

東海第二発電所	工事計画審査資料
資料番号	補足-340-2 改 2
提出年月日	平成 30 年 4 月 17 日

工事計画に係る補足説明資料

耐震性に関する説明書のうち

補足-340-2 【耐震評価対象の網羅性，既工認との手法の相
違点の整理について】

平成 30 年 4 月

日本原子力発電株式会社

改定履歴

改定	改定日 (提出年月日)	改定内容
改0	2018年2月26日	資料番号「補足-342」として提出
改1	2018年3月2日	添付-8(耐震評価における等価繰り返し回数の妥当性確認)の追加
改2	2018年3月6日	添付7(既工認との手法の相違(機電分))の追加
改0	2018年3月22日	<ul style="list-style-type: none"> ・ 資料番号を「補足-342」から「補足-340-2」に変更 ・ 添付4-2(建物・構築物, 土木構造物及び浸水防護施設の耐震評価フロー並びに評価対象一覧)の追加 ・ 添付7(既工認との手法の相違(建物・構築物分))の追加
改1	2018年3月26日	<ul style="list-style-type: none"> ・ 1章, 2章のうち建物・構築物及び屋外重要土木構造物に係る箇所の追加 ・ 添付-1, 添付4-1, 添付4-2, 添付-7(建物・構築物, 土木構造物)の追加
改2	2018年4月17日	<ul style="list-style-type: none"> ・ 1.1.2(2)の記載見直し, 補足1(弾性設計用地震動S_dの等価繰り返し回数の設定について), 添付-8(耐震評価における等価繰り返し回数の妥当性確認について)の資料見直し

目 次

1. 東海第二発電所における耐震評価について	1
1.1 耐震Sクラス施設の評価（耐震Sクラス設備への波及的影響評価及び非常用取水設備含む）	4
1.1.1 基準地震動 S_s による評価	4
(1) 別表第二を踏まえた対象設備の網羅性について	4
(2) 対象設備の評価部位の網羅性について	4
(3) 対象設備の評価項目（応力分類）の網羅性について	10
(4) 対象設備の耐震重要度分類の区分（主要設備等）を踏まえた整理について	10
(5) 別表第二の対象外である耐震Sクラス施設の耐震安全性評価結果	10
(6) 地震応答解析が記載されていない設備の扱いについて	10
1.1.2 弾性設計用地震動 S_d による評価	11
(1) 弾性設計用地震動 S_d による評価のうち、一次＋二次応力評価の省略について	14
(2) <u>弾性設計用地震動S_dによる評価のうち、一次＋二次＋ピーク応力評価（疲労評価）の省略について</u>	15
1.1.3 静的地震力による評価	17
1.2 耐震Bクラス施設の評価	20
1.3 耐震Cクラス施設の評価	20
1.4 耐震Sクラス設備の間接支持構造物の評価	20
1.5 耐震Bクラス設備の間接支持構造物の評価	21
1.6 耐震Cクラス設備の間接支持構造物の評価	21
2. 東海第二発電所の既工認との手法の相違点の整理について	22
2.1 既工認との手法の整理一覧	22
2.2 相違点及び適用性の説明	22
2.2.1 機器・配管系	22
2.2.1.1 手法の相違点	22
2.2.1.2 手法の変更項目に対する東海第二発電所への適用性	23
2.2.2 建物・構築物，屋外重要土木構造物	25
2.2.2.1 建物・構築物	25
2.2.2.2 屋外重要土木構造物	27
2.2.2.3 浸水防護施設	27

【補足説明資料】

補足 1 弾性設計用地震動 S_d の等価繰返し回数 の設定について

【添付資料】

添付-1 別表第二を踏まえた対象設備の網羅性

添付-2 対象設備の評価部位の網羅性

添付2-1 中性子計測ハウジング貫通部及び中性子計測ハウジングの評価省略理由

添付2-2 原子炉圧力容器スタビライザディスクスプリングの評価省略理由

添付2-3 炉心支持板スタッドの評価省略理由

添付2-4 シュラウドヘッドボルトの評価省略理由

添付2-5 主蒸気隔離弁制御用アキュムレータの評価省略理由

添付2-6 ドライウェルビームシートのシートプレート、側壁、下板、補強リングの評価省略理由

添付2-7 脚材（非常用ガス再循環フィルタトレイン及び非常用ガス処理系フィルタトレイン）の評価省略理由

添付2-8 鉛直方向動的地震力の導入による影響検討について

添付-3 対象設備の評価項目（応力分類）の網羅性

添付4-1 対象設備の耐震重要度分類の区分（主要設備等）を踏まえた整理

添付4-2 建物・構築物及び屋外重要土木構造物の耐震評価フロー並びに評価対象一覧

添付-5 別表第二に記載のない耐震Sクラス施設の耐震安全性評価結果

添付-6 既設設備（機器・配管系）の静的地震力による評価結果

添付-7 既工認との手法の整理一覧

添付7-1-1 原子炉建屋クレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用について

添付7-1-2 使用済燃料乾式貯蔵建屋クレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用について

添付7-2 ポンプ等の解析モデルの精緻化について

添付7-3 容器等の応力解析へのFEMモデルの適用について

添付7-4 最新知見として得られた減衰定数の採用について

添付7-5 水平方向と鉛直方向の動的地震力の二乗和平方根法による組合せについて

添付7-6 鉛直方向応答解析モデルの追加について

添付-8 耐震評価における等価繰返し回数の妥当性確認について

下線：本日ご提出資料

- (2) 弾性設計用地震動 S_d による評価のうち、一次＋二次＋ピーク応力評価（疲労評価）の省略について

一次＋二次＋ピーク応力評価については、地震動により算定した評価用等価繰り返し回数を用いた疲労評価を行っている。評価用等価繰り返し回数は、J E A G 4601-1987の記載に示すピーク応力法により設定している。

以下に許容繰り返し回数及び等価繰り返し回数の関係性から弾性設計用地震動 S_d による一次＋二次＋ピーク応力について、基準地震動 S_s に対する評価で代表できることを説明する。

【許容繰り返し回数（許容限界）】

弾性設計用地震動 S_d の地震加速度は基準地震動 S_s の地震加速度に対して $1/2$ 程度であることから、一次＋二次＋ピーク応力（以下「ピーク応力」という。）が $1/2$ 程度になると考えれば、設計疲労線図から求める許容繰り返し回数としては $5 \sim 10$ 倍程度（図3）となる。

【等価繰り返し回数（発生値）】

等価繰り返し回数 N_e は、疲れ累積係数 UF と最大ピーク応力に対する許容繰り返し回数 N_0 の積から求められる。

$$N_e = UF \times N_0$$

なお、疲れ累積係数 UF は、以下の式から求まる。ここで、 N_i は地震により発生する応力時刻歴波の各ピーク応力の許容繰り返し回数であり、 n はピーク数である。

$$UF = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_i}$$

弾性設計用地震動 S_d の応力時刻歴波の各ピーク応力は、前述のとおり基準地震動 S_s の各ピーク応力より小さくなることから、各ピーク応力の許容繰り返し回数は増加し、疲れ累積係数 UF は減少する。そのため、弾性設計用地震動 S_d の等価繰り返し回数 N_e は基準地震動 S_s の等価繰り返し回数より少なくなる。

東海第二発電所の弾性設計用地震動 S_d については、基準地震動 S_s より地震の発生頻度が多いことを踏まえ、2回分を考慮する。この場合においても、弾性設計用地震動 S_d の等価繰り返し回数は基準地震動 S_s の等価繰り返し回数より少なくなるため、弾性設計用地震動 S_d の等価繰り返し回数を基準地震動 S_s の等価繰り返し回数と同じ回数とすることは、保守的な設定である（補足1）。

以上のとおり、弾性設計用地震動 S_d と基準地震動 S_s との等価繰り返し回数（発生値）が同じであれば、許容繰り返し回数が少ない基準地震動 S_s を用いた評価のほうが弾性設計用地震動 S_d による評価に対して厳しい結果となることから、基準地震動 S_s の評価で代表できる。

