

本資料のうち、枠囲みの内容は、
営業秘密又は防護上の観点から
公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	TK-1-1913 改0
提出年月日	平成30年8月31日

平成30年8月31日
日本原子力発電株式会社

原子炉建屋3次元FEM解析による面外振動の機器に対する影響評価について

1. 概要

原子炉建屋の3次元FEMによる解析の結果、壁及び床の面外方向の応答が大きくなる傾向が確認されたことから、壁及び床に設置される機器への影響評価を実施する。

2. 検討方針

影響評価の対象は、面外応答が大きい原子炉建屋の壁及び床の中央付近に設置される機器として、壁の水平方向の応答増幅について「①ブローアウトパネル閉止装置」及び「②原子炉建屋クレーン」を、床の鉛直方向の応答増幅について「③燃料取替機」及び「④使用済燃料貯蔵ラック」を対象とする。

評価の方法については、原子炉建屋の質点系モデルによる応答と3次元FEMモデルによる応答を比較し、質点系モデルの応答が上回っている場合は影響なしと判断し、質点系モデルの応答が下回っている場合には、3次元FEMモデルの応答を考慮した機器への影響評価（震度比率と耐震裕度の比較等）を実施する。

各機器の評価に用いる床応答スペクトル及び最大床応答加速度(ZPA)については、原子炉建屋の3次元FEMモデルによる応答解析の結果から、評価対象機器設置位置付近の節点における加速度時刻歴を基に作成する。評価対象機器の設置位置と3次元FEMモデルの節点との関係を図1及び図2に示す。

3次元FEMモデルへの地震動の入力は1方向入力とし、各機器の評価を行う際には、3方向同時入力の影響を確認するため、3方向それぞれの入力における面外方向成分の加速度時刻歴を代数和した加速度時刻歴を使用する。加速度時刻歴の3方向の組合せの際には、機器ごとに、1方向入力の面外応答が最大となる節点を抽出し、当該節点に対して、3方向入力による面外方向の加速度時刻歴を算定する。

応答解析に用いる地震動は、全周期帯の応答が大きく機器への影響も大きい弾性設計用地震動 S_d-D1 を用いる。

なお、原子炉建屋の3次元FEMモデルの詳細は、補足説明資料「補足-340-7 水平2方向及び鉛直方向地震力の適切な組合せに関する検討について」の別紙3の「2. 3次元FEMモデルの構築」に示すものと同一である。

3. 評価結果

3.1 ブローアウトパネル閉止装置

3次元FEMモデルによる応答解析の結果、ブローアウトパネル閉止装置の設置位

置における壁の面外方向（水平）の応答が大きくなる傾向が確認されたことから、応答増幅に対する影響を評価した。評価方法は、質点系モデルの応答解析結果を基に設定した設計震度（工認計算書記載値）と、3次元FEMモデルの S_d-D1 の震度から推定した震度を比較することにより、震度の包絡性を確認した。

評価の結果、工認計算書の設計震度が3次元FEMモデルの震度を包絡しており、閉止装置の健全性に影響ないことを確認した。評価の詳細を、別紙-1に示す。

3.2 原子炉建屋クレーン

3次元FEMモデルによる応答解析の結果、原子炉建屋クレーンの設置位置における壁の面外方向（水平）の応答が大きくなる傾向が確認されたことから、応答増幅に対する影響を評価した。評価対象は、工認計算書に記載されている評価部位のうち、水平方向荷重の影響が大きい評価部位として、落下防止金具を対象とした。

評価の結果、震度比率が設計裕度に収まっていることから、原子炉建屋クレーンの健全性に影響ないことを確認した。評価の詳細を別紙-2に示す。

3.3 燃料取替機

3次元FEMモデルによる応答解析の結果、燃料取替機の設置位置における床の面外方向（鉛直）の応答が大きくなる傾向が確認されたことから、応答増幅に対する影響を評価した。評価対象は、工認計算書に記載されている評価部位のうち、最小裕度となる評価部位として、トロリ脱線防止ラグ取付ボルトを対象とした。

評価の結果、工認計算書に記載する手法で計算すると算出応力が許容応力をわずかに超えるものの、耐震評価の目的が波及的影響防止であることを踏まえ、許容応力の算定に用いるF値に $0.7S_u$ を適用することにより、許容応力内に収まることを確認した。これより、燃料取替機の健全性に影響ないことを確認した。評価の詳細を別紙-3に示す。

