

島根原子力発電所 2号炉 審査資料	
資料番号	EP-050 改 50
提出年月日	令和 2年 7月 7日

# 島根原子力発電所 2号炉

## 地震による損傷の防止

令和 2年 7月  
中国電力株式会社

## 第4条：地震による損傷の防止

### <目次>

#### 第1部

1. 基本方針
  - 1.1 要求事項の整理
  - 1.2 追加要求事項に対する適合性
    - (1) 位置，構造及び設備
    - (2) 安全設計方針
    - (3) 適合性説明
  - 1.3 気象等
  - 1.4 設備等
  - 1.5 手順等

#### 第2部

1. 耐震設計の基本方針
  - 1.1 基本方針
  - 1.2 適用規格
2. 耐震設計上の重要度分類
  - 2.1 重要度分類の基本方針
  - 2.2 耐震重要度分類
3. 設計用地震力
  - 3.1 地震力の算定法
  - 3.2 設計用地震力
4. 荷重の組合せと許容限界
  - 4.1 基本方針
5. 地震応答解析の方針
  - 5.1 建物・構築物
  - 5.2 機器・配管系
  - 5.3 屋外重要土木構造物
  - 5.4 津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備並びに浸水防止設備及び津波監視設備が設置された建物・構築物
6. 設計用減衰定数
7. 耐震重要施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響
8. 水平2方向及び鉛直方向の地震力の組合せに関する影響評価方針
9. 構造計画と配置計画

(別添)

- 別添－1 設計用地震力
- 別添－2 動的機能維持の評価
- 別添－3 弾性設計用地震動  $S_d$  ・静的地震力による評価
- 別添－4 上位クラス施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響の検討について
- 別添－5 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価方針
- 別添－6 屋外重要土木構造物等の耐震評価における断面選定の考え方
- 別添－7 主要建物の構造概要について
- 別添－8 地震応答解析に用いる地質断面図の作成例及び地盤の速度構造

(別紙)

- 別紙－1 設置変更許可申請における既許可からの変更点及び既工認との手法の相違点の整理について
- 別紙－2 建物の地震応答解析モデルについて（建物基礎底面の付着力及び3次元FEMモデルの採用）
- 別紙－3 基礎スラブの応力解析モデルへの弾塑性解析の適用について
- 別紙－4 原子炉建物屋根トラスの解析モデルへの弾塑性解析の適用について
- 別紙－5 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化について
- 別紙－6 屋外重要土木構造物等の耐震評価における断面選定について
- 別紙－7 機器・配管系における手法の変更点について
- 別紙－8 サプレッション・チェンバ内部水質量の考え方の変更について
- 別紙－9 下位クラス施設の波及的影響の検討について
- 別紙－10 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
- 別紙－11 液状化影響の検討方針について
- 別紙－12 既設設備に対する耐震補強等について
- 別紙－13 後施工せん断補強筋による耐震補強
- 別紙－14 地震時における燃料被覆管の閉じ込め機能の維持について
- 別紙－15 動的機能維持評価の検討方針について
- 別紙－16 建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価について

別紙－１７ 地下水位低下設備について

別紙－１８ 機器・配管系への制震装置の適用について

下線は、今回の提出資料を示す。



## 島根原子力発電所 2 号炉

機器・配管系における手法の変更点

について

(耐震)

## 目 次

1. はじめに
2. 手法の相違点
3. 手法の変更項目に対する島根 2 号炉への適用性

添付資料-1 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について

添付資料-2 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について

添付資料-3 ポンプ等の応答解析モデルの精緻化について

添付資料-4 容器等の応力解析への F E Mモデルの適用について

添付資料-5 原子炉建物-大型機器連成解析モデルの変更について

添付資料-6 最新知見として得られた減衰定数の採用について

添付資料-7 水平方向と鉛直方向の動的地震力の二乗和平方根法による組合せについて

添付資料-8 等価繰返し回数の評価方針について

添付資料-9 多入力の時刻歴応答解析の適用について

下線は、今回の提出資料を示す。

## 1. はじめに

機器・配管系の耐震評価において既工認から評価手法を変更するものについて、「別紙－1 設置変更許可申請における既許可からの変更点及び既工認との手法の相違点の整理について」の整理結果を踏まえ、手法の相違点及び島根2号炉としての適用性の確認結果を示す。

## 2. 手法の相違点

### (1) クレーン類への非線形時刻歴応答解析の適用

原子炉建物天井クレーン及び取水槽ガントリクレーンの解析では、より詳細な手法を用いる観点から、すべり及び浮上りの条件を考慮した非線形時刻歴応答解析にて評価を実施する。クレーン類への非線形時刻歴応答解析の適用は、他プラントを含む既工認あるいは補正工認において適用実績がある手法である（詳細は添付資料-1 参照）。なお、取水槽ガントリクレーンについては、既工認の実績として参照した大間1号炉建設工認の原子炉建屋天井クレーンと主要構造に差異がある（詳細は添付資料-2 参照）。

### (2) ポンプ等の応答解析モデルの精緻化

最新の工認実績を踏まえ、ポンプ等の一部設備に対して応答解析モデルの変更を行う。応答解析モデルの変更については、他プラントを含む既工認において適用実績がある手法である（詳細は添付資料-3 参照）。

### (3) 容器等の応力解析へのFEM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モデル等を適用した耐震評価を実施する。FEMモデルを用いた応力解析手法は、他プラントを含む既工認において適用実績がある手法である（詳細は添付資料-4 参照）。

### (4) 原子炉建物－大型機器連成解析モデルの変更

原子炉本体及び炉内構造物の水平方向応答解析モデルについて、既工認では建設工程の関係上、原子炉格納容器－原子炉压力容器モデルと原子炉压力容器－炉内構造物モデルの2種類のモデルを用いていたが、今回工認では、原子炉格納容器－原子炉压力容器－炉内構造物モデルを用いる。これに合わせて、原子炉压力容器スタビライザ及び原子炉格納容器スタビライザのばね定数算出方法について、最新の工認実績を踏まえた算出方法に変更する。本手法は、他プラントを含む既工認あるいは補正工認において適用実績がある手法である。

また、鉛直方向に動的地震力が導入されたことから、原子炉本体及び炉内構造物について、鉛直方向の応答を適切に評価する観点で、水平方向応答解析モデルとは別に鉛直方向応答解析モデル（原子炉压力容器－原子炉格納容器－炉内構造物モデル）を新たに採用し、鉛直地震動に対する評価を実施する。鉛直方向応答解析モデルは、他プラントを含む既工認において適用実績がある手法である（詳細は添付資料-5 参照）。

### (5) 最新知見として得られた減衰定数の採用

配管系，原子炉建物天井クレーン及び燃料取替機について，最新知見として得られた減衰定数を採用する。その値は，振動試験結果等を踏まえ，設計評価用として安全側に設定した減衰定数を採用したものである。また，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についても新たに設定している。

上記の減衰定数の設定は，他プラントを含む既工認において適用実績がある手法である（詳細は添付資料-6 参照）。

(6) 水平方向と鉛直方向の動的地震力の二乗和平方根法による組合せ

鉛直方向の動的地震力が導入されたことから，水平方向と鉛直方向の地震力の組合せとして，既往の研究等に基づき二乗和平方根（以下「S R S S」という。）法を用いる。S R S S法による荷重の組合せは，他プラントを含む既工認において適用実績がある手法である（詳細は添付資料-7 参照）。

(7) 等価繰返し回数の評価方針

基準地震動の見直しに伴い，耐震評価における疲労評価に適用する等価繰返し回数を見直す。適用する等価繰返し回数の設定法は他プラントを含む既工認において適用実績がある手法である（詳細は添付資料-8 参照）。

(8) 多入力の時刻歴応答解析手法の適用

三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析において，多入力の時刻歴応答解析手法を適用する。なお，本解析手法は，原子炉建物等の建物・構築物の地震応答解析において，他プラントを含む既工認にて適用実績がある（詳細は添付資料-9 参照）。

3. 手法の変更項目に対する島根 2 号炉への適用性

手法の変更点について，以下に示す 3 項目に分別した上で，島根 2 号炉としての適用性を示す。

(1) 先行プラントの知見反映を基本として変更する手法

先行プラントで適用されている知見を反映する変更項目については，評価対象施設に応じて質点系モデル，F E Mモデル等により適切にモデル化し，適切な解析手法を用いて地震応答解析を実施することから，島根 2 号炉への適用に際して問題となることはない。

- ・ クレーン類への非線形時刻歴応答解析の適用
- ・ ポンプ等の応答解析モデルの精緻化
- ・ 容器等の応力解析への F E Mモデルの適用
- ・ 原子炉建物－大型機器連成解析モデルの変更
- ・ 等価繰返し回数の評価方針

(2) 鉛直方向地震の動的な取扱いを踏まえて適用する手法

平成 18 年 9 月の耐震設計審査指針改訂から鉛直方向地震力に対する動的な取扱いがされており，大間 1 号炉建設工認及び P W R プラントの新規制基準工認で適用実績があり，島根 2 号炉への適用に際して問題となることはない。

- ・水平方向と鉛直方向の動的地震力の二乗和平方根による組合せ
- ・原子炉建物－大型機器連成解析モデルの変更

(3) より現実的な応答を模擬する観点から採用する手法

a. 最新知見として得られた減衰定数の採用

配管系，原子炉建物天井クレーン及び燃料取替機の減衰定数は，振動試験結果等を踏まえて設定した減衰定数を採用する。

配管系については，PWRプラントの新規制基準工認で適用実績があり，また炉型，プラント毎による設計方針について大きな差はない。また，最新知見として採用する減衰定数の設定の検討に際して，BWRプラントの配管系を踏まえた検討も実施しており，適用に際して問題となることはない。

原子炉建物天井クレーン及び燃料取替機の減衰定数の設定に際しては，振動試験を用いた検討を実施している。振動試験の試験体は，実機と同様の振動特性である試験体を用いることにより，減衰定数のデータを採取している。島根2号炉の原子炉建物天井クレーン及び燃料取替機は，振動試験に用いた試験体と同様の構造，仕様であることを確認しており，最新知見として得られた減衰定数の適用に際して問題となることはない（試験等の詳細は，添付資料-6 に記載）。なお，本減衰定数の適用は大間1号炉建設工認及びPWRプラントの新規制基準工認において適用実績がある。

b. 多入力の時刻歴応答解析手法の適用

三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析において，多入力の時刻歴応答解析手法を適用する。本解析手法は，原子炉建物等の建物・構築物の地震応答解析において，他プラントを含む既工認にて適用実績がある。

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について

目 次

1. はじめに
2. 基本方針
  - 2.1 要求事項
  - 2.2 構造の概要
    - 2.2.1 取水槽ガントリクレーンの主要構造
    - 2.2.2 単軸粘性ダンパ
    - 2.2.3 転倒防止装置の構造
    - 2.2.4 トロリストッパ
    - 2.2.5 ホイストレール・車輪
  - 2.3 評価方針
  - 2.4 適用規格
3. 応答解析の方法
  - 3.1 解析方法及び解析モデル
    - 3.1.1 解析方法の詳細
    - 3.1.2 解析モデル及び諸元
    - 3.1.3 解析モデルの境界条件
  - 3.2 入力地震動
4. 耐震評価の方法
  - 4.1 評価方針
  - 4.2 荷重の組合せ
  - 4.3 評価対象部位
  - 4.4 許容限界
    - 4.4.1 許容応力
    - 4.4.2 許容浮上り量
    - 4.4.3 吊具の許容荷重
    - 4.4.4 単軸粘性ダンパの許容限界
  - 4.5 各部の評価方法
    - 4.5.1 取水槽ガントリクレーン本体，転倒防止装置，走行レール，単軸粘性ダンパブレース及び単軸粘性ダンパクレビス部の応力評価方法
    - 4.5.2 トロリの浮上り評価方法
    - 4.5.3 吊具の荷重評価方法
    - 4.5.4 単軸粘性ダンパの変位及び荷重評価方法

## 5. 評価条件・評価結果

### 5.1 評価条件

### 5.2 評価結果

#### 添付資料

- (2-1) 取水槽ガントリクレーンの改造箇所
- (2-2) 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
- (2-3) 取水槽ガントリクレーンの解析ケースの設定
- (2-4) 取水槽ガントリクレーン車輪部の非線形要素（摩擦，接触，減衰）
- (2-5) 取水槽ガントリクレーン本体及びトロリのすべりの影響について

## 1. はじめに

設計基準対象施設のうちSクラスに属する施設, その間接支持構造物及び屋外重要土木構造物(以下「Sクラス施設等」という。)が下位クラス施設の波及的影響によってその安全機能を損なわないこと, また, 重大事故等対処施設のうち常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備並びにこれらが設置される常設重大事故等対処施設(以下「重要SA施設」という。)が下位クラス施設の波及的影響によって重大事故等に対処するために必要な機能を損なわないことについては, 「別紙-9 下位クラス施設の波及的影響の検討について」(以下「波及的影響検討」という。)において確認している。

波及的影響検討において抽出された下位クラス施設のうち, 島根2号炉の取水槽ガントリクレーンの耐震評価について, 取水槽ガントリクレーンが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, 鉛直方向地震力に対する車輪の浮上り等の挙動を考慮した応答解析の方法及び耐震評価の方法について示す。また, 耐震評価を実施し, 構造成立性を見通しを示す。なお, 取水槽ガントリクレーンに設置する単軸粘性ダンパの詳細については, 別紙-18 「機器・配管系への制震装置の適用について」に示す。

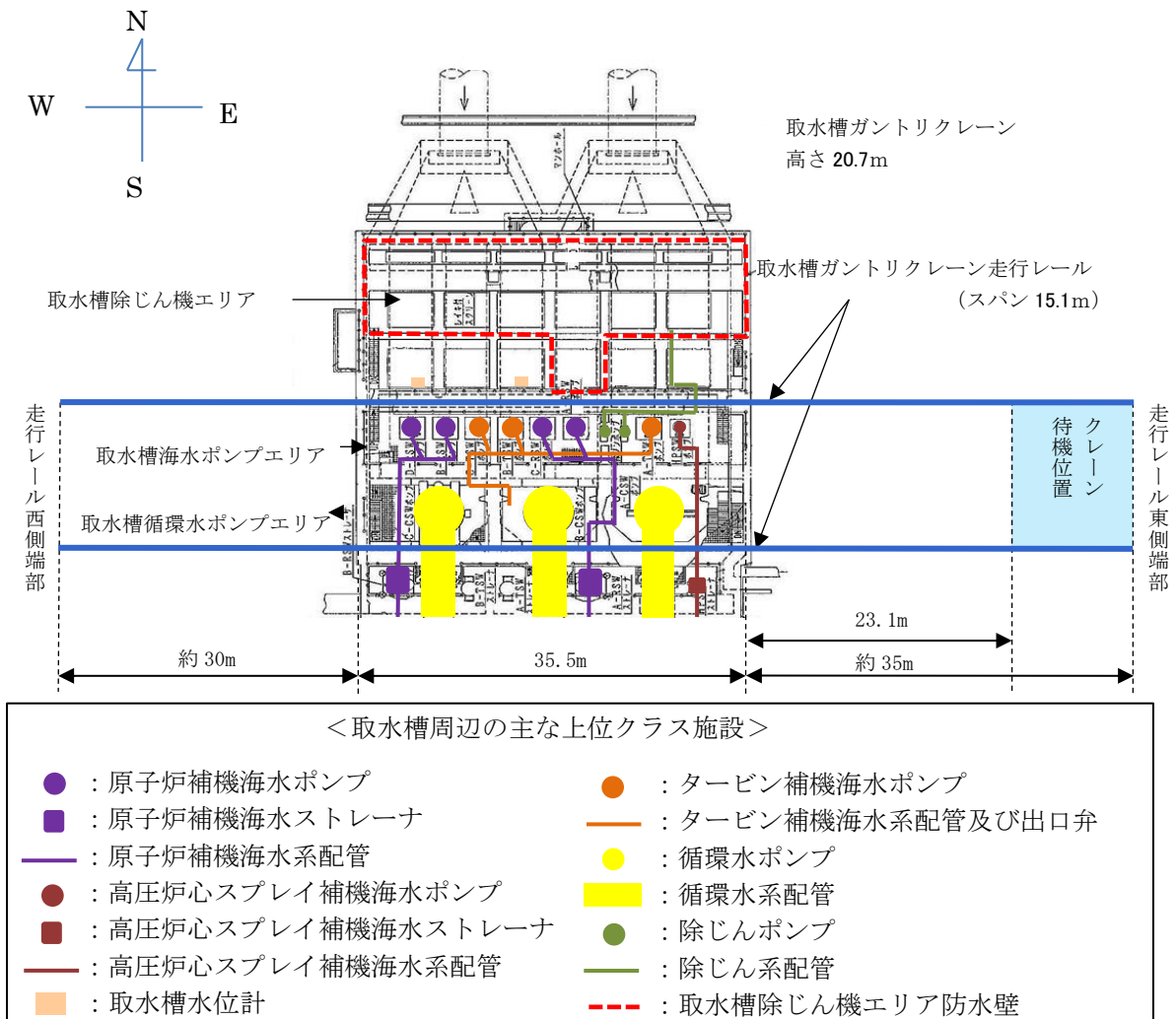
## 2. 基本方針

### 2.1 要求事項

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, 原子炉補機海水ポンプ等のメンテナンスに使用される設備である。取水槽ガントリクレーンの設置位置について第2-1図に示す。

発電所の運転中など原子炉補機海水ポンプ等のメンテナンスを実施しない期間は, 取水槽ガントリクレーンは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。一方で, 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, 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。





第2-1図 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

## 2.2 構造の概要

### 2.2.1 取水槽ガントリクレーンの主要構造

取水槽ガントリクレーンの主要な構造部材としては、脚、ガーダ、トロリ、ホイスト、単軸粘性ダンパがある。構造を第2-2図に示す。

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。原子炉補機海水ポンプ等のメンテナンス時には、トロリに設置された巻上げ装置（主巻）、又はホイストを使用して、ワイヤロープ及びフックを介し、吊荷の吊上げ、吊下げ、移動等の作業を実施する。

取水槽ガントリクレーンは大型の構造物であり、制震装置の設置による地震荷重の低減が耐震性向上に有効である。取水槽ガントリクレーンの応答は、走行レールの直交方向に脚が変形する振動モードが支配的であり、ガーダと脚の

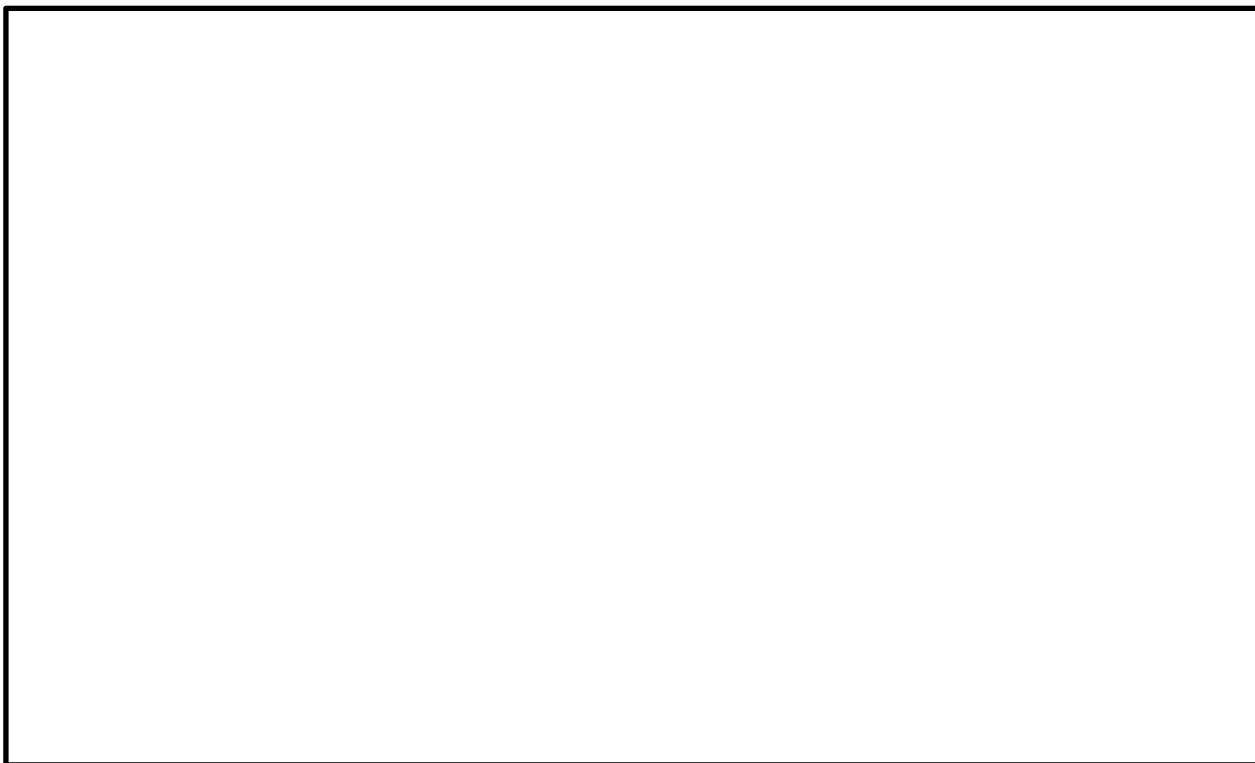
間にブレースを介して単軸粘性ダンパを制震装置として設置する。

単軸粘性ダンパ取付部の構造を第2-3図に示す。ダンパ本体の長さは標準設計の約1.5mとし、これに約10mのブレースを接続している。単軸粘性ダンパとガーダの接続、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。このクレビスは単軸粘性ダンパの伸縮方向と直交する一方向にはピンを軸として自由に回転可能となっている。また、ピンの軸受部は球面軸受となっており、クレビスの回転方向以外の方向にも約3度の許容回転角度を有することで、単軸粘性ダンパに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取付部材の質量は適切に地震応答解析モデルに反映する。

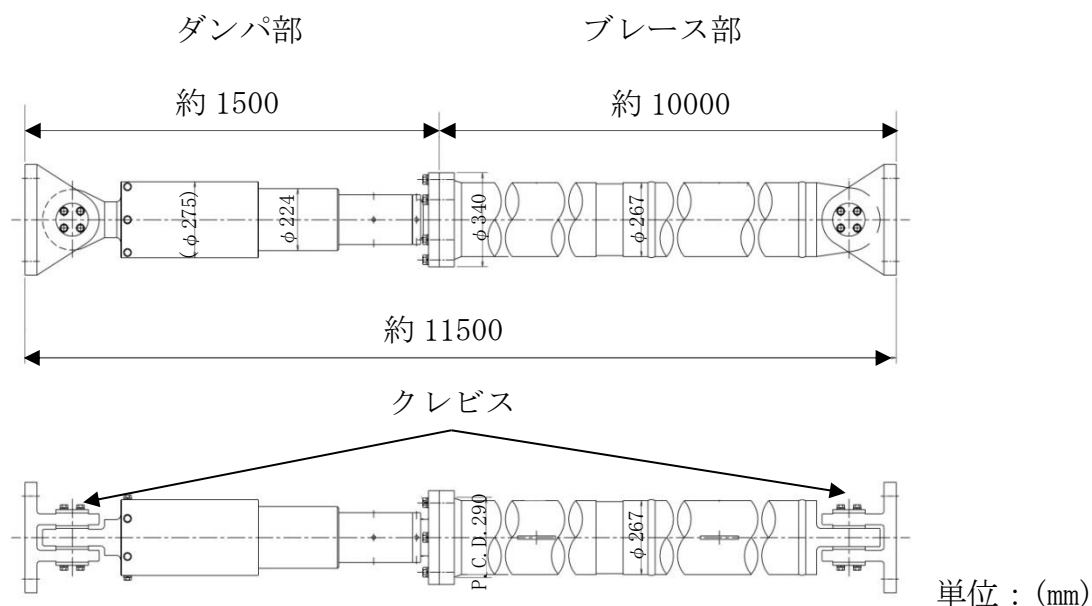
取水槽ガントリクレーン本体は、取水槽海水ポンプエリアの北側と取水槽循環水ポンプエリア南寄りに敷設された走行レール上を脚下部にある走行装置及び車輪によって東西方向に移動する。トロリは、ガーダ上面の横行レール上を横行装置及び横行車輪によって南北方向に移動する。ホイストは、ガーダ下に設置されたホイストレールに沿って、南北方向に移動する。また、取水槽ガントリクレーン本体の地震による転倒を防止するため、本体下部に転倒防止装置が設置されており、地震時に浮上りが生じた場合でも転倒しない構造となっている。トロリにはトロリストoppaを設置しており、浮上りによる脱線・落下を防止する構造となっている。

なお、本資料で示す取水槽ガントリクレーンの構造は、改造後の状態のものである。改造箇所の概要を添付資料(2-1)に示す。

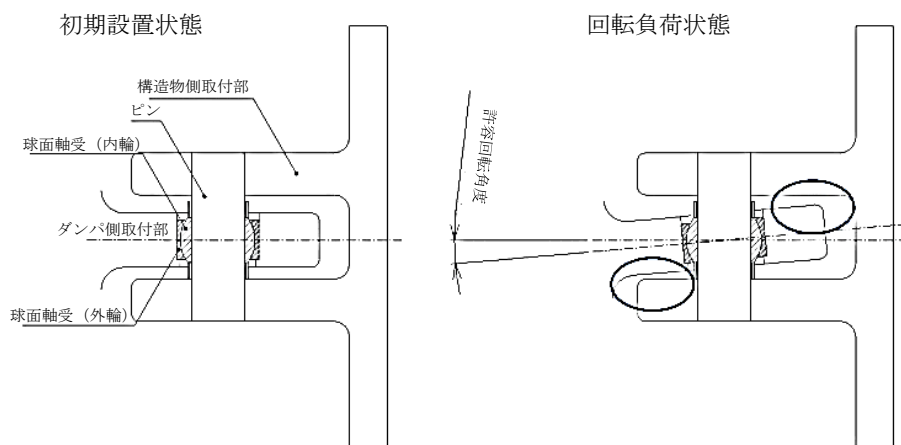


第2-2図 取水槽ガントリクレーンの構造

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。



単軸粘性ダンパ及びブレースの構造



クレビス部詳細

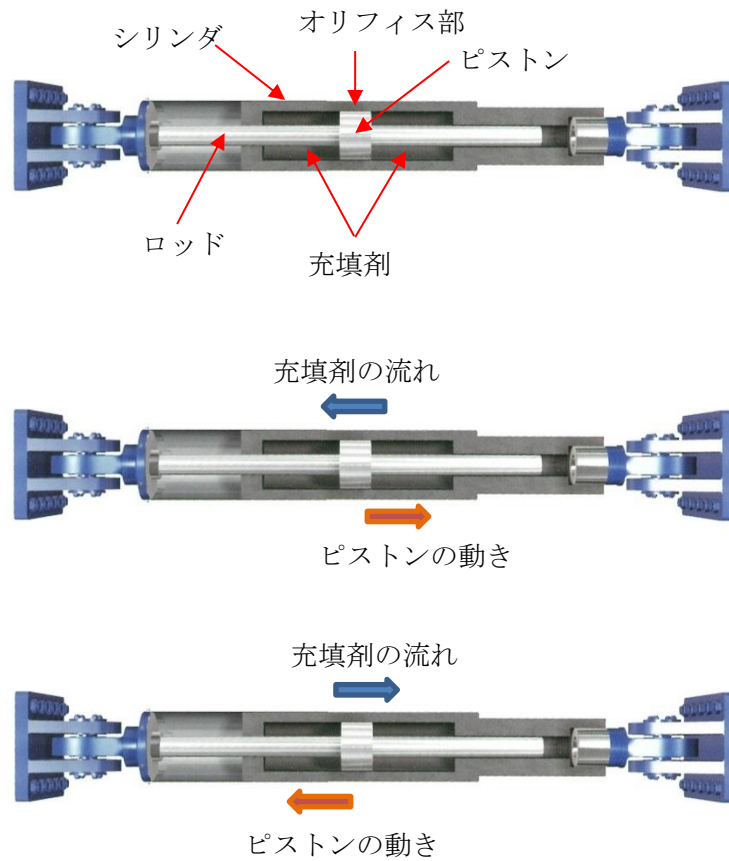
第2-3図 単軸粘性ダンパ取付部の構造

### 2.2.2 単軸粘性ダンパ

単軸粘性ダンパの仕様を第2-1表に示す。単軸粘性ダンパの基本構成、動作を第2-4図に示す。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の外面の間に形成されるオリフィス部を粘性流体が流れ、その抵抗力により減衰性能を発揮するものである。単軸粘性ダンパの粘性体は化学的に安定であり、消防法で定められている危険物に該当しない。

第2-1表 単軸粘性ダンパの仕様

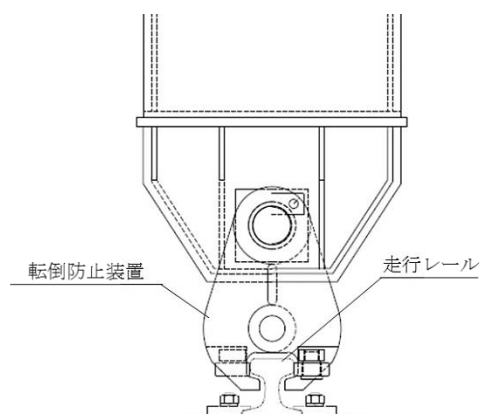
定格荷重 (kN)	全長 (mm)	外径 (mm)	質量 (kg)	許容荷重 (kN)	許容変位 (mm)
220	1535	224	533	300	100



第2-4図 単軸粘性ダンパの動作原理

### 2.2.3 転倒防止装置の構造

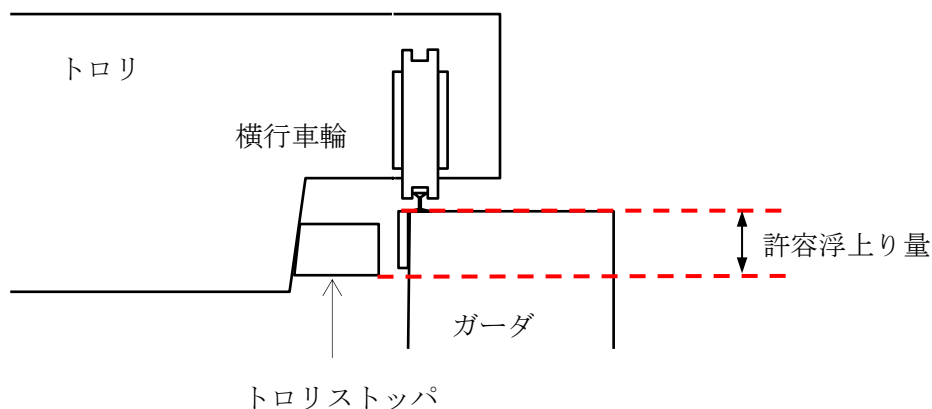
取水槽ガントリークレーン本体車輪部には、地震によって浮上りが発生した場合でも転倒しないように転倒防止装置が取り付けられており、浮上りによる脱線・転倒を防止する構造となっている。転倒防止装置の構造を第2-5図に示す。



第2-5図 転倒防止装置の構造

### 2.2.4 トロリストoppa

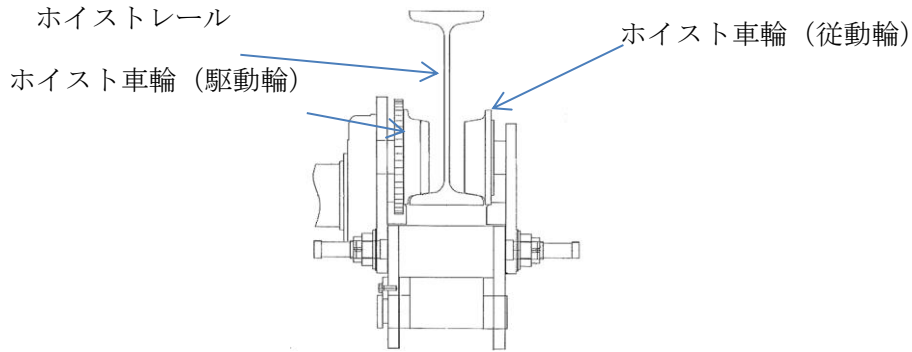
トロリの車輪部には、地震によって浮上りが発生した場合でも落下しないようにトロリストoppaを設置し、浮上りによる脱線・落下を防止する構造とする。トロリストoppaの概略構造を第2-6図に示す。



第2-6図 トロリストoppaの概略構造

### 2.2.5 ホイストレール・車輪

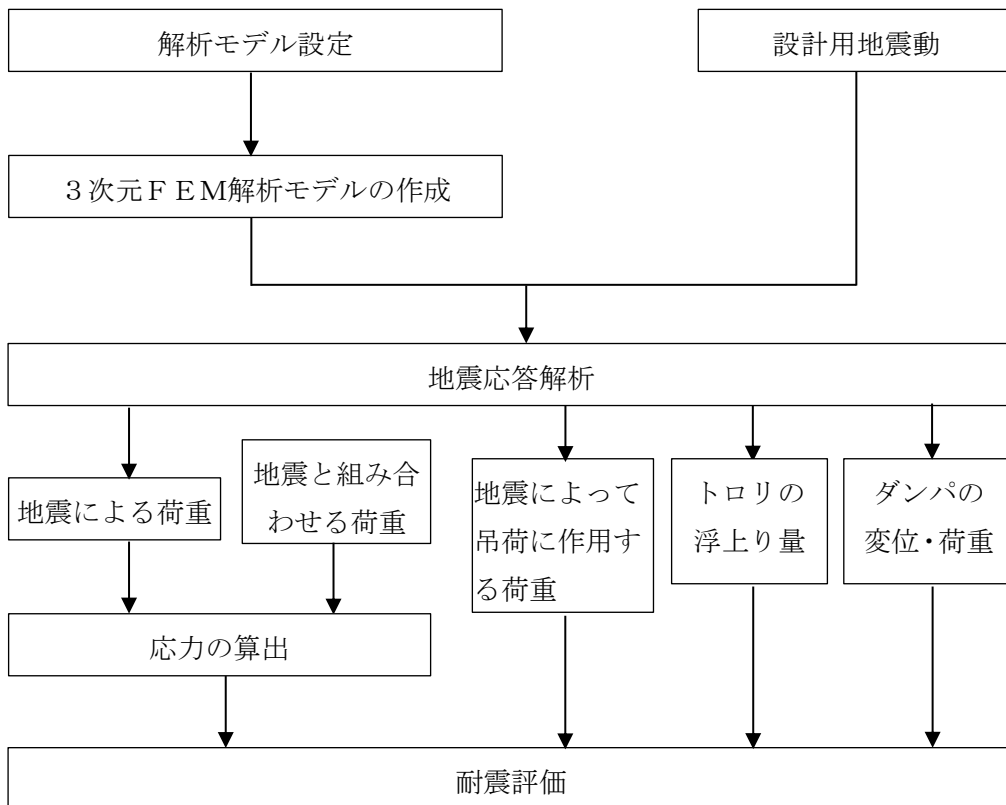
ホイストは、ホイスト車輪がホイストレールを挟み込むことにより懸架されている。ホイストレール及びホイスト車輪の構造を第2-7図に示す。



第 2-7 図 ホイストレール及び車輪の構造

### 2.3 評価方針

取水槽ガントリクレーンの耐震評価にあたっては、「2.2 構造の概要」にて示した取水槽ガントリクレーンの構造を踏まえ作成した「3.1 解析方法及び解析モデル」に示す解析モデルを用いて地震応答解析を行う。解析によって得られた結果を用いて「4. 耐震評価方法」に示す方法により応力、荷重等が許容限界以内であることを確認する。取水槽ガントリクレーンの耐震評価フローを第 2-8 図に示す。



第 2-8 図 取水槽ガントリクレーンの耐震評価フロー

### 2.4 適用規格

取水槽ガントリクレーンの設計には、以下の規格（以下「J E A G 4 6 0 1 等」という。）を適用する。

- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987」 (社) 日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984」(社) 日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」(社) 日本電気協会
- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格(2005年版(2007年追補版を含む)) <第I編 軽水炉規格>JSME S NC1-2005/2007」(日本機械学会)

### 3. 応答解析の方法

#### 3.1 解析方法及び解析モデル

取水槽ガントリクレーンの地震応答解析方法及び解析モデルについて以下に示す。

##### 3.1.1 解析方法の詳細

- (1) 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り、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。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については添付資料(2-2)に示す。
- (2) 取水槽ガントリクレーン本体及びトロリの車輪部はレール上に乗っており固定されていないため、すべりが発生する構造であることから、解析にあたっては車輪、レールのすべり状況を考慮する。
- (3) 吊具の評価を行う場合は、トロリに設置された主巻、ホイストレールに設置されたホイストにワイヤロープを模擬したトラス要素と吊荷を模擬した質点を設けて地震応答解析を実施し、吊具に発生する張力を算出し、これを用いて評価を行う。また、ワイヤロープについては、引張方向(鉛直下向き)にのみ荷重を受け、圧縮方向(鉛直上向き)の荷重を受けない設定とする。
- (4) 単軸粘性ダンパの減衰性能は、抵抗力が速度の0.1乗に比例するダッシュポットとばねを直列に接続したMaxwellモデルでモデル化する。単軸粘性ダンパのMaxwellモデルを第3-1図に示す。なお、単軸粘性ダンパの減衰性能とモデル化の詳細については、別紙-18「機器・配管系への制震装置の適用について」に示す。
- (5) 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、鉛直方向ともに2.0%とし、レイリー減衰を設定する。レイリー減衰は、質量マトリクス及び剛性マトリクスの線形結合により、以下の式で表される。

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K]$$

[C] : 減衰マトリクス  
[M] : 質量マトリクス  
[K] : 剛性マトリクス  
 $\alpha, \beta$  : 係数

係数 $\alpha, \beta$ は、取水槽ガントリクレーンの固有振動数において、適用する減衰定数とレイリー減衰が一致するように以下の式で求める。

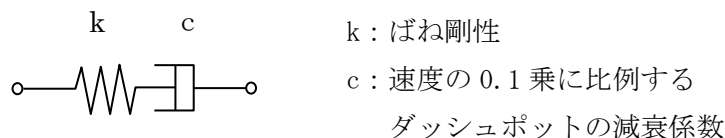
$$h = \frac{\alpha}{2\omega_n} + \frac{\beta\omega_n}{2}$$

$h$  : 減衰比

$\omega_n$  : 固有値解析により求められた $n$ 次モードの固有円振動数

具体的には、取水槽ガントリクレーンの固有値解析の結果から、NS方向の1次固有振動数(1.97Hz)及び鉛直方向の1次固有振動数(4.48Hz)において減衰比が2.0%となるように係数 $\alpha, \beta$ を設定する。設定したレイリー減衰の各固有振動数における減衰比を第3-2図に示す。

- (6) 解析コードはABAQUS (Ver. 6.11-1)を使用する。
- (7) 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可能性があるため、トロリ及びホイストの位置並びに吊荷の有無を考慮し解析ケースを設定する(添付資料(2-3))。トロリとホイストを同時に使用することはないため、いずれかが吊荷有りの場合は、もう一方は待機位置で吊荷なしとする。なお、吊荷の質量はそれぞれの最大質量を設定する。解析ケースを第3-1表に示す。
- (8) 耐震評価に用いる寸法は公称値を使用する。

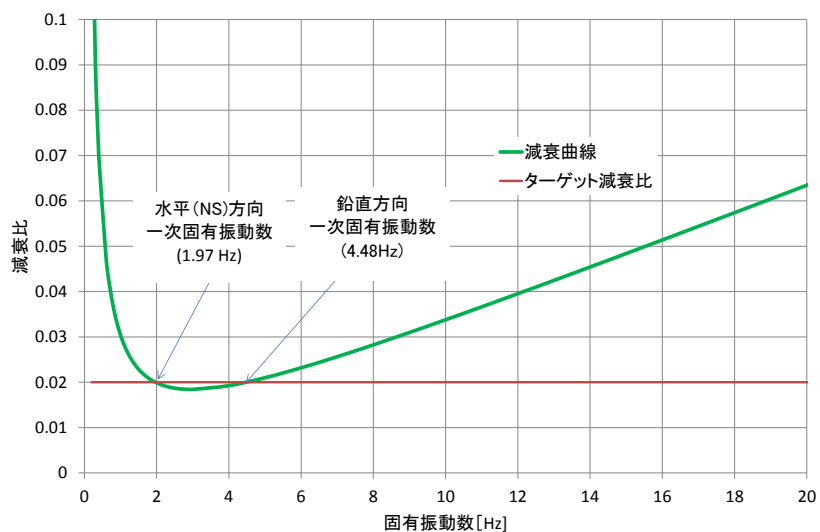


第3-1図 単軸粘性ダンパのMaxwellモデル



第3-1表 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)



第3-2図 設定したレイリー減衰の各固有振動数における減衰比

### 3.1.2 解析モデル及び諸元

取水槽ガントリクレーンの解析モデルは、取水槽ガントリクレーン本体を質点及びはり要素でモデル化した3次元FEM解析モデルとする。取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデルの概要を第3-3図に示す。取水槽ガントリクレーン諸元及び解析モデル諸元を第3-2表及び第3-3表に示す。



第3-3図 取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデル

第3-2表 取水槽ガントリクレーン諸元

部位	質量 (t)
取水槽ガントリクレーン本体 (脚, ガーダ等含む)	162.5
トロリ	17.8
吊具 (主巻ワイヤ, フック)	2.0
ホイスト	3.5
吊具 (ホイストワイヤ, フック)	0.7
吊荷 (最大荷重)	50
合計	236.5

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。

第3-3表 取水槽ガントリクレーン解析モデル諸元

部材	縦弾性係数 (MPa)	断面二次モーメント (mm <sup>4</sup> )		断面積 (mm <sup>2</sup> )
		Iz	Iy	
ガーダ	202000			
脚	202000			
ガーダ継ぎ	202000			
脚下部継ぎ	202000			

### 3.1.3 解析モデルの境界条件

走行車輪（駆動輪，従動輪）と走行レール，横行車輪（駆動輪，従動輪）と横行レール，ホイスト車輪（駆動輪，従動輪）とホイストレールにおける解析モデルの境界条件をそれぞれ第3-4表，第3-5表，第3-6表に示す。

走行車輪においては，EW方向（クレーン本体走行方向）及び鉛直方向について，それぞれすべり，浮上りを考慮しているため，非拘束条件としている。また，NS方向（クレーン本体走行方向に直交する方向）については，走行車輪と走行レールとの間隙（片側約13mm）が小さく，地震時には走行車輪と走行レールが接触して荷重が伝達されるため，すべりを生じない拘束条件としている。

横行車輪においては，NS方向（トロリ横行方向）及び鉛直方向について，それぞれすべり，浮上りを考慮して非拘束条件としている。また，EW方向（トロリ横行方向に直交する方向）については，横行車輪と横行レールの間隙（片側約9mm）が小さく，地震時には横行車輪と横行レールが接触して荷重が伝達されるため，すべりを生じない拘束条件としている。

ホイスト車輪においては，NS方向（ホイスト横行方向）及び鉛直方向について，それぞれすべり，浮上りを考慮して非拘束条件としている。また，EW方向（ホイスト横行方向に直交する方向）については，ホイスト車輪とホイストレールの間隙（片側約5mm）が小さく，地震時にはホイスト車輪とホイストレールが接触して荷重が伝達されるため，すべりを生じない拘束条件としている。

走行車輪，横行車輪及びホイスト車輪の構造概要を第3-4図に示す。

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。

第3-4表 境界条件（走行車輪（クレーン本体車輪）と走行レール）

部位 <sup>注1</sup>	NS方向 (クレーン本体走行方向の 直交方向)	EW方向 (クレーン本体走行方向)	鉛直方向
駆動輪	【拘束】 走行レールによる 拘束	【非拘束】 すべり考慮 $\mu = 0.3$	【非拘束】 浮上り考慮
従動輪		【非拘束】 追従による移動 $\mu = 0$	

注1：部位については，第2-3添図参照

$\mu$ ：摩擦係数

第3-5表 境界条件（横行車輪（トロリ車輪）と横行レール）

部位 <sup>注1</sup>	NS方向 (トロリの横行方向)	EW方向 (トロリ横行方向の 直交方向)	鉛直方向
駆動輪	【非拘束】 すべり考慮 $\mu = 0.3$	【拘束】 横行レールによる 拘束	【非拘束】 浮上り考慮
従動輪	【非拘束】 追従による移動 $\mu = 0$		

注1：部位については，第2-3添図参照

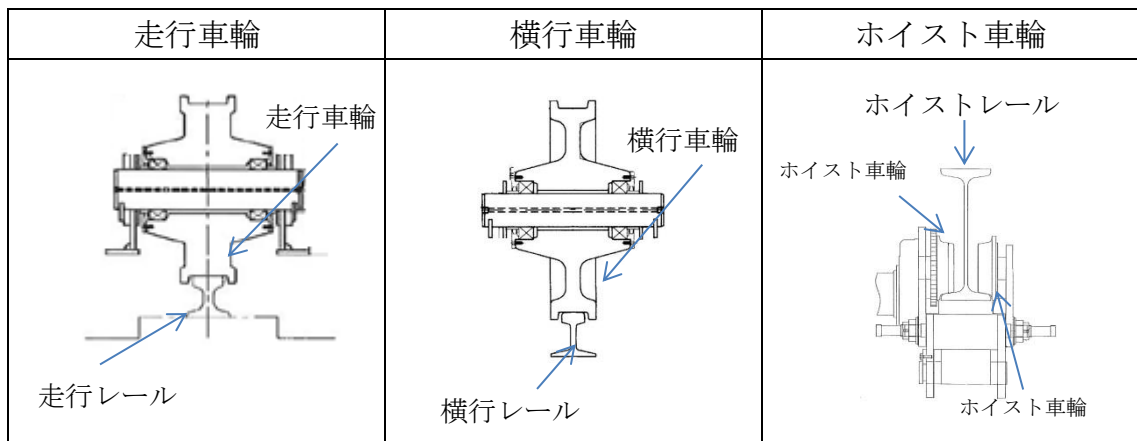
$\mu$ ：摩擦係数

第3-6表 境界条件 (ホイスト車輪とホイストレール)

部位 <sup>注1</sup>	NS方向 (ホイストの横行方向)	EW方向 (ホイスト横行方向の 直交方向)	鉛直方向
駆動輪	【非拘束】 すべり考慮 $\mu = 0.3$	【拘束】 ホイストレール による拘束	【非拘束】 浮上り考慮
従動輪	【非拘束】 追従による移動 $\mu = 0$		

注1：部位については、第2-7図参照

$\mu$ ：摩擦係数



第3-4図 走行車輪，横行車輪及びホイスト車輪の構造概要図

### 3.2 入力地震動

取水槽ガントリクレーンの地震応答解析に適用する地震動に係る事項を以下に示す。

#### (1) 適用する地震動

取水槽ガントリクレーンの地震応答解析に適用する地震動は基準地震動  $S_s$  とし、取水槽ガントリクレーン走行レールの設置位置を考慮して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。取水槽のNS断面の地震応答解析モデルを第3-5図に示す。この解析モデルより求めた基準地震動  $S_s - D$  のNS方向、鉛直方向の入力加速度時刻歴波形を第3-6図、第3-7図に、床応答スペクトルを第3-8図に示す。なお、地震応答解析においては、南北レール位置の床応答スペクトルがほぼ同等のため、取水槽ガントリクレーンの固有周期における応答加速度が大きい南側レール位置（節点10095）の加速度時刻歴を用いる。また、取水槽EW断面の地震応答解析モデルにより求めたEW方向の入力加速度時刻歴波形を第3-9図に示す。

(2) 地震動の入力方向

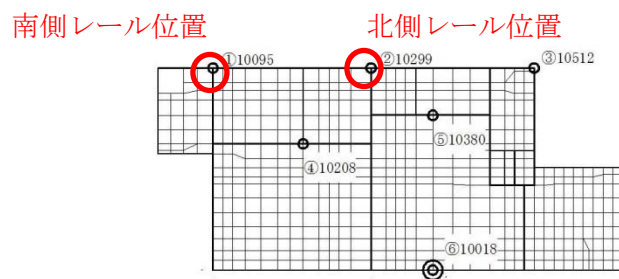
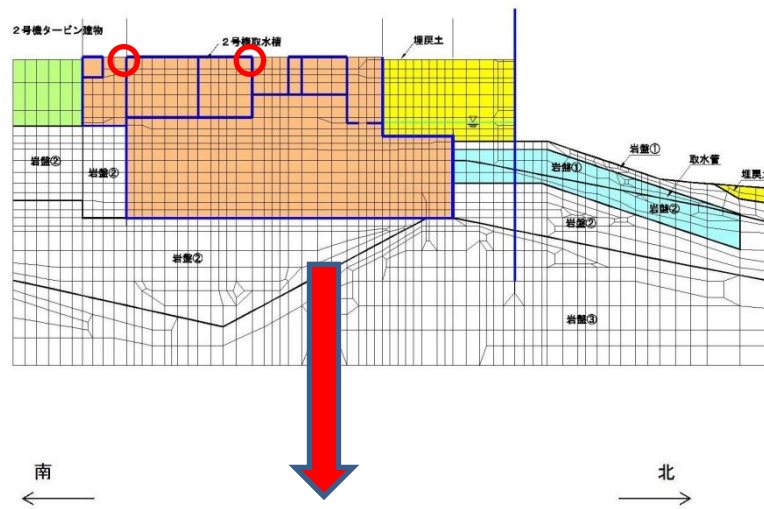
水平2方向及び鉛直方向の3方向同時入力（NS方向，EW方向，鉛直方向）により評価を実施する。

なお，クレーン本体の走行車輪と走行レールは固定されていないため，走行方向においては，各時刻における最大静止摩擦力以上の地震慣性力が加わった場合，クレーン本体は走行レール上をすべる。

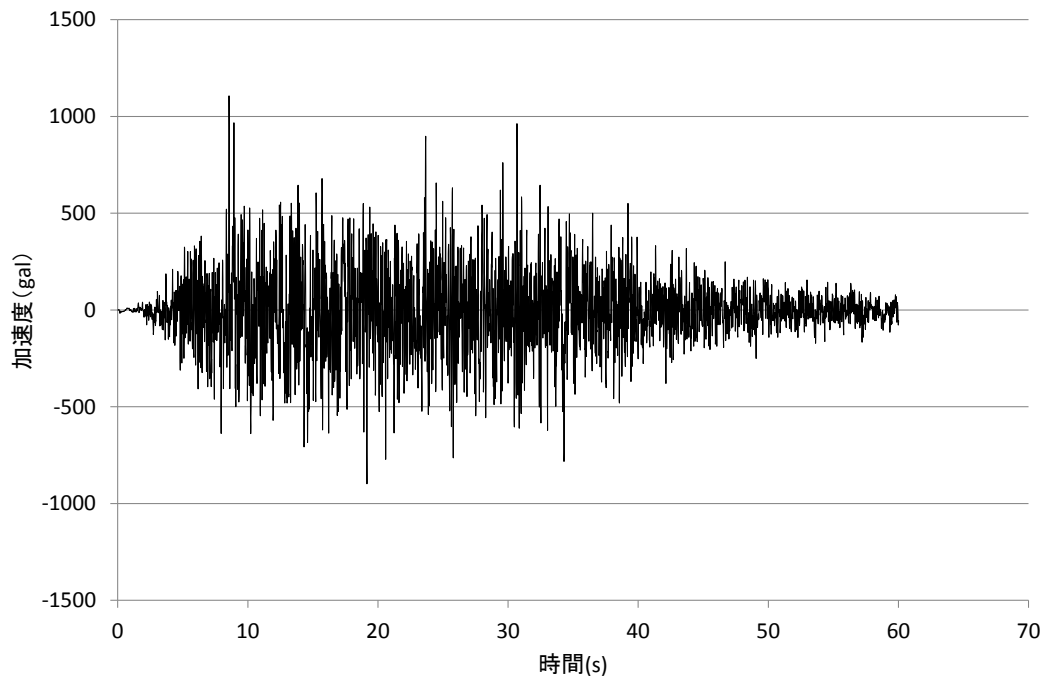
(3) 地盤物性等の不確かさに対する検討方針

スペクトルモーダル解析では，床応答加速度は地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動を考慮して周期方向に±10%拡幅した設計用床応答曲線を用いる。取水槽ガントリクレーンの地震応答解析では，設計用床応答曲線を用いない時刻歴応答解析を採用するが，制震装置により取水槽ガントリクレーンに付与される減衰が大きくなるため，地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動の影響は軽微であると考えられる。詳細設計段階において，ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION III，DIVISION1—NONMANDATORY APPENDIX N（ARTICLE N-1222.3 Time History Broadening）に規定された手法を踏まえ，影響を確認する。

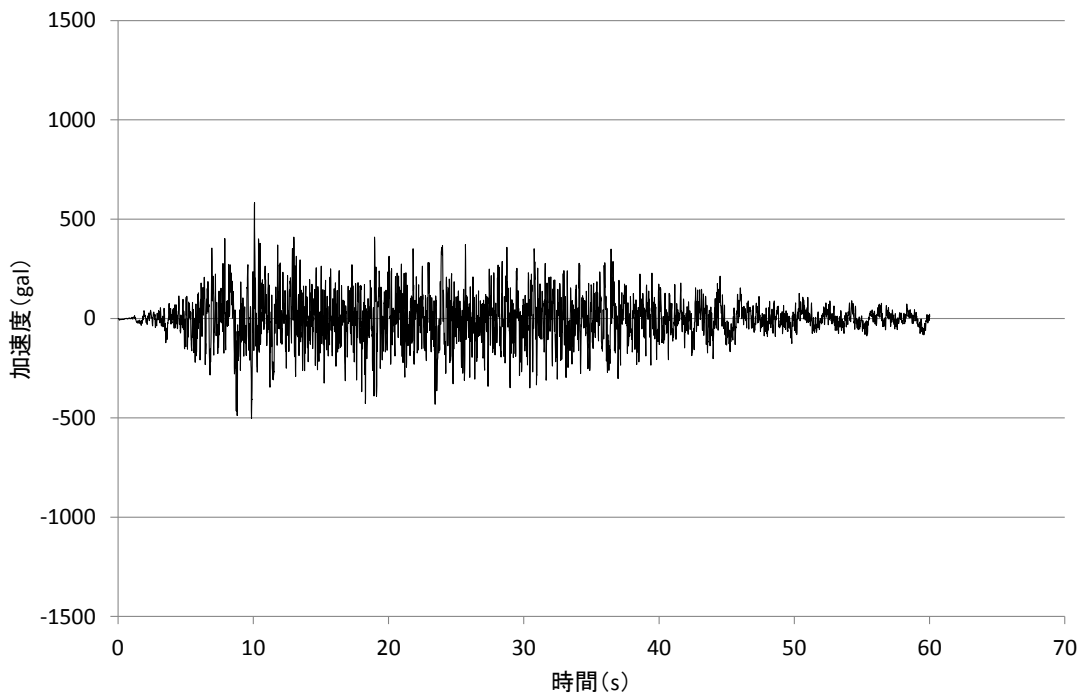
Time History Broadening の概念を第3-10 図に示す。



第 3-5 図 取水槽の地震応答解析モデル図 (N S 断面)



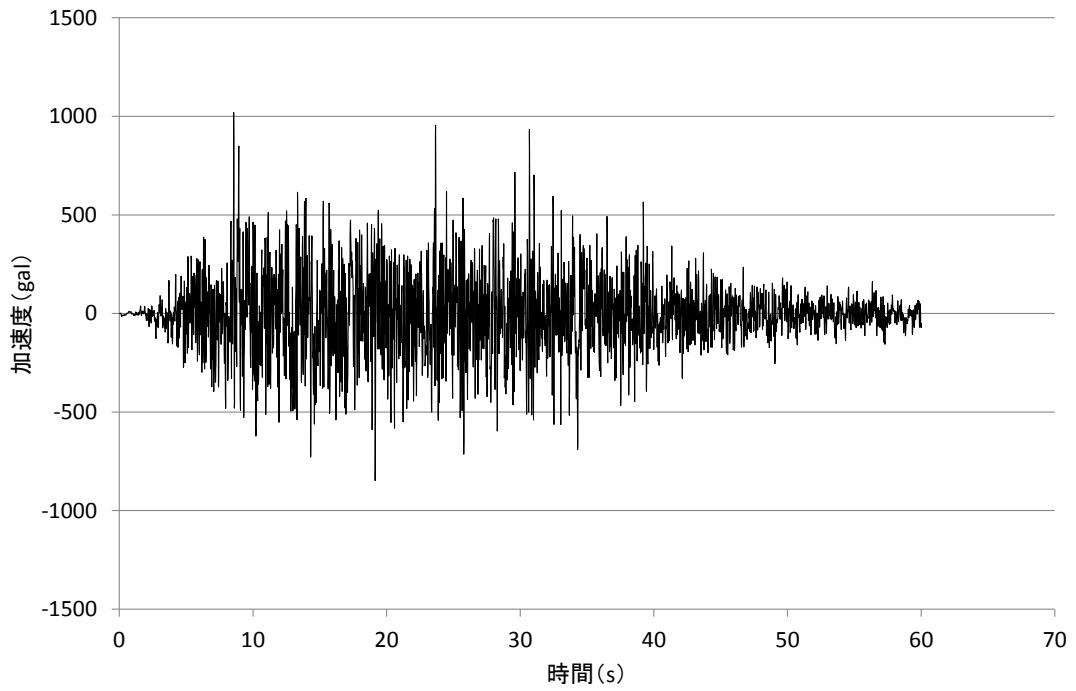
水平方向（N S）



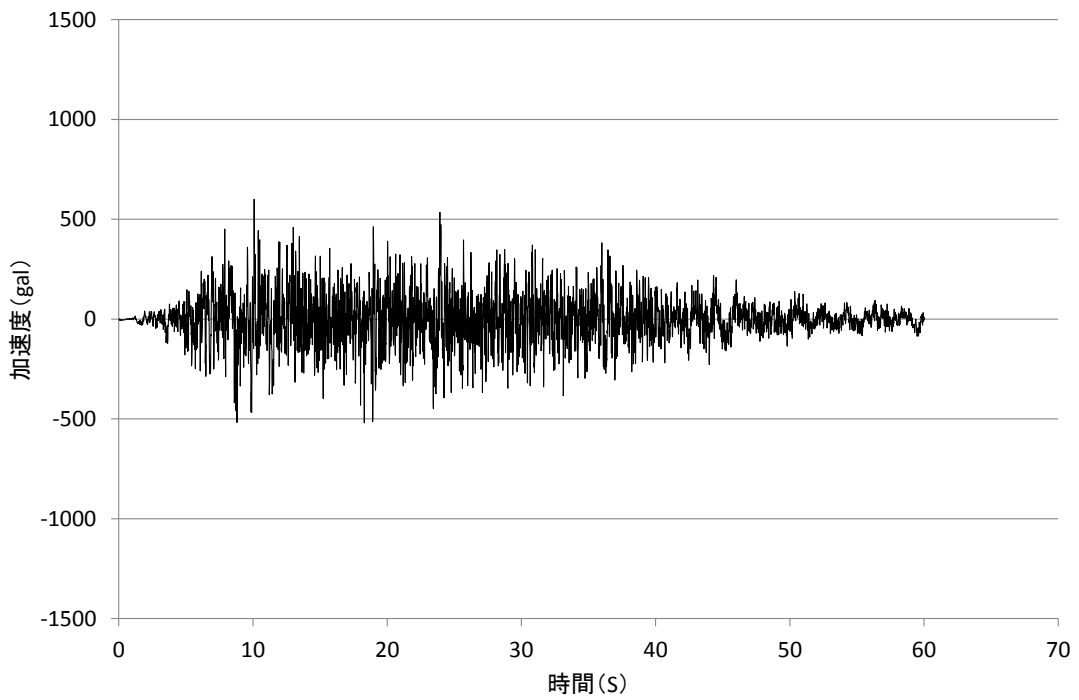
鉛直方向

第3-6図 入力加速度時刻歴波形  
 (S s - D 南側レール位置 (節点 10095))



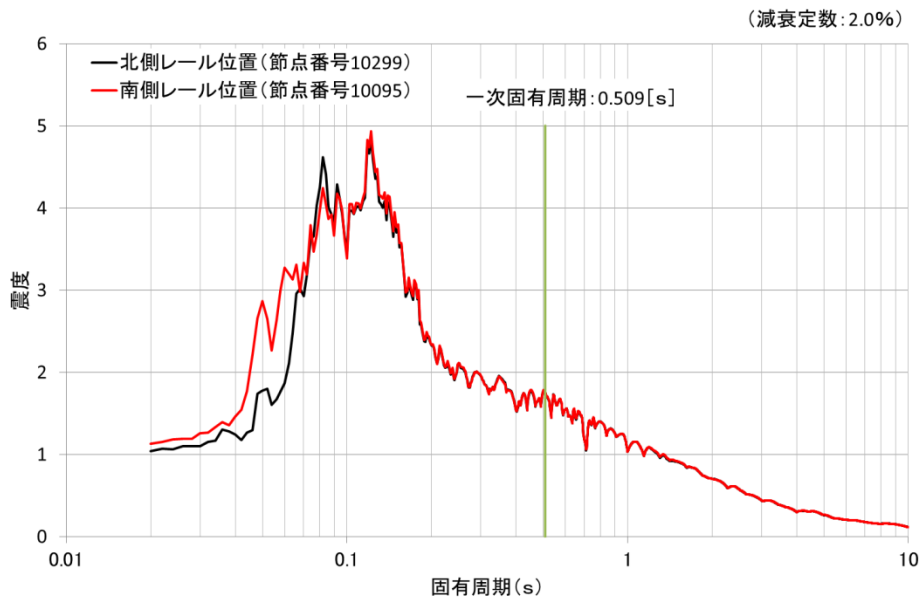


水平方向 (N S)

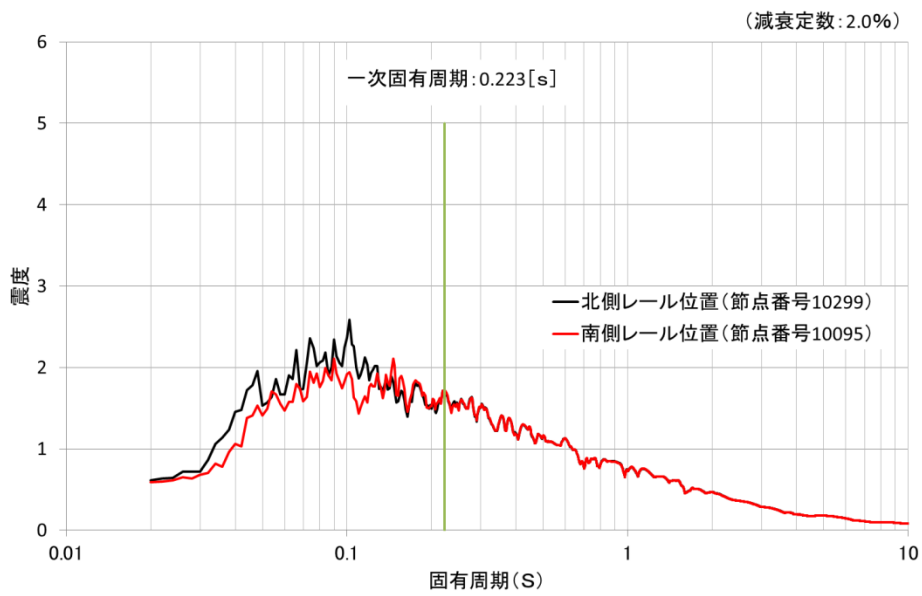


鉛直方向

第 3-7 図 入力加速度時刻歴波形  
(S s - D 北側レール位置 (節点 10299))

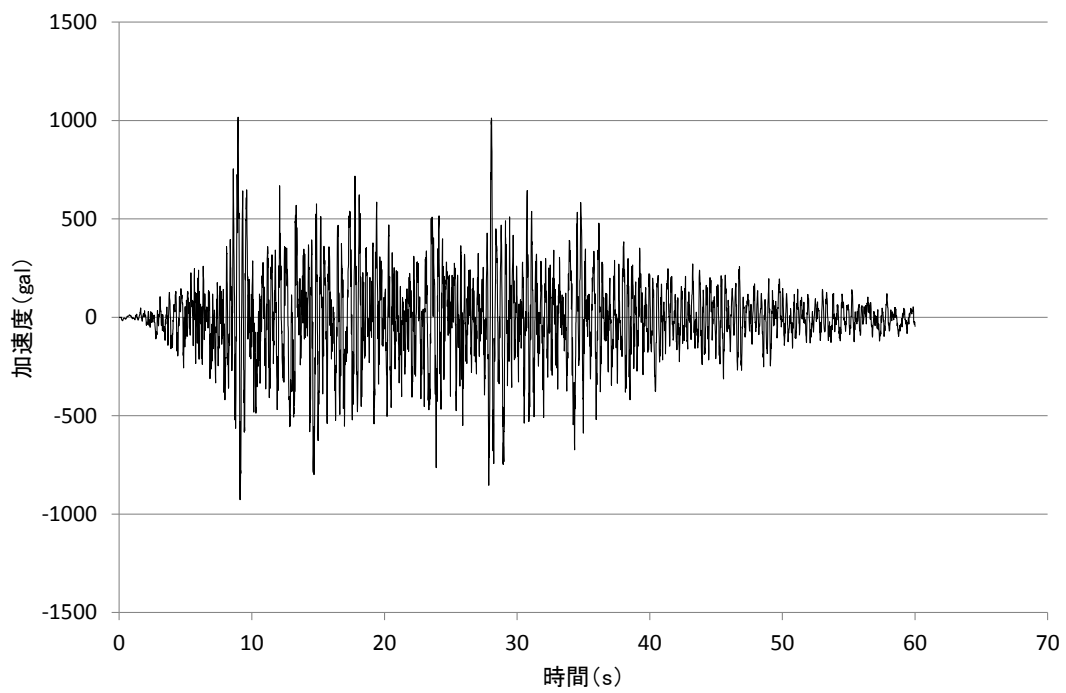


水平方向 (NS)



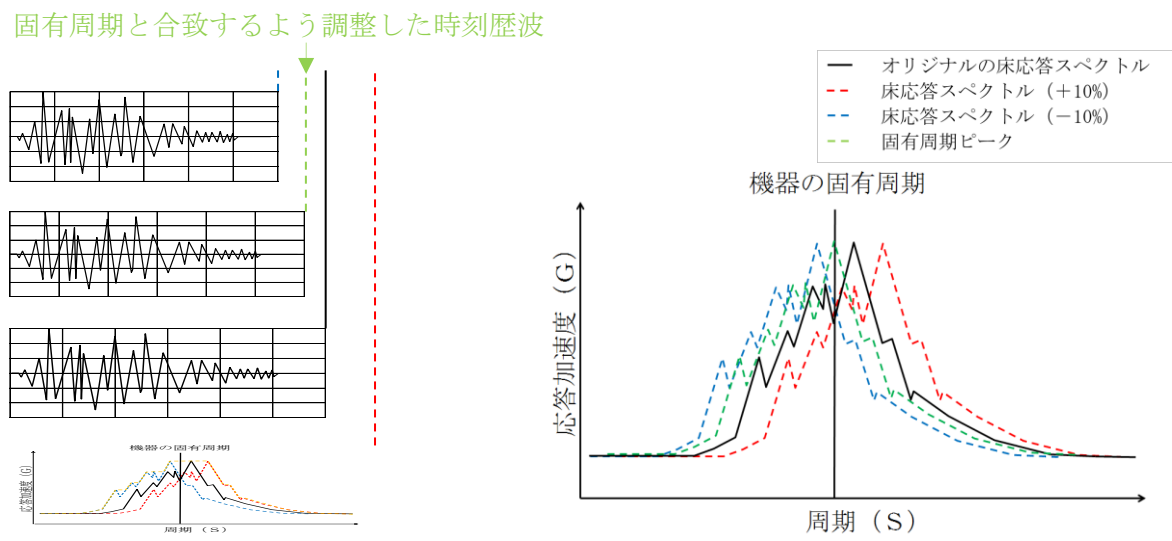
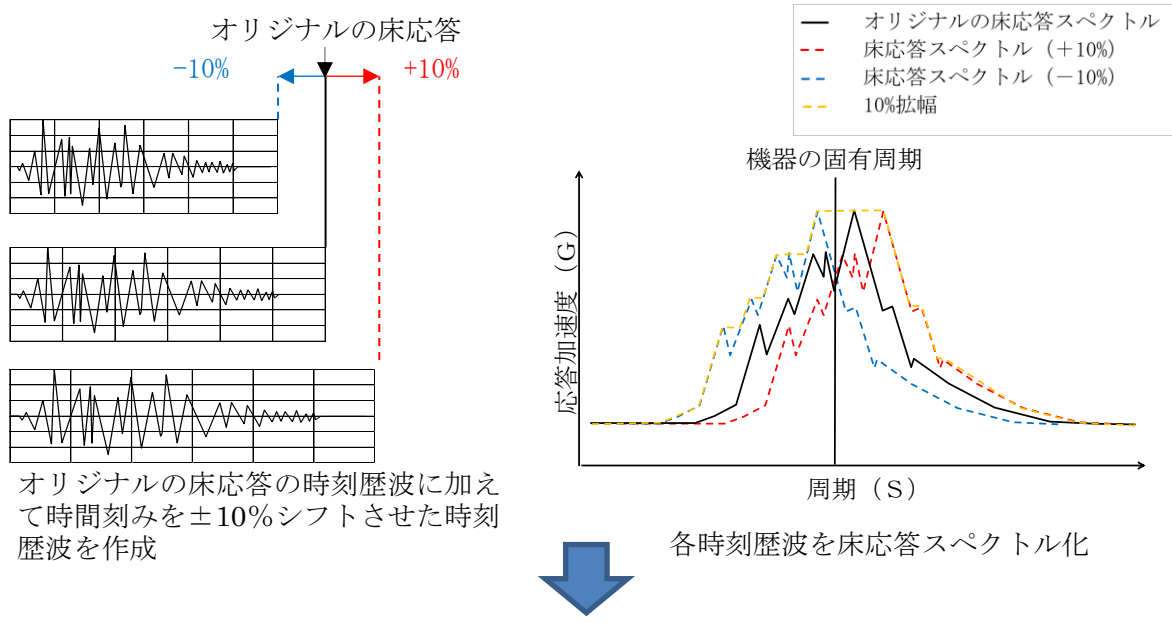
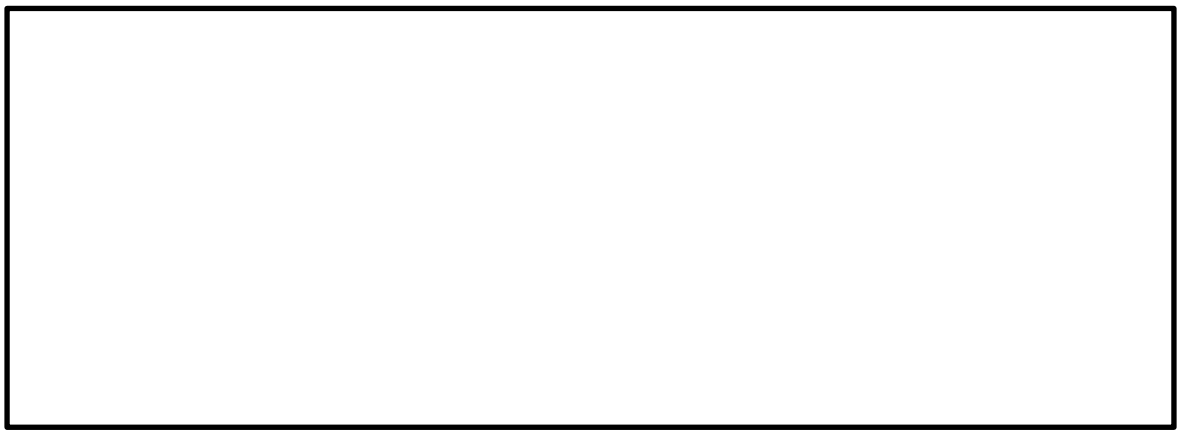
鉛直方向

第 3-8 図 南北レール位置における床応答スペクトル



水平方向 (E W)

第 3-9 図 入力加速度時刻歴波形 (S s - D)



機器の固有周期が床応答スペクトルピークの谷間に存在する場合、ピークと合うような時刻歴波を作成し、時刻歴応答解析を実施する。

第3-10図 Time History Broadening の概念図

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。

## 4. 耐震評価の方法

### 4.1 評価方針

取水槽ガントリクレーンは、「3. 応答解析の方法」に記載の地震応答解析によって得られた各部位の荷重及び浮上り量を用いて評価する。各部位の応力は荷重を用いて公式により計算する。応力の許容限界については JSME S NC1-2005/2007 及び JEAG4601 を参照し、その他の支持構造物の許容応力を適用する。評価に適用する温度条件は、設備の使用環境を考慮して設定する。また、地震応答解析により算出したトロリの浮上り量、単軸粘性ダンパの変位及び荷重、並びに吊具の荷重がそれぞれの許容限界以下であることを確認する。

### 4.2 荷重の組合せ

取水槽ガントリクレーンの耐震評価にあたっては、地震荷重と組み合わせる荷重として以下を考慮する。

- ・自重
- ・積雪荷重

### 4.3 評価対象部位

取水槽ガントリクレーンの耐震評価は、取水槽ガントリクレーン運転時において本体の損傷、転倒及び吊荷の落下により原子炉補機海水ポンプ等の上位クラス施設が損傷することを防止するため、以下を評価対象部位として選定し、評価を実施する。

#### (1) 取水槽ガントリクレーン本体

取水槽ガントリクレーン本体については、ガーダ、脚、ガーダ継ぎ、下部脚継ぎの応力評価を実施する。

#### (2) 転倒防止装置、走行レール、トロリ

取水槽ガントリクレーンの本体の転倒を防止する転倒防止装置の応力評価を実施する。また、走行車輪からクレーン走行方向と直交する方向の荷重並びに転倒防止装置から上方向の荷重を受ける走行レールの応力評価を実施する。なお、トロリストoppaとホイストレールについては、詳細設計中のため、詳細設計段階において評価を実施する。

トロリの落下防止の観点から、トロリの浮上り量を算出し、許容浮上り量と比較する。

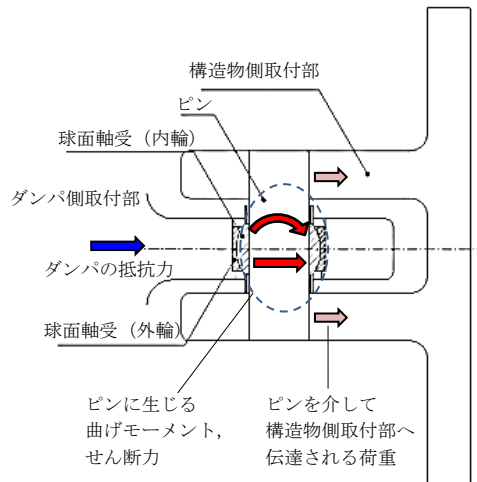
#### (3) 吊具

吊具については、トロリ主巻のワイヤ及びフックの荷重評価を実施する。なお、ホイストワイヤ及びフックについては詳細設計中のため、詳細設計段階において評価を実施する。

(4) 単軸粘性ダンパ

単軸粘性ダンパについては、ダンパに生じる最大荷重、最大変位を許容限界と比較する。

また、取付部であるブレースとクレビス部の応力評価を実施する。クレビス部については、断面積が小さくダンパの抵抗力により曲げモーメントとせん断力を受けるピンを評価部位とする（第4-1図）。



第4-1図 クレビス部の荷重伝達

4.4 許容限界

4.4.1 許容応力

取水槽ガントリクレーンの各部位の評価に用いる許容応力を第4-1表に示す。

第4-1表 許容応力（その他の支持構造物）

許容応力状態	許容応力 (ボルト以外)				
	一次応力				
IVAS	引張	せん断	圧縮	曲げ	支圧
	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_s^*$	$1.5 \cdot f_c^*$	$1.5 \cdot f_b^*$	$1.5 \cdot f_p^*$

注記：応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対しても評価を行う。

$f_t, f_s, f_c, f_b, f_p$ は、 $F$ 値を $F = \min[S_y, 0.7S_u]$ として、 $F$ 値より算出した値

$f_t^*, f_s^*, f_c^*, f_b^*, f_p^*$ は、上記 $F$ 値の $S_y$ を $1.2S_y$ と読み替え算出した値

$S_y$ ：材料の設計降伏点

$S_u$ ：材料の設計引張強さ

#### 4.4.2 許容浮上り量

トロリ（横行車輪）の許容浮上り量を第4-2表に示す。

第4-2表 トロリの許容浮上り量

	許容浮上り量 (mm)
トロリ（横行車輪）	150 <sup>注1</sup>

注1：トロリストッパの形状設計中のため暫定値

#### 4.4.3 吊具の許容荷重

トロリ主巻のワイヤ及びフックの許容荷重を第4-3表に示す。

第4-3表 吊具の許容荷重

	許容荷重 (kN)
主巻ワイヤ	$4.28 \times 10^3$
主巻フック	$4.98 \times 10^3$

#### 4.4.4 単軸粘性ダンパの許容限界

単軸粘性ダンパの許容限界を第4-4表に示す。

第4-4表 単軸粘性ダンパの許容限界

許容変位	許容荷重
100mm	300kN

#### 4.5 各部の評価方法

##### 4.5.1 取水槽ガントリクレーン本体，転倒防止装置，走行レール，単軸粘性ダンパブレース及び単軸粘性ダンパクレビス部の応力評価方法

###### (1) 引張応力

$$\sigma_t = \frac{F_t}{A_t}$$

$$\sigma_t \leq f_t$$

$F_t$ ：部材に発生する引張荷重

$A_t$ ：引張荷重が作用する断面積

$\sigma_t$ ：部材に発生する引張応力

$f_t$ ：部材の許容引張応力 (=1.5・ $f_t^*$ )

(2) 圧縮応力

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A_c}$$

$$\sigma_c \leq f_c$$

$F_c$  : 部材に発生する圧縮荷重

$A_c$  : 圧縮荷重が作用する断面積

$\sigma_c$  : 部材に発生する圧縮応力

$f_c$  : 部材の許容圧縮応力 (座屈) ( $=1.5 \cdot f_c^*$ )

