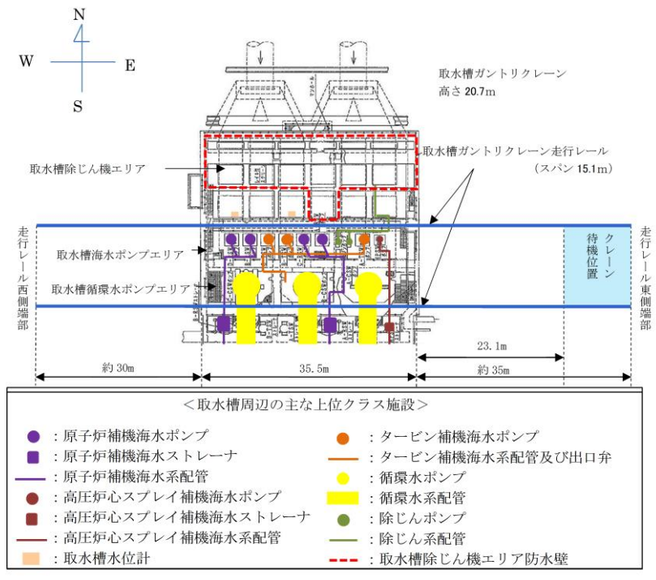
柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		別紙－18　機器・配管系への制震装置の適用について 目　次 1.　概要 2.　単軸粘性ダンパの取水槽ガントリクレーンへの設置 2.1　基本方針 2.1.1　要求事項 2.1.2　構造の概要 2.1.3　設計方針 2.1.4　適用規格 2.2　耐震評価方法 2.2.1　評価方針 2.2.2　単軸粘性ダンパの配置検討 2.2.3　性能試験及び解析モデル 2.2.4　地震応答解析手法 2.2.5　単軸粘性ダンパ評価 2.2.6　機器評価 2.3　耐震評価結果 3.　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 3.2.3　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	・対象設備の相違 【柏崎 6/7，東海第二】 島根 2 号炉では，制震装置を適用した機器・配管系の地震応答解析手法を用いる

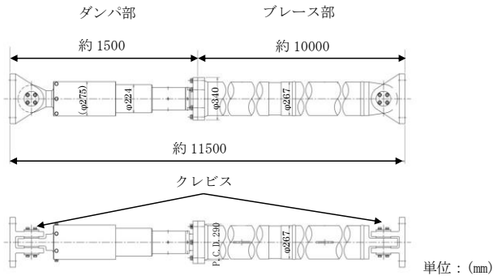
柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		添　付　資　料 1－1　制震装置の減衰性能に影響する検討項目の抽出 1－2　既工認実績のある制震装置との差異の整理 1－3　Time History Broadening の概要 1－4　新規制基準適合性審査の実績等を踏まえた検討事項に対する考察 1－5　制震装置に応じた減衰性能の表現及びモデル化 2－1　取水槽ガントリクレーンに設置する制震装置の選定 2－2　単軸粘性ダンパの性能試験方法 2－3　単軸粘性ダンパの特性試験 2－4　単軸粘性ダンパを設置し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 3－13 三軸粘性ダンパの動作原理について	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		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。	

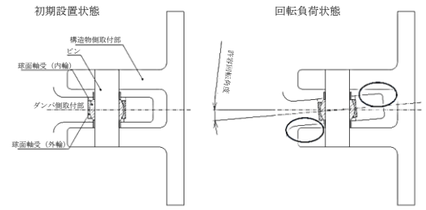
柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		2.　単軸粘性ダンパの取水槽ガントリクレーンへの設置 2.1　基本方針 2.1.1　要求事項 取水槽ガントリクレーンは，取水槽海水ポンプエリア及び取水槽循環水ポンプエリアを跨いで設置されており，原子炉補機海水ポンプ等のメンテナンスに使用される設備である。取水槽ガントリクレーンの設置位置及び取水槽周辺の上位クラス施設概要を第 2－1 図に示す。 発電所の運転中などメンテナンスを実施しない期間は，取水槽ガントリクレーンは待機位置に待機しており，周辺の上位クラ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Ｓｓ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	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		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	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考



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。

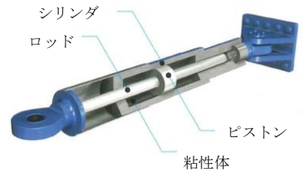
単軸粘性ダンパの動作原理を第 2－5 図に示す。単軸粘性ダンパは，ピストン，ロッドが軸方向に移動することにより，シリンダ内面とピストン外面の間に形成されるオリフィス部を粘性体が流れ，その抵抗力により減衰性能を発揮するものであり，自重等の静的荷重は支持しない。

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

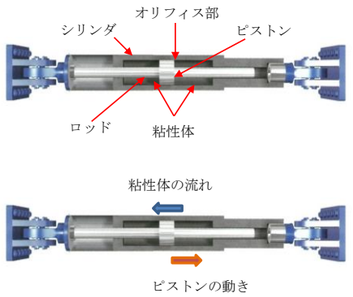
柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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

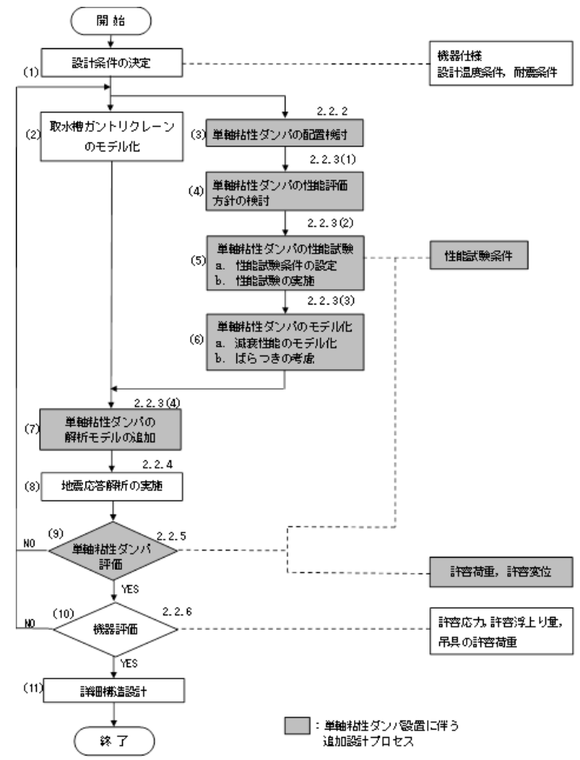


第 2－5 図　単軸粘性ダンパの動作原理

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。

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		 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	

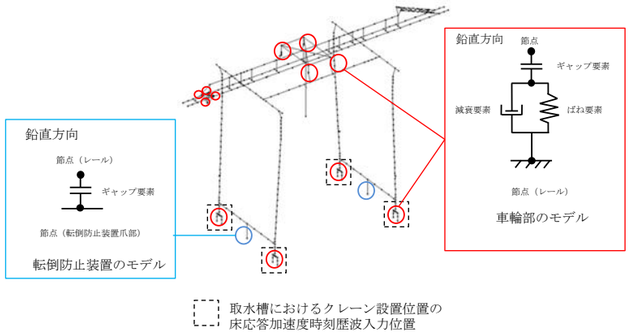
柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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。

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考



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

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「ＪＥＡＧ４６０１等」という。）を適用する。

・「原子力発電所耐震設計技術指針　ＪＥＡＧ４６０１－1987」（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ＪＥＡＧ４６０１・補－1984」（社）日本電気協会
・「原子力発電所耐震設計技術指針　ＪＥＡＧ４６０１－1991 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）

<table>
<tr>
<th>柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）</th>
<th>東海第二発電所（2018.9.18 版）</th>
<th>島根原子力発電所　２号炉</th>
<th>備考</th>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td>
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
<table>
<tr><th>適用対象</th><th colspan="2">適用範囲</th><th>適用規格</th><th>適用の考え方</th></tr>
<tr><td rowspan="3">取水槽
ガントリ
クレーン全体</td><td colspan="2">減衰定数</td><td>―
（振動試験結果）</td><td>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）。</td></tr>
<tr><td colspan="2">一般事項</td><td rowspan="2">ＪＥＡＧ４６０１等</td><td rowspan="2">従来のクレーンの評価と同様である。</td></tr>
<tr><td colspan="2">構造強度評価</td></tr>
<tr><td>吊具</td><td colspan="2">構造強度評価</td><td></td></tr>
<tr><td>トロリ</td><td colspan="2">浮上り量評価</td><td>―
（構造寸法に基づく）</td><td>クレーンの構造寸法に基づき設定する。</td></tr>
<tr><td rowspan="3">単軸粘性ダンパ</td><td rowspan="2">構造強度評価</td><td>許容荷重</td><td>ＪＥＡＧ４６０１等</td><td>従来の機器・配管系の支持構造物と同様である。</td></tr>
<tr><td>許容変位</td><td>―
（構造寸法に基づく）</td><td>制震装置ごとの構造寸法に基づき設定する。</td></tr>
<tr><td colspan="2">減衰性能の設定</td><td>―
（性能試験結果）</td><td>制震装置の特性に応じて試験結果に基づき設定する。</td></tr>
</table>

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。
</td>
<td></td>
</tr>
</table>

<table>
<tr>
<td>柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）</td>
<td>東海第二発電所（2018.9.18 版）</td>
<td>島根原子力発電所　２号炉</td>
<td>備考</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td>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）
<table><tr><th>No.</th><th>項目</th><th>減衰性能への影響</th><th>対応方針</th></tr><tr><td>1</td><td>連続加振</td><td>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）。</td><td>－</td></tr><tr><td>2</td><td>振動数</td><td>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）。</td><td rowspan="2">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。</td></tr><tr><td>3</td><td>製造公差</td><td>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。</td></tr></table>
(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 100㎜ 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。</td>
<td></td>
</tr>
</table>

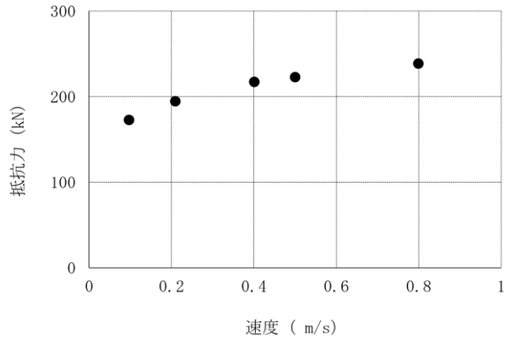
柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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



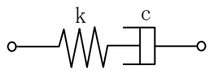
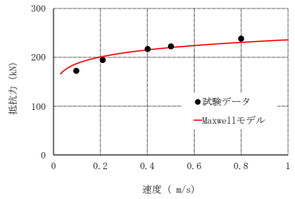
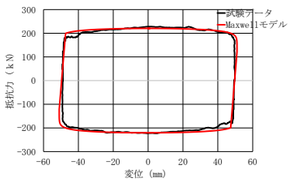
第 2－8 図　性能試験結果

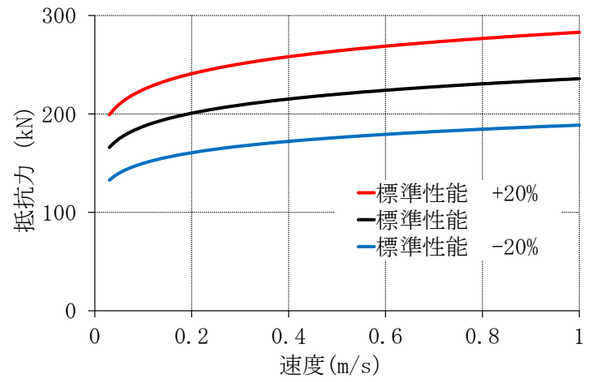
(3)単軸粘性ダンパのモデル化

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

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		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。  k：ばね剛性 c：速度の 0.1 乗に比例する 　　ダッシュポットの減衰係数 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	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		 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	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		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）。 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，ＪＥＡＧ４６０１等に基づき設定することを基本とする。	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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Ｓｓ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ⅣＡＳ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ⅣＡＳ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ⅣＡＳ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ⅣＡＳ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ⅣＡＳ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

