

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-補-E-19-0600-30_改6
提出年月日	2021年11月11日

補足-600-30 制御棒貯蔵ラックの耐震性についての計算書に関する

補足説明資料

1. はじめに

制御棒貯蔵ラックは、近傍に設置された上位クラス施設である使用済燃料貯蔵ラックに対して波及的影響を及ぼさないことを目的として、基準地震動 S_s に対する耐震性を評価しており、その結果を「VI-2-11-2-13 制御棒貯蔵ラックの耐震性についての計算書」に示している。

本設備は、耐震性確保を目的として既工認から構造変更していることから、その差異等について整理するものである。

2. 制御棒貯蔵ラックの配置

図1に示すとおり、制御棒貯蔵ラックは使用済燃料貯蔵プール内に2台設置されており、近傍に上位クラス施設である使用済燃料貯蔵ラックが設置されている。したがって、制御棒貯蔵ラックが地震時に損傷、転倒することで、使用済燃料貯蔵ラックに波及的影響を及ぼす可能性があるため、基準地震動 S_s に対して十分な構造強度を有していることを確認する。

耐震性確保のため構造変更（取り替え）を実施するが、設置位置は改造前後で変更はない（図1参照）。

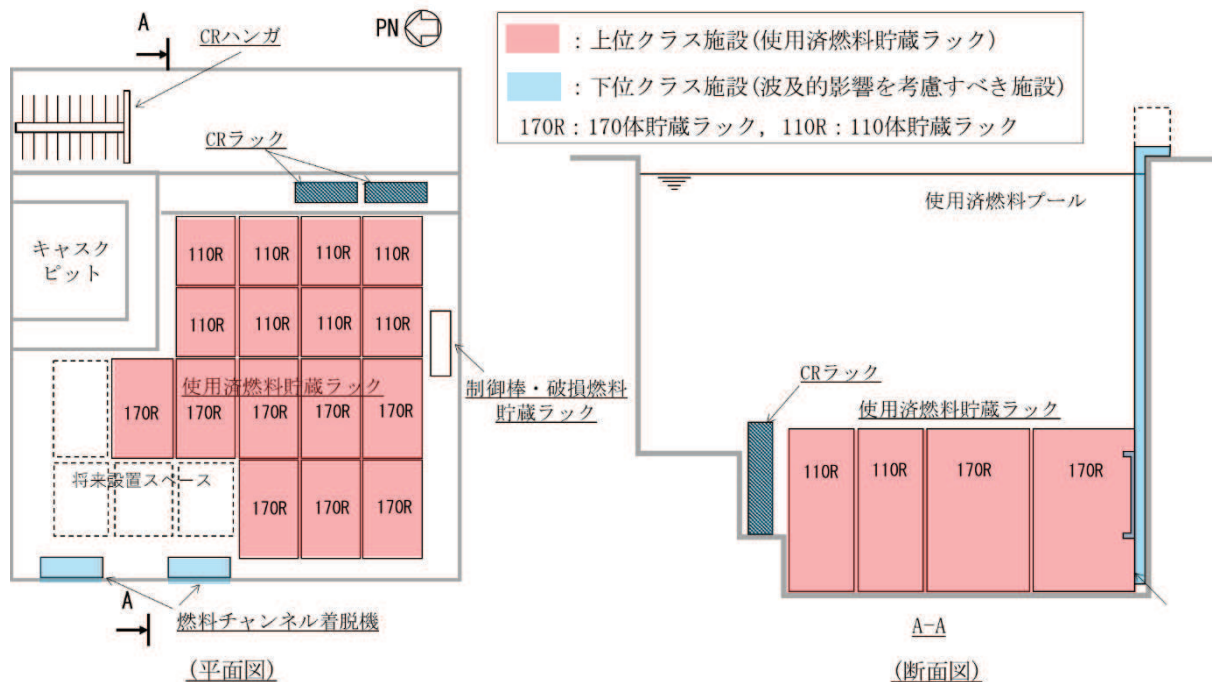


図1 使用済燃料貯蔵プール内制御棒貯蔵ラックの配置

3. 構造変更の概要

制御棒貯蔵ラックについて、基準地震動 S_s に対する構造健全性を満足するため、既工認とは異なる構造へ取り替え工事を実施する方針としている。

既工認と今回工認における制御棒貯蔵ラックの主要諸元の比較及び構造の比較について、表1及び図2に示す。

表1 既工認及び今回工認の主要諸元の比較

	既工認	今回工認
主要構造	たて置ラック式（円管構造）	たて置ラック式（フレーム構造）
固定方式	ボルトによる床固定式（自立型）	同左
主要材質		
質量(kg)		
全高(mm)		
全幅(mm)		
個数（台）	2	同左
貯蔵容量(本)	12	同左

