

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-027-03
提出年月日	2022年1月6日

耐震評価における等価繰返し回数について

2022年1月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

目 次

1. はじめに	1
2. 島根原子力発電所第2号機の耐震評価における疲労評価と等価繰返し回数	2
3. 一律に設定する等価繰返し回数	5
4. 個別に設定する等価繰返し回数	21
5. まとめ	23

別紙1 地震応答解析モデルにおける等価繰返し回数の算出点

別紙2 減衰定数をパラメータとした等価繰返し回数の比較

別紙3 等価繰返し回数の算出における材料物性の不確かさの影響検討

別紙4 基準地震動 S_s に対する等価繰返し回数算出結果

別紙5 弾性設計用地震動 S_d に対する等価繰返し回数算出結果

別紙6 ピーク応力の算出方法

別紙7 疲労評価の対象設備及び部位毎のピーク応力

別紙8 ピーク応力法における各ピークのサイクル数の求め方

別紙9 ピーク応力の大きさと等価繰返し回数の関係

別紙10 等価繰返し回数算出プログラム

別紙11 多方向入力を対象とした等価繰返し回数算出方法

別紙12 時刻歴応答波形（荷重）から直接等価繰返し回数を算定した場合との比較検討

別紙13 島根原子力発電所第2号機の等価繰返し回数の設定の保守性

1. はじめに

島根原子力発電所第2号機の今回工認における耐震評価の疲労評価は、J E A G 4 6 0 1-1987 記載の手順^{*1}に従い、等価繰返し回数を用いた評価を行っている。疲労評価は、応力振幅と繰返し回数の情報が必要となるため、本来は設備の応力時刻歴が必要となるが、最大応力値のみを用いて安全側に疲労累積係数UFを評価できるように等価繰返し回数を設定することで、評価の簡便化を図っている。添付書類「VI-2-1-9 機能維持の基本方針」に記載のとおり、島根原子力発電所第2号機の疲労評価に用いる等価繰返し回数は、一律に設定する値（ S_s : 150回、 S_d : 300回）又は個別に設定する値を用いている。

なお、建設時における等価繰返し回数は、建設時の基準地震動S1及びS2による検討を行い、保守性を持たせた一律の等価繰返し回数（ S_1 : 100回、 S_2 : 100回）を設定している。

本図書では、疲労評価に用いる等価繰返し回数の設定について説明する。

注記*1： J E A G 4 6 0 1-1987 p574 より抜粋

疲れ解析は、1次+2次+ピーク応力より疲れ累積係数を求めて評価するが、この手法には、地震動の等価繰返し回数を用いる方法あるいは機器の時刻歴応答から応力振幅の大きさの頻度分布を直接求める方法がある。

なお、地震動の等価繰返し数を求める場合にはピーク応力法あるいはエネルギー換算法が用いられている。

ここで「疲れ累積係数」とは、各応力サイクルにおける実際の繰返し回数と繰返しピーク応力強さに対応する許容繰返し回数との比をすべての応力サイクルについて加えたものをいう。

2. 島根原子力発電所第2号機の耐震評価における疲労評価と等価繰返し回数

島根原子力発電所第2号機の耐震評価における疲労評価は、J E A G 4 6 0 1 -1987 記載の手順のうち、等価繰返し回数を用いた評価を採用している。等価繰返し回数はピーク応力法による算出結果に基づき、一律に設定する値又は個別に設定する値を用いている。

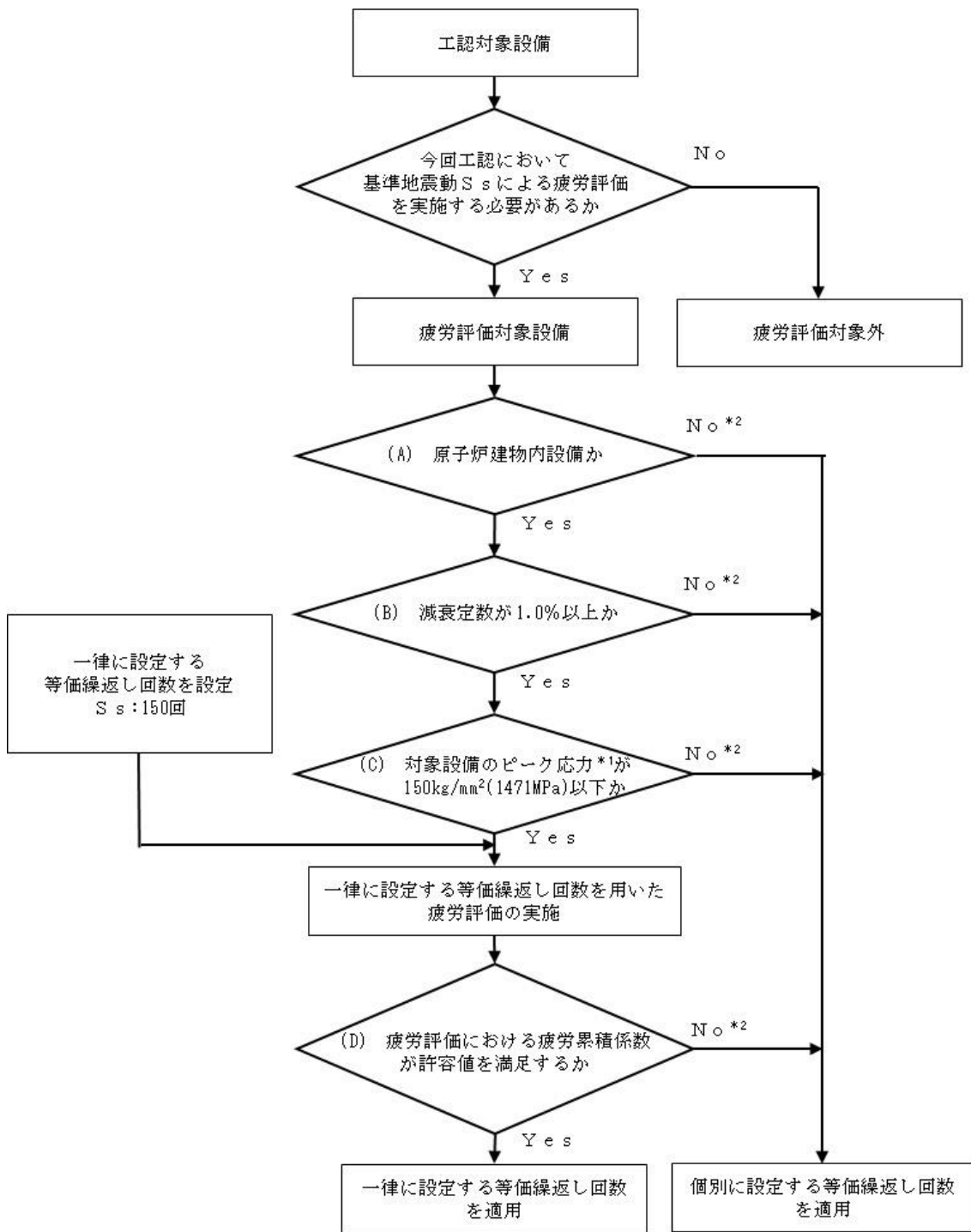
ここで、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d の疲労評価に用いる等価繰返し回数について、一律に設定する値又は個別に設定する値の使い分けの考え方を記載するとともに、使い分けのフローを図 2-1 及び図 2-2 に示す。なお、疲労評価対象設備は、工認耐震計算書対象とする設備・部位のうち、疲労評価を実施するものとしている。

(1) 基準地震動 S_s の疲労評価に用いる等価繰返し回数の設定

- 一律に設定する等価繰返し回数は、原子炉建物内に設置された疲労評価対象設備に用いることとし、原子炉建物以外に設置された疲労評価対象設備については、個別に設定する等価繰返し回数を用いる。(図 2-1 の (A))
- 一律に設定する等価繰返し回数は、減衰定数が 1.0%以上の疲労評価対象設備に用いることとし、減衰定数が 0.5%の疲労評価対象設備については、個別に設定する等価繰返し回数を用いる。(図 2-1 の (B))
- 一律に設定する等価繰返し回数は、疲労評価対象設備に発生するピーク応力(算出方法は別紙 6 参照)が 150kg/mm^2 (1471MPa) 以下となる場合に用いることとし、 150kg/mm^2 (1471MPa) を超える場合は、個別に設定する等価繰返し回数を用いる。(図 2-1 の (C))
- 一律に設定する等価繰返し回数を用いた疲労評価における疲労累積係数が評価基準値を満足しない場合は、個別に設定する等価繰返し回数を用いる。(図 2-1 の (D))

(2) 弾性設計用地震動 S_d の疲労評価に用いる等価繰返し回数の設定

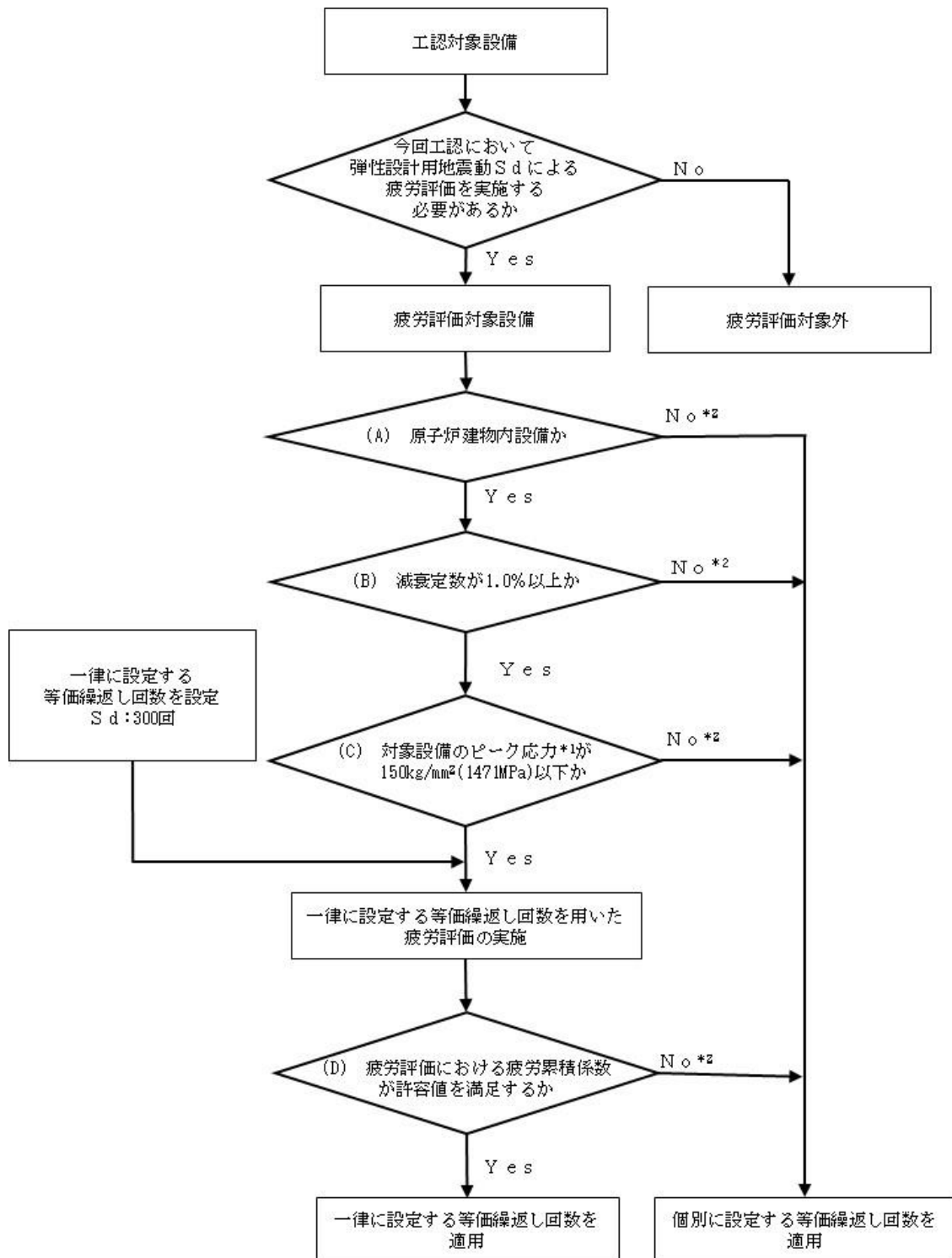
- 一律に設定する等価繰返し回数は、原子炉建物内に設置された疲労評価対象設備に用いることとし、原子炉建物以外に設置される疲労評価対象設備については、個別に設定する等価繰返し回数を用いる。(図 2-2 の (A))
- 一律に設定する等価繰返し回数は、減衰定数が 1.0%以上の疲労評価対象設備に用いることとし、減衰定数が 0.5%の疲労評価対象設備については、個別に設定する等価繰返し回数を用いる。(図 2-2 の (B))
- 一律に設定する等価繰返し回数は、疲労評価対象設備に発生するピーク応力(算出方法は別紙 6 参照)が 150kg/mm^2 (1471MPa) 以下となる場合に用いることとし、 150kg/mm^2 (1471MPa) を超える場合は、個別に設定する等価繰返し回数を用いる。(図 2-2 の (C))
- 一律に設定する等価繰返し回数を用いた疲労評価における疲労累積係数が評価基準値を満足しない場合は、個別に設定する等価繰返し回数を用いる。(図 2-2 の (D))



注記*1：疲労評価対象設備のピーク応力は、別紙7参照

*2：該当する疲労評価対象設備は、4. 参照

図 2-1 基準地震動 Ss の疲労評価に用いる等価繰返し回数の分類



注記*1：疲労評価対象設備のピーク応力は，別紙7参照

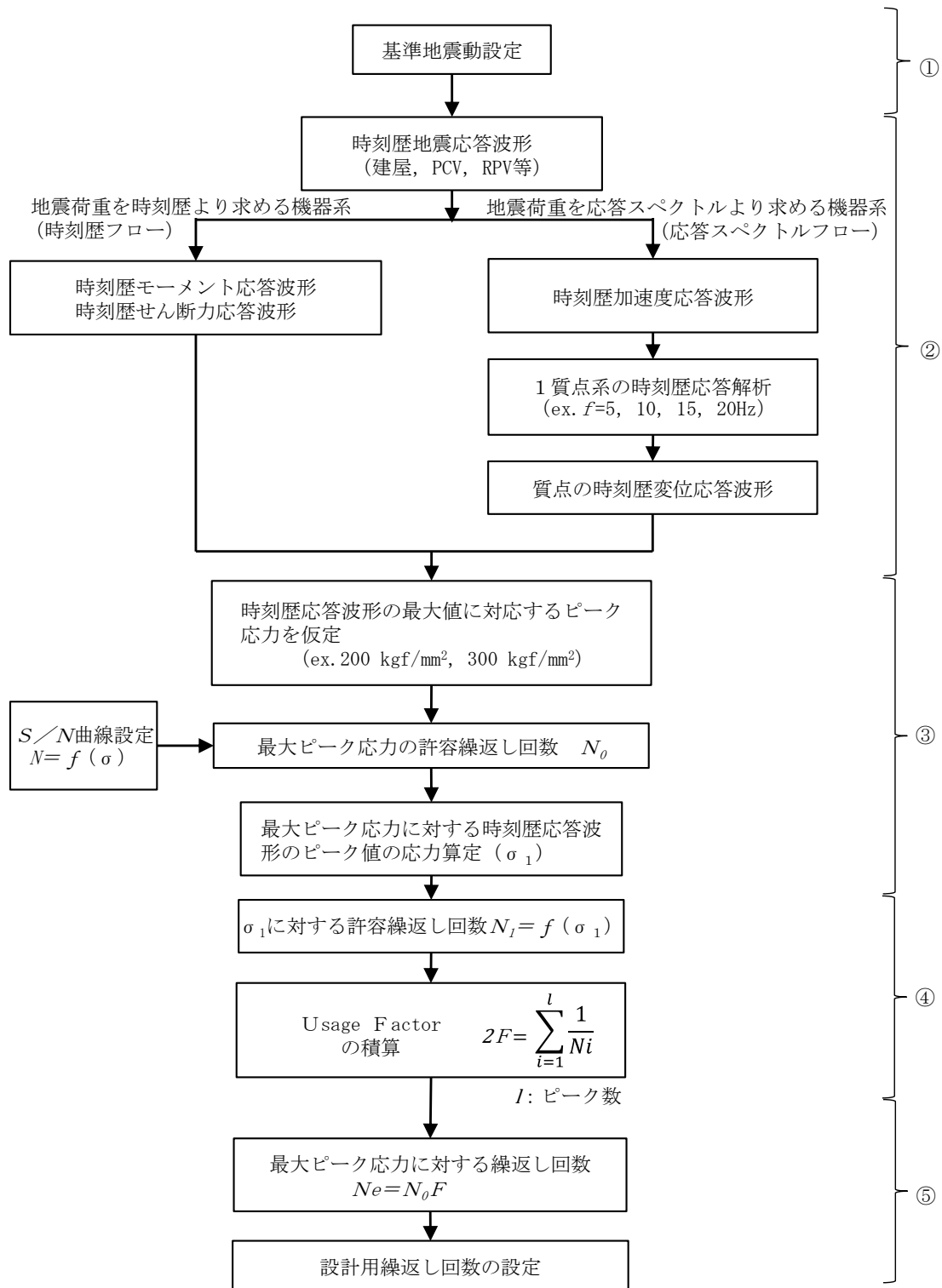
*2：該当する疲労評価対象設備は，4. 参照

図 2-2 弾性設計用地震動 S d の疲労評価に用いる等価繰返し回数の分類

3. 一律に設定する等価繰返し回数

(1) 算出方法

島根原子力発電所第2号機の一律に設定する等価繰返し回数の算出方法について J E A G 4 6 0 1 -1987 記載のピーク応力法による算出フロー（図 3-1, 以下「J E A G フロー」という。）に基づき説明する。また, 「昭和 55 年度耐震設計の標準化に関する調査報告書」, 建設時及び今回工認における一律に設定する等価繰返し回数の算出方法の比較を表 3-1 に示す。



(J E A G 4 6 0 1-1987 p576に加筆)

図 3-1 ピーク応力法による算出フロー

表 3-1 昭和 55 年度 耐震設計の標準化に関する調査報告書及び島根原子力発電所第 2 号機の一律に設定する等価繰返し回数算出条件の比較

		昭和 55 年度 耐震設計の標準化に関する調査報告書 (標準化報告書)		島根原子力発電所第 2 号機	
		原子炉圧力容器 スカート	第 1 種配管	建設時 建設時における 等価繰返し回数	今回工認 一律に設定する 等価繰返し回数
対象設備		原子炉圧力容器 スカート	第 1 種配管	原子炉建物に 設置された設備	原子炉建物に 設置された設備
算出方法		時刻歴解析より算定される時刻歴モーメントを用いた算出方法*3	建物床応答を入力とした 1 質点系モデルによる応答時刻歴を用いた算出方法*4	時刻歴解析より算定される時刻歴荷重を用いた算出方法*3又は建物床応答を入力とした 1 質点系モデルによる応答時刻歴を用いた算出方法*4	建物床応答を入力とした 1 質点系モデルによる応答時刻歴を用いた算出方法*4
	波形	時刻歴モーメント波形	変位応答時刻歴波形	荷重時刻歴波形又は変位応答時刻歴波形	変位応答時刻歴波形
回数算出に 用いる応答 時刻歴波	時刻歴最大値 (設備の最大 ピーク応力)	5 種類のピーク応力 (最大 300kg/mm ²)	代表設備の最大ピーク応力を安全側に設定 (300kg/mm ²)	150kg/mm ² (147MPa) (標準化報告書の検討にて十分とされる値)	同左
	対象建物・床	代表設備の設置床面	同左	代表設備の設置位置	原子炉建物地震応答解析モデル： 全床面 (質点) 原子炉本体地震応答解析モデル： 床面 (質点)
固有周期	時刻歴解析結果より 直接算定	設備の固有周期 ではなく、全固有周期	設備の固有周期 ではなく、全固有周期	対象設備の固有周期 ではなく、全固有周期	対象設備の固有周期 ではなく、全固有周期
減衰定数	報告書に言及なし	同左	同左	0.5%, 1.0%	1.0%
設計疲労線図	代表設備材料の 線図を使用	同左	同左	炭素鋼の設計疲労線図*1	炭素鋼の設計疲労線図*2
各方向の算出結果の組合せ	報告書に言及なし	同左	同左	NS・EW の 2 方向のうち 最大となる値	NS・EW・鉛直の 3 方向のうち 最大となる値
材料物性の不確かさの考慮	あり	報告書に言及なし	報告書に言及なし	なし	あり (地盤物性)

注記*1：発電用原子力設備に関する構造等の技術基準 (昭和 55 年通商産業省告示第 501 号) を適用

*2：日本機械学会 設計建設規格 (J S M E S N C 1 2005/2007) を適用

*3：図 3-1 における左側のフロー

*4：図 3-1 における右側のフロー

① 地震動の設定

基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d に対し以下を考慮して設定する。

(a) 基準地震動 S_s に対する考慮

- ・基準地震動 S_s の 1 回分を考慮する。

(b) 弾性設計用地震動 S_d に対する考慮

- ・基準地震動 S_s に比べ発生頻度が多いことを踏まえ、設計上の配慮として弾性設計用地震動 S_d の 2 回分を考慮する。

② 時刻歴波形の設定

等価繰返し回数の算出に用いる時刻歴波形は、地震荷重を時刻歴より求める機器系の場合（図 3-1 左側のフロー（以下「時刻歴フロー」という。））と、地震荷重を応答スペクトルより求める機器系の場合（図 3-1 右側のフロー（以下「応答スペクトルフロー」という。））の 2 種類の方法があるが、今回工認の一律に設定する等価繰返し回数の設定では、いずれの機器系に対しても、応答スペクトルフローを用いる。なお、時刻歴フロー（せん断、モーメント、軸力）を用いた等価繰返し回数が応答スペクトルフローよりも小さいことを確認している。（別紙 12 参照）

応答スペクトルフローでは、時刻歴地震応答解析（原子炉建物地震応答解析又は原子炉本体地震応答解析）の結果から算出される時刻歴加速度応答波形を入力とした、固有振動数 f の 1 質点系の変位応答時刻歴波形を求める。この変位応答時刻歴波形は、固有振動数すべて（1～20Hz）に対して算出する。

③ 時刻歴ピーク応力値の設定

疲労評価対象設備に発生するピーク応力の最大値を J E A G フロー②で求めた変位応答時刻歴波形の最大値とすることで、応力の時刻歴波形を作成する。J E A G フロー③の「時刻歴応答波形の最大値に対応するピーク応力を仮定」とは、個々の疲労評価対象設備のピーク応力でなく、すべての疲労評価対象設備のピーク応力の最大値を時刻歴応答波形の最大値とすることに対応している。