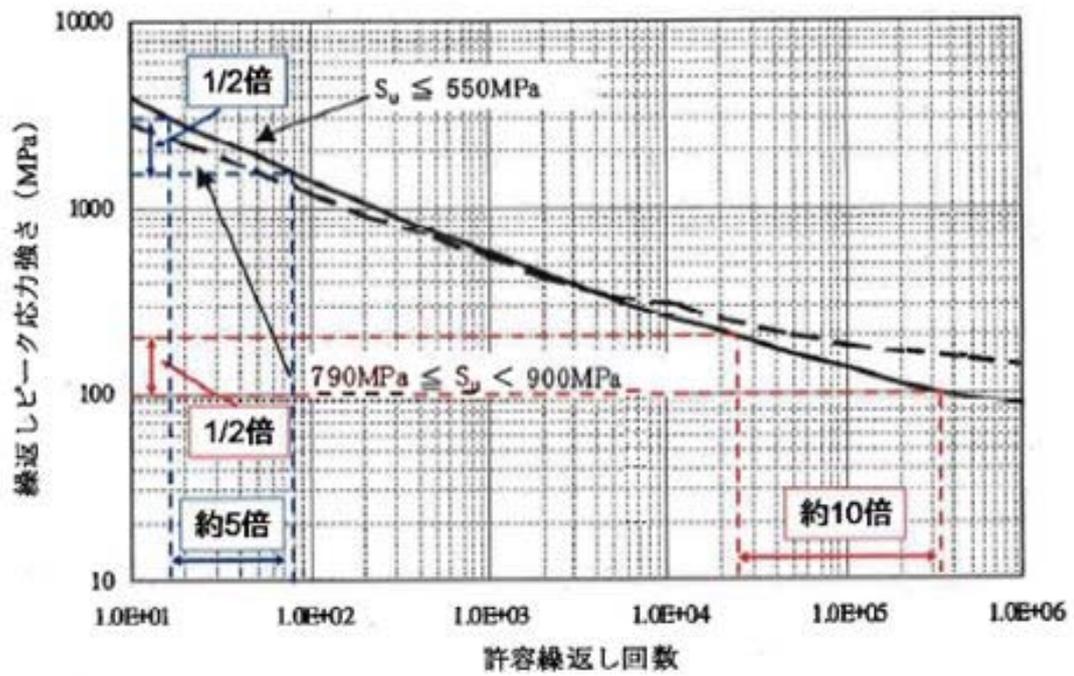


図3 設計疲労線図（炭素鋼，低合金鋼及び高長力鋼）におけるピーク応力と許容繰返し回数との関係

弾性設計用地震動 S_d の等価繰返し回数の設定について

弾性設計用地震動 S_d の等価繰返し回数は、基準地震動 S_s での算定結果を用いることとしている。本資料では、弾性設計用地震動 S_d の等価繰返し回数を基準地震動 S_s の等価繰返し回数と同じ回数とすることが保守的な設定であることを示す。なお、 S_d 地震については S_s 地震より地震の発生頻度が多いことを踏まえ、2回分を考慮した等価繰返し回数とする。

基準地震動 S_s において等価繰返し回数が最大となった条件を選択し、基準地震動 S_s の応答加速度と弾性設計用地震動 S_d との応答加速度の差に着目し、基準地震動 S_s の最大応答加速度に最大ピーク応力として設定した場合における弾性設計用地震動 S_d による等価繰返し回数の増分を確認することにより S_d 地震の等価繰返し回数の確認を行った。

【実施条件】

- ・ 基準地震動 S_s において等価繰返し回数が最大となった条件を適用（表-1）
 考慮する地震波：基準地震動 S_s-D1
 評価点：原子炉建屋：46.5m
 減衰定数：0.5%
- ・ 基準地震動 S_s-D1 による加速度応答時刻歴と弾性設計用地震動 S_d-D1 による加速度時刻歴とを繋げたデータを用いる。（図-1）
- ・ S_s-D1 と S_d-D1 と繋げた加速度時刻歴における等価繰返し回数を算出し、基準地震動 S_s のみで算出した等価繰返し回数との差より S_d-D1 における等価繰返し回数を求め、その値を2倍することで S_d 地震2回分の等価繰返し回数とする。

【実施結果】

S_s-D1 のみで算定した等価繰返し回数と、 S_s-D1 と S_d-D1 とを繋げた算定した等価繰返し回数から S_s-D1 のみで算定した等価繰返し回数との差から算定した S_d-D1 における等価繰返し回数を2倍した値との比較を表-2に示す。表-2に示すとおり S_d 地震2回分の等価繰返し回数は S_s-D1 の等価繰返し回数よりも小さく S_s-D1 の等価繰返し回数を用いることは保守的であることを確認した。

表-2 等価繰返し回数の比較

	S _s -D1 による 等価繰返し回数	S _d -D1 による 等価繰返し回数 × 2	(参考) S _s -D1及び S _d -D1による 等価繰返し回数
NS方向	81	62	112
EW方向	75	64	107
UD方向	133	60	163

表-1 基準地震動S_sにおける等価繰返し回数

評価点	減衰	基準地震動S _s																										
		Ss-D1			Ss-11			Ss-12			Ss-13			Ss-14			Ss-21			Ss-22			Ss-31					
		NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD			
原子炉建屋 EL 46.500m	h=0.5%	81	75	133	41	43	49	40	45	37	39	44	36	45	48	32	47	51	48	42	63	50	42	63	50	16	16	20
	h=1.0%	55	55	111	31	28	28	29	29	24	28	31	28	28	30	28	31	38	38	31	45	44	31	45	44	13	13	13
原子炉建屋 EL 38.800m	h=0.5%	67	66	133	41	43	49	40	45	37	39	43	35	45	47	32	47	51	48	43	62	50	43	62	50	16	16	20
	h=1.0%	50	49	111	31	27	27	29	29	24	28	31	28	28	30	27	31	35	38	30	45	43	30	45	43	13	13	13
原子炉建屋 EL 34.700m	h=0.5%	64	63	134	41	43	49	40	44	37	39	43	35	45	47	32	47	50	48	43	62	50	43	62	50	16	16	20
	h=1.0%	50	49	110	31	27	27	29	29	24	28	31	28	29	29	27	31	36	38	30	44	43	30	44	43	13	13	13
原子炉建屋 EL 29.000m	h=0.5%	58	59	133	41	43	49	40	44	37	39	43	35	44	46	32	47	50	48	44	61	50	44	61	50	15	15	20
	h=1.0%	49	49	110	30	26	26	28	29	24	27	31	27	27	28	27	31	37	38	31	44	43	31	44	43	13	13	13
原子炉建屋 EL 20.300m	h=0.5%	78	65	129	41	43	49	40	43	37	39	42	35	32	45	32	48	49	48	43	59	50	43	59	50	15	15	20
	h=1.0%	59	49	109	30	25	26	28	28	24	27	30	27	26	27	27	31	37	38	37	41	43	37	41	43	13	13	13
原子炉建屋 EL 14.000m	h=0.5%	94	85	125	41	40	49	40	43	37	39	40	35	32	44	32	48	48	48	43	57	51	43	57	51	15	15	20
	h=1.0%	67	66	109	30	23	26	28	27	24	27	27	25	26	25	27	31	38	38	32	39	43	32	39	43	13	13	13
原子炉建屋 EL 8.200m	h=0.5%	90	89	122	41	38	49	40	41	37	39	36	34	32	42	32	48	47	48	43	56	51	43	56	51	15	15	20
	h=1.0%	72	73	109	30	24	26	28	25	24	27	24	25	25	24	28	30	38	37	31	38	43	31	38	43	13	13	13
原子炉建屋 EL 2.000m	h=0.5%	92	92	118	41	36	49	40	39	37	39	33	34	38	39	32	49	45	48	43	54	51	43	54	51	15	15	20
	h=1.0%	84	84	109	30	24	26	28	24	24	27	21	25	25	23	28	30	35	37	32	40	43	32	40	43	13	13	13
原子炉建屋 EL -4.000m	h=0.5%	101	101	115	41	34	49	39	34	37	39	33	34	42	36	32	49	42	48	43	52	51	43	52	51	15	15	20
	h=1.0%	93	93	108	30	24	26	28	23	24	27	22	25	25	22	27	30	35	37	32	43	43	32	43	43	13	13	13