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

既工認

今回工認

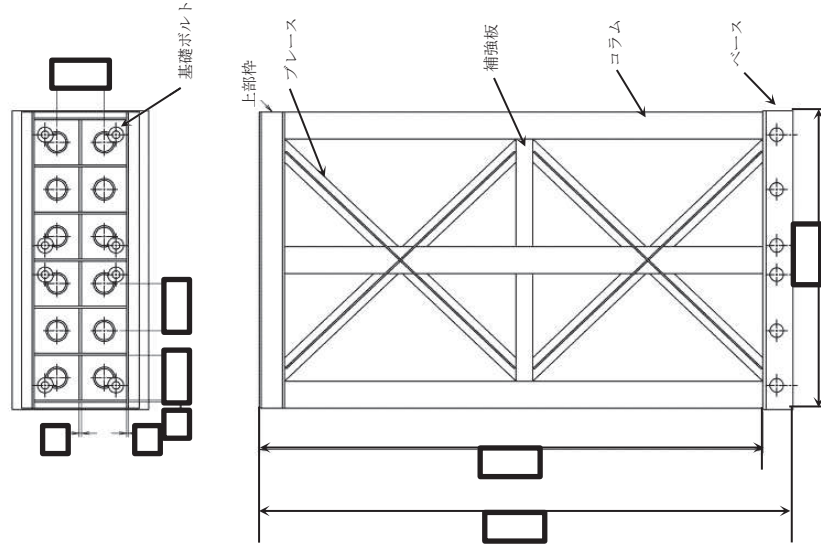
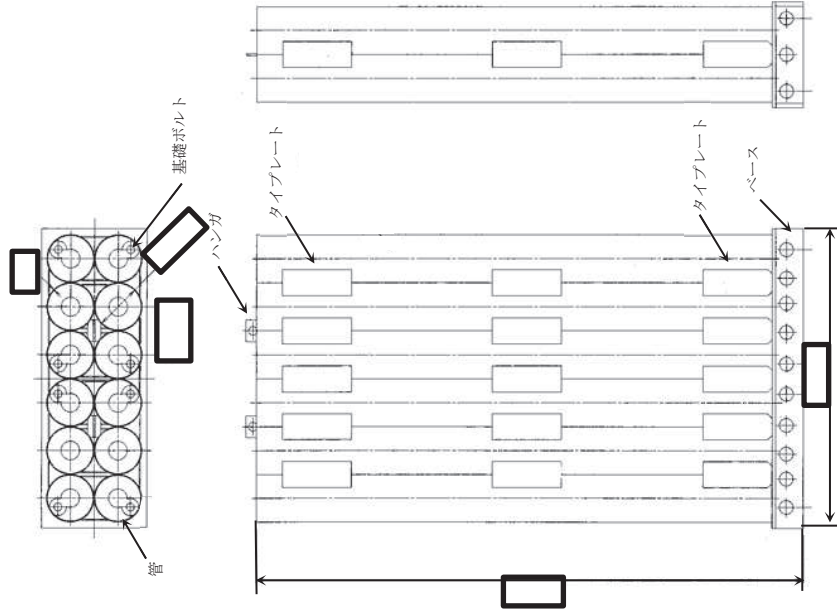


図2 既工認及び今回工認の構造の比較

枠組みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4. 既工認と今回工認の耐震設計手法の比較

既工認と今回工認の耐震設計手法の比較を表2に示す。

既工認においては、耐震Bクラス設備として多質点系モデルおよび公式等を用いて耐震設計を実施していたが、今回工認においては、解析モデルおよび解析手法に使用済燃料貯蔵ラックの耐震評価において実績のある3次元FEMモデルを用いたスペクトルモーダル解析に変更した。

また、その他の変更点として、今回工認においては既工認で考慮していたラック内包水質量を考慮しない方針としている。その理由として、既工認のラックは円管上部以外に内部流体の出入りが無い閉塞された構造であるのに対して、今回工認のラックはフレーム構造を採用し、流体を内包しない構造へ変更しているためである。

