

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-19-0030_改0
提出年月日	2021年 6月 11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

2021年6月11日
東北電力株式会社

本日のご説明内容

1. はじめに
2. 女川2号機の燃料ラックの構造
3. 燃料ラックの耐震設計における既工認からの変更点
4. 設置許可段階での説明内容及び詳細設計申送り事項
5. 今回工認の耐震設計に適用する設計用減衰定数の設定
6. 加振試験の外挿領域における設計用減衰定数設定の妥当性
 6. 1 燃料ラックの減衰要因の分類
 6. 2 燃料ラックの減衰要因の整理
 6. 3 減衰要因の整理結果を踏まえた解析による減衰定数の検討
 6. 4 加振試験の外挿領域における設計用減衰定数設定の妥当性
7. まとめ

参考1 加振試験に基づく減衰定数設定の全体概要

参考2 $S_s-1, 2$ に対する減衰定数

1. はじめに

- 女川2号機の使用済燃料貯蔵ラックの今回工認の耐震設計においては、水平方向の設計用減衰定数について、実物大加振試験の結果に基づき、既工認から変更した値を用いることとしている。
- 設置許可段階(第560回審査会合, 2018年3月29日他)では、平成25年12月設置変更許可申請時の基準地震動 $S_s-1, 2$ (以下「 $S_s-1, 2$ 」という。)に対し、試験結果のばらつき、耐震設計の簡便さと余裕を考慮して、燃料ラックの種類(角管110/170体)、燃料貯蔵率及び地震動(S_s/S_d)によらず、水平方向の設計用減衰定数として一律7.0%を採用することとした。
- これに関わる詳細設計送付事項(今回工認の耐震設計に適用する設計用減衰定数について、基準地震動 S_s の確定条件に基づく適用性を改めて確認)に対する回答(基準地震動 S_s の水平方向の設計用減衰定数の10%への変更を含む)等を説明する。

2. 女川2号機の燃料ラックの構造

- 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、原子炉建屋3階の使用済燃料プール(以下「燃料プール」という。)内に設置された、「角管型」のラックである。
- 角管型の燃料ラックは角管と補強板を溶接することで、格子状のセルを構成している。
- 燃料ラックには、角管を10列×11列に配列した貯蔵体数110体のラックと、同じく10列×17列に配列した貯蔵体数170体のラックの2種類がある。

