

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-027-01
提出年月日	2021年12月3日

設計用床応答スペクトルの作成方針に関する補足説明資料

2021年12月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

1. 設計用床応答スペクトルの作成方法及び適用方法について
2. 機器・配管系の耐震設計における剛柔判定を行う固有周期について

1. 設計用床応答スペクトルの作成方法
及び適用方法について

目 次

1. 概要	1
2. 設計用床応答スペクトルⅠの作成方法	2
2.1 基本方針	2
2.2 地震応答解析の実施	3
2.3 応答スペクトルの作成	3
2.4 機器の固有周期のずれ等の影響の考慮	4
2.5 料物性の不確かさの影響の考慮	4
2.6 誘発上下動の考慮	5
3. 設計用床応答スペクトルⅡの作成方法	6
4. 設計用床応答スペクトルの作成における高振動数領域の考慮	7
5. 設計用床応答スペクトルの適用方法	8

別紙1 積雪ケースの設計用床応答スペクトルに対する影響について

別紙2 各設備の耐震計算書に適用する設計用地震力

1. 概要

機器・配管系の評価においては、VI-2-1-7「設計用床応答スペクトルの作成方針」に示すとおり、設計用床応答スペクトルとして、設計用床応答スペクトルⅠ、設計用床応答スペクトルⅡ又はすべての固有周期における震度が設計用床応答スペクトルⅠ以上となる床応答スペクトルを用いる。

ここで、設計用床応答スペクトルⅠは、その作成過程において、応答スペクトルの拡張や複数の応答スペクトルの包絡等の処理を行うことで、材料物性の不確かさが機器・配管系の評価に及ぼす影響を予め織り込めるように配慮して作成する条件である。

また、設計用床応答スペクトルⅡは、標準物性の解析ケース（以下「基本ケース」という。）における応答スペクトルの震度に1.5以上の係数を乗じて作成するものであり、設計用床応答スペクトルⅠに対して余裕のある条件である。

本資料は、これらの設計用床応答スペクトルの作成方法及び適用方法について説明するものである。

ここで、設計用床応答スペクトルを作成する建物・構築物を表1に整理する。

表1 設計用床応答スペクトルを作成する建物・構築物

分類	施設名称*
建物・構築物	原子炉建物 炉心、原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉本体の基礎 制御室建物 タービン建物 廃棄物処理建物 緊急時対策所 ガスタービン発電機建物

注記*：第1回補正対象に関する施設を記載

2. 設計用床応答スペクトル I の作成方法

2.1 基本方針

設計用床応答スペクトル I の作成方法の全体像は図 1 に示すとおりである。以降、2.2 項から 2.5 項で各項目の詳細な説明を行う。ここで、本資料では、材料物性の不確かさ等を考慮したケースを「不確かさケース」として扱う。

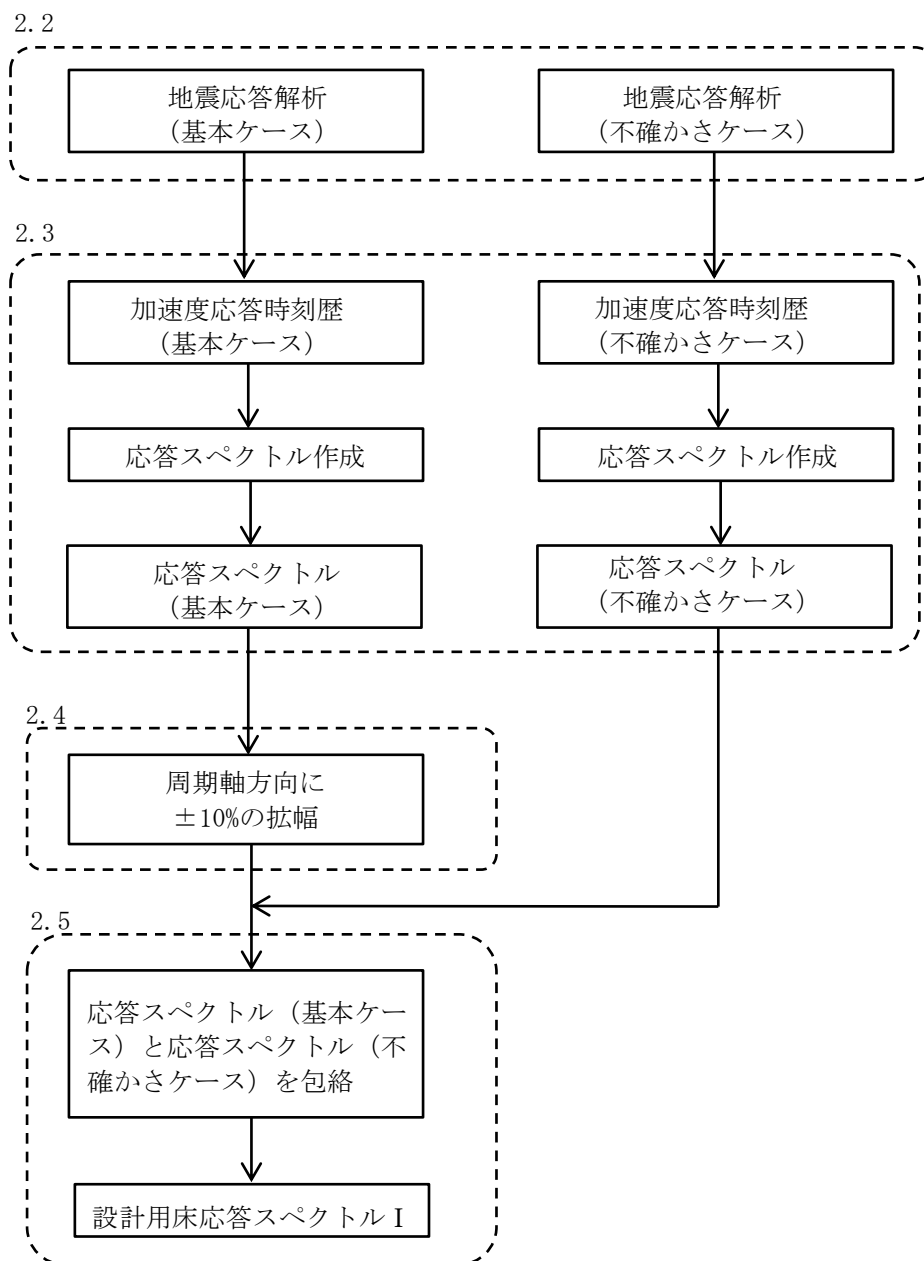


図 1 設計用床応答スペクトル I の作成方法

2.2 地震応答解析の実施

地震応答解析は、表 2 の解析ケースで実施する。なお、表 2 は、各施設の地震応答計算書に記載される解析ケースを整理したものである。

表 2 地震応答解析を実施する解析ケースの整理(建物・構築物)

施設*		基本ケース	不確かさケース		
名称	地震応答 計算書	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
		工認モデル	地盤物性 + σ	地盤物性 - σ	積雪
原子炉建物	VI-2-2-2	○	○	○	○
炉心、原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉本体の基礎	VI-2-2-1	○	○	○	—
制御室建物	VI-2-2-5	○	○	○	○
タービン建物	VI-2-2-7	○	○	○	○
廃棄物処理建物	VI-2-2-9	○	○	○	○
緊急時対策所	VI-2-2-11	○	○	○	○
ガスタービン発電機建物	VI-2-2-16	○	○	○	○

注記*：第 1 回補正対象に関する施設を記載

2.3 応答スペクトルの作成

2.2 項で示した地震応答解析(基本ケース及び不確かさケース)から得られる加速度応答時刻歴を入力波として、応答スペクトルを作成する。

なお、応答スペクトル作成においては、不確かさケースのうち、ケース 4 (積雪) を影響が小さいことから考慮しない (別紙 1 参照)。

以降、本資料では、基本ケースの地震応答解析に基づく応答スペクトルを「応答スペクトル(基本ケース)」、不確かさケースの地震応答解析に基づく応答スペクトルを「応答スペクトル(不確かさケース)」という。

2.4 機器の固有周期のずれ等の影響の考慮

2.3項で作成した応答スペクトル(基本ケース)に対して、J E A G 4 6 0 1-1987を参照し、機器の固有周期のずれや地盤物性、建物剛性、地盤ばね定数、減衰定数、模擬地震波の位相特性等といった因子の変動に伴う応答スペクトルの変動の影響をカバーすることを目的として、周期軸方向に±10%拡幅することとする(図2参照)。

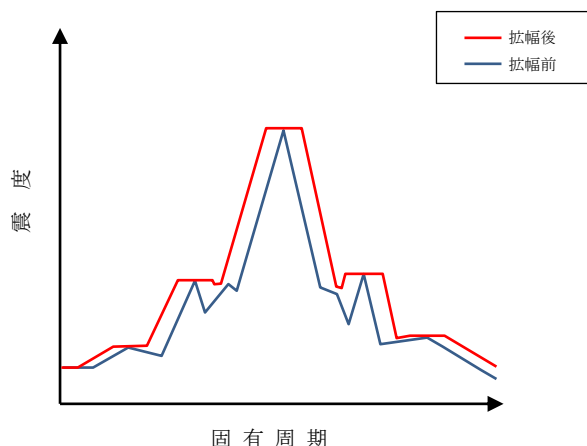


図2 機器の固有周期のずれ等の影響を考慮した応答スペクトル

2.5 材料物性の不確かさの影響の考慮

2.4項で作成したものと、2.3項で作成した応答スペクトル(不確かさケース)を包絡させることにより、材料物性の不確かさの影響について配慮を行い、これを設計用床応答スペクトルIとする(図3参照)。

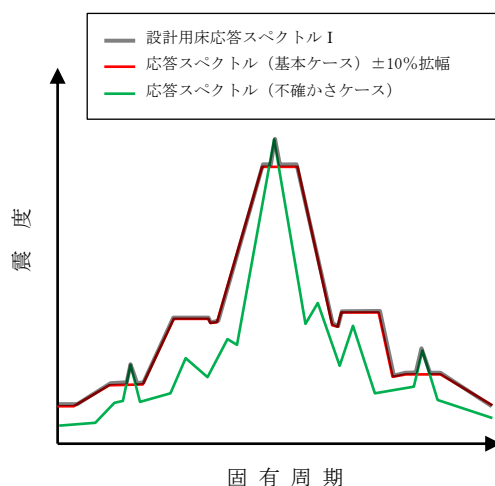


図3 材料物性の不確かさの影響を考慮した応答スペクトル

2.6 誘発上下動の考慮

VI-2-1-6「地震応答解析の基本方針」に基づき誘発上下動を考慮した地震応答解析を実施する場合、以下のとおり設計条件に誘発上下動を考慮する。

鉛直方向地震力に対する鉛直方向の応答時刻歴に、誘発上下動の応答時刻歴を時々刻々加算及び減算をする。

- ・ $V + V_{NS}$
- ・ $V - V_{NS}$
- ・ $V + V_{EW}$
- ・ $V - V_{EW}$

ここで、

- V : 鉛直方向地震力に対する鉛直方向の応答時刻歴
- V_{NS} : NS 方向地震力に対する誘発上下動の応答時刻歴
- V_{EW} : EW 方向地震力に対する誘発上下動の応答時刻歴

誘発上下動を考慮しない応答加速度時刻歴及び上記で得られた応答加速度時刻歴から最大応答加速度及び床応答スペクトルを算出し、包絡したものを設計に適用する。

基準地震動 S_s に対して、誘発上下動を考慮可能な地震応答解析モデルを採用している廃棄物処理建物については、すべての解析ケースで誘発上下動を考慮する。

なお、廃棄物処理建物以外については、すべての解析ケースにおいて接地率が 65% を上回るため、誘発上下動は考慮しない。

また、弾性設計用地震動 S_d による地震応答解析においては、すべての解析ケースにおいて接地率が 65% を上回るため、誘発上下動は考慮しない。

3. 設計用床応答スペクトルⅡの作成方法

設計用床応答スペクトルⅡは、設計用床応答スペクトルⅠに対して余裕のある条件により機器・配管系の耐震設計を行うことを目的として作成した床応答スペクトルであり、2.4項で作成した応答スペクトルの震度に1.5以上の係数を乗じて作成したものである（図4参照）。

なお、応答スペクトルに乗じる係数は設計用床応答スペクトルⅡが設計用床応答スペクトルⅠを包絡するように設定する。

ここで、設計用床応答スペクトルⅠは、「2.」に示した方法で材料物性の不確かさの影響を考慮しているため、設計用床応答スペクトルⅡもその影響を考慮したものとなる。

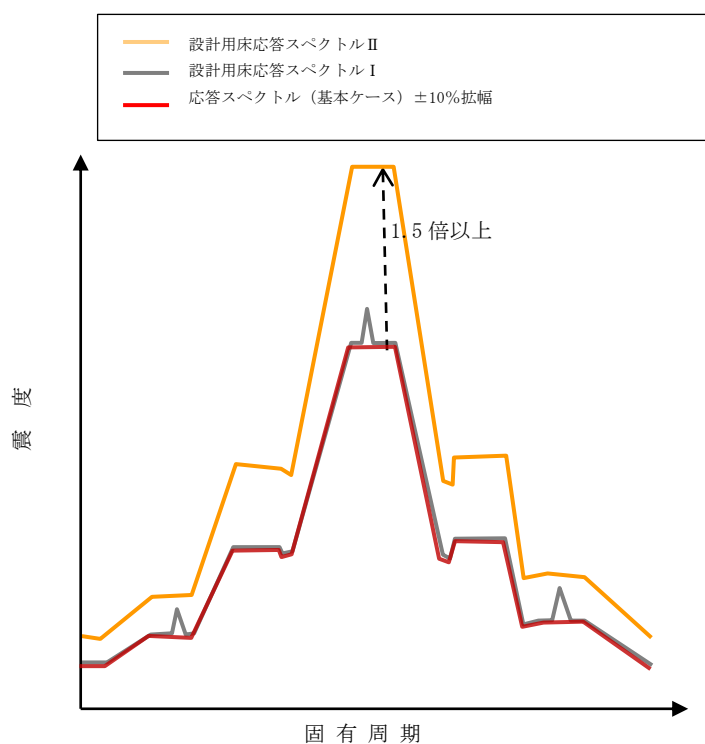


図4 設計用床応答スペクトルⅡの設定方法

4. 設計用床応答スペクトルの作成における高振動数領域の考慮

設計用床応答スペクトルは、J E A G 4 6 0 1-1987 に従い周期 0.05 秒以上 (20Hz 以下) の領域について 2. 及び 3. で示した方法にて作成する。

さらに、周期 0.05 秒未満 (20Hz 超) の領域については、応答増幅を考慮しない剛な領域として扱うが、床応答スペクトルの連続性に配慮して 0.033 秒 (30Hz) と 0.045 秒 (22.2Hz) の間の領域については直線補間する (図 5 参照)。

これは、J E A G 4 6 0 1-1987 の「その機器が剛構造と判断される場合 (例えば機器の 1 次固有振動数が 20Hz 以上、あるいは、設計用床応答スペクトルの卓越する領域より高い固有振動数を有する場合) には、その機器の据付位置における建物の応答加速度を基に定まる震度により地震力を算出する。」のとおり、20Hz 超の領域についてはスペクトルを定める必要はないが、工学的判断で一定の保守性を考慮したものである。

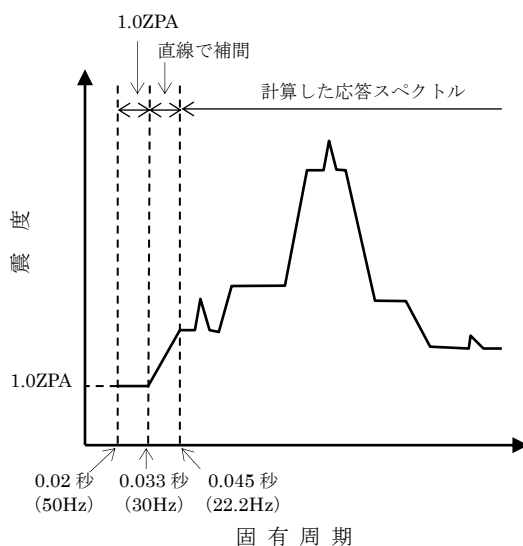


図 5 設計用床応答スペクトルの作成における高振動数領域考慮方法

5. 設計用床応答スペクトルの適用方法

機器・配管系の耐震評価においては、設計用床応答スペクトルⅠ，設計用床応答スペクトルⅡ又はすべての固有周期における震度が設計用床応答スペクトルⅠ以上となる床応答スペクトルを用いる。

機器・配管系の評価に用いる設計用床応答スペクトルの一例を図6に示す。

ここで、設計用床応答スペクトルⅠ，設計用床応答スペクトルⅡは、それぞれ「2.」，「3.」に示した方法で、材料物性の不確かさの影響を予め織り込んでいるため、機器・配管系の評価において、いずれの条件を用いた場合でも、その結果は、材料物性の不確かさの影響を考慮したものとなる。また、各設備の耐震計算書に適用する設計用床応答スペクトル、設計用震度、地震荷重(せん断力、モーメント、配管反力等)を別紙2に示す。

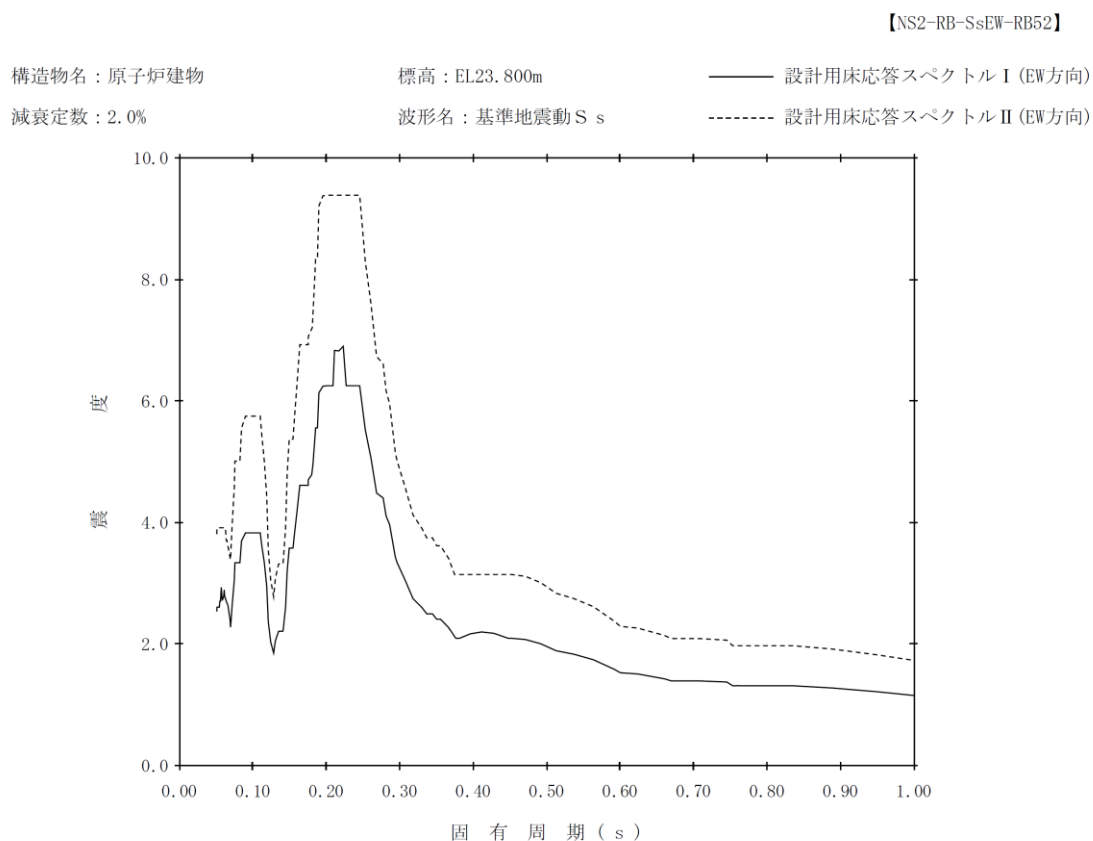


図6 設計用床応答スペクトルの例

積雪ケースの設計用床応答スペクトルに対する影響について

1. はじめに

本文表 2-1 に示すとおり，原子炉建物等の地震応答解析においては，不確かさケースの 1 つとして積雪荷重との組合せを考慮した地震応答解析（以下，「積雪ケース」という。）を実施しているが，VI-2-2-1「炉心，原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉本体の基礎の地震応答計算書」における大型機器連成解析モデルによる地震応答解析及び原子炉建物等の機器・配管系の設計用床応答スペクトル作成においては積雪ケースを考慮していない。

本資料は，機器・配管系の設計用床応答スペクトルに対する積雪ケースの影響について確認し，積雪ケースを考慮しないことの妥当性を説明するものである。

2. 確認方針

基準地震動 S_s のうち機器・配管系の耐震性評価において支配的な S_s-D について，積雪ケースの地震応答解析結果から原子炉建物代表フロア（EL42.8m, 15.3m, 1.3m）における床応答スペクトル及び最大応答加速度を作成し， S_s-D の基本ケースにおける床応答スペクトル及び最大応答加速度との比較を実施する。

3. 確認結果

S_s-D の基本ケースと積雪ケースの床応答スペクトルの比較を図 1~3，最大応答加速度の比較を表 1 に示す。比較の結果，積雪ケースと基本ケースの床応答スペクトル及び最大応答加速度は同等であり，積雪荷重との組合せの影響は軽微である。

なお，設計用床応答スペクトル作成においては基本ケースの床応答スペクトルを周期方向に $\pm 10\%$ 拡幅して使用することから，積雪ケースの床応答スペクトルは設計用床応答スペクトルにほぼ包絡される。

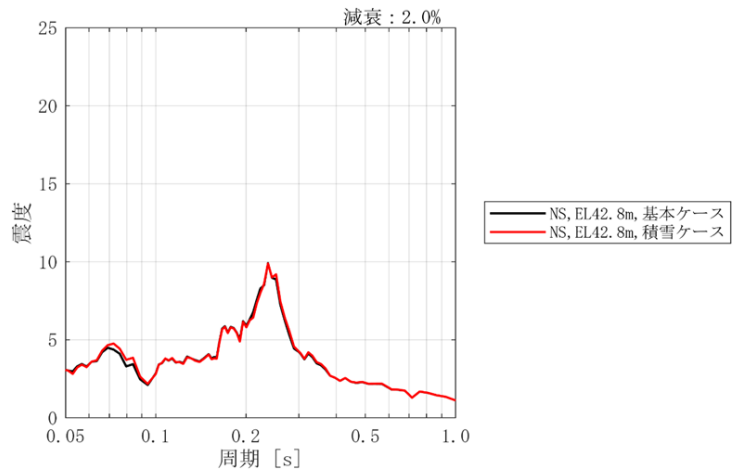


図 1-1 基本ケースと積雪ケースの床応答スペクトル【S s -D, EL42.8m, NS 方向】

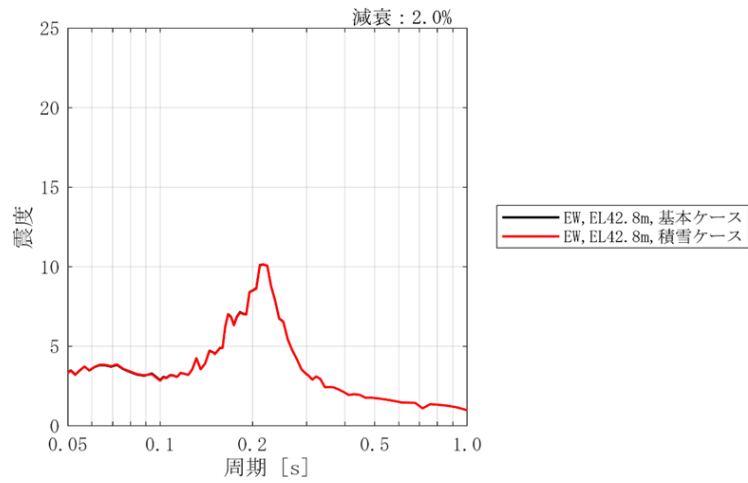


図 1-2 基本ケースと積雪ケースの床応答スペクトル【S s -D, EL42.8m, EW 方向】

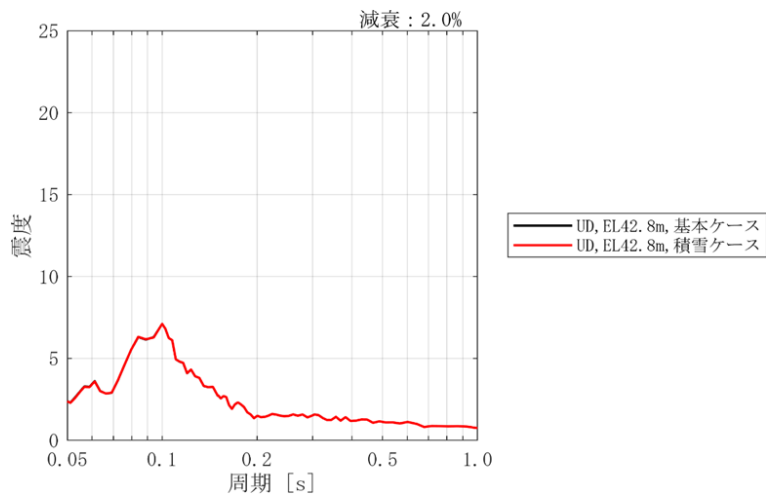


図 1-3 基本ケースと積雪ケースの床応答スペクトル【S s -D, EL42.8m, 鉛直方向】

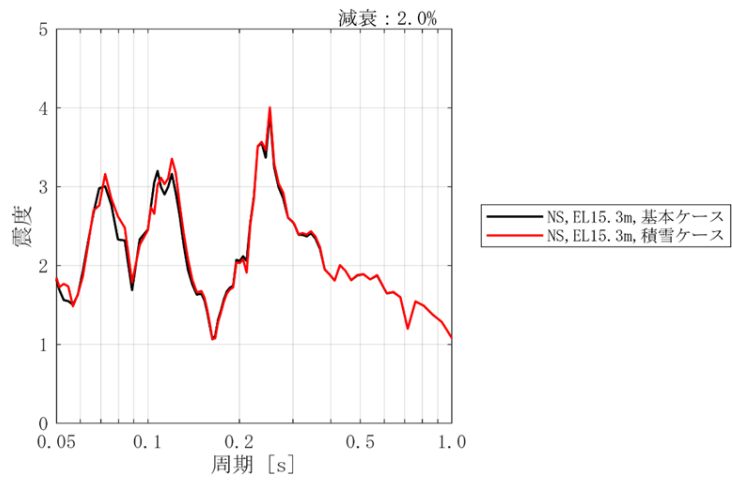


図 2-1 基本ケースと積雪ケースの床応答スペクトル【S s -D, EL15.3m, NS 方向】

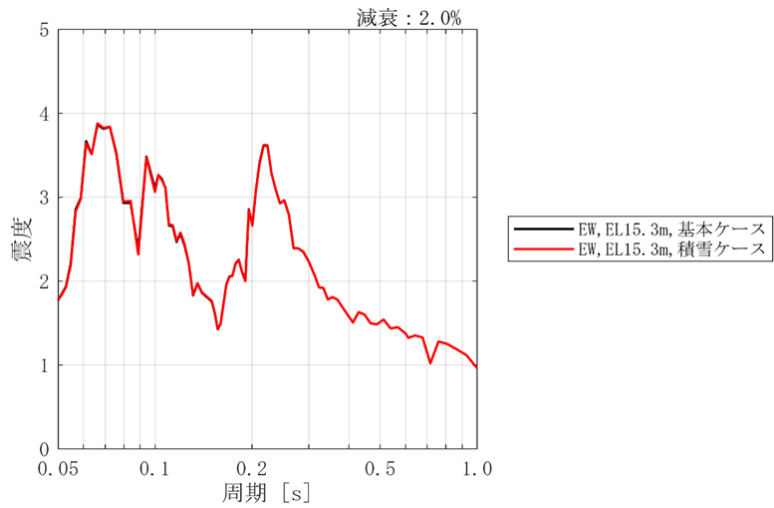


図 2-2 基本ケースと積雪ケースの床応答スペクトル【S s -D, EL15.3m, EW 方向】

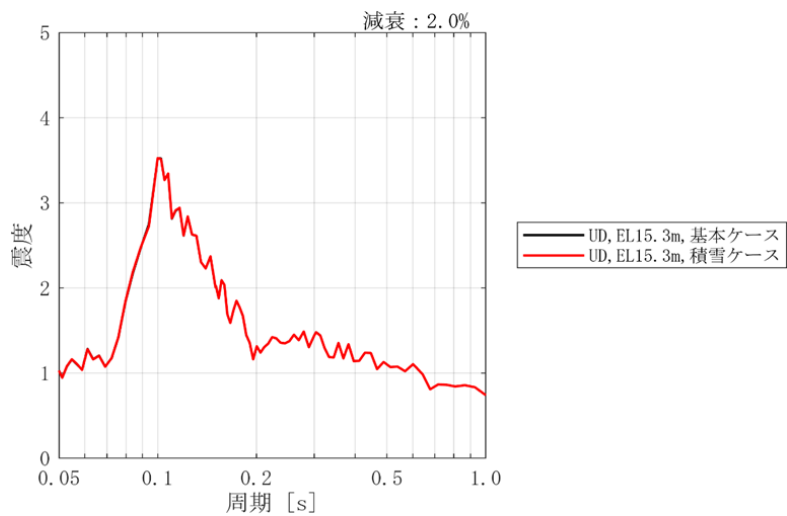


図 2-3 基本ケースと積雪ケースの床応答スペクトル【S s -D, EL15.3m, 鉛直方向】

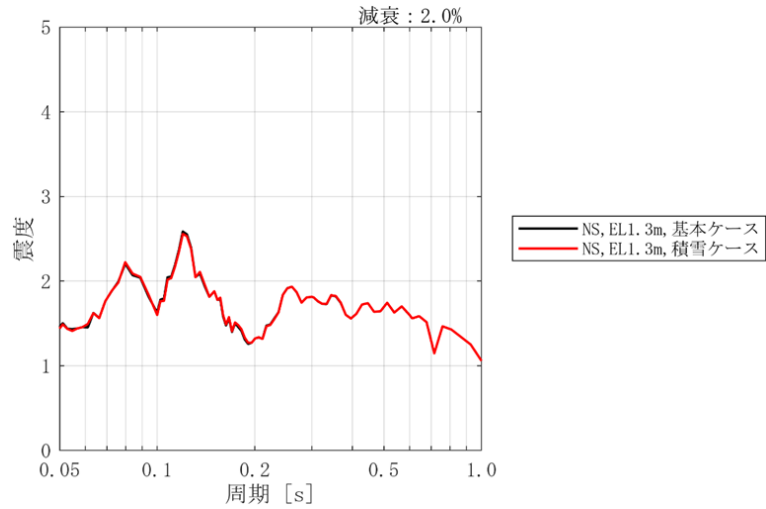


図 3-1 基本ケースと積雪ケースの床応答スペクトル【S s -D, EL1.3m, NS 方向】

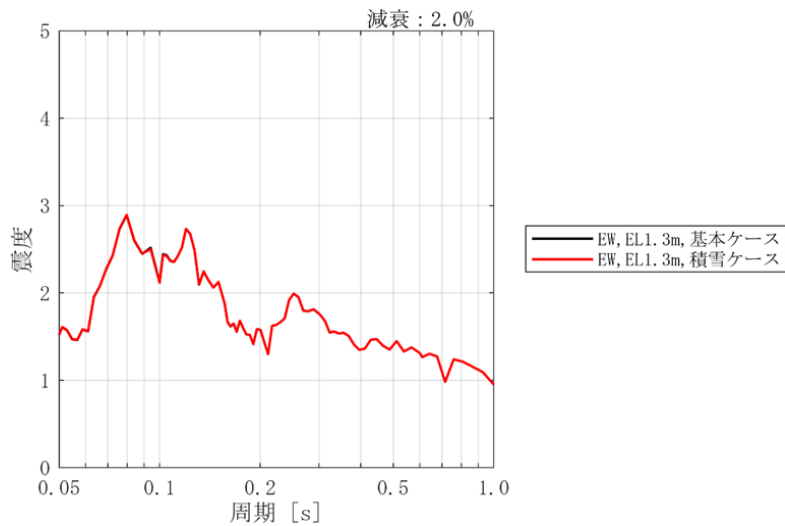


図 3-2 基本ケースと積雪ケースの床応答スペクトル【S s -D, EL1.3m, EW 方向】

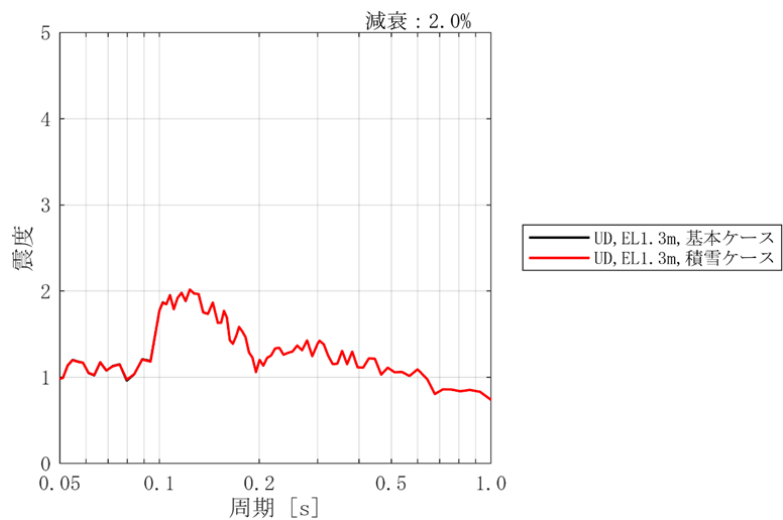


図 3-3 基本ケースと積雪ケースの床応答スペクトル【S s -D, EL1.3m, 鉛直方向】

表1 基本ケースと積雪ケースの最大応答加速度 ($\times 9.80665\text{m/s}^2$) (S s - D)

EL(m)	方向	基本ケース	積雪ケース
42.8	NS	1.28	1.27
	EW	1.41	1.41
	鉛直	1.19	1.18
15.3	NS	0.88	0.89
	EW	0.86	0.87
	鉛直	0.71	0.71
1.3	NS	0.71	0.71
	EW	0.78	0.79
	鉛直	0.58	0.58

4. まとめ

機器・配管系の設計用床応答スペクトルに対する積雪ケースの影響は小さく、大型機器連成解析モデルによる地震応答解析及び設計用床応答スペクトル作成において積雪ケースを考慮しないことは妥当である。

各設備の耐震計算書に適用する設計用地震力

各設備の耐震計算書に適用する設計用床応答スペクトル, 設計用震度, 地震荷重(せん断力, モーメント, 配管反力等)(以下本資料では総称して「設計用地震力」という。)を表 2 に整理する。

表 2 では, 設計用地震力を以下の 4 種類に区別する。

- ・設計用 I
- ・設計用 II
- ・設計用 I を上回る
- ・設計用 II を上回る

ここで, 「設計用 I」及び「設計用 II」は, VI-2-1-7「設計用床応答スペクトルの作成方針」, VI-2-2-1「炉心, 原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉本体の基礎の地震応答計算書」に示す設計用地震力である。また, 「設計用 I を上回る」「設計用 II を上回る」は, 評価作業の合理化や保守的な条件で評価を行うことを目的として, 下記の方法で個別に設定した設計用地震力であり, それぞれ設計用 I, 設計用 II による値を上回ることを確認している。

- ・過去の評価(建設時工認での評価, 耐震設計審査指針改定時の耐震安全性評価等)の際に用いた設計用最大応答加速度又は地震荷重を活用するもの
- ・配管反力の算出に先立ち工学的判断により定めた地震荷重を用いて評価を行うもの

表 2 においては「設計用 I」, 「設計用 II」, 「設計用 I を上回る」「設計用 II を上回る」を用いている場合に, それぞれ「I」, 「II」, 「I を上回る」「II を上回る」と表記し, 同一の耐震計算書で複数の耐震条件を使用する場合は「分類等」欄に表 1 の分類を記載している。

表1 複数の耐震条件を使用する場合の分類

分類		内容	設備例
a	機器別	同一の耐震計算書に複数の機器が存在し、機器毎（管についてはモデル毎）に条件を使い分けているもの	・ドレン移送系配管
b	S _s / S _d 別	S _s を用いた評価とS _d を用いた評価で条件を使い分けているもの	
c	弁動的	構造強度評価と弁動的機能維持評価で条件を使い分けているもの	
d	機器動的	構造強度評価と動的・電氣的機能維持評価で条件を使い分けているもの	

表2 各設備の耐震計算書に適用する設計用地震力 (1/1)

工認図書番号	図書名称	設備を設置する施設名称	設計用床応答スペクトル又は設計用震度		地震荷重 (せん断力、モーメント、配管反力等)	分類等
			構造強度評価	動的・電氣的機能維持評価		
VI-2	耐震性に関する説明書	—	—	—	—	—
VI-2-1	耐震設計の基本方針	—	—	—	—	—
VI-2-2	耐震設計上重要な設備を設置する施設の耐震性に関する説明書	—	—	—	—	—
VI-2-3	原子炉本体の耐震性に関する説明書	—	—	—	—	—
VI-2-3-2	炉心の耐震性についての計算書	—	—	—	—	—
VI-2-3-2-2	炉心支持構造物の耐震性についての計算書	—	—	—	—	—
VI-2-3-2-2-1	炉心支持構造物の耐震性についての計算書	—	—	—	—	—
VI-2-3-2-2-2	炉心シールドの耐震性についての計算書	大型機器系	—	—	Iを上回る	—
VI-2-3-2-2-4	上部格納箱の耐震性についての計算書	大型機器系	—	—	Iを上回る	—
VI-2-3-2-2-5	炉心支持板の耐震性についての計算書	大型機器系	—	—	Iを上回る	—
VI-2-3-2-2-6	燃料支持金具の耐震性についての計算書	大型機器系	—	—	Iを上回る	—
VI-2-3-2-2-7	炉筒案内管の耐震性についての計算書	大型機器系	—	—	Iを上回る	—
VI-2-3-3	原子炉圧力容器の耐震性についての計算書	—	—	—	—	—
VI-2-3-3-1	原子炉圧力容器本体の耐震性についての計算書	—	—	—	—	—
VI-2-3-3-2	原子炉圧力容器付属構造物の耐震性についての計算書	—	—	—	—	—
VI-2-3-3-2-1	原子炉圧力容器スタビライザの耐震性についての計算書	大型機器系	—	—	Iを上回る	—
VI-2-3-3-2-2	原子炉格納箱スタビライザの耐震性についての計算書	大型機器系	—	—	Iを上回る	—
VI-2-3-3-3	原子炉圧力容器内部構造物の耐震性についての計算書	—	—	—	—	—
VI-2-3-3-3-1	原子炉圧力容器内部構造物の応力解析の方針	—	—	—	—	—
VI-2-3-3-3-2	蒸気発生器の耐震性についての計算書	大型機器系	—	—	Iを上回る	—
VI-2-3-3-3-3	気水分離器及びスタンドパイプの耐震性についての計算書	大型機器系	—	—	Iを上回る	—
VI-2-3-3-3-4	シュワフトヘッドの耐震性についての計算書	大型機器系	—	—	Iを上回る	—
VI-2-3-3-3-5	ジェットポンプの耐震性についての計算書	大型機器系	—	—	Iを上回る	—
VI-2-3-3-3-6	給水パルージャの耐震性についての計算書	大型機器系	—	—	Iを上回る	—
VI-2-3-3-3-7	高圧及び低圧炉心スプレイスバーの耐震性についての計算書	大型機器系	—	—	Iを上回る	—
VI-2-3-3-3-8	低圧注水系統管 (原子炉圧力容器内部) の耐震性についての計算書	大型機器系	—	—	Iを上回る	—
VI-2-3-3-3-9	高圧及び低圧炉心スプレイス配管 (原子炉圧力容器内部) の耐震性についての計算書	大型機器系	—	—	Iを上回る	—
VI-2-3-3-3-10	蒸気発生器・高圧注水系統管 (原子炉圧力容器内部) の耐震性についての計算書	大型機器系	—	—	Iを上回る	—
VI-2-7	放射線遮蔽物の耐震性に関する説明書	—	—	—	—	—
VI-2-7-2	液体廃棄物処理系の耐震性についての計算書	—	—	—	—	—
VI-2-7-2-1	ドレン移送系の耐震性についての計算書	—	—	—	—	—
VI-2-7-2-1-1	管の耐震性についての計算書	大型機器系 原子炉建物	I, II	—	—	a (機器別)
VI-2-8-3	換気設備の耐震性についての計算書	—	—	—	—	—
VI-2-8-3-2	中央制御室空気供給系の耐震性についての計算書	—	—	—	—	—
VI-2-8-3-2-1	管の耐震性についての計算書	制御室建物 廃棄物処理建物	II	—	—	—
VI-2-8-3-3	緊急時対策用換気空調系の耐震性についての計算書	—	—	—	—	—
VI-2-8-3-3-1	管の耐震性についての計算書	—	—	—	—	—
VI-2-9	原子炉格納箱の耐震性に関する説明書	—	—	—	—	—
VI-2-9-2-1	ドライウェルの耐震性についての計算書	大型機器系	—	—	Iを上回る	—

2. 機器・配管系の耐震設計における
剛柔判定を行う固有周期について

目 次

1. はじめに	1
2. 剛柔判定を行う固有周期の考え方	1
3. 剛柔判定を行う固有周期と地震力の算定法	1
4. 実機に対する適用性	2
5. 剛柔判定に係る閾値の検討	8

1. はじめに

島根原子力発電所第2号機における機器・配管系の耐震設計においては、当該設備が柔構造と判断される場合には、動的解析により地震力を算定し、剛構造と判断される場合には、機器・配管系の設置床面の最大応答加速度の1.2倍の加速度を震度(1.2ZPA)とした静的解析により地震力を算定するが、この剛柔判定を行う閾値として固有周期0.05秒(20Hz)を適用している。

本検討においては、0.05秒以下の領域も考慮した地震応答解析を行い、剛柔判定を行う閾値として固有周期0.05秒を適用していることの妥当性を検討する。

なお、本資料が関連する工認図書は以下のとおり。

- ・VI-2 「耐震性に関する説明書」

2. 剛柔判定を行う固有周期の考え方

剛柔判定の固有周期と動的解析の適用範囲の概要を図1に示す。剛柔判定の固有周期は、地震動による応答増幅が大きくなる建物・構築物の卓越周期から十分離隔した位置に設定し、動的解析の適用要否の決定に用いている。なお、この考え方は、J E A G 4 6 0 1-1970に示されている。

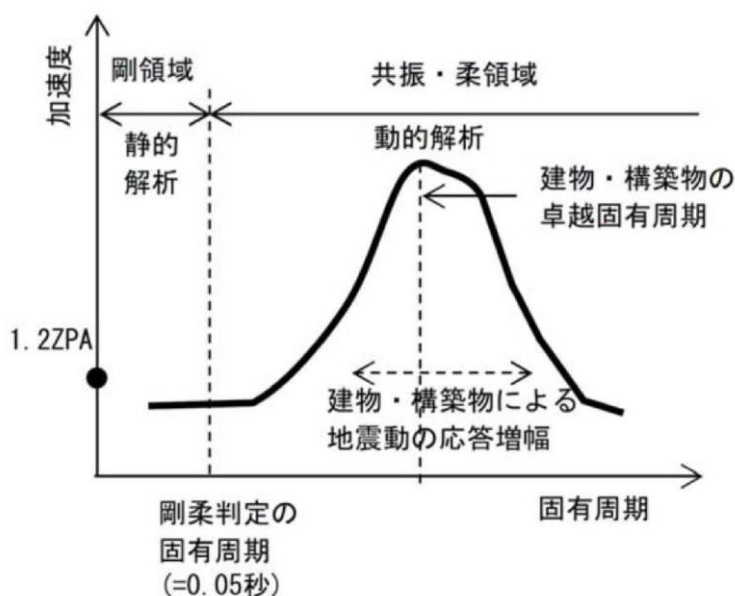


図1 床応答スペクトルにおける剛柔判定の固有周期と動的解析の適用範囲の概要

3. 剛柔判定を行う固有周期と地震力の算定法

J E A G 4 6 0 1-1987の抜粋を図2に示す。機器・配管系の剛柔判定については、J E A G 4 6 0 1-1987に例示されているとおり、機器・配管系の1次固有周期が0.05秒以下の場合には剛構造、0.05秒を超える場合は柔構造とする。この方針は、既工認と同じである。

機器・配管系の耐震設計では、剛柔判定の固有周期0.05秒を超える場合は、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d に対して動的解析により水平及び鉛直方向の動的地震力を定め

る。固定周期が 0.05 秒以下の場合は、機器・配管系の設置床面の最大応答加速度の 1.2 倍の加速度を震度（1.2ZPA）とした静的解析により地震力を算出する。