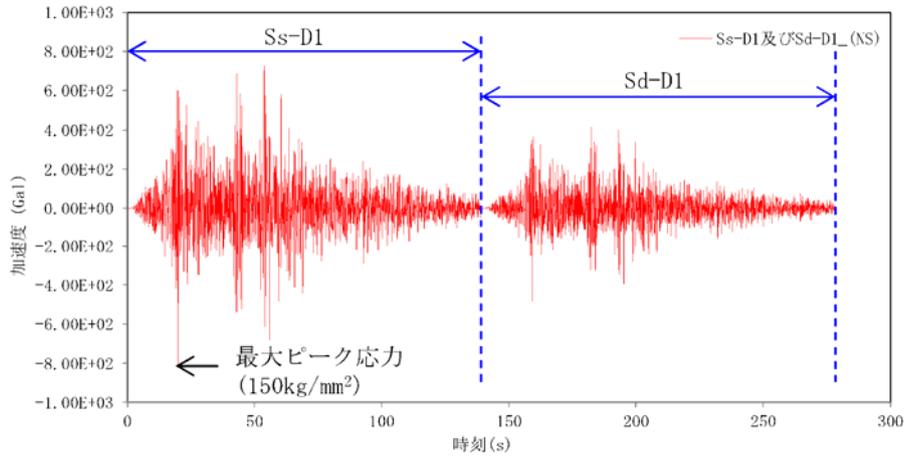


図-1(1) 等価繰返し回数算定に用いる加速度応答時刻歴 (NS方向)

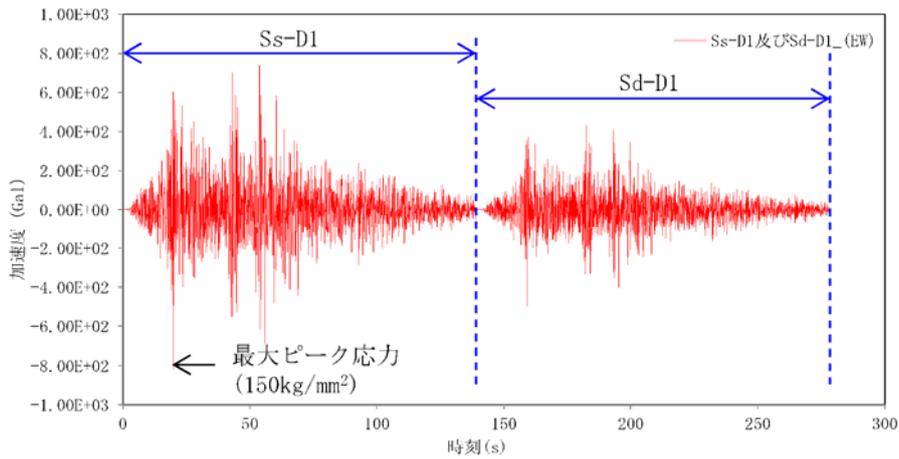


図-1(2) 等価繰返し回数算定に用いる加速度応答時刻歴 (NS方向)

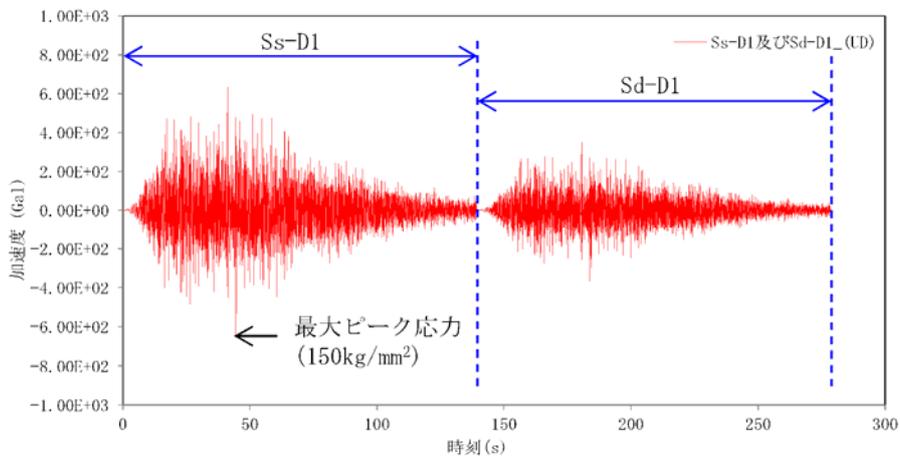


図-1(3) 等価繰返し回数算定に用いる加速度応答時刻歴 (UD方向)

耐震評価における等価繰返し回数の妥当性確認について

(目次)

1. はじめに
2. JEAG4601 における記載内容
3. 東海第二発電所の等価繰返し回数の設定
4. 一律に設定する地震時等価繰返し回数の設定
5. 繰返し回数設定における保守性
6. 繰返し回数設定における保守性を踏まえた追加検討
7. まとめ

補足 1. ピーク応力法における各ピークのサイクル数の求め方 (追而)

補足 2. 東海第二発電所地震時等価繰返し回数の妥当性確認方法について

参考 1. 疲労評価の全対象設備 (追而)

参考 2. 各設備の部位毎のピーク応力 (追而)

参考 3. ピーク応力の算定方法について (追而)

参考 4. 時刻歴応答波形から直接等価繰返し回数を算定した場合との比較検討 (追而)

参考 5. 相対変位に対する繰返し回数の算定について (追而)

参考 6. 繰返し回数算定エビデンス (追而)

参考 7. 等価繰返し回数の算定における材料物性のばらつき等の影響検討

参考 8. 多質点モデルにおける加速度時刻歴と変位時刻歴の組合せに対する等価繰返し回数の算定について (追而)

1. はじめに

東海第二発電所の今回工認における耐震評価の疲労評価は、J E A G 4601-1987（以下「J E A G 4601」という。）の記載手順に従い、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保守側に疲労累積係数を評価できるように設定した等価繰返し数を設定することで、評価の簡便化を図っている。東海第二発電所の疲労評価に用いる等価繰返し回数は、設備ごとに個別に設定した値又は一律に設定した値を用いている。

なお、建設時の等価繰返し回数は、O B E 地震 1 回当たりの繰返し回数を 10 回として、プラントライフ中 5 回発生すると仮定し、余裕をみて 6 回起きた場合の 60 回という米国プラント設計の考え方を踏襲し設定している。

2. J E A G 4601 における記載内容

J E A G 4601 の疲労評価の手順に関する記載は、以下のとおりである。（J E A G 4601-1987 p574 より）

- ・ 疲れ解析は、1 次 + 2 次 + ピーク圧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。
- ・ 地震動の等価繰返し回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。

3. 東海第二発電所の等価繰返し回数の設定

東海第二発電所の耐震評価における疲労評価は、J E A G 4601 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り、東海第二発電所で一律に設定した値を用いている。なお、これらの値はピーク応力法により算定した等価繰返し回数を安全側に丸めることによる保守性を有した値としている。

一律に設定した値と、設備毎に個別に算出された値の使い分けフローを図 1 に示す。ここで、フロー中の疲労評価対象設備は、工認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。

工認計算書で対象とする設備・部位は、東海第二発電所の既工認や大間 1 号機の建設工認を踏まえ、選定しているものであり、耐震設計として評価すべき設備・部位を網羅して設定している（詳細は補足説明資料「耐震評価対象の網羅性、既工認との手法の相違点の整理について」参照）。

