別紙－15

島根原子力発電所２号炉

動的機能維持評価の検討方針について

目　　次

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

7.　弁の動的機能維持評価に用いる配管系の応答値について

別表１　検討対象設備の抽出結果

添付資料１　高圧原子炉代替注水ポンプの加振試験について

参考資料１　ガスタービン発電機の加振試験について

1. はじめに

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

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

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

実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈(抜粋)

第５条(地震による損傷の防止)

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

耐震設計に係る工認審査ガイド(抜粋)

4.6.2 動的機能

【審査における確認事項】

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

【確認内容】

動的機能については以下を確認する。

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

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

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

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

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

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

(1) 検討対象設備

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

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

(2) 新たな検討，詳細検討又は加振試験が必要な設備の抽出

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

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

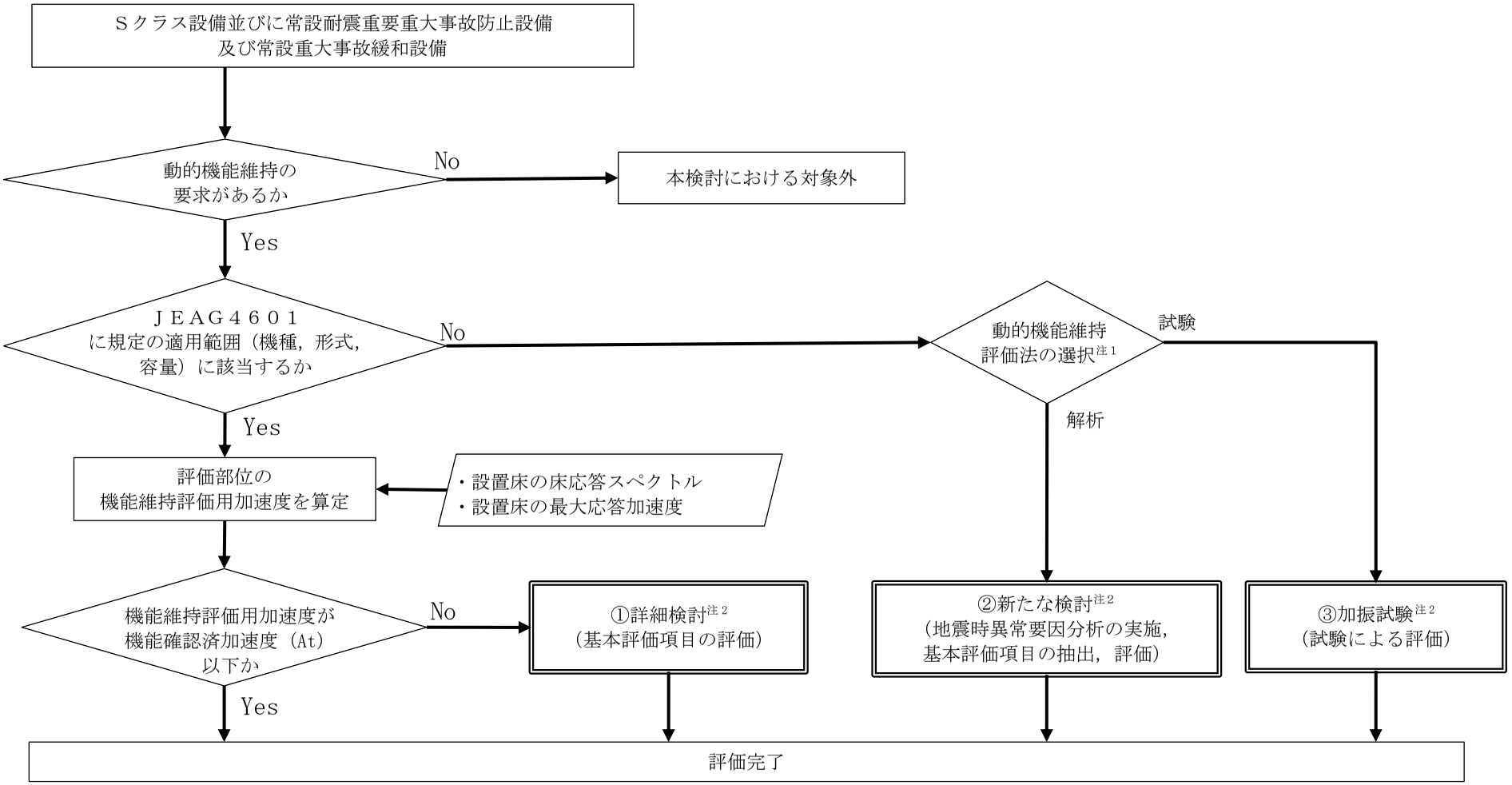
さらに，機能維持評価用加速度がＪＥＡＧ４６０１及び既往の研究※等により妥当性が確認されている機能確認済加速度（Ａｔ）以下であることの確認を行い，機能確認済加速度を超える設備については詳細検討(基本評価項目の評価)が必要な設備として抽出する。

なお，弁についてはＪＥＡＧ４６０１にて機能維持評価用加速度が機能確認済加速度を超えた場合の詳細検討の具体的手順が定められているため，詳細評価法検討の対象外とする。

上記の整理結果として別表１に検討対象設備を示すとともに，詳細検討又は新たな検討が必要な設備の抽出のための情報としてＪＥＡＧ４６０１に該当する機種名等を整理した。

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

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



注１：対象物の複雑さ，加振試験の可否等により選択

注２：評価の成立性が確認できない場合，対策による検討を実施

第３－１図　動的機能維持評価の検討フロー

(3)　抽出結果

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

① 詳細検討(基本評価項目の評価)が必要な設備

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

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

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

新たな検討が必要な設備としては，以下の設備が該当する。

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

＜ガスタービン機関＞
・ガスタービン発電機

③ 加振試験（試験による評価）が必要な設備

加振試験が必要な設備としては，以下の設備が該当する。

・高圧原子炉代替注水ポンプ

第3－1表　新たな検討又は詳細検討が必要な設備の抽出結果(1/2)

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

第３－１表　新たな検討又は詳細検討が必要な設備の抽出結果(2/2)

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

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

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

4.　新たな検討が必要な設備における動的機能維持評価の検討

4.1　新たな検討が必要な設備における動的機能維持の検討方針

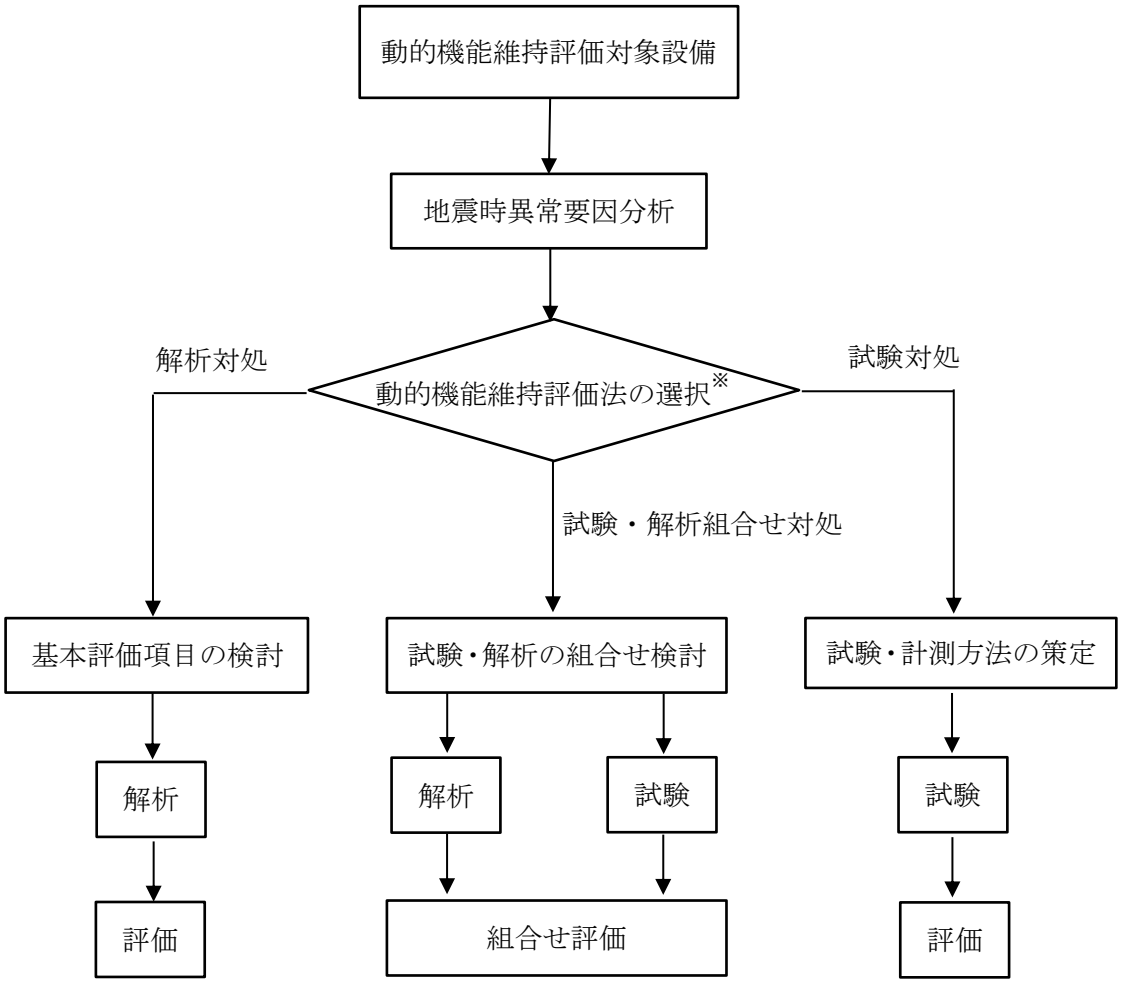
検討対象設備のうち，3.(3)②に示す機器については，ＪＥＡＧ４６０１に定められた機種及び適用形式から外れ，機能確認済加速度との比較による評価方法が適用できないことから，新たに評価項目の検討が必要となる設備である。

ＪＥＡＧ４６０１に定められた機能確認済加速度との比較による評価方法が適用できる機種の範囲から外れた設備における動的機能維持の検討においては，技術基準規則解釈等の改正を踏まえて，公知化された検討として(社)日本電気協会 電気技術基準調査委員会の下に設置された原子力発電耐震設計特別調査委員会（以下「耐特委」という。）により取り纏められた類似機器における検討及び電力共通研究（以下「電共研」という。）にて取り纏められた類似機器を参考に検討を実施する。

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

ＪＥＡＧ４６０１に定められた機種及び適用形式から外れた設備については，作動原理，構造又は機能が類似している構成設備を有する機種／形式に対する耐特委及び電共研での検討を参考に，形式による構造の違いを踏まえた上で地震時異常要因分析を実施し，基本評価項目を選定し動的機能維持評価を実施する。動的機能維持評価のフローを第4.1－1図に示す。

なお，ＪＥＡＧ４６０１においても，機能維持評価の基本方針として，地震時の異常要因分析を考慮し，動的機能の維持に必要な評価のポイントを明確にすることとなっている。



※対象物の複雑さ等で選択

第 4.1－1 図　動的機能維持評価フロー

4.2　スクリュー式ポンプに対する検討

4.2.1　検討対象設備の概要

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

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

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

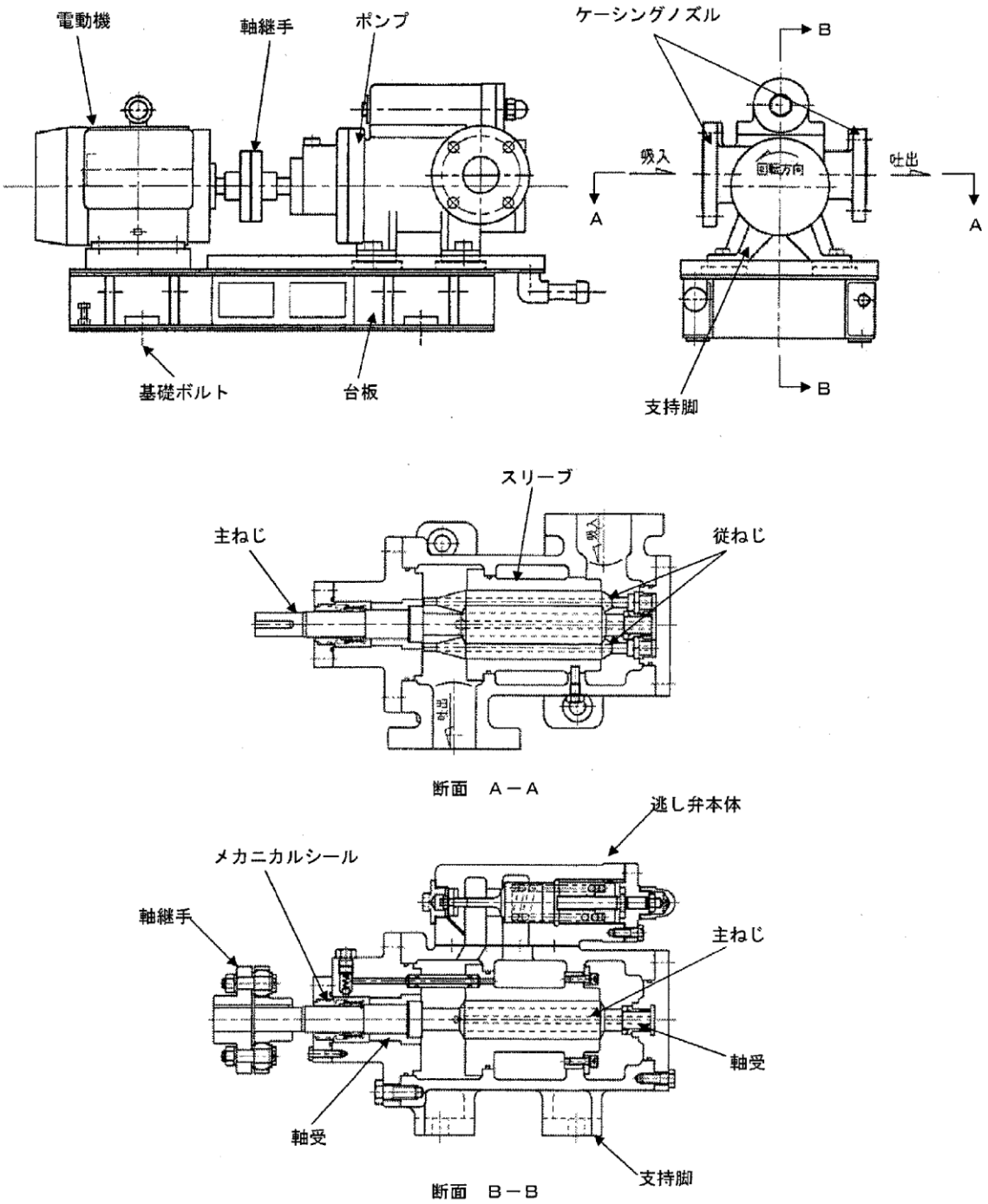
また，固定方法については，基礎ボルトで周囲を固定した架台の上に，駆動機器である横形ころがり軸受の電動機とポンプが取付ボルトにより設置され，地震荷重は主軸，軸受を通してケーシングに伝達されることから，基本構造は同じと言える。さらに，電動機からの動力は軸継手を介してポンプ側に伝達する方式であることから，作動原理についても同じと言える。

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

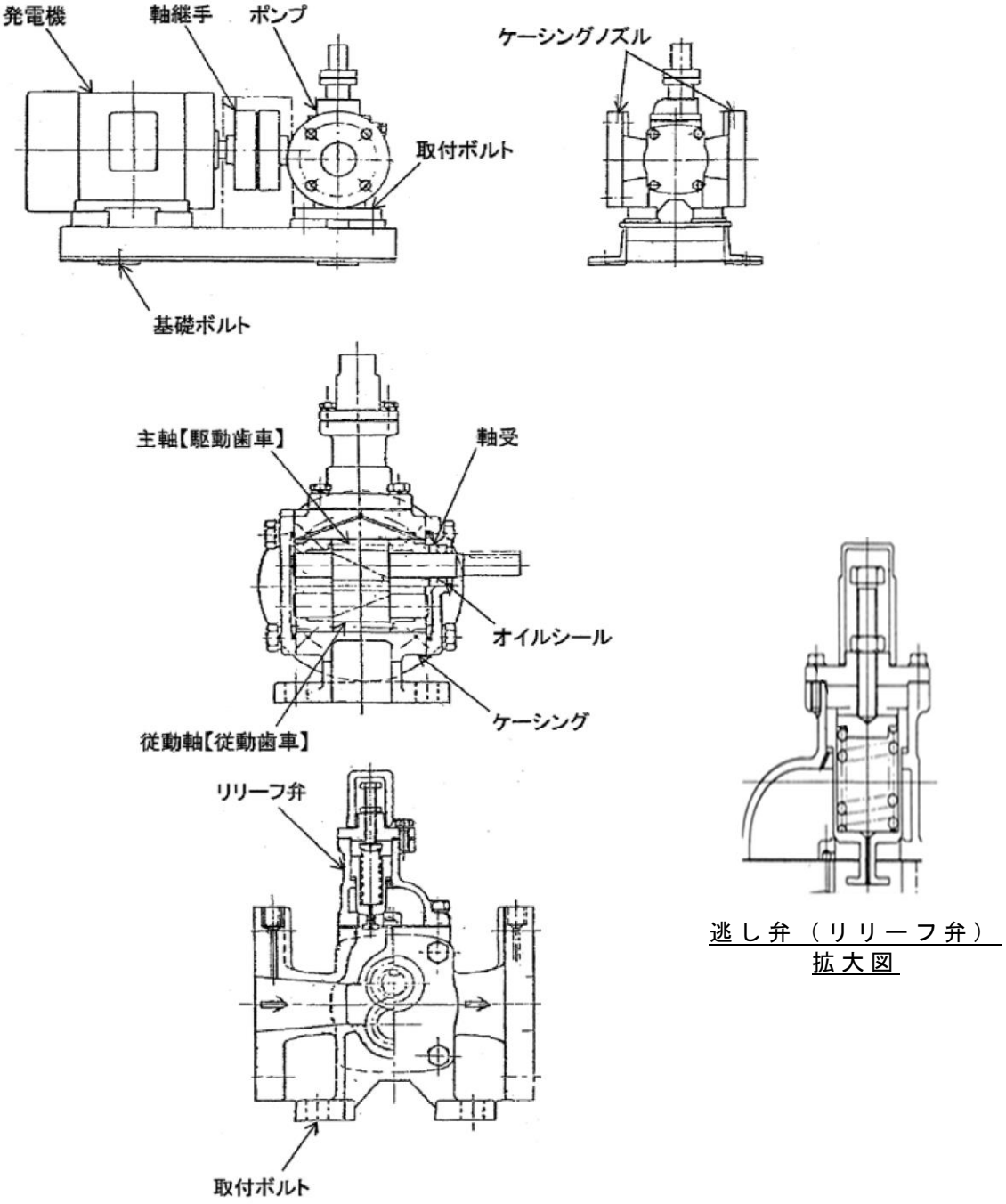
なお，ガスタービン発電設備燃料移送ポンプ，非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備燃料移送ポンプについては，新規制基準により新たに動的機能要求が必要となり，評価する設備となる。

第 4.2.1－1 表　新たな検討が必要な設備において参考とする機種／形式

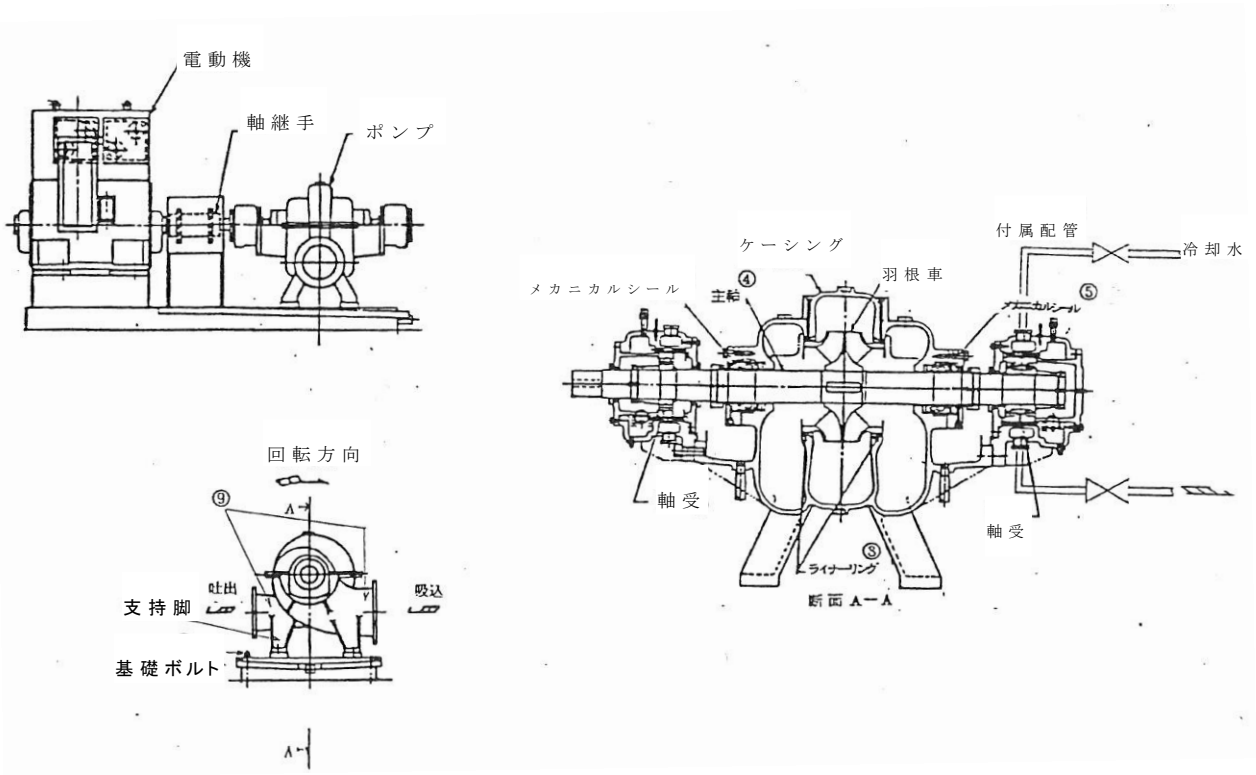
新たな検討が必要な設備		参考とする機種／形式
設備名	機種／形式	
・非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ ・ガスタービン発電機用燃料移送ポンプ	横形ポンプ／スクリュー式	横形ポンプ／単段遠心式
		横形ポンプ／ギヤ式



第 4.2.1－1 図　スクリュー式ポンプ構造概要図



第 4.2.1－2 図　ギヤ式ポンプ構造概要図

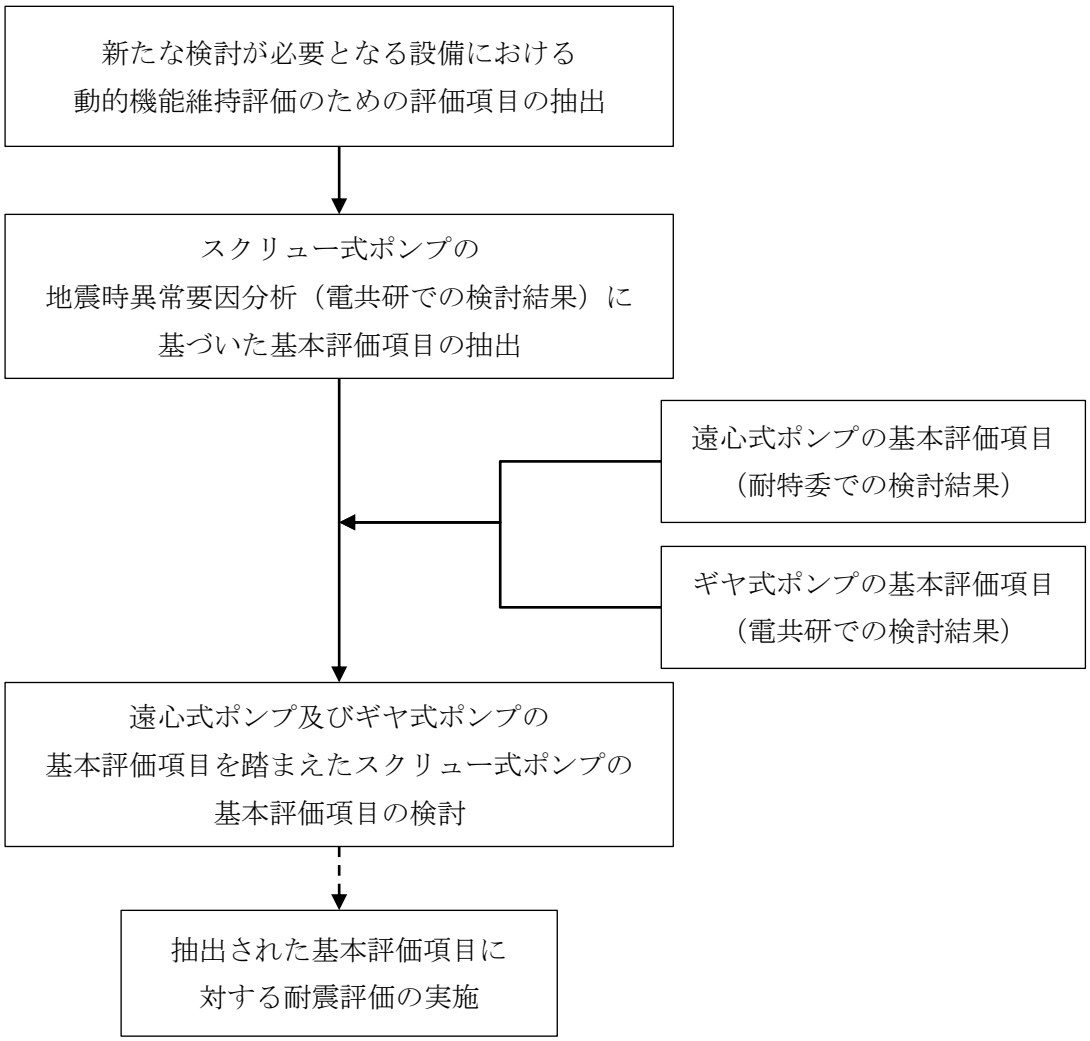


第 4.2.1－3 図　遠心式ポンプ構造概要図

4.2.2　スクリュー式ポンプの動的機能維持評価項目の抽出

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

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

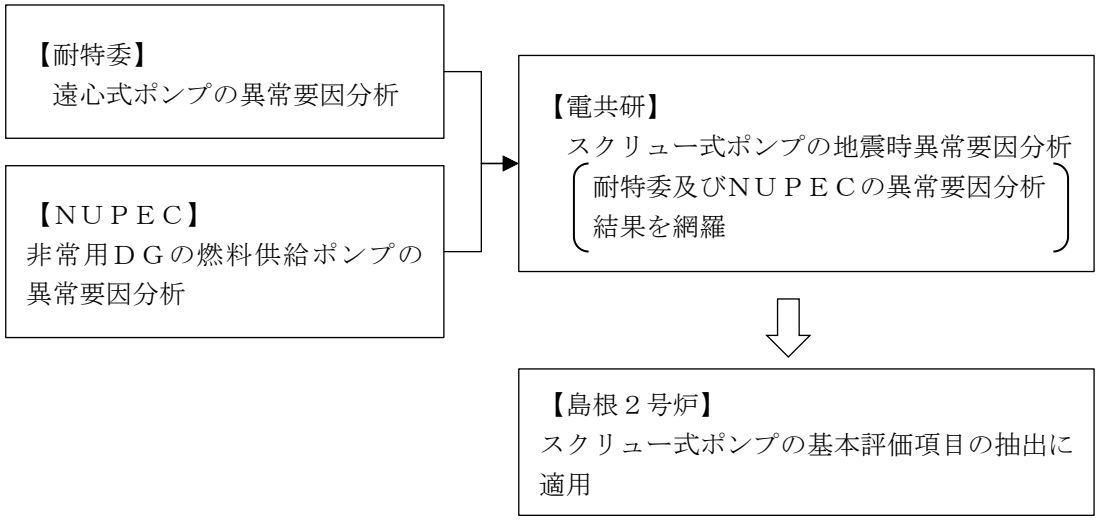


第 4.2.2－1 図　スクリュー式ポンプにおける動的機能維持評価のための基本評価項目の抽出フロー

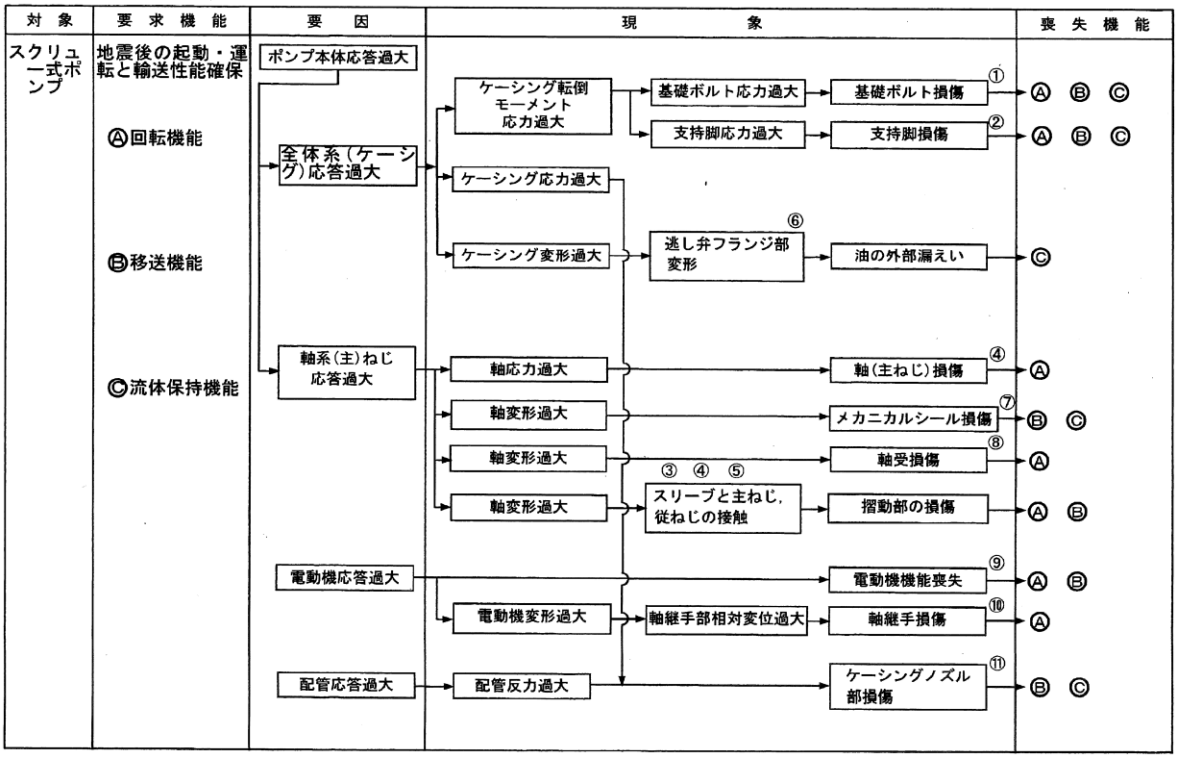
スクリュー式ポンプの地震時異常要因分析図(以下「異常要因分析図」という。)及び基本評価項目は，電共研※での検討内容を用いる。電共研では第 4.2.2－2 図に示すとおり，耐特委における遠心式ポンプ及びＮＵＰＥＣにおける非常用ディーゼル発電機の燃料供給ポンプに対する異常要因分析結果(非常用ディーゼル発電機システム耐震実証試験(1992年3月))を網羅するように，スクリュー式ポンプに対する地震時異常要因分析を行い，基本評価項目を抽出している。

