

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

| | |
|------------------|------------------|
| 東海第二発電所 工事計画審査資料 | |
| 資料番号 | 補足-340-2 改 3 |
| 提出年月日 | 平成 30 年 5 月 11 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 5 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返し回数の妥当性確認について)の資料見直し |
| 改3 | 2018年5月11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）】

基準地震動 S_s と弾性設計用地震動 S_d の加速度時刻歴を繋げた加速度時刻歴にて等価繰り返し回数を算出し、基準地震動 S_s のみで算出した等価繰り返し回数との差より弾性設計用地震動 S_d の等価繰り返し回数を求めた場合、東海第二発電所の弾性設計用地震動 S_d 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回分を考慮するが、2回分を考慮した弾性設計用地震動 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（補足1）。

以上のとおり、2回分を考慮した弾性設計用地震動 S_d の等価繰り返し回数を、より多い基準地震動 S_s の等価繰り返し回数（発生値）と同じとすることは保守的であり、さらに、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 による評価より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。

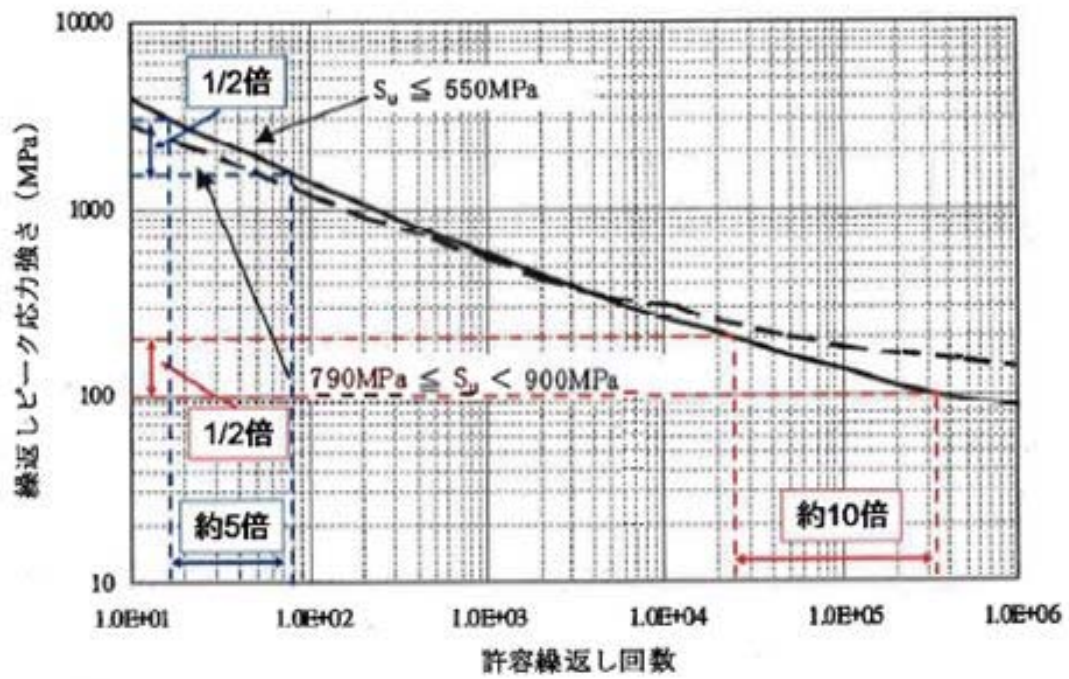


図3 設計疲労線図（炭素鋼，低合金鋼及び高長力鋼）におけるピーク応力と許容繰返し回数との関係

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

| | $S_s - D_1$ による 等価繰返し回数 | $S_d - D_1$ による 等価繰返し回数 $\times 2$ | (参考) $S_s - D_1$ 及び $S_d - D_1$ による 等価繰返し回数 |
|------|-------------------------------|---|--|
| NS方向 | | | |
| EW方向 | | | |
| UD方向 | | | |

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 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|--------|----------------------|----|----|--------------------|----|----|--------------------|----|----|--------------------|----|----|--------------------|----|----|--------------------|----|----|--------------------|----|----|--------------------|----|----|
| | | S _s -D1 | | | S _s -11 | | | S _s -12 | | | S _s -13 | | | S _s -14 | | | S _s -21 | | | S _s -22 | | | S _s -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% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | h=1.0% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 原子炉建屋 EL 38.800m | h=0.5% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | h=1.0% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 原子炉建屋 EL 34.700m | h=0.5% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | h=1.0% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 原子炉建屋 EL 29.000m | h=0.5% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | h=1.0% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 原子炉建屋 EL 20.300m | h=0.5% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | h=1.0% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 原子炉建屋 EL 14.000m | h=0.5% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | h=1.0% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 原子炉建屋 EL 8.200m | h=0.5% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | h=1.0% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 原子炉建屋 EL 2.000m | h=0.5% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | h=1.0% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 原子炉建屋 EL -4.000m | h=0.5% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | h=1.0% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

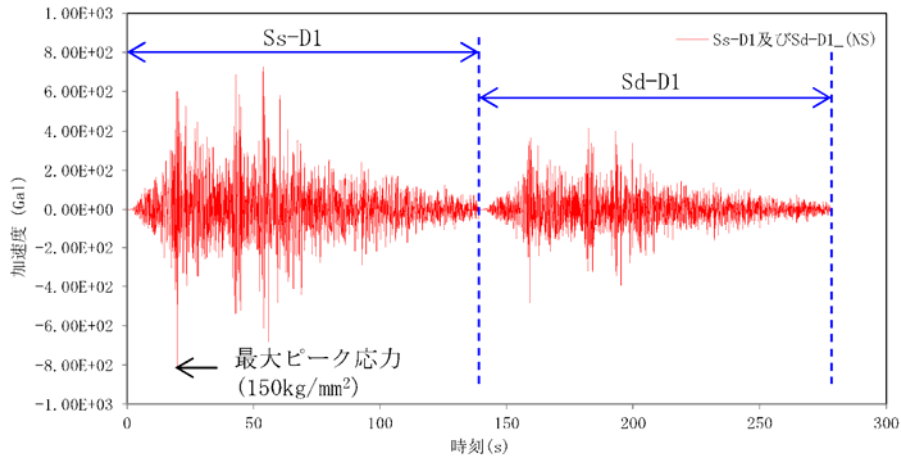


図-1(1) 等価繰返し回数算定に用いる加速度応答時刻歴 (NS方向)

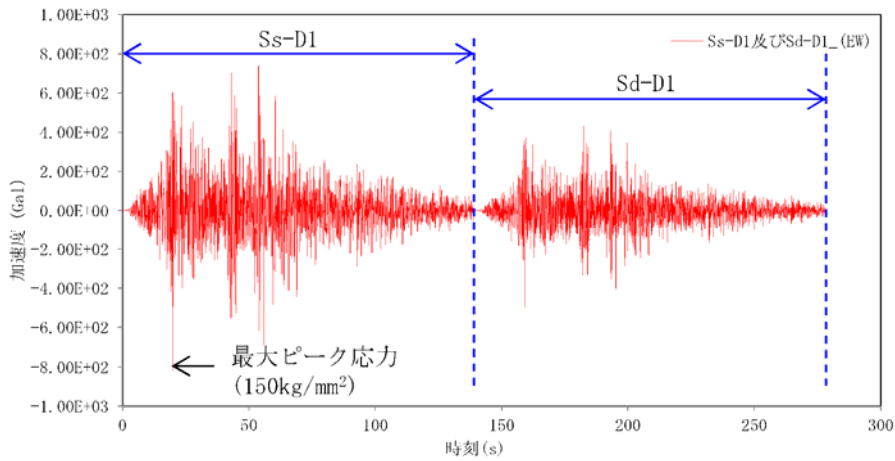


図-1(2) 等価繰返し回数算定に用いる加速度応答時刻歴 (NS方向)

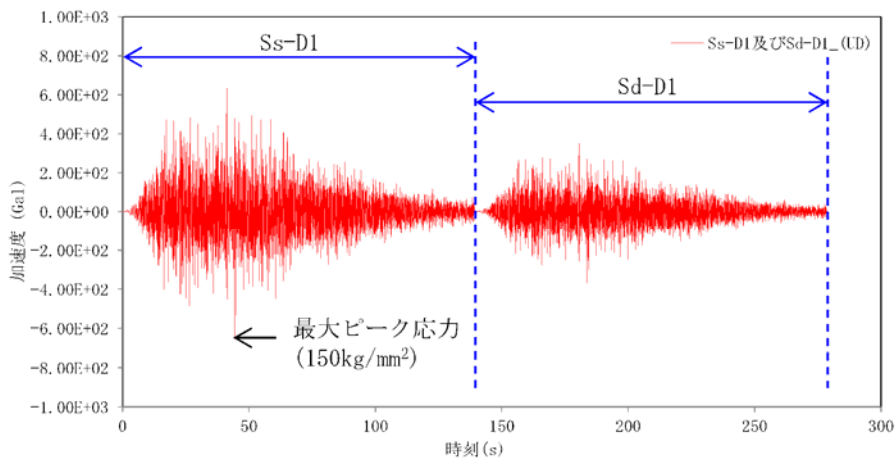


図-1(3) 等価繰返し回数算定に用いる加速度応答時刻歴 (UD方向)

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

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

参考 5. 繰返し回数算定エビデンス

参考 6. 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

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。こ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。なお、一律に設定した等価繰返し回数を用いるのは原子炉建屋内の設備とする。原子炉建屋以外に設置される疲労評価が必要な設備は、設備毎に個別に算出した等価繰返し回数を用いる。

