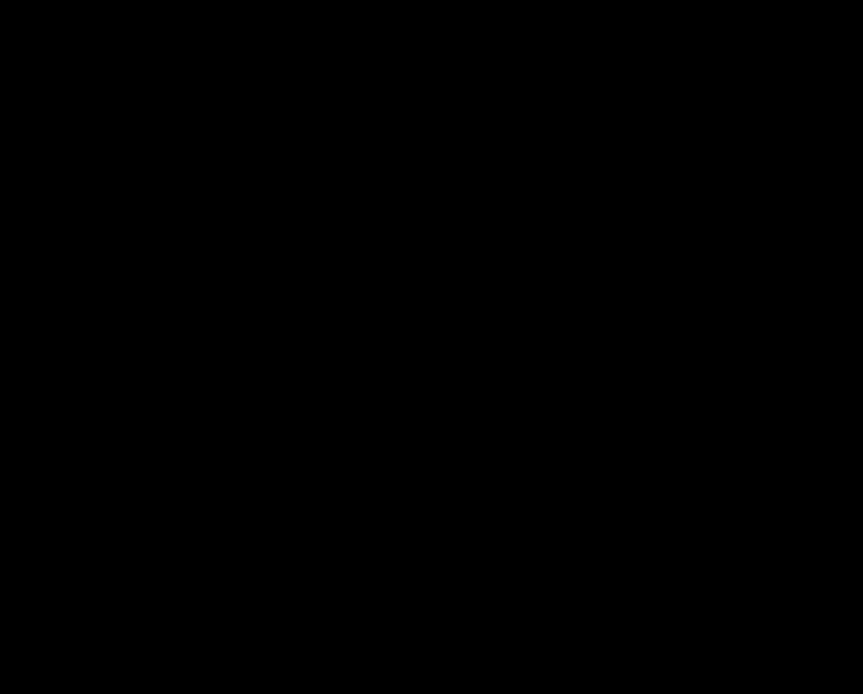
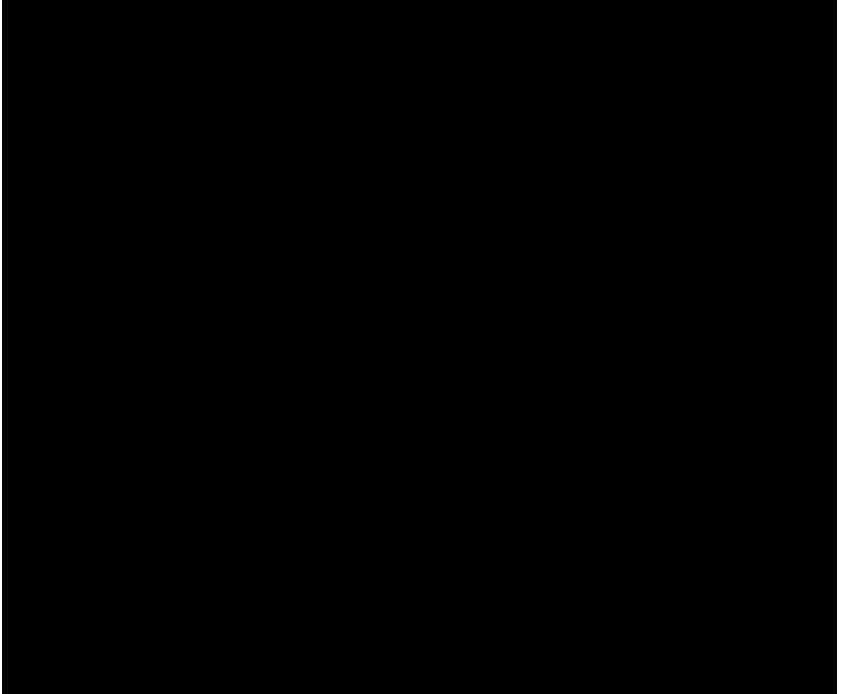
2. 設計見直し箇所について（全体概要）