3.4 使用済燃料貯蔵ラック

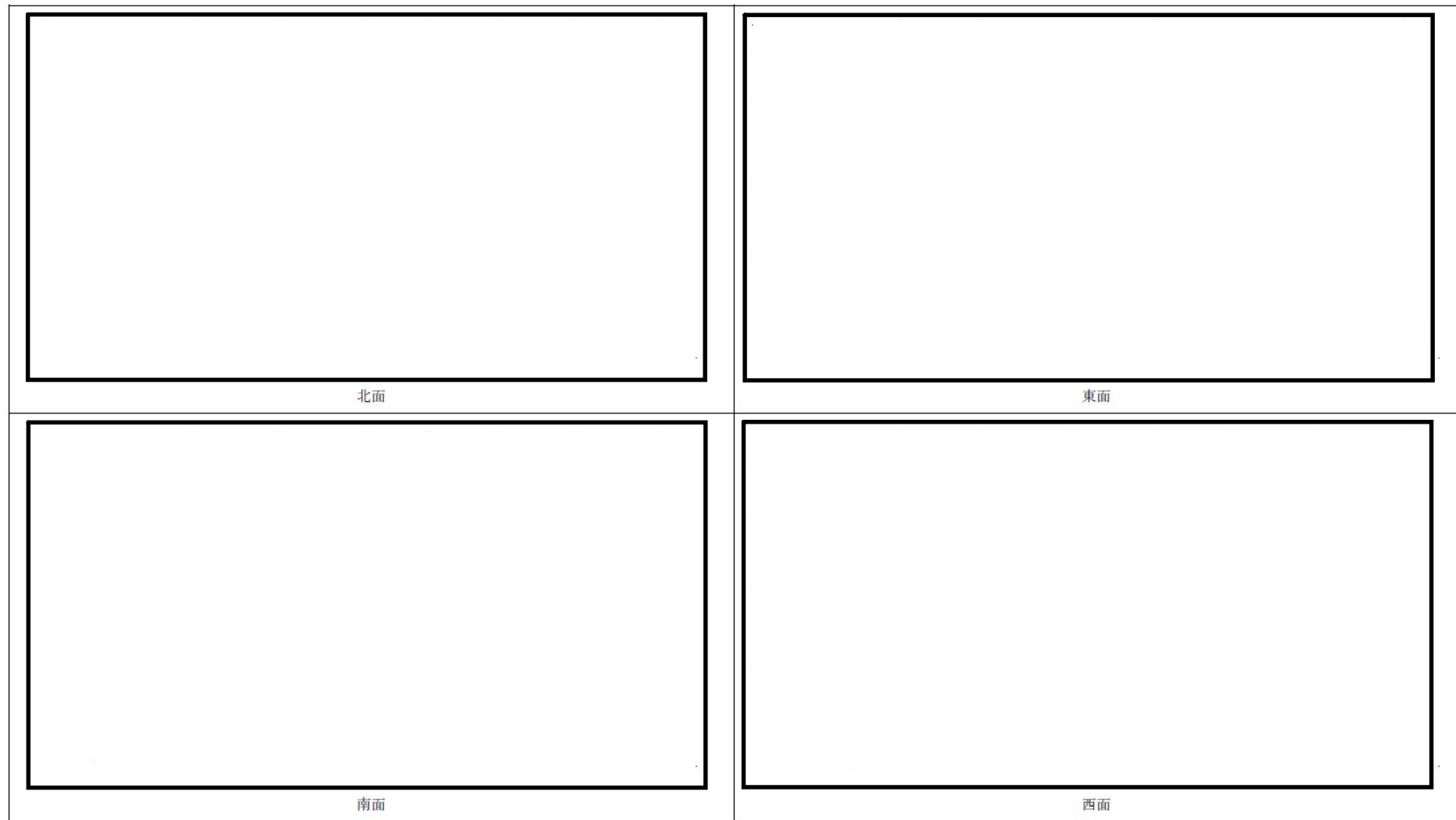
3次元FEMモデルによる応答解析の結果、使用済燃料貯蔵ラックの設置位置における床の面外方向（鉛直）の応答が大きくなる傾向が確認されたことから、応答増幅に対する影響を評価した。評価対象は、工認計算書に記載されている評価部位のうち、設計裕度が少ない評価部位として、ラック取付ボルト及び基礎ボルトを対象とした。

評価の結果、工認計算書に記載する手法で計算すると算出応力が許容応力をわずかに超えるものの、保守的に設定していた応力評価式を絶対値和法からSRSS法に見直すことにより、許容応力内に収まることを確認した。これより、使用済燃料貯蔵ラックの健全性に影響ないことを確認した。評価の詳細を別紙-4に示す。

4. まとめ

原子炉建屋の 3 次元 F E M による解析の結果，壁及び床の面外方向の応答が大きくなる傾向が確認されたことから，壁及び床に設置される機器への影響評価を実施した。

評価の結果，一部の機器については，評価目的に照らした許容応力の見直しや保守的に設定した評価方法の見直しが必要なものの，いずれも許容応力内に収まることが確認できたことから，各機器の健全性に影響のないことを確認した。