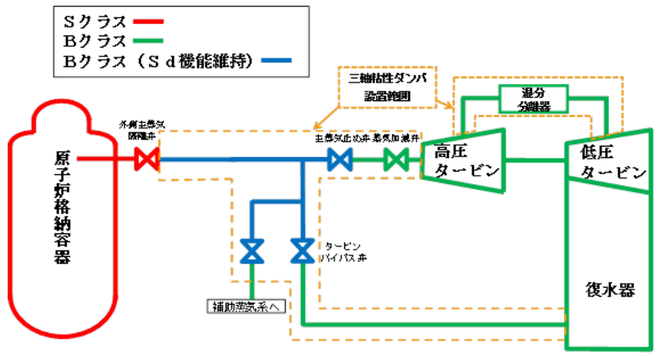
2.3　耐震評価結果

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）

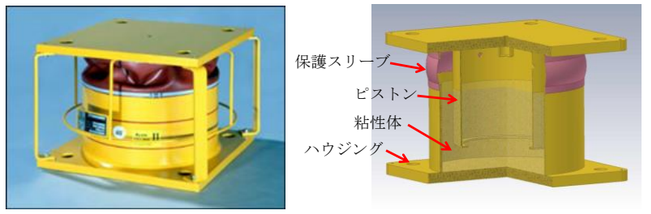
柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		3.　三軸粘性ダンパの配管系への設置 3.1　基本方針 3.1.1　要求事項 三軸粘性ダンパは外側主蒸気隔離弁から低圧タービン，復水器までの主蒸気系配管及び蒸気タービン本体に属する配管（以下「主蒸気系配管等」という。）に設置する。三軸粘性ダンパの設置範囲を第 3－1 図に示す。当該配管の耐震重要度分類はＢクラスである。また，外側主蒸気隔離弁から主蒸気止め弁までの範囲はＳｄ機能維持設計とする。 なお，既工認では基準地震動Ｓ１の最大加速度の 1/2 の値を鉛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等に対しては，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）主蒸気系配管等の構造概要 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等は，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等について，代表箇所を第 3－2 図に示す。	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		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等に設置する。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等（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，粘性体の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（添付資料 3－13 参照）。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	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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。

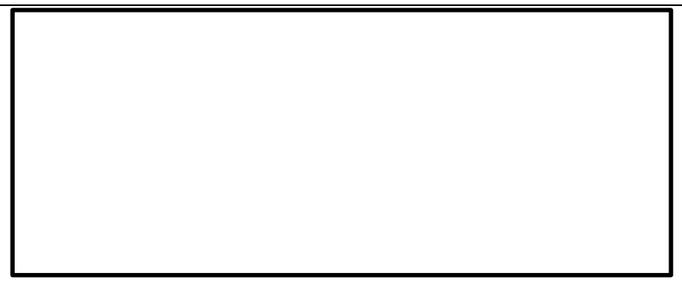


第 3－3 図　三軸粘性ダンパの外観及び構造

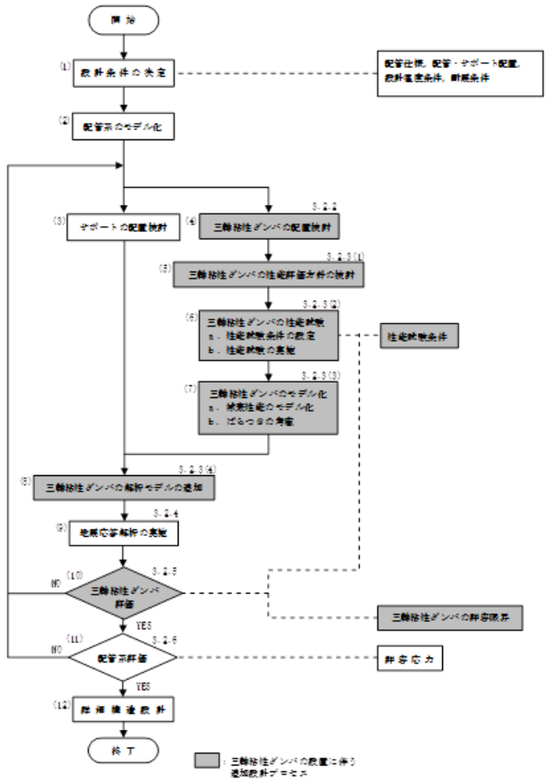
第 3－1 表　三軸粘性ダンパの仕様

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

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		 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 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。	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考



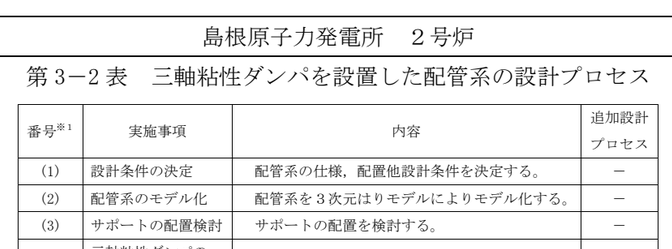
第 3－7 図　三軸粘性ダンパを設置した配管系の耐震設計フロー

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

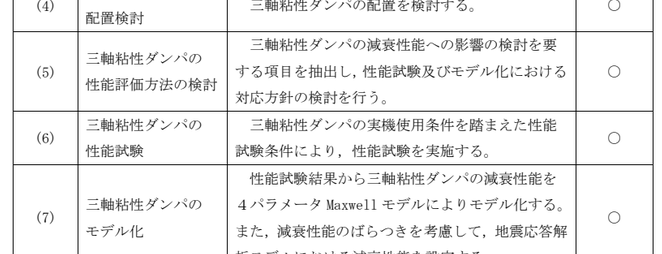
第 3－2 表　三軸粘性ダンパを設置した配管系の設計プロセス

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

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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ＪＥＡＧ４６０１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

<table>
<tr><th>適用対象</th><th colspan="2">適用範囲</th><th>適用規格</th><th>適用の考え方</th></tr>
<tr><td rowspan="2">配管系全体</td><td colspan="2">減衰定数</td><td>―
（振動試験結果）</td><td>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）。</td></tr>
<tr><td colspan="2">一般事項</td><td rowspan="3">ＪＥＡＧ４６０１等</td><td rowspan="3">従来の配管系，支持構造物の評価と同様である。</td></tr>
<tr><td>配管</td><td colspan="2">構造強度評価</td></tr>
<tr><td>支持構造物</td><td colspan="2">構造強度評価</td></tr>
<tr><td rowspan="3">三軸粘性ダンパ</td><td rowspan="2">構造強度評価</td><td>許容荷重</td><td rowspan="2">―
（構造寸法に基づく）</td><td rowspan="2">制震装置ごとの構造寸法に基づき設定する。</td></tr>
<tr><td>許容変位</td></tr>
<tr><td colspan="2">減衰性能の設定</td><td>―
（性能試験結果）</td><td>制震装置の特性に応じて試験結果に基づき設定する。</td></tr>
</table>

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。

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		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。	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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。	左記のばらつき要因を合わせて±30％の減衰性能のばらつきを考慮する。
7	据付公差	据付公差による減衰性能のばらつきは±20%以内で管理する（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

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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。

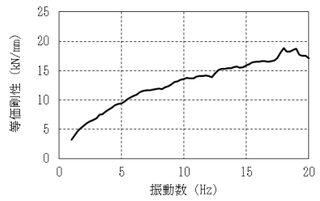
第 3－5 表に示す性能試験条件に基づいて取得した三軸粘性ダンパの高側ダンパ試験性能（K_{High}，C_{High}）と，低側ダンパ試験性能（K_{Low}，C_{Low}）を第 3－9 図及び第 3－10 図に示す。

第 3－5 表　三軸粘性ダンパの性能試験条件の設定

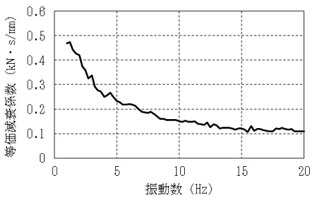
取得性能	試験条件設定の考え方	性能試験条件		
		温度	加振振幅	累積消費エネルギー
高側ダンパ試験性能（K_{High}，C_{High}）	実機使用条件より減衰性能を高く取得するため，室温，微小加振振幅，微小累積消費エネルギーとする。	常温	小	小
低側ダンパ試験性能（K_{Low}，C_{Low}）	実機使用条件より減衰性能を低く取得するため，実機使用で想定される最高温度，最大加振振幅，最大累積消費エネルギーとする。	高温※1	大※1	大※1

※１：実機使用条件を想定して設定する。

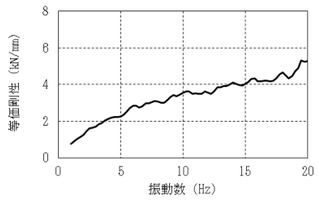
柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考



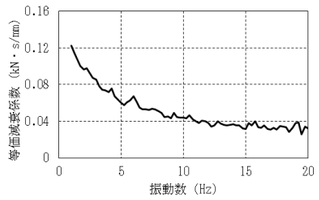
（H－1）等価剛性 K_{High}（水平方向）



（H－2）等価減衰係数 C_{High}（水平方向）

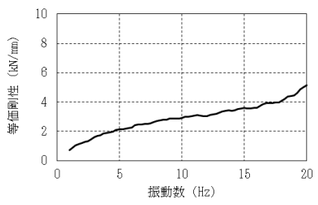


（V－1）等価剛性 K_{High}（鉛直方向）

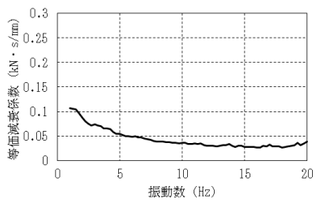


（V－2）等価減衰係数 C_{High}（鉛直方向）

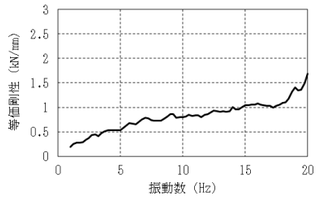
第 3－9 図　高側ダンパ試験性能（中型の例）



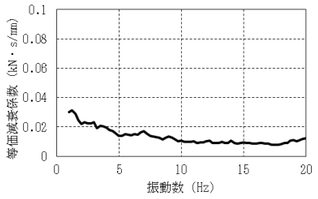
（H－1）等価剛性 K_{Low}（水平方向）



（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）



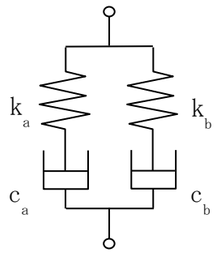
（V－2）等価減衰係数 C_{Low}（鉛直方向）

第 3－10 図　低側ダンパ試験性能（中型の例）

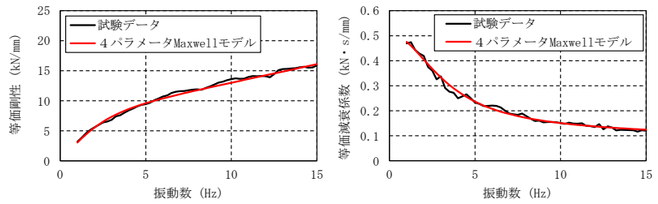
(3)三軸粘性ダンパのモデル化

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。

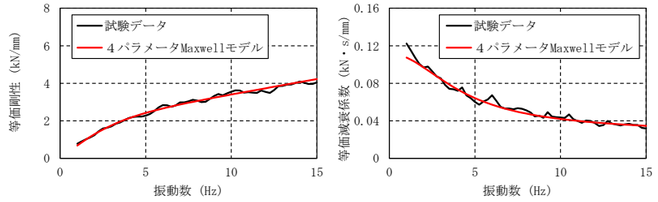
柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		三軸粘性ダンパの減衰性能は，水平方向及び鉛直方向でそれぞれ高側ダンパ試験性能（K_{High}，C_{High}）及び低側ダンパ試験性能（K_{Low}，C_{Low}）を性能試験により取得するため，４パラメータ Maxwell モデルは各方向に対して高側及び低側を設定する。 ｂ．ばらつきの考慮 三軸粘性ダンパの減衰性能のばらつきを考慮して，地震応答解析に用いる解析モデルを設定する。性能試験結果に基づいてモデル化した三軸粘性ダンパの高側及び低側の減衰性能に対して，更に第 3－4 表のうち製造公差による±10％のばらつきと，据付公差による±20％のばらつきを合わせて±30％のばらつきとして考慮し，解析上の減衰性能の上限（$K_1=1.3\times K_{High}$，$C_1=1.3\times C_{High}$）及び下限（$K_5=0.7\times K_{Low}$，$C_5=0.7\times C_{Low}$）を第 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。  k_a，k_b：ばね剛性 c_a，c_b：ダッシュポットの減衰係数 第 3－11 図　三軸粘性ダンパの４パラメータ Maxwell モデル	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考



