

平成 24 年 2 月 13 日
四国電力株式会社

第 7 回高経年化技術評価に関する意見聴取会

四国電力（株）伊方 2 号炉についての委員コメントに対する回答

第 7 回高経年化技術評価に関する意見聴取会
四国電力（株）伊方 2 号炉についての委員コメントに対する回答リスト
（第 6 回までの高経年化技術評価に関する意見聴取会）

No.	質問内容	質問者
①	配管減肉に関して、配管サポートについても健全性確認の観点から耐震裕度を示すとともに、配管サポートが外れた場合の耐震裕度を示して欲しい。	飯井委員
②	ターボポンプの高サイクル疲労と低サイクル疲労の重畳について、弾性解析なのか弾塑性解析なのか示されていないので、詳細な検討内容を示して欲しい。 評価に使用した疲労曲線は実力ベースなのか、設計に余裕を見込んだ設計値なのか明らかにして欲しい。 単純な軸以外に 3 次元的形状のインペラは、どのように評価しているのか示して欲しい。	飯井委員
③	第 6 回意見聴取会 資料 5 3/11 頁の表 2 の確認結果で、S1 による評価のみとなっているが、弾性範囲を超えるものとして、S2, SS による評価結果はどうなるのか。	井野委員

②、③：第 7 回高経年化技術評価に関する意見聴取会で回答する。

質問 事項	第7回高経年化技術評価に関する意見聴取会 伊方2号炉についての委員コメントに対する回答 ② ターボポンプの高サイクル疲労と低サイクル疲労の重畳について、弾性解析なのか弾塑性解析なのか示されていないので、詳細な検討内容を示して欲しい。 評価に使用した疲労曲線は実力ベースなのか、設計に余裕を見込んだ設計値なのか明らかにして欲しい。 単純な軸以外に3次元的形状のインペラは、どのように評価しているのか示して欲しい。
四電 回答	ECCSのターボ機械類としては、余熱除去ポンプ等のターボポンプがありますが、これらの主軸について、起動・停止時に生じる荷重による低サイクル疲労と運転中の変動応力による高サイクル疲労の重畳について評価しました。 その結果、低サイクル疲労、高サイクル疲労とも発生する応力振幅は、材料の疲労強度に対して十分小さく、問題ないことを確認しています。（「別紙」（表1）を参照） なお、起動・停止時に主軸に生じる応力としては、軸方向スラスト荷重による引張応力、軸トルクによるせん断応力、ラジアル荷重および自重による曲げ応力を考慮しています。また、対象とするターボポンプの場合、いずれも主軸に円盤状の羽根車が焼きばめ等により取り付けられていることから、起動・停止時に主軸に遠心力が発生することはありません。 ○ターボポンプの高サイクル疲労と低サイクル疲労の重畳に関して、詳細な検討内容を「別紙」に示します。 なお、「別紙」に示す評価は、一般的な強度計算に基づくものです。 また、評価に用いた疲労曲線は、疲労試験データに基づき表面粗さ等を考慮したものです。 ○インペラの形状については、水力効率を考慮し設計しており、また、インペラの羽根出口の先端寸法は形状変化をゆるやかにするとともに、十分な強度を有するものにしています。 また、伊方2号炉では、ポンプの分解点検時に、インペラについても浸透探傷検査を実施しており、有意な欠陥がないことを確認しています。 別紙：ポンプ主軸の低サイクル疲労と高サイクル疲労の重畳評価について

ポンプ主軸の低サイクル疲労と高サイクル疲労の重畳評価について

1. 発生応力の算定方法

(1) はじめに

当評価で考慮する応力のイメージを図1に示します。

低サイクルについては、起動～停止をひとつのサイクルとし、起動前の状態から運転時にポンプ主軸に発生する応力振幅を低サイクル時の発生応力 σ_L として評価します。

また、高サイクルについては、運転中のポンプ主軸に発生する応力の変動成分のサイクルをひとつのサイクルとし、その応力振幅を高サイクル時の発生応力 σ_H として評価します。