| 第11回技術会合時点のFEMモデル | 設計を見直したFEMモデル |
|---|--|
|  |  |

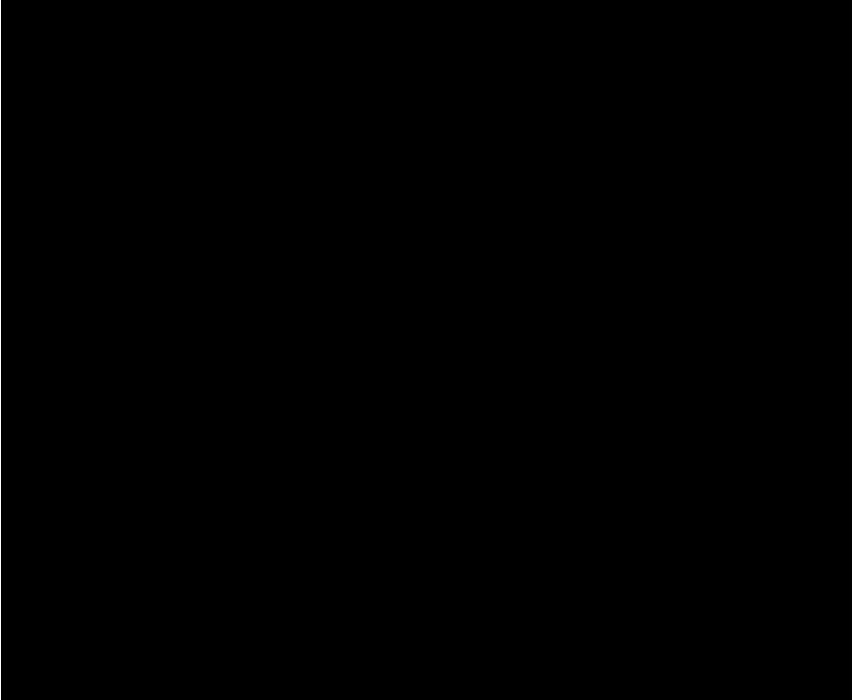
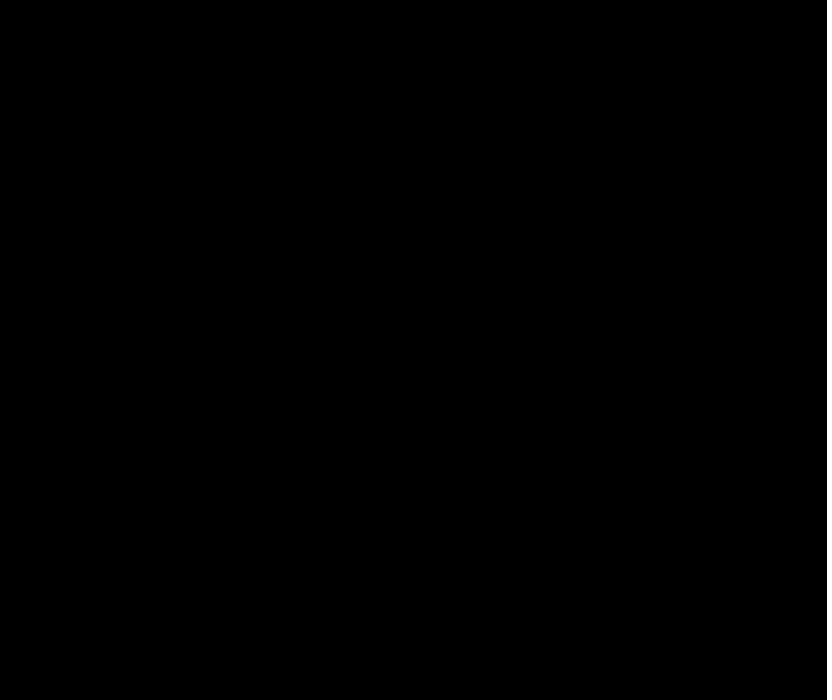
2. 設計見直し箇所について（見直し箇所1）

| 第11回技術会合時点の側面図 | 設計を見直した側面図 |
|--|---|
| <p data-bbox="232 432 356 523">見直し 箇所1</p>  | <p data-bbox="1137 432 1261 523">見直し 箇所1</p>  |
| <p data-bbox="474 1305 1749 1353">荷重を分散させるため、ブラケットの拡張及びボルトを1本追加した。</p> | |

2. 設計見直し箇所について（見直し箇所2）

| 第11回技術会合時点の平面図 | 設計を見直した平面図 |
|--|---|
| <p data-bbox="232 432 353 523">見直し 箇所2</p>  | <p data-bbox="1137 432 1258 523">見直し 箇所2</p>  |
| <p data-bbox="488 1305 1738 1353">荷重を分散させるため、ブラケットの拡張及びボルトを2本追加した。</p> | |

