

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1
提出年月日	2021年 9月 3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9月3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。

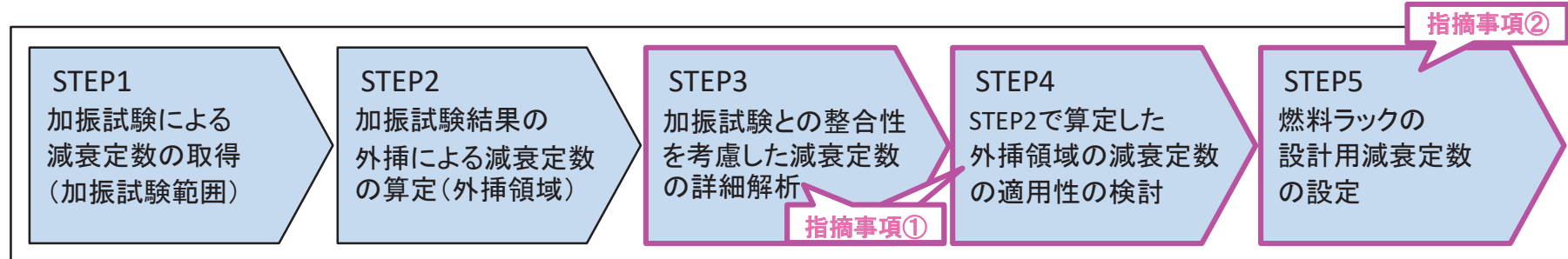
前回審査会合(7/6)における指摘事項及び回答概要

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"> 解析モデルは試験体構造と燃料ラックの減衰メカニズム(構造減衰, 流体減衰, 摩擦減衰)を考慮して多質点系モデルとし, 解析条件は試験結果との整合性を考慮して設定している。 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)を有することを踏まえ, これに適した応答倍率法を適用している。 	P5 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"> 減衰定数(ζ)の算出式上, ラック頂部の応答倍率(Q)及び刺激関数($\beta\phi$)が分母と分子の関係にあることで, 流体-構造連成による燃料ラックの応答低減効果が相殺されるため, 応答倍率曲線を用いた減衰定数の算定から除外される。 	P6, 7
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(入力値)のうち、『試験結果との整合性を考慮して設定するもの』に分類した5項目*は, 変動範囲が燃料ラックの構造等を踏まえて現実的に取り得る範囲であり, 試験結果と整合することを考慮して設定している。 *: 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, ボルト締結面摩擦力, 締結ボルトばね剛性の振幅依存性を定義する最大変位 	P8-14 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"> 解析条件(入力値)のうち, 値に幅をもつ5項目(上記と同じ)について, 現実的に取り得る範囲内で値を変動させた場合, 試験の外挿領域でも減衰定数が急減する傾向はなく, その低下量は最大でも2.36%となることから, 影響はほとんどない。 	P15, 16 別紙3
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"> JEAG4601等では, 設計用減衰定数の設定に係る詳細な規定はないため, JEAG4601等の指針・規格策定時における他設備の設定事例に対し, 以下の3つの観点に着目して調査・整理した。 <ul style="list-style-type: none"> 減衰定数の取得方法 減衰定数に対する設計余裕の取り方 減衰定数とパラメータに相関関係(応答依存性)がある場合の取扱い その結果, 3つの観点全てにおいて, 女川2号機の燃料ラックの設計用減衰定数設定と同様の対応を行っている他設備事例があることを確認した。 	P17-19 別紙4

1. 設置許可段階からの変更点及び今回工認での検討概要

- 設置許可段階(第560回審査会合, 2018年3月29日他)では, 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。)は, 実物大加振試験(以下「加振試験」という。)等に基づき, 水平方向の設計用減衰定数を既工認(1%)から一律7%に変更することとしていた。
- 工認段階では, 基準地震動 S_s の追加等により, 燃料ラックの S_s 応答加速度の一部が加振試験の範囲を超えるため, 加振試験の外挿領域における設計用減衰定数を設定する必要が生じた。
- 上記を踏まえて今回工認では, 以下の検討フローに基づき, **加振試験結果の外挿により算定した外挿領域の減衰定数に対して, 加振試験との整合性を考慮した減衰定数の詳細解析を踏まえ, 外挿領域の減衰定数の適用性を検討し, 更に一定の余裕を考慮した燃料ラックの設計用減衰定数として, 基準地震動 S_s には10%, 弾性設計用地震動 S_d には設置許可段階と同じ7%を設定した。**

	設置許可段階	工認段階
S_s 応答加速度と加振試験の応答加速度の関係	S_s 応答加速度は加振試験の範囲内	S_s 応答加速度の一部が加振試験の範囲を超える
減衰定数の取得方法	加振試験	加振試験及び試験結果の外挿(解析的な確認を含む)
設計用減衰定数(水平方向)	一律: 7%	基準地震動 S_s : 10% 弾性設計用地震動 S_d : 7%



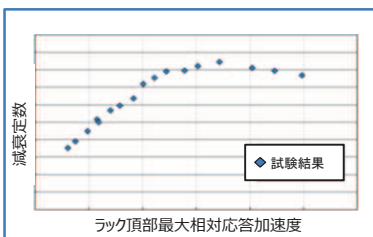
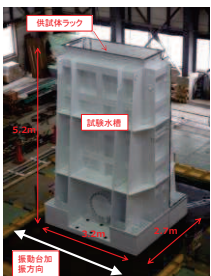
燃料ラックの設計用減衰定数設定に係る検討フロー

2. 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全体概要

■ 女川2号機使用済燃料貯蔵ラックの今回工認における設計用減衰定数は、STEP1~5の検討に基づき設定している。

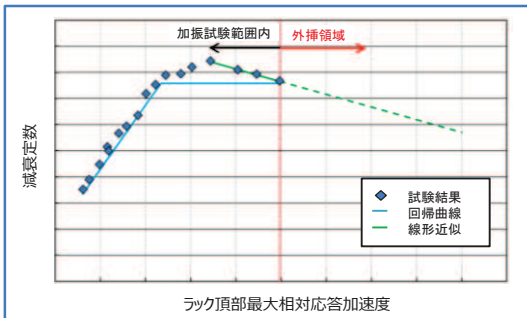
STEP1: 実物大加振試験による減衰定数の取得

- 燃料ラックは、燃料プール内の水中に設置され、燃料集合体を貯蔵していることから、着座部の摩擦、燃料ラック締結部の摩擦及び水の抵抗等により、運動エネルギーの消散が大きくなり、1.0%より大きな減衰があると想定。
- JEAG4601の規定*1も踏まえて実物大加振試験を実施し、加速度応答依存性のある減衰定数を取得。



STEP2: 加振試験結果及び外挿による減衰定数の算定

- Ss応答加速度の一部が加振試験範囲を超えているため、加振試験範囲の内外で各々以下の統計処理を実施して減衰定数を算定。



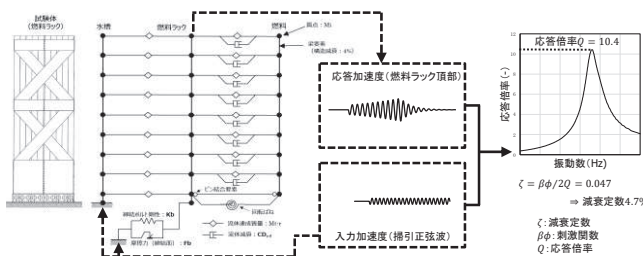
応答加速度	減衰定数算定(統計処理)方法
加振試験範囲内	実施範囲の回帰直線(-2σ)
加振試験範囲外(外挿領域)	減衰定数低下部分の線形近似の外挿

*1 設計用減衰定数の設定に係るJEAG4601の規定
「JEAG4601-1991 追補版」では、『実験等に基づきその妥当性が確認された場合は表(引用者注:設計用減衰定数の一覧表)と異なる設計用減衰定数を用いることができる』ことを規定。

STEP3: 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) 指摘事項①

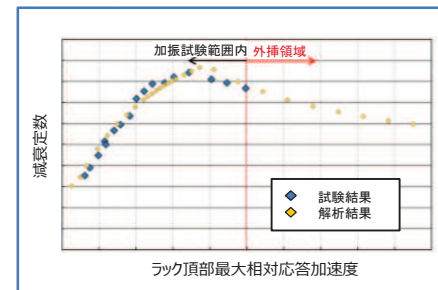
解析モデル, 解析条件の妥当性

- 詳細解析*2の解析モデル及び解析条件は、加振試験結果等の分析に基づく減衰要因検討結果等に基づき、加振試験体を多質点系でモデル化し、減衰挙動を表現するように設定。
(指摘事項①-1: 流体-構造連成による応答低減効果の扱い)に対する検討を含む)
- 解析条件は、試験条件等から一意に定まるもの(10項目)、試験結果との整合性を考慮して設定するもの(5項目)に分類。
- 試験結果との整合性を考慮して設定するもの(5項目)は、現実的に取り得る変動範囲内の値となっている。(指摘事項①-2)



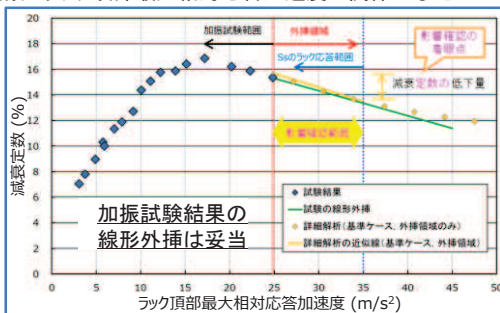
減衰定数算出方法の妥当性

- 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。
- 詳細解析による減衰定数算出結果
- 詳細解析結果は、加振試験範囲内において試験の減衰挙動を表現できていることを確認。



STEP4: STEP2で算定した減衰定数の適用性検討 指摘事項①

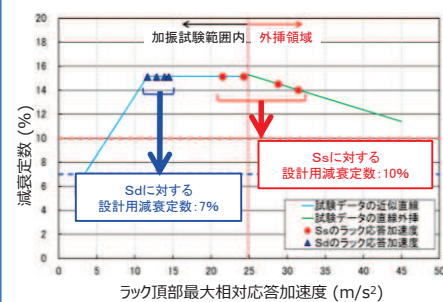
- STEP2で算定した外挿領域における減衰定数について、STEP3で検討した“試験結果との整合性を考慮して設定する項目(5項目)”の入力値を変動させ、減衰定数とラック頂部最大相対応答加速度の関係に与える影響(減衰低下傾向の変化, 低下量)を確認。
- いずれの項目でも試験の外挿領域で減衰定数が急減する傾向はなく、減衰低下量は、加振試験結果の線形外挿は1.97%、解析(基準ケース)は2.23%とほぼ同程度。
(指摘事項①-3)



*2 詳細解析の目的
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。

STEP5: 設計用減衰定数の設定 指摘事項②

- 個別の設計用減衰定数の設定にあたり、指針・規格を策定した際(JEAG4601/JEAC4601)の他設備の設定事例を調査・分析。
 ✓ 減衰定数の取得方法: 加振試験及びその外挿、加振試験及び他の手法の組合せで取得した事例あり
 ✓ 設計余裕の取り方: 下限値に一定の余裕(1~3%程度)を見込む事例あり
 ✓ その他: 多様性のある設備で減衰定数の下限値に一定の余裕を見込む傾向あり
 ✓ その他: 減衰定数とパラメータに相関関係(依存性)がある場合は、パラメータ(応答振幅、振動数)に応じた設計用減衰定数を設定した事例あり
- 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に対し、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。

