

柏崎刈羽原子力発電所第6号機 設計及び工事計画審査資料	
資料番号	KK6 補足-028-1-2 改0
提出年月日	2023年10月6日

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

2023年10月

東京電力ホールディングス株式会社

目 次

1. 剛柔判定を行う固有周期の考え方	1
2. 剛柔判定を行う固有周期と地震力の算定法	2
3. 実機に対する適用性	3
4. 剛柔判断及び打切り振動数に係る検討	9

1. 剛柔判定を行う固有周期の考え方

機器・配管系の耐震設計では、基準地震動 S_s 、弾性設計用地震動 S_d に対して動的解析を行い水平及び鉛直方向の動的地震力を定める。その機器・配管系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。

ここで、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。

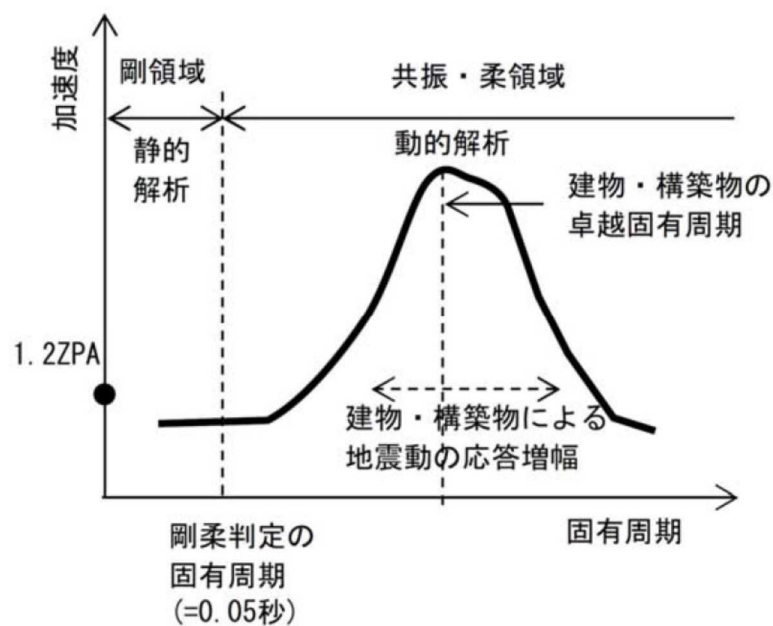


図 1 床応答スペクトルにおける剛柔判定の固有周期と動的解析の適用範囲 (概要図)

2. 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、0.05 秒を超える場合は柔とする。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 秒を超える場合は地震応答を動的解析により行い、0.05 秒以下の地震応答は動的解析を行うのに代えて静的解析を行う。

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）

3. 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。新規制基準においては、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。

柏崎刈羽原子力発電所の原子炉建屋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について、VI-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」の抜粋(基準地震動 Ss-1 の例)を表 1 及び表 2 並びに図 4~図 6 に示す。建屋の卓越固有周期は水平及び鉛直方向とも概ね 0.2 秒以上であり、剛柔判定の固有周期 0.05 秒は、原子炉建屋の卓越固有周期に対して十分な離隔(卓越固有周期の $1/2$ 以下)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 に示すが、固有周期 0.05 秒で加速度は概ね収斂している。

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、建屋の卓越固有周期に対して十分な離隔をもっており、柏崎刈羽原子力発電所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たって重要なことは、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 原子炉建屋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	0.440	2.27	0.430	2.33
2 次	0.192	5.20	0.191	5.24

表 2 原子炉建屋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)
1 次	0.258	3.87

屋根トラス部が卓越するモード除く

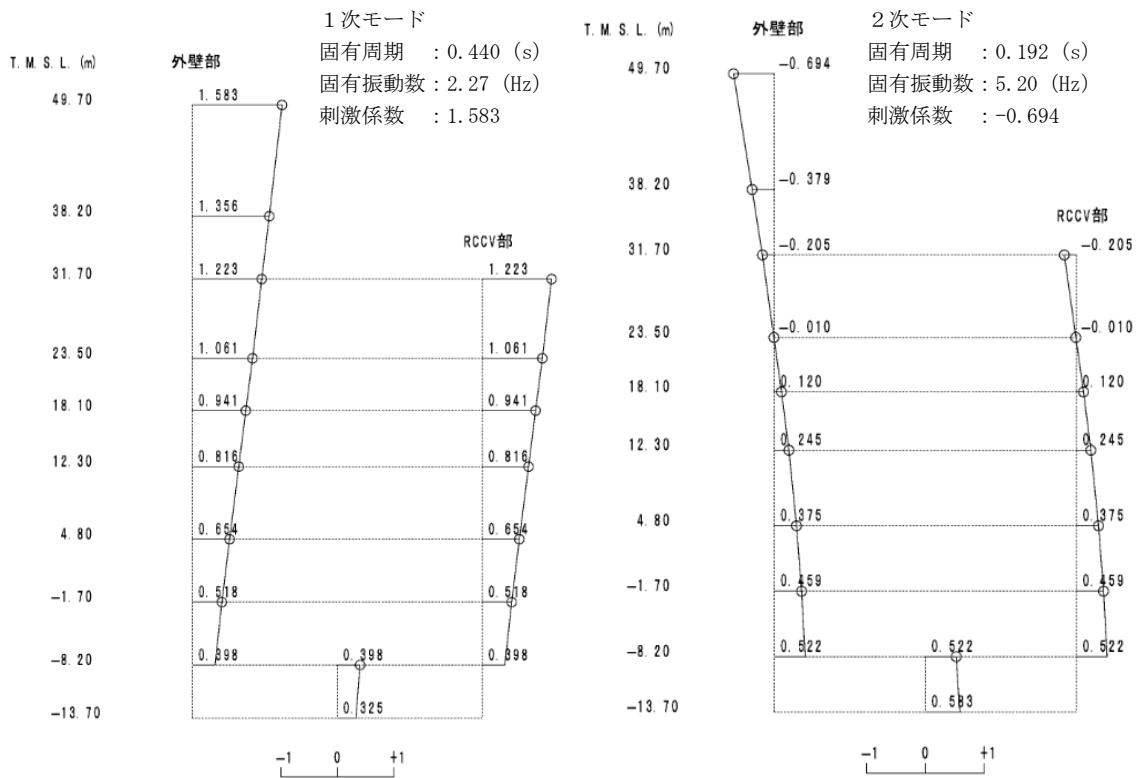


図4 刺激関数図 (Ss-1, NS方向)

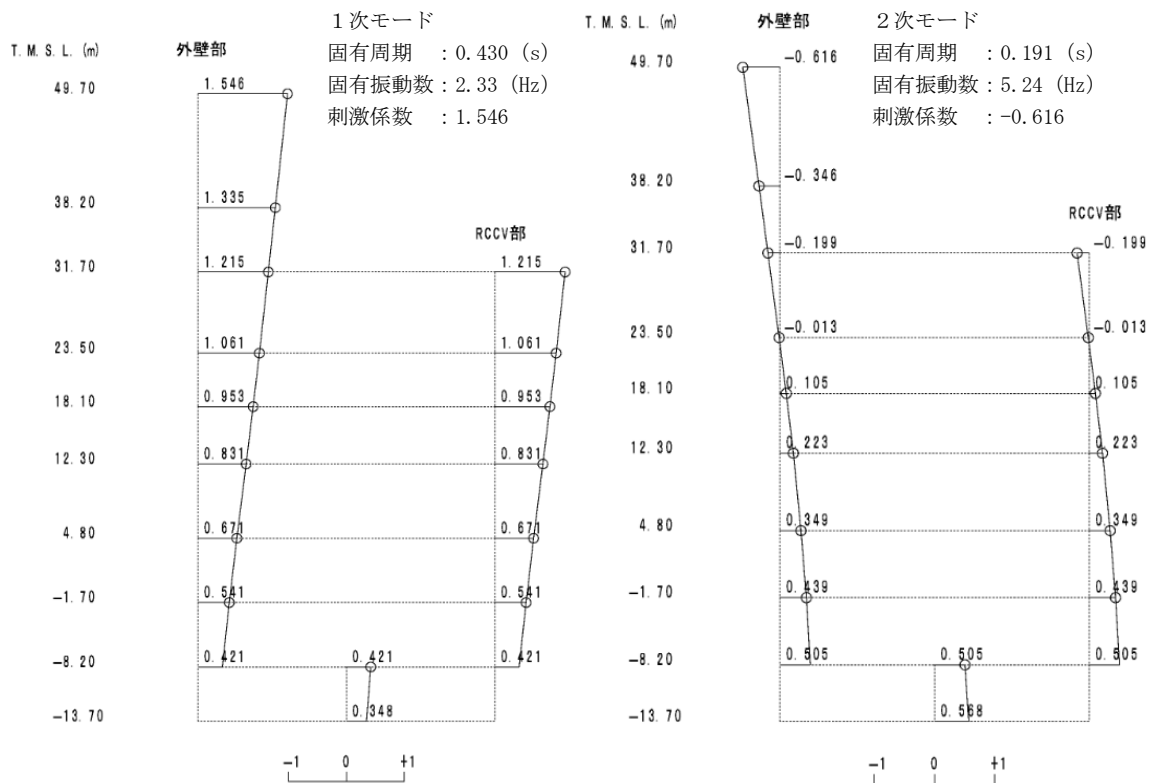


図5 刺激関数図 (Ss-1, EW方向)

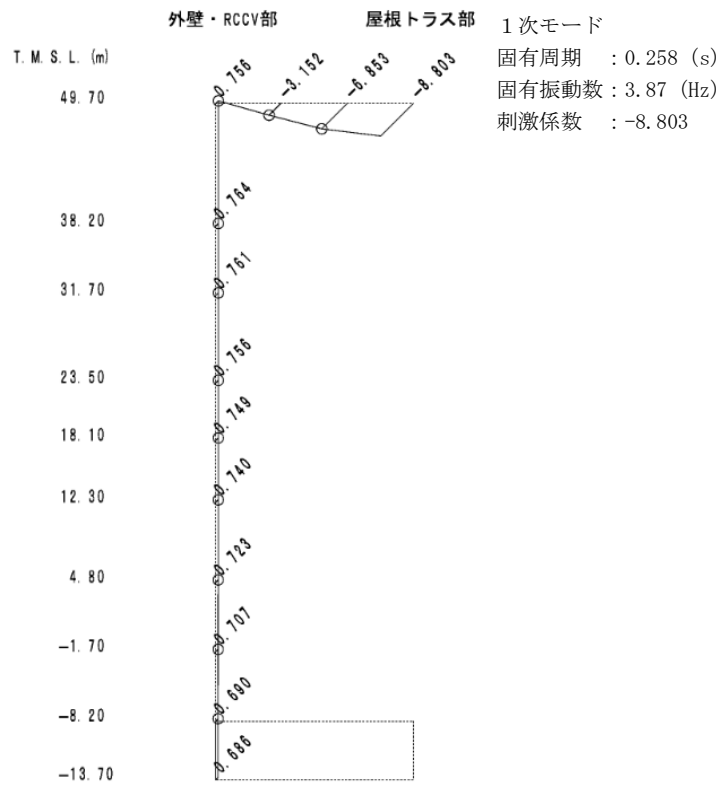


図6 刺激関数図 (Ss-1, 鉛直方向)

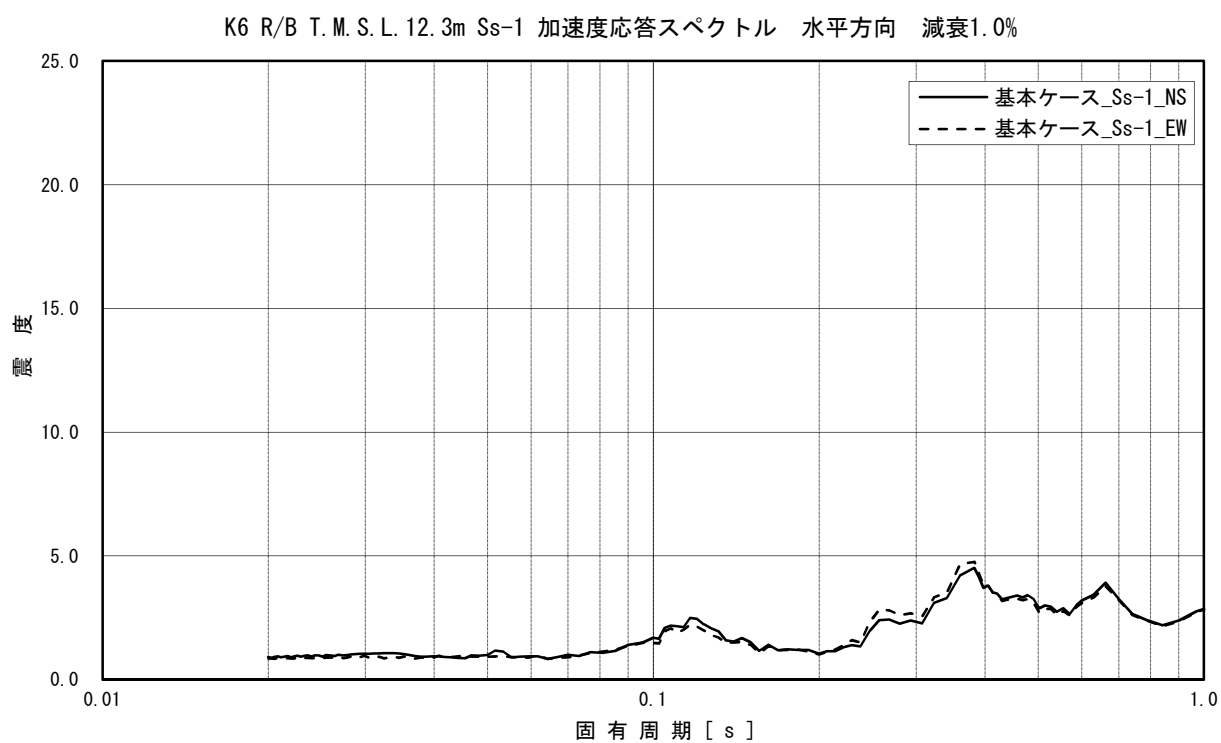


図 7(1) 原子炉建屋 (T. M. S. L. 12. 3m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)

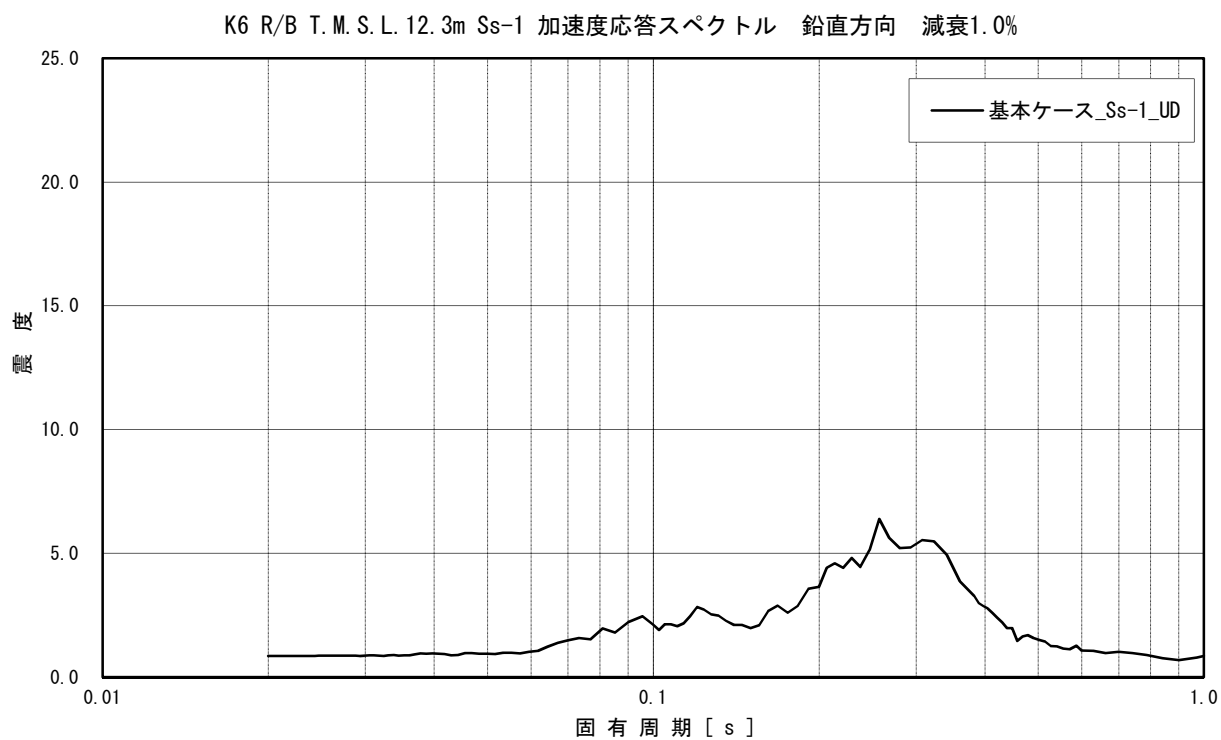


図 7(2) 原子炉建屋 (T. M. S. L. 12. 3m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)

K6 原子炉建屋 (T. M. S. L. 12.3m) の変位応答スペクトル (水平方向, 減衰1.0%) Ss-1

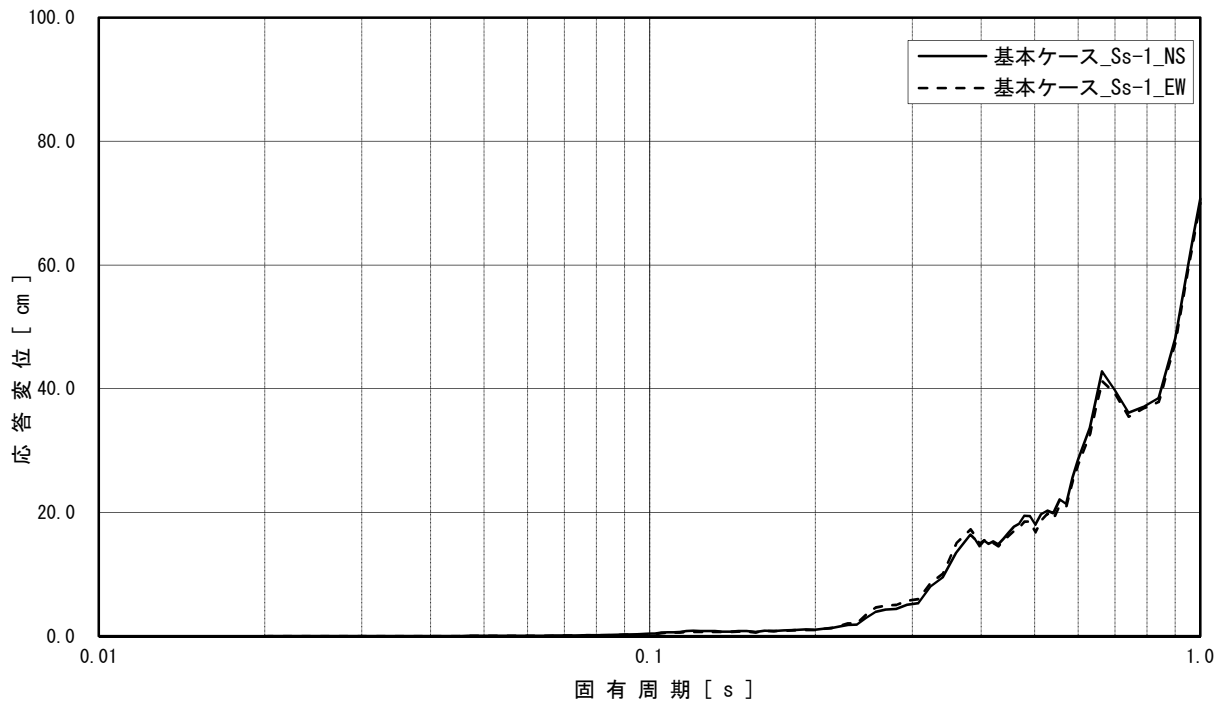


図 8(1) 原子炉建屋 (T. M. S. L. 12.3m) の変位応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)

K6 原子炉建屋 (T. M. S. L. 12.3m) の変位応答スペクトル (鉛直方向, 減衰1.0%) Ss-1

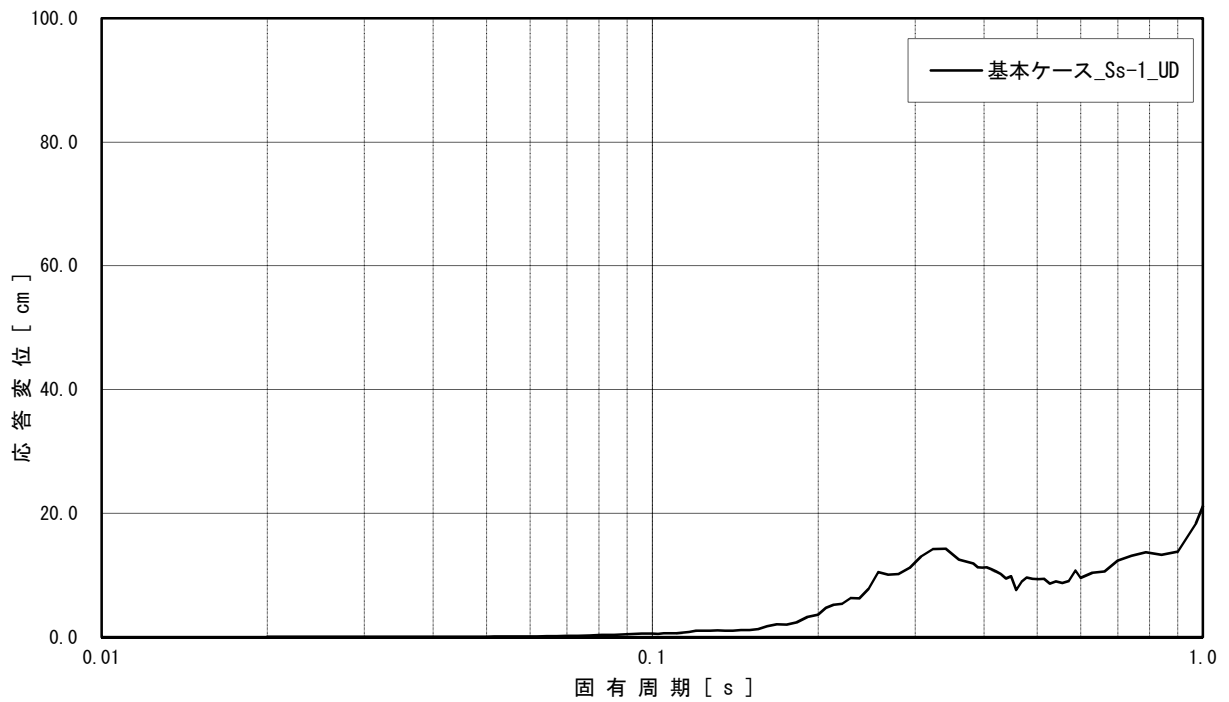


図 8(2) 原子炉建屋 (T. M. S. L. 12.3m) の変位応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)

4. 剛柔判断及び打切り振動数に係る検討

(1) 剛柔判断の閾値を 0.05 秒とすることに関連する知見

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 秒を剛柔判断の閾値としている。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。

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考えられている知見を以下に記載する。

a. J E A G 4 6 0 1-1987 版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。

J E A G 4 6 0 1-1987 における剛柔判断の固有振動数 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、原子炉建屋の卓越固有周期が剛柔判断の固有周期 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、変位応答スペクトルにおける 0.1 秒での応答について概ね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）※

※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。

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米国内の発電所（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。

※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

- f. 建築構造学大系振動理論：振動理論（大崎著）によると、速度応答スペクトルに関して系に与える最大のエネルギーと密接な関係があると述べられている。最大相対変位に角周波数を乗じたものが速度応答スペクトルとなるため、単位質量あたりの最大エネルギーは、速度応答スペクトルで表すことができる。よって、速度応答スペクトルは構造物に対して固有周期に応じて与える一種のエネルギースペクトルであると解釈することが出来る。

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

原子炉遮蔽壁（T. M. S. L. 18. 10m）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 9 に示す。また、同様に変位応答スペクトルを図 10 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を有するが、構造強度の評価に直接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。

※： 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。

K-6 原子炉遮蔽壁 (T. M. S. L. 18. 100m) 水平方向 減衰定数1.0%

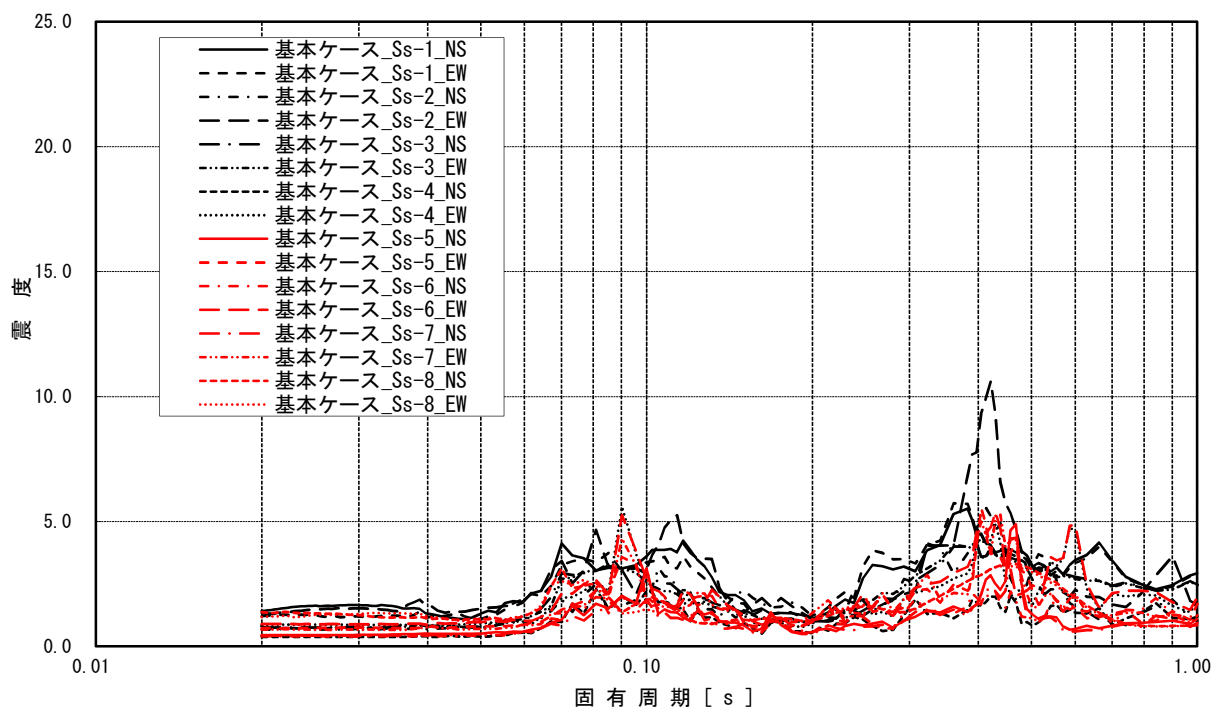


図 9(1) 原子炉遮蔽壁 (T. M. S. L. 18. 10m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)

K-6 原子炉遮蔽壁 (T. M. S. L. 18. 100m) 鉛直方向 減衰定数1.0%

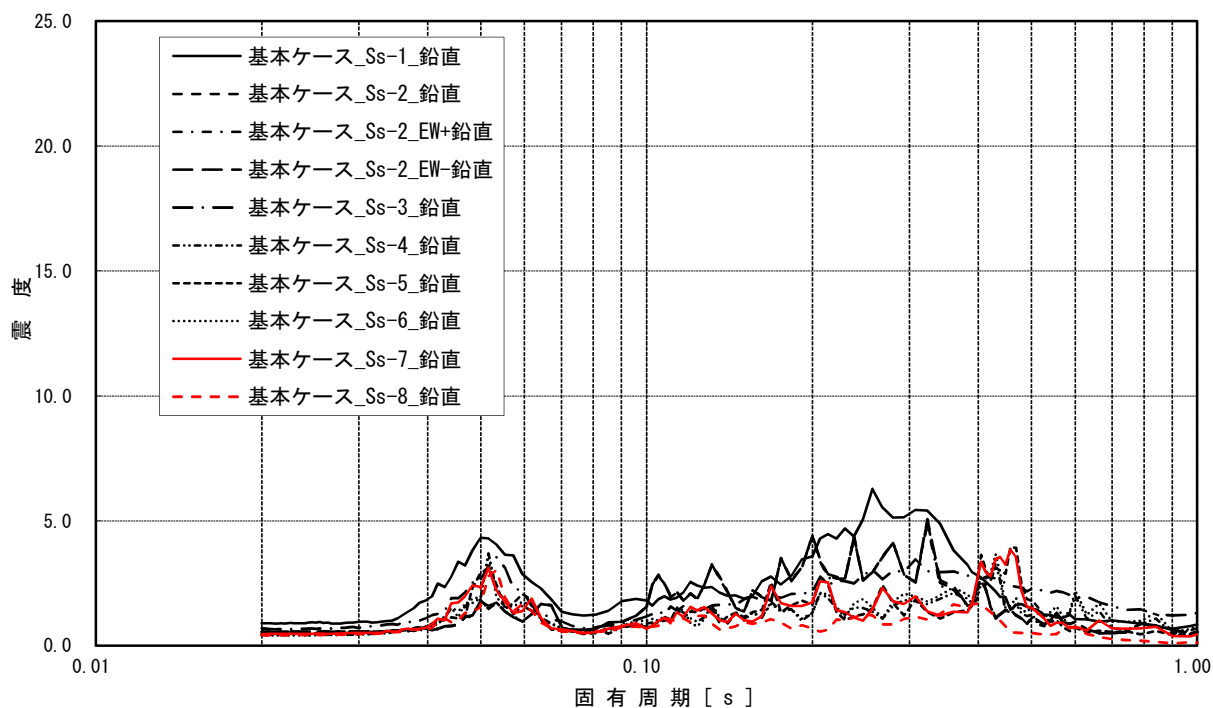


図 9(2) 原子炉遮蔽壁 (T. M. S. L. 18. 10m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)