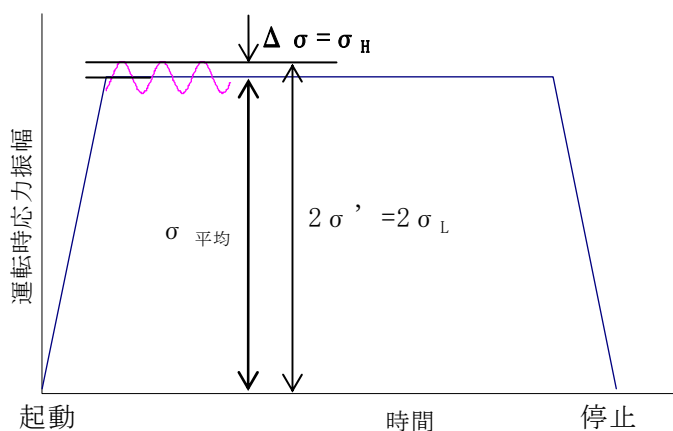


図1 当評価で考慮する応力（イメージ）

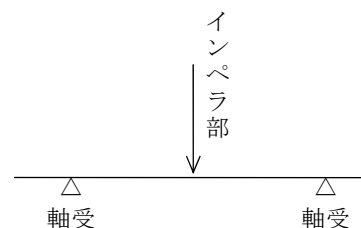
(2) 低サイクル時の発生応力

低サイクルは起動～停止をひとつのサイクルとし、図1に示すように起動前の状態から運転時にポンプ主軸に発生する応力振幅を低サイクル時の発生応力 σ_L として評価します。

σ_L には、主軸に発生する引張応力、曲げ応力およびせん断応力を考慮しています。

a. 計算モデル

応力計算は、右図に示す単純なはりモデルに置き換えます。なお、応力評価に当っては、条件的に厳しいと考えられるインペラ部及び継手部について応力を算出し、段付部の影響も考慮します。



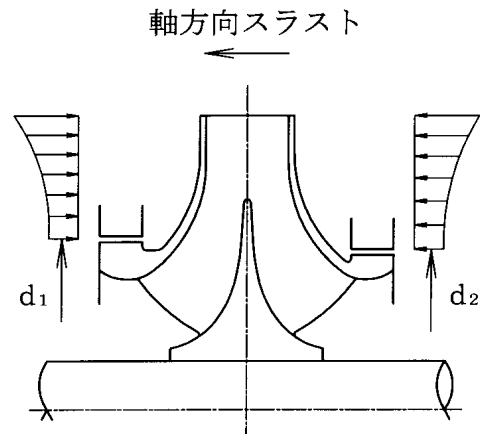
両持ちポンプ

計算モデル

b. 引張応力 ($\Delta \sigma_t'$)

運転時の圧力と起動前の圧力差によるインペラ軸方向流体スラスト力により発生する応力を算出し、1サイクルの応力振幅として評価します。

引張応力は、右図に示すインペラ左右の受圧面積の差によって発生する軸方向流体スラスト荷重により発生する応力を算出します。



(図は両持ちポンプの一例を示すものである。)

c. 曲げ応力 ($\Delta \sigma_b$)

運転時の圧力と起動前の圧力差による水力的なラジアル荷重により発生する応力となります。

d. せん断応力 ($\Delta \tau'$)

起動前の軸トルク“0”から運転時の軸トルクの差による応力を算出し、1サイクルの応力振幅として評価します。

e. 等価応力 ($\sigma_{\text{平均}}, \Delta \sigma, \sigma'$)

上記の発生応力を下記のとおり等価応力に換算します。

$$\sigma_{\text{平均}} = \sqrt{(\Delta \sigma_t')^2 + 3(\Delta \tau')^2}$$

変動成分は定常成分の $\pm a\%$ として $\Delta \sigma_t$ 、 $\Delta \tau$ を算出します。

$$\Delta \sigma = \sqrt{((\Delta \sigma_t + \Delta \sigma_b))^2 + 3(\Delta \tau)^2}$$

a : プラントメーカー設計値

$$\sigma_{\text{max}} = \sigma_{\text{平均}} + \Delta \sigma, \quad \sigma_{\text{min}} = \min(\sigma_{\text{平均}} - \Delta \sigma, 0)$$

