

柏崎刈羽原子力発電所 1 号機  
機器・配管系の耐震安全性評価について

(指摘事項に関する回答)

平成 22 年 3 月 15 日

東京電力株式会社

## ○コメント内容

水中にある設備に対する付加質量について、付加質量は周波数に依存するがどのように考えているのか。また、付加質量の算出には無限水中条件の算出式を適用しているが、なぜそのように扱っているのか。

(平成 22 年 3 月 8 日 耐震・構造設計小委員会構造WG (第 47 回))

## ○回答

### 1. 付加質量に与える周波数の影響について

一般的に、流体の粘度、したがって動粘度が増加すると運動量拡散の範囲が増加し、その分だけ付加質量も増加する。図 1 は二重同心円筒の外筒を固定し、内筒を軸に直角に正弦振動させたときの粘性非圧縮性流体の付加質量を示したものである。

このときの付加質量は以下の式で与えられる。

$$m_v = \pi \cdot \rho \cdot r^2 \cdot \text{Re}(H)$$

$\rho$  : 流体密度

$r$  : 内筒半径

図より、 $\text{Re}(H)$  が取る値は、振動レイノルズ数  $S$  ( $S = \omega \cdot r^2 / \nu$ ,  $\omega$  : 角振動数,  $r$  : 内筒外半径,  $\nu$  : 動粘度) により変化することがわかる。すなわち、角振動数 (周波数) が変化すると  $S$  が変化することにより  $\text{Re}(H)$  も変化し、付加質量も変化することがわかる。

ここで、実際の構造物を想定して、振動レイノルズ数  $S$  の試算をおこなった結果を以下に示す。本試算によると、実際の構造物における  $S$  の値は 5000 ~  $\infty$  である。図より、この領域では、 $\text{Re}(H)$  の取る値は  $S$  の値の影響をほと

んど受けず、すなわち、周波数に対する依存性はほとんど無いことが分かる。

< 振動レイノルズ数  $S$  の試算 >

$$\cdot \omega = \frac{2\pi}{0.05(s)}, \frac{2\pi}{0.10(s)}, \frac{2\pi}{0.15(s)}, \frac{2\pi}{1.0(s)}$$

$$\cdot r = 1.0 \text{ m (例として, 仮に 1m とした)}$$

$$\cdot \nu = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad (\text{水の動粘度 at } 20^\circ\text{C})$$

○ 試算結果

|     | T=0.05(s)         | T=0.10(s)         | T=0.15(s)         | T=1.00(s)         |
|-----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $S$ | $1.3 \times 10^8$ | $6.3 \times 10^7$ | $4.1 \times 10^7$ | $6.2 \times 10^6$ |

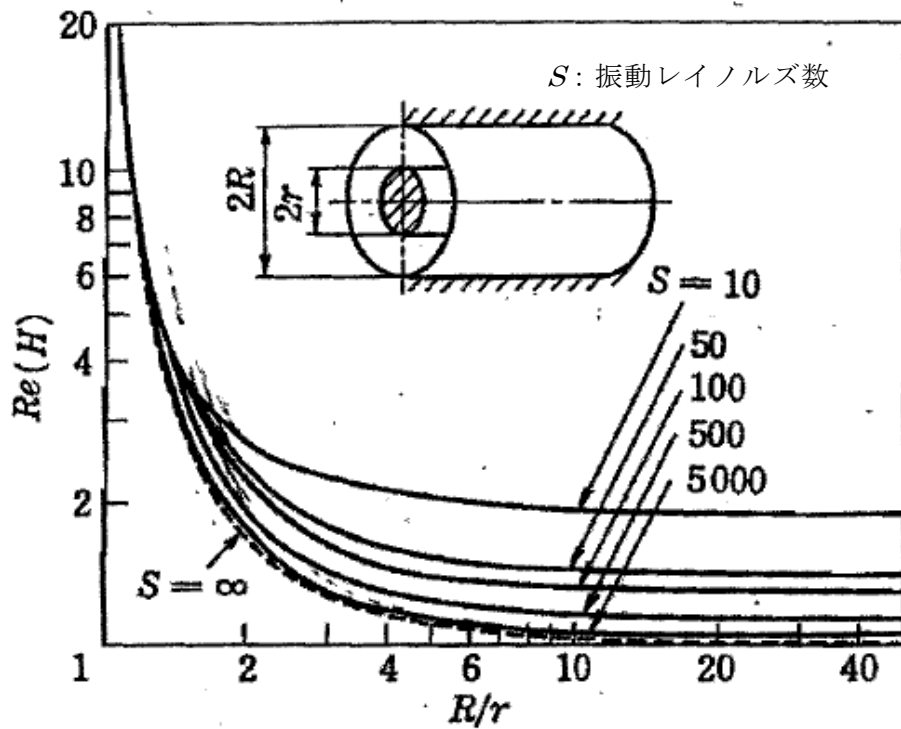


図1 二重同心円筒の単位長さ当たり付加質量 (粘性流体の場合)

