

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-工-B-02-0008_改4
提出年月日	2021年10月1日

## VI-2-3-4-1-1 原子炉圧力容器の応力解析の方針

## まえがき

本書は、原子炉圧力容器の耐震評価及び重大事故等時における強度評価に関する応力解析の方針を、以下の二つに示すものである。

(1)耐震評価編

(2)強度評価編

(1) 耐震評価編

## 目次

1.	概要	1
2.	一般事項	2
2.1	構造計画	2
2.2	評価方針	4
2.3	適用規格・基準等	4
2.4	記号の説明	5
2.5	計算精度と数値の丸め方	7
3.	計算条件	8
3.1	評価対象機器	8
3.2	形状及び寸法	9
3.3	物性値	9
3.4	荷重の組合せ及び許容応力状態	9
3.5	許容応力	9
3.6	許容応力評価条件	9
4.	荷重条件	10
4.1	設計条件	10
4.2	運転条件	10
4.3	重大事故等時の条件	10
4.4	荷重の組合せ及び応力評価	11
5.	応力評価の手順	12
5.1	計算に使用する解析コード	12
5.2	荷重条件の選定	12
5.3	応力の評価	12
5.3.1	主応力	12
5.3.2	応力強さ	12
5.3.3	一次応力強さ	12
5.3.4	一次＋二次応力強さ	13
5.4	繰返し荷重の評価	13
5.4.1	疲労解析不要の検討	13
5.4.2	疲労解析	13
5.5	特別な応力の評価	14
5.5.1	純せん断応力の評価	14
5.5.2	支圧応力の評価	14
5.5.3	座屈の評価	14

5.6	原子炉圧力容器基礎ボルトの評価	15
6.	評価結果の添付	16
6.1	応力評価結果	16
6.2	繰返し荷重の評価結果	17
7.	引用文献	18
8.	参照図書	18

## 図表目次

図 2-1	原子炉圧力容器の耐震評価フロー	4
図 3-1	全体断面図	19
図 4-1	運転状態 V における差圧	20
表 2-1	原子炉圧力容器の構造計画	3
表 2-2	表示する数値の丸め方	7
表 3-1	繰返し荷重の評価に使用する材料の物性値	21
表 3-2	荷重の組合せ及び許容応力状態	22
表 3-3	許容応力 (クラス 1 容器及び重大事故等クラス 2 容器)	24
表 3-4	許容応力 (クラス 1 支持構造物及び重大事故等クラス 2 支持構造物)	25
表 3-5	許容応力評価条件	26
表 4-1	外荷重	27
表 4-2	荷重の組合せ	39
表 5-1	繰返しピーク応力強さの割増し方法	40

## 1. 概要

本書は、添付書類「VI-2-1-9 機能維持の基本方針」にて設定している構造強度の設計方針に基づき、原子炉压力容器（原子炉压力容器支持スカート及び原子炉压力容器基礎ボルトを含む）の耐震評価に関する応力解析の方針を説明するものである。

設計用地震力を除く荷重による原子炉压力容器本体の応力評価は、平成4年1月13日付け3資庁第10518号にて認可された工事計画の添付書類（参照図書(1)）に、原子炉压力容器基礎ボルトの応力評価の手順は、平成元年6月8日付け元資庁第2015号にて認可された工事計画の添付書類（参照図書(2)）による。

注1：本書に記載していない特別な内容がある場合は、添付書類「VI-2-3-4-1-2 原子炉压力容器の耐震性についての計算書」（以下「耐震計算書」という。）に示す。

注2：図表は、原則として巻末に示す。

注3：平成4年1月13日付け3資庁第10518号にて認可された工事計画の添付書類（参照図書(1)）及び平成元年6月8日付け元資庁第2015号にて認可された工事計画の添付書類（参照図書(2)）は以下「既工認」という。

## 2. 一般事項

### 2.1 構造計画

原子炉圧力容器の構造計画を表2-1に示す。

原子炉圧力容器は、下記の機器により構成される。

- (1) 胴板
- (2) 上部鏡板，鏡板フランジ，胴板フランジ及びスタッドボルト
- (3) 下部鏡板
- (4) 制御棒駆動機構ハウジング貫通孔
- (5) 中性子束計測ハウジング貫通孔
- (6) 再循環水出口ノズル (N1)
- (7) 再循環水入口ノズル (N2)
- (8) 主蒸気出口ノズル (N3)
- (9) 給水ノズル (N4)
- (10) 低圧炉心スプレイノズル (N5)
- (11) 低圧注水ノズル (N6)
- (12) 上蓋スプレイノズル (N7)
- (13) ベントノズル (N8)
- (14) ジェットポンプ計測管貫通部ノズル (N9)
- (15) 差圧検出・ほう酸水注入ノズル (N11)
- (16) 計装ノズル (N12, N13, N14)
- (17) ドレンノズル (N15)
- (18) 高圧炉心スプレイノズル (N16)
- (19) ブラケット類
- (20) 原子炉圧力容器支持スカート
- (21) 原子炉圧力容器基礎ボルト



表2-1 原子炉圧力容器の構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
<p>原子炉圧力容器を原子炉圧力容器支持スカートが支持する。また、原子炉圧力容器支持スカートは原子炉圧力容器基礎ボルトにて原子炉本体基礎に固定される。</p>	<p>原子炉圧力容器は、胴板、上部鏡板、鏡板フランジ、胴板フランジ及びスタッドボルト、下部鏡板、制御棒駆動機構ハウジング貫通孔、中性子束計測ハウジング貫通孔、再循環水出口ノズル、再循環水入口ノズル、主蒸気出口ノズル、給水ノズル、低圧炉心スプレイノズル、低圧注水ノズル、上蓋スプレイノズル、ベントノズル、ジェットポンプ計測管貫通部ノズル、差圧検出・ほう酸水注入ノズル、計装ノズル、ドレンノズル、高圧炉心スプレイノズル、ブラケット類、原子炉圧力容器支持スカート、原子炉圧力容器基礎ボルトより構成される。</p>	

## 2.2 評価方針

原子炉圧力容器の構造強度評価は、添付書類「VI-2-1-9 機能維持の基本方針」及び「3. 計算条件」にて設定した荷重及び荷重の組合せ並びに許容応力に基づき、「2.1 構造計画」にて示す原子炉圧力容器の各機器の耐震計算書にて設定する箇所において、「4. 荷重条件」にて設定した荷重に基づく応力等が許容応力内に収まることを、「5. 応力評価の手順」に示す方法にて確認することで実施する。確認結果を耐震計算書に示す。

原子炉圧力容器の耐震評価フローを図2-1に示す。

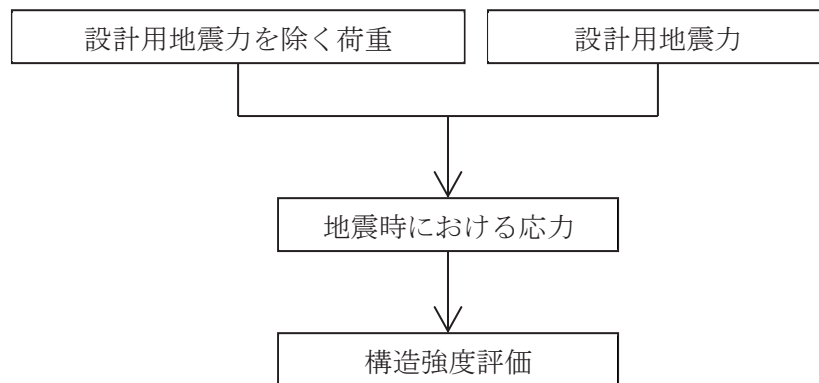


図2-1 原子炉圧力容器の耐震評価フロー

## 2.3 適用規格・基準等

適用する規格・基準等を以下に示す。

- (1) 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 (日本電気協会)
- (2) 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 (日本電気協会)
- (3) 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版 (日本電気協会) (以降「J E A G 4 6 0 1」と記載しているものは上記3 指針を指す。)
- (4) 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 2007年9月) (以下「設計・建設規格」という。)

注：本書及び耐震計算書において、設計・建設規格の条項は「設計・建設規格 ○○○-△△△△(◇)a. (a)」として示す。

## 2.4 記号の説明

本書及び耐震計算書において、以下の記号を使用する。ただし、本書及び耐震計算書中に別途記載ある場合は、この限りでない。

記号	記号の説明	単位
$A_0$	簡易弾塑性解析に使用する係数	—
$a$	簡易弾塑性解析に使用する係数	—
$B_0$	簡易弾塑性解析に使用する係数	—
$E$	縦弾性係数	MPa
$E_0$	設計疲労線図に使用されている縦弾性係数	MPa
$f_{t0}$	引張力のみを受ける基礎ボルトの許容引張応力	MPa
$f_{sb}$	せん断力のみを受ける基礎ボルトの許容せん断応力	MPa
$f_{st}$	基礎ボルトの許容組合せ応力	MPa
$F_x$	水平力	N
$F_y$	鉛直力	N
$F_z$	軸力	N
$H$	水平力	N
$i$	応力振幅のタイプ	—
$K$	簡易弾塑性解析に使用する係数	—
$K_e$	簡易弾塑性解析に用いる繰返しピーク応力強さの補正係数	—
$M$	モーメント	N・m
$M_z$	ねじりモーメント	N・m
$N_a$	$S_e'$ に対応する許容繰返し回数	回
$N_c$	実際の繰返し回数	回
$P_b$	一次曲げ応力	MPa
$P_L$	一次局部膜応力	MPa
$P_m$	一次一般膜応力	MPa
$Q$	二次応力	MPa
$q$	簡易弾塑性解析に使用する係数	—
$S_d^*$	弾性設計用地震動 $S_d$ により定まる地震力又は S クラス設備に適用される静的地震力のいずれか大きい方の地震力	—
$S_s$	基準地震動 $S_s$ により定まる地震力	—

記号	記号の説明	単位
S	10 <sup>6</sup> 回又は10 <sup>11</sup> 回に対する許容繰返しピーク応力強さ	MPa
S <sub>12</sub>	主応力差 $\sigma_1 - \sigma_2$	MPa
S <sub>23</sub>	主応力差 $\sigma_2 - \sigma_3$	MPa
S <sub>31</sub>	主応力差 $\sigma_3 - \sigma_1$	MPa
S <sub>ℓ</sub>	繰返しピーク応力強さ	MPa
S <sub>ℓ'</sub>	補正繰返しピーク応力強さ	MPa
S <sub>m</sub>	設計応力強さ	MPa
S <sub>n</sub>	運転状態 I 及び II における一次＋二次応力の応力差最大範囲	MPa
S <sub>n</sub> <sup>#1</sup>	地震荷重 S <sub>d</sub> * による一次＋二次応力の応力差最大範囲	MPa
S <sub>n</sub> <sup>#2</sup>	地震荷重 S <sub>s</sub> による一次＋二次応力の応力差最大範囲	MPa
S <sub>p</sub>	一次＋二次＋ピーク応力の応力差範囲	MPa
S <sub>p</sub> <sup>#1</sup>	地震荷重 S <sub>d</sub> * による一次＋二次＋ピーク応力の応力差範囲	MPa
S <sub>p</sub> <sup>#2</sup>	地震荷重 S <sub>s</sub> による一次＋二次＋ピーク応力の応力差範囲	MPa
S <sub>u</sub>	設計引張強さ	MPa
S <sub>y</sub>	設計降伏点	MPa
S <sub>y</sub> (RT)	40℃における設計降伏点	MPa
U <sub>f</sub>	疲労累積係数 (U <sub>n</sub> + U <sub>S<sub>d</sub></sub> 又は U <sub>n</sub> + U <sub>S<sub>s</sub></sub> )	—
U <sub>n</sub>	運転状態 I 及び II における疲労累積係数	—
U <sub>S<sub>d</sub></sub>	地震荷重 S <sub>d</sub> * による疲労累積係数	—
U <sub>S<sub>s</sub></sub>	地震荷重 S <sub>s</sub> による疲労累積係数	—
V	鉛直力	N
α	形状係数 (純曲げによる全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比, 又は 1.5のいずれか小さい方の値)	—
σ <sub>1</sub>	主応力	MPa
σ <sub>2</sub>	主応力	MPa
σ <sub>3</sub>	主応力	MPa