また、疲労評価を実施するものとしては、J E A G 4601・補 1984 に基づき疲労評価が必要となる設備・部位であり、具体的には以下が対象となる。

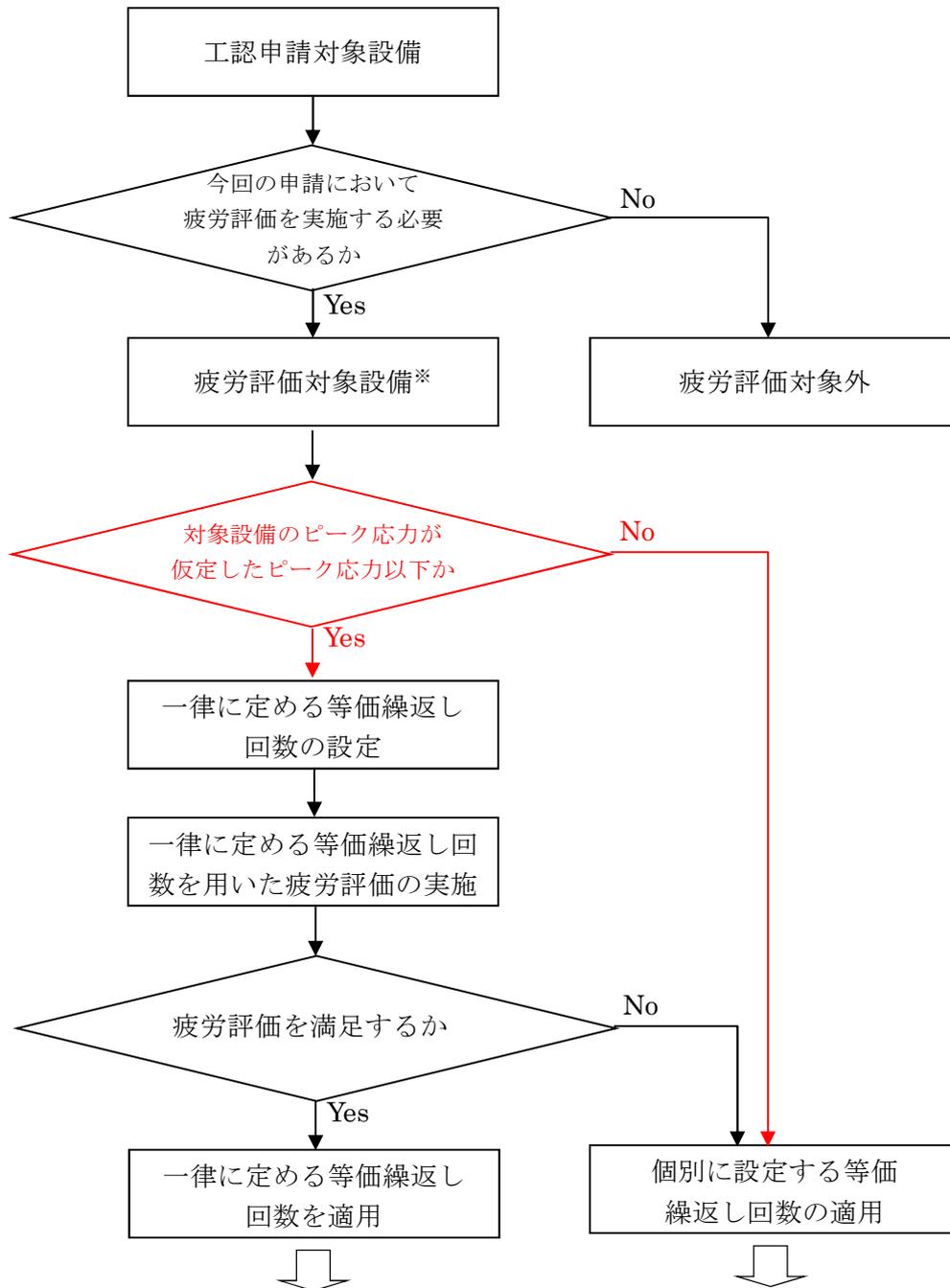
○ 設計基準対象設備

- ・クラス1 容器, 管, ポンプ (J E A G 4601 補 1984 における疲労評価不要の条件 (クラス1 容器については, 第1 種容器の許容応力表の注5) に従うものを除く。)
- ・クラス2, 3 容器, クラス2, 3 管, クラス2, 3, その他ポンプ (1 次+2 次応力評価が許容値を満足するものを除く。)

○ 重大事故等対処施設

- ・重大事故等クラス2 容器, 管, ポンプ (設計基準対象設備のクラスに準ずる。)

東海第二発電所の等価繰返し回数の設定が保守的な設定であることを確認する際は, 等価繰返し回数設定のパラメータ (ピーク応力, 固有周期, 対象床面, 地震波, 減衰定数, 設計疲労線図) に加え, ばらつきによる影響 (水平2 方向, 時刻歴解析による評価設備, 地盤物性の影響) に対しても検討する。



一律に定める等価繰返し回数として、原子炉建屋に設置される機器・配管系は160回、原子炉格納容器、原子炉压力容器等の大型機器は110回を設定（4項で説明）

対象設備ごと等価繰返し回数を設定
個別に設定する等価繰返し回数を適用する設備について添付1（追而）に示す。

※ 疲労評価対象設備については、補足説明資料耐震評価対象の網羅性、既工認手法との手法の相違点の整理について添付-3参照

図1 適用する等価繰返し回数の使い分け

4. 一律に設定する地震等価繰返し回数の設定について

(1) 算定方法

東海第二発電所のピーク応力法による等価繰返し回数算定方法の手順を、J E A G 4601 に記載されたピーク応力法による算定フロー（図 2，以下「フロー」という）との対比で説明する。

このフローには分岐があり、建屋時刻歴応答を直接機器の評価に用いる場合と、建屋応答を床応答曲線として用いる場合が示されている。

左側のフローは、時刻歴応答を用いて設備の応答を求めている場合のフローであり、この場合、等価繰返し回数算出に必要な設備の荷重時刻歴が算出されることから、この時刻歴波形を用いて直接等価繰返し回数を算定するものである。

一方、右側のフローは、床応答曲線を用いて機器の応力を算定している場合のフローであり、改めて機器の固有周期に応じた応答時刻歴を求めているものであり、設備の時刻歴応答解析を改めて行わず、一質点系モデルにより、応答時刻歴を算定する方法が J E A G 4601 に記載されている。

今回の東海第二発電所においては、個別機器ごとに等価繰返し回数を設定する手間を省力化するため、主要施設が設置される原子炉建屋及び、原子炉格納容器、原子炉圧力容器等の大型機器に対して、図 2 に示す右側のフローにより、対象設備一律に適用可能な等価繰返し回数を設定する*1。

等価繰返し回数の検討は、「昭和 55 年度 耐震設計の標準化に関する調査報告書」にてされており、当該報告書における算定方法と、今回の算定方法の比較を表 1 に示す。なお、設備の繰返し回数を個別に算定した場合においては、個別のピーク応力、固有周期、減衰定数、設置される床面における等価繰返し回数を算定することになり、算定される等価繰返し回数としては、一律に設定した等価繰返し回数の方がより保守的な算定となる。（各パラメータに対する検討は 5. 項参照。）

以下に具体的な手順を示す。①～④の手順はフロー中の番号に対応している。

- * 1 ただし、一律に設定した等価繰返し回数で許容値を超える（疲労累積係数が 1 を超える）場合及び原子炉建屋以外に設置される設備において、疲労評価が必要になった場合は、個別に等価繰返し回数の設定を行う。