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

※動的機器の地震時機能維持の耐震余裕に関する研究(平成 25 年 3 月)



第 4.2.2－2 図　地震時異常要因分析の適用（スクリュー式ポンプ）



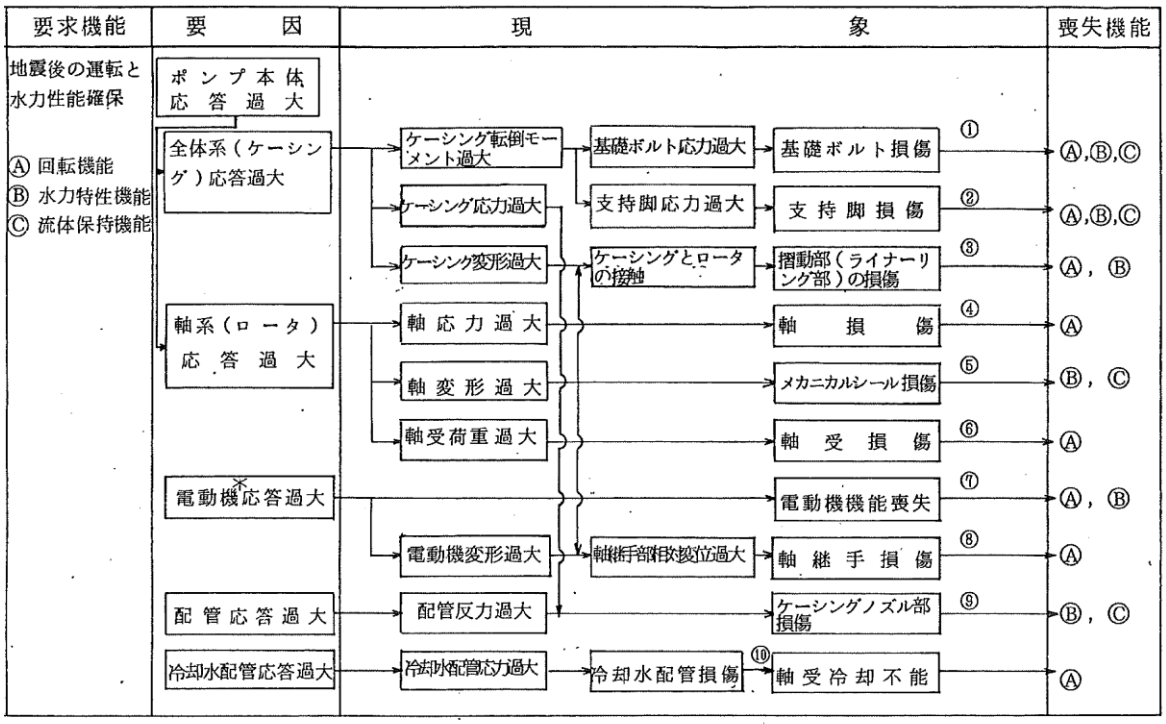
第 4.2.2－3 図　スクリュー式ポンプの地震時異常要因分析図

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

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

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

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



＊　駆動用タービンの場合も同様。また，増速機も含む。

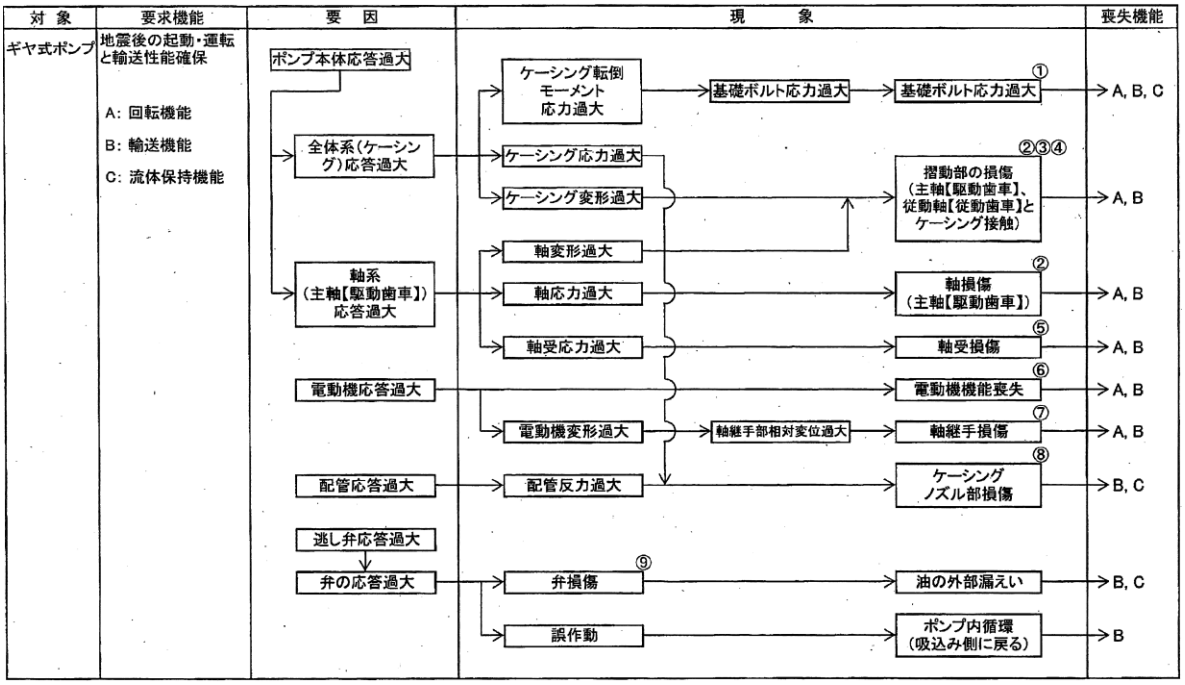
第 4.2.3－1 図　遠心式ポンプの地震時異常要因分析図

第 4.2.3－1 表　遠心式ポンプの要因分析図から抽出された基本評価項目

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

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

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



第 4.2.4－1 図　ギヤ式ポンプの地震時異常要因分析図

第 4.2.4－1 表　ギヤ式ポンプの要因分析図から抽出された基本評価項目

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

4.2.5　スクリュー式ポンプの基本評価項目の検討

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

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

第 4.2.5－1 表　スクリュー式ポンプにおける基本評価項目の整理結果

○：既往知見における評価項目，－：対象外

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

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

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

No.Ⅰ：基礎ボルト（取付ボルト含む）

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

No.Ⅱ：支持脚

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

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

No.Ⅲ：摺動部

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

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

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

No.Ⅳ：軸系

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

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

No.Ⅴ：逃がし弁フランジ部（漏えい防止）

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

No.Ⅵ:逃がし弁（移送機能）

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

No.Ⅶ：メカニカルシール

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

No.Ⅷ：軸受

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

No.Ⅸ:電動機

スクリュー式ポンプの電動機は，横向きに設置されるころがり軸受を使用する電動機であり，その構造は耐特委（ＪＥＡＧ４６０１）で検討されている横型ころがり軸受電動機の適用範囲内である。

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

No.Ⅹ:軸継手

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

よって，軸継手は動的機能維持評価の対象外とする。

No.Ⅺ:ケーシングノズル

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

よって，ケーシングノズルは動的機能維持評価の対象外とする。

No.Ⅻ：軸冷却水配管

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

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

4.2.6　スクリュー式ポンプの動的機能維持評価項目の検討結果

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

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

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

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

○：評価対象（計算書対象），－：対象外

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

4.3　ガスタービン発電機に対する検討

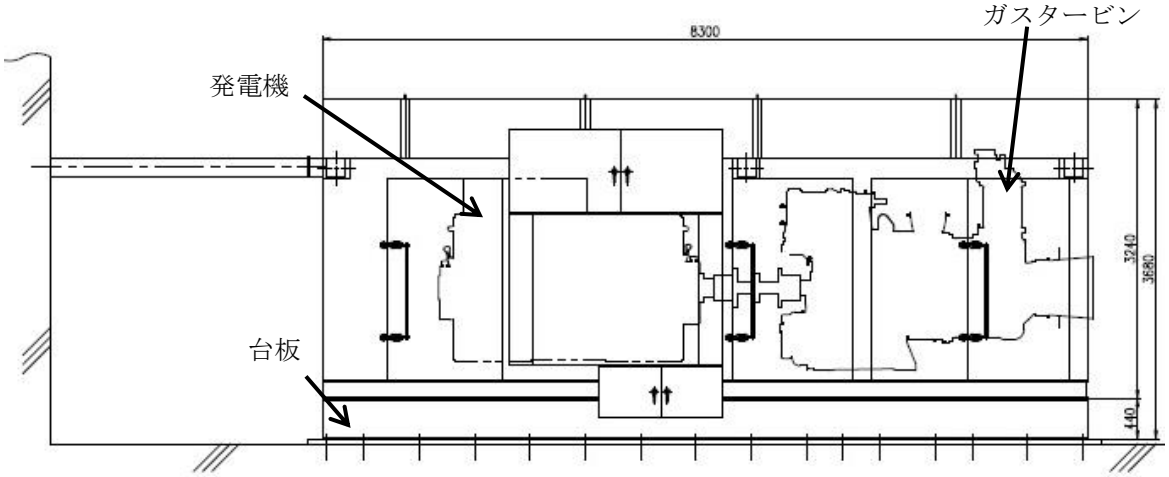
4.3.1　検討対象設備の概要

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

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

第 4.3.1－1 表　新たな検討が必要な設備において参考とする機種／形式

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



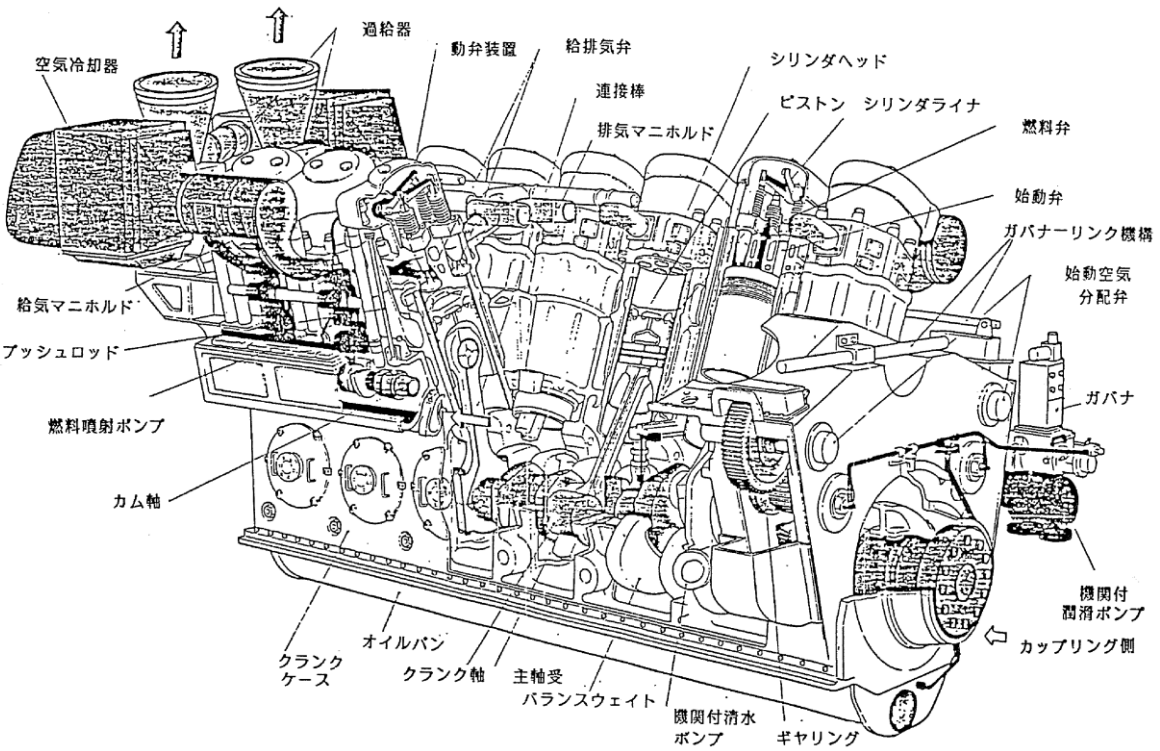
ガスタービン発電機

ガスタービン

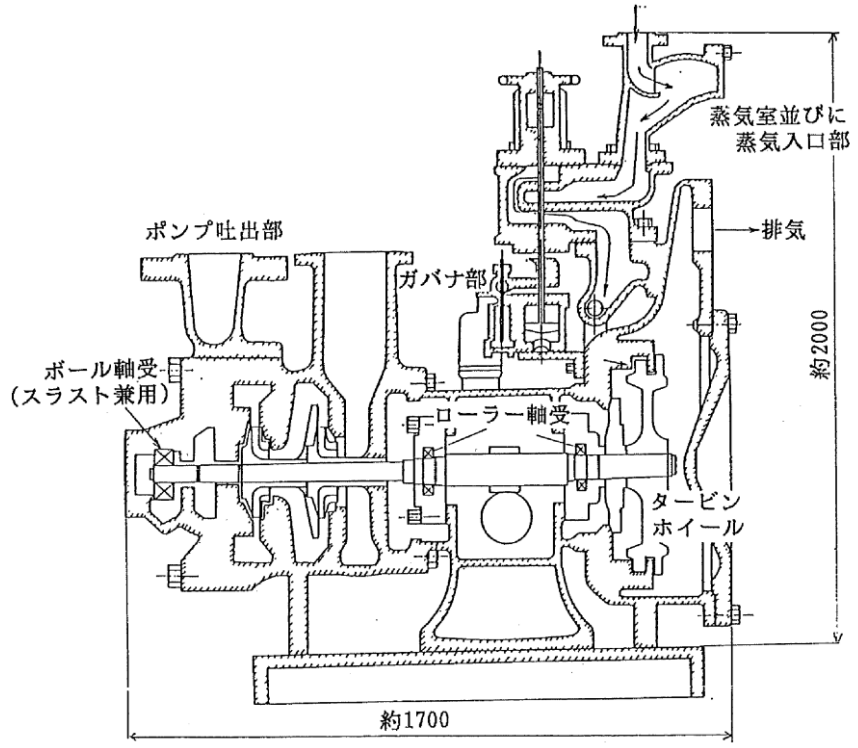
ガスタービン機関

第 4.3.1－1 図　ガスタービン発電機構造概要図

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



第 4.3.1－2 図　非常用ディーゼル発電機構造概要図



第 4.3.1－3 図　ポンプ駆動用タービン（ＡＦＷＰ用）構造概要図

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

(1)非常用ディーゼル発電機

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

a．ガスタービン（機関）

非常用ディーゼル発電機の過給機と以下の点において類似性を有する。

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

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

b．ガスタービン（減速機）

非常用ディーゼル発電機のギヤリングと以下の点において類似性を有する。

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

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

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

c．ガスタービン付きポンプ（主燃料油ポンプ，潤滑油ポンプ）

非常用ディーゼル発電機の潤滑油ポンプと以下の点において類似性を有する。

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

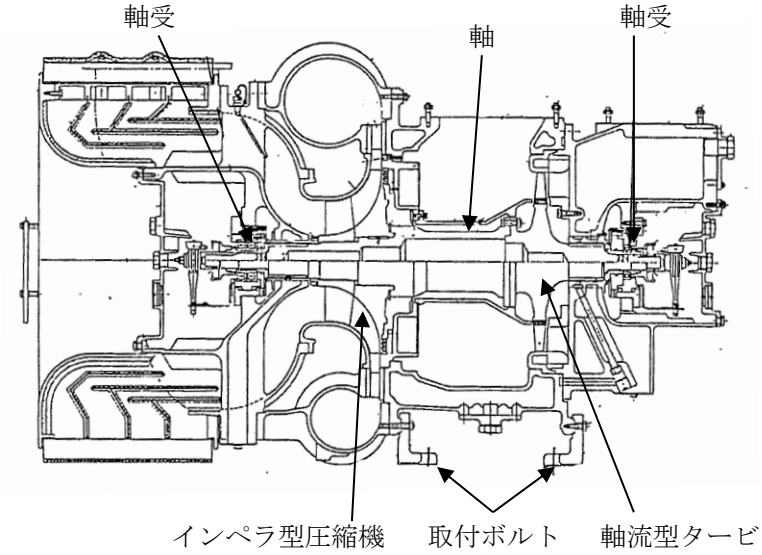
また，共に流体を押し出す回転部品とケーシングで構成された単純な構造の機器であり，主機関にボルト結合された支持構造であることから，振動特性の観点からも類似性を有している。

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

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

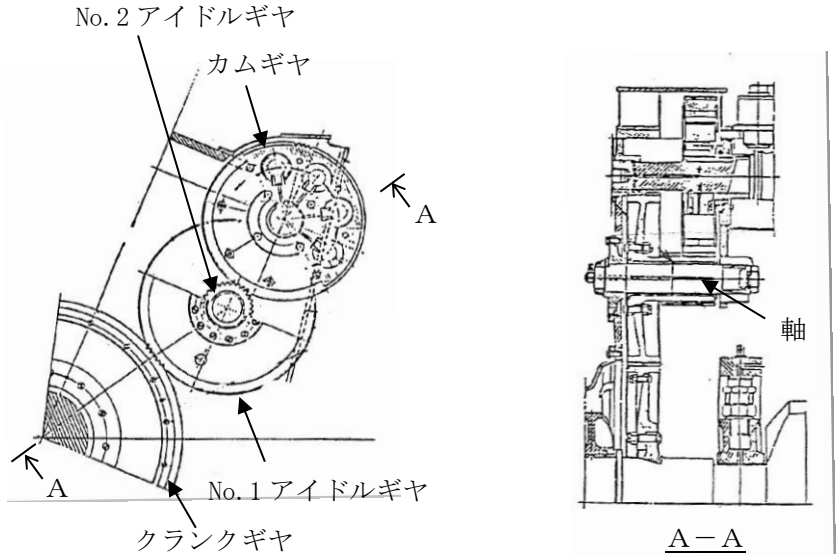
非常用ディーゼル発電機のガバナは，ディーゼル機関の回転数を一定に保つために，燃料流量を制御しており，機構は異なるものの同様に回転数を一定に保つために燃料流量制御を行うガスタービンの燃料制御装置と機能面で類似性を有している。

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

非常用ディーゼル発電機の過給機	
ガスタービン（機関）	
類似点	・燃焼用空気を機関に送気する機能を有したターボ機械である。 ・圧縮機とタービンを一軸上の回転軸に配置し両端の軸受で支持した構造である。 ・回転軸がケーシング内に内包されており，ケーシングがボルト結合されている。 ・機関全体が高い剛性を有している。

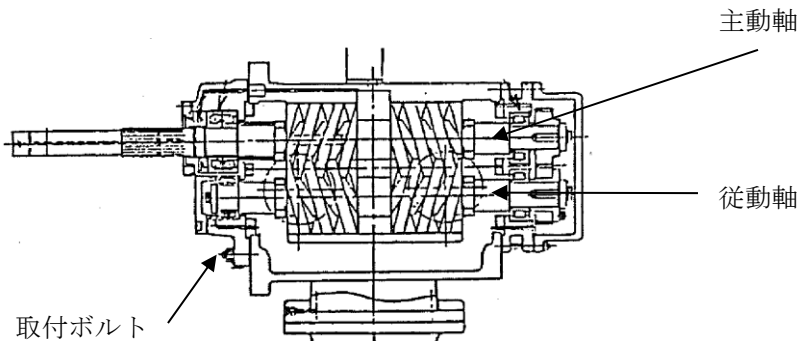
第 4.3.1－4 図　非常用ディーゼル発電機の過給機と
ガスタービン（機関）の比較

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

非常用ディーゼル発電機のギヤリング	
ガスタービン（減速機）	
類似点	・歯車機構を介して動力を伝達する機能を有する。 ・歯車軸がケーシング内に内包されており，ケーシングがボルト結合されている。 ・機器全体が高い剛性を有している。

第 4.3.1－5 図　非常用ディーゼル発電機のギヤリングと
ガスタービン（減速機）の比較

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

非常用ディーゼル発電機の潤滑油ポンプ	
ガスタービン付きポンプ（主燃料油ポンプ・潤滑油ポンプ）	
類似点	・主機関より動力を得て流体を輸送するポンプ機能を有する。 ・流体を押し出す回転部品とケーシングで構成された単純な構造の機器である。 ・主機関にボルト結合されている。

第 4.3.1－6 図　非常用ディーゼル発電機の潤滑油ポンプと
ガスタービン付きポンプ（主燃料油ポンプ，潤滑油ポンプ）の比較

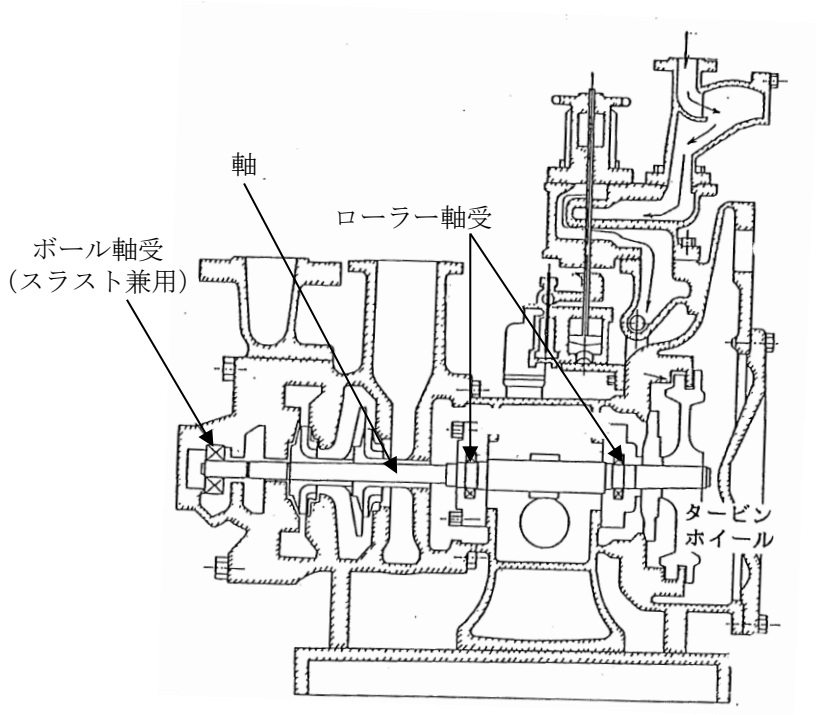
本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(2) ポンプ駆動用タービン

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

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

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

ポンプ駆動用タービン	
ガスタービン（機関）	
類似点	・タービンにより高速で回転する回転軸を有する。 ・回転軸がケーシング内に内包されており，ケーシングがボルト結合されている。 ・回転軸及び関連部位が高い剛性を有する。