○ : ブローアウトパネル閉止装置 ○ : 原子炉建屋クレーン

図1 原子炉建屋6階の壁における評価対象機器の設置位置と3次元FEMモデルの節点との関係

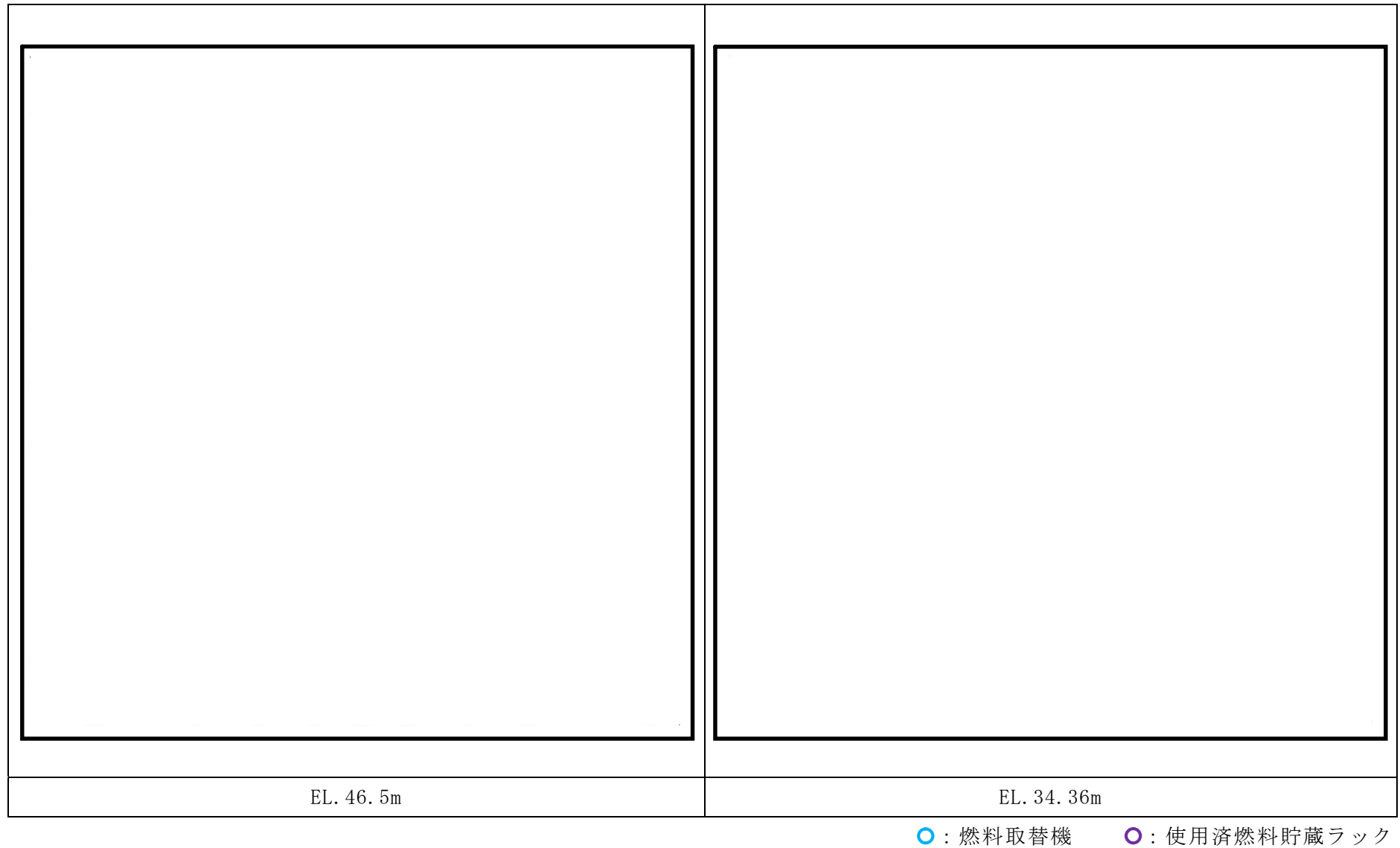


図2 原子炉建屋6階の床における評価対象機器の設置位置と3次元FEMモデルの節点との関係

ブローアウトパネル閉止装置に対する壁の面外振動の影響評価

1. 目的

3次元FEMモデルによる応答解析の結果、ブローアウトパネル閉止装置の設置位置における壁の面外方向（水平）の応答が大きくなる傾向が確認されたことから、応答増幅に対する影響を評価する。

