

本資料のうち、枠囲みの内容は
商業機密の観点から公開できま
せん。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-他-F-19-0040_改0
提出年月日	2021年 8月 19日

女川原子力発電所第2号機 使用済燃料貯蔵ラックの設計用減衰定数について (指摘事項に対する回答)

2021年8月19日
東北電力株式会社

前回審査会合(7/6)における指摘事項及び回答概要

- 第988回審査会合において、審査の中で論点として新たに整理された、使用済燃料貯蔵ラックの設計用減衰定数について説明し、以下の指摘があったことから、指摘事項に対する回答について説明する。

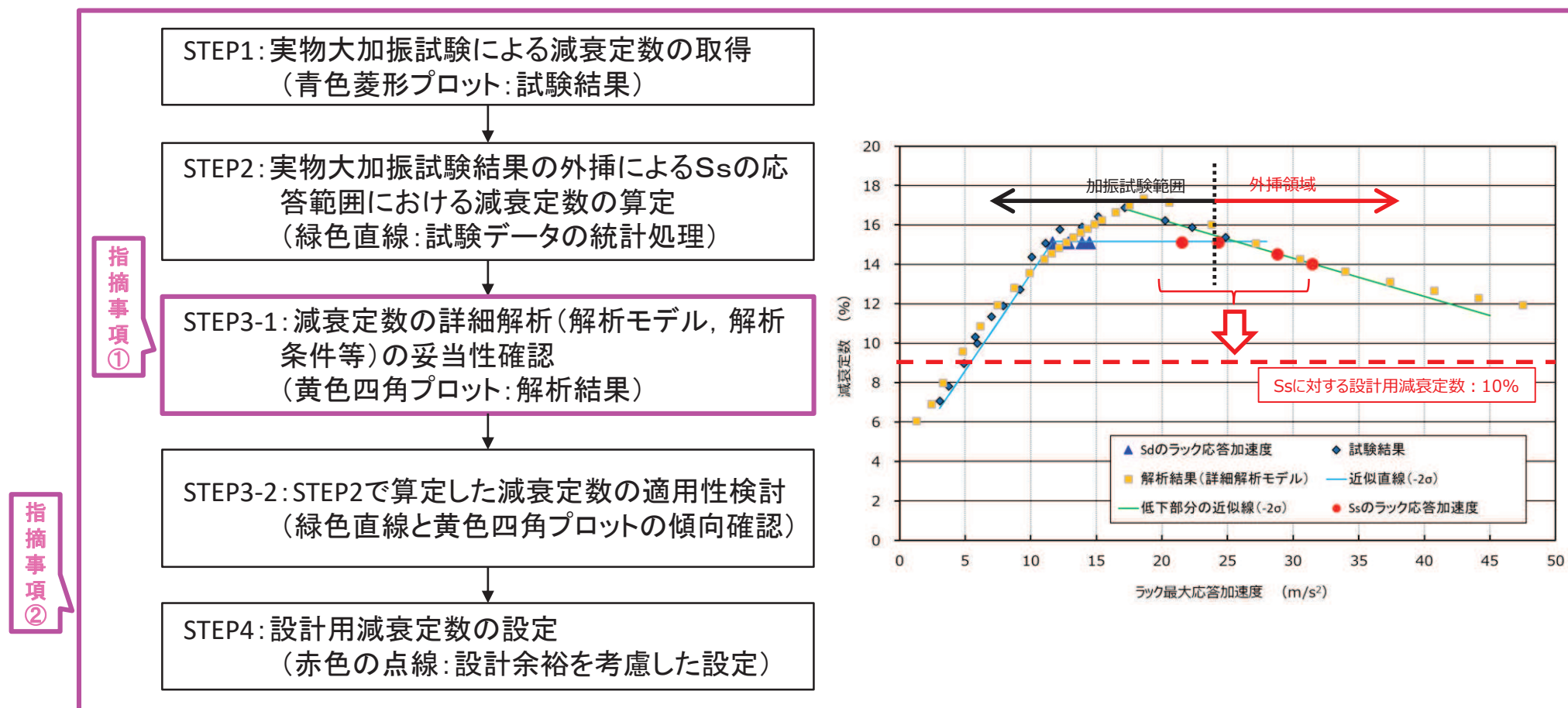
No.	実施日	指摘事項
1	2021年7月6日 第988回審査会合	<p>使用済燃料貯蔵ラックの減衰挙動に関する詳細解析について、以下の観点も含め、解析モデル及び解析条件の設定方法並びに減衰定数の算出方法の妥当性を整理して説明すること。その上で、改めて設計用減衰定数の設定の妥当性を整理して説明すること。</p> <ul style="list-style-type: none">➤ 流体－構造連成による燃料ラックの応答低減効果を減衰として扱わないことについて、応答倍率曲線を用いた減衰定数の算定における応答低減効果の除外方法を整理して説明すること。➤ 詳細解析モデルの解析条件のうち、締結ボルト剛性、ラック剛性、摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位等について、燃料ラックの構造及び加振試験データとの関係を含め、入力値の妥当性を説明すること。➤ 詳細解析モデルの解析条件のうち、燃料ラックの構造及び加振試験データ等から得られる値に幅があるものについては、入力値を変動させた場合の減衰定数への影響を説明すること。

前回審査会合(7/6)における指摘事項及び回答概要

No.	指摘事項	指摘事項に対する回答	記載箇所
①	使用済燃料貯蔵ラックの減衰挙動に関する詳細解析について、以下の観点も含め、解析モデル及び解析条件の設定方法並びに減衰定数の算出方法の妥当性を整理して説明すること。	<ul style="list-style-type: none"> 加振試験体及び燃料ラックの減衰要因を考慮し、試験結果に合わせるように解析条件等を設定して詳細解析の妥当性を確認した。 燃料ラックが非線形性(ラックベースと床面の摩擦等)を有するため、非線形性のある振動系の減衰算出に適した応答倍率法を適用しており、減衰定数の算出方法が妥当であることを確認した。 	P4 別紙1
①-1	流体-構造連成による燃料ラックの応答低減効果を減衰として扱わないことについて、応答倍率曲線を用いた減衰定数の算定における応答低減効果の除外方法を整理して説明すること。	<ul style="list-style-type: none"> 流体-構造連成効果を含んだ刺激関数$\beta\phi$と減衰定数ζは、各々独立した変数であり、流体-構造連成による応答低減効果は減衰として扱わない。 応答倍率法においては、ラック頂部の応答倍率Q及び刺激関数$\beta\phi$は、減衰定数ζにほぼ影響しないことを確認した。 	P5, 6
①-2	詳細解析モデルの解析条件のうち、締結ボルト剛性、ラック剛性、摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位等について、燃料ラックの構造及び加振試験データとの関係を含め、入力値の妥当性を説明すること。	<ul style="list-style-type: none"> 解析条件に係る入力諸元を、試験条件等から一意に定まる10項目と、試験結果に合うよう調整して設定する5項目に分類した。 それぞれについて燃料ラックの構造及び加振試験データ等に基づき、設定方法や入力値の妥当性を確認した。 試験結果に合うよう調整して設定する5項目の入力諸元が、現実的に取り得る範囲内の値であり妥当であることを確認した。 	P7-10 別紙2
①-3	詳細解析モデルの解析条件のうち、燃料ラックの構造及び加振試験データ等から得られる値に幅があるものについては、入力値を変動させた場合の減衰定数への影響を説明すること。	<ul style="list-style-type: none"> 試験結果に合うよう調整して設定する5項目の入力諸元について、現実的に取り得る範囲内での変動影響を考慮しても、減衰定数の低下量は最大で2.36%であることを確認した。 	P11-17
②	設計用減衰定数の設定の妥当性を整理して説明すること。	<ul style="list-style-type: none"> 加振試験結果による近似直線(詳細解析による減衰定数)に対して、余裕を考慮して燃料ラックの設計用減衰定数を設定した。 <ul style="list-style-type: none"> 基準地震動S_sに対して10% 弾性設計用地震動S_dに対して7% 他設備の設計用減衰定数の設定事例等は、今回の設計用減衰定数の設定の妥当性を補足するものである。 	P18-23 別紙3

1. 女川2号機使用済燃料貯蔵ラックの設計用減衰定数設定の流れ

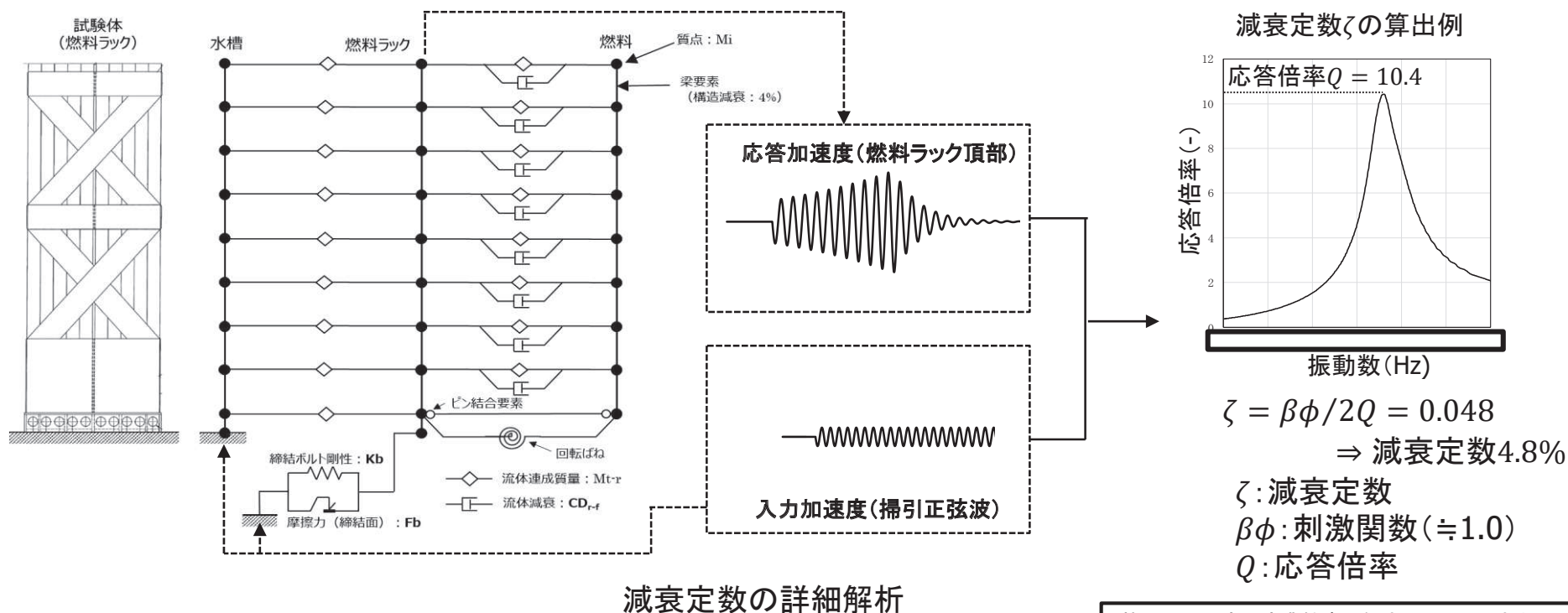
- 女川2号機の使用済燃料貯蔵ラック(以下「燃料ラック」という。)の耐震設計に適用する設計用減衰定数設定に係る流れを下図に示す。
- 機器・配管系の設計用減衰定数の設定については、「原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1991 追補版」(以下「JEAG4601」という。)に「試験等によりその妥当性が確認された場合」と規定されており、試験結果に解析の検討を交えて設定した配管系の実例がある。それを踏まえて、女川2号機の燃料ラックの設計用減衰定数を下記のステップで設定している。



