

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第6号機	設計及び工事計画審査資料
資料番号	KK6 補足-028-10-63 改0
提出年月日	2024年1月15日

原子炉本体の基礎の耐震・強度計算に関する補足説明資料

2024年1月

東京電力ホールディングス株式会社

目 次

原子炉本体の基礎の解析モデルへの荷重等入力方法と境界条件について

1. 概要	1
2. FEM モデルへの荷重等入力方法についてのイメージ図	1
3. 半割部における境界条件設定の理由	7

原子炉本体の基礎の耐震重要度分類について

1. はじめに	8
2. 既工認における取扱い	8
3. 今回申請設工認における取扱い	8

原子炉本体の基礎における理論式の応力度算出過程について

1. はじめに	9
2. 基部アンカ部の応力度算出過程	9
2.1 アンカボルト	9
2.1.1 アンカボルトの最大引張応力度	9
2.1.2 アンカボルトの定着	10
2.2 ベアリングプレート	12
3. ブラケット部	13
4. 添付資料	14

原子炉本体の基礎の解析モデルへの荷重等入力方法と境界条件について

1. 概要

本申請の原子炉本体の基礎の FEM モデルは既工認同様 1/2 モデルを用いており、荷重等の入力方法や境界条件がフルモデルに比べて複雑なため、本資料で荷重等の入力方法をイメージ図で示し、1/2 モデル境界条件の設定についての詳細を示すものとする。

本資料が関連する設工認図書は以下のとおり。

- ・ VI-1-2-1 「原子炉本体の基礎に関する説明書」

2. FEM モデルへの荷重等入力方法についてのイメージ図

原子炉本体の基礎の FEM モデルを図 1 に示す。原子炉本体の基礎の評価では、荷重の種類ごとに図 1 に示す解析モデルを用いて応力を算出し、それらを荷重組み合わせに従い足し合わせることで応力等を算出する。

