

島根原子力発電所2号炉 地震による損傷の防止 (耐震設計の論点)

[機器・配管系に係る論点のうち
機器・配管系への制震装置の適用他]

令和元年11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

Energia

論点[Ⅱ]既工認と今回工認の手法の相違点の整理に基づく論点		
＜機器・配管系＞		
No.	論点	説明頁
1	[論点Ⅱ－6] 機器・配管系への制震装置の適用	2～46
2	[論点Ⅱ－10] 取水槽ガントリクレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用	47～59
3	[論点Ⅱ－18] 原子炉建物天井クレーンの非線形時刻歴応答解析の適用	60～66

論点Ⅱ－6 機器・配管系への制震装置の適用

■ 耐震設計の論点

【論点Ⅱ－6：機器・配管系への制震装置の適用】（論点の重み付け：A）

○制震装置を適用した地震応答解析の実施に係る論点の審査では、制震装置（単軸粘性ダンパ、三軸粘性ダンパ）の構造、作動原理、適用対象（配管系の対象）、適用実績との条件の差異、制震装置と対象設備の地震時の構造成立性、適用による効果、試験結果、解析モデル化・解析手法の妥当性等の詳細を説明する。（第701回審査会合（平成31年4月9日）における指摘事項「No.6」の回答）

■ 論点に係る説明概要

- ・島根2号炉において、波及的影響を防止するための対策を行う取水槽ガントリクレーン及びBクラスの配管系に、耐震性向上を目的として制震装置を設置する。
- ・制震装置の適用にあたっては、その減衰性能を適切にモデル化し、制震装置を組み込んだ機器・配管系の地震応答解析を実施する必要がある。
⇒制震装置の構造、作動原理等を示した上で、制震装置の減衰性能を適切に考慮したモデル化及び地震応答解析手法について説明する。

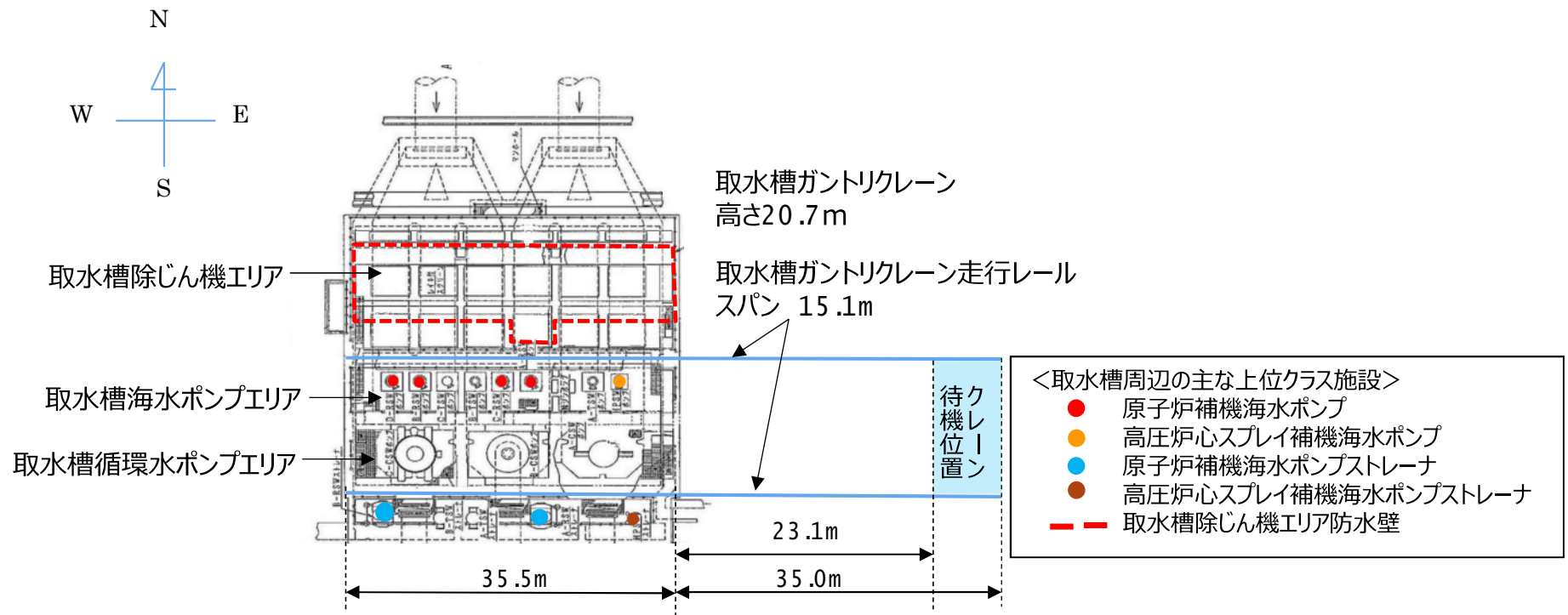
■ 先行プラント実績

- ・制震装置（単軸粘性ダンパ）の設置は島根2号炉、島根3号炉及び柏崎6／7号炉等の排気筒で実績がある。
- ・取水槽ガントリクレーンでは、制震装置として非線形の単軸粘性ダンパを適用するためダンパの特性に差異があり、単軸粘性ダンパを設置する設備の主要構造に差異がある。
- ・Bクラスの配管系に適用する三軸粘性ダンパは、海外の原子力発電所では適用実績があるものの、国内の原子力発電所では適用実績がない。

【論点Ⅱ-6】 1. 単軸粘性ダンパの取水槽ガントリクレーンへの設置

(1) 取水槽ガントリクレーンに係る要求事項

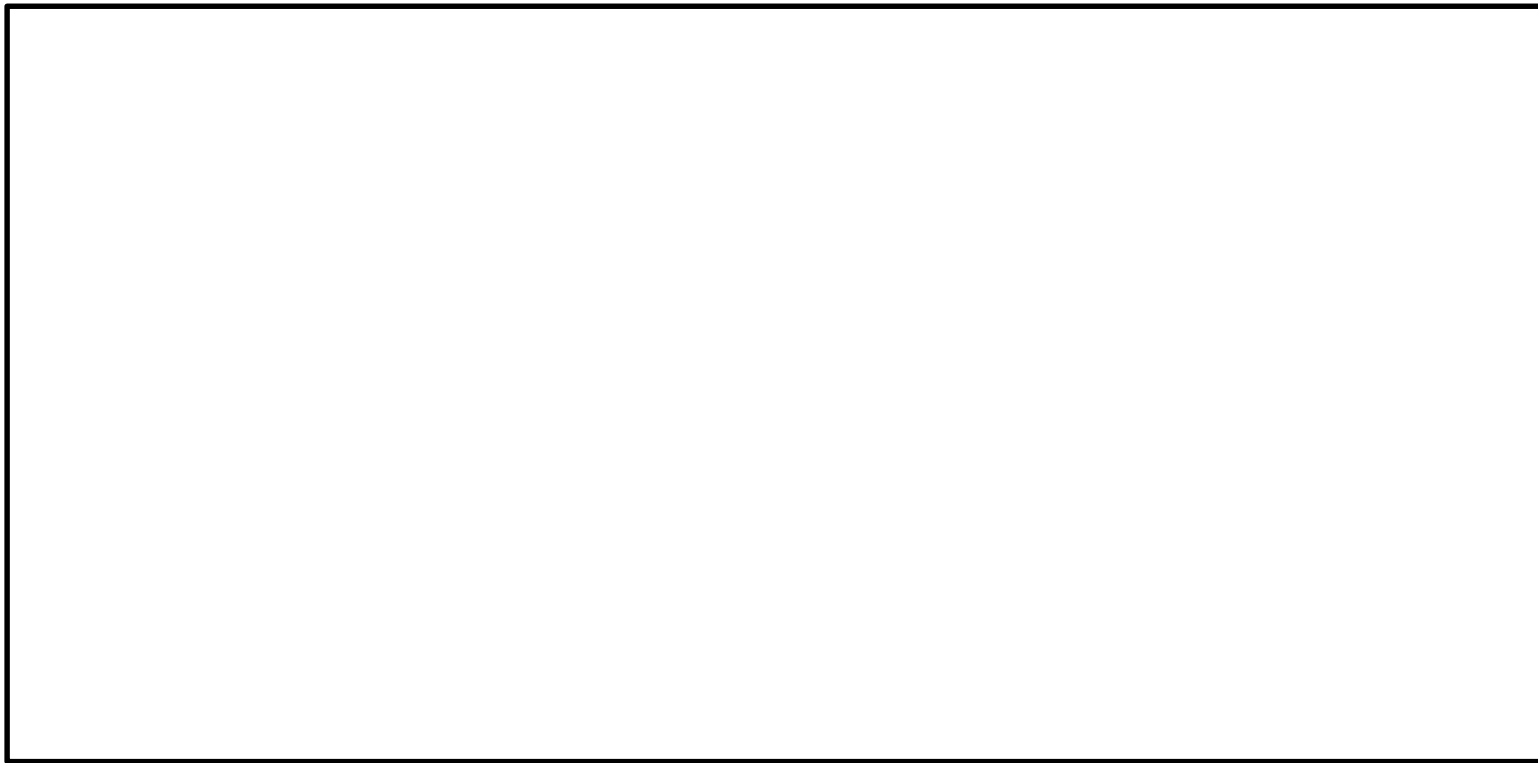
- 発電所の運転中は、取水槽ガントリクレーンは図中に示す待機位置に待機しており、周辺の上位クラス施設とは十分な離隔距離があることから波及的影響を及ぼすおそれはない。
- 定期検査中など原子炉補機海水ポンプ等のメンテナンスを実施する期間には、上位クラス施設が設置されている取水槽海水ポンプエリア付近に位置することとなるため、基準地震動 s_s による地震力に対して取水槽ガントリクレーンが損傷、転倒及び落下することで上位クラス施設へ波及的影響を及ぼさないことが要求される。



取水槽ガントリクレーンの設置位置及び
取水槽周辺の上位クラス施設概要

【論点Ⅱ-6】 1. 単軸粘性ダンパの取水槽ガントリクレーンへの設置 (2) 取水槽ガントリクレーンの構造概要

- 取水槽ガントリクレーンの構造として、脚はガーダを支持し、下部には走行車輪が設置されている。ガーダは脚の上部にあり、その上面にトロリが移動するための横行レールが設置されており、下部にはホイストレールが設置されている。
- 取水槽ガントリクレーンは横行方向に脚が変形する振動モードが支配的であり、1方向に減衰性能を発揮する単軸粘性ダンパが制震装置として適している（添付資料1）。

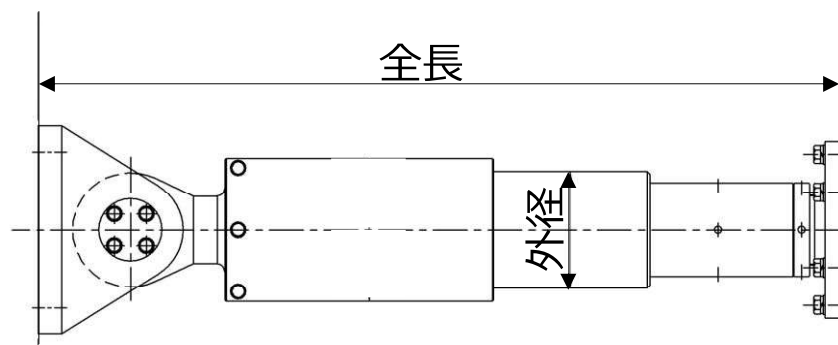


取水槽ガントリクレーンの構造

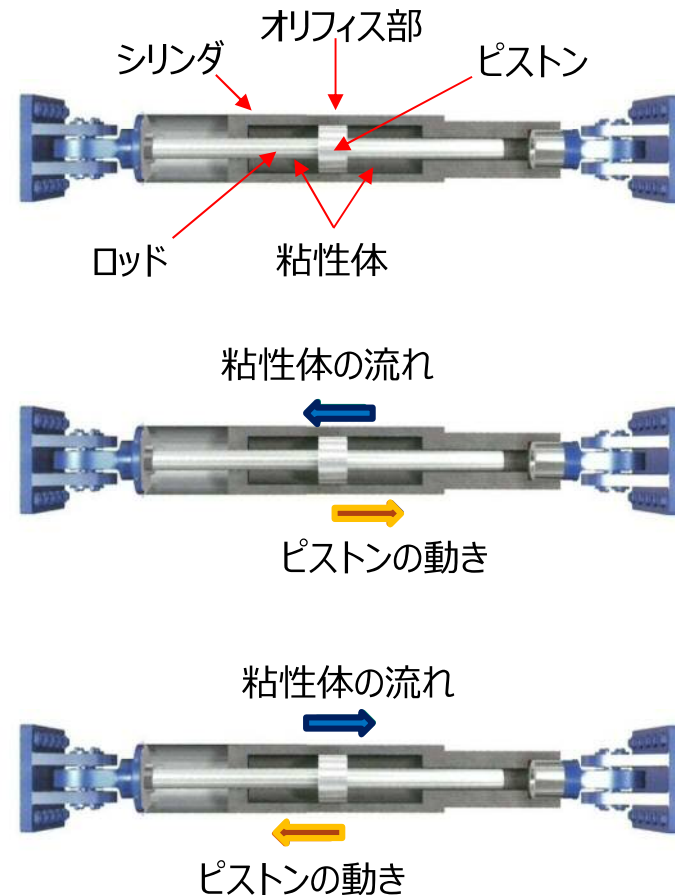
【論点Ⅱ-6】 1. 単軸粘性ダンパの取水槽ガントリクレーンへの設置

(3) 単軸粘性ダンパの構造概要

- 単軸粘性ダンパは主にシリンダ、ピストン、ロッド及び粘性体により構成されている。
- 単軸粘性ダンパは、ピストン、ロッドが軸方向に移動することにより、シリンダ内面とピストン外面の間に形成されるオリフィス部を粘性体が流れ、その抵抗力により減衰性能を発揮するものである。



単軸粘性ダンパの構造



単軸粘性ダンパの動作原理

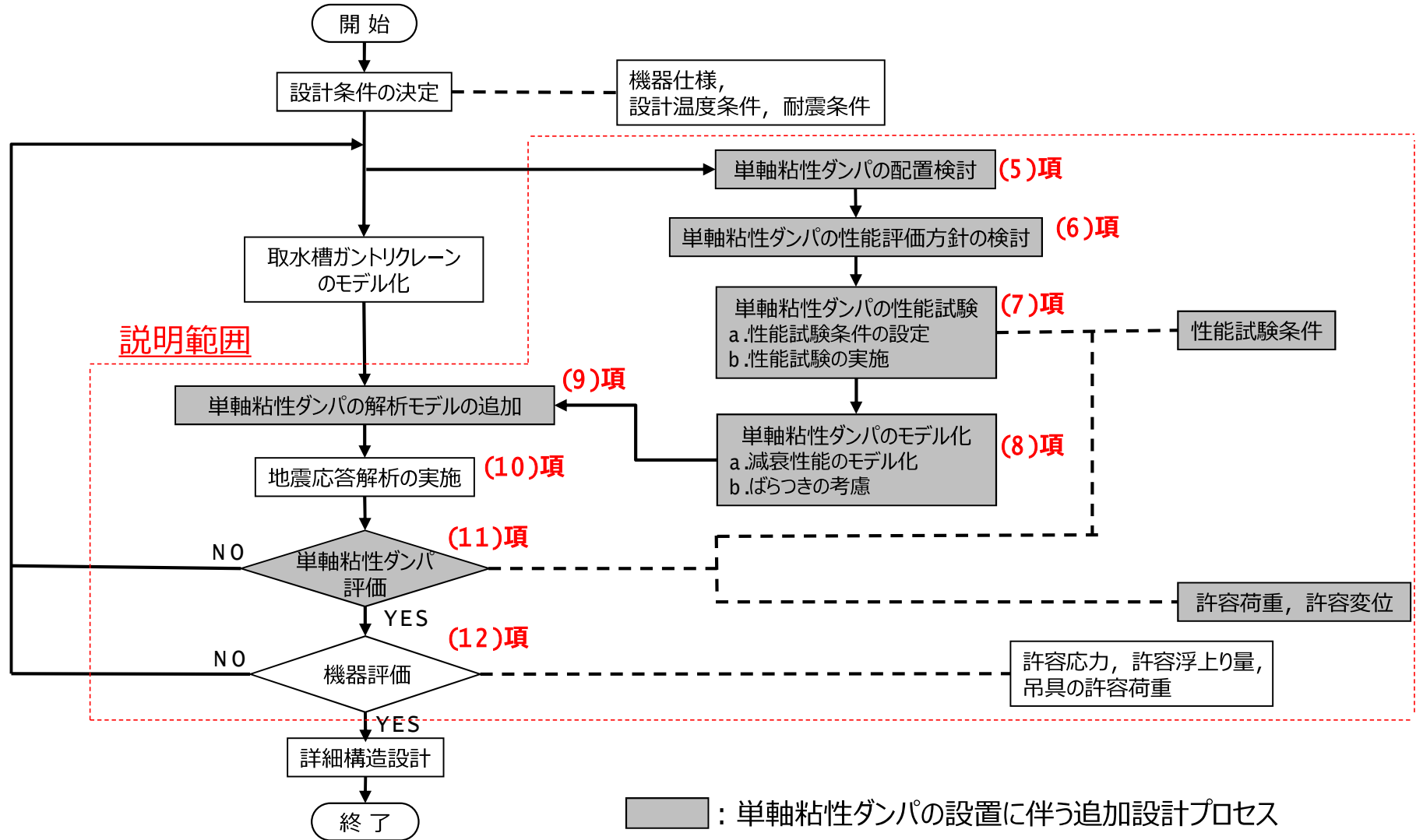
単軸粘性ダンパの仕様

定格荷重 (kN)	全長 (mm)	外径 (mm)	質量 (kg)	許容荷重 (kN)	許容変位 (mm)
220	1535	224	533	300	100

【論点Ⅱ-6】 1. 単軸粘性ダンパの取水槽ガントリクレーンへの設置

(4) 単軸粘性ダンパを設置する取水槽ガントリクレーンの設計方針

- 単軸粘性ダンパの設置に伴う追加設計プロセスについて、以降で説明する。

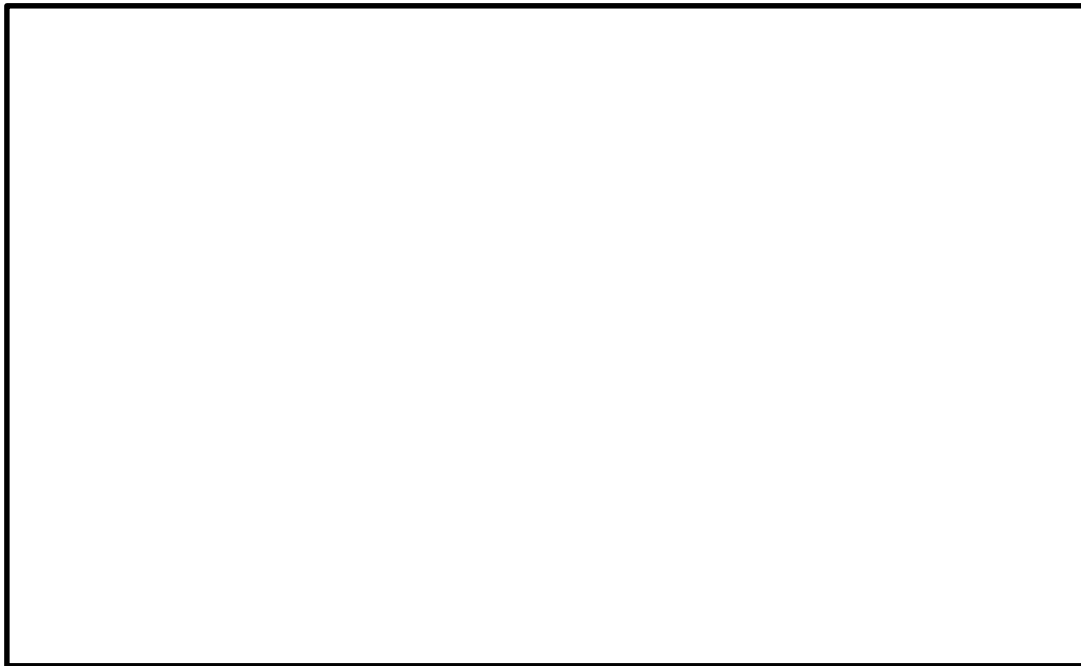


単軸粘性ダンパを設置する取水槽ガントリクレーンの耐震設計フロー

【論点Ⅱ－6】 1. 単軸粘性ダンパの取水槽ガントリクレーンへの設置 (5) 単軸粘性ダンパの配置検討

① 単軸粘性ダンパの設置箇所

- 取水槽ガントリクレーンの構造を考慮して、地震荷重の低減に効果的な単軸粘性ダンパの配置を検討する。
- 単軸粘性ダンパはピストン、ロッドが軸方向に移動することで生じる抵抗力により減衰性能を発揮するため、大きな変位が生じる取水槽ガントリクレーンのガーダと脚の間に設置する。



取水槽ガントリクレーンの構造



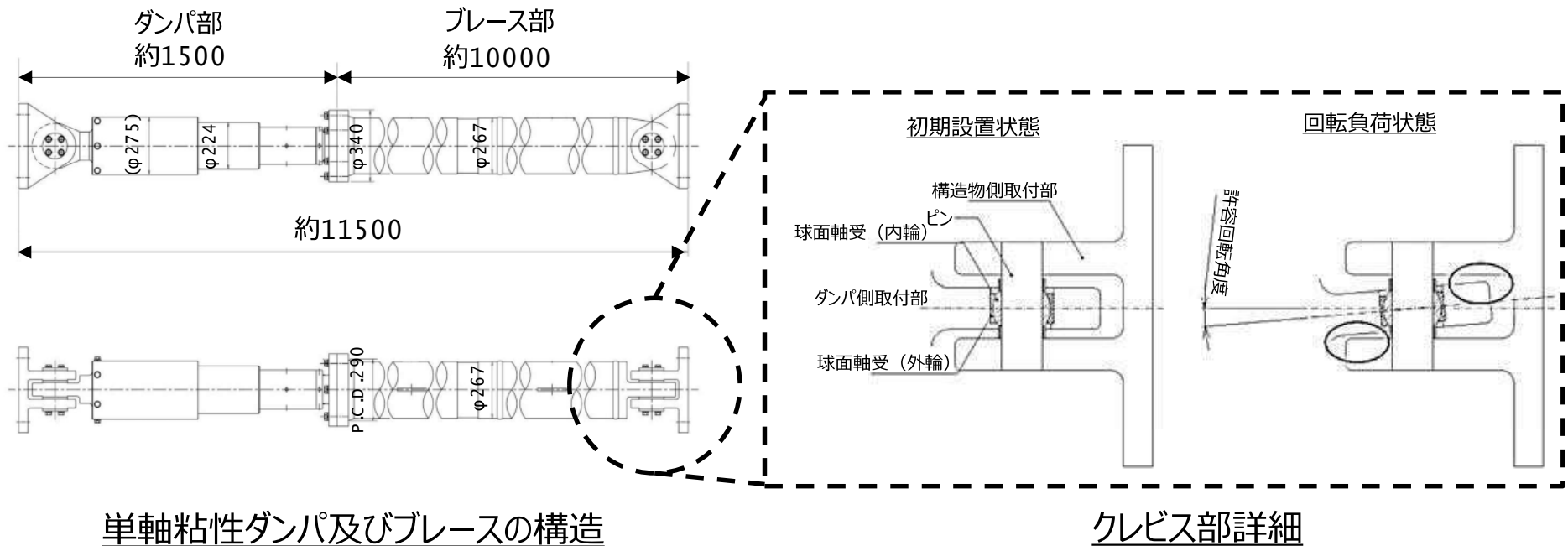
単軸粘性ダンパの外観（橋梁への設置例）

【論点Ⅱ-6】 1. 単軸粘性ダンパの取水槽ガントリクレーンへの設置

(5) 単軸粘性ダンパの配置検討

②単軸粘性ダンパの取付方法

- 単軸粘性ダンパとガーダの接続部，ブレースと脚の接続部にはクレビスと呼ぶ回転部を設けている。
- クレビスはダンパの伸縮方向と直交する一方向には回転可能となっており，回転方向以外にも約3度の許容回転角度を有することで，伸縮方向以外の荷重が加わらない構造としている。