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。

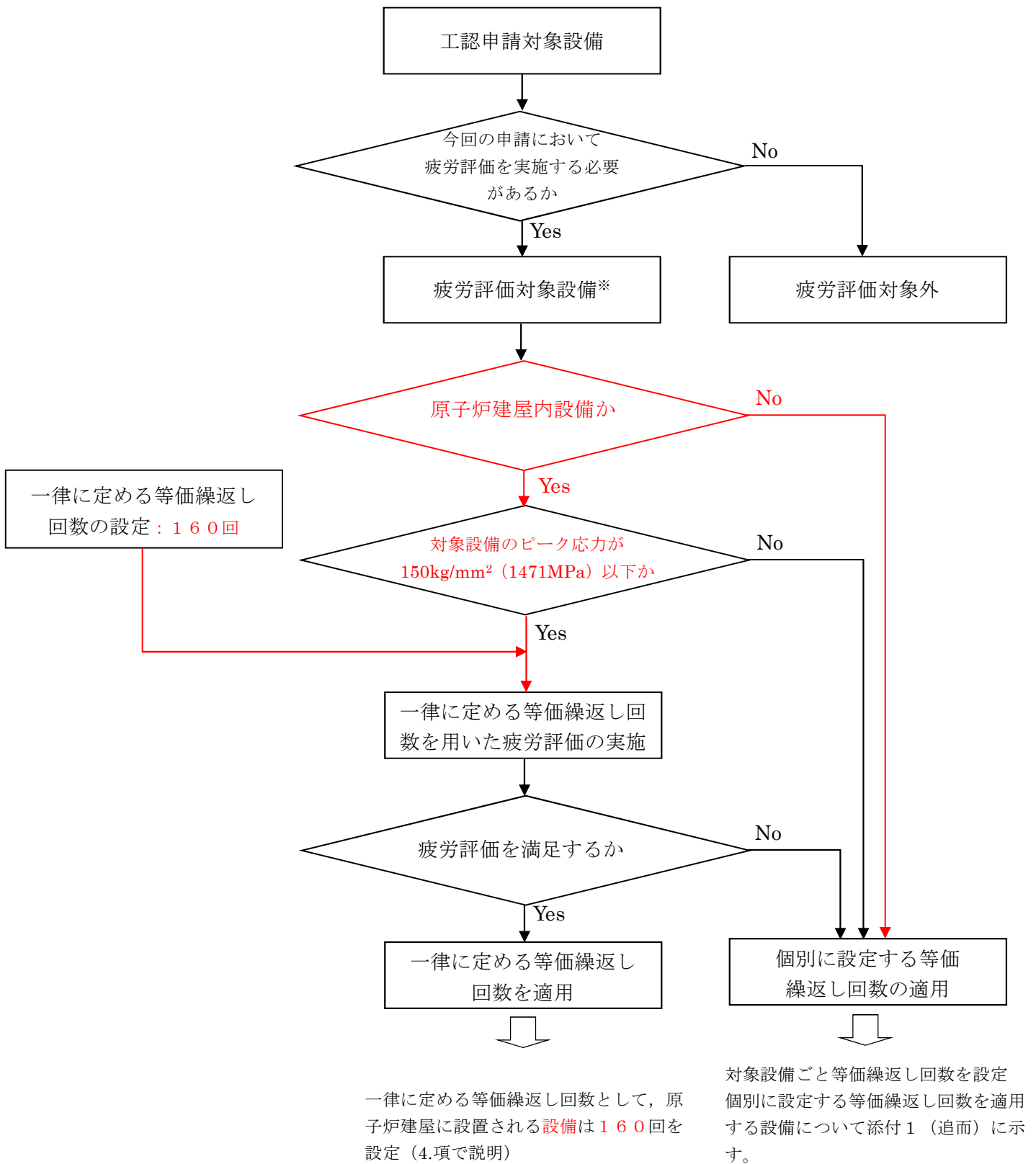
○ 設計基準対象設備

- ・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，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。



※ 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、個別機器ごとの等価繰返し回数の設定を合理化するため、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」に記載されており、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。

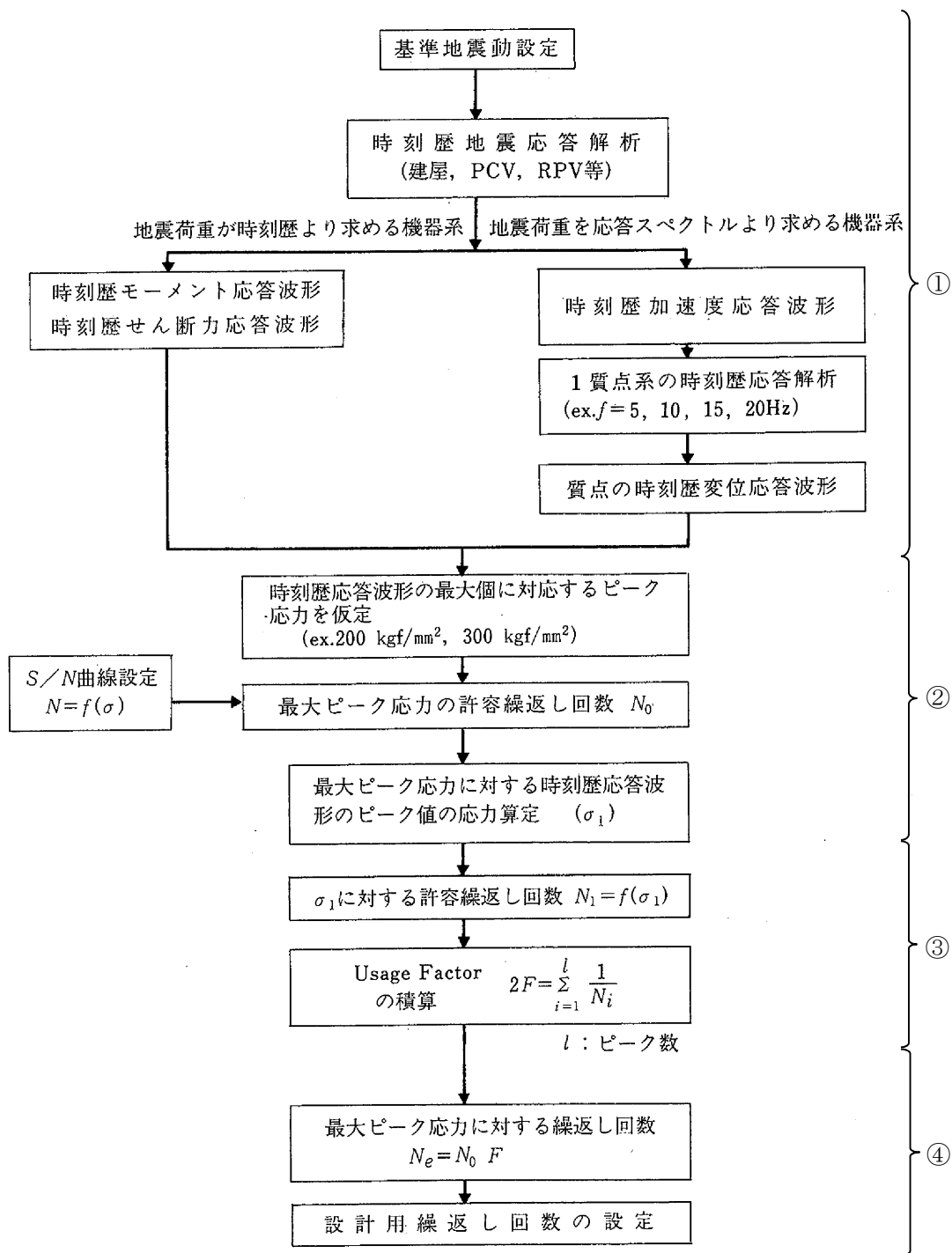


図2 ピーク応力法による算定フロー (J E A G 4601-1987 に追記)

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

| | | 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 一律に設定する等価繰返し回数の設定 | |
|---------------------------|----------------------------|---|---|--|-----------------------|
| | | 【手法1】 | 【手法2】 | | |
| 対象設備 | | 原子炉压力容器スカート | 第一種配管 | 原子炉格納容器, 原子炉 压力容器等大型機器 | 原子炉建屋に設置され た機器・配管系 |
| 算出方法 (JEAG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 (JEAG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 (JEAGにお ける右側のフロー) | 標準化報告書【手法2】 と同じ (JEAG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 | 時刻歴モーメント波形 | 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) | 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し た300kg/mm ² | 150kg/mm ² (1471MPa) 「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 | | Vs=500, 1000, 1500m/s | Vs=1500m/s | Vs=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)

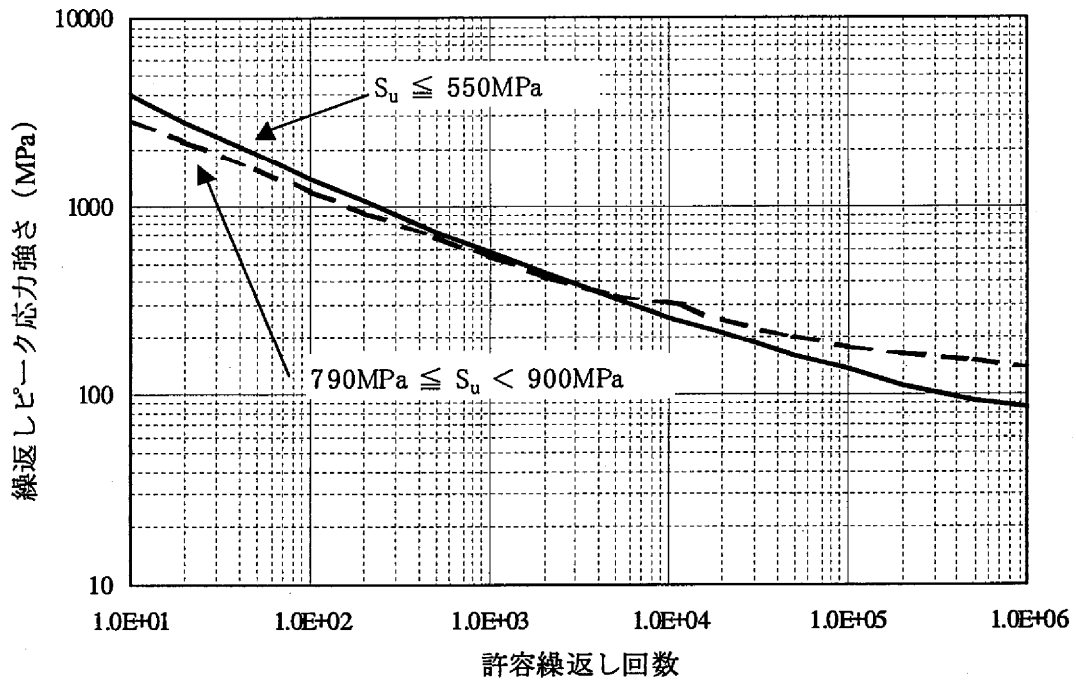


図3 炭素鋼，低合金鋼及び高張力鋼オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金の設計疲労線図

(J SME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

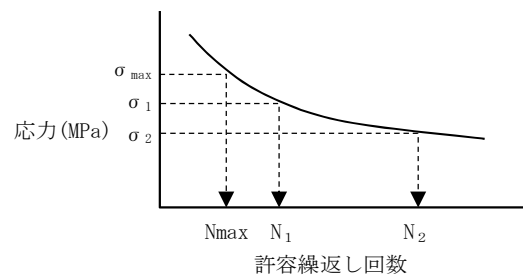


図4 UF算定方法

- 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**加速度**時刻歴より求めた 1 質点系の**変位**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 160 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**加速度**時刻歴より求めた 1 質点系の**変位**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。