荷重の種類ごとの荷重入力イメージを図 2～図 11 に示す。

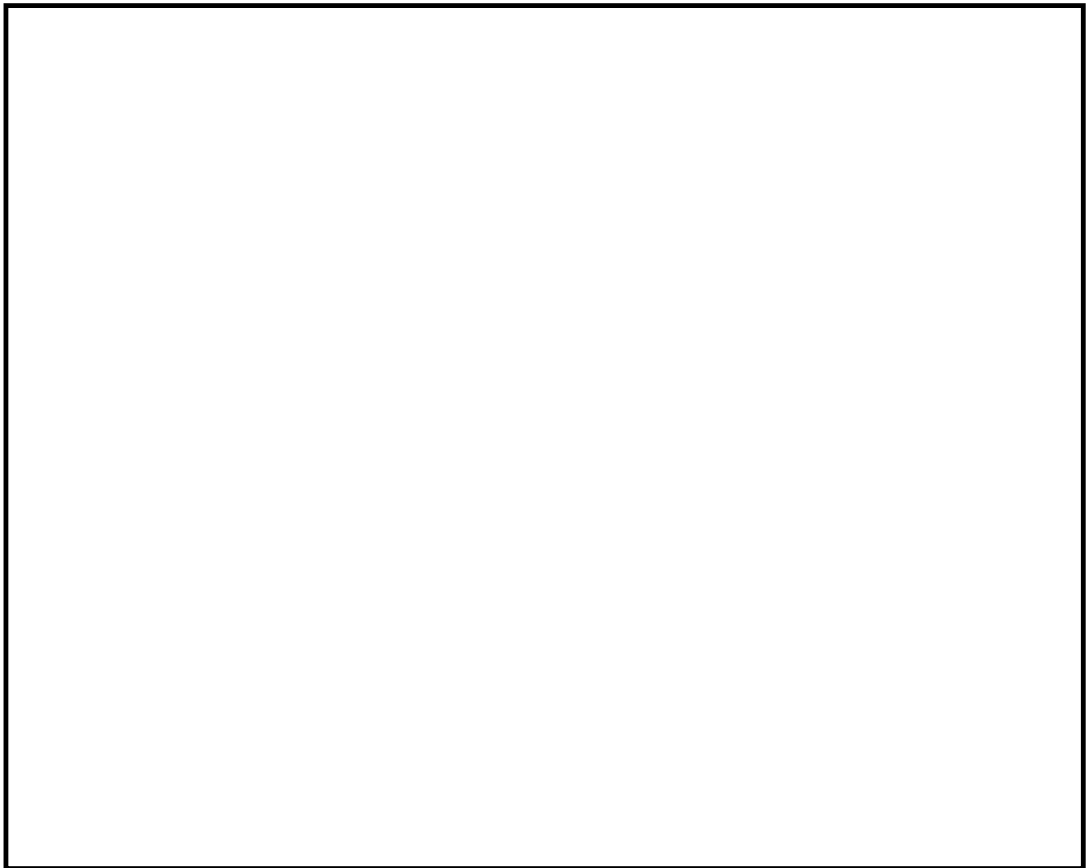


図 1 解析モデル

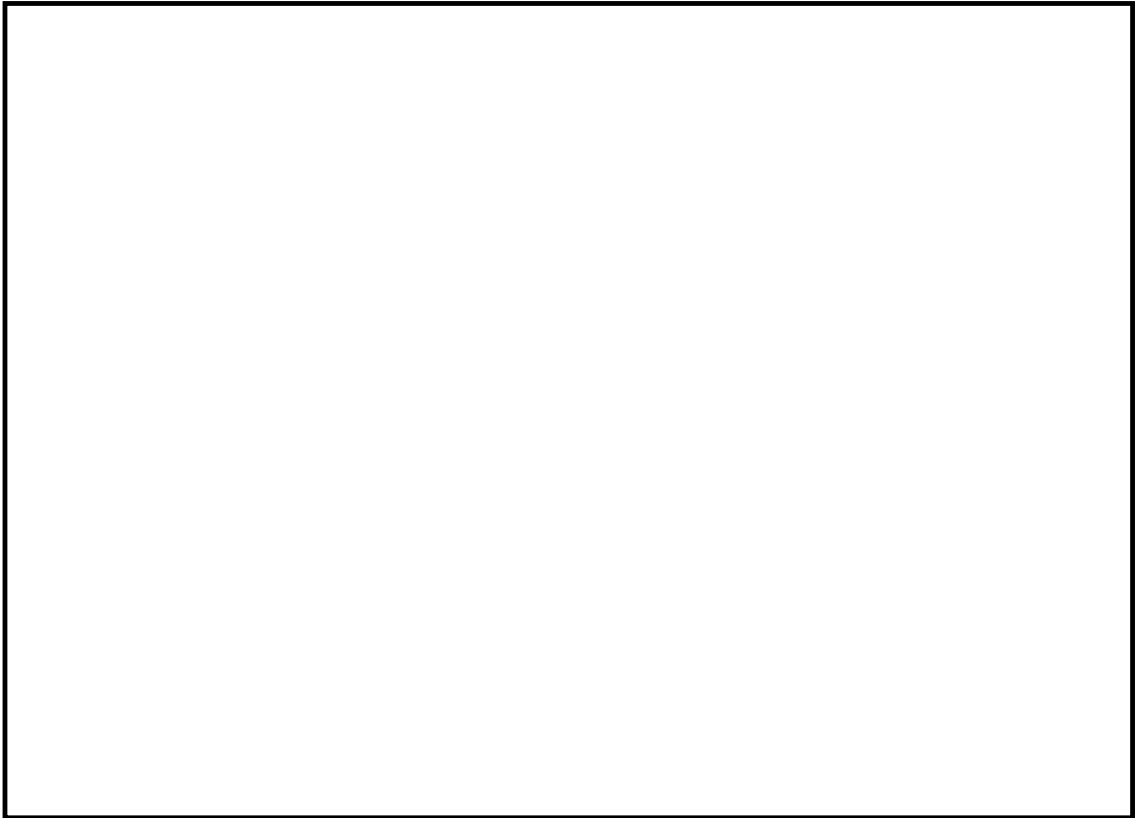


図2 解析モデルのイメージ（死荷重及び鉛直地震荷重）

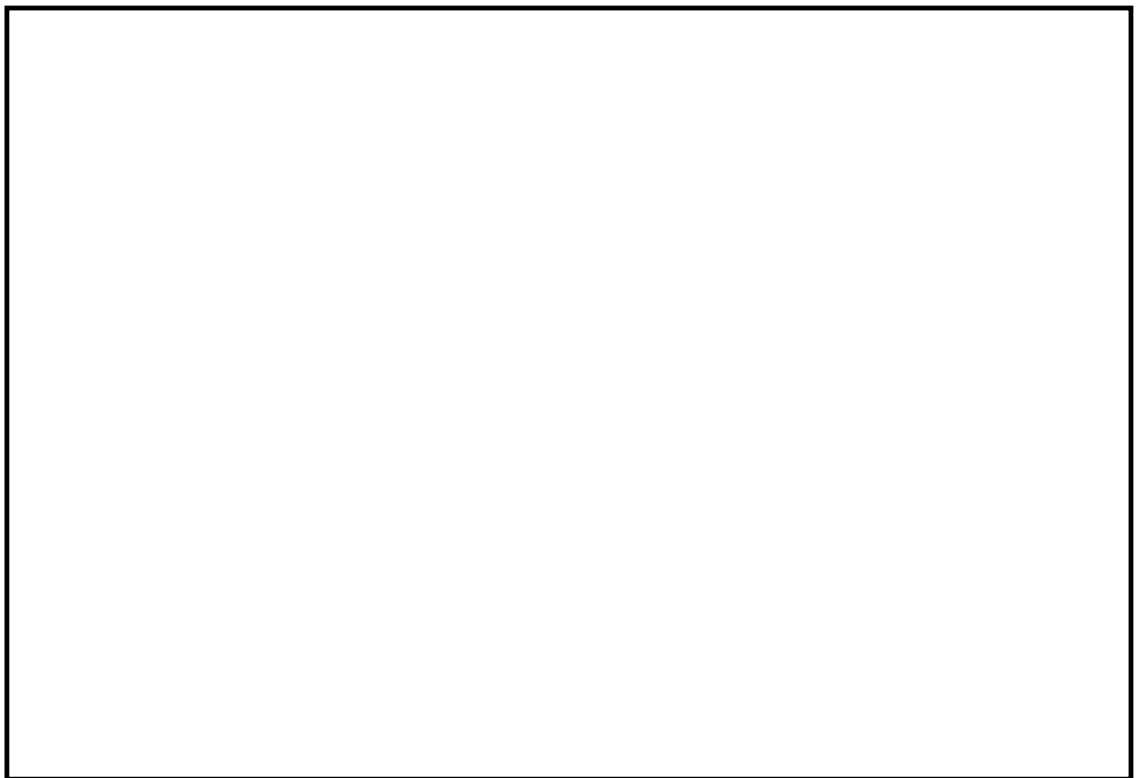


図3 解析モデルのイメージ（水頭圧）

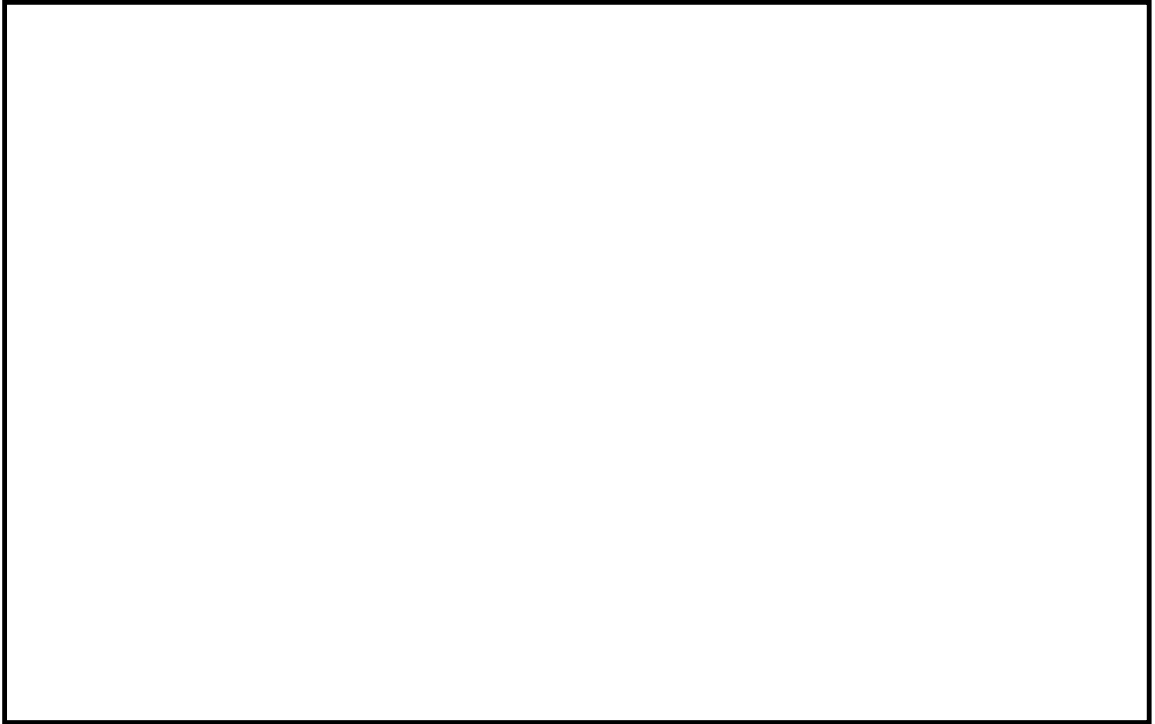


図 4 解析モデルのイメージ (圧力荷重)

