

柏崎刈羽原子力発電所 第7号機
工事計画認可申請に係る論点整理について
(指摘事項に対する回答)

TEPCO

2020年7月30日
東京電力ホールディングス株式会社

【説明内容】

- 下記の工事計画認可申請に係る論点及び第867回審査会合における指摘事項に対する回答について説明する。

■ 耐震評価に関する論点整理・指摘事項への回答

分類	No.	説明項目（論点/指摘事項への回答）	関連する 主な説明事項
耐震	1	建物・構築物における地震応答解析モデルの既工認からの変更点 (1) 廃棄物処理建屋で用いる地震応答解析手法/応力解析手法の妥当性確認 【指摘事項に対する回答】	[3]－4

【論点1】

建物・構築物における地震応答解析モデルの既工認からの変更点

(1)廃棄物処理建屋で用いる地震応答解析手法/応力解析手法の
妥当性確認【指摘事項に対する回答】

本日のご説明内容

▶ 原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合の指摘事項に対する回答

No.	実施日	指摘事項
1	令和2年6月16日 第867回 審査会合	入力を増大させた際の加速度応答スペクトルについて、接地率35%から22%への減少に伴い一部の周期帯に複数のピークが現れ、傾向に変化が見られるため、これらの周期における建屋の挙動も含めて、応答スペクトルの変化に対する考察を説明すること。
2	令和2年6月16日 第867回 審査会合	建屋の応答が低接地率となる場合、基礎浮き上がりに伴う建屋の回転による変形が大きくなるため、隣接建屋への影響について詳細に説明すること。

1. 地盤 3次元FEM解析に見られる短周期の応答増幅について
2. 隣接建屋への影響について

(1) はじめに

廃棄物処理建屋の地盤3次元FEM解析結果として、入力地震動を増大させて建屋の応答変化を加速度応答スペクトルで比較した結果、下図に示すように入力1.2倍（接地率22%）のケースでは、0.05～0.2秒程度の短周期域で地上2階の増幅割合が大きい結果となった。今回はこの原因について考察した。

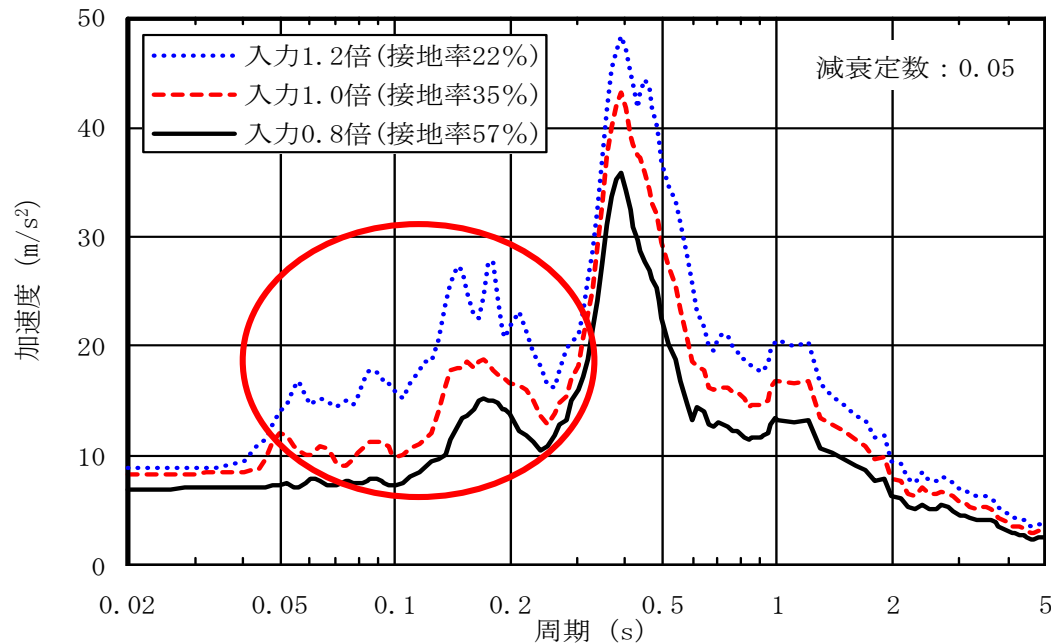
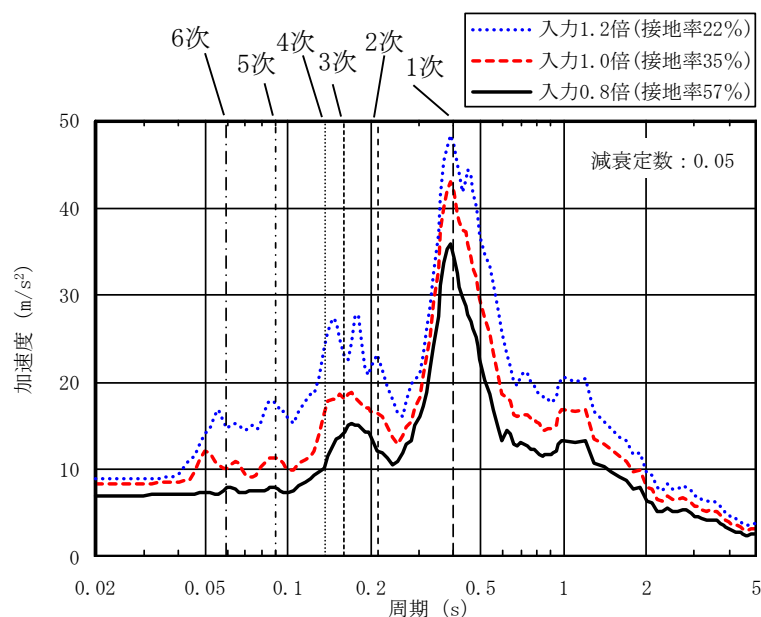