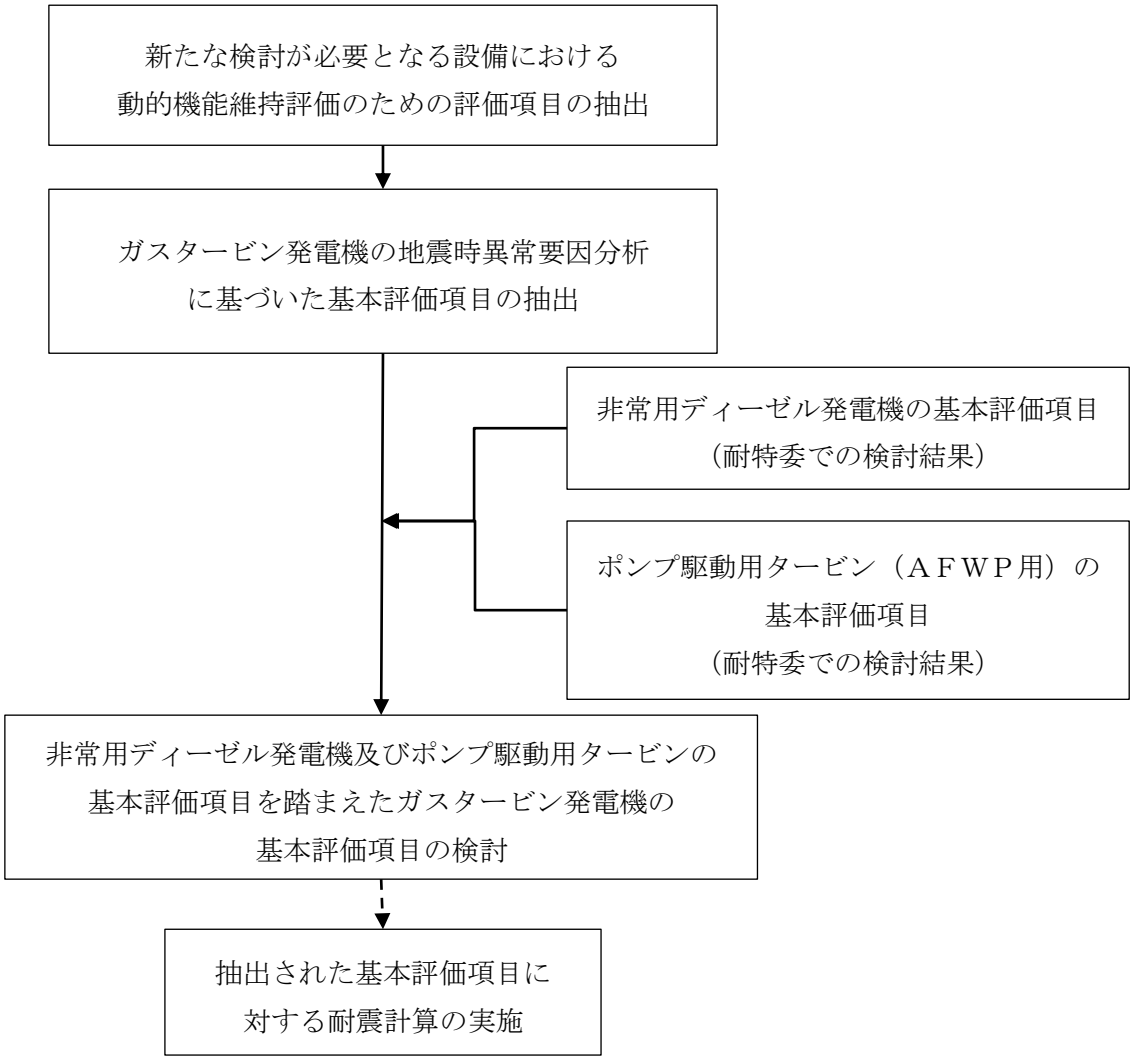
第 4.3.1－7 図　ポンプ駆動用タービンとガスタービン（機関）の比較

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

4.3.2　ガスタービン発電機の動的機能維持評価項目の抽出

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

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



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

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

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

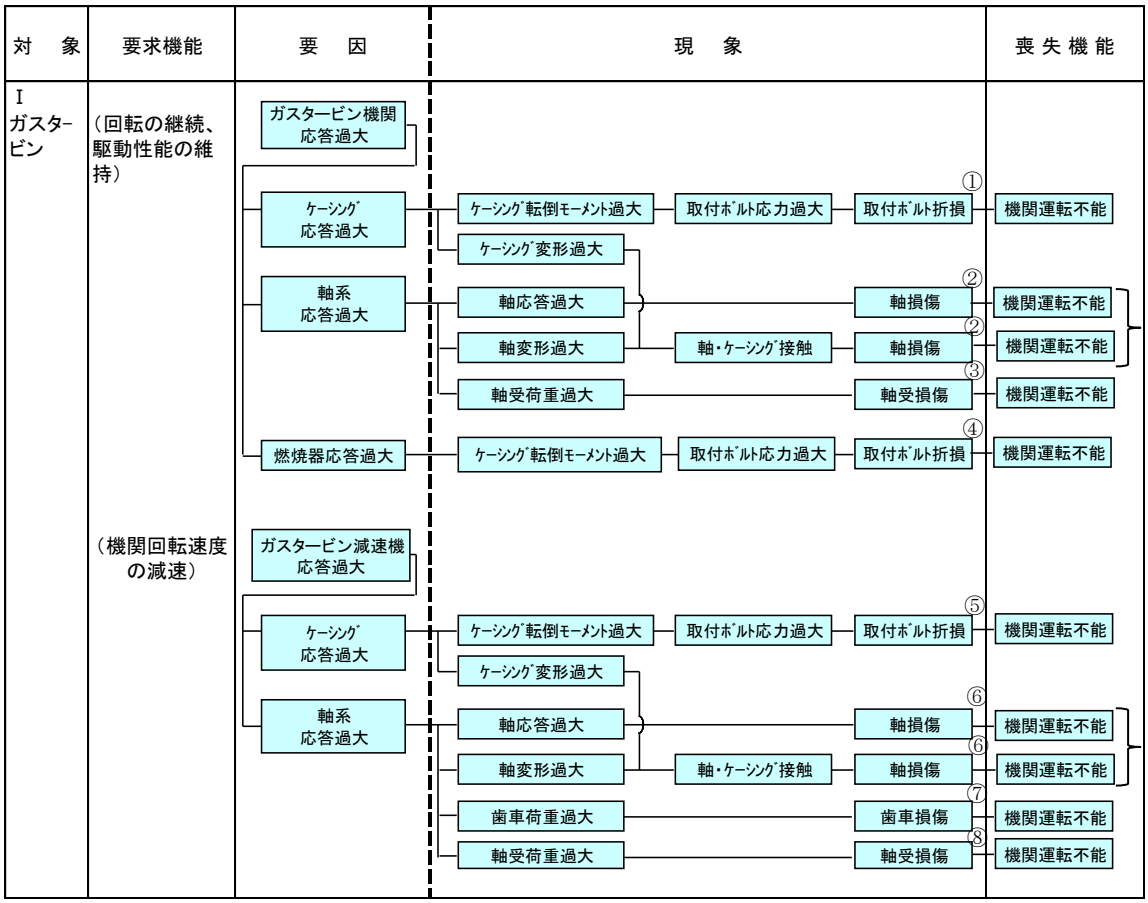
ガスタービン発電機の異常要因分析図を第 4.3.2－2 図～第 4.3.2－7 図に示す。要因分析図に基づき抽出されるガスタービンの基本評価項目は，第 4.3.2－1 表のとおりである。なお，ガスタービンの異常要因分析は以下の区分に分類し実施した。

＜異常要因分析の検討区分＞

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

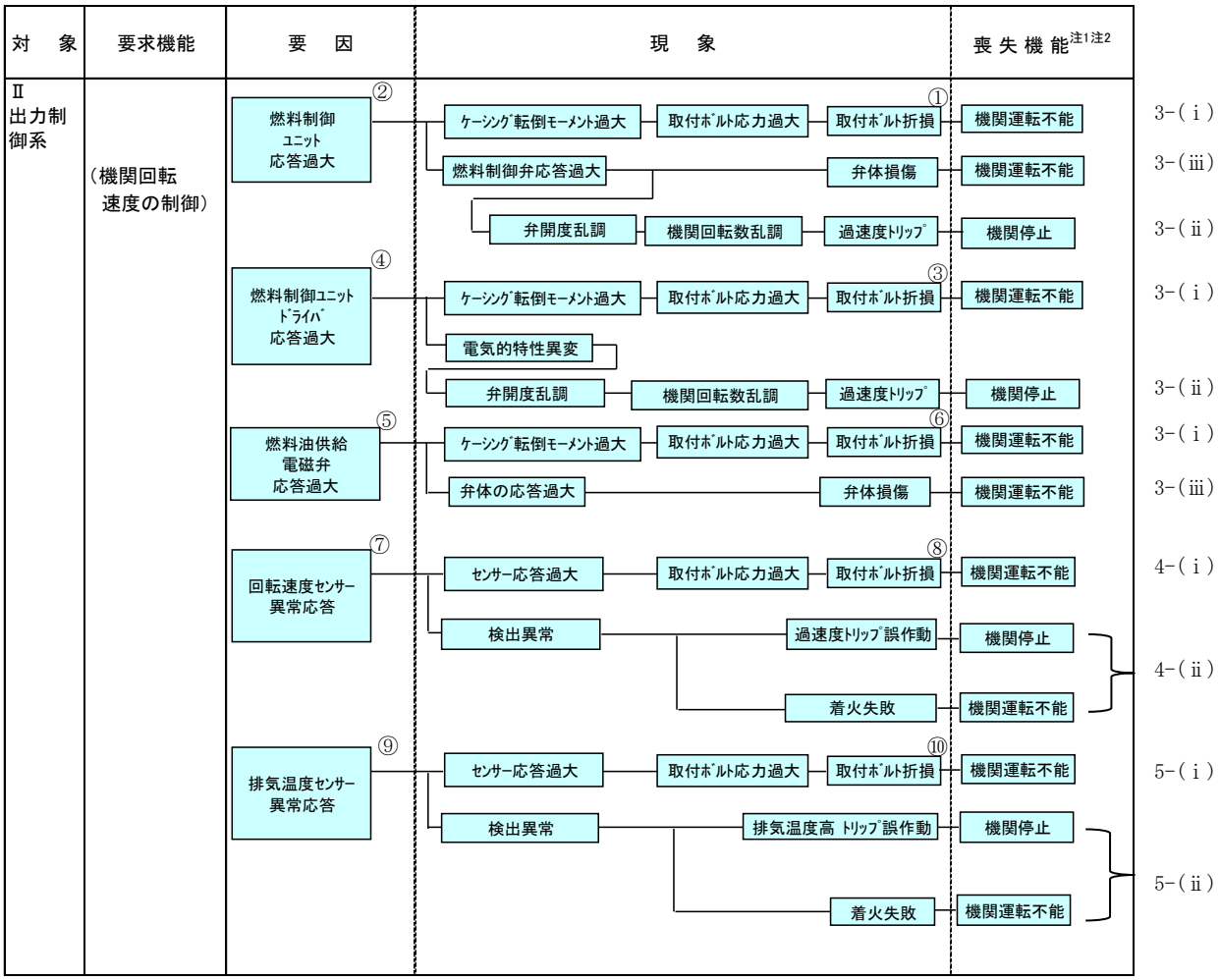
なお，ガスタービン（機関）等の軸応答過大による軸損傷は，次の理由により基本評価項目から除外した。

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



第 4.3.2－2 図　異常要因分析図と構造図（ガスタービン）

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

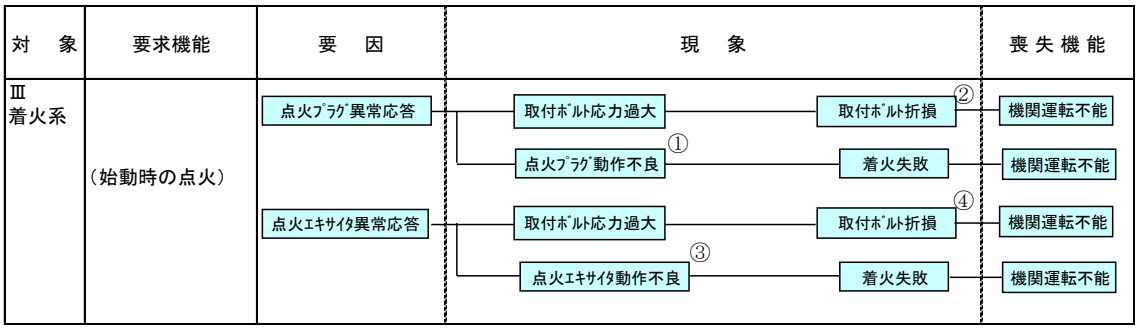


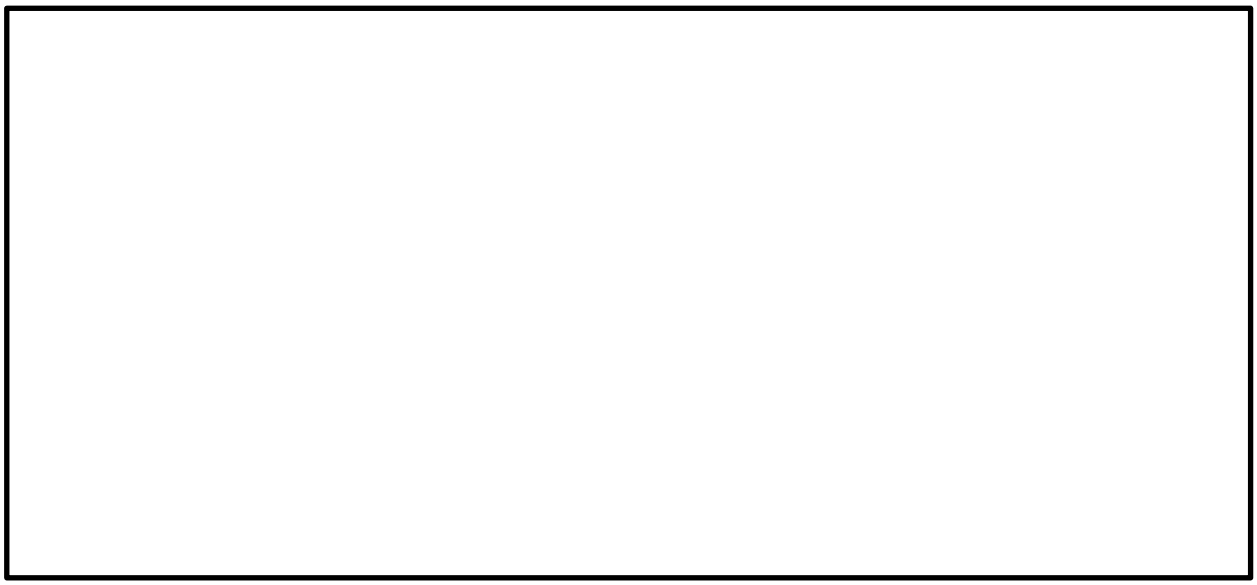
注１　機関運転不能：構成機器の損傷や動作不良により運転が不能となる

注２　機関停止：誤信号によるトリップにより運転が停止する（損傷に至らない）

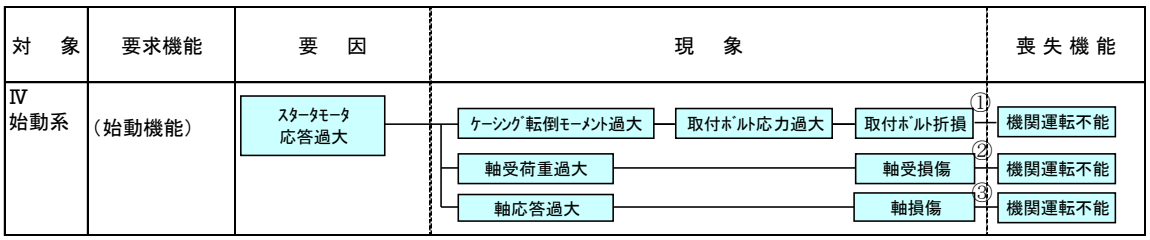
第 4.3.2－3 図　異常要因分析図と構造図（出力制御系）

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。





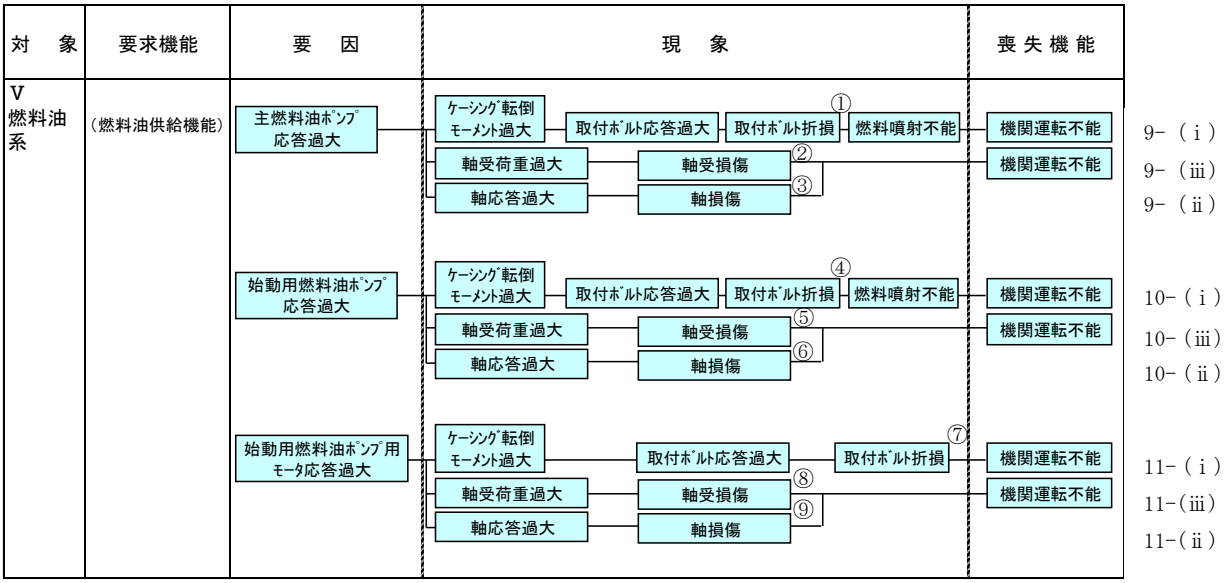
第 4.3.2－4 図　異常要因分析図と構造図（着火系）





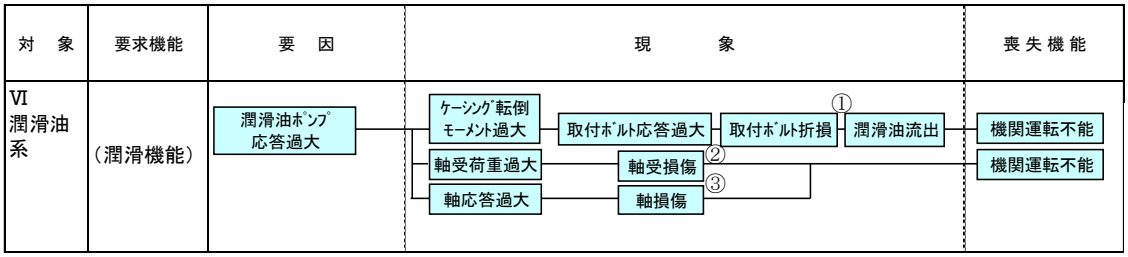
第 4.3.2－5 図　異常要因分析図と構造図（始動系）

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



第 4.3.2－6 図　異常要因分析図と構造図（燃料油系）

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



第 4.3.2－7 図　異常要因分析図と構造図（潤滑油系）

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

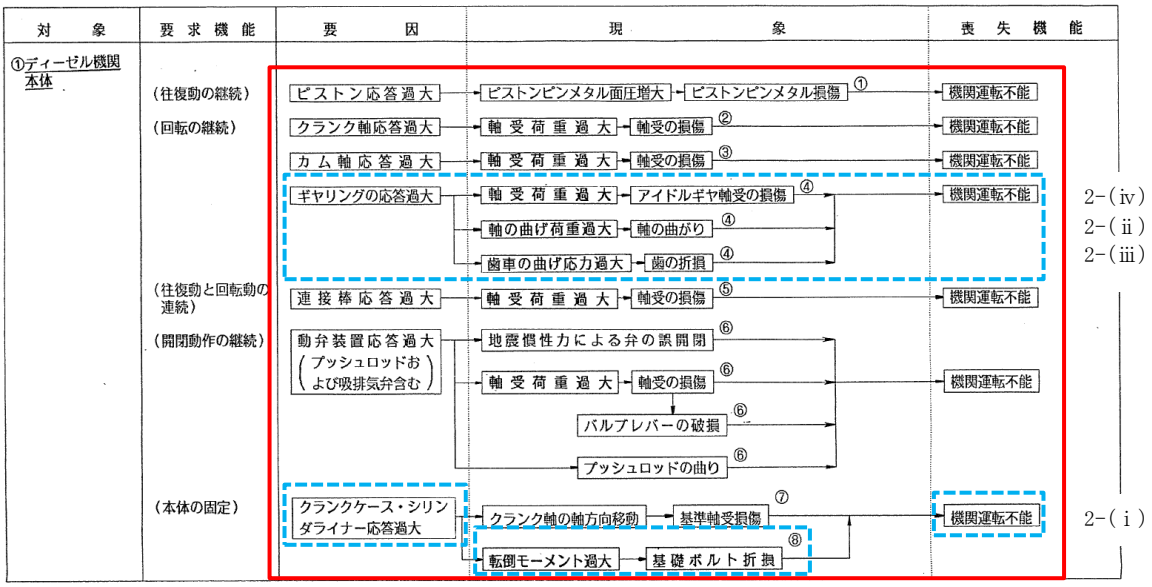
No.	基本評価項目	異常要因
11-(ⅰ)	始動用燃料油ポンプ用モータ取付ボルト	始動用燃料油ポンプ用モータの地震応答が過大となることで,転倒モーメントによる取付ボルトの応力が過大となる。その結果，取付ボルトが損傷に至り,転倒することでモータの回転機能を喪失し,燃料油供給機能を喪失する。
11-(ⅱ)	始動用燃料油ポンプ用モータ 摺動部（軸とケーシングのクリアランス)	始動用燃料油ポンプ用モータの地震応答が過大となることで,回転軸の応答が過大となり，軸部の変形によりケーシングと接触する。その結果，軸が損傷に至り，モータの回転機能を喪失し，燃料油供給機能を喪失する。
11-(ⅲ)	始動用燃料油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

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

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

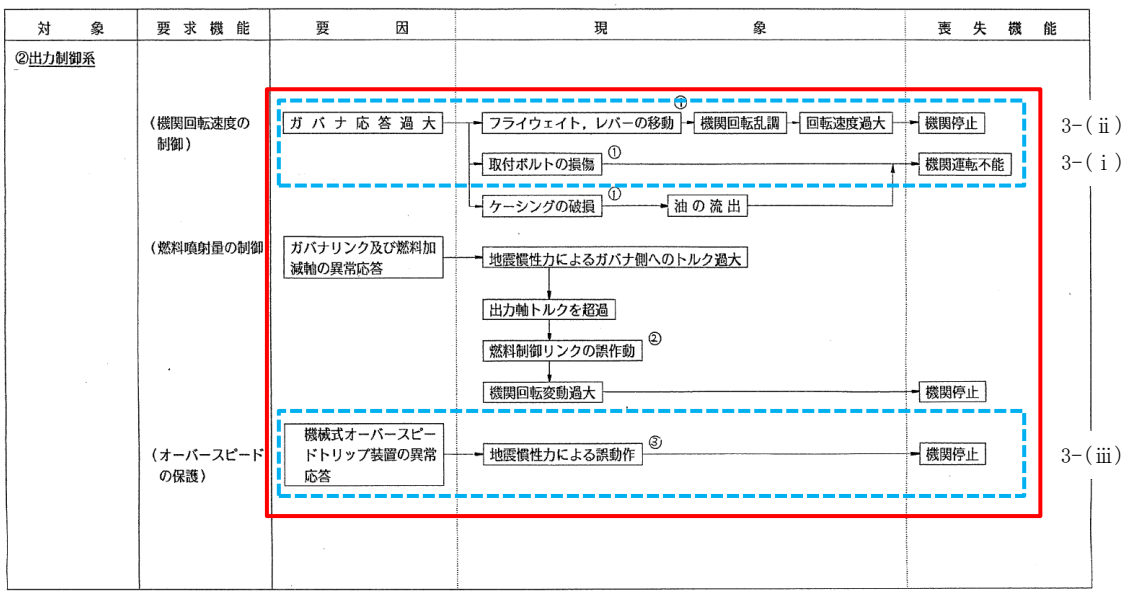
ガスタービン発電機に属する機器のうち，非常用ディーゼル発電機と類似性を有する機器については，異常要因分析に基づいて抽出された評価項目においても類似性を有していることが確認できる。また，異常要因分析の考え方についても，非常用ディーゼル発電機での異常要因分析の手法に倣い，要求機能別の系統構成に分類した各機器の構造や作動原理から地震時に発生し得る異常現象を抽出した結果，ガスタービン発電機と非常用ディーゼル発電機の要因分析結果との類似性が確認できる。

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



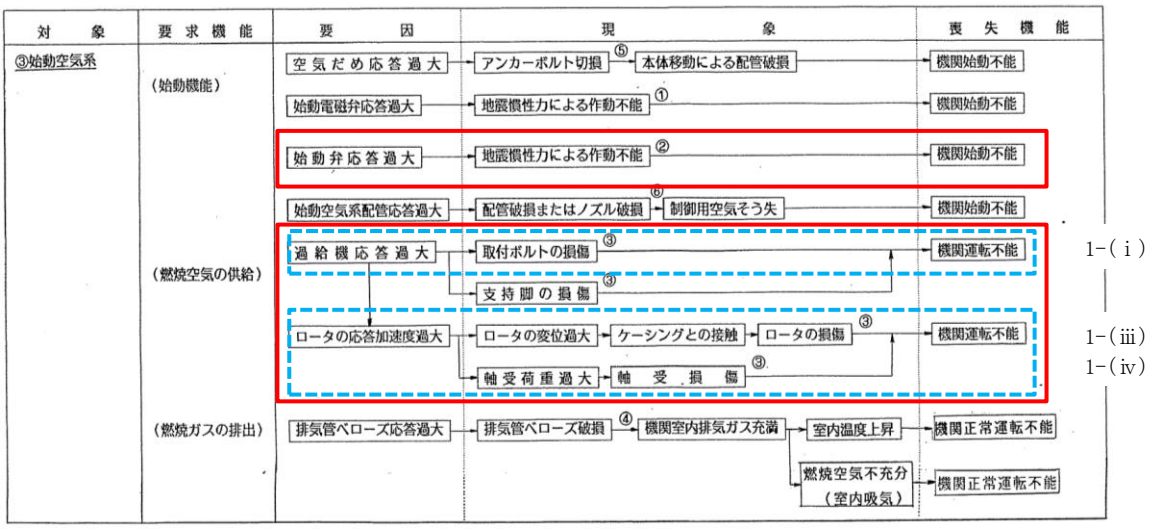
：非常用ディーゼル発電機のうち機関及び機関付き機器の項目
：ガスタービンとの類似評価項目

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



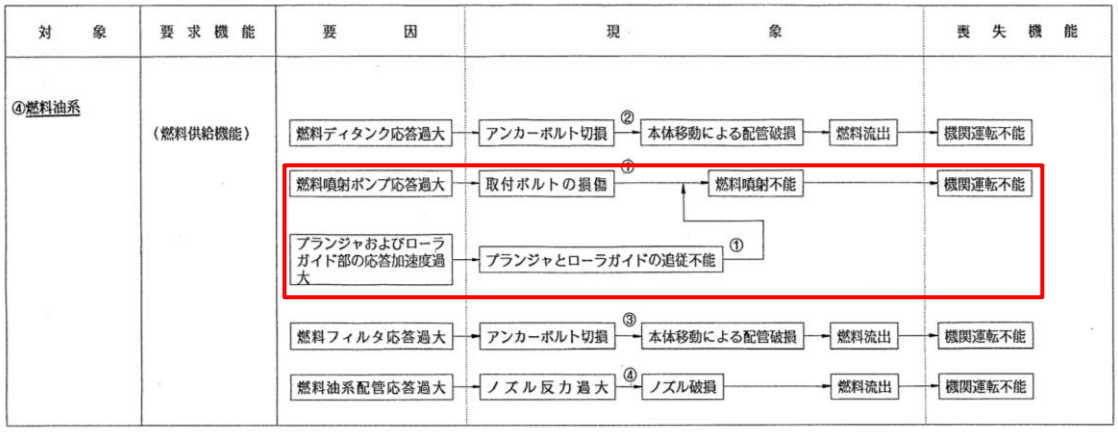
：非常用ディーゼル発電機のうち機関及び機関付き機器の項目
：ガスタービンとの類似評価項目

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



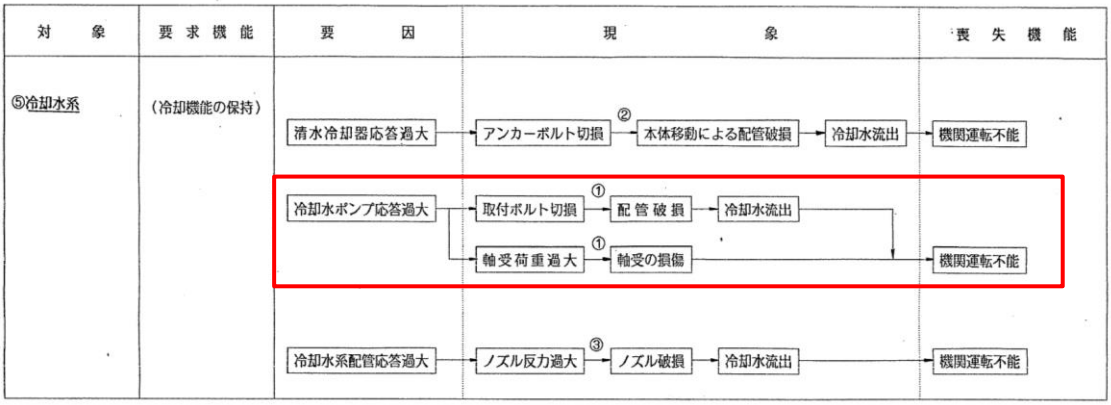
：非常用ディーゼル発電機のうち機関及び機関付き機器の項目
：ガスタービンとの類似評価項目

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



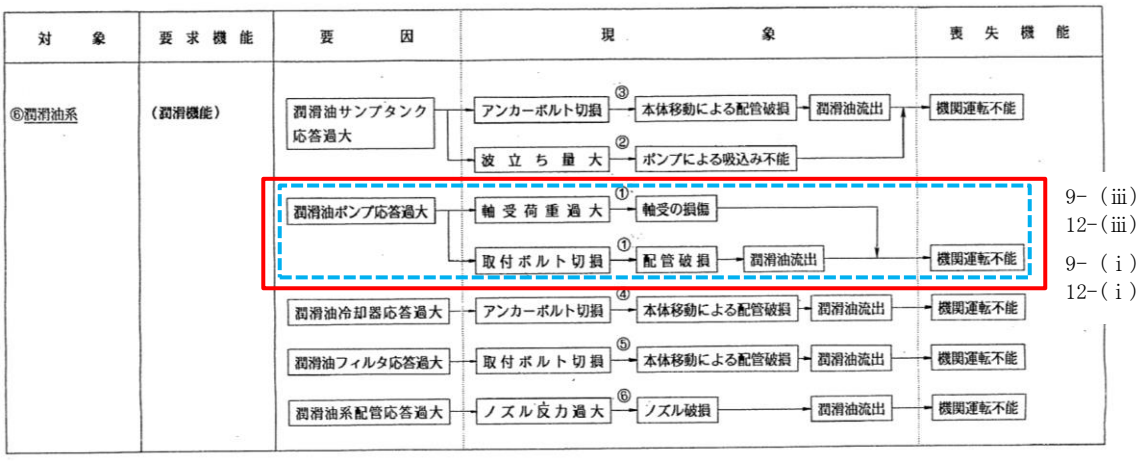
：非常用ディーゼル発電機のうち機関及び機関付き機器の項目
：ガスタービンとの類似評価項目

