

本資料のうち、枠囲みの内容は、
営業秘密あるいは防護上の観点
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 10
提出年月日	平成 30 年 8 月 3 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 8 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"> ・ 添付8の記載の適正化
改4	2018年5月22日	<ul style="list-style-type: none"> ・ 本文の記載の適正化 ・ 添付-1, 2, 3, 4-1, 7, 7-3の記載の適正化 ・ 添付-2-1, 2-2, 2-6, 2-8, 7-7の追加及び添付2-4, 5の削除
改5	2018年7月11日	<ul style="list-style-type: none"> ・ 本文の記載の適正化 ・ 添付-6の追加 ・ 添付-2-6, 2-8, 7, 7-7の記載の適正化
改6	2018年7月13日	<ul style="list-style-type: none"> ・ S_dの等価繰返し回数を見直したことによる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)を削除, 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7	2018年7月18日	<ul style="list-style-type: none"> ・ 1.1.2(2)の記載見直し ・ 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8	2018年7月20日	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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9	2018年8月1日	<ul style="list-style-type: none"> ・ 1.1.2及び1.1.3の記載の修正 ・ 添付2-8記載の修正及び別紙2の追加 ・ 添付7-8の追加
改10	2018年8月3日	<ul style="list-style-type: none"> ・ 添付2-8別紙1, 2及び添付7-8の修正 ・ 1.1.2(2)の記載見直し ・ 添付-8の資料見直し ・ 補足1の追加

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	11
(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	11
1.1.2 弾性設計用地震動 S_d による評価	12
(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	15
(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	16
1.1.3 静的地震力による評価	18
1.2 耐震Bクラス施設の評価	22
1.3 耐震Cクラス施設の評価	22
1.4 耐震Sクラス設備の間接支持構造物の評価	22
1.5 耐震Bクラス設備の間接支持構造物の評価	23
1.6 耐震Cクラス設備の間接支持構造物の評価	23
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	24
2.1 既工認との手法の整理一覧	24
2.2 相違点及び適用性の説明	24
2.2.1 機器・配管系	24
2.2.1.1 手法の相違点	24
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	26
2.2.2 建物・構築物，屋外重要土木構造物	28
2.2.2.1 建物・構築物	28
2.2.2.2 屋外重要土木構造物	30
2.2.2.3 浸水防護施設	30

【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 (欠番)

添付2-5 (欠番)

添付2-6 ドライウェルビームシートの評価省略理由

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7-7 炉心シュラウド等の公式等による評価について

添付7-8 補機類のアンカー定着部の評価について

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

添付-9 工認耐震計算書に地震応答解析が記載されていない設備の扱いについて

下線：本日ご提出資料

1.1.2 弾性設計用地震動 S_d による評価

a. 機器・配管系

機器・配管系の評価対象設備が弾性設計用地震動 S_d に対して概ね弾性状態にあることを確認するために、以下の手順にて評価を実施した。評価手順を図 2 に示す。

また、評価は、基準地震動 S_s による評価の対象設備（波及的影響設備は除く。）の評価部位すべてについて、基準地震動 S_s による発生値と評価基準値（許容応力状態Ⅲ_AS）の比較（許容値置き換え）による一次応力評価を基本としている。

原子炉格納容器の弾性設計用地震動 S_d 評価においては、J E A G 4601・補-1984 及び J E A G 4601-1987 では運転状態Ⅳ(L)との組合せ及び L O C A 後の最大内圧との組合せを実施する必要がある。運転状態Ⅳ(L)の条件 (P_L, M_L) 及び L O C A 後の最大内圧の条件 (P_L^*, M_L) は、基準地震動 S_s と組み合わせる運転状態の条件 (P, L) より厳しくなることから、許容値置き換え評価ではなく、運転状態Ⅳ(L)又は、L O C A 後の最大内圧と弾性設計用地震動 S_d を組み合わせた評価を実施している。なお、原子炉格納容器については、運転状態Ⅳ(L)を設計条件としていることから、許容応力状態Ⅰ*_Aとし、 S_d との組合せにおいて許容応力状態Ⅲ_ASを適用している。

また、非常用炉心冷却系ストレーナの弾性設計用地震動 S_d 評価においては、「非常用炉心冷却設備又は格納容器熱除去設備に係るろ過装置の性能評価等について（内規）」（平成 20 年 2 月 27 日付け平成 20・02・12 原院第 5 号）に規定に基づき、許容値置き換え評価ではなく、異物荷重を組み合わせた評価を実施している。

E C C S 及びそれに関連する系統（以下「E C C S 等」という。）の弾性設計用地震動 S_d 評価においては、J E A G 4601・補-1984 及び J E A G 4601-1987 では、運転状態Ⅳ(L)と組み合わせる必要がある。しかしながら、E C C S 等の運転状態Ⅳ(L)の条件 (P_L, M_L) は、基準地震動 S_s と組み合わせべき、プラントの運転状態の条件 (P, M)（クラス 1 設備）若しくは、設計上定められた条件 (P_D, M_D) に包絡されることから、許容値置き換え評価を実施する。なお、E C C S 等については、運転状態Ⅳ(L)を設計条件としていることから、許容応力状態Ⅰ*_Aとし、 S_d との組合せにおいて許容応力状態Ⅲ_ASを適用している。

（荷重の組合せの詳細は、補足説明資料「地震時荷重と事故時荷重との組合せについて」参照）

【評価手順の説明】

① S_s による発生値と評価基準値 ($III_A S$) の比較

評価対象設備の基準地震動 S_s による発生値が弾性設計用の評価基準値 (許容応力状態 $III_A S$) 以下であることを確認する。

弾性設計用地震動 S_d は基準地震動 S_s の係数倍にて定義していることから、設備の基準地震動 S_s による発生値が、評価基準値 (許容応力状態 $III_A S$) 以下であれば、弾性設計用地震動 S_d による発生値についても、評価基準値 (許容応力状態 $III_A S$) 以下となる。

② 弾性設計用地震動 S_d による発生値と評価基準値 ($III_A S$) の比較

①項にて、評価対象設備の基準地震動 S_s による発生値が、評価基準値 (許容応力状態 $III_A S$) を上回った部位については、弾性設計用地震動 S_d を用いて応力分類を全て評価し、算定した発生値が評価基準値 (許容応力状態 $III_A S$) 以下であることを確認する。

b. 建物・構築物

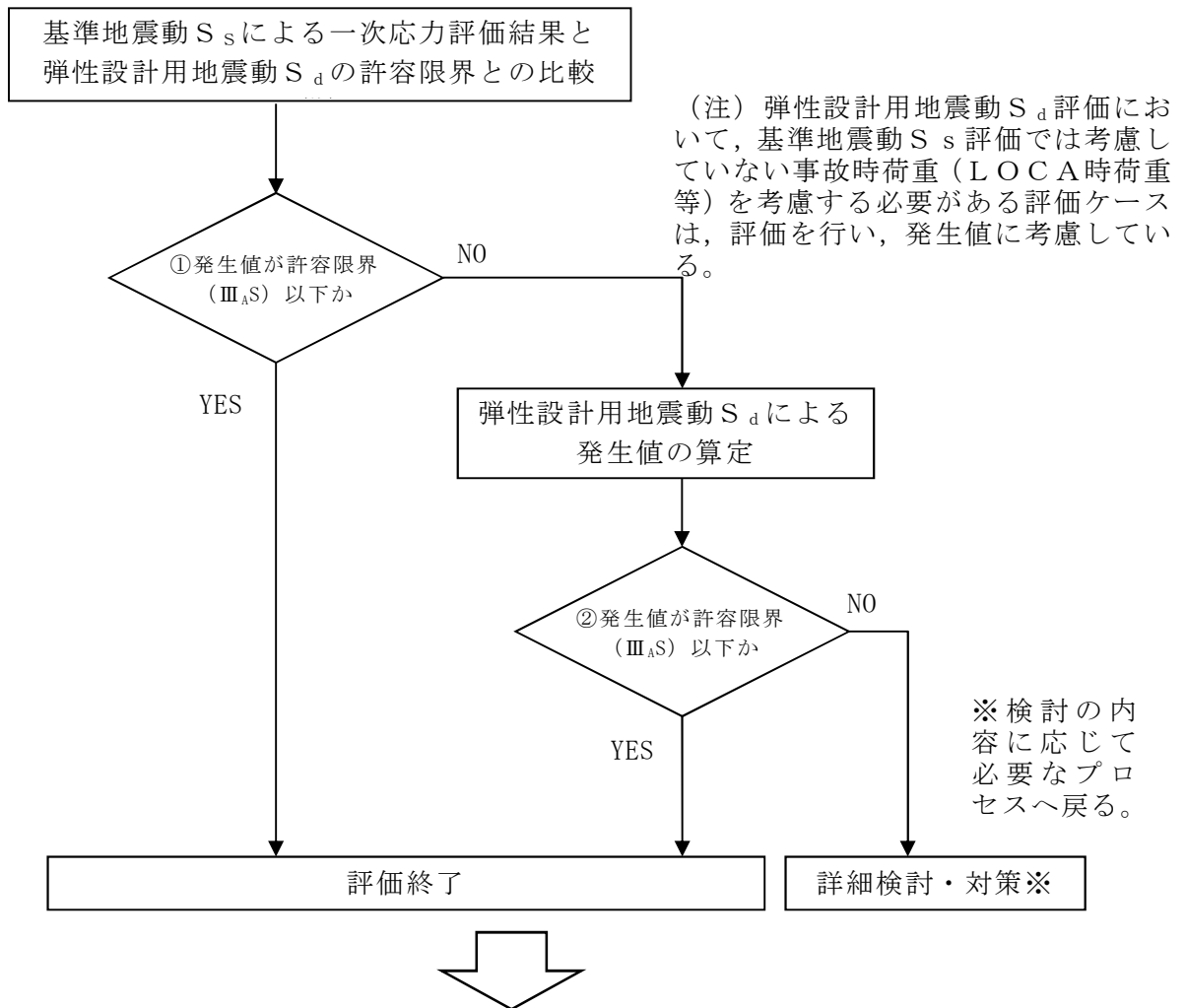
耐震 S クラスの建物・構築物の対象設備について、既工認、最新プラントである大間の建設工認、大飯 3, 4 号機の新規制基準対応工認及び今回工認の評価部位の比較を添付 4-2 に示す。建物・構築物は、既工認、大間の建設工認及び大飯 3, 4 号機の新規制基準対応工認にて評価を実施している以下の部位について評価を行う。

原子炉建屋原子炉棟、中央制御室遮蔽、使用済燃料プール、原子炉格納容器底部コンクリートマット及び原子炉建屋基礎盤については、弾性設計用地震動 S_d による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方と地震力以外の荷重を組み合わせ、その結果発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。

原子炉建屋原子炉棟及び中央制御室遮蔽の耐震壁、使用済燃料プール[※]については、常時荷重、運転時荷重及び事故時荷重が設計時と同一であること、また、応答に対して支配的となる水平方向の弾性設計用地震動 S_d による地震力及び静的地震力がいずれも『既工事計画認可申請書第 1 回 資料 III-1-4 「原子炉建屋の地震応答計算書」 (47 公第 12076 号 昭和 48 年 4 月 9 日認可)』の設計用地震力よりも小さいことから、 S_d 地震時に対する評価は行わない。

また、建物・構築物の基礎地盤の支持性能について、弾性設計用地震動 S_d による接地圧が地盤の極限支持力度に対して妥当な安全余裕を有することを確認する。

※:使用済燃料プールの弾性設計用地震動 S_d と温度荷重の組合せの評価について検討中



基準地震動 S_s による評価結果に対する許容値置き換え評価結果又は弾性設計用地震動 S_d を用いた評価結果を工認添付資料へ記載
また評価に際してフローの順に関わらずに、②による評価を実施する場合もある。

図2 機器・配管系の弾性設計用地震動 S_d に対する評価手順

- (1) 弾性設計用地震動 S_d による評価において、一次＋二次応力評価の省略について

弾性設計用地震動 S_d による評価において、一次＋二次応力評価を省略した理由について以下に示す。

一次＋二次応力評価については、JEAG4601 に規定されている許容応力状態 $IV_A S$ と $III_A S$ の許容値は同一となる。許容値が同じであれば、弾性設計用地震動 S_d より大きな地震動である基準地震動 S_s で評価した結果の方が厳しいことは明らかであることから、基準地震動 S_s の評価を実施することで、弾性設計用地震動 S_d による評価は省略した。

ただし、支持構造物（ボルト以外）のうち、「支圧」に対しては、許容応力状態 $IV_A S$ と $III_A S$ で許容値が異なるケース*が存在する。

一次＋二次応力評価のうち、「支圧」の評価が必要な設備は、使用済燃料乾式貯蔵容器支持構造物があるため、「支圧」評価を実施している評価項目について、表 1 により確認を行った。

* 許容応力状態 $III_A S$ と $IV_A S$ ではそれぞれの許容値算出において用いるパラメータである F 値の設定に差がある。材料次第ではあるが、 $III_A S$ において F 値は $\min(S_y, 0.7S_u)$ だが、 $IV_A S$ では S_y を 2 割増しした値を用いる規定となっているため、 S_y と S_u の関係により、最大 2 割の差が生じることとなる。

表 1 支持構造物（ボルト以外）の一次＋二次の支圧応力

評価対象設備	評価部位	発生値 (MP a)	許容値 $IV_A S$ (許容値 $III_A S$ S) (MP a)	耐震裕度 ($III_A S$ 裕 度)
使用済燃料乾式貯蔵容器支持構造物	支持台座	36	361 (301)	10.0 (8.3)
使用済燃料乾式貯蔵容器支持構造物 (タイプ II)	支持台座	41	362 (302)	8.8 (7.3)

(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

(a) 弾性設計用地震動 S_d の一律に設定する等価繰返し回数と許容繰返し回数の関係について

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返し回数を用いた疲労評価を行っている。評価用等価繰返し回数は、J E A G 4601-1987の記載に示すピーク応力法により一律に設定する保守的な値 (S_s : 160回, S_d : 320回)、若しくは設備毎に個別に設定する値を用いている。

以下の許容繰返し回数及び等価繰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弾性設計用地震動 S_d の許容繰返し回数としては、基準地震動 S_s の許容繰返し回数の5~10倍程度（図3）となる。

【等価繰返し回数（発生値）】

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回分を考慮しており、弾性設計用地震動 S_d の一律に設定する等価繰返し回数について算定した結果を保守的に丸めて、320回とする（補足1参照）。これは、基準地震動 S_s の一律に設定する等価繰返し回数の2倍の回数となるが、上記の基準地震動 S_s と弾性設計用地震動 S_d の許容繰返し回数の差（5~10倍程度）ほど大きな違いは生じない。

以上のとおり基準地震動 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。

(b) 今回工認における弾性設計用地震動 S_d による、一次+二次+ピーク応力評価（疲労評価）の対応方針について

弾性設計用地震動 S_d の一律に設定する等価繰返し回数については、当初検討においては弾性設計用地震動 S_d の回数を1回とし、基準地震動 S_s の一律に設定する等価繰返し回数と同じ160回としていたが、弾性設計用地震動 S_d の発生頻度は基準地震動よりも高いため2回を考慮することとした。また、弾性設計用地震動 S_d の一律に設定する等価繰返し回数の算出に当たっては、基準地震動 S_s と弾性設計用地震動 S_d の時刻歴応答波形を繋げて算出する方法から、弾性設計用地震動 S_d のみの時刻歴加速度波形から算出する方法に変更した。この結果、弾性設計用地震動 S_d の一律に設定する等価繰

返し回数は、当初の160回から2倍の320回に見直したが、前項(a)に示した通り、弾性設計用地震動 S_d の等価繰返し回数（発生値）が2倍となっても、弾性設計用地震動 S_d の許容繰返し回数（許容限界）は基準地震動 S_s の許容繰返し回数（許容限界）に対して5～10倍程度になるため、弾性設計用地震動 S_d による疲労評価は、基準地震動 S_s による疲労評価で代表できるものと判断する。

しかし、弾性設計用地震動 S_d の一律に設定する等価繰返し回数のみに着目すると、基準地震動 S_s の一律に設定する等価繰返し回数160回に対して、弾性設計用地震動 S_d の一律に設定する等価繰返し回数を320回に設定しているため、弾性設計用地震動 S_d が疲労評価に及ぼす影響について確認する。確認の方法としては、弾性設計用地震動 S_d の一律に設定する等価繰返し回数320回により評価することが考えられるが、今回工認においては、弾性設計用地震動 S_d の個別に設定する等価繰返し回数が、基準地震動 S_s の一律に設定する等価繰返し回数を下回ることが確認できれば影響はないと判断できることから、この方法により確認することとする。確認の結果、基準地震動 S_s の一律に設定する繰返し回数160回を上回る設備がある場合には、個別に設定する等価繰返し回数又は一律に設定する等価繰返し回数320回での評価を行う。

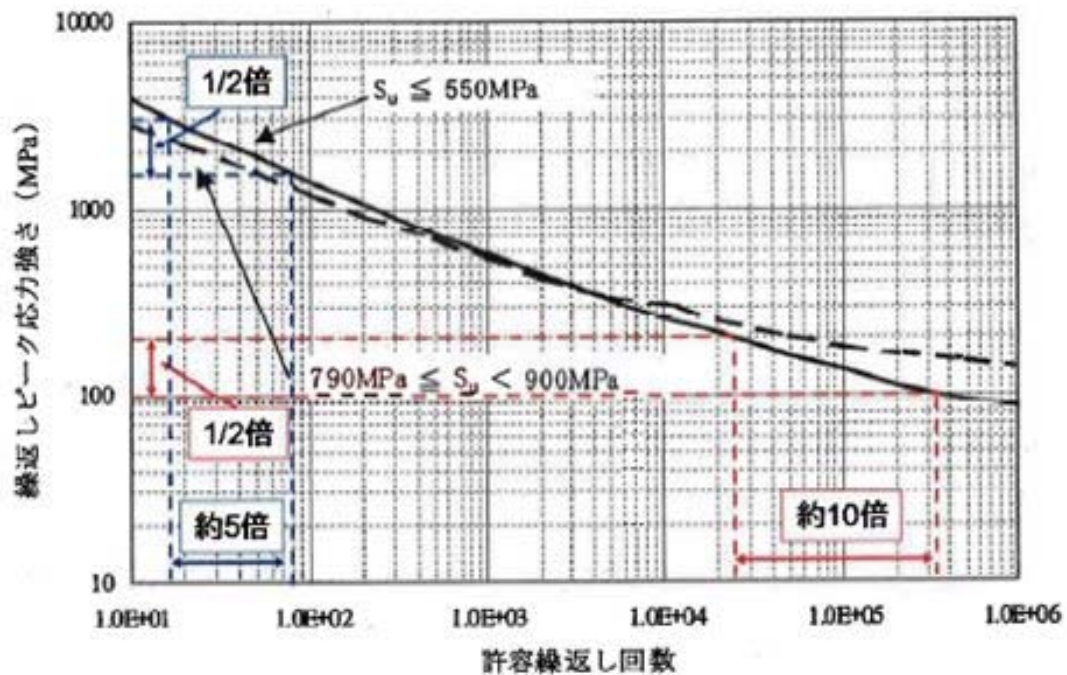


図3 設計疲労線図（炭素鋼，低合金鋼及び高張力鋼）におけるピーク応力と許容繰返し回数との関係

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

1. はじめに

本資料は、弾性設計用地震動 S_d の一律に設定する等価繰返し回数の算定について纏めたものである。

2. 算定条件

弾性設計用地震動 S_d の一律に設定する等価繰返し回数は、下記条件にて求める。

2. 1 地震波

弾性設計用地震動 S_d は基準地震動 S_s に 1/2 以上の係数を乗じて設定しており、周波数特性、継続時間等同じ特性を持つ。そのため、基準地震動 S_s において、 $S_s-D 1$ の等価繰返し回数が最大となったため、 $S_d-D 1$ に対する等価繰返し回数を算定する。

2. 2 ピーク応力

弾性設計用地震動 S_d のピーク応力は基準地震動 S_s の応答加速度と弾性設計用地震動 S_d の応答加速度との応答比で発生すると仮定し、基準地震動 S_s での一律に設定する等価繰返し回数の算定に適用するピーク応力 (150kg/mm² (1471MPa)) に、応答比を乗じることにより求める (添付 8 補足 3 3. 3 項参照)。

2. 3 考慮する弾性設計用地震動 S_d の回数

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。なお、等価繰返し回数の算定は、弾性設計用地震動 S_d 1 回分を算定し、その値を 2 倍した値とする。

2. 4 その他

上記以外の条件については、基準地震動 S_s の一律に設定する等価繰返し回数の算定と同じ条件とする (添付 8 表 1 参照)。

3. 算定結果

弾性設計用地震動 S_d 1 回分の等価繰返し回数を算定し、その値を 2 倍した値を表 1 に示す。弾性設計用地震動 S_d の一律に設定する等価繰返し回数については、表 1 の数値の最大値 (266 回) を保守的に丸めた 320 回とする。

表 1 (1) 弾性設計用地震動 S_d における原子炉格納容器, 原子炉圧力容器等の等価繰返し回数算定結果

評価点	減衰	Sd ピーク応力 [kgf/mm ²]			固有 周期	設計用 疲労線図	等価繰返し回数*		
		Sd-D1					NS	EW	UD
		NS	EW	UD					

*: 算定した弾性設計用地震動 S_d 1 回分の値を 2 倍した値。

表 1 (2) 弾性設計用地震動 S_d における原子炉建屋の等価繰返し回数算定結果

評価点	減衰	Sd ピーク応力 [kgf/mm ²]			固有 周期	設計用 疲労線図	等価繰返し回数*		
		Sd-D1					NS	EW	UD
		NS	EW	UD					
原子炉建屋 EL 46.500m 質点 No. 3	h=0.5%								
	h=1.0%								
原子炉建屋 EL 38.800m 質点 No. 4	h=0.5%								
	h=1.0%								
原子炉建屋 EL 34.700m 質点 No. 5	h=0.5%								
	h=1.0%								
原子炉建屋 EL 29.000m 質点 No. 6	h=0.5%								
	h=1.0%								
原子炉建屋 EL 20.300m 質点 No. 7	h=0.5%								
	h=1.0%								
原子炉建屋 EL 14.000m 質点 No. 8	h=0.5%								
	h=1.0%								
原子炉建屋 EL 8.200m 質点 No. 9	h=0.5%								
	h=1.0%								
原子炉建屋 EL 2.000m 質点 No. 10	h=0.5%								
	h=1.0%								
原子炉建屋 EL -4.000m 質点 No. 11	h=0.5%								
	h=1.0%								

* : 算定した弾性設計用地震動 S_d 1 回分の値を 2 倍した値。

原子炉格納容器シアラグ等の鉛直方向動的地震力の影響について

原子炉格納容器には上部シアラグと下部シアラグを有しており、地震時に原子炉格納容器の水平方向荷重を原子炉建屋側に伝達する機能を担っている。また、上下方向の変位については拘束されていないため、原子炉格納容器の鉛直方向動的地震力が作用した場合において原子炉格納容器スタビライザ（原子炉遮蔽頂部）、マイルシアラグ（原子炉格納容器側）及びフィメールシアラグ（原子炉建屋側）がそれぞれ水平方向に荷重を伝達する断面形状が変化する可能性がある。

しかしながら、鉛直方向の地震時の原子炉格納容器スタビライザ、マイルシアラグ及びフィメールシアラグの相対変位量は十分小さいため、従前の評価で問題ないことを示す。

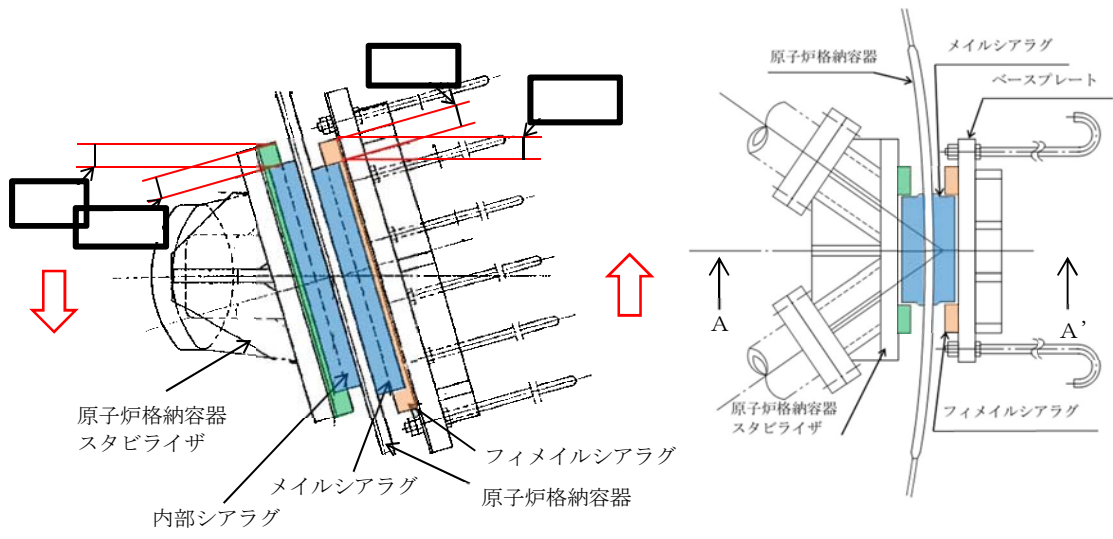
1. 鉛直方向動的地震力による相対変位

鉛直方向動的地震力による移動量は、マイルシアラグ及びフィメールシアラグは建屋機器連成解析モデルにて時々刻々の相対変位の最大値を求める。

原子炉格納容器スタビライザは建屋機器連成解析から得られた原子炉遮蔽頂部と当該位置の原子炉格納容器の時々刻々の相対変位の最大値に原子炉遮蔽頂部の床応答曲線から当該設備の固有周期に該当する震度を与えた原子炉格納容器スタビライザの最大変位を加える。