(機械工学便覧 基礎編 α2 機械力学 P.110)

## 2. 付加質量に対する壁などの影響について

図2のような円柱の構造物が、無限に広がった水中にあると仮定した場合、単位長さ当たりの付加質量 $m_v$ は、水を非粘性流体、非圧縮性流体として以下の式で求められる。

$$m_v = \pi \cdot \rho \cdot a^2 \quad (1)$$

$\rho$  : 流体の密度

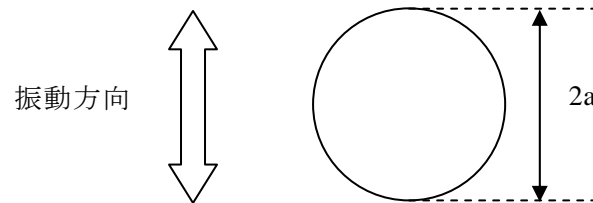


図2 円柱の付加質量

しかしながら、一般的に水中構造物に対する付加質量は、壁などのその周囲の影響を受ける。1号機の制御棒・破損燃料貯蔵ラックおよび使用済燃料貯蔵ラック（以下、「ラック」）の耐震安全性評価においては、ラックに対する付加質量は無限に広がった水中にあると仮定した場合の(1)式を用いて算出している。以下では、付加質量の算出に壁などの周囲の影響を考慮した場合の耐震安全性評価への影響について確認する。

1号機の使用済燃料貯蔵プール内のラックの配置図を図3に示す。ここでは検討のために、この配置を基に使用済燃料貯蔵プールとラック群をそれぞれ等価な面積を持つ円とみなして、図4のような、内部にギャップを有する二重円筒と仮定し、その場合の付加質量を算出した。

この場合の付加質量は、参考文献<sup>1</sup>に基づき以下の式で求められる。

$$m_v = \frac{(1-\xi)(r_0^2 + r_1^2)}{(1+\xi)r_0^2 - (1-\xi)r_1^2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot r_1^2 (1-\xi) \quad (2)$$

$$\xi = N \cdot \delta / 2r_1$$

$N$  : ギャップの数

$\delta$  : ギャップ距離

$r_0$  : 外筒半径

$r_1$  : 内筒半径

$\rho$  : 流体密度

(2)式を用いてラック群に対する付加質量を算出すると、約383tonと求められる。これは、耐震安全性評価に用いている(1)式による付加質量(合計約412ton)に対して、約1割変化している。この場合の、ラックの耐震安全性評価に与える影響を確認する。

ラックの固有振動数の変化率は、以下の式で与えられる。

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M+M_2}}}{\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M+M_1}}} = \sqrt{\frac{M+M_1}{M+M_2}} \quad (3)$$

$f_1$  : 無限水中条件とした場合の固有振動数 (Hz)

$f_2$  : 壁の影響を考慮した場合の固有振動数 (Hz)

$k$  : ラック剛性

$M$  : ラック重量 (内部水, 燃料含む) (kg)