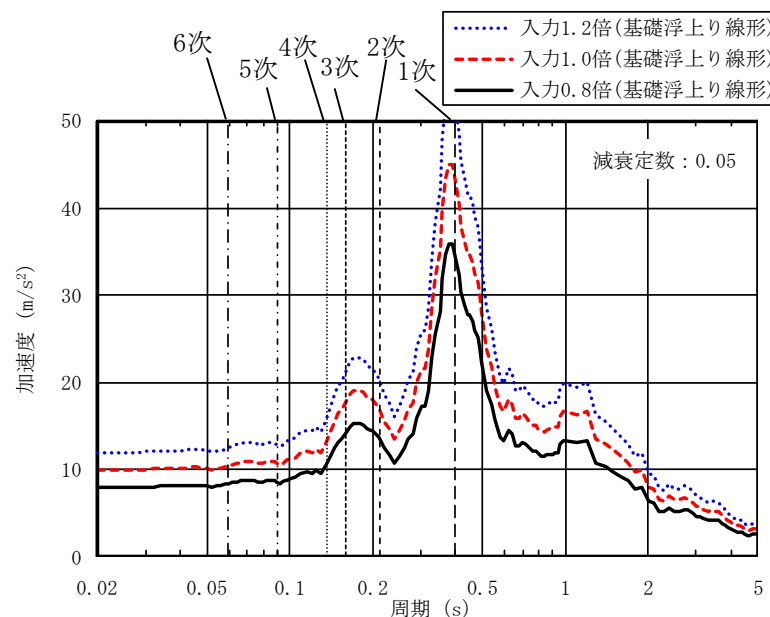
図1 地上2階（T.M.S.L.20.4m）の加速度応答スペクトル

(2) 増幅率と固有周期の関係

- ・基礎浮上りに伴う周期毎の応答増幅の傾向を把握するために、比較対象として**基礎浮上り線形モデル**で同様の地震応答解析を実施し、**基礎浮上り非線形モデル**の加速度応答スペクトルを比較した。
- ・その結果、**基礎浮上り非線形モデル**を採用したことにより短周期域で増幅割合が大きくなり、特に接地率が小さくなる1.2倍のケースでその傾向が顕著になることが分かった。
- ・また、増幅割合が大きい周期帯は、概ね3次～6次の固有周期に一致している。



(a) 基礎浮上り非線形モデル



(b) 基礎浮上り線形モデル

図2 地上2階 (T.M.S.L.20.4m) の加速度応答スペクトル

(3) 基礎浮上りに伴う剛体回転挙動

- ・下図に示すように基礎が浮き上がることにより，線形時には回転角 θ_0 が，非線形時には回転角 θ_1 がそれぞれ生じるため，この回転角に伴い上部では高さに応じた水平変位 x_0 及び x_1 が生じる。
- ・通常の固有値解析では線形時の回転によるモードは考慮されるが，非線形時の回転によるモードは考慮できないため，モード形をみても応答増幅として現れてこない。
- ・このような回転角 θ_1 に伴う剛体回転挙動が，周期0.2秒以下の増幅においてどの程度含まれているかを確認する。

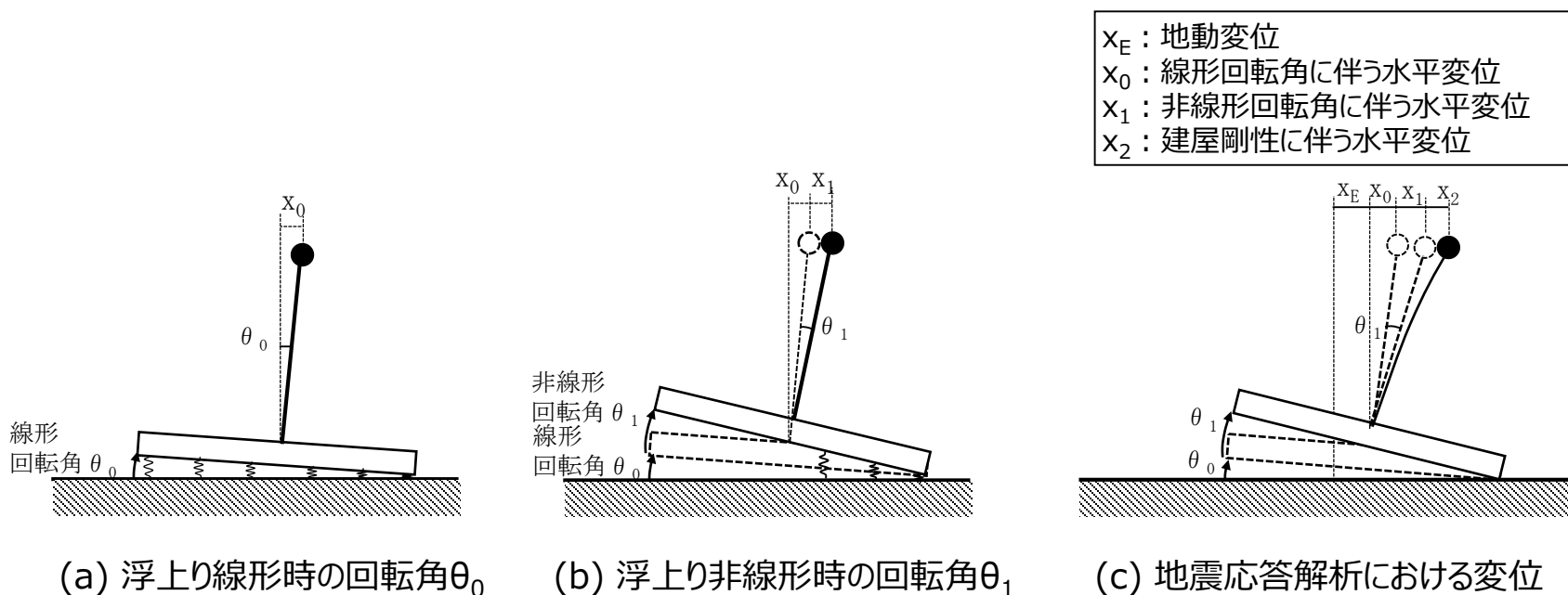


図3 基礎の回転に伴う応答変位の概念図

(4) バンドパスフィルター波形による検討 (1/3)

- ・周期0.2秒以下の増幅において回転角 $\theta(\theta_0 + \theta_1)$ に伴う剛体回転挙動の影響がどの程度含まれているかを確認するために、3次と4次の間のピークに着目して、基礎浮上り非線形モデルの基礎上と2階の応答加速度波形の周期0.160~0.145秒(6.25Hz~6.90Hz)のバンドパスフィルター波形（以下「バンドパス波形」という。）を算定した。