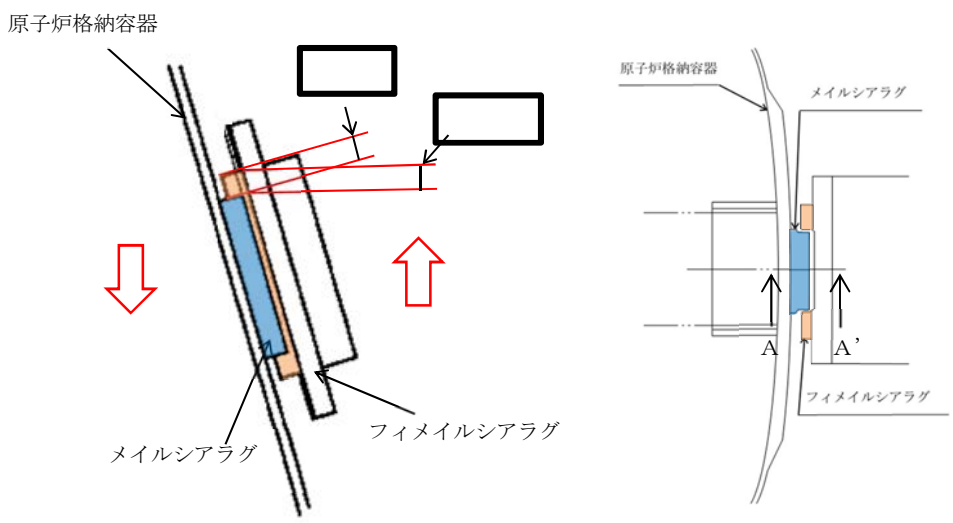
それぞれの相対変位が許容範囲内に収まっていることを確認する。

上部シアラグ及び下部シアラグの断面図を図 1 に示す。



上部シアラグ断面図 (A-A' 断面)

上部シアラグ平面図



下部シアラグ断面図 (A-A' 断面)

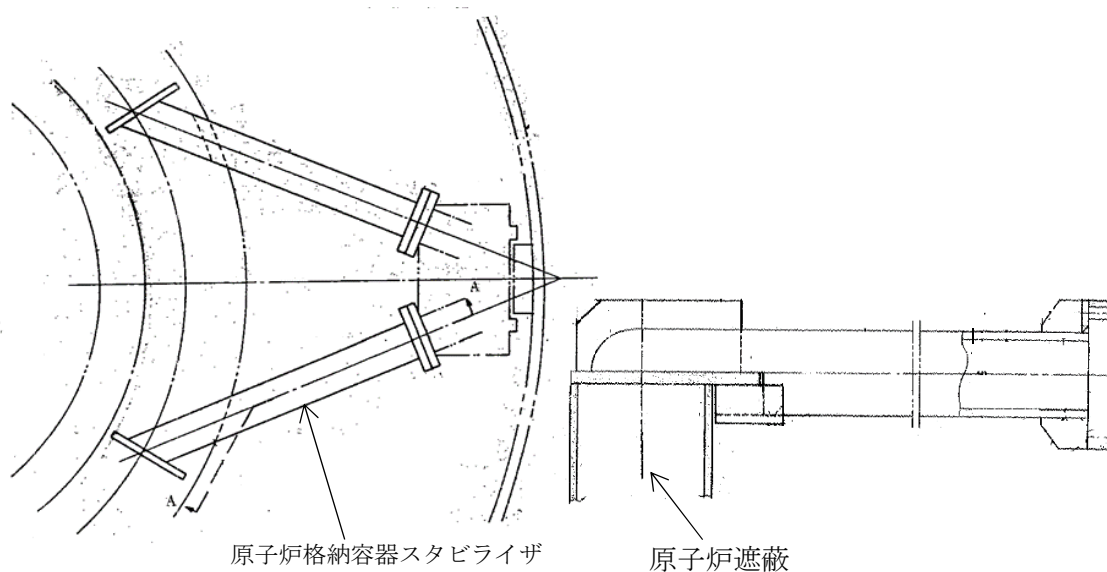
下部シアラグ平面図

図1 シアラグ断面図

1.1 原子炉格納容器スタビライザの鉛直方向変位の算出

1.1.1 原子炉格納容器スタビライザの固有周期の計算

原子炉格納容器スタビライザの構造図及び固有値計算モデルを下図に示す。個々の原子炉格納容器スタビライザは原子炉遮蔽に取り付けられた片持ち梁構造であることから、1質点モデルにより固有周期を算出する。

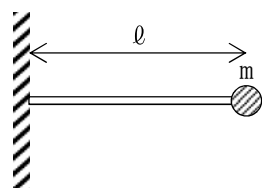


原子炉格納容器スタビライザ

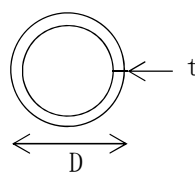
原子炉遮蔽

原子炉格納容器スタビライザ（平面図）

原子炉格納容器スタビライザ（断面図）



固有周期算出モデル



断面図

また、固有周期は以下の式により算出する。

$$T_v = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$k : \text{ばね定数} \left(= \frac{3EI}{\ell^3} \right)$$

$$I : \text{断面二次モーメント} \left(= \frac{\pi \times \{D^4 - (D - 2t)^4\}}{64} \right)$$

1.1.2 固有周期計算条件

項目	記号	単位	入力値
材質	—	—	
機器質量	m	kg	
固定端から機器重心までの水平距離	ℓ	mm	
据付部材の縦弾性係数	E	MPa	
据付部材の外径	D	mm	
据付部材の板厚	t	mm	
最高使用温度	—	°C	171

機器重心位置は先端とする。

1.1.3 固有周期算出結果

1.1.1 及び 1.1.2 から固有周期の計算結果は 0.057[s]である。

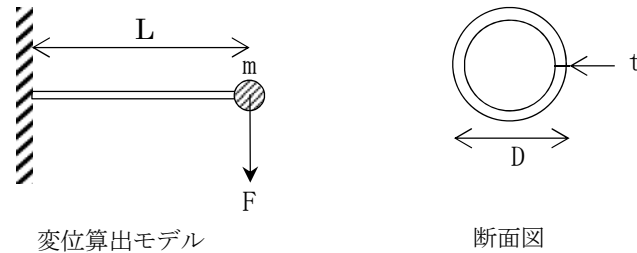
1.1.4 設計用地震力

「1.1.3 固有周期算出結果」から鉛直固有周期は 0.05[s]を上回るため、設計用床応答曲線から当該固有周期に該当する設計震度を適用する。設計震度は原子炉格納容器スタビライザが設置される原子炉遮蔽 EL. 34.643m 位置の減衰定数 1%（溶接構造物の減衰定数を適用）の設計用床応答曲線を適用する。

据付場所及び 床面高さ (m)	固有周期 (s)	減衰定数	基準地震動 S _s	備考
	鉛直方向	鉛直方向	鉛直方向 設計震度	
原子炉遮蔽 EL. 34.643	0.057	1%	C _v =4.61	SsD1～Ss31 の 8 波 (基本ケース) 及びばらつき 1～5 ケースの 4 波の包絡条件

1.1.5 変位の算出

変位は片持ち梁によるたわみ量にて求める。地震時に作用する荷重は自重を含め先端に付与されるものとし、変位は以下の式により算出する。なお、変位の算出に用いる水平距離 L については、トラスと原子炉遮蔽の取合部から先端までの距離 2750mm とし、荷重は先端に付与されるものとする。



$$y = \frac{F \times L^3}{3 \times E \times I}$$

F : 鉛直荷重(= $(1 + C_v) \times m$)

1.1.6 変位の算出結果

1.1.5 の変位の算出式及び 1.1.2 の諸元から原子炉格納容器スタビライザの最大変位は 11.4mm となる。

2. 評価結果

原子炉格納容器スタビライザ、メイルシアラグ及びフィメイルシアラグ間の相対変位量と許容値をまとめたものを表 1 に示す。相対変位量は許容値を下回っており、鉛直方向動的地震力を考慮した場合においても、断面形状に変化はないことを確認した。

表 1 鉛直方向地震時の相対変位量

評価箇所		相対変位量	許容値
上部シアラグ	原子炉格納容器スタビライザ ー内部シアラグ間	13.8mm*	
	メイルシアラグー フィメイルシアラグ間	1.9mm	
下部シアラグ	メイルシアラグー フィメイルシアラグ間	0.8mm	

※：原子炉格納容器スタビライザ自体の最大変位 (11.4mm) と原子炉遮蔽と上部シアラグの時刻歴応答解析による相対変位 (2.4mm) の和。

再循環系ポンプモータスラスト軸受の鉛直方向動的地震力の影響検討について

1. はじめに

再循環系ポンプ（以下「PLRポンプ」という。）のモータスラスト軸受については、JEAG4601・補-1984にて地震により軸固着を生じないことを確認するよう求められており、今回、鉛直動的地震力の増大により、軸固着が生じず、PLRポンプの回転機能が維持可能であることを確認するための評価を実施する。

2. PLRポンプモータスラスト軸受の軸固着の検討方針

PLRポンプモータスラスト軸受の軸固着の検討としては、JEAG4601・補-1984、JEAG4601-1991 追補版に記載の動的機能評価維持評価のうち、回転機能の維持を確認すればよく、軸受部の損傷がなければ回転機能は維持されるため、軸受評価を実施する。

3. PLRポンプ及びモータ軸受構造

PLRポンプ及びモータ軸受の構造を図1，2に示す。

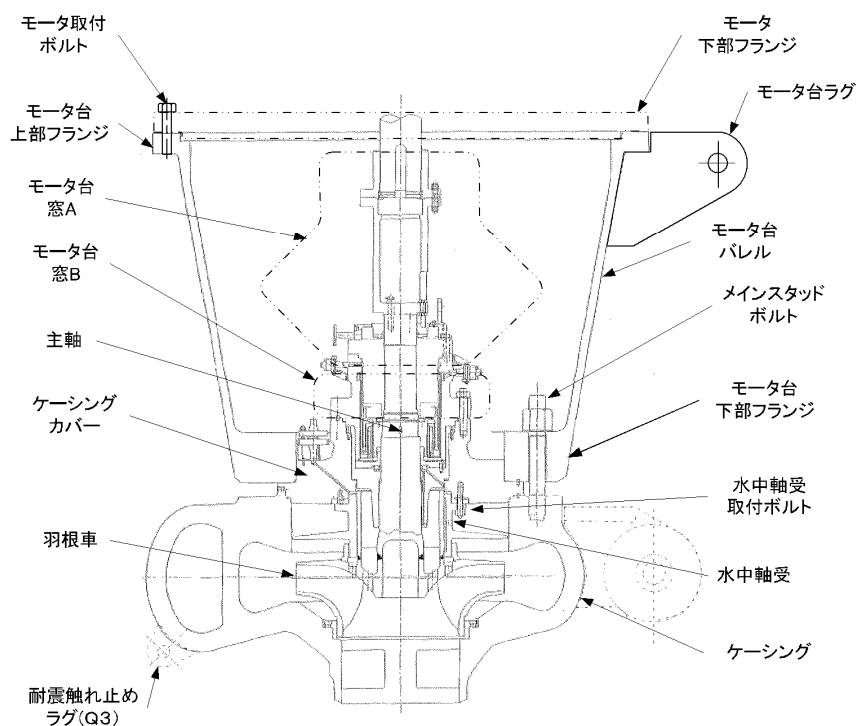


図1 PLRポンプ構造図

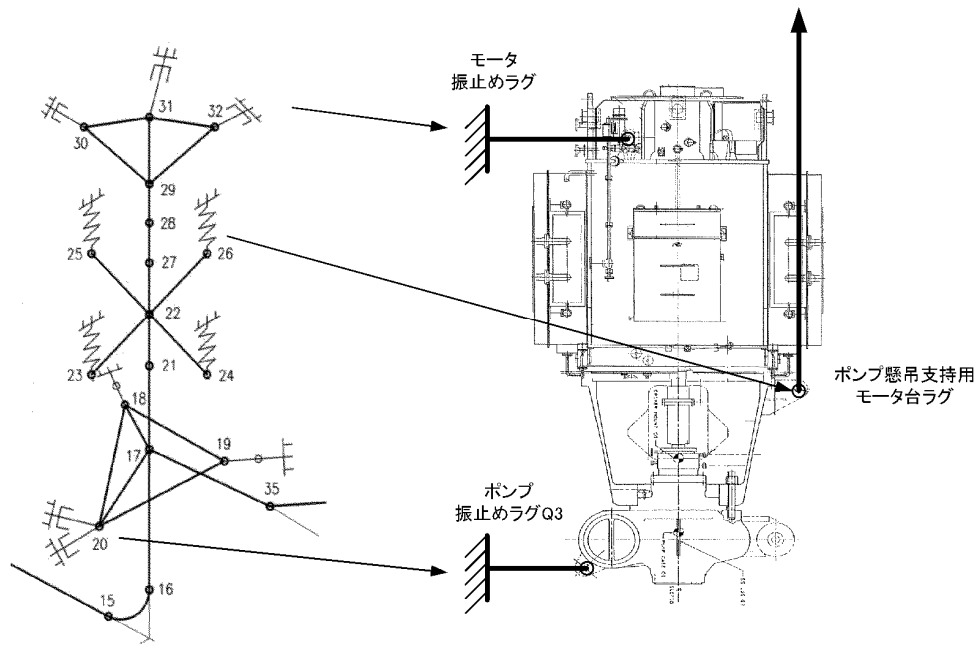


図2 PLRポンプ及びモータの支持構造図及び地震応答解析モデル

4. モータスラスト軸受評価

4.1 評価方針

軸受評価は、スラスト軸受の許容荷重と、地震時にPLRポンプに発生する鉛直方向荷重の比較にて実施する。すなわち「許容荷重 > 発生する鉛直方向荷重」であればモータスラスト軸受の健全性は確保される。

4.2 許容荷重

許容荷重については、軸受構造上の許容荷重と油膜形成上の許容荷重を比較することで求める。

a. 軸受構造上の許容荷重

軸受を構成する部品のうち、最も低い許容荷重を有する箇所はレベリングプレートであるため、当該プレートの許容荷重を軸受構造上の許容荷重とする。

b. 油膜（水膜）形成上の許容荷重

PLRポンプ主軸と軸受間の油膜（水膜）が維持される（主軸と軸受が接触しない）荷重を、油膜（水膜）形成上の許容荷重とする。

c. 軸受の許容値

それぞれの軸受に対する許容値を表1に示す。

表 1 軸受の許容値※1

(単位：kN)

種別	軸受構造物上の許容荷重	油膜形成上の許容荷重	許容値
スラスト軸受 (上向き)			
スラスト軸受 (下向き)			

※ 1：許容荷重の算出の考え方については補足－1に示す。

4.3 発生荷重について

(鉛直上向き)

PLRポンプ軸には、再循環系の圧力等によるスラスト力が上向きに作用している。鉛直上向きの発生荷重については上向きに作用するスラスト力と鉛直加速度により発生する荷重を下式により算出する。また、上向きに作用するスラスト力には下向きに発生するスラスト流体力は考慮しない。

なお、評価で用いる加速度は原子炉再循環系配管の地震応答解析モデルにおける各PLRポンプ及びモータの質点に生じる鉛直加速度のうち最大の値を用いる。

$$\text{「発生荷重」} = \text{「内圧等によるスラスト力」} + \text{「軸の質量」} \times \text{「鉛直方向加速度} - \text{重力加速度」}$$

(鉛直下向き)

鉛直下向きの評価にあたっては、下向きに発生するスラスト流体力を考慮する。

$$\text{「発生荷重」} = \text{「軸の質量」} \times \text{「鉛直方向加速度} + \text{重力加速度」} - \text{「内圧等によるスラスト力」}$$

4.4 評価結果

評価結果を表2に示す。評価の結果、冷却材ポンプのスラスト軸受部に発生する荷重は許容荷重を下回るため、PLRポンプのスラスト軸受の健全性は確保される。

表 2 評価結果

種別	発生荷重	許容荷重	備考
スラスト軸受	上向き		
	下向き		

5. その他（P L R ポンプ及びモータのラジアル軸受健全性評価）

5.1 評価方針

鉛直地震力の増大とは関係しないが、参考に P L R ポンプ及びモータのラジアル軸受の健全性評価について示す。評価方法は 4 項のスラスト軸受と同様、ラジアル方向の許容値と発生する水平方向荷重を比較することで行う。

また、ラジアル軸受としては、P L R モータに二つ、P L R ポンプに一つあるが、軸受の許容荷重が小さい P L R ポンプのラジアル軸受について評価を実施する。

5.2 許容値について

4.2 項のスラスト軸受と同様の考え方により求めたラジアル軸受の許容値を表 3 に示す。

表 3 軸受の許容値

種別	支持構造物上の 許容応力	水膜形成上の 許容荷重*
ラジアル軸受		

※：許容値の考え方については、補足－2 に示す。

5.3 発生荷重について

ラジアル方向の評価にあたっては、回転による半径方向荷重（ラジアル流体力）を考慮する。また、水中軸受に作用する地震荷重は、P L R ポンプ及びモータの回転体系の荷重のつり合い解析にて求める。

なお、評価で用いる加速度は原子炉再循環系配管の地震応答解析モデルにおける各 P L R ポンプの質点に生じる鉛直加速度のうち最大の値を用いる。

「発生荷重」＝「ラジアル流体力」＋「地震荷重」

5.4 評価結果

評価結果を表4に示す。評価の結果、PLRポンプのラジアル軸受部に発生する荷重は許容値を下回るため、PLRポンプのラジアル軸受の健全性は確保される。

表4 評価結果

種別	発生値	許容値	備考
ラジアル軸受 (水膜)			単位：kN
ラジアル軸受 (支持構造物)			単位：MPa

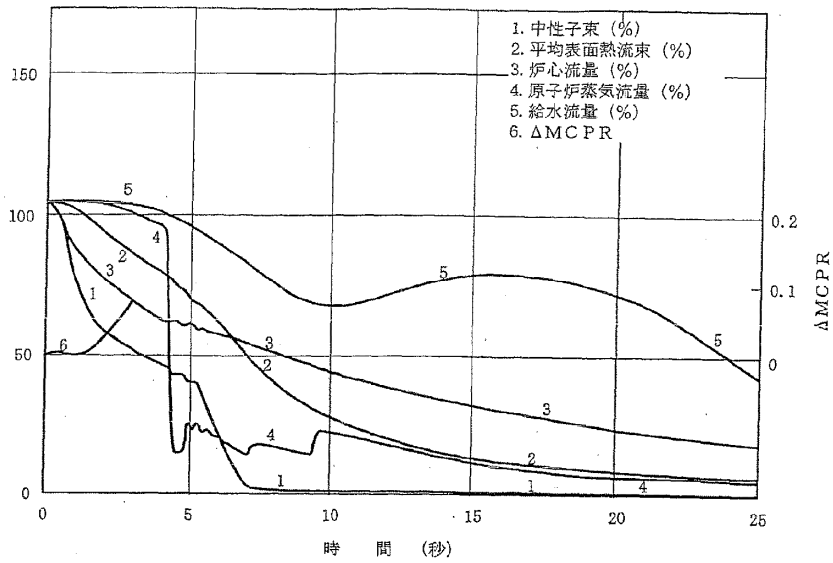
4項及び5項の評価で考慮した各発生荷重について、表5「PLR軸受に作用する荷重」にまとめる。

なお、コストダウン運転時はPLR回転数が低下することから、水膜（油膜）形成上の許容荷重は低下する傾向になる。

コストダウンにより回転数が低下すると、許容荷重が下がるため、定格運転の約50%の回転数（約5秒）で許容荷重が発生荷重を下回り、地震時に軸と軸受の接触が生じる可能性がある。

地震によりPLRポンプ2台トリップが発生した際には、ポンプ回転軸と軸受の接触が生じる可能性がある約5秒よりも前に、原子炉水位高（レベル8）によるタービントリップにより原子炉がスクラムし原子炉出力が低下するため、下図に示すようにMCRPは初期値を下回ることではなく、炉心の熱的余裕が失われるようなことにはならないと考えられる。

さらに地震時には地震加速度大により原子炉がスクラムする場合には、より早く原子炉出力が低下することからも、ポンプ回転軸と軸受の接触が生じる可能性により熱的余裕が失われることにはならないと考えられる。



東海第二発電所 「原子炉冷却材流量の喪失」の解析図

なお、仮に発生荷重>許容荷重となって軸と軸受の片当たりを想定する場合でも、PLRポンプ主軸と軸受内面は異種材料であるとともに、PLRポンプ回転数低下により軸固着の要因となる接触による摩擦を考慮しても軸固着が発生することはないと言え、また、構造強度上の許容荷重は満足していることから、変形により軸固着が生じることはない

表5 P L R 軸受に作用する荷重

No.	P L R ポンプ軸受に発生する荷重		荷重を受ける軸受	考慮する荷重の方向	補足説明
	分類	発生する荷重			
1	内圧による荷重	P L R 系統内圧により発生するスラスト力 (上向き)	スラスト軸受 (上向き, 下向き)	鉛直上向き	運転中, 軸受に定常的に作用する荷重であることから考慮している。
2	死荷重	ロータ自重 (下向き)	スラスト軸受 (上向き, 下向き)	鉛直下向き	運転中, 軸受に定常的に作用する荷重であることから考慮している。
3		機械の振動による荷重	ラジアル軸受	考慮しない	ロータの危険速度は定格回転速度よりも十分に高く, 静止部材に対する相対振動は十分小さいことから考慮しない。
4		ラジアル流体力	ラジアル軸受	水平方向	運転中, 軸受に定常的に作用する荷重であることから考慮する。
5	機械的荷重	スラスト流体力	スラスト軸受 (上向き)	考慮しない	スラスト流体力は, 以下の2つの荷重が発生する。 ①ポンプヘッドによる荷重 (鉛直下向き) ②羽根車の吸込口から出口に向かって水流が方向変化することによる荷重 (鉛直上向き)
6			スラスト軸受 (下向き)	考慮する	それぞれを足し合わせたスラスト流体力は鉛直下向きの荷重となるため, 保守的な評価として, スラスト軸受 (上向き) に対しては考慮せず, スラスト軸受 (下向き) に対しては考慮する。

モータ軸受（スラスト軸受）の構造及び許容荷重算出の考え方

1. 軸受の構造

[上部軸受構造]

上部軸受は上向きスラスト軸受/下向きスラスト軸受及び上部ガイド軸受/下部ガイド軸受から構成される。PLRポンプモータの構造概要図を図3に示す。

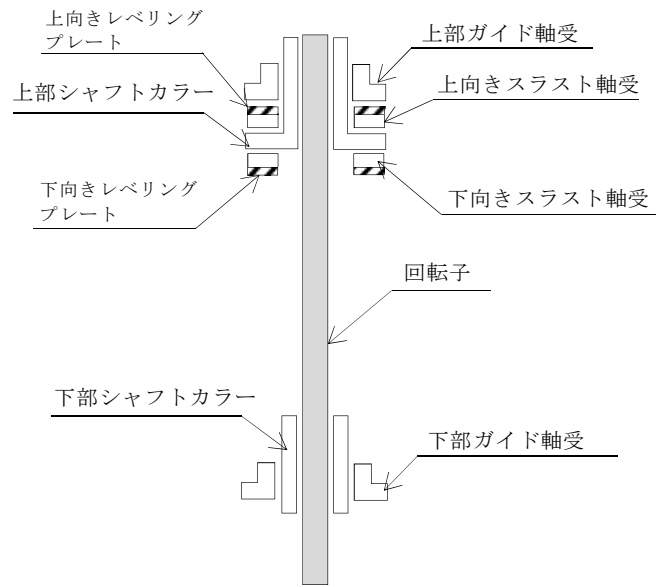


図3 PLRポンプモータ 軸受構造概要図

2. 許容荷重の考え方

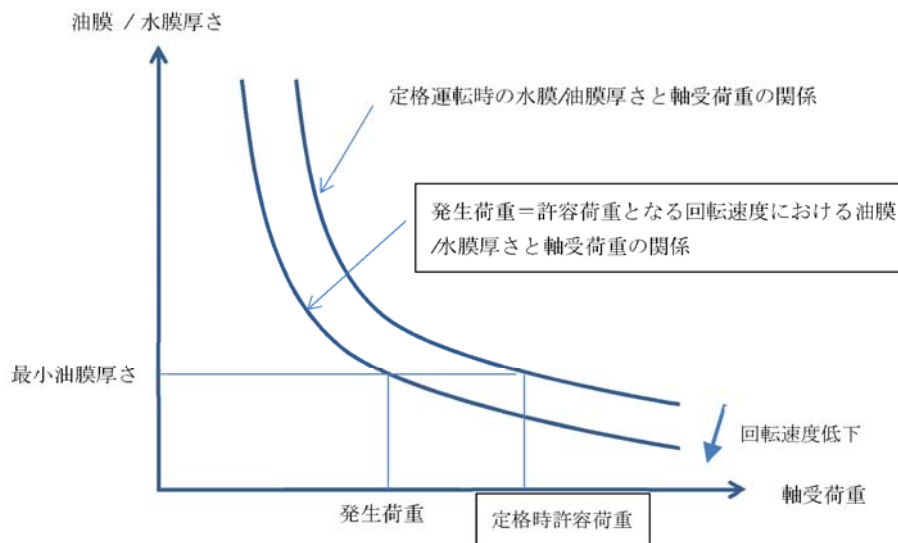
[軸受構造物の許容荷重]