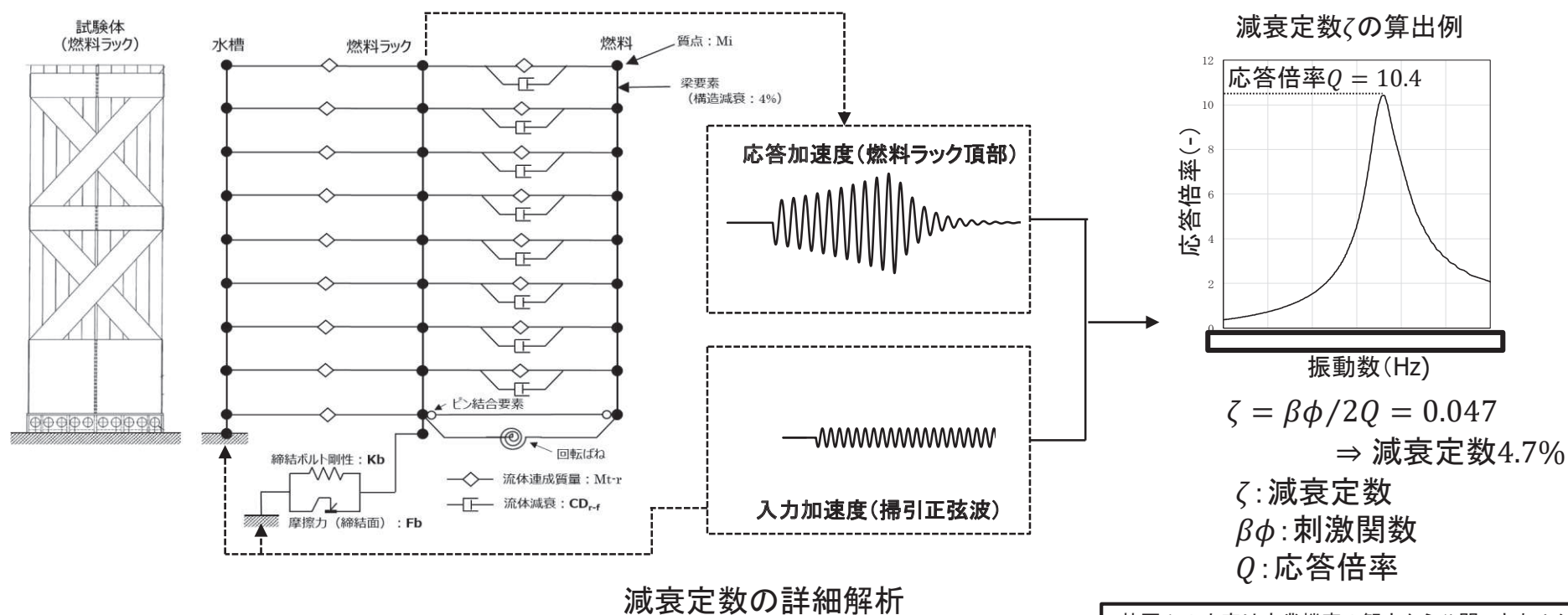


3. 指摘事項①に対する回答

【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)】

STEP1 STEP2 STEP3 STEP4 STEP5

- 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る。
- 減衰定数の詳細解析では、試験体を多質点とし、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)を考慮して解析モデルを作成するとともに、試験結果との整合性を考慮して解析条件を設定している(詳細は、次頁以降の指摘事項①-1, ①-2, ①-3に対する回答参照)。
- **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定数の算出に適した応答倍率法を適用している(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)】

STEP1 STEP2 STEP3 STEP4 STEP5

流体-構造連成による応答低減効果の扱い(1/2)

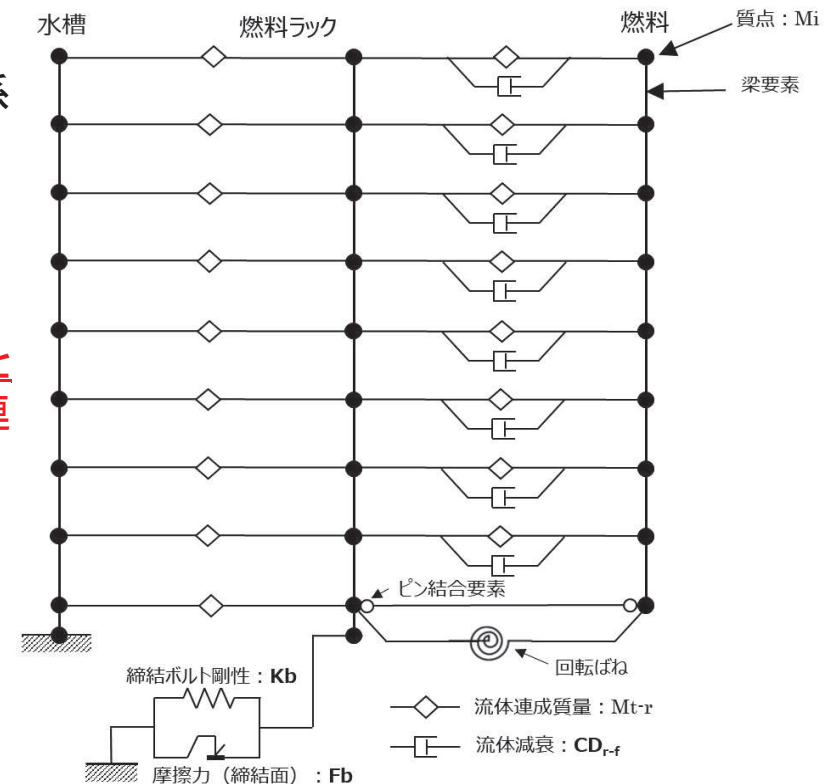
- 減衰定数の詳細解析では, 加振試験体を可能な限り忠実に表現するため, 構造物間の流体の質量による応答低減効果を流体-構造連成質量(質量マトリクス $[M]$ の非対角質量)としてモデル化している。
- 詳細解析の応答倍率曲線から求まる燃料ラック頂部の応答倍率 Q は, 減衰定数 ζ の算出にあたり, 1自由度系における応答倍率 Q_1 を仮定すると, 刺激関数 $\beta\phi$ (質量マトリクス $[M]$ として考慮)を用いて, 下式で表される。

$$Q = \beta\phi Q_1$$

- 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 $\beta\phi$ 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)】

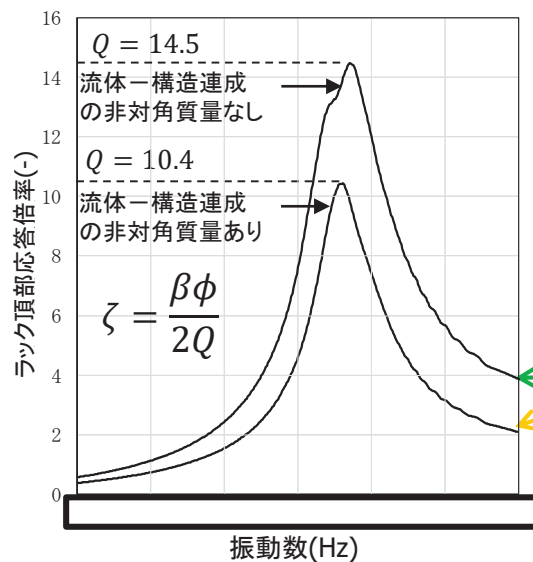
STEP1 STEP2 STEP3 STEP4 STEP5

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)においては、減衰定数 ζ の算出式上、分母と分子の関係にあることで影響が相殺されるため、減衰定数の算定から応答低減効果を除外でき、減衰定数 ζ にはほぼ影響しない。
- 上記の定量的な確認のため、詳細解析モデルにおける水槽と燃料ラック間の流体-構造連成質量(質量マトリクス $[M]$ の非対角質量)を考慮せずに解析を実施した結果、実際に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。

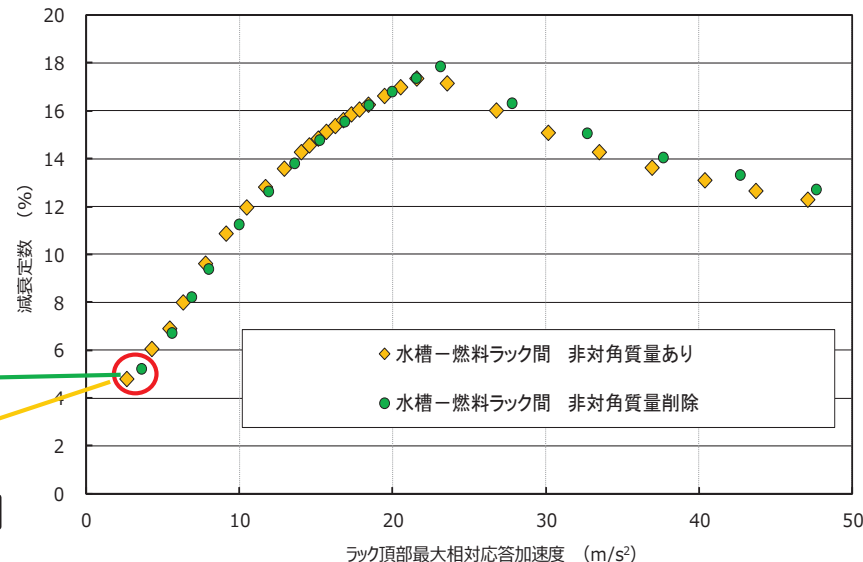
	流体-構造連成の非対角質量あり	流体-構造連成の非対角質量なし
応答倍率 $Q(-)$	10.4	14.5
応答加速度 (m/s^2)	2.6	3.6
刺激係数 $\beta(-)$	0.97	1.55
固有ベクトル $\phi(-)^*$	1.0	1.0
減衰定数 $\zeta(\%)$	4.7	5.3

注記*: 固有ベクトルは1.0で正規化している



ラック頂部の応答倍率比較

応答低減効果の減衰に対する影響検討結果



非対角質量の影響(減衰定数-応答加速度線図)

4. 指摘事項①-2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)】

解析条件(入力値)の分類

- 解析条件(入力値)は, 下表のとおり, 試験条件等から一意に定まるもの(10項目), 試験結果との整合性を考慮して設定するもの(5項目)の2つに分類される。
- このうち, 試験条件等から一意に定まるもの(10項目)については, 理論式, 燃料ラックの構造及び試験結果に基づき設定する入力値である(詳細は, 別紙2参照)。

記号	解析条件(入力値)	試験条件等から一意に定まるもの	試験結果との整合性を考慮して設定するもの
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(2/7)

【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)】

試験結果との整合性を考慮して設定するもの(5項目)

- 試験結果との整合性を考慮して設定する解析条件(入力値)は、燃料ラックの構造、試験結果等を考慮すると、一定の範囲内で変動し得ることから、解析条件(入力値)の考え方、現実的に取り得る変動範囲及び詳細解析に適用した入力値(基準ケース)の設定について、以下のとおり整理した。

a. ボルト締結面摩擦力 $F_{b_{max}}$

- 解析条件(入力値)の考え方:

燃料ラック下端のボルト締結面には、押付け力として燃料ラック及び燃料の水中質量 W とボルト締付力 P_b が加わるため、ボルト締結面の摩擦力 $F_{b_{max}}$ は、

$$F_{b_{max}} = \mu (W + P_b)$$

ここで、ボルト締付力 P_b は、締結ボルトの締付トルク T 、トルク係数 K 、呼び径 D 、本数 N_b により表される(右図)。

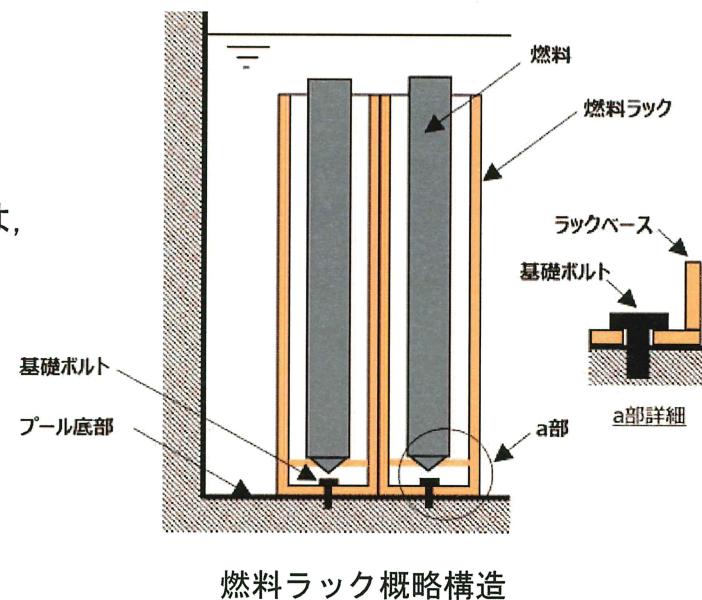
$$P_b = N_b T / K D$$

- 入力値の変動範囲:

ボルト締付力 P_b は、締結ボルトの締付トルク T の管理値が であるため、入力値の変動範囲はこれによる上限値及び下限値と設定した。

- 入力値の設定(基準ケース):

締結ボルトの締付トルク T は管理値 、トルク係数 K は燃料ラック据付時の条件(潤滑なし)から一般値 *1、呼び径 D 、本数 N_b 、及び摩擦係数 μ は燃料ラックが水中に設置されることによる水膜効果を考慮*1,2,3した から、ボルト締結面摩擦力 $F_{b_{max}}$ を と設定した。



注記*1:「機械工学便覧 A3編 力学・機械力学」, 日本機械学会編, 日本機械学会

*2:「金属便覧」, 日本金属学会編, 日本金属学会

*3:「機械工学便覧 B1編 機械要素設計・トライボロジ」, 日本機械学会編, 日本機械学会

4. 指摘事項①-2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)】

b. 摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位 δf

- 解析条件(入力値)の考え方:

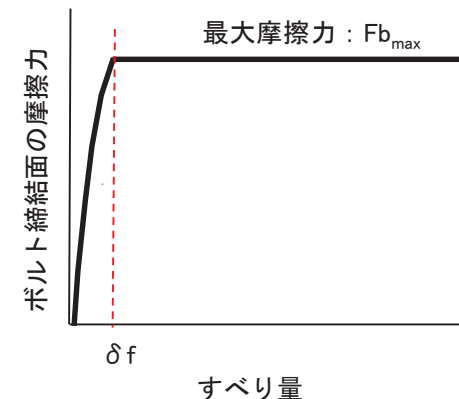
ボルト締結面に作用する力が最大摩擦力 $F_{b_{max}}$ に到達してすべり始める(主すべりの発生)前から, 微小すべり(予すべり)が先行的に発生する考え方*1~*3を導入する。ボルト締結面に作用する摩擦力は, すべり量の増加に伴い増加し(低振幅側), δf を境に高振幅側では最大摩擦力 $F_{b_{max}}$ で一定となる(右図)。

- 入力値の変動範囲:

ボルト締結面の微小すべりは, 既往の知見*2,3において, サブミリオーダーの事象を取り扱った事例であるが, 摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位 δf は構造の相違等で多少前後することも考慮して, これら事例を参考に の変動範囲を設定した。

- 入力値の設定(基準ケース):

既往の知見における事例及び試験結果との整合性を考慮して, 摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位 δf は と設定した。



注記*1:「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)

*2:「任意方向の微小すべりを考慮した摩擦継手のすべり強度解析」, 長嶋ら, 土木学会第44回年次学術講演会, 平成元年10月

*3:「東神戸大橋の主構トラス格点部の設計」, 北沢ら, 阪神高速道路株式会社 技術報告(技報)第9号, 論文13, 平成2年4月

4. 指摘事項①-2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)】

c. 締結ボルト剛性 $K_{b_{max}}$

- 解析条件(入力値)の考え方:

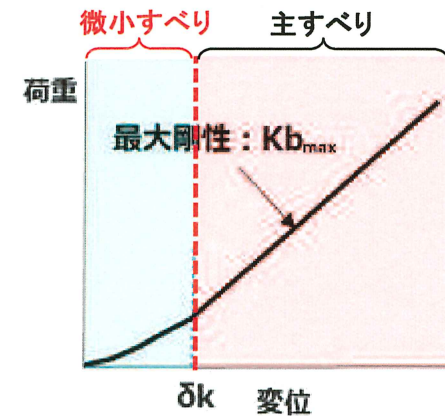
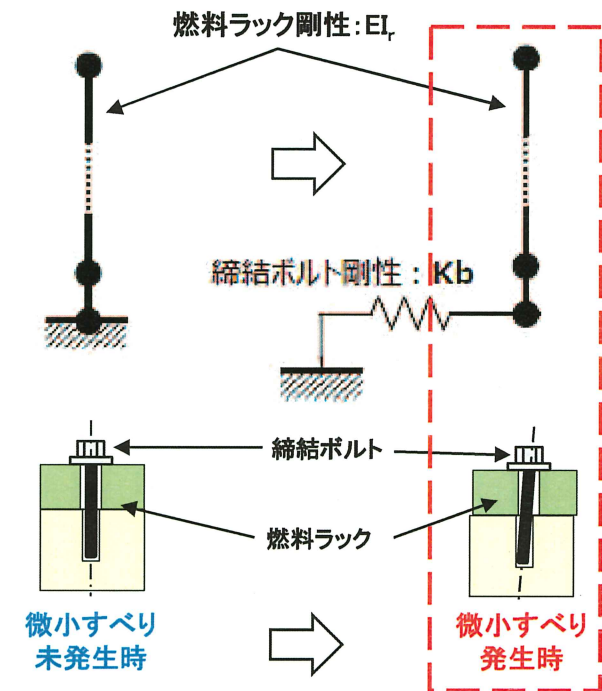
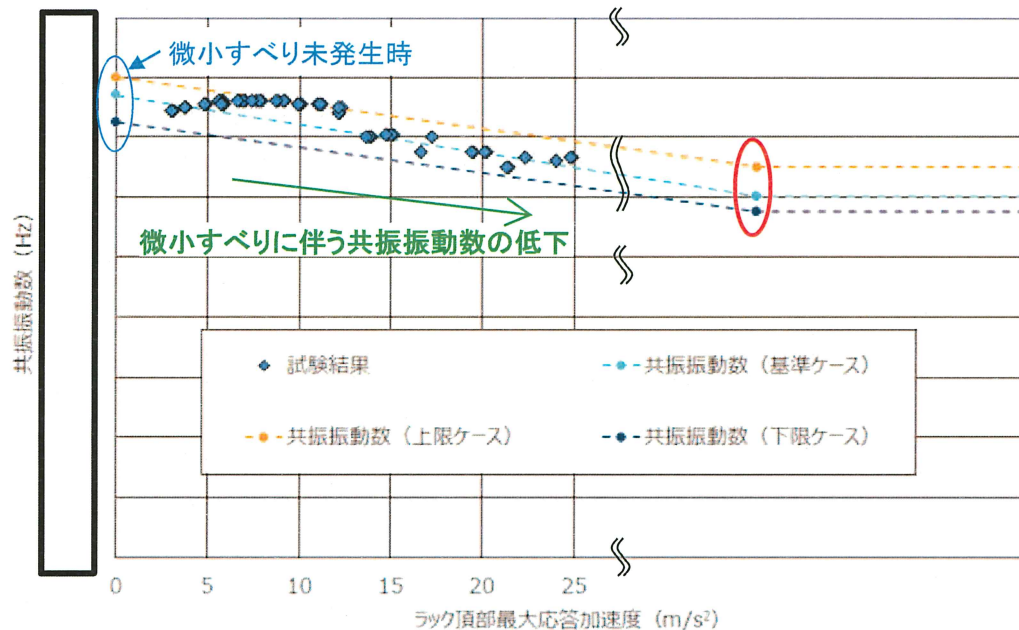
締結ボルトの剛性は, 燃料ラックの微小すべり未発生時は剛体として扱い, 燃料ラック下端の締結面の微小すべり発生時には, 燃料ラックの剛性と合計した剛性(直列ばね)として作用する(右図)。

- 入力値の変動範囲:

微小すべり発生時の共振振動数は, 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 以上のすべり変位で一定であり, 試験結果の共振振動数が応答加速度が増加するにつれて低下傾向を示すことから, 上限値 下限値 の範囲で変動すると考えられる(下図)。

- 入力値の設定(基準ケース):

締結ボルト剛性 $K_{b_{max}}$ は, 試験結果との整合性(全体的な傾向)を考慮して, S_s の応答領域で共振振動数が となる に設定した。



荷重とすべり変位の関係

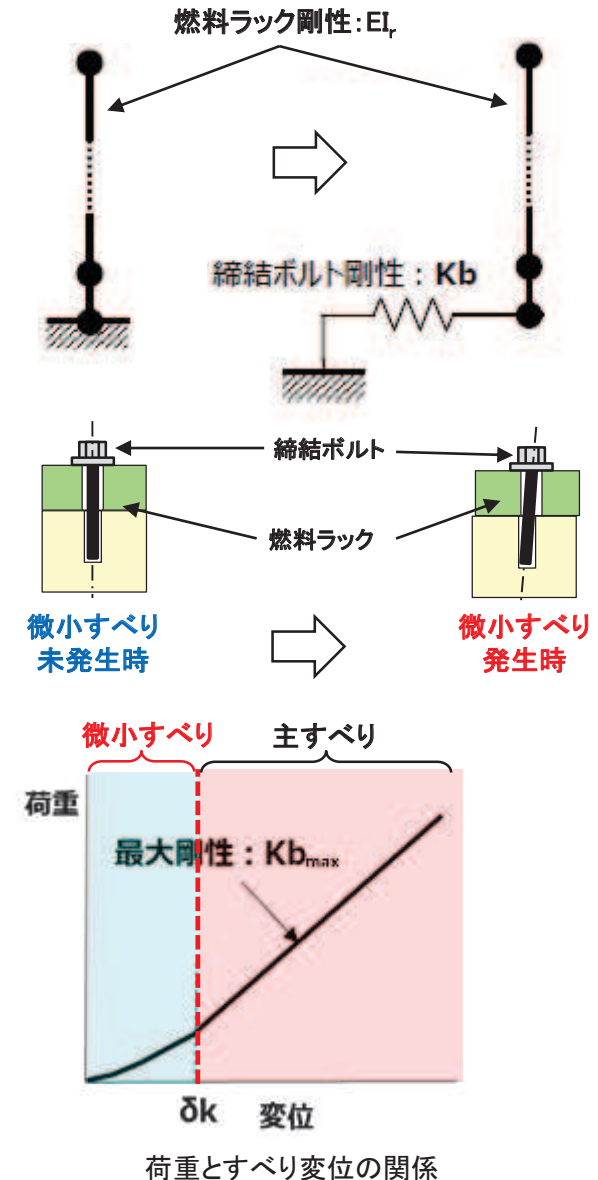
枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4. 指摘事項①-2に対する回答(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)】

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

- 解析条件(入力値)の考え方:
締結ボルト締結部のすべり変位は, 燃料ラック下部における締結ボルトの傾きによる水平方向変位を考慮する。
- 入力値の変動範囲:
締結ボルトのはめあい部では, 外径公差(両側隙間の平均(0.338mm))の隙間によって締結ボルトが傾くことが想定される。この締結ボルトの傾き及びボルト締結部のグリップ長さ(61.5mm)を考慮すると, 締結ボルト頭部下面の水平方向変位量は, 最大 となるため, これを上限値とした。また, はめあい部には外径公差が必ず存在するが, 極端なケースとして下限値は を設定した(右図)。
- 入力値の設定(基準ケース):
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 は, 上記の上限値が規格の公差に基づく標準的な値であること及び試験結果との整合性を考慮して, と設定した。