ここで、 $f_c$  の算出方法を示す。

a. 圧縮材の細長比が限界細長比以下の場合

$$f_c = \left\{ 1 - 0.4 \left( \frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{\nu}$$

$f_c$  : 許容圧縮応力

$\lambda$  : 圧縮材の有効細長比

$$\lambda = \frac{l_k}{i}$$

$l_k$  : 座屈長さ

$i$  : 座屈軸についての断面二次半径

$\Lambda$  : 限界細長比

$$\Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6F}}$$

$F$  : 材料の設計降伏点, 設計引張強さにより定まる値

$E$  : 材料の縦弾性係数

$\nu$  : 以下の式により計算した値

$$\nu = 1.5 + \frac{2}{3} \left( \frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

b. 圧縮材の細長比が限界細長比を超える場合の場合

$$f_c = 0.277F \left( \frac{\Lambda}{\lambda} \right)^2$$

$\lambda$  及び  $\Lambda$  : a. と同様

許容圧縮応力の算定諸元を第 4-5 表に示す。



第4-5表 許容圧縮応力の算出諸元

評価部位	座屈長さ			断面二次半径 選定断面
	対象長さ $l$	回転に対する 条件*	座屈長さ $l_k$	
ブレース	ダンパと ブレースの 合計長さ	両端自由	$l$	ブレース部の 断面
脚	脚長さ	1端自由 他端拘束	$0.8l$	脚断面 (最小断面)
ガーダ継ぎ	ガーダ継ぎ長さ	両端拘束	$0.65l$	ガーダ継ぎ 断面
脚下部継ぎ	脚下部継ぎ長さ	両端拘束	$0.65l$	脚下部継ぎ 断面

※移動に対する条件は全て拘束とした。

(3) 曲げ応力

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

$$\sigma_b \leq f_b$$

$M$  : 部材に発生する曲げモーメント

$Z$  : 曲げモーメントが作用する断面の断面係数

$\sigma_b$  : 部材に発生する曲げ応力

$f_b$  : 部材の許容曲げ応力 ( $=1.5 \cdot f_b^*$ )

(4) せん断応力

$$\tau = \frac{Q}{A_s}$$

$$\tau \leq f_s$$

$Q$  : 部材に発生するせん断荷重

$A_s$  : せん断荷重が作用する断面積

$\tau$  : 部材に発生するせん断応力

$f_s$  : 部材の許容せん断応力 ( $=1.5 \cdot f_s^*$ )

(5) 組合せ応力

引張応力と曲げ応力の組合せ応力

$$\frac{\sigma_t + \sigma_b}{f_t} \leq 1$$

圧縮応力と曲げ応力の組合せ応力

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1$$

垂直応力とせん断応力の組合せ応力

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \leq f_t$$

$\sigma_x, \sigma_y$  : 互いに直交する垂直応力

$\tau_{xy}$  :  $\sigma_x, \sigma_y$  の作用する面内のせん断応力

(6) 支圧応力

$$\sigma_p = \frac{F_p}{A_p}$$

$$\sigma_p \leq f_p$$

$F_p$  : 部材に発生する支圧荷重

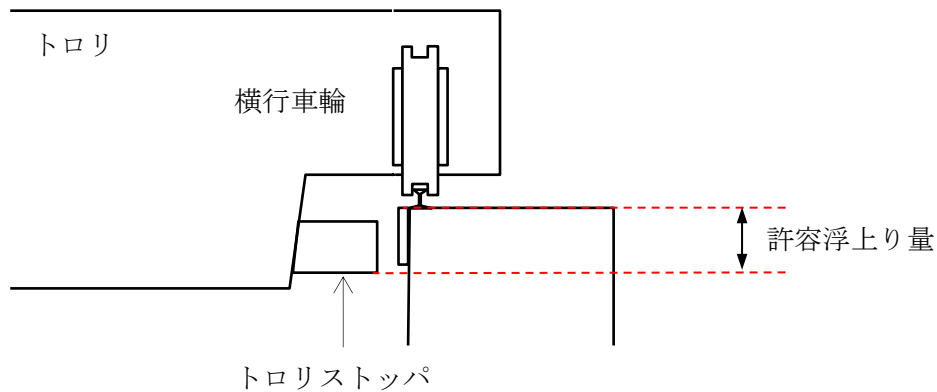
$A_p$  : 支圧荷重が作用する断面積

$\sigma_p$  : 部材に発生する支圧応力

$f_p$  : 部材の許容支圧応力 (=1.5・ $f_p^*$ )

4.5.2 トロリの浮上り評価方法

トロリに浮上りが生じても落下しないことを評価するため、地震応答解析にて算出したトロリの浮上り量が許容浮上り量以下であることを確認する。許容浮上り量の概念図を第4-2図に示す。



第4-2図 許容浮上り量の概念図

#### 4.5.3 吊具の荷重評価方法

吊具の荷重評価では、地震応答解析によって得られる吊具部分の最大荷重が許容荷重以下であることを確認する。

主巻のワイヤロープに作用する荷重は、ロープに取り付けられたエコライザシーブ（平衡装置）とクラブシーブ（滑車）の回転により自動的に荷重を釣り合い状態に保つため、12本掛けのワイヤロープに均等に荷重が作用するものとして評価する。ホイストのワイヤロープについても同様に評価する。

ワイヤロープは長さを長く設定すると固有周期が大きくなり、短く設定すると固有周期が小さくなるという特徴を踏まえ、地震応答との関係から、吊具に対して応答が厳しくなる最大吊り上げ時のワイヤロープ長さでの地震応答解析結果を用いて荷重評価を実施する。

#### 4.5.4 単軸粘性ダンパの変位及び荷重評価方法

単軸粘性ダンパの変位及び荷重評価は、地震応答解析によって得られる最大変位及び最大荷重が許容限界以下であることを確認する。

## 5. 評価条件・評価結果

### 5.1 評価条件

地震応答解析の条件を第5-1表に示す。入力地震波として、取水槽ガントリクレーンの固有振動数において床応答加速度の大きい基準地震動  $S_s - D$  を用い、解析ケースは吊荷荷重が最大となる第3-1表のケース2とした。また、ダンパ性能のばらつきとして $\pm 20\%$ を考慮し、ダンパ性能標準、 $+20\%$ 、 $-20\%$ の3ケースを実施した。

第5-1表 応答解析の条件

項目	内容
入力地震波	基準地震動 $S_s - D$
取水槽ガントリクレーンの解析ケース	トロリ位置中央 吊荷あり (50t) ホイスト待機位置 吊荷なし (第3-1表のケース2)
ダンパ性能	ダンパ性能標準, $\pm 20\%$ (3ケース)

### 5.2 評価結果

固有値解析の結果を第5-2表に、振動モードを第5-1図に示す。なお、固有値解析は、単軸粘性ダンパを初期剛性と等しいばねに置き換えて実施した。

耐震評価の結果を第5-3表に示す。各評価部位の発生値が許容限界を下回っていることから、取水槽ガントリクレーンは、島根2号炉の基準地震動  $S_s$  に対して損傷・落下せず上位クラス施設へ波及的影響を及ぼさないことの見通しを得た。なお脚において裕度が比較的小さい部位が存在するが、当該部位は断面の補強を計画しており、詳細設計を反映して、追加の補強を検討する。裕度が小さい脚下部の補強について、第5-2図に示す。

詳細設計段階においては、第3-1表の全てのケースについて、基準地震動  $S_s$  の5波に対する耐震評価を実施して、地震による波及的影響を及ぼさないことを確認する。評価の際には、地盤の不確かさも考慮し、時刻歴応答解析の保守性に配慮した詳細な検討を行う。

第5-2表 取水槽ガントリクレーンの一次固有周期

水平方向	鉛直方向
0.509s (1.97Hz)	0.223s (4.48Hz)



水平一次モード

鉛直一次モード

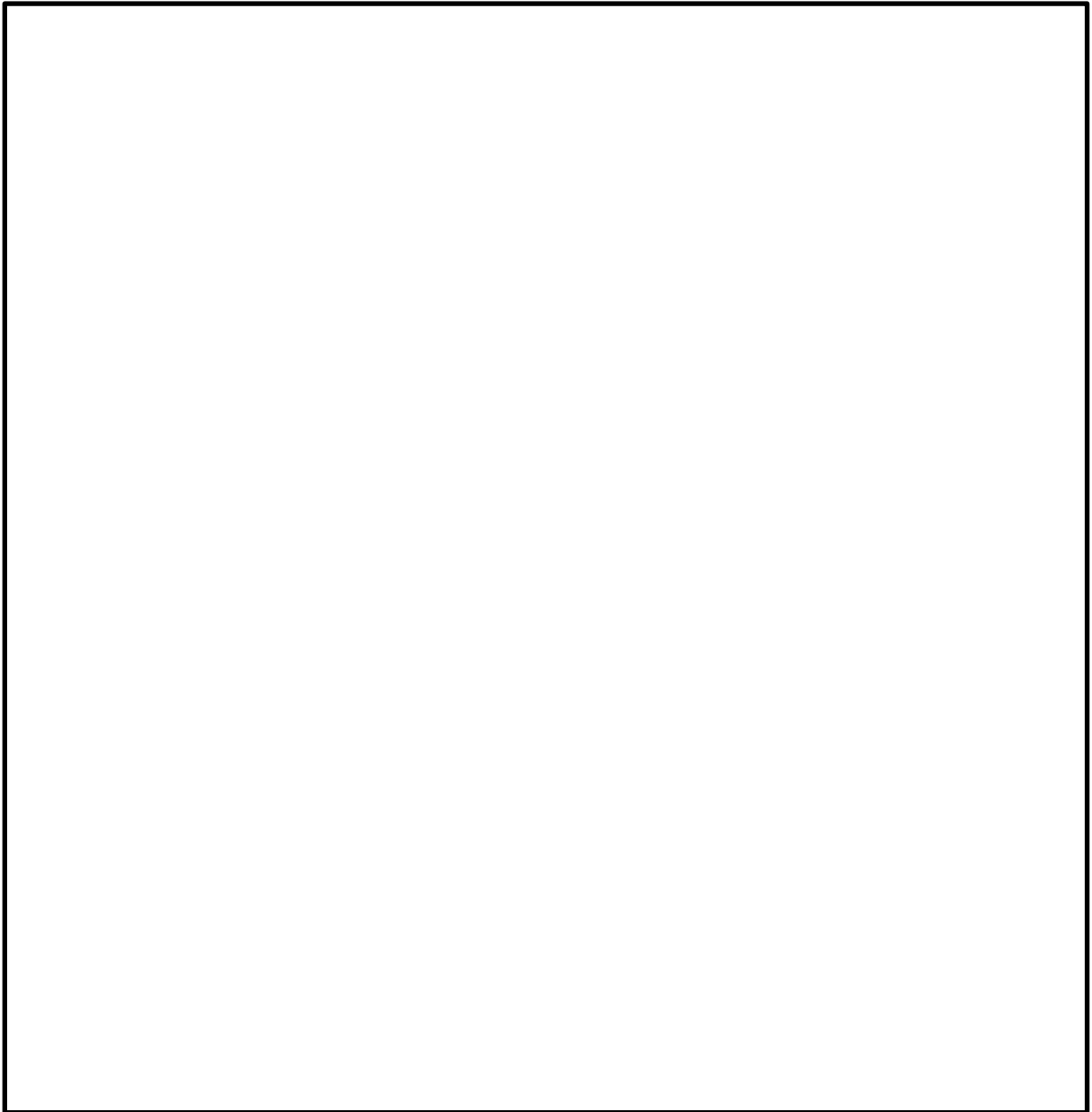
第5-1図 振動モード図

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。

第5-3表 取水槽ガントリクレーンの耐震評価結果

評価部位		評価項目	発生値	許容限界
取水槽ガントリクレーン本体	ガーダ	曲げ応力	111 (MPa)	280 (MPa)
		せん断応力	29 (MPa)	161 (MPa)
	脚	引張応力	4 (MPa)	280 (MPa)
		圧縮応力	43 (MPa)	226 (MPa) ※
		曲げ応力	214 (MPa)	280 (MPa)
		せん断応力	61 (MPa)	161 (MPa)
		組合せ応力 (垂直+せん断)	253 (MPa)	280 (MPa)
		組合せ応力 (曲げ+圧縮)	0.93 (-)	1 (-)
	ガーダ継ぎ	引張応力	4 (MPa)	280 (MPa)
		圧縮応力	5 (MPa)	279 (MPa) ※
		曲げ応力	101 (MPa)	280 (MPa)
		組合せ応力 (曲げ+圧縮)	0.36 (-)	1 (-)
	脚下部継ぎ	引張応力	11 (MPa)	280 (MPa)
		圧縮応力	22 (MPa)	263 (MPa) ※
		曲げ応力	219 (MPa)	280 (MPa)
		せん断応力	36 (MPa)	161 (MPa)
		組合せ応力 (垂直+せん断)	229 (MPa)	280 (MPa)
		組合せ応力 (曲げ+圧縮)	0.81 (-)	1 (-)
転倒防止装置		組合せ応力	70 (MPa)	357 (MPa)
走行レール		組合せ応力	360 (MPa)	546 (MPa)
トロリ		浮上り	2.8 (mm)	150 (mm)
吊具	ワイヤロープ	荷重	$1.35 \times 10^3$ (kN)	$4.28 \times 10^3$ (kN)
	主巻フック	荷重	$1.35 \times 10^3$ (kN)	$4.98 \times 10^3$ (kN)
単軸粘性ダンパ	本体	変位	41 (mm)	100 (mm)
		荷重	261 (kN)	300 (kN)
	ブレース	圧縮応力	18 (MPa)	74 (MPa) ※
	クレビス部 (ピン)	曲げ応力	264 (MPa)	651 (MPa)
		せん断応力	93 (MPa)	375 (MPa)
組合せ応力 (垂直+せん断)		309 (MPa)	651 (MPa)	

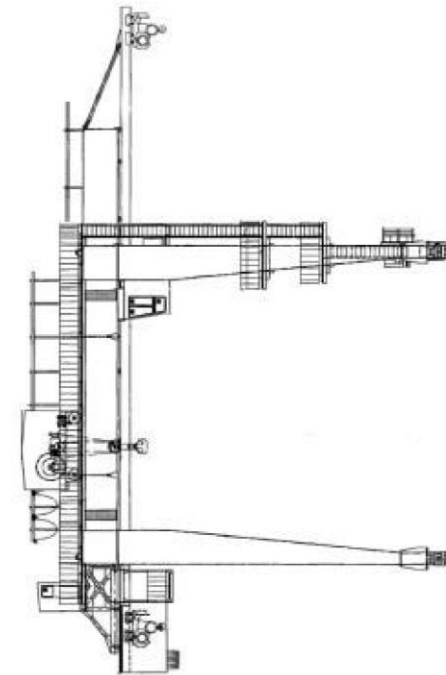
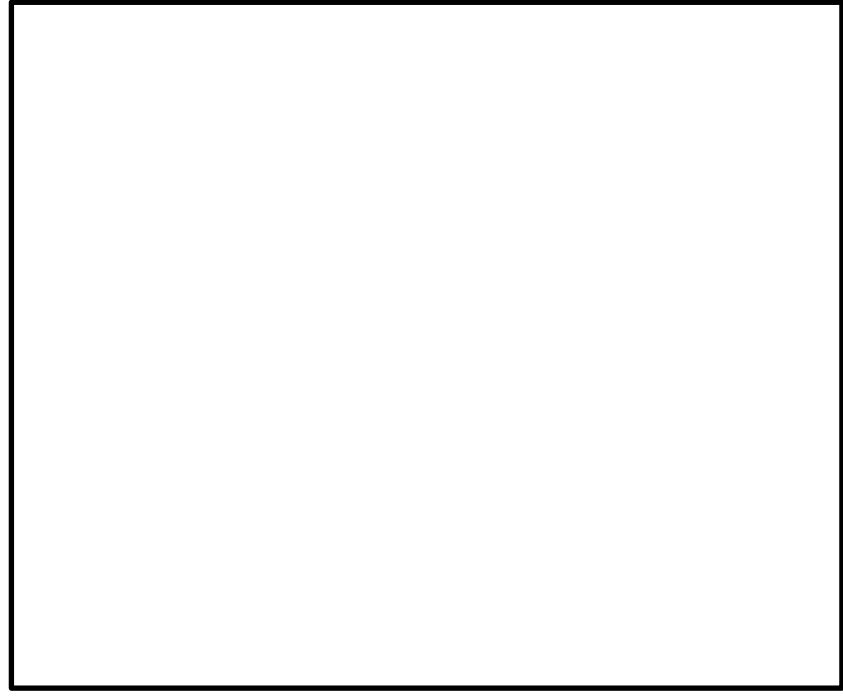
※座屈評価



第5-2 図 裕度が小さい脚下部の補強計画

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。

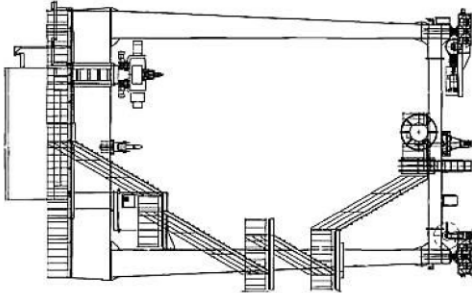

添付資料(2-1) 取水槽ガントリクレーンの改造箇所

取水槽ガントリクレーンの改造箇所 (1/2)	改造前	
	改造後	
改造内容		単軸粘性ダンパの設置, 脚下部の補強

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。



取水槽ガントリクレーンの改造箇所 (2/2)

<p>改造前</p>	
<p>改造後</p>	
<p>改造内容</p>	<p>脚下部継ぎの補強, ホイストの交換</p>

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。

## 添付資料(2-2) 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. 概要

取水槽ガントリクレーンの耐震評価にあたっては、当該クレーンが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、水平方向へのすべりと鉛直方向の車輪部の浮上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。構造図を第2-1添図に、解析モデルの概要を第2-2添図に示す。

本資料では、先行審査実績のあるクレーン類と構造、評価方法等の比較を行い、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を示す。



第2-1添図 取水槽ガントリクレーン構造図

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。

## 第2-2添図 非線形時刻歴応答解析に用いる解析モデル概要図

### 2. 先行審査実績のあるクレーン類との構造比較

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（以下「原子炉建屋天井クレーン」という。）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（以下「海水ポンプ室門型クレーン」という。）があるため、それぞれの構造や特徴を比較し、適用性について確認する。

#### 2.1 全体構造について

##### (1) 構造概要

原子炉建屋天井クレーンは、トロリ式天井クレーンに分類されるものであり、2本のレール上を走行する方式である。走行レール間はガーダと呼ばれる部材が渡された桁構造で、ガーダ下部に設けられている車輪を介して走行レール上に設置されている。また、ガーダ上部には横行レールとトロリが設置され、吊荷の吊上げ、吊下げ及び移動が行われる。

海水ポンプ室門型クレーン及び取水槽ガントリクレーンは、トロリ式橋型クレーンに分類されるものであり、2本のレール上を走行する方式である。走行レール間はトロリ式天井クレーンと同様にガーダが渡された桁構造となっている。ガーダ下部には脚が設けられており、この脚の下部の車輪を介して走行レール上に設置されている。ガーダ上部にはトロリ式天井クレーンと同じく横行レールとトロリが設置され、吊荷の吊上げ、吊下げ及び移動が行われる。

これらの設備の概要図について第2-3添図に示す。

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。

## (2) 全体構造

原子炉建屋天井クレーンの本体構造はガーダ、サドルと呼ばれる鋼構造物が主体となっている。トロリ本体も同様に鋼構造物で構成されている。ガーダは走行レール上に、トロリは横行レール上にもともに4箇所にある車輪を介して固定されずに設置されており、地震時には水平方向にすべり、鉛直方向に浮上りが発生する可能性がある。

海水ポンプ室門型クレーンの本体構造はガーダ及び脚と呼ばれる鋼構造物が主体となっている。トロリ本体も同様に鋼構造物で構成されている。脚は走行レール上に、トロリは横行レール上にもともに4箇所にある車輪を介して固定されずに設置されており、地震時には水平方向にすべり、鉛直方向に浮上りが発生する可能性がある。

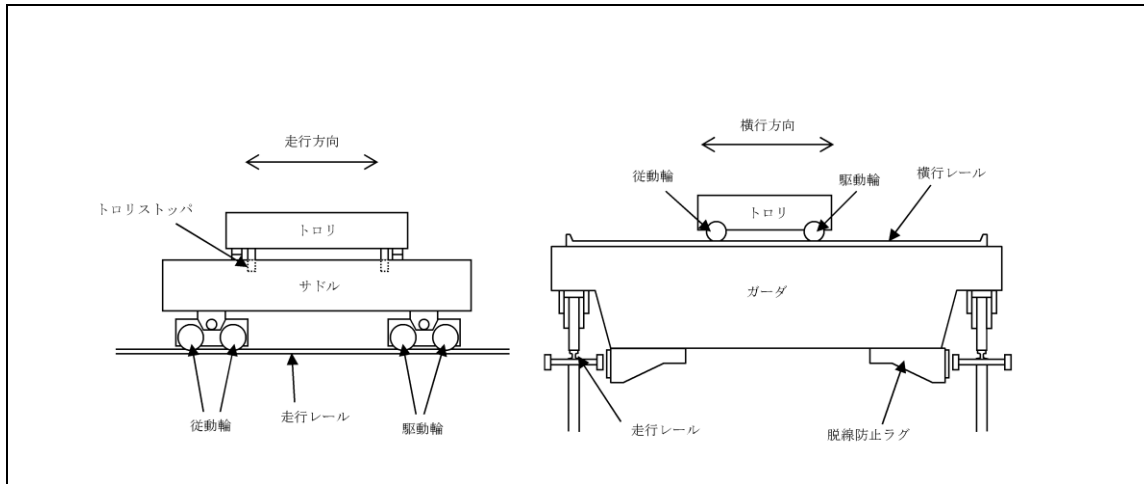
取水槽ガントリクレーンの本体構造はガーダ及び脚と呼ばれる鋼構造物が主体となっている。トロリ本体も同様に鋼構造物で構成されている。脚は走行レール上に、トロリは横行レール上にもともに4箇所にある車輪を介して固定されずに設置されている。取水槽ガントリクレーンは、走行方向の駆動輪、従動輪の間に転倒防止装置が設置されているが、地震時には原子炉建屋天井クレーンと同様、車輪は水平方向にすべり、鉛直方向に浮上りが発生する可能性がある。

## (3) 構造の特徴比較

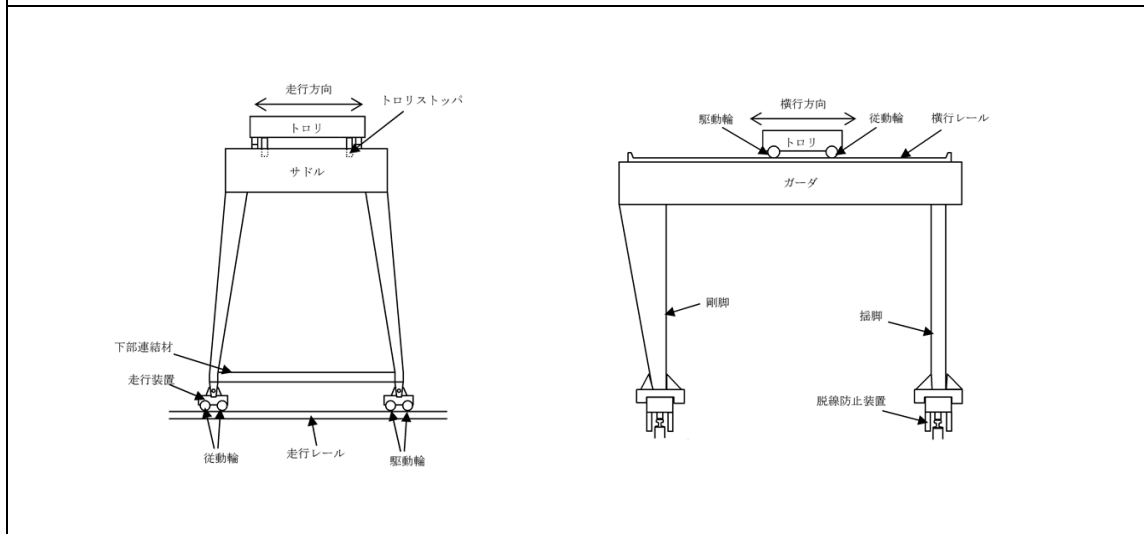
原子炉建屋天井クレーン、海水ポンプ室門型クレーン及び取水槽ガントリクレーンの構造について特徴を比較した結果を第2-1添表に示す。

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が挙げられる。また、原子炉建屋天井クレーンでは、レールが破損した場合でも脱線防止ラグがガーダに当たって脱線を防ぐ構造であるのに対し、取水槽ガントリクレーンの転倒防止装置では、レールを掴むことで転倒を防止する構造になっている点が異なっている。なお、取水槽ガントリクレーンの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の構造である。それ以外の構造物としての特徴は類似しており、レールと4箇所の車輪が固定されずに接触し、水平方向にすべり、鉛直方向に浮上りが発生する挙動も両クレーンで類似している。

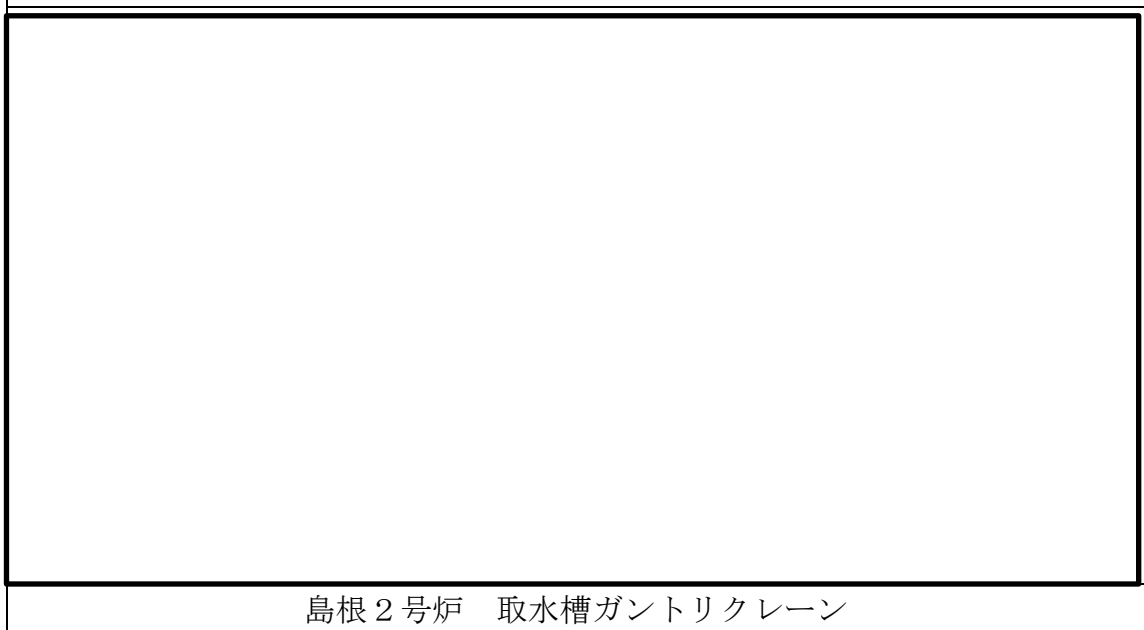
海水ポンプ室門型クレーンと取水槽ガントリクレーンの違いは単軸粘性ダンパの有無が挙げられる。また、海水ポンプ室門型クレーンは、原子炉建屋天井クレーンの脱線防止ラグと同等の構造の脱線防止装置を設置しており、取水槽ガントリクレーンとは構造が異なっている。それ以外の構造物としての特徴は類似しており、ともに鉛直方向に浮上る可能性がある。



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

第2-3添図 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及び島根 2 号炉取水槽ガントリクレーンの構造概要図

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。

第2-1添表 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"> <li>・2本のレール間を跨ぐ桁構造</li> <li>・ガーダ上にトロリを設置</li> <li>・車輪を介してレールに設置</li> </ul>	同左	同左
主要構造物	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガーダ</li> <li>・サドル</li> <li>・トロリ</li> <li>・脱線防止ラグ</li> <li>・トロリストoppa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガーダ</li> <li>・サドル</li> <li>・トロリ</li> <li>・脚</li> <li>・脱線防止装置</li> <li>・トロリストoppa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガーダ</li> <li>・トロリ</li> <li>・ホイスト</li> <li>・脚</li> <li>・単軸粘性ダンパ</li> <li>・転倒防止装置</li> <li>・トロリストoppa</li> </ul>
構造形状	鋼構造物（炭素鋼）	同左	同左
	溶接構造物	同左	同左

## 2.2 荷重伝達について

原子炉建屋天井クレーンと取水槽ガントリクレーンの本体及びトロリは、いずれも固定されずにレール上に車輪を介して設置されており、以下に示す荷重伝達機構も同様である。

### (1) 走行方向（EW方向）の水平力

#### a. クレーン本体

(a) クレーン本体は走行レール上に乗っており、固定されていないため、走行方向（EW方向）の水平力が加わっても、クレーン本体は走行レール上をすべり、クレーン本体には走行レールと走行車輪間の最大静止摩擦力以上の荷重は作用しない。

(b) クレーン本体の走行車輪は、駆動輪及び従動輪である。

(c) 駆動輪は、電動機及び減速機等の回転部分と連結されているため、最大静止摩擦力以上の地震慣性力が車輪部に加わった場合、回転部分が追従できず、走行レール上をすべる。

(d) 従動輪は回転が拘束されていないため、クレーン本体の動きに合わせて自由に回転することからクレーン本体走行方向の水平力をクレーン本体に伝達しない。

#### b. トロリ

(a) トロリはクレーン本体の走行レールに対して直交方向に設置された横行

レール上に設置していることから、走行方向（E W方向）の地震力はガーダ本体・横行レールを介してトロリへ作用する。

(2) 横行方向（N S方向）の水平力

a. クレーン本体

(a) クレーン本体は横行レールに対して直交方向に設置された走行レール上に設置していることから、横行方向（N S方向）の地震力は走行レールを介してクレーン本体へ作用する。

b. トロリ

(a) トロリは横行レール上に乗っており、横行レールとは固定されていないため、横行方向（N S方向）の水平力がトロリに加わっても、トロリは横行レール上をすべり、トロリ本体には横行レールと横行車輪間の最大静止摩擦力以上の荷重は作用しない。

(b) トロリの横行車輪は、駆動輪及び従動輪である。

(c) トロリの駆動輪は、電動機及び減速機等の回転部分と連結されているため、最大静止摩擦力以上の地震慣性力が車輪部に加わった場合、回転部分が追従できず、横行レール上をすべる。

(d) 従動輪は回転が拘束されていないため、トロリの動きに合わせて自由に回転することからトロリ横行方向の水平力をトロリ本体に伝達しない。

(3) 鉛直力

クレーン本体及びトロリは、レールと固定されていないことから、鉛直方向の地震力によってレールから浮上る可能性がある。

### 2.3 車輪まわりの構造比較

本解析手法は車輪まわりのすべりや浮上りを考慮した非線形解析であり、車輪まわりの特徴を踏まえたモデル化が必要であることから、車輪とレールの接触部分を対象として、原子炉建屋天井クレーンと取水槽ガントリクレーンについて詳細に構造比較を行う。

(1) 原子炉建屋天井クレーン

原子炉建屋天井クレーンの車輪まわりは、走行装置が前後左右の4隅に配置された構造であり、各走行装置は2輪ずつの車輪で構成されている。車輪と走行レール間には鉛直上向きの拘束がなく浮上りが発生する可能性がある構造となっており、クレーンと走行レールの接触点は、ともに鋼製部材である車輪と走行レールの接触となる。

また、車輪については、駆動装置が設置された駆動輪（2隅分）とクレーンの動きに追従して回転する従動輪（2隅分）があり、全体の半分の車輪で駆動力を伝達する機構となっている。

トロリの車輪まわりは、前後左右で1輪ずつ配置された構造となっており、

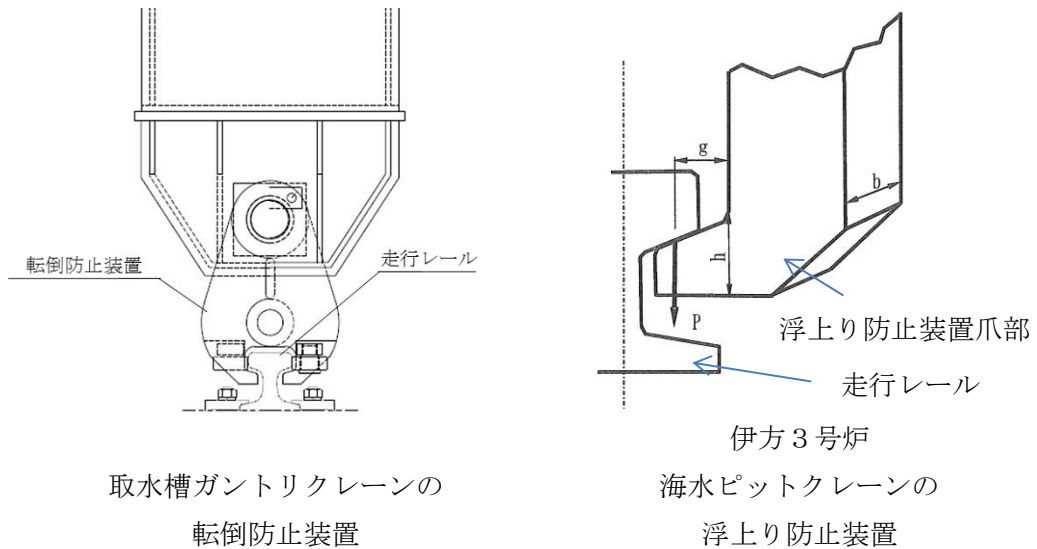
クレーン本体の車輪と同様に鉛直方向の拘束がないため浮上りが発生する可能性がある構造となっている。駆動輪と従動輪についてもクレーン本体の車輪と同様に前後で役割の異なる車輪が配置されている。

クレーン本体車輪まわり及びトロリ車輪まわりには、脱線防止装置若しくはトロリストoppaが設置されているため、車輪がレールから浮上る現象が発生した場合でも、脱線を防止する構造となっている。

(2) 取水槽ガントリクレーン

取水槽ガントリクレーンの本体車輪まわりは、第2-3添図に示すとおり走行装置が前後左右の4隅に配置された構造であり、各走行装置は2輪ずつの車輪で構成されている。車輪とレール間は鋼製部材同士の接触で上向きの拘束がなく浮上りが発生する可能性がある点や駆動輪と従動輪が半数ずつで車輪が構成されている点など、原子炉建屋天井クレーンと同様の構造である。トロリの車輪まわりについても車輪（駆動輪，従動輪）配置や接触状況等について同様の構造である。

取水槽ガントリクレーン本体車輪の間には転倒防止装置が設置されており、走行レールを掴むことで、転倒・脱線を防止する構造となっている。この構造は原子炉建屋天井クレーンと異なっているが、伊方3号炉海水ピットクレーンの浮上り防止装置と同様の構造である。取水槽ガントリクレーンの転倒防止装置と伊方3号炉海水ピットクレーンの浮上り防止装置の構造を第2-4添図に示す。



第2-4添図 取水槽ガントリクレーンの転倒防止装置及び伊方3号炉海水ピットクレーンの浮上り防止装置の構造



### 3. 先行審査実績（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）との評価方法の比較

#### 3.1 評価方法の比較

原子炉建屋天井クレーン，海水ポンプ室門型クレーン，取水槽ガントリクレーンの評価方法の比較を第2-2添表に示す。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。なお，原子炉建屋天井クレーンの脱線防止ラグ及び海水ポンプ室門型クレーンの脱線防止装置と取水槽ガントリクレーンの転倒防止装置は構造が異なるが，転倒防止装置のルールと爪部のギャップ要素を含めたモデル化は，伊方3号炉海水ピットクレーンの浮上り防止装置と同様である。

入力地震動はそれぞれの設備を設置している箇所の地震動を適用するため，評価方法の差異にはあたらない。

第2-2添表 先行審査実績のあるクレーン類の評価方法との比較

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-ルール間の 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

#### 3.2 地震応答解析モデルの比較

原子炉建屋天井クレーン及び取水槽ガントリクレーンの解析モデルの概要を第2-5添図に示す。

取水槽ガントリクレーンは原子炉建屋天井クレーンと同様に，クレーンの主要構成部材をはり要素でモデル化している。また，車輪部についても原子炉建屋天井クレーンと同様に水平方向のすべり及び鉛直方向の浮上りを考慮する

ため、ギャップ要素、ばね及び減衰要素でモデル化している。なお、車輪部の非線形要素については添付資料（2-4）に詳細を示す。

大間 1 号炉原子炉建屋天井クレーン	島根 2 号炉取水槽ガントリクレーン

第2-5添図 解析モデル概要図

#### 4. 非線形時刻歴応答解析の適用性（まとめ）

島根 2 号炉取水槽ガントリクレーンに対して非線形時刻歴応答解析を適用するにあたり、先行審査実績（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）との構造及び評価方法の比較を行った。

全体構造、荷重伝達及び車輪まわりの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に対して、取水槽ガントリクレーンは、クレーン本体の鋼構造物として脚が存在し単軸粘性ダンパを有する点及び脱線防止ラグと転倒防止装置の構造が異なる点において差異があるが、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、脚及び単軸粘性ダンパが存在することについては、適切に解析モデルに反映することとし、単軸粘性ダンパを有する構造物の解析手法については、別紙-18 「機器・配管系への制震装置の適用について」に示す。

また、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。なお、原子炉建屋天井クレーンの脱線防止ラグ及び海水ポンプ室門型クレーンの脱線防止装置と取水槽ガントリクレーンの転倒防止装置は構造が異なるが、転倒防止装置は伊方 3 号炉海水ピットクレーンの浮上り防止装置と同等の構造となっており、浮上りが発生し、浮上り防止装置の爪部とレールが接触しない限りは、応力が発生しない構造であり、モデル化が適切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られる。

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。

### 添付資料(2-3) 取水槽ガントリクレーンの解析ケースの設定

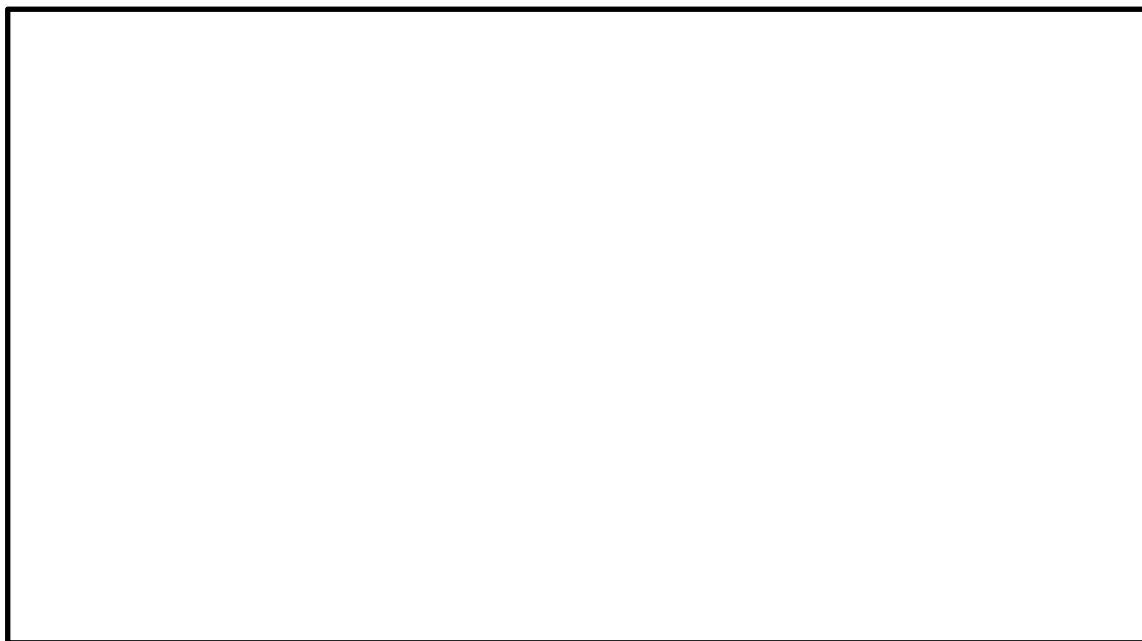
取水槽ガントリクレーンの地震応答解析にあたっては、トロリ及びホイストの位置や吊荷の有無によって地震時の挙動が変化する可能性があるため、トロリ及びホイストの位置並びに吊荷の有無に応じた解析ケースを設定する必要がある。設定した解析ケースを第3-1添表に示す。取水槽ガントリクレーン使用時の状況を踏まえて解析ケースについて検討した内容を以下に示す。

取水槽ガントリクレーンを使用する場合、まずクレーン本体が待機位置から吊り上げ対象物に向けて走行方向（EW方向）に移動する。クレーン本体の移動中は、トロリ及びホイストはそれぞれの待機位置にある。このような状態を踏まえた解析ケースとして、トロリ及びホイストがいずれも待機位置で吊荷なしの条件を設定する。（ケース1）

トロリにより吊荷を吊り上げる場合は、トロリを横行方向（NS方向）に対象物の直上まで移動させ、対象物を吊り上げた後、トロリ位置はそのままでクレーン本体が走行方向（EW方向）に点検等の作業エリアへ移動する。また、ホイストにより吊荷を吊り上げる場合もトロリの場合と同様に、ホイストを横行方向（NS方向）に対象物の直上まで移動させ、対象物を吊り上げた後、ホイスト位置はそのままでクレーン本体が走行方向（EW方向）に点検等の作業エリアへ移動する。トロリとホイストを同時に使用することはないため、トロリを使用する場合にはホイストは待機位置、ホイストを使用する場合にはトロリは待機位置から移動しない。トロリ及びホイストの待機位置について第3-1添図に示す。以上のトロリ及びホイストの使用状態を踏まえた解析ケースとして、トロリ及びホイストのいずれかは最大質量の吊荷有りとし、もう一方は待機位置で吊荷なしの条件を設定する。なお、吊荷有りの場合のトロリ及びホイストの位置は中央付近であるためガーダの中央とする。（ケース2，3）

第3-1添表 取水槽ガントリクレーンの耐震評価ケース

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)

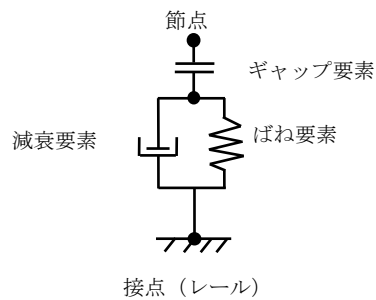


第3-1添図 取水槽ガントリクレーンのトロリ，ホイスト待機位置

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。

添付資料(2-4) 取水槽ガントリクレーン車輪部の非線形要素  
(摩擦, 接触, 減衰)

取水槽ガントリ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。また, 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, 第4-1添図に示すように, ギャップ要素と直列に配置する。



第4-1添図 車輪部の非線形要素

1. 車輪とレール間の摩擦特性

取水槽ガントリ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。第4-2添図に取水槽ガントリクレーンの概要図を示す。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。ここで, 摩擦係数は原子炉建物天井クレーンと同様の0.3を用いる。



第4-2添図 取水槽ガントリクレーンの概要図

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。

## 2. 車輪とレールの接触剛性

接触剛性は「平成 20 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 動的上下動耐震試験(クレーン類)に係る報告書(09 耐部報-0008, (独)原子力安全基盤機構)」を参照し、車輪とレールの衝突時の剛性を模擬したばね要素を考慮し、クレーン質量で構成される 1 自由度系の固有振動数が 20Hz 相当になるように設定する。

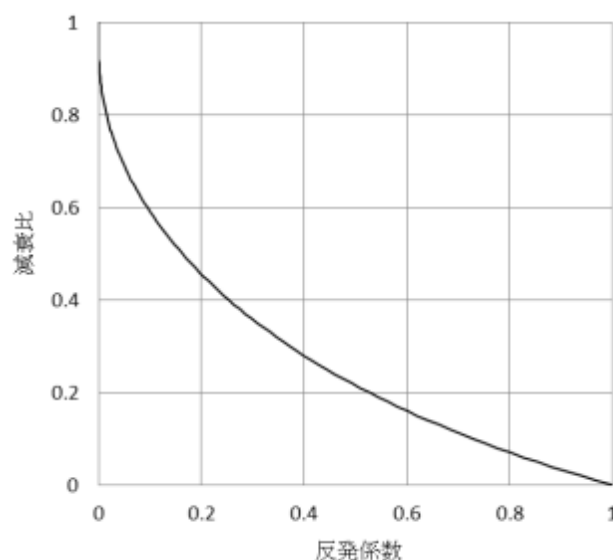
## 3. 車輪とレール間の衝突による減衰

衝突による減衰は「平成 19 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 動的上下動耐震試験(クレーン類)に係る報告書(08 耐部報-0021, (独)原子力安全基盤機構)」にて実施した要素試験のうち、車輪反発係数試験結果より評価した反発係数から算出する。なお、減衰比と反発係数の関係式には次式を用いる。

$$e = \exp\left(-\frac{h \pi}{\sqrt{1-h^2}}\right)$$

ここで、 $e$  は反発係数、 $h$  は減衰比である。

上記の式で表される反発係数と減衰比との関係を第 4-3 添図に示す。



第 4-3 添図 反発係数と減衰比の関係

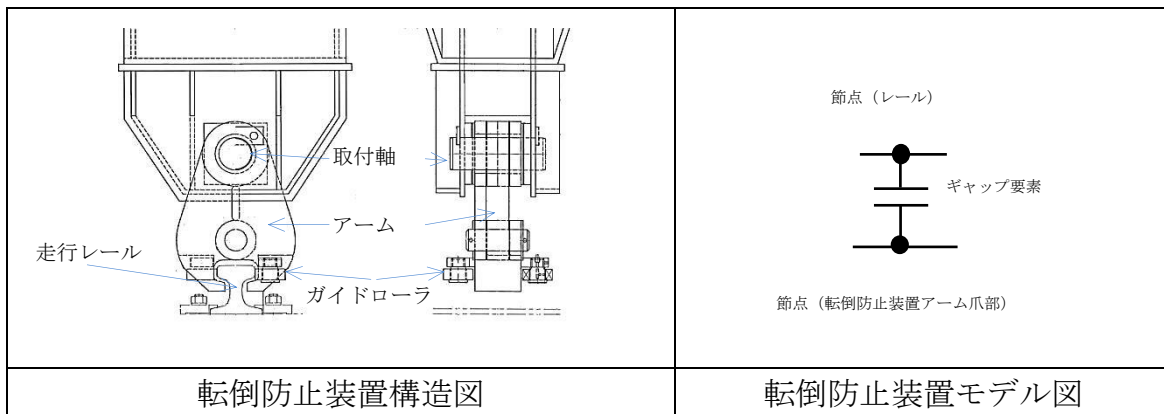
## 4. 転倒防止装置の構造・モデル化について

転倒防止装置は、第 4-4 添図に示すように、レールの上部からレール頭部をアームで挟み込む構造である。通常運転時、アームの先端の爪部とレールの間には間隙がある。クレーンに浮上りが発生してレール頭部と転倒防止装置のアーム先端の爪部が接触すると鉛直方向の荷重が伝達される。

水平方向については、レール直交方向には転倒防止装置が取付軸により回転す

る構造となっており、レールに沿った方向（クレーン走行方向）にはガイドローラによって滑る構造のため、水平荷重は発生しない。

以上より、転倒防止装置については、鉛直方向の爪部とレール頭部の間隙を考慮して、第4-4添図に示すギャップ要素によりモデル化を行う。



第4-4添図 転倒防止装置の構造及びモデル図

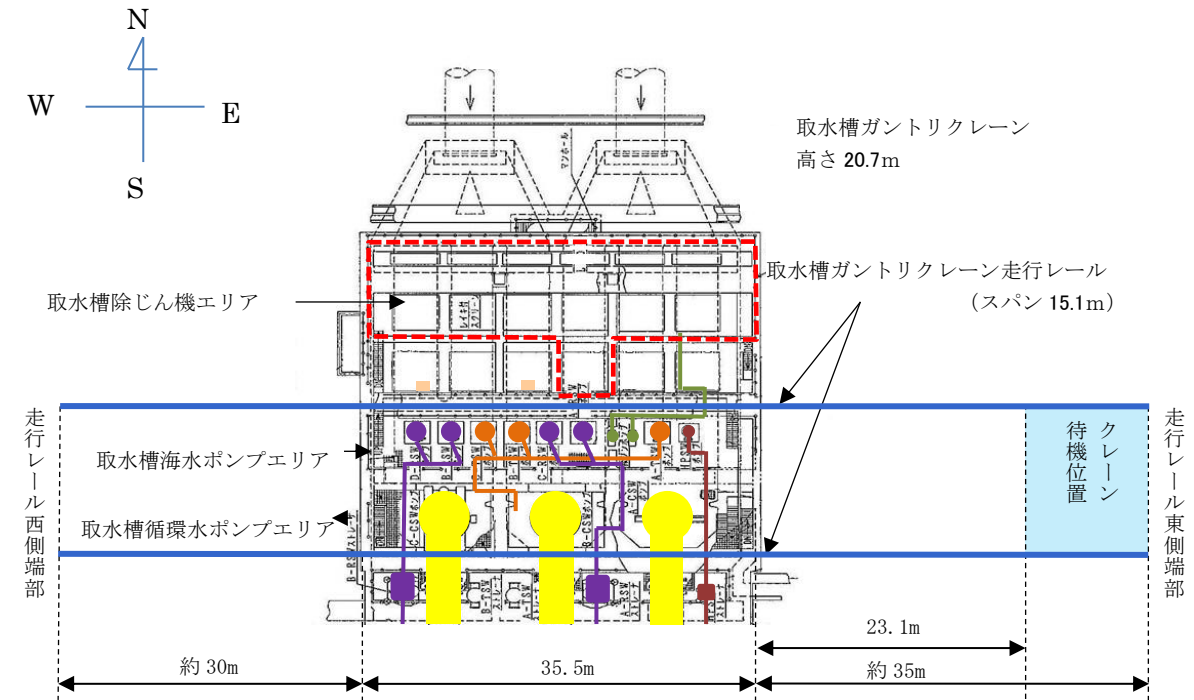
## 添付資料(2-5) 取水槽ガントリクレーン本体及びトロリのすべりの影響について

取水槽ガントリクレーン本体及びトロリがすべりによって走行レール端部及び横行レール端部に衝突した場合、取水槽ガントリクレーン本体の転倒、トロリの落下により上位クラス施設へ波及的影響を及ぼすおそれがあることから、取水槽ガントリクレーン本体及びトロリのすべりによるレール端部への衝突の有無を確認する。取水槽ガントリクレーンの走行範囲を第5-1添図に示す。

取水槽から走行レール端部までの距離は最小で約30mであり、取水槽ガントリクレーンがすべりによって走行レール端部に衝突することはない。

トロリについては、詳細設計段階においてすべり量を算出し、レール端部との適切な離隔距離を確保する。





＜取水槽周辺の主な上位クラス施設＞

●	：原子炉補機海水ポンプ	●	：タービン補機海水ポンプ
■	：原子炉補機海水ストレーナ	—	：タービン補機海水系配管及び出口弁
—	：原子炉補機海水系配管	●	：循環水ポンプ
●	：高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ	■	：循環水系配管
■	：高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナ	●	：除じんポンプ
—	：高圧炉心スプレイ補機海水系配管	—	：除じん系配管
■	：取水槽水位計	---	：取水槽除じん機エリア防水壁

第5-1添図 取水槽ガントリクレーンの走行範囲

## 多入力の時刻歴応答解析の適用について

## 1. 概要

今回工認では、三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析において、多入力の時刻歴応答解析手法を適用するため、本資料にて、その解析手法を説明する。なお、本解析手法は、原子炉建物等の建物・構築物の地震応答解析において、他プラントを含む既工認にて適用実績がある。

注1：原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 - 1987 (社団法人日本電気協会)

## 2. 多入力の時刻歴応答解析法

多入力の時刻歴応答解析では、基準とする入力点（基準入力点）に対する配管系の相対変位及び入力点の相対変位を用いると、地震による慣性力を受ける配管系の運動方程式は以下となる。

$$[M]\{\ddot{x}_a\} + [C]\{\dot{x}_a\} + [K]\{x_a\} = -[M]\{I\}\ddot{y}_0 - [\tilde{C}]\{\dot{x}_b\} - [\tilde{K}]\{x_b\} \quad (1)$$

$[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$  : 配管系の質量, 減衰, 剛性マトリクス

$\{I\}$  : 単位ベクトル

$\{x_a\}$  : 基準入力点に対する配管系の相対変位ベクトル

$\{x_b\}$  : 基準入力点に対する入力点の相対変位ベクトル

$y_0$  : 基準入力点の絶対変位

$[\tilde{C}]$  : 入力点の相対速度に対応した減衰マトリクス

$[\tilde{K}]$  : 入力点の相対変位に対応した剛性マトリクス

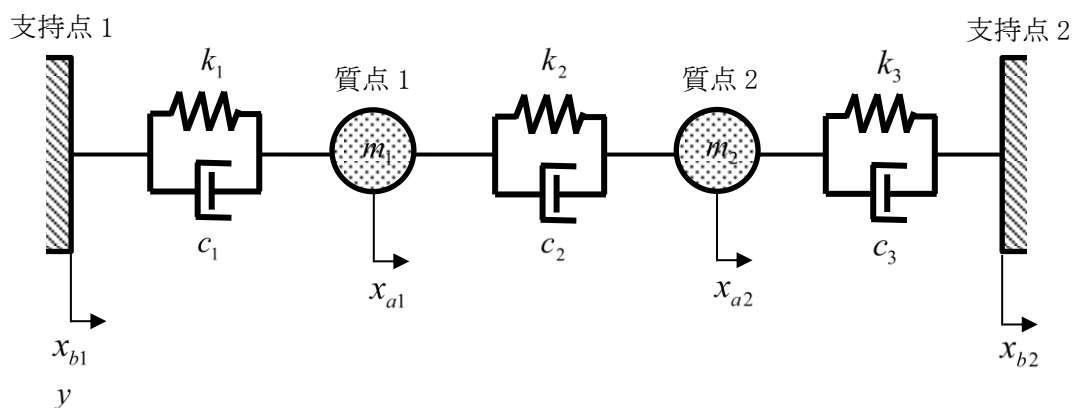
式(1)の左辺は地震による慣性力を受ける配管系の運動方程式である。右辺第一項は、基準入力点の加速度を用いており、右辺第二項及び右辺第三項は、入力点の相対変位、相対速度により生じる力を表している。式(1)は、単一入力の場合と同様に、モード座標系の運動方程式に変換することが可能であり、今回の評価では、モード空間での連成した運動方程式に対して時間積分を行う方法を適用する。

## 3. 多入力の場合の2自由度系の運動方程式の例

多入力の時刻歴応答解析手法は、いくつかの定式化が可能であるが、前項に示した系全体の絶対変位を「基準とする支持点の絶対変位」と「基準とする支持点からの相対変位」の和で表す場合の定式化について、多入力の場合の2自由度系の運動方程式の例を以下に示す。対象とする2自由度系を図3-1に示す。

なお、系を静的平衡関係から得られる疑似静的変位と動変位の和で定義す

ることを特徴とする Clough の方法が J E A G 4 6 0 1 に示されているが、変位等の定義の仕方が異なるだけであり、系の運動方程式としては、式 (1) と同等である (参考資料 (9-1) 参照)。



- $y$  : 基準とする支持点 1 の絶対変位
- $x_{a1}, x_{a2}$  : 支持点 1 に対する各質点の相対変位
- $x_{b1}, x_{b2}$  : 支持点 1 に対する各支持点の相対変位 ( $x_{b1} = 0$ )
- $m_1, m_2$  : 質量
- $k_1, k_2, k_3$  : ばね定数
- $c_1, c_2, c_3$  : 減衰係数

図 3-1 多入力の場合の 2 自由度系

地震による慣性力を受ける配管系の運動方程式を以下に示す。

$$\begin{cases} m_1(\ddot{x}_{a1} + \ddot{y}) + c_1(\dot{x}_{a1} - \dot{x}_{b1}) - c_2(\dot{x}_{a2} - \dot{x}_{a1}) + k_1(x_{a1} - x_{b1}) - k_2(x_{a2} - x_{a1}) = 0 & (2) \\ m_2(\ddot{x}_{a2} + \ddot{y}) + c_2(\dot{x}_{a2} - \dot{x}_{a1}) - c_3(\dot{x}_{b2} - \dot{x}_{a2}) + k_2(x_{a2} - x_{a1}) - k_3(x_{b2} - x_{a2}) = 0 & (3) \end{cases}$$

基準とする支持点 1 に関する項を右辺に移項して整理すると、

$$\begin{cases} m_1\ddot{x}_{a1} + (c_1 + c_2)\dot{x}_{a1} - c_2\dot{x}_{a2} + (k_1 + k_2)x_{a1} - k_2x_{a2} - c_1\dot{x}_{b1} - k_1x_{b1} = -m_1\ddot{y} & (4) \\ m_2\ddot{x}_{a2} - c_2\dot{x}_{a1} + (c_2 + c_3)\dot{x}_{a2} - k_2x_{a1} + (k_2 + k_3)x_{a2} - c_3\dot{x}_{b2} - k_3x_{b2} = -m_2\ddot{y} & (5) \end{cases}$$

となる。式 (4) および式 (5) を行列式で表現すると、

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_{a1} \\ \ddot{x}_{a2} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 + c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_{a1} \\ \dot{x}_{a2} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{a1} \\ x_{a2} \end{Bmatrix} \\
+ \begin{bmatrix} -c_1 & 0 \\ 0 & -c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_{b1} \\ \dot{x}_{b2} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -k_1 & 0 \\ 0 & -k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{b1} \\ x_{b2} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{y}
\end{aligned} \tag{6}$$

となる。

ここで、入力点の相対速度に対応した減衰マトリクスを $[\tilde{C}]$ 、入力点の相対変位に対応した剛性マトリクスを $[\tilde{K}]$ としたうえでこれらを右辺に移項すると、以下の式となる。

$$[M]\{\ddot{x}_a\} + [C]\{\dot{x}_a\} + [K]\{x_a\} = -[M]\{I\}\ddot{y} - [\tilde{C}]\{\dot{x}_b\} - [\tilde{K}]\{x_b\} \tag{7}$$

式(7)の左辺は質点の変位 $x_a$ 、右辺は支持点の変位 $x_b$ および $y$ の運動方程式であり、前項に示す式(1)と同様の方程式となる。

J E A G 4 6 0 1 -1987 (抜粋)  
 6.5.4 地震応答解析法 (3)配管

(3) 配 管

Aクラス配管の地震応答解析手法として設計において最も多く用いられている方法は、「6.5.4(2)容器」で示したスペクトルモーダル解析法であるが、「6.5.4(1)建屋連成系の機器」で述べた時刻歴解析法による場合もある。配管系は、多数の支持点にて支持されていることから多入力解析を用いることが合理的と考えられる。この多入力解析法については、いくつかの定式化が考えられるが、配管を対象とした多入力解析の場合は Clough により提案された方法<sup>(6.5.4-2)</sup>を用いることが多い。この Clough の方法は、系を静的平衡関係から得られる擬似静的変位と動の変位の和で定義したことを特徴とするもので、最終的には系の運動方程式は次の式(6.5.4-8)となる。

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = -MH\ddot{U}_b \quad \dots\dots\dots (6.5.4-8)$$

- $M$  : 質量マトリクス
- $C$  : 減衰マトリクス
- $K$  : 剛性マトリクス
- $\ddot{U}_b$  : 支持点の絶対加速度
- $H$  : 静的平衡関係から得られる変換マトリクス

式(6.5.4-8)はこれまでに扱ってきた運動方程式と同様な形式となっているため、時刻歴による多入力解析はもちろんであるが支持点の応答スペクトルを用いたスペクトル多入力解析をも可能としている。ただし、膨大な数のモデルを対象とする配管設計においては、簡便さと安全側の観点から各々の支持部の入力を包絡し、単一入力として解析する場合が多い。

つまり、配管系の地震応答解析は「6.5.2(3)配管」において述べたように曲げせん断はり(ビーム、管要素)により3次元のモデル化が行われスペクトルモーダル解析により地震力を求める解析法が主となっている。そして、スペクトルモーダル解析においてモード合成により部材力を求める場合は「SRSS」法が用いられ、地震入力方向の合成には絶対値和法を用いるのが普通である。

# 島根原子力発電所 2 号炉

## 動的機能維持評価の検討方針

について

(耐震)

## 目 次

1. はじめに
2. 動的機能維持のための新たな検討，詳細検討又は加振試験が必要な設備の検討方針
3. 動的機能維持のための新たな検討，詳細検討又は加振試験が必要な設備の抽出
4. 新たな検討が必要な設備における動的機能維持評価の検討
  - 4.1 新たな検討が必要な設備における動的機能維持の検討方針
  - 4.2 スクリュー式ポンプに対する検討
    - 4.2.1 検討対象設備の概要
    - 4.2.2 スクリュー式ポンプの動的機能維持評価項目の抽出
    - 4.2.3 耐特委で検討された遠心式ポンプの地震時異常要因分析による基本評価項目
    - 4.2.4 電共研で検討されたギヤ式ポンプの地震時異常要因分析による基本評価項目
    - 4.2.5 スクリュー式ポンプの基本評価項目の検討
    - 4.2.6 スクリュー式ポンプの動的機能維持評価項目の検討結果
  - 4.3 ガスタービン発電機に対する検討
    - 4.3.1 検討対象設備の概要
    - 4.3.2 ガスタービン発電機の動的機能維持評価項目の抽出
    - 4.3.3 耐特委で検討された非常用ディーゼル発電機の地震時異常要因分析による基本評価項目
    - 4.3.4 耐特委で検討されたポンプ駆動用タービンの地震時異常要因分析による基本評価項目
    - 4.3.5 ガスタービン発電機の基本評価項目の検討
    - 4.3.6 ガスタービン発電機の動的機能維持評価項目の検討結果
5. 詳細検討が必要な設備における動的機能維持の検討方針
6. 加振試験が必要な設備における動的機能維持評価の検討

7. 弁の動的機能維持評価に用いる配管系の応答値について

別表 1 検討対象設備の抽出結果

添付資料 1 高圧原子炉代替注水ポンプの加振試験について

参考資料 1 ガスタービン発電機の加振試験について



## 1. はじめに

本資料では、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈等における動的機能保持に関する評価に係る一部改正を踏まえて、動的機能維持についての検討方針、新たな検討又は詳細検討が必要な設備の抽出及び検討結果を示す。

なお、検討の結果、詳細な評価が必要になった設備については、工認段階で詳細評価の内容を説明する。

実用発電用原子炉及びその附属設備の技術基準に関する規則の解釈および耐震設計に係る審査ガイドのうち、動的機能維持の評価に係る部分は以下のとおり。

### 実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈(抜粋)

#### 第5条(地震による損傷の防止)

- 3 動的機器に対する「施設の機能を維持していること」とは、基準地震動による応答に対して、当該機器に要求される機能を保持することをいう。具体的には、当該機器の構造、動作原理等を考慮した評価を行うこと、既往研究で機能維持の確認がなされた機能確認済加速度等を超えていないことを確認することをいう。

### 耐震設計に係る工認審査ガイド(抜粋)

#### 4.6.2 動的機能

##### 【審査における確認事項】

Sクラスの施設を構成する主要設備又は補助設備に属する機器のうち、地震時又は地震後に機能保持が要求される動的機器については、基準地震動 $S_s$ を用いた地震応答解析結果の応答値が動的機能保持に関する評価基準値を超えていないことを確認する。

##### 【確認内容】

動的機能については以下を確認する。

- (1) 水平方向の動的機能保持に関する評価については、規制基準の要求事項に留意して、機器の地震応答解析結果の応答値が JEAG4601 の規定を参考に設定された機能確認済加速度、構造強度等の評価基準値を超えていないこと。(中略)また、適用条件、適用範囲に留意して、既往の研究等において試験等により妥当性が確認されている設定等を用いること。
- (2) 鉛直方向の動的機能保持に関する評価については、規制基準の要求事項に留意して、機器の地震応答解析結果の応答値が水平方向の動的機能保持に関する評価に係る JEAG4601 の規定を参考に設定された機能確認済加速度、構造強度等の評価基準値を超えていないこと。(中略)また、適用条件、適用範囲に留意して、既往の研究等において試験等により妥当性が確認されている設定等を用いること。

(3) 上記(1)及び(2)の評価に当たっては、当該機器が JEAG4601 に規定されている機種、形式、適用範囲等と大きく異なる場合又は機器の地震応答解析結果の応答値が JEAG4601 の規定を参考にして設定された機能確認済加速度を超える場合(評価方法が JEAG4601 に規定されている場合を除く。)については、既往の研究等を参考に異常要因分析を実施し、当該分析に基づき抽出した評価項目毎に評価を行い、評価基準値を超えていないこと。また、当該分析結果に基づき抽出した評価部位について、構造強度評価等の解析のみにより行うことが困難な場合には、当該評価部位の地震応答解析結果の応答値が、加振試験(既往の研究等において実施されたものを含む。)により動的機能保持を確認した加速度を超えないこと。

2. 動的機能維持のための新たな検討、詳細検討又は加振試験が必要な設備の検討方針

動的機能維持評価において、原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版(以下「JEAG4601」という。)に定められた適用範囲から外れ新たな検討又は加振試験が必要な設備、もしくは機能維持評価用加速度が機能確認済加速度を超えるため詳細検討が必要な設備を抽出するとともに、抽出された設備における動的機能維持のための検討方針を示す。

3. 動的機能維持のための新たな検討、詳細検討又は加振試験が必要な設備の抽出

(1) 検討対象設備

検討対象設備は、Sクラス設備並びに常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備とし、動的機能が必要な設備として JEAG4601 で適用範囲が定められている機種(立形ポンプ、横形ポンプ、電動機等)とする。

なお、電気計装機器については、原則として加振試験により電氣的機能維持を確認することから、動的機能維持評価の検討対象設備から除いている。

(2) 新たな検討、詳細検討又は加振試験が必要な設備の抽出

第3-1 図に動的機能維持評価の検討フローを示す。検討対象設備について、動的機能維持の要求の有無を確認し、要求がない設備については本検討における対象外とする。

動的機能維持の要求がある検討対象設備について、JEAG4601 に定める機能確認済加速度(A<sub>t</sub>)との比較による評価方法が適用できる機種に対して、構造、作動原理、各機器の流量、出力等が JEAG4601 で定められた適用範囲と大きく異なることを確認する。大きく異なる場合は、新たな検討(地震時異常要因分析の実施、基本評価項目の抽出、評価)が必要な設備、又は加振試験を実施する設備として抽出する。

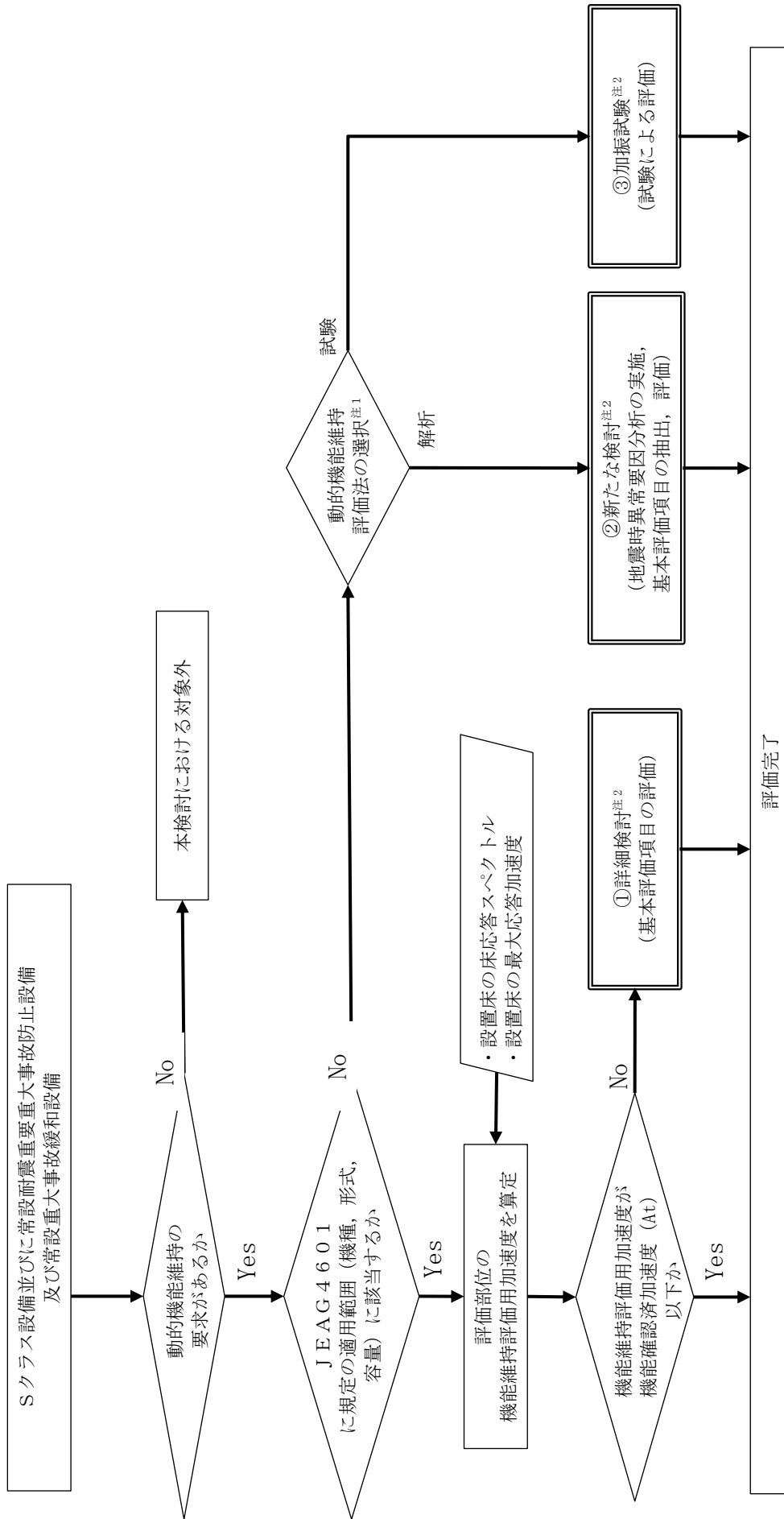
さらに、機能維持評価用加速度が J E A G 4 6 0 1 及び既往の研究<sup>※</sup>等により妥当性が確認されている機能確認済加速度 (A t) 以下であることの確認を行い、機能確認済加速度を超える設備については詳細検討(基本評価項目の評価)が必要な設備として抽出する。

なお、弁については J E A G 4 6 0 1 にて機能維持評価用加速度が機能確認済加速度を超えた場合の詳細検討の具体的手順が定められているため、詳細評価法検討の対象外とする。

上記の整理結果として別表 1 に検討対象設備を示すとともに、詳細検討又は新たな検討が必要な設備の抽出のための情報として J E A G 4 6 0 1 に該当する機種名等を整理した。

また、別表 1 に整理した設備や機能維持評価用加速度等の内容については、設計途中のため、動的機能維持評価の方針が検討中の設備も含まれており、今後の詳細設計の進捗に併せて変更の可能性があることから、工認段階で再度、設備及び評価方法の整理を行う。

※電力共通研究「鉛直地震動を受ける設備の耐震評価手法に関する研究  
(平成 10 年度～平成 13 年度)」



注1：対象物の複雑さ，加振試験の可否等により選択

注2：評価の成立性が確認できない場合，対策による検討を実施

第3-1 図 動的機能維持評価の検討フロー

### (3) 抽出結果

別表1をもとに、第3-1図の検討フローにより、①詳細検討、②新たな検討及び③加振試験が必要な設備を検討した結果を、第3-1表に示す。

#### ① 詳細検討(基本評価項目の評価)が必要な設備

機能維持評価用加速度が機能確認済加速度を超え、詳細検討が必要となる設備として、以下の設備が該当する。

- ・原子炉補機海水ポンプ及び電動機
- ・非常用ガス処理系排風機及び電動機
- ・可燃性ガス濃度制御系再結合装置ブロワ及び電動機
- ・ほう酸水注入ポンプ及び電動機・燃料プール冷却ポンプ及び電動機
- ・高圧炉心スプレイポンプ補機海水ポンプ及び電動機

#### ② 新たな検討(地震時異常要因分析の実施、基本評価項目の抽出、評価)が必要な設備

新たな検討が必要な設備としては、以下の設備が該当する。

##### <スクリー式ポンプ>

- ・非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ
- ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ
- ・ガスタービン発電機用燃料移送ポンプ

##### <ガスタービン機関>

- ・ガスタービン発電機

#### ③ 加振試験(試験による評価)が必要な設備

加振試験が必要な設備としては、以下の設備が該当する。

- ・高圧原子炉代替注水ポンプ

第3-1表 新たな検討又は詳細検討が必要な設備の抽出結果(1/2)

機種名	設備名称	JEAG4601の適用性確認 ○:適用可 ×:適用外 (新たな検討が必要)	At確認 <sup>注1</sup> ○:At以下 (評価完了) ×:At超過 (詳細検討が必要) -:対象外, 評価中
立形ポンプ	残留熱除去ポンプ	○	○
	高压炉心スプレイポンプ	○	○
	低压炉心スプレイポンプ	○	○
	原子炉補機海水ポンプ	○	×
	高压炉心スプレイ補機海水ポンプ	○	×
横形ポンプ	燃料プール冷却ポンプ	○	×
	高压原子炉代替注水ポンプ	× (タービン駆動水潤滑式)	-
	残留熱代替除去ポンプ	○	○
	原子炉隔離時冷却ポンプ	○	○
	低压原子炉代替注水ポンプ	○	○
	原子炉補機冷却水ポンプ	○	○
	高压炉心スプレイ補機冷却水ポンプ	○	○
	非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ	× (スクュー式)	-
	高压炉心スプレイ系ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ	× (スクュー式)	-
	ガスタービン発電機用燃料移送ポンプ	× (スクュー式)	-
往復動式ポンプ	ほう酸水注入ポンプ	○	×
ポンプ駆動用タービン	原子炉隔離時冷却ポンプ駆動用蒸気タービン	○	○
電動機	燃料プール冷却ポンプ用電動機	○	×
	残留熱除去ポンプ用電動機	○	○
	高压炉心スプレイポンプ用電動機	○	○
	低压炉心スプレイポンプ用電動機	○	○
	残留熱代替除去ポンプ用電動機	○	○
	低压原子炉代替注水ポンプ用電動機	○	○
	原子炉補機冷却水ポンプ用電動機	○	○
	原子炉補機海水ポンプ用電動機	○	×
	高压炉心スプレイ補機冷却水ポンプ用電動機	○	○
	高压炉心スプレイ補機海水ポンプ用電動機	○	×
	ほう酸水注入ポンプ用電動機	○	×

第3-1表 新たな検討又は詳細検討が必要な設備の抽出結果(2/2)

機種名	設備名称	JEAG4601の適用性確認 ○:適用可 ×:適用外 (新たな検討が必要)	At確認 <sup>注1</sup> ○:At以下 (評価完了) ×:At超過 (詳細検討が必要) -:対象外, 評価中
電動機	中央制御室送風機用電動機	○	○
	中央制御室非常用再循環送風機用電動機	○	○
	非常用ガス処理系排風機用電動機	○	×
	可燃性ガス濃度制御系再結合装置ブロワ用電動機	○	×
	非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ用電動機	○	○
	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ用電動機	○	○
	ガスタービン発電機用燃料移送ポンプ用電動機	○	○
ファン	中央制御室送風機	○	○
	中央制御室非常用再循環送風機	○	○
	非常用ガス処理系排風機	○	×
	可燃性ガス濃度制御系再結合装置ブロワ	○	×
非常用ディーゼル 発電設備	非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関	○	○
	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関	○	○
ガスタービン機関	ガスタービン発電機	× (ガスタービン発電機)	-
制御棒	制御棒(地震時挿入性)	○	○ <sup>注2</sup>

注1：今後の設計進捗によって機能維持評価用加速度が変更となる場合は確認結果に反映する。

注2：地震応答解析結果から求めた燃料集合体相対変位が、加振試験により確認された制御棒挿入機能に支障を与えない変位に対して下回ることを確認。

#### 4. 新たな検討が必要な設備における動的機能維持評価の検討

##### 4.1 新たな検討が必要な設備における動的機能維持の検討方針

検討対象設備のうち、3.(3)②に示す機器については、J E A G 4 6 0 1に定められた機種及び適用形式から外れ、機能確認済加速度との比較による評価方法が適用できないことから、新たに評価項目の検討が必要となる設備である。