K-6 原子炉遮蔽壁 (T. M. S. L. 18. 100m) 水平方向 減衰定数1.0%

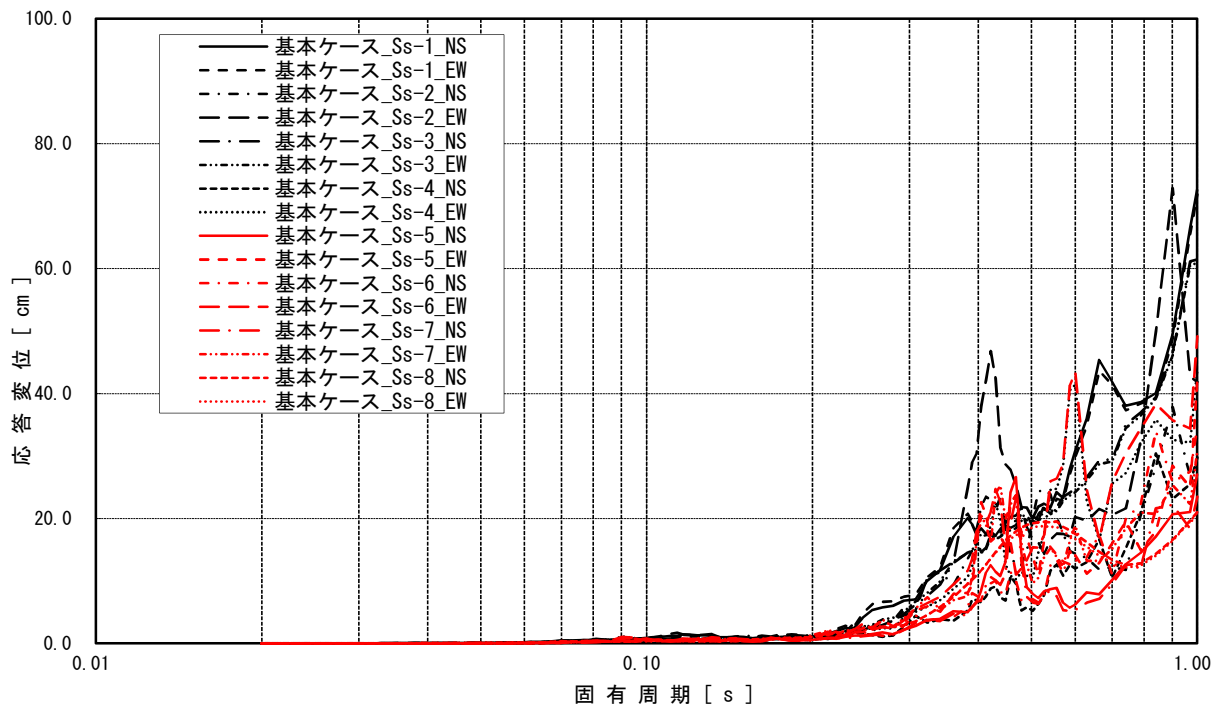


図 10(1) 原子炉遮蔽壁 (T. M. S. L. 18. 10m) の変位応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)

K-6 原子炉遮蔽壁 (T. M. S. L. 18. 100m) 鉛直方向 減衰定数1.0%

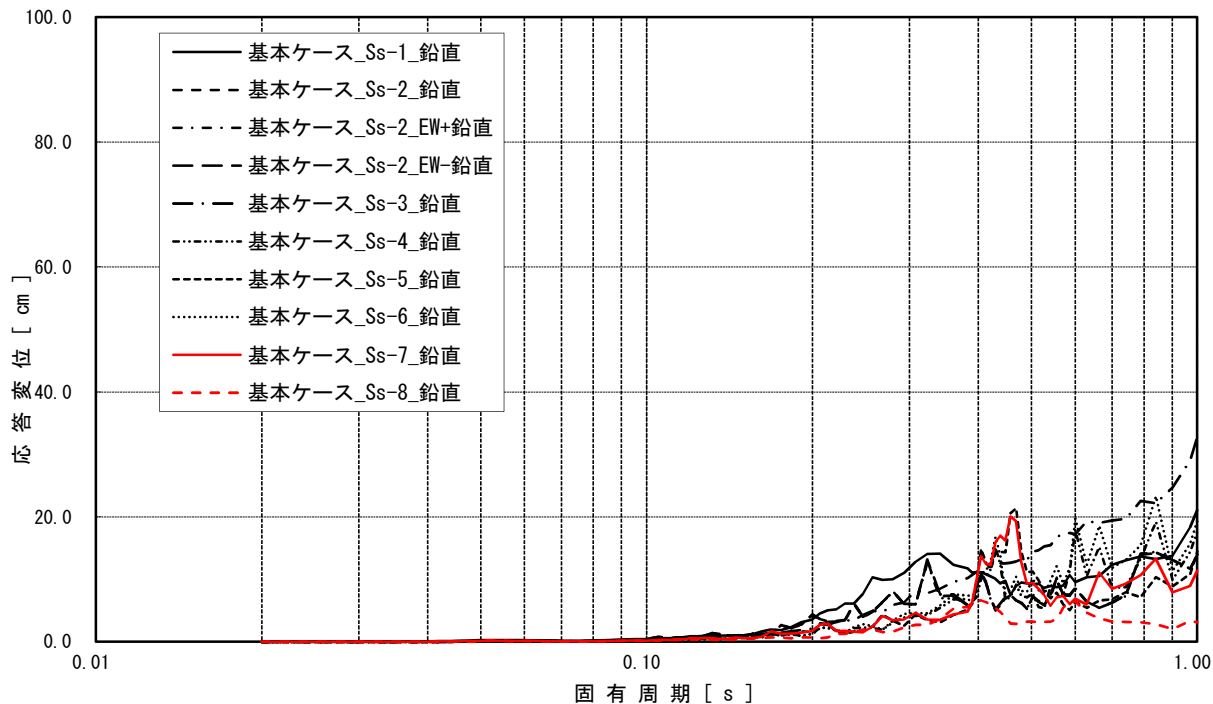


図 10(2) 原子炉遮蔽壁 (T. M. S. L. 18. 10m) の変位応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)

(3) 現行の動的解析法の妥当性確認

本項では現行の 0.05 秒を超える領域（20Hz 未満）を考慮した動的解析法が、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の算定方法については、工事計画に係る補足説明資料【KK6 補足-028-5 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曲線を適用する設備を選定する。また、設計用床応答曲線を 20Hz までの作成としていることを踏まえて、1 次固有振動数が 20Hz 未満の範囲で 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曲線を適用する設備

以下の代表構築物の加速度応答スペクトルの傾向を確認する。代表構築物の加速度応答スペクトルを添付図 1～添付図 4 に、最大応答加速度（1.2ZPA）を添付表 1～添付表 2 に示す。

・原子炉建屋

水平及び鉛直方向ともに剛領域になるに従って加速度が低下傾向にあり 20Hz 近傍に卓越するピークはない。

・原子炉遮蔽壁及び原子炉本体基礎

水平方向では剛領域になるに従って加速度が低下傾向にあり 20Hz 近傍に卓越するピークはない。鉛直方向では上層階ほど 20Hz 近傍に卓越する応答を有する。

上述した各構築物の加速度応答スペクトルの傾向として原子炉建屋（水平方向及び鉛直方向）の応答、原子炉遮蔽壁及び原子炉本体基礎（水平方向）の応答については、剛領域になるに従って加速度は低下傾向にあり、20Hz 近傍に卓越する応答はないため、20Hz 近傍に卓越する応答を有する原子炉遮蔽壁及び原子炉本体基礎（鉛直方向）の設計用床応答曲線を適用し評価する設備に対して検討を行う。

原子炉遮蔽壁及び原子炉本体基礎（鉛直方向）の設計用床応答曲線を適用し耐震評価を実施する設備を表 3 に示す。動的解析法の妥当性確認のための検討対象設備については、20Hz 近傍の加速度が大きい原子炉遮蔽壁の設計用床応答曲線を適用するもののうち、一次応力の裕度が最も小さい主蒸気系配管（モデル No. MS-004）を対象として検討する。

表3 原子炉遮蔽壁及び原子炉本体基礎（鉛直方向）の設計用床応答曲線を適用する設備

設備名称	評価に適用する設計用床応答曲線の作成位置 (最高標高)	1次固有周期 (s)
原子炉冷却材浄化系配管		
復水給水系配管		
高圧炉心注水系配管		
主蒸気系配管		
格納容器下部注水系配管		
放射性ドレン移送系配管		
残留熱除去系配管		
高圧窒素ガス供給系配管		

(b) 1次固有振動数が20Hz近傍に有する設備

原子炉建屋に設置される配管系において、20Hz未満の範囲で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、 2次として の振動モードを有する原子炉補機冷却水系配管(モデル No. RCW-012)を選定する。

b. 確認方法

図11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曲線を適用した地震応答解析結果を用いて行う。

また、従来の耐震設計で適用している20Hzまでの領域を考慮した地震応答解析結果と比較する。

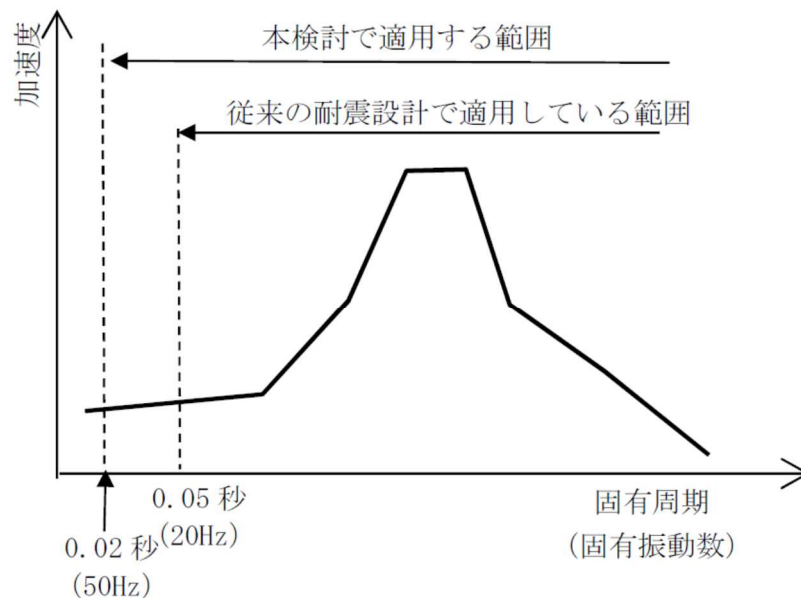


図11 地震応答解析で考慮する固有振動数領域

c. 検討用床応答曲線

地震応答解析に適用する検討用床応答曲線を図 12 に示す。剛領域の設備応答の影響を確認する観点から、設計用床応答曲線 I と同様の方法で固有周期 0.02 秒 (50Hz) まで作成する。なお、検討用床応答曲線の固有周期の計算間隔は、表 4 に示す計算間隔を用いる。

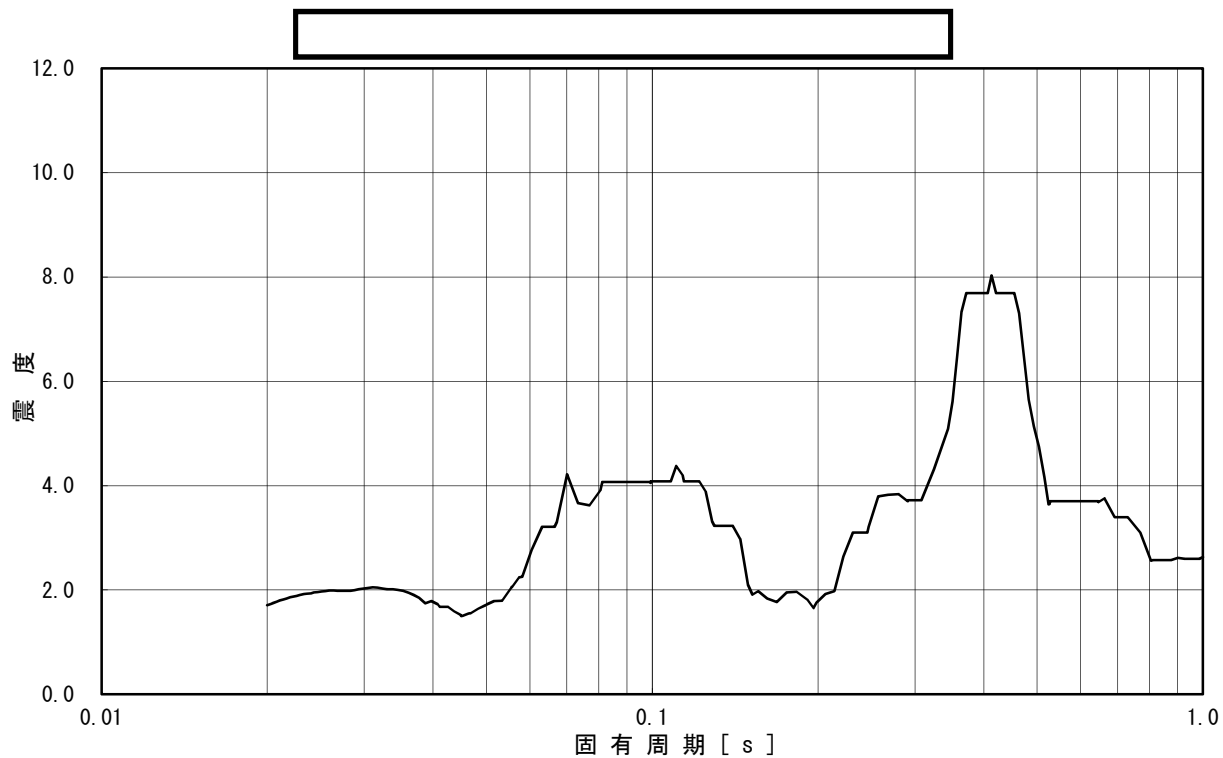


図 12(1) 検討用床応答曲線（主蒸気系配管用）

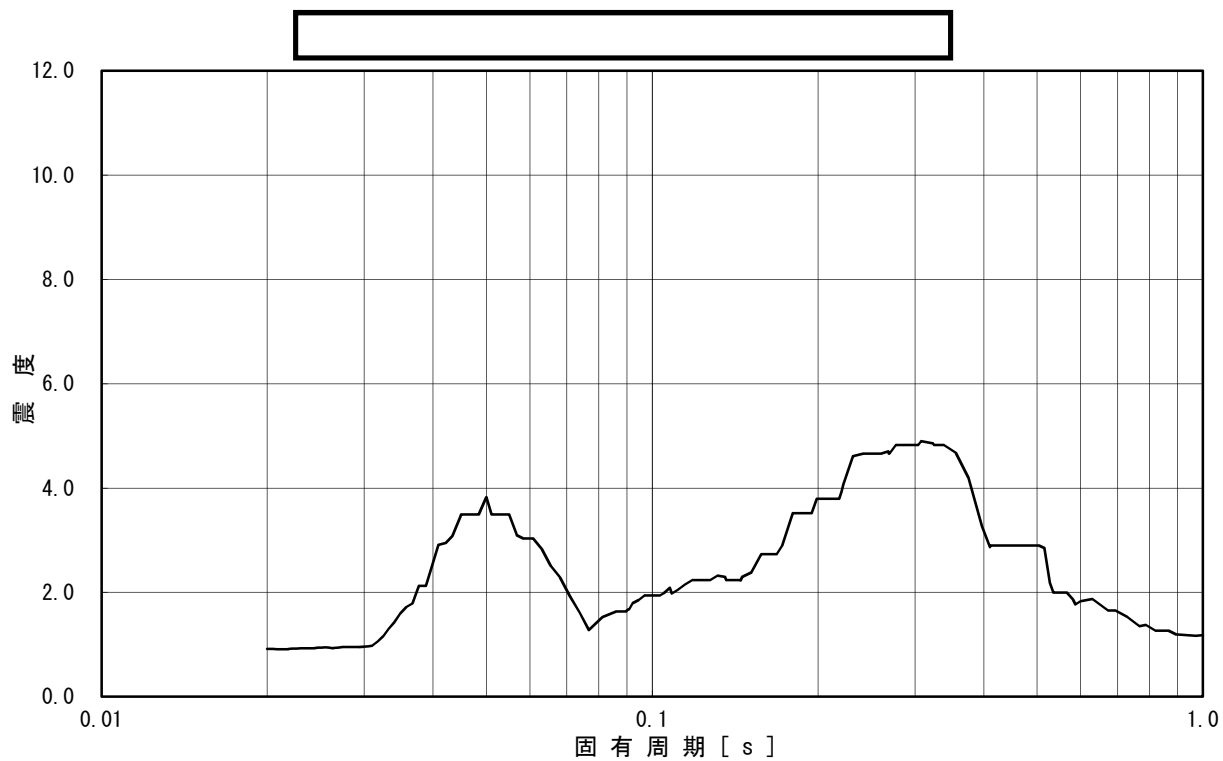


図 12(2) 検討用床応答曲線（主蒸気系配管用）

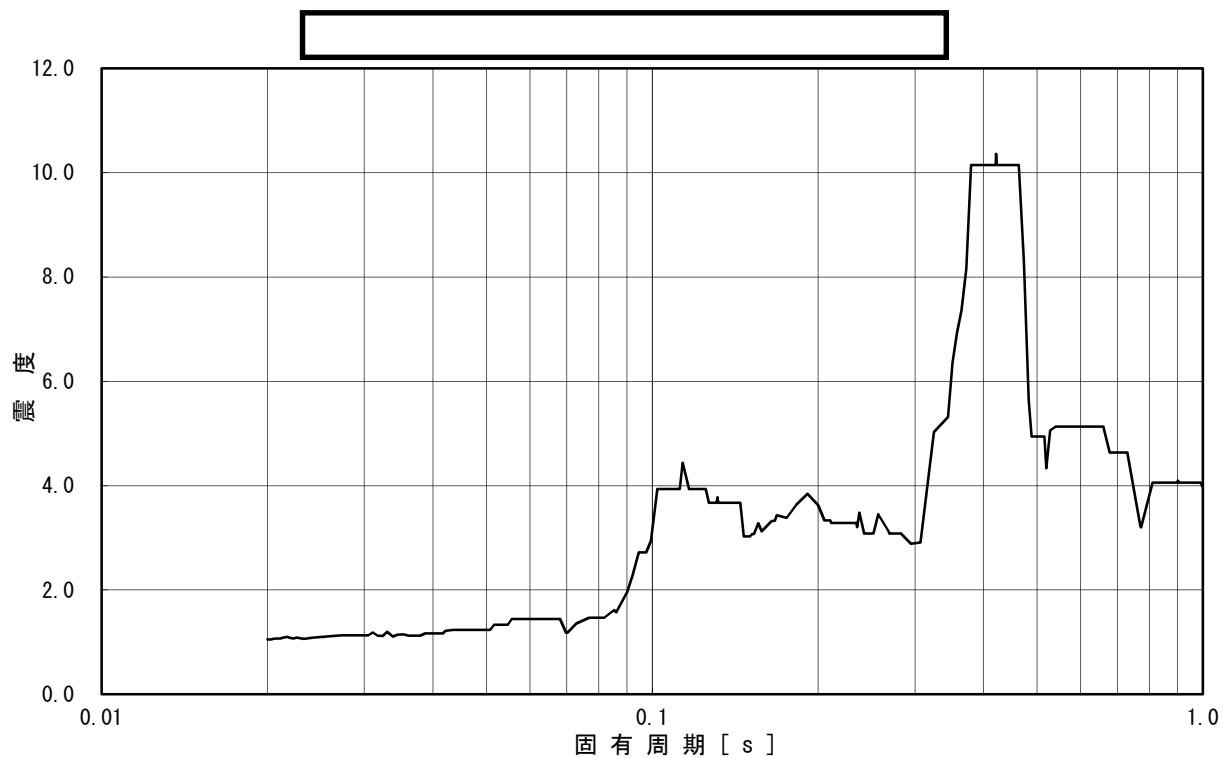


図 12(3) 検討用床応答曲線 (原子炉補機冷却水系配管用)

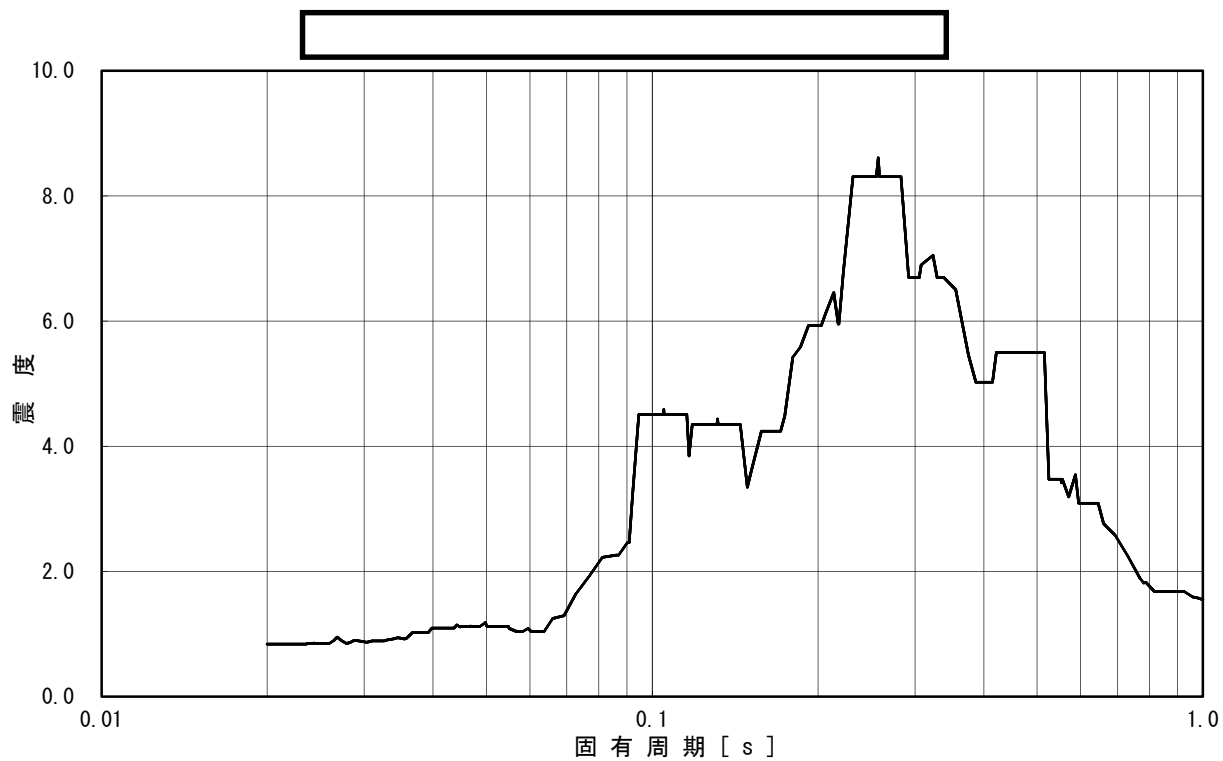


図 12(4) 検討用床応答曲線 (原子炉補機冷却水系配管用)

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
0.1~0.2	1.5
0.2~0.39	1.0
0.39~0.6	0.3
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主蒸気系配管，原子炉補機冷却水系配管の主要仕様，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) 主蒸気系配管

主蒸気系配管の主要仕様を表 5 に，解析モデル図を図 13 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 14 に示す。

表 5 主蒸気系配管の主要仕様

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)	711.2
厚さ (mm)	35.7
材料	STS480

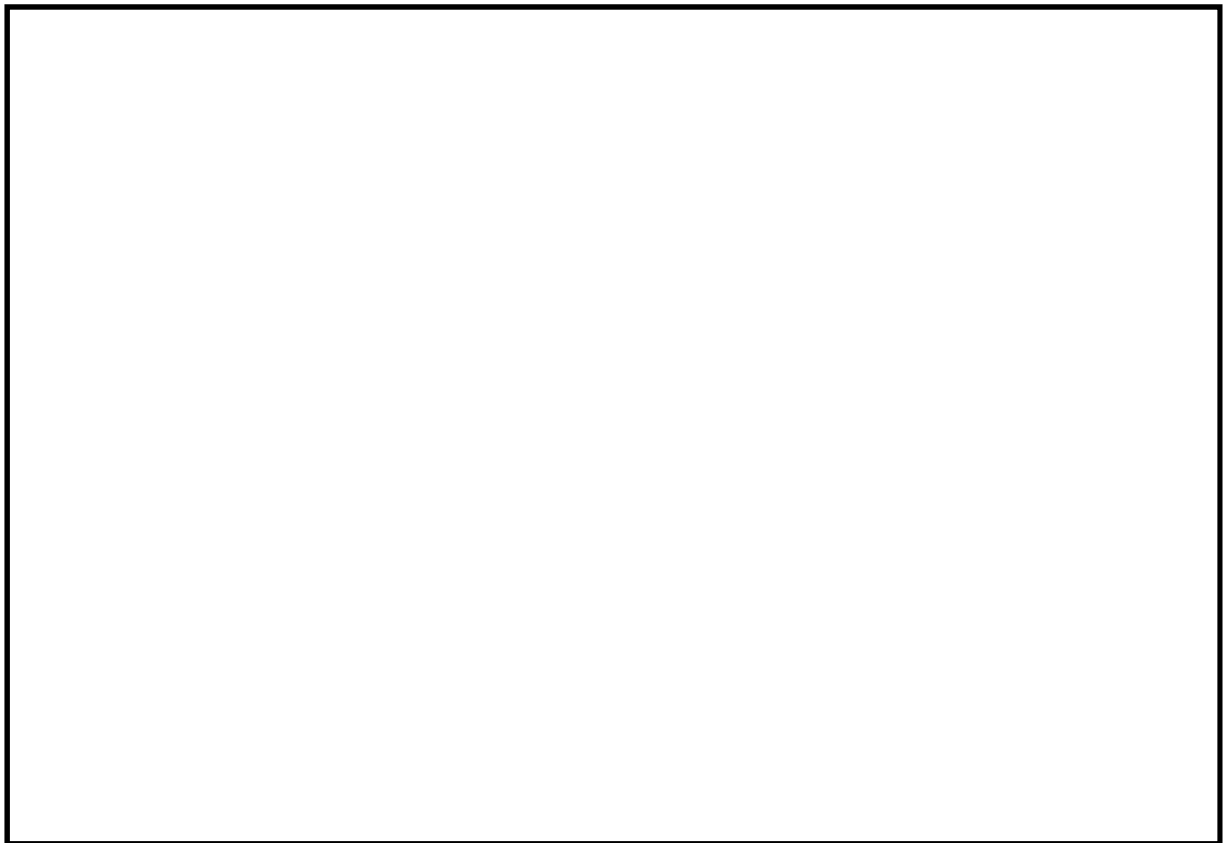


図 13 主蒸気系配管の解析モデル図

表 6 主蒸気系配管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*			設計震度		
						水平方向		鉛直方向
			X方向	Y方向	Z方向	X方向	Z方向	Y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。

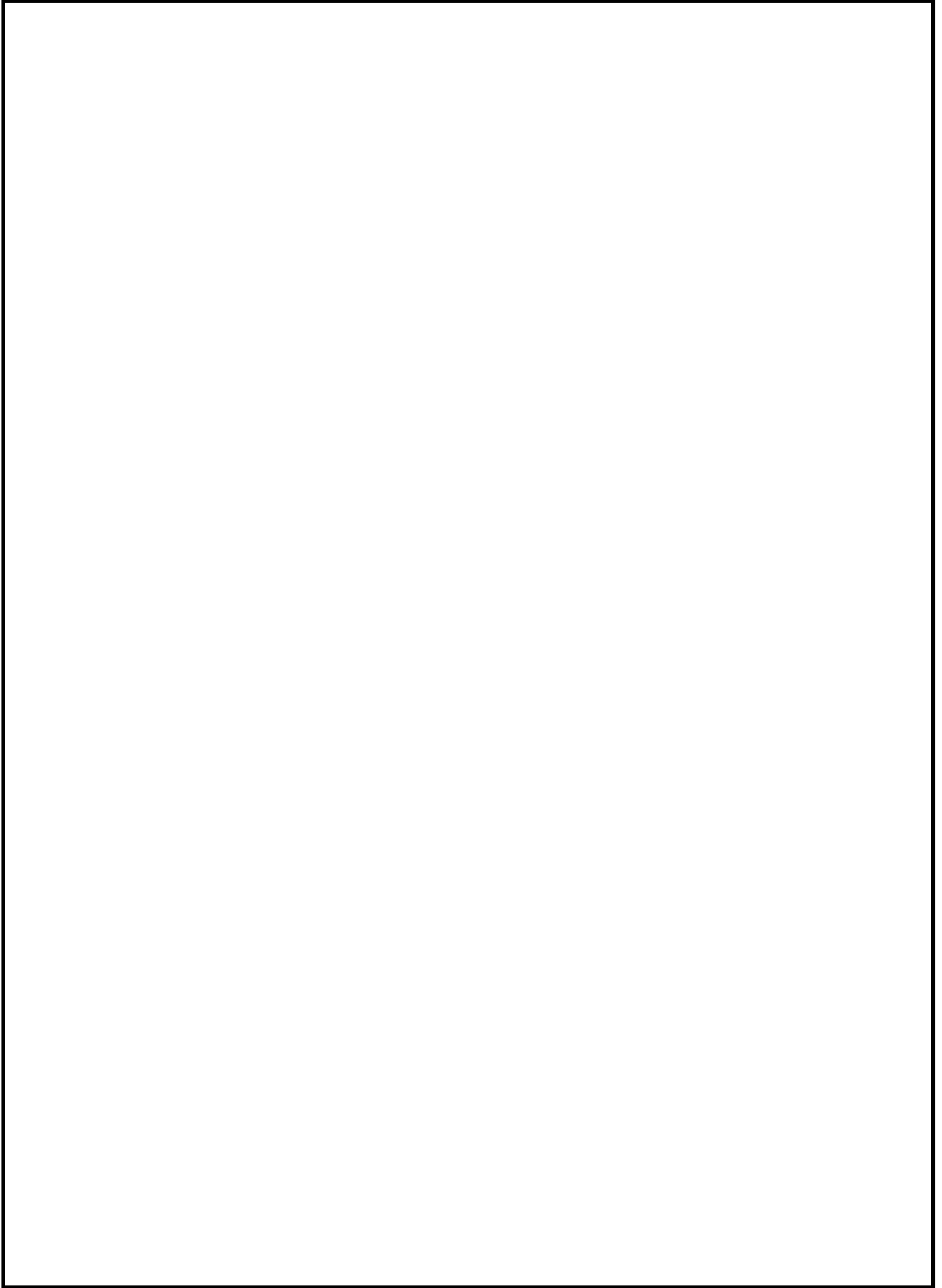


図 14(1) 主蒸気系配管のモード図

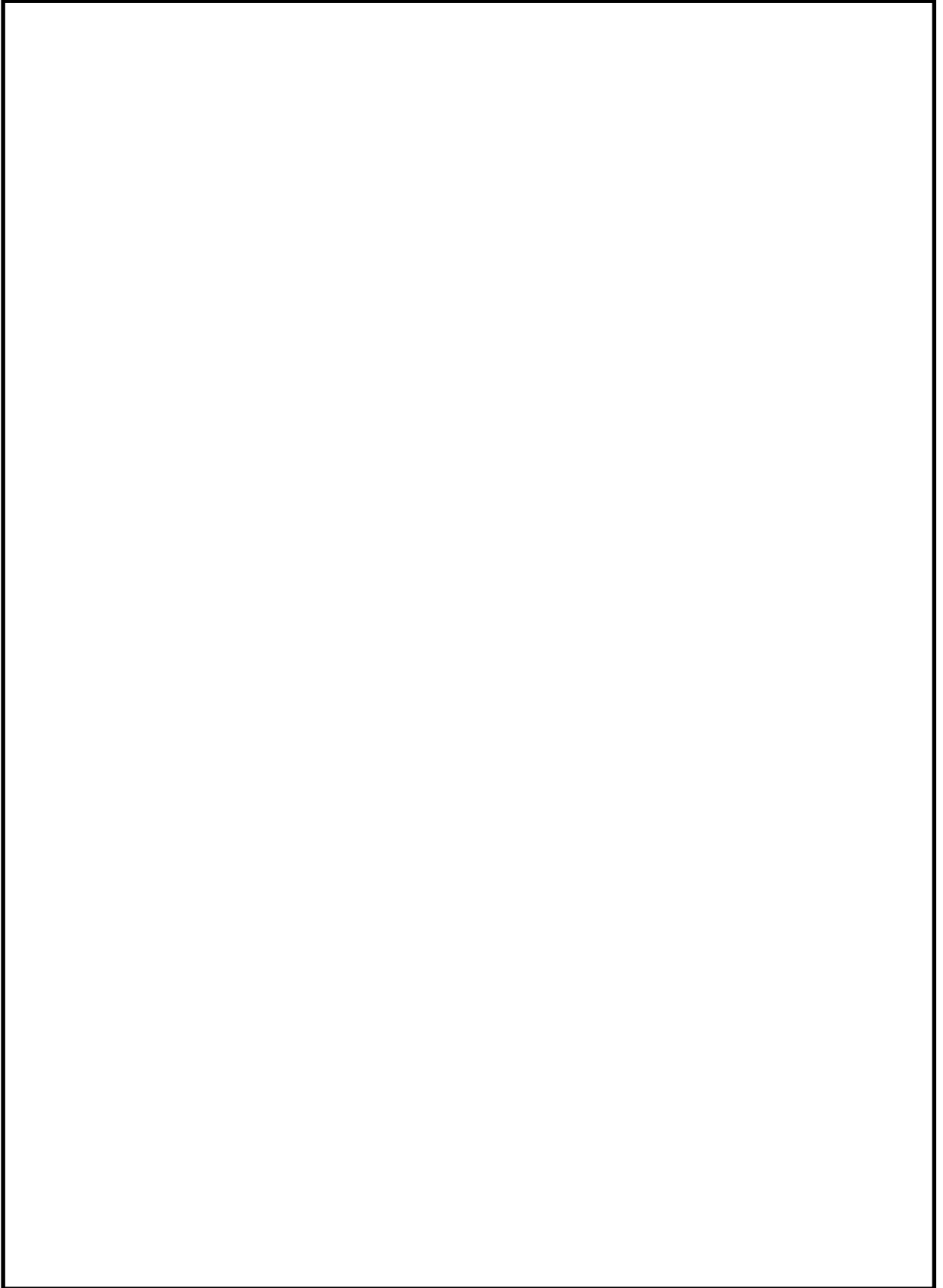


図 14(2) 主蒸気系配管のモード図

(b) 原子炉補機冷却水系配管

原子炉補機冷却水系配管の主要仕様を表 7 に、解析モデル図を図 15 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 16 に示す。

