

本資料のうち、枠囲みの内容は、  
営業秘密又は防護上の観点から  
公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	工認-988 改2
提出年月日	平成30年9月13日

V-3-9-1-1-5 原子炉格納容器胴アンカー一部強度計算書

## 目次

1. 概要.....	1
2. 一般事項.....	1
2.1 構造計画.....	1
2.2 評価方針.....	3
2.3 適用基準.....	3
2.4 記号の説明.....	4
2.5 計算精度と数値の丸め方.....	6
3. 評価部位.....	7
4. 強度評価.....	8
4.1 強度評価方法.....	8
4.2 荷重の組合せ及び許容限界.....	8
4.3 計算方法.....	12
5. 評価結果.....	19
5.1 重大事故等対処設備としての評価結果.....	19

## 1. 概要

本計算書は、原子炉圧力容器胴アンカー部の強度計算書である。

原子炉圧力容器は、設計基準対象施設の原子炉圧力容器を重大事故等クラス2容器として兼用する機器である。

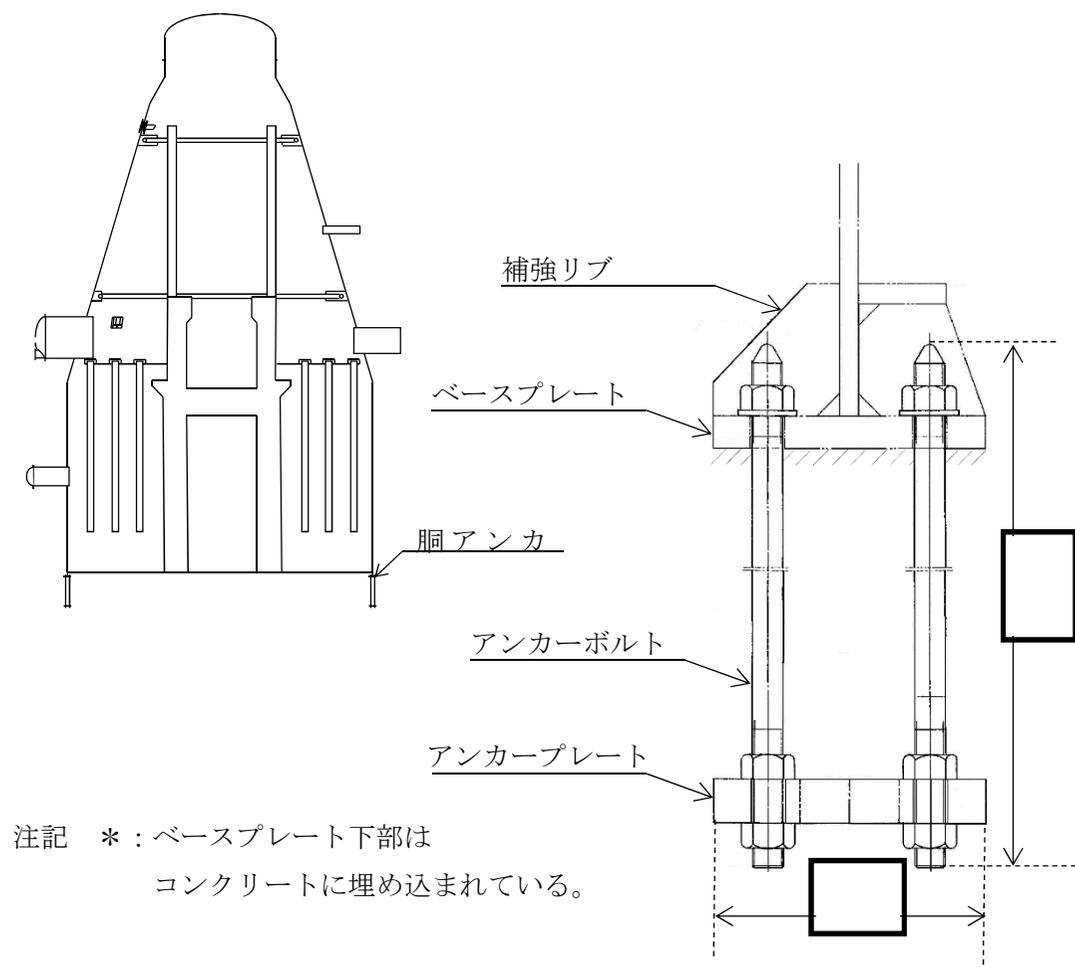
以下、重大事故等クラス2容器として添付書類「V-3-1-6 重大事故等クラス2機器及び重大事故等クラス2支持構造物の強度計算の基本方針」にて設定している構造強度の設計方針に基づき原子炉圧力容器胴アンカー部の強度評価について記載する。

## 2. 一般事項

### 2.1 構造計画

胴アンカー部の構造計画を表2-1に示す。

表 2-1 構造計画

計画の概要		概略構造図
<p>基礎・支持構造</p>	<p>主体構造</p>	 <p>注記 * : ベースプレート下部は コンクリートに埋め込まれている。</p> <p>胴アンカー部拡大図 (単位 : mm)</p>
<p>炉心を中心に直径約 <span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;"> </span> m の円筒形の基礎で, 原子炉格納容器底部コンクリートマットと一体となっている。</p>	<p>胴アンカー部は, 原子炉格納容器底部コンクリートマットにアンカーボルトで一体化され, 鉛直方向地震荷重は, このアンカーボルトを介して原子炉格納容器底部コンクリートマットに伝達させる。</p>	