単軸粘性ダンパ及びブレースの構造

クレビス部詳細

単軸粘性ダンパ取付部の構造

【論点Ⅱ-6】 1. 単軸粘性ダンパの取水槽ガントリクレーンへの設置 (6) 単軸粘性ダンパの性能評価方針の検討

- 単軸粘性ダンパの性能試験及びモデル化にあたって、減衰性能への影響の検討を要する項目を「免震構造の審査手引きの提案（平成26年1月）独立行政法人原子力安全基盤機構」を参照して抽出した。
- 減衰性能に影響する項目は、減衰性能を取得するための性能試験条件の設定もしくは地震応答解析においてばらつきとして考慮する。

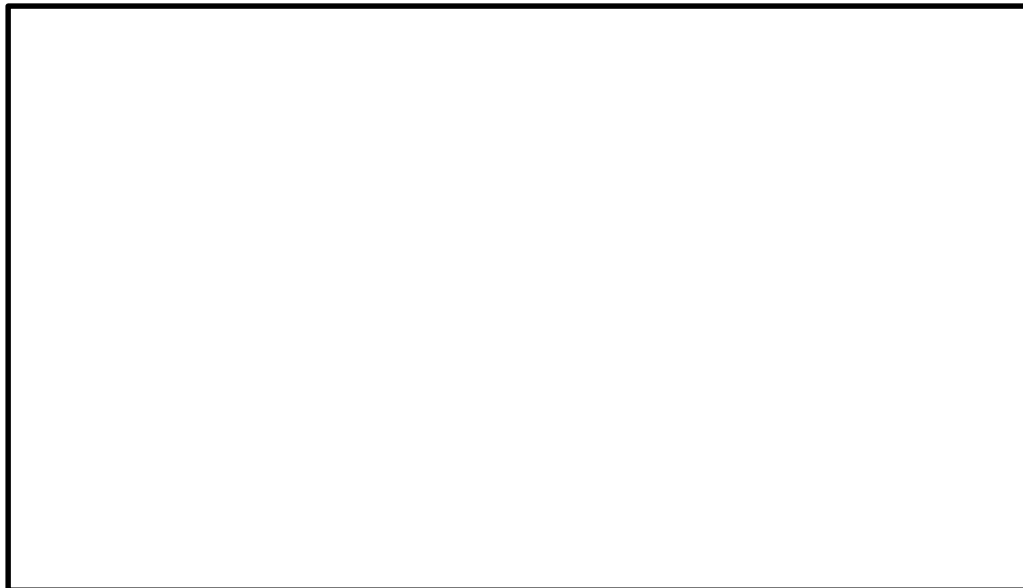
減衰性能への影響の検討結果（単軸粘性ダンパ）

No.	項目	減衰性能への影響	対応方針
1	連続加振	連続加振による減衰性能への影響は十分小さいことを試験により確認している。	—
2	振動数	減衰性能は、加振振動数によって±10%以内の範囲で変動することを試験により確認している。	左記の変動及びばらつき要因を合わせて、±20%の減衰性能のばらつきを考慮する。
3	製造公差	製造公差による減衰性能のばらつきは±10%以内で管理する。	

【論点Ⅱ－6】 1. 単軸粘性ダンパの取水槽ガントリクレーンへの設置

(7) 単軸粘性ダンパの性能試験 (a.性能試験条件の設定)

- 三軸粘性ダンパの実機使用条件を踏まえ、性能試験条件を設定する。
- 性能試験条件として、加振振動数による変動は小さいことを踏まえ、単軸粘性ダンパの許容変位100mmの中で実機使用条件を含む幅広い試験速度 (0.1～0.8m/s) を設定する。



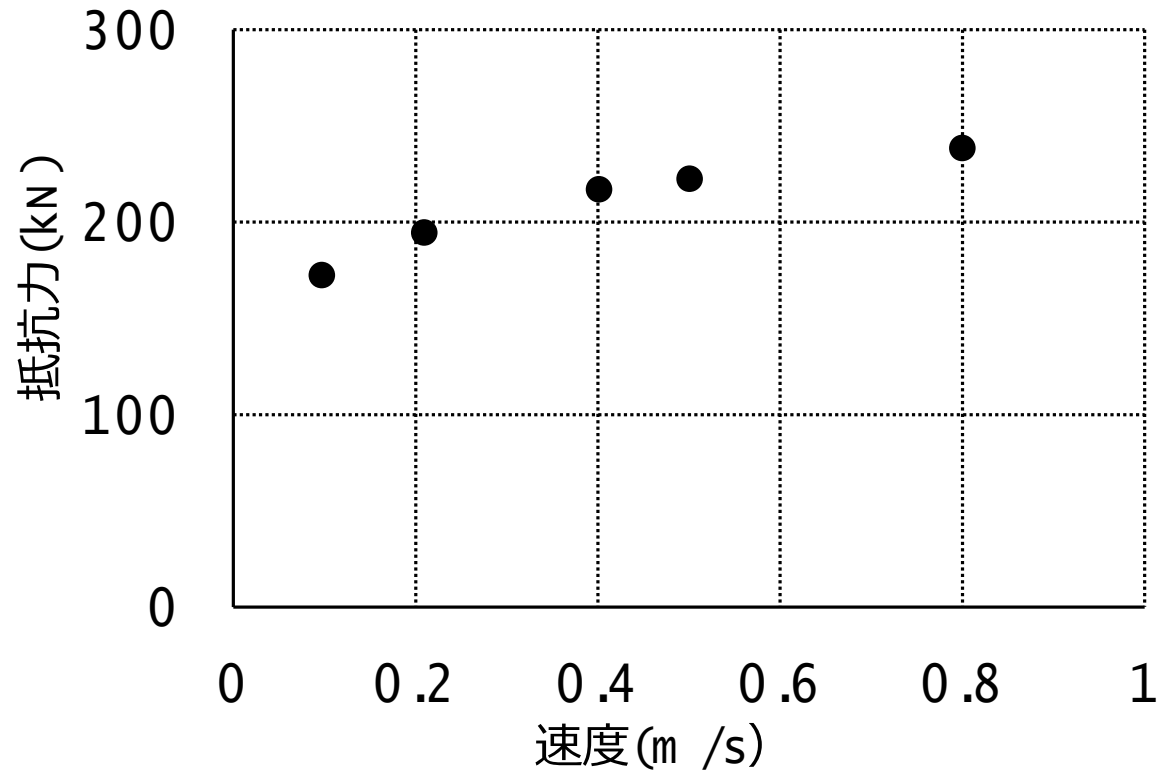
単軸粘性ダンパの性能試験装置の構成

単軸粘性ダンパの性能試験条件

No.	振動数(Hz)	速度(m/s)
1	1.6	0.1
2		0.2
3		0.4
4		0.5
5		0.8

【論点Ⅱ－6】 1. 単軸粘性ダンパの取水槽ガントリクレーンへの設置
(7) 単軸粘性ダンパの性能試験 (b.性能試験の実施)

- 設定した性能試験条件により，実機に設置する単軸粘性ダンパについて，減衰性能を取得した。
- 単軸粘性ダンパは抵抗力が速度の0.1乗に比例するように設計されており，非線形の挙動を示すことから，その減衰性能は抵抗力と速度の関係で把握する。

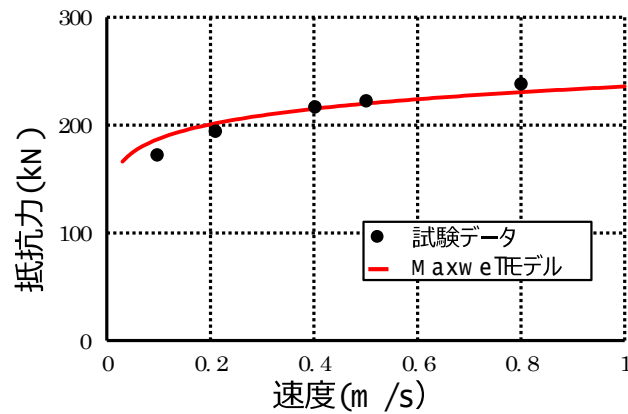


性能試験結果

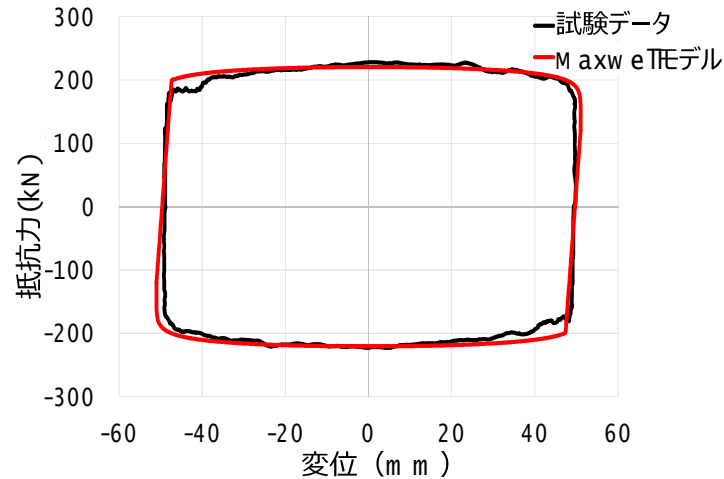
【論点Ⅱ-6】 1. 単軸粘性ダンパの取水槽ガントリクレーンへの設置

(8) 単軸粘性ダンパのモデル化 (a. 減衰性能のモデル化)

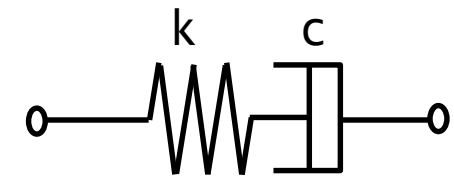
- 性能試験の結果に基づき、単軸粘性ダンパの減衰性能をMaxwellモデルでモデル化する。
- 単軸粘性ダンパの減衰性能は、加振速度の変化に対して抵抗力の変化が小さく、振動数依存性も比較的小さいことから、速度の0.1乗に比例するダッシュポットを組み込んだMaxwellモデルを用いる。
- 速度と抵抗力の関係及び履歴曲線で囲まれる面積に相当する散逸エネルギーのいずれに関しても、Maxwellモデルにより減衰性能を精度よく表現できる。



速度と抵抗力の関係



速度0.5m/sにおける
正弦波1周期分の履歴曲線



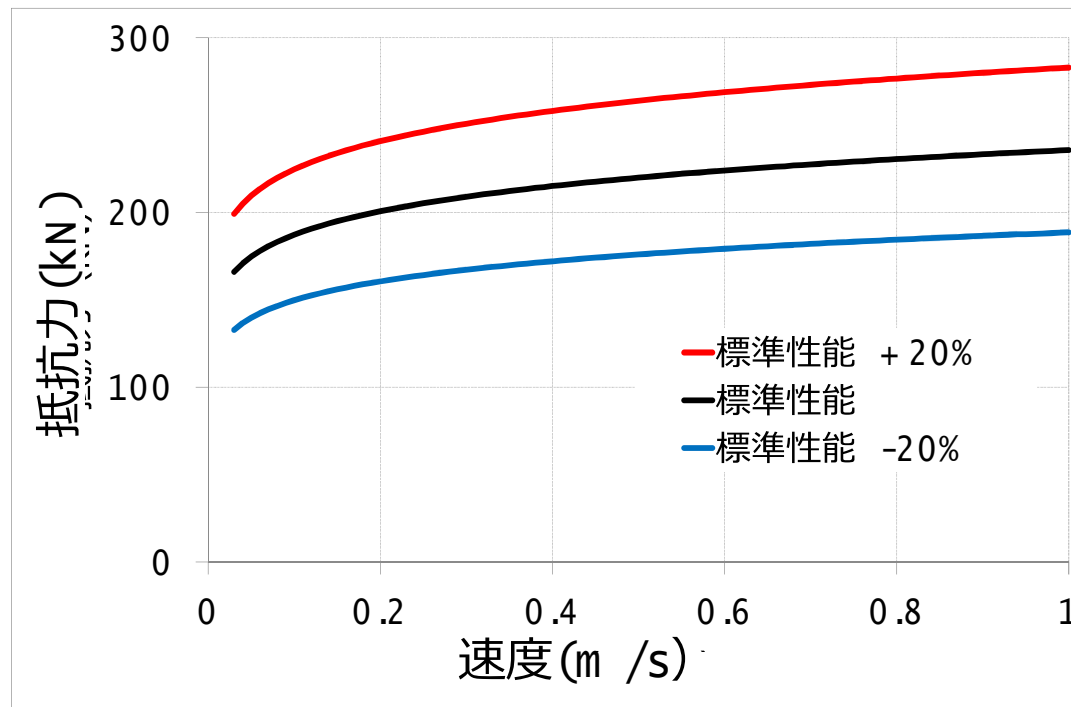
k :ばね剛性
c :速度の0.1乗に比例する
ダッシュポットの減衰係数

単軸粘性ダンパの
Maxwellモデル

Maxwellモデルによる計算値と性能試験結果の比較 (加振振動数1.6Hz)

【論点Ⅱ-6】 1. 単軸粘性ダンパの取水槽ガントリクレーンへの設置 (8) 単軸粘性ダンパのモデル化 (b.ばらつきの考慮)

- 性能試験結果に基づいてモデル化した単軸粘性ダンパの減衰性能に対して、 $\pm 20\%$ のばらつき（振動数 $\pm 10\%$ 、製造公差 $\pm 10\%$ ）を考慮して、標準性能 $+20\%$ 、標準性能、標準性能 -20% の3段階の減衰性能を設定する。
- 標準性能 $+20\%$ の減衰性能を設定する理由は、単軸粘性ダンパの取付部材の設計においては減衰性能が高く抵抗力が大きい場合の荷重を適用するためである。

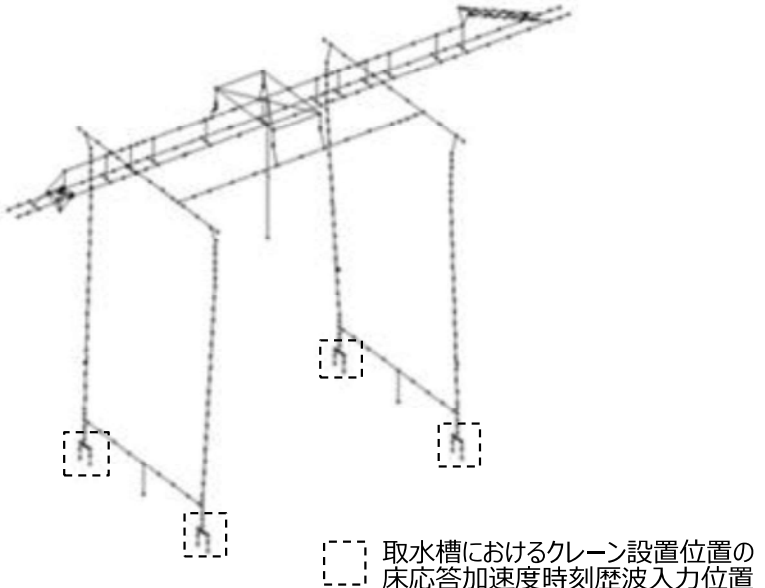


地震応答解析モデルにおける段階的な減衰性能の設定

【論点Ⅱ-6】 1. 単軸粘性ダンパの取水槽ガントリクレーンへの設置

(9) 単軸粘性ダンパの解析モデルの追加

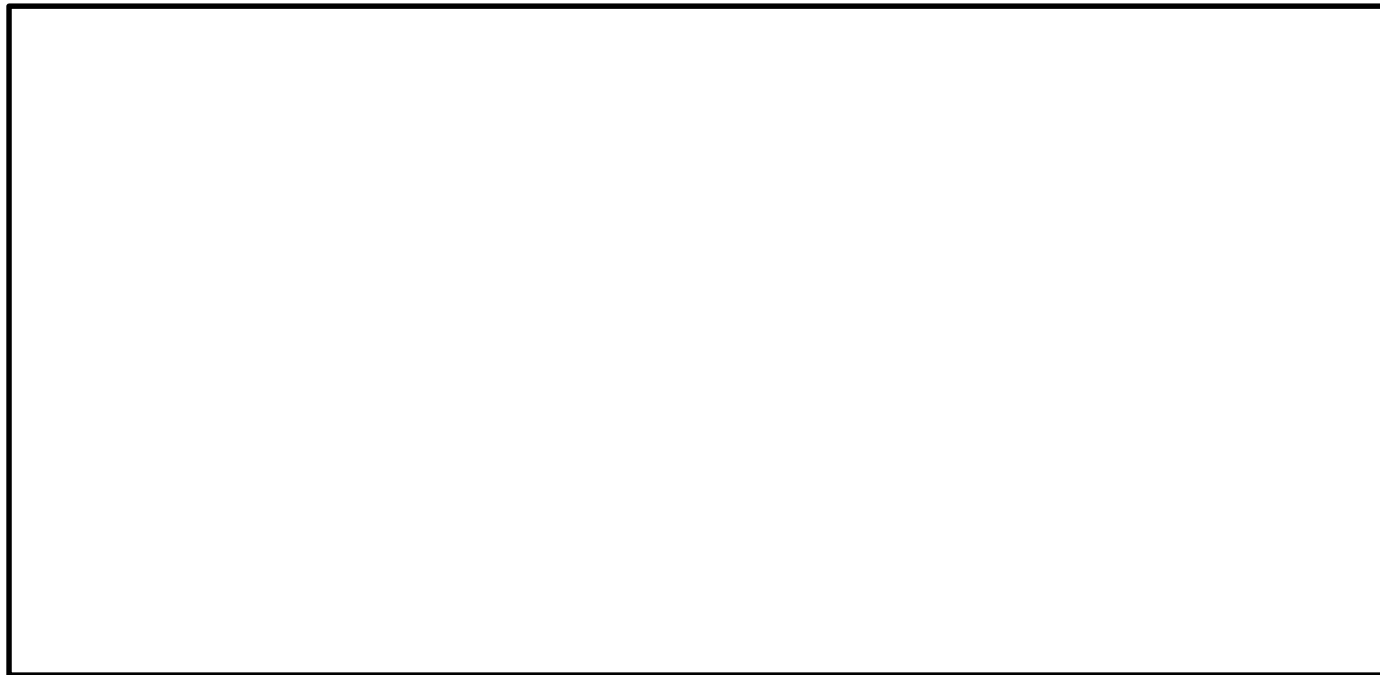
- 取水槽ガントリクレーン本体について構成する主要部材を質点及びはり要素でモデル化し，車輪部のすべり及び浮上り等の非線形挙動をギャップ要素，ばね要素及び減衰要素でモデル化する。
- 単軸粘性ダンパをモデル化したMaxwellモデルを取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデルに追加する。
- 単軸粘性ダンパ設置前の地震応答解析モデルに制震装置を適切にモデル化して追加するという考え方は，既工認実績のある排気筒のモデル化の考え方と同様である。

設置前	設置後
 <p>--- 取水槽におけるクレーン設置位置の床応答加速度時刻歴波入力位置</p>	

単軸粘性ダンパ設置前後の比較

【論点Ⅱ－6】 1. 単軸粘性ダンパの取水槽ガントリクレーンへの設置 (10) 地震応答解析の実施

- 取水槽ガントリクレーンは地震時に浮上りの可能性があるため、非線形時刻歴応答解析を適用する。
(論点Ⅱ－10)
- 3段階の減衰性能に対応した地震応答解析を行い、これらの最大応答を用いて耐震評価を行う。
- 取水槽ガントリクレーンの減衰定数については、既往の研究等によって妥当性が確認され、クレーン類に適用実績のある値として、水平2.0%、鉛直2.0%を適用する。
- 取水槽ガントリクレーンは時刻歴応答解析を採用することから、地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動の影響を考慮し、機器評価への影響が大きい地震動に対し、ASME Boiler and Pressure Vesselに規定された手法等により検討を行う。



取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデル

【論点Ⅱ－6】 1. 単軸粘性ダンパの取水槽ガントリクレーンへの設置

(11) 単軸粘性ダンパ評価

- 単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの地震応答解析によって得られた応答値が、単軸粘性ダンパの減衰性能を取得した性能試験の試験条件の範囲内であることを確認する。
- 単軸粘性ダンパが許容限界を満足し、地震時にその機能を維持する設計とするため、許容荷重及び許容変位を満たすように設計する。