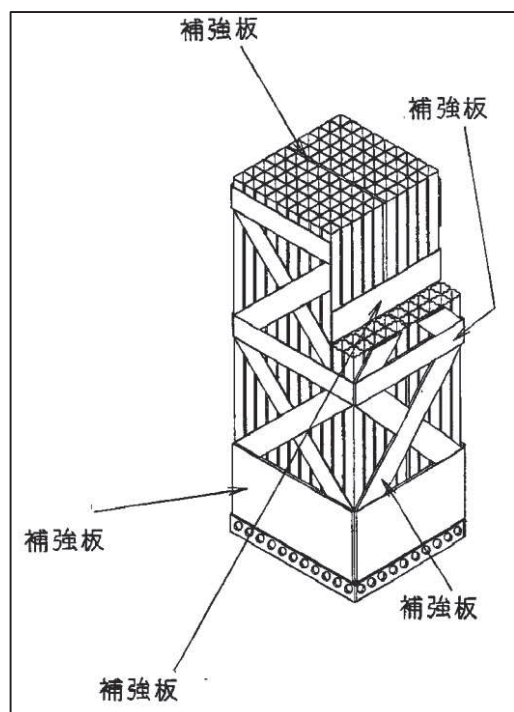


図 燃料ラック概略構造図

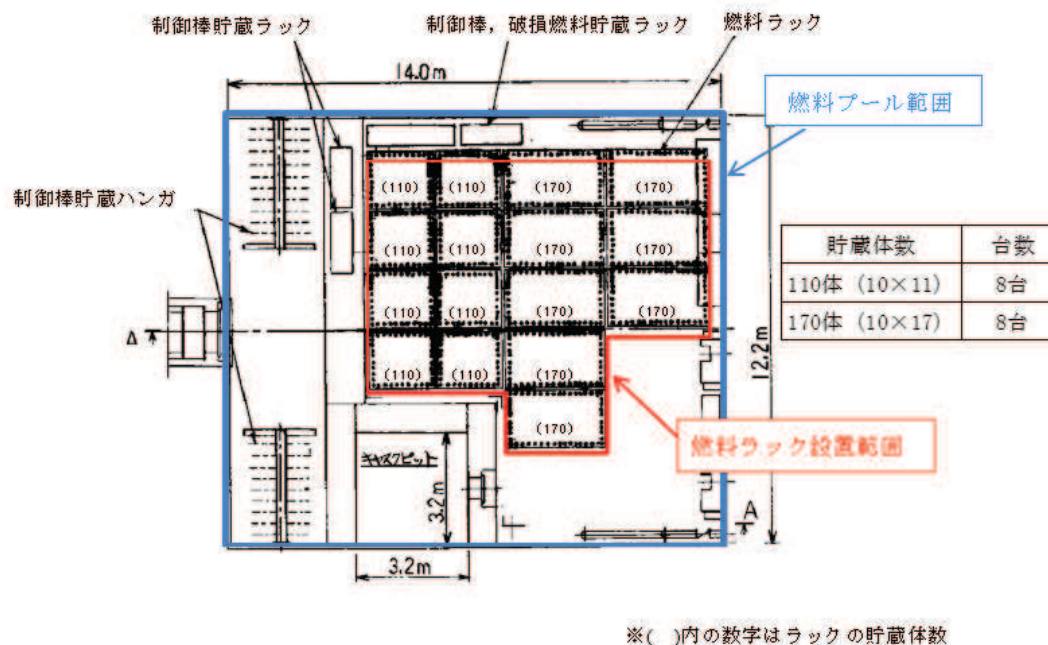


図 燃料ラック配置図

3. 燃料ラックの耐震設計における既工認からの変更点

- 燃料ラックの耐震設計における既工認からの変更点は設計用減衰定数(水平方向)(以下「設計用減衰定数」という。)のみである。
- 設計用減衰定数は、既工認では「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。)に規定される溶接構造物の設計用減衰定数1.0%を用いていた。
- これに対し、実際の燃料ラックは、燃料プール内に設置され、また、燃料集合体を貯蔵していることから、燃料集合体のガタつき、燃料集合体の着座部の摩擦、ラック内壁と燃料集合体の衝突及び水の抵抗により、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考えられる。
- そのため、今回工認の燃料ラックの耐震設計においては、燃料ラックの設計用減衰定数は、実物大加振試験(以下「加振試験」という。)の結果に基づき設定している。【参考1】

		既工認手法	今回工認手法
解析モデル		3次元有限要素モデル	同左
耐震解析手法	水平方向	スペクトルモーダル解析	同左
	鉛直方向	静的解析	同左(剛構造のため)
設計用減衰定数	水平方向	1.0%	Ss:10.0% Sd:7.0%
	鉛直方向	—	—
許容応力		JEAG4601	同左
地盤・建屋等の不確かさの考慮		床応答スペクトルの周期方向への±10%拡幅	同左
モデルの考え方		剛性は燃料ラック本体の寸法及びヤング率より設定。 質量は燃料ラック本体、燃料ラック内の燃料集合体、水及び付加質量を考慮。	同左

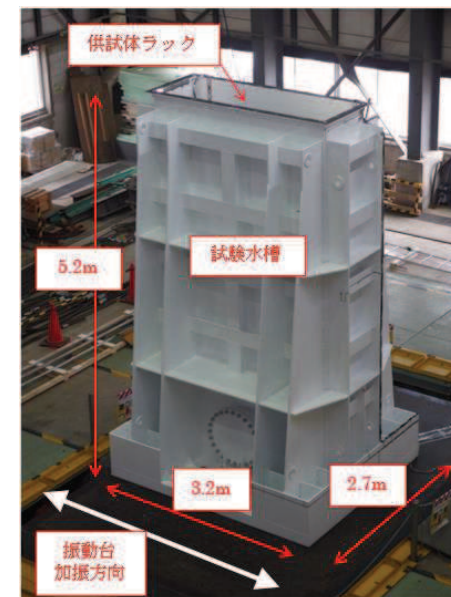
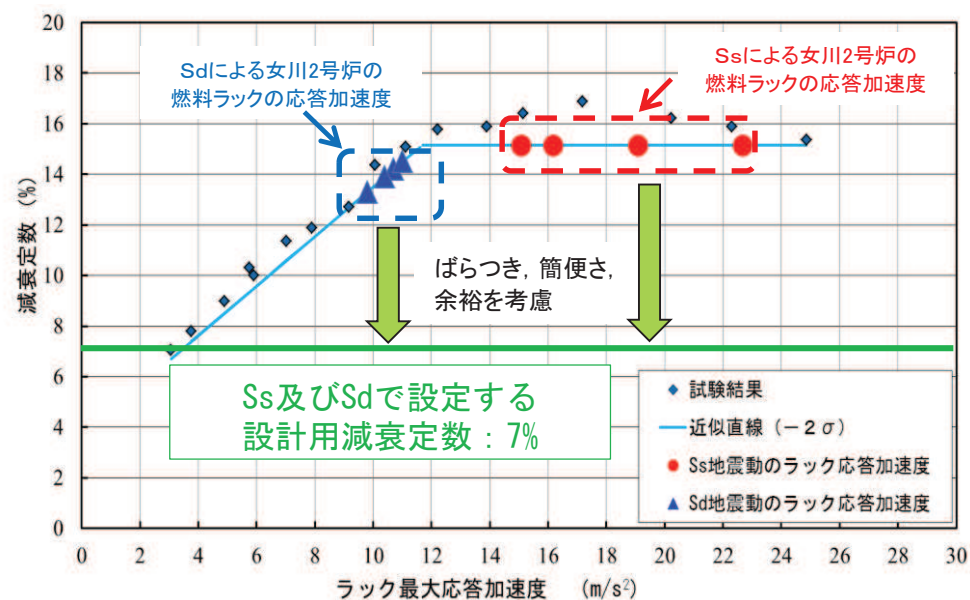


図 実物大加振試験

4. 設置許可段階での説明内容及び詳細設計申送り事項

- 設置許可段階(第560回審査会合, 2018年3月29日他)では, 耐震設計に適用する設計用減衰定数について, $S_s-1, 2$ に対し, 試験結果のばらつき, 耐震設計の簡便さと余裕を考慮して, 燃料ラックの種類(角管110/170体), 燃料貯蔵率及び地震動(S_s/S_d)によらず, 一律7.0%を採用することとした。【参考2】
- これに対し, 詳細設計申送り事項として, 今回工認の耐震設計に適用する設計用減衰定数について, 基準地震動の確定条件に基づく適用性を改めて確認することとなった。



女川2号炉の燃料ラックの設計用減衰定数の設定

(第560回審査会合(2018年3月29日)資料1-3-1抜粋)