表2 既工認と今回工認の耐震設計手法の比較

		既工認	今回工認
耐震クラス		Bクラス	Bクラス (S s)
解析モデル		多質点系モデル (固有値解析のみ)	3次元FEMモデル
地震応答解析手法		公式等による評価	スペクトルモーダル解析
応力評価			公式等による評価
評価部位		ラック本体 (管), 基礎ボルト	ラック本体 (フレーム等), 基礎ボルト
設計用減衰定数		1.0%	1.0%
流体質量 の考慮	内包水質量	有	無
	付加質量*	有	有
	排除水体積質量に よる応答低減*	無	無
水平地震力と鉛直地震力の 組合せ法		—	SRSS

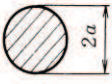
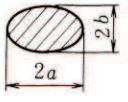
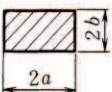
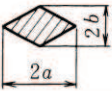

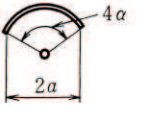

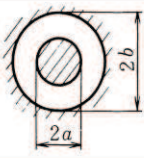

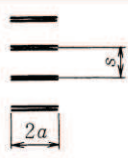
注記*：付加質量及び排除水体積質量による応答低減効果については「補足-600-40-40 耐震評価における流体中の構造物に対する付加質量及び応答低減効果の考慮」に詳細を示す。

5. 水の付加質量の算出方法

ラック及び制御棒の単位長さ当りの水の付加質量は表3より算出する。制御棒の付加質量は制御棒断面の外接円を考慮した円断面を持つ柱状物体として算出し、ラックの各部材の付加質量は長方形断面もしくは平板断面を持つ柱状物体として算出する。また、制御棒の付加質量は制御棒支持部に、ラックの付加質量は各部材に分配している。

なお、表3に示す機械工学便覧に記載されている付加質量は方向によらず断面形状に応じて適用可能である。

表3 柱状物体の単位長さ当たりの付加質量（機械工学便覧抜粋）

断面形状		付加質量						
円		$\pi\rho a^2$						
だ円		$\pi\rho a^2$ $\pi\rho b^2$						
長方形		$\pi K_1\rho a^2$						
ひし形		$\pi K_2\rho a^2$						
平板		$\pi\rho a^2$						
円弧翼		$\frac{\pi\rho a^2}{2}\left(1+\frac{1}{\cos^2\alpha}\right)$ $\frac{\pi\rho a^2}{2}\tan^2\alpha$						
ジェーコフスキー対称翼		$\frac{\pi\rho a^2}{4}\left(4+\frac{k-2}{k+1}\right)$ $\frac{\pi\rho a^2}{4}(k-2)(k+1)$						
同心固定同筒内の円		$\pi\rho a^2\left(\frac{b^2+a^2}{b^2-a^2}\right)$						
固定壁近くの平板		$\pi\rho a^2 K_3$						
平板列		$\frac{2\rho s^2}{\pi}\log\left\{\cos h\left(\frac{\pi a}{s}\right)\right\}$						
備考								
b/a	0	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10
K_1	1.00	1.14	1.21	1.36	1.51	1.70	1.98	2.23
b/a	0.5	1	2	5				
K_2	0.85	0.76	0.67	0.61				
$h/2a$	∞	2.5	0.5					
K_3	1.00	1.03	1.165					

付加質量を考慮する部材のうち、ブレースは全体座標系に対し傾きを有している。ブレースの振動方向は、図3に示す部材直交方向に振動するため、この振動方向に対する付加質量を算出し評価へ考慮する場合、X方向及びZ方向それぞれに斜め方向振動時の付加質量が付与されるものと考えられる。そこで、ブレースのような斜材に対しては、傾きを有する部材の振動に伴う付加質量を各軸の地震応答解析へ反映するために、投影した長さを適用して付加質量を算出していることから、水平方向と鉛直方向の付加質量算出の考え方を以下に示す。

(1) ブレースにおける水平方向の付加質量

図3に示すとおり、ブレースは全体座標系のXZ平面においてZ軸に対して傾きを有することから、水平方向のうちX方向の振動における付加質量を算出する場合、YZ平面へ投影した長さで付加質量を算出する。ここで、ブレースの水平方向のうちX方向の付加質量算出の際に考慮する断面については、図3に示すA-A断面のとおり、部材直交方向に断面を設定し、ウェブ部及びフランジ部をそれぞれ長方形断面の柱状物体として単位長さ当たりの付加質量を算出する。

