

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-027-10-22
提出年月日	2022年3月24日

燃料取替機の耐震性についての計算書に関する  
補足説明資料

2022年3月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

## 1. はじめに

島根 2 号機の燃料取替機（B クラス施設）は、下部に設置された上位クラス施設である燃料プール、使用済燃料貯蔵ラック等に対して、波及的影響を及ぼさないことを確認する必要があるため、添付書類 VI-2-11-2-7-2 「燃料取替機の耐震性についての計算書」において耐震評価結果を示している。

本書は、添付書類 VI-2-11-2-7-2 「燃料取替機の耐震性についての計算書」に関する補足説明資料として、燃料取替機に積載している大型構成部品の落下物評価や燃料プールのスロッシングに対する影響検討等についてまとめたものである。

## 2. 添付資料

添付 1 燃料取替機の大型構成品の落下評価に対する検討

添付 2 燃料取替機の地震時におけるストッパへの影響評価

添付 3 燃料取替機に対するスロッシングの影響評価

添付 4 燃料取替機の吊具荷重算出時における吊荷位置選定の考え方

燃料取替機の大型構成品の落下評価に対する検討

1. 目的

燃料プールへの重量物落下に対する燃料プールの健全性について、燃料取替機に積載される大型構成品の落下評価に対する検討を行う。

2. 検討内容

図 1-1 に、落下評価に対する健全性評価フローを示す。

概要は下記(1)～(5)の流れであり、これに従い検討を行うものである。

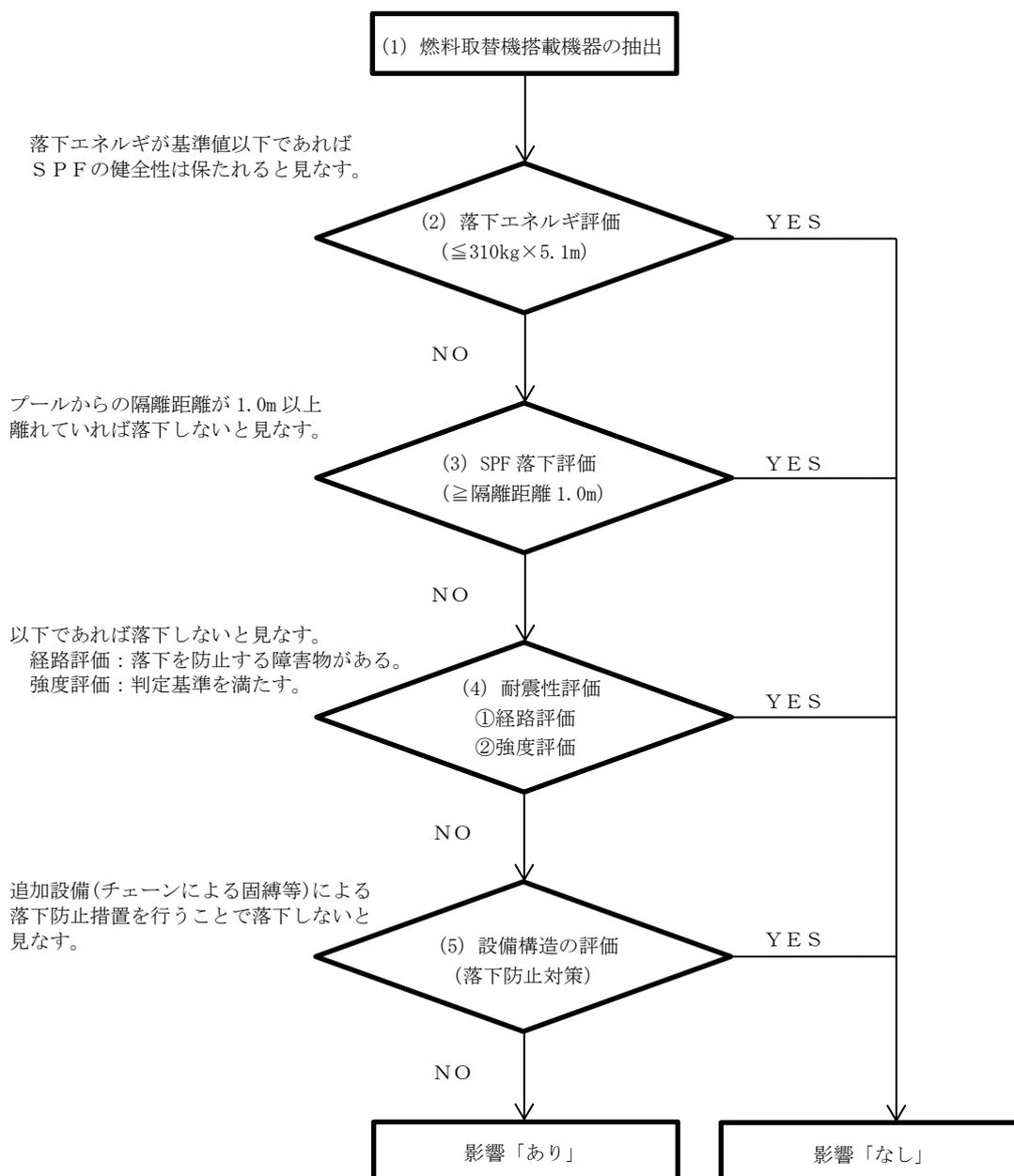


図 1-1 落下評価に対する健全性評価フロー

## 2.1 落下物のスクリーニング

### (1) 燃料取替機の搭載機器の抽出

燃料取替機の搭載機器については、構造図から抽出する。

なお、燃料取替機本体（構造物フレーム）及び吊荷（吊具）については、添付書類VI-2-11-2-7-2「燃料取替機の耐震性についての計算書」において耐震評価をしていることから、ここでは評価対象外とする。

### (2) 落下エネルギー評価

上記(1)で抽出した機器に関し、燃料プールの健全性が確認されている落下エネルギー(310kg×5.1m×9.8m/s<sup>2</sup>, 気中落下)を判定基準\*として各機器の落下エネルギーを算出し、判定基準\*を満たす機器については、仮に燃料プールへ落下したとしても燃料プールの健全性に影響を及ぼさないと判断し、その時点で評価対象外とする。判定基準に満たない機器については次ステップで評価する。

なお、落下エネルギーの算出については、燃料プールの最深位置である EL 30.83m への落下（気中落下）を想定し、判定基準は下記とする。

#### 【判定基準】

落下エネルギーが 15.5kJ(310kg×5.1m×9.8m/s<sup>2</sup>)以下 ⇒ 「影響なし」

注記\*：株式会社日立製作所、「沸騰水型原子力発電所燃料集合体落下時の燃料プールライニングの健全性について」(HLR-050),平成6年12月

### (3) 燃料プール落下評価（離隔距離）

落下エネルギー評価で次ステップとなった搭載機器について、落下評価（離隔距離）を行う。

落下評価に関し、各機器に対する離隔距離：1m以上を判定基準とし、基準に満たない機器については次ステップで評価する。具体的には、プールサイドから1m以上離れた場所にある機器は燃料プールへ落下しないものと判断し、機器の外径から1m以上離れた場所に燃料プールがあるかを確認する。

なお、当該評価は平面距離での評価とし、高さ方向の条件は含まないものとする。

#### 【判定基準】

搭載機器の燃料プールまでの離隔距離が1m以上 ⇒ 「影響なし」(落下しない)

## 2.2 耐震性評価

### (1) 経路評価

上記スクリーニング評価で次ステップとなった機器について、経路評価を行う。

燃料プール落下評価は平面距離での評価であるが、ここでは手摺等、機器落下を防止する障害物となるものを拾い出し、改めて落下評価を行うものである。

### (2) 強度評価

手摺により落下防止が見込まれる機器について、障害物となる手摺の取付ボルト評価を行う。その結果、判定基準を満足しなかった機器については既に強度評価対象となっている機器と同様、機器の取付ボルト又は部材の評価を行う。

なお、波及的影響の観点から機器の取付ボルト又は部材が破断しないことを確認することを目的にS u 値を許容応力に適用した評価を実施する。

## 2.3 設備構造評価

耐震性評価で落下の可能性を否定できない機器は、固縛等の追加設備による落下防止対策の検討を行う。

## 3. 検討結果

### 3.1 落下物のスクリーニング

表 1-1 及び図 1-1 に、燃料取替機における落下物のスクリーニング結果を示す。

なお、2.1(3)燃料プール落下評価（離隔距離）において、離隔距離が 1m 以上となる機器はなかったため、表 1-1 における離隔距離によるスクリーニング結果の記載は省略する。

搭載機器に関し、落下エネルギー評価及び燃料プール落下評価を行った結果、以下の機器が判定基準を満足せず、次ステップでの評価を実施する。

- ・ブリッジ : 走行駆動系, 走行電動機, ケーブルダクト, 機上盤類,  
ケーブルベア, 手摺等
- ・トロリ 1 階 : 横行駆動軸, 横行電動機, 盤类等
- ・トロリ 2 階 : 主ホイスト, 盤類, 補助ホイスト等
- ・トロリ 3 階 : 伸縮管, 補助ホイスト等

### 3.2 耐震性評価

#### (1) 経路評価

表 1-2 及び図 1-2 に、経路評価結果を示す。

落下物のスクリーニング評価で次ステップとなった搭載機器に関し、燃料プール落下に至る経路上に障害物となるものがあるかを評価した結果、以下の搭載機器が判定基準を満足せず、次ステップでの評価を実施する。

- ・ブリッジ : 機上電源盤, 手摺
- ・トロリ 1 階 : 機上操作盤
- ・トロリ 2 階 : 固定補助ホイスト
- ・トロリ 3 階 : 回転ジブクレーン

これら判定基準を満足しなかった搭載機器は, 機器の取付ボルト又は部材の強度評価を行う。また, 手摺により落下防止となった搭載機器については, 手摺の取付ボルト強度評価を行うこととする。

## (2) 強度評価

表 1-3 及び図 1-3 に, 強度評価の結果を示す。

手摺の取付ボルト評価については, 手摺が障害物となり燃料プールへ落下しないとした搭載機器の中から, 機器質量が大きいものを代表機器として評価した。その結果, 手摺の取付ボルトが破断することはなく, 燃料プール落下の障害物となり, 損傷を防止できる。

経路評価で次ステップとなった搭載機器についても, 強度評価の結果, 機器の取付ボルトが破断することはなく, 燃料プール落下には至らない見通しである。

## 3.3 設備構造評価

上述の強度評価結果を受けて, 健全性評価が必要な燃料取替機搭載機器は全て落下しない見通しであることから, 追加設備 (チェーンによる固縛等) による落下防止対策の検討は不要である。

## 4. まとめ

表 1-4 に, 重量物落下評価のまとめを示す。

燃料取替機の搭載機器について健全性評価フローに基づき, 燃料プール落下の可能性及び燃料プールの健全性に影響を及ぼす可能性が高い機器の強度評価結果から耐震成立性の確認が得られ, 燃料プールの健全性に影響を及ぼす燃料取替機の搭載機器の落下はないという結果が得られた。

表 1-1(1/3) 落下物のスクリーニング〈搭載機器, ブリッジ〉

搭載位置		機器名称		落下エネルギー評価		
				評価値 (kJ)	許容値 (kJ)	判定
ブリッジ	ガード	No. 1	走行駆動系	186.5	15.5	×
		No. 2	走行電動機	26.3		×
		No. 3	走行ケーブルダクト(ケーブル)	54.8		×
		No. 4	A-機上補助盤	36.1		×
		No. 5	A-機上電源盤	40.8		×
		No. 6	B-機上電源盤	36.1		×
	プラットフォーム	No. 7		1.7		○
		No. 8	手摺	1.7		○
		No. 9		1.7		○
		No. 10		6.2		○
		No. 11	横行ケーブルベア(ケーブル)	56.5		×
		No. 12		2.3		○
		No. 13	走行検出装置	13.1		○
		No. 14		1.9		○
		No. 15		11.2		○
	ギャラリー	No. 16		20.8		×
		No. 17		15.9		×
		No. 18		19.2		×
		No. 19	手摺	1.4		○
		No. 20		1.9		○
		No. 21		5.3		○
		No. 22		1.9		○
		No. 23		3.5		○
		No. 24		20.7		×
		No. 25	梯子	3.5		○
	No. 26	3.1		○		
	その他	No. 27	走行ケーブルベア(ケーブル)	274.7		×
		No. 28	走行ケーブルベアレール	468.6		×

○ : 評価完了 (評価値 ≤ 許容値)  
 × : 次ステップ (評価値 > 許容値)