記号	記号の説明	単位
$\sigma_b$	引張応力	MPa
$\sigma_\ell$	軸方向応力	MPa
$\sigma_r$	半径方向応力	MPa
$\sigma_t$	周方向応力	MPa
$\tau_b$	せん断応力	MPa
$\tau_{\ell r}$	せん断応力	MPa
$\tau_{r t}$	せん断応力	MPa
$\tau_{t \ell}$	せん断応力	MPa
III <sub>AS</sub>	設計・建設規格の供用状態C相当の許容応力を基準として、それに地震により生じる応力に対する特別な応力の制限を加えた許容応力状態	—
IV <sub>AS</sub>	設計・建設規格の供用状態D相当の許容応力を基準として、それに地震により生じる応力に対する特別な応力の制限を加えた許容応力状態	—
V <sub>AS</sub>	運転状態V（重大事故等時の状態）相当の応力評価を行う許容応力状態を基本として、それに地震により生じる応力に対する特別な応力の制限を加えた許容応力状態	—

## 2.5 計算精度と数値の丸め方

精度は、有効数字6桁以上を確保する。

表示する数値の丸め方は、表2-2に示すとおりである。

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
地震荷重	— <sup>*1</sup>	有効数字4桁目	切上げ	有効数字3桁目 <sup>*2</sup>
算出応力	MPa	小数点以下第1位	切上げ	整数位
応力強さ	MPa	小数点以下第1位	切上げ	整数位
許容応力 <sup>*3</sup>	MPa	小数点以下第1位	切捨て	整数位
座屈の評価	—	小数点以下第3位	切上げ	小数点以下第2位 <sup>*4</sup>
疲労累積係数	—	小数点以下第4位	切上げ	小数点以下第3位 <sup>*4</sup>

注記\*1：機器毎に考慮する荷重に応じた単位を適用する。

\*2：差圧検出・ほう酸水注入ノズル(N11)，ドレンノズル(N15)及びノズルサーマルスリーブの表示桁は小数点以下第2位とし，上記以外のノズルの表示桁は地震荷重以外の外荷重の表示桁に合わせる。なお，処理方法は切上げとする。

\*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許容応力は，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。

\*4：許容値の表示桁は評価結果の表示桁に合わせる。

### 3. 計算条件

#### 3.1 評価対象機器

応力評価を行う機器は、次のとおりである。(表2-1及び図3-1参照)

機器名称		評価対象	
		耐震性についての計算書 (許容応力状態に対する評価)	
		Ⅲ <sub>AS</sub> , Ⅳ <sub>AS</sub>	V <sub>AS</sub>
(1)	胴板	○	○
(2)	上部鏡板, 鏡板フランジ, 胴板フランジ及びスタッドボルト	×*1	×*1
(3)	下部鏡板	○	○
(4)	制御棒駆動機構ハウジング貫通孔	○	○
(5)	中性子束計測ハウジング貫通孔	×*2	×*2
(6)	再循環水出口ノズル (N1)	○	○
(7)	再循環水入口ノズル (N2)	○	○
(8)	主蒸気出口ノズル (N3)	○	○
(9)	給水ノズル (N4)	○	○
(10)	低圧炉心スプレイノズル (N5)	○	○
(11)	低圧注水ノズル (N6)	○	○
(12)	上蓋スプレイノズル (N7)	○	○
(13)	ベントノズル (N8)	○	○
(14)	ジェットポンプ計測管貫通部ノズル (N9)	○	○
(15)	差圧検出・ほう酸水注入ノズル (N11)	○	○
(16)	計装ノズル (N12, N13, N14)	○	○
(17)	ドレンノズル (N15)	○	○
(18)	高圧炉心スプレイノズル (N16)	○	○
(19)	原子炉圧力容器スタビライザブラケット	○	×*3
(20)	蒸気乾燥器ホールドダウンブラケット	×*4	×*3
(21)	ガイドロッドブラケット	×*4	×*3
(22)	蒸気乾燥器支持ブラケット	○	×*3
(23)	給水スパーチャブラケット	○	×*3
(24)	炉心スプレイブラケット	○	×*3
(25)	原子炉圧力容器支持スカート	○	×*3
(26)	原子炉圧力容器基礎ボルト	○	×*3
(27)	差圧検出・ほう酸水注入系配管 (ティーよりN11ノズルまでの外管)*5	○	○

注: 「○」は評価対象, 「×」は評価対象外を示す。

注記 \*1: 作用する主たる荷重は内圧であり, 地震力を負担するような部位ではなく, 既工認からの変更はないため, 評価対象機器としない。

\*2: 結果が厳しくなる制御棒駆動機構ハウジング貫通孔を代表として評価するため, 評価対象機器としない。

\*3: 設計基準対象施設としてのみ申請する施設

\*4: 使用条件が一時的 (機器搬出入時又は事故時の蒸気乾燥器浮上がり等) なものであり, 通常運転時に外荷重が作用せず, 既工認からの変更はないため, 評価対象機器としない。

\*5: クラス1管であるが, 設計・建設規格 PPB-3112の規定により, クラス1容器として, 本応力解析の方針を適用する。

### 3.2 形状及び寸法

各部の形状及び寸法は、耐震計算書に示す。

### 3.3 物性値

地震荷重による繰返し荷重の評価に使用する材料の物性値を表3-1に示す。

### 3.4 荷重の組合せ及び許容応力状態

原子炉圧力容器の荷重の組合せ及び許容応力状態のうち、設計基準対象施設の評価に用いるものを表3-2(1)に、重大事故等対処設備の評価に用いるものを表3-2(2)に示す。また、各許容応力状態で考慮する荷重は、4章に示すとおりである。

なお、原子炉圧力容器については、重大事故等対処設備の耐震評価は、設計基準対象施設の耐震評価に包絡される。

### 3.5 許容応力

- (1) 原子炉圧力容器の許容応力は、添付書類「VI-2-1-9 機能維持の基本方針」に基づき表3-3に示す。この表に記載のない圧縮荷重を受ける場合に対する許容応力は、耐震計算書に記載するものとする。
- (2) 原子炉圧力容器基礎ボルトの許容応力は、添付書類「VI-2-1-9 機能維持の基本方針」に基づき表3-4に示す。

### 3.6 許容応力評価条件

- (1) 設計応力強さ  $S_m$ 、設計降伏点  $S_y$  及び設計引張強さ  $S_u$  は、それぞれ設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表1、表2、表8及び表9に定められたものを使用する。
- (2) 許容応力状態Ⅲ<sub>AS</sub>及び許容応力状態Ⅳ<sub>AS</sub>の一次応力の評価には、運転状態Ⅰ及びⅡにおける流体の最高温度  に対する許容応力を用いる。また、許容応力状態Ⅲ<sub>AS</sub>及び許容応力状態Ⅳ<sub>AS</sub>の一次＋二次応力及び繰返し荷重の評価には、運転温度として定格出力運転時の蒸気温度  に対する許容応力を用いる。
- (3) 原子炉圧力容器の許容応力評価条件を表3-5に示す。

なお、原子炉圧力容器基礎ボルトの許容応力評価条件及び各機器で使用される材料は、耐震計算書に示す。

#### 4. 荷重条件

原子炉圧力容器は、以下の荷重条件に耐えることを確認する。

各機器の応力評価には、本章に示す荷重を考慮する。

##### 4.1 設計条件

設計条件は既工認からの変更はなく、参照図書(1)a.に定めるとおりである。

##### 4.2 運転条件

運転条件及び記号は、既工認からの変更はなく、参照図書(1)a.に定めるとおりである。

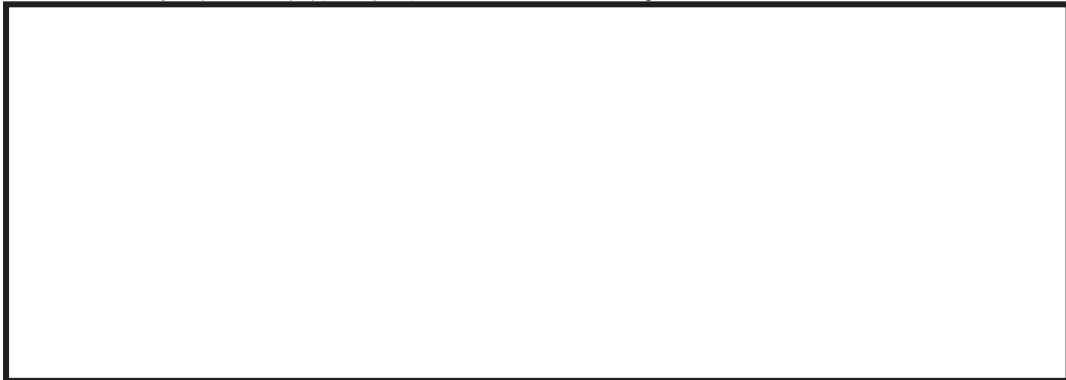
各機器の応力評価において考慮する外荷重の値を表4-1に示す。

原子炉圧力容器の評価に用いる設計用地震力は、添付書類「VI-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」及び「VI-2-3-2 炉心、原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」により求めた荷重、若しくはそれらの条件を包絡する様に定めた保守的な荷重とする。

また、地震荷重  $S_d^*$  及び地震荷重  $S_s$  の繰返し回数は、地震動に対する応答特性等を考慮して、地震荷重  $S_d^*$  は590回、地震荷重  $S_s$  は340回とする。

##### 4.3 重大事故等時の条件

重大事故等時の条件は以下のとおりである。





#### 4.4 荷重の組合せ及び応力評価

荷重の組合せ及び応力評価項目の対応を表4-2に示す。表4-2及び耐震計算書において、荷重の種類と記号は以下のとおりである。

なお、荷重の組合せについては、機器ごとに適切に組み合わせる。

荷重	記号
(1) 内圧	[L01]
(2) 差圧	[L02]
(3) 死荷重	[L04]
(4) 熱変形力（熱膨張差により生じる荷重）	[L07]
(5) 活荷重（流体反力，スクラム反力及びその他機器作動時に働く荷重）	[L08]
(6) 熱負荷	[L10]
(7) ボルト締結力	[L11]
(8) 配管又は機器の地震時の慣性力による地震荷重 $S_d^*$ （一次荷重）	[L14]
(9) 配管又は機器の拘束点の地震時の相対変位による地震荷重 $S_d^*$ （二次荷重）	[L15]
(10) 配管又は機器の地震時の慣性力による地震荷重 $S_s$ （一次荷重）	[L16]
(11) 配管又は機器の拘束点の地震時の相対変位による地震荷重 $S_s$ （二次荷重）	[L17]
(12) 外荷重（運転状態Ⅰ及びⅡにおける荷重）	[L12, L13, L18, L19]
(13) 外荷重（運転状態Ⅴにおける荷重）	[L21]

## 5. 応力評価の手順

応力評価の手順について述べる。

### 5.1 計算に使用する解析コード

解析コードは「A-SAFIA」, 「PIPE」, 「STAX」及び「ASHSD」を用いる。なお、評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、添付書類「VI-5 計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