一方、図3に示すB-B断面のとおり、全体座標系のZ軸に直交する方向で断面形状を考慮するとブレースのウェブ部及びフランジ部の幅は、A-A断面での断面形状よりも広がるが、付加質量を算出する際、小数点以下第一位で切上しているため、算出される付加質量は表4に示すとおり同値となることを確認している。

水平方向のうちY方向は傾きを有していないため、A-A断面での断面形状により単位長さ当たりの付加質量を算出し、斜材部の長さを用いて付加質量を算出している。

(2) ブレースを含む各部材の鉛直方向の付加質量

図3に示すとおり、ブレースは全体座標系のXZ平面においてX軸に対して傾きを有することから、鉛直方向(Z方向)の振動における付加質量を算出する場合、XY平面へ投影した長さで付加質量を算出することを基本とする。ただし、鉛直方向(Z方向)の付加質量については、Z軸に対して平板形状であり付加質量の影響が大きいベースのみを考慮している。また、ベース以外の部材の付加質量は小さく固有周期等への影響が軽微であることから、鉛直方向付加質量は考慮しない。各部材の鉛直方向の付加質量を表5に示す。表5に示すとおりベースに比べ、ベース以外の部材の付加質量は小さい。

ここで、ベース以外の部材の鉛直方向付加質量が耐震評価に及ぼす影響を確認するため、その付加質量を考慮した影響評価用モデルを作成し、固有周期を算出する。影響確認に必要な諸元及び確認結果を以下及び表6に示す。

制御棒貯蔵ラックを1質点系のモデルと考え、「VI-2-11-2-13 制御棒貯蔵ラックの耐震性についての計算書」に記載の解析モデル(以下「工認解析モデル」という。)全質量M及び固有周期Tから鉛直方向剛性Kを(1)式*2により算出する。

$$K = (2\pi / T)^2 \times M \dots \dots \dots (1)$$

注記*2：モデル全質量M[kg] $M = m_R + m_{CR} + m_V$

(m_R ：ラック質量[kg]， m_{CR} ：制御棒質量[kg]， m_V ：鉛直方向付加質量[kg])

固有周期T [s] ()：工認解析モデルより算出)

鉛直方向剛性K [kg/s²]

(1)式により算出した鉛直方向剛性及びベース以外の部材の鉛直方向付加質量を考慮した影響評価用モデル全質量Mを用いて、固有周期Tを式(2)により算出する。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} \dots \dots \dots (2)$$

表6に示すとおり、ベース以外の部材の鉛直方向付加質量を考慮した影響評価用モデルの固有周期とベースのみの鉛直方向付加質量を考慮した工認解析モデルの差異は非常に小さく、ベース以外の部材の鉛直方向付加質量による固有周期への影響は軽微であることを確認した。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