2. 影響評価結果

質点系モデルの応答解析結果から設定した原子炉建屋6階の設計震度（工認計算書記載値）と、3次元FEMの応答解析結果から評価した面外方向震度について整理した結果を表1-1に示す。表1-1より、ブローアウトパネル閉止装置の工認計算書の設計震度は、3次元FEMの計算結果から推定した面外方向の設計震度を包絡しており、閉止装置の健全性に影響ないことを確認した。

表 1-1 ブローアウトパネル閉止装置の面外方向設計震度

扉状態	評価用 地震動	S _d -D1の3次元FEMモデルの結果から推定した震度					⑥ 工認計算書 の震度* ²	評価 (⑤<⑥)
		① S _d -D1の 震度* ^{1,2}	② S _d 8波への 補正比率* ⁵	③ S _s /S _d 比率* ⁶	④ がた考慮 (2倍)* ⁷	⑤ 評価震度* ² (①×②×③×④)		
閉	S _d	1.80* ³	2.02	—	—	3.64	4.18* ⁸	○
開	S _s	1.43* ⁴	1.11	1.85	2	5.88	6.33* ⁹	○

注記 *1: 3次元FEMモデルによるS_d-D1の面外方向震度

*2: 震度は、G=9.80665 (m/s²)

*3: 扉閉状態の固有周期 秒における震度（図 1-1 参照）

*4: 扉開状態の固有周期は 0.05 秒以下であるため 1.2ZPA の値（表 1-2 参照）

*5: 質点系モデルでの「S_d-D1」と「S_d8波+ばらつき考慮」の応答スペクトルの比率（「3次元FEMでのS_d8波+ばらつき考慮相当」の震度算定用）

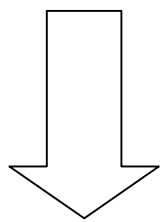
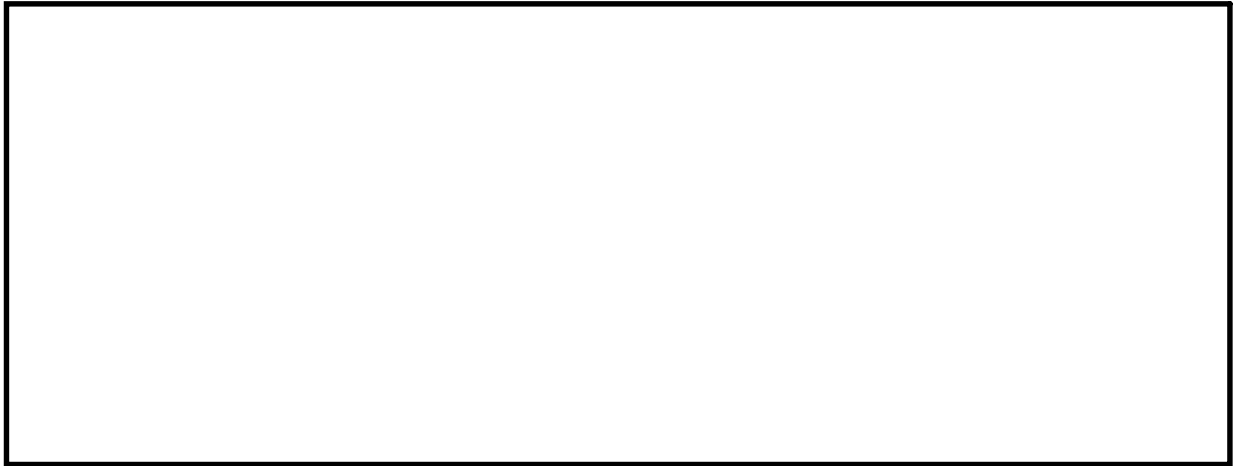
*6: 質点系モデルの EL. 63.65m における、S_dに対するS_sの最大応答加速度比率（3次元FEMモデルでのS_s評価用の震度を設定するための比率）

*7: 扉開状態での面外方向は固定されていないため、がたの影響として2倍を考慮

*8: EL. 63.65m におけるS_d8波+ばらつき考慮の応答スペクトルの固有周期 秒における震度（閉止装置設置位置より高いEL.を適用し保守性を確保）

*9: EL. 63.65m におけるS_s8波+ばらつき考慮の応答スペクトルの固有周期 0.069 秒における震度（閉止装置設置位置より高いEL.を適用し保守性を確保、剛構造であるが 秒の震度を適用することで保守性を確保）