5. 今回工認の耐震設計に適用する設計用減衰定数の設定

- 実物大加振試験の結果に基づく設計用減衰の設定のプロセス、及びSdで設定する設計用減衰定数は、設置許可段階（第560回審査会合，2018年3月29日他）にてご説明済みの内容（【参考1】）から変更なし。
- 今回工認の耐震設計に適用する基準地震動Ssに対する設計用減衰定数については、基準地震動Ssの確定条件に基づく応答加速度範囲において、加振試験で得られた減衰定数が15%を上回っており、加振試験範囲を超えた応答加速度範囲においても10%を大きく上回ると考えられるため、加振試験範囲の内外を問わず、10%と設定することとした。（下図参照）
- 加振試験範囲を超えた応答加速度範囲において、減衰定数が10%を大きく上回るとの判断の妥当性については、「加振試験の外挿領域における設計用減衰定数設定の妥当性」として次項で説明する。

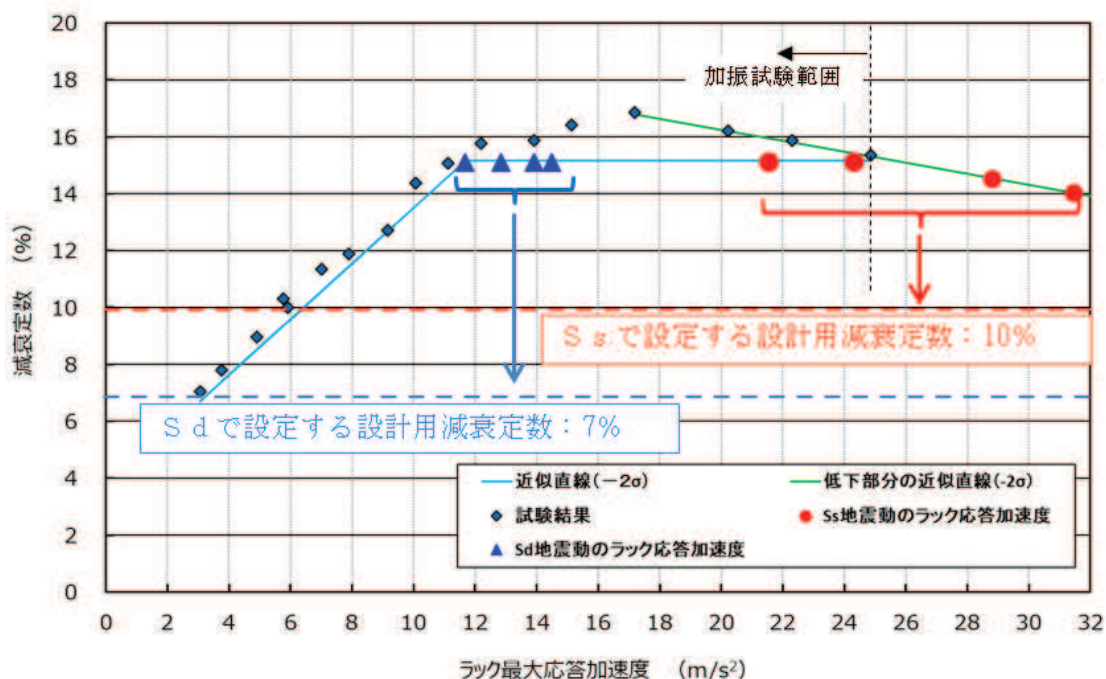


図 燃料ラック頂部最大応答加速度と減衰定数の関係

6. 加振試験の外挿領域における設計用減衰定数設定の妥当性

6.1 燃料ラックの減衰要因の分類

➤ 加振試験の外挿領域においても減衰定数が10%を大きく上回るとの判断の妥当性を確認するため、応答依存性の観点から燃料ラックの加振時に発生する減衰の要因を分類した。

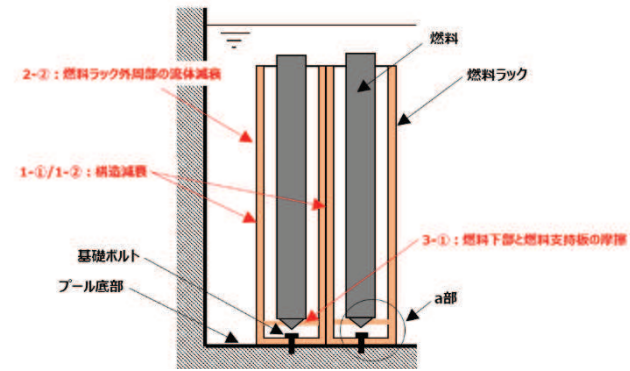
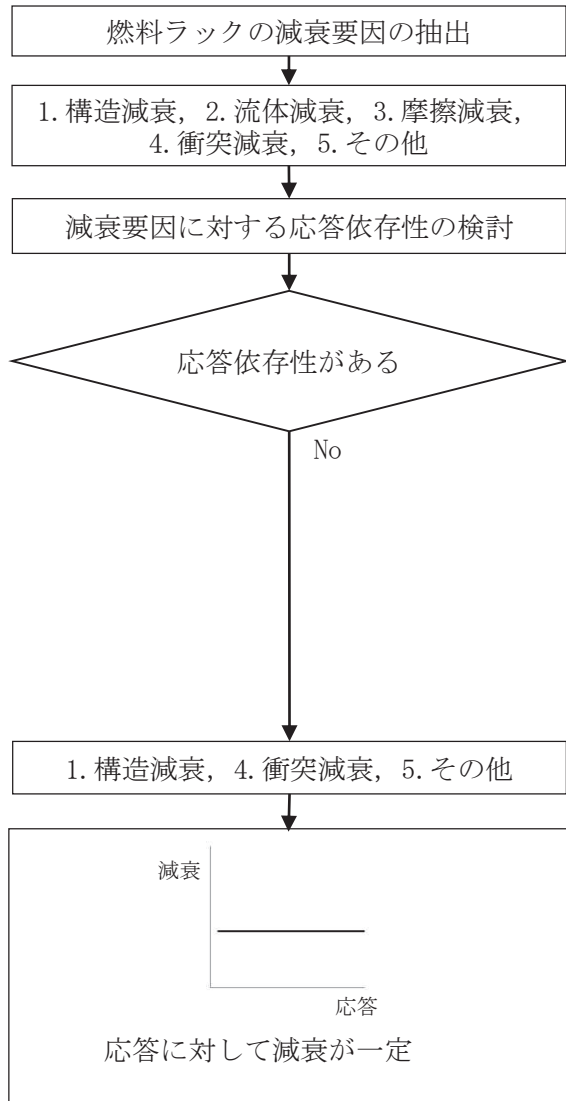
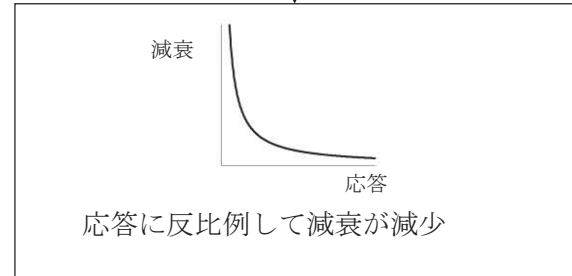