単軸粘性ダンパの許容変位及び許容荷重

許容荷重 (kN)	許容変位 (mm)
300	100

【論点Ⅱ－6】 1. 単軸粘性ダンパの取水槽ガントリクレーンへの設置

(12) 機器評価

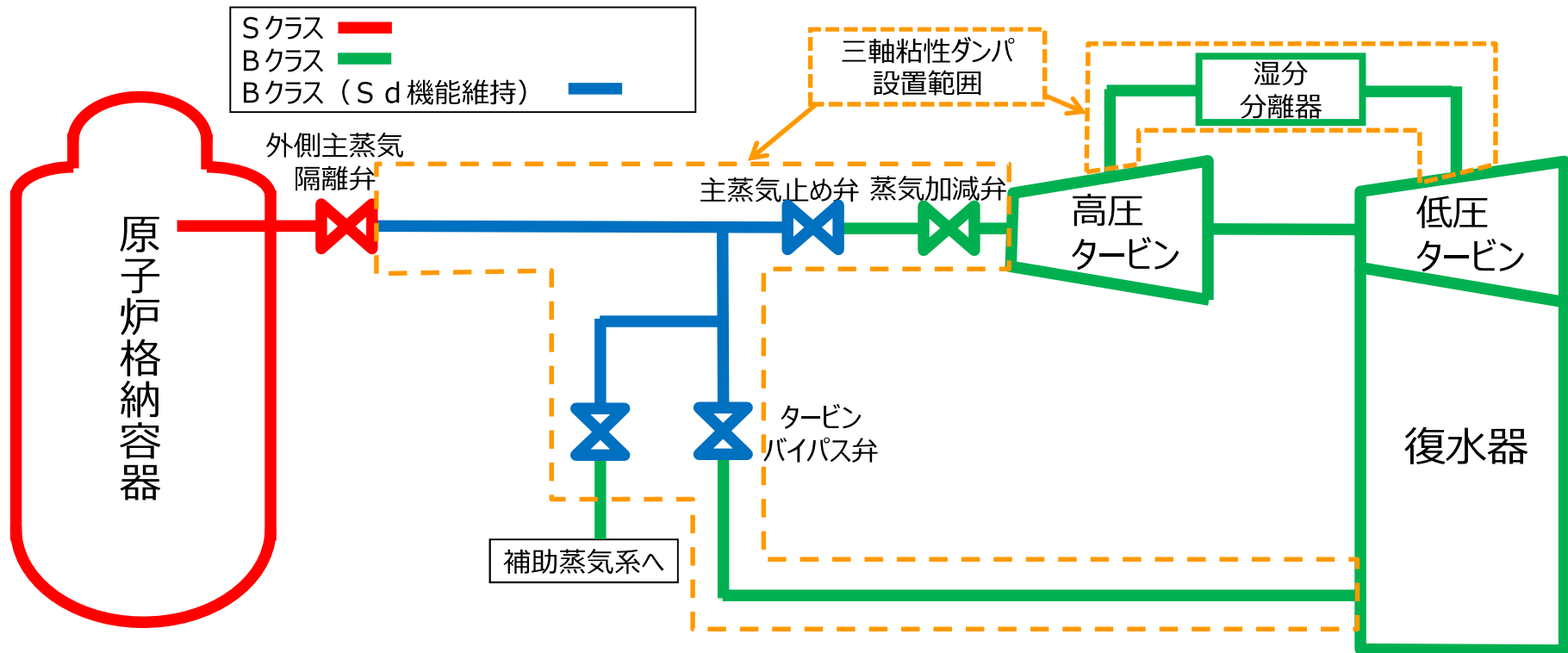
- 機器評価の応力評価等における許容限界は、J E A G 4 6 0 1 等に基づき設定することを基本とする。

機器評価における評価方法及び許容限界

評価方針	設計地震力	部位	評価方法	許容限界
上位クラス施設へ波及的影響を及ぼさないこと	基準地震動 S_s による地震力	クレーン本体	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。	許容応力状態Ⅳ A S の許容応力
		転倒防止装置	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。	許容応力状態Ⅳ A S の許容応力
		レール	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。	許容応力状態Ⅳ A S の許容応力
		トロリ	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。	許容応力状態Ⅳ A S の許容応力
			浮上り量が許容値を超えないことを確認する。	トロリストッパ高さに基づく許容浮上り量
		吊具	吊具の許容荷重を超えないことを確認する。	吊具の許容荷重
		ブレース	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。	許容応力状態Ⅳ A S の許容応力
		単軸粘性ダンパ	単軸粘性ダンパの荷重及び変位が許容限界を超えないことを確認する。	許容荷重及び許容変位

【論点Ⅱ-6】 2. 三軸粘性ダンパの配管系への設置 (1) 主蒸気系配管に係る要求事項

- 三軸粘性ダンパは外側主蒸気隔離弁から低圧タービン，復水器までの主蒸気系配管に設置する。
- 主蒸気系配管の耐震重要度分類はBクラスであり，外側主蒸気隔離弁から主蒸気止め弁までの範囲はS d 機能維持設計とする。



三軸粘性ダンパの設置範囲及び耐震クラス

【論点Ⅱ-6】 2. 三軸粘性ダンパの配管系への設置

(2) 主蒸気系配管の構造概要

- 主蒸気系配管は、大口径配管（主流路は600A～1600A程度）であり地震荷重が大きく、運転時には高温になるため、熱膨張の変位を拘束せずに地震荷重を低減する対策が有効である。
- 配管系の応答は、複数の振動モードの重ね合わせであり、応答の方向も部位により異なるため、配管系の耐震評価においては、3方向の影響を考慮する必要がある。
- 熱膨張の変位を拘束せず、配管系の応答に対応した3方向に減衰性能を発揮する三軸粘性ダンパを、主蒸気系配管に設置する（添付資料2）。



主蒸気ヘッド周辺 (600A)



高圧タービン下部 (1050A)

三軸粘性ダンパ設置範囲の主蒸気系配管（代表箇所）

【論点Ⅱ-6】 2. 三軸粘性ダンパの配管系への設置

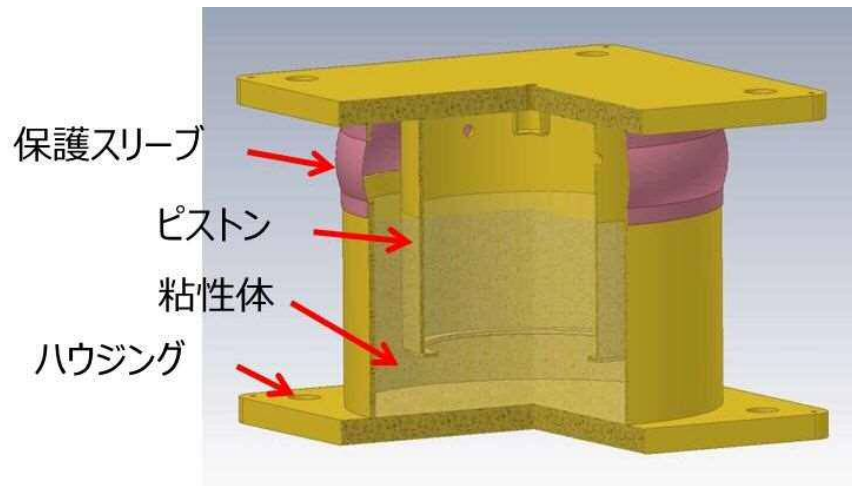
(3) 三軸粘性ダンパの構造概要

①三軸粘性ダンパの構造

- 三軸粘性ダンパは、主にピストン、ハウジング及び粘性体から構成されており、粘性体への異物等の混入防止のために保護スリーブが取り付けられている。

三軸粘性ダンパの仕様

型式	外径 (mm)	高さ (mm)	質量 (kg)	許容荷重 (kN)		許容変位 (mm)	
				水平	鉛直	水平	鉛直
中型	325	343	111	68	27		
大型	630	586	691	350	140		



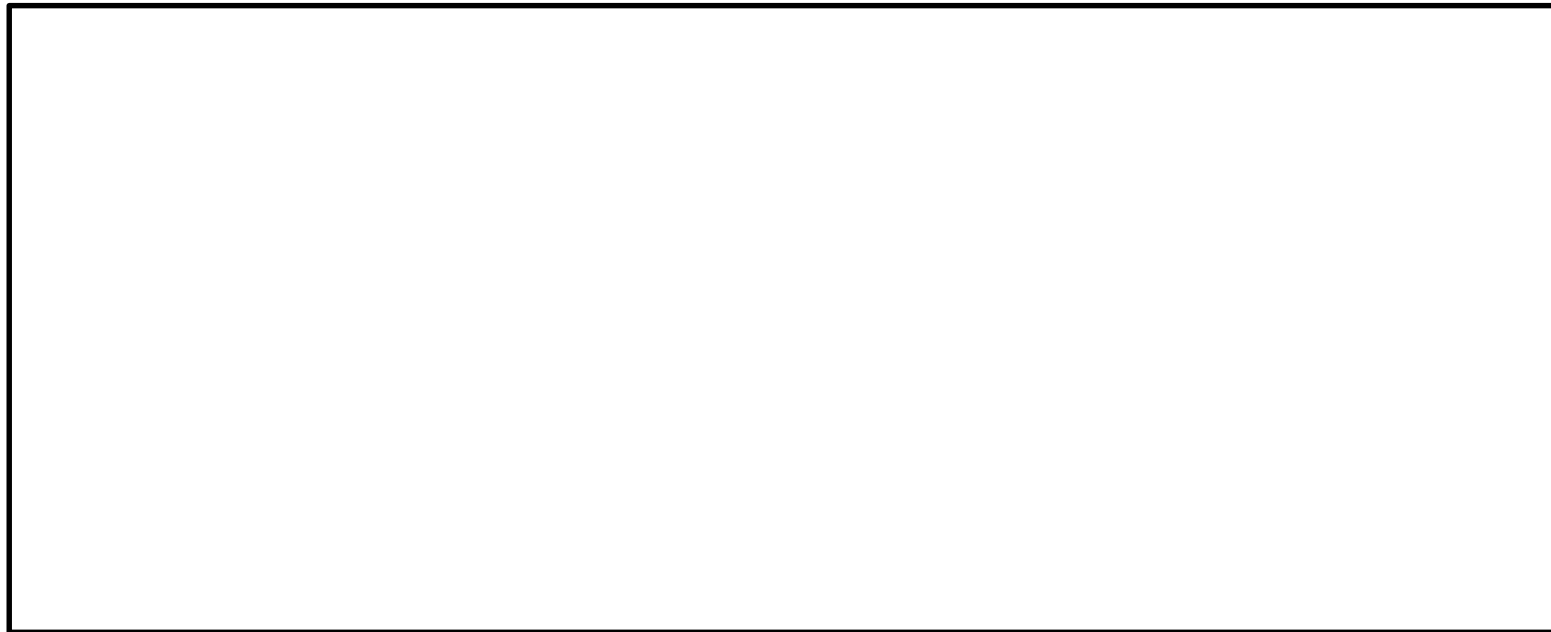
三軸粘性ダンパの外観及び構造

【論点Ⅱ－6】 2. 三軸粘性ダンパの配管系への設置

(3) 三軸粘性ダンパの構造概要

②三軸粘性ダンパの動作機構

- 三軸粘性ダンパは、粘性体とピストンの間に相対運動が生じることで、相対運動の方向と逆向きに流動抵抗による減衰性能を発揮する。
- 回転対称構造であることから、水平方向については減衰性能の違いはないが、鉛直方向については動作機構が異なるため、水平方向と鉛直方向では減衰性能が異なる。
- 三軸粘性ダンパは自重等の静的荷重は支持せず、熱膨張のような低速度の運動を拘束しない。

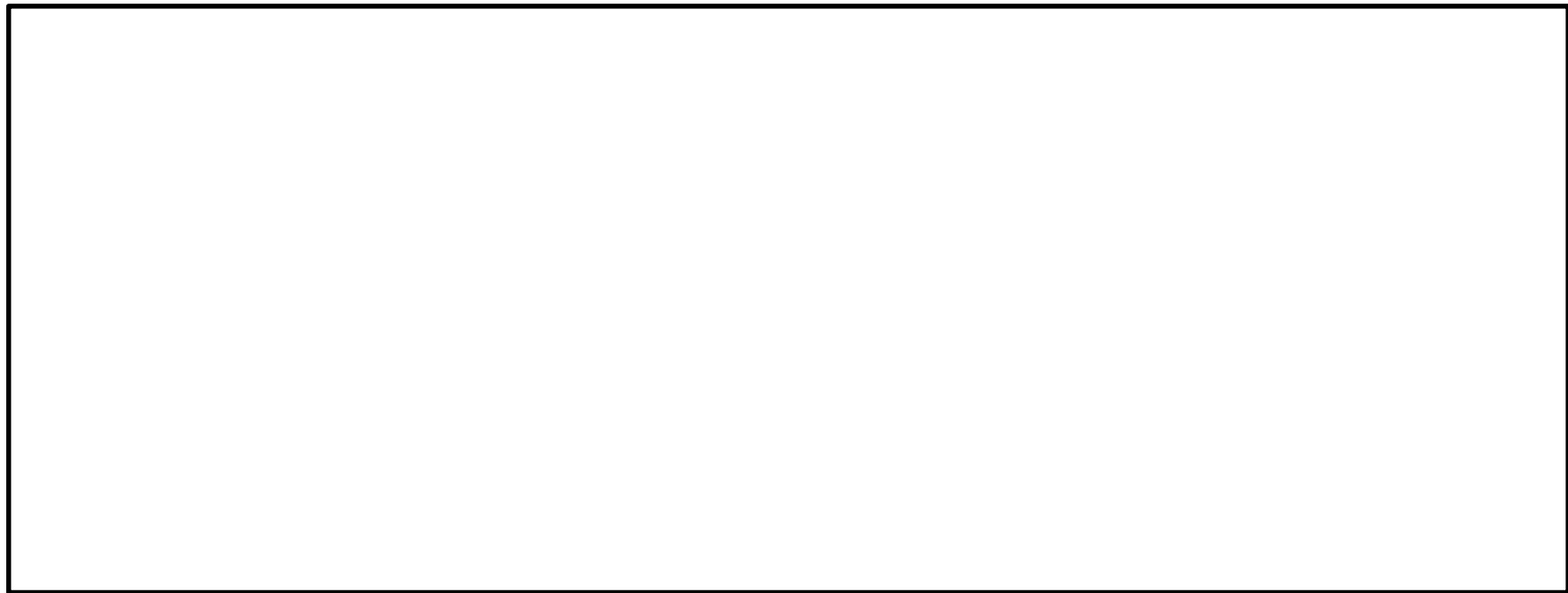


三軸粘性ダンパの動作機構

【論点Ⅱ－6】 2. 三軸粘性ダンパの配管系への設置

(4) 三軸粘性ダンパの適用性

- 三軸粘性ダンパは、原子力発電所に用いることができる制震装置としてASME Boiler and Pressure Vessel Code に記載されており、海外の原子力発電所において振動対策及び地震対策として設置実績がある（添付資料3）。
- 三軸粘性ダンパを配管系に設置した場合の有効性を確認するため、配管系を対象とした加振試験を実施し、地震応答の低減に有効であることを確認した（添付資料4）。

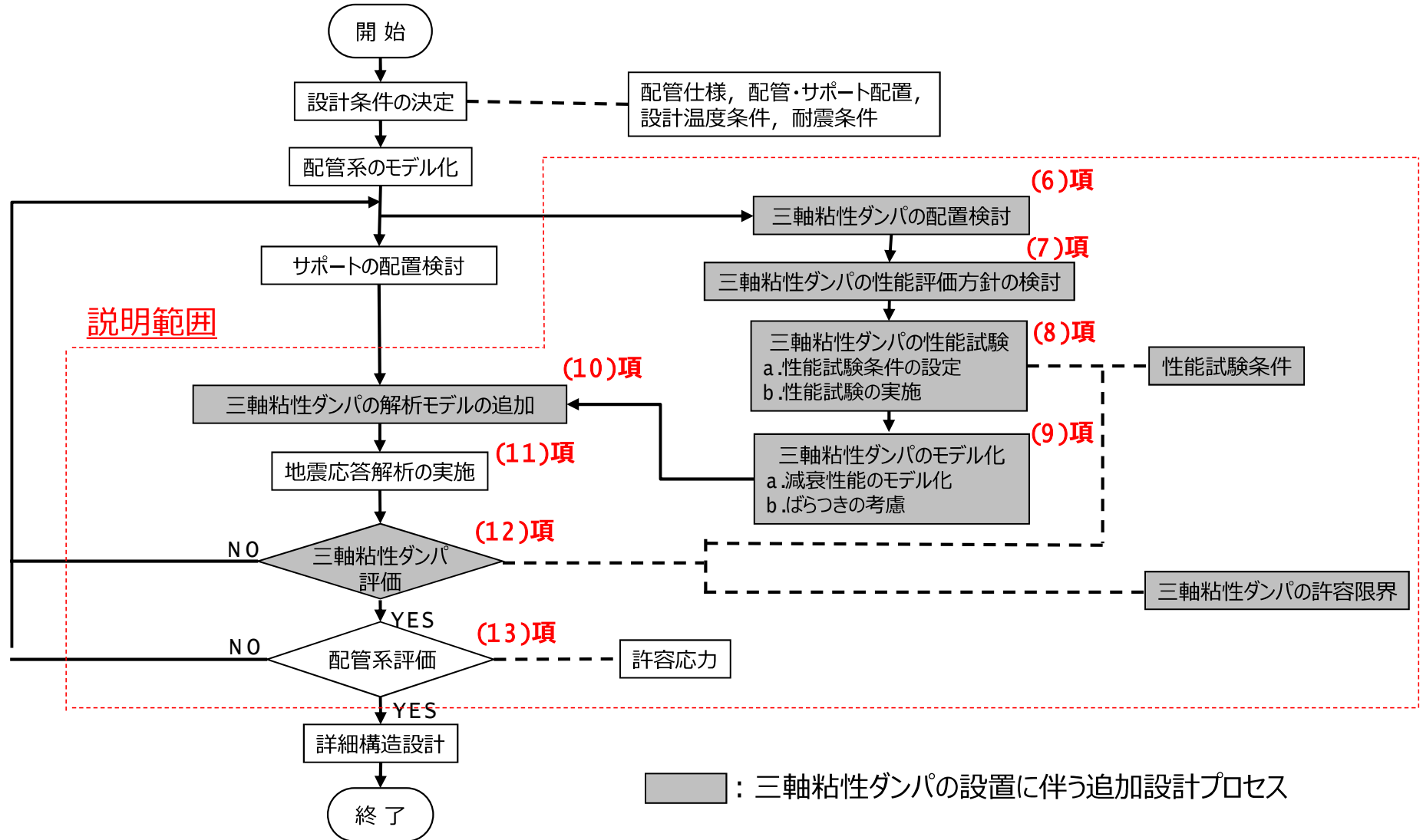


海外原子力発電所における三軸粘性ダンパの設置例

【論点Ⅱ-6】 2. 三軸粘性ダンパの配管系への設置

(5) 三軸粘性ダンパを設置する配管系の設計方針

- 三軸粘性ダンパの設置に伴う追加設計プロセスについて、以降で説明する。

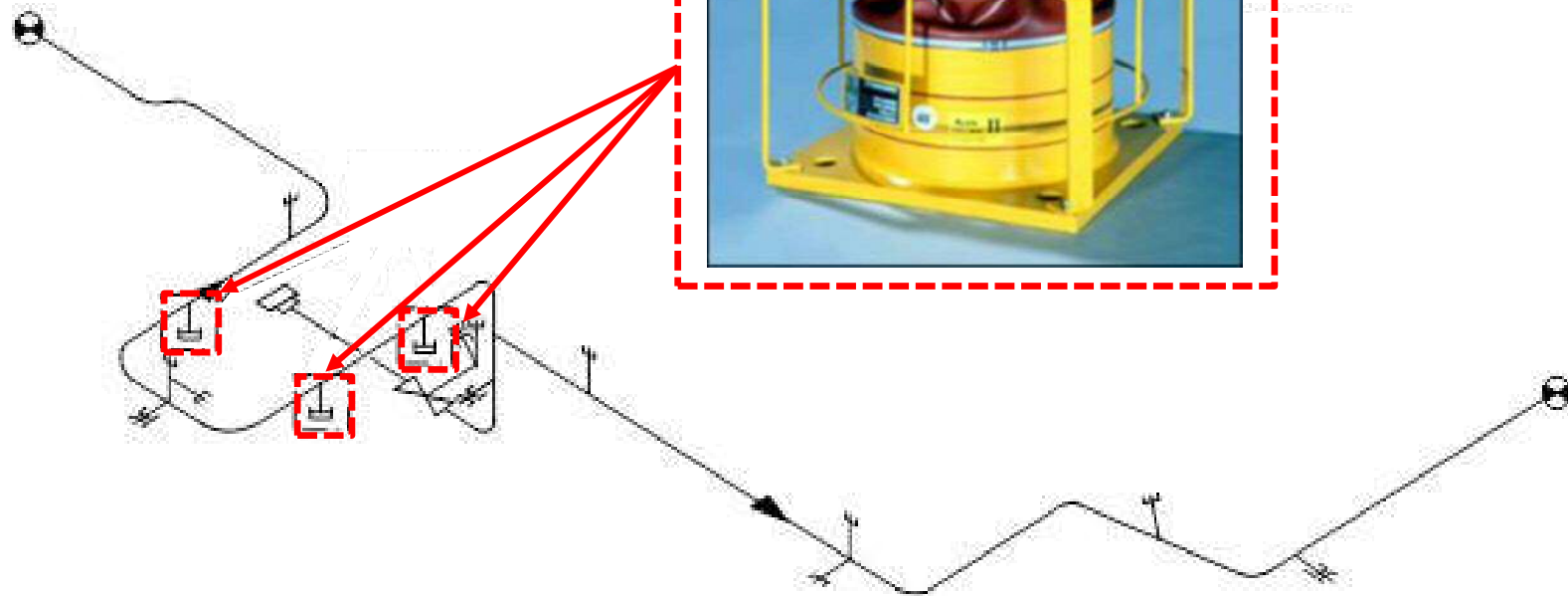


三軸粘性ダンパを設置する配管系の耐震設計フロー

【論点Ⅱ-6】 2. 三軸粘性ダンパの配管系への設置 (6) 三軸粘性ダンパの配置検討

- 配管系の地震荷重の低減に効果的な三軸粘性ダンパの配置を検討する。
- 三軸粘性ダンパは粘性体とピストンの間に相対運動が生じることで減衰性能を発揮するため、配管系の変位が大きくなる箇所に設置する。