4. 指摘事項①-2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)】

e. 燃料ラックの剛性(曲げ剛性) EI_r

- 解析条件(入力値)の考え方:

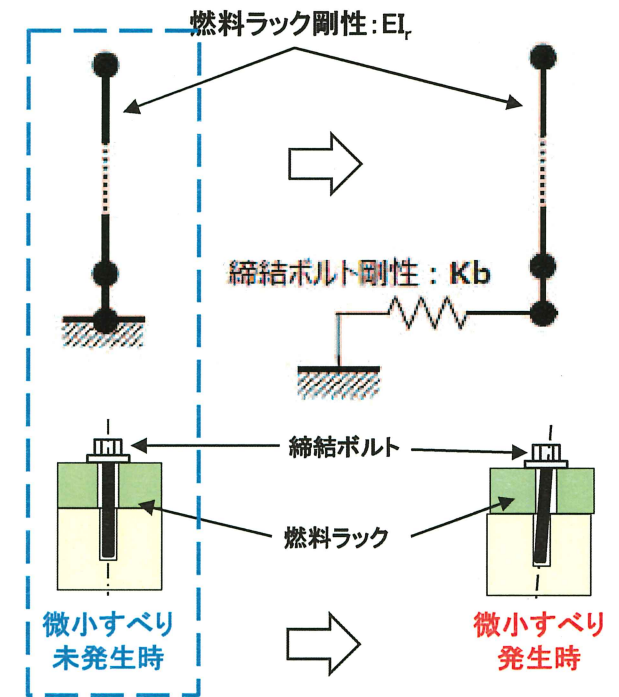
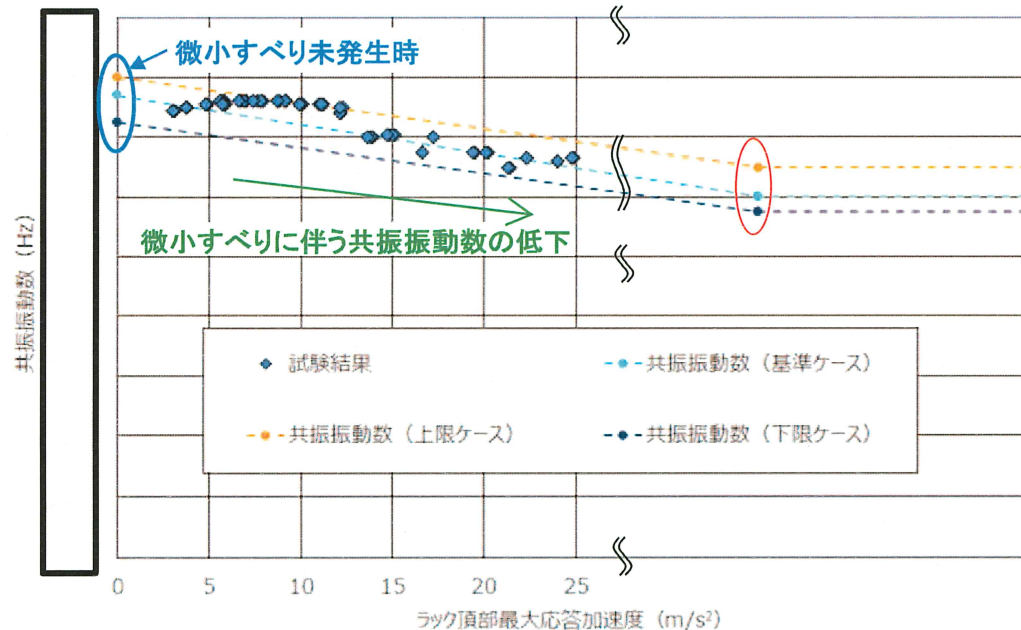
燃料ラックの剛性は、燃料ラックの微小すべり未発生時は締結ボルトを剛体とし、燃料ラック下端の締結面の微小すべり発生時には、締結ボルトの剛性と合計した剛性(直列ばね)として作用する。また、燃料ラックの剛性(曲げ剛性)は、試験結果の共振振動数を考慮し、微小すべり未発生時において設定する(右図)。

- 入力値の変動範囲:

微小すべり未発生時の共振振動数は、応答加速度がゼロ時点となることから、試験結果の共振振動数が応答加速度が増加するにつれて低下傾向(応答加速度がする方向に対しては増加傾向)を示すことを考慮して、上限値 , 下限値 の範囲で変動すると考えられる。

- 入力値の設定(基準ケース):

燃料ラックの剛性 EI_r は、試験結果との整合性(全体的な傾向)を考慮して、燃料ラックの共振振動数が となる と設定した。



4. 指摘事項①-2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)】

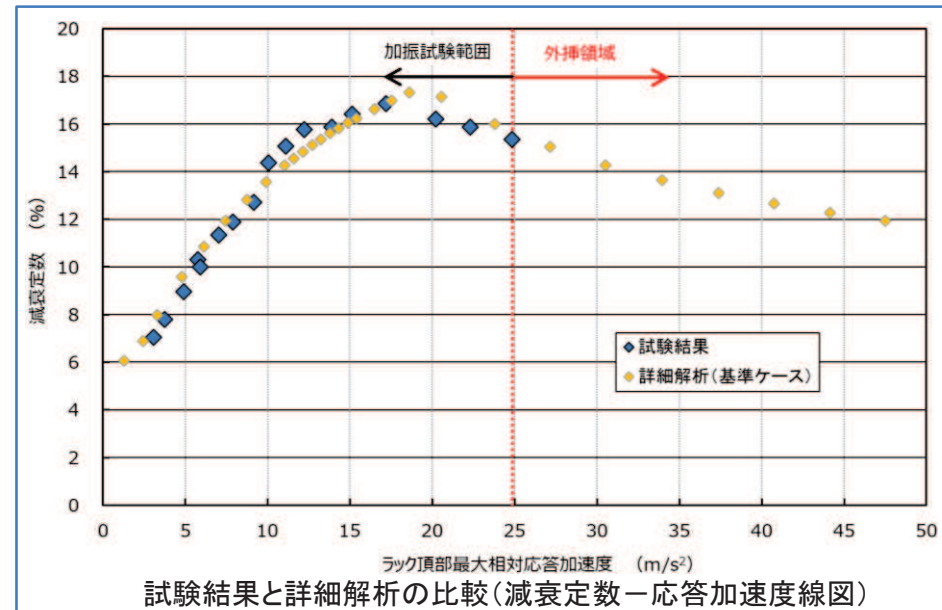
STEP1 STEP2 STEP3 STEP4 STEP5

減衰定数の詳細解析の妥当性

- 詳細解析の解析条件(入力値)について, 試験条件等から一意に定まるもの(10項目)及び試験結果との整合性を考慮して設定するもの(5項目)に分類・整理した結果, 設定方法及び入力値に加えて, 入力値が変動し得るものは, 試験結果との整合性を考慮した設定で現実的に取り得る範囲内となる。
- 減衰定数の詳細解析の結果は, 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)を考慮して解析モデル及び上記の入力値(基準ケース)を適用したものである(下表)。
- 解析結果(基準ケース)は, 加振試験範囲内において, 試験結果の減衰挙動を捉えて表現できていることから, その外挿領域においても減衰挙動を概ね表現している(下図)。

試験結果との整合性を考慮して設定したもの(5項目)

記号	解析条件 (入力値)	単位	入力値		
			基準ケース	変動範囲	
				下限値	上限値
Fb_{max}	ボルト締結面摩擦力	N			
δf	摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位	mm			
Kb_{max}	締結ボルト剛性	N/m			
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			
EI_r	燃料ラックの剛性(曲げ剛性)	Nm ²			



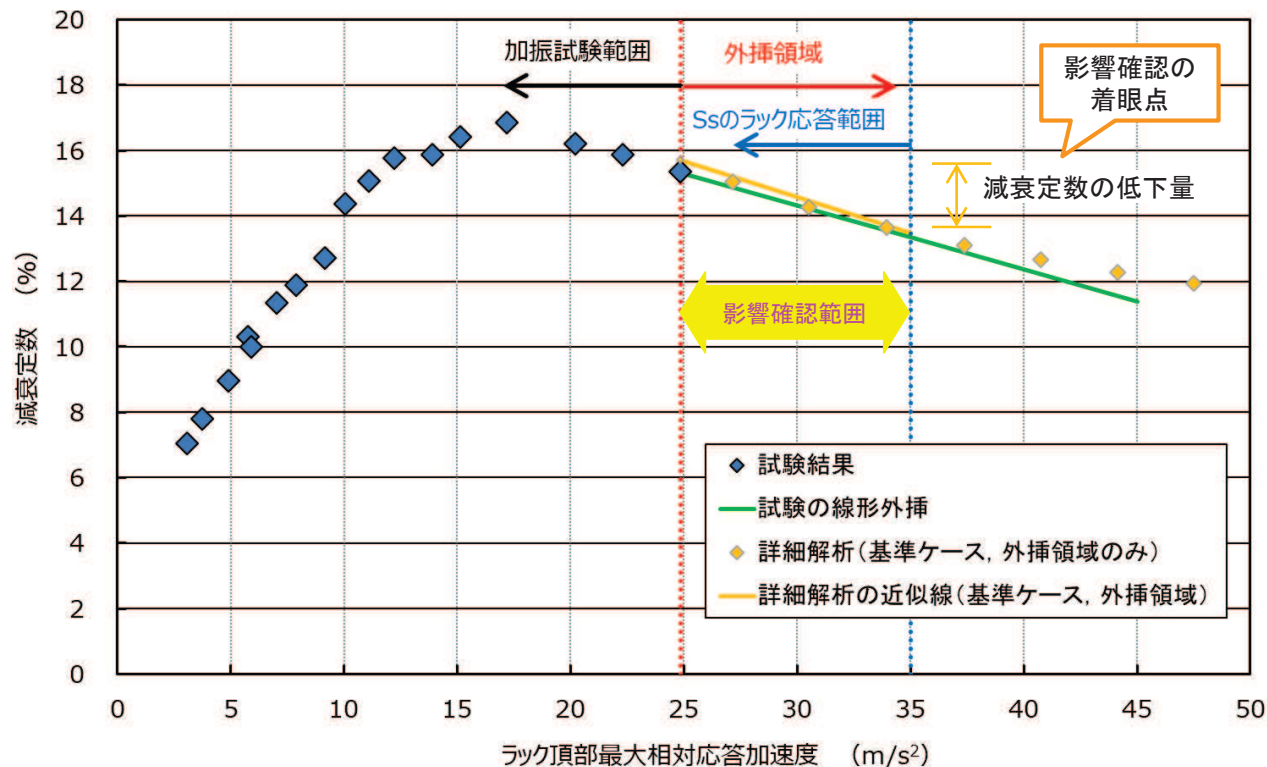
5. 指摘事項①-3に対する回答(1/2)

【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)】

STEP1 STEP2 STEP3 STEP4 STEP5

解析条件(入力値)を変動させた場合の減衰定数への影響確認方針

- 試験結果との整合性を考慮して設定するもの(5項目)については, 入力値の変動範囲において詳細解析を実施し, 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に与える影響(減衰定数の低下傾向及び低下量)を確認する。
- 影響確認に適用する入力値は, 前項で整理した変動範囲の上限値及び下限値とする。なお, 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 は, 基準ケースが上限値であるため, 上限値と下限値の中間値を上限値とする。
- **影響確認の着眼点は, 加振試験の外挿領域における燃料ラックの S_s 応答加速度範囲(以下, 「影響確認範囲」という。)に対する減衰挙動であるため, 影響確認範囲における減衰定数の低下量を算定・比較する。**
- 減衰定数の低下量は, 各入力値に対する詳細解析結果を用いて影響確認範囲を直線で表し(右図参照), 加振試験の最大応答加速度点を始点とする。