$$\sigma' = (\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}) / 2$$

低サイクル時の疲労評価には、 σ' を繰返し応力(σ_L)として評価します。

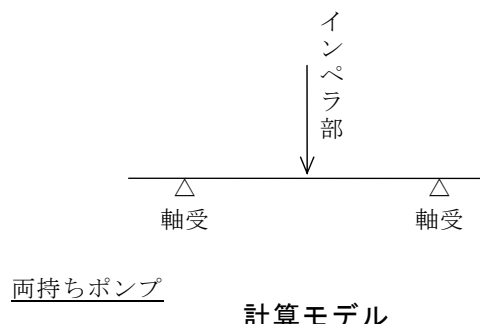
(3) 高サイクル時発生応力

高サイクルは図 1 に示すように運転中のポンプ主軸に発生する応力振幅を高サイクル時の発生応力 σ_H として評価します。

σ_H には、主軸に発生する引張応力、曲げ応力およびせん断応力を考慮しています。

a. 計算モデル

応力計算は、右図に示す単純なはりモデルに置き換えます。なお、応力評価に当っては、条件的に厳しいと考えられるインペラ部及び継手部について応力を算出し、段付部の影響も考慮します。(低サイクル時と同様)



計算モデル

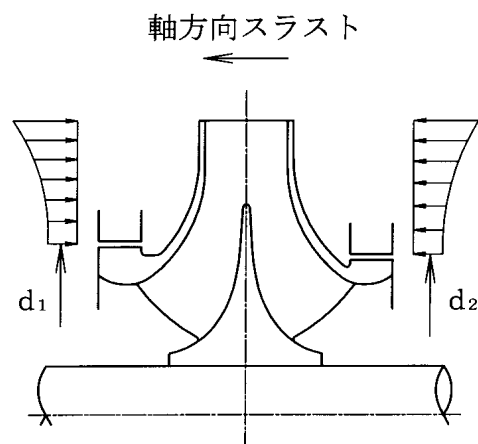
b. 主軸に発生する応力

① 引張応力 (σ_t 、 $\Delta \sigma_t$)

引張応力は、右図に示すインペラ左右の受圧面積の差によって発生する軸方向流体スラスト荷重により発生する応力を算出します。

なお、軸方向スラスト荷重は定常成分と変動成分を考慮する必要がありますが、変動成分は定常成分の $\pm a\%$ として、それぞれ定常成分 (σ_t) 及び変動成分 ($\Delta \sigma_t$) を算出します。

a : プラントメーカ設計値



(図は両持ちポンプの一例を示すものである。)

② 曲げ応力 ($\Delta \sigma_b$)

曲げ応力は、インペラ部に発生する水力的なラジアル荷重およびインペラ、主軸の自重を考慮して算出します。なお、主軸に発生する応力は前述のはりモデルにより算出しますが、曲げ応力は主軸が回転することから、変動応力 ($\Delta \sigma_b$) としてのみ主軸に作用します。

③ せん断応力 (τ 、 $\Delta \tau$)

せん断応力は、軸トルクにより発生する応力を算出します。

なお、軸トルクは定常成分と変動成分を考慮する必要がありますが、変動成分は定常成分の $\pm a\%$ として、それぞれ定常成分 (τ) 及び変動成分 ($\Delta \tau$) を算出します。

a : プラントメーカ設計値

c. 等価応力 ($\Delta \sigma$)

$$\Delta \sigma = \sqrt{((\Delta \sigma_t + \Delta \sigma_b)^2 + 3 \Delta \tau^2)} \quad [\text{変動成分}]$$

(段付部等の変動成分については、応力集中係数を考慮)