三軸粘性ダンパの外観



主蒸気系配管における三軸粘性ダンパの配置イメージ

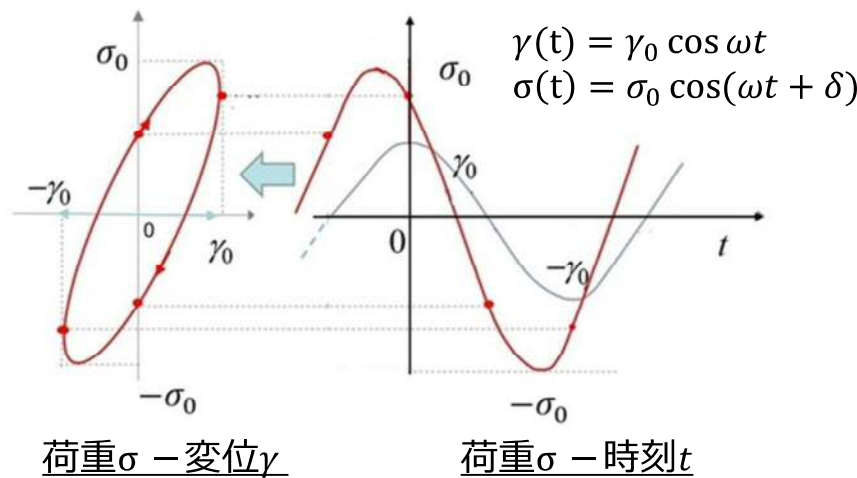
【論点Ⅱ-6】 2. 三軸粘性ダンパの配管系への設置

(7) 三軸粘性ダンパの性能評価方針の検討

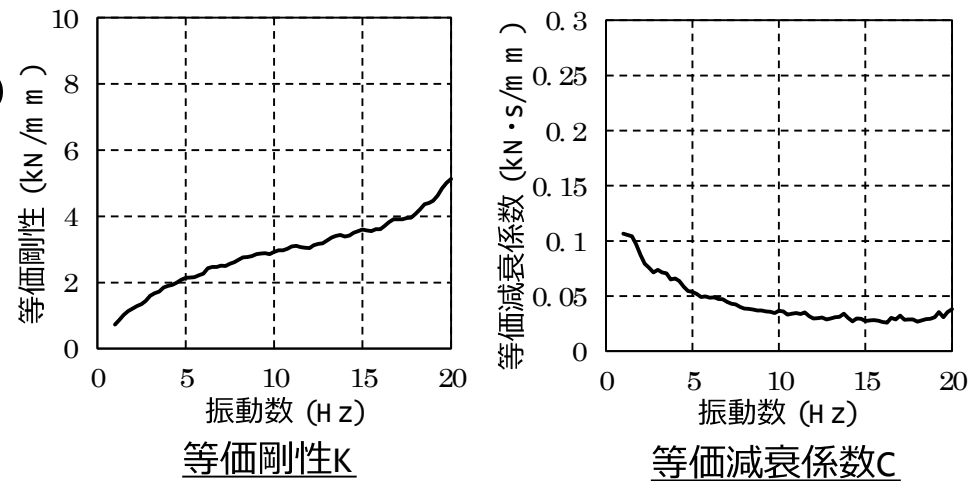
①三軸粘性ダンパの減衰性能

- 三軸粘性ダンパに使用される粘性体は粘弾性を有しており、その減衰性能は等価剛性 K 及び等価減衰係数 C により表現できる。
- 等価剛性 K は最大変位 γ_0 と最大荷重 σ_0 の比 σ_0/γ_0 で表され、粘弾性体の剛性を定量的に定義する一般的なパラメータである。
- 等価減衰係数 C は、粘弾性体を散逸エネルギーが等しい速度比例型ダッシュポットに置き換えた場合の減衰係数として定義される。なお、散逸エネルギーは荷重 σ - 変位 γ の履歴曲線で囲まれる面積に相当する。
- 三軸粘性ダンパの等価剛性 K 及び等価減衰係数 C は、振動数依存性を有している。

γ_0 : 変位の振幅 ω : 変位の角振動数
 σ_0 : 荷重の振幅 δ : 位相角 (変位及び荷重の位相差)



典型的な粘弾性体の荷重 - 変位特性



等価剛性 K 及び等価減衰係数 C の例

【論点Ⅱ－6】 2. 三軸粘性ダンパの配管系への設置

(7) 三軸粘性ダンパの性能評価方針の検討

②三軸粘性ダンパの減衰性能への影響の検討

- 三軸粘性ダンパの性能試験及びモデル化にあたって、減衰性能への影響の検討を要する項目を「免震構造の審査手引きの提案（平成26年1月）独立行政法人原子力安全基盤機構」を参照して抽出した。
- 減衰性能に影響する項目は、減衰性能を取得するための性能試験条件の設定もしくは地震応答解析においてばらつきとして考慮する。

減衰性能への影響の検討結果（三軸粘性ダンパ）

No.	項目	減衰性能への影響	対応方針
1	水平・鉛直同時加振	地震時に三軸粘性ダンパは3方向同時加振されることから、水平方向及び鉛直方向の同時加振と1方向加振との減衰性能に差異がないことを試験により確認している。	—
2	放射線	放射線による減衰性能への影響が十分小さいことを試験により確認している。	—
3	温度	粘性体は高温になるほど粘度が低下する性質があることから、粘性体の温度によって三軸粘性ダンパの減衰性能が変動することを試験により確認している。	減衰性能を取得する性能試験条件の設定において考慮する。
4	振幅	減衰性能は加振振幅が大きいほど低下することを試験により確認している。	
5	連続加振	減衰性能は連続加振により累積消費エネルギーが増大すると低下することを試験により確認している。	
6	製造公差	製造公差による減衰性能のばらつきは±10%以内で管理する。	左記のばらつき要因を合わせて±30%の減衰性能のばらつきを考慮する。
7	据付公差	据付公差による減衰性能のばらつきは±20%以内で管理する。	

【論点Ⅱ－6】 2. 三軸粘性ダンパの配管系への設置

(8) 三軸粘性ダンパの性能試験 (a.性能試験条件の設定)

- 三軸粘性ダンパの実機使用条件を踏まえ、性能試験条件を設定する。
- 三軸粘性ダンパの減衰性能は、変動及びばらつきを包絡するように上限と下限を設定する。上限及び下限を設定する理由は、減衰性能が低いほど配管系の応答は大きくなる傾向であるが、三軸粘性ダンパを支持する構造物の設計においては上限の減衰性能に基づく最大荷重を適用するためである。
- 温度、振幅及び連続加振による変動を踏まえた性能試験条件により、高側ダンパ試験性能 (K_{High} , C_{High}) と、低側ダンパ試験性能 (K_{Low} , C_{Low}) を性能試験で取得する (添付資料5)。
- 三軸粘性ダンパは水平方向と鉛直方向では減衰性能が異なるため、各方向で性能試験を実施する。

三軸粘性ダンパの性能試験条件の設定

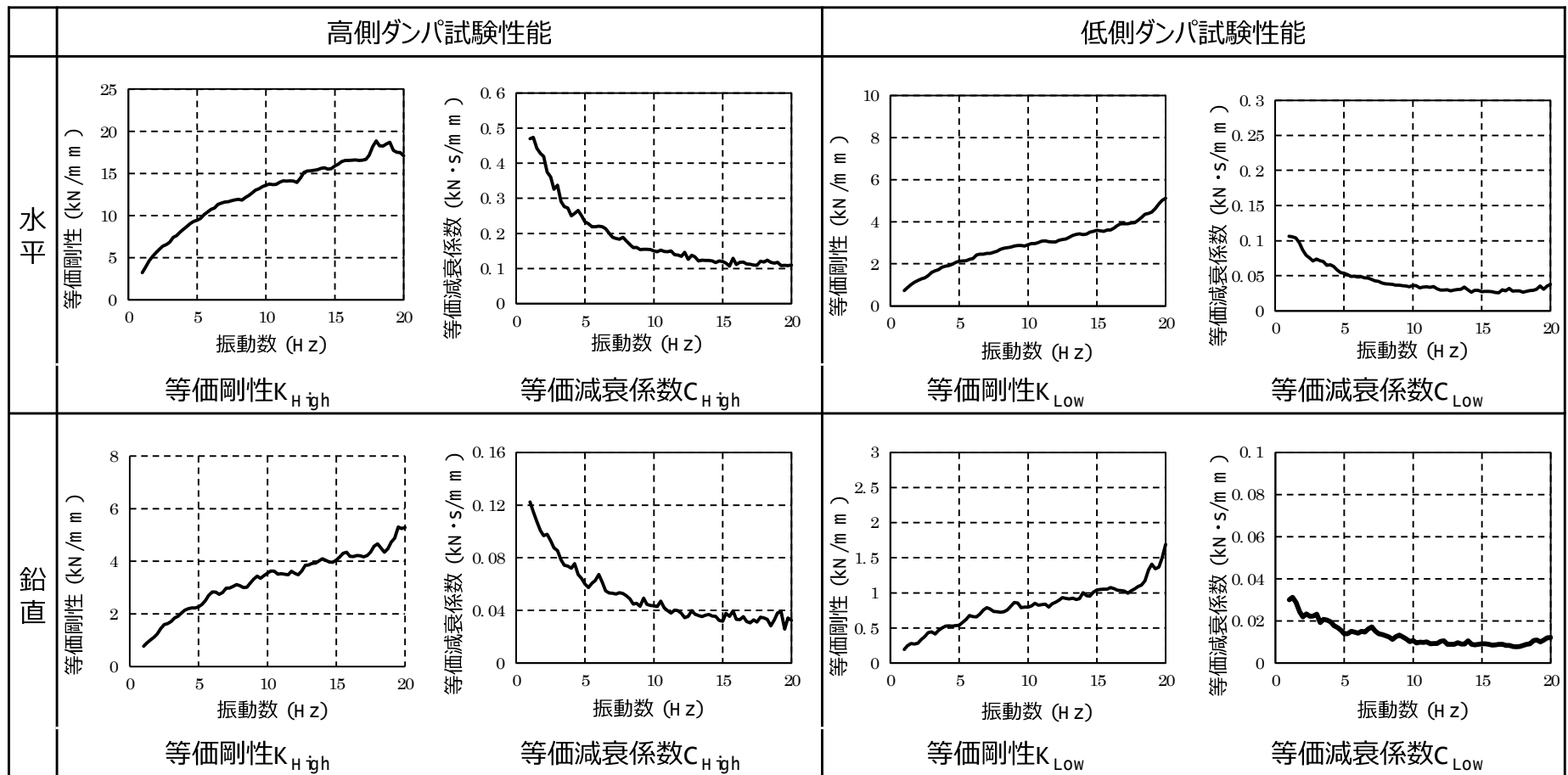
取得性能	試験条件設定の考え方	性能試験条件		
		温度	加振振幅	累積消費エネルギー
高側ダンパ試験性能 (K_{High} , C_{High})	実機使用条件より減衰性能を高く取得するため、室温、微小加振振幅、微小累積消費エネルギーとする。	常温	小	小
低側ダンパ試験性能 (K_{Low} , C_{Low})	実機使用条件より減衰性能を低く取得するため、実機使用で想定される最高温度、最大加振振幅、最大累積消費エネルギーとする。	高温※1	大※1	大※1

※1：実機使用条件を想定して設定する

【論点Ⅱ-6】 2. 三軸粘性ダンパの配管系への設置

(8) 三軸粘性ダンパの性能試験 (b.性能試験の実施)

- 設定した性能試験条件により、実機に設置する各型式の三軸粘性ダンパについて、水平方向及び鉛直方向でそれぞれ高側及び低側ダンパ試験性能を取得した。



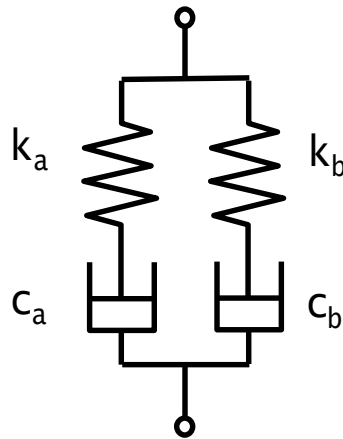
高側及び低側ダンパ性能試験結果 (中型の例)

【論点Ⅱ-6】 2. 三軸粘性ダンパの配管系への設置

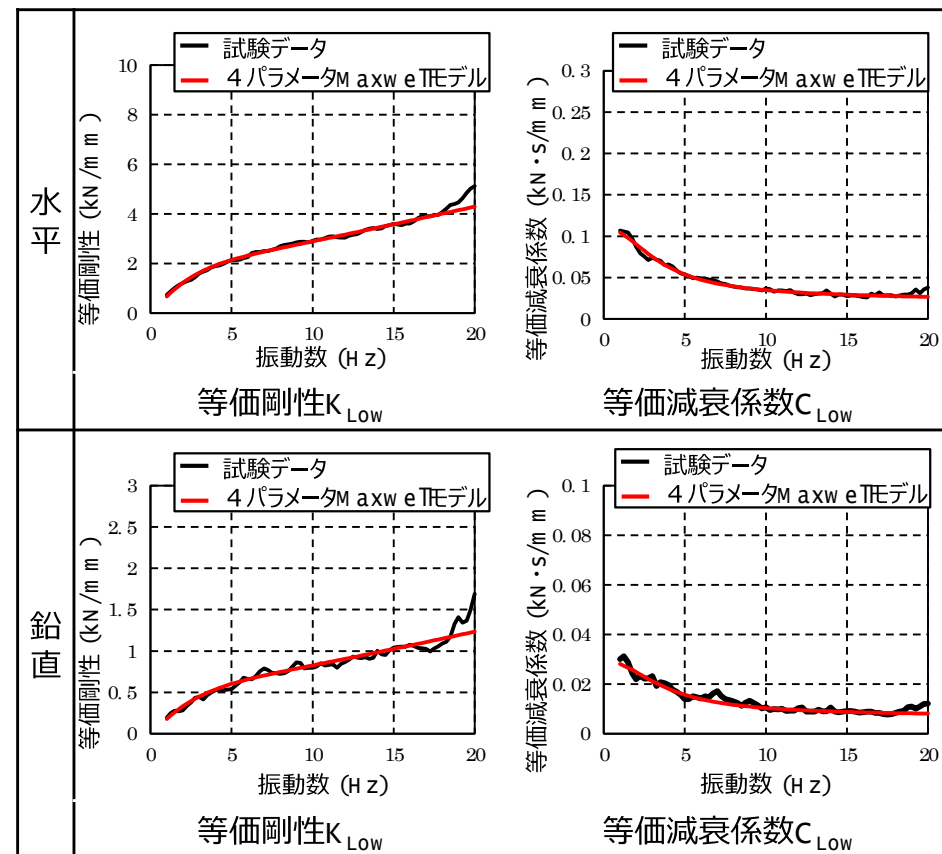
(9) 三軸粘性ダンパのモデル化 (a. 減衰性能のモデル化)

- 性能試験の結果に基づき、三軸粘性ダンパの減衰性能を振動数依存性を精度良くモデル化できる4パラメータ Maxwell 型モデルでモデル化する。
- 三軸粘性ダンパの減衰性能は、水平方向及び鉛直方向でそれぞれ高側及び低側ダンパ試験性能を取得するため、4パラメータ Maxwell 型モデルも同様に各方向に対して高側及び低側を設定する。

k_a, k_b :ばね剛性
 c_a, c_b :ダッシュポットの減衰係数



三軸粘性ダンパの4パラメータ Maxwell 型モデル



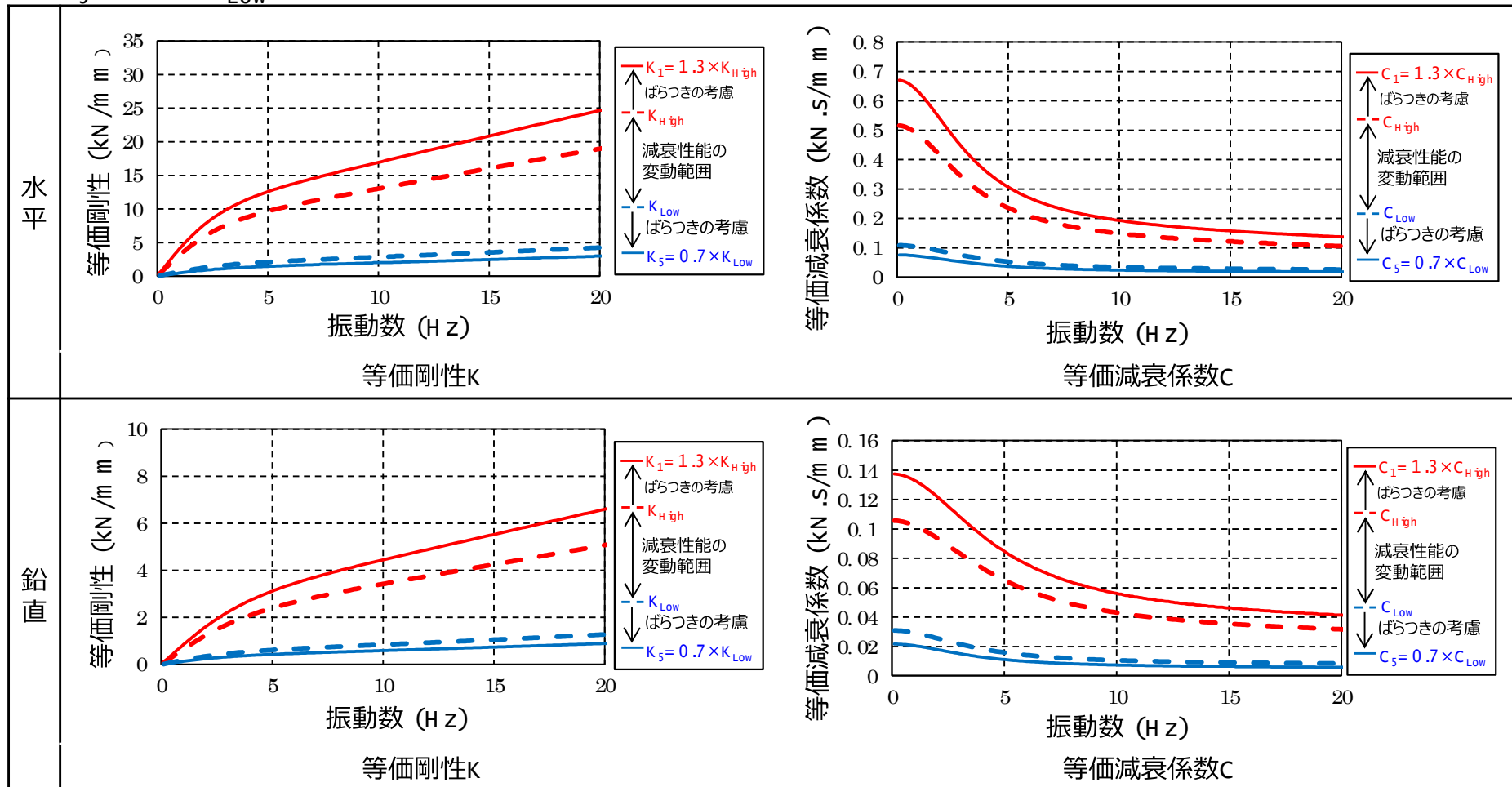
ダンパ性能試験のモデル化 (中型・低側の例)

【論点Ⅱ-6】 2. 三軸粘性ダンパの配管系への設置

(9) 三軸粘性ダンパのモデル化 (b.ばらつきの考慮)

① 上限及び下限の減衰性能のモデル化

- 高側及び低側の減衰性能に、さらに±30%のばらつき（製造公差：±10%、据付公差：±20%）を考慮し、解析上の減衰性能の上限（ $K_1 = 1.3 \times K_{High}$, $C_1 = 1.3 \times C_{High}$ ）及び下限（ $K_5 = 0.7 \times K_{Low}$, $C_5 = 0.7 \times C_{Low}$ ）を設定する。



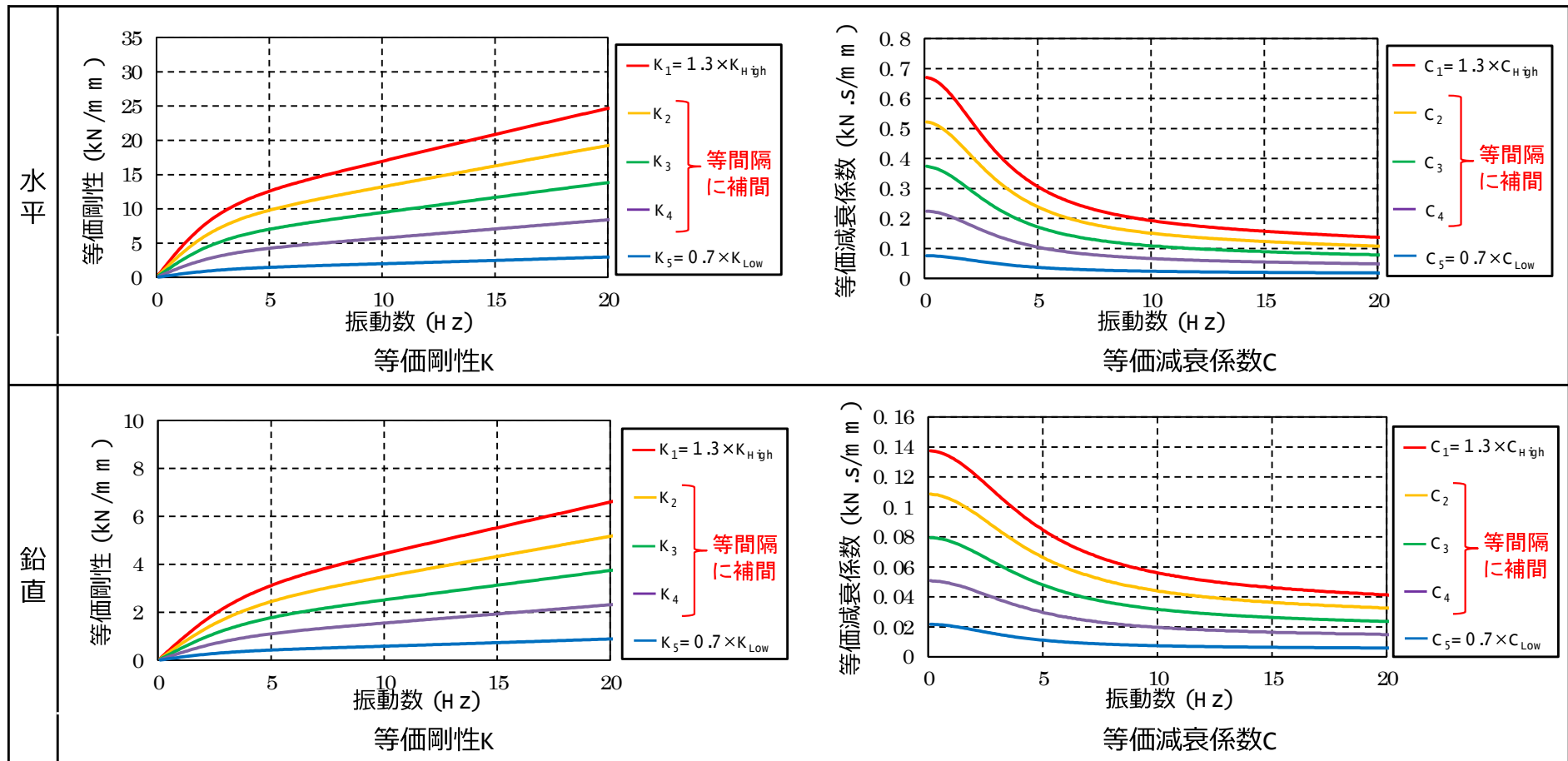
性能試験による減衰性能の上限と下限の設定 (中型の例)

【論点Ⅱ-6】 2. 三軸粘性ダンパの配管系への設置

(9) 三軸粘性ダンパのモデル化 (b.ばらつきの考慮)