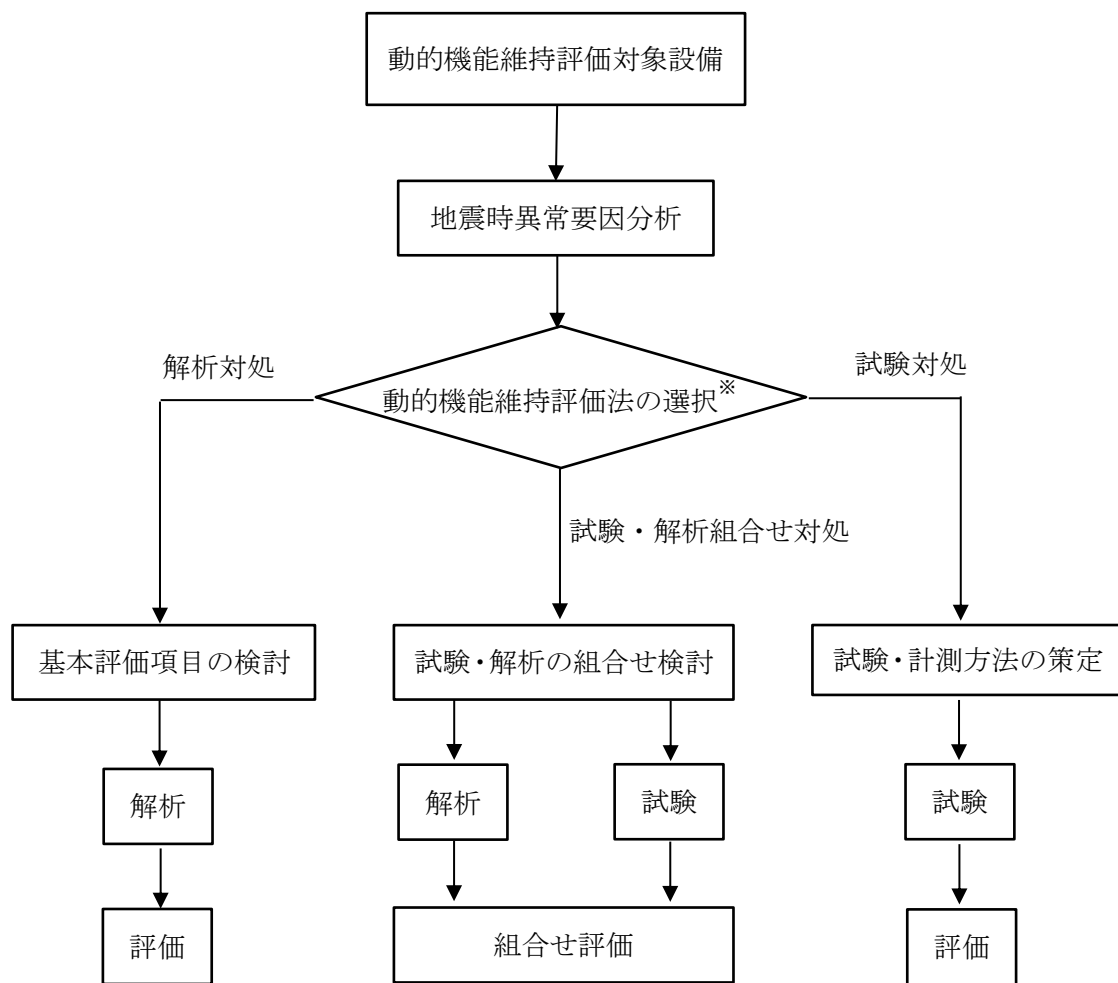
J E A G 4 6 0 1に定められた機能確認済加速度との比較による評価方法が適用できる機種の範囲から外れた設備における動的機能維持の検討においては、技術基準規則解釈等の改正を踏まえて、公知化された検討として(社)日本電気協会 電気技術基準調査委員会の下に設置された原子力発電耐震設計特別調査委員会(以下「耐特委」という。)により取り纏められた類似機器における検討及び電力共通研究(以下「電共研」という。)にて取り纏められた類似機器を参考に検討を実施する。

具体的には、耐特委では動的機能の評価においては、対象機種ごとに現実的な地震応答レベルでの異常のみならず、破壊に至るような過剰な状態を念頭に地震時に考え得る異常状態を抽出し、その分析により動的機能上の評価項目を検討し、動的機能維持を評価する際に確認すべき事項として、基本評価項目を選定している。また、電共研の検討では、耐特委及び原子力発電技術機構(以下「NUPEC」という。)での検討を踏まえて、動的機能維持の基本評価項目を選定している。

J E A G 4 6 0 1に定められた機種及び適用形式から外れた設備については、作動原理、構造又は機能が類似している構成設備を有する機種/形式に対する耐特委及び電共研での検討を参考に、形式による構造の違いを踏まえた上で地震時異常要因分析を実施し、基本評価項目を選定し動的機能維持評価を実施する。動的機能維持評価のフローを第4.1-1図に示す。

なお、J E A G 4 6 0 1においても、機能維持評価の基本方針として、地震時の異常要因分析を考慮し、動的機能の維持に必要な評価のポイントを明確にすることとなっている。





※対象物の複雑さ等で選択

第 4.1-1 図 動的機能維持評価フロー

## 4.2 スクリュー式ポンプに対する検討

### 4.2.1 検討対象設備の概要

スクリー式ポンプは、その作動原理・構造から異常要因分析や基本評価項目の抽出が可能であり、分析や項目の抽出において参考とする類似ポンプの検討事例があることから、解析による評価を実施する。地震時異常要因分析を検討するにあたり、第 4.2.1-1 表に、新たな検討が必要な設備及び参考とする機種／形式を示すとともに、第 4.2.1-1 図、第 4.2.1-2 図及び第 4.2.1-3 図に、今回工認において、新たな検討が必要な設備として抽出されたスクリー式ポンプ、参考とする耐特委で検討された遠心式ポンプ及び電共研で検討されたギヤ式ポンプの構造概要図を示す。

スクリー式ポンプは、容積式の横形ポンプであり、一定容積の液をスクリーにて押し出す構造のポンプである。参考とするギヤ式ポンプは、スクリー式ポンプと同様の容積式であり、ギヤで一定容積を押し出す構造である。

一方、遠心式ポンプはインペラの高速回転により液を吸込み・吐出するポンプであり、スクリー式と内部流体の吐出構造が異なるが、ケーシング内にて軸系が回転し内部流体を吐出する機構を有している。

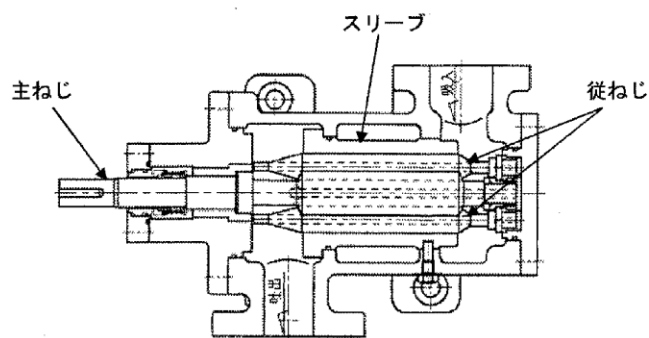
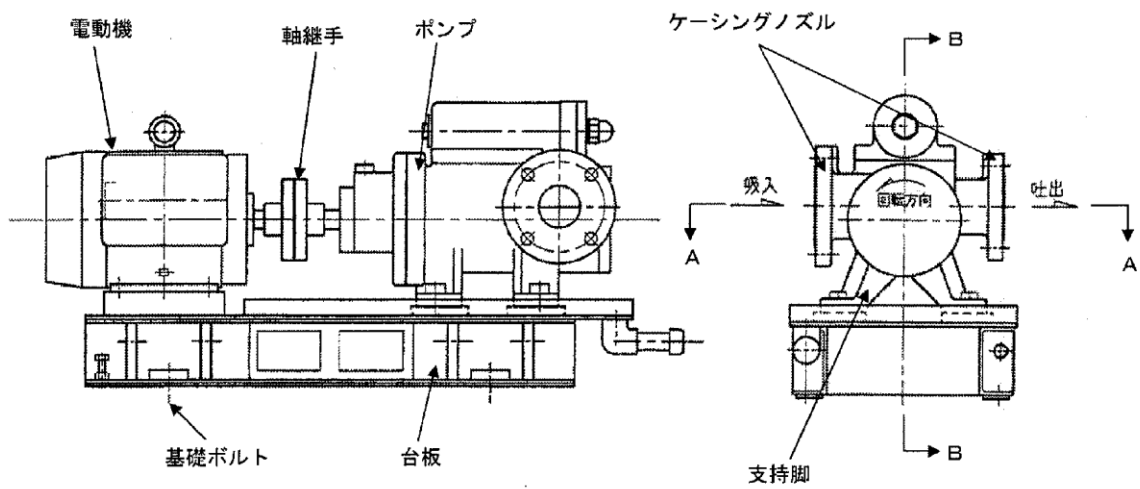
また、固定方法については、基礎ボルトで周囲を固定した架台の上に、駆動機器である横形ころがり軸受の電動機とポンプが取付ボルトにより設置され、地震荷重は主軸、軸受を通してケーシングに伝達されることから、基本構造は同じと言える。さらに、電動機からの動力は軸継手を介してポンプ側に伝達する方式であることから、作動原理についても同じと言える。

そのため、スクリー式ポンプについては、遠心式ポンプ及びギヤ式ポンプを参考として、地震時異常要因分析を実施する。

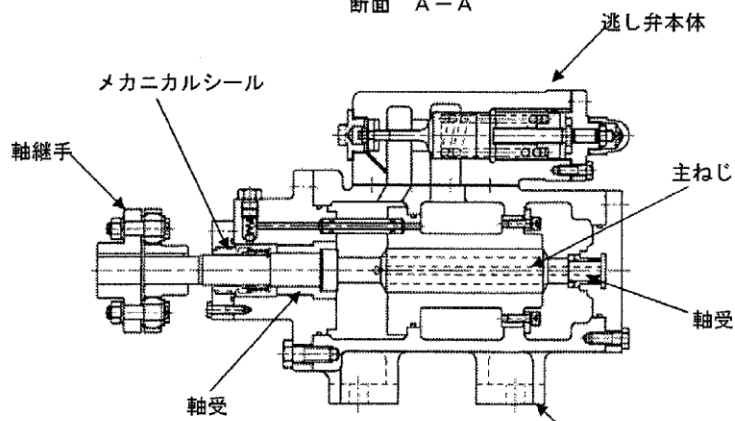
なお、ガスタービン発電設備燃料移送ポンプ、非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備燃料移送ポンプについては、新規制基準により新たに動的機能要求が必要となり、評価する設備となる。

第 4.2.1-1 表 新たな検討が必要な設備において参考とする機種／形式

新たな検討が必要な設備		参考とする 機種／形式
設備名	機種／形式	
<ul style="list-style-type: none"> <li>・非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ</li> <li>・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ</li> <li>・ガスタービン発電機用燃料移送ポンプ</li> </ul>	横形ポンプ／ スクリー式	横形ポンプ／ 単段遠心式
		横形ポンプ／ ギヤ式

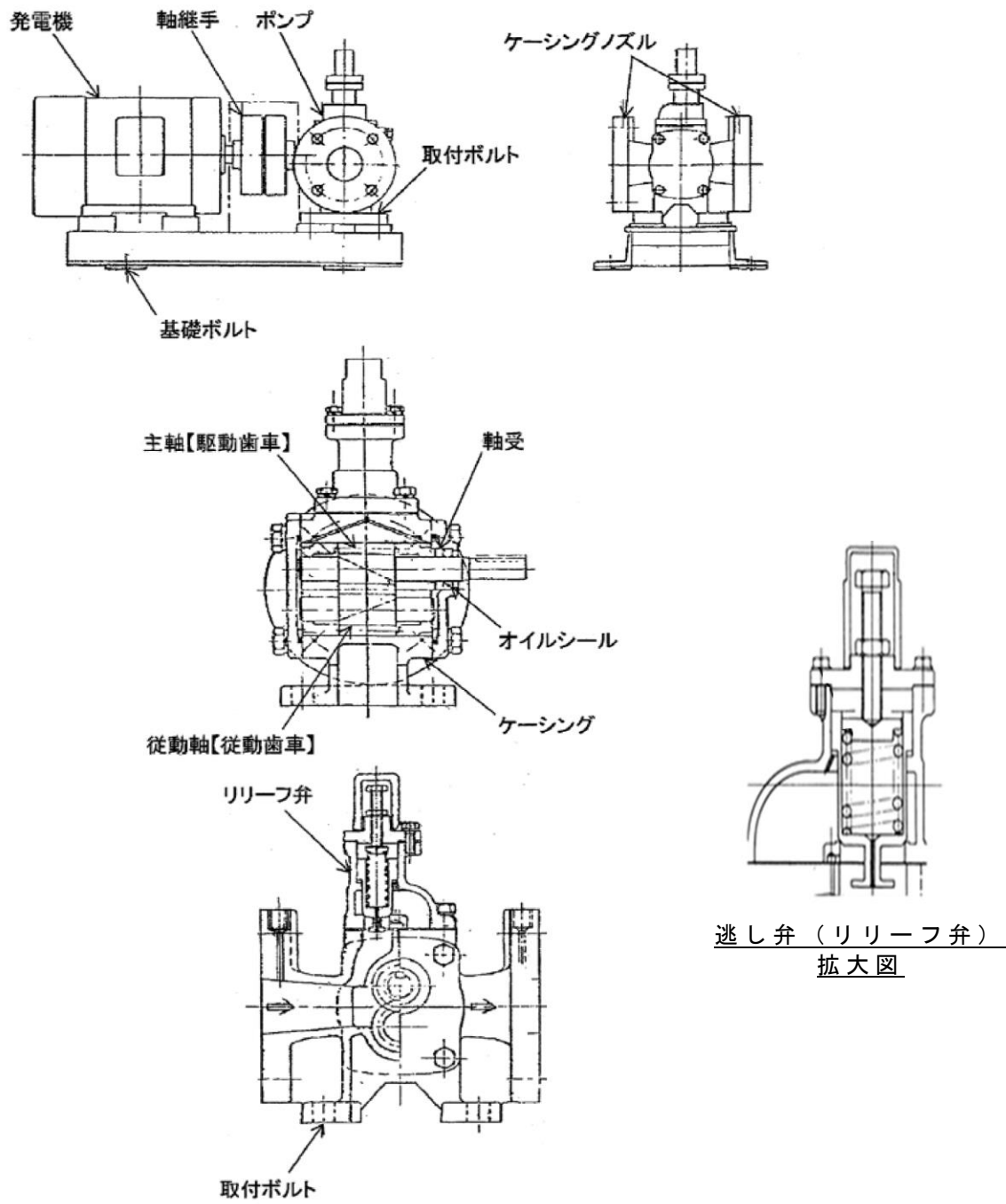


断面 A-A

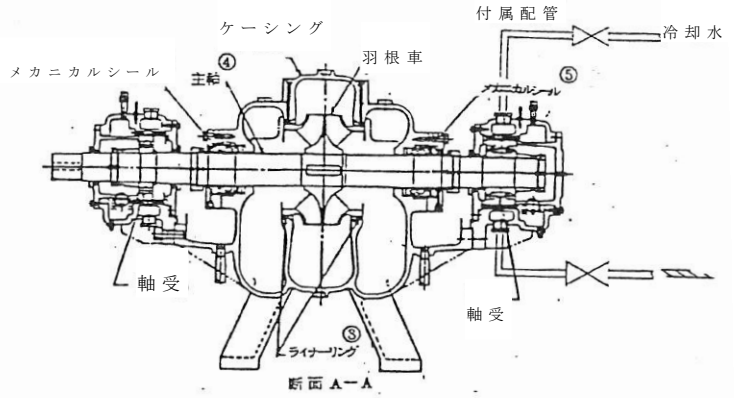
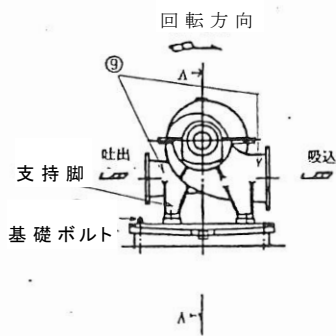
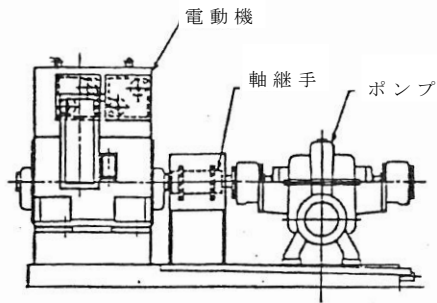


断面 B-B

第 4.2.1-1 図 スクリュー式ポンプ構造概要図



第 4. 2. 1-2 図 ギヤ式ポンプ構造概要図

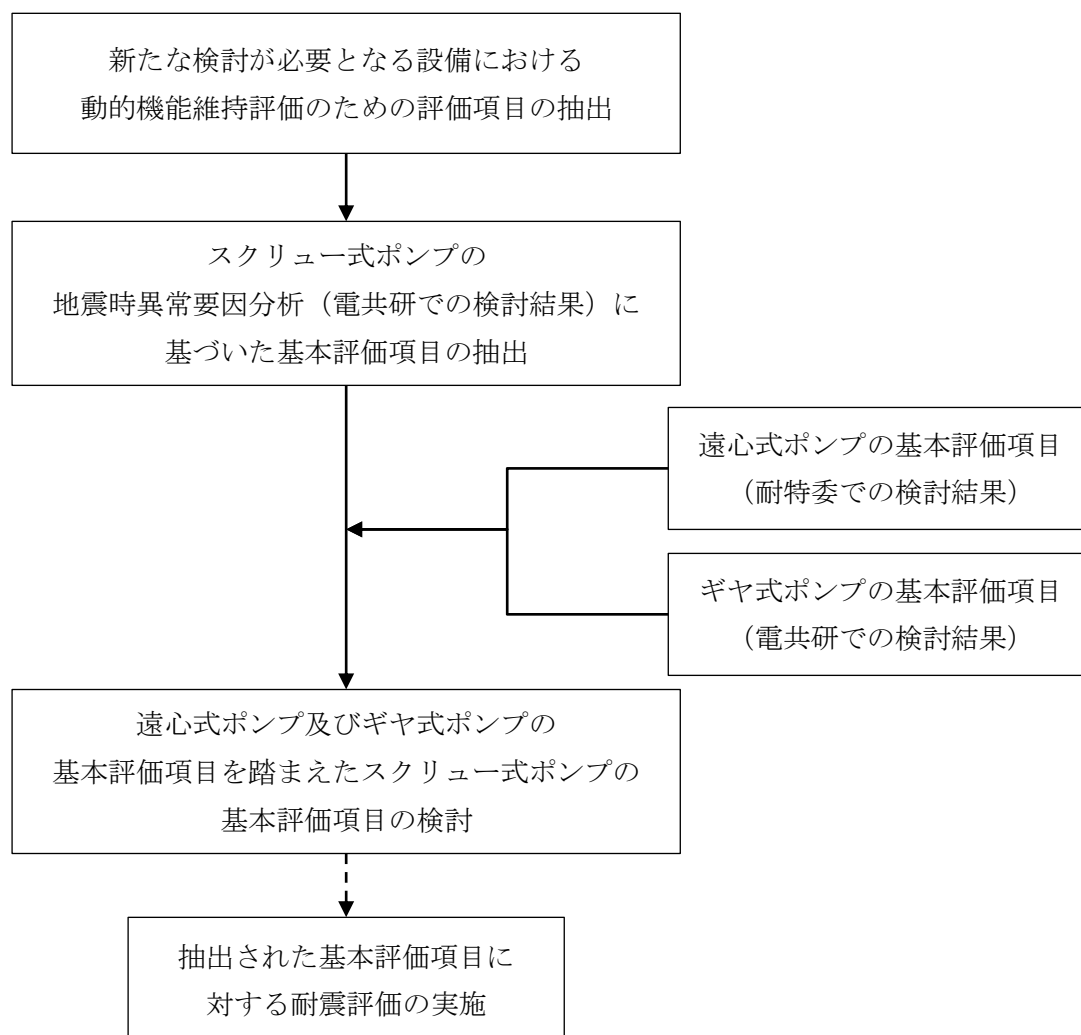


第 4.2.1-3 図 遠心式ポンプ構造概要図

#### 4.2.2 スクリュー式ポンプの動的機能維持評価項目の抽出

新たな検討が必要な設備であるスクリュー式ポンプの動的機能維持評価の評価項目については、電共研で検討されたスクリュー式ポンプに対する地震時異常要因分析を踏まえて基本評価項目を検討する。また、当該検討において参考とする、耐特委で検討された遠心式ポンプ及び電共研で検討されたギヤ式ポンプに対する地震時異常要因分析による基本評価項目を踏まえた検討を行う。

スクリュー式ポンプにおける動的機能維持評価のための基本評価項目の抽出フローを第4.2.2-1図に示す。

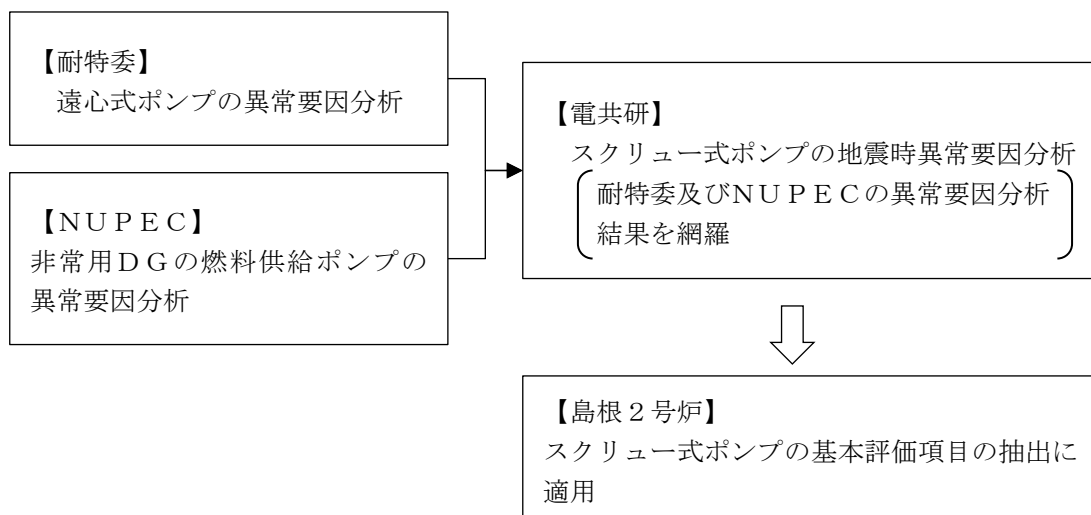


第4.2.2-1図 スクリュー式ポンプにおける動的機能維持評価のための基本評価項目の抽出フロー

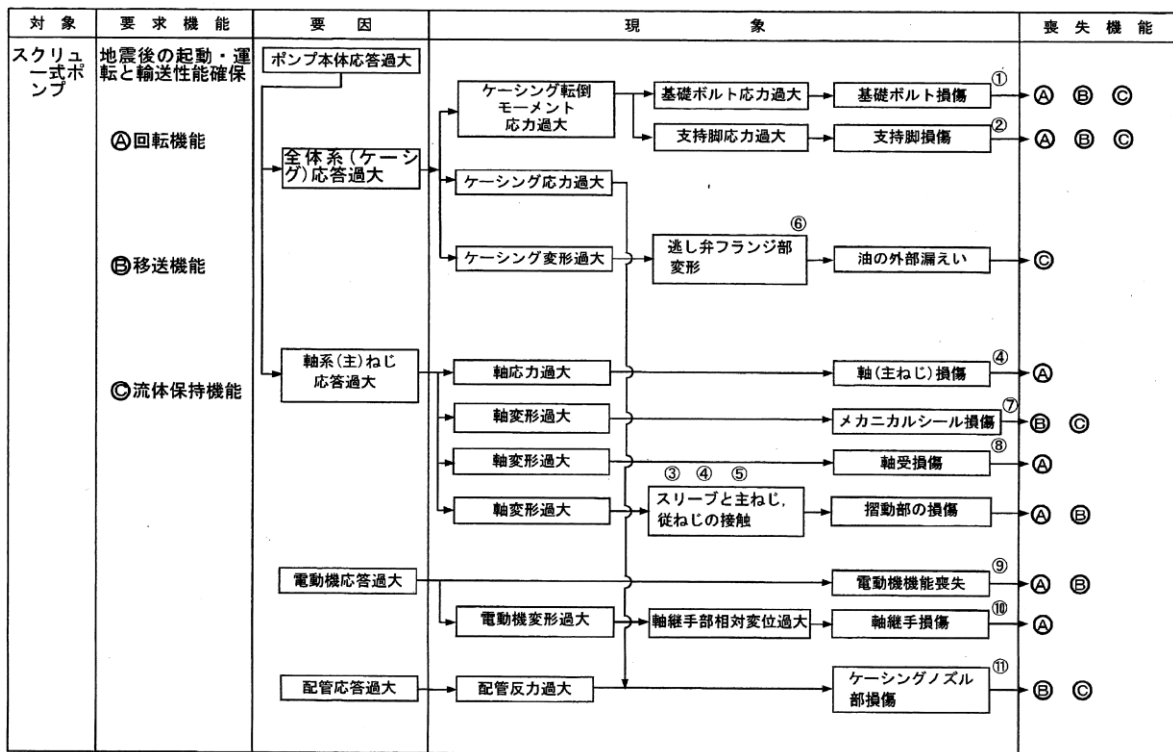
スクリー式ポンプの地震時異常要因分析図(以下「異常要因分析図」という。)及び基本評価項目は、電共研<sup>※</sup>での検討内容を用いる。電共研では第 4.2.2-2 図に示すとおり、耐特委における遠心式ポンプ及びNUPECにおける非常用ディーゼル発電機の燃料供給ポンプに対する異常要因分析結果(非常用ディーゼル発電機システム耐震実証試験(1992年3月))を網羅するように、スクリー式ポンプに対する地震時異常要因分析を行い、基本評価項目を抽出している。

スクリー式ポンプの要因分析図を第 4.2.2-3 図に示す。要因分析図に基づき抽出されるスクリー式ポンプの基本評価項目は、第 4.2.2-1 表のとおりである。

※動的機器の地震時機能維持の耐震余裕に関する研究(平成 25 年 3 月)



第 4.2.2-2 図 地震時異常要因分析の適用 (スクリー式ポンプ)



第 4.2.2-3 図 スクリュー式ポンプの地震時異常要因分析図

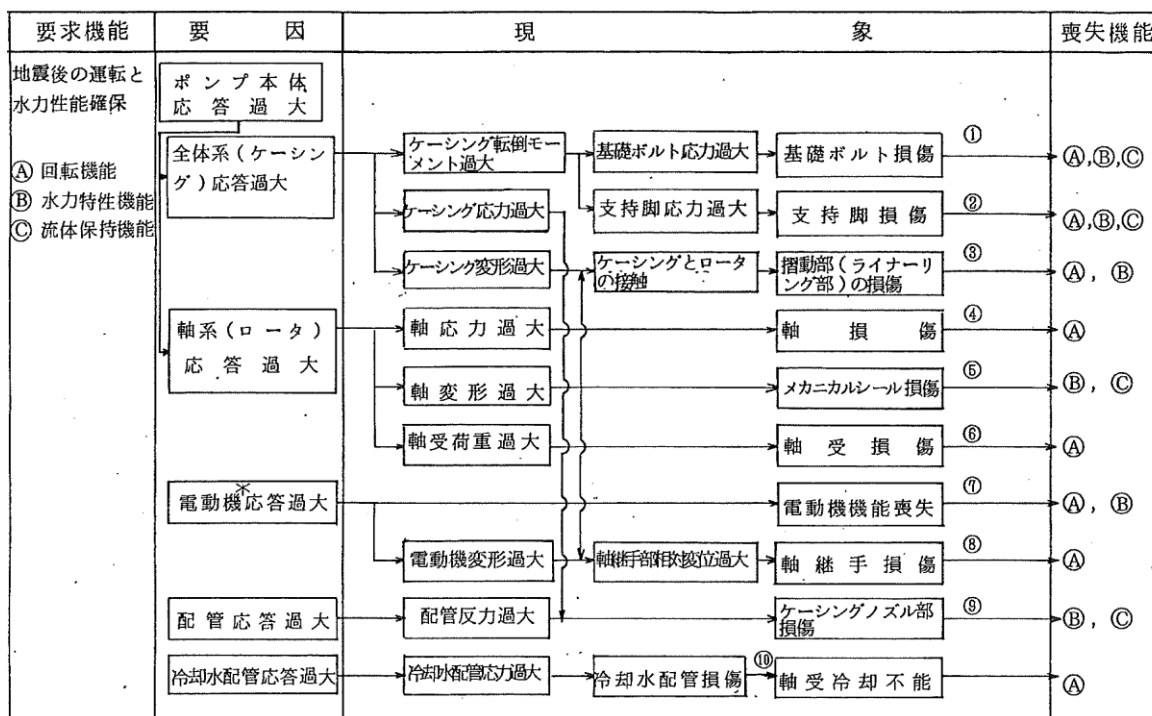


第 4.2.2-1 表 スクリュー式ポンプの異常要因分析図から抽出した基本評価項目

No.	基本評価項目	異常要因
①	基礎ボルト (取り付けボルト含む)	ポンプ全体系の応答が過大となることで、転倒モーメントにより基礎ボルト(取付ボルトを含む)の応力が過大となることにより損傷に至り、全体系が転倒することで機能喪失する。
②	支持脚	ポンプ全体系の応答が過大となることで、転倒モーメントにより支持脚の応力が過大となることにより損傷に至り、全体系が転倒することで機能喪失する。
③ ④ ⑤	摺動部 (③スリーブ, ④主ねじ, ⑤従ねじのクリアランス)	ポンプ全体系の応答が過大となることで、軸変形が過大となりスリーブと主ねじ又は従ねじが接触し、摺動部が損傷に至り回転機能及び移送機能が喪失する。
④	軸系	軸応力が過大となり軸が損傷することにより、回転機能及び移送機能が喪失する。
⑥	逃がし弁フランジ部	ケーシングの応答が過大となり逃がし弁フランジ部が変形し、油の外部漏えいに至る。
⑦	メカニカルシール	軸系ねじの応答過大により軸変形に至り、メカニカルシールが損傷することにより、移送機能及び流体保持機能が喪失する。
⑧	軸受	軸変形が過大となり軸受が損傷することで、回転機能及び移送機能が喪失する。
⑨	電動機	電動機の応答が過大になり電動機の機能が喪失することで、回転機能及び移送機能が喪失する。
⑩	軸継手	電動機の変形過大により軸受部の相対変位が過大となり、軸継手が損傷することで回転機能が喪失する。
⑪	ケーシングノズル	接続配管の応答が過大となり、ケーシングノズルが損傷することで移送機能及び流体保持機能が喪失する。

### 4.2.3 耐特委で検討された遠心式ポンプの地震時異常要因分析による基本評価項目

新たな検討が必要な設備として抽出されたスクリー式ポンプの基本評価項目の検討において、公知化された検討として、参考とする耐特委での遠心式ポンプの異常要因分析図を第4.2.3-1図に、異常要因分析図から抽出される遠心式ポンプの基本評価項目を第4.2.3-1表に示す。



\* 駆動用タービンの場合も同様。また、増速機も含む。

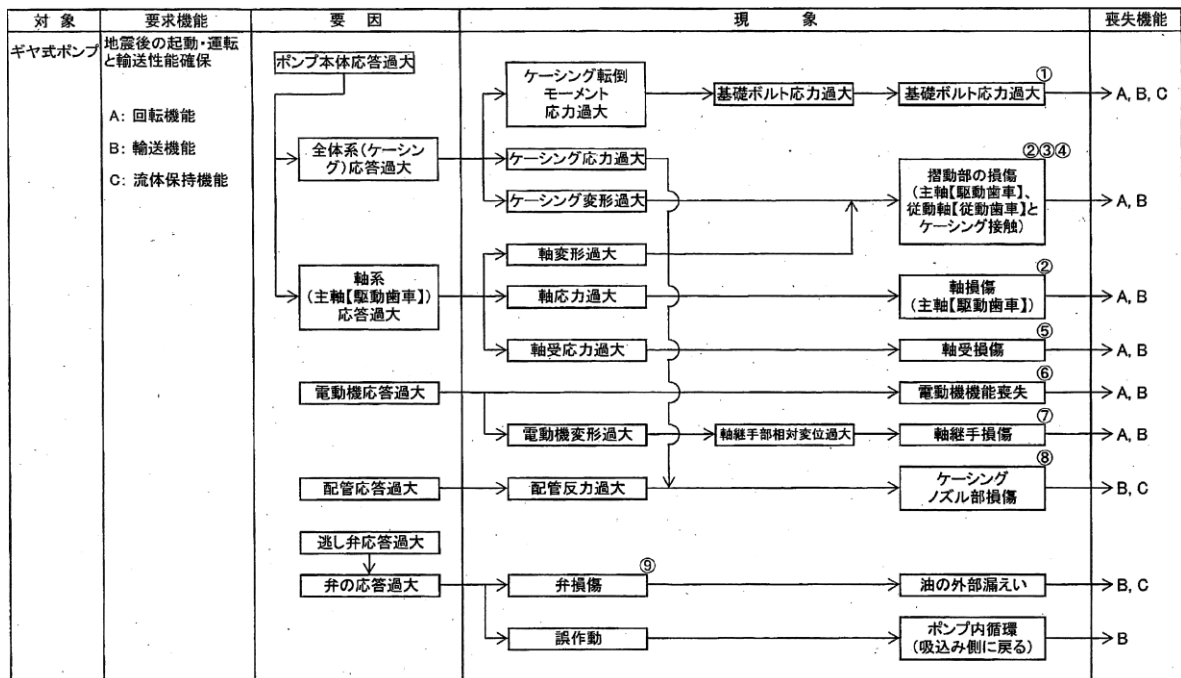
第4.2.3-1図 遠心式ポンプの地震時異常要因分析図

第 4.2.3-1 表 遠心式ポンプの要因分析図から抽出された基本評価項目

No.	評価項目	異常要因
①	基礎ボルト (取付ボルト含む)	ポンプ全体系の応答が過大となることで、転倒モーメントにより基礎ボルト(取付ボルトを含む)の応力が過大となることにより、損傷に至り、全体系が転倒することによって機能喪失する。また、ポンプ全体系の応答が過大となることで、支持脚の応力が過大となることにより損傷に至り、ポンプが転倒することにより機能喪失する。
②	支持脚	
③	摺動部 (インペラとライナーリングのクリアランス)	軸変形が過大となり、インペラがライナーリングと接触することで損傷に至り、回転機能及び輸送機能が喪失する。
④	軸系	軸応力が過大となり、軸が損傷することで回転機能及び輸送機能が喪失する。
⑤	メカニカルシール	軸変形が過大となり、メカニカルシールが損傷することで流体保持機能が喪失する。
⑥	軸受	軸受荷重が過大となり、軸受が損傷することで回転機能及び輸送機能が喪失する。
⑦	電動機	電動機の応答が過大になり電動機の機能が喪失することで、回転機能及び輸送機能が喪失する。
⑧	軸継手	被駆動器軸と電動機軸の相対変位が過大となり、軸継手が損傷することで回転機能及び輸送機能が喪失する。
⑨	ケーシングノズル	接続配管の応答が過大となり、ケーシングノズルが損傷することで輸送機能及び流体保持機能が喪失する。
⑩	軸冷却水配管	冷却水配管の応答が過大となり、損傷することで軸冷却不能に至り、回転機能が喪失する。

#### 4.2.4 電共研で検討されたギヤ式ポンプの地震時異常要因分析による基本評価項目

新たな検討が必要な設備として抽出されたスクリー式ポンプの基本評価項目の検討において、公知化された検討として、参考とする電共研でのギヤ式ポンプの異常要因分析図を第 4.2.4-1 図に、異常要因分析図から抽出されるギヤ式ポンプの基本評価項目を第 4.2.4-1 表に示す。



第 4.2.4-1 図 ギヤ式ポンプの地震時異常要因分析図

第 4.2.4-1 表 ギヤ式ポンプの要因分析図から抽出された基本評価項目

No.	評価項目	異常要因
①	基礎ボルト (取付ボルト含む)	ポンプ全体系の応答が過大となることで、転倒モーメントにより基礎ボルト(取付ボルトを含む)の応力が過大となり損傷に至り、全体系が転倒することにより機能喪失する。
② ③ ④	摺動部 (②主軸又は③従動軸と④ケーシングのクリアランス)	ポンプ全体系の応答が過大となることで、主軸(主動歯車)及び従動軸(従動歯車)の応答が過大となることによる軸部の変形により、ギヤがケーシングと接触することで損傷に至り、回転機能及び輸送機能が喪失する。
②	軸系	軸応力が過大となり、軸が損傷することで回転機能及び輸送機能が喪失する。
⑤	軸受	軸受荷重が過大となり、軸受が損傷することで回転機能及び輸送機能が喪失する。
⑥	電動機	電動機の応答が過大になり電動機の機能が喪失することで、回転機能及び輸送機能が喪失する。
⑦	軸継手	被駆動機軸と電動機軸の相対変位が過大となり、軸継手が損傷することで回転機能及び輸送機能が喪失する。
⑧	ケーシングノズル	接続配管の応答が過大となり、ケーシングノズルが損傷することで輸送機能及び流体保持機能が喪失する。
⑨	逃がし弁	弁の応答が過大となり、弁が損傷又は誤動作することで外部漏えい、ポンプ内循環が発生し、輸送機能及び流体保持機能が喪失する。

#### 4.2.5 スクリュー式ポンプの基本評価項目の検討

##### (1) 遠心式ポンプ及びギヤ式ポンプの基本評価項目を踏まえたスクリュー式ポンプの評価項目の整理

スクリュー式ポンプの異常要因分析結果について、参考として遠心式ポンプ及びギヤ式ポンプの異常要因分析結果と同様に整理した結果、スクリュー式ポンプの基本評価項目は、第 4.2.5-1 表に示すとおり、一部構造の差異による違いはあるものの、参考とする遠心式ポンプ及びギヤ式ポンプの評価項目を網羅していることを確認した。

第 4.2.5-1 表 スクリュー式ポンプにおける基本評価項目の整理結果

○：既往知見における評価項目，－：対象外

No.	基本評価項目	検討対象 (参照知見)	参考とする機種 (参照知見)		備考
		スクリュー式 ポンプ (電共研)	ギヤ式ポンプ (電共研)	遠心式ポンプ (耐特委)	
I	基礎ボルト (取付ボルト含む)	○	○	○	
II	支持脚	○		○	ギヤ式ポンプには構造上、存在しない
III	摺動部	○	○	○	
IV	軸系 (主ねじ)	○	○	○	
V	逃がし弁フランジ部 (漏えい防止)	○	－		遠心式ポンプには構造上、存在しない
VI	逃がし弁 (移送機能)	－	○		遠心式ポンプには構造上、存在しない
VII	メカニカルシール	○		○	ギヤ式ポンプはブッシングを使用
VIII	軸受	○	○	○	
IX	電動機	○	○	○	
X	軸継手	○	○	○	
XI	ケーシングノズル	○	○	○	
XII	軸冷却水配管			○	試験体が大型ポンプのため設置

(2) 島根 2 号炉のスクリー式ポンプにおける動的機能維持評価の基本評価項目の検討

島根 2 号炉のスクリー式ポンプにおける動的機能維持評価の基本評価項目の選定に当たっては、第 4.2.5-1 表のとおり、既往知見により抽出されたスクリー式ポンプの基本評価項目に、参考とする遠心式ポンプ及びギヤ式ポンプの基本評価項目を踏まえた全 12 項目について検討を行う。

No. I : 基礎ボルト (取付ボルト含む)

スクリー式ポンプは参考とする遠心式ポンプ及びギヤ式ポンプと同様に、基礎ボルトで固定された架台の上に駆動機器及び被駆動機器が取付ボルトで設置されており、地震時に有意な荷重がかかる構造となっていることから、基礎ボルトを動的機能維持評価の基本評価項目として選定する。

No. II : 支持脚

支持脚については、スクリー式ポンプと遠心式ポンプとで構造に大きな違いはなく、高い剛性を有するためにケーシング定着部に荷重がかかる構造となっている。

そのため、取付ボルト及び基礎ボルトが評価上厳しい部位となることから、取付ボルト及び基礎ボルトを支持脚の評価として代替する。

No. III : 摺動部

摺動部の損傷の観点から、遠心式ポンプの検討において、ケーシングがローターと接触して損傷するライナーリング部(摺動部)の評価を行うのと同様に、スクリー式ポンプにおいても摺動部の検討を行い、動的機能維持評価の基本評価項目として以下のとおり選定する。

スクリー式ポンプの摺動部であるスクリー部は剛性が高く、地震応答増幅が小さいため、動的機能評価上重要な部分の地震荷重は通常運転荷重に比べて十分小さいと考えられる。また、スリーブ部については、剛性の高いケーシング部に設置されており、有意な変形が生じることはない。

スクリー部を構成する主ねじ又は従ねじについては、損傷によってスリーブと接触することで、回転機能及び移送機能が喪失に至ることが考えられるため、摺動部を動的機能維持評価の基本評価項目として選定する。

#### No. IV : 軸系

スクリー式ポンプは主ねじ及び従ねじを有する構造であり、遠心式ポンプは一軸構造、ギヤ式ポンプは主軸及び従動軸からなる二軸構造となっている。各ポンプによって軸構造は異なるが、軸系の損傷によってポンプとしての機能を喪失することは同様である。

そのため、軸損傷が発生しないことを確認するために、軸系を動的機能維持評価の基本評価項目として選定する。

#### No. V : 逃がし弁フランジ部 (漏えい防止)

逃がし弁フランジ部については、地震によりポンプケーシングの応答が増大すると、フランジ部に変形が生じて内部流体の漏えいに至り、ポンプとしての機能に影響を与えることから、逃がし弁フランジ部(漏えい防止)を動的機能維持の基本評価項目として選定し、フランジ部の構造評価を実施する。

#### No. VI: 逃がし弁 (移送機能)

スクリー式ポンプは、ギヤ式ポンプと同様に逃がし弁が設置されており、誤作動すれば移送機能に影響を与えることから、逃がし弁(移送機能)を動的機能維持評価の基本評価項目として選定する。評価においては、弁に作用する最大加速度が、安全弁の機能確認済加速度以下であることを確認する。

#### No. VII : メカニカルシール

メカニカルシールは、高い剛性を有するケーシングに固定されており、地震時に有意な変位が生じない。また軸封部は軸受近傍に位置し、軸は地震時でも軸受で支持されており、有意な変位は生じることはなく、軸封部との接触は生じないため、メカニカルシールは動的機能維持評価の対象外とする。

#### No. VIII : 軸受

ポンプにおける軸受の役割は回転機能の保持であり、その役割はスクリー式ポンプと参考とする遠心式及びギヤ式ポンプで同じである。軸受が損傷すると、ポンプの機能喪失につながることから、軸受は動的機能維持評価の基本評価項目として選定する。また、評価においては発生する荷重として、スラスト方向及びラジアル方向の荷重を考慮して評価を行う。



#### No. IX:電動機

スクリー式ポンプの電動機は、横向きに設置されるころがり軸受を使用する電動機であり、その構造は耐特委(J E A G 4 6 0 1)で検討されている横型ころがり軸受電動機の適用範囲内である。

そのため、電動機を動的機能維持評価の基本評価項目として選定し、機能確認済加速度との比較により評価を行う。

#### No. X:軸継手

スクリー式ポンプは遠心式及びギヤ式ポンプと同様に、軸受でスラスト荷重を受け持つこと及びフレキシブルカップリングを採用しており、軸継手にはスラスト荷重による有意な応力が発生しない構造となっている。

よって、軸継手は動的機能維持評価の対象外とする。

#### No. XI:ケーシングノズル

スクリー式ポンプのケーシングノズル部は、遠心式及びギヤ式ポンプと同様に、ポンプケーシングと配管の接続部であるが、ノズル出入口配管のサポートについて適切に配管設計することで、ノズル部に過大な配管荷重が伝わらないようにすることが可能である。

よって、ケーシングノズルは動的機能維持評価の対象外とする。

#### No. XII:軸冷却水配管

耐特委で検討された遠心式ポンプは大型のポンプであり、軸受としてすべり軸受を採用していることから、軸受の冷却が必要となる。このため、地震により軸冷却水配管の損傷に至ればポンプの機能維持に影響を及ぼすため、基本評価項目としている。

一方、スクリー式ポンプの軸受は内部流体で冷却が可能であるため、軸冷却水配管は有していないことから、軸冷却水配管は動的機能維持評価の対象外とする。

#### 4.2.6 スクリュー式ポンプの動的機能維持評価項目の検討結果

島根2号炉における規格適用外の動的機能維持が必要な設備のうち、新たな検討が必要な設備であるスクリュー式ポンプについて、基本的な構造が類似している耐特委での遠心式ポンプ及び電共研でのギヤ式ポンプにおける検討結果を参考に、形式による構造の違いを踏まえた上で地震時異常要因分析を行い、動的機能維持を確認するための基本評価項目の抽出を行った。

その結果、スクリュー式ポンプの基本評価項目は、参考とした遠心式ポンプ及びギヤ式ポンプとの構造の違いにより一部の評価項目は異なるが、ほぼ同様となった。また、参考とするポンプとの構造及び評価項目の差異を踏まえ、基本評価項目について、島根2号炉のスクリュー式ポンプにおける動的機能維持評価の基本評価項目について検討した結果、評価項目が異なる部位に対する評価方法は同様であり、既往の評価手法を踏まえた詳細評価が可能であると考えられる。

以上の検討結果から、島根2号炉のスクリュー式ポンプにおける動的機能維持評価の基本評価項目については、第4.2.6-1表のとおり整理し、抽出された基本評価項目に対して、耐震計算を実施する。

第 4.2.6-1 表 島根 2 号炉のスクリー式ポンプにおける動的機能維持  
評価の基本評価項目の検討結果

○：評価対象（計算書対象），－：対象外

No.	既往知見における 基本評価項目	スクリー式ポンプにおける 動的機能維持評価の基本評価 項目	主な理由
I	基礎ボルト (取付ボルト含む)	○	損傷によりポンプ機能喪失
II	支持脚	－	基礎ボルトにて代替評価
III	摺動部	○	損傷によりポンプ機能喪失
IV	軸系	○	損傷によりポンプ機能喪失
V	逃がし弁フランジ部 (漏えい防止)	○	損傷によりポンプ機能喪失
VI	逃がし弁 (移送機能)	○	誤動作によりポンプ機能喪失
VII	メカニカルシール	－	地震により損傷しないため 評価不要
VIII	軸受	○	損傷によりポンプ機能喪失
IX	電動機	○	損傷によりポンプ機能喪失
X	軸継手	－	地震により損傷しないため 評価不要
XI	ケーシングノズル	－	配管設計により対応可能な ため評価不要
XII	軸冷却水配管		構造上，存在しないため評 価不要

#### 4.3 ガスタービン発電機に対する検討

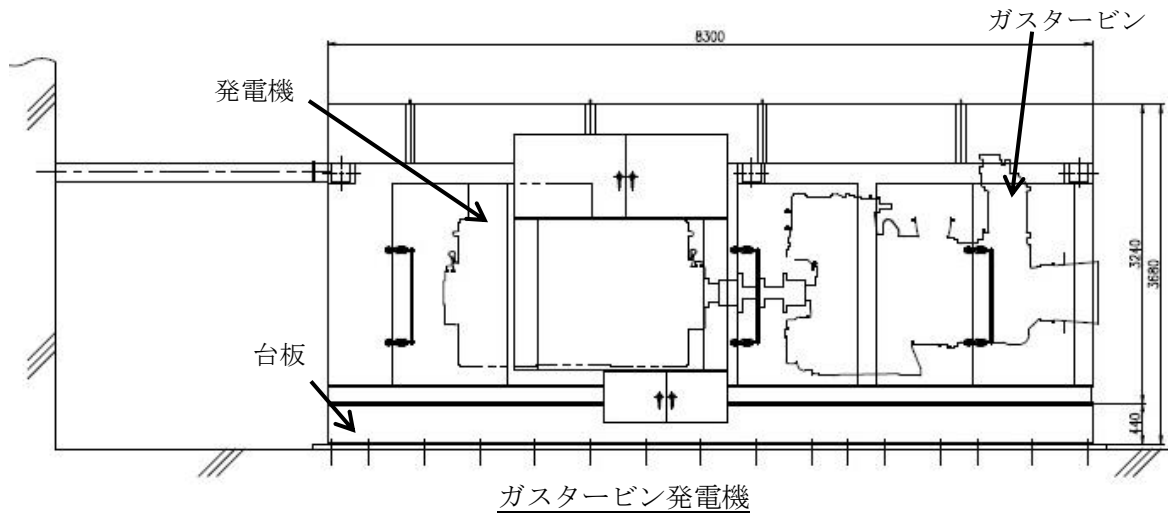
##### 4.3.1 検討対象設備の概要

ガスタービン発電機は、その作動原理・構造から異常要因分析や基本評価項目の抽出が可能であり、分析や項目の抽出において参考とする類似機器の検討事例があることから、解析による評価を実施する。地震時異常要因分析を検討するに当たり、第 4.3.1-1 表に新たな検討が必要な設備及び参考とする機種／形式を示すとともに、第 4.3.1-1 図、第 4.3.1-2 図及び第 4.3.1-3 図に今回工認において新たな検討が必要な設備として抽出されたガスタービン発電機、参考とする耐特委で検討された非常用ディーゼル発電機及びポンプ駆動用タービンの構造概要図を示す。

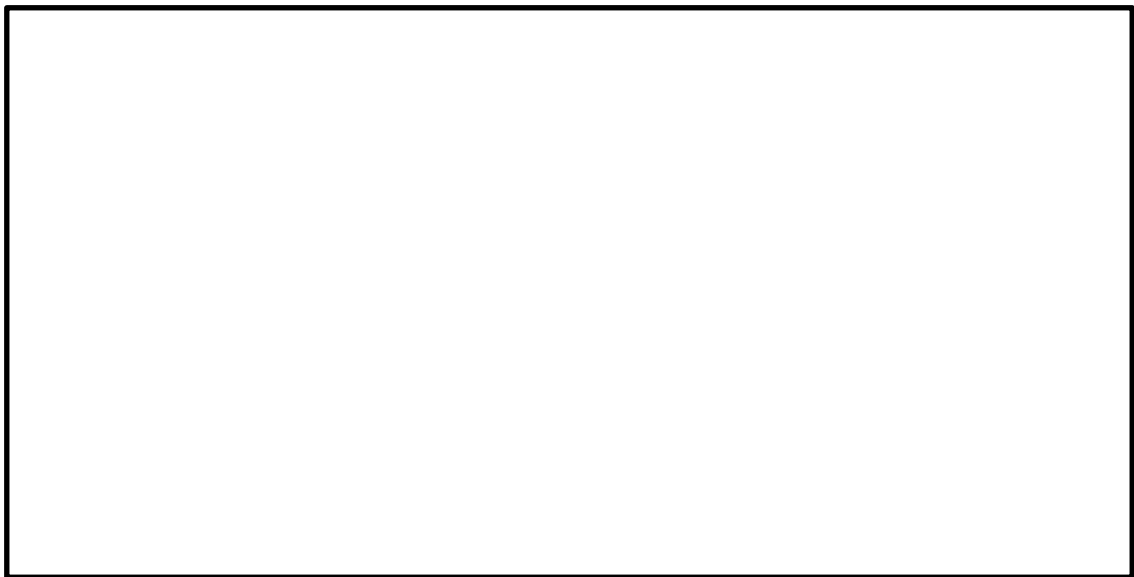
ガスタービン発電機は第 4.3.1-1 図に示すように、同一の台板上にガスタービンと発電機が据え付けられた構造となっている。ガスタービンと発電機は、軸継手によって連結されており、ガスタービンによって出力軸を回転させ、軸継手を介して発電機回転子を回転させて発電を行っている。ガスタービン発電機には、運転に必要な空気の取り込み、排出を行うために、伸縮継手を介して専用のダクト（吸排気設備）を設けている。

第 4.3.1-1 表 新たな検討が必要な設備において参考とする機種／形式

新たな検討が必要な設備		参考とする 機種／形式
設備名	機種／形式	
ガスタービン発電機	ガスタービン発電機 ／機関本体	非常用ディーゼル発電機/ 機関本体
		ポンプ駆動用タービン/ AFWP用



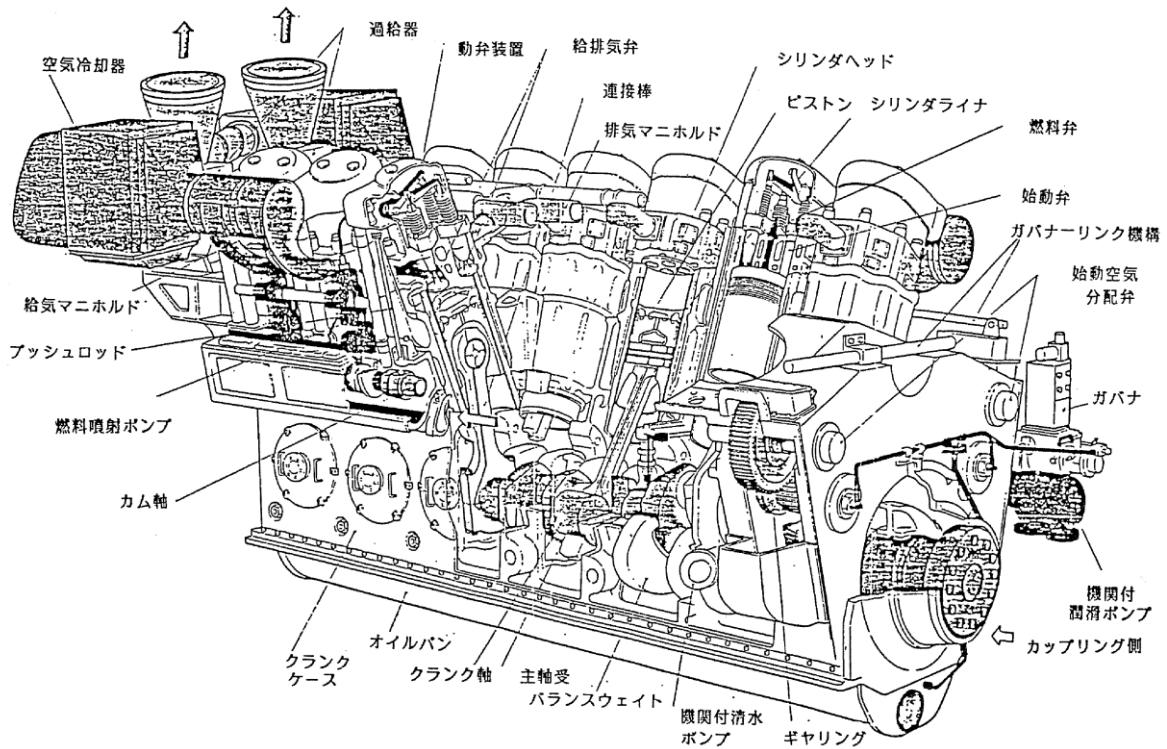
ガスタービン



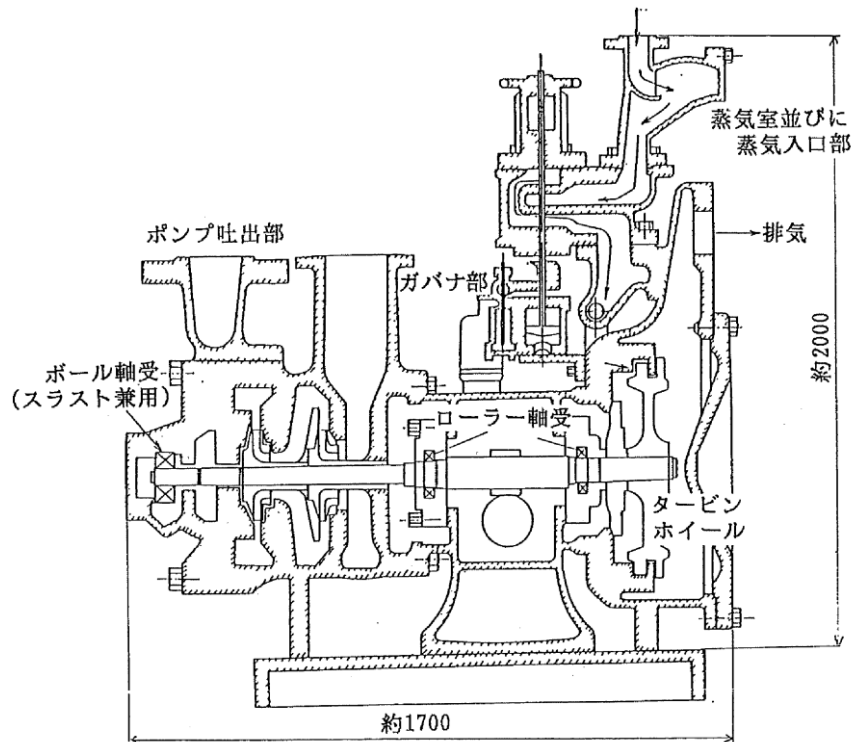
ガスタービン機関

第 4.3.1-1 図 ガスタービン発電機構造概要図

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。



第 4.3.1-2 図 非常用ディーゼル発電機構造概要図



第 4.3.1-3 図 ポンプ駆動用タービン (AFWP用) 構造概要図

ガスタービン発電機の動的機能維持評価において参考とする非常用ディーゼル発電機及びポンプ駆動用タービンについて、ガスタービンとの類似性を以下に示す。

#### (1) 非常用ディーゼル発電機

非常用ディーゼル発電機とガスタービン発電機は機関の構造は異なるが、動力機関と発電機及び付帯設備からなる非常用発電機という点で類似な設備であり、系統構成が同等である。各構成設備においても、その機能・作動原理から類似といえる機器が存在する。以下に、類似性を有する構成機器及びその根拠を示す。

##### a. ガスタービン（機関）

非常用ディーゼル発電機の過給機と以下の点において類似性を有する。

非常用ディーゼル発電機の過給機とガスタービン（機関）の構造比較を第 4.3.1-4 図に示す。非常用ディーゼル発電機の過給機とガスタービン（機関）は、共に昇圧した燃焼用空気を機関に送気する機能を有したターボ機械である。過給機は、燃焼後の排気ガスにて動力を得るための軸流型タービンと燃焼用空気を過給するためのインペラ型圧縮機を一軸上に配した回転軸を2つの軸受で支持した構造である。一方、ガスタービン（機関）も圧縮機とタービンを一軸上の回転軸に配し両端の軸受で支持した構造である。

共に高速で回転する回転軸が支持している軸受を介してケーシング内に内包された構造であり、このケーシングを本体取付面にボルト結合されている点で類似の構造である。また、共に回転軸は常用の回転速度において固有振動数が危険速度と一致しないように離調されており、この軸振動特性を確保するために回転軸のみならず軸受及びこれを支えるケーシングに対しても変形を抑制する高い剛性が要求されている。このように、機関全体が高い剛性を有しており、振動特性の観点からも両者は類似している。

##### b. ガスタービン（減速機）

非常用ディーゼル発電機のギヤリングと以下の点において類似性を有する。

非常用ディーゼル発電機のギヤリングとガスタービン（減速機）の構造比較を第 4.3.1-5 図に示す。非常用ディーゼル発電機のギヤリングは、クランクの回転より得た動力をクランクギヤ、アイドルギヤ、及びカムギヤ等で構成された歯車機構を介して燃料噴射系及び排気動弁系の機器を駆動させるカムへ伝達する機能を有している。一方、ガスタービン（減速機）も遊星歯車等の歯車で構成された歯車機構を介してガスタービン（機

関) 主軸より得た動力を適切な回転速度に減速調整して出力軸より発電機へ伝達する機能を有しており、類似の動力伝達の機能を有した機器である。また、共に回転する歯車軸が軸受を介してケーシング内に内包された構造であり、このケーシングを台板にボルト結合されている点で類似の構造を有している。

また、動力伝達時に歯車同士が噛み合うことで生じる反力を歯車軸で受けながら円滑な回転を確保するために、歯車軸をはじめ、軸受及びこれを支えるケーシングに対しても変形を抑制する高い剛性が要求されている。このように、機関全体が高い剛性を有しており、振動特性の観点からも類似性を有している。

c. ガスタービン付きポンプ（主燃料油ポンプ，潤滑油ポンプ）

非常用ディーゼル発電機の潤滑油ポンプと以下の点において類似性を有する。

非常用ディーゼル発電機の潤滑油ポンプとガスタービン付きポンプ（主燃料油ポンプ，潤滑油ポンプ）の構造比較を第 4.3.1-6 図に示す。非常用ディーゼル発電機の潤滑油ポンプは、機関各部へ潤滑油を供給するため、機関本体に付属して回転するクランク軸（クランクギヤ）より歯車を介して動力を得る回転式ポンプである。一方、ガスタービン付きポンプ（主燃料油ポンプ，潤滑油ポンプ）も機関各部へ燃料油や潤滑油を供給するため、ガスタービン（減速機）に付属して回転する減速機軸より動力を得る回転式ポンプであり、共に主機関より動力を得て流体を輸送するポンプ機能を有する点で類似している。

また、共に流体を押し出す回転部品とケーシングで構成された単純な構造の機器であり、主機関にボルト結合された支持構造であることから、振動特性の観点からも類似性を有している。

d. 燃料制御装置（燃料制御ユニット，燃料制御ユニットドライバ，燃料供給電磁弁）

非常用ディーゼル発電機のガバナ及びオーバースピードトリップ装置と以下の点において類似性を有する。

非常用ディーゼル発電機のガバナは、ディーゼル機関の回転数を一定に保つために、燃料流量を制御しており、機構は異なるものの同様に回転数を一定に保つために燃料流量制御を行うガスタービンの燃料制御装置と機能面で類似性を有している。

また、非常用ディーゼル発電機のオーバースピードトリップ装置とガスタービン発電機の燃料供給電磁弁は、共に過速度トリップ機能として燃料供給制御を行う点で類似性を有している。



<p>非常用ディーゼル発電機の過給機</p>	
<p>ガスタービン (機関)</p>	
<p>類似点</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 燃焼用空気を機関に送気する機能を有したターボ機械である。</li> <li>・ 圧縮機とタービンを一軸上の回転軸に配置し両端の軸受で支持した構造である。</li> <li>・ 回転軸がケーシング内に内包されており，ケーシングがボルト結合されている。</li> <li>・ 機関全体が高い剛性を有している。</li> </ul>

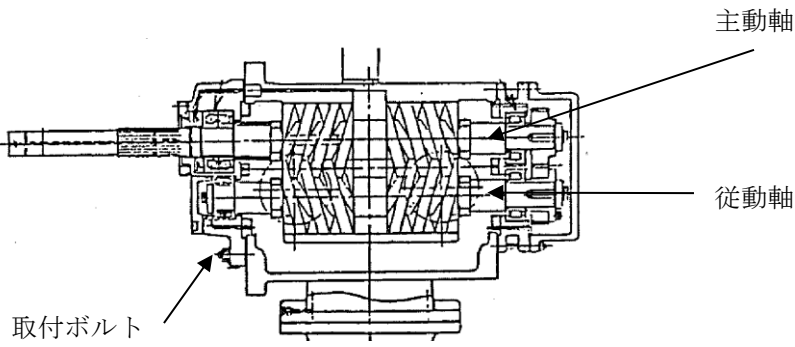
第 4.3.1-4 図 非常用ディーゼル発電機の過給機とガスタービン (機関) の比較

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。

<p>非常用ディーゼル発電機のギヤリング</p>	
<p>ガスタービン（減速機）</p>	
<p>類似点</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 歯車機構を介して動力を伝達する機能を有する。</li> <li>• 歯車軸がケーシング内に内包されており、ケーシングがボルト結合されている。</li> <li>• 機器全体が高い剛性を有している。</li> </ul>

第 4. 3. 1-5 図 非常用ディーゼル発電機のギヤリングとガスタービン（減速機）の比較

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。

<p>非常用ディーゼル発電機の潤滑油ポンプ</p>	
<p>ガスタービン付きポンプ（主燃料油ポンプ・潤滑油ポンプ）</p>	
<p>類似点</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・主機関より動力を得て流体を輸送するポンプ機能を有する。</li> <li>・流体を押し出す回転部品とケーシングで構成された単純な構造の機器である。</li> <li>・主機関にボルト結合されている。</li> </ul>

第 4. 3. 1-6 図 非常用ディーゼル発電機の潤滑油ポンプと  
ガスタービン付きポンプ（主燃料油ポンプ，潤滑油ポンプ）の比較

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。

## (2) ポンプ駆動用タービン

ポンプ駆動用タービンとガスタービン発電機は、以下の点で類似性を有するターボ機械である。

ポンプ駆動用タービンとガスタービン（機関）の構造比較を第4.3.1-7図に示す。ポンプ駆動用タービンは、駆動用蒸気を動力とする軸流型タービンとポンプタービンを一軸上に配した回転軸を複数の軸受で支持した構造である。一方、ガスタービン（機関）も、圧縮機とタービンからなる一軸の回転軸を両端の軸受で支持した構造である。共に高速で回転する回転軸を支持する軸受を介してケーシング内に内包した構造であり、このケーシングを本体取付面にボルト結合している点で類似の構造を有している。

また、共に回転軸は常用の回転速度において固有振動数が危険速度と一致しないように離調されており、この軸振動特性を確保するために回転軸のみならず軸受、及びこれを支えるケーシングに対しても変形を抑制する高い剛性が要求されている。このように、回転軸及び関連部位が高い剛性を有しており、振動特性の観点からも両者は類似している。

<p>ポンプ駆動用タービン</p>	
<p>ガスタービン (機関)</p>	
<p>類似点</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・タービンにより高速で回転する回転軸を有する。</li> <li>・回転軸がケーシング内に内包されており、ケーシングがボルト結合されている。</li> <li>・回転軸及び関連部位が高い剛性を有する。</li> </ul>

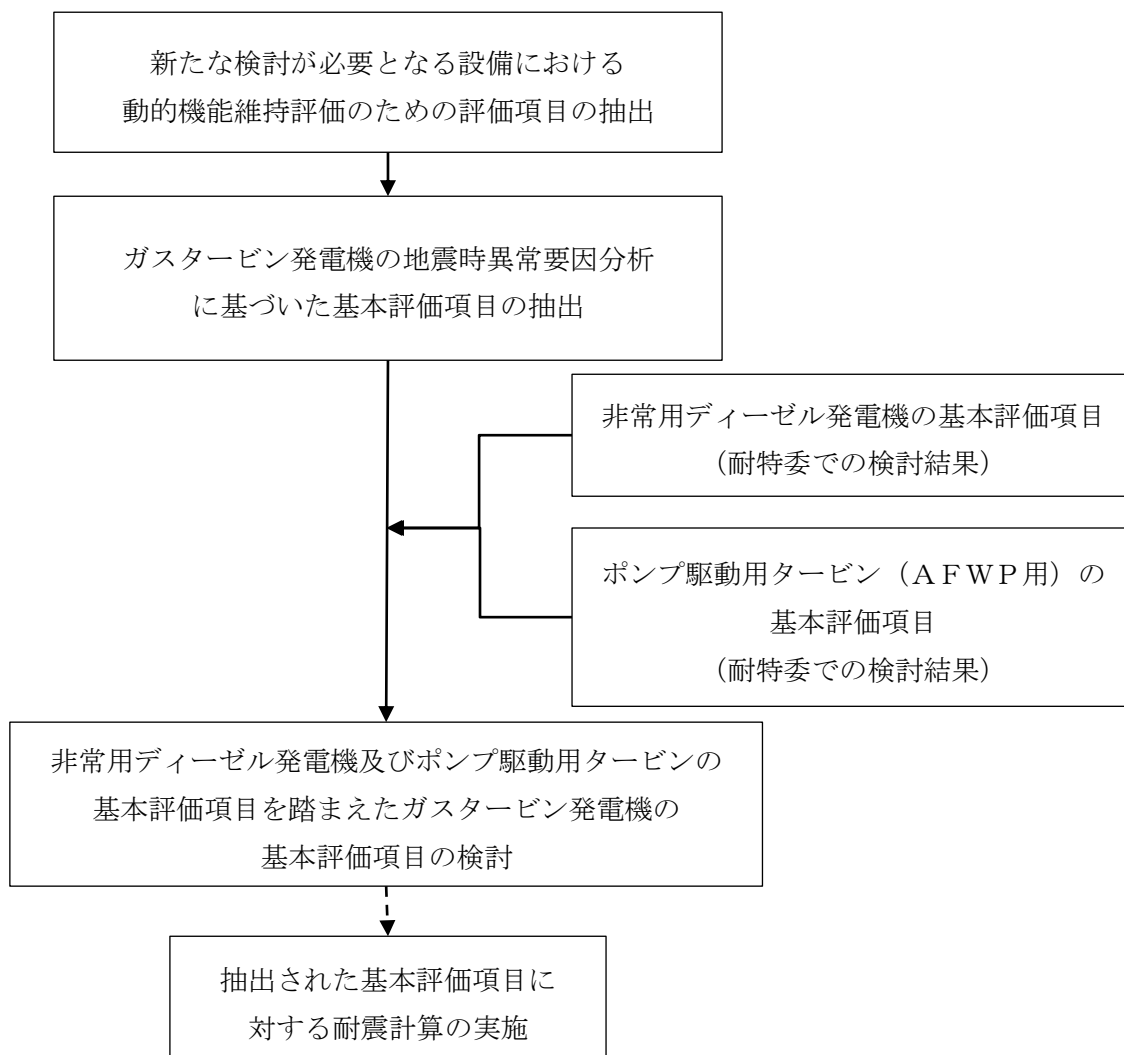
第 4.3.1-7 図 ポンプ駆動用タービンとガスタービン (機関) の比較

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。

#### 4.3.2 ガスタービン発電機の動的機能維持評価項目の抽出

新たな検討が必要な設備であるガスタービン発電機の動的機能維持評価の評価項目については、耐特委で検討された非常用ディーゼル機関及びポンプ駆動用タービンに対する地震時異常要因分析による基本評価項目を踏まえた検討を行う。

ガスタービン発電機における動的機能維持評価のための基本評価項目の抽出フローを第4.3.2-1図に示す。



第4.3.2-1図 ガスタービン発電機における動的機能維持評価のための基本評価項目の抽出フロー

ガスタービン発電機の動的機能維持を評価する上で、ガスタービン及びガスタービン付き機器を対象に評価項目を検討した。

第 4.3.1-1 図に示すガスタービン発電機のうち、台板等の構造物は動作を要求される機器ではないため、本検討の対象外とした。また、ガスタービン発電機の関連設備として、非常用ディーゼル発電機における吸排気設備やデイトンク等と同様に付帯設備として設置される設備も存在するが、既往の非常用ディーゼル発電機にて評価手法が確立されているため、本検討の対象外とした。発電機については、非常用ディーゼル発電機における発電機の評価と同様に、基本構造が同一である電動機における機能確認済加速度との比較により動的機能維持評価を行う。なお、ガスタービンと発電機は、軸継手により連結しているが、それぞれの軸は機器両端の軸受で支持されており、軸継手には変位吸収が可能なダイヤフラムカップリングを用いて、軸端の応答が互いに影響を及ぼさない構造となっているため、機器は個別に評価が可能である。

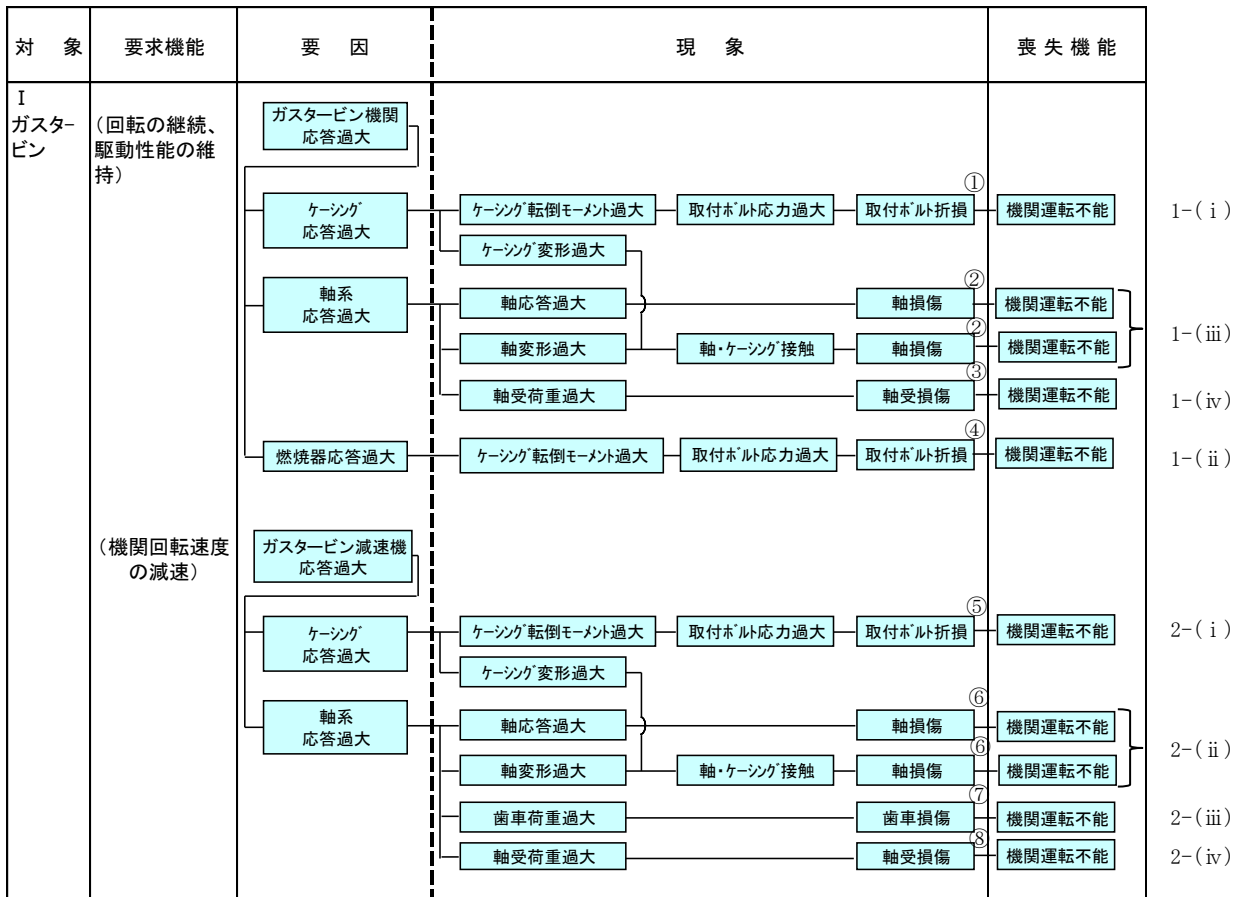
ガスタービン発電機の異常要因分析図を第 4.3.2-2 図～第 4.3.2-7 図に示す。要因分析図に基づき抽出されるガスタービンの基本評価項目は、第 4.3.2-1 表のとおりである。なお、ガスタービンの異常要因分析は以下の区分に分類し実施した。

#### <異常要因分析の検討区分>

- I ガスタービン（機関、減速機）
- II 出力制御系
- III 着火系
- IV 始動系
- V 燃料油系
- VI 潤滑油系

なお、ガスタービン（機関）等の軸応答過大による軸損傷は、次の理由により基本評価項目から除外した。

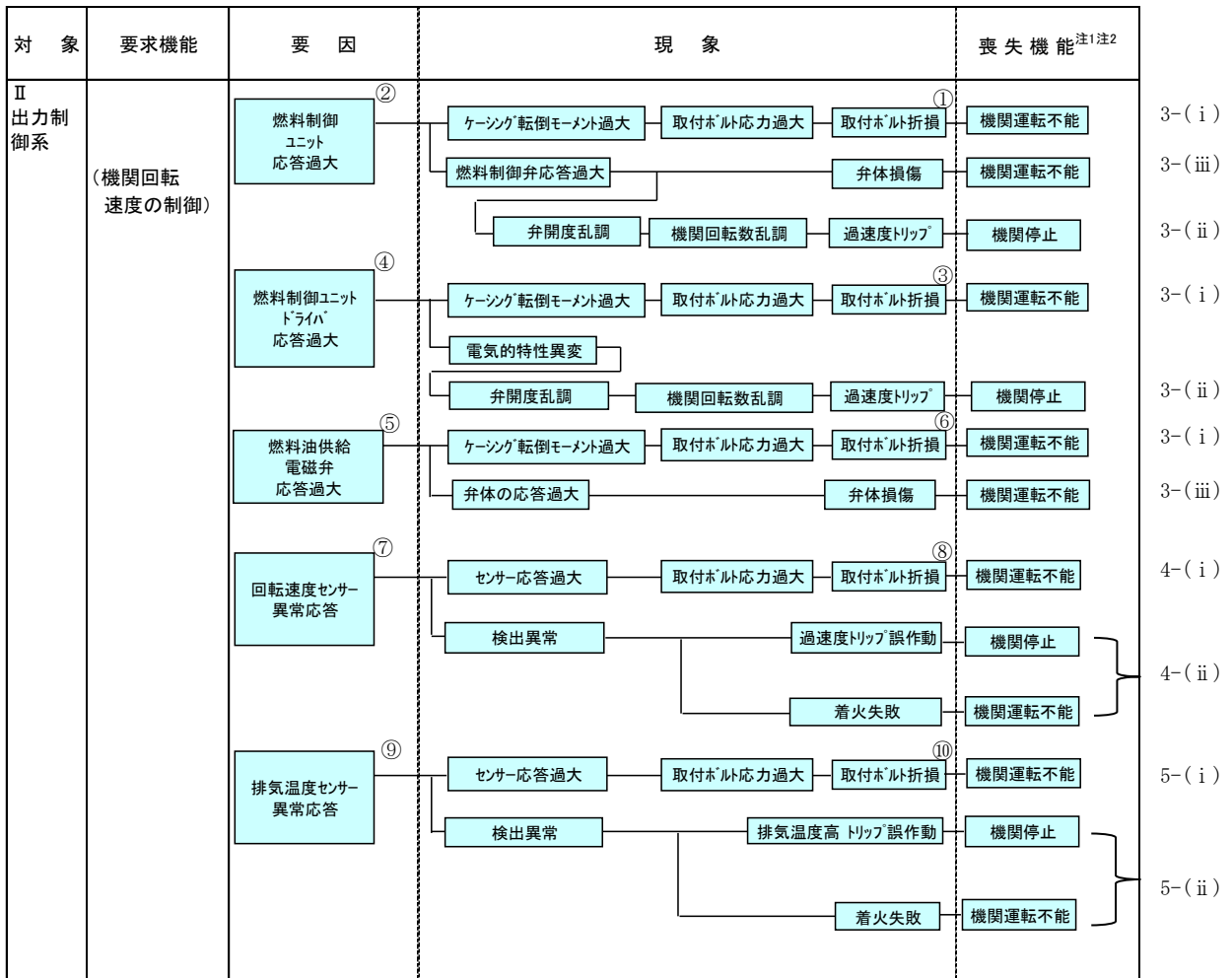
軸損傷は軸部のケーシングへの接触や破断がその対象となる。いずれも軸に作用する外力によって軸の変形を伴う事象であるが、構造的な特徴として破断に到る前に軸とケーシングが接触する。よって、軸の破断に対する強度評価は軸とケーシングとのクリアランスを評価することで包絡可能である。



第 4.3.2-2 図 異常要因分析図と構造図 (ガスタービン)