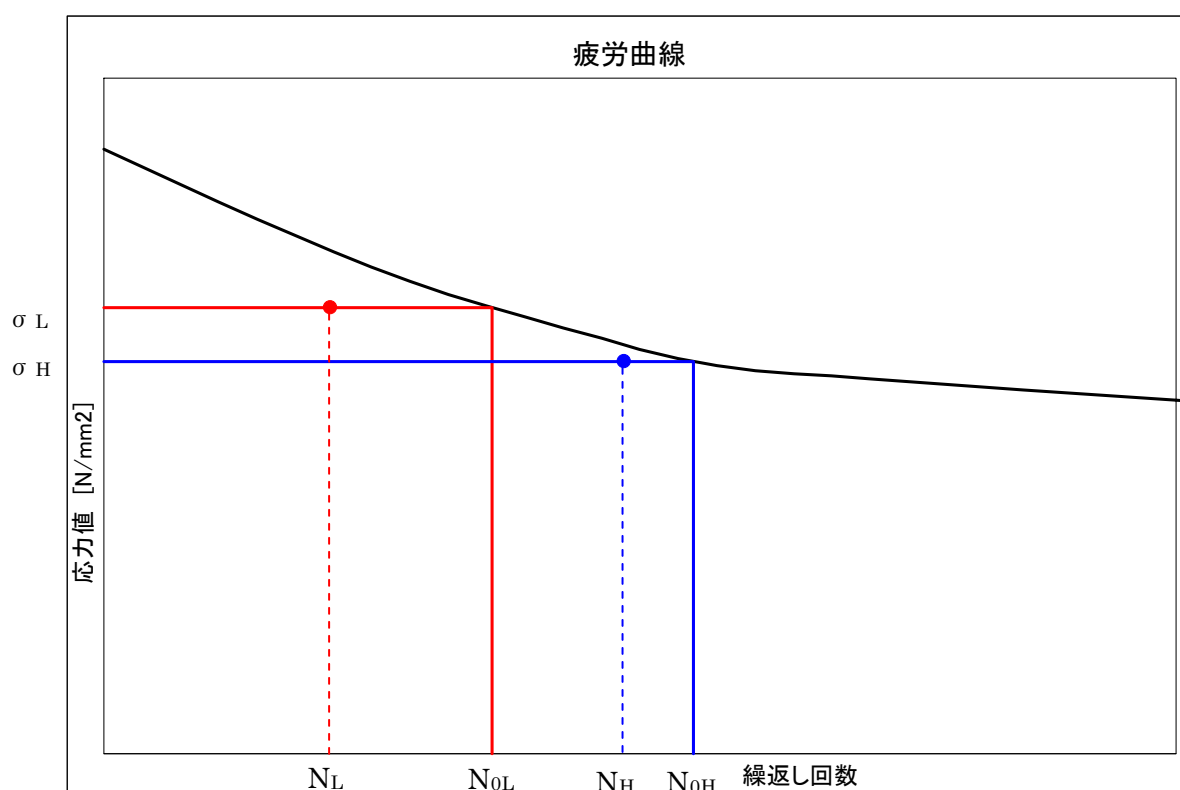
高サイクル時の疲労評価には、 $\Delta \sigma$ を繰返し応力 (σ_H) として評価します。

2. 疲労評価方法

疲労曲線により、運転開始後 60 年時点での低サイクル疲労と高サイクル疲労の重畳を考慮した場合の、疲れ累積係数（UF 値）を算出します。

なお、今回の評価では、発生応力（応力振幅）が疲労強度を下回ったため、UF 値は“0”としています。

低サイクル時の疲れ累積係数	$UF_L = N_L / N_{0L}$
高サイクル時の疲れ累積係数	$UF_H = N_H / N_{0H}$
運転開始後 60 年時点での疲れ累積係数	$UF = UF_L + UF_H$
本評価における判定	<u>$UF < 1$</u>



【記号の説明】

σ_L : 低サイクル時の発生応力

σ_H : 高サイクル時の発生応力

N_L : 運転開始後 60 年時点の低サイクル回数

N_H : 運転開始後 60 年時点の高サイクル回数

N_{0L} : 低サイクル時の許容繰返し回数

N_{0H} : 高サイクル時の許容繰返し回数

表 1 E C C S 関連ポンプの評価結果

ポンプ	主軸材料	起動・停止時の応力振幅 σ_L (低サイクル) (N/mm ²)	運転中の 応力振幅 σ_H (高サイクル) (N/mm ²)	運転開始後60年 時点の起動回数 (低サイクル) N_L	運転開始後60年 時点の繰返し回数 (高サイクル) N_H	評価結果 (UF値)
余熱除去ポンプ	SUS403	80 (疲労強度の約25%)	80 (疲労強度の約25%)	1155	2.2×10^9	0
高圧注入ポンプ	SUS630	68 (疲労強度の約20%)	58 (疲労強度の約15%)	900	7.7×10^7	0
原子炉補機冷却水ポンプ	SUS403	57 (疲労強度の約20%)	56 (疲労強度の約20%)	600	1.9×10^{10}	0
海水ポンプ	GSUS317J4L	116 (疲労強度の約65%)	39 (疲労強度の約25%)	300	2.1×10^{10}	0