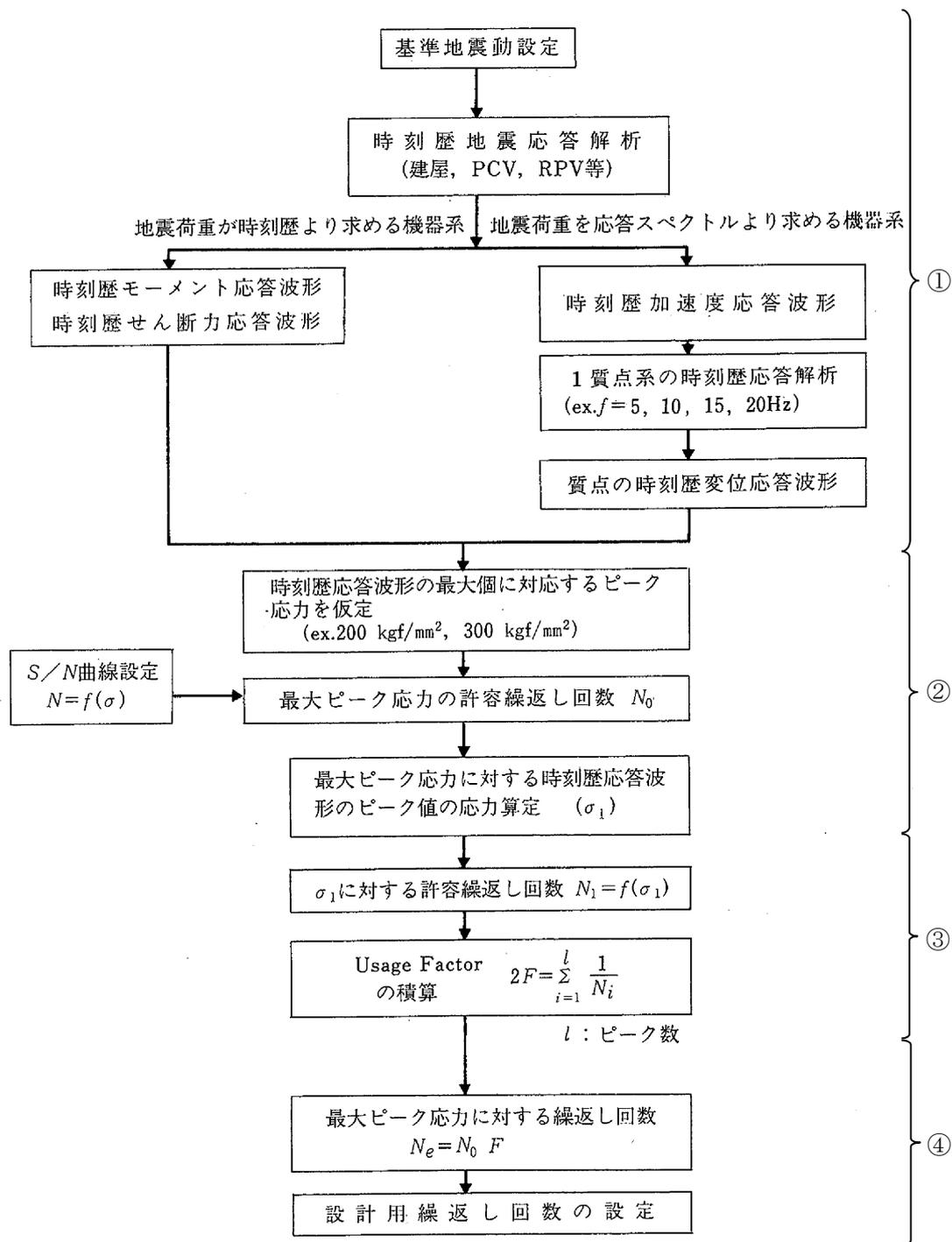


図2 ピーク応力法による算定フロー (J E A G 4601-1987 に追記)

表 1 昭和 55 年度 耐震設計の標準化に関する調査報告書における算定条件との比較

対象設備	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)		東海第二発電所	
	【手法 1】	【手法 2】	一律に設定する等価繰返し回数の設定	
原子炉設備	原子炉圧力容器スカート	【手法 2】 第一種配管	原子炉格納容器, 原子炉 圧力容器等大型機器	原子炉建屋に設置され た機器・配管系
算出方法 (J E A G のフローの左右どちらか)	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 (J E A G における左側のフロー)	建屋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 (J E A G における右側のフロー)	標準化報告書【手法 2】 と同じ (J E A G における右側のフロー)	同左
回数算出に用いる応答時刻歴波	波形	変位応答時刻歴波	標準化報告書【手法 2】 と同じ	同左
	時刻歴最大値 (設備の最大ピーク応力)	代表設備の最大ピーク応力を安全側に設定した 300kg/mm ²	150kg/mm ² 「昭和 55 年度 耐震設計の標準化に関する調査報告書」の検討にて十分とされている値*	同左
対象建屋・床	代表設備の設置床面	同左	標準化報告書【手法 1】 及び【手法 2】と同じ	全ての床面
固有周期	時刻歴解析結果より直接算定	設備の固有周期でなく, 全固有周期	標準化報告書【手法 2】 と同じ	同左
減衰定数	報告書に言及なし	同左	1.0%, 0.5%	同左
設計用疲労線図	代表設備材料の線図を使用	同左	標準化報告書【手法 1】 及び【手法 2】と同じ	同左
地盤条件	V _s =500, 1000, 1500m/s	V _s =1500m/s	V _s =700m/s	同左

* : 設備のピーク応力が 150 kg/mm² を超える場合は個別に評価を行う。

① 全設備の固有周期に対する応答加速度時刻歴波形の算定

ピーク応力法による等価繰返し回数を求めるためには、設備の応力時刻歴波が必要となる。図2のフローでは地震荷重を時刻歴より求める場合（左側のフロー）は時刻歴モードメント応答波形又は時刻歴せん断力波形、応答スペクトルより求める場合（右側のフロー）は時刻歴変位応答波形を用いることとなっているが、今回の算定では、右側のフローとして時刻歴変位応答波の波形を用いることとしている。

建屋地震応答解析又は建屋-機器連成解析（フローでは「時刻歴地震応答解析」と記載）の結果から算出される変位加速度応答波を用いて、振動数 f の1質点系に入力した場合の時刻歴変位応答波形を求める。この時刻歴波形は、固有振動数全てに対して算出する。

② 時刻歴ピーク応力値の設定

設備に発生するピーク応力の最大値を①で求めた時刻歴波形の最大値とすることで、応力の時刻歴波を作成する。なお、フローの「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、この設備に発生するピーク応力の最大値を①で求めた時刻歴波形の最大値とすることに対応している。なおピーク応力は、当該床面・固有周期に対応する設備のピーク応力ではなく、対象設備全てのピーク応力最大値を、時刻歴波の最大値と仮定しており、また、多質点系モデルの場合、ピーク応力は各モードの重ね合わせの結果として算定されるものであり、必ずしも波形の最大値がピーク応力の最大値になるとは限らないが、多質点系モデルの場合においても、最大値がピーク応力であると仮定していることを指している。

ここで、東海第二発電所における地震時等価繰返し回数の設定に用いるピーク応力は、 150 kg/mm^2 (1471 MPa) を用いている。設備のピーク応力が 150 kg/mm^2 (1471 MPa) を超える場合は個別に評価を行う。

③ 各ピーク点の応力に対する許容繰返し回数 (N_i) を設計疲労線図より求め、疲れ累積係数 UF (Usage Factor) を求める。

図3に示す設計疲労線図を用い、応力時刻歴波に対して各時刻歴振振に対する許容繰返し回数を算定する。

各応力時刻歴波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を算定する。(図4参照)

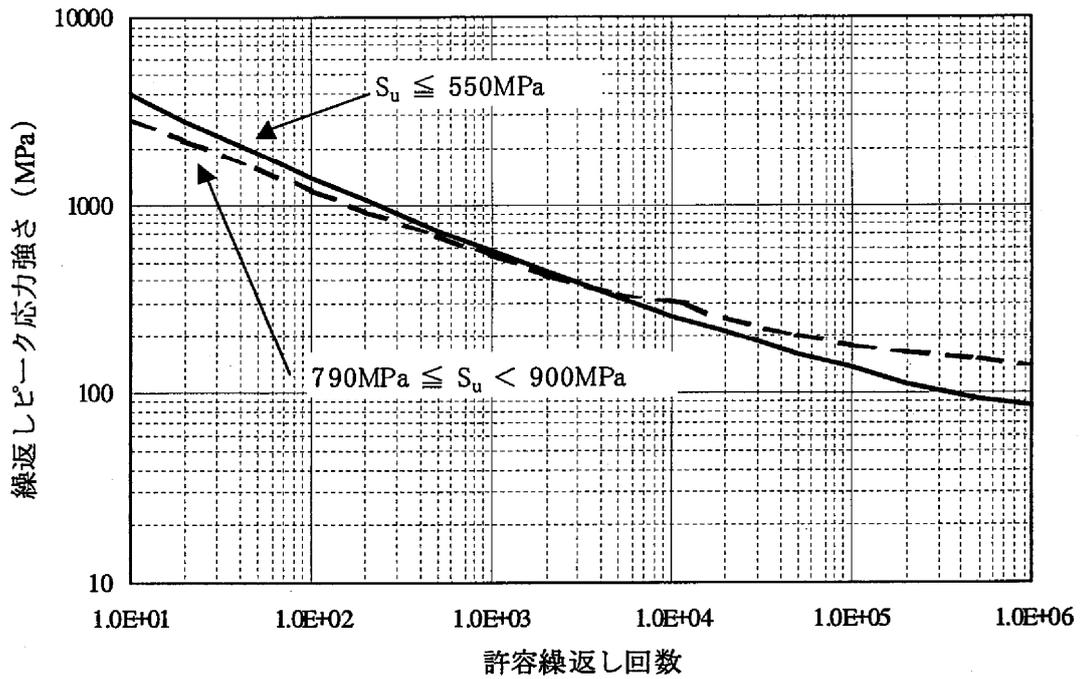


図3 炭素鋼，低合金鋼及び高張力鋼オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金の設計疲労線図

(J S M E 設計・建設規格より抜粋)

$$\text{地震 UF} = \frac{n_{\max}}{N_{\max}} + \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2}$$

