

本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

| | |
|-----------------------|---------------|
| 柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉審査資料 | |
| 資料番号 | KK67-0100 改02 |
| 提出年月日 | 平成28年4月22日 |

柏崎刈羽原子力発電所 6号及び7号炉

地震による損傷の防止について
(補足説明資料)

平成28年4月

東京電力ホールディングス株式会社

目次

1. 建屋地震応答解析モデルの既工認との差異について
 - 補足説明資料 1-1 建屋側面地盤回転バネを考慮することの妥当性について
 - 補足説明資料 1-2 各モデルの変更点の中越沖地震時のシミュレーション解析結果に与える影響について
 - 補足説明資料 1-3 建屋コンクリート剛性について

2. 原子炉格納容器コンクリート部の材料構成則について
 - 補足説明資料 2 原子炉格納容器コンクリート部の材料構成則について

3. 既工認実績のない規格・手法の適用性について
 - 補足説明資料 3-1 原子炉建屋屋根トラス及び排気筒の評価モデルについて
 - 補足説明資料 3-2 使用済燃料貯蔵ラックの減衰定数について (7号炉)
 - 補足説明資料 3-3 原子炉本体基礎の非線形特性について

下線部：今回ご提出資料

使用済燃料貯蔵ラックの減衰定数について
(7号炉)

1. はじめに

柏崎刈羽原子力発電所第7号炉（以下、「柏崎刈羽7号炉」という）の既工認では、使用済燃料貯蔵ラック（以下、「燃料ラック」という）水平方向の設計用減衰定数は、「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、気中を前提とした溶接構造物の設計用減衰定数1%を用いていたが、今回の耐震計算では燃料ラックが水中に設置されており、水の効果による減衰効果が期待されることから、実物大加振試験（以下、「本試験」という）の結果に基づき設定した減衰定数7%を採用した。

本資料は、燃料ラックの振動試験結果に基づき設定した設計用減衰定数の柏崎刈羽7号炉への適用性を纏めたものである。

2. 燃料ラックの耐震設計法の既工認と今回手法の比較

2. 1 燃料ラックの耐震設計手法について

柏崎刈羽7号炉の燃料ラックは、角管を市松模様に配列し、底部にシートプレート及びベースを有する構造であり、ベースと燃料プール床を基礎ボルトにより固定している。

既工認の耐震計算においては、燃料ラックをシェル要素でモデル化しており（図-1）、モデル化にあたっては、燃料ラックの質量に燃料ラック自身の質量、使用済燃料の質量、燃料ラックに含まれる水の質量及び水中の機器の形状により排除される機器周囲の流体の質量である付加質量を考慮し、これら使用済燃料及び燃料ラックに含まれる水の質量及び付加質量は角管の全長にわたって等分布に与えている。

既工認の応力評価は、角管と基礎ボルトに対しておこなっており、角管の応力は図-1の解析モデルを用いて、スペクトルモーダル解析により算出し、基礎ボルトの応力はラック設置位置における水平・鉛直震度を用いて、各ボルトに生じるモーメントの釣り合いを考慮して算出している。

また、燃料ラックは、耐震設計上の性能目標として、地震中及び地震後においても臨界を防止するための幾何学的な形状の維持が求められていることから、変形を概ね弾性範囲内に収める必要があり、その許容応力は「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601 補-1984」の「その他支持構造物」に規定されている。

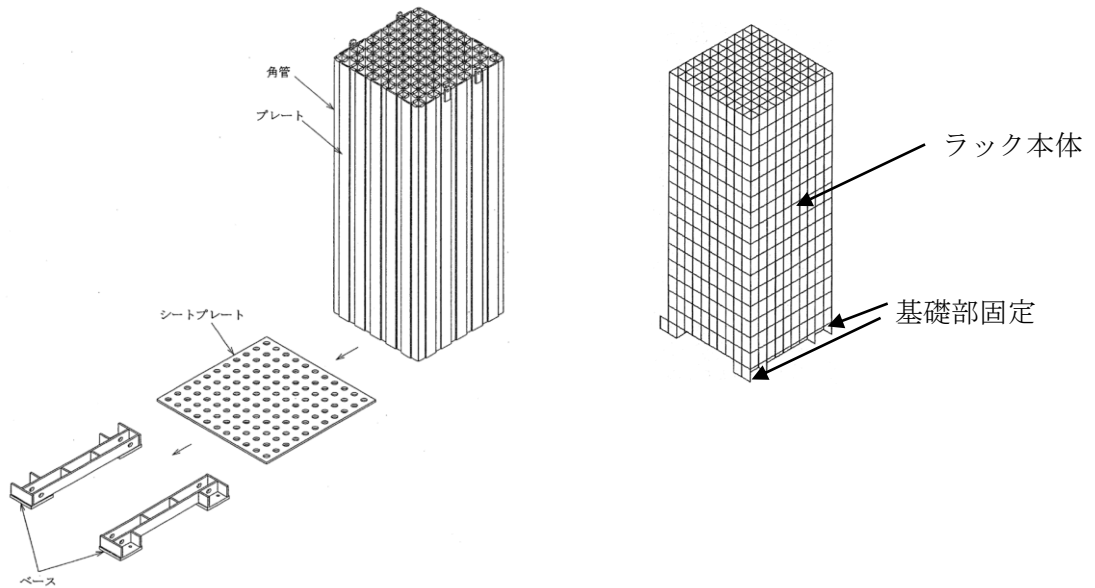


図-1 柏崎刈羽7号炉の燃料ラックの構造と解析モデル（100体）の例

2. 2 減衰定数7%を採用する目的と効果

既工認における設計用減衰定数は、JEAG4601に規定される気中を前提とした溶接構造物の設計用減衰定数1%を用いていたが、基準地震動の増大により、既工認と同じ減衰定数（1%）を用いた評価では、評価基準値を満足しないと推測される（表-1）。そのため、耐震評価に用いる入力条件の低減を期待し、本試験により取得した減衰定数7%を採用した（図-2）。

表-1 減衰定数1%による燃料ラックの試評価

| | 計算値 | 評価基準値 |
|----------------|---------|---------|
| ラック基礎ボルト（引張応力） | 165*MPa | 153*MPa |

*：暫定条件による概算値。水平2方向地震動の組み合わせは考慮せず。

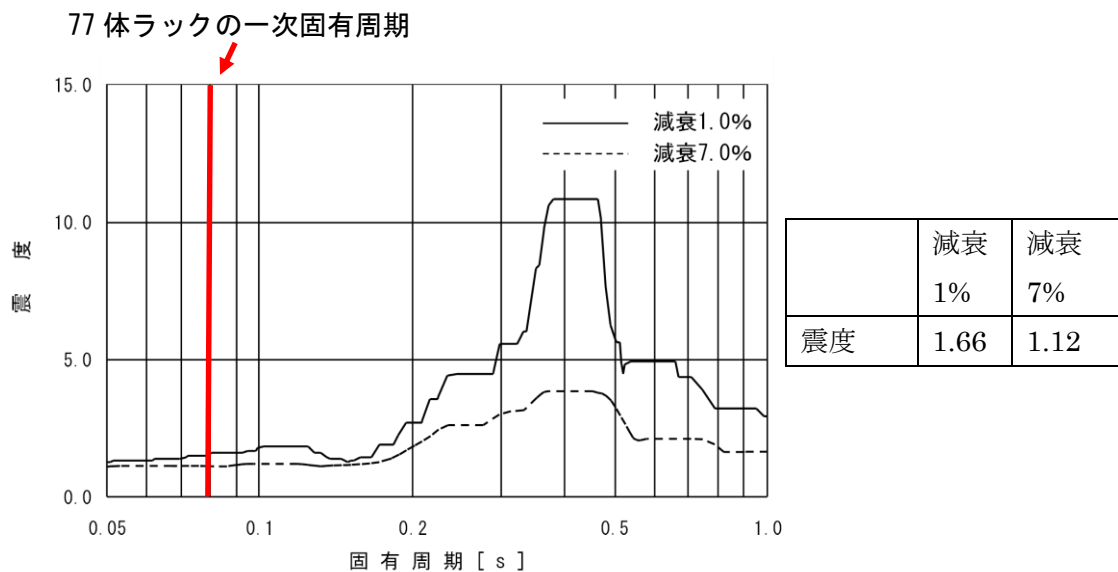


図-2 燃料ラック設置位置における床応答スペクトル比較

なお、柏崎刈羽7号炉の燃料ラックの耐震設計における既工認と今回手法の比較を表-2に示す。既工認からの変更は、設計用減衰定数のみである。

表-2 柏崎刈羽7号炉 燃料ラックの耐震設計法の既工認と今回手法の比較

| | | 既工認手法 | 今回手法 |
|----------------|------|---|-------------|
| 解析モデル | | FEM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 | 静的設計* | 同左 (剛構造のため) |
| 設計用減衰定数 | 水平方向 | 1.0% | 7.0% |
| | 鉛直方向 | — | 1.0% |
| 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 |
| モデル化の考え方 | | 剛性はラック本体の寸法, ヤング率より設定, 質量はラック本体, ラック内の燃料体, 流体およびプール水の付加質量を考慮。 | 同左 |

* : 鉛直地震動の規定なし

3. 減衰定数取得試験

3. 1 試験の概要

燃料ラックは使用済燃料貯蔵プール（以下、「燃料プール」という）水中に設置されるため、水の効果による減衰効果が期待されることから、本試験では、燃料ラックを実機と同等の水中の条件下で減衰を評価する試験を実施し、減衰定数を取得した。

3. 2 燃料ラックの水中試験方法について

(1)試験供試体

柏崎刈羽7号炉燃料ラックの配置図を図-3に、構造図を図-4および図-5に示す。

燃料ラックは、燃料プール床の基礎ボルトで固定した自立型であり、ラックセルは角管を市松模様に配列した構造（以下、「市松ラック」という）を採用している。燃料ラックと壁および燃料ラック同士は接続されていない。したがって、柏崎刈羽7号炉の燃料ラックは、地震荷重に対して床の基礎ボルトのみで荷重を燃料プールへ伝達している。