質問事項	第7回高経年化技術評価に関する意見聴取会 伊方2号炉についての委員コメントに対する回答 ③ 第6回意見聴取会 資料5 3/11頁の表2の確認結果で、S1による評価のみとなっているが、弾性範囲を超えるものとして、S2、Ssによる評価結果はどうなるのか。										
四電回答	第6回高経年化技術評価に関する意見聴取会（H24.2.7）「資料5 四国電力伊方2号炉についての委員コメントに対する回答」③に対する委員コメントのうち、現行評価（PLM耐震安全性評価）で耐震裕度が最も厳しかった評価断面（節点809）を含む配管要素に対して、「限界曲げ荷重評価基準」を適用した場合の限界曲げ荷重※（S1地震時荷重×3.95倍）と弾性範囲を超える状態を許容するS2及びSs地震時の荷重（いずれも1次応力算出時）を比較した結果を以下に示します。 ※：評価部位全体が降伏状態に至る荷重 評価断面（節点809）の評価に用いた地震荷重の確認結果 <table border="1" data-bbox="443 891 1257 1310"> <thead> <tr> <th></th><th>S1地震時荷重に対する倍率</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>S1地震時荷重 （現行評価）</td><td>1.0</td></tr> <tr> <td>限界曲げ荷重</td><td>3.95</td></tr> <tr> <td>S2地震時</td><td>1.35</td></tr> <tr> <td>Ss地震時</td><td>0.93</td></tr> </tbody> </table> 以上より、「限界曲げ荷重評価基準」に基づき算定した限界曲げ荷重は、配管サポートが健全であれば、S2及びSs地震力に対して、十分余裕があることが確認できました。 なお、弾性範囲を超える状態を許容する地震荷重の大小関係において、S2地震時荷重＞Ss地震時荷重（応力評価結果も同様）となっており、その理由を考察しました。 現行評価（PLM耐震安全性評価：S1、S2地震）における当該配管系の地震応答解析では、「原子力発電所耐震設計技術指針（JEAC4601-1991）」に基づき、建屋1次固有周期制限を考慮した設計用減衰定数（下限値：0.5%）を適用しています。 一方、当該配管系のSs地震に対する地震応答解析では、「原子力発電所耐震設計技術規程（JEAC4601-2008）」に基づき、建屋1次固有周期制限の合理化及びJEAC4601-2008で規定する設計用減衰定数（3.0%）を適用可能であり、S2地震時に比較して、1次固有周期に対応する応答加速度が低減（約40～50%程度）されるため、地震時の1次応力も約30%程度低減されたものとなっています。 以上より、今回のケースについては、配管系の地震応答解析に適用する設計用減衰定数の合理化効果により応答加速度が低減され、評価結果の差異に現れたものと考えます。 （詳細は「別紙」を参照）		S1地震時荷重に対する倍率	S1地震時荷重 （現行評価）	1.0	限界曲げ荷重	3.95	S2地震時	1.35	Ss地震時	0.93
	S1地震時荷重に対する倍率										
S1地震時荷重 （現行評価）	1.0										
限界曲げ荷重	3.95										
S2地震時	1.35										
Ss地震時	0.93										

**伊方2号炉主給水系統配管に減肉を考慮した耐震安全性評価結果の耐震裕度について
(S₂地震力とS_s地震力の比較)**

主給水系統配管（B系統）については、解析モデル化上、当該配管系の全ての減肉想定部位に必要な最小厚さまでの周軸方向一様減肉を考慮し、PLM耐震安全性評価（S₂地震力）及び耐震バックチェック（S_s地震力）の地震荷重による耐震安全性評価を行っている。

（「図1」、「表1」を参照）

表1 減肉耐震評価結果

節点 番号	地震力	1次応力 [MPa]			
		地震 以外	地震 1次	合計※ ¹	許容応力※ ² (0.9Su)
809	S ₂	103.9	162.9	267	380
	S _s		112.1	216	

※¹：整数値に切り上げ処理

※²：弾性範囲を超える状態を許容（Su：設計引張強さ）

表1より、地震時の1次応力はS₂地震時＞S_s地震時であるが、その理由を考察する。

【考察結果】

配管系の地震応答解析（スペクトルモーダル解析）に用いた床応答曲線を「図2」に示す。

S₂、S_s地震時の配管系の1次固有周期（配管系の多質点梁モデルによる固有値解析結果）に対応する応答加速度を「表2」に示す。

表2 主給水配管の評価用地震加速度の算出結果

地震力	配管系の固有周期 (減肉考慮) [sec]	応答加速度 [G]	
		X方向	Y方向
S ₂	1次モード：0.118	32.7	23.7
S _s	(建屋の1次固有周期：約0.11)	18.9	12.3