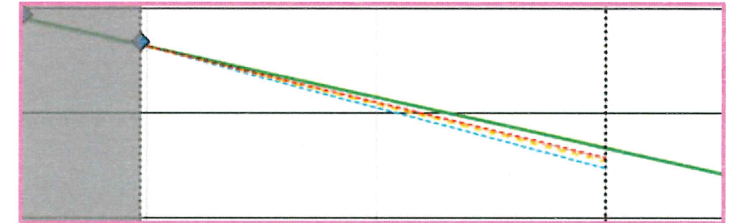
減衰定数-応答加速度線図(外挿領域における減衰低下量)

5. 指摘事項①-3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)】

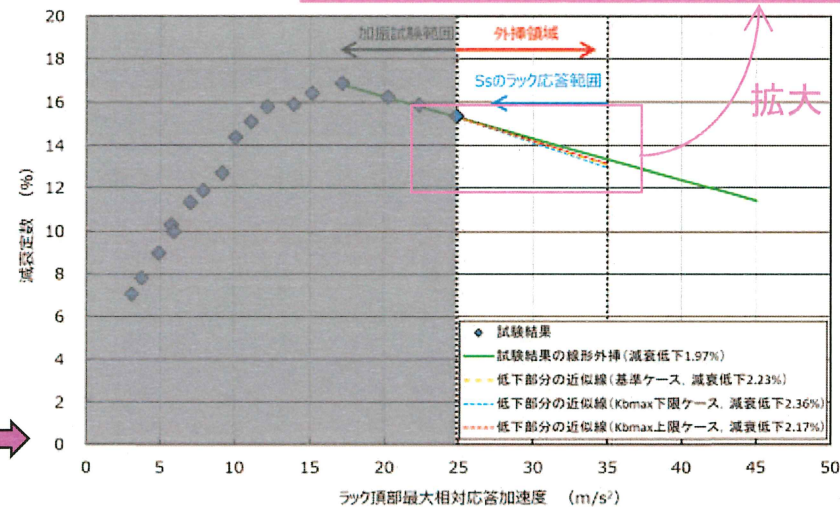
解析条件(入力値)を変動させた場合の減衰定数への影響確認結果(まとめ)

- 試験結果との整合性を考慮して設定するもの(5項目)の入力値(基準ケース)を変動させた場合(上限値及び下限値)の影響確認範囲における減衰定数について, 各解析条件(入力値)及び算定結果を下表に示す(詳細は別紙3参照)。
- 影響確認範囲における減衰定数は, 基準ケースと同様な低下傾向(急減しないこと)を示し, 低下量は最大2.36%であった。これは, 基準ケースの低下量(2.23%)及び試験結果の外挿により算定した減衰定数の低下量(1.97%)と同程度であり, 燃料ラックのSs応答加速度範囲における減衰定数への影響が軽微であることを確認した。
- 以上のことから, 試験結果の外挿により算定した減衰定数は, 試験結果の外挿領域における燃料ラックのSs応答加速度範囲の減衰挙動を表現できていると判断した。



減衰定数の影響確認結果(まとめ)

解析条件(入力値)	入力値(基準ケース)	入力値(影響確認ケース)		減衰低下量
		下限値	上限値	
$F_{b_{max}}$	ボルト締結面摩擦力			2.19% ~ 2.25%
δf	摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位			2.02% ~ 2.15%
$K_{b_{max}}$	締結ボルト剛性			2.17% ~ 2.36%
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			0.81% ~ 1.67%
E_l	燃料ラックの剛性			2.12% ~ 2.35%



締結ボルト剛性 $K_{b_{max}}$ の入力値を変動させた場合の減衰定数算定結果
⇒ 減衰定数の低下量: 2.36%(下限ケース)

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(1/3)

【設計用減衰定数設定の妥当性】

(1) 設計用減衰定数設定の妥当性確認方針

- JEAC4601等では、設計用減衰定数の設定に係る詳細な規定はない。
- このため、女川2号機の燃料ラックに対して設定した設計用減衰定数について、JEAG4601-1991追補版及びJEAC4601-2008を策定した際の、他の機器・配管系の設計用減衰定数設定事例を参照し、加振試験等により取得した減衰定数に対する余裕の取り方等に同等の事例があること等をもって妥当性を確認する方針とする。


(2) JEAG4601等の規定に基づく他設備の設計用減衰定数の設定事例の調査・整理結果

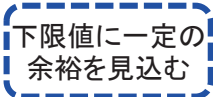
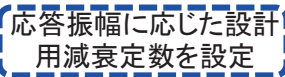
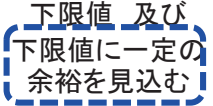
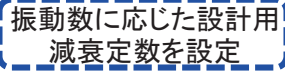

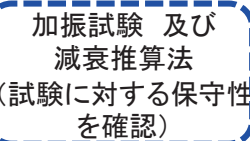
- 設計用減衰定数の設定に当たって軸となる3つの観点『減衰定数の取得方法』『減衰定数に対する設計余裕の取り方』『減衰定数とパラメータに相関関係(依存性)がある場合の取扱い』に着目して事例を調査・整理した(詳細は次ページ参照)。概要は以下のとおり。
 - 『減衰定数の取得方法』に関しては、加振試験のみの取得以外に、加振試験及びその外挿(外挿の妥当性は他の試験の分析・類推)、加振試験及び他の手法の組合せ(試験で保守性を確認した減衰推算法)で取得した事例がある。
 - 『減衰定数に対する設計余裕の取り方』に関しては、減衰定数の下限値以外に、下限値に一定の余裕(1~3%程度)を見込む、減衰定数の回帰直線(平均)から設計用減衰定数を設定した事例がある。
 - 『減衰定数とパラメータに相関関係(依存性)がある場合の取扱い』に関しては、依存するパラメータ(応答振幅、振動数)に応じた設計用減衰定数を設定した事例がある。
 - 空調用ダクトに代表される多様性のある設備には、減衰定数の下限値に一定の余裕を見込む傾向がある。

6. 指摘事項②に対する回答(2/3)

【設計用減衰定数設定の妥当性】

JEAG4601の規定に基づく他設備の設計用減衰定数の設定事例の調査・整理結果

 女川2号機と同様の項目

	対象設備	設計用減衰定数の設定方法			設計用減衰定数の設定結果		
		減衰定数(減衰定数)の取得方法	減衰定数に対する余裕の取り方	減衰定数とパラメータに相関関係(依存性)がある場合の取扱い	減衰定数(下限値)	設計用減衰定数の設定値	余裕(最小値)
減衰とパラメータに相関関係あり	女川2号機 使用済燃料貯蔵ラック	加振試験及び試験データの外挿(外挿の妥当性を解析で確認)	統計処理(回帰直線(-2σ))に、さらに一定の余裕を見込む	応答振幅に応じた設計用減衰定数を設定	・応答加速度依存 14~15%(S _s) 14~15%(S _d)	・応答加速度依存 10%(S _s) 7%(S _d)*	4%(S _s) 7%(S _d)
減衰とパラメータに明確な相関関係なし	空調用ダクト, ケーブルトレイ, 電気盤	加振試験	 下限値に一定の余裕を見込む	—	2.8~8.0% 8~10% 4.3~16.0%	2.5% 5% 4%	0.3% 3% 0.3%
	PWR蒸気発生器伝熱管	加振試験	下限値	—	8.0%(面外方向) 15.0%(面内方向)	8.0%(面外方向) 15.0%(面内方向)	—
減衰とパラメータに相関関係あり	PWR燃料集合体	加振試験	記載なし	 応答振幅に応じた設計用減衰定数を設定	・応答振幅依存 記載なし	・応答振幅依存 10~15%	記載なし
	PWR使用済燃料貯蔵ラック (キャン型の例)	加振試験	 下限値 及び 下限値に一定の余裕を見込む	 振動数に応じた設計用減衰定数を設定	・振動数依存 8%(<20Hz) 5%(20Hz~30Hz)	・振動数依存 7.0%(<20Hz) 5.0%(20Hz~30Hz)	1%(<20Hz) —(20Hz~30Hz)
	クレーン類 (BWR燃料取替機の例)	 加振試験 及び 試験データの外挿	統計処理(回帰直線(平均))	応答振幅依存性があるもの一律の設計用減衰定数を設定	・応答振幅依存 3.1%	・一律 2.0%	1.1%
	配管系 (Uボルト支持の例)	 加振試験 及び 減衰推算法 (試験に対する保守性を確認)	下限値	応答振幅依存性があるもの一律の設計用減衰定数を設定	・応答振幅依存 2.0%	・一律 2.0%	—

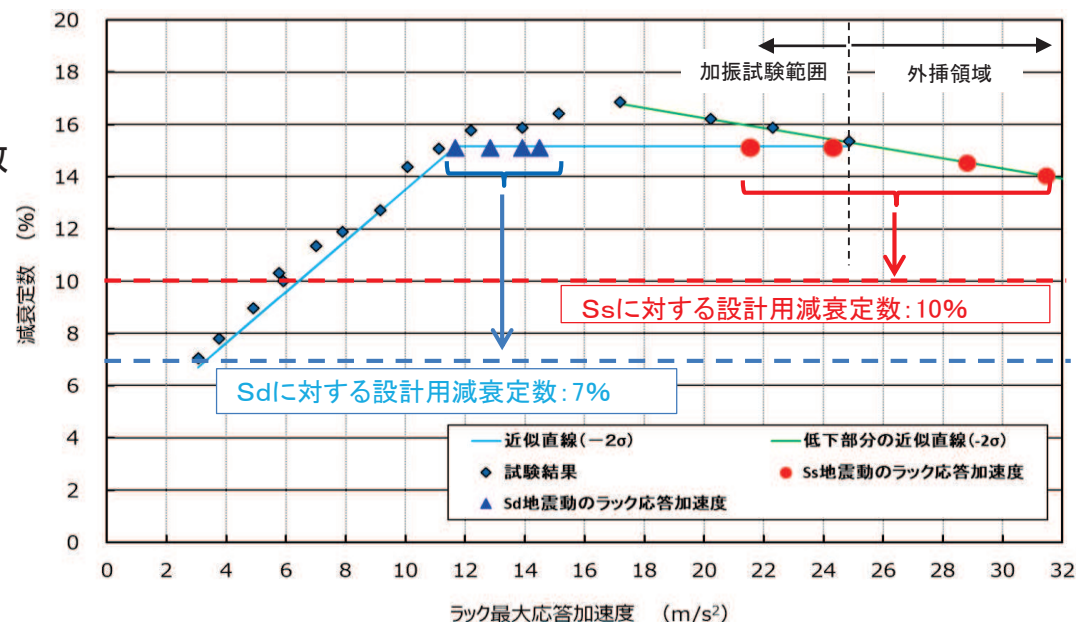
注記*: 弾性設計用地震動S_dに対しては、7%の設計用減衰定数を設定した(設置許可段階と同じ)。これは、減衰定数と応答加速度の関係において、弾性設計用地震動S_dの応答加速度が減衰定数が増加する領域に掛かっており、設計手法が持つ保守性から、実際の応答加速度が設計値を下回る可能性を考慮した。

(3) 設計用減衰定数設定の妥当性確認結果

- 女川2号機の燃料ラックに対して設定した設計用減衰定数は、**その設定に当たって軸となる3つの観点で、他設備にも同様の事例がある。**
- 女川2号機の燃料ラックと同様の設備であるPWR使用済燃料貯蔵ラックは、加振試験のみから減衰定数を取得している点で女川2号機と異なるものの、女川2号機では詳細解析により外挿領域の減衰挙動を確認したうえで、統計処理した値にさらに一定の余裕を見込んで設計用減衰定数を設定していることから、PWR使用済燃料貯蔵ラックと比較しても保守性で劣ることはない。
- 以上の検討から、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。