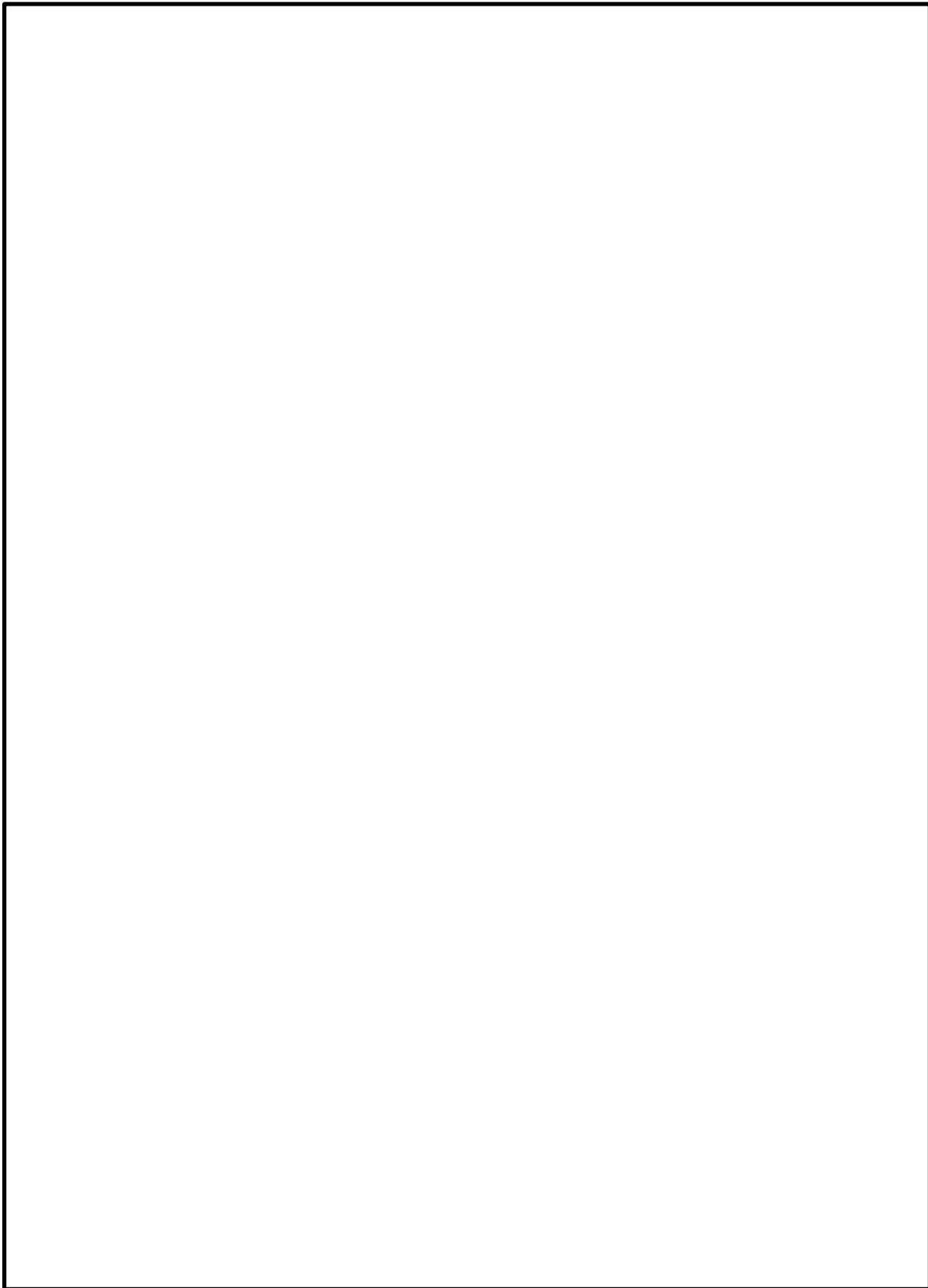


図 1-1(1/3) 搭載機器位置 <ブリッジ>

添付 1-6

表 1-1(2/3) 落下物のスクリーニング〈搭載機器, トロリ 1 階〉

搭載位置		機器名称		落下エネルギー評価		
				評価値 (kJ)	許容値 (kJ)	判定
トロリ	1 階	No.				
		29	手摺	6.4	15.5	○
		30		1.0		○
		31		4.5		○
		32		1.6		○
		33		1.6		○
		34		6.4		○
		35		4.0		○
		36		3.4		○
		37	横行駆動軸	106.0		×
		38	横行従動軸	13.1		○
		39	横行電動機	15.6		×
		40	振れ止め装置	14.1		○
		41	B-機上補助盤	35.5		×
		42	機上操作盤	35.5		×
		43	横行検出装置	2.4		○
		44		12.7		○
45	2.4	○				
46	12.7	○				
47	4.4	○				

○ : 評価完了 (評価値 ≤ 許容値)  
 × : 次ステップ (評価値 > 許容値)

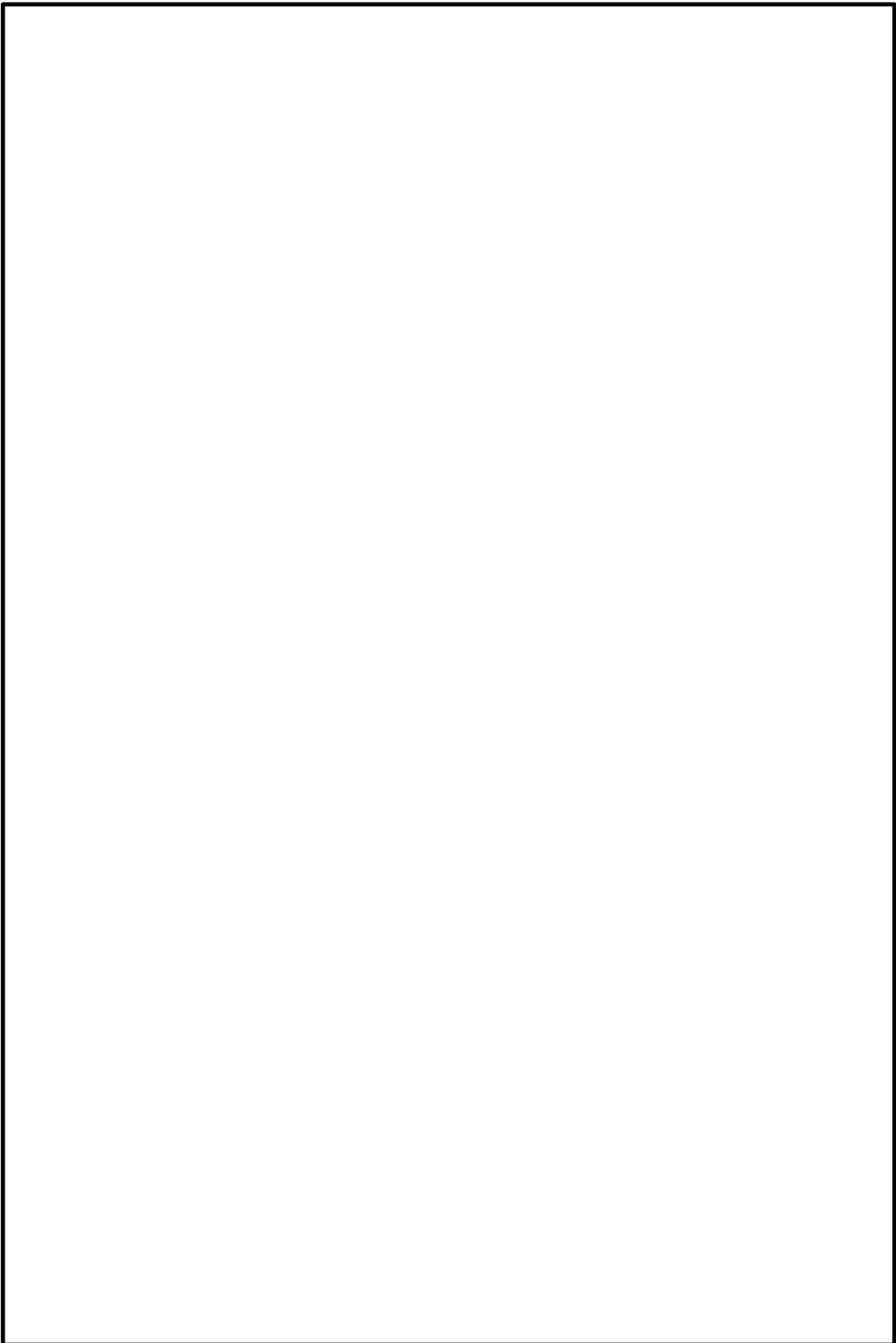


図 1-1(2/3) 搭載機器位置 <トロリ 1階>

添付 1-8

表 1-1(3/3) 落下物のスクリーニング〈搭載機器, トロリ 2階, 3階〉

搭載位置		機器名称		落下エネルギー評価		
				評価値 (kJ)	許容値 (kJ)	判定
トロリ	2階	No.				
		48		2.4	15.5	○
		49		10.1		○
		50		1.5		○
		51	手摺	2.4		○
		52		9.6		○
		53		1.0		○
		54		5.9		○
		55	主ホイスト	146.6		×
		56	空気圧縮機	15.0		○
		57	荷重検出制御盤	35.7		×
	58	昇降検出装置	6.9	○		
	59		10.7	○		
	60	固定補助ホイスト(補助ホイスト)	100.3	×		
	61	ホースリール	22.0	×		
	3階	62		11.2	○	
		63		9.1	○	
		64	手摺	4.0	○	
		65		7.6	○	
		66		9.7	○	
		67	梯子	3.9	○	
		68	伸縮管	123.1	×	
		69	グラブプル	2.9	○	
70		回転ジブクレーン(補助ホイスト)	345.0	×		
71		ガイド機構	212.5	×		
72		ホースリール	28.1	×		
73		〃	22.8	×		

○ : 評価完了 (評価値 ≤ 許容値)  
 × : 次ステップ (評価値 > 許容値)

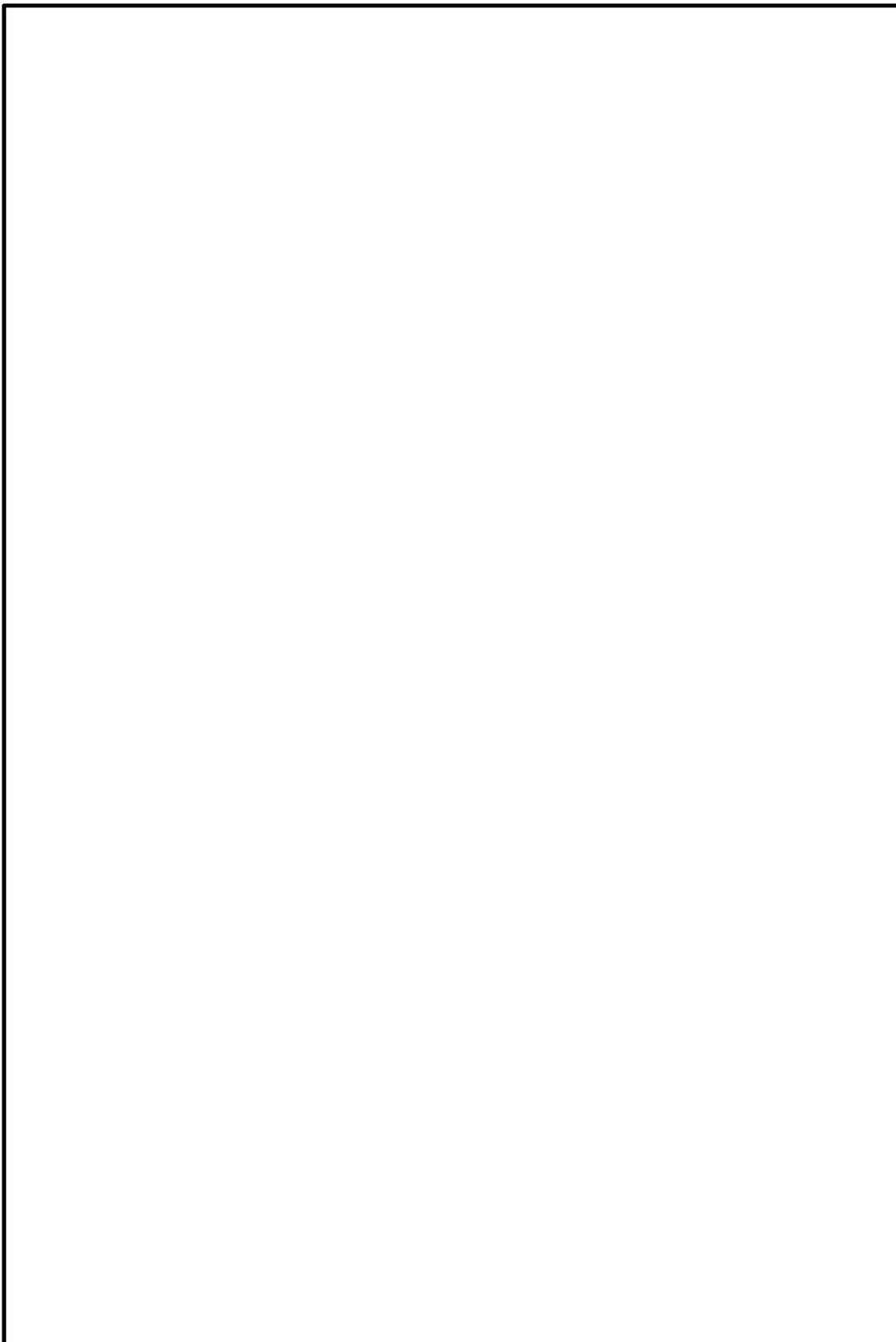


図 1-1(3/3) 搭載機器位置 <トロリ 2階, 3階>

添付 1-10

表 1-2 耐震性評価〈経路評価〉

搭載位置	機器名称		質量 (kg)	障害物		判定	備考
	No.			有	無		
ガーダ	1	走行駆動系		◇		○	本体フレームより落下し難いと考えられる。
	2	走行電動機		◇		○	本体フレームより落下し難いと考えられる。
	3	走行ケーブルダクト(ケーブル)		◇		○	本体フレームより落下し難いと考えられる。
	4	A-機上補助盤		◇		○	本体フレームより落下し難いと考えられる。
	5	A-機上電源盤		◇	◇	×	
	6	B-機上電源盤		◇		○	本体フレームより落下し難いと考えられる。
プラットフォーム	11	横行ケーブルベア(ケーブル)	◇		○	本体フレームより落下し難いと考えられる。	
ギヤラリ	16			◇		×	
	17	手摺		◇		×	
	18			◇		×	
	24			◇		×	
その他	27	走行ケーブルベア(ケーブル)		◇		○	本体フレームより落下し難いと考えられる。
	28	走行ケーブルベアレール		◇		○	本体フレームより落下し難いと考えられる。
1階	37	横行駆動軸		◇		○	トロリフレームにより落下し難いと考えられる。
	39	横行電動機		◇		○	トロリフレームにより落下し難いと考えられる。
	41	B-機上補助盤		◇		○	本体フレームより落下し難いと考えられる。
	42	機上操作盤		◇		×	
2階	55	主ホイス		◇		○	トロリフレームにより落下し難いと考えられる。
	57	荷重検出制御盤		◇		○	手摺により落下し難いと考えられる。
	60	固定補助ホイス(補助ホイス)		◇		×	
	61	ホースリール		◇		○	手摺により落下し難いと考えられる。
3階	68	伸縮管		◇		○	落下防止機構により落下し難いと考えられる。
	70	回転ブレン(補助ホイス)		◇		×	
	71	ガイド機構		◇		○	トロリフレームにより落下し難いと考えられる。
3階	72	ホースリール		◇		○	手摺により落下し難いと考えられる。
	73	〃		◇		○	手摺により落下し難いと考えられる。