表 7 原子炉補機冷却水系配管の主要仕様

項目	主要仕様
最高使用圧力 (MPa)	1.37
最高使用温度 (°C)	70
外径 (mm)	609.6
厚さ (mm)	9.5
材料	SM400CA

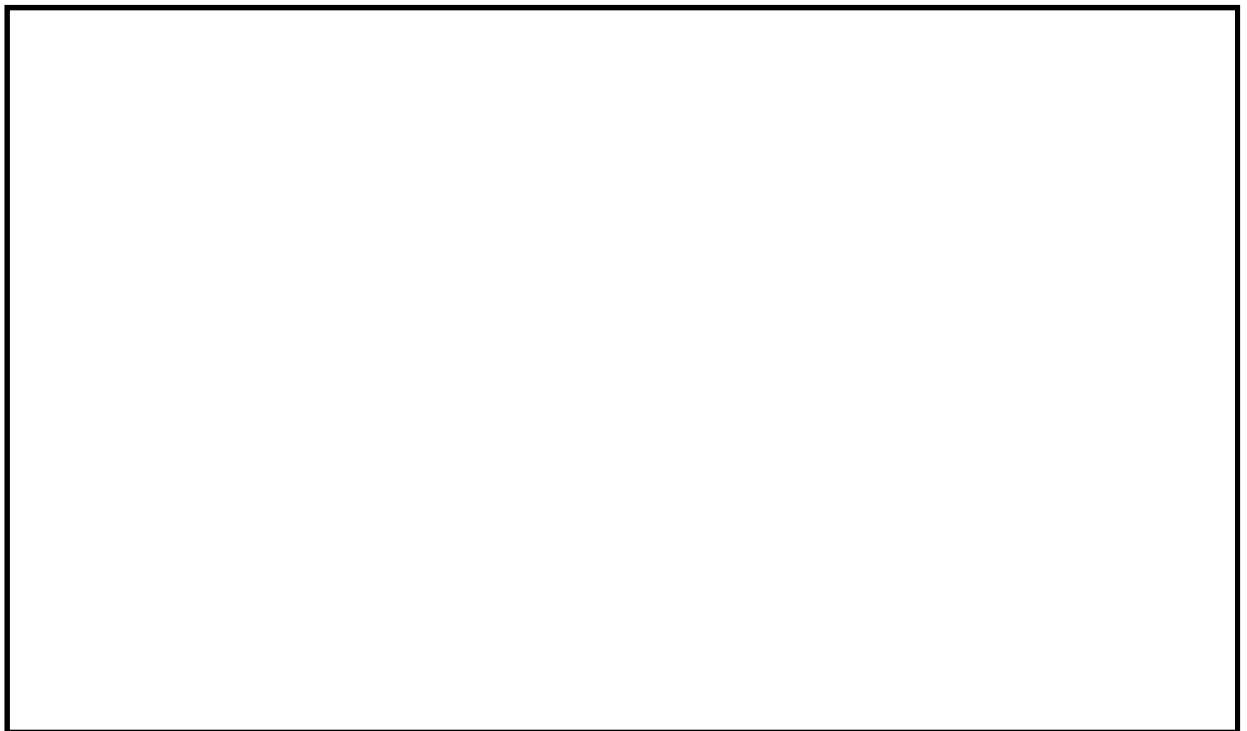


図 15 原子炉補機冷却水系配管の解析モデル図

表 8 原子炉補機冷却水系配管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*			設計震度		
						水平方向		鉛直方向
			X方向	Y方向	Z方向	X方向	Z方向	Y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。

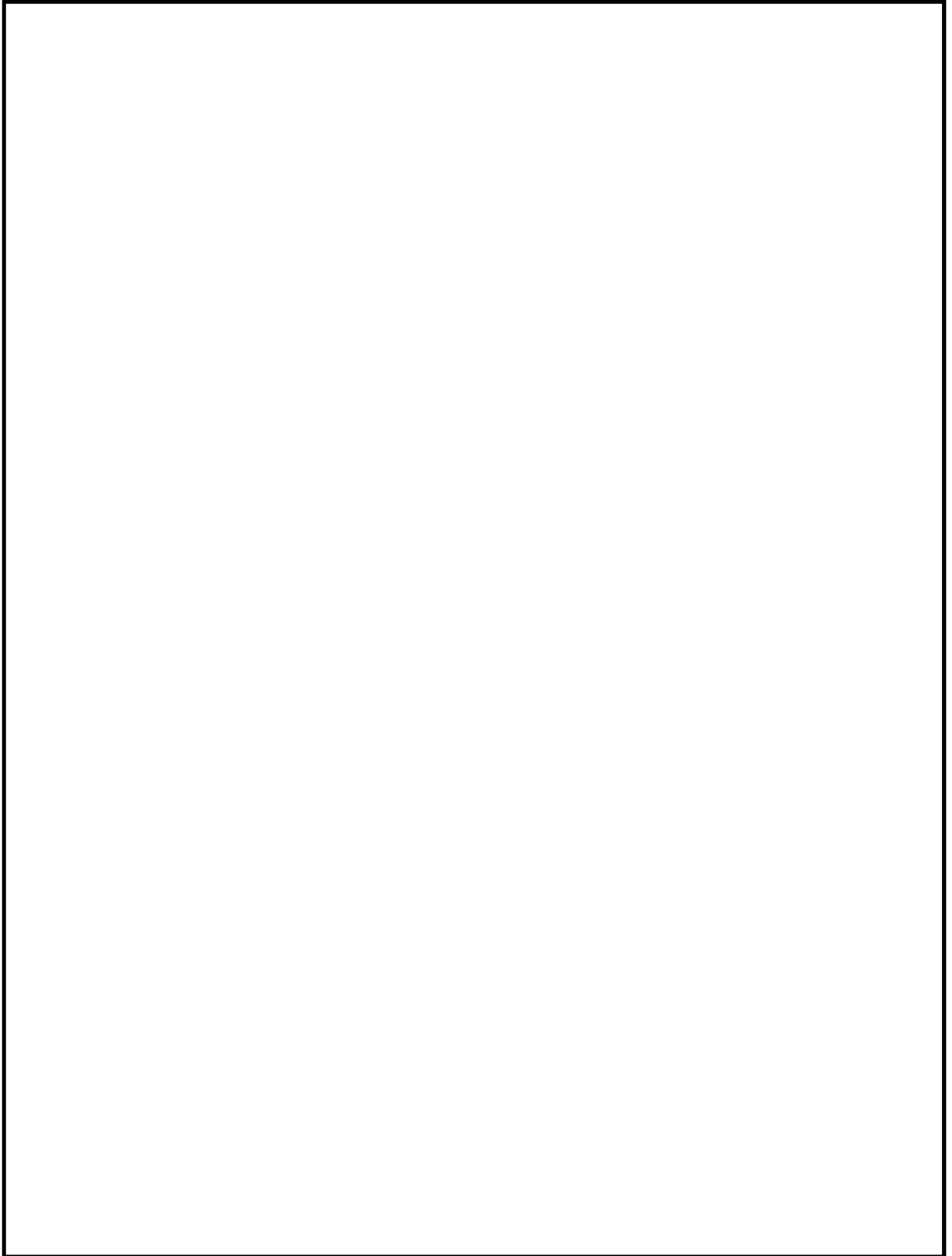


図 16 (1) 原子炉補機冷却水系配管のモード図

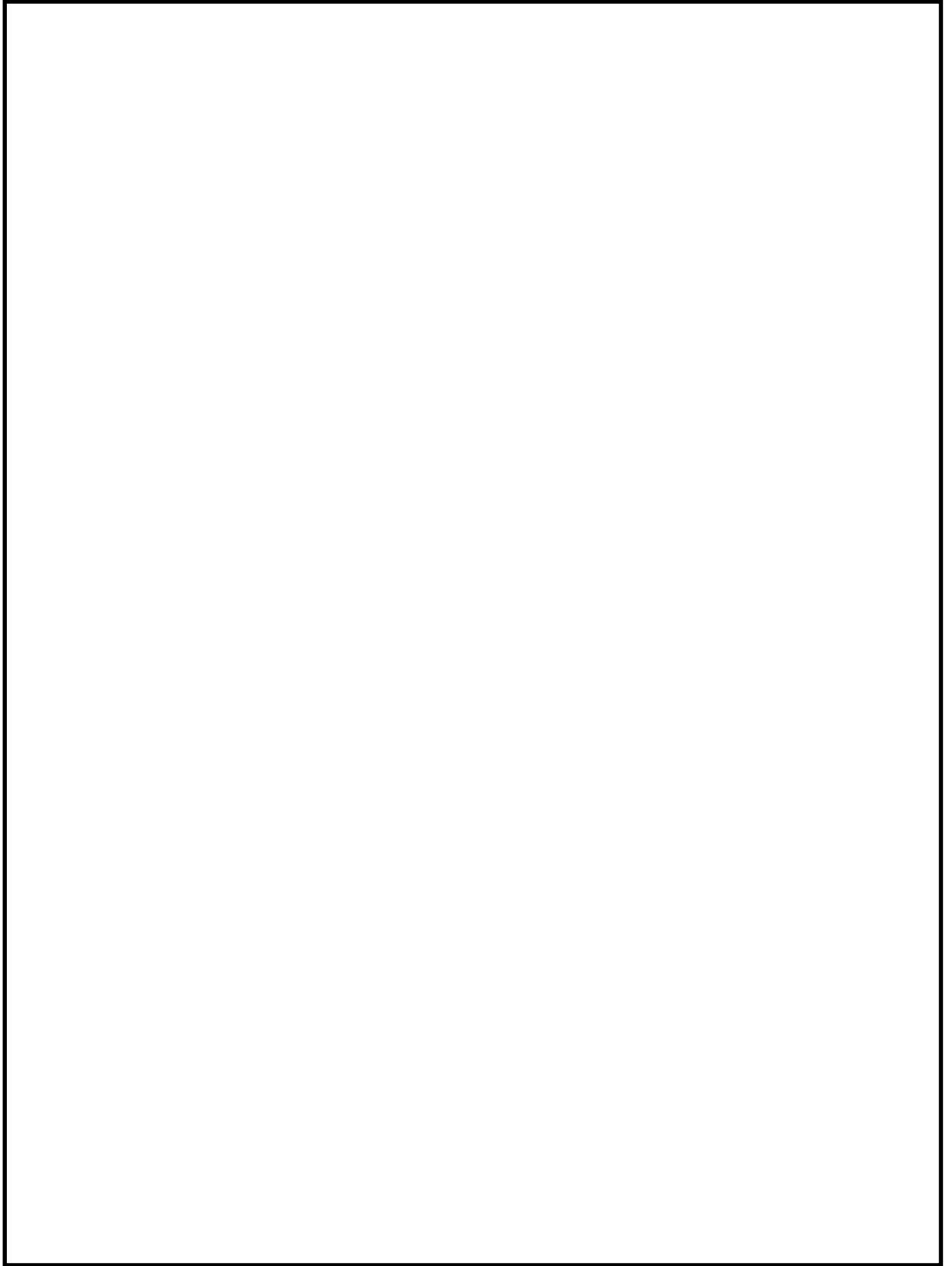


図 16 (2) 原子炉補機冷却水系配管のモード図

e. 解析結果

設計用床応答曲線を用いた地震応答解析結果，検討用床応答曲線を用いた地震応答解析結果及び静的解析結果を示す。

(a) 主蒸気系配管

評価結果を表 9 に示すとともに，最大応力発生部位を図 17 に示す。一次応力の裕度が最も小さい主蒸気系配管（モデル No. MS-004）について，現行の手法である設計用床応答曲線を用いた 20Hz までの領域を考慮した地震応答解析結果 210MPa に対して，検討用床応答曲線を用いて 50Hz までの領域を考慮した地震応答解析結果は 237MPa であり，応力は増加したものの，その増加は僅かであり，許容応力を十分満足することが確認された。

表 9 主蒸気系配管の評価結果

		一次応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
現行の手法による評価結果	20Hz までの領域を考慮した地震応答解析結果 (設計用床応答曲線)	210	375
	静的解析 (1.2ZPA)	142	
	包絡値	210*	
妥当性検討用	50Hz までの領域を考慮した地震応答解析結果 (検討用床応答曲線)	237	375

注記*：設計用床応答曲線Ⅰ及び設計用最大応答加速度Ⅰを用いて算出した値であるため，耐震計算書（VI-2-5-2-1-2）の値（設計用床応答曲線Ⅱ及び設計用最大応答加速度Ⅱを用いて算出）とは異なる。

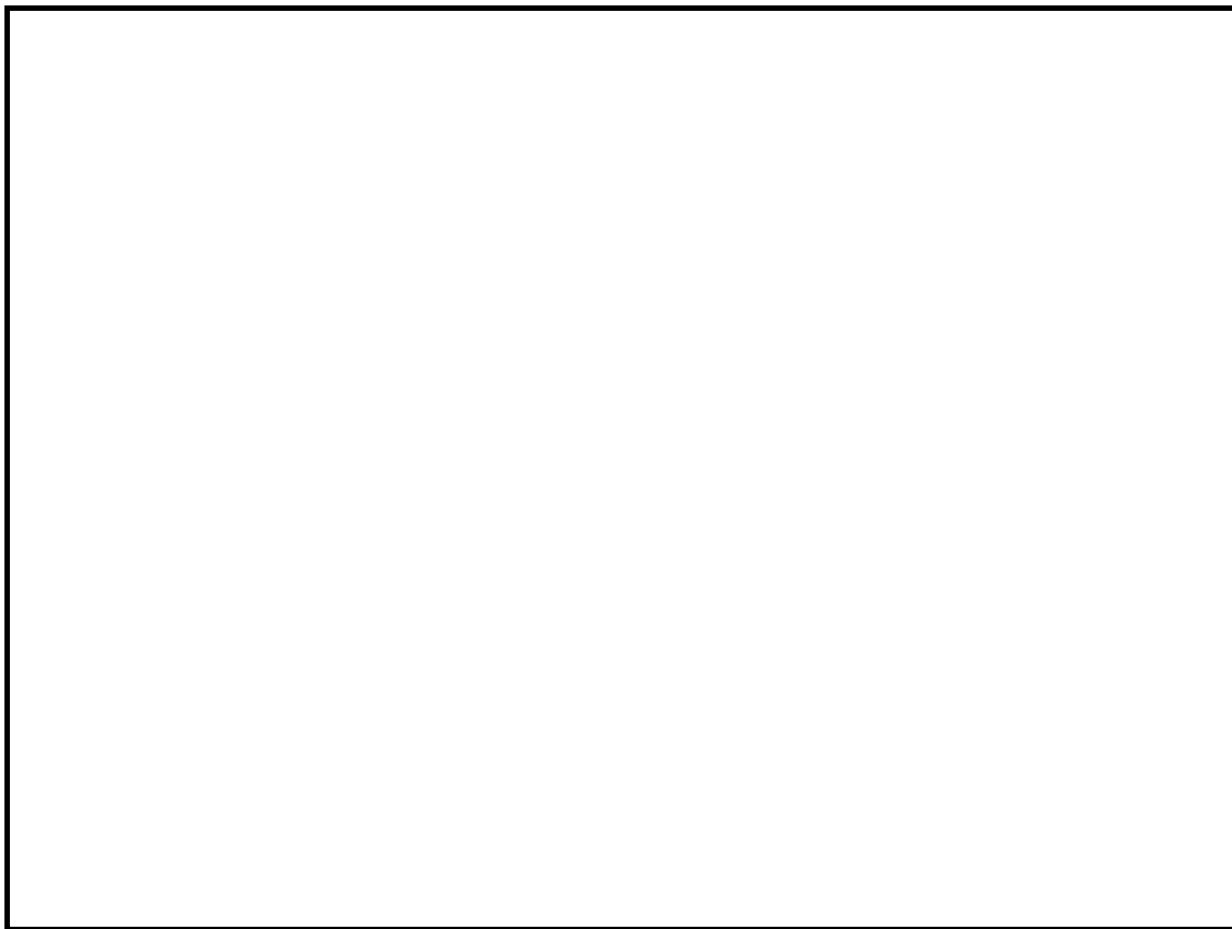


図 17 主蒸気系配管の最大応力発生部位

(b) 原子炉補機冷却水系配管

評価結果を表 10 に示すとともに、最大応力発生部位を図 18 に示す。現行の手法である設計用床応答曲線を用いた 20Hz までの領域を考慮した地震応答解析結果 41MPa に対して、検討用床応答曲線を用いて 50Hz までの領域を考慮した地震応答解析結果は 44MPa であった。また 1.2ZPA を用いた静的解析による評価結果は 45MPa であった。

以上のとおり、現行の手法による評価結果 45MPa が妥当性検討結果 44MPa と同等の結果となった。

表 10 原子炉補機冷却水系配管の評価結果

		一次応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
現行の手法による評価結果	20Hz までの領域を考慮した地震応答解析結果 (設計用床応答曲線)	41	344
	静的解析 (1.2ZPA)	45	
	包絡値	45	
妥当性検討用	50Hz までの領域を考慮した地震応答解析結果 (検討用床応答曲線)	44	344

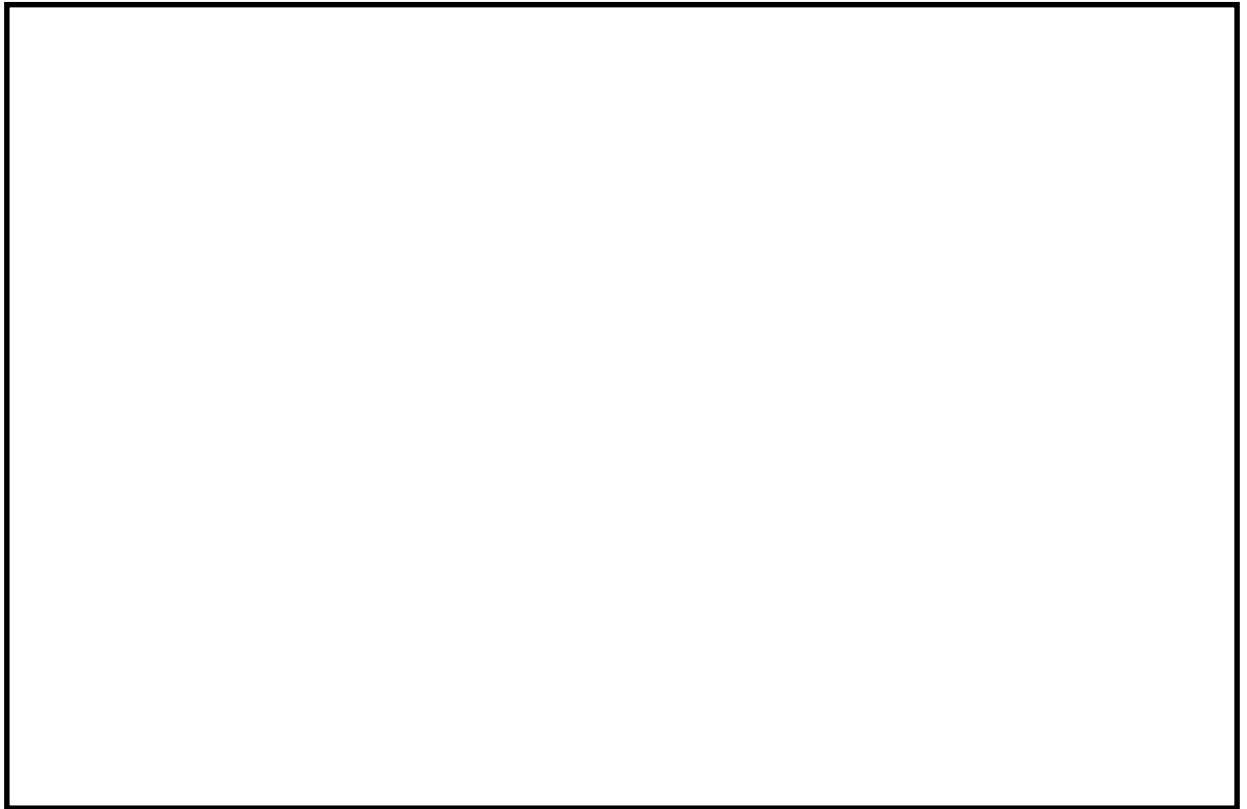


図 18 原子炉補機冷却水系配管の最大応力発生部位

以上のとおり，主蒸気系配管及び原子炉補機冷却水系配管ともに現行の手法による評価結果に対して，妥当性検討として実施した 50Hz までの領域を考慮した地震応答解析結果による応力の増加は僅かであることが確認できた。

応力の増加が僅かである理由としては，図 10 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

現行手法の妥当性検討として、20Hz 近傍に卓越する応答を有する床応答スペクトルを適用する主蒸気系配管及び 20Hz 近傍に 1 次固有振動数を有する原子炉補機冷却水系配管を対象に地震応答解析を実施した（表 11 参照）。

表 11 妥当性検討に用いた対象設備

対象設備	説明
主蒸気系配管	20Hz 近傍に卓越する応答を示す原子炉遮蔽壁の設計用床応答曲線を適用するもののうち、一次応力の裕度が最も小さい設備として選定した。
原子炉補機冷却水系配管	20Hz 未満の範囲で 20Hz 近傍に 1 次固有振動数を有する設備として選定した。1 次固有振動数 <input type="text"/> , 2 次固有振動数 <input type="text"/> であり、現行手法では 1 次固有振動数のみ考慮される。

解析結果のまとめを表 12 に示す。

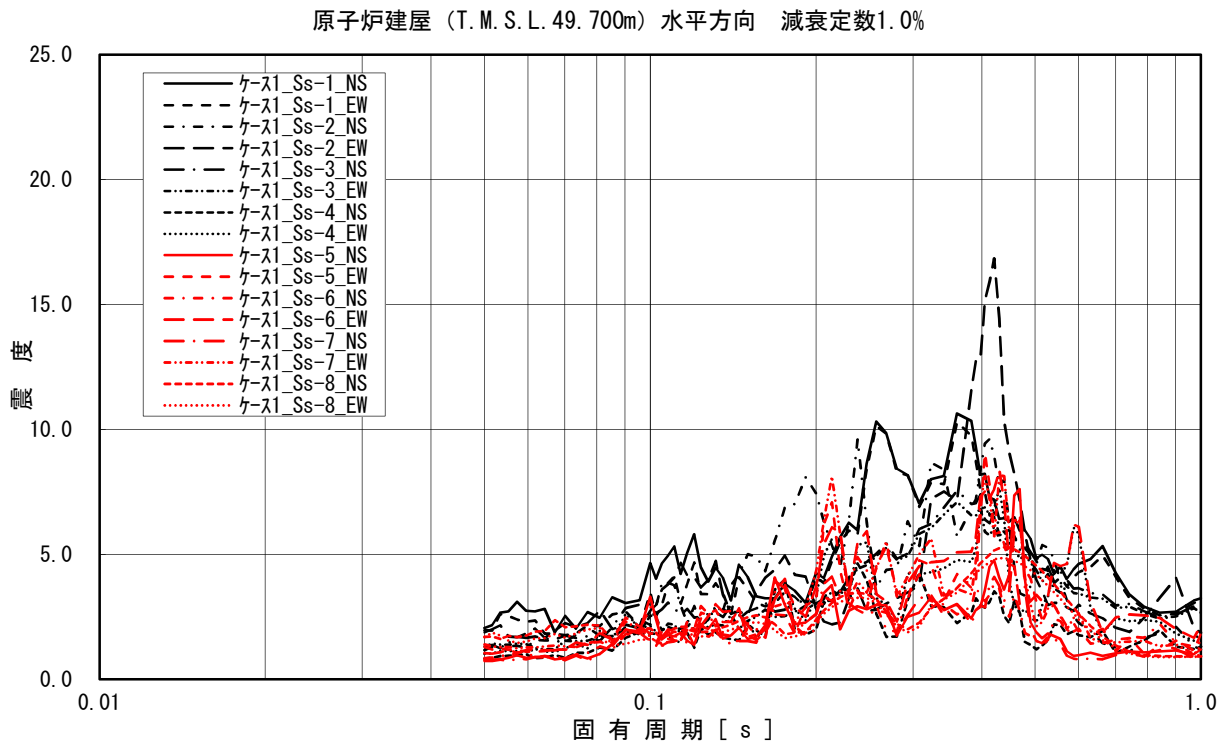
主蒸気系配管は、現行手法による発生応力に対して、妥当性検討による発生応力の増加が確認されたものの、増分は僅かであった。これは、1～11 次の固有振動数（20Hz 未満）での応答の配管に発生する応力への寄与が、12 次以降の固有振動数での応答に対して相対的に小さいことによるものと考えられる。

また、原子炉補機冷却水系配管は、現行手法のうち動的解析による発生応力に対して、妥当性検討による発生応力が僅かに大きくなったものの、現行手法のうち静的解析による発生応力と同等となっており、動的解析に加えて静的解析を行うことで 50Hz までの領域を考慮した地震応答解析を行うことと同等の結果が得られることを確認した。

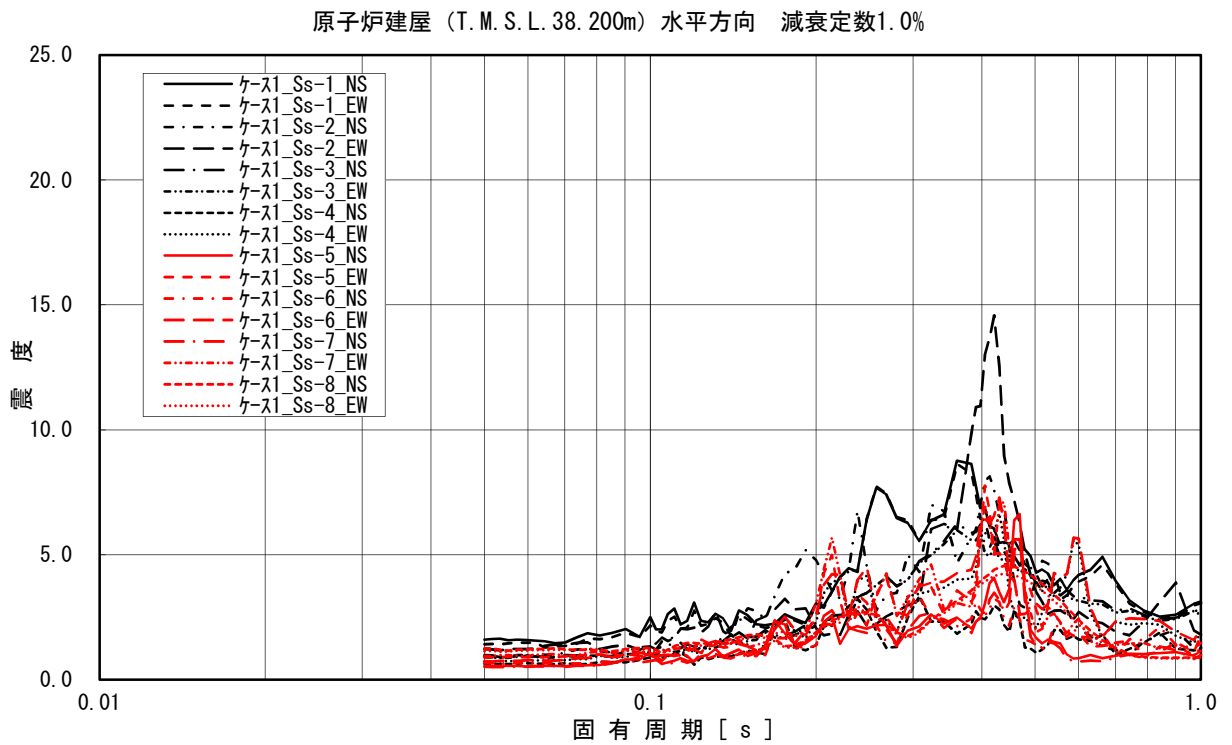
以上のとおり、剛柔判定の閾値を 20Hz とし、現行手法で解析を実施することは、耐震設計を行う上で妥当であると考えられる。

表 12 現行手法及び妥当性検討の評価結果まとめ

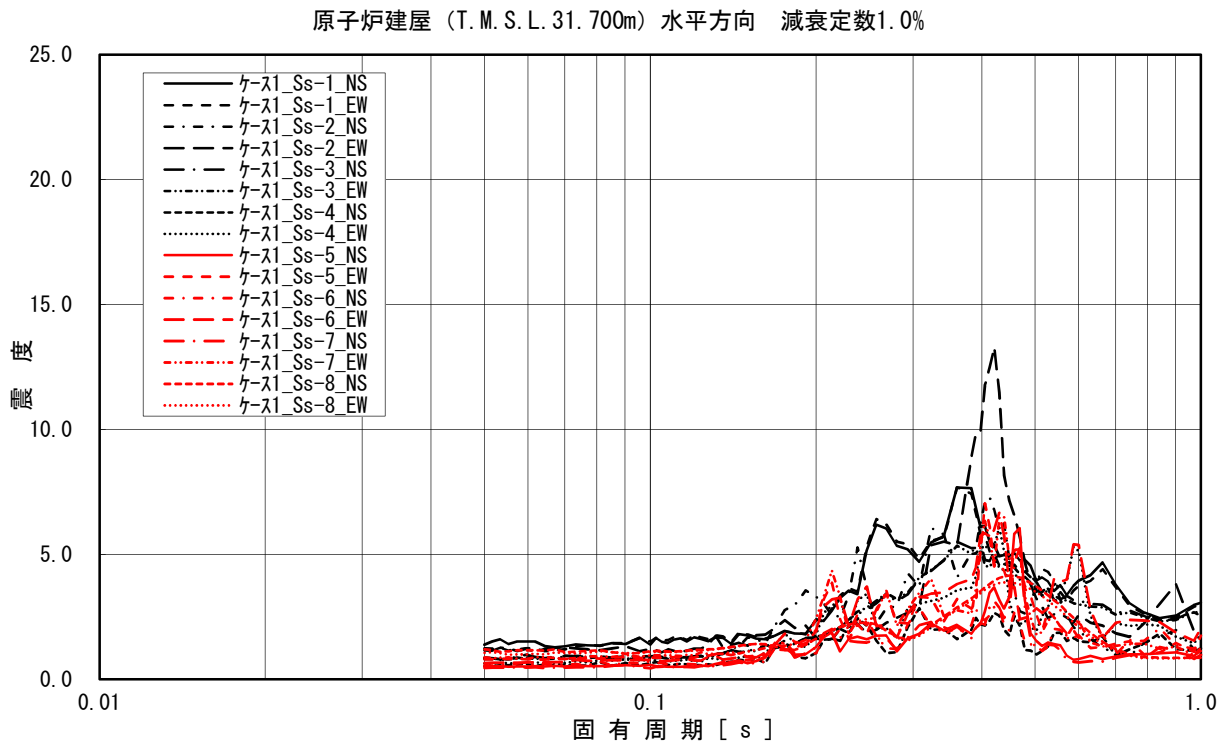
対象設備	発生応力 (MPa)		許容応力 (MPa)
	現行手法	妥当性検討	
主蒸気系配管	210 〔 動的解析 : 210 静的解析 : 142 〕	237	375
原子炉補機冷却水系配管	45 〔 動的解析 : 41 静的解析 : 45 〕	44	344