### 5.2 荷重条件の選定

応力解析においては、4章に示した荷重条件のうちから、その部分に作用する荷重を選定して計算を行う。

### 5.3 応力の評価

#### 5.3.1 主応力

計算した応力は、応力の分類ごとに重ね合わせ、組合せ応力を求める。

組合せ応力は、一般に $\sigma_t$ ,  $\sigma_\ell$ ,  $\sigma_r$ ,  $\tau_{t\ell}$ ,  $\tau_{\ell r}$ ,  $\tau_{rt}$ の6成分を持つが、主応力 $\sigma$ は、引用文献(1)の1.3.6項により、次式を満足する3根 $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ として計算する。

$$\begin{aligned} & \sigma^3 - (\sigma_t + \sigma_\ell + \sigma_r) \cdot \sigma^2 + (\sigma_t \cdot \sigma_\ell + \sigma_\ell \cdot \sigma_r + \sigma_r \cdot \sigma_t - \tau_{t\ell}^2 \\ & - \tau_{\ell r}^2 - \tau_{rt}^2) \cdot \sigma - \sigma_t \cdot \sigma_\ell \cdot \sigma_r + \sigma_t \cdot \tau_{\ell r}^2 + \sigma_\ell \cdot \tau_{rt}^2 \\ & + \sigma_r \cdot \tau_{t\ell}^2 - 2 \cdot \tau_{t\ell} \cdot \tau_{\ell r} \cdot \tau_{rt} = 0 \end{aligned}$$

上式により主応力を求める。

#### 5.3.2 応力強さ

以下の3つの主応力差の絶対値で最大のものを応力強さとする。

$$S_{12} = \sigma_1 - \sigma_2$$

$$S_{23} = \sigma_2 - \sigma_3$$

$$S_{31} = \sigma_3 - \sigma_1$$

#### 5.3.3 一次応力強さ

許容応力状態Ⅲ<sub>S</sub>及び許容応力状態Ⅳ<sub>S</sub>において生じる一次一般膜応力、一次局部膜応力及び一次膜+一次曲げ応力の応力強さが、3.5節に示す許容応力を満足することを示す。

ただし、一次局部膜応力より一次膜+一次曲げ応力の方が発生値及び許容応力の観点で厳しくなることから、一次局部膜応力強さの評価については省略する。

#### 5.3.4 一次+二次応力強さ

許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>S及び許容応力状態Ⅳ<sub>A</sub>Sにおいて生じる一次+二次応力の応力差最大範囲 ( $S_n^{\#1}$ ,  $S_n^{\#2}$ ) が、3.5節に示す許容応力を満足することを示す。

本規定を満足しない応力評価点については、5.4節で述べる設計・建設規格 PVB-3300に基づいた簡易弾塑性解析を行う。

#### 5.4 繰返し荷重の評価

繰返し荷重の評価は、運転状態Ⅰ及びⅡによる荷重並びに許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>S及び許容応力状態Ⅳ<sub>A</sub>Sによる荷重を用いて、次の方法によって行う。

##### 5.4.1 疲労解析不要の検討

本項の検討は、添付書類「VI-2-1-9 機能維持の基本方針」に基づき、設計・建設規格 PVB-3140(6)を満たすことを示す。

##### 5.4.2 疲労解析

以下の手順で疲労解析を行う。

- (1) 運転状態Ⅰ及びⅡにおいて生じる一次+二次+ピーク応力の応力差の変動並びに許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>S及び許容応力状態Ⅳ<sub>A</sub>Sにおいて生じる一次+二次+ピーク応力の応力差の変動を求める。また、この変動の繰返し回数として、参照図書(1)a.に示す各運転条件の繰返し回数及び4.2節に示す地震荷重の繰返し回数を考慮する。
- (2) 応力差の変動とその繰返し回数より、一次+二次+ピーク応力の応力差範囲 ( $S_p$ ,  $S_p^{\#1}$ 及び $S_p^{\#2}$ )及びこの応力振幅の繰返し回数を求める。
- (3) 繰返しピーク応力強さは、次式により求める。

$$S_{\ell} = \frac{S_p}{2}$$

ただし、一次+二次応力の応力差最大範囲 ( $S_n$ ,  $S_n^{\#1}$ 又は $S_n^{\#2}$ ) が $3 \cdot S_m$ を超える応力評価点については、設計・建設規格 PVB-3300の簡易弾塑性解析の適用性の検討を行い、適合する場合は、表5-1に示す方法により繰返しピーク応力強さの割増しを行う。

- (4) 設計疲労線図に使用している縦弾性係数 ( $E_0$ ) と解析に用いる縦弾性係数 ( $E$ ) との比を考慮し、繰返しピーク応力強さを次式で補正する。

$$S_{\ell}' = S_{\ell} \cdot \frac{E_0}{E}$$

なお、 $E$  と  $E_0$  は表3-1に示す。

(5) 疲労累積係数 ( $U_f$ )

疲労累積係数 ( $U_f$ ) は、 $S'_0$  に対応する許容繰返し回数が $10^6$ 回以下（低合金鋼及び炭素鋼）又は $10^{11}$ 回以下（オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金）となる応力振幅について、次式により求める。設計・建設規格 PVB-3114又はPVB-3315に従って、運転状態Ⅰ及びⅡにおける疲労累積係数 $U_n$ と許容応力状態Ⅲ $_A S$ における疲労累積係数 $U_{s_d}$ 又は許容応力状態Ⅳ $_A S$ における疲労累積係数 $U_{s_s}$ の和 $U_f$  ( $U_n + U_{s_d}$ 又は $U_n + U_{s_s}$ ) が、1以下であることを示す。

オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金の場合、繰返しピーク応力強さ194MPa以下の設計疲労線図は、設計・建設規格 表 添付4-2-2の曲線Cを用いる。

$$\text{疲労累積係数}(U_f) = \sum_{i=1}^k \frac{N_c(i)}{N_a(i)}$$

5.5 特別な応力の評価

5.5.1 純せん断応力の評価

純せん断荷重を受ける部分は、設計・建設規格 PVB-3115により評価する。解析箇所を以下に示す。評価方法は参照図書(1)u.に示し、許容応力は表3-3に示す。

- (1) ブラケット類

5.5.2 支圧応力の評価

支圧荷重を受ける部分は、設計・建設規格 PVB-3116により評価する。解析箇所を以下に示す。評価方法及び許容応力は、耐震計算書に示す。

- (1) 胴板

5.5.3 座屈の評価

軸圧縮荷重を受ける部分は、設計・建設規格 PVB-3117あるいはJ E A G 4 6 0 1に基づき評価する。解析箇所を以下に示す。評価方法及び許容応力は、耐震計算書に示す。

- (1) 制御棒駆動機構ハウジング貫通孔スタブチューブ
- (2) 原子炉圧力容器支持スカート

## 5.6 原子炉圧力容器基礎ボルトの評価

原子炉圧力容器基礎ボルトの評価方法は参照図書(2)に示す。基礎ボルトは引張応力とせん断力を同時に受けるため、引張応力 $\sigma_b$ は次式より求めた許容引張応力 $f_{ts}$ 以下であること。ただし、 $f_{to}$ は下表による。

$$f_{ts} = \text{Min.} (1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to})$$

せん断応力 $\tau_b$ はせん断力のみを受ける基礎ボルトの許容せん断応力 $f_{sb}$ 以下であること。ただし、 $f_{sb}$ は下表による。

	弾性設計用地震動S <sub>d</sub> 又は静的震度による荷重との組合せの場合	基準地震動S <sub>s</sub> による荷重との組合せの場合
許容引張応力 $f_{to}$	$\frac{F}{2} \cdot 1.5$	$\frac{F^*}{2} \cdot 1.5$
許容せん断応力 $f_{sb}$	$\frac{F}{1.5\sqrt{3}} \cdot 1.5$	$\frac{F^*}{1.5\sqrt{3}} \cdot 1.5$

[記号の説明]

F : 設計・建設規格 SSB-3121.1(1)に定める値

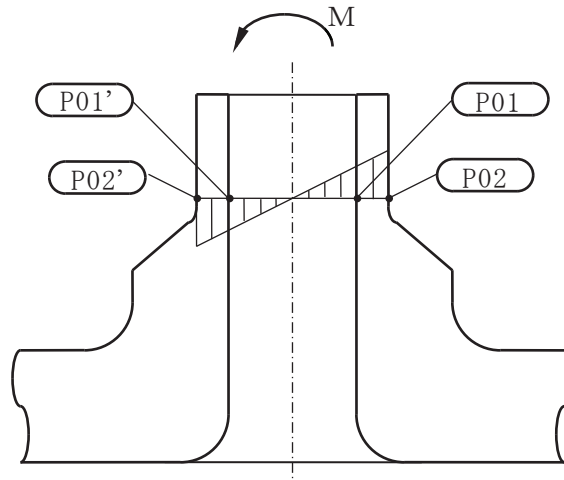
F\* : 設計・建設規格 SSB-3133に定める値

## 6. 評価結果の添付

応力評価点番号は、機器ごとに記号P01からの連番とする。奇数番号を内面の点、偶数番号を外面の点として、耐震計算書の形状・寸法・材料・応力評価点を示す図において定義する。

なお、軸対称モデル解析において、非軸対称な外荷重による応力評価を行った場合、荷重の入力方位と応力評価点の方位の関係により応力に極大値と極小値が生じる。外荷重による応力が極大となる方位の応力評価点は〔例 P01〕と表し、極小となる方位の応力評価点にはプライム（'）を付けて〔例 P01'〕と表す。

一次応力の評価は、内外面の応力評価点を含む断面（応力評価面）について行う。



### 6.1 応力評価結果

- (1) 次の応力評価結果は、全応力評価点（面）について添付する。
  - a. 一次一般膜応力強さの評価のまとめ
  - b. 一次膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ
  - c. 一次＋二次応力強さの評価のまとめ
  - d. 疲労累積係数の評価のまとめ
- (2) 次の特別な評価は、対象となるすべての部位について評価し、結果を記載する。
  - a. 純せん断応力
  - b. 支圧応力
  - c. 座屈
- (3) 原子炉圧力容器基礎ボルトの評価は、次の応力評価結果を記載する。
  - a. 引張応力
  - b. せん断応力

## 6.2 繰返し荷重の評価結果

運転状態Ⅰ及びⅡにおける疲労累積係数に許容応力状態Ⅲ<sub>AS</sub>又は許容応力状態Ⅳ<sub>AS</sub>のいずれか大きい方の疲労累積係数を加えた値の計算結果については、それぞれの部分で最も厳しい部分について添付する。

## 7. 引用文献

文献番号は、本書及び耐震計算書において共通である。

- (1) 機械工学便覧 基礎編 α3 (日本機械学会)