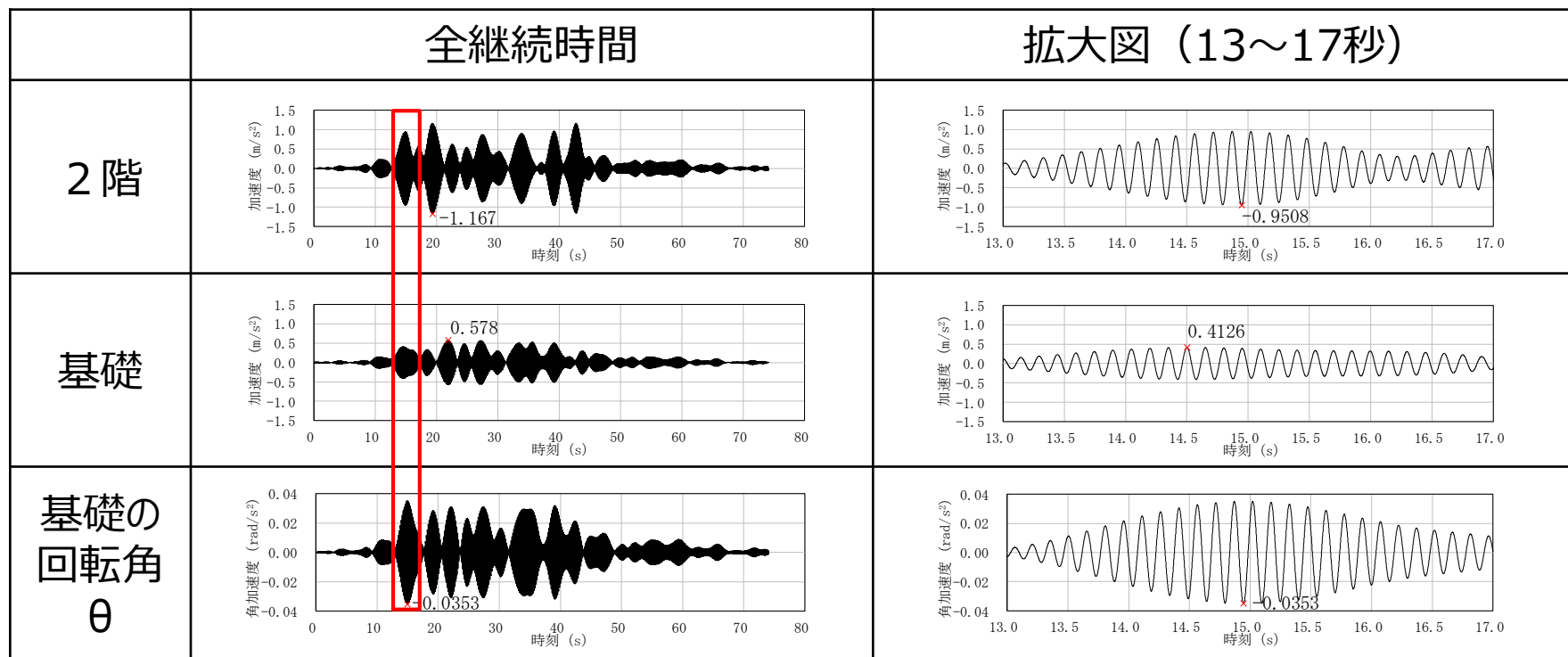


図4 1.2倍入力に対するバンドパス波形の比較 (6.25Hz~6.90Hz)

(4) バンドパスフィルター波形による検討 (2/3)

- ・入力を0.8倍,1.0倍,1.2倍とした3ケースのバンドパス波形について, (a) 2階と基礎上, (b) 2階と剛体回転拳動に伴う応答 (基礎の回転角×基礎上から2階までの高さ $H(=26.5\text{m})$) であり, 「 $\theta \cdot H$ 」と称す。) の波形を重ねて比較した。
- ・(a) 2階と基礎上の比較により, 位相は異なるため, この帯域は建屋のモードに起因したものではないと考えられる。
- ・(b) 2階と $H \cdot \theta$ の比較により, 位相は一致しており, 2階の応答は基礎の回転角に関係していると考えられる。