ここで、多方向入力の等価繰返し回数の算定方法として、各方向の最大値、SRSS、代数和等の等価繰返し回数を組み合わせる方法が考えられる。これらの中でSRSSや代数和は過度に保守的な評価となるため（追而）、各方向の最大値を保守的に丸めた回数を等価繰返し回数とした。

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. 36.431m | h=0.5% | 66 | 65 | 140 | 41 | 42 | 49 | 40 | 43 | 37 | 39 | 43 | 34 |
| | h=1.0% | 51 | 51 | 109 | 31 | 27 | 27 | 29 | 29 | 24 | 28 | 30 | 26 |
| 原子炉格納容器 EL. 33.431m | h=0.5% | 64 | 63 | 140 | 41 | 42 | 49 | 40 | 43 | 37 | 39 | 43 | 34 |
| | h=1.0% | 50 | 51 | 109 | 30 | 26 | 27 | 29 | 29 | 24 | 28 | 30 | 26 |
| 原子炉格納容器 EL. 27.432m | h=0.5% | 59 | 59 | 140 | 41 | 42 | 49 | 40 | 43 | 37 | 39 | 42 | 34 |
| | h=1.0% | 50 | 50 | 109 | 30 | 26 | 26 | 28 | 29 | 24 | 28 | 30 | 26 |
| 原子炉格納容器 EL. 24.422m | h=0.5% | 59 | 59 | 140 | 41 | 42 | 49 | 40 | 43 | 37 | 39 | 41 | 34 |
| | h=1.0% | 49 | 50 | 109 | 30 | 25 | 26 | 28 | 29 | 24 | 28 | 30 | 26 |
| 原子炉格納容器 EL. 18.420m | h=0.5% | 75 | 77 | 139 | 41 | 42 | 49 | 40 | 43 | 37 | 39 | 41 | 34 |
| | h=1.0% | 54 | 54 | 109 | 30 | 24 | 25 | 28 | 28 | 24 | 28 | 28 | 26 |
| 原子炉格納容器 EL. 16.319m | h=0.5% | 83 | 82 | 139 | 41 | 42 | 49 | 40 | 43 | 37 | 39 | 40 | 34 |
| | h=1.0% | 61 | 60 | 109 | 30 | 25 | 25 | 28 | 28 | 24 | 28 | 28 | 26 |
| 原子炉遮蔽 EL. 34.643m | h=0.5% | 85 | 98 | 145 | 41 | 42 | 48 | 40 | 44 | 37 | 39 | 43 | 35 |
| | h=1.0% | 75 | 82 | 107 | 31 | 27 | 39 | 29 | 30 | 24 | 28 | 31 | 26 |
| 原子炉遮蔽 EL. 28.308m | h=0.5% | 92 | 103 | 145 | 41 | 42 | 48 | 40 | 44 | 37 | 39 | 42 | 35 |
| | h=1.0% | 94 | 82 | 107 | 30 | 26 | 38 | 29 | 30 | 24 | 28 | 32 | 26 |
| 原子炉本体の基礎 EL. 19.856m | h=0.5% | 90 | 97 | 145 | 41 | 42 | 48 | 40 | 44 | 37 | 39 | 41 | 35 |
| | h=1.0% | 73 | 77 | 107 | 30 | 25 | 37 | 28 | 29 | 24 | 28 | 31 | 26 |
| 原子炉本体の基礎 EL. -2.167m | h=0.5% | 93 | 93 | 139 | 41 | 35 | 49 | 40 | 35 | 37 | 39 | 33 | 34 |
| | h=1.0% | 94 | 94 | 109 | 30 | 25 | 26 | 28 | 24 | 24 | 27 | 21 | 25 |
| 原子炉圧力容器 EL. 39.215m | h=0.5% | 89 | 92 | 145 | 41 | 42 | 48 | 40 | 44 | 37 | 39 | 44 | 35 |
| | h=1.0% | 85 | 77 | 107 | 31 | 27 | 38 | 29 | 30 | 24 | 28 | 32 | 26 |
| 原子炉圧力容器 EL. 34.656m | h=0.5% | 87 | 99 | 145 | 41 | 42 | 48 | 40 | 44 | 37 | 39 | 43 | 35 |
| | h=1.0% | 89 | 83 | 107 | 31 | 27 | 39 | 29 | 30 | 24 | 28 | 32 | 26 |
| 原子炉圧力容器 EL. 31.535m | h=0.5% | 88 | 102 | 145 | 41 | 42 | 48 | 40 | 44 | 37 | 39 | 43 | 35 |
| | h=1.0% | 94 | 89 | 107 | 31 | 26 | 38 | 29 | 30 | 24 | 28 | 32 | 26 |
| 原子炉圧力容器 EL. 20.292m | h=0.5% | 89 | 100 | 145 | 41 | 42 | 48 | 40 | 44 | 37 | 39 | 42 | 35 |
| | h=1.0% | 81 | 80 | 107 | 30 | 25 | 36 | 28 | 29 | 24 | 28 | 31 | 26 |

表 4(2) 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-14 | | | Ss-21 | | | Ss-22 | | | Ss-31 | | |
|-------------------------|--------|-------|----|----|-------|----|----|-------|----|----|-------|----|----|
| | | NS | EW | UD | NS | EW | UD | NS | EW | UD | NS | EW | UD |
| 原子炉格納容器 EL. 36.431m | h=0.5% | 46 | 47 | 32 | 47 | 50 | 48 | 42 | 61 | 53 | 16 | 16 | 19 |
| | h=1.0% | 29 | 29 | 27 | 31 | 35 | 41 | 31 | 44 | 43 | 14 | 14 | 13 |
| 原子炉格納容器 EL. 33.431m | h=0.5% | 46 | 47 | 32 | 48 | 50 | 48 | 43 | 61 | 53 | 16 | 16 | 19 |
| | h=1.0% | 29 | 28 | 27 | 31 | 35 | 41 | 30 | 43 | 43 | 14 | 14 | 13 |
| 原子炉格納容器 EL. 27.432m | h=0.5% | 45 | 47 | 32 | 48 | 50 | 48 | 43 | 60 | 53 | 15 | 15 | 19 |
| | h=1.0% | 26 | 28 | 27 | 31 | 36 | 41 | 30 | 42 | 45 | 14 | 14 | 13 |
| 原子炉格納容器 EL. 24.422m | h=0.5% | 42 | 47 | 32 | 48 | 50 | 48 | 43 | 59 | 53 | 15 | 15 | 19 |
| | h=1.0% | 26 | 27 | 27 | 31 | 36 | 40 | 30 | 42 | 43 | 13 | 13 | 13 |
| 原子炉格納容器 EL. 18.420m | h=0.5% | 32 | 45 | 32 | 49 | 49 | 48 | 43 | 58 | 53 | 15 | 15 | 19 |
| | h=1.0% | 26 | 26 | 27 | 30 | 38 | 40 | 31 | 40 | 43 | 13 | 13 | 13 |
| 原子炉格納容器 EL. 16.319m | h=0.5% | 32 | 44 | 32 | 49 | 49 | 48 | 43 | 58 | 53 | 15 | 15 | 19 |
| | h=1.0% | 26 | 26 | 27 | 30 | 38 | 40 | 31 | 40 | 43 | 13 | 13 | 13 |
| 原子炉遮蔽 EL. 34.643m | h=0.5% | 47 | 47 | 32 | 47 | 51 | 48 | 43 | 61 | 54 | 16 | 16 | 19 |
| | h=1.0% | 29 | 28 | 29 | 37 | 35 | 39 | 41 | 44 | 43 | 14 | 14 | 13 |
| 原子炉遮蔽 EL. 28.308m | h=0.5% | 46 | 47 | 32 | 48 | 50 | 48 | 44 | 60 | 54 | 16 | 16 | 19 |
| | h=1.0% | 29 | 28 | 29 | 40 | 35 | 39 | 39 | 43 | 43 | 14 | 14 | 13 |
| 原子炉本体の基礎 EL. 19.856m | h=0.5% | 42 | 47 | 32 | 48 | 50 | 48 | 43 | 59 | 54 | 15 | 15 | 19 |
| | h=1.0% | 26 | 27 | 29 | 37 | 37 | 39 | 36 | 42 | 43 | 13 | 13 | 13 |
| 原子炉本体の基礎 EL. -2.167m | h=0.5% | 40 | 37 | 32 | 49 | 44 | 48 | 44 | 53 | 53 | 15 | 15 | 19 |
| | h=1.0% | 25 | 22 | 27 | 31 | 33 | 40 | 33 | 36 | 43 | 13 | 13 | 13 |
| 原子炉圧力容器 EL. 39.215m | h=0.5% | 46 | 47 | 32 | 47 | 51 | 48 | 42 | 62 | 54 | 16 | 16 | 19 |
| | h=1.0% | 29 | 29 | 29 | 41 | 35 | 39 | 40 | 45 | 43 | 14 | 14 | 13 |
| 原子炉圧力容器 EL. 34.656m | h=0.5% | 47 | 47 | 32 | 47 | 51 | 48 | 44 | 61 | 54 | 16 | 16 | 19 |
| | h=1.0% | 29 | 29 | 29 | 40 | 35 | 39 | 41 | 44 | 43 | 14 | 14 | 13 |
| 原子炉圧力容器 EL. 31.535m | h=0.5% | 46 | 47 | 32 | 48 | 51 | 48 | 47 | 61 | 54 | 16 | 16 | 19 |
| | h=1.0% | 29 | 28 | 29 | 40 | 35 | 39 | 40 | 44 | 43 | 14 | 14 | 13 |
| 原子炉圧力容器 EL. 20.292m | h=0.5% | 42 | 47 | 32 | 48 | 50 | 48 | 43 | 59 | 54 | 15 | 15 | 19 |
| | h=1.0% | 26 | 27 | 29 | 37 | 37 | 39 | 37 | 42 | 43 | 14 | 14 | 13 |



図5 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位置(水平方向)