## 2.2 評価方針

胴アンカー部の応力評価は、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針 3.1 構造強度上の制限」にて設定した荷重及び荷重の組み合わせ並びに許容限界に基づき、「2.1 構造計画」にて示す胴アンカー部の部位を踏まえた「3. 評価部位」にて設定する箇所において、供用状態Eにおける温度、圧力の条件による応力等が許容限界に収まることを、「4. 強度評価」にて示す方法にて確認することで実施する。評価結果を「5. 評価結果」に示す。

胴アンカー部の耐震評価フローを図2-1に示す。

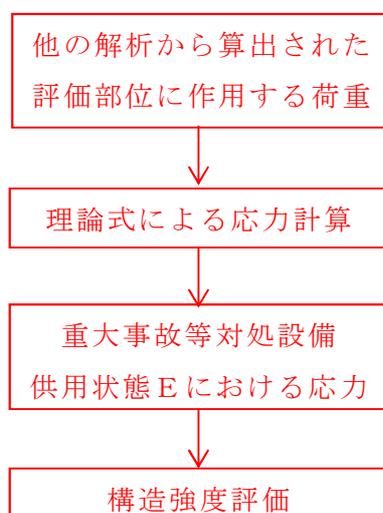


図2-1 胴アンカー部の強度評価フロー

## 2.3 適用基準

適用基準を以下に示す。

- (1) 発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2005年版（2007年追補版含む。)) J S M E S N C 1-2005/2007（日本機械学会）（以下「設計・建設規格」という。）

## 2.4 記号の説明

記号	記号の説明	単位
a	ベースプレートの曲げ応力算出に用いる平板の固定された辺の長さ	mm
$A_1$	等価円筒の面積	mm <sup>2</sup>
$A_2$	補強リブ及びサプレッション・チェンバ本体の溶接部の断面積	mm <sup>2</sup>
$A_3$	補強リブ及びサプレッション・チェンバ本体の断面積	mm <sup>2</sup>
$A_{B1}$	ボルトの最大直径有効断面積	mm <sup>2</sup>
$A_{B2}$	ボルトの谷径有効断面積	mm <sup>2</sup>
$A_p$	アンカープレートと接するコンクリートの面積	mm <sup>2</sup>
b	ベースプレートの曲げ応力算出に用いる平板の支持された辺の長さ	mm
b'	サプレッション・チェンバ本体の厚さ	mm
b''	補強リブの厚さ	mm
$C_t$	e > r の場合のアンカーボルトの引張り応力を求めるための係数	—
$C_c$	e > r の場合のコンクリートの圧縮応力を求めるための係数	—
d	円周上 2 列のボルトサークルの平均径	mm
$d_{B1}$	アンカーボルトの最大直径	mm
$d_{B2}$	アンカーボルトの谷径	mm
$d_p$	アンカープレートの穴部の径	mm
$D_{B1}$	胴アンカー直径（外側ボルトの中心間）（図 3-1 参照）	mm
$D_{B2}$	胴アンカー直径（内側ボルトの中心間）（図 3-1 参照）	mm
e	アンカーボルトに垂直荷重及びモーメントを受ける場合、断面に働く外力の合力の作用点が断面の中心から偏心する距離	mm
E	ボルトの縦弾性係数	MPa
$E_c$	コンクリートの縦弾性係数	MPa
F	せん断力	N
j	$W_t$ と $W_c$ の作用点間の距離と d との比	—
$l_{Bi}$	ボルト各部の寸法 (i=1, 2, 3) (図 3-1 参照)	mm
$l_{BPO}$	外側ボルト間の距離 (図 3-1 参照)	mm
$l_{BPI}$	内側ボルト間の距離 (図 3-1 参照)	mm
$l_i$	胴アンカー各部の寸法 (i=1, 2, 3...) (図 3-1 参照)	mm
$l_R$	補強リブ間の距離（円周方向）（図 3-1 参照）	MPa
M	アンカープレートの発生するモーメント	N・mm
$M_o$	アンカーボルトに作用するモーメント	N・mm
n	$E_s/E_c$	—
$n_R$	補強リブの数	—
$n_{WC}$	最大圧縮応力	MPa
$N_b$	アンカーボルトの本数	本
P	$t_1/t_2$	—
q	ベースプレートの曲げ応力算出に用いる等価分布荷重	N
r	円周上 2 列のボルトサークルの平均径の 1/2 (d/2)	mm