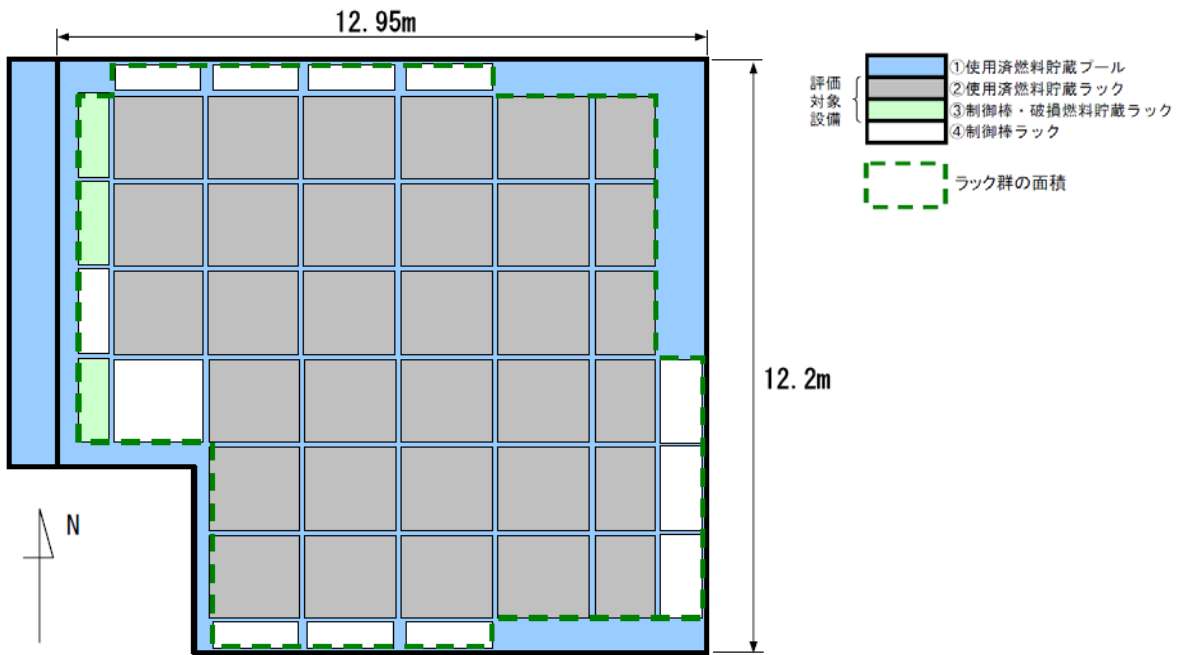
$M_1$  : 無限水中条件とした場合の付加質量 (kg)

$M_2$  : 壁の影響を考慮した場合の付加質量 (kg)

付加質量が約 1 割変化するとした場合, (3) 式を用いて, ラックの固有振動数の変化率を算出すると, 約 1%となる。

図 5 にラック (制御棒・破損燃料貯蔵ラック) の耐震安全性評価に用いている床応答スペクトルを示す。耐震安全性評価に用いる床応答スペクトルは, 周期軸方向に $\pm 10\%$  拡張をおこなっていることから, 固有周期が数%変化したとしても評価に用いる震度にはほとんど変化はなく, 耐震安全性評価へ与える影響は小さいものと判断する。