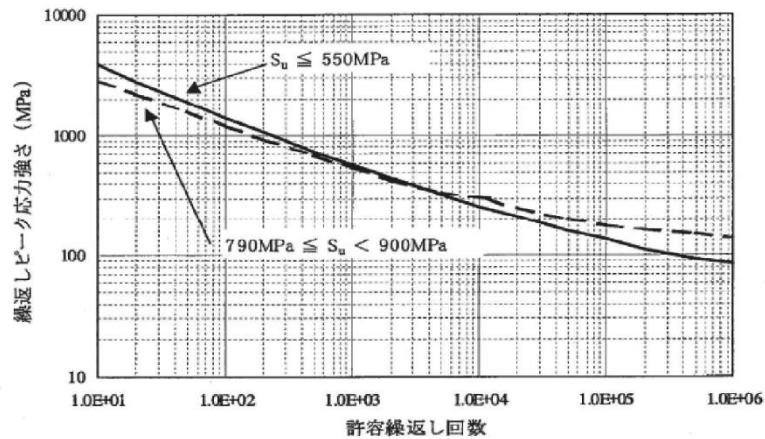
- (a) 基準地震動 S_s に対する疲労評価の等価繰返し回数の設定に用いるピーク応力は、1471MPa*を用いることとし、疲労評価対象設備のピーク応力が 1471MPa を超える場合は個別に設定する。

注記*：「昭和 55 年度耐震設計の標準化に関する調査報告書」にて十分とされている値（150kg/mm²）を単位換算した値。

- (b) 弾性設計用地震動 S_d に対する疲労評価の等価繰返し回数の設定に用いるピーク応力は、基準地震動 S_s におけるピーク応力と同様に 1471MPa を用いることとし、疲労評価対象設備のピーク応力が 1471MPa を超える場合は個別に設定する。

④ 疲労累積係数 UF (Usage Factor) の算出

図 3-2 に示す発電用原子力設備規格設計・建設規格 (以下「J SME 設計・建設規格」という。) に記載される設計疲労線図を用い、応力の時刻歴応答波形に対して各時刻歴振幅に対する許容繰返し回数を算出する。なお、時刻歴振幅とそれが何回繰返されるか (ピークのサイクル数) の算出方法はレインフロー法を用いる (別紙 8 参照)。



(J SME 設計・建設規格より抜粋)

図 3-2 炭素鋼, 低合金鋼および高張力鋼の設計疲労線図

応力の時刻歴応答波形の振幅に対する許容繰返し回数と、ピークのサイクル数から、UF を算出する。

$$2UF = \frac{n_0}{N_0} + \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots$$

n_i : 各ピークのサイクル数

N_i : 各ピークに対する許容繰返し回数

注記：上式は片振りのピークを 1 サイクルとしてサイクル数をカウントし UF を算出する式であり、片振りのピークを 0.5 サイクル、両振りのピークを 1 サイクルとして UF を算出する場合、上式は $UF = \frac{n_0}{N_0} + \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots$ となる。

⑤ 等価繰返し回数 N_e の算出

J E A G フロー④で算出した UF と、J E A G フロー③より求められる最大ピーク応力に対する許容繰返し回数 N_0 から、下式により、等価繰返し回数 N_e を求める。

$$N_e = N_0 \times UF$$

以上の J E A G フロー①～⑤を踏まえ、島根原子力発電所第 2 号機の等価繰返し回数の算出方法を図 3-3 に示す。

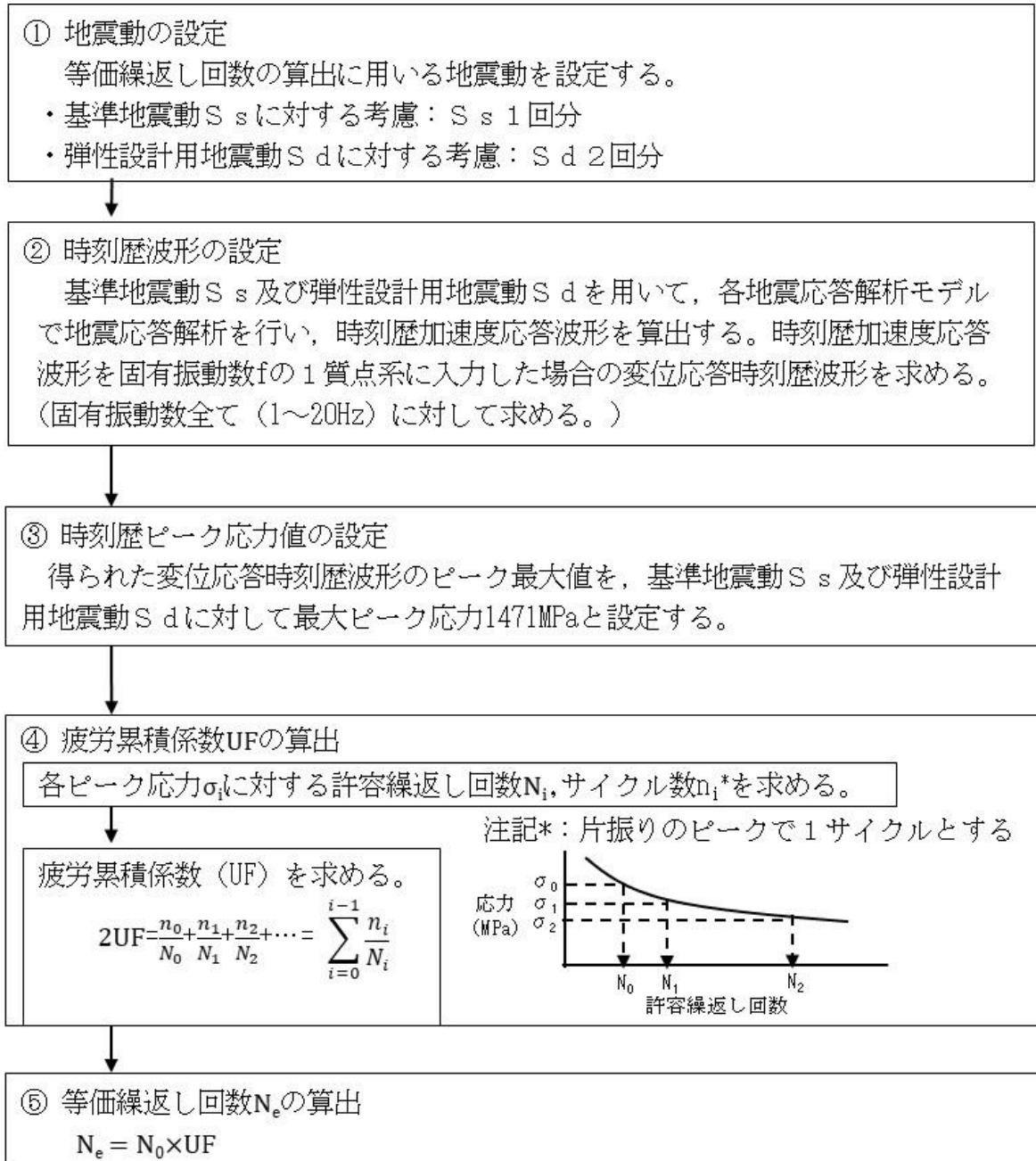


図 3-3 等価繰返し回数の算出方法

(2) 一律に設定する等価繰返し回数の算出パラメータの設定の考え方

等価繰返し回数の算出パラメータとしては、以下のパラメータがあり、一律に設定する等価繰返し回数の検討に用いるパラメータが適切であることを確認する。

- a. ピーク応力
- b. 固有周期
- c. 対象床面（質点）
- d. 地震動
- e. 減衰定数
- f. 設計疲労線図
- g. 材料物性の不確かさの考慮

a. ピーク応力

「昭和 55 年度耐震設計の標準化に関する調査報告書」にてピーク応力の設定値が高くなるほど等価繰返し回数が大きくなる傾向となることが確認されている。その傾向の計算例を別紙 9 に示す。当該報告書の中でピーク応力の設定値として十分とされている値 ($150\text{kg}/\text{mm}^2$) を参考に、一律に設定する等価繰返し回数算出に当たっては、当該の値を単位換算した 1471MPa^* を用いる。

ピーク応力の設定の適切性は、各疲労評価対象設備のピーク応力が 1471MPa に包絡されることにより確認する。水平 2 方向と鉛直方向の地震力の組合せの影響を確認する設備については、水平 2 方向と鉛直方向の地震力を組み合わせた場合のピーク応力についても考慮する。

なお、疲労評価対象設備のピーク応力が 1471MPa を超える場合は、個別に等価繰返し回数の設定を行う。

注記*：「昭和 55 年度 耐震設計の標準化に関する報告書」にて十分とされている値 ($150\text{kg}/\text{mm}^2$) を単位換算した値。

b. 固有周期

固有周期と等価繰返し回数の関係について図 3-4 に示す。

一律に設定する等価繰返し回数算出に当たっては、全固有周期帯 ($0.05\text{s}\sim 1.00\text{s}$) で算出した等価繰返し回数のうち最大回数を用いる。実際の設備は、特定の固有周期を有しているが、全固有周期帯の最大回数を考慮することで安全側の設定となる。

なお、等価繰返し回数算出における固有周期の計算間隔は表 3-2 に示す。

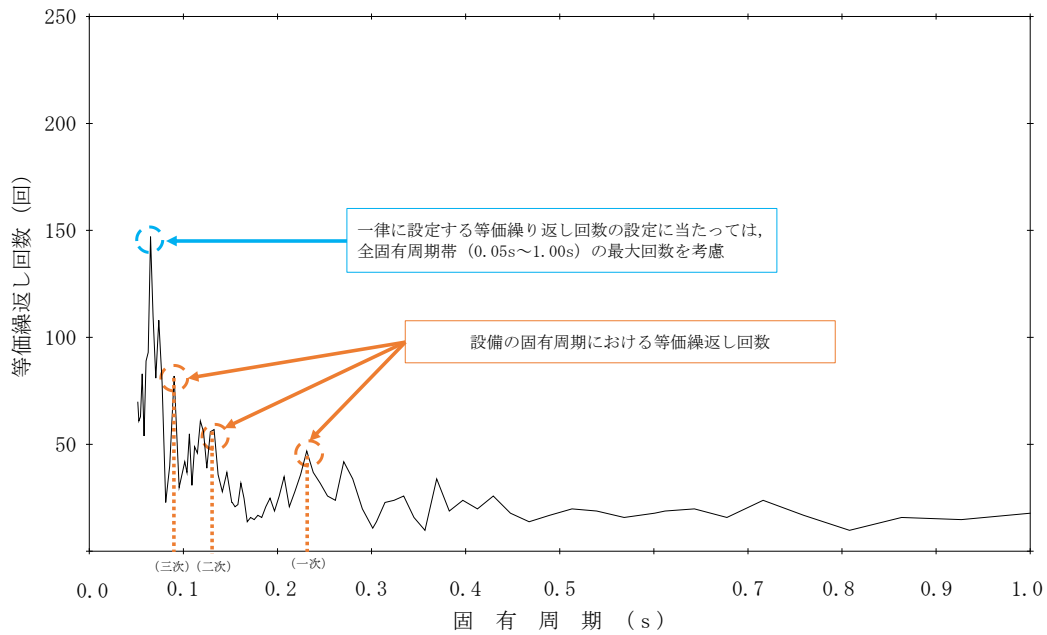


図 3-4 固有周期と等価繰返し回数の関係 (例)

(原子炉本体地震応答解析モデルにて等価繰返し回数が最大回数となる条件)

表 3-2 等価繰返し回数算出における固有周期計算間隔

固有周期 (s)	計算間隔 (rad/s)
0.05 ~ 0.1	4.0
0.1 ~ 0.15	1.5
0.15 ~ 0.3	0.8
0.3 ~ 0.6	0.6
0.6 ~ 1.0	0.5

注：固有周期の計算間隔の設定に当たっては、J E A G 4 6 0 1-1987 P515 表 6.5.1-1 の計算間隔例を用いた。

c. 対象床面（質点）

等価繰返し回数を算出する床面（質点）は、原子炉建物地震応答解析モデルでは、添付書類「VI-2-1-7 設計用床応答スペクトルの作成方針」で設備設計に用いる床応答スペクトルを算出するすべての床面（質点）を対象とし、原子炉本体地震応答解析モデルでは、添付書類「VI-2-2-1 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本体の基礎の地震応答計算書」で設備設計に用いる荷重及び床応答スペクトルを算出するすべての床面（質点）のうち疲労評価を実施する設備を有する床面（質点）を対象とする（別紙1参照）。一律に設定する等価繰返し回数設定に当たっては、算出した等価繰返し回数の包絡値を用いる。

d. 地震動

島根原子力発電所第2号機における基準地震動は $S_s-D, F1, F2, N1, N2$ （以下「 S_s5 波」という。）及び弾性設計用地震動は $S_d-D, F1, F2, N1, N2$ 及び S_d-1 （以下「 S_d6 波」という。）がある。

等価繰返し回数の算出に当たっては、検討対象地震動による変位応答時刻歴波形のピーク最大値を最大ピーク応力 1471MPa と一律に設定するため、等価繰返し回数に対しては、地震動の大きさではなく主要動の継続時間が影響する。ここで、基準地震動 S_s5 波の加速度時刻歴波形を図3-5～図3-9に示す。図3-5～図3-9における S_s5 波のうち、 S_s-D は主要動の継続時間が20.4秒と最も長く、継続時間（振幅包絡線において最大振幅の0.1倍の振幅に達するまでの時間）も60.0秒と長いことから、基準地震動 S_s における一律に設定する等価繰返し回数算出に当たっては、 S_s-D を用いる。

また、弾性設計用地震動 S_d6 波の加速度時刻歴波形を図3-10～図3-15に示す。図3-10～図3-15における S_d6 波のうち、 S_d-D 及び S_d-1 の継続時間が最も長いことから、弾性設計用地震動 S_d における一律に設定する等価繰返し回数算出に当たっては、 S_d-D に加え、 S_d-1 の地震動を用いる。

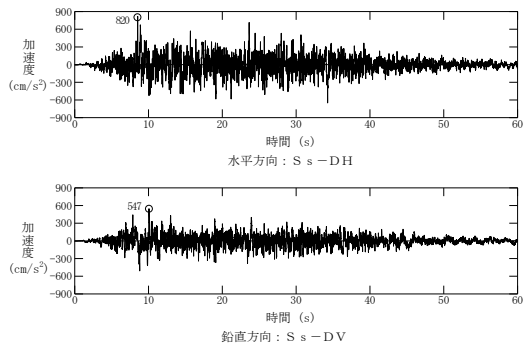


図 3-5 基準地震動 S s - D の
加速度時刻歴波形

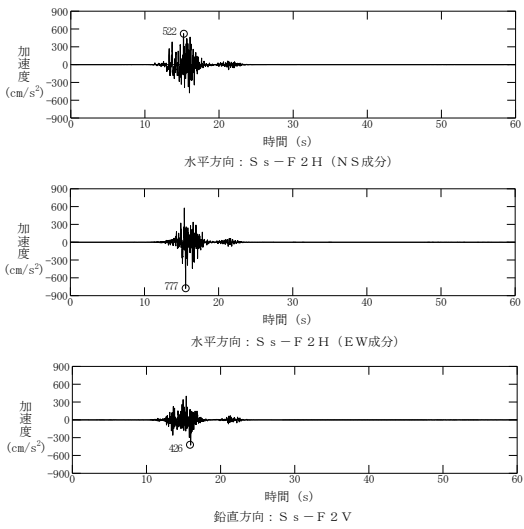


図 3-7 基準地震動 S s - F 2 の
加速度時刻歴波形

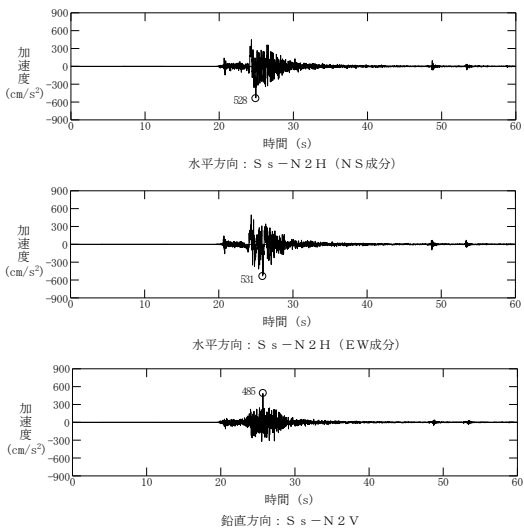


図 3-9 基準地震動 S s - N 2 の
加速度時刻歴波形

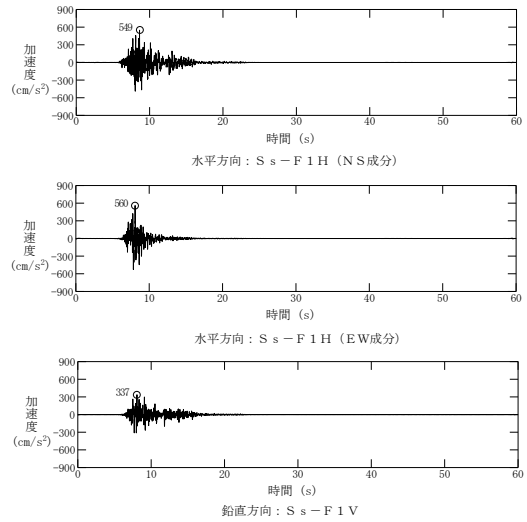


図 3-6 基準地震動 S s - F 1 の
加速度時刻歴波形

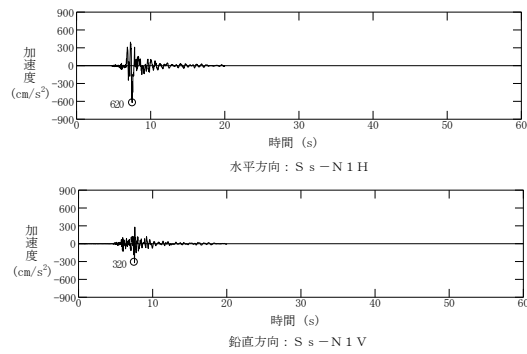


図 3-8 基準地震動 S s - N 1 の
加速度時刻歴波形

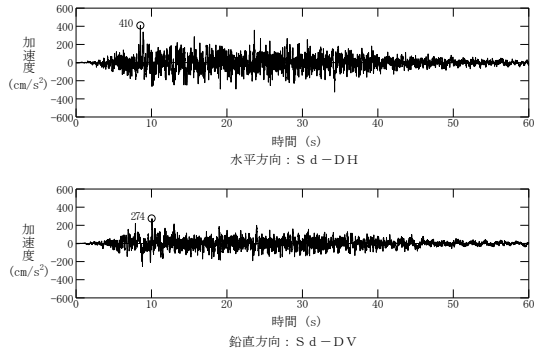


図 3-10 弾性設計用地震動 S d - D の
加速度時刻歴波形

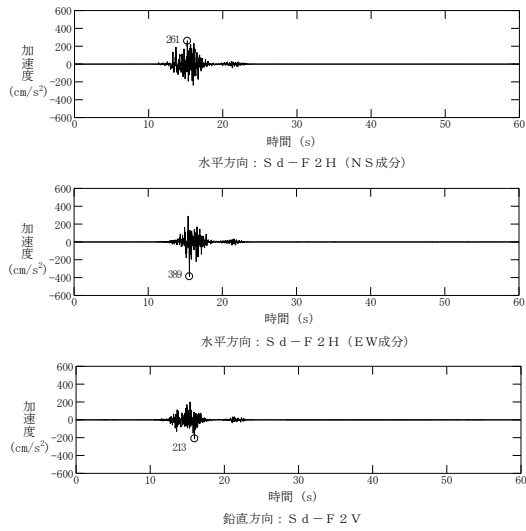


図 3-12 弾性設計用地震動 S d - F 2 の
加速度時刻歴波形

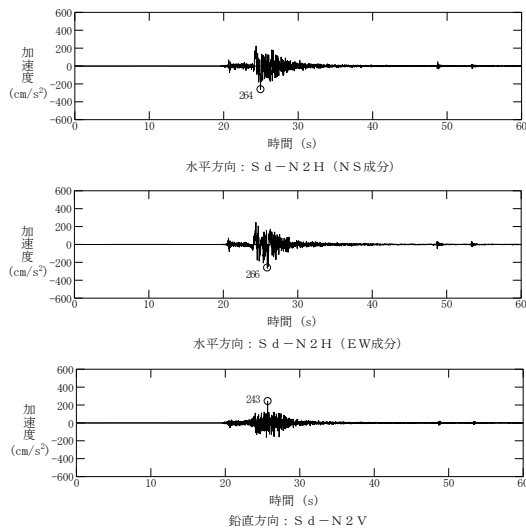


図 3-14 弾性設計用地震動 S d - N 2 の
加速度時刻歴波形

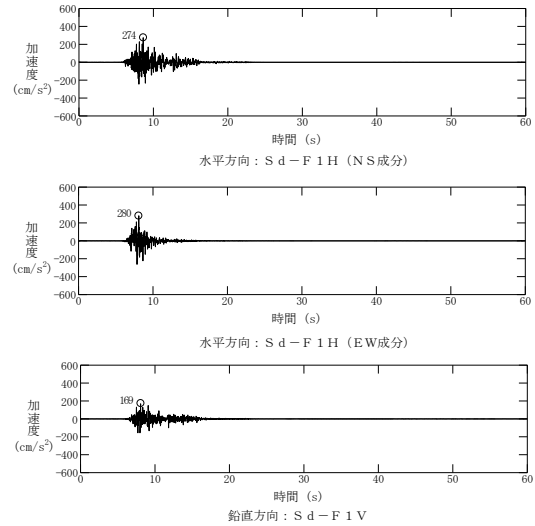


図 3-11 弾性設計用地震動 S d - F 1 の
加速度時刻歴波形

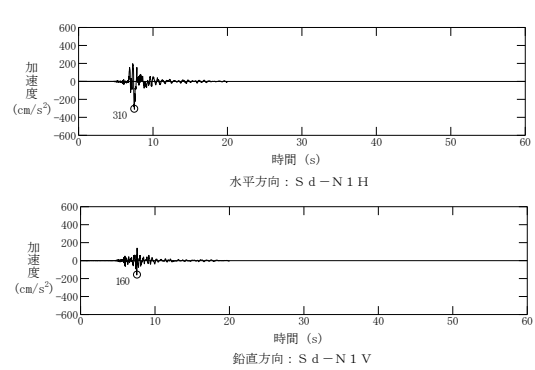


図 3-13 弾性設計用地震動 S d - N 1 の
加速度時刻歴波形

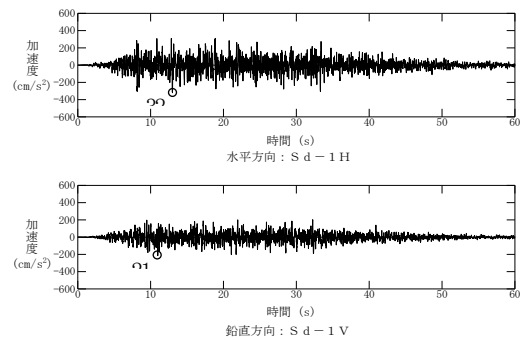


図 3-15 弾性設計用地震動 S d - 1 の
加速度時刻歴波形

e. 減衰定数

応答スペクトルフローでの算出に用いる 1 質点系の時刻歴応答解析の減衰定数について、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%をパラメータとした等価繰返し回数の算出結果を別紙 2 に、等価繰返し回数の最大回数を整理した結果を表 3-3 に示す。表 3-3 の結果から、減衰定数が小さいほど等価繰返し回数が多く算出される傾向にあることを確認した。