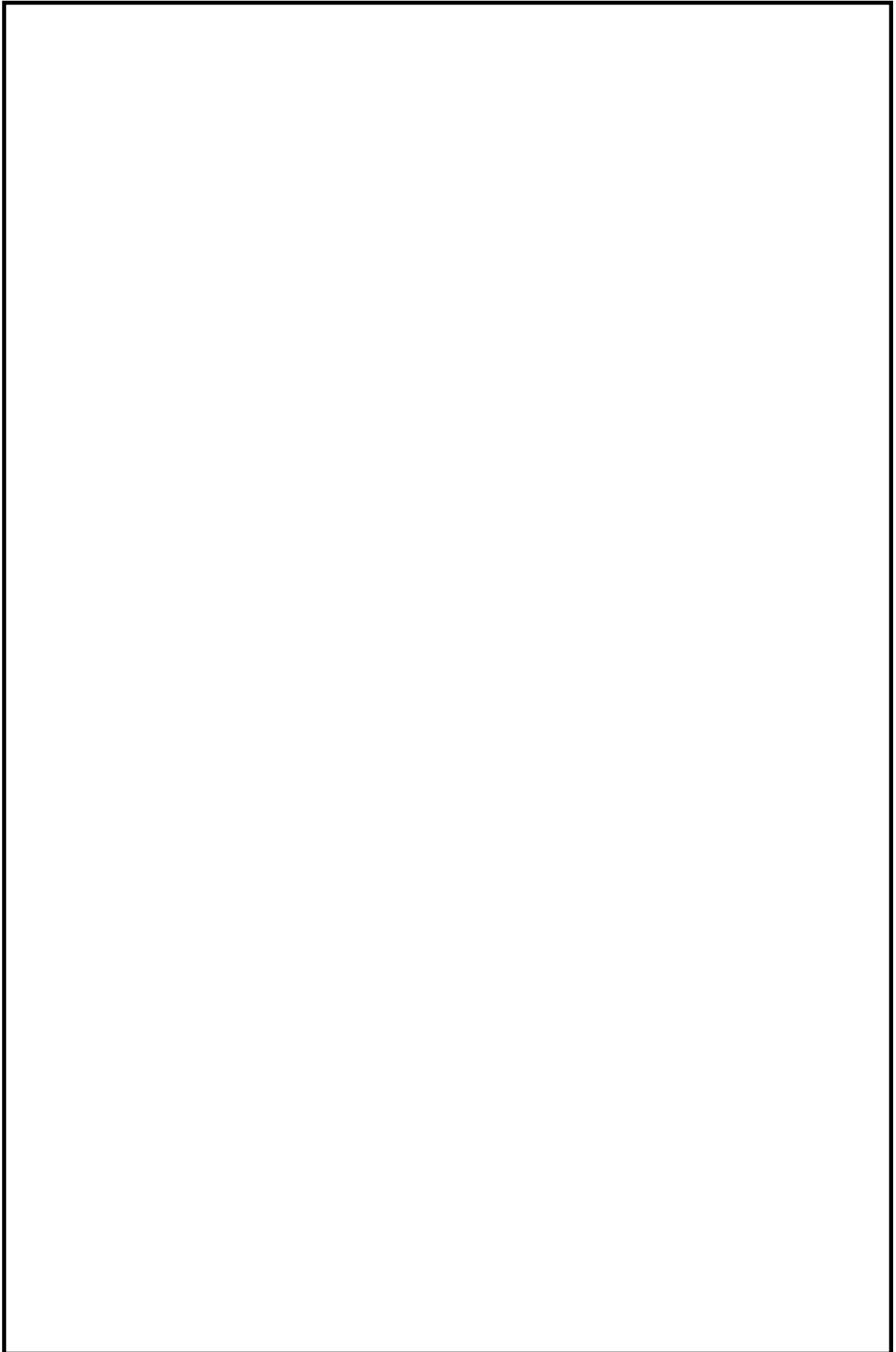


図6 原子炉格納容器, 原子炉圧力容器等の等価繰返し回数の算定位置 (鉛直方向)

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 | NS | EW | UD | NS | EW | UD | 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 |

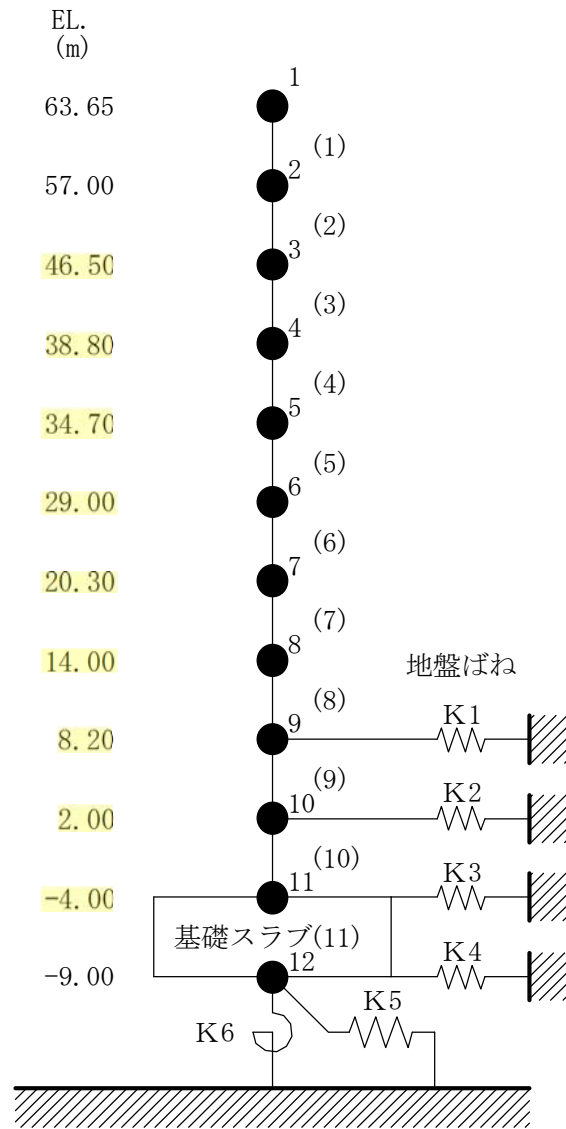


図7 原子炉建屋の等価繰返し回数の算定位置 (水平方向)

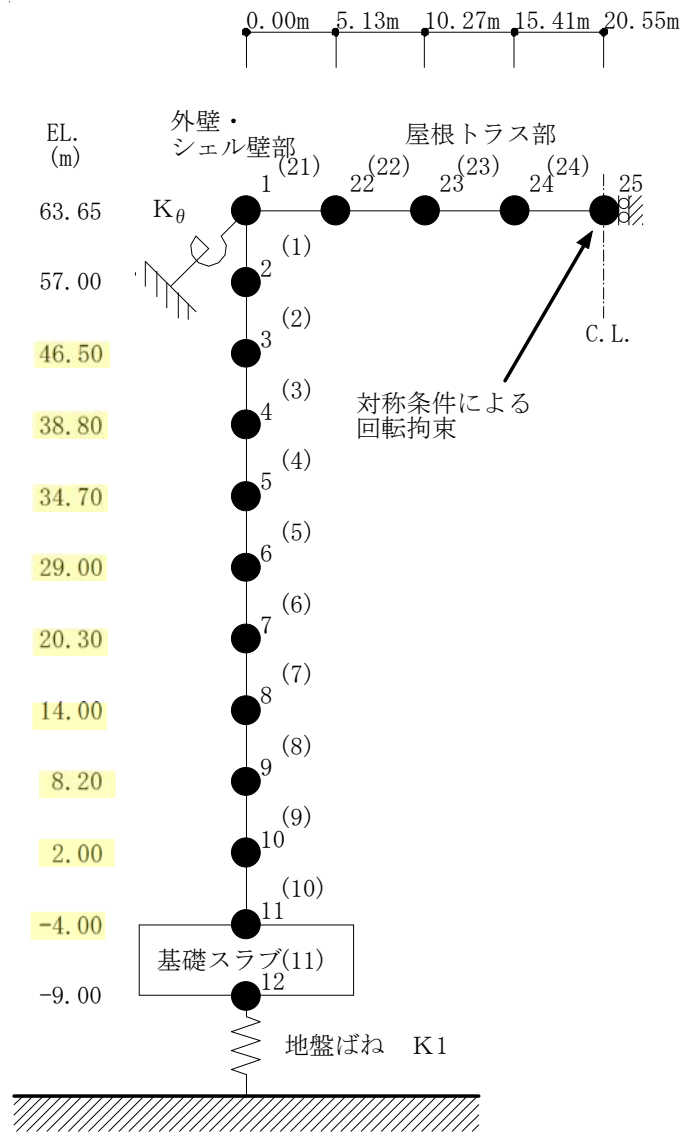


図8 原子炉建屋の等価繰返し回数の算定位置（鉛直方向）

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。

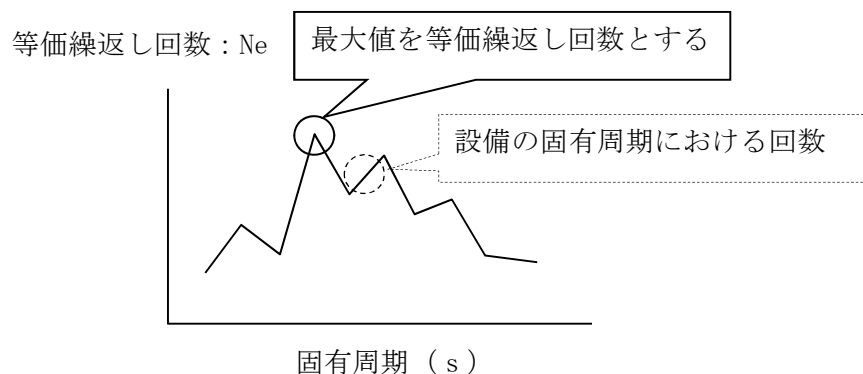
*1 「昭和 55 年度耐震設計の標準化に関する調査報告書」での整理。

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) 材料物性の影響

(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参考4に示す。

設備の時刻歴応答荷重より直接算定した回数は、160回より十分小さく、一律に設定した等価繰返し回数の設定に問題ないことを確認した。

(b) 水平2方向による影響（追而）

(c) 材料物性の影響

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した結果を参考6に示す。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 回以下であることを確認した。

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。

ピーク応力法における各ピークのサイクル数の求め方

東海第二発電所におけるピーク応力法のサイクル数は、ピーク法にて求める。

ピーク法における各ピーク点におけるサイクル数 n については、図 1 に示すとおり、応力波形から平均値(本評価では 0)以上では極大値(正のピーク)、平均値(本評価では 0)以下では極小値(負のピーク)を計測する方法である。正のピークの最大値と負のピークの最小値により 1 つのサイクルの波形とし、次の正と負のピークで 1 つのサイクルとしてカウントする方法である。この方法では矢印に示すような微小振幅をカウントしないが、本評価では 1 質点系応答解析で算定した周期毎の応答変位時刻歴に基づきカウントを行うため、対象となる波形は特定周期の正弦波時刻歴となり、矢印に示すような微小振幅が生じることは考えにくい。