平面図



断面図

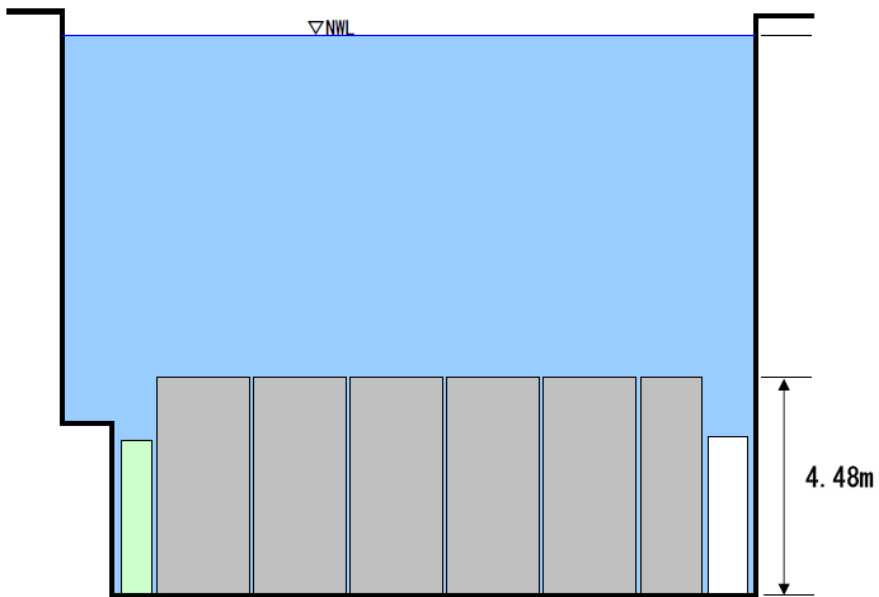


図3 使用済燃料貯蔵プール内ラック配置図

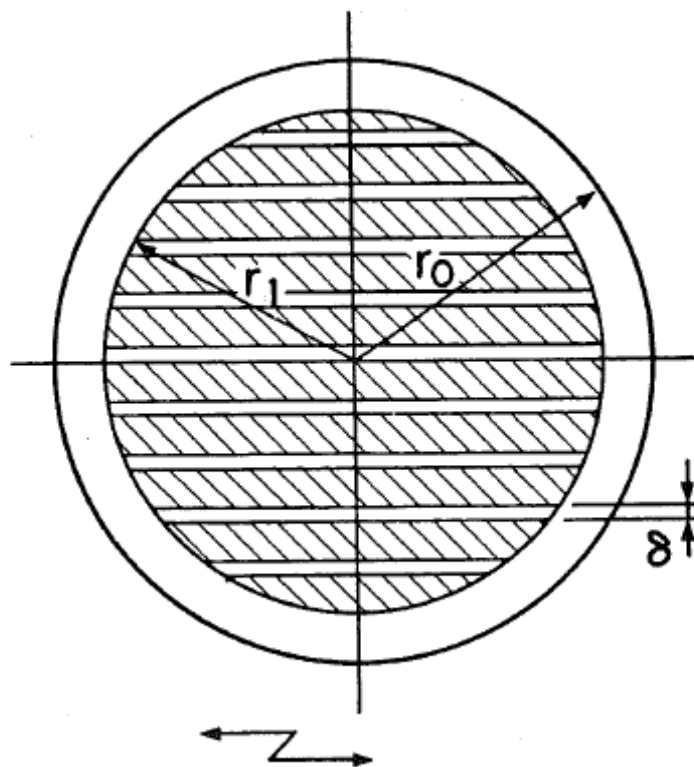


図4 ギャップを有する二重円筒モデル

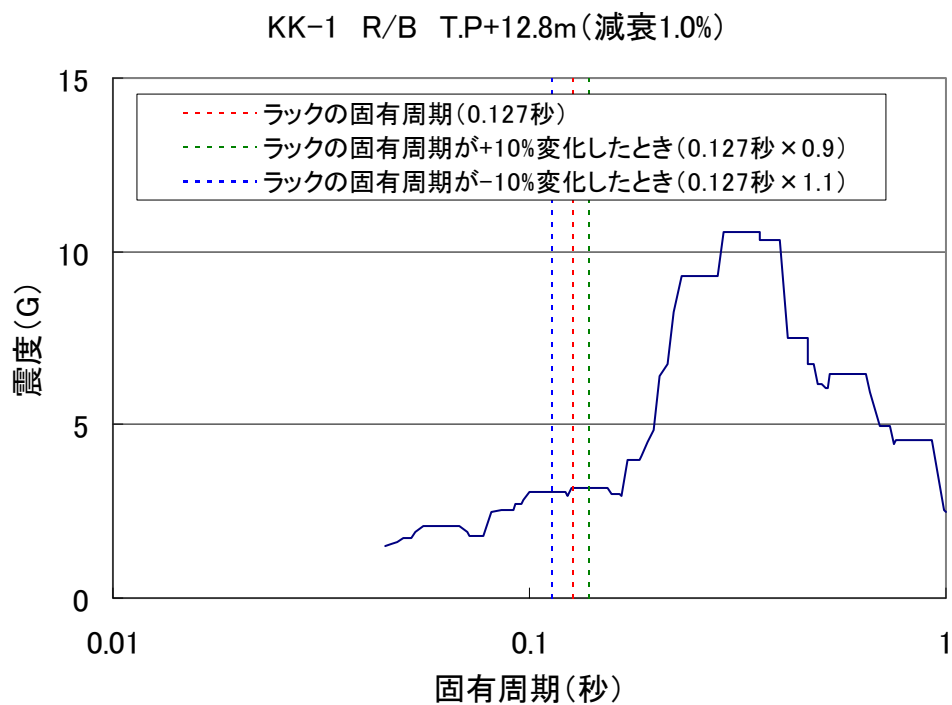


図5 原子炉建屋床応答スペクトル (T.P.12.8m, 水平方向)



[参考文献]

1. Y.Aida 他 : VIBRATION ANALYSIS OF BWR CORE FUEL ASSEMBLIES  
(ASME PVP-Vol.182)