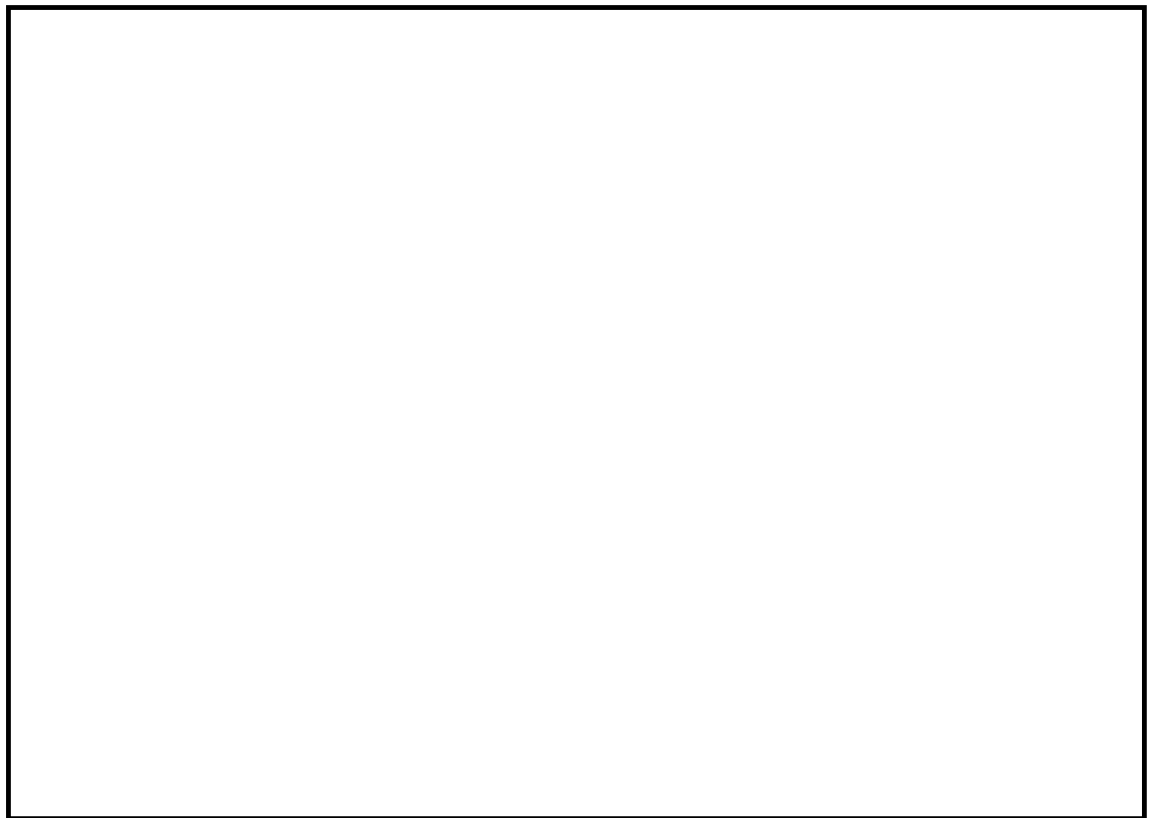


図 5 解析モデルのイメージ (温度荷重)

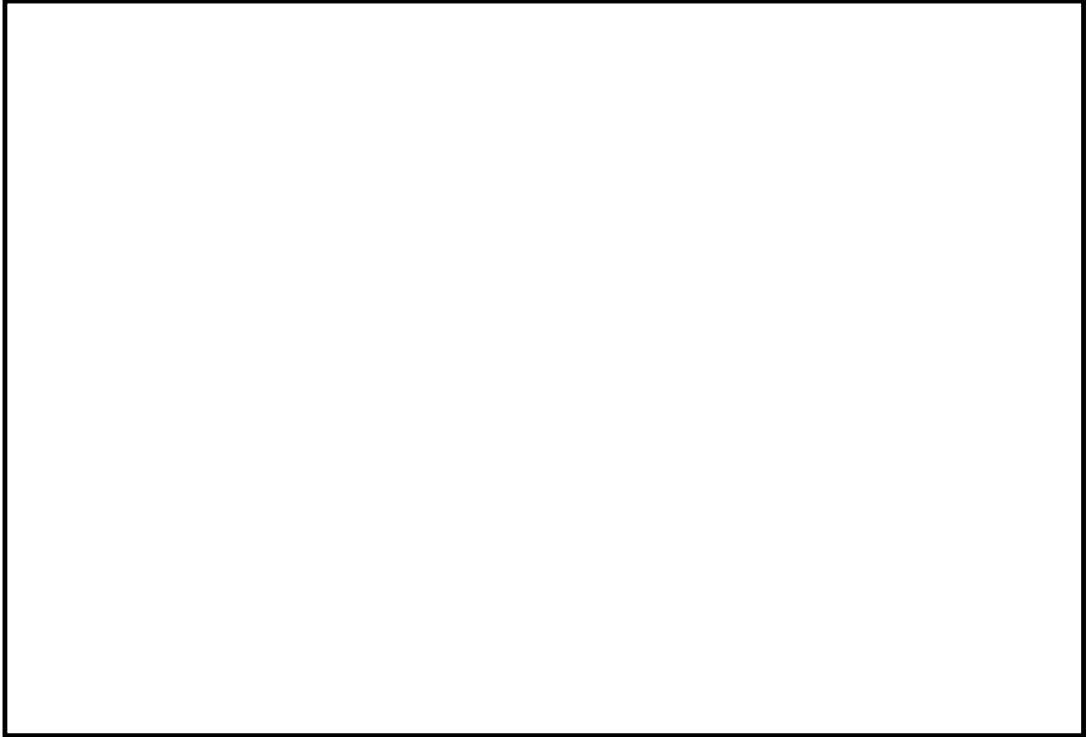


図6 解析モデルのイメージ (逃がし安全弁動作時水力的動荷重)

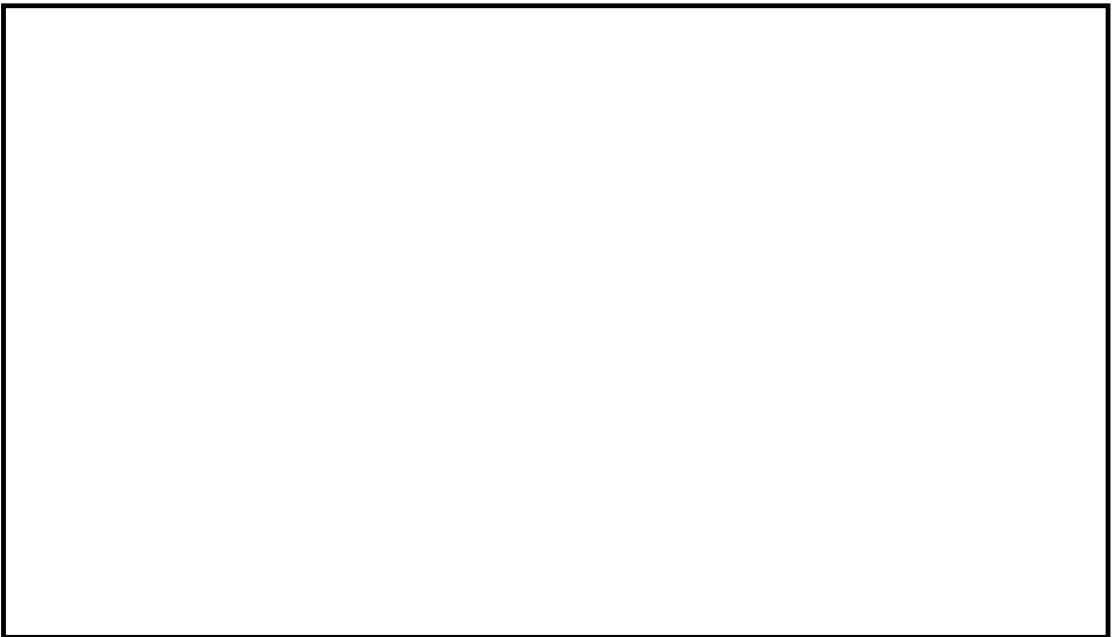


図7 解析モデルのイメージ (チャタリング及び蒸気凝縮振動荷重)