実物大試験供試体は、図-6(1)、(2)に示すとおり柏崎刈羽7号炉と同じ床固定自立式の市松ラックを用い、装荷できる燃料体数は、流体および燃料体による付加減衰効果が実機よりも小さくなるように50体（5列×10列）とした。また、ラックには燃料体を装荷し、装荷する燃料体は実燃料模擬体と形状模擬体の2種類を用いた。実燃料模擬体は実機と同様であるが、燃料ペレットの代わりに鉛で質量を一致させた。さらに、加速度を計測するため頂部に加速度計を設置した。形状模擬体は実機の外形を模擬した実燃料模擬体の質量およびチャンネルボックス外形を模擬し、頂部および中間部に加速度計が設置されている。

(2)試験水槽

燃料プール内に設置されている状態を模擬するために図-6(3)の試験水槽を製作し、水を張って、その中にラックを設置した。水槽の大きさは、流体による付加減衰効果が最も小さくなる無限水中と同等となる最小の大きさとし（別紙-1）、高さ（水深）は実機と異なるが、市松ラックの振動特性に与える影響が小さいことを確認した（別紙-2）。

試験水槽、ラック、燃料体、内包水をあわせて最大100t程度の質量となるため、つくば市の防災科学技術研究所の振動台（最大搭載質量500t、寸法：14.5m×15m）を用いて試験を実施した^[1]。図-6(4)に試験状況（市松ラック（試験供試体）の水槽内設置状態）を示す。

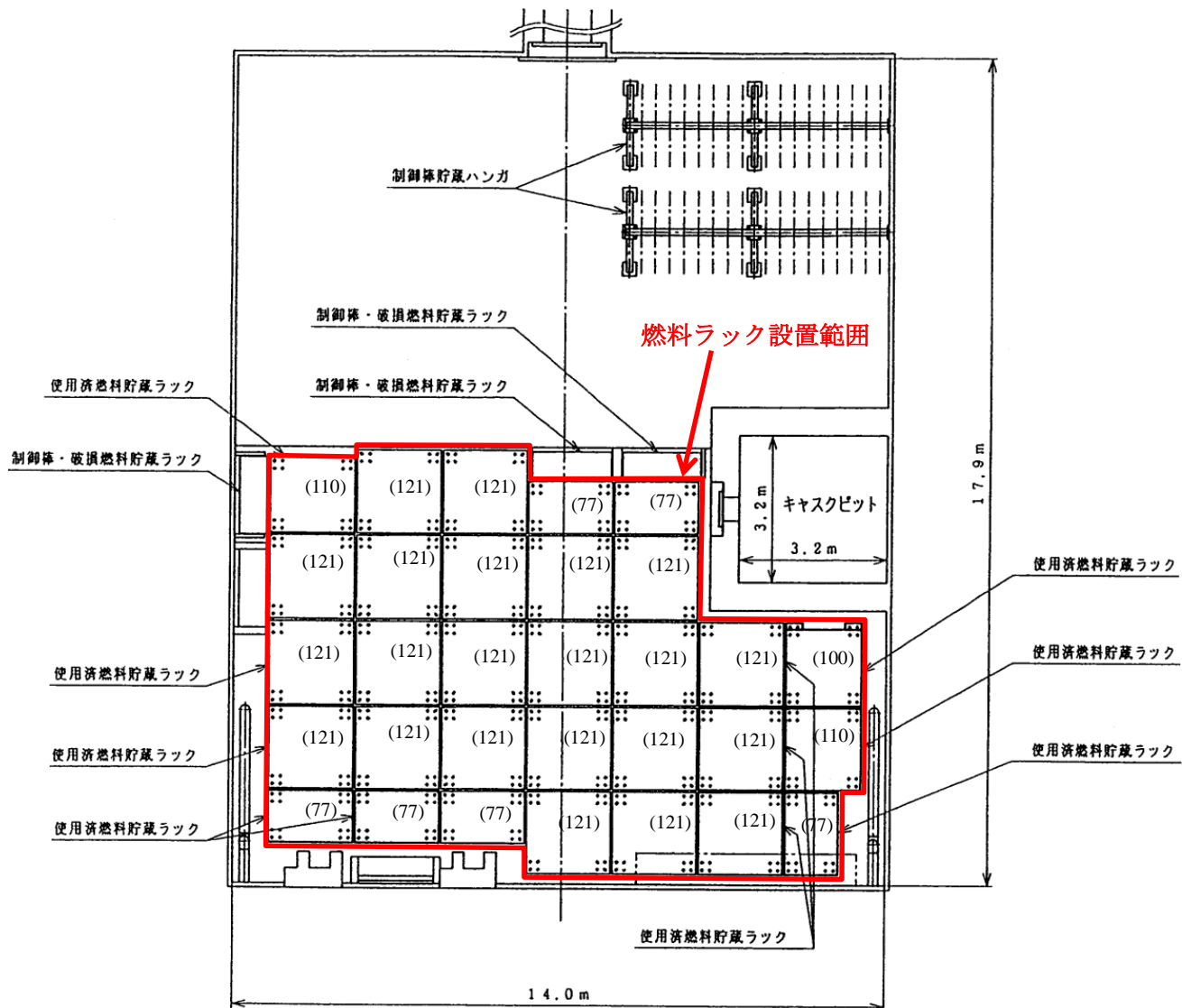
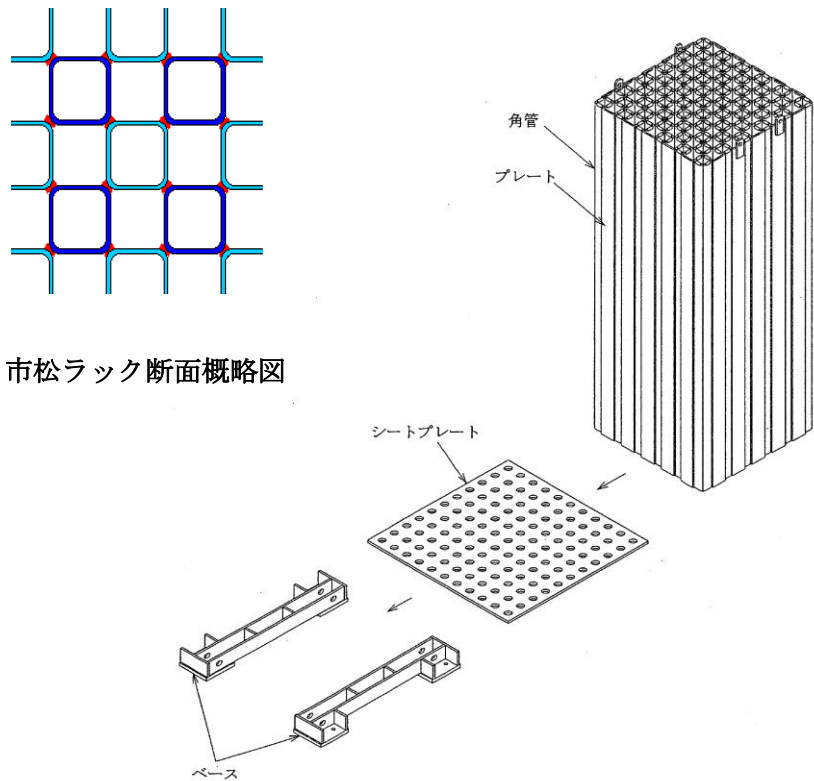


図-3 燃料ラック配置図

※()内の数字はラックの貯蔵体数

柏崎刈羽7号炉 内訳

| 使用済燃料貯蔵ラック | 台数 |
|-------------|-----|
| 77体(11×7) | 6台 |
| 100体(10×10) | 1台 |
| 110体(11×10) | 2台 |
| 121体(11×11) | 22台 |



市松ラック断面概略図

図-4 燃料ラックの構造図

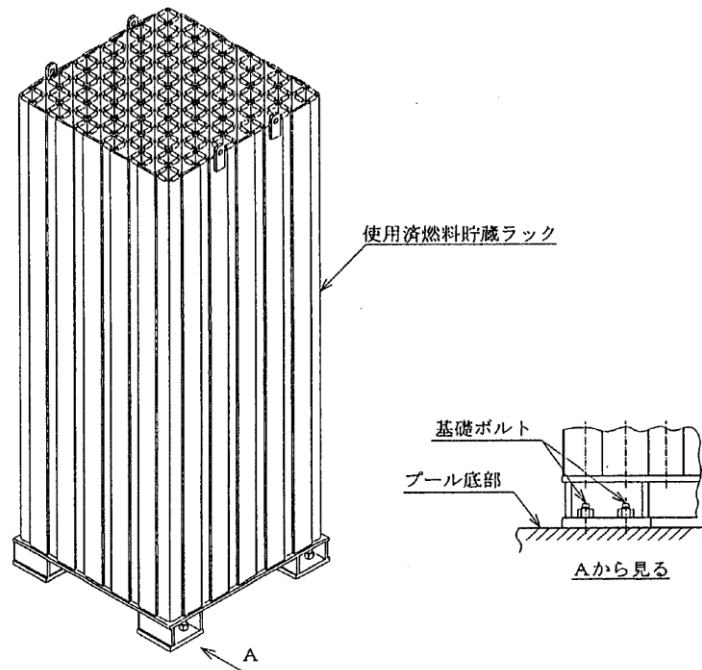
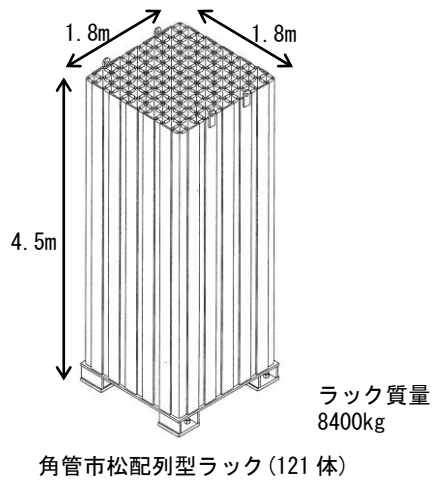
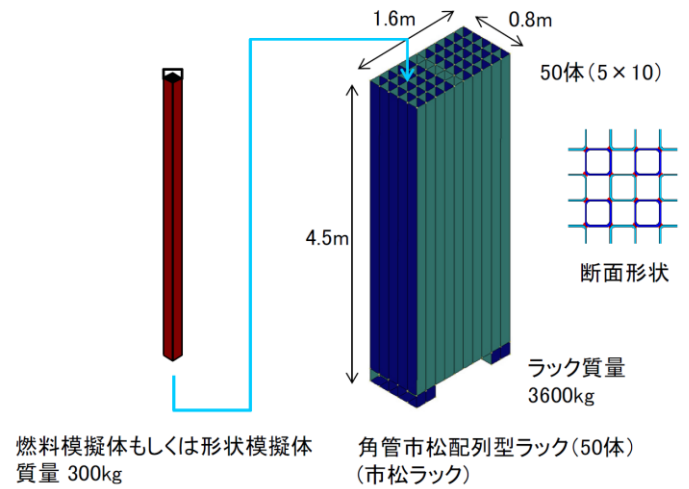