軸受構造物については軸受を構成する各部品について、上向き及び下向きスラスト荷重に対する許容荷重を算出する。当該モータにおいては、構成部品のうちで最も低い許容荷重を有する箇所はレベリングプレートであり、軸受が動作を継続できる最大の荷重を軸受構造物の許容荷重としている。

[油膜形成上の軸受荷重]

油膜形成上の許容荷重は軸受油膜特性（油膜厚さと軸受荷重の関係）と最小油膜厚さより求めている。

定格運転時に P L R ポンプモータの上下部シャフトカラーと軸受間に油膜が維持される荷重を油膜形成上の許容荷重とする。地震力が発生した際の機能性評価のため、油膜厚さは通常運転時の値は使用せず軸受が接触しない厚さを最小油膜厚さとして評価する。また、油膜形成上の軸受荷重は回転速度に依存するため、回転速度による影響を考慮する。



3. 軸受許容荷重

2項で求めた軸受構造物及び油膜形成上の許容荷重を下表に示す。これより、それぞれの許容荷重の低い値を軸受許容荷重として設定した。

単位：kN

種別	軸受構造物の許容荷重	油膜形成上の許容荷重
スラスト軸受（上向き）		
スラスト軸受（下向き）		

4. P L R ポンプモータスラスト軸受の発生荷重算出

P L R モータ及びポンプ回転体の荷重に鉛直方向加速度が上向き/下向きに作用したときの発生荷重を算出する。

<算出方法>

以下の式により算出する。

(鉛直上向き)

$$A_1 = B_1 + C \times (D - g)$$

A : 鉛直上向き方向発生荷重

B₁ : 内圧等によるスラスト力 (上向き) (スラスト流体力除く)

C : 回転子の質量

D : 鉛直方向地震加速度

g : 重力加速度 (=9.80665[m/s²])

ここで東海第二については以下の値となる

B₁ : [kN]

※P L R ポンプ通常運転中はP L R 圧力によるスラスト力が上向きに作用しているため、モータスラスト軸受 (上向き) にてスラスト力を保持している。

C : [ton]

D : 37 [m/s²] (P L R ポンプモータの質点に生じる最大加速度であるB号機の値)

以上より

A₁ =
であるため鉛直上向き方向発生荷重はA = [kN]となる。

(鉛直下向き)

鉛直下向きの評価も同様に算出する。

$$A_2 = C \times (D + g) - B_2$$

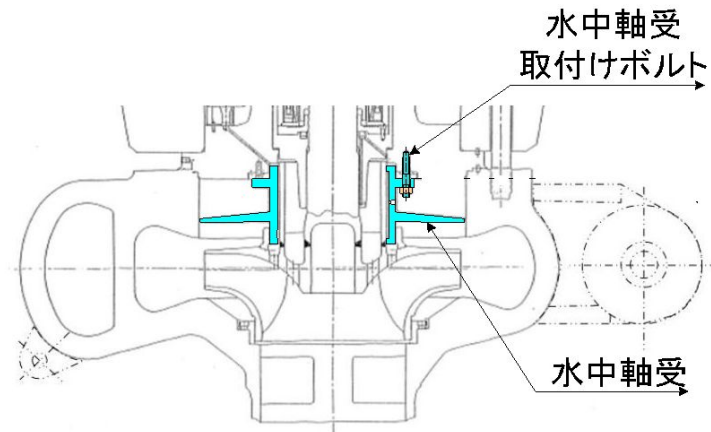
B₂ : 内圧等によるスラスト力 (上向き) (スラスト流体力含む)

A₂ =
であるため鉛直下向き方向発生荷重はA = [kN]となる。

ポンプ軸受（ラジアル軸受）の構造及び許容値算出の考え方

1. P L R ポンプ軸受の構造

P L R ポンプ軸受（ラジアル軸受）は水中軸受であり，主軸と軸受の間に水膜を形成することで，ポンプの回転機能を維持している。



断面図

平面図

図４ P L R ポンプ軸受（ラジアル軸受）構造図

2. 許容値の考え方

PLRポンプ軸受の許容値としては、以下の2つの考え方に基づいて設定している。

① 軸受水膜形成上の許容荷重

PLR軸受と軸受間の水膜が維持される（主軸と軸受が接触しない）許容荷重として設定するもの。

② 軸受構造上の許容応力

PLR軸受の支持構造物上の許容応力として、軸受を締結している軸受取付ボルトの許容応力として設定するもの。

3. ポンプ軸受の許容値

上記に基づいて求めた各許容値を下表に示す。

水膜形成上の裕度が支持構造物上の裕度より低いため、ポンプラジアル軸受は、水膜形成上の許容荷重 を採用している。

種別	支持構造物上の許容応力	水膜形成上の許容荷重
ラジアル軸受	<input type="text"/>	<input type="text"/>

4. P L R水中軸受の発生荷重の算出

図6に示す解析モデルを用いたつり合い解析にて、地震時の発生加速度※により発生する軸受荷重を算出する。

※：地震時の発生加速度は原子炉冷却材再循環系の耐震性についての計算書のうちV-2-5-2-1-1「管の耐震性についての計算書」にて得られる再循環系ポンプ及びモータ位置の水平・鉛直の最大応答加速度を使用する（下表参照）。

評価部位	水平方向加速度 (m/s ²)	鉛直方向加速度 (m/s ²)
ポンプ部	20	37
モータ部	43	37

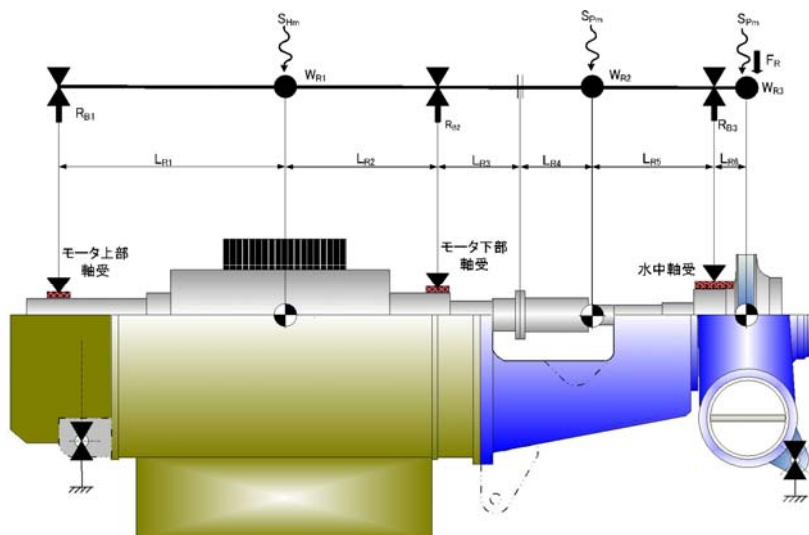


図6 回転体の荷重のつり合い解析モデル

上記モデルによる荷重のつり合い解析を行い各軸受部の反力 RB1（モータ上部ラジアル軸受）、RB2（モータ下部ラジアル軸受）、RB3（ポンプ軸受）を回転数比 $N_x = (n/n_0)$ に対して求める。100%回転時の解析結果を下表に示す。

表 軸受に生じる荷重（100%回転時）

軸受名称	発生荷重 (S s 時)	備考
モータ上部ラジアル軸受 RB1		kN
モータ下部ラジアル軸受 RB2		kN
ポンプ軸受 RB3		kN

補機類のアンカー定着部の評価について

1. 概要

既工認における補機類の基礎ボルト及びコンクリートの定着部の設計は、コンクリート部の評価断面積はボルト又はスリーブの表面積としてボルトの引抜き力よりもコンクリートの定着力が大きくなるような、必要な埋込深さを算定していたが、今回工認においては、JEAG4601-1991 追補版に基づいた評価断面をコーン状破断面に変更する。

2. 既工認と今回工認での定着部評価の相違

既工認におけるコンクリート部の評価は、東海第二は JEAG4601・補-1984 適用以前に建設されたプラントであることから、当時の鋼構造設計規準に基づく付着評価を実施していた。

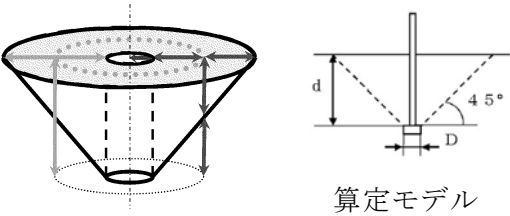
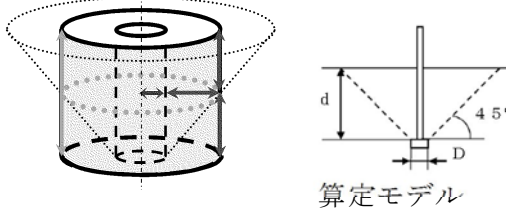
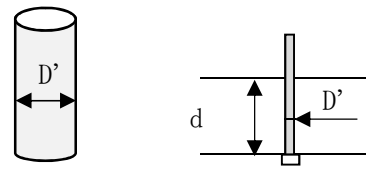
付着評価の評価断面はボルト又はスリーブ表面積としており、JEAG4601-1991 追補版に定められる評価断面よりも厳しい断面である。

具体的には、表 1 に示すとおり、既工認の評価断面は、単独ボルトの条件では JEAG4601-1991 追補版と比べ小さく、JEAG4601-1991 追補版の評価断面に変えた場合の裕度は既工認におけるボルトの裕度より、コンクリートの裕度の方が高くなる。

ボルトの引張許容値から定めた限界引抜き力に対して、JEAG4601-1991 追補版と同様のコンクリート許容せん断応力度及びせん断力算定断面積（コーン状破壊を想定）による引抜き耐力が上回るような、必要埋込深さとなり、基礎ボルトに着目した耐震評価を行うことでコンクリート定着部の健全性も確認できる。

この既工認の評価と今回工認での評価の関係は、機器に関わらず同様であることから、以下では、高圧炉心スプレイ系ポンプを例に基礎ボルトとコンクリート定着部の許容荷重の比較を示す。

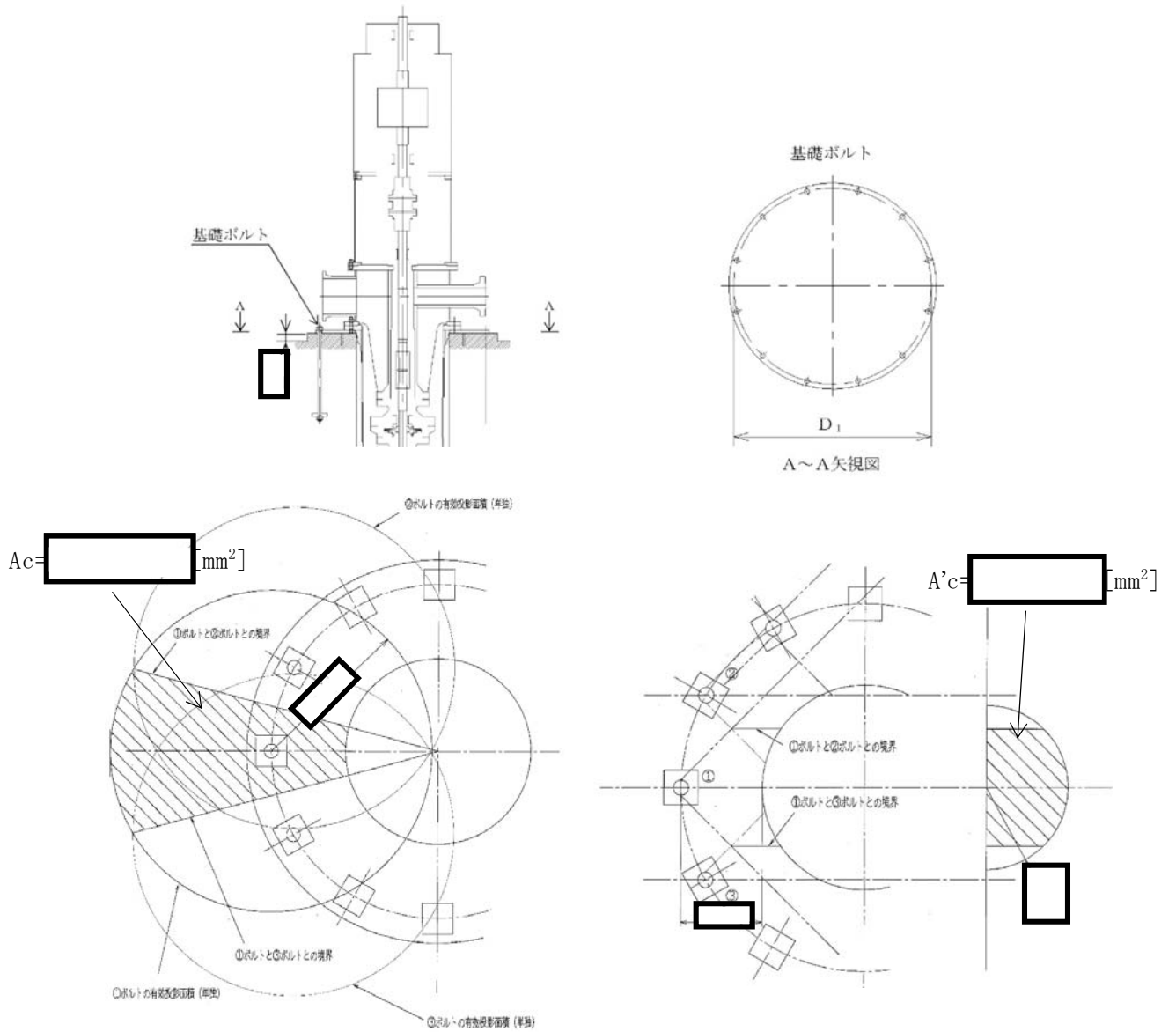
表1 コンクリート定着部の評価

	今回工認	(参考)	既工認
適用規格	JEAG4601-1991 追補版	JEAG4601-1984	鋼構造設計規準
評価内容	コンクリートの押抜き力（シアコーン）により生じるせん断応力評価	コンクリートの押抜き力（パンチングシア）により生じるせん断応力評価	コンクリートへの付着評価
評価手法	 <p>せん断力算定断面積 （コーン状破断面） $= \pi (\text{大半径})^2 - \pi (\text{小半径})^2$ $= \pi \left(\frac{D}{2} + d\right)^2 - \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2$ $= \pi \cdot d \cdot (D + d)$ d:埋込深さ D:埋込板直径</p>	 <p>せん断力算定断面積 （パンチングシア形状） $= \text{高さ} \times \text{円周長さ}$ $= d \cdot \pi \cdot (D + d)$ $= \pi \cdot d \cdot (D + d)$ d:埋込深さ D:埋込板直径</p>	 <p>せん断力算定断面積 （ボルト、スリーブ表面） $= \text{高さ} \times \text{円周長さ}$ $= d \cdot \pi \cdot D'$ $= \pi \cdot d \cdot D'$ d:埋込深さ D' :スリーブ又はボルト直径</p>

3. 評価例

3.1 高圧炉心スプレイ系ポンプの基礎ボルト配置

高圧炉心スプレイ系ポンプの基礎ボルト配置を以下に示す。



3.2 評価結果

【引張荷重】

基礎ボルトが引張荷重を受ける場合のコンクリートの評価は JEAG4601-1991 追補版より

$$p \leq p_a = \min(p_{a1}, p_{a2})$$

ここに

$$p_{a1} = 0.31 \cdot K_1 \cdot A_c \cdot \sqrt{F_c}$$

$$p_{a2} = K_2 \cdot \alpha_c \cdot A_0 \cdot F_c$$

p : 基礎ボルト 1 本当たりの引張荷重 (N)

p_a : 基礎ボルト 1 本当たりのコンクリート部の許容引張荷重 (N)

p_{a1} : コンクリート躯体がコーン状破壊する場合の基礎ボルト 1 本当たりの許容引張荷重 (N)

p_{a2} : 基礎ボルト頭部に接するコンクリート部が支圧破壊する場合の基礎ボルト 1 本当たりの許容引張荷重 (N)

K_1 : コーン状破壊する場合の引張耐力の低減係数 (IVAS の 0.6 とする)

K_2 : 支圧破壊する場合の引張耐力の低減係数 (IVAS の 0.75 とする)

F_c : コンクリートの設計基準強度 (N/mm²) : 22.1N/mm²

A_c : コンクリートのコーン状破壊面の有効投影面積 (mm²)

α_c : 支圧面積と有効投影面積から定まる定数 ($= \sqrt{A_c/A_0}$ かつ 10 以下)

A_0 : 支圧面積 (mm²)

$$A_0 = L^2 - \frac{\pi}{4} \times d^2 = \boxed{} = 52239.172$$

よって,

$$p_{a1} = 0.31 \times 0.6 \times \boxed{} \times \sqrt{22.1} = 1386532 \approx 1.38 \times 10^6 [N]$$

$$p_{a2} = 0.75 \times 5.509 \times 52239.172 \times 22.1 = 4770046 \approx 4.77 \times 10^6 [N]$$

$$p_a = \min(1.38 \times 10^6, 4.77 \times 10^6) = 1.38 \times 10^6 [N]$$

以上より, 基礎ボルト 1 本当たりのコンクリート部の許容引張荷重は $1.38 \times 10^6 [N]$ である。

一方, 基礎ボルト (M64 : SS400) の許容応力 210MPa から求まる基礎ボルト 1 本当たりの引張破壊荷重は,

$$\frac{\pi}{4} \times 64^2 \times 210 = 675568.1 \approx 6.76 \times 10^5 [N]$$

である。基礎ボルト 1 本当たりの引張破壊荷重 $6.76 \times 10^5 [N]$ と比較して, 基礎ボルト 1 本当たりのコンクリート部の許容引張荷重は $1.38 \times 10^6 [N]$ であり, コンクリート部の許容引張荷重が十分大きい。

【せん断荷重】

基礎ボルトがせん断荷重を受ける場合のコンクリートの評価は、JEAG-4601 1991 追補版より

$$q \leq q_a = \min(q_{a1}, q_{a2})$$

ここに

$$q_{a1} = 0.5 \cdot K_3 \cdot A_b \cdot \sqrt{E_c \cdot F_c}$$

$$q_{a2} = 0.31 \cdot K_4 \cdot A_{c1} \cdot \sqrt{F_c}$$

q : 基礎ボルト 1 本当たりのせん断荷重 (N)

q_a : 基礎ボルト 1 本当たりのコンクリート部の許容せん断荷重 (N)

q_{a1} : 基礎ボルトと基礎ボルト周辺のコンクリートが圧壊して破壊（複合破壊）する場合の基礎ボルト 1 本当たりの許容せん断荷重 (N)

q_{a2} : へり側コンクリートが破壊する場合の基礎ボルト 1 本当たりの許容せん断荷重 (N)

K_3 : 複合破壊の場合のせん断耐力の低減係数 (IVAS の 0.8 とする)

K_4 : へり側コンクリート破壊の場合のせん断耐力の低減係数 (IVAS の 0.6 とする)

A_b : 基礎ボルトの谷径断面積 (スタッドの場合は軸部断面積) (mm^2)
(M64 : $2.597 \times 10^3 \text{mm}^2$)

E_c : コンクリートのヤング率 (N/mm^2) : $20600 \text{N}/\text{mm}^2$

F_c : コンクリートの設計基準強度 (N/mm^2) : $22.1 \text{N}/\text{mm}^2$

$A'c$: コンクリートのコーン状破壊面の有効投影面積 (mm^2)

へりあきの面積はへりあきのある基礎ボルトとへりあきのない基礎ボルトの平均をへりあき面積とする。

$$A'c = \boxed{} = 1317261.96 \text{mm}^2$$

よって、

$$q_{a1} = 0.5 \times 0.8 \times 2.597 \times 10^3 \times \sqrt{20600 \times 22.1} = 700909 \approx 7.00 \times 10^5 [\text{N}]$$

$$q_{a2} = 0.31 \times 0.6 \times 1317261.96 \times \sqrt{22.1} = 1151811 \approx 11.5 \times 10^5 [\text{N}]$$

$$q_a = \min(7.00 \times 10^5, 11.5 \times 10^5) = 7.00 \times 10^5 [\text{N}]$$

以上より、基礎ボルト 1 本当たりのコンクリート部の許容せん断荷重は $7.00 \times 10^5 [\text{N}]$ である。

一方、基礎ボルト (M64 : SS400) の許容応力 160MPa から求まる基礎ボルト 1 本当たりのせん断破壊荷重は、

$$\frac{\pi}{4} \times 64^2 \times 160 = 514718.5 \approx 5.15 \times 10^5 [\text{N}]$$

である。基礎ボルト 1 本当たりのせん断破壊荷重 $5.15 \times 10^5 [\text{N}]$ と比較して、基礎ボルト 1 本当たりのコンクリート部の許容せん断荷重は $7.00 \times 10^5 [\text{N}]$ であり、コンクリート部の許容引張荷重が十分大きい。

【組合せ応力】

基礎ボルトが引張，せん断の組合せ荷重を受ける場合のコンクリートの評価は，JEAG-4601-1991 追補版より

$$\left(\frac{p}{p_a}\right)^2 + \left(\frac{q}{q_a}\right)^2 \leq 1$$

ここに

p_a : 引張荷重のみに対する基礎ボルト 1 本当たりのコンクリート部の許容引張荷重 (N) = $\min(p_{a1}, p_{a2})$

q_a : せん断荷重のみに対する基礎ボルト 1 本当たりのコンクリート部の許容せん断荷重 (N) = $\min(q_{a1}, q_{a2})$

p : 基礎ボルト 1 本当たりの引張荷重 (N)

q : 基礎ボルト 1 本当たりのせん断荷重 (N)

仮に p に対して，基礎ボルト 1 本当たりの引張破壊荷重を，また q に対して基礎ボルト 1 本当たりのせん断破壊荷重を用いて保守的に計算すると，

$$\left(\frac{6.76 \times 10^5}{1.38 \times 10^6}\right)^2 + \left(\frac{5.15 \times 10^5}{7.00 \times 10^5}\right)^2 \approx 0.79 < 1$$

となり，組合せ応力評価に対しても，基礎ボルトよりコンクリート部の方が十分余裕がある。

以上をまとめると以下のとおりである。

基礎ボルト 1 本当たりの破壊荷重及びコンクリートの許容荷重	基礎ボルト 1 本当たりの引張破壊荷重 p (N)	基礎ボルト 1 本当たりのコンクリート部の許容引張荷重 p_a (N)	基礎ボルト 1 本当たりのせん断破壊荷重 q (N)	基礎ボルト 1 本当たりのコンクリート部の許容せん断荷重 q_a (N)
	6.76×10^5	1.38×10^6	5.15×10^5	7.00×10^5
引張・せん断評価	$p < p_a$ OK		$q < q_a$ OK	
組合せ評価	$\left(\frac{p}{p_a}\right)^2 + \left(\frac{q}{q_a}\right)^2 \leq 1$ OK			

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. 一律に設定する等価繰返し回数の設定
5. 一律に設定する等価繰返し回数設定における保守性
6. 一律に設定する等価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

補足 3. 個別に設定する等価繰返し回数について

参考 1. 疲労評価の全対象設備

参考 2. 各設備の部位毎のピーク応力

参考 3. ピーク応力の算定方法について

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. 地震時等価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

参考 7. 多方向入力を対象とした等価繰返し回数算定方法について

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。

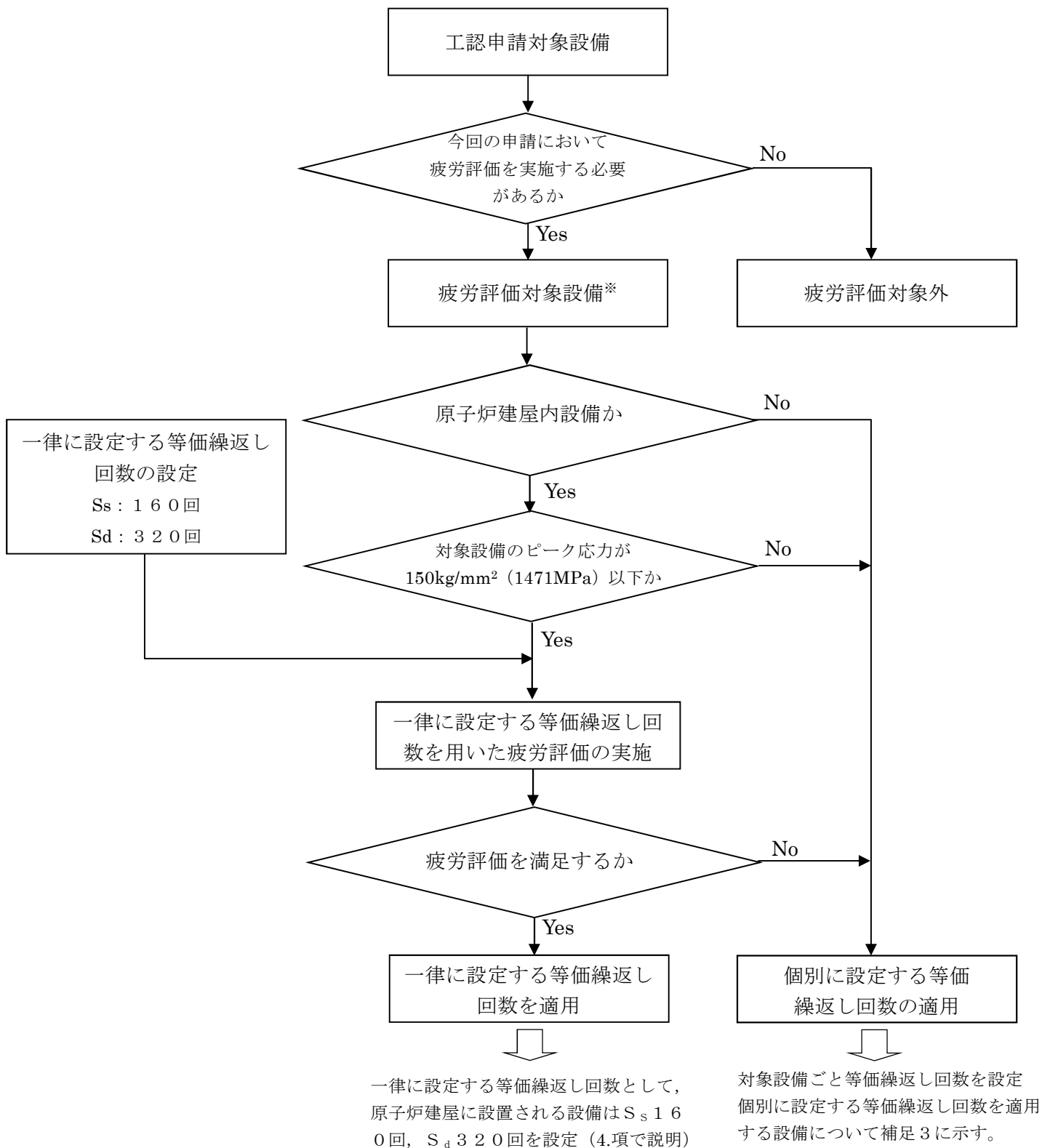
○ 設計基準対象設備

- ・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，MC 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、参考1参照。このフローによらず個別に設定する等価繰返し回数を適用する場合がある。