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。



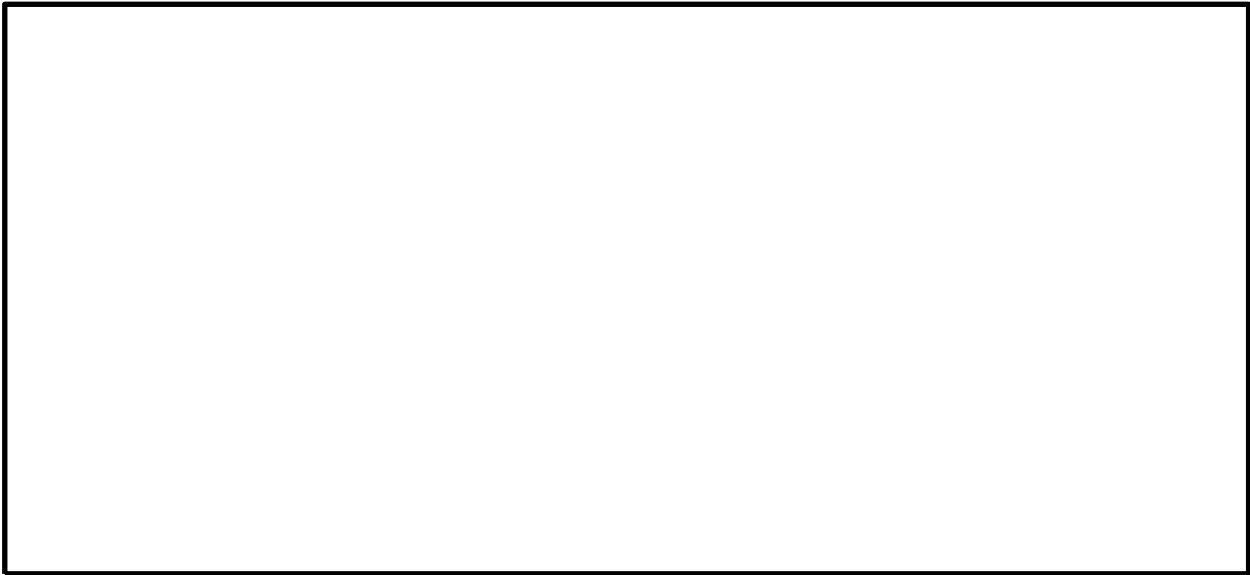
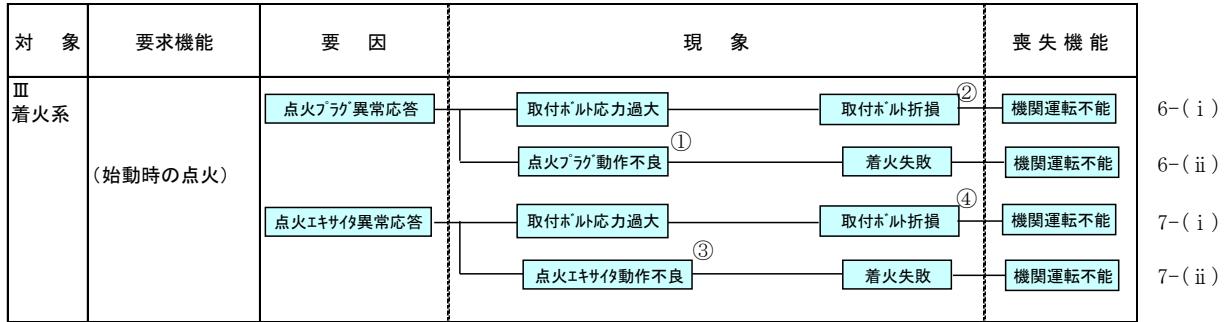


注1 機関運転不能：構成機器の損傷や動作不良により運転が不能となる

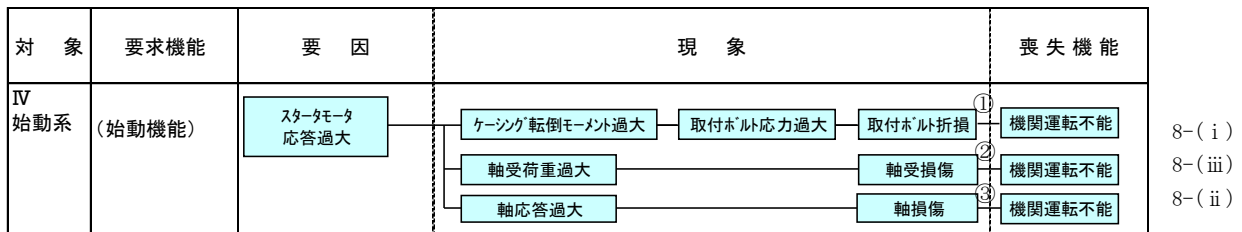
注2 機関停止：誤信号によるトリップにより運転が停止する（損傷に至らない）

第 4.3.2-3 図 異常要因分析図と構造図（出力制御系）

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。



第 4.3.2-4 図 異常要因分析図と構造図 (着火系)



第 4.3.2-5 図 異常要因分析図と構造図 (始動系)

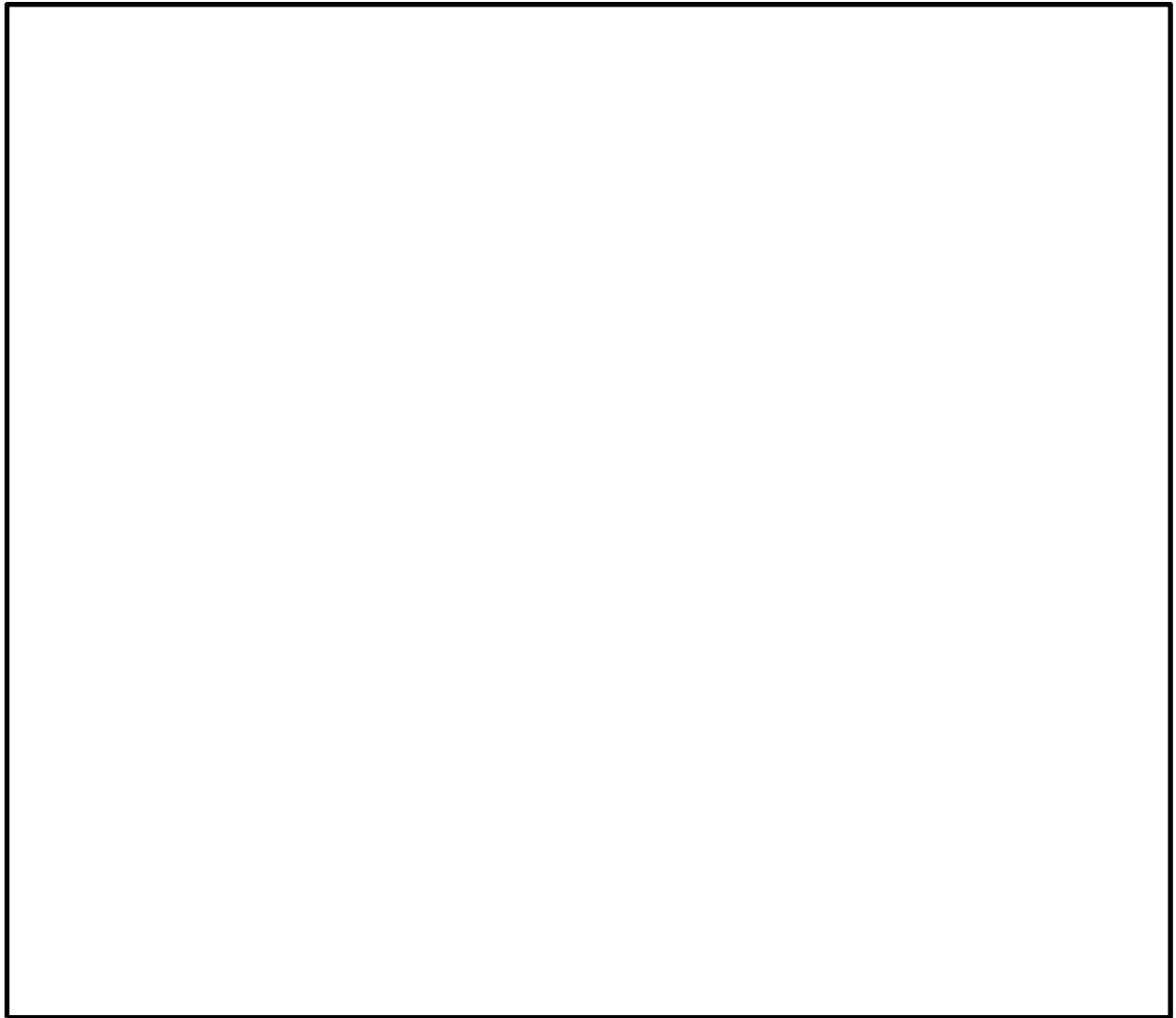
本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

対象	要求機能	要因	現象	喪失機能				
V 燃料油系	(燃料油供給機能)	主燃料油ポンプ 応答過大	ケージング転倒 モーメント過大	取付ホルト応答過大	取付ホルト折損 <sup>①</sup>	燃料噴射不能	機関運転不能	9-(i)
			軸受荷重過大	軸受損傷 <sup>②</sup>			機関運転不能	9-(iii)
			軸応答過大	軸損傷 <sup>③</sup>			機関運転不能	9-(ii)
		始動用燃料油ポンプ 応答過大	ケージング転倒 モーメント過大	取付ホルト応答過大	取付ホルト折損 <sup>④</sup>	燃料噴射不能	機関運転不能	10-(i)
			軸受荷重過大	軸受損傷 <sup>⑤</sup>			機関運転不能	10-(iii)
			軸応答過大	軸損傷 <sup>⑥</sup>			機関運転不能	10-(ii)
		始動用燃料油ポンプ用 モータ応答過大	ケージング転倒 モーメント過大	取付ホルト応答過大	取付ホルト折損 <sup>⑦</sup>		機関運転不能	11-(i)
			軸受荷重過大	軸受損傷 <sup>⑧</sup>			機関運転不能	11-(iii)
			軸応答過大	軸損傷 <sup>⑨</sup>			機関運転不能	11-(ii)

第 4.3.2-6 図 異常要因分析図と構造図 (燃料油系)

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。

対象	要求機能	要因	現象	喪失機能
VI 潤滑油系	(潤滑機能)	潤滑油ポンプ 応答過大	<pre> graph LR     A[潤滑油ポンプ 応答過大] --- B[ケーシング転倒 モーメント過大]     A --- C[軸受荷重過大]     A --- D[軸応答過大]     B --- E[取付ボルト応答過大]     C --- E     D --- E     E --- F[取付ボルト折損]     E --- G[潤滑油流出]     F --- G     G --- H[機関運転不能]     G --- I[機関運転不能]     </pre>	12- ( i ) 12- ( iii ) 12- ( ii )



第 4.3.2-7 図 異常要因分析図と構造図 (潤滑油系)

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。

第 4.3.2-1 表 ガスタービン発電機の異常要因分析図から  
抽出した基本評価項目 (1/5)

No.	基本評価項目	異常要因
1-(i)	ケーシング取付ボルト	ガスタービン（機関）の地震応答が過大となると、転倒モーメントによるガスタービン（機関）の取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、機関ケーシング部が脱落し、回転の継続及び駆動性能の維持機能を喪失する。
1-(ii)	燃焼器取付ボルト	燃焼器の地震応答が過大となると、転倒モーメントによる取付ボルトの応力が過大となり損傷に至る。その結果、燃焼器が脱落し、燃焼ガスを保持できなくなり機関の回転の継続及び駆動性能の維持機能を喪失する。
1-(iii)	ガスタービン機関摺動部（軸とケーシングとのクリアランス）	ガスタービン（機関）の地震応答が過大となると、回転軸の応答が過大となり、軸部の変形によりケーシングに付随する静止部と接触する。その結果、軸部が損傷に至り、回転の継続及び駆動性能の維持機能を喪失する。なお、クリアランスを形成する静止部は軸よりも外径側にあり、且つ耐圧構造で剛性の高いケーシングに固定されているため、その変形量は軽微となる。よって、変形量の評価は軸のみを対象とする。
1-(iv)	ガスタービン機関軸受	軸受荷重が過大となり、軸受が損傷することにより回転の継続及び駆動性能の維持機能が喪失する。
2-(i)	減速機取付ボルト	ガスタービン全体系の地震応答が過大となると、転倒モーメントによる減速機取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、全体系が転倒することで機関回転速度の減速機能を喪失する。
2-(ii)	減速機摺動部（軸とケーシングのクリアランス）	ガスタービン全体系の地震応答が過大となると、回転体である歯車の応答が過大となり、歯車軸部の変形によりケーシングと接触する。その結果、軸が損傷に至り、機関回転速度の減速機能を喪失する。

第 4.3.2-1 表 ガスタービン発電機の異常要因分析図から  
抽出した基本評価項目 (2/5)

No.	基本評価項目	異常要因
2-(iii)	減速機歯車	減速機軸系の地震応答が過大となると、減速機歯車荷重が過大となる。その結果、歯車が損傷することで機関回転速度の減速機能を喪失する。
2-(iv)	減速機軸受	軸受荷重が過大となり、軸受が損傷することにより機関回転速度の減速機能を喪失する。
3-(i)	燃料制御ユニット、燃料制御ユニットドライバ、燃料油供給電磁弁 取付ボルト	燃料制御ユニット、燃料制御ユニットドライバ、燃料油供給電磁弁の地震応答が過大となると、転倒モーメントによる取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、脱落することで機関回転速度の制御機能を喪失する。
3-(ii)	燃料制御ユニット、燃料制御ユニットドライバ	燃料制御ユニットドライバの地震応答が過大となると、回路の電気的特性に異変が生じ、制御信号に乱れが生じる可能性がある。制御信号の乱れ又は燃料制御ユニットの燃料制御弁の過大応答により弁開度が乱調し、適切な燃料投入量が得られなくなることで、機関回転数の乱調に伴う過速度トリップによりガスタービンが停止する。
3-(iii)	燃料制御ユニット、燃料油供給電磁弁 弁体	燃料制御ユニット、燃料油供給電磁弁の地震応答が過大となると、弁体の損傷に至り、機関回転速度の制御機能を喪失する。
4-(i)	回転速度センサー取付ボルト	回転速度センサーの地震応答が過大となると、転倒モーメントによる回転速度センサーの取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、回転速度センサーが脱落すると機関回転速度の制御機能を喪失する。
4-(ii)	回転速度センサー	回転速度センサーの地震応答が過大となると、定格運転中は検出異常による過速度トリップの誤作動が発生し、ガスタービンが停止する可能性がある。また、始動中は燃料制御異常による着火失敗(機関回転速度の制御機能の喪失)に至る可能性がある。

第 4.3.2-1 表 ガスタービン発電機の異常要因分析図から  
抽出した基本評価項目 (3/5)

No.	基本評価項目	異常要因
5-(i)	排気温度センサー取付ボルト	排気温度センサーの地震応答が過大となると、転倒モーメントによる排気温度センサーの取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、排気温度センサーが脱落することで、始動中の機関回転速度の制御機能を喪失する。
5-(ii)	排気温度センサー	排気温度センサーの地震応答が過大となると、定格運転中は検出異常による排気温度高トリップの誤作動が発生し、ガスタービンが停止する可能性がある。また、始動中は燃料制御異常による着火失敗（機関回転速度の制御機能の喪失）に至る可能性がある。
6-(i)	点火プラグ取付ボルト	点火プラグの地震応答が過大となると、転倒モーメントによる点火プラグの取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、点火プラグが脱落することで始動時の点火機能を喪失し、着火失敗に至る。
6-(ii)	点火プラグ	点火プラグの地震応答が過大となることで、始動時に電氣的動作不良が発生すると、点火機能を喪失し、着火失敗に至る。
7-(i)	点火エキサイタ取付ボルト	点火エキサイタの地震応答が過大となることで、転倒モーメントによる点火エキサイタの取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、点火エキサイタが脱落することで始動時の点火機能を喪失する。
7-(ii)	点火エキサイタ	点火エキサイタの地震応答が過大となることで、電氣的動作不良が発生し、着火失敗に至る。その結果、始動時の点火機能を喪失する。
8-(i)	スタータモータ取付ボルト	スタータモータの地震応答が過大となることで、転倒モーメントによる取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、スタータモータが転倒することで始動機能を機能喪失する。

第 4.3.2-1 表 ガスタービン発電機の異常要因分析図から  
抽出した基本評価項目 (4/5)

No.	基本評価項目	異常要因
8-(ii)	スタータモータ摺動部 (軸とケーシングのクリアランス)	スタータモータの地震応答が過大となることで、回転体である軸の応答が過大となり、軸部の変形によりケーシングと接触する。その結果、軸が損傷に至り、始動機能を喪失する。
8-(iii)	スタータモータ軸受	軸受荷重が過大となり、軸受が損傷することにより始動機能を喪失する。
9-(i)	主燃料油ポンプ取付ボルト	主燃料油ポンプの地震応答が過大となることで、転倒モーメントによる取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、ポンプが脱落することで燃料油供給機能を喪失する。
9-(ii)	主燃料油ポンプ摺動部 (軸とケーシングのクリアランス)	主燃料油ポンプの地震応答が過大となることで、回転軸の応答が過大となり、軸部の変形によりケーシングと接触する。その結果、軸が損傷に至り、燃料油供給機能を喪失する。
9-(iii)	主燃料油ポンプ軸受	主燃料油ポンプの軸受荷重が過大となり、軸受が損傷することで燃料油供給機能を喪失する。
10-(i)	始動用燃料油ポンプ取付ボルト	始動用燃料油ポンプの地震応答が過大となることで、転倒モーメントによる取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、ポンプが転倒することで燃料油供給機能を喪失する。
10-(ii)	始動用燃料油ポンプ摺動部 (軸とケーシングのクリアランス)	始動用燃料油ポンプの地震応答が過大となることで、回転体軸の応答が過大となり、軸部の変形によりケーシングと接触する。その結果、軸が損傷に至り、燃料油供給機能を喪失する。
10-(iii)	始動用燃料油ポンプ軸受	始動用燃料油ポンプの軸受荷重が過大となり、軸受が損傷することにより燃料油供給機能を喪失する。



第 4.3.2-1 表 ガスタービン発電機の異常要因分析図から  
抽出した基本評価項目 (5/5)

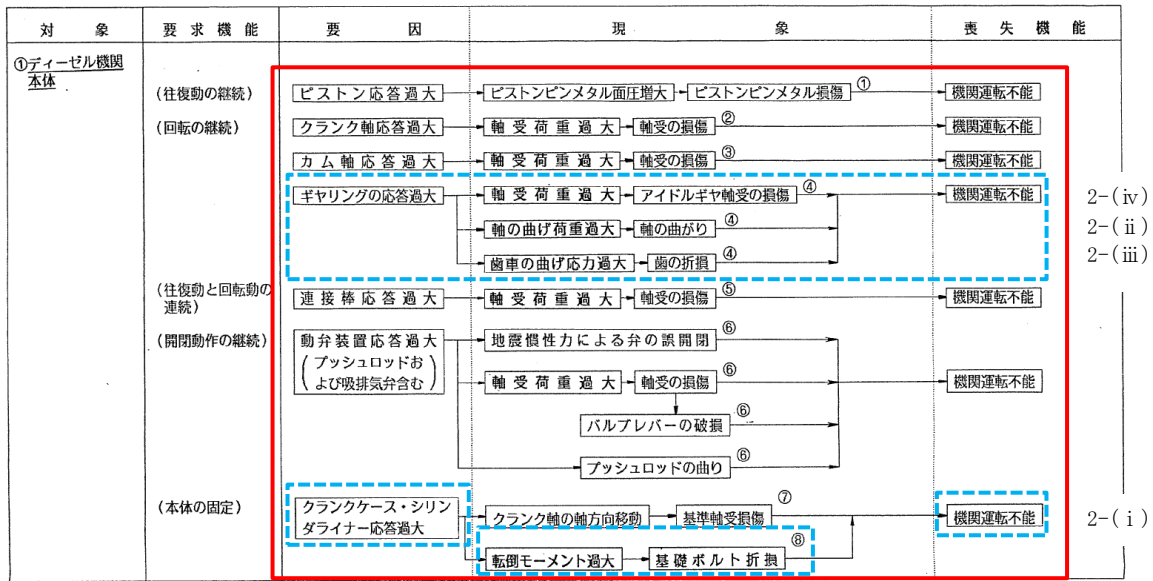
No.	基本評価項目	異常要因
11-(i)	始動用燃料油ポンプ用モータ取付ボルト	始動用燃料油ポンプ用モータの地震応答が過大となることで、転倒モーメントによる取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、転倒することでモータの回転機能を喪失し、燃料油供給機能を喪失する。
11-(ii)	始動用燃料油ポンプ用モータ 摺動部 (軸とケーシングのクリアランス)	始動用燃料油ポンプ用モータの地震応答が過大となることで、回転軸の応答が過大となり、軸部の変形によりケーシングと接触する。その結果、軸が損傷に至り、モータの回転機能を喪失し、燃料油供給機能を喪失する。
11-(iii)	始動用燃料油ポンプ用モータ 軸受	始動用燃料油ポンプ用モータの軸受荷重が過大となり、軸受が損傷することによりモータの回転機能を喪失し、燃料油供給機能を喪失する。
12-(i)	潤滑油ポンプ取付ボルト	潤滑油ポンプの地震応答が過大となることで、転倒モーメントによる取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトの損傷に至り、ポンプが脱落することで、潤滑機能を喪失する。
12-(ii)	潤滑油ポンプ摺動部 (軸とケーシングのクリアランス)	潤滑油ポンプの地震応答が過大となることで、回転軸の応答が過大となり、軸部の変形によりケーシングと接触する。その結果、軸が損傷に至り、潤滑機能を喪失する。
12-(iii)	潤滑油ポンプ軸受	潤滑油ポンプの軸受荷重が過大となり、軸受が損傷することにより潤滑機能を喪失する。

#### 4.3.3 耐特委で検討された非常用ディーゼル発電機の地震時異常要因分析による基本評価項目

新たな検討が必要な設備として抽出されたガスタービン発電機の基本評価項目の検討において、公知化された検討として、参考とする耐特委での非常用ディーゼル発電機の地震時異常要因分析図を第 4.3.3-1 図～第 4.3.3-6 図に、地震時異常要因分析図から抽出される非常用ディーゼル発電機の基本評価項目とこれに対応するガスタービンにおける類似評価項目を第 4.3.3-1 表に示す。

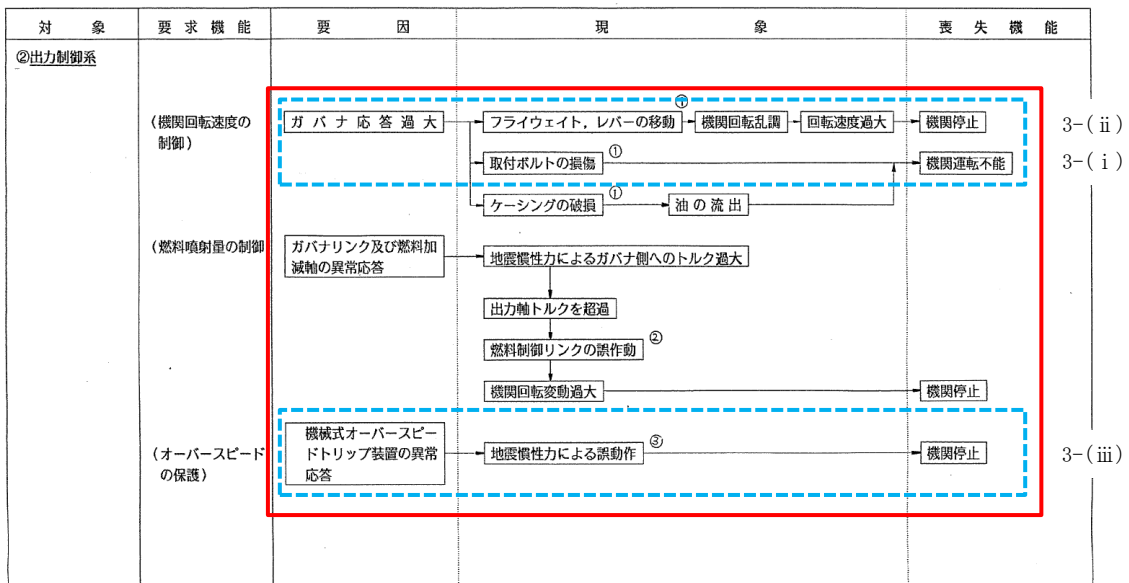
ガスタービン発電機に属する機器のうち、非常用ディーゼル発電機と類似性を有する機器については、異常要因分析に基づいて抽出された評価項目においても類似性を有していることが確認できる。また、異常要因分析の考え方についても、非常用ディーゼル発電機での異常要因分析の手法に倣い、要求機能別の系統構成に分類した各機器の構造や作動原理から地震時に発生し得る異常現象を抽出した結果、ガスタービン発電機と非常用ディーゼル発電機の要因分析結果との類似性が確認できる。

以上より、ガスタービン発電機のうち、非常用ディーゼル発電機と類似性を有する評価項目が網羅的に抽出されていることが確認された。



□ : 非常用ディーゼル発電機のうち機関及び機関付き機器の項目  
□ : ガスタービンとの類似評価項目

第 4.3.3-1 図 非常用ディーゼル発電機の異常要因分析図 (ディーゼル機関本体)



□ : 非常用ディーゼル発電機のうち機関及び機関付き機器の項目  
□ : ガスタービンとの類似評価項目

第 4.3.3-2 図 非常用ディーゼル発電機の異常要因分析図 (出力制御系)

対象	要求機能	要因	現象	喪失機能
③始動空気系	(始動機能)	空気だめ応答過大	アンカーボルト切損 <sup>⑤</sup> → 本体移動による配管破損	機関始動不能
		始動電磁弁応答過大	地震慣性力による作動不能 <sup>①</sup>	機関始動不能
		始動弁応答過大	地震慣性力による作動不能 <sup>②</sup>	機関始動不能
		始動空気系配管応答過大	配管破損またはノズル破損 <sup>⑥</sup> → 制御用空気喪失	機関始動不能
	(燃焼空気の供給)	過給機応答過大	取付ボルトの損傷 <sup>③</sup> → 支持脚の損傷 <sup>③</sup>	機関運転不能
		ロータの応答加速度過大	ロータの変位過大 → ケーシングとの接触 → ロータの損傷 <sup>③</sup> 軸受荷重過大 → 軸受損傷 <sup>③</sup>	機関運転不能
	(燃焼ガスの排出)	排気管ベローズ応答過大	排気管ベローズ破損 <sup>④</sup> → 機関室内排気ガス充満 → 室内温度上昇	機関正常運転不能
				燃焼空気不十分 (室内吸気) → 機関正常運転不能

1-(i)  
1-(iii)  
1-(iv)

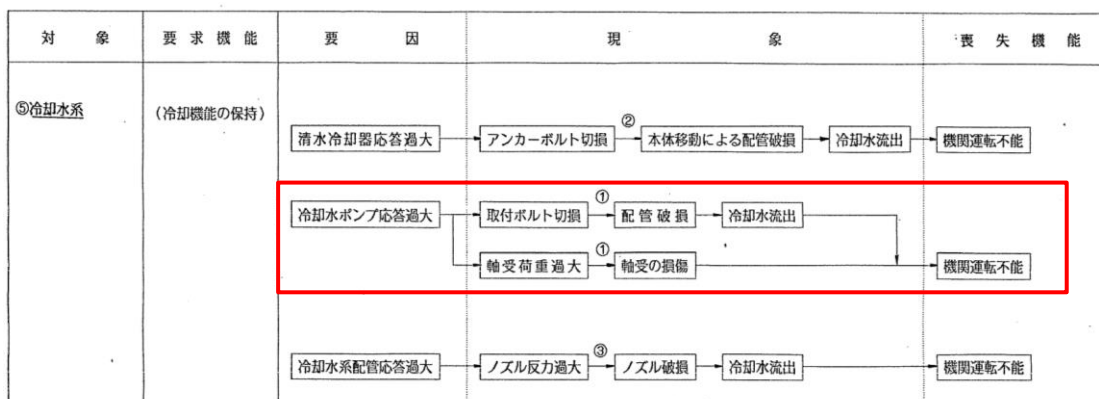
□ : 非常用ディーゼル発電機のうち機関及び機関付き機器の項目  
□ : ガスタービンとの類似評価項目

第 4.3.3-3 図 非常用ディーゼル発電機の異常要因分析図 (始動空気及び吸排気系)

対象	要求機能	要因	現象	喪失機能
④燃料油系	(燃料供給機能)	燃料ディタンク応答過大	アンカーボルト切損 <sup>②</sup> → 本体移動による配管破損 → 燃料流出	機関運転不能
		燃料噴射ポンプ応答過大	取付ボルトの損傷 <sup>①</sup> → 燃料噴射不能	機関運転不能
		プランジャおよびローラガイド部の応答加速度過大	プランジャとローラガイドの追従不能 <sup>①</sup>	燃料噴射不能
		燃料フィルタ応答過大	アンカーボルト切損 <sup>③</sup> → 本体移動による配管破損 → 燃料流出	機関運転不能
		燃料油系配管応答過大	ノズル反力過大 <sup>④</sup> → ノズル破損 → 燃料流出	機関運転不能

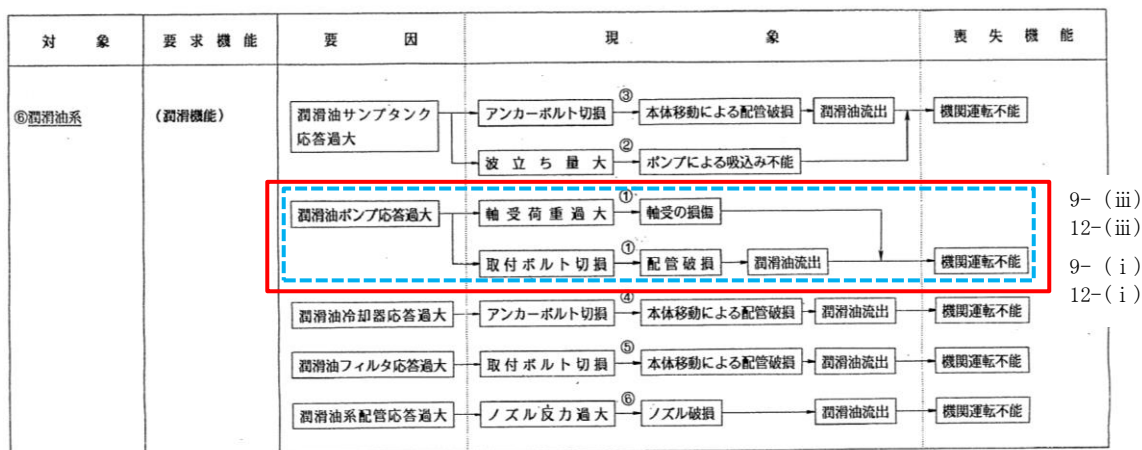
□ : 非常用ディーゼル発電機のうち機関及び機関付き機器の項目  
□ : ガスタービンとの類似評価項目

第 4.3.3-4 図 異常要因分析図 (燃料油系)



□ : 非常用ディーゼル発電機のうち機関及び機関付き機器の項目  
□ : ガスタービンとの類似評価項目

第 4.3.3-5 図 非常用ディーゼル発電機の異常要因分析図 (冷却水系)



9- (iii)  
 12- (iii)  
 9- (i)  
 12- (i)

□ : 非常用ディーゼル発電機のうち機関及び機関付き機器の項目  
□ : ガスタービンとの類似評価項目

第 4.3.3-6 図 非常用ディーゼル発電機の異常要因分析図 (潤滑油系)

第4.3.3-1表 非常用ディーゼル発電機とガスタービン発電機の評価項目比較（ディーゼル機関本体）

No.	非常用ディーゼル発電機			ガスタービン発電機に対応する評価項目	
	機器名称	異常要因分析 該当項目	評価項目	No.	評価項目
1	ピストン	ピストンピンメタル損傷	軸受強度	—	該当なし
2	クランク軸	軸受の損傷	軸受強度	—	該当なし
3	連接棒	軸受の損傷	軸受強度	—	該当なし
4	カム軸	軸受の損傷	軸受強度	—	該当なし
5	ギヤリング	アイドルギヤ軸受の損傷	軸受強度	2-(iv)	ガスタービン（減速機）軸受
		軸の曲がり	軸の強度	2-(ii)	ガスタービン（減速機）摺動部（軸とケーシングのクリアランス）
6	動弁装置	歯の折損	歯車の強度	2-(iii)	ガスタービン（減速機）歯車
		バルブレバーの破損	軸受強度	—	該当なし
		ブッシュロッドの曲がり	ブッシュロッド強度	—	該当なし
		バルブレバーの破損	バルブレバーの強度	—	該当なし
7	基準軸受	地震慣性力による弁の誤開閉	ブッシュロッド弁	—	該当なし
		基準軸受損傷	軸受ハウジング強度	—	該当なし
8	機関本体	基礎ボルト折損	軸受強度	—	該当なし
			基礎ボルト強度	2-(i)	減速機取付ボルト

4.3.3-1 表 非常用ディーゼル発電機とガスタービン発電機の評価

項目比較 (出力制御系)

No.	非常用ディーゼル発電機		評価項目	No.	評価項目	
	機器名称	異要因分析 該当項目				
9	ガバナ	フライウエイト, レバーの移動	ガバナの健全性評価 (地震時の機能維持確認)	3-(ii)	燃料制御ユニット, 燃料制御ユニットドドライブ	
		取付ボルトの損傷		3-(i)		燃料制御ユニット, 燃料制御ユニットドドライブ, 燃料油供給電磁弁 取付ボルト
		ケーシングの破損		—		該当なし
10	ガバナリンク及び燃料加減軸	燃料制御リンクの誤作動	地震時の抵抗	—	該当なし	
11	オーバーバースピードトリップ装置	地震慣性力による誤作動	コントロールラック中の燃料加減軸のつかえ有無	3-(iii)	燃料制御ユニット, 燃料油供給電磁弁 弁体	

第 4.3.3-1 表 非常用ディーゼル発電機とガスタービン発電機の評価項目比較 (始動空気系, 燃料油系, 冷却水系)

No.	非常用ディーゼル発電機		ガスタービン発電機	
	機器名称	異常要因分析 該当項目	評価項目	No.
始動空気系				
12	始動弁	地震慣性力による 動作不能	弁棒の変形	該当なし
			弁棒の曲げ	該当なし
			弁の誤開閉	該当なし
13	過給機	取付ボルトの損傷 支持脚の損傷 ロータの損傷 軸受損傷	取付ボルトの強度	1-(i) ケーシング取付ボルト
			支持脚の強度	該当なし
			軸とケーシングのクリ アランス (たわみ)	1-(iii) ガスタービン機関摺動部 (軸とケーシングとの クリアランス)
			軸受強度	1-(iv) ガスタービン機関軸受
燃料油系				
14	燃料噴射 ポンプ	取付ボルトの損傷 プランジヤとローラガイドの 追従不能	取付ボルトの強度	該当なし
			押付け力評価	該当なし
冷却水系				
15	冷却水 ポンプ	取付ボルト折損  軸受荷重過大	取付ボルトの強度	該当なし
			軸受強度	該当なし
			インペラとケーシング のクリアランス	該当なし



第4.3.3-1表 非常用ディーゼル発電機とガスタービン発電機の評価項目比較（潤滑油系）

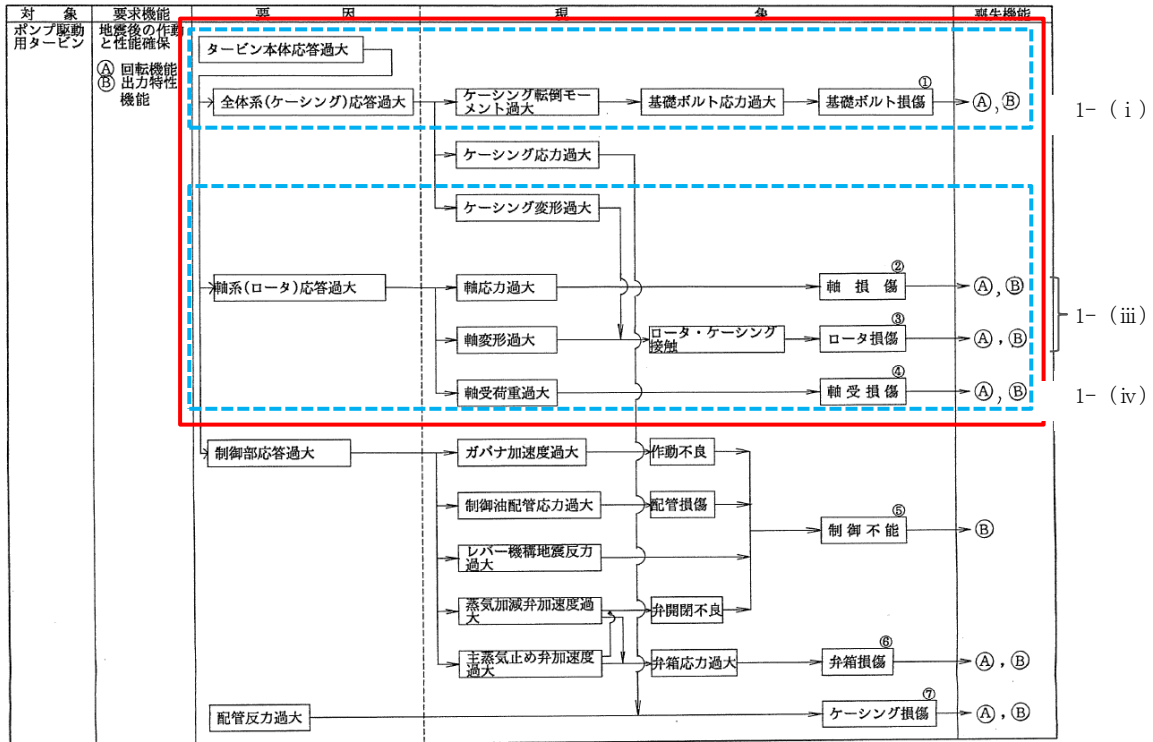
No.		非常用ディーゼル発電機		ガスタービン発電機		
機器名称		異常要因分析 該当項目	評価項目	No.	評価項目	
潤滑油系						
16	潤滑油 ポンプ	取付ボルト折損	取付ボルトの強度	9-(i)	主燃料油ポンプ取付ボルト	
				12-(i)	潤滑油ポンプ取付ボルト	
		軸受荷重過大	軸受強度	9-(iii)	主燃料油ポンプ軸受	
				12-(iii)	潤滑油ポンプ軸受	
				軸とケーシングのクリ アランス	9-(ii)	主燃料油ポンプ摺動部（軸とケーシングのクリ アランス）
					12-(ii)	潤滑油ポンプ摺動部（軸とケーシングのクリ アランス）

#### 4.3.4 耐特委で検討されたポンプ駆動用タービンの地震時異常要因分析による基本評価項目

新たな検討が必要な設備として抽出されたガスタービン発電機の基本評価項目の検討において、公知化された検討として参考とする耐特委でのポンプ駆動用タービンの地震時異常要因分析図を第 4.3.4-1 図に、地震時異常要因分析図から抽出されるポンプ駆動用タービン（タービン本体部分）の基本評価項目とこれに対応するガスタービン発電機における類似評価項目を第 4.3.4-1 表に示す。

ガスタービン発電機に属する機器のうちポンプ駆動用タービン（タービン本体部分）と類似性を有する機器については、異常要因分析に基づいて抽出された評価項目においても類似性を有していることが確認できる。また、異常要因分析の考え方についても、異常要因分析結果との類似性が確認できる。

以上より、ガスタービン発電機のうち、ポンプ駆動用タービン（タービン本体部分）と類似性を有する評価項目が網羅的に抽出されていることが確認された。



: ポンプ駆動用タービンのうちタービン本体の項目  
 : ガスタービンとの類似評価項目

第 4.3.4-1 図 ポンプ駆動用タービンの異常要因分析図

第4.3.4-1表 ポンプ駆動用タービンとガスタービン発電機の評価項目比較

No.	ポンプ駆動用タービン (タービン本体部分)		ガスタービン発電機で対応する評価項目	
	機器名称	異常要因分析 該当項目	評価項目	No.
1	ケーシング	基礎ボルト損傷	基礎ボルト強度	1-(i) ケーシング取付ボルト
2	軸系	軸損傷	ロータ変位	1-(iii) ガスタービン機関摺動部 (軸とケーシングとの クリアランス)
		ロータ損傷		
		軸受損傷	軸受強度	1-(iv) ガスタービン機関軸受

#### 4.3.5 ガスタービン発電機の基本評価項目の検討

ガスタービン発電機は高温高圧の燃焼ガスによる熱的荷重、高速回転による遠心力に十分耐えられる材料、構造、強度を有しており、地震加速度による影響は小さいと考えられる。また、島根2号炉のガスタービンと類似の仕様である米国PWR向けガスタービンに対して加振試験が実施されており、試験では島根2号炉の機能維持評価用加速度を上回る加速度により健全性が確認されていることから、前項までの検討結果を踏まえた異常要因分析図から抽出された基本評価項目に対し、動的機能維持評価における評価対象部位を選定した。米国PWR向けのガスタービン発電機に対する加振試験について参考資料1に示すとともに、選定結果を第4.3.5-1表に示す。

第 4.3.5-1 表 ガスタービンの動的機能維持評価における  
評価対象部位の選定結果(1/7)

No.	基本評価項目	評価対象	理由
1-(i)	ケーシング取付ボルト	×	取付ボルトについては、減速機取付ボルトに対して裕度が大きいいため、評価対象外とした。
1-(ii)	燃焼器取付ボルト	×	取付ボルトについては、減速機取付ボルトに対して裕度が大きいいため、評価対象外とした。
1-(iii)	ガスタービン機関摺動部（軸とケーシングとのクリアランス）	○	ガスタービンの軸及びケーシングは十分剛な構造であり、地震による変形量は軽微であるが、軸とケーシング間のクリアランスもわずかであること、軸とケーシングの接触に伴う軸損傷が運転に及ぼす影響が大きいことから評価対象部位として選定した。

第 4.3.5-1 表 ガスタービンの動的機能維持評価における  
評価対象部位の選定結果(2/7)

No.	基本評価項目	評価対象	理由
1-(iv)	ガスタービン機関軸受	○	<p>ガスタービン（機関）の軸は他の動的機器と比べても高速回転（18,000rpm）であり、軸受部は軸の回転を支持する動的機能維持上重要な部位である。また、軸受の損傷は機関全体の重大な損傷につながる可能性がある。ガスタービン（機関）の軸受は、ガスタービン及びガスタービン付き機器で使用されている軸受の中で、ガスタービン（減速機）の一部の軸受を除いて裕度が小さい。ここで、ガスタービン（減速機）の軸受のうち、運転時に加わる機械荷重が支配的となる軸受については、ガスタービン（機関）の軸受と比較して地震荷重の寄与分に対する強度上の裕度（＝（許容値－運転時荷重）／地震のみの荷重）が大きいことが確認されている。一方、地震荷重が支配的となる軸受については、ガスタービン（機関）の軸受と比較して耐震裕度が大きいことが確認されている。したがって、異常発生時の影響の大きさも考慮して、耐震評価上より厳しいと考えられるガスタービン（機関）の軸受を評価対象部位として選定した。</p>
2-(i)	減速機取付ボルト	○	<p>減速機取付ボルトは、ガスタービン及びガスタービン付き機器の重量を支えるボルトであり、ガスタービン及びガスタービン付き機器で使用されている取付ボルトの中で転倒モーメントが大きく、裕度が小さいため、本取付ボルトを評価対象部位として選定した。</p>

第 4.3.5-1 表 ガスタービンの動的機能維持評価における  
評価対象部位の選定結果(3/7)

No.	基本評価項目	評価対象	理由
2-(ii)	減速機摺動部（軸とケーシングのクリアランス）	×	ガスタービン（減速機）の軸は、歯車の両側近傍に軸受を有した構造であり、ガスタービン（機関）の軸と比較して軸受間距離が短く、たわみ発生量が小さい。また、クリアランスはガスタービン（機関）と比較して大きい傾向にあり、最狭部でも同程度である。したがって、ガスタービン（機関）の軸とケーシングを代表評価部位とし、減速機取付ボルトについては評価対象外とした。
2-(iii)	減速機歯車	×	ガスタービン（減速機）の歯元曲げ応力を支配するのは運転時に加わる機械荷重であり、地震により加わる荷重は十分小さく、耐震性を有していることが確認されていることから、評価対象外とした。（非常用ディーゼル発電機のギヤリングと同様の整理。）
2-(iv)	減速機軸受	×	ガスタービン（減速機）の軸受は、耐震評価上より厳しいと考えられるガスタービン（機関）の軸受を代表評価部位とするため、減速機取付ボルトについては評価対象外とした。
3-(i)	燃料制御ユニット、燃料制御ユニットドライバ、燃料油供給電磁弁 取付ボルト	×	取付ボルトについては、減速機取付ボルトに対して裕度が大きいいため、評価対象外とした。
3-(ii)	燃料制御ユニット、燃料制御ユニットドライバ	○	高速回転機器であるガスタービンの回転数を制御する装置であり、回転の機能維持上重要であることから選定した。
3-(iii)	燃料制御ユニット、燃料油供給電磁弁 弁体	×	弁体のばね力評価については、ばね力を打ち消す地震による慣性力が弁体等の重量に比例するが、比較的軽量であり、その影響は軽微であることから、評価対象外とした。



第 4.3.5-1 表 ガスタービンの動的機能維持評価における  
評価対象部位の選定結果(4/7)

No.	基本評価項目	評価対象	理由
4-(i)	回転速度センサー 取付ボルト	×	取付ボルトについては、減速機取付ボルトに対して裕度が大きいいため、評価対象外とした。
4-(ii)	回転速度センサー	×	<p>回転速度センサーは、下記理由により取付部の健全性を確認することで、電氣的機能維持を確保できるため、評価対象外とした。</p> <p>①回転速度センサーには電磁ピックアップ式センサーが用いられており動作部がない。</p> <p>②軽量かつ単純構造であり、地震力により発生する荷重が小さく、構造強度について十分な裕度を持っている。</p> <p>③J E A G 4 6 0 1 -1987 の電気計装機器のうち、剛体と見なせる器具に該当すると考えられ、構造健全性が保たれている限り、その機能が失われることはないと考えられる。</p>
5-(i)	排気温度センサー 取付ボルト	×	取付ボルトについては、減速機取付ボルトに対して裕度が大きいいため、評価対象外とした。
5-(ii)	排気温度センサー	×	<p>排気温度センサーは、下記理由により取付部の健全性を確認することで、電氣的機能維持を確保できるため、評価対象外とした。</p> <p>①排気温度センサーにはシース熱電対が用いられており動作部がない。</p> <p>②軽量かつ単純構造であり、地震力により発生する荷重が小さく、構造強度について十分な裕度を持っている。</p> <p>③J E A G 4 6 0 1 -1987 の電気計装機器のうち、剛体と見なせる器具に該当すると考えられ、構造健全性が保たれている限り、その機能が失われることはないと考えられる。</p>

第 4.3.5-1 表 ガスタービンの動的機能維持評価における  
評価対象部位の選定結果(5/7)

No.	基本評価項目	評価対象	理由
6-(i)	点火プラグ 取付ボルト	×	取付ボルトについては、減速機取付ボルトに対して裕度が大きいいため、評価対象外とした。
6-(ii)	点火プラグ	×	点火プラグは、下記理由により、取付部の健全性を確認することで、電氣的機能維持を確保できるため、評価対象外とした。 ①点火プラグにはスパークプラグが用いられており動作部がない。 ②軽量かつ単純構造であり、地震力により発生する荷重が小さく、構造強度について十分な裕度を持っている。 ③J E A G 4 6 0 1 -1987 の電氣計装機器のうち、剛体と見なせる器具に該当すると考えられ、構造健全性が保たれている限り、その機能が失われることはないと考えられる。
7-(i)	点火エキサイタ 取付ボルト	×	取付ボルトについては、減速機取付ボルトに対して裕度が大きいいため、評価対象外とした。
7-(ii)	点火エキサイタ	×	点火エキサイタは、下記理由により、取付部の健全性を確認することで、電氣的機能維持を確保できるため、評価対象外とした。 ①点火エキサイタには Capacitor Discharge Ignition 方式の点火装置が用いられており動作部がない。 ②軽量かつ単純構造であり、地震力により発生する荷重が小さく、構造強度について十分な裕度を持っている。 ③J E A G 4 6 0 1 -1987 の電氣計装機器のうち、剛体と見なせる器具に該当すると考えられ、構造健全性が保たれている限り、その機能が失われることはないと考えられる。

第 4.3.5-1 表 ガスタービンの動的機能維持評価における  
評価対象部位の選定結果(6/7)

No.	基本評価項目	評価対象	理由
8-(i)	スタータモータ取付ボルト	×	取付ボルトについては、減速機取付ボルトに対して裕度が大きいいため、評価対象外とした。
8-(ii)	スタータモータ摺動部 (軸とケーシングのクリアランス)	×	ガスタービン付きポンプはガスタービン(機関)に比べて小型軽量であり、軸に発生する応力が比較的小さいことから、評価対象外とした。
8-(iii)	スタータモータ軸受	×	ガスタービン(機関)の軸受に対して裕度が大きいいため、評価対象外とした。
9-(i)	主燃料油ポンプ取付ボルト	×	取付ボルトについては、減速機取付ボルトに対して裕度が大きいいため、評価対象外とした。
9-(ii)	主燃料油ポンプ摺動部 (軸とケーシングのクリアランス)	×	ガスタービン付きポンプはガスタービン(機関)に比べて小型軽量であり、軸に発生する応力が比較的小さいことから、評価対象外とした。
9-(iii)	主燃料油ポンプ軸受	×	ガスタービン(機関)の軸受に対して裕度が大きいいため、評価対象外とした。
10-(i)	始動用燃料油ポンプ取付ボルト	×	取付ボルトについては、減速機取付ボルトに対して裕度が大きいいため、評価対象外とした。
10-(ii)	始動用燃料油ポンプ摺動部 (軸とケーシングのクリアランス)	×	ガスタービン付きポンプはガスタービン(機関)に比べて小型軽量であり、軸に発生する応力が比較的小さいことから、評価対象外とした。
10-(iii)	始動用燃料油ポンプ軸受	×	ガスタービン(機関)の軸受に対して裕度が大きいいため、評価対象外とした。
11-(i)	始動用燃料油ポンプ用モータ取付ボルト	×	取付ボルトについては、減速機取付ボルトに対して裕度が大きいいため、評価対象外とした。
11-(ii)	始動用燃料油ポンプ用モータ 摺動部 (軸とケーシングのクリアランス)	×	ガスタービン付きポンプはガスタービン(機関)に比べて小型軽量であり、軸に発生する応力が比較的小さいことから、評価対象外とした。

第 4.3.5-1 表 ガスタービンの動的機能維持評価における  
評価対象部位の選定結果(7/7)

No.	基本評価項目	評価対象	理由
11-(iii)	始動用燃料油ポンプ用モータ 軸受	×	ガスタービン（機関）の軸受に対して裕度が大きいため、評価対象外とした。
12-(i)	潤滑油ポンプ取付ボルト	×	取付ボルトについては、減速機取付ボルトに対して裕度が大きいため、評価対象外とした。
12-(ii)	潤滑油ポンプ摺動部（軸とケーシングのクリアランス）	×	ガスタービン付きポンプはガスタービン（機関）に比べて小型軽量であり、軸に発生する応力が比較的小さいことから、評価対象外とした。
12-(iii)	潤滑油ポンプ軸受	×	ガスタービン（機関）の軸受に対して裕度が大きいため、評価対象外とした。

#### 4.3.6 ガスタービン発電機の動的機能維持評価項目の検討結果

島根2号炉における規格適用外の動的機能維持が必要な設備のうち、新たな検討が必要な設備であるガスタービンについて、耐特委での非常用ディーゼル発電機及びポンプ駆動用タービンにおける検討結果を参考に、構造の違いを踏まえた上で地震時異常要因分析を行い、動的機能維持を確認するための基本評価項目の抽出を行った。また、抽出した基本評価項目に対し、ガスタービン発電機の動的機能維持評価における評価対象部位を選定した。

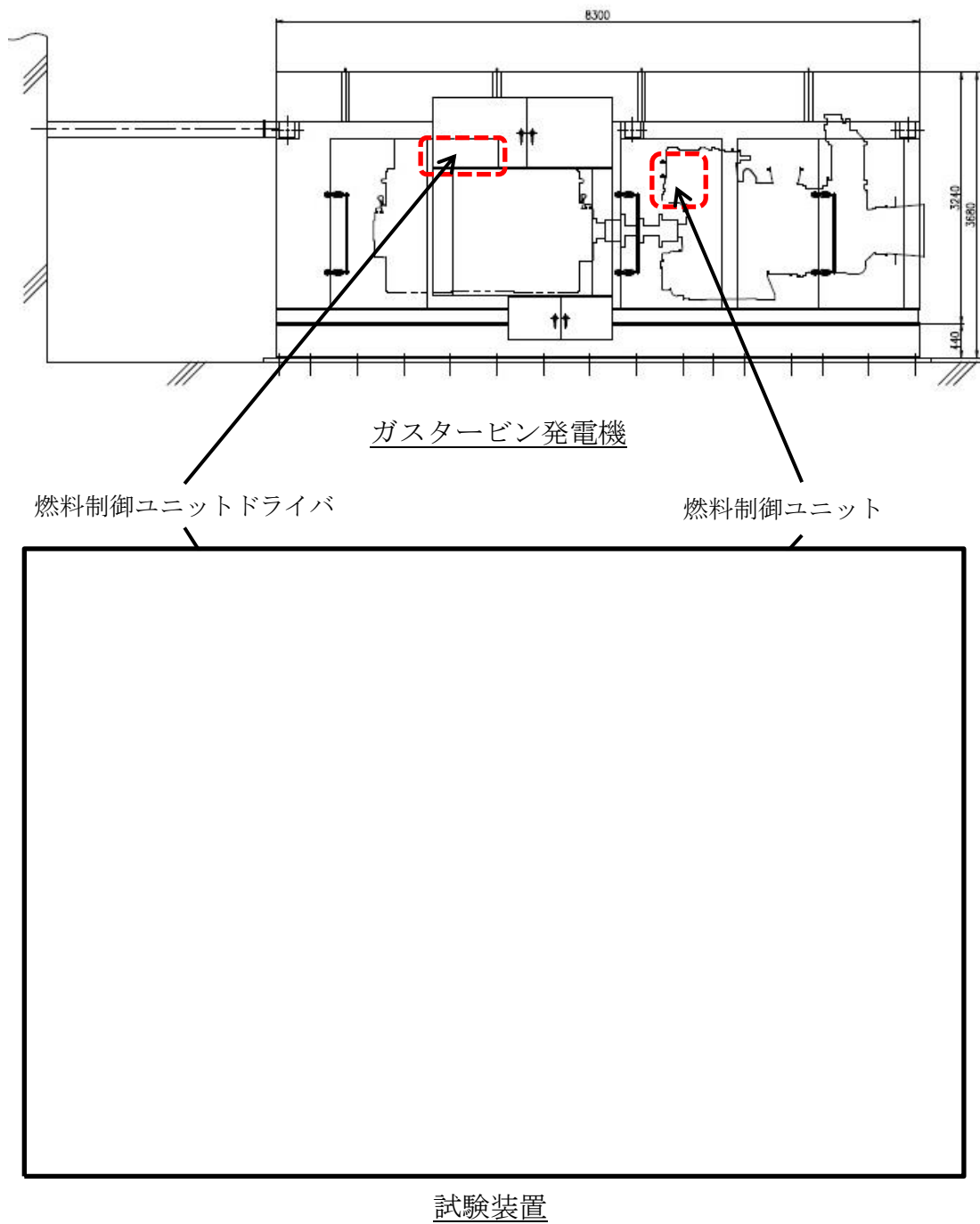
以上の検討結果から、島根2号炉のガスタービン発電機における動的機能維持評価の評価項目については第4.3.6-1表に整理し、抽出された評価項目に対して耐震評価を実施する。

第 4.3.6-1 表 島根 2 号炉のガスタービンにおける動的機能維持評価の  
評価項目の検討結果(1/2)

No.	評価項目	評価内容
I	ガスタービン機関摺動部 (軸とケーシングとのク リアランス)	<p>ガスタービンとポンプ駆動用タービンは、回転機器として同様な軸系の構造を有しており、ケーシング、軸系とも剛性が高いことから類似構造であると言える。したがって、ガスタービンの軸とケーシングのクリアランスも、J E A G 4 6 0 1 に示されるポンプ駆動用タービンの荷重条件を用いて軸の変位量を評価する。</p> <p>なお、両端を軸受で支持された軸のたわみ量の算出において、軸受自体の剛性による変位は数十 <math>\mu\text{m}</math> 程度と十分小さく、軸とケーシングとのクリアランスを評価する上では有意とはならないため考慮は不要と判断している。一方、軸受による軸の支持条件は単純支持として、軸のたわみ量が大きくなるよう保守的に評価する。</p>
II	ガスタービン機関軸受	<p>ガスタービンとポンプ駆動用タービンは、回転機器として同様な軸系の構造を有しており、ケーシング、軸系とも剛性が高いことから類似構造であると言える。したがって、ガスタービンの軸受も、J E A G 4 6 0 1 に示されるポンプ駆動用タービンにおける軸受の評価方法を適用可能であるが、ここでは軸受荷重の許容値がメーカー規定の基本静定格荷重（メーカー保証値）で設定されていることから、J I S ( J I S B 1519-2009) に基づくメーカー規定の計算式（ガスタービン回転軸に地震力や運転中のスラスト荷重が作用することにより軸受に発生する静等価荷重）にて評価する。</p> <p>軸受強度は、軸受の剛性に関わりなく軸受に作用する荷重が許容される荷重以下であることで評価される。</p>

第 4.3.6-1 表 島根 2 号炉のガスタービンにおける動的機能維持評価の  
評価項目の検討結果(2/2)

No.	評価項目	評価内容
Ⅲ	減速機取付ボルト	ガスタービンと非常用ディーゼル発電機はいずれも剛性の高い設備であり，1 質点系モデルに置き換えることが可能である。したがって，減速機取付ボルトも，非常用ディーゼル発電機と同様に 1 質点系モデルにより評価する。
Ⅳ	燃料制御ユニット, 燃料制御ユニットドライバ	燃料制御ユニット及び燃料制御ユニットドライバは解析による評価が困難であるため，実機を加振試験することにより電氣的機能維持の確認を行う。燃料制御ユニット及び燃料制御ユニットドライバの加振試験を第 4.3.6-1 図に示す。加振試験により燃料制御ユニットの機能維持評価用加速度が機能確認済加速度以下となることを確認する。



第 4.3.6-1 図 燃料制御ユニット及び燃料制御ユニットドライバ  
加振試験

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。



5. 詳細検討が必要な設備における動的機能維持の検討方針

機能維持評価用加速度が機能確認済加速度を超えた場合の検討については、J E A G 4 6 0 1 及び耐特委報告書にて、動的機能維持の評価上必要な基本評価項目が地震時異常要因分析に基づき選定されている（第5-1表）。

機能維持評価に当たっては、技術基準規則解釈等の改正を踏まえて、基本評価項目に対して、必要な評価項目を選定し、その妥当性を示した上で検討を実施する。なお、詳細設計段階において、弁の応答加速度（機能維持評価用加速度）が機能確認済加速度を超える場合、J E A G 4 6 0 1 に基づき詳細検討を実施する。

第 5-1 表 各設備における基本評価項目 (1/2)

詳細検討が必要な設備	機種／形式	基本評価項目
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 原子炉補機海水ポンプ</li> <li>・ 高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ</li> </ul>	立形ポンプ／斜流式	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 基礎ボルト，取付ボルト</li> <li>② ディスチャージケーシング</li> <li>③ バレル</li> <li>④ コラム</li> <li>⑤ 軸受</li> <li>⑥ 軸</li> <li>⑦ 冷却水配管</li> <li>⑧ メカニカルシール熱交換器</li> <li>⑨ 電動機</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 燃料プール冷却ポンプ</li> </ul>	横形ポンプ／単段遠心式	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 基礎ボルト</li> <li>② 支持脚</li> <li>③ 摺動部（ライナーリング部）</li> <li>④ 軸</li> <li>⑤ メカニカルシール</li> <li>⑥ 軸受</li> <li>⑦ 電動機</li> <li>⑧ 軸継手</li> <li>⑨ ケーシングノズル部</li> <li>⑩ 冷却水配管</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ほう酸水注入ポンプ</li> </ul>	往復動式ポンプ／横形 3 連往復動式	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 基礎ボルト</li> <li>② ポンプ本体取付ボルト</li> <li>③ クランク軸軸受</li> <li>④ コネクティングロッド軸受</li> <li>⑤ クロスヘッドガイド摺動部</li> <li>⑥ バルブシート面</li> <li>⑦ 吸込・吐出ノズル</li> <li>⑧ 減速機取付ボルト</li> <li>⑨ 歯車軸軸受</li> <li>⑩ 歯車</li> <li>⑪ 電動機</li> <li>⑫ 軸継手</li> <li>⑬ 油配管</li> </ul>

第5-1表 各設備における基本評価項目(2/2)

詳細検討が必要な設備	機種／形式	基本評価項目
<ul style="list-style-type: none"> <li>・燃料プール冷却ポンプ用電動機</li> <li>・原子炉補機海水ポンプ用電動機</li> <li>・高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ用電動機</li> <li>・ほう酸水注入ポンプ用電動機</li> <li>・非常用ガス処理系排風機用電動機</li> <li>・可燃性ガス濃度制御系再結合装置ブロワ用電動機</li> </ul>	電動機／横形ころがり軸受，立形ころがり軸受	<ul style="list-style-type: none"> <li>①端子箱</li> <li>②フレーム</li> <li>③基礎ボルト，取付ボルト</li> <li>④固定子</li> <li>⑤軸（回転子）</li> <li>⑥軸受</li> <li>⑦固定子と回転子のクリアランス</li> <li>⑧軸継手</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・非常用ガス処理系排風機</li> <li>・可燃性ガス濃度制御系再結合装置ブロワ</li> </ul>	ファン／遠心直結型，遠心直動式	<ul style="list-style-type: none"> <li>①ケーシング</li> <li>②ケーシング取付ボルト</li> <li>③軸</li> <li>④軸受</li> <li>⑤軸受取付ボルト</li> <li>⑥インペラ</li> <li>⑦ベローズ</li> <li>⑧軸継手</li> <li>⑨メカニカルシール</li> <li>⑩電動機取付ボルト</li> <li>⑪電動機</li> <li>⑫基礎ボルト</li> <li>⑬フレキシブルダクト継手</li> </ul>

6. 加振試験が必要な設備における動的機能維持評価の検討

高圧原子炉代替注水ポンプは、海外メーカー製であり、異常要因分析や基本評価項目の抽出が容易ではないことから、加振試験による評価を実施する。高圧原子炉代替注水ポンプの構造概要を第6-1図に示すとともに、加振試験の内容を添付資料1に示す。また、加振試験結果より設定した機能確認済加速度と島根2号炉高圧原子炉代替注水ポンプの動的機能維持における機能維持評価用加速度の比較を第6-1表に示す。



第6-1図 高圧原子炉代替注水ポンプの構造概要図

第6-1表 島根2号炉高圧原子炉代替注水ポンプ機能維持評価用加速度と機能確認済加速度の比較

島根2号炉 高圧原子炉代替注水ポンプ 機能維持評価用加速度 <sup>注1</sup> [G]	加振試験により確認された 機能確認済加速度 [G]
水平：0.81 鉛直：0.58	

注1：機能維持評価用加速度は、暫定値であり今後設計進捗により変更の可能性がある。

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。

## 7. 弁の動的機能維持評価に用いる配管系の応答値について

技術基準規則解釈等の改正を踏まえて、島根2号炉の配管系に設置される弁の機能維持評価に適用する加速度値の算定方針について、規格基準に基づく設計手順を整理し、比較することにより示す。規格基準に基づく手法としてJ E A G 4 6 0 1の当該記載部の抜粋を第7-1図に示す。

### (1) 規格基準に基づく設計手順の整理

J E A G 4 6 0 1において、弁の動的機能維持評価に用いる弁駆動部の応答加速度の算定方針が示されている。配管系の固有値が剛と判断される場合は最大加速度（Z P A）を用いること。また、柔の場合は設計用床応答スペクトルを入力とした配管系のスペクトルモーダル解析を行い、算出された弁駆動部での応答加速度を用いることにより、弁の動的機能維持評価を実施することとされている。

### (2) 今回工認における島根2号炉の設計手順

今回工認における島根2号炉の弁駆動部での応答加速度値の設定は、上記J E A G 4 6 0 1の規定に加えて、一定の余裕を見込み評価を実施する方針とする。

#### a. 剛の場合

配管系が剛な場合は、最大加速度に一定の裕度を考慮し、1.2倍した値（1.2 Z P A）を弁駆動部の応答加速度を算出し、機能維持評価を実施する。

#### b. 柔の場合

配管系の固有値が柔の場合は、J E A G 4 6 0 1の手順と同様にスペクトルモーダル解析を行い、弁駆動部の応答加速度を算出した値に加えて、剛領域の振動モードの影響を考慮する観点から1.2倍した最大加速度（1.2 Z P A）による弁駆動部の応答加速度を算定し、いずれか大きい加速度を用いて機能維持評価を行う方針とする。

また、弁駆動部の応答加速度の算定に用いる配管系のスペクトルモーダル解析において、剛領域の振動モードの影響により応答加速度の増加が考えられる場合には、剛領域の振動モードの影響を考慮するため、高周波数域の振動モードまで考慮した地震応答解析を行う。地震応答解析に用いる20Hz以上（周期0.05s以下）の高振動数領域を考慮した床応答スペクトルは、従来から適用している20Hz以下（周期0.05s以上）の床応答スペクトルの作成方法と同様に、建物や連成解析から得られた応答加速度時刻歴を用いて算出し、周期軸方向に拡幅して設定する。弁の動的機能維持評価に適用する床応答スペクトルのイメージを第7-2図に示す。

弁の機能維持評価における規格基準に基づく耐震設計手順及び島根2号炉の耐震設計手順の比較を第7-1表に示す。

第7-1表に示すとおり、島根2号炉における弁の機能維持評価に用いる加速度値としては、規格基準に基づく設定方法に比べて一定の裕度を見込んだ値としている。

第7-1表 弁の動的機能維持評価の耐震設計手順の比較

配管系の固有値	J E A G 4 6 0 1	島根2号炉
剛の場合	最大応答加速度 (1.0Z P A) を適用する。	最大応答加速度を 1.2 倍した値 (1.2 Z P A) を適用する。
柔の場合	スペクトルモーダル解析により算出した弁駆動部の応答を適用する。	スペクトルモーダル解析により算出した弁駆動部の応答 <sup>注1</sup> 又は最大応答加速度を 1.2 倍した値 (1.2 Z P A) のいずれか大きい方を適用する。

注1：高周波数領域の振動モードまで考慮した地震応答解析を行う。

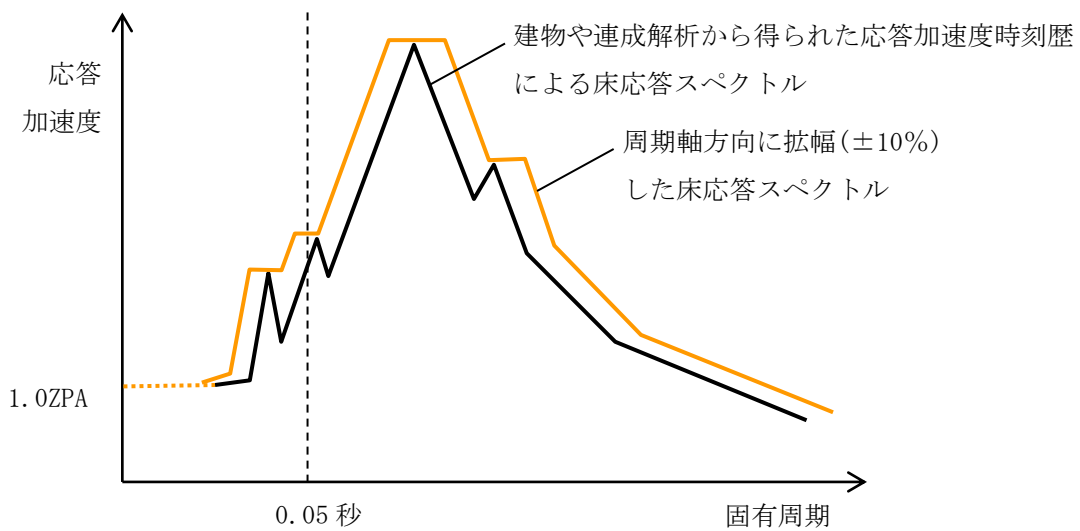
(5) 地震応答解析

弁の地震応答を算出するに当たり、(4)項で作成した弁モデルを配管系モデルに組み込み、地震応答解析を実施する。この場合の解析方法は、配管系の固有値に応じて静的応答解析法あるいはスペクトルモーダル応答解析法を用いる。

配管系の固有値が剛と判断される場合は、静的応答解析を行うが、この場合弁に加わる加速度は設計用床応答スペクトルのZ P A (ゼロ周期加速度)であり、これを弁駆動部応答加速度と見なして評価を行う。また、剛の範囲にない場合には、原則として(3)項で定めた設計用床応答スペクトルを入力とする配管系のスペクトルモーダル解析を行い、算出された弁駆動部応答加速度を用いて弁の評価を実施する。更に、弁の詳細評価が必要となる場合には、弁各部の強度評価に必要な応答荷重を算出する。

なお、減衰定数については現在配管系の解析に使用されている0.5~2.5%の値を用いるものとする。

第7-1図 J E A G 4 6 0 1-1991 抜粋



第 7-2 図 弁の動的機能維持評価に適用する床応答スペクトル(イメージ)

別表1 検討対象設備の抽出結果(1/4)

施設区分/設備名称	動的機能維持要求の有無	動的機能維持の確認方法	機能維持評価用加速度がA1超過時の評価方法がJEAGに規定されているか ○:規定されている ×:規定されていない -:対象外	JEAG4601適用性確認				機能確認済加速度(A1)との比較			備考
				機種名	形式(適用範囲)	設置容量	適用性 ○:適用可 ×:適用外	方向	機能維持評価用加速度 <sup>(1)</sup>	機能確認済加速度	
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設											
使用済燃料貯蔵設備											
使用済燃料貯蔵槽冷却浄化設備											
燃料プール冷却系											
燃料プール冷却ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	横形ポンプ	単段遠心式(～2400m <sup>3</sup> /h)	198m <sup>3</sup> /h	○	水平	1.46	3.2(軸直角方向) 1.4(軸方向)	機能維持評価用加速度がA1超過のため詳細検討を実施する。
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受(～950kW)	110kW	○	鉛直	1.44	1.0	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受(～950kW)	110kW	○	水平	1.46	4.7	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受(～950kW)	110kW	○	鉛直	1.44	1.0	
燃料プールのスプレイ系											
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
その他の核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設											
原子炉冷却系統施設											
原子炉冷却材再循環設備											
原子炉再循環系											
原子炉再循環ポンプ	無	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
原子炉冷却材の循環設備											
主蒸気系											
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
給水系											
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
残留熱除去設備											
残留熱除去系											
残留熱除去ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	立形ポンプ	ビットバレル形(～1800m <sup>3</sup> /h)	1218m <sup>3</sup> /h	○	水平	0.81	10.0	
		JEAG4601による確認	×	電動機	立形すべり軸受(～2700kW)	560kw	○	鉛直	0.58	1.0	
		JEAG4601による確認	×	電動機	立形すべり軸受(～2700kW)	560kw	○	水平	0.81	2.5	
		JEAG4601による確認	×	電動機	立形すべり軸受(～2700kW)	560kw	○	鉛直	0.58	1.0	
非常用炉心冷却設備その他原子炉注水設備											
高圧炉心スプレイ系											
高圧炉心スプレイポンプ	有	JEAG4601による確認	×	立形ポンプ	ビットバレル形(～1800m <sup>3</sup> /h)	1342m <sup>3</sup> /h	○	水平	0.81	10.0	
		JEAG4601による確認	×	電動機	立形すべり軸受(～2700kW)	2380kw	○	鉛直	0.58	1.0	
		JEAG4601による確認	×	電動機	立形すべり軸受(～2700kW)	2380kw	○	水平	0.81	2.5	
		JEAG4601による確認	×	電動機	立形すべり軸受(～2700kW)	2380kw	○	鉛直	0.58	1.0	
低圧炉心スプレイ系											
低圧炉心スプレイポンプ	有	JEAG4601による確認	×	立形ポンプ	ビットバレル形(～1800m <sup>3</sup> /h)	1164m <sup>3</sup> /h	○	水平	0.81	10.0	
		JEAG4601による確認	×	電動機	立形すべり軸受(～2700kW)	910kw	○	鉛直	0.58	1.0	
		JEAG4601による確認	×	電動機	立形すべり軸受(～2700kW)	910kw	○	水平	0.81	2.5	
		JEAG4601による確認	×	電動機	立形すべり軸受(～2700kW)	910kw	○	鉛直	0.58	1.0	
高圧原子炉代替注水系											
高圧原子炉代替注水ポンプ	有	加振試験による確認	×	横形ポンプ	タービン駆動水潤滑式	93m <sup>3</sup> /h	×	水平	-	-	*設備の構造がJEAG4601適用外のため、加振試験を実施する。
低圧原子炉代替注水系											
低圧原子炉代替注水ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	横形ポンプ	多段遠心式(～700m <sup>3</sup> /h)	230 m <sup>3</sup> /h	○	水平	-	3.2(軸直角方向) 1.4(軸方向)	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受(～950kW)	210 kW	○	鉛直	-	1.0	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受(～950kW)	210 kW	○	水平	-	4.7	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受(～950kW)	210 kW	○	鉛直	-	1.0	
原子炉冷却材補給設備											
原子炉隔離時冷却系											
原子炉隔離時冷却ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	横形ポンプ	多段遠心式(～700m <sup>3</sup> /h)	99 m <sup>3</sup> /h	○	水平	0.81	3.2(軸直角方向) 1.4(軸方向)	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受(～950kW)	99 m <sup>3</sup> /h	○	鉛直	0.58	1.0	
原子炉隔離時冷却ポンプ駆動用蒸気タービン	有	JEAG4601による確認	×	ポンプ駆動用タービン	RCICポンプ用(プラント出力等による構造、寸法の違いはほとんどない。)	550 kW	○	水平	0.81	2.4	
		JEAG4601による確認	×	タービン	RCICポンプ用(プラント出力等による構造、寸法の違いはほとんどない。)	550 kW	○	鉛直	0.58	1.0	
原子炉補機冷却設備											
原子炉補機冷却系及び原子炉補機海水系											
原子炉補機冷却水ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	横形ポンプ	単段遠心式(～2400m <sup>3</sup> /h)	1680 m <sup>3</sup> /h	○	水平	0.92	3.2(軸直角方向) 1.4(軸方向)	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受(～950kW)	360 kW	○	鉛直	0.97	1.0	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受(～950kW)	360 kW	○	水平	0.92	4.7	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受(～950kW)	360 kW	○	鉛直	0.97	1.0	
原子炉補機海水ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	立形ポンプ	斜流式(～7600m <sup>3</sup> /h)	2040 m <sup>3</sup> /h	○	水平	1.42	10.0	機能維持評価用加速度がA1超過のため詳細検討を実施する。
		JEAG4601による確認	×	電動機	立形ころがり軸受(～1300kW)	410 kW	○	鉛直	1.34	1.0	
		JEAG4601による確認	×	電動機	立形ころがり軸受(～1300kW)	410 kW	○	水平	1.42	2.5	機能維持評価用加速度がA1超過のため詳細検討を実施する。
		JEAG4601による確認	×	電動機	立形ころがり軸受(～1300kW)	410 kW	○	鉛直	1.34	1.0	



別表1 検討対象設備の抽出結果(2/4)

施設区分/設備名称	動的機能維持要求の有無	動的機能維持の確認方法	機能維持評価用加速度がAt超過時の評価方法がEAGに規定されているか ○:規定されている ×:規定されていない -:対象外	JEAG4601適用性確認				機能確認済加速度(A1)との比較			備考
				機種名	形式(適用範囲)	設備容量	適用性 ○:適用可 ×:適用外	方向	機能維持評価用加速度 <sup>1)</sup>	機能確認済加速度	
高圧炉心スプレイ補機冷却系及び高圧炉心スプレイ補機海水系											
高圧炉心スプレイ補機冷却水ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	横形ポンプ	単段遠心式 (~2400m <sup>3</sup> /h)	240 m <sup>3</sup> /h	○	水平	0.88	3.2(軸直角方向) 1.4(軸方向)	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受 (~950kW)	37 kW	○	鉛直	0.64	1.0	
高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	立形ポンプ	斜流式 (~7600m <sup>3</sup> /h)	336 m <sup>3</sup> /h	○	水平	0.88	4.7	機能維持評価用加速度がAt超過のため詳細検討を実施する。
		JEAG4601による確認	×	電動機	立形ころがり軸受 (~1300kW)	75 kW	○	鉛直	0.64	1.0	
原子炉補機代替冷却系											
-											
原子炉冷却材浄化設備											
-											
原子炉浄化系											
-											
計測制御系従属施設											
制御材											
制御棒(地震時挿入性)	有	JEAG4601による確認	×	制御棒	BWR標準型式	BWR標準型式	○	水平	評価用変位 35.0 mm	確認済変位 40.0 mm	
									詳細設計段階で鉛直方向地震による影響を評価する		
制御材駆動装置											
-											
制御棒駆動水圧系											
-											
ほう酸水注入設備											
ほう酸水注入系											
ほう酸水注入ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	往復動式ポンプ	横形3連往復動式 (流量、吐出圧力等ほぼ同一)	9.72 m <sup>3</sup> /h	○	水平	1.17	1.6	機能維持評価用加速度がAt超過のため詳細検討を実施する。
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受 (~950kW)	45 kW	○	鉛直	1.49	1.0	
放射性廃棄物の廃棄施設											
-											
放射線管理施設											
-											
換気設備											
中央制御室空調換気系											
中央制御室送風機	有	JEAG4601による確認	×	ファン	遠心直結型 (~2900m <sup>3</sup> /min)	2000 m <sup>3</sup> /min	○	水平	1.10	2.3	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受 (~950kW)	180 kW	○	鉛直	0.93	1.0	
中央制御室非常用再循環送風機	有	JEAG4601による確認	×	ファン	遠心直結型 (~2900m <sup>3</sup> /min)	534 m <sup>3</sup> /min	○	水平	1.10	2.3	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受 (~950kW)	30 kW	○	鉛直	0.93	1.0	
中央制御室空気供給系											
-											
緊急時対策所換気空調系											
-											
生体遮蔽装置											
-											
その他の放射線管理施設											
原子炉格納施設											
原子炉格納容器安全設備											
原子炉格納容器スプレイ設備											
格納容器代替スプレイ系											
-											
ベダスタル代替注水系											
-											
残留熱代替除去系											
残留熱代替除去ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	横形ポンプ	単段遠心式 (~2400m <sup>3</sup> /h)	150 m <sup>3</sup> /h	○	水平	0.81	3.2(軸直角方向) 1.4(軸方向)	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受 (~950kW)	75 kW	○	鉛直	0.58	1.0	