ここで、 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

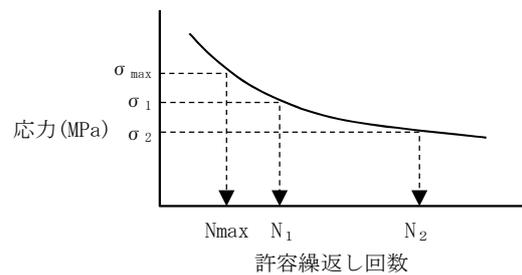


図4 UF 算定方法

- ④ UF と、最大ピーク応力に対する許容繰返し回数 N_0 の積をとることにより最大ピーク応力に対する等価繰返し回数 N_e を求める。

③で算定した UF と、②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。

$$N_e = UF \times N_0$$

(2) 算定結果

(1) に基づき等価繰返し回数を算定した結果を示す。

a. 原子炉格納容器，原子炉圧力容器等の大型機器

原子炉格納容器，原子炉圧力容器等の大型機器の各質点の水平（NS，EW）及び鉛直（UD）方向の変位時刻歴より求めた 1 質点系の応答に対する等価繰返し回数を表 4 に示す。一律に定める等価繰返し回数については，表 4 の数値を保守的に丸めた 110 回を設定する。

b. 原子炉建屋に設置された機器・配管系

原子炉建屋の各質点の水平（NS，EW）及び鉛直（UD）方向の変位時刻歴より求めた 1 質点系の応答に対する等価繰返し回数を表 5 に示す。一律に定める等価繰返し回数については，表 5 の数値を保守的に丸めた 160 回を設定する。

表 4(1) 原子炉格納容器, 原子炉圧力容器等の等価繰返し回数の算定結果

	減衰定数	Ss-D1			Ss-11			Ss-12			Ss-13		
		NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD
原子炉格納容器 EL. 36.431 m	h=0.5%	66	65	29	41	42	22	40	43	26	39	43	25
	h=1.0%	51	51	19	31	27	24	29	29	19	28	30	14
原子炉格納容器 EL. 33.431 m	h=0.5%	64	63	28	41	42	22	40	43	26	39	43	25
	h=1.0%	50	51	19	30	26	26	29	29	18	28	30	14
原子炉格納容器 EL. 27.432 m	h=0.5%	59	59	28	41	42	24	40	43	26	39	42	26
	h=1.0%	50	50	20	30	26	24	28	29	17	28	30	15
原子炉格納容器 EL. 24.422 m	h=0.5%	59	59	28	41	42	25	40	43	26	39	41	27
	h=1.0%	49	50	20	30	25	22	28	29	16	28	30	15
原子炉格納容器 EL. 18.420 m	h=0.5%	75	77	28	41	42	23	40	43	28	39	41	28
	h=1.0%	54	54	21	30	24	20	28	28	18	28	28	16
原子炉格納容器 EL. 16.319 m	h=0.5%	83	82	28	41	42	23	40	43	29	39	40	28
	h=1.0%	61	60	21	30	25	21	28	28	19	28	28	16
原子炉遮蔽 EL. 34.643 m	h=0.5%	85	98	27	41	42	25	40	44	26	39	43	26
	h=1.0%	75	82	19	31	27	21	29	30	18	28	31	17
原子炉遮蔽 EL. 28.308 m	h=0.5%	92	103	27	41	42	26	40	44	25	39	42	26
	h=1.0%	94	82	19	30	26	21	29	30	19	28	32	17
原子炉本体 の基礎 EL. 19.856 m	h=0.5%	90	97	28	41	42	28	40	44	24	39	41	25
	h=1.0%	73	77	20	30	25	23	28	29	19	28	31	18
原子炉本体 の基礎 EL. -2.167 m	h=0.5%	93	93	30	41	35	32	40	35	25	39	33	26
	h=1.0%	94	94	21	30	25	29	28	24	17	27	21	21
原子炉圧力容器 EL. 39.215 m	h=0.5%	89	92	27	41	42	29	40	44	26	39	44	26
	h=1.0%	85	77	20	31	27	23	29	30	20	28	32	18
原子炉圧力容器 EL. 34.656 m	h=0.5%	87	99	27	41	42	29	40	44	25	39	43	26
	h=1.0%	89	83	20	31	27	23	29	30	20	28	32	18
原子炉圧力容器 EL. 31.535 m	h=0.5%	88	102	27	41	42	28	40	44	25	39	43	26
	h=1.0%	94	89	20	31	26	23	29	30	19	28	32	18
原子炉圧力容器 EL. 20.292 m	h=0.5%	89	100	28	41	42	27	40	44	24	39	42	25
	h=1.0%	81	80	19	30	25	23	28	29	18	28	31	17

表 4(1) 原子炉格納容器, 原子炉压力容器等の等価繰返し回数の算定結果

	減衰定数	Ss-14			Ss-21			Ss-22			Ss-31		
		NS	EW	UD									
原子炉格納容器 EL. 36.431 m	h=0.5%	46	47	23	47	50	33	42	61	27	16	16	5
	h=1.0%	29	29	16	31	35	20	31	44	19	14	14	5
原子炉格納容器 EL. 33.431 m	h=0.5%	46	47	23	48	50	33	43	61	25	16	16	5
	h=1.0%	29	28	16	31	35	20	30	43	18	14	14	5
原子炉格納容器 EL. 27.432 m	h=0.5%	45	47	21	48	50	34	43	60	23	15	15	6
	h=1.0%	26	28	19	31	36	19	30	42	16	14	14	5
原子炉格納容器 EL. 24.422 m	h=0.5%	42	47	21	48	50	35	43	59	23	15	15	6
	h=1.0%	26	27	18	31	36	21	30	42	16	13	13	5
原子炉格納容器 EL. 18.420 m	h=0.5%	32	45	20	49	49	35	43	58	24	15	15	6
	h=1.0%	26	26	18	30	38	21	31	40	17	13	13	5
原子炉格納容器 EL. 16.319 m	h=0.5%	32	44	20	49	49	35	43	58	25	15	15	6
	h=1.0%	26	26	18	30	38	21	31	40	18	13	13	5
原子炉遮蔽 EL. 34.643 m	h=0.5%	47	47	28	47	51	21	43	61	24	16	16	6
	h=1.0%	29	28	17	37	35	17	41	44	17	14	14	5
原子炉遮蔽 EL. 28.308 m	h=0.5%	46	47	26	48	50	20	44	60	24	16	16	6
	h=1.0%	29	28	17	40	35	18	39	43	17	14	14	5
原子炉本体 の基礎 EL. 19.856 m	h=0.5%	42	47	24	48	50	22	43	59	26	15	15	6
	h=1.0%	26	27	18	37	37	21	36	42	14	13	13	5
原子炉本体 の基礎 EL. -2.167 m	h=0.5%	40	37	23	49	44	34	44	53	35	15	15	6
	h=1.0%	25	22	16	31	33	25	33	36	27	13	13	5
原子炉压力容器 EL. 39.215 m	h=0.5%	46	47	27	47	51	20	42	62	24	16	16	6
	h=1.0%	29	29	17	41	35	15	40	45	17	14	14	5
原子炉压力容器 EL. 34.656 m	h=0.5%	47	47	26	47	51	20	44	61	24	16	16	6
	h=1.0%	29	29	17	40	35	15	41	44	17	14	14	5
原子炉压力容器 EL. 31.535 m	h=0.5%	46	47	26	48	51	20	47	61	24	16	16	6
	h=1.0%	29	28	17	40	35	16	40	44	17	14	14	5
原子炉压力容器 EL. 20.292 m	h=0.5%	42	47	23	48	50	21	43	59	26	15	15	6
	h=1.0%	26	27	18	37	37	20	37	42	14	14	14	5