2. 指摘事項①(①-1, ①-2, ①-3)に対する回答

【減衰定数の詳細解析(解析モデル, 解析条件, 減衰定数の算出方法)の妥当性確認】

- 詳細解析の目的は、加振試験の外挿領域における燃料ラックの減衰定数が急激に低下するものでないこと及び減衰定数の程度感を確認することにより、実物大加振試験データの外挿によるSsの応答範囲における減衰定数の適用性を示すものである。
- 減衰定数の詳細解析では、加振試験体を多質点系でモデル化し、燃料ラックの減衰要因と考えられる減衰メカニズム(構造減衰, 流体減衰, 摩擦減衰)を考慮し、加振試験結果の減衰挙動に合わせるように解析条件を設定して解析を実施しており、妥当である(指摘事項①-1, ①-2, ①-3の回答参照)。
- 減衰定数の算出方法は、燃料ラックが非線形性(ラックベースと床面の摩擦等)を有するため、非線形性のある振動系の減衰算出に適した応答倍率法を適用しており、妥当である(詳細は別紙1参照)。



3. 指摘事項①－1に対する回答(1/2)

【減衰定数の詳細解析(解析モデル, 解析条件, 減衰定数の算出方法)の妥当性確認】

流体－構造連成による応答低減効果の扱い(1/2)

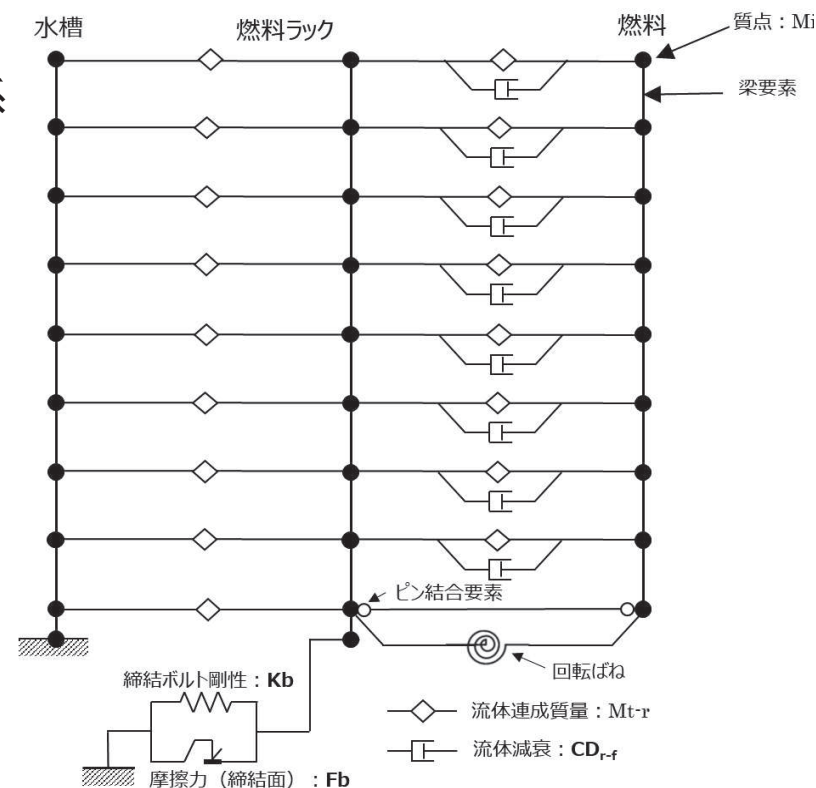
- 減衰定数の詳細解析では, 加振試験体を可能な限り忠実に表現するため, 構造物間の流体の質量による応答低減効果を流体－構造連成質量(質量マトリクス $[M]$ の非対角質量)としてモデル化している。
- 詳細解析の応答倍率曲線から求まる燃料ラック頂部の応答倍率 Q は, 減衰定数 ζ の算出にあたり, 1自由度系における応答倍率 Q_1 を仮定すると, 刺激関数 $\beta\phi$ (質量マトリクス $[M]$ として考慮)を用いて, 下式で表される。

$$Q = \beta\phi Q_1$$

- また, 1自由度系における応答倍率 Q_1 と減衰定数 ζ の関係は, 下式で表される。

$$\zeta = \frac{1}{2Q_1}$$

- 以上のことから, 流体－構造連成に関連する刺激関数 $\beta\phi$ (質量マトリクス $[M]$ として考慮)と減衰定数 ζ は, 各々独立した変数であるため, 流体－構造連成による応答低減効果を減衰として扱わない。
- なお, 加振試験の減衰定数の算定においても同様である。



3. 指摘事項①-1に対する回答(2/2)

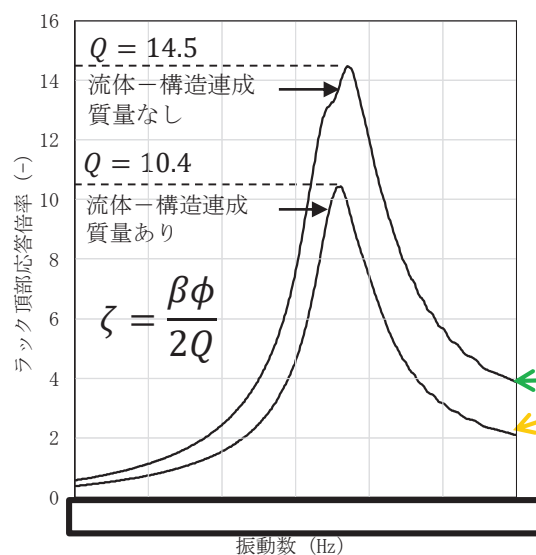
【減衰定数の詳細解析(解析モデル, 解析条件, 減衰定数の算出方法)の妥当性確認】

流体-構造連成による応答低減効果の扱い(2/2)

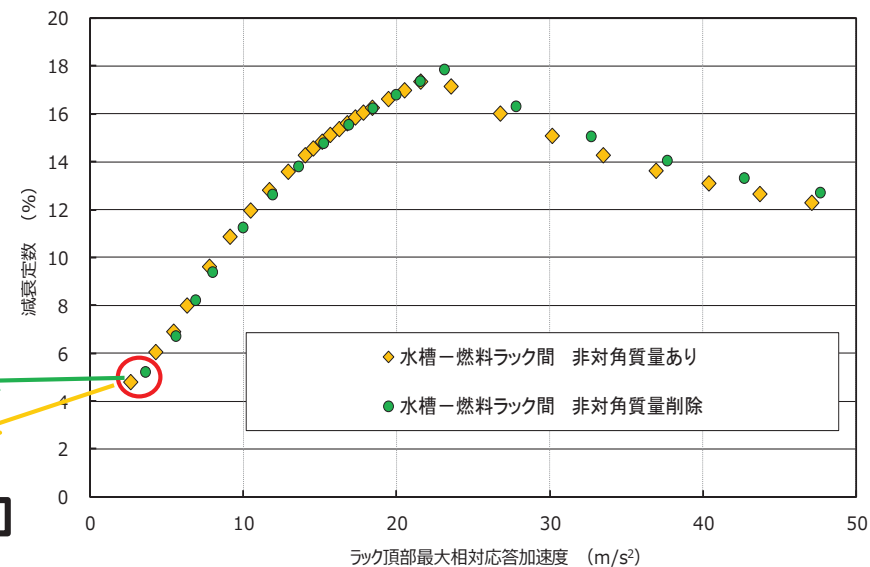
- ラック頂部の応答倍率 Q 及び刺激関数 $\beta\phi$ は, 流体-構造連成による応答低減効果によって変化するが, 応答倍率曲線を用いた減衰定数の算定(応答倍率法)による減衰定数 ζ の算出式上, 分母と分子の関係にあるため, 減衰定数 ζ にはほぼ影響しない。
- 上記に係る定量的な検討として, 詳細解析モデルにおける流体-構造連成質量(水槽と燃料ラック間)を考慮せずに解析を実施した結果, 減衰定数と応答加速度の関係に大きな差異はないことを確認した。

	流体-構造連成質量あり	流体-構造連成質量なし
応答倍率 $Q(-)$	10.4	14.5
応答加速度 (m/s^2)	2.6	3.6
刺激係数 $\beta(-)$	0.97	1.55
固有ベクトル $\phi(-)$	1.0	1.0
減衰定数 $\zeta(\%)$	4.7	5.3

流体-構造連成質量
に対する影響検討結果



ラック頂部の応答倍率比較



減衰定数と応答加速度との関係比較

4. 指摘事項①－2に対する回答(1/4)

【減衰定数の詳細解析(解析モデル, 解析条件, 減衰定数の算出方法)の妥当性確認】

解析条件に係る入力諸元の分類

- 解析条件に係る入力諸元は, 下表のとおり, ①試験条件等から一意に定まるもの(10項目), ②試験結果に合うよう調整して設定するもの(5項目)に分類される。
- ①試験条件等から一意に定まる入力諸元は, その設定方法(理論式, 構造を含む試験条件及び加振試験結果)が明確であるため妥当である(入力諸元の詳細は別紙2参照)。
 - ②試験結果に合うよう調整して設定する入力諸元は, 現実的に取り得る範囲内の値であるため, 妥当である(入力諸元の詳細は次頁以降参照)。

記号	解析条件に係る入力諸元	①試験条件等から一意に定まるもの	②試験結果に合うよう調整して設定するもの
M_r	燃料ラック質量	○	
M_f	燃料質量	○	
M_t	水槽質量	○	
M_{r-f}	燃料ラック－燃料間連成質量	○	
M_{t-r}	水槽－燃料ラック間連成質量	○	
Kb_{max}	締結ボルト剛性		○
EI_r	燃料ラック剛性(曲げ剛性)		○
EI_f	燃料の剛性(曲げ剛性)	○	
EI_t	水槽の剛性(曲げ剛性)	○	
K_θ	燃料ラック-燃料間の回転ばね	○	
Cr	燃料ラックの構造減衰	○	
Fb_{max}	ボルト締結面摩擦力		○
CD_{r-f}	燃料ラック－燃料間流体減衰	○	
δf	摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位		○
δk	締結ボルトばね剛性の振幅依存性を定義する最大変位		○