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ものである。

東海第二発電所の今回工認においては、個別機器ごとの等価繰返し回数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する場合においては、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。

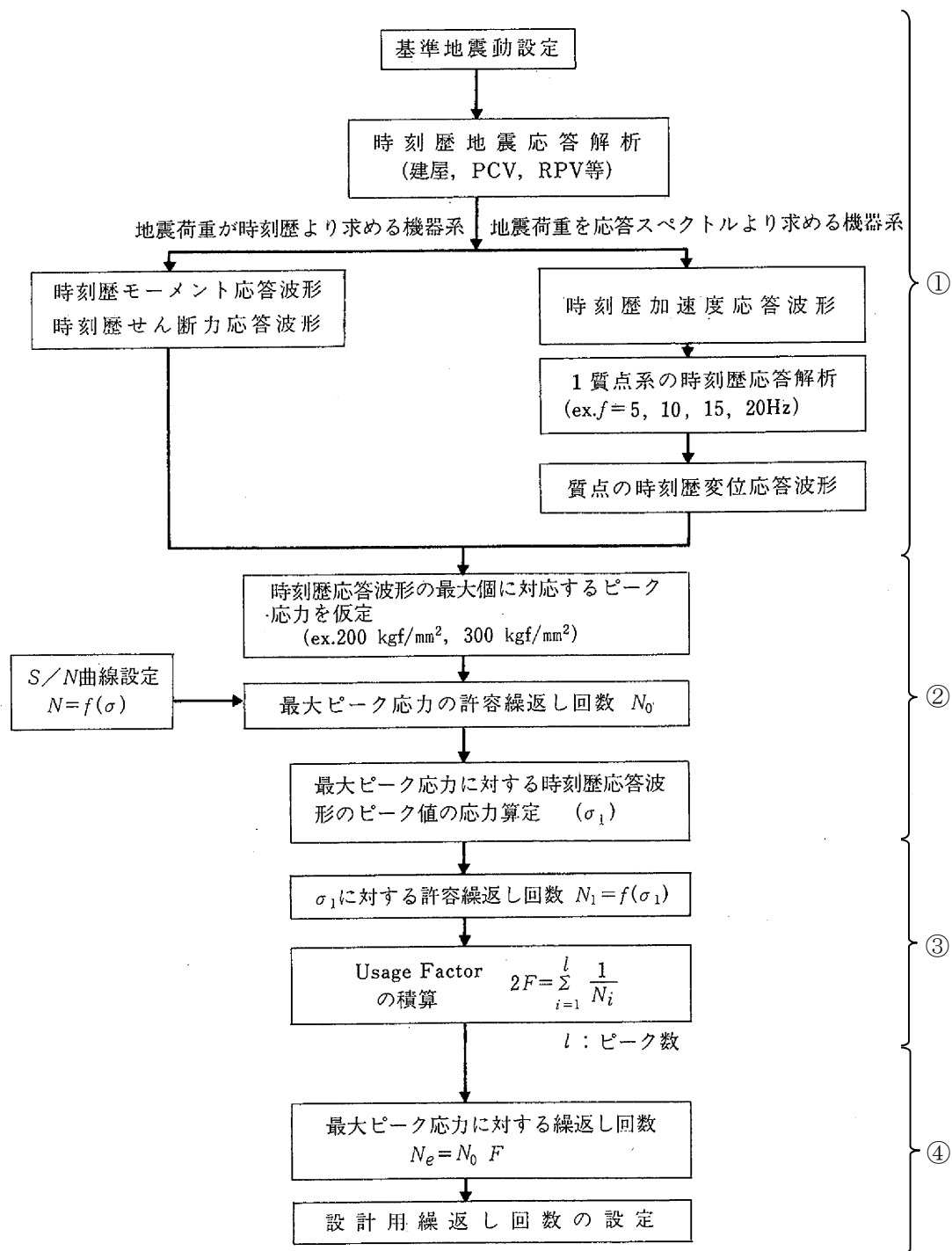


図2 ピーク応力法による算定フロー (J E A G 4601-1987 に追記)

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東海第二における一律に設定する等価繰返し回数算定条件との比較

		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】	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
対象設備		原子炉圧力容器スカート	【手法2】 第一種配管		
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	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	東海第二の地盤条件 Vs=約700m/s	同左

* : 設備のピーク応力が150 kg/mm² (1471MPa) 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を用いること、及び、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、今回工認の算定では、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幅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)

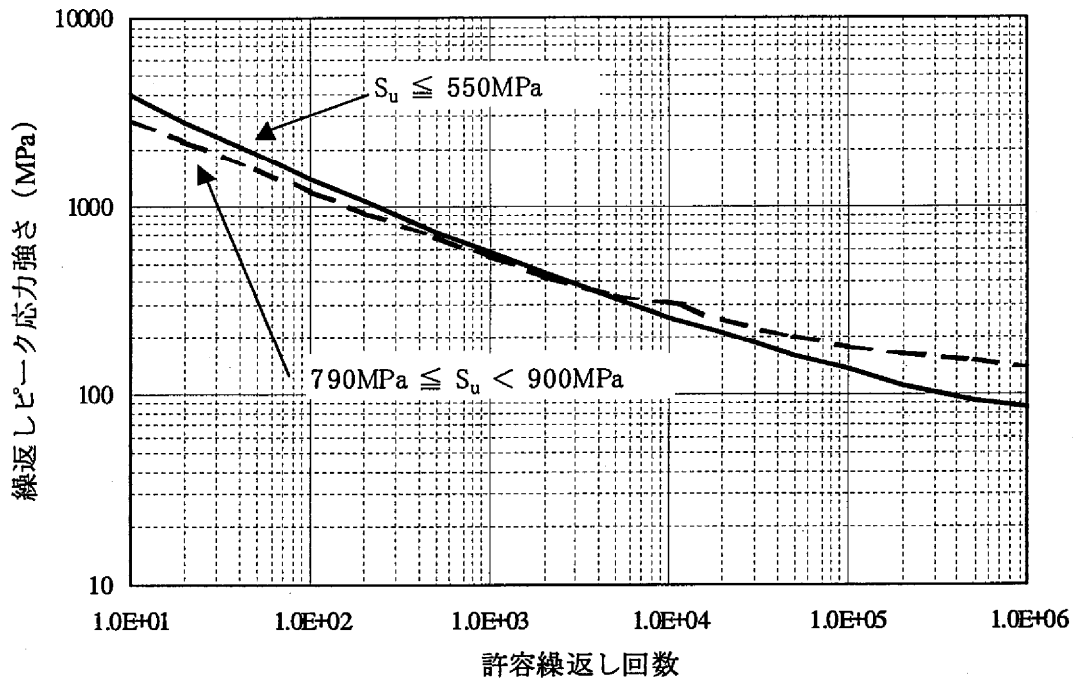


図3 炭素鋼，低合金鋼及び高張力鋼の設計疲労線図
(J SME 設計・建設規格より抜粋)

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

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

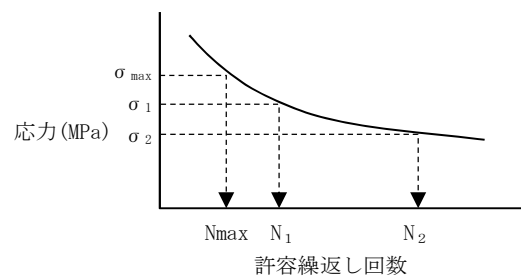


図4 UF 算定方法

- 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) に基づき一律に設定する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 2 に示す。一律に設定す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。一律に設定する等価繰返し回数については，表 3 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 of 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（参考 7 参照），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 2 (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

注) 質点No. は水平方向のモデル (図5参照) の番号を示す。

表 2 (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

注) 質点No. は水平方向のモデル (図5参照) の番号を示す。



図5 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(水平方向)

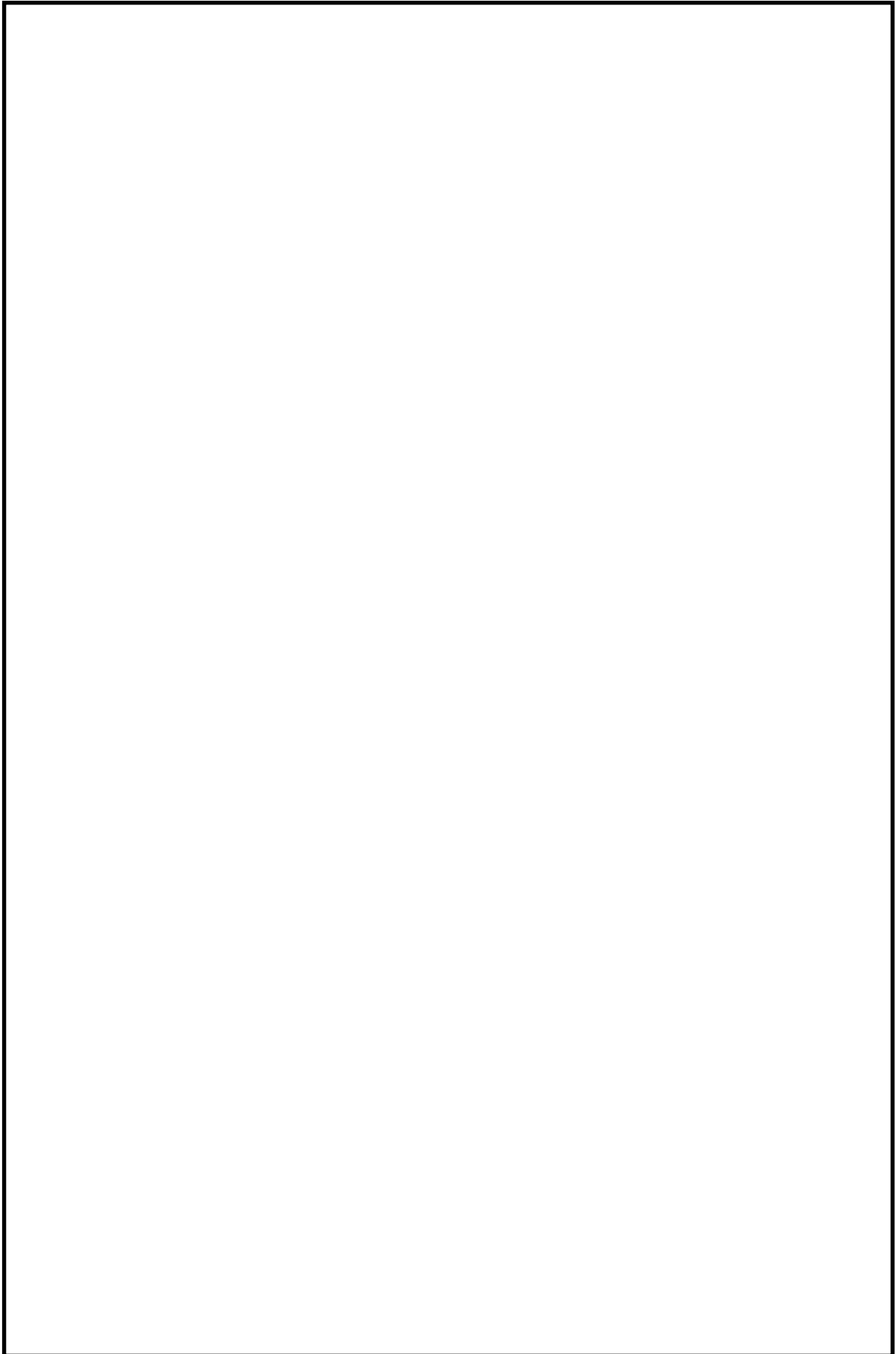


図6 原子炉格納容器, 原子炉圧力容器等の等価繰返し回数の算定位置 (鉛直方向)

表 3 (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 質点 No. 3	h=0.5%												
	h=1.0%												
原子炉建屋 EL. 38.800 m 質点 No. 4	h=0.5%												
	h=1.0%												
原子炉建屋 EL. 34.700 m 質点 No. 5	h=0.5%												
	h=1.0%												
原子炉建屋 EL. 29.000 m 質点 No. 6	h=0.5%												
	h=1.0%												
原子炉建屋 EL. 20.300 m 質点 No. 7	h=0.5%												
	h=1.0%												
原子炉建屋 EL. 14.000 m 質点 No. 8	h=0.5%												
	h=1.0%												
原子炉建屋 EL. 8.200 m 質点 No. 9	h=0.5%												
	h=1.0%												
原子炉建屋 EL. 2.000 m 質点 No. 10	h=0.5%												
	h=1.0%												
原子炉建屋 EL. -4.000 m 質点 No. 11	h=0.5%												
	h=1.0%												

注) 質点 No. は図 7 及び図 8 の番号を示す。

表 3 (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 質点 No. 3	h=0.5%												
	h=1.0%												
原子炉建屋 EL. 38.800 m 質点 No. 4	h=0.5%												
	h=1.0%												
原子炉建屋 EL. 34.700 m 質点 No. 5	h=0.5%												
	h=1.0%												
原子炉建屋 EL. 29.000 m 質点 No. 6	h=0.5%												
	h=1.0%												
原子炉建屋 EL. 20.300 m 質点 No. 7	h=0.5%												
	h=1.0%												
原子炉建屋 EL. 14.000 m 質点 No. 8	h=0.5%												
	h=1.0%												
原子炉建屋 EL. 8.200 m 質点 No. 9	h=0.5%												
	h=1.0%												
原子炉建屋 EL. 2.000 m 質点 No. 10	h=0.5%												
	h=1.0%												
原子炉建屋 EL. -4.000 m 質点 No. 11	h=0.5%												
	h=1.0%												

注) 質点 No. は図 7 及び図 8 の番号を示す。

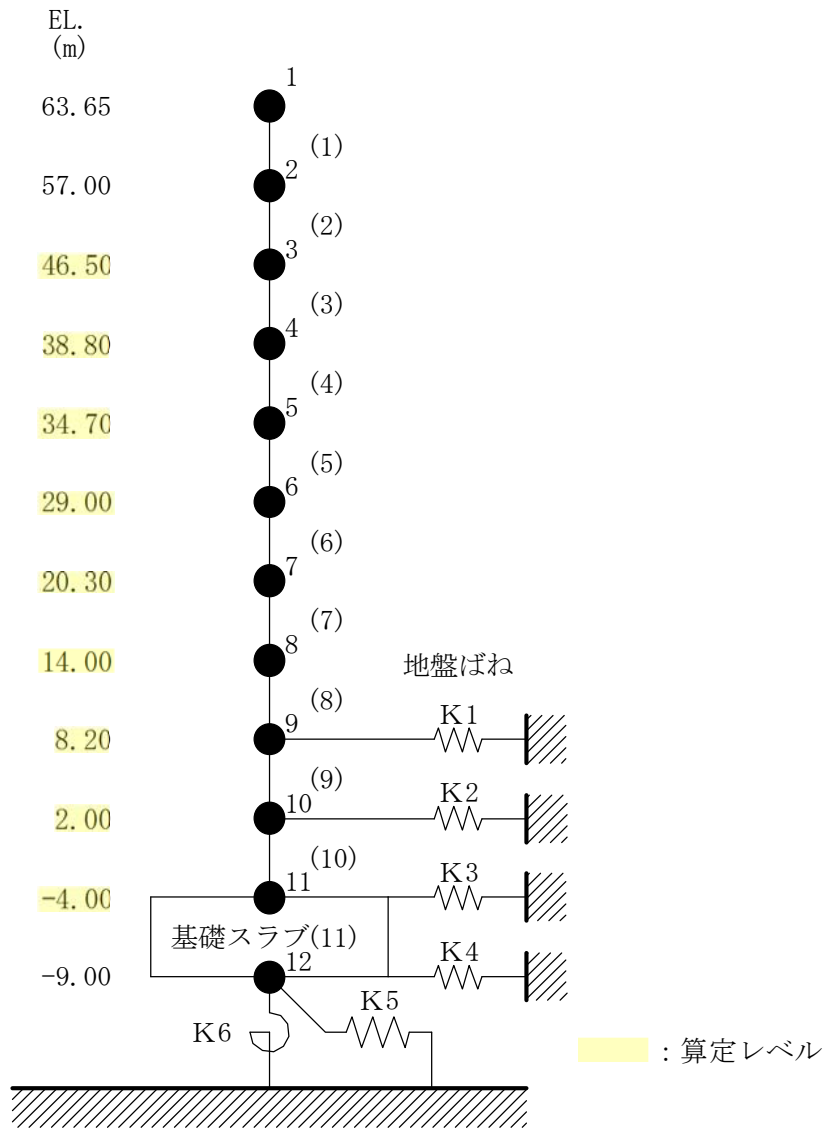


図7 原子炉建屋の等価繰返し回数の算定位置（水平方向）

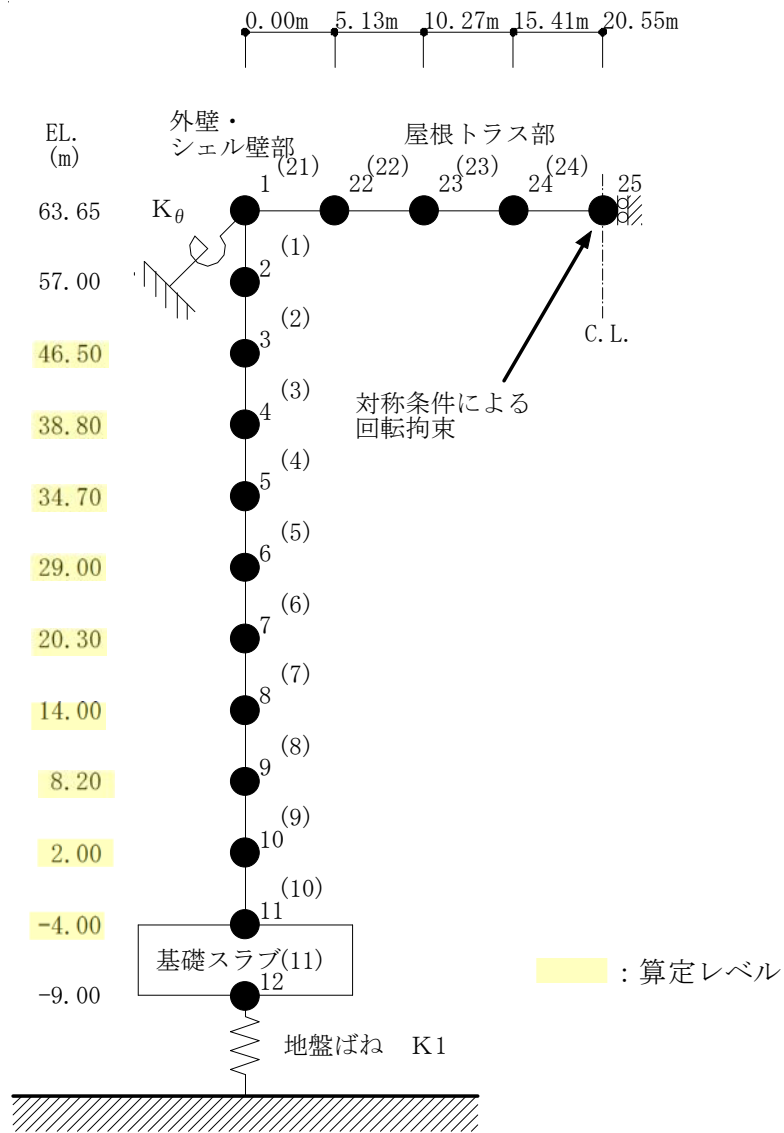


図8 原子炉建屋の等価繰返し回数の算定位置（鉛直方向）

5. 一律に設定する等価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、一律に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一律に設定する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 (1471 MPa) を超える場合は個別に評価を行う。

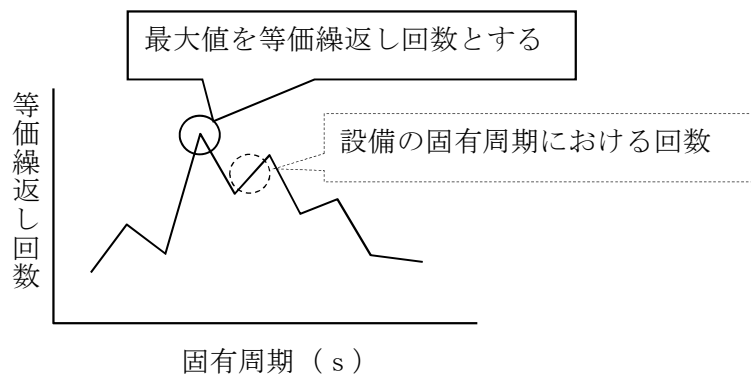
*1 「昭和 55 年度耐震設計の標準化に関する調査報告書」での整理。

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 SFVV 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 まで考慮すれば十分としている。

② 固有周期

今回工認の基準地震動 S_s の一律に設定する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 における一律に設定する等価繰返し回数は， S_s の 2 倍の回数を用いている。 S_d の等価繰返し回数を S_s の等価繰返し回数の 2 倍の回数とすることが保守的な設定であることは，1.1.2(2)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. 一律に設定する等価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等価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、等価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等価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

(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、一律に設定する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

疲労評価対象設備における水平1方向及び鉛直方向の地震動に対するピーク応力と、水平2方向及び鉛直方向の地震動に対するピーク応力を参考2に纏めた。なお、水平2方向の考慮は「補足-340-7【水平2方向及び鉛直方向の適切な組合せに関する検討に

ついて】」における検討結果を踏まえ纏めた。

上部シアラグと格納容器との接合部は水平 1 方向を考慮した場合と、水平 2 方向を考慮した場合が共に 150 kg/mm^2 (1471MPa) を上回っていることから、個別に等価繰返し回数を設定する（補足 3 参照）。

その他の設備については、水平 2 方向による影響を考慮しても、 150 kg/mm^2 (1471MPa) を下回っていることから、一律に設定する等価繰返し回数の設定に影響ないことを確認した。

(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、一律に設定する繰返し回数の 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と個別に設定した値を用いている。本資料において一律に設定した等価繰返し回数が、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、一律に設定する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 方向の影響及び材料物性の影響）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Sd 2回分を考慮しても、一律に設定する等価繰返し回数（原子炉格納容器、原子炉压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 320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) BWRプラントにおける地震等価繰返し回数の算定方針

BWRプラントにおける等価繰返し回数は、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。

(2) 東海第二発電所の今回工認における考慮する地震の回数

東海第二発電所の今回工認における基本方針としては、S_s地震よりS_d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、S_s地震については1回分、また、S_d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、下記の通りピーク応力法を用いている。

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。

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。

*：昭和55年度 耐震設計の標準化に関する調査報告書

個別に設定する等価繰返し回数について

1. 適用

本資料は東海第二発電所の今回工認における，耐震計算書の疲労評価で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設備に対する，等価繰返し回数の算定方法を定めたものである。

2. 対象設備

疲労評価が必要となる設備の内，一律に設定する等価繰返し回数を適用しない以下の設備に対して，個別に設定する等価繰返し回数を算定する。

- ① 原子炉建屋以外に設置される設備
- ② 発生するピーク応力が 150kg/mm^2 (1471MPa) を超える設備
- ③ 一律に定める等価繰返し回数を用いた疲労評価が満足しない設備
- ④ S_d に対する疲労評価が必要な設備（*1）

*1： S_d に対する疲労評価を S_s の疲労評価で代表させるために， S_d の等価繰返し回数が S_s の一律に設定する等価繰返し回数（160回）を下回ることを確認する。