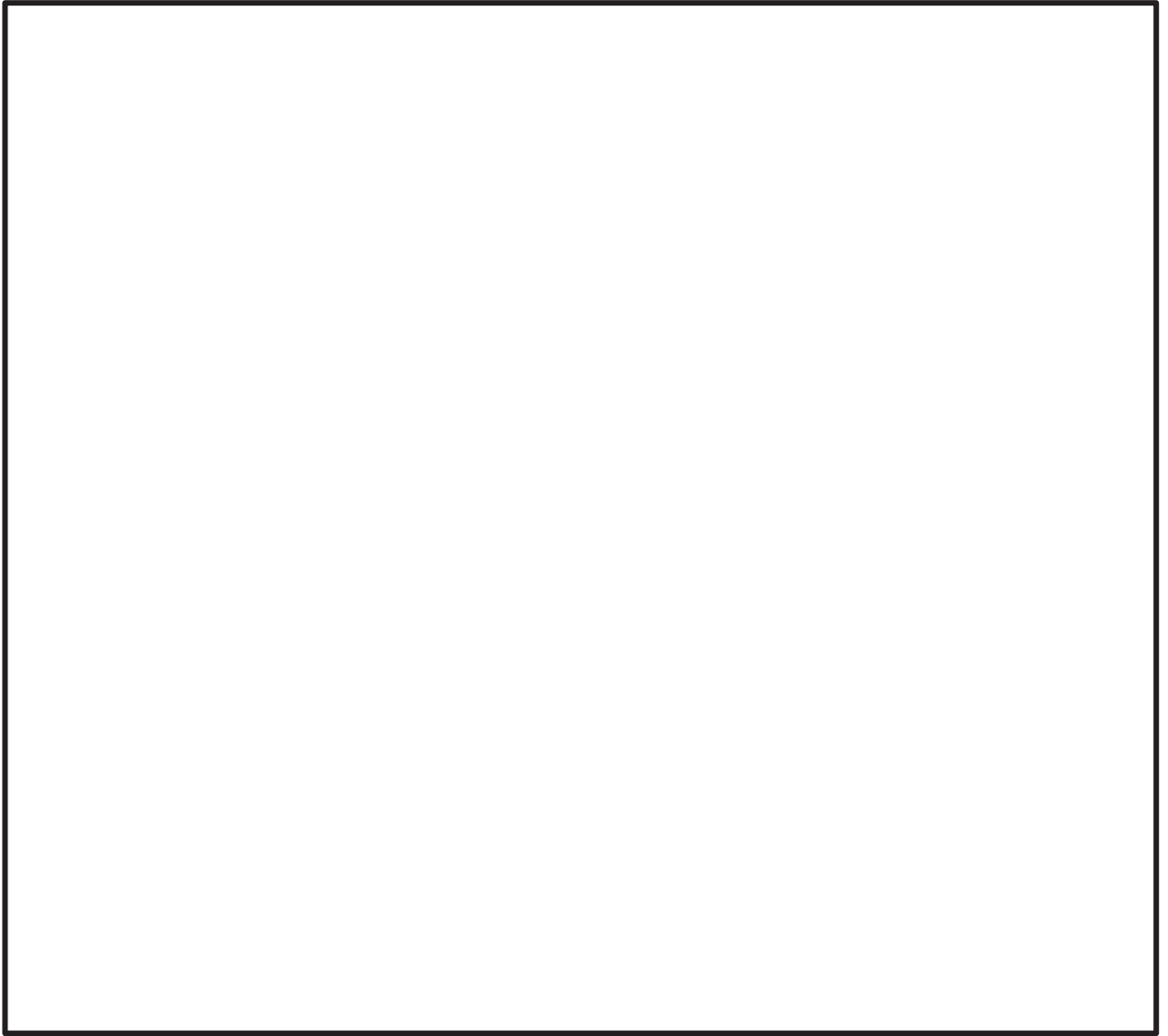


図3 ブレースに対する付加質量算出の考え方

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

表 4 異なる断面形状の取り方をした場合のブレースの付加質量

部材	方向	断面形状	外形寸法 (mm)		b/a	K1	単位長さ 当たりの 付加質量 (kg/mm)	長さ (mm)	付加質量 (kg)
			2a	2b					
部材に直交する 方向の断面形状に よる工認解析 モデルの 付加質量 (図 3 A-A 断面)	ブレース (ウェブ部)								
	ブレース (フランジ部)								
全体座標系に 直交する方向の 断面形状による 付加質量 (図 3 B-B 断面)	ブレース (ウェブ部)								
	ブレース (フランジ部)								

注記* : Y 方向は流れに対し傾きを有していないため、部材に対し直交する断面形状により単位長さ当たりの付加質量を算出し、斜材部の長さを用いて付加質量を算出している。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

表 5 各部位材の鉛直方向の付加質量

部位材	方向	断面形状	外形寸法 (mm)		b/a	K1	長さ (mm)	単体付加質量 (kg)	数量	付加質量 (kg)	今回考慮*1
			2a	2b							
			ベース	Z							
ブレース (ウェーブ部)	Z										
ブレース (フランジ部)	Z										
上部枠 (長辺補強部材)	Z										
上部枠 (短辺補強部材)	Z										
全体合計	Z										

注記*1：工認解析モデルにおいて、考慮しているものを「○」、考慮していないものを「×」

表 6 ベース以外の部位材の鉛直方向付加質量を考慮した場合の固有周期への影響

工認解析モデル (ベースのみ鉛直方向付加質量を考慮) 影響評価用モデル (すべての部位材の鉛直方向付加質量を考慮)	ラック質量 m_R [kg]	制御棒質量 m_{CR} [kg]	鉛直方向付加質量 m_V [kg]	モデル全質量 M [kg]	鉛直方向剛性 K [kg/s ²]	固有周期 T^{*2} [s]