表 5(1) 原子炉建屋の等価繰返し回数の算定結果

	減衰定数	Ss-D1			Ss-11			Ss-12			Ss-13		
		NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD
原子炉建屋 EL. 46.500 m	h=0.5%	81	75	133	41	43	49	40	45	37	39	44	36
	h=1.0%	55	55	111	31	28	28	29	29	24	28	31	28
原子炉建屋 EL. 38.800 m	h=0.5%	67	66	133	41	43	49	40	45	37	39	43	35
	h=1.0%	50	49	111	31	27	27	29	29	24	28	31	28
原子炉建屋 EL. 34.700 m	h=0.5%	64	63	134	41	43	49	40	44	37	39	43	35
	h=1.0%	50	49	110	31	27	27	29	29	24	28	31	28
原子炉建屋 EL. 29.000 m	h=0.5%	58	59	133	41	43	49	40	44	37	39	43	35
	h=1.0%	49	49	110	30	26	26	28	29	24	27	31	27
原子炉建屋 EL. 20.300 m	h=0.5%	78	65	129	41	43	49	40	43	37	39	42	35
	h=1.0%	59	49	109	30	25	26	28	28	24	27	30	27
原子炉建屋 EL. 14.000 m	h=0.5%	94	85	125	41	40	49	40	43	37	39	40	35
	h=1.0%	67	66	109	30	23	26	28	27	24	27	27	25
原子炉建屋 EL. 8.200 m	h=0.5%	90	89	122	41	38	49	40	41	37	39	36	34
	h=1.0%	72	73	109	30	24	26	28	25	24	27	24	25
原子炉建屋 EL. 2.000 m	h=0.5%	92	92	118	41	36	49	40	39	37	39	33	34
	h=1.0%	84	84	109	30	24	26	28	24	24	27	21	25
原子炉建屋 EL. -4.000 m	h=0.5%	101	101	115	41	34	49	39	34	37	39	33	34
	h=1.0%	93	93	108	30	24	26	28	23	24	27	22	25

表 5(2) 原子炉建屋の等価繰返し回数の算定結果

	減衰定数	Ss-14			Ss-21			Ss-22			Ss-31		
		NS	EW	UD									
原子炉建屋 EL. 46.500 m	h=0.5%	45	48	32	47	51	48	42	63	50	16	16	20
	h=1.0%	28	30	28	31	38	38	31	45	44	13	13	13
原子炉建屋 EL. 38.800 m	h=0.5%	45	47	32	47	51	48	43	62	50	16	16	20
	h=1.0%	28	30	27	31	35	38	30	45	43	13	13	13
原子炉建屋 EL. 34.700 m	h=0.5%	45	47	32	47	50	48	43	62	50	16	16	20
	h=1.0%	29	29	27	31	36	38	30	44	43	13	13	13
原子炉建屋 EL. 29.000 m	h=0.5%	44	46	32	47	50	48	44	61	50	15	15	20
	h=1.0%	27	28	27	31	37	38	31	44	43	13	13	13
原子炉建屋 EL. 20.300 m	h=0.5%	32	45	32	48	49	48	43	59	50	15	15	20
	h=1.0%	26	27	27	31	37	38	37	41	43	13	13	13
原子炉建屋 EL. 14.000 m	h=0.5%	32	44	32	48	48	48	43	57	51	15	15	20
	h=1.0%	26	25	27	31	38	38	32	39	43	13	13	13
原子炉建屋 EL. 8.200 m	h=0.5%	32	42	32	48	47	48	43	56	51	15	15	20
	h=1.0%	25	24	28	30	38	37	31	38	43	13	13	13
原子炉建屋 EL. 2.000 m	h=0.5%	38	39	32	49	45	48	43	54	51	15	15	20
	h=1.0%	25	23	28	30	35	37	32	40	43	13	13	13
原子炉建屋 EL. -4.000 m	h=0.5%	42	36	32	49	42	48	43	52	51	15	15	20
	h=1.0%	25	22	27	30	35	37	32	43	43	13	13	13

5. 繰返し回数設定における保守性

等価繰返し回数の設定におけるパラメータとしては、以下の 6 種類がある。ここでは、それぞれのパラメータに対する包絡性を検討し、設定する等価繰返し回数が保守的な回数であることを確認する。

- ①ピーク応力
- ②固有周期
- ③対象床面
- ④地震波
- ⑤減衰定数
- ⑥設計疲労線図

① ピーク応力

同じ波形で応力値の大きな波と小さな波があった場合、ピーク応力法で等価繰返し回数を算出すると、応力値の大きな波の方が回数を大きく算出することになる。

東海第二発電所における地震時等価繰返し回数の設定に用いるピーク応力は、 150 kg/mm^2 (1471MPa) を用いる。当設定は、「昭和 55 年度耐震設計の標準化に関する調査報告書」での検討にて、当値まで考慮すれば十分とされた値*1である。なお、設備のピーク応力が 150 kg/mm^2 (1471MPa) を超える場合は個別に評価を行う。

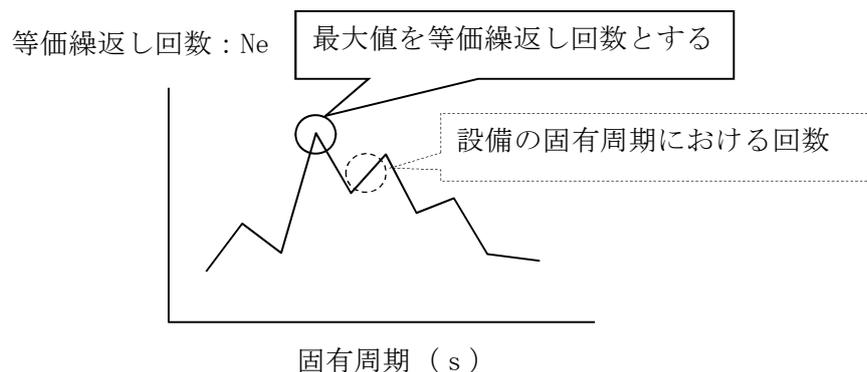
*1 「昭和 55 年度耐震設計の標準化に関する調査報告書」での整理。

現在用いられている材料において RPV 本体材料である SQV 2 A 及び SFV V 3 の一次+二次応力に対する許容値が最も高く、その値は $3S_m = 56.4 \text{ kg/mm}^2$ となる。

応力係数の極大値 5 とすれば、ピーク応力の値としては片振幅に対して、 $56.4 \times 5 \div 2 = 141 \text{ kg/mm}^2$ となることから、最大ピーク応力としては、 150 kg/mm^2 まで考えれば十分としている。

② 固有周期

今回の S_s の等価繰返し回数の設定においては、設備の固有周期の有無に係わらず全周期帯での最大の等価繰返し回数としている。実際の設備としては、特定の固有周期を有していることから、当該建屋（又は質点）の等価繰返し回数は、確実にそれ以下の回数となり、保守側の算出となっている。



③ 代表床面（質点）における等価繰返し回数の設定

原子炉格納容器，原子炉圧力容器等の大型機器については，「昭和 55 年度耐震設計の標準化に関する調査報告書」と同様に代表質点にて等価繰返し回数を設定しており，代表質点は，クラス 1 の機器・配管系の設置位置を選定している。また，(2) 項の表 5 で示した等価繰返し回数は，原子炉建屋に設置された機器・配管系は全ての床面の回数を算定した上で，最大の回数を記載しており，設備の等価繰返し回数は，確実にそれ以下の回数となり保守側の算出となっている。

④ 地震波

東海第二発電所における地震波としては， $S_s - D, 11, 12, 13, 14, 21, 22, 31$ がある。今回の等価繰返し回数の設定においては，全ての S_s を用いており，設備の等価繰返し回数は，確実にそれ以下の回数となり保守側の算出となっている。

また， S_d における等価繰返し回数は， S_s と同じ回数を用いている。 S_d の等価繰返し回数を S_s の等価繰返し回数と同じ回数とすることが保守的な設定であることは，補足-342「東海第二発電所耐震性に関する説明書に係る補足説明資料（耐震評価対象の網羅性，既工認との手法の相違点の整理について）」にて示している。

⑤ 減衰定数

一律に設定する等価繰返し回数の算定においては，減衰定数は 0.5%及び 1.0%を用いている。表 4 及び表 5 に示すとおり減衰定数が小さいほど，等価繰返し回数が多く算定される傾向にあり，機器・配管系に適用される最小の減衰定数は，0.5%であることから，設備の等価繰返し回数は，確実にそれ以下の回数となり保守側の算出となっている。