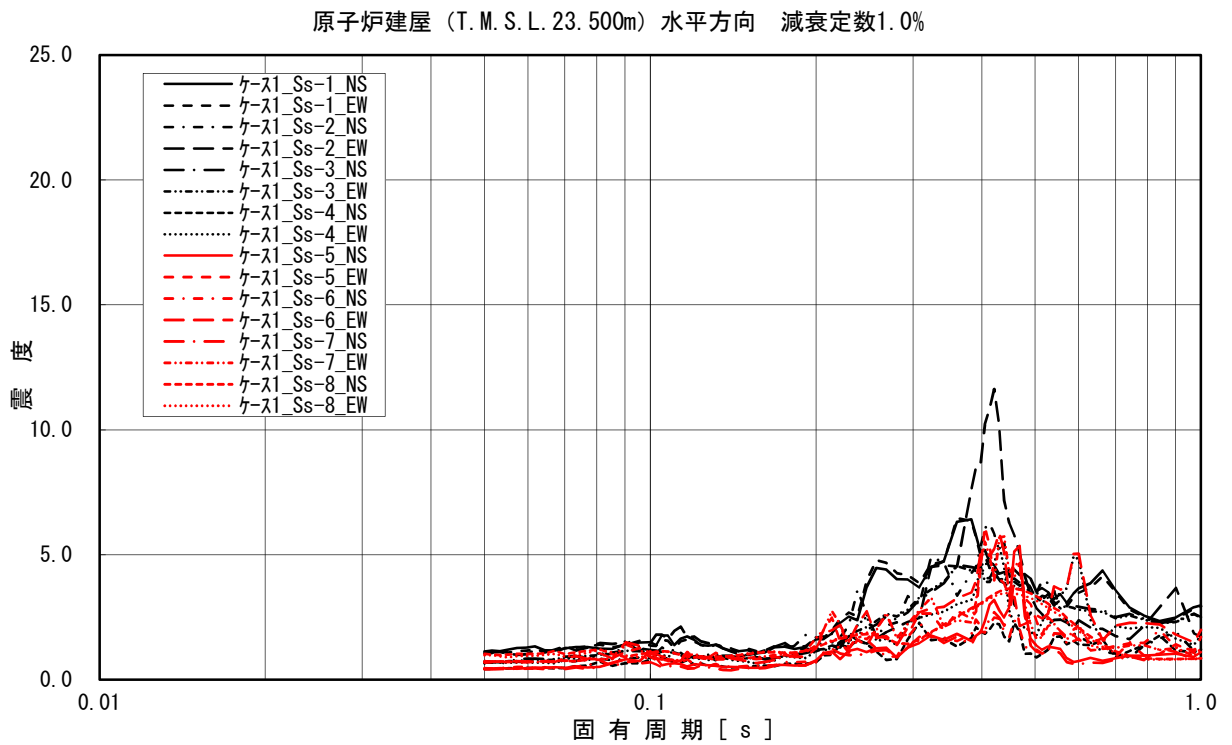
添付図 1(1) 原子炉建屋 (T. M. S. L. 49. 700m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)



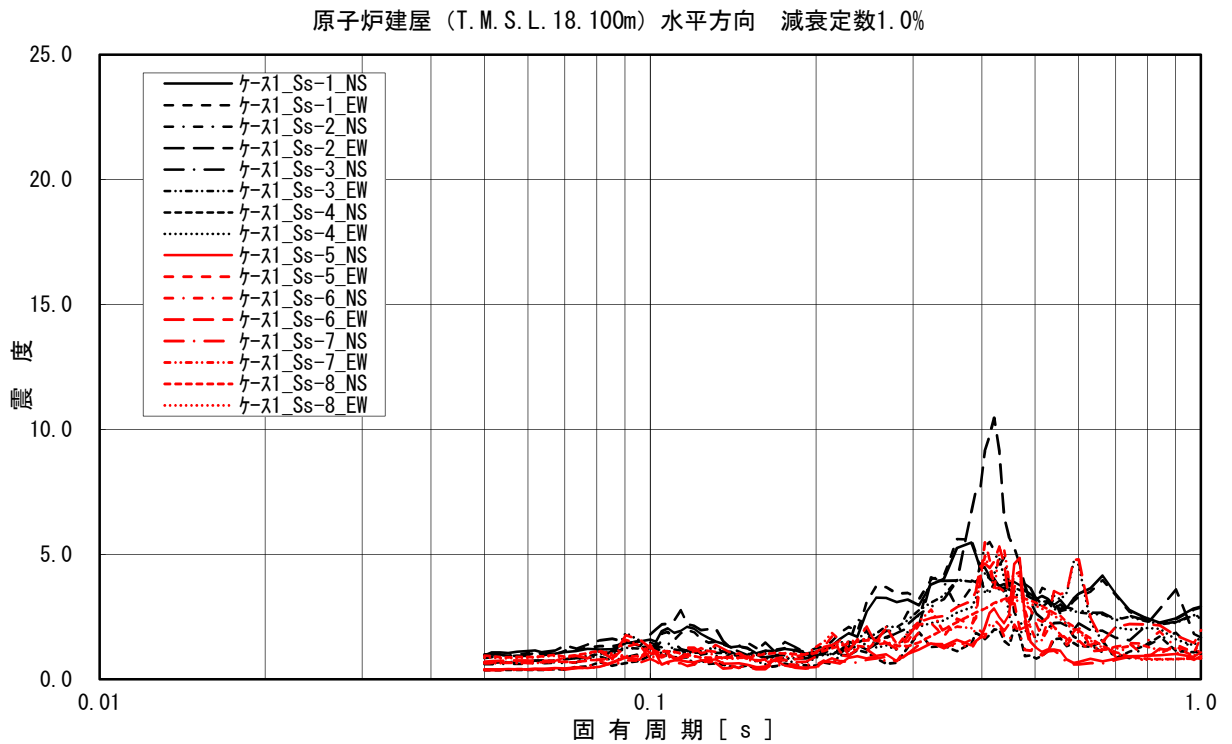
添付図 1(2) 原子炉建屋 (T. M. S. L. 38. 200m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)



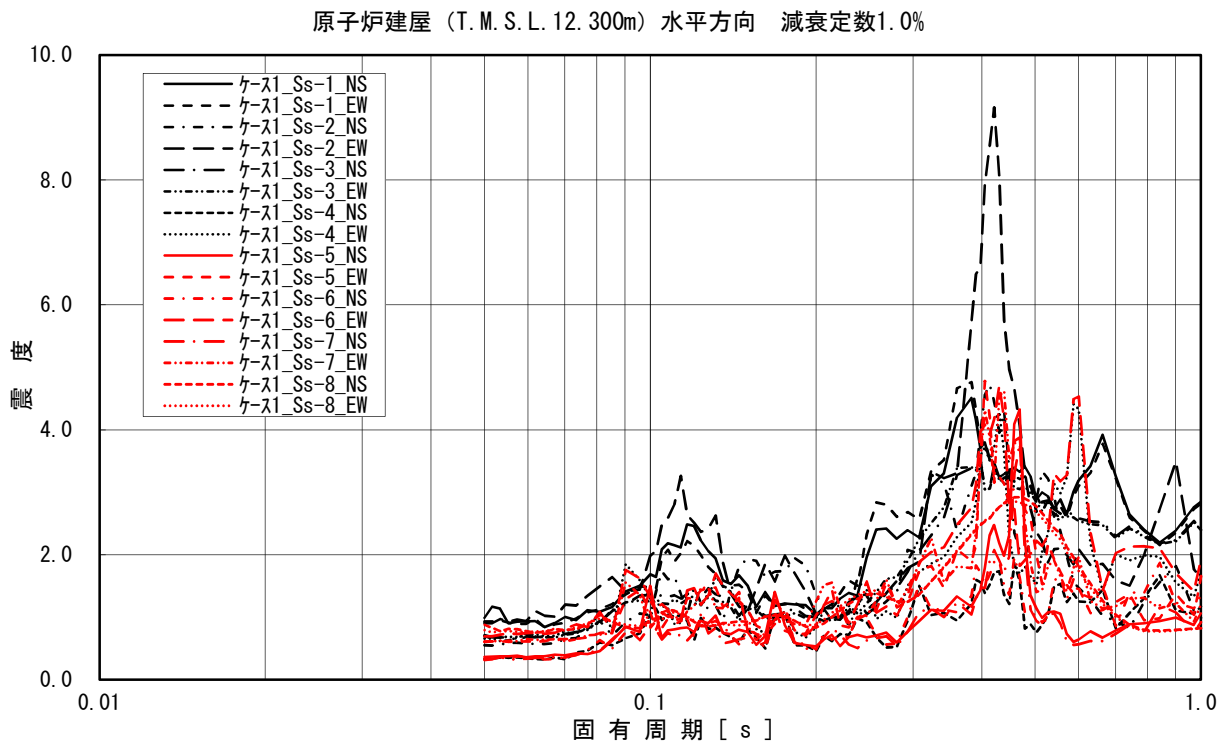
添付図 1(3) 原子炉建屋 (T.M.S.L. 31.700m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)



添付図 1(4) 原子炉建屋 (T.M.S.L. 23.500m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)

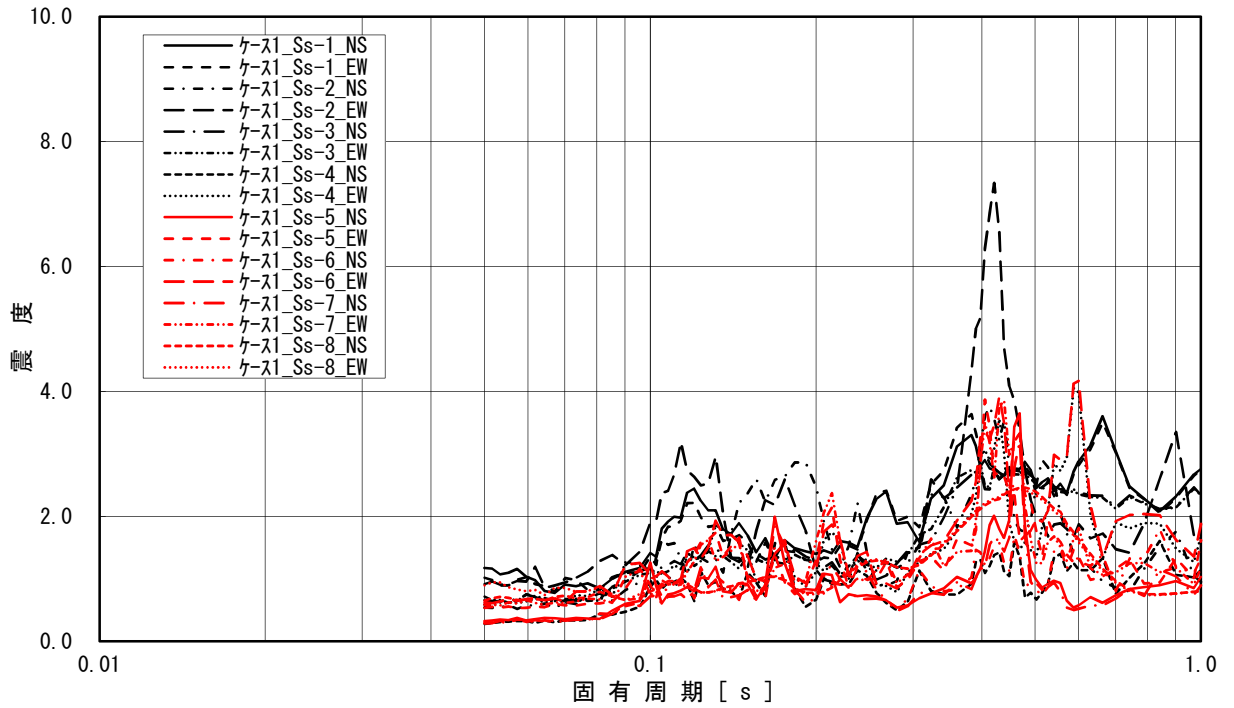


添付図 1(5) 原子炉建屋 (T. M. S. L. 18. 100m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)



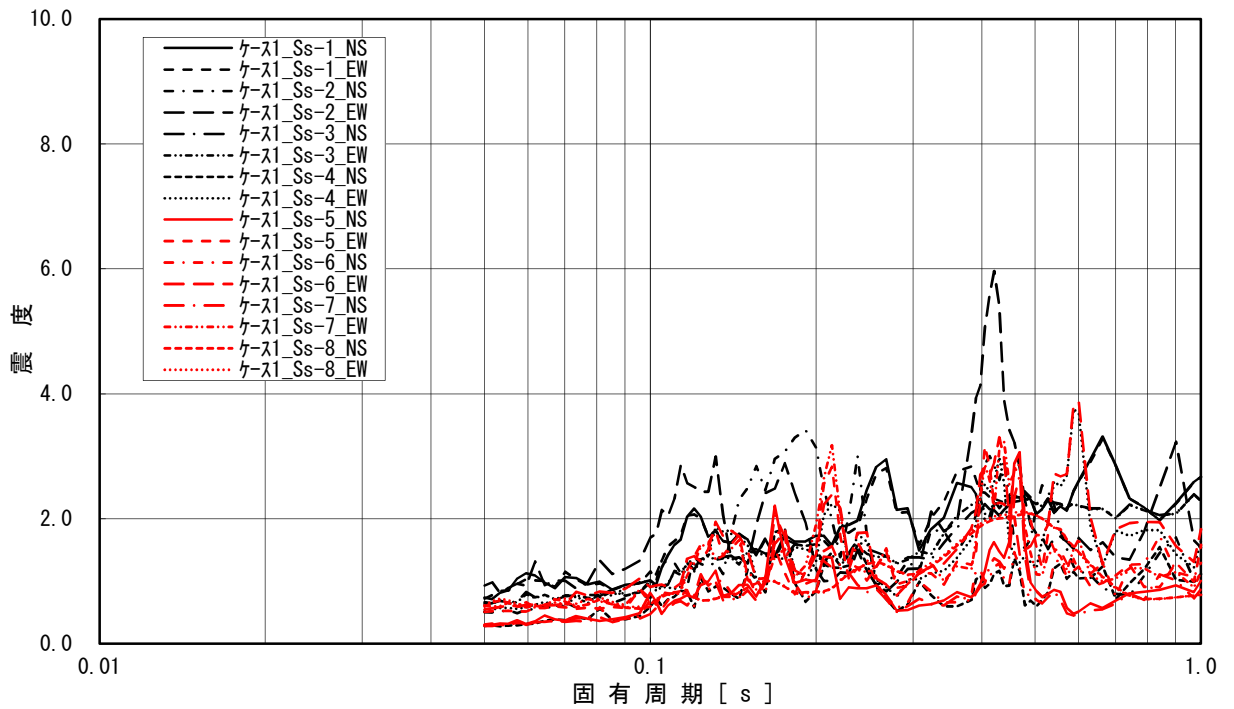
添付図 1(6) 原子炉建屋 (T. M. S. L. 12. 300m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)

原子炉建屋 (T. M. S. L. 4. 800m) 水平方向 減衰定数1.0%



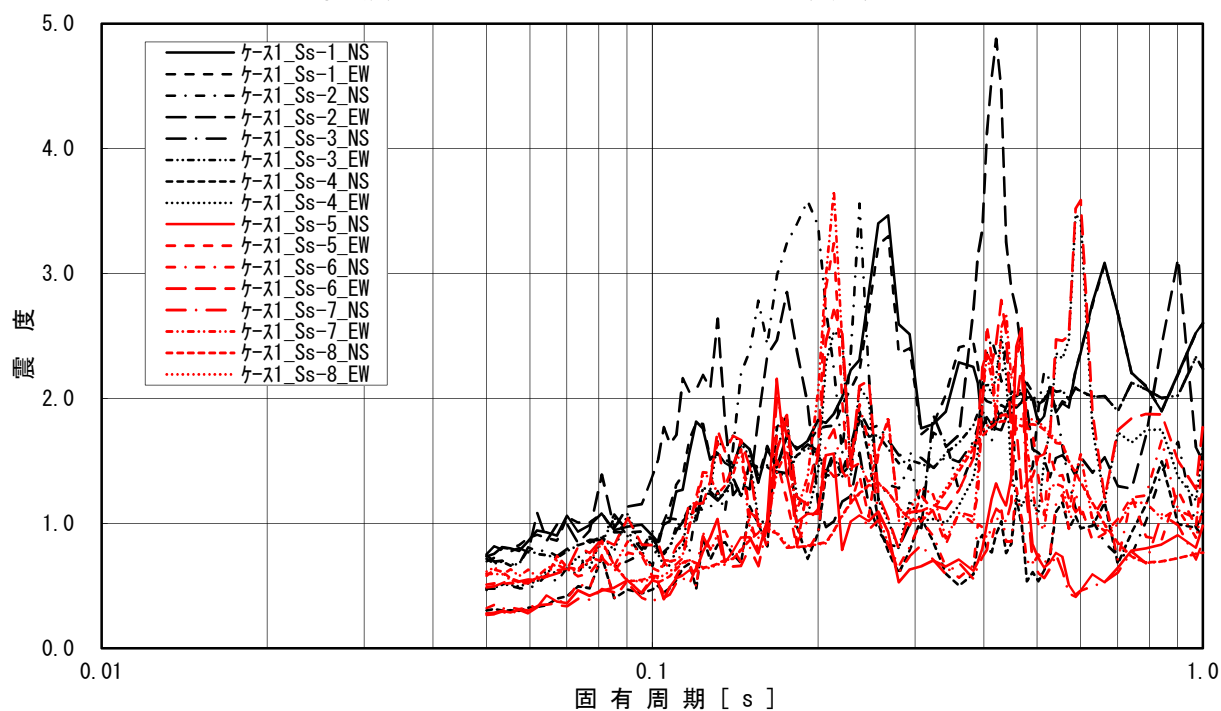
添付図 1(7) 原子炉建屋 (T. M. S. L. 4. 800m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)

原子炉建屋 (T. M. S. L. -1. 700m) 水平方向 減衰定数1.0%

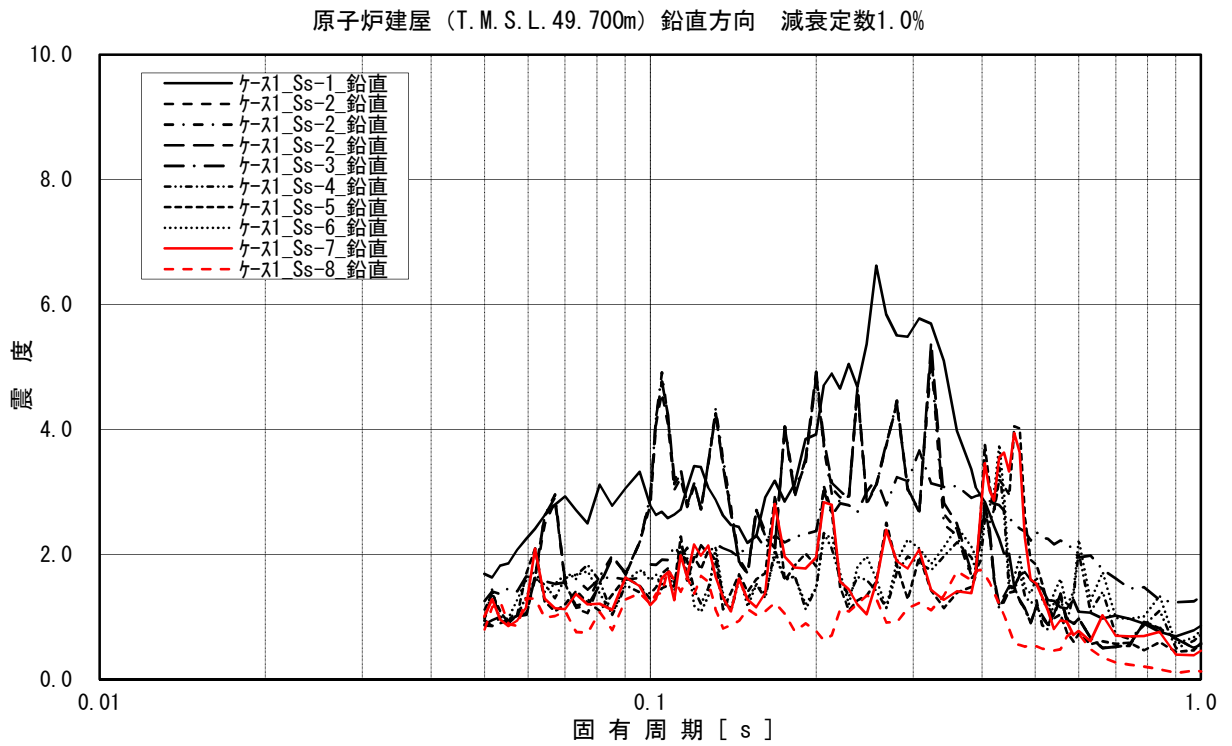


添付図 1(8) 原子炉建屋 (T. M. S. L. -1. 700m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)

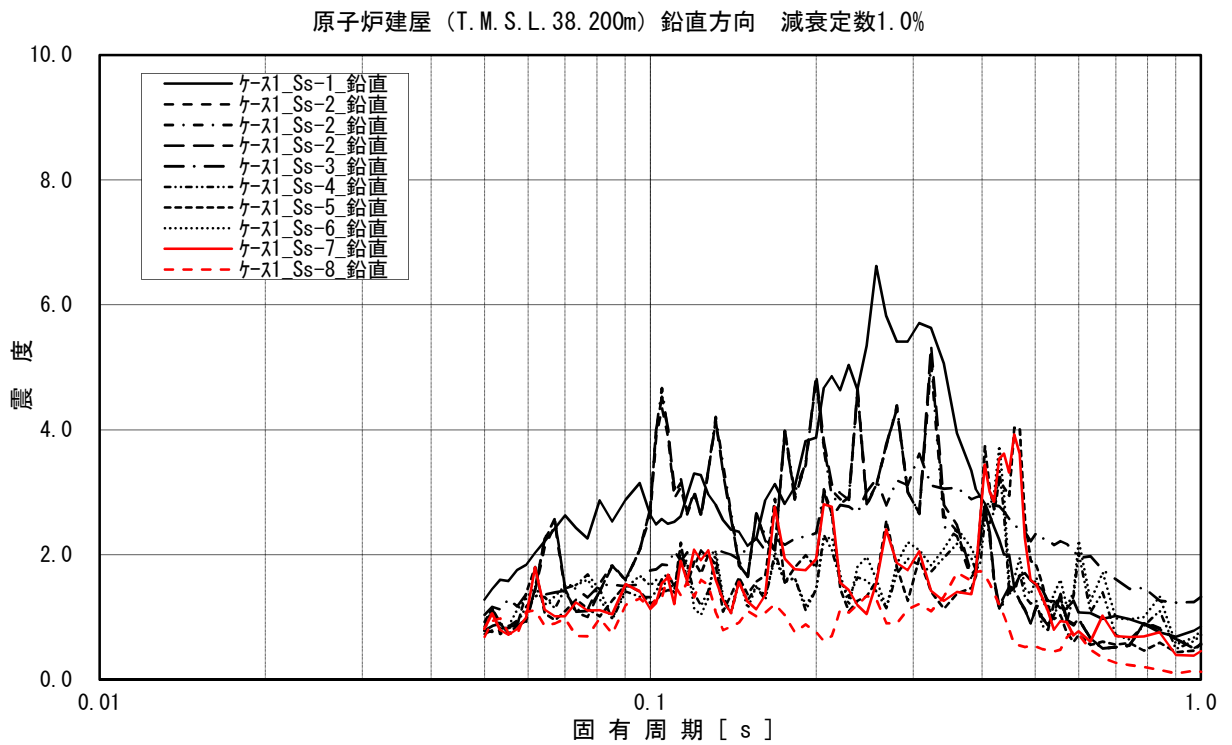
原子炉建屋 (T. M. S. L. -8. 200m) 水平方向 減衰定数1.0%



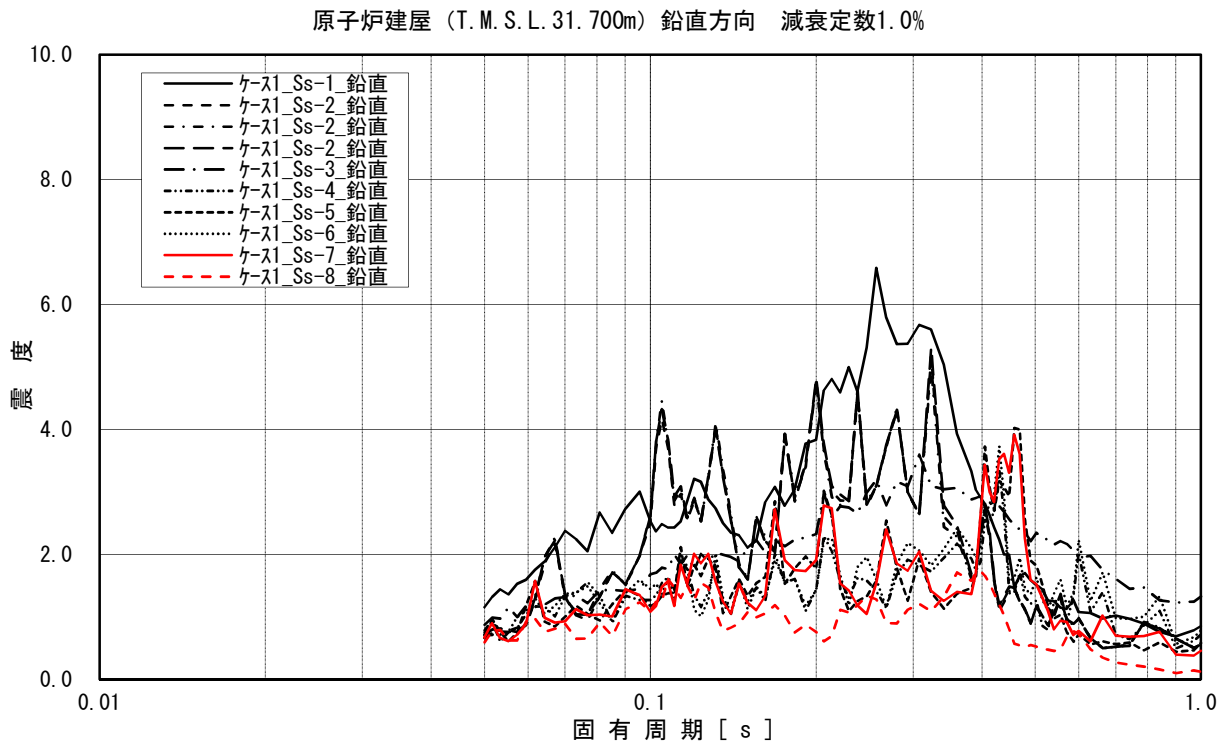
添付図 1(9) 原子炉建屋 (T. M. S. L. -8. 200m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)



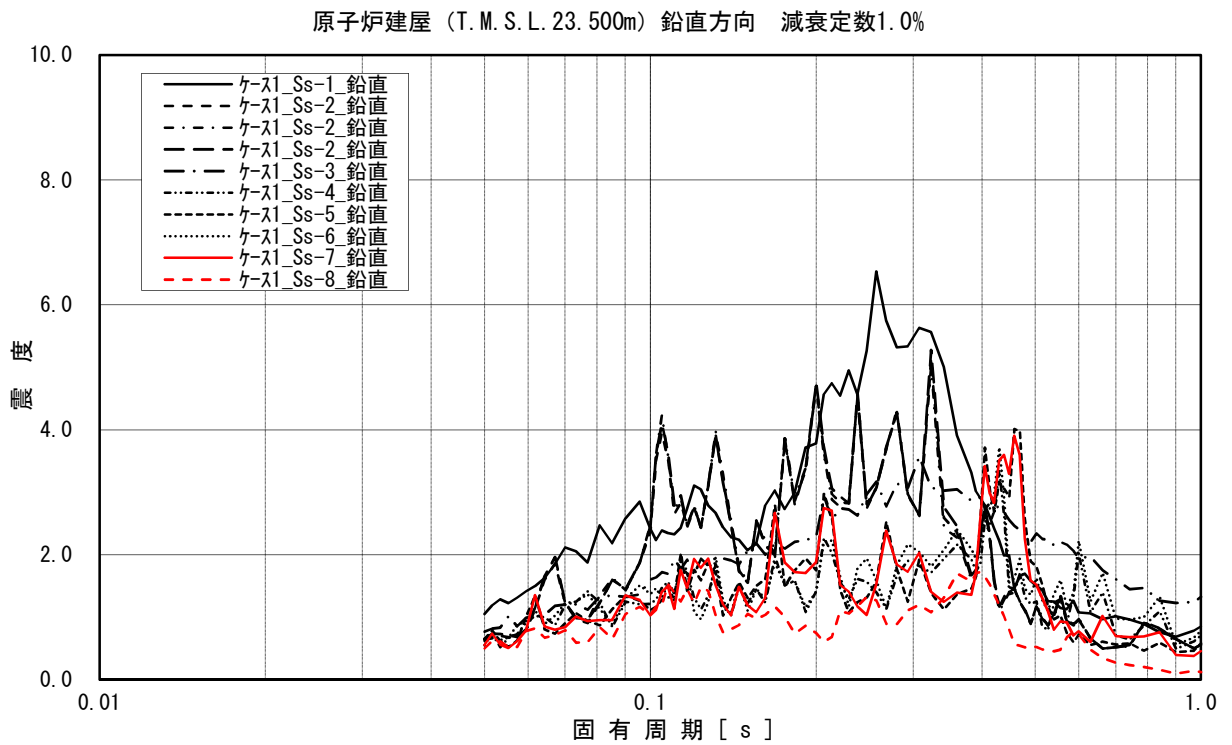
添付図 2(1) 原子炉建屋 (T. M. S. L. 49. 700m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)



添付図 2(2) 原子炉建屋 (T. M. S. L. 38. 200m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)