注記*2：影響確認のため、小数点第4位四捨五入前の数値を示す。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

6. 制御棒貯蔵ラック内の制御棒の貯蔵状態

制御棒貯蔵ラック内の制御棒の貯蔵状態を図4に示す。制御棒は制御棒貯蔵ラックの上部枠及び着座部により移動が制限されており、地震発生時でも制御棒が貯蔵位置から移動することはない。制御棒と制御棒貯蔵ラックのクリアランス等の寸法情報は以下のとおり。

- ・制御棒と制御棒貯蔵ラックの水平方向のクリアランスは、上部枠において最大で mm, 着座部において最大で mm である。
- ・鉛直方向においては、ソケット部を除いた制御棒の全長 mm に対し、 mm の位置で上部枠により支持され、ソケット部の差込量は mm である。

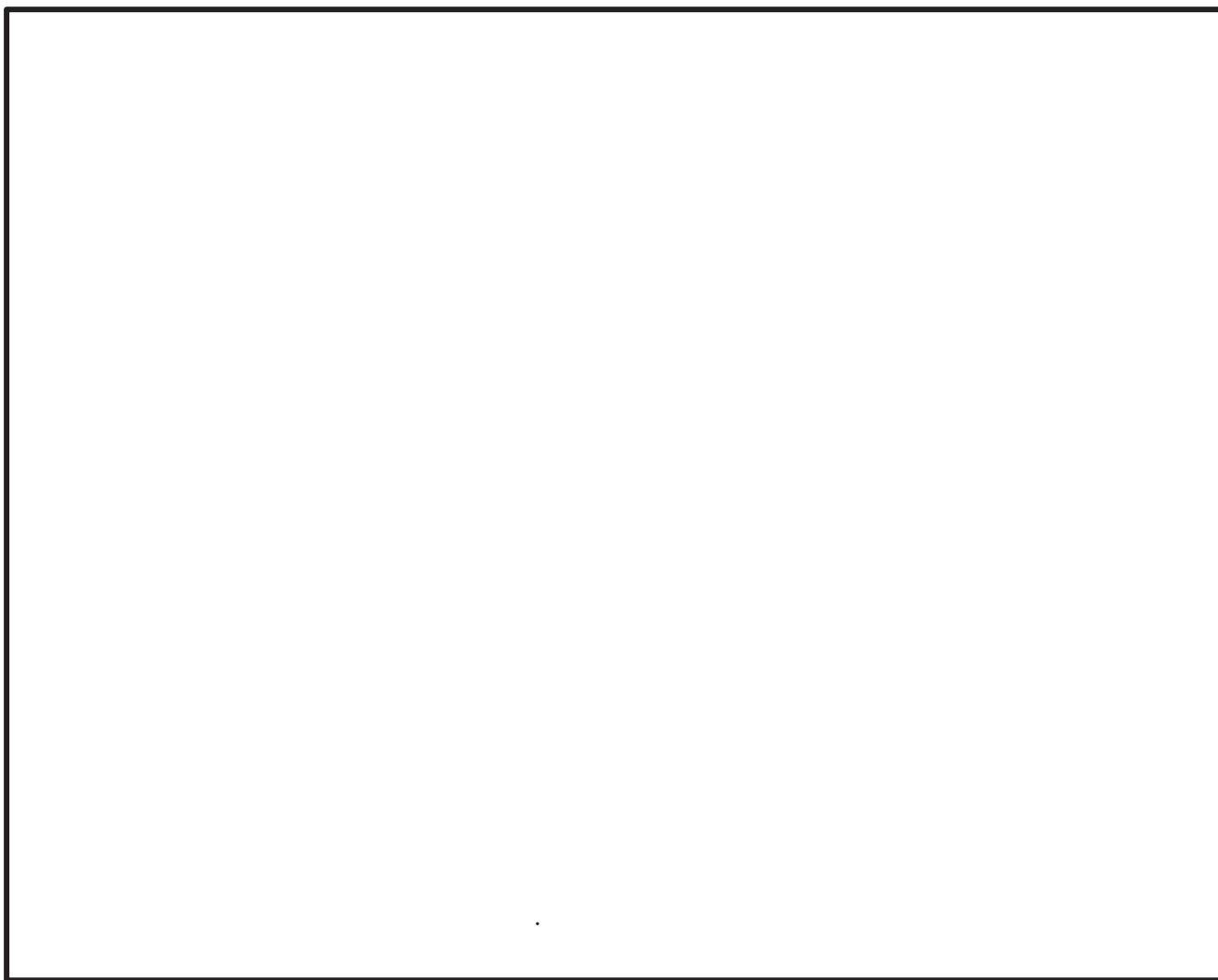


図4 制御棒貯蔵ラック内の制御棒の貯蔵状態

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

また、制御棒が地震発生時において制御棒貯蔵ラックの着座部から脱落しないことを確認するため、制御棒の浮上り量とソケット部の差込量を比較する。制御棒の浮上り量については、「補足-600-16 制御棒の挿入性評価について」に記載の既往知見*¹における鉛直方向地震力による燃料集合体の最大浮上り量を参考に検討する。制御棒は燃料集合体と同じく鉛直方向に剛構造であるため、既往知見と同様に鉛直方向の応答加速度に応じた浮上りが発生するものと考えられることから、本既往知見を適用するものである。

図5に示すとおり、既往知見における燃料集合体の最大浮上り量68mmは入力地震加速度 $2.0 \times 9.8\text{m/s}^2$ 、5Hzにおける浮上り量であり、制御棒の浮上り量は以下の観点から、燃料集合体の最大浮上り量を超えることはないと考えられる。