6.4.3 動的地震力の概要

機器・配管系の耐震設計に用いる動的地震力は、重要性の高い As クラス機器の地震力を基本に定めるものである。本項では、その概要を示し、地震力算定の詳細は「6.5 地震応答解析」に述べることとする。

(1) As 及び A クラス機器

A クラス機器に関しては、基準地震動 S₁ に対し動的解析（地盤—建屋—機器連成の解析あるいは据付位置における設計用床応答スペクトルを用いた解析等）により算定される水平地震力を適用する。A クラス機器の中で特に重要な As クラス機器に関しては、さらに基準地震動 S₂ に対し動的解析によって得られる水平地震力をも適用する。ただし、その機器が剛構造と判断される場合（例えば機器の 1 次固有振動数が 20Hz 以上、あるいは、設計用床応答スペクトルの卓越する領域より高い固有振動数を有する場合）には、その機器の据付位置における建物の応答加速度を基に定まる震度により地震力を算定する。なお、As、A クラスの機器については鉛直地震力をも考慮し、基準地震動の最大加速度を 1/2 とした鉛直震度（高さ方向については一定とする）より求まる鉛直地震力を水平地震力と同時に不利な方向で組合せる。

図 2 J E A G 4 6 0 1-1987（抜粋）

4. 実機に対する適用性

J E A G 4 6 0 1-1987 の記載は、水平方向の動的解析への適用として剛柔判定の固有周期 0.05 秒の考え方を示したものである。新規基準においては、鉛直方向についても水平方向と同様に動的な扱いとするため、鉛直方向も含め剛柔判定の固有周期 0.05 秒が地震力算定に適用可能であることを検討した。本検討に際して参照した J E A G 4 6 0 1-1970 の抜粋を図 3 に示す。J E A G 4 6 0 1-1970 には建物・構築物の卓越固有周期の 1/2 を剛柔判定の固有周期とするとの考え方が示されており、原子力発電所の建物・構築物の卓越周期は一般に、0.1～0.5 秒（2～10Hz）であることを考慮して、0.05 秒を剛柔判定の固有周期とすれば十分であると記載されている。

島根原子力発電所第 2 号機の原子炉建物地震応答解析モデルに基づく、水平方向及び鉛直方向における固有周期を表 1 及び表 2 並びに図 4～図 6 に示す。建物の卓越固有周期は水平及び鉛直方向とも概ね 0.1 秒以上であり、剛柔判定の固有周期 0.05 秒は、原子炉建物の卓越固有周期に対して十分な離隔（卓越固有周期の 1/2 程度）をもって設定されている。

また加速度応答スペクトルを図 7 に、変位応答スペクトルを図 8 に示す。加速度応答スペクトルでは 0.05 秒未満で一定の加速度値を有するが、変位応答スペクトルにおいては固有周期 0.05 秒で概ね収斂している。

上記の検討結果より、既工認と同じ剛柔判定の固有周期 0.05 秒は、建物の卓越固有周期に対して十分な離隔をもっており、島根原子力発電所第 2 号機の水平及び鉛直方向の地震力算定に適用可能であることを確認した。

原子力発電所の場合について一般的にみると、地盤の卓越振動数、構築物の固有振動数をあわせ考えて、2～10 Hz が取付け点の卓越振動数域すなわち床応答曲線が持ち上る領域と考えられる。したがって動特性がまったく不明な場合には一応これより共振領域としては1～20 Hz を考えれば一応十分であろう。

そこで固有振動数の評価に当って重要なことは、対象となっている機械系が固有振動数解析を必要とする範囲にあるか否かを判定することである。明らかに20 Hz よりはるかに高い固有振動数を有すると推定される対象につき、多くの計算を行なう必要はない。その推定は在来の経験であってもよし、対象物あるいはそれと類似な機器についての試験の結果であってもよい。この試験もたとえば簡単に木槌でたたいてみるといったことであってもよいのである。ときには、これによって支持金具の不完全さなどを見出すことができる。

図3 J E A G 4 6 0 1-1970 (抜粋)

表1 原子炉建物地震応答解析モデルの固有値解析結果 (水平方向)

次数	NS 方向		EW 方向	
	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)
1次	0.220	4.55	0.203	4.94
2次	0.099	10.10	0.093	10.72

表2 原子炉建物地震応答解析モデルの固有値解析結果 (鉛直方向)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)
2次*	0.105	9.48

注記*：屋根トラス部が卓越するモード除く

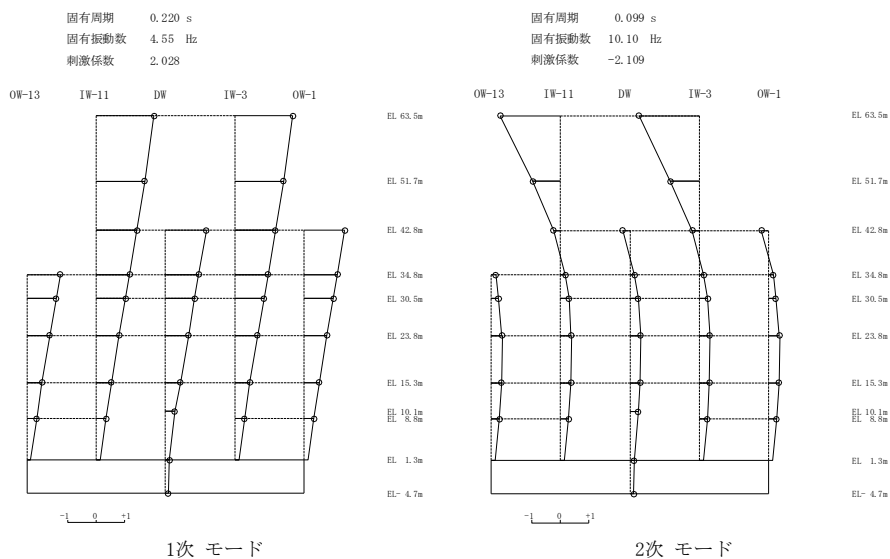


図4 刺激関数図 (NS方向)

固有周期 0.203 s
固有振動数 4.94 Hz
刺激係数 2.012

固有周期 0.093 s
固有振動数 10.72 Hz
刺激係数 -2.137

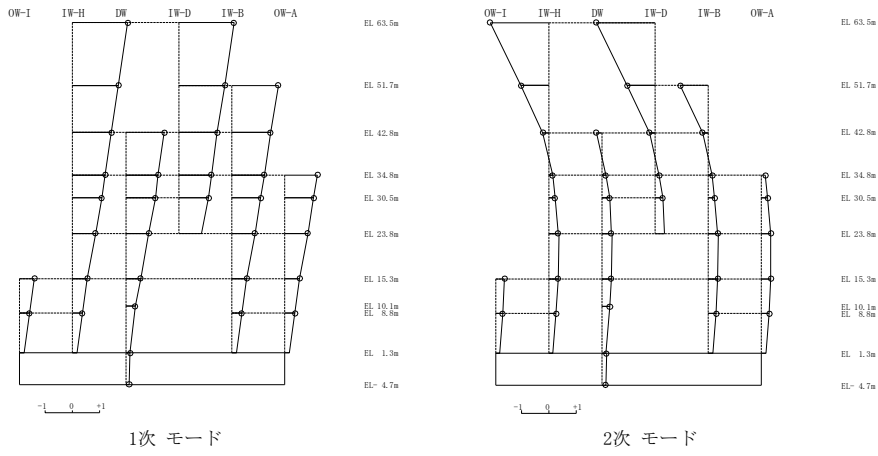


図5 刺激関数図 (EW方向)

固有周期 0.105 s
固有振動数 9.48 Hz
刺激係数 1.959

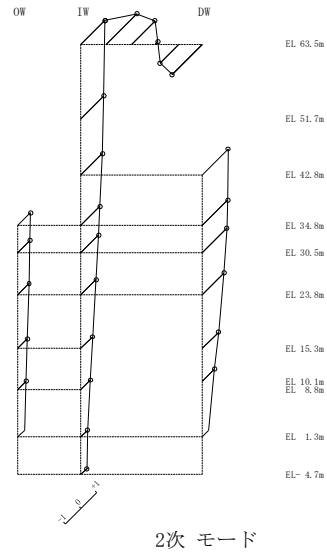


図6 刺激関数図 (鉛直方向)

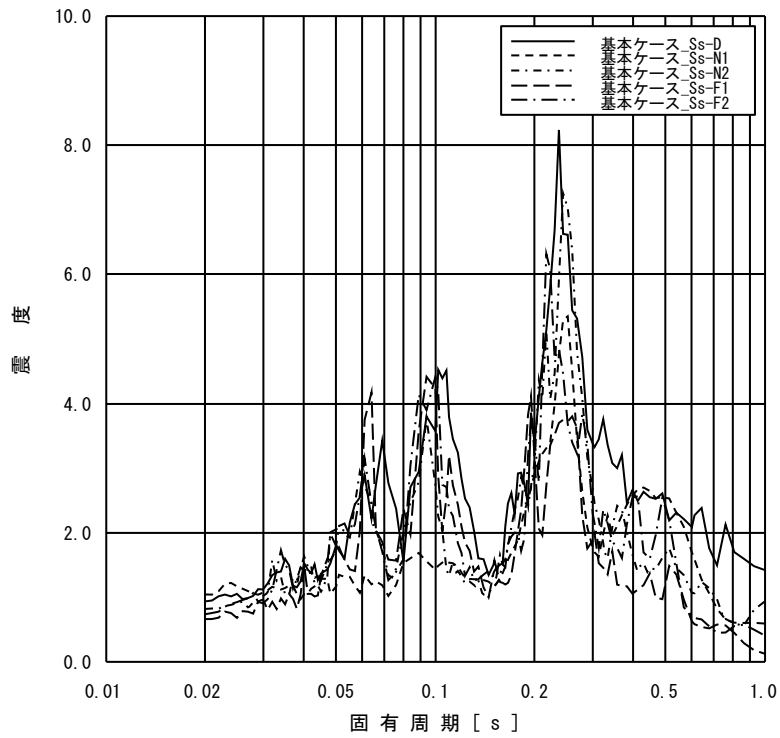


図 7(1) 原子炉建物 (EL23.800m) の加速度応答スペクトル (NS 方向, 基準地震動 S_s , 減衰定数 1.0%)

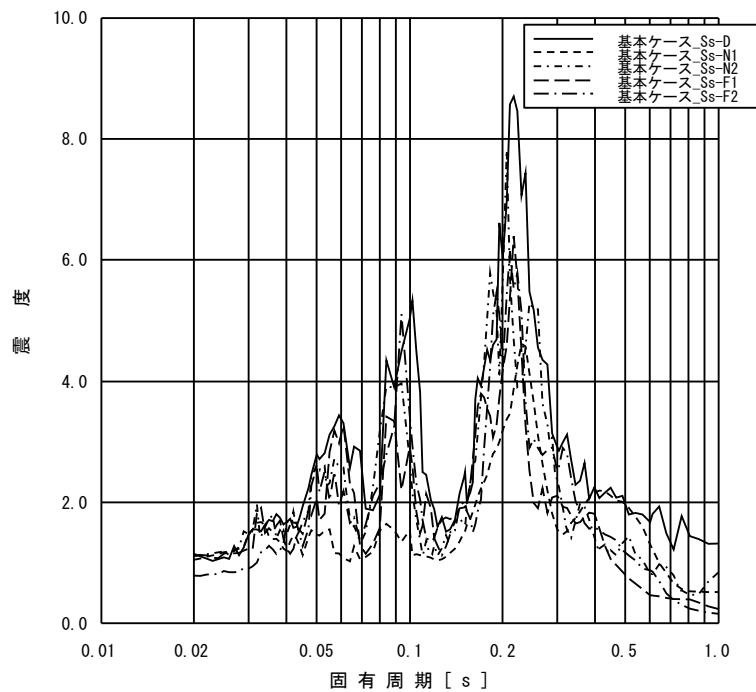


図 7(2) 原子炉建物 (EL23.800m) の加速度応答スペクトル (EW 方向, 基準地震動 S_s , 減衰定数 1.0%)

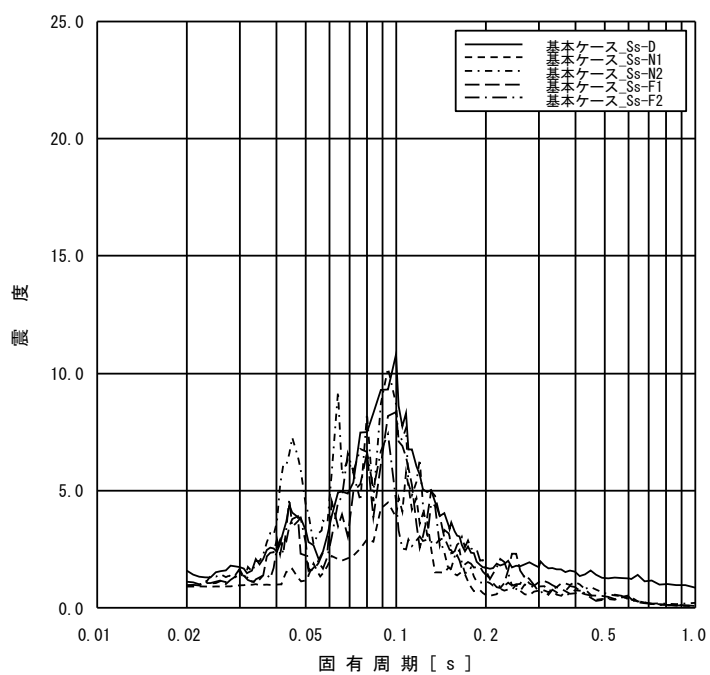


図 7(3) 原子炉建物 (EL23.800m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 基準地震動 S_s , 減衰定数 1.0%)

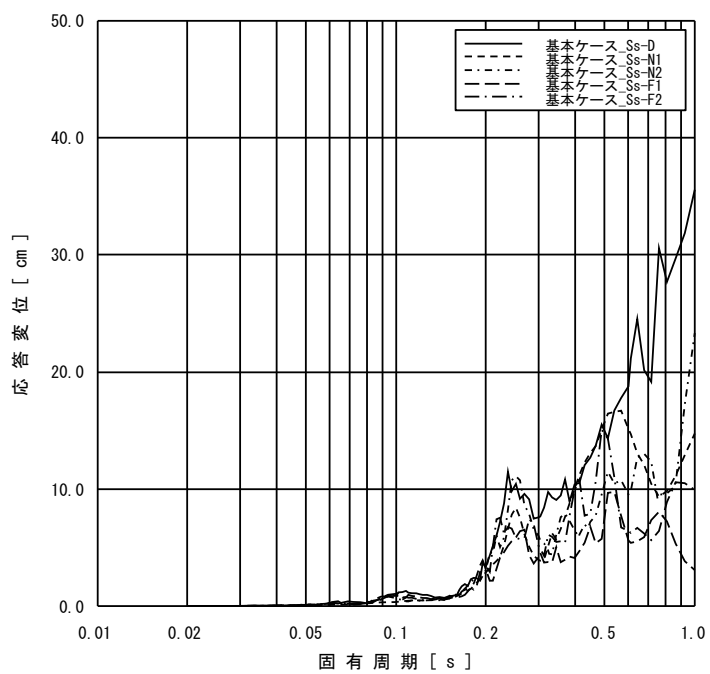


図 8(1) 原子炉建物 (EL23.800m) の変位応答スペクトル
(NS 方向, 基準地震動 S_s , 減衰定数 1.0%)

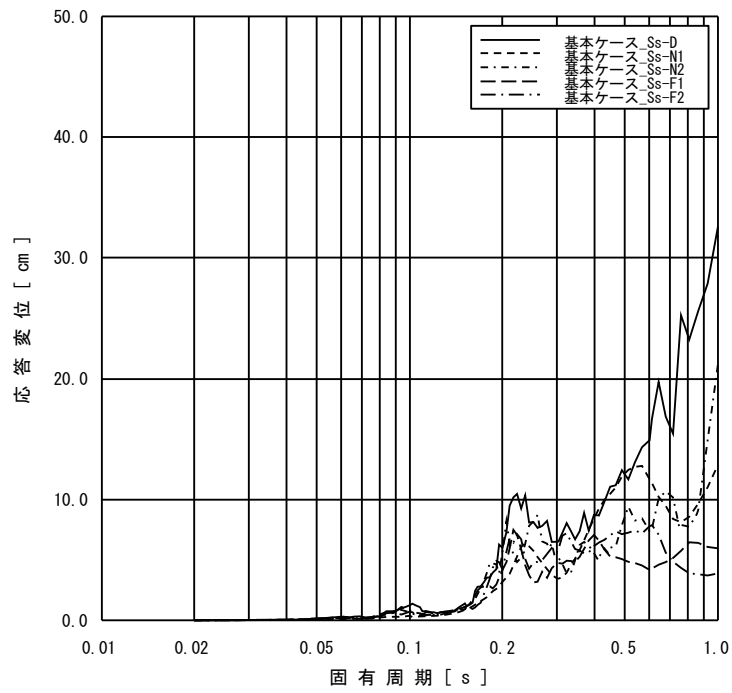


図 8(2) 原子炉建物 (EL23.800m) の変位応答スペクトル
(EW 方向, 基準地震動 S_s , 減衰定数 1.0%)

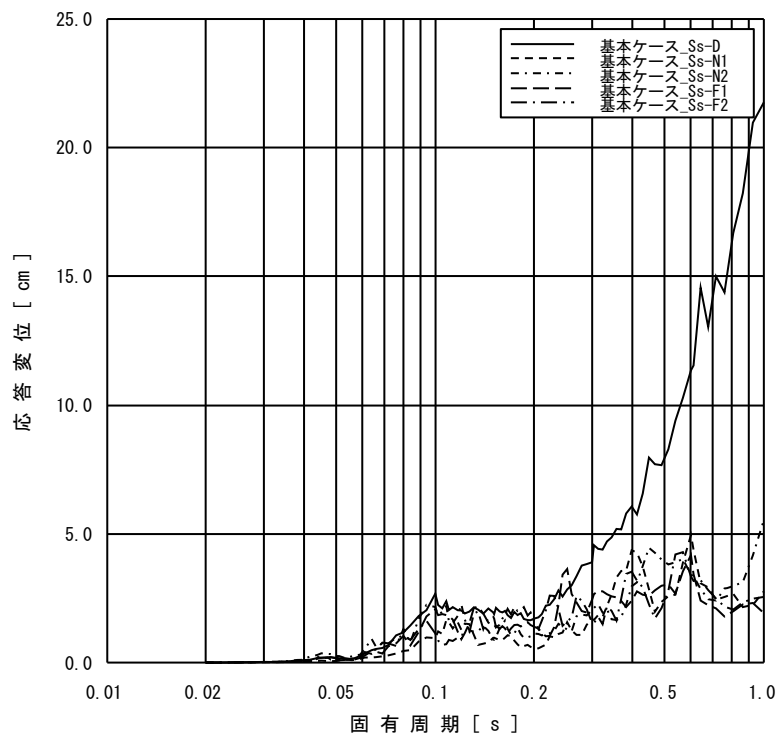


図 8(3) 原子炉建物 (EL23.800m) の変位応答スペクトル
(鉛直方向, 基準地震動 S_s , 減衰定数 1.0%)

5. 剛柔判定に係る閾値の検討

(1) 剛柔判定の閾値を 0.05 秒とすることに関する知見

地震動の高振動数領域においては地震力が短い周期で交番することから地震による変位やエネルギーが小さくなる傾向があり、設備の損傷の観点からは影響は小さいと考えられることから、0.05 秒を剛柔判定の閾値としている。この地震動の高振動数領域が設備の損傷に与える影響は小さいとの考え方は、米国における地震時の点検・再起動等においても取り入れられている。

島根 2 号機の耐震評価において剛柔判定の閾値を 0.05 秒と設定することを踏まえ、地震動の 0.1 秒以下の高振動数領域が設備の損傷に与える影響は小さいと検討されている既往知見を以下に記載する。

- a. J E A G 4 6 0 1-1987 で機器が剛構造と判断される場合の例示として、1 次固有振動数が 20Hz 以上、あるいは、設計用床応答スペクトルの卓越する領域より高い振動数を有する場合を掲示している。また、J E A G 4 6 0 1-1970 では、一般的なものとして、2~10Hz が取付け点の卓越振動数域と考えられ、共振領域としては 1~20Hz を考えれば十分であろうとしている。(当該部分の抜粋は図 2, 3 に示す。)

J E A G 4 6 0 1-1987 における剛柔判定の固有振動数 20Hz 以上の考え方は、水平方向の動的解析への適用として示したものであるが、鉛直方向においても J E A G 4 6 0 1-1970 の考え方にに基づき、原子炉建物の卓越固有周期が剛柔判定の固有周期 0.05 秒に対して、十分な離隔を有することを確認している。また、構造強度の評価に直接かわる変位応答スペクトルにおいては、水平方向では 0.1 秒で概ね収斂している。鉛直方向では、0.1 秒でも一定の応答変位がみられるが、0.1 秒以下では概ね単調減少して 0.05 秒では収斂していることを確認している。

- b. 過去に、観測された地震動が 0.1 秒以下の周期領域のみで設計時の想定を超えた原子力発電所では耐震設計上重要な施設に対して被害の発生が無い。

【周期 0.1 秒以下で設計時の想定を超える地震動が観測された原子力発電所】

女川原子力発電所 (2005 年宮城県沖地震)

米国 Perry 原子力発電所 (1986 年 Leroy 地震) *

米国 Summer 原子力発電所 (1978 年小規模地震多数) *

注記* : (出典) EPRI 1988.7 A Criterion for Determining Exceedance of the Operating Basis Earthquake

- c. 気象庁の震度階：近地地震などでは短周期成分が多く含まれており，日本では経験的に地震動と破壊の状態との関係を震度で示している。気象庁震度階の元となっている計測震度では，周期 0.1 秒よりも短周期側の地震動成分をフィルタでカットしている。計測震度の算出方法について，図 9 に気象庁ホームページに公開されている内容の抜粋を示す。

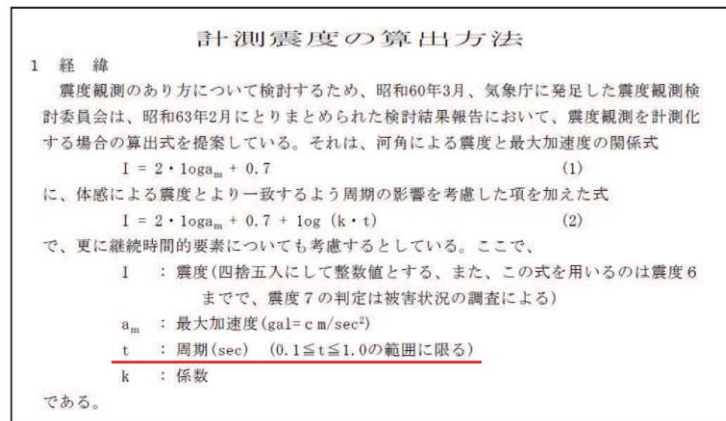


図 9 計測震度の算出方法 (抜粋)

(<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/shindo-kentokai/hensen.pdf>)
より転載

- d. 米国の規格：地震後の対応に関する米国の規格：Nuclear Plant Response to an Earthquake (ANSI/ANS-2.23-2002) では，観測された地震が設計用の地震動を超えたか否かの判定 (OBE Exceedance Criteria) で，応答スペクトルで 0.1 秒以下の周期帯について考慮外としている。本規格では，CAV (Cumulative Absolute Velocity) という指標を導入して観測された地震動の有効性 (構造物の破壊に対する影響度) を判定している。

原波形と 0.1 秒のフィルタを掛けた波形について各々 CAV を算出し，その比を地震による影響の程度を示す震度 (米国では修正メルカリ震度を使用している) に対してプロットすると，破損が生じるといわれる修正メルカリ震度 VII 程度以上で安定し，0.1 秒のフィルタを掛けた波形が破損との関係をより良く表している。

- e. 米国電力研究所の調査*：10Hz を超える振動数領域における高加速度振動による設備の影響について調査を行い，一部の設備を除き影響は無視できると結論付けている。固有振動数が低い設備は高振動数領域の加速度には影響を受けず，また，固有振動数が高い設備についても，高振動数領域における加速度では変位や応力が小さくなるため。高振動数領域で SSE (Safety Shutdown Earthquake) を超える地震動に見舞われた国内の発電所 (上記 b. の発電所) において，設備に影響が無かったことも紹介されている。

注記* : (出典) EPRI 2006.12 Program on Criterion Technology Innovation: The Effects of High-Frequency Ground Motion on Structures, Components, and Equipment in Nuclear Power Plants

なお, b. ~d. についての情報は, 一般社団法人日本原子力技術協会 (現一般社団法人原子力安全推進協会) 地震後の機器健全性評価ガイドライン (平成 24 年 3 月) にまとめて記述されている。

<http://www.gengikyo.jp/archive/pdf/JANTI-SANE-G1.pdf>

(2) 変位応答スペクトルを踏まえた剛柔判定の検討

島根原子力発電所第 2 号機のガンマ線遮蔽壁 EL29.962m における基準地震動 S_s による加速度応答スペクトルを図 10 に示す。また, 同様に変位応答スペクトルを図 11 に示す。

加速度応答スペクトルでは 0.05 秒未満で一定の加速度値を有するが, 構造強度の評価に直接かかわる変位応答スペクトル*の卓越周期に対し, 剛柔判定の固有周期 0.05 秒は, 十分な離隔をもって設定されていることが分かる。

注記* : 機器・配管系の動的解析に適用されるスペクトルモーダル解析 (J E A G 4 6 0 1-1987 P565, 567) では, 加速度応答スペクトルから各モードに対応する応答変位を求め, この応答変位に剛性を乗じて部材力(曲げモーメント, せん断力等)を算出している。

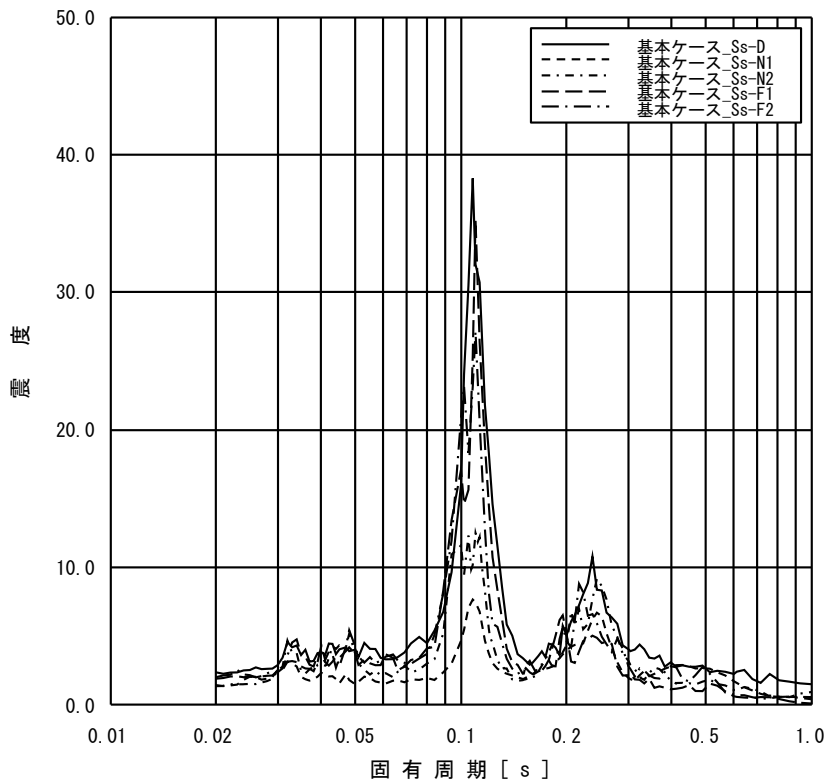


図 10(1) ガンマ線遮蔽壁 EL29.962m の加速度応答スペクトル (NS 方向, 減衰定数 1.0%)

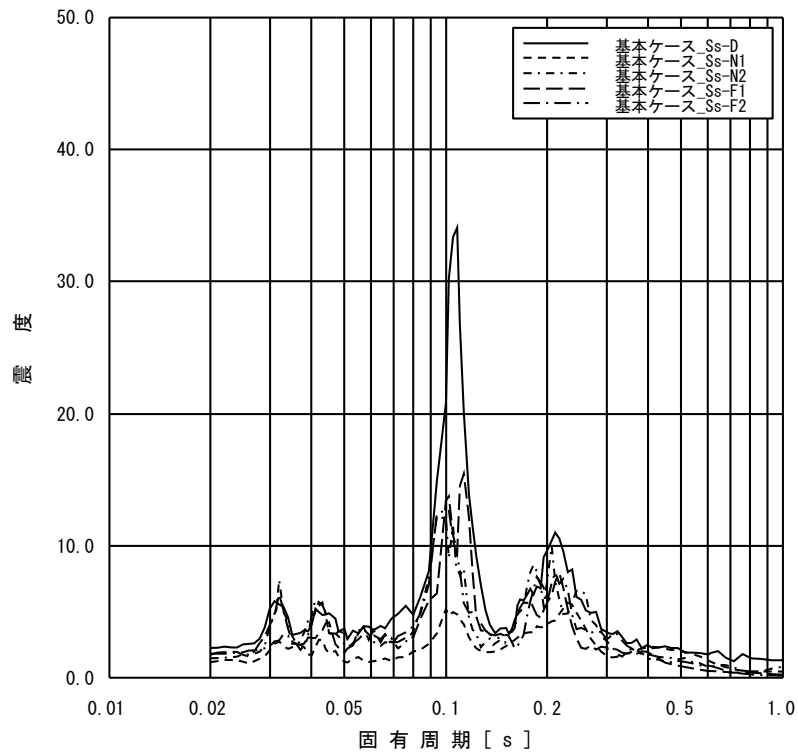


図 10(2) ガンマ線遮蔽壁 EL29.962m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%)

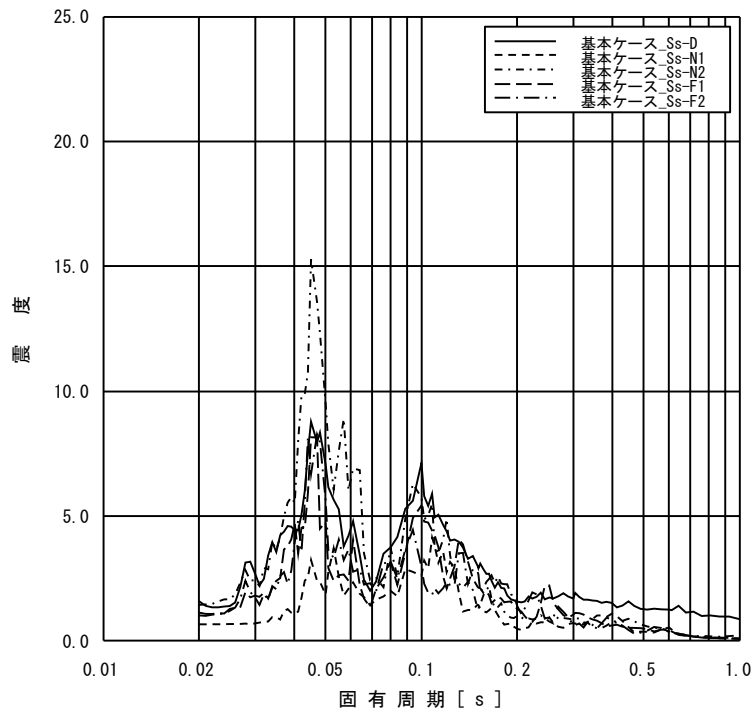


図 10(3) ガンマ線遮蔽壁 EL29.962m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)

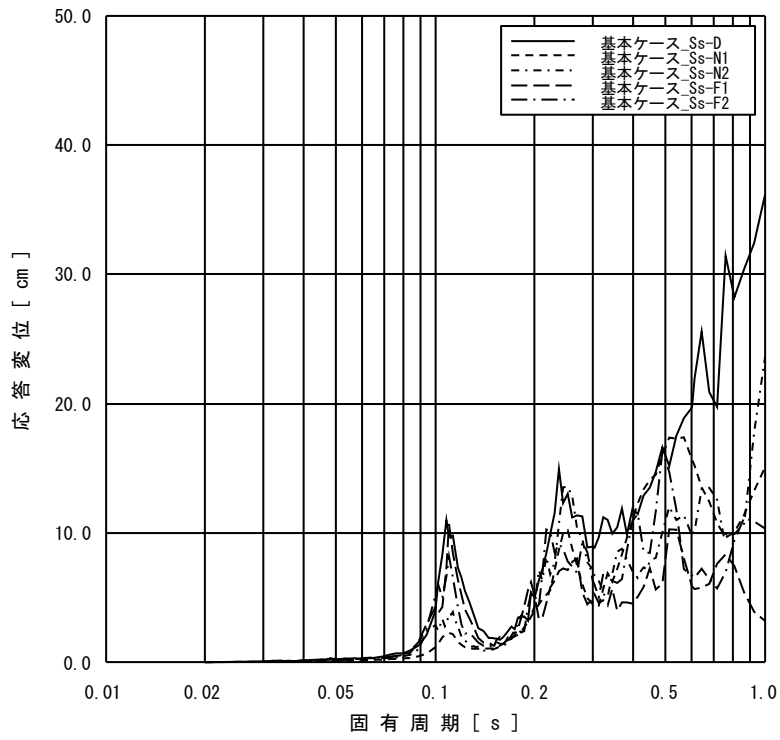


図 11(1) ガンマ線遮蔽壁 EL29.962m の変位応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%)

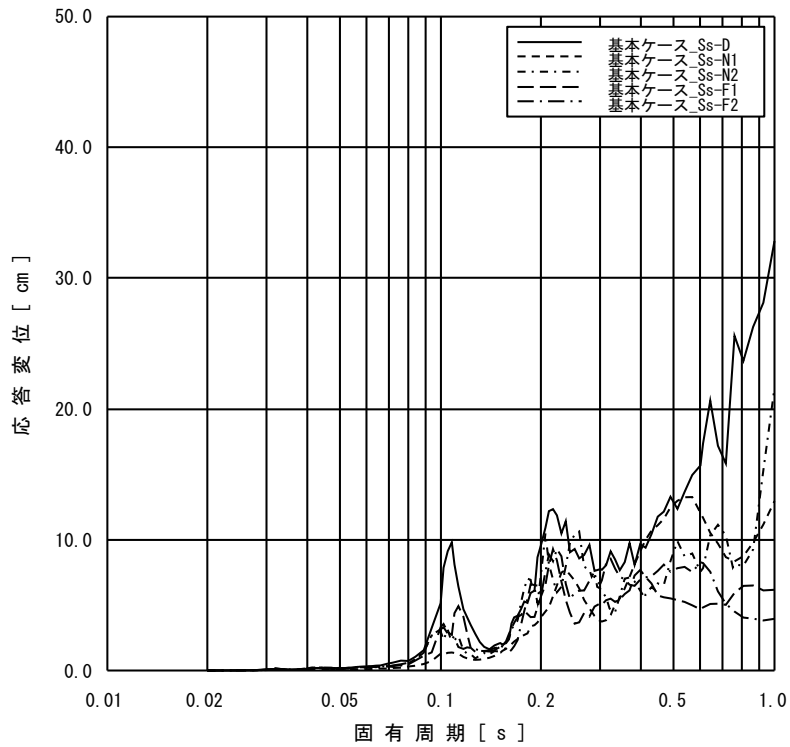


図 11(2) ガンマ線遮蔽壁 EL29.962m の変位応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%)

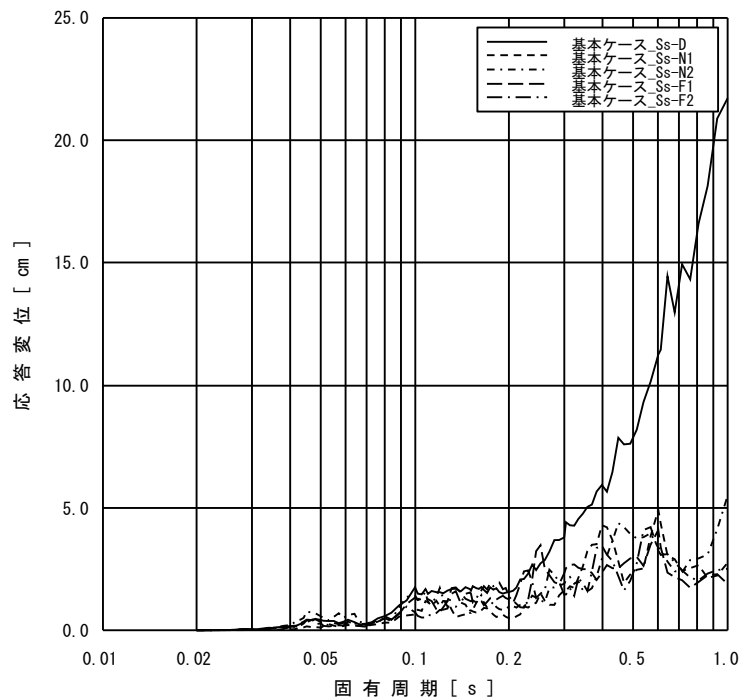


図 11(3) ガンマ線遮蔽壁 EL29.962m の変位応答スペクトル
(鉛直方向，減衰定数 1.0%)

(3) 動的解析法の妥当性確認

本項では現行の動的解析において応答増幅を考慮する固有振動数の範囲は 0.05 秒を超える (20Hz 未満) 範囲としていることについて、構造強度設計を行う上で妥当であること、すなわち、変位応答スペクトルをベースに設定した剛柔判定の固有周期が耐震設計を行う上で妥当性を有していることを確認する。なお、弁の動的機能維持評価に適用する加速度値の算定方法については、補足-027-5「弁の動的機能維持評価について」に示す。

a. 検討対象設備

検討対象設備は、20Hz 近傍に卓越する応答に対する検討を行う観点から 20Hz 近傍に卓越する応答を有する構築物の設計用床応答スペクトルを適用する設備を選定する。また、設計用床応答スペクトル作成において 20Hz 以降の高振動数領域を剛な領域としていることを踏まえて、1 次固有振動数が 20Hz 近傍に有する設備を選定する。

(a) 20Hz 近傍に卓越する応答を有する設計用床応答スペクトルを適用する設備

耐震評価対象設備が最も多い原子炉建物及び原子炉圧力容器等の大型機器類を代表として、以下の地震応答について確認した。加速度応答スペクトルを添付図 1~6 に示す。

- ・ 原子炉建物
- ・ 原子炉格納容器
- ・ ガンマ線遮蔽壁
- ・ 原子炉圧力容器ペDESTAL

・原子炉圧力容器

添付図 1～6 より、水平及び鉛直方向ともに高振動数領域(50Hz)へ向かうにつれて加速度値は低下傾向にあるものの、20Hz 近傍で応答が卓越している質点が複数あることが分かる。

そこで、各加速度応答スペクトルの結果から、20Hz 近傍で最も加速度値が大きい原子炉建物 EL51.700m(水平方向) とガンマ線遮蔽壁 EL29.962m (鉛直方向) の設計用床応答スペクトルを適用するもののうち、一次応力の裕度が小さい燃料プールの系配管 (モデル No. SFPS-R-3) 及び残留熱除去系配管 (モデル No. RHR-PD-8) を対象として検討する。

なお、原子炉建物 EL51.700m (水平方向) とガンマ線遮蔽壁 EL29.962m (鉛直方向) の設計用床応答スペクトルを適用し耐震評価を実施する設備を表 3 に示す。

表 3 原子炉建物 EL51.700m (水平方向) とガンマ線遮蔽壁 EL29.962m (鉛直方向) の設計用床応答スペクトルを適用する設備

設備名称 (モデル No.)	評価に適用する設計用 床応答スペクトルの作成位置	1 次固有周期 (s)
燃料プールの系配管 (SFPS-R-3)	原子炉建物 EL 51.700m	
燃料プールの系配管 (SFPS-R-4)	原子炉建物 EL 51.700m	
燃料プールの系配管 (SFPS-R-7)	原子炉建物 EL 51.700m	
燃料プールの系配管 (SFPS-R-8)	原子炉建物 EL 51.700m	
残留熱除去系配管 (RHR-PD-8)	ガンマ線遮蔽壁 EL 29.962m	

(b) 1 次固有振動数が 20Hz 近傍に有する設備

原子炉建物に設置される配管系において、20Hz 近傍に 1 次固有振動数を有する設備を選定する。20Hz 近傍に 1 次固有振動数を有する配管系として、1 次として Hz、2 次として Hz の振動モードを有する燃料プールの系配管 (モデル No. SFPS-R-2) を選定する。

b. 確認方法

図 12 に検討における地震応答解析で考慮する固有振動数領域を示す。本検討は、50Hz の領域まで作成した検討用の床応答スペクトルを適用した地震応答解析結果を用いて行う。

上記の結果を、従来の耐震設計と同様に、20Hz までの領域で応答増幅を考慮して設定した設計用床応答スペクトルによる地震応答解析結果と比較する。

また、現行の手法では、機器・配管系が柔構造と判断される場合には、設計用床応答スペクトルを用いた動的解析結果と 1.2ZPA を用いた静的解析結果の包絡値を用いることから、本検討でも同様の手法による地震応答解析結果と検討用床応答スペクトルによる地震応答解析結果の比較を実施する。

なお、本検討における地震応答解析においては、水平 2 方向及び鉛直 1 方向を考慮した解析を実施する。

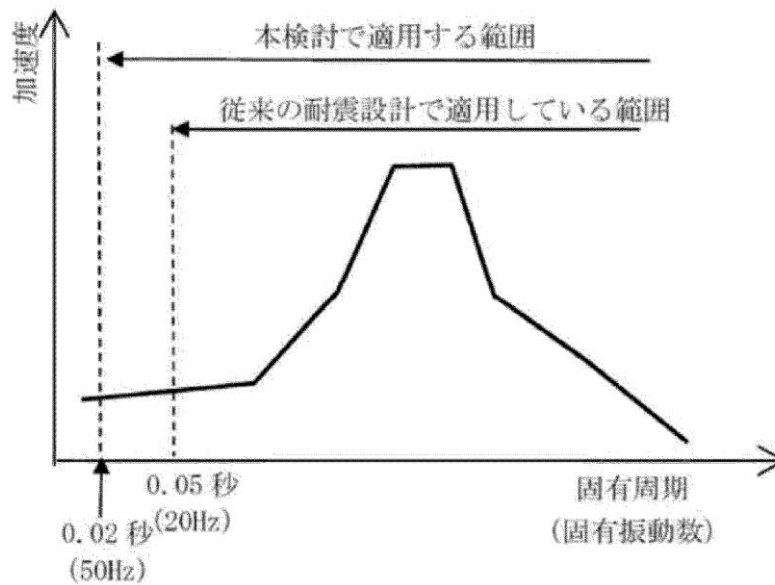


図 12 地震応答解析で考慮する固有振動数領域

c. 検討用床応答スペクトル

地震応答解析に適用する検討用床応答スペクトルを図 13～図 15 に示す。剛領域の設備応答の影響を確認する観点から、固有周期 0.02 秒 (50Hz) まで作成するとともに、設計用床応答スペクトルと同様に基本ケースについては周期軸方向に 10% 拡幅する。また、検討用床応答スペクトルの固有周期の計算間隔は、表 4 に示す計算間隔を用いる。

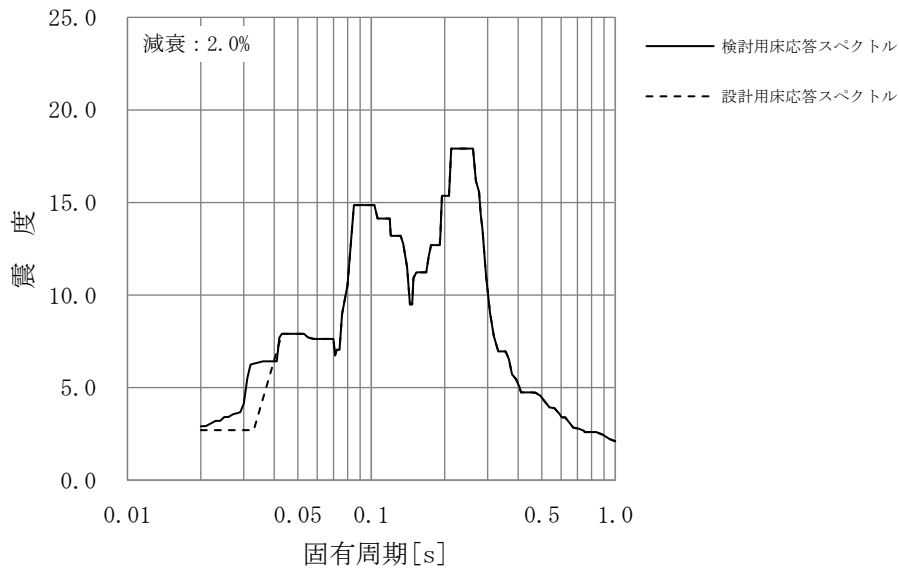


図 13(1) 検査用床応答スペクトル (燃料プールのスプレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-3))
(NS 方向)