別表1 検討対象設備の抽出結果(3/4)

施設区分/設備名称	動的機能維持要求の有無	動的機能維持の確認方法	機能維持評価用加速度がA1超過時の評価方法がJ.EAGに規定されているか ○:規定されている ×:規定されていない -:対象外	J.EAG-4601適用性確認				機能確認済加速度(A1)との比較			備考
				機種名	形式(適用範囲)	設備容量	適用性 ○:適用可 ×:適用外	方向	機能維持評価用加速度 <sup>(1)</sup>	機能確認済加速度	
放射線物質濃度制御設備及び可燃性ガス濃度制御設備並びに格納容器再循環設備											
非常用ガス処理系											
非常用ガス処理系排風機	有	J.EAG-4601による確認	×	ファン	遠心直結型 (~2900m <sup>3</sup> /min)	74m <sup>3</sup> /min	○	水平	1.17	2.3	機能維持評価用加速度がA1超過のため詳細検討を実施する。
		J.EAG-4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受 (~950kW)	22 kW	○	鉛直	1.49	1.0	
可燃性ガス濃度制御系再結合装置ブロー	有	J.EAG-4601による確認	×	ファン	遠心直結型 (~2500m <sup>3</sup> /min)	4.25 m <sup>3</sup> /min	○	水平	1.17	2.6	機能維持評価用加速度がA1超過のため詳細検討を実施する。
		J.EAG-4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受 (~950kW)	15 kW	○	鉛直	1.49	1.0	
原子炉建屋水素濃度抑制設備											
窒素ガス代替注入系											
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
原子炉格納容器調気設備											
窒素ガス制御系											
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
圧力逃がし装置											
格納容器フィルタバント系											
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
その他発電用原子炉の附属施設											
非常用電源設備											
非常用発電装置											
非常用ディーゼル発電設備											
非常用ディーゼル発電設備補助装置及び保護継電装置											
非常用ディーゼル発電設備 ディーゼル機関及び発電機	有	J.EAG-4601による確認	×	中速形ディーゼル機関	機関本体 (~15500kW)	6150kW	○	水平	0.88	1.1	発電機の基本構造は電動機と同一であることから、電動機における機能確認済加速度を適用する。
		J.EAG-4601による確認	×	調速装置	UG形	UG形	○	鉛直	0.64	1.0	
		J.EAG-4601による確認	×	電動機	横形すべり軸受 (~1400kW)	5840kW	○	鉛直	0.64	1.0	
非常用ディーゼル発電設備 燃料移送ポンプ	有	新たな検討による確認	×	横形ポンプ	スクロー式	4 m <sup>3</sup> /h	×	水平	-	-	型式がJ.EAG-4601の適用対象外のため新たな検討を実施する。
		J.EAG-4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受 (~950kW)	2.2 kW	○	鉛直	0.78	1.0	
高圧炉心スプレイスディーゼル発電設備											
高圧炉心スプレイスディーゼル発電設備補助装置及び保護継電装置											
高圧炉心スプレイスディーゼル 発電設備ディーゼル機関及び 発電機	有	J.EAG-4601による確認	×	中速形ディーゼル機関	機関本体 (~15500kW)	3480kW	○	水平	0.88	1.1	発電機の基本構造は電動機と同一であることから、電動機における機能確認済加速度を適用する。
		J.EAG-4601による確認	×	調速装置	UG形	UG形	○	鉛直	0.64	1.0	
		J.EAG-4601による確認	×	電動機	横形すべり軸受 (~1400kW)	3200kW	○	鉛直	0.64	1.0	
高圧炉心スプレイスディーゼル 発電設備燃料移送ポンプ	有	新たな検討による確認	×	横形ポンプ	スクロー式	4 m <sup>3</sup> /h	×	水平	-	-	型式がJ.EAG-4601の適用対象外のため新たな検討を実施する。
		J.EAG-4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受 (~950kW)	2.2 kW	○	鉛直	0.78	1.0	
ガスタービン発電機											
ガスタービン発電機補助装置及び保護継電装置											
ガスタービン発電機	有	新たな検討による確認	×	ガスタービン機関	機関本体	4800kW	×	水平	-	-	型式がJ.EAG-4601の適用対象外のため新たな検討を実施する。
		J.EAG-4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受 (~950kW)	4800kW	○	鉛直	0.69	1.0	
ガスタービン発電機用燃料移送 ポンプ	有	新たな検討による確認	×	横形ポンプ	スクロー式	4 m <sup>3</sup> /h	×	水平	-	-	型式がJ.EAG-4601の適用対象外のため新たな検討を実施する。
		J.EAG-4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受 (~950kW)	3.7 kW	○	鉛直	0.61	1.0	

別表1 検討対象設備の抽出結果(4/4)

施設区分/設備名称	動的機能維持要求の有無	動的機能維持の確認方法	機能維持評価用加速度がA1超過時の評価方法がJEAGに規定されているか ○:規定されている ×:規定されていない -:対象外	JEAG4601適用性確認				機能確認用加速度(A1)との比較			備考
				機種名	形式(適用範囲)	設備容量	適用性 ○:適用可 ×:適用外	方向	機能維持評価用加速度 <sup>(1)</sup>	機能確認用加速度	
弁											
一般弁											
グローブ弁 <sup>(2)</sup>	有	JEAG4601による確認	○	-	-	-	-	-	-	-	-
ゲート弁 <sup>(2)</sup>	有	JEAG4601による確認	○	-	-	-	-	-	-	-	-
バタフライ弁 <sup>(2)</sup>	有	JEAG4601による確認	○	-	-	-	-	-	-	-	-
逆止弁 <sup>(2)</sup>	有	JEAG4601による確認	○	-	-	-	-	-	-	-	-
特殊弁											
主蒸気隔離弁 <sup>(2)</sup>	有	JEAG4601による確認	○	-	-	-	-	-	-	-	-
安全弁 <sup>(2)</sup>	有	JEAG4601による確認	○	-	-	-	-	-	-	-	-
制御棒駆動系スクラム弁 <sup>(2)</sup>	有	JEAG4601による確認	○	-	-	-	-	-	-	-	-

注1：機能維持評価用加速度は、暫定値であり今後設計進捗により変更の可能性がある。

注2：弁の確認結果については、詳細設計段階にて示す。

## 高圧原子炉代替注水ポンプの加振試験について

高圧原子炉代替注水ポンプは横形のポンプであるが、原動機であるタービンと一体構造となっており、J E A G 4 6 0 1における適用形式が異なることから、機能確認済加速度を用いた評価とすることができない。そのため、機能確認済加速度を設定することを目的とし、を用いて、高圧原子炉代替注水ポンプに対する加振試験を実施した。加振試験の概要について、以下に示す。

## 1. 試験概要

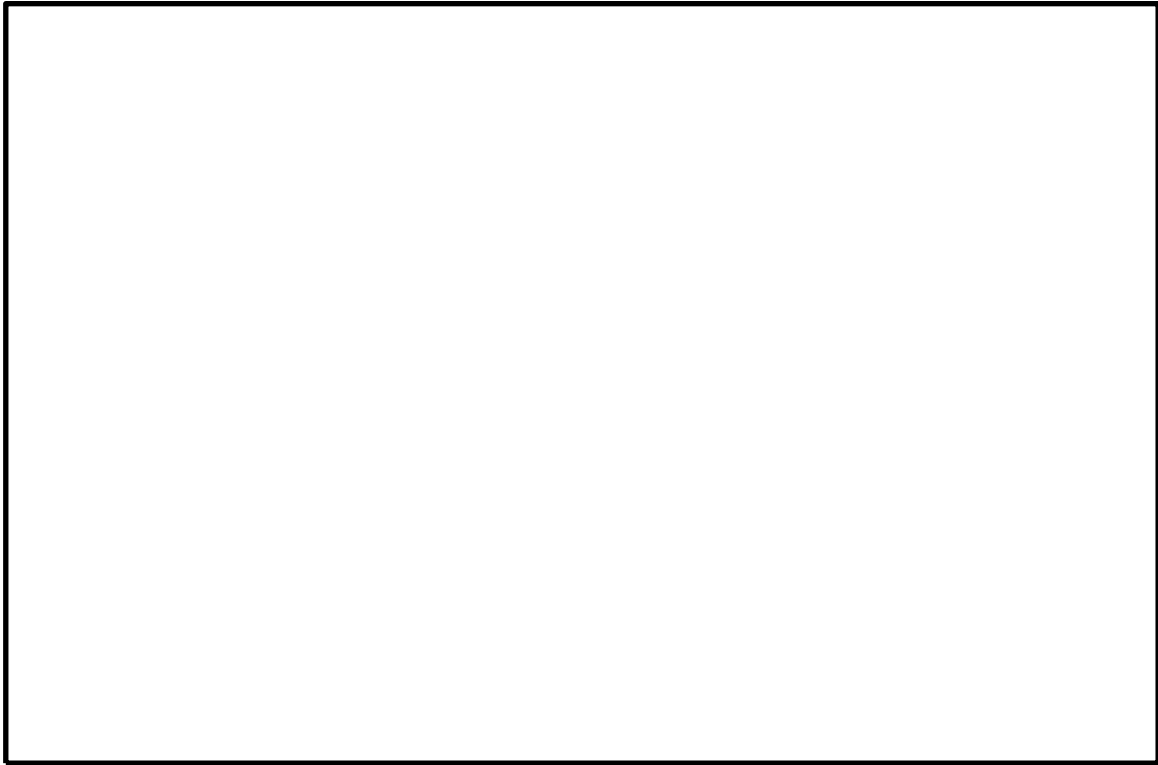
高圧原子炉代替注水ポンプはタービンと一体構造であるため、ガバナ等の付属品を含む形で試験を実施した。ポンプ断面イメージ図を第 1-1 図に示す。

試験方法としては振動特性把握試験を実施し固有振動数を求め、剛構造であることを確認した後、機器の据付位置における機能維持評価用加速度を包絡する加振波で加振試験を実施した。また、加振試験に加え、試験前後の性能比較及び試験後に機器毎の部品に分解し目視検査を実施することで健全性を確認している。振動試験装置外観を第 1-2 図、加振台仕様を第 1-1 表に示す。



第 1-1 図 ポンプ断面イメージ図

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。



第 1-2 図 振動試験装置外観

第 1-1 表 加振台仕様

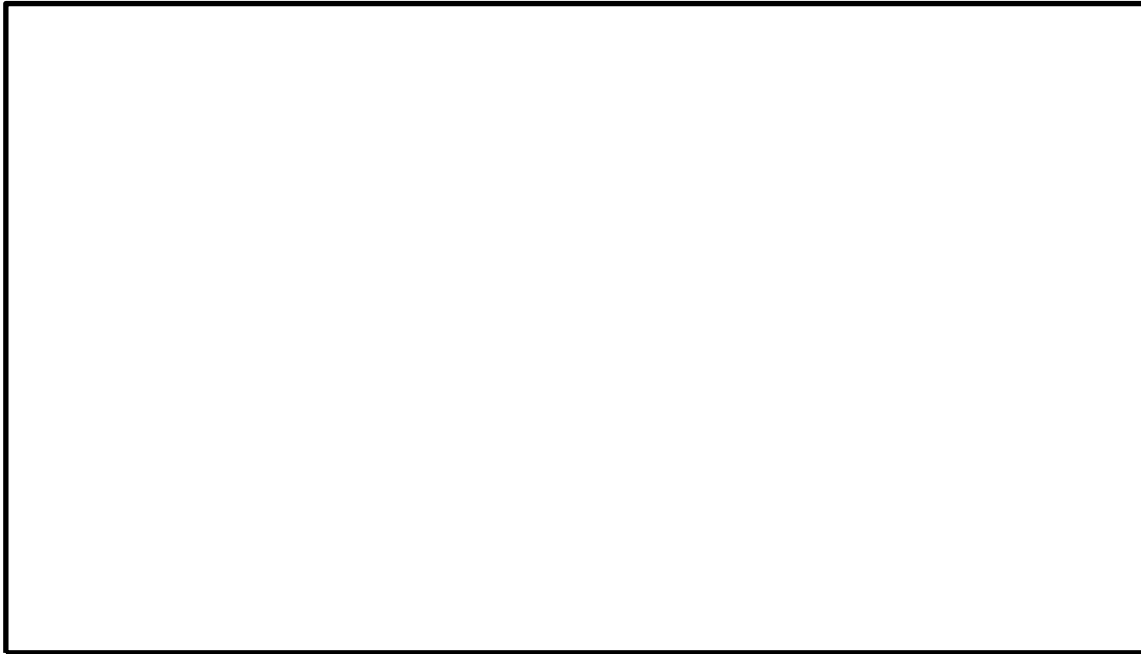
寸法		
最大積載量		
運転周波数帯域		
最大加速度	水平	
	鉛直	

## 2. 振動特性把握試験

### 2.1 試験条件

ポンプに 3 軸加速度計を取付け、までの範囲のランダム波による各軸単独加振を実施し、応答加速度による周波数応答関数から固有周期を求める。計測センサー取付位置を第 2.1-1 図に示す。

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。

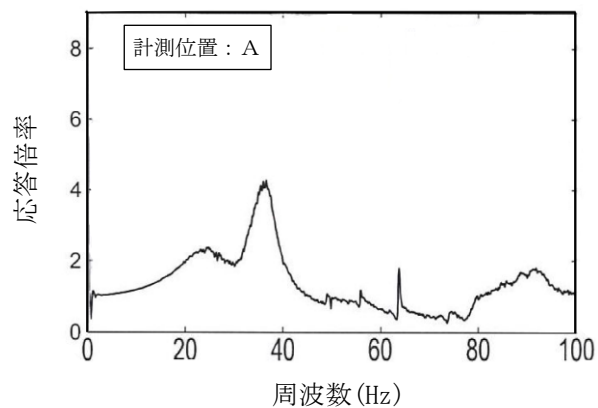


第 2.1-1 図 計測センサー取付位置

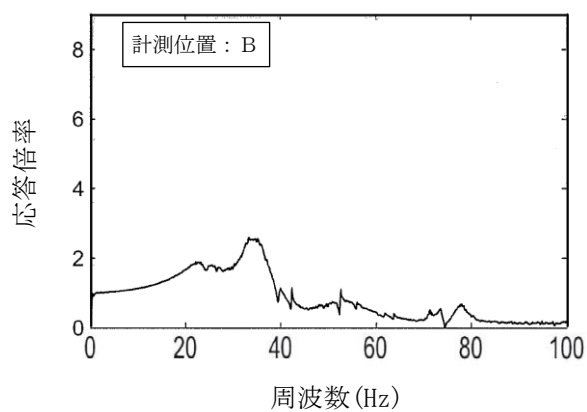
本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

## 2.2 試験結果

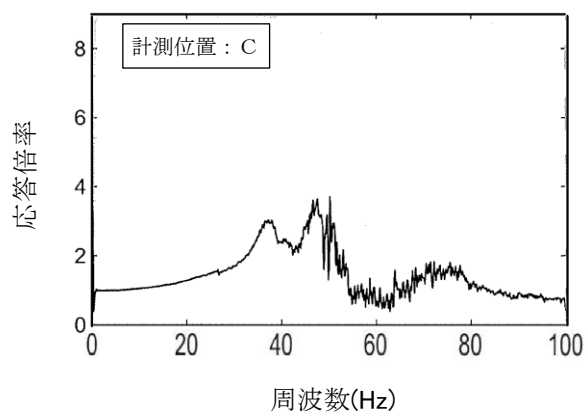
試験結果として得られた周波数応答関数を第 2.2-1 図に、各軸方向の固有振動数を第 2.2-1 表に示す。第 2.2-1 表より、各軸方向について剛構造と見なせる固有周期 0.05 秒を十分に下回る結果が得られた。



X方向



Y方向



Z方向

第 2.2-1 図 周波数応答関数

第 2.2-1 表 各軸方向の固有振動数

方向	固有周期 [s]	固有振動数 [Hz]
X		
Y		
Z		

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。



### 3. 加振試験

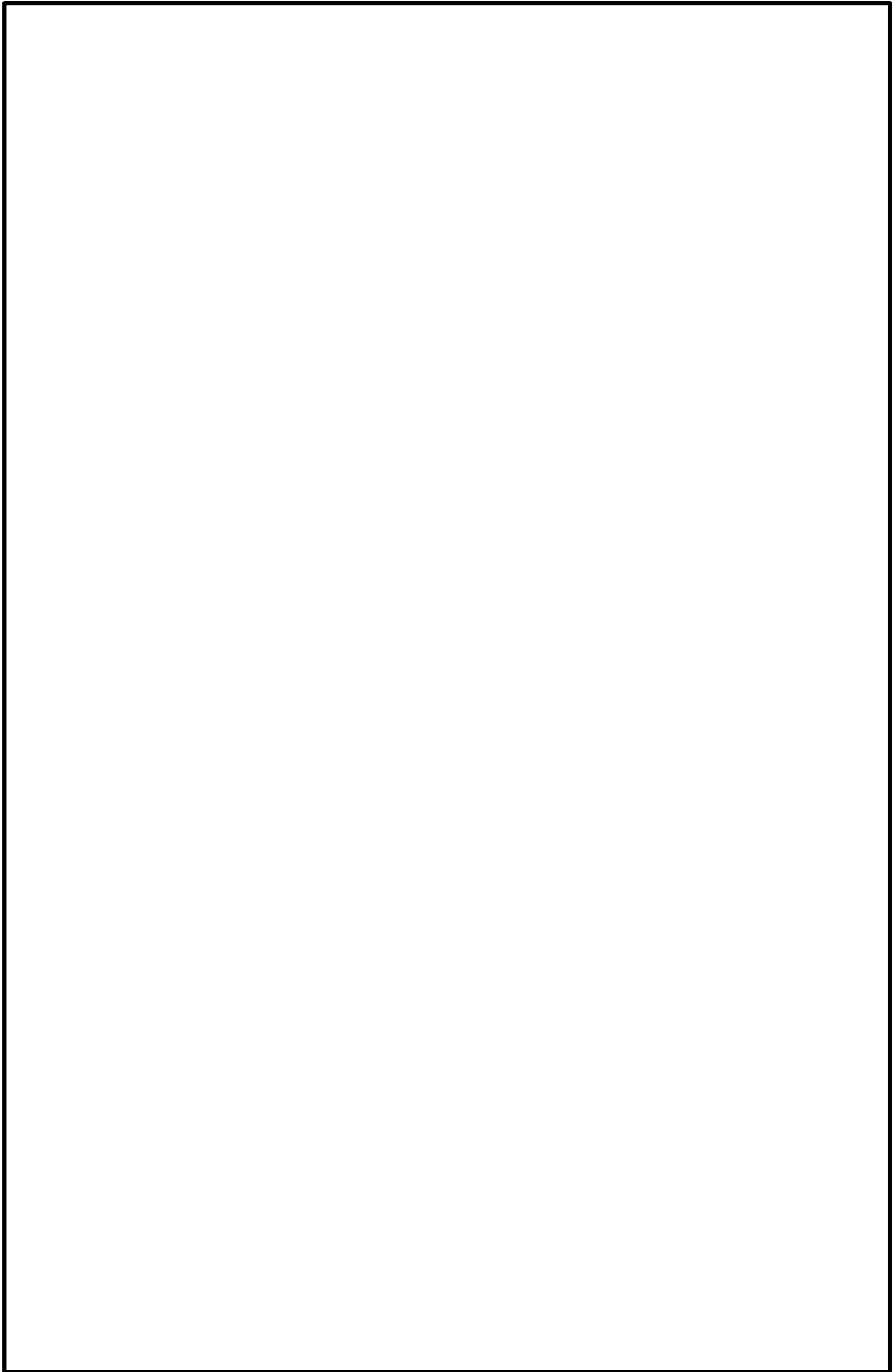
#### 3.1 試験条件

加振試験における試験条件を第 3.1-1 表に示す。また、加振台上の加速度時刻歴波形を第 3.1-1 図に、加振台床応答曲線と島根 2 号炉の高圧原子炉代替注水ポンプの設置位置における床応答曲線（以下「HPAC 床応答曲線」という。）の比較を第 3.1-2 図に示す。機器の固有周期は 0.05 秒を下回っており、剛構造と見なせることから、機器設置位置における機能維持評価用加速度を包絡する加振波を生成し、加振試験を実施する。加振方向は水平（前後、左右）及び鉛直方向の三軸同時加振とする。なお、第 3.1-1 図に示す加振台床応答曲線は、加振波を入力とした振動台の時刻歴応答波形の床応答曲線であり、振動台の  の影響により、50Hz 近傍にピークが生じている。

第 3.1-1 表 加振試験条件

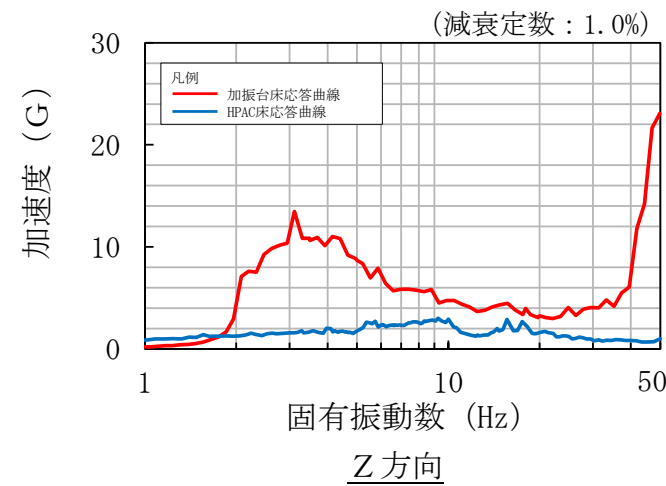
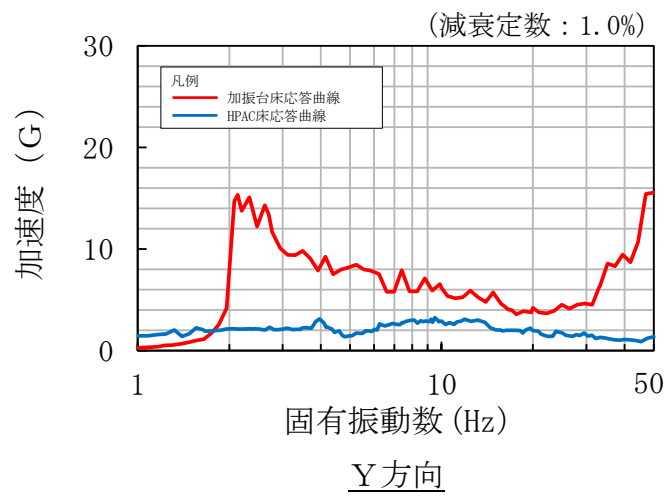
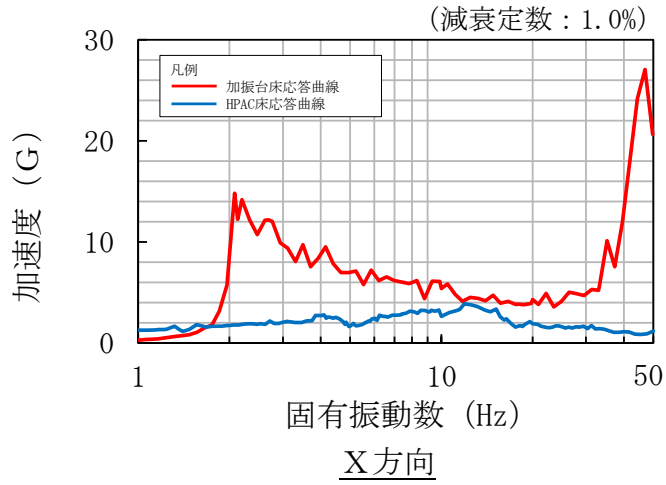
項目	試験条件
加振地震波	ランダム波
加振方向	水平 2 方向 + 鉛直方向の 3 軸同時加振試験
運転状態	停止中加振 <sup>注 1</sup> （満水状態）
取付条件	振動台上に設置された台板にボルトにて取り付け

注 1：重大事故等は「地震の独立事象」として扱っており、高圧原子炉代替注水ポンプの運転を想定する時間は、事象発生後約 8.3 時間であることから、地震荷重との組合せが不要な期間（ $10^{-2}$  年）より短時間であるため、加振試験条件として停止時を考慮する。



第 3.1-1 図 加振台上の加速度時刻歴波形

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。



第 3.1-2 図 加振台床応答曲線と HPAC 床応答曲線の比較

### 3.2 試験結果

以下について機器に異常のないことを確認し、本試験において加振台での最大加速度を整数位で切り捨てた値を機能確認済加速度とした。

- (1) 漏えいのないこと。
- (2) 構造上損傷のないこと。
- (3) 加振中にガバナが  以上変位しないこと。
- (4) トリップ装置が誤作動しないこと。
- (5) 動作試験として、加振試験前後の性能比較を実施し、機器の健全性ならびに動作性に異常のないこと。
  - a. 高圧および低圧時における定格流量点で設計揚程の  の範囲にあること。
  - b. 高圧時による性能試験で、必要揚程を下回らないこと。
  - c. 高圧時による性能試験で、設定締切揚程を上回らないこと。
  - d. 正常にトリップ機能が動作すること
  - e. 漏えいのないこと
- (6) 加振試験後に機器毎の部品に分解し、外観目視点検により損傷のないこと。

加振試験における機能確認済加速度と、島根 2 号炉高圧原子炉代替注水ポンプの動的機能維持における機能維持評価用加速度の比較を第 3.2-1 表に示す。また、試験体と島根 2 号炉高圧原子炉代替注水ポンプの主な仕様の比較を第 3.2-2 表に示す。

第 3.2-1 表 機能確認済加速度と島根 2 号炉高圧原子炉代替注水ポンプ  
機能維持評価用加速度の比較

方向	島根 2 号炉 高圧原子炉代替注水ポンプ 機能維持評価用加速度 <sup>注 1</sup> [G]	試験により確認された 機能確認済加速度 [G]	加振台加振試験時 最大加速度 [G]
X	0.81		
Y	0.81		
Z	0.58		

注 1：機能維持評価用加速度は、暫定値であり今後設計進捗により変更の可能性  
がある。

第 3.2-2 表 高圧原子炉代替注水ポンプの主な仕様の比較

		試験体	島根 2 号炉 高圧原子炉代替注水 ポンプ
外形寸法		1430mm (長さ) 940mm (幅) 1285mm (高さ)	1394mm (長さ) 850mm (幅) 1251.5mm (高さ)
重量		3740kg	3280kg
ポンプ	種類	ターボ形	
	容量	136 m <sup>3</sup> /h	93 m <sup>3</sup> /h
原動機	種類	背圧式蒸気タービン	
	出力	553kW	567kW

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。

ガスタービン発電機の加振試験について

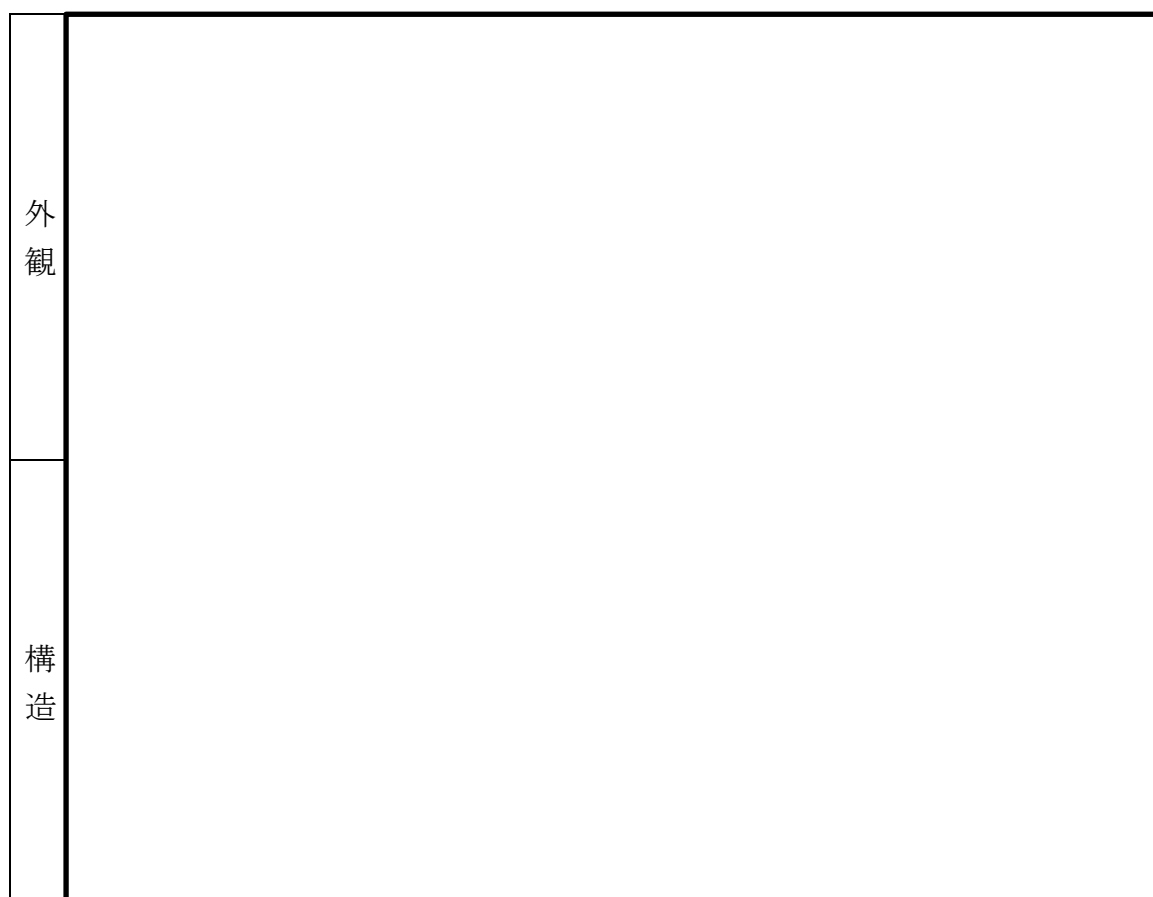
米国 PWR 向けのガスタービン（以下「US-APWR ガスタービン」という。）について、加振試験が実施されている<sup>[1]</sup>。

島根 2 号炉のガスタービンと US-APWR ガスタービンは類似の仕様であることから、島根 2 号炉のガスタービン発電機に対する動的機能維持のための新たな検討の補足として、US-APWR ガスタービンに対する加振試験を示すとともに、US-APWR ガスタービンと島根 2 号炉のガスタービンの類似性を示す。

1. US-APWR ガスタービン加振試験

1.1 試験概要

US-APWR ガスタービンは、米国における電気設備の加振試験に関して規定されている IEEE Std 344<sup>[2]</sup>に基づき試験が実施されている。実規模の試験における US-APWR ガスタービンの構造概要を第 1.1-1 図に示す。



第 1.1-1 図 US-APWR ガスタービンの構造概要

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。

## 1.2 振動特性把握試験

### 1.2.1 試験条件

振動特性把握試験における試験条件を第 1.2.1-1 表に示す。水平（軸方向，軸直方向）及び鉛直方向に対して、それぞれ 1～50Hz の振動数範囲で加振レベル約 0.1G の正弦波掃引加振を実施し，ガスタービンの固有振動数を確認した。計測センサー取付位置を第 1.2.1-1 図に示す。

第 1.2.1-1 表 正弦波掃引加振の試験条件

項目	試験条件
掃引振動数	1～50Hz
加振レベル	0.1G
加振方向	水平（軸方向，軸直方向）及び鉛直方向単独

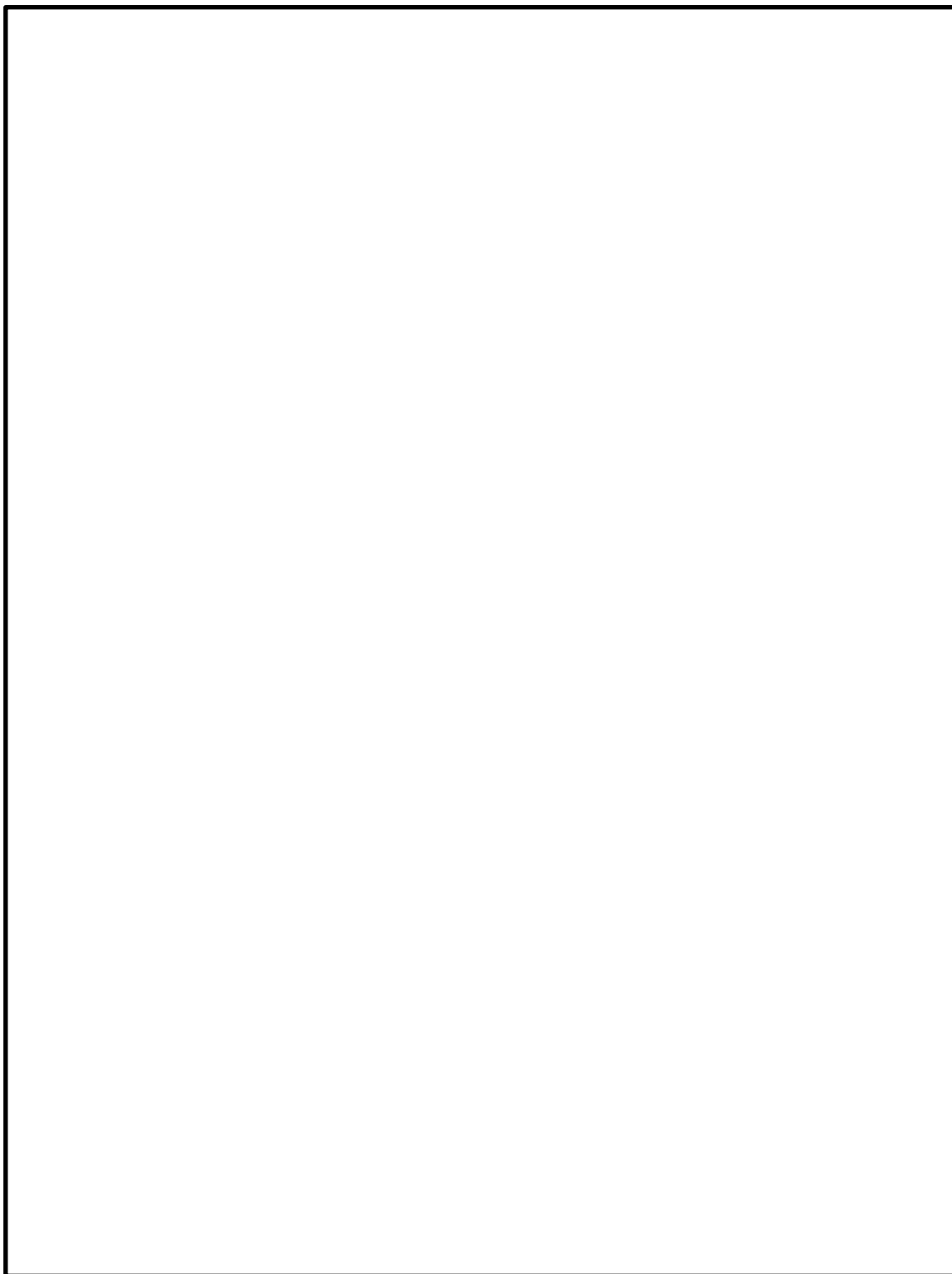


第 1.2.1-1 図 計測センサー取付位置

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。

### 1.2.2 試験結果

試験結果として得られた周波数応答関数を第 1.2.2-1 図に、各軸方向での固有振動数を第 1.2.2-1 表に示す。第 1.2.2-1 表より、ガスタービンが剛構造であることを確認した。



第 1.2.2-1 図 周波数応答関数

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。



第 1.2.2-1 表 各軸方向の固有振動数

--

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。

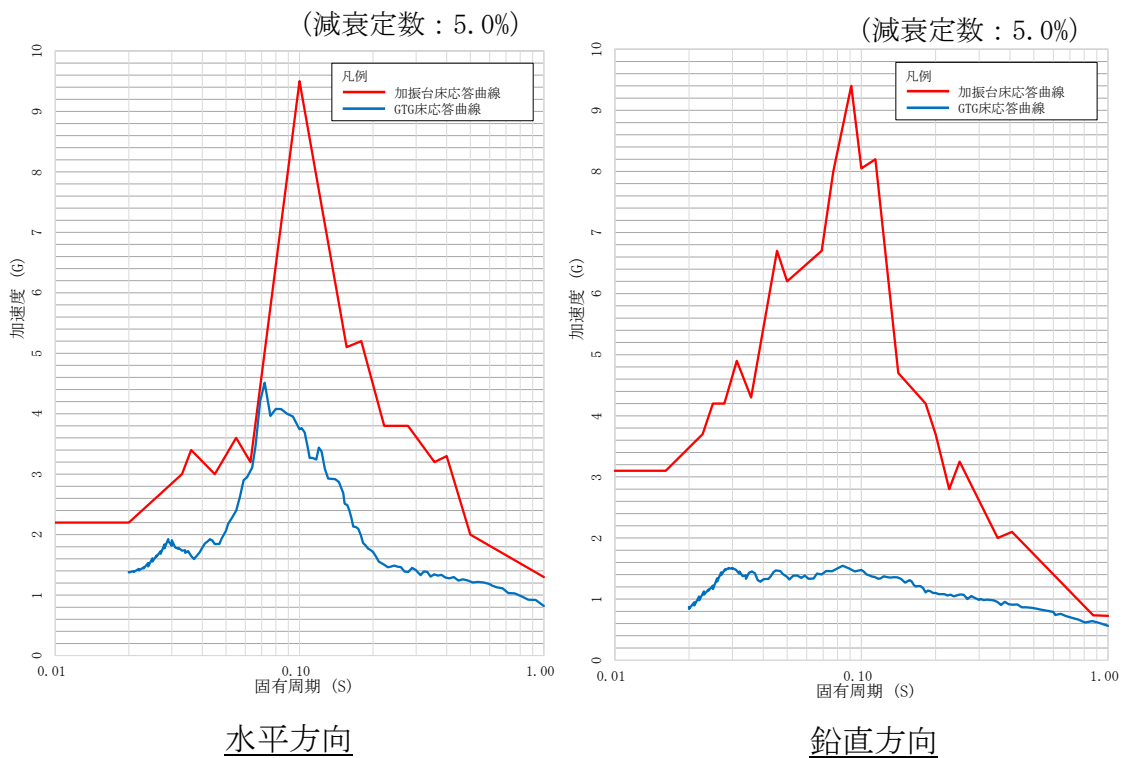
### 1.3 加振試験

#### 1.3.1 試験条件

加振試験における試験条件を第 1.3.1-1 表に示す。また、US-APWR ガスタービンの加振試験は地震波加振により実施されている為、参考として加振台床応答曲線と島根 2 号炉のガスタービン設置位置における床応答曲線（以下「GTG 床応答曲線」という。）の比較を第 1.3.1-1 図に示す。なお、第 1.3.1-1 図に示す加振台床応答曲線の減衰定数は、IEEE Std 344<sup>[2]</sup>に基づき、米国の加振試験における加振波の設定において推奨されている減衰定数 5.0%を用いている。

第 1.3.1-1 表 加振試験条件

項目	試験条件
試験体	US-APWR ガスタービン（発電機部分を除く）
加振地震波	ランダム波
加振方向	水平 1 方向 + 鉛直方向の 2 軸同時加振試験
運転状態	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 停止中加振</li> <li>・ 運転中加振</li> <li>・ 加振中起動</li> </ul>
取付条件	振動台上に設置された台板にボルトにて取り付け



第 1.3.1-1 図 加振台床応答曲線と GTG 床応答曲線の比較

### 1.3.2 試験結果

US-APWR ガスタービンの試験結果を第 1.3.2-1 表に示す。加振試験時及び加振試験後において、ガスタービンの運転性能に異常は確認されず、US-APWR ガスタービンの機能確認済加速度として、水平方向：2.2G、鉛直方向：3.1G が得られた。

第 1.3.2-1 表 加振試験結果

項目		試験結果
最大 加速度	水平	2.2G
	鉛直	3.1G
試験結果		全ての運転状態（停止中加振、運転中加振、加振中起動）において、ガスタービンの運転性能に異常のないことを確認した。
試験後確認		試験後の確認運転において、ガスタービンの運転性能に異常のないことを確認した。また、試験後の開放点検においても、外観、寸法、構成部品の作動に異常のないことを確認した。

### 2. 島根 2 号炉のガスタービンと US-APWR ガスタービンの類似性

US-APWR ガスタービンと島根 2 号炉のガスタービンの主な仕様の比較を第 2-1 表に、ガスタービン機関の構造概要の比較を第 2-1 図に示す。また、US-APWR ガスタービン加振試験における機能確認済加速度と、島根 2 号炉ガスタービンの動的機能維持における機能維持評価用加速度の比較を第 2-2 表に示す。

第 2-1 表及び第 2-1 図の通り、US-APWR ガスタービンと島根 2 号炉のガスタービンは類似している。また、島根 2 号炉の機能維持評価用加速度を上回る加速度による加振試験により健全性が確認されている。このため、島根 2 号炉のガスタービンにおいても加振試験に対して同等の健全性を有すると考えられる。

第2-1表 ガスタービンの主な仕様の比較

		US-APWR ガスタービン	島根2号炉 ガスタービン
型式			
エンジン基数			
構造	圧縮機		
	タービン		
	燃焼器		
	減速機		
外形寸法		2877 mm(全長) 2180 mm(幅) 2275 mm(高さ)	同左
定格出力 [発電機出力]		5,625 kVA [4,500 kW]	6,000 kVA [4,800 kW]
電圧		6,900 V	同左
周波数		60 Hz	同左
回転数	ガスタービン		
	発電機	1,800 min <sup>-1</sup>	同左
始動方式		空気始動方式	電気始動方式

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。

US-APWR ガスタービン	島根 2 号炉ガスタービン

第 2-1 図 ガスタービン機関の構造概要の比較

第 2-2 表 US-APWR ガスタービンの機能確認済加速度と  
島根 2 号炉ガスタービン機能維持評価用加速度の比較

US-APWR ガスタービンの 試験により確認された 機能確認済加速度 [G]	島根 2 号炉ガスタービン 機能維持評価用加速度 <sup>注 1</sup> [G]
水平：2.2 鉛直：3.1	水平：1.47 鉛直：0.69

注 1：機能維持評価用加速度は、暫定値であり今後設計進捗により変更の可能性がある。

【参考文献】

- [1] Mitsubishi Heavy Industries, LTD., "Initial Type Test Result of Class 1E Gas Turbine Generator System" (MUAP-10023-NP[R7]), December 2013
- [2] IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations

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。

## 島根原子力発電所 2 号炉

機器・配管系への制震装置  
の適用について  
(耐震)

## 目 次

1. 概要
2. 単軸粘性ダンパの取水槽ガントリクレーンへの設置
  - 2.1 基本方針
    - 2.1.1 要求事項
    - 2.1.2 構造の概要
    - 2.1.3 設計方針
    - 2.1.4 適用規格
  - 2.2 耐震評価方法
    - 2.2.1 評価方針
    - 2.2.2 単軸粘性ダンパの配置検討
    - 2.2.3 性能試験及び解析モデル
    - 2.2.4 地震応答解析手法
    - 2.2.5 単軸粘性ダンパ評価
    - 2.2.6 機器評価
  - 2.3 耐震評価結果
3. 三軸粘性ダンパの配管系への設置
  - 3.1 基本方針
    - 3.1.1 要求事項
    - 3.1.2 構造の概要
    - 3.1.3 設計方針
    - 3.1.4 適用規格
  - 3.2 耐震評価方法
    - 3.2.1 評価方針
    - 3.2.2 三軸粘性ダンパの配置検討
    - 3.2.3 性能試験及び解析モデル
    - 3.2.4 地震応答解析手法
    - 3.2.5 三軸粘性ダンパ評価
    - 3.2.6 配管系評価
  - 3.3 耐震評価結果
    - 3.3.1 評価条件
    - 3.3.2 評価結果
4. 実績との比較
5. まとめ

## 添 付 資 料

- 1-1 制震装置の減衰性能に影響する検討項目の抽出
- 1-2 既工認実績のある制震装置との差異の整理
- 1-3 Time History Broadening の概要
- 1-4 新規制基準適合性審査の実績等を踏まえた検討事項に対する考察
- 1-5 制震装置に応じた減衰性能の表現及びモデル化
  
- 2-1 取水槽ガントリクレーンに設置する制震装置の選定
- 2-2 単軸粘性ダンパの性能試験方法
- 2-3 単軸粘性ダンパの特性試験
- 2-4 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手法
- 2-5 単軸粘性ダンパの減衰性能と取水槽ガントリクレーンの応答の関係
  
- 3-1 三軸粘性ダンパの低速移動時の拘束力
- 3-2 配管系に設置する制震装置の選定
- 3-3 三軸粘性ダンパに関する ASME Boiler and Pressure Vessel Code の記載
- 3-4 三軸粘性ダンパを設置した配管系の加振試験の概要
- 3-5 三軸粘性ダンパの減衰性能及び解析モデルによる表現
- 3-6 三軸粘性ダンパの特性試験
- 3-7 三軸粘性ダンパの据付公差による減衰性能への影響
- 3-8 三軸粘性ダンパの性能試験方法
- 3-9 三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析手法
- 3-10 三軸粘性ダンパの減衰性能と配管系の応答の関係
- 3-11 三軸粘性ダンパの配管への取付部の設計について
- 3-12 三軸粘性ダンパの耐震評価方法に関する海外実績との比較



## 1. 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。大きな地震力が作用する機器・配管系に対して、耐震構造による補強では設計及び施工が困難となる場合、制震装置の設置により地震応答を低減することは有効な耐震補強の手法のひとつである。

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。本資料では、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。また、取水槽ガントリクレーンの車輪部のすべり、浮上り等の非線形挙動のモデル化及び解析手法については、別紙-7 添付資料-2「取水槽ガントリクレーンへの非線形時刻歴解析の適用について」に示す。

なお、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。

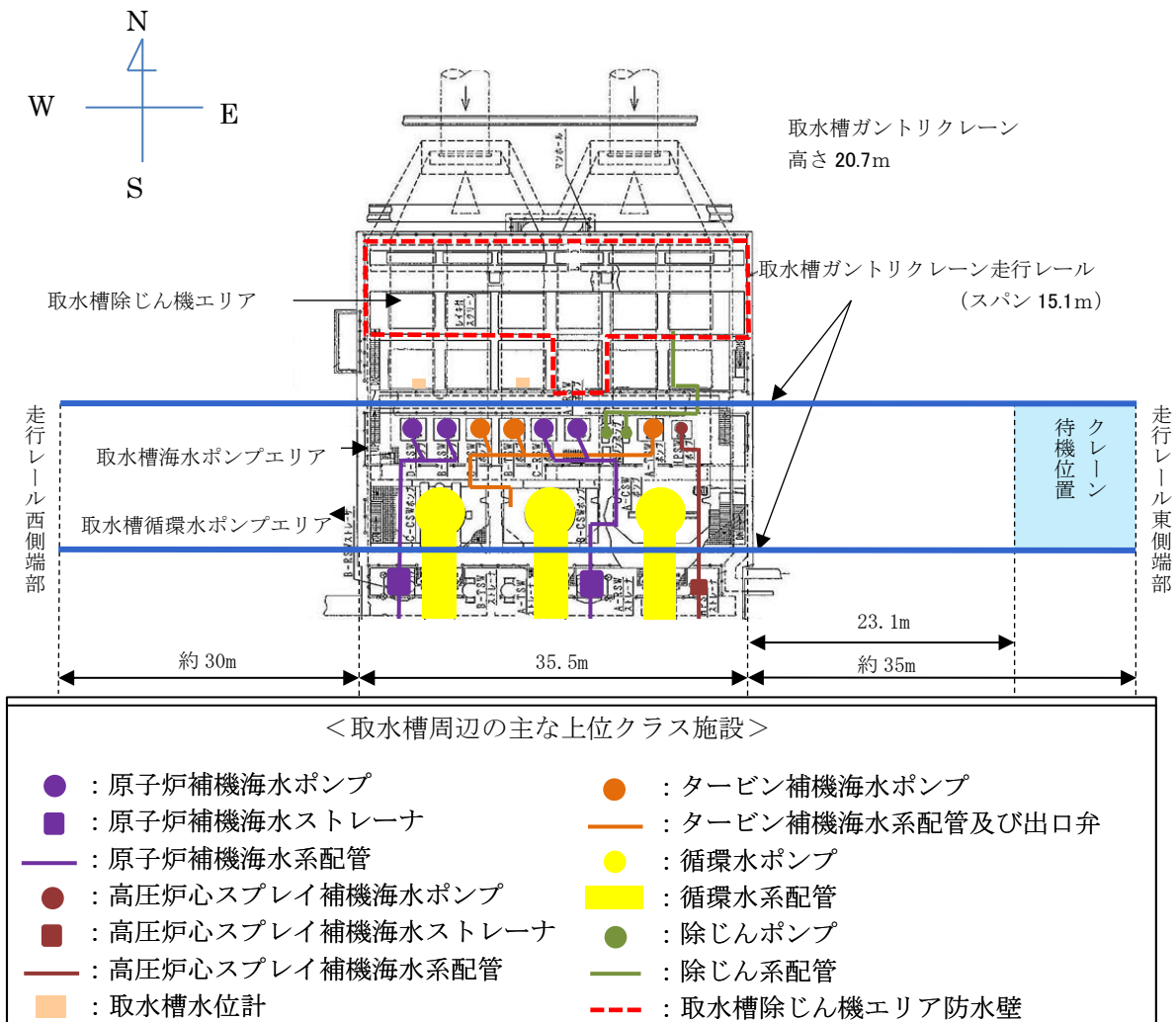
## 2. 単軸粘性ダンパの取水槽ガントリクレーンへの設置

### 2.1 基本方針

#### 2.1.1 要求事項

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、原子炉補機海水ポンプ等のメンテナンスに使用される設備である。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を第2-1図に示す。

発電所の運転中などメンテナンスを実施しない期間は、取水槽ガントリクレーンは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。一方で、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。



第2-1図 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

## 2.1.2 構造の概要

### (1) 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を第2-2図に示す。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。原子炉補機海水ポンプ等のメンテナンス時には、トロリに設置された巻上げ装置（主巻）、又はホイストを使用して、ワイヤロープ及びフックを介し、吊荷の吊上げ、吊下げ、移動等の作業を実施する。

取水槽ガントリクレーンは大型の構造物であり、制震装置の設置による地震荷重の低減が耐震性向上に有効である。取水槽ガントリクレーンの応答は、横行方向に脚が変形する振動モードが支配的であり、ガーダと脚の間にブレースを介して単軸粘性ダンパを制震装置として設置する。制震装置選定の考え方を添付資料 2-1 に示す。単軸粘性ダンパの設置は、島根2号炉、島根

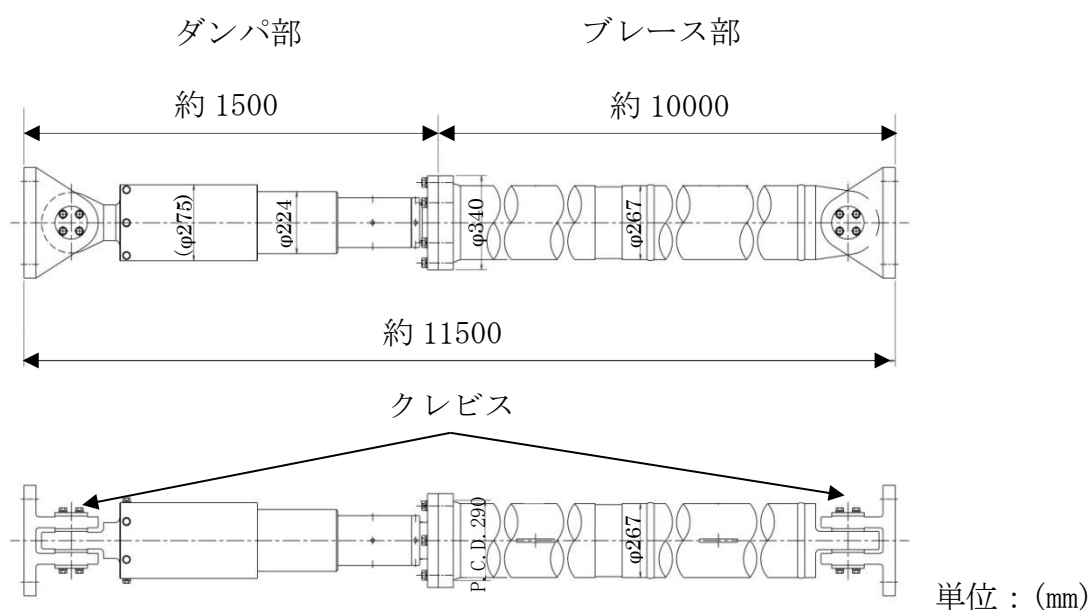
3号炉及び柏崎6／7号炉等の排気筒で実績がある。

単軸粘性ダンパ取付部の構造を第2-3図に示す。ダンパ本体の長さは標準設計の約1.5mとし、これに約10mのブレースを接続している。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。このクレビスは単軸粘性ダンパの伸縮方向と直交する一方向にはピンを軸として自由に回転可能となっている。また、ピンの軸受部は球面軸受となっており、クレビスの回転方向以外の方向にも約3度の許容回転角度を有することで、単軸粘性ダンパに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取付部材の質量は適切に地震応答解析モデルに反映する。

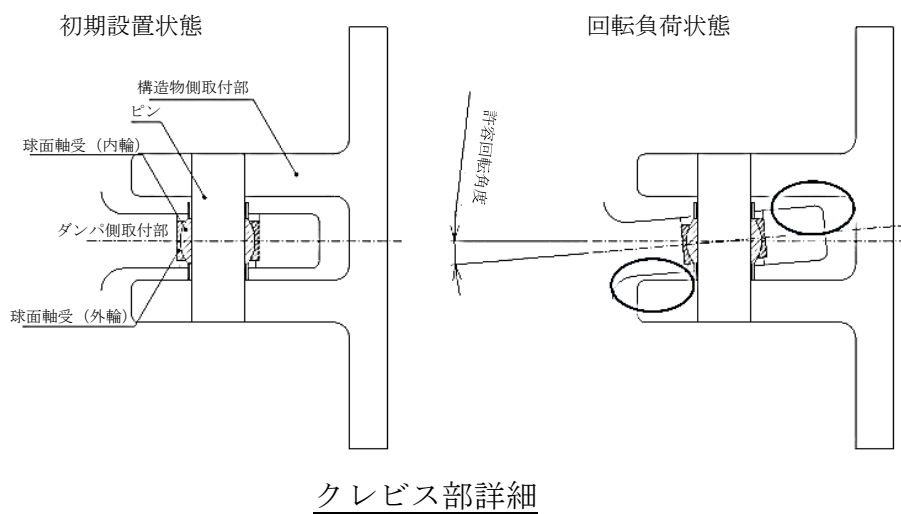


第2-2図 取水槽ガントリクレーンの構造

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。



単軸粘性ダンパ及びブレースの構造



クレビス部詳細

第 2-3 図 単軸粘性ダンパ取付部の構造

(2) 単軸粘性ダンパの構造概要

取水槽ガントリークレーンに設置する単軸粘性ダンパの仕様を第 2-1 表に示す。また、単軸粘性ダンパの外観及び構造を第 2-4 図に示す。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。単軸粘性ダンパの粘性体は化学的に安定であり、消防法で定められている危険物に該当しない。

単軸粘性ダンパの動作原理を第 2-5 図に示す。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

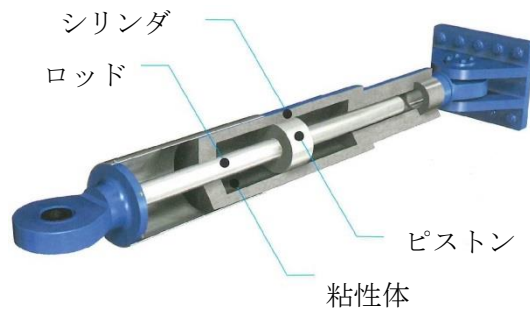
に形成されるオリフィス部を粘性体が流れ、その抵抗力により減衰性能を発揮するものであり、自重等の静的荷重は支持しない。

第2-1表 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

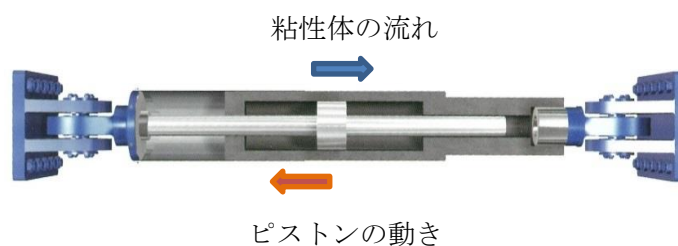
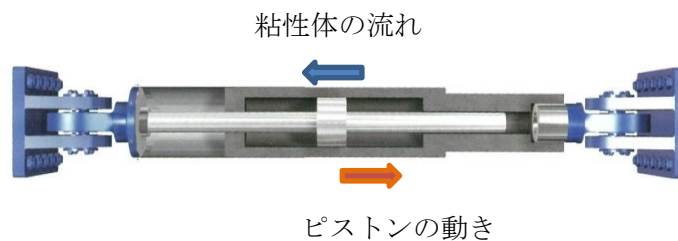
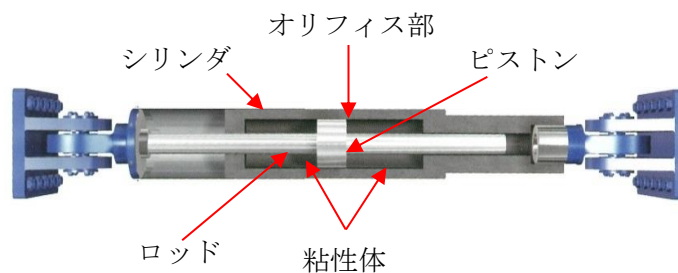


単軸粘性ダンパの外観（橋梁への設置例）



単軸粘性ダンパの構造

第2-4図 単軸粘性ダンパの外観及び構造

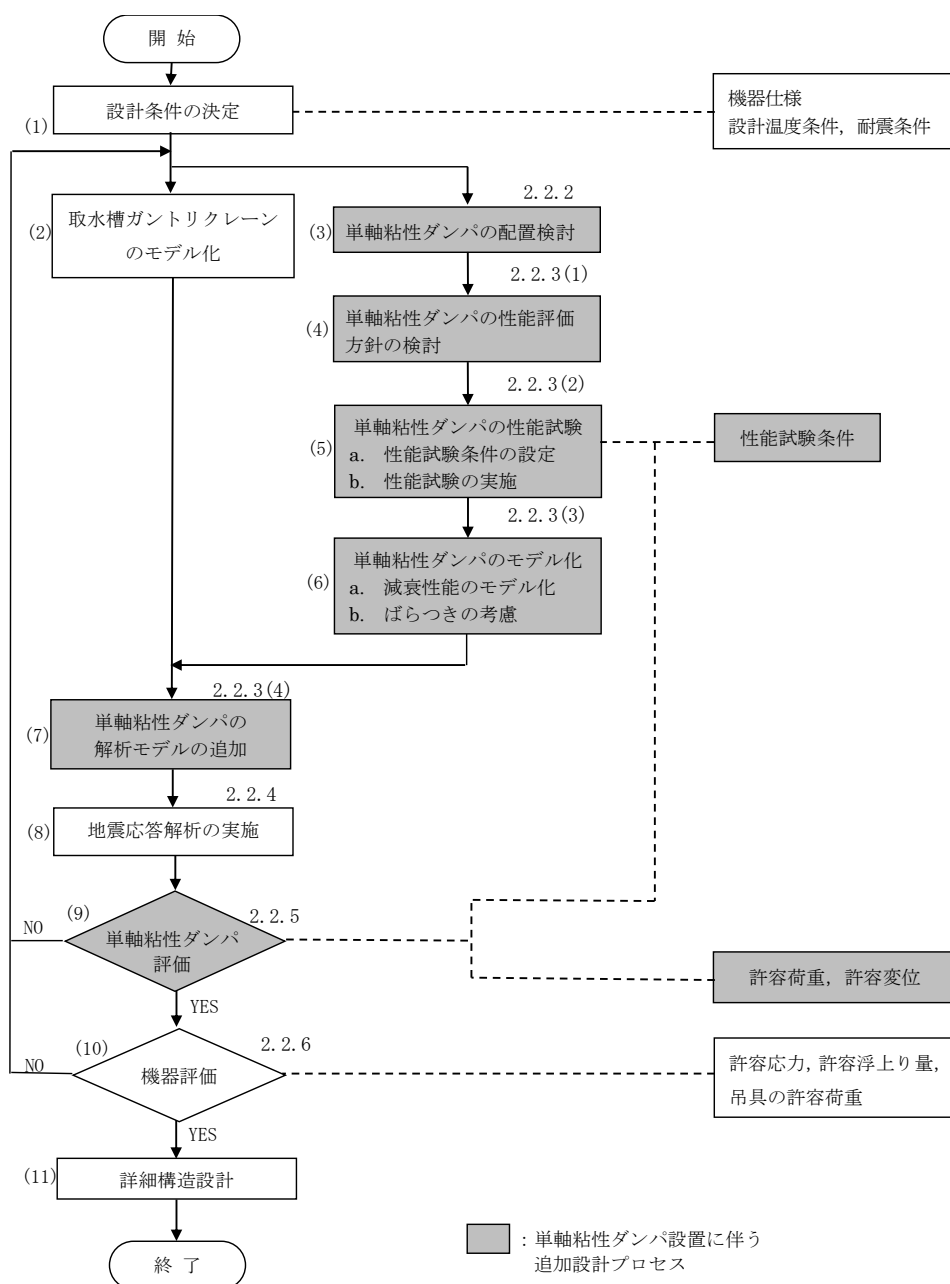


第2-5図 単軸粘性ダンパの動作原理

### 2.1.3 設計方針

単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの耐震設計フローを第2-6図に、設計プロセスを第2-2表に示す。また、単軸粘性ダンパ設置前の取水槽ガントリクレーンと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モデルを第2-7図に示す。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。

第2-6図の耐震設計フローは、基本的に一般的な機器の設計フローと同じであるが、第2-6図における単軸粘性ダンパを設置することに伴う追加の設計プロセスについて、2.2項にて詳細に説明する。

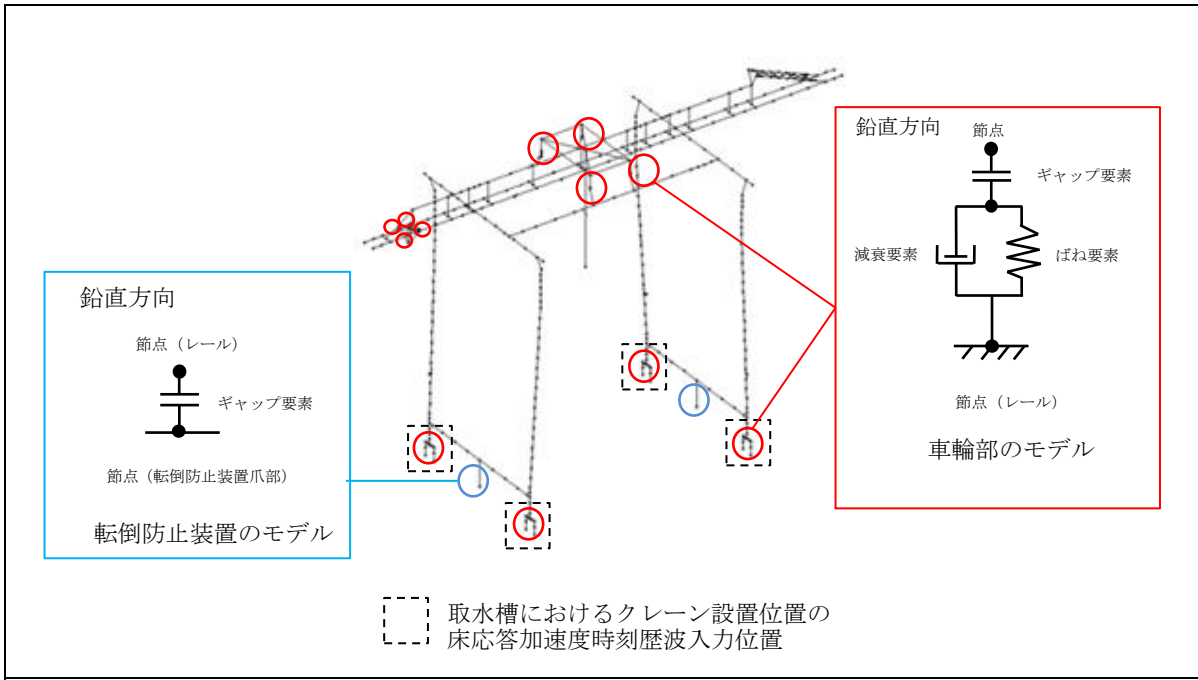


第2-6図 単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの耐震設計フロー

第2-2表 単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの  
設計プロセス

番号※1	実施事項	内容	追加設計プロセス
(1)	設計条件の決定	取水槽ガントリクレーンの仕様, 設計条件を決定する。	—
(2)	取水槽ガントリクレーンのモデル化	取水槽ガントリクレーン本体を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。	—
(3)	単軸粘性ダンパの配置検討	単軸粘性ダンパの配置を検討する。	○
(4)	単軸粘性ダンパの性能評価方針の検討	単軸粘性ダンパの減衰性能への影響の検討を要する項目を抽出し, 性能試験及びモデル化における対応方針の検討を行う。	○
(5)	単軸粘性ダンパの性能試験	単軸粘性ダンパの実機使用条件を踏まえた性能試験条件を設定し, 性能試験を実施する。	○
(6)	単軸粘性ダンパのモデル化	性能試験結果から単軸粘性ダンパの減衰性能をMaxwellモデルによりモデル化する。また, 減衰性能のばらつきを考慮して, 地震応答解析モデルにおける減衰性能を設定する。	○
(7)	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の地震応答解析モデルに単軸粘性ダンパをモデル化したMaxwellモデルを追加する。	○
(8)	地震応答解析の実施	地震応答解析を実施し, 応力, 変位等を求める。	—
(9)	単軸粘性ダンパ評価	地震応答解析により得られた応答値が性能試験条件の範囲内であること及び単軸粘性ダンパの許容限界が満たされていることを確認する。	○
(10)	機器評価	地震応答解析結果を基に, 発生応力, 浮上り量, 吊具荷重が許容値以内であることを確認する。	—
(11)	詳細構造設計	地震応答解析結果を基に, 各部の詳細構造設計を行う。	—

※1 : 番号は第2-6図の耐震設計フローの番号に対応している。



単軸粘性ダンパを設置前の取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデル



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モデル

第 2-7 図 取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデル

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。



#### 2.1.4 適用規格

取水槽ガントリクレーンの設計には、以下の規格（以下「J E A G 4 6 0 1 等」という。）を適用する。

- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987」 (社) 日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984」 (社) 日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」 (社) 日本電気協会
- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2005 年版 (2007 年追補版を含む)) <第 I 編 軽水炉規格> JSME S NC1-2005/2007」 (日本機械学会)

取水槽ガントリクレーンの設計における適用規格の適用範囲について第2-3表に示す。

第2-3表 単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの適用規格及び適用範囲

適用対象	適用範囲		適用規格	適用の考え方
取水槽 ガントリ クレーン全体	減衰定数		— (振動試験結果)	振動試験結果を踏まえ設計評価用として安全側に設定した減衰定数を採用する (別紙-7 添付資料-6 「最新知見として得られた減衰定数の採用について」 参照)。
	一般事項		J E A G 4 6 0 1 等	従来のクレーンの評価と同様である。
	構造強度評価			
吊具	構造強度評価			
トロリ	浮上り量評価		— (構造寸法に基づく)	クレーンの構造寸法に基づき設定する。
単軸粘性ダンパ	構造強度評価	許容荷重	J E A G 4 6 0 1 等	従来の機器・配管系の支持構造物と同様である。
		許容変位	— (構造寸法に基づく)	制震装置ごとの構造寸法に基づき設定する。
	減衰性能の設定		— (性能試験結果)	制震装置の特性に応じて試験結果に基づき設定する。

## 2.2 耐震評価方法

### 2.2.1 評価方針

2.1.3にて整理した単軸粘性ダンパを設置することに伴う追加の設計プロセスについて、具体的な評価方針を以下に示す。

まず、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。次に、単軸粘性ダンパの減衰性能への影響の検討を要する項目を抽出し、性能試験及びモデル化における対応方針を検討する。単軸粘性ダンパのモデル化を行うために、実機使用条件を踏まえた性能試験条件により、実機に設置する単軸粘性ダンパを用いた性能試験を実施する。性能試験の結果に基づき減衰性能を設定し、単軸粘性ダンパを Maxwell モデルによりモデル化する。この 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し、地震応答解析を行う。単軸粘性ダンパの評価として、地震応答解析により得られた応答値が性能試験条件の範囲内であること及び単軸粘性ダンパの許容限界が満たされていることを確認する。

### 2.2.2 単軸粘性ダンパの配置検討

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。

### 2.2.3 性能試験及び解析モデル

#### (1) 単軸粘性ダンパの性能評価方針の検討

単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの評価においては単軸粘性ダンパの減衰性能を適切に取得して設定することが重要であるため、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（添付資料 1-1 参照）。減衰性能への影響の検討結果を第 2-4 表に示す。減衰性能に影響する項目については、減衰性能を取得するための性能試験条件の設定において適切に考慮する、若しくは地震応答解析においてばらつきとして考慮する方針とする。

第2-4表 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（添付資料2-3参照）。	—
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た（添付資料2-3参照）。	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。	

(2) 単軸粘性ダンパの性能試験

a. 性能試験条件の設定

単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。

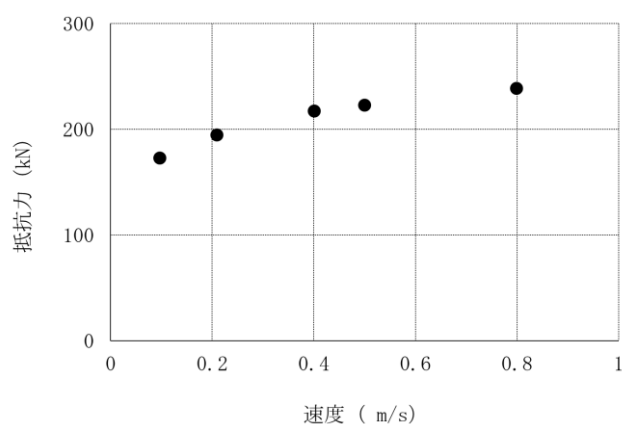
加振振動数による単軸粘性ダンパの減衰性能の変動は比較的小さいことを踏まえ、単軸粘性ダンパの許容変位 100mm の中で実機使用条件を含む幅広い試験速度 (0.1~0.8m/s) を設定して性能試験を実施する。単軸粘性ダンパの性能試験条件を第2-5表に示す。

b. 性能試験の実施

設定した性能試験条件により、単軸粘性ダンパの性能試験を実施する。性能試験の詳細について添付資料2-2に示す。地震応答解析に適用する単軸粘性ダンパの減衰性能は、実機に設置する単軸粘性ダンパについて性能試験を実施のうえ設定する。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。性能試験結果により取得した減衰性能を第2-8図に示す。

第2-5表 単軸粘性ダンパの性能試験条件

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



第2-8図 性能試験結果

### (3) 単軸粘性ダンパのモデル化

#### a. 減衰性能のモデル化

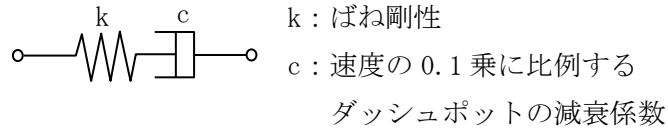
性能試験の結果に基づき、単軸粘性ダンパの減衰性能をモデル化する。

単軸粘性ダンパは、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2パラメータのMaxwellモデルを用いる。単軸粘性ダンパの減衰性能を模擬するMaxwellモデルを第2-9図に示す。加振振動数1.6Hzの場合のMaxwellモデルによる計算値と性能試験結果の比較を第2-10図に示す。この図から、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良く表現できることが分かる。

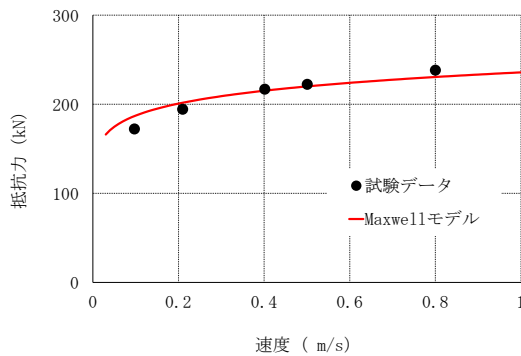
#### b. ばらつきの考慮

単軸粘性ダンパの減衰性能のばらつきを考慮して、地震応答解析に用いる解析モデルを設定する。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、第2-4表に基づき、振動数による±10%の変動と、製造公差による±10%のばらつきを合わせて±20%のばらつきを考慮する。単軸粘性ダンパの減衰性能は、ばらつきを考慮して標準性能+20%、標準性能、標準性能-20%の3段階設定する。標準性能+20%の減衰性能を設定す

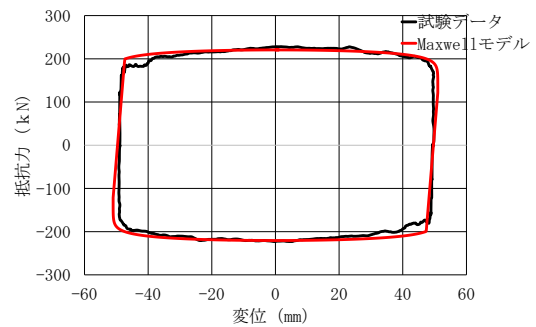
る理由は、単軸粘性ダンパの取付部材の設計においては減衰性能が高く抵抗力が大きい場合の荷重を適用するためである。地震応答解析モデルにおける減衰性能の設定を第2-11図に示す。



第2-9図 単軸粘性ダンパのMaxwellモデル

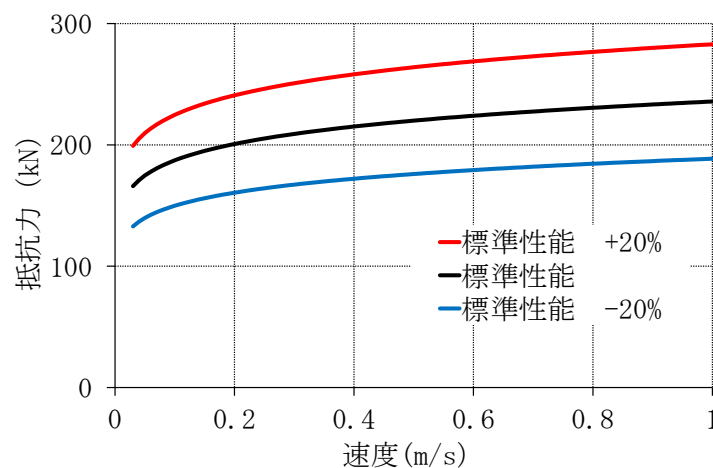


速度と抵抗力の関係



速度 0.5m/s における  
正弦波 1 周期分の履歴曲線

第2-10図 Maxwellモデルによる計算値と性能試験結果の比較



第2-11図 地震応答解析モデルにおける段階的な減衰性能の設定

#### (4) 単軸粘性ダンパの解析モデルの追加

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ことにより、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モデルを作成する。

#### 2.2.4 地震応答解析手法

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（添付資料 2-4 参照）。標準性能+20%、標準性能、標準性能-20%の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（第 2-11 図参照）。

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、鉛直方向ともに別紙-7 添付資料-6「最新知見として得られた減衰定数の採用について」に示す原子炉建物天井クレーンの減衰定数 2.0%を適用する。

スペクトルモーダル解析では、床応答加速度は地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動を考慮して周期方向に±10%拡幅した設計用床応答曲線を用いている。取水槽ガントリクレーン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 Code SECTION III, DIVISION 1—NONMANDATORY APPENDIX N (ARTICLE N-1222.3 Time History Broadening) に規定された手法等により検討を行う（添付資料 1-3 参照）。

#### 2.2.5 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。

また、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、単軸粘性ダンパは許容荷重及び許容変位を満たすように設計する。

## 2.2.6 機器評価

取水槽ガントリクレーンは、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ため、機器評価における評価方法及び許容限界は第2-6表のとおりとする。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。

第2-6表 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	取水槽ガントリクレーン本体	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
			浮上り量が許容限界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	吊具部分の荷重が許容限界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

### 2.3 耐震評価結果

取水槽ガントリクレーンの評価結果は、別紙－7添付資料－2「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について」に示す。また、地震応答解析は3段階の減衰性能を設定して実施することから、3段階の減衰性能と取水槽ガントリクレーンの地震応答についてまとめた結果を添付資料2-5に示す。

単軸粘性ダンパを含めた取水槽ガントリクレーンの解析結果から、単軸粘性ダンパの応答値と解析上の前提条件の比較を第2-7表に示す。単軸粘性ダンパの応答値が解析上の前提条件の範囲内であることを確認した。