1 方向入力時の面外方向の応答スペクトル



【FRSの選定】

南北面の節点のうち 秒で最大応答を示す節点 (No. 3) を抽出

東西面の節点のうち 秒で最大応答を示す節点 (No. 12) を抽出

【3方向入力の考慮】

3方向入力による面外成分の加速度時刻歴を代数和で算出

3 方向入力時の面外方向の応答スペクトル

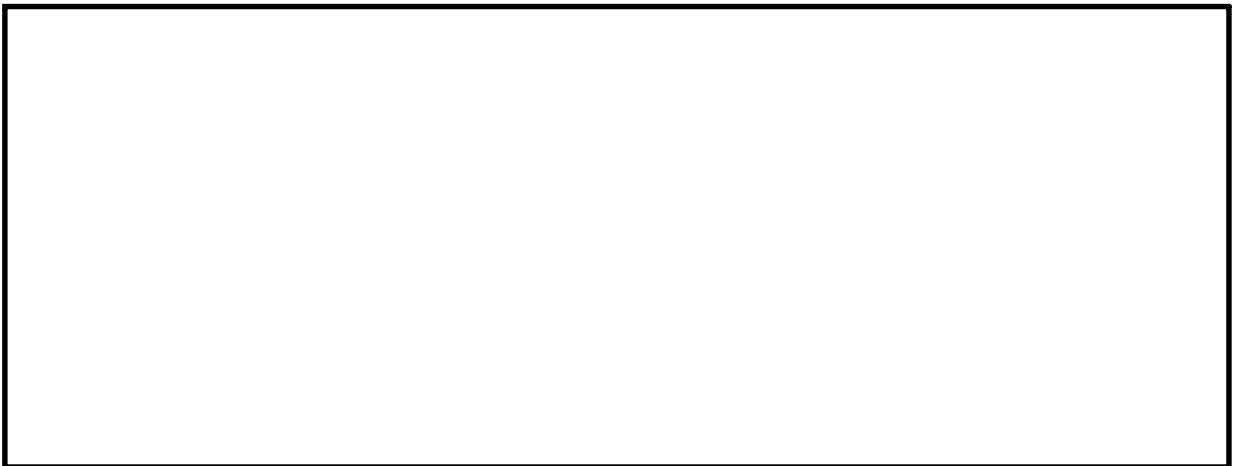


図 1-1 扉閉状態 (S_d 評価) における「① $S_d - D1$ の震度」の設定方法

表 1-2 扉開状態 (S_s 評価) における「① $S_d - D1$ の震度」の設定方法

評価節点	1 方向入力の ZPA	3 方向考慮の ZPA	3 方向考慮の 1.2ZPA
No. 17 1 方向入力で 最大 ZPA となる節点	1.267	1.190	1.428
No. 3 南北面の節点のうち <input type="text"/> 秒で最大応答を示す節点	1.137	1.083	1.300
No. 12 東西面の節点のうち <input type="text"/> 秒で最大応答を示す節点	0.922	1.152	1.383

以上

原子炉建屋クレーンに対する壁の面外振動の影響評価

1. 目的

3次元FEMモデルによる応答解析の結果、原子炉建屋クレーンの設置位置における壁の面外方向（水平）の応答が大きくなる傾向が確認されたことから、応答増幅に対する影響を評価する。

2. 影響評価結果

質点系モデルの応答解析結果から設定した原子炉建屋6階の設計震度（工認計算書記載値）と、3次元FEMの応答解析結果から評価した面外方向震度について整理した結果を表2-1に示す。表2-1より、原子炉建屋クレーンの工認計算書の設計震度は、3次元FEMの応答を考慮した面外方向（EW方向）の設計震度を下回ることから、影響評価を実施する。

表 2-1 原子炉建屋クレーンの固有周期，固有周期における震度及び震度比率

	固有周期 (s) *1		震度 *3	
	走行方向 *2 (NS方向)	横行方向 *2 (EW方向)	走行方向 *2 (NS方向)	横行方向 *2 (EW方向)
質点系モデル	—		0.075*4	0.80*5
3次元FEMモデル	—		0.075*4	1.96*5
震度比率			1.00	2.45

注記 *1：設計基準対象施設（DB）の評価では、クレーンのトロリが中央にある条件で、重大事故等対処設備（SA）の評価では、クレーンのトロリが端部にある状態で固有周期を算出

*2：原子炉建屋クレーンは、原子炉建屋6階の東面と西面にレールが設置されており、NS方向が走行方向、EW方向が横行方向となる。

*3：弾性設計用地震動 $S_d - D1$ による応答解析により得られた震度

*4：最大静止摩擦係数より求めた水平方向設計震度であり建屋応答に依存しない値

*5：固有周期が0.05秒以下の剛構造であるため、据付場所での最大応答加速度（ZPA）の1.2倍の値を記載（節点No.2）

評価部位は、工認計算書に記載されている評価部位のうち、水平方向荷重の影響が大きい評価部位として、落下防止金具を対象とした。原子炉建屋クレーンの影響評価部位を図2-1に示す。