○：評価完了(落下しない)  
 ×：次ステップ



図 1-2 搭載機器位置 <ブリッジ, トロリ各階>

表 1-3(1/3) 耐震性評価 <強度評価結果 (手摺: ストップ及び取付ボルト)>

搭載位置		機器名称	質量 (kg)	手摺の強度評価				備考	
				部位	種類	算出応力 (MPa)	評価応力*1 (MPa)		判定
ブリッジ	ギャラリー	手摺		-	-	-		○	
				-	-	-		○	
				-	-	-		○	
				-	-	-		○	
トロリ	2階	荷重検出制御盤		ストップ	引張り	21		○	代表評価*2
					せん断	1		○	
					組合せ	21		○	
				取付ボルト	引張り	36		○	
	3階	61	ホースリール	-	-	-	○		
3階	72	ホースリール	-	-	-	○			
	73	ホースリール	-	-	-	○			

注記\*1: S u 値を適用した許容応力

(IV A S 評価で許容応力の算出に用いる F 値 (設計・建設規格<sup>8</sup> SSB-3121.1(1)により

規定される値) を S u 値に置き換えて各応力分類の許容応力を算出した値)

\*2: 対象機器のうち、手摺の評価として最も厳しいと考えられる(機器質量が最も重いものを代表として評価を実施

○: 評価完了 (算出応力 ≤ 許容応力)

×: 次ステップ (算出応力 > 許容応力)

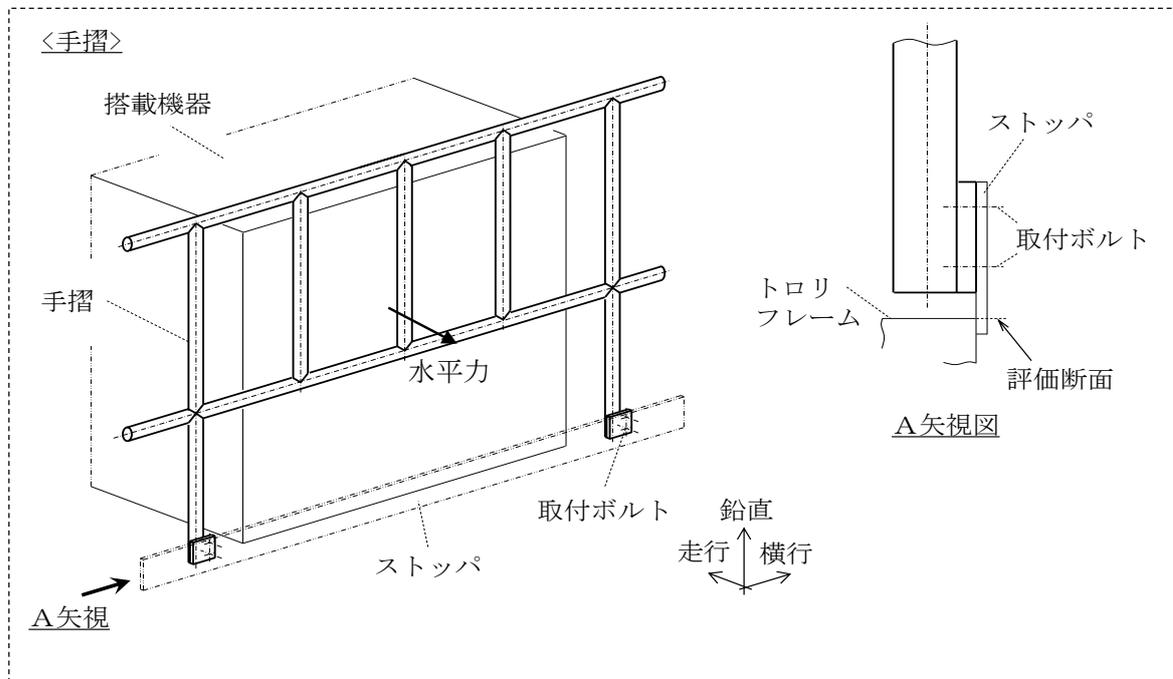


図 1-3(1/3) 強度評価対象 <手摺>

表 1-3(2/3) 耐震性評価 <強度評価結果 (搭載機器：盤類)>

搭載位置		No.	機器名称	質量 (kg)	取付部(ボルト)の強度評価			
					種類	算出応力 (MPa)	評価応力*1 (MPa)	判定
ブリッジ	ガード	5	A-機上電源盤	[ ]	引張り	51	[ ]	○
					せん断	6		○
トロリ	1階	42	機上操作盤		引張り	53		○
					せん断	2		○

注記\*1：S u 値を適用した許容応力

(IV<sub>A</sub>S 評価で許容応力の算出に用いる F 値 (設計・建設規格<sup>※</sup>SSB-3121.1(1)により規定される値) を S u 値に置き換えて各応力分類の許容応力を算出した値)

\*2：引張力とせん断力を同時に受けるボルトの許容引張応力  $f_{ts} = \text{Min} [1.4 \cdot f_{t0} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{t0}]$  より算出

○：評価完了 (算出応力 ≤ 許容応力)  
 ×：次ステップ (算出応力 > 許容応力)

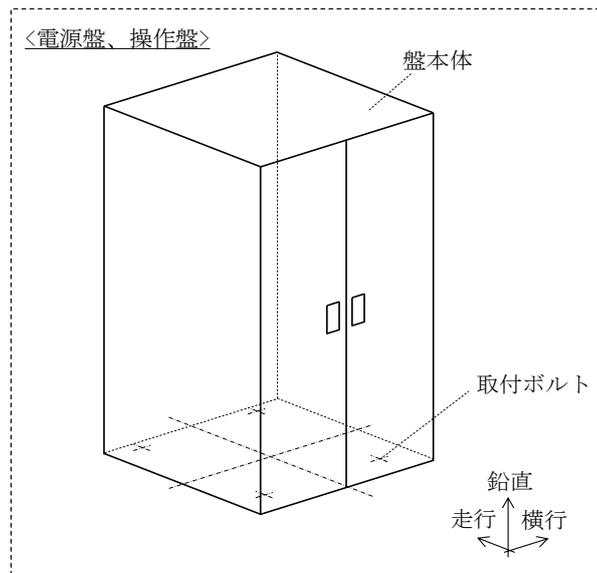


図 1-3(2/3) 強度評価対象 <盤類>

表 1-3(3/3) 耐震性評価 <強度評価結果 (搭載機器: 補助ホイスト)>

搭載位置	No.	機器名称	質量 (kg)	種類	算出応力 (MPa)	評価応力*1 (MPa)	判定	
ト ロ リ	2階	60		固定補助ホイスト (補助ホイスト)	引張り	289		○
				せん断	3	○		
	3階	70		回転ジブクレーン (補助ホイスト)	引張り	231		○
				せん断	2	○		

注記\*1: S u 値を適用した許容応力

(IVAS 評価で許容応力の算出に用いる F 値 (設計・建設規格 SSB-3121.1(1)により規定される値) を S u 値に置き換えて各応力分類の許容応力を算出した値)

\*2: 引張力とせん断力を同時に受けるボルトの許容引張応力  $f_{ts} = \text{Min} [1.4 \cdot f_{t0} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{t0}]$  より算出

○: 評価完了 (算出応力 ≤ 許容応力)  
×: 次ステップ (算出応力 > 許容応力)

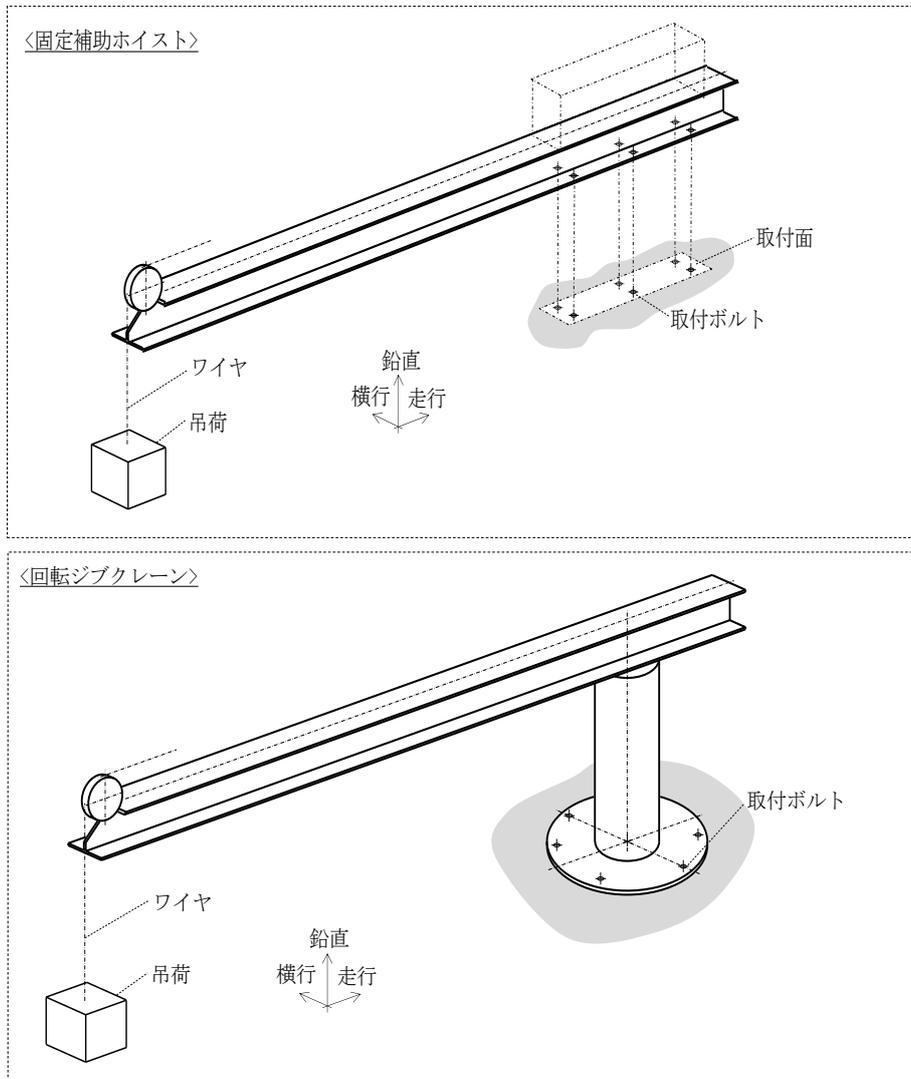


図 1-3(3/3) 強度評価対象 <補助ホイスト>

表 1-4(1/2) 重量物落下評価まとめ〈搭載機器, ブリッジ〉

搭載位置	No.	機器名称	評価項目				最終結果
			落下エネルギー評価	離隔距離	耐震性評価		
					経路評価	強度評価	
ガーダ	1	走行駆動系	×	×	○	-	○
	2	走行電動機	×	×	○	-	○
	3	走行ケーブルダクト(ケーブル)	×	×	○	-	○
	4	A-機上補助盤	×	×	○	-	○
	5	A-機上電源盤	×	×	×	○	○
	6	B-機上電源盤	×	×	○	-	○
プラットフォーム	7		○	-	-	-	○
	8	手摺	○	-	-	-	○
	9		○	-	-	-	○
	10		○	-	-	-	○
	11	横行ケーブルヘア(ケーブル)	×	×	○	-	○
	12	走行検出装置	○	-	-	-	○
	13		○	-	-	-	○
	14		○	-	-	-	○
15	○		-	-	-	○	
ギャラリー	16		×	×	×	○	○
	17		×	×	×	○	○
	18		×	×	×	○	○
	19		○	-	-	-	○
	20	手摺	○	-	-	-	○
	21		○	-	-	-	○
	22		○	-	-	-	○
	23		○	-	-	-	○
	24		×	×	×	○	○
	25	梯子	○	-	-	-	○
	26		○	-	-	-	○
その他	27	走行ケーブルヘア(ケーブル)	×	×	○	-	○
	28	走行ケーブルヘアレール	×	×	○	-	○