第2-7表 単軸粘性ダンパの応答値と解析上の前提条件の比較

	発生値	解析条件
最大速度	0.47 (m/s)	0.8 (m/s)



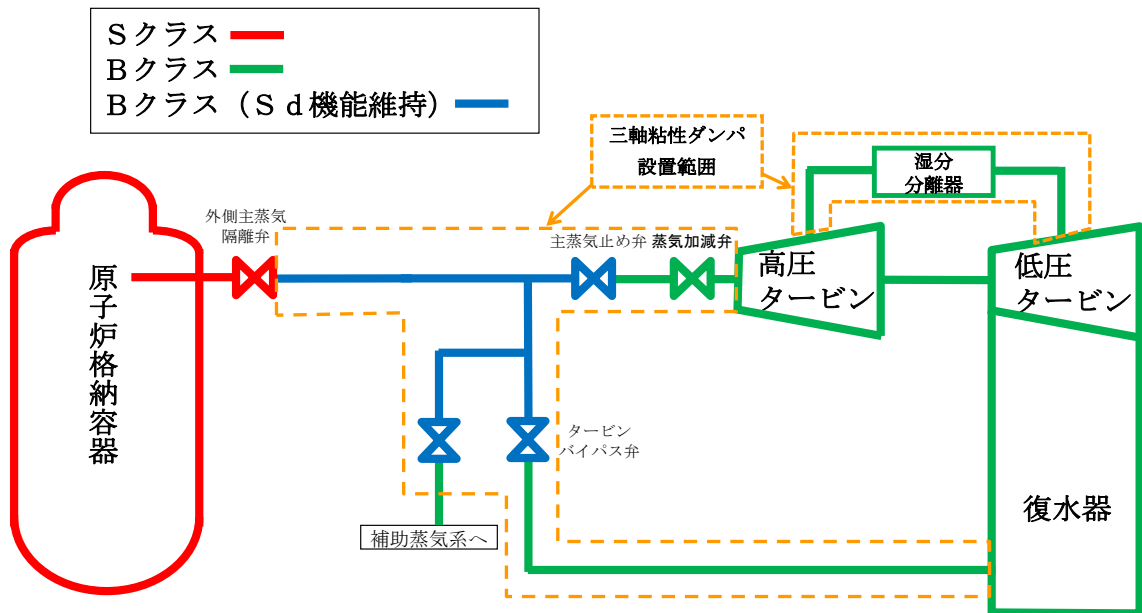
### 3. 三軸粘性ダンパの配管系への設置

#### 3.1 基本方針

##### 3.1.1 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。三軸粘性ダンパの設置範囲を第3-1図に示す。当該配管の耐震重要度分類はBクラスである。また、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。

なお、既工認では基準地震動S1の最大加速度の1/2の値を鉛直震度として求まる鉛直方向地震力を考慮していたが、今回工認では鉛直方向の動的地震力を考慮する。大口径の主蒸気系配管に対しては、鉛直方向の動的地震力の影響は大きく、耐震構造による補強では設計及び施工が困難であることから、三軸粘性ダンパによる耐震補強を行う。



第3-1図 三軸粘性ダンパの設置範囲及び耐震クラス

##### 3.1.2 構造の概要

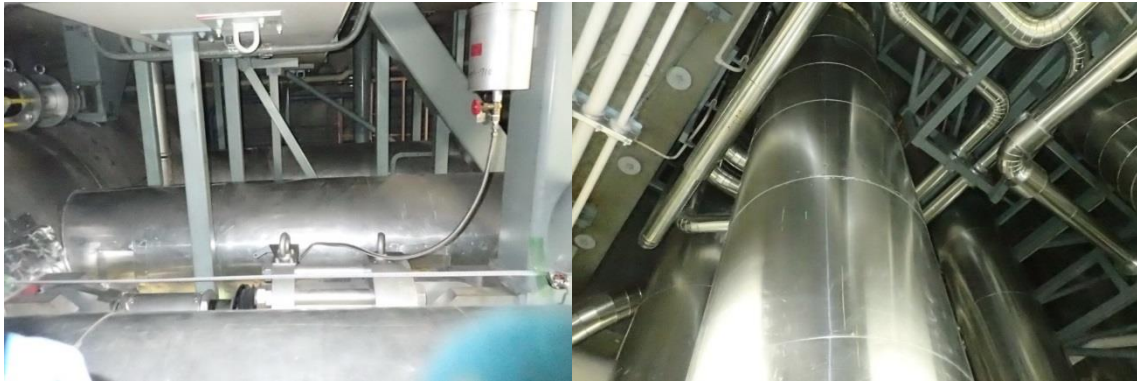
###### (1) 主蒸気系配管の構造概要

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は、大口径配管（主流路は600A～1600A程度）であり、また運転時には高温になるため、熱膨張による配管変位を考慮した設計が必要である。地震荷重が大きく、熱膨張の変位を拘束するサポートの設置が困難であることから、熱膨張の変位を拘束しない制震装置の設置による地震荷重の低減が耐震性向上に有効である。三軸粘性ダンパ設置範囲の主蒸気系配管について、代表箇所を第3-2図に示す。

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、3方向に減衰性能を発揮し、熱膨張による低速度の運動を

拘束しない(添付資料 3-1 参照) 三軸粘性ダンパを主蒸気系配管に設置する。制震装置選定の考え方を添付資料 3-2 に示す。

なお、三軸粘性ダンパの合計質量(約 50 台想定)は、建物の配管系設置床の質点質量に対して 0.1%以下であり、建物の地震応答解析結果への影響は軽微である。また、三軸粘性ダンパを設置する配管系については三軸粘性ダンパ設置に伴う質量増加を踏まえてモデル化を行う。



(a) 主蒸気ヘッダ周辺 (600A)                      (b) 高圧タービン下部 (1050A)

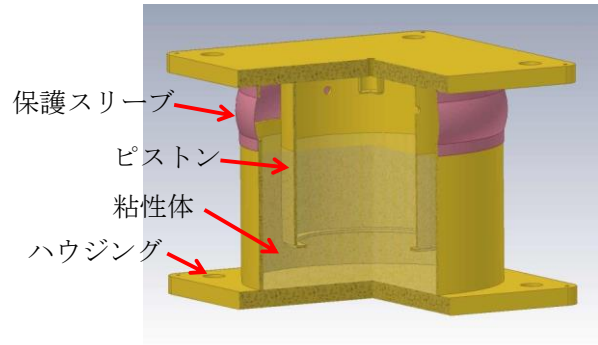
第 3-2 図 三軸粘性ダンパ設置範囲の主蒸気系配管 (代表箇所)

## (2) 三軸粘性ダンパの構造概要

三軸粘性ダンパの外観及び構造を第 3-3 図に、仕様を第 3-1 表に、動作機構を第 3-4 図に示す。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。三軸粘性ダンパの粘性体は化学的に安定であり、消防法で定められている危険物に該当しない。三軸粘性ダンパは、粘性体に入ったハウジングにピストンが挿入された構造であり、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力による減衰性能を発揮する。水平方向については回転対称な構造であるため、方向による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 SECTION III, DIVISION1-Subsection NF-Supports に記載されており(添付資料 3-3 参照)、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。海外の原子力発電所における三軸粘性ダンパの設置例を第 3-5 図に示す。なお、国内においては原子力分野以外で、石油プラントの配管系(口径 300A)、コンサートホール等の大規模建物の制振システム及び振動台等の機械装置の防振対策等への採用実績があり、採用実績の例を第 3-6 図に示す。

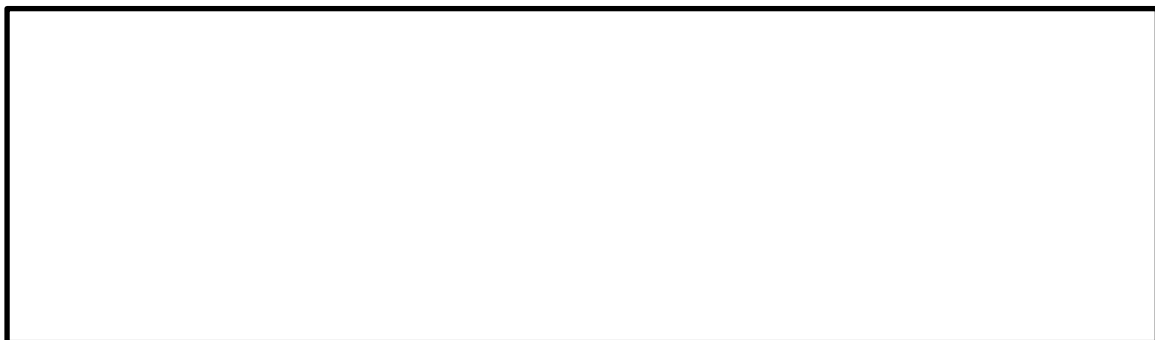
また、三軸粘性ダンパを配管系に設置した場合の有効性を確認するため、配管系を対象とした加振試験を実施し、地震応答の低減に有効であることを確認した。加振試験の詳細は添付資料 3-4 に示す。



第 3-3 図 三軸粘性ダンパの外観及び構造

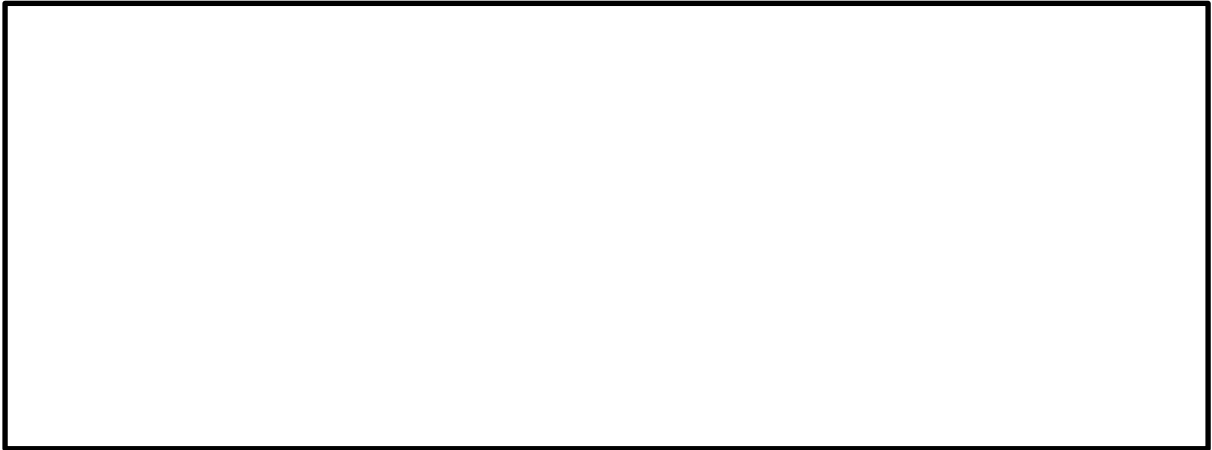
第 3-1 表 三軸粘性ダンパの仕様

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		



第 3-4 図 三軸粘性ダンパの動作機構

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。



第3-5図 海外の原子力発電所における三軸粘性ダンパの設置例



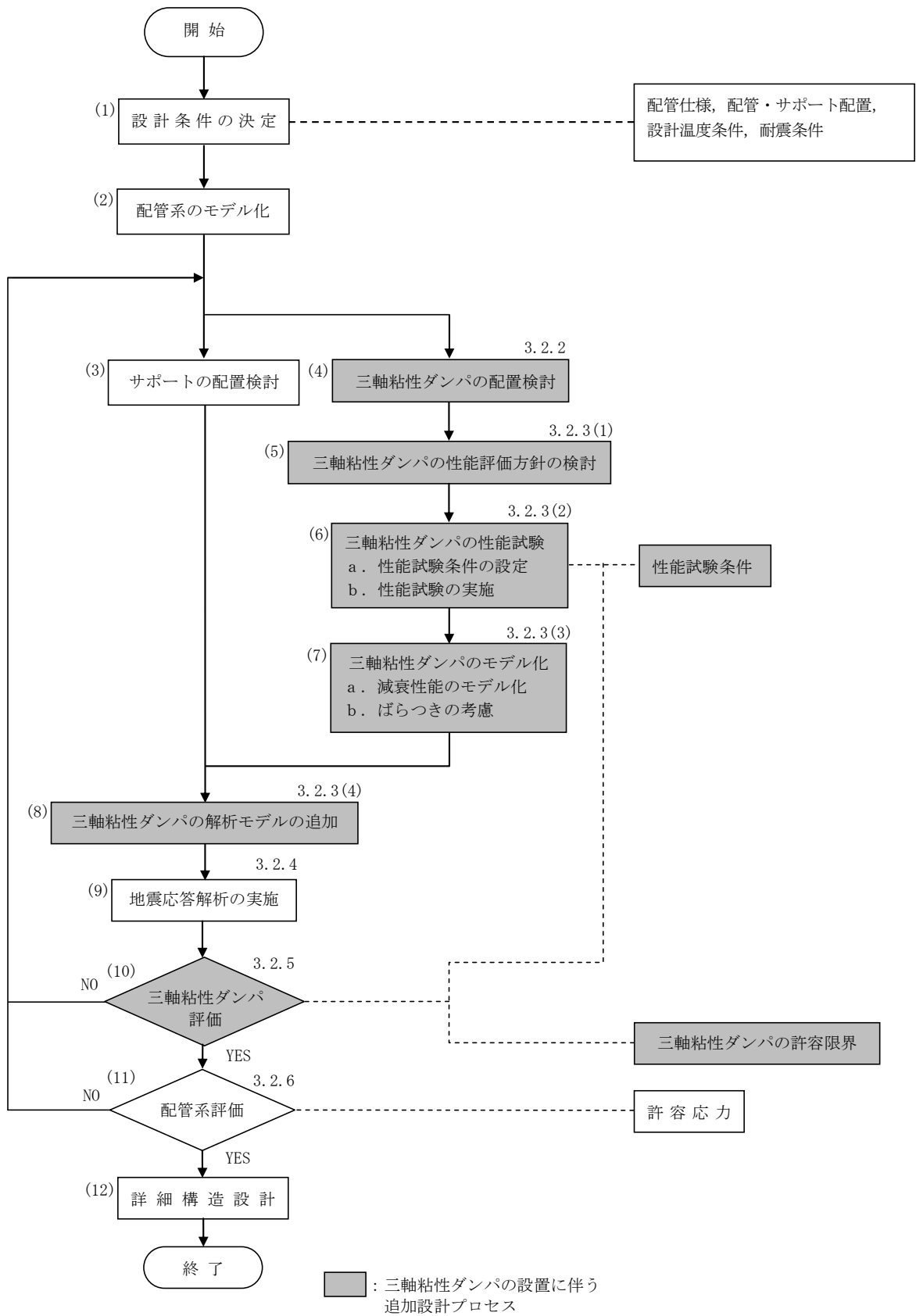
第3-6図 国内における三軸粘性ダンパの採用実績の例

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。

### 3.1.3 設計方針

三軸粘性ダンパを設置した配管系の耐震設計フローを第3-7図に、設計プロセスを第3-2表に示す。また、三軸粘性ダンパ設置前の配管系と三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析モデルの一例を第3-8図に示す。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る。また、4パラメータ Maxwell モデルによる三軸粘性ダンパのモデル化は、海外の原子力発電所において実績のあるモデル化手法である。

第3-7図の耐震設計フローは、基本的に一般的な配管系の設計フローと同じであるが、第3-7図における三軸粘性ダンパを設置することに伴う追加の設計プロセスについて、3.2項にて詳細に説明する。

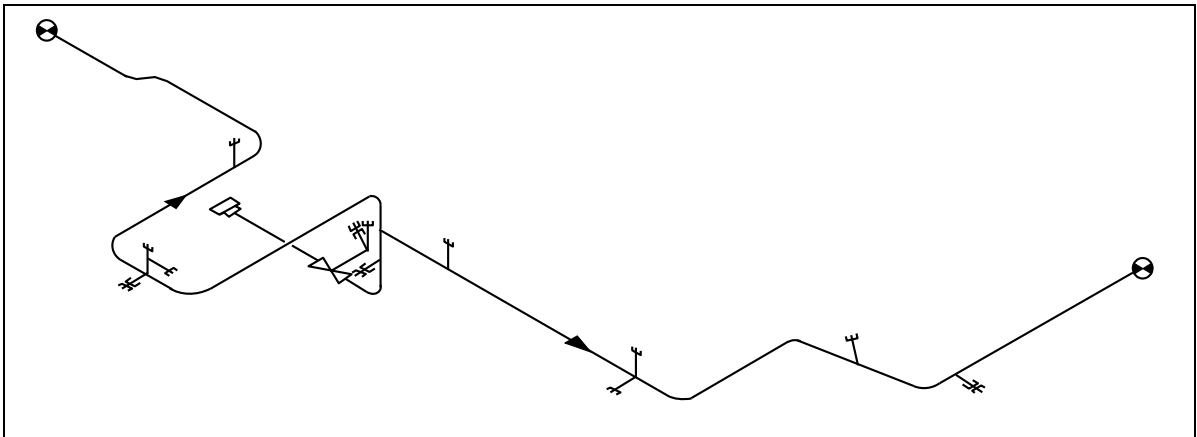


第3-7図 三軸粘性ダンパを設置した配管系の耐震設計フロー

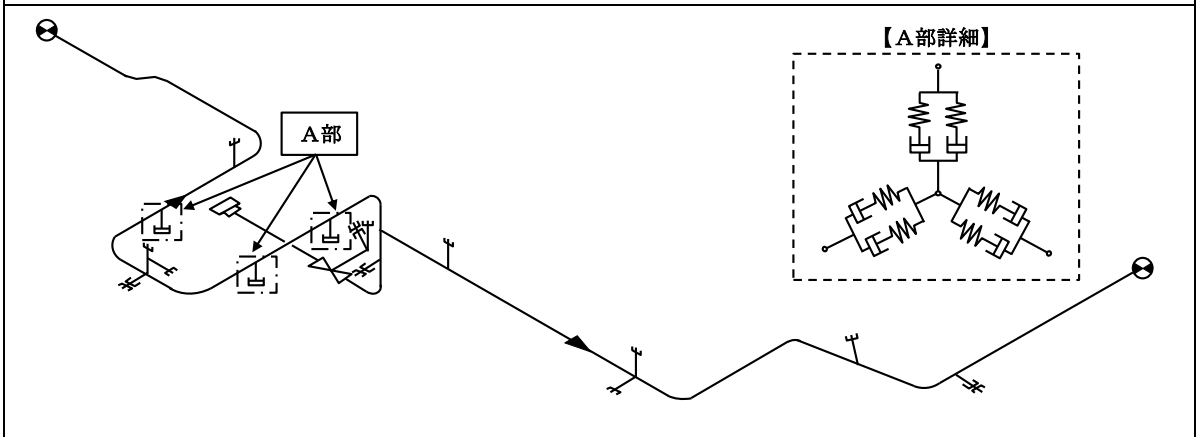
第3-2表 三軸粘性ダンパを設置した配管系の設計プロセス

番号※1	実施事項	内容	追加設計プロセス
(1)	設計条件の決定	配管系の仕様, 配置他設計条件を決定する。	—
(2)	配管系のモデル化	配管系を3次元はりモデルによりモデル化する。	—
(3)	サポートの配置検討	サポートの配置を検討する。	—
(4)	三軸粘性ダンパの配置検討	三軸粘性ダンパの配置を検討する。	○
(5)	三軸粘性ダンパの性能評価方法の検討	三軸粘性ダンパの減衰性能への影響の検討を要する項目を抽出し, 性能試験及びモデル化における対応方針の検討を行う。	○
(6)	三軸粘性ダンパの性能試験	三軸粘性ダンパの実機使用条件を踏まえた性能試験条件により, 性能試験を実施する。	○
(7)	三軸粘性ダンパのモデル化	性能試験結果から三軸粘性ダンパの減衰性能を4パラメータ Maxwell モデルによりモデル化する。また, 減衰性能のばらつきを考慮して, 地震応答解析モデルにおける減衰性能を設定する。	○
(8)	三軸粘性ダンパの解析モデルの追加	配管系の地震応答解析モデルに三軸粘性ダンパをモデル化した4パラメータ Maxwell モデルを追加する。	○
(9)	地震応答解析の実施	地震応答解析を実施し, 応力, 変位等を求める。	—
(10)	三軸粘性ダンパ評価	地震応答解析により得られた応答値が性能試験条件の範囲内であること及び三軸粘性ダンパの許容限界が満たされていることを確認する。	○
(11)	配管系評価	地震応答解析結果を基に, 配管系の発生応力が許容応力を満たしていることを確認する。	—
(12)	詳細構造設計	地震応答解析結果を基に, 各部の詳細構造設計を行う。	—

※1 : 番号は第3-7図の耐震設計フローの番号に対応している。



三軸粘性ダンパ設置前の配管系の地震応答解析モデル



三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析モデル

第3-8図 配管系の地震応答解析モデル



### 3.1.4 適用規格

配管系の設計に用いる規格としては、原子力発電所の施設設計に用いる J E A G 4 6 0 1 等を基本とする。配管系の設計における適用規格の適用範囲について第 3-3 表に示す。

第 3-3 表 三軸粘性ダンパを設置した配管系の適用規格及び適用範囲

適用対象	適用範囲		適用規格	適用の考え方
配管系全体	減衰定数		— (振動試験結果)	振動試験結果を踏まえ設計評価用として安全側に設定した減衰定数を採用する（別紙-7 添付資料-6「最新知見として得られた減衰定数の採用について」参照）。
	一般事項		J E A G 4 6 0 1 等	従来の配管系、支持構造物の評価と同様である。
配管	構造強度評価			
支持構造物	構造強度評価			
三軸粘性ダンパ	構造強度評価	許容荷重	—	制震装置ごとの構造寸法に基づき設定する。
		許容変位	— (構造寸法に基づく)	
	減衰性能の設定		— (性能試験結果)	制震装置の特性に応じて試験結果に基づき設定する。

## 3.2 耐震評価方法

### 3.2.1 評価方針

3.1.3にて整理した三軸粘性ダンパを設置することに伴う追加の設計プロセスについて、三軸粘性ダンパを設置した配管系の評価方針を以下に示す。

まず、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。次に、三軸粘性ダンパの減衰性能への影響の検討を要する項目を抽出し、性能試験及びモデル化における対応方針の検討を行う。三軸粘性ダンパのモデル化を行うために、実機使用条件を踏まえた性能試験条件により、三軸粘性ダンパを用いた性能試験を実施する。性能試験の結果に基づき減衰性能を設定し、三軸粘性ダンパを 4 パラメータ Maxwell モデルによりモデル化する。この 4 パラメータ Maxwell モデルを配管系の地震応答解析モデルに追加し、地震応答解析を行う。三軸粘性ダンパの評価として、地震応答解析により得られた応答値が性能試験条件の範囲内であること及び三軸粘性ダンパの許容限界が満たされ

ていることを確認する。

### 3.2.2 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。

### 3.2.3 性能試験及び解析モデル

#### (1) 三軸粘性ダンパの性能評価方針の検討

三軸粘性ダンパの粘性体は粘弾性を有するため、その減衰性能は等価剛性  $K$  及び等価減衰係数  $C$  により表現する（添付資料 3-5 参照）。また、三軸粘性ダンパはその構造から水平方向加振に対する減衰性能は各方向で等しいが、水平方向加振と鉛直方向加振では減衰性能が異なるため、各方向で減衰性能を表現する。

三軸粘性ダンパを設置した配管系の評価においては三軸粘性ダンパの減衰性能を適切に取得して設定することが重要であるため、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（添付資料 1-1 参照）。抽出した項目と減衰性能への影響の検討結果を第 3-4 表に示す。減衰性能に影響する項目については、減衰性能を取得するための性能試験条件の設定において適切に考慮する、若しくは地震応答解析においてばらつきとして考慮する方針とする。

第3-4表 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（添付資料3-6参照）。	—
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（添付資料3-6参照）。	—
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（添付資料3-6参照）。	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（添付資料3-6参照）。	
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（添付資料3-6参照）。	
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。	
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（添付資料3-7参照）。	

(2) 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。三軸粘性ダンパはその構造から水平方向加振に対する減衰性能は各方向で等しいが、水平方向加振と鉛直方向加振では減衰性能が異なるため、水平方向及び鉛直方向でそれぞれ性能試験を実施する。

減衰性能への影響の検討結果（第3-4表参照）に基づき、三軸粘性ダンパの減衰性能については、変動及びばらつきを包絡するように減衰性能の上限と下限を設定する。第3-4表のうち温度、振幅及び連続加振による変動を踏まえた第3-5表に示す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。具体的な性能試験条件の設定例について添付資料 3-8 に示す。なお、減衰性能の設定において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。

#### b. 性能試験の実施

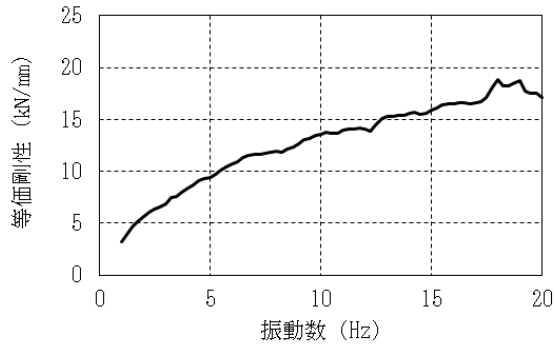
設定した性能試験条件により、三軸粘性ダンパの性能試験を実施する。性能試験の詳細について添付資料 3-8 に示す。地震応答解析に適用する三軸粘性ダンパの減衰性能は、実機に設置する各型式の三軸粘性ダンパについて性能試験を実施のうえ設定する。

第 3-5 表に示す性能試験条件に基づいて取得した三軸粘性ダンパの高側ダンパ試験性能 ( $K_{High}$ ,  $C_{High}$ ) と、低側ダンパ試験性能 ( $K_{Low}$ ,  $C_{Low}$ ) を第 3-9 図及び第 3-10 図に示す。

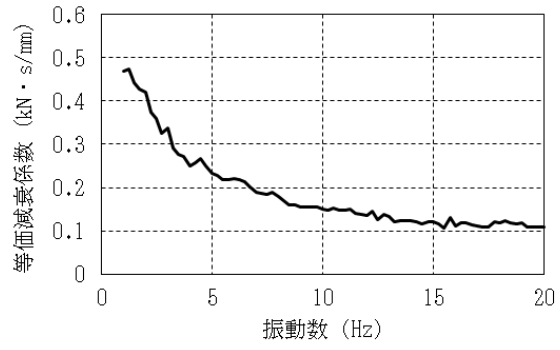
第 3-5 表 三軸粘性ダンパの性能試験条件の設定

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 <sup>※1</sup>	大 <sup>※1</sup>	大 <sup>※1</sup>

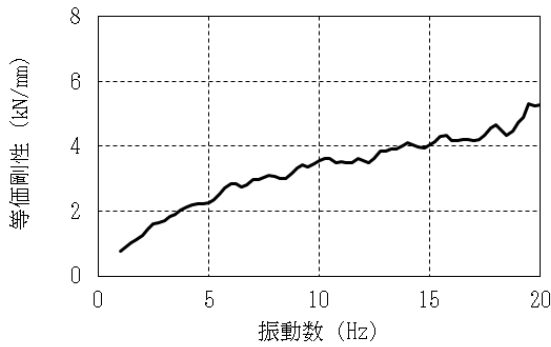
※1：実機使用条件を想定して設定する。



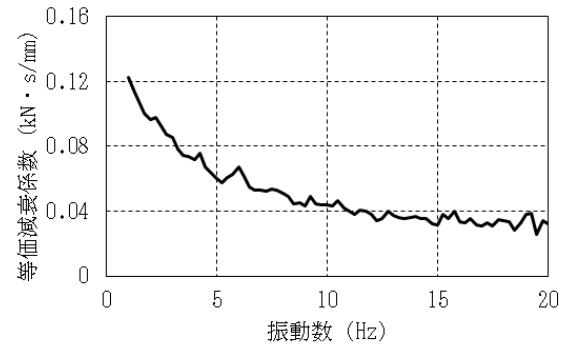
(H-1) 等価剛性  $K_{High}$  (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数  $C_{High}$  (水平方向)

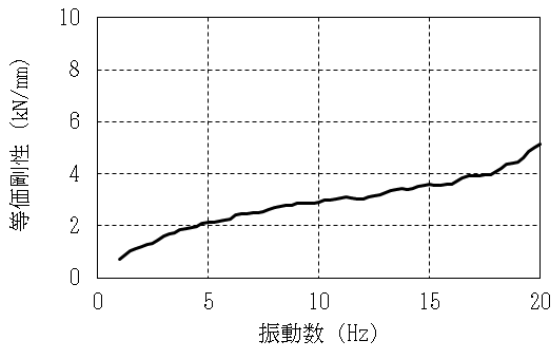


(V-1) 等価剛性  $K_{High}$  (鉛直方向)

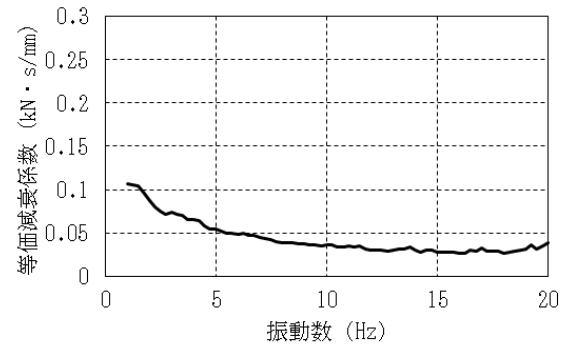


(V-2) 等価減衰係数  $C_{High}$  (鉛直方向)

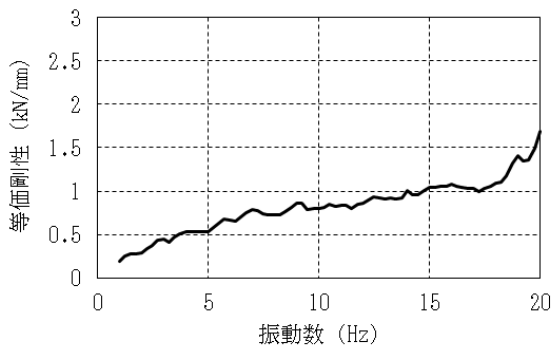
第3-9図 高側ダンパ試験性能 (中型の例)



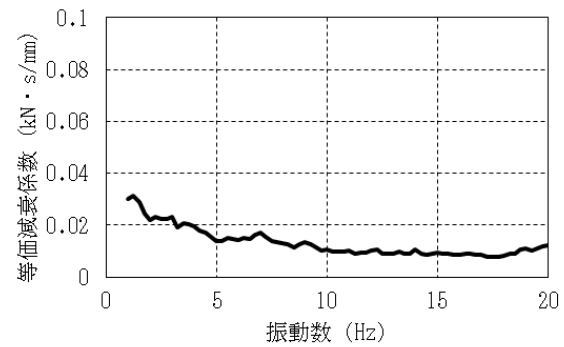
(H-1) 等価剛性  $K_{Low}$  (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数  $C_{Low}$  (水平方向)



(V-1) 等価剛性  $K_{Low}$  (鉛直方向)



(V-2) 等価減衰係数  $C_{Low}$  (鉛直方向)

第3-10図 低側ダンパ試験性能 (中型の例)

### (3) 三軸粘性ダンパのモデル化

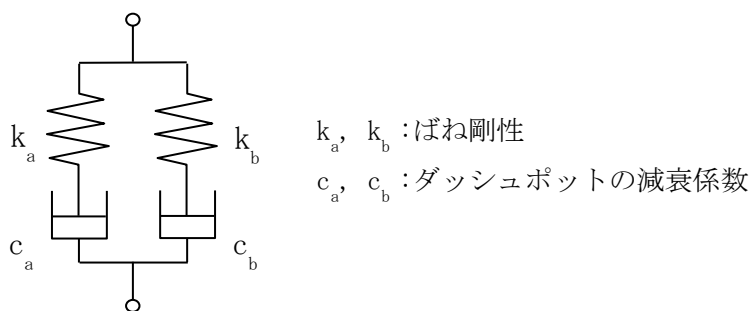
#### a. 減衰性能のモデル化

性能試験の結果に基づき、三軸粘性ダンパの減衰性能をモデル化する。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が、4パラメータ Maxwell モデルにより、その振動数特性を精度良くモデル化できる。4パラメータ Maxwell モデルを第3-11図に、4パラメータ Maxwell モデルによる性能試験結果のモデル化を第3-12図及び第3-13図に示す。

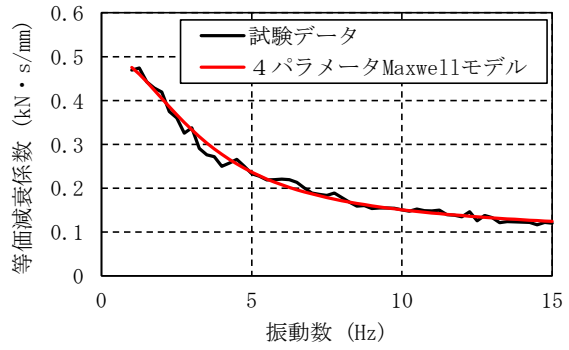
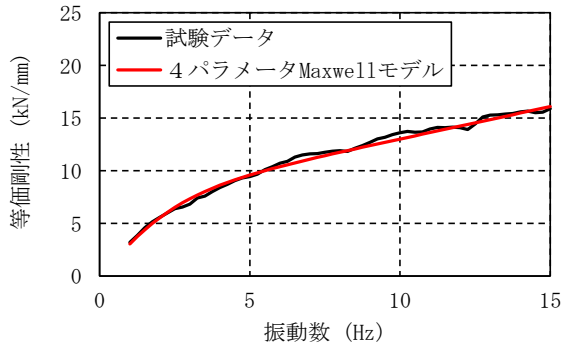
三軸粘性ダンパの減衰性能は、水平方向及び鉛直方向でそれぞれ高側ダンパ試験性能 ( $K_{\text{High}}, C_{\text{High}}$ ) 及び低側ダンパ試験性能 ( $K_{\text{Low}}, C_{\text{Low}}$ ) を性能試験により取得するため、4パラメータ Maxwell モデルは各方向に対して高側及び低側を設定する。

#### b. ばらつきの考慮

三軸粘性ダンパの減衰性能のばらつきを考慮して、地震応答解析に用いる解析モデルを設定する。性能試験結果に基づいてモデル化した三軸粘性ダンパの高側及び低側の減衰性能に対して、さらに第3-4表のうち製造公差による $\pm 10\%$ のばらつきと、据付公差による $\pm 20\%$ のばらつきを合わせて $\pm 30\%$ のばらつきとして考慮し、解析上の減衰性能の上限 ( $K_1=1.3 \times K_{\text{High}}, C_1=1.3 \times C_{\text{High}}$ ) 及び下限 ( $K_5=0.7 \times K_{\text{Low}}, C_5=0.7 \times C_{\text{Low}}$ ) を第3-14図のように設定する。また、保守的に変動及びばらつきを考慮することで上限と下限の減衰性能の差が大きくなるため、等間隔に補間した減衰性能も設定することとし、上限と下限を含めた5段階の減衰性能を設定する。地震応答解析モデルにおける減衰性能の設定を第3-6表、第3-15図に示す。

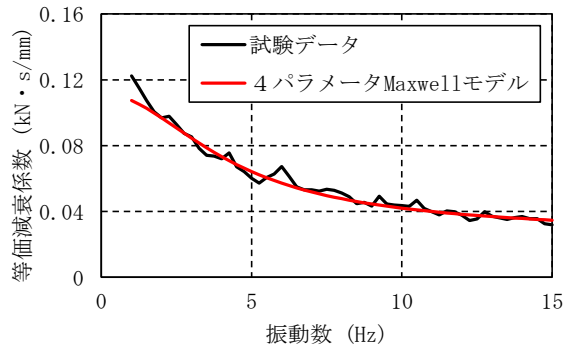
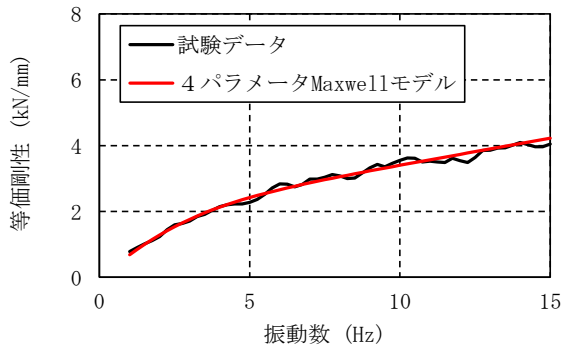


第3-11図 三軸粘性ダンパの4パラメータ Maxwell モデル



(H-1) 等価剛性  $K_{High}$  (水平方向)

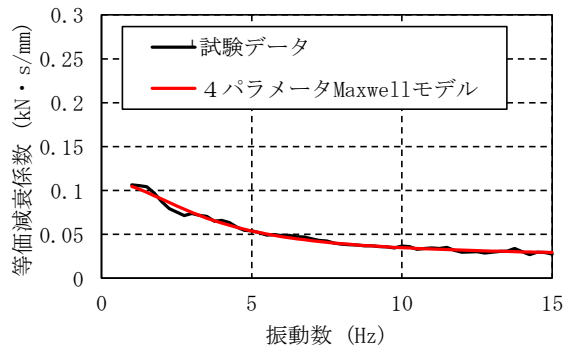
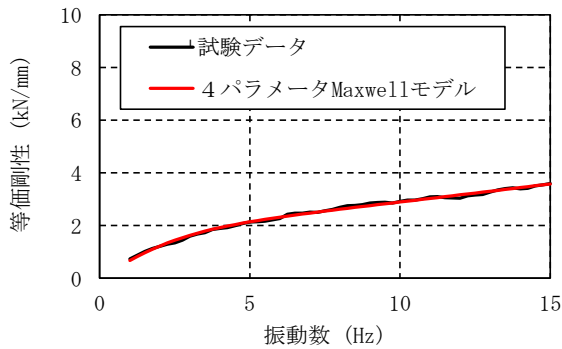
(H-2) 等価減衰係数  $C_{High}$  (水平方向)



(V-1) 等価剛性  $K_{High}$  (鉛直方向)

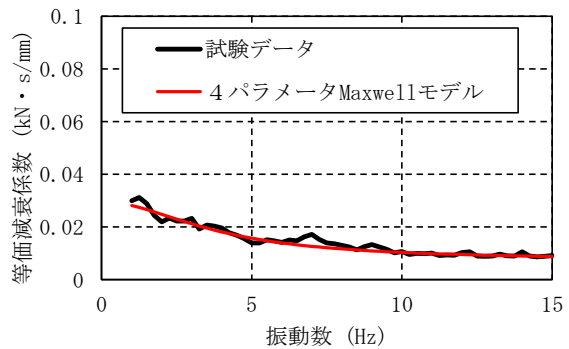
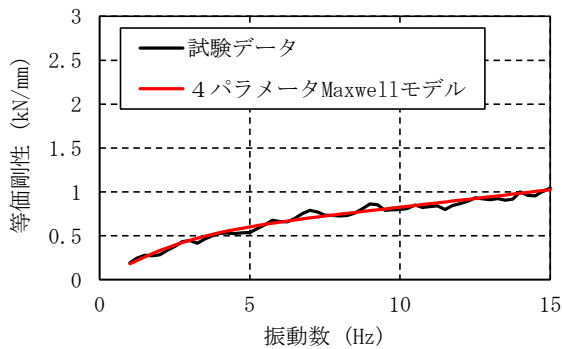
(V-2) 等価減衰係数  $C_{High}$  (鉛直方向)

第 3-12 図 高側ダンパ試験性能のモデル化 (中型の例)



(H-1) 等価剛性  $K_{Low}$  (水平方向)

(H-2) 等価減衰係数  $C_{Low}$  (水平方向)



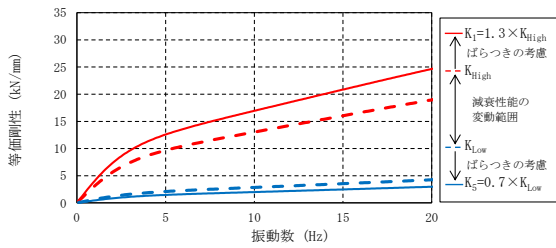
(V-1) 等価剛性  $K_{Low}$  (鉛直方向)

(V-2) 等価減衰係数  $C_{Low}$  (鉛直方向)

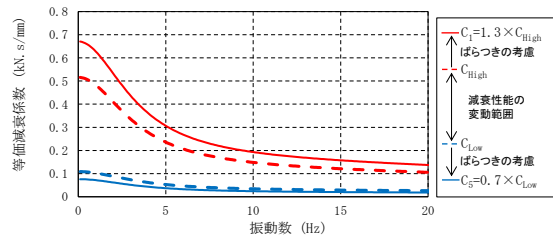
第 3-13 図 低側ダンパ試験性能のモデル化 (中型の例)

第3-6表 地震応答解析モデルにおける減衰性能の設定

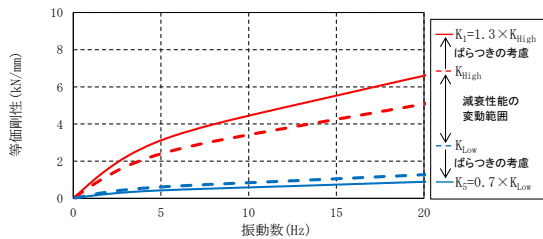
解析モデル	減衰性能
1	$K_1, C_1$ (上限)
2	均等に内挿
3	
4	
5	$K_5, C_5$ (下限)



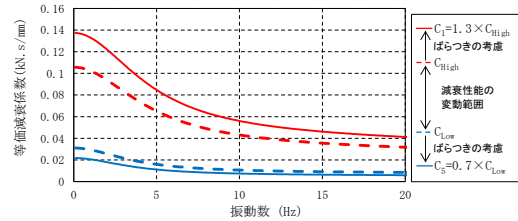
(H-1) 等価剛性 (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)

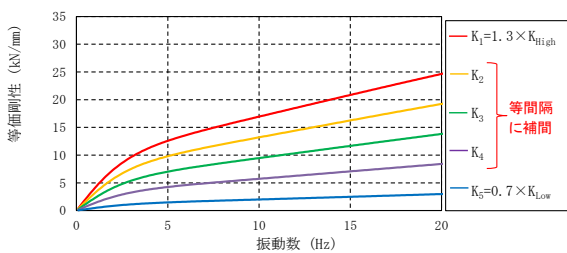


(V-1) 等価剛性 (鉛直方向)

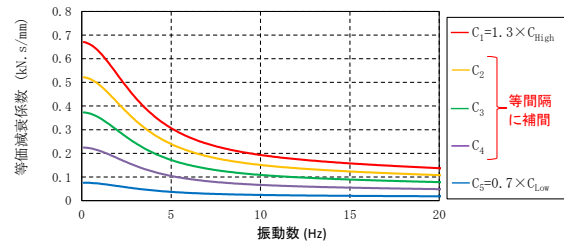


(V-2) 等価減衰係数 (鉛直方向)

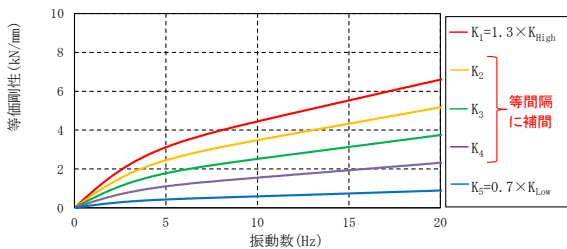
第3-14図 性能試験による減衰性能の上限と下限の設定 (中型の例)



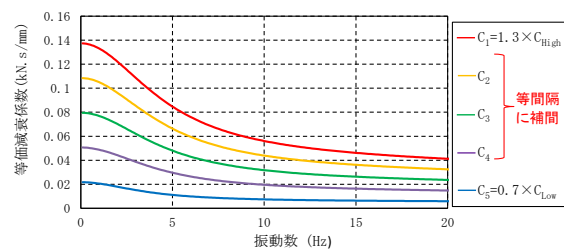
(H-1) 等価剛性 (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)



(V-1) 等価剛性 (鉛直方向)



(V-2) 等価減衰係数 (鉛直方向)

第3-15図 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)



### (3) 三軸粘性ダンパの解析モデルの追加

三軸粘性ダンパをモデル化した4パラメータ Maxwell モデルを配管系の地震応答解析モデルに追加することにより、三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析モデルを作成する。

#### 3.2.4 地震応答解析手法

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適用できず、時刻歴応答解析を適用する(添付資料3-9参照)。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、別紙-7添付資料-6「最新知見として得られた減衰定数の採用について」に示す配管系の減衰定数を適用する。

スペクトルモーダル解析では、床応答加速度は地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動を考慮して周期方向に±10%拡幅した設計用床応答曲線を用いている。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 Code SECTION III, DIVISION1-NONMANDATORY APPENDIX N (ARTICLE N-1222.3 Time History Broadening)に規定された手法等により検討を行う(添付資料1-3参照)。

#### 3.2.5 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、三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。

また、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、三軸粘性ダンパは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。

#### 3.2.6 配管系評価

三軸粘性ダンパを設置する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ため、応力評価等における許容限界は第3-7表のとおりとする。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。

第3-7表 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 <sub>d</sub> 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 BAS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 BAS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 <sub>d</sub> 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 IVAS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 IVAS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 <sub>d</sub> 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 BAS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 BAS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

### 3.3 耐震評価結果

#### 3.3.1 評価条件

##### (1) 評価対象配管モデル

外側主蒸気隔離弁から高圧タービン、復水器までの配管系を対象としてS d機能維持評価結果を示す。配管モデルを第3-16図に示す。当該配管モデルには三軸粘性ダンパを37箇所設置予定である。

三軸粘性ダンパを設置する前の配管モデルの固有周期及び刺激係数を第3-8表に示す。また、主要な振動モードのモード図を第3-17図に示す。

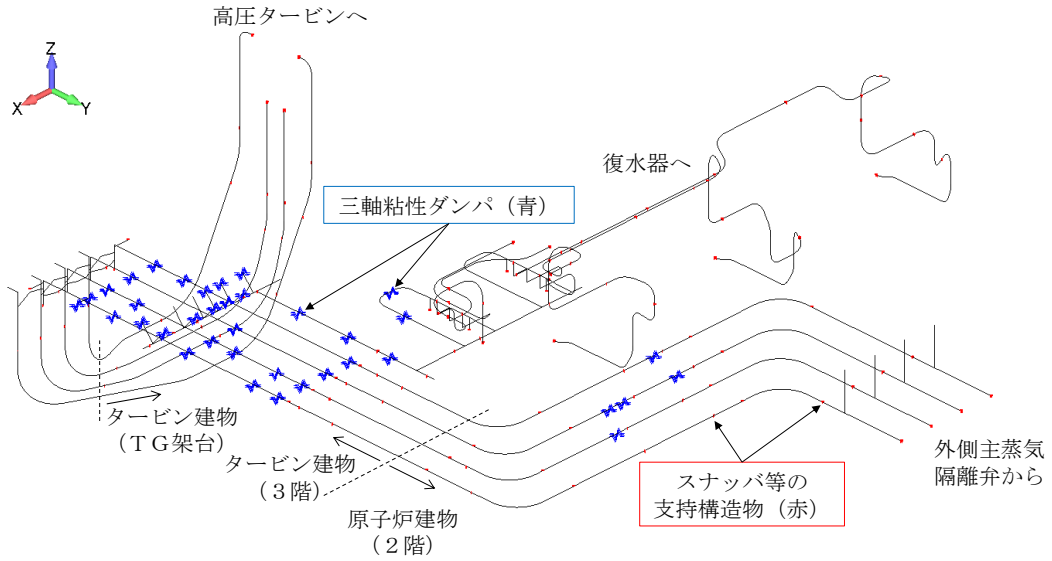
##### (2) 入力地震動

弾性設計用地震動S d-1, S d-D, S d-F 1, S d-F 2, S d-N 1, S d-N 2のうち最も評価上厳しいと考えられるS d-1を入力地震動とする。なお詳細設計段階においては、弾性設計用地震動の6波を考慮して、耐震評価を実施する。S d-1の加速度時刻歴及び床応答スペクトルを第3-18図～第3-21図に示す。評価対象配管は原子炉建物及びタービン建物に支持されるため、各支持点（三軸粘性ダンパ及びスナッパ等の支持構造物）に対応した各建物の加速度時刻歴を入力する。なお、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せを考慮して、解析は三方向同時入力により実施する。

#### 3.3.2 評価結果

三軸粘性ダンパを含む配管系の評価結果を第3-9表～第3-12表に、配管の最大応力発生箇所を第3-22図に示す。三軸粘性ダンパを含めた配管系の構造強度評価が成立し、三軸粘性ダンパの応答値が解析上の前提条件の範囲内であることを確認した。なお、三軸粘性ダンパ以外の支持構造物については算出された荷重に基づいて設計を行う。また、地震応答解析は5段階の減衰性能を設定して実施することから、5段階の減衰性能と配管系の地震応答についてまとめた結果を添付資料3-10に示す。

三軸粘性ダンパの配管取付部の構造等の詳細については、添付資料3-11に示す。

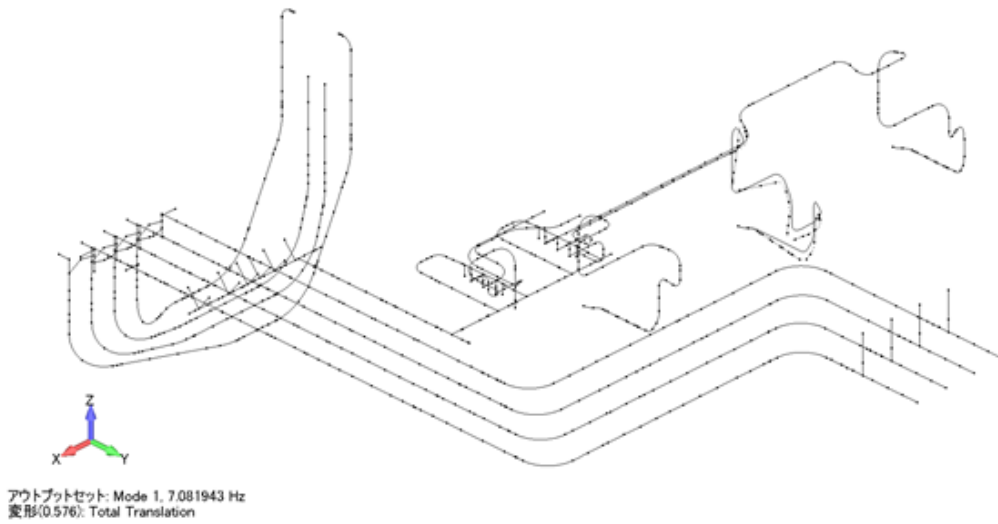


第3-16図 評価対象の配管モデル

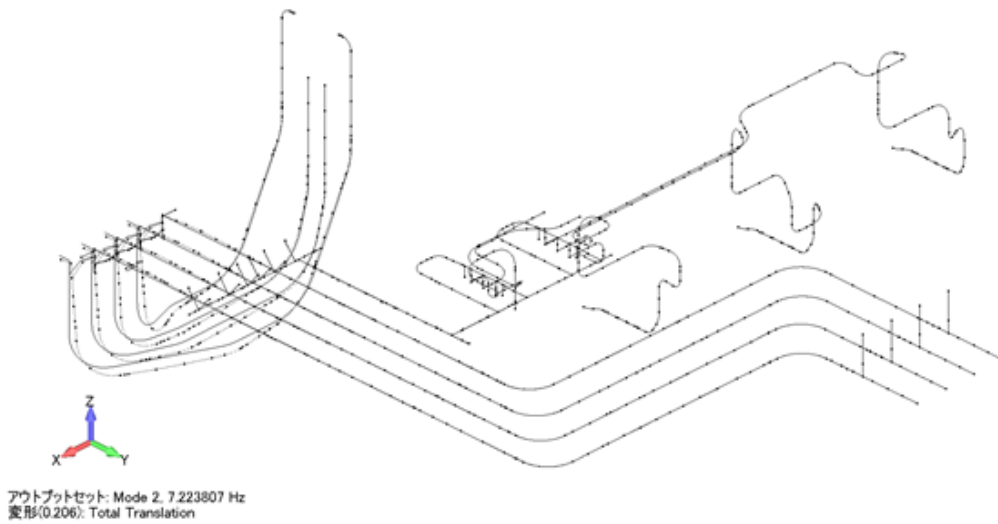
第3-8表 固有周期及び刺激係数

モード	固有周期(s)	刺激係数 <sup>※1</sup>		
		X方向	Y方向	Z方向
1次	0.141	0.023	0.433	-1.608
2次	0.138	-1.826	6.356	-4.263
3次	0.112	0.726	-0.214	0.053
4次	0.109	6.901	13.153	1.067
5次	0.108	0.684	-0.335	-1.264
6次	0.106	-4.331	1.345	-0.471
7次	0.103	0.765	-0.701	-0.642
8次	0.102	-0.068	0.387	0.273
65次	0.050	3.859	1.941	-0.146

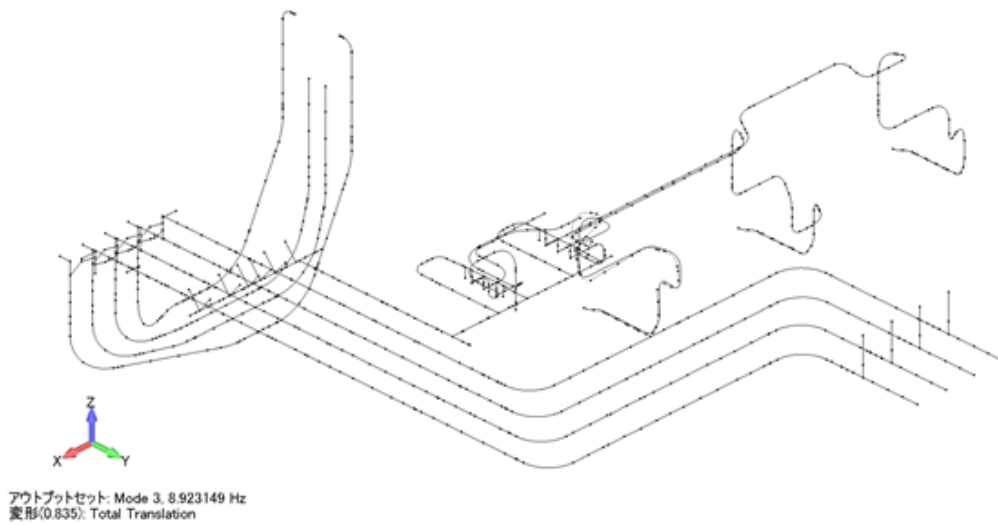
※1：モード質量が1となるように固有ベクトルを正規化して算出



(a) 1次モード

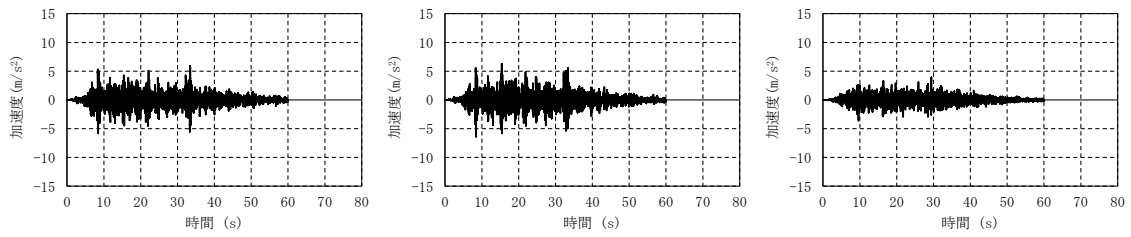


(b) 2次モード



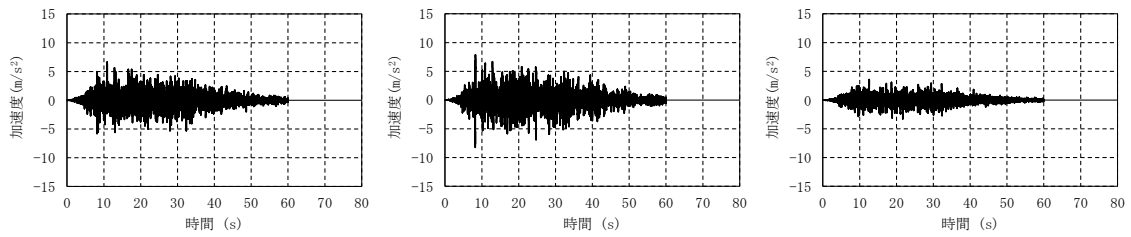
(c) 3次モード

第3-17図 振動モード図



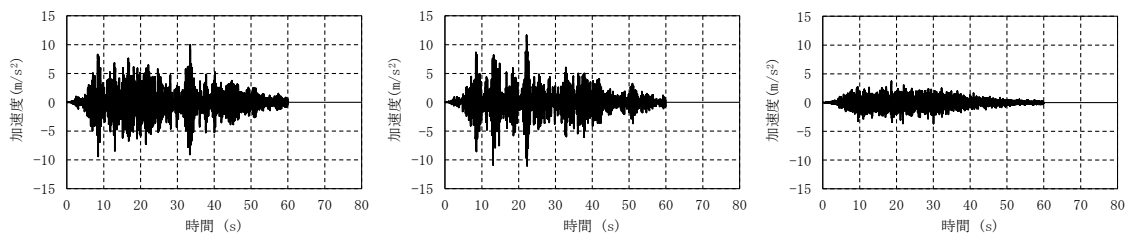
(a) NS方向 (b) EW方向 (c) 鉛直方向

第3-18図 原子炉建物（2階：EL. 23800）の加速度時刻歴



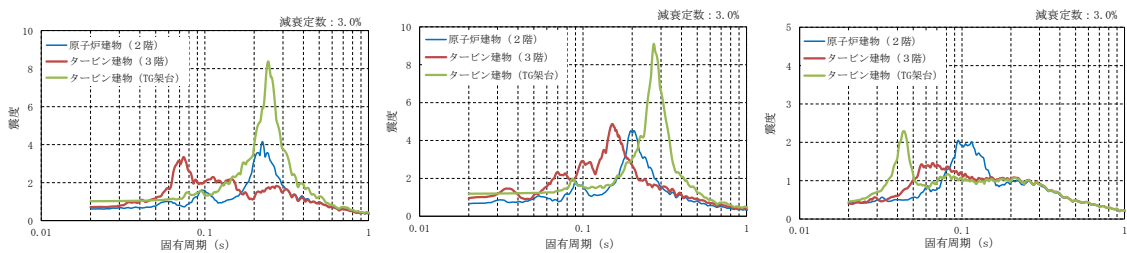
(a) NS方向 (b) EW方向 (c) 鉛直方向

第3-19図 タービン建物（3階：EL. 20600）の加速度時刻歴



(a) NS方向 (b) EW方向 (c) 鉛直方向

第3-20図 タービン建物（TG架台：EL. 20480）の加速度時刻歴



(a) NS方向 (b) EW方向 (c) 鉛直方向

第3-21図 床応答スペクトル

第3-9表 配管の構造強度評価結果

評価項目	発生値	許容限界
一次応力	122 (MPa)	377 (MPa)
一次+二次応力	163 (MPa)	406 (MPa)

第3-10表 三軸粘性ダンパの構造強度評価結果

評価項目		発生値	許容限界
最大荷重 <sup>※1</sup>	水平	117 (kN)	350 (kN)
	鉛直	36 (kN)	140 (kN)
最大変位 <sup>※1</sup>	水平	4.3 (mm)	
	鉛直	2.7 (mm)	

※1：最も厳しい結果を記載

第3-11表 三軸粘性ダンパ取付部（クランプ）の構造強度評価結果

評価項目		発生値	許容限界
最大荷重 <sup>※1</sup>	水平	117 (kN)	156 (kN)
	鉛直	36 (kN)	140 (kN)

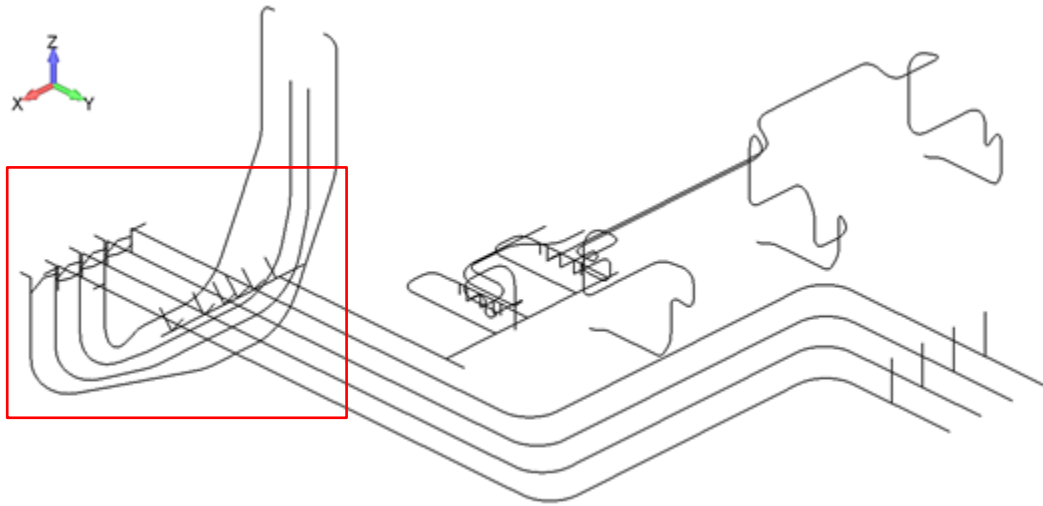
※1：最も厳しい結果を記載

第3-12表 三軸粘性ダンパの応答値と解析上の前提条件の比較

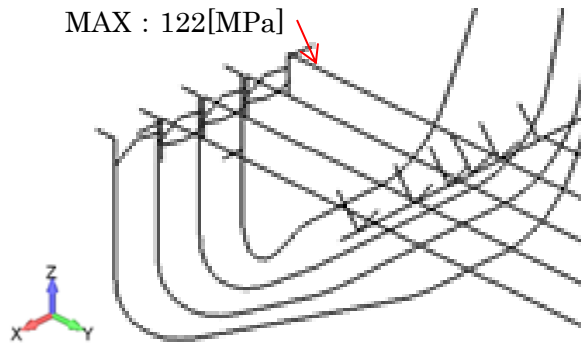
評価項目		発生値	解析条件
最大変位 <sup>※1</sup>	水平	4.3 (mm)	
	鉛直	2.7 (mm)	
累積消費 エネルギー <sup>※1</sup>	水平	12.3 (kJ)	
	鉛直	3.6 (kJ)	

※1：最も厳しい結果を記載

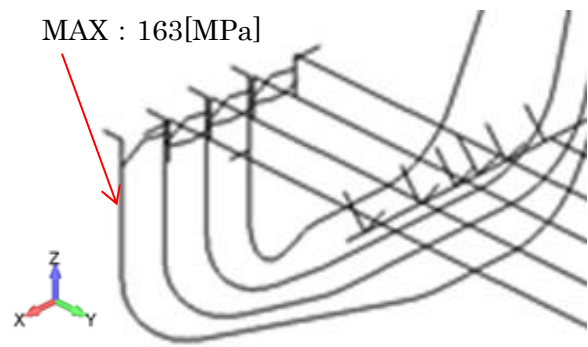
本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



(a) 全体図



(b) 一次応力発生箇所拡大図



(c) 一次+二次応力発生箇所拡大図

第3-22図 配管の最大応力発生箇所



#### 4. 実績との比較

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。その結果、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。既工認実績との差異の確認結果について、詳細は添付資料 1-2 に示す。

また、三軸粘性ダンパについては、海外実績と島根 2 号炉における耐震評価方法を添付資料 3-12 で比較し、海外実績に加えて減衰性能の変動及びばらつきを考慮していることを示した。

制震装置を設置する場合の耐震評価方法について、原子炉施設の耐震設計の体系及び新規制基準適合性審査の実績を踏まえて重点的に検討すべき事項を抽出し、耐震評価方法において考慮していることを確認するため、「耐震設計に係る工認審査ガイド(最終改正 平成 29 年 11 月 15 日, 原規技発第 1711152 号)」に基づき、耐震評価方法の設定にあたって必要な検討を実施していることを確認した。確認の結果を添付資料 1-4 に示す。工認審査ガイドに基づいて抽出した検討事項は、耐震評価方法の設定にあたって考慮されており、追加の検討を要する事項はないことを確認した。

#### 5. まとめ

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。単軸粘性ダンパ及び三軸粘性ダンパの減衰性能の表現方法及びモデル化の考え方について、添付資料 1-5 で比較して示した。また、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踏まえて段階的に設定した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。従って、単軸粘性ダンパ及び三軸粘性ダンパのモデル化は妥当であり、減衰性能の変動及びばらつきを適切に考慮していることから、地震応答解析手法として妥当と考える。

設定した耐震評価方法に基づき、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耐震評価を実施し、構造成立性を確認した。

## 【参考文献】

- (1) 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
- (2) 三方向粘性ダンパを適用した機器・配管系の地震応答解析法に関する確性試験 報告書（平成 28 年 3 月） 一般財団法人 発電設備技術検査協会
- (3) I. Tamura, M. Kuramasu, “A STUDY ABOUT THE EFFECTIVENESS OF SEISMIC SAFETY IMPROVEMENT BY INSTALLING VISCOELASTIC DAMPERS AT PIPING SYSTEMS AND COMPONENTS,” Proceedings of ICAPP 2017, Fukui and Kyoto (Japan), April 24–28, 2017.
- (4) V. Kostarev, I. Tamura, M. Kuramasu, F. Barutzki, P. Vasiliev, Y. Enomoto, Y. Namita, S. Okita, Y. Sato, “Shaking Table Test of a Piping System with Viscoelastic Dampers Subjected to Severe Earthquake Motions,” ASME Pressure Vessels & Piping Conference, Vancouver, British Columbia, Canada, July 17–21, 2016, PVP2016–64004 (2016).
- (5) I. Tamura, M. Kuramasu, F. Barutzki, D. Fischer, V. Kostarev, A. Berkovsky, P. Vasiliev, T. Inoue, S. Okita, Y. Namita, “Dynamic Analysis of NPP Piping System and Components with Viscoelastic Dampers Subjected to Severe Earthquake Motions,” ASME Pressure Vessels & Piping Conference, Vancouver, British Columbia, Canada, July 17–21, 2016, PVP2016–64029 (2016).
- (6) 免震構造設計指針 日本建築学会
- (7) パッシブ制振構造 設計・施工マニュアル 第 2 版 社団法人 日本免震構造協会
- (8) 金子美香, 熊谷仁志, 岡田敬一, “三次元大型振動台と三次元大振幅振動台の開発”, 日本地震工学会論文集第 16 卷, 第 9 号, 2016
- (9) Masaya Aoyama, Toshiaki Itou, Kouji Yamamoto, Hiroki Matsunaga, Ryouta Inoue, Shuhei Kaneko, “Development and Design of System to Control Vibrations due to Human Rhythmic Action of Concert Audiences using Floating Mass Damper,” Proceedings of the 7<sup>th</sup> Structural Engineers World Congress 2019 Architecture and Structure : From Past to Future, Istanbul, Turkey, April 24–26, 2019.