記号	記号の説明	単位
$t$	ベースプレートの曲げ応力算出に用いる平板の厚さ	mm
$t_1$	アンカーボルトの等価円筒の板厚	mm
$t_2$	圧縮側のコンクリートの板厚	mm
$w_c$	ベースプレートと接するコンクリートの圧縮応力	$N/mm^2$
$W_c$	圧縮側で受ける全圧縮力	N
$w_t$	最大引張応力	MPa
$W_t$	引張側で受ける全引張力	N
$W_v$	アンカーボルトに作用する垂直荷重	N
$Z_1$	等価円筒の断面二次モーメント	$mm^2$
$Z_2$	スカートを中心線と中立軸の間の距離を $Z_d$ とする係数	—
$Z_d$	$e > r$ の場合のスカートの中心線と中立軸の間の距離	mm
$Z_{D-D}$	アンカープレートの断面二次モーメント	$mm^2$
$\alpha$	$e > r$ の場合の等価円筒での引張りと圧縮力が釣合う位置での円周における角度	rad
$\beta$	R. J. ROARK "FORMULAS FOR STRESS AND STRAIN" 4TH EDITION の 227 ページ TABLE45 に示される 1 辺固定, 1 辺自由, 2 辺支持の平板に等分布荷重が加わるものと仮定して計算した値	—
$\delta_B$	アンカーボルトの伸び量	mm
$\sigma$	補強リブ及びサプレッション・チェンバ本体の溶接部の合成応力	MPa
$\sigma_{b1}$	アンカープレートの曲げ応力	MPa
$\sigma_{b2}$	ベースプレートの曲げ応力	MPa
$\sigma_c$	補強リブ及びサプレッション・チェンバ本体の圧縮応力	MPa
$\sigma_{cc}$	アンカープレートと接するコンクリートの圧縮応力	$N/mm^2$
$\sigma_t$	サプレッション・チェンバ本体及び補強リブの溶接部の引張応力	MPa
$\tau$	サプレッション・チェンバ本体及び補強リブの溶接部のせん断応力	MPa
$\tau_c$	アンカープレートによるコンクリートのせん断力	$N/mm^2$

## 2.5 計算精度と数値の丸め方

精度は6桁以上を確保する。表示する数値の丸め方は表2-2に示すとおりとする。

表2-2 表示する数値の丸め方

数値の種類	単位	処理桁	処理方法	表示桁
温度*1	℃	—	—	整数位
長さ*1	mm	—	—	整数位
面積	mm <sup>2</sup>	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁*2
モーメント	N・mm	有効数字4桁目	四捨五入	有効数字3桁*2
力	N	有効数字4桁目	四捨五入	有効数字3桁*2
胴アンカー 算出応力	MPa	小数点以下第1位	切上げ	整数位
コンクリート 算出応力	N/mm <sup>2</sup>	小数点以下第2位	切上げ	小数点以下第1位
胴アンカー 許容応力*3	MPa	小数点以下第1位	切捨て	整数位
コンクリート 許容応力*3	N/mm <sup>2</sup>	小数点以下第2位	切捨て	小数点以下第1位