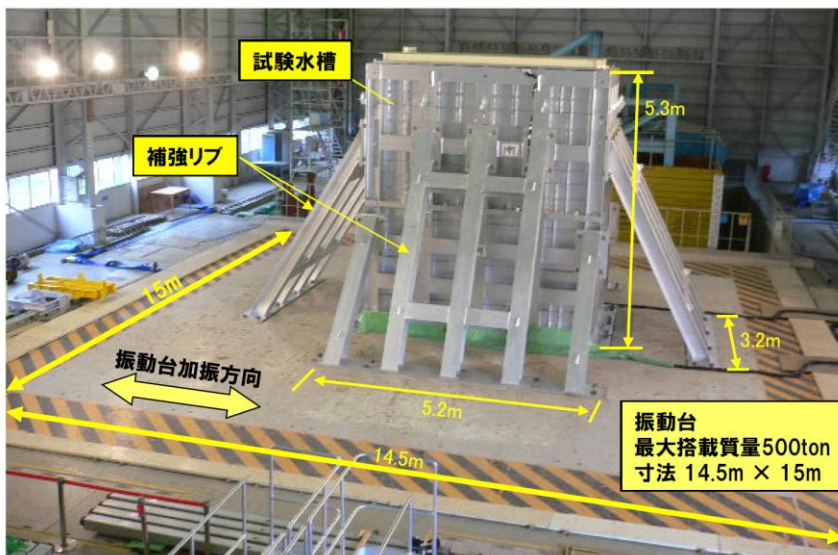
図-5 燃料プール床と固定部の詳細



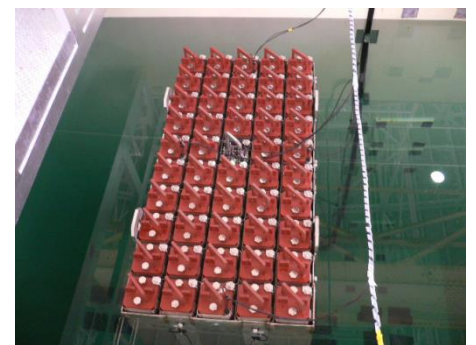
(1) 市松ラック (柏崎刈羽 7 号炉)



(2) 市松ラック (試験供試体) [2]



(3) 試験状況 [2]



(4) 市松ラック (試験供試体) の
水槽内設置状態

図-6 試験供試体の構造(市松ラック試験供試体, 試験水槽および振動台)

(3) 実機燃料ラックと実物大試験供試体の主要諸元比較

実物大試験供試体の仕様は、概ね実機燃料ラックと同等であり、貯蔵体数やラックセルと燃料集合体の隙間等は、流体及び燃料集合体による付加減衰効果が実機より小さくなるよう設定した (表-3)。

(4) 今回の試験で得られた減衰定数の柏崎刈羽 7 号炉への適用性について

実物大試験供試体の仕様は、概ね実機燃料ラックと同等であるため、実機適用性があると考えられる。

表-3 柏崎刈羽7号炉 燃料ラックと実物大試験供試体の主要諸元の比較

| 項目 | 柏崎刈羽7号炉 | 実物大試験供試体 | 備考 | |
|-------|----------------|----------------------|----------------------|---|
| 燃料ラック | 燃料ラックの支持形式 | 床固定式・自立型 | 床固定式・自立型 | — |
| | ラックセルの形式 | 角管市松配列型 | 角管市松配列型 | — |
| | 貯蔵体数 | 77~121体 | 50体 | 試験供試体は流体および燃料体による付加減衰効果が実機よりも小さいと考えられるラックを選定。 |
| | ラックセルと燃料集合体の隙間 | <input type="text"/> | <input type="text"/> | チャンネルボックスの外面とセル内面間距離。 |
| | 燃料ラックから壁までの距離 | 約250~900mm | 約450mm~1600mm | 流体による付加減衰効果が最も小さくなる無限水中と同等となる最小の寸法として設定した。 |
| | ラックセル高さ | <input type="text"/> | <input type="text"/> | — |
| | ラックセルのピッチ | <input type="text"/> | <input type="text"/> | 実物大試験供試体については、燃料集合体のセル内での衝突の影響が小さくなるラックセルピッチが小さな燃料ラックを採用。 |
| | ラックセルの厚さ | <input type="text"/> | <input type="text"/> | — |
| 燃料集合体 | 燃料タイプ | 8×8燃料 (ステップⅠ燃料) | 9×9燃料 (ステップⅢ燃料) | 7号炉工認では、燃料プール共用化条件を考慮し、評価結果が厳しくなる質量が大きい燃料条件により評価している。 |
| | 質量 | <input type="text"/> | <input type="text"/> | 想定している燃料タイプの違いによる。 |
| 燃料プール | 水深 | 約12m | 約5m | 高さ(水深)は実機と異なるが、市松ラックの振動特性に与える影響が小さいことを確認した。 |

(5) 試験方法

a. 加振方法および減衰定数の評価方法

試験供試体に模擬燃料を装荷し、試験水槽に水を注入した状態にて加振試験を実施した。試験は、試験供試体の長辺方向及び短辺方向それぞれについておこなった。

加振レベルの小さい範囲では正弦波による掃引試験をおこない、ハーフパワー法を用いて減衰定数を評価した。加振レベルの大きい範囲では、試験装置の損傷を防止する観点から、半波の加振試験をおこない、自由減衰波形から減衰定数を評価した。なお、各々の試験について、入力加速度を変えた3ケースを実施した（表-4）。

表-4 減衰定数の評価に用いた試験条件

| No. | 試験方法 | 方向 | 入力加速度 | 備考 |
|-----|---------|----|-----------------------|-------------------------|
| 1 | 正弦波掃引試験 | 短辺 | 0.50m/s ² | 減衰定数をハーフパワー法により算出（別紙-3） |
| 2 | | | 0.75 m/s ² | |
| 3 | | | 1.00m/ s ² | |
| 4 | | 長辺 | 0.50m/s ² | |
| 5 | | | 0.75 m/s ² | |
| 6 | | | 1.00m/ s ² | |
| 7 | 半波加振試験 | 短辺 | 2.91m/s ² | 減衰定数を自由振動波形から算出（別紙-4） |
| 8 | | | 3.98m/s ² | |
| 9 | | | 5.00m/ s ² | |
| 10 | | 長辺 | 2.96m/s ² | |
| 11 | | | 3.75 m/s ² | |
| 12 | | | 4.50m/ s ² | |

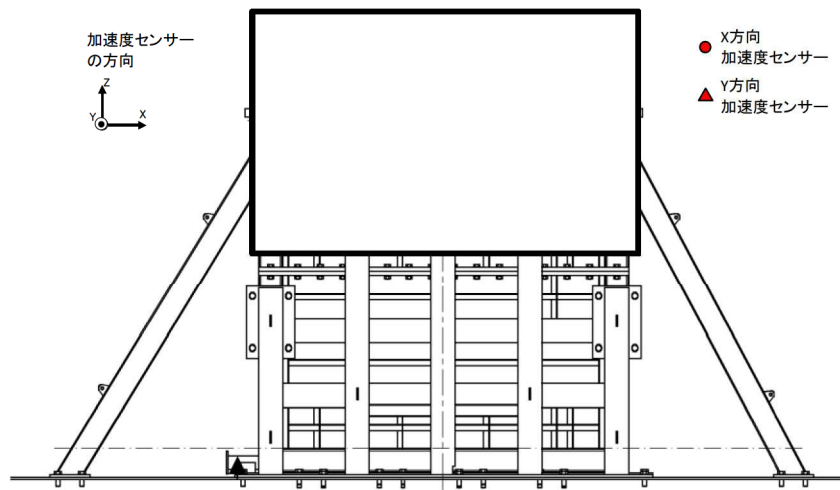
(6) 計測方法

ラックの固有振動数、減衰定数および振動モードを算出するためにラック および と燃料体の の加速度を計測する。また、基準となる入力加速度として振動台上の水槽周囲の加速度を計測した（図-7）。

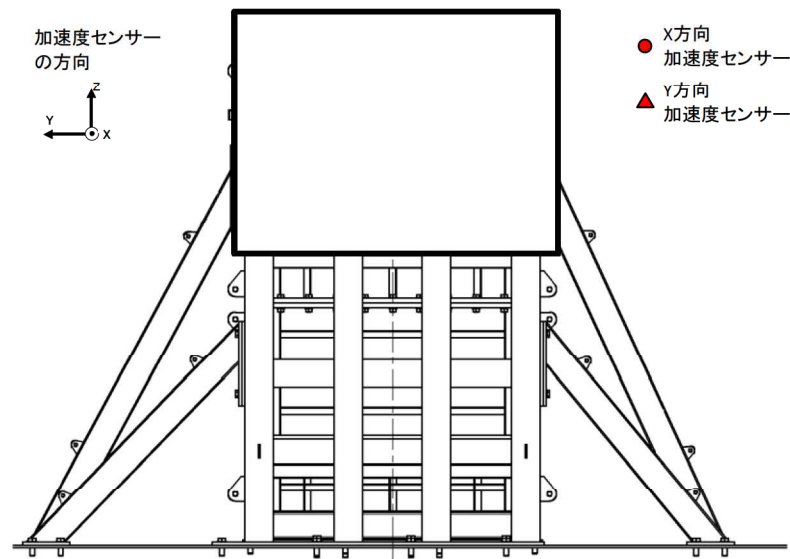
ラックが弾性範囲内で加振されていることを確認するために、ラックの および のひずみを計測した。