第 4.3.3－4 図　異常要因分析図（燃料油系）



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

第 4.3.3－5 図　非常用ディーゼル発電機の異常要因分析図（冷却水系）



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

第 4.3.3－6 図　非常用ディーゼル発電機の異常要因分析図（潤滑油系）

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

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

4.3.3－1表　非常用ディーゼル発電機とガスタービン発電機の評価

項目比較（出力制御系）

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

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

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

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

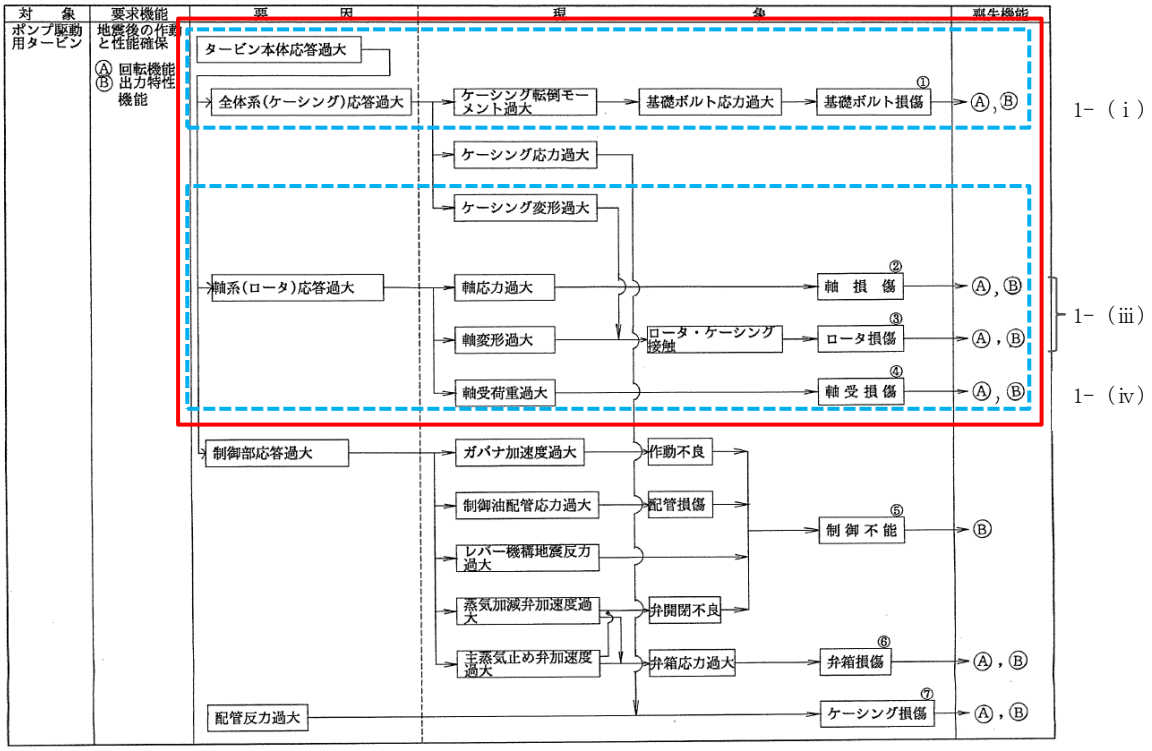
No.	非常用ディーゼル発電機			ガスタービン発電機で対応する評価項目	
	機器名称	異常要因分析 該当項目	評価項目	No.	評価項目
潤滑油系					
16	潤滑油 ポンプ	取付ボルト折損	取付ボルトの強度	9-（ⅰ）	主燃料油ポンプ取付ボルト
				12-（ⅰ）	潤滑油ポンプ取付ボルト
		軸受荷重過大	軸受強度	9-(ⅲ)	主燃料油ポンプ軸受
				12-(ⅲ)	潤滑油ポンプ軸受
			軸とケーシングのクリアランス	9-（ⅱ）	主燃料油ポンプ摺動部（軸とケーシングのクリアランス）
				12-（ⅱ）	潤滑油ポンプ摺動部（軸とケーシングのクリアランス）

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

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

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

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



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

第 4.3.4－1 図　ポンプ駆動用タービンの異常要因分析図

第 4.3.4－1 表　ポンプ駆動用タービンとガスタービン発電機の評価項目比較

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

4.3.5　ガスタービン発電機の基本評価項目の検討

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

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

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

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

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

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

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

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

No.	基本評価項目	評価対象	理　由
4-(ⅰ)	回転速度センサー 取付ボルト	×	取付ボルトについては，減速機取付ボルトに対して裕度が大きいため，評価対象外とした。
4-(ⅱ)	回転速度センサー	×	回転速度センサーは，下記理由により取付部の健全性を確認することで，電気的機能維持を確保できるため，評価対象外とした。 ①回転速度センサーには電磁ピックアップ式センサーが用いられており動作部がない。 ②軽量かつ単純構造であり，地震力により発生する荷重が小さく，構造強度について十分な裕度を持っている。 ③ＪＥＡＧ４６０１－1987 の電気計装機器のうち，剛体と見なせる器具に該当すると考えられ，構造健全性が保たれている限り，その機能が失われることはないと考えられる。
5-(ⅰ)	排気温度センサー 取付ボルト	×	取付ボルトについては，減速機取付ボルトに対して裕度が大きいため，評価対象外とした。
5-(ⅱ)	排気温度センサー	×	排気温度センサーは，下記理由により取付部の健全性を確認することで，電気的機能維持を確保できるため，評価対象外とした。 ①排気温度センサーにはシース熱電対が用いられており動作部がない。 ②軽量かつ単純構造であり，地震力により発生する荷重が小さく，構造強度について十分な裕度を持っている。 ③ＪＥＡＧ４６０１－1987 の電気計装機器のうち，剛体と見なせる器具に該当すると考えられ，構造健全性が保たれている限り，その機能が失われることはないと考えられる。

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

No.	基本評価項目	評価対象	理　由
6-(ⅰ)	点火プラグ 取付ボルト	×	取付ボルトについては，減速機取付ボルトに対して裕度が大きいため，評価対象外とした。
6-(ⅱ)	点火プラグ	×	点火プラグは，下記理由により，取付部の健全性を確認することで，電気的機能維持を確保できるため，評価対象外とした。 ①点火プラグにはスパークプラグが用いられており動作部がない。 ②軽量かつ単純構造であり，地震力により発生する荷重が小さく，構造強度について十分な裕度を持っている。 ③ＪＥＡＧ４６０１－1987 の電気計装機器のうち，剛体と見なせる器具に該当すると考えられ，構造健全性が保たれている限り，その機能が失われることはないと考えられる。
7-(ⅰ)	点火エキサイタ 取付ボルト	×	取付ボルトについては，減速機取付ボルトに対して裕度が大きいため，評価対象外とした。
7-(ⅱ)	点火エキサイタ	×	点火エキサイタは，下記理由により，取付部の健全性を確認することで，電気的機能維持を確保できるため，評価対象外とした。 ①点火エキサイタには Capacitor Discharge Ignition 方式の点火装置が用いられており動作部がない。 ②軽量かつ単純構造であり，地震力により発生する荷重が小さく，構造強度について十分な裕度を持っている。 ③ＪＥＡＧ４６０１－1987 の電気計装機器のうち，剛体と見なせる器具に該当すると考えられ，構造健全性が保たれている限り，その機能が失われることはないと考えられる。

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

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

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

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

4.3.6　ガスタービン発電機の動的機能維持評価項目の検討結果

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

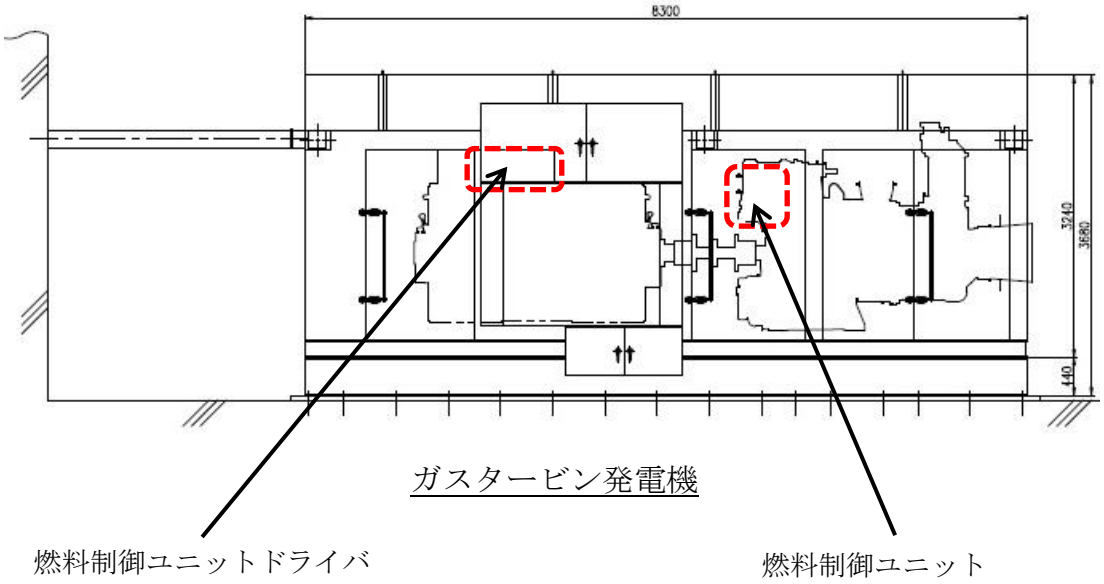
以上の検討結果から，島根２号炉のガスタービン発電機における動的機能維持評価の評価項目については第 4.3.6－1 表に整理し，抽出された評価項目に対して耐震評価を実施する。

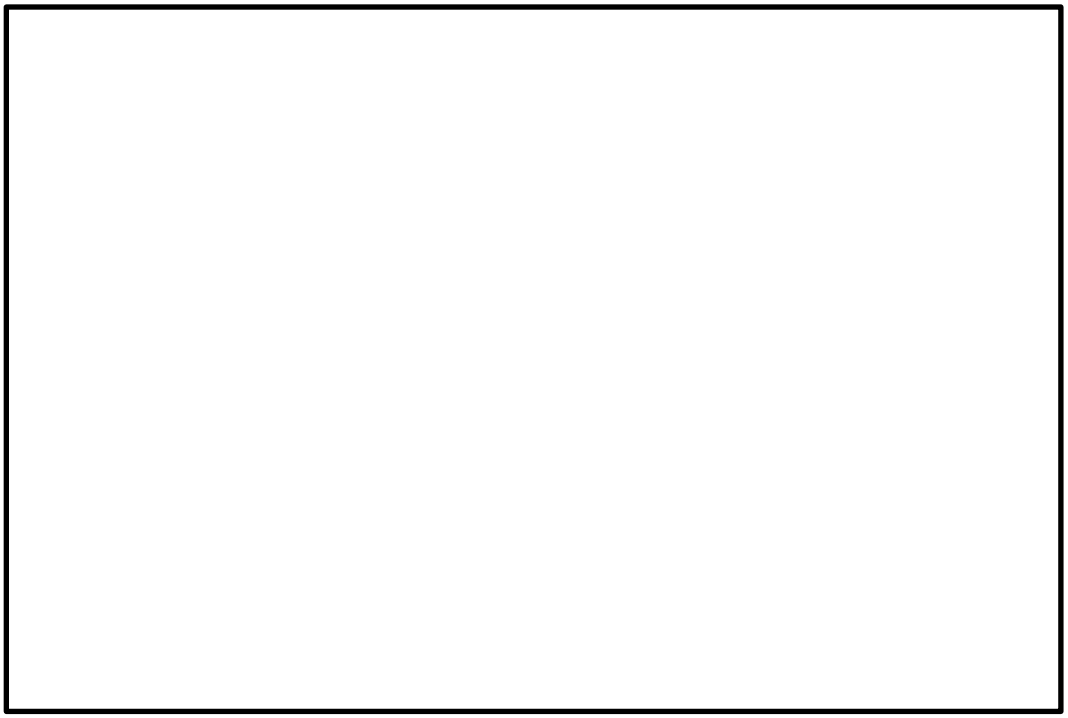
第 4.3.6－1 表　島根２号炉のガスタービンにおける動的機能維持評価の評価項目の検討結果(1/2)

No.	評価項目	評価内容
Ⅰ	ガスタービン機関摺動部（軸とケーシングとのクリアランス)	ガスタービンとポンプ駆動用タービンは，回転機器として同様な軸系の構造を有しており，ケーシング，軸系とも剛性が高いことから類似構造であると言える。したがって，ガスタービンの軸とケーシングのクリアランスも，ＪＥＡＧ４６０１に示されるポンプ駆動用タービンの荷重条件を用いて軸の変位量を評価する。 なお，両端を軸受で支持された軸のたわみ量の算出において，軸受自体の剛性による変位は数十μｍ 程度と十分小さく，軸とケーシングとのクリアランスを評価する上では有意とはならないため考慮は不要と判断している。一方，軸受による軸の支持条件は単純支持として，軸のたわみ量が大きくなるよう保守的に評価する。
Ⅱ	ガスタービン機関軸受	ガスタービンとポンプ駆動用タービンは，回転機器として同様な軸系の構造を有しており，ケーシング，軸系とも剛性が高いことから類似構造であると言える。したがって，ガスタービンの軸受も，ＪＥＡＧ４６０１に示されるポンプ駆動用タービンにおける軸受の評価方法を適用可能であるが，ここでは軸受荷重の許容値がメーカ規定の基本静定格荷重（メーカ保証値）で設定されていることから，ＪＩＳ（ＪＩＳ Ｂ 1519－2009）に基づくメーカ規定の計算式（ガスタービン回転軸に地震力や運転中のスラスト荷重が作用することにより軸受に発生する静等価荷重）にて評価する。 軸受強度は，軸受の剛性に関わりなく軸受に作用する荷重が許容される荷重以下であることで評価される。

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

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





試験装置

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

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

5.　詳細検討が必要な設備における動的機能維持の検討方針

機能維持評価用加速度が機能確認済加速度を超えた場合の検討については，ＪＥＡＧ４６０１及び耐特委報告書にて，動的機能維持の評価上必要な基本評価項目が地震時異常要因分析に基づき選定されている（第5－1表）。

機能維持評価に当たっては，技術基準規則解釈等の改正を踏まえて，基本評価項目に対して，必要な評価項目を選定し，その妥当性を示した上で検討を実施する。なお，詳細設計段階において，弁の応答加速度（機能維持評価用加速度）が機能確認済加速度を超える場合，ＪＥＡＧ４６０１に基づき詳細検討を実施する。

第 5－1 表　各設備における基本評価項目(1/2)

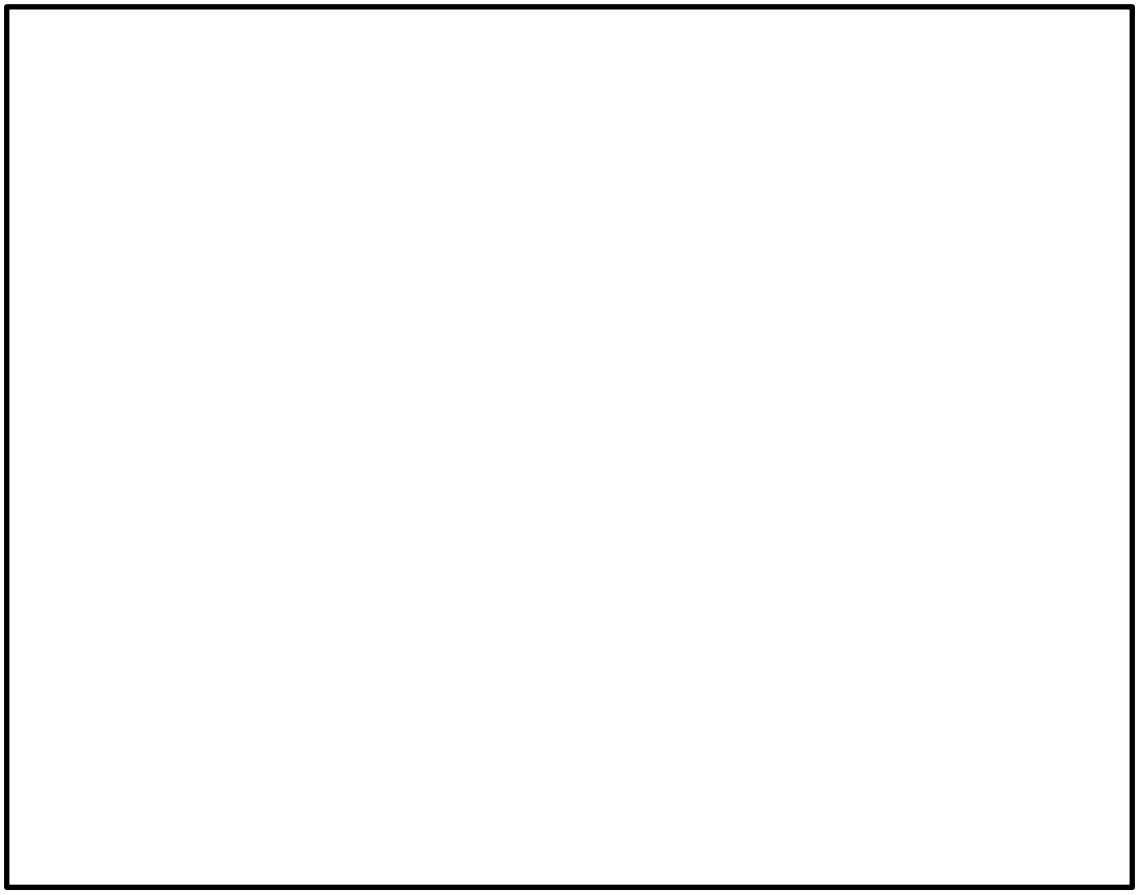
詳細検討が必要な設備	機種／形式	基本評価項目
・原子炉補機海水ポンプ ・高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ	立形ポンプ／斜流式	①基礎ボルト，取付ボルト ②ディスチャージケーシング ③バレル ④コラム ⑤軸受 ⑥軸 ⑦冷却水配管 ⑧メカニカルシール熱交換器 ⑨電動機
・燃料プール冷却ポンプ	横形ポンプ／単段遠心式	①基礎ボルト ②支持脚 ③摺動部（ライナーリング部） ④軸 ⑤メカニカルシール ⑥軸受 ⑦電動機 ⑧軸継手 ⑨ケーシングノズル部 ⑩冷却水配管
・ほう酸水注入ポンプ	往復動式ポンプ／横形 3 連往復動式	①基礎ボルト ②ポンプ本体取付ボルト ③クランク軸軸受 ④コネクティングロッド軸受 ⑤クロスヘッドガイド摺動部 ⑥バルブシート面 ⑦吸込・吐出ノズル ⑧減速機取付ボルト ⑨歯車軸軸受 ⑩歯車 ⑪電動機 ⑫軸継手 ⑬油配管

第 5－1 表　各設備における基本評価項目(2/2)

詳細検討が必要な設備	機種／形式	基本評価項目
・燃料プール冷却ポンプ用電動機 ・原子炉補機海水ポンプ用電動機 ・高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ用電動機 ・ほう酸水注入ポンプ用電動機 ・非常用ガス処理系排風機用電動機 ・可燃性ガス濃度制御系再結合装置ブロワ用電動機	電動機／横形ころがり軸受，立形ころがり軸受	①端子箱 ②フレーム ③基礎ボルト，取付ボルト ④固定子 ⑤軸（回転子） ⑥軸受 ⑦固定子と回転子のクリアランス ⑧軸継手
・非常用ガス処理系排風機 ・可燃性ガス濃度制御系再結合装置ブロワ	ファン／遠心直結型，遠心直動式	①ケーシング ②ケーシング取付ボルト ③軸 ④軸受 ⑤軸受取付ボルト ⑥インペラ ⑦ベローズ ⑧軸継手 ⑨メカニカルシール ⑩電動機取付ボルト ⑪電動機 ⑫基礎ボルト ⑬フレキシブルダクト継手

6.　加振試験が必要な設備における動的機能維持評価の検討

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



第6－1図　高圧原子炉代替注水ポンプの構造概要図

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

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

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

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

7.　弁の動的機能維持評価に用いる配管系の応答値について

技術基準規則解釈等の改正を踏まえて,島根２号炉の配管系に設置される弁の機能維持評価に適用する加速度値の算定方針について,規格基準に基づく設計手順を整理し,比較することにより示す。規格基準に基づく手法としてＪＥＡＧ４６０１の当該記載部の抜粋を第7－1図に示す。

(1)　規格基準に基づく設計手順の整理

ＪＥＡＧ４６０１において，弁の動的機能維持評価に用いる弁駆動部の応答加速度の算定方針が示されている。配管系の固有値が剛と判断される場合は最大加速度（ＺＰＡ）を用いること。また，柔の場合は設計用床応答スペクトルを入力とした配管系のスペクトルモーダル解析を行い，算出された弁駆動部での応答加速度を用いることにより，弁の動的機能維持評価を実施することとされている。

(2)　今回工認における島根２号炉の設計手順

今回工認における島根２号炉の弁駆動部での応答加速度値の設定は，上記ＪＥＡＧ４６０１の規定に加えて，一定の余裕を見込み評価を実施する方針とする。

ａ．剛の場合

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

ｂ．柔の場合

配管系の固有値が柔の場合は，ＪＥＡＧ４６０１の手順と同様にスペクトルモーダル解析を行い，弁駆動部の応答加速度を算出した値に加えて，剛領域の振動モードの影響を考慮する観点から1.2倍した最大加速度(1.2ＺＰＡ)による弁駆動部の応答加速度を算定し，いずれか大きい加速度を用いて機能維持評価を行う方針とする。

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

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

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

第７－１表　弁の動的機能維持評価の耐震設計手順の比較

配管系の固有値	ＪＥＡＧ４６０１	島根２号炉
剛の場合	最大応答加速度（1.0ＺＰＡ）を適用する。	最大応答加速度を 1.2 倍した値（1.2ＺＰＡ）を適用する。
柔の場合	スペクトルモーダル解析により算出した弁駆動部の応答を適用する。	スペクトルモーダル解析により算出した弁駆動部の応答[注1]又は最大応答加速度を 1.2 倍した値（1.2ＺＰＡ）のいずれか大きい方を適用する。

注１：高周波数領域の振動モードまで考慮した地震応答解析を行う。

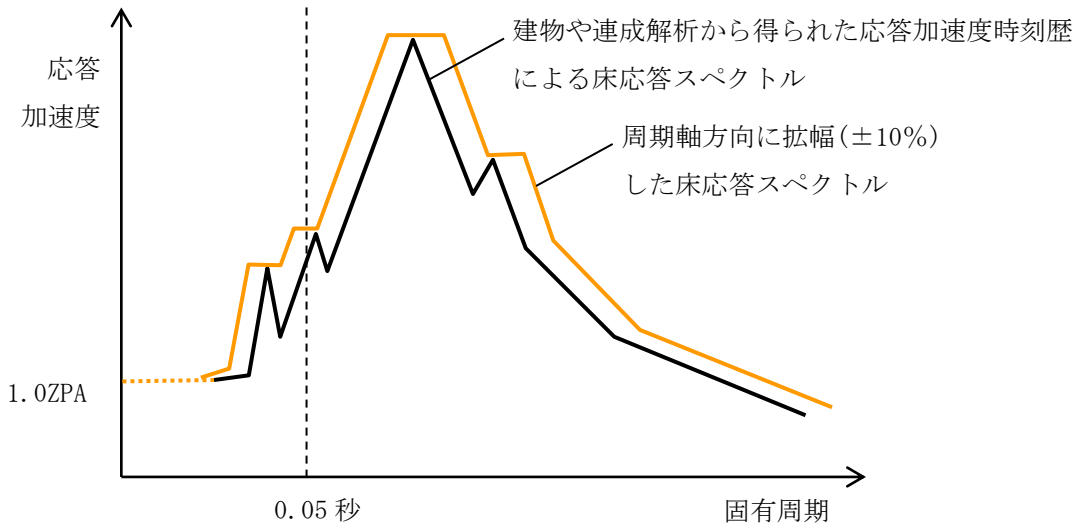
⑸　地震応答解析

弁の地震応答を算出するに当たり，⑷項で作成した弁モデルを配管系モデルに組み込み，地震応答解析を実施する。この場合の解析方法は，配管系の固有値に応じて静的応答解析法あるいはスペクトルモーダル応答解析法を用いる。

配管系の固有値が剛と判断される場合は，静的応答解析を行うが，この場合弁に加わる加速度は設計用床応答スペクトルのＺＰＡ（ゼロ周期加速度）であり，これを弁駆動部応答加速度と見なして評価を行う。また，剛の範囲にない場合には，原則として⑶項で定めた設計用床応答スペクトルを入力とする配管系のスペクトルモーダル解析を行い，算出された弁駆動部応答加速度を用いて弁の評価を実施する。更に，弁の詳細評価が必要となる場合には，弁各部の強度評価に必要な応答荷重を算出する。

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

第７－１図　ＪＥＡＧ４６０１-1991 抜粋



第 7－2 図　弁の動的機能維持評価に適用する床応答スペクトル(イメージ)

別表１　検討対象設備の抽出結果(1/4)

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

別表１　検討対象設備の抽出結果(2/4)

施設区分／設備名称	動的機能維持要求の有無	動的機能維持の確認方法	機能維持評価用加速度がAt超過時の評価方法がJEAGに規定されているか ○：規定されている ×：規定されていない －：対象外	JEAG4601適用性確認				機能確認済加速度(At)との比較			備考
				機種名	形式 (適用範囲)	設備容量	適用性 ○：適用可 ×：適用外	方向	機能維持評価用加速度[注1]	機能確認済加速度	
高圧炉心スプレイ補機冷却系及び高圧炉心スプレイ補機海水系											
高圧炉心スプレイ補機冷却水ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	横形ポンプ	単段遠心式 (～2400m^3/h)	240 m^3/h	○	水平	0.88	3.2(軸直角方向) 1.4(軸方向)	
								鉛直	0.64	1.0	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受 (～950kW)	37 kW	○	水平	0.88	4.7	
								鉛直	0.64	1.0	
高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	立形ポンプ	斜流式 (～7600m^3/h)	336 m^3/h	○	水平	1.42	10.0	機能維持評価用加速度がAt超過のため詳細検討を実施する。
								鉛直	1.34	1.0	
		JEAG4601による確認	×	電動機	立形ころがり軸受 (～1300kW)	75 kW	○	水平	1.42	2.5	機能維持評価用加速度がAt超過のため詳細検討を実施する。
								鉛直	1.34	1.0	
原子炉補機代替冷却系											
－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
原子炉冷却材浄化設備											
原子炉浄化系											
－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
計測制御系統施設											
制御材											
制御棒(地震時挿入性)	有	JEAG4601による確認	×	制御棒	BWR 標準型式	BWR 標準型式	○	水平	評価用変位 35.0 mm	確認済変位 40.0 mm	
								鉛直	詳細設計段階で鉛直方向地震による影響を評価する		
制御材駆動装置											
制御棒駆動水圧系											
－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
ほう酸水注入設備											
ほう酸水注入系											
ほう酸水注入ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	往復動式ポンプ	横形3連往復動式 (流量，吐出圧力等ほぼ同一)	9.72 m^3/h	○	水平	1.17	1.6	機能維持評価用加速度がAt超過のため詳細検討を実施する。
								鉛直	1.49	1.0	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受 (～950kW)	45 kW	○	水平	1.17	4.7	機能維持評価用加速度がAt超過のため詳細検討を実施する。
								鉛直	1.49	1.0	
放射性廃棄物の廃棄施設											
放射線管理施設											
換気設備											
中央制御室空調換気系											
中央制御室送風機	有	JEAG4601による確認	×	ファン	遠心直結型 (～2900m^3/min)	2000 m^3/min	○	水平	1.10	2.3	
								鉛直	0.93	1.0	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受 (～950kW)	180 kW	○	水平	1.10	4.7	
								鉛直	0.93	1.0	
中央制御室非常用再循環送風機	有	JEAG4601による確認	×	ファン	遠心直結型 (～2900m^3/min)	534 m^3/min	○	水平	1.10	2.3	
								鉛直	0.93	1.0	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受 (～950kW)	30 kW	○	水平	1.10	4.7	
								鉛直	0.93	1.0	
中央制御室空気供給系											
－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
緊急時対策所換気空調系											
－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
生体遮蔽装置											
その他の放射線管理施設											
原子炉格納施設											
原子炉格納容器安全設備											
原子炉格納容器スプレイ設備											
格納容器代替スプレイ系											
－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
ペデスタル代替注水系											
－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
残留熱代替除去系											
残留熱代替除去ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	横形ポンプ	単段遠心式 (～2400m^3/h)	150 m^3/h	○	水平	0.81	3.2(軸直角方向) 1.4(軸方向)	
								鉛直	0.58	1.0	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受 (～950kW)	75 kW	○	水平	0.81	4.7	
								鉛直	0.58	1.0	

別表１　検討対象設備の抽出結果(3/4)