女川2号機使用済燃料貯蔵ラックの設計用減衰定数

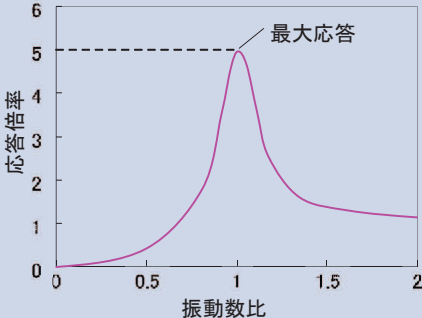
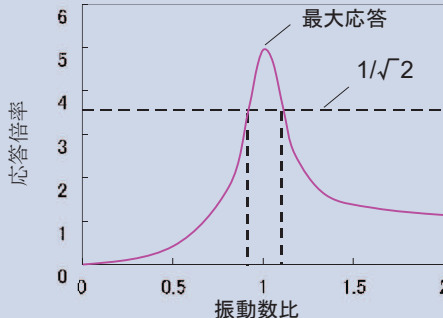
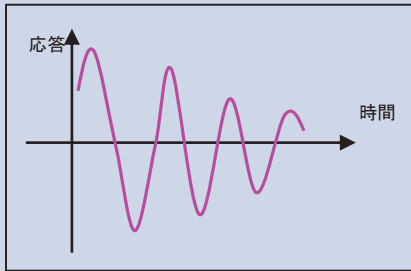
機器	設計用減衰定数(%)	
	基準地震動 S _s	弾性設計用 地震動S _d
使用済燃料 貯蔵ラック	10.0	7.0



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

別紙1. 応答倍率法による減衰定数の算出方法の妥当性

- 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いため、適用しないことにした。

詳細解析モデルの入力諸元一覧

記号	解析モデルの入力諸元	入力値	設定方法	
M_r	燃料ラック質量		一意に定まる	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。
M_f	燃料質量		一意に定まる	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。
M_t	水槽質量		一意に定まる	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。
M_{r-f}	燃料ラック-燃料間連成質量		一意に定まる	理論式に基づく流体付加質量を各質点に均等に設定。
M_{t-r}	水槽-燃料ラック間連成質量		一意に定まる	理論式に基づく流体付加質量を各質点に均等に設定。
Kb_{max}	締結ボルト剛性		試験結果との整合性を考慮して補正する	試験結果(微小すべり発生後の、燃料ラック固有振動数)を考慮して設定。
EI_r	ラック剛性(曲げ剛性)		試験結果との整合性を考慮して補正する	試験結果(微小すべり発生前の、燃料ラック固有振動数)を考慮して設定。
EI_f	燃料の剛性(曲げ剛性)		一意に定まる	燃料チャンネルボックスの断面形状寸法より設定。
EI_t	水槽の剛性(曲げ剛性)		一意に定まる	試験結果(水槽固有振動数)から設定。
K_θ	燃料ラック-燃料間の回転ばね		一意に定まる	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。
Cr	燃料ラックの構造減衰		一意に定まる	試験結果(30体貯蔵)から減衰4%と設定。
Fb_{max}	ボルト締結面摩擦力		試験結果との整合性を考慮して補正する	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		一意に定まる	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。
δf	摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位		試験結果との整合性を考慮して補正する	摩擦力 Fb_{max} 以下で先行的に微小な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		試験結果との整合性を考慮して補正する	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。

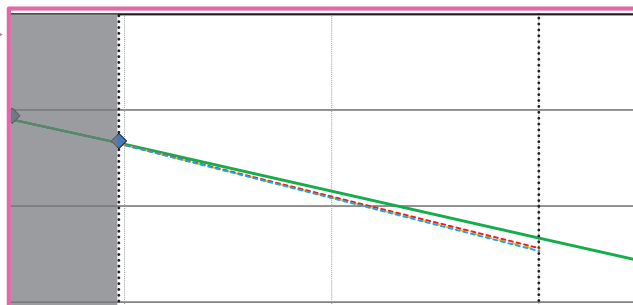
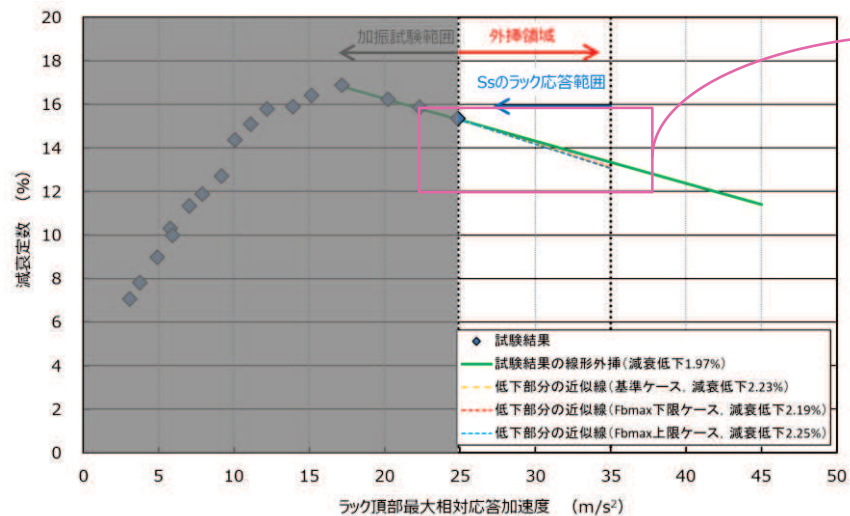
解析条件の入力値を変動させた場合の減衰定数への影響確認結果のまとめ

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)	
$F_{b_{max}}$	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			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	摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位	試験結果を表現する微小すべり変位量(1mm以下を目安)			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%
$K_{b_{max}}$	締結ボルト剛性	微小すべり発生後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	締結ボルトばね剛性の振幅依存性を定義する最大変位	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			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%
E_r	燃料ラックの剛性	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*1: 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。

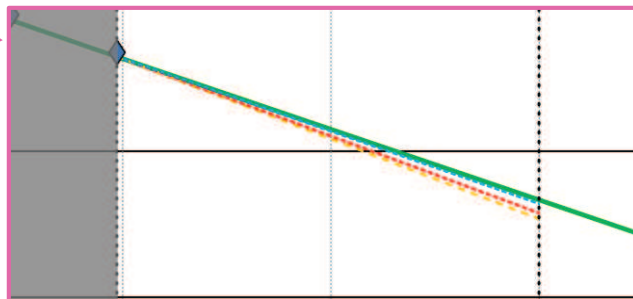
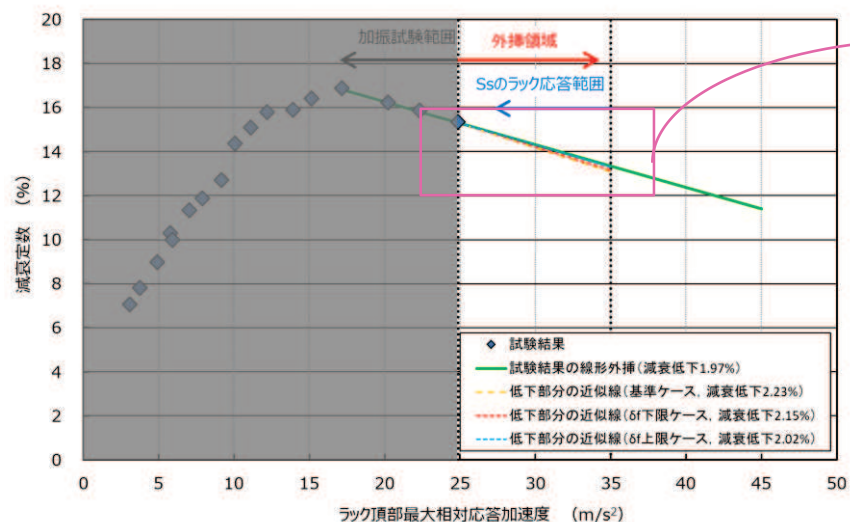
*2: 基準ケースが上限値のため、上限と下限の中間値を上側のケースとして設定している。

a. ボルト締結面摩擦力 $F_{b,max}$ の入力値を変動させた場合



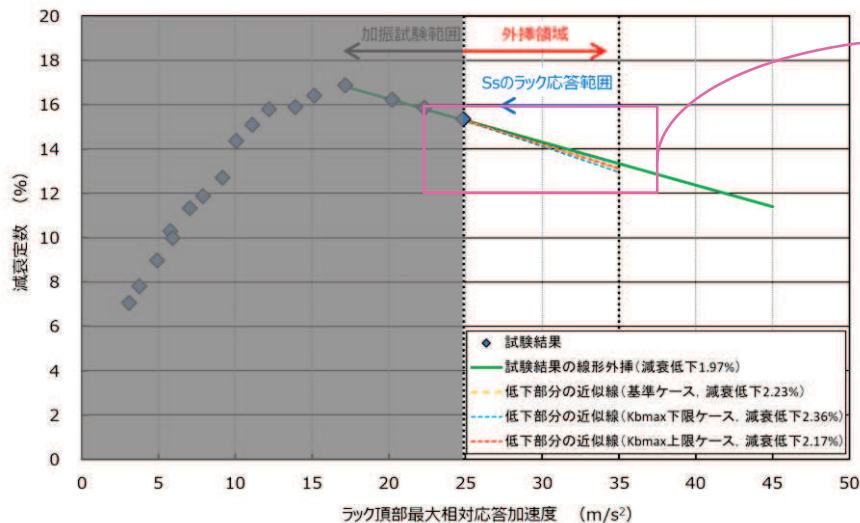
最大の減衰低下量: 2.25%(上限ケース)

b. 摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位 δf の入力値を変動させた場合

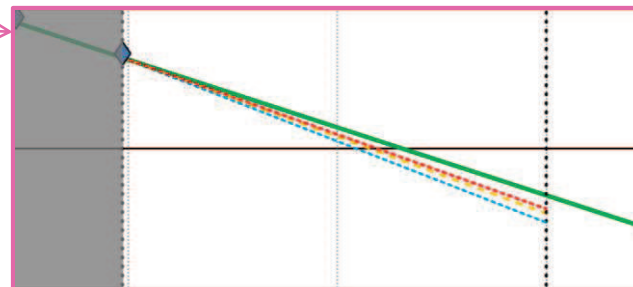


最大の減衰低下量: 2.23%(基準ケース)

c. 締結ボルト剛性 Kb_{max} の入力値を変動させた場合

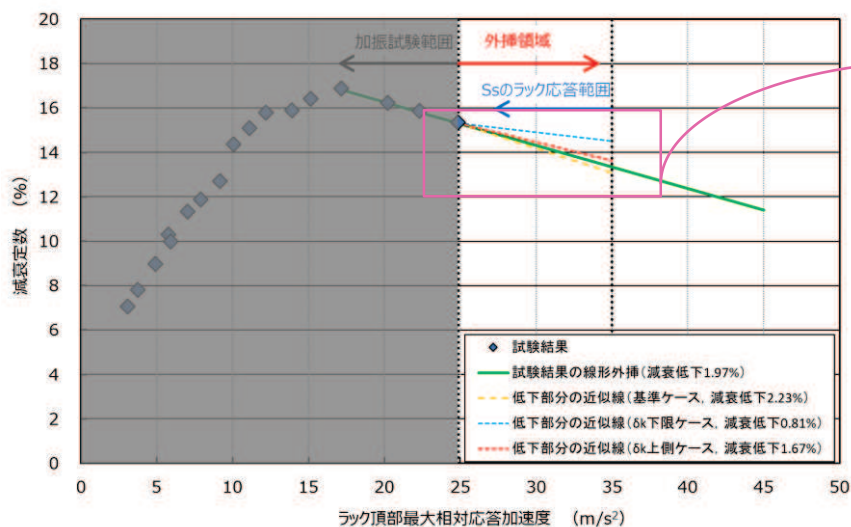


拡大

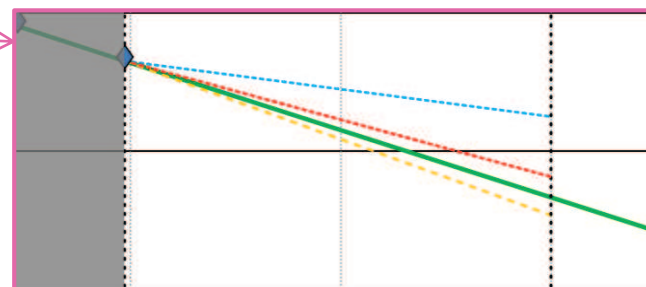


最大の減衰低下量: 2.36% (Kb_{max} 下限ケース)