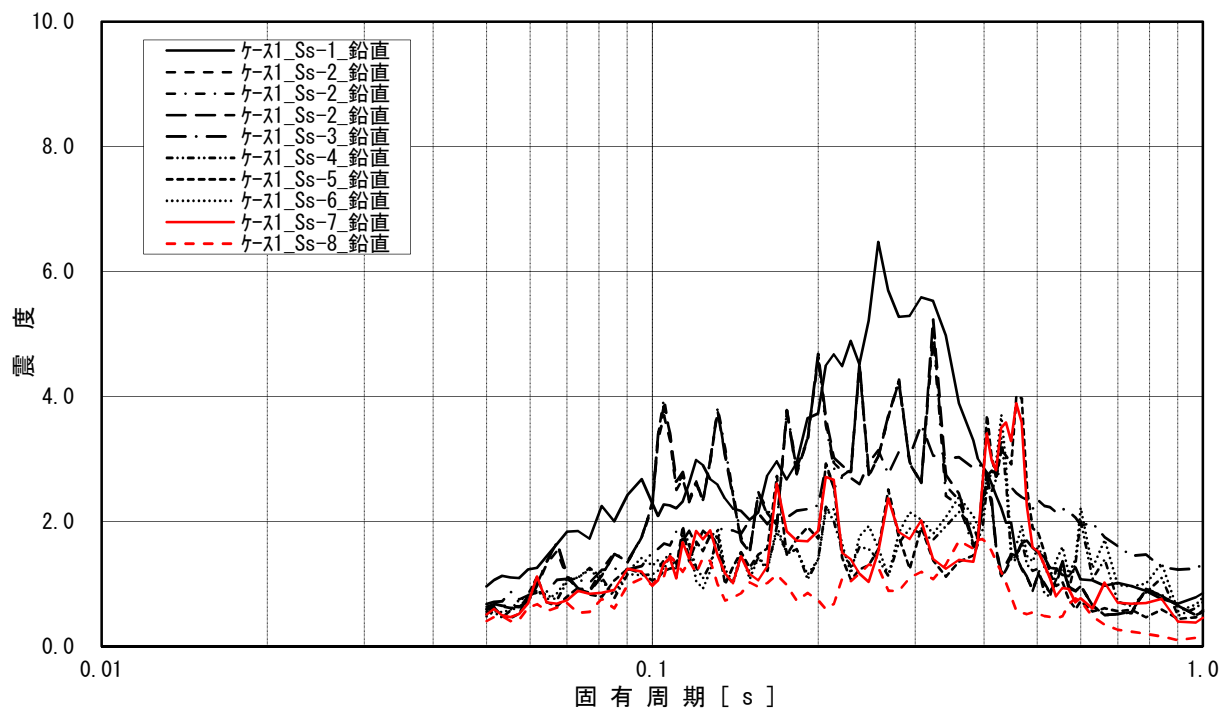


添付図 2(3) 原子炉建屋 (T. M. S. L. 31. 700m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)



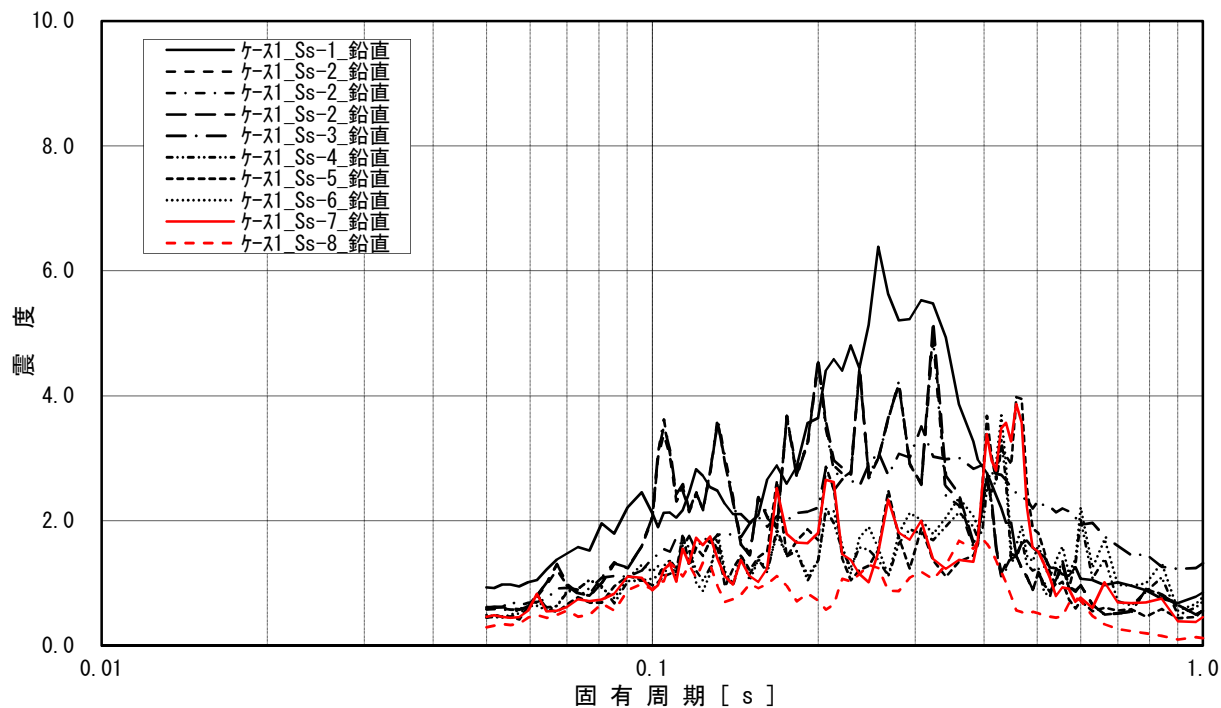
添付図 2(4) 原子炉建屋 (T. M. S. L. 23. 500m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)

原子炉建屋 (T. M. S. L. 18. 100m) 鉛直方向 減衰定数1.0%



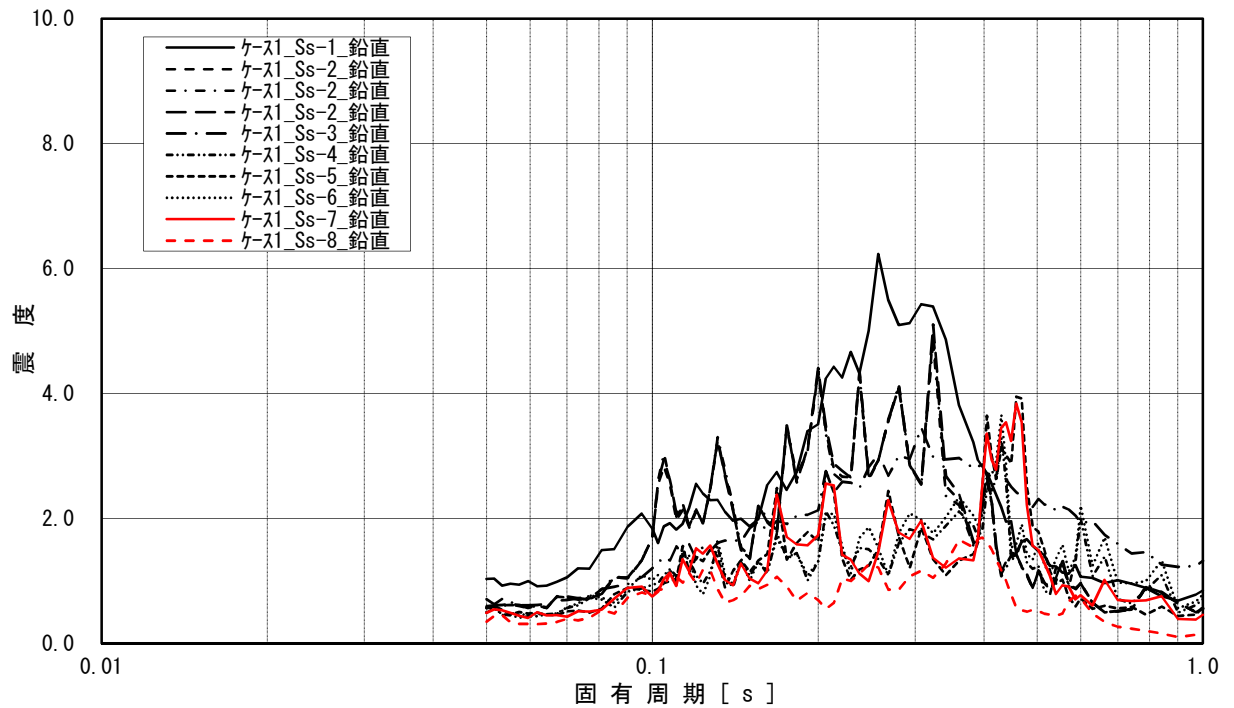
添付図 2(5) 原子炉建屋 (T. M. S. L. 18. 100m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)

原子炉建屋 (T. M. S. L. 12. 300m) 鉛直方向 減衰定数1.0%



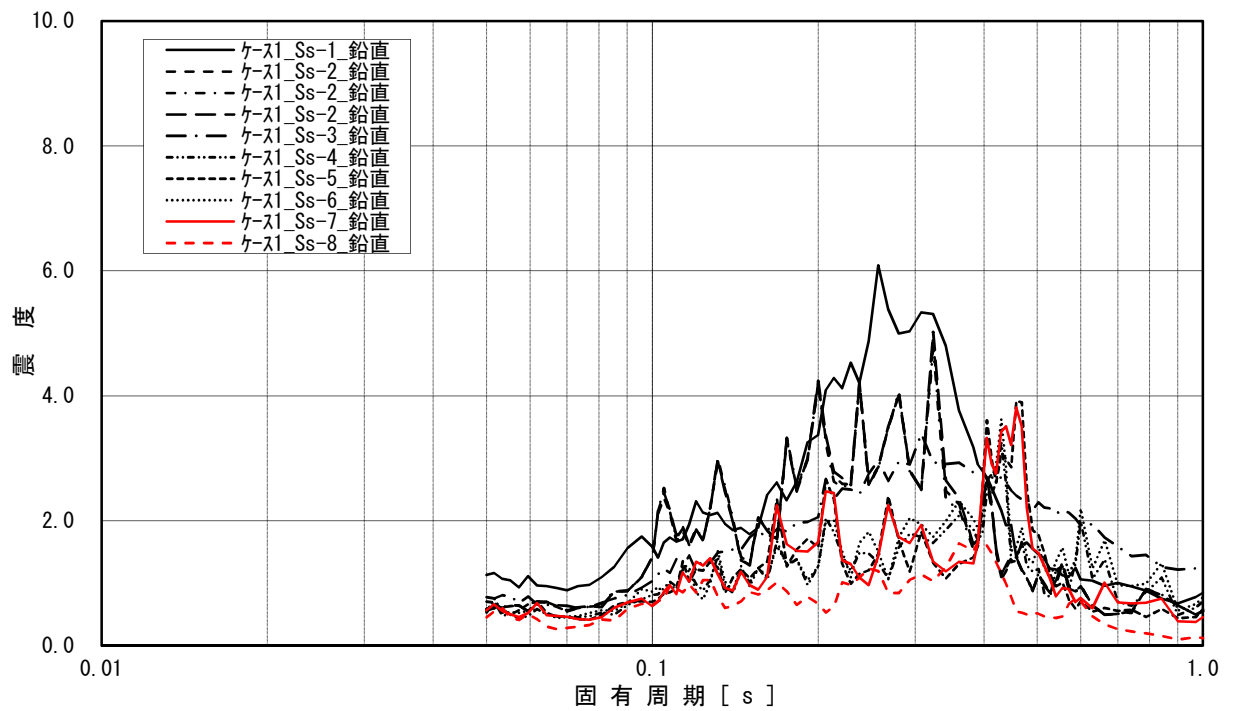
添付図 2(6) 原子炉建屋 (T. M. S. L. 12. 300m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)

原子炉建屋 (T. M. S. L. 4. 800m) 鉛直方向 減衰定数1.0%



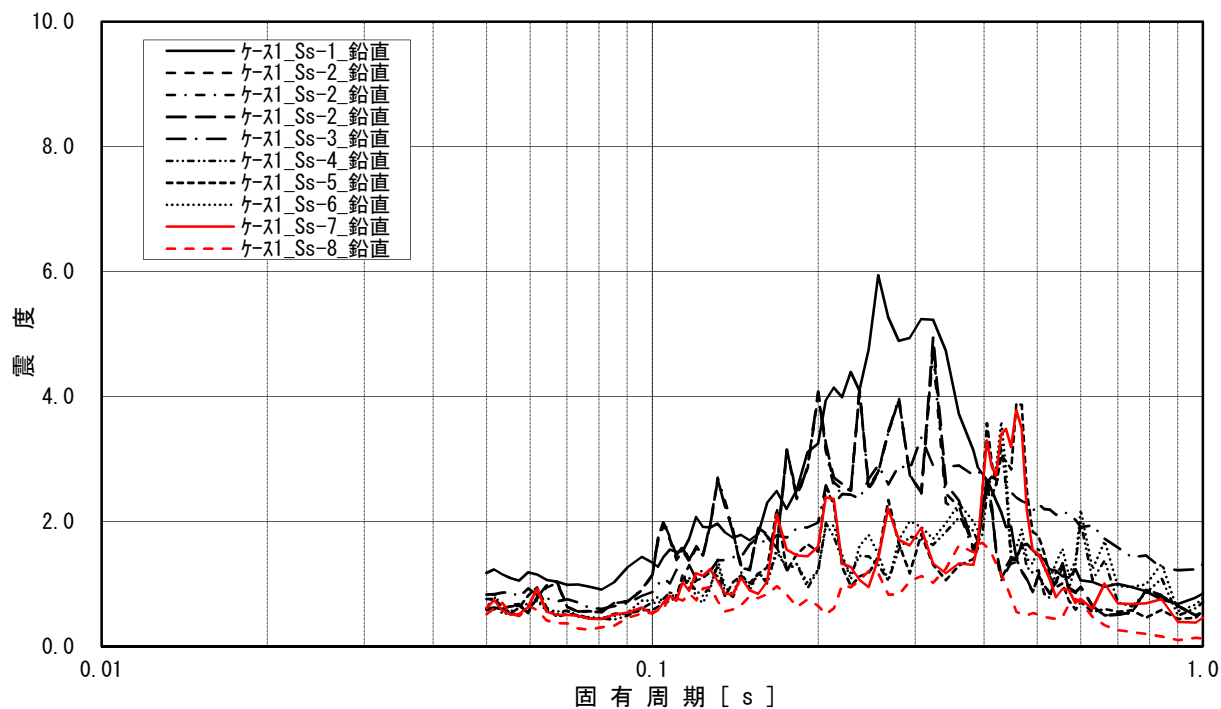
添付図 2(7) 原子炉建屋 (T. M. S. L. 4. 800m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)

原子炉建屋 (T. M. S. L. -1. 700m) 鉛直方向 減衰定数1.0%



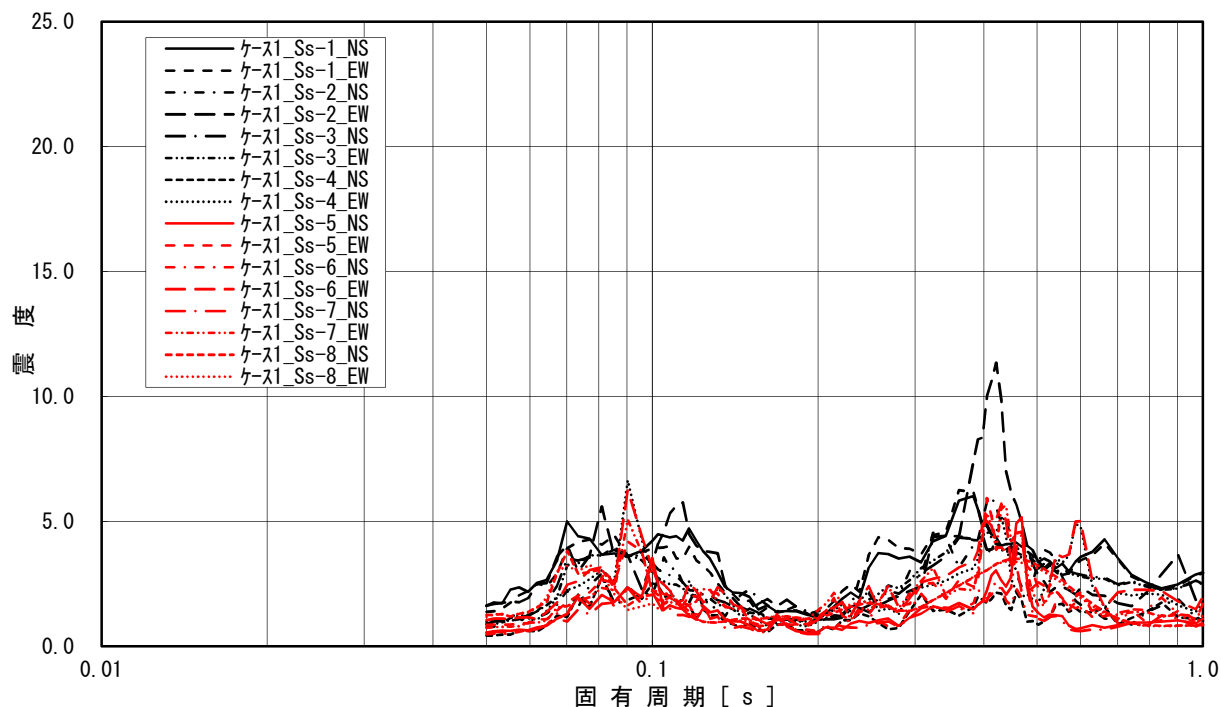
添付図 2(8) 原子炉建屋 (T. M. S. L. -1. 700m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)

原子炉建屋 (T. M. S. L. -8. 200m) 鉛直方向 減衰定数1.0%



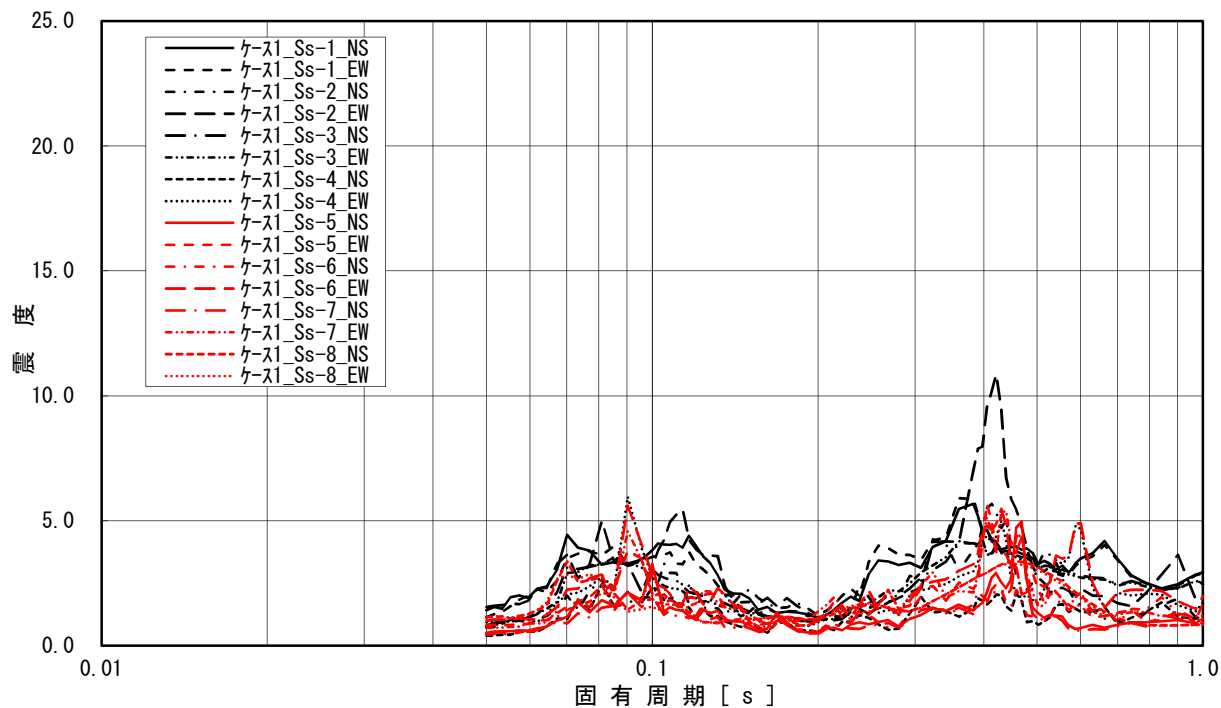
添付図 2(9) 原子炉建屋 (T. M. S. L. -8. 200m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)

原子炉遮蔽壁 (T.M.S.L. 21. 200m) 水平方向 減衰定数1.0%



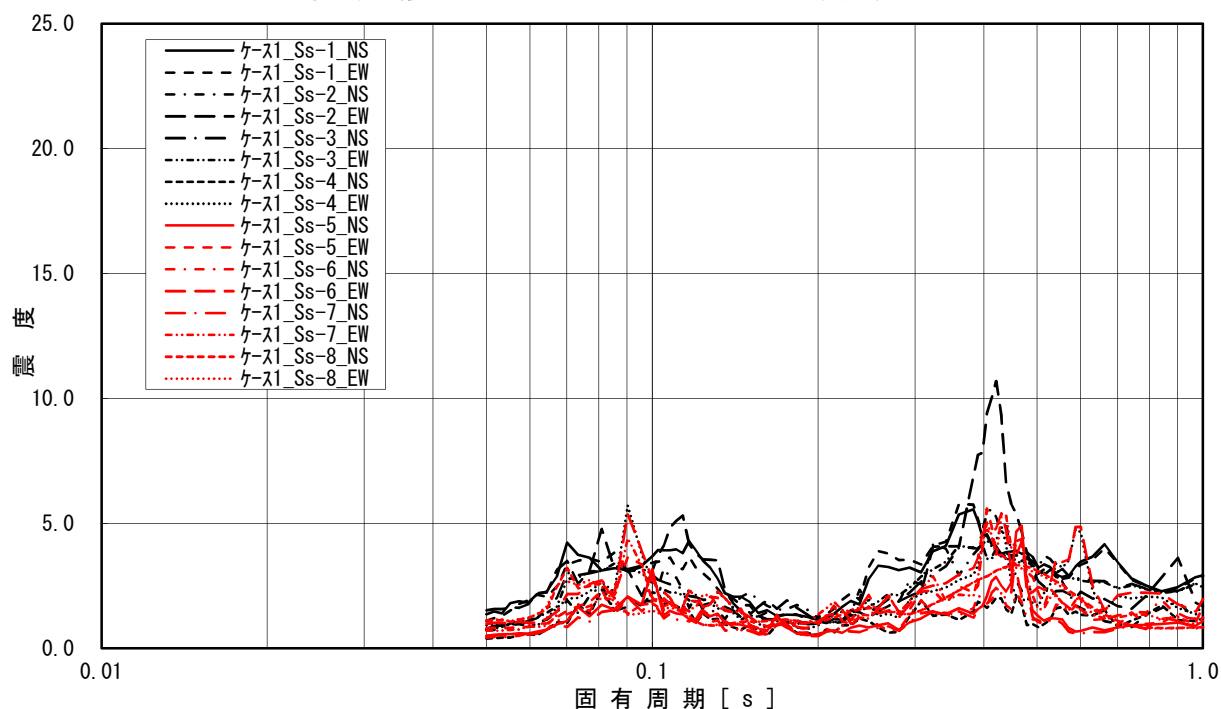
添付図 3(1) 原子炉遮蔽壁 (T.M.S.L. 21. 200m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)

原子炉遮蔽壁 (T.M.S.L. 19. 138m) 水平方向 減衰定数1.0%



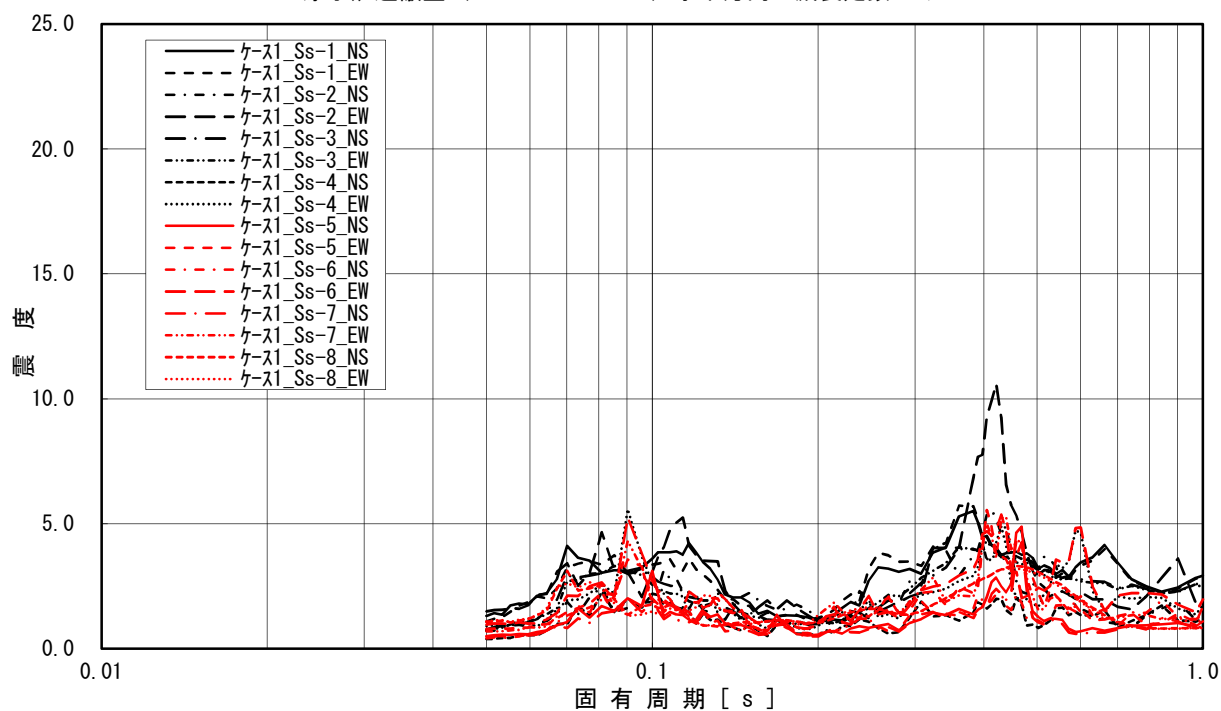
添付図 3(2) 原子炉遮蔽壁 (T.M.S.L. 19. 138m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)

原子炉遮蔽壁 (T.M.S.L. 18.440m) 水平方向 減衰定数1.0%



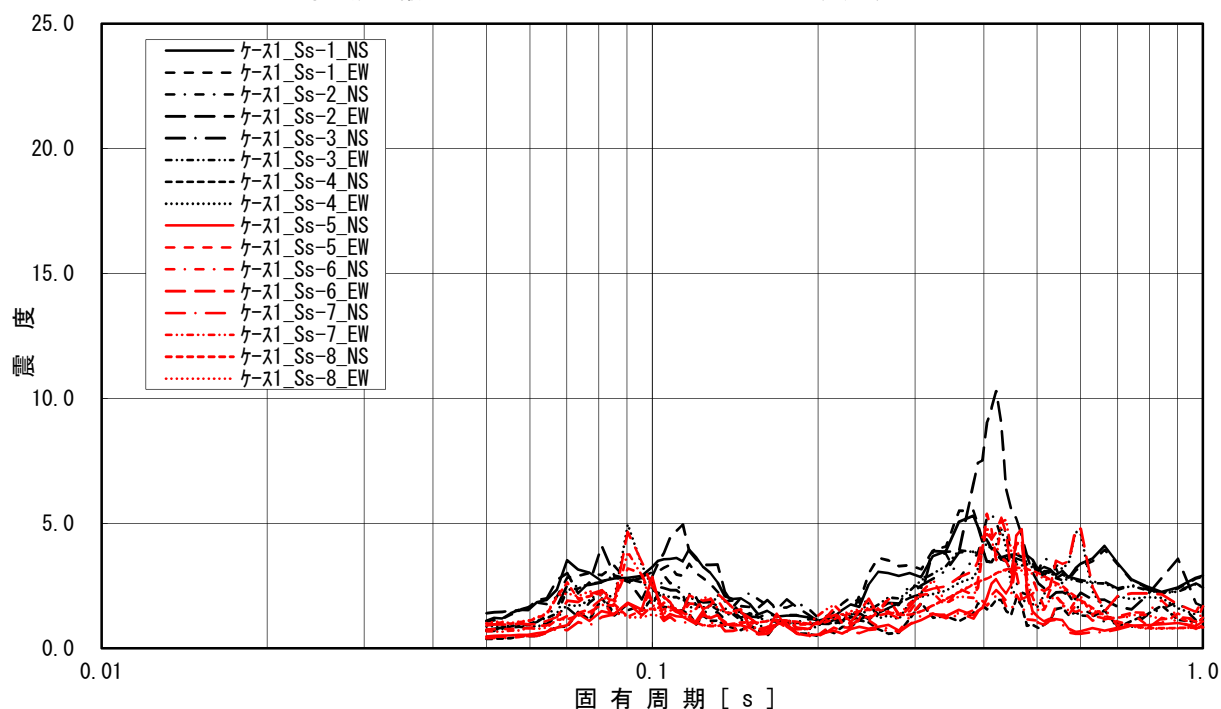
添付図 3(3) 原子炉遮蔽壁 (T.M.S.L. 18.440m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)

原子炉遮蔽壁 (T.M.S.L. 18.100m) 水平方向 減衰定数1.0%



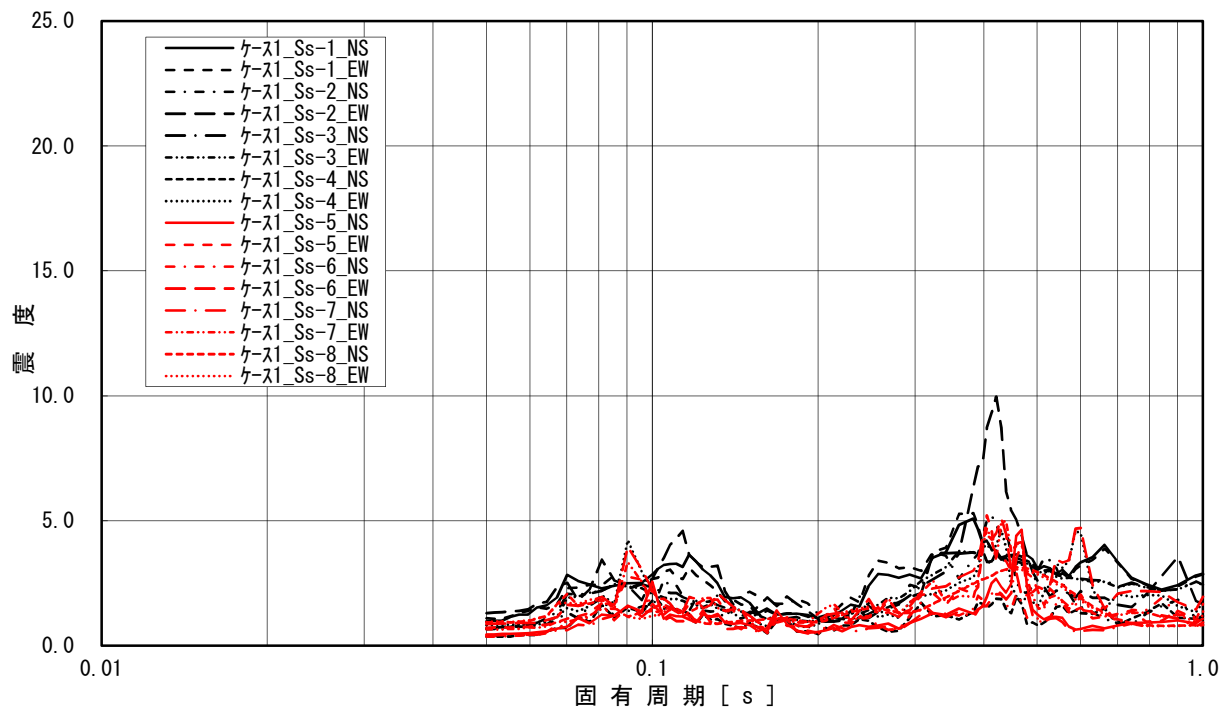
添付図 3(4) 原子炉遮蔽壁 (T.M.S.L. 18.100m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)