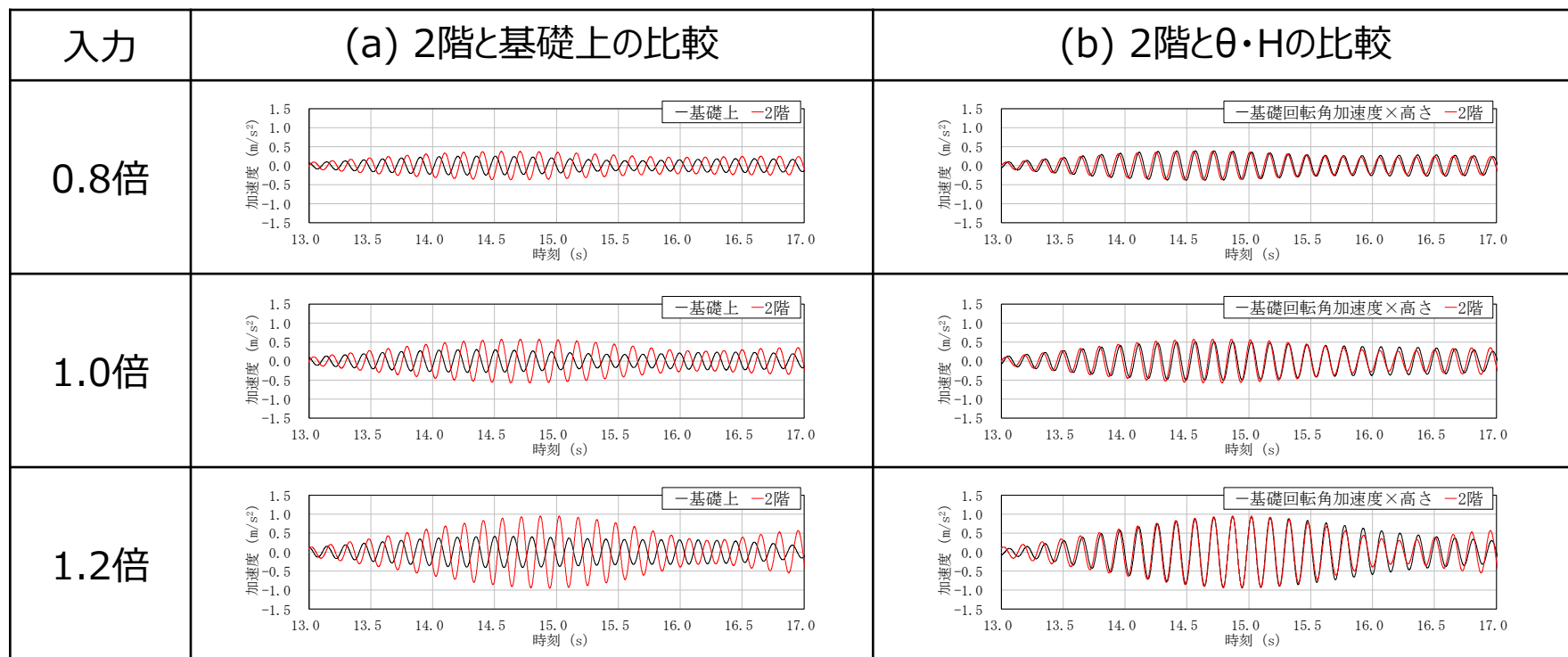


図5 バンドパス波形の重ね書き

(4) バンドパスフィルター波形による検討 (3/3)

- ・図3に示したように、計算される X は、 $X = x_E + x_0 + x_1 + x_2$ であることから、剛体回転拳動による $x_0 + x_1 = H \cdot \theta$ を差し引いた応答波形を求めた。
- ・入力倍率により大きく異なっていた応答倍率（2階／基礎上）が、剛体回転拳動による $H \cdot \theta$ を差し引くことにより、どの入力ケースの応答倍率も同程度になる結果となった。
- ・このため、基礎浮上り非線形時の応答増幅の原因としては、基礎の浮上り非線形により生じた基礎の回転角に伴う幾何学的な建屋上部の変形が追加されたことによるものと考えられる。

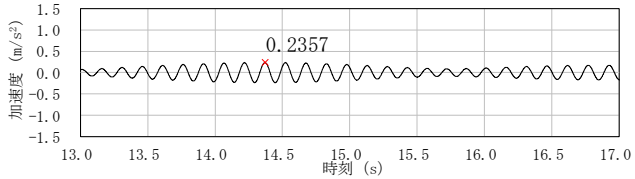
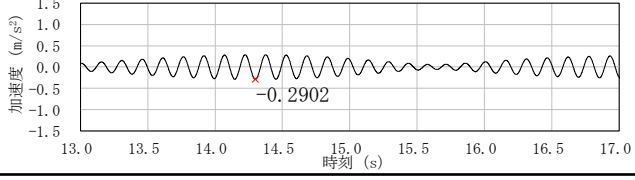
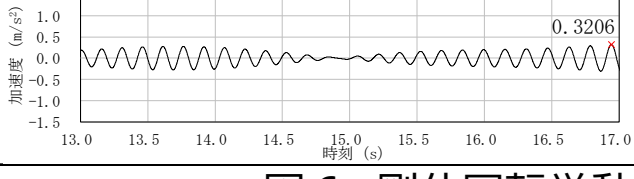
入力	補正後			補正前			
	補正波（2階の加速度応答 - $H \cdot \theta$ ）	最大振幅		応答倍率 ①／②	最大振幅		応答倍率 ①／②
		① 2階	② 基礎上		① 2階	② 基礎上	
0.8倍		0.236	0.251	0.94	0.373	0.251	1.49
1.0倍		0.290	0.301	0.96	0.574	0.301	1.91
1.2倍		0.321	0.423	0.78	0.951	0.423	2.30

図6 剛体回転拳動による $H \cdot \theta$ を差し引いた補正波形の比較

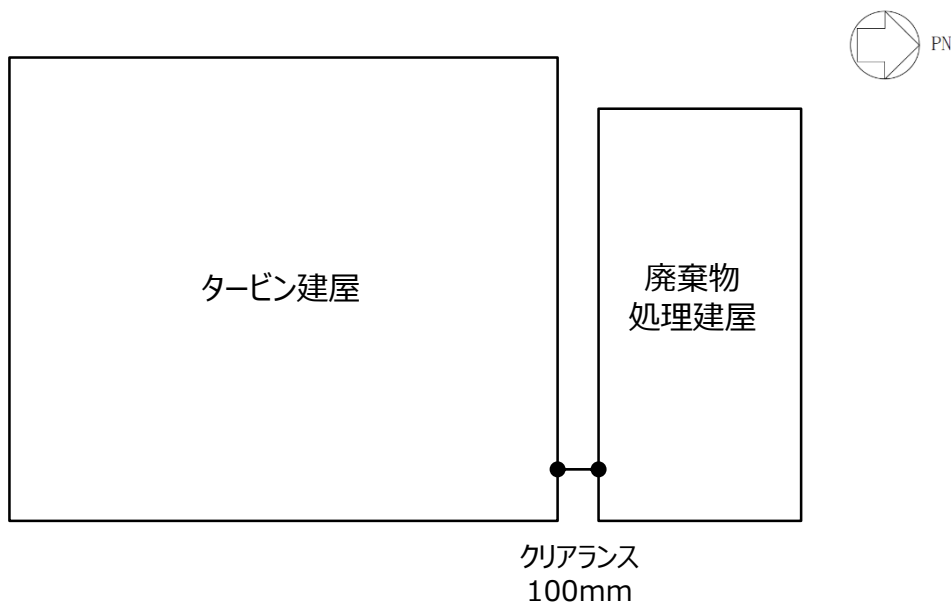
(5) まとめ

- ①廃棄物処理建屋の地盤3次元FEM解析結果として、入力地震動を増大させて建屋の応答変化を加速度応答スペクトルで比較した結果、入力1.2倍のケースでは0.05～0.2秒程度の短周期域で地上2階の増幅割合が大きくなる原因について考察した。
- ②基礎浮上り線形モデルの地震応答解析を行って、加速度応答スペクトルを比較した結果、基礎浮上り非線形を考慮したことにより短周期域で増幅割合が大きくなり、特に接地率が小さくなる1.2倍のケースでその傾向が顕著になることが確認できた。
- ③応答増幅が顕著な周期帯域を対象としてバンドパス波形による検討を行った結果、基礎浮上り非線形時の応答増幅の原因としては、基礎の浮上り非線形により生じた基礎の回転角に伴う幾何学的な建屋上部の変形が追加されたことによるものと考えられた。