3. 個別に設定する等価繰返し回数算定方針

3. 1 前項①～③の等価繰返し回数算定方針

個別に設定する等価繰返し回数の算定方針について，表1に示す。

3. 2 ④の等価繰返し回数算定方針

S_d の等価繰返し回数を求める際は，図1のフローに従い算定する。 S_d 8波/ S_s 8波の応答比の算出方法は3. 3項に示す。

表1 昭和55年度 耐震設計の標準化に関する調査報告書、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での算定条件比較
(下線部が一律に設定する等価繰返し回数との相違点)

		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		東海第二発電所 個別に設定する等価繰返し回数の算定方法	
		【手法1】	【手法2】	原子炉格納容器, 原子炉圧力容器等 大型機器	原子炉格納容器, 原子炉圧力容器等 大型機器	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
対象設備		原子炉圧力容器 スカート	第一種配管	原子炉格納容器, 原子炉圧力容器等 大型機器	原子炉格納容器, 原子炉圧力容器等 大型機器	建屋-機器連成解析でモデル化されていない剛な設備	剛な設備
算出方法 (J E A G のフ ローの左右どちらからか)		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)	標準化報告書【手法1】と同じ (J E A G における左側のフロー)	耐震評価条件: 荷重	耐震評価条件: 床応答スペクトル
回数算出に用いている応答時刻歴	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	標準化報告書【手法1】と同じ。以下を用いる。 ・時刻歴せん断力波形、 ・時刻歴モーメント波形、 ・時刻歴軸力波形	標準化報告書【手法2】と同じ。以下を用いる。 ・変位応答時刻歴波	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	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 ^(注1)	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 ^(注1)	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	標準化報告書【手法1】及び【手法2】と同じ	評価対象設備の設置床面	同左
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	標準化報告書【手法1】と同じ。時刻歴解析結果より直接算定。	設備の固有周期(剛のため0.05s)で算定。	標準化報告書【手法2】と同じ。設備の固有周期でなく、全固有周期 ^(注3) 。
減衰定数		報告書に言及なし	同左	1.0%, 0.5%	同左	評価対象設備の減衰	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	標準化報告書【手法1】及び【手法2】と同じ ^(注2)	標準化報告書【手法1】及び【手法2】と同じ ^(注2)	同左
地盤条件		V _s = 500, 1000, 1500m/s	V _s = 1500m/s	東海第二の地盤条件 V _s = 約700m/s	東海第二の地盤条件 V _s = 約700m/s	東海第二の地盤条件 V _s = 約700m/s	同左

注1: S_sに対してピーク応力を150kg/mm² (1471MPa) と設定する。S_dのピーク応力は図1に基づき設定する。

設備のピーク応力が解析条件として設定したピーク応力値を超える場合は設備のピーク応力にて評価を行う。

注2: 等価繰返し回数低減のため、必要に応じて個別に設定する設備の使用材料の設計用疲労線図を用いる。

注3: 必要に応じて設備の1次固有周期より短周期側の等価繰返し回数の最大値を用いる。

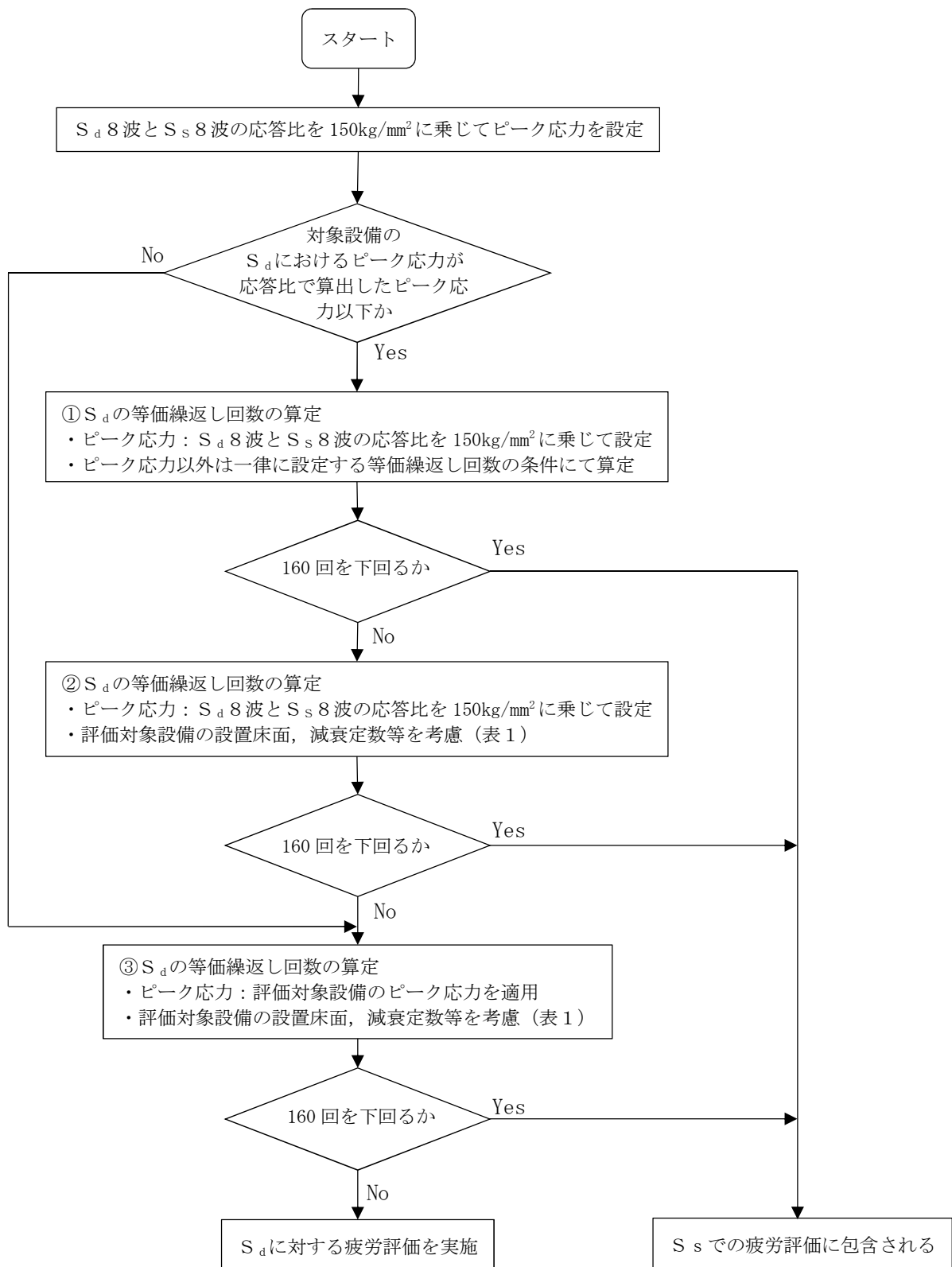


図1 S_dの等価繰返し回数算定手順

3. 3 S_s 8波/S_d 8波の応答比の算出方法

S_sでの一律に設定する等価繰返し回数の算定に適用しているピーク応力は150kg/mm²(1471MPa)を適用している。S_dでのピーク応力はS_sとS_dの応答比で発生すると仮定し、150kg/mm²(1471MPa)に応答比を乗じることにより求める。

応答比は、各標高（建屋モデルの質点）におけるS_s 8波とS_d 8波それぞれの最大値の比から求める。

【手順1】各標高でのS_s 8波とS_d 8波の応答比を算定し、最大値を求める

標高	S _s 応答			S _d 応答			比率	応答比最大値
	Ss-D1	...	Ss-31	Sd-D1	...	Ss-31	Max(S _d 8波)/Max(Ss 8波)	
A	CH _{Ss-D1A}	...	CH _{Ss-31A}	CH _{Sd-D1A}	...	CH _{Sd-31A}	Max(CH _{Sd-D1A} ~CH _{Ss-31A})/Max(CH _{Ss-D1A} ~CH _{Ss-31A})	R _A
B	CH _{Ss-D1B}	...	CH _{Ss-31B}	CH _{Sd-D1B}	...	CH _{Sd-31B}	Max(CH _{Sd-D1A} ~CH _{Ss-31A})/Max(CH _{Ss-D1A} ~CH _{Ss-31A})	R _B
C	CH _{Ss-D1C}	...	CH _{Ss-31C}	CH _{Sd-D1C}	...	CH _{Sd-31C}	Max(CH _{Sd-D1A} ~CH _{Ss-31A})/Max(CH _{Ss-D1A} ~CH _{Ss-31A})	R _C
D	CH _{Ss-D1D}	...	CH _{Ss-31D}	CH _{Sd-D1D}	...	CH _{Sd-31D}	Max(CH _{Sd-D1A} ~CH _{Ss-31A})/Max(CH _{Ss-D1A} ~CH _{Ss-31A})	R _D
E	CH _{Ss-D1E}	...	CH _{Ss-31E}	CH _{Sd-D1E}	...	CH _{Sd-31E}	Max(CH _{Sd-D1A} ~CH _{Ss-31A})/Max(CH _{Ss-D1A} ~CH _{Ss-31A})	R _E

【手順2】各標高の応答比最大値からS_dのピーク応力を設定する。

$$\text{標高Aに設置される設備のS}_d\text{のピーク応力} = \frac{150\text{kg/mm}^2(1471\text{MPa})}{\text{S}_s\text{のピーク応力}} \times \frac{R_A}{\text{応答比最大値}}$$

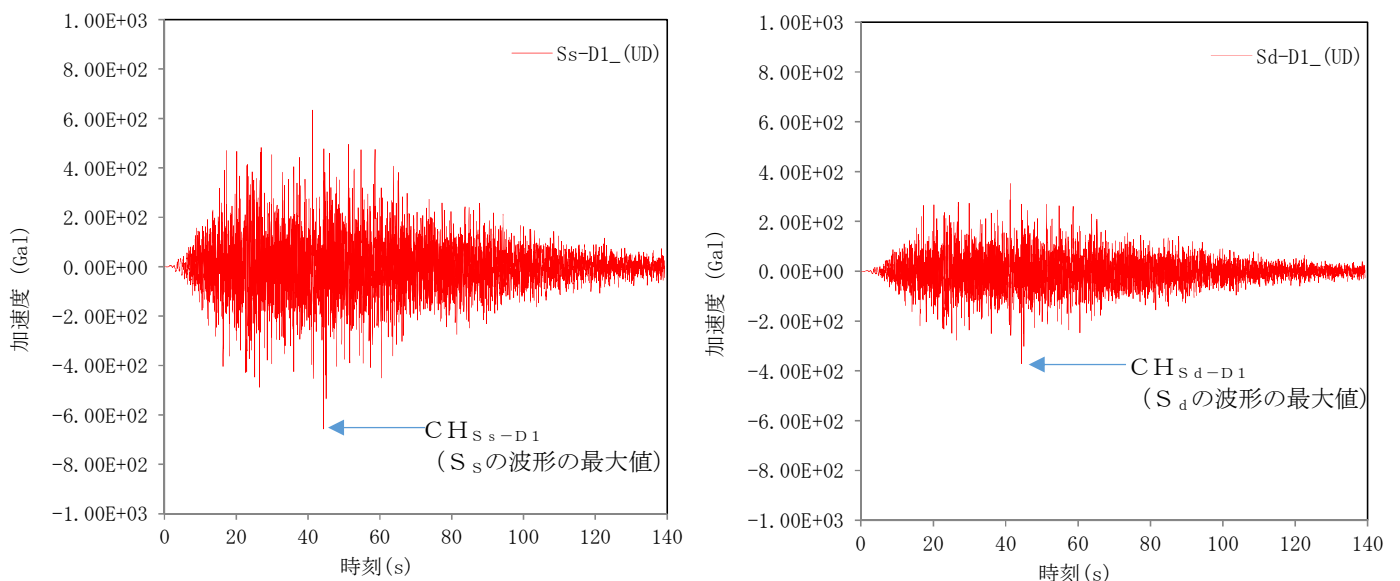


図2 加速度時刻歴波形の最大値の例
(原子炉建屋質点 EL. 46. 50m Ss-D1 (UD) と Sd-D1 (UD))

4. 個別に定める等価繰返し回数算定結果

3項の方針に基づき算定した等価繰返し回数を保守的に丸めて設定した等価繰返し回数（以下「評価用等価繰返し回数」という。）を以下に示す。なお、表4-4～表4-24の質点番号は添付8図5，図6に対応する。

4.1 発生するピーク応力が150kg/mm²（1471MPa）を超える設備

該当する設備は上部シアラグと格納容器との接合部があり，ピーク応力は1918MPaとなっている。

算定した等価繰返し回数と，その値を保守的に丸めて設定した設備の等価繰返し回数（評価用等価繰返し回数）を表4-1に示す。

表4-1 発生するピーク応力が150kg/mm²（1471MPa）を超える設備の等価繰返し回数

設備	評価	考慮する耐震条件	算定結果	算定した等価繰返し回数	評価用等価繰返し回数	備考
上部シアラグと格納容器との接合部	S _s	荷重	表4-4	□	40	当該部に発生する応力の内，ばね反力による応力が支配的であるため，ばね反力の時刻歴波にて算定し，等価繰返し回数を設定。

4.2 一律に設定する等価繰返し回数を用いた疲労評価が満足しない設備

該当する設備は，主蒸気系配管（MS-A），原子炉冷却材浄化系配管がある。そのため，算定した等価繰返し回数と，その値を保守的に丸めて設定した設備の等価繰返し回数（評価用等価繰返し回数）を表4-2に示す。

表4-2 一律に設定する等価繰返し回数を用いた疲労評価が満足しない設備の等価繰返し回数

設備	評価	考慮する耐震条件	算定結果	算定した等価繰返し回数	評価用等価繰返し回数	備考
主蒸気系配管 （MS-A）	S _s	FRS	表4-5	□	110	—
原子炉冷却材 浄化系配管	S _s	FRS	表4-5	□	110	—

4.3 S_dに対する疲労評価が必要な設備

算定した等価繰返し回数と，その値を保守的に丸めて設定した設備の等価繰返し回数（評価用等価繰返し回数）を表4-3に示す。

表 4-3 S_dに対する疲労評価が必要な設備の等価繰返し回数

設備	評価	考慮する耐震条件	算定結果	算定した等価繰返し回数*1	評価用等価繰返し回数	備考
原子炉圧力容器胴板	S _d	震度荷重	表 4-6		160	図 1 の②で算定
原子炉圧力容器下部鏡板	S _d	震度荷重				
原子炉圧力容器スカート	S _d	震度荷重				
制御棒駆動機構ハウジング貫通部	S _d	震度荷重	表 4-7		160	図 1 の②で算定
再循環水出口ノズル (N1)	S _d	配管反力 (FRS)	表 4-8		160	図 1 の②で算定
再循環水入口ノズル (N2)	S _d	配管反力 (FRS, 震度)	表 4-9		160	図 1 の②で算定
主蒸気ノズル (N3)	S _d	配管反力 (FRS)	表 4-10		160	図 1 の②で算定
給水ノズル (N4)	S _d	配管反力 (FRS, 震度)	表 4-11		160	図 1 の②で算定
炉心スプレイノズル (N5)	S _d	配管反力 (FRS, 震度)	表 4-12		160	図 1 の③で算定 * 3
上鏡スプレイノズル (N6)	S _d	配管反力 (FRS)	表 4-13		160	図 1 の②で算定
ベントノズル (N7)	S _d	配管反力 (FRS)	表 4-14	160	図 1 の②で算定	
ジェットポンプ計測管貫通部ノズル (N8)	S _d	配管反力 (FRS)	表 4-15	160	図 1 の②で算定	
差圧検出・ほう酸水注入管ノズル (N10)	S _d	配管反力 (FRS, 震度)	表 4-16	160	図 1 の③で算定	
計装ノズル (N11)	S _d	配管反力 (FRS)	追而	追而	追而	—
計装ノズル (N16)	S _d	配管反力 (FRS)	追而	追而	追而	—
計装ノズル (N12)	S _d	配管反力 (FRS)	表 4-19		160	図 1 の③で算定 * 2
ドレンノズル (N15)	S _d	配管反力 (FRS)	表 4-20		160	図 1 の②で算定
低圧注水ノズル (N17)	S _d	配管反力 (FRS, 震度)	表 4-21		160	図 1 の③で算定
上部シアラグ及びスタビライザ	S _d	荷重	表 4-22		80	図 1 の③で算定
原子炉格納容器機器搬入用ハッチ	S _d	FRS 震度荷重	表 4-23		160	図 1 の③で算定
制御棒駆動機構	S _d	震度荷重	表 4-24		160	図 1 の②で算定

* 1 : () 内は算定した S_d 1 回分の回数。

* 2 : 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設計用疲労線図を使用。

* 3 : 設備の固有周期を考慮。

表4-4 上部シアラグと格納容器との接合部 (S_s) 等価繰返し回数算定結果 (ばね反力)

質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]	固有周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (ばね反力)												最大回数				
					Ss-D1		Ss-11		Ss-12		Ss-13		Ss-14		Ss-21			Ss-22		Ss-31	
					NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW		NS	EW	NS	EW

* : 耐震計算により求めたピーク応力。

表4-5 主蒸気系配管 (S_s)、原子炉冷却材浄化系配管 (S_s) 等価繰返し回数算定結果 (FRS)

質点番号 []内は鉛直 質点番号	減衰 (%)	ピーク応力 [kgf/mm ²]	固有周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (FRS)												最大回数				
					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	

表4-6 (1) 胴板 (S_d)、下部鏡板 (S_d)、原子炉圧力容器スカート (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (震度)

質点番号 []内は鉛直 質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]	固有周期 [s]	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (震度)												最大回数				
					Sd-D1		Sd-11		Sd-12		Sd-13		Sd-14		Sd-21			Sd-22		Sd-31	
					UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD		UD	UD	UD	

* : S_sとS_dの応答比から求めたピーク応力。

表 4-6 (2) 胴板 (S_d), 下部鏡板 (S_d), 原子炉圧力容器スカート (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (せん断力)

質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]	固有 周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (せん断力)												最大回数				
					Sd-D1		Sd-11		Sd-12		Sd-13		Sd-14		Sd-21			Sd-22		Sd-31	
					NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW		NS	EW	NS	EW

* : S_sとS_dの応答比から求めたピーク応力。

表 4-6 (3) 胴板 (S_d), 下部鏡板 (S_d), 原子炉圧力容器スカート (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (モーメント)

質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]	固有 周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (モーメント)												最大回数				
					Sd-D1		Sd-11		Sd-12		Sd-13		Sd-14		Sd-21			Sd-22		Sd-31	
					NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW		NS	EW	NS	EW

* : S_sとS_dの応答比から求めたピーク応力。

表 4-6 (4) 胴板 (S_d), 下部鏡板 (S_d), 原子炉压力容器スカート (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (軸力)

質点番号 []内は鉛直 質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]	固有 周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (軸力)							最大回 数									
					Sd-D1	Sd-11	Sd-12	Sd-13	Sd-14	Sd-21	Sd-22		Sd-31								
					UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD		UD								

*: S_sとS_dの応答比から求めたピーク応力。

表 4-7 (1) 制御棒駆動機構ハウジング貫通部 (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (震度)

質点番号 []内は鉛直 質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]	固有 周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (震度)							最大回 数									
					Sd-D1	Sd-11	Sd-12	Sd-13	Sd-14	Sd-21	Sd-22		Sd-31								
					UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD		UD								

*: S_sとS_dの応答比から求めたピーク応力。

表4-7 (2) 制御棒駆動機構ハウジング貫通部 (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (せん断力)

質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]	固有 周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (せん断力)												最大回数				
					Sd-D1		Sd-11		Sd-12		Sd-13		Sd-14		Sd-21			Sd-22		Sd-31	
					NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW		NS	EW	NS	EW

*: S_sとS_dの応答比から求めたピーク応力。

表4-7 (3) 制御棒駆動機構ハウジング貫通部 (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (モーメント)

質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]	固有 周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (モーメント)												最大回数				
					Sd-D1		Sd-11		Sd-12		Sd-13		Sd-14		Sd-21			Sd-22		Sd-31	
					NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW		NS	EW	NS	EW

* : S_sとS_dの応答比から求めたピーク応力。

表4-7 (4) 制御棒駆動機構ハウジング貫通部 (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (軸力)

質点番号 []内は鉛直 質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]	固有 周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (軸力)												最大回数				
					Sd-D1		Sd-11		Sd-12		Sd-13		Sd-14		Sd-21			Sd-22		Sd-31	
					UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD		UD	UD	UD	UD

* : S_sとS_dの応答比から求めたピーク応力。

表4-8 再循環水出口ノズル (N1) (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (FRS)

質点番号 []内は鉛直 質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]		固有周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (FRS)												最大 回数				
		水平	鉛直			Sd-D1		Sd-11		Sd-12		Sd-13		Sd-14		Sd-21			Sd-22		Sd-31	
						NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD		NS	EW	UD	NS

* : S_sとS_dの応答比から求めたピーク応力。

表4-9 再循環水入口ノズル (N2) (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (FRS, 震度)

質点番号 []内は鉛直 質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]		固有周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (FRS, 震度)												最大 回数				
		水平	鉛直			Sd-D1		Sd-11		Sd-12		Sd-13		Sd-14		Sd-21			Sd-22		Sd-31	
						NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD		NS	EW	UD	NS

* : S_sとS_dの応答比から求めたピーク応力。

表4-10 主蒸気ノズル (N3) (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (FRS)

質点番号 []内は鉛直 質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]		固有周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (FRS)												最大 回数				
		水平	鉛直			Sd-D1		Sd-11		Sd-12		Sd-13		Sd-14		Sd-21			Sd-22		Sd-31	
						NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD		NS	EW	UD	NS

* : S_sとS_dの応答比から求めたピーク応力。

表4-1-1 給水ノズル (N4) (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (F R S, 震度)

質点番号 []内は鉛直 質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]		固有周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (F R S, 震度)												最大回数												
		水平	鉛直			Sd-D1			Sd-11			Sd-12			Sd-13				Sd-14			Sd-21			Sd-22			Sd-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

*: S_sとS_dの応答比から求めたピーク応力。

表4-1-2 炉心スプレイノズル (N5) (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (F R S, 震度)

質点番号 []内は鉛直 質点番号	減衰 (%)	ピーク応力 [kgf/mm ²]		固有周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (F R S, 震度)												最大回数												
		水平	鉛直			Sd-D1			Sd-11			Sd-12			Sd-13				Sd-14			Sd-21			Sd-22			Sd-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

*1: S_sとS_dの応答比から求めたピーク応力。

*2: 耐震計算から求めたピーク応力。

*3: ノズル反力を算定する配管の1次固有周期は高圧炉心スプレイ配管:0.108s, 低圧炉心スプレイ配管:0.112sであり, 配管の1次固有周期より短周期側での最大値。

表4-1-3 上鏡スプレイノズル (N6) (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (F R S)

質点番号 []内は鉛直 質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]		固有周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (F R S)												最大回数												
		水平	鉛直			Sd-D1			Sd-11			Sd-12			Sd-13				Sd-14			Sd-21			Sd-22			Sd-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

*: S_sとS_dの応答比から求めたピーク応力。

表4-1-4 ベントノズル (N7) (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (FRS)

質点番号 []内は鉛直 質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]		固有周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (FRS)												最大 回数				
		水平	鉛直			Sd-D1		Sd-11		Sd-12		Sd-13		Sd-14		Sd-21			Sd-22		Sd-31	
						NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD		NS	EW	UD	NS

*: S_sとS_dの応答比から求めたピーク応力。

表4-1-5 ジェットポンプ計測管貫通部ノズル (N8) (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (FRS)

質点番号 []内は鉛直 質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]		固有周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (FRS)												最大 回数				
		水平	鉛直			Sd-D1		Sd-11		Sd-12		Sd-13		Sd-14		Sd-21			Sd-22		Sd-31	
						NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD		NS	EW	UD	NS

*: S_sとS_dの応答比から求めたピーク応力。

表4-1-6 差圧検出・ほう酸水注入管ノズル (N10) (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (震度, FRS)

質点番号 []内は鉛直 質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]		固有周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (震度, FRS)												最大 回数				
		水平	鉛直			Sd-D1		Sd-11		Sd-12		Sd-13		Sd-14		Sd-21			Sd-22		Sd-31	
						NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD		NS	EW	UD	NS

*: 耐震計算により求めたピーク応力を保守的に設定した値。

表4-1-7 計装ノズル (N11) (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (FRS)
(追而)

表4-1-8 計装ノズル (N16) (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (FRS)
(追而)

表4-1-9 計装ノズル (N12) (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (FRS)

質点番号 []内は鉛直 質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]		固有周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (FRS)												最大 回数												
		水平	鉛直			Sd-D1			Sd-11			Sd-12			Sd-13				Sd-14			Sd-21			Sd-22			Sd-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

*: 耐震計算から求めたピーク応力。

表4-2-0 ドレンノズル (N15) (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (FRS)

質点番号 []内は鉛直 質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]		固有周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (FRS)												最大 回数												
		水平	鉛直			Sd-D1			Sd-11			Sd-12			Sd-13				Sd-14			Sd-21			Sd-22			Sd-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

*: S_sとS_dの応答比から求めたピーク応力。

表4-2-1 低圧注水ノズル (N17) (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (FRS, 震度)

質点番号 []内は鉛直 質点番号	減衰 (%)	ピーク応力 [kgf/mm ²]		固有周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (FRS, 震度)												最大 回数												
		水平	鉛直			Sd-D1			Sd-11			Sd-12			Sd-13				Sd-14			Sd-21			Sd-22			Sd-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

*1: S_sとS_dの応答比から求めたピーク応力。

*2: 耐震計算から求めたピーク応力。

表 4-2-2 上部シアラグ及びスタビライザ (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (ばね反力)