2. 設計見直し箇所について（見直し箇所3）

| 第11回技術会合時点の平面図 | 設計を見直した平面図 |
|--|---|
| <p data-bbox="235 432 353 523">見直し 箇所3</p>  | <p data-bbox="1140 432 1258 523">見直し 箇所3</p>  |
| <p data-bbox="293 1305 1928 1353">荷重を分散させるため、ブラケットの拡張、ボルトの配置変更及びボルトを1本追加した。</p> | |

3. 評価方法

鉄セルのSs900に対する耐震性を確認するため、3次元FEMモデルを構築し、以下の項目・条件で評価を実施する。

評価対象は、全体の中で発生荷重が大きく、かつ断面積が小さいために発生応力が大きくなる基礎ボルトとした。

なお、FEM解析により基礎ボルトが最弱部であることを確認している。

◆評価項目

以下の①、②及び③について評価を行う。

- ①固有値解析
- ②基礎ボルトに発生するせん断応力及び引張応力
- ③アンカー部評価

◆設計用地震力

以下の設計用地震力で鉄セルを評価する。

動的地震力

Ss900

(鉄セルは剛構造であり※1、建屋のSs900による解析で得られる最大床応答加速度 (1階) でFEM解析を実施)

※1 固有値解析の結果は次頁に示す。

◆供用状態

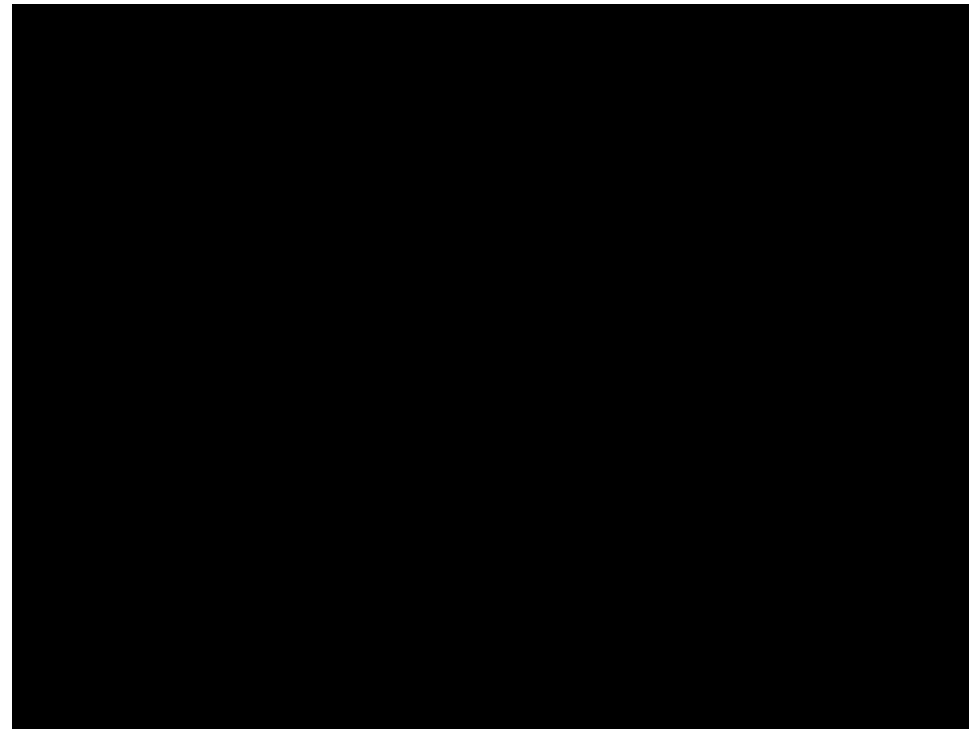
Ss900で機能維持を確認することから供用状態 D_S ※2とする。

※2 原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG4601-1987) に基づくとともに、原子力発電所耐震設計技術規程 (JEAC4601-2008) を参考とした。