評価部位の震度比率と設計裕度を比較した結果、設計裕度の方が大きいことを確認した。評価結果を表2-2に示す。以上より、原子炉建屋クレーンの健全性に影響ないこと

を確認した。

表 2-2 評価結果

方向	評価部位	震度比率	設計裕度	評価
水平（横行方向）	落下防止金具	2.45	5.23	○

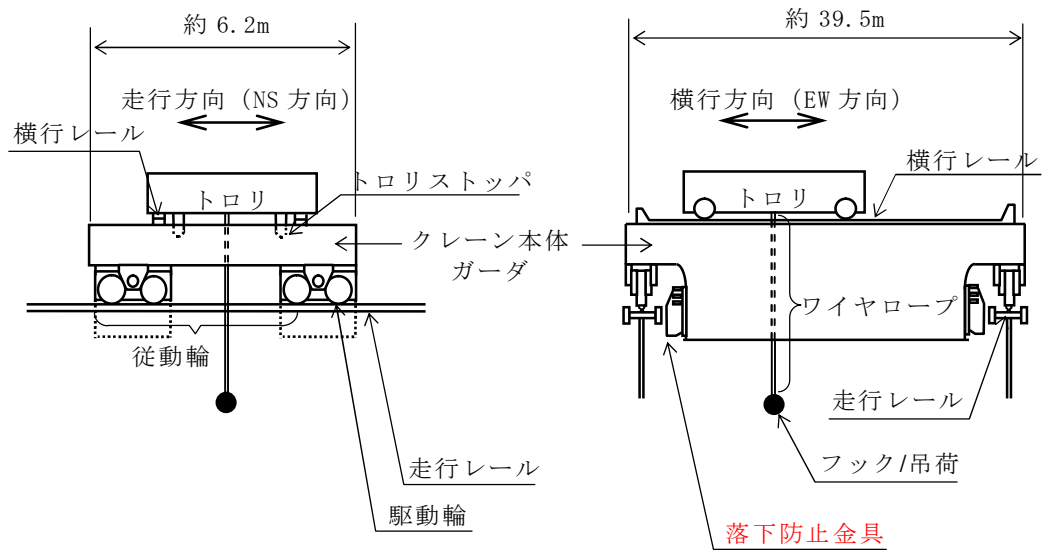


図 2-1 原子炉建屋クレーンの影響評価部位（落下防止金具）

以上

燃料取替機に対する床の面外振動の影響評価

1. 目的

3次元FEMモデルによる応答解析の結果、燃料取替機の設置位置における床の面外方向（鉛直）の応答が大きくなる傾向が確認されたことから、応答増幅に対する影響を評価する。

2. 影響評価結果

質点系モデルの応答解析結果から設定した原子炉建屋6階の設計震度（工認計算書記載値）と、3次元FEMの応答解析結果から評価した面外方向震度について整理した結果を表3-1に示す。表3-1より、燃料取替機の工認計算書の設計震度は、3次元FEMの応答を考慮した面外方向の設計震度を下回ることから、影響評価を実施する。

表 3-1 燃料取替機の固有周期，固有周期における震度及び震度比率

	固有周期 (s) *1	震度*2
	鉛直方向	鉛直方向
質点系モデル		1.35*3
3次元FEMモデル		1.46*3
震度比率		1.08

注記 *1：設計基準対象施設（DB）の評価では、クレーンのトロリが中央にある条件で、重大事故等対処設備（SA）の評価では、クレーンのトロリが端部にある状態で固有周期を算出

*2：弾性設計用地震動 S_d-D1 による応答解析により得られた震度

*3：震度が大きくなる設計基準対象施設（DB）の固有周期 0.089 秒における震度を記載（図 3-1 参照）（節点 No. 2）

評価部位は、工認計算書に記載されている評価部位のうち、最小裕度となる評価部位として、トロリ脱線防止ラグ取付ボルトを対象とした。燃料取替機の影響評価部位を図 3-2 に示す。

鉛直方向の震度の増分を考慮したトロリに掛かる地震時荷重を計算し、トロリ脱線防止ラグ取付ボルトの発生応力を算出した結果、許容応力に収まることを確認した。評価結果を表 3-2 に示す。ただし、許容応力の算定には、燃料取替機の評価の目的が波及的影響防止であることを踏まえ、許容応力の算定に用いる F 値に $0.7 S_u$ を適用した許容応力としている。以上より、燃料取替機の健全性に影響ないことを確認した。

表 3-2 評価結果

(単位：MPa)