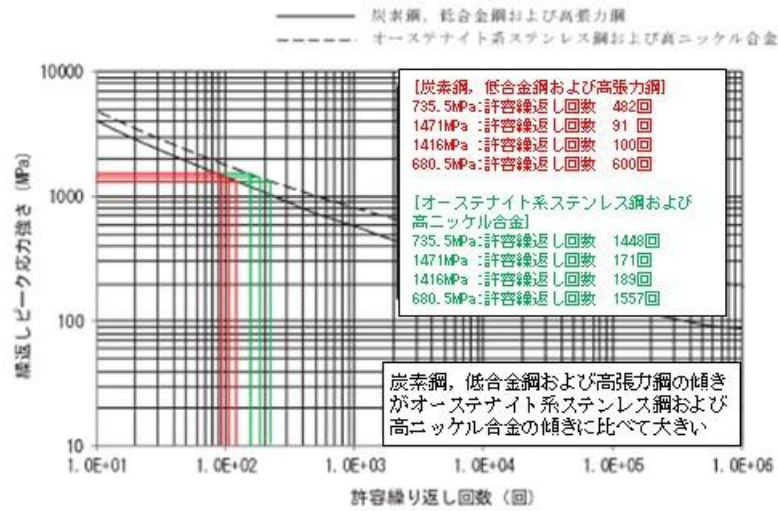
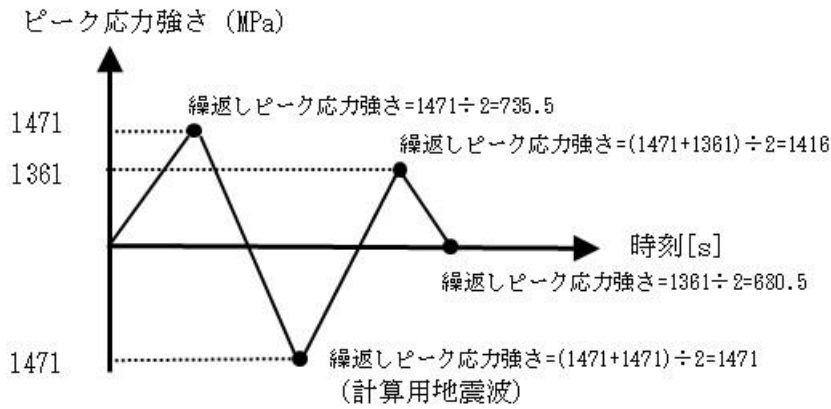
なお、機器・配管系の評価に適用される最小の減衰定数は 0.5%であるが、減衰定数が 0.5%の設備については対象設備が限られることから個別に設定する等価繰返し回数を用いることとし、一律に設定する等価繰返し回数算出に当たっては、1.0%の減衰定数を用いる。

表 3-3 減衰定数をパラメータとした等価繰返し回数の比較結果

算出条件				各減衰定数に対する等価繰返し回数（最大回数）				
解析モデル	地震動	設計疲労線図	材料物性の不確かさ	1.0%	1.5%	2.0%	2.5%	3.0%
原子炉建物 地震応答解析 モデル	S s -D	炭素鋼，低合金鋼 および高張力鋼	基本ケース					

f. 設計疲労線図

一律に設定する等価繰返し回数算出に当たっては、J S M E 設計・建設規格に記載の設計疲労線図のうち、「炭素鋼，低合金鋼および高張力鋼」の設計用疲労線図を用いる。ここで、設計疲労線図の違いに対する等価繰返し回数の検討結果を図 3-16 に示す。図 3-16 より、「炭素鋼，低合金鋼および高張力鋼」の設計用疲労線図を用いるの方が同じピーク応力とした場合に J S M E 設計・建設規格に記載される「オーステナイト系ステンレス鋼および高ニッケル合金」よりも許容繰返し回数が小さくなり、等価繰返し回数が大きく算出されることを確認した。



炭素鋼、低合金鋼および高張力鋼の等価繰返し回数：

$$\left[\frac{0.5}{482} + \frac{0.5}{91} + \frac{0.5}{100} + \frac{0.5}{600} \right] \times 91 = 1.13 \text{ 回}$$

オーステナイト系ステンレス鋼および高ニッケル合金の等価繰返し回数：

$$\left[\frac{0.5}{1448} + \frac{0.5}{171} + \frac{0.5}{189} + \frac{0.5}{1557} \right] \times 171 = 1.07 \text{ 回}$$

同一の地震応答に対し等価繰返し回数を算出する場合、「炭素鋼、低合金鋼および高張力鋼」の方が「オーステナイト系ステンレス鋼および高ニッケル合金」よりも大きくなる。

図 3-16 設計疲労線図の違いに対する等価繰返し回数の検討結果

g. 材料物性の不確かさの考慮

添付書類「VI-2-1-1 耐震設計の基本方針」にて材料物性の不確かさを適切に考慮する方針としていることから、今回工認の等価繰返し回数についても、算出に用いる地震応答解析モデルの材料物性の不確かさによる影響を考慮する。

3. (2)d., 3. (2)e. 及び 3. (2)f. の結果を踏まえ、等価繰返し回数の算出パラメータとして、地震動を「S s-D」、減衰定数を「1.0%」及び設計疲労線図を「炭素鋼，低合金鋼および高張力鋼」とした条件において、材料物性の不確かさをパラメータとして等価繰返し回数を算出する。材料物性の不確かさを考慮する検討ケースを表 3-4 に示す。

材料物性の不確かさをパラメータとした等価繰返し回数の算出結果を別紙 3 に、最大回数を整理した結果を表 3-5 に示す。別紙 3 の結果から、地震応答解析モデルの材料物性の不確かさを考慮した場合、各質点の等価繰返し回数に影響があるものの、その最大回数は、原子炉本体地震応答解析モデルの EW 方向の基本ケースとなることを確認した。また、表 3-5 の結果から基本ケースの等価繰返し回数を上回るケースは、原子炉建物地震応答解析モデルのケース 2 のみであり、その影響も 1%程度と軽微であるため、一律に設定する等価繰返し回数算出に当たっては、基本ケースを用いて検討する。

なお、島根原子力発電所第 2 号機の疲労評価に用いる一律に設定する等価繰返し回数は、最終段階での取り扱いとして安全側に切り上げて設定する。

表 3-4 等価繰返し回数算出において材料物性の不確かさを考慮する検討ケース

検討ケース	コンクリート剛性	地盤物性	備考
ケース 1 (工認モデル)	設計基準強度	標準地盤	基本ケース
ケース 2 (地盤物性 + σ)	設計基準強度	標準地盤 + σ (+10%, +20%)	
ケース 3 (地盤物性 - σ)	設計基準強度	標準地盤 - σ (-10%, -20%)	

表 3-5 材料物性の不確かさをパラメータとした等価繰返し回数の比較結果

算出条件				各材料物性の不確かさの等価繰返し回数 (最大回数) *		
解析モデル	地震動	減衰定数 (%)	設計疲労線図	基本ケース	ケース 2	ケース 3
原子炉建物 地震応答解析 モデル	S s-D	1.0	炭素鋼, 低合金鋼 および 高張力鋼			
原子炉本体 地震応答解析 モデル	S s-D	1.0	炭素鋼, 低合金鋼 および 高張力鋼			

注記* : ()内の数字は基本ケースにおける等価繰返し回数に対する各ケースの等価繰返し回数の比率を示す

(3) 算出結果

(2) で整理した算出パラメータを用いて、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d に対する各地震応答解析モデルにおける等価繰返し回数の最大回数を整理した結果を表 3-6 及び表 3-7 に示し、その詳細内訳を別紙 4 及び別紙 5 に示す。

基準地震動 S_s に対する等価繰返し回数は、原子炉本体地震応答解析モデル EW 方向での 回が最大であった。また、弾性設計用地震動 S_d に対する等価繰返し回数は、原子炉本体地震応答解析モデル EW 方向での 回が最大であった。

表 3-6 基準地震動 S_s に対する最大等価繰返し回数

算出条件					方向別最大回数		最大回数
解析モデル	地震動	減衰定数 (%)	設計疲労線図	材料物性の不確かさ	方向	回数	
原子炉建物地震応答解析モデル	$S_s - D$	1.0	炭素鋼, 低合金鋼 および高張力鋼	基本ケース	NS	<input type="text"/>	
					EW		
					UD		
原子炉本体地震応答解析モデル	$S_s - D$	1.0	炭素鋼, 低合金鋼 および高張力鋼	基本ケース	NS	<input type="text"/>	
					EW		
					UD		

表 3-7 弾性設計用地震動 S_d に対する最大等価繰返し回数

算出条件					方向別最大回数		最大回数
解析モデル	地震動	減衰定数 (%)	設計疲労線図	材料物性の不確かさ	方向	回数	
原子炉建物地震応答解析モデル	$S_d - D \times 2$ 回 又は $S_d - 1 \times 2$ 回	1.0	炭素鋼, 低合金鋼 および高張力鋼	基本ケース	NS	<input type="text"/>	
					EW		
					UD		
原子炉本体地震応答解析モデル	$S_d - D \times 2$ 回 又は $S_d - 1 \times 2$ 回	1.0	炭素鋼, 低合金鋼 および高張力鋼	基本ケース	NS	<input type="text"/>	
					EW		
					UD		

(4) 結果まとめ

a. 基準地震動 S_s の疲労評価に用いる一律に設定する等価繰返し回数

- ・原子炉建物（原子炉本体地震応答解析モデル及び原子炉建物地震応答解析モデル）を対象とし、等価繰返し回数を算出した。
- ・等価繰返し回数の算出パラメータのうち、地震動、減衰定数及び設計疲労線図について、「 S_s-D 」、「1.0%」及び「炭素鋼、低合金鋼および高張力鋼」の条件が安全側の設定であることを確認した。
- ・基準地震動 S_s の1回分を考慮して、安全側に設定した算出パラメータで等価繰返し回数を算出した結果、最大等価繰返し回数は 回であることを確認した。
- ・原子炉建物地震応答解析モデル及び原子炉本体地震応答解析モデルに対し材料物性の不確かさの影響確認を行った結果、基本ケースによる等価繰返し回数に対する影響は1%程度であり、影響は軽微であることを確認した。

以上のことから、島根原子力発電所第2号機における基準地震動 S_s の疲労評価に用いる一律に設定する等価繰返し回数は、安全側に150回と設定する。

b. 弾性設計用地震動 S_d の疲労評価に用いる一律に設定する等価繰返し回数

- ・原子炉建物（原子炉本体地震応答解析モデル及び原子炉建物地震応答解析モデル）を対象とし、等価繰返し回数を算出した。
- ・等価繰返し回数の算出パラメータのうち、地震動、減衰定数及び設計疲労線図について、「 S_d-D 及び S_d-1 」、「1.0%」及び「炭素鋼、低合金鋼および高張力鋼」の条件が安全側の設定であることを確認した。
- ・弾性設計用地震動 S_d の2回分を考慮して、基準地震動 S_s で確認した安全側となる算出パラメータで等価繰返し回数を算出した結果、最大等価繰返し回数は 回であることを確認した。
- ・基準地震動 S_s に対する材料物性の不確かさの影響確認結果から、影響は軽微であることを確認した。

以上のことから、島根原子力発電所第2号機における弾性設計用地震動 S_d の疲労評価に用いる一律に設定する等価繰返し回数は、安全側に300回と設定する。

4. 個別に設定する等価繰返し回数

島根原子力発電所第2号機の今回工認において一律に設定する等価繰返し回数を適用せず、個別に設定する等価繰返し回数を適用する場合について説明する。

(1) 対象設備

個別に設定する等価繰返し回数を設定する必要がある疲労評価対象設備は図 2-1 及び図 2-2 のフローに従って抽出される以下の設備となる。

① 基準地震動 S_s における個別に設定する等価繰返し回数

- (A) 原子炉建物以外に設置される設備
- (B) 減衰定数が 0.5% の疲労評価対象設備
- (C) 発生するピーク応力が 1471MPa を超える設備
- (D) 一律に設定する等価繰返し回数を用いた疲労評価が許容値を満足しない設備

② 弾性設計用地震動 S_d における個別に設定する等価繰返し回数

- (A) 原子炉建物以外に設置される設備
- (B) 減衰定数が 0.5% の疲労評価対象設備
- (C) 発生するピーク応力が 1471MPa を超える設備
- (D) 一律に設定する等価繰返し回数を用いた疲労評価が許容値を満足しない設備

(2) 個別に設定する等価繰返し回数設定方針

個別に設定する場合の算出条件を一律に設定する等価繰返し回数と併せて表 4-1 に示す。

算出条件の一部（設置場所，固有周期，減衰定数，ピーク応力，設計用疲労線図）に疲労評価対象設備固有の条件を用いた上で算出することで，各疲労評価対象設備に対して個別に設定する等価繰返し回数とする。

また，一律に設定する等価繰返し回数と同様に，材料物性の不確かさの影響を考慮する。

表 4-1 一律に設定する等価繰返し回数と個別に設定する等価繰返し回数の条件

条件の項目	一律に設定する 等価繰返し回数	個別に設定する 等価繰返し回数	備考
算出フロー	応答スペクトルフロー	応答スペクトルフロー*1	*1：必要に応じて時刻歴フローを用いる。
対象床面 (質点)	原子炉建物地震応答解析 モデル：全床面（質点） 原子炉本体地震応答解析 モデル：疲労評価を実施する 設備を有する床面（質点）	疲労評価対象設備 の設置位置	—
ピーク応力	1471MPa	1471MPa*2	*2：必要に応じて疲労評価 対象設備のピーク応 力を用いる。
固有周期	全固有周期	全固有周期*3	*3：必要に応じて疲労評価 対象設備の固有周期 を用いる。
減衰定数	1.0%	疲労評価対象設備の 減衰定数	—
設計用 疲労線図	炭素鋼，低合金鋼 および高張力鋼	炭素鋼，低合金鋼 および高張力鋼*4	*4：必要に応じて疲労評価 対象設備の使用材料 の設計用疲労線図を 用いる。

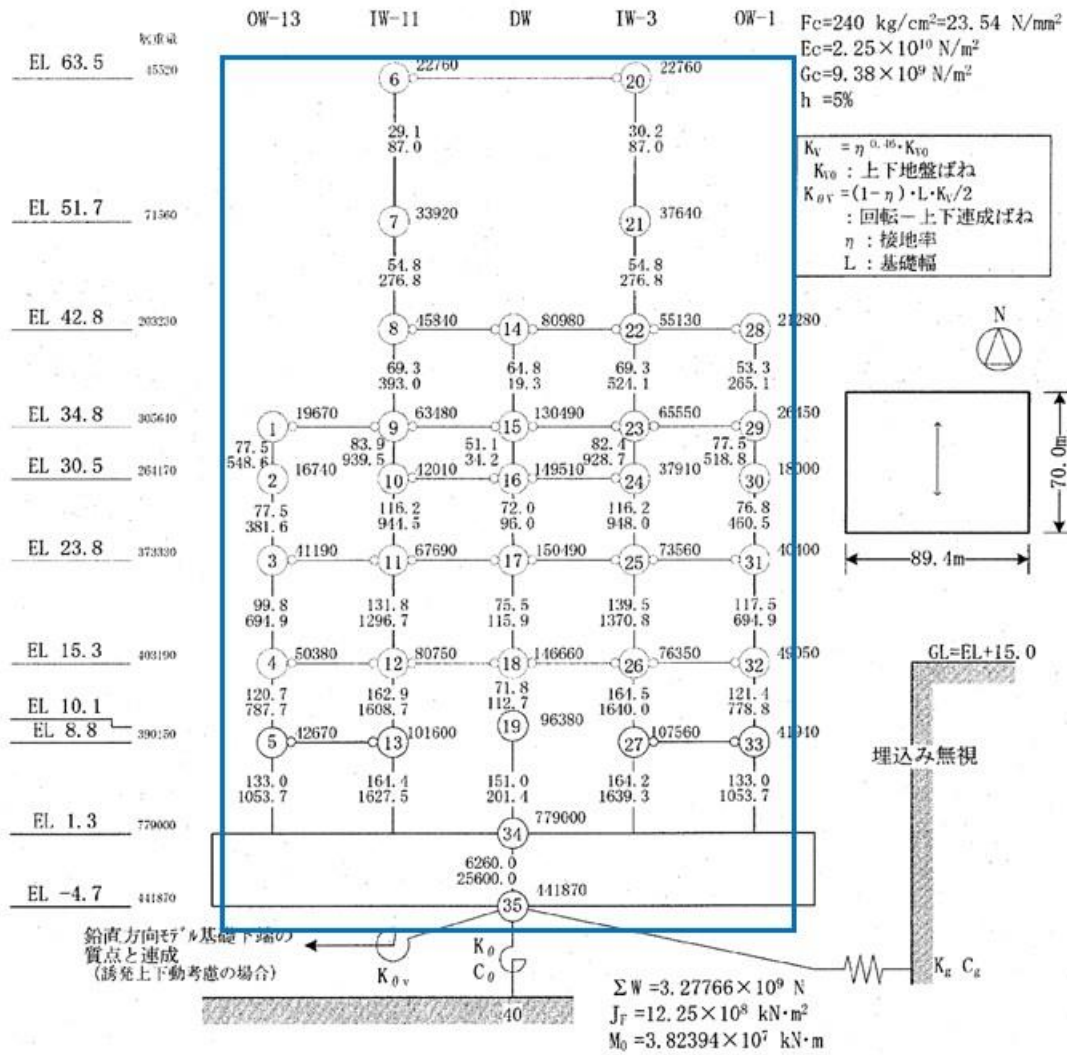
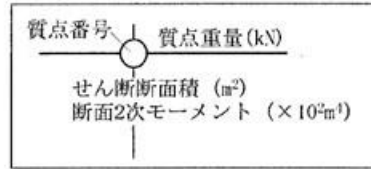
5. まとめ

島根原子力発電所第2号機の疲労評価に用いる等価繰返し回数は、J E A G 4 6 0 1-1987 記載の手順及び等価繰返し回数算出に影響するパラメータを保守的に設定した算出結果を踏まえ、基準地震動 S_s の疲労評価に用いる一律に設定する等価繰返し回数を 150 回及び弾性設計用地震動 S_d の疲労評価に用いる一律に設定する等価繰返し回数を 300 回に設定する。

別紙 1 地震応答解析モデルにおける等価繰返し回数の算出点

*1: 成層補正地盤の物性値による

: 算出点

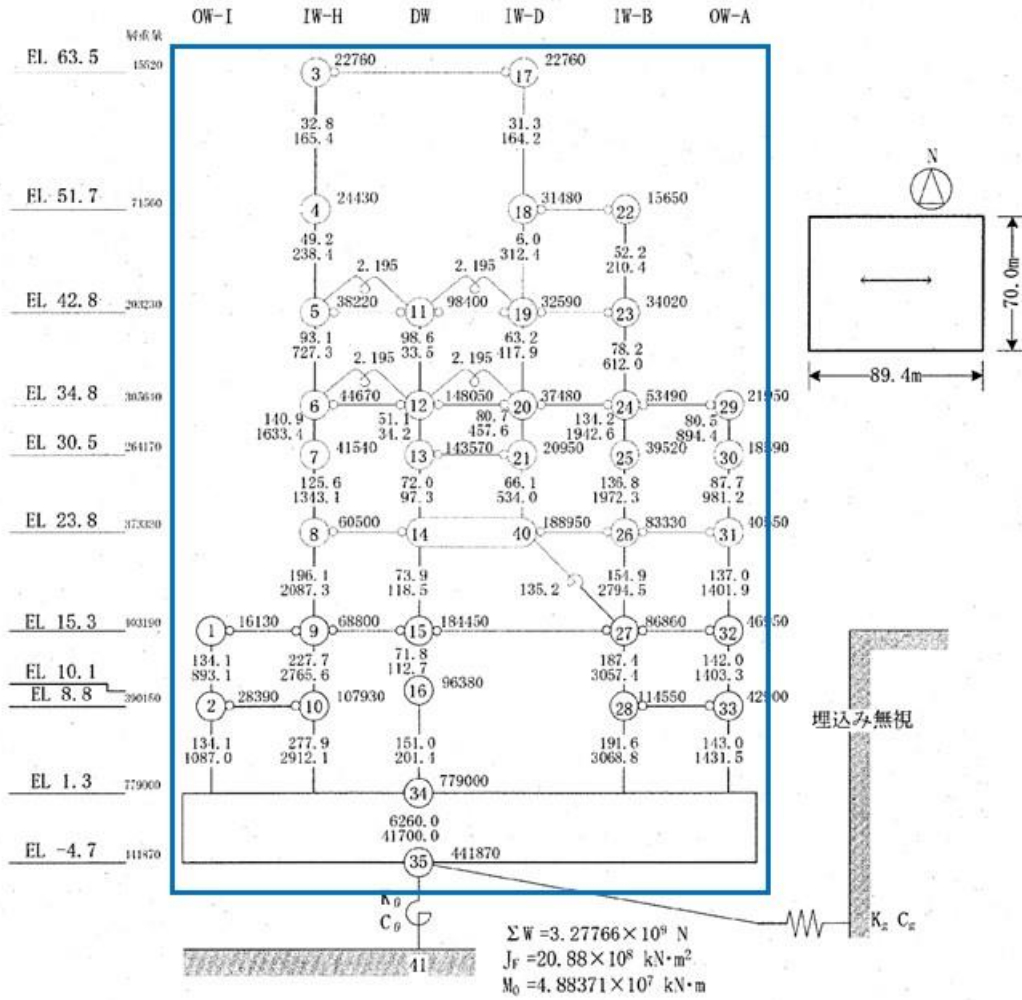
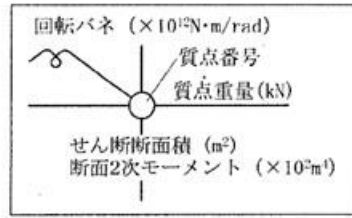


別図 1-1 原子炉建物地震応答解析モデルの等価繰返し回数の算出点 (水平方向 (NS 方向))