図 燃料ラックの減衰要因(イメージ)

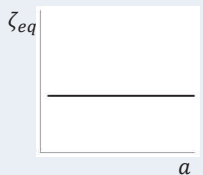
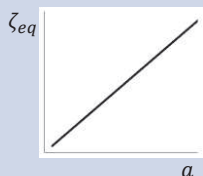


6. 加振試験の外挿領域における設計用減衰定数設定の妥当性

6.2 燃料ラックの減衰要因の整理(1/2)

- 燃料ラックの加振時に発生する減衰の各要因に対し、応答依存性及び減衰の大きさについて整理した。

表 燃料ラックの減衰要因と応答依存性(1/2)


要因	No.	内容	応答依存性	減衰の大きさ
1.構造減衰	1-①	材料自体の減衰(内部減衰)	材料に起因するため応答依存性なし	加振試験結果から燃料ラック応答が振幅ゼロの場合の減衰は約4%と想定される。なお、一般的な機械構造物の設計用減衰定数は1%~2%。
	1-②	部材間(角管, 補強板)の摺動などによる減衰	減衰力による消費エネルギーと構造体の振動エネルギーはともに応答に応じて大きくなるため、等価減衰定数は一定となり応答依存性はない 	
2.流体減衰	2-①	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	等価減衰定数 ζ_{eq} は変位に比例して増加 $\zeta_{eq} = \frac{4C}{3\pi M} a$ C : 流体減衰の減衰係数 M : 質量 a : 変位	燃料ラック内の狭い空間(セル内)における相対運動による流体減衰のため、 応答が大きくなるに従い、減衰が増加する と考えられる。
	2-②	燃料ラック外周部の流体抵抗力による減衰		ラック外周と壁との間隔が広いため、流体減衰は小さいと考えられる。

6. 加振試験の外挿領域における設計用減衰定数設定の妥当性

6.2 燃料ラックの減衰要因の整理(2/2)

➤ 燃料ラックの加振時に発生する減衰の各要因に対し、応答依存性及び減衰の大きさについて整理した。

表 燃料ラックの減衰要因と応答依存性(2/2)

要因	No.	内容	応答依存性	減衰の大きさ
3.摩擦減衰	3-①	燃料下部と燃料支持板の摩擦	<p>摩擦力Fに対して、静止状態からすべり始めるときの減衰は大きく、すべり発生後は応答に反比例の傾向で緩やかに低下する。*1 (すべり発生後の等価減衰定数ζ_{eq}は変位aに反比例で減少)</p>	<p>3-②(ラックベースと床面の摩擦減衰)の締結ボルト締付による押付け力(約100ton)に対して、試験燃料(30体)の自重(約9ton)による押付け力は約1/10以下であることから、燃料下部と燃料支持板の摩擦による減衰は小さいと考えられる。</p>
	3-②	ラックベースと床面の摩擦	$\zeta_{eq} = \frac{2F}{\pi Ka}$ <p>F: 摩擦力 K: ばね定数 a: 変位</p> 	<p>ラックベースと床面の締結ボルト締付による押付け力(摩擦力)は、約100tonと大きいため、すべり始めるときの減衰は大きく、すべり発生後は応答に反比例して低下すると考えられる。</p>
4.衝突減衰	4-①	燃料とラックセルとの衝突	<p>衝突による減衰は、反発係数eと減衰比hとして以下の式で表せる。反発係数は一般的に衝突部の形状や材質で決まるため、衝突減衰に応答依存性はない。*2</p> $h = \sqrt{\frac{\{\ln(1/e)\}^2}{\pi^2 + \{\ln(1/e)\}^2}}$	<p>加振試験では、試験体燃料とラックセルに接触痕は確認されず、試験状況映像でも衝突が確認されなかったことから、今回の試験範囲では燃料とラックセルの衝突による減衰はなかったと考えられる。</p>
5.その他	5-①	燃料ラックと燃料の連成による応答低減(動吸振器効果*3)	<p>燃料ラックと燃料の振動数比により応答低減程度が決まるため応答依存性なし</p>	<p>燃料ラックの質量に対して燃料の質量が比較的多きため、連成挙動による応答低減効果があると考えられる。</p>