## 8. 参照図書

- (1) 女川原子力発電所第2号機 第5回工事計画認可申請書 添付書類

- a. IV-3-1-1-1 原子炉压力容器の応力解析の方針
- b. IV-3-1-1-2 原子炉压力容器の穴と補強についての計算書
- c. IV-3-1-1-3 胴板の応力計算書
- d. IV-3-1-1-4 上部鏡板、鏡板フランジ及び胴板フランジの応力計算書
- e. IV-3-1-1-5 下部鏡板の応力計算書
- f. IV-3-1-1-6 制御棒駆動機構ハウジング貫通孔の応力計算書
- g. IV-3-1-1-7 中性子束計測ハウジング貫通孔の応力計算書
- h. IV-3-1-1-8 再循環水出口ノズル(N1)の応力計算書
- i. IV-3-1-1-9 再循環水入口ノズル(N2)の応力計算書
- j. IV-3-1-1-10 主蒸気出口ノズル(N3)の応力計算書
- k. IV-3-1-1-11 給水ノズル(N4)の応力計算書
- l. IV-3-1-1-12 低圧炉心スプレイノズル(N5)の応力計算書
- m. IV-3-1-1-13 低圧注水ノズル(N6)の応力計算書
- n. IV-3-1-1-14 上蓋スプレイノズル(N7)の応力計算書
- o. IV-3-1-1-15 ベントノズル(N8)の応力計算書
- p. IV-3-1-1-16 ジェットポンプ計測管貫通部ノズル(N9)の応力計算書
- q. IV-3-1-1-17 差圧検出・ほう酸水注入ノズル(N11)の応力計算書
- r. IV-3-1-1-18 計装ノズル(N12, N13, N14)の応力計算書
- s. IV-3-1-1-19 ドレンノズル(N15)の応力計算書
- t. IV-3-1-1-20 高圧炉心スプレイノズル(N16)の応力計算書
- u. IV-3-1-1-21 ブラケット類の応力計算書
- v. IV-3-1-3-7 差圧検出・ほう酸水注入系配管 (ティーよりN11ノズルまでの外管) の応力計算書

- (2) 女川原子力発電所第2号機 第1回工事計画認可申請書 添付書類

- IV-2-4-1-1 原子炉压力容器基礎ボルトの耐震性についての計算書



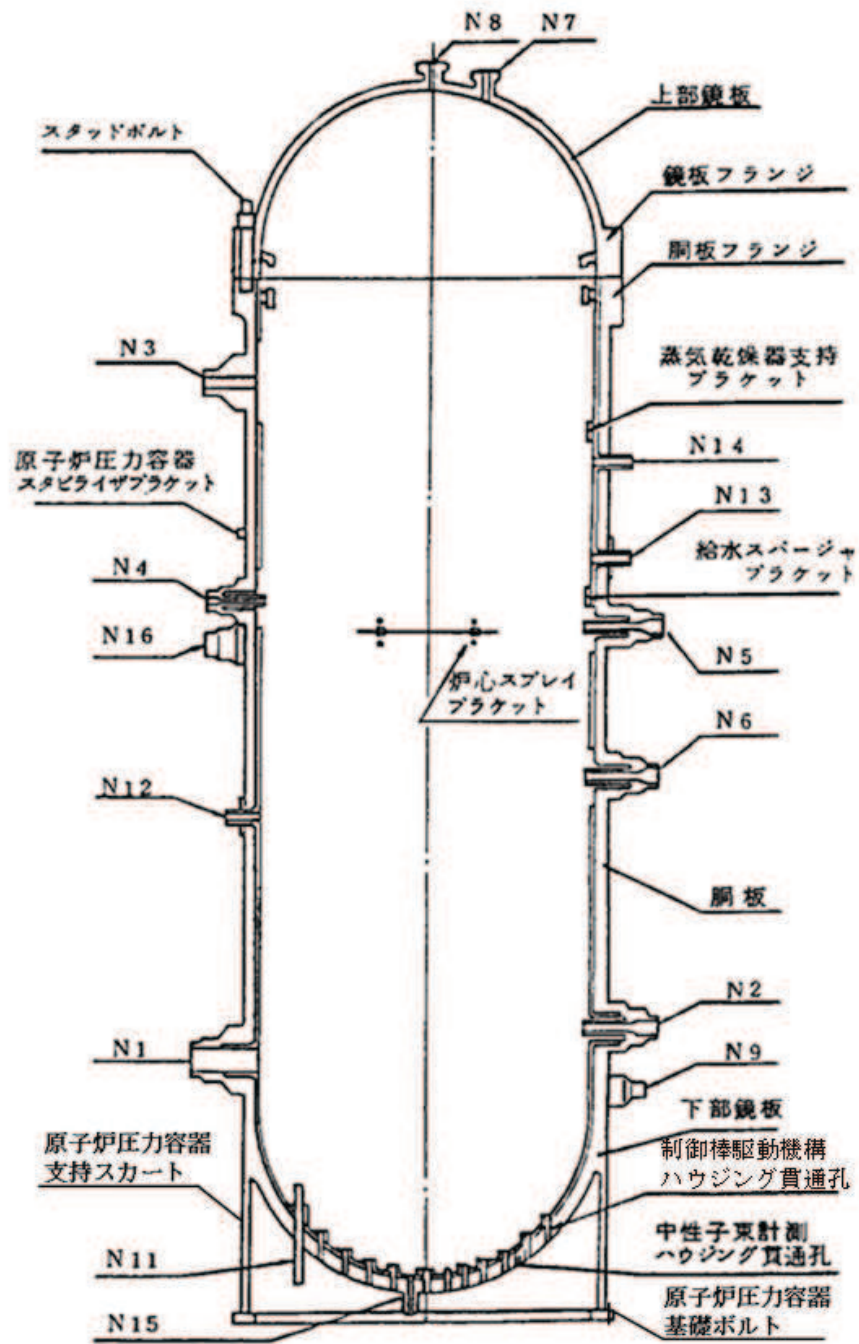
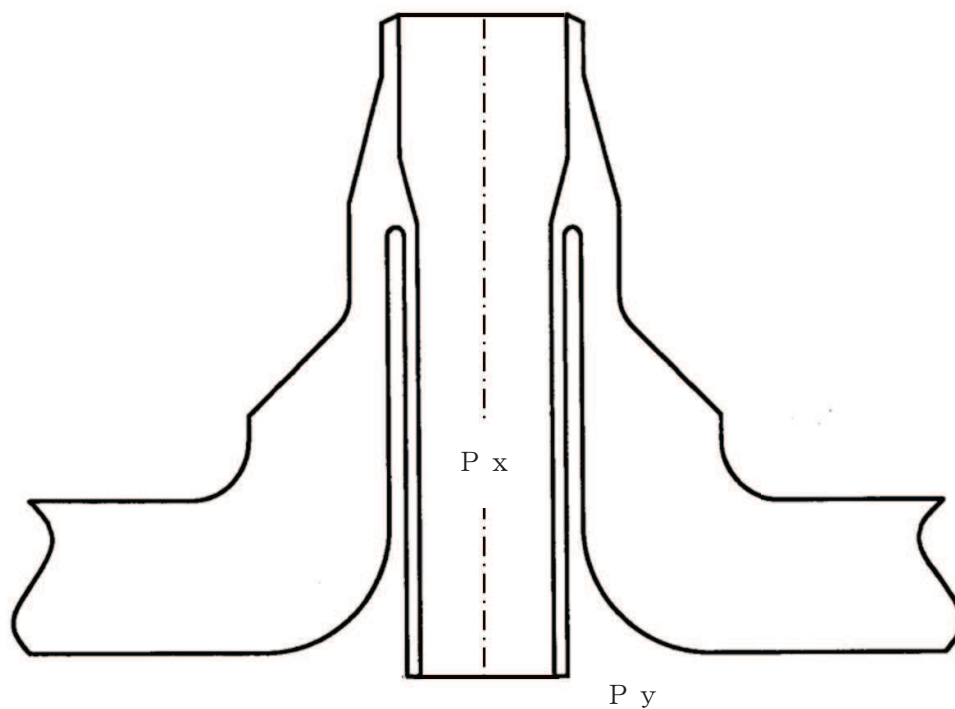


図3-1 全体断面図



$P_x$  : スリーブ内圧力

$P_y$  : 原子炉圧力容器内圧力

差圧 ( $P_{xy}$ ) =  $P_x - P_y$

(単位 : MPa)

部位	運転状態 V
再循環水入口ノズル (N2)	
給水ノズル (N4)	
低圧炉心スプレイノズル (N5)	
低圧注水ノズル (N6)	
高圧炉心スプレイノズル (N16)	

図4-1 運転状態Vにおける差圧

表3-1 繰返し荷重の評価に使用する材料の物性値

材料	E ×10 <sup>5</sup> (MPa)	S <sub>m</sub> (MPa)	S (MPa)	E <sub>0</sub> ×10 <sup>5</sup> (MPa)	q	A <sub>0</sub>	B <sub>0</sub>
SQV2A					3.1	1.0	1.25
SFVQ1A					3.1	1.0	1.25
SFVC2B					3.1	0.66	2.59
SUSF316					3.1	0.7	2.15
SUS316LTP					3.1	0.7	2.15
NCF600-B					3.1	0.7	2.15
SGV480					3.1	0.66	2.59

[記号の説明]

- E : 運転温度  に対する縦弾性係数
- S<sub>m</sub> : 運転温度  に対する設計応力強さ
- S : 設計・建設規格 表 添付 4-2-1の S<sub>u</sub> ≤ 550MPaの10<sup>6</sup>回に対する繰返しピーク応力強さ, 設計・建設規格 表 添付4-2-2の曲線Cの10<sup>11</sup>回に対する繰返しピーク応力強さ
- E<sub>0</sub> : 設計・建設規格 添付4-2に記載された縦弾性係数
- q, A<sub>0</sub>, B<sub>0</sub> : 設計・建設規格 表 PVB-3315-1に示された簡易弾塑性解析に使用する係数の値

表3-2(1) 荷重の組合せ及び許容応力状態（設計基準対象施設）

施設区分		機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉本体	原子炉圧力容器及び炉心	原子炉圧力容器	S	クラス1容器 *1	$D + P + M + S_d^*$	III <sub>A</sub> S
					$D + P_L + M_L + S_d^*$	IV <sub>A</sub> S
					$D + P + M + S_s$	

[記号の説明]

D : 死荷重

P : 地震と組み合わせすべきプラントの運転状態（地震との組合せが独立な運転状態IV， Vは除く）における圧力荷重

M : 地震及び死荷重以外で地震と組み合わせべきプラントの運転状態（地震との組合せが独立な運転状態IV， Vは除く）で設備に作用している機械的荷重

$S_d^*$  : 弾性設計用地震動  $S_d$  により定まる地震力又は S クラス設備に適用される静的地震力のいずれか大きい方の地震力

$P_L$  : 地震との組合せが独立な運転状態IVの事故の直後を除き，その後に生じている圧力荷重

$M_L$  : 地震との組合せが独立な運転状態IVの事故の直後を除き，その後に生じている死荷重及び地震荷重以外の機械的荷重

$S_s$  : 基準地震動  $S_s$  により定まる地震力

注記 \*1 : クラス1支持構造物を含む。

表 3-2(2) 荷重の組合せ及び許容応力状態（重大事故等対処設備）

施設区分		機器名称	設備分類 *1	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉 本体	原子炉 压力容器 及び炉心	原子炉 压力容器	常設耐震／防止 常設／緩和常設 ／防止 (DB拡張)	重大事故等 クラス2	$D + P_L + M_L + S_d^*$	IV <sub>AS</sub>
					$D + P + M + S_s$	
					$D + P_{SAL} + M_{SAL} + S_d$	V <sub>AS</sub> (V <sub>AS</sub> としてIV <sub>AS</sub> の許容応力を用い る。)
					$D + P_{SALL} + M_{SALL} + S_s$	

[記号の説明]