燃料体については、燃料模擬体(形状模擬)は4体について の加振方向の加速度を、燃料模擬体(実燃料模擬)は で加振方向の加速度を計測した。

市松ラックおよび燃料体の加速度とひずみの計測位置をそれぞれ図-8に示す。また、模擬燃料体の内部構造を図-9、その諸元を表-5に示す。



(a) 水槽長辺方向



(b) 水槽短辺方向

図-7 水槽の加速度計測位置

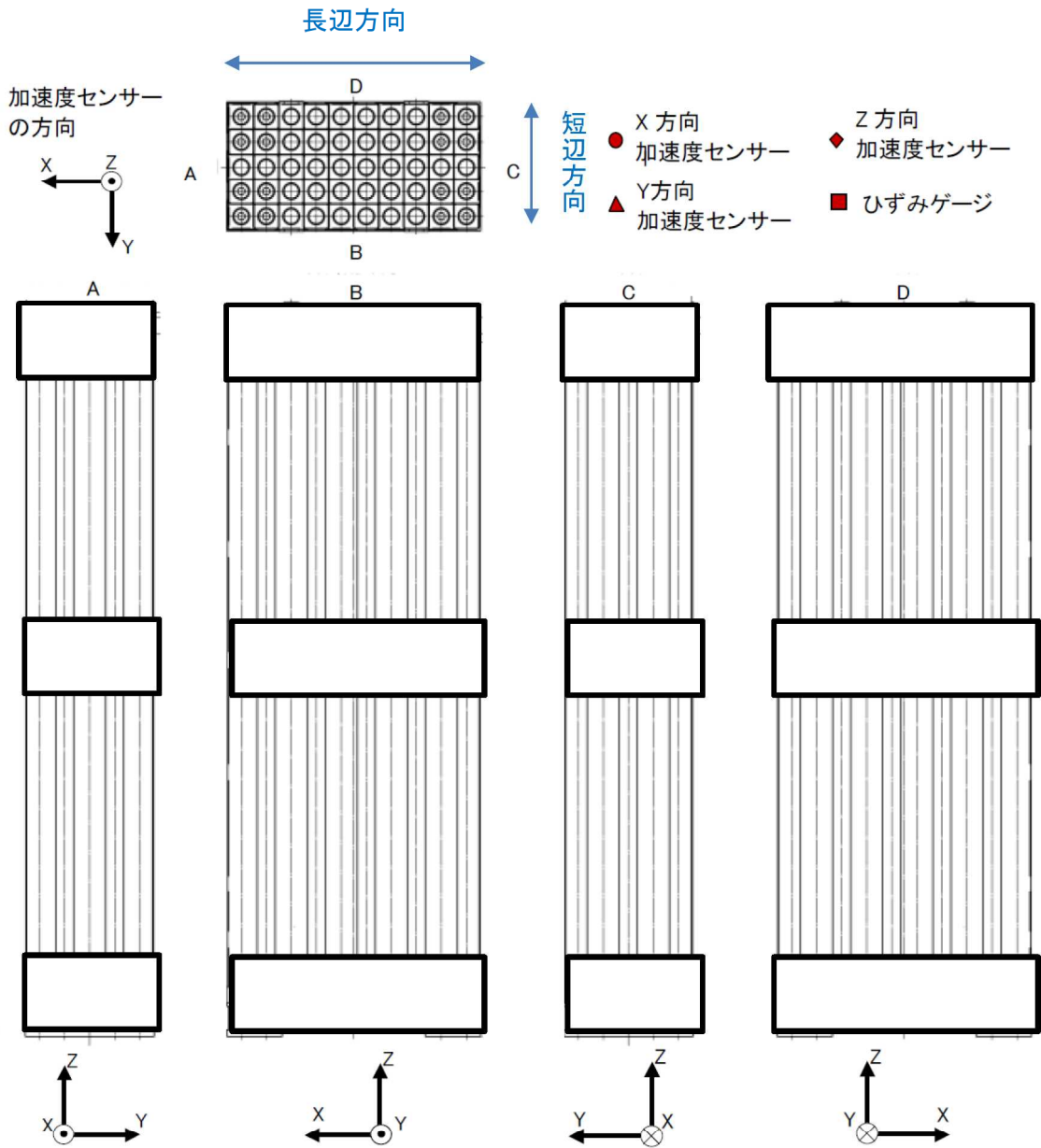


図-8 (1/2) 市松ラックの加速度とひずみの計測位置

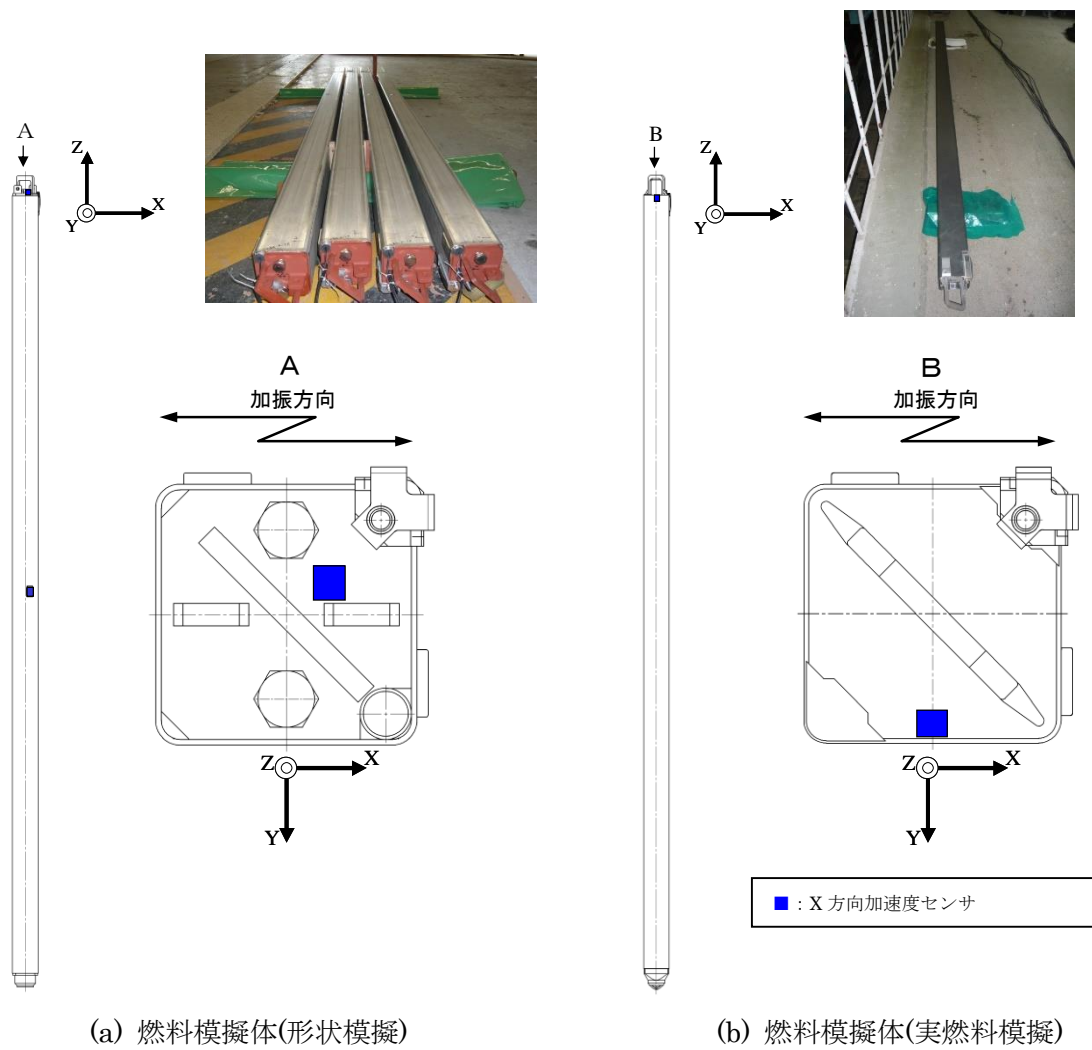
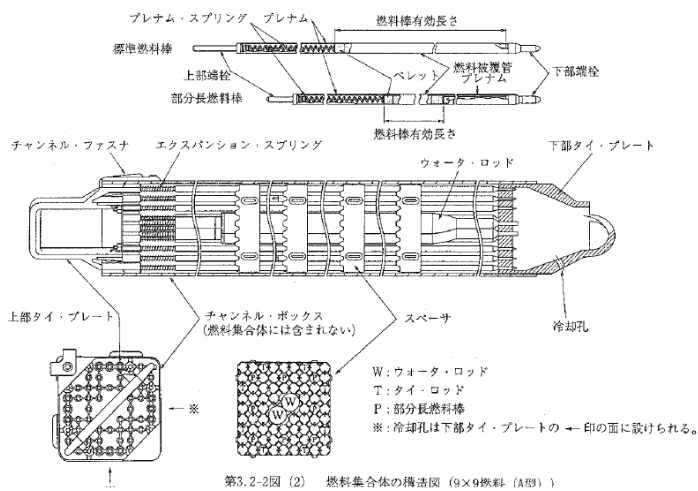
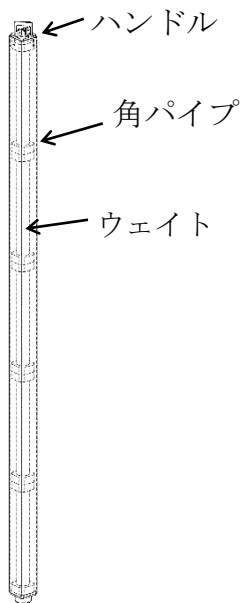