4. 指摘事項①－2に対する回答(2/4)

【減衰定数の詳細解析(解析モデル, 解析条件, 減衰定数の算出方法)の妥当性確認】

②試験結果に合うよう調整して設定する入力諸元(5項目)の考え方

a. ボルト締結面摩擦力 Fb_{max}

- 燃料ラック下端のボルト締結面に, 燃料ラック及び燃料の水中質量 W とボルト締付力 Pb が押付力 P として加わることに
より, ボルト締結面の摩擦力 Fb_{max} は摩擦係数 μ から以下より求まる。

$$Fb_{max} = \mu P = \mu (W + Pb)$$

- ボルト締付力 Pb は, 締付トルク T , トルク係数 K , ねじの呼び径 D , ボルト本数 Nb から以下より求まる。

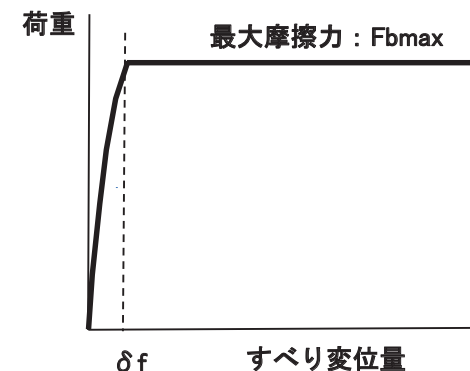
$$Pb = NbT / KD$$

- 解析では, 締付トルク T は供試体のトルク管理値 , トルク係数 K は潤滑なしの一般値 , 摩擦係数 μ は水膜による潤滑効果を考慮し一般値より低い値 を設定し, 上記の摩擦係数 μ 及び押付け力 P に対して, 試験結果から得られた減衰特性を再現するように修正係数 Kc を調整し, 以下の式でボルト締結面摩擦力 Fb_{max} を設定した。

$$Fb_{max} = Kc \mu P$$

b. 摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位 δf

- 燃料ラック下端のボルト締結面に発生する摩擦力は, δf を境に高振幅側では最大摩擦力 Fb_{max} で一定となり, 低振幅側では変位に従って最大減衰力に向かい増加する設定とした。
- これは, 既往知見*を踏まえ, ボルト締結面に作用する力が最大摩擦力 Fb_{max} に到達する以前から先行的に微小すべり(予すべり)が発生することをモデル化。
- 最大摩擦力 Fb_{max} に到達する変位を最大変位 δf とし, 試験結果から得られた減衰特性を再現するように設定した。



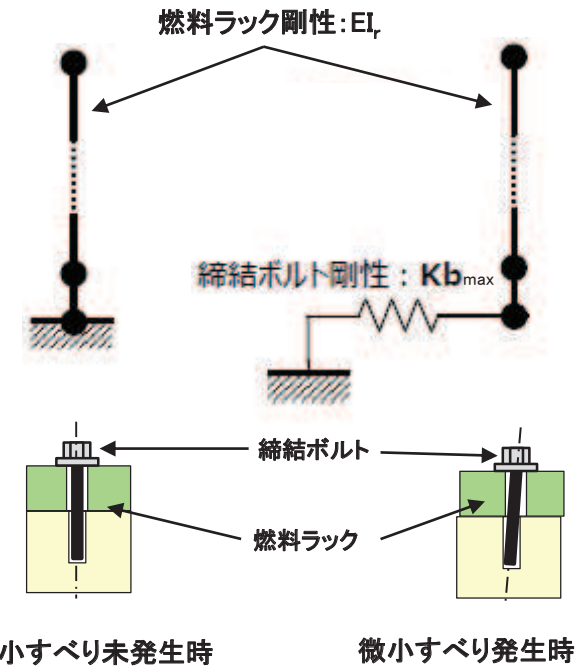
* :「接合面を有する系の減衰振動の解析」, 新野ら, 日本機械学会論文集(C編)49巻448号(1983)

4. 指摘事項①-2に対する回答(3/4)

【減衰定数の詳細解析(解析モデル, 解析条件, 減衰定数の算出方法)の妥当性確認】

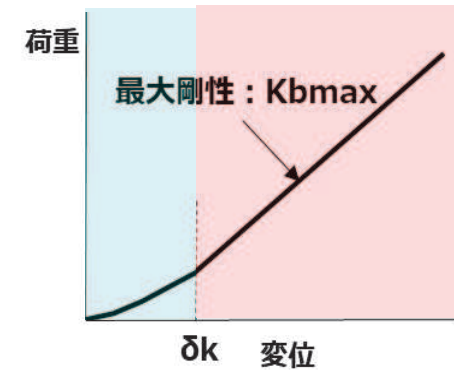
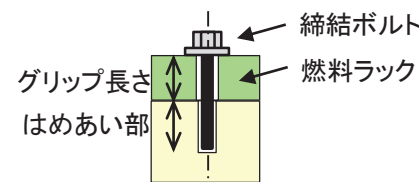
c. 締結ボルト剛性 Kb_{max}

- 締結ボルトの剛性は、微小すべり未発生時は剛体として扱い、燃料ラック下端の締結面に微小すべりが生じた際は、水平方向の締結ボルトの剛性と燃料ラックの剛性を合計した剛性(直列ばね)が作用するようにモデル化。
- 微小すべりが発生し、締結ボルトの剛性と燃料ラックの剛性が直列ばねとして働いている際の共振振動数は、応答が大きい領域の試験結果(程度)を考慮する。
- 加振試験の共振振動数は、応答加速度が増加するにつれて低下傾向を示していることから、まで低下するとし、締結ボルト剛性 Kb_{max} を設定した。



d. 締結ボルトばね剛性の振幅依存性を定義する最大変位 δk

- 締結ボルトの傾きを考慮して、最大変位 δk を設定する。
- 締結ボルト(M45)のおねじとめねじの外径公差による両隙間は平均0.338mmである。
- はめあい部(55mm)の下端と、はめあい部上端部(締結面)で締結ボルトが隙間によって傾き、さらにねじ締結部のグリップ長さ(61.5mm)からこの傾きによるボルト下面の変位量を求め、これを締結ボルトばねの最大変位 δk を設定した。



荷重とすべり変位の関係

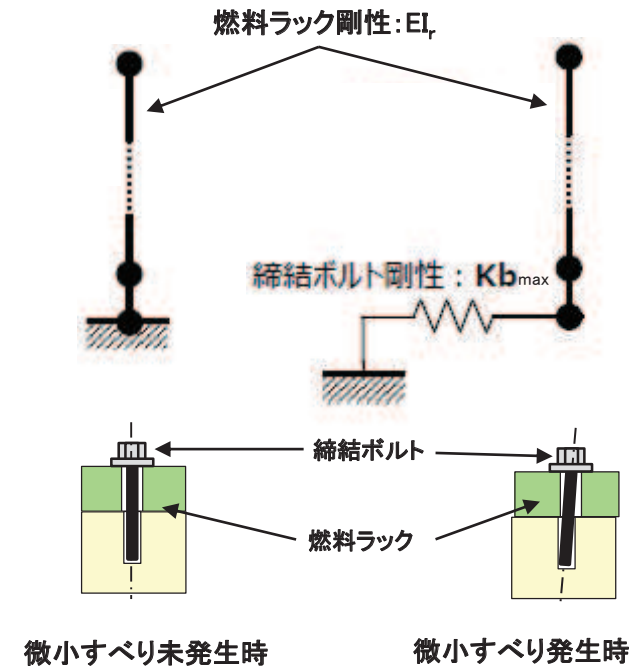
枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4. 指摘事項①-2に対する回答(4/4)

【減衰定数の詳細解析(解析モデル, 解析条件, 減衰定数の算出方法)の妥当性確認】

e. 燃料ラックの剛性(曲げ剛性) EI_r

- 燃料ラックの断面二次モーメント I_r 及び縦弾性係数 E_r から等価剛性を算出し, 試験結果から得られた共振振動数を考慮して, 微小すべり未発生時(入力加速度がゼロ)における燃料ラックの曲げ剛性 EI_r を設定する。
- 微小すべり未発生時(入力加速度がゼロ)の共振振動数は, 応答が小さい領域の試験結果(程度)を考慮する。
- 締結ボルト剛性 Kb_{max} の設定と同様, 試験結果の共振振動数は応答加速度が増加するにつれて低下傾向を示していることから, 試験結果よりやや高めのに設定した。



5. 指摘事項①－3に対する回答(1/7)

【減衰定数の詳細解析(解析モデル, 解析条件, 減衰定数の算出方法)の妥当性確認】

解析条件の入力値を変動させた場合の減衰定数への影響確認方針

- 解析条件に係る入力諸元は, ①解析条件等から一意に定まるもの(10項目), ②試験結果に合うよう調整して設定するもの(5項目)に分類される。
- ②試験結果に合うよう調整して設定する入力諸元(5項目)については, 現実的に取り得る範囲内で変動し得ると考えられる。
- このことから, これらの入力諸元について, その変動範囲で変化させ, 試験の外挿領域における減衰定数とラック頂部相対応答加速度の関係が, 大きく変化した挙動とならないこと確認する。

記号	解析条件に係る入力諸元	単位	入力値			変動範囲の考え方
			基準ケース	影響検討ケース		
				下限	上限(上側)	
Fb_{max}	ボルト締結面摩擦力	N				締結ボルトの締付トルク管理値の上限と下限
δf	摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位	mm				試験結果に合う微小すべり変位量(1mm以下を目安)
Kb_{max}	締結ボルト剛性	N/m				微小すべり発生後の共振振動数が試験範囲内と範囲外
δk	締結ボルトばね剛性の振幅依存性を定義する最大変位	mm				ボルト締結部の隙間による傾きで発生し得る最小値と中間値の変位量
EI_r	燃料ラックの剛性(曲げ剛性)	Nm ²				微小すべり未発生時の共振振動数が試験範囲内と範囲外