- ・制御棒貯蔵ラックの鉛直方向設計用地震加速度は $1.77 \times 9.8\text{m/s}^2$ であり、燃料集合体の浮上り量評価時の入力地震加速度 $2.0 \times 9.8\text{m/s}^2$ よりも小さい。
- ・燃料集合体の浮上り量は5Hz（正弦波）において最大値を示しており、5Hz以上では燃料集合体の浮上り量は小さくなっている。女川2号機の鉛直方向応答加速度は図6に示すとおり5Hz以上の振動数で上下の振動を繰り返す。

以上から、制御棒の浮上り量は、既往知見で得られている最大浮上り量68mmよりも大きくなることはないと考えられるため、ソケット部の差込量 mm を超える浮上りにより、制御棒が着座部から脱落することはない。

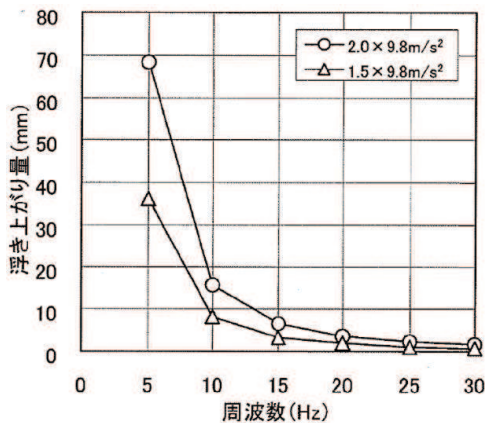


図5 燃料集合体浮上り量解析結果（正弦波）
（既往知見*¹より抜粋）

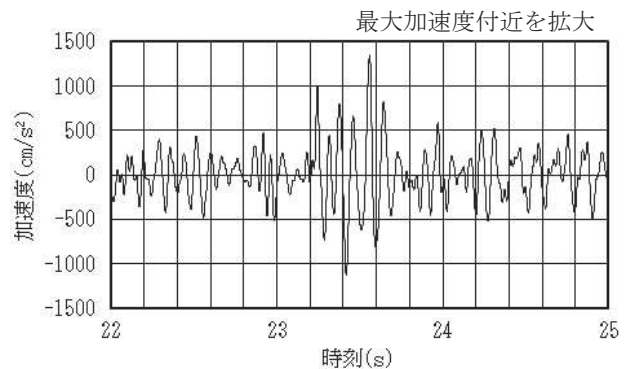


図6 鉛直方向応答加速度時刻歴*²
（S s - D 2 原子炉建屋 O. P. 33. 20m）

注記*¹：「平成17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機器耐力その2（BWR 制御棒挿入性）に係る報告書（06 基構報-0014,（独）原子力安全基盤機構）」

*²：鉛直方向地震加速度が大きいS s - D 2の鉛直方向応答加速度時刻歴を例として記載

7. まとめ

制御棒貯蔵ラックについては、構造部材の変更 や主要構造を変更（円管構造からフレーム構造）した新たなラックに取り替えを行うことで、基準地震動 S_s に対する構造健全性を確保する。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。