○ : SFPの健全性に影響を及ぼさない  
 × : SFPの健全性に影響を及ぼす可能性あり

表 1-4(2/2) 重量物落下評価まとめ (搭載機器, トロリ)

搭載位置	No.	機器名称	評価項目				最終結果
			落下エネルギー評価	離隔距離	耐震性評価		
					経路評価	強度評価	
トロリ 1階	29	手摺	○	-	-	-	○
	30		○	-	-	-	○
	31		○	-	-	-	○
	32		○	-	-	-	○
	33		○	-	-	-	○
	34		○	-	-	-	○
	35		○	-	-	-	○
	36		○	-	-	-	○
	37	横行駆動軸	×	×	○	-	○
	38	横行従動軸	○	-	-	-	○
	39	横行電動機	×	×	○	-	○
	40	振れ止め装置	○	-	-	-	○
	41	B-機上補助盤	×	×	○	-	○
	42	機上操作盤	×	×	×	○	○
	43	横行検出装置	○	-	-	-	○
44	○		-	-	-	○	
45	○		-	-	-	○	
46	○		-	-	-	○	
47	○		-	-	-	○	
トロリ 2階	48	手摺	○	-	-	-	○
	49		○	-	-	-	○
	50		○	-	-	-	○
	51		○	-	-	-	○
	52		○	-	-	-	○
	53		○	-	-	-	○
	54		○	-	-	-	○
	55		主ホイスト	×	×	○	-
	56	空気圧縮機	○	-	-	-	○
	57	荷重検出制御盤	×	×	(○)	○	○
	58	昇降検出装置	○	-	-	-	○
59	固定補助ホイスト(補助ホイスト)	○	-	-	-	○	
60		×	×	×	○	○	
61		×	×	(○)	○	○	
トロリ 3階	62	手摺	○	-	-	-	○
	63		○	-	-	-	○
	64		○	-	-	-	○
	65		○	-	-	-	○
	66		○	-	-	-	○
	67	梯子	○	-	-	-	○
	68	伸縮管	×	×	○	-	○
	69	グラブ	○	-	-	-	○
	70	回転ジブクレーン(補助ホイスト)	×	×	×	○	○
	71	ガイド機構	×	×	○	-	○
	72	ホースリール	×	×	(○)	○	○
	73	〃	×	×	(○)	○	○

- : SFPの健全性に影響を及ぼさない
- (○) : SFPの健全性に影響を及ぼさない  
(手摺の強度評価で落下しないことを確認するもの)
- ×

燃料取替機の地震時におけるストップへの影響評価

1. 目的

VI-1-3-3「燃料体等又は重量物の落下による使用済燃料貯蔵槽内の燃料体等の破損の防止及び使用済燃料貯蔵槽の機能喪失の防止に関する説明書」において、燃料取替機は走行方向に対する脱線を防止するために走行ストップが設置されており、燃料プールへ落下することはないとしていることから、走行ストップに対する評価を行う。

2. 評価方法

図 2-1 の計算モデルに基づき、地震時に燃料取替機がすべり、走行ストップに衝突したときの荷重を算出する。また、図 2-2 の計算モデルに基づき、ストップ断面に加わる曲げモーメントおよびせん断力を算出し、応力評価にて走行ストップへの影響を評価する。

表 2-1 に評価諸元を示す。

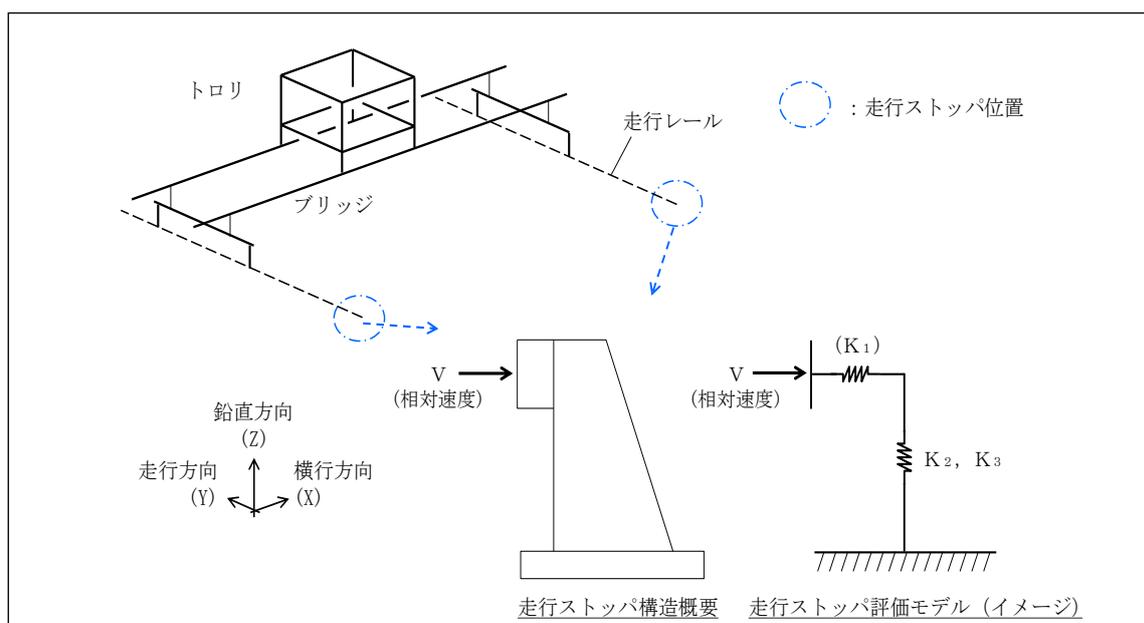


図 2-1 計算モデル (ストップへの衝突荷重算出)

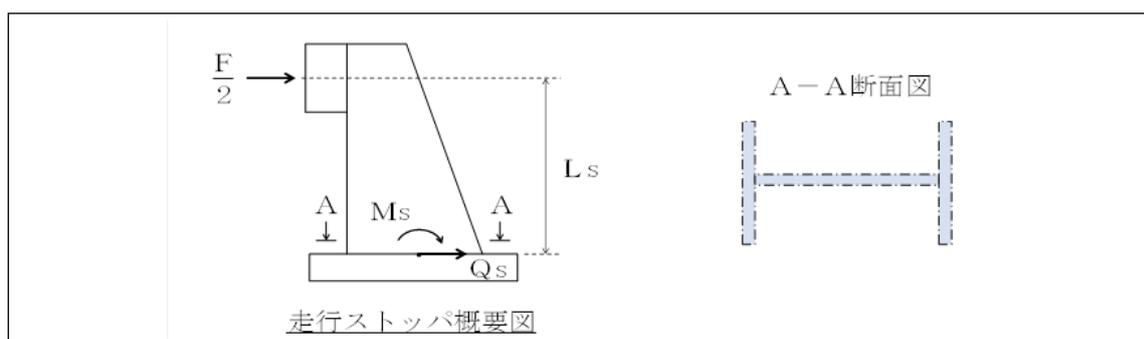
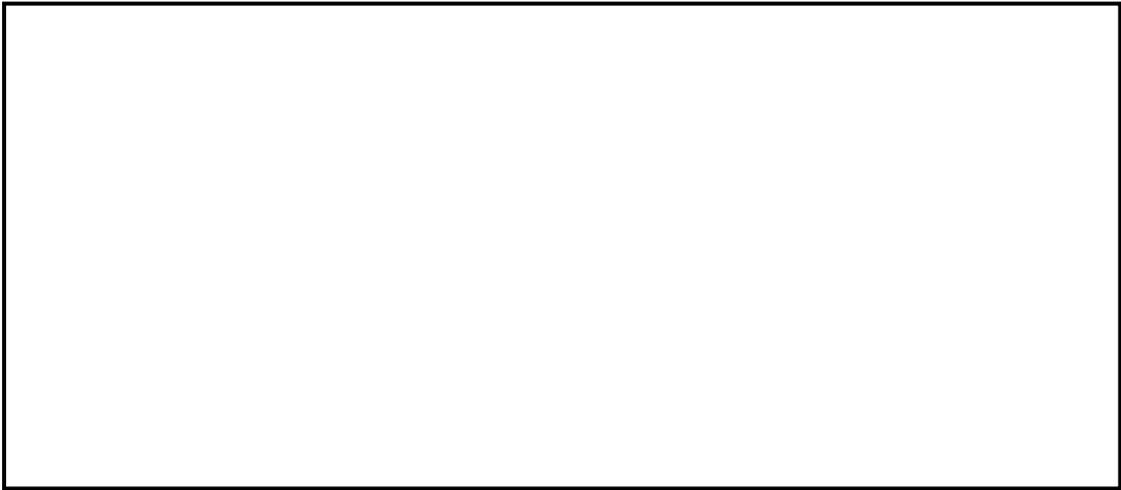


図 2-2 計算モデル (ストップ応力評価)

表 2-1 評価諸元

記号	記号の説明	入力値	単位
m	燃料取替機質量	<input type="text"/>	kg
$T_f$	燃料取替機走行方向卓越 周期	トロリ位置中央 : <input type="text"/> トロリ位置端部 : <input type="text"/>	s
$\alpha_f$	燃料取替機走行方向応答 震度	0.15	—
$V_B$	建物応答速度	0.00	mm/s
g	重力加速度	9806.65	mm/s <sup>2</sup>
$L_s$	ストッパ高さ	345	mm
$A_s$	ストッパ断面積	$6.848 \times 10^3$	mm <sup>2</sup>
$Z_s$	ストッパ断面係数	$4.309 \times 10^5$	mm <sup>3</sup>
$I_s$	断面二次モーメント	$4.524 \times 10^7$	mm <sup>4</sup>
$E_s$	縦断性係数	<input type="text"/>	MPa
$G_s$	せん断弾性係数	77,300	MPa





### 3. 評価結果

波及的影響の観点から走行ストッパが破断しないことを確認することを目的に  $S_u$  値を許容応力に適用して評価を実施した。

表 2-2 のとおり、トロリ位置によらず許容応力を満足することを確認し、ストッパ機能へ影響を及ぼさないことを確認した。

表 2-2 走行ストッパ応力評価結果まとめ

#### ・トロリ位置中央

応力分類	算出応力 (MPa)	許容応力 (MPa) *	裕度	判定
引張り $\sigma$	87			○
せん断 $\tau$	16			○
組合せ $\sigma_c$	91			○

#### ・トロリ位置端部

応力分類	算出応力 (MPa)	許容応力 (MPa) *	裕度	判定
引張り $\sigma$	59			○
せん断 $\tau$	11			○
組合せ $\sigma_c$	62			○

注記\* :  $S_u$  値を適用した許容応力

( $IV_A S$  評価で許容応力の算出に用いる  $F$  値 (設計・建設規格 SSB-3121.1(1) により規定される値) を  $S_u$  値に置き換えて各応力分類の許容応力を算出した値)

判定

○ :  $1.0 \leq$  裕度

× :  $1.0 >$  裕度

## 燃料取替機に対するスロッシングの影響評価

## 1. 検討概要

地震による燃料プールの液面揺動（以下「スロッシング」という。）が発生した場合における燃料取替機に対する影響評価結果を示す。

スロッシング荷重は、添付書類VI-1-1-9-3「溢水評価条件の設定」に示す評価条件を用いて実施した三次元流動解析の結果に基づき設定する。減衰定数は、添付書類VI-2-1-6「地震応答解析の基本方針」に記載の減衰定数を用いる。

評価対象部位となるブリッジガーダ及び脱線防止ラグは、燃料プール表面の水の鉛直速度成分から荷重を算出し、伸縮管は、燃料プール水中の水の水平速度成分から荷重を算出して、地震による荷重を加えて構造強度を評価する。

## 2. 評価条件

## 2.1 検討対象地震動

燃料プールの三次元流動解析では燃料プールの固有周期に対する震度が最大となる地震波を用いることとし、図 3-1 に示す設計用床応答スペクトルより、NS 方向及び EW 方向ともに固有周期に対する震度が最大となる基準地震動  $S_s-D$  とする。また、地震入力は、NS 方向、EW 方向及び鉛直方向の地震動を同時に入力する。