（H－1）等価剛性 K_{High}（水平方向）

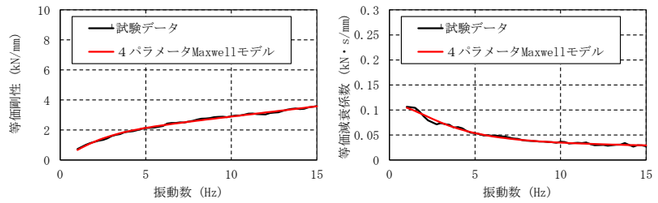
（H－2）等価減衰係数 C_{High}（水平方向）



（V－1）等価剛性 K_{High}（鉛直方向）

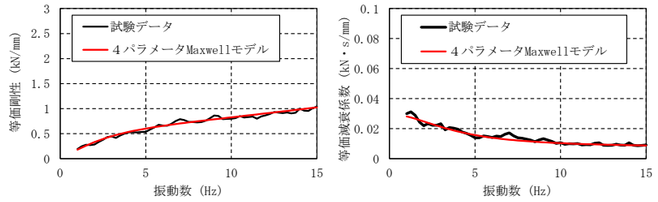
（V－2）等価減衰係数 C_{High}（鉛直方向）

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）

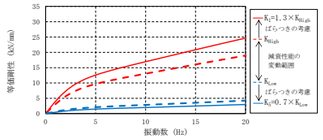
（V－2）等価減衰係数 C_{Low}（鉛直方向）

第 3－13 図　低側ダンパ試験性能のモデル化（中型の例）

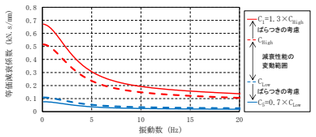
第 3－6 表　地震応答解析モデルにおける減衰性能の設定

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）

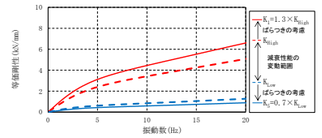
柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考



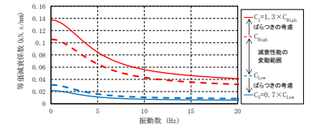
（H－1）等価剛性（水平方向）



（H－2）等価減衰係数（水平方向）

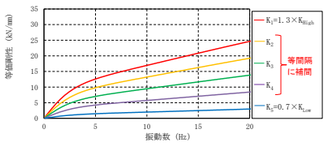


（V－1）等価剛性（鉛直方向）

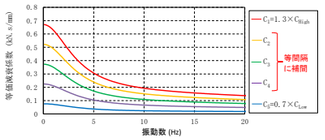


（V－2）等価減衰係数（鉛直方向）

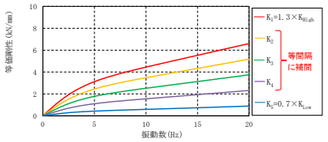
第 3－14 図　性能試験による減衰性能の上限と下限の設定
（中型の例）



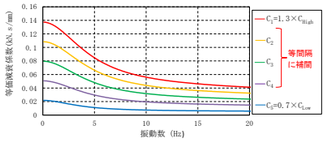
（H－1）等価剛性（水平方向）



（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

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		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等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Ｓｄ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，ＪＥＡＧ４６０１等に基づき設定することを基本とする。	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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Ｓｄ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
	弾性設計用地震動Ｓｄ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Ｓｄ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

3.3　耐震評価結果

3.3.1　評価条件

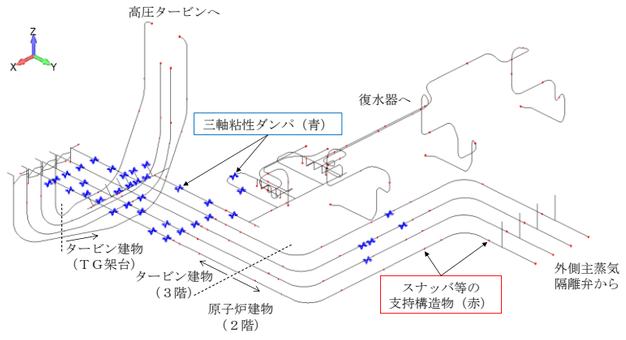
(1)評価対象配管モデル

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Ｓｄ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Ｓｄ－１，Ｓｄ－Ｄ，Ｓｄ－Ｆ１，Ｓｄ－Ｆ２，Ｓｄ－Ｎ１，Ｓｄ－Ｎ２のうち最も評価上厳しいと考えられるＳｄ－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。Ｓｄ－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。

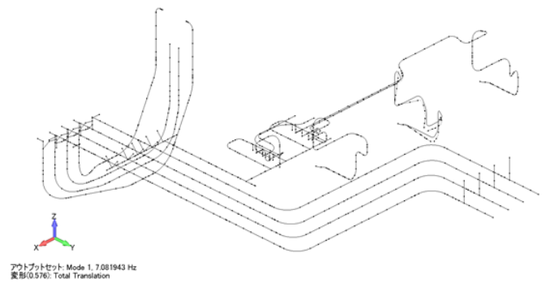
柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		評価対象配管は原子炉建物及びタービン建物に支持されるため，各支持点（三軸粘性ダンパ及びスナッバ等の支持構造物）に対応した各建物の加速度時刻歴を入力する。なお，水平２方向及び鉛直方向地震力の組合せを考慮して，解析は三方向同時入力により実施する。 3.3.2　評価結果 　三軸粘性ダンパを含む配管系の評価結果を第 3－9 表～第 3－12 表に，配管の最大応力発生箇所を第 3－22 図に示す。三軸粘性ダンパを含めた配管系の構造強度評価が成立し，三軸粘性ダンパの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	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

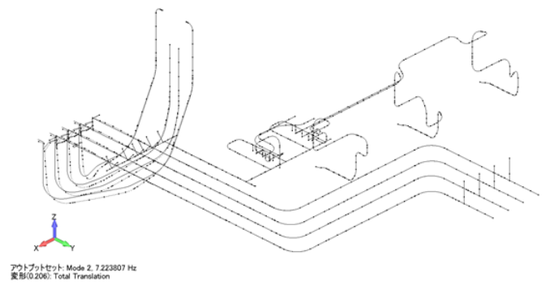
第 3－8 表　固有周期及び刺激係数

モード	固有周期(s)	刺激係数※1		
		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

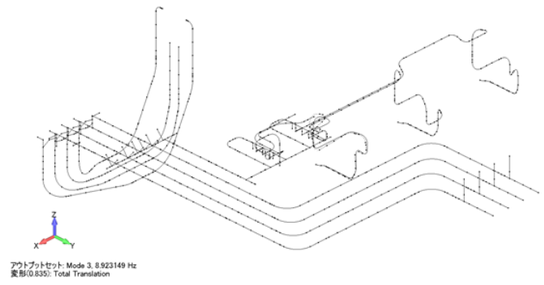
※1：モード質量が 1 となるように固有ベクトルを正規化して算出



（a） 1 次モード



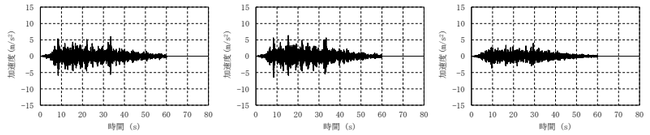
（b） 2 次モード



（c） 3 次モード

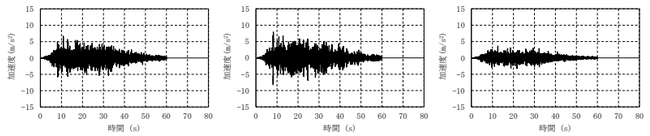
第 3－17 図　振動モード図

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考



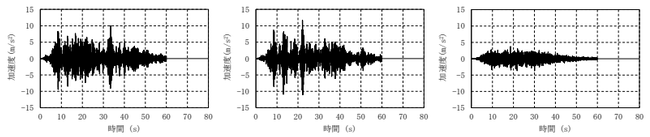
（ａ）ＮＳ方向　（ｂ）ＥＷ方向　（ｃ）鉛直方向

第 3－18 図　原子炉建物（２階：EL.23800）の加速度時刻歴



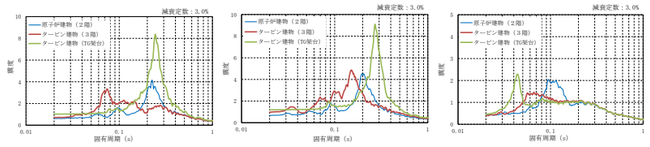
（ａ）ＮＳ方向　（ｂ）ＥＷ方向　（ｃ）鉛直方向

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)

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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※1	水平	117(kN)	350(kN)
	鉛直	36(kN)	140(kN)
最大変位※1	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※1	水平	117(kN)	156(kN)
	鉛直	36(kN)	140(kN)

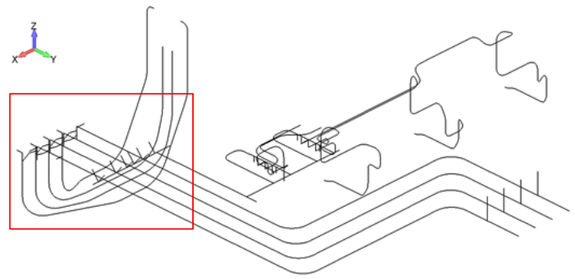
※1：最も厳しい結果を記載

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

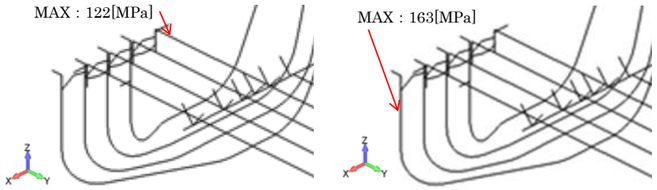
評価項目		発生値	解析条件
最大変位※1	水平	4.3(mm)	
	鉛直	2.7(mm)	
累積消費エネルギー※1	水平	12.3(kJ)	
	鉛直	3.6(kJ)	

※1：最も厳しい結果を記載

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考



（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。

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		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。したがって，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	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		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 巻，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 7th Structural Engineers World Congress 2019 Architecture and Structure：From Past to Future, Istanbul, Turkey, April 24-26, 2019.	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		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

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

第１－１－１液添表　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。	【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 【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 【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
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。	【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 【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 【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
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。	
⑦連続加振	作動中の減衰性能の変化について検討する。	
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。	【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 【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 【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 【参考資料-4】

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。	【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 【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 【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
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。	【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 【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
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。	【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
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。	【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 【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 【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

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

第１－１－２添表　減衰性能への影響の検討項目の抽出

項目※1		単軸粘性ダンパ		三軸粘性ダンパ	
		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	④温度	－	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）	○	屋内外の使用環境温度による減衰性能への影響を確認する。
	放射線	－	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経年劣化	－	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。
⑦速度		－	単軸粘性ダンパは押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性能試験により適切にモデル化する。	○	速度（振幅）※2による減衰性能への影響を確認する。
⑧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。
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。
ばらつき	⑩据付公差	－	単軸粘性ダンパはオリフィ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わずかであり，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。
⑪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，機構，漏洩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，減衰性能に影響はない、また，シリンダは粘性体で満たされ，密閉されているため揺露しない。	－	変位防止用ストッパー，台座，機構等の制震装置の動作を制限するものは設置しておらず，漏洩防止カバーにあるが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，使用環境において揺露は生じない。
⑫地震以外の外的事象		－	津波対策の実施により津波の襲来は防止しており，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。	－	津波対策の実施により津波の襲来は防止しており，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１－１－２添表内の各項目番号に対応している。
※２：三軸粘性ダンパへ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とは加振振幅を変更することと等しいため，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。