注記 \*1：設計上定める値が小数点以下の場合は，小数点以下表示とする。

\*2：絶対値が1000以上のときは，べき数表示とする。

\*3：設計・建設規格 付録材料図表に記載された温度の中間における引張強さ及び降伏点は比例法により補間した値の小数点以下第1位を切り捨て，整数位までの値とする。

### 3. 評価部位

胴アンカー部の形状及び主要寸法を図 3-1 に、使用材料及び使用部位を表 3-1 に示す。

NT2 補③ V-3-9-1-1-5 R0

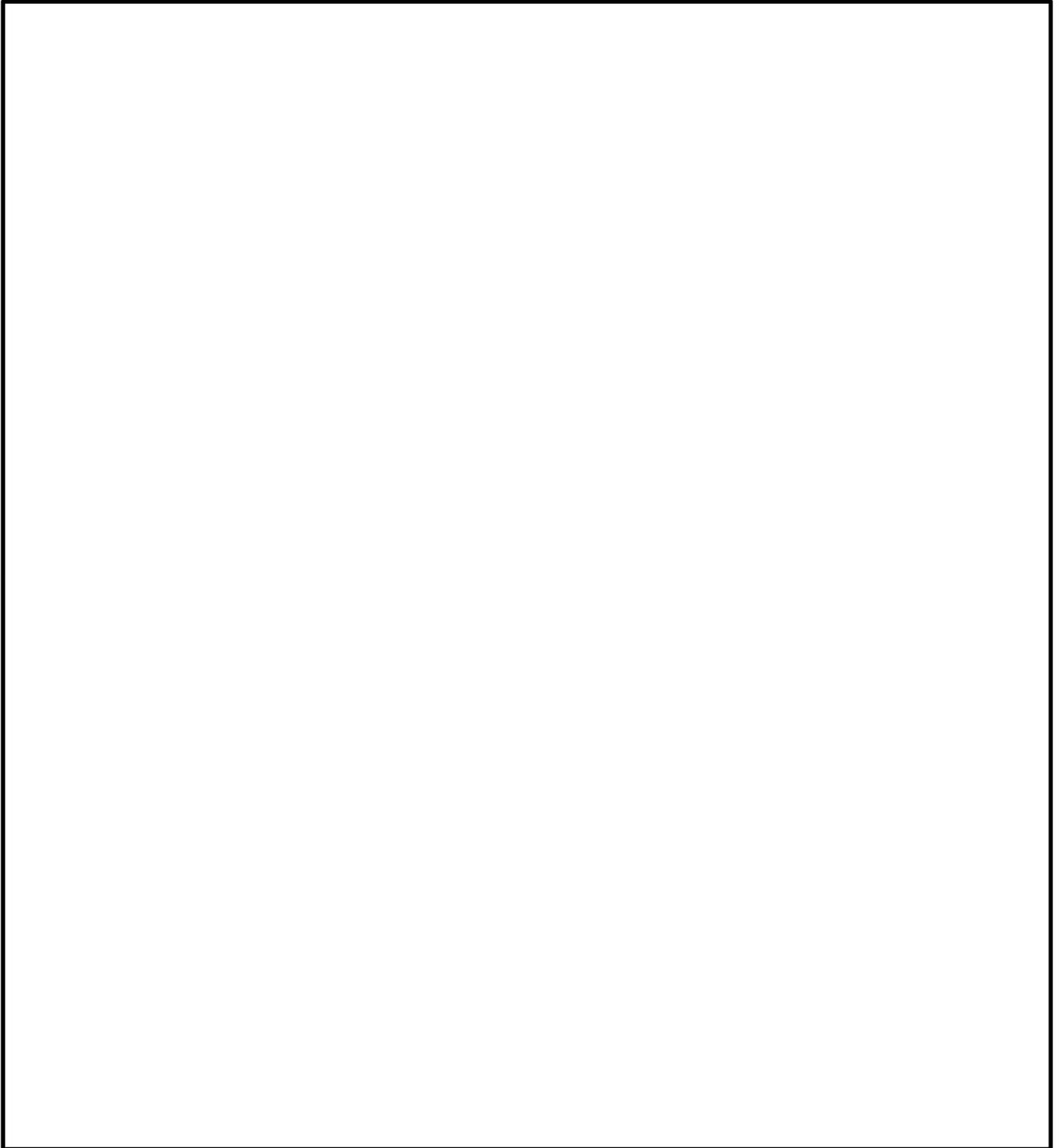


図 3-1 胴アンカー部の形状及び主要寸法（単位：mm）

表 3-1 使用材料表

使用部位	使用材料		備考
アンカーボルト	GBL(5種)相当		GBL1～GBL5*
ベースプレート	SGV49 相当		SGV480*
補強リブ	SGV49 相当		SGV480*
アンカープレート	SGV49 相当		SGV480*

注記 \*：新 JIS を示す。

#### 4. 強度評価

##### 4.1 強度評価方法

- (1) 胴アンカー部は、原子炉格納容器底部コンクリートマットにアンカーボルトで一体化され、鉛直方向荷重は、このアンカーボルトを介して原子炉格納容器底部コンクリートマットに伝達させる。自重、水荷重、活荷重を用いて、強度評価を行う。
- (2) 構造評価に用いる寸法は、公称値を使用する。
- (3) 概略構造図を表 2-1 に示す。

##### 4.2 荷重の組合せ及び許容限界

###### 4.2.1 荷重の組合せ及び供用状態

胴アンカーの荷重の組合せ及び供用状態のうち、重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4-1 に示す。荷重の組合せは、添付書類「V-1-8-1 原子炉格納施設の設計条件に関する説明書」に従い、対象機器の設置位置等を考慮し決定する。

###### 4.2.2 許容限界

胴アンカーの許容限界を表 4-2 に示す。

###### 4.2.3 使用材料の許容応力評価条件及び許容応力

胴アンカーの許容応力評価条件のうち、重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4-3 及び表 4-4 に示す。また、使用材料の許容応力を表 4-5 から表 4-6 に示す。

表4-1 荷重の組合せ及び供用状態（重大事故等対処設備）

施設区分		機器名称	機器等の区分	荷重の組合せ	供用状態
原子炉格納施設	原子炉格納容器	胴アンカー一部	重大事故等 クラス2 支持構造物	$D + P_{SA} + M_{SA}$	E

D : 死荷重

$P_{SA}$  : 重大事故等時の状態（運転状態V）で作用する圧力荷重

$M_{SA}$  : 重大事故等時の状態（運転状態V）で作用する機械的荷重

E : Eとして供用状態Dの許容限界を準用する。

表4-2 許容限界（クラスMC支持構造物及び重大事故等クラス2支持構造物）

供用状態	許容限界*1, *2, *3 (ボルト等以外)					許容限界*2 (ボルト等)		
	一次応力					一次応力		
	引張	せん断	圧縮	曲げ	支圧	引張 圧縮	引張	せん断
E	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_s^*$	$1.5 \cdot f_c^*$	$1.5 \cdot f_b^*$	$1.5 \cdot f_p^*$	$3 \cdot f_t$	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_s^*$