評価部位	応力	算出応力	許容応力	評価
トロリ脱線防止ラグ取付ボルト	せん断 τ_{bT}	148	158* ¹ (146* ²)	○

注記 *1：許容応力の算定に用いるF値に0.7S_uを適用した許容応力

*2：許容応力の算定に用いるF値に1.2S_yを適用した許容応力（工認計算書の手法）

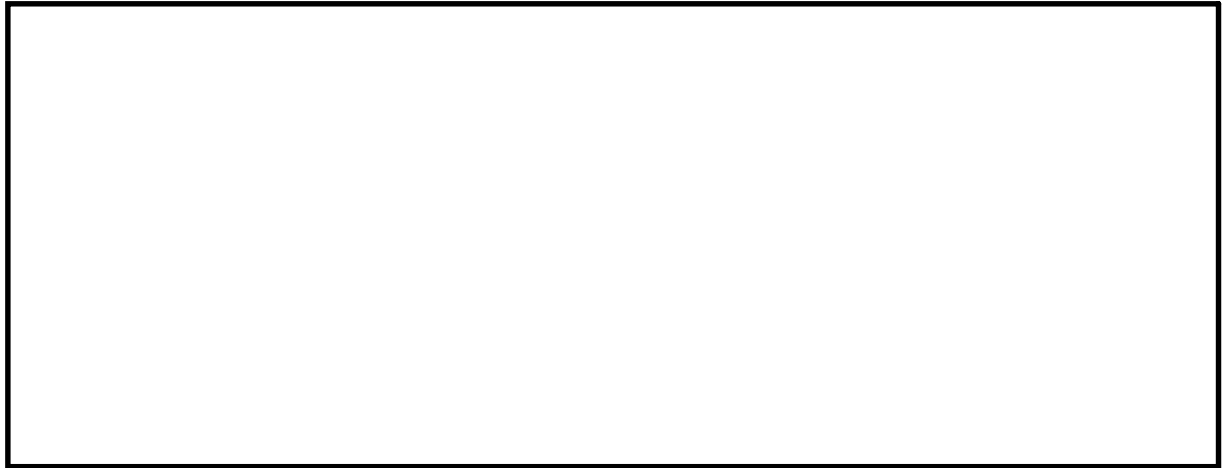


図 3-1 各モデルの応答解析結果により得られた床応答スペクトル（燃料取替機位置）

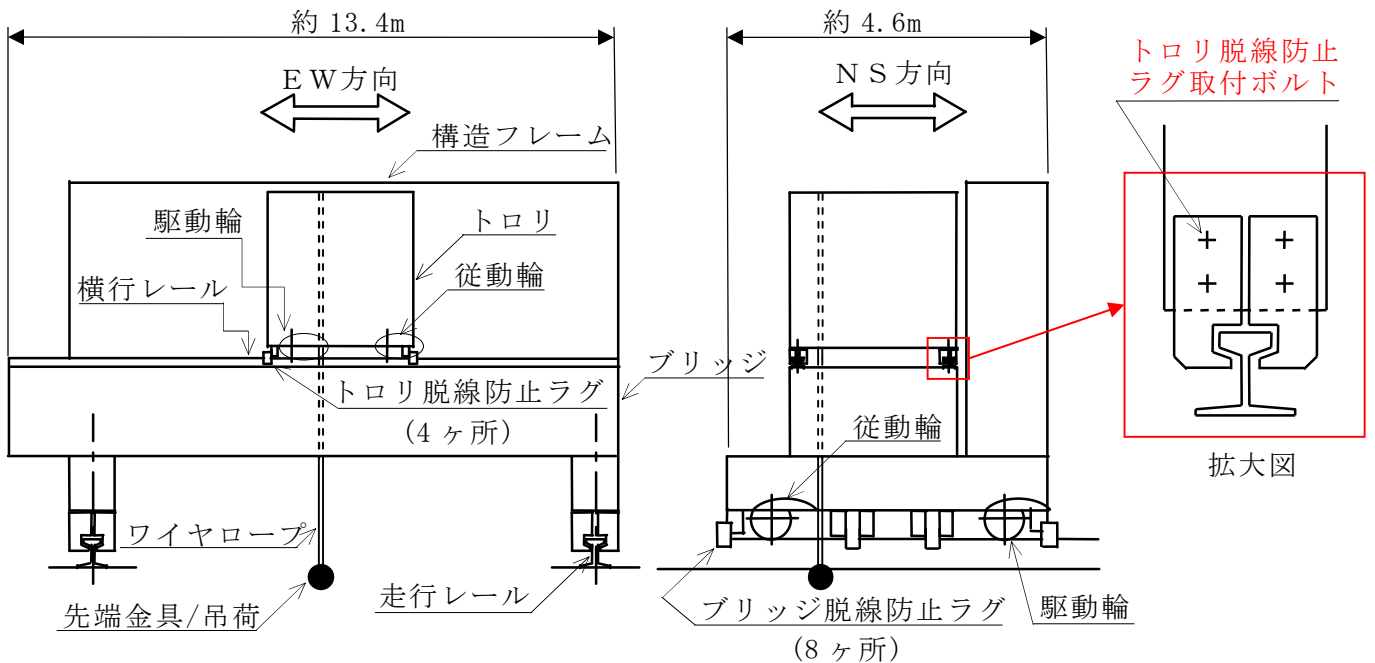


図 3-2 燃料取替機の影響評価部位（トロリ脱線防止ラグ取付ボルト）

以上

使用済燃料貯蔵ラックに対する床の面外振動の影響評価

1. 目的

3次元FEMモデルによる応答解析の結果，使用済燃料貯蔵ラックの設置位置における床の面外方向（鉛直）の応答が大きくなる傾向が確認されたことから，応答増幅に対する影響を評価する。

2. 影響評価結果

質点系モデルの応答解析結果から設定した原子炉建屋6階の設計震度（工認計算書記載値）と，3次元FEMの応答解析結果から評価した面外方向震度について整理した結果を表4-1に示す。表4-1より，使用済燃料貯蔵ラックの工認計算書の設計震度は，3次元FEMの応答を考慮した面外方向の設計震度を下回ることから，影響評価を実施する。

表4-1 使用済燃料貯蔵ラックの固有周期，固有周期における震度及び震度比率

	固有周期 (s)	震度*1
	鉛直方向	鉛直方向
質点系モデル	0.05 秒以下 (70 体ラック)	0.36*2
3次元FEMモデル	0.05 秒以下 (110 体ラック)	0.89*2