NS 方向



EW 方向

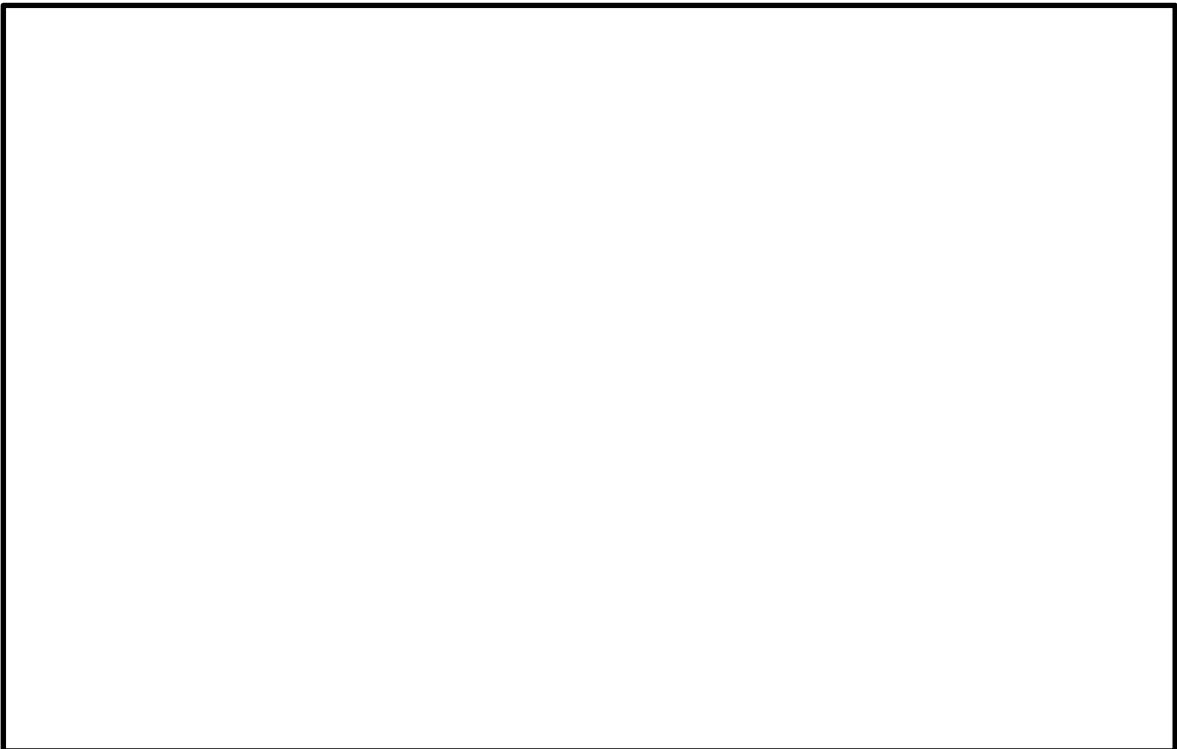


図 3-1 設計用床応答スペクトル (EL 42.80m, 減衰 0.5%)

## 2.2 スロッシング流動解析

燃料プールの三次元流動解析では、図 3-2 に示すとおり燃料プール及び上部空間をモデル化しており、このときの解析条件を表 3-1 に示す。



図 3-2 解析モデル図及び解析メッシュ図

表 3-1 解析条件

項目	内容
モデル化範囲	燃料プール, キャスク置場, 上部空間
境界条件	プール上部は開放とし, 他は壁による境界を設定する。解析範囲外に流出した水は戻らないものとする。壁面での水の流速は 0 となるように設定する。
初期水位	EL42.56m (HWL: High Water Level) (底面より 11.73m, プール壁上端より -0.34m)
評価用地震動	基準地震動 S s - D による燃料プール位置 (EL42.8m) の床応答波
解析コード	汎用熱流体解析コード F l u e n t Ver. 18.1.0
解析時間	100 秒*
物性値	密度 (kg/m <sup>3</sup> ) : 1.190 (空気), 998.2 (水) 粘性係数 (Pa·s) : 1.827×10 <sup>-5</sup> (空気), 1.094×10 <sup>-3</sup> (水)
プール寸法	14000 mm (NS) × 13500 mm (EW) × 12070 mm (UD) (プール壁上端 EL42900mm)
プール内部構造物	内部構造物が流体の運動を障害しないように, 保守的な条件として燃料ラック等のプール内構造物はモデル化しない。
その他	プール周りに設置されているフェンス等による流出に対する抵抗は考慮しない。

注記\* : 溢水量に有意な増加が確認できなくなった時間

### 2.2.1 ブリッジガーダ及び脱線防止ラグに適用するスロッシング速度評価点

スロッシング時にプール水が燃料取替機に達した場合、燃料取替機はプール水により押し上げられる可能性が考えられる。従って、スロッシング速度評価点は、燃料プールの全メッシュの中から燃料取替機のブリッジガーダ下面高さ(EL43.800m)における鉛直方向の流速が最大となる位置及び時刻を確認する。次に、その評価点を含む水平方向(燃料取替機のブリッジガーダ長手方向)について、約1m間隔で同時刻での鉛直方向の流速を抽出・整理する。

図3-3(1/2)にスロッシング解析に基づくEL43.800mレベル(最大速度発生時刻)での速度分布、図3-3(2/2)にスロッシング速度評価点の位置及び出力結果を示す。

### 2.2.2 伸縮管に適用するスロッシング速度評価点

燃料取替機の伸縮管はスロッシング時にプール水の影響を受けるため、スロッシング速度評価点は、燃料プールの全メッシュの中から水平方向の流速が最大となる位置及び時刻を確認する。次に、その評価点を含む鉛直方向(伸縮管の軸方向)について、約1m間隔で同時刻での水平方向の流速を抽出・整理する。