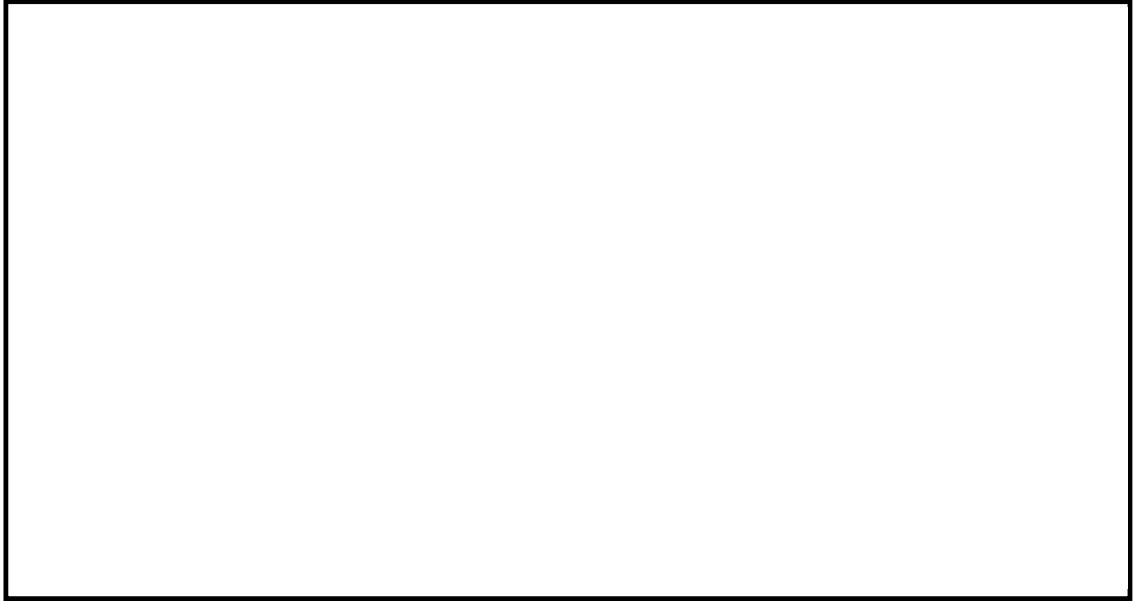


図8 解析モデルのイメージ (EW 方向水平地震荷重)

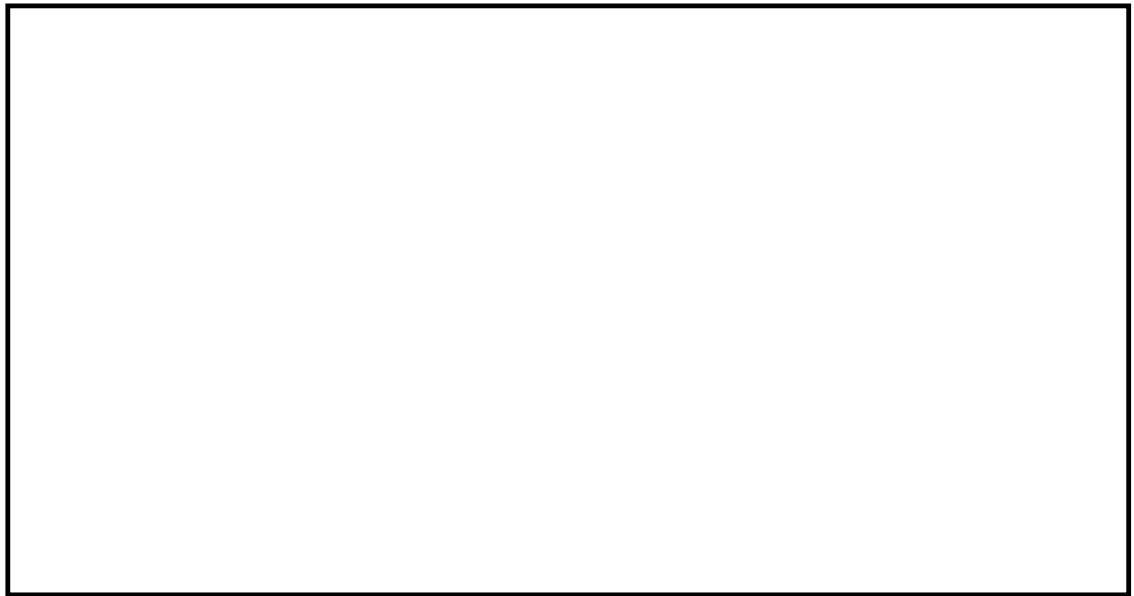


図9 解析モデルのイメージ (NS 方向水平地震荷重)

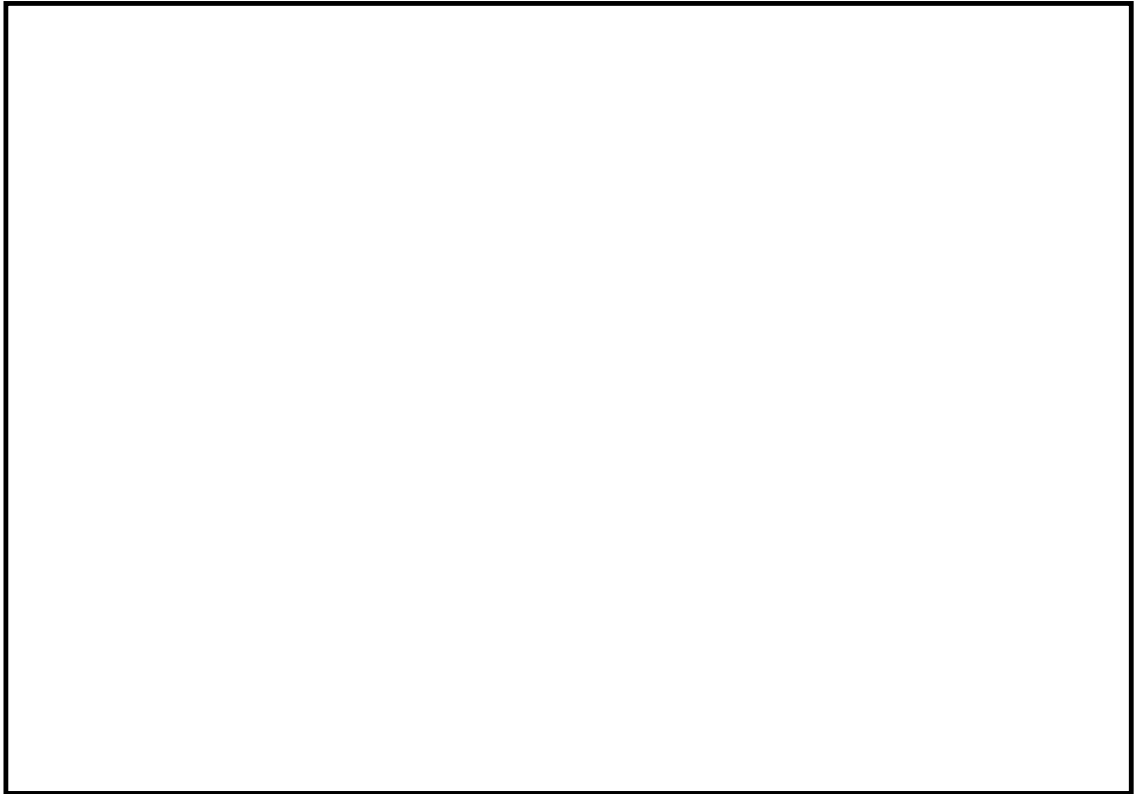


図 10 解析モデルのイメージ (ダイヤフラムフロアより作用する荷重)