注記 \*1:「鋼構造設計規準 SI単位版」(2002年日本建築学会)等の幅厚比の制限を満足させる。

\*2: 応力の組合せが考えられる場合には, 組合せ応力に対しても評価を行う。

\*3: 耐圧部に溶接等により直接取り付けられる支持構造物であって耐圧部と一体の応力解析を行うものについては, 耐圧部と同じ許容応力とする。

表4-3 使用材料（アンカーボルト）の許容応力評価条件（重大事故等対処設備）

評価部材	材料	温度条件 (°C)		S (MPa)	S <sub>y</sub> (MPa)	S <sub>u</sub> (MPa)	S <sub>y</sub> (R T) (MPa)
		周囲環境 温度					
アンカーボルト	GBL1~GBL5	周囲環境 温度	150	—	659	862	—
		周囲環境 温度	171	—	648	862	—

表4-4 使用材料（ベースプレート，補強リブ，アンカープレート）の許容応力評価条件（重大事故等対処設備）

評価部材	材料	温度条件 (°C)		S (MPa)	S <sub>y</sub> (MPa)	S <sub>u</sub> (MPa)	S <sub>y</sub> (R T) (MPa)
		周囲環境 温度					
ベースプレート 補強リブ アンカープレート	SGV480	周囲環境 温度	150	—	232	424	—
		周囲環境 温度	171	—	229	423	—

表4-5 原子炉格納容器胴アンカー部の許容応力（重大事故等対処設備）

（単位：MPa）

材料	温度 (°C)	供用状態	基準 応力 F	許容応力（一次応力）				
				引張り $f_t$	曲げ $f_b$	せん断 $f_s$	圧縮 $f_c$	組合せ $f_t$
SGV480	200	E	271	271	312	—	—	271
GBL1～GBL5	200	E	603	452	—	—	—	—

表 4-6 コンクリートの許容応力（重大事故等対処設備）

（単位：N/mm<sup>2</sup>）

材料	供用状態	基準強度 $F_c$	圧縮応力 $f_c$	せん断応力 $f_s$
コンクリート	E	22.0	18.7	1.0

#### 4.2.4 設計荷重

(1) 重大事故等対処設備としての評価圧力及び評価温度

内圧  $P_{SA}$  620 kPa

温度  $T_{SA}$  200 °C

(2) 自重（胴部）  $1.18 \times 10^7$  N

(3) 水荷重

サプレッション・チェンバ内保有水のうち、リングガーダ上にある水の重量は、原子炉格納容器側に加わるものと仮定する。

重大事故時  $7.11 \times 10^7$  N

(4) 活荷重

重大事故時  $4.27 \times 10^6$  N

### 4.3 計算方法

#### 4.3.1 応力評価点

胴アンカーの応力評価点は、胴アンカーを構成する部材の形状及び荷重伝達経路を考慮し、発生応力が大きくなる部位を選定する。選定した応力評価点を表 4-7 及び図 4-1 に示す。