震度比率		2.48

注記 *1：弾性設計用地震動 $S_d - D1$ による応答解析により得られた震度

*2：固有周期が 0.05 秒以下の剛構造であるため，据付場所での最大応答加速度（ZPA）を記載（節点 No.2）

評価部位は，工認計算書に記載されている評価部位のうち，設計裕度が少ない評価部位として，ラック取付ボルト及び基礎ボルトを対象とした。使用済燃料貯蔵ラックの影響評価部位を図4-1に示す。

鉛直方向の震度の増分を考慮した使用済燃料貯蔵ラックの転倒モーメントに対するラック取付ボルト及び基礎ボルトの発生応力を算出した結果，許容応力に収まることを確認した。評価結果を表4-2に示す。ただし，算出応力の計算においては，工認計算書で保守的に設定していた応力評価式を絶対値和法からSRSS法に見直している。以上より，使用済燃料貯蔵ラックの健全性に影響ないことを確認した。

表 4-2 評価結果

(単位：MPa)

評価部位		応力	算出応力* ¹	許容応力	評価
ラック取付ボルト	70体ラック	引張り	94* ² (134* ³)	153	○
	110体ラック	引張り	103* ² (157* ³)	153	○
基礎ボルト	共通ベース	引張り	130* ² (196* ³)	150	○

注記 *1：NS，EW方向により評価結果が異なるため，算出応力の大きい方を記載
 *2：応力評価式にSRSS法を適用した算出応力
 *3：応力評価式に絶対値和法を適用した算出応力（工認計算書の手法）

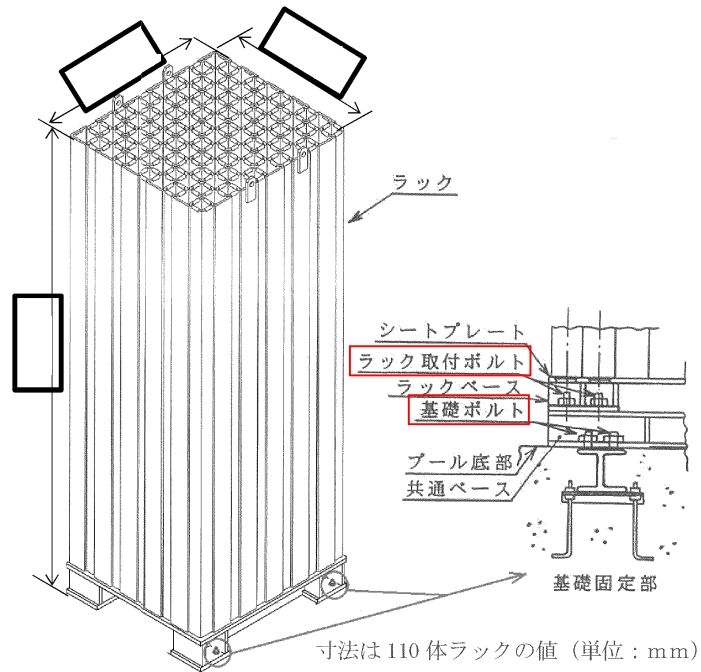


図 4-1 燃料取替機の影響評価部位（ラック取付ボルト，基礎ボルト）

以上