次頁以降に、本カウント方法に関する文献説明を示す。

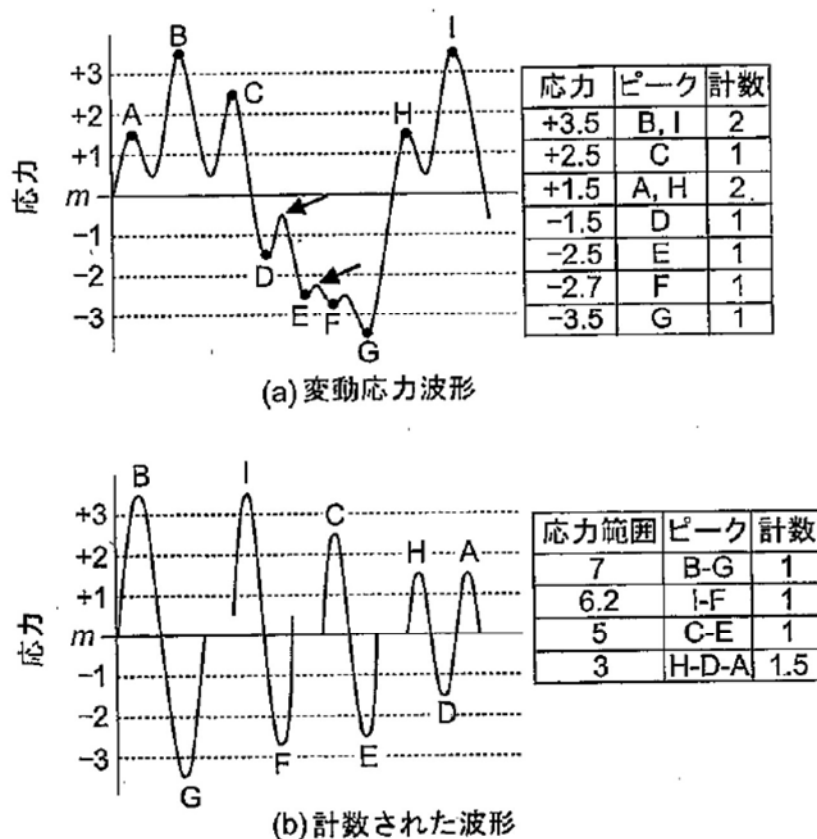


図 4.34 ピーク法による波形計数例

「材料強度学」(社団法人 日本材料学会, 平成 18 年 3 月 15 日第 2 版) より参照

図 1 サイクル数カウント方法

「材料強度学」(社団法人 日本材料学会, 平成 18 年 3 月 15 日第 2 版)

改訂
材料強度学



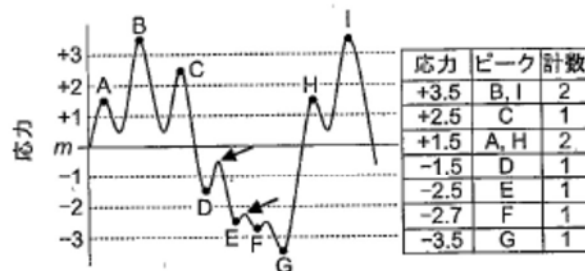
社団法人 日本材料学会

b. 応力波形の計数法

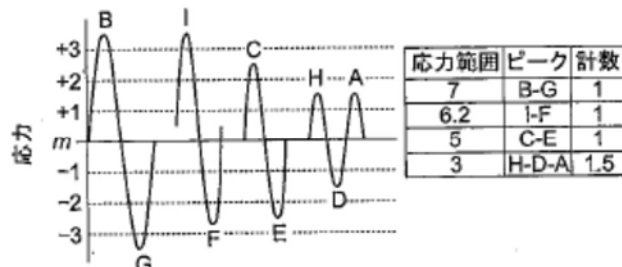
ランダム応力による疲労損傷を評価するためには、実働応力波形から疲労強度を支配する特性因子を抽出し、上記のような応力頻度分布を考える必要がある。このような影響因子の抽出は応力波形の計数法あるいはカウント法 (counting method) とよばれている。波形計数法に関しては ASTM E1049²⁸⁾ に規格化されており、ここではこの規格を参考に、代表的なものについて説明する。

(i) ピーク法 (peak counting)

図 4.34(a) に示すように、応力波形全体の平均値 (m) 以上では極大値 (正のピーク, peak),



(a) 変動応力波形



(b) 計数された波形

図 4.34 ピーク法による波形計数例

平均値以下では極小値 (負のピーク, valley) を計数する方法である。その計数結果を用いて、図 4.34(b) に示すように正のピークの最大値と負のピークの最小値により 1 つのサイクルの波形 (B-G) を作成し、次に 2 番目の正と負のピークを合わせたサイクル (I-F) を作成と、このように順次応力波形サイクルを作成する方法である。この方法は一般に疲労寿命を過小評価する傾向がある。ピーク法には極値すべてを計数する方法もあり、全ピーク法 (full peak counting) とよばれる。この方法は、図中矢印で示した負の値の極大値も計数するため一般に安全側の寿命推定を与える。

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Sd 2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及び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

東海第二発電所の建設時の等価繰返し回数は、OBE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。

今回工認においては地震等価繰返し回数を算定する手法としては、JEAG4601 に基づくこととする。JEAG4601 ではエネルギー換算法及びピーク応力法による繰返し回数の説明があるが、エネルギー換算法は、機器系の固有振動に対する応力の全体応力に対する寄与が小さくなる剛な領域では、過大に安全側の評価となっているため*、ピーク応力法を用いる。

*：昭和55年度 耐震設計の標準化に関する調査報告書

(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、Ss地震よりSd地震の方が発生頻度が多いことを踏まえ、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。

ただし、Sd地震2回分を考慮した等価繰返し回数は、Ss地震から設定した等価繰返し回数以下となるため、Ss地震と同じ回数とする。

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

1. はじめに

JEAG4601 における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（左側のフロー）と、建屋応答に基づく 1 質点系応答解析により変位を算定して用いる場合（右側のフロー）が示されている。今回の東海第二発電所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、右側のフロー（1 質点系応答解析により変位を算定して用いる場合）にて検討することとしている。

なお、左側のフロー（建屋時刻歴応答を直接機器の評価に用いる場合）で等価繰返し回数を算定することは可能であるが、これらの荷重は特定の設備のみ使用されるものであることから、今回の等価繰返し回数設定においては、右側のフローを用いている。

本資料では、JEAG4601 の左側のフローである建屋時刻歴応答を直接機器の評価に用いる場合においても、今回の等価繰返し回数 160 回の設定に問題がないことを確認する。

2. 時刻歴応答解析から算出される時刻歴波形（荷重）を用いた等価繰返し回数

2. 1 対象設備

「昭和 55 年 耐震設計の標準化に関する調査報告書」において原子炉圧力容器スカート（RPV スカート）について左側のフローでの評価を実施している。そのため、代表として RPV スカートに対して、時刻歴応答波形（荷重）から直接等価繰返し回数を評価した場合の等価繰返し回数を算定する。なお RPV スカートは東海第二発電所では疲労評価を実施している設備である。

検討対象設備として選定した RPV スカートのピーク応力は、表 1 に示すとおりである。

表 1 検討対象設備の選定結果

| 検討対象設備 | ピーク応力 (MPa) | 耐震評価のインプットに用いる 解析結果 |
|-----------------|-------------------|------------------------|
| 原子炉圧力容器 スカート | 171 ^{※1} | モーメント 軸力 |

※1：繰返し回数の算出の際は 150kg/mm^2 (1471MPa) を用いる。

以下では、RPV スカートにおいても、今回の等価繰返し回数 160 回の設定に問題がないことを確認する。

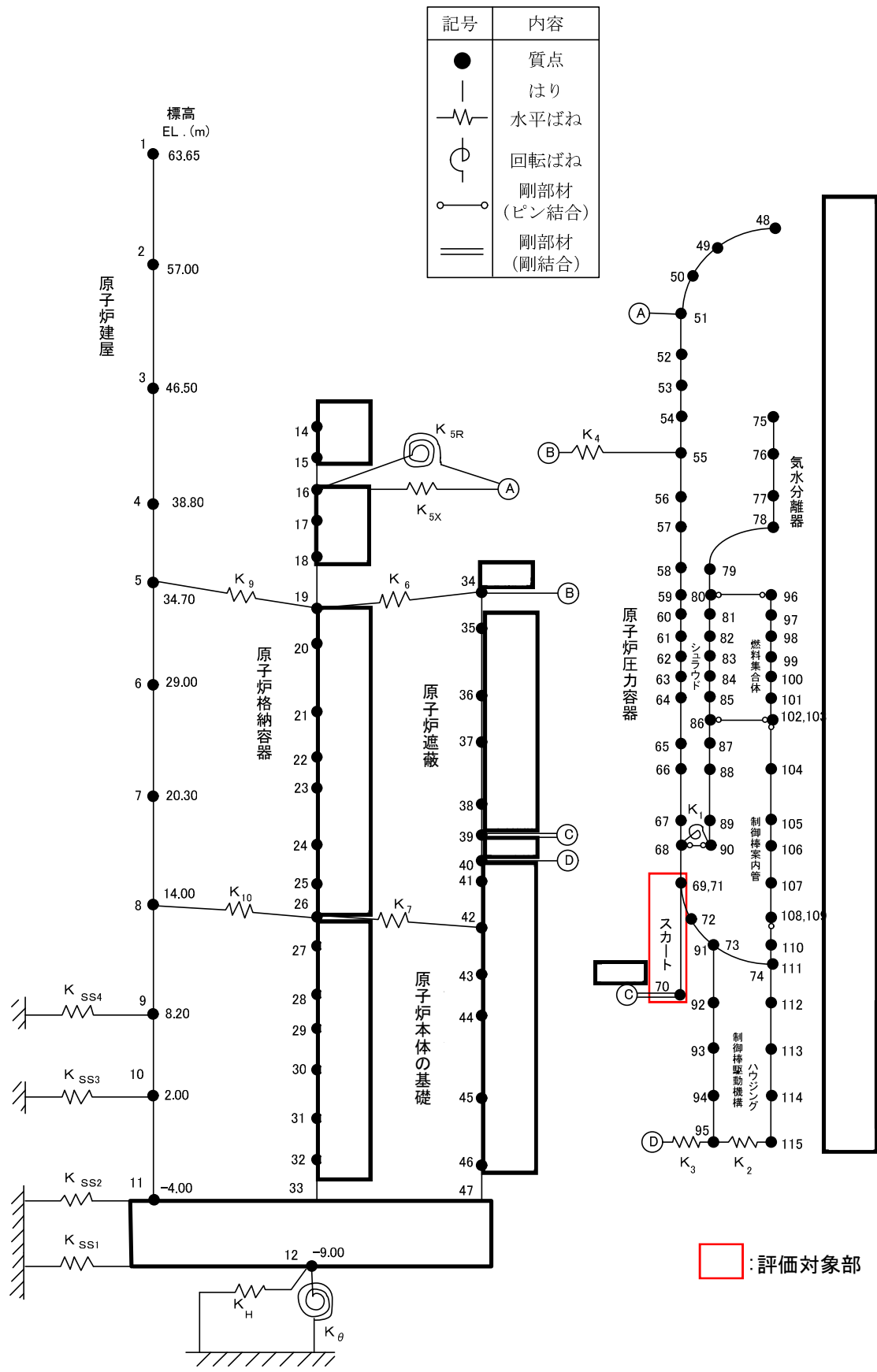


図1 RPV スカート等価繰返し回数評価点
(時刻歴を用いた節点・座標系)