表 4-7 応力評価点

応力評価点番号	応力評価点
P 1	アンカーボルト
P 2	コンクリート
P 3	アンカープレート
P 4	補強リブ
P 5	ベースプレート

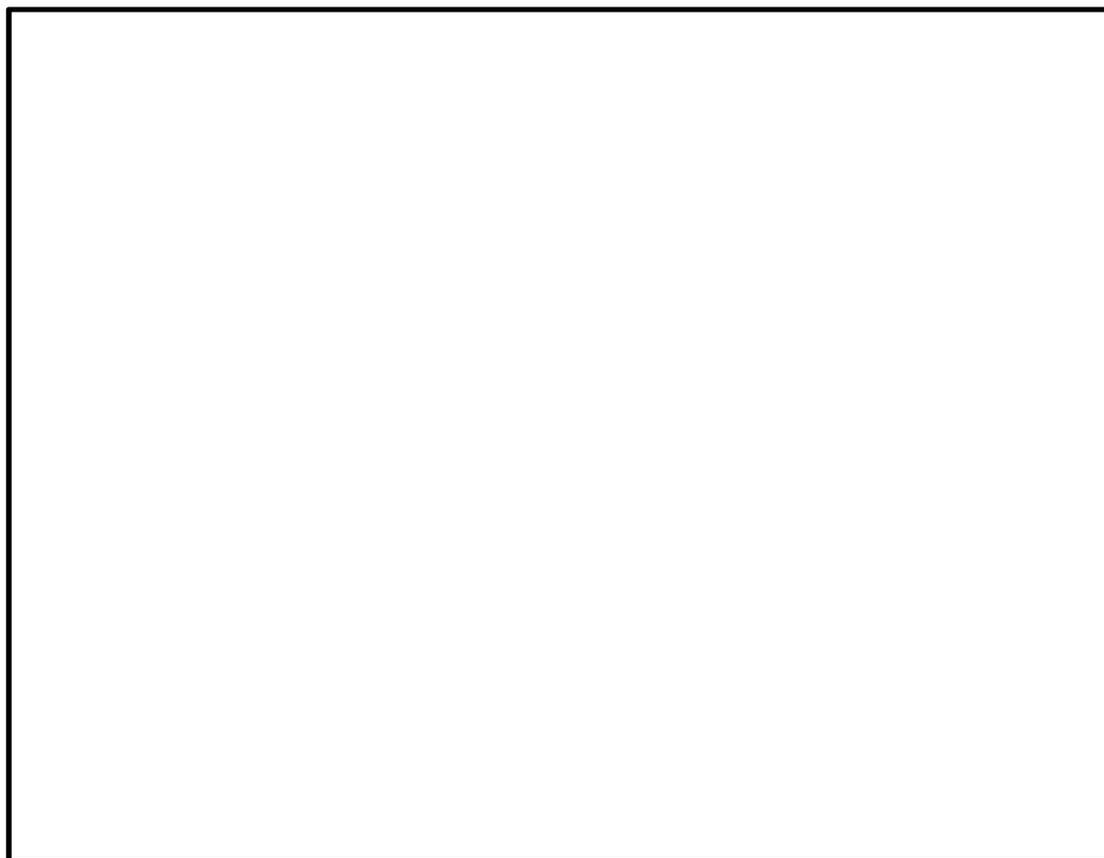


図 4-1 応力評価点

### 4.3.2 応力計算方法

#### 4.3.2.1 アンカーボルト及びコンクリート（応力評価点 P 1 及び P 2）

アンカーボルトに加わる軸力を表 4-8 に示す。

表 4-8 アンカーボルトの荷重（重大事故等対処設備）

荷重の組合せ	荷重	軸力* (N)
D + P <sub>SA</sub> + M <sub>SA</sub>		-2.37 × 10 <sup>8</sup>

注記 \* : 下方向を正とする。

#### (2) アンカーボルト及びコンクリートの応力

アンカーボルトの応力は次に示す仮定にもとづいて計算する。

- ① アンカーボルトの等価円筒及び荷重分布は図 4-2 に示す円周上 2 列のボルトサークルの平均径とする。また、そのボルトサークル上にボルトの全本数がある。
- ② 応力は最大引張応力 ( $w_t$ ) から最大圧縮応力 ( $n w_c$ ) まで直線的に変化する。
- ③ アンカーボルトに加わる荷重は平均径のサークル上のボルトの全断面積に等しい厚さの等価円筒に加わるものとする。

アンカーボルトに垂直荷重及びモーメントを受ける場合、断面に働く外力の合力の作用点が断面の中心から偏心する距離  $e$  は次式によって得られる。

$$e = \frac{M_b}{W_v}$$

- a. アンカーボルトの等価円筒の板厚

$$t_1 = \frac{N_b \times \frac{\pi}{4} \times d_{B2}^2}{\pi \times \frac{D_{B1} + D_{B2}}{2}} = 9.51 \text{ mm}$$