添付資料 1-1 制震装置の減衰性能に影響する検討項目の抽出

制震装置の減衰性能の設定において考慮すべき事項について「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」を参照して第 1-1-1 添表に整理した。各項目について単軸粘性ダンパ及び三軸粘性ダンパの構造、使用条件、性能試験方法等を踏まえて、減衰性能への影響の検討要否を第 1-1-2 添表に整理した。第 1-1-2 添表で検討要となった項目については、制震装置のモデル化にあたって減衰性能への影響を検討する。

第 1-1-1 添表 免震構造の審査手引きの提案における検討項目（1/3）

項目	内容	記載箇所
①制震装置に応じた減衰性能の設定	制震装置に応じた減衰性能の設定方法について検討する。	【本文】 5. 4. 8(機器免震に係る考慮事項)(2) 免震装置の構造に起因する応答特性の考慮 p. 31 【解説】 5. 4. 8(機器免震に係る考慮事項)(2)免震装置の構造に起因する応答特性の考慮 p. 38 【審査等のポイント】 5. 4. 8(機器免震に係る考慮事項)(2)免震装置の構造に起因する応答特性の考慮 p. 42
②地震入力方向	地震入力方向による減衰性能の変化について検討する。	【本文】 5. 4. 8(機器免震に係る考慮事項)(1)地震入力方向による免震特性変化の考慮 p. 31 【解説】 5. 4. 8(機器免震に係る考慮事項)(1)地震入力方向による免震特性変化の考慮 p. 38 【審査等のポイント】 5. 4. 8(機器免震に係る考慮事項)(1)地震入力方向による免震特性変化の考慮 p. 42
③使用環境	使用環境を踏まえて減衰性能を設定する。	【本文】 5. 4. 6 p. 30 【解説】 5. 4. 6 p. 33

第1-1-1 添表 免震構造の審査手引きの提案における検討項目 (2/3)

項目	内容	記載箇所
④温度	減衰性能の変化要因として温度による影響を検討する。	<p>【本文】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.31</p> <p>【解説】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○地震時免震機能の変化の考慮 p.36</p> <p>【審査等のポイント】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○地震時免震機能の変化の考慮 p.41</p>
⑤速度	減衰性能の変化要因として速度による影響を検討する。	<p>【本文】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○地震時免震機能の変化の考慮 p.31</p>
⑥振動数	減衰性能の変化要因として振動数による影響を検討する。	<p>【解説】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○地震時免震機能の変化の考慮 p.36</p>
⑦連続加振	作動中の減衰性能の変化について検討する。	<p>【審査等のポイント】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○地震時免震機能の変化の考慮 p.41</p>
⑧経年劣化	経年劣化による減衰性能のばらつきについて検討する。	<p>【本文】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.31</p> <p>【解説】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.35</p> <p>【審査等のポイント】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.41</p> <p>【参考資料-4】</p>

第1-1-1 添表 免震構造の審査手引きの提案における検討項目 (3/3)

項目	内容	記載箇所
⑨製造公差	製造公差による減衰性能のばらつきについて検討する。	<p>【本文】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.31</p> <p>【解説】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.35</p> <p>【審査等のポイント】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.41</p>
⑩据付公差	据付公差による減衰性能のばらつきについて検討する。	<p>【解説】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.35</p> <p>【審査等のポイント】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.41</p>
⑪制震装置の構造上の動作制限	制震装置の構造上、動作に影響を与える機構等があれば、その影響を検討する。	<p>【解説】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震装置変位防止用ストッパー、台座、擁壁、塵埃防止カバー、結露に対する免震機能の変化の考慮 p.36</p>
⑫地震以外の外的事象	地震以外の外的事象による減衰性能への影響を検討する。	<p>【本文】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○地震以外の津波や風等外的事象に対する免震機能の変化の考慮 p.31</p> <p>【解説】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○地震以外の津波や風等外的事象に対する免震機能の変化の考慮 p.36</p> <p>【審査等のポイント】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○地震以外の津波や風等外的事象に対する免震機能の変化の考慮 p.42</p>

第1-1-2添表 減衰性能への影響の検討項目の抽出

項目 <sup>※1</sup>		三軸粘性ダンパ		三軸粘性ダンパ	
要否	理由	要否	理由	要否	理由
①制震装置に応じた減衰性能の設定	—	—	単軸粘性ダンパの性能試験結果を踏まえて減衰性能を適切にモデル化する。	—	三軸粘性ダンパの性能試験結果を踏まえて減衰性能を適切にモデル化する。
②地震入力方向	—	—	単軸粘性ダンパは、伸縮方向にのみ動作することから、この方向に加振して減衰性能を取得する。	○	三軸粘性ダンパは、水平方向は回転対称な構造であり方向による減衰性能の違いはないが、水平方向及び鉛直方向では動作機構が異なるためそれぞれ性能試験を実施して減衰性能を取得する。また、三軸に動作するものであることから、水平・鉛直同時加振による減衰性能への影響を確認する。
	③使用環境	—	屋外で使用するため、使用環境温度の変化は小さい。また、減衰性能に対する温度の影響は小さいことを試験により確認済みである。(添付2-2参照)	○	屋内の使用環境温度による減衰性能への影響を確認する。
④経年劣化	—	—	屋外で使用するため放射線の影響を受けない。	○	放射線による減衰性能への影響を確認する。
	⑤条件	—	化学的に安定な粘性体を使用しており、減衰性能の劣化は生じない。単軸粘性ダンパは10年以上の継続使用の実績がある。	—	化学的に安定な粘性体を使用しており、減衰性能の劣化は生じない。三軸粘性ダンパは10年以上の継続使用の実績がある。
⑥振動数	○	○	振動数による減衰性能への影響を確認する。	—	三軸粘性ダンパの減衰性能は振動数依存性を有することから、この振動数特性を適切にモデル化する。
⑤速度	—	—	単軸粘性ダンパは非線形の挙動を示すことから、減衰性能は速度と抵抗力の関係として把握し、これを適切にモデル化する。	○	速度(振幅) <sup>※2</sup> による減衰性能への影響を確認する。
⑦連続加振	○	○	連続加振による減衰性能への影響を確認する。	○	連続加振による減衰性能への影響を確認する。
ばらつき	⑨製造公差	○	製造公差による減衰性能のばらつきが生じる。	○	製造公差による減衰性能のばらつきが生じる。
	⑩据付公差	—	単軸粘性ダンパはオリアフイス部を粘性体が移動する際の流動抵抗により減衰性能を発揮するものであるため、ピストン位置による減衰性能の変化は小さい。また、据付時にシムによりピストン位置を調整するため、据付公差は小さい。	○	据付公差による減衰性能のばらつきが生じる。
⑩制震装置の構造上の動作制限	—	—	変位防止用ストッパー、台座、擁壁、塵埃防止カバー等の制震装置の動作を制限するものは設置しておらず、塵埃防止カバーにあたる保護スリーブは柔軟性を有しておりピストンの動作に影響するものではないため、減衰性能に影響はない。また、屋内で使用し、使用環境において結露は生じない。	—	変位防止用ストッパー、台座、擁壁等の制震装置の動作を制限するものは設置しておらず、塵埃防止カバーにあたる保護スリーブは柔軟性を有しておりピストンの動作に影響するものではないため、減衰性能に影響はない。また、屋内で使用し、使用環境において結露は生じない。
⑩地震以外の外的事象	—	—	津波対策の実施により津波の敷地内への流入は防止しており、津波による減衰性能への影響を考慮する必要はない。なお、シリンダは密閉構造であるため、雨水の影響はない。また、単軸粘性ダンパは円筒形状であり、風及び積雪により受ける荷重は小さく、動作への影響はない。	—	屋内で使用するため、津波、風、積雪等の外的事象による減衰性能への影響はない。

※1：第1-1-2添表内の各項目番号は、第1-1-1添表内の各項目番号に対応している。

※2：三軸粘性ダンパの減衰性能は振動数に応じて表現しており、ある振動数において加振速度を変更することは加振振幅を変更することにより減衰性能の速度依存性を把握する。

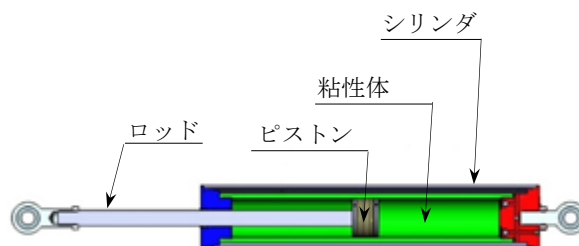
## 添付資料 1-2 既工認実績のある制震装置との差異の整理

### 1. はじめに

取水槽ガントリクレーンに設置する単軸粘性ダンパ及び配管系に設置する三軸粘性ダンパと既工認実績である島根 2 号炉排気筒に設置した制震装置（単軸粘性ダンパ）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する。

### 2. 島根 2 号炉の排気筒で実績のある制震装置について

島根 2 号炉の排気筒で適用実績のある単軸粘性ダンパについて，概要を以下に示す。この単軸粘性ダンパは，粘性体が充填されたシリンダとピストンにより構成され，シリンダ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生じる抵抗力を用いるものである。単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。単軸粘性ダンパの外観及び構造を第 1-2-1 添図に示す。また，単軸粘性ダンパの仕様を第 1-2-1 添表に示す。



第 1-2-1 添図 島根 2 号炉の排気筒に設置した単軸粘性ダンパの外観及び構造

第 1-2-1 添表 単軸粘性ダンパの仕様

全長 (mm)	外径 (mm)	質量 (kg)	許容荷重 (kN)	許容変位 (mm)
1350	165	86	144	300

### 3. 今回適用する制震装置と既工認実績のある制震装置の差異

取水槽ガントリクレーンに設置する単軸粘性ダンパ及び配管系に設置する三軸粘性ダンパと島根 2 号炉排気筒の単軸粘性ダンパを比較し，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。結果を第 1-2-2 添表及び第 1-2-3 添表に示す。その結果，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。

第1-2-2 添表 適用実績のある制震装置との差異の整理（単軸粘性ダンパ）

	単軸粘性 ダンパ 【島根2号 炉排気筒】	単軸粘性 ダンパ 【取水槽ガ ントリクレ ーン】	差異	検討内容
適用対象	排気筒	取水槽ガ ントリクレ ーン	○	適用対象のモデル化の方 法を検討（2.1.3 参照）
環境条件	屋外	屋外	—	—
制震 装置	単軸線形 タイプ	単軸非線形 タイプ	○	制震装置のモデル化の方 法を検討（2.2.3 参照）
解 析	制震 装置 モデル	Maxwell モデル	—	—
	解析 手法	時刻歴 応答解析	—	—

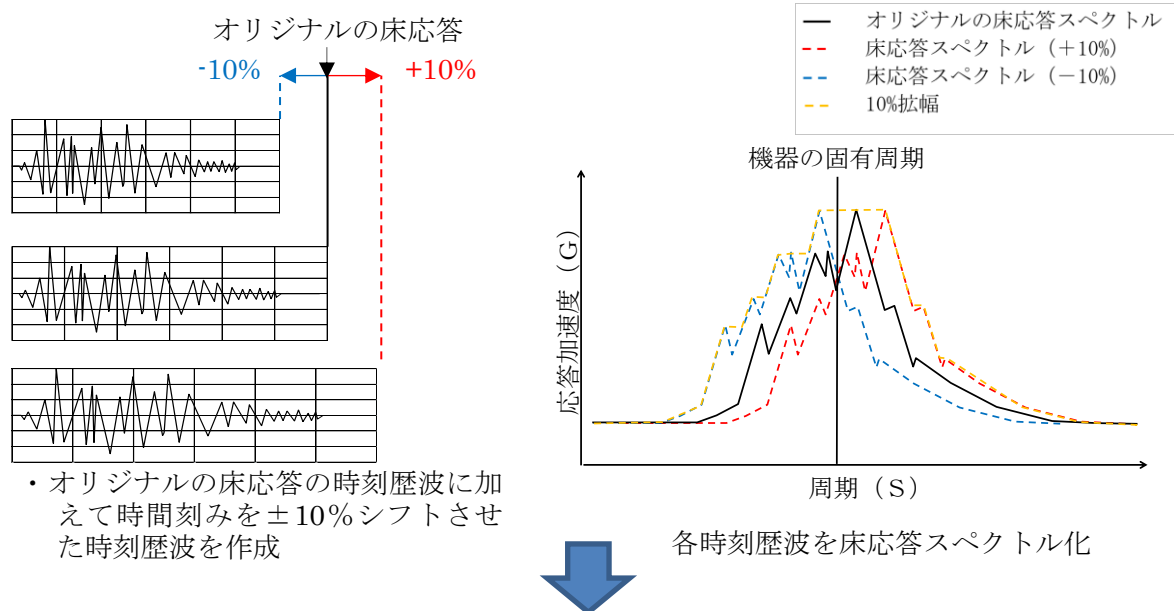
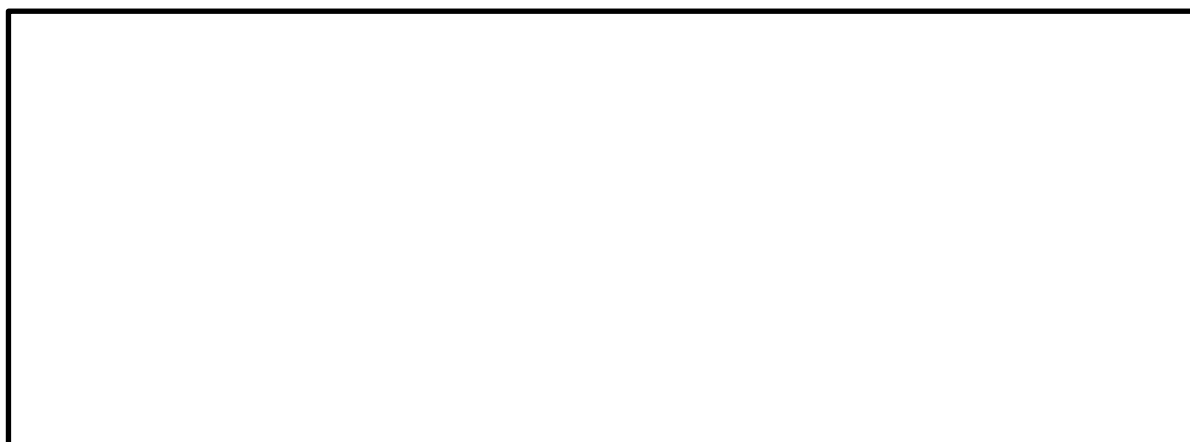


第1-2-3 添表 適用実績のある制震装置との差異の整理（三軸粘性ダンパ）

	単軸粘性 ダンパ 【島根2号 炉排気筒】	三軸粘性 ダンパ 【配管系】	差異	検討内容
適用対象	排気筒	配管系	○	適用対象のモデル化の方法を検討（3.1.3 参照）
環境条件	屋外	屋内	○	屋内の環境条件による制震装置の減衰性能への影響を検討（3.2.1 参照）
制震装置	単軸線形 タイプ	三軸非線形 タイプ	○	制震装置のモデル化の方法を検討（3.2.3 参照）
解析	制震装置 モデル	Maxwell モデル (4パラメータ)	—	—
	解析 手法	時刻歴 応答解析	—	—

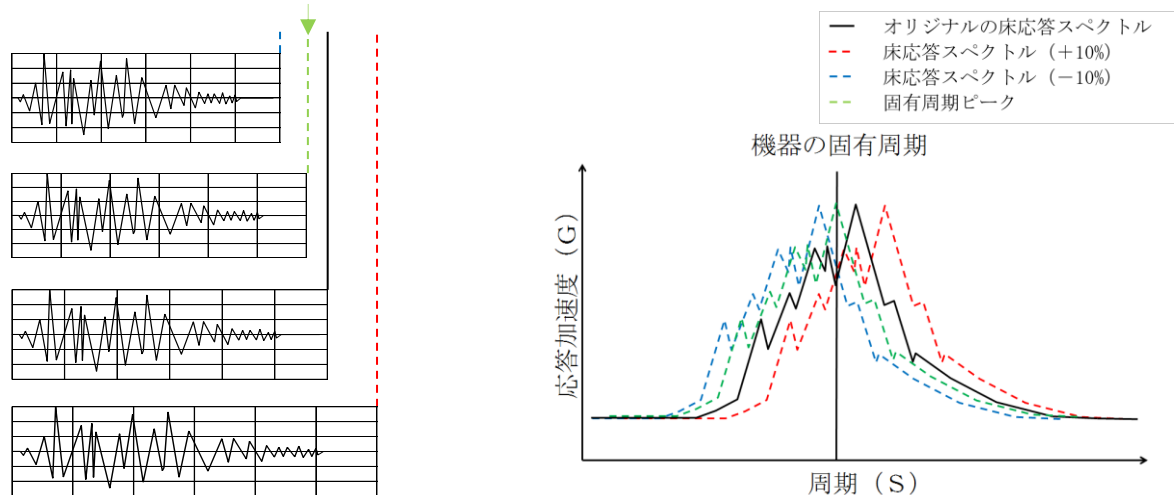
添付資料 1-3 Time History Broadening の概要

ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION III, DIVISION 1—NONMANDATORY APPENDIX N (ARTICLE N-1222.3 Time History Broadening) より引用



- オリジナルの床応答の時刻歴波に加えて時刻刻みを±10%シフトさせた時刻歴波を作成

固有周期と合致するよう調整した時刻歴波



- 機器の固有周期が床応答スペクトルピークの谷間に存在する場合、ピークと合うような時刻歴波を作成し、時刻歴応答解析を実施する。

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。

添付資料 1-4 新規制基準適合性審査の実績等を踏まえた検討事項に対する考察

制震装置を設置する場合の耐震評価方法について、原子炉施設の耐震設計の体系及び新規制基準適合性審査の実績を踏まえて重点的に検討すべき事項を抽出し、耐震評価方法において考慮されていることを確認する。具体的には、「耐震設計に係る工認審査ガイド（最終改正 平成 29 年 11 月 15 日，原規技発第 1711152 号）」（以下「工認審査ガイド」という。）に基づき，耐震評価方法の設定にあたって必要な検討が実施されていることを確認する。

確認の結果を第 1-4-1 添表に示す。工認審査ガイドに基づいて抽出した検討事項は，耐震評価方法の設定にあたって考慮されており，追加の検討を要する事項はないことを確認した。

第 1-4-1 添表 工認審査ガイドに基づく検討事項の耐震評価方法への反映要否 (1/4)

検討事項 工認審査ガイド 4. 機器・配管系 に関する事項	工認審査ガイドに対応した耐震評価方法の設定にあたっての検討内容		追加検討 事項の有無 ○：有 —：無
4. 1 使用材料及び材 料定数	<p>単軸粘性ダンパを設置する取水槽タンククレーン</p> <p>機器・配管系の地震応答解析及び構造設計において，工認審査ガイドに従って適用可能な規格及び基準等を使用する。</p> <p>地震応答解析に用いる材料定数は、地盤の諸定数も含めて材料のばらつきによる変動幅を適切に考慮する。なお、制震装置により機器・配管系に付与される減衰が大きくなるため、影響は軽微であると考えているが、詳細設計段階において ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION III, DIVISION 1 – NONMANDATORY APPENDIX N (ARTICLE N-1222.3 Time History Broadening) に規定された手法等により検討を行い、影響が軽微であることを確認する（添付資料 1-3 参照）。</p>	<p>同左</p> <p>同左</p>	<p>— (考慮済)</p> <p>— (考慮済)</p>

第1-4-1 添表 工認審査ガイドに基づく検討事項の耐震評価方法への反映要否 (2/4)

<p>検討事項                      (工認審査ガイド                      4. 機器・配管系                      に関する事項)</p>	<p>工認審査ガイドに対応した耐震評価方法の設定にあたっての検討内容</p>	<p>三軸粘性ダンパを設置する配管系</p>	<p>追加検討                      事項の有無                      (○：有                      ー：無)</p>
<p>4. 2                      荷重及び荷重の                      組合せ</p>	<p>地震力と地震力以外の荷重は、工認審査ガイドに例示されている規格及び基準等に基づき適切に組み合わせる。</p>	<p>同左</p>	<p>—                      (考慮済)</p>
<p>4. 3                      許容限界</p>	<p>取水槽ガントリクレーンに係る許容限界及び単軸粘性ダンパの許容荷重は、工認審査ガイドに例示されている規格及び基準等に基づき設定する。                      単軸粘性ダンパの許容変位は、その構造、寸法に基づき設定する。</p>	<p>配管、支持構造物に係る許容限界及び三軸粘性ダンパの許容荷重は、工認審査ガイドに例示されている規格及び基準等に基づき設定する。                      三軸粘性ダンパの許容変位は、その構造、寸法に基づき設定する。</p>	<p>—                      (考慮済)</p>
<p>4. 4                      地震応答解析                      4. 4. 1                      地震応答解析手                      法及び地震応答                      解析モデル</p>	<p>地震応答解析手法は、工認審査ガイドに例示されている規格及び基準等並びに新規制審査実績を参考に設定する。                      取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデルは、工認審査ガイドに例示されている規格及び基準等並びに新規制審査実績を参考に設定する。また、単軸粘性ダンパの減衰性能は、性能試験結果に基づいてモデル化し、減衰性能のばらつきを考慮する。                      取水槽ガントリクレーンの水平方向及び鉛直方向の減衰定数については、最新の知見を反映して設定する。詳細は、別紙-7 添付資料-6「最新知見として得られた減衰定数の採用について」に示す。</p>	<p>地震応答解析手法は、工認審査ガイドに例示されている規格及び基準等を参考に設定する。                      配管系の地震応答解析モデルは、工認審査ガイドに例示されている規格及び基準等を参考に設定する。また、三軸粘性ダンパの減衰性能は、性能試験結果に基づいてモデル化し、減衰性能の変動及びばらつきを考慮する。                      配管系の水平方向及び鉛直方向の減衰定数については、最新の知見を反映して設定する。詳細は、別紙-7 添付資料-6「最新知見として得られた減衰定数の採用について」に示す。</p>	<p>—                      (考慮済)</p>

第1-4-1 添表 工認審査ガイドに基づく検討事項の耐震評価方法への反映要否 (3/4)

<p>検討事項                      (工認審査ガイド                      4. 機器・配管系                      に関する事項)</p>	<p>工認審査ガイドに対応した耐震評価方法の設定にあたっての検討内容</p>	<p>追加検討                      事項の有無                      (○：有                      ー：無)</p>
<p>4.4.2                      入力地震力</p>	<p>単軸粘性ダンパを設置する取水槽ガントリクレーン                       入力地震力は、取水槽ガントリクレーン設置位置の応答波を用                      いる。</p>	<p>三軸粘性ダンパを設置する配管系                       入力地震力は、配管系設置位置の応答波を用いる。</p>
<p>4.5                      構造設計手法                      4.5.1                      構造解析手法及                      び構造解析モデ                      ル</p>	<p>構造解析手法及び構造解析モデルは、工認審査ガイドに例示さ                      れている規格及び基準等並びに新規制審査実績を参考に設定す                      る。構造解析モデルの材料定数は、「4.1 使用材料及び材料定                      数」による。</p>	<p>同左                       同左</p>
<p>4.5.2                      水平方向及び鉛                      直方向地震力の                      組合せ</p>	<p>水平2方向及び鉛直方向の動的地震力の組み合わせに関して                      は、三方向同時入力により地震応答解析を行う。</p>	<p>同左                       同左</p>

第1-4-1 添表 工認審査ガイドに基づく検討事項の耐震評価方法への反映要否 (4/4)

検討事項 (工認審査ガイド 4. 機器・配管系 に関する事項)	工認審査ガイドに対応した耐震評価方法の設定にあたっての検討内容		追加検討 事項の有無 ( ○：有 —：無 )
	単軸粘性ダンパを設置する取水槽ガントリクレーン	三軸粘性ダンパを設置する配管系	
4.6 基準地震動 $S_s$ による地震力に対する耐震設計 4.6.1 構造強度	取水槽ガントリクレーンは、基準地震動 $S_s$ による地震力に対して、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ものである。構造強度に関する耐震設計においては、耐震性を確認する上で必要な評価対象部位を選定し、施設に作用する応力等が工認審査ガイドに例示されている規格及び基準等に基づき設定した許容限界を超えていないことを確認する。	三軸粘性ダンパを設置する配管系はBクラス(一部 $S_d$ 機能維持設計)であり、基準地震動 $S_s$ による地震力に対する耐震設計の対象に該当しない。	— (考慮済) 【取水槽ガン トリクレーン】
4.6.2 動的機能	取水槽ガントリクレーンは、基準地震動 $S_s$ による地震力に対して、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ものであり、動的機能維持の対象に該当しない。	三軸粘性ダンパを設置する配管系はBクラス(一部 $S_d$ 機能維持設計)であり、動的機能維持の対象に該当しない。	— (対象外) 【配管系】
4.7 弾性設計用地震動 $S_d$ による地震力・静的地震力に対する耐震設計	取水槽ガントリクレーンは、基準地震動 $S_s$ による地震力に対して、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ものであり、弾性設計用地震動 $S_d$ による地震力及び静的地震力に対する耐震設計の対象に該当しない。	三軸粘性ダンパを設置する配管系はBクラス(一部 $S_d$ 機能維持設計)である。構造強度に関する耐震設計においては、耐震性を確認する上で必要な評価対象部位を選定し、施設に作用する応力等が工認審査ガイドに例示されている規格及び基準等に基づき設定した許容限界を超えていないことを確認する。	— (対象外) 【取水槽ガン トリクレーン】
			— (考慮済) 【配管系】

## 添付資料 1-5 制震装置に応じた減衰性能の表現及びモデル化

本資料では、単軸粘性ダンパと三軸粘性ダンパについて減衰性能の特性を整理し、その違いを踏まえた減衰性能の表現及びモデル化の考え方を示す。

### 1. 制震装置の減衰性能の振動数依存性

単軸粘性ダンパと三軸粘性ダンパについて、振動数を変化させた場合の速度と抵抗力の関係を第 1-5-1 添図に示す。

単軸粘性ダンパは、微小速度の領域を除けば速度の変化に対して抵抗力の変化が小さい。一方、三軸粘性ダンパは、速度と抵抗力がほぼ比例関係とみなすことができる。

また、振動数の変化に対して、単軸粘性ダンパは速度と抵抗力の関係の変化は小さいが、三軸粘性ダンパは速度と抵抗力の関係の変化が大きい。

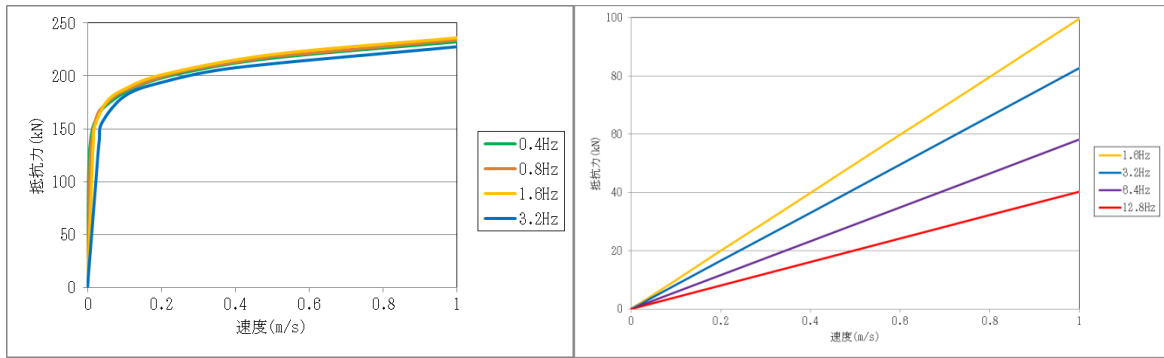
### 2. 単軸粘性ダンパの減衰性能のモデル化

単軸粘性ダンパは、微小速度では速度の変化に対して抵抗力が大きく変化し、それ以降は速度の変化に対して抵抗力の変化が小さいという特性を有している。これは単軸粘性ダンパの抵抗力が速度の 0.1 乗に比例するように設計されているためである。また、単軸粘性ダンパの速度と抵抗力の関係に対して、振動数依存性は小さいことが確認されている。このような特性を踏まえて、単軸粘性ダンパの減衰性能は、速度と抵抗力の関係として表現することとし、解析モデルとしては速度の 0.1 乗に比例するダッシュポットを組み込んだ Maxwell モデルを使用する。Maxwell モデルのパラメータ数は 2 つであるが、第 1-5-2 添図に示すとおり、2 つのパラメータで精度良く減衰性能を表現することができる。

### 3. 三軸粘性ダンパの減衰性能のモデル化

三軸粘性ダンパは減衰性能の振動数依存性が大きいことから、各振動数における等価剛性及び等価減衰係数により減衰性能を表現する。また、解析モデルとしては減衰性能の振動数特性を表現できる Maxwell モデルを使用する。

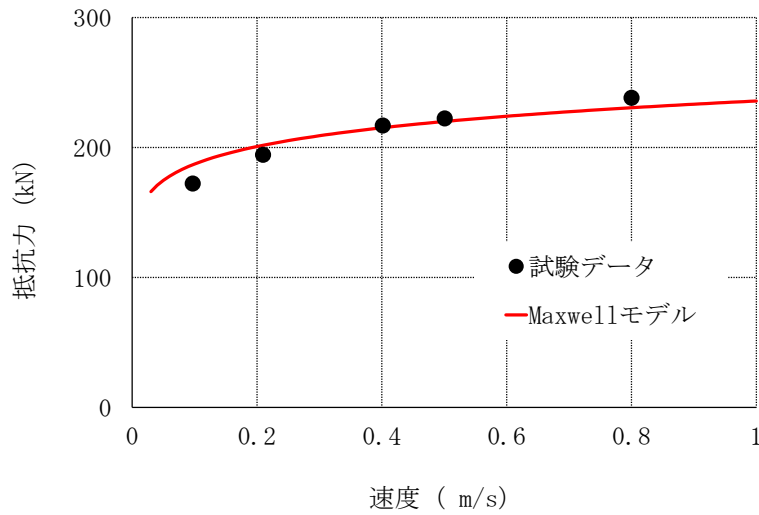
一般的な Maxwell モデルのパラメータ数は 2 つであるが、精度良く振動数特性を表現することを目的として、パラメータ数を増やした 4 パラメータ Maxwell モデルを使用する（第 1-5-3 添図参照）。



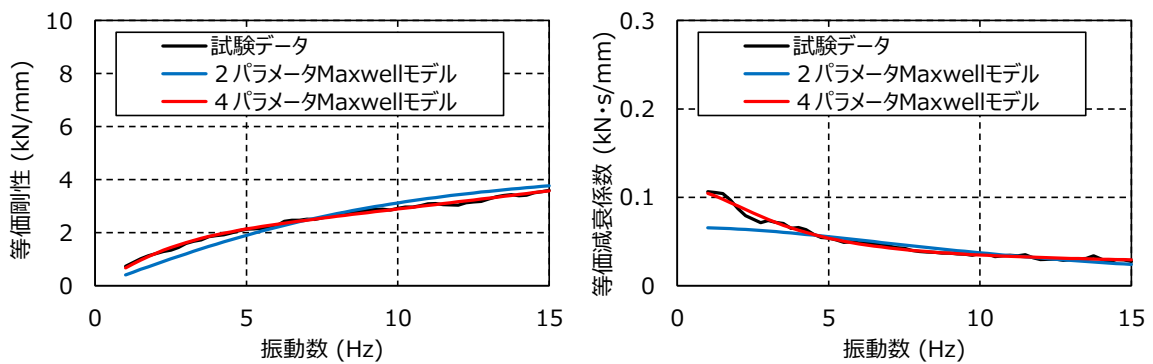
(a) 単軸粘性ダンパ

(b) 三軸粘性ダンパ

第1-5-1 添図 振動数を変化させた場合の速度と抵抗力の関係



第1-5-2 添図 単軸粘性ダンパの減衰性能のモデル化



(H-1) 等価剛性 (水平方向)

(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)

第1-5-3 添図 三軸粘性ダンパの減衰性能のモデル化



添付資料 2-1 取水槽ガントリクレーンに設置する制震装置の選定

取水槽ガントリクレーンに設置する制震装置として単軸粘性ダンパを選定した理由について第2-1-1添表に整理した。

第2-1-1添表 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 又は 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。		△	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。				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。
	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			抵抗力は鉛の剛性、二次剛性で決まる。						
粘性型	粘性ダンパ (非線形)	粘性体の流動抵抗力を利用してエネルギーを吸収するダンパ	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)	粘性体の流動抵抗力を利用してエネルギーを吸収するダンパ			抵抗力は速度に比例し、履歴曲線は楕円に近い。				排気筒への 適用例あり	○	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	オイルの流動抵抗力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	粘性体の流動抵抗力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。			

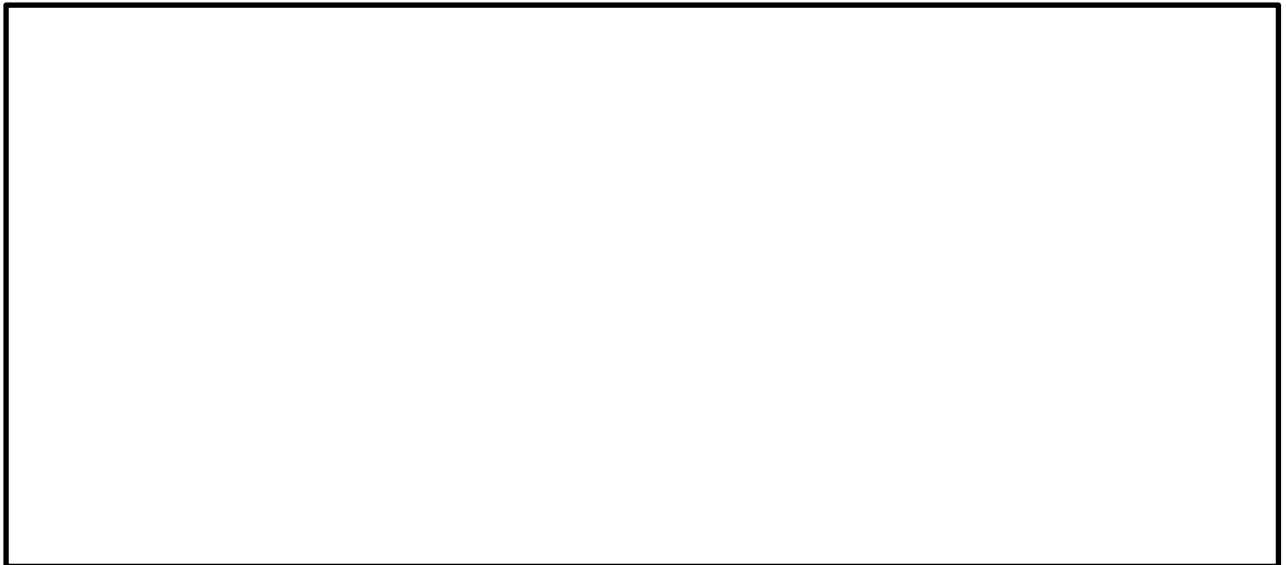
凡例 ◎：適用可能 (有効性が最も高い) ○：適用可能 △：適用するため課題がある ×：適用不可

## 添付資料 2-2 単軸粘性ダンパの性能試験方法

単軸粘性ダンパは、微小速度の領域を除けば速度の変化に対する抵抗力の変化を小さくすることを目的として、速度の 0.1 乗に比例した減衰性能を発揮するように設計されており、性能試験で設計通りの抵抗力が得られることを確認する。また、抵抗力が速度の 0.1 乗に比例するダッシュポットとばねを直列に接続した Maxwell モデルによりモデル化できることを確認する。ここでは、Maxwell モデルのパラメータを決定し、単軸粘性ダンパをモデル化するための性能試験方法について示す。

### 1. 単軸粘性ダンパの性能試験方法

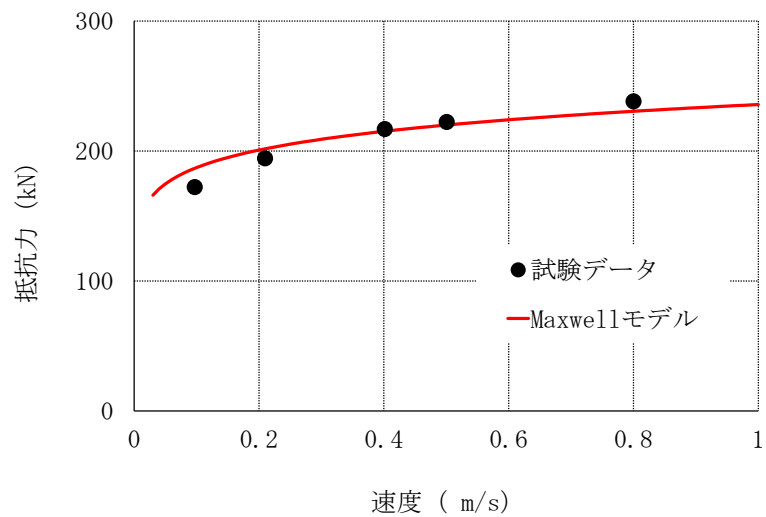
単軸粘性ダンパの性能試験装置の構成を第 2-2-1 添図に示す。単軸粘性ダンパの性能試験では、アクチュエータを用いて単軸粘性ダンパを所定の正弦波により加振し、加振中の変位及び荷重を測定する。性能試験条件を第 2-2-1 添表に示す。加振振動数による単軸粘性ダンパの減衰性能の変動は小さいことを踏まえ、単軸粘性ダンパのストローク 100mm の中で実機使用条件を含む幅広い試験速度 (0.1~0.8m/s) を設定して性能試験を実施する。単軸粘性ダンパ設置前の取水槽ガントリクレーンの固有振動数 (1.03Hz) 及び予備解析における単軸粘性ダンパの入力波形の主要な振動数 (0.8Hz~2.0Hz 程度) を考慮して加振振動数は 1.6Hz とした。また、単軸粘性ダンパの減衰性能は温度の影響を受けない (添付資料 2-3 参照) ことから、性能試験は室温にて実施した。単軸粘性ダンパの性能試験結果を第 2-2-2 添図に示す。測定した速度及び抵抗力に適合するように、Maxwell モデルのパラメータを決定する。パラメータの設定は最小二乗法により実施しており、第 2-2-2 添図に示すとおり、Maxwell モデルによって試験結果として得られた減衰性能を精度良く表現できることを確認した。



第2-2-1 添図 単軸粘性ダンパの性能試験装置の構成

第2-2-1 添表 単軸粘性ダンパの性能試験条件

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



第2-2-2 添図 単軸粘性ダンパの性能試験結果

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。

### 添付資料 2-3 単軸粘性ダンパの特性試験

単軸粘性ダンパの減衰性能に影響する特性を把握するために実施した特性試験の結果を以下に示す。なお、(1) 及び (2) の特性試験は、取水槽ガントリクレーンに設置する単軸粘性ダンパを用いて実施した。また、(3) 温度依存性試験については、温度による減衰性能への影響が生じる場合、その主要な要因は粘性体の物性変化と考えられることから、取水槽ガントリクレーンに設置する単軸粘性ダンパと同タイプ（粘性体が同一）で定格荷重の異なるダンパを用いた。

#### <試験項目>

- (1) 加振振動数を変更した特性試験
- (2) 連続加振試験
- (3) 温度依存性試験

## 1. 加振振動数を変更した特性試験

加振振動数に応じた単軸粘性ダンパの減衰性能への影響を確認するため、以下の試験条件で単軸粘性ダンパの特性試験を実施した。

### 1.1 試験条件

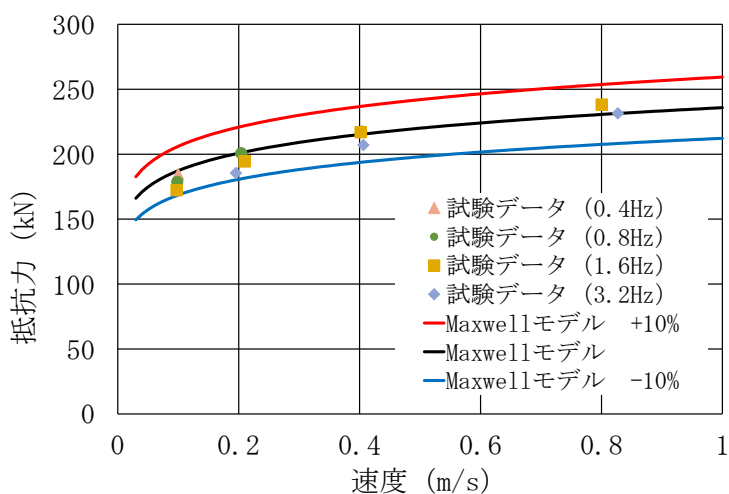
4段階の加振速度を設定し、同一の加振速度で振動数を変更した正弦波により特性試験を実施した。試験条件を第2-3-1添表に示す。

第2-3-1添表 加振振動数を変更した特性試験の試験条件

No.	加振速度 (m/s)	振動数 (Hz)
1	0.1	0.4
2		0.8
3		1.6
4	0.2	0.8
5		1.6
6		3.2
7	0.4	0.8
8		1.6
9		3.2
10	0.8	1.6
11		3.2

### 1.2 試験結果

試験結果を第2-3-1添図に示す。この図には、加振振動数 1.6Hz の時の Maxwell モデルによる計算値をあわせて示しているが、振動数を変更することによる抵抗力の変化は小さく、その変化幅は±10%以内であることが確認された。



第2-3-1添図 加振振動数を変更した単軸粘性ダンパの特性試験結果

## 2. 連続加振試験

連続加振による単軸粘性ダンパの減衰性能への影響を確認するため、正弦波による連続加振試験を実施した。

### 2.1 試験条件

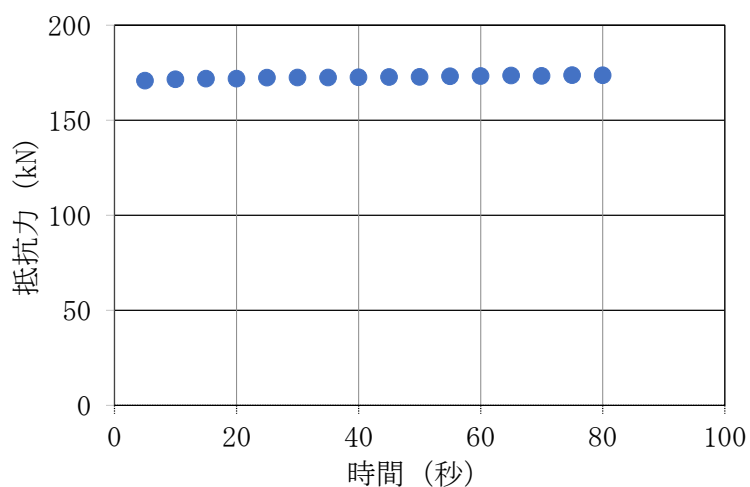
第2-3-2添表に試験条件を示す。試験条件は、取水槽ガントリクレーンにおける単軸粘性ダンパの散逸エネルギーを上回る条件として設定した。

第2-3-2添表 連続加振による試験条件

入力波	振動数 (Hz)	振幅 (mm)	加振時間 (秒)
正弦波	1	10	80以上

### 2.2 試験結果

連続加振試験における抵抗力の時間変化を第2-3-2添図に示す。80秒経過までの連続加振により抵抗力は変化しておらず、連続加振による減衰性能への影響はないことを確認した。



第2-3-2添図 連続加振試験結果

### 3. 温度依存性試験

周囲環境温度による単軸粘性ダンパの減衰性能への影響を確認するため、温度を変化させて単軸粘性ダンパの性能試験を実施した。

#### 3.1 試験条件

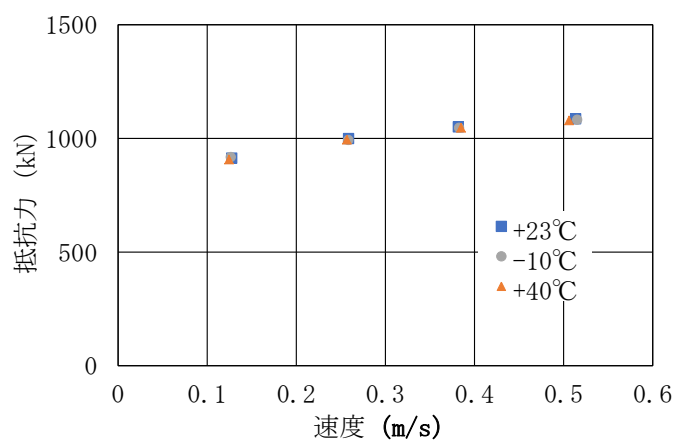
試験条件を第2-3-3添表に示す。屋外に設置することから、温度は-10℃、23℃、40℃の3段階とした。

第2-3-3添表 温度依存性試験の試験条件

No.	振動数 (Hz)	加振速度 (m/s)	温度 (°C)
1	1.0	0.13	-10
2			23
3			40
4		0.26	-10
5			23
6			40
7		0.39	-10
8			23
9			40
10		0.52	-10
11			23
12			40

#### 3.2 試験結果

試験結果を第2-3-3添図に示す。温度が異なっても、抵抗力にほとんど差が見られないことから、単軸粘性ダンパの減衰性能への影響がないことを確認した。



第2-3-3添図 温度依存性試験結果

添付資料 2-4 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手法

本資料では、単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの時刻歴応答解析手法を説明する。

1. 地震応答解析

地震による慣性力を受けるクレーンの運動方程式を以下に示す。単軸粘性ダンパの減衰性能は、ばね（クレーン剛性マトリクス内の要素として考慮）と抵抗力が速度の 0.1 乗に比例するダッシュポットを直列に接続した Maxwell モデルでモデル化する。

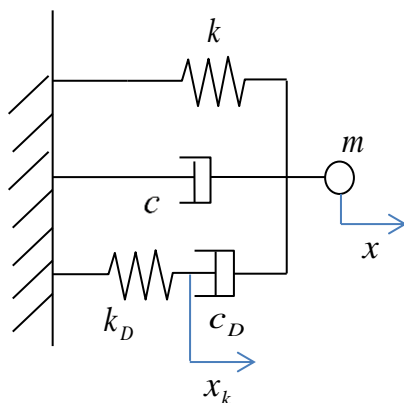
$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} + [C_D]\left[\dot{X}_D^{0.1}\right]\{I\} = -[M]\{I\}\ddot{y} \quad (1)$$

- $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$  : クレーンの質量, 減衰, 剛性マトリクス
- $[C_D]$  : 相対速度の 0.1 乗に比例するダッシュポットの減衰マトリクス
- $[X_D]$  : クレーンの相対変位マトリクス
- $\{x\}$  : クレーンの変位ベクトル
- $\{I\}$  : 単位ベクトル
- $\ddot{y}$  : 地動加速度

2. 個別要素のモデル化

2.1 単軸粘性ダンパの減衰

単軸粘性ダンパを含む系の運動方程式の簡単な例として、1 質点系に単軸粘性ダンパを表す Maxwell モデルを接続した第 2-4-1 添図に示す系の運動方程式を示す。



第 2-4-1 添図 単軸粘性ダンパを接続した 1 質点系のモデル

ここで(1)式の  $\{x\}$  を



$$\{x\} = \begin{pmatrix} x \\ x_k \end{pmatrix} \quad (2)$$

とすると、この系の運動方程式は以下となる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + c_D(\dot{x} - \dot{x}_k)^{0.1} = -m\ddot{y} \quad (3)$$

$$k_D x_k - c_D(\dot{x} - \dot{x}_k)^{0.1} = 0 \quad (4)$$

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では、単軸粘性ダンパの抵抗力の速度に対する非線形性を表す $[c_D][\dot{x}_D^{0.1}]\{I\}$ の項が存在することから、直接積分による時刻歴応答解析を採用する。

## 2.2 取水槽ガントリクレーンの構造減衰

取水槽ガントリクレーンの解析に適用する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、鉛直方向ともに2.0%とし、レイリー減衰を設定する。レイリー減衰は、質量マトリクス及び剛性マトリクスの線形結合により、以下の式で表される。

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (5)$$

$[C]$  : 減衰マトリクス

$[M]$  : 質量マトリクス

$[K]$  : 剛性マトリクス

$\alpha, \beta$  : 係数

係数 $\alpha, \beta$ は、取水槽ガントリクレーンの固有振動数において、適用する減衰定数とレイリー減衰が一致するように以下の式で求める。

$$h = \frac{\alpha}{2\omega_n} + \frac{\beta\omega_n}{2} \quad (6)$$

$h$  : 減衰比

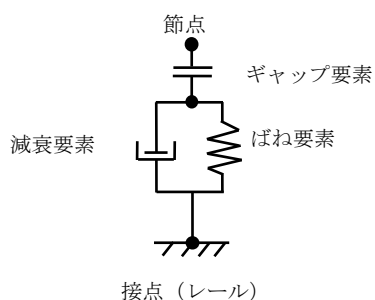
$\omega_n$  : 固有値解析により求められた $n$ 次モードの固有円振動数

## 2.3 車輪部の非線形要素

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り、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。

取水槽ガントリ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。また、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、第 2-4-2 添図に示すように、ギャップ要素と直列に配置する。なお、取水槽ガントリクレーンの車輪部のすべり、浮上り等の非線形挙動のモデル化及び解析手法については、別紙-7 添付資料-2「取水槽ガントリクレーンへの非線形時刻歴解析の適用について」に示す。



第 2-4-2 添図 車輪部の非線形要素

添付資料 2-5 単軸粘性ダンパの減衰性能と取水槽ガントリクレーンの応答の関係

単軸粘性ダンパの減衰性能と取水槽ガントリクレーンの応答の関係を第 2-5-1 添表及び第 2-5-2 添表に示す。

取水槽ガントリクレーンの荷重及び単軸粘性ダンパの最大変位は、減衰性能を変化させても影響は軽微であった。また、単軸粘性ダンパの最大荷重は、減衰性能が高いほど算出値が大きくなる傾向であり、これは単軸粘性ダンパの減衰性能が高くなることで単軸粘性ダンパが負担する荷重が大きくなるためである。

第 2-5-1 添表 取水槽ガントリクレーンの荷重

減衰性能	ガーダ			脚		
	せん断 (kN)	軸力 (kN)	曲げ モーメント (kN・m)	せん断 (kN)	軸力 (kN)	曲げ モーメント (kN・m)
標準性能 +20%	708.8	1303	2043	566.3	1794	3160
標準性能	660.7	1262	2014	512.5	1752	3189
標準性能 -20%	721.3	1335	2220	499.3	1869	3267

第 2-5-2 添表 単軸粘性ダンパの荷重及び変位

減衰性能	最大変位 (mm)	最大荷重 (kN)	最大速度 (m/s)
標準性能+20%	41	260.2	0.44
標準性能	41	218.3	0.47
標準性能-20%	40	173.6	0.44

### 添付資料 3-1 三軸粘性ダンパの低速移動時の拘束力

#### 1. 概要

三軸粘性ダンパは熱膨張のような低速度の運動を拘束しないものであるが、低速移動時の拘束力を定量的に確認するため、低速移動試験を実施した。

#### 2. 試験条件

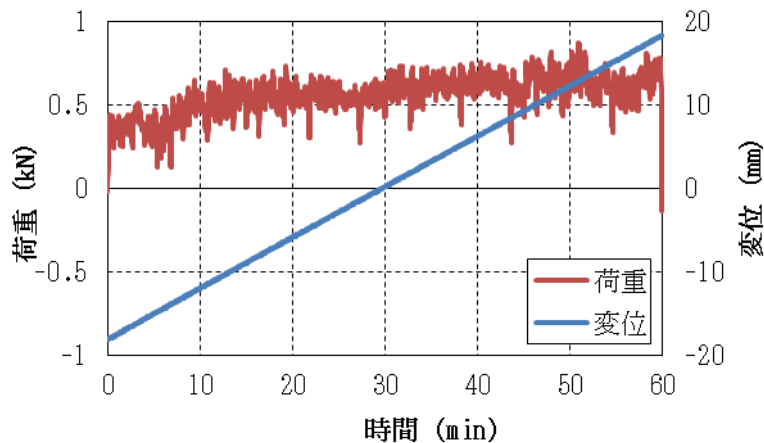
低速移動試験の試験条件を第 3-1-1 添表に示す。熱膨張が大きい主蒸気配管がプラント起動時に約 4.5 時間で通常運転温度まで昇温することから、大型ダンパの水平方向許容変位 72mm と等しい熱変位が約 4.5 時間で生じることを想定した場合の速度 0.005mm/s に余裕をみて、試験条件は 0.01mm/s とした。

第 3-1-1 添表 低速移動試験の試験条件

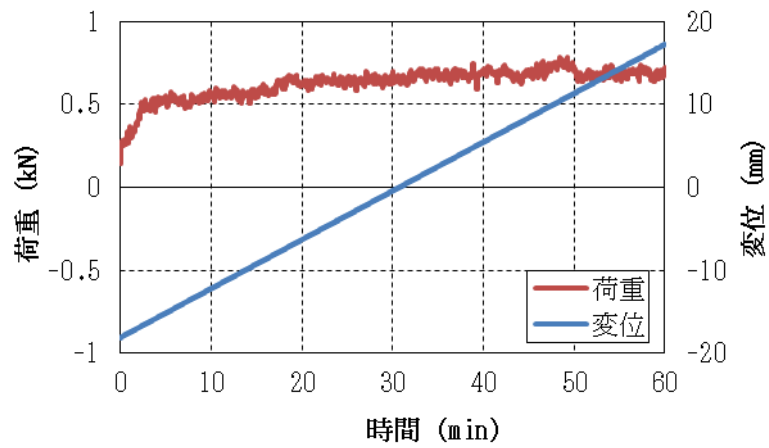
試験体	速度
大型	0.01mm/s

#### 3. 試験結果

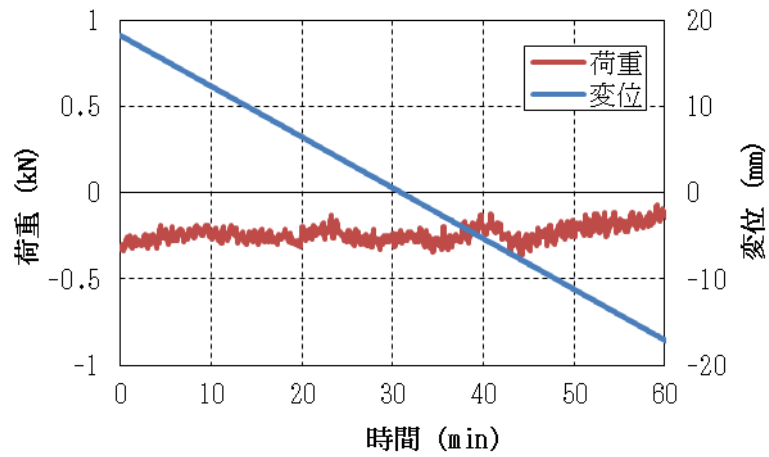
試験結果を第 3-1-1 添図～第 3-1-3 添図に示す。熱膨張を想定した低速移動に対して三軸粘性ダンパの発生荷重は 1kN を下回る十分に小さな値となり、三軸粘性ダンパは熱膨張のような低速度の運動を拘束しないことが確認された。



第 3-1-1 添図 水平方向の低速移動に対する発生荷重



第3-1-2 添図 鉛直方向（ピストンを上げる方向）の低速移動に対する発生荷重



第3-1-3 添図 鉛直方向（ピストンを下げる方向）の低速移動に対する発生荷重

添付資料 3-2 配管系に設置する制震装置の選定

配管系に設置する制震装置として三軸粘性ダンパを選定した理由について第 3-2-1 添表に整理した。

第 3-2-1 添表 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 又は 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	鉛の塑性流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ			抵抗力は鉛の期剛性、二次剛性で決まる。				
粘性型	粘性ダンパ (非線形)	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	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。				排気筒への 適用例あり
	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。	

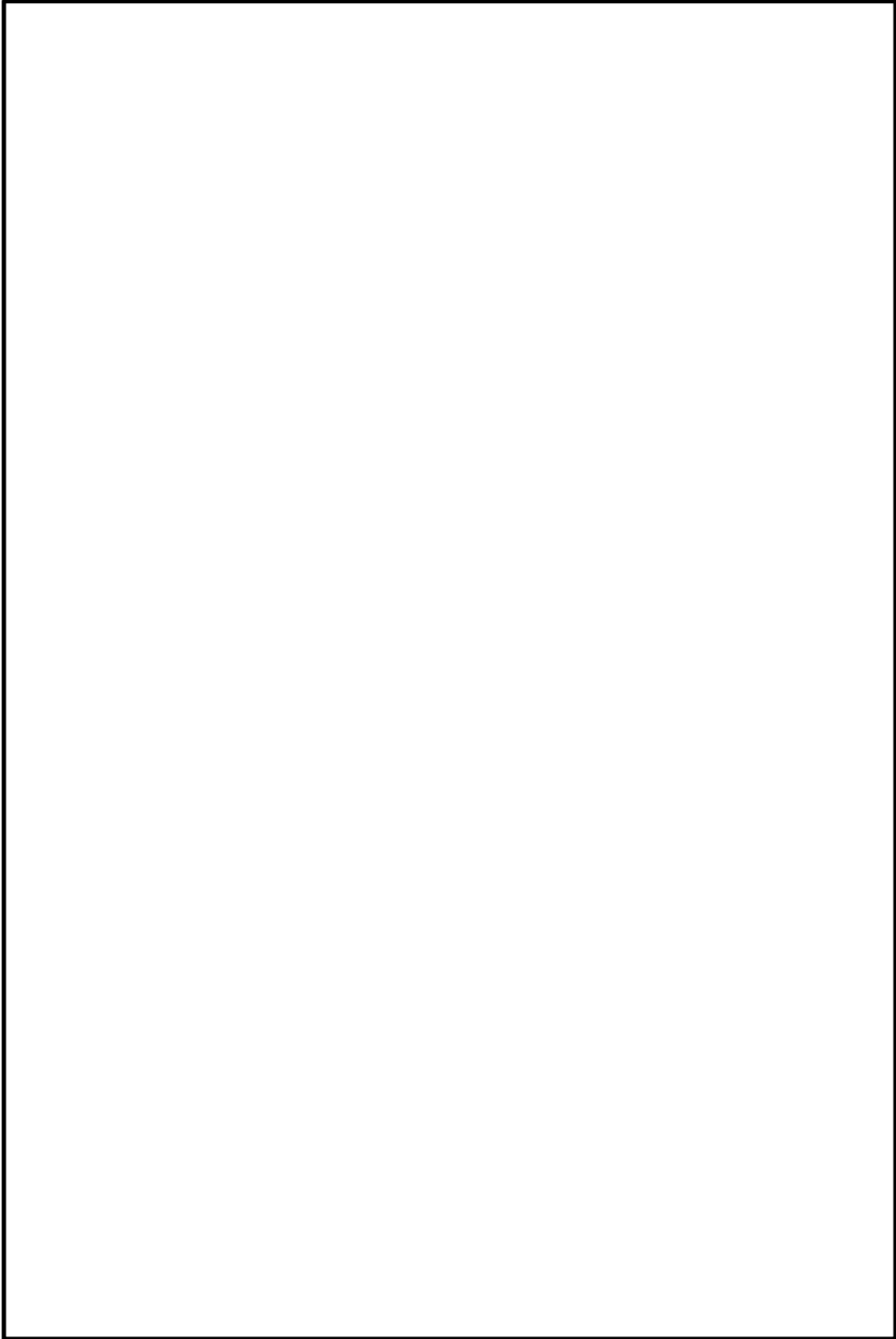
凡例 ◎：適用可能 (有効性が最も高い) ○：適用可能 △：適用するため課題がある ×：適用不可

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

三軸粘性ダンパは ASME Boiler and Pressure Vessel Code において、原子力発電所に設置できる典型的なダンパとして例示されている。三軸粘性ダンパに関する ASME Boiler and Pressure Vessel Code の記載について第 3-3-1 添表に示す。

第 3-3-1 添表 ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION III, DIVISION 1-Subsection NF-Supports 2013 の記載

主な記載箇所			記載内容
ARTICLE NF-1000 INTRODUCTION	NF-1100 SCOPE AND GENERAL REQUIREMENTS	NF-1130 BOUNDARIES OF JURISDICTION	NF-1132 Boundary Between Supports and the Building Structure  NF-1214 Standard Supports
	NF-1200 TYPES OF SUPPORTS AND ATTACHMENTS	NF-1210 TYPES OF SUPPORTS	
NONMANDATORY NF-E DAMPERS, ENERGY ABSORBERS, AND SNUBBERS ARTICLE NF-E-1000		NF-E-1210 DESCRIPTION	ダンパは動的振動を低減させる機能を持つ支持装置として使用され、系に減衰を付加することが記載されている。  三軸粘性ダンパを例として、構造、動作等について記載されている。  ダンパは振動対策や地震対策等に用いられることが記載されている。
		NF-E-1220 FUNCTION  NF-E-1230 APPLICATIONS	
		NF-E-1240 MODELING	ダンパは動的な支持装置であり静的荷重に対しては機能しないことが記載されている。また、機器・配管系にダンパを設置した場合の数値解析法として、モーダル解析及び時刻歴解析が記載されている。



第3-3-1添図 ASME Boiler and Pressure Vessel Code の関連図

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。



添付資料 3-4 三軸粘性ダンパを設置した配管系の加振試験の概要

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、配管系の加振試験を実施し、配管応答の低減効果を確認した。試験の概要を第 3-4-1 添表に示す。

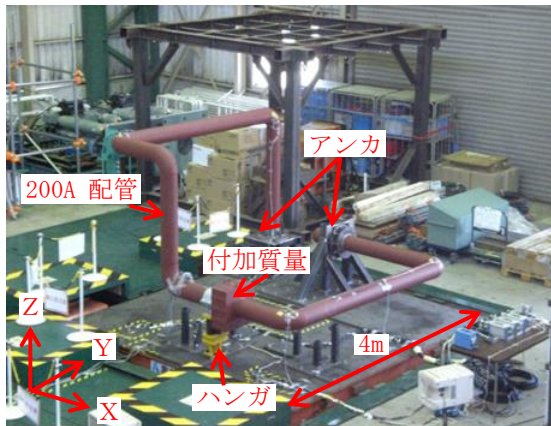
第 3-4-1 添表 試験の概要

実施期間	2014. 6. 9～2014. 6. 13
実施場所	奥村組技術研究所振動台

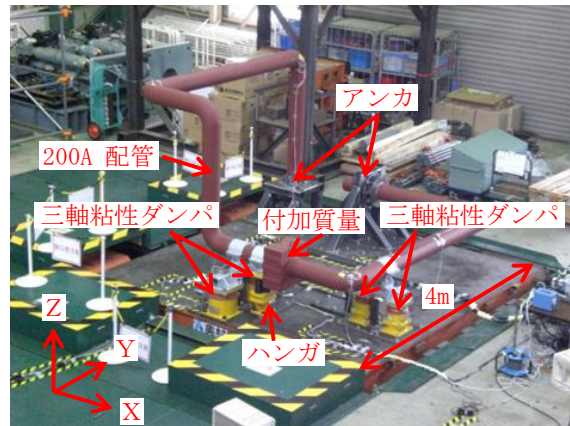
2. 加振試験条件

2.1 試験体

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。配管系試験体を第 3-4-1 添図に、配管系試験体構造図を第 3-4-2 添図に示す。いずれの配管系も配管部は 200A Sch40 の直管（STPT410）及びショートエルボ（STPT410）で構成している。また、配管系は終端 2 箇所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。

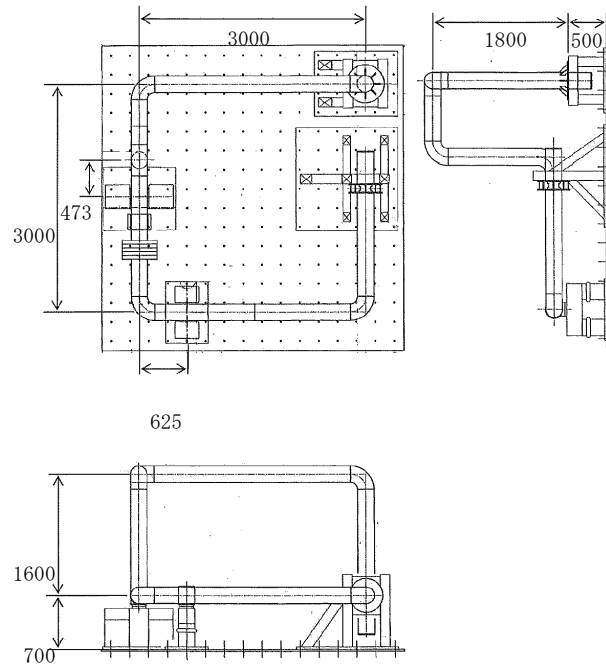


配管系試験体（ダンパ無配管）



配管系試験体（ダンパ設置配管）

第 3-4-1 添図 配管系試験体



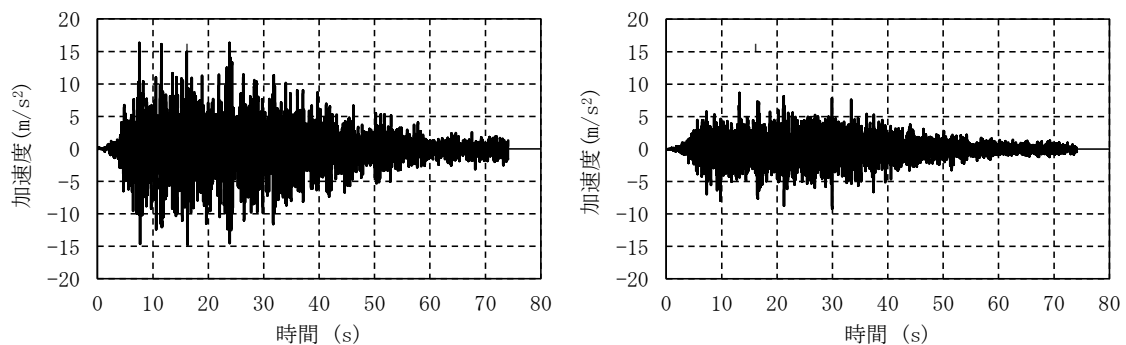
第3-4-2添図 配管系試験体の構造図

## 2.2 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  $S_s - 1$  (600gal) 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地震波を用いた。入力地震波の加速度時刻歴波形を第3-4-3添図に、応答スペクトルを第3-4-4添図に示す。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。

配管系試験体はY方向加振時の応答よりもX方向加振時の応答が大きくなる傾向があるため、水平方向加振はX方向を代表とし、地震波加振はX+Z方向について実施した。

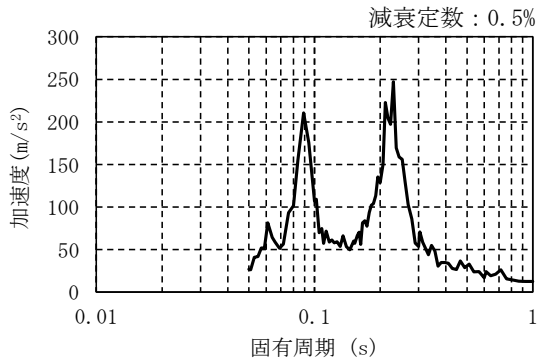
各試験ケースにおける加速度レベルを第3-4-2添表に示す。



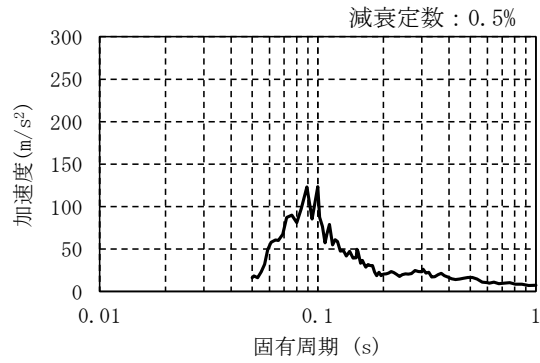
(a) 水平方向 (X方向)

(b) 鉛直方向 (Z方向)

第3-4-3添図 入力地震波の加速度時刻歴波形



(a) X方向



(b) Z方向

第3-4-4添図 入力地震波の応答スペクトル

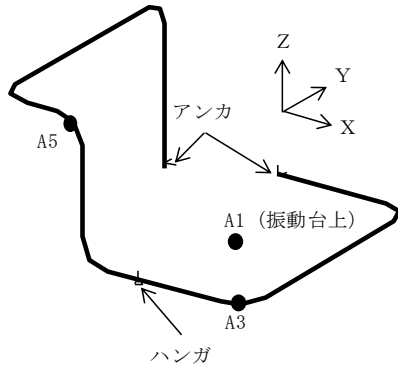
第3-4-2添表 地震波加振の試験ケース

No.	試験体条件	加速度レベル (m/s <sup>2</sup> )	
		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

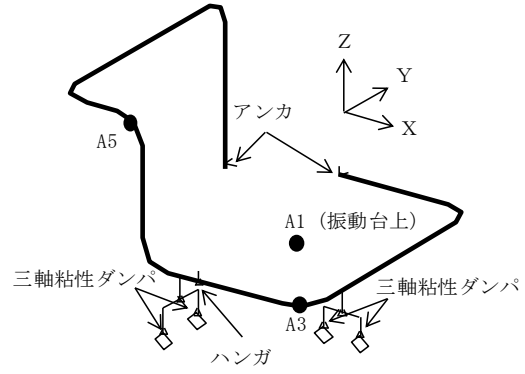
### 3. 加振試験結果

#### 3.1 正弦波掃引試験結果

配管系試験体の概略図を第3-4-5添図に示す。また、ダンパ無配管におけるX方向の正弦波掃引試験結果について、振動台上の加振方向の加速度に対する配管位置の加振方向の応答加速度の振動伝達特性を第3-4-6添図に、カーブフィットにより得られた配管系試験体の固有振動数とモード減衰比を第3-4-3添表に示す。同様にダンパ設置配管での振動伝達特性を第3-4-7添図に、配管系試験体の固有振動数とモード減衰比を第3-4-4添表に示す。第3-4-4添表において、固有振動数とモード減衰比の値は概略値で示す。ダンパ設置配管の場合、配管系の減衰が非常に大きくなり、カーブフィットに対して固有振動数、モード減衰比の感度が低くなるため、モード減衰比を一律20%とした概略値で試験結果とカーブフィットが良好に一致する。これらの結果から、ダンパ無配管では最大で120倍程度の応答倍率を持つ複数のピークがあったが、ダンパ設置配管での応答倍率は最大で4倍程度まで低減されたことを確認した。また、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。

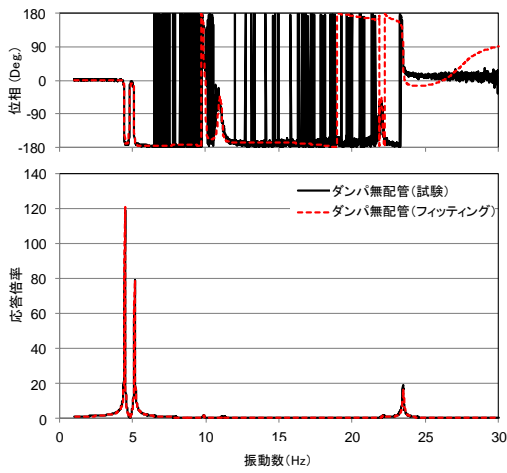


配管系試験体（ダンパ無配管）

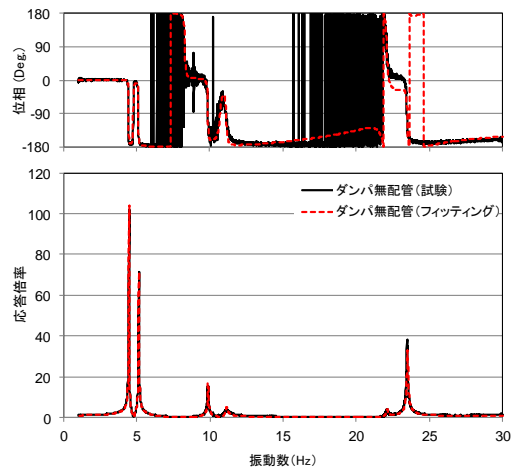


配管系試験体（ダンパ設置配管）

第3-4-5添図 配管系試験体の概略図

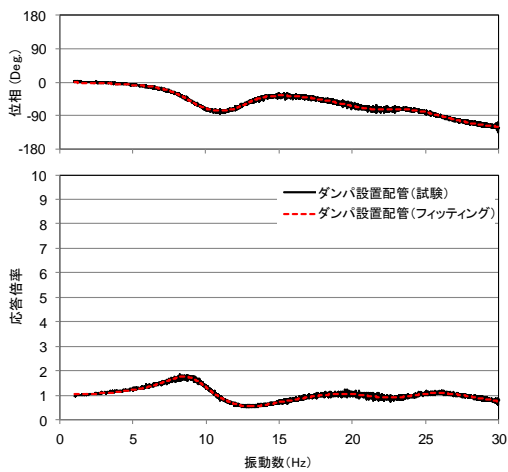


(1) A3X/A1X

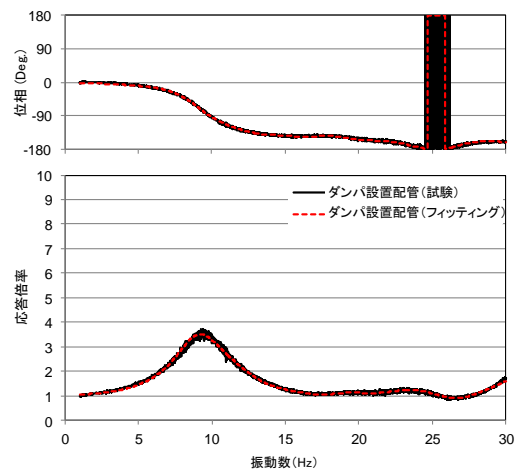


(2) A5X/A1X

第3-4-6添図 振動伝達特性（ダンパ無配管、X方向加振、入力加速度、 $0.5\text{m/s}^2$ ）



(1) A3X/A1X



(2) A5X/A1X

第3-4-7添図 振動伝達特性（ダンパ設置配管、X方向加振、入力加速度  $1.0\text{m/s}^2$ ）

第3-4-3 添表 固有振動数とモード減衰比（ダンパ無配管）

No.	固有振動数(Hz)	モード減衰比(%)
1	4.5	0.22
2	5.1	0.26
3	9.9	0.26
4	11.1	0.55
5	22.1	0.30
6	23.5	0.15

第3-4-4 添表 固有振動数とモード減衰比（ダンパ設置配管）

No.	固有振動数(Hz)	モード減衰比(%)
1	9	20
2	13	20
3	17	20
4	19	20
5	23	20
6	25	20

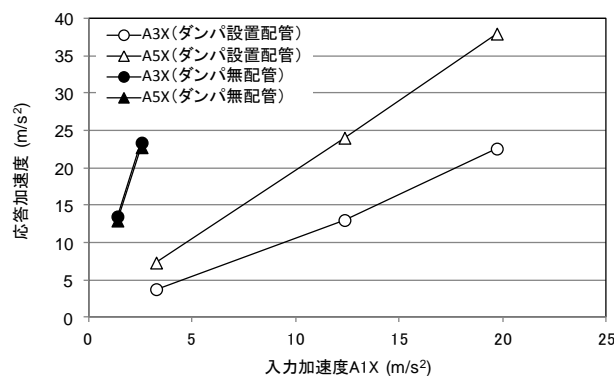
### 3.2 地震波加振の試験結果

入力地震波（X+Z方向）により加振した場合のダンパ無配管とダンパ設置配管の配管応答加速度を第3-4-8添図及び第3-4-9添図に示す。第3-4-8添図では、ダンパ無配管の応答倍率（応答/入力）がA3及びA5の位置で10倍程度であるのに対し、ダンパ設置配管の場合の応答倍率はA3の位置で1倍程度、A5の位置で2倍程度であり、応答がそれぞれ1/10、1/5に低減されている。また、第3-4-9添図では、ダンパ無配管の応答倍率がA3及びA5の位置で10倍程度であるのに対し、ダンパ設置配管の場合の応答倍率はA3の位置で1倍程度、A5の位置で0.7倍程度であり、応答がそれぞれ1/10、7/100に低減されている。

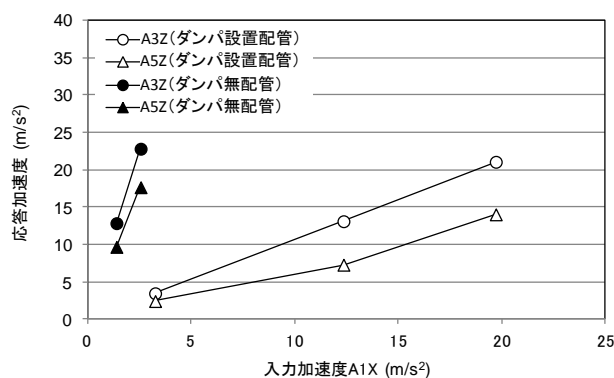
地震波加振試験において応答が低減した要因には、ダンパ設置配管のモード減衰比が大きくなったことに加えて、ダンパ設置配管の固有振動数が剛側に変動することによる影響も含まれる。固有振動数の変動による影響について考察するため、X方向の応答が卓越する1次モードと、Z方向の応答が卓越する2次モードに着目し、ダンパ設置前後における床応答スペクトルの値を第3-4-10添図にて比較した。X方向入力では、1次固有周期における床応答スペクトルの値がダンパ設置前後で0.3倍程度となっており、Z方向入力では、2次固有周期における床応答スペクトルの値がダンパ設置前後で5倍程度となっている。これに対して、地震波加振試験におけるダンパ設置前後の応答倍率の変化はX方向で1/10、1/5であり、床応答スペクトルの低下率よりも大きく低減されている。また、Z方向

では床応答スペクトルの値は大きくなっているにも関わらず応答倍率は 1/10, 7/100 に低減されている。床応答スペクトルの変化よりも大きく応答倍率が低減されていることは、三軸粘性ダンパの設置による減衰の効果と考えられる。

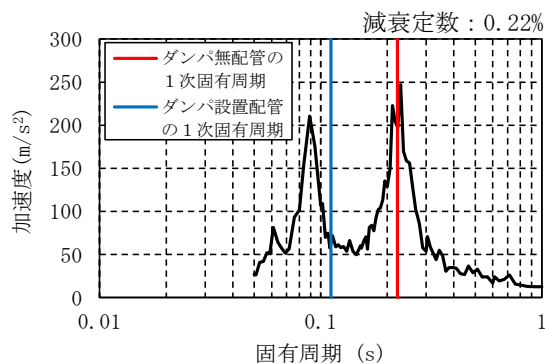
以上より、正弦波掃引試験により確認された三軸粘性ダンパの応答低減効果は、地震波加振試験の結果においても確認された。



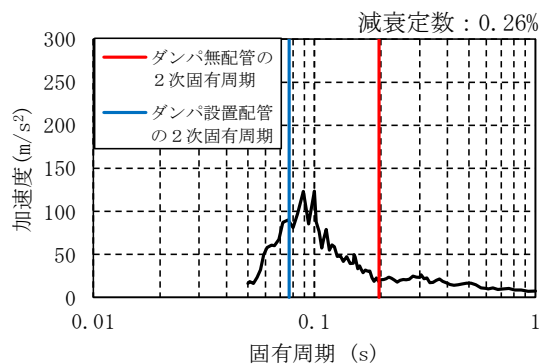
第3-4-8添図 入力加速度 A1X に対する X 方向の応答加速度  
(地震波 X + Z 方向加振)



第3-4-9添図 入力加速度 A1X に対する Z 方向の応答加速度  
(地震波 X + Z 方向加振)



(a) X 方向入力



(b) Z 向入力

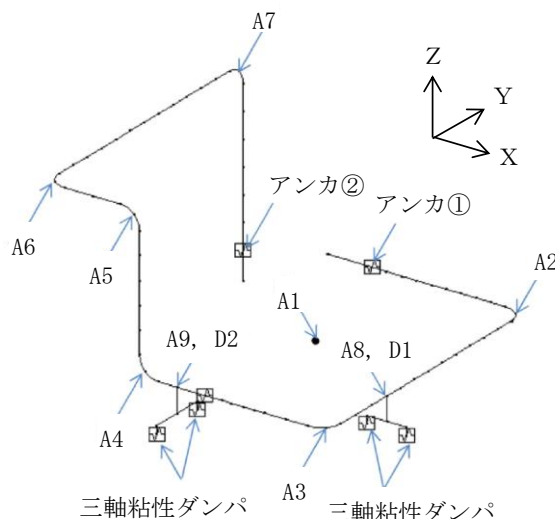
第3-4-10添図 卓越モードの固有周期における応答スペクトルの比較

#### 4. 三軸粘性ダンパを適用した配管系の加振試験結果による妥当性確認

三軸粘性ダンパを適用した配管系の地震応答解析法の妥当性を加振試験結果と解析結果の比較により確認する。

##### 4.1 解析モデル

三軸粘性ダンパを適用した配管系の加振試験の試験体をモデル化して地震応答解析を実施した。解析モデルを第3-4-11添図に示す。



第3-4-11添図 解析モデル

##### 4.2 解析ケース

上限の減衰性能 ( $K_1, C_1$ ), 下限の減衰性能 ( $K_5, C_5$ ) 及びその間の3つの内挿点の計5ケースの減衰性能により地震応答解析を実施した。地震応答解析ケースを第3-4-5添表に示す。なお、地震応答解析の対象とする試験ケースは、X方向及びZ方向の最大加振ケース (X方向:  $19.7\text{m/s}^2$ , Z方向:  $10.6\text{m/s}^2$ ) とした。

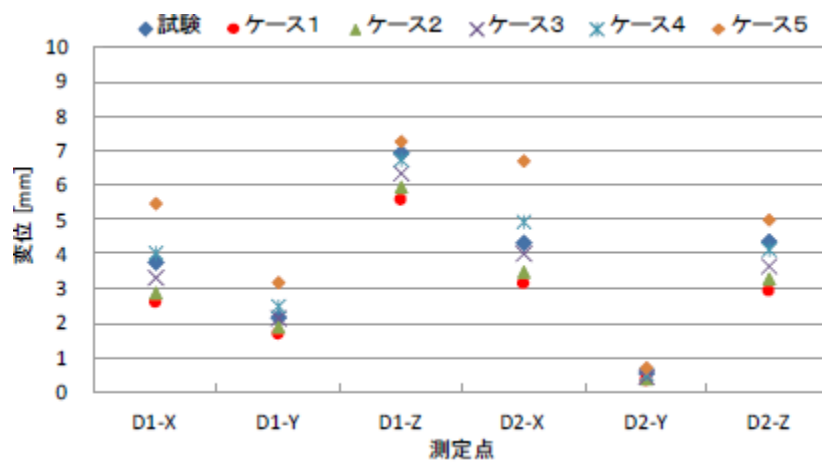
第3-4-5添表 解析ケース

解析ケース	減衰性能
1	$K_1, C_1$ (上限)
2	均等に内挿
3	
4	
5	$K_5, C_5$ (下限)

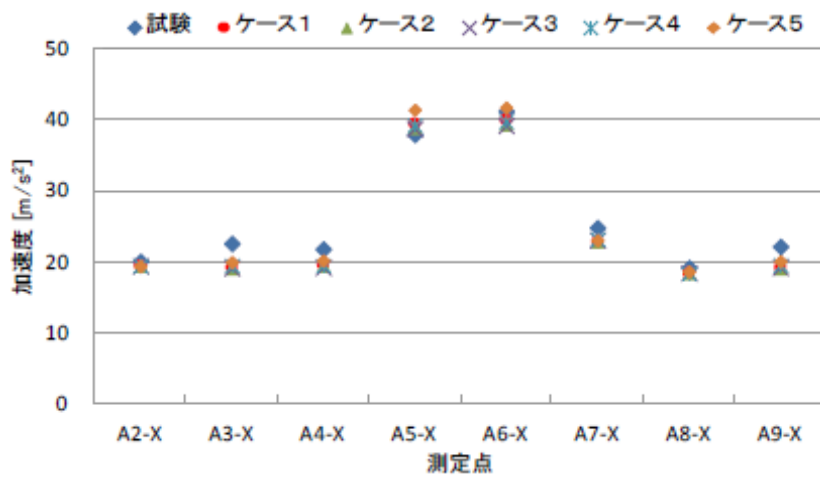
##### 4.3 解析結果

三軸粘性ダンパの最大応答変位の試験結果と解析結果を第3-4-12添図に示す。X方向及びZ方向の最大応答加速度の試験結果と解析結果を第3-4-13添図に示す。三軸粘性ダンパの最大応答変位の解析結果は、試験結果を上回る保守的な評

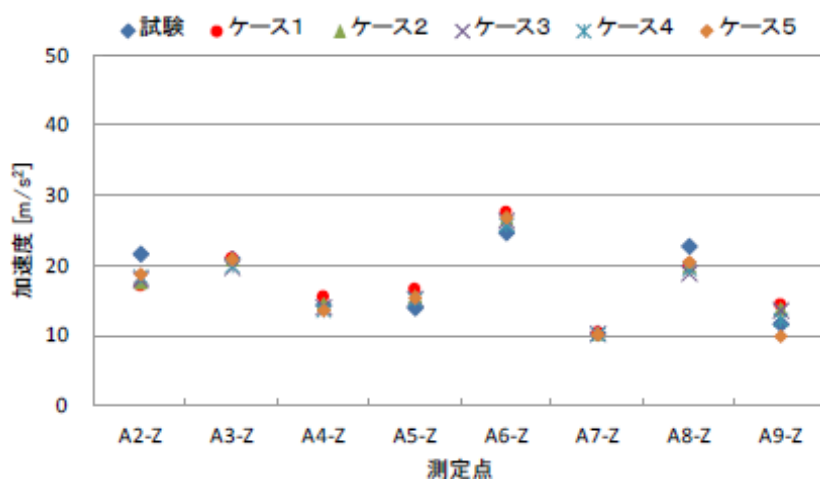
価となっている。また、配管最大応答加速度の解析結果は、試験結果に対して10%程度以上の精度で一致している。



第3-4-12添図 三軸粘性ダンパ最大応答変位



(a) X方向



(b) Z方向

第3-4-13添図 最大応答加速度



#### 4.4 解析結果の考察

上限の減衰性能 ( $K_1, C_1$ ), 下限の減衰性能 ( $K_5, C_5$ ) 及びその間に内挿した減衰性能で地震応答解析を行い, 最大応答変位及び最大応答加速度を適切に評価できることを確認した。最大応答変位については, 解析結果が試験結果を上回っており, 地震動による配管応力を保守的に評価することができる。

添付資料 3-5 三軸粘性ダンパの減衰性能及び解析モデルによる表現

1. 三軸粘性ダンパの性能の表し方

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、三軸粘性ダンパの減衰性能は粘弾性を表すパラメータにより表現される。一般に粘弾性体を式(1)に示す正弦波変位  $\gamma(t)$  で加振すると、第3-5-1添図に示すように位相が変位に対して  $\delta$  ( $0 \sim \pi/2$ ) 進んだ荷重  $\sigma(t)$  (式(2))が生じる。

$$\gamma(t) = \gamma_0 \cos \omega t \quad (1)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cos(\omega t + \delta) \quad (2)$$

$\gamma_0$  : 変位の振幅  $\omega$  : 変位の角振動数  $\sigma_0$  : 荷重の振幅  
 $\delta$  : 位相角 (変位及び荷重の位相差)

荷重  $\sigma(t)$  は、式(3)に示すとおり変位成分に比例する弾性応答成分と速度成分に比例する粘性応答成分の和として表現することができる。

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \sigma_0 \cos(\omega t + \delta) \\ &= \sigma_0 \cos \delta \cdot \cos \omega t - \sigma_0 \sin \delta \cdot \sin \omega t \\ &= \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \cos \delta \cdot \gamma_0 \cos \omega t - \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \sin \delta \cdot \gamma_0 \sin \omega t \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)の最大変位  $\gamma_0$  と最大荷重  $\sigma_0$  の比  $\sigma_0/\gamma_0$  を等価剛性  $K$  と呼ぶ。等価剛性  $K$  は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。