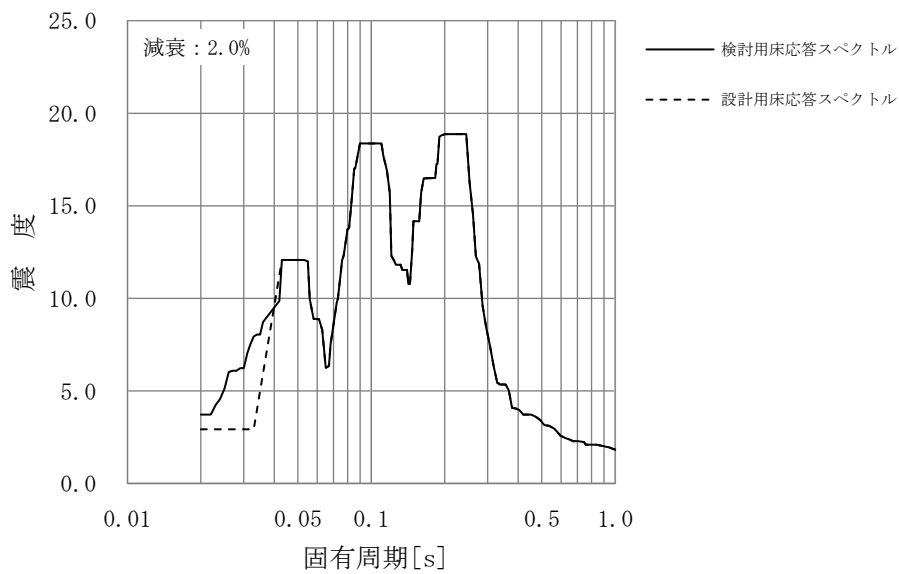


図 13(2) 検査用床応答スペクトル (燃料プールのスプレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-3))
(EW 方向)

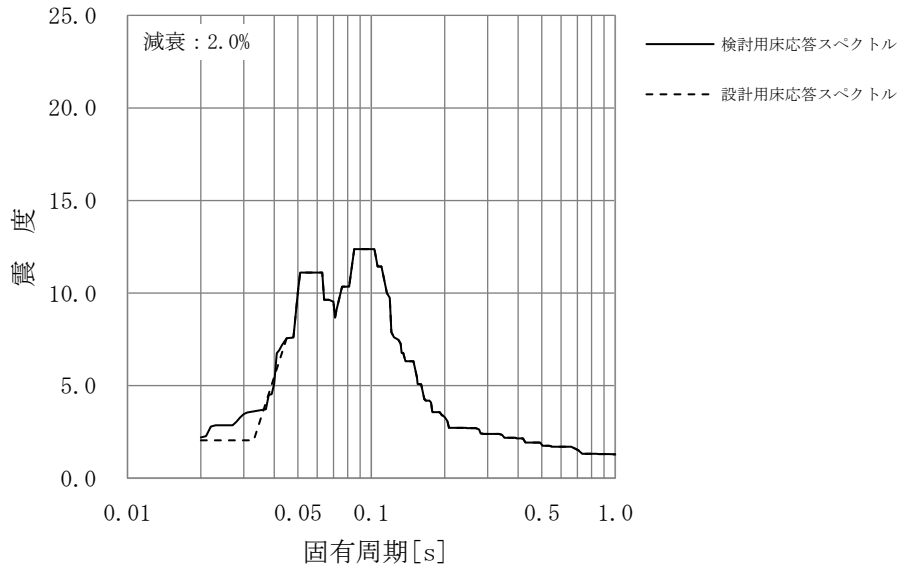


図 13(3) 検討用床応答スペクトル (燃料プールのスプレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-3)) (鉛直方向)

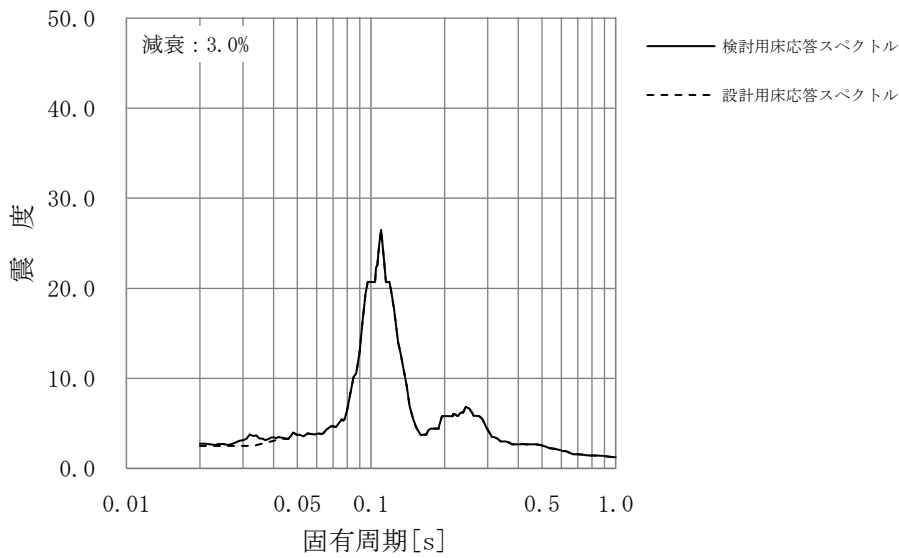


図 14(1) 検討用床応答スペクトル (残留熱除去系配管 (モデル No. RHR-PD-8)) (NS 方向)

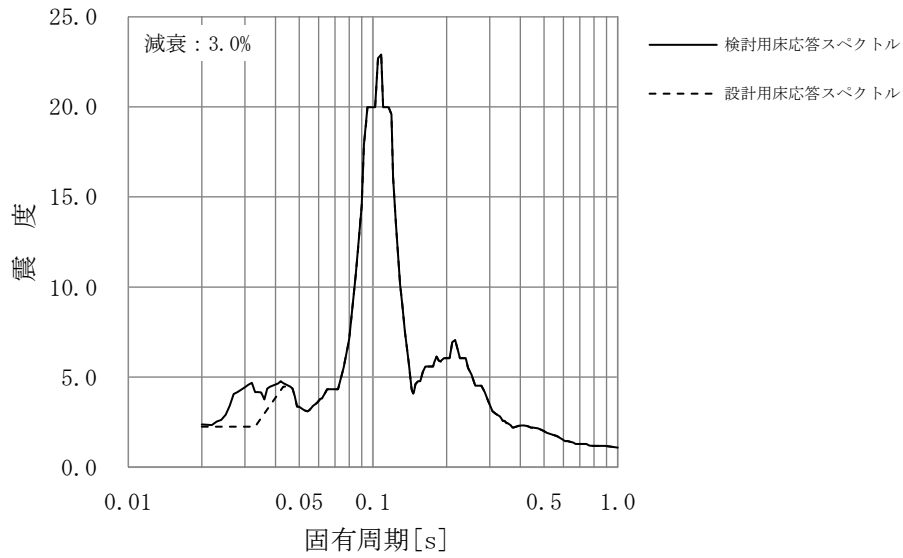


図 14(2) 検討用床応答スペクトル (残留熱除去系配管 (モデル No. RHR-PD-8)) (EW 方向)

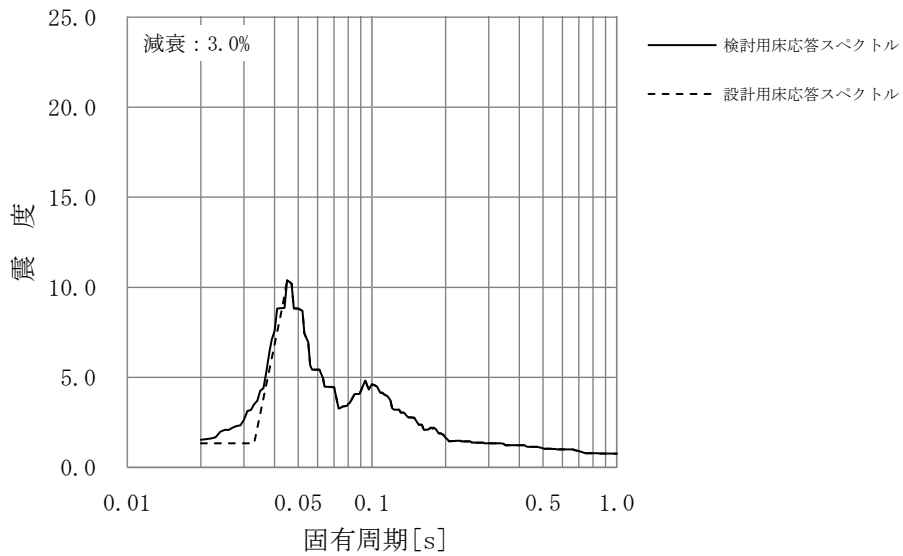


図 14(3) 検討用床応答スペクトル (残留熱除去系配管 (モデル No. RHR-PD-8)) (鉛直方向)

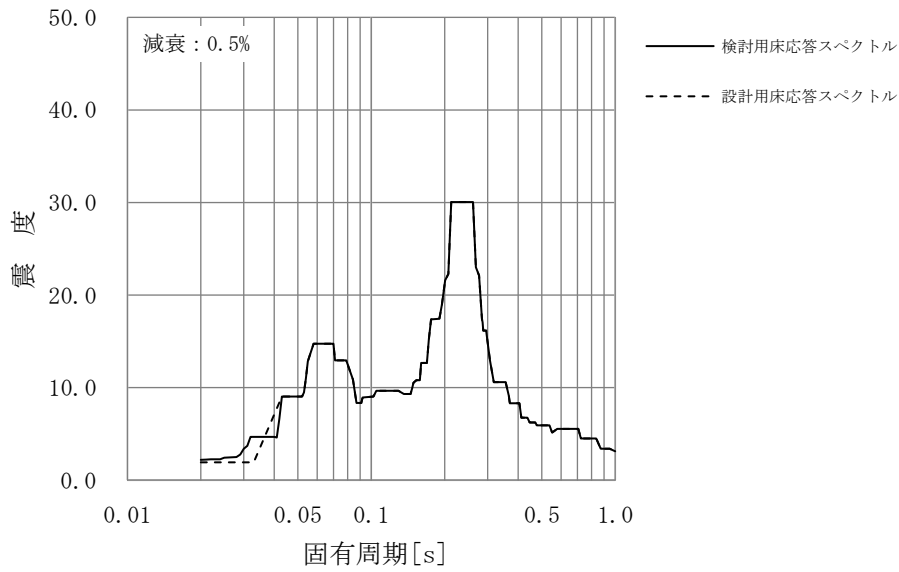


図 15(1) 検討用床応答スペクトル (燃料プールのスプレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-2))
(NS 方向)

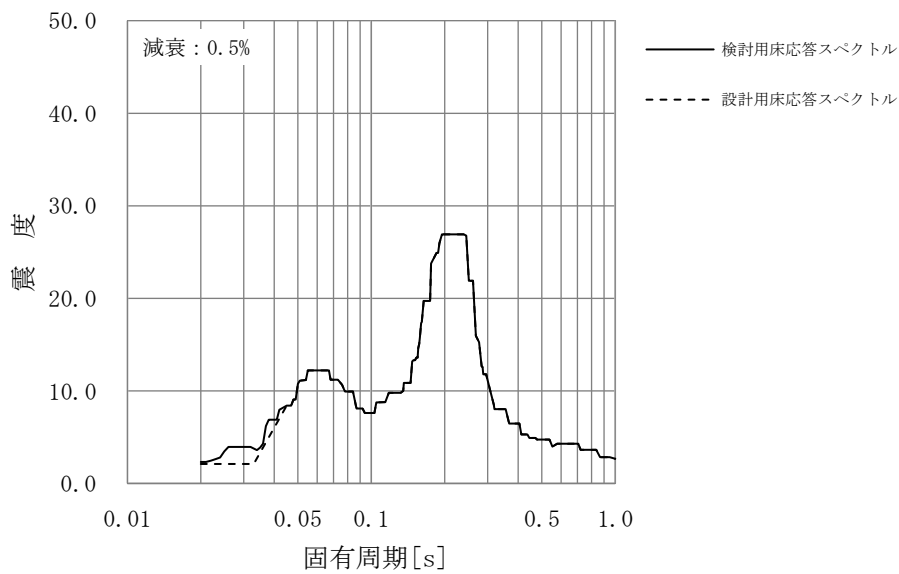


図 15(2) 検討用床応答スペクトル (燃料プールのスプレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-2))
(EW 方向)

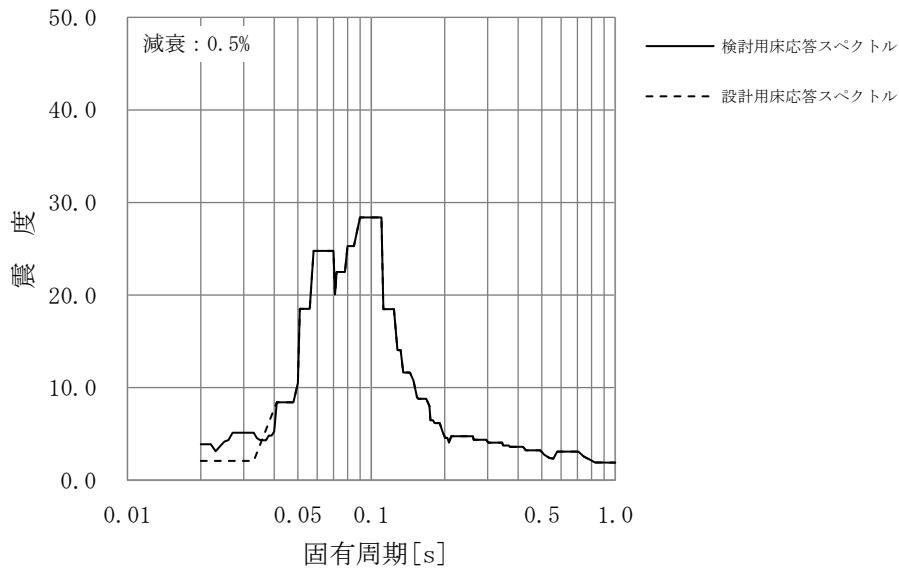


図 15(3) 検討用床応答スペクトル (燃料プールのスプレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-2))
(鉛直方向)

表 4 固有周期の計算間隔

固有周期 (s)	計算間隔 ($\Delta\omega$: rad/s)
0.02 ~ 0.1	4.0
0.1 ~ 0.15	1.5
0.15 ~ 0.3	0.8
0.3 ~ 0.6	0.6
0.6 ~ 1.0	0.5

d. 検討対象設備の主要諸元，解析モデル

検討対象設備として燃料プールのスプレイ系配管及び残留熱除去系配管の主要仕様，解析モデル図，固有振動数及び刺激係数，主要次数のモード図を示す。

(a) 燃料プールのスプレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-3)

燃料プールのスプレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-3) の主要仕様を表 5 に，解析モデル図を図 16 に，固有振動数及び刺激係数を表 6 に，主要次数のモード図を図 17 に示す。

表 5 燃料プールのスプレイ系配管（モデル No. SFPS-R-3）の主要仕様

項目	主要仕様
最高使用圧力 (MPa)	2.45
最高使用温度 (°C)	66
外径 (mm)	114.3
厚さ (mm)	6.0
材料	SUS304TP

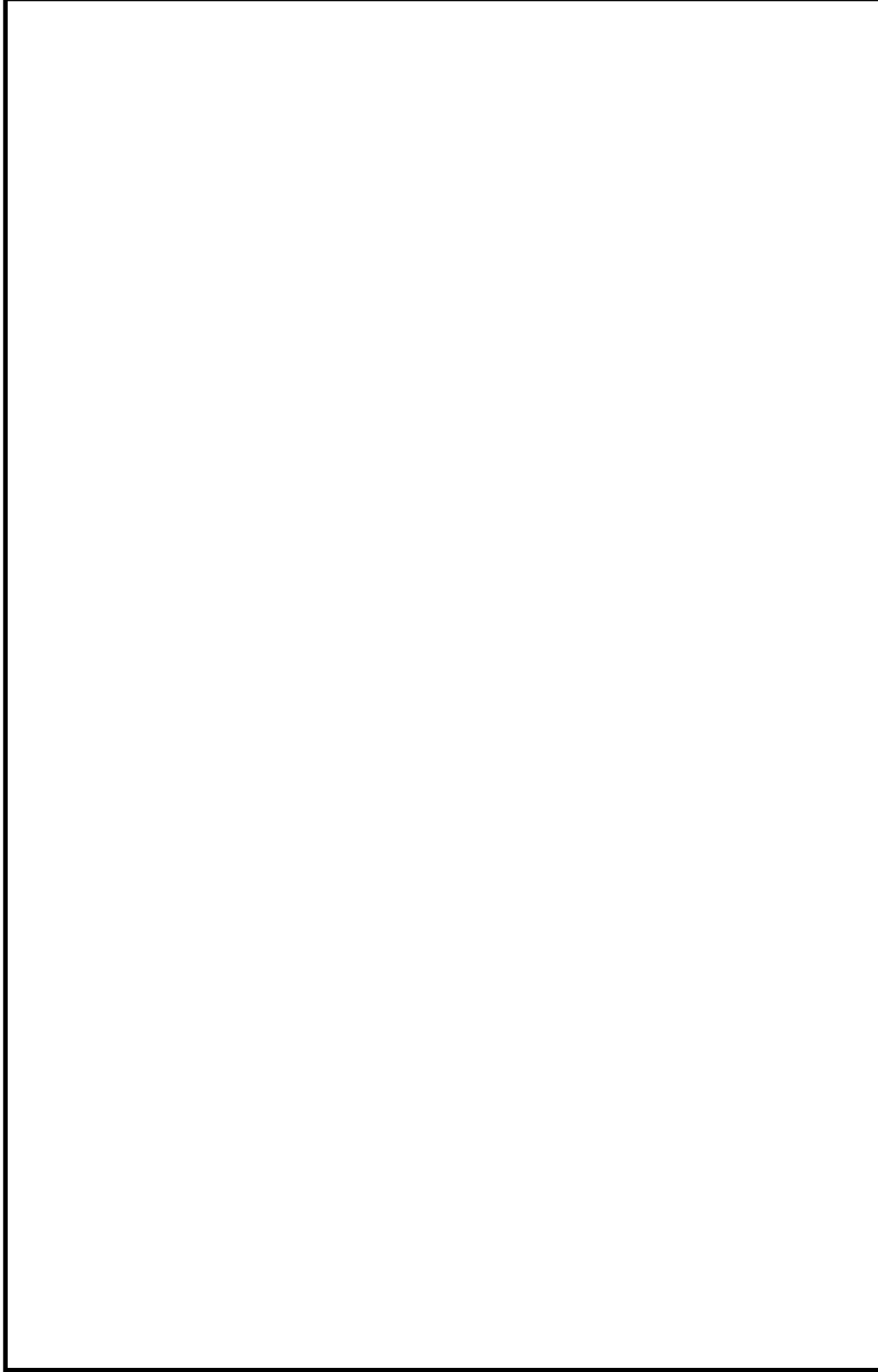


図 16 燃料プールの系配管 (モデル No. SFPS-R-3) の解析モデル図

表 6 燃料プールスプレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-3) の固有振動数及び刺激係数 (1 / 2)

モード	固有 振動数 (Hz)	固有 周期 (s)	刺激係数*		
			X 方向	Y 方向	Z 方向

表 6 燃料プールのスプレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-3) の固有振動数及び刺激係数 (2 / 2)

モード	固有 振動数 (Hz)	固有 周期 (s)	刺激係数*		
			X 方向	Y 方向	Z 方向

注記* : 刺激係数は、モード質量を正規化し、固有ベクトルと質量マトリックスの積から算出した値を示す。

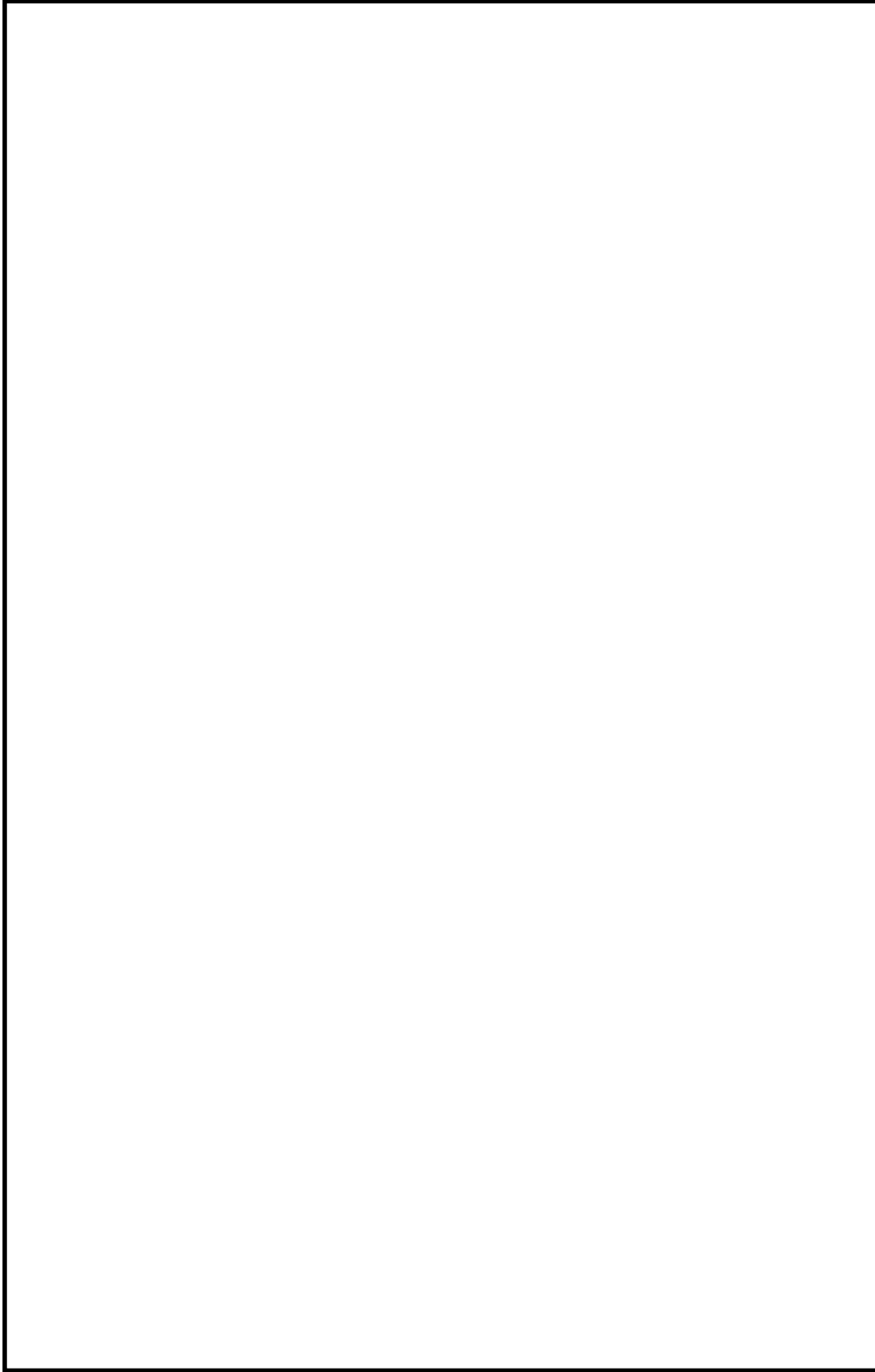


図 17(1) 燃料プールの系配管 (モデル No. SFPS-R-3) のモード図 (1 次)

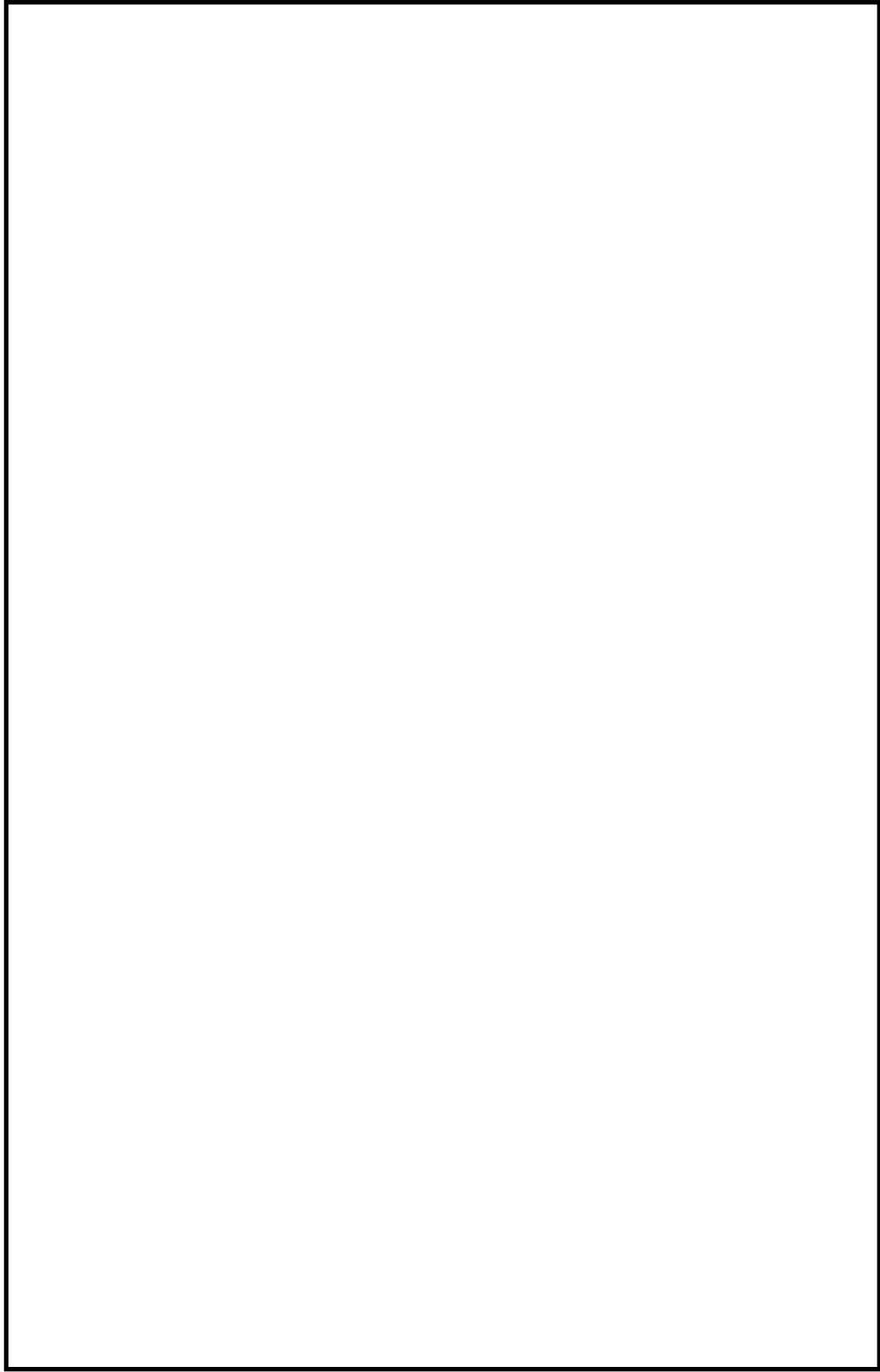


図 17(2) 燃料プールの系配管 (モデル No. SFPS-R-3) のモード図 (2 次)

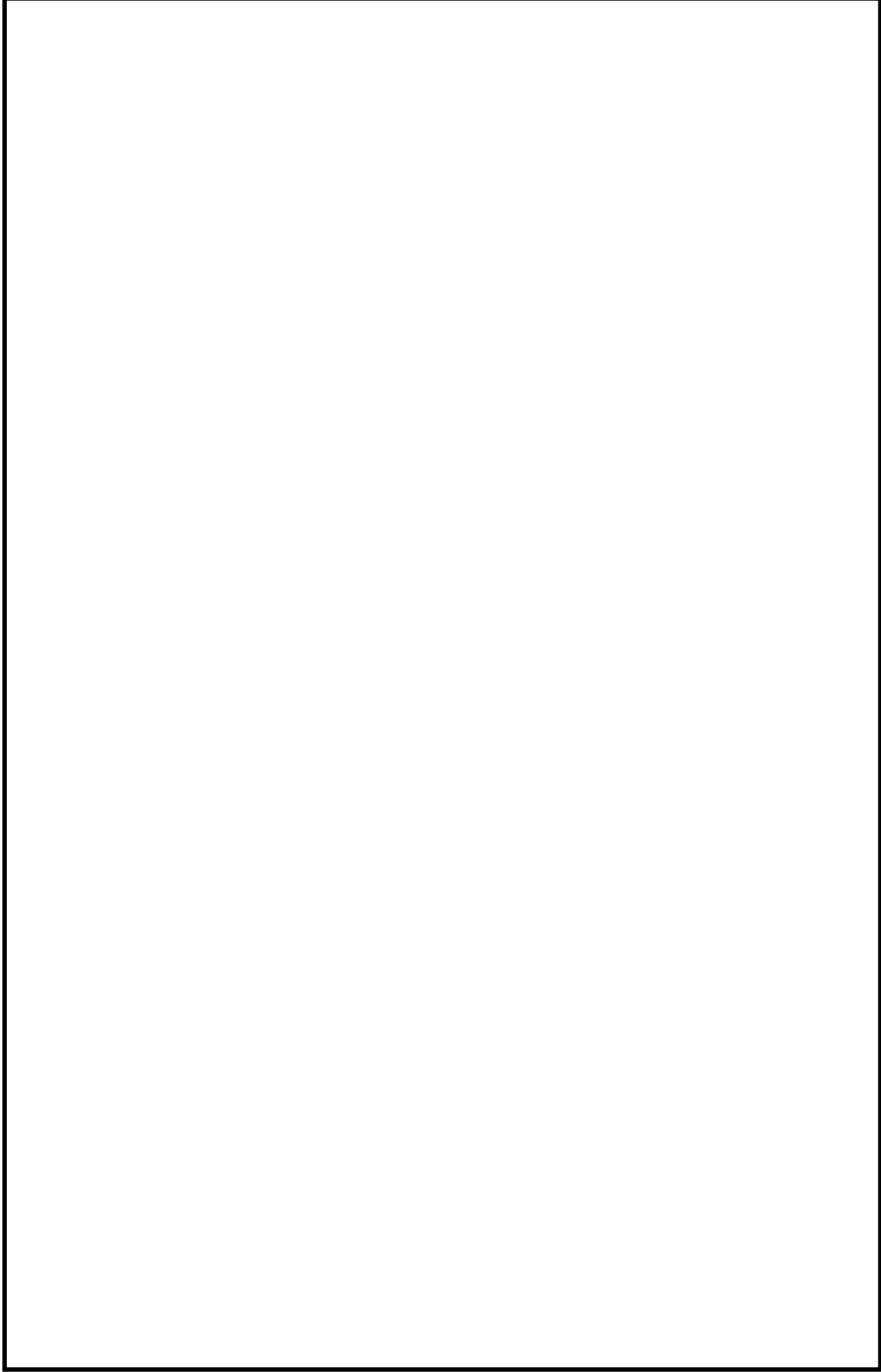


図 17(3) 燃料プールの系配管 (モデル No. SFPS-R-3) のモード図 (3 次)

(b) 残留熱除去系配管 (モデル No. RHR-PD-8)

残留熱除去系配管 (モデル No. RHR-PD-8) の主要仕様を表 7 に、解析モデル図を図 18 に、固有振動数及び刺激係数を表 8 に、主要次数のモード図を図 19 に示す。

表 7 残留熱除去系配管 (モデル No. RHR-PD-8) の主要仕様

項目	主要仕様
最高使用圧力 (MPa)	8.62
最高使用温度 (°C)	302
外径 (mm)	114.3
厚さ (mm)	11.1
材料	STS42

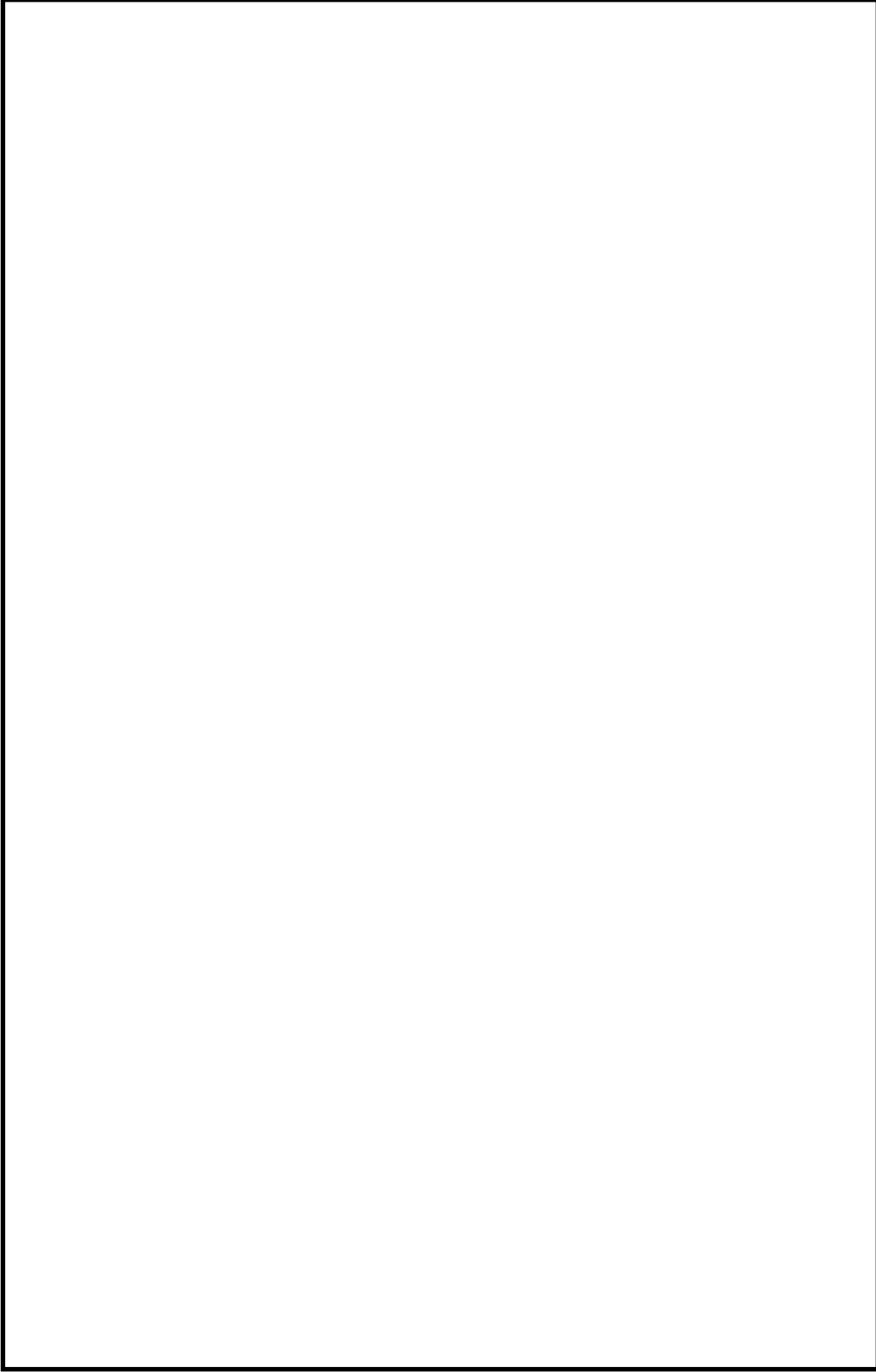


図 18 残留熱除去系配管（モデル No. RHR-PD-8）の解析モデル図

表 8 残留熱除去系配管（モデル No. RHR-PD-8）の固有振動数及び刺激係数

モード	固有 振動数 (Hz)	固有 周期 (s)	刺激係数*		
			X 方向	Y 方向	Z 方向

注記*：刺激係数は、モード質量を正規化し、固有ベクトルと質量マトリックスの積から算出した値を示す。

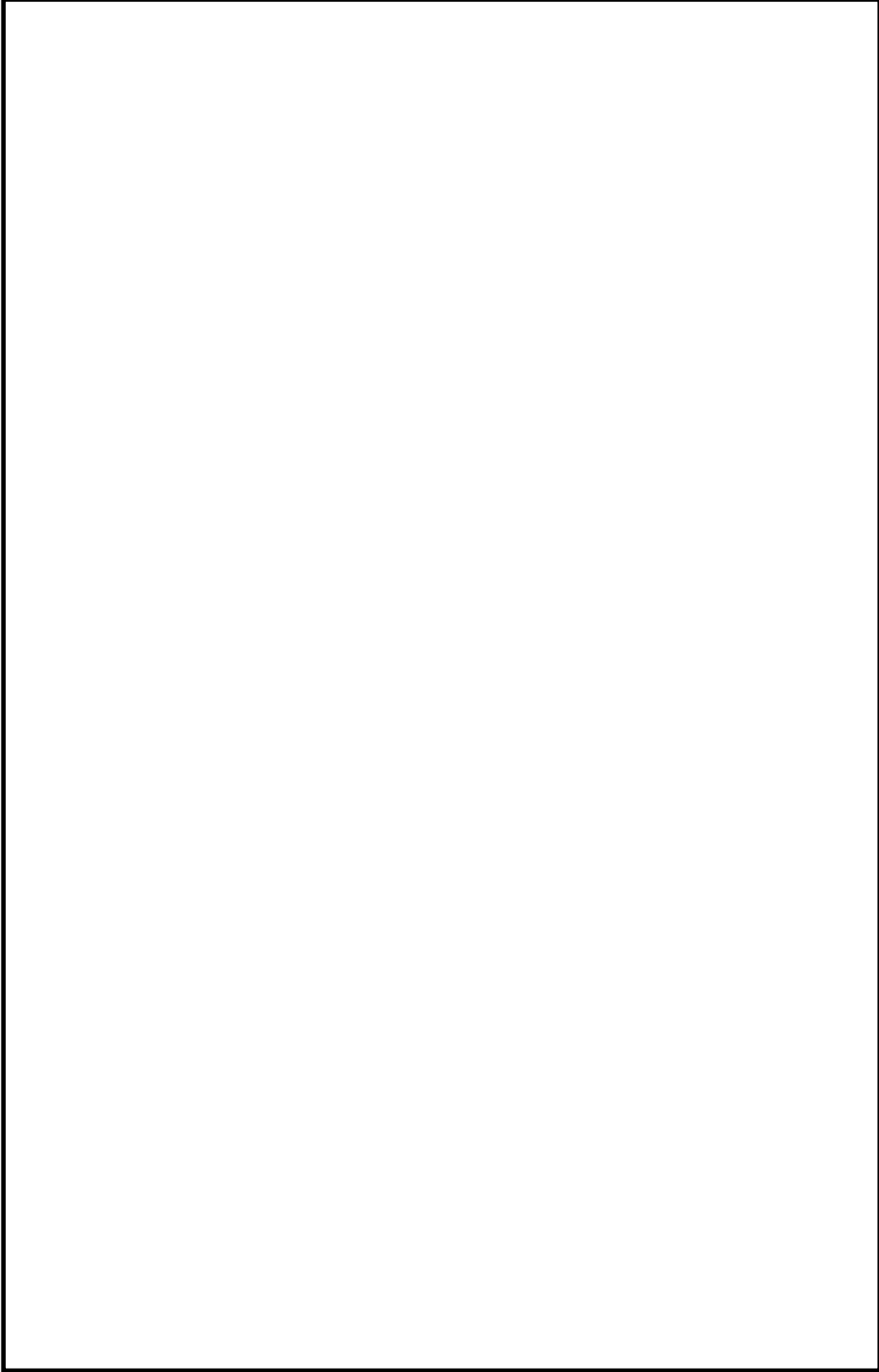


図 19(1) 残留熱除去系配管 (モデル No. RHR-PD-8) のモード図 (1 次)

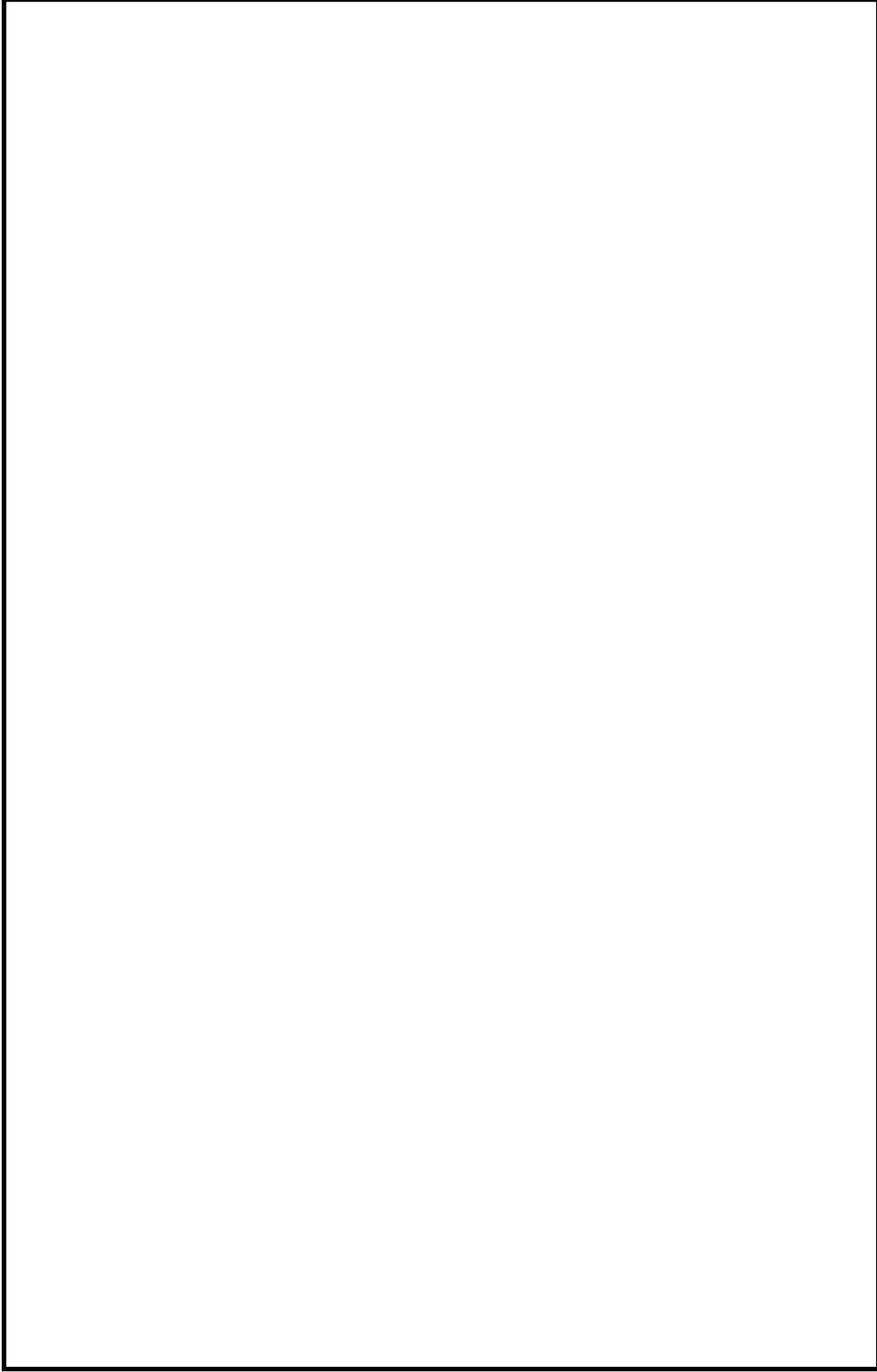


図 19(2) 残留熱除去系配管 (モデル No. RHR-PD-8) のモード図 (2 次)