注記*1: 参考文献「ダイナミクスハンドブック(普及版)―運動・振動・制御―」朝倉書店

*2: 参考文献「平成19年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 動的上下動耐震試験(クレーン類)に関する報告書(08 耐部報-0021, (独)原子力安全基盤機構)」

*3: 動吸振器効果とは、主振動系に対して補助振動系をばねやダンパーを介して接続し、補助振動系の固有振動数を主振動系に同調させることによって、主振動系の共振を抑制する効果。例えば、ビルの頂部におもりやダンパーを設置して揺れを抑制するのに用いられている。参考文献「動吸振器とその応用」コロナ社

6. 加振試験の外挿領域における設計用減衰定数設定の妥当性

6.3 減衰要因の整理結果を踏まえた解析による減衰定数の検討(1/2)

- 燃料ラックの加振時に発生する減衰要因の整理結果を踏まえ、減衰挙動の解析検討として多自由度解析モデルを用いた解析を実施した。
- 解析検討では、燃料ラックの減衰挙動の主要因である摩擦減衰(ラックベースと床面の摩擦, P9表の3-②)に加えて、加速度応答増加に伴って増加傾向を示す流体減衰(燃料ラック内に貯蔵された燃料(セル内流動)の流体抵抗による減衰, P8表の2-①), 応答依存性はないものの減衰要因となり得るその他の減衰(燃料ラックと燃料の連成による応答低減, P9表の5-①)についても考慮してモデルを設定した。

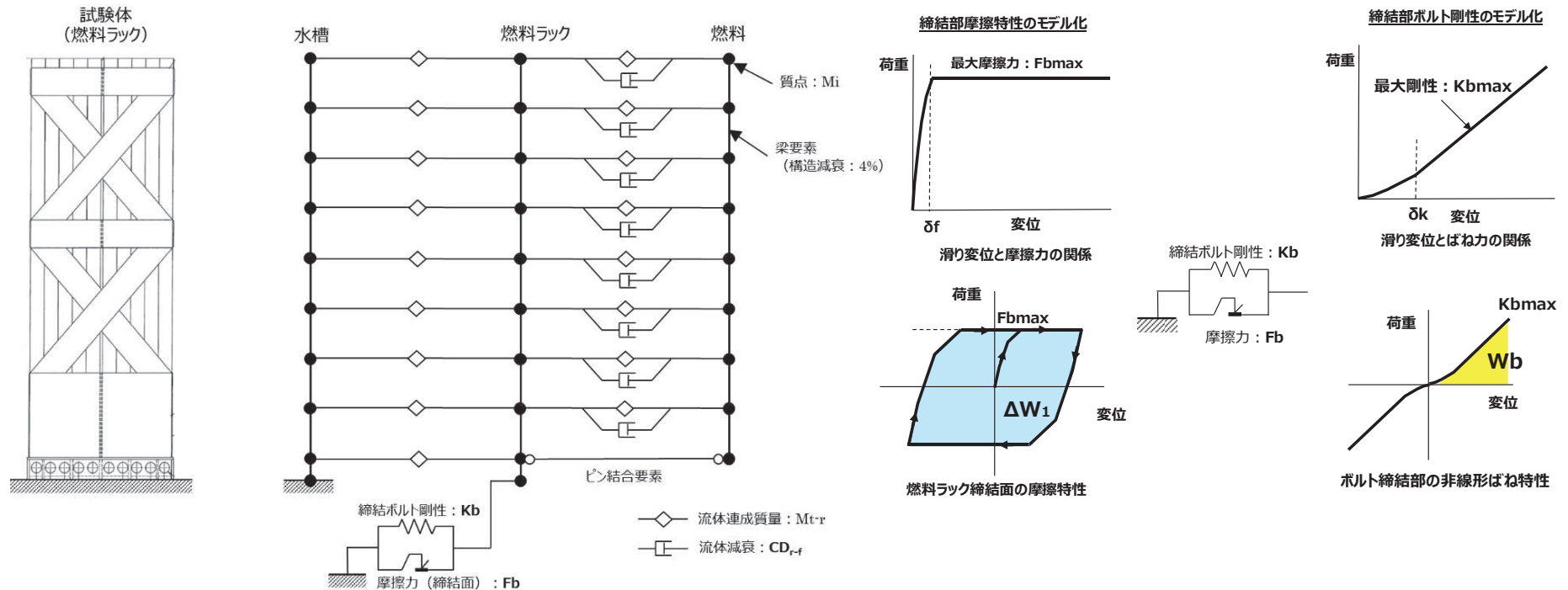


図 多自由度系解析モデル

6. 加振試験の外挿領域における設計用減衰定数設定の妥当性

6.3 減衰要因の整理結果を踏まえた解析による減衰定数の検討(2/2)

- 減衰発生要因の整理結果を踏まえた解析結果は、燃料ラックの応答加速度の増大に伴って増加して最大値を取った後低下する傾向が試験結果と概ね一致している(減衰定数の最大値も約17%と概ね一致)。