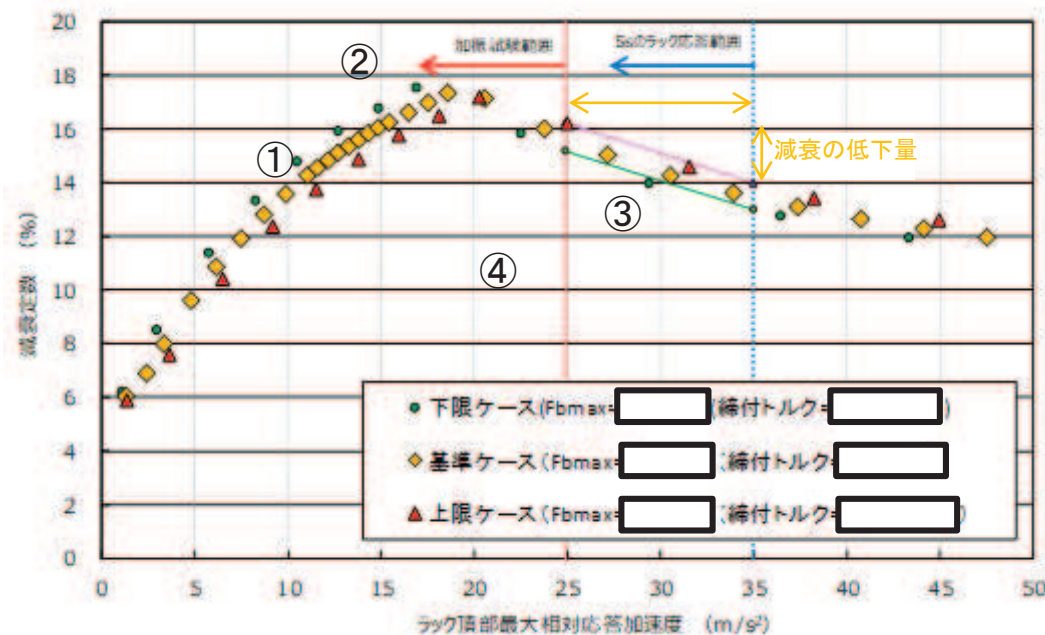
注記*: 変動幅が小さいため, 想定を超えた範囲を極端なケースとして設定している。

5. 指摘事項①-3に対する回答(2/7)

【減衰定数の詳細解析(解析モデル, 解析条件, 減衰定数の算出方法)の妥当性確認】

解析条件の入力値を変動させた場合の減衰定数への影響確認結果

- ▶ 詳細解析の目的は, 加振試験の外挿領域における燃料ラックの減衰定数が急激に低下するものでないこと及び減衰定数の程度感を確認することにより, 実物大加振試験データの外挿による S_s の応答範囲における減衰定数の適用性を示すものであり, これは, 試験結果の減衰定数とラック頂部相対応答加速度の関係を概ね表現できていることを前提としている。
- ▶ 影響確認では, 「試験の外挿領域におけるデータの右肩下がりの傾向」だけでなく, 「ラックの応答が小さい領域におけるデータの右肩上がりの傾向」, 「減衰定数の最大値」, 「すべてのデータプロットから成るグラフの概形」を加えた4つの観点で確認した。
- ▶ 以降, 影響確認結果を示す。



影響確認の4つの観点:

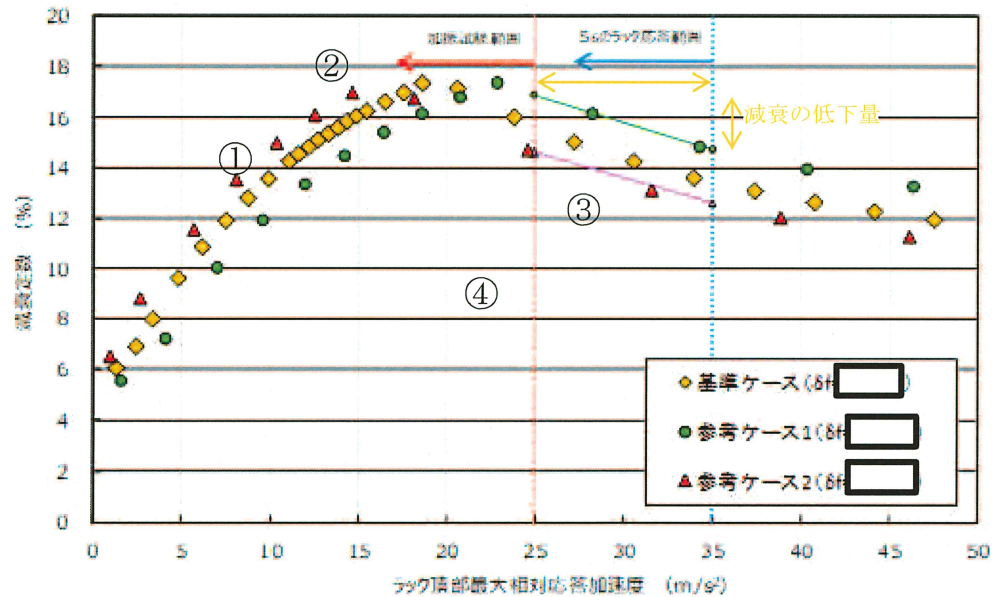
- ①右肩上がりの勾配: 若干低下する
- ②減衰定数の最大値: ほとんど変わらない
- ③右肩下がりの勾配: ほとんど変わらない
- ④グラフの概形: ほぼ同様である

減衰の低下量: 最大2.25%(上限ケース)

入力値変動の影響(ボルト締結面摩擦力 $F_{b_{max}}$)

5. 指摘事項①-3に対する回答(3/7)

【減衰定数の詳細解析(解析モデル, 解析条件, 減衰定数の算出方法)の妥当性確認】



影響確認の4つの観点:

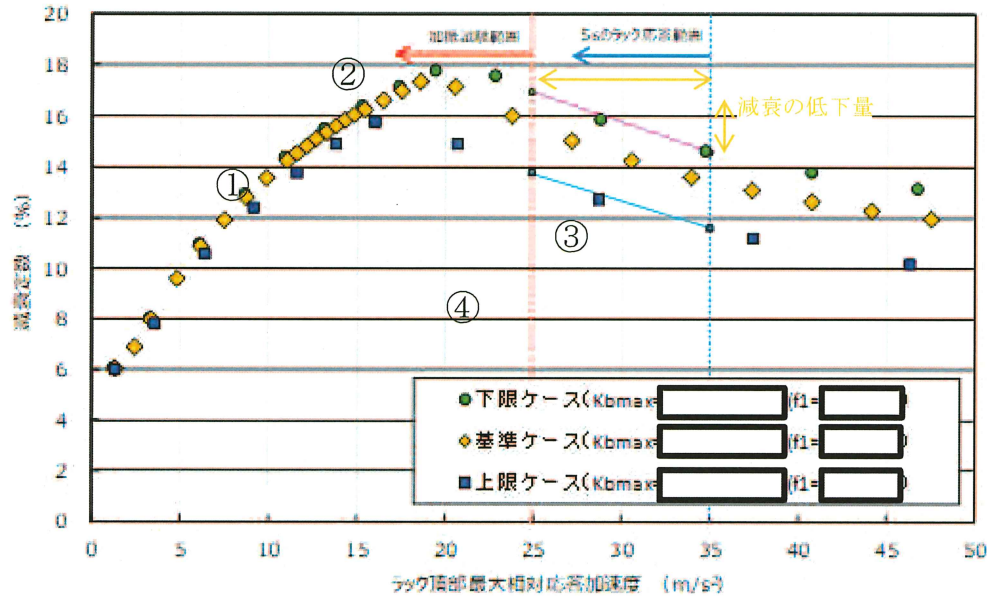
- ①右肩上がりの勾配: 増加する
- ②減衰定数の最大値: ほとんど変わらない
- ③右肩下がりの勾配: ほとんど変わらない
- ④グラフの概形: ほぼ同様である

減衰の低下量: 最大2.23%(標準ケース)

入力値変動の影響(摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位 δf の影響)

5. 指摘事項①-③に対する回答(4/7)

【減衰定数の詳細解析(解析モデル, 解析条件, 減衰定数の算出方法)の妥当性確認】



影響確認の4つの観点:

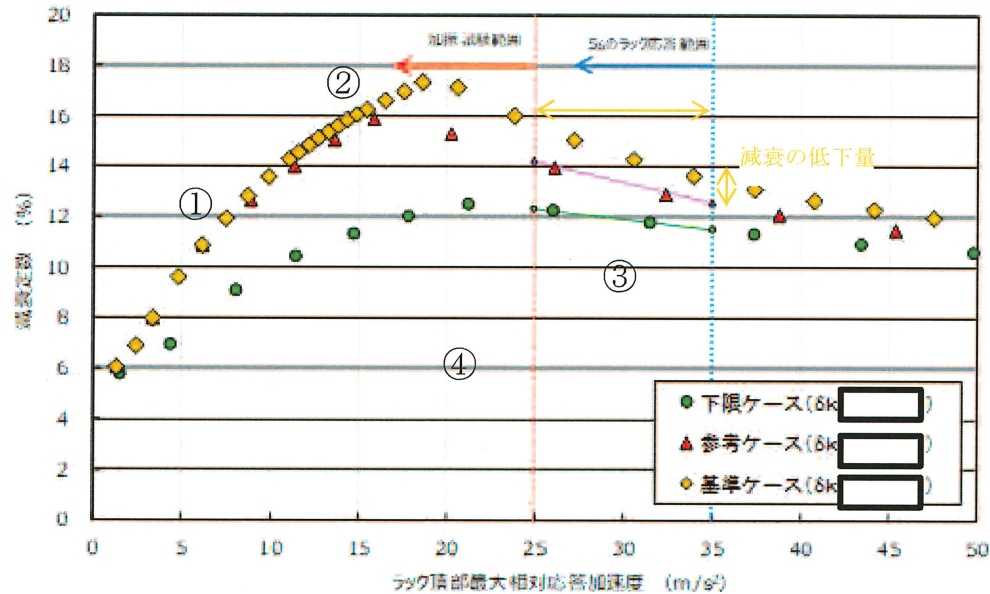
- ①右肩上がりの勾配: ほとんど変わらない
- ②減衰定数の最大値: 低下する
- ③右肩下がりの勾配: ほとんど変わらない
- ④グラフの概形: ほぼ同様である

減衰の低下量: 最大2.36%(上限ケース)

入力値変動の影響(締結ボルト剛性 $K_{b_{max}}$)

5. 指摘事項①-3に対する回答(5/7)

【減衰定数の詳細解析(解析モデル, 解析条件, 減衰定数の算出方法)の妥当性確認】



影響確認の4つの観点:

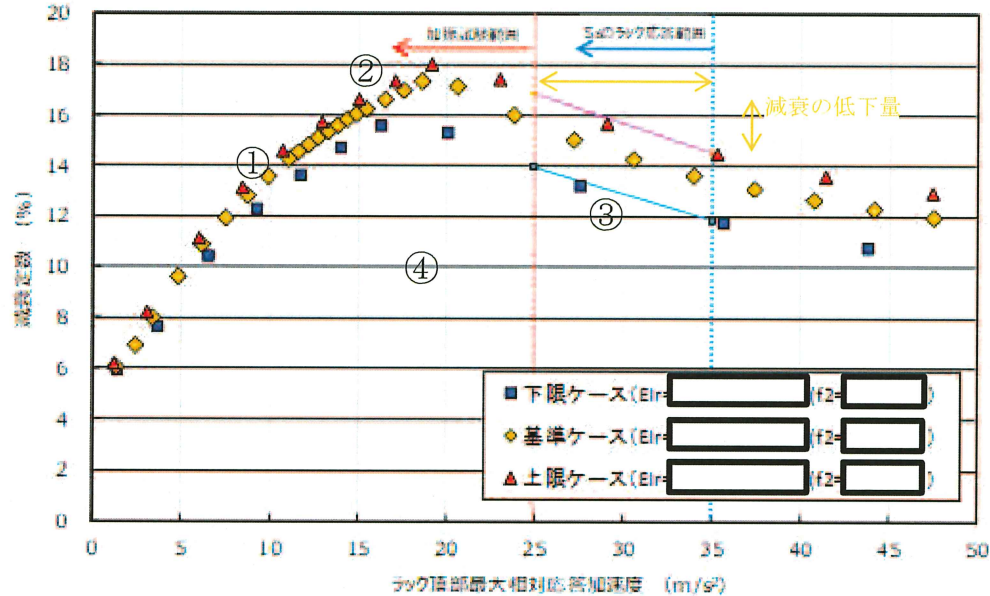
- ①右肩上がりの勾配: 増加する
- ②減衰定数の最大値: 増加する
- ③右肩下がりの勾配: 増加する
- ④グラフの概形: 変化する