② 段階的な減衰性能の設定

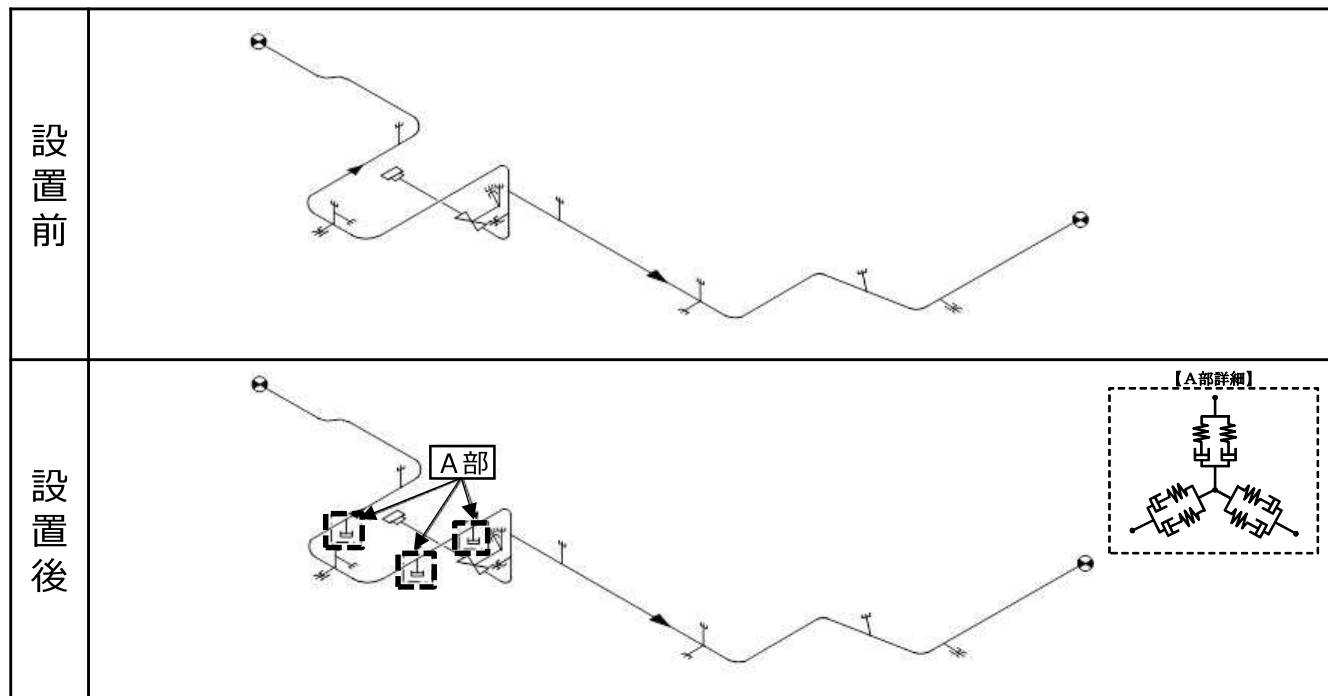
- 三軸粘性ダンパの減衰性能は、性能試験結果及び製造公差等のばらつきを考慮することに伴い、上限と下限の減衰性能の差が大きくなるため、5段階の等間隔に補間した減衰性能を設定する。



地震応答解析モデルにおける段階的な減衰性能の設定 (中型の例)

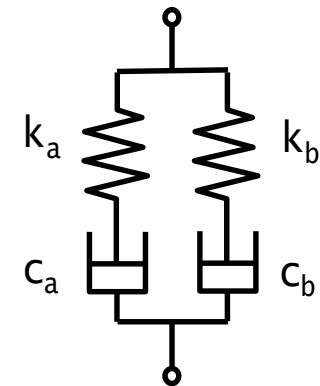
【論点Ⅱ-6】 2. 三軸粘性ダンパの配管系への設置 (10) 三軸粘性ダンパの解析モデルの追加

- 配管系は3次元はりモデルによりモデル化する。
- 三軸粘性ダンパを4パラメータMaxwellモデルでモデル化し、その設置位置に追加する。
- 三軸粘性ダンパ設置前の地震応答解析モデルに制震装置を適切にモデル化して追加するという考え方は、既工認実績のある排気筒のモデル化の考え方と同様であり、4パラメータMaxwellモデルによるモデル化は海外の原子力発電所において実績のある手法である。



配管系の地震応答解析モデルの比較

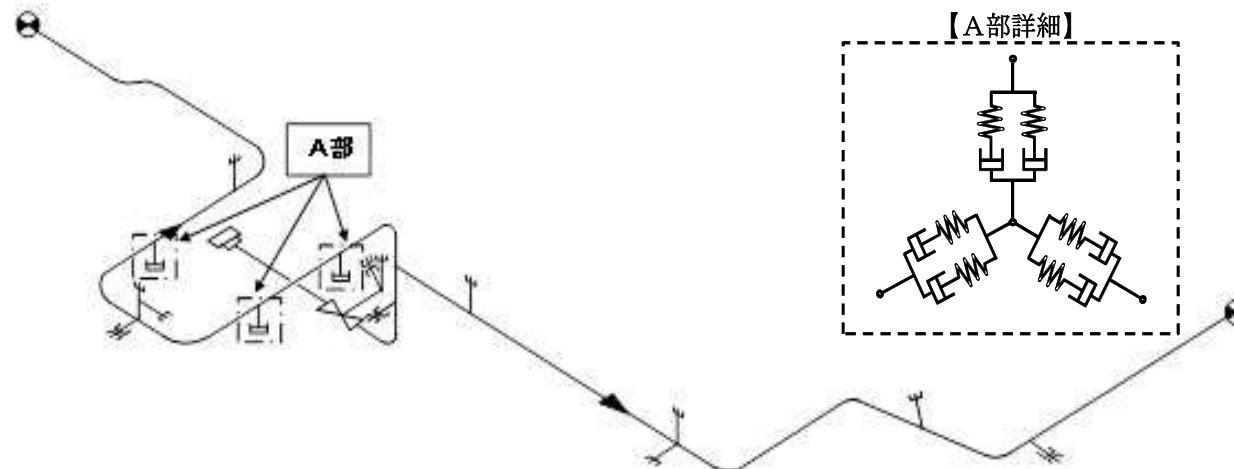
k_a, k_b :ばね剛性
 c_a, c_b :ダッシュポットの減衰係数



三軸粘性ダンパの
4パラメータMaxwellモデル

【論点Ⅱ－6】 2. 三軸粘性ダンパの配管系への設置 (11) 地震応答解析の実施

- 三軸粘性ダンパを設置した配管系は減衰が大きくなるため、地震応答解析手法としてスペクトルモーダル解析は一般的ではないことから、時刻歴応答解析を適用する。
- 三軸粘性ダンパの減衰性能の上限と下限を含めた5段階の減衰性能に対応した地震応答解析を行い、これらの最大応答を用いて耐震評価を行う。
- 配管系の減衰定数については、配管系の振動試験の研究成果に基づく設計用減衰定数を適用する。(論点Ⅱ－16)
- 三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析では、時刻歴応答解析を採用することから、地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動の影響を考慮し、機器評価への影響が大きい地震動に対し、ASME Boiler and Pressure Vesselに規定された手法等により検討を行う。



配管系の地震応答解析モデル

【論点Ⅱ－6】 2. 三軸粘性ダンパの配管系への設置 (12) 三軸粘性ダンパ評価

- 三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析によって得られた応答値が、減衰性能を取得した性能試験条件の範囲内であることを確認する。
- 三軸粘性ダンパが許容限界を満足し、地震時にその機能を維持する設計とするため、許容荷重及び許容変位を満たすように設計する。なお、許容変位の評価においては配管系の熱移動も考慮する。

三軸粘性ダンパの許容荷重及び許容変位

型式	許容荷重 (kN)		許容変位 (mm)	
	水平	鉛直	水平	鉛直
中型	68	27		
大型	350	140		

【論点Ⅱ－6】 2. 三軸粘性ダンパの配管系への設置 (13) 配管系評価

- 配管系評価の応力評価等における許容限界は、J E A G 4 6 0 1 等に基づき設定することを基本とする。

配管系評価における評価方法及び許容限界

範囲	地震力	部位	評価方法	許容限界
外側主蒸気隔離弁から 主蒸気止め弁まで	静的地震力及び 弾性設計用地震動 S d に 2 分の 1 を乗 じたものによる地震力	配管	部材に発生する応力が許容限界を 超えないことを確認する。	許容応力状態 B A S の 許容応力
		支持構造物	部材に発生する応力が許容限界を 超えないことを確認する。	許容応力状態 B A S の 許容応力
		三軸粘性 ダンパ	三軸粘性ダンパの荷重及び変位が 許容限界を超えないことを確認する。	許容荷重及び許容変位
	弾性設計用地震動 S d による地震力	配管	部材に発生する応力が許容限界を 超えないことを確認する。	許容応力状態 I V A S の 許容応力
		支持構造物	部材に発生する応力が許容限界を 超えないことを確認する。	許容応力状態 I V A S の 許容応力
		三軸粘性 ダンパ	三軸粘性ダンパの荷重及び変位が 許容限界を超えないことを確認する。	許容荷重及び許容変位
上記以外の範囲	静的地震力及び 弾性設計用地震動 S d に 2 分の 1 を乗 じたものによる地震力	配管	部材に発生する応力が許容限界を 超えないことを確認する。	許容応力状態 B A S の 許容応力
		支持構造物	部材に発生する応力が許容限界を 超えないことを確認する。	許容応力状態 B A S の 許容応力
		三軸粘性 ダンパ	三軸粘性ダンパの荷重及び変位が 許容限界を超えないことを確認する。	許容荷重及び許容変位

- 単軸粘性ダンパ及び三軸粘性ダンパは，その減衰性能をMaxwellモデルにより精度良くモデル化できる。
- 単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーン及び三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析では，減衰性能の変動及びばらつきを適切に考慮したモデル化を行っていることから，地震応答解析手法として妥当と考える。
- 既工認実績のある制震装置との差異に着目し，機器・配管系への適用性や減衰性能への影響の観点から検討を要する項目を整理した結果，追加の検討項目は抽出されず，必要な検討が行われていることを確認した。

添付資料

【論点Ⅱ-6】

添付資料1 単軸粘性ダンパの選定理由

取水槽ガントリクレーンに設置する制震装置の検討

分類	ダンパの種類	原理	作動方向	支持荷重	抵抗力の特性	原子力施設における適用実績	適用性	理由
履歴型	弾塑性ダンパ	材料の弾塑性挙動を利用してエネルギーを吸収するダンパ	1方向 または 2方向	熱膨張 地震荷重	抵抗力は、材料の初期剛性、二次剛性で決まる。	なし	△	塑性変形で地震エネルギーを吸収しており、繰返しにより抵抗力が変化する。また、ダンパの剛性が高いため、クレーンの剛性が高くなる。
	摩擦ダンパ	摩擦抵抗力を利用してエネルギーを吸収するダンパ			抵抗力は、摩擦材の締め付け力等で決定し、履歴曲線は矩形に近い。		○	粘性ダンパと特性は類似しているが、加振繰返し回数が増えると、性能が変化する可能性がある。
	鉛ダンパ	鉛の塑性流動抵抗力を利用してエネルギーを吸収するダンパ			抵抗力は鉛の初期剛性、二次剛性で決まる。		△	塑性変形で地震エネルギーを吸収しており、繰返しにより抵抗力が変化する。
粘性型	単軸	粘性ダンパ (非線形)	1方向	地震荷重	抵抗力は速度のべき乗(0.1~1)に比例し、0.1乗の場合、履歴曲線は矩形に近い。	なし	◎	微小変位から最大変位まで、抵抗力の変化が小さく、エネルギー吸収が大きいため、クレーンの剛性を高くせず、地震エネルギーの吸収を大きくできる
		粘性ダンパ (線形)			抵抗力は速度に比例し、履歴曲線は楕円に近い。		○	適用は可能であるが、粘性ダンパほどのエネルギー吸収が期待できない。
		オイルダンパ			オイルの流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ		抵抗力は速度のべき乗(0.4~1)に比例し、履歴曲線は楕円に近い。	○
	三軸	粘性ダンパ	粘性体の流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ	3方向	抵抗力は速度に比例し、履歴曲線は楕円に近い。	海外での適用例あり	△	取水槽ガントリクレーンは1軸方向の地震荷重の低減を必要としているため、3方向の減衰は必要ない。

凡例 ◎：適用可能（有効性が最も高い） ○：適用可能 △：適用するために課題がある ×：適用不可

【論点Ⅱ-6】

添付資料2 三軸粘性ダンパの選定理由

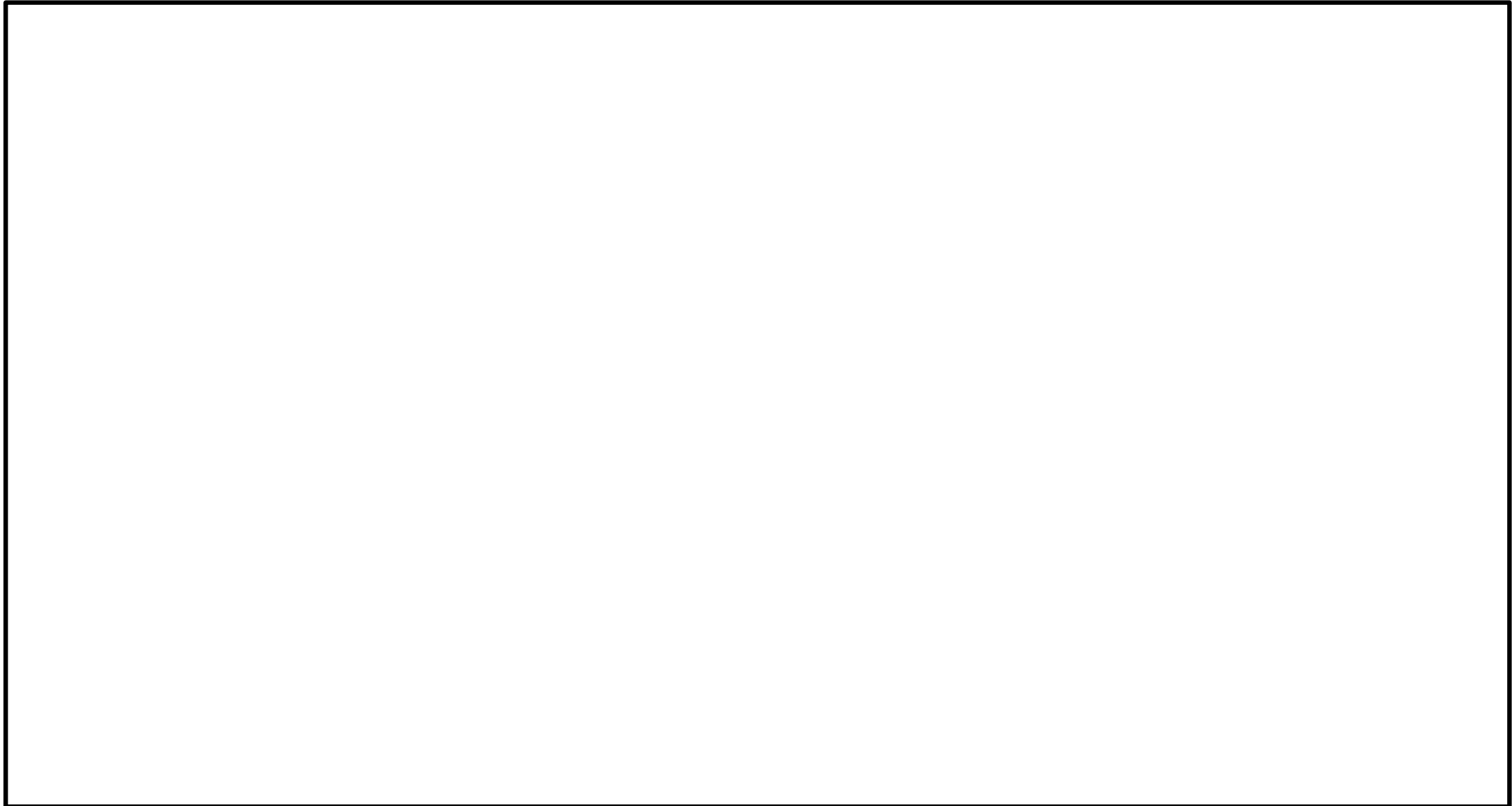
配管系に設置する制震装置の検討

分類	ダンパの種類	原理	作動方向	支持荷重	抵抗力の特性	原子力施設における適用実績	適用性	理由	
履歴型	弾塑性ダンパ	材料の弾塑性挙動を利用してエネルギーを吸収するダンパ	1方向または2方向	熱膨張 地震荷重	抵抗力は、材料の初期剛性、二次剛性で決まる。	なし	△	装置単体では熱膨張を拘束するため、別途熱膨張を逃がす据付方法を検討する必要がある。	
	摩擦ダンパ	摩擦抵抗力を利用してエネルギーを吸収するダンパ			抵抗力は、摩擦材の締め付け力等で決定し、履歴曲線は矩形に近い。		△		
	鉛ダンパ	鉛の塑性流動抵抗力を利用してエネルギーを吸収するダンパ			抵抗力は鉛の初期剛性、二次剛性で決まる。		△		
粘性型	単軸	粘性ダンパ(非線形)	1方向	地震荷重	抵抗力は速度のべき乗(0.1~1)に比例し、0.1乗の場合、履歴曲線は矩形に近い。	なし	○	三方向に応答する配管系に対して、1方向のみに減衰性能を発揮する。	
		粘性ダンパ(線形)			粘性体の流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ		抵抗力は速度に比例し、履歴曲線は楕円に近い。		○
		オイルダンパ			オイルの流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ		抵抗力は速度のべき乗(0.4~1)に比例し、履歴曲線は楕円に近い。		○
	三軸	粘性ダンパ	粘性体の流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ	3方向	抵抗力は速度に比例し、履歴曲線は楕円に近い。	海外での適用例あり	◎	三方向に減衰性能を発揮するため、三方向に応答する配管系に適している。	

凡例 ◎：適用可能（有効性が最も高い） ○：適用可能 △：適用するために課題がある ×：適用不可

【論点Ⅱ－6】 添付資料3 三軸粘性ダンパに関するASME Boiler and Pressure Vessel Codeの記載

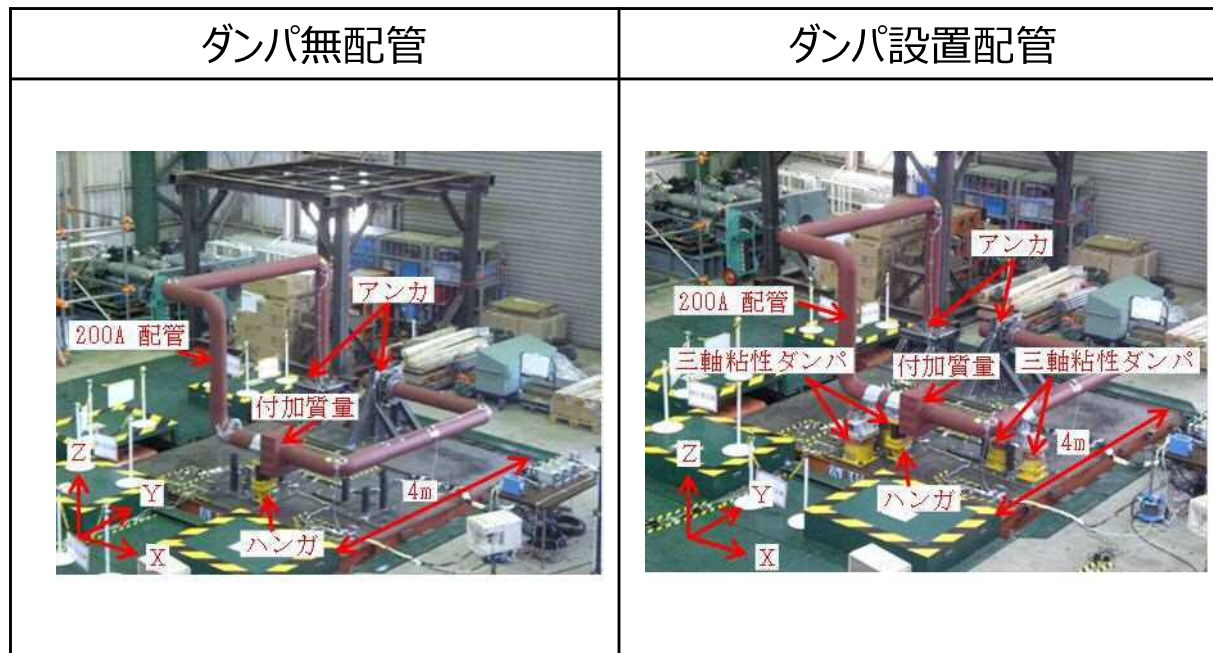
- NONMANDATORY APPENDIX NF-E に、三軸粘性ダンパの構造、動作等について記載されている。
- 支持構造物と建物・構築物との取合や、支持構造物の例の中に三軸粘性ダンパが記載されている。



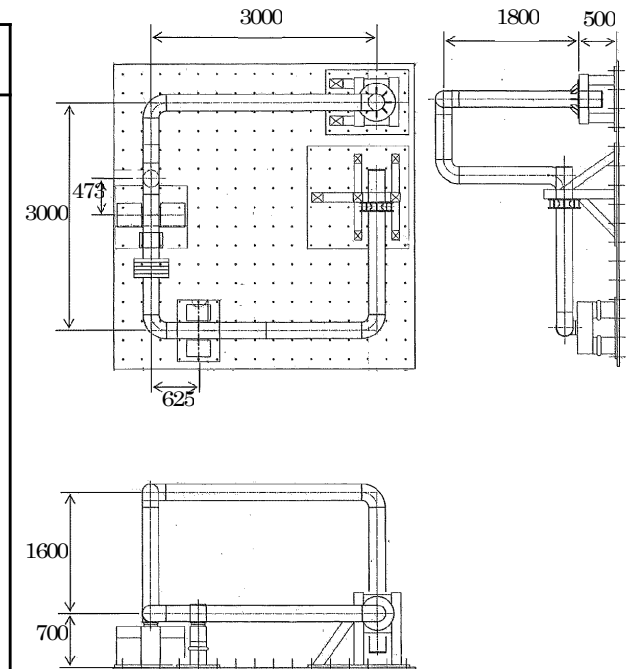
ASME Boiler and Pressure Vessel Codeの関連図

【論点Ⅱ-6】 添付資料4 三軸粘性ダンパを設置した配管系の加振試験 (1) 試験の概要

- 配管系に三軸粘性ダンパを設置した場合の効果を検証するため、三軸粘性ダンパを設置した配管系（以下「ダンパ設置配管」という。）と三軸粘性ダンパを設置しない配管系（以下「ダンパ無配管」という。）の2種類の試験体を用いて加振試験を実施した。
- 配管系試験体の配管部は200A sch40の直管及びショートエルボで構成しており、終端2箇所でアンカにより固定され、1箇所でスプリングハンガにより支持されており、弁を模擬した付加質量（372kg）を有する。
- ダンパ設置配管には、三軸粘性ダンパを配管系の2箇所に合計4台（2箇所×2台）設置した。