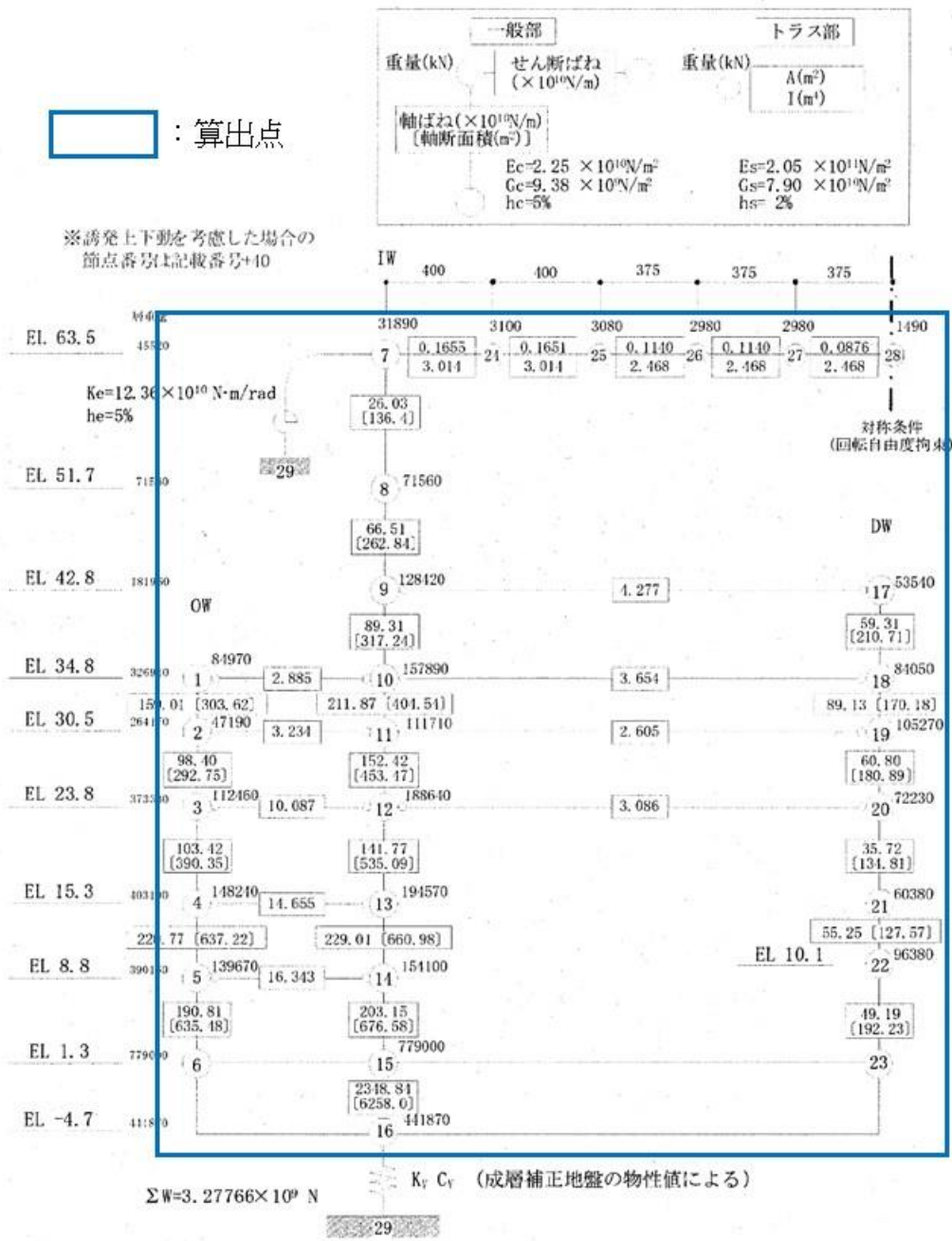
*1 : 成層補正地盤の物性値による

: 算出点

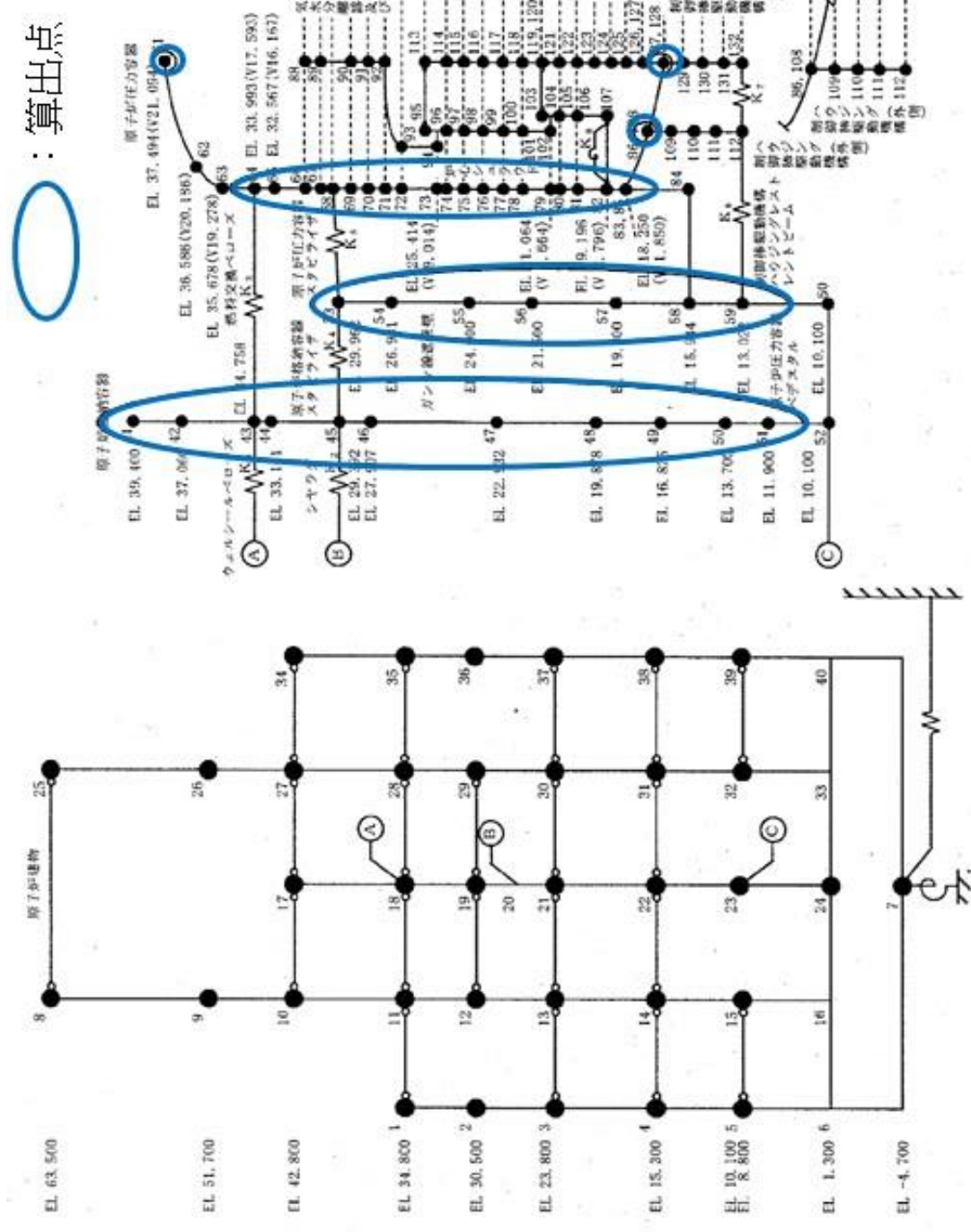
$F_c = 240 \text{ kg/cm}^2 = 23.54 \text{ N/mm}^2$
 $E_c = 2.25 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
 $G_c = 9.38 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
 $h = 5\%$



別図 1-2 原子炉建物地震応答解析モデルの等価繰返し回数の算出点 (水平方向 (EW 方向))

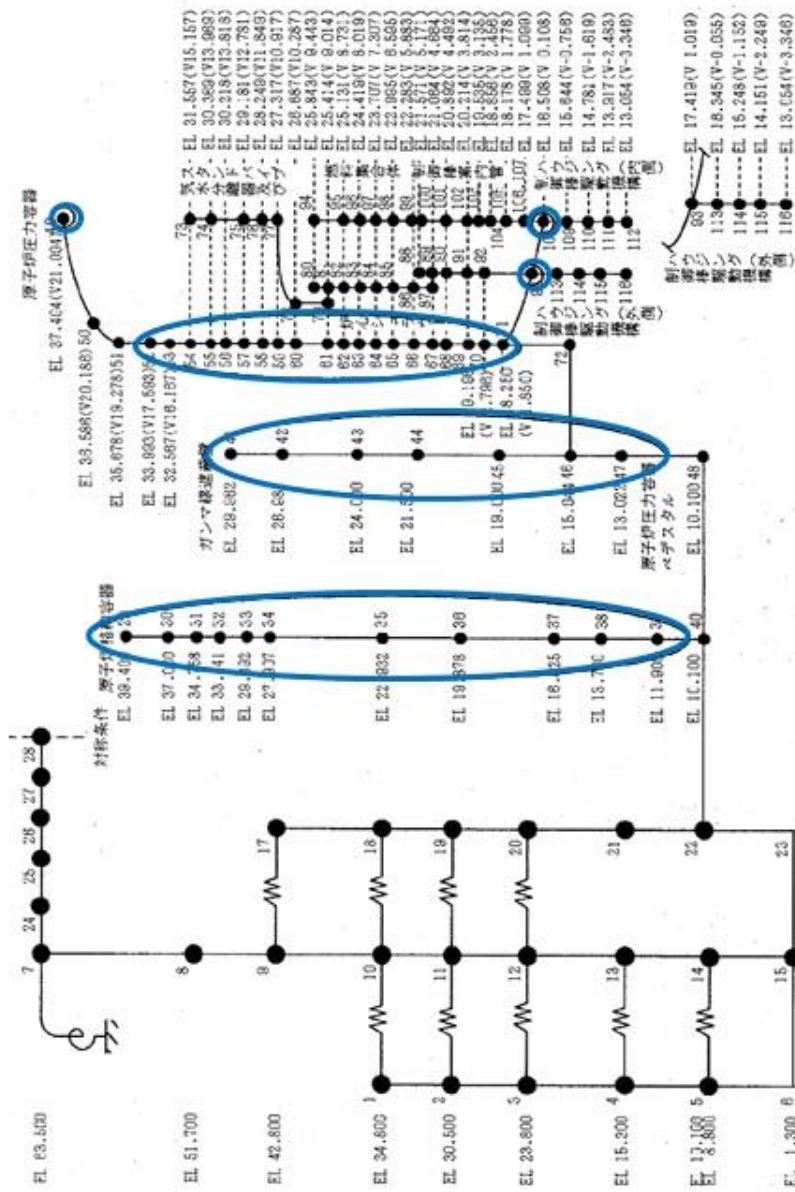


別図 1-3 原子炉建物地震応答解析モデルの等価繰返し回数の算出点 (鉛直方向)



別図 1-4 原子炉本体地震応答解析モデルの等価繰返し回数の算出点（水平方向（NS 方向））

○ : 算出点



別図 1-6 原子炉本体地震応答解析モデルの等価繰返し回数の算出点（鉛直方向）

別紙 2 減衰定数をパラメータとした等価繰返し回数の比較

別表 2-1 減衰定数をパラメータとした等価繰返し回数の算出結果 (NS 方向)

算出条件						各減衰定数に対する等価繰返し回数					
解析モデル	地震動	設計疲労線図	材料物性の不確かさ	EL (m)	質点	1.0%	1.5%	2.0%	2.5%	3.0%	
原子炉建物 地震応答解析 モデル	S s - D	炭素鋼, 低合金鋼 および 高張力鋼	基本ケース	63.500	6						
					7						
				51.700	21						
				42.800	8						
				34.800	1						
					2						
				30.500	10						
					30						
				23.800	3						
				15.300	4						
				10.100	19						
				8.800	5						
					27						
				1.300	34						
-4.700	35										

注：下線部は、各減衰定数に対する全方向（NS, EW, 鉛直）の等価繰返し回数の最大値を表す。

別表 2-2 減衰定数をパラメータとした等価繰返し回数の算出結果 (EW 方向)

解析モデル	地震動	算出条件				各減衰定数に対する等価繰返し回数					
		設計疲労線図	材料物性の不確かさ	EL (m)	質点	1.0%	1.5%	2.0%	2.5%	3.0%	
原子炉建物 地震応答解析 モデル	S s - D		基本ケース	63.500	3						
				51.700	4						
					18						
				42.800	5						
				34.800	6						
				30.500	7						
					13						
					25						
					30						
				23.800	8						
				15.300	1						
				10.100	16						
				8.800	2						
					28						
1.300	34										
-4.700	35										

注：下線部は、各減衰定数に対する全方向 (NS, EW, 鉛直) の等価繰返し回数の最大値を表す。

別表 2-3 減衰定数をパラメータとした等価繰返し回数の算出結果（鉛直方向）

算出条件						各減衰定数に対する等価繰返し回数					
解析モデル	地震動	設計疲労線図	材料物性の不確かさ	EL (m)	質点	1.0%	1.5%	2.0%	2.5%	3.0%	
原子炉建物 地震応答解析 モデル	S s - D	炭素鋼, 低合金鋼 および 高張力鋼	基本ケース	63.500	7						
				51.700	8						
				42.800	9						
					17						
				34.800	1						
					10						
					18						
				30.500	2						
					11						
					19						
				23.800	3						
					12						
					20						
				15.300	4						
					13						
					21						
10.100	22										
8.800	5										
	14										
1.300	15										
-4.700	16										

注：下線部は、各減衰定数に対する全方向（NS, EW, 鉛直）の等価繰返し回数の最大値を表す。

別紙 3 等価繰返し回数の算出における材料物性の不確かさの影響検討

1. はじめに

島根原子力発電所第 2 号機の耐震設計において、材料物性の不確かさを適切に考慮する方針としていることから、本資料において、等価繰返し回数算出に係る材料物性の不確かさによる影響検討を実施した。

2. 材料物性の不確かさを考慮した場合の等価繰返し回数の算出条件

原子炉建物地震応答解析モデル、原子炉本体地震応答解析モデルにおける材料物性の不確かさを考慮した場合の等価繰返し回数を算出する。別表 3-1 に等価繰返し回数の算出条件を示す。

別表 3-1 等価繰返し回数の算出条件

解析モデル	材料物性の不確かさ*	地震動	固有周期	減衰定数	設計疲労線図
原子炉建物地震応答解析モデル	基本ケース	S s - D	全固有周期帯	1.0%	炭素鋼、低合金鋼および高張力鋼
	ケース 2 (標準地盤 + σ)				
	ケース 3 (標準地盤 - σ)				
原子炉本体地震応答解析モデル	基本ケース	S s - D	全固有周期帯	1.0	炭素鋼、低合金鋼および高張力鋼
	ケース 2 (標準地盤 + σ)				
	ケース 3 (標準地盤 - σ)				

注記*：材料物性の不確かさを考慮した検討ケースの条件は、本文表 3-4 参照。

3. 算出結果及びまとめ

材料物性の不確かさをパラメータとした等価繰返し回数の最大回数を別表 3-2 に、それらの詳細内訳を別表 3-3～別表 3-8 に示す。地震応答解析モデルの材料物性の不確かさを考慮した場合、各質点の等価繰返し回数に影響があるものの、その最大回数は、原子炉本体地震応答解析モデルの EW 方向の基本ケースとなることを確認した。また、別表 3-2 の結果から基本ケースの等価繰返し回数を上回るケースは、原子炉建物地震応答解析モデルのケース 2 のみであり、その影響も 1%程度で影響軽微であるため、一律に設定する等価繰返し回数算出に当たっては、基本ケースを用いて検討する。

なお、島根原子力発電所第 2 号機の疲労評価に用いる一律に設定する等価繰返し回数は、最終段階での取り扱いとして安全側に切り上げて設定する。

別表 3-2 材料物性の不確かさをパラメータとした等価繰返し回数の比較結果

算出条件				各材料物性の不確かさに対する等価繰返し回数(最大回数)*		
解析モデル	地震動	減衰定数 (%)	設計疲労線図	基本ケース	ケース 2	ケース 3
原子炉建物 地震応答解析 モデル	S s - D	1.0	炭素鋼、低合金鋼 および高張力鋼			
原子炉本体 地震応答解析 モデル	S s - D	1.0	炭素鋼、低合金鋼 および高張力鋼			

注記* : () 内の数字は基本ケースにおける等価繰返し回数に対する各ケースの等価繰返し回数の比率を示す。

別表 3-3 材料物性の不確かさをパラメータとした等価繰返し回数の算出結果 (原子炉建物地震応答解析モデル, NS 方向)

解析モデル	算出条件				各材料物性の不確かさに対する等価繰返し回数		
	地震動	減衰定数 (%)	設計疲労線図	EL (m)	基本ケース	ケース 2	ケース 3
原子炉建物 地震応答解析 モデル	S s - D	1.0	炭素鋼, 低合金鋼 および高張力鋼	63.500	6		
				51.700	7		
				21	21		
				42.800	8		
				34.800	1		
					2		
				30.500	10		
					30		
				23.800	3		
				15.300	4		
				10.100	19		
				8.800	5		
					27		
				1.300	34		
				-4.700	35		

注：下線部は、原子炉建物地震応答解析モデルにおける各材料物性の不確かさに対する全方向 (NS, EW, 鉛直) の等価繰返し回数の最大値を表す。

別表 3-4 材料物性の不確かさをパラメータとした等価繰返し回数の算出結果 (原子炉建物地震応答解析モデル, EW 方向)

算出条件				各材料物性の不確かさに対する等価繰返し回数				
解析モデル	地震動	減衰定数 (%)	設計疲労線図	EL (m)	質点	基本ケース	ケース 2	ケース 3
原子炉建物 地震応答解析 モデル	S s - D	1.0	炭素鋼, 低合金鋼お よび高張力鋼	63.500	3			
				51.700	4			
				42.800	18			
				5				
				34.800	5			
				6				
				7				
				30.500	13			
				25				
				30				
				8				
				15.300	1			
				10.100	16			
8.800	2							
28								
1.300	34							
-4.700	35							

注：下線部は，原子炉建物地震応答解析モデルにおける各材料物性の不確かさに対する全方向 (NS, EW, 鉛直) の等価繰返し回数の最大値を表す。

別表 3-5 材料物性の不確かさをパラメータとした等価繰返し回数の算出結果 (原子炉建物地震応答解析モデル, 鉛直方向)

解析モデル	地震動	算出条件			各材料物性の不確かさに対する等価繰返し回数			
		減衰定数 (%)	設計疲労線図	EL (m)	質点	基本ケース	ケース2	ケース3
原子炉建物 地震応答解析 モデル	S s - D	1.0	炭素鋼, 低合金鋼および高張力鋼	63.500	7			
				51.700	8			
				42.800	9			
					17			
				34.800	1			
					10			
					18			
					2			
				30.500	11			
					19			
				23.800	3			
					12			
					20			
					4			
				15.300	13			
					21			
10.100	22							
8.800	5							
	14							
1.300	15							
-4.700	16							

注: 下線部は, 原子炉建物地震応答解析モデルにおける各材料物性の不確かさに対する全方向 (NS, EW, 鉛直) の等価繰返し回数の最大値を表す。

別表 3-6 材料物性の不確かさをパラメータとした等価繰返し回数の算出結果
(原子炉本体地震応答解析モデル, NS 方向)

解析モデル	地震動	算出条件			各材料物性の不確かさに対する等価繰返し回数				
		減衰定数 (%)	設計疲労線図	機器	EL (m)	質点	基本ケース	ケース 2	ケース 3
原子炉本体 地震応答解析 モデル	S s - D	1.0	炭素鋼, 低合金鋼 および高張力鋼	原子炉格納容器	39.400	41			
					37.060	42			
					34.758	43			
					33.141	44			
					29.392	45			
					27.907	46			
					22.932	47			
					19.878	48			
					16.825	49			
					13.700	50			
				11.900	51				
				ガンマ線遮蔽壁	29.962	53			
					26.981	54			
					24.000	55			
				原子炉圧力容器 ペDESTAL	21.500	56			
					19.000	57			
				原子炉圧力容器	15.944	58			
					13.022	59			
					37.494	61			
					33.993	64			
					32.567	65			
					31.557	66			
					30.369	67			
					30.218	68			
					29.181	69			
					28.249	70			
					27.317	71			
					26.687	72			
					25.414	73			
					25.131	74			
					24.419	75			
23.707	76								
22.995	77								
22.283	78								
21.064	79								
20.892	80								
20.214	81								
19.196	82								
18.250	83								
18.250	85								
17.442	86								
16.508	87								

注：下線部は、原子炉本体地震応答解析モデルにおける各材料物性の不確かさに対する全方向（NS, EW, 鉛直）の等価繰返し回数の最大値を表す。

別表 3-7 材料物性の不確かさをパラメータとした等価繰返し回数の算出結果
(原子炉本体地震応答解析モデル, EW 方向)

算出条件						各材料物性の不確かさに対する等価繰返し回数			
解析モデル	地震動	減衰定数 (%)	設計疲労線図	機器	EL (m)	質点	基本ケース	ケース 2	ケース 3
原子炉本体 地震応答解析 モデル	S s - D	1.0	炭素鋼, 低合金鋼 および高張力鋼	原子炉格納容器	39.400	41			
					37.060	42			
					34.758	43			
					33.141	44			
					29.392	45			
					27.907	46			
					22.932	47			
					19.878	48			
					16.825	49			
					13.700	50			
				11.900	51				
				ガンマ線遮蔽壁	29.962	53			
					26.981	54			
					24.000	55			
				原子炉圧力容器 ベDESTAL	21.500	56			
					19.000	57			
				原子炉圧力容器	15.944	58			
					13.022	59			
					37.494	61			
					33.993	64			
					32.567	65			
					31.557	66			
					30.369	67			
					30.218	68			
					29.181	69			
					28.249	70			
					27.317	71			
					26.687	72			
					25.414	73			
					25.131	74			
					24.419	75			
					23.707	76			
22.995	77								
22.283	78								
21.064	79								
20.892	80								
20.214	81								
19.196	82								
18.250	83								
18.250	85								
17.442	86								
16.508	87								

注：下線部は、原子炉本体地震応答解析モデルにおける各材料物性の不確かさに対する全方向（NS, EW, 鉛直）の等価繰返し回数の最大値を表す。

別表 3-8 材料物性の不確かさをパラメータとした等価繰返し回数の算出結果
(原子炉本体地震応答解析モデル, 鉛直方向)

算出条件						各材料物性の不確かさに対する等価繰返し回数			
解析モデル	地震動	減衰定数 (%)	設計疲労線図	機器	EL (m)	質点	基本ケース	ケース 2	ケース 3
原子炉本体 地震応答解析 モデル	S s - D	1.0	炭素鋼, 低合金鋼 および高張力鋼	原子炉格納容器	39.400	29			
					37.060	30			
					34.758	31			
					33.141	32			
					29.392	33			
					27.907	34			
					22.932	35			
					19.878	36			
					16.825	37			
					13.700	38			
				11.900	39				
				ガンマ線遮蔽壁	29.962	41			
					26.981	42			
					24.000	43			
					21.500	44			
				原子炉圧力容器 ベデスタル	15.944	46			
					13.022	47			
				原子炉圧力容器	37.494	49			
					33.993	52			
					32.567	53			
					31.557	54			
					30.369	55			
					30.218	56			
					29.181	57			
					28.249	58			
					27.317	59			
					26.687	60			
					25.414	61			
					25.131	62			
					24.419	63			
23.707	64								
22.995	65								
22.283	66								
21.064	67								
20.892	68								
20.214	69								
19.196	70								
18.250	71								
17.419	93								
16.508	108								

注：下線部は、原子炉本体地震応答解析モデルにおける各材料物性の不確かさに対する全方向（NS, EW, 鉛直）の等価繰返し回数の最大値を表す。

別紙 4 基準地震動 S s に対する等価繰返し回数算出結果

別表 4-1 基準地震動 S s に対する等価繰返し回数算出結果
(原子炉建物地震応答解析モデル, NS 方向)

算出条件							等価繰返し回数
解析モデル	地震動	減衰定数 (%)	設計疲労線図	材料物性の不確かさ	EL (m)	質点	
原子炉建物地震応答解析モデル	S s - D	1.0	炭素鋼, 低合金鋼および高張力鋼	基本ケース	63.500	6	
					51.700	7	
						21	
					42.800	8	
					34.800	1	
					30.500	2	
						10	
						30	
					23.800	3	
					15.300	4	
					10.100	19	
					8.800	5	
27							
1.300	34						
-4.700	35						

注：下線部は、原子炉建物地震応答解析モデルにおける基準地震動 S s に対する等価繰返し回数算出結果のうち NS 方向の中で最大の等価繰返し回数を表す。

別表 4-2 基準地震動 S s に対する等価繰返し回数算出結果
(原子炉建物地震応答解析モデル, EW 方向)

算出条件							等価繰返し回数
解析モデル	地震動	減衰定数 (%)	設計疲労線図	材料物性の不確かさ	EL (m)	質点	
原子炉建物地震応答解析モデル	S s - D	1.0	炭素鋼, 低合金鋼および高張力鋼	基本ケース	63.500	3	
					51.700	4	
						18	
					42.800	5	
					34.800	6	
					30.500	7	
						13	
						25	
					30		
					23.800	8	
					15.300	1	
					10.100	16	
8.800	2						
	28						
1.300	34						
-4.700	35						