D : 死荷重

$P_L$  : 地震との組合せが独立な運転状態IVの事故の直後を除き、その後に生じている圧力荷重

$M_L$  : 地震との組合せが独立な運転状態IVの事故の直後を除き、その後に生じている死荷重及び地震荷重以外の機械的荷重

$S_d^*$  : 弾性設計用地震動  $S_d$  により定まる地震力又はSクラス設備に適用される静的地震力のいずれか大きい方の地震力

P : 地震と組み合わせべきプラントの運転状態（地震との組合せが独立な運転状態IV、Vは除く）又は運転状態Vにおける圧力荷重

M : 地震及び死荷重以外で地震と組み合わせべきプラントの運転状態（地震との組合せが独立な運転状態IV、Vは除く）又は運転状態Vで設備に作用している機械的荷重

$S_s$  : 基準地震動  $S_s$  により定まる地震力

$P_{SAL}$  : 重大事故等時の状態（運転状態V）で長期的（長期（L））に作用する圧力荷重

$M_{SAL}$  : 重大事故等時の状態（運転状態V）で長期的（長期（L））に作用する機械的荷重

$S_d$  : 弾性設計用地震動  $S_d$  により定まる地震力

$P_{SALL}$  : 重大事故等時の状態（運転状態V）で長期的（長期（L））より更に長期的（長期（LL））に作用する圧力荷重

$M_{SALL}$  : 重大事故等時の状態（運転状態V）で長期的（長期（L））より更に長期的（長期（LL））に作用する機械的荷重

注記 \*1: 「常設耐震／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備, 「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備, 「常設／防止 (DB拡張)」は常設重大事故防止設備 (設計基準拡張) を示す。

表3-3 許容応力 (クラス1容器及び重大事故等クラス2容器)

許容応力状態	許容応力*3					
	一次一般膜応力	一次膜+ 一次曲げ応力	一次+二次応力	一次+二次+ ピーク応力	純せん断 応力	支圧応力
III <sub>AS</sub>	S <sub>y</sub> と2/3・S <sub>u</sub> の小さい方。 ただし、ASS及びHNAについては1.2・S <sub>m</sub> とする。	左欄の α倍の値*1	3・S <sub>m</sub> *2	S <sub>d</sub> またはS <sub>s</sub> 地震動*4のみによる疲労解析を行い、運転状態I及びIIにおける疲労累積係数との和が1.0以下であること。*5	0.6・S <sub>m</sub>	S <sub>y</sub> *6 (1.5・S <sub>y</sub> )
IV <sub>AS</sub>	2/3・S <sub>u</sub>	左欄の α倍の値*1	S <sub>d</sub> またはS <sub>s</sub> 地震動*4のみによる応力振幅について評価する。		0.4・S <sub>u</sub>	S <sub>u</sub> *6 (1.5・S <sub>u</sub> )
V <sub>AS</sub> (V <sub>AS</sub> としてIV <sub>AS</sub> の許容応力を用いる。)	ただし、ASS及びHNAについては2/3・S <sub>u</sub> と2.4・S <sub>m</sub> の小さい方。					

- 注記 \*1: 設計・建設規格 PVB-3111 に基づき, 純曲げによる全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比または1.5のいずれか小さい方の値(α)を用いる。  
 \*2: 3・S<sub>m</sub>を超える場合は弾塑性解析を行う。この場合, 設計・建設規格 PVB-3300 (PVB-3313を除く)の簡易弾塑性解析を用いる。  
 \*3: 当該の応力が生じない場合, 規格基準で省略可能とされている場合及び他の応力で代表可能である場合は評価を省略する。  
 \*4: クラス1容器及び重大事故等クラス2容器においては, S<sub>d</sub>\*またはS<sub>s</sub>地震力を考慮する。  
 \*5: 設計・建設規格 PVB-3140(6)を満たすときは疲労解析不要。  
 ただし, PVB-3140(6)の「応力の全振幅」は「S<sub>d</sub>\*又はS<sub>s</sub>地震動による応力の全振幅」と読み替える。  
 \*6: ()内は, 支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値。

表3-4 許容応力（クラス1支持構造物及び重大事故等クラス2支持構造物）

許容応力状態	許容応力*1, *2 (ボルト等)	
	一次応力	
	引張	せん断
Ⅲ <sub>AS</sub>	$1.5 \cdot f_t$	$1.5 \cdot f_s$
Ⅳ <sub>AS</sub>	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_s^*$
Ⅴ <sub>AS</sub> (Ⅴ <sub>AS</sub> としてⅣ <sub>AS</sub> の 許容応力を用いる)		

[記号の説明]

- $f_t$  : 許容引張応力 ボルト等に対して設計・建設規格 SSB-3131(1)に定める値
- $f_s$  : 許容せん断応力 ボルト等に対して設計・建設規格 SSB-3131(2)に定める値
- $f_t^*$  : 上記の  $f_t$  の値を算出する際に設計・建設規格 付属材料図表 Part5 表8に定める値とあるのを設計・建設規格 付属材料図表 Part5 表8に定める値の1.2倍と読み替えて計算した値
- $f_s^*$  : 上記の  $f_s$  の値を算出する際に設計・建設規格 付属材料図表 Part5 表8に定める値とあるのを設計・建設規格 付属材料図表 Part5 表8に定める値の1.2倍と読み替えて計算した値

注記\*1: 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。

\*2: 当該の応力が生じない場合, 規格基準で省略可能とされてる場合及び他の応力で代表可能である場合は評価を省略する。





表4-1(1) 外荷重

下部鏡板外荷重（胴板及び圧力容器支持スカートを含む）

記号	荷重名称	運転状態	鉛直力		水平力	モーメント
			$V_1^{*1}$ (kN)	$V_2^{*2}$ (kN)	H (kN)	M (kN・m)
L12	外荷重A	運転状態 I 及び II (下記を除く運転時)				
L13	外荷重B	運転状態 I 及び II (スクラム時)				
L18	外荷重C	運転状態 I 及び II (耐圧試験時)				
L21	外荷重E	運転状態 V				
L14	地震荷重 S d *					
L16	地震荷重 S s					

02 ③ VI-2-3-4-1-1(1) R 2

表 4-1(2) 外荷重

炉心シュラウド支持ロッドから原子炉圧力容器胴板に作用する外荷重

記号	荷重名称		水平力
			H (kN)
L14	地震荷重 S <sub>d</sub> *	上部ウェッジ	
		下部スタビライザ	
L16	地震荷重 S <sub>s</sub>	上部ウェッジ	
		下部スタビライザ	

02 ③ VI-2-3-4-1-1(1) R1

表 4-1(3) 外荷重

制御棒駆動機構ハウジング貫通孔外荷重

記号	荷重名称	運転状態	鉛直力		水平力		モーメント	
			V <sub>1</sub> (kN)	V <sub>2</sub> (kN)	H <sub>1</sub> (kN)	H <sub>2</sub> (kN)	M <sub>1</sub> (kN・m)	M <sub>2</sub> (kN・m)
L12	外荷重A	運転状態 I 及び II (下記を除く運転時)						
L13	外荷重B	運転状態 I 及び II (スクラム時) *1, *2						
L18	外荷重C	運転状態 I 及び II (バッファ効果なし) *1						
L19	外荷重D	運転状態 I 及び II (ロッドスタック) *1						
L21	外荷重E	運転状態 V						
L14	地震荷重 S d *							
L16	地震荷重 S s							

O 2 ③ VI-2-3-4-1-1(1) R 1

表 4-1(4) 外荷重

ノズル外荷重

ノズル	記号	荷重名称	力		モーメント		荷重作用点位置 (mm)
			H (kN)	F <sub>z</sub> (kN)	M (kN・m)	M <sub>z</sub> (kN・m)	
再循環水出口ノズル (N1)	L04	死荷重					
	L07	熱変形力					
	L14	地震荷重 S <sub>d</sub> * (一次)					
	L15	地震荷重 S <sub>d</sub> * (二次)					
	L16	地震荷重 S <sub>s</sub> (一次)					
	L17	地震荷重 S <sub>s</sub> (二次)					
再循環水入口ノズル (N2)	L04	死荷重					
	L07	熱変形力					
	L14	地震荷重 S <sub>d</sub> * (一次)					
	L15	地震荷重 S <sub>d</sub> * (二次)					
	L16	地震荷重 S <sub>s</sub> (一次)					
	L17	地震荷重 S <sub>s</sub> (二次)					
主蒸気出口ノズル (N3)	L04	死荷重					
	L07	熱変形力					
	L14	地震荷重 S <sub>d</sub> * (一次)					
	L15	地震荷重 S <sub>d</sub> * (二次)					
	L16	地震荷重 S <sub>s</sub> (一次)					
	L17	地震荷重 S <sub>s</sub> (二次)					
給水ノズル (N4)	L04	死荷重					
	L07	熱変形力					
	L14	地震荷重 S <sub>d</sub> * (一次)					
	L15	地震荷重 S <sub>d</sub> * (二次)					
	L16	地震荷重 S <sub>s</sub> (一次)					
	L17	地震荷重 S <sub>s</sub> (二次)					
低圧, 高圧炉心スプレインノズル (N5, N16)	L04	死荷重					
	L07	熱変形力					
	L14	地震荷重 S <sub>d</sub> * (一次)					
	L15	地震荷重 S <sub>d</sub> * (二次)					
	L16	地震荷重 S <sub>s</sub> (一次)					
	L17	地震荷重 S <sub>s</sub> (二次)					

O 2 ③ VI-2-3-4-1-1(1) R 1

表 4-1(4) 外荷重 (続)

ノズル外荷重

ノズル	記号	荷重名称	力		モーメント		荷重作用点位置 (mm)
			H (kN)	F <sub>z</sub> (kN)	M (kN・m)	M <sub>z</sub> (kN・m)	
低圧注水ノズル (N6)	L04	死荷重					
	L07	熱変形力					
	L14	地震荷重 S <sub>d</sub> * (一次)					
	L15	地震荷重 S <sub>d</sub> * (二次)					
	L16	地震荷重 S <sub>s</sub> (一次)					
	L17	地震荷重 S <sub>s</sub> (二次)					
上蓋スプレイノズル (N7)	L04	死荷重					
	L07	熱変形力					
	L14	地震荷重 S <sub>d</sub> * (一次)					
	L15	地震荷重 S <sub>d</sub> * (二次)					
	L16	地震荷重 S <sub>s</sub> (一次)					
	L17	地震荷重 S <sub>s</sub> (二次)					
ベントノズル (N8)	L04	死荷重					
	L07	熱変形力					
	L14	地震荷重 S <sub>d</sub> * (一次)					
	L15	地震荷重 S <sub>d</sub> * (二次)					
	L16	地震荷重 S <sub>s</sub> (一次)					
	L17	地震荷重 S <sub>s</sub> (二次)					
ジェットポンプ計測管貫通部ノズル (N9)	L04	死荷重					
	L07	熱変形力					
	L14	地震荷重 S <sub>d</sub> * (一次)					
	L15	地震荷重 S <sub>d</sub> * (二次)					
	L16	地震荷重 S <sub>s</sub> (一次)					
	L17	地震荷重 S <sub>s</sub> (二次)					
差圧検出・ほう酸水注入ノズル (N11)*1	L04	死荷重					
	L07	熱変形力					
	L14	地震荷重 S <sub>d</sub> * (一次)					
	L15	地震荷重 S <sub>d</sub> * (二次)					
	L16	地震荷重 S <sub>s</sub> (一次)					
	L17	地震荷重 S <sub>s</sub> (二次)					

O2 ③ VI-2-3-4-1-1(1) R1

表 4-1(4) 外荷重 (続)