現行評価（PLM耐震安全性評価：S₁、S₂地震）における当該配管系の地震応答解析では、「原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601-1991）」に基づき、建屋1次固有周期制限を考慮した設計用減衰定数（下限値：0.5%）を適用している。

一方、当該配管系のS_s地震に対する地震応答解析では、「原子力発電所耐震設計技術規程（JEAC4601-2008）」に基づき、建屋1次固有周期制限の合理化及びJEAC4601-2008で規定する設計用減衰定数（3.0%）を適用可能であり、S₂地震時に比較して、1次固有周期に対応する応答加速度が低減（約40～50%程度）されるため、地震時の1次応力も約30%程度低減されている。

（「図2」を参照）

したがって、今回のケースについては、配管系の地震応答解析に適用する設計用減衰定数の合理化効果により応答加速度が低減され、評価結果の差異に現れたものと考える。

以上

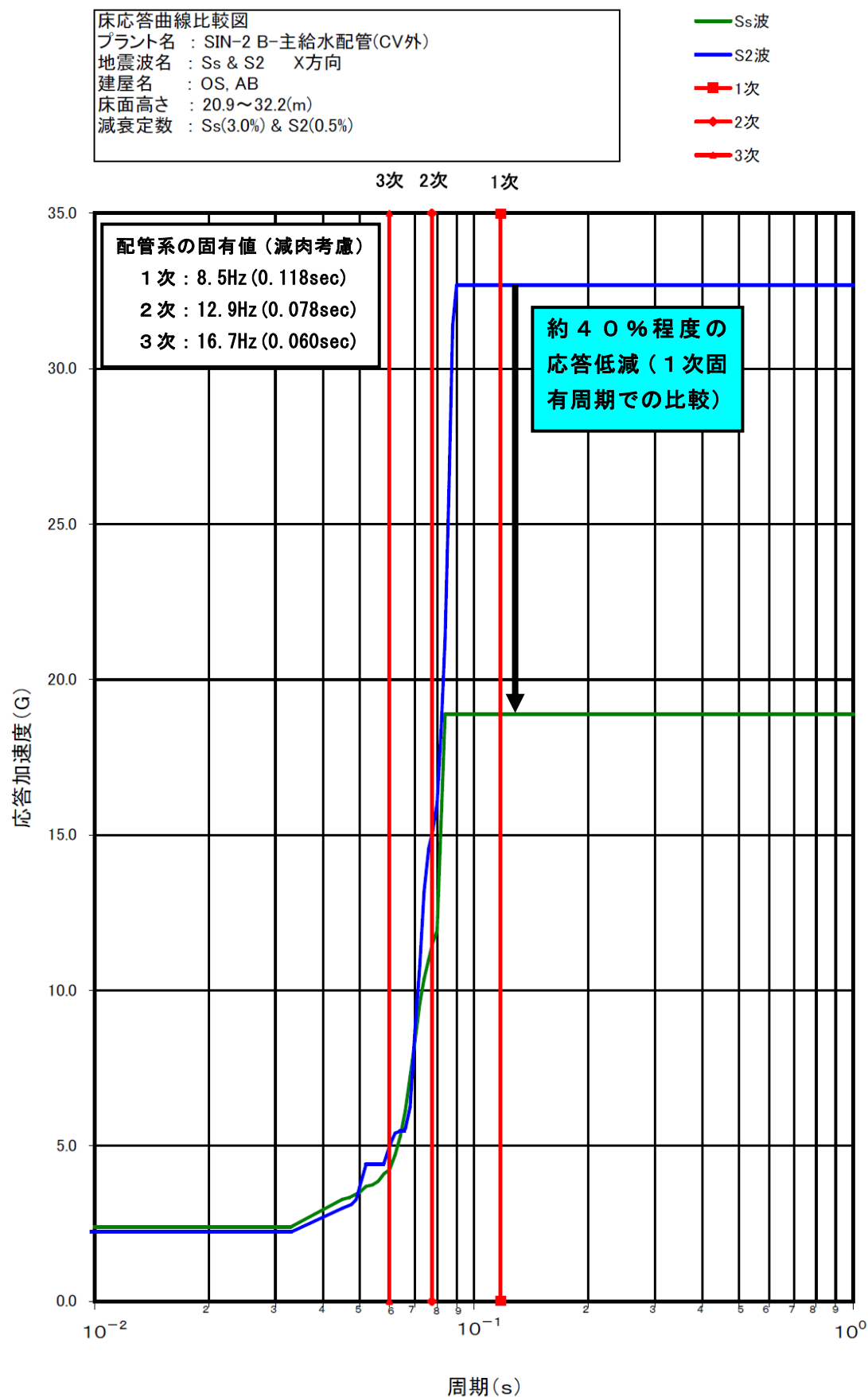


図2(1/2) 主給水系統配管 (B系統) の減肉耐震評価に用いた床応答曲線 (X方向)