原子炉遮蔽壁 (T.M.S.L. 16.850m) 水平方向 減衰定数1.0%



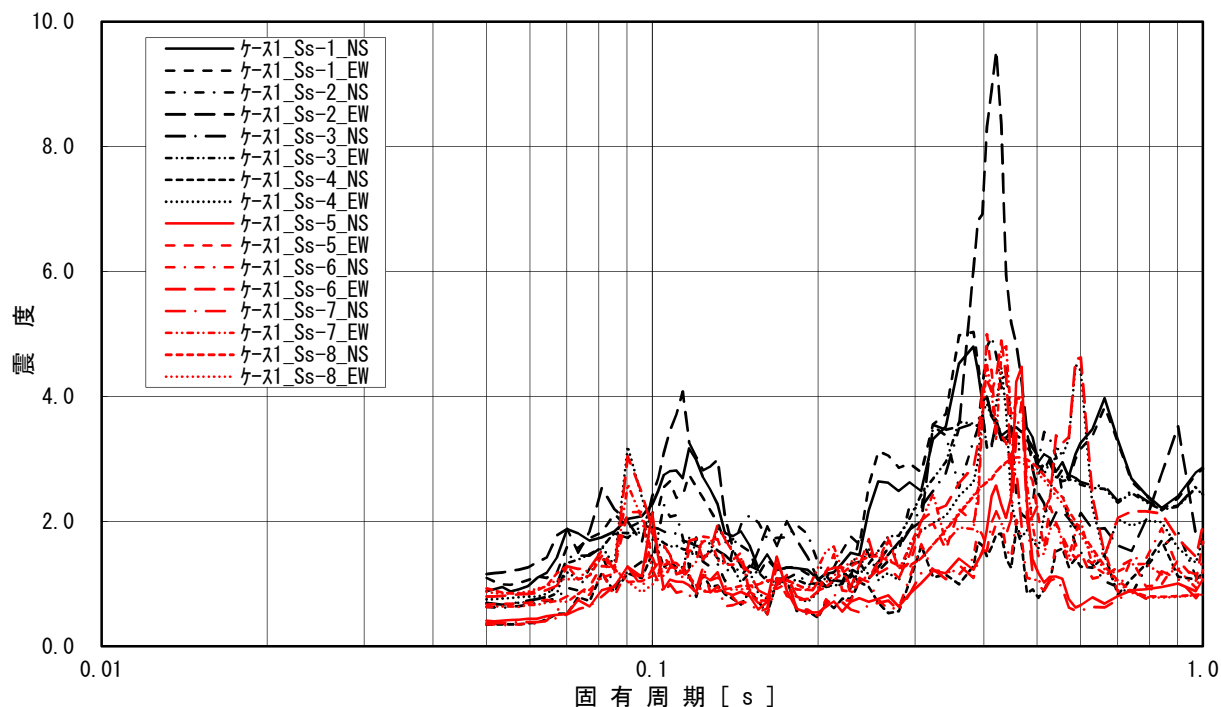
添付図 3(5) 原子炉遮蔽壁 (T.M.S.L. 16.850m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)

原子炉遮蔽壁 (T.M.S.L. 15.600m) 水平方向 減衰定数1.0%



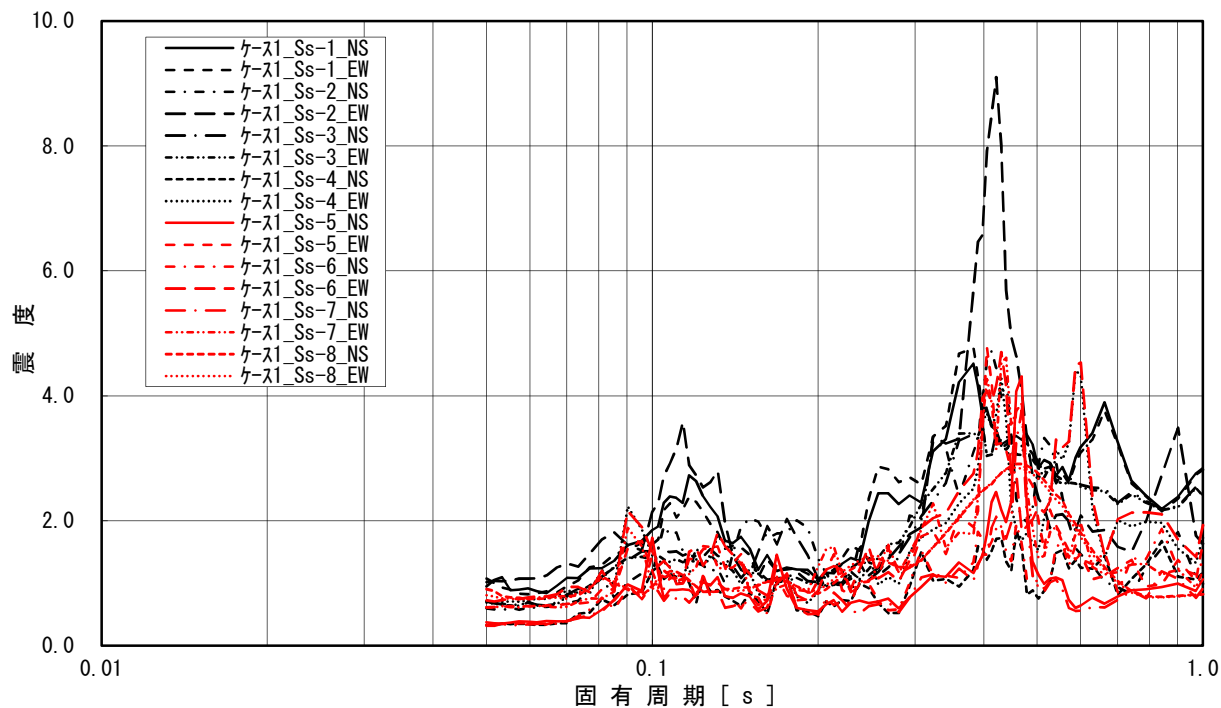
添付図 3(6) 原子炉遮蔽壁 (T.M.S.L. 15.600m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)

原子炉遮蔽壁 (T.M.S.L. 13.950m) 水平方向 減衰定数1.0%

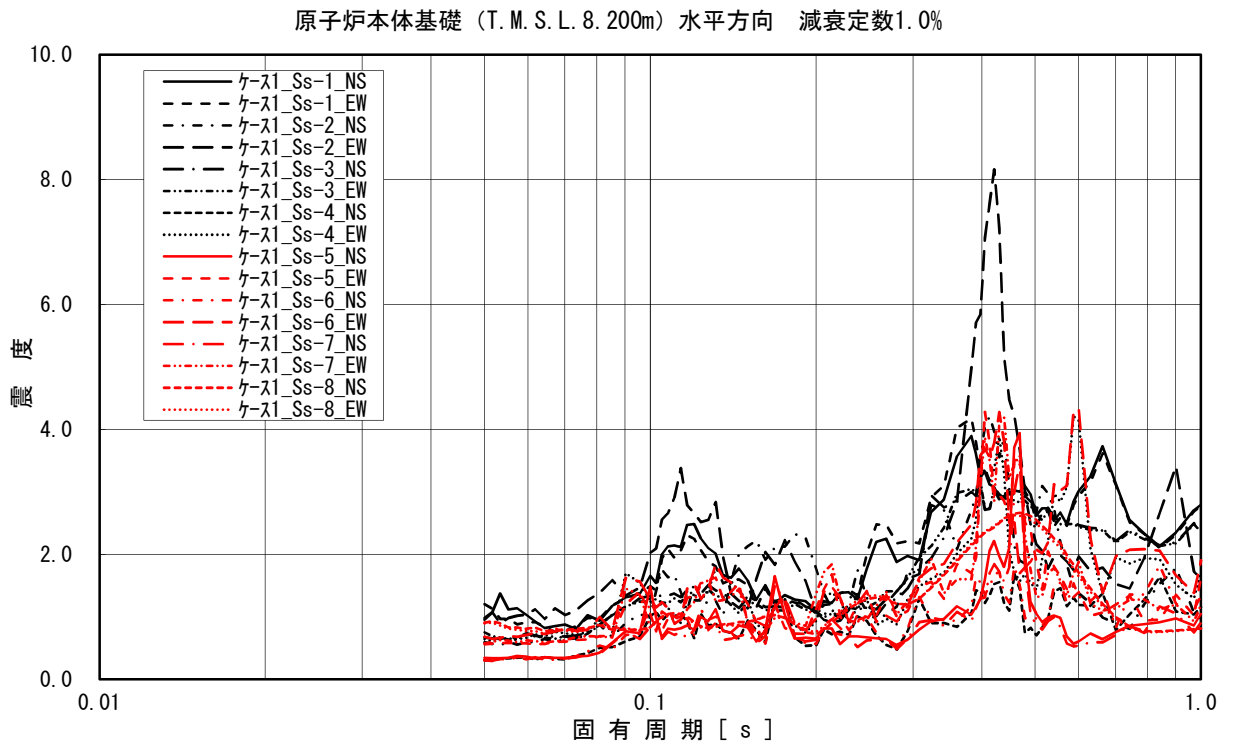


添付図 3(7) 原子炉遮蔽壁 (T.M.S.L. 13.950m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)

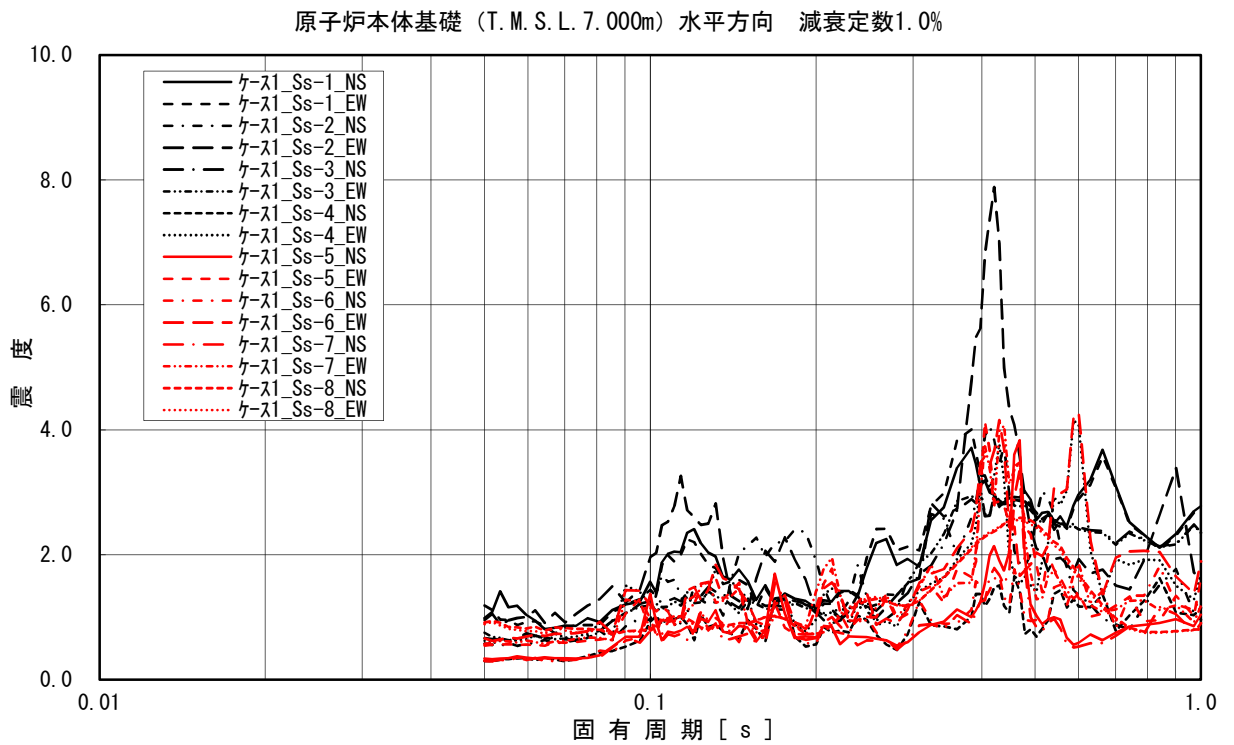
原子炉本体基礎 (T.M.S.L. 12.300m) 水平方向 減衰定数1.0%



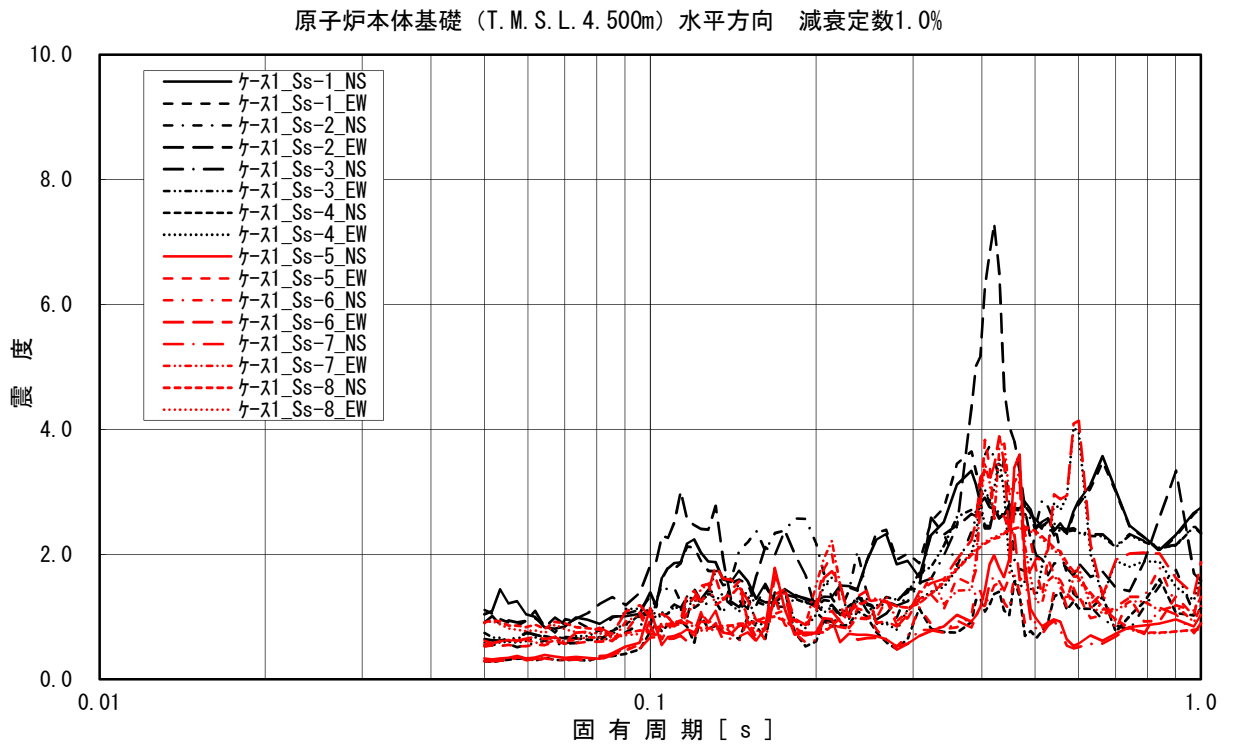
添付図 3(8) 原子炉本体基礎 (T.M.S.L. 12.300m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)



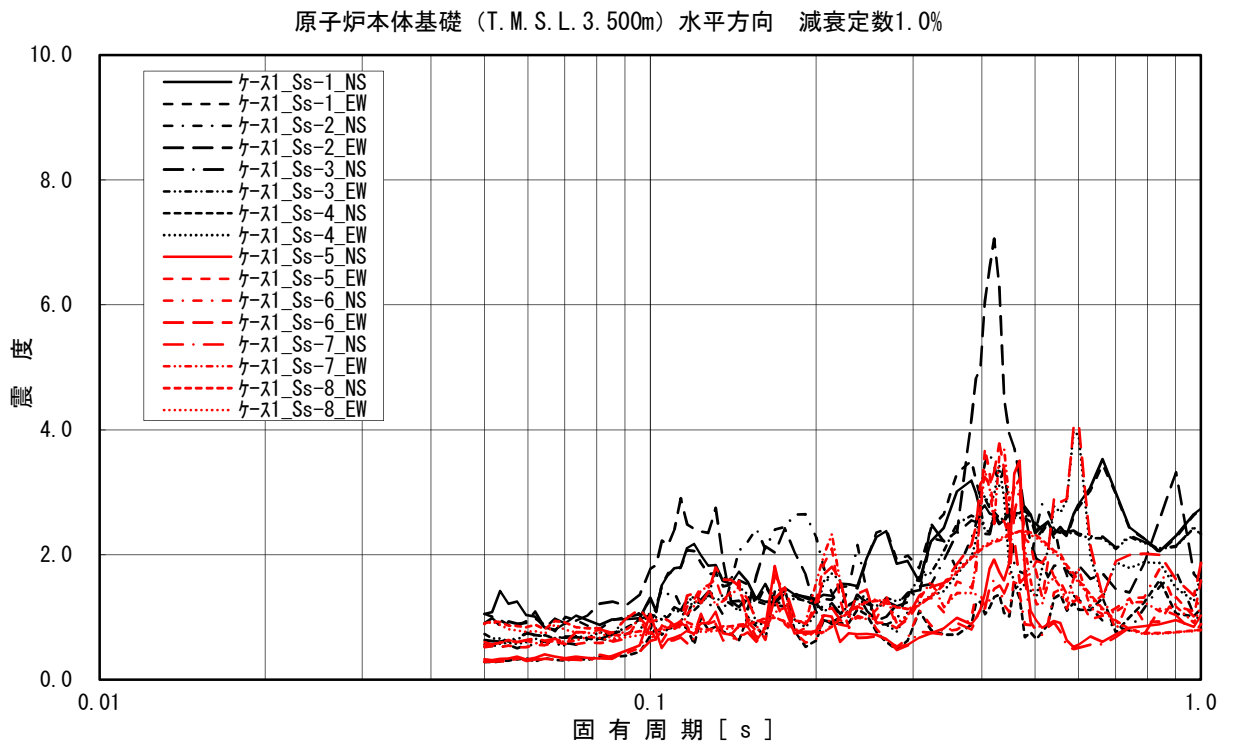
添付図 3(9) 原子炉本体基礎 (T. M. S. L. 8. 200m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)



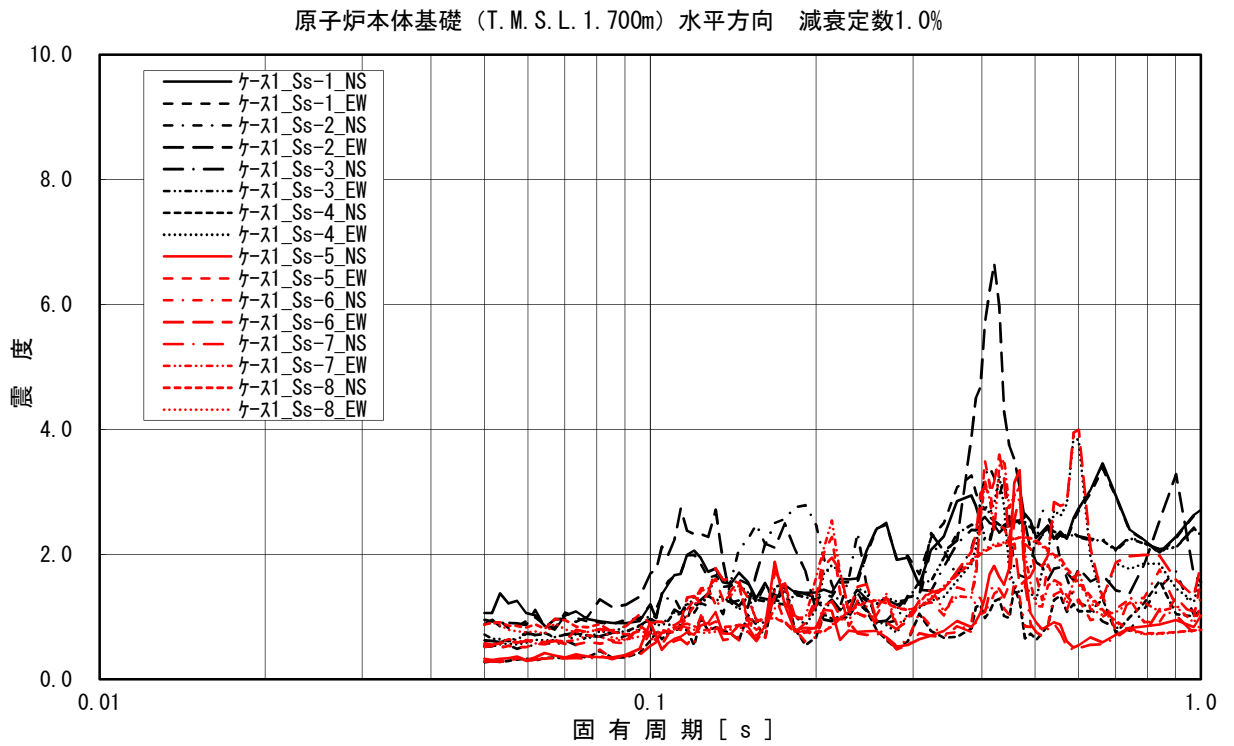
添付図 3(10) 原子炉本体基礎 (T. M. S. L. 7. 000m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)



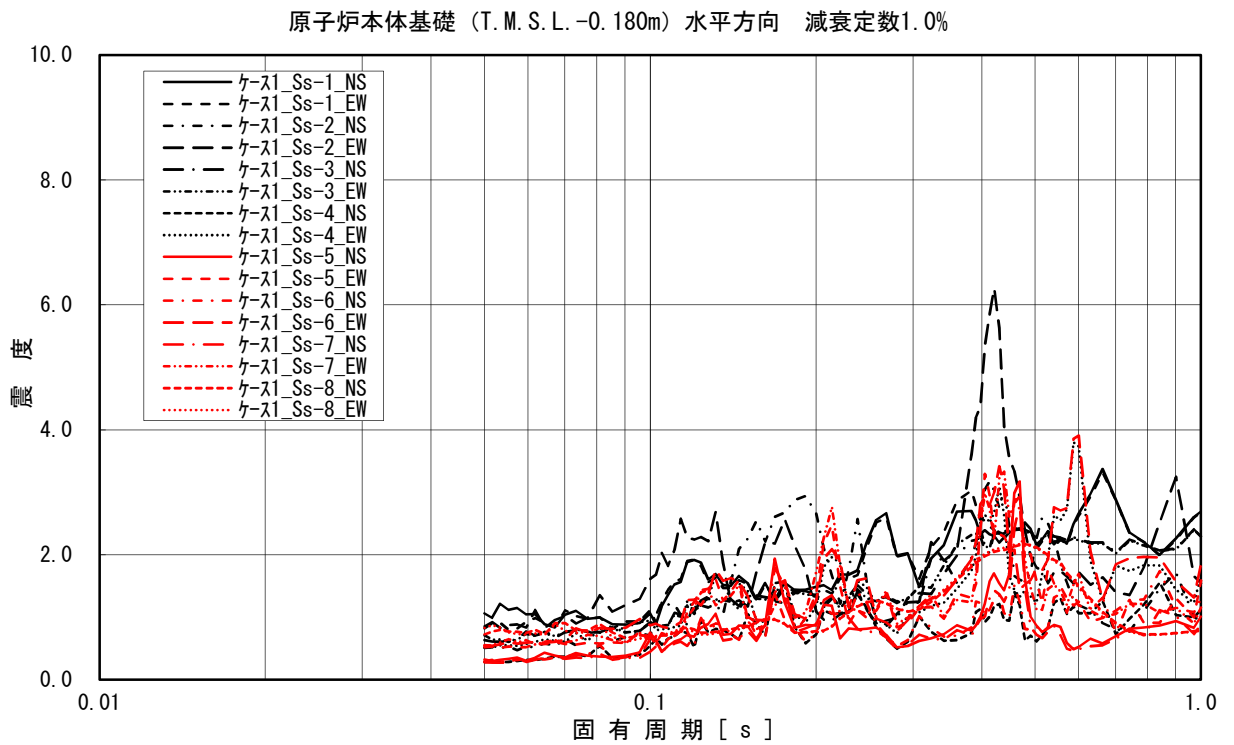
添付図 3(11) 原子炉本体基礎 (T. M. S. L. 4. 500m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)



添付図 3(12) 原子炉本体基礎 (T. M. S. L. 3. 500m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)

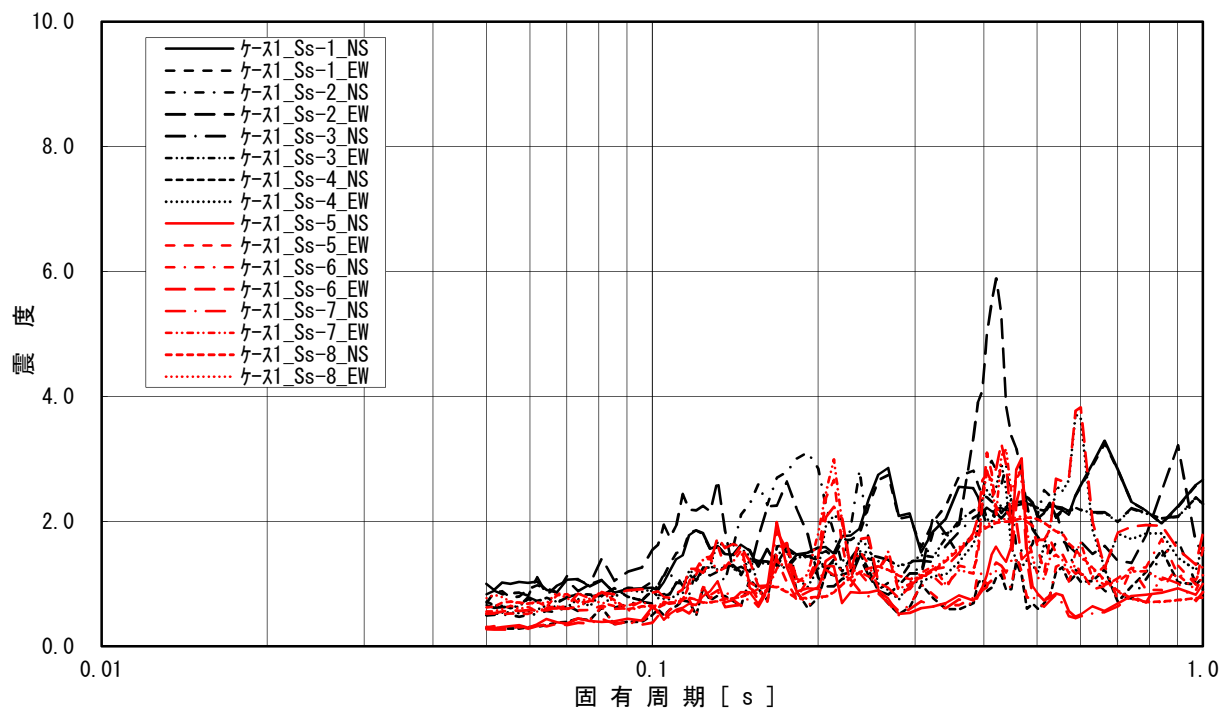


添付図 3(13) 原子炉本体基礎 (T. M. S. L. 1.700m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)



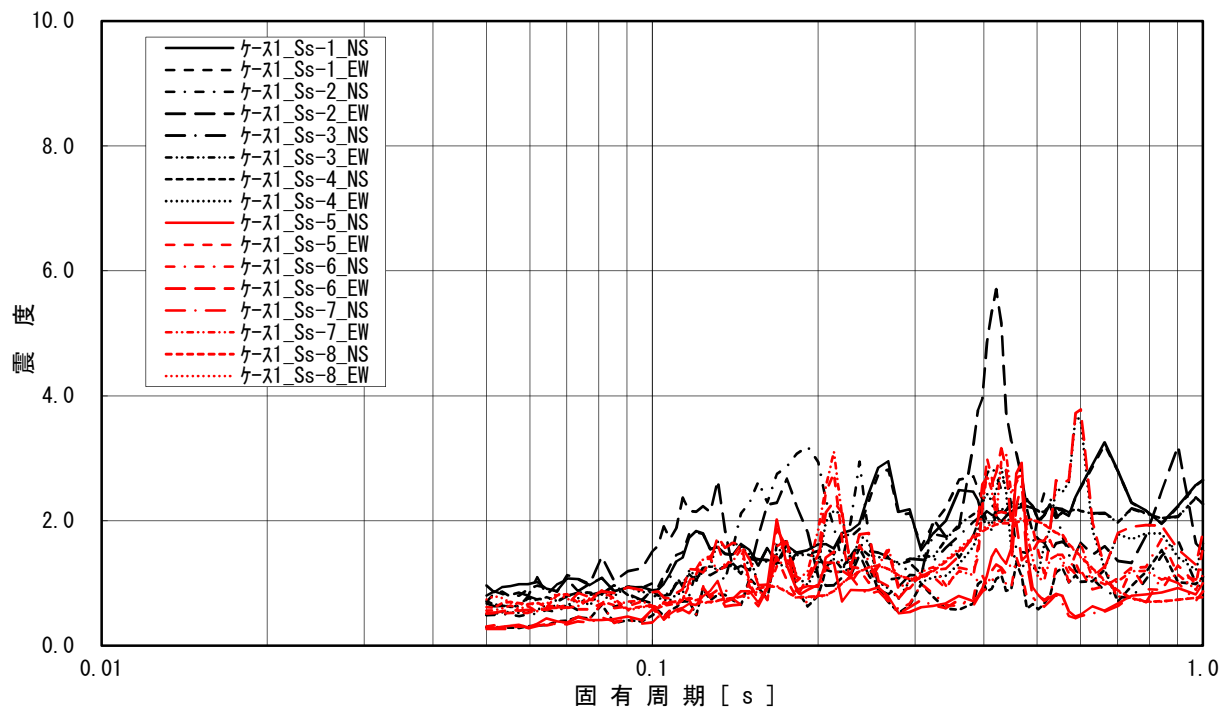
添付図 3(14) 原子炉本体基礎 (T. M. S. L. -0.180m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)