4. 固有値解析の結果について

第11回技術会合から設計を見直したFEMモデルで固有周期を解析した結果、固有周期は1次振動モードで**0.047秒**となった。

固有周期は0.05秒以下であることから、**鉄セルは剛構造であることを確認**した。



FEM解析モデル

5. 地震力の設定について

◆設計用地震力の設定

固有値解析で、鉄セルは剛構造であることを確認したことから、静的な設計用地震力を以下のとおり設定する。

- ①鉄セルが設置される1階における建屋のSs900に対する地震応答解析結果を各方向に対して20%割り増しし、重力加速度で除することで震度は以下のとおりとなる。

| 方向 | 水平方向 | | 鉛直方向 |
|---------------------------------|--------|--------|-------|
| | EW方向 | NS方向 | UD方向 |
| 1階における建屋のSs900に対する最大床応答加速度[Gal] | 982 | 1028 | 732 |
| | ↓ | ↓ | ↓ |
| 20%割り増した加速度[Gal] | 1178.4 | 1233.6 | 878.4 |
| | ↓ | ↓ | ↓ |
| 震度[-] | 1.21 | 1.26 | 0.90 |

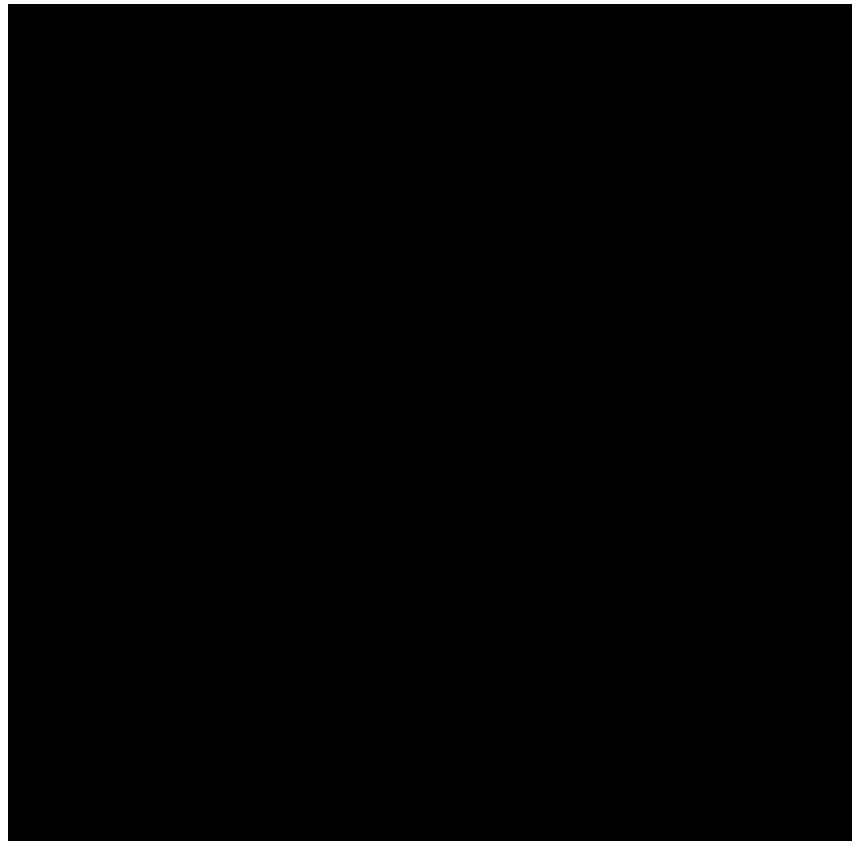
- ②水平方向の設計震度について保守的に包絡させるため、最終的に設計用震度は以下のとおりとなる。

| 方向 | 水平方向 | | 鉛直方向 |
|----------|------|------|------|
| | EW方向 | NS方向 | UD方向 |
| 設計用震度[-] | 1.26 | 1.26 | 0.90 |

6. 応力評価の結果について

地震力の入力方向の組合せは8通り※1ある。各発生応力が最大となる入力方向の組合せにおける基礎ボルトの発生応力を以下に示す。

※1 X、Y、Z方向の3方向に対して、それぞれ正又は負方向の2通りが考えられるため、8(=2×2×2) 通りとなる。



各最大発生応力の発生箇所

下表のとおり、すべての応力について**最大発生応力が許容応力を下回っているため、鉄セルはSs900に対して耐震性を有することを確認した。**

| 評価応力 | 節点番号 | 最大発生応力 (MPa) | 許容応力※3 (MPa) |
|---------|-------|--------------|--------------|
| 引張応力 | 5878 | 276 | 487 |
| せん断応力 | 23875 | 255 | 375 |
| 組合せ応力※2 | 23875 | 209 | 273 |