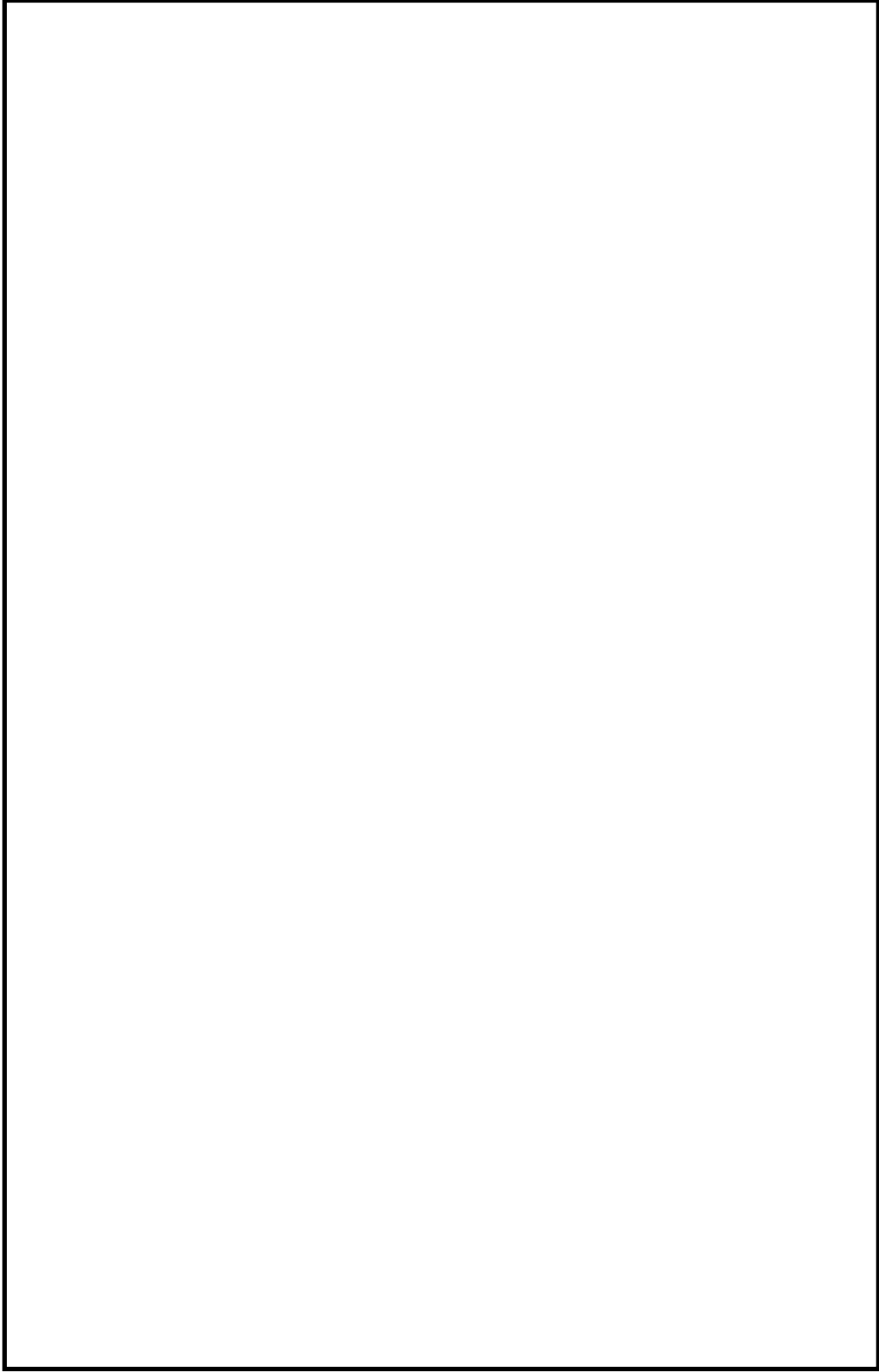


図 19(3) 残留熱除去系配管（モデル No. RHR-PD-8）のモード図（3 次）

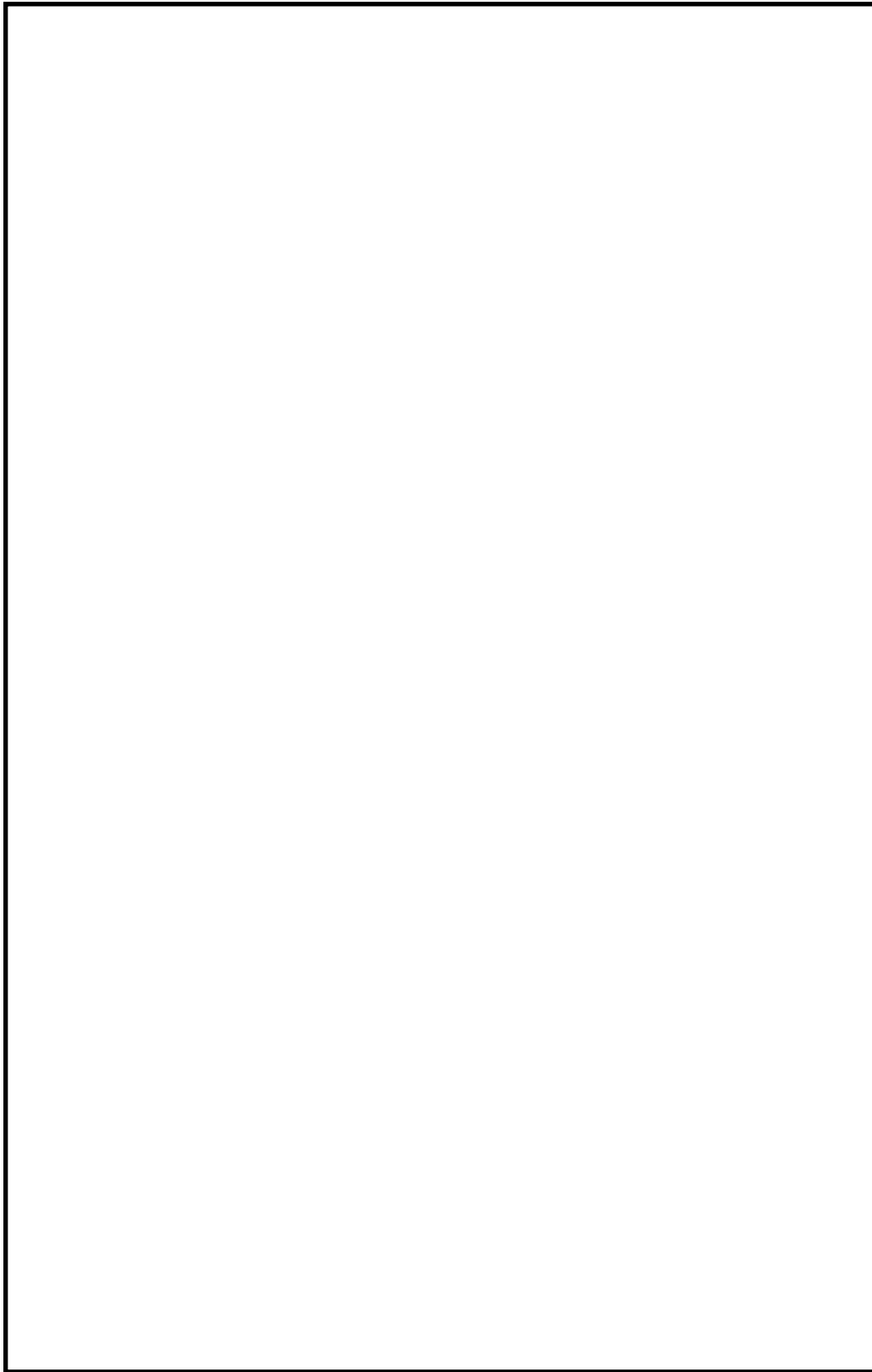


図 19(4) 残留熱除去系配管 (モデル No. RHR-PD-8) のモード図 (4 次)

(c) 燃料プールのスプレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-2)

燃料プールのスプレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-2) の主要仕様を表 9 に、解析モデル図を図 20 に、固有振動数及び刺激係数を表 10 に、主要次数のモード図を図 21 に示す。

表 9 燃料プールのスプレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-2) の主要仕様

項目	主要仕様
最高使用圧力 (MPa)	2.45
最高使用温度 (°C)	66
外径 (mm)	114.3
厚さ (mm)	6.0
材料	SUS304TP

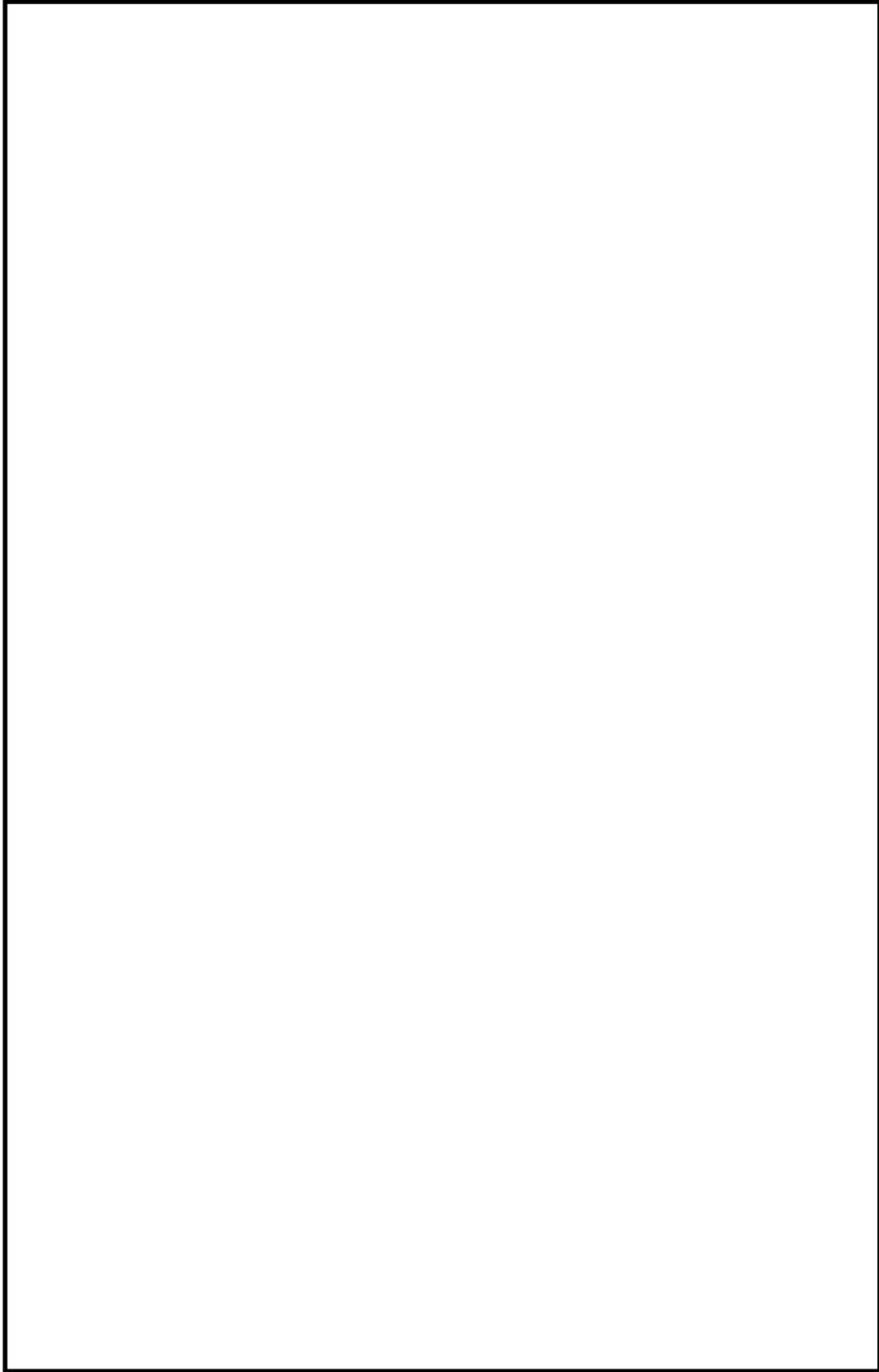


図 20 燃料プールの系配管（モデル No. SFPS-R-2）の解析モデル図

表 10 燃料プールのスプレイ系配管（モデル No. SFPS-R-2）の固有振動数及び刺激係数

モード	固有 振動数 (Hz)	固有 周期 (s)	刺激係数*		
			X 方向	Y 方向	Z 方向

注記*：刺激係数は、モード質量を正規化し、固有ベクトルと質量マトリックスの積から算出した値を示す。

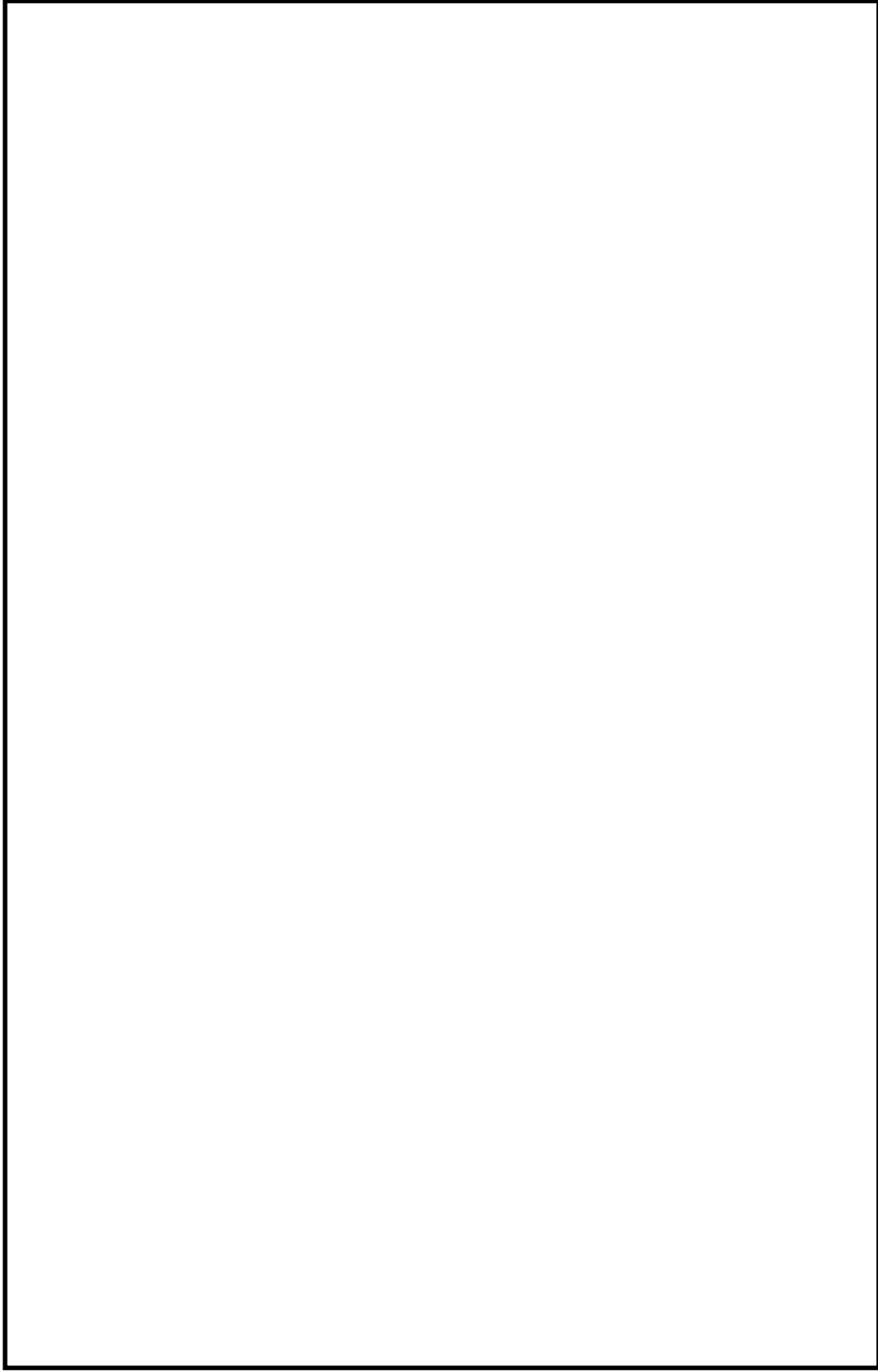


図 21(1) 燃料プールスブレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-2) のモード図 (1 次)

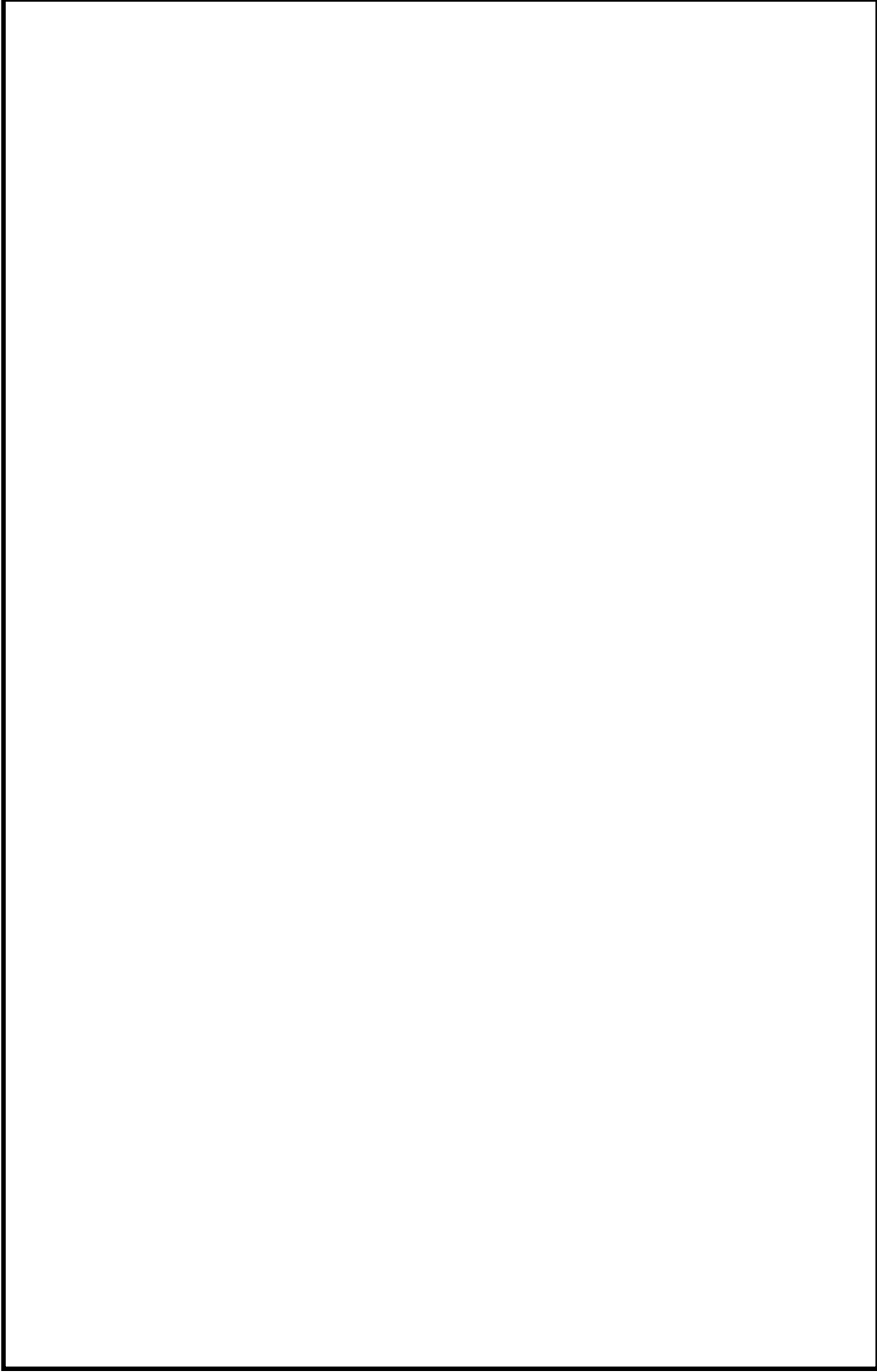


図 21(2) 燃料プールスプレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-2) のモード図 (2次)

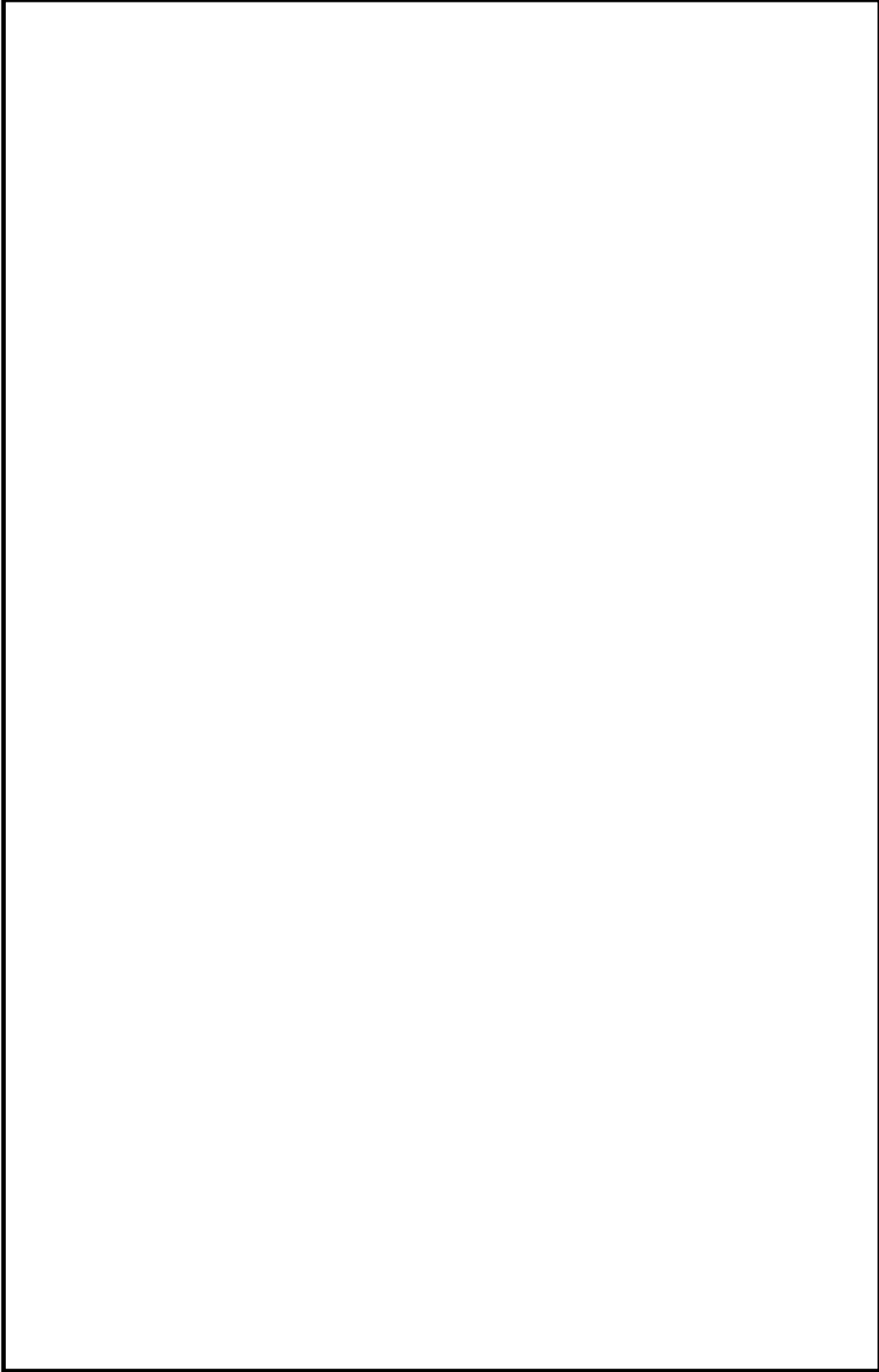


図 21(3) 燃料プールスプレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-2) のモード図 (3 次)

e. 解析結果

設計用床応答スペクトルを用いた地震応答解析結果及び静的解析結果，検討用床応答スペクトルを用いた地震応答解析結果を示す。

(a) 燃料プールスプレイ系配管（モデル No. SFPS-R-3）

評価結果を表 11 に示すとともに，最大応力発生部位を図 22 に示す。燃料プールスプレイ系配管（モデル No. SFPS-R-3）について，設計用床応答スペクトルを用いた地震応答解析結果 192MPa に対して，検討用床応答スペクトルを用いた地震応答解析結果は 192MPa であり，同等であることが確認された。

表 11 燃料プールスプレイ系配管（モデル No. SFPS-R-3）の評価結果

(質点 98)		一次応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
現行の手法	設計用床応答スペクトル	192	431
	静的解析 (1.2ZPA)	74	
	包絡値	192	
妥当性検討用	検討用床応答スペクトル	192	431



図 22 燃料プールスプレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-3) の最大応力発生部位

(b) 残留熱除去系配管（モデル No. RHR-PD-8）

評価結果を表 12 に示すとともに、最大応力発生部位を図 23 に示す。残留熱除去系配管（モデル No. RHR-PD-8）について、設計用床応答スペクトルを用いた地震応答解析結果 63MPa に対して、検討用床応答スペクトルを用いた地震応答解析結果は 65MPa であり、発生応力は増加したものの、その増分は僅かであることが確認された。なお、現行の手法のうち静的解析（1.2ZPA）結果は 74MPa であり、現行の手法の結果が検討用床応答スペクトルを用いた地震応答解析結果を上回ることが確認された。

表 12 残留熱除去系配管（モデル No. RHR-PD-8）の評価結果

(質点 17)		一次応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
現行の手法	設計用床応答スペクトル	63	364
	静的解析 (1.2ZPA)	74	
	包絡値	74	
妥当性検討用	検討用床応答スペクトル	65	364

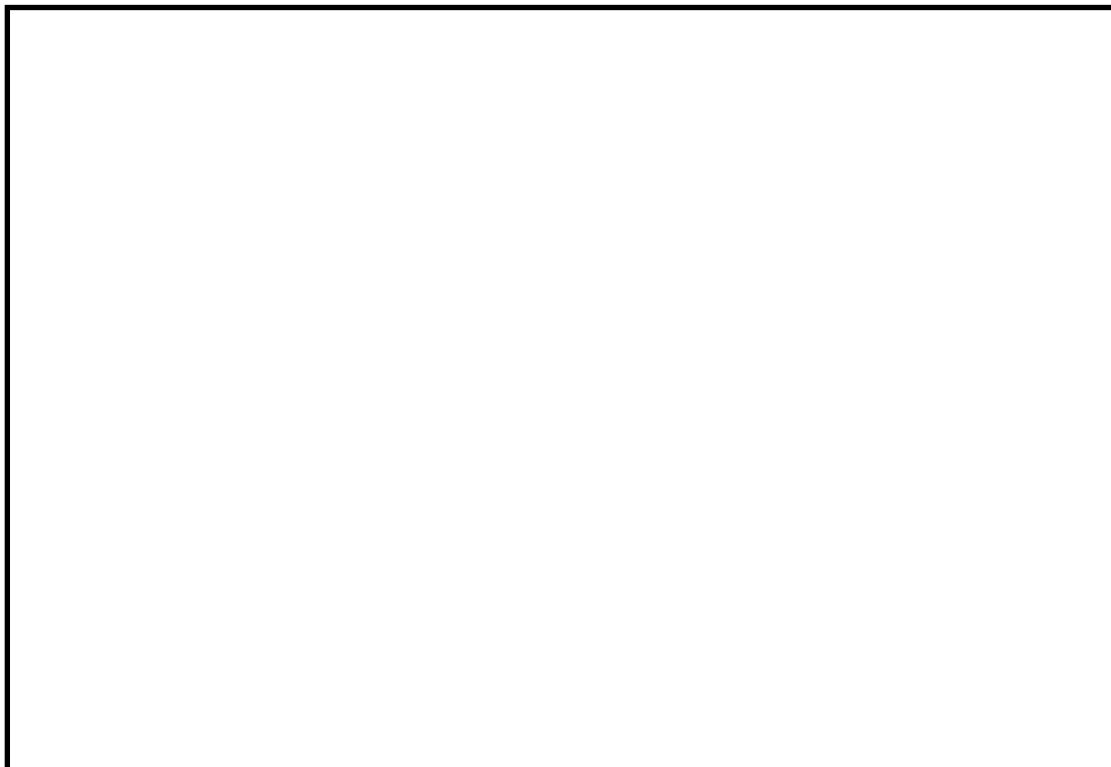


図 23 残留熱除去系配管（モデル No. RHR-PD-8）の最大応力発生部位

(c) 燃料プールスプレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-2)

評価結果を表 13 に示すとともに、最大応力発生部位を図 24 に示す。燃料プールスプレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-2) について、設計用床応答スペクトルを用いた地震応答解析結果 143MPa に対して、検討用床応答スペクトルを用いた地震応答解析結果は 143MPa であり、同等であることが確認された。

表 13 燃料プールスプレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-2) の評価結果

(質点 37)		一次応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
現行の手法	設計用床応答スペクトル	143	431
	静的解析 (1.2ZPA)	47	
	包絡値	143	
妥当性検討用	検討用床応答スペクトル	143	431

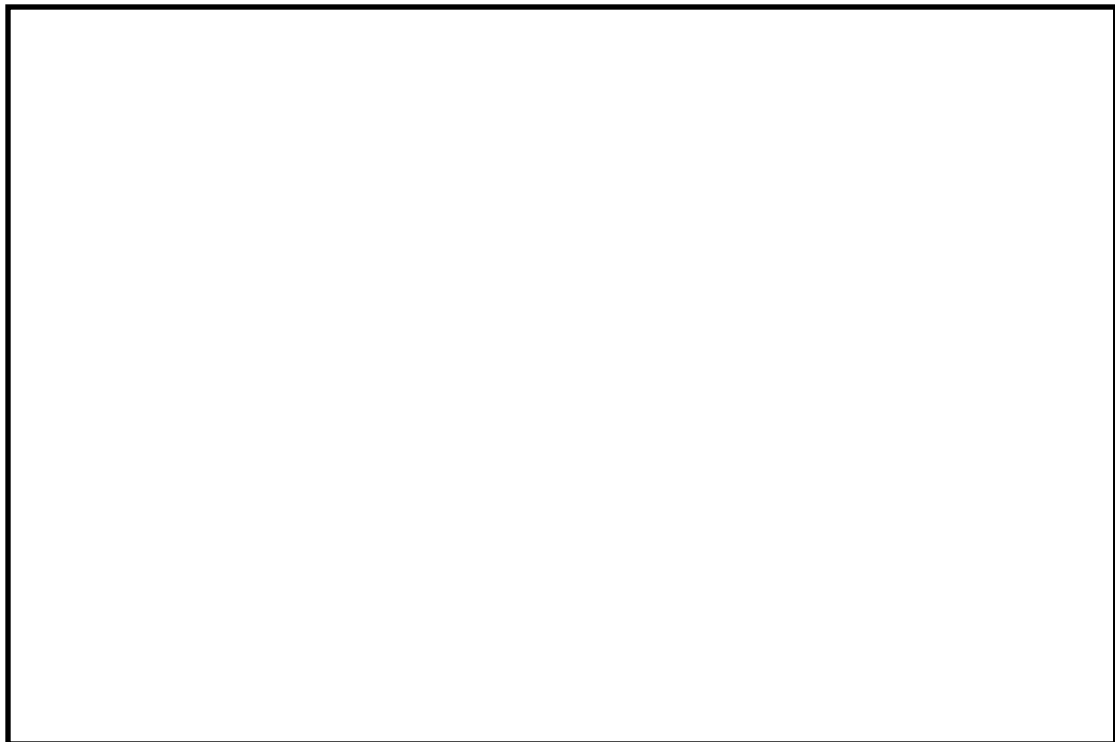


図 24 燃料プールスプレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-2) の最大応力発生部位

以上のとおり，設計用床応答スペクトルによる地震応答解析結果に対して，検討用床応答スペクトルを用いた地震応答解析結果による発生応力の増加は僅か，若しくは同等であることが確認できた。

発生応力の増加が僅かである理由としては，図 11 変位応答スペクトルで示したように，高振動数側では応答変位が小さく，機器に発生する応力への寄与は，低振動数側と比較しても相対的に小さくなるため，20Hz 未満の振動数領域での応力が支配的となり，20Hz 以上の振動数領域を考慮しても有意な応力の上昇が現れなかったものと考えられる。

(4) まとめ

剛柔判定の固有周期を 0.05 秒 (20Hz) とし，現行手法で解析を実施することの妥当性検討として，表 14 に示す配管を対象に地震応答解析を実施した。

表 14 妥当性検討に用いた対象設備

対象設備	選定理由
燃料プールのプレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-3)	水平方向で 20Hz 近傍の加速度が最も大きい原子炉建物 EL51.700m の設計用床応答スペクトルを適用し評価する設備のうち，一次応力の裕度が小さい設備として選定した。
残留熱除去系配管 (モデル No. RHR-PD-8)	鉛直方向で 20Hz 近傍の加速度が最も大きいガンマ線遮蔽壁 EL29.962m の設計用床応答スペクトルを適用し評価する設備のうち，一次応力の裕度が小さい設備として選定した。
燃料プールのプレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-2)	20Hz 近傍に 1 次固有振動数を有し，2 次固有振動数が 20Hz 以上となる設備として選定した。

解析結果のまとめを表 15 に示す。

燃料プールのプレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-3) は，最大応力となる評価点 98 の発生応力については，1 次モード () Hz) の応答が支配的な影響を有しており，設計用床応答スペクトルと検討用床応答スペクトルの差異が生じる剛領域の影響をほとんど受けないことから，設計用床応答スペクトルでの評価結果と検討用床応答スペクトルでの評価結果が同等となると考えられる。

残留熱除去系配管 (モデル No. RHR-PD-8) は，最大応力となる評価点 17 の発生応力については 4 次モード () Hz) の応答が比較的大きな影響を有しており，これらの振動モードは，設計用床応答スペクトルと検討用床応答スペクトルにおいて比較的差異が小さい領域にあることから，動的解析結果においては両ケースの評価結果がほぼ同等となると考えられる。

燃料プールのプレイ系配管 (モデル No. SFPS-R-2) は，最大応力となる評価点 37 の発生応力については，1 次モード () Hz) の応答が支配的な影響を有しており，設計用床応答スペクトルと検討用床応答スペクトルの差異が生じる剛領域の影響をほとんど受けないことか

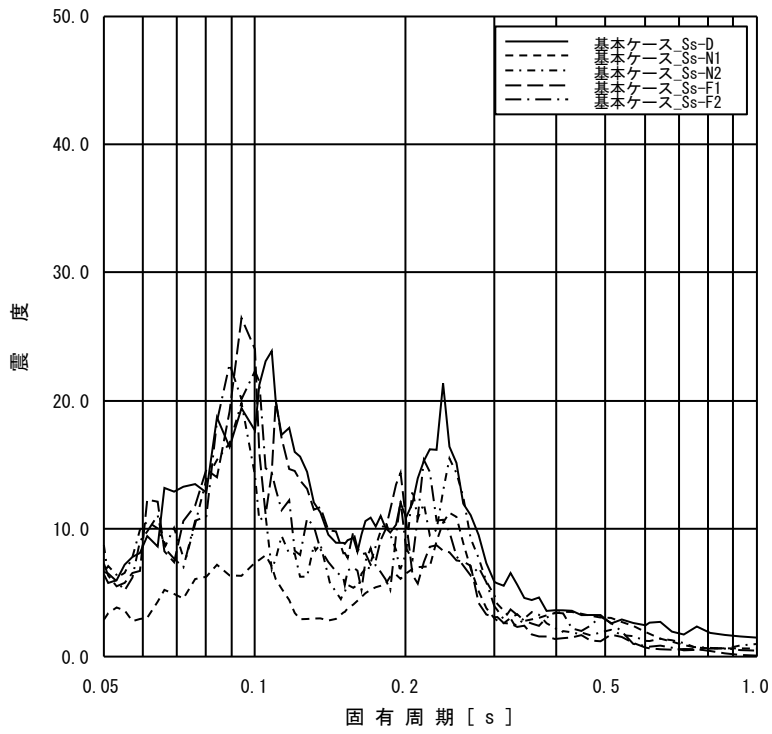
ら、設計用床応答スペクトルでの評価結果と検討用床応答スペクトルでの評価結果が同等となると考えられる。

以上の結果から、剛柔判定の固有周期を 0.05 秒 (20Hz) とし、現行の手法で解析を実施することは、耐震設計を行う上で妥当である。

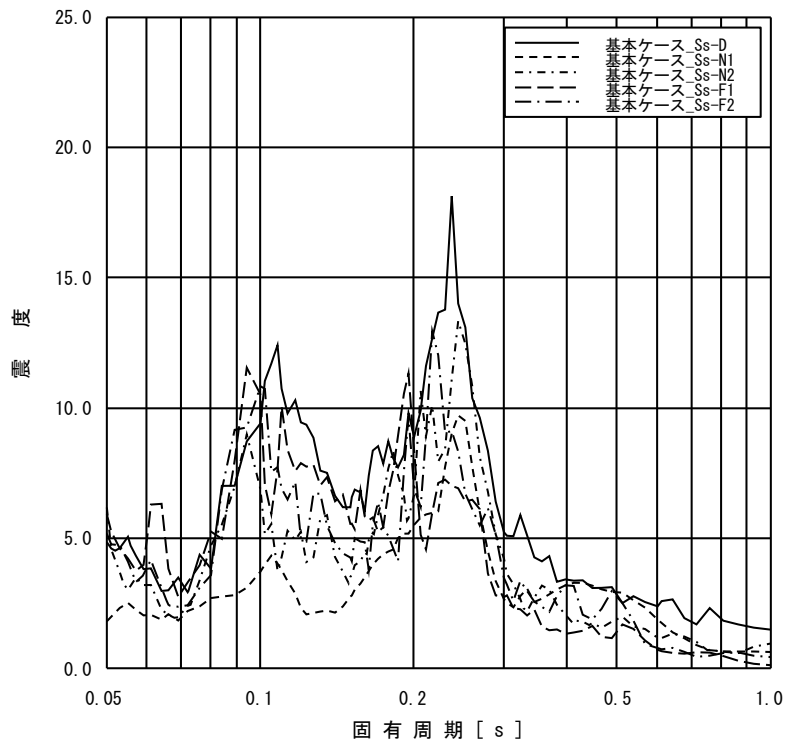
なお、弁の動的機能維持評価については、補足-027-5「弁の動的機能維持評価について」に示すとおり、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈等における動的機能維持に関する評価に係る一部改正及びそれに伴い改正された耐震設計に係る工認審査ガイドの記載を踏まえて、20Hz を超える高振動数領域を考慮した地震応答解析により弁の応答加速度を算定し耐震評価を実施する。

表 15 現行手法及び妥当性検討の評価結果まとめ

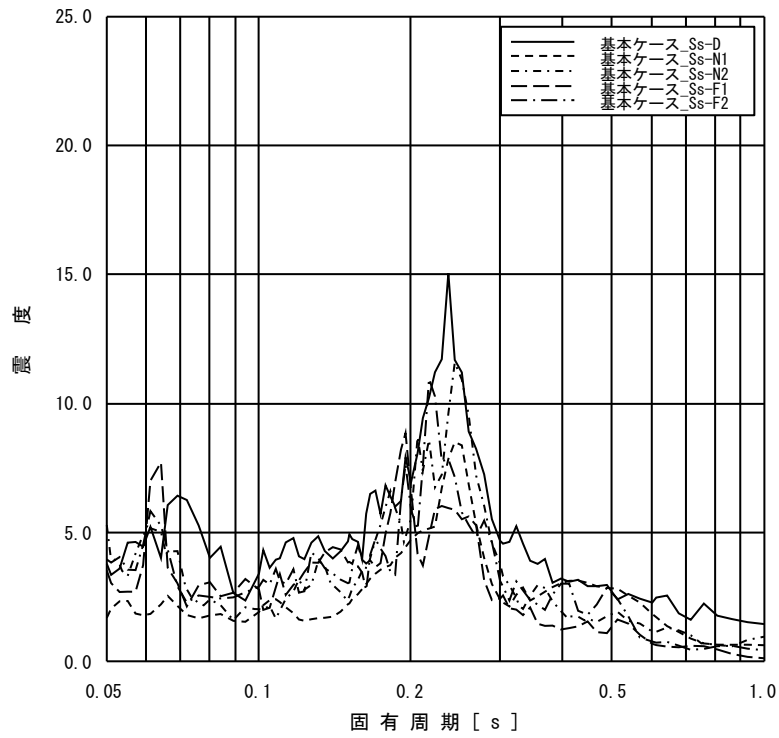
モデル名	発生応力 (MPa)			許容応力 (MPa)
	最大応力 評価点	現行手法	妥当性検討	
SFPS-R-3	98	192 動的解析：192 静的解析：74	192	431
RHR-PD-8	17	74 動的解析：63 静的解析：74	65	364
SFPS-R-2	37	143 動的解析：143 静的解析：47	143	431



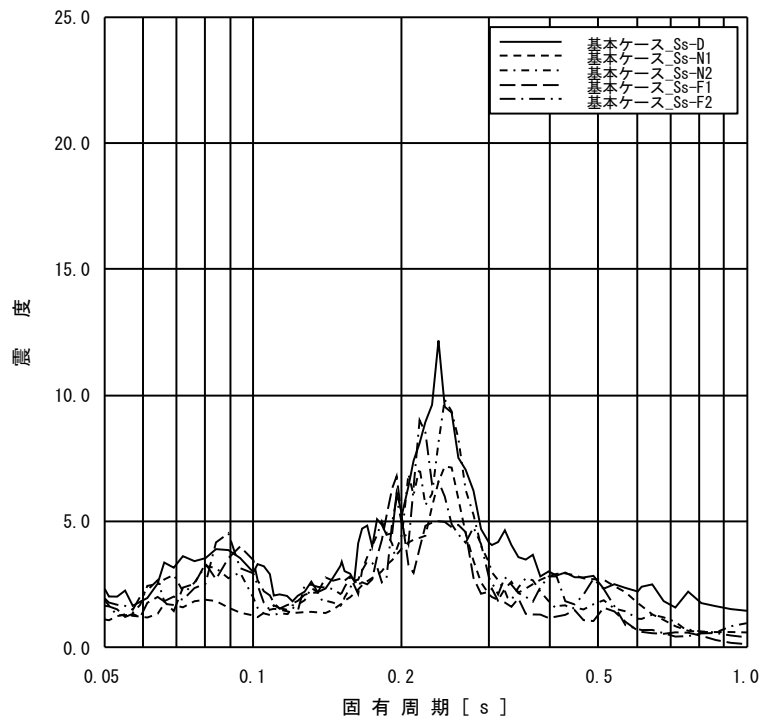
添付図 1(1) 原子炉建物 EL63.500m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



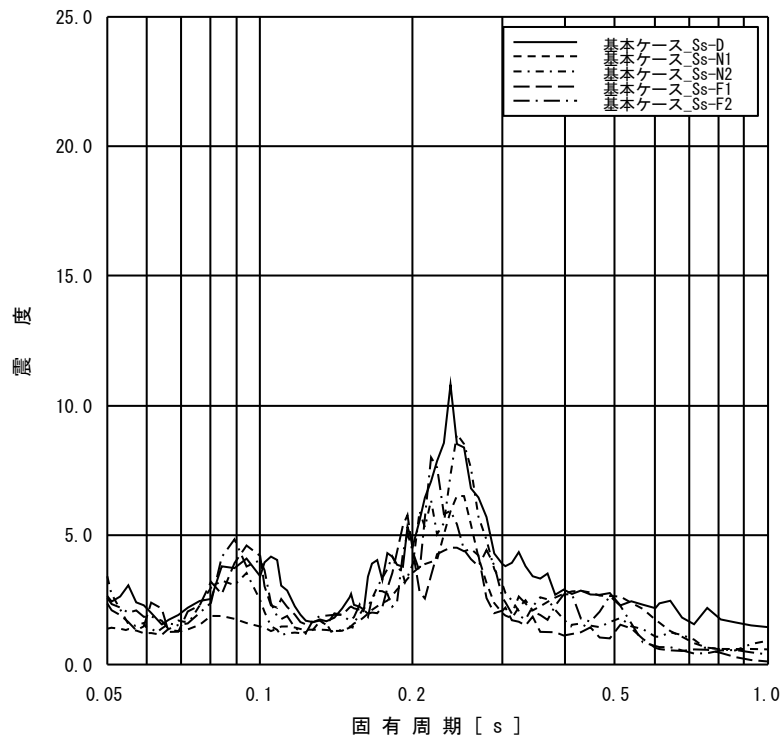
添付図 1(2) 原子炉建物 EL51.700m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



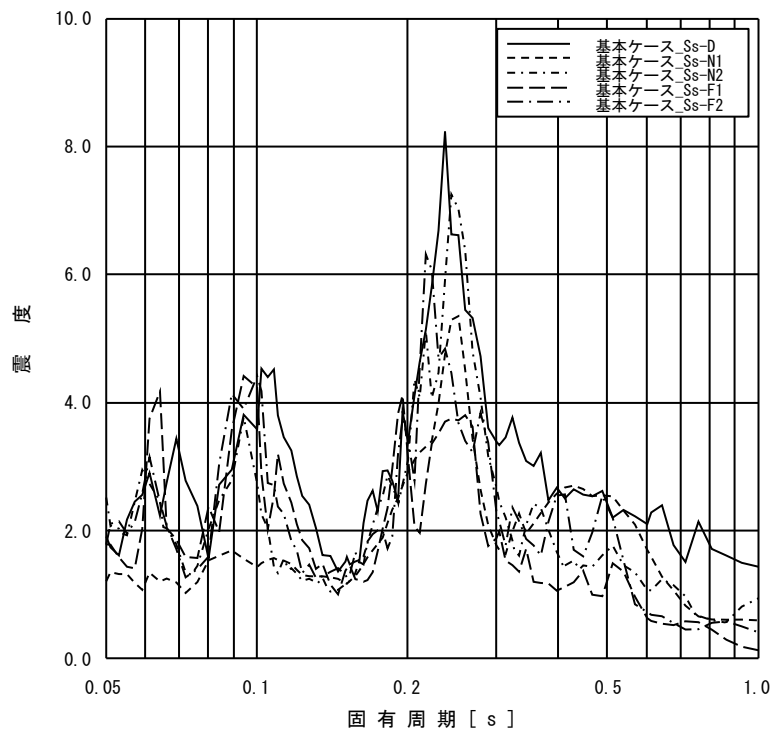
添付図 1(3) 原子炉建物 EL42.800m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