注：下線部は、原子炉建物地震応答解析モデルにおける基準地震動 S s に対する等価繰返し回数算出結果のうち EW 方向の中で最大の等価繰返し回数を表す。

別表 4-2 基準地震動 S s に対する等価繰返し回数算出結果
(原子炉建物地震応答解析モデル, 鉛直方向)

算出条件							等価繰返し回数
解析モデル	地震動	減衰定数 (%)	設計疲労線図	材料物性の不確かさ	EL (m)	質点	
原子炉建物 地震応答解析 モデル	S s -D	1.0	炭素鋼, 低合金鋼 および高張力鋼	基本ケース	63.500	7	
					51.700	8	
					42.800	9	
						17	
					34.800	1	
						10	
						18	
					30.500	2	
						11	
						19	
					23.800	3	
						12	
						20	
					15.300	4	
						13	
						21	
10.100	22						
8.800	5						
	14						
1.300	15						
-4.700	16						

注：下線部は，原子炉建物地震応答解析モデルにおける基準地震動 S s に対する等価繰返し回数算出結果のうち鉛直方向の中で最大の等価繰返し回数を表す。

別表 4-4 基準地震動 S s に対する等価繰返し回数算出結果
(原子炉本体地震応答解析モデル, NS 方向)

解析モデル	地震動	減衰定数 (%)	算出条件				EL (m)	質点	等価繰返し回数
			設計疲労線図	材料物性の不確かさ	機器				
原子炉本体地震応答解析モデル	S s - D	1.0	炭素鋼, 低合金鋼 および 高張力鋼	基本ケース	原子炉格納容器	39.400	41		
						37.060	42		
						34.758	43		
						33.141	44		
						29.392	45		
						27.907	46		
						22.932	47		
						19.878	48		
						16.825	49		
						13.700	50		
					11.900	51			
					ガンマ線遮蔽壁	29.962	53		
						26.981	54		
						24.000	55		
						21.500	56		
					原子炉圧力容器 ベデスタル	15.944	58		
						13.022	59		
					原子炉圧力容器	37.494	61		
						33.993	64		
						32.567	65		
						31.557	66		
						30.369	67		
						30.218	68		
						29.181	69		
						28.249	70		
						27.317	71		
						26.687	72		
						25.414	73		
25.131	74								
24.419	75								
23.707	76								
22.995	77								
22.283	78								
21.064	79								
20.892	80								
20.214	81								
19.196	82								
18.250	83								
18.250	85								
17.442	86								
16.508	87								

注：下線部は、原子炉本体地震応答解析モデルにおける基準地震動 S s に対する等価繰返し回数算出結果のうち NS 方向の中で最大の等価繰返し回数を表す。

別表 4-5 基準地震動 S s に対する等価繰返し回数算出結果
(原子炉本体地震応答解析モデル, EW 方向)

解析モデル	地震動	減衰定数 (%)	設計疲労線図	材料物性の不確かさ	機器	算出条件		等価繰返し回数
						EL (m)	質点	
原子炉本体地震応答解析モデル	S s - D	1.0	炭素鋼, 低合金鋼および高張力鋼	基本ケース	原子炉格納容器	39.400	41	
						37.060	42	
						34.758	43	
						33.141	44	
						29.392	45	
						27.907	46	
						22.932	47	
						19.878	48	
						16.825	49	
					13.700	50		
					11.900	51		
					ガンマ線遮蔽壁	29.962	53	
						26.981	54	
						24.000	55	
						21.500	56	
					原子炉圧力容器 ベDESTAL	15.944	58	
						13.022	59	
					原子炉圧力容器	37.494	61	
						33.993	64	
						32.567	65	
						31.557	66	
						30.369	67	
						30.218	68	
						29.181	69	
						28.249	70	
						27.317	71	
						26.687	72	
						25.414	73	
						25.131	74	
						24.419	75	
						23.707	76	
22.995	77							
22.283	78							
21.064	79							
20.892	80							
20.214	81							
19.196	82							
18.250	83							
18.250	85							
17.442	86							
16.508	87							

注：下線部は、原子炉本体地震応答解析モデルにおける基準地震動 S s に対する等価繰返し回数算出結果のうち EW 方向の中で最大の等価繰返し回数を表す。

別表 4-6 基準地震動 S s に対する等価繰返し回数算出結果
(原子炉本体地震応答解析モデル, 鉛直方向)

解析モデル	地震動	減衰定数 (%)	算出条件				EL (m)	質点	等価繰返し回数
			設計疲労線図	材料物性の不確かさ	機器				
原子炉本体地震応答解析モデル	S s - D	1.0	炭素鋼, 低合金鋼 および 高張力鋼	基本ケース	原子炉格納容器	39.400	29		
						37.060	30		
						34.758	31		
						33.141	32		
						29.392	33		
						27.907	34		
						22.932	35		
						19.878	36		
						16.825	37		
						13.700	38		
					11.900	39			
					ガンマ線遮蔽壁	29.962	41		
						26.981	42		
						24.000	43		
						21.500	44		
					原子炉圧力容器 ベDESTAL	19.000	45		
						15.944	46		
					原子炉圧力容器	13.022	47		
						37.494	49		
						33.993	52		
						32.567	53		
						31.557	54		
						30.369	55		
						30.218	56		
						29.181	57		
						28.249	58		
						27.317	59		
						26.687	60		
						25.414	61		
						25.131	62		
24.419	63								
23.707	64								
22.995	65								
22.283	66								
21.064	67								
20.892	68								
20.214	69								
19.196	70								
18.250	71								
17.419	93								
16.508	108								

注：下線部は、原子炉本体地震応答解析モデルにおける基準地震動 S s に対する等価繰返し回数算出結果のうち鉛直方向の中で最大の等価繰返し回数を表す。

別紙 5 弾性設計用地震動 S d に対する等価繰返し回数算出結果

別表 5-1 弾性設計用地震動 S d に対する等価繰返し回数算出結果
(原子炉建物地震応答解析モデル, NS 方向)

算出条件							等価繰返し回数
解析モデル	地震動	減衰定数 (%)	設計疲労線図	材料物性の不確かさ	EL (m)	質点	
原子炉建物地震応答解析モデル	S d - D × 2 回 又は S d - 1 × 2 回	1.0	炭素鋼, 低合金鋼 および 高張力鋼	基本ケース	63.500	6	
					51.700	7	
						21	
					42.800	8	
					34.800	1	
					30.500	2	
						10	
						30	
					23.800	3	
					15.300	4	
					10.100	19	
					8.800	5	
						27	
1.300	34						
-4.700	35						

注：下線部は，原子炉建物地震応答解析モデルにおける弾性設計用地震動 S d に対する等価繰返し回数算出結果のうち NS 方向の中で最大の等価繰返し回数を表す。

別表 5-2 弾性設計用地震動 S d に対する等価繰返し回数算出結果
(原子炉建物地震応答解析モデル, EW 方向)

算出条件							等価繰返し回数
解析モデル	地震動	減衰定数 (%)	設計疲労線図	材料物性の不確かさ	EL (m)	質点	
原子炉建物地震応答解析モデル	S d - D × 2 回 又は S d - 1 × 2 回	1.0	炭素鋼, 低合金鋼 および 高張力鋼	基本ケース	63.500	3	
					51.700	4	
						18	
					42.800	5	
					34.800	6	
					30.500	7	
						13	
						25	
					30	30	
					23.800	8	
					15.300	1	
					10.100	16	
					8.800	2	
28							
1.300	34						
-4.700	35						

注：下線部は，原子炉建物地震応答解析モデルにおける弾性設計用地震動 S d に対する等価繰返し回数算出結果のうち EW 方向の中で最大の等価繰返し回数を表す。

別表 5-3 弾性設計用地震動 S d に対する等価繰返し回数算出結果
(原子炉建物地震応答解析モデル, 鉛直方向)

算出条件							等価繰返し回数
解析モデル	地震動	減衰定数 (%)	設計疲労線図	材料物性の不確かさ	EL (m)	質点	
原子炉建物 地震応答解析 モデル	S d - D × 2回 又は S d - 1 × 2回	1.0	炭素鋼, 低合金鋼 および 高張力鋼	基本ケース	63.500	7	
					51.700	8	
					42.800	9	
						17	
					34.800	1	
						10	
						18	
					30.500	2	
						11	
						19	
					23.800	3	
						12	
						20	
					15.300	4	
						13	
						21	
10.100	22						
8.800	5						
	14						
1.300	15						
-4.700	16						

注：下線部は，原子炉建物地震応答解析モデルにおける弾性設計用地震動 S d に対する等価繰返し回数算出結果のうち鉛直方向の中で最大の等価繰返し回数を表す。

別表 5-4 弾性設計用地震動 S d に対する等価繰返し回数算出結果
(原子炉本体地震応答解析モデル, NS 方向)

算出条件								等価繰返し回数
解析モデル	地震動	減衰定数 (%)	設計疲労線図	材料物性の不確かさ	機器	EL (m)	質点	
原子炉本体地震応答解析モデル	S d - D × 2回 又は S d - 1 × 2回	1.0	炭素鋼, 低合金鋼 および 高張力鋼	基本ケース	原子炉格納容器	39.400	41	
						37.060	42	
						34.758	43	
						33.141	44	
						29.392	45	
						27.907	46	
						22.932	47	
						19.878	48	
						16.825	49	
					13.700	50		
					11.900	51		
					ガンマ線遮蔽壁	29.962	53	
						26.981	54	
						24.000	55	
						21.500	56	
					原子炉圧力容器 ペダスタル	19.000	57	
						15.944	58	
					原子炉圧力容器	13.022	59	
						37.494	61	
						33.993	64	
						32.567	65	
						31.557	66	
						30.369	67	
						30.218	68	
						29.181	69	
						28.249	70	
						27.317	71	
						26.687	72	
						25.414	73	
						25.131	74	
						24.419	75	
						23.707	76	
						22.995	77	
						22.283	78	
						21.064	79	
						20.892	80	
					20.214	81		
19.196	82							
18.250	83							
18.250	85							
17.442	86							
16.508	87							

注：下線部は，原子炉本体地震応答解析モデルにおける弾性設計用地震動 S d に対する等価繰返し回数算出結果のうち NS 方向の中で最大の等価繰返し回数を表す。

別表 5-5 弾性設計用地震動 S d に対する等価繰返し回数算出結果
(原子炉本体地震応答解析モデル, EW 方向)

算出条件								等価繰返し回数
解析モデル	地震動	減衰定数 (%)	設計疲労線図	材料物性の不確かさ	機器	EL (m)	質点	
原子炉本体地震応答解析モデル	S d - D × 2回 又は S d - 1 × 2回	1.0	炭素鋼, 低合金鋼 および 高張力鋼	基本ケース	原子炉格納容器	39.400	41	
						37.060	42	
						34.758	43	
						33.141	44	
						29.392	45	
						27.907	46	
						22.932	47	
						19.878	48	
						16.825	49	
						13.700	50	
					11.900	51		
					ガンマ線遮蔽壁	29.962	53	
						26.981	54	
						24.000	55	
						21.500	56	
					原子炉圧力容器 ベDESTAL	19.000	57	
						15.944	58	
					原子炉圧力容器	13.022	59	
						37.494	61	
						33.993	64	
						32.567	65	
						31.557	66	
						30.369	67	
						30.218	68	
						29.181	69	
						28.249	70	
						27.317	71	
						26.687	72	
						25.414	73	
						25.131	74	
24.419	75							
23.707	76							
22.995	77							
22.283	78							
21.064	79							
20.892	80							
20.214	81							
19.196	82							
18.250	83							
18.250	85							
17.442	86							
16.508	87							

注：下線部は、原子炉本体地震応答解析モデルにおける弾性設計用地震動 S d に対する等価繰返し回数算出結果のうち EW 方向の中で最大の等価繰返し回数を表す。

別表 5-6 弾性設計用地震動 S d に対する等価繰返し回数算出結果
(原子炉本体地震応答解析モデル, 鉛直方向)

算出条件								等価繰返し回数
解析モデル	地震動	減衰定数 (%)	設計疲労線図	材料物性の不確かさ	機器	EL (m)	質点	
原子炉本体地震応答解析モデル	S d - D × 2 回 又は S d - 1 × 2 回	1.0	炭素鋼, 低合金鋼 および 高張力鋼	基本ケース	原子炉格納容器	39.400	29	
						37.060	30	
						34.758	31	
						33.141	32	
						29.392	33	
						27.907	34	
						22.932	35	
						19.878	36	
						16.825	37	
						13.700	38	
					11.900	39		
					ガンマ線遮蔽壁	29.962	41	
						26.981	42	
						24.000	43	
						21.500	44	
					原子炉圧力容器 ベDESTAL	19.000	45	
						15.944	46	
					原子炉圧力容器	13.022	47	
						37.494	49	
						33.993	52	
						32.567	53	
						31.557	54	
						30.369	55	
						30.218	56	
						29.181	57	
						28.249	58	
						27.317	59	
						26.687	60	
						25.414	61	
						25.131	62	
24.419	63							
23.707	64							
22.995	65							
22.283	66							
21.064	67							
20.892	68							
20.214	69							
19.196	70							
18.250	71							
17.419	93							
16.508	108							

注：下線部は、原子炉本体地震応答解析モデルにおける弾性設計用地震動 S d に対する等価繰返し回数算出結果のうち鉛直方向の中で最大の等価繰返し回数を表す。

別紙 6 ピーク応力の算出方法

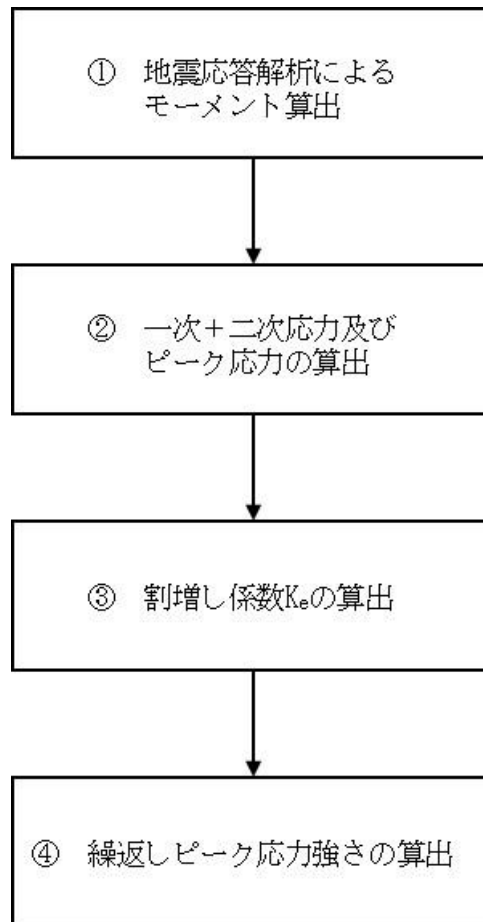
1. はじめに

本資料では、疲労評価に用いる地震時のピーク応力の算出方法について、クラス1管のうち残留熱除去系配管（配管解析モデル RHR-PD-7）を代表設備として説明する。

2. ピーク応力の算出方法

2.1 ピーク応力の算出フロー

ピーク応力の算出フローを別図 6-1 に示す。



別図 6-1 地震時のピーク応力算出フロー

一次＋二次応力及びピーク応力の算出で用いている記号は以下のとおり。

- S_n : 一次＋二次応力 (MPa)
- S_p : ピーク応力 (MPa)
- K_2, C_2 : 応力係数 (J S M E 設計・建設規格(2005/2007) PPB-3812.3)
- M_{is} : 地震による慣性力と相対変位により生じるモーメントの全振幅
(別表 6-1 記載の各方向モーメントの SRSS) (N・mm)
- Z_i : 管の断面係数(mm³)

③ 割増し係数 K_e の算出

②にて求めた一次＋二次応力 S_n が $3 \cdot S_m$ 以上となるため、割増し係数 K_e を算出する。当該配管は J S M E 設計・建設規格(2005/2007)PVB-3315(2) a. (b)の場合に該当するため、割増し係数 K_e は以下のとおりとなる (J S M E 設計・建設規格(2005/2007)PVB-84)。

$$K_e = K_e' = 1 + (q - 1) \cdot \left(1 - \frac{3 \cdot S_m}{S_n} \right)$$



割増し係数 K_e の算出で用いている記号は以下のとおり。

- S_m : 設計応力強さ (MPa)
- q : J S M E 設計・建設規格(2005/2007)表 PVB-3315-1 のうち RHR-PD-7 の材料である炭素鋼の値

④ 繰返しピーク応力強さの算出

ピーク応力 S_p 及び割増し係数 K_e を用い、繰返しピーク応力強さ S_ℓ は以下のとおりとなる (J S M E 設計・建設規格(2005/2007)PVB-82)。

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



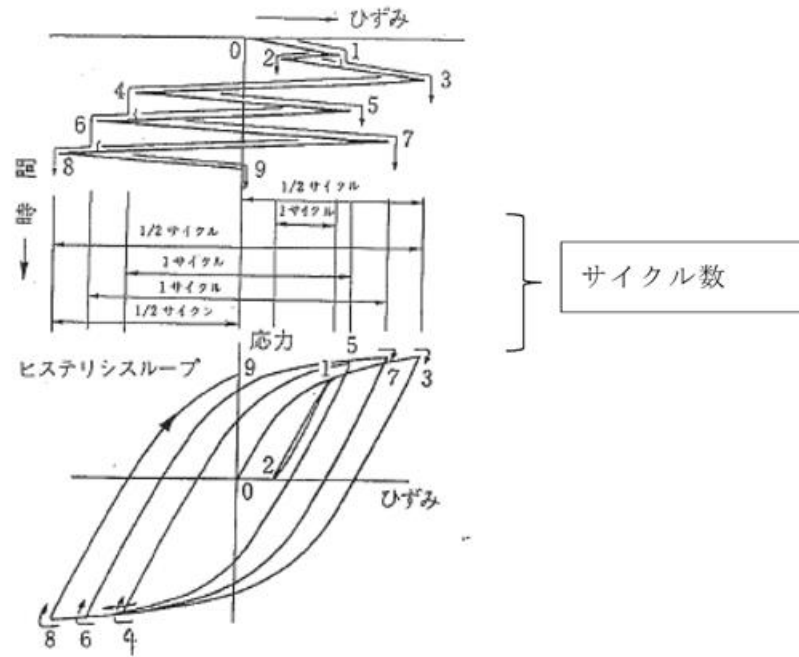
(MPa)

別紙 7 疲労評価の対象設備及び部位毎のピーク応力

一律の等価繰返し回数を用いる疲労評価対象設備			
設備名称	評価部位	ピーク応力 (MPa) (水平2方向考慮なし)	ピーク応力 (MPa) (水平2方向考慮あり)
機器搬入口	機器搬入口本体 と補強板との結 合部	—	
制御棒駆動機 構搬出ハッチ	制御棒駆動機構 搬出ハッチ本体 と補強板との結 合部	—	
所員用エアロ ック	所員用エアロッ ク本体と補強板 との結合部	—	
電気配線貫通 部 (X-100A~D)	ドライウエルと スリーブとの結 合部	—	
CRD-PD-1	配管本体	—	759
CRD-PD-2	配管本体	—	1028
PLR-PD-1	配管本体	—	435
PLR-PD-2	配管本体	—	410
CUW-PD-1	配管本体	—	40
CUW-R-1	配管本体	—	38
SLC-R-1	配管本体	—	741