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

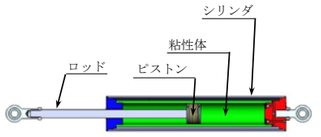
添付資料 1－2　既工認実績のある制震装置との差異の整理

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

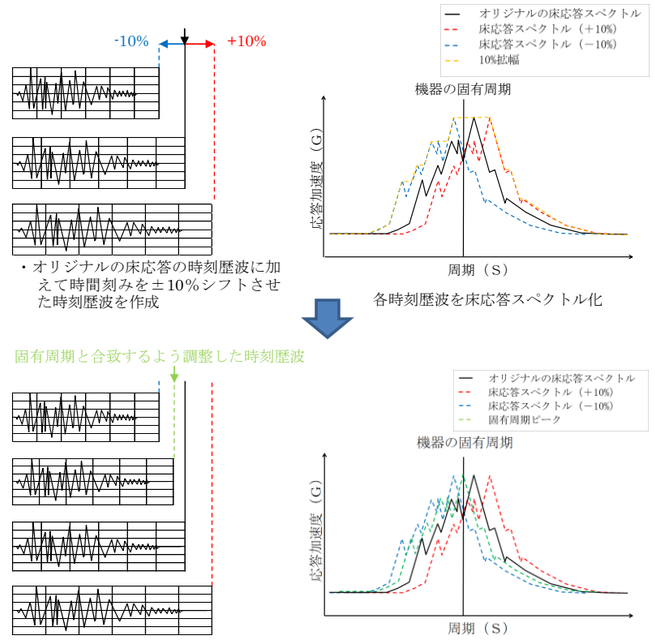
－3 添表に示す。その結果，追加の検討項目は抽出されず，必要な検討が行われていることを確認した。

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	Maxwell モデル	－	－
	解析手法	時刻歴応答解析	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	Maxwell モデル（４パラメータ）	－	－
	解析手法	時刻歴応答解析	時刻歴応答解析	－	－

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		添付資料１－３　Time History Broadening の概要 ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION Ⅲ, DIVISION1 －NONMANDATORY APPENDIX N（ARTICLE N－1222.3 Time History Broadening）より引用 [redacted]  ・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。	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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）
	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	
4．1 使用材料及び材料定数	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。	同左	―（考慮済）
	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, 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い，影響が軽微であることを確認する（添付資料１－３参照）。	同左	―（考慮済）

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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）

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	
4．2 荷重及び荷重の組合せ	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。	同左	― （考慮済）
4．3 許容限界	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。	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。	― （考慮済）
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	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「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。	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「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。	― （考慮済）

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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）

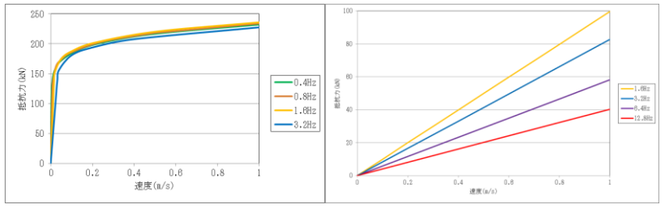
検討事項 （工認審査ガイド 4. 機器・配管系 に関する事項）	工認審査ガイドに対応した耐震評価方法の設定にあたっての検討内容 単軸粘性ダンパを設置する取水槽ガントリクレーン	三軸粘性ダンパを設置する配管系	追加検討事項の有無 （○：有 ―：無）
４．４．２ 入力地震力	入力地震力は，取水槽ガントリクレーン設置位置の応答波を用いる。	入力地震力は，配管系設置位置の応答波を用いる。	― （考慮済）
４．５ 構造設計手法 ４．５．１ 構造解析手法及び構造解析モデル	構造解析手法及び構造解析モデルは，工認審査ガイドに例示されている規格及び基準等並びに新規制審査実績を参考に設定する。構造解析モデルの材料定数は，「４．１ 使用材料及び材料定数」による。	同左	― （考慮済）
４．５．２ 水平方向及び鉛直方向地震力の組合せ	水平２方向及び鉛直方向の動的地震力の組合せに関しては，三方向同時入力により地震応答解析を行う。	同左	― （考慮済）

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 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	追加検討 事項の有無 （○：有 －：無）
４．６ 基準地震動Ｓｓ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Ｓｓ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Ｓｄ機能維持設計）であり，基準地震動Ｓｓ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】 － （対象外） 【配管系】
４．６．２ 動的機能	取水槽ガントリクレーンは，基準地震動Ｓｓ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Ｓｄ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）
４．７ 弾性設計用地震動Ｓｄ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Ｓｓ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Ｓｄ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Ｓｄ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】

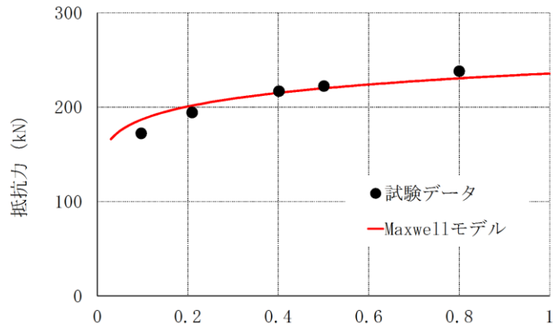
柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		添付資料１－５　制震装置に応じた減衰性能の表現及びモデル化 本資料では，単軸粘性ダンパと三軸粘性ダンパについて減衰性能の特性を整理し，その違いを踏まえた減衰性能の表現及びモデル化の考え方を示す。 1.　制震装置の減衰性能の振動数依存性 単軸粘性ダンパと三軸粘性ダンパについて，振動数を変化させた場合の速度と抵抗力の関係を第１－５－１添図に示す。 単軸粘性ダンパは，微小速度の領域を除けば速度の変化に対して抵抗力の変化が小さい。一方，三軸粘性ダンパは，速度と抵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 Mawxwell 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）。	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

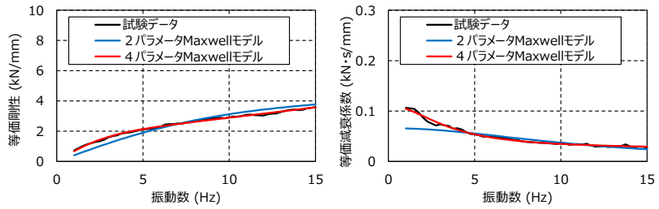


（ａ）単軸粘性ダンパ　　（ｂ）三軸粘性ダンパ

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

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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	抵抗力は，材料の初期剛性，二次剛性で決まる。	なし	△	塑性変形で地震エネルギーを吸収しており，繰り返しにより抵抗力が高いため，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		地震荷重	抵抗力は，摩擦材の締め付け力等で決定し，履歴曲線は矩形に近い。		○	粘性ダンパと特性は類似しているが，加振繰り返し回数が多くなると，性能が変化する場合がある。
	鉛ダンパ	鉛の塑性流動抵抗力を利用してエネルギーを吸収するダンパ			抵抗力は鉛の初期剛性，二次剛性で決まる。		△	塑性変形で地震エネルギーを吸収しており，繰り返しにより抵抗力が変化する。
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	◎	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。		○	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。
	粘性ダンパ	粘性体の流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ	3 方向		抵抗力は速度に比例し，履歴曲線は楕円に近い。	海外での適用例あり	△	取水槽ガントリクレーンは 1 軸方向の地震荷重の低減を必要としているため，3 方向の減衰は必要ない。

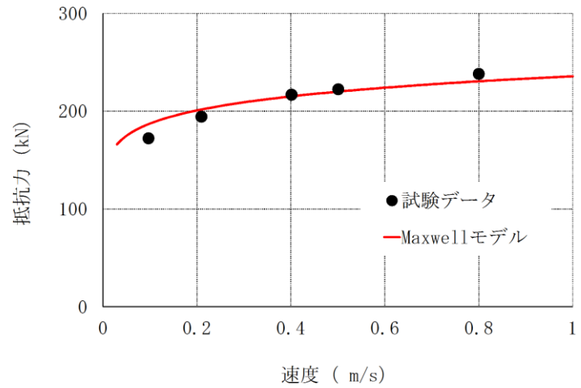
凡例　◎：適用可能（有効性が最も高い）　○：適用可能　△：適用するために課題がある　×：適用不可

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		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	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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。

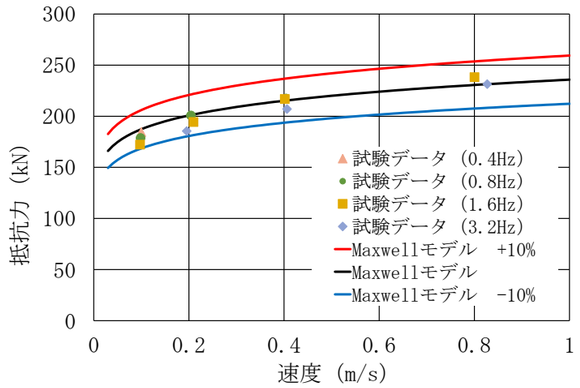
第2－3－1添表　加振振動数を変更した特性試験の試験条件

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

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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併せて示しているが，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。

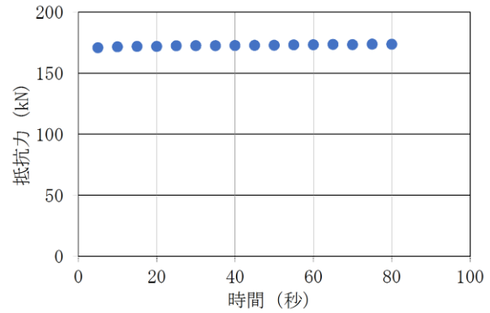
第2－3－2添表　連続加振による試験条件

入力波	振動数（Hz）	振幅（㎜）	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。

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考



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

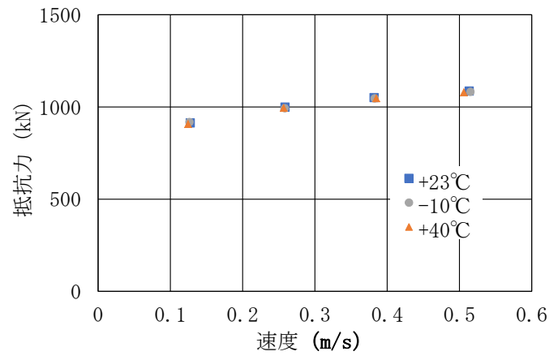
試験条件を第 2－3－3 添表に示す。屋外に設置することから，温度は－10℃，23℃，40℃の 3 段階とした。

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（℃）
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。温度が異なっていても，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。

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		 第２－３－３添図　温度依存性試験結果	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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（クレーンの剛性マトリクスの要素として考慮）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。

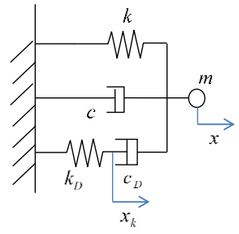
$$[M]\{\ddot{x}\}+[C]\{\dot{x}\}+[K]\{x\}+[C_D]\left[\dot{X}_D^{0.1}\right]\{I\}=-[M]\{I\}\ddot{y} \quad (1)$$

$[M]$，$[C]$，$[K]$：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

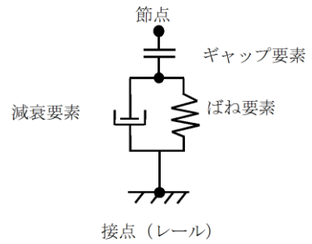
$$\{x\}=\begin{pmatrix} x \\ x_k \end{pmatrix} \quad (2)$$

とすると，この系の運動方程式は以下となる。

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		$m\ddot{x}+c\dot{x}+kx+c_D\left(\dot{x}-\dot{x}_k\right)^{0.1}=-m\ddot{y}$ （3） $k_D(x_k)-c_D\left(\dot{x}-\dot{x}_k\right)^{0.1}=0$ （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$[C_D]\left[\dot{\boldsymbol{X}}_D{}^{0.1}\right]\{I\}$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。 $[C]=\alpha[M]+\beta[K]$ （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 α，β：係数 係数α，β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。 $h=\frac{\alpha}{2\omega_n}+\frac{\beta\omega_n}{2}$ （6） h：減衰比 ω_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

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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