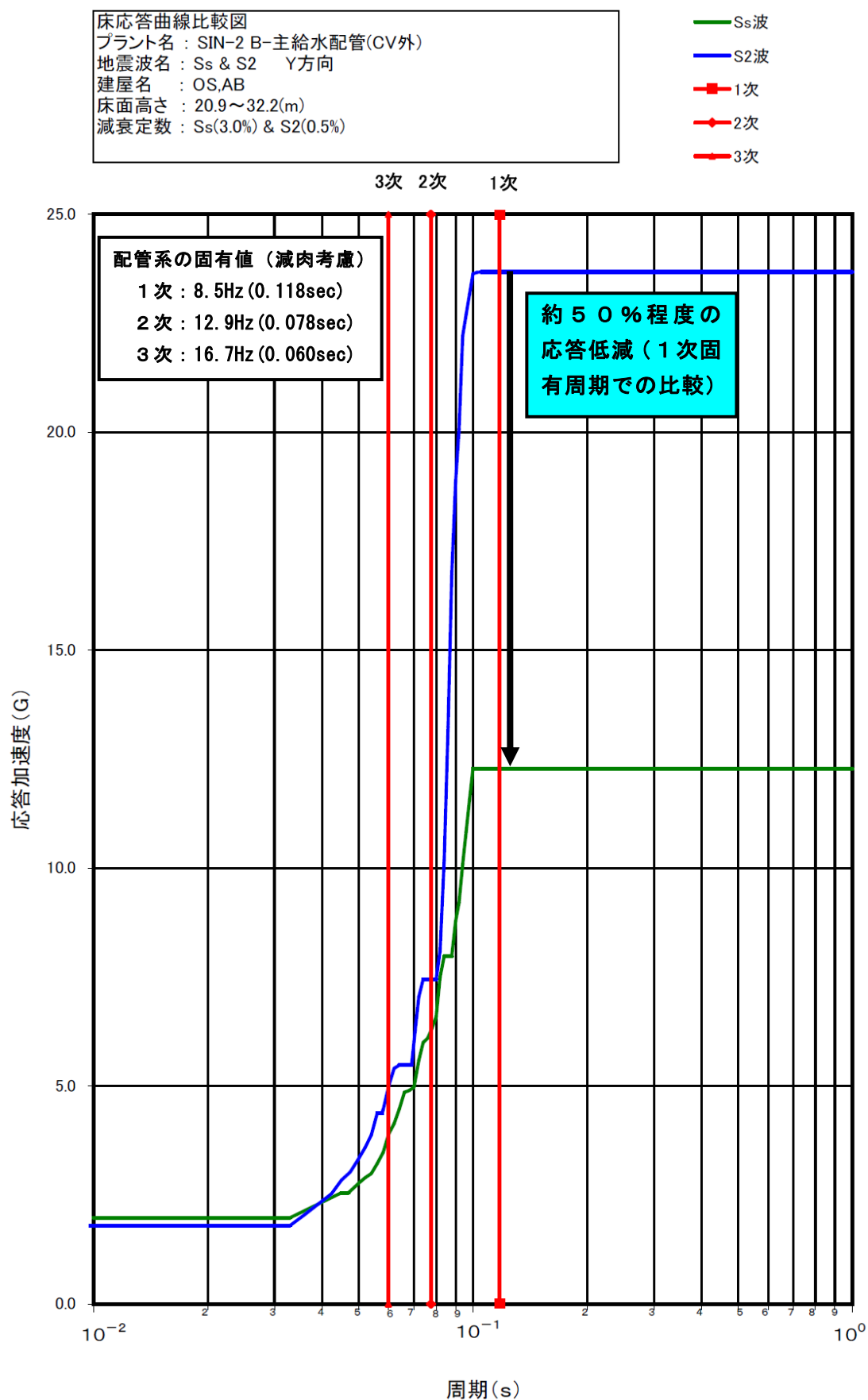


図2(2/2) 主給水系統配管(B系統)の減肉耐震評価に用いた床応答曲線(Y方向)