質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]	固有周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (ばね反力)												最大回数				
					Sd-D1		Sd-11		Sd-12		Sd-13		Sd-14		Sd-21			Sd-22		Sd-31	
					NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW		NS	EW	NS	EW

*: 耐震計算により求めたピーク応力。

表 4-2-3 (1) 原子炉格納容器 機器搬入用ハッチ (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (せん断力)

質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]	固有周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (せん断力)												最大回数				
					Sd-D1		Sd-11		Sd-12		Sd-13		Sd-14		Sd-21			Sd-22		Sd-31	
					NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW		NS	EW	NS	EW

*: S_sとS_dの応答比から求めたピーク応力。

表 4-2-3 (2) 原子炉格納容器 機器搬入用ハッチ (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (モーメント)

質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]	固有周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (モーメント)												最大回数				
					Sd-D1		Sd-11		Sd-12		Sd-13		Sd-14		Sd-21			Sd-22		Sd-31	
					NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW		NS	EW	NS	EW

*: S_sとS_dの応答比から求めたピーク応力。

表 4-2-3 (3) 原子炉格納容器 機器搬入用ハッチ (Sd) 等価繰返し回数算定結果 (軸力)

質点番号 []内は鉛直質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]	固有周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (軸力)													最大回数
					Sd-D1 UD	Sd-11 UD	Sd-12 UD	Sd-13 UD	Sd-14 UD	Sd-21 UD	Sd-22 UD	Sd-31 UD						

*: S_sと S_dの応答比から求めたピーク応力。

表 4-2-3 (4) 原子炉格納容器 機器搬入用ハッチ (Sd) 等価繰返し回数算定結果 (震度, FRS)

質点番号 []内は鉛直 質点番号	減衰 (%)	ピーク応力 [kgf/mm ²]		固有周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (震度, FRS)																								最大回数		
		水平	鉛直			Sd-D1			Sd-11			Sd-12			Sd-13			Sd-14			Sd-21			Sd-22			Sd-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	NS	EW	UD

*1: S_sと S_dの応答比から求めたピーク応力。

*2: 耐震計算から求めたピーク応力。

表4-2-4 (1) 制御棒駆動機構 (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (震度)

質点番号 []内は鉛直 質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]		固有 周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (震度)								最大回数			
		水平	鉛直			Sd-D1	Sd-11	Sd-12	Sd-13	Sd-14	Sd-21	Sd-22	Sd-31				
						UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD

*: S_sとS_dの応答比から求めたピーク応力。

表 4-2-4 (2) 制御棒駆動機構 (S_d) 等価繰返し回数算定結果 (モーメント)

質点番号	減衰 (%)	ピーク応力* [kgf/mm ²]	固有周期	設計用疲労線図	等価繰返し回数 (モーメント)												最大回数				
					Sd-D1		Sd-11		Sd-12		Sd-13		Sd-14		Sd-21			Sd-22		Sd-31	
					NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW		NS	EW	NS	EW

* : S_sとS_dの応答比から求めたピーク応力。

疲労評価の全対象設備

設備名称	疲労評価の実施の有無 ○：有 ×：無	省略理由
原子炉圧力容器 (クラス1 容器)	○	
原子炉圧力容器スカート (クラス1 容器)	○	
原子炉圧力容器スタビライザブラケット (クラス1 容器)	×	既工認実績から地震荷重による一次＋二次応力の裕度は一次応力よりも高い裕度を有するため、一次応力にて代表する。
スチームドライヤサポートブラケット (クラス1 容器)	×	既工認実績から地震荷重による一次＋二次応力の裕度は一次応力よりも高い裕度を有するため、一次応力にて代表する。
給水スパージャブラケット (クラス1 容器)	×	既工認実績から地震荷重による一次＋二次応力の裕度は一次応力よりも高い裕度を有するため、一次応力にて代表する。
炉心スプレイブラケット (クラス1 容器)	×	既工認実績から地震荷重による一次＋二次応力の裕度は一次応力よりも高い裕度を有するため、一次応力にて代表する。
差圧検出・ほう酸水注入管 (ティーよりN10ノズルまでの外管) (クラス1 配管)	×	設計・建設規格PVB-3140(6)を適用して疲労評価不要であることを確認しているため評価を省略する。
使用済燃料乾式貯蔵容器 (キャスク容器) (クラス1 容器)	×	設計・建設規格PVB-3140(6)を適用して疲労評価不要であることを確認しているため評価を省略する。
使用済燃料乾式貯蔵容器 (タイプⅡ) (キャスク容器) (クラス1 容器相当)	×	設計・建設規格PVB-3140(6)を適用して疲労評価不要であることを確認しているため評価を省略する。
使用済燃料乾式貯蔵容器 (一次蓋締付けボルト) (クラス1 耐圧部テンションボルト) (容器)	○	
使用済燃料乾式貯蔵容器 (タイプⅡ) (一次蓋締付けボルト) (クラス1 耐圧部テンションボルト) (容器)	○	
使用済燃料乾式貯蔵容器 (二次蓋) (クラス3 容器)	×	規格基準 (JEAG4601・補1984) に従い、一次＋二次応力で求めた応力範囲が2Sy以下であることを確認して疲労評価を省略している。

設備名称	疲労評価の実施の有無 ○：有 ×：無	省略理由
使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプⅡ） （二次蓋） （クラス3容器相当）	×	規格基準（JEAG4601・補1984）に従い、一次＋二次応力で求めた応力範囲が2Sy以下であることを確認して疲労評価を省略している。
主蒸気逃がし安全弁逃がし弁機能用アキュムレータ （クラス3容器）	×	規格基準（JEAG4601・補1984）に従い、一次＋二次応力で求めた応力範囲が2Sy以下であることを確認して疲労評価を省略している。
主蒸気逃がし安全弁自動減圧機能用アキュムレータ （クラス3容器）	×	規格基準（JEAG4601・補1984）に従い、一次＋二次応力で求めた応力範囲が2Sy以下であることを確認して疲労評価を省略している。
低圧マニホールド （クラス2，3容器）	×	規格基準（JEAG4601・補1984）に従い、一次＋二次応力で求めた応力範囲が2Sy以下であることを確認して疲労評価を省略している。
残留熱除去系熱交換器 （クラス2，3容器ラグ支持たて置円筒形容器）	×	規格基準（JEAG4601・補1984）に従い、一次＋二次応力で求めた応力範囲が2Sy以下であることを確認して疲労評価を省略している。
残留熱除去系ストレーナ （クラス2配管）	×	二次応力が発生しないため。
高圧炉心スプレイ系ストレーナ （クラス2配管準用）	×	二次応力が発生しないため。
低圧炉心スプレイ系ストレーナ （クラス2配管準用）	×	二次応力が発生しないため。
制御棒駆動機構 （クラス1配管）	○	
ほう酸水貯蔵タンク （クラス2，3容器 平底たて置円筒形容器）	×	規格基準（JEAG4601・補1984）に従い、一次＋二次応力で求めた応力範囲が2Sy以下であることを確認して疲労評価を省略している。
原子炉格納容器本体 （クラスMC容器）	○	
原子炉格納容器 機器搬入用ハッチ 所員用エアロック サプレッションチェンバ・アクセスハッチ 配管貫通部 電気配線貫通部 （クラスMC容器）	○	
原子炉格納容器本体 上部シアラグと格納容器胴との接合部 下部シアラグと格納容器胴との接合部 （クラスMC容器）	○	
原子炉格納容器 格納容器スプレイヘッド （ドライウエル側） （サプレッション・チェンバ側） （クラス2配管）	×	規格基準（JEAG4601・補1984）に従い、一次＋二次応力で求めた応力範囲が2Sy以下であることを確認して疲労評価を省略している。

設備名称	疲労評価の実施の有無 ○：有 ×：無	省略理由
原子炉格納容器 ベント管 (クラス2配管)	×	規格基準 (JEAG4601・補1984) に従い、一次＋二次応力で求めた応力範囲が2Sy以下であることを確認して疲労評価を省略している。
非常用ディーゼル発電機 空気だめ (クラス2, 3容器 横置容器)	×	規格基準 (JEAG4601・補1984) に従い、一次＋二次応力で求めた応力範囲が2Sy以下であることを確認して疲労評価を省略している。
非常用ディーゼル発電機 空気だめ (クラス2, 3支持構造物 (クラス2, 3容器))	×	規格基準 (JEAG4601・補1984) に従い、一次＋二次応力で求めた応力範囲が2Sy以下であることを確認して疲労評価を省略している。
軽油貯蔵タンク (クラス2, 3容器 横置き円筒容器) (クラス3容器)	×	規格基準 (JEAG4601・補1984) に従い、一次＋二次応力で求めた応力範囲が2Sy以下であることを確認して疲労評価を省略している。
非常用ディーゼル発電機 燃料油デイタンク (クラス2, 3容器 横置容器)	○	
非常用ディーゼル発電機 燃料油デイタンク (クラス2, 3支持構造物 (クラス2, 3容器))	○	
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機 空気だめ (クラス2, 3容器 横置容器)	×	規格基準 (JEAG4601・補1984) に従い、一次＋二次応力で求めた応力範囲が2Sy以下であることを確認して疲労評価を省略している。
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機 空気だめ (クラス2, 3支持構造物 (クラス2, 3容器))	×	規格基準 (JEAG4601・補1984) に従い、一次＋二次応力で求めた応力範囲が2Sy以下であることを確認して疲労評価を省略している。
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機 燃料油デイタンク (クラス2, 3容器 横置容器)	×	規格基準 (JEAG4601・補1984) に従い、一次＋二次応力で求めた応力範囲が2Sy以下であることを確認して疲労評価を省略している。
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機 燃料油デイタンク (クラス2, 3支持構造物 (クラス2, 3容器))	×	規格基準 (JEAG4601・補1984) に従い、一次＋二次応力で求めた応力範囲が2Sy以下であることを確認して疲労評価を省略している。
クラス1配管	○	
クラス2, 3配管	○	一次＋二次応力の評価で許容値を満足する場合は省略

各設備の部品毎のピーク応力

設備名称	評価部位	①ピーク応力 (MPa)	②ピーク応力 (MPa) (水平2方向考慮) *	ピーク応力 (MPa) (①と②の最大値)	備考
原子炉圧力容器 (クラス1 容器)	胴板	20	20	20	水平2方向の地震力の影響は軽微
	下部鏡板	72	72	72	水平2方向の地震力の影響は軽微
	制御棒駆動機構ハウジング貫通部	300	300	300	水平2方向の地震力の影響は軽微
	ノズル	699	699	699	設計用地震力として $\sqrt{2}$ 倍以上を考慮
原子炉圧力容器スカート (クラス1 容器)	原子炉圧力容器スカート	171	171	171	水平2方向の地震力の影響は軽微
使用済燃料乾式貯蔵容器 (一次蓋締付けボルト) (クラス1 耐圧部テンションボルト) (容器)	一次蓋締付けボルト	6	6	6	水平2方向の地震力の影響は軽微
使用済燃料乾式貯蔵容器 (タイプII) (一次蓋締付けボルト) (クラス1 耐圧部テンションボルト) (容器)	一次蓋締付けボルト	3	3	3	水平2方向の地震力の影響は軽微
制御棒駆動機構 (クラス1 配管)	管	8	8	8	水平2方向の地震力の影響は軽微
原子炉格納容器本体 (クラスMC 容器)	下段B ビームシートとの接合部	1079	1079	1079	水平2方向の地震力の影響は軽微
機器搬入用ハッチ (クラスMC 容器)	機器搬入用ハッチ本体と補強板との接合部	788	788	788	設計用地震力として $\sqrt{2}$ 倍以上を考慮
	ドライウェル円錐胴と補強板との接合部	925	925	925	設計用地震力として $\sqrt{2}$ 倍以上を考慮
所員用エアロック (クラスMC 容器)	ドライウェル円錐胴と補強板との接合部	393	393	393	設計用地震力として $\sqrt{2}$ 倍以上を考慮
サプレッションチェンバ・アクセスハッチ (クラスMC 容器)	サプレッションチェンバ・アクセスハッチ本体と補強板との接合部	773	773	773	設計用地震力として $\sqrt{2}$ 倍以上を考慮
	サプレッションチェンバ円筒胴と補強板との接合部	694	694	694	設計用地震力として $\sqrt{2}$ 倍以上を考慮
電気配線貫通部 (クラスMC 容器)	原子炉格納容器胴とスリーブとの取付部 (胴側)	776	776	776	水平2方向の地震力の影響は軽微
	補強板取付部 (胴側)	421	421	421	水平2方向の地震力の影響は軽微
上部シアラグと格納容器胴との接合部 (クラスMC 容器)	上部シアラグと格納容器胴との接合部	1918	1918	1918	水平2方向の地震力の影響は軽微
非常用ディーゼル発電機 燃料油デイトンク (クラス2, 3 容器 横置容器)	胴	958	958	958	水平2方向の地震力の影響は軽微

設備名称	評価部位	①ピーク応力 (MPa)	②ピーク応力 (MPa) (水平2方向考慮) *	ピーク応力 (MPa) (①と②の最大値)	備考
非常用ディーゼル発電機 燃料油ダイタンク (クラス2, 3支持構造物 (クラス2, 3容器))	脚	639	639	639	水平2方向の地震力の影響は軽微
クラス1配管		追而	追而	追而	追而
クラス2, 3配管		追而	追而	追而	追而

* : 水平2方向のピーク応力の考え方は「補足-340-7【水平2方向及び鉛直方向の適切な組合せに関する検討について】」参照

ピーク応力の算定方法について

ここでは、等価繰返し回数算定に当たって用いた代表設備（主蒸気系配管（配管解析モデル MS-B））のピーク応力の算定方法について説明する。

（1）地震時のピーク応力算定方法

地震時のピーク応力算定フローを図 1 に、算定方法を以下に示す。

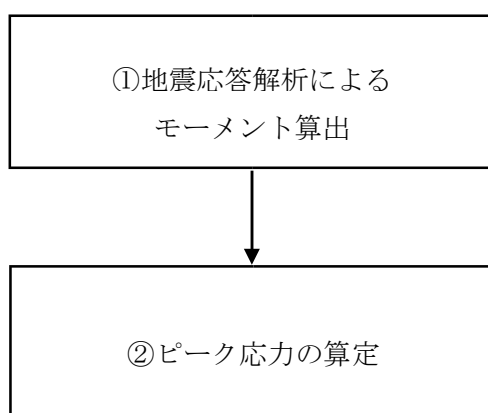


図 1 地震時のピーク応力算定フロー

①地震応答解析によるモーメント算出

MS-B に生じるモーメントの算定にあたっては、MS-B の地震応答解析（3次元はりモデルを用いたスペクトルモーダル解析）を実施する。

この地震応答解析から得られたモーメントを表 1 に示す。

表1 地震応答解析から得られたモーメント

(N・mm)

分類	部位	方向	モーメント			算出に 使用
			MX	MY	MZ	
慣性力	主管	X-Y				○
		Y-Z				—
	分岐管	X-Y				○
		Y-Z				—
相対変位	主管	X-Y				—
		Y-Z				○
	分岐管	X-Y				—
		Y-Z				○

②ピーク応力の算定

表 1 に示す設計荷重から、ピーク応力を算定する。

表 1 に示すモーメントにより算出した地震によるピーク応力(S_p)は、下式を用いて算定する。(J E A G 4601・補-1984 許容応力編 2.2.1)

$$S_p = \frac{K2b \times C2b \times Mbs}{Zb} + \frac{K2r \times C2r \times Mrs}{Zr}$$

$$S_p = \boxed{\hspace{20em}}$$

$$= \boxed{\hspace{3em}} \text{ (MPa)}$$

ここから、繰返しピーク応力 (SI) は、下式を用いて算出する。

$$SI = Ke \times Sp/2 = \boxed{\hspace{4em}} \text{ (MPa)}$$

縦弾性係数による温度補正 (302°C) した後の繰返しピーク応力(SI')を以下に示す。

$$SI' = \boxed{\hspace{4em}} \text{ (MPa)}$$

なお、上記で使用している記号は以下の通り。

- S_p : ピーク応力
- $K2, C2$: 応力係数 (設計・建設規格 2005/2007 PPB-3813)
- Mbs : 表 1 より算出した分岐管のモーメント (モーメントの各方向を SRSS)
- Mrs : 表 1 より算出した主管のモーメント (モーメントの各方向を SRSS)
- Zb : 分岐管の断面係数
- Zr : 主管の断面係数
- SI : 繰返しピーク応力 (温度補正前)
- SI' : 繰返しピーク応力 (温度補正後)
- Ke : J E A G 4601・補-1984 許容応力編 2.2.1 により計算した値

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」において原子炉压力容器スカート（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
原子炉压力容器 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/mm²（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。

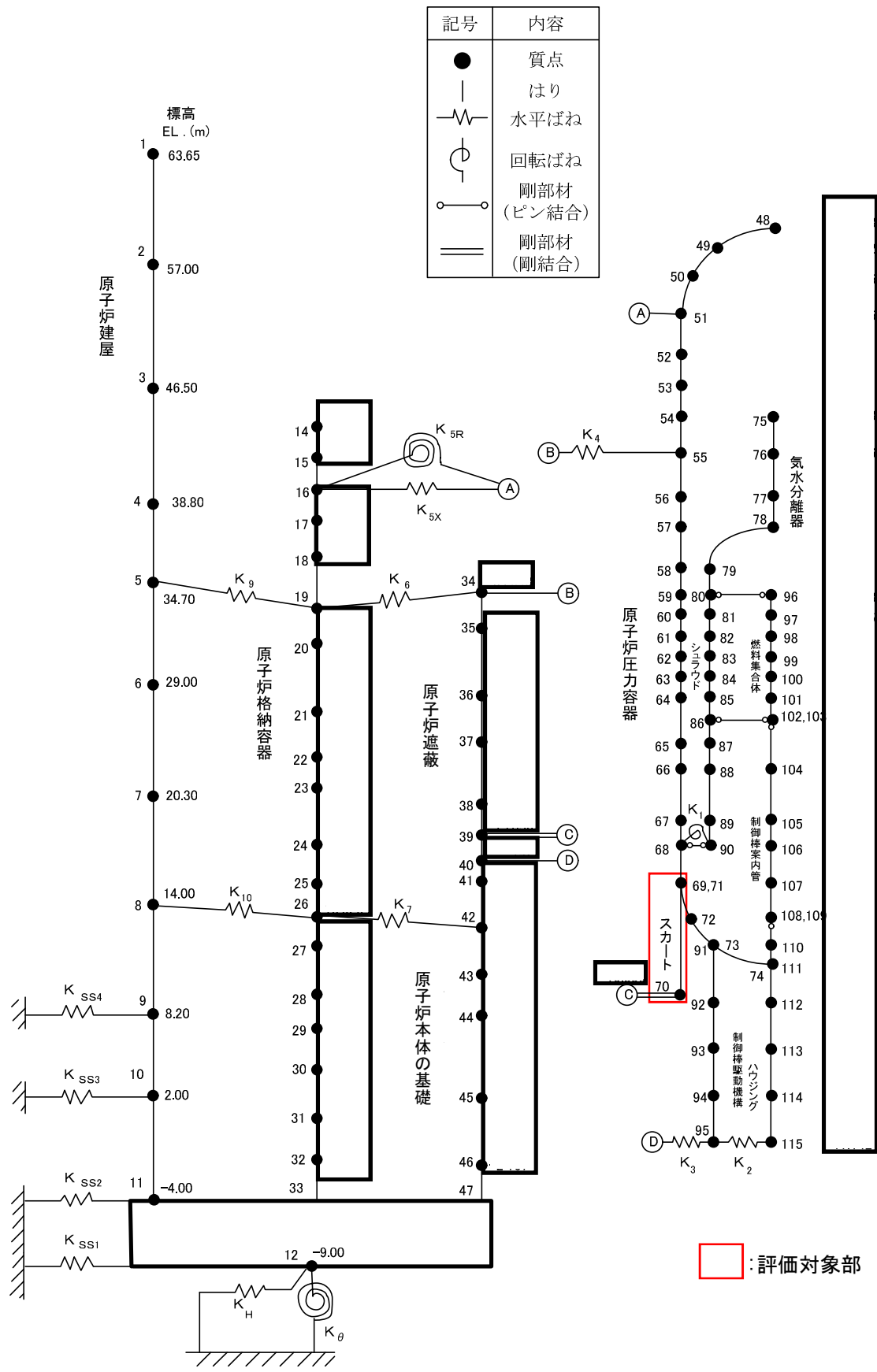


図1 RPV スカート等価繰返し回数評価点
(時刻歴を用いた節点・座標系)

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 150kg/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。

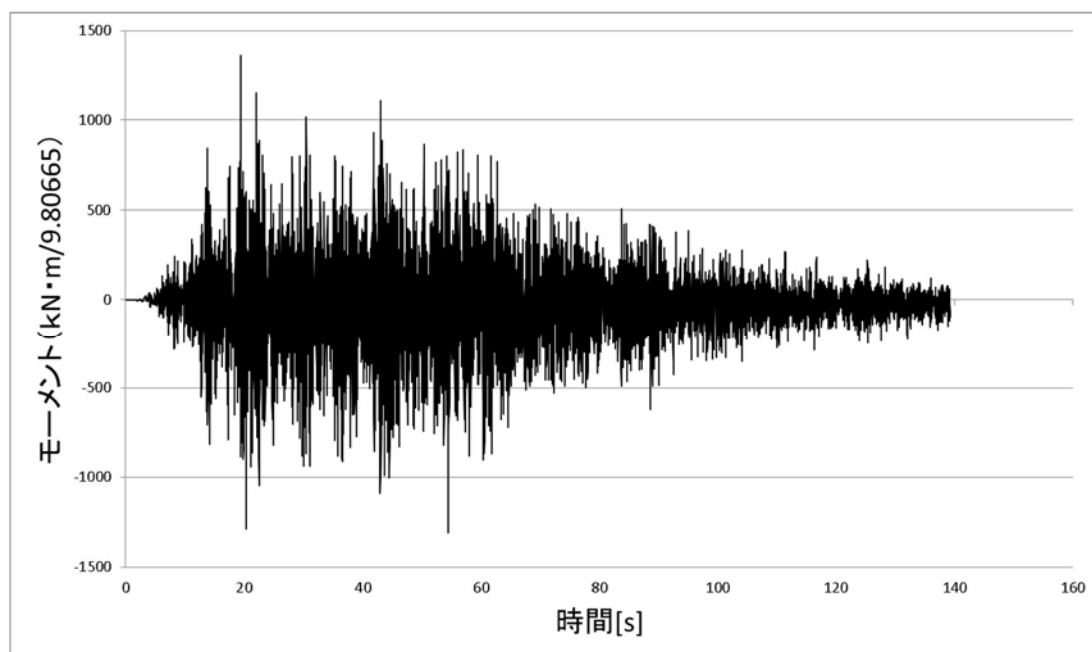


図2-1 建屋－大型機器系連成解析モデル時刻歴（モーメント）（NS方向）

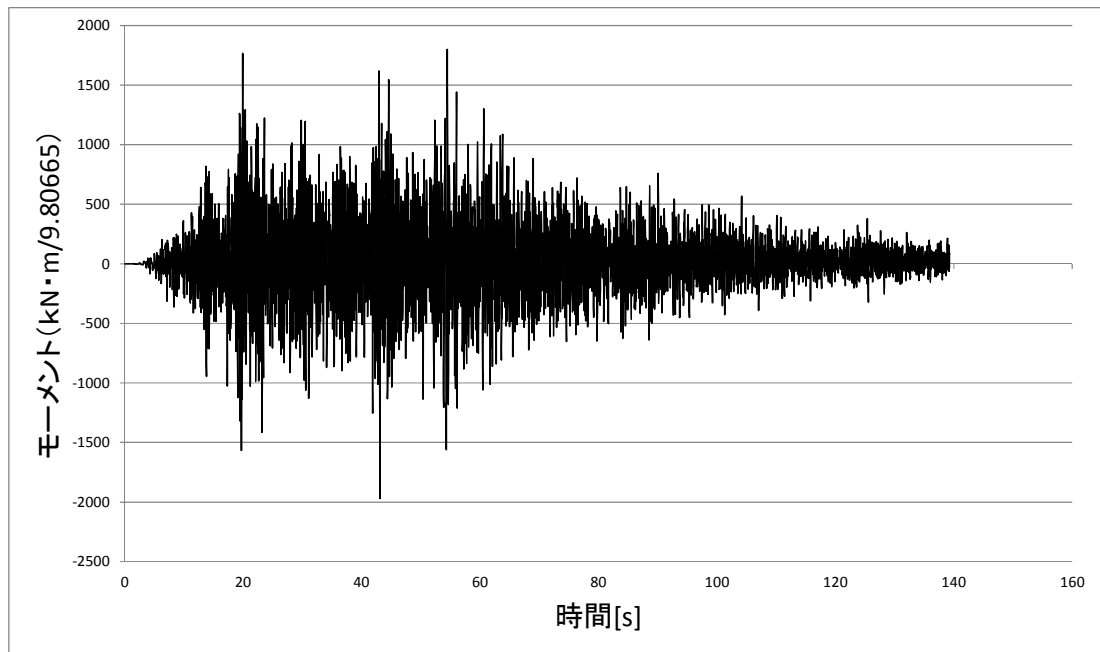


図 2 - 2 建屋-大型機器系連成解析モデル時刻歴 (モーメント) (EW 方向)