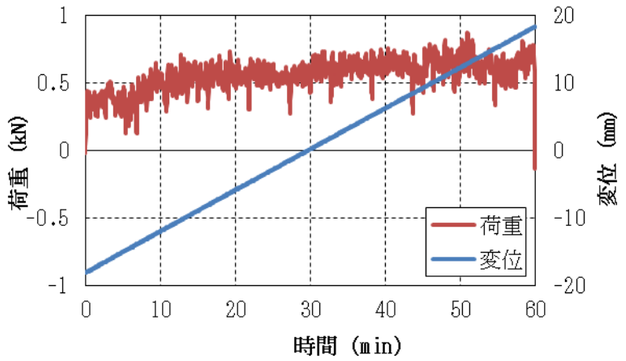
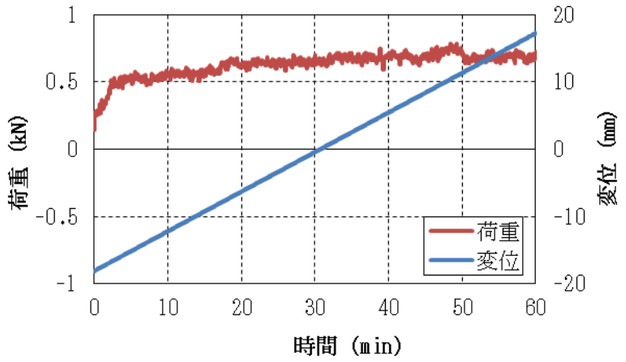
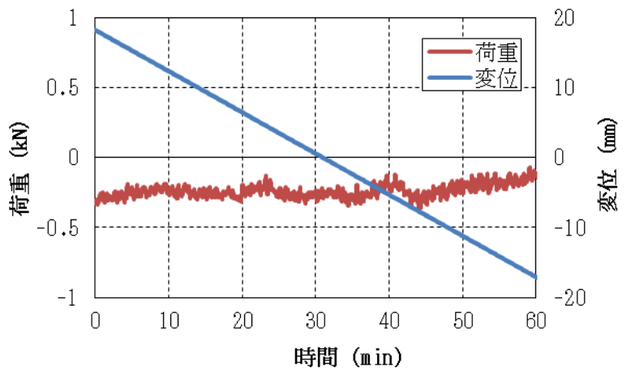
低速移動試験の試験条件を第 3－1－1 添表に示す。熱膨張が大きい主蒸気系配管等がプラント起動時に約 4.5 時間で通常運転温度まで昇温することから，大型ダンパの水平方向許容変位 72mm と等しい熱変位が約 4.5 時間で生じることを想定した場合の速度 0.005mm/s に余裕をみて，試験条件は 0.01mm/s とした。

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。

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		 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	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		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	摩擦抵抗力を利用してエネルギーを吸収するダンパ			抵抗力は，摩擦材の締め付け力等で決定し，履歴曲線は矩形に近い。		△	
	鉛ダンパ	鉛の塑性流動抵抗力を利用してエネルギーを吸収するダンパ			抵抗力は鉛の降伏剛性，二次剛性で決まる。		△	
粘性型	単軸 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 c 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。
	単軸 粘性ダンパ（減衰）	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	○	
	単軸 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 c 乗（0.4～1）に比例し，履歴曲線は楕円に近い。		○	
	三軸 粘性ダンパ	粘性体の流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ	3 方向		抵抗力は速度に比例し，履歴曲線は楕円に近い。	海外での適用例あり	◎	三方向に減衰性能を発揮するため，三方向に応答する配管系に適している。

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

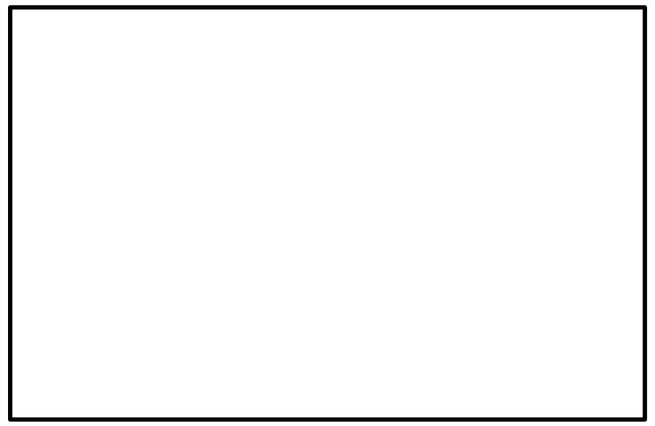
柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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 SECTIONⅢ，DIVISION1-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	支持構造物と建物・構築物との取合について記載されており，Figure NF-1132-1 の典型例の中に三軸粘性ダンパが図示されている（第３－３－１添図参照）。
	NF-1200 TYPES OF SUPPORTS AND ATTACHMENTS	NF-1210 TYPES OF SUPPORTS	NF-1214 Standard Supports	基本的な支持構造物の例として三軸粘性ダンパが記載されており，Figure NF-1214-1 の支持装置の典型例の中に三軸粘性ダンパが図示されている（第３－３－１添図参照）。
			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。
			NF-E-1220 FUNCTION	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。
			NF-E-1230 APPLICATIONS	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。
NONMANDATORY APPENDIX NF-E DAMPERS, ENERGY ABSORBERS, AND SNUBBERS ARTICLE NF-E-1000	NF-E-1210 DAMPERS		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。

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		 第 3－3－1 添図　ASME Boiler and Pressure Vessel Code の関連図	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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，加振台仕様を第３－４－２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

第３－４－２添表　加振台仕様

寸法		4m×4m
最大積載量		60t
運転周波数帯域		DC-70Hz
最大加速度※1	水平	3G
	鉛直	3G

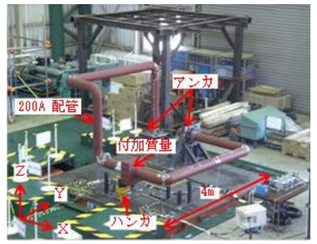
※１：定格積載量（20t）での最大加速度を示す。

2.　加振試験条件

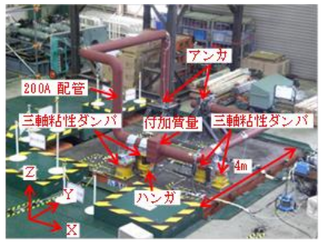
2.1　試験体

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箇所でアンカにより固定され，１箇所でスプリングハンガにより支持されており，弁を模擬した付加質量（372kg）を有する。ダンパ設置配管には，三軸粘性ダンパを配管系の２箇所に合計４台（２箇所×２台）設置した。

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

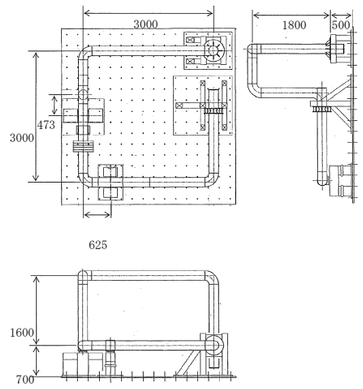


配管系試験体（ダンパ無配管）



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

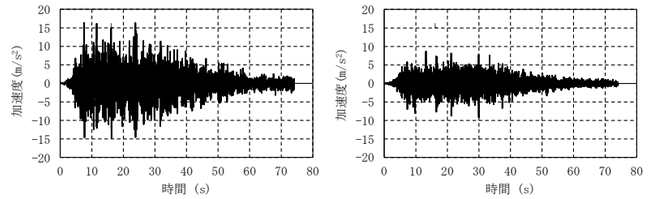
2.2　入力地震波

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Ｓｓ－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。

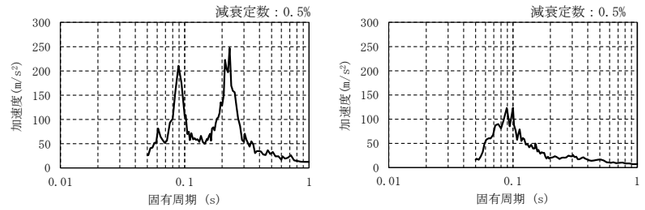
各試験ケースにおける加速度レベルを第 3－4－3 添表に示す。

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考



（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 3－4－3 添表　地震波加振の試験ケース

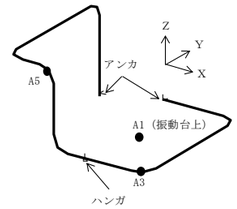
No.	試験体条件	加速度レベル(m/s²)	
		Ｘ方向	Ｚ方向
1	ダンパ無配管	1.5	0.84
2		2.5	1.41
3	ダンパ設置配管	2.5	1.41
4		10	5.6
5		18	10.1

3.　加振試験結果

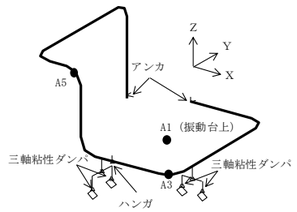
3.1　正弦波掃引試験結果

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 3－4－4 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 3－4－5 添表に示す。第 3－4－5 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

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		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。	

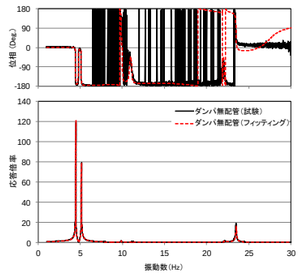


配管系試験体（ダンパ無配管）

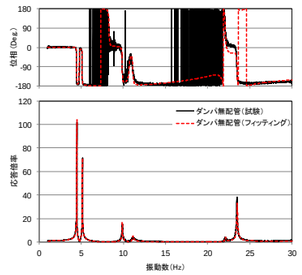


配管系試験体（ダンパ設置配管）

第 3－4－5 添図　配管系試験体の概略図

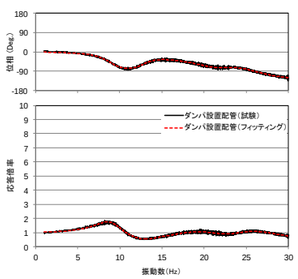


（1）A3X/A1X

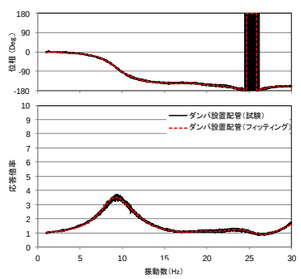


（2）A5X/A1X

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，0.5m/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 1.0m/s^2）

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

第 3－4－4 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

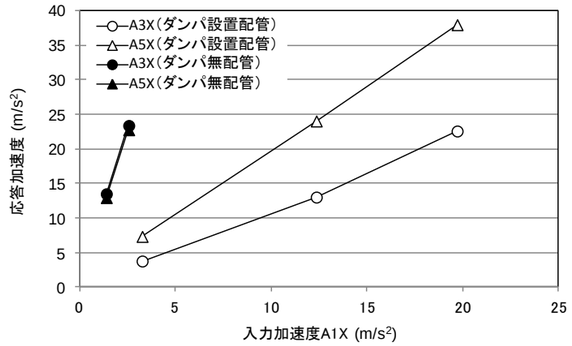
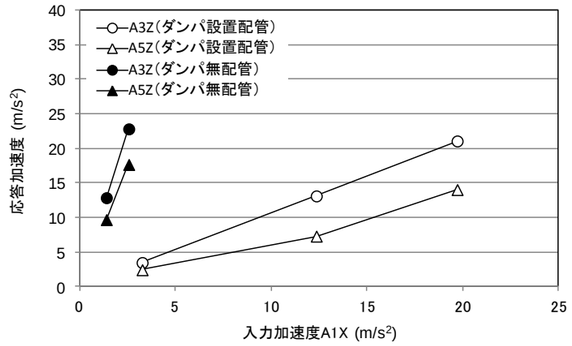
第 3－4－5 添表　固有振動数とモード減衰比（ダンパ設置配管）

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

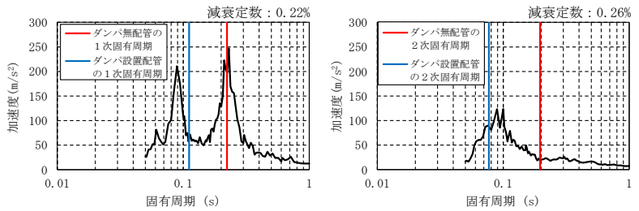
3.2　地震波加振の試験結果

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，

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		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）	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考



（ａ）Ｘ方向入力　　（ｂ）Ｚ方向入力

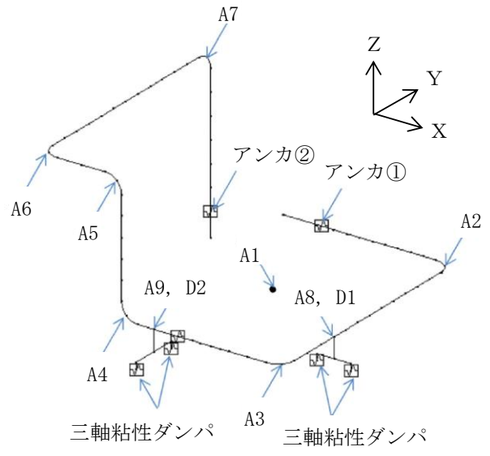
第３－４－10 添図　卓越モードの固有周期における応答スペクトルの比較

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。なお，解析手法は「3.2.4 地震応答解析手法」のとおりであり，その詳細を添付資料3－9に示す。