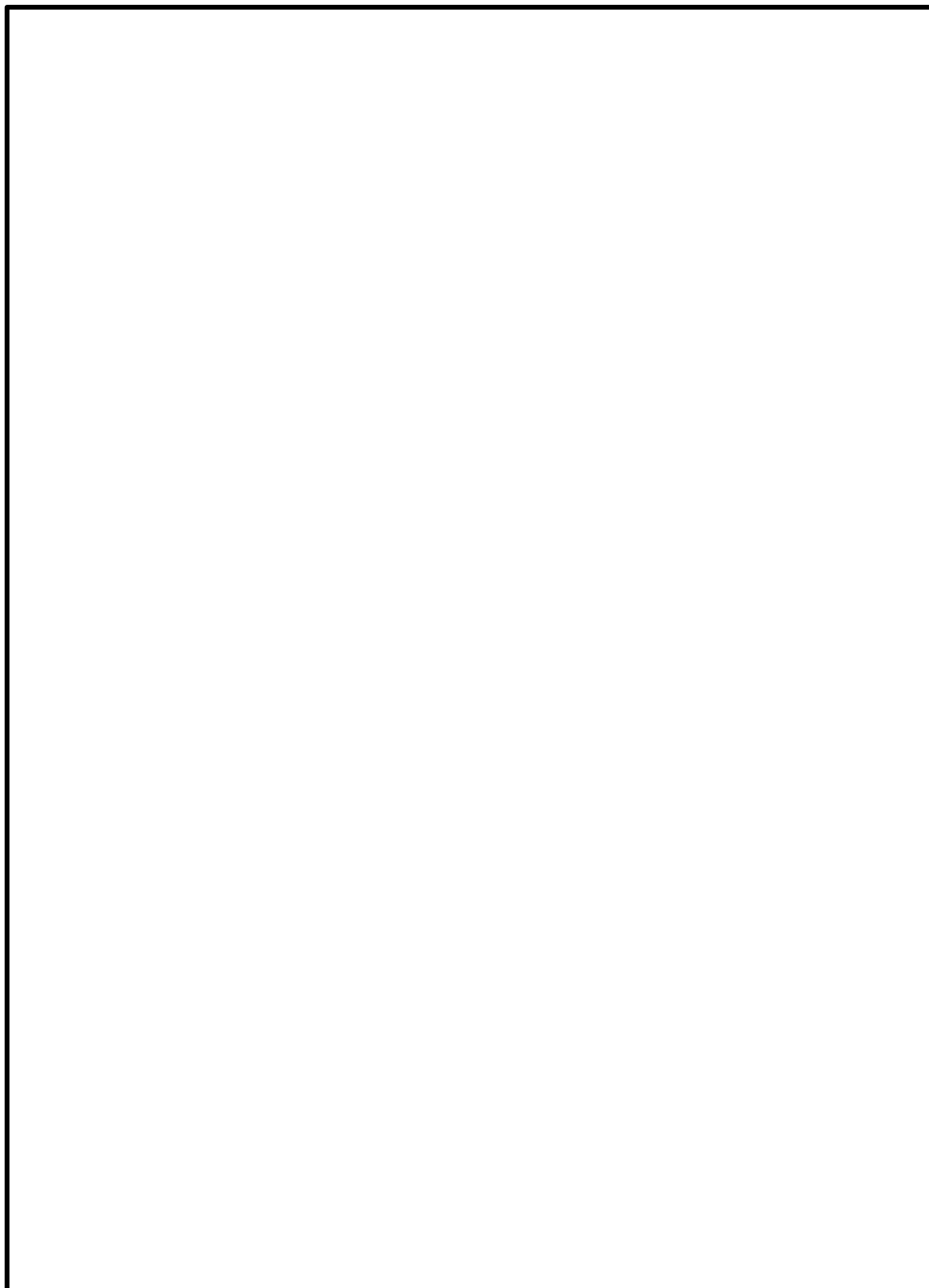
別紙 8 ピーク応力法における各ピークのサイクル数の求め方

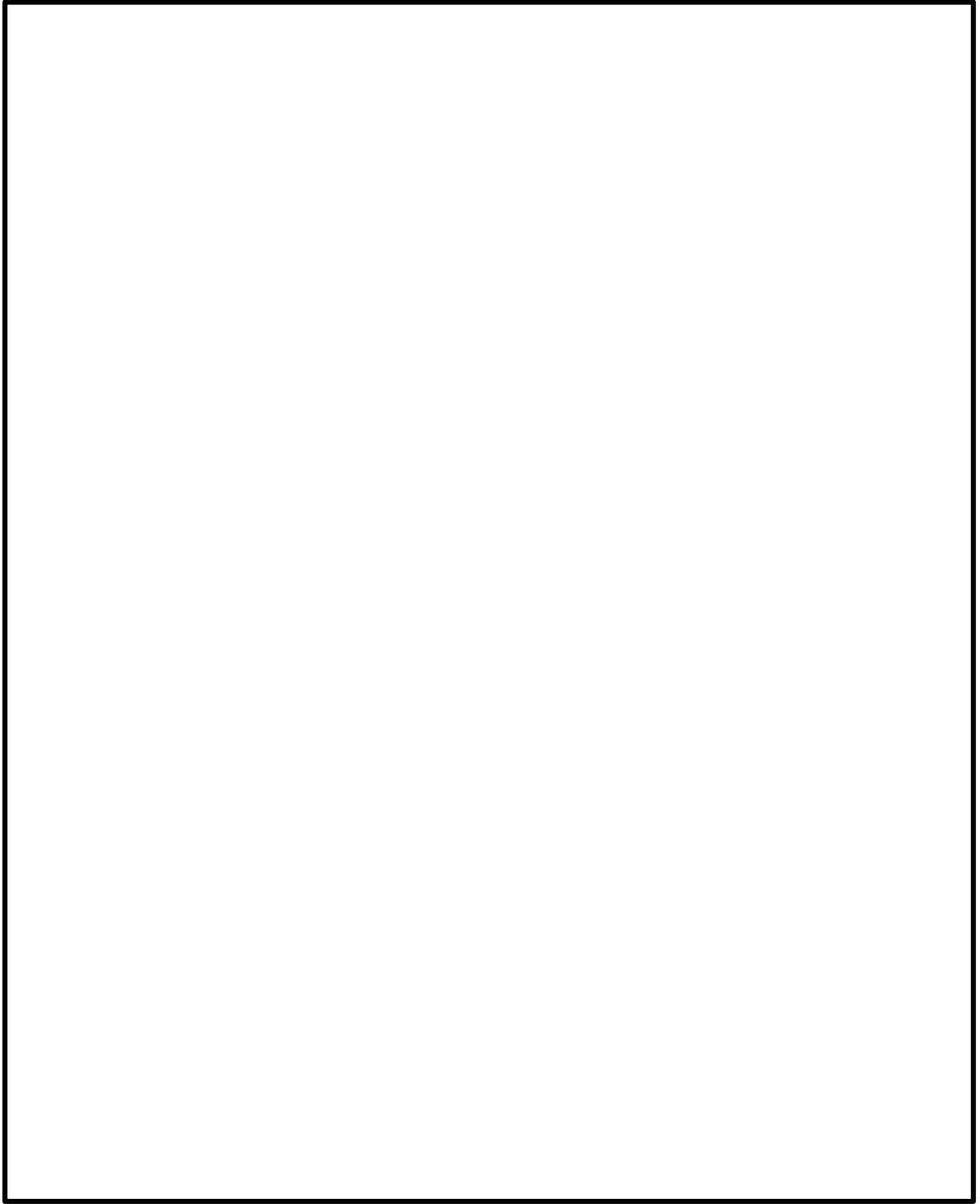
島根原子力発電所第2号機のピーク応力法における各ピーク点のサイクル数についてはレインフロー法にて求める。別図 8-1 に示すとおり、実際の材料挙動に着目し、片振りとなるピーク点については0.5、両振りとなるピーク点については1と割り当てている。なお、このサイクル数のカウント方法は、疲労設計において、材料の応力-ひずみ挙動との対応が良いことから一般的に用いられている手法である（別紙 8 別添参照。）。



別図 8-1 レインフロー法の概要

(出典：「疲労設計便覧」(別紙 8 別添参照。))

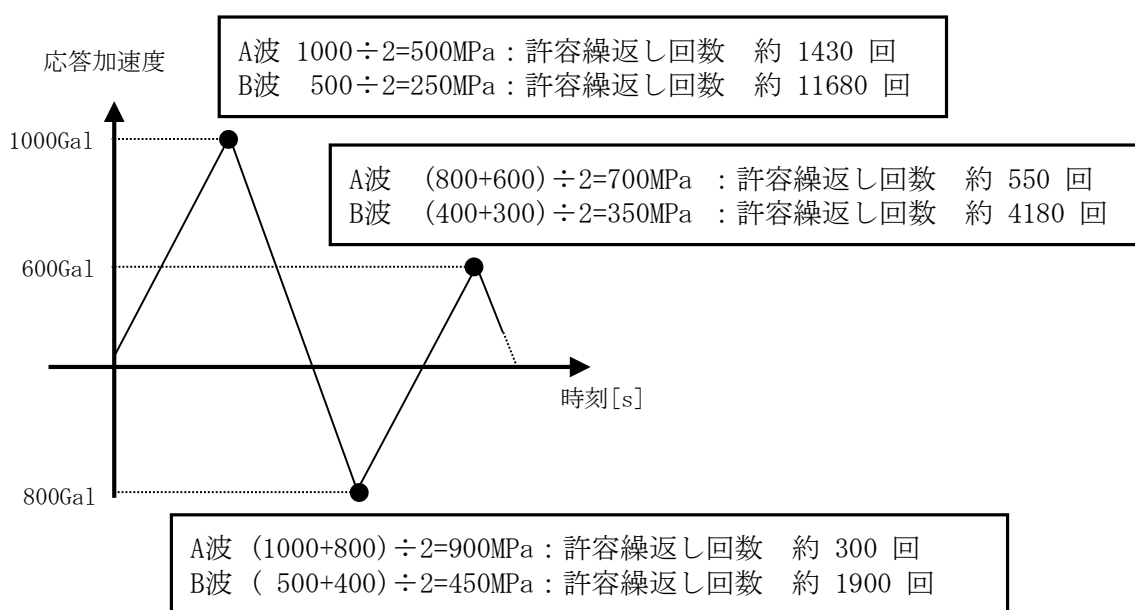




別紙9 ピーク応力の大きさと等価繰返し回数の関係

「昭和55年度 耐震設計の標準化に関する調査報告書」にてピーク応力の設定値が高くなるほど回数が大きくなる傾向となることが確認されている。本資料ではピーク応力を大きく設定することで、等価繰返し回数が大きく算出され、保守的な設定になることを簡単な例により説明する。

例として、別図9-1に示す応答波形を仮定する。

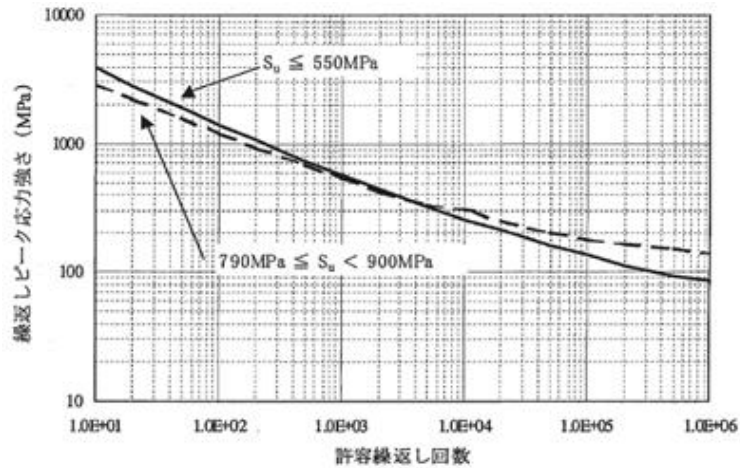


別図9-1 1質点系の時刻歴応答波形

また、大小2つの応答波形について、応答振幅が2対1の関係であると仮定し、以下に示す最大ピーク応力を仮定し、それぞれの等価繰返し回数を算出する。なお、別図9-1の各ピーク応力は1質点系の応答波形に線形比例で設定した。

- ・ A波:地震動に対する最大ピーク応力 900MPa
- ・ B波:地震動に対する最大ピーク応力 450MPa

各ピークにおける許容繰返し回数は、別図9-2に示す炭素鋼の設計疲労線図にて算出し、その結果を別図9-1に併せて示す。



(J SME 設計・建設規格より抜粋)

別図 9-2 設計疲労線図

これにより、算出した等価繰返し回数は以下の関係となる。

$$A波の地震動の等価繰返し回数 : \left[\frac{0.5}{1430} + \frac{0.5}{300} + \frac{0.5}{550} \right] \times 300 = 0.88 \text{ 回}$$

$$B波の地震動の等価繰返し回数 : \left[\frac{0.5}{11680} + \frac{0.5}{1900} + \frac{0.5}{4180} \right] \times 1900 = 0.81 \text{ 回}$$

上記の結果を比較すると、各ピーク応力における許容繰返し回数の差が等価繰返し回数に影響するため、A波の等価繰返し回数が大きくなることがわかる。その許容繰返し回数の差は、別図 9-2 に示すとおり、ピーク応力が小さくなるにつれて、設計疲労線図の勾配が緩やかになっているため、ピーク応力が低減するほど許容繰返し回数の増加の割合が大きくなっていることによるものである。

以上より、ピーク応力を大きく設定することは、等価繰返し回数が大きく算出されるため、保守的な設定であるといえる。

別紙 10 等価繰返し回数算出プログラム

1. はじめに

今回工認における等価繰返し回数算出において使用した計算機プログラム（解析コード）について説明する。

島根原子力発電所第2号機の等価繰返し回数の算出において、「PLTCOM2」を使用しており、解析コードの概要を以降に記載する。

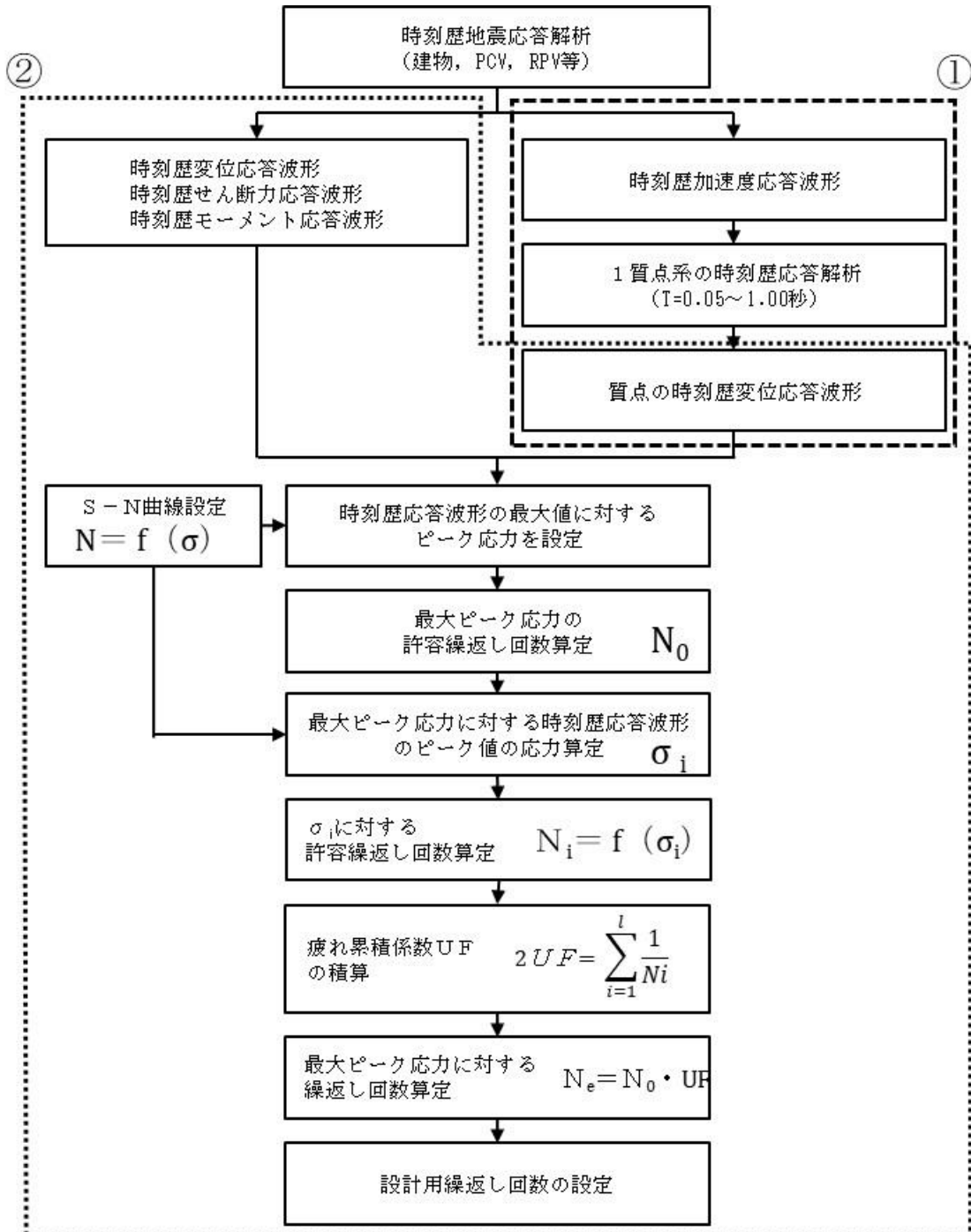
2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	等価繰返し回数算出プログラム（PLTCOM2）
使用目的	等価繰返し回数の算出
開発機関	日立GEニュークリア・エナジー株式会社
開発時期	2017年
使用したバージョン	Ver1.00, 1.10
コードの概要	等価繰返し回数算出プログラム（PLTCOM2）（以下、「本解析コード」という。）は、耐震設計に使用する条件を作成することを目的に、レインフロー法等を用いた方法で等価繰返し回数を算出する機能を統合したシステムである。
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>【検証（Verification）】 本解析コードの検証の内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードでレインフロー法によって算出した等価繰返し回数の値と、手計算で計算した値が一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・算出方法はJ E A G 4 6 0 1記載の設計用繰返し回数設定（ピーク応力法）のフローに従っており、妥当性に問題はない。

3. 解析コード（PLTCOM2）における等価繰返し回数算出機能の検証

3.1 概要

本工事計画認可申請書において使用した解析コード「PLTCOM2」（以下、「本解析コード」という。）を用いて得られた計算結果の妥当性を確認し、本解析コードの検証を行う。本解析コードを用いた、等価繰返し回数算出フロー（ピーク応力法）を別図 10-1 に示す。



別図 10-1 等価繰返し回数算出フロー（ピーク応力法）

3.2 解析コードの検証

(1) 検証の概要

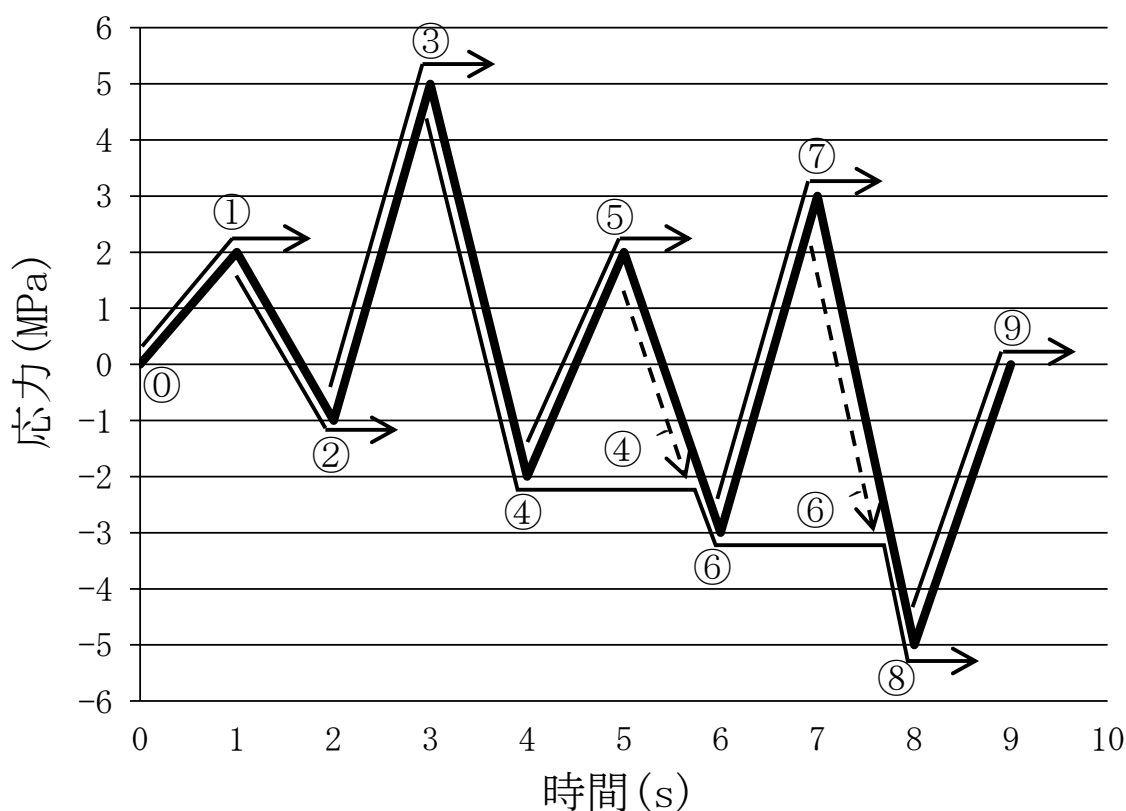
本解析コードによる計算結果の妥当性の確認には、手計算により算出した等価繰返し回数を用いる。

本解析コードと手計算により算出した等価繰返し回数の比較をすることにより、解析コードの検証を行った。

(2) 検証ケース

別図 10-2 に示す時刻歴データを入力地震動として、本解析コードを用いて計算する。等価繰返し回数算出において、別図 10-1 に示す等価繰返し回数算出フロー（ピーク応力法）の①と②で計算を行っているが、①の時刻歴加速度応答波形による 1 質点系の時刻歴応答解析は、「Seismic Analysis System (S A S)」の設計用床応答スペクトル作成機能と同モジュールを使用している。

時刻歴加速度応答波形による 1 質点系の時刻歴応答解析後の処理は②と同じであるため、本検証では、②の計算結果と手計算により算出した等価繰返し回数の比較をする。



別図 10-2 入力地震動

(3) 算出条件

J E A G 4 6 0 1 記載の等価繰返し回数算出フロー（ピーク応力法）のうち時刻歴波形に対する等価繰返し回数を算出する。算出条件を別表 10-1 に、使用する設計疲労線図の材料データを別表 10-2 に示す。

別表 10-1 算出条件

設定項目	算出条件
設計疲労線図	炭素鋼，低合金鋼および高張力鋼 ($S_u \leq 550\text{MPa}$)
最大ピーク応力	1471MPa

別表 10-2 設計疲労線図 材料データ

許容繰返し回数 (回)	繰返しピーク応力強さ (MPa)
10	3999
20	2827
50	1896
100	1413
200	1069
500	724
1000	572
2000	441
5000	331
10000	262
12000	248
20000	214
50000	159
100000	138
200000	114
500000	93
1000000	86

(4) 計算結果の比較

本解析コード及び手計算で計算した等価繰返し回数 N_0 を別表 10-3 に示す。そのうち、応力に対する許容繰返し回数 N_i は J S M E 設計・建設規格に記載の補間方法を用いて算出した。また、 N_0 は N_i における最大ピーク応力である。

手計算による σ_i に対する許容繰返し回数 N_i の計算結果を別表 10-4、手計算による疲れ累積係数 $U F$ の計算結果を別表 10-5 に示す。

(5) 検証結果

別表 10-3 に示す等価繰返し回数の比較結果のとおり、両者は一致しており、本解析コードを用いて得られた計算結果の妥当性を確認した。

別表 10-3 本解析コード及び手計算による等価繰返し回数の計算結果

No.	項目	本解析コードによる 計算結果	手計算による 計算結果

注記*1:プログラムによる自動計算

*2:小数部を切上げ

別表 10-4 手計算による σ_i に対する許容繰返し回数 N_i の計算結果

ピーク点		ピーク応力 (MPa)	最大ピーク応力に対する 時刻歴応答波形の ピーク応力 σ_i (MPa)	σ_i に対する 許容繰返し回数 N_i (回)
START	END			