ノズル外荷重

ノズル	記号	荷重名称	力		モーメント		荷重作用点位置 (mm)
			H (kN)	F <sub>z</sub> (kN)	M (kN・m)	M <sub>z</sub> (kN・m)	
差圧検出・ほう酸水注入ノズル (N11)*2	L04	死荷重					
	L07	熱変形力					
	L14	地震荷重 S <sub>d</sub> * (一次)					
	L15	地震荷重 S <sub>d</sub> * (二次)					
	L16	地震荷重 S <sub>s</sub> (一次)					
	L17	地震荷重 S <sub>s</sub> (二次)					
計装ノズル (N12, N13, N14)	L04	死荷重					
	L07	熱変形力					
	L14	地震荷重 S <sub>d</sub> * (一次)					
	L15	地震荷重 S <sub>d</sub> * (二次)					
	L16	地震荷重 S <sub>s</sub> (一次)					
	L17	地震荷重 S <sub>s</sub> (二次)					
ドレンノズル (N15)	L04	死荷重					
	L07	熱変形力					
	L14	地震荷重 S <sub>d</sub> * (一次)					
	L15	地震荷重 S <sub>d</sub> * (二次)					
	L16	地震荷重 S <sub>s</sub> (一次)					
	L17	地震荷重 S <sub>s</sub> (二次)					

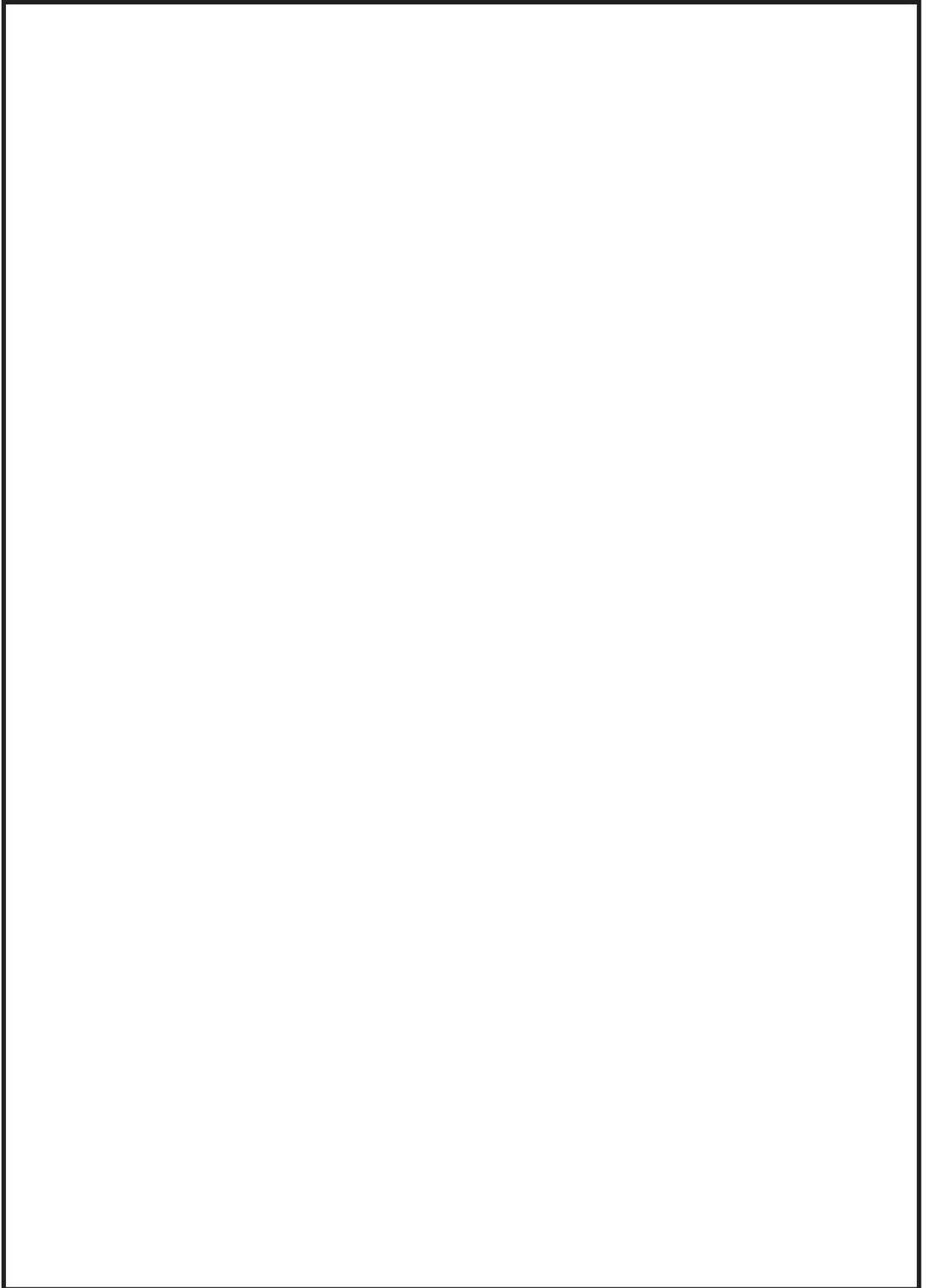


表 4-1(5) 外荷重

ノズルサーマルスリーブ荷重

ノズル	記号	荷重名称	力		モーメント		荷重作用点 位置 (mm)
			H (kN)	F <sub>z</sub> (kN)	M (kN・m)	M <sub>z</sub> (kN・m)	
再循環水 入口ノズル (N2)	L04	死荷重					
	L07	熱変形力					
	L14	地震荷重 S <sub>d</sub> * (一次)					
	L15	地震荷重 S <sub>d</sub> * (二次)					
	L16	地震荷重 S <sub>s</sub> (一次)					
	L17	地震荷重 S <sub>s</sub> (二次)					
給水ノズル (N4)	L04	死荷重					
	L07	熱変形力					
	L14	地震荷重 S <sub>d</sub> * (一次)					
	L15	地震荷重 S <sub>d</sub> * (二次)					
	L16	地震荷重 S <sub>s</sub> (一次)					
	L17	地震荷重 S <sub>s</sub> (二次)					
低圧, 高 圧炉心ス プレイノ ズル (N5, N16)	L04	死荷重					
	L07	熱変形力(流れなし)					
	L07	熱変形力(注水時)					
	L14	地震荷重 S <sub>d</sub> * (一次)					
	L15	地震荷重 S <sub>d</sub> * (二次)					
	L16	地震荷重 S <sub>s</sub> (一次)					
	L17	地震荷重 S <sub>s</sub> (二次)					
低圧注水 ノズル (N6)	L04	死荷重					
	L07	熱変形力(流れなし)					
	L07	熱変形力(注水時)					
	L14	地震荷重 S <sub>d</sub> * (一次)					
	L15	地震荷重 S <sub>d</sub> * (二次)					
	L16	地震荷重 S <sub>s</sub> (一次)					
	L17	地震荷重 S <sub>s</sub> (二次)					

O 2 ③ VI-2-3-4-1-1(1) R 1



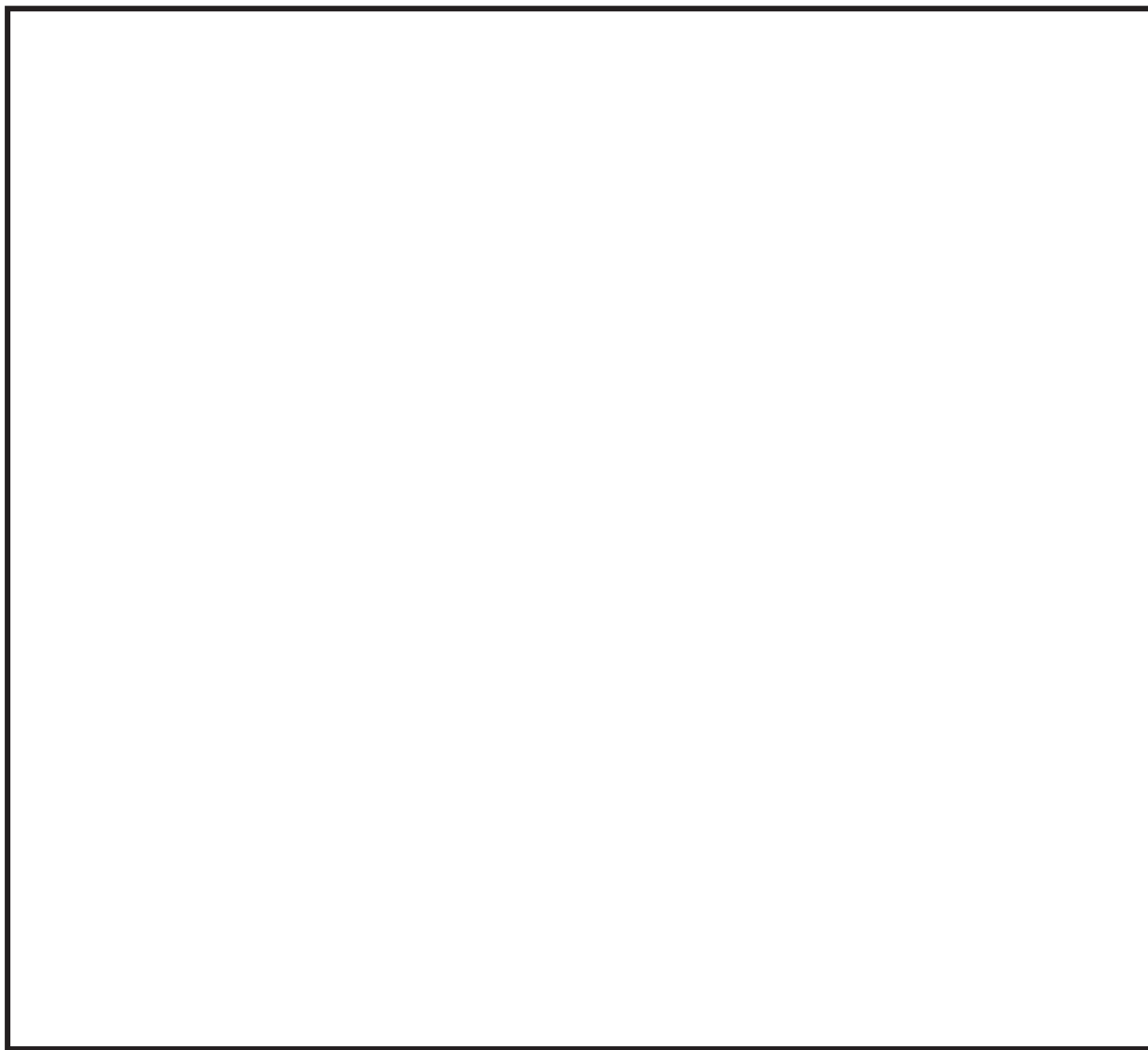


表 4-1(6) 外荷重

ブラケット外荷重

ブラケット	荷重名称	力 (kN)		
		F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>z</sub>
原子炉圧力容器 スタビライザ	地震荷重 S <sub>d</sub> *			
	地震荷重 S <sub>s</sub>			
蒸気乾燥器支持	地震荷重 S <sub>d</sub> *			
	地震荷重 S <sub>s</sub>			
給水スパージャ	地震荷重 S <sub>d</sub> *			
	地震荷重 S <sub>s</sub>			
炉心スプレイ	地震荷重 S <sub>d</sub> *			
	地震荷重 S <sub>s</sub>			