2. 2 検討内容

RPV スカートの荷重（モーメント，軸力）の時刻歴波を用いて等価繰返し回数を算定する。

当該部位の評価においては，建屋－大型機器系連成解析により得られた荷重（モーメント，軸力）時刻歴に基づき算出する。図2-1～図2-3に解析の荷重の時刻歴波としてモーメント・軸力の時刻歴波を示す。

次に，解析にて算出した時刻歴波を用いて RPV スカートの等価繰返し回数を算定する。RPV スカートは荷重（モーメント，軸力）を用いて評価しているため，それぞれの時刻歴波を用いて等価繰返し回数を算定した。

なお，等価繰返し回数の算出の際は $150\text{kg}/\text{mm}^2$ (1471MPa) を用いる。*

※：各荷重・モーメントの時刻歴波において，波の振幅に関係なく，荷重・モーメントの最大値をピーク応力の最大値である 1471MPa に置き換えることで応力の時刻歴波とし，等価繰返し回数を算定する。

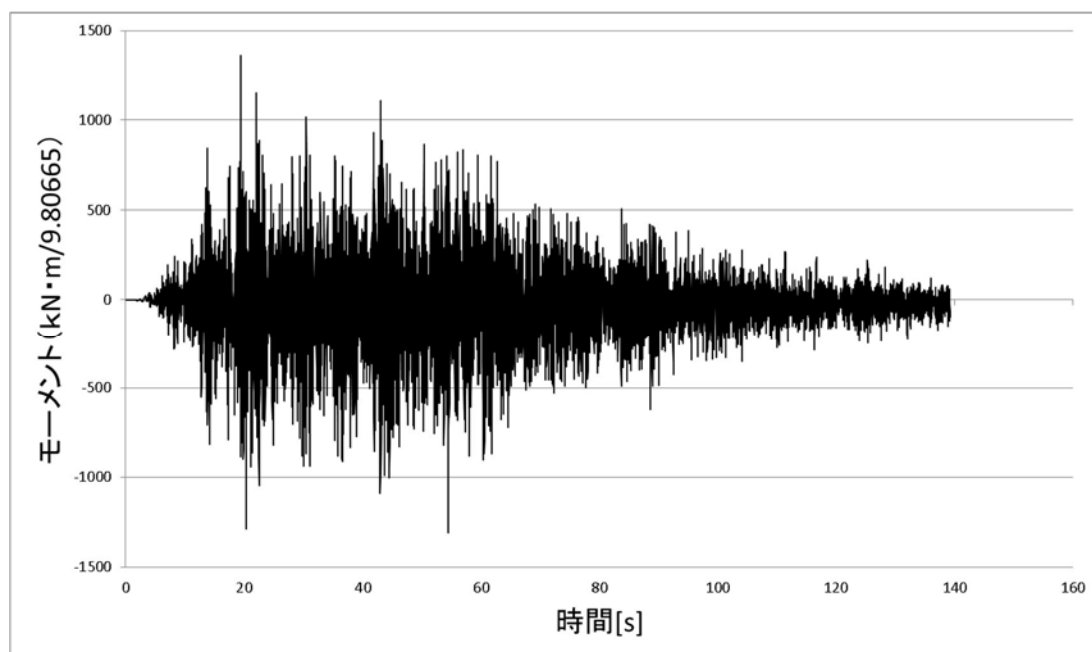


図2-1 建屋－大型機器系連成解析モデル時刻歴（モーメント）（NS 方向）

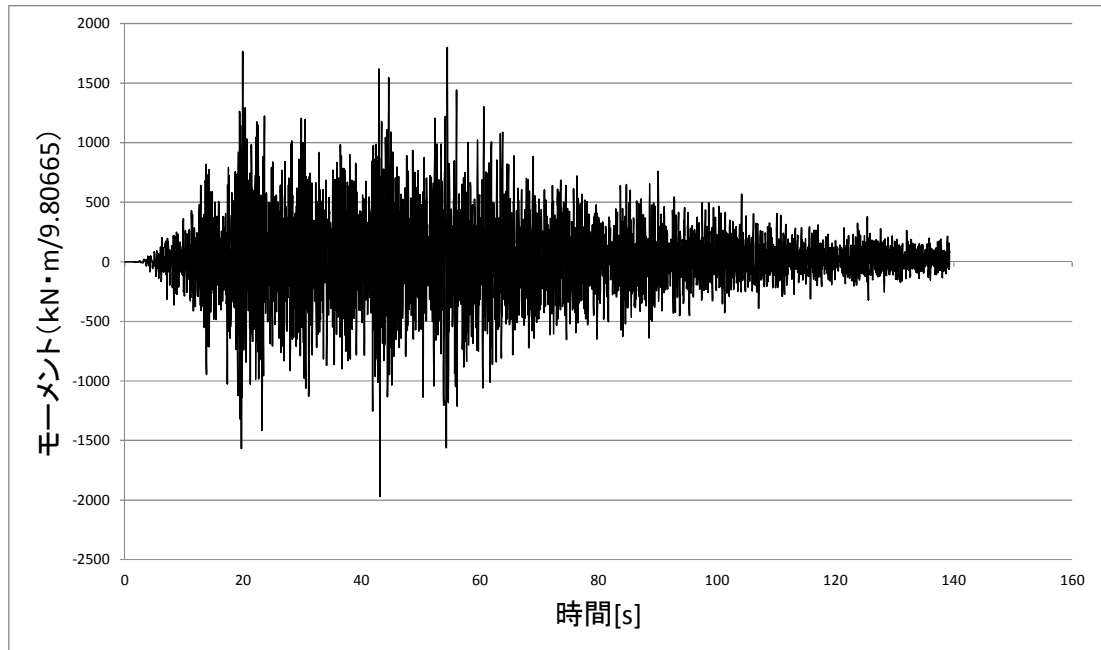


図 2 - 2 建屋—大型機器系連成解析モデル時刻歴 (モーメント) (EW 方向)

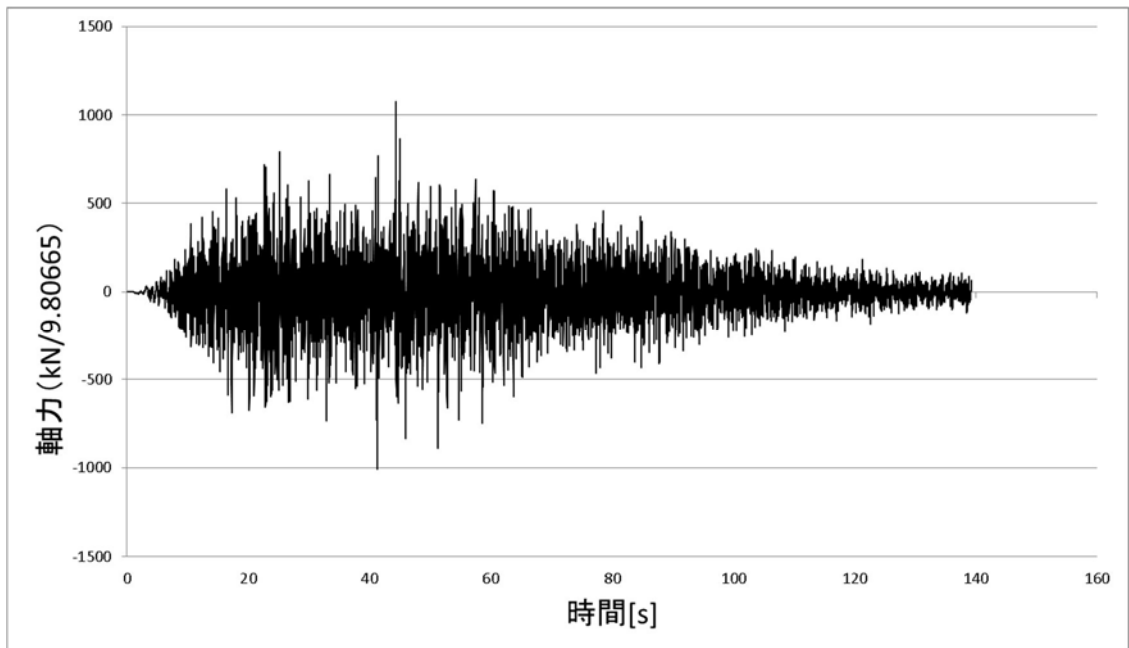


図 2 - 3 建屋—大型機器系連成解析モデル時刻歴 (軸力) (UD 方向)

2. 3 検討結果

RPV スカートにおける等価繰返し回数の算定結果を表 2 に示す。

Ss-D1 の時刻歴波について等価繰返し回数を算定した結果、RPV スカートのモーメント時刻歴波（図 2-1, 2-2 参照）において最大等価繰返し回数 となった。

以上より、設備の時刻歴応答波形より直接算定した回数は、160 回より十分小さく、一律に設定した等価繰返し回数の設定に問題はないと考えられる。

表 2 荷重時刻歴波形（解析結果）を用いた地震繰返し回数算定結果

| 評価点 | ピーク応力 | 成分 | NS 方向 モデル | EW 方向 モデル | UD 方向 モデル |
|-----------------|-------------------------------------|-------------|----------------------|--------------|--------------|
| 原子炉压力容器 スカート | 1471MPa (150kg/mm ²) | モーメント 軸力 | <input type="text"/> | | |
| | | | | | |