配管系試験体

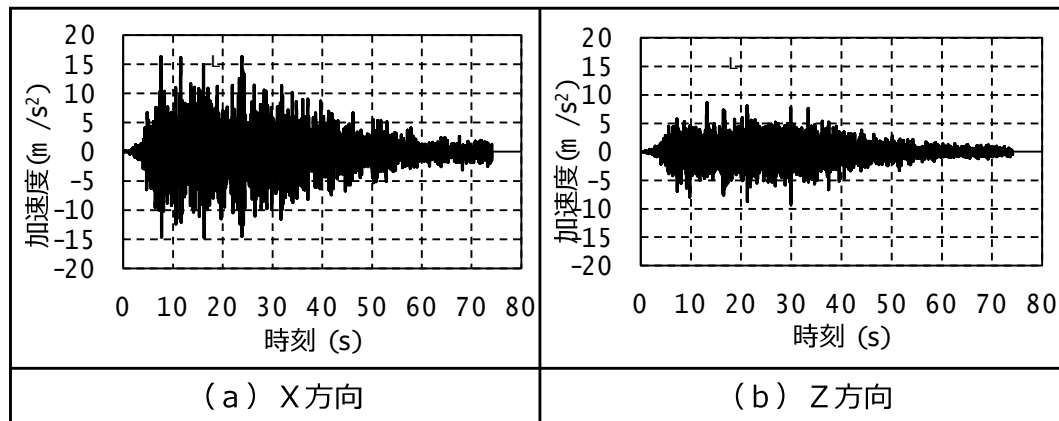


構造図

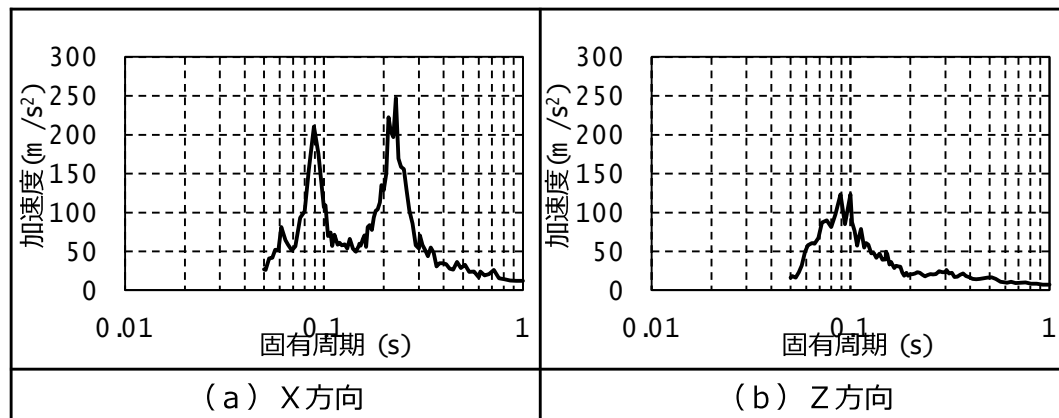
【論点Ⅱ-6】 添付資料4 三軸粘性ダンパを設置した配管系の加振試験

(2) 入力地震波

- 地震波加振における入力地震波は、耐震バックチェック評価用地震動 S s - 1 (600ga) に対して島根原子力発電所 2 号炉原子炉建物の地震応答解析により算出した床応答波を参考に設定した。
- 加振試験における加振レベルは、配管系が弾性域に留まり、三軸粘性ダンパ設置位置の変位及び荷重が三軸粘性ダンパの許容範囲内となる最大加振レベルを目安として設定した。



入力地震波の加速度時刻歴波形



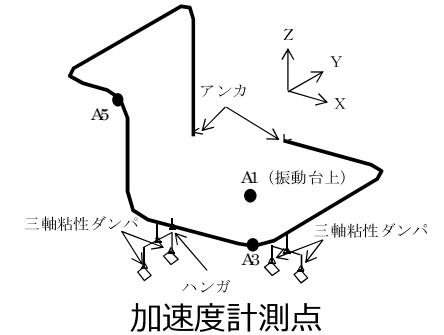
入力地震波の応答スペクトル (減衰定数0.5%)

地震波加振の試験ケース

No.	試験体条件	加速度レベル(m /s ²)	
		X方向	Z方向
1	ダンパ無配管	1.5	0.84
2		2.5	1.41
3	ダンパ設置配管	2.5	1.41
4		10	5.6
5		18	10.1

【論点Ⅱ-6】 添付資料4 三軸粘性ダンパを設置した配管系の加振試験 (3) 正弦波掃引試験結果

- 正弦波掃引試験結果から、カーブフィットにより配管系試験体の固有振動数とモード減衰比を得た。
- ダンパ無配管は減衰比が非常に小さいが、ダンパ設置配管は減衰比が非常に大きいことが確認された。



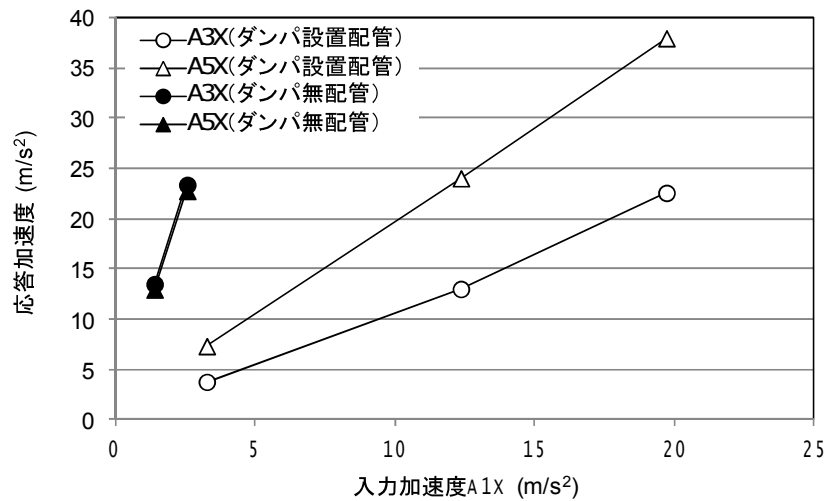
ダンパ無配管とダンパ設置配管の比較

	振動伝達特性		固有振動数とモード減衰比		
	A3X / A1X	A5X / A1X	No.	固有振動数 (Hz)	モード減衰比 (%)
ダンパ無配管			1	4.5	0.22
			2	5.1	0.26
ダンパ設置配管			3	9.9	0.26
			4	11.1	0.55
			5	22.1	0.30
			6	23.5	0.15
			1	9	20
			2	13	20
		3	17	20	
		4	19	20	
		5	23	20	
		6	25	20	

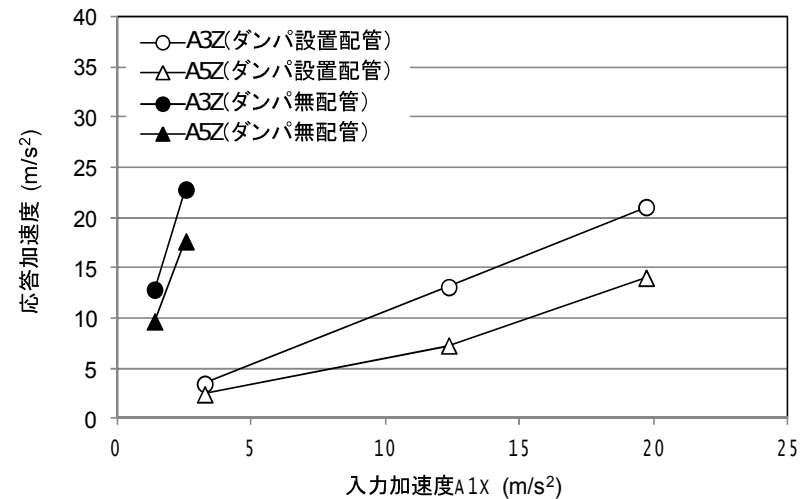
【論点Ⅱ-6】 添付資料4 三軸粘性ダンパを設置した配管系の加振試験

(4) 地震波加振の試験結果

- X + Z方向に加振した場合のダンパ無配管とダンパ設置配管の応答倍率（応答／入力）を比較すると、X方向ではA3の位置で1/10，A5の位置で1/5に低減されており，Z方向ではA3の位置で1/10，A5の位置で7/100に低減されている。
- 配管系に三軸粘性ダンパを設置することは，地震応答の低減に有効であることが示された。



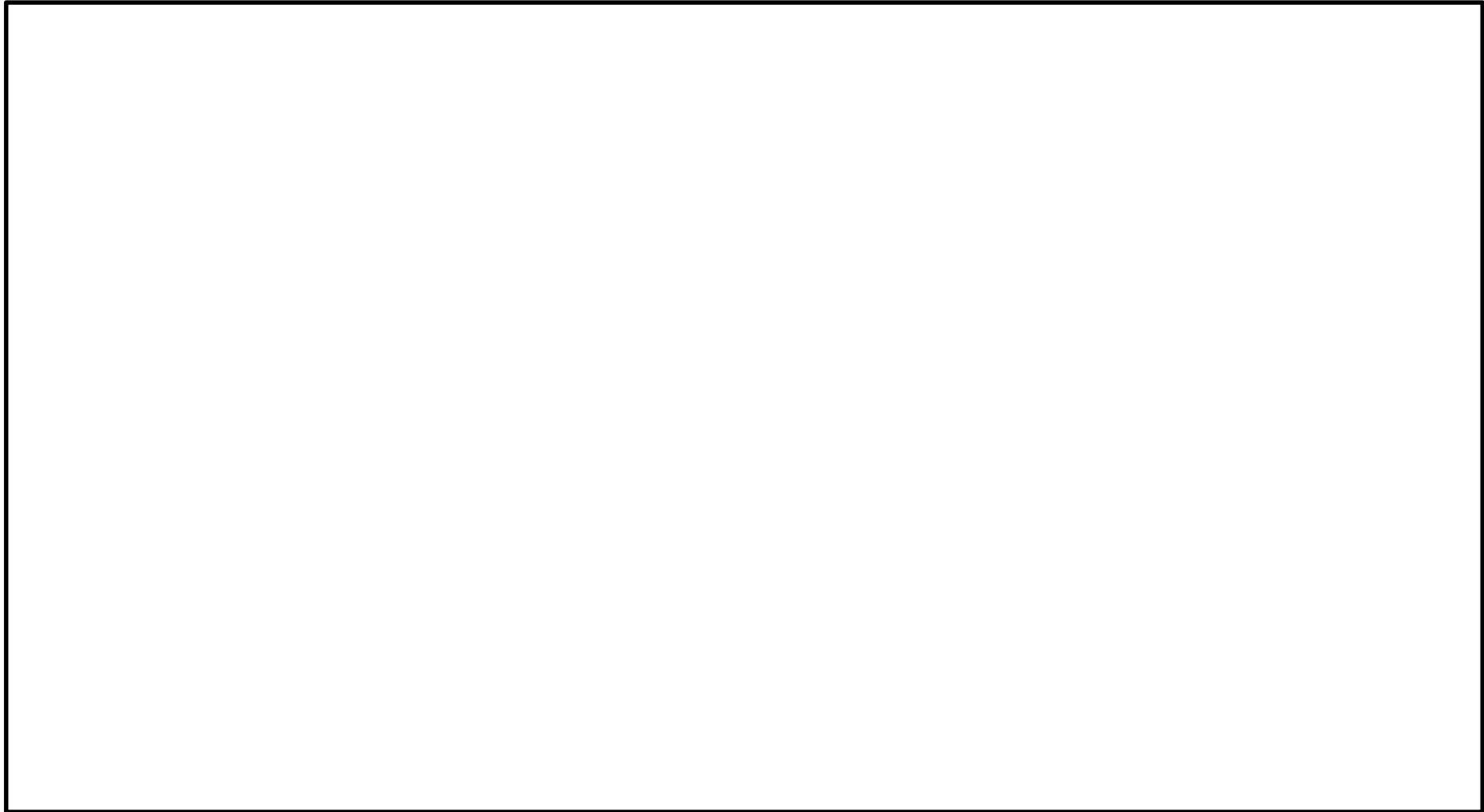
X方向の応答加速度



Z方向の応答加速度

【論点Ⅱ-6】**添付資料5 三軸粘性ダンパの性能試験方法**

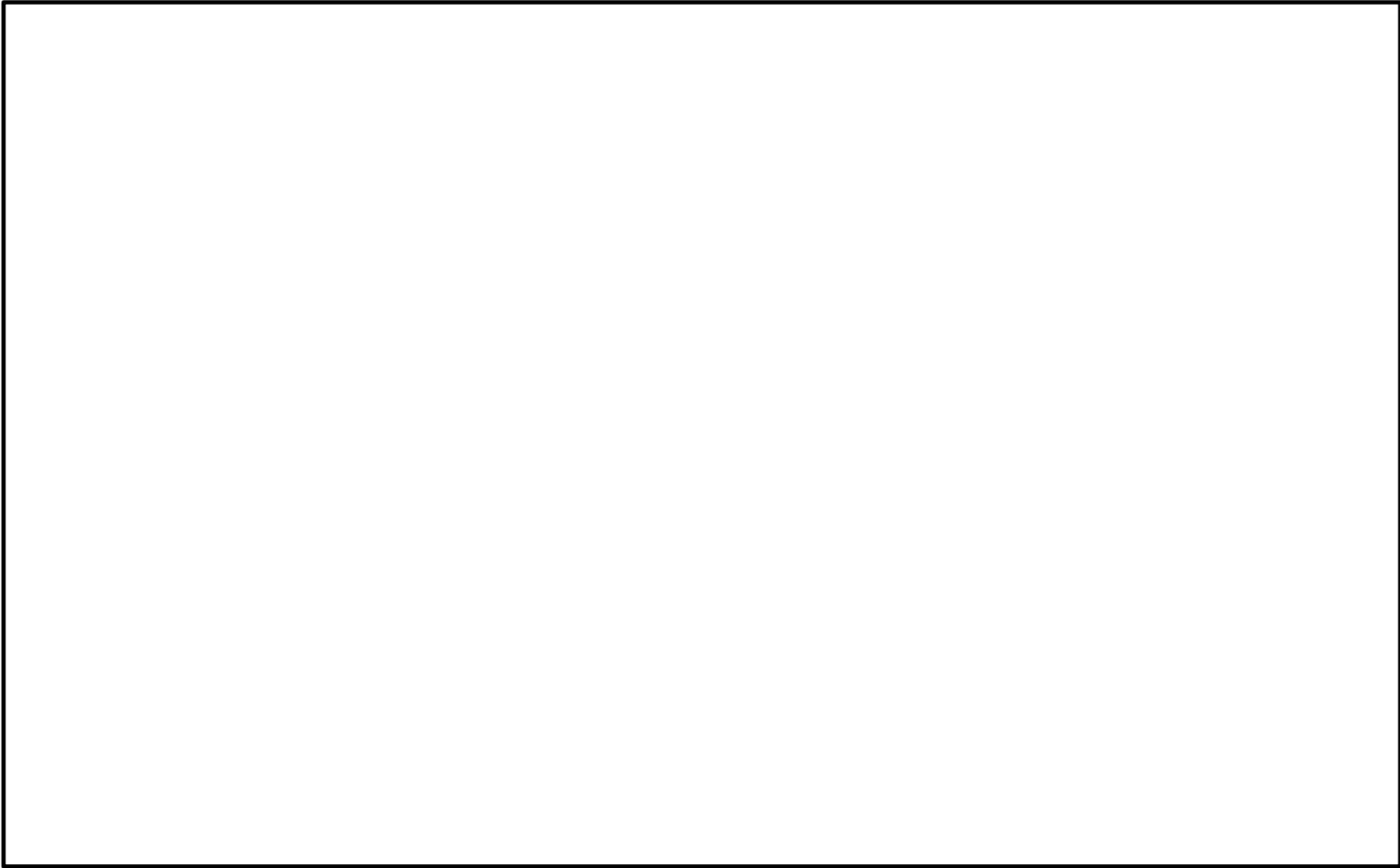
- 三軸粘性ダンパの等価剛性 k 及び等価減衰係数 c を取得し、4パラメータMaxwellモデルの4つのパラメータを決定するための性能試験はフローを示す。



性能試験フロー（1 / 3）

【論点Ⅱ－6】

添付資料5 三軸粘性ダンパの性能試験方法



性能試験フロー（2 / 3）

【論点Ⅱ－6】

添付資料5 三軸粘性ダンパの性能試験方法



性能試験フロー（3 / 3）

論点Ⅱ-10 取水槽ガントリクレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用

■ 耐震設計の論点

【論点Ⅱ-10：取水槽ガントリクレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用】（論点の重み付け：B3）

○取水槽ガントリクレーンの耐震性評価において、浮上りやすべりを考慮した解析モデルによる非線形時刻歴応答解析を適用する。

■ 論点に係る説明概要

- 取水槽ガントリクレーンは、取水槽海水ポンプエリア及び取水槽循環水ポンプエリアを跨いで設置されており、地震に伴う損傷、落下によって上位クラス施設に波及的影響を及ぼさないことが要求される。
- 取水槽ガントリクレーンは車輪がレールの上に設置され拘束されておらず、浮上りが発生する可能性がある。
- 取水槽ガントリクレーンの耐震評価にあたり、鉛直方向地震力に対する車輪の浮上り等の挙動を考慮した地震応答解析方法及び耐震評価方法について説明する。

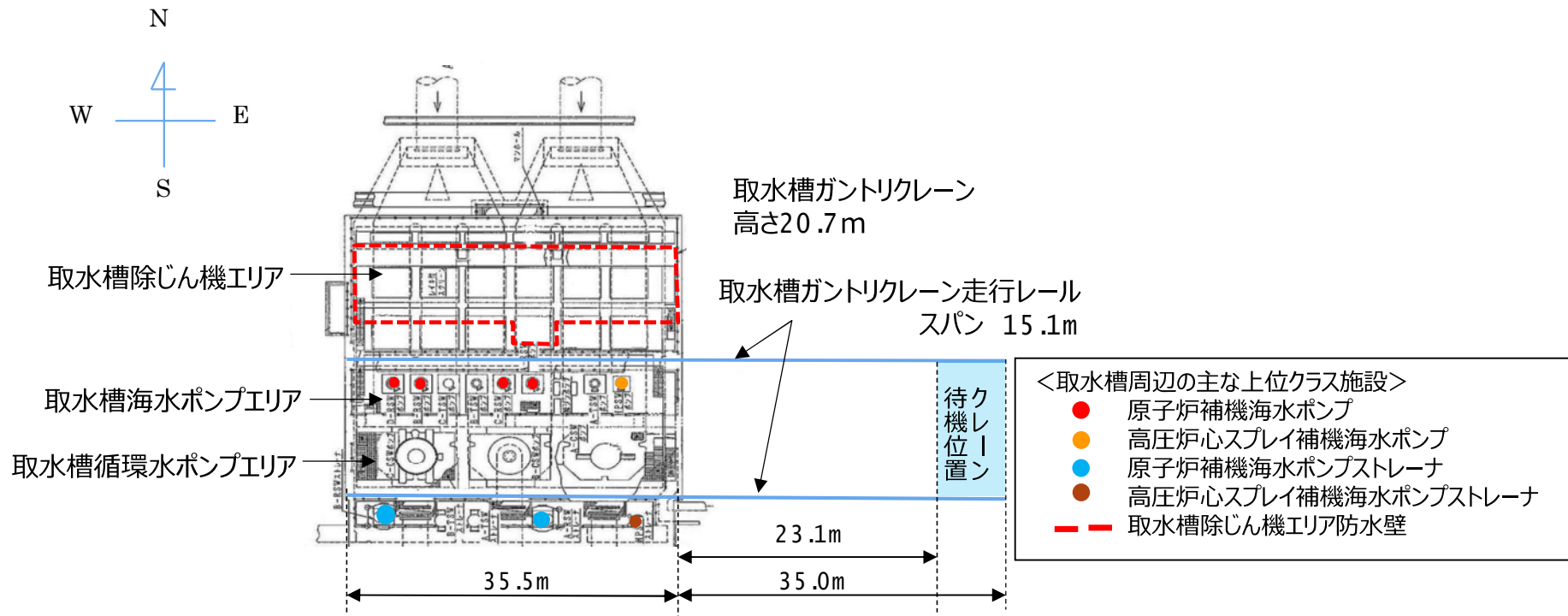
■ 先行プラント実績

- 大間1号炉建設工認の原子炉建屋天井クレーンへの適用例があるが、島根2号炉の取水槽ガントリクレーンとの構造差異がある。
- 女川2号炉の海水ポンプ室門型クレーンに対して設置変更許可段階の審査において採用している手法と同様である。

【論点Ⅱ-10】

1. 取水槽ガントリクレーンの設置位置

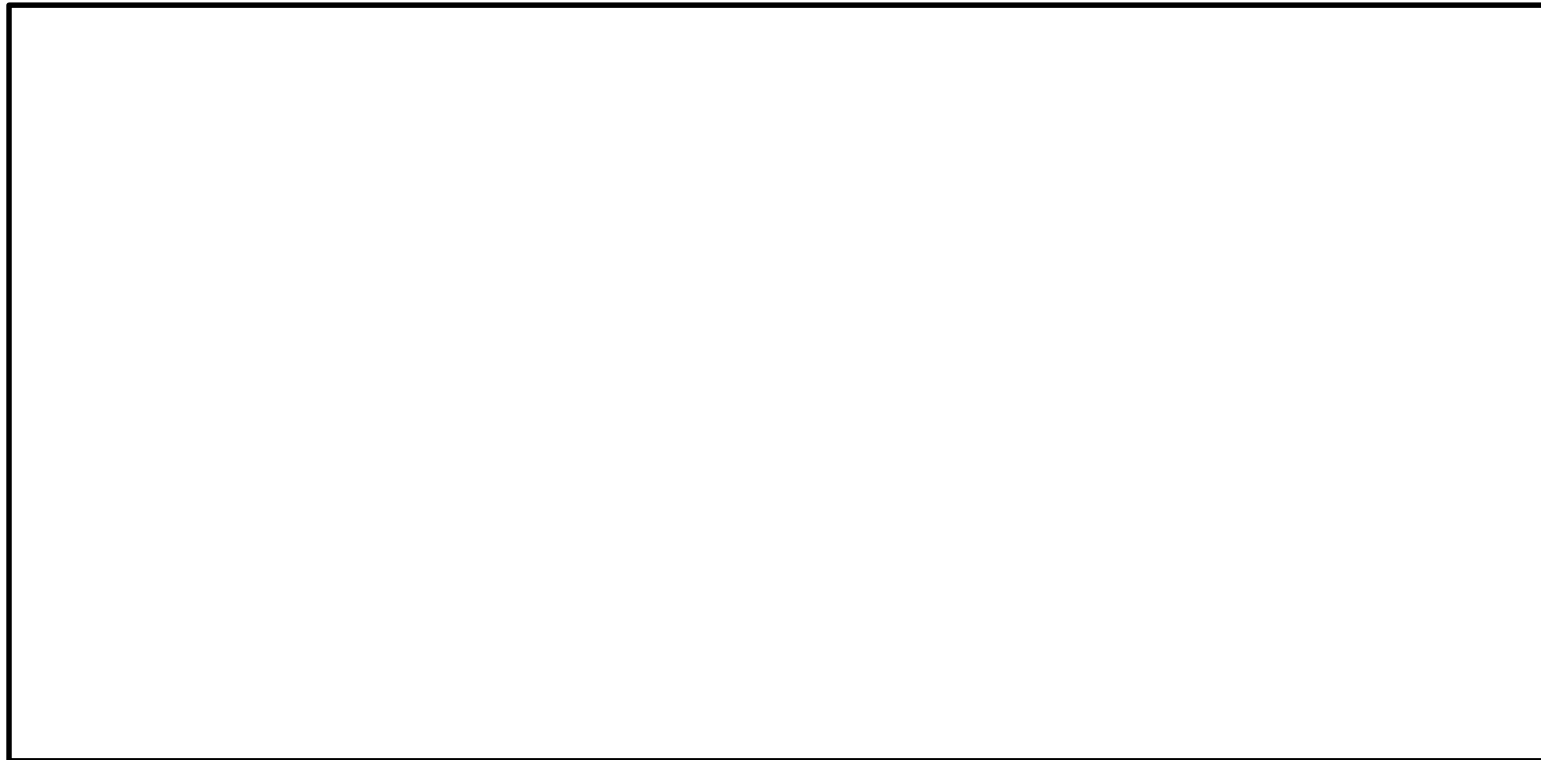
- ・ 発電所の運転中は、取水槽ガントリクレーンは図中に示す待機位置に待機しており、周辺の上位クラス施設とは十分な離隔距離があることから波及的影響を及ぼすおそれはない。
- ・ 定期検査中などクレーンを使用する期間には、上位クラス施設が設置されている取水槽海水ポンプエリア付近に位置することとなるため、取水槽ガントリクレーンが地震に伴う損傷、落下によって上位クラス施設へ波及的影響を及ぼさないことが要求される。