d. 締結ボルト剛性の振幅依存性を定義する最大変位 δk の入力値を変動させた場合

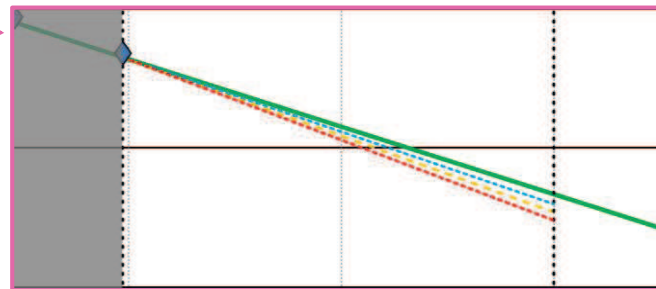
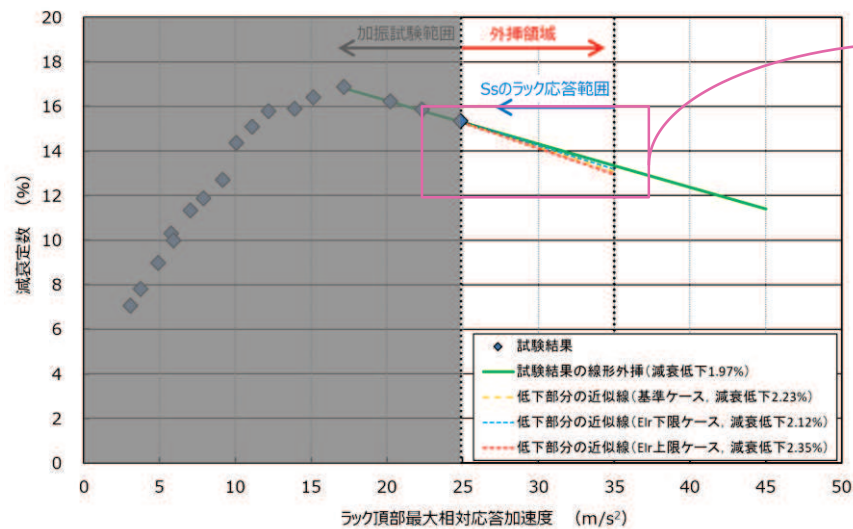


拡大



最大の減衰低下量: 2.23% (基準ケース)

e. 燃料ラックEI_rの剛性解析条件の入力値を変動させた場合



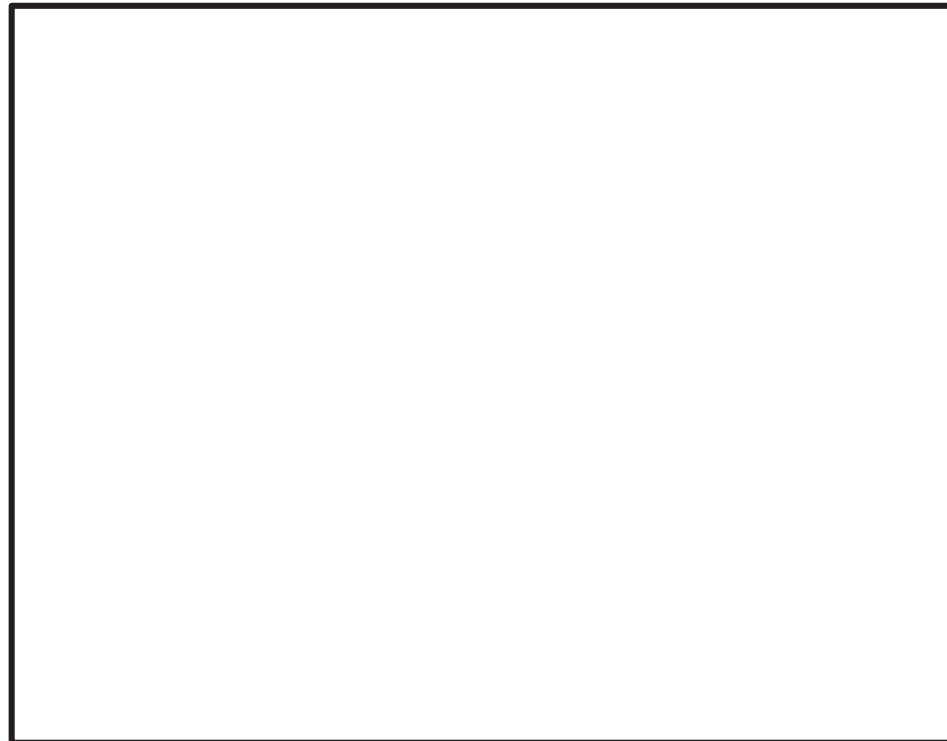
最大の減衰低下量: 2.35%(上限ケース)

空調用ダクトの例(JEAG4601-1991 追補版より引用)

減衰定数(減衰定数)の取得方法



減衰定数(下限値)



減衰定数に対する余裕の取り方

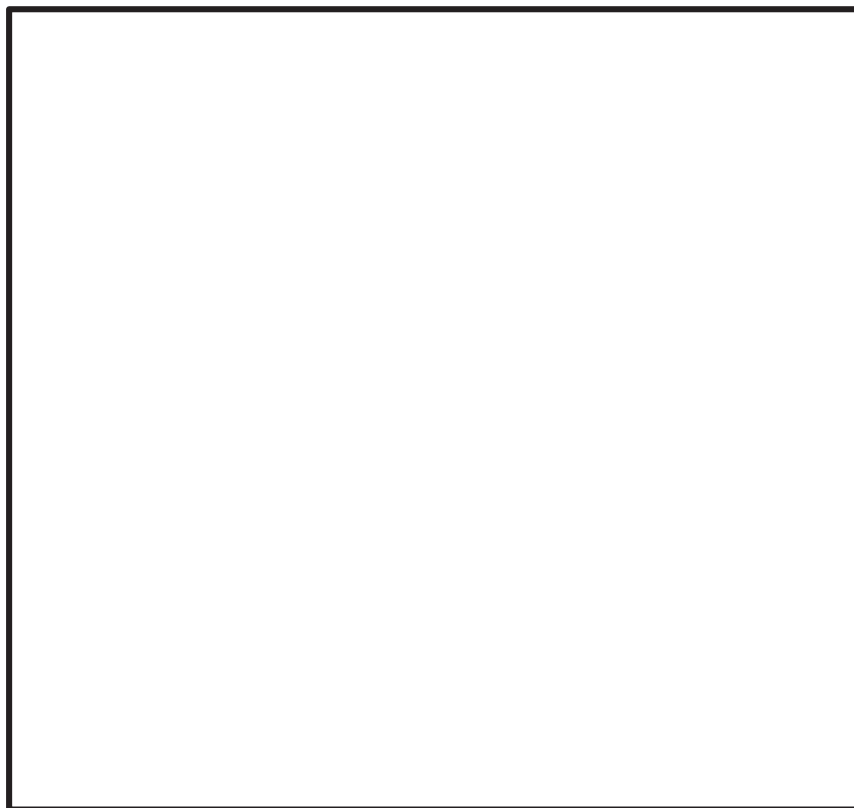


設計用減衰定数の設定値



PWR蒸気発生器伝熱管の例(JEAC4601-2008より引用)

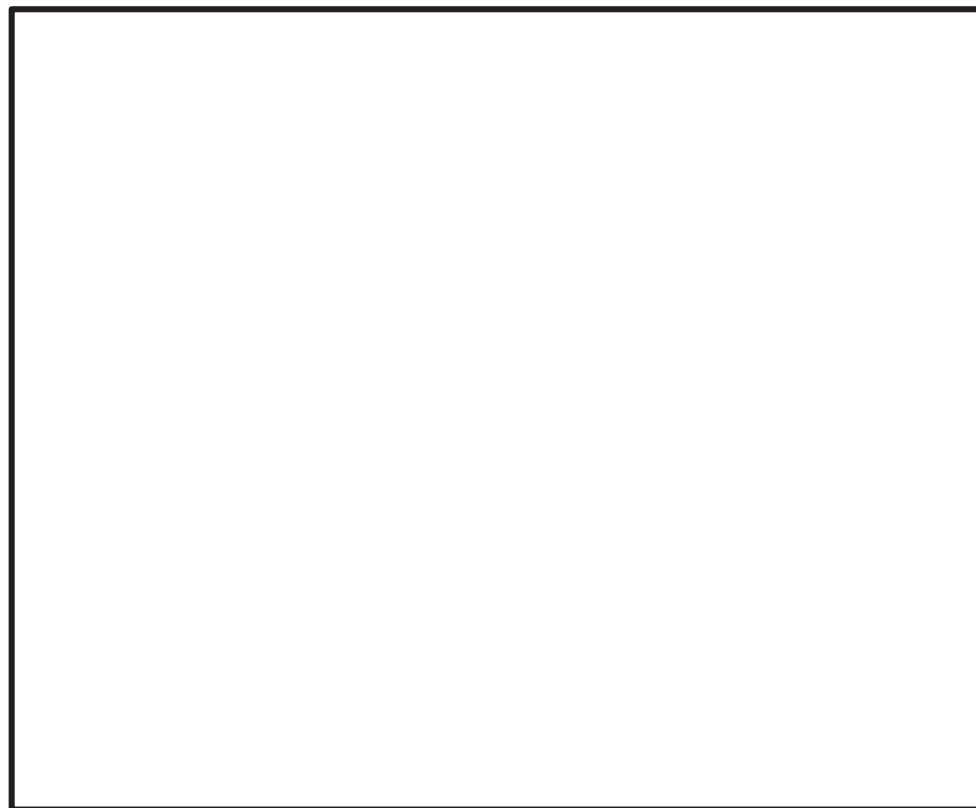
減衰定数(減衰定数)の取得方法



減衰定数に対する余裕の取り方



減衰定数



設計用減衰定数の設定値



PWR使用済燃料貯蔵ラック(キャン型)の例(JEAC4601-2008より引用)

減衰定数(減衰定数)の取得方法



減衰定数(下限値)