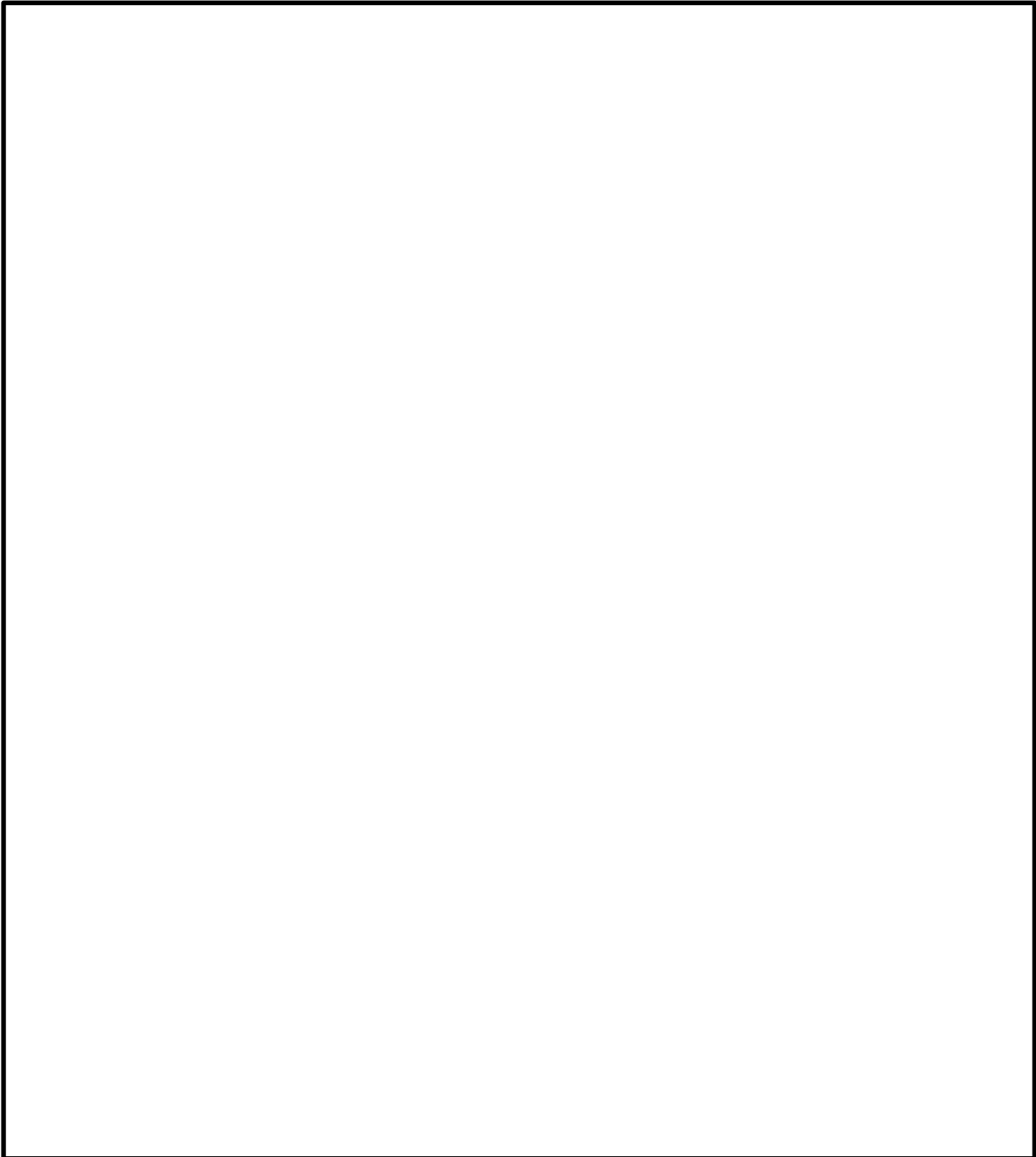
別表 10-5 手計算による疲れ累積係数 UF の計算結果

疲れ累積係数 UF

別紙 11 多方向入力を対象とした等価繰返し回数算出方法

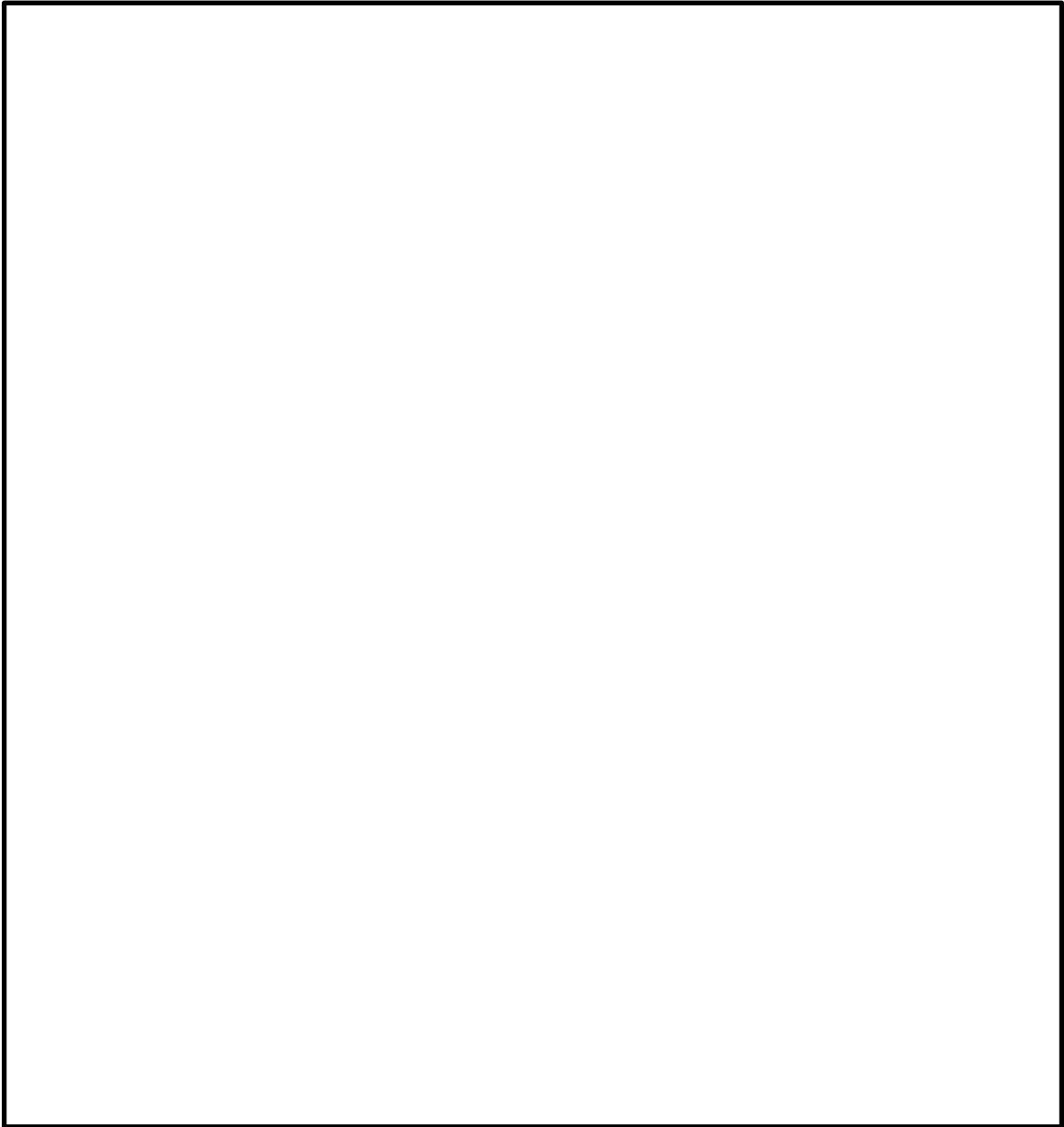
1. はじめに

本資料は、多方向入力を対象とした等価繰返し回数算出方法についてまとめたものである。本内容は、2 項にて電共研「新規制基準対応を踏まえた機器・配管系評価方法に関する研究」（平成 29 年 3 月）における検討内容を示し、3 項にて島根原子力発電所第 2 号機において多方向入力時に各方向の等価繰返し回数の最大値を用いることが妥当であることを示すものである。