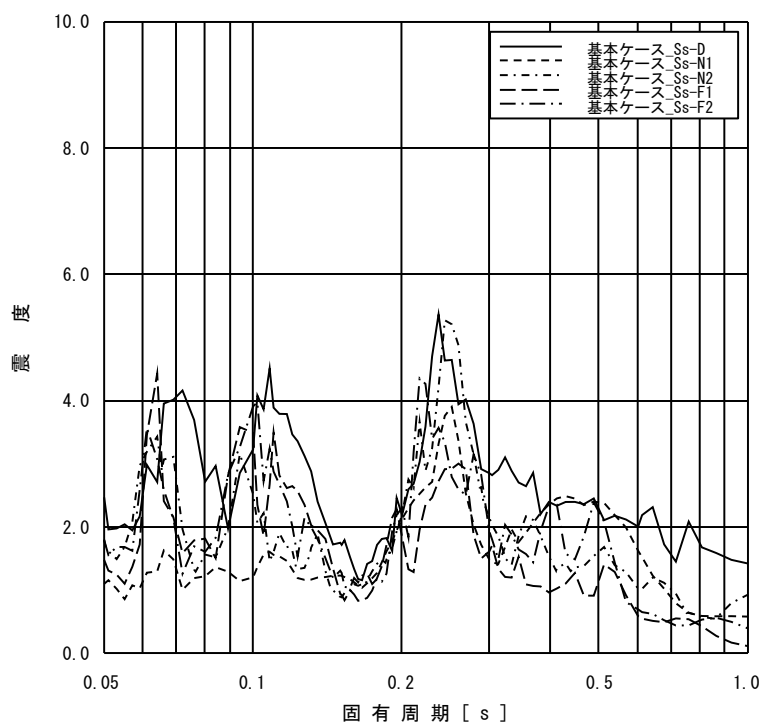
添付図 1(4) 原子炉建物 EL34.800m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



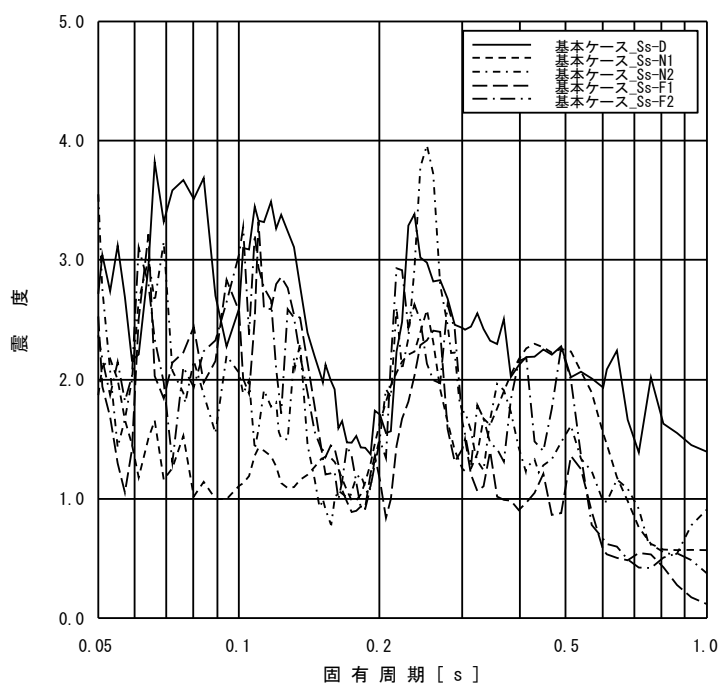
添付図 1(5) 原子炉建物 EL30.500m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



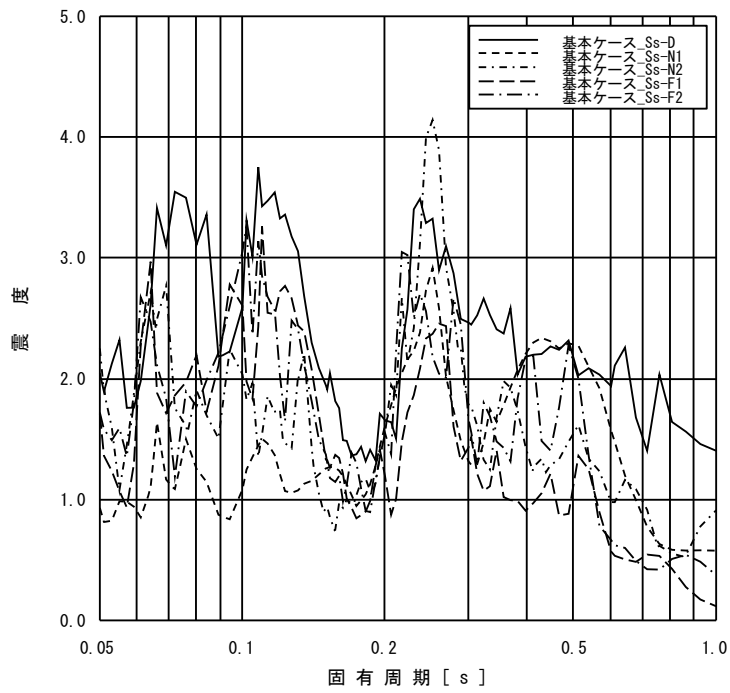
添付図 1(6) 原子炉建物 EL23.800m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



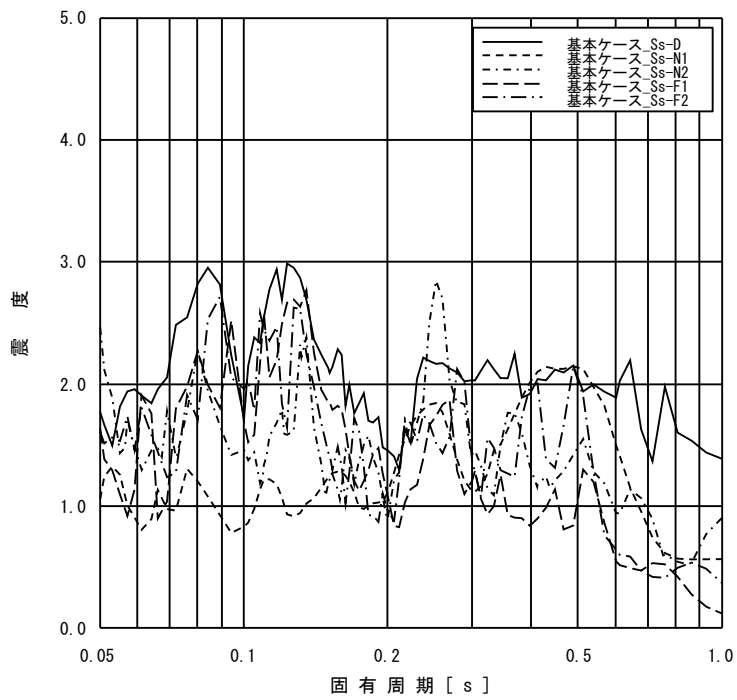
添付図 1(7) 原子炉建物 EL15.300m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



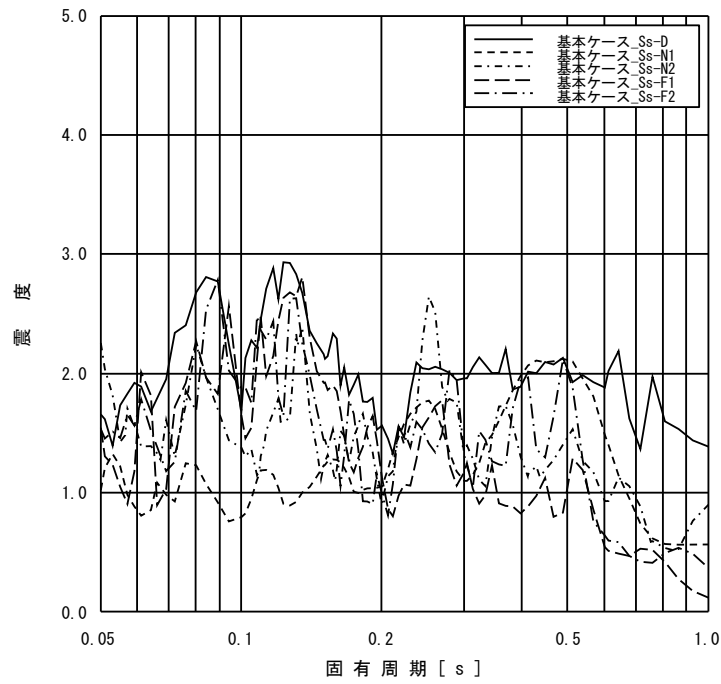
添付図 1(8) 原子炉建物 EL10.100m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



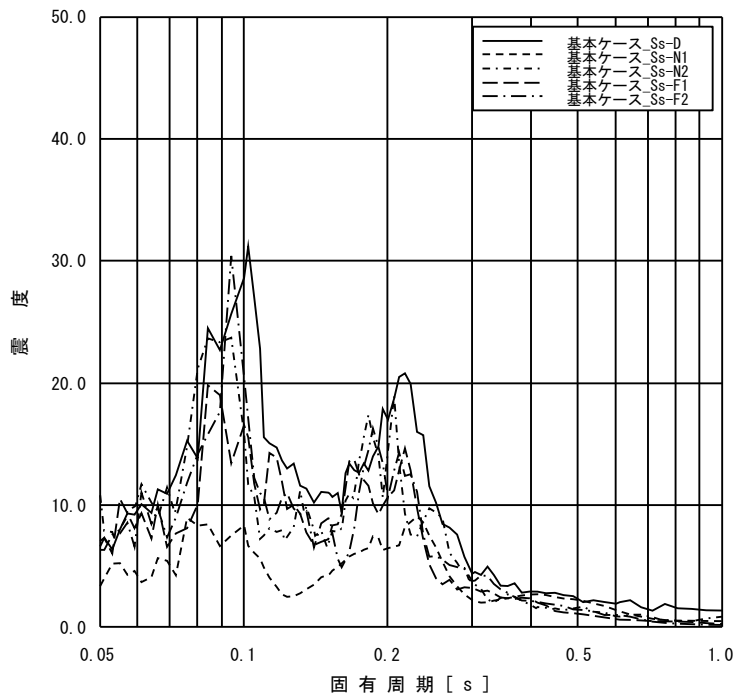
添付図 1(9) 原子炉建物 EL8.800m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



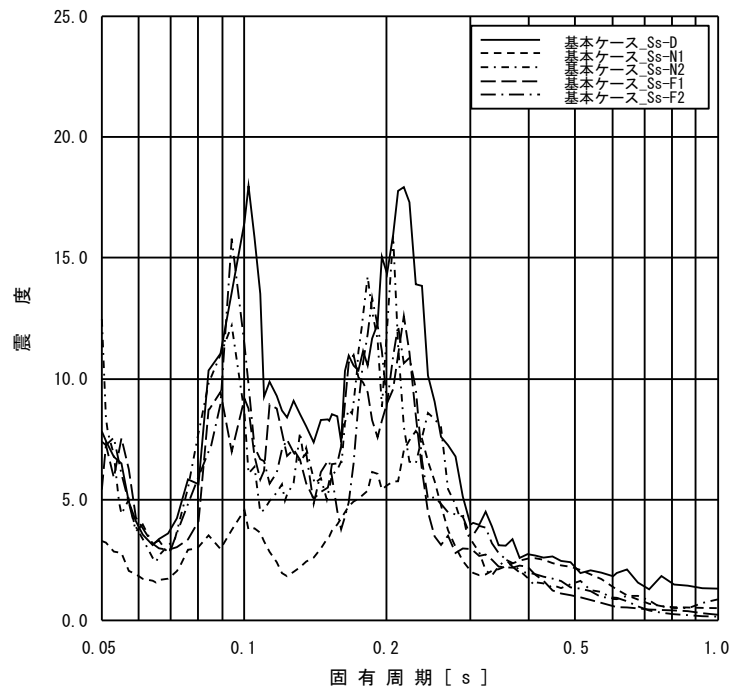
添付図 1(10) 原子炉建物 EL1.300m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



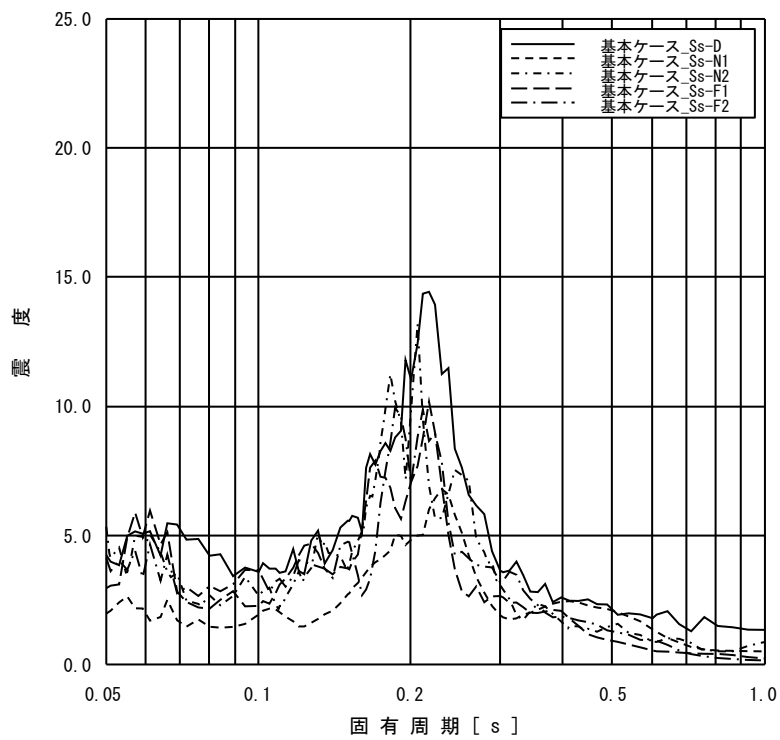
添付図 1(11) 原子炉建物 EL-4.700m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



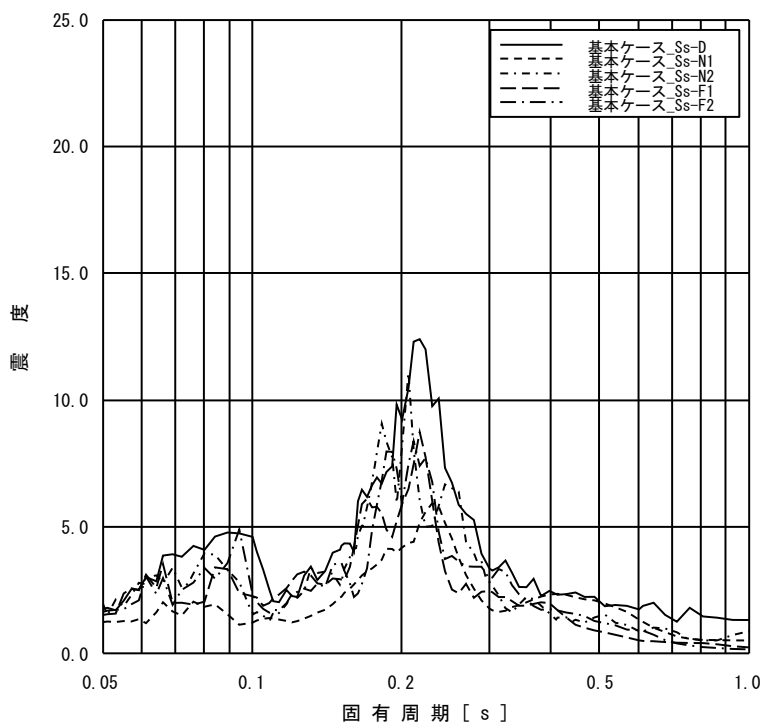
添付図 2(1) 原子炉建物 EL63.500m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



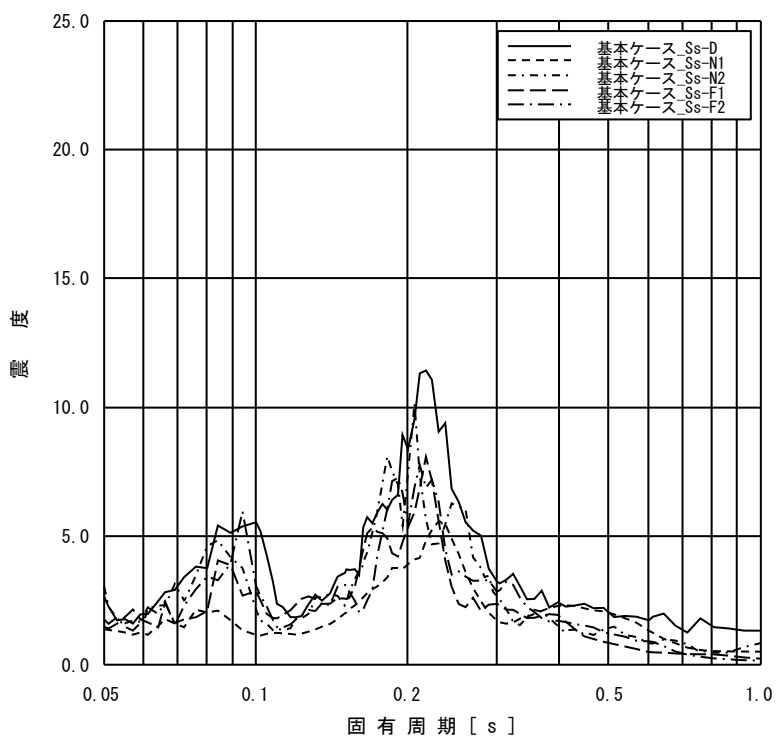
添付図 2(2) 原子炉建物 EL51.700m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



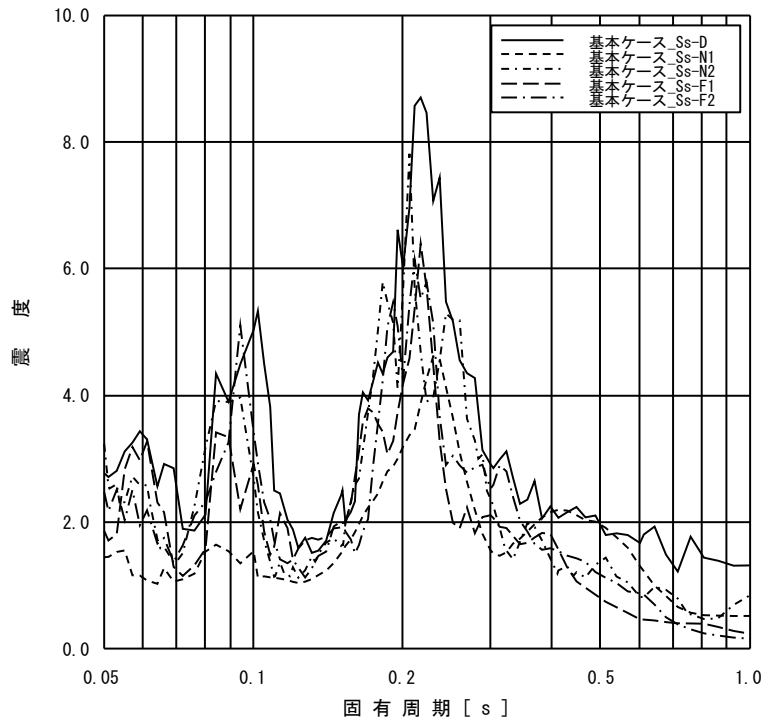
添付図 2(3) 原子炉建物 EL42.800m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



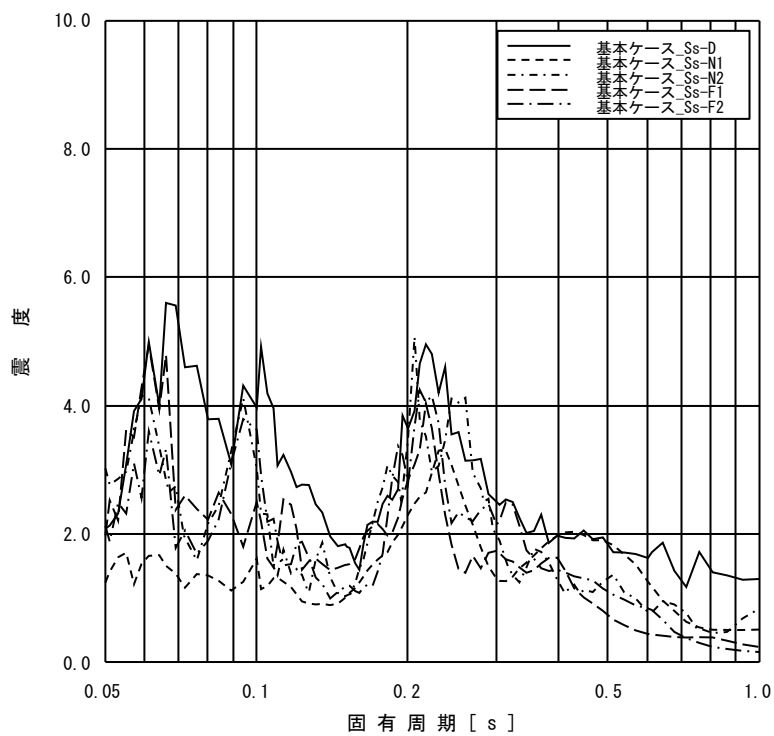
添付図 2(4) 原子炉建物 EL34.800m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



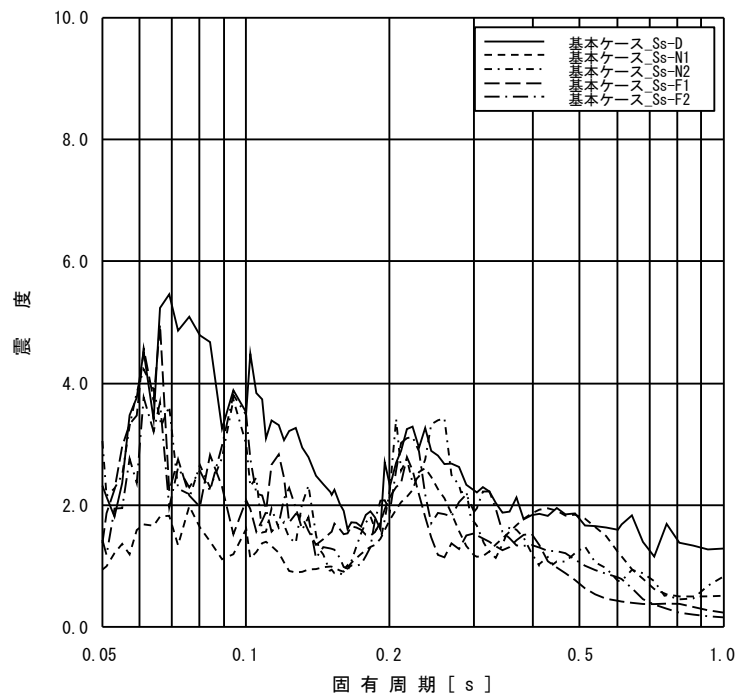
添付図 2(5) 原子炉建物 EL30.500m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



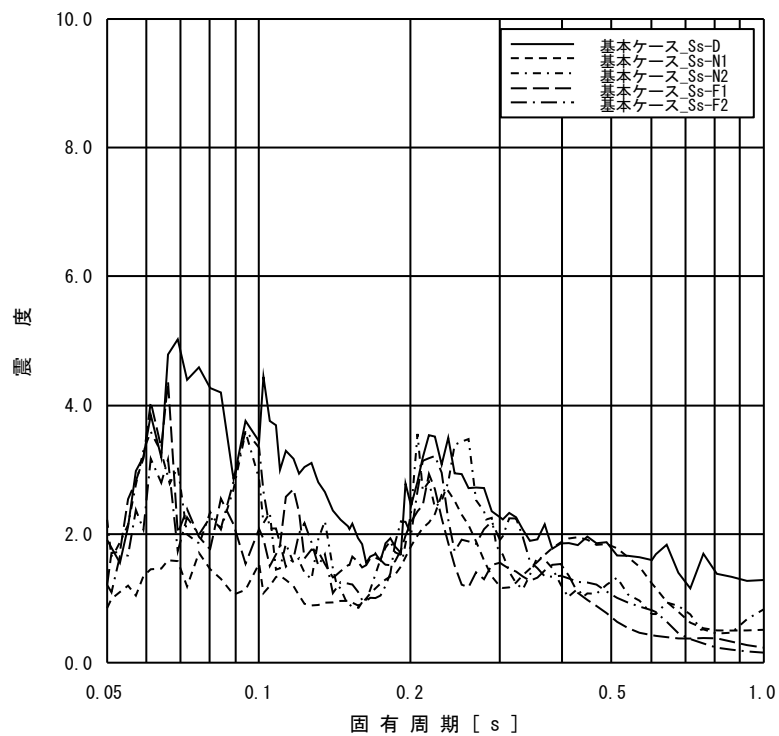
添付図 2(6) 原子炉建物 EL23.800m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



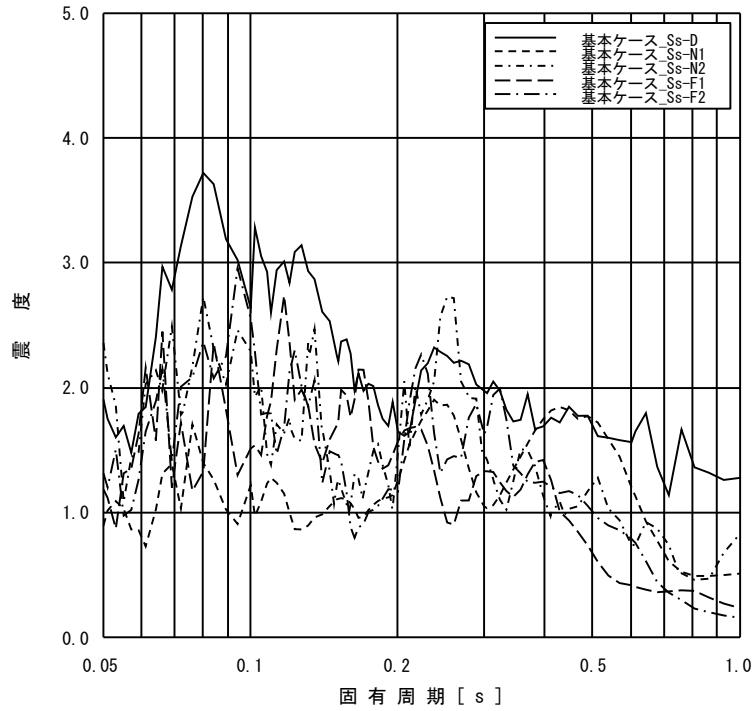
添付図 2(7) 原子炉建物 EL15.300m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



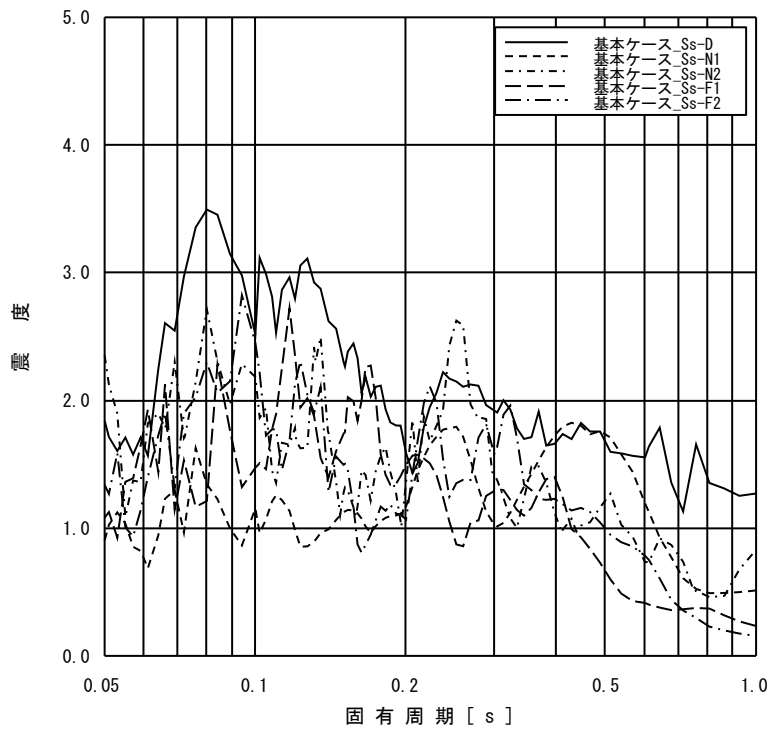
添付図 2(8) 原子炉建物 EL10.100m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



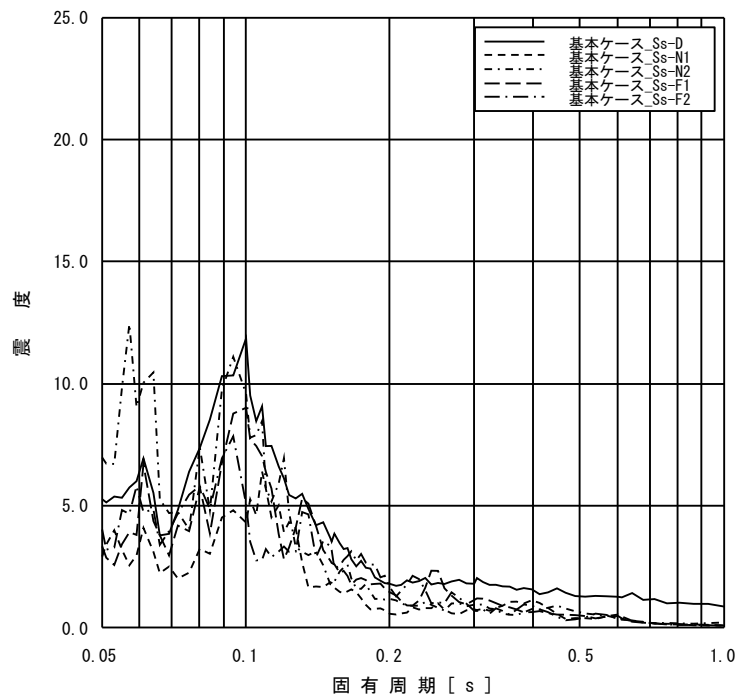
添付図 2(9) 原子炉建物 EL8.800m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



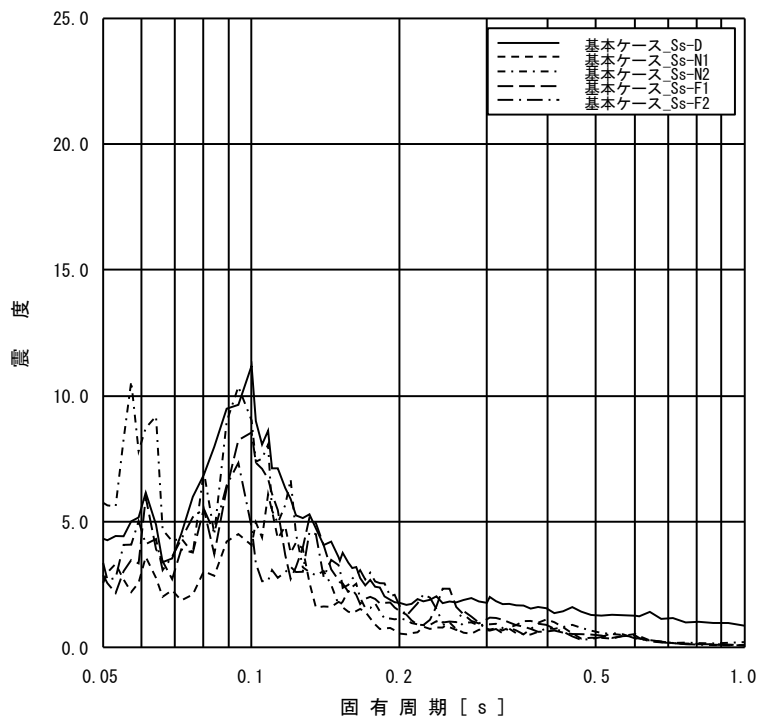
添付図 2(10) 原子炉建物 EL1.300m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



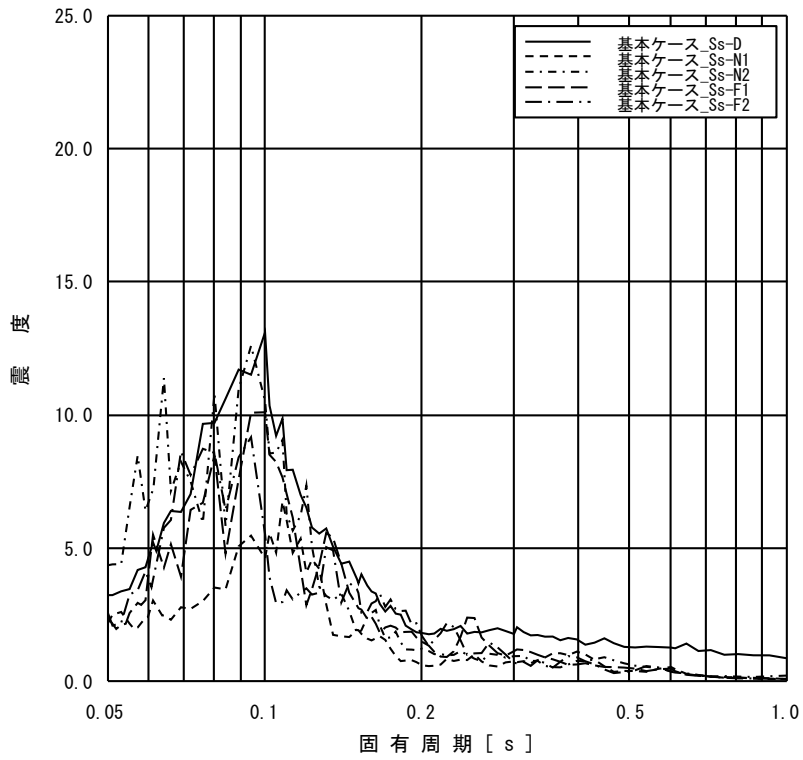
添付図 2(11) 原子炉建物 EL-4.700m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



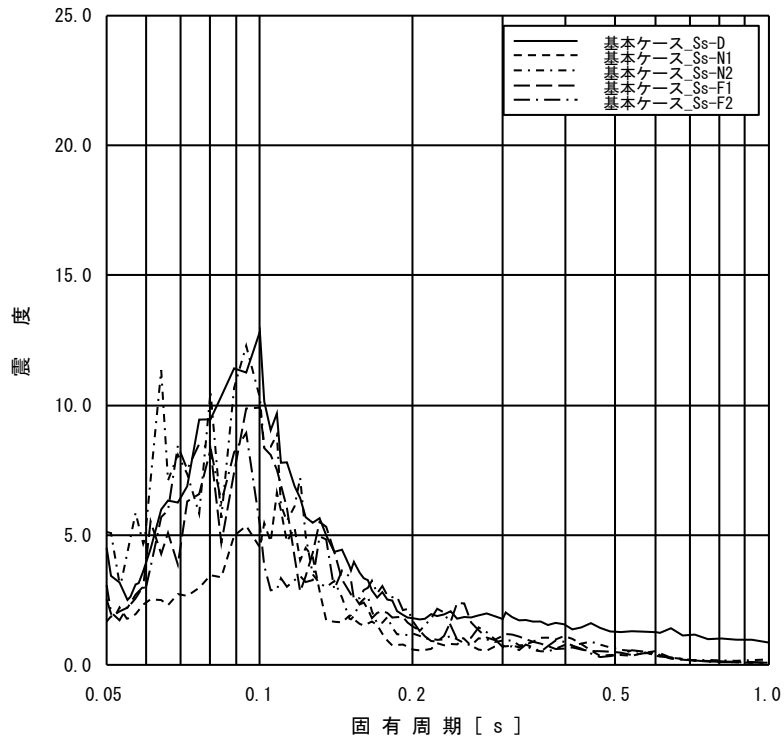
添付図 3(1) 原子炉建物 EL63.500m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



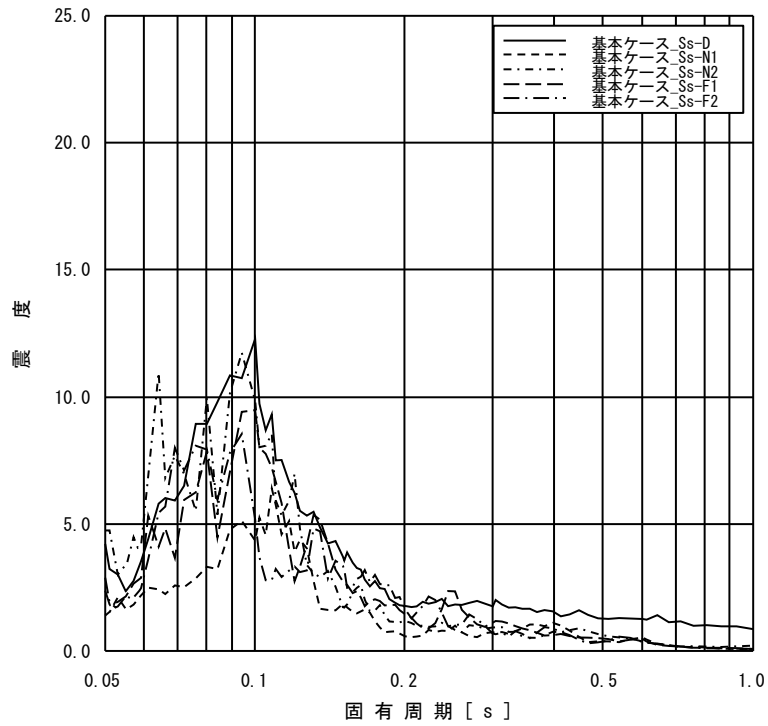
添付図 3(2) 原子炉建物 EL51.700m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



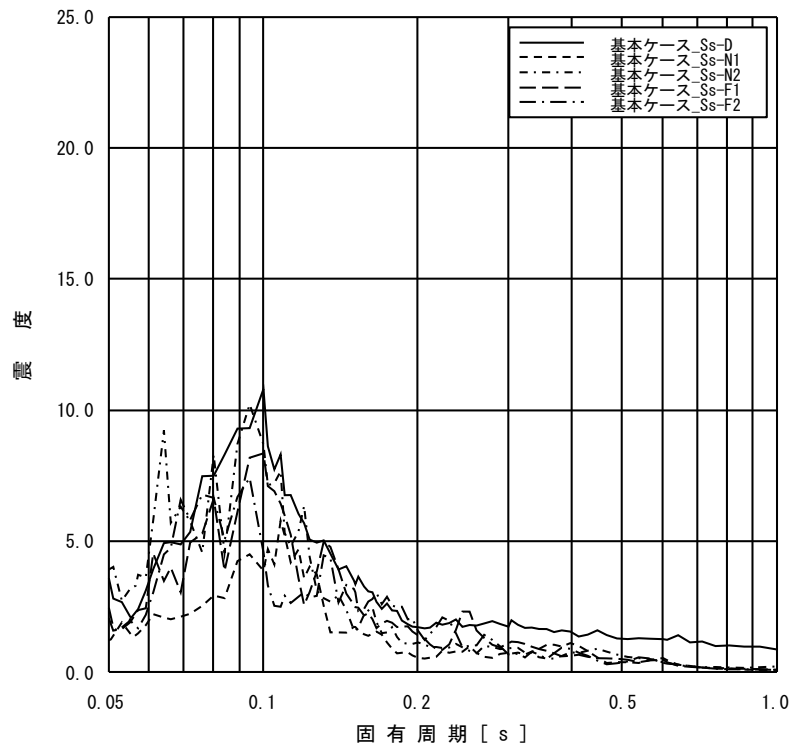
添付図 3(3) 原子炉建物 EL42.800m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



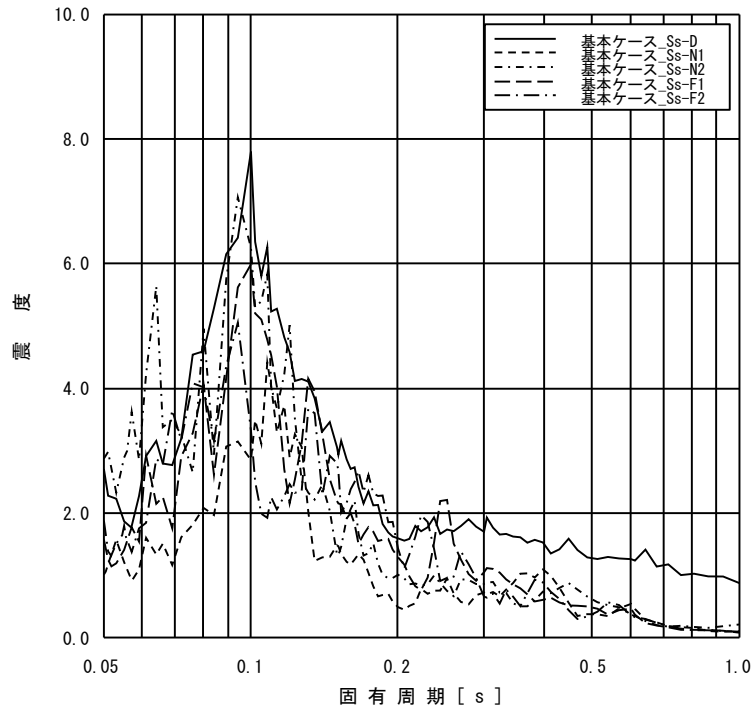
添付図 3(4) 原子炉建物 EL34.800m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



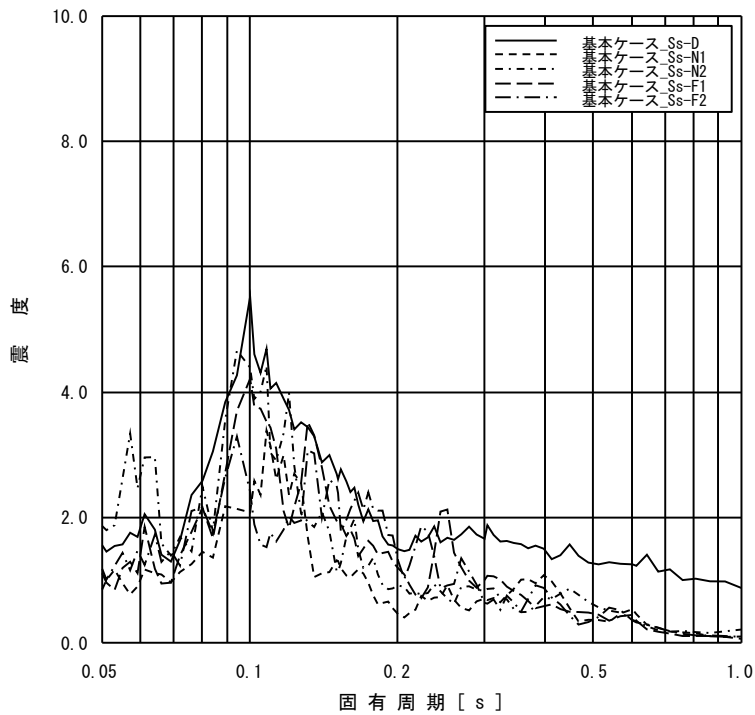
添付図 3(5) 原子炉建物 EL30.500m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



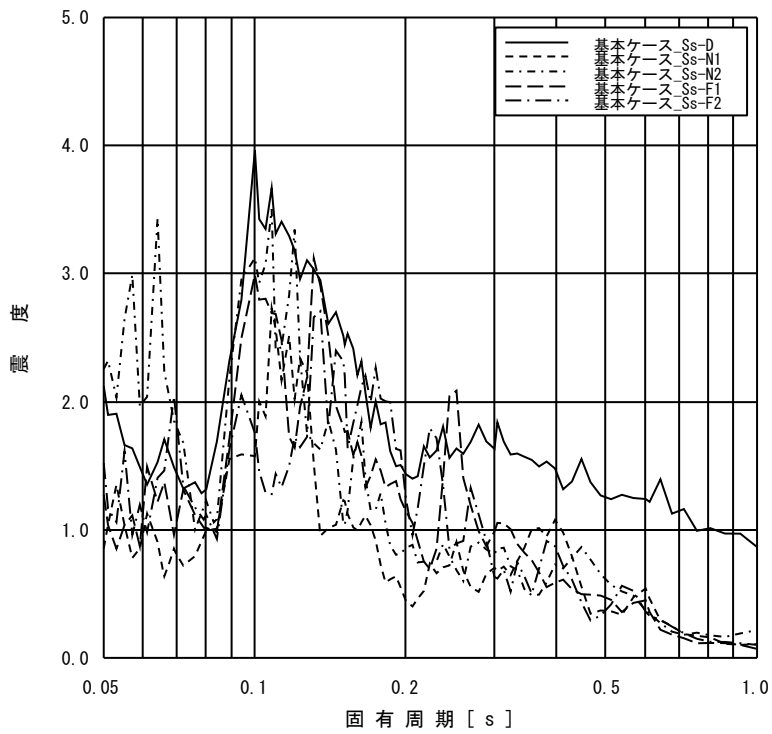
添付図 3(6) 原子炉建物 EL23.800m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