減衰定数に対する余裕の取り方

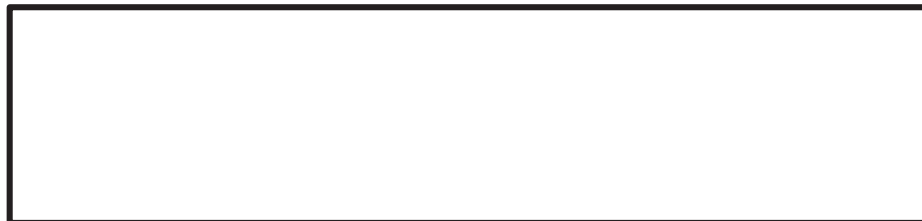


設計用減衰定数の設定値

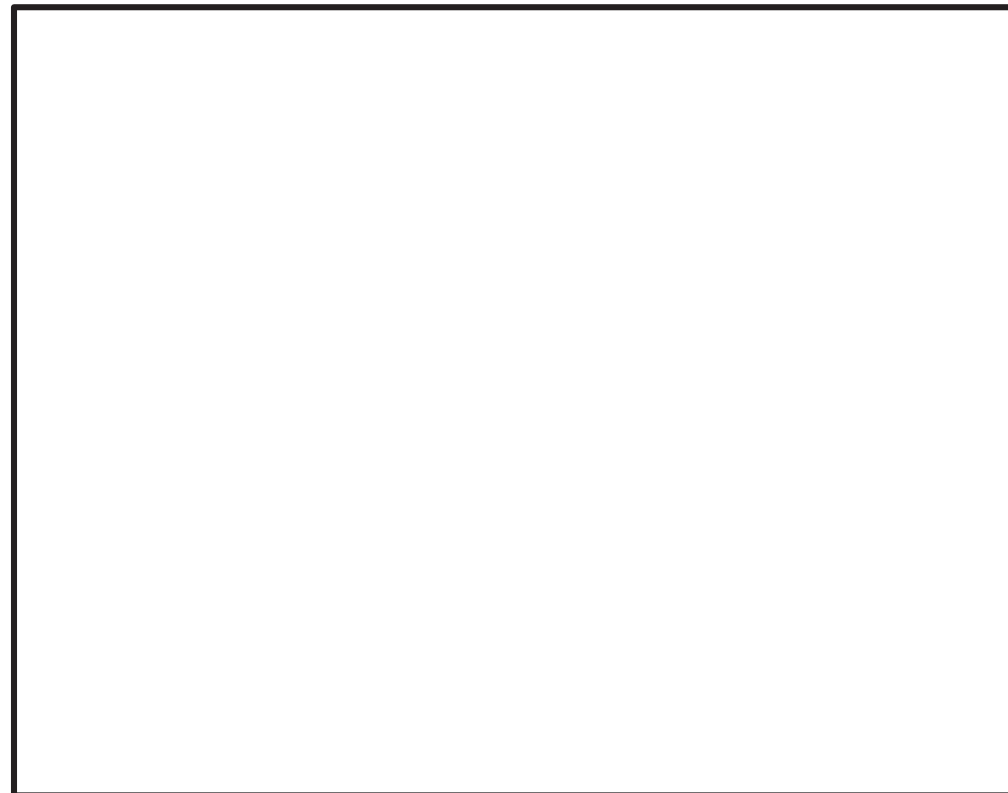


クレーン類(BWR燃料取替機)の例(JEAC4601-2008より引用)

減衰定数(減衰定数)の取得方法




減衰定数(下限値)



減衰定数に対する余裕の取り方



設計用減衰定数の設定値



配管系(Uボルト支持)の例(JEAC4601-2008より引用)

減衰定数(減衰定数)の取得方法



減衰定数に対する余裕の取り方



減衰定数(下限値)



設計用減衰定数の設定値



別紙4. 他設備の設計用減衰定数の設定事例(6/6) (設計用減衰定数に関する海外規格の例)

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(下表)。
- 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、地震動レベルに応じた設計用減衰定数が規定されている。

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

Table 1. SSE Damping Values

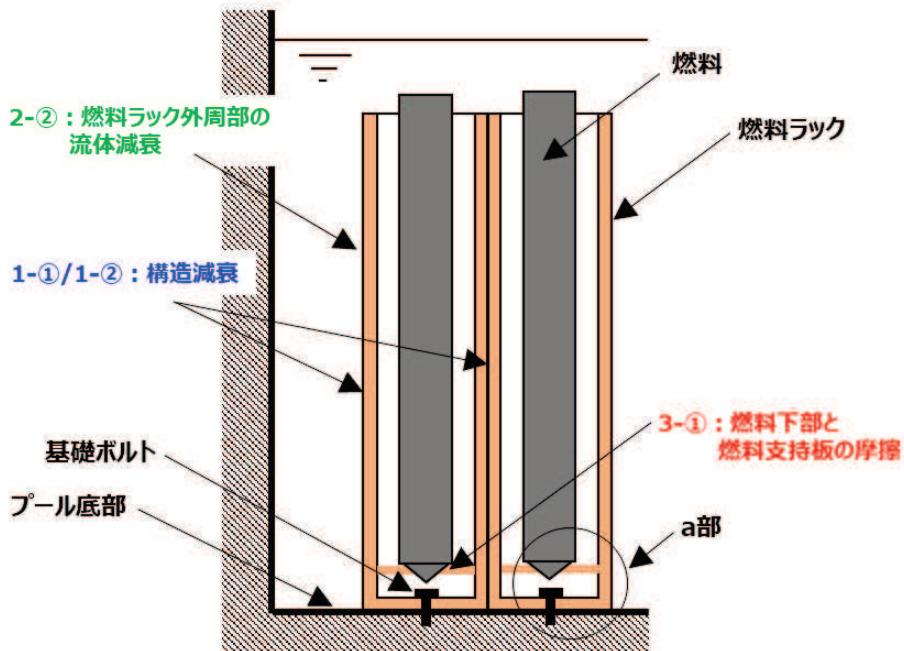
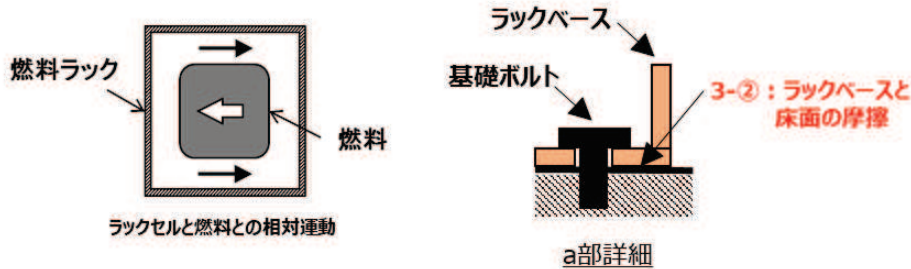
Structural Material	Damping (% of Critical Damping)
Reinforced Concrete	7%
Reinforced Masonry	7%
Prestressed Concrete	5%
Welded Steel or Bolted Steel with Friction Connections	4%
Bolted Steel with Bearing Connections	7%
Note: For steel structures with a combination of different connection types, use the lowest specified damping value, or as an alternative, use a “weighted average” damping value based on the number of each type present in the structure.	

Table 2. OBE Damping Values

Structural Material	Damping (% of Critical Damping)
Reinforced Concrete	4%
Reinforced Masonry	4%
Prestressed Concrete	3%
Welded Steel or Bolted Steel with Friction Connections	3%
Bolted Steel with Bearing Connections	5%

➤ 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



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)の摺動などによる減衰
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。

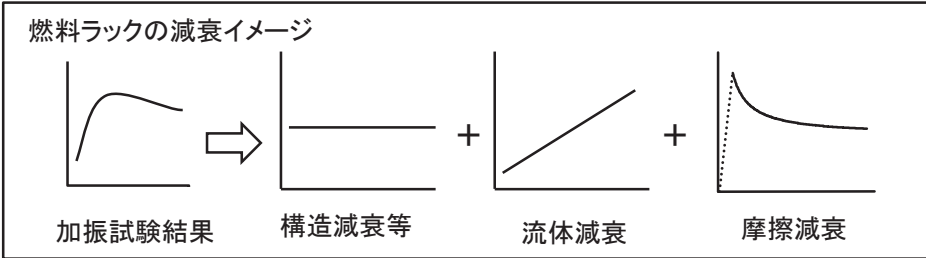
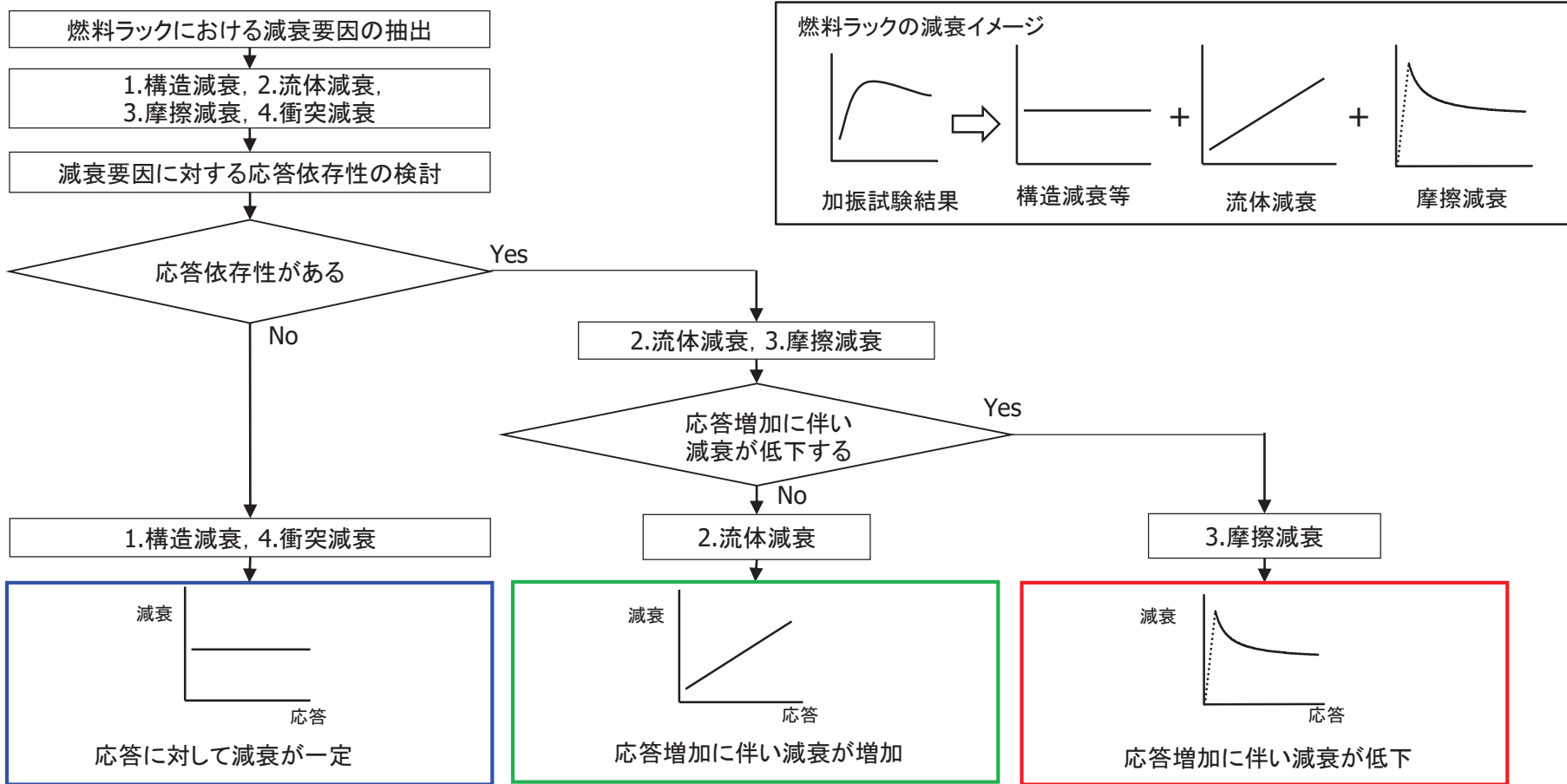
$$\text{燃料ラック(頂部)の応答倍率 } Q = \frac{\left| \frac{\dot{x}(t)}{\ddot{u}(t)} \right|_{\max_1}}{\left| \frac{\dot{q}(t)}{\ddot{u}(t)} \right|_{\max}} = \beta\phi \left[\frac{\dot{q}(t)}{\ddot{u}(t)} \right]_{\max} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{1自由度系の} \\ \text{応答倍率 } Q_1 \end{array} \right.$$

- 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