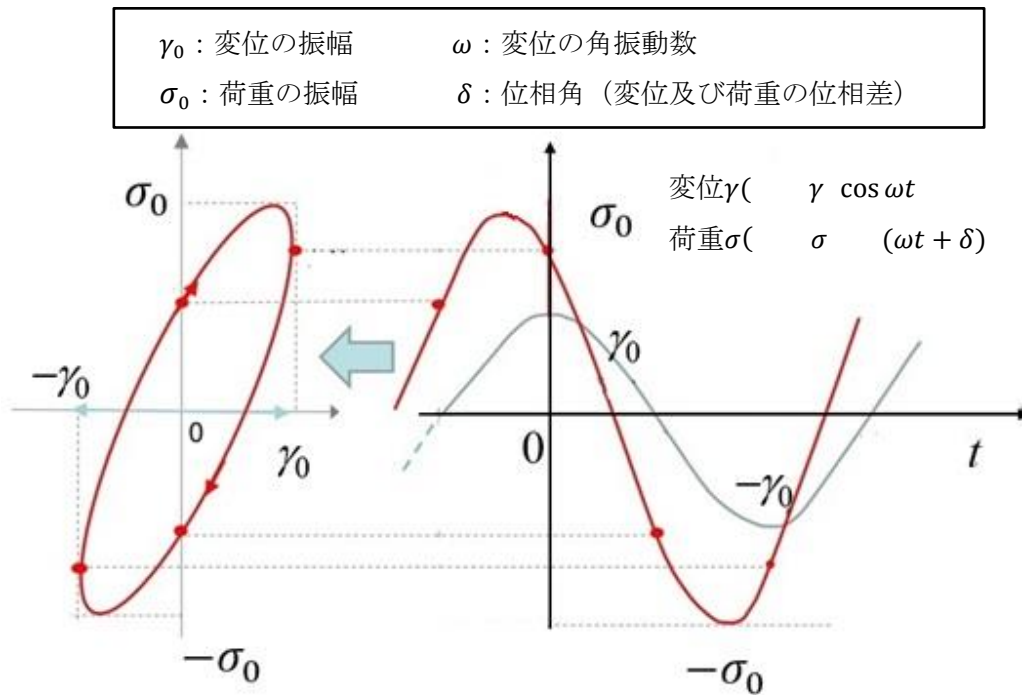
荷重の式(3)に対して一周期分の積分を行うと変位成分に比例する弾性応答成分の項は0、速度成分に比例する粘性応答成分の項は  $\pi \sigma_0 \gamma_0 \sin \delta$  となり、粘性応答成分による散逸エネルギーが求められる。散逸エネルギーは第3-5-1添図のリサーチ曲線で囲まれる面積に相当する。このような減衰性能を定量的に定義するため、粘弾性体を散逸エネルギーの等しい理想的な粘性体である速度比例型ダッシュポットに置き換えた場合の比例係数を等価減衰係数  $C$  と定義する。一周期分の変位  $\gamma(t)$  を減衰係数  $C$  のダッシュポットに入力した場合の散逸エネルギーが  $C\gamma_0^2\omega\pi$  であるので、散逸エネルギーに関して式(4)の関係となる。従って、等価減衰係数  $C$  は式(5)となる。

$$\pi \sigma_0 \gamma_0 \sin \delta = C \gamma_0^2 \omega \pi \quad (4)$$

$$C = \frac{\sigma_0}{\gamma_0 \omega} \sin \delta \quad (5)$$

三軸粘性ダンパの減衰性能は、これまで述べた粘弾性体の基本的な性質と同様に、等価剛性  $K$  及び等価減衰係数  $C$  により表現することができる。

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おり、一般に振動数が高いほど等価剛性  $K$  は大きく、等価減衰係数  $C$  は小さくなる傾向がある。



第3-5-1添図 典型的な粘弾性体の荷重-変位特性  
(左：荷重-変位，右：荷重-時間)

## 2. 三軸粘性ダンパの解析モデル

粘弾性体のモデル化には、Voigt モデル、Maxwell モデル及びそれらを混合したモデル等が一般的に用いられている。三軸粘性ダンパの減衰性能は振動数依存性を有するため、その振動数特性を表現できる Maxwell モデルを採用する。Maxwell モデルは、第3-5-2添図に示すばね剛性 (=  $k$ ) とダッシュポットの減衰係数 (=  $c$ ) を直列につないだものである。また、 $k/c$  を Maxwell モデルの特性振動数 (=  $\omega_0$ ) とする。Maxwell モデルに変位  $\gamma = \gamma_0 \cos \omega t$  を与えた場合の荷重  $\sigma(t)$  を以下に示す。

$$\sigma(t) = \gamma_0 K_e \cos \omega t + \gamma_0 K_v \sin \omega t \quad (6)$$

$\gamma_0$  : 変位の振幅  $\omega$  : 変位の角振動数,  
 $K_e$  : 三軸粘性ダンパの貯蔵弾性率,  $K_v$  : 三軸粘性ダンパの損失弾性率

または,

$$\sigma(t) = \gamma_0 K \cos(\omega t + \delta) \quad (7)$$

$K$  : 三軸粘性ダンパの等価剛性  $(= \sqrt{K_e^2 + K_v^2})$   $\delta$  : 位相角  $(= \tan^{-1}(K_v / K_e))$

Maxwell モデルの場合、 $K_e$  及び  $K_v$  は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 K_e &= k(\omega/\omega_0)^2 / (1+(\omega/\omega_0)^2) \\
 K_v &= k(\omega/\omega_0) / (1+(\omega/\omega_0)^2)
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

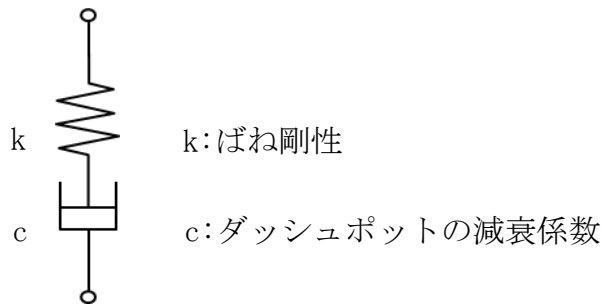
k : Maxwell モデルのばね剛性     $\omega_0$  : Maxwell モデルの特性振動数

三軸粘性ダンパのモデル化にあたっては、その減衰性能の振動数特性をより精度良く表現するため、Maxwell モデルを2つ並列にした4パラメータ Maxwell モデル(第3-5-3 添図参照)を用いる(第3-5-4 添図参照)。4パラメータ Maxwell モデルでは、 $K_e$ 及び $K_v$ は以下の式となる。

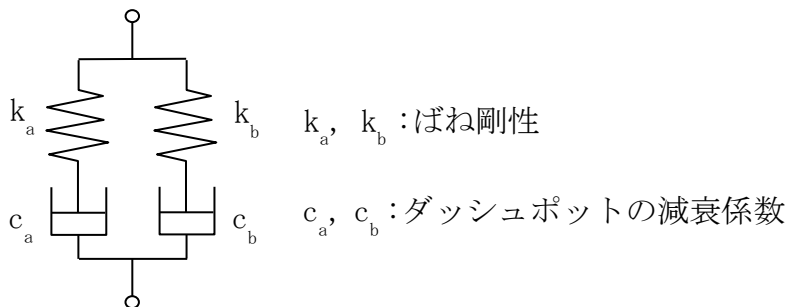
$$\begin{aligned}
 K_e &= K_a(\omega/\omega_a)^2 / (1+(\omega/\omega_a)^2) + K_b(\omega/\omega_b)^2 / (1+(\omega/\omega_b)^2) \\
 K_v &= K_a(\omega/\omega_a) / (1+(\omega/\omega_a)^2) + K_b(\omega/\omega_b) / (1+(\omega/\omega_b)^2)
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

ここで、 $\omega_a = k_a/c_a$ 、 $\omega_b = k_b/c_b$

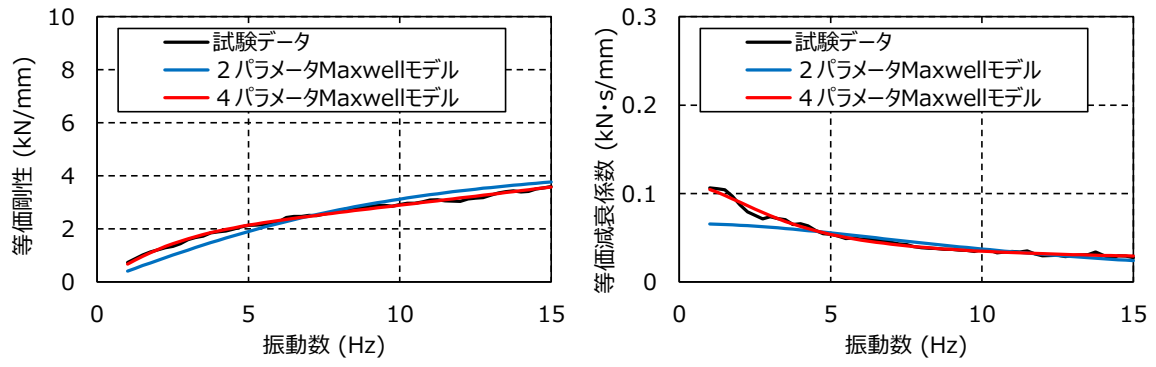
4パラメータ Maxwell モデルのパラメータは、三軸粘性ダンパの性能試験結果に基づいて設定する。



第3-5-2 添図 Maxwell モデル



第3-5-3 添図 4パラメータ Maxwell モデル



(H-1) 等価剛性 (水平方向)

(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)

第3-5-4添図 4パラメータMaxwellモデルとMaxwellモデルの比較  
(中型の例)

### 添付資料 3-6 三軸粘性ダンパの特性試験

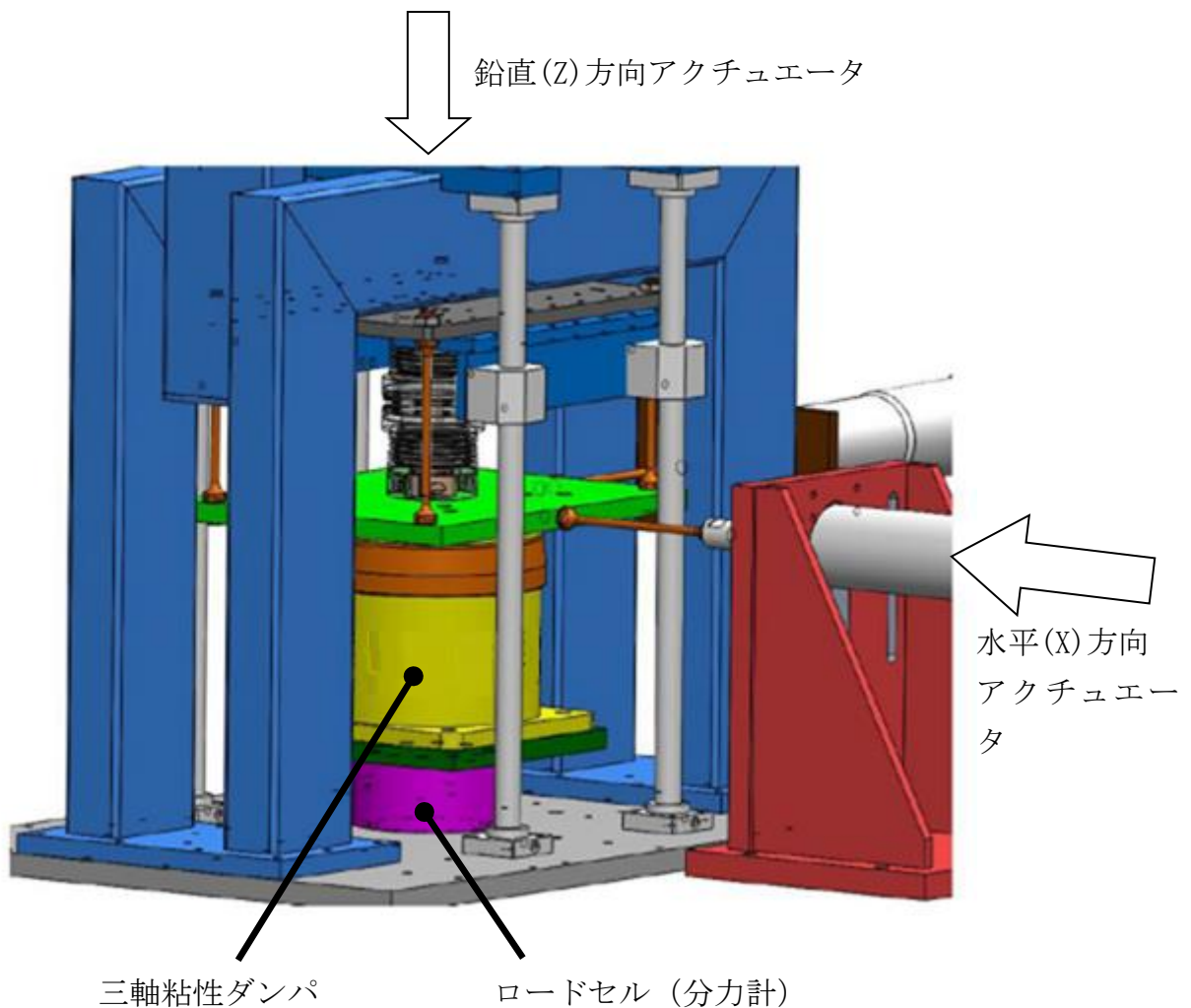
三軸粘性ダンパの減衰性能に影響する特性を把握するために実施した特性試験の結果を以下に示す。なお、三軸粘性ダンパは型式によらず構造は同じであり、使用する粘性体も同一であることから、特性試験結果については、中型及び小型（実機適用なし）の試験結果で代表して示す。

#### <試験項目>

1. 水平・鉛直同時加振試験（水平・鉛直同時加振）
2. 放射線照射試験（放射線）
3. 粘性体温度を変えた性能試験（温度）
4. 加振振幅を変えた性能試験（振幅）
5. 連続加振試験（連続加振）

### 1. 水平・鉛直同時加振試験

三軸粘性ダンパの性能試験は、水平、鉛直の各方向で1方向加振を行う方法により実施する。一方、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、水平方向加振と鉛直方向加振で相互に減衰性能に影響を及ぼす場合は、性能試験で取得した減衰性能と地震時の減衰性能に差が生じる可能性がある。そのため、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の比較を行った。水平・鉛直同時加振試験の概略図を第3-6-1添図に示す。試験条件を第3-6-1添表に、変位の時刻歴波形を第3-6-2添図に、試験結果を第3-6-3添図に示す。第3-6-3添図のとおり、水平方向及び鉛直方向の同時加振と1方向加振では減衰性能に差がないことを確認した。



第3-6-1添図 水平・鉛直同時加振試験

第3-6-1 添表 水平・鉛直同時加振試験条件

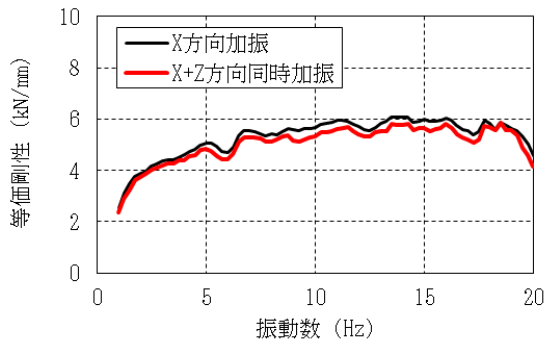
No.	型式	温度 (°C)	加振 方向	入力波形	振幅 (mm)	継続時間 (s)
1	中型	20	水平	ランダム波	3	32
2			鉛直			
3			水平 ・ 鉛直			



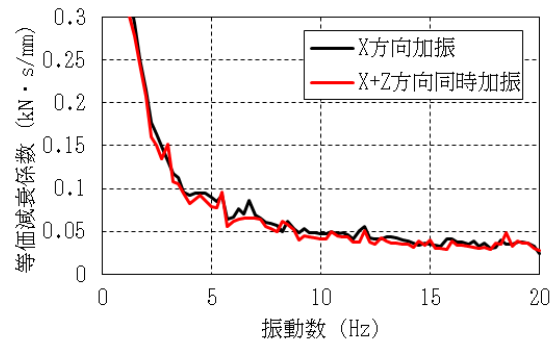
(H) 水平方向

(V) 鉛直方向

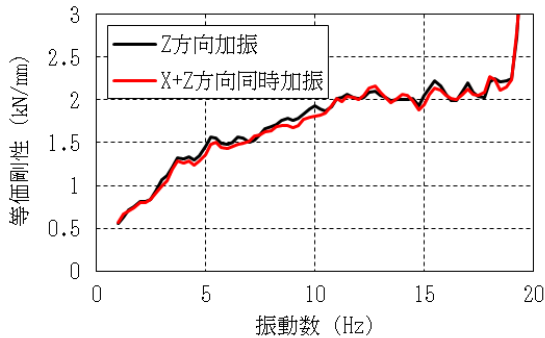
第3-6-2 添図 変位の時刻歴波形



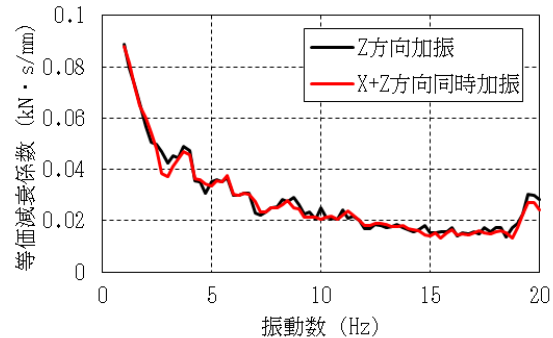
(H-1) 等価剛性 (水平単独と比較)



(H-2) 等価減衰係数 (水平単独と比較)



(V-1) 等価剛性 (鉛直単独と比較)



(V-2) 等価減衰係数 (鉛直単独と比較)

第3-6-3 添図 水平・鉛直同時加振による減衰性能への影響確認結果

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。



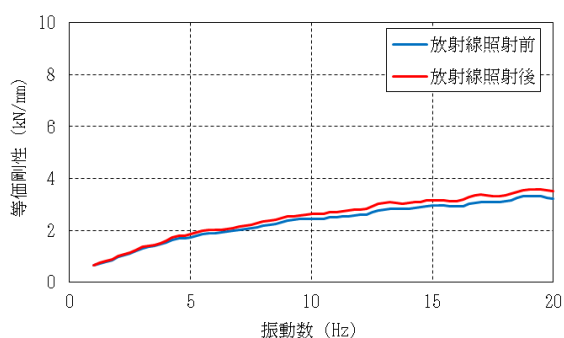
## 2. 放射線照射試験

放射線による三軸粘性ダンパの減衰性能への影響を確認するため、 $\gamma$ 線照射量を変えた第3-6-2添表に示す試験条件にて三軸粘性ダンパの性能試験を実施した。 $\gamma$ 線照射量は、島根2号炉の一般管理区域における40年間積算放射線量0.004kGyに余裕を見た1kGyとした。

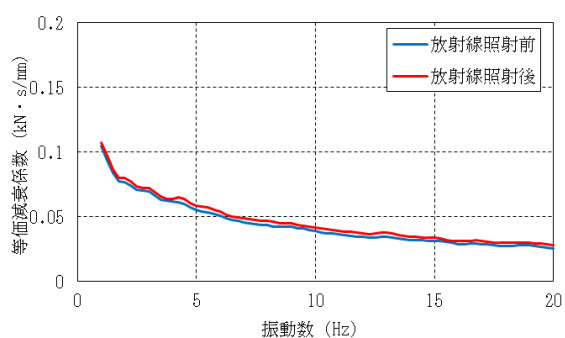
結果を第3-6-4添図に示す。第3-6-4添図のとおり、1kGyの照射では減衰性能は変化しておらず、影響がないことが確認された。

第3-6-2添表 放射線照射試験条件

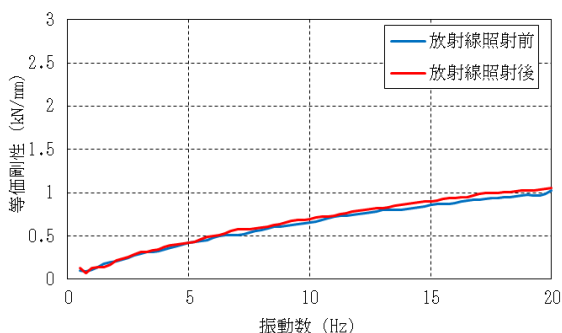
No.	型式	温度(°C)	加振方向	入力波形	振幅(mm)	継続時間(s)	$\gamma$ 線照射量
1	小型	20	水平	ランダム波	1	32	照射なし
2							1kGy
3			鉛直				照射なし
4							1kGy



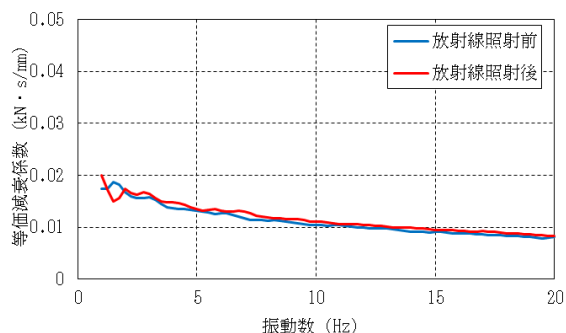
(H-1) 等価剛性 (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)



(V-1) 等価剛性 (鉛直方向)



(V-2) 等価減衰係数 (鉛直方向)

第3-6-4添図 放射線による減衰性能への影響確認結果

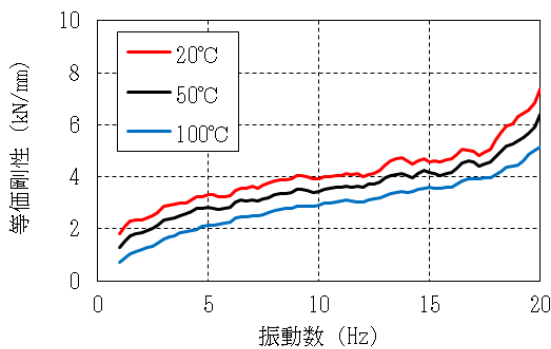
### 3. 粘性体温度を変えた性能試験

粘性体温度による三軸粘性ダンパの減衰性能への影響を確認するため、粘性体温度を変えた第 3-6-3 添表の試験条件にて三軸粘性ダンパの性能試験を実施した。

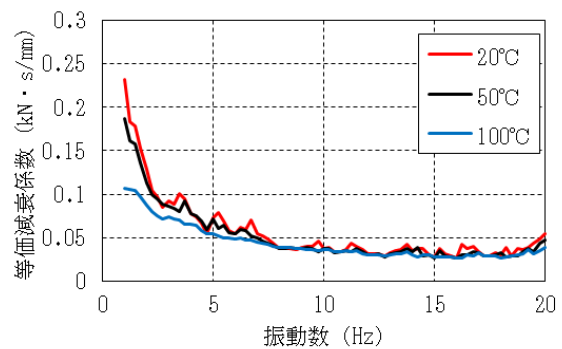
試験結果を第 3-6-5 添図に示す。第 3-6-5 添図のとおり、粘性体温度が高くなるほど三軸粘性ダンパの減衰性能が低下することが確認された。これは、粘性体の温度が上昇するほどその粘度が低下することが要因と考えられる。

第 3-6-3 添表 粘性体温度を変えた性能試験条件

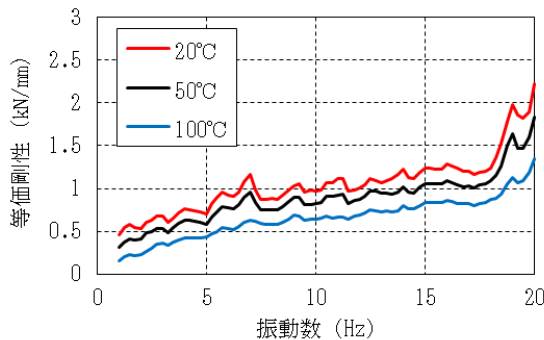
No.	型式	温度 (°C)	加振方向	入力波形	振幅 (mm)	継続時間 (s)
1	中型	20	水平	ランダム波	6	32
2		50				
3		100				
4		20	鉛直			
5		50				
6		100				



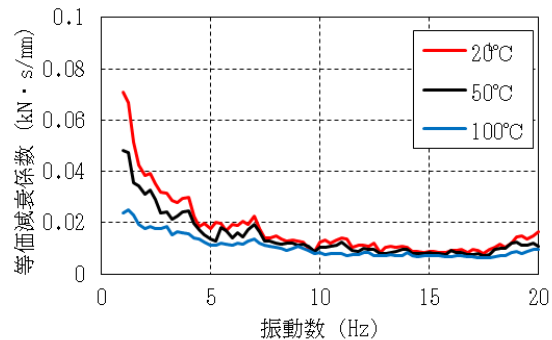
(H-1) 等価剛性 (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)



(V-1) 等価剛性 (鉛直方向)



(V-2) 等価減衰係数 (鉛直方向)

第 3-6-5 添図 粘性体温度による減衰性能への影響確認結果

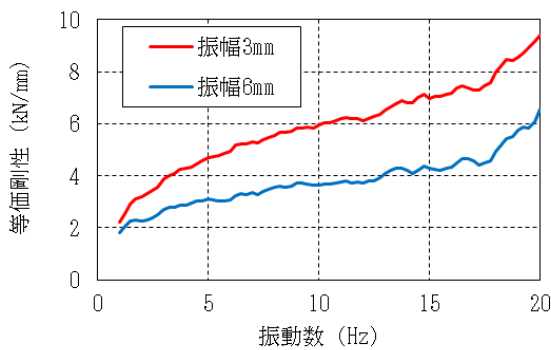
#### 4. 加振振幅を変えた性能試験

振幅の大きさによる三軸粘性ダンパの減衰性能への影響を確認するため、振幅を変えた第3-6-4添表の試験条件にて三軸粘性ダンパの性能試験を実施した。

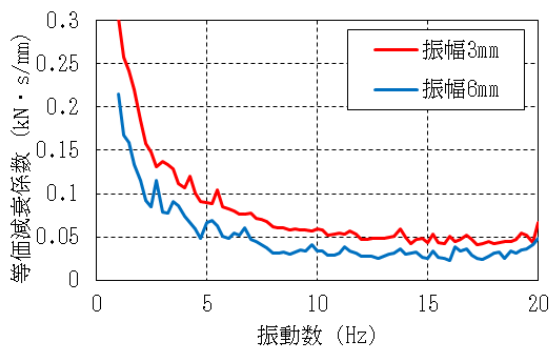
試験結果を第3-6-6添図に示す。第3-6-6添図のとおり、振幅が大きいほど三軸粘性ダンパの減衰性能が低下することが確認された。これは、三軸粘性ダンパで消費されたエネルギーにより粘性体温度が上昇したこと、粘性体が内部で流動し、ダンパピストンとの接触状態が変化したことが要因と考えられる。

第3-6-4添表 加振振幅を変えた性能試験条件

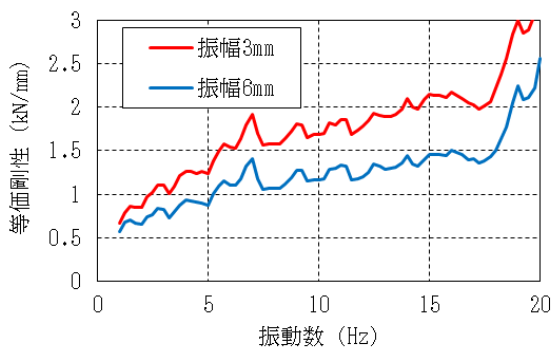
No.	型式	温度 (°C)	加振方向	入力波形	振幅 (mm)	継続時間 (s)
1	中型	20	水平	ランダム波	3	32
2			鉛直			
3			水平		6	
4			鉛直			



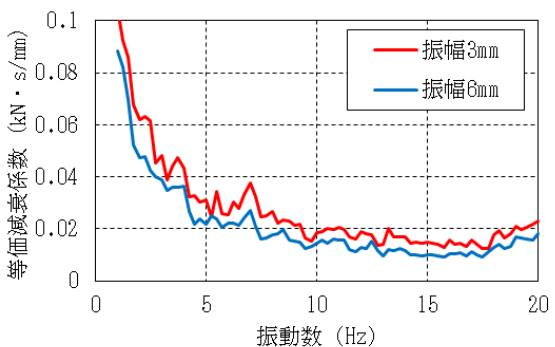
(H-1) 等価剛性 (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)



(V-1) 等価剛性 (鉛直方向)



(V-2) 等価減衰係数 (鉛直方向)

第3-6-6添図 振幅による減衰性能への影響確認結果

## 5. 連続加振試験

連続加振による三軸粘性ダンパの減衰性能への影響を確認するため、第3-6-5添表に示す試験条件により、連続加振試験を実施した。

試験結果を第3-6-7添図に示す。第3-6-7添図のとおり、三軸粘性ダンパの累積消費エネルギー $W$ が増大すると単調に減衰性能が低下することが確認された。これは、三軸粘性ダンパで消費されたエネルギーにより粘性体温度が上昇したこと、粘性体が内部で流動し、ダンパピストンとの接触状態が変化したことが要因と考えられる。累積消費エネルギー $W$ とは加振により三軸粘性ダンパで消費されるエネルギーの総和をいい、以下の式(1)で表される。

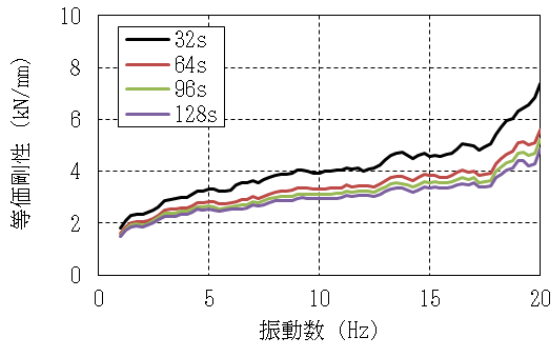
$$W = \int_0^T F(t) \frac{dx(t)}{dt} dt \quad (1)$$

ここで、

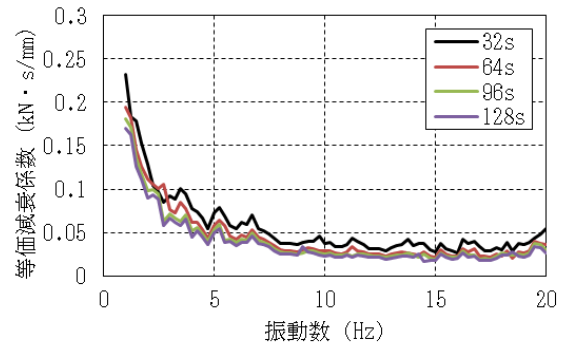
$F(t)$  : 三軸粘性ダンパ反力,  $x(t)$  : 三軸粘性ダンパ変位,  $T$  : 加振継続時間

第3-6-5添表 連続加振試験条件

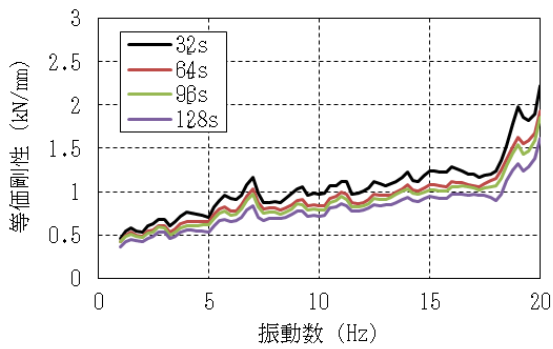
No.	型式	温度 (°C)	加振 方向	入力波形	振幅 (mm)	継続時間 (s)
1	中型	20	水平	ランダム波	6	32
2			鉛直			
3			水平			64
4			鉛直			
5			水平			96
6			鉛直			
7			水平			128
8			鉛直			



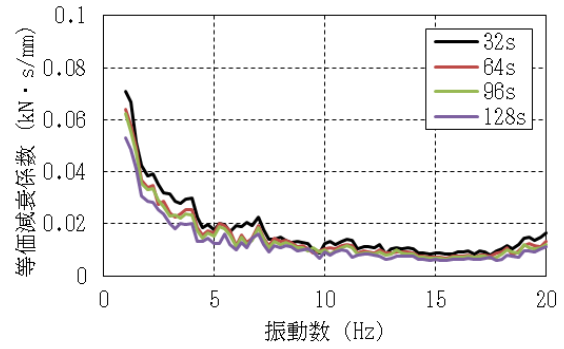
(H-1) 等価剛性 (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)



(V-1) 等価剛性 (鉛直方向)



(V-2) 等価減衰係数 (鉛直方向)

第3-6-7添図 連続加振による減衰性能への影響確認結果

添付資料 3-7 三軸粘性ダンパの据付公差による減衰性能への影響

三軸粘性ダンパは、配管系の熱移動も考慮した上で、運転時にハウジング中心付近の標準位置にピストンが位置するように据付を行うことから、標準位置からのピストンの初期変位は小さいと考えられるが、その影響の程度を把握するため、三軸粘性ダンパのピストンに標準位置からの初期変位を与えた場合の減衰性能への影響を試験により確認した。なお、ピストン及びハウジングの角度については、水準器を用いて水平を保って据付を行うこと及び配管の熱移動により生じる配管のねじれは微小であることから、減衰性能への影響は軽微と判断する。

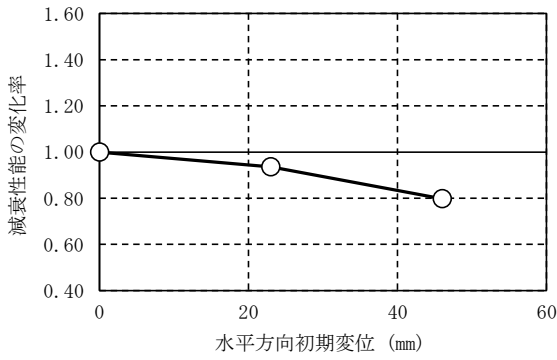
三軸粘性ダンパの初期変位による減衰性能への影響確認試験の試験ケースを第 3-7-1 添表に、試験結果を第 3-7-1 添図～第 3-7-2 添図に示す。三軸粘性ダンパの減衰性能は振動数依存性を有するため、減衰性能の変化率は 5～15Hz の平均値で示す。また、等価剛性及び等価減衰係数のうち、より大きい変化率を減衰性能の変化率と整理する。

試験により把握した初期変位による減衰性能への影響を第 3-7-2 添表に整理する。試験結果に基づき、初期変位による減衰性能への影響が±20%以内となるようにピストン位置の基準を定めて管理する。なお、本資料では、中型の三軸粘性ダンパを代表として試験結果を示したが、大型の三軸粘性ダンパについても初期変位による減衰性能への影響について同様の管理を行う。

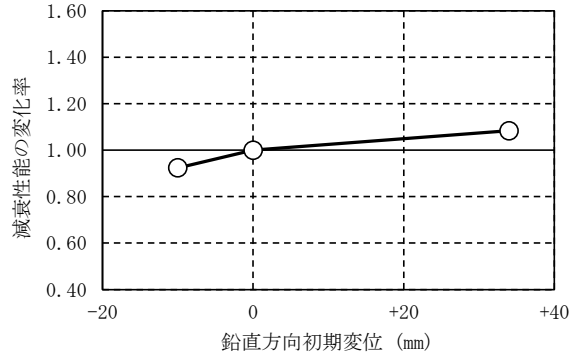
第 3-7-1 添表 初期変位の影響確認試験条件

No.	型式	温度 (°C)	加振 方向	入力波形	振幅 (mm)	継続 時間 (s)	初期変位 (mm)	
							水平	鉛直※1
1	中型	20	水平	ランダム波	6	32	0	0
2			鉛直					
3			水平				23	0
4			鉛直					
5			水平				46	0
6			鉛直					
7			水平				0	34
8			鉛直					
9			水平				0	-10
10			鉛直					

※ 1 : 鉛直方向の初期変位についてはピストンを引き抜く方向をマイナスとする。

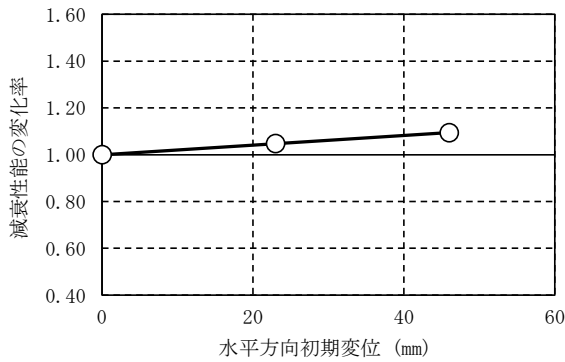


(H) 水平方向初期変位

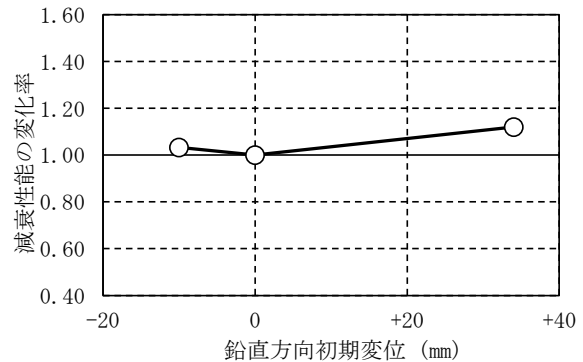


(V) 鉛直方向初期変位

第3-7-1添図 水平方向の減衰性能の変化



(H) 水平方向初期変位



(V) 鉛直方向初期変位

第3-7-2添図 鉛直方向の減衰性能の変化

第3-7-2添表 三軸粘性ダンパの初期変位による減衰性能への影響

	減衰性能への影響	
	水平方向初期変位	鉛直方向初期変位
水平方向の減衰性能	初期変位が大きいかほど直線的に減衰性能が低下する（最大で <u>-20%</u> となる）。	上向きの初期変位に対しては減衰性能が低下する（ <u>-10mm</u> に対して <u>-10%未満</u> ）。 下向きの初期変位に対しては減衰性能が高くなる（最大で <u>+10%未満</u> ）。
鉛直方向の減衰性能	初期変位が大きいかほど直線的に減衰性能が大きくなる（最大で <u>+10%未満</u> ）。	上向きの初期変位に対しては減衰性能の変化は軽微である。 下向きの初期変位に対しては減衰性能が高くなる（最大で <u>+13%未満</u> ）。

## 添付資料 3-8 三軸粘性ダンパの性能試験方法

三軸粘性ダンパの減衰性能は等価剛性  $K$  及び等価減衰係数  $C$  によって表現し、減衰性能の振動数特性を精度良く表現できる 4 パラメータ Maxwell モデルによりモデル化する。ここでは、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 モデルのパラメータを決定するための性能試験方法について示す。

### 1. 性能試験方法

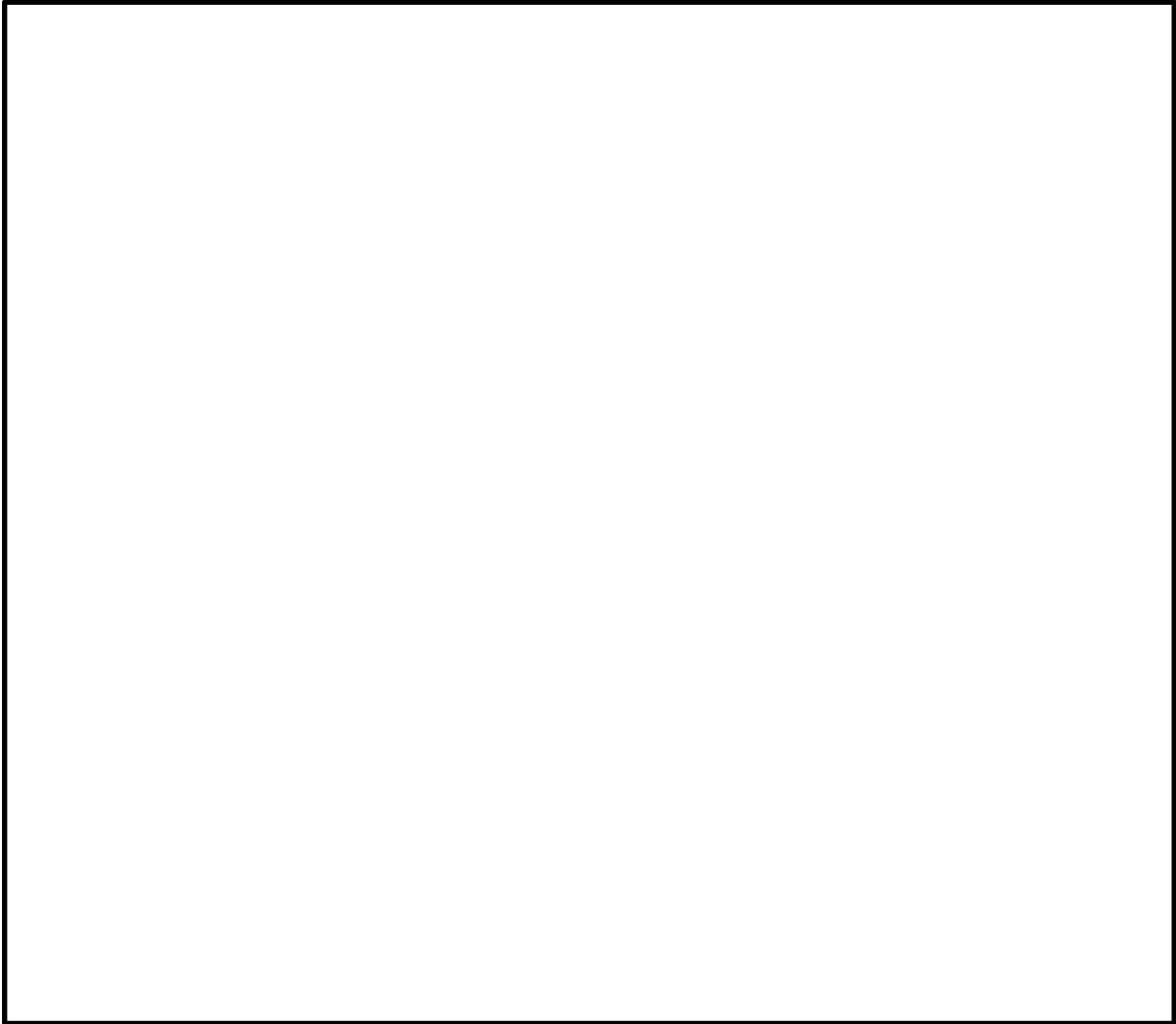
三軸粘性ダンパの等価剛性  $K$  及び等価減衰係数  $C$  を取得し、4 パラメータ Maxwell モデルの 4 つのパラメータを決定するための性能試験は、以下の流れで実施する。

最初に粘性体が均一に所定の温度となるように三軸粘性ダンパを恒温槽等で加温する。次に、試験機を用いて三軸粘性ダンパを所定の変位波形で加振し、加振中の変位及び荷重を測定する。なお、減衰性能は水平方向加振と鉛直方向加振で異なることから、水平方向及び鉛直方向のそれぞれで加振を行い、データを取得する。加振中に測定した変位及び荷重の時刻歴波形からフーリエ変換によりフーリエスペクトルを求めて、伝達関数を算出し、三軸粘性ダンパの等価剛性  $K$  及び等価減衰係数  $C$  を得る。最後に、性能試験により取得した三軸粘性ダンパの等価剛性  $K$  及び等価減衰係数  $C$  に基づき、4 パラメータ Maxwell モデルの 4 つのパラメータを決定する。性能試験のフローを第 3-8-1 添図に示す。

三軸粘性ダンパの性能試験においては、温度、加振振幅及び連続加振による減衰性能の変動を考慮して、高側ダンパ試験性能 ( $K_{\text{High}}, C_{\text{High}}$ ) と低側ダンパ試験性能 ( $K_{\text{Low}}, C_{\text{Low}}$ ) を取得する。高側ダンパ試験性能 ( $K_{\text{High}}, C_{\text{High}}$ ) は実際の使用条件よりも高い減衰性能となる試験条件で、低側ダンパ試験性能 ( $K_{\text{Low}}, C_{\text{Low}}$ ) は実際の使用条件よりも低い減衰性能となる試験条件で取得する性能である。試験条件の設定例を第 3-8-1 添表に示す。



第3-8-1 添表 三軸粘性ダンパの性能試験条件の例



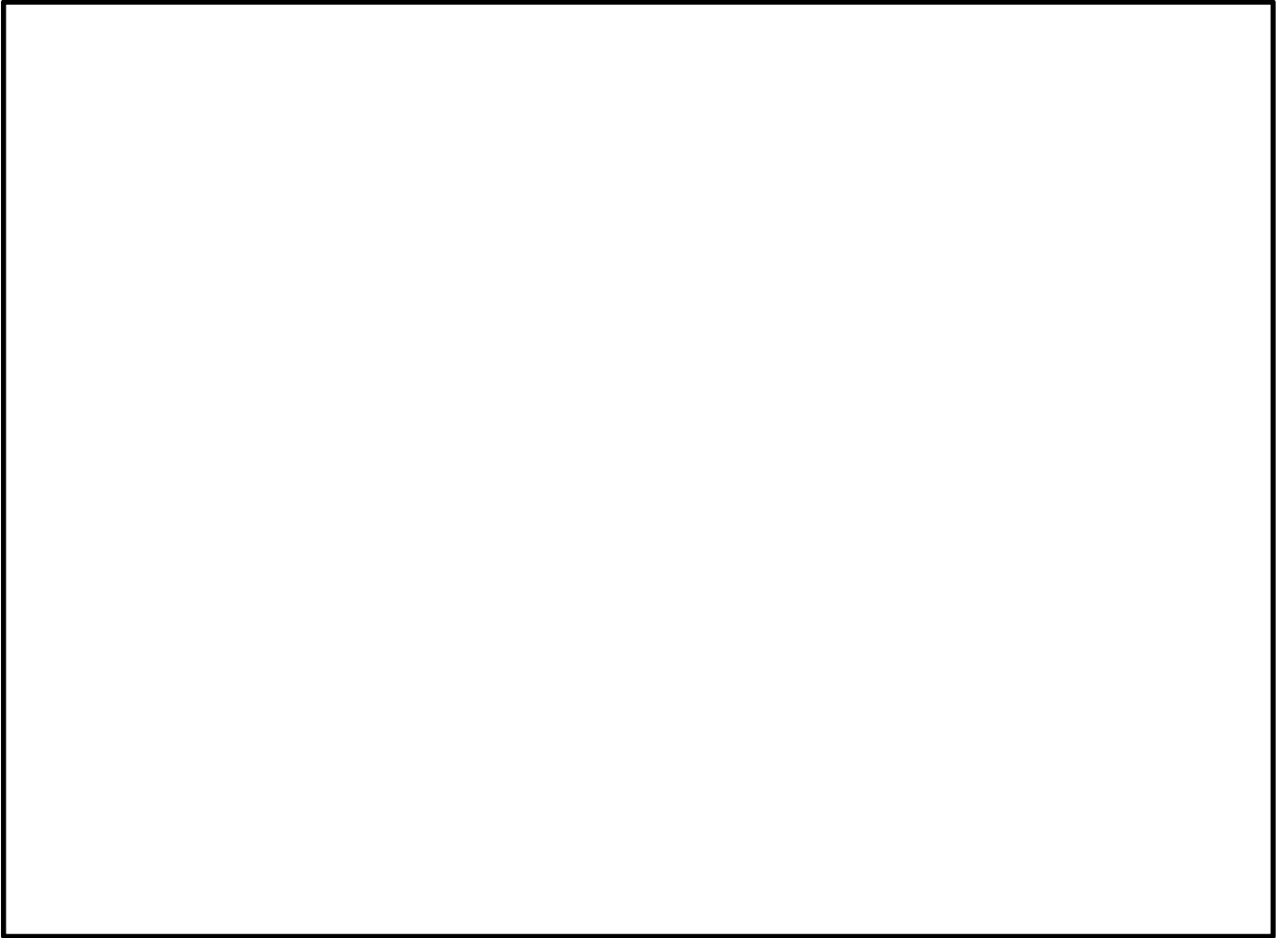
本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

第 3-8-1 添図 性能試験フロー(1/3)

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。

第 3-8-1 添図 性能試験フロー (2/3)

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。



第3-8-1 添図 性能試験フロー(3/3)

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。

本資料では、三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析に用いる時刻歴応答解析手法を説明する。

地震による慣性力を受ける配管系の運動方程式を以下に示す。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{I\}\ddot{y} \quad (1)$$

$[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$  : 配管系の質量, 減衰, 剛性マトリクス  
 $\{x\}$  : 配管系の変位ベクトル  
 $\{I\}$  : 単位ベクトル  
 $\ddot{y}$  : 地動加速度

ここで、減衰マトリクスの値が小さいとして  $[C]=0$  と仮定し、 $-[M]\{I\}\ddot{y}=0$  とすると、

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \quad (2)$$

となる。この式を用いて実固有値解析を行うことにより各モードの固有角振動数  $\omega_i$  とモードマトリクス  $[\Lambda]$  が算出される。モードマトリクス  $[\Lambda]$  を使い  $\{x\}$  を以下の式で表現する。

$$\{x\} = [\Lambda]\{q\} \quad \{q\} : \text{各次モードの応答} \quad (3)$$

式(3)を式(1)に代入して左側から  $[\Lambda]^T$  を掛けると以下の式になる。

$$[\Lambda]^T [M] [\Lambda] \{\ddot{q}\} + [\Lambda]^T [C] [\Lambda] \{\dot{q}\} + [\Lambda]^T [K] [\Lambda] \{q\} = -[\Lambda]^T [M] \{I\} \ddot{y} \quad (4)$$

式(4)について、 $[C]$  の値が小さく、対角化できると仮定して展開すると以下の式になる。

$$\begin{bmatrix} \ddots & & 0 \\ & m_i & \\ 0 & & \ddots \end{bmatrix} \{\ddot{q}\} + \begin{bmatrix} \ddots & & 0 \\ & c_i & \\ 0 & & \ddots \end{bmatrix} \{\dot{q}\} + \begin{bmatrix} \ddots & & 0 \\ & k_i & \\ 0 & & \ddots \end{bmatrix} \{q\} = -[\Lambda]^T [M] \{I\} \ddot{y} \quad (5)$$

式(5)は式(6)に示すモード空間での非連成の運動方程式となる。

$$\ddot{q}_i + 2\zeta_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = -\beta_i \ddot{y} \quad (6)$$

ここで、

$\zeta_i$  :  $i$  次のモード減衰比     $\beta_i$  :  $i$  次モードの刺激係数  $\left( = \frac{\{\lambda_i\}^T [M] \{I\}}{\{\lambda_i\}^T [M] \{\lambda_i\}} \right)$   
 $\lambda_i$  :  $i$  次モードの固有ベクトル     $q_i$  :  $i$  次モードの応答

このモード空間での非連成の運動方程式から、 $i$  次モードのモードベクトル  $\{\Lambda\}_i$ 、刺激係数  $\beta_i$  及び  $i$  次モードの固有角振動数  $\omega_i$  の応答スペクトル値を用いて、スペクトルモーダル解析を行うことができる。

一方で、配管系に三軸粘性ダンパを設置した場合、減衰マトリクス  $[C]$  が大きな値となり対角化できず、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$  の3つのマトリクスを解く複素固有値解析になる。この場合、固有値、固有ベクトルは複素数となるため、上記のスペクトルモーダル解析は適用できない。三軸粘性ダンパの減衰性能を解析モデルへ反映して解析を行う方法としては、モード解析を用いて、モード空間での連成した運動方程式に対して時間積分を行う方法が適用できる。この方法では、減衰マトリクス  $[C]$  が対角化できず、式(4)がモード空間での連成した運動方程式となる場合にも、運動方程式の解を求めることができる。この場合、三軸粘性ダンパを設置した配管系では減衰マトリクス  $[C]$  は、三軸粘性ダンパによって配管系に付与される減衰に対応した減衰マトリクス  $[C_D]$  と、各モードに一律付与する配管系の減衰定数に対応した減衰マトリクス  $[C_p]$  の和として式(7)のように設定することが可能である。また、モーダル座標を用いること以外は、一般的な直接積分による時刻歴応答解析と同様の手法である。

$$[C] = [C_p] + [C_D] \quad (7)$$

ここで、 $[C_p]$  は一般的な配管系と同様の減衰マトリクスであり、モード空間では対角項が配管の減衰定数に関する要素、非対角項がすべてゼロ要素からなる式(8)のような対角行列となる。

$$[\Lambda]^T [C_p] [\Lambda] \cong \begin{bmatrix} \ddots & & 0 \\ & 2\zeta_i \omega_i & \\ 0 & & \ddots \end{bmatrix} \quad (8)$$

なお、多入力の時刻歴応答解析では、基準とする入力点（基準入力点）に対する配管系の相対変位及び入力点の相対変位を用いると、地震による慣性力を受ける配管系の運動方程式は以下となる。

$$[M]\{\ddot{x}_a\} + [C]\{\dot{x}_a\} + [K]\{x_a\} = -[M]\{I\}\ddot{y}_0 - [\tilde{C}]\{\dot{x}_b\} - [\tilde{K}]\{x_b\} \quad (9)$$

$\{x_a\}$  : 基準入力点に対する配管系の相対変位ベクトル

$\{x_b\}$  : 基準入力点に対する入力点の相対変位ベクトル

$y_0$  : 基準入力点の絶対変位

$[\tilde{C}]$  : 入力点の相対速度に対応した減衰マトリクス

$[\tilde{K}]$  : 入力点の相対変位に対応した剛性マトリクス

式（9）の左辺は式（1）と同様である。右辺第一項は、地動加速度に替えて基準入力点の加速度を用いるが、その意味は式（1）の右辺と同様である。右辺第二項及び右辺第三項は、入力点の相対変位、相対速度により生じる力を表している。式（9）は、単一入力の場合と同様に、モード座標系の運動方程式に変換することが可能であり、今回の評価では、モード空間での連成した運動方程式に対して時間積分を行う方法を適用する。

添付資料 3-10 三軸粘性ダンパの減衰性能と配管系の応答の関係

三軸粘性ダンパの減衰性能と配管系の応答の関係を第 3-10-1 添表及び第 3-10-2 添表に示す。配管モーメント及び三軸粘性ダンパの最大変位は、減衰性能が低いほど算出値が大きくなる傾向であり、三軸粘性ダンパの減衰性能が低くなるほど配管系の応答が大きくなるといえる。また、三軸粘性ダンパの最大荷重は、減衰性能が高いほど算出値が大きくなる傾向であり、これは三軸粘性ダンパの減衰性能が高いことにより三軸粘性ダンパが負担する荷重が大きくなるためである。

第 3-10-1 添表 配管モーメント

項目	減衰性能	発生値
配管モーメント <sup>※1</sup>	K <sub>1</sub> , C <sub>1</sub>	3.19×10 <sup>5</sup> (N・m)
	K <sub>2</sub> , C <sub>2</sub>	3.27×10 <sup>5</sup> (N・m)
	K <sub>3</sub> , C <sub>3</sub>	3.30×10 <sup>5</sup> (N・m)
	K <sub>4</sub> , C <sub>4</sub>	3.38×10 <sup>5</sup> (N・m)
	K <sub>5</sub> , C <sub>5</sub>	3.59×10 <sup>5</sup> (N・m)

※1：最も厳しい結果を記載

第 3-10-2 添表 三軸粘性ダンパの荷重及び変位

項目	減衰性能	発生値	
		水平	鉛直
最大荷重 <sup>※1</sup>	K <sub>1</sub> , C <sub>1</sub>	117(kN)	36(kN)
	K <sub>2</sub> , C <sub>2</sub>	104(kN)	31(kN)
	K <sub>3</sub> , C <sub>3</sub>	84(kN)	24(kN)
	K <sub>4</sub> , C <sub>4</sub>	69(kN)	18(kN)
	K <sub>5</sub> , C <sub>5</sub>	36(kN)	9(kN)
最大変位 <sup>※1</sup>	K <sub>1</sub> , C <sub>1</sub>	1.4(mm)	1.7(mm)
	K <sub>2</sub> , C <sub>2</sub>	1.6(mm)	1.8(mm)
	K <sub>3</sub> , C <sub>3</sub>	1.8(mm)	2.1(mm)
	K <sub>4</sub> , C <sub>4</sub>	2.4(mm)	2.3(mm)
	K <sub>5</sub> , C <sub>5</sub>	4.3(mm)	2.7(mm)

※1：最も厳しい結果を記載



## 添付資料 3-11 三軸粘性ダンパの配管への取付部の設計について

三軸粘性ダンパは、ラグ又はクランプにより配管に取り付ける。本資料では、配管への取付部の構造概要、荷重伝達機構及び構造成立性を示す。また、配管系への三軸粘性ダンパの配置計画の成立性について説明する。

### 1. ラグの設計について

#### 1. 1 構造概要

ラグの構造の概要を第 3-11-1 添図に示す。ラグの構造については、従来のアンカサポート等の設計と同様であり、配管と溶接により一体となる構造とする。ラグと三軸粘性ダンパは第 3-11-2 添図のとおり取付ボルトにより接続する。

#### 1. 2 荷重の伝達機構

地震により配管に振動が生じた場合、ラグは配管と一体となって運動し、取付ボルトを介して三軸粘性ダンパに運動が伝達される。これを受けて、三軸粘性ダンパのピストンが粘性体中を移動し、抵抗力が生じる。この抵抗力は、三軸粘性ダンパのピストンから取付ボルト及びラグを介して配管へ伝達される。

#### 1. 3 構造成立性について

ラグは三軸粘性ダンパを接続すること以外は従来の構造及び設計と同様であり、三軸粘性ダンパの発生荷重に対して十分な構造強度を持つように設計する。

なお、取付ボルトは、三軸粘性ダンパの構造強度評価において、三軸粘性ダンパの許容荷重に対する評価を行う。

### 2. クランプの設計について

#### 2. 1 構造概要

クランプの構造の概要を第 3-11-3 添図に示す。クランプは上部クランプ及び下部クランプから構成され、第 3-11-4 添図のように上部クランプと下部クランプをクランプボルトにより締め付けることで配管に取り付ける。クランプと三軸粘性ダンパは取付ボルトにより接続する。

#### 2. 2 荷重の伝達機構

地震により配管に振動が生じた場合、クランプは配管と一体となって運動し、取付ボルトを介して三軸粘性ダンパに運動が伝達される。これを受けて、三軸粘性ダンパのピストンが粘性体中を移動し、抵抗力が生じる。この抵抗力は、三軸粘性ダンパのピストンから取付ボルト及びクランプを介して配管へ伝達される。クランプから配管への荷重伝達機構は、荷重の方向により異なることから、各方

向の荷重伝達機構を以下に示す。

### 【クランプから配管への荷重伝達機構】

#### (1) 水平方向

水平方向の荷重伝達機構を第3-11-5添図に示す。水平方向については、配管軸方向及び配管軸直角方向に分けて説明する。

##### a. 配管軸方向

第3-11-5添図(a)に示すように、クランプが配管を押し返すことや、配管軸方向の摩擦によりクランプが配管を拘束することで荷重が伝達される。

##### b. 配管軸直方向

第3-11-5添図(b)に示すように、クランプが配管を押し返すことや、配管周方向の摩擦によりクランプが配管を拘束することで荷重が伝達される。

#### (2) 鉛直方向

鉛直方向の荷重伝達機構を第3-11-6添図に示す。クランプボルトで配管に取り付けられたクランプが配管を押し返すことで荷重が伝達される。

## 2. 3 構造成立性について

クランプに対して水平方向及び鉛直方向における三軸粘性ダンパの荷重伝達機構を考慮のうえ、許容荷重を設定する。クランプに接続される三軸粘性ダンパの地震応答解析における最大荷重と設定した許容荷重を比較することで構造成立性を確認する。

### (1) 水平方向荷重に対するクランプの構造成立性

水平方向の荷重はクランプと配管の摩擦によって制限されるため、クランプの最大摩擦力と等しくなる時の三軸粘性ダンパのピストンに生じる荷重をクランプの許容荷重とする。許容荷重の算出方法を以下に示す。

上部クランプと下部クランプにおいて、許容荷重の算出方法は同様であるため、下部クランプを例に説明する。クランプ締付力により、下部クランプに一樣な圧力が $p_l$ が生じた状態を考える。第3-11-7添図に示すとおり、下部クランプと配管が接している範囲の角度 $-\alpha \leq \theta \leq \alpha$ の中で微小角度 $d\theta$ を考えると、 $d\theta$ においてクランプの締付により鉛直方向に生じる力 $Q_{ld\theta}$ は式(1)となる。

$$Q_{ld\theta} = N_{ld\theta} \cdot \cos \theta = p_l \cdot \frac{D}{2} \cdot d\theta \cdot B \cdot \cos \theta \quad (1)$$

ここで、 $N_{ld\theta}$ は微小角度 $d\theta$ においてクランプ面に垂直な方向に生じる力、 $D$ は配管外径、 $B$ はクランプ幅である。

$Q_{ld\theta}$ をクランプが配管と接している角度 $-\alpha \leq \theta \leq \alpha$ で積分すると、鉛直方向の力の総和 $Q_l$ は式(2)となる。

$$Q_l = \int_{-\alpha}^{\alpha} Q_{ld\theta} = \int_{-\alpha}^{\alpha} p_l \cdot \frac{D}{2} \cdot B \cdot \cos \theta \, d\theta = p_l \cdot \frac{D}{2} \cdot B \cdot 2 \sin \alpha \quad (2)$$

この鉛直方向の力  $Q_l$  はクランプの締付力  $F_c$  と等しいため、

$$F_c = Q_l = p_l \cdot \frac{D}{2} \cdot B \cdot 2 \sin \alpha \quad (3)$$

となり、クランプの締付による下部クランプに生じる圧力  $p_l$  は式 (4) となる。

$$p_l = \frac{F_c}{D \cdot B \cdot \sin \alpha} \quad (4)$$

この圧力  $p_l$  が角度  $-\alpha \leq \theta \leq \alpha$  の部分の面積に加わるため、クランプの締付により下部クランプに生じる垂直抗力  $F_{IN}$  は式 (5) となる。

$$F_{IN} = p_l \cdot \frac{D}{2} \cdot 2\alpha \cdot B = \frac{F_c}{D \cdot B \cdot \sin \alpha} \cdot \frac{D}{2} \cdot 2\alpha \cdot B = \frac{F_c \cdot \alpha}{\sin \alpha} \quad (5)$$

摩擦係数を  $\mu$  とすると下部クランプに生じる静止摩擦力  $F_{lf}$  は式 (6) となる。

$$F_{lf} = \mu \cdot F_{IN} = \frac{\mu \cdot F_c \cdot \alpha}{\sin \alpha} \quad (6)$$

上部クランプについても同様に静止摩擦力  $F_{uf}$  を計算すると、上部クランプと下部クランプによる摩擦力  $F_f$  は式 (7) となる。

$$F_f = F_{uf} + F_{lf} = 2F_{lf} = 2 \frac{\mu \cdot F_c \cdot \alpha}{\sin \alpha} \quad (7)$$

配管軸方向の拘束については  $F_f$  が許容荷重となる。

配管軸直角方向の拘束については、三軸粘性ダンパの抵抗力がピストンと粘性体の接触面で生じることから、荷重作用点を考慮して算出したモーメントに対してすべりが生じることのない摩擦力を確保する。そのため、配管外径を  $D$ 、荷重発生箇所のモーメントアームを  $L_m$  とすると、モーメントのつり合いから式 (8) により配管軸直角方向の許容荷重  $F_a$  が得られる。

$$F_f \cdot \frac{D}{2} = F_a \cdot L_m \quad (8)$$

$$F_a = \frac{F_f D}{2L_m}$$

許容荷重  $F_f$  及び  $F_a$  を式 (7)、(8) 及びクランプの諸元により算出した結果を第 3-11-1 添表に示す。なお、クランプの構造成立性の確認にあたっては、値の小さい軸直角方向の許容荷重  $F_a$  を水平方向の共通の許容荷重として第 3-11-2 添表のとおり設定する。

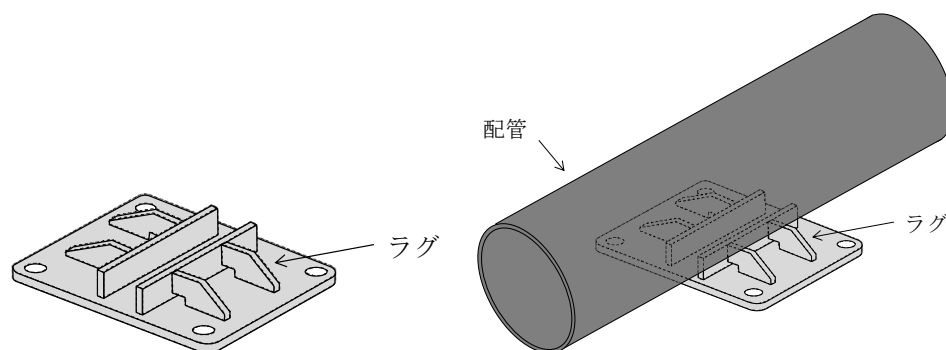
## (2) 鉛直方向荷重に対するクランプの構造成立性

三軸粘性ダンパは鉛直方向の許容荷重が 140 (kN) であり、水平方向と比べて小さいため、クランプの許容荷重も第 3-11-2 添表のとおり接続する三軸粘性ダンパ

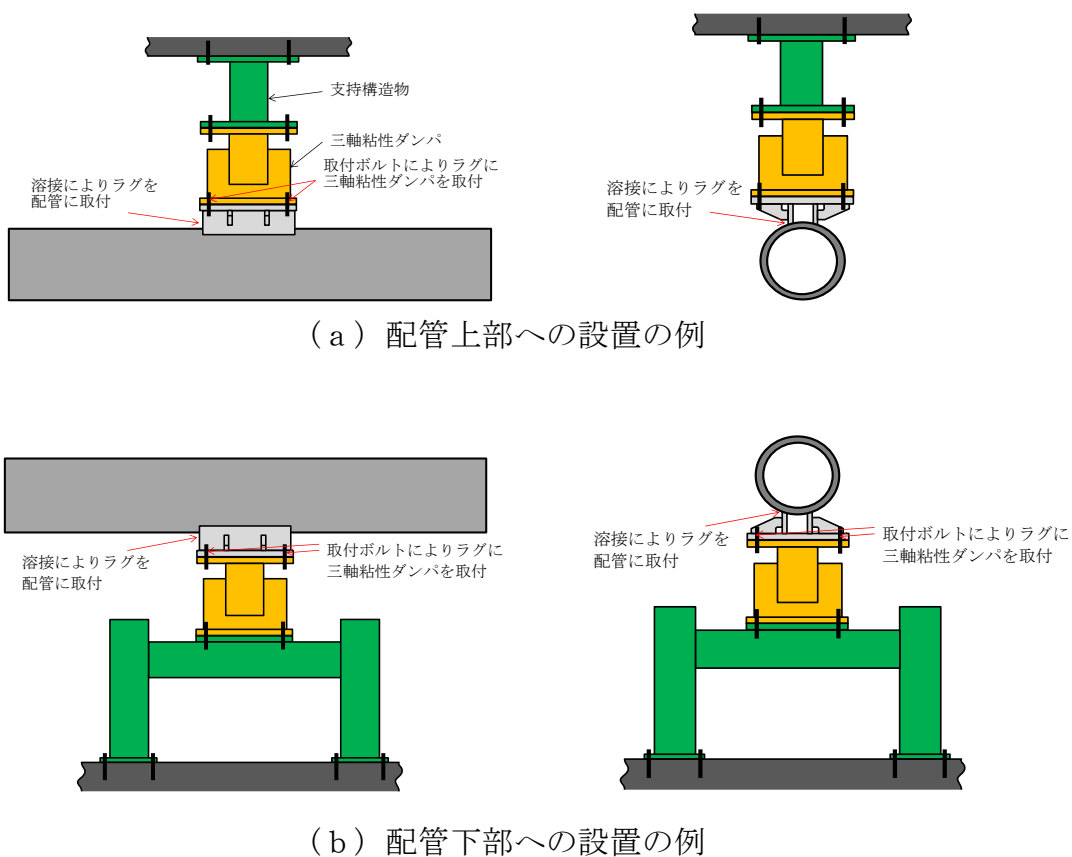
と同じ 140 (kN) に設定する。三軸粘性ダンパ及びクランプ共通の許容荷重 140 (kN) に対して、クランプの構成部品の中で余裕が小さいと想定される評価対象部位としてクランプボルトの構造強度評価を J E A G 4 6 0 1 等に基づいて実施した。評価の結果は第 3-11-3 添表のとおりであり、構造成立性を確認した。

### 3. 配管系への三軸粘性ダンパの配置計画の成立性について

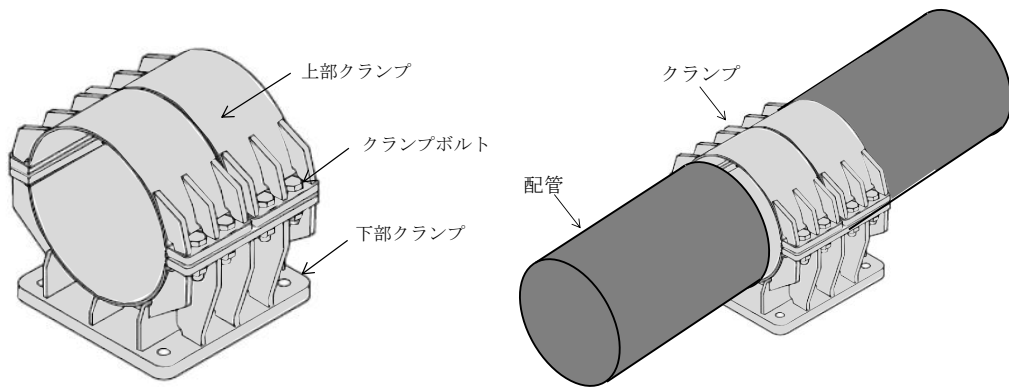
三軸粘性ダンパは、配管への取付方法としてラグ又はクランプを選択可能であり、配管の上部及び下部のいずれの位置にも設置することができる。配管への取付方法及び設置位置は設置スペース、干渉物、施工性等を考慮して現場状況に応じて選択することから、配置計画の成立性に問題はないと判断している。



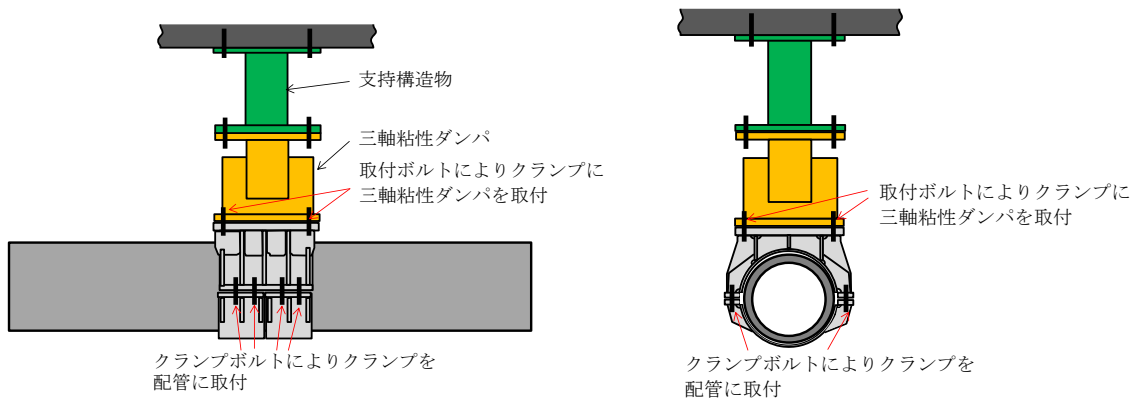
第 3-11-1 添図 ラグの構造概要



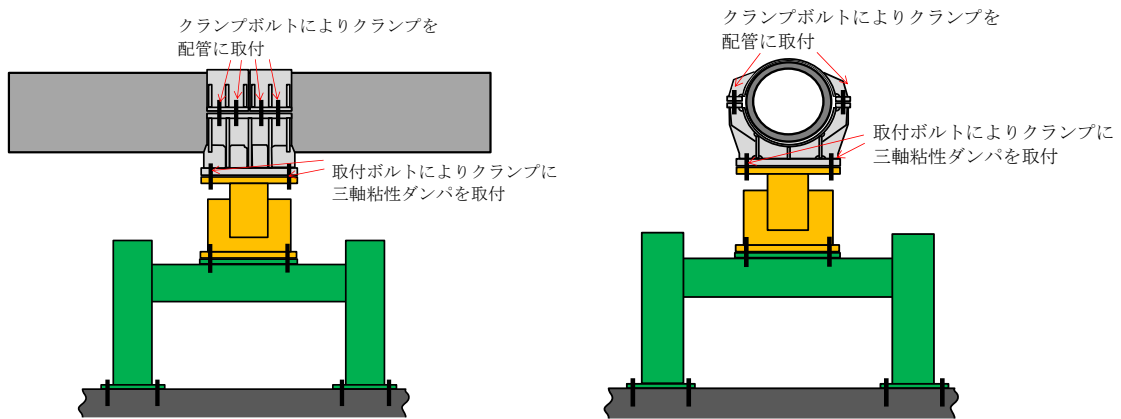
第 3-11-2 添図 ラグの配管への取付及び三軸粘性ダンパへの接続



第3-11-3 添図 クランプの構造概要



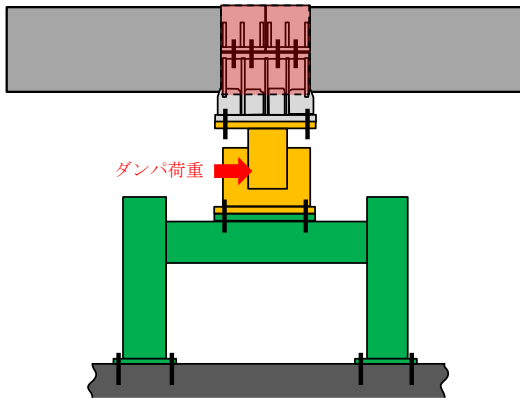
(a) 配管上部への設置の例



(b) 配管下部への設置の例

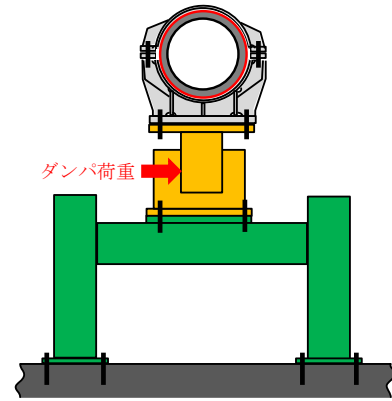
第3-11-4 添図 クランプの配管への取付及び三軸粘性ダンパへの接続

クランプが配管を押し返すことや、  
配管軸方向の摩擦により荷重を伝達



(a) 配管軸方向荷重の伝達

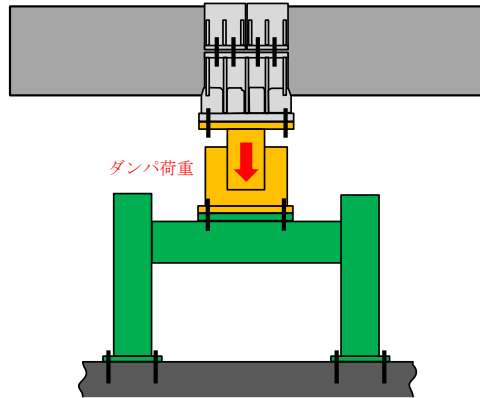
クランプが配管を押し返すことや、  
配管周方向の摩擦により荷重を伝達



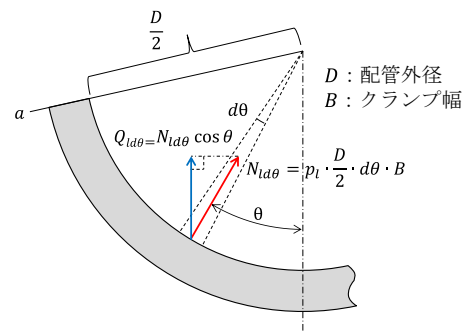
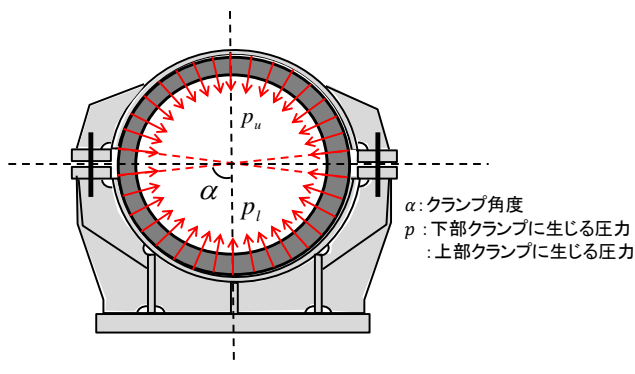
(b) 配管軸直方向荷重の伝達

第 3-11-5 添図 クランプによる水平方向の荷重伝達機構

クランプボルトで配管に接続されたクランプが  
配管を押し返すことで荷重を伝達



第 3-11-6 添図 クランプによる鉛直方向の荷重伝達機構



第 3-11-7 添図 クランプ締付力による鉛直方向の力の算出

第3-11-1 添表 クランプの諸元及び水平方向許容荷重の算出値

摩擦係数 $\mu$	締付力 $F_c$ (kN)	クランプ角度 $\alpha$ (rad)	配管 直径 $D$ (mm)	モーメント アーム $L_m$ (mm)	算出値	
					$F_f$ (kN)	$F_a$ (kN)
0.3	660.8	$(85/180)\pi$	609.6	1150	590	156

第3-11-2 添表 クランプの許容荷重

方向		許容荷重
水平方向	配管軸直角方向	156 (kN)
	配管軸方向	156 (kN) <sup>※1</sup>
鉛直方向		140 (kN) <sup>※2</sup>

※1：より厳しい配管軸直角方向の許容荷重に合わせて設定

※2：三軸粘性ダンパの鉛直方向の許容荷重に合わせて設定

第3-11-3 添表 鉛直方向許容荷重によるクランプボルトの評価結果

評価項目	発生値	許容限界 <sup>※1</sup>
引張応力	25 (MPa)	398 (MPa)

※1：許容応力状態  $B_A S$  の許容応力

添付資料 3-12 三軸粘性ダンパの耐震評価方法に関する海外実績との比較

三軸粘性ダンパを設置した配管系の耐震評価方法について、海外実績と島根 2 号炉の比較を第 3-12-1 添表に示す。第 3-12-1 添表に示すとおり、三軸粘性ダンパを設置する場合の耐震評価方法は同様である。島根 2 号炉では、海外実績における耐震評価方法に加えて減衰性能の変動及びばらつきを考慮しているが、これは「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」及び工認審査ガイドを踏まえて考慮することとしたものである。

第 3-12-1 添表 海外実績と島根 2 号炉における耐震評価方法の比較

項目	海外実績	島根 2 号炉
減衰性能のパラメータ設定方法	三軸粘性ダンパの性能試験結果に基づき、等価剛性及び等価減衰係数のフィッティングにより 4 パラメータ Maxwell モデルのパラメータを設定している。	同左
地震応答解析手法	時刻歴応答解析を適用している。	同左
三軸粘性ダンパの許容限界	地震応答解析結果から三軸粘性ダンパの荷重及び変位を算出し、許容荷重及び許容変位と比較している。	同左
減衰性能の変動及びばらつき	—	減衰性能の変動及びばらつきを包絡するように上限及び下限の減衰性能を設定した上で、5 段階の段階的な減衰性能を設定する。