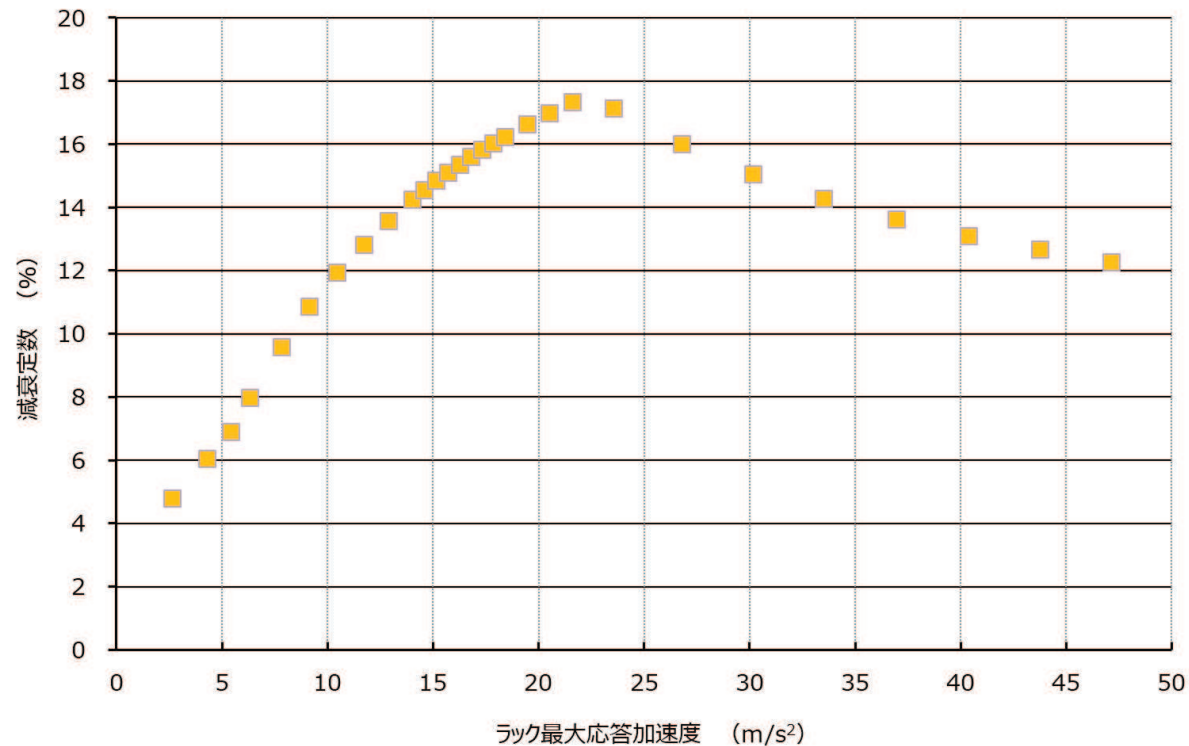


図 燃料ラックの減衰挙動に係る解析結果(多自由度モデル)

6. 加振試験の外挿領域における設計用減衰定数設定の妥当性

6.4 加振試験の外挿領域における設計用減衰定数設定の妥当性

- 解析結果は、加振試験結果と比較して、燃料ラックの応答加速度である横軸がわずかに相違していたため、解析結果に対して横軸を -3m/s^2 シフトさせた場合及び加振試験結果における減衰の全体傾向比較を行った。
- 全体的な傾向は概ね一致しており、加振試験の外挿領域における減衰の低下傾向を解析結果が補間できているものと考えられる。
- そのため、加振試験の外挿領域を含め、基準地震動 S_s に対する燃料ラックの減衰は、加振試験結果を用いて減衰を低下させる近似直線によれば、約14~15%の範囲になる。
- よって、加振試験の外挿領域においても設計用減衰定数を10%と設定することは可能である。