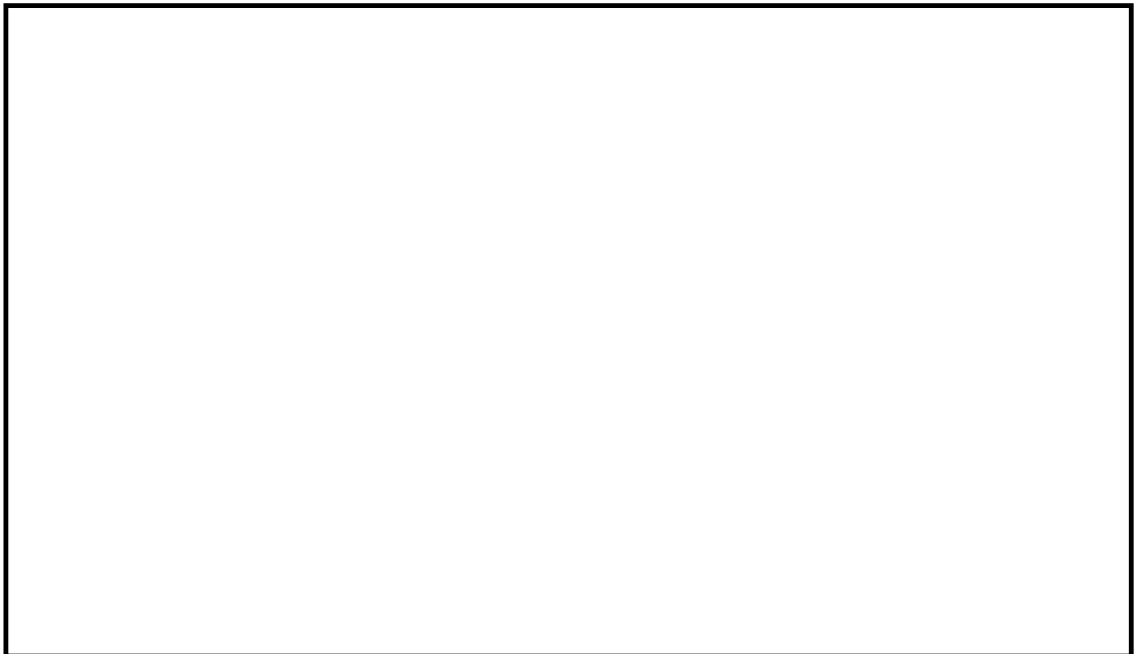


図 11 解析モデルのイメージ (下部ドライウエルアクセストンネルより作用する荷重)

3. 半割部における境界条件設定の理由

原子炉本体の基礎の解析モデルは、構造の対称性から 1/2 モデルとしている（図 12）。1/2 モデルの境界部における境界条件は、入力する荷重の方向に応じて「対称境界」と「逆対称境界」を使い分けている。境界条件の使い分けを整理した結果を表 1 に示す。

表 1 半割部における境界条件の使い分け

対称境界	構造に対称荷重が作用する場合に適用する。（例：圧力荷重，EW 方向* ¹ 水平地震荷重） 解析対象からはずした領域の解析結果は，解析領域と対称となる。イメージ図を図 12 に示す。
逆対称境界	構造に逆対称荷重が作用する場合に適用する。（例：NS 方向* ² 水平地震荷重） 解析対象からはずした領域の解析結果は，解析領域と逆対称となる。イメージ図を図 12 に示す。

注記*1：図 12 の Y 軸方向が図 8 の EW 方向に該当する。

*2：図 12 の X 軸方向が図 9 の NS 方向に該当する。

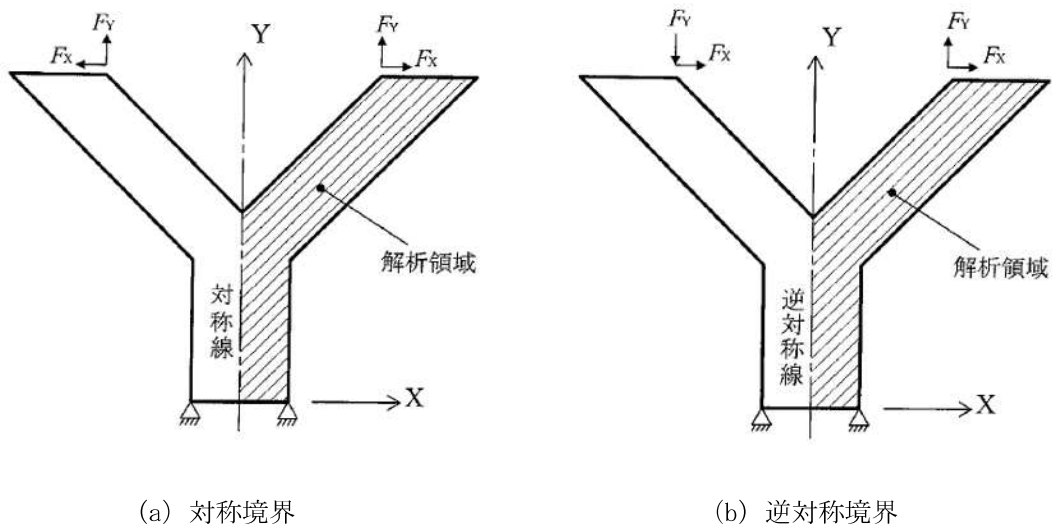


図 12 境界条件設定のイメージ図*

※ 出典：構造解析のための有限要素法実践ハンドブック（発行：森北出版株式会社）

原子炉本体の基礎の耐震重要度分類について

1. はじめに

原子炉本体の基礎はVI-1-2-1「原子炉本体の基礎に関する説明書」において、耐震重要度分類を「Sクラス相当」と記載している。本資料はこの理由について説明する資料である。

2. 既工認における取扱い

原子炉本体の基礎は原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編（J E A G 4 6 0 1・補-1984）の分類例において、原子炉圧力容器等の間接支持構造物と分類されており、既工認においても間接支持構造物として取り扱っている。

一方で、原子炉本体の基礎は間接支持構造物の機能に加えて、ドライウエルとサプレッションチェンバの圧力境界となる機能も有しているため、既工認においてSクラスと同等の評価を実施している。

3. 本申請における取扱い

本申請においても、既工認における整理を踏襲し、間接支持構造物として分類するが、評価としてはSクラスと同等の評価を実施することとし、VI-1-2-1「原子炉本体の基礎に関する説明書」の耐震計算上は、「Sクラス相当」と記載することとする。