図3-4(1/2)にスロッシング解析に基づく最大速度発生点のレベル/時刻での速度分布、図3-4(2/2)にスロッシング速度評価点の位置及び出力結果を示す。

### 2.3 燃料取替機の評価対象部位

燃料取替機のブリッジガーダ及び脱線防止ラグの構造概要を図3-5、伸縮管の構造概要を図3-6、伸縮管の評価対象部位を図3-7に示す。

スロッシングの影響評価では、燃料プール上の水面に近いブリッジガーダと脱線防止ラグ、プール水中で水平方向荷重を受ける伸縮管とその支持部に対して実施する。

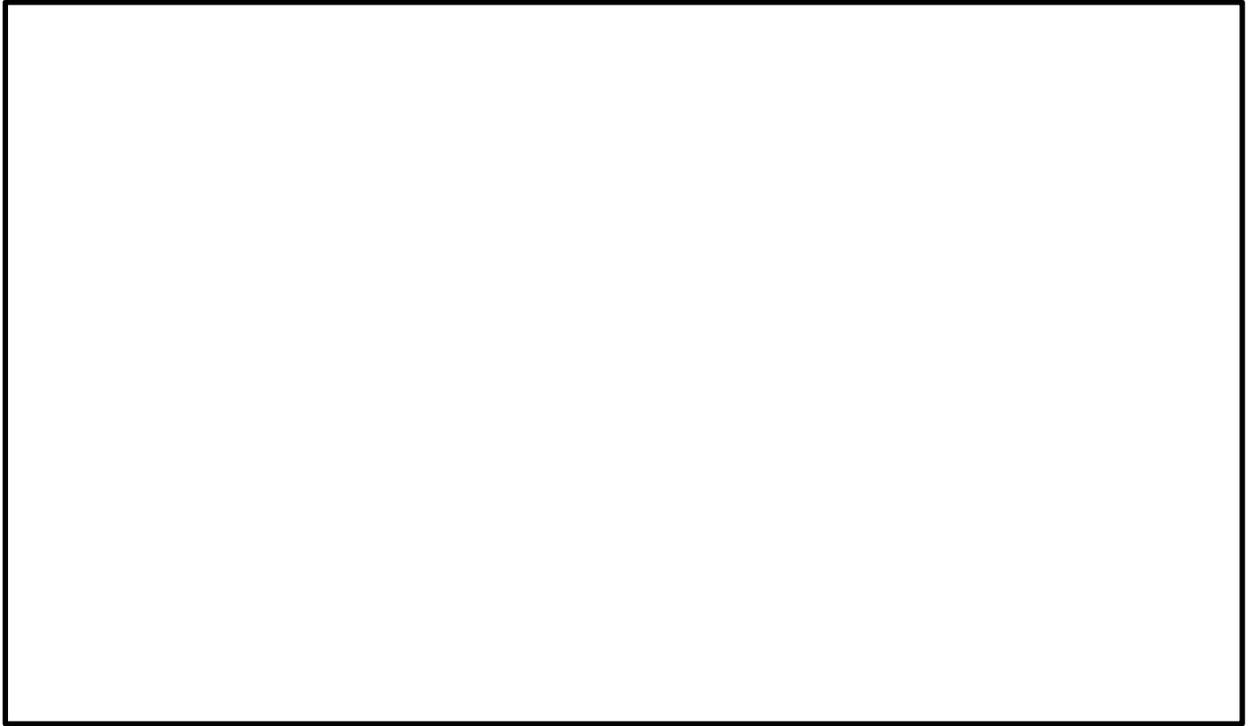


図 3-3(1/2) スロッシング解析結果

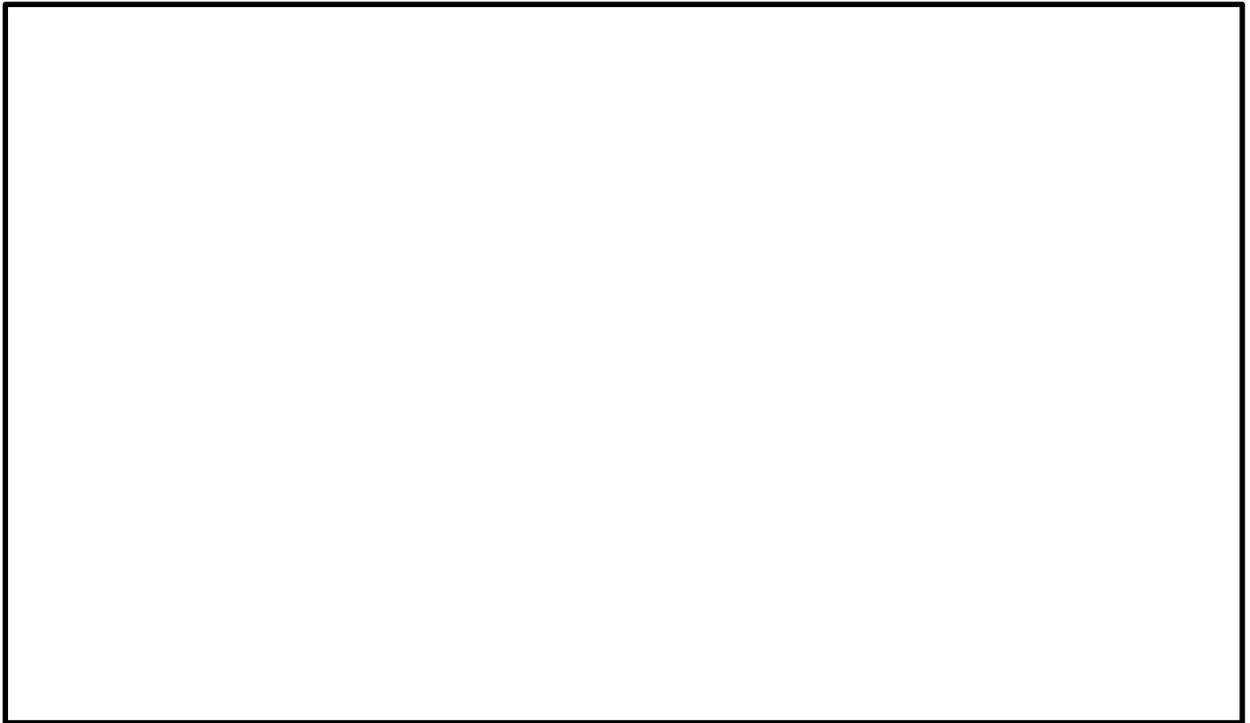


図 3-3(2/2) 水平方向のスロッシング速度評価点及び出力結果 <平面図>

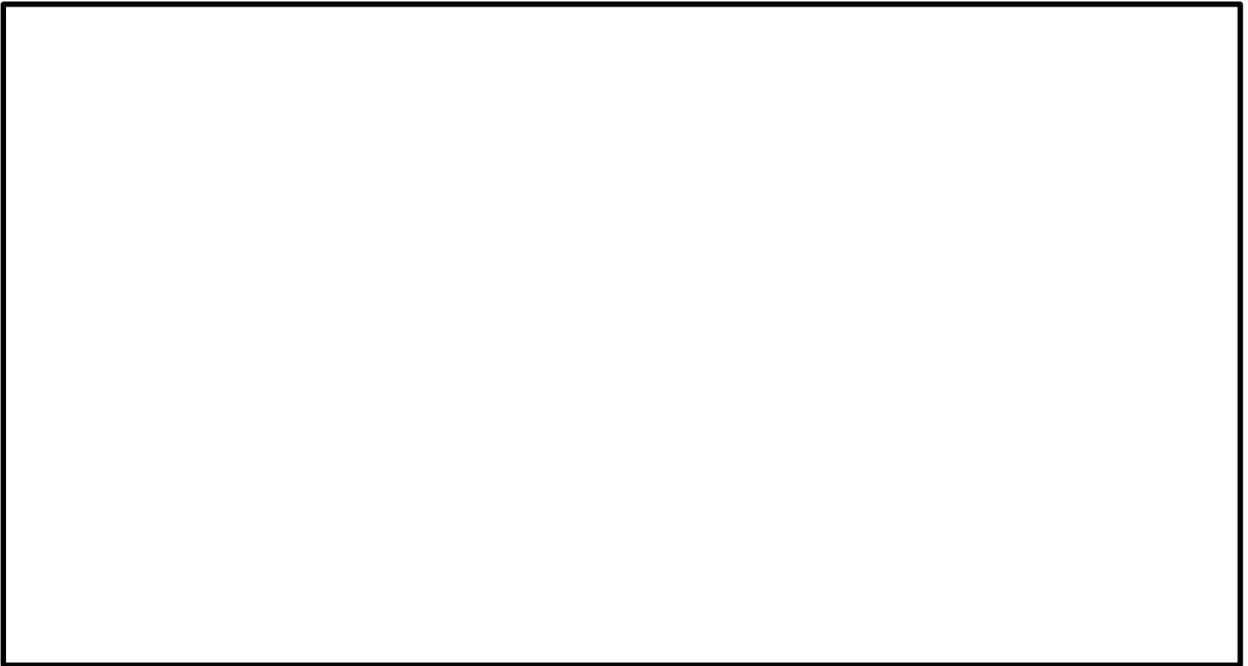


図 3-4(1/2) スロッシング解析結果

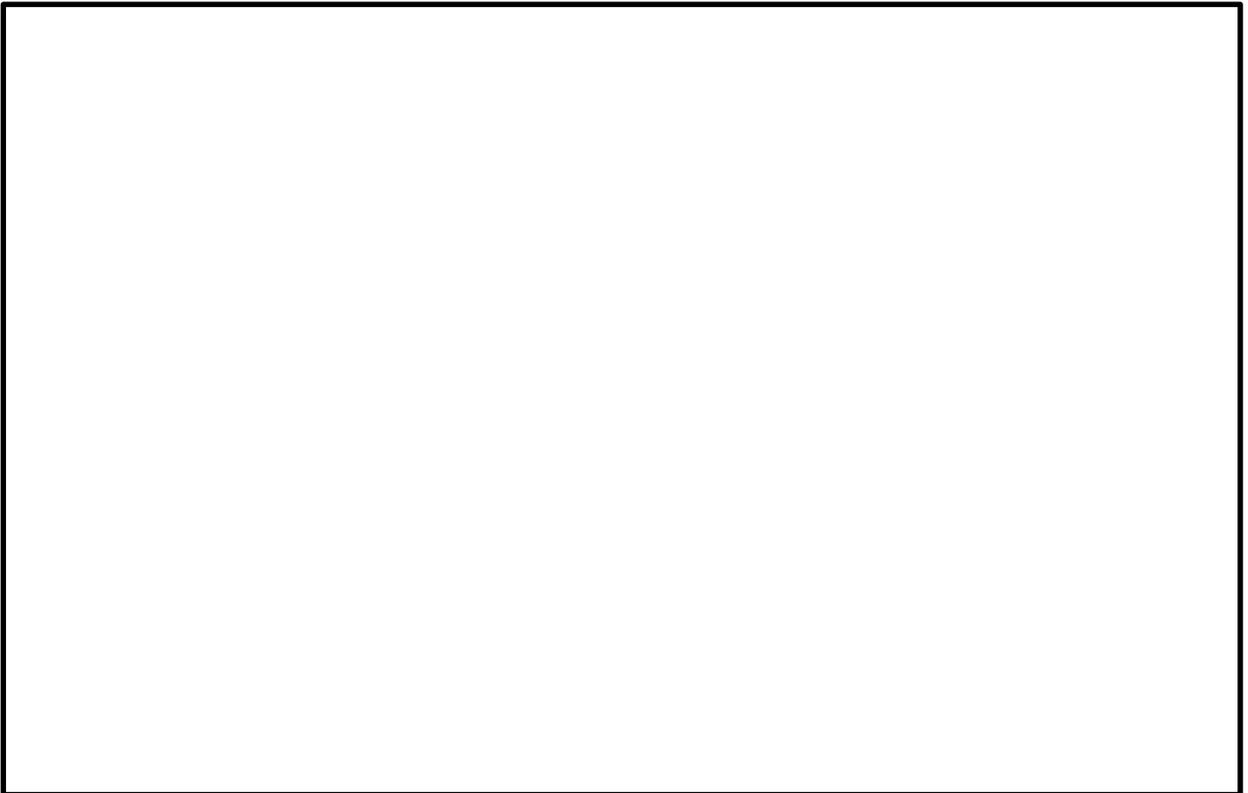


図 3-4(2/2) 鉛直方向のスロッシング速度評価点及び出力結果 <断面図>

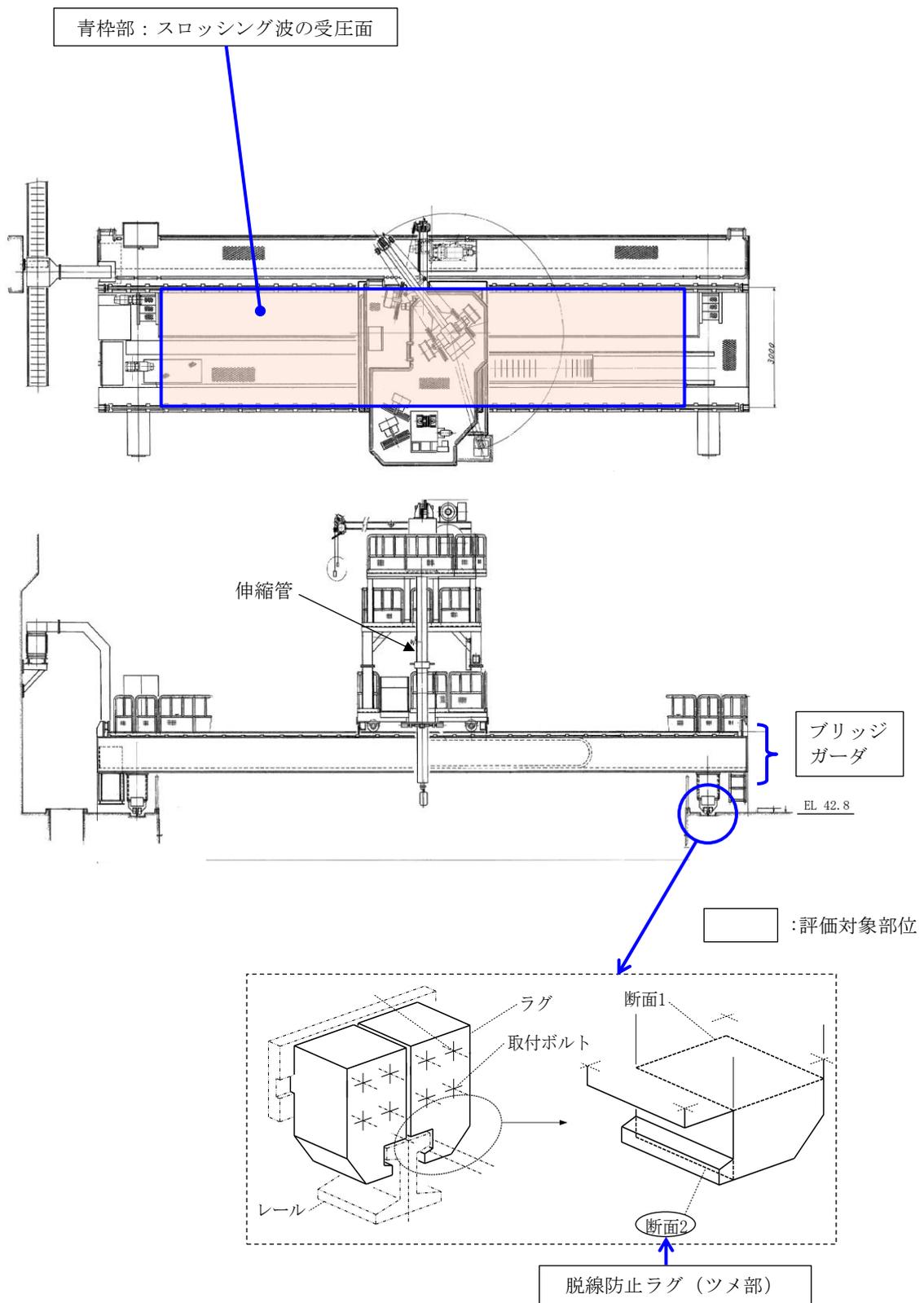


図 3-5 ブリッジガーダ及び脱線防止ラグの構造概要図

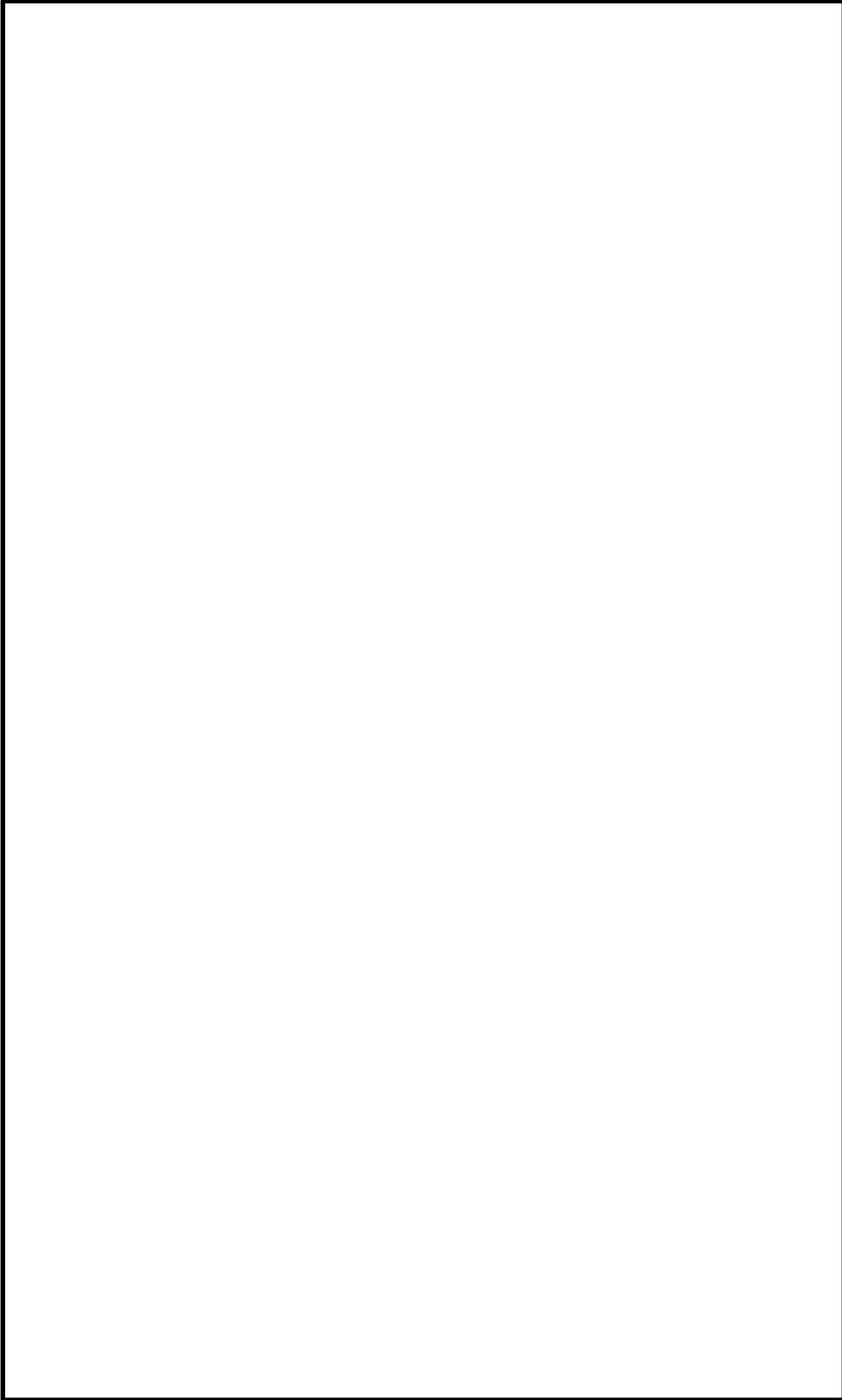


図 3-6 伸縮管の構造概要図

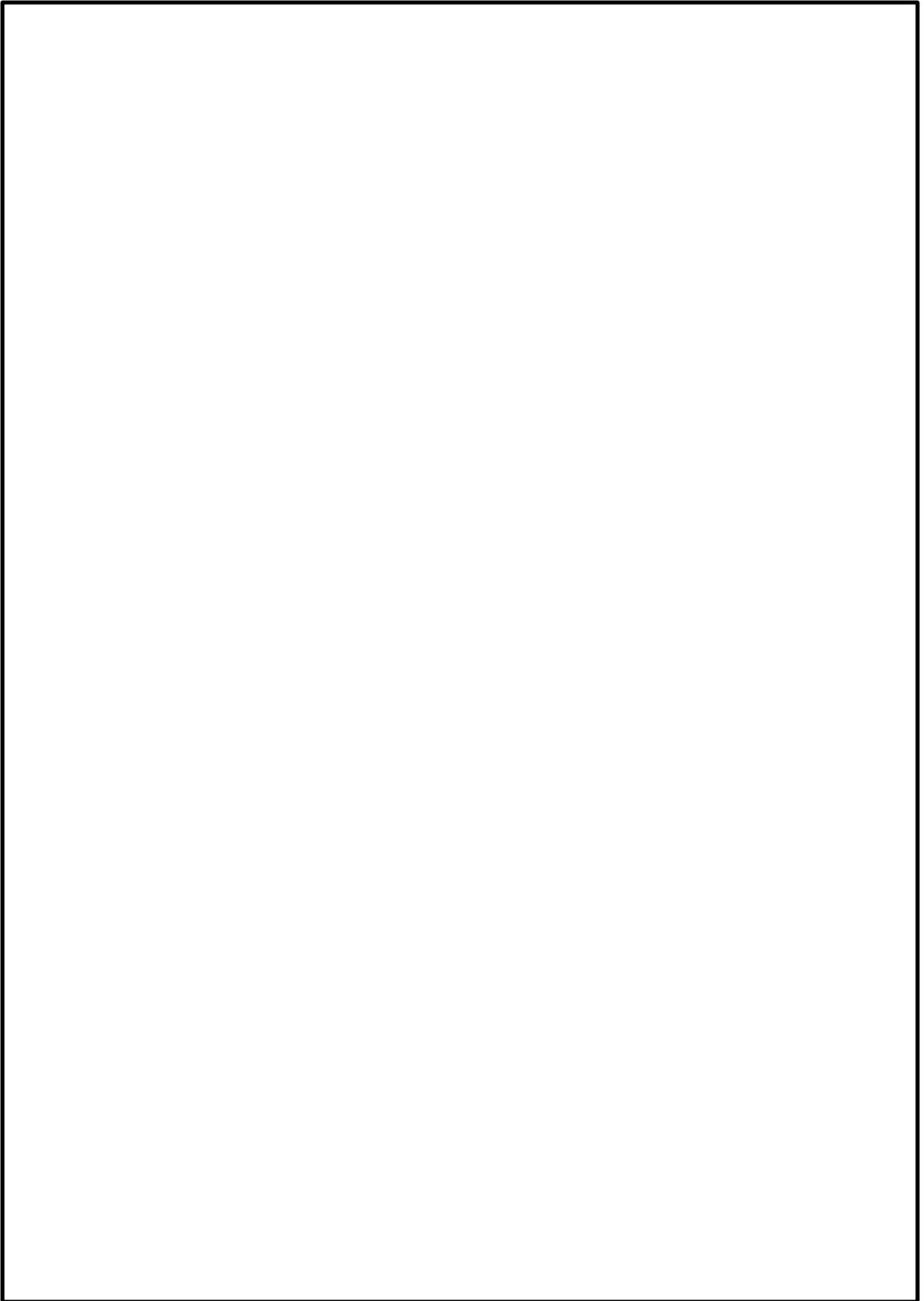


図 3-7 伸縮管の評価対象部位

添付 3-9

### 3. 評価方法

燃料取替機に対するスロッシングの影響評価では、地震により燃料取替機に生じる応力とスロッシング影響の重畳を考慮する。

#### 3.1 ブリッジガーダ及び脱線防止ラグの影響評価

スロッシング時にプール水が燃料取替機の下面に達した場合、燃料取替機はプール水により押し上げられる可能性が考えられる。従って、ここでは以下の観点から評価対象をブリッジガーダと脱線防止ラグとする。

なお、水平方向のスロッシングによる影響は、仮にプール水をブリッジガーダの側面で受けたとしても、燃料取替機は走行レール上を移動することができるため、本評価では考慮しない。

- ・ブリッジガーダ：燃料取替機の主要部位
- ・脱線防止ラグ：燃料取替機の浮き上がりを防止する部位

##### (1) 荷重算出

2.2.1項の各評価点から得られるスロッシングの流動解析結果（プール水のスロッシング速度）から動水圧を算出し、その動水圧を負荷させた条件で燃料取替機の当該箇所（燃料プール幅とブリッジガーダに囲まれた図 3-5 に示す範囲）の受圧面積に乗じてスロッシング荷重を算出する。このとき、スロッシング荷重は燃料取替機の下面全体に分散して付加されるが、本評価では保守的に主要部材であるブリッジガーダが全て負担するとした。

$$F_B = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_B \cdot v_B^2 \quad \dots (3.1)$$

$F_B$ ：ブリッジガーダ（2本）に作用するスロッシング荷重 [N]

$\rho$ ：流体（水）の質量密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$A_B$ ：ブリッジ底部のスロッシング受圧面積 [m<sup>2</sup>]

$v_B$ ：プール EW 方向の同一列上に並んだ各評価点の鉛直スロッシング速度の最大値 [m/s]

なお、脱線防止ラグが負担するスロッシング荷重は、両サイドのラグのうち反力が大きい側となる脱線防止ラグを評価する。

##### (2) 応力評価

ブリッジガーダ及び脱線防止ラグとも、スロッシングによる発生応力と地震による発生応力を足し合わせ、波及的影響の観点から部材が破断しないことを確認する目的で Su 値を適用した許容応力と比較する。

### 3.2 伸縮管の影響評価

伸縮管は図 3-7 に示すとおり、ジンバル機構（構造）を介してトロリと取り合っており、この取り合い構造により、伸縮管は水平方向に荷重が作用してもジンバル機構を支点として可動することで、荷重を逃す構造となっている。従って、ここでの評価対象は、荷重伝達経路となる伸縮管（第 1 管）、ジンバル機構からジンバルピン、リング、及びハンガとする。