施設区分／設備名称	動的機能維持要求の有無	動的機能維持の確認方法	機能維持評価用加速度がAt超過時の評価方法がJEAGに規定されているか ○：規定されている ×：規定されていない －：対象外	JEAG4601適用性確認				機能確認済加速度（At）との比較			備考
				機種名	形式 （適用範囲）	設備容量	適用性 ○：適用可 ×：適用外	方向	機能維持評価用加速度[注1]	機能確認済加速度	
放射性物質濃度制御設備及び可燃性ガス濃度制御設備並びに格納容器再循環設備											
非常用ガス処理系											
非常用ガス処理系排風機	有	JEAG4601による確認	×	ファン	遠心直結型 （～2900m^3/min）	74m^3/min	○	水平	1.17	2.3	機能維持評価用加速度がAt超過のため詳細検討を実施する。
								鉛直	1.49	1.0	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受 （～950kW）	22 kW	○	水平	1.17	4.7	機能維持評価用加速度がAt超過のため詳細検討を実施する。
								鉛直	1.49	1.0	
可燃性ガス濃度制御系											
可燃性ガス濃度制御系再結合装置ブロワ	有	JEAG4601による確認	×	ファン	遠心直動型 （～2500m^3/min）	4.25 m^3/min	○	水平	1.17	2.6	機能維持評価用加速度がAt超過のため詳細検討を実施する。
								鉛直	1.49	1.0	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受 （～950kW）	15 kW	○	水平	1.17	4.7	機能維持評価用加速度がAt超過のため詳細検討を実施する。
								鉛直	1.49	1.0	
原子炉建物水素濃度抑制設備											
窒素ガス代替注入系											
－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
原子炉格納容器調気設備											
窒素ガス制御系											
－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
圧力逃がし装置											
格納容器フィルタベント系											
－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
その他発電用原子炉の附属施設											
非常用電源設備											
非常用発電装置											
非常用ディーゼル発電設備											
非常用ディーゼル発電設備励磁装置及び保護継電装置											
非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び発電機	有	JEAG4601による確認	×	中速形 ディーゼル機関	機関本体 （～15500kW）	6150kW	○	水平	0.88	1.1	
								鉛直	0.64	1.0	
		JEAG4601による確認	×	調速装置	UG形	UG形	○	水平	0.88	1.8	
								鉛直	0.64	1.0	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形すべり軸受 （～1400kW）	5840kW	○	水平	0.88	2.6	発電機の基本構造は電動機と同一であることから，電動機における機能確認済加速度を適用する。
								鉛直	0.64	1.0	
非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ	有	新たな検討による確認	×	横形ポンプ	スクリュー式	4 m^3/h	× （該当型式なし）	水平	－	－	型式がJEAG4601の適用対象外のため新たな検討を実施する。
								鉛直	－	－	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受 （～950kW）	2.2 kW	○	水平	1.22	4.7	
								鉛直	0.78	1.0	
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備											
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備励磁装置及び保護継電装置											
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び発電機	有	JEAG4601による確認	×	中速形 ディーゼル機関	機関本体 （～15500kW）	3480kW	○	水平	0.88	1.1	
								鉛直	0.64	1.0	
		JEAG4601による確認	×	調速装置	UG形	UG形	○	水平	0.88	1.8	
								鉛直	0.64	1.0	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形すべり軸受 （～1400kW）	3200kW	○	水平	0.88	2.6	発電機の基本構造は電動機と同一であることから，電動機における機能確認済加速度を適用する。
								鉛直	0.64	1.0	
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ	有	新たな検討による確認	×	横形ポンプ	スクリュー式	4 m^3/h	× （該当型式なし）	水平	－	－	型式がJEAG4601の適用対象外のため新たな検討を実施する。
								鉛直	－	－	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受 （～950kW）	2.2 kW	○	水平	1.22	4.7	
								鉛直	0.78	1.0	
ガスタービン発電機											
ガスタービン発電機励磁装置及び保護継電装置											
ガスタービン発電機	有	新たな検討による確認	×	ガスタービン機関	機関本体	4800kW	× （該当型式なし）	水平	－	－	型式がJEAG4601の適用対象外のため新たな検討を実施する。
								鉛直	－	－	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受 （～950kW）	4800kW	○	水平	1.47	4.7	発電機の基本構造は電動機と同一であることから，電動機における機能確認済加速度を適用する。
								鉛直	0.69	1.0	
ガスタービン発電機用燃料移送ポンプ	有	新たな検討による確認	×	横形ポンプ	スクリュー式	4 m^3/h	× （該当型式なし）	水平	－	－	型式がJEAG4601の適用対象外のため新たな検討を実施する。
								鉛直	－	－	
		JEAG4601による確認	×	電動機	横形ころがり軸受 （～950kW）	3.7 kW	○	水平	0.96	4.7	
								鉛直	0.61	1.0	

別表１　検討対象設備の抽出結果(4/4)

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

注１：機能維持評価用加速度は，暫定値であり今後設計進捗により変更の可能性がある。
注２：弁の確認結果については，詳細設計段階にて示す。

添付資料１

高圧原子炉代替注水ポンプの加振試験について

高圧原子炉代替注水ポンプは横形のポンプであるが，原動機であるタービンと一体構造となっており，ＪＥＡＧ４６０１における適用形式が異なることから，機能確認済加速度を用いた評価とすることができない。そのため，機能確認済加速度を設定することを目的とし，[　　]を用いて，高圧原子炉代替注水ポンプに対する加振試験を実施した。加振試験の概要について，以下に示す。

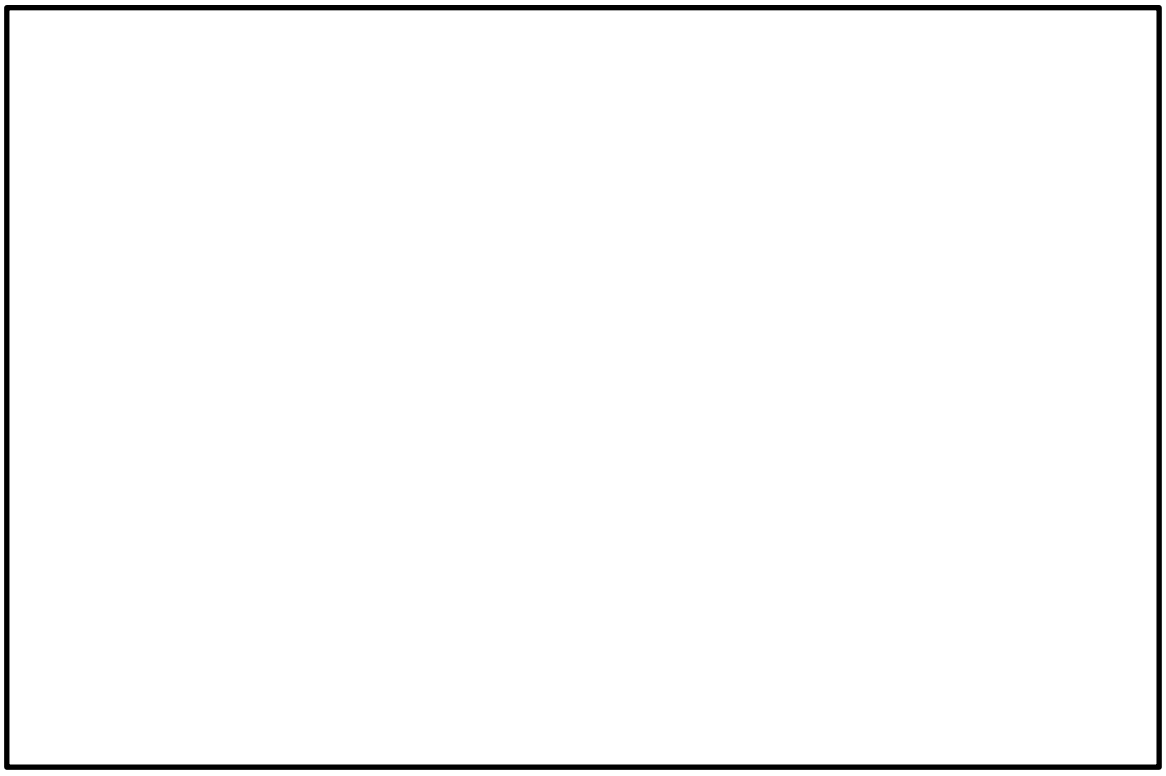
1.　試験概要

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

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

第1－1図　ポンプ断面イメージ図

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



第 1－2 図　振動試験装置外観

第 1－1 表　加振台仕様

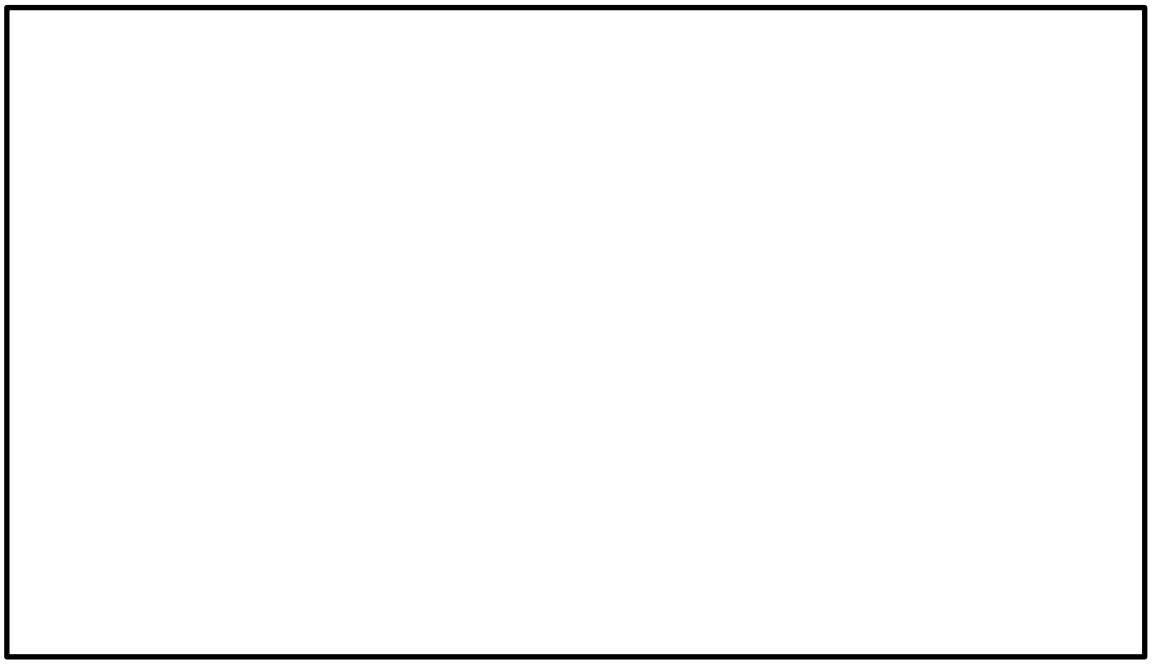
寸法		
最大積載量		
運転周波数帯域		
最大加速度	水平	
	鉛直	

2.　振動特性把握試験

2.1　試験条件

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

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

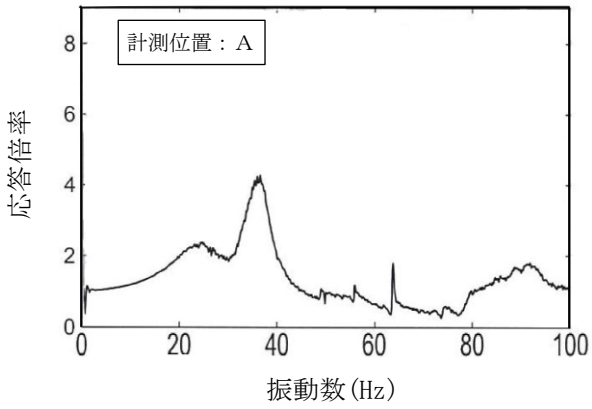


第 2.1－1 図　計測センサー取付位置

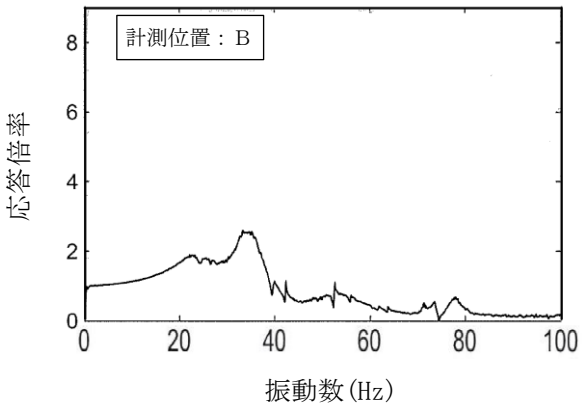
本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

2.2　試験結果

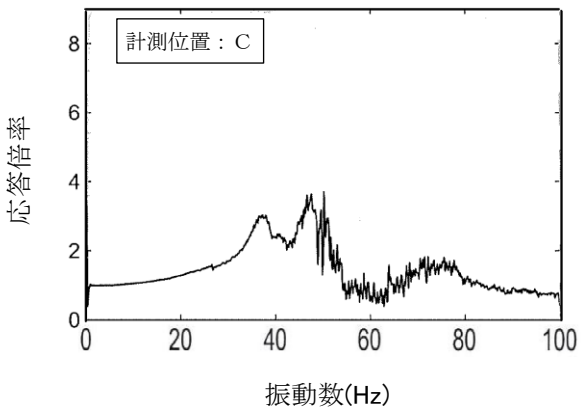
試験結果として得られた周波数応答関数を第 2.2－1 図に，各軸方向の固有振動数を第 2.2－1 表に示す。第 2.2－1 表より，各軸方向について剛構造と見なせる固有周期 0.05 秒を十分に下回る結果が得られた。



Ｘ方向



Ｙ方向



Ｚ方向

第 2.2－1 図　周波数応答関数

第 2.2－1 表　各軸方向の固有振動数

方向	固有周期［s］	固有振動数［Hz］
X		
Y		
Z		

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

3.　加振試験

3.1　試験条件

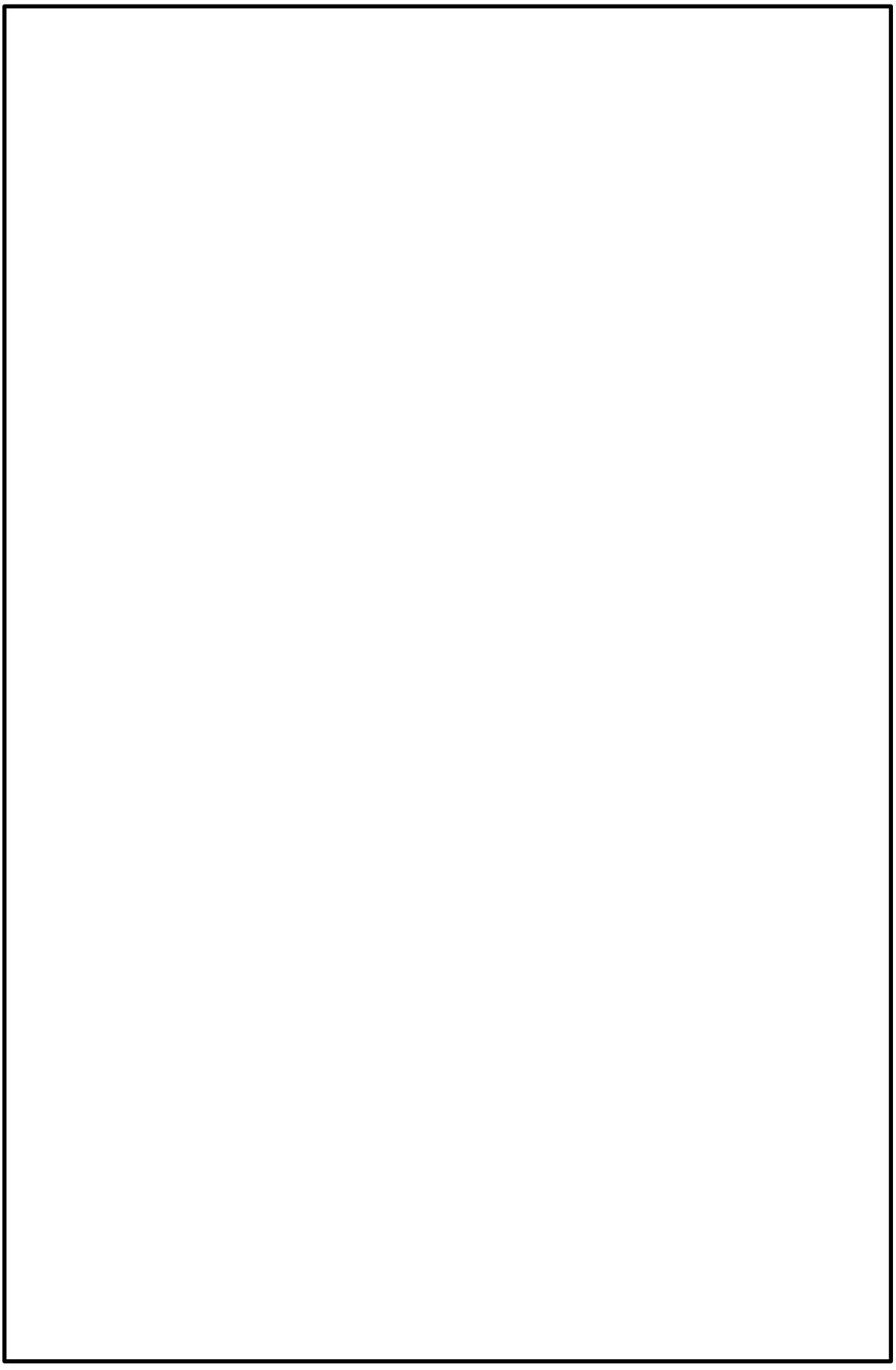
加振試験における試験条件を第 3.1－1 表に示す。また，加振台上の加速度時刻歴波形を第 3.1－1 図に，加振台床応答曲線と島根２号炉の高圧原子炉代替注水ポンプの設置位置における床応答曲線（以下「HPAC 床応答曲線」という。）の比較を第 3.1－2 図に示す。機器の固有周期は 0.05 秒を下回っており，剛構造と見なせることから，機器設置位置における機能維持評価用加速度を包絡する加振波を生成し，加振試験を実施する。加振方向は水平（前後，左右）及び鉛直方向の三軸同時加振とする。なお，第 3.1－1 図に示す加振台床応答曲線は，加振波を入力とした振動台の時刻歴応答波形の床応答曲線であり，振動台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

第 3.1－1 表　加振試験条件

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

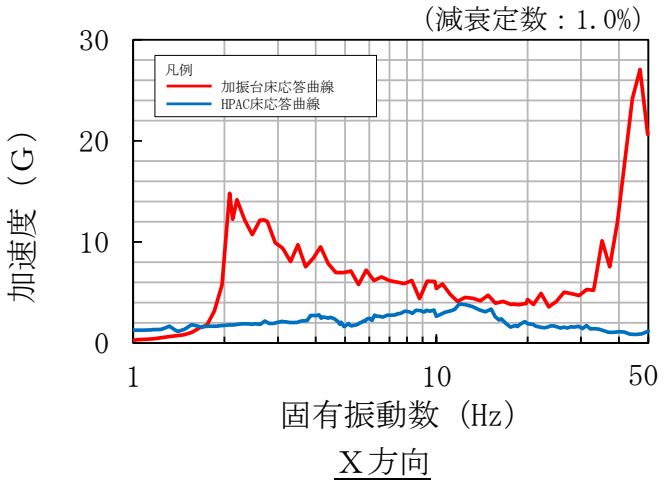
注１：重大事故等は「地震の独立事象」として扱っており，高圧原子炉代替注水ポンプの運転を想定する時間は，事象発生後約 8.3 時間であることから，地震荷重との組合せが不要な期間（10^{-2} 年）より短時間であるため，加振試験条件として停止時を考慮する。

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

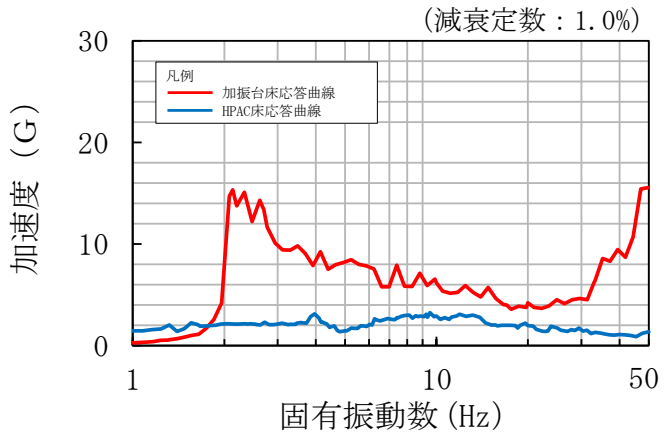


第 3.1－1 図　加振台上の加速度時刻歴波形

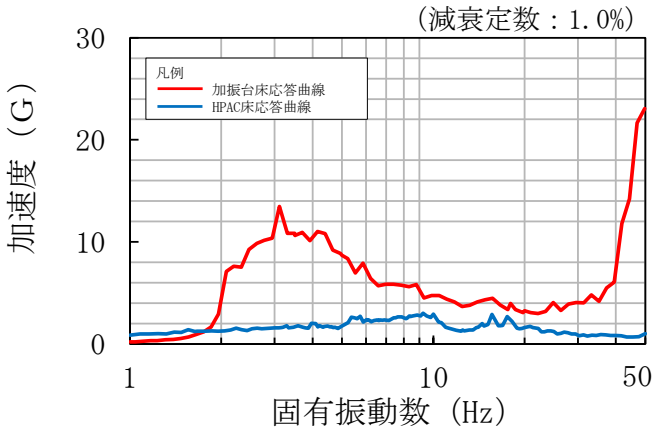
本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



X方向



Y方向



Z方向

第3.1－2 図　加振台床応答曲線とHPAC床応答曲線の比較

3.2　試験結果

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

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

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

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

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

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

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

第 3.2－2 表　高圧原子炉代替注水ポンプの主な仕様の比較

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

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

参考資料１

ガスタービン発電機の加振試験について

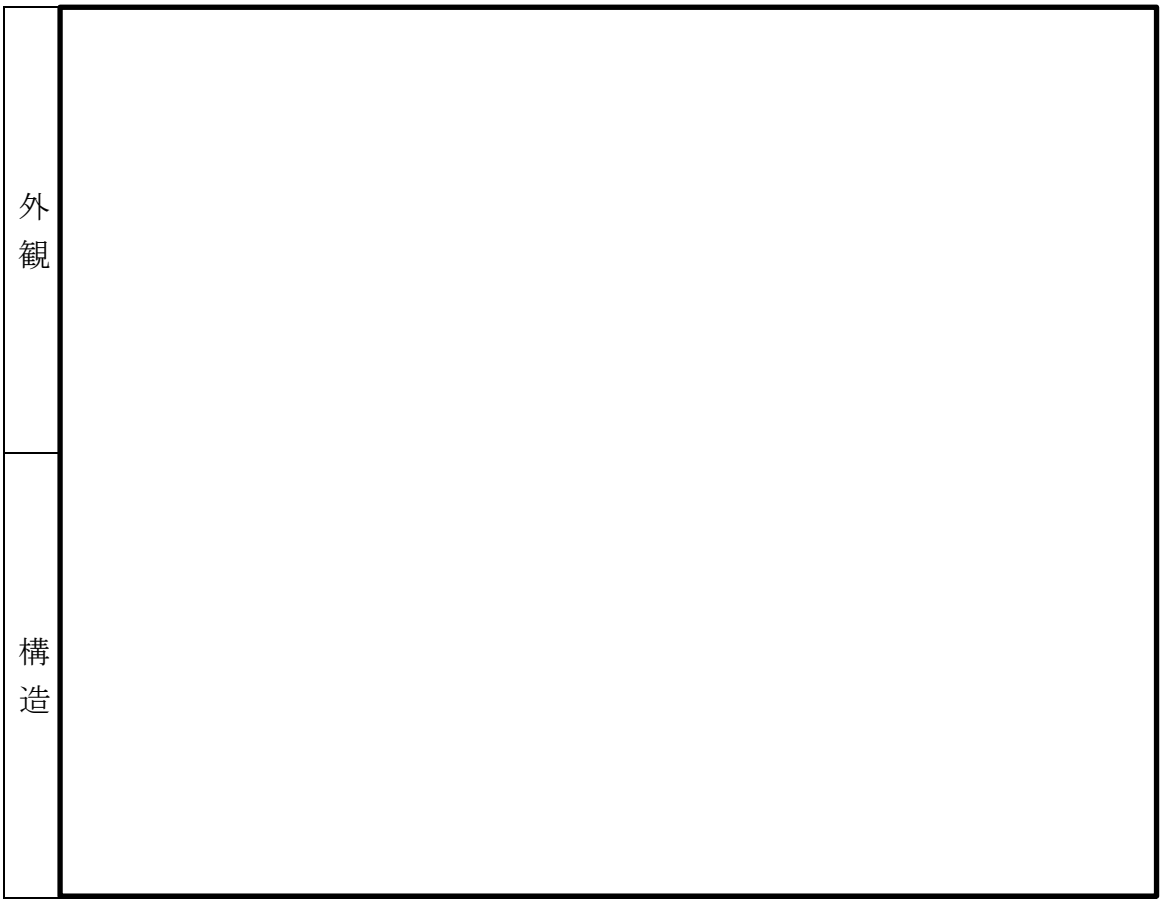
米国ＰＷＲ向けのガスタービン（以下「US-APWR ガスタービン」という。）について，加振試験が実施されている[1]。