原子炉本体基礎 (T. M. S. L. -2.100m) 水平方向 減衰定数1.0%



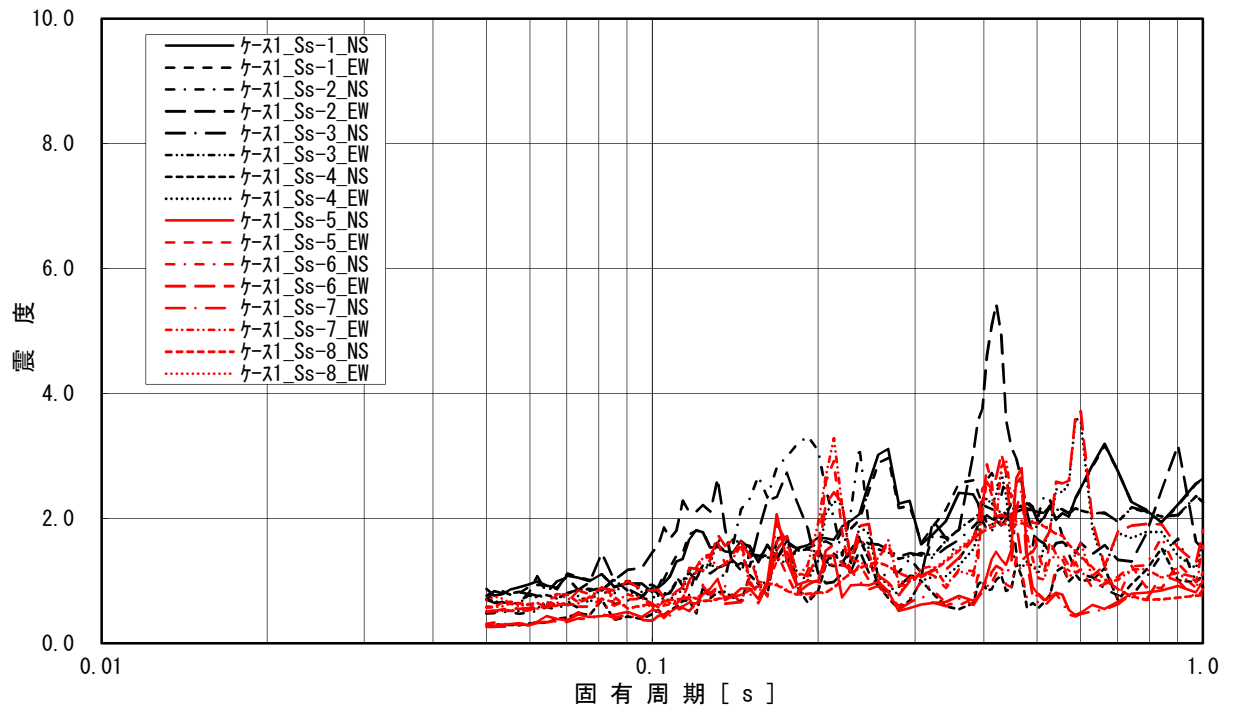
添付図 3(15) 原子炉本体基礎 (T. M. S. L. -2.100m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)

原子炉本体基礎 (T. M. S. L. -3.100m) 水平方向 減衰定数1.0%

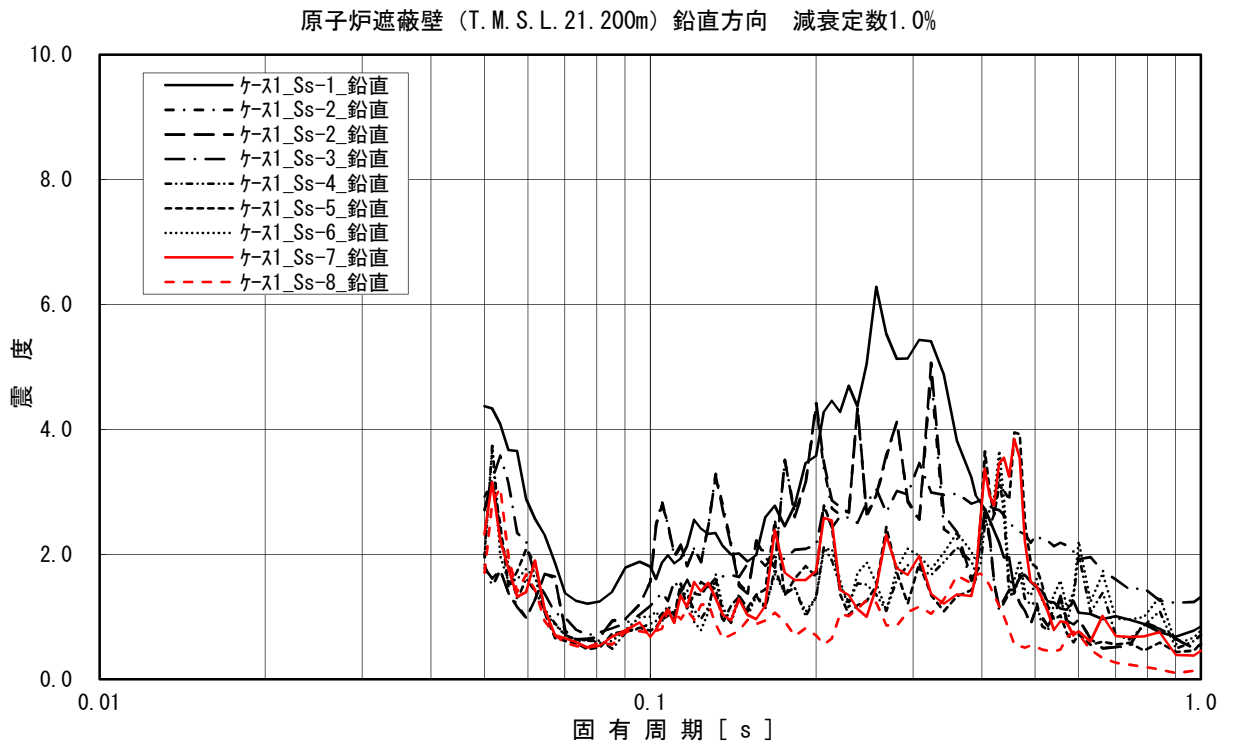


添付図 3(16) 原子炉本体基礎 (T. M. S. L. -3.100m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)

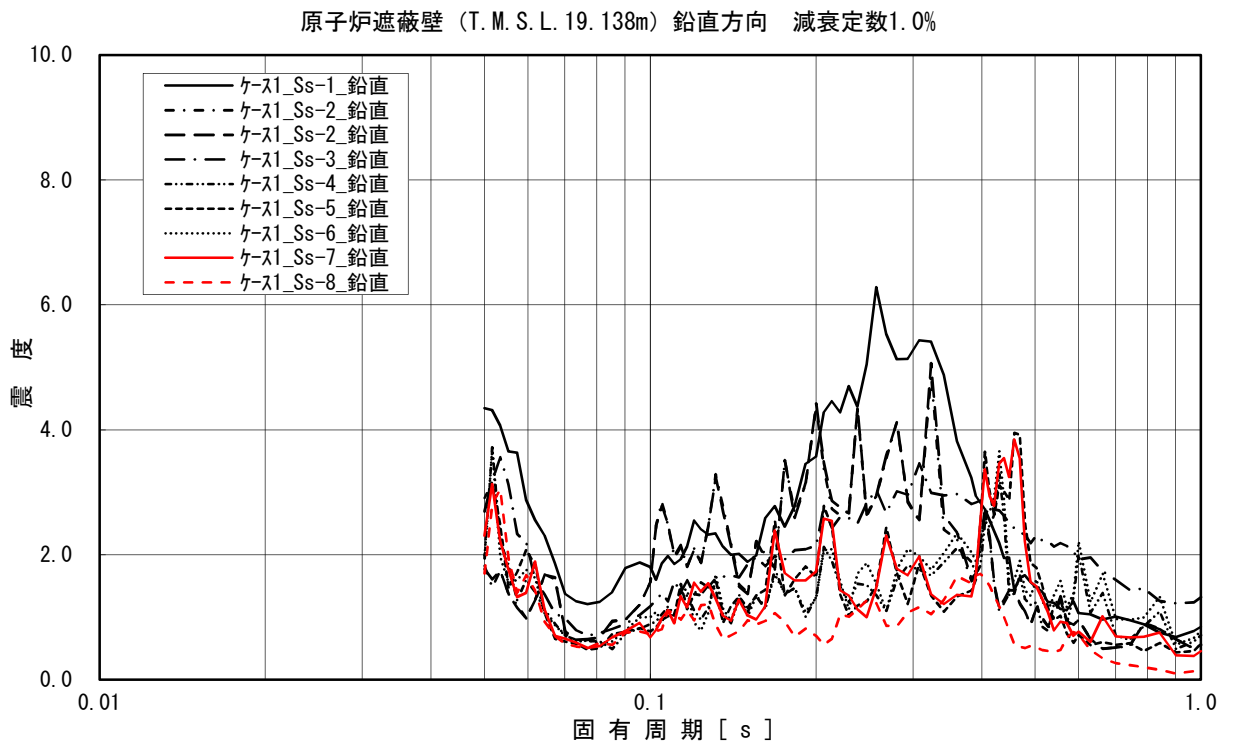
原子炉本体基礎 (T. M. S. L. -4.700m) 水平方向 減衰定数1.0%



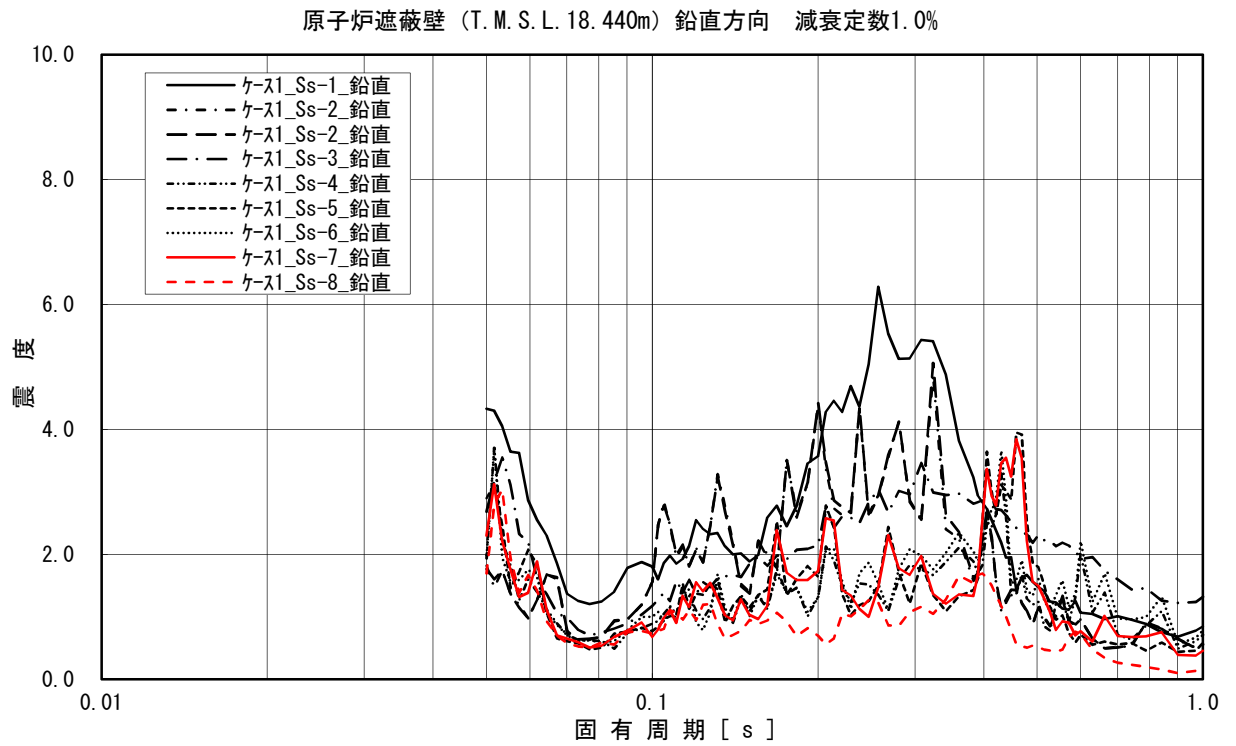
添付図 3(17) 原子炉本体基礎 (T. M. S. L. -4.700m) の加速度応答スペクトル
(水平方向, 減衰定数 1.0%)



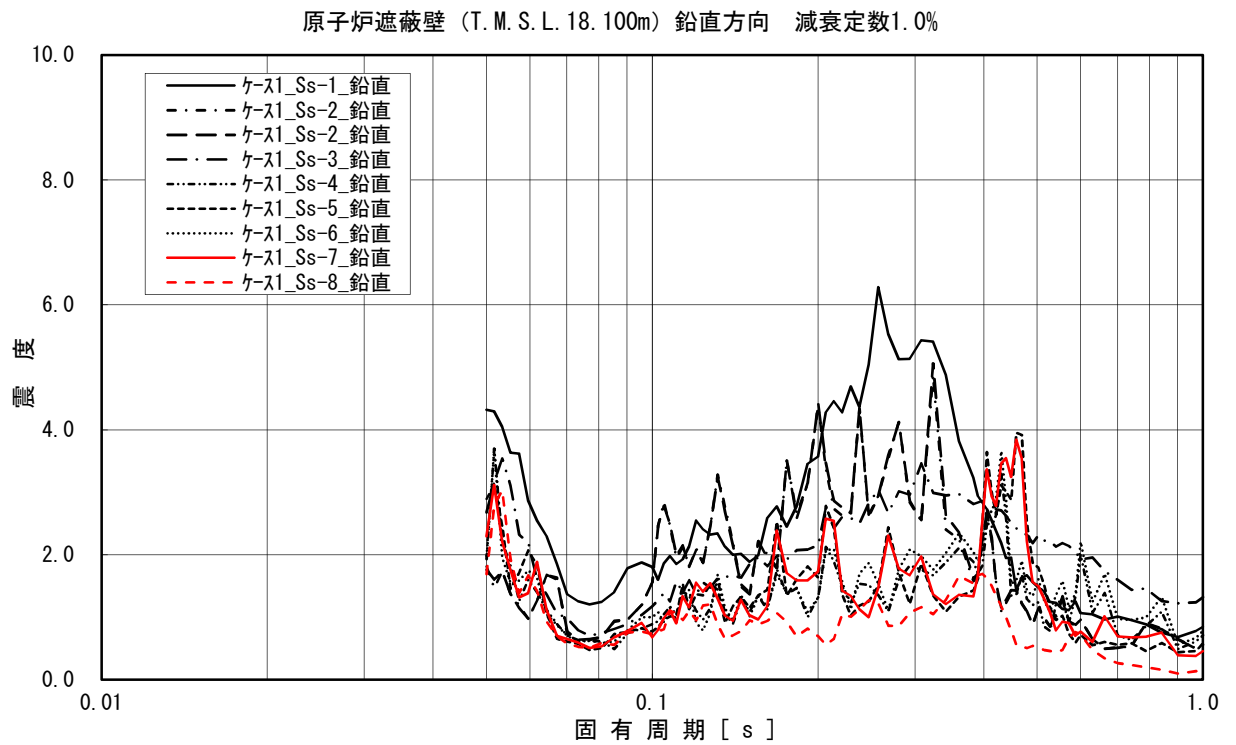
添付図 4(1) 原子炉遮蔽壁 (T.M.S.L. 21. 200m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)



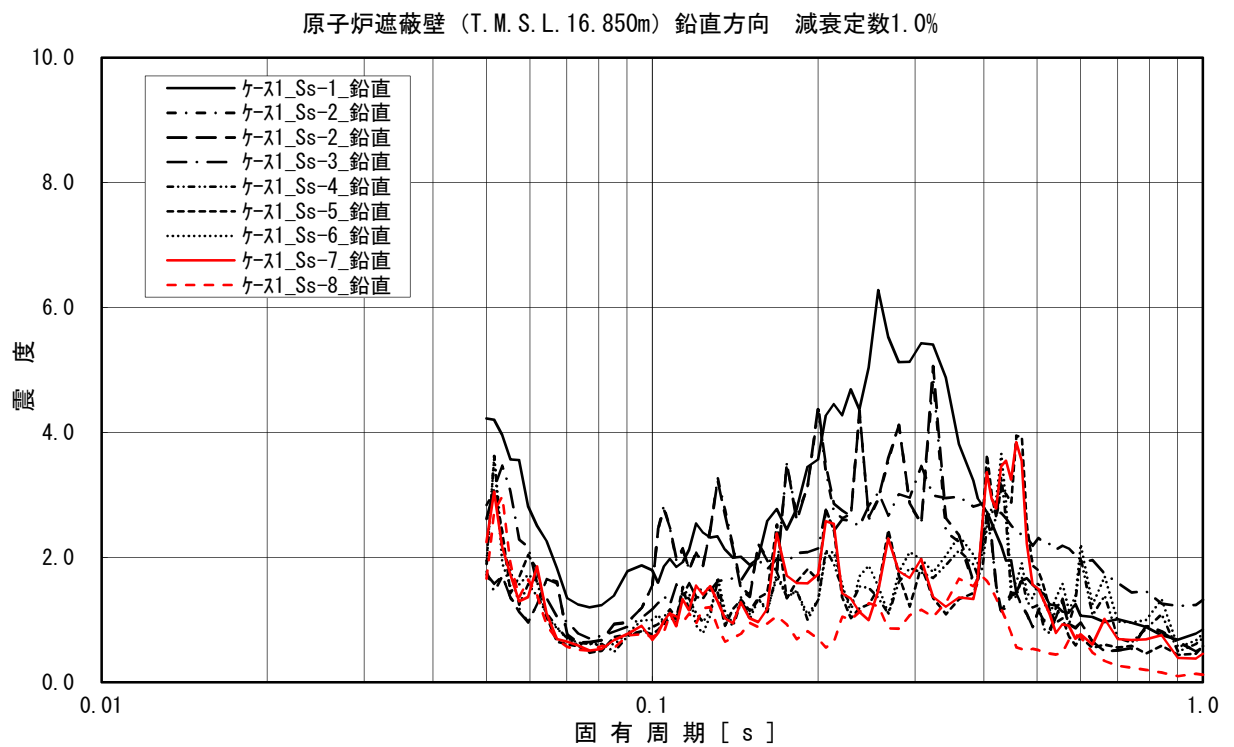
添付図 4(2) 原子炉遮蔽壁 (T.M.S.L. 19. 138m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)



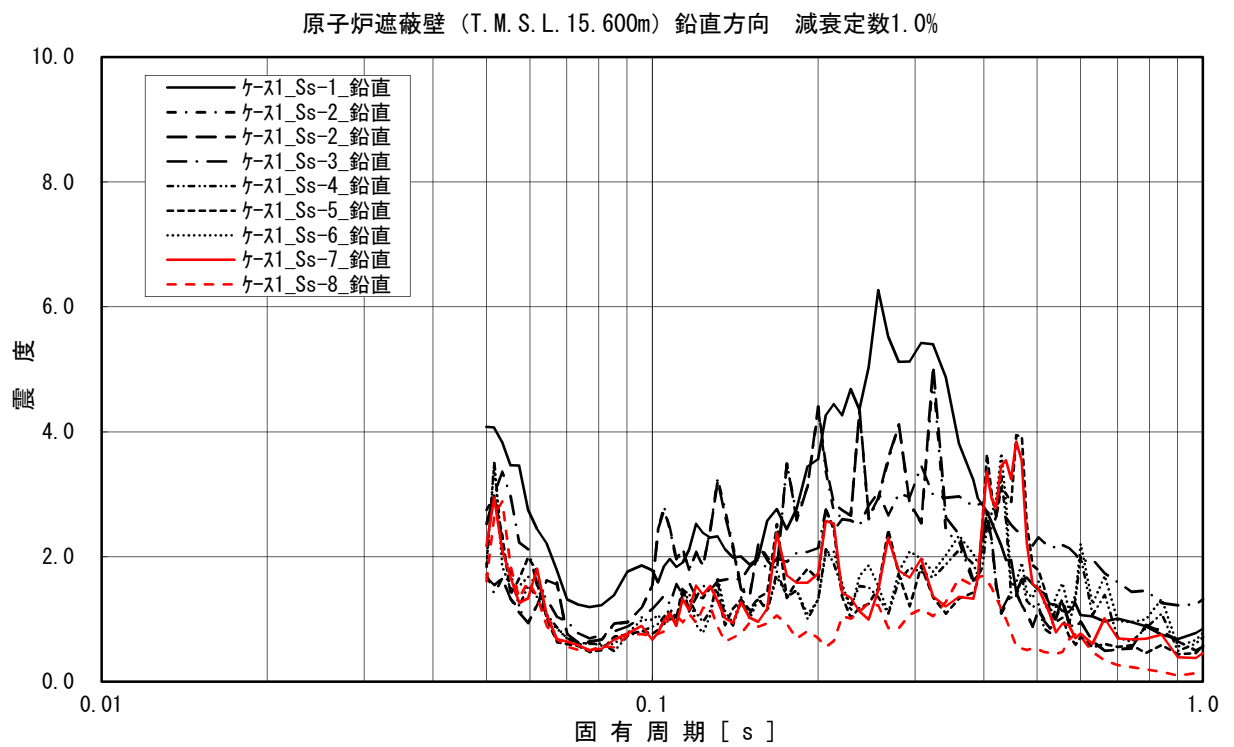
添付図 4(3) 原子炉遮蔽壁 (T.M.S.L. 18. 440m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)



添付図 4(4) 原子炉遮蔽壁 (T.M.S.L. 18. 100m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)

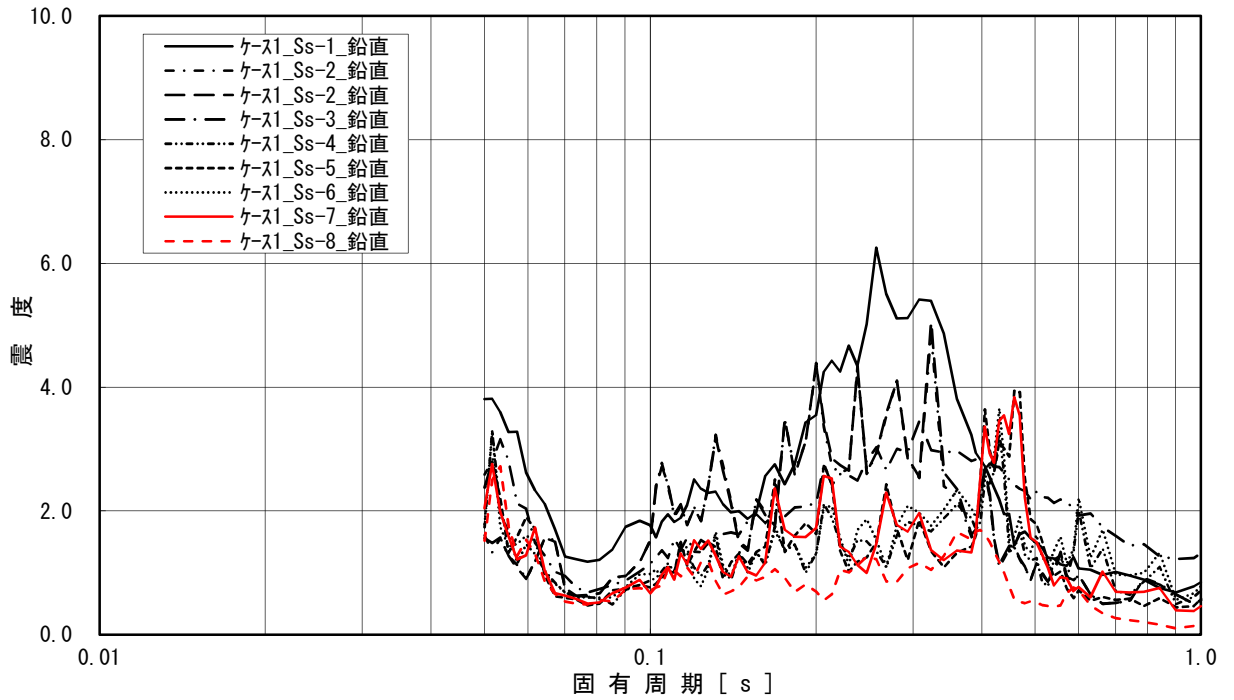


添付図 4(5) 原子炉遮蔽壁 (T.M.S.L. 16.850m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)



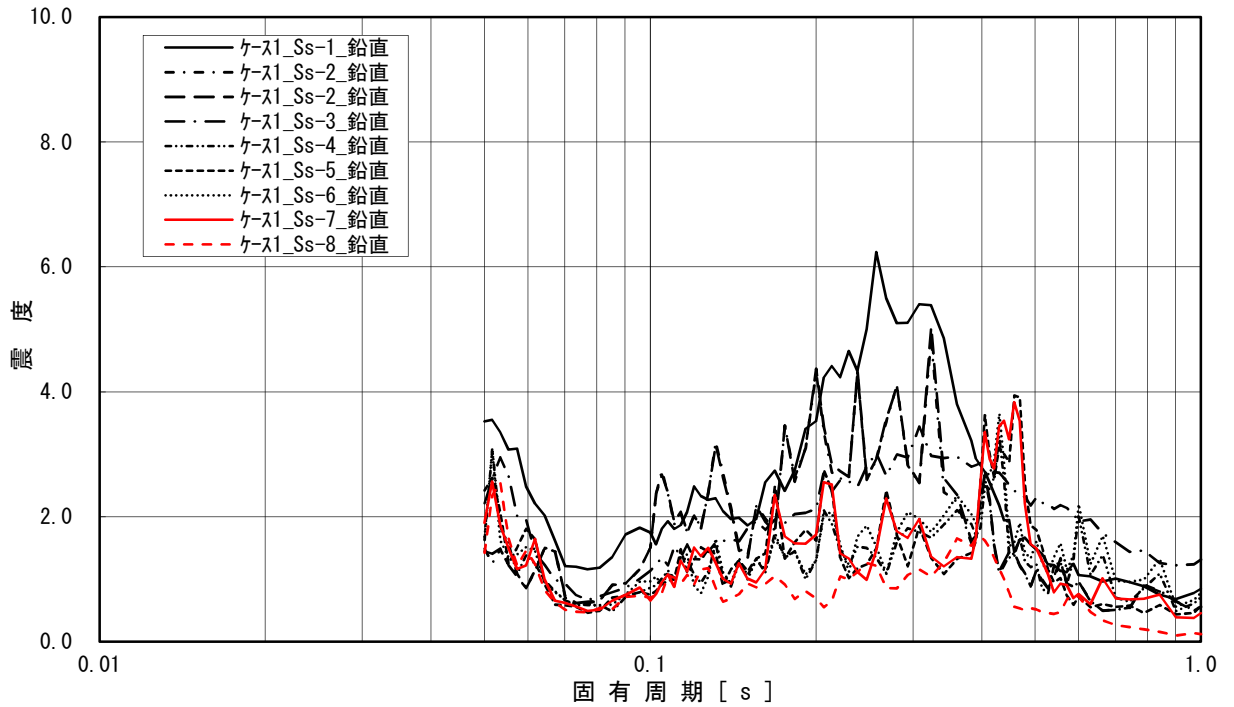
添付図 4(6) 原子炉遮蔽壁 (T.M.S.L. 15.600m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)

原子炉遮蔽壁 (T.M.S.L. 13.950m) 鉛直方向 減衰定数1.0%

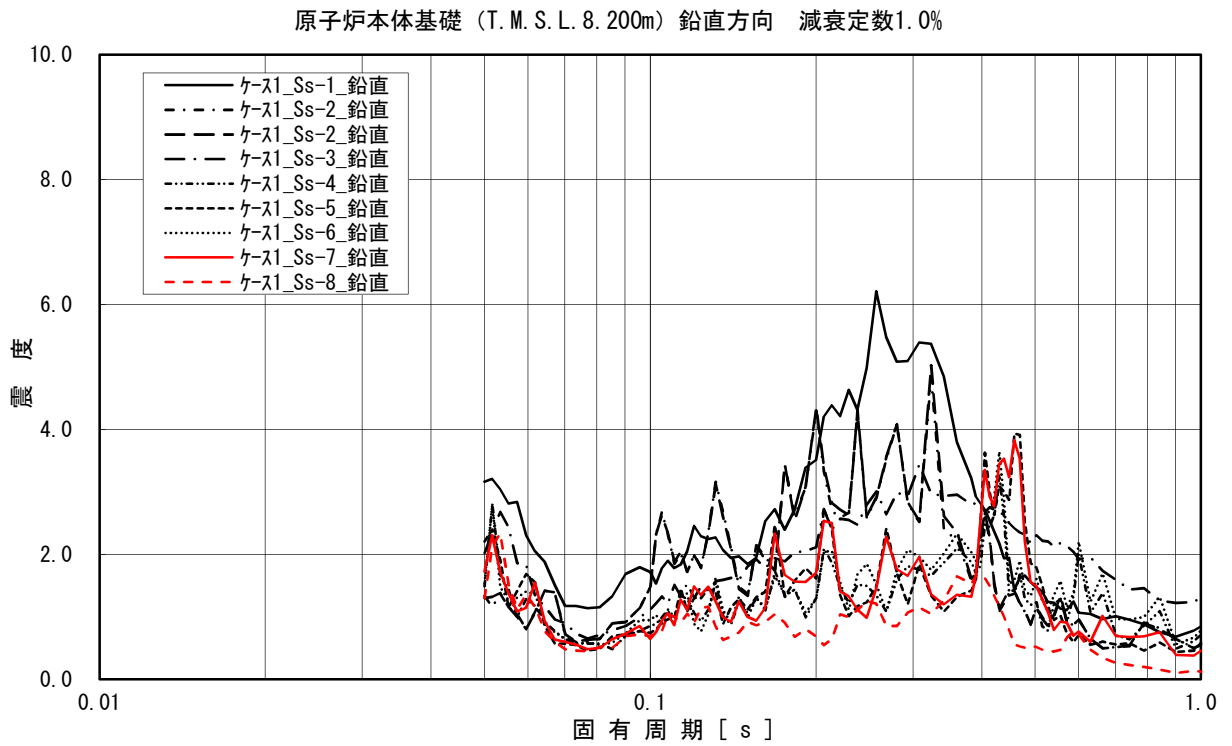


添付図 4(7) 原子炉遮蔽壁 (T.M.S.L. 13.950m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)

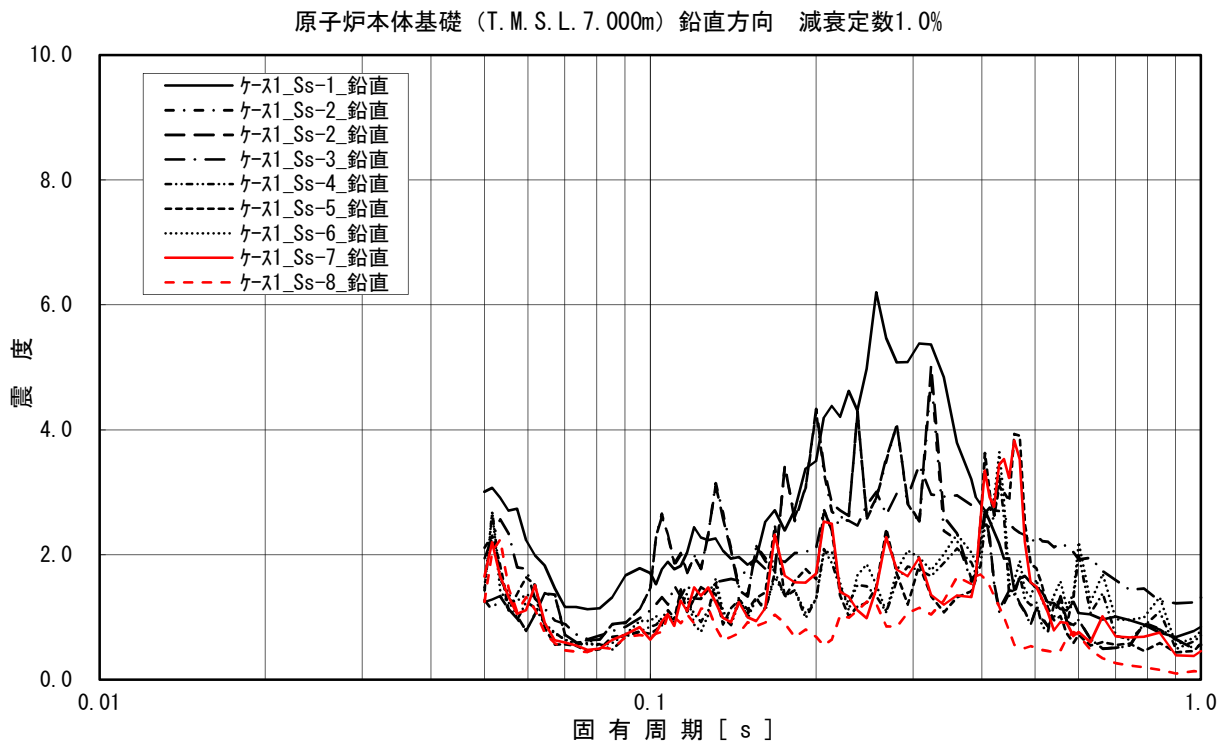
原子炉本体基礎 (T.M.S.L. 12.300m) 鉛直方向 減衰定数1.0%