- b. 圧縮側のコンクリートの板厚

$$t_2 = \ell_{11} = 500 \text{ mm}$$

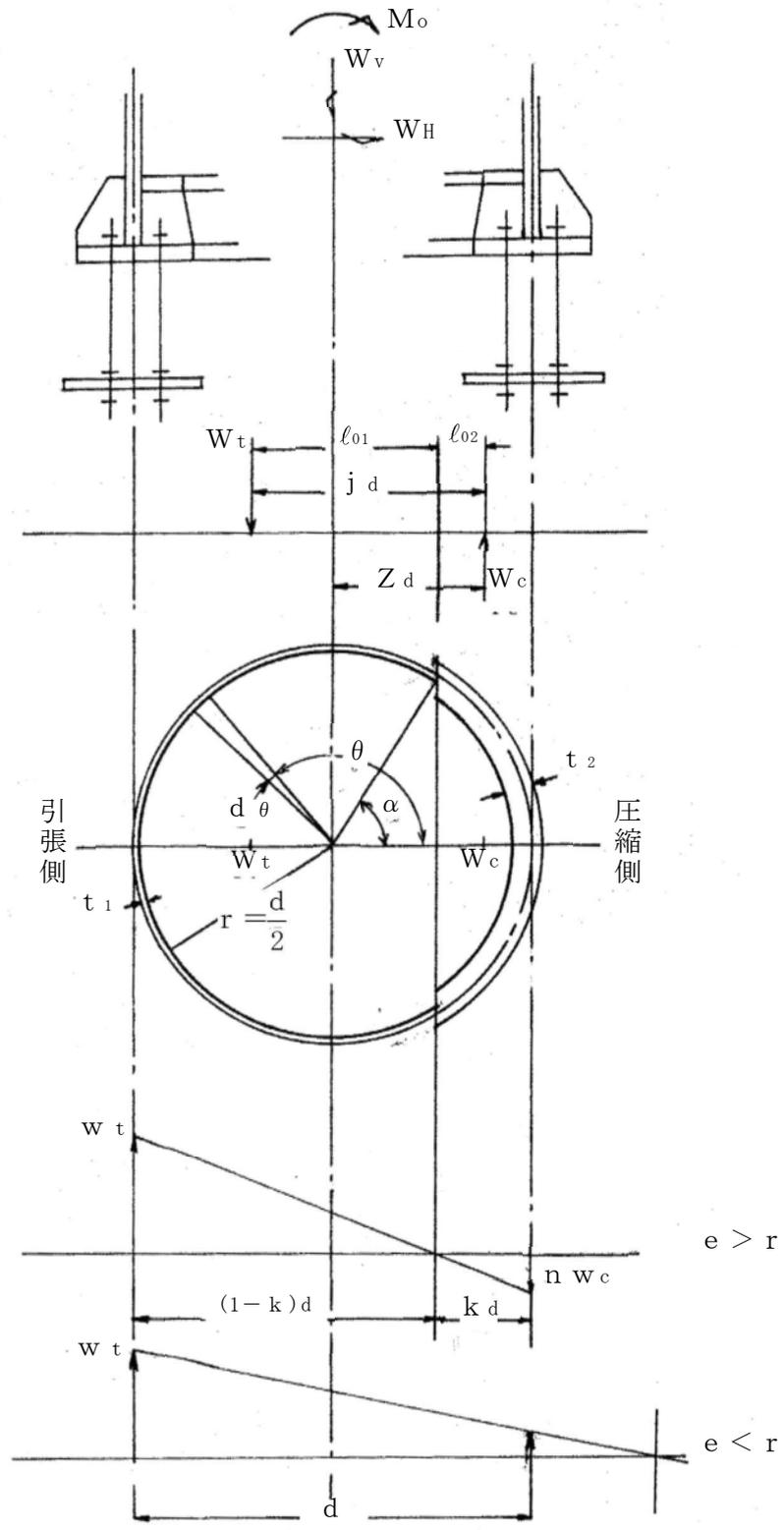


図 4-2 アンカーボルトの等価円筒及び荷重分布

c.  $e < r$  の場合（全面引張）

アンカーボルトの引張応力の最大値は次式により得られる。

$$w_t = \frac{W_v}{A_1} + \frac{M_o}{Z_1}$$

ここで、

$$A_1 = \pi \cdot d \cdot t_1$$

$$Z = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(d + t_1)^4 - (d - t_1)^4}{d + t_1}$$

d.  $e > r$  の場合

(a) 引張側で受ける全引張力

$$W_t = \frac{M_o - W_v \cdot Z_2 \cdot d}{j \cdot d}$$

ここで、

$j$  :  $W_t$  と  $W_c$  の作用点間の距離と  $d$  との比

$$= \frac{1}{2} \cdot \left\{ \frac{(\pi - \alpha) \cdot \cos^2 \alpha + \frac{3}{2} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha + \frac{1}{2} \cdot (\pi - \alpha)}{(\pi - \alpha) \cdot \cos \alpha + \sin \alpha} \right\} + \frac{1}{2} \cdot \left\{ \frac{\alpha \cos^2 \alpha - \frac{3}{2} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha + \frac{1}{2} \cdot \alpha}{\sin \alpha - \alpha \cos \alpha} \right\}$$

$Z_2$  : スカートの中心線と中立軸の間の距離を  $Z_d$  とする係数

$$= \frac{1}{2} \cdot \left\{ \cos \alpha + \frac{\alpha \cos^2 \alpha - \frac{3}{2} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha + \frac{1}{2} \cdot \alpha}{\sin \alpha - \alpha \cos \alpha} \right\}$$

$\alpha$  : 以下の式から求める。

$$e/r = \frac{(1 - P - n \cdot P) \cdot (\alpha - \sin \alpha \cdot \cos \alpha) + \pi \cdot n \cdot P}{2 \cdot \{(1 - P - n \cdot P) \cdot (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha) - \pi \cdot n \cdot P \cdot \cos \alpha\}}$$

ここで、

$$P = \frac{t_1}{t_2}$$

$$n = \frac{E}{E_c} = 10$$

(b) 圧縮側で受ける全圧縮力

$$W_c = W_t + W_v$$

(c) アンカーボルトの引張応力

$$w_t = \frac{W_t}{t_1 \cdot r \cdot C_t}$$

ここで、

$$C_t = \frac{2}{1 + \cos \alpha} \cdot \{(\pi - \alpha) \cos \alpha + \sin \alpha\}$$

(d) コンクリートの圧縮応力

$$w_c = \frac{W_c}{t_2 \cdot r \cdot C_c}$$

ここで、

$$C_c = \frac{2 \cdot (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha)}{1 - \cos \alpha}$$

(3) アンカーボルトの伸び量

$$\delta_B = \frac{W_t}{E} \cdot \left\{ \frac{A_{B1}}{A_{B2}} \cdot (\ell_{B2} + \ell_{B3}) + \ell_{B1} \right\}$$

ここで、

$$A_{B1} : \text{ボルトの最大直径有効断面積} = \pi / 4 \cdot d_{B1}^2 = 1963 \text{ mm}^2$$

$$A_{B2} : \text{ボルトの谷径有効断面積} = \pi / 4 \cdot d_{B2}^2 = 1424 \text{ mm}^2$$

$$E : \text{ボルトの縦弾性係数} = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$$

4.3.2.2 アンカープレート（応力評価点P3）

(1) アンカープレートと接するコンクリートの圧縮応力

$$\sigma_{cc} = \frac{2 \cdot w_t \cdot A_{B2}}{A_p}$$

ここで、

$$A_p : \text{アンカープレートと接するコンクリートの面積} \\ = \ell_{14} \cdot \ell_{15} - 2 \cdot \pi / 4 \cdot d_{B1}^2 = 1.211 \times 10^5 \text{ mm}^2$$