図-8 (2 / 2) 燃料模擬体の加速度とひずみの計測位置



第3.2-2図 (2) 燃料集合体の構造図 (9×9燃料 (A型))

実燃料のペレットを鉛ペレットにし制作

(a) 燃料模擬体 (形状模擬)

(b) 燃料模擬体 (実燃料模擬)

図-9 燃料模擬体の内部構造

表-5 実機燃料仕様と模擬体仕様の比較

| | 燃料模擬体 | | 柏崎刈羽7号炉 |
|--------|--------|-------|-----------|
| | 実燃料模擬体 | 形状模擬体 | 8×8 燃料*2 |
| 長さ | | | 4470mm |
| 断面寸法*1 | | | □139.14mm |
| 質量 | | | 302kg |
| 材質 | | | SUS |

*1 チャンネルボックス外形寸法

*2 柏崎刈羽7号炉に装荷される燃料集合体のうち、最も重量が大きいもの

3. 3 試験結果

(1) 正弦波掃引試験

正弦波掃引試験の減衰定数は、加振レベル 3 ケースで求めた伝達関数 (図-10) よりハーフパワー法で評価した。

(2) 半波加振試験

半波加振試験の減衰定数は、加振レベル 3 ケースから得られた自由振動波形 (図-11) より減衰定数を評価した。

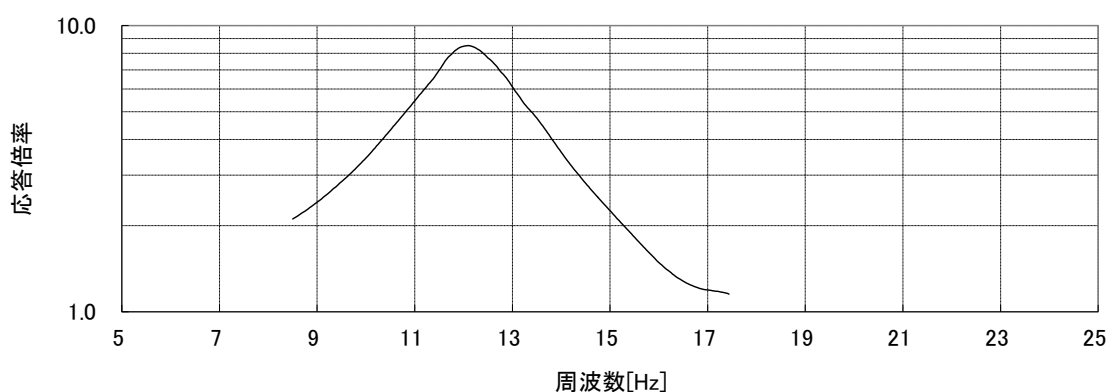


図-10 正弦波掃引試験によるラック頂部加速度の伝達関数 (例)
(試験条件 No.6 短辺方向, 入力加速度 1.00m/s²)

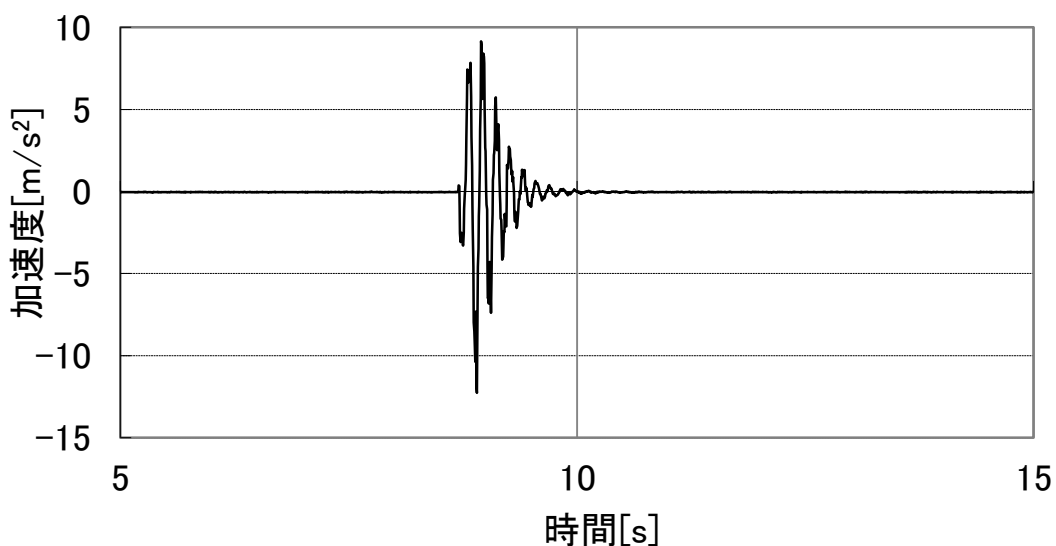


図-11 半波加振試験による自由減衰波形 (例)
(試験条件 No.9 短辺方向, 入力加速度 5.00m/s²)

(3) 試験結果のまとめ

正弦波掃引試験から得られた減衰定数と、正弦半波加振による自由減衰波形から得られた減衰定数をプロットした(図-12)。長辺方向における正弦波掃引試験では、加速度レベルの低い範囲では一部7%を下回るデータが存在するものの、加速度レベルの増大に伴い大きな減衰定数が得られる傾向が見られている。短辺方向における正弦波掃引試験では、加速度レベルの低い範囲では若干の減衰定数の低下傾向が見られるが、その傾向は加速度レベルの増大に伴いゆるやかとなっており、半波加振試験の結果では加速度レベルの高い範囲では7%を十分上回っている。

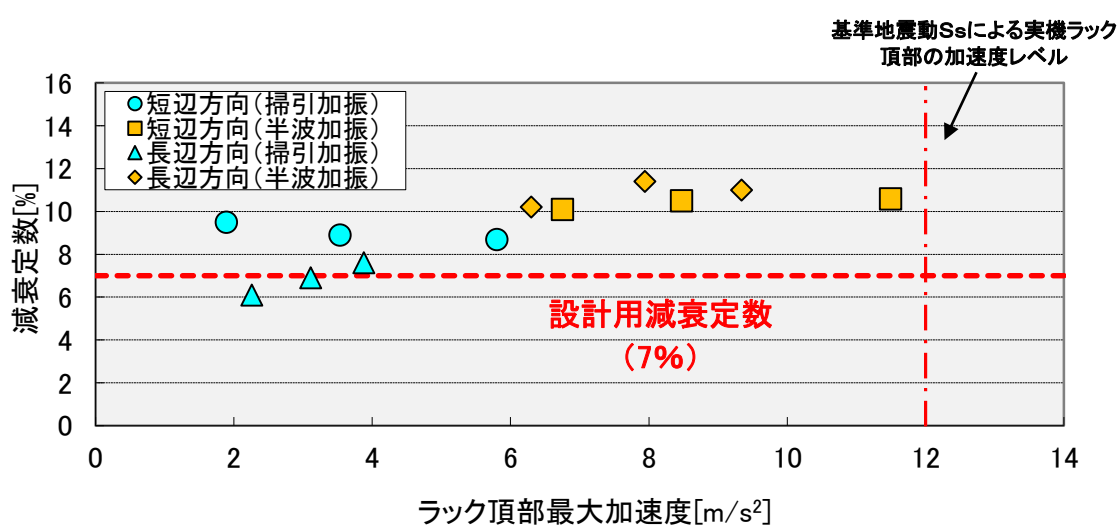


図-12 ラック頂部最大応答加速度と減衰定数の関係 [2]

4. 結論

今回工認で採用予定の設計用減衰定数7%は、柏崎刈羽7号炉の燃料ラックと同等な試験体を用い、実機と同等な試験条件によりおこなわれた加振試験で得られたものであることから、設計用減衰定数として妥当であることを確認した。

引用文献

- [1] 大型耐震実験施設(LARGE-SCALE EARTHQUAKE SIMULATOR)パンフレット, 独立行政法人 防災科学技術研究所
- [2] 浪田他, 「水中振動試験による BWR 使用済燃料貯蔵ラックの減衰定数」, 日本機械学会 [No.10-8] Dynamics and Design Conference 2010 論文集 No.417

別紙－1 試験水槽の形状決定方法

試験水槽の大きさは流体によるラックへの付加質量効果が最も小さくなる無限水中と同等となる大きさに設定した。

ラックの付加質量については、二重円筒の間に流体が存在する系の振動に関する運動方程式(1-1)式^[1]の内筒をラック、外筒を試験水槽とみなし、内筒の自己付加質量 M_{11} に着目し検討した。試験水槽は長方形断面であるため、表－別紙1－1^[2]より $a/b=2$ として二重円筒の自己付加質量 M_{11} を1.36倍した。

円筒であるラック寸法 r_1 はすでに決まっているため、外筒である試験水槽の寸法 r_0 を変化した場合のラックの付加質量 M_{11} との関係を図－別紙1－1に示す。この図より、試験水槽を大きくしても付加質量 M_{11} がほとんど変化しない r_0 の範囲は、無限水中と同等とみなせると考えられることから、中心から1250mm 離すことで、ラックが壁の影響を受けないという結果を得た。この結果を反映した試験水槽の大きさを図－別紙1－2に示す。

$$\left(\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

ここに

M_1, M_2 : 内筒及び外筒の質量

$M_{11} = \pi r_1^2 \rho \left(\frac{r_0^2 + r_1^2}{r_0^2 - r_1^2} \right)$: 内筒の自己付加質量

$M_{12} = M_{21} = -2\pi r_1^2 \rho \left(\frac{r_0^2}{r_0^2 - r_1^2} \right)$: 相互影響による付加質量