第3－4－11添図　解析モデル

4.2　解析ケース

「3.2.3 項(3)b.ばらつきの考慮」に基づき，三軸粘性ダンパの減衰性能のばらつきを考慮して設定した上限の減衰性能（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

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

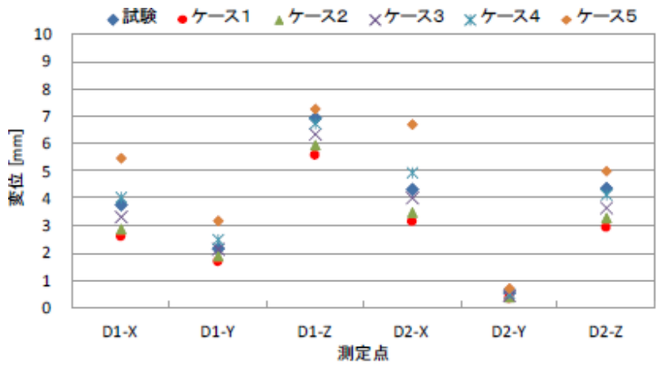
減衰性能により地震応答解析を実施した。地震応答解析ケースを第3－4－6 添表に示す。なお，地震応答解析の対象とする試験ケースは，Ｘ方向及びＺ方向の最大加振ケース（Ｘ方向：19.7m/s^2，Ｚ方向：10.6m/s^2）とした。

第3－4－6添表　解析ケース

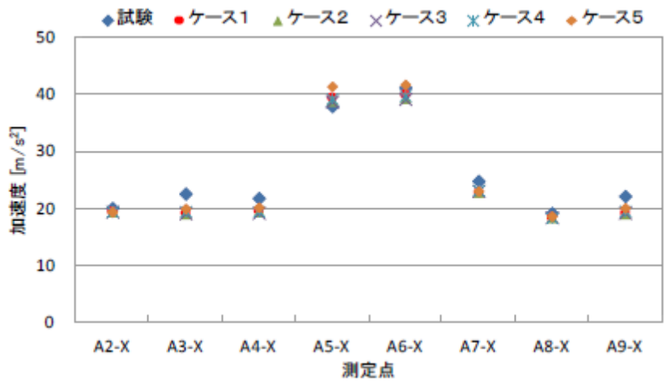
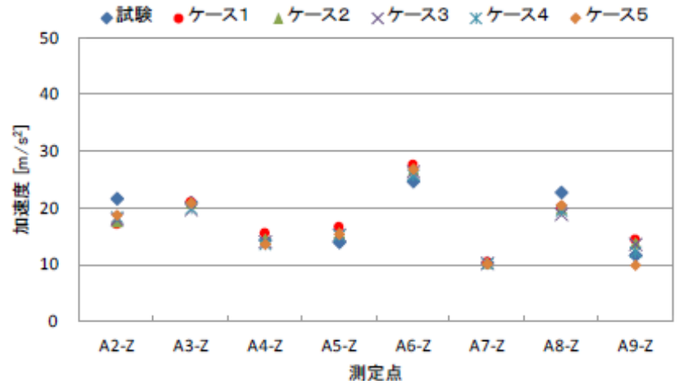
解析ケース	減衰性能
1	K_1，C_1（上限）
2	均等に内挿
3	
4	
5	K_5，C_5（下限）

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

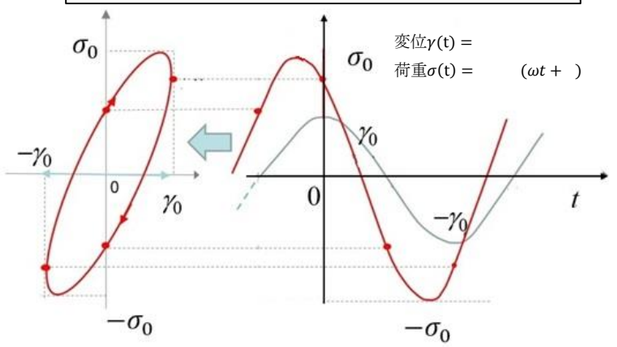
柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		 （ａ）Ｘ方向  （ｂ）Ｚ方向 第 3－4－13 添図　最大応答加速度 4.4　解析結果の考察 上限の減衰性能（K_1，C_1），下限の減衰性能（K_5，C_5）及びその間に内挿した減衰性能で地震応答解析を行い，最大応答変位及び最大応答加速度を適切に評価できることを確認した。最大応答変位については，解析結果が試験結果を上回っており，地震動による配管応力を保守的に評価することができる。	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		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 γ(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 δ(0～π/2)進んだ荷重σ(t)（式（２））が生じる。 $(t) = \gamma_0 \cos \omega t$　（１） $(t) = \sigma_0 \cos(\omega t + \delta)$　（２） $_0$：変位の振幅　ω：変位の角振動数　σ_0：荷重の振幅 δ：位相角（変位及び荷重の位相差） 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。 $(t) = \sigma_0 \cos(\omega t + \delta)$ $= \sigma_0 \cos\delta \cdot \cos\omega t - \sigma_0 \sin\delta \cdot \sin\omega t$ $= \frac{\sigma_0}{\gamma_0}\cos\delta \cdot \gamma_0 \cos\omega t - \frac{\sigma_0}{\gamma_0}\sin\delta \cdot \gamma_0 \sin\omega t$　（３） 式（３）の最大変位 γ_0と最大荷重 σ_0 の比 σ_0/γ 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添図のリサージュ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。したがって，等価減衰係数Ｃは式（５）となる。 $_0\gamma_0 sin\delta = C\gamma^2{}_0\,\omega$　（４） $= \frac{\sigma_0}{\gamma_0\omega}\sin\delta$　（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。	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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。

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



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（＝ω_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σ(t)を以下に示す。

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

γ_0：変位の振幅　ω：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

又は，

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

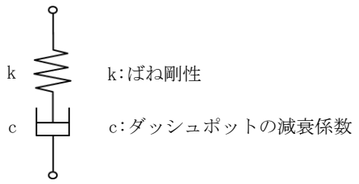
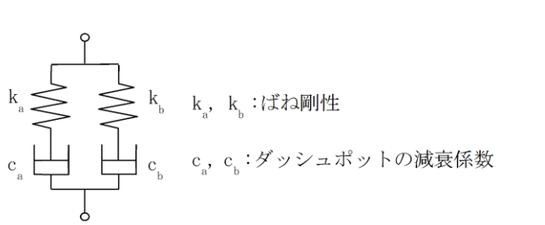
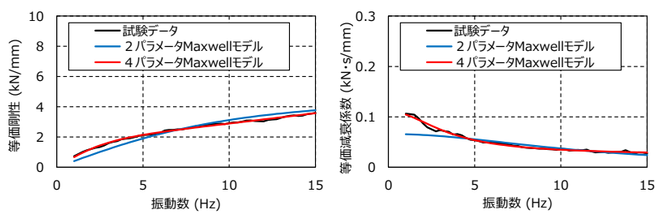
K：三軸粘性ダンパの等価剛性$\left(=\sqrt{K_e^2 + K_v^2}\right)$　δ：位相角 $\left(=\tan^{-1}(K_v / K_e)\right)$

Maxwell モデルの場合，K_e及びK_vは以下の式で与えられる。

$$K_e = k(\omega/\omega_0)^2/(1+(\omega/\omega_0)^2)$$
$$K_v = k(\omega/\omega_0)/(1+(\omega/\omega_0)^2) \qquad (8)$$

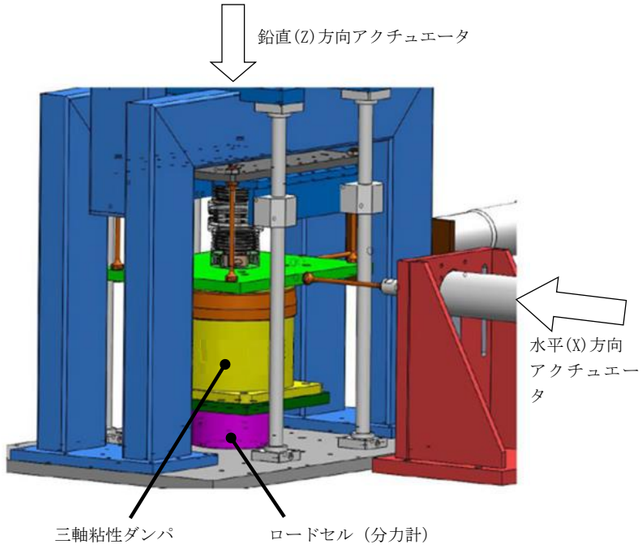
k：Maxwell モデルのばね剛性　ω_0：Maxwell モデルの特性振動数

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

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		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。 $$K_e = K_a(\omega/\omega_a)^2/(1+(\omega/\omega_a)^2)+K_b(\omega/\omega_b)^2/(1+(\omega/\omega_b)^2)$$ $$K_v = K_a(\omega/\omega_a)/(1+(\omega/\omega_a)^2)+K_b(\omega/\omega_b)/(1+(\omega/\omega_b)^2) \quad (9)$$ 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）	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		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。	

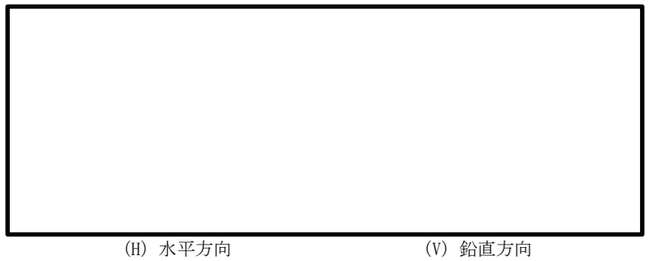
柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考



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

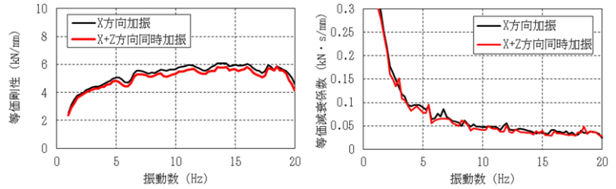
No.	型式	温度（℃）	加振方向	入力波形	振幅（mm）	継続時間（s）
1	中型	20	水平	ランダム波	3	32
2			鉛直			
3			水平・鉛直			



（H）水平方向　　（V）鉛直方向

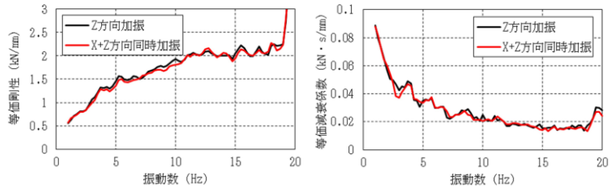
第 3－6－2 添図　変位の時刻歴波形

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考



（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

2.　放射線照射試験

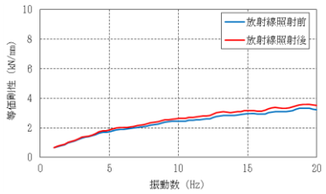
放射線による三軸粘性ダンパの減衰性能への影響を確認するため，γ線照射量を変えた第 3－6－2 添表に示す試験条件にて三軸粘性ダンパの性能試験を実施した。γ線照射量は，島根２号炉の一般管理区域における 40 年間積算放射線量 0.004kGy に余裕を見た 1kGy とした。

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。

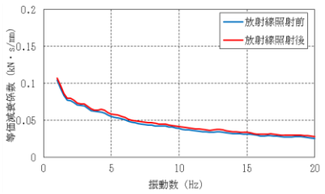
第 3－6－2 添表　放射線照射試験条件

No.	型式	温度（℃）	加振方向	入力波形	振幅（mm）	継続時間（s）	γ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

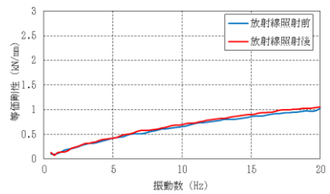
柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考