原子炉本体の基礎における理論式の応力度算出過程について

1. はじめに

本資料は原子炉本体の基礎の理論式による応力度計算箇所について、その過程について説明する資料である。

なお、計算過程は許容応力状態短期 (D + P + M + S d*) について提示し、そのほかの結果についてはまとめ表として添付資料-1 に示す。

本資料が関連する設工認図書は以下のとおり。

- ・ VI-1-2-1 「原子炉本体の基礎に関する説明書」

2. 基部アンカ部の応力度算出過程

2.1 アンカボルト

基部アンカ部を図1 に示す。

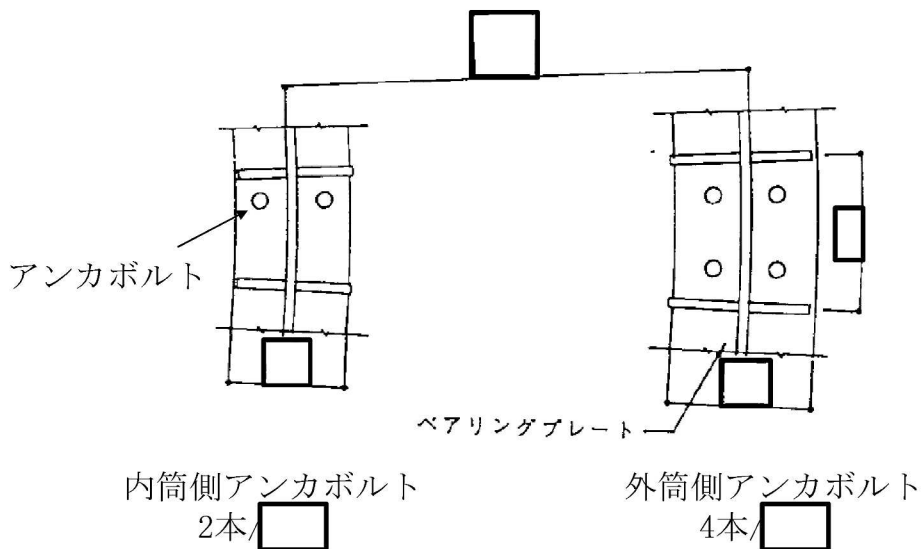


図1 基部アンカ部

2.1.1 アンカボルトの最大引張応力度

VI-1-2-1 「原子炉本体の基礎に関する説明書」における解析モデル及び解析モデル諸元に基づく解析結果より、アンカボルトに生じる最大引張応力度 σ_t は、

$$\sigma_t = \boxed{} \text{ N/mm}^2$$

となる。この値より、ねじ部有効断面でのアンカボルトの引張応力度 σ_{ta} を求めると、

$$\sigma_{ta} = \sigma_t \times A_0 / A_1 = \boxed{} \times \boxed{} / \boxed{} = \boxed{} \text{ N/mm}^2$$

となり、アンカボルトの短期許容引張応力度 $1.5 \cdot f_t = 1.5 \times F / 1.5 = \boxed{} \text{ N/mm}^2$ 以下となる。

2.1.2 アンカボルトの定着

VI-1-2-1「原子炉本体の基礎に関する説明書」における解析モデル及び解析モデル諸元に
基づき求めたアンカボルトに生じる引張応力度 $\sigma_{t o}$ 及び $\sigma_{t i}$ より、アンカボルトの引抜き
力 F は、

$$F = (4 \times \sigma_{t o} + 2 \times \sigma_{t i}) \times A_0$$

$$= (4 \times \square + 2 \times \square) \times \square = 2.256 \times 10^6 \text{ N/4.5}^\circ$$

となり、コンクリートの短期許容せん断力 $Q_{p a}$ 以下である。

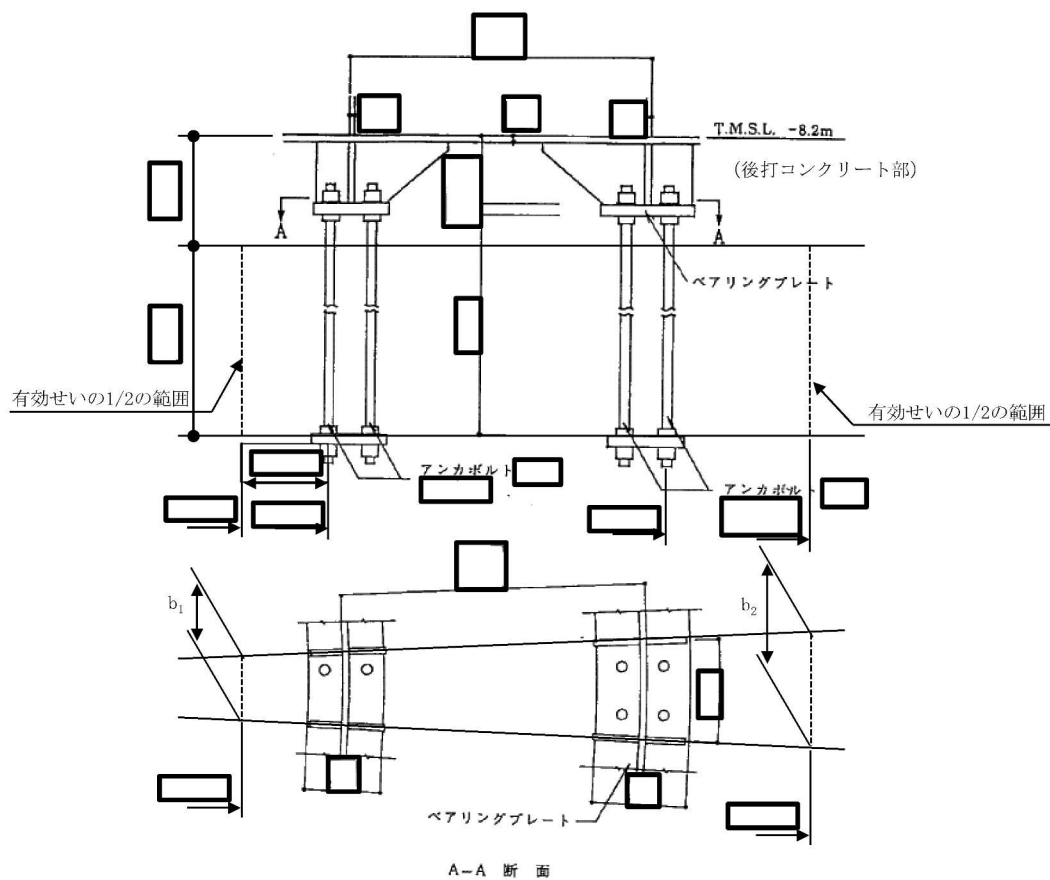
$$Q_{p a} = \alpha \times b_0 \times j \times f_s$$

$$= 1.5 \times \square \times \square \times 1.19$$

$$= \square \text{ N/4.5}^\circ$$

ここで、

σ_t	アンカボルト軸断面での最大引張応力度
$\sigma_{t a}$	アンカボルトねじ部有効断面での最大引張応力度
A_0	アンカボルトの軸断面積 ($\square \text{ mm}^2 \times 1 \text{ 本}$)
A_1	アンカボルトのねじ部有効断面積 ($\square \text{ mm}^2 \times 1 \text{ 本}$)
F	アンカボルト (\square) の許容応力度の基準値
F	アンカボルトの引抜き力
$\sigma_{t o}$	外筒側のアンカボルト軸断面での引張応力度
$\sigma_{t i}$	内筒側のアンカボルト軸断面での引張応力度
$Q_{p a}$	コンクリートの短期許容せん断力
α	1.5 (定数)
b_0	せん断力算定断面の延べ幅 (図2 参照)
j	応力中心間距離 (図2 参照)
f_s	コンクリートの短期許容せん断応力度