○ 2 ③ VI-2-3-4-1-1(1) R 1

表 4-1(7) 外荷重

原子炉压力容器基礎ボルト外荷重

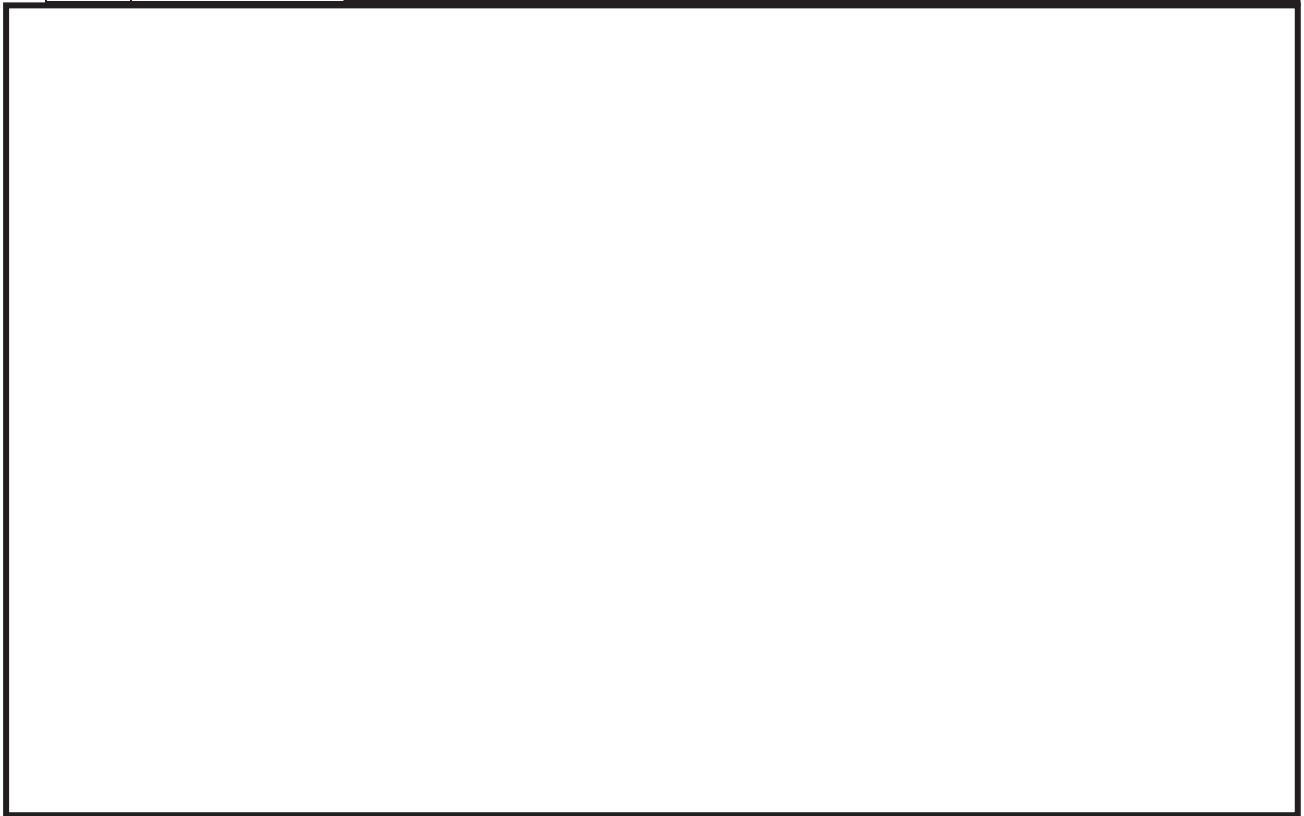
記号	荷重名称	軸力		せん断力	モーメント
		N (最大) (kN)	N (最小) (kN)	Q (kN)	M (kN・m)
—	運転状態 I 及び II				
—	運転状態 IV* <sup>1</sup>				
L14	地震荷重 S d *				
L16	地震荷重 S s				

○ 2 ③ VI-2-3-4-1-1(1) R 1

表 4-1(8) 外荷重

差圧検出・ほう酸水注入系配管（ティーより N11 ノズルまでの外管）外荷重

記号	条件	荷重 作用点	せん断力	軸力	曲げ モーメント	ねじり モーメント
			H (N)	$F_z$ (N)	M (kN・mm)	$M_z$ (kN・mm)
L04	死荷重					
L14	弾性設計用 地震動 $S_d^*$					
L16	基準地震動 $S_s$					



O 2 ③ VI-2-3-4-1-1(1) R 2

表4-2 荷重の組合せ

状態	荷重の組合せ	応力評価
運転状態Ⅰ及びⅡ	L01+L02+ (L04, L12, L13, L18 又は L19) * +L07+L08+L10+L11	$P_L + P_b + Q$ 疲労解析
許容応力状態Ⅲ <sub>A</sub> S	L01+L02+ (L04, L12, L13, L18 又は L19) * +L08+L11+L14	$P_m$ $P_L + P_b$
	L14+L15	$P_L + P_b + Q$ 疲労解析
許容応力状態Ⅳ <sub>A</sub> S	L01+L02+ (L04, L12, L13, L18 又は L19) * +L08+L11+L16	$P_m$ $P_L + P_b$
	L16+L17	$P_L + P_b + Q$ 疲労解析

注記\*： ( ) 内の荷重のうち、各運転条件において実際に考慮する荷重を組合せる。

表5-1 繰返しピーク応力強さの割増し方法

$S_n$	$S_\ell$
$3 \cdot S_m$ 未満	$S_\ell = \frac{S_p}{2}$
$3 \cdot S_m$ 以上	$S_\ell = \frac{K_e \cdot S_p}{2}$ <p><math>K_e</math>は、次の手順により計算する。</p> <p>(1) <math>K &lt; B_0</math></p> <p>① <math>\frac{S_n}{3 \cdot S_m} &lt; \frac{\left(q + \frac{A_0}{K} - 1\right) - \sqrt{\left(q + \frac{A_0}{K} - 1\right)^2 - 4 \cdot A_0 \cdot (q-1)}}{2 \cdot A_0}</math></p> $K_e = 1 + A_0 \cdot \left(\frac{S_n}{3 \cdot S_m} - \frac{1}{K}\right)$ <p>② <math>\frac{S_n}{3 \cdot S_m} \geq \frac{\left(q + \frac{A_0}{K} - 1\right) - \sqrt{\left(q + \frac{A_0}{K} - 1\right)^2 - 4 \cdot A_0 \cdot (q-1)}}{2 \cdot A_0}</math></p> $K_e = 1 + (q-1) \cdot \left(1 - \frac{3 \cdot S_m}{S_n}\right)$ <p>(2) <math>K \geq B_0</math></p> <p>① <math>\frac{S_n}{3 \cdot S_m} &lt; \frac{(q-1) - \sqrt{A_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right) \cdot (q-1)}}{a}</math></p> $K_e = a \cdot \frac{S_n}{3 \cdot S_m} + A_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right) + 1 - a$ <p>② <math>\frac{S_n}{3 \cdot S_m} \geq \frac{(q-1) - \sqrt{A_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right) \cdot (q-1)}}{a}</math></p> $K_e = 1 + (q-1) \cdot \left(1 - \frac{3 \cdot S_m}{S_n}\right)$ <p>ここで、</p> $K = \frac{S_p}{S_n}$ $a = A_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right) + (q-1) - 2 \cdot \sqrt{A_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right) \cdot (q-1)}$

注1:  $q$ ,  $A_0$ ,  $B_0$ は、表3-1に示す。

注2: 地震荷重  $S_{d^*}$  及び地震荷重  $S_s$  にあつては、 $S_n$ をそれぞれ  $S_n^{\#1}$ ,  $S_n^{\#2}$  と読み替え、 $S_p$ をそれぞれ  $S_p^{\#1}$ ,  $S_p^{\#2}$  と読み替えるものとする。

(2) 強度評価編

## 目次

1.	概要	1
2.	一般事項	2
2.1	構造計画	2
2.2	評価方針	2
2.3	適用規格・基準等	2
2.4	記号の説明	3
2.5	計算精度と数値の丸め方	3
3.	計算条件	4
3.1	評価対象機器	4
3.2	形状及び寸法	4
3.3	荷重の組合せ及び運転状態	5
3.4	許容応力	5
3.5	許容応力評価条件	5
4.	荷重条件	6
4.1	運転条件	6
4.2	重大事故等時の条件	6
4.3	荷重の組合せ及び応力評価	6
5.	応力評価の手順	7
5.1	荷重条件の選定	7
5.2	応力の評価	7
5.2.1	主応力	7
5.2.2	応力強さ	7
5.2.3	一次応力強さ	7
5.3	ボルトの応力評価	7
5.4	特別な応力の評価	7
5.4.1	座屈の評価	7
6.	評価結果の添付	8
6.1	応力評価結果	8
7.	引用文献	9
8.	参照図書	9



## 図表目次

図2-1	原子炉圧力容器の強度評価フロー	2
表2-1	表示する数値の丸め方	3
表3-1	荷重の組合せ及び運転状態	10
表3-2	許容応力（クラス1容器及び重大事故等クラス2容器）	11
表3-3	許容応力評価条件	12
表4-1	荷重の組合せ	13

## 1. 概要

本書は、添付書類「VI-3-1-5 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、原子炉压力容器の重大事故等時における強度評価に関する応力解析の方針を説明するものである。

重大事故等時の内圧を除く荷重による原子炉压力容器本体の応力評価は、平成4年1月13日付け3資庁第10518号にて認可された工事計画の添付書類（参照図書(1)）による。

注1：本書に記載していない特別な内容がある場合は、添付書類「VI-3-3-1-1-1 原子炉压力容器本体の強度計算書」（以下「強度計算書」という。）に示す。

注2：図表は、原則として巻末に示す。

注3：平成4年1月13日付け3資庁第10518号にて認可された工事計画の添付書類（参照図書(1)）は以下「既工認」という。

2. 一般事項

2.1 構造計画

原子炉圧力容器の構造計画は、本書(1)耐震評価編の2.1節に記載のとおりである。

2.2 評価方針

原子炉圧力容器の構造強度評価は、添付書類「VI-3-1-5 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」及び「3. 計算条件」にて設定した荷重及び荷重の組合せ並びに許容応力に基づき、「2.1 構造計画」にて示す原子炉圧力容器の各機器の強度計算書にて設定する箇所において、「4. 荷重条件」にて設定した荷重に基づく応力等が許容応力内に収まることを、「5. 応力評価の手順」に示す方法にて確認することで実施する。確認結果を強度計算書に示す。

原子炉圧力容器の強度評価フローを図2-1に示す。

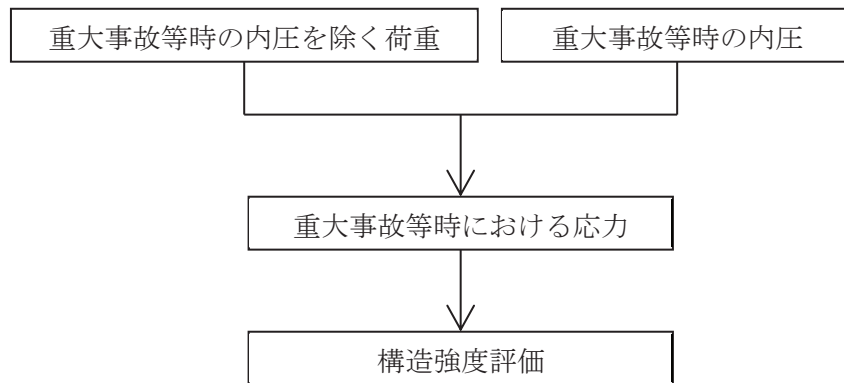


図2-1 原子炉圧力容器の強度評価フロー

2.3 適用規格・基準等

適用する規格・基準等を以下に示す。

- (1) 発電用原子力設備に関する構造等の技術基準（昭和55年10月30日 通商産業省告示第501号（以下「告示」という。））

注：本書及び強度計算書において、告示の条項は「告示第○条第○項第○号○○」として示す。

## 2.4 記号の説明

本書及び強度計算書において使用する記号は、本書(1)耐震評価編の2.4節に記載のとおりである。

## 2.5 計算精度と数値の丸め方

精度は、有効数字6桁以上を確保する。

表示する数値の丸め方は、表 2-1 に示すとおりである。

表 2-1 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
算出応力	MPa	小数点以下第1位	切上げ	整数位
応力強さ	MPa	小数点以下第1位	切上げ	整数位
許容応力*	MPa	小数点以下第1位	切捨て	整数位