以上より、短周期域での応答増幅は、基礎浮上り非線形による基礎の回転に伴う応答増幅が原因であるものと考えらえる。

(1) はじめに

隣接建屋への影響について、廃棄物処理建屋とタービン建屋のクリアランス（建屋間隔）が100mmであるため、タービン建屋と廃棄物処理建屋の地震応答解析に基づく建屋間の相対変位から衝突の有無を確認し、衝突する場合は影響確認を行う。



建屋配置図（概略図）

(2) 最大相対変位の評価結果

○絶対値和による最大相対変位

廃棄物処理建屋とタービン建屋の地震応答解析結果（ケース1）の応答変位から算出した絶対値和による最大相対変位を以下に示す。

- ・Ss-1,2,3,8は、上層部の最大相対変位がクリアランス（100mm）を超える。
- ・Ss-4～7は、最大相対変位がクリアランス（100mm）以下になる。

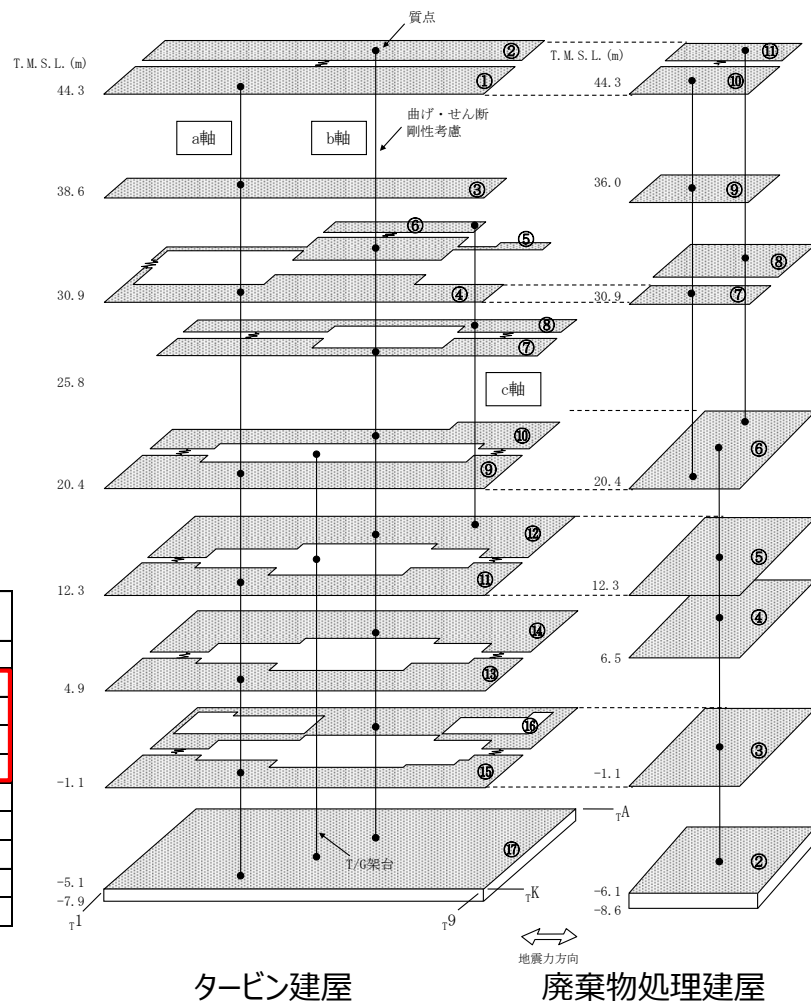
タービン建屋と廃棄物処理建屋間の絶対値和による最大相対変位（ケース1）

T. M. S. L. (m)	質点番号		最大相対変位（絶対値和）(mm)							
	タービン建屋	廃棄物処理建屋	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5	Ss-6	Ss-7	Ss-8
44.3	1	10	213.5	158.4	160.8	68.2	73.4	73.0	63.1	164.1
	2	11	121.9	96.1	112.3	48.9	53.8	52.0	46.5	127.2
38.6	3	—*1	166.7	119.2	126.7	50.3	56.9	54.2	48.3	137.4
36.7	—*1	9	144.7	104.6	114.1	43.2	50.5	46.7	42.6	126.7
30.9	4	7	75.3	60.8	75.1	22.6	32.1	25.0	26.8	91.7
	5,6*2	—*1	79.6	59.0	74.4	28.8	40.4	31.9	36.5	83.8
30.4	—*1	8	77.2	56.6	72.1	27.9	39.4	31.0	35.4	82.2
25.8	7,8*2	—*1	61.3	42.9	56.9	23.1	32.4	25.7	28.4	72.6
20.4	9,10*2	6	49.6	34.2	46.6	16.4	23.2	18.0	19.7	61.8

注記*1：建屋質点間の変位は上下質点の変位を線形補間する

*2：最大相対変位が大きい質点番号の値を採用する

 ：クリアランス(100mm)を超える。



タービン建屋 廃棄物処理建屋
NS方向の地震応答解析モデルの高さ関係

(2) 最大相対変位の評価結果

○時刻歴和による最大相対変位

時刻歴和による最大相対変位を示す。なお、時刻歴和による最大相対変位は、タービン建屋の応答変位から廃棄物処理建屋の応答変位を減じて算出した。

- ・Ss-1,2,3,8の一部ケースにおいて、最大相対変位がクリアランス（100mm）を超える。
- ・T.M.S.L.44.3m位置での最大相対変位は、Ss-8ケース3の137.0mmであり、この時の相対変位の時刻歴和を以下に示す。