減衰の低下量: 最大2.23%(標準ケース)

入力値変動の影響(締結ボルトばね剛性の振幅依存性を定義する最大変位 δk)

5. 指摘事項①-3に対する回答(6/7)

【減衰定数の詳細解析(解析モデル, 解析条件, 減衰定数の算出方法)の妥当性確認】



影響確認の4つの観点:

- ①右肩上がりの勾配: ほとんど変わらない
- ②減衰定数の最大値: 増加する
- ③右肩下がりの勾配: ほとんど変わらない
- ④グラフの概形: ほぼ同様である

減衰の低下量: 最大2.35%(上限ケース)

入力値変動の影響(燃料ラックの代表剛性(胴部中央の曲げ剛性)EIr)

5. 指摘事項①-3に対する回答(7/7)

【減衰定数の詳細解析(解析モデル, 解析条件, 減衰定数の算出方法)の妥当性確認】

解析条件の入力値を変動させた場合の減衰定数への影響確認結果のまとめ

- 減衰定数とラック頂部最大相対加速度の関係は、加速度が大きくなるにつれて減衰定数は漸増(右肩上がり)し、最大となったのち、漸減(右肩下がり)しながらある一定値に漸近していく全体の傾向は共通である。
- 試験の外挿領域において、減衰定数とラック頂部最大相対加速度の関係を示す勾配は、女川2号機のSsと同程度の加速度領域(約25~30m/s²)で急減することはない。
- 試験の外挿領域で、女川2号機のSsの応答加速度範囲における減衰定数の低下量は、諸元の値をそれぞれ変化させても、最大2.36%であり、入力値の変動による影響も小さい。

入力諸元	入力値 (基準ケース)	変動範囲	入力値 (影響検討ケース)		減衰定数への影響 (入力諸元の値を大きくした場合として記載)				減衰低下量
			下限	上限(上側)	①漸増傾向の勾配(減衰の立上り領域)	②減衰定数の最大値	③漸減傾向の勾配(減衰の低下領域)	④減衰-加速度の曲線形状(グラフの概形)	
Fbmax 【12】	ボルト締結面摩擦力	締結ボルトの締付トルク管理値の上限と下限 試験結果に合う微小すべり変位量(1mm以下を目安) 微小すべり発生後の共振振動数が試験範囲内と範囲外 ボルト締結部の隙間による傾きで発生し得る最小値と中間値の変位量 微小すべり未発生時の共振振動数が試験範囲内と範囲外			漸増傾向(右肩上がり)の勾配が若干低下する	減衰定数の最大値はほとんど変わらない	漸減傾向(右肩下がり)の勾配はほとんど変わらない	グラフの概形は同様である	2.19% ~ 2.25%
δf 【14】	摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位				漸増傾向(右肩上がり)の勾配が増加する	減衰定数の最大値はほとんど変わらない	漸減傾向(右肩下がり)の勾配はほとんど変わらない	グラフの概形はほぼ同様である	2.02% ~ 2.15%
Kbmax 【6】	締結ボルト剛性				漸増傾向(右肩上がり)の勾配はほとんど変わらない	減衰定数の最大値が低下する	漸減傾向(右肩下がり)の勾配はほとんど変わらない	グラフの概形は同様である	2.17% ~ 2.36%
δk 【15】	締結ボルトばね剛性の振幅依存性を定義する最大変位				漸増傾向(右肩上がり)の勾配が増加する	減衰定数の最大値が増加する	減衰定数の最大値が増加することで漸減傾向(右肩下がり)の勾配が増加する	グラフの概形が大きく変化する	0.81% ~ 1.67%
Elr 【7】	燃料ラックの剛性				漸増傾向(右肩上がり)の勾配はほとんど変わらない	減衰定数の最大値が増加する	漸減傾向(右肩下がり)の勾配はほとんど変わらない	グラフの概形はほぼ同様である	2.12% ~ 2.35%

注記*: 変動幅が小さいため、想定を超えた範囲を極端なケースとして設定している。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

6. 指摘事項②に対する回答(1/6)

【設計用減衰定数の設定】

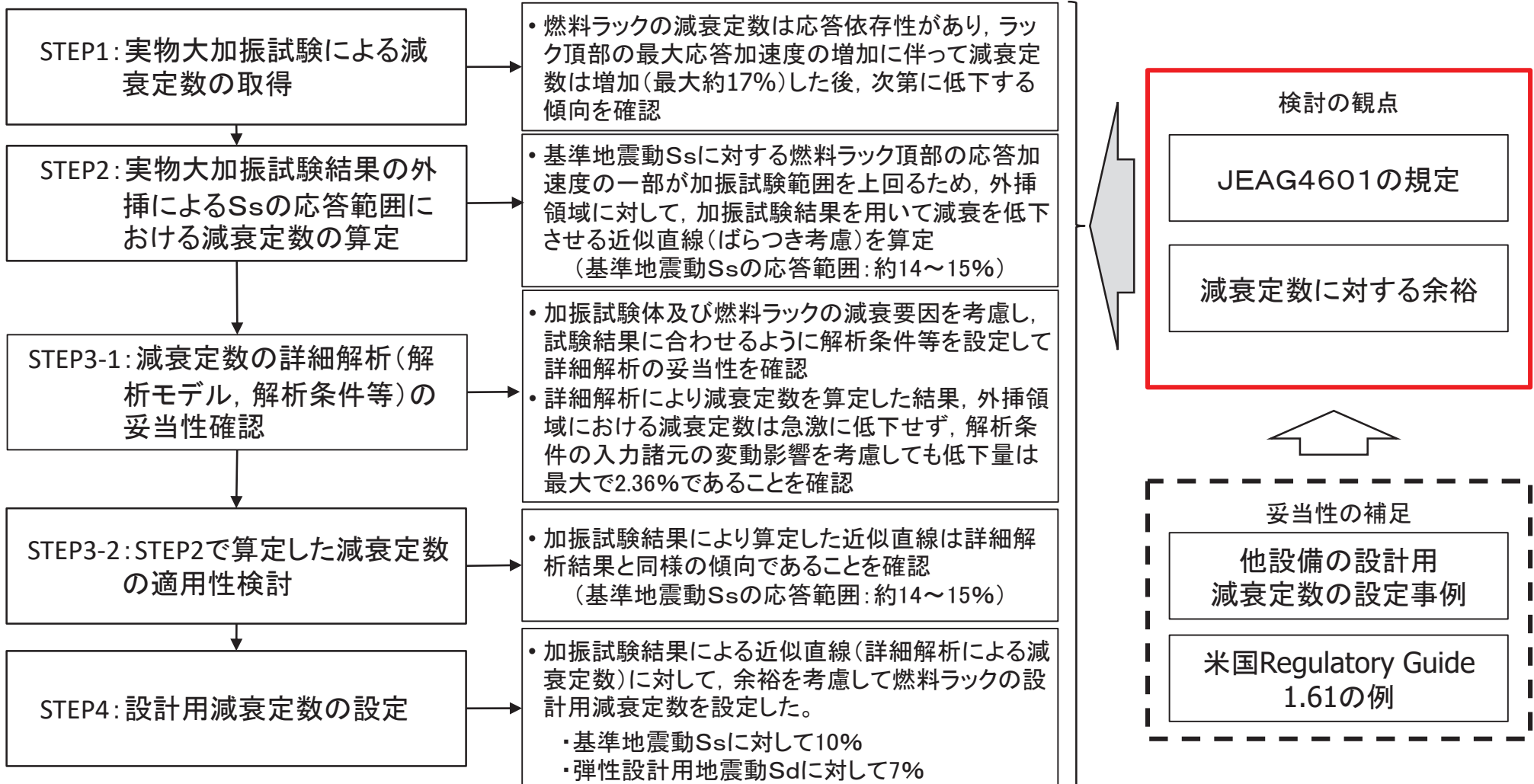
(1) 設計用減衰定数設定の妥当性の検討

- 設計用減衰定数設定に係る各STEPにおける検討結果を踏まえ、今回工認で設定した燃料ラックの設計用減衰定数について、以下に示す観点から妥当性を検討する。

設計用減衰定数設定に係るアプローチ

各STEPでの検討結果(概要)

妥当性の検討

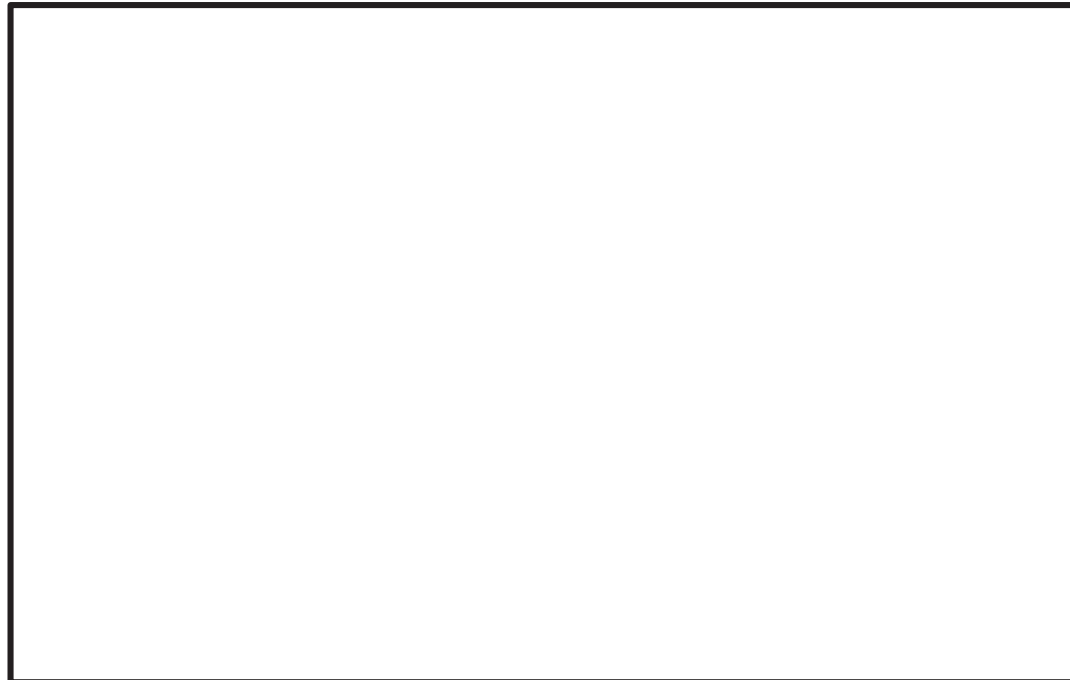


6. 指摘事項②に対する回答(2/6)