※2 引張応力とせん断力の組合せ

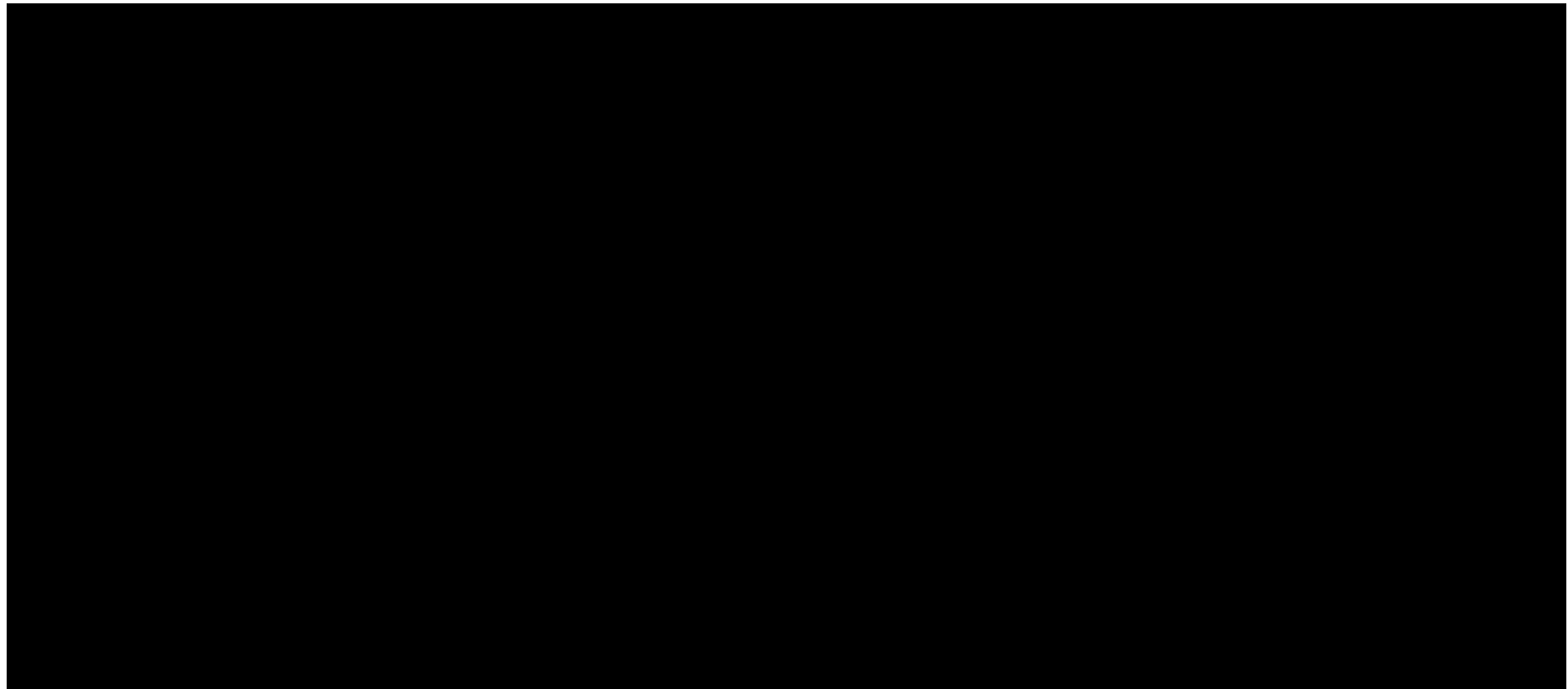
※3 原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG4601) 及び発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005/2007) に基づく

➔ **鉄セルはコンクリートセルへ波及的影響を及ぼさない。**

7. アンカー部評価について (1/5)

◆評価方法 (1/2)