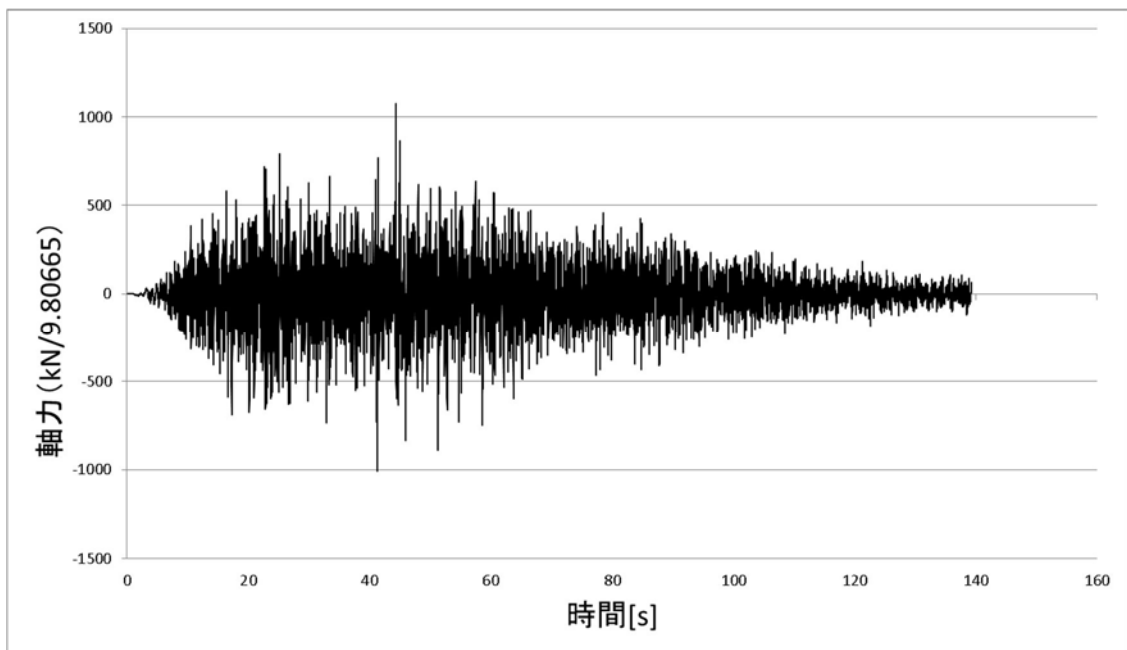


図 2 - 3 建屋-大型機器系連成解析モデル時刻歴 (軸力) (UD 方向)

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 回となった。

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			

* : 本モーメント記載は、原子炉压力容器 EL m 位置の値。

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/mm² (1471MPa) を用いる。

表 2, 3 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. 材料物性のばらつきを重畳させた場合の影響検討

添付 8 6 項において、「a. 6 つのパラメータによる等価繰返し回数への影響」、「b. 6 つのパラメータ以外による等価繰返し回数への影響」の検討を行っている。「a. 6 つのパラメータによる等価繰返し回数への影響」では、最も厳しい条件を仮定して一律に設定した等価繰返し回数を設定していること確認しており、「b. 6 つのパラメータ以外による等価繰返し回数への影響」において、時刻歴解析を用いている設備への影響、水平 2 方向による影響の評価を行い、共に影響ないことを確認している。そのため、材料物性のばらつきを重畳させた場合においても、前項における評価結果と同じであり、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。

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 質点 No. 3	h=0.5%												
	h=1.0%												
原子炉建屋 EL 38.800m 質点 No. 4	h=0.5%												
	h=1.0%												
原子炉建屋 EL 34.700m 質点 No. 5	h=0.5%												
	h=1.0%												
原子炉建屋 EL 29.000m 質点 No. 6	h=0.5%												
	h=1.0%												
原子炉建屋 EL 20.300m 質点 No. 7	h=0.5%												
	h=1.0%												
原子炉建屋 EL 14.000m 質点 No. 8	h=0.5%												
	h=1.0%												
原子炉建屋 EL 8.200m 質点 No. 9	h=0.5%												
	h=1.0%												
原子炉建屋 EL 2.000m 質点 No. 10	h=0.5%												
	h=1.0%												
原子炉建屋 EL -4.000m 質点 No. 11	h=0.5%												
	h=1.0%												

* : 質点 No. は添付 8 図 7 参照

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

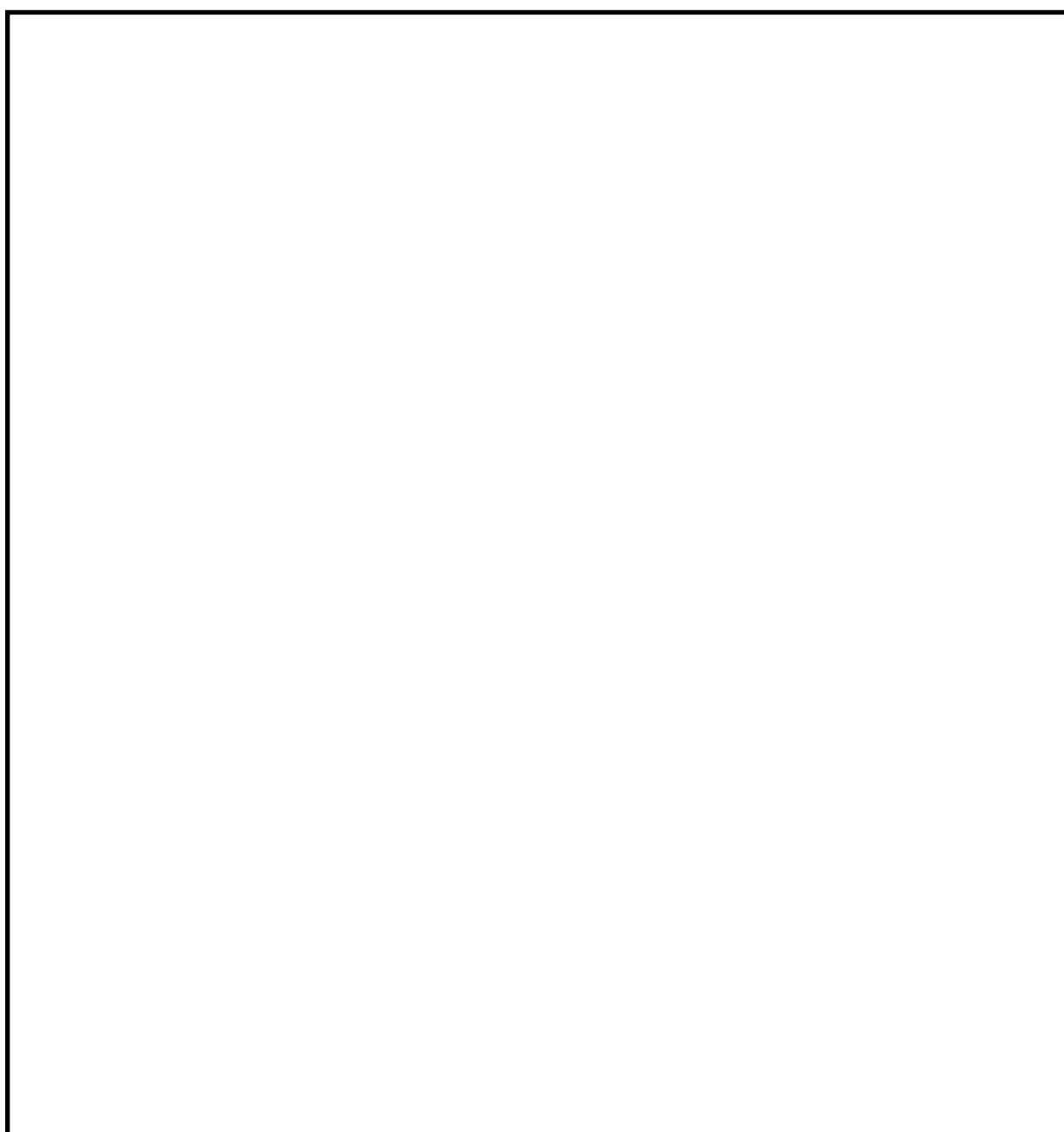
評価点*	減衰	基本ケース			ばらつきケース								
		Ss-D1			ケース1			ケース2			ケース3		
		NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD

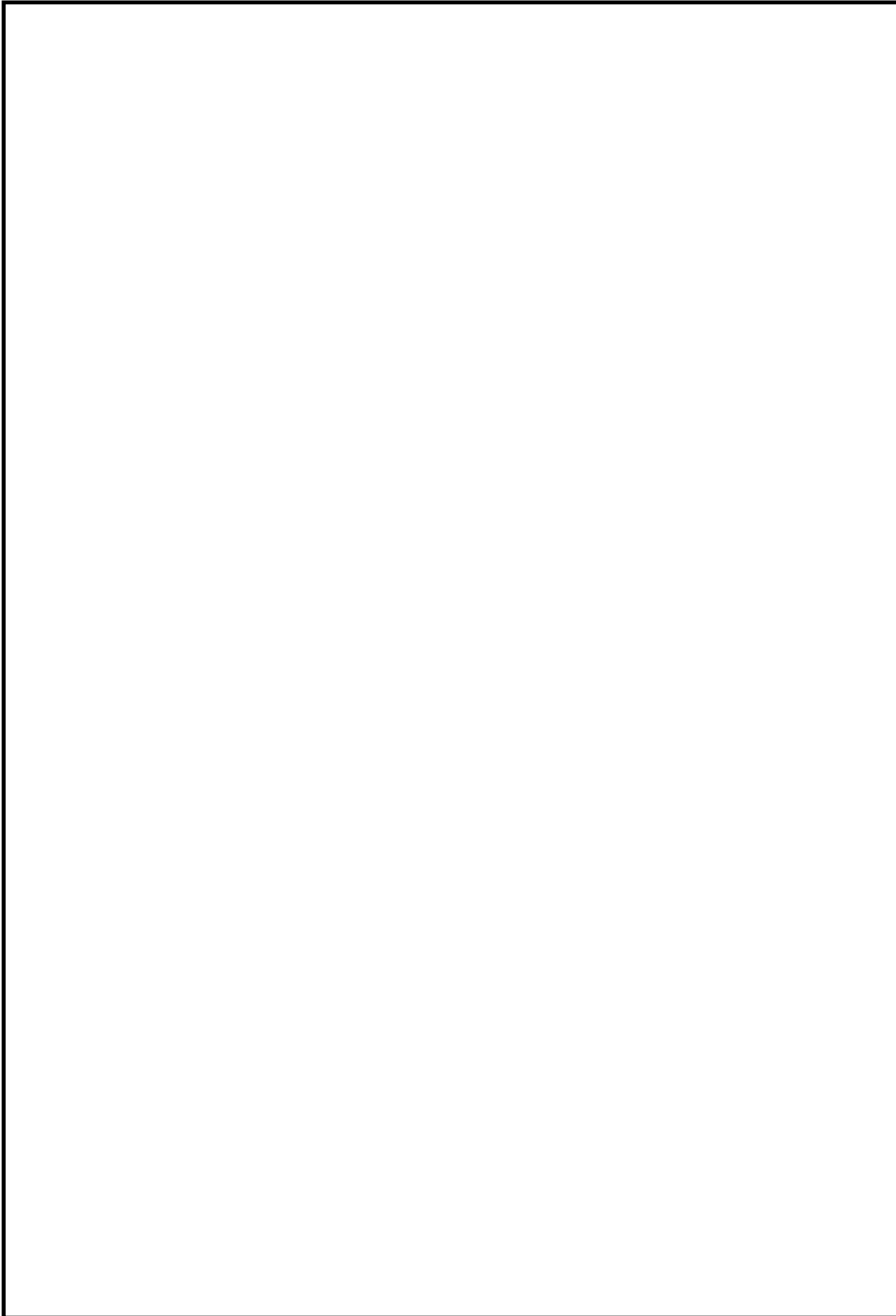
*：質点 No. は添付8 図5 参照

東海第二発電所 多方向入力を対象とした等価繰返し回数算定方法について

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定方法についてまとめたものである。本内容は電共研「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）にて検討されており、多方向入力において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を示すものである。





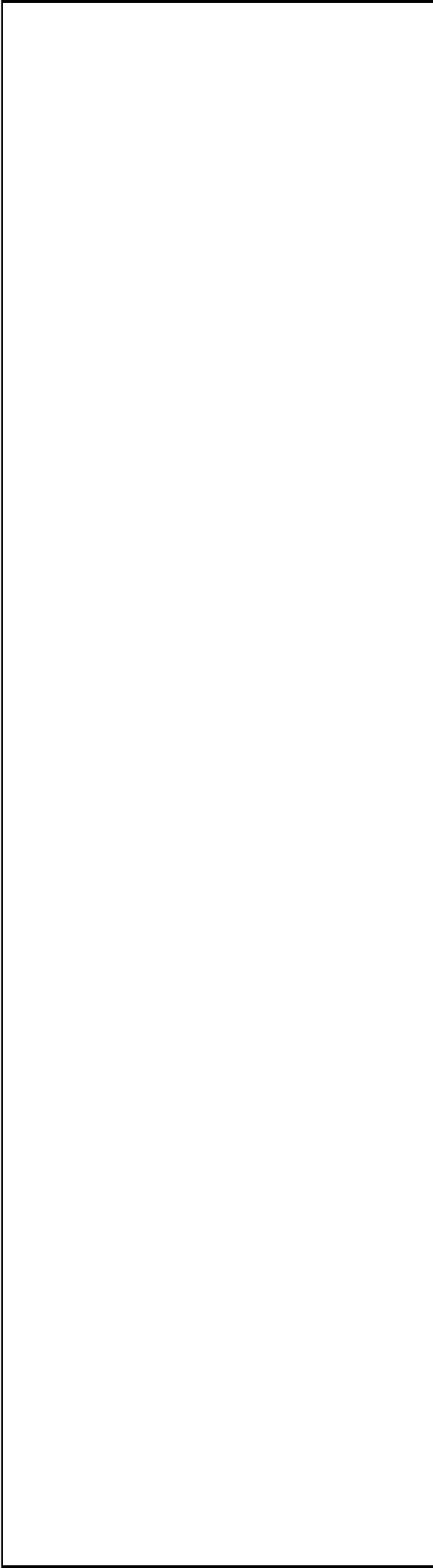


図1 水平方向入力波の時刻歴波形と応答スペクトル (減衰 2%)

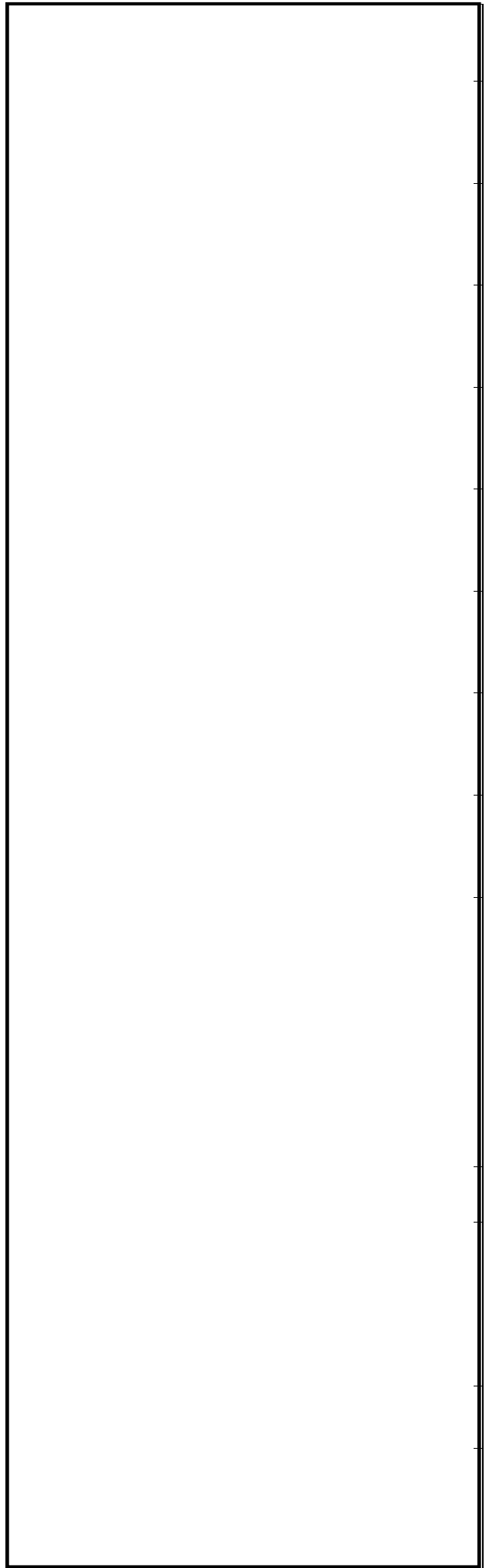


図2 上下方向入力波の時刻歴波形と応答スペクトル (減衰 2%)