【設計用減衰定数設定の妥当性】

JEAG4601の規定

- 個別の設計用減衰定数の設定方法については、「原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1991 追補版 第6章 1.機器・配管系の設計用減衰定数」に記載され、その経緯及び内容の詳細は、「JEAC 4601-2008 参考資料4.10 水平方向及び鉛直方向の設計用減衰定数」により詳述されている。
- この中で、配管系の設計用減衰定数は、『学識経験者、電気事業者、プラントメーカーで構成される「原子力発電所ダンピング問題研究会」(昭和52年発足)において試験研究結果に基づき策定された減衰推算法をもとに、実機配管系の解析及び検討を行い、設計用減衰定数が定められた』とあり、試験結果に解析の検討を交えて設計用減衰定数を設定した実例がある。
- よって、女川2号機の燃料ラックの今回工認において、試験結果に解析の検討を交えて設定した設計用減衰定数は妥当である。

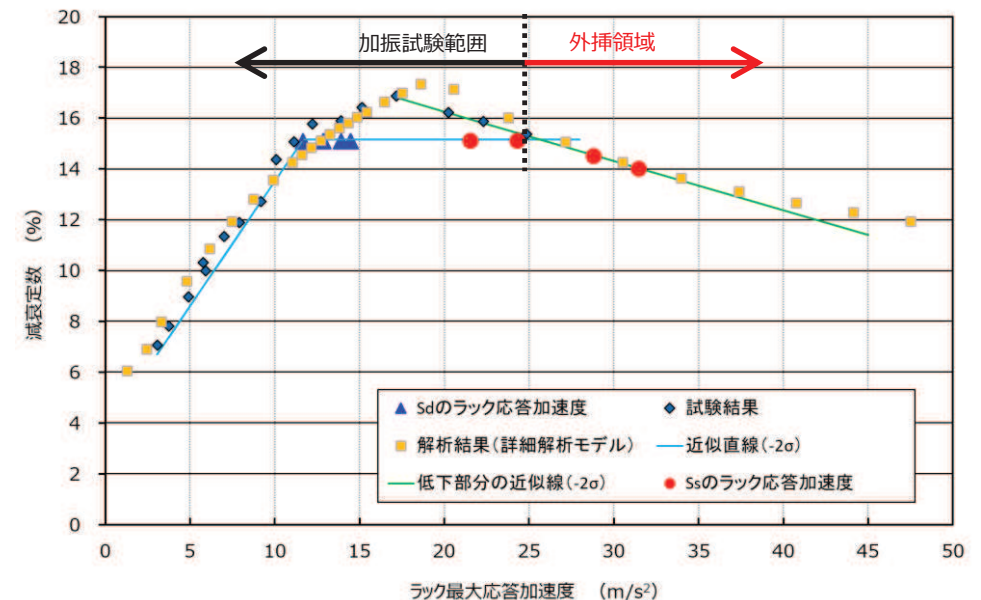
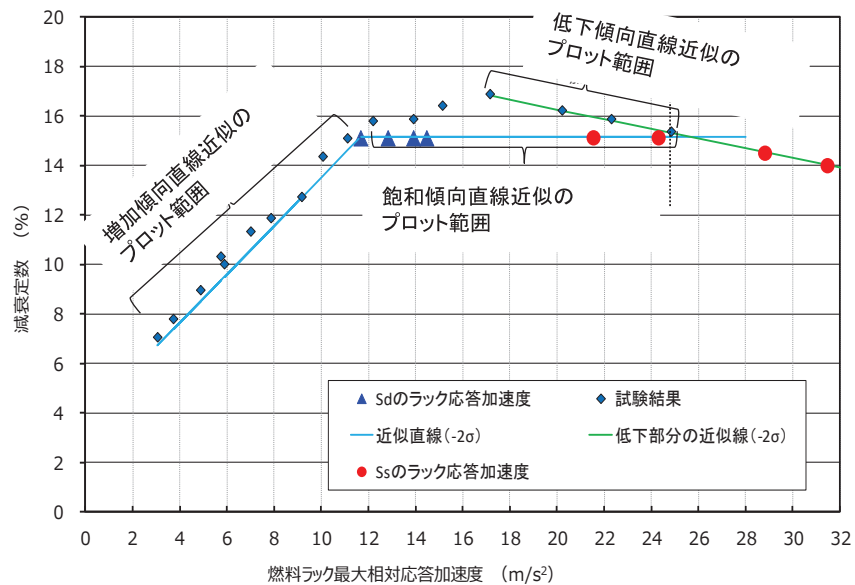


6. 指摘事項②に対する回答(3/6)

【設計用減衰定数設定の妥当性】

試験結果等に対する余裕の確保(1/2)

- 試験結果から算出される減衰定数は、4点の計測位置のうち、下限値となる値を採用。
- 試験結果を、燃料ラックの減衰が増加する領域と、一定の領域に分割し、試験結果の回帰直線に余裕を確保(95%信頼区間: -2σ)した近似直線を設定。
- S_s の応答が加振試験範囲を上回るため、外挿領域に対して、加振試験結果を用いて減衰を低下させる近似直線(試験のばらつきとして -2σ を考慮)を用いて加振試験範囲を超える外挿領域の減衰定数を算定。
- 加振試験結果の減衰挙動に合わせて解析条件を設定して詳細解析を行った結果から得られる減衰定数は、特に外挿領域について近似直線と概ね同程度。

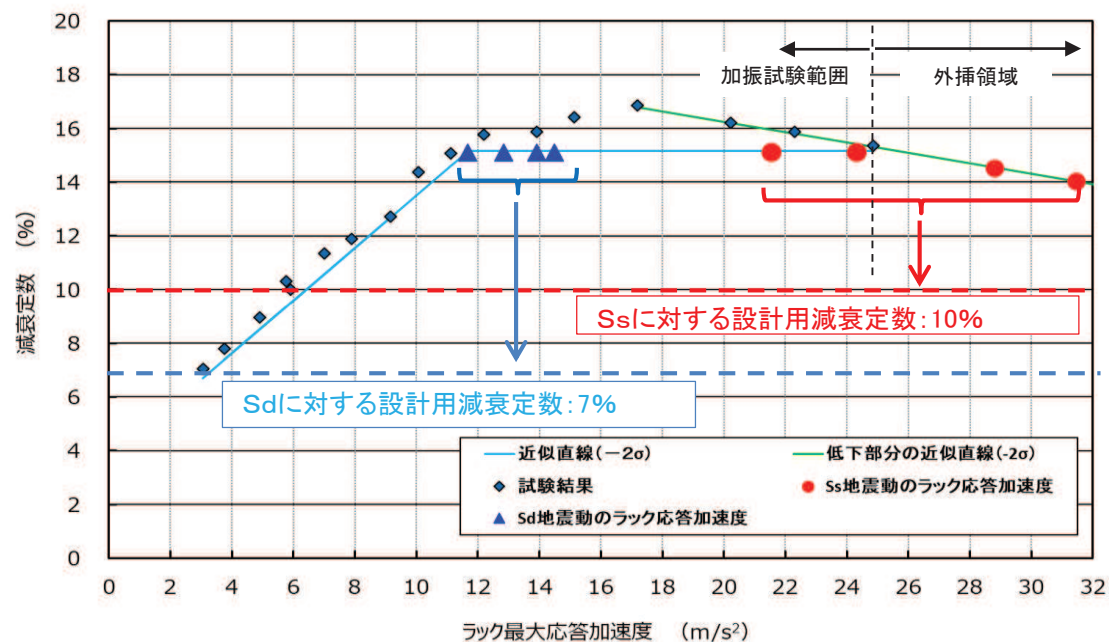


6. 指摘事項②に対する回答(4/6)

【設計用減衰定数設定の妥当性】

試験結果等に対する余裕の確保(2/2)

- 試験結果の近似直線から得られた減衰定数は、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d における燃料ラックの応答加速度に対して、約14~15%である。
- 上記に対して、更に余裕を考慮して、基準地震動 S_s に対して10%、弾性設計用地震動 S_d に対して7%の設計用減衰定数をそれぞれ設定することは妥当である。



燃料ラックの最大応答加速度と減衰定数の関係及び設計用減衰定数

6. 指摘事項②に対する回答(5/6)

【設計用減衰定数設定の妥当性】

他設備の設計用減衰定数の設定事例

- JEAG4601等における機器・配管系の設計用減衰定数について、試験結果等から設計用減衰定数を設定した事例を調査・分析した結果を下表のとおり整理した(別紙3参照)。
- 女川2号機の燃料ラックの減衰定数は、試験結果から応答依存性があることが確認されており、女川2号機と同様に減衰定数とパラメータに相関関係があると考えられる場合においても、設計用減衰定数の設定方法は下表のとおり様々である。
- よって、加振試験で得られた減衰定数及び加振試験の外挿領域に対する解析的な検討結果を踏まえ、さらに一定の余裕を考慮して設定した女川2号機の燃料ラックの設計用減衰定数は妥当なものである。

設計用減衰定数の設定方法		設定例
減衰とパラメータに明確な相関関係が無い場合	試験結果の下限値に一定の余裕を見込んだ値	空調用ダクト, ケーブルトレイ, 電気盤
	試験結果の下限値	PWR蒸気発生器伝熱管
減衰とパラメータに相関関係があると考えられる場合	試験結果の下限値及び下限値に一定の余裕を見込んだ値	PWR使用済燃料貯蔵ラック
	試験結果の回帰直線(平均値)及び設計レベルまでの試験データの外挿を検討した結果	クレーン類
	試験結果の下限値及び実規模配管系試験から策定された減衰推算法(解析)との組合せ	配管系

6. 指摘事項②に対する回答(6/6)

【設計用減衰定数設定の妥当性】

米国Regulatory Guide 1.61の例

- 米国Regulatory Guide 1.61*では、米国の発電用原子炉施設の耐震設計に適用する設計用減衰定数を定義している。
- その中では、2つの異なる地震、Safe-Shutdown Earthquake (SSE, 安全停止地震) 及び Operating-Basis Earthquake (OBE, 運転基準地震) に対して、それぞれに適用可能な設計用減衰定数が示されており、地震動レベルの大きいSSEに対する設計用減衰定数は、OBEよりも大きな値が規定されている。
- 女川2号機の今回工認においては、燃料ラックの設計用減衰定数に対して、地震動の強さに応じた設計用減衰定数として弾性設計用地震動Sdに7%、基準地震動Ssに10%を適用することは、Regulatory Guide 1.61の考え方に整合している。