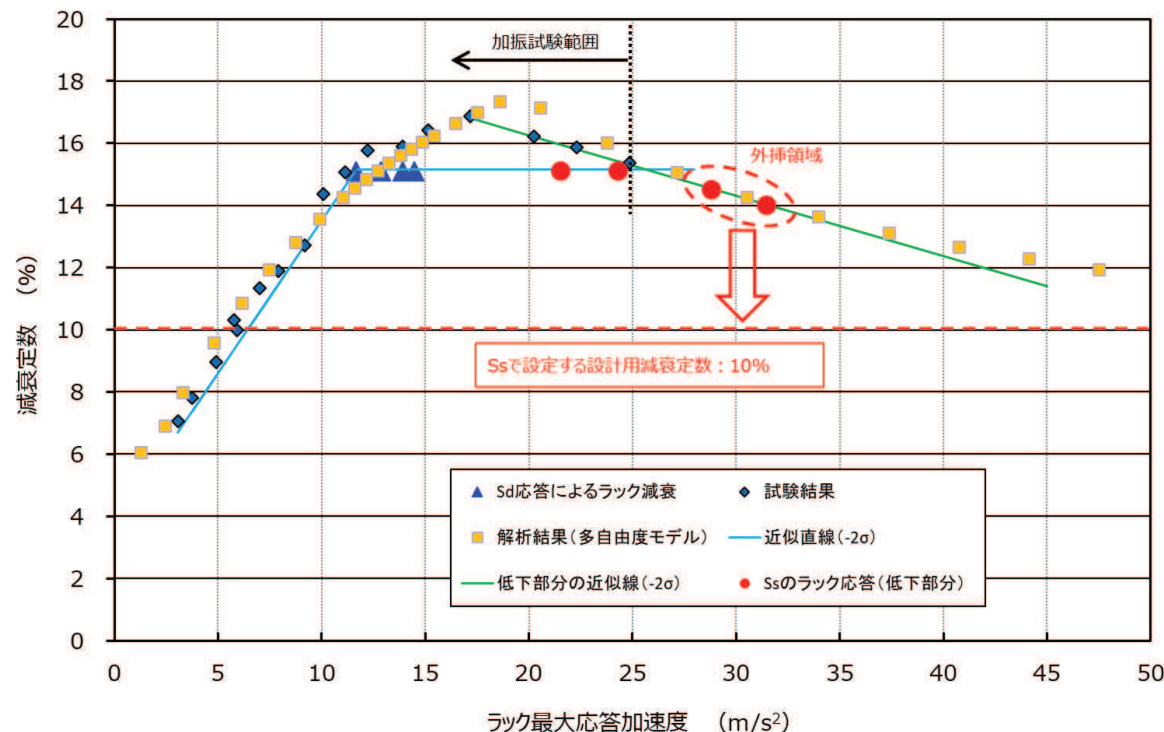


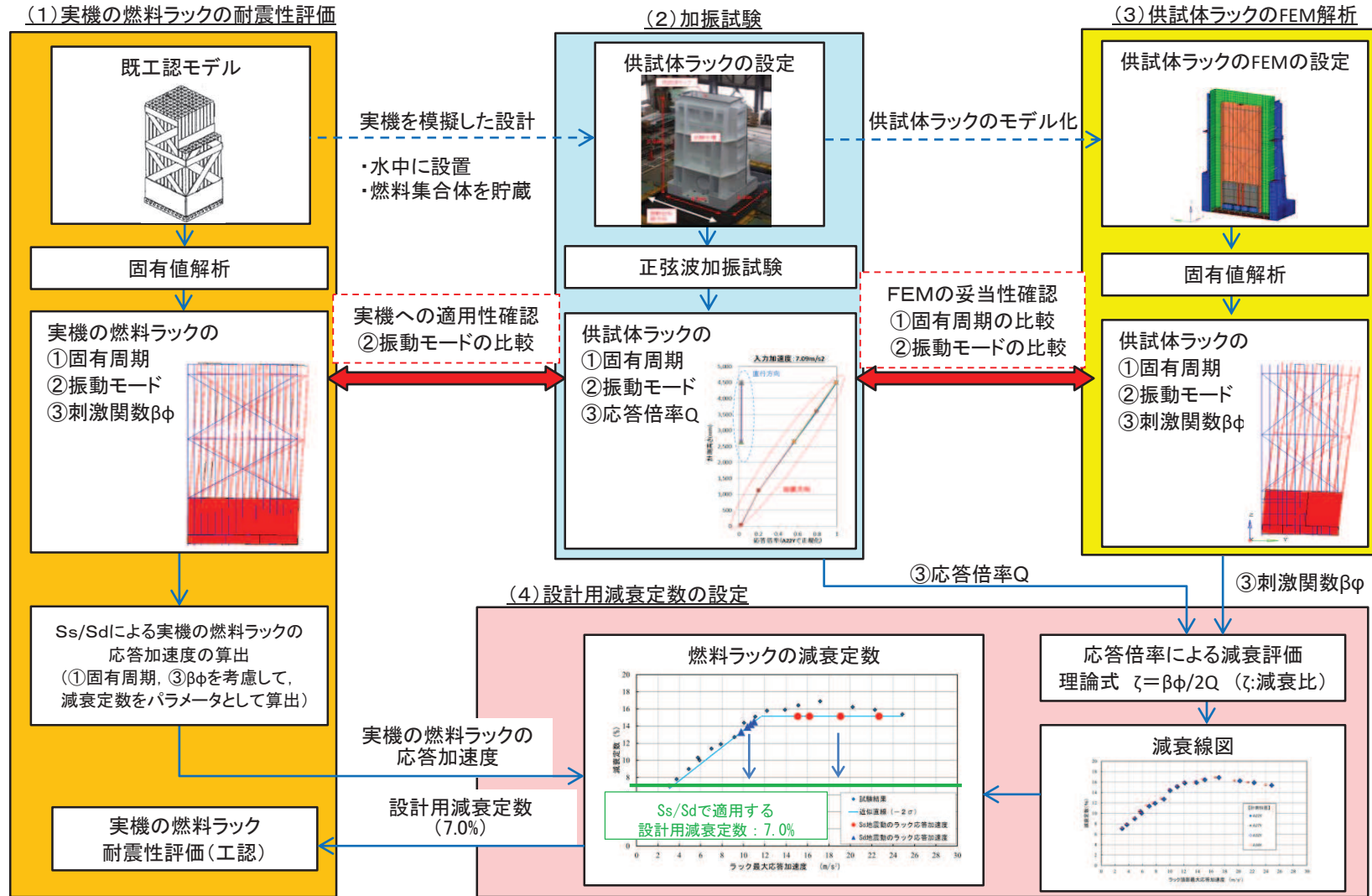
図 燃料ラックの減衰挙動に係る解析結果と試験結果(解析結果の横軸を -3m/s^2 シフト)

7. まとめ

- 女川2号機の使用済燃料貯蔵ラックの今回工認の耐震設計に適用する水平方向の設計用減衰定数については、既工認の1%から変更し、基準地震動の確定条件及び実物大加振試験の結果に基づき10%と設定する。
- 基準地震動の確定条件で実物大加振試験の範囲を超えた応答加速度範囲においても、水平方向の設計用減衰定数は10%と設定することとし、その妥当性について、使用済燃料貯蔵ラック加振時の減衰発生要因の整理結果を踏まえた解析により確認した。