* : 本モーメント記載は、原子炉压力容器 EL 位置の値。

地震時等価繰返し回数算定エビデンス

1. はじめに

本資料は、ピーク法を考慮したピーク応力法の地震等価繰返し回数の算定についてまとめたものである。

ピーク法を考慮したピーク応力法による等価繰返し回数の算定方法について、各ステップの詳細な説明を示す。

2. ピーク法を考慮したピーク応力法による等価繰返し回数の算定方法

・ステップ 1

加速度時刻歴波形から 1 質点系応答解析により、各周期応答変位を算定する。算定した応答変位時刻歴波形から平均値(本評価では 0)以上では極大値(正のピーク)、平均値(本評価では 0)以下では極小値(負のピーク)を計測し、正のピークの最大値と負のピークの最小値により 1 つのサイクルの波形とし、次の正と負のピークで 1 つのサイクルとしてカウントする。

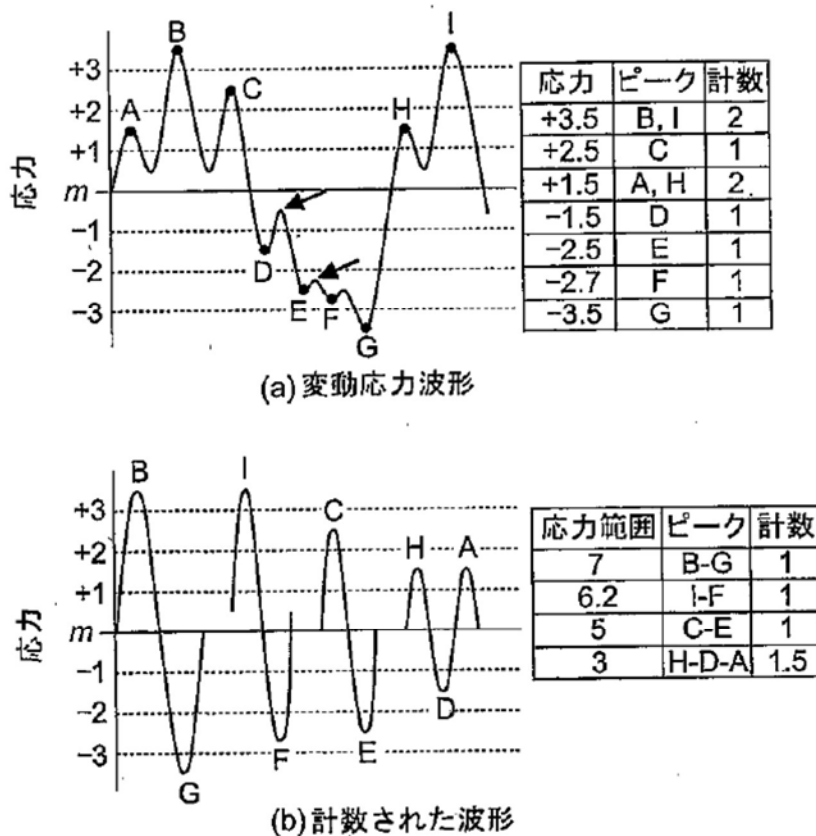


図 4.34 ピーク法による波形計数例

「材料強度学」(社団法人 日本材料学会, 平成 18 年 3 月 15 日第 2 版) より参照

図 1 サイクル数カウント方法

・ステップ2

抽出した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、ピーク点の疲れ累積係数 UF (Usage Factor) を求める。

○UFの算定式

$$UN = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} \dots$$

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

・ステップ (3)

最大ピーク応力に対応する許容繰返し回数 (N_0) を設計疲労線図より求め、UF に乗じることで、最大ピーク応力に対する等価繰返し回数 (N_e) を求める。

○最大ピーク応力に対する等価繰返し回数(N_e)

$$N_e = UF \times N_0$$

3. 等価繰返し回数算定エビデンス

以降では、下表に示す原子炉建屋 EL 46.500m の Ss-D1 の等価繰返し回数の算定エビデンスを示す。

表 1 原子炉建屋 EL 46.500m の Ss-D1 の等価繰返し回数

| 標高 | 地震動 | ピーク応力：1471MPa (150kg/mm ²) | | |
|--------------------|-------|---|-------|-------|
| | | NS 方向 | EW 方向 | UD 方向 |
| 原子炉建屋 EL46.500m | Ss-D1 | 81 回 | 75 回 | 133 回 |

原子炉建屋 EL 46.500m の Ss-D1 の加速度時刻歴波形を図 3-1～図 3-3 に示す。本時刻歴から 1 質点系応答解析により、各周期応答変位を算定する。

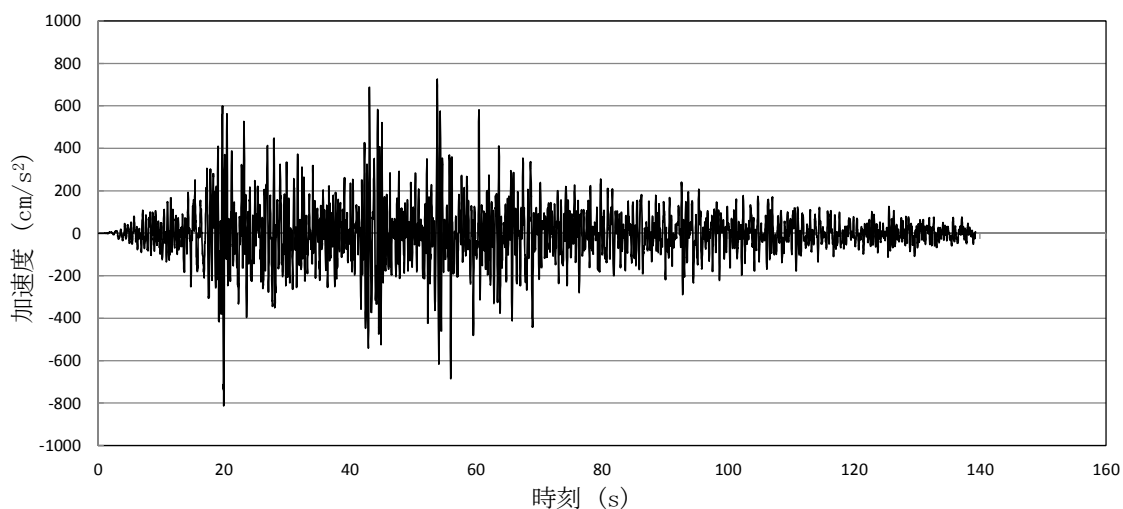


図 3-1 加速度時刻歴波形 (NS 方向)

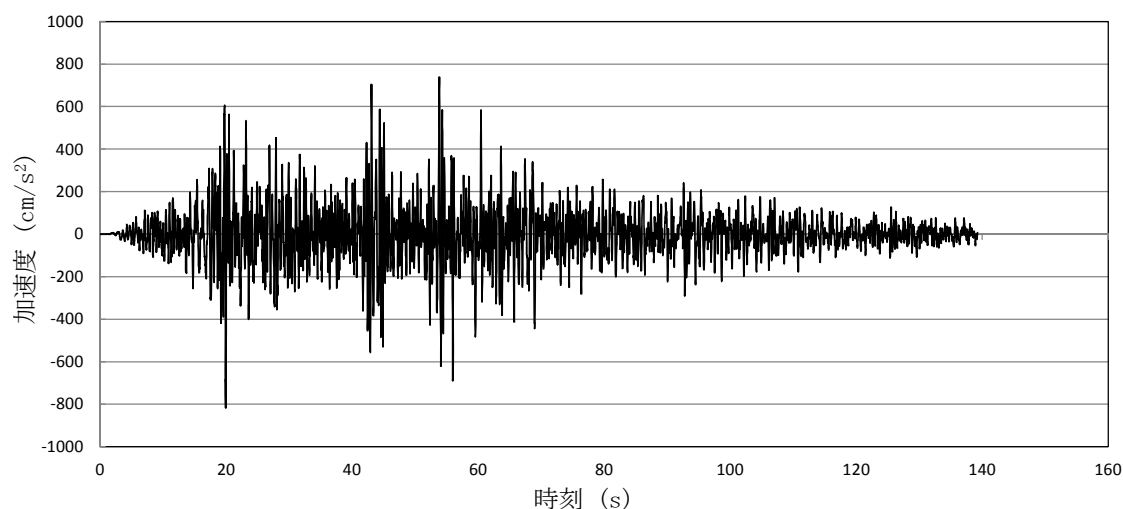


図 3-2 加速度時刻歴波形 (EW 方向)

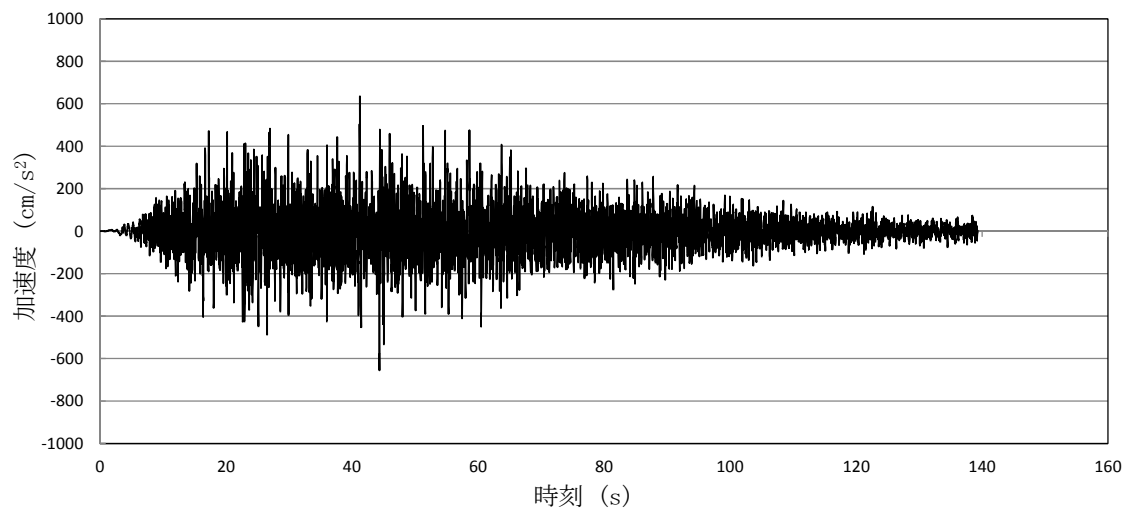


图 3-3 加速度時刻歴波形 (UD 方向)