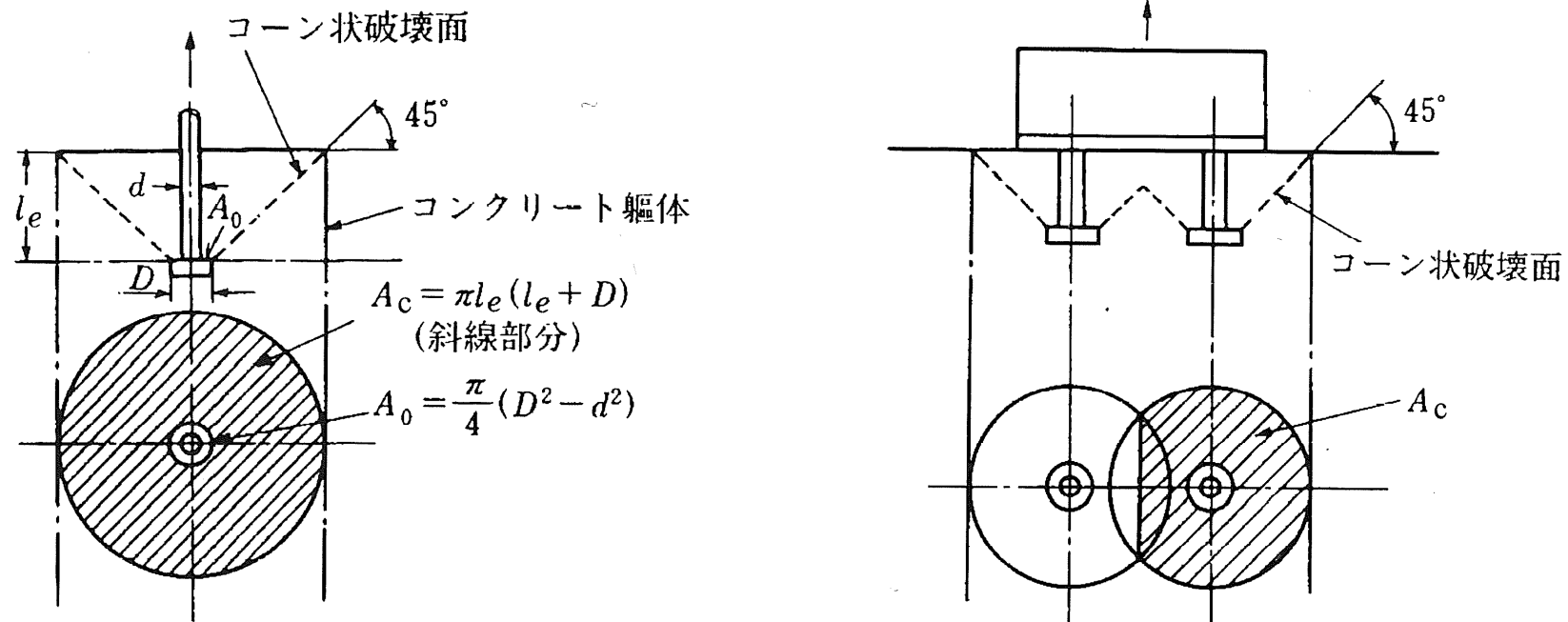
鉄セル遮蔽体のアンカー部の評価は、原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG4601-1991追補) に基づくとともに、原子力発電所耐震設計技術規程 (JEAC4601-2008) を参考に行う。基礎ボルトに発生する荷重をブラケット/埋込金物ごとに足し合わせることで、コーン状破壊の発生の有無を確認する。なお、供用状態はD_Sとする。



7. アンカー部評価について (2/5)

◆評価方法 (2/2)

鉄セル遮蔽体の基礎ボルトについて、ブラケットに配置される基礎ボルトについては、互いに隣接しているため、ブラケット／埋込金物ごとに「アンカーボルトが複数の場合の有効投影面積」(右図) の考え方で有効投影面積を算出し、アンカー部評価を行う。



(原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG4601-1991追補) 及び原子力発電所耐震設計技術規程 (JEAC4601-2008) から図を引用)

単一のアンカーボルトの有効投影面積 A_c (斜線部分)

アンカーボルトが複数の場合の有効投影面積 A_c (斜線部分)

7. アンカー部評価について (3/5)