(a) ケース1

T. M. S. L. (m)	質点番号		最大相対変位 (時刻歴和) (mm)			
	タービン 建屋	廃棄物 処理建屋	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-8
	2	11	46.3	51.3	60.2	64.7
38.6	3	—*1	86.7	80.5	80.1	68.1

(b) ケース2

T. M. S. L. (m)	質点番号		最大相対変位 (時刻歴和) (mm)			
	タービン 建屋	廃棄物 処理建屋	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-8
	2	11	39.2	47.3	48.1	42.7
38.6	3	—*1	68.8	64.8	60.0	44.0

(c) ケース3

T. M. S. L. (m)	質点番号		最大相対変位 (時刻歴和) (mm)			
	タービン 建屋	廃棄物 処理建屋	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-8
	2	11	73.2	64.7	78.1	79.3
38.6	3	—*1	107.5	86.7	82.0	105.9

注記※1：建屋質点間の変位は上下質点の変位を線形補間する

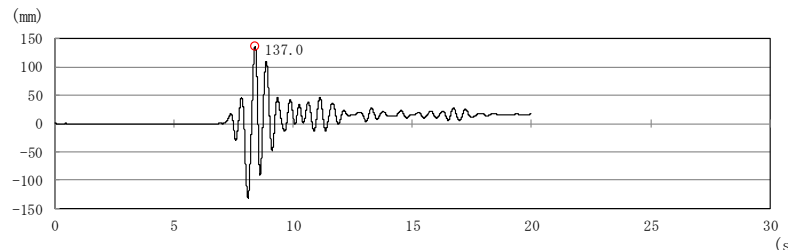
 ：クリアランス(100mm)を超える。

(d) ケース4

T. M. S. L. (m)	質点番号		最大相対変位 (時刻歴和) (mm)			
	タービン 建屋	廃棄物 処理建屋	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-8
	2	11	64.6	61.2	63.2	62.0
38.6	3	—*1	93.8	79.8	73.1	62.4

(e) ケース5

T. M. S. L. (m)	質点番号		最大相対変位 (時刻歴和) (mm)			
	タービン 建屋	廃棄物 処理建屋	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-8
	2	11	43.9	47.0	62.0	64.3
38.6	3	—*1	88.7	79.6	83.2	68.7



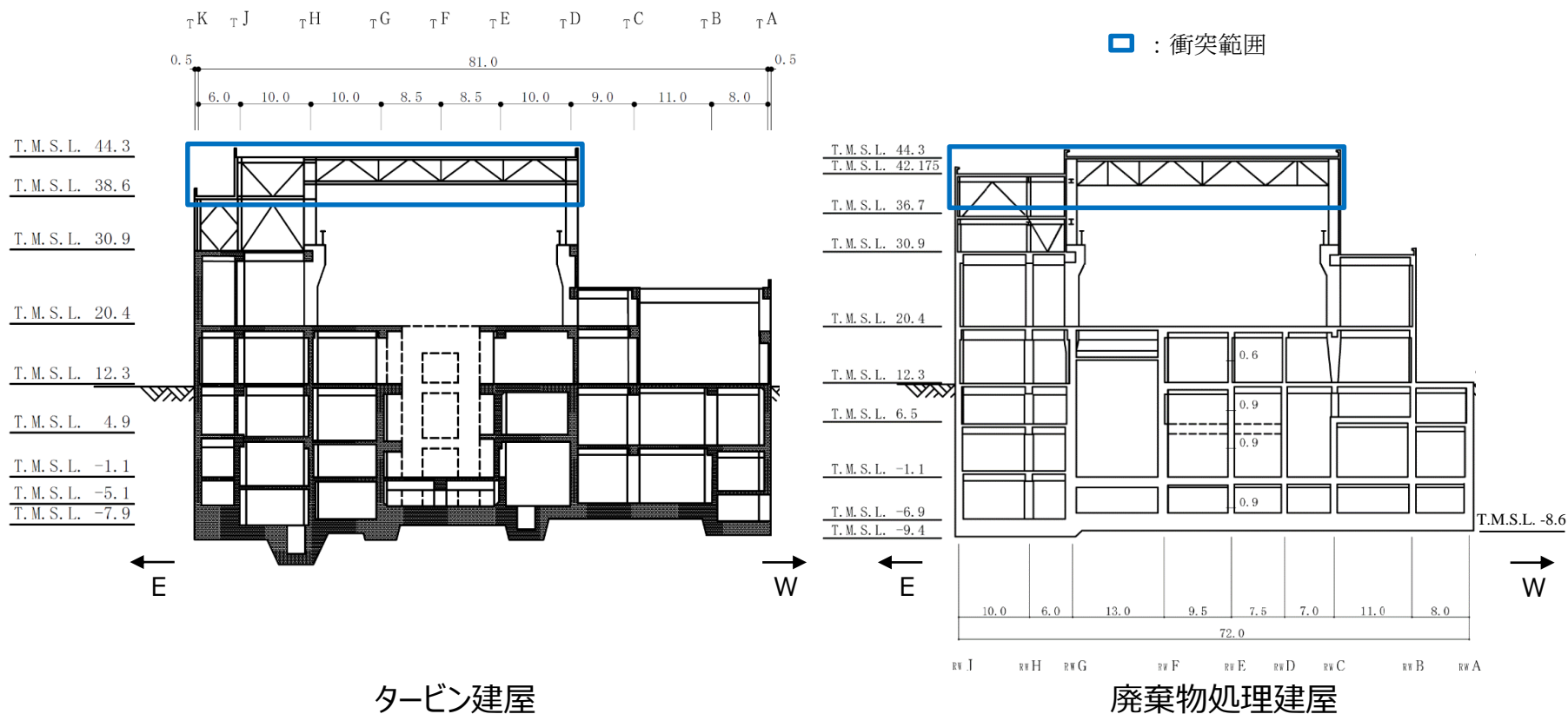
タービン建屋（質点①）と廃棄物処理建屋（質点⑩）間の相対変位の時刻歴和（Ss-8ケース3）