$M_{22} = \pi r_0^2 \rho \left(\frac{r_0^2 + r_1^2}{r_0^2 - r_1^2} \right)$: 外筒の自己付加質量

r_1 = 内筒の外半径

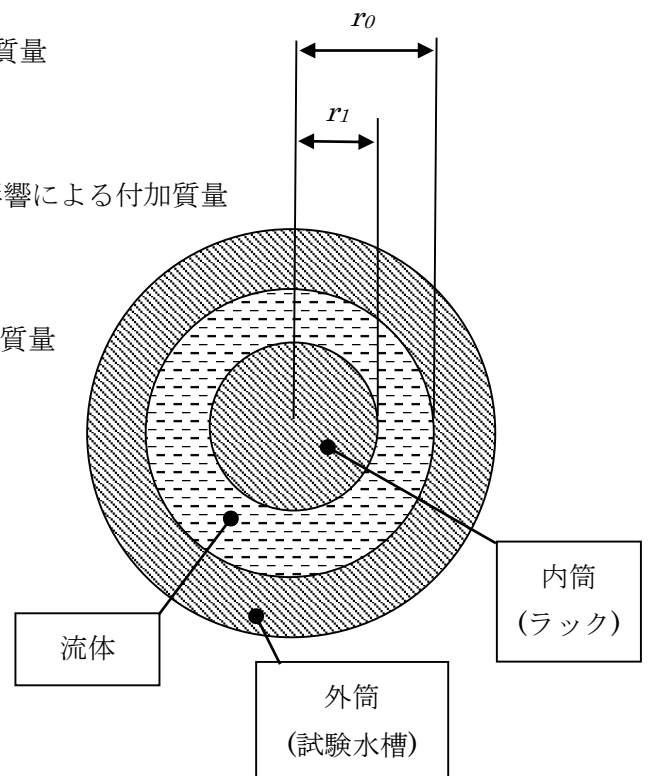
r_0 = 外筒の内半径

\ddot{u}_1, \ddot{u}_2 = 内筒、外筒の絶対加速度

x_1, x_2 = 内筒、外筒の相対変位

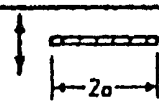
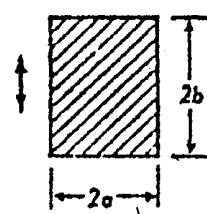
k_1, k_2 = 内筒、外筒の剛性

ρ = 流体の密度



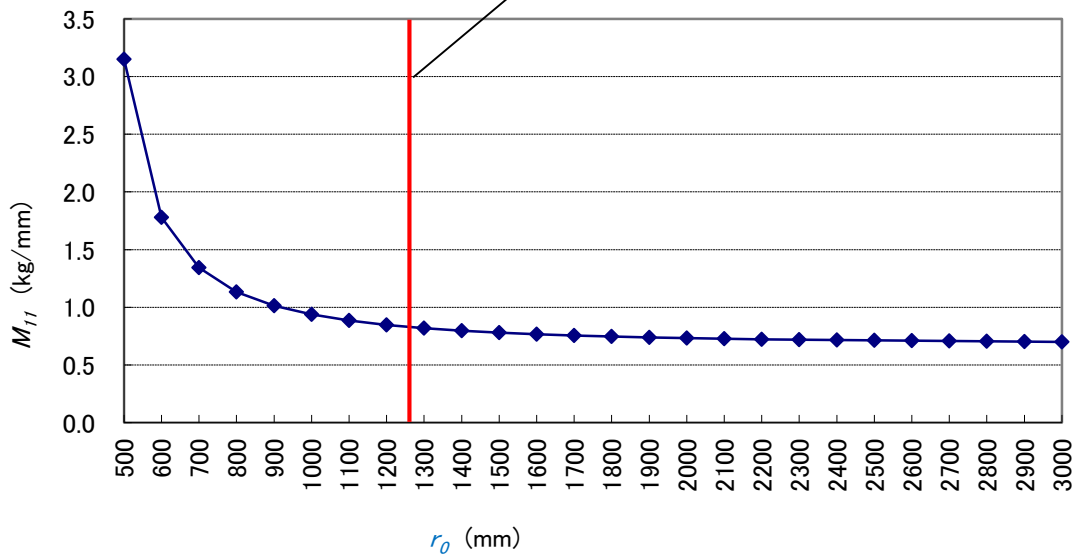
表一別紙 1 - 1 2次元断面形状における付加質量^[2]

TABLE 1
TWO-DIMENSIONAL BODIES

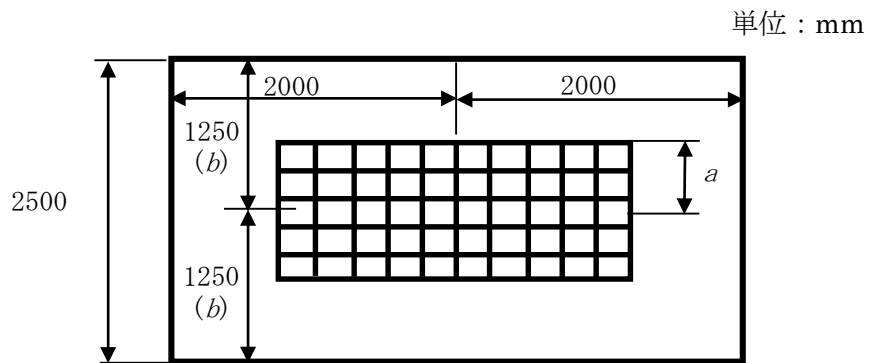
| SECTION THROUGH BODY | TRANSLATIONAL DIRECTION | HYDRODYNAMIC MASS PER UNIT LENGTH | SOURCE |
|---|-------------------------|-----------------------------------|----------------|
|  | Vertical | $m_h = 1 \pi \rho a^2$ | (4) t (6) c |
|  | Vertical | $m_h = 1 \pi \rho a^2$ | (4) t |
| | $a/b = \infty$ | $m_h = 1 \pi \rho a^2$ | (4) t |
| | $a/b = 10$ | $m_h = 1.14 \pi \rho a^2$ | (4) t |
| | $a/b = 5$ | $m_h = 1.21 \pi \rho a^2$ | (4) t |
| | $a/b = 2$ | $m_h = 1.36 \pi \rho a^2$ | (4) t |
| | $a/b = 1$ | $m_h = 1.51 \pi \rho a^2$ | (4) t |
| | $a/b = 1/2$ | $m_h = 1.70 \pi \rho a^2$ | (4) t |
| | $a/b = 1/5$ | $m_h = 1.98 \pi \rho a^2$ | (4) t |
| | $a/b = 1/10$ | $m_h = 2.23 \pi \rho a^2$ | (4) t |

試験水槽の形状

試験水槽として採用した値



図一別紙 1 - 1 ラックとプールの隔壁間の距離とラックの付加質量



図一別紙 1 - 2 試験水槽形状図

参考文献[1]：「Seismic Analysis of Safety Related Nuclear Structures」
(Standards ASCE 4-98)

[2]：「Table of Hydrodynamic Mass Factors for Translational Motion」
(ASME)

別紙－２ 試験における水深(スロッシング等)の影響について

実機ラックは水深 11.5m のところに設置されているが、試験では試験設備の関係から試験水槽の水深は 4.8m とした。試験水槽の水深 4.8m の試験で、実機ラックの振動特性に影響を与えないか検討するため、解析モデルを作成し NASTRAN の MFLUID 機能^{※1}を用いて水深が異なる場合の振動特性を検討した。

(1) 検討方法

市松ラックの水中の振動特性に与える水深の影響を評価した。なお、試験における入力波はスロッシングの影響を回避するような波を使用しており、本解析においてもスロッシング効果は考慮していない。

市松ラックの代表寸法は、幅 1584mm、奥行き 804mm、高さ 4493mm である。NASTRAN の MFLUID 機能を用いて試験水槽の水深 4.8m の場合と実機水深 11.5m の場合の固有振動数と周波数応答を算出した。ラック外側の水平方向は無限水中とした。

(2) 検討結果

(a) 固有振動数

水深 4.8m の場合と水深 11.5m の場合の固有振動数を表－別紙 2－1 に示す。

水深 4.8m の場合と水深 11.5m の場合の固有振動モードを図－別紙 2－1 に示す。

試験水槽の水深 4.8m の場合と実機水深 11.5m の場合の固有振動数の差異は小さいことがわかった。

表－別紙 2－1 固有振動数の比較

| 次数 | 水深4.8m | | 水深11.5m | |
|----|---------------|-------|---------------|-------|
| | 固有振動数 [Hz] | 振動モード | 固有振動数 [Hz] | 振動モード |
| 1 | 10.25 | Y方向変形 | 10.20 | Y方向変形 |
| 2 | 22.43 | X方向変形 | 22.40 | X方向変形 |