取水槽ガントリクレーンの設置位置

2. 取水槽ガントリクレーンの構造

- クレーン本体は、走行レール上を脚下部にある走行装置及び車輪によって移動する。トロリは、ガーダ上面の横行レール上を横行装置及び横行車輪によって移動する。ホイストは、ガーダ下に設置されたホイストレールに沿って移動する。ガーダと脚の間に単軸粘性ダンパを設置する。

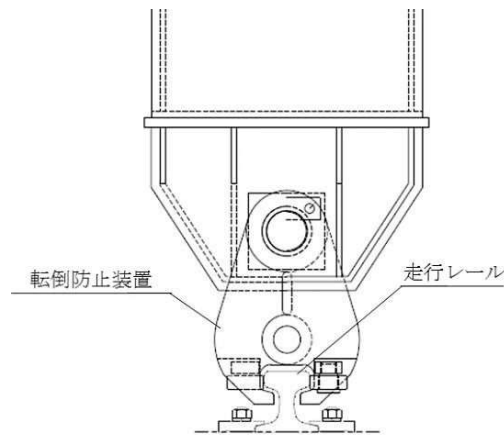


取水槽ガントリクレーンの構造

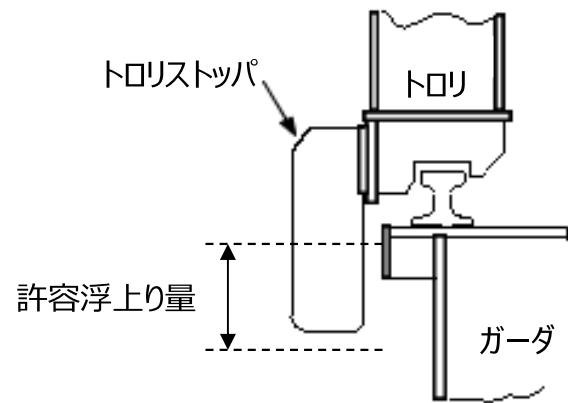
【論点Ⅱ-10】

3. 取水槽ガントリクレーンの各部の構造

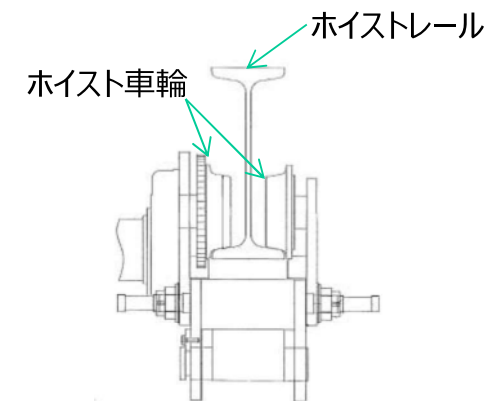
- 転倒防止装置
クレーン本体の地震による転倒を防止するため、本体下部に転倒防止装置が設置されており、地震時に浮上りが生じた場合でも転倒しない構造となっている
- トロリストッパ
トロリにはトロリストッパを設置しており、浮上りによる脱線・落下を防止する構造となっている。
- ホイストレール、車輪
ホイストは、ホイスト車輪がホイストレールを挟み込むことにより懸架されている。
- 単軸粘性ダンパ
論点Ⅱ-6で説明する。



転倒防止装置の構造



トロリストッパの概略構造

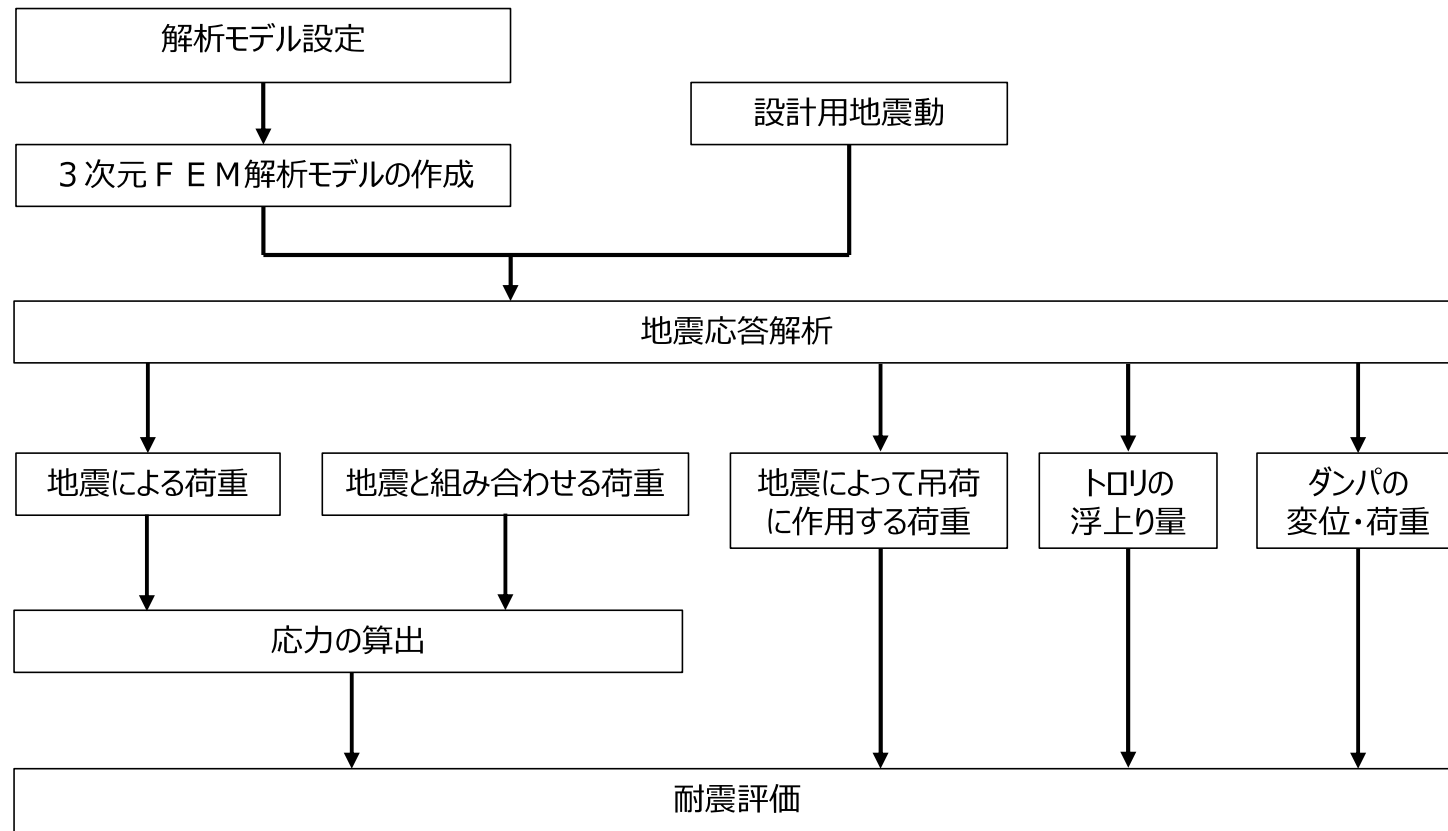


ホイストレール・車輪の構造

【論点Ⅱ-10】

4. 評価方針

- 取水槽ガントリークレーンの耐震評価にあたっては、その構造を踏まえ作成した解析モデルを用いて地震応答解析を行い、発生する応力等を算出し、許容限界以内であることを確認する。



取水槽ガントリークレーンの耐震評価フロー

【論点Ⅱ-10】

5. 取水槽ガントリクレーンの地震応答解析方法

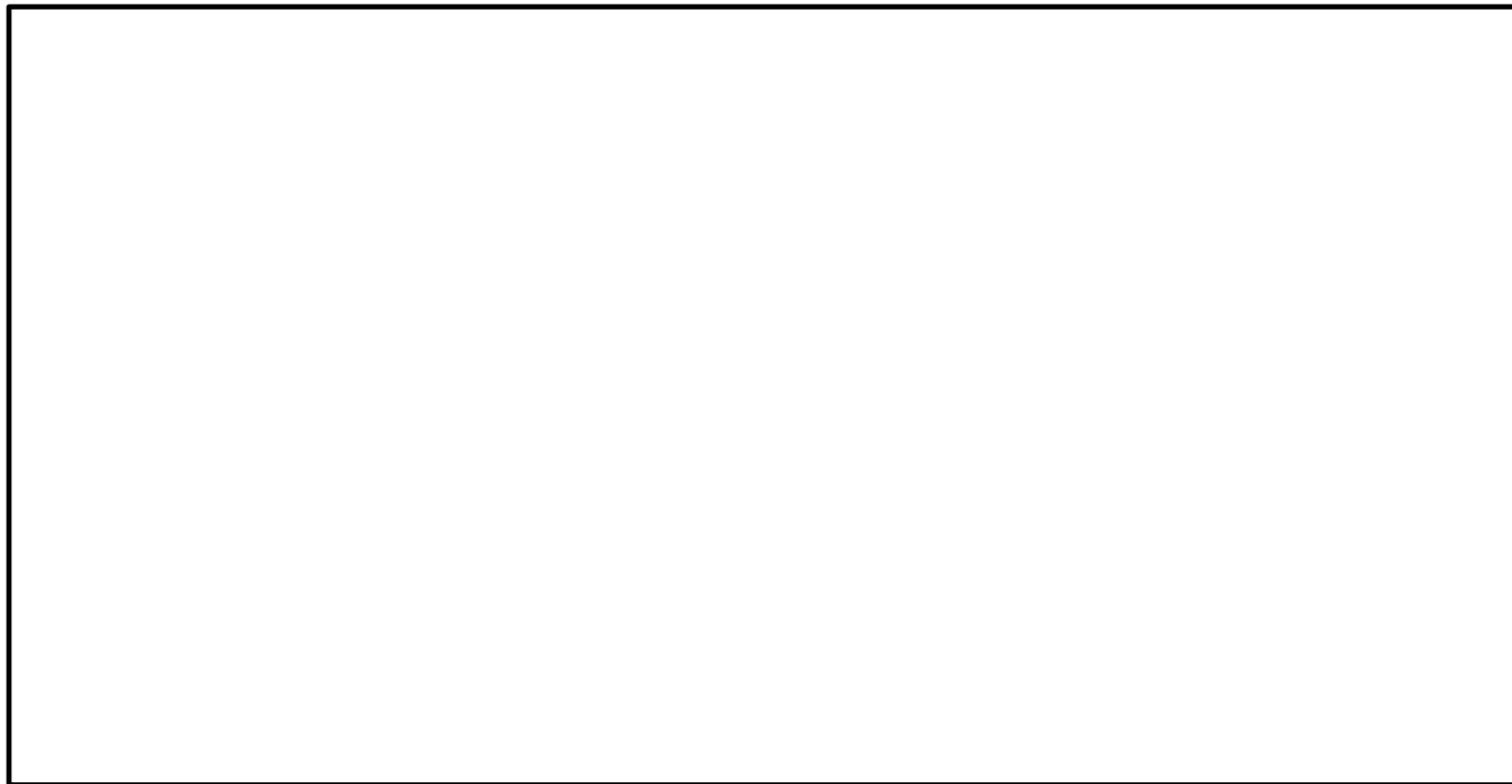
- 取水槽ガントリクレーンは、地震時に浮上りが発生する可能性があるため、浮上り状況を適切に評価するために3次元FEM解析モデルによる非線形時刻歴応答解析を適用する。
- 単軸粘性ダンパについては、Maxwellモデルでモデル化する。（詳細は論点Ⅱ-6で説明）
- 減衰定数については、既往の研究等によって妥当性が確認され、先行のクレーン類に適用実績のある値として水平、鉛直方向ともに2%を適用する。
- 入力する地震動は、取水槽最上部の節点より求められる応答加速度時刻歴を適用する。詳細設計段階において、基準地震動Ssを用いて評価を実施し、地盤物性の不確かさ等の影響も検討する。
- 地震応答解析にあたっては、トロリ及びホイストの位置や吊荷の有無によって地震時の応答が変化するため、下表のとおり解析ケースを設定する。吊荷の質量はそれぞれの最大質量を設定する。

取水槽ガントリクレーンの解析ケース

ケース	トロリ		ホイスト	
	位置	吊荷有無（質量）	位置	吊荷有無（質量）
1	待機位置	なし	待機位置	なし
2	中央	有り（50t）	待機位置	なし
3	待機位置	なし	中央	有り（17t）

【論点Ⅱ-10】**6. 取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデル****(1) 取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデル**

- 取水槽ガントリクレーンの解析モデルは、クレーン本体をはり要素でモデル化した3次元FEM解析モデルとする。
- 各部の構造の特徴を踏まえ、車輪部、転倒防止装置、単軸粘性ダンパを適切にモデル化する。



取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデル

6. 取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデル

(2) 車輪とレール間の摩擦特性

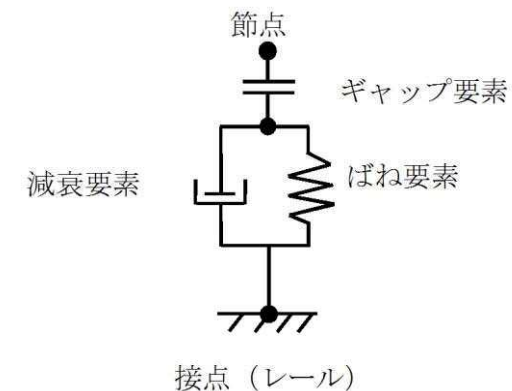
- クレーンの車輪には、電動機及び減速機等の回転部分と連結された駆動輪と、回転部分と連結されていない従動輪の2種類がある。このうち駆動輪は回転が拘束されているため、最大静止摩擦力以上の地震慣性力が加わった場合、レール上をすべる挙動を示す。

(3) 車輪部の非線形要素

- クレーン車輪部のモデル化では、すべり、浮上り及び衝突の挙動を模擬するためギャップ要素を用いる。
- 接触部位の局所変形による接触剛性をばね要素で、衝突による減衰効果を減衰要素で模擬し、ギャップ要素と直列に配置する。



車輪まわりの概要



車輪部の非線形要素

【論点Ⅱ-10】

7. 耐震評価方法

- 取水槽ガントリクレーンの評価部位及び評価方法を下表に示す。
- 許容応力についてはJSM E S N C1-2005/2007及びJEAG 4601を参照し、その他の支持構造物の許容応力を適用する。

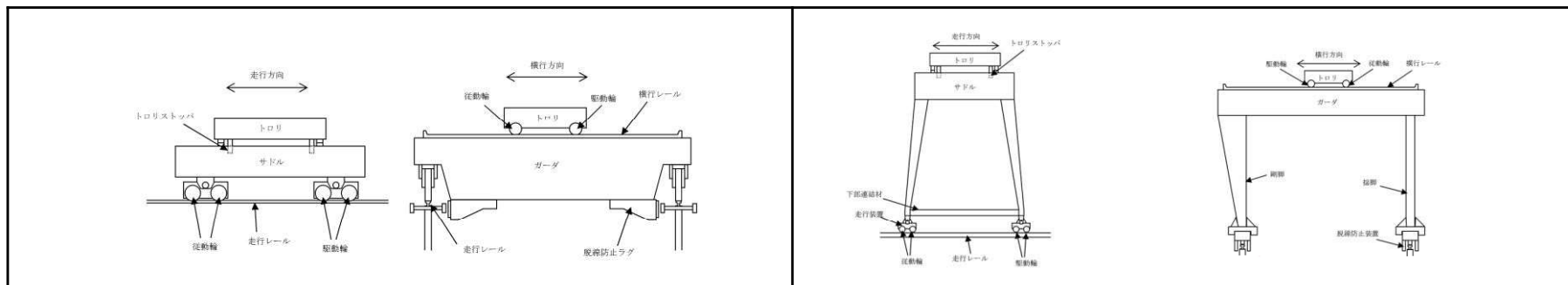
取水槽ガントリクレーンの評価部位及び評価方法

No.	評価部位	評価方法
1	クレーン本体	脚，ガーダ，ガーダ継ぎ及び脚下部継ぎの応力評価を実施し，許容応力以下であることを確認する。
2	転倒防止装置	クレーン本体の転倒防止装置の応力評価を実施し，許容応力以下であることを確認する。
3	レール	走行レール及びホイストレールの応力評価を実施し，許容応力以下であることを確認する。
4	トロリストッパ	トロリストッパの応力評価を実施し，許容応力以下であることを確認する。また，脱線防止の観点から，トロリの浮上り量が許容浮上り量を上回らないことを確認する。
5	単軸粘性ダンパ	単軸粘性ダンパの変位及び荷重が許容限界以下であることを確認する。
6	吊具	ワイヤロープ及びフックに生じる荷重が許容荷重以下であることを確認する。

【論点Ⅱ-10】8. 取水槽ガントリクレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用性

(1) 構造の比較

取水槽ガントリクレーンに非線形時刻歴応答解析を適用するにあたって、クレーン類に非線形時刻歴応答解析を適用した先行審査実績として大間1号炉原子炉建屋天井クレーン及び設置変更許可審査中である女川2号炉海水ポンプ室門型クレーンと構造や特徴を比較し、適用性について確認する。



大間1号炉 原子炉建屋天井クレーン

女川2号炉 海水ポンプ室門型クレーン



島根2号炉 取水槽ガントリクレーン

【論点Ⅱ-10】8. 取水槽ガントリクレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用性

(2) 構造の特徴比較

- 原子炉建屋天井クレーンと取水槽ガントリクレーンの違いは脚及び単軸粘性ダンパの有無，脱線防止装置と転倒防止装置の構造の違いであり，それ以外の構造物としての特徴は類似している。水平方向にすべり，鉛直方向に浮上りが発生する挙動は両クレーンで類似している。
- 海水ポンプ室門型クレーンと取水槽ガントリクレーンの違いは単軸粘性ダンパの有無，脱線防止装置と転倒防止装置の構造の違いであり，それ以外の構造物としての特徴は類似しており，ともに鉛直方向に浮上る可能性がある。

構造の特徴比較

	大間1号炉 原子炉建屋天井クレーン	女川2号炉 海水ポンプ室門型クレーン	島根2号炉 取水槽ガントリクレーン
構造概要	<ul style="list-style-type: none"> ・2本のレール間を跨ぐ桁構造 ・ガーダ上にトロリを設置 ・車輪を介してレールに設置 	同左	同左
主要構造物	<ul style="list-style-type: none"> ・ガーダ ・サドル ・トロリ ・脱線防止ラグ ・トロリストッパ 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガーダ ・サドル ・トロリ ・脚 ・脱線防止装置 ・トロリストッパ 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガーダ ・トロリ ・ホイスト ・脚 ・単軸粘性ダンパ ・転倒防止装置 ・トロリストッパ
構造形状	鋼構造物（炭素鋼）	同左	同左
	溶接構造物	同左	同左

【論点Ⅱ-10】8. 取水槽ガントリクレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用性 (3) 評価方法の比較

58

- 車輪部のすべり，浮上り，衝突を考慮した取水槽ガントリクレーンの解析手法，解析モデル，境界条件等は，原子炉建屋天井クレーン及び海水ポンプ室門型クレーンと同一の評価方法である。
- 転倒防止装置の構造は伊方3号炉海水ピットクレーンの浮上り防止装置と同等であり，そのモデル化も同等である。

評価手法の比較

項目		大間1号炉 原子炉建屋天井クレーン	女川2号炉 海水ポンプ室門型クレーン	島根2号炉 取水槽ガントリクレーン
解析手法		非線形時刻歴応答解析	同左	同左
解析モデル		3次元FEM解析モデル	同左	同左
車輪-レール間の 境界条件		すべり，浮上り，衝突考慮	同左	同左
地震力	水平	動的地震力	同左	同左
	鉛直	動的地震力	同左	同左
入力地震動		原子炉建屋におけるクレーン 設置位置の加速度時刻歴	海水ポンプ室におけるクレーン 設置位置の加速度時刻歴	取水槽におけるクレーン設置 位置の加速度時刻歴
減衰定数	水平	2.0%	同左	同左
	鉛直	2.0%	同左	同左
解析プログラム		ABAQUS (Ver.6.5-4)	ABAQUS (Ver.6.11-1)	同左

9. 取水槽ガントリクレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用（まとめ）

- 構造について比較した結果，先行審査実績のある原子炉建屋天井クレーンと取水槽ガントリクレーンの違いは脚及び単軸粘性ダンパの有無，脱線防止装置と転倒防止装置の構造の違いであり，これ以外の全体構造，荷重伝達及び車輪まわりの構造が同等であることを確認した。なお，脚，単軸粘性ダンパ及び転倒防止装置については，適切に解析モデルに反映する。
- 評価方法及び解析モデルについて比較した結果，解析モデルの設定方法として，はり要素によるモデル化，水平方向のすべり，鉛直方向の浮上り等の挙動を考慮する非線形要素の考え方が同様であることを確認した。
- 以上のことから，島根2号炉取水槽ガントリクレーンの耐震評価として，先行審査実績のある非線形時刻歴応答解析を適用することは妥当であると考ええる。

論点Ⅱ-18 原子炉建物天井クレーンの非線形時刻歴応答解析の適用

■ 耐震設計の論点

【論点Ⅱ-18：原子炉建物天井クレーンの非線形時刻歴応答解析の適用】（論点の重み付け：D1）

○浮上りやすべりを考慮した解析モデルによる非線形時刻歴応答解析を適用する。

■ 論点に係る説明の概要

- 原子炉建物天井クレーンは、原子炉建物内に設置されており、地震に伴う損傷、落下によって、上位クラス施設に波及的影響を及ぼさないことが要求される。
- 原子炉建物天井クレーンの構造は、大間1号炉原子炉建屋天井クレーンと同等であり、車輪はレールの上に設置され、拘束されておらず、浮上りが発生する可能性がある。
- 原子炉建物天井クレーンの耐震評価にあたり、鉛直方向地震力に対する車輪の浮上り等の挙動を考慮した地震応答解析方法及び耐震評価方法について説明する。