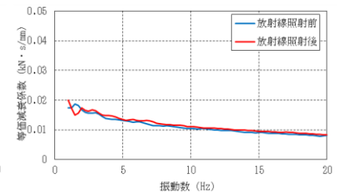
（H－1）等価剛性（水平方向）



（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

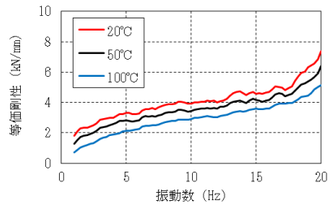
粘性体温度による三軸粘性ダンパの減衰性能への影響を確認するため，粘性体温度を変えた第 3－6－3 添表の試験条件にて三軸粘性ダンパの性能試験を実施した。

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。

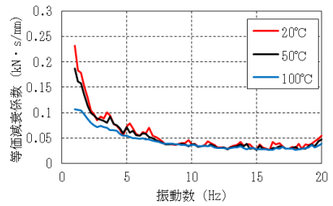
第 3－6－3 添表　粘性体温度を変えた性能試験条件

No.	型式	温度（℃）	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				

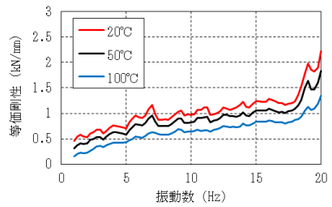
柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考



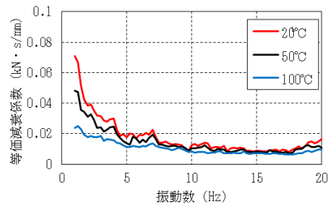
（H－1）等価剛性（水平方向）



（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

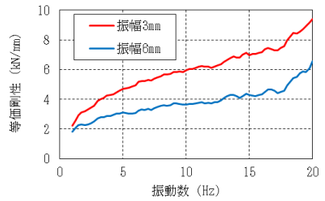
振幅の大きさによる三軸粘性ダンパの減衰性能への影響を確認するため，振幅を変えた第 3－6－4 添表の試験条件にて三軸粘性ダンパの性能試験を実施した。

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。

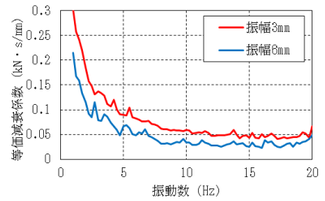
第 3－6－4 添表　加振振幅を変えた性能試験条件

No.	型式	温度（℃）	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			

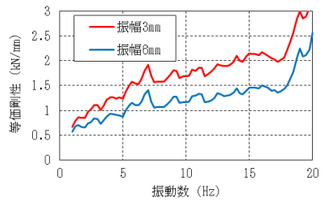
柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考



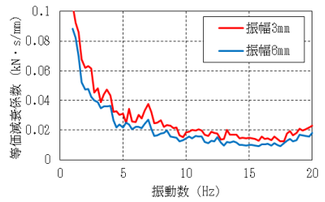
（H－1）等価剛性（水平方向）



（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。

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

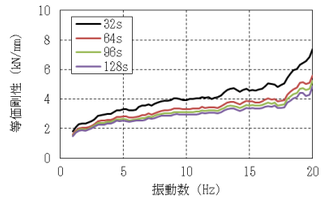
ここで，

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

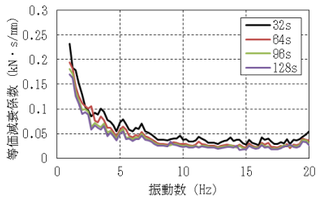
柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

第 3－6－5 添表　連続加振試験条件

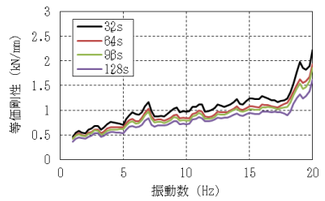
No.	型式	温度（℃）	加振方向	入力波形	振幅（mm）	継続時間（s）
1	中型	20	水平	ランダム波	6	32
2			鉛直			
3			水平			64
4			鉛直			
5			水平			96
6			鉛直			
7			水平			128
8			鉛直			



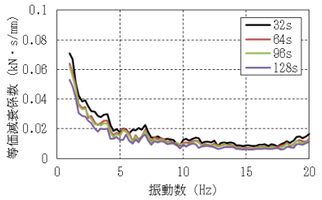
（H－1）等価剛性（水平方向）



（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

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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。

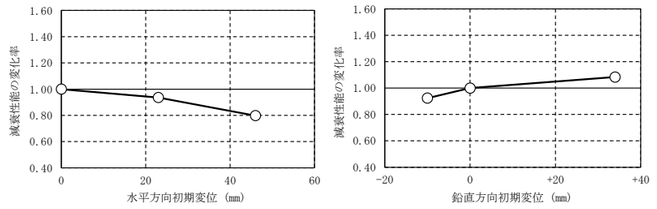
試験により把握した初期変位による減衰性能への影響を第３－７－２添表に整理する。試験結果に基づき，初期変位による減衰性能への影響が±20％以内となるようにピストン位置の基準を定めて管理する。なお，本資料では，中型の三軸粘性ダンパを代表として試験結果を示したが，大型の三軸粘性ダンパについても初期変位による減衰性能への影響について同様の管理を行う。

第３－７－１添表　初期変位の影響確認試験条件

No.	型式	温度（℃）	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					

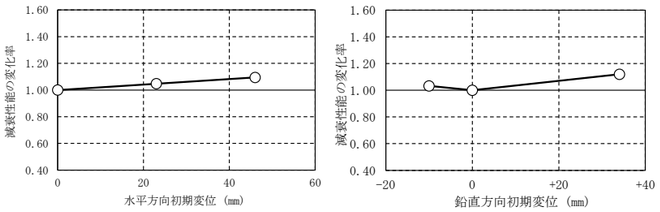
※１：鉛直方向の初期変位についてはピストンを引き抜く方向をマイナスとする。

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考



（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



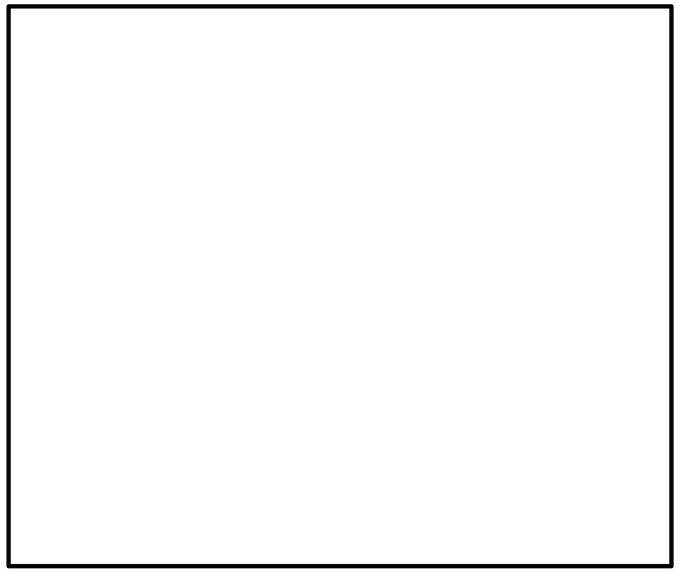
（H）水平方向初期変位　　（V）鉛直方向初期変位

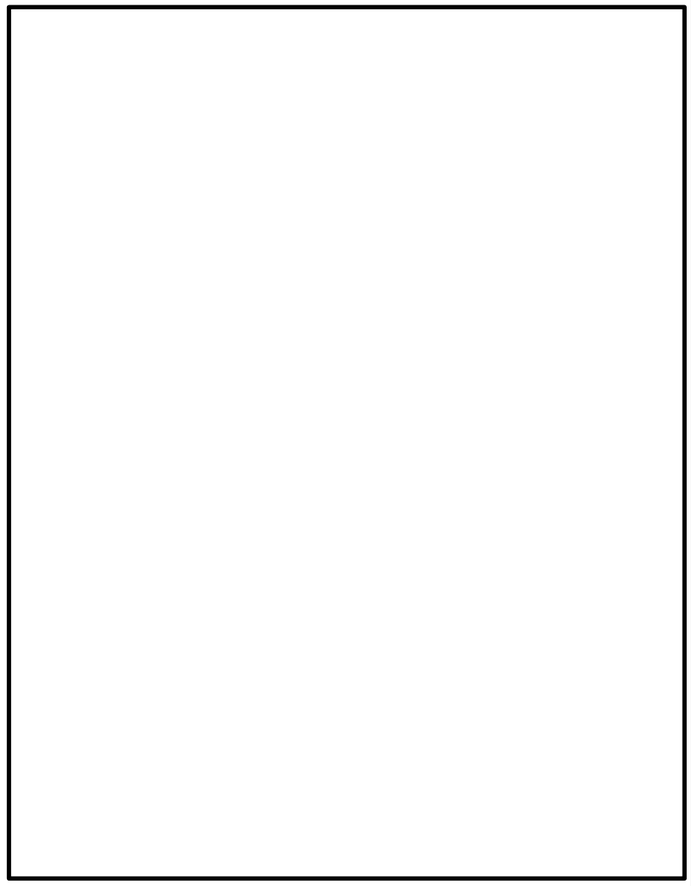
第 3－7－2 添図　鉛直方向の減衰性能の変化

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

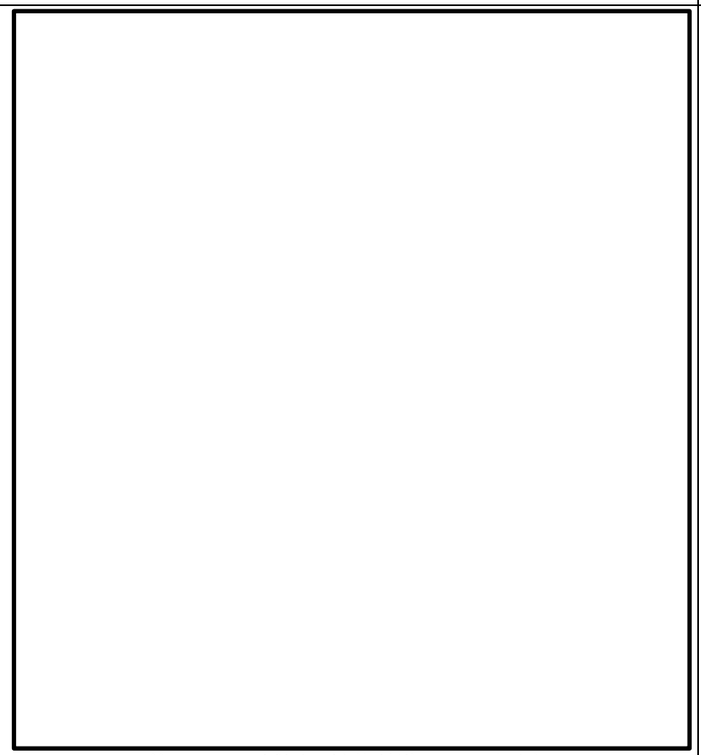
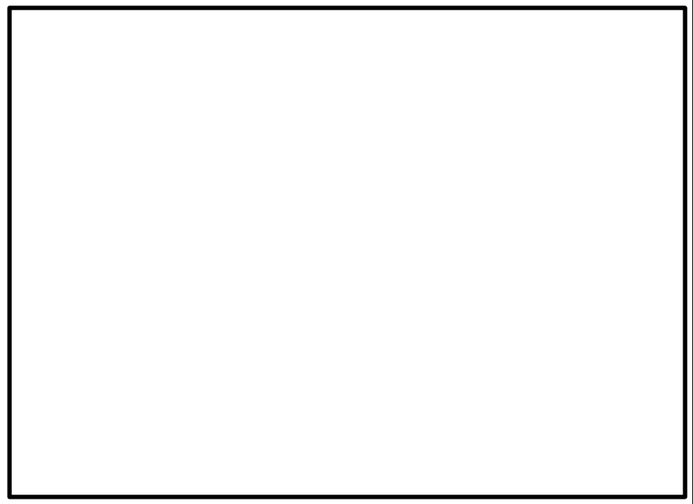
	減衰性能への影響	
	水平方向初期変位	鉛直方向初期変位
水平方向の減衰性能	初期変位が大きいほど直線的に減衰性能が低下する（最大で−20%となる）。	上向きの初期変位に対しては減衰性能が低下する（−10mm に対して−10%未満）。 下向きの初期変位に対しては減衰性能が高くなる（最大で+10%未満）。
鉛直方向の減衰性能	初期変位が大きいほど直線的に減衰性能が大きくなる（最大で+10%未満）。	上向きの初期変位に対しては減衰性能の変化は軽微である。 下向きの初期変位に対しては減衰性能が高くなる（最大で+13%未満）。