応答変位時刻歴波形に対し最大ピーク応力を 1471MPa として、ピーク応力法により周期毎の等価繰返し回数 (Ne) を算定した。

各周期毎の等価繰返し回数結果を図 3-4～図 3-6 に示す。表-1 の等価繰返し回数は各周期の等価繰返し回数の最大値である。

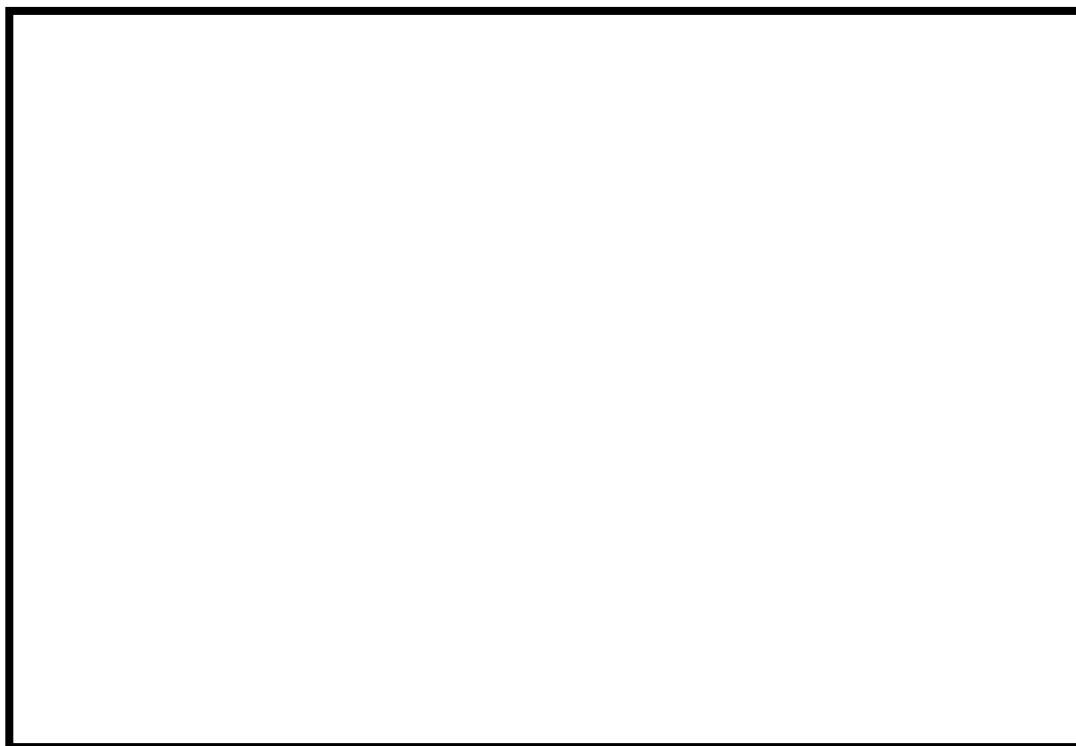


図 3-4 等価繰返し回数 (NS 方向)

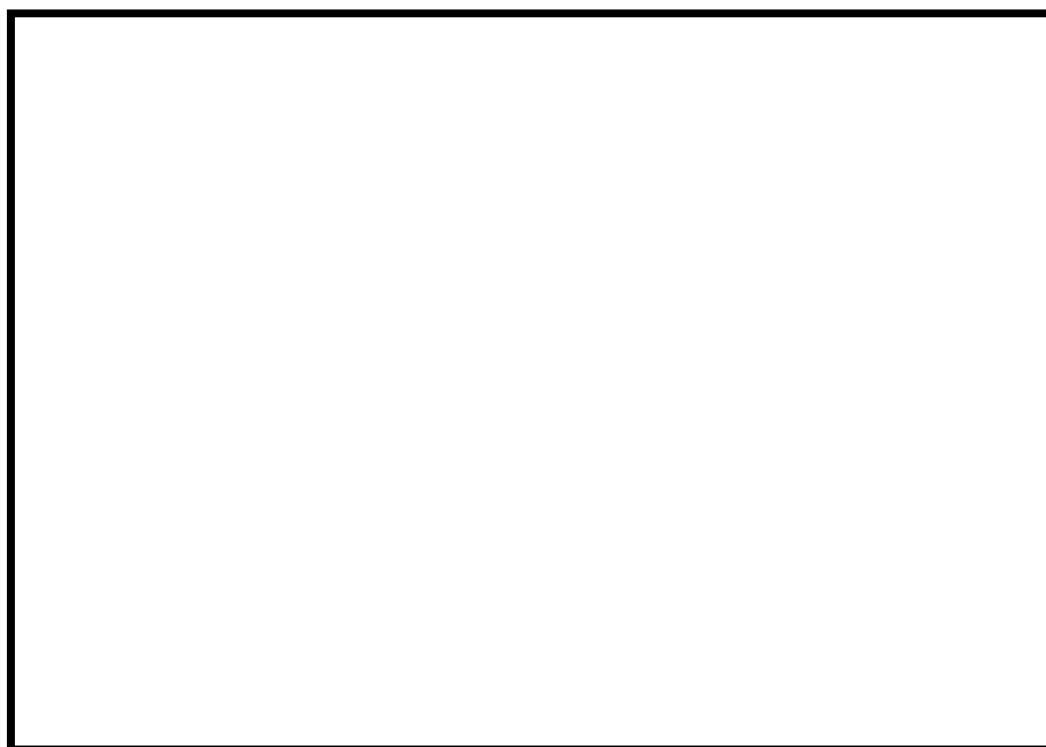


図 3-5 等価繰返し回数 (EW 方向)

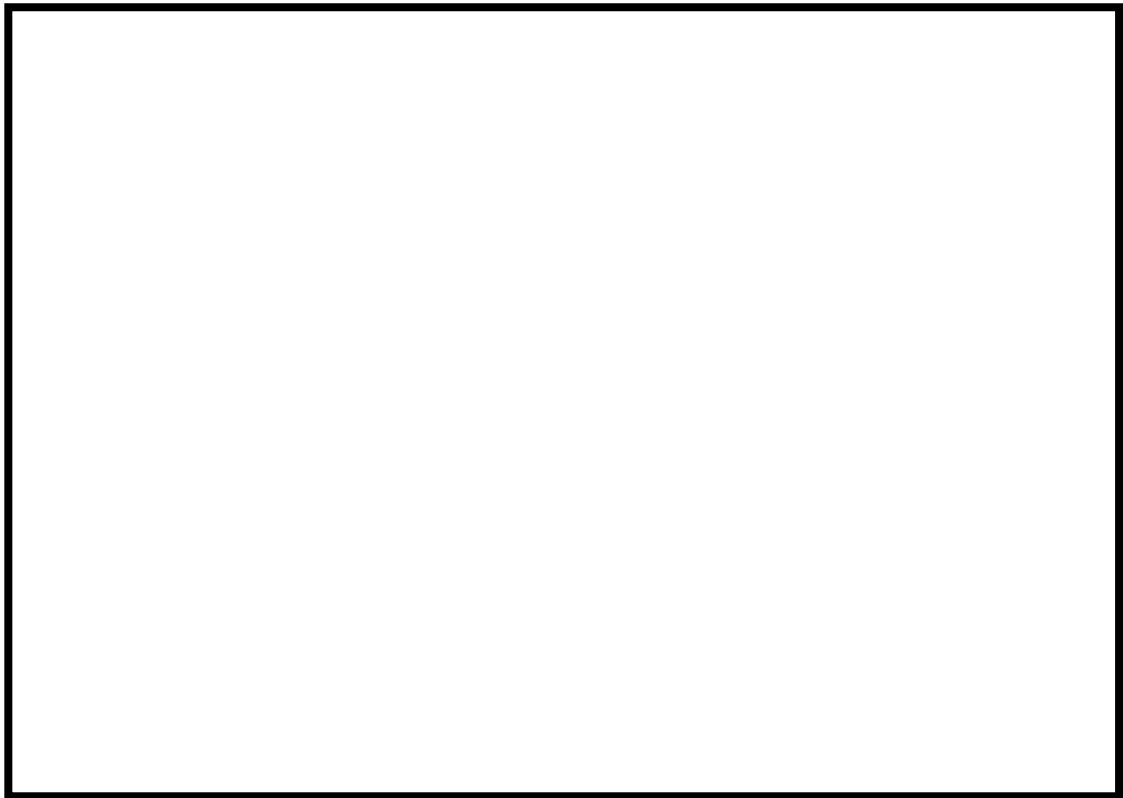


図 3-6 等価繰返し回数 (UD 方向)

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原子炉建屋の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 | | | | | | | | | | | | |
| | h=1.0% | 55 | 55 | 111 | | | | | | | | | | | | |
| 原子炉建屋 EL 38.800m | h=0.5% | 67 | 66 | 133 | | | | | | | | | | | | |
| | h=1.0% | 50 | 49 | 111 | | | | | | | | | | | | |
| 原子炉建屋 EL 34.700m | h=0.5% | 64 | 63 | 134 | | | | | | | | | | | | |
| | h=1.0% | 50 | 49 | 110 | | | | | | | | | | | | |
| 原子炉建屋 EL 29.000m | h=0.5% | 58 | 59 | 133 | | | | | | | | | | | | |
| | h=1.0% | 49 | 49 | 110 | | | | | | | | | | | | |
| 原子炉建屋 EL 20.300m | h=0.5% | 78 | 65 | 129 | | | | | | | | | | | | |
| | h=1.0% | 59 | 49 | 109 | | | | | | | | | | | | |
| 原子炉建屋 EL 14.000m | h=0.5% | 94 | 85 | 125 | | | | | | | | | | | | |
| | h=1.0% | 67 | 66 | 109 | | | | | | | | | | | | |
| 原子炉建屋 EL 8.200m | h=0.5% | 90 | 89 | 122 | | | | | | | | | | | | |
| | h=1.0% | 72 | 73 | 109 | | | | | | | | | | | | |
| 原子炉建屋 EL 2.000m | h=0.5% | 92 | 92 | 118 | | | | | | | | | | | | |
| | h=1.0% | 84 | 84 | 109 | | | | | | | | | | | | |
| 原子炉建屋 EL -4.000m | h=0.5% | 101 | 101 | 115 | | | | | | | | | | | | |
| | h=1.0% | 93 | 93 | 108 | | | | | | | | | | | | |

表3 材料物性のばらつき等を考慮した原子炉格納容器，原子炉圧力容器等の等価繰返し回数の算定結果（追而）