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

1. US-APWR ガスタービン加振試験

1.1 試験概要

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



第 1.1－1 図　US-APWR ガスタービンの構造概要

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

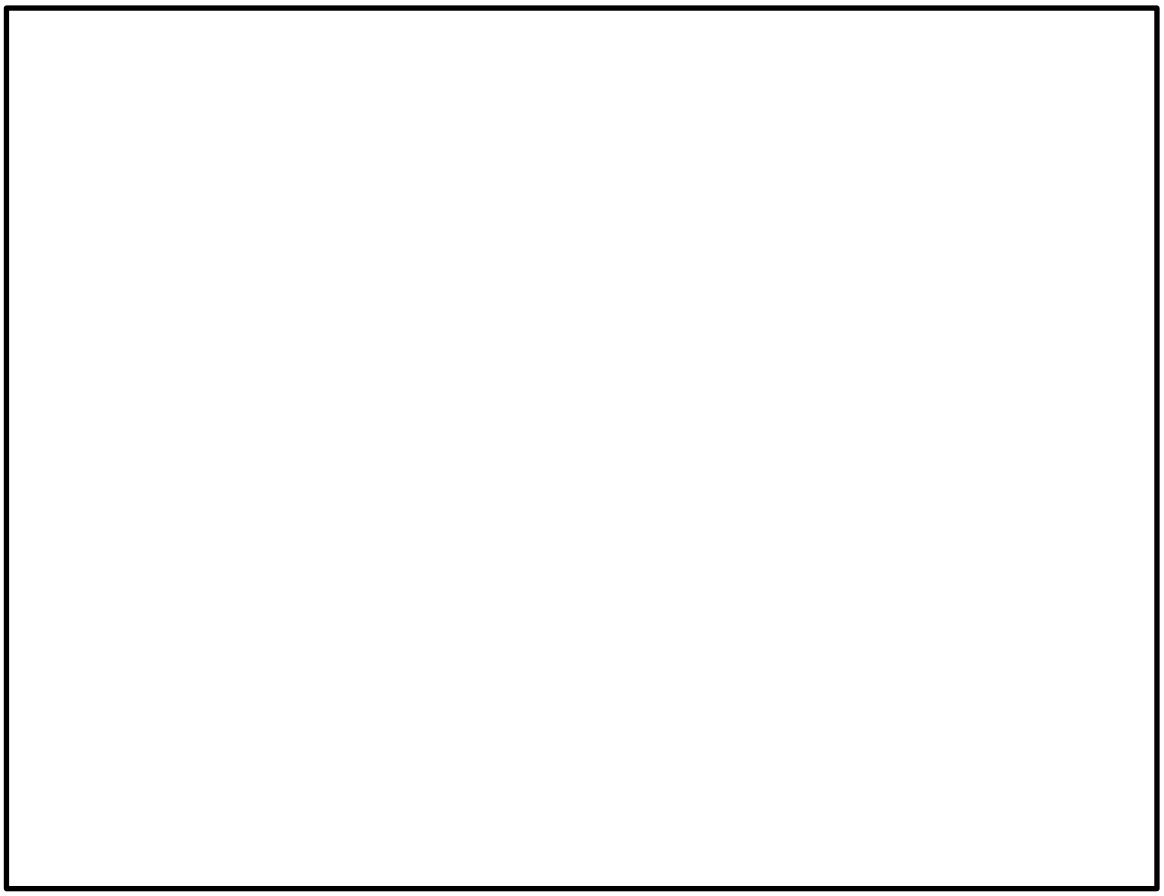
1.2　振動特性把握試験

1.2.1　試験条件

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

第 1.2.1－1 表　正弦波掃引加振の試験条件

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

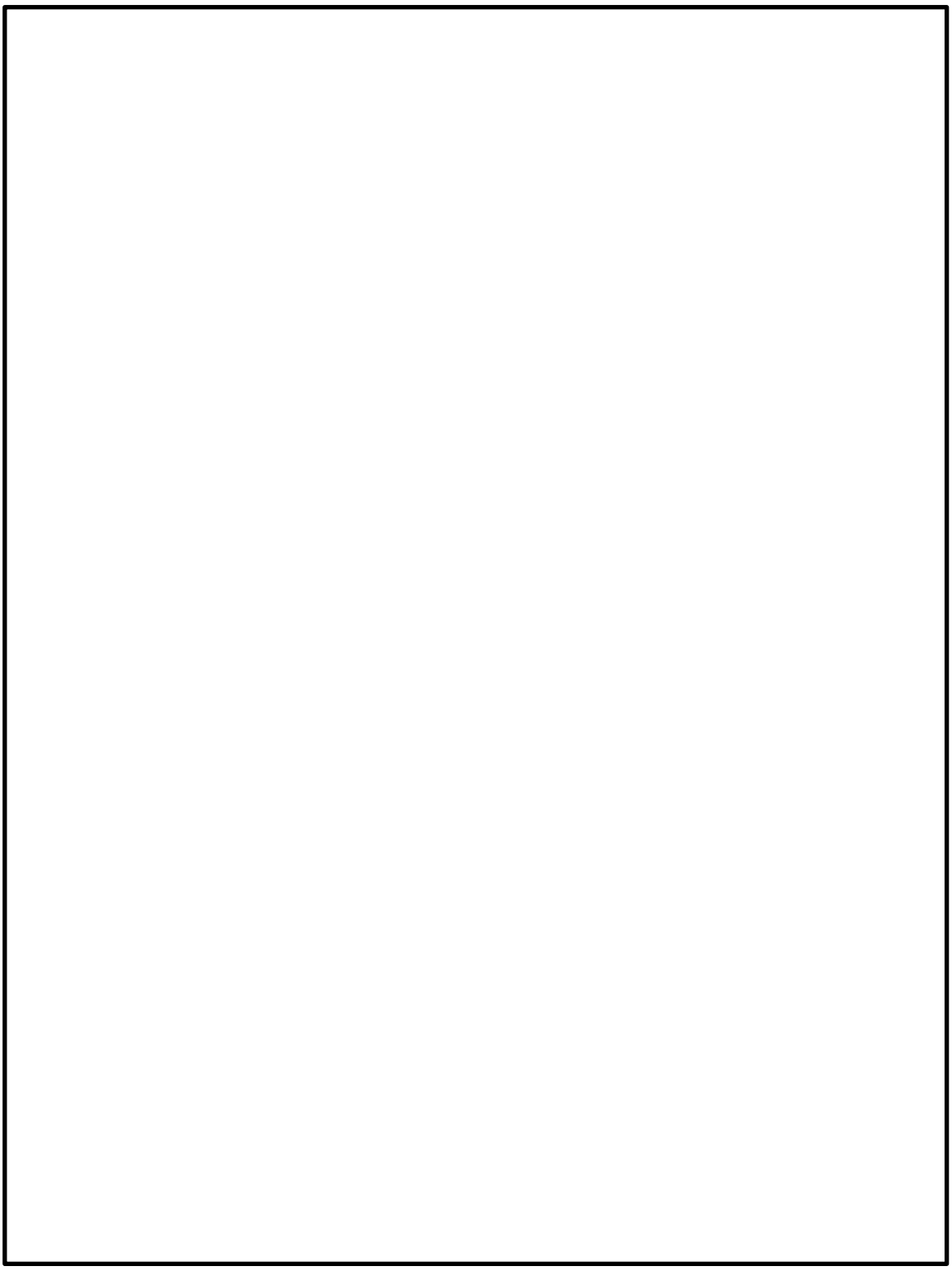


第 1.2.1－1 図　計測センサー取付位置

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

1.2.2　試験結果

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



第 1.2.2－1 図　周波数応答関数

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

第 1.2.2－1 表　各軸方向の固有振動数

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

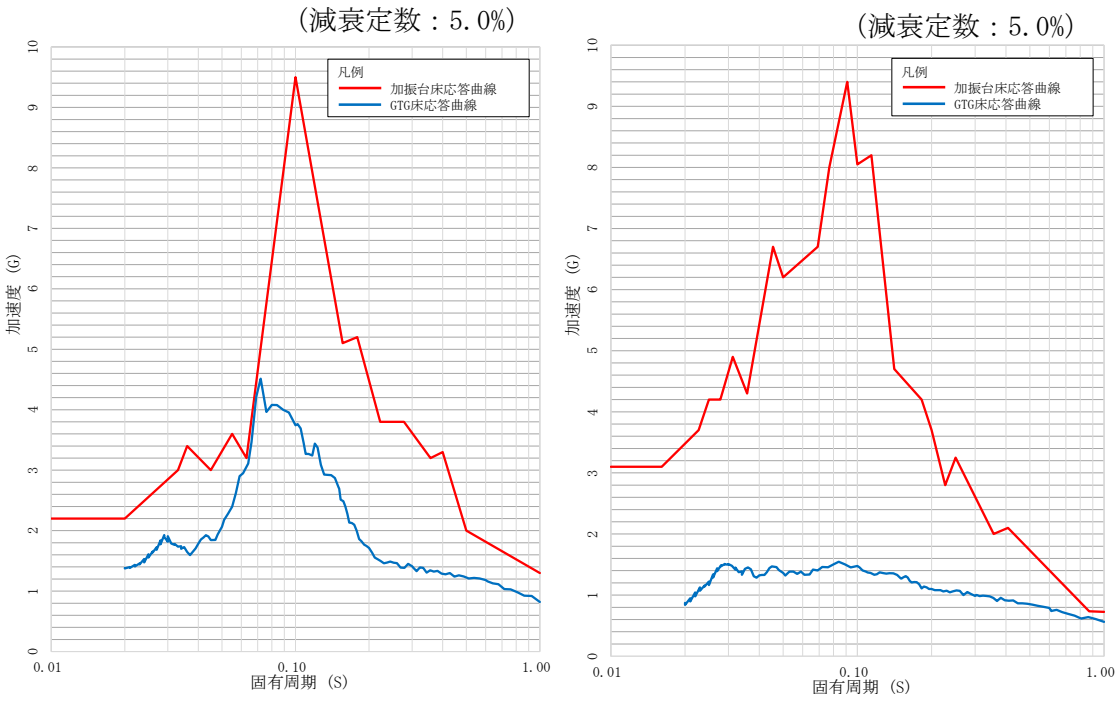
1.3　加振試験

1.3.1　試験条件

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

第 1.3.1－1 表　加振試験条件

項目	試験条件
試験体	US-APWR ガスタービン（発電機部分を除く）
加振地震波	ランダム波
加振方向	水平１方向＋鉛直方向の２軸同時加振試験
運転状態	・停止中加振 ・運転中加振 ・加振中起動
取付条件	振動台上に設置された台板にボルトにて取り付け



水平方向　　鉛直方向

第 1.3.1－1 図　加振台床応答曲線と GTG 床応答曲線の比較

1.3.2　試験結果

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

第 1.3.2－1 表　加振試験結果

項目		試験結果
最大加速度	水平	２．２Ｇ
	鉛直	３．１Ｇ
試験結果		すべての運転状態（停止中加振，運転中加振，加振中起動）において，ガスタービンの運転性能に異常のないことを確認した。
試験後確認		試験後の確認運転において，ガスタービンの運転性能に異常のないことを確認した。また，試験後の開放点検においても，外観，寸法，構成部品の作動に異常のないことを確認した。

2.　島根２号炉のガスタービンと US-APWR ガスタービンの類似性

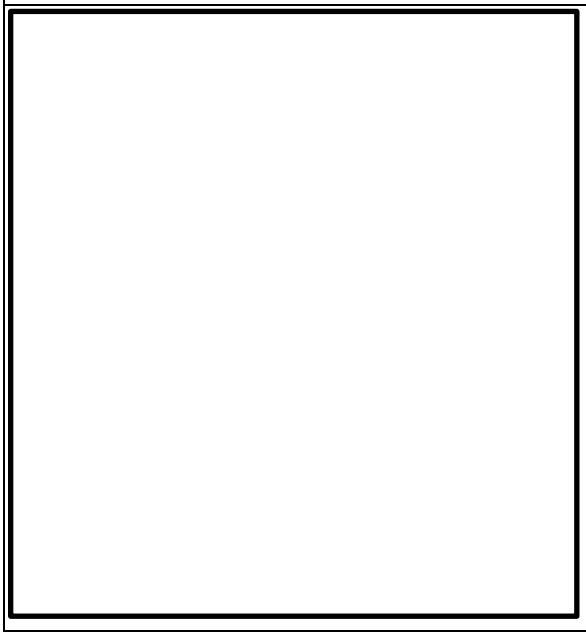
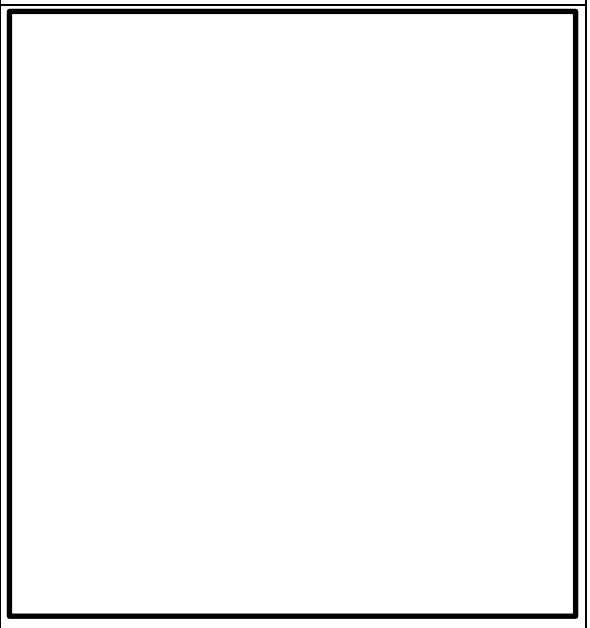
US-APWR ガスタービンと島根２号炉のガスタービンの主な仕様の比較を第 2－1 表に，ガスタービン機関の構造概要の比較を第 2－1 図に示す。また，US-APWR ガスタービン加振試験における機能確認済加速度と，島根２号炉ガスタービンの動的機能維持における機能維持評価用加速度の比較を第 2－2 表に示す。

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

第2－1表　ガスタービンの主な仕様の比較

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

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

US-APWR ガスタービン	島根２号炉ガスタービン
	

第２－１図　ガスタービン機関の構造概要の比較

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

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

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

【参考文献】

[1] Mitsubishi Heavy Industries, LTD.,”Initial Type Test Result of Class 1E Gas Turbine Generator System”(MUAP-10023-NP[R7]), December 2013

[2] IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

別紙－16

島根原子力発電所２号炉

建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価について

目　次

1. はじめに
2. 入力地震動評価における既工認からの変更点とその設定根拠及び影響について
3. 建物・構築物の入力地震動の算定に用いる解析モデルの詳細設計における適用方針について
4. 詳細設計段階における影響検討方針について
5. まとめ
6. 参考文献

参考資料－1　既工認と今回工認の入力地震動の評価手法の比較
参考資料－2　入力地震動評価用解析モデルの地盤物性値
参考資料－3　２次元ＦＥＭ解析モデル側面の境界条件
参考資料－4　既工認モデルと今回工認モデルによる入力地震動の比較
参考資料－5　２次元ＦＥＭモデルのメッシュ分割高さに関する検討
参考資料－6　２号炉主要建物における１次元波動論及び２次元ＦＥＭによる入力地震動の比較

1.　はじめに

島根原子力発電所の建設時の工事計画認可申請書（以下「既工認」という。）では，原子炉建物等の地震応答解析における入力地震動は１次元波動論，２次元ＦＥＭ解析又は直接入力（以下「１次元波動論又は２次元ＦＥＭ解析等」という。）により評価を実施している。

今回の工事計画認可申請（以下「今回工認」という。）では，既工認において採用実績のある１次元波動論又は２次元ＦＥＭ解析等を採用する方針であり，解放基盤表面で定義される基準地震動Ｓｓ及び弾性設計用地震動Ｓｄを基に，対象建物・構築物の地盤条件を適切に考慮したうえで，２次元ＦＥＭ解析又は１次元波動論により，地震応答解析モデルの入力位置で評価した入力地震動を設定する。

本資料は原子炉建物について，既工認と今回工認の入力地震動の評価手法及び解析モデルを示す。原子炉建物以外の建物・構築物及び土木構造物については評価手法を示し，解析モデルについては詳細設計段階で示す。

2.　入力地震動評価における既工認からの変更点とその設定根拠及び影響について

2.1　原子炉建物の入力地震動の評価について

原子炉建物の地震応答解析に用いる入力地震動の評価手法は，既工認と同様に１次元波動論及び２次元ＦＥＭ解析を採用する。また，解析モデルについては，建設時以降の敷地内の追加地質調査結果の反映等により，最新のデータを基に，より詳細にモデル化したものである。

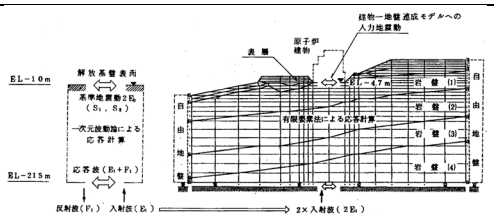
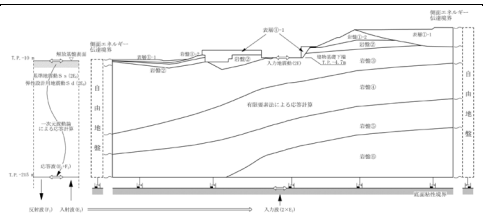
既工認と今回工認の評価手法及び解析モデルの比較を第 2－1 表及び第 2－2 表に示す。

2.2　原子炉建物以外の建物・構築物及び土木構造物の評価について

原子炉建物以外の建物・構築物及び土木構造物についても，評価手法は既工認において採用実績のある１次元波動論又は２次元ＦＥＭ解析等を採用する方針とし，解析モデルは建設時以降の敷地内の追加地質調査結果等に基づき設定する。

建物・構築物及び土木構造物の既工認と今回工認の入力地震動の評価手法の比較について参考資料－１に示す。

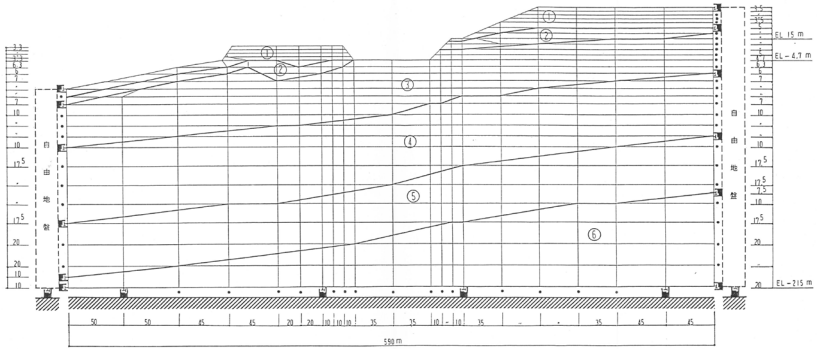
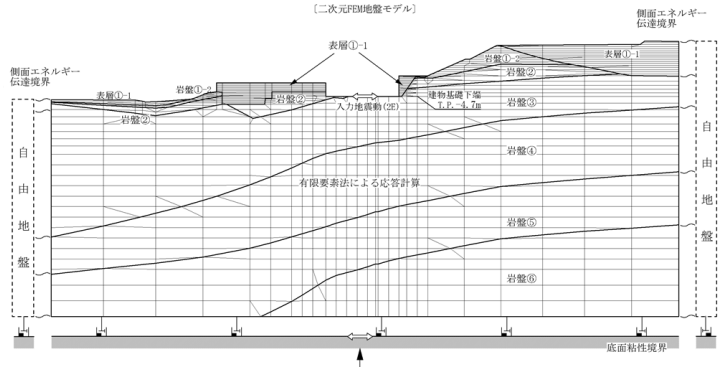
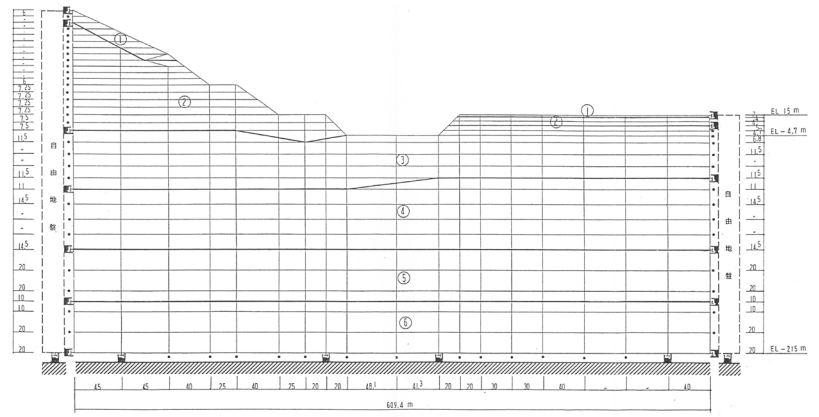
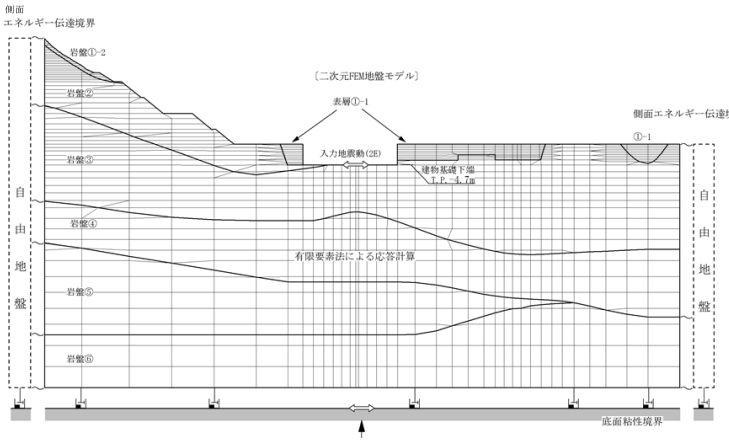
第2－1表　原子炉建物の地震応答解析に用いる入力地震動の評価手法及び解析モデルの比較（主な解析条件）

	既工認	今回工認
入力地震動の評価（概要）	 （ＮＳ方向）	 （ＮＳ方向） ※解放基盤表面から T.P.－215m までの１次元モデルは既工認と同じ。
評価手法		
解析方法	周波数応答解析	同左
入力地震動の算定方法［計算機コード］	・引下げ：１次元波動論［SHAKE］ ・引上げ：２次元ＦＥＭ解析［VESL-DYN］	・引下げ：１次元波動論［SHAKE］ ・引上げ：２次元ＦＥＭ解析［SuperFLUSH］
入力地震動の解析モデル		
モデル化範囲	・引下げ：解放基盤表面(T.P.－10m)から T.P.－215m までをモデル化 ・引上げ：幅は約 600m の範囲とし，高さは T.P.－215m 以浅をモデル化	・引下げ：同左 ・引上げ：同左
速度層区分	建設時の地質調査結果に基づき設定	建設時の地質調査結果に加えて，建設時以降の敷地内の追加地質調査結果（ボーリング，ＰＳ検層）に基づき設定
地盤物性値[注1]	建設時の地質調査結果に基づき設定 ※表層地盤については文献(1)に基づく標準的な砂質土のひずみ依存性を考慮した等価物性値を設定	同左 ※表層地盤については，地震動レベル及び試験結果に基づく埋戻土のひずみ依存性を考慮した等価物性値を設定
境界条件[注2]（２次元ＦＥＭ）	・底面：粘性境界 ・側面：粘性境界	・底面：粘性境界 ・側面：エネルギー伝達境界※ ※側方地盤への波動の逸散をより詳細に評価する境界条件に変更
入力地震動出力位置	EL －4.7m	同左
備考	建設工認　第１回　添付書類Ⅳ-2-4-1「原子炉建物の地震応答計算書」による	
地震応答解析モデル		
相互作用モデル	水平：地盤ばねモデル（SR モデル） 鉛直：―	水平：地盤ばねモデル（SR モデル） 鉛直：地盤ばねモデル（底面鉛直ばねモデル）
建物設置レベル	EL －4.7m	同左

____箇所：主な相違点

注１：入力地震動評価用解析モデルの地盤物性値を参考資料－２に示す。
注２：２次元ＦＥＭ解析モデル側面の境界条件を参考資料－３に示す。

第2－2表　原子炉建物の地震応答解析に用いる入力地震動の評価手法及び解析モデルの比較（2次元ＦＥＭ解析モデル）

	既工認	今回工認
NS		
EW		

※　今回工認モデルでは建物基礎底面レベルの振動を同一とするため，建物基礎底面レベルの平面を保持する拘束条件を設けている。
　　また，建物床レベルの水平変位を同一とするため，切欠き地盤側面には水平変位を保持する拘束条件を設けている。

※　入力地震動評価用解析モデルの地盤物性値を参考資料－２に示す。

※　既工認モデルと今回工認モデルによる入力地震動の比較を参考資料－４に示す。

※　２次元ＦＥＭモデルのメッシュ分割高さに関する検討結果を参考資料－５に示す。

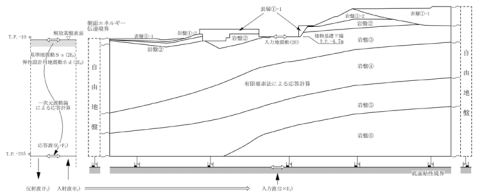
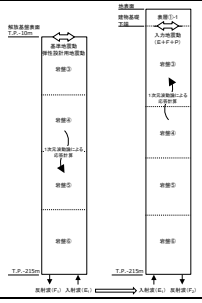
3. 建物・構築物の入力地震動の算定に用いる解析モデルの詳細設計における適用方針について

今回工認におけるＳクラス施設を含む 2 号炉の主要な建物・構築物である原子炉建物及び制御室建物の入力地震動は，以下の通り算定することとする。

水平方向は，原子炉建物の既工認と同様に，速度層の傾斜及び建物周辺の地形等の影響を考慮するため，２次元ＦＥＭモデルを採用する。鉛直方向は，入力地震動に対する建物直下地盤による影響が大きく，速度層の傾斜等の影響は小さいと考えられることから，１次元波動論モデルを採用する。

原子炉建物及び制御室建物の入力地震動の算定方法について，今回工認の評価手法及び解析モデルを第 3－1 表に示す。

第 3－1 表　今回工認の原子炉建物及び制御室建物の
入力地震動の算定方法

	水平方向	鉛直方向
入力地震動の評価（概念図）		
評価手法		
入力地震動の算定方法［計算機コード］	・引下げ：１次元波動論[SHAKE] ・引上げ：２次元ＦＥＭ解析［SuperFLUSH］	・引下げ：１次元波動論[SHAKE] ・引上げ：１次元波動論[SHAKE]
解析モデル		
モデル化範囲	・引下げ：解放基盤表面(T.P.-10m)から T.P.-215m までをモデル化 ・引上げ：幅は約 600m の範囲とし，高さは T.P.-215m 以浅をモデル化	・引下げ：解放基盤表面(T.P.-10m)から T.P.-215m までをモデル化 ・引上げ：T.P.-215m 以浅の地盤を水平成層にモデル化
速度層区分	建設時の地質調査結果に加えて，建設時以降の敷地内の追加地質調査結果（ボーリング，ＰＳ検層）に基づき設定	同左
地盤物性値	建設時の地質調査結果に基づき設定 ※表層地盤については，地震動レベル及び試験結果に基づく埋戻土のひずみ依存性を考慮した等価物性値を設定	同左

注１　原子炉建物及び制御室建物について，水平方向・鉛直方向それぞれの１次元波動論及び２次元ＦＥＭによる入力地震動の比較を，参考資料－６に示す。

4.　詳細設計段階における影響検討方針について

建物・構築物の入力地震動の評価について，詳細設計段階において以下に示す影響検討を行い，その影響が有意であれば，影響を考慮して設計を行う方針とする。

4.1　１次元波動論の入力地震動の保守性の確認

入力地震動の評価手法（参考資料－１），１次元波動論及び２次元ＦＥＭによる入力地震動の比較（参考資料－６）を踏まえ，２次元ＦＥＭモデルの速度層に基づき設定した１次元波動論モデルにより入力地震動を算定している建物及び機器・配管について，詳細設計段階において，建物・内包する施設の重要度，及びそれらの許容限界に対する裕度を踏まえた上で，代表とする建物を選定し，２次元ＦＥＭ解析による水平方向の入力地震動を算定し，１次元波動論による入力地震動の保守性を確認する。

１次元波動論と２次元ＦＥＭ解析による入力地震動の加速度応答スペクトルを比較し，影響があると判断した場合は，２次元ＦＥＭ解析による入力地震動を用いた地震応答解析により，建物及び機器・配管への影響検討を実施する。

4.2　表層地盤の物性値（せん断剛性(G)，減衰定数(h)）を一定値にすることの保守性の確認

入力地震動を算定する際の表層地盤（層番号①-1）の物性値については，既工認において表層地盤の物性値の変動による入力地震動に対する影響は小さいと判断していたことを踏まえ，基準地震動Ｓｓ及び弾性設計用地震動Ｓｄそれぞれの地震動レベルに応じた一定値を設定する方針であるが（参考資料－２），詳細設計段階において，建物・内包する施設の重要度，及びそれらの許容限界に対する裕度を踏まえた上で，代表とする建物を選定し，地震動に応じた等価線形解析による入力地震動を算定し，現行の設定方法の保守性を確認する。

なお，代表建物の選定にあたっては，表層地盤の分布状況や地盤構造の特徴等も考慮して選定する。

また，既工認では埋戻し土としてモデル化していた今回工認の①-2 層については，地震時の非線形性が建物の入力地震動に与える影響は小さいと判断し，地質調査結果に基づく地盤物性値を用い，線形として扱う方針であるが（参考資料－２），詳細設計段階において，ひずみ依存性を考慮した等価線形解析及び線形解析から算定される入力地震動を比較し，影響を確認する。

等価線形解析による入力地震動と表層地盤の物性値を一定値とした線形解析による入力地震動の加速度応答スペクトルを比較し，影響があると判断した場合は，等価線形解析による入力地震動を用いた地震応答解析により，建物及び機器・配管への影響検討を実施する。

4.3　高振動数領域の応答に関する影響検討

建物・構築物の入力地震動の算定に用いる２次元ＦＥＭモデルについて，原子炉建物を代表として最高振動数（50Hz）に対して設定した比較用モデルによる解析を実施し，入力地震動への影響を評価した結果，高振動数領域（約 30～50Hz）で比較用モデル（50Hz 透過）が今回工認モデル（20Hz 透過）を上回る周期帯があることから，高振動数領域の応答による影響が考えられる弁の動的機能維持評価等にあたっては，詳細設計段階において影響検討を実施する。（参考資料－５）

5.　まとめ

原子炉建物等の地震応答解析における入力地震動について，今回工認では，既工認において採用実績のある１次元波動論又は２次元ＦＥＭ解析等を採用する方針としている。

原子炉建物の地震応答解析に用いる入力地震動の評価手法及び解析モデルについて，既工認と今回工認を比較し，その差異について整理した。

なお，原子炉建物以外の建物・構築物及び土木構造物についても，評価手法は既工認において採用実績のある１次元波動論又は２次元ＦＥＭ解析等を採用する方針とし，解析モデルは建設時以降の敷地内の追加地質調査結果に基づき設定する。

6.　参考文献

(1) 大崎他，地盤振動解析のための土の動力学モデルの提案と解析例，第 5 回 日本地震工学シンポジウム，1978

既工認と今回工認の入力地震動の評価手法の比較

1.　入力地震動の評価手法について

建物・構築物の入力地震動の評価手法は，耐震クラス，各建物の埋込み状況及び周辺地盤への設置状況を踏まえて，以下の通り使い分けを行う。なお，埋込み及び切欠きの影響については適切に評価する。

＜水平方向＞

- 「耐震Ｓクラス施設」の建物については，速度層の傾斜及び建物周辺の地形等の影響をより詳細にモデル化した「２次元ＦＥＭ解析」を基本とする。（原子炉建物の既工認の考え方と同様）
- 「耐震Ｓクラス施設以外」の建物については，「１次元波動論」による評価を基本とする。（タービン建物等の既工認の考え方と同様）

＜鉛直方向＞

- 入力地震動に対して建物直下地盤による影響が大きく，速度層の傾斜等の影響は小さいことから「１次元波動論」による評価を基本とする。（参考資料－６において，２次元ＦＥＭ解析との比較により速度層の傾斜等の入力地震動への影響が小さいことを確認している。）

構内配置図を第 1－1 図に，各建物・構築物の入力地震動の評価手法の選定フローを第 1－2 図に示す。また，第 1－2 図に従い整理した建物・構築物の入力地震動の評価手法の使い分けの一覧を第 1－1 表に示す。