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		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_{High}，C_{High}）と低側ダンパ試験性能（K_{Low}，C_{Low}）を取得する。高側ダンパ試験性能（K_{High}，C_{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_{Low}，C_{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。	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		第 3－8－1 添表　三軸粘性ダンパの性能試験条件の例 	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
			

第３－８－１ 添図　性能試験フロー(1/3)

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		 第 3－8－1 添図　性能試験フロー(2/3)  第 3－8－1 添図　性能試験フロー(3/3)	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

添付資料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

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ω_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。

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

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。

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

ここで，

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

減衰マトリックス$[C]$の値が小さい場合は，式（６）に示した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β_i及びｉ次モードの固有角振動数ω_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

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		解析を行う方法としては，モード解析を用いて，三軸粘性ダンパによって与えられる減衰が非対角項にある状態のまま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あり，MSC.Nastran の標準機能として実装されている(1)。本手法は，対角化できない減衰マトリックスが存在する場合にモード座標において連成した運動方程式を解く時刻歴モーダル解析手法であり，モード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。この方法を用いることで配管系の設計用減衰定数と対応したモード減衰を考慮することができる。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。 $[C]=[C_P]+[C_D]$ （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。 $[\Lambda]^T[C_P][\Lambda] \cong \begin{bmatrix} \ddots & & 0 \\ & 2\zeta_i\omega_i & \\ 0 & & \ddots \end{bmatrix}$ （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。 $[M]\{\ddot{x}_a\}+[C]\{\dot{x}_a\}+[K]\{x_a\}=-[M]\{I\}\ddot{y}_0-[\tilde{C}]\{\dot{x}_b\}-[\tilde{K}]\{x_b\}$ （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	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		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。 【参考文献】 (1)　MSC.Nastran ユーザーガイド　基礎動解析	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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※1	K_1，C_1	3.19×10^5(N・m)
	K_2，C_2	3.27×10^5(N・m)
	K_3，C_3	3.30×10^5(N・m)
	K_4，C_4	3.38×10^5(N・m)
	K_5，C_5	3.59×10^5(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※1	K_1，C_1	117(kN)	36(kN)
	K_2，C_2	104(kN)	31(kN)
	K_3，C_3	84(kN)	24(kN)
	K_4，C_4	69(kN)	18(kN)
	K_5，C_5	36(kN)	9(kN)
最大変位※1	K_1，C_1	1.4(mm)	1.7(mm)
	K_2，C_2	1.6(mm)	1.8(mm)
	K_3，C_3	1.8(mm)	2.1(mm)
	K_4，C_4	2.4(mm)	2.3(mm)
	K_5，C_5	4.3(mm)	2.7(mm)

※１：最も厳しい結果を記載

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		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。	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		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とき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，下部クランプに一様な圧力が p_l が生じた状態を考える。第 3－	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		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_{lN}は式（５）となる。 $$F_{lN} = p_l \cdot \frac{D}{2} \cdot 2\alpha \cdot B = \frac{F_c}{D \cdot B \cdot \sin\alpha} \cdot \frac{D}{2} \cdot 2\alpha \cdot B = \frac{F_c \cdot \alpha}{\sin\alpha} \quad (5)$$ 摩擦係数をμ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。 $$F_{lf} = \mu \cdot F_{lN} = \frac{\mu \cdot F_c \cdot \alpha}{\sin\alpha} \quad (6)$$ 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。	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

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

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

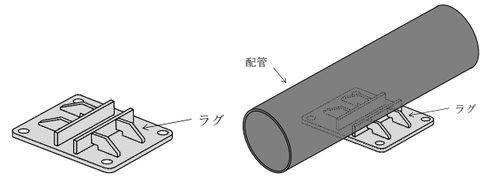
許容荷重F_f及びF_aを式（７），（８）及びクランプの諸元により算出した結果を第 3－11－1 添表に示す。なお，クランプの構造成立性の確認にあたっては，値の小さい軸直角方向の許容荷重F_aを水平方向の共通の許容荷重として第 3－11－2 添表のとおり設定する。

（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ＪＥＡＧ４６０１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。

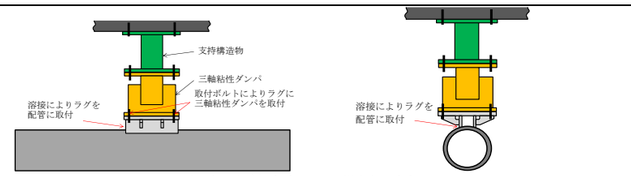
３．　配管系への三軸粘性ダンパの配置計画の成立性について

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。

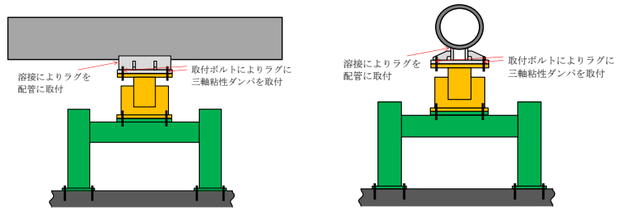


第 3－11－1 添図　ラグの構造概要

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

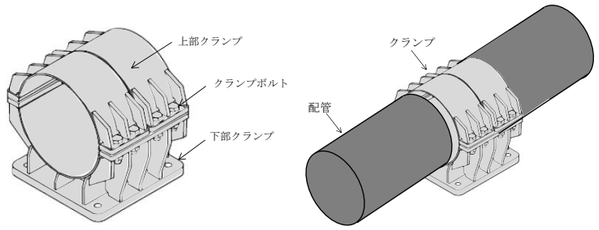


（ａ）配管上部への設置の例



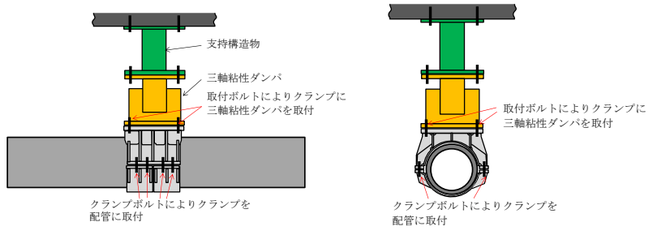
（ｂ）配管下部への設置の例

第 3－11－2 添図　ラグの配管への取付及び三軸粘性ダンパへの接続

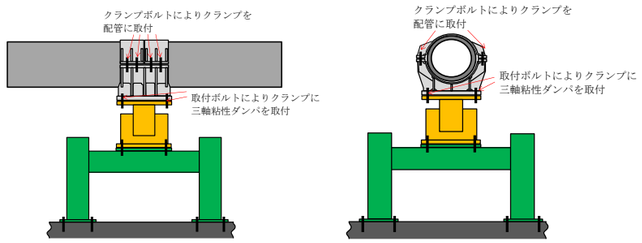


第 3－11－3 添図　クランプの構造概要

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

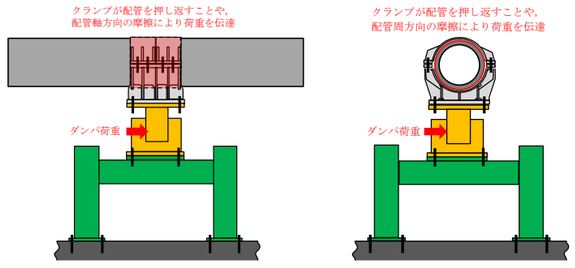


（ａ）配管上部への設置の例



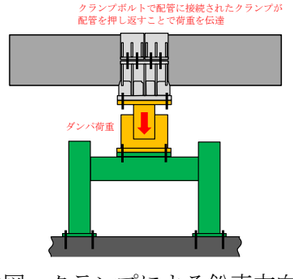
（ｂ）配管下部への設置の例

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



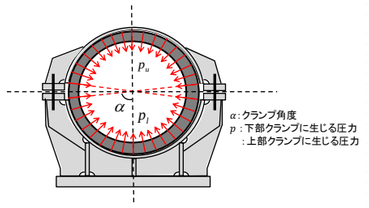
（ａ）配管軸方向荷重の伝達　　（ｂ）配管軸直方向荷重の伝達

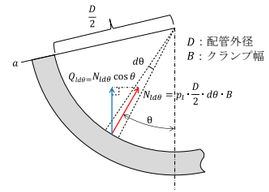
第 3－11－5 添図　クランプによる水平方向の荷重伝達機構



第 3－11－6 添図　クランプによる鉛直方向の荷重伝達機構

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考





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 μ	締付力 F_c(kN)	クランプ角度 α（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) π	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)※1
鉛直方向		140(kN)※2

※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※1
引張応力	25(MPa)	398(MPa)

※1：許容応力状態 $B_A S$ の許容応力

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考

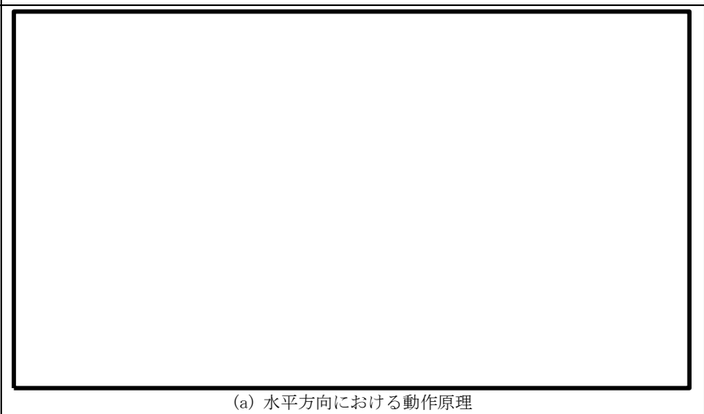
添付資料３－12　三軸粘性ダンパの耐震評価方法に関する海外実績との比較

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。

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		添付資料 3－13　三軸粘性ダンパの動作原理について １．概要 本資料は，主蒸気系配管等に設置する三軸粘性ダンパの動作原理について示す。三軸粘性ダンパは，粘性体の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の相対運動により，相対運動の方向と逆向きに抵抗力が生じ，減衰性能を発揮する。 一般的に流体中を物体が運動するとき，物体の運動と逆向きに抗力が作用する。抗力は物体の表面に垂直に働く圧力抵抗と物体の表面に平行に働く粘性抵抗（または摩擦抵抗という）に大別され，これらを合わせたものが三軸粘性ダンパの抵抗力となる。三軸粘性ダンパの設計では，内部のピストン等の形状の工夫や高粘度の粘性流体を使用することにより，大きな抵抗力を得られる設計としている。 ２．動作原理 三軸粘性ダンパが水平方向に動作する際の抵抗力を第 3－13－1 添図(a)に示す。ピストンが左方向に移動する際，ピストンの左側には粘性体を押しのけることで圧力抵抗（正圧）が作用し，ピストンの右側はピストンが移動したことにより圧力抵抗（負圧）が作用し，速度に応じた抵抗力が生じる。また，ピストンには，ピストン表面と平行に粘性体の速度勾配に応じた粘性抵抗（ピストン上下の矢印参照）の合力が生じる。 次に三軸粘性ダンパが鉛直方向に動作する際の抵抗力を第 3－13－1 添図(b)に示す。ピストンが下方向に移動する際，水平方向の動作原理と同様にピストン下部のプレートの上下に圧力抵抗（上面が負圧，下面が正圧）が生じ，ピストンの表面には粘性抵抗が生じる。 実際の三軸粘性ダンパの減衰性能は，内部流体が理想的な粘性体ではなく粘弾性の特性を有していることから，粘性的特性（速度成分に応じた抵抗力）及び弾性的特性（変位成分に応じた抵抗力）の両者を有している。粘弾性体としての三軸粘性ダンパの具体的な減衰性能は，当該粘性ダンパを用いた性能試験により確認している（添付資料 3－8 参照）。また，粘弾性体としての減衰性能は，Maxwell モデルにより表現することができる（添付資料 3－5 参照）。	

柏崎刈羽原子力発電所　６／７号炉　（2017.12.20 版）	東海第二発電所（2018.9.18 版）	島根原子力発電所　２号炉	備考
		 (a) 水平方向における動作原理 (b) 鉛直方向における動作原理 第 3－13－1 添図　三軸粘性ダンパの動作原理について	