■ 先行プラント実績

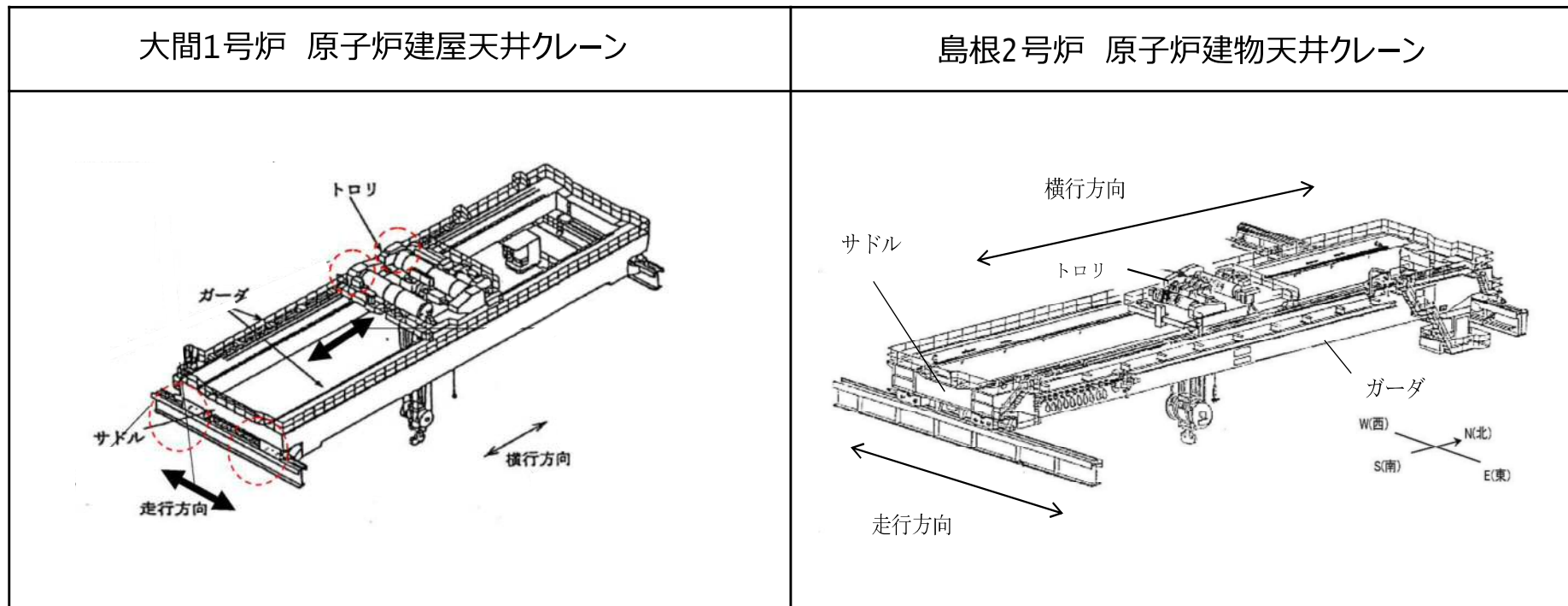
- 大間1号炉建設工認や東海第二の新規制審査での適用例がある。

【論点Ⅱ-18】

1. 原子炉建物天井クレーンの構造

- ・島根2号炉原子炉建物天井クレーンは、原子炉建物に設置された走行レール上をガーダ及びサドルが走行し、ガーダ上に設置された横行レール上をトロリが横行する構造である。
- ・島根2号炉原子炉建物天井クレーンと大間1号炉原子炉建物天井クレーンは、下図に示すとおり同様の構造である。

原子炉建物天井クレーンの構造比較



第1-1図 原子炉建物天井クレーン概要図

2. 既工認からの構造の変更箇所

トロリストッパ及び落下防止ラグにより浮上りを防止する構造としていたが、鉛直方向に動的な地震動を考慮することにより鉛直方向地震力が大きくなったことから、浮上りを許容することで耐震性を確保する構造に変更したため、トロリ及びガーダは、鉛直荷重に対し、浮上りが発生する。

構造変更箇所

	構造変更前	構造変更後
落下防止ラグ	<p>走行レール ランウェイガーダ ガーダ 落下防止ラグ</p>	<p>走行レール ランウェイガーダ ガーダ 落下防止ラグ</p>
トロリストッパ	<p>トロリ 横行レール トロリストッパ ガーダ</p>	<p>トロリ 横行レール トロリストッパ ガーダ</p>

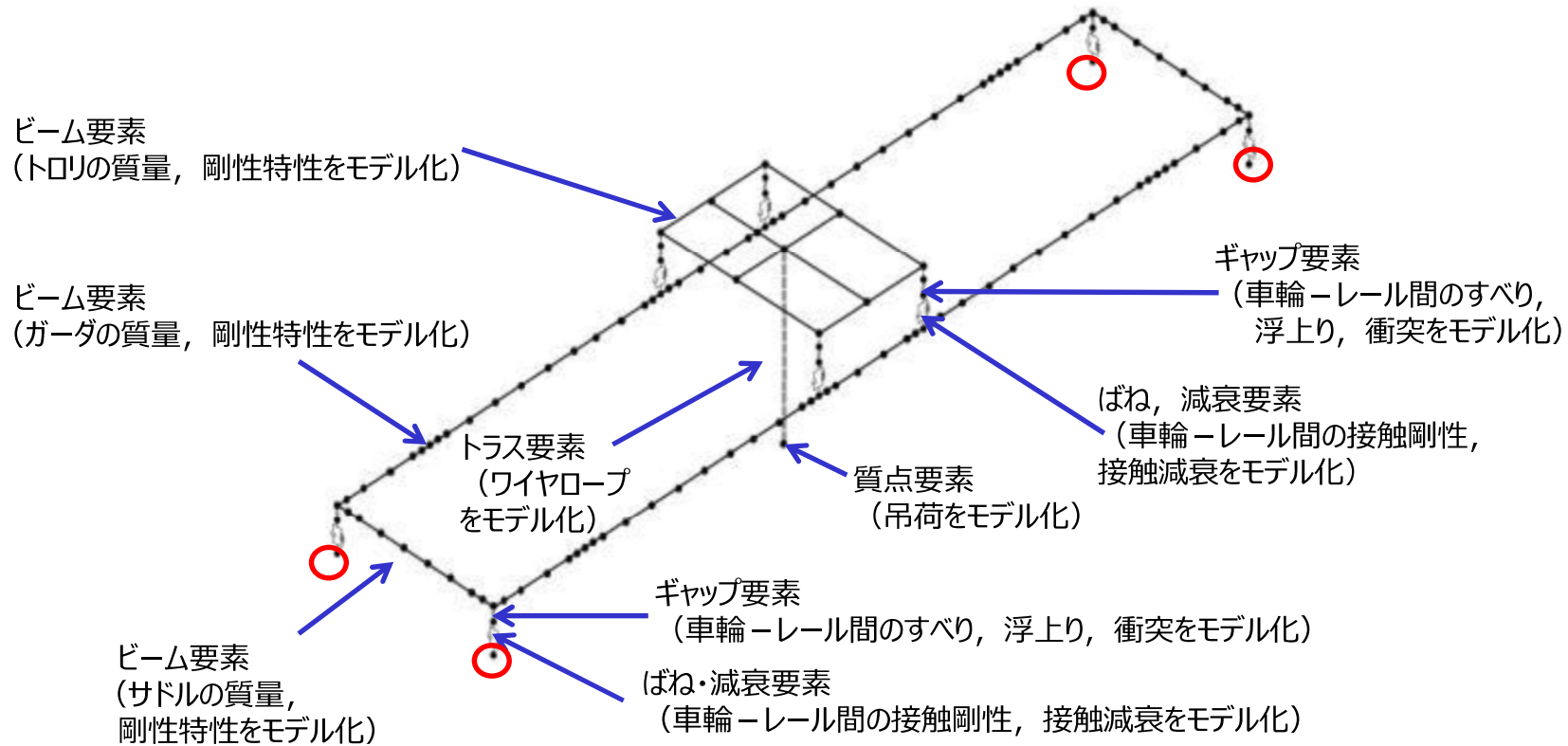
今回工認では、鉛直方向動的地震力を考慮する必要があること及びクレーン車輪部の構造を変更しておりレール上に固定されていないという構造上の特徴を踏まえ、鉛直方向の地震力に対する車輪部の浮上り挙動を考慮した3次元FEM解析モデルを用いた非線形時刻歴応答解析により評価を実施する。

評価手法の比較

		大間1号炉	島根2号炉
解析手法		非線形時刻歴応答解析	同左
解析モデル		3次元FEMモデル	同左
車輪-レール間の境界条件		すべり, 浮上り, 衝突考慮	同左
地震力	水平	動的地震力	同左
	鉛直	動的地震力	同左
入力地震動		原子炉建物におけるクレーン設置位置の床応答加速度	同左
減衰定数	水平	2.0%	同左
	鉛直	2.0%	同左
解析プログラム		ABAQUS (Ver.6.5-4)	ABAQUS (Ver.6.11-1)

天井クレーンを構成する主要部材はビーム要素でモデル化する。車輪部はレールに乗っており固定されず、すべり、浮上り、衝突等の非線形挙動を考慮する必要があることから、ギャップ要素、ばね要素及び減衰要素でモデル化する。

○：原子炉建物における天井クレーン設置位置の床応答加速度時刻歴波の入力位置

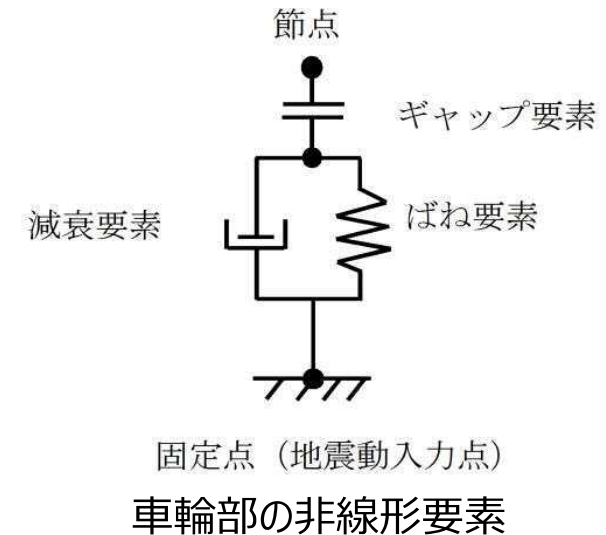
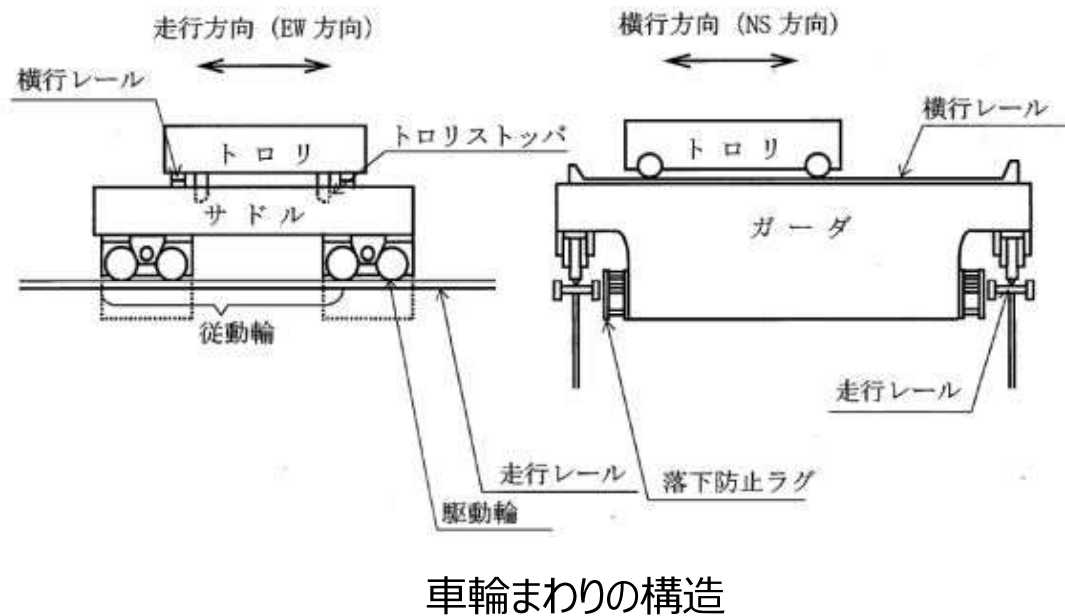


原子炉建物天井クレーンの解析モデル

【論点Ⅱ-18】

5. 車輪とレール間の摩擦特性及び非線形要素

- クレーンの車輪には、電動機及び減速機等の回転部分と連結された駆動輪と回転部分と連結されていない従動輪の2種類がある。このうち駆動輪は回転が拘束されているため、最大静止摩擦力以上の地震慣性力が加わった場合、回転部分が追従できず、レール上をすべる挙動をする。ここで、摩擦係数は0.3を用いる。
- 車輪部の浮上り等の挙動を模擬するためギャップ要素を用いる。
- 接触部位の局所変形による接触剛性をばね要素で、衝突による減衰効果を減衰要素で模擬し、ギャップ要素と直列に配置する。



6. 原子炉建物天井クレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用（まとめ）

- 構造について比較した結果，先行実績のある大間1号炉の原子炉建屋天井クレーンと島根2号炉の天井建物天井クレーンに差異は見られなかった。
- 評価手法及び解析モデルについて比較した結果，解析モデルの設定方法として，はり要素によるモデル化，水平方向のすべり，鉛直方向の浮上り挙動を考慮する非線形要素の考え方が同様であることを確認した。
- 以上のことから，島根2号炉原子炉建物クレーンの耐震評価として，先行審査実績のある非線形時刻歴応答解析を適用することは妥当であると考ええる。

參考資料

(参考) 論点[Ⅱ]既工認と今回工認の手法の相違点の整理に基づく 論点のうち機器・配管系に係る論点一覧表 (1)

分類	項目	内容	適用実績・ 審査実績	論点整理 結果※	今回 説明	備考
機器 配管系	[論点Ⅱ-5] サプレッション・チェンバ内部 水質量の考え方の変更	・既工認では内部水全体を剛体と見なし、 水の全質量を用いていたが、今回工認 ではタンクの耐震設計に一般的に用いら れている有効質量の考え方を適用する。	—	A	—	—
	[論点Ⅱ-6] 機器・配管系への制震装 置の適用	・取水槽ガントリクレーン及びsクラス以外 の配管系に制震装置を設置するため、 地震応答解析において制震装置の特性 を適切にモデル化し、時刻歴応答解析 を適用する。	BW R (柏崎6,7号 既工認他) ^{注1}	A	○	—
	[論点Ⅱ-7] 地震時の燃料被覆管の 閉じ込め機能の維持	・燃料被覆管の閉じ込め機能維持の観 点で、地震時の荷重を考慮した一次+ 二次応力の評価を実施する。	—	A	—	第759回審査会合 (R元年8月27日) にて説明
	[論点Ⅱ-8] 規格適用範囲外の動的 機能維持評価の実施	・燃料移送ポンプの動的機能維持評価 について、JEAG4601の考え方及び既 往研究の知見を用いて詳細評価（異常 要因分析や構造強度評価）を実施する。	BW R (東海第二)	B1	—	—
	[論点Ⅱ-9] 一定の余裕を考慮した弁 の動的機能維持評価	・弁等の機器の動的機能維持評価にあ たって、応答加速度が当該機器を支持 する配管の地震応答により増加すると考 えられるときは、配管の地震応答の影 響を考慮し、一定の余裕を見込んだ評 価を行う。	PW R BW R (東海第二他)	B2	—	—

※ (論点整理結果の定義)

A : 過去に適用実績がないもの (新規性: 高)

B 1 : 新規制審査実績はあるが、個別の確認を要するもの (新規性: 中), B 2 : 新規制審査実績が十分にあるもの (新規性: 低), B 3 : 過去の工認実績はあるが、一部差異があるもの (新規性: 低)

C : 過去の工認実績と相違がなく、個別審査が不要なもの

D 1 : 過去に十分な工認実績があり、工認段階の審査とするもの

注 1 : 排気筒への制震装置の適用例がある。

(参考) 論点[Ⅱ]既工認と今回工認の手法の相違点の整理に基づく 論点のうち機器・配管系に係る論点一覧表 (2)

分類	項目	内容	適用実績・ 審査実績	論点整理 結果※	今回 説明	備考
機器 配管系	[論点Ⅱ-10] 取水槽ガントリクレーンへの 非線形時刻歴応答解析 の適用	・取水槽ガントリクレーンの耐震性評価において、浮き上がりやすさを考慮した解析モデルによる非線形時刻歴応答解析を適用する。	BWR (大間1号 既工認他)	B3	○	—
	[論点Ⅱ-11] 原子炉格納容器スタビライ ザばね定数の変更	・既工認では、1対のトラス（パイプ2本）の荷重－変位関係によりばね定数を算定していたが、今回工認では、取り付け部であるガセットプレート及びビヤラグもモデル化対象に含め、全体系モデルによるFEM解析により、実現象に即したばね定数を算定する。	BWR (大間1号 既工認他)	B3	—	—
	[論点Ⅱ-12] 容器等の応力解析へのF EMモデルの適用	・既工認において公式等による評価にて耐震計算を実施していた設備について、3次元FEMモデルを適用した耐震評価を実施する。	BWR (大間1号 既工認他)	D1	—	第781回審査会合 (R元年10月8日) にて説明
	[論点Ⅱ-13] 水平方向の原子炉建物 －大型機器連成モデルの 変更（原子炉圧力容器 スタビライザのばね定数変 更を含む）	・水平方向の応答解析モデルについて、既工認ではPCV-RPVモデルとRPV-Rinモデルの2種類のモデルを用いていたが、今回工認ではPCV-RPV-Rinモデルを用いる。 ・RPVスタビライザのばね定数算出方法を変更する。	BWR (大間1号 既工認他)	D1	—	—

※（論点整理結果の定義）

A：過去に適用実績がないもの（新規性：高）

B1：新規審査実績はあるが、個別の確認を要するもの（新規性：中）、B2：新規審査実績が十分にあるもの（新規性：低）、B3：過去の工認実績はあるが、一部差異があるもの（新規性：低）

C：過去の工認実績と相違がなく、個別審査が不要なもの

D1：過去に十分な工認実績があり、工認段階の審査とするもの

(参考) 論点[Ⅱ]既工認と今回工認の手法の相違点の整理に基づく 論点のうち機器・配管系に係る論点一覧表 (3)

分類	項目	内容	適用実績・ 審査実績	論点整理 結果※	今回 説明	備考
機器 配管系	[論点Ⅱ-14] 鉛直方向応答解析モデル の追加	・鉛直方向の動的地震力に対する考慮 が必要となったことから、鉛直方向につい ても動的地震力の算定を行うための解析 モデルを作成する。	PW R BW R (大間1号 既工認他)	D1	—	第781回審査会合 (R元年10月8日) にて説明
	[論点Ⅱ-15] 鉛直方向の減衰定数の 考慮	・鉛直方向の動的地震力を適用するこ とに伴い、鉛直方向の設計用減衰定数を 新たに設定する。	PW R BW R (大間1号 既工認他)	D1	—	第781回審査会合 (R元年10月8日) にて説明
	[論点Ⅱ-16] 最新知見として得られた減 衰定数の採用	・今回工認では最新知見として得られた 減衰定数を採用する。	PW R BW R (大間1号 既工認他)	D1	—	第781回審査会合 (R元年10月8日) にて説明
	[論点Ⅱ-17] 水平方向と鉛直方向の二 乗和平方根 (SRSS) 法 による組合せ	・水平方向及び鉛直方向ともに動的な 地震力での評価となったことから、方向ご との最大加速度の生起時刻に差があると いう実挙動を踏まえて、二乗和平方根 (SRSS) 法による組合せ法を適用する。	PW R BW R (大間1号 既工認他)	D1	—	第781回審査会合 (R元年10月8日) にて説明

※ (論点整理結果の定義)

A : 過去に適用実績がないもの (新規性: 高)

B 1 : 新規制審査実績はあるが、個別の確認を要するもの (新規性: 中), B 2 : 新規制審査実績が十分にあるもの (新規性: 低), B 3 : 過去の工認実績はあるが、一部差異があるもの (新規性: 低)

C : 過去の工認実績と相違がなく、個別審査が不要なもの

D 1 : 過去に十分な工認実績があり、工認段階の審査とするもの

(参考) 論点[Ⅱ]既工認と今回工認の手法の相違点の整理に基づく 論点のうち機器・配管系に係る論点一覧表 (4)

分類	項目	内容	適用実績・ 審査実績	論点整理 結果※	今回 説明	備考
機器 配管系	[論点Ⅱ-18] 原子炉建物天井クレーンの非線形時刻歴応答解析の適用	・浮き上がりやすべりを考慮した解析モデルによる非線形時刻歴応答解析を適用する。	BW R (大間1号 既工認他)	D1	○	—
	[論点Ⅱ-19] 立形ポンプの応答解析モデルの精緻化	・既工認モデルに対してJEAG4601-1991追補版に基づくモデルの精緻化を行う。	PW R BW R (大間1号 既工認他)	D1	—	第781回審査会合 (R元年10月8日) にて説明
	[論点Ⅱ-20] 動的機能維持評価の実施	・地震時又は地震後に動的機能が要求される機器等については、基準地震動Ssによる応答に対して、実証試験等により確認されている機能確認済加速度等を許容限界とした評価を行う。	PW R BW R (大間1号 既工認他)	D1	—	—
	[論点Ⅱ-21] 等価繰返し回数の設定	・基準地震動の変更に伴い、機器・配管系の耐震評価における疲労評価に用いる等価繰返し回数の見直しを行う。 (第701回審査会合(平成31年4月9日)における指摘事項「機器・配管系の地震等価繰返し回数の設定については、論点として抽出した上で、既工認、他プラントとの比較の観点から重み付けを行い、その結果を説明すること。」の回答)	PW R BW R (大間1号 既工認他)	D1	—	第781回審査会合 (R元年10月8日) にて説明

※ (論点整理結果の定義)

A : 過去に適用実績がないもの(新規性:高)

B1 : 新規制審査実績はあるが、個別の確認を要するもの(新規性:中), B2 : 新規制審査実績が十分にあるもの(新規性:低), B3 : 過去の工認実績はあるが、一部差異があるもの(新規性:低)

C : 過去の工認実績と相違がなく、個別審査が不要なもの

D1 : 過去に十分な工認実績があり、工認段階の審査とするもの