(3) 衝突時の影響確認

建屋上層部において相対変位が100mmを超えることから、衝突範囲を確認する。

○衝突範囲の確認

T.M.S.L.44.3mにおいて最大相対変位となるSs-8ケース3のときのタービン建屋と廃棄物処理建屋の衝突範囲を示す。タービン建屋の質点①と廃棄物処理建屋の質点⑩の相対変位が100mmを超えることから、衝突範囲は屋根トラスの東側部分となるが、保守的にトラス全体が衝突することを想定する。



建屋断面図 (EW方向)

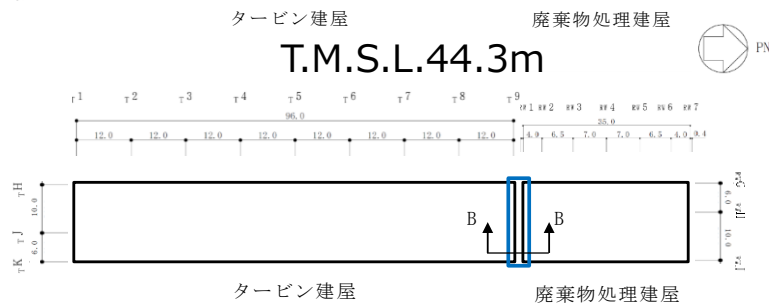
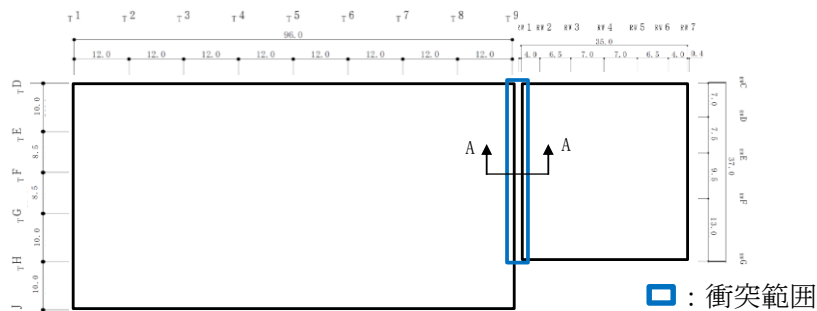
(3) 衝突時の影響確認

○衝突範囲の確認

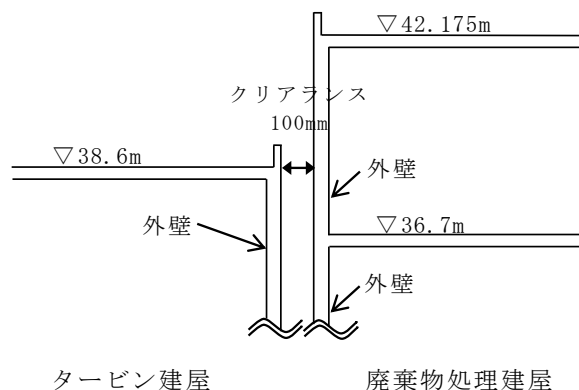
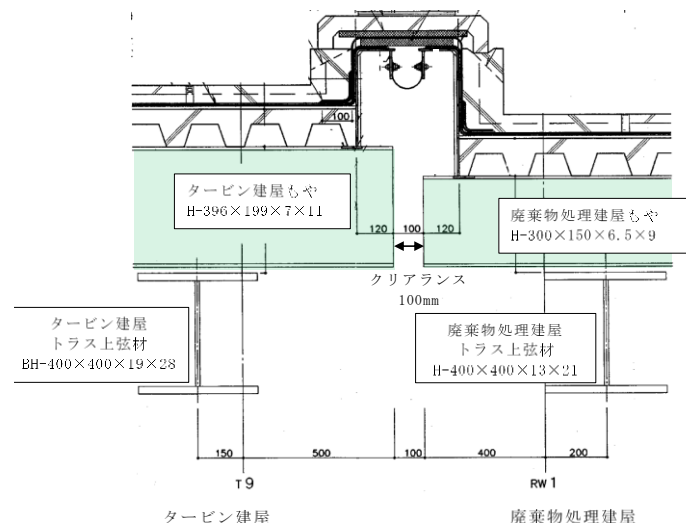
- ・T.M.S.L.44.3mでは、もや同士が衝突する。
- ・T.M.S.L.38.6mでは、外壁同士が衝突する。

○局部評価の評価方針

- ・T.M.S.L.44.3mについては、衝撃力がもやの許容限界を超えないことを確認する。
- ・建屋上層部の変位が大きいことから、もやより下部については、もやの衝突を考慮した上で、衝突の有無を判断する。



建屋平面図 (概略図)



(3) 衝突時の影響確認

○T.M.S.L.44.3mの局部評価の評価方法

- ・ 局部評価に用いる衝撃力は以下の評価式から求め、衝撃力がもやの許容限界（弾性限強度に基づく圧縮力）を超えないことを確認する。

(衝撃力の評価式)

$$F = \frac{2 \cdot m_T \cdot m_R}{m_T + m_R} \cdot \frac{v_T - v_R}{t} = \frac{2 \cdot m_T \cdot m_R}{m_T + m_R} \cdot (a_T - a_R)$$

F : 物体が受ける外力（衝撃力）

m_T : タービン建屋衝突時の評価に用いる質量

m_R : 廃棄物処理建屋衝突時の評価に用いる質量

v_T : タービン建屋の質点1の衝突前速度

v_R : 廃棄物処理建屋の質点10の衝突前速度

t : 単位時間

a_T : タービン建屋の質点1の衝突時の加速度

a_R : 廃棄物処理建屋の質点10の衝突時の加速度

○T.M.S.L.44.3mの局部評価の諸条件

- ・ 相対変位が100mmを超える時の相対加速度が最大となる時刻の加速度を用いて衝撃力を算定する。
- ・ 評価に用いる質量は、衝突部位に近い通り芯の柱、梁の支配面積分を基本と考えるが、ここでは保守的に1スパン分を用いる。