#### (1) 荷重算出

伸縮管の評価用荷重は、2.2.2 項の各評価点から得られるスロッシングの流動解析結果（プール水のスロッシング速度）に沿って伸縮管（各管）を分割し、各々分割された伸縮管の高さ方向の中間位置にスロッシング速度から算出した動水圧を負荷した場合を想定する。それら動水圧は、負荷位置に対応した伸縮管の投影面積を乗じることで荷重に変換されるため、各伸縮管の荷重負荷位置におけるモーメントを考慮して伸縮管（第 1 管）位置における荷重を算出する。

伸縮管の投影面積（受圧面積）は、燃料プール内での伸縮量及び燃料集合体の寸法を考慮する。

地震による水平荷重の影響については、燃料取替機が水平方向にすべることを考慮した  $0.15G^{*1}$  相当の荷重を、鉛直方向は評価上厳しくなるトロリ位置中央での卓越周期を考慮した荷重を、伸縮管質量から算出して重畳させる。

プール水のスロッシングにより伸縮管に作用する荷重を 3.2 式により求める。

注記\*1：最大静止摩擦力より求めた水平方向設計震度

$$F_m = P_{tm} \cdot A_m \quad \dots (3.2)$$

$F_m$ ：伸縮管に作用するスロッシング荷重 [N]

$P_{tm}$ ：伸縮管に作用する動水圧 [N/m<sup>2</sup>]

$$P_{tm} = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot (v_m + v_f)^2$$

$A_m$ ：伸縮管の水平投影面積 [m<sup>2</sup>]

$C_d$ ：抗力係数 (=1.0)

$\rho$ ：流体（水）の質量密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$v_m$ ：プール同一標高における各評価点の水平スロッシング流速の最大値 [m/s]

$v_f$ ：燃料取替機のすべり速度 [m/s]

なお、鉛直方向荷重については、図 3-6 に示す伸縮管の構造概要のとおり、二重のワイヤロープにより燃料集合体を吊り下げる構造となっており、吊荷である燃料集合体の質量が伸縮管に直接は掛からないことから、鉛直方向荷重の算出では伸縮管質量のみ考慮する。

図 3-8 に伸縮管に対するスロッシング及び地震による荷重負荷の模式図を示す。

## (2) 応力評価

全ての評価対象部位について、スロッシング及び地震による荷重から算出した応力を、波及的影響の観点から部材が破断しないことを確認する目的で Su 値を適用した許容応力と比較する。

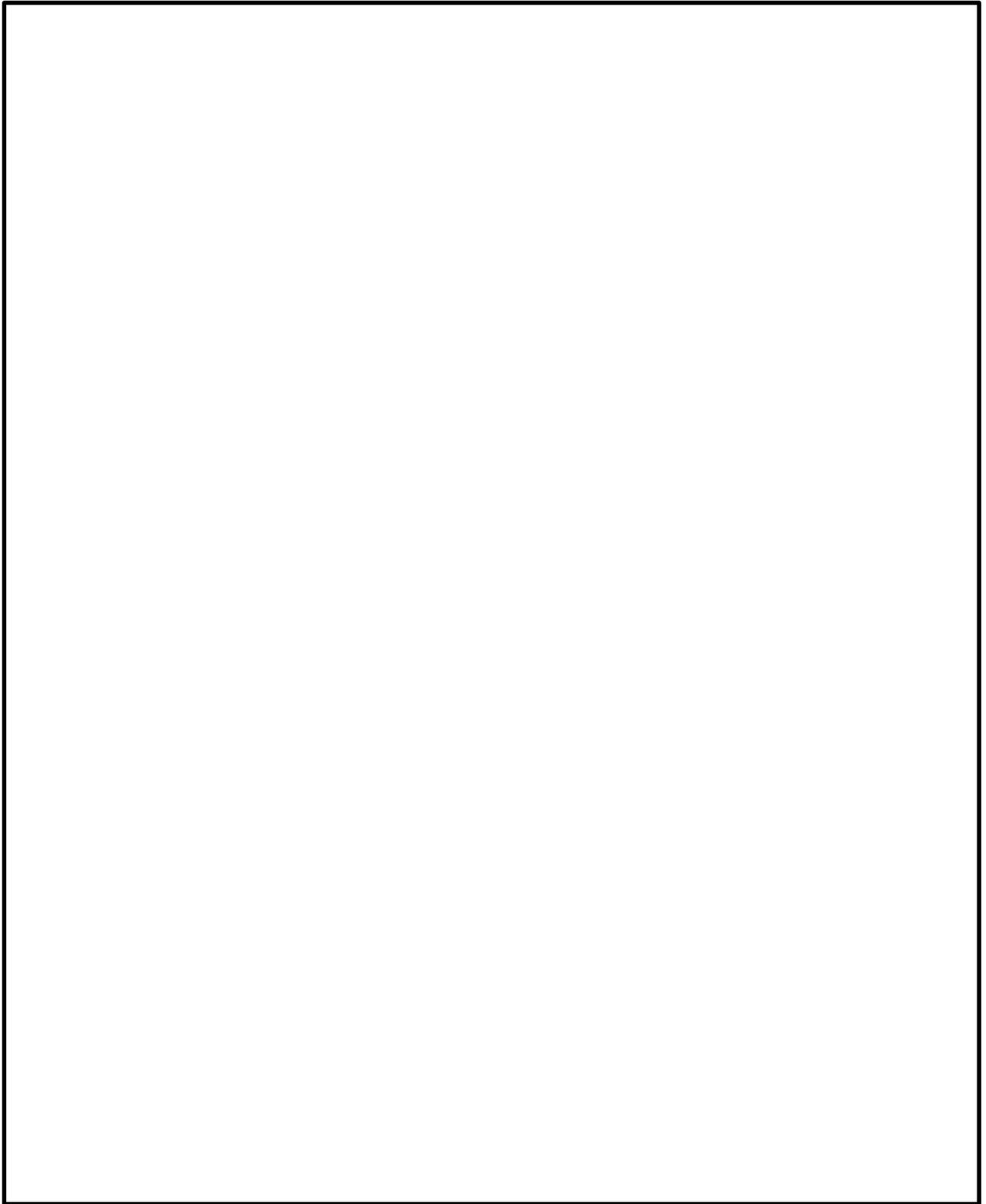


図 3-8 伸縮管に対するスロッシング及び地震による荷重負荷の模式図

#### 4. 評価結果

##### 4.1 ブリッジガーダ及び脱線防止ラグ

表 3-1 に示すとおり、ブリッジガーダ及び脱線防止ラグともにスロッシングを考慮した算出応力が、許容応力を下回っていることを確認した。

表 3-1 ブリッジガーダ及び脱線防止ラグの評価結果

評価対象部位	材料	応力分類	算出応力 (MPa)	許容応力* (MPa)
ブリッジガーダ		引張り	240	
		せん断	20	
		組合せ	242	
脱線防止ラグ		引張り	160	
		せん断	48	
		組合せ	180	

注記\*：S<sub>u</sub>値を適用した許容応力（IV<sub>A</sub>S評価で許容応力の算出に用いるF値（設計・建設規格SSB-3121.1(1)により規定される値）をS<sub>u</sub>値に置き換えて各応力分類の許容応力を算出した値）

##### 4.2 伸縮管

表 3-2 に示すとおり、伸縮管の評価対象部位においてスロッシングを考慮した算出応力が、許容応力を下回っていることを確認した。

表 3-2 伸縮管の評価結果

評価対象部位	材料	応力分類	算出応力 (MPa)	許容応力* (MPa)
伸縮管第1管		引張り	49	
		せん断	2	
		組合せ	50	
ジンバルピン		引張り	452	
		せん断	87	
		組合せ	477	
リング		引張り	200	
		せん断	61	
		組合せ	226	
ハンガ		引張り	59	
		せん断	4	
		組合せ	60	

注記\*：S<sub>u</sub>値を適用した許容応力（IV<sub>A</sub>S評価で許容応力の算出に用いるF値（設計・建設規格SSB-3121.1(1)により規定される値）をS<sub>u</sub>値に置き換えて各応力分類の許容応力を算出した値）