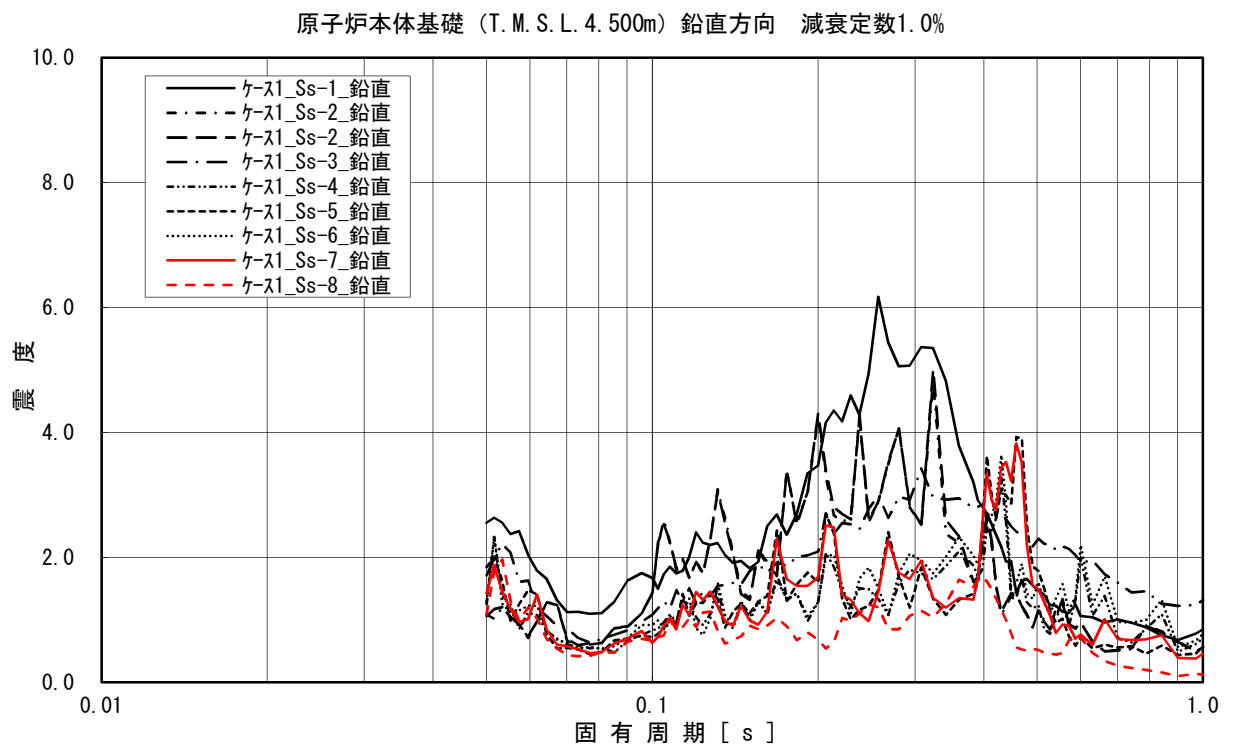
添付図 4(8) 原子炉本体基礎 (T.M.S.L. 12.300m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)



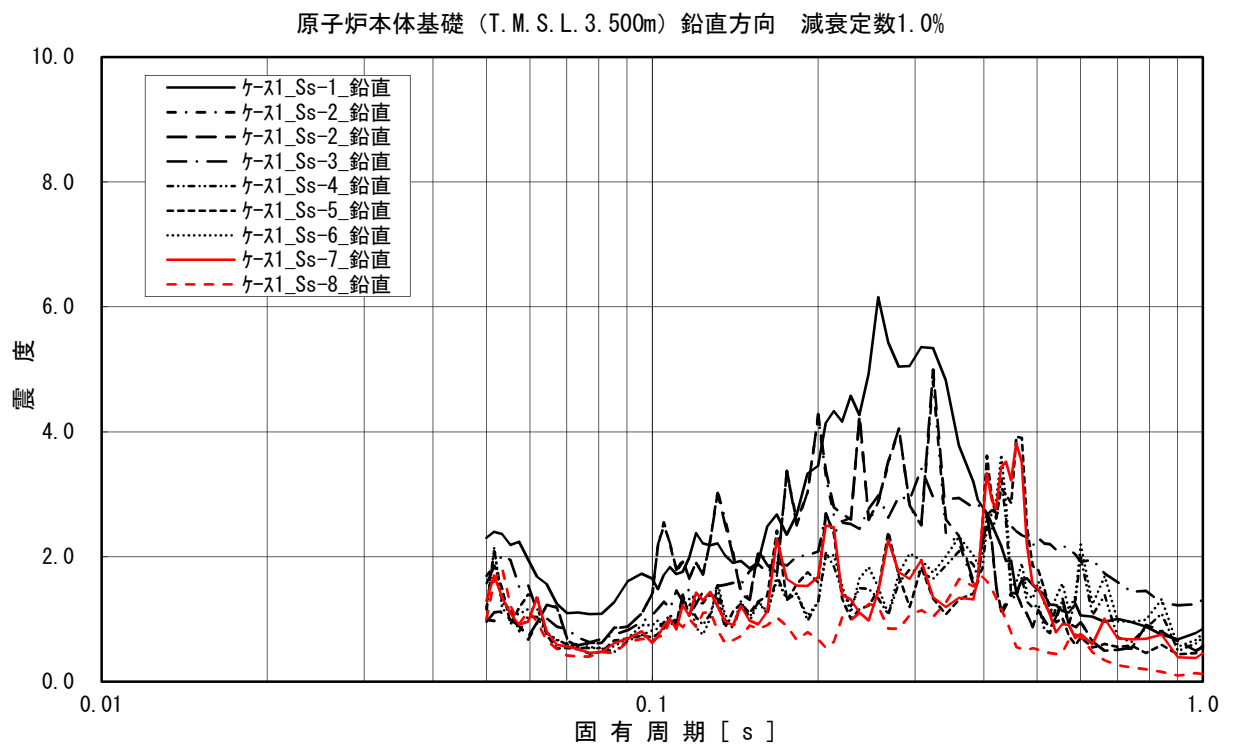
添付図 4(9) 原子炉本体基礎 (T. M. S. L. 8. 200m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)



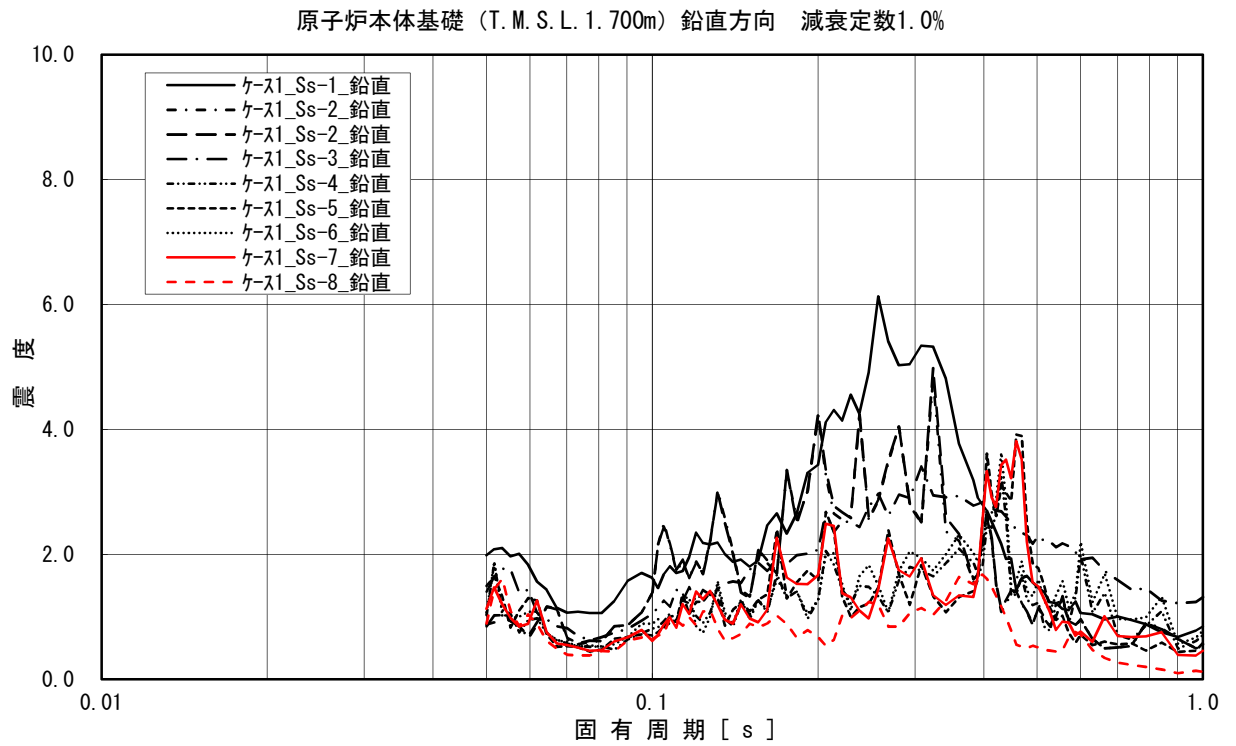
添付図 4(10) 原子炉本体基礎 (T. M. S. L. 7. 000m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)



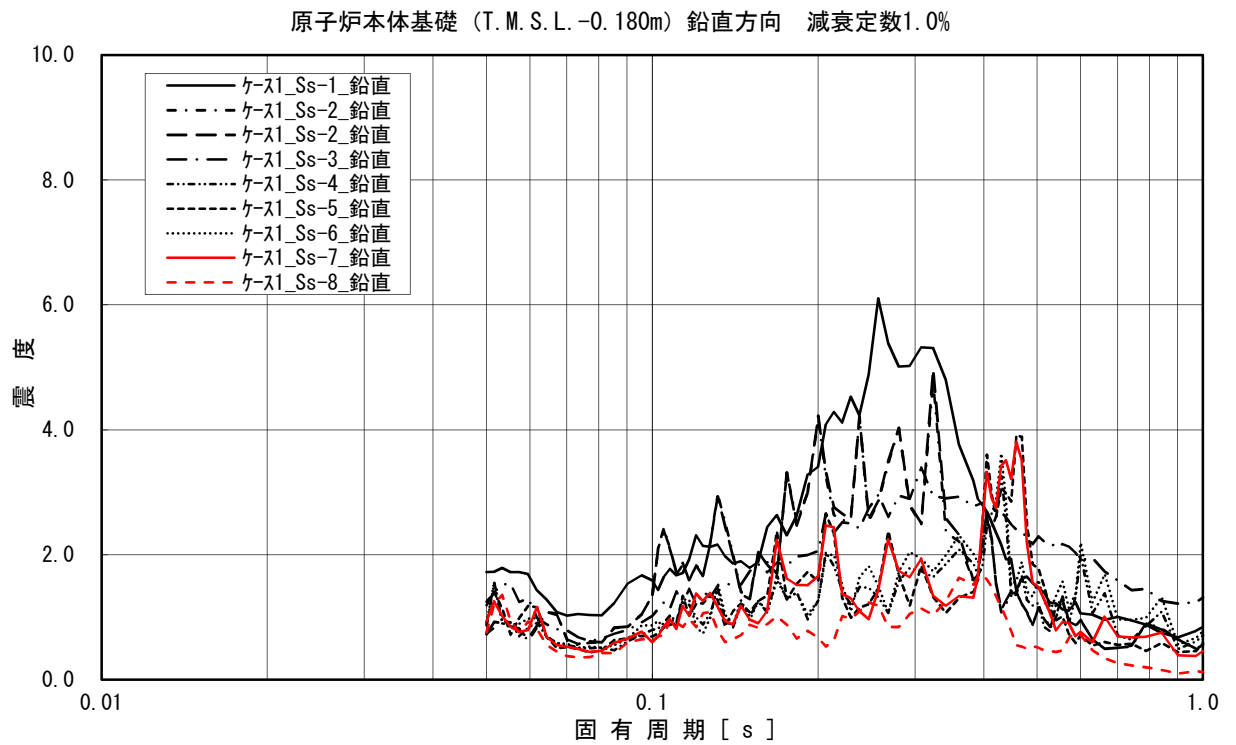
添付図 4(11) 原子炉本体基礎 (T. M. S. L. 4. 500m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)



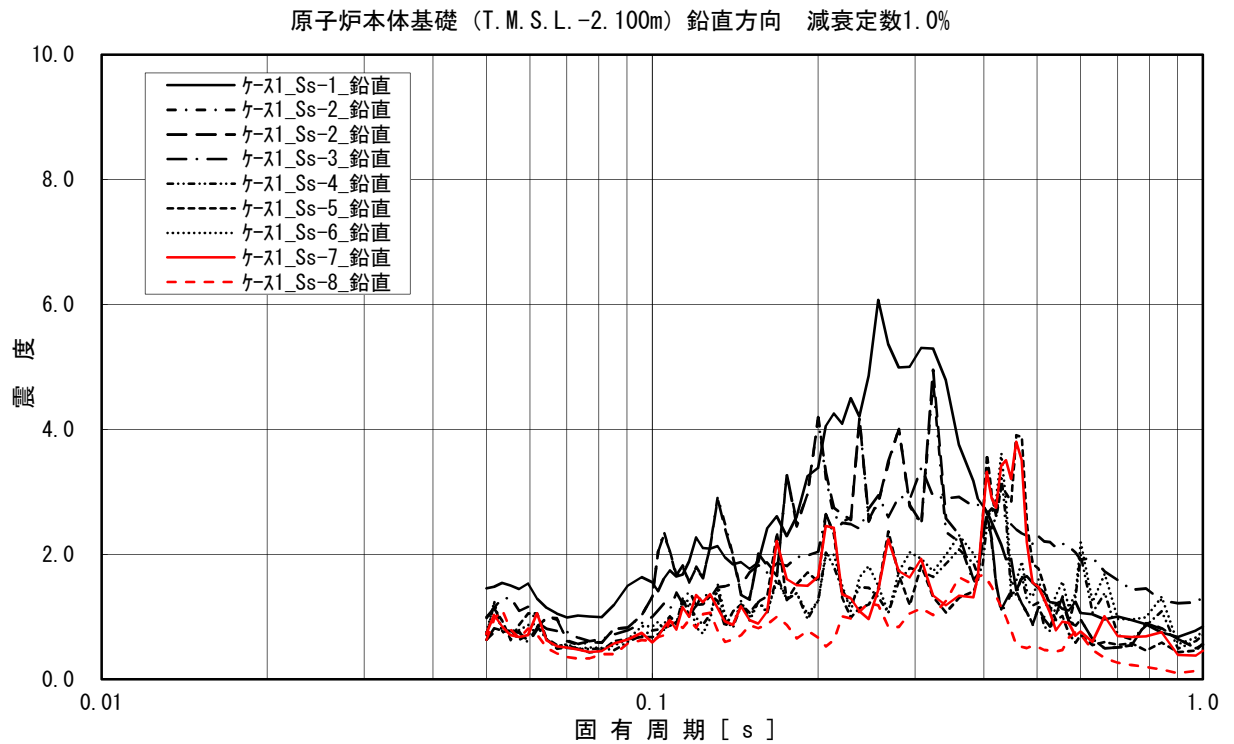
添付図 4(12) 原子炉本体基礎 (T. M. S. L. 3. 500m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)



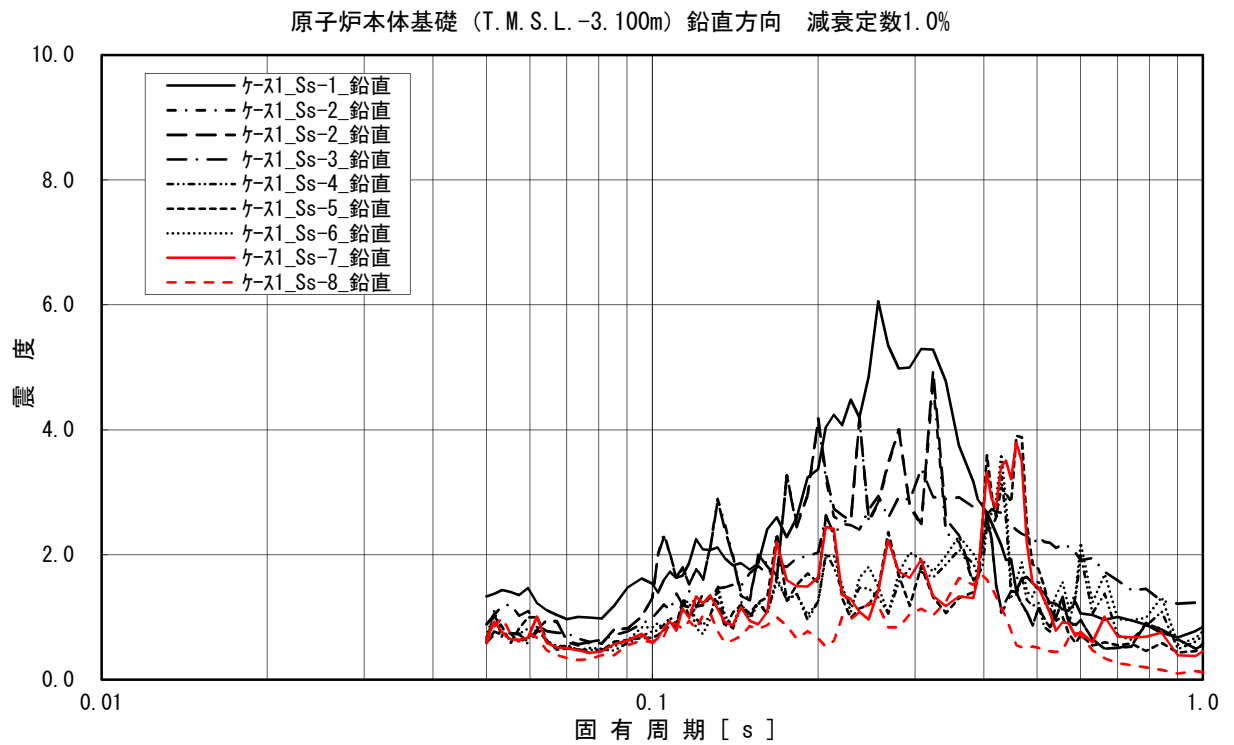
添付図 4(13) 原子炉本体基礎 (T. M. S. L. 1.700m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)



添付図 4(14) 原子炉本体基礎 (T. M. S. L. -0.180m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)

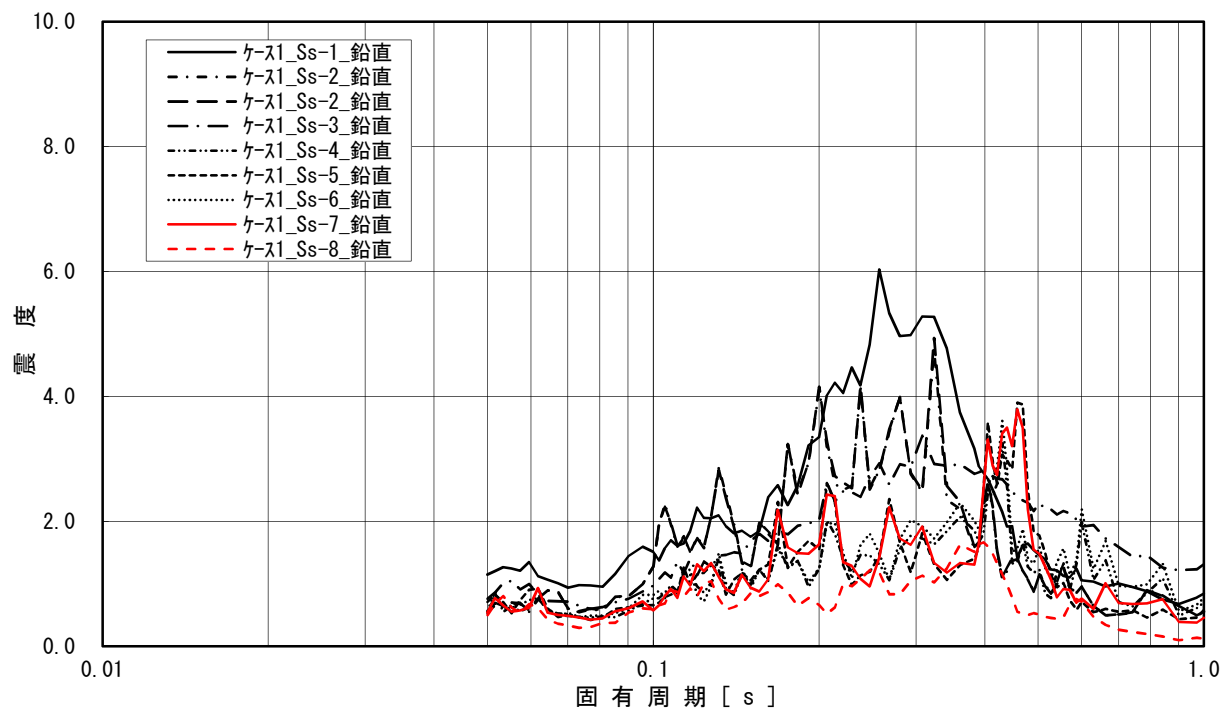


添付図 4(15) 原子炉本体基礎 (T. M. S. L. -2.100m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)



添付図 4(16) 原子炉本体基礎 (T. M. S. L. -3.100m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)

原子炉本体基礎 (T. M. S. L. -4.700m) 鉛直方向 減衰定数1.0%



添付図 4(17) 原子炉本体基礎 (T. M. S. L. -4.700m) の加速度応答スペクトル
(鉛直方向, 減衰定数 1.0%)

添付表 1(1) 原子炉建屋の最大応答加速度（水平方向，1.2ZPA）

構造物名	質点 番号	標高 T. M. S. L. (m)	最大応答加速度 ($\times 9.80665\text{m/s}^2$) $\times 1.2$															
			Ss-1		Ss-2		Ss-3		Ss-4		Ss-5		Ss-6		Ss-7		Ss-8	
			NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
原子炉建屋	1	49.700	2.21	2.03	1.34	1.70	1.33	1.26	0.97	1.12	0.82	1.26	1.00	1.14	0.82	1.44	1.75	1.64
	2	38.200	1.51	1.50	1.06	1.43	1.09	1.04	0.75	0.86	0.64	1.05	0.78	0.88	0.61	1.10	1.35	1.30
	3	31.700	1.31	1.32	0.95	1.31	0.96	0.93	0.64	0.75	0.59	0.95	0.67	0.79	0.54	0.99	1.20	1.16
	4	23.500	1.13	1.08	0.82	1.19	0.84	0.83	0.52	0.76	0.52	0.84	0.54	0.81	0.48	0.85	1.12	1.09
	5	18.100	0.99	1.00	0.73	1.13	0.77	0.76	0.45	0.76	0.47	0.78	0.47	0.81	0.42	0.78	1.00	1.01
	6	12.300	0.93	0.96	0.64	1.06	0.73	0.73	0.39	0.74	0.43	0.71	0.40	0.79	0.37	0.73	0.91	0.92
	7	4.800	0.82	0.89	0.61	0.99	0.69	0.69	0.33	0.67	0.39	0.64	0.33	0.72	0.35	0.69	0.77	0.81
	8	-1.700	0.85	0.82	0.57	1.01	0.72	0.70	0.32	0.60	0.35	0.61	0.35	0.65	0.33	0.68	0.68	0.69
	9	-8.200	0.72	0.72	0.55	0.88	0.77	0.76	0.34	0.54	0.33	0.61	0.37	0.57	0.31	0.69	0.62	0.63
	10	-13.700	0.78	0.75	0.56	0.85	0.82	0.80	0.34	0.52	0.32	0.62	0.38	0.55	0.31	0.70	0.58	0.59

添付表 1(2) 原子炉建屋の最大応答加速度（鉛直方向，1.2ZPA）

構造物名	質点 番号	標高 T. M. S. L. (m)	最大応答加速度 ($\times 9.80665\text{m/s}^2$) $\times 1.2$							
			Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5	Ss-6	Ss-7	Ss-8
			鉛直	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直
原子炉建屋	1	49.700	1.19	0.76	0.80	0.60	0.58	0.62	0.59	0.45
	2	38.200	1.15	0.73	0.77	0.57	0.57	0.59	0.57	0.39
	3	31.700	1.11	0.72	0.75	0.54	0.56	0.57	0.56	0.37
	4	23.500	1.08	0.71	0.73	0.52	0.55	0.54	0.54	0.35
	5	18.100	1.05	0.70	0.73	0.50	0.53	0.52	0.52	0.33
	6	12.300	1.03	0.68	0.72	0.48	0.52	0.52	0.50	0.30
	7	4.800	0.99	0.65	0.72	0.47	0.50	0.50	0.47	0.30
	8	-1.700	0.96	0.63	0.72	0.47	0.49	0.49	0.44	0.30
	9	-8.200	0.95	0.60	0.72	0.46	0.48	0.47	0.42	0.31
	10	-13.700	0.95	0.59	0.72	0.46	0.47	0.47	0.41	0.31

添付表 2(1) 原子炉遮蔽壁及び原子炉本体基礎の最大応答加速度（水平方向，1.2ZPA）

構造物名	質点 番号	標高 T. M. S. L. (m)	最大応答加速度 ($\times 9.80665\text{m/s}^2$) $\times 1.2$															
			Ss-1		Ss-2		Ss-3		Ss-4		Ss-5		Ss-6		Ss-7		Ss-8	
			NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
原子炉遮蔽壁	35	21.200	1.43	1.40	0.88	1.64	0.99	0.95	0.49	1.13	0.59	0.94	0.54	1.17	0.57	0.86	1.29	1.22
	34	19.138	1.31	1.30	0.83	1.57	0.93	0.90	0.47	1.05	0.56	0.90	0.50	1.10	0.53	0.82	1.20	1.16
	33	18.440	1.27	1.27	0.81	1.54	0.91	0.88	0.46	1.03	0.55	0.89	0.49	1.07	0.52	0.81	1.16	1.13
	32	18.100	1.26	1.25	0.81	1.53	0.90	0.87	0.46	1.01	0.55	0.88	0.48	1.06	0.51	0.81	1.15	1.12
	31	16.850	1.18	1.17	0.77	1.45	0.87	0.84	0.44	0.96	0.52	0.85	0.46	1.01	0.49	0.79	1.08	1.07
	30	15.600	1.14	1.09	0.74	1.35	0.83	0.81	0.43	0.90	0.49	0.81	0.45	0.96	0.46	0.77	1.06	1.02
	29	13.950	0.98	1.00	0.70	1.21	0.79	0.77	0.41	0.83	0.46	0.77	0.42	0.88	0.41	0.76	0.98	0.96
原子炉本体基礎	28	12.300	0.99	0.97	0.66	1.12	0.75	0.74	0.40	0.77	0.43	0.73	0.40	0.82	0.37	0.74	0.93	0.93
	27	8.200	0.87	0.88	0.65	1.07	0.74	0.74	0.37	0.72	0.40	0.68	0.37	0.78	0.35	0.72	0.83	0.87
	26	7.000	0.85	0.86	0.63	1.04	0.73	0.73	0.36	0.70	0.40	0.67	0.36	0.75	0.35	0.71	0.83	0.85
	25	4.500	0.85	0.85	0.61	0.99	0.69	0.69	0.35	0.68	0.39	0.64	0.34	0.73	0.34	0.70	0.85	0.86
	24	3.500	0.81	0.83	0.61	1.01	0.69	0.69	0.34	0.67	0.38	0.63	0.34	0.71	0.34	0.69	0.85	0.86
	23	1.700	0.79	0.81	0.60	1.04	0.68	0.69	0.33	0.64	0.37	0.63	0.35	0.70	0.33	0.68	0.84	0.84
	22	-0.180	0.89	0.79	0.57	1.07	0.69	0.67	0.32	0.62	0.36	0.61	0.35	0.66	0.33	0.67	0.81	0.80
	21	-2.100	0.85	0.75	0.56	1.06	0.71	0.70	0.32	0.61	0.35	0.61	0.36	0.64	0.32	0.68	0.79	0.76
	20	-3.100	0.83	0.74	0.56	1.02	0.72	0.72	0.33	0.60	0.35	0.61	0.36	0.63	0.32	0.68	0.78	0.73
19	-4.700	0.80	0.72	0.55	0.92	0.74	0.73	0.33	0.58	0.34	0.61	0.37	0.62	0.32	0.69	0.74	0.68	

添付表 2(2) 原子炉遮蔽壁及び原子炉本体基礎の最大応答加速度（鉛直方向，1.2ZPA）

構造物名	質点 番号	標高 T. M. S. L. (m)	最大応答加速度 ($\times 9.80665\text{m/s}^2$) $\times 1.2$							
			Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5	Ss-6	Ss-7	Ss-8
			鉛直	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直
原子炉遮蔽壁	18	21.200	1.05	0.68	0.78	0.51	0.56	0.50	0.55	0.48
	17	19.138	1.05	0.68	0.78	0.51	0.56	0.50	0.55	0.48
	16	18.440	1.05	0.68	0.78	0.51	0.56	0.50	0.54	0.48
	15	18.100	1.05	0.68	0.78	0.51	0.56	0.50	0.54	0.48
	14	16.850	1.05	0.68	0.78	0.51	0.56	0.50	0.54	0.48
	13	15.600	1.04	0.67	0.78	0.51	0.55	0.50	0.54	0.47
	12	13.950	1.03	0.67	0.77	0.51	0.54	0.49	0.53	0.46
原子炉本体基礎	11	12.300	1.02	0.66	0.77	0.50	0.53	0.49	0.52	0.45
	10	8.200	1.01	0.66	0.76	0.50	0.52	0.48	0.50	0.43
	9	7.000	1.00	0.65	0.76	0.50	0.51	0.48	0.50	0.42
	8	4.500	0.99	0.64	0.75	0.49	0.50	0.48	0.48	0.40
	7	3.500	0.98	0.64	0.75	0.49	0.49	0.48	0.48	0.39
	6	1.700	0.96	0.64	0.74	0.48	0.48	0.48	0.47	0.37
	5	-0.180	0.95	0.63	0.73	0.48	0.47	0.48	0.46	0.35
	4	-2.100	0.95	0.62	0.73	0.47	0.47	0.48	0.45	0.33
	3	-3.100	0.95	0.62	0.72	0.47	0.47	0.48	0.44	0.33
2	-4.700	0.95	0.62	0.72	0.47	0.47	0.48	0.44	0.31	