◆評価式

①基礎ボルトが引張荷重を受ける場合のアンカー部評価

・コンクリートにせん断補強筋が無い場合

荷重の算定で得られた基礎ボルトの引張荷重は、以下に示すコンクリート部の引張荷重に対する許容値以下となるようにする。

$$p \leq p_a = \min[p_{a1}, p_{a2}]$$

$$p_{a1} = 0.31K_1 A_c \sqrt{F_c}$$

$$p_{a2} = K_2 \alpha_c A_0 F_c$$

p : 基礎ボルト1本当たりの引張荷重 (N)
 p_a : 基礎ボルト1本当たりのコンクリート部の許容引張荷重 (N)
 p_{a1} : コンクリート躯体がコーン状破壊する場合の基礎ボルト1本当たりの許容引張荷重 (N)
 p_{a2} : 基礎ボルト頭部に接するコンクリート部が支圧破壊する場合の基礎ボルト1本当たりの許容引張荷重 (N)
 K_1 : コーン状破壊する場合の引張耐力の低減係数
 K_2 : 支圧破壊する場合の引張耐力の低減係数
 F_c : コンクリートの設計基準強度 (N/mm²)
 A_c : コンクリートのコーン状破壊面の有効投影面積 (mm²)
 α_c : 支圧面積と有効投影面積から定まる係数、 $= \sqrt{A_c/A_0}$ かつ10以下
 A_0 : 支圧面積 (mm²)
 l_e : 基礎ボルトのコンクリート内への埋め込み長さ (mm)
 D : 基礎ボルト頭部の直径 (mm)
 d : 基礎ボルトの呼び径 (mm)

②基礎ボルトがせん断荷重を受ける場合のコンクリートの評価

$$q \leq q_a = \min[q_{a1}, q_{a2}]$$

$$q_{a1} = 0.5K_3 A_b \sqrt{E_c F_c}$$

$$q_{a2}^{\ast} = 0.31K_4 A_{c1} \sqrt{F_c}$$

q : 基礎ボルト1本当たりのせん断荷重 (N)
 q_a : 基礎ボルト1本当たりのコンクリート部の許容せん断荷重 (N)
 q_{a1} : 基礎ボルトと基礎ボルト周辺のコンクリートが圧壊して破壊 (複合破壊) する場合の基礎ボルト1本当たりの許容せん断荷重 (N)
 q_{a2} : へり側コンクリートが破壊する場合の基礎ボルト1本当たりの許容せん断荷重 (N)
 K_3 : 複合破壊の場合のせん断耐力の低減係数
 K_4 : へり側コンクリート破壊の場合のせん断耐力の低減係数
 A_b : 基礎ボルトの谷径断面積 (スタッドの場合は軸部断面積) (mm²)
 E_c : コンクリートのヤング係数 (N/mm²)
 F_c : コンクリートの設計基準強度 (N/mm²)
 A_{c1} : コンクリートのコーン状破壊面の有効投影面積 (mm²)

※ 鉄セル遮蔽体の固定ボルトはへり部に配置されないため、 q_{a2} は計算を省略

7. アンカー部評価について (4/5)

◆床部の評価結果

床に配置されるブラケットごとのコーン状破壊の評価結果を下表に示す。

- 引張荷重が許容引張荷重を下回ることを確認した。
- せん断荷重が許容せん断荷重を下回ることを確認した。
- 引張荷重及びせん断荷重の組合せを考慮しても許容値を下回ることを確認した。

| ブラケット番号 | 引張荷重 p(kN) | 許容引張荷重 p _a (kN) | せん断荷重 q(kN) | 許容せん断荷重 q _a (kN) | 組合せ評価※ (-) |
|---------|---------------|-------------------------------|----------------|--------------------------------|---------------|
| 1 | 49 | 410 | 190 | 470 | 0.18 |
| 2 | 47 | 400 | 98 | 470 | 0.056 |
| 3 | 41 | 400 | 98 | 470 | 0.053 |
| 4 | 45 | 400 | 107 | 470 | 0.063 |
| 5 | 200 | 730 | 370 | 950 | 0.23 |
| 6 | 30 | 380 | 170 | 590 | 0.086 |
| 7 | 200 | 930 | 550 | 1100 | 0.26 |
| 8 | 57 | 380 | 140 | 470 | 0.12 |
| 9 | 48 | 410 | 110 | 470 | 0.070 |
| 10 | 51 | 320 | 140 | 470 | 0.11 |
| 11 | 32 | 330 | 140 | 470 | 0.10 |
| 12 | 30 | 260 | 130 | 470 | 0.086 |
| 13 | 25 | 320 | 110 | 470 | 0.062 |
| 14 | 36 | 410 | 78 | 470 | 0.035 |
| 15 | 9.2 | 260 | 54 | 230 | 0.053 |

※ $(p/p_a)^2 + (q/q_a)^2$ で計算され、許容値である1以下であればコーン状破壊は発生しない。

7. アンカー部評価について (5/5)