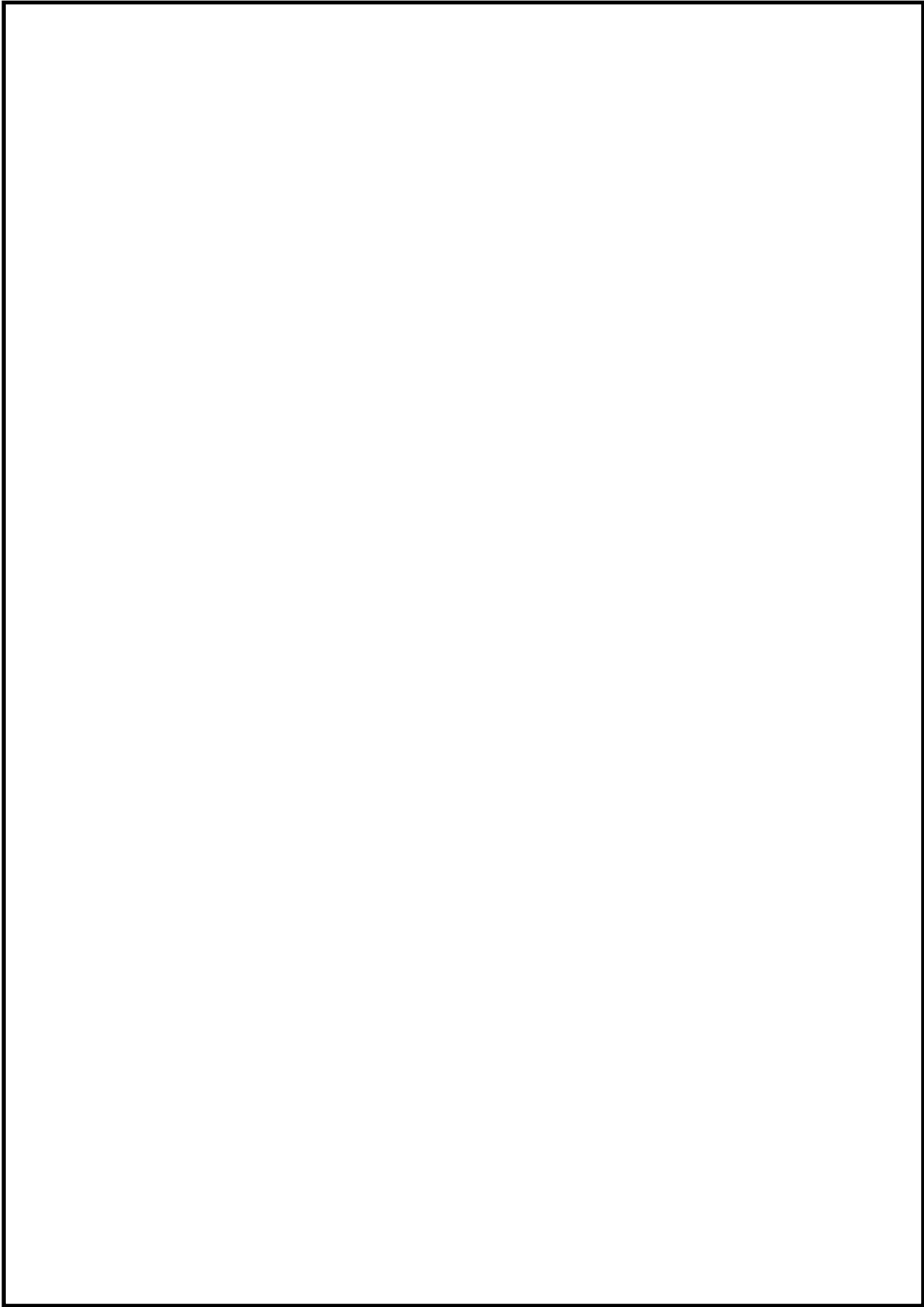


図3 配管モデルA

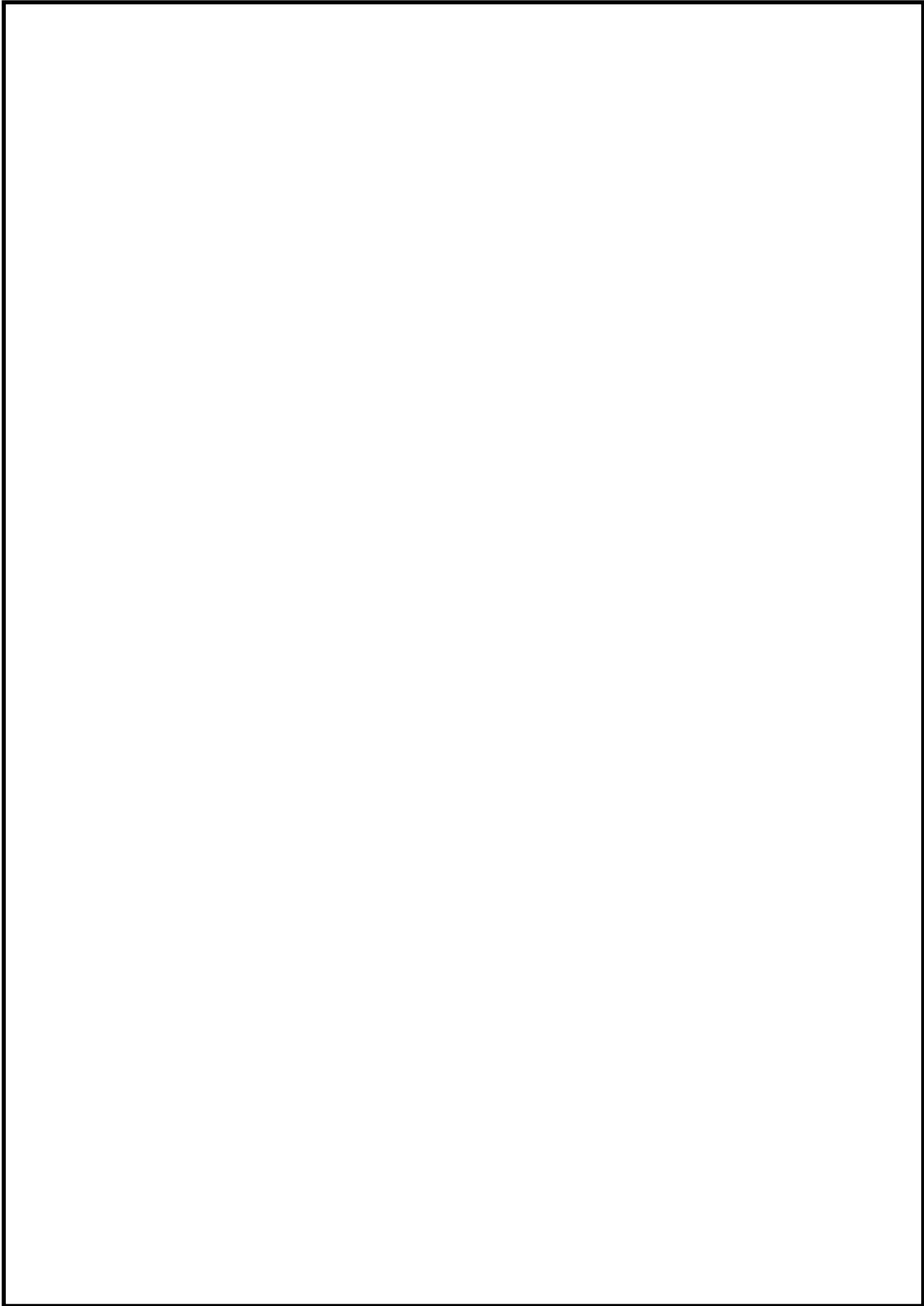


図 4 配管モデル B

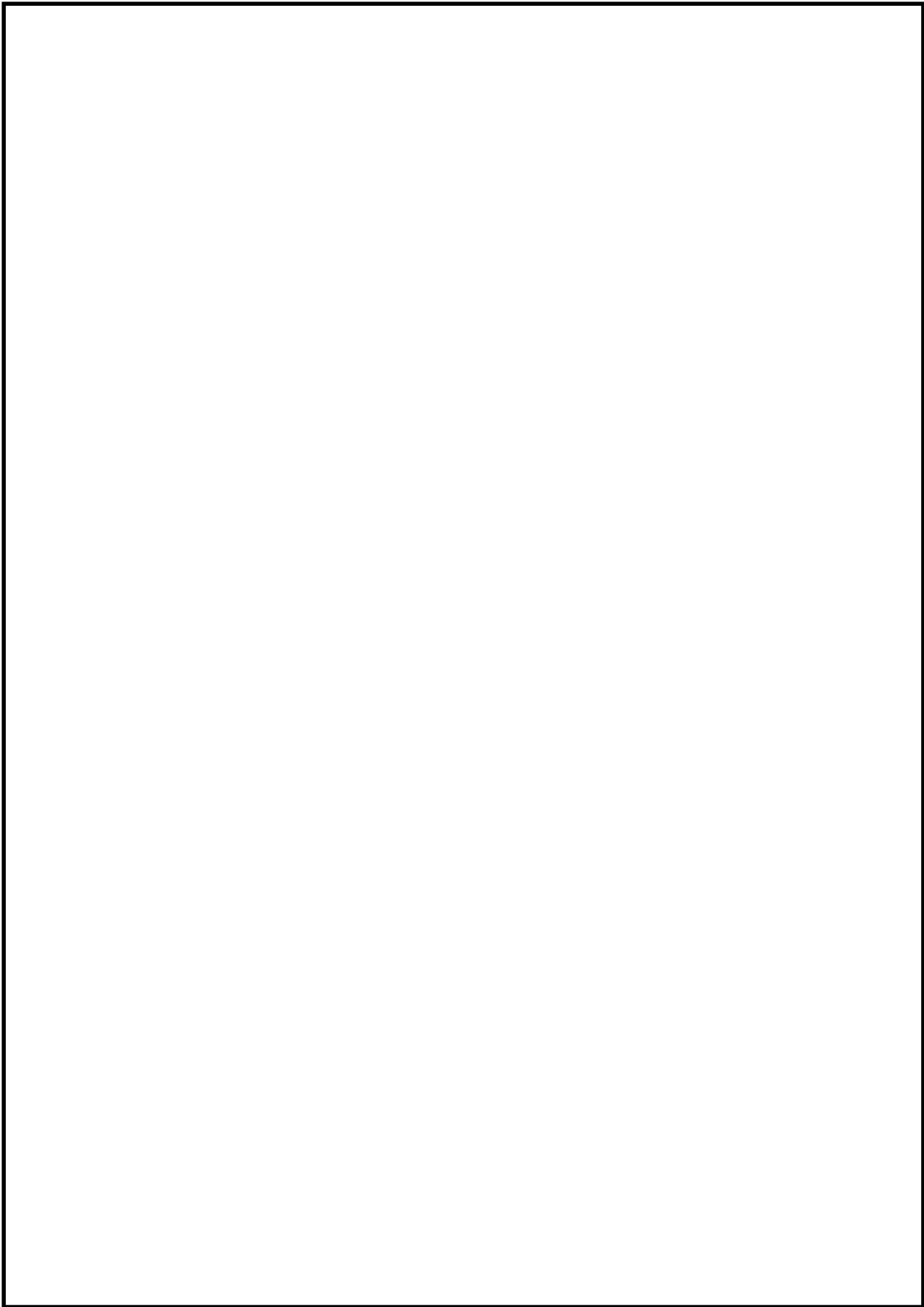


表 1 配管モデルAの固有値解析結果

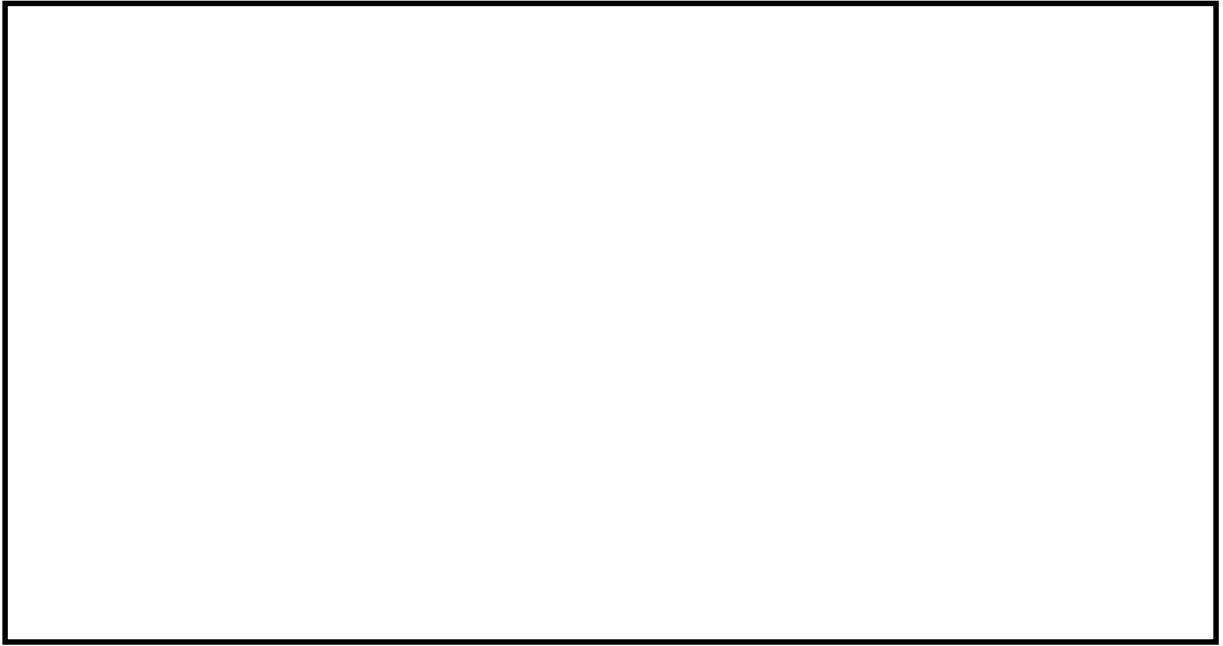
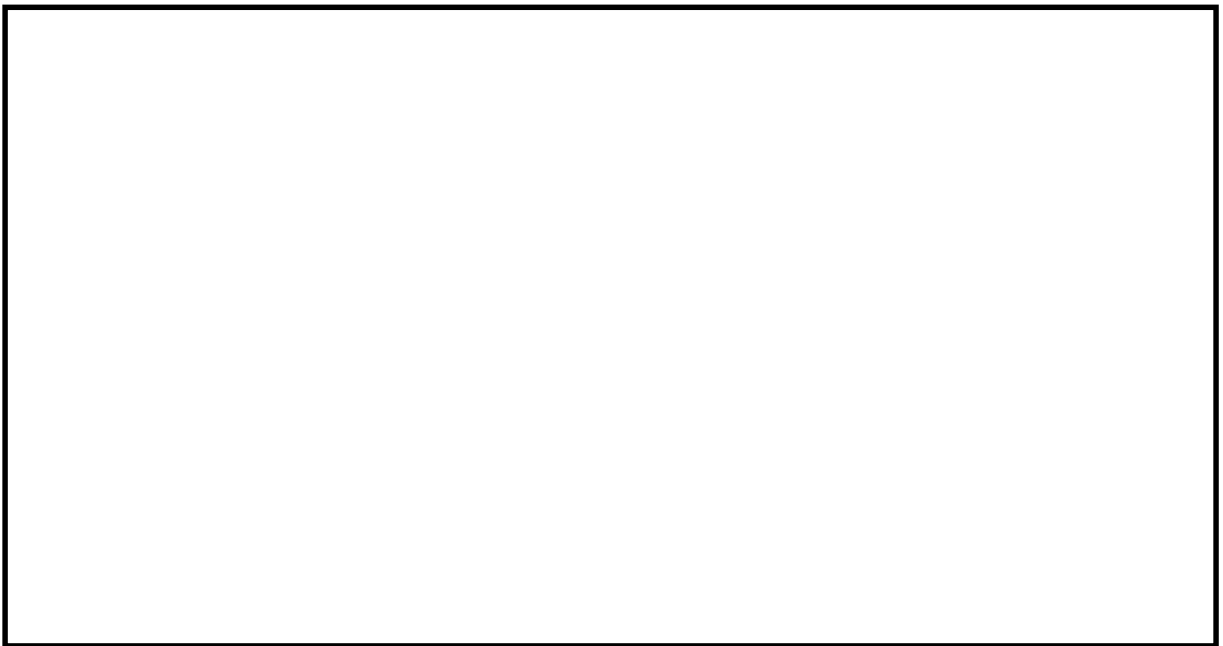
A large empty rectangular box with a black border, intended for the content of Table 1.

図 5 配管モデルAの固有モード

表 2 配管モデルBの固有値解析結果

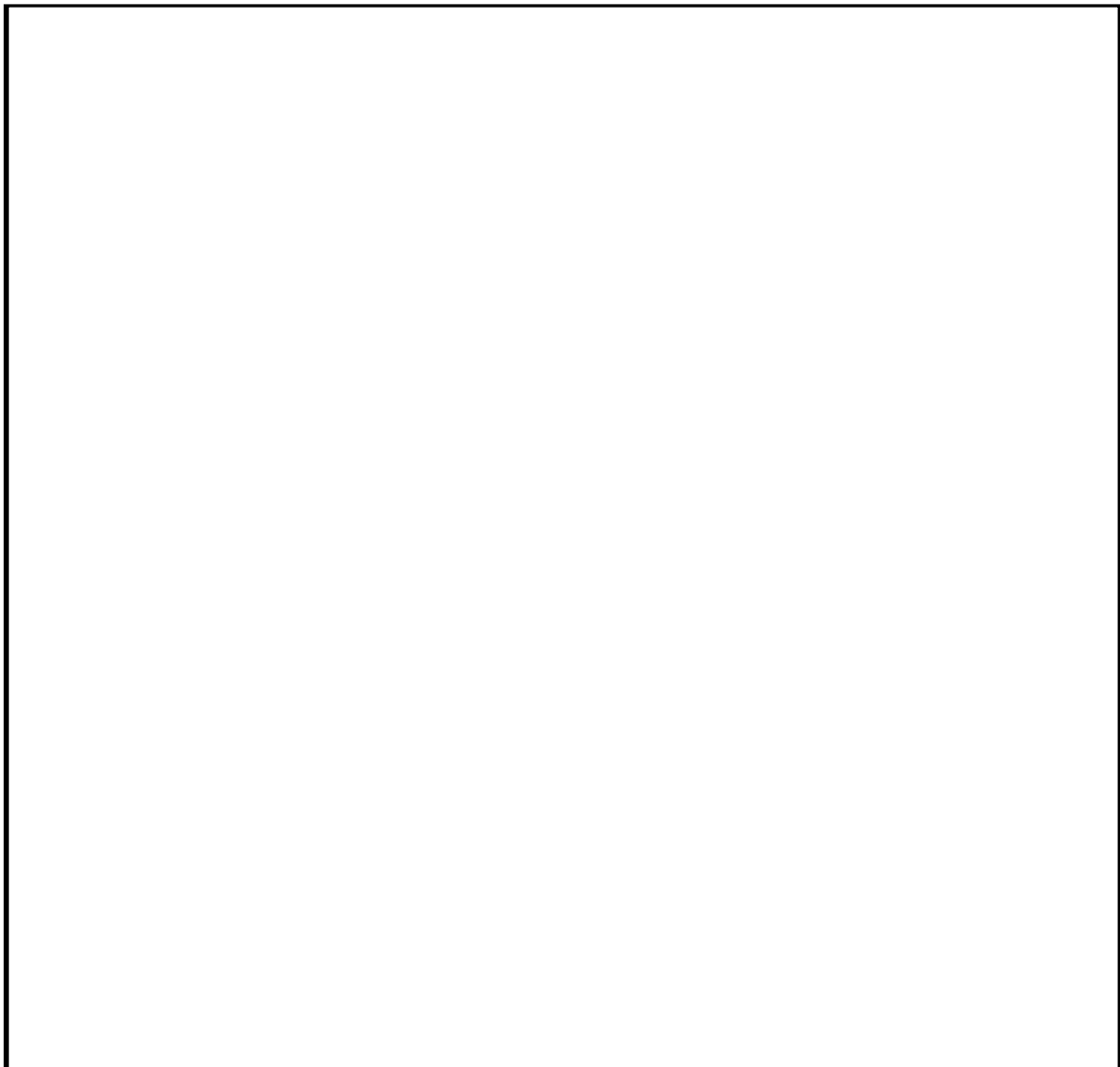
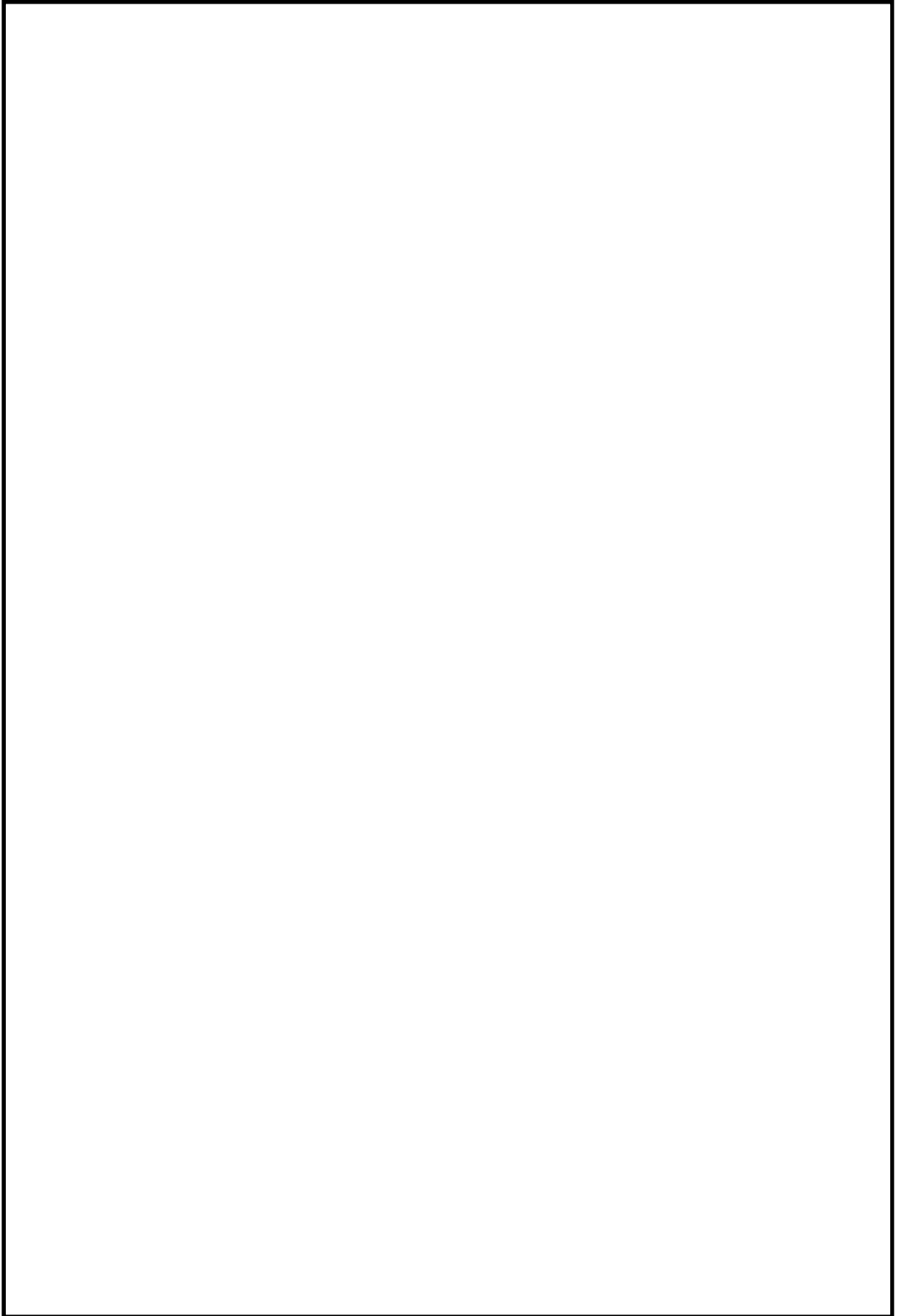
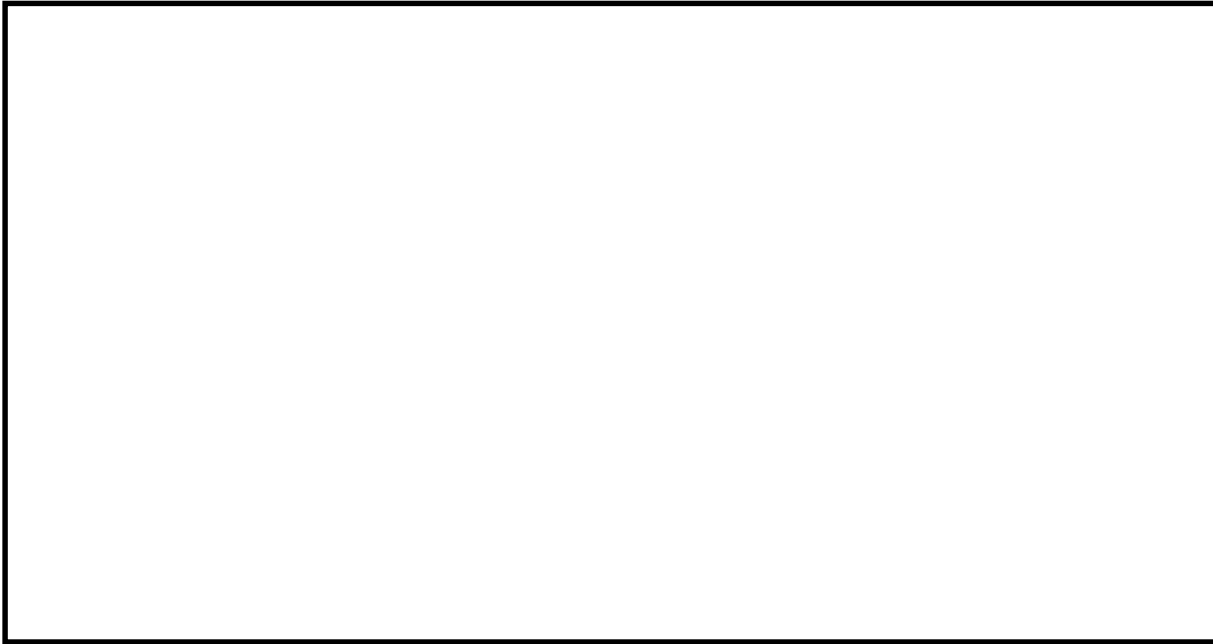
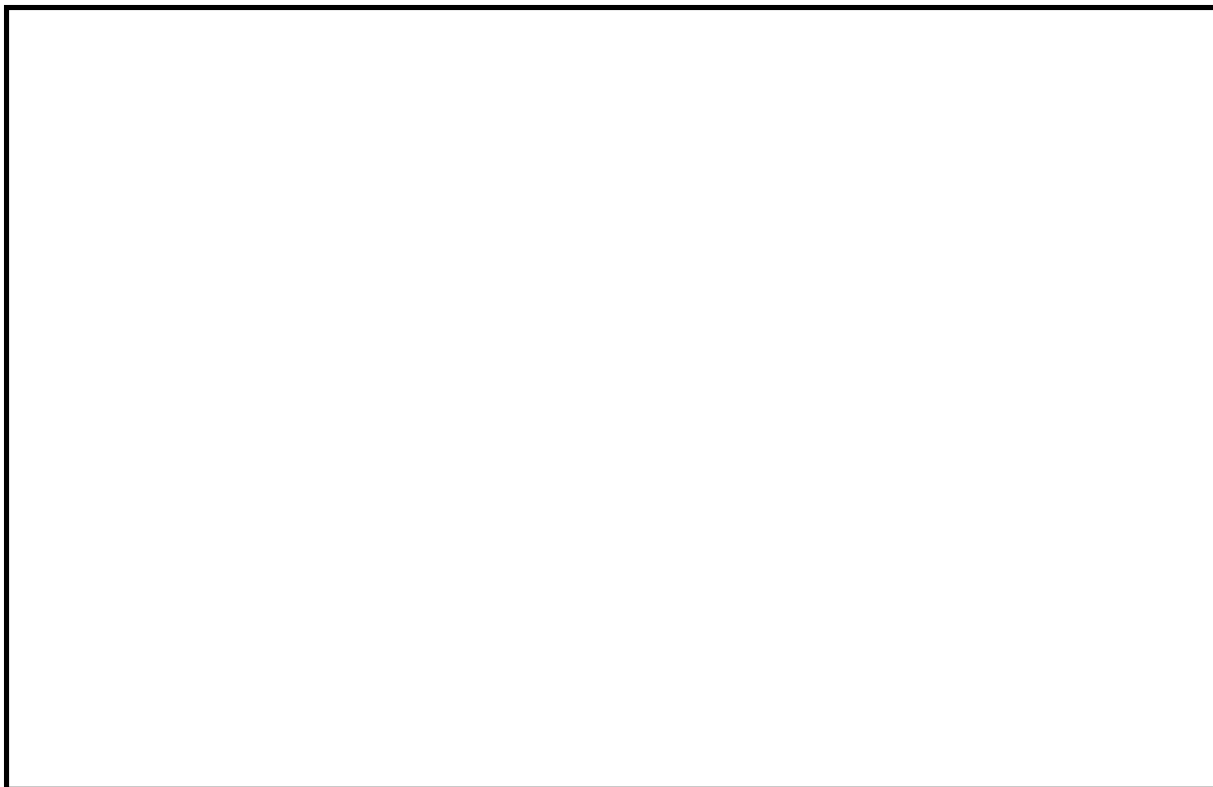
An empty rectangular box with a black border, intended for the eigenvalue analysis results of piping model B.

図 6 配管モデルBの固有モード





4. 3 東海第二発電所における多方向入力を対象とした等価繰返し回数算定方法について
4. 2項において2方向同時入力の結果について纏めているが、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言える。



以上のことから、東海第二発電所においても、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。

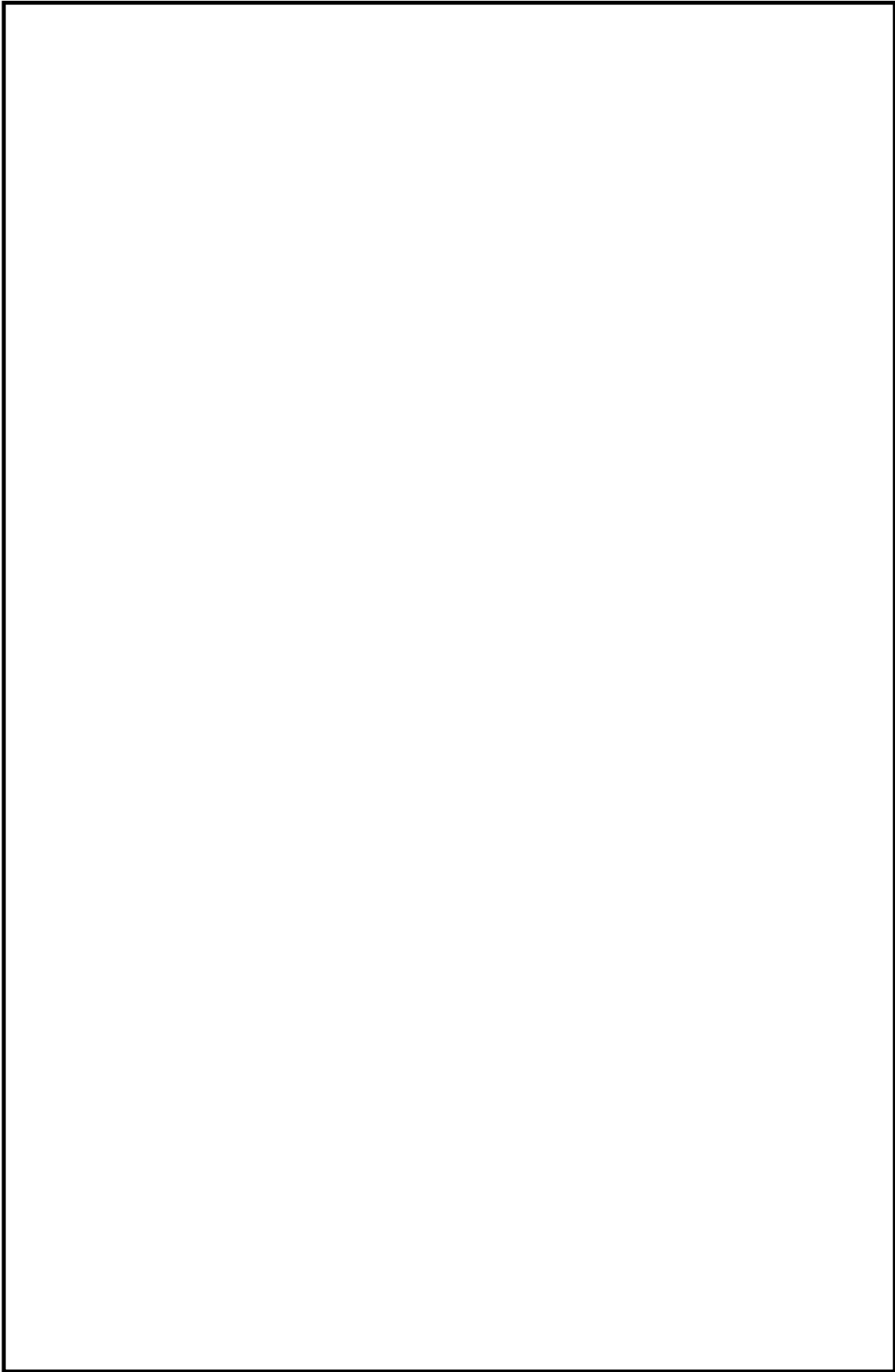


図7 2方向同時入力を行った等価繰返し回数が、1方向単独入力を行った等価繰返し回数より少なくなる場合(イメージ)

表3 配管モデルAにおける各方向と多方向の等価繰返し回数と比較

--

表4 配管モデルBにおける各方向と多方向の等価繰返し回数と比較

--

表 5 配管モデル A における最大変位応答の比率

--

表 6 配管モデル B における最大変位応答の比率

--