2.　入力地震動の評価手法の概念図

入力地震動の評価手法（直接入力，１次元波動論，２次元ＦＥＭ解析）の概念図を，第 2－1 表に示す。

3.　入力地震動の評価手法の比較

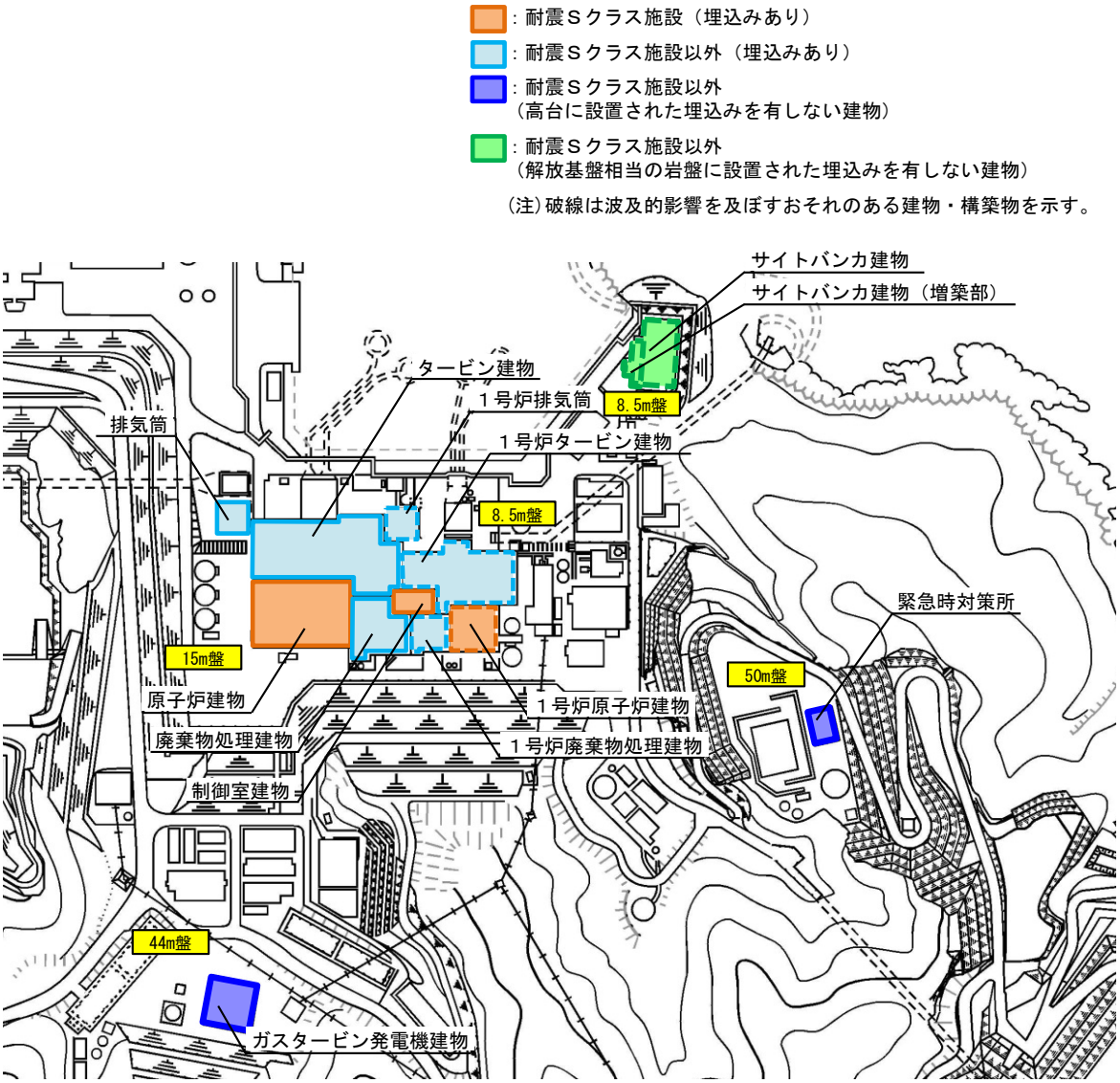
建物・構築物及び土木構造物における，既工認と今回工認の入力地震動の評価手法の比較を第 3－1 表及び第 3－2 表に示す。

建物・構築物の入力地震動は建物基礎底面位置で評価する。なお，今回工認の建物･構築物の地震応答解析モデルは，既工認と同様に質点系モデルを採用する。

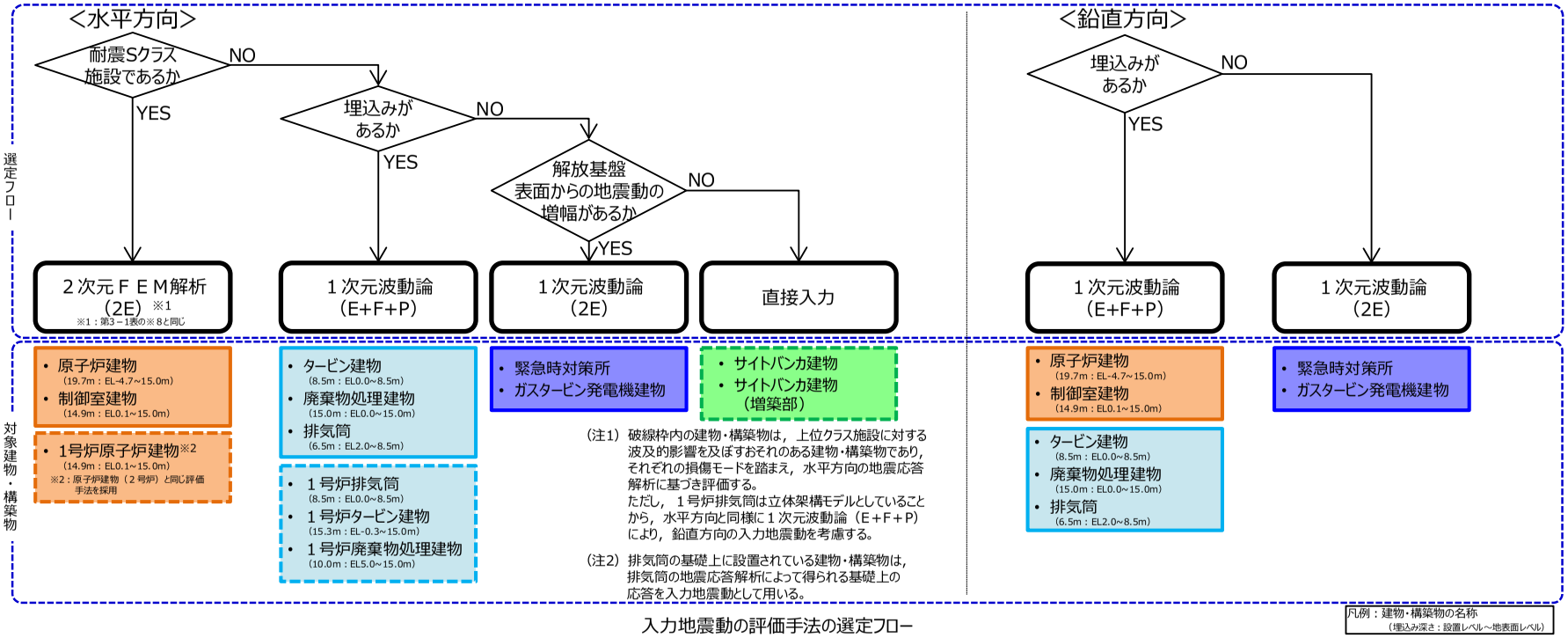
土木構造物の入力地震動は構造物の基礎底面又はＦＥＭモデルの下端位置で評価する。なお，今回工認の取水槽及び屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の地震応答解析モデルは，既工認から変更し，地盤－構造物連成系の２次元ＦＥＭモデルを採用する。

4.　１次元波動論モデルの速度層の設定例

建物・構築物の１次元波動論モデルは，建物中央の速度層の層厚及び物性値に基づきモデル化する。１次元波動論モデルの速度層の設定例として，タービン建物及び廃棄物処理建物の速度層の設定方法を第4－1表に示す。これらの建物の１次元波動論モデルの速度層は，原子炉建物の２次元ＦＥＭモデルにおけるＮＳ方向又はＥＷ方向の速度層に基づき，建物中央でモデル化している。



第１－１図　構内配置図



入力地震動の評価手法の選定フロー

第1－1表　建物・構築物の入力地震動の評価方法

耐震クラス	建物・構築物の設置状況		建物・構築物	入力地震動の評価手法		選定理由等
				水平	鉛直	
Sクラス施設	埋込みあり	EL8.5m盤もしくはEL15m盤	・原子炉建物 ・制御室建物 ・1号炉原子炉建物※1	2次元FEM（2E）※2	1次元波動論（E+F+P）	【水平方向】 ・原子炉建物　：「Sクラス施設」として，既工認と同様に2次元FEMモデルを採用 ・制御室建物　：「Sクラス施設」として，原子炉建物と同様に2次元FEMモデルを採用 ・1号炉原子炉建物　：原子炉建物であることを踏まえ，原子炉建物（2号炉）と同じ評価手法を採用 【鉛直方向】 建物の設置状況が「埋込みあり」のため，埋込みを考慮した1次元波動論（E＋F＋P）を採用
Sクラス施設以外 ・Sクラス施設の間接支持構造物 ・SA施設 ・SA施設の間接支持構造物 ・波及的影響を及ぼすおそれのある施設	埋込みあり	EL8.5m盤もしくはEL15m盤	・タービン建物 ・廃棄物処理建物 ・排気筒 ・1号炉タービン建物※1 ・1号炉廃棄物処理建物※1 ・1号炉排気筒※1	1次元波動論（E+F+P）	1次元波動論（E+F+P）	【水平方向】 ・タービン建物　：「Sクラス施設以外」，「埋込みあり」として，既工認と同様に埋込みを考慮した1次元波動論を採用 ・廃棄物処理建物　：同上 ・排気筒　：同上 ・1号炉タービン建物　：「Sクラス施設以外」，「埋込みあり」として，タービン建物（2号炉）と同じ評価手法を採用 ・1号炉廃棄物処理建物　：「Sクラス施設以外」，「埋込みあり」として，廃棄物処理建物（2号炉）と同じ評価手法を採用 ・1号炉排気筒　：「Sクラス施設以外」，「埋込みあり」として，排気筒（2号炉）と同じ評価手法を採用 【鉛直方向】 建物の設置状況が「埋込みあり」のため，埋込みを考慮した1次元波動論（E＋F＋P）を採用
	埋込みなし	高台（EL44m盤もしくはEL50m盤）	・緊急時対策所 ・ガスタービン発電機建物	1次元波動論（2E）	1次元波動論（2E）	【水平，鉛直方向】 ・緊急時対策所　：「Sクラス施設以外」の建物で，「埋込みを有しない」，高台のEL44m盤に設置された「解放基盤表面からの地震動の増幅がある」建物であることから，1次元波動論（2E）を採用 ・ガスタービン発電機建物　：「Sクラス施設以外」の建物で，「埋込みを有しない」，高台のEL50m盤に設置された「解放基盤表面からの地震動の増幅がある」建物であることから，1次元波動論（2E）を採用
		解放基盤相当の岩盤（EL8.5m盤）	・サイトバンカ建物※1 ・サイトバンカ建物（増築部）※1	直接入力	－	【水平方向】 ・サイトバンカ建物　：「Sクラス施設以外」の建物で，「埋込みを有しない」，EL8.5m盤に設置された「解放基盤表面からの地震動の増幅がない」解放基盤相当（Vs=1600m/s）の岩盤に支持された建物であることから，既工認と同様に直接入力を採用 ・サイトバンカ建物（増築部）　：「Sクラス施設以外」の建物で，「埋込みを有しない」，EL8.5m盤に設置された「解放基盤表面からの地震動の増幅がない」解放基盤相当（Vs=1600m/s）の岩盤に支持された建物であることから，サイトバンカ建物と同じ評価手法を採用
		排気筒の基礎上	・2号炉排気筒モニタ室※1 ・燃料移送ポンプエリア竜巻防護対策設備※1	排気筒の基礎上の地震応答解析結果を用いる	－	【水平方向】 ・2号炉排気筒モニタ室　：「排気筒の基礎上に配置」されているため，排気筒の地震応答解析によって得られる基礎上の応答を入力地震動として採用 ・燃料移送ポンプエリア竜巻防護対策設備　：同上

※1：上位クラス施設に対する波及的影響を及ぼすおそれのある建物・構築物については，それぞれの損傷モードを踏まえ，水平方向の地震応答解析に基づき評価する。
ただし，1号炉排気筒は立体架構モデルとしていることから，水平方向と同様に1次元波動論（E＋F＋P）により，鉛直方向の入力地震動を考慮する。

※2：第3－1表の※8と同じ

第２－１表　入力地震動の評価手法の概念図
（直接入力，１次元波動論，２次元ＦＥＭ解析）

第 3－1 表　入力地震動の評価手法（建物・構築物）

建物・構築物		入力地震動の評価手法							建物・構築物の地震応答解析モデル		
		既工認		今回工認		変更理由		入力地震動出力位置	相互作用モデル		建物・構築物の設置レベル※5
		水平	鉛直	水平	鉛直	水平	鉛直		水平※4	鉛直	
Sクラス施設及びSクラス施設の間接支持構造物	原子炉建物	(引下げ) 1次元波動論 (引上げ) 2次元FEM解析 2E	—	(引下げ) 1次元波動論 (引上げ) 2次元FEM解析 2E※8	(引下げ，引上げ) 1次元波動論 E+F+P	—	—	EL -4.7m	地盤ばねモデル (SRモデル)	地盤ばねモデル (底面鉛直ばねモデル)	EL -4.7m
	制御室建物	直接入力	—	(引下げ) 1次元波動論 (引上げ) 2次元FEM解析 2E※8	(引下げ，引上げ) 1次元波動論 E+F+P	Sクラス施設を含む建物・構築物であるため，原子炉建物の評価手法と合わせる	—	EL 0.1m	地盤ばねモデル (SRモデル)	地盤ばねモデル (底面鉛直ばねモデル)	EL 0.1m
	タービン建物	(引下げ，引上げ) 1次元波動論 E+F	—	(引下げ，引上げ) 1次元波動論 E+F+P	(引下げ，引上げ) 1次元波動論 E+F+P	埋込みによる影響を詳細に評価するため，ＪＥＡＧ４６０１－1991追補版に基づき，切欠き力を考慮する	—	EL 0.0m	地盤ばねモデル (SRモデル)	地盤ばねモデル (底面鉛直ばねモデル)	EL 0.0m
	廃棄物処理建物	(引下げ，引上げ) 1次元波動論 E+F	—	(引下げ，引上げ) 1次元波動論 E+F+P	(引下げ，引上げ) 1次元波動論 E+F+P	埋込みによる影響を詳細に評価するため，ＪＥＡＧ４６０１－1991追補版に基づき，切欠き力を考慮する	—	EL 0.0m	ジョイント要素を用いた 3次元ＦＥＭモデル		EL 0.0m
	排気筒	(引下げ，引上げ) 1次元波動論※1 E+F+P	(引下げ，引上げ) 1次元波動論※1 E+F+P	(引下げ，引上げ) 1次元波動論 E+F+P	(引下げ，引上げ) 1次元波動論 E+F+P	—	—	EL 2.0m	地盤ばねモデル (立体架構モデル)		EL 2.0m
重要ＳＡ施設	ガスタービン発電機建物	—	—	(引下げ，引上げ) 1次元波動論 2E※2	(引下げ，引上げ) 1次元波動論 2E※2	—	—	EL 44.0m	地盤ばねモデル (SRモデル)	地盤ばねモデル (底面鉛直ばねモデル)	EL 44.0m
	緊急時対策所	—	—	(引下げ，引上げ) 1次元波動論 2E※3	(引下げ，引上げ) 1次元波動論 2E※3	—	—	EL 48.25m	地盤ばねモデル (SRモデル)	地盤ばねモデル (底面鉛直ばねモデル)	EL 48.25m
波及的影響を及ぼすおそれのある施設	1号炉 原子炉建物	直接入力	—	(引下げ) 1次元波動論 (引上げ) 2次元FEM解析 2E	—	2号炉原子炉建物の評価手法と合わせる	—	EL 0.1m	ジョイント要素を用いた 3次元ＦＥＭモデル	—	EL 0.1m
	1号炉 タービン建物	—	—	(引下げ，引上げ) 1次元波動論 E+F+P	—	—	—	EL -0.3m	地盤ばねモデル (SRモデル)	—	EL -0.3m
	1号炉 廃棄物 処理建物	—	—	(引下げ，引上げ) 1次元波動論 E+F+P	—	—	—	EL 5.0m	地盤ばねモデル (SRモデル)	—	EL 5.0m
	1号炉 排気筒	直接入力	—	(引下げ，引上げ) 1次元波動論 E+F+P	(引下げ，引上げ) 1次元波動論 E+F+P	2号炉排気筒の評価手法と合わせる	—	EL 0.0m	地盤ばねモデル (立体架構モデル)		EL 0.0m
	サイトバンカ建物	直接入力	—	直接入力※6	—	—	—	—	地盤ばねモデル (SRモデル)	—	EL 7.3m
	サイトバンカ建物 (増築部)	—	—	直接入力※6	—	—	—	—	基礎固定モデル	—	EL 7.3m
	2号炉 排気筒モニタ室	—	—	排気筒の基礎上の地震応答解析結果を用いる※7	—	—	—	—	基礎固定モデル	—	EL 8.8m (排気筒基礎上)
	燃料移送ポンプエリア竜巻防護対策設備	—	—	排気筒の基礎上の地震応答解析結果を用いる※7	—	—	—	—	基礎固定モデル	—	EL 8.7m (排気筒基礎上)

※１：　排気筒の既工認は，改造工認（平成 25 年）を示す。

※２：　高台の EL 44m 盤に設置された埋込みを有しない建物であることから，「2E」とする。

※３：　高台の EL 50m 盤に設置された埋込みを有しない建物であることから，「2E」とする。

※４：　水平方向の相互作用モデルにおいて，側面ばねは考慮しない。

※５：　代表的な設置レベルを示す。

※６：　EL 8.5m 盤に設置された埋込みを有しない建物であり，解放基盤相当（Vs=1600m/s）に支持されていることから，既工認と同様に直接入力とする。

※７：　排気筒の基礎上に設置されている建物・構築物であるため，排気筒の地震応答解析によって得られる基礎上の応答を入力地震動として用いる。

※８：　原子炉建物及び制御室建物の水平入力動は，２次元ＦＥＭモデルの切欠き地盤の表面応答であるため「2E」と表記しているが，建物の埋込みによる切欠き地盤を詳細にモデル化しているため，埋込みと切欠きの影響は入力地震動に考慮されている。

注１：　「E+F+P」は地盤の切欠き力の影響を考慮した建物基礎底面位置の地震動を表す。

注２：　「2E」は地盤表面の地震動を表す。

第3－2表　入力地震動の評価手法（土木構造物）

土木構造物		入力地震動の評価手法					土木構造物の地震応答解析モデル		
		既工認		今回工認		入力地震動出力位置	相互作用モデル		土木構造物の設置レベル※1
		水平	鉛直	水平	鉛直		水平	鉛直	
屋外重要土木構造物（Sクラス施設の間接構造物を含む）	取水槽	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	—	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	EL −65.0m	地盤－構造物連成系の2次元FEMモデル		EL −10.75m
	屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	—	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	EL −30.0m	地盤－構造物連成系の2次元FEMモデル		EL 5.2m
	B－ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎	—	—	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	EL −50.0m	地盤－構造物連成系の2次元FEMモデル		EL 8.85m
	屋外配管ダクト（B－ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）	—	—	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	EL −20.0m	地盤－構造物連成系の2次元FEMモデル		EL 11.011m
	屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）	—	—	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	EL −50.0m	地盤－構造物連成系の2次元FEMモデル		EL 1.6m
	取水管	—	—	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	EL −100.0m	地盤－構造物連成系の2次元FEMモデル		EL −18.43m
	取水口	—	—	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	EL −100.0m	地盤－構造物連成系の2次元FEMモデル		EL −22.0m
津波防護施設	防波壁（多重鋼管杭式擁壁）	—	—	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	EL −50.0m	地盤－構造物連成系の2次元FEMモデル		EL −19.1m（杭下端レベル）
	防波壁（逆T擁壁）	—	—	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	EL −50.0m	地盤－構造物連成系の2次元FEMモデル		EL 8.5m
	防波壁（波返重力擁壁）	—	—	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	EL −50.0m	地盤－構造物連成系の2次元FEMモデル		EL −13.0m（ケーソン下端レベル）
	1号炉取水槽流路縮小工（北側壁含む）	—	—	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	EL −65.0m	地盤－構造物連成系の2次元FEMモデル		EL −6.575m（北側壁：EL −7.6m）
	防波壁通路防波扉	—	—	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	EL −50.0m	地盤－構造物連成系の2次元FEMモデル		EL −10.0m（杭下端レベル）
重要SA施設	第1ベントフィルタ格納槽	—	—	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	EL −35.0m	地盤－構造物連成系の2次元FEMモデル		EL 1.7m
	低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽	—	—	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	EL −35.0m	地盤－構造物連成系の2次元FEMモデル		EL −0.3m
	緊急時対策所用燃料地下タンク	—	—	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	EL 35.0m	地盤－構造物連成系の2次元FEMモデル		EL 46.8m
	ガスタービン発電機用軽油タンク基礎	—	—	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E※3	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E※3	EL 45.8m	地盤ばねモデル（SRモデル）	地盤ばねモデル（底面鉛直ばねモデル）	EL 45.8m
	屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）	—	—	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	EL 40.0m	地盤－構造物連成系の2次元FEMモデル		EL 45.7m
波及的影響を及ぼすおそれのある施設	免震重要棟遮蔽壁	—	—	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	EL 30.0m	地盤－構造物連成系の2次元FEMモデル		EL 43.85m（杭下端レベル）
	取水槽循環水ポンプエリア竜巻防護対策設備	—	—	取水槽の地震応答解析結果を用いる※2	取水槽の地震応答解析結果を用いる※2	—	基礎固定モデル		EL 8.8m（取水槽上）
	取水槽海水ポンプエリア竜巻防護対策設備	—	—	取水槽の地震応答解析結果を用いる※2	取水槽の地震応答解析結果を用いる※2	—	基礎固定モデル		EL 8.8m（取水槽上）
	取水槽海水ポンプエリア防水壁	—	—	取水槽の地震応答解析結果を用いる※2	取水槽の地震応答解析結果を用いる※2	—	基礎固定モデル		EL 8.8m（取水槽上）
	1号炉取水槽ピット部	—	—	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	（引下げ，引上げ）1次元波動論 2E	EL −65.0m	地盤－構造物連成系の2次元FEMモデル		EL 0.2m

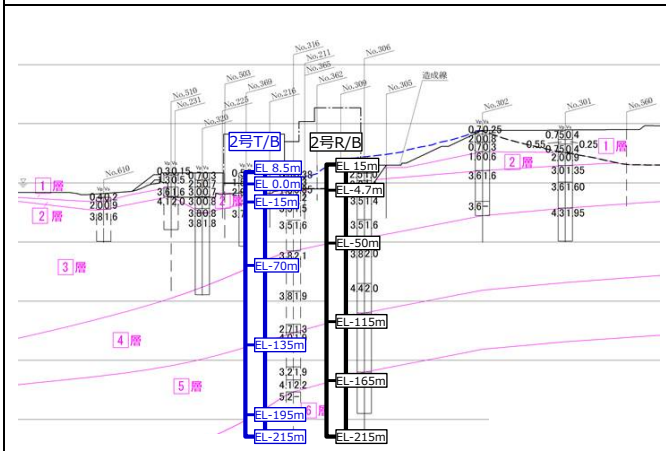
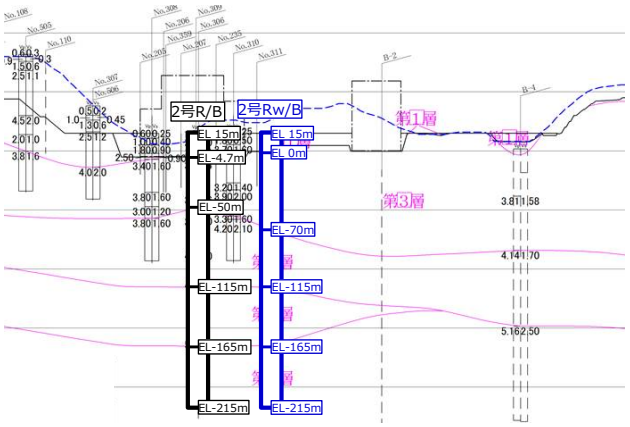
※1：　代表的な設置レベルを示す。

※2：　取水槽に設置されている土木構造物であるため，取水槽の地震応答解析によって得られる応答を入力地震動として用いる。

※3：　高台のEL 44m盤に設置された埋込みを有しない土木構造物であることから，「2E」とする。

注1：　「2E」は，地盤－構造物連成モデルに入力する，地盤の入射波の2倍の地震動を示す。

第 4－1 表　速度層区分と１次元波動論モデルの設定例

<table>
<tr><th colspan="2">（例１）タービン建物</th><th colspan="2">（例２）廃棄物処理建物</th></tr>
<tr><td colspan="2"> 
</td><td colspan="2"> 
</td></tr>
<tr><td>設定根拠</td><td>原子炉建物の２次元ＦＥＭモデルにおけるＮＳ方向の速度層に基づき，建物中央でモデル化</td><td>設定根拠</td><td>原子炉建物の２次元ＦＥＭモデルにおけるＥＷ方向の速度層に基づき，建物中央でモデル化</td></tr>
</table>

参考資料－２

入力地震動評価用解析モデルの地盤物性値

1. 入力地震動評価用解析モデルの地盤物性値

原子炉建物の今回工認の入力地震動評価用解析モデルの地盤物性値を第 1－1 表に示す。表層地盤を除く岩盤の地盤物性値は，既工認で設定した値を用いる。

なお，既工認では埋戻し土としてモデル化していた今回工認の①-2 層については，C_L 級及びＤ級の岩盤であり，Ｓ波速度（Vs）は小さいが，検討建物から離れたわずかな領域に分布しており，地震時の非線形性が建物の入力地震動に与える影響は小さいと判断し，地質調査結果に基づく地盤物性値を用い，線形として扱う。

今回工認モデルにおいては，埋戻し土を反映した表層地盤（層番号①-1）について，基準地震動Ｓｓ及び弾性設計用地震動Ｓｄそれぞれに対して，２次元ＦＥＭモデルによる等価線形解析に基づき等価物性値（剛性，減衰定数）を詳細設計段階で設定することとする。なお，既工認モデルにおける表層地盤（層番号①）については，基準地震動Ｓ１及びＳ２に対する１次元モデルによる等価線形解析に基づき，等価物性値（剛性）を設定している。

第 1－1 表　入力地震動評価用解析モデルの地盤物性値

層番号[注1]		Ｓ波速度 Vs (m/s)	Ｐ波速度 Vp (m/s)	単位体積重量[注3] γ (kN/m³)	ポアソン比 ν (－)	ヤング係数[注3] E (×10⁵kN/m²)	せん断弾性係数[注3] G (×10⁵kN/m²)	減衰定数 h (%)
既工認	今回工認							
①	①-1	等価線形解析及び試験結果に基づき設定						
	①-2	250	800	20.6	0.446	3.80	1.31	3[注2]
②	②	900	2100	23.0	0.388	52.9	19.0	3[注2]
③	③	1600	3600	24.5	0.377	176.5	64.0	3
④	④	1950	4000	24.5	0.344	256.0	95.1	3
⑤	⑤	2000	4050	26.0	0.339	283.4	105.9	3
⑥	⑥	2350	4950	27.9	0.355	427.6	157.9	3

注１：層番号は解析モデル図(4 条-別紙 16-4　第 2－2 表)を参照。

注２：既工認では，慣用値として 5%と設定。

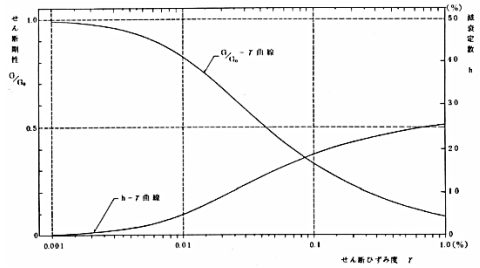
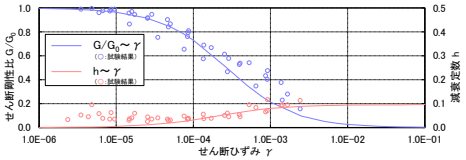
注３：単位体積重量，ヤング係数及びせん断弾性係数については，今回工認では既工認の値（MKS 単位系）を単位換算（SI 単位系）した値を示す。

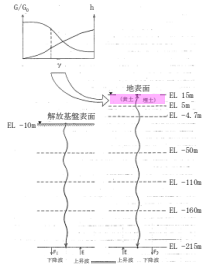
表層地盤（①-1：埋戻土）のせん断剛性及び減衰定数のひずみ依存性と等価物性値の設定の考え方を，既工認と比較して第1－2表に示す。

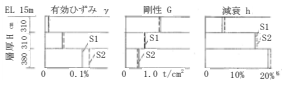
埋戻土の剛性と減衰のひずみ依存性は，既工認では文献(1)に基づく標準的な砂質土のひずみ依存性としていたが，今回工認では試験結果に基づくひずみ依存性に変更する。

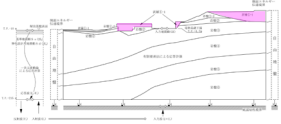
なお，島根原子力発電所の建物・構築物の支持地盤は硬質岩盤であるため，既工認において表層地盤のみ地震動レベルに応じた非線形性を考慮することとし，表層地盤の物性値の変動による入力地震動に対する影響は小さいと判断していたことを踏まえ，剛性及び減衰定数はそれぞれの地震動レベル（Ｓｓ，Ｓｄ）に対してモデルの要素の大きさを考慮した等価物性値（一定値）を設定する。