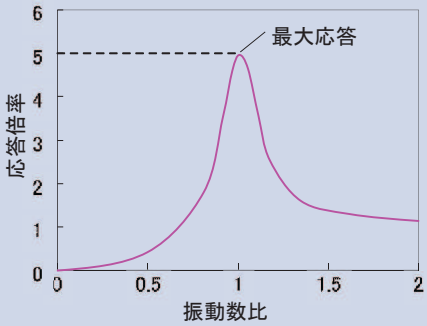
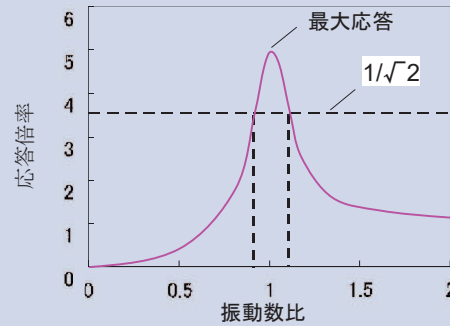
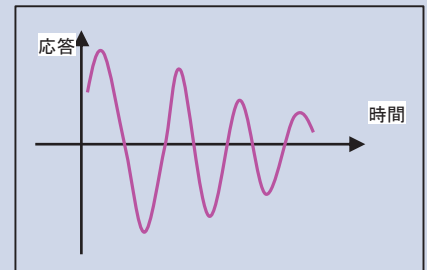
注記*：“DAMPING VALUES FOR SEISMIC DESIGN OF NUCLEAR POWER PLANTS”, U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, REGULATORY GUIDE 1.61, Revision 1, March 2007.

他設備の設計用減衰定数の設定事例及び米国Regulatory Guide 1.61の例に対する考察

- 他設備の設計用減衰定数の設定事例より、設計用減衰定数の設定方法は様々である。
- 米国Regulatory Guide 1.61では、地震動レベルの大きいSSEに対する設計用減衰定数は、OBEよりも大きな値が規定されている。
- これらの事例は、女川2号機の燃料ラックの設計用減衰定数として、加振試験で得られた減衰定数及び加振試験の外挿領域に対する解析的な検討結果を踏まえ、さらに一定の余裕を考慮し、弾性設計用地震動Sdに7%、基準地震動Ssに10%と設定していることの妥当性を補足するものである。

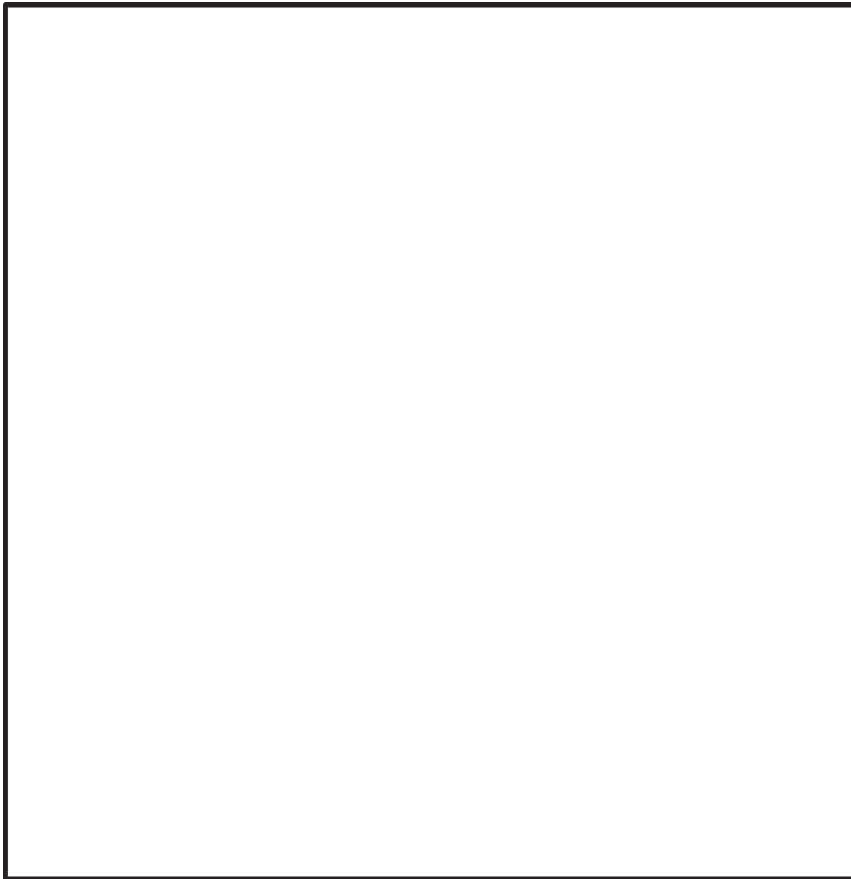
別紙1. 応答倍率法による減衰定数の算出方法に係る妥当性

- 加振試験や解析の結果から減衰定数を算出する際に一般的に使われる、応答倍率法、ハーフパワー法及び自由減衰法の3つの手法について、これらの特徴を比較・検討した。
- 女川2号機の燃料ラックは、非線形性のある振動系であるため、応答倍率法を適用することが妥当である。

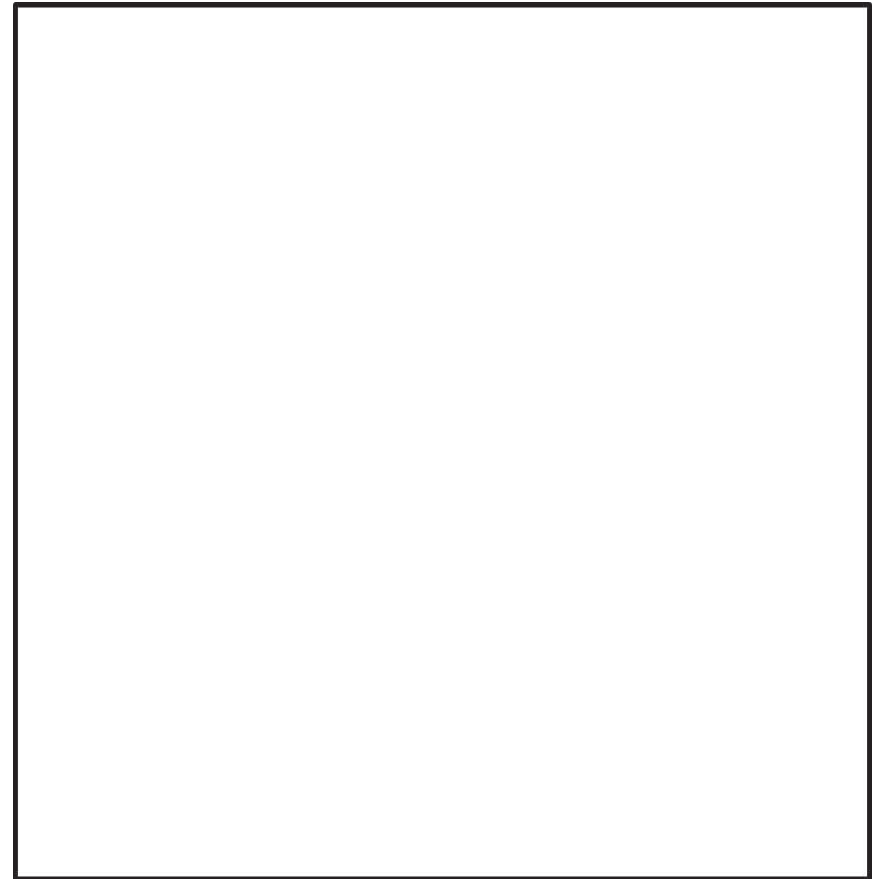
	応答倍率法	ハーフパワー法	自由減衰法
手法の概要	<ul style="list-style-type: none"> 掃引正弦波加振試験から得られる共振曲線から共振状態の応答倍率を求め、応答倍率から減衰を求める。 	<ul style="list-style-type: none"> 掃引正弦波加振試験から得られる共振曲線の共振振動数と共振曲線の幅（共振応答倍率の$1/\sqrt{2}$の位置における共振曲線の振動数幅）の比から減衰比を求める。 	<ul style="list-style-type: none"> 供試体の対象とするモードの共振振動数付近の正弦波加振で供試体を共振応答させ、振動台を急停止し供試体を自由振動させる。自由振動波形（減衰波形）から減衰比を求める。 
手法の特徴	<ul style="list-style-type: none"> 共振曲線のピーク位置を対象とするモードにおける線形状態（定常状態）とし、その応答倍率から等価線形な減衰を求める手法であり、非線形性のある振動系の減衰推定に適用可能である。 	<ul style="list-style-type: none"> 非線形性のある振動系のように共振曲線の形状が理論的な1質点系の形状と相違した場合では、減衰の推定誤差が大きくなる。 減衰が小さい場合の近似式から求める手法であるため、減衰が大きい場合には推定誤差が大きくなる。* 	<ul style="list-style-type: none"> 振動台性能の影響を受ける場合がある。 減衰が大きな場合には、振動台停止とほぼ同時に供試体の応答振幅が低下してしまうため、安定した自由振動波形が得られず誤差が大きくなる。 振幅に応じて減衰が変化するような非線形な減衰の場合は誤差が大きくなる。
女川2号機への適用性	<ul style="list-style-type: none"> 燃料ラックは非線形性のある振動系であるため、適用することにした。 	<ul style="list-style-type: none"> 燃料ラックは非線形性のある振動系であるため、適用しないことにした。 女川2号機の燃料ラックの減衰定数が大きいため、適用しないことにした。 	<ul style="list-style-type: none"> 燃料ラックの減衰は応答振幅の依存性があるため、適用しないことにした。 女川2号機の燃料ラックの減衰定数は大きいため、適用しないことにした。