【補足】

RC 規準 20 条 1. (4) ii) より、 b_o はアンカボルトから基礎スラブ有効せいの 1/2 の点を連ねた曲線の延べ幅である。また、 j は基礎スラブの応力中心間距離で、 $7/8 \times$ 基礎スラブの算定断面有効せい d とすることができる。□ の範囲における b_o 及び j の算出式を以下に示す。

$$b_o = b_1 + b_2 = (\square \times 2\pi) \times \square / 360 + (\square \times 2\pi) \times \square / 360 = \square \rightarrow \square \text{ mm}$$

$$d = \square \text{ mm}$$

$$j = \square \times (7/8) = \square \rightarrow \square \text{ mm}$$

図 2 セン断力算定断面の延べ幅 b_o 及び応力中心間距離 j

2.2 ベアリングプレート

ベアリングプレートの形状図を図3に示す。

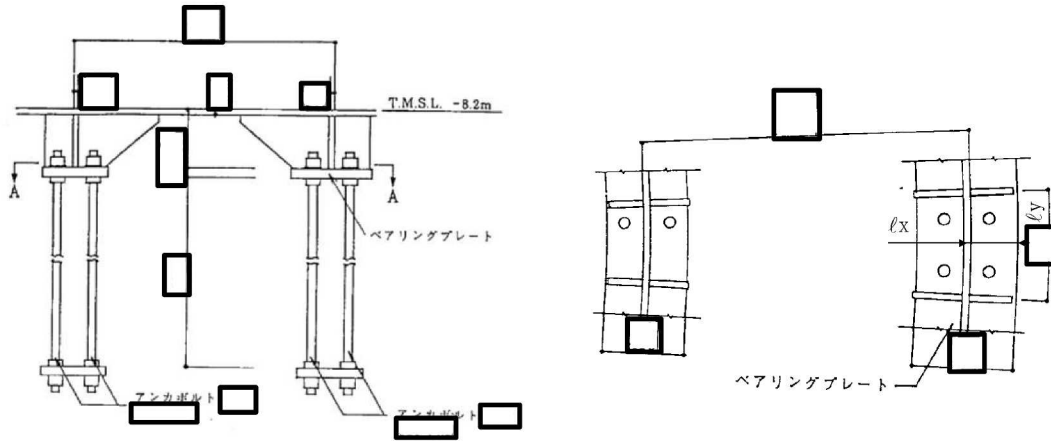


図3 ベアリングプレート形状図

ベアリングプレートを三辺固定一辺自由端の板と考える。

$$l_x = \boxed{} \text{ mm} \quad l_y = \boxed{} \text{ mm}$$

VI-1-2-1「原子炉本体の基礎に関する説明書」における解析モデル及び解析モデル諸元に基づき求めたアンカボルトに生じる最大引張応力度 σ_t より、ベアリングプレートに生じる最大引張応力度 w_t は、

$$w_t = \sigma_t \times A_0 \times 2 / (l_x \times l_y) = \boxed{} \text{ N/mm}^2$$

となる。一方、同解析結果より、ベアリングプレートに生じる最大圧縮応力度 w_c は、 $\boxed{} \text{ N/mm}^2$ になるため、以下の検討は最大圧縮応力度 w_c により行う。

最大曲げモーメントは、単位幅 1mm 当たり、

$$M = 0.30 \times w_c \times l_x^2 = 0.30 \times \boxed{} = \boxed{} \text{ N} \cdot \text{mm/mm}$$

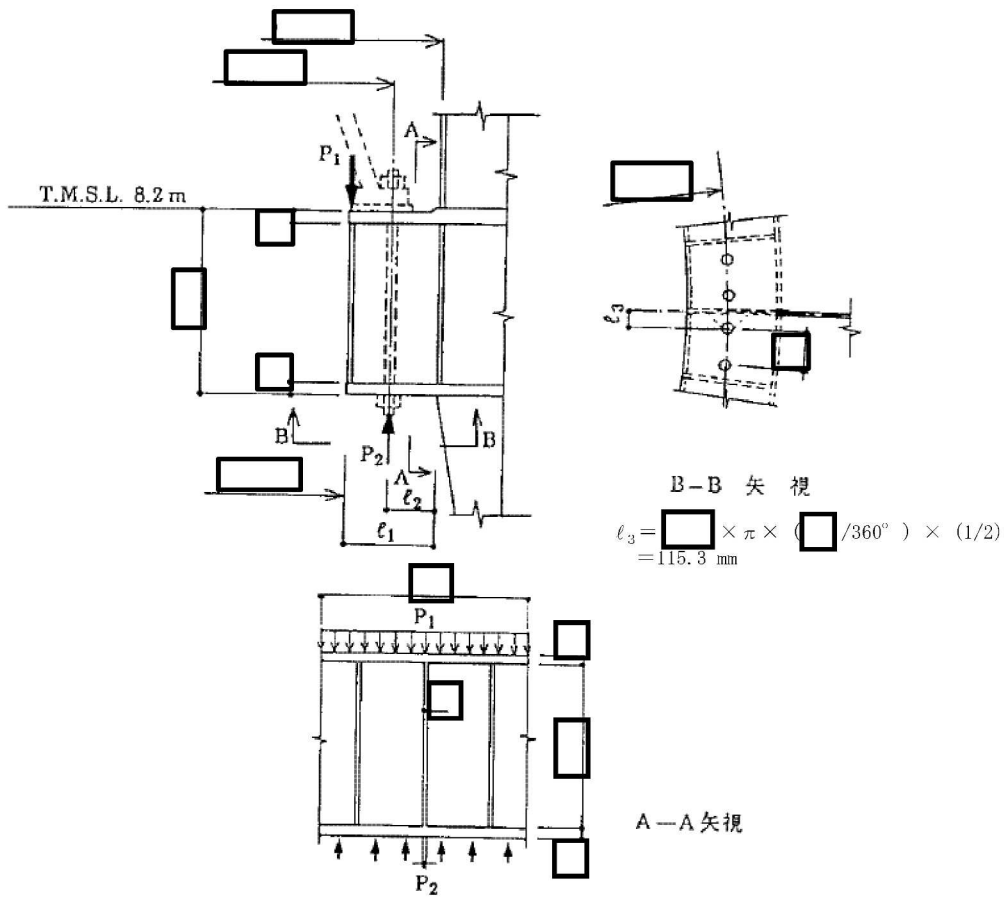
ベアリングプレートの曲げ応力度 σ_b は、

$$\sigma_b = M/Z = \boxed{} = 291.6 \text{ N/mm}^2$$

となり、ベアリングプレートの短期許容曲げ応力度 $1.5 \cdot f_b = 1.5 \times F/1.3 = \boxed{} \text{ N/mm}^2$ 以下となる。

3. ブラケット部

ブラケット部の詳細を図4に示す。ブラケット部に作用する荷重は、原子炉压力容器ベースプレート上の最大圧縮力作用時の荷重及び原子炉压力容器基礎ボルトの最大引張力作用時の荷重から算出する。



$P_1 : 3.595 \times 10^3 \text{ N/mm}$ (最大圧縮力作用時)

$P_2 : 5.850 \times 10^5 \text{ N/本}$ (最大引張力作用時)