注記\*：告示別表に記載された温度の中間における許容応力は、比例法により補間した値の小数点以下第3位を切り捨て、小数点以下第2位までの値として算出する。得られた値をSI単位に換算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. 計算条件

#### 3.1 評価対象機器

応力評価を行う機器は、次のとおりである。(本書(1)耐震評価編の表2-1及び図3-1参照)

機器名称		評価対象
		強度計算書 〔運転状態Vに対する評価〕
(1)	胴板	○
(2)	上部鏡板, 鏡板フランジ, 胴板フランジ及びスタッドボルト	○
(3)	下部鏡板	○
(4)	制御棒駆動機構ハウジング貫通孔	○
(5)	中性子束計測ハウジング貫通孔	○
(6)	再循環水出口ノズル (N1)	○
(7)	再循環水入口ノズル (N2)	○
(8)	主蒸気出口ノズル (N3)	○
(9)	給水ノズル (N4)	○
(10)	低圧炉心スプレイノズル (N5)	○
(11)	低圧注水ノズル (N6)	○
(12)	上蓋スプレイノズル (N7)	○
(13)	ベントノズル (N8)	○
(14)	ジェットポンプ計測管貫通部ノズル (N9)	○
(15)	差圧検出・ほう酸水注入ノズル (N11)	○
(16)	計装ノズル (N12, N13, N14)	○
(17)	ドレンノズル (N15)	○
(18)	高圧炉心スプレイノズル (N16)	○
(19)	原子炉圧力容器スタビライザブラケット	×*1
(20)	蒸気乾燥器ホールドダウンブラケット	×*1
(21)	ガイドロッドブラケット	×*1
(22)	蒸気乾燥器支持ブラケット	×*1
(23)	給水スパーチャブラケット	×*1
(24)	炉心スプレイブラケット	×*1
(25)	原子炉圧力容器支持スカート	×*1
(26)	原子炉圧力容器基礎ボルト	×*1
(27)	差圧検出・ほう酸水注入系配管 (ティーよりN11ノズルまでの外管) *2	○

注: 「○」は評価対象, 「×」は評価対象外を示す。

注記 \*1: 設計基準対象施設としてのみ申請する施設

\*2: 第1種管であるが, 告示第46条第1項の規定により, 第1種容器として, 本応力解析の方針を適用する。

#### 3.2 形状及び寸法

各部の形状及び寸法は, 強度計算書に示す。

### 3.3 荷重の組合せ及び運転状態

原子炉圧力容器の荷重の組合せ及び運転状態を表3-1に示す。また、各運転状態で考慮する荷重は、4章に示すとおりである。

### 3.4 許容応力

- (1) 許容応力は、添付書類「VI-3-1-5 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」に基づき表3-2に示す。この表に記載のない圧縮荷重を受ける場合に対する許容応力は、強度計算書に記載するものとする。

### 3.5 許容応力評価条件

- (1) 設計応力強さ  $S_m$ 、設計降伏点  $S_y$  及び設計引張強さ  $S_u$  は、それぞれ告示別表第2、第3、第9、第10に定められたものを使用する。
- (2) 運転状態Vの一次応力強さの評価には、運転状態Vにおける評価温度  に対する許容応力を用いる。
- (3) 原子炉圧力容器の許容応力評価条件を表3-3に示す。

#### 4. 荷重条件

原子炉圧力容器は，以下の荷重条件に耐えることを確認する。

各機器の応力評価には，本章に示す荷重を考慮する。

##### 4.1 運転条件

運転条件は，本書(1)耐震評価編の4.2節に定めるとおりである。

##### 4.2 重大事故等時の条件

重大事故等時の条件は，本書(1)耐震評価編の4.3節に定めるとおりである。

##### 4.3 荷重の組合せ及び応力評価

荷重の組合せ及び応力評価項目の対応を表4-1に示す。表4-1及び強度計算書において，荷重の種類と記号は，本書(1)耐震評価編の4.4節に定めるとおりである。

なお，荷重の組合せについては，機器ごとに適切に組み合わせる。

## 5. 応力評価の手順

応力評価の手順について述べる。

### 5.1 荷重条件の選定

応力解析においては、4章に示した荷重条件のうちから、その部分に作用する荷重を選定して計算を行う。

### 5.2 応力の評価

#### 5.2.1 主応力

主応力の計算は、本書(1)耐震評価編の5.3.1項に定めるとおりである。

#### 5.2.2 応力強さ

応力強さは、本書(1)耐震評価編の5.3.2項に定めるとおりである。

#### 5.2.3 一次応力強さ

運転状態Vにおいて生じる一次一般膜応力、一次局部膜応力及び一次膜＋一次曲げ応力の応力強さが、3.4節に示す許容応力を満足することを示す。

ただし、一次局部膜応力より一次膜＋一次曲げ応力の方が発生値及び許容応力の観点で厳しくなることから、一次局部膜応力強さの評価については省略する。

### 5.3 ボルトの応力評価

ボルトの応力評価は、告示第13条第1項第2号ハに基づき、ボルトの軸方向に垂直な断面の平均引張応力及び平均引張応力＋曲げ応力について行う。運転状態Vにおいて生じる平均引張応力及び平均引張応力＋曲げ応力が、3.4節に示す許容応力を満足することを示す。

### 5.4 特別な応力の評価

#### 5.4.1 座屈の評価

軸圧縮荷重又は外圧を受ける部分は、告示第13条第1項第1号ヌ又は告示第13条第2項に基づき評価する。解析箇所を以下に示す。評価方法及び許容応力は、強度計算書に示す。

- (1) 制御棒駆動機構ハウジング貫通孔スタブチューブ



## 6. 評価結果の添付

応力評価点番号は，本書(1)耐震評価編の6章に定めるとおりである。

### 6.1 応力評価結果

- (1) 次の応力評価結果は，全応力評価点（面）について添付する。
  - a. 一次一般膜応力強さの評価のまとめ
  - b. 一次膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ
  
- (2) 次の特別な評価は，対象となるすべての部位について評価し，結果を記載する。
  - a. 座屈

## 7. 引用文献

引用文献は、本書(1)耐震評価編の7章に記載のとおりである。

## 8. 参照図書

### (1) 女川原子力発電所第2号機 第5回工事計画認可申請書 添付書類

- a. IV-3-1-1-1 原子炉压力容器の応力解析の方針
- b. IV-3-1-1-2 原子炉压力容器の穴と補強についての計算書
- c. IV-3-1-1-3 胴板の応力計算書
- d. IV-3-1-1-4 上部鏡板、鏡板フランジ及び胴板フランジの応力計算書
- e. IV-3-1-1-5 下部鏡板の応力計算書
- f. IV-3-1-1-6 制御棒駆動機構ハウジング貫通孔の応力計算書
- g. IV-3-1-1-7 中性子束計測ハウジング貫通孔の応力計算書
- h. IV-3-1-1-8 再循環水出口ノズル(N1)の応力計算書
- i. IV-3-1-1-9 再循環水入口ノズル(N2)の応力計算書
- j. IV-3-1-1-10 主蒸気出口ノズル(N3)の応力計算書
- k. IV-3-1-1-11 給水ノズル(N4)の応力計算書
- ℓ. IV-3-1-1-12 低圧炉心スプレイノズル(N5)の応力計算書
- m. IV-3-1-1-13 低圧注水ノズル(N6)の応力計算書
- n. IV-3-1-1-14 上蓋スプレイノズル(N7)の応力計算書
- o. IV-3-1-1-15 ベントノズル(N8)の応力計算書
- p. IV-3-1-1-16 ジェットポンプ計測管貫通部ノズル(N9)の応力計算書
- q. IV-3-1-1-17 差圧検出・ほう酸水注入ノズル(N11)の応力計算書
- r. IV-3-1-1-18 計装ノズル(N12, N13, N14)の応力計算書
- s. IV-3-1-1-19 ドレンノズル(N15)の応力計算書
- t. IV-3-1-1-20 高圧炉心スプレイノズル(N16)の応力計算書
- u. IV-3-1-1-21 ブラケット類の応力計算書
- v. IV-3-1-3-7 差圧検出・ほう酸水注入系配管(ティーよりN11ノズルまでの外管)の応力計算書

### (2) 女川原子力発電所第2号機 第1回工事計画認可申請書 添付書類

- IV-2-4-1-1 原子炉压力容器基礎ボルトの耐震性についての計算書

表3-1 荷重の組合せ及び運転状態（重大事故等対処設備）

施設区分		機器名称	設備分類 *	機器等の区分	荷重の組合せ	運転状態
原子炉 本体	原子炉 圧力容器 及び炉心	原子炉 圧力容器	常設耐震／防止 常設／緩和 常設／防止 (DB拡張)	重大事故等 クラス2	D + P + M + A	V

[記号の説明]

D : 死荷重

P : 地震と組み合わせべきプラントの運転状態（地震との組合せが独立な運転状態Ⅳ、Ⅴは除く）又は運転状態Ⅴにおける圧力荷重

M : 地震及び死荷重以外で地震と組み合わせべきプラントの運転状態（地震との組合せが独立な運転状態Ⅳ、Ⅴは除く）又は運転状態Ⅴで設備に作用している機械的荷重

A : 事故時荷重

注記 \* : 「常設耐震／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備，「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備，「常設／防止（DB拡張）」は常設重大事故防止設備（設計基準拡張）を示す。

表3-2 許容応力 (クラス1容器及び重大事故等クラス2容器)

運転状態	許容応力*1					
	一次一般膜応力*2	一次膜+ 一次曲げ応力*3	一次+二次応力	一次+二次+ ピーク応力	純せん断 応力	支圧応力
V (VとしてIVの許容 応力を用いる。)	$2/3 \cdot S_u$ ただし, A S S 及び H N A については $2/3 \cdot S_u$ と $2.4 \cdot S_m$ の小さい方。	左欄の 1.5 倍の値	—	—	$0.4 \cdot S_u$	$S_u$ *4 ( $1.5 \cdot S_u$ )

注記 \*1: 当該の応力が生じない場合, 規格基準で省略可能とされている場合及び他の応力で代表可能である場合は評価を省略する。

\*2: ボルトにあっては平均引張応力に対する許容応力を示す。

\*3: ボルトにあっては平均引張+曲げ応力に対する許容応力を示す。

\*4: ( ) 内は, 支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値。

表3-3 許容応力評価条件（重大事故等対処設備）

評価部位	材料		温度条件 (°C)	S <sub>m</sub> (MPa)	S <sub>y</sub> (MPa)	S <sub>u</sub> (MPa)	S <sub>y</sub> (R T) (MPa)
原子炉 圧力容器	炭素鋼及び低合金鋼	SQV2A	評価温度				
		SFVC2B	評価温度				
		SFVQ1A	評価温度				
	オーステナイト系 ステンレス鋼及び 高ニッケル合金	SUS316LTP	評価温度				
		SUSF316	評価温度				
		NCF600-B	評価温度				
	フェライト系 ステンレス鋼	SNB24-3	評価温度				

表4-1 荷重の組合せ

状態	荷重の組合せ	応力評価
運転状態V	L01+L02+ (L04 又は L21) *+L08+L11	$P_m$ $P_L + P_b$

注記\*： ( ) 内の荷重のうち，各運転条件において実際に考慮する荷重を組合せる。