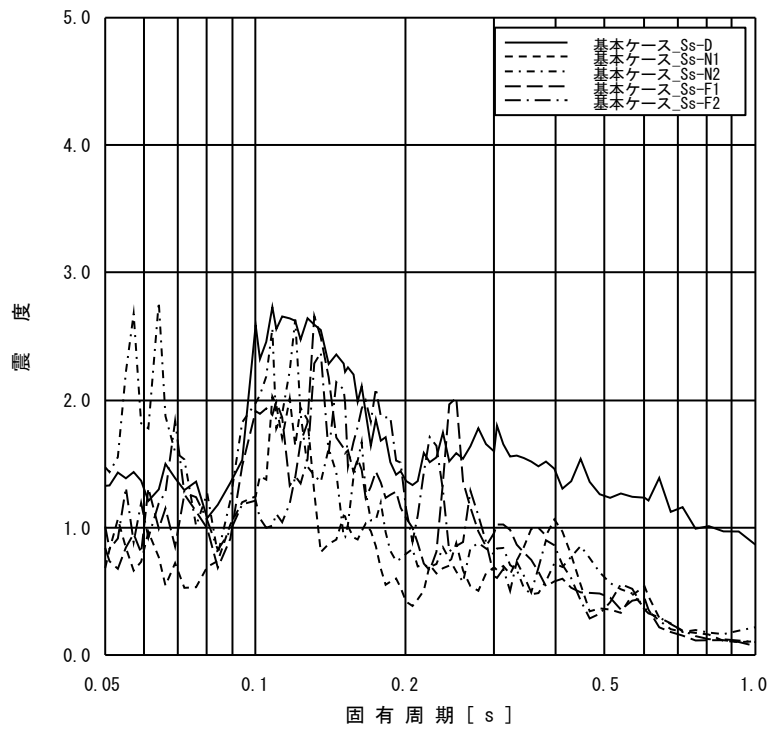
添付図 3(7) 原子炉建物 EL15.300m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



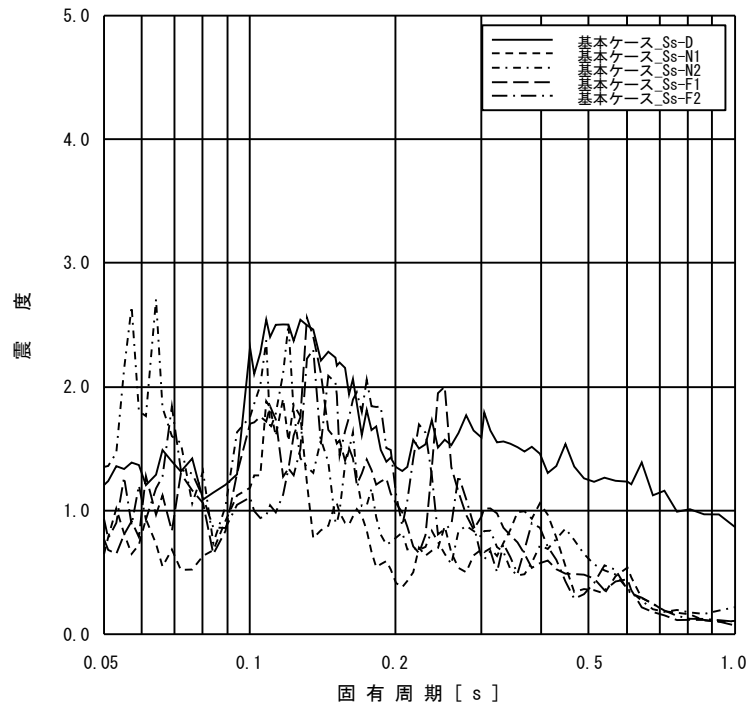
添付図 3(8) 原子炉建物 EL10.100m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



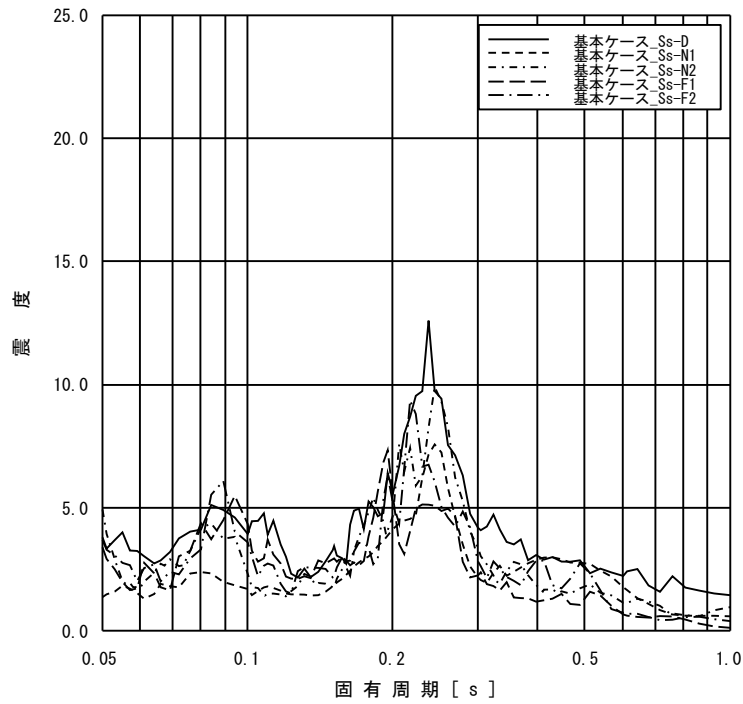
添付図 3(9) 原子炉建物 EL8.800m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



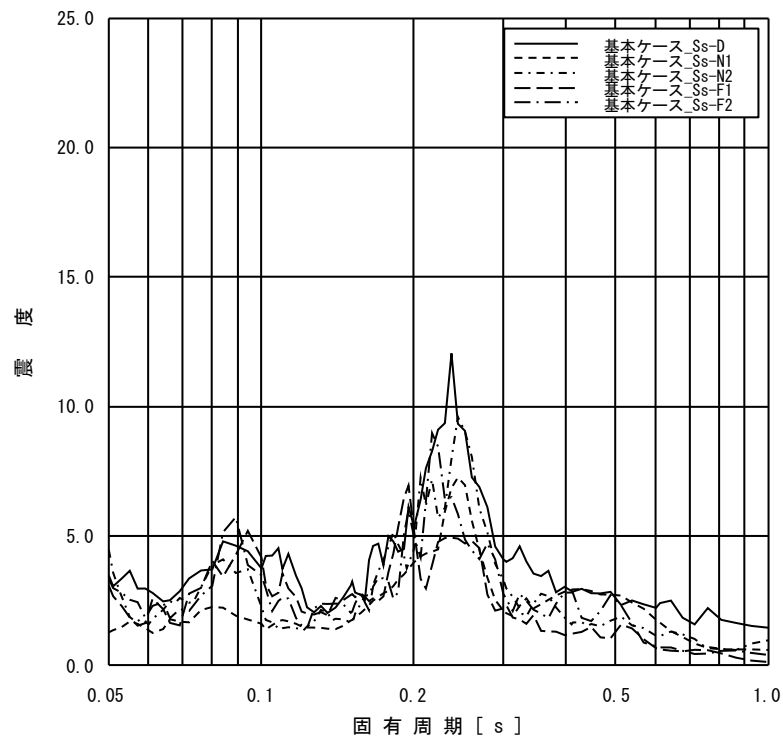
添付図 3(10) 原子炉建物 EL1.300m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



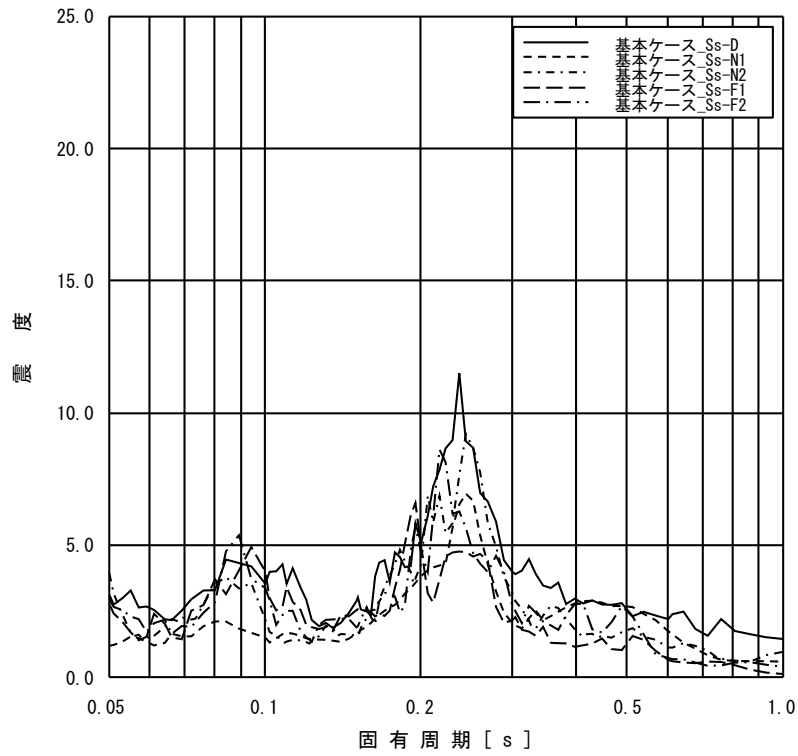
添付図 3(11) 原子炉建物 EL-4.700m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



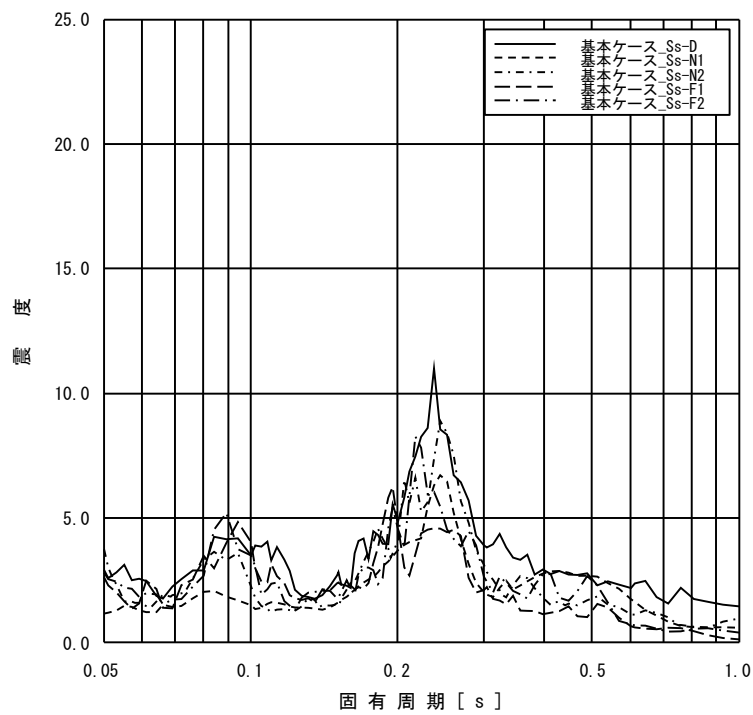
添付図 4(1) 原子炉格納容器 EL39.400m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



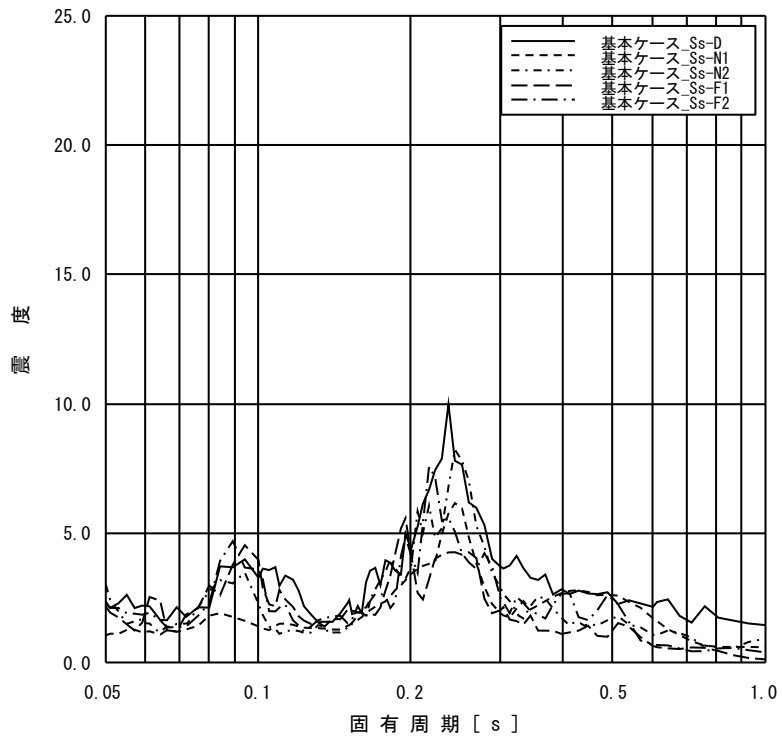
添付図 4(2) 原子炉格納容器 EL37.060m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



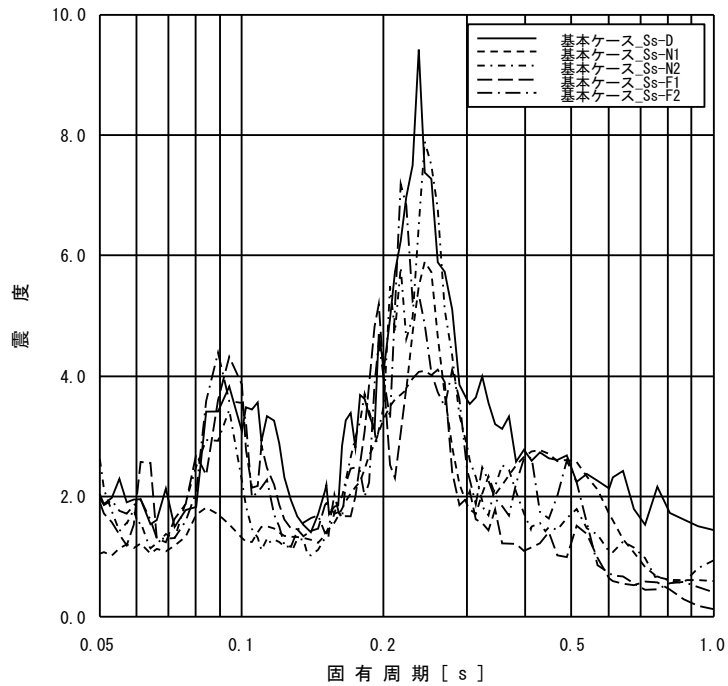
添付図 4(3) 原子炉格納容器 EL34.758m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



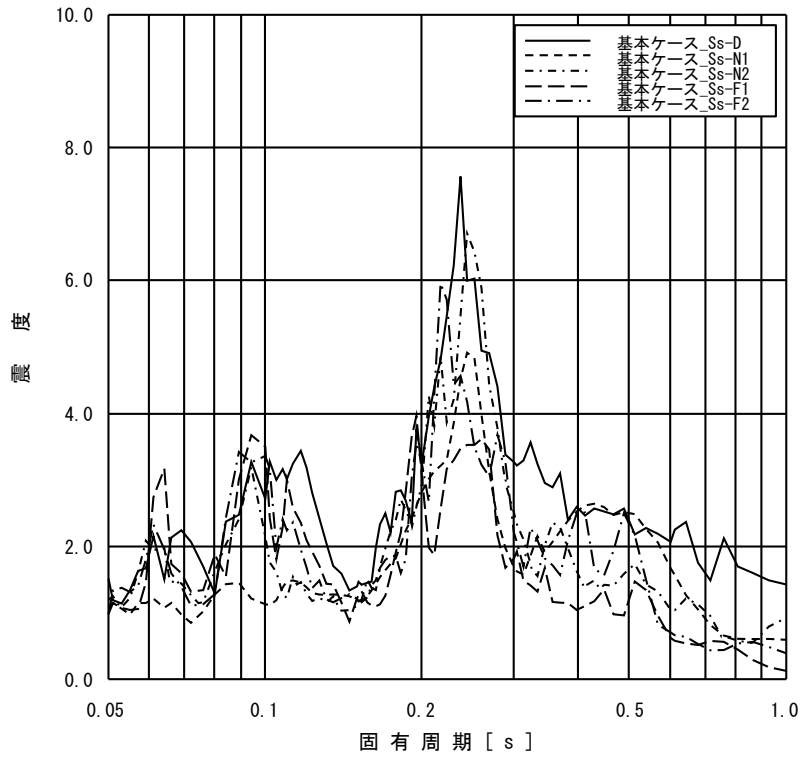
添付図 4(4) 原子炉格納容器 EL33.141m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



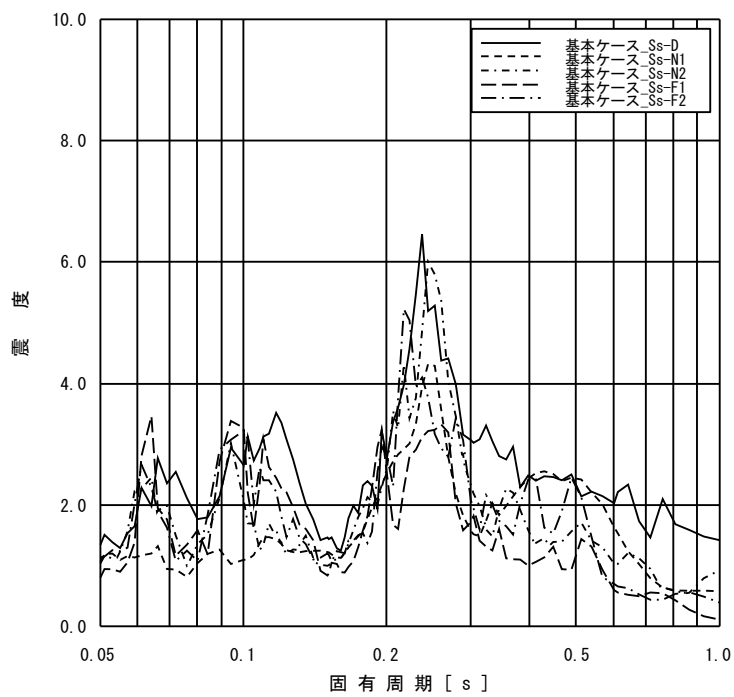
添付図 4(5) 原子炉格納容器 EL29.392m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



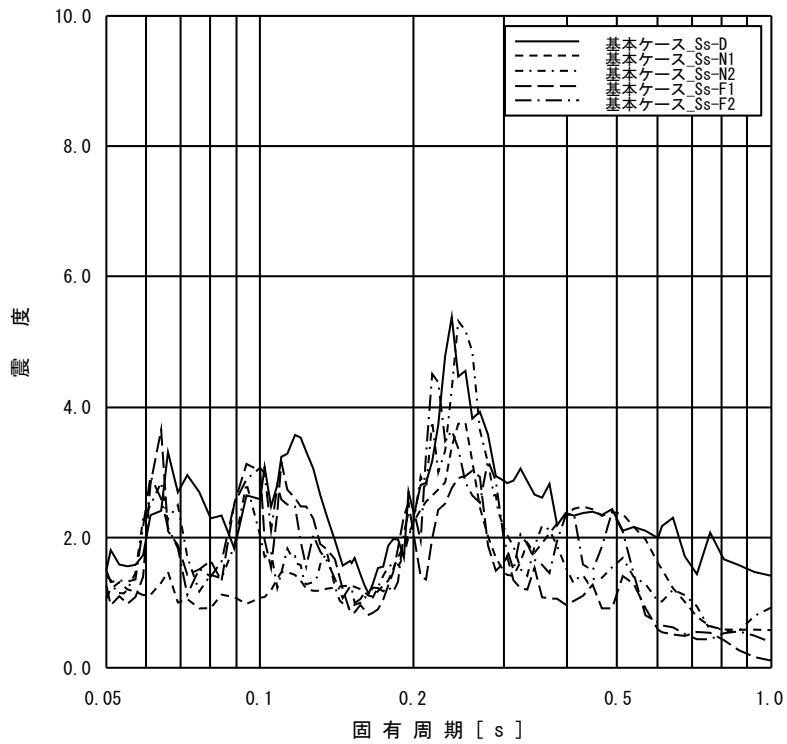
添付図 4(6) 原子炉格納容器 EL27.907m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



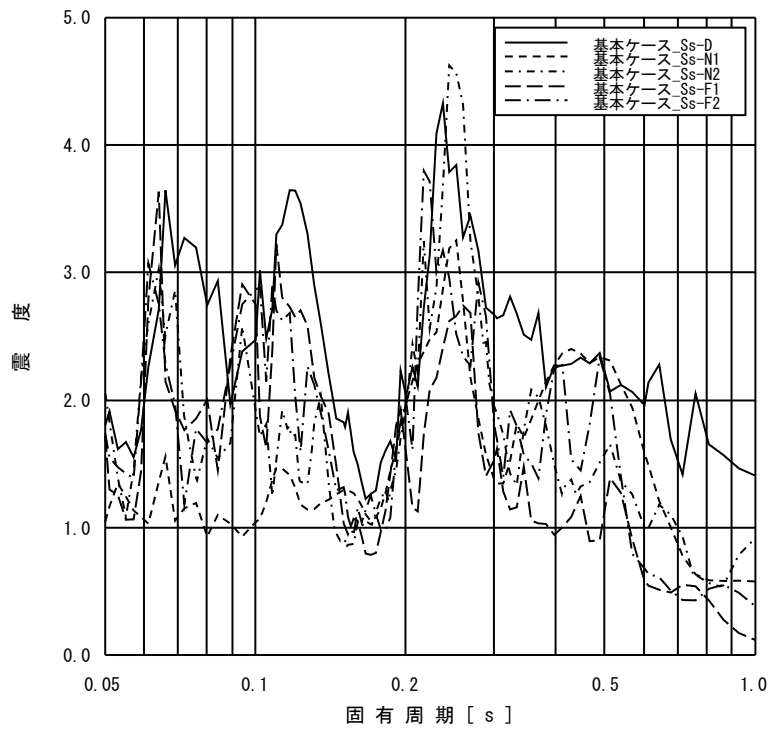
添付図 4(7) 原子炉格納容器 EL22.932m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



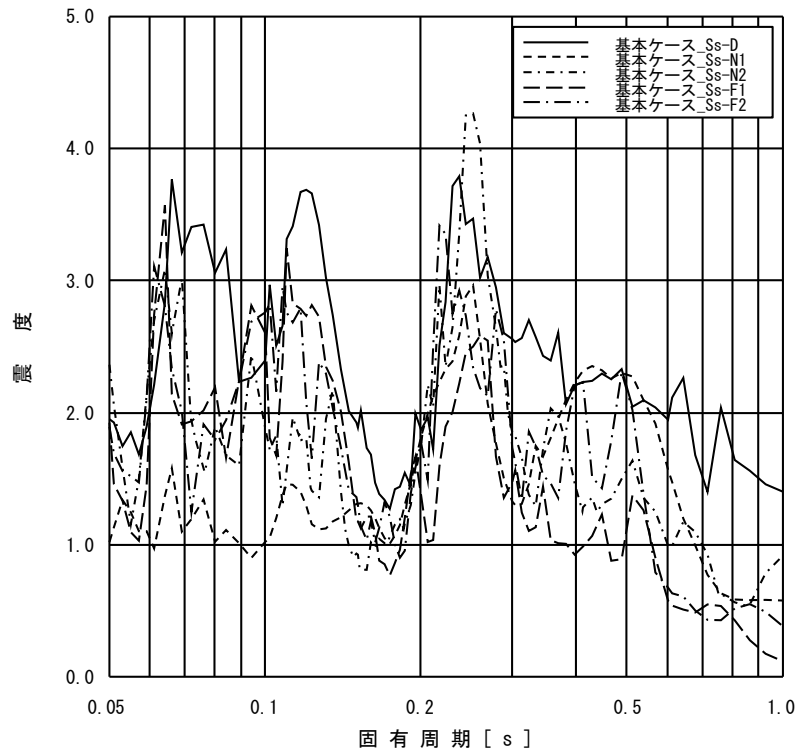
添付図 4(8) 原子炉格納容器 EL19.878m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



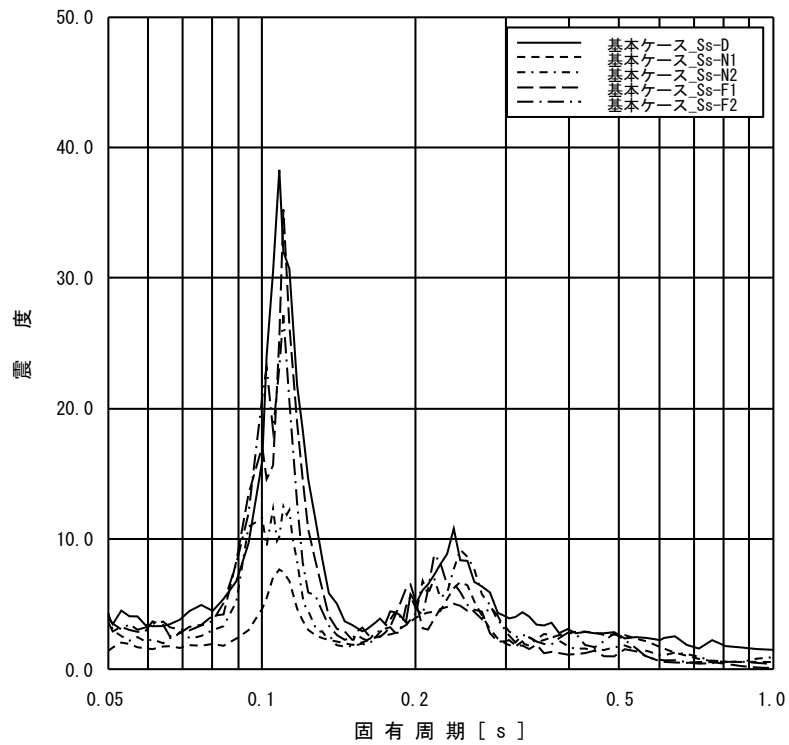
添付図 4(9) 原子炉格納容器 EL16.825m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



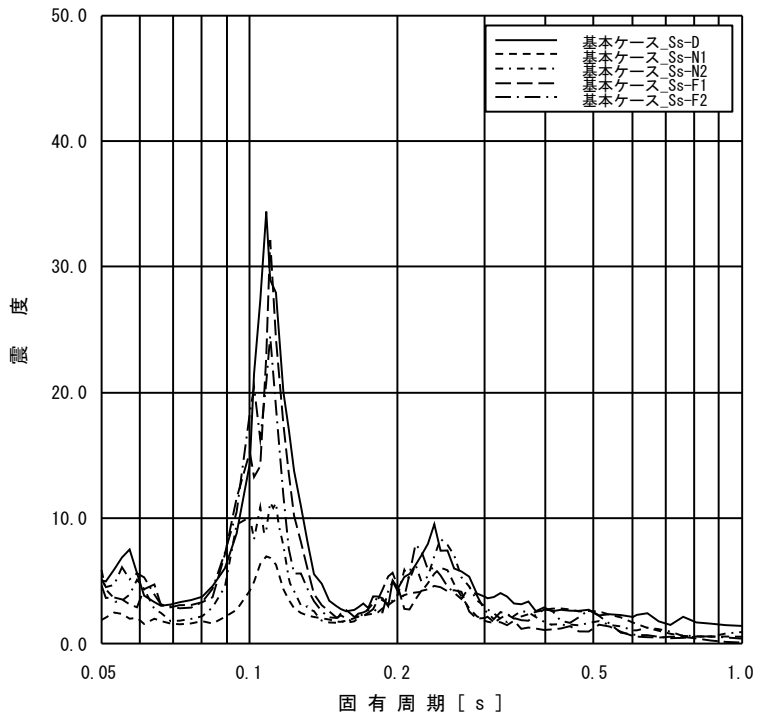
添付図 4(10) 原子炉格納容器 EL13.700m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



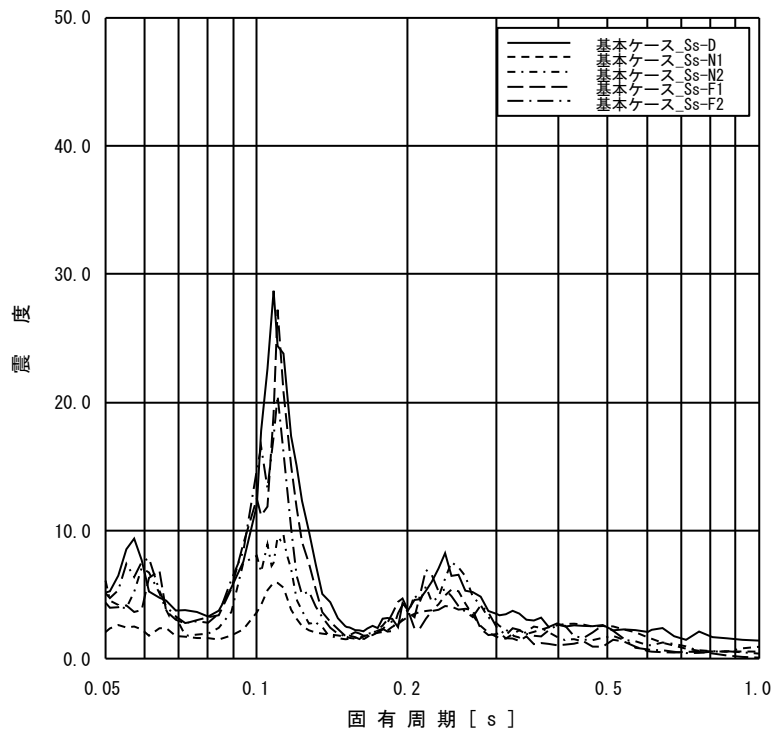
添付図 4(11) 原子炉格納容器 EL11.900m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



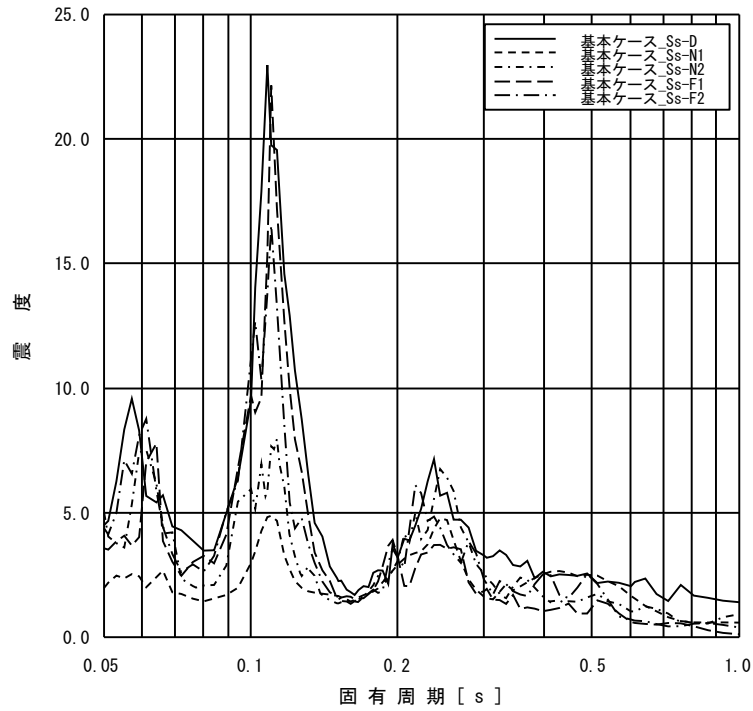
添付図 4(12) ガンマ線遮蔽壁 EL29.962m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



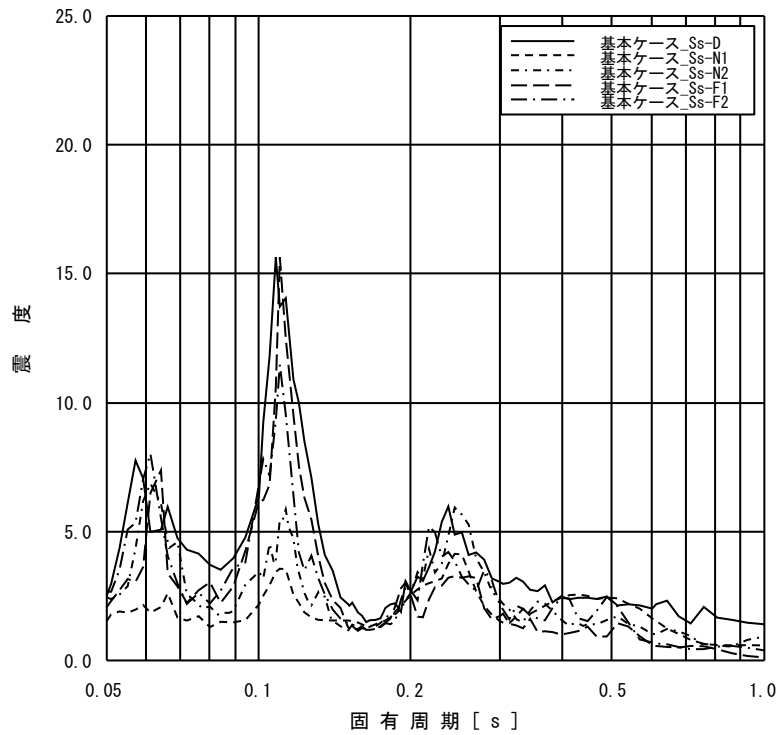
添付図 4(13) ガンマ線遮蔽壁 EL26.981m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



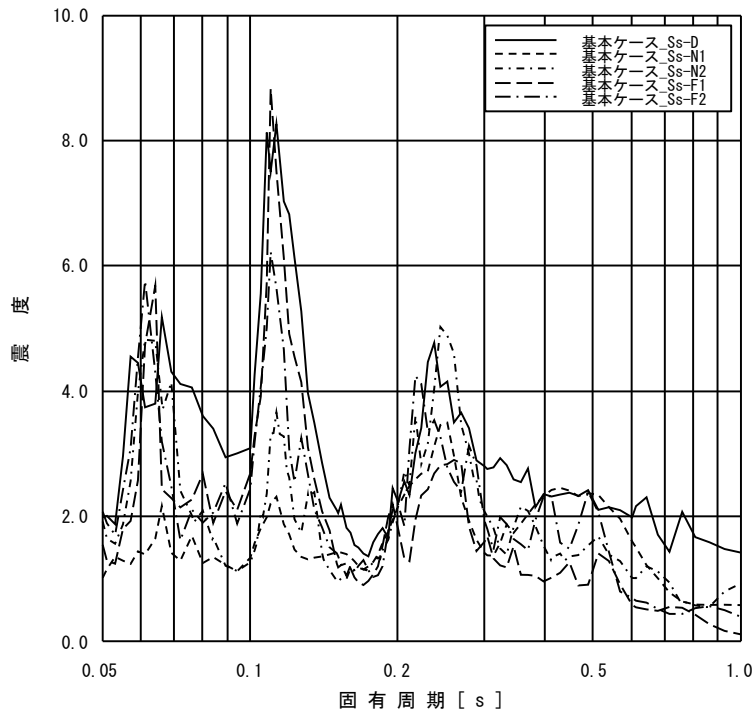
添付図 4(14) ガンマ線遮蔽壁 EL24.000m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



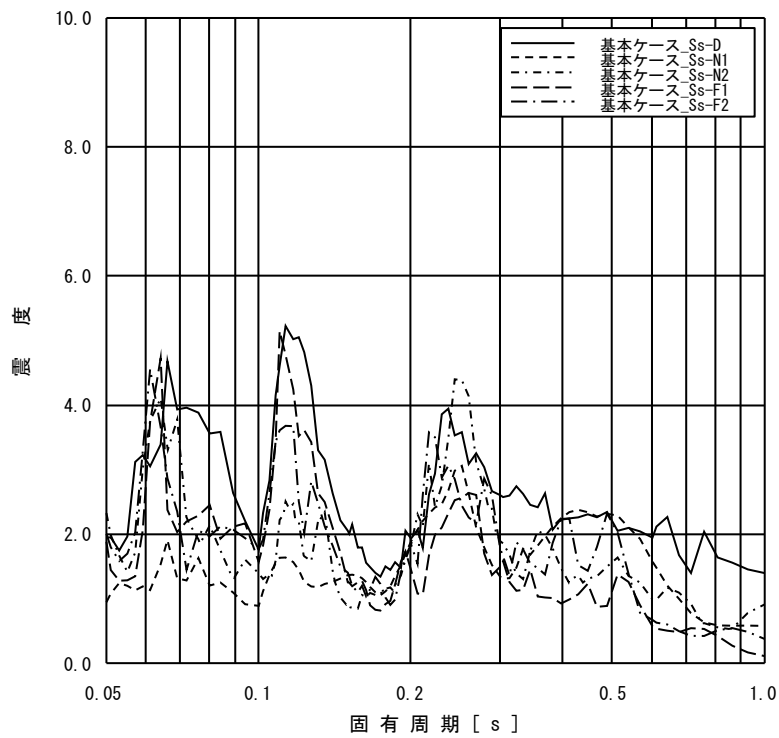
添付図 4(15) ガンマ線遮蔽壁 EL21.500m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



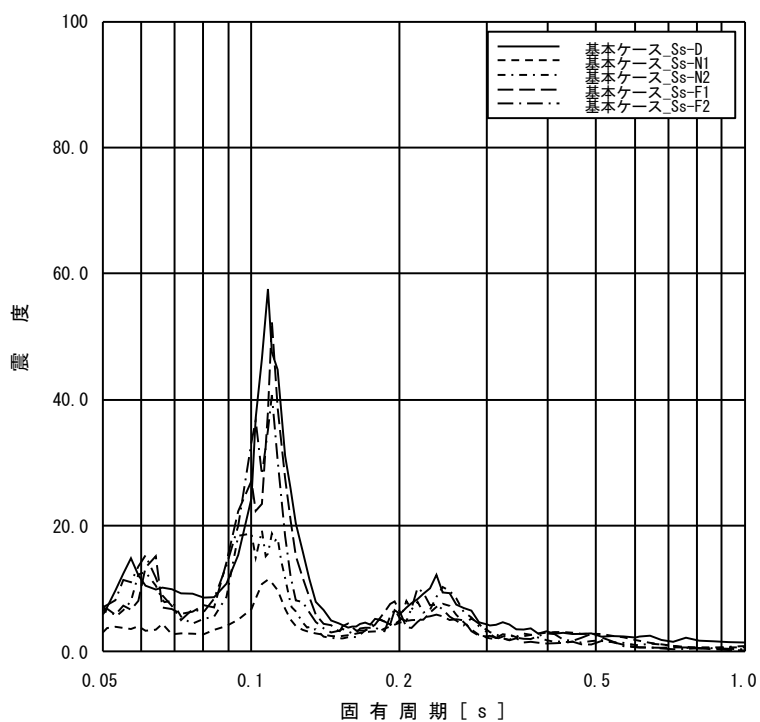
添付図 4(16) ガンマ線遮蔽壁 EL19.000m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



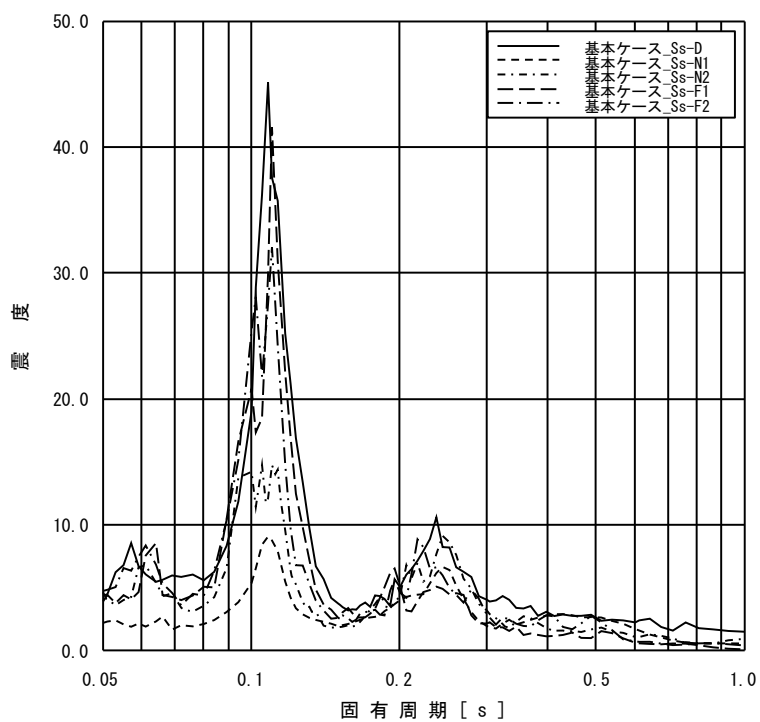
添付図 4(17) 原子炉压力容器ペダスタル EL15.944m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



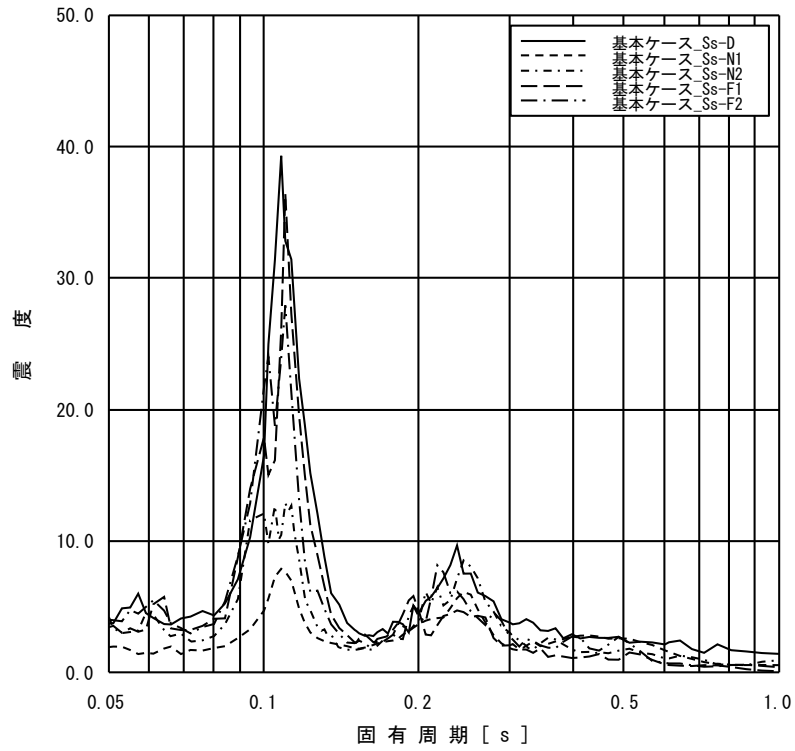
添付図 4(18) 原子炉压力容器ペダスタル EL13.022m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



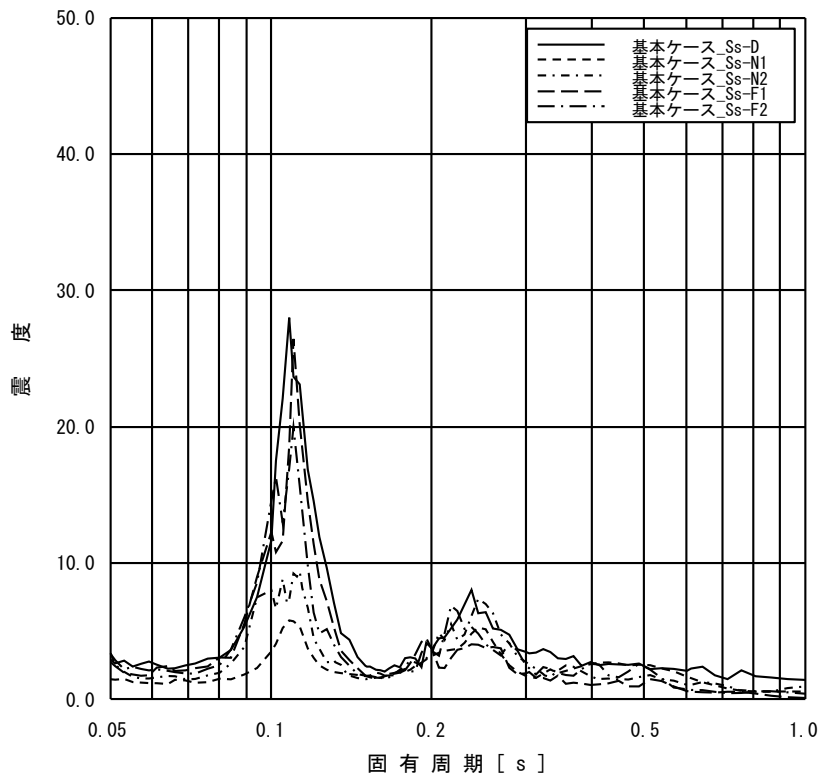
添付図 4(19) 原子炉压力容器 EL32.567m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