【参考1】 加振試験に基づく減衰定数設定の全体概要

第560回審査会合(2018年3月29日)資料1-3-1抜粋



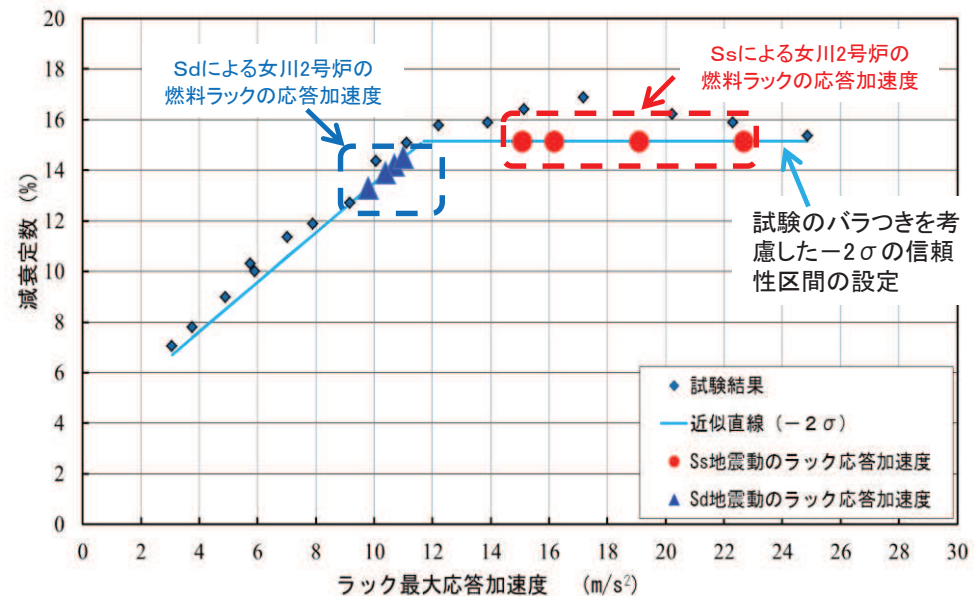
【参考2】 $S_s-1, 2$ に対する減衰定数の設定(1)

第560回審査会合(2018年3月29日)資料1-3-1抜粋

- 供試体ラックの減衰定数には応答依存性があることを確認したことから、女川2号炉の燃料ラックの耐震設計に適用する設計用減衰定数を設定するため、評価用地震動(S_s/S_d)に対する燃料ラックの応答加速度を確認
- 供試体ラックと燃料ラックの応答加速度の比較に当たっては、各試験ケースで得られた4点の加速度計による減衰のうち下限値を代表とし、さらに -2σ (95%)の信頼性区間の直線近似を設定の上、女川2号炉の燃料ラックの応答加速度と比較
- 基準地震動 S_s 相当に対する女川2号炉の燃料ラックの応答加速度レベルにおける減衰定数は約15%、弾性設計用地震動 S_d 相当に対する減衰定数は約13~14%であることを確認

女川2号炉の燃料ラックの加速度レベルの確認

地震動	ラック種類	方向	固有周期 (s)	最大応答加速度 (m/s^2)	減衰定数 (%)
基準地震動 S_s 相当	110体	短辺		19.1	15.1
		長辺		16.2	15.1
	170体	短辺		22.7	15.1
		長辺		15.1	15.1
弾性設計用地震動 S_d 相当	110体	短辺		11.0	14.5
		長辺		10.4	13.9
	170体	短辺		10.7	14.2
		長辺		9.8	13.3



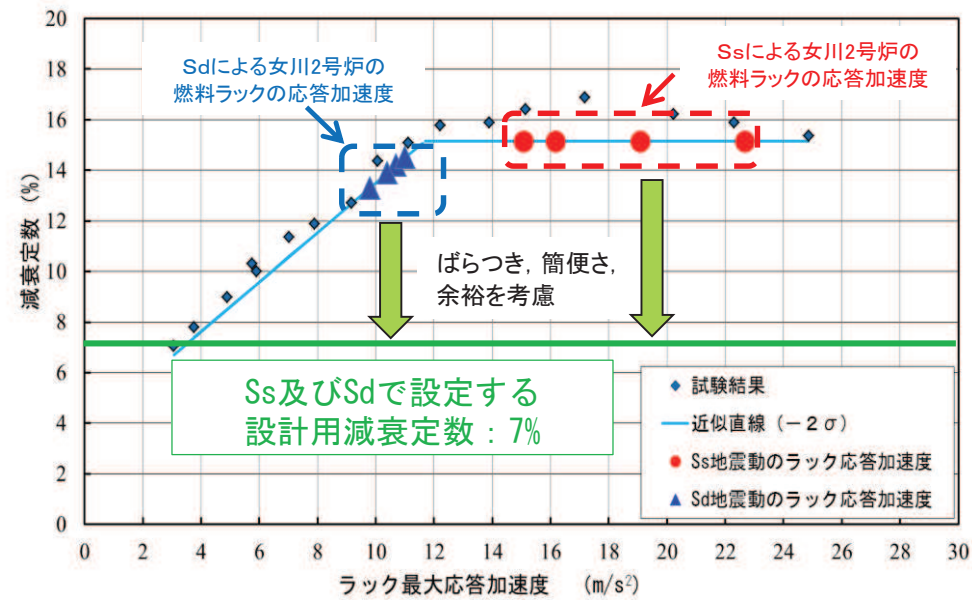
女川2号炉の燃料ラックの設計用減衰定数の設定

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

【参考2】 $S_s-1, 2$ に対する減衰定数の設定(2)

第560回審査会合(2018年3月29日)資料1-3-1抜粋

- 女川2号炉の今回工認の耐震設計に適用する設計用減衰定数は、試験結果のばらつき、耐震設計の簡便さと余裕を考慮して、燃料ラックの種類(角管110/170体)、燃料貯蔵率及び評価用地震動(S_s/S_d)によらず一律7.0%を採用する



女川2号炉の燃料ラックの設計用減衰定数の設定