第 1－2 表　表層地盤のせん断剛性及び減衰定数のひずみ依存性と等価物性値の設定の考え方

<table>
<tr><th></th><th>既工認</th><th>今回工認</th></tr>
<tr><td>埋戻土の
せん断剛性
及び
減衰定数の
ひずみ
依存性</td><td> 
</td><td> 

第 762 回審査会合　資料 1-1「島根原子力発電所２号炉
防波壁及び１号放水連絡通路防波扉の周辺斜面の安定性評価
について」より引用</td></tr>
<tr><td>設定根拠</td><td>文献(1)に基づく標準的な
砂質土のひずみ依存性</td><td>埋戻土における動的変形試験結果により
設定したひずみ依存性</td></tr>
<tr><td>評価
フロー</td><td>・２号炉原子炉建物の１次元波動論モデルに基づき設定
・表層地盤の初期せん断弾性係数(G_0)，ひずみ依存性(G/G_0－γ，h－γ)を設定
 

等価線形解析の概念図
等価線形解析による収束計算
基準地震動Ｓ１，Ｓ２
・Ｓ１，Ｓ２による収束値から算定した平均的な剛性低下率に基づき，等価なせん断弾性係数(G)を設定
・各建物の表層地盤の物性値に設定
 

表層地盤の有効ひずみ，剛性及び減衰
G(平均)=ΣHG/ΣH
剛性低下率=G(平均)/G_0
※剛性低下率はS1，S2 共通とし，
表層地盤の３層の平均値に基づき設定</td><td>・２号炉原子炉建物の NS 方向及び EW 方向の２次元 FEM モデルに基づき設定
・表層地盤の拘束圧依存性を考慮した初期せん断弾性係数(G_0)，ひずみ依存性(G/G_0－γ，h－γ)を設定
 
等価線形解析の概念図
等価線形解析による収束計算
基準地震動Ｓｓ，
弾性設計用地震動Ｓｄ
・Ｓｓ，Ｓｄによる各要素の収束値から算定した平均的な剛性低下率に基づき，Ｓｓ，Ｓｄそれぞれの等価なせん断弾性係数(G)及び減衰定数(h)を設定
・各建物の表層地盤の物性値に設定</td></tr>
<tr><td rowspan="3">等価
物性値</td><td colspan="2">基準地震動Ｓ１，Ｓ２</td><td colspan="2">基準地震動Ｓｓ，弾性設計用地震動Ｓｄ</td></tr>
<tr><td>せん断剛性（G）</td><td>減衰定数（h）</td><td>せん断剛性（G）</td><td>減衰定数（h）</td></tr>
<tr><td>0.65(t/cm^2)
(剛性低下率 G/G_0 0.485)</td><td>5%（慣用値）</td><td colspan="2">詳細設計段階でＳｓ，Ｓｄそれぞれの
等価線形解析に基づき設定</td></tr>
</table>

2.　参考文献

(1) 大崎他，地盤振動解析のための土の動力学モデルの提案と解析例，第 5 回 日本地震工学シンポジウム，1978

２次元ＦＥＭ解析モデル側面の境界条件

1.　２次元ＦＥＭ解析モデル側面の境界条件

２次元ＦＥＭ解析モデルの側面の境界条件については，既工認では粘性境界を用いていたが，今回工認ではエネルギー伝達境界に変更する。

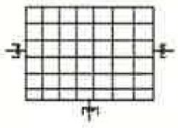
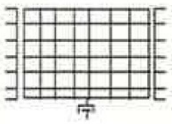
側面の境界条件はＦＥＭ部分から側方地盤への波動の逸散を考慮したものであり，粘性境界は隣接する側方地盤との変位の関係から，エネルギー伝達境界はＦＥＭ部分と側方地盤全体の変位分布の関係からこの逸散を考慮している。

粘性境界とエネルギー伝達境界の比較を第 1－1 表に示す。

粘性境界はダッシュポットを用いた速度比例型の減衰力により，側方地盤への波動の逸散を考慮する。解の精度が良く，計算も容易である。

一方，エネルギー伝達境界はＦＥＭ部分の境界節点と側方地盤との変位分布の差から，側方地盤への波動の逸散を考慮する。解の精度がとても良く，より現実に即した解析結果を得ることができる。なお，先行プラントの工認において適用実績がある。

第 1－1 表　側面の境界条件(1)

境界処理法	概念図	説明	定式化の難易度	計算上の特徴	解の精度	その他
粘性境界		・速度比例型の減衰力により波動逸散波を吸収	容易	・計算は容易 ・[K*]は対角またはバンドマトリクス	○	・手間と制度のバランスが良い ・周波数応答/時刻歴解析の双方に適用可能 ・1～3 次元で適用可能
エネルギー伝達境界		・一般化表面波の固有モードを合成し，側方の水平成層地盤と結合	難解	・計算は煩雑，かつ固有値解析に計算時間を要する ・側方の[K*]はフルマトリクス	◎	・2 次元および軸対称の周波数応答のみ適用可能

（参考文献(1)より引用）

2.　参考文献

(1) 日本建築学会：入門・建物と地盤との動的相互作用，1996

既工認モデルと今回工認モデルによる入力地震動の比較

1. 検討条件

原子炉建物の入力地震動の評価に用いる２次元ＦＥＭモデルについて，４条-別紙 16-4　第 2－2 表に示す既工認モデルと今回工認モデルを用いた基準地震動Ｓｓ－Ｄによる入力地震動を比較する。なお，既工認モデルの表層地盤の物性値及び減衰定数については既工認の値を用い，今回工認モデルの表層地盤の物性値及び減衰定数については，G/G_0=0.2 及び h=8％と設定した。

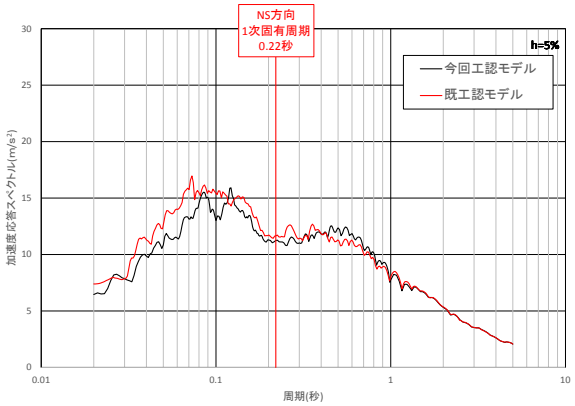
解析プログラムは，既工認モデル及び今回工認モデルともに SuperFLUSH を用いる。

2. 検討結果

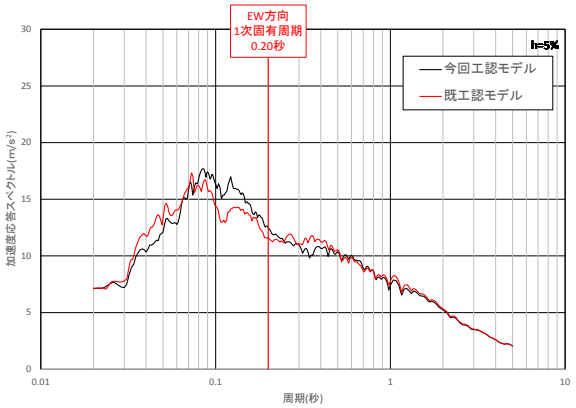
既工認モデルと今回工認モデルによる入力地震動の加速度応答スペクトルの比較を第 2－1 図に示す。

既工認モデルと今回工認モデルによる入力地震動を比較すると，一部の周期帯において差異はあるものの，加速度応答スペクトルの傾向は概ね一致しており，建物の応答値への影響は軽微である。

以上のことから，今回工認モデルは，建設時の地質調査結果に加えて，建設時以降の追加地質調査結果に基づき設定しており，妥当である。



（ＮＳ方向）



（ＥＷ方向）

第 2－1 図　既工認モデルと今回工認モデルによる
入力地震動の加速度応答スペクトルの比較

２次元ＦＥＭモデルのメッシュ分割高さに関する検討

1.　メッシュ分割高さの設定方法

２次元ＦＥＭモデルのメッシュ分割高さは，設備の耐震設計で考慮する振動数を踏まえて設定することとし，今回工認は既工認と同様に最高振動数（20Hz）に対して設定する。

メッシュ分割高さ Hは，先行審査実績と同様にＪＥＡＧ４６０１－1991 追補版に示された以下の基準を満足するように設定している。

$$H \leq \frac{1}{5}\frac{V_s}{f_{max}}$$

ここで，V_s　：Ｓ波速度（m/s）

f_{max}：最高透過振動数（Hz）

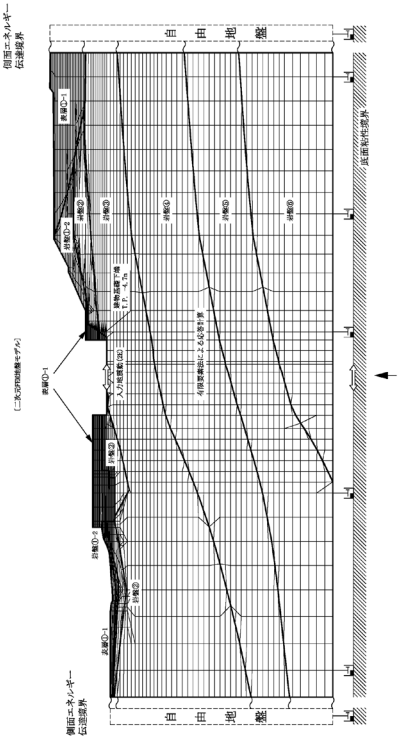
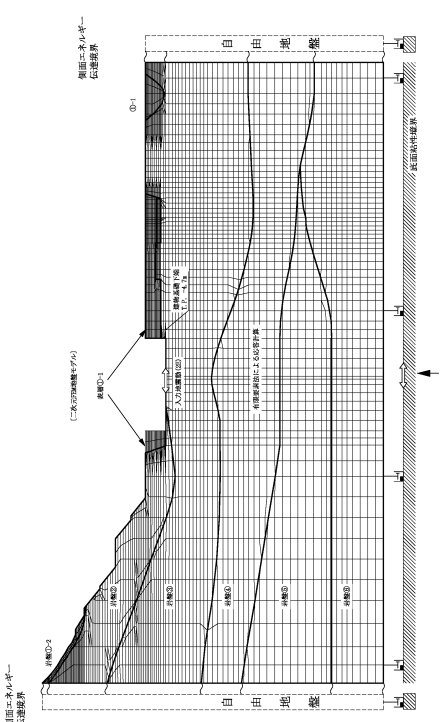
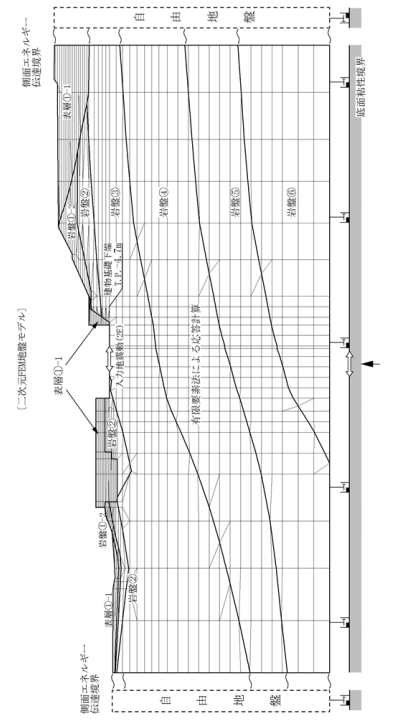
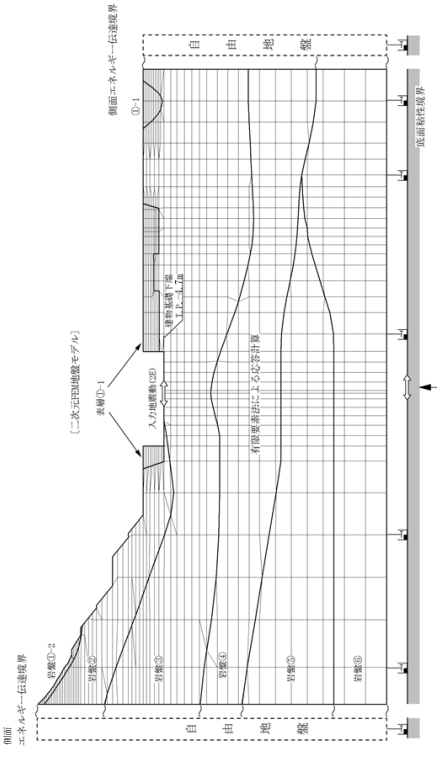
2.　メッシュ分割高さの違いによる影響検討

2.1　検討条件

メッシュ分割高さの妥当性を確認するため，原子炉建物を代表として最高振動数（50Hz）に対して設定した比較用モデルによる解析を実施し，入力地震動への影響を評価する。

第2－1表に今回工認モデルと比較用モデルにおける２次元ＦＥＭモデル図を示す。

第2－1表　今回工認モデル（20Hz 透過）と比較用モデル（50Hz 透過）における２次元ＦＥＭ解析モデル図

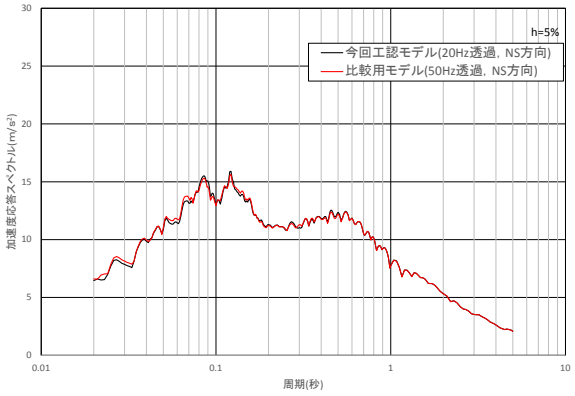
	NS	EW
比較用モデル（50Hz 透過）		
今回工認モデル（20Hz 透過）		

2.2　検討結果

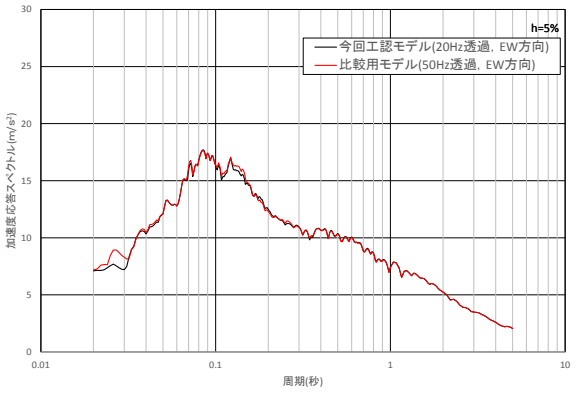
基準地震動Ｓｓ－Ｄによる入力地震動の加速度応答スペクトルの比較を第 2－1 図に示す。

今回工認モデル（20Hz 透過）及び比較用モデル（50Hz 透過）において，両者の加速度応答スペクトルは概ね一致していることから，今回工認においても既工認と同様に 20Hz を透過させるようにメッシュ分割高さを設定する。なお，先行サイトの審査実績においても，建物・構築物の入力地震動の算定に用いる２次元ＦＥＭモデルにおけるメッシュ分割高さは20Hz を考慮して作成されている。

ただし，ＥＷ方向において高振動数領域（約 30～50Hz）で比較用モデル（50Hz 透過）が今回工認モデル（20Hz 透過）を上回る周期帯があることから，高振動数領域の応答による影響が考えられる弁の動的機能維持評価等にあたっては，詳細設計段階において影響検討を実施する。



（ＮＳ方向）



（ＥＷ方向）

第 2－1 図　基準地震動Ｓｓ－Ｄにおける入力地震動の
加速度応答スペクトルの比較（今回工認モデル，比較用モデル）

２号炉主要建物における１次元波動論及び２次元ＦＥＭによる入力地震動の比較

1.　検討条件

原子炉建物及び制御室建物について，解析モデルの違いによる入力地震動への影響を確認するため，基準地震動Ｓｓ－Ｄを用いて，第1－1表に示す比較検討を実施した。

第1－1表　２号炉主要建物の入力地震動の解析モデルの比較
（引上げモデル）

	今回工認モデル	比較用モデル
水平方向	２次元ＦＥＭモデル	１次元波動論モデル
鉛直方向	１次元波動論モデル	２次元ＦＥＭモデル

2.　検討結果

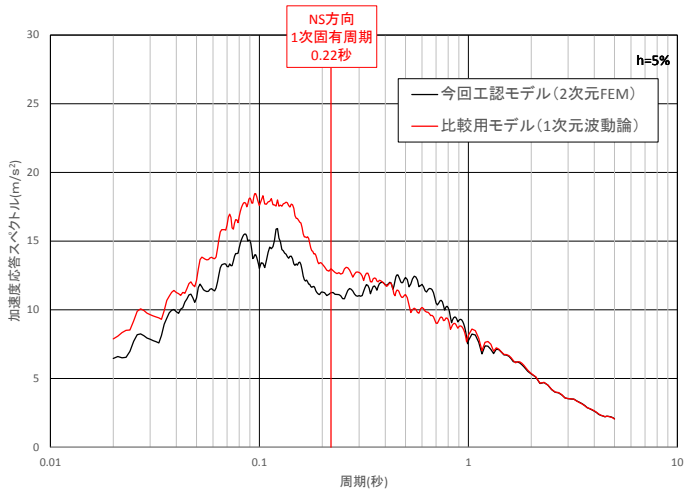
入力地震動の加速度応答スペクトルの比較を第2－1図に示す。

2.1　水平方向

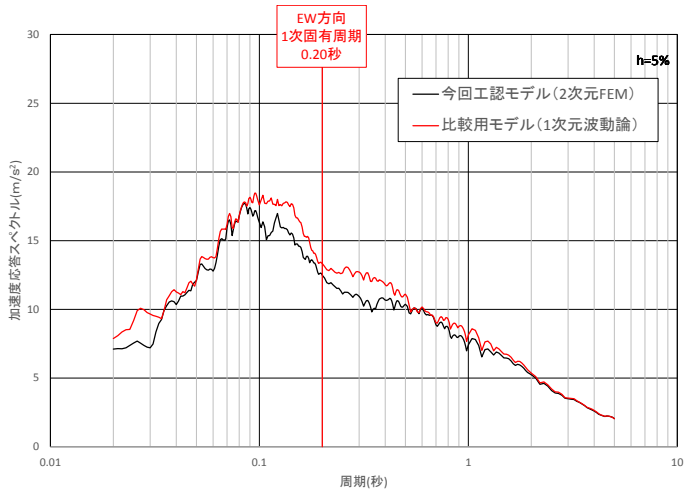
水平方向は，２次元ＦＥＭモデル及び１次元波動論モデルで多少の差異が認められ，また，地盤の傾斜をモデル化しているＮＳ方向においてその差が大きくなっているが，２次元ＦＥＭモデルでは地盤の速度層の傾斜及び建物周辺の地形の影響等をより詳細に評価できると考えられることから，原子炉建物の既工認と同様に，水平方向の解析において２次元ＦＥＭモデルによって求められる入力地震動を用いることは適切である。

2.2　鉛直方向

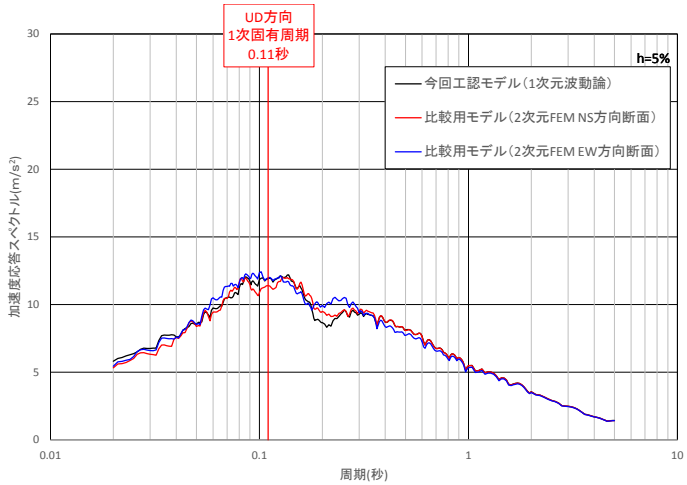
鉛直方向は，建物直下地盤による影響が大きく，１次元波動論モデルと２次元ＦＥＭモデルの加速度応答スペクトルは概ね一致している。また，それぞれの建物の固有周期における加速度応答スペクトルの値に大きな差はない。よって，モデルの違いによる入力地震動への影響は軽微であり，鉛直方向の解析において１次元波動論モデルによって求められる入力地震動を用いることは適切である。



（水平方向（ＮＳ方向））

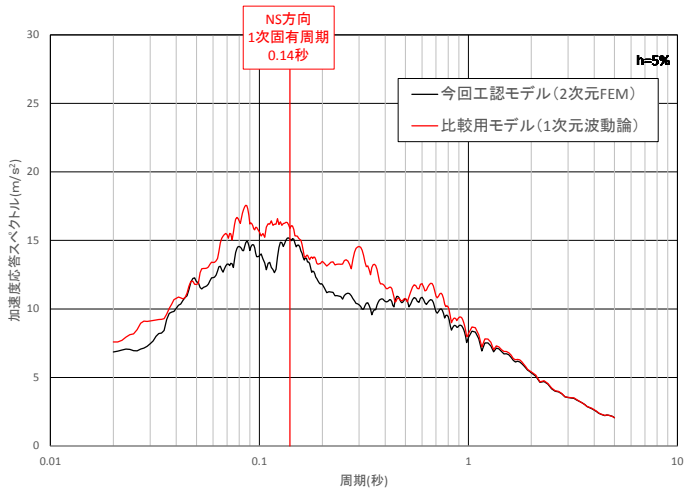


（水平方向（ＥＷ方向））

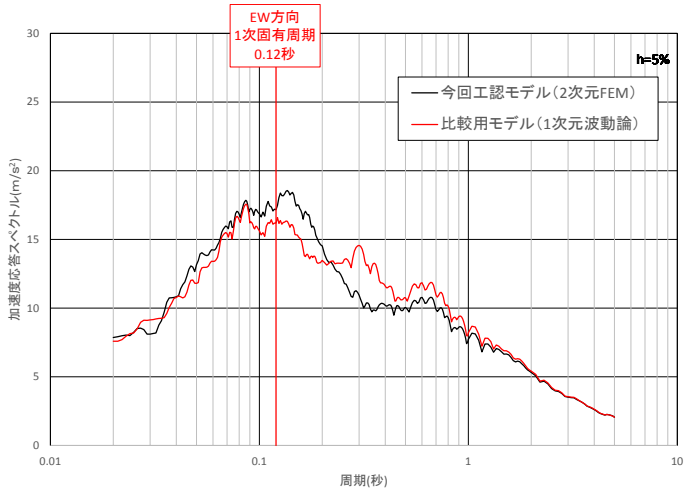


（鉛直方向）

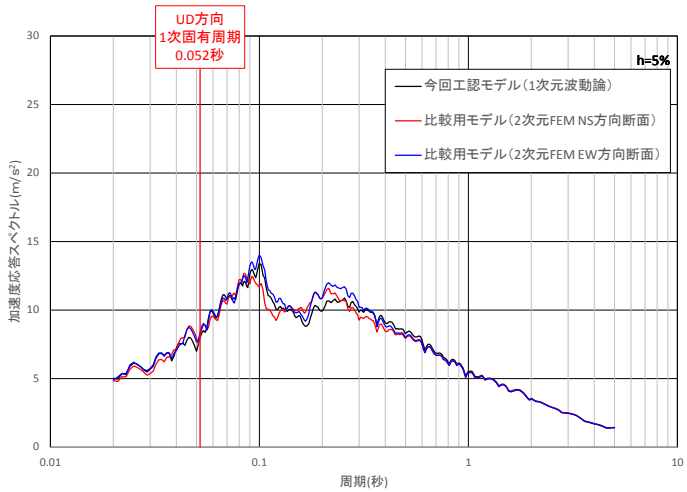
第２－１(1)図　１次元波動論及び２次元ＦＥＭによる入力地震動の比較
（原子炉建物）



（水平方向（ＮＳ方向））



（水平方向（ＥＷ方向））



（鉛直方向）

第２－１(2)図　１次元波動論及び２次元ＦＥＭによる入力地震動の比較
（制御室建物）

別紙－17

島根原子力発電所２号炉

地下水位低下設備について

目次

第Ⅰ編　地下水位低下設備の要求機能及び地下水位の設定方針.....1
1.　地下水位低下設備の要求機能.....1
2.　設計地下水位の設定方針.....6
2.1　基本的な考え方.....6
2.2　解析モデル作成.....10
2.3　再現解析による検証.....12
2.4　地下水位が上昇した場合の影響確認.....20
2.5　設計地下水位の設定.....26
2.6　観測による検証.....28
2.7　解析条件及び地下水位設定方針の整理.....29

第Ⅱ編　地下水位低下設備の信頼性向上の方針.....30
1.　地下水位低下設備の目的,機能及び位置付け.....30
2.　機能喪失要因等の分析に基づく設備構成の検討.....32
2.1　供用期間中における機能維持に必要な耐性の分析.....32
2.2　関係する条文の抽出.....33
2.3　各構成部位の機能喪失要因の分析.....35
2.4　分析結果を踏まえた信頼性向上のための配慮事項.....43
2.5　監視・制御機能及び電源接続の系統構成.....46
2.6　信頼性の向上を考慮した設備構成の検討.....47
3.　運用管理・保守管理上の方針.....49
4.　信頼性向上の方針のまとめ.....52

第Ⅲ編　設置許可段階における構造成立性検討用の地下水位の設定.....53

添付資料1　　ドレーンの信頼性確保の検討
添付資料2　　設置変更許可段階及び工事計画認可以降の提示内容
補足説明資料1　敷地の水文環境
補足説明資料2　建設時工認段階の浸透流解析結果
補足説明資料3　構内排水路の概要
補足説明資料4　三次元浸透流解析による３号炉北側防波壁周辺の地盤改良後の影響確認
補足説明資料5　基礎地盤の安定性評価における地下水位設定の考え方
補足説明資料6　現行の重要度分類上の位置付けの整理
補足説明資料7　新設揚水井戸・ドレーンの構造・配置及び施工例
補足説明資料8　透水係数の妥当性確認
補足説明資料9　観測孔における地下水位観測記録

第Ⅰ編　地下水位低下設備の要求機能及び地下水位の設定方針

1.　地下水位低下設備の要求機能

【地下水位低下設備の位置付け】

原子炉建物等の主要建物直下及びその周囲には地下水位を一定の範囲に保持する地下水位低下設備（既設）※1を設置しており，建物，構築物（原子炉建物等）については,揚圧力低減のため地下水位低下設備（既設）の機能に期待した地下水位を設定していた。

一方，屋外重要土木構造物（取水槽及び屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒））は，施設護岸に近傍しており，施設護岸が基礎捨石上に設置された構造物であるため，地下水位を朔望平均満潮位H.W.L.（既工認時EL.＋0.3m）と設定していた。

地下水位低下設備（既設）の機能は,地下水位を一定の範囲に保持することであり,これにより地下水位低下設備の機能に期待する施設に及ぶ水位上昇に伴う影響が低減される。

従来，地下水は山から海へ向かう一方向の流動場が形成されていたが(補足説明資料１参照),津波防護施設として防波壁の設置及び地盤改良を実施したこと(別紙17-2,3図)により,地下水の流れが遮断される等，流動場が変化する可能性がある。

また，地下水位低下設備の機能に期待できない場合,地下水位は防波壁設置前より上昇し,施設の安全性へ影響が生じる可能性がある。

防波壁設置後の地下水位を観測した結果，１，２号機エリアの地下水位低下設備（既設）周辺及び高台の地下水位については，大きな変化がないものの，３号機北側施設護岸周辺（改良地盤）の地下水位は若干上昇する傾向が認められる。

以上を踏まえ，地下水位低下設備（既設）の有無による建物・構築物への影響を検討し，基準適合上の位置付けを整理する。

地下水位低下設備（既設）の有無による建物・構築物への影響について，第３条第２項における液状化影響低減及び第４条（第39条）における揚圧力低減のため，地下水位低下設備（既設）の機能に期待する施設は，建物・構築物のうち原子炉建物，タービン建物，廃棄物処理建物，制御室建物及び排気筒であり，地下水位低下設備（既設）の機能に期待する基礎地盤・周辺斜面，屋外重要土木構造物，津波防護施設，重大事故等対処施設及び保管場所・アクセスルートはない。

一方で，地下水位低下設備（既設）については，ドレーン（サブドレーン，集水管及び接続枡）の直接的な確認ができない等から，保守管理性が低い設備である。

以上を踏まえ，原子炉建物，タービン建物，廃棄物処理建物，制御室建物及び排気筒に作用する揚圧力及び液状化影響の低減を目的として，信頼性（耐久性・耐震性・保守管理性）を満足する地下水位低下設備※2を新設する。

また，設置許可基準規則第３条第２項及び第４条(第39条)への適合に当たり，

原子炉建物等の設計の前提条件となる地下水位を一定の範囲に保持するために必要であることから，地下水位低下設備を設計基準対象施設（Ｃクラス：Ｓｓ機能維持）として位置付ける。