※1 解析モデル上考慮している流体の付加質量を計算する機能

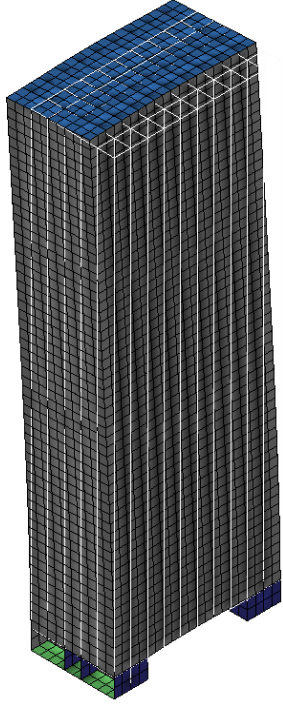
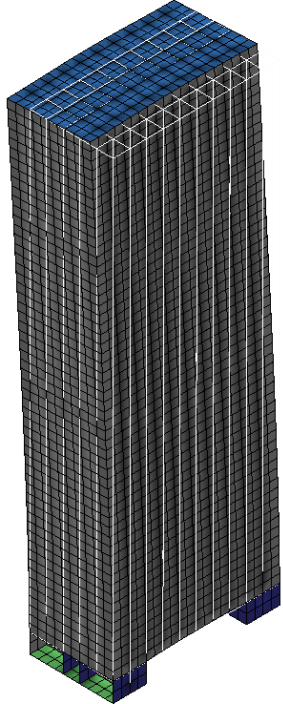
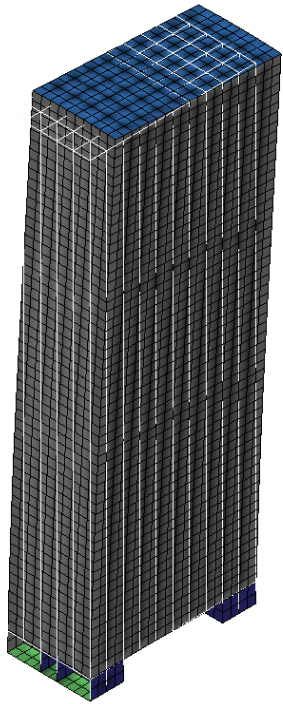
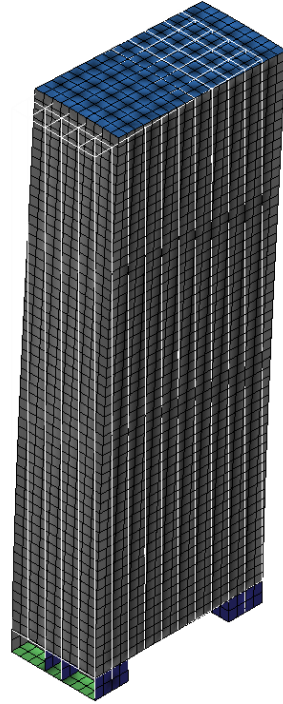
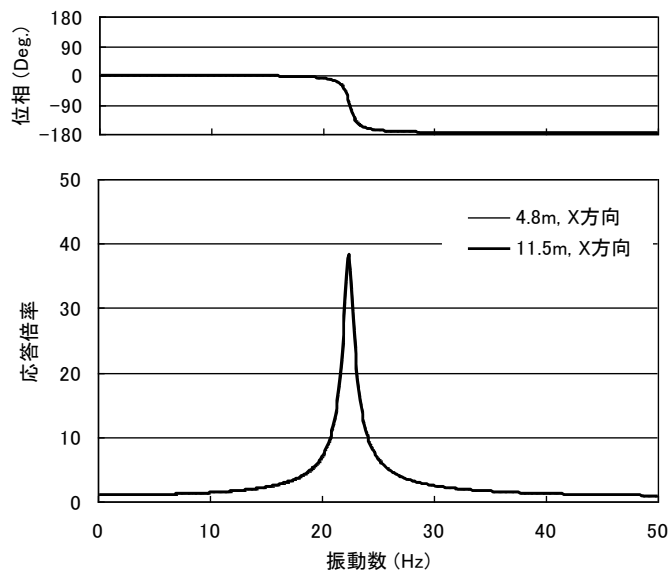
| | 試験：水深 4.8m | 実機：水深 11.5m |
|-----------|--|---|
| 1次 モード |  <p>10.25Hz</p> |  <p>10.20Hz</p> |
| 2次 モード |  <p>22.43Hz</p> |  <p>22.40Hz</p> |

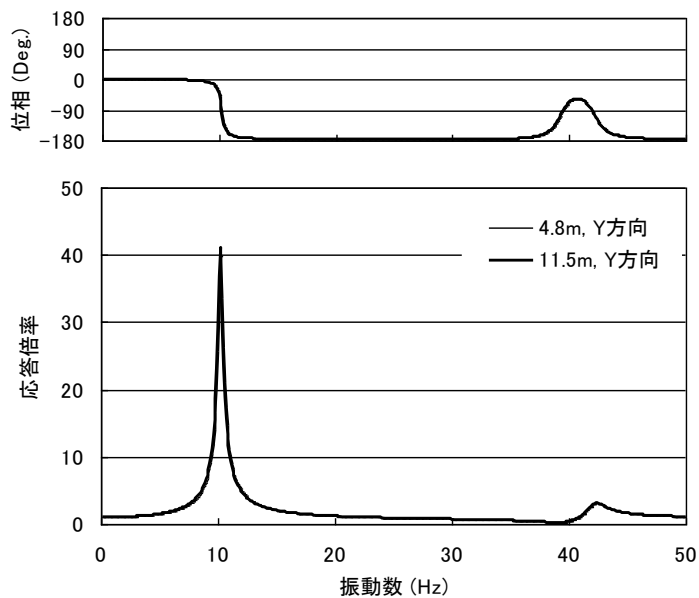
図-別紙 2-1 水深 4.8m と 11.5m のラック振動モード

(b) 周波数応答

固有振動数の違いは小さいことがわかったが、応答特性の違いも小さいことを確認するために、上記の解析モデルを用いて周波数応答計算を行った。図一別紙2-2にX方向加振時の周波数応答、Y方向加振時の周波数応答を示す。水深が4.8mの場合と11.5mの場合で違いはほとんどないことがわかる。なお、減衰定数は2%と仮定した。



(1) X方向加振時



(2) Y方向加振時

図一別紙2-2 周波数応答解析結果

(3) 検討結果のまとめ

実機プラントのラックは水深 11.5m のところに設置されているが、試験では試験設備の関係から試験水槽の水深は 4.8m とした。試験水槽の水深 4.8m の試験で、実機ラックの振動特性に影響を与えないか検討するため、解析モデルを作成し NASTRAN の MFLUID 機能を用いて水深が異なる場合の振動特性を検討した。その結果、水深 4.8m および水深 11.5m の条件において、水位は付加質量に対して影響を与えないため、固有振動数および周波数応答に差異がなく、水深 4.8m の試験水槽を用いた試験で実機の振動特性を模擬できることを確認した。なお、水位をラック高さ以下に変化させることでラックに掛かる付加質量を変化させて、本解析モデルで指定した水深が付加質量に影響していることを確認した検討結果を以下に示す。

(4) 水深の影響によるラックの固有値解析

本検討では水深 11.5m と水深 4.8m の固有値解析結果に対して、水位高さ 4.473m (ラック高さ) と 2m (ラック高さ以下の水位) の 2 ケースの固有値解析を追加実施した。本試験においてスロッシングを回避するように入力波形に対するフィルタ処理を実施しているため、本解析ではスロッシング効果を考慮しておらず、付加質量を考慮した計算を実施している。

表一別紙 2-2 に市松ラックの短辺方向および長辺方向について、水深と固有振動数の関係を示す。表より、水深 11.5m の固有振動数に対してラック高さと同等の水深 4.473m の固有振動数はほぼ変化しないが、ラック高さ以下の水深 2m の固有振動数では変化率が大きいことがわかる。ラック高さ以下のケースとして実施した水深 2m の固有値解析ではラック高さの半分程度が水中にないため、ラックに対して付加質量を受けない部分があり、固有振動数が高くなったといえる。すなわち、本解析結果においてラック高さ以上の水位ではラックに与える付加質量は変わらず、試験計画の水深 4.8m で実機プラントでの水深 11.5m の振動特性を模擬できているといえる。

表一別紙 2-2 水深と固有振動数

| No. | 水深[m] | 固有振動数[Hz] | | 備考 |
|-----|-------|-----------|-------|------------|
| | | 短辺方向 | 長辺方向 | |
| 1 | 11.5 | 10.20 | 22.40 | |
| 2 | 4.8 | 10.25 | 22.43 | |
| 3 | 4.473 | 10.31 | 22.46 | ラック高さ |
| 4 | 2 | 12.10 | 23.86 | ラック高さ以下の水位 |

別紙-3 ハーフパワー法について

加振力 $F e^{i\omega t}$ を受ける 1 自由度系の振動方程式は式(1)で表される。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F e^{i\omega t} \quad (1)$$

上式の解を $x = A e^{i\omega t}$ とし、式(1)に代入すると、

$$A = \frac{F}{-m\omega^2 + ic\omega + k} = \frac{F}{k \left\{ \left(1 - \frac{m}{k} \omega^2 \right) + i \frac{c}{k} \omega \right\}}$$

ここで、固有周期 $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 、減衰定数 $\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\sqrt{mk}} = \frac{c\omega_0}{2k}$ とおくと

$$A = \frac{F}{k \left[\left\{ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right\} + i 2\zeta \frac{\omega}{\omega_0} \right]}$$

よって、

$$x = \frac{1}{k \left[\left\{ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right\} + i 2\zeta \frac{\omega}{\omega_0} \right]} F e^{i\omega t}$$

となる。

よって、加振力 $F e^{i\omega t}$ に対する変位の振動伝達特性の振幅は式(2)で与えられる。

$$A = \frac{1}{k} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2}} \quad (2)$$

いま $\zeta \leq 1$ とすると式(2)の振幅曲線はピーク値付近で $\omega = \omega_p$ に対しほぼ対称である。

そこで ω_p より少し低い ω_L 点の振幅を A_L とする。

$$\Delta\omega/2 = \omega_p - \omega_L = \omega_0 - \omega_L \quad (\omega_p \approx \omega_0) \text{ より}$$

$$A_L = \frac{1}{k} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - (\omega_0 - \Delta\omega/2)^2 / \omega_0^2\right)^2 + 4\zeta^2 (\omega_0 - \Delta\omega/2)^2 / \omega_0^2}}$$

$$\approx \frac{1}{k} \frac{1}{\sqrt{(\Delta\omega / \omega_0)^2 + 4\zeta^2}}$$

一方,

$$A_{\max} = \frac{1}{2k\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \approx \frac{1}{2\zeta k}$$

となる。 A_{\max} と A_L の比 R は

$$R = \frac{A_{\max}}{A_L} = \frac{\sqrt{(\Delta\omega / \omega_0)^2 + 4\zeta^2}}{2\zeta}$$

となり, 整理すると

$$\zeta = \frac{1}{2} \frac{\Delta\omega / \omega_0}{\sqrt{R^2 - 1}}$$

となる。 $R = \sqrt{2}$ とすると以下のように簡単になる。

$$\zeta = \frac{1}{2} \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{1}{2} \frac{\omega_U - \omega_L}{\omega_0} = \frac{f_U - f_L}{2f_0}$$

よって, 周波数応答の $A_{\max} / \sqrt{2}$ を示す周波数 f_U , f_L と固有振動数 f_0 を計測すれば減衰定数 ζ を求めることができる。この減衰定数測定方法をハーフパワー法という (図-別紙 3-1)。