⑥ 設計疲労線図

疲労評価に用いている設計用疲労線図としては，JSME に記載されている「オーステナイト系ステンレス鋼および高ニッケル合金」と「炭素鋼，低合金鋼及び高張力鋼」の 2

種類が該当する。

一律に設定する等価繰返し回数の算定は、設計疲労線図は代表設備の設計疲労線図（炭素鋼、低合金鋼及び高張力鋼）を用いる。「炭素鋼、低合金鋼及び高張力鋼」の設計用疲労線図を用いるほうが、同じピーク応力とした場合に「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、地震繰返し回数が多く算定されるため、設備の等価繰返し回数は、確実にそれ以下の回数となり保守側の算出となっている。

6. 繰返し回数設定における保守性を踏まえた追加検討

a. 6つのパラメータによる繰返し回数への影響

5. 項では、6つのパラメータに対して検討を行った。その結果、一律に設定する等価繰返し回数は最も厳しい条件を仮定した回数、また「昭和55年度耐震設計の標準化に関する調査報告書」で検討された手法を用いており、繰返し回数の設定としては保守性を有している。

b. 6つのパラメータ以外による繰返し回数への影響

a. 項では、6つのパラメータに対する検討を行ったが、6つのパラメータ以外に等価繰返し回数に影響する要因としては、以下の項目が挙げられる。一律に設定した等価繰返し回数は、保守性は有しており、その設定に問題はないと考えるが、以下の要因に対しても、問題がないことを確認する。

(a) 時刻歴解析を用いている設備（J E A G 4601-1987（P. 576）の左側のフローについても、1質点系の応答波形を用いて回数を設定（J E A G 4601-1987（P. 576）の右側のフロー）していること

(b) 水平2方向による影響

(c) 地盤物性の影響

(a) 時刻歴解析を用いている設備への影響

時刻歴解析を行う設備は、J E A G 4601の左側のフローを用いることとされているが、今回の等価繰返し回数の算定においてはJ E A G 4601の右側のフローを用いている。時刻歴解析を用いている設備に対して、その時刻歴応答荷重（J E A Gの左側のフロー）を用いて等価繰返し回数を算定した結果と、1質点系の応答波形（J E A Gの右側のフロー）を用いて算出した結果の比較を表6（追而）に示す。

(b) 水平2方向による影響（追而）

(c) 地盤物性の影響（追而）

7. まとめ

東海第二発電所における等価繰返し回数は一律に設定した値を用いており、J E A G 4601に基づき妥当な設定であり、保守的な設定となっていることを確認した。

なお、一律に設定した等価繰返し回数については、等価繰返し回数算定に影響する6つのパラメータ（ピーク応力、固有周期、対象床面、地震波、減衰定数、設計疲労線図）を踏まえても、パラメータ全体として保守的であること、また、それ以外の要因（時刻歴波形を用いた場合の影響、水平2方向の影響及び地盤物性の影響）に対しても検討を行い、保守的な設定となっていることを確認した。

以上より、今回の東海第二発電所における一律に設定した保守的な値はJ E A G 4601に基づき妥当な設定となっている。

東海第二発電所 地震等価繰返し回数の妥当性確認方法について

1. 東海第二発電所における地震等価繰返し回数妥当性確認の方針

今回の東海第二発電所の等価繰返し回数の妥当性確認においては、JEAG4601 に記載されているエネルギー換算法、ピーク応力法の 2 つの手法のうち、ピーク応力法を用いている。また、JEAG4601 には特に要求が無いが、自主的な配慮として Sd2 回分を考慮しても、一律に設定した等価繰返し回数（原子炉格納容器、原子炉圧力容器等の大型機器：Ss：110 回，Sd：110 回，原子炉建屋に設置された機器・配管系：Ss：160 回，Sd：160 回）を超えることがないことを確認している。以下ではその考え方について説明する。

(1) 東海第二発電所における地震等価繰返し回数の算定方針

東海第二発電所の地震等価繰返し回数については、以下のとおり設定している。

- 等価繰返し回数を算定する手法は、JEAG4601 に基づくこととし、ピーク応力法を用いることとしている。
- 設計上の配慮として、S2(Ss)地震については 1 回分、また、S1(Sd)地震については 2 回分を考慮することとしている。これは S2(Ss)地震より S1(Sd)地震の方が、発生頻度が大きいことを踏まえ、S1(Sd)地震時の保守性を多くとることとしたものである。なお、JEAG4601 において地震の発生回数の規定はない。

(2) 東海第二発電所の今回工認における地震等価繰返し回数

東海第二発電所の今回工認においては、(1) 項に示す方針を踏まえ、設計上の配慮として、Ss 地震については 1 回分、また、Sd 地震については 2 回分を考慮することとし、地震等価繰返し回数を算定する手法としては、ピーク応力法を用いている。

なお、上記の算定方法は、新規制基準対応工認における先行プラント（大飯 3・4 号機等）と同じ方法である。

等価繰返し回数の算定における材料物性のばらつき等の影響検討

「昭和 55 年度 耐震設計の標準化に関する調査報告書」の疲労評価用地震等価繰返し回数
の検討において、ピーク応力法を用いた等価繰返し回数の評価時の解析条件として、地盤条
件を変更した検討をしている。本資料においては、材料物性のばらつき等を考慮した建屋応
答時刻歴波を用いた場合の影響検討を実施した。

1. 材料物性のばらつき等を考慮した場合の等価繰返し回数の算定

原子炉建屋における建屋剛性及び地盤物性のばらつきを考慮した場合の等価繰返し回数を
算定する。表 1 に等価繰返し回数の算定条件を示す。

表 1 等価繰返し回数の算定条件

対象建屋	ピーク応力	地震動	固有周期	減衰定数	設計疲労線図	検討ケース
原子炉建屋	1471MPa※	Ss-D1	全周期帯	0.5% 1%	炭素鋼，低合 金鋼及び高張 力鋼	(ケース 1) 地盤物性 + σ 考慮モデル
						(ケース 2) 地盤物性 - σ 考慮モデル
						(ケース 3) 建屋剛性 考慮モデル

※ピーク応力については、 150kg/mm^2 (1471MPa) を用いる。

表 2 に等価繰返し回数の算定結果を示す。材料物性のばらつき等を考慮した場合でも、等
価繰返し回数の算定結果への影響は軽微であり、一律に設定した繰返し回数の 160 回以下で
あることが確認できる。

2. 地盤物性の不確かさを重畳させた場合の影響検討
(追而)

表2 材料物性のばらつき等を考慮した等価繰返し回数の算定結果

評価点	減衰	基本ケース			ばらつきケース								
		Ss-D1			ケース1			ケース2			ケース3		
		NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD
原子炉建屋 EL 46.500m	h=0.5%	81	75	133	93	90	133	73	76	140	76	78	134
	h=1.0%	55	55	111	60	60	112	51	51	107	59	58	110
原子炉建屋 EL 38.800m	h=0.5%	67	66	133	78	73	133	67	66	141	69	67	133
	h=1.0%	50	49	111	50	50	112	50	50	107	51	51	110
原子炉建屋 EL 34.700m	h=0.5%	64	63	134	62	61	134	63	63	139	67	66	132
	h=1.0%	50	49	110	50	50	112	50	49	107	50	50	110
原子炉建屋 EL 29.000m	h=0.5%	58	59	133	59	59	135	58	58	137	63	62	130
	h=1.0%	49	49	110	50	50	112	50	49	107	49	50	110
原子炉建屋 EL 20.300m	h=0.5%	78	65	129	88	88	134	59	64	132	59	59	127
	h=1.0%	59	49	109	70	64	111	50	53	106	49	49	110
原子炉建屋 EL 14.000m	h=0.5%	94	85	125	97	95	130	69	76	128	75	80	124
	h=1.0%	67	66	109	74	69	111	63	64	106	66	66	109
原子炉建屋 EL 8.200m	h=0.5%	90	89	122	97	93	127	75	77	124	82	84	122
	h=1.0%	72	73	109	84	84	110	68	69	105	74	74	109
原子炉建屋 EL 2.000m	h=0.5%	92	92	118	92	93	123	84	86	120	90	90	119
	h=1.0%	84	84	109	92	91	110	83	84	105	81	81	109
原子炉建屋 EL -4.000m	h=0.5%	101	101	115	97	97	118	91	91	114	101	102	117
	h=1.0%	93	93	108	95	95	110	89	88	105	91	92	109