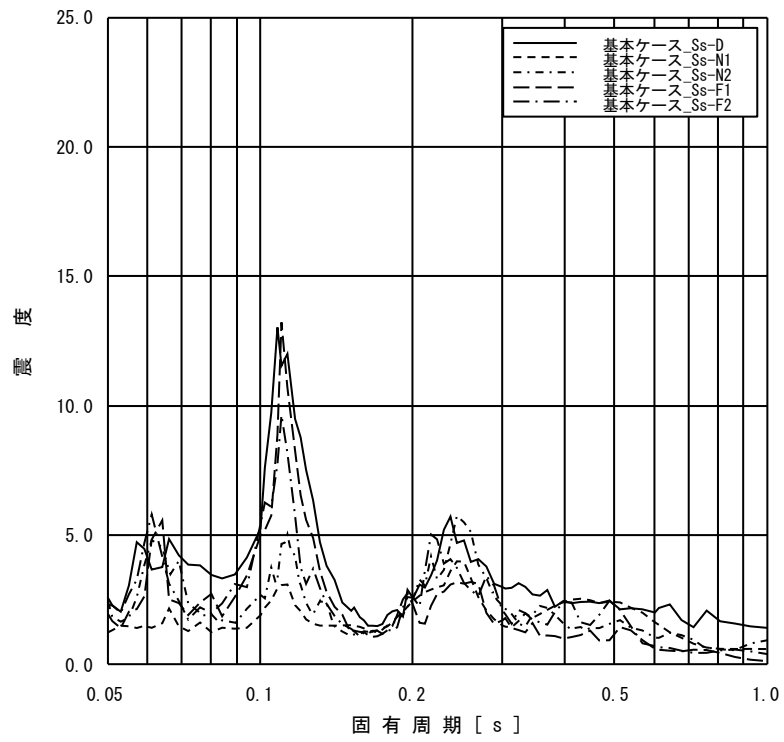
添付図 4(20) 原子炉压力容器 EL29.181m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



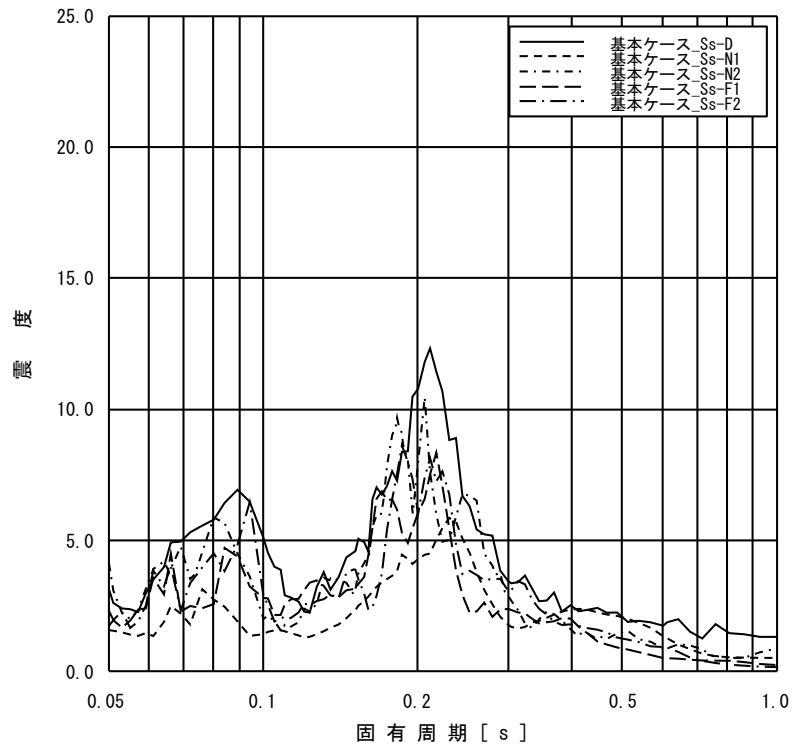
添付図 4(21) 原子炉压力容器 EL27.317m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



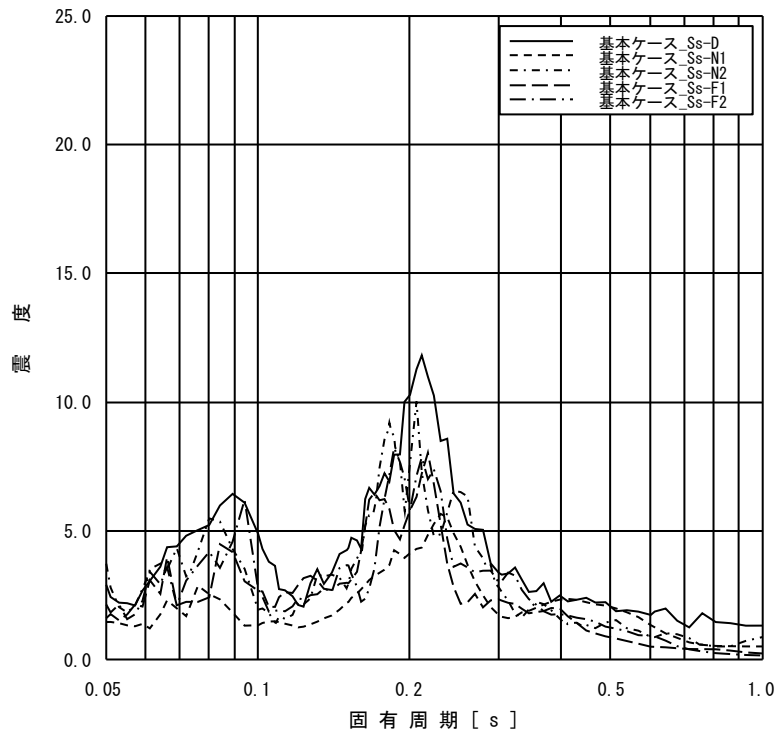
添付図 4(22) 原子炉压力容器 EL23.707m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



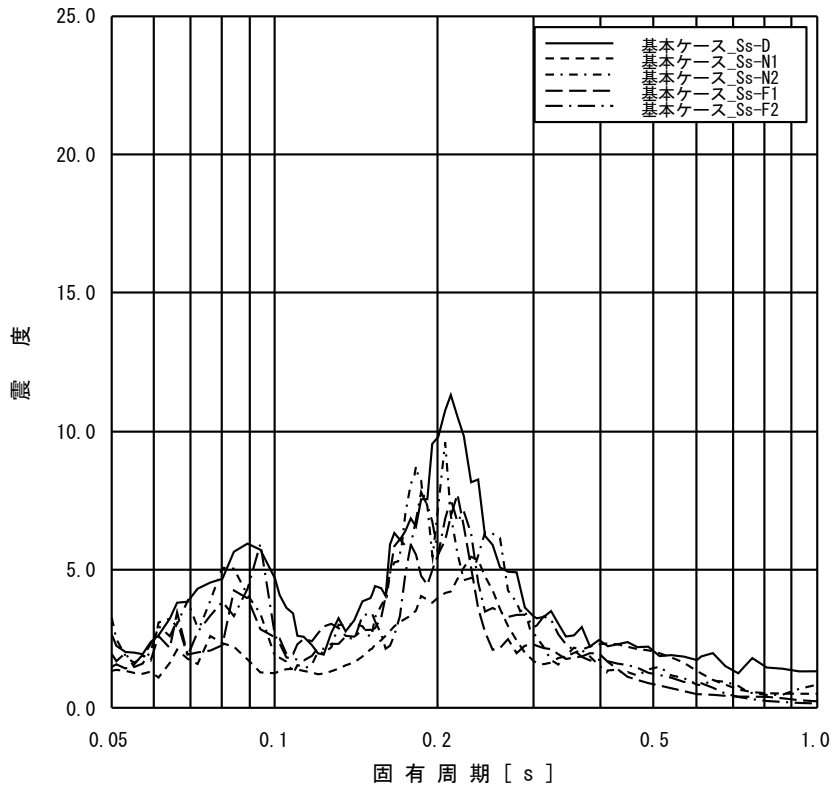
添付図 4(23) 原子炉压力容器 EL18. 250m の加速度応答スペクトル
(NS 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



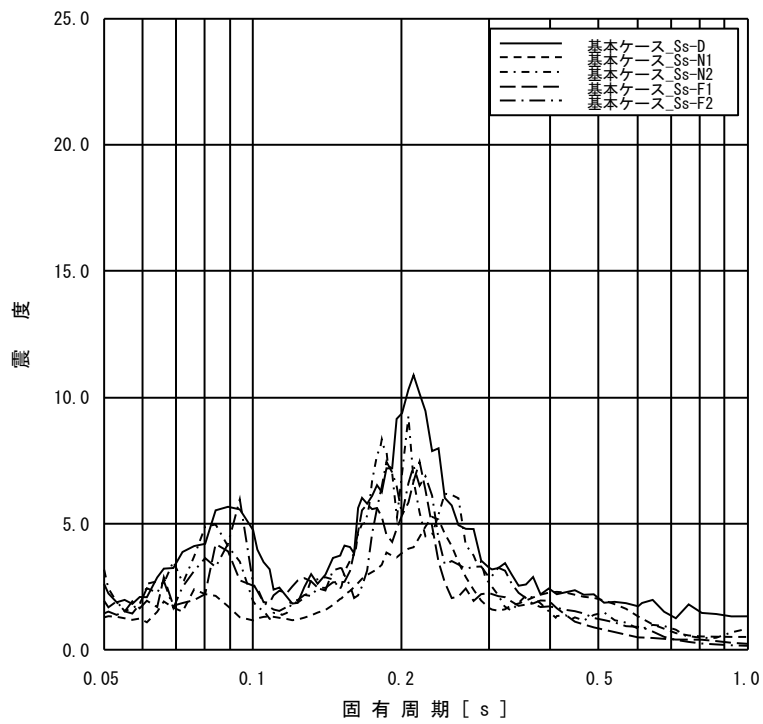
添付図 5(1) 原子炉格納容器 EL39.400m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



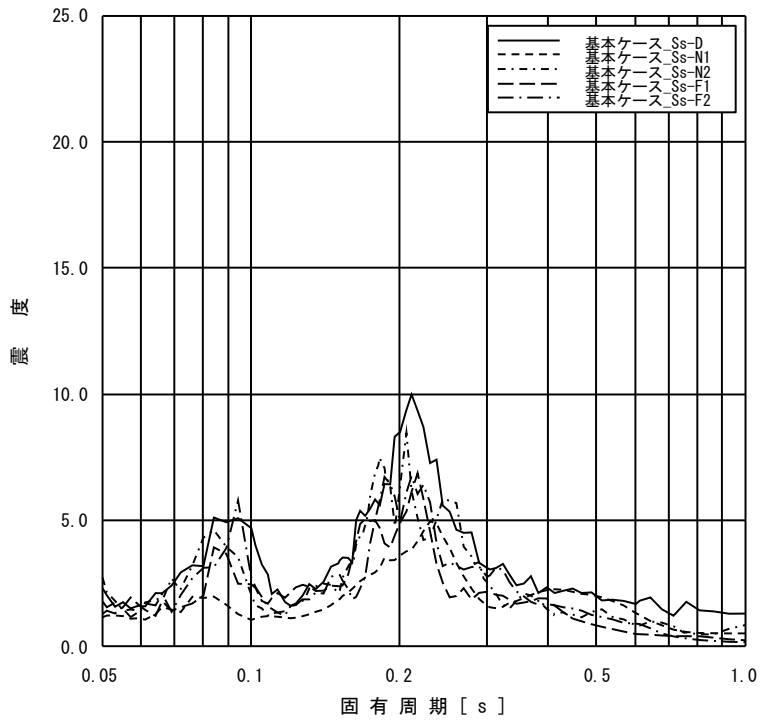
添付図 5(2) 原子炉格納容器 EL37.060m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



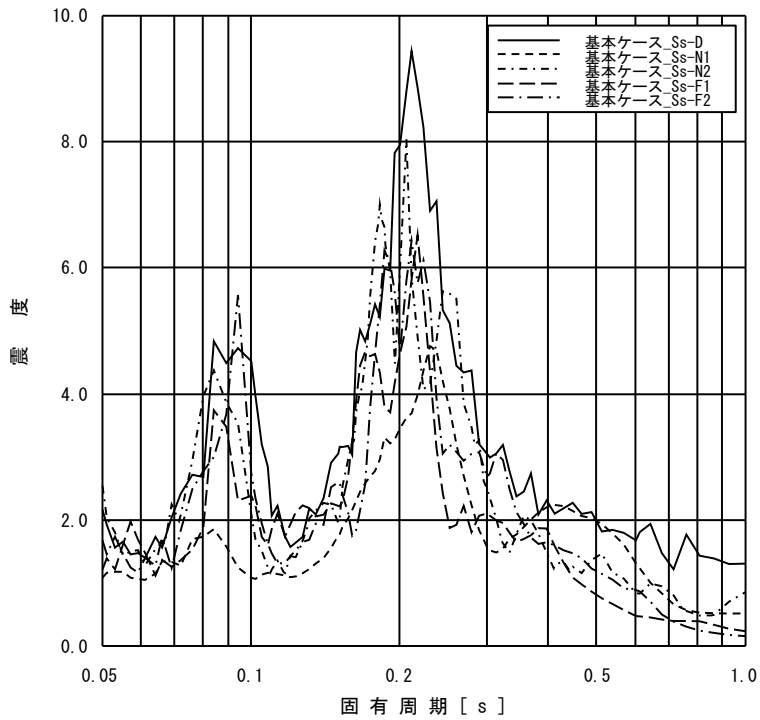
添付図 5(3) 原子炉格納容器 EL34.758m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



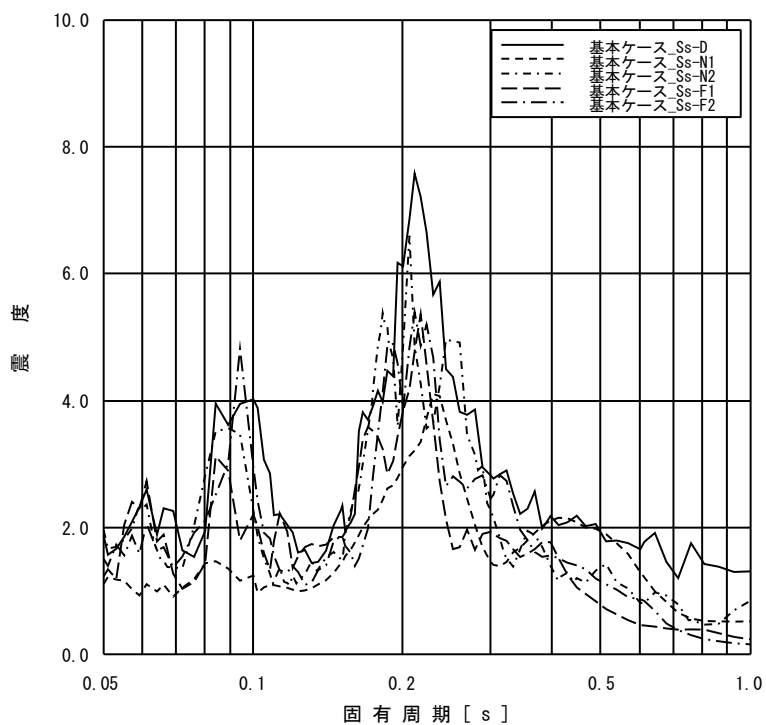
添付図 5(4) 原子炉格納容器 EL33.141m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



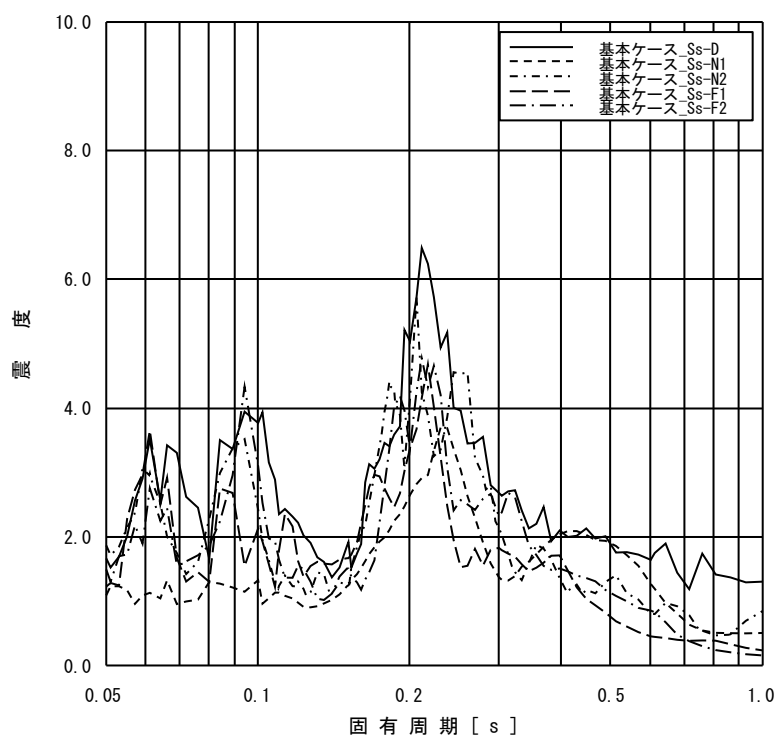
添付図 5(5) 原子炉格納容器 EL29.392m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



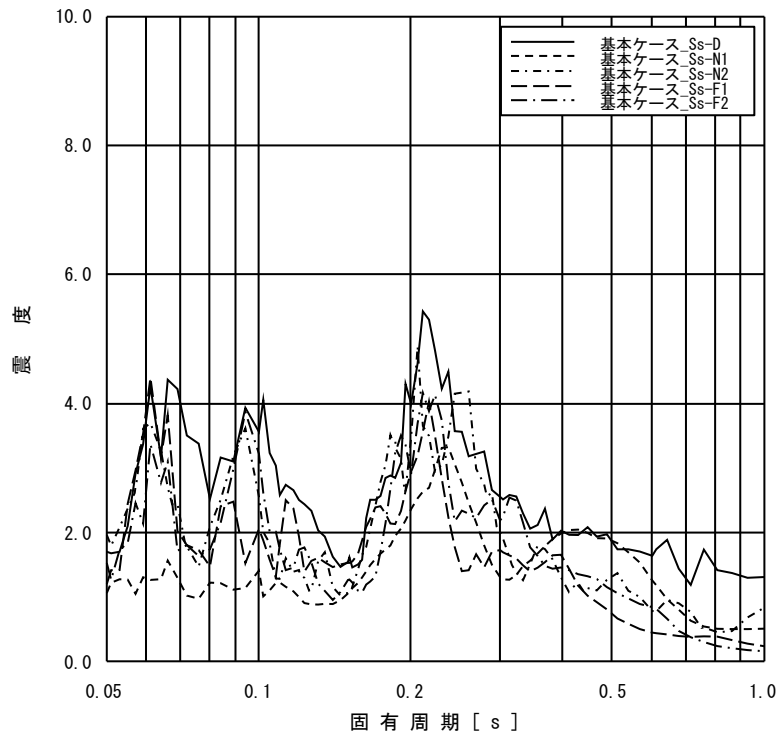
添付図 5(6) 原子炉格納容器 EL27.907m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



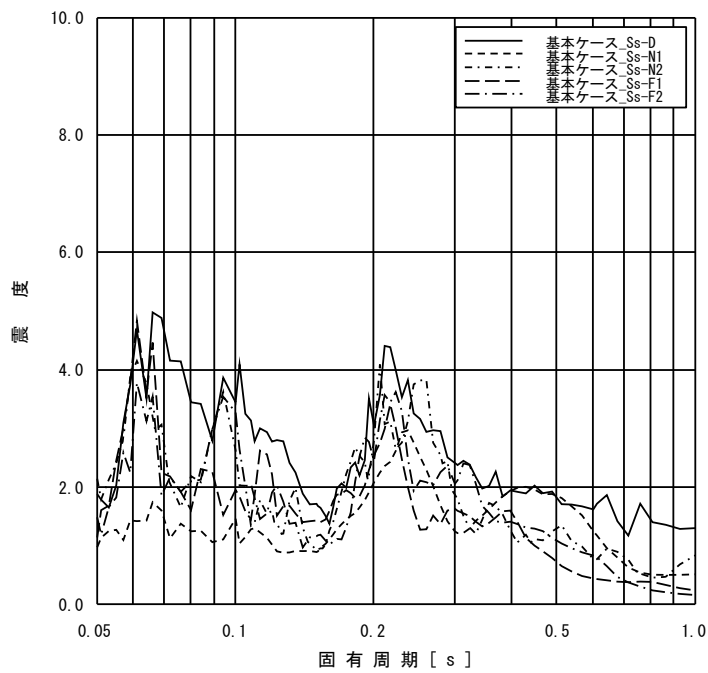
添付図 5(7) 原子炉格納容器 EL22.932m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



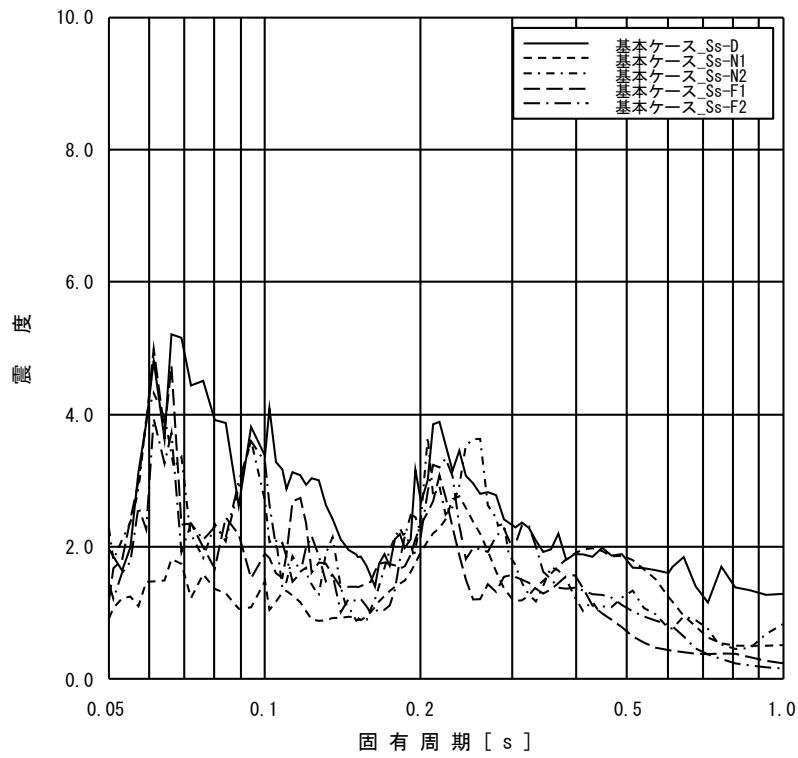
添付図 5(8) 原子炉格納容器 EL19.878m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



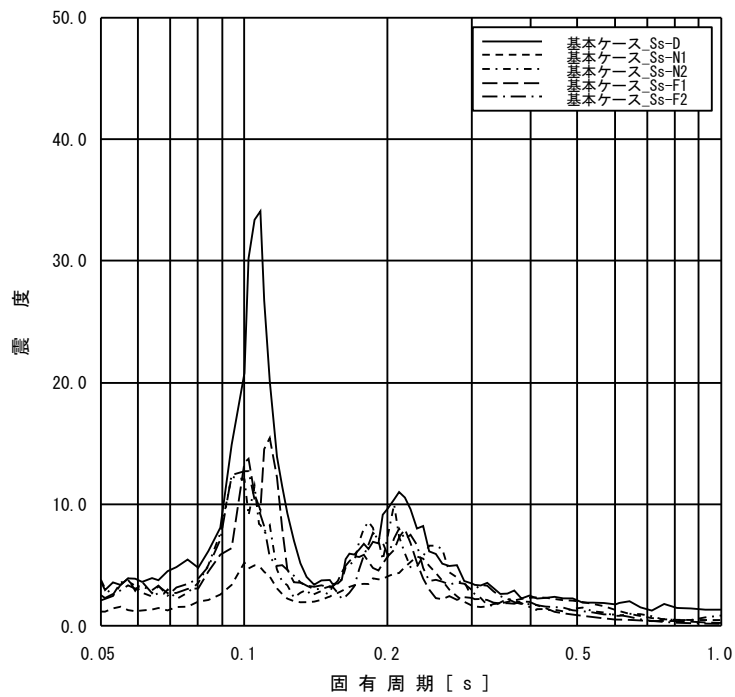
添付図 5(9) 原子炉格納容器 EL16.825m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



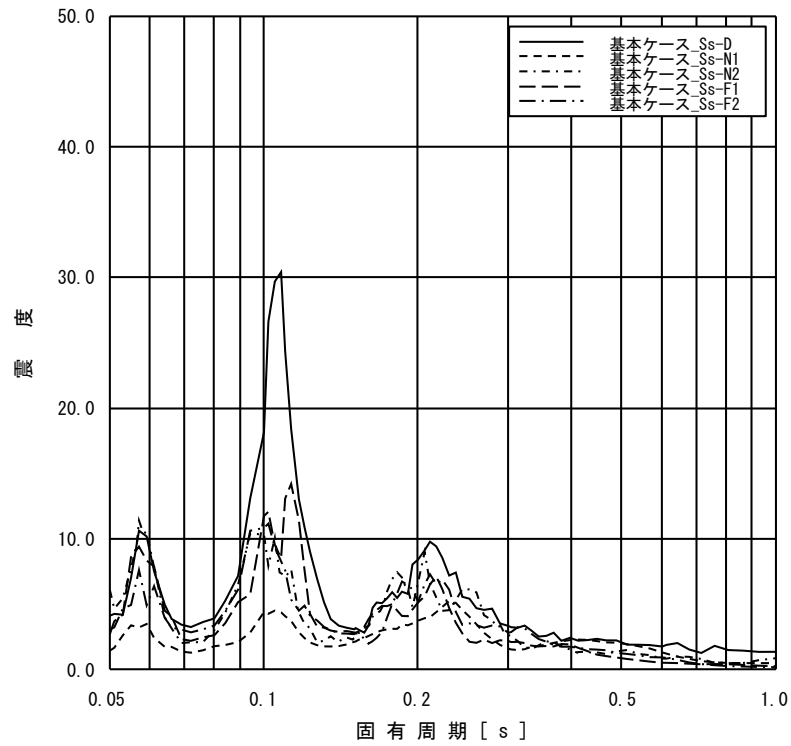
添付図 5(10) 原子炉格納容器 EL13.700m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



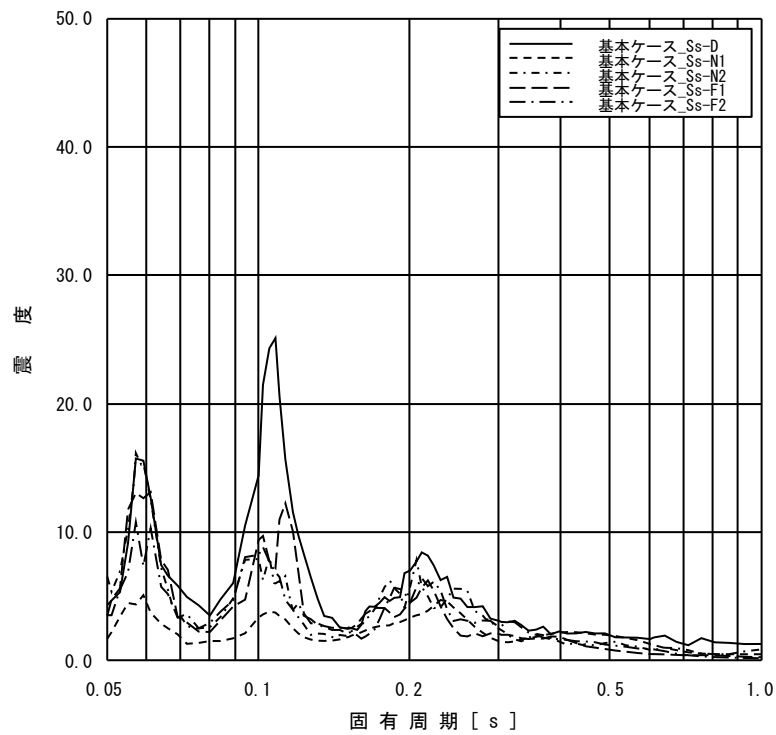
添付図 5(11) 原子炉格納容器 EL11.900m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



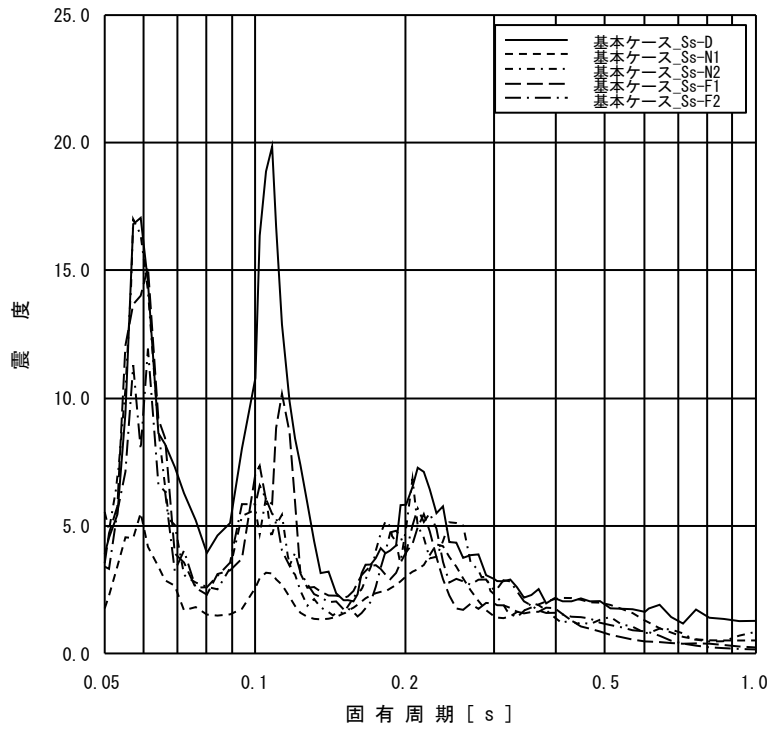
添付図 5(12) ガンマ線遮蔽壁 EL29.962m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



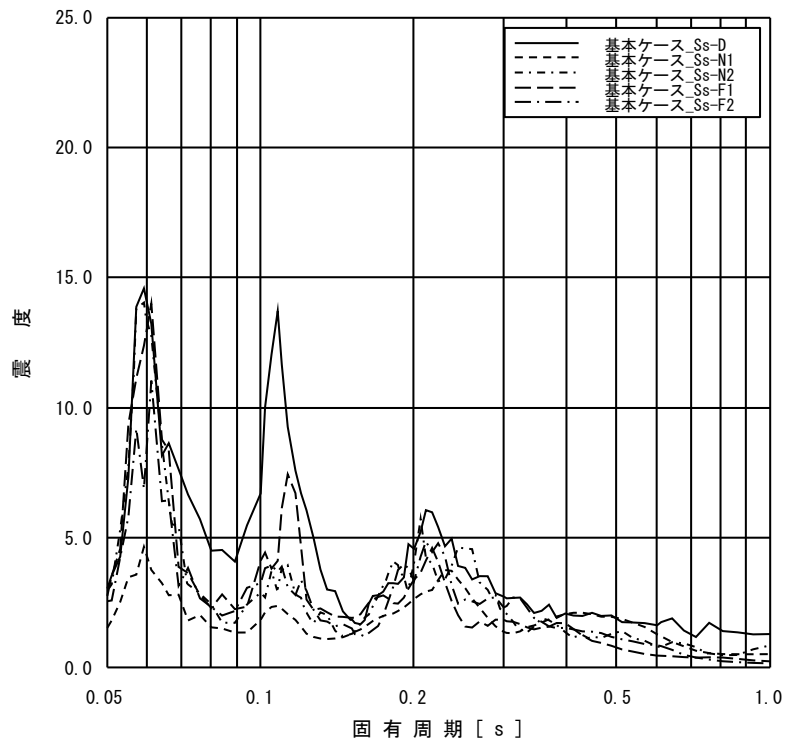
添付図 5(13) ガンマ線遮蔽壁 EL26.981m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



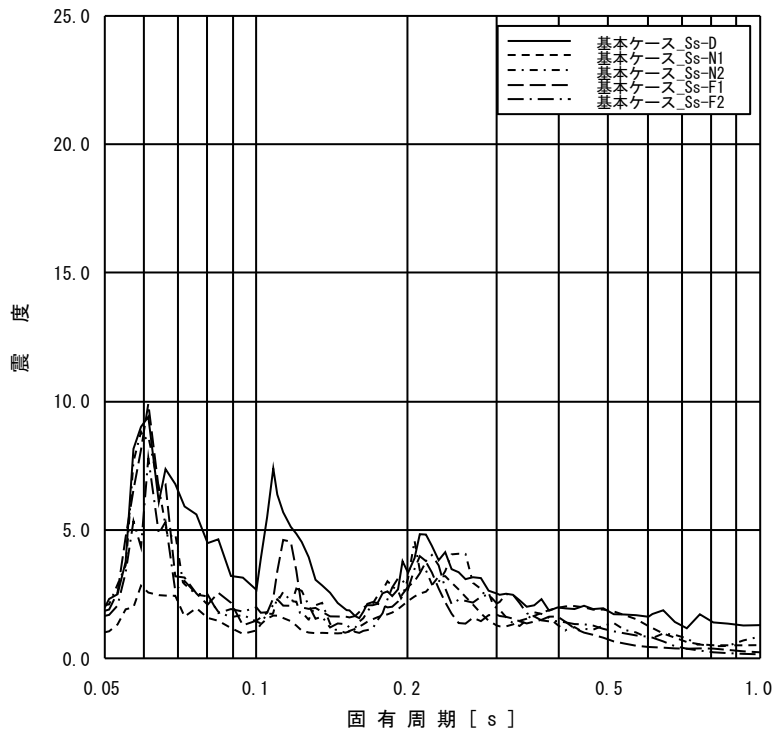
添付図 5(14) ガンマ線遮蔽壁 EL24.000m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



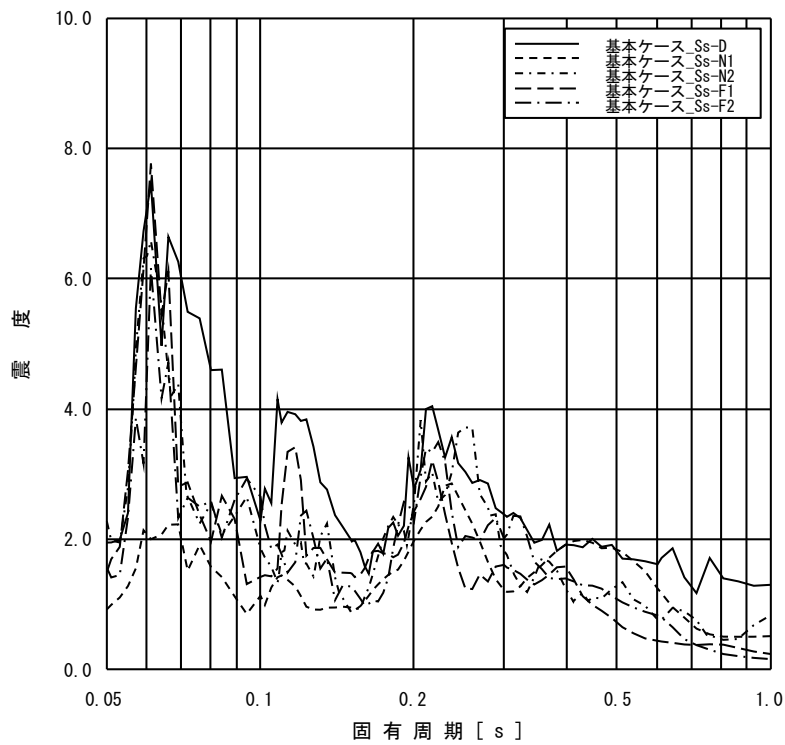
添付図 5(15) ガンマ線遮蔽壁 EL21.500m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



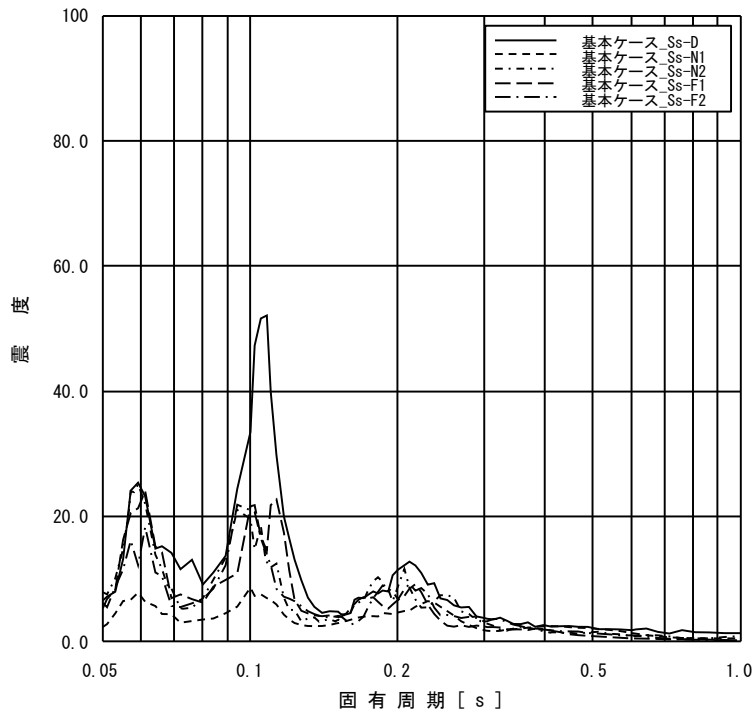
添付図 5(16) ガンマ線遮蔽壁 EL19.000m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



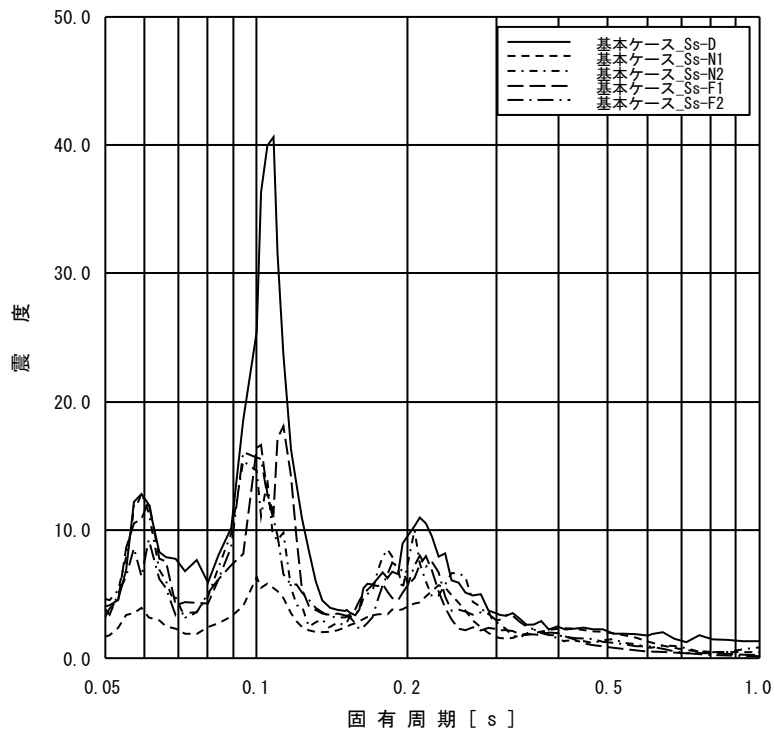
添付図 5(17) 原子炉压力容器ペダスタル EL15.944m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



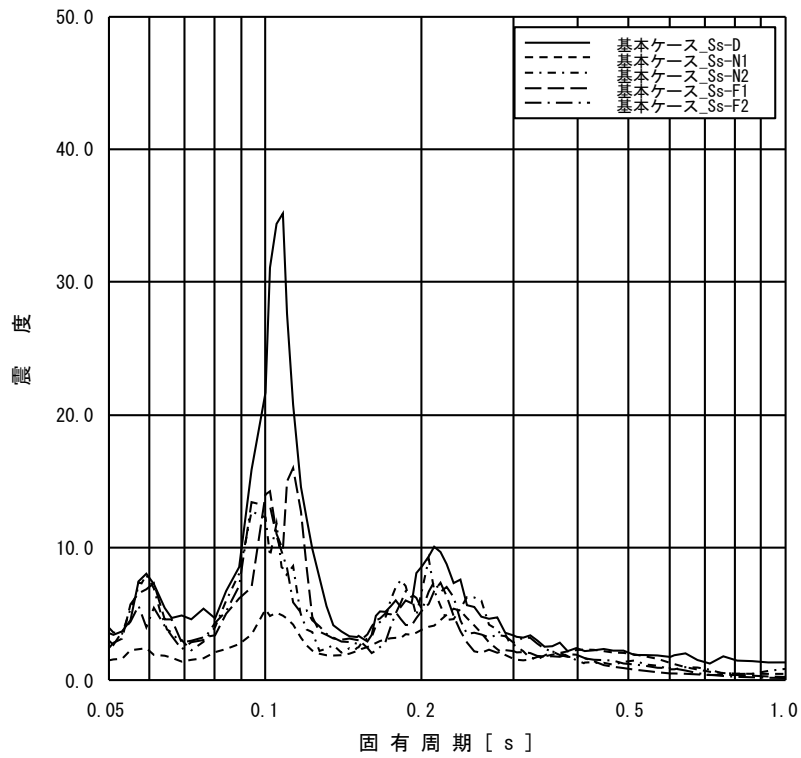
添付図 5(18) 原子炉压力容器ペダスタル EL13.022m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



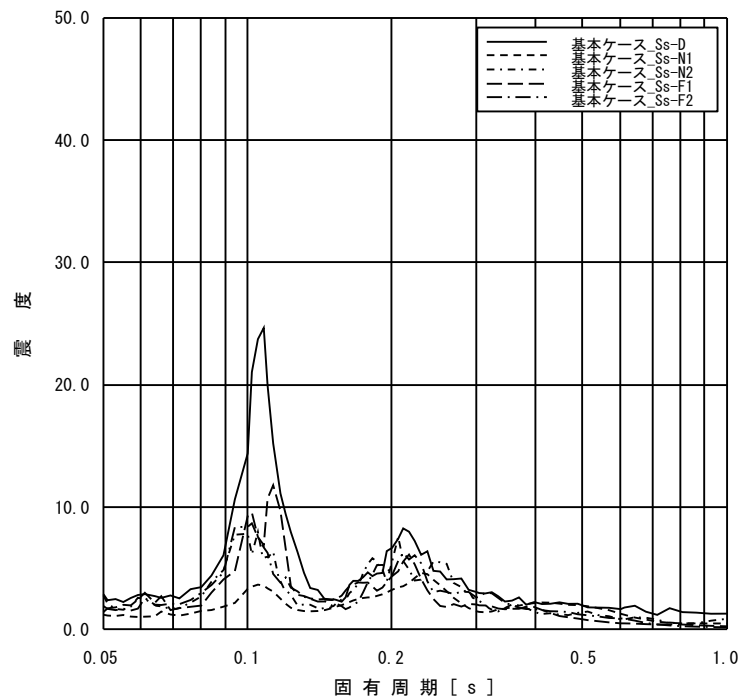
添付図 5(19) 原子炉圧力容器 EL32.567m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