記号	解析条件に係る入力諸元	入力値	設定方法
M_r	燃料ラック質量		構造質量と理論式に基づく流体付加質量を燃料ラックの各質点に均等に設定。一意に定まる。
M_f	燃料質量		構造質量と理論式に基づく流体付加質量を燃料の各質点に均等に設定。一意に定まる。
M_t	水槽質量		構造質量と理論式に基づく流体付加質量を水槽の各質点に均等に設定。一意に定まる。
M_{r-f}	燃料ラック-燃料間連成質量		理論式に基づく流体付加質量を各質点に均等に設定。一意に定まる。
M_{t-r}	水槽-燃料ラック間連成質量		理論式に基づく流体付加質量を各質点に均等に設定。一意に定まる。
Kb_{max}	締結ボルト剛性		試験結果を考慮 して設定。 (締結ボルト剛性が低下した後の、燃料ラック固有振動数)
EI_r	ラック剛性(曲げ剛性)		試験結果を考慮 して設定。 (締結ボルト剛性が低下する前の、燃料ラック固有振動数)
EI_f	燃料の剛性(曲げ剛性)		燃料チャンネルボックスの断面形状寸法より設定。一意に定まる。
EI_t	水槽の剛性(曲げ剛性)		試験結果(水槽固有振動数)から設定。一意に定まる。
K_θ	燃料ラック-燃料間の回転ばね		燃料の転倒方向の剛体モードに対し、下端回転剛性を燃料の高次モードに影響のない値を設定。一意に定まる。
Cr	燃料ラックの構造減衰		試験結果(30体貯蔵)から減衰4%と設定。一意に定まる。
Fb_{max}	ボルト締結面摩擦力		燃料ラックのボルト締付力と 試験結果を考慮 して設定。
CD_{r-f}	燃料ラック-燃料間流体減衰		燃料ラックセル内の流動抵抗を抗力係数: $Cd=2$ として設定。一意に定まる。
δf	摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位		摩擦力 Fb_{max} 以下で先行的に微小な予すべりが発生すると仮定し、これを模擬するための摩擦力の低下領域として 試験結果を考慮 して設定。
δk	締結ボルトばね剛性の振幅依存性を定義する最大変位		締結ボルトのおねじとめねじの隙間により剛性が低下すると仮定し、締結ボルトの剛性が低下する領域として 試験結果を考慮 して設定。

①試験結果の下限値に一定の余裕を見込んだ値
(空調用ダクトの例)



②試験結果の下限値
(PWR蒸気発生器伝熱管の例)



③試験結果の下限値及び下限値に
一定の余裕を見込んだ値
(PWR使用済燃料貯蔵ラック)



- ④試験結果の回帰直線(平均値)及び設計レベルまでの試験データの外挿を検討した結果
(クレーン類)



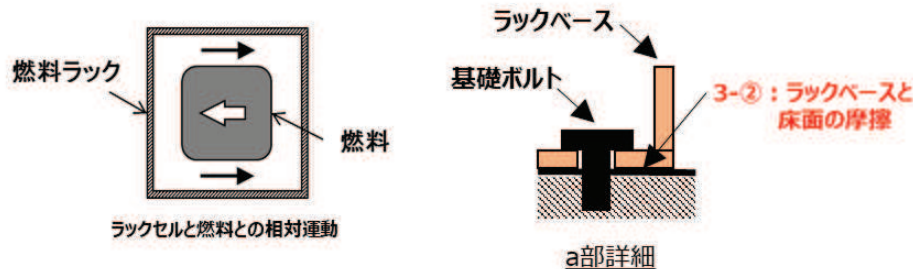
- ⑤試験結果の下限値及び実規模配管系試験から策定された減衰推算法(解析)との組合せ
(配管系)



➤ 燃料ラックの構造特徴を考慮し，地震時の燃料ラックの減衰に寄与する減衰要因を抽出した結果として，下記のとおり分類した。

2-①：ラックセル内流動による流体減衰

4-①：燃料とラックセルとの衝突

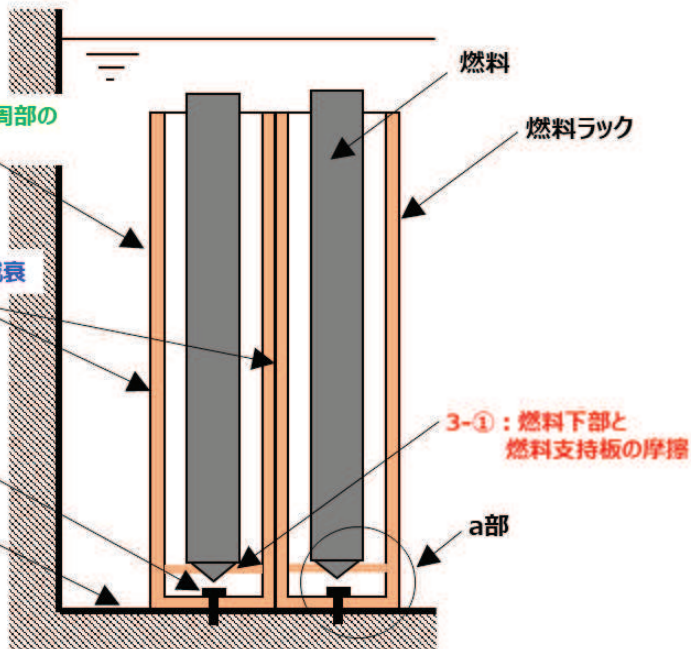


2-②：燃料ラック外周部の流体減衰

1-①/1-②：構造減衰

基礎ボルト

プール底部



要因	内容
1.構造減衰	① 材料自体の減衰(内部減衰)
	② 部材間(角管, 補強板)の撓動などによる減衰
2.流体減衰	① 燃料ラック内に貯蔵された燃料(セル内流動)の流体抵抗力による減衰
	② 燃料ラック外周部の流体抵抗力による減衰
3.摩擦減衰	① 燃料下部と燃料支持板の摩擦
	② ラックベースと床面の摩擦
4.衝突減衰	① 燃料とラックセルとの衝突

【流体-構造連成による応答低減効果の扱い】

- 流体-構造連成は，流体中の構造物において流体と構造物の相互作用を質量として考慮するもの。
- 加振試験及び詳細解析における燃料ラック(頂部)の応答倍率 Q (加速度の入力 $\ddot{u}(t)$ と応答 $\dot{x}(t)$ の関係)は，下式の通り，刺激係数 $\beta\phi$ (質量マトリクス $[M]$ として考慮)及び1自由度系の応答倍率 Q_1 で表せる。

$$\text{燃料ラック(頂部)の応答倍率 } Q \quad \left[\begin{array}{c} \dot{x}(t) \\ \ddot{u}(t) \end{array} \right]_{\max} = \beta\phi \left[\begin{array}{c} \dot{q}(t) \\ \ddot{u}(t) \end{array} \right]_{\max} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{1自由度系の} \\ \text{応答倍率 } Q_1 \end{array} \right.$$

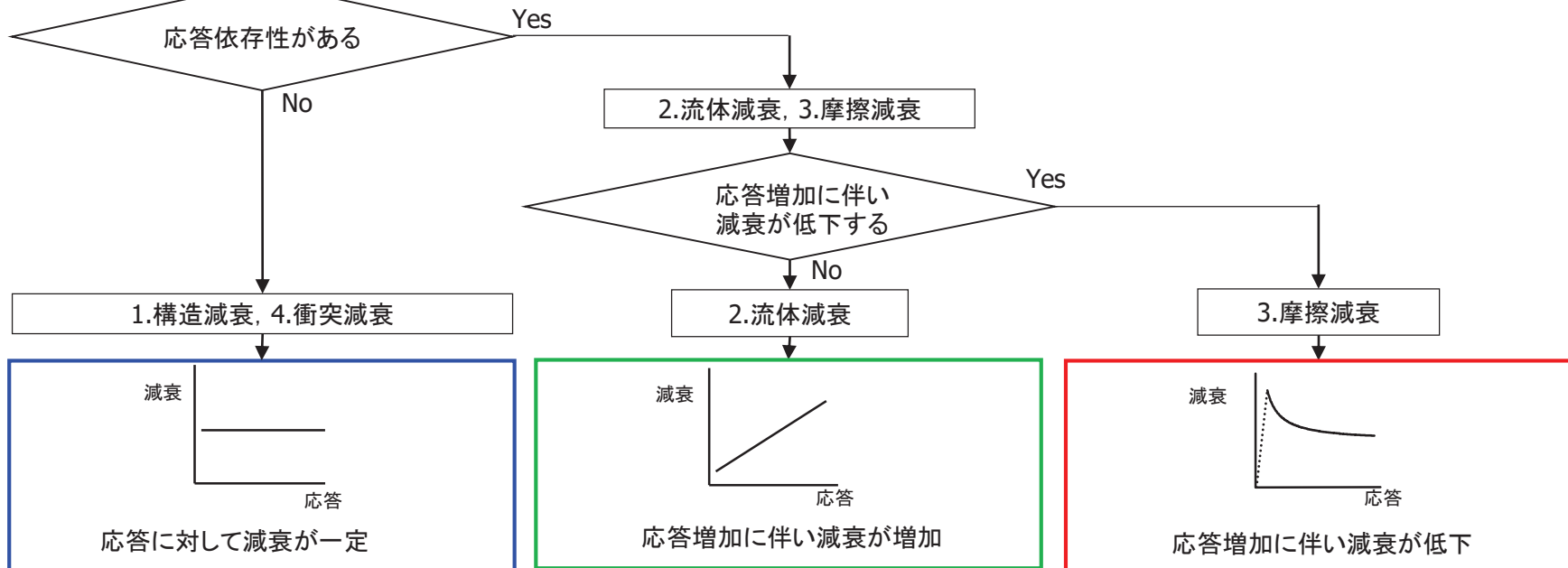
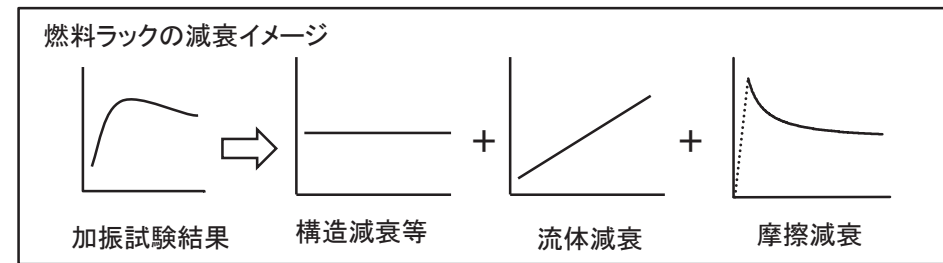
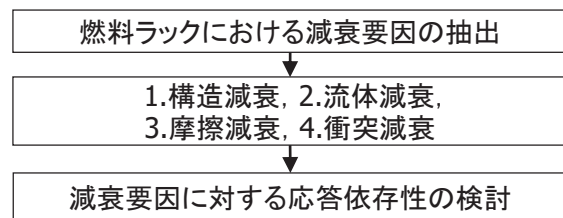
- また，減衰定数 ζ は，1自由度系の応答倍率 Q_1 との関係から下式で表せる。

$$\zeta = \frac{1}{2Q_1}$$

- したがって，流体-構造連成に関連する刺激関数 $\beta\phi$ と減衰定数 ζ (1自由度系の応答倍率 Q_1 に関連)は，各々独立した変数であるため，本検討では，流体-構造連成による応答低減効果を減衰として扱わない。

燃料ラックにおける減衰要因の抽出

- 燃料ラックにおける各減衰要因について、応答依存性の観点から分類した結果、加振試験範囲及び外挿領域における減衰定数の低下傾向は、摩擦減衰に起因することが分かる。【参考2】
- 加振試験で確認されている燃料ラックの減衰は、以下の減衰要因が重畳した挙動であると考えられる。



各減衰要因の応答依存性に係る分類フロー