図4 ブラケット部詳細図

最大圧縮力作用時に生じる応力は、 \square 当たり以下となる。

せん断力 $Q_1 = P_1 \times \left(\frac{\square}{2} \right) \times \pi \times \frac{\square}{360}$

$$= 3.595 \times 10^3 \times \left(\frac{\square}{2} \right) \times \pi \times \frac{\square}{360}$$

$$= \square \text{ N}$$

曲げモーメント $M_1 = Q_1 \times l_1 = \square \text{ N} \cdot \text{mm}$

曲げ応力度 $\sigma_{b1} = M_1 / Z = \square \text{ N/mm}^2$

せん断応力度 $\tau_1 = Q_1 / A_e = \square \text{ N/mm}^2$

最大引張力作用時に生じる応力は、 当たり以下となる。

$$\begin{aligned} \text{せん断力} \quad Q_2 &= P_2 \times 6 = \text{} \text{ N} \\ \text{曲げモーメント} \quad M_2 &= Q_2 \times l_2 = \text{} \text{ N} \cdot \text{mm} \\ \text{曲げ応力度} \quad \sigma_{b2} &= M_2 / Z = \text{} \text{ N/mm}^2 \\ \text{せん断応力度} \quad \tau_2 &= Q_2 / A_e = \text{} \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

ここで、

Z : 断面係数

A_e : 有効せん断断面積

また、最大引張力作用時に下面の水平プレートに局部的に生じる応力は以下となる。

$$\begin{aligned} \text{曲げモーメント} \quad M_3 &= P_2 \times l_3 = \text{} \text{ N} \cdot \text{mm} \\ \text{曲げ応力度} \quad \sigma_{b3} &= M_3 / Z = \text{} = 271.6 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

ここで、

l_3 : リブから基礎ボルトまでの距離

Z : 水平プレートの断面係数

以上より、ブラケット部の鋼材に生じる応力度は、

$$\text{短期許容曲げ応力度} \quad 1.5 \cdot f_b = 1.5 \times F / 1.5 = \text{} \text{ N/mm}^2,$$

$$\text{短期許容せん断応力度} \quad 1.5 \cdot f_s = 1.5 \times F / (1.5 \times \sqrt{3}) = \text{} \text{ N/mm}^2 \text{ 以下である。}$$

4. 添付資料

添付資料-1 評価結果一覧

【アンカボルト】

添付表 1-1 アンカボルトの最大引張応力度

荷重の組合せ	最大引張応力度 (軸断面) σ_t (N/mm ²)	最大引張応力度 (有効断面) σ_{ta} (N/mm ²)	短期許容引張応力度 $1.5 \cdot f_t$ (N/mm ²)
D + P + M + S _d *			
D + P _L + M _L + S _d *			
D + P + M + S _s			
D + P _{SA} + M _{SA}			
D + P _{SAL} + M _{SAL} + S _d			
D + P _{SALL} + M _{SALL} + S _s			

添付表 1-2 アンカボルトの定着

荷重の組合せ	外筒の引張応力度 (軸断面) σ_{to} (N/mm ²)	内筒の引張応力度 (軸断面) σ_{ti} (N/mm ²)	引抜き力 F (N/4.5°)	短期許容せん断力 Q _{pa} (N/4.5°)
D + P + M + S _d *			2.256 × 10 ⁶	
D + P _L + M _L + S _d *			1.984 × 10 ⁶	
D + P + M + S _s			3.625 × 10 ⁶	
D + P _{SA} + M _{SA}			1.254 × 10 ⁵	
D + P _{SAL} + M _{SAL} + S _d			1.187 × 10 ⁶	
D + P _{SALL} + M _{SALL} + S _s			3.477 × 10 ⁶	

【ベアリングプレート】

添付表 2 ベアリングプレートの曲げ応力度

荷重の組合せ	ベアリングプレート に生じる 最大引張応力度 w_t (N/mm ²)	ベアリングプレート に生じる 最大圧縮応力度 w_c (N/mm ²)	曲げモーメント (単位幅 1mm 当たり) M (N・mm/mm)	曲げ応力度 σ_b (N/mm ²)	短期許容曲げ応力度 $1.5 \cdot f_b$ (N/mm ²)
D + P + M + S d *	5.0			291.6	
D + P _L + M _L + S d *	4.4			296.7	
D + P + M + S s	8.0			379.3	
D + P _{SA} + M _{SA}	2.8			283.8	
D + P _{SAL} + M _{SAL} + S d	2.7			296.7	
D + P _{SALL} + M _{SALL} + S s	7.7			394.8	

【ブラケット部】

添付表 3-1 最大圧縮力作用時のブラケット部の曲げ応力度及びせん断応力度

荷重の組合せ	最大圧縮力 作用時 P_1 (N/mm)	せん断力 Q_1 (N)	曲げ モーメント M_1 (N・mm)	曲げ応力度 σ_{b1} (N/mm ²)	せん断応力度 τ_1 (N/mm ²)	短期許容 曲げ応力度 $1.5 \cdot f_b$ (N/mm ²)	短期許容 せん断応力度 $1.5 \cdot f_s$ (N/mm ²)
D + P + M + S d *	3.595×10^6			28.7	62.3		
D + P _L + M _L + S d *	3.595×10^6			28.7	62.3		
D + P + M + S s	4.301×10^6			34.3	74.5		
D + P _{SA} + M _{SA}	—			—	—		
D + P _{SAL} + M _{SAL} + S d	3.595×10^6			28.7	62.3		
D + P _{SALL} + M _{SALL} + S s	4.301×10^6			34.3	74.5		

添付表 3-2 最大引張力作用時のブラケット部の曲げ応力度及びせん断応力度

荷重の組合せ	最大引張力 作用時 P_2 (N/本)	せん断力 Q_2 (N)	曲げ モーメント M_2 (N・mm)	曲げ応力度 σ_{b2} (N/mm ²)	せん断応力度 τ_2 (N/mm ²)	短期許容 曲げ応力度 $1.5 \cdot f_b$ (N/mm ²)	短期許容 せん断応力度 $1.5 \cdot f_s$ (N/mm ²)
D + P + M + S d *	5.850×10^5			10.6	43.8		
D + P _L + M _L + S d *	5.850×10^5			10.6	43.8		
D + P + M + S s	7.290×10^5			13.2	54.6		
D + P _{SA} + M _{SA}	—			—	—		
D + P _{SAL} + M _{SAL} + S d	5.850×10^5			10.6	43.8		
D + P _{SALL} + M _{SALL} + S s	7.290×10^5			13.2	54.6		

添付表 3-3 最大引張力作用時の下面の水平プレートに局部的に生じる曲げ応力度

荷重の組合せ	最大引張力 作用時 P_2 (N/本)	曲げモーメント M_3 (N・mm)	曲げ応力度 σ_{b3} (N/mm ²)	短期許容 曲げ応力度 $1.5 \cdot f_b$ (N/mm ²)
D + P + M + S _d *	5.850×10^5		271.6	
D + P _L + M _L + S _d *	5.850×10^5		271.6	
D + P + M + S _s	7.290×10^5		338.4	
D + P _{SA} + M _{SA}	—		—	
D + P _{SAL} + M _{SAL} + S _d	5.850×10^5		271.6	
D + P _{SALL} + M _{SALL} + S _s	7.290×10^5		338.4	