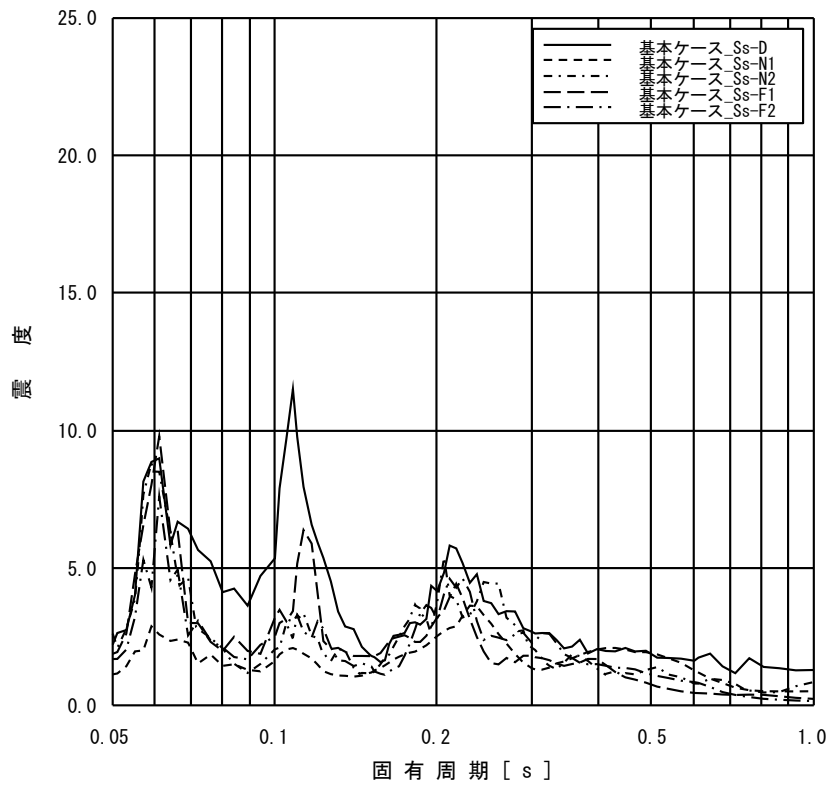
添付図 5(20) 原子炉圧力容器 EL29.181m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



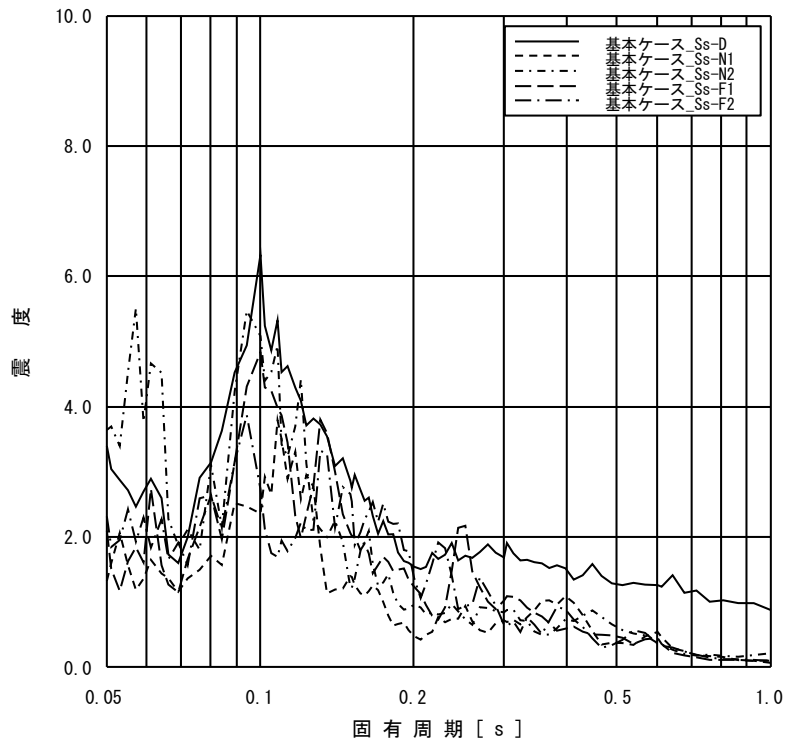
添付図 5(21) 原子炉压力容器 EL27.317m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



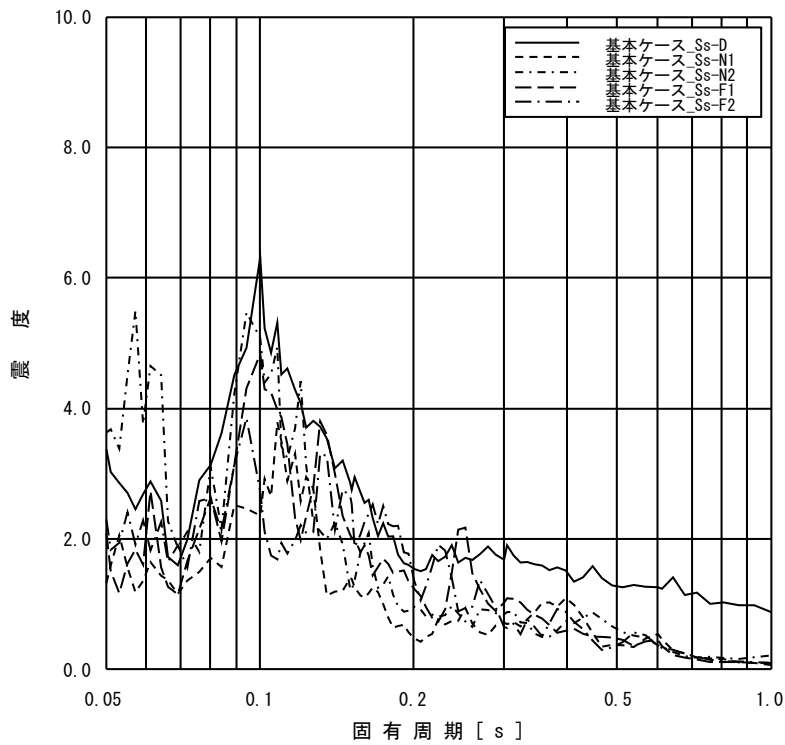
添付図 5(22) 原子炉压力容器 EL23.707m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



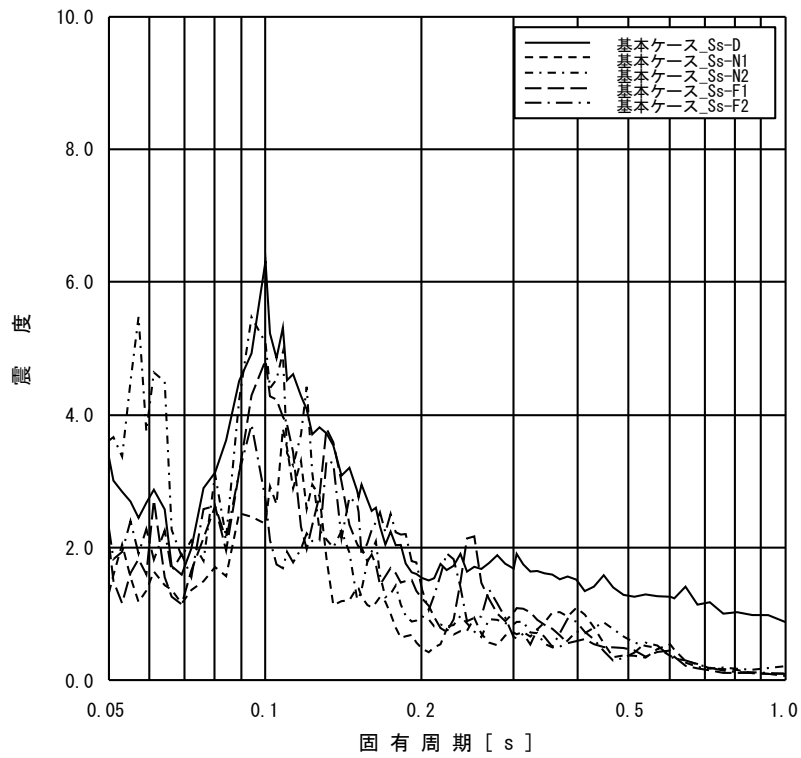
添付図 5(23) 原子炉压力容器 EL18.250m の加速度応答スペクトル
(EW 方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



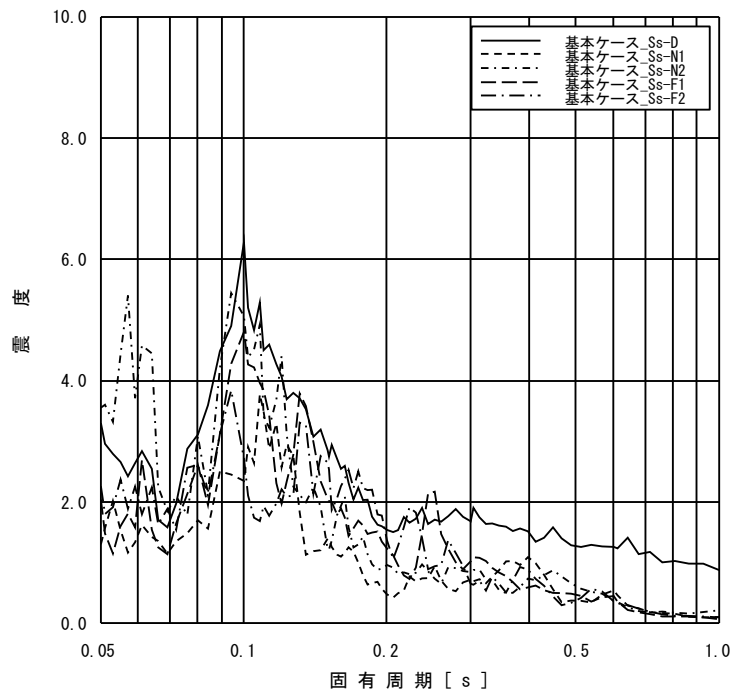
添付図 6(1) 原子炉格納容器 EL39.400m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



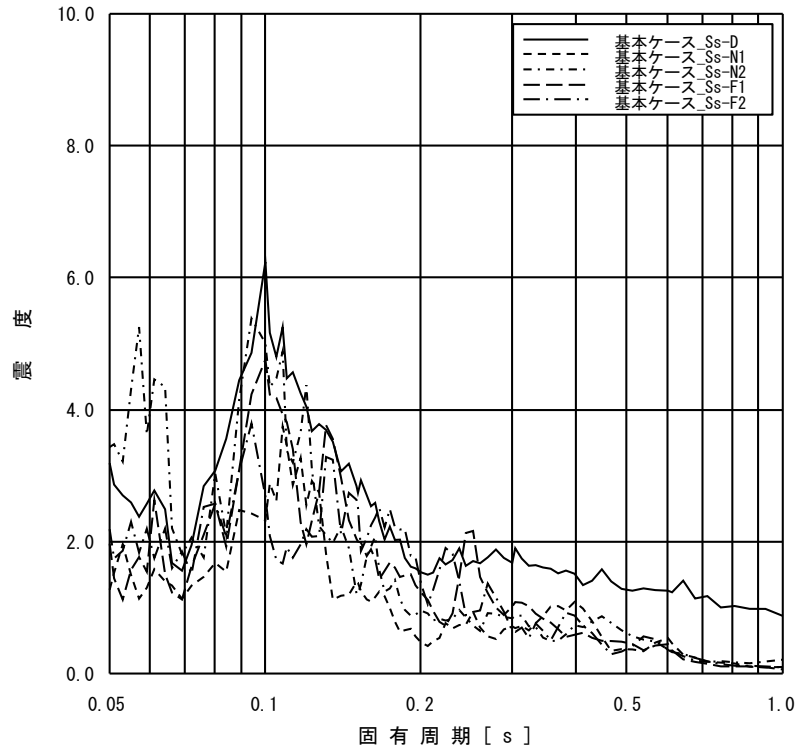
添付図 6(2) 原子炉格納容器 EL37.060m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



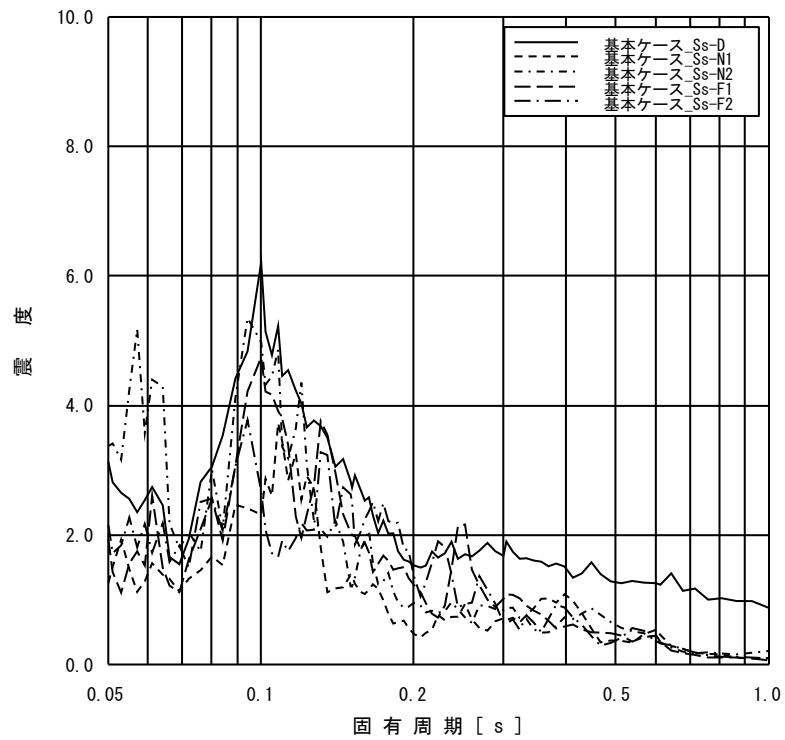
添付図 6(3) 原子炉格納容器 EL34.758m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



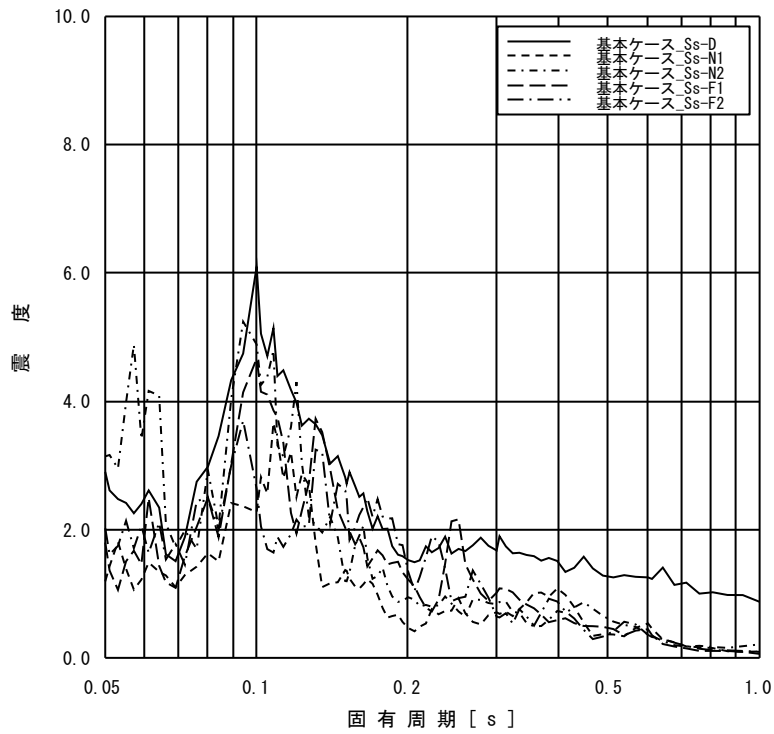
添付図 6(4) 原子炉格納容器 EL33.141m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



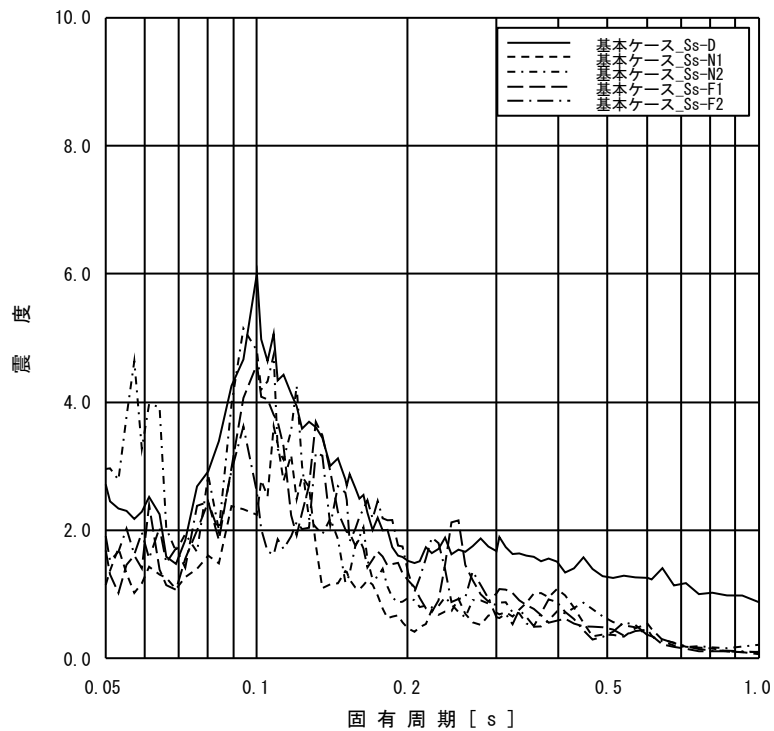
添付図 6(5) 原子炉格納容器 EL29.392m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



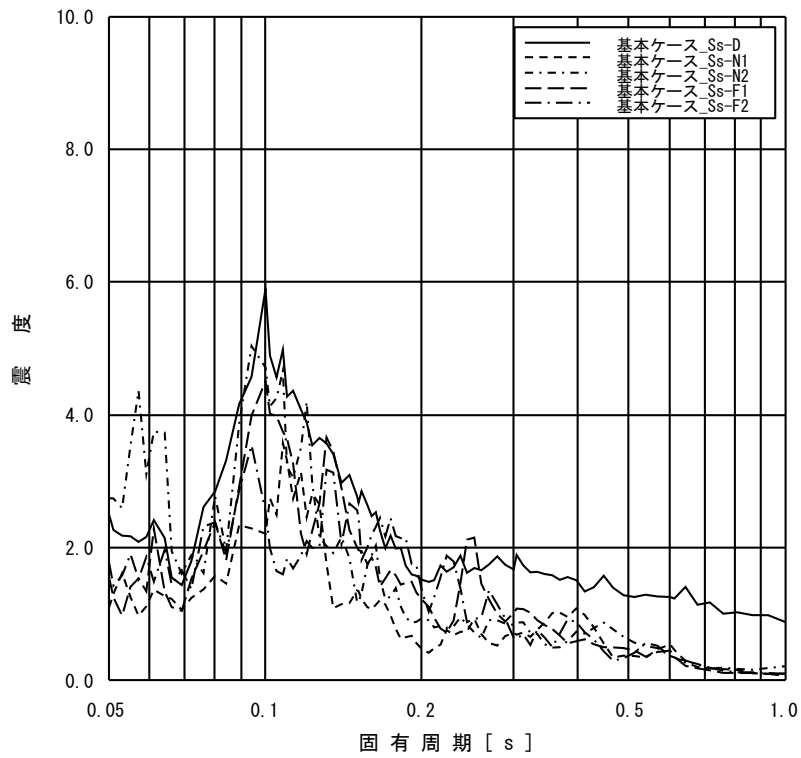
添付図 6(6) 原子炉格納容器 EL27.907m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



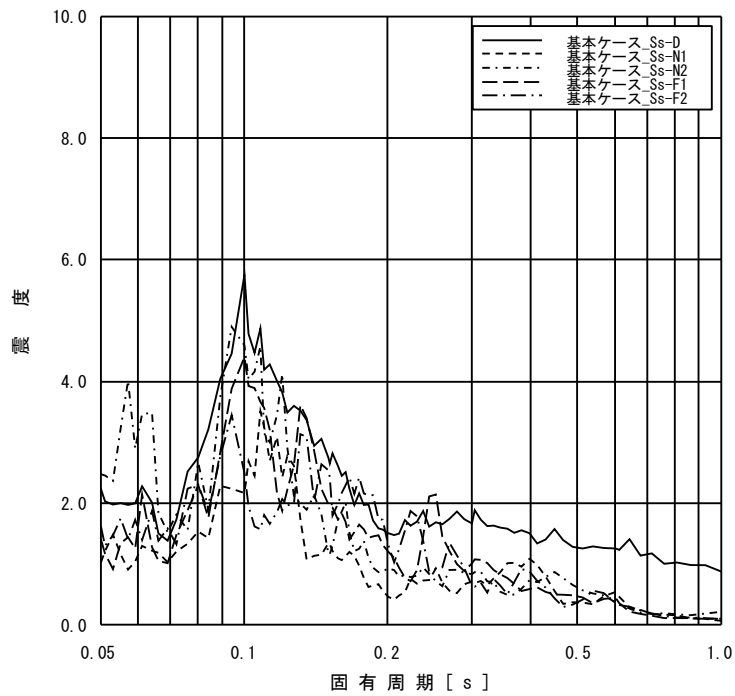
添付図 6(7) 原子炉格納容器 EL22.932m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



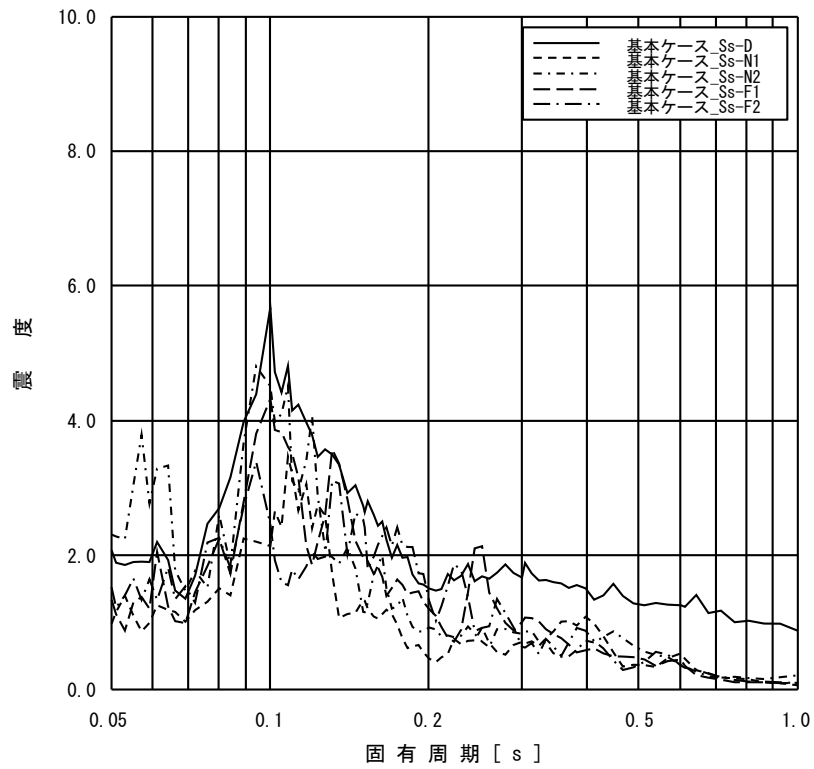
添付図 6(8) 原子炉格納容器 EL19.878m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



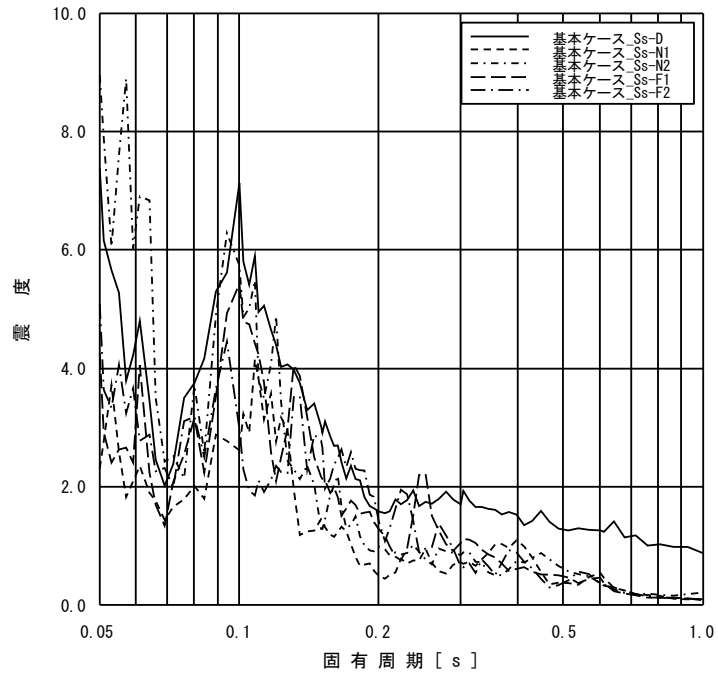
添付図 6(9) 原子炉格納容器 EL16.825m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



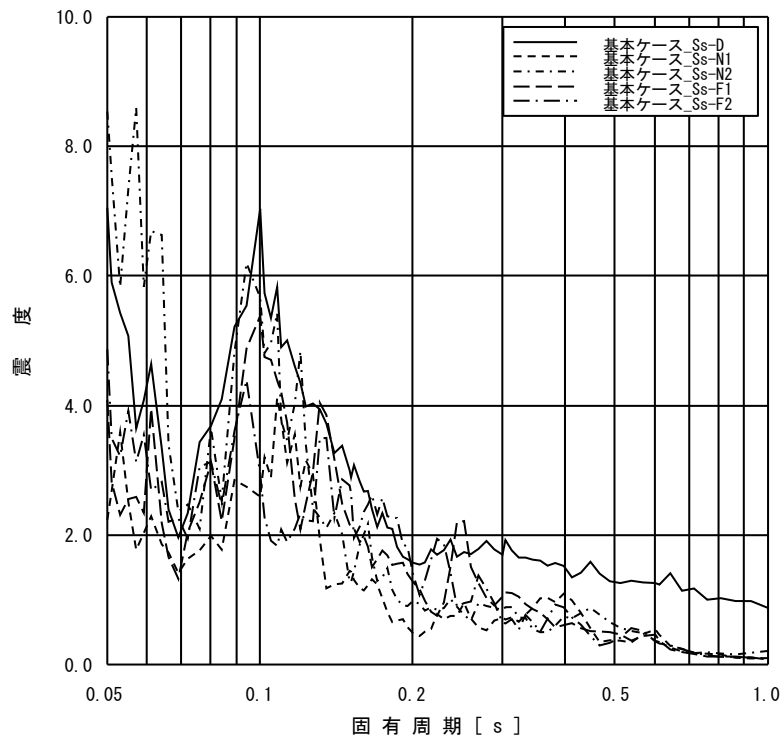
添付図 6(10) 原子炉格納容器 EL13.700m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



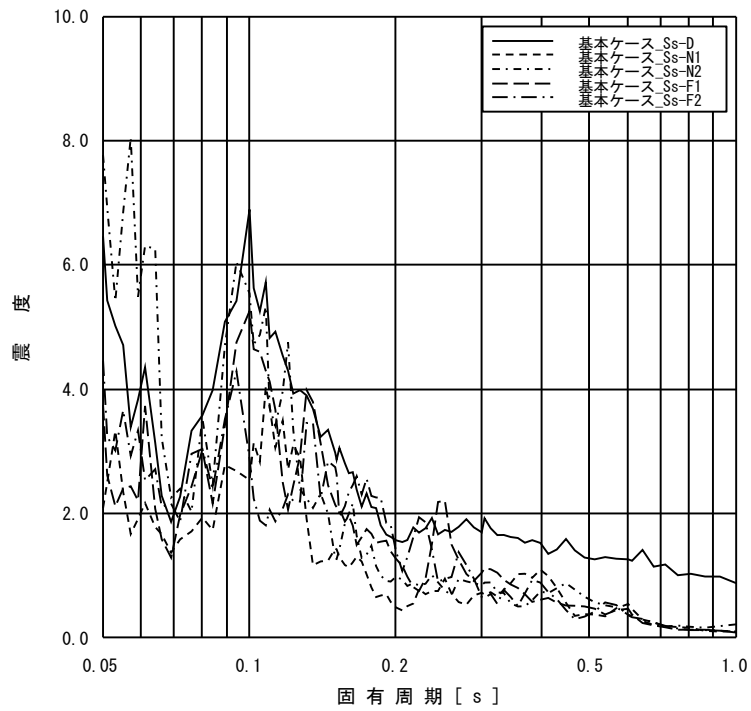
添付図 6(11) 原子炉格納容器 EL11.900m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



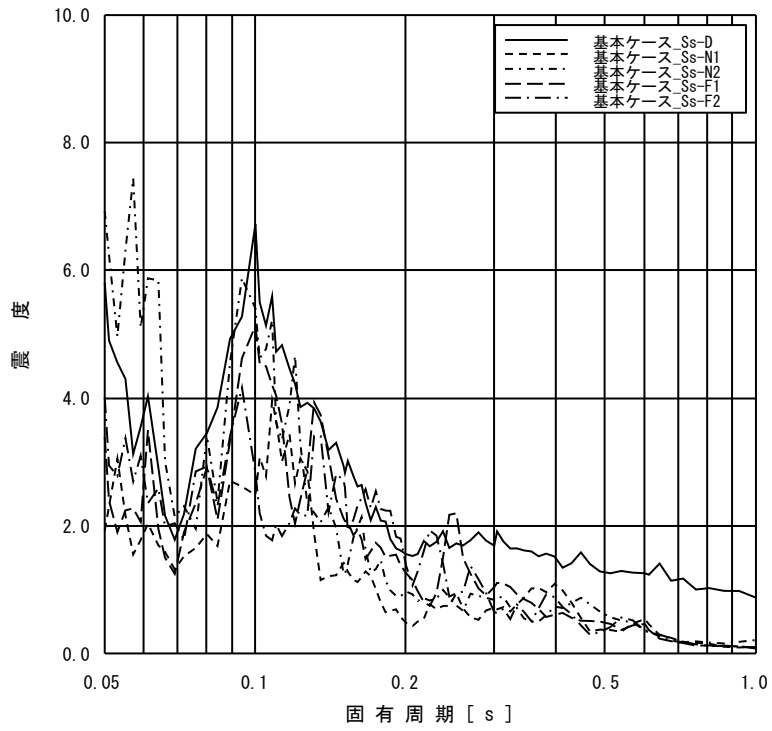
添付図 6(12) ガンマ線遮蔽壁 EL29.962m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



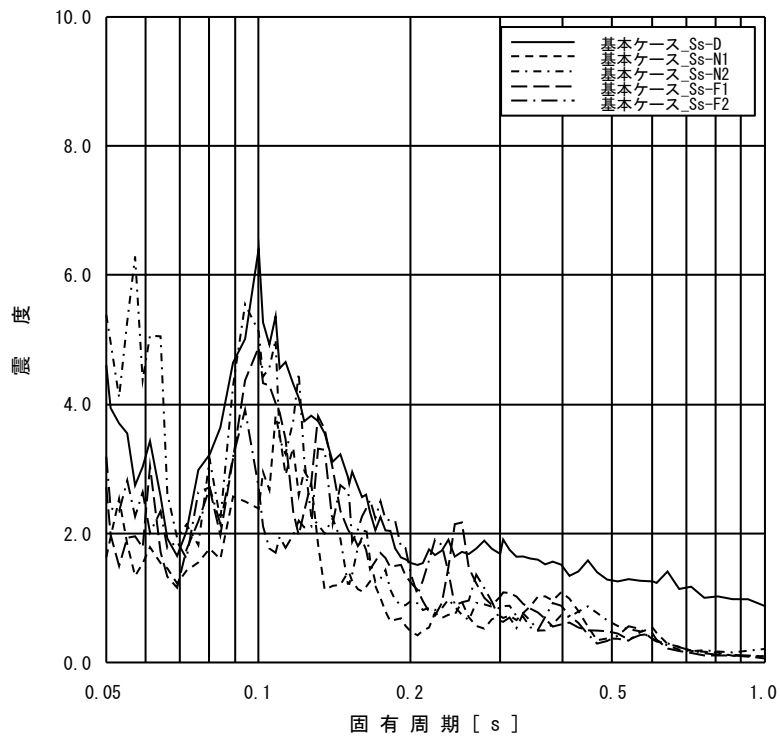
添付図 6(13) ガンマ線遮蔽壁 EL26.981m の加速度応答スペクトル
 (鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



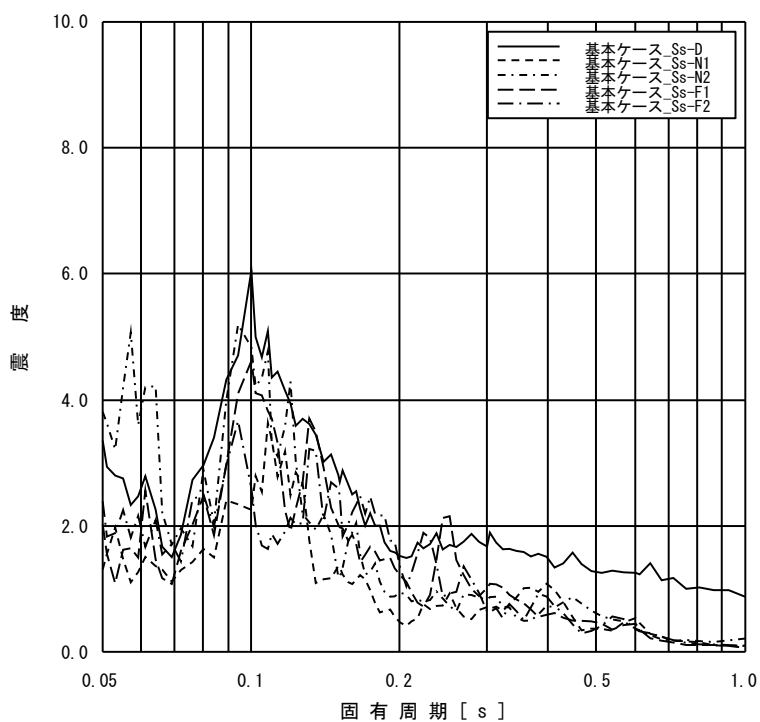
添付図 6(14) ガンマ線遮蔽壁 EL24.000m の加速度応答スペクトル
 (鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



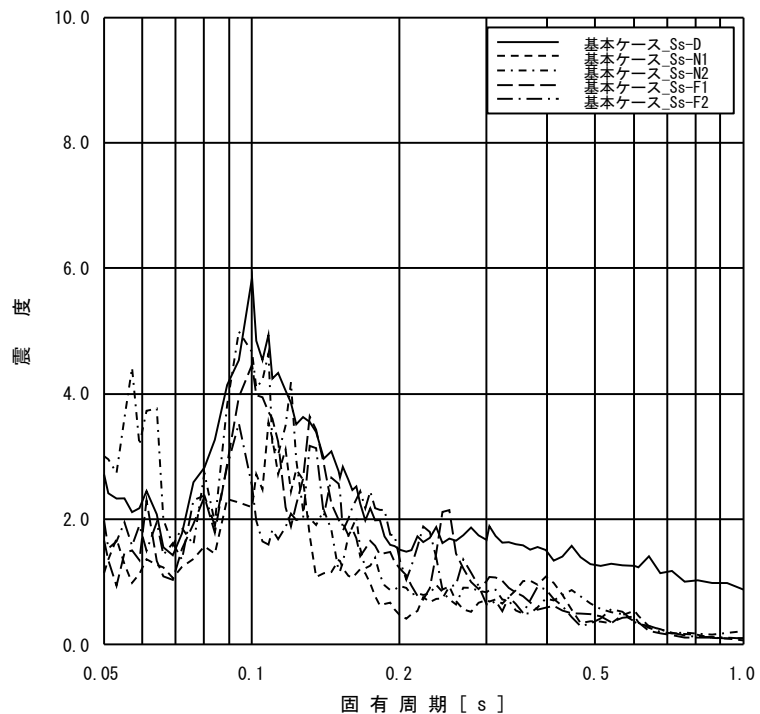
添付図 6(15) ガンマ線遮蔽壁 EL21.500m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



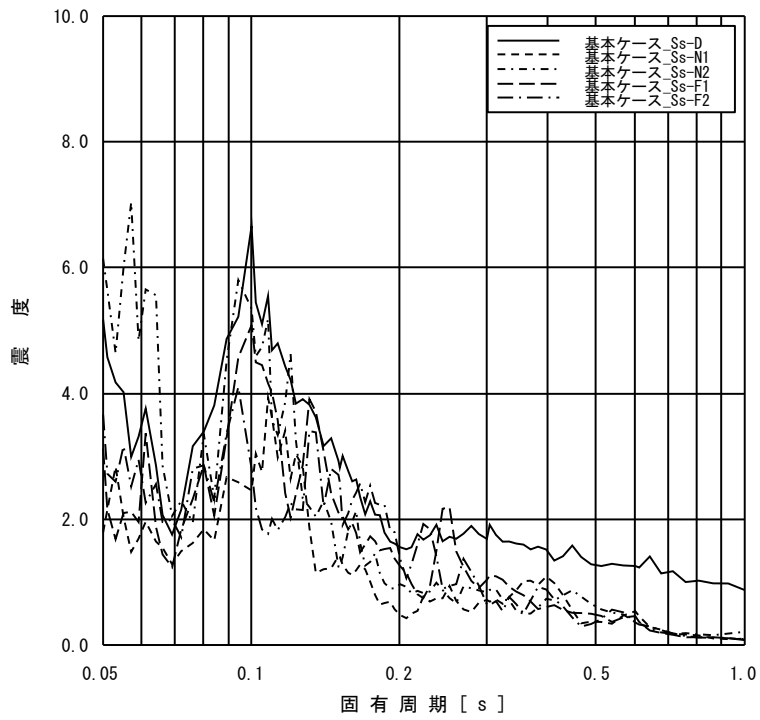
添付図 6(16) ガンマ線遮蔽壁 EL19.000m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



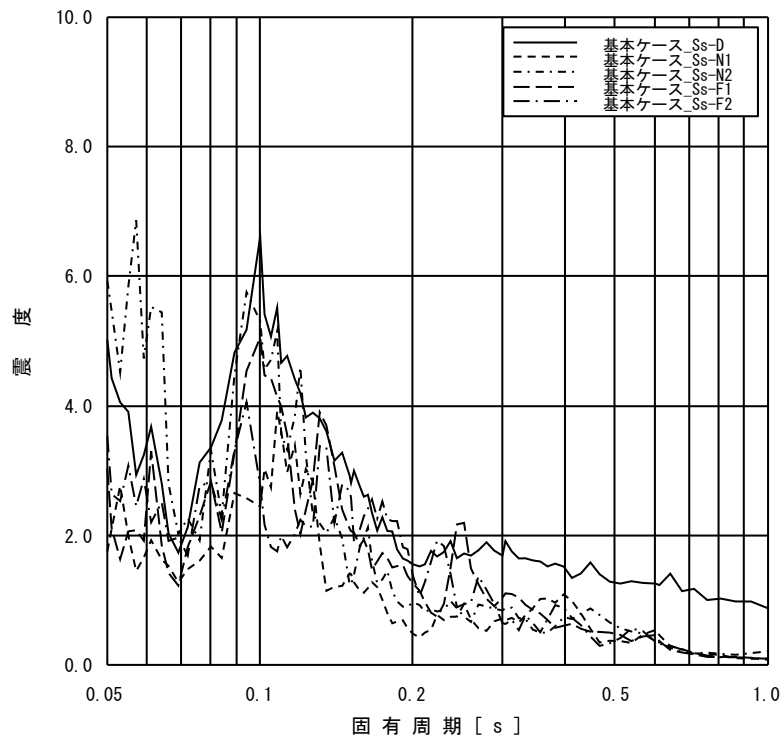
添付図 6(17) 原子炉压力容器ペDESTAL EL15.944m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



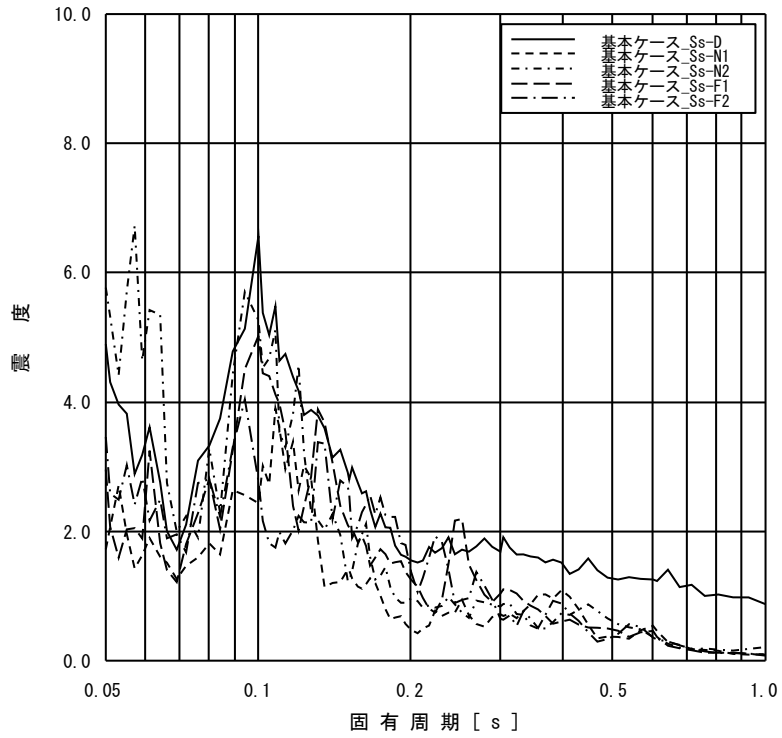
添付図 6(18) 原子炉压力容器ペDESTAL EL13.022m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



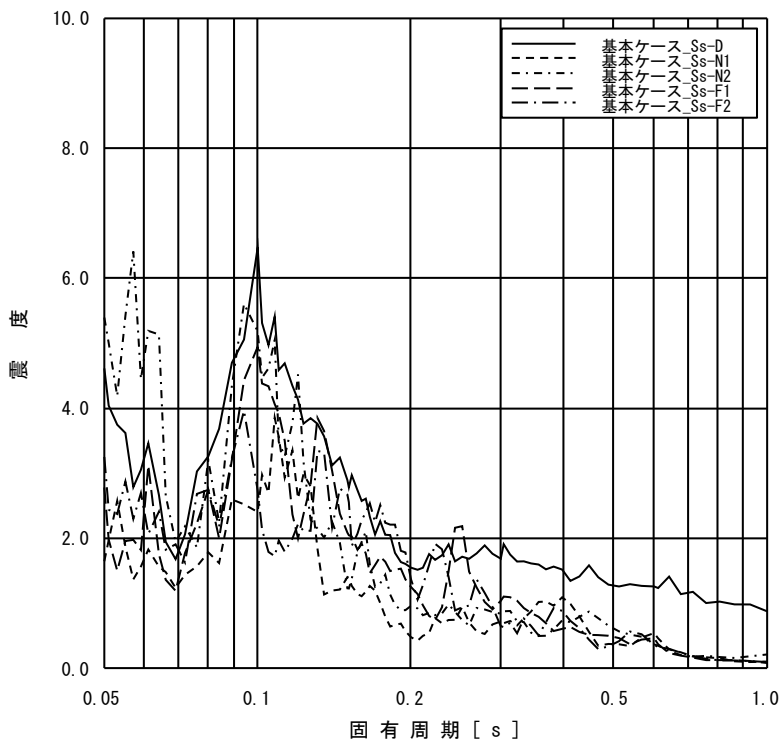
添付図 6(19) 原子炉压力容器 EL32.567m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



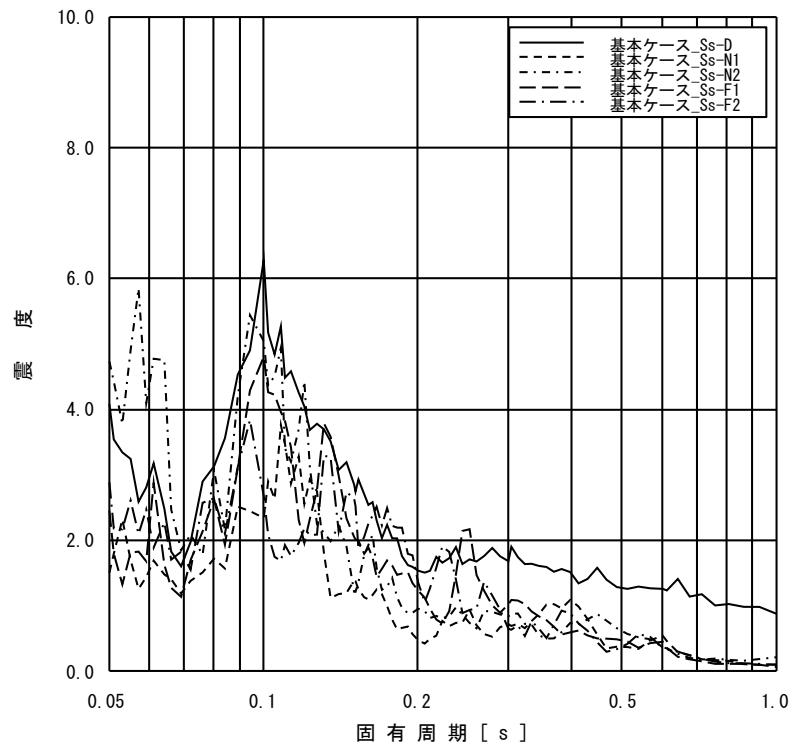
添付図 6(20) 原子炉压力容器 EL29.181m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



添付図 6(21) 原子炉压力容器 EL27.317m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



添付図 6(22) 原子炉压力容器 EL23.707m の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)



添付図 6(23) 原子炉压力容器 EL18. 250m の加速度応答スペクトル
 (鉛直方向, 減衰定数 1.0%, 基本ケース)