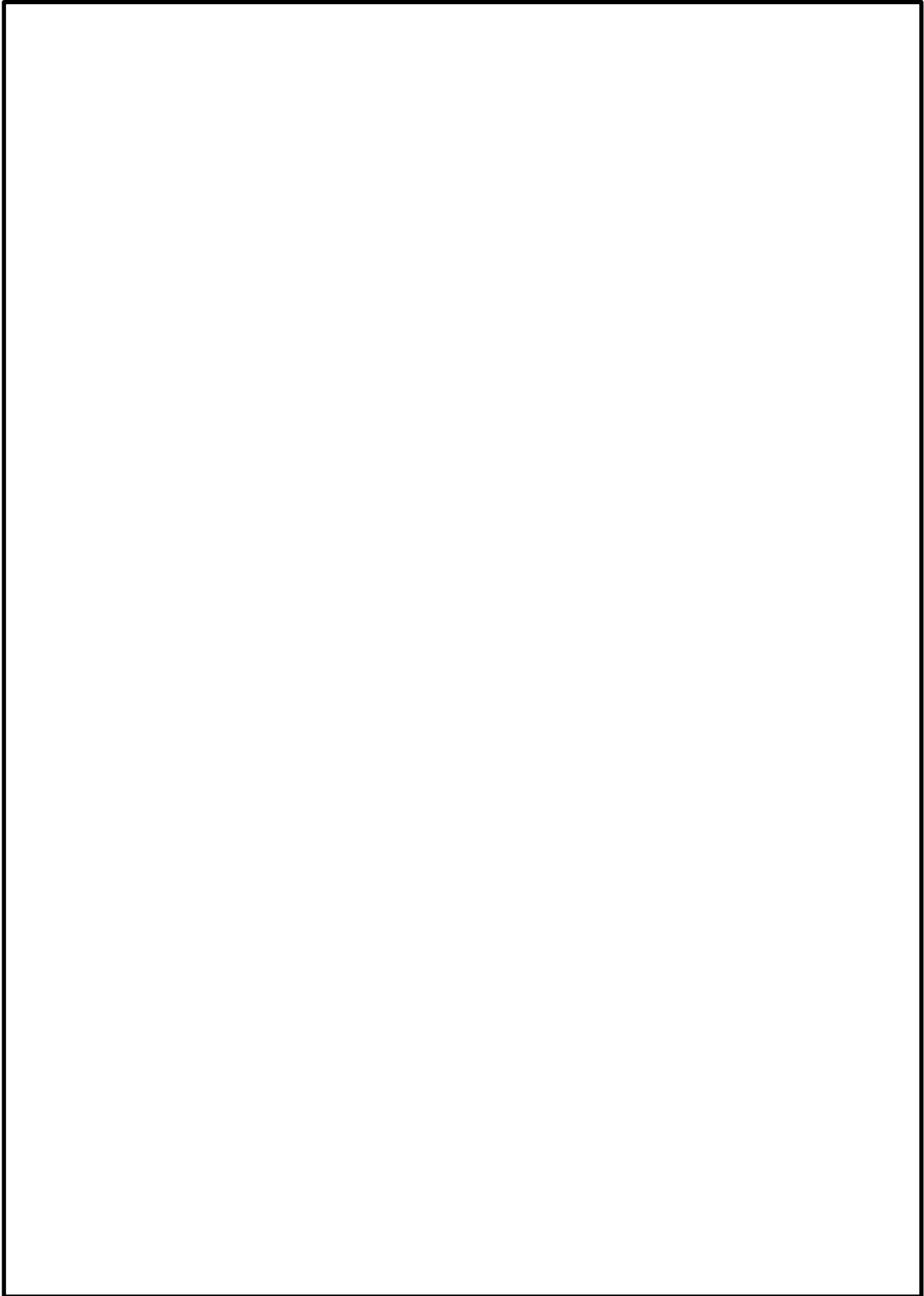


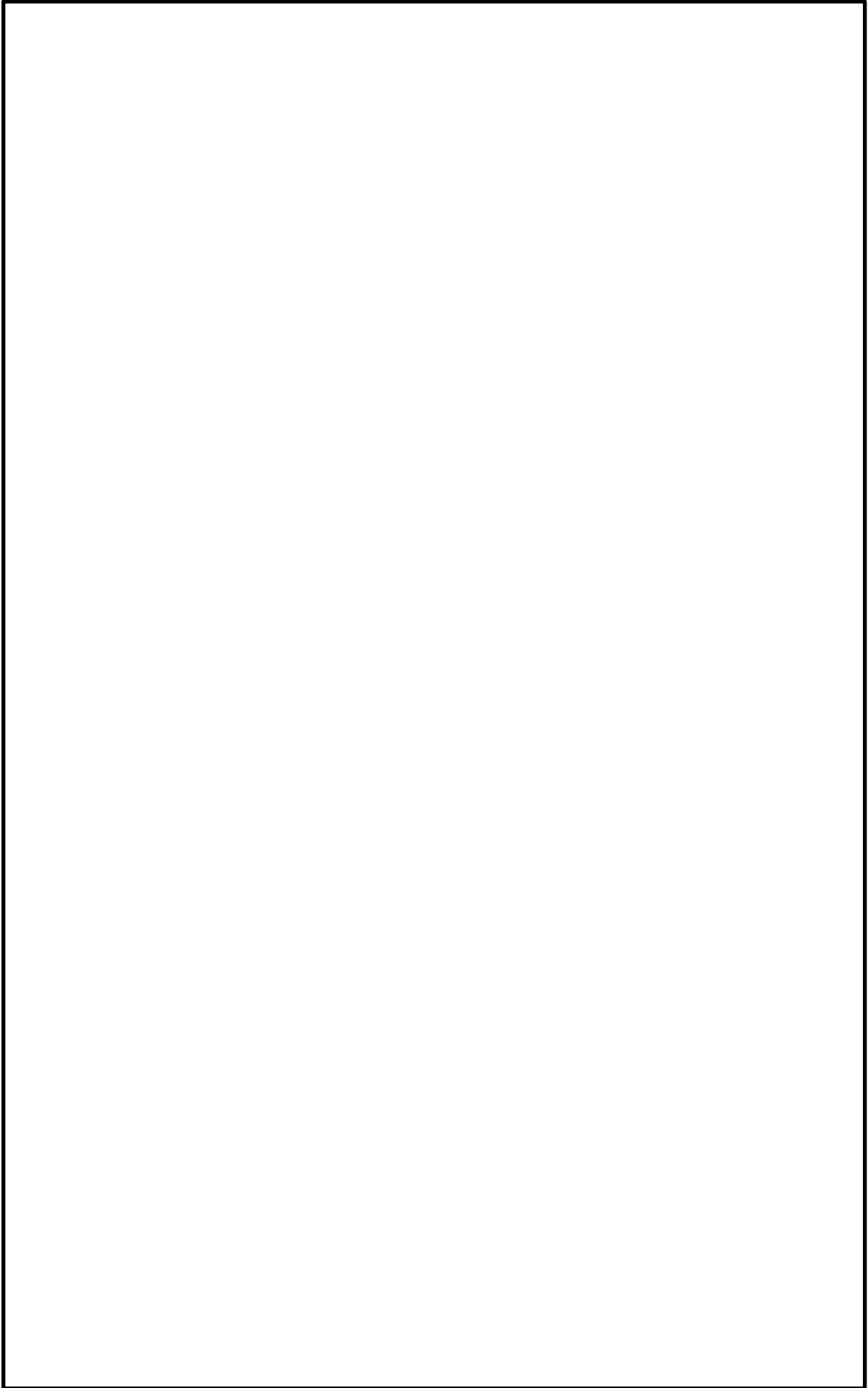


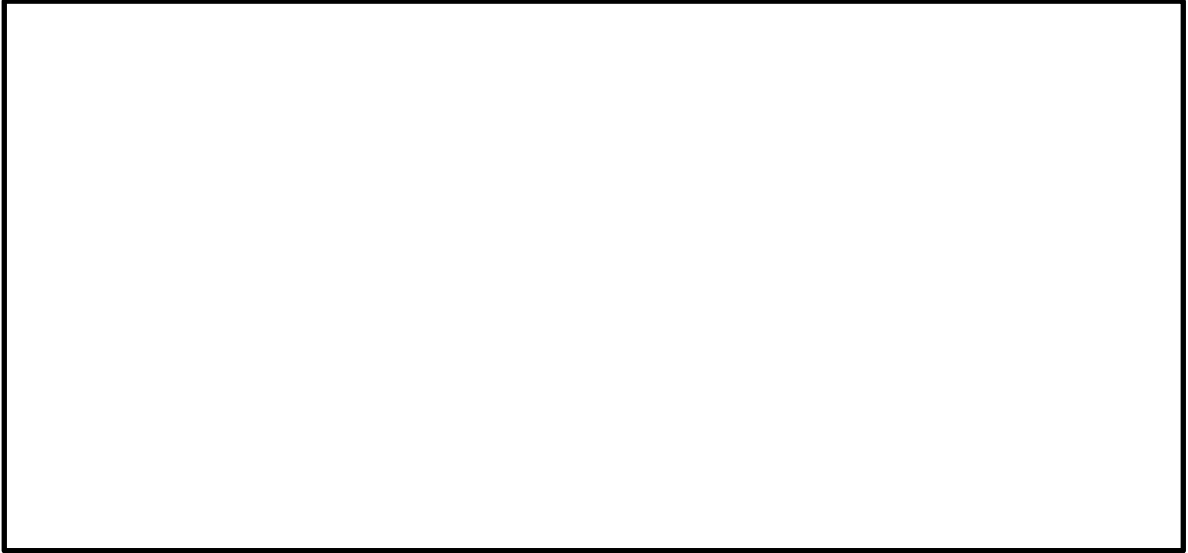


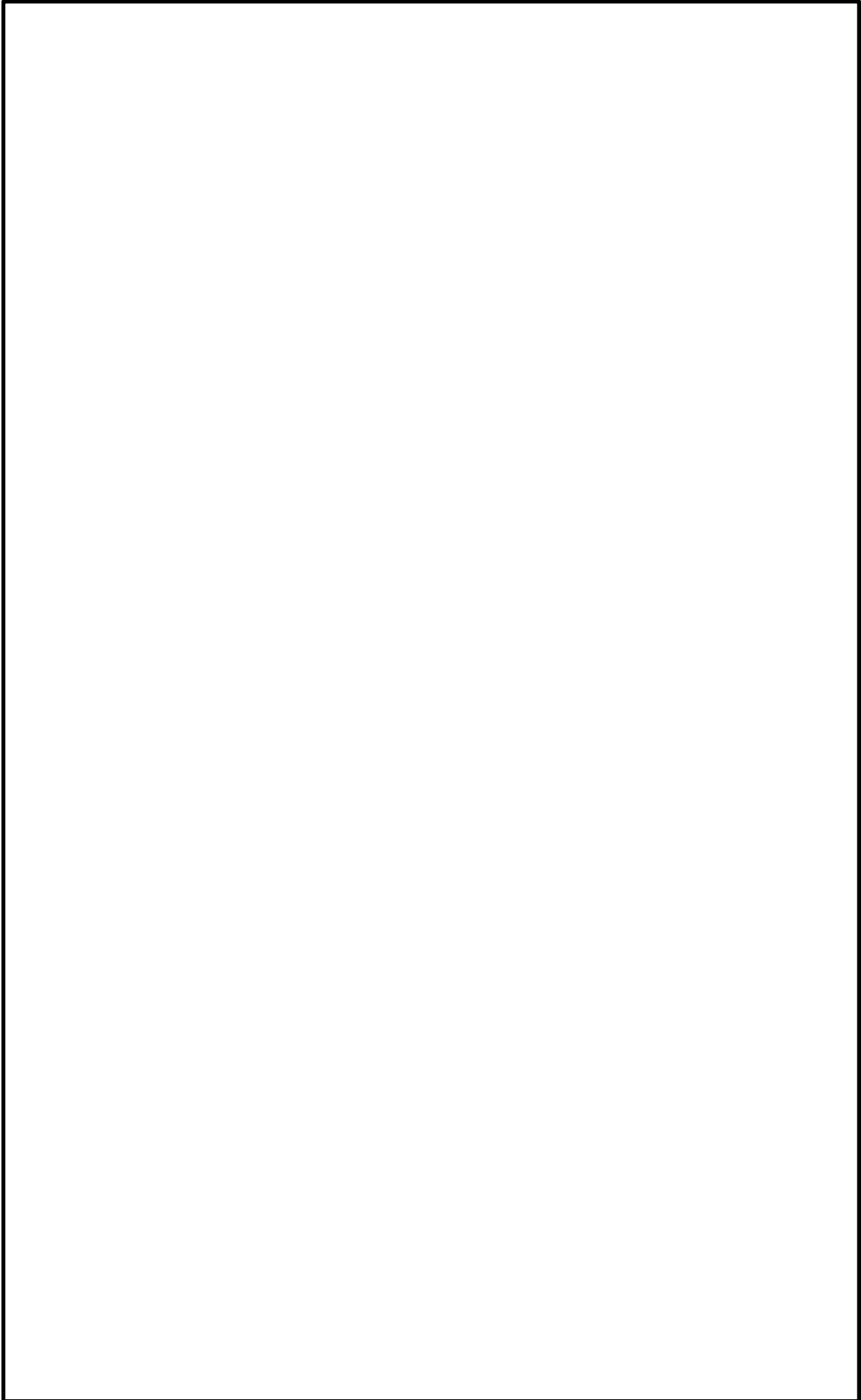


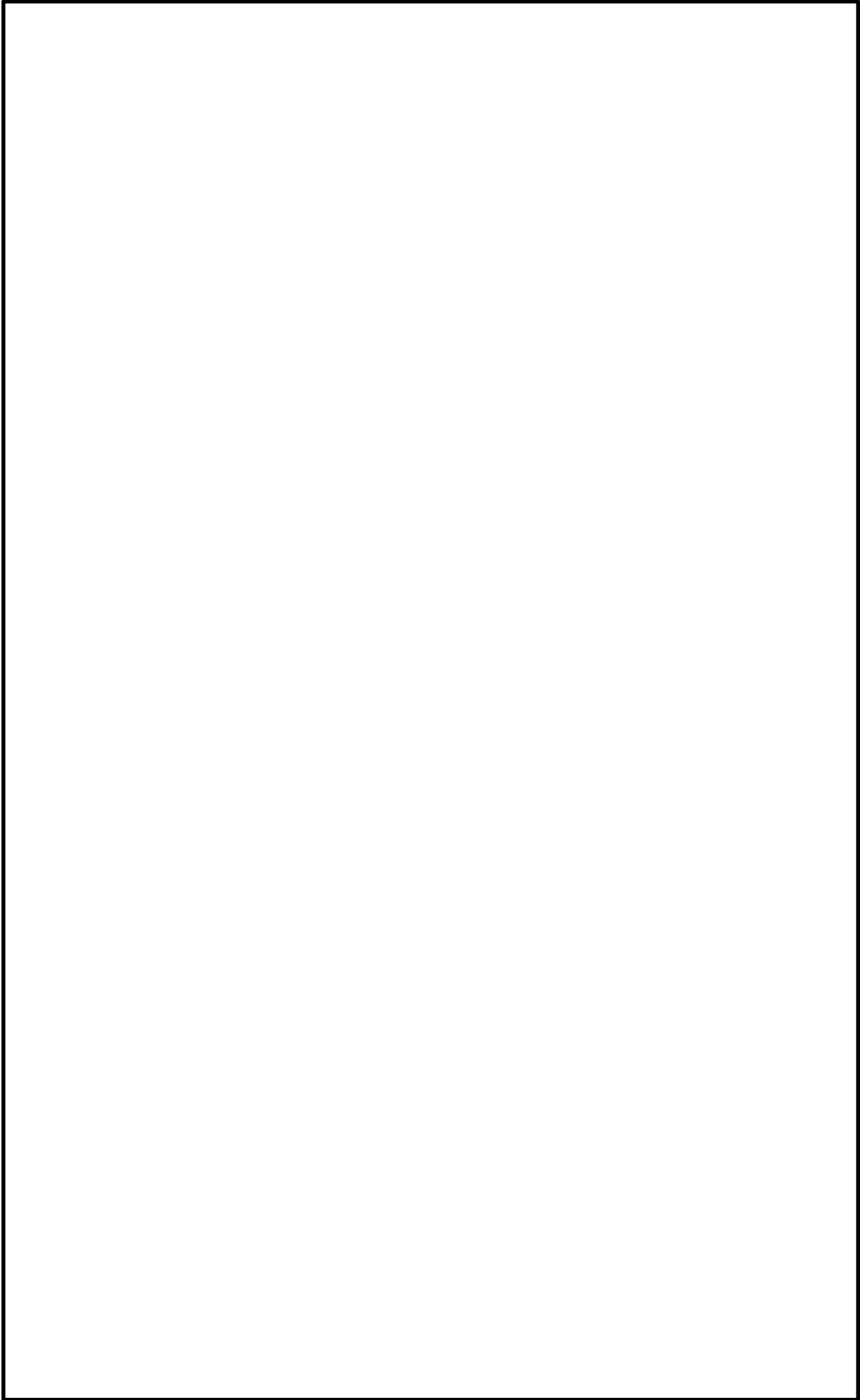






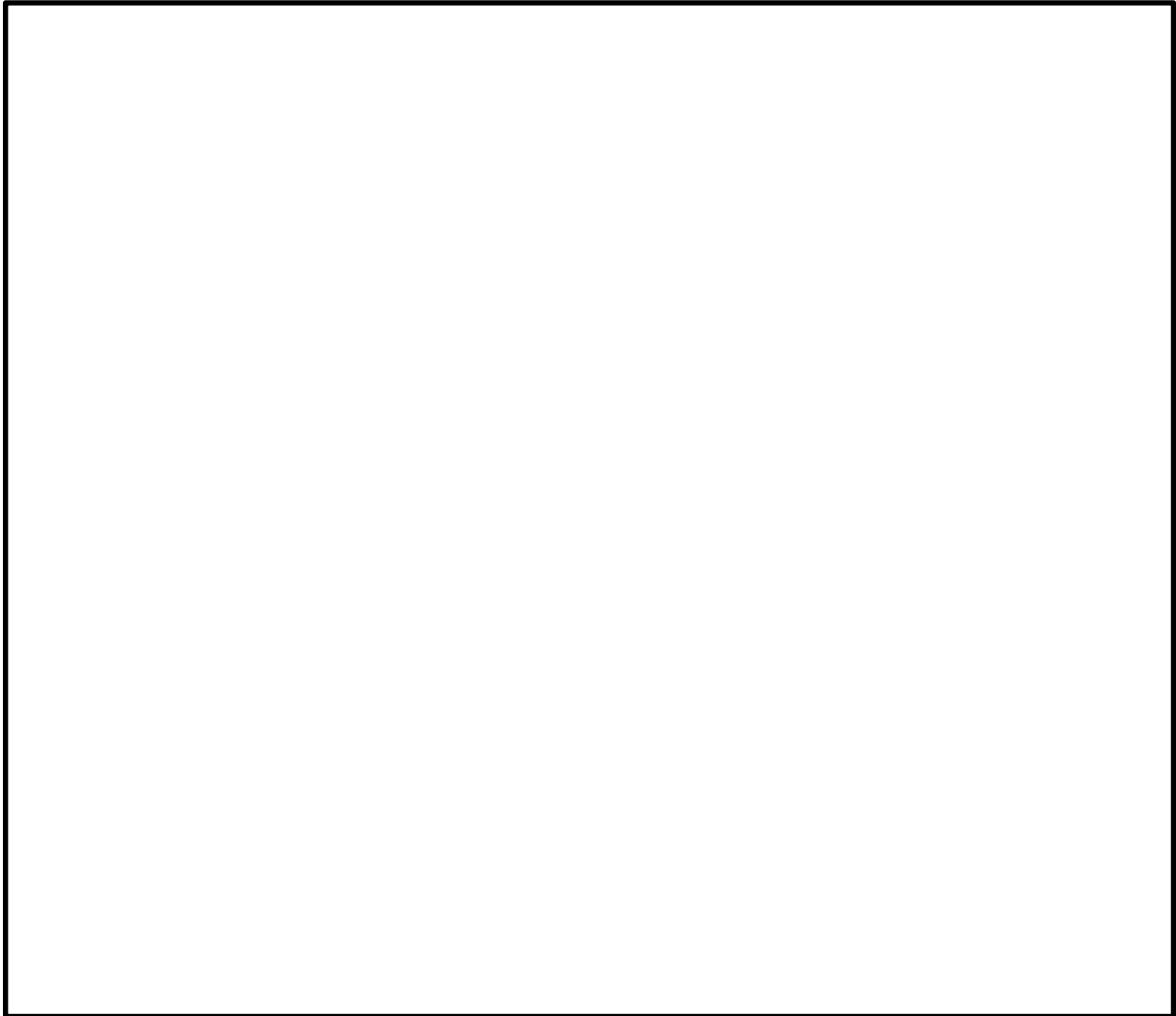


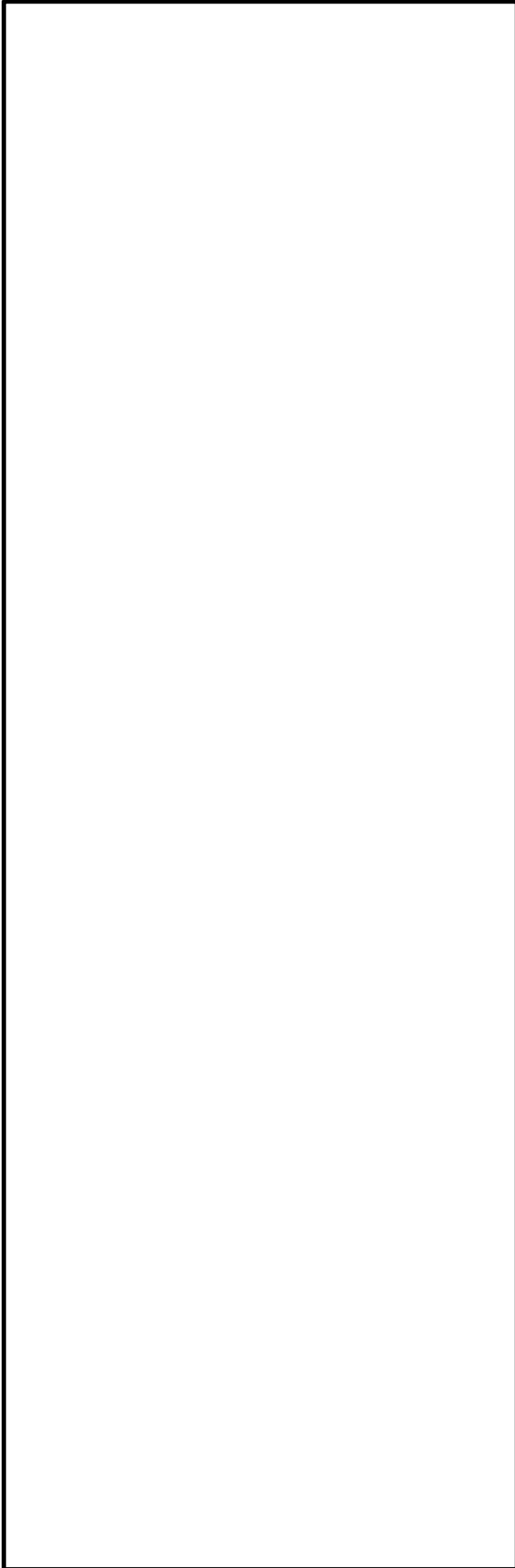




3. 島根原子力発電所第2号機における多方向入力を対象とした等価繰返し回数算出方法について

2.2.2項において2方向同時入力の結果についてまとめているが、下記理由により3方向同時入力に対しても同様に各方向の等価繰返し回数の最大値を用いることは妥当であることがいえる。





別紙 12 時刻歴応答波形(荷重)から直接等価繰返し回数を算定した場合との比較検討

1. はじめに

J E A G 4 6 0 1-1987 記載のピーク応力法による算出フロー（以下「J E A G フロー」という。）には分岐があり，地震荷重を時刻歴より求める機器系（時刻歴応答解析から算出される時刻歴応答波形（荷重）を用いる場合）（以下「時刻歴フロー」という。）と，地震荷重を応答スペクトルより求める機器系（建物応答及び原子炉本体の応答に基づく 1 質点系応答解析により算定した時刻歴変位波形を用いる場合）（以下「応力スペクトルフロー」という。）が示されている。今回の島根原子力発電所第 2 号機における一律に設定する地震時等価繰返し回数の設定においては，応答スペクトルフローにて検討することとしている。

本資料では，J E A G フローの時刻歴フローにより等価繰返し回数を算出し，応答スペクトルフローによる算出結果と比較することで，今回工認における一律に設定する等価繰返し回数設定において，応答スペクトルフローにて算出した等価繰返し回数を適用することの妥当性を確認する。

2. 時刻歴フローを用いた等価繰返し回数

2.1 対象設備

島根原子力発電所第 2 号機における原子炉本体地震応答解析モデルの各機器に対して，時刻歴応答波形（荷重）から直接等価繰返し回数を算定する。

2.2 検討内容

2.1 の対象設備に対し，原子炉本体地震応答解析により得られた荷重（せん断力，モーメント，軸力）時刻歴に基づき算出する。なお，等価繰返し回数の算出の際のピーク応力は $150\text{kg}/\text{mm}^2$ （ 1471MPa ）を用いる。

2.3 検討結果

時刻歴フローによる等価繰返し回数の最大回数を整理した結果を別表 12-1 に，算出結果を別表 12-2～別表 12-6 に示す。別表 12-1 の結果から，時刻歴フローによる等価繰返し回数は応答スペクトルフローによる等価繰返し回数に比べ小さいことを確認した。

以上より，一律に設定した等価繰返し回数設定に当たって応答スペクトルフローにて検討することは妥当である。

別表 12-1 算出フローの違いによる等価繰返し回数の最大回数比較

算出条件							最大回数	比率*3
フロー	荷重	解析モデル	地震動	設計疲労線図	材料物性の不確かさ	減衰定数 (%)		
時刻歴フロー	せん断力	原子炉本体地震応答解析モデル	S s - D	炭素鋼、 低合金鋼 および 高張力鋼	基本ケース	—*2		
	モーメント							
	軸力							
応答スペクトルフロー	—*1					1.0		

注記*1：応答スペクトルフローでは変位応答時刻歴を使用

*2：各設備の減衰定数を考慮した原子炉本体地震応答解析から得られる応答を使用

*3：時刻歴フローの最大回数/応答スペクトルフローの最大回数により算出

別表 12-2 原子炉本体地震応答解析モデル（せん断力（NS 方向））

算出条件						等価繰返し回数
解析モデル	地震動	設計疲労線図	材料物性の不確かさ	機器	EL (m)	
原子炉本体地震応答解析モデル	S s - D	炭素鋼, 低合金鋼 および 高張力鋼	基本ケース	原子炉格納容器		
				ガンマ線遮蔽壁		
				原子炉格納容器 ベデスタル		
				原子炉圧力容器		

別表 12-3 原子炉本体地震応答解析モデル (せん断力 (EW 方向))

解析モデル	地震動	算出条件				等価繰返し回数
		設計疲労線図	材料物性の不確かさ	機器	EL (m)	
原子炉本体 地震応答解析 モデル	S s - D	炭素鋼, 低合金鋼 および 高張力鋼	基本ケース	原子炉格納容器		
				ガンマ線遮蔽壁		
				原子炉格納容器 ベデスタル		
				原子炉圧力容器		

注：下線部は算出結果が最大の等価繰返し回数

別表 12-4 原子炉本体地震応答解析モデル(モーメント(NS 方向))

算出条件						等価繰返し回数
解析モデル	地震動	設計疲労線図	材料物性の不確かさ	機器	EL (m)	
原子炉本体地震応答解析モデル	S s - D	炭素鋼, 低合金鋼 および 高張力鋼	基本ケース	原子炉格納容器		
				ガンマ線遮蔽壁		
				原子炉格納容器 ベデスタル		
				原子炉圧力容器		

別表 12-5 原子炉本体地震応答解析モデル(モーメント(EW 方向))

算出条件						等価繰返し回数
解析モデル	地震動	設計疲労線図	材料物性の不確かさ	機器	EL (m)	
原子炉本体地震応答解析モデル	S s - D	炭素鋼, 低合金鋼 および 高張力鋼	基本ケース	原子炉格納容器		
				ガンマ線遮蔽壁		
				原子炉格納容器 ベダスタル		
				原子炉圧力容器		

注：下線部は算出結果が最大の等価繰返し回数

別表 12-6 原子炉本体地震応答解析モデル(軸力)

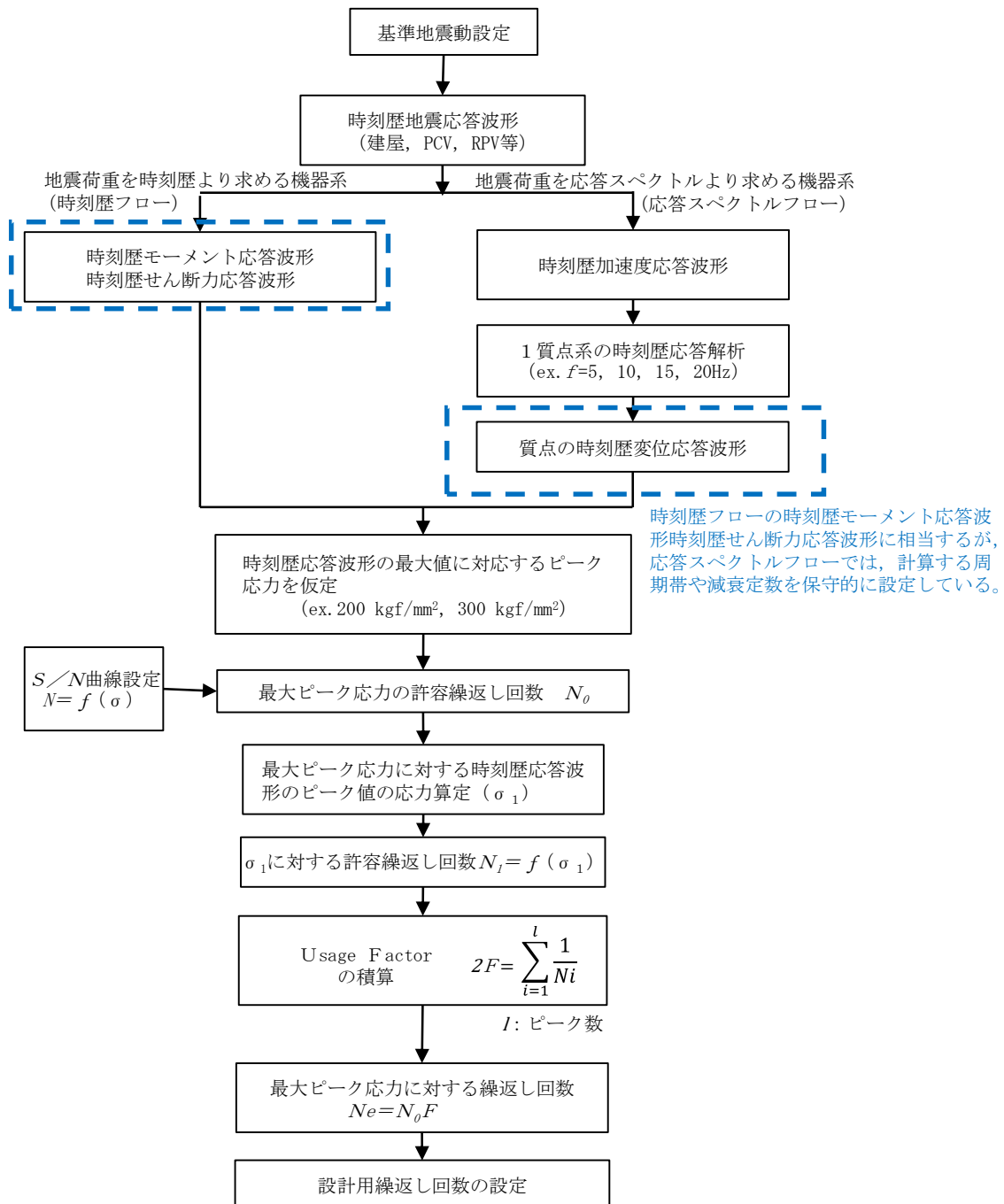
算出条件						等価繰返し回数
解析モデル	地震動	設計疲労線図	材料物性の不確かさ	機器	EL (m)	
原子炉本体地震応答解析モデル	S s - D	炭素鋼, 低合金鋼 および 高張力鋼	基本ケース	原子炉格納容器		
				ガンマ線遮蔽壁		
				原子炉格納容器 ベDESTAL		
				原子炉圧力容器		

注：下線部は算出結果が最大の等価繰返し回数

2.4 考察

2.3 項に示すとおり，時刻歴フローにおける等価繰返し回数は応答スペクトルフローにおける等価繰返し回数に比べ小さいことを確認した。これは各フローの算出方法の違いによるものと考える。ここで，J E A G フローを別図 12-1 に示す。

時刻歴フローでは原子炉本体地震応答解析から得られる荷重時刻歴から等価繰返し回数を算出するのに対し，応答スペクトルフローでは原子炉本体地震応答解析から得られる応答時刻歴を用いて 1 質点系の時刻歴応答解析を行い，1 質点系の応答時刻歴から等価繰返し回数を算定している。応答スペクトルフローの 1 質点系の時刻歴応答解析では，質点に設置された設備の共振が考慮されること，その解析条件として計算する周期帯や減衰定数を保守的に設定していることから，応答スペクトルフローの回数が大きく算出されると考える。



(J E A G 4 6 0 1 -1987 p576に加筆)

別図 12-1 ピーク応力法による算出フロー

別紙 13 島根原子力発電所第 2 号機の等価繰返し回数の設定の保守性

1. はじめに

島根原子力発電所第 2 号機の今回工認では一律に設定する等価繰返し回数（ S_s : 150 回， S_d : 300 回）の設定を行っている。この設定の保守性について説明する。

2. 検討事項

本資料では以下項目を検討し、島根原子力発電所第 2 号機の一律に設定する等価繰返し回数の設定の保守性を示す。

(1) 等価繰返し回数算出パラメータの保守性 (3. 参照)

(2) 島根原子力発電所第 2 号機の地震動の特性を踏まえた保守性 (4. 参照)

3. 等価繰返し回数算出パラメータの保守性

本文 3. (2) にて説明している等価繰返し回数の算出に用いるパラメータについて先行プラントである東海第二発電所及び柏崎刈羽原子力発電所第 7 号機と比較した結果を別表 13-1 に示す。

比較の結果、東海第二発電所とのパラメータの差異として、③対象床面（質点）、④-1 地震動（基準地震動 S_s の種類）及び⑤減衰定数を抽出した。また、柏崎刈羽原子力発電所第 7 号機とのパラメータの差異として、③対象床面（質点）、④-1 地震動（基準地震動 S_s の種類）、④-2 地震動（基準地震動 S_s の回数）、④-3 地震動（弾性設計用地震動 S_d の回数）及び⑤減衰定数を抽出した。

差異を抽出した項目については、いずれも島根原子力発電所第 2 号機に対する疲労評価の条件設定において適切な設定がなされていることを確認した。

別表 13-1 一律に設定する等価繰返し回数算出パラメータに係る比較

パラメータ	島根原子力発電所第2号機	東海第二発電所	柏崎刈羽原子力発電所第7号機	比較結果
①ピーク応力	1471MPa	1471MPa	1471MPa	差異なし
②固有周期	全固有周期	全固有周期	全固有周期	差異なし
③対象床面(質点)	【原子炉建屋に設置された機器・配管系】 全床面(質点) 【原子炉格納容器, 原子炉圧力容器等大型機器】 疲労評価を実施する設備を有する床面(質点)	【原子炉建屋に設置された機器・配管系】 全床面(質点) 【原子炉格納容器, 原子炉圧力容器等大型機器】 代表設備の設置床面	【原子炉建屋に設置された機器・配管系】 全床面(質点) 【原子炉格納容器, 原子炉圧力容器等大型機器】 全床面(質点)	【東海第二】 東海第二では、代表性を持たせた床面(質点)を対象としていることに対して、島根2号機は、疲労評価を実施する設備を有する床面(質点)を対象としている。 【柏崎刈羽7号機】 柏崎刈羽7号機では、工認添付にて耐震条件を作成する全床面(質点)を対象としていることに対して、島根2号機では、疲労評価を実施する設備を有する床面(質点)を対象として検討を行っている。
④-1地震動(基準地震動Ssの種類)	基準地震動Ss-D(代表)	基準地震動Ss (Ss-D, 11, 12, 13, 14, 21, 22, 23)の全8波を考慮。	基準地震動Ss (Ss-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)の全8波を考慮	【共通】 先行プラントでは、複数の地震動に対する検討を行っていることに対して、島根2号機では基準地震動5波の比較から、代表性を確認した地震動を用いて検討を行っている。(本文3.(2)d参照)
④-2地震動(基準地震動Ssの回数)	基準地震動Ss1回分を考慮。	基準地震動Ss1回分を考慮。	基準地震動Ss1回分に加えて、NCO及び弾性設計用地震動Sdの1/3倍した地震動5回分考慮	【東海第二】 差異なし 【柏崎刈羽7号機】 柏崎刈羽7号機では、2007年に発生した新潟県中越沖地震を被災していることから、基準地震動Ss1回分に加えてNCOを考慮し、さらに米国の知見を参考に弾性設計用地震動Sdの1/3倍した地震動5回分を考慮している。島根2号機では、スクラムレベルを超える地震の発生がない(2000年鳥取県西部地震による基礎マット上での最大加速度値は34.3Gal)ことから、基準地震動Ss1回分を考慮している。
④-3地震動(弾性設計用地震動Sdの回数)	弾性設計用地震動Sd2回分を考慮	弾性設計用地震動Sd2回分を考慮	基準地震動Ss1回分に加えて、NCO及び弾性設計用地震動Sdの1/3倍した地震動5回分考慮	【東海第二】 差異なし 【柏崎刈羽7号機】 柏崎刈羽7号機では、基準地震動Ssの等価繰返し回数を用いることで、ピーク応力, 算出用地震動(Ss×1回+(1/3)Sd×5回+NCO)で保守性を持たせている(概ね弾性設計用地震動Sd2回分相当)。島根2号機では、弾性設計用地震動Sdの発生回数が基準地震動Ssよりも発生頻度が高いため、弾性設計用地震動Sd2回分を考慮している。
⑤減衰定数	1.0(%)	0.5, 1.0(%)	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0(%)	【共通】 先行プラントでは複数の減衰定数に対する検討を行っていることに対して、島根2号機では減衰定数が小さいほど等価繰返し回数が多く算出される傾向であることを確認した上で、減衰1.0%を用いて検討を行っている。また、島根2号機では減衰0.5%の設備については対象設備に限られることから個別の等価繰返し回数を用いる。(本文3.(2)e参照)
⑥設計疲労線図	炭素鋼, 低合金鋼および高張力鋼	炭素鋼, 低合金鋼および高張力鋼	炭素鋼, 低合金鋼および高張力鋼	差異なし
⑦材料物性の不確かさの考慮	地震応答解析モデルの材料物性の不確かさによる影響を考慮	地震応答解析モデルの材料物性の不確かさによる影響を考慮	地震応答解析モデルの材料物性の不確かさ等による影響を考慮	差異なし

4. 島根原子力発電所第2号機の地震動の特性を踏まえた保守性
等価繰返し回数を用いた疲労評価において、疲労累積係数UFは以下の式にて算出される。

$$UF = \frac{N_e}{N_0}$$

UF：疲労累積係数

N_e ：地震による等価繰返し回数

N_0 ：疲労評価対象設備に発生するピーク応力での許容繰返し回数

一般的な疲労評価では、等価繰返し回数 N_e と許容繰返し回数 N_0 は同一の地震動を基に算出した値を用いて行う。これに対し、島根原子力発電所第2号機では基準地震動 S_s が5波存在するため、各基準地震動 S_s に対する等価繰返し回数の比較を行い、主要動の継続時間が最も長く等価繰返し回数が大きく算出される $S_s - D$ を代表として、一律に設定する等価繰返し回数 N_e を150回と定めている。また、許容繰返し回数 N_0 は各疲労評価対象設備のピーク応力により定まる値であるが、許容繰返し回数 N_0 を算出するためのピーク応力を求める際にも、基準地震動 S_s 5波の耐震条件を包絡させた上で応力計算を実施しピーク応力を算出しているため、基準地震動 S_s 5波に対する最大のピーク応力であり、設計疲労線図及びピーク応力から求まる許容繰返し回数は最小の値となる。

このように、疲労累積係数UFは、島根原子力発電所第2号機の地震動の特性を踏まえて、すべての基準地震動を考慮した上で最も厳しくなるように保守的に算出されている。

5. まとめ

島根原子力発電所第2号機の等価繰返し回数算出パラメータについて先行プラントと比較し、同等の設定となっているか、差異がある場合は島根原子力発電所第2号機として適切な設定であることを確認した。

また、疲労累積係数UFは、島根原子力発電所第2号機の地震動の特性を踏まえて、すべての基準地震動を考慮した上で最も厳しくなるように保守的に算出されていることを確認した。

以上より、島根原子力発電所第2号機における等価繰返し回数の設定は、十分な保守性を有していると考えられる。