◆コンクリートセル壁部の評価結果

コンクリートセル壁に配置される埋込金物ごとのコーン状破壊の評価結果を下表に示す。

- **引張荷重が許容引張荷重を下回ることを確認した。**
- **せん断荷重が許容せん断荷重を下回ることを確認した。**
- **引張荷重及びせん断荷重の組合せを考慮しても許容値を下回ることを確認した。**

| 埋込金物番号 | 引張荷重 p(kN) | 許容引張荷重 p _a (kN) | せん断荷重 q(kN) | 許容せん断荷重 q _a (kN) | 組合せ評価※ (-) |
|--------|---------------|-------------------------------|----------------|--------------------------------|---------------|
| 1 | 46 | 250 | 190 | 1400 | 0.051 |
| 2 | 68 | 250 | 210 | 1400 | 0.093 |
| 3 | 82 | 250 | 230 | 1400 | 0.13 |
| 4 | 400 | 790 | 520 | 3200 | 0.29 |
| 5 | 110 | 250 | 190 | 1400 | 0.22 |
| 6 | 140 | 250 | 190 | 1400 | 0.33 |
| 7 | 200 | 250 | 240 | 1400 | 0.67 |
| 8 | 160 | 250 | 140 | 1400 | 0.44 |
| 9 | 4.5 | 250 | 11 | 1400 | <0.01 |
| 10 | 5.3 | 250 | 13 | 1400 | <0.01 |

※ $(p/p_a)^2 + (q/q_a)^2$ で計算され、許容値である1以下であればコーン状破壊は発生しない。

8. まとめ

- 前のご説明内容から基礎ボルト部の設計を一部見直した（基礎ボルトの追加、ブラケットの拡張、ボルトの配置変更）。
- 見直し後のモデルで**Ss900に対する耐震評価を行った結果、応力評価及びアンカー部評価ともに許容値を下回る結果となった。**
- 鉄セル遮蔽体はSs900に対して耐震性を有することを確認した。
- **Ss900に対して耐震性を有することから、コンクリートセルへ波及的影響を及ぼさないことを確認した。**

補足

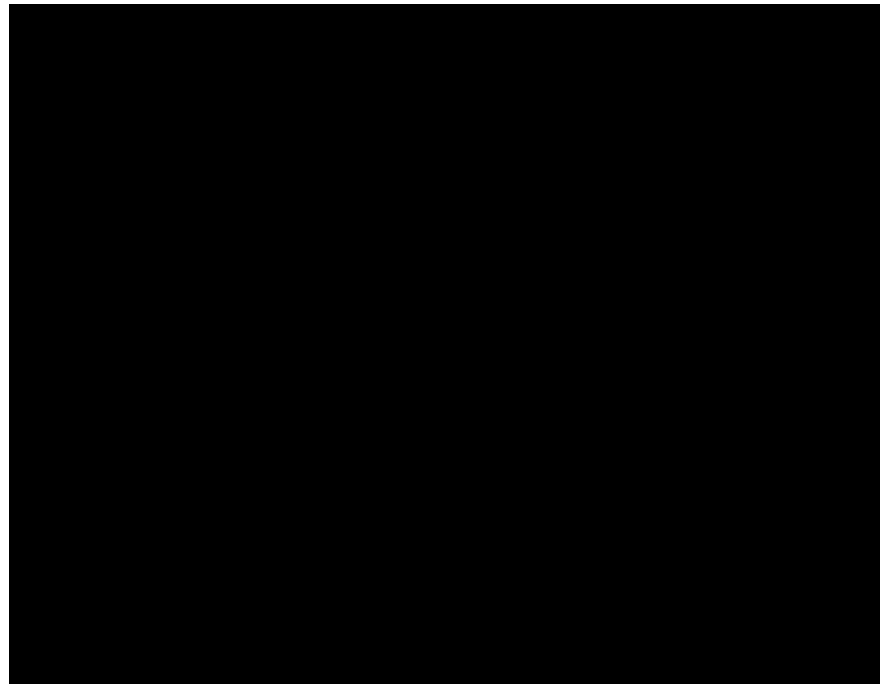
鉄セル遮蔽体の基礎ボルト部の設計見直しについて

第11回技術会合で説明した鉄セル遮蔽体について、アンカー部評価を実施したところ、下図で示す箇所について許容値を上回ることが確認された。

許容値を上回る箇所について、アンカー部評価の結果が許容値を下回るように設計の見直しを行った。(P.5参照)

また、上記の設計見直しに伴い、荷重のかかり方が変わるため、他の箇所についても許容値を下回るように設計の見直しを行った。(P.4, 6参照)

許容値を上回った箇所
(評価値/許容値は1.1~1.3)



アンカー部評価で許容値を上回った箇所 (第11回技術会合時点の平面図)