(2) アンカープレートの曲げ応力

$$\sigma_{b1} = \frac{M}{Z_{D-D}}$$

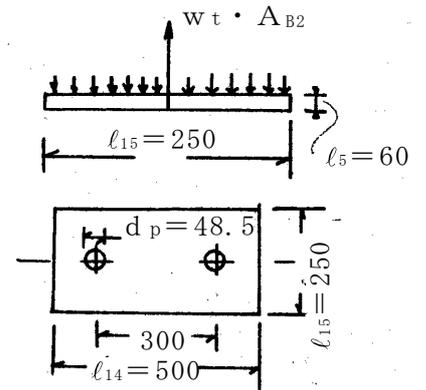
ここで、

$$M = \frac{\ell_{15}}{4} \cdot w_t \cdot A_{B2}$$

$$Z_{D-D} = \frac{1}{6} \cdot (\ell_{14} - 2 \cdot d_p) \cdot \ell_5^2 = 2.418 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

(3) アンカープレートによるコンクリートのせん断応力

$$\tau_c = \frac{2 \cdot w_t \cdot A_{B2}}{(\ell_{BPO} + \ell_{BPI}) \cdot \ell_4}$$



(単位 : mm)

4.3.2.3 補強リブ及びベースプレート（応力評価点 P 4 及び P 5）

(1) サプレッション・チェンバ本体及び補強リブの溶接部の応力

a. 引張応力

$$\sigma_t = \frac{w_t \cdot t_1 \cdot \ell_R}{A_2}$$

ここで、

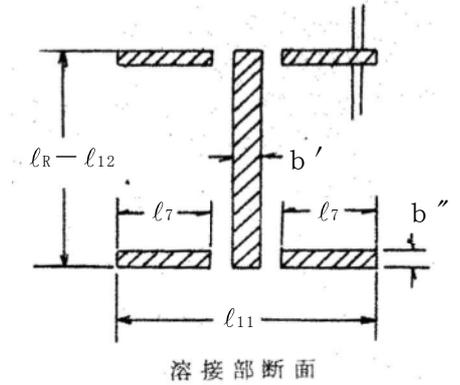
$$b' = \ell_6 = 38 \text{ mm}$$

$$b'' = \ell_{12} = 22 \text{ mm}$$

$$\ell_7 = 191 \text{ mm}$$

$A_2$  : 溶接部の断面積

$$= 2 \cdot b'' \cdot \ell_7 + b' \cdot (\ell_R - \ell_{12}) = 3.037 \times 10^4 \text{ mm}^2$$



(2) ベースプレートの曲げ応力

$$\sigma_{b2} = \frac{\beta \cdot b^2}{t^2} \cdot q$$

ここで、

$\beta$  : R. J. ROARK "FORMULAS FOR STRESS AND STRAIN" 4TH EDITION の 227 ページ TABLE45 に示される 1 辺固定, 1 辺自由, 2 辺支持の平板に等分布荷重が加わるものと仮定して計算した値

$$\beta = 2.304$$

$$a : \ell_R = 600.0 \text{ mm}$$

$$b : \ell_9 = \ell_{10} = 231 \text{ mm}$$

$$t : \ell_3 = 60 \text{ mm}$$

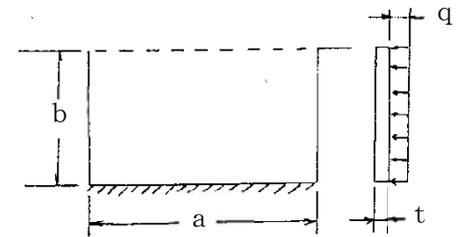
$$\frac{a}{b} = \frac{600.0}{231} = 2.597$$

q : 引張側

$$= \frac{w_t \cdot t_1 \cdot \ell_R}{2 \cdot a \cdot b}$$

q : 圧縮側

$$= \frac{w_c \cdot t_2 \cdot \ell_R}{2 \cdot a \cdot b}$$



## 5. 評価結果

### 5.1 重大事故等対処設備としての評価結果

胴アンカー部の重大事故等対処設備としての強度評価結果を以下に示す。発生値は許容値を満足していることを確認した。

#### (1) 供用状態Eに対する評価

供用状態Eに対する応力評価結果を表 5-1 に示す。

表 4-1 に示す荷重の組合せについて記載している。

表 5-1 供用状態 E に対する評価結果 (D + P<sub>SA</sub> + M<sub>SA</sub>)

評価対象設備	評価部位	応力分類	E		判定	備考
			発生値	許容値		
			MPa	MPa		
原子炉格納容器 胴アンカー部	アンカーボルト	引張応力	306	452	○	
	アンカープレート	曲げ応力	113	312	○	
	ベースプレート	曲げ応力 (引張側)	216	312	○	
		曲げ応力 (圧縮側)	—	—	—	
	補強リブ	引張応力	58	271	○	
		圧縮応力	—	—	—	
		せん断応力	—	—	—	
		組合せ応力	—	—	—	
	コンクリート	圧縮応力	7.2	18.7	○	単位 N/mm <sup>2</sup>
		せん断応力	0.6	1.0	○	単位 N/mm <sup>2</sup>