評価に用いる相対加速度

ケース	最大相対加速度 (m/s ²)
Ss-8ケース3	16.6

評価に用いる質量

建屋	質量 (t)
タービン建屋 m_T	724.6
廃棄物処理建屋 m_R	413.8

(3) 衝突時の影響確認

○T.M.S.L.44.3mの局部評価の評価結果

- 衝突時の衝撃力は、もやの許容限界を超えないことを確認した。

①衝撃力 (kN)	②許容限界 (kN)	検定値 ①/②
8735	21720	0.403

○衝突時のもやの変形量

- 衝撃力から下式を用いて衝突時のもやの変形量を算出した結果、もやの変形量は、両建屋の合計で0.7mm程度変形する結果となった。

衝撃力 (kN)	①廃棄物処理建屋の もやの変形量 (mm)	②タービン建屋の もやの変形量 (mm)	①+② もやの変形量の合計 (mm)
8735	0.304	0.329	0.633 ⇒ 0.7

(変形量の評価式)

$$\Delta L = \frac{F \cdot L}{E \cdot A}$$

ΔL : もやの変形量 (mm)

F : 衝撃力

L : もやの部材長さ (T/B : 650mm, Rw/B : 600mm)

E : 鉄骨のヤング係数 (205000N/mm²)

A : 廃棄物処理建屋のもやの軸断面積の合計 (0.084201m²)

(3) 衝突時の影響確認

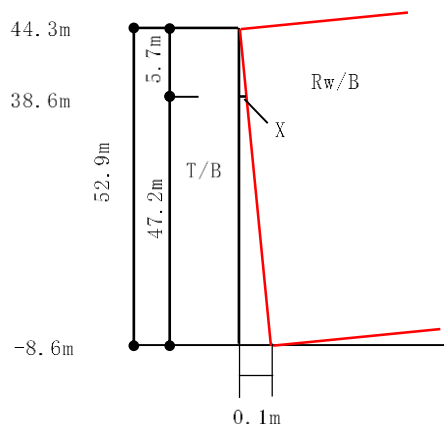
○衝突時のT.M.S.L.38.6mの建屋間隔

- T.M.S.L.44.3mのもやが衝突した時のT.M.S.L.38.6mにおける廃棄物処理建屋とタービン建屋の建屋間隔を求め、T.M.S.L.38.6mにおける衝突の有無を確認する。
- 衝突時のもやの変形を考慮したT.M.S.L.38.6mにおける建屋間隔は、10.1mmとなり、T.M.S.L.38.6mにおいては衝突しないことを確認した。

廃棄物処理建屋とタービン建屋の衝突時の建屋間隔

T.M.S.L. (m)	①もやの変形を考慮しない 建屋間隔(mm)	②もやの変形量 (mm)	①－② もやの変形を考慮した 建屋間隔(mm)
38.6	10.8	0.7	10.1

T. M. S. L.



相似則より

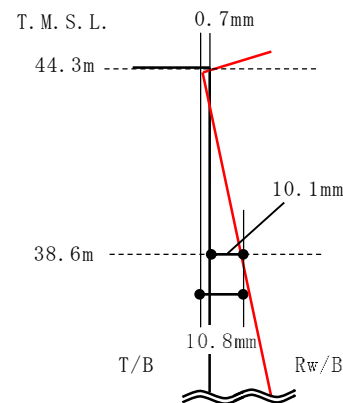
$$52.9:0.1 = 5.7: X$$

$$X = (5.7 \times 0.1) / 52.9 = 0.0108 \text{ (m)}$$

建屋間隔は 10.8mm

もやの変形を考慮しない場合の建屋間隔(①)

T. M. S. L.



もやの変形を考慮した場合の建屋間隔(①－②)

- もやの変形量を考慮した建屋間隔は、廃棄物処理建屋が基礎下T.M.S.L.-8.6mからタービン建屋側に転倒（回転）したと仮定し、T.M.S.L.44.3mの相対変位が0mmとなる時のT.M.S.L.38.6mの相対変位を相似則により算出し(①)、この相対変位からもやの変形量(②)を減じて算出する。

(4) まとめ

- ① 廃棄物処理建屋とタービン建屋間の相対変位について評価した結果、クリアランス（建屋間隔）100mmを、T.M.S.L.44.3mにおいては最大で37.0mm、T.M.S.L.38.6mにおいては最大で7.5mm超え、衝突することを確認した。
- ② 衝突時の影響評価として、衝突時の衝撃力が部材(もや)に与える影響を評価した結果、T.M.S.L.44.3mにおいては、衝撃力がもやの許容限界を超えないことを確認した。また、T.M.S.L.38.6mにおいては、T.M.S.L.44.3mのもや衝突時における建屋間隔を評価し、衝突しないことを確認した。

【参考】

第769回審査会合にて説明した主な説明事項

主な説明事項		
[1] 詳細設計段階における設置変更 許可審査時からの設計変更	1	中央制御室待避室の遮蔽設計の見直し
	2	5号機原子炉建屋内緊急時対策所の遮蔽設計の見直し
	3	5号機原子炉建屋内緊急時対策所可搬型電源設備の保管方法の変更
	4	復水移送ポンプ周りの手動弁の電動弁化及び屋内アクセスルートの見直し
[2] 設計方針に関する説明事項	1	使用済燃料貯蔵プール水位の監視
	2	重大事故等時の格納容器評価における評価条件
	3	火災感知器の配置
	4	地下水に対する浸水防護対策
	5	竜巻設計飛来物の感度解析
	6	ブローアウトパネル及びブローアウトパネル閉止装置
[3] 耐震・強度評価に関する説明事項	1	津波漂流物の衝撃荷重（海水貯留堰）
	2	地盤物性の設定
	3	基礎地盤傾斜による建物・構築物及び機器の耐震性への影響
	4	建物・構築物における地震応答解析モデルの既工認からの変更点
	5	原子炉本体基礎の復元力特性
	6	建物・構築物の応力解析における弾塑性解析の採用
	7	格納容器圧力逃がし装置基礎の地震応答解析モデルのモデル化方針
	8	屋外重要土木建造物のモデル化方針
	9	耐震評価における等価繰返し回数
	10	加振試験に基づく使用済燃料貯蔵ラックの減衰定数の設定
	11	弁の動的機能維持評価（一定の余裕の確保）
	12	燃料集合体の耐震性
	13	制御棒・破損燃料貯蔵ラックにおける排除水体積質量減算の適用
	14	ECCSストレナの耐震・強度評価への流動解析の適用