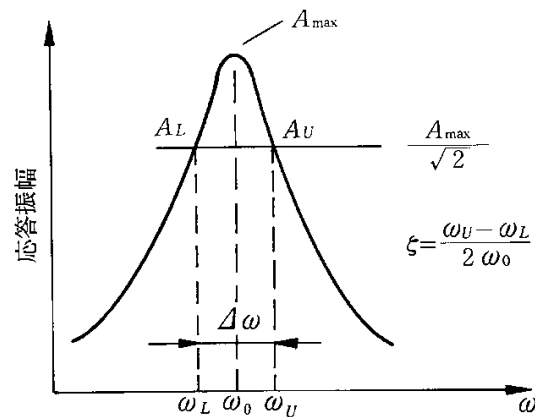
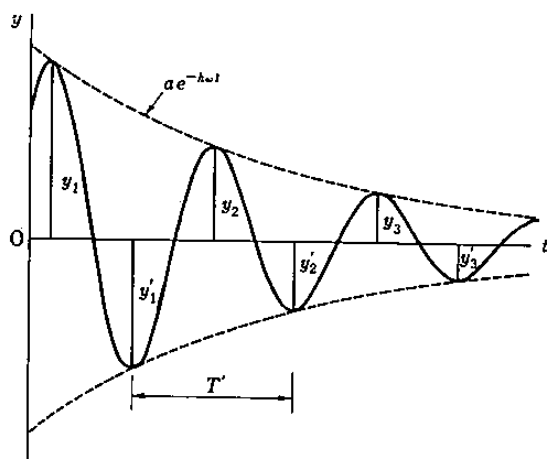


図-別紙 3-1 ハーフパワー法

別紙－4 自由振動波形からの減衰定数の算出方法

自由減衰振動波形は、指数関数的に減衰することから、隣り合う振幅の比の対数をとると常に一定の値となり、この隣り合う振幅の比の自然対数から対象とする構造の減衰定数を求めることができる（図－別紙4－1）。



$$\text{(振幅比)} d = \frac{y_1}{y_2} = \frac{y_2}{y_3} = \dots$$

$$h = \left(\frac{\ln d}{2\pi} \right) / \sqrt{1 + \left(\frac{\ln d}{2\pi} \right)^2}$$

図－別紙4－1 減衰定数の算出方法(自由振動波形からの減衰定数の算定方法)

別紙－5 水および燃料体の体数が減衰定数に与える影響

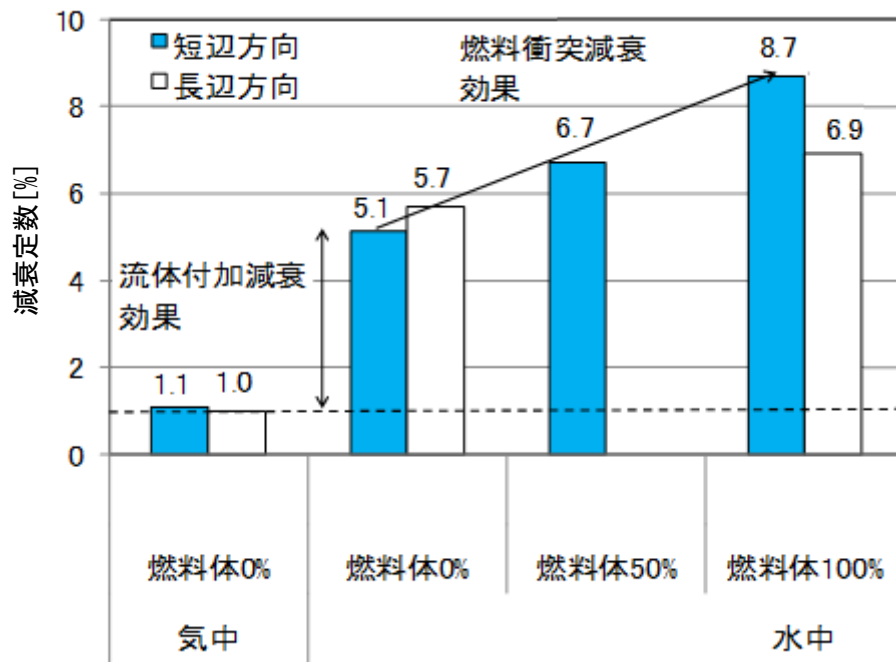
水および燃料体の体数による減衰定数への影響を確認するため、以下の条件にて正弦波掃引試験をおこなった（表－別紙5－1）。水の影響を確認するため、燃料ラック単体（燃料体 0%）で気中と水中それぞれで、試験をおこなった。燃料体の影響を確認するため、燃料体の体数を変えて試験をおこなった。

表－別紙5－1 水及び燃料体数の影響評価に用いた試験条件

| No. | 試験方法 | 方向 | 入力加速度 | 気中/水中 | 燃料体 | 備考 |
|-----|---------|----|--------------------|-------|------|-----------------------------|
| 1 | 正弦波掃引試験 | 短辺 | 1m/ s ² | 気中 | 0% | 減衰定数をハーフパワー法により算出 (別紙－3) |
| 2 | | | | 水中 | 0% | |
| 3 | | | | 水中 | 50% | |
| 4 | | | | 水中 | 100% | |
| 5 | | 長辺 | | 気中 | 0% | |
| 6 | | | | 水中 | 0% | |
| 7 | | | | 水中 | 100% | |

試験結果を図－別紙5－1に示す。

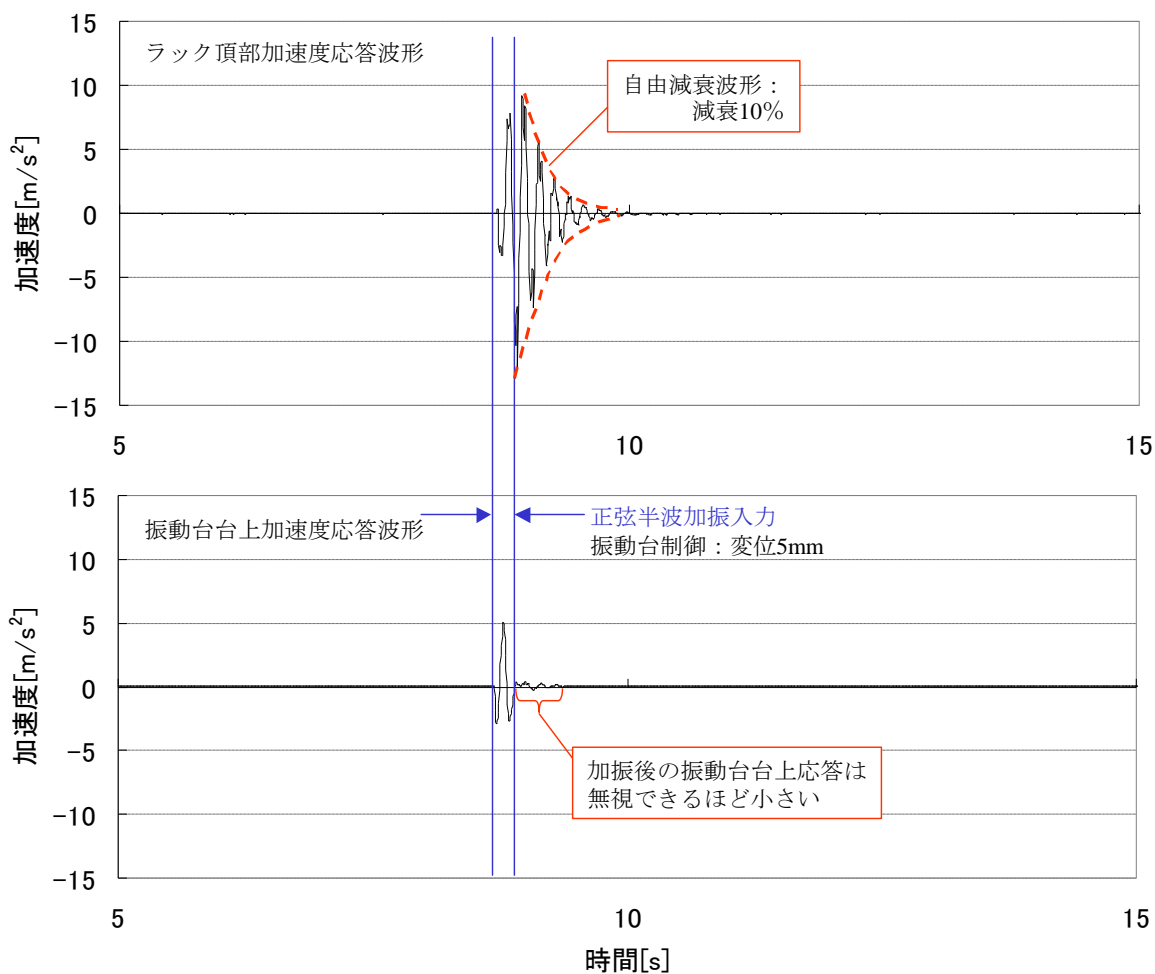
燃料体 0%における気中および水中の試験結果を比較すると、流体付加減衰効果により減衰定数が大きくなる。また、水中で燃料体が 0%, 50%, 100%と増加するに従って、燃料体の衝突による減衰の増加により減衰定数が増加することがわかる。



図一別紙5-1 水および燃料体の体数が減衰定数に与える影響^[2]より抜粋

別紙－6 正弦半波加振試験における振動台の影響について

正弦半波加振におけるラック頂部および振動台上の加速度時刻歴波形を図－別紙6－1に示す。振動台上加速度応答波形において、正弦半波加振入力後の台上応答加速度は、ラック頂部加速度に比べて無視できるほど小さいことがわかる。なお、振動台上応答加速度がほぼゼロとなる時点からラック頂部応答加速度の自由減衰波形として減衰定数を求めている。



図－別紙6－1 燃料ラックの自由振動波形と減衰定数
(振動台による半波突印加振)