## 5. 結論

燃料取替機のブリッジガーダ、脱線防止ラグ及び伸縮管について、地震時における燃料プールのスロッシング影響を考慮した場合でも十分な強度を有していることを確認した。よって、地震時に燃料プールでスロッシングが生じた場合でも、燃料取替機に対する影響はない。

## 燃料取替機の吊具荷重算出時における吊荷位置選定の考え方

## 1. 目的

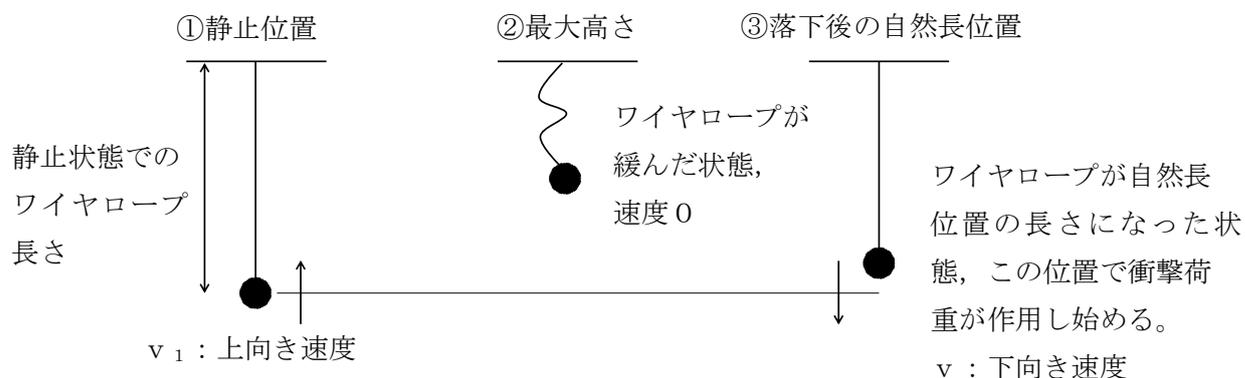
燃料取替機は、添付書類VI-2-11-2-7-2「燃料取替機の耐震性についての計算書」において吊具に発生する荷重を算出しているが、吊荷位置によって吊具荷重が変動することから吊具荷重算出時における吊具位置選定の考え方について述べる。

## 2. 吊具荷重の算出方法

耐震計算書に示すとおり、吊具の荷重算出は燃料取替機本体の鉛直方向固有周期及び吊荷の固有周期に対応した震度を用いて速度を算出し、吊具に作用する衝撃荷重を求めている。荷重の算出手順を以下に示す。

## 2.1 吊荷の浮上り後の落下速度の算出

吊荷は、図 4-1 に示すように、鉛直方向に浮き上がって再び自然長位置に戻った瞬間から、吊具の衝撃荷重を与える。



○ 下向き速度  $v$

②, ③まではエネルギー保存則より

下向き速度  $v$  は

$$v < v_1$$

となるが、保守的に

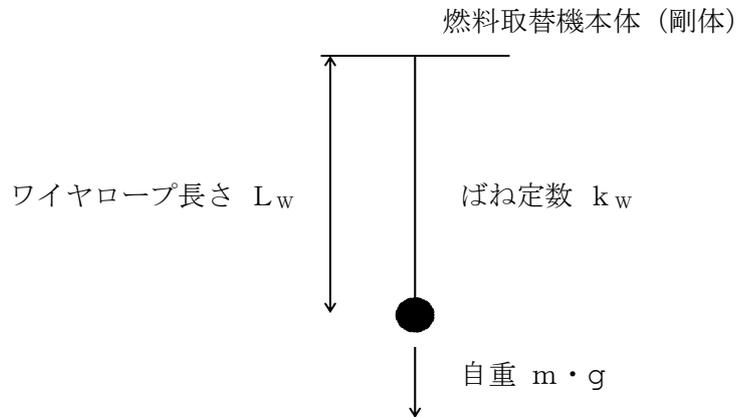
$$v = v_1$$

として評価を行う。

図 4-1 吊荷の浮上りの様子

## 2.2 吊荷の固有周期

図 4-2 に示すとおり，燃料取替機本体を剛体としたときの吊荷の固有周期  $T_w$  を算出する。



$$\text{固有周期： } T_w = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k_w}}$$

ここで、  
 $T_w$  : 吊荷の固有周期  
 $m$  : 吊荷の質量  
 $k_w$  : ワイヤロープのばね定数

図 4-2 吊荷の固有周期の算出

## 2.3 吊荷，燃料取替機本体の速度の算出

以下の式に従い，吊荷及び燃料取替機本体に作用する最大加速度による速度を算出する。

$$v_1 = a_w \cdot g \cdot T_w / (2 \cdot \pi)$$

$$v_2 = a_f \cdot g \cdot T_f / (2 \cdot \pi)$$

ここで、  
 $v_1$  : 吊荷の最大速度  
 $v_2$  : 燃料取替機本体の最大速度  
 $a_w$  : 吊荷に作用する震度  
 $a_f$  : 燃料取替機本体に作用する震度  
 $g$  : 重力加速度  
 $T_w$  : 吊荷の固有周期  
 $T_f$  : 燃料取替機本体の鉛直方向固有周期

## 2.4 吊具に作用する衝撃荷重

以下のとおり、吊具に作用する荷重Fを算出する。

図4-3及び図4-4に示すように、ワイヤロープの下端にある吊荷の運動量の変化は吊荷と燃料取替機本体の質量や固有値が異なることから $v_1$ と $v_2$ が同値にならないが、保守的に吊具の減衰がなく完全弾性衝突を仮定して反発係数を1とすれば以下となる。

$$(\text{力積}) : \int_0^{\frac{T}{4}} F \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{t}{T_w}\right) \cdot dt$$

$$(\text{吊荷の運動量の変化}) : m \cdot (v_1 + v_2)$$

ここで、  
 $F$  : 吊具に作用する荷重  
 $T_w$  : 吊荷の固有周期  
 $m$  : 吊荷の質量  
 $v_1$  : 吊荷の最大速度  
 $v_2$  : 燃料取替機本体の最大速度

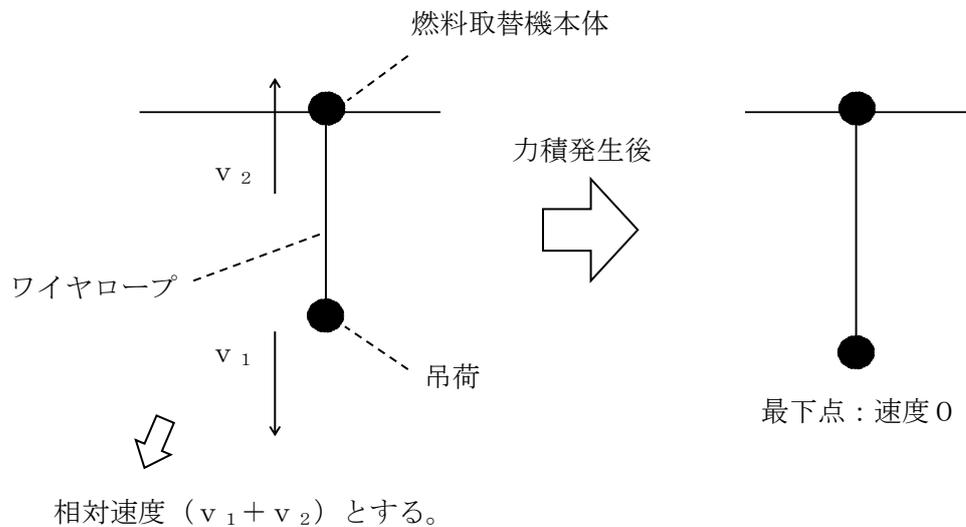


図4-3 吊荷落下後の速度変化

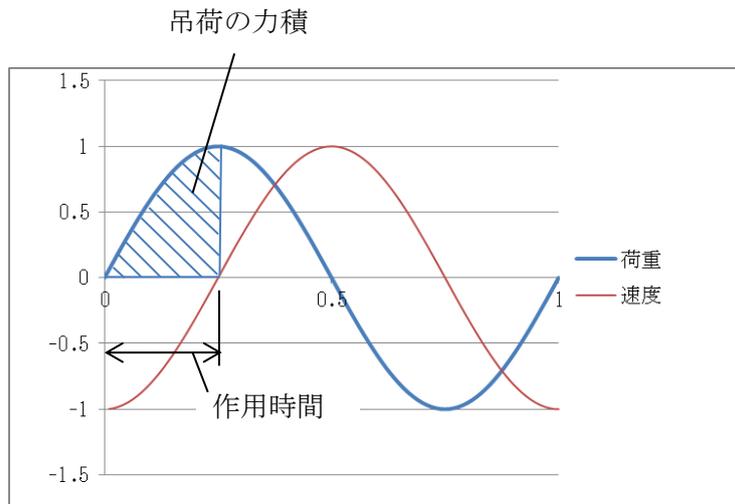


図 4-4 吊荷の力積の概念図

吊荷の運動方向が変化する時間については、ワイヤロープが完全弾性体で、吊荷と燃料取替機本体の運動が自由振動系であることを仮定すれば、吊荷の固有周期 $T_w$ の4分の1となる。

以上から、運動量変化及び作用時間をもとに荷重は、自重分を追加して吊具に作用する荷重を以下の通り計算する。

$$F = \frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot (v_1 + v_2)}{T_w} + m \cdot g$$

- ここで、
- F : 吊具に作用する荷重
  - m : 吊荷の質量
  - $v_1$  : 吊荷の最大速度
  - $v_2$  : 燃料取替機本体の最大速度
  - $T_w$  : 吊荷の固有周期
  - g : 重力加速度

### 3. 吊荷位置選定の考え方

2. 項に示す方法で吊具の評価を実施するにあたり、吊具の固有周期は吊荷の位置によって変動することから、固有周期と床応答スペクトルの関係から評価が厳しくなるような吊荷位置とする。吊荷位置選定の考え方を以下に示す。

燃料取替機では、吊荷位置が吊上げ上限、及び吊上げ下限における検討を実施している。吊荷に作用する震度を求める際に用いる設計用床応答スペクトルを図 4-5 に、燃料取替機各吊荷位置における固有周期、震度、速度及び吊具に作用する荷重を表 4-1 に示す。

図 4-5 に示すとおり震度が最大となる吊荷位置である吊上げ上限時において、表 4-1 に示すとおり吊具に作用する荷重  $F$  が最大となることから、添付書類 VI-2-11-2-7-2 「燃料取替機の耐震性についての計算書」においては、吊上げ上限のケースを代表として、吊具評価結果を記載する。

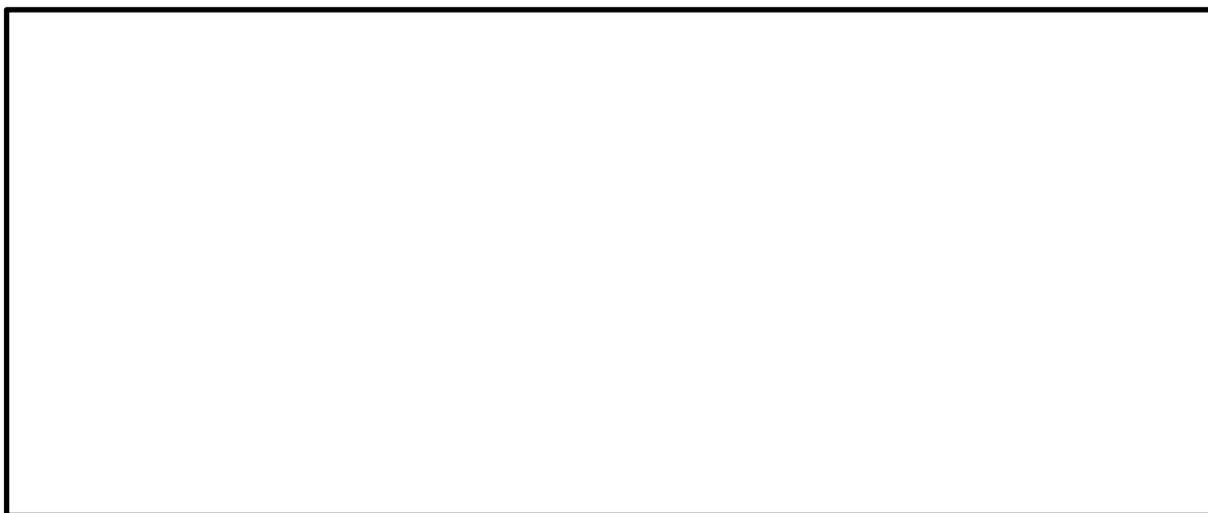


図 4-5 燃料取替機各吊荷位置における震度算出に用いた設計用床応答スペクトル

表 4-1 燃料取替機各吊荷位置における緒元整理表

吊荷位置	m (kg)	$L_w$ (mm)	$T_f$ (s)	$T_w$ (s)	$a_f$ (-)	$a_w$ (-)	$v_1$ (mm/s)	$v_2$ (mm/s)	F (N)
吊上げ上限									$2.962 \times 10^4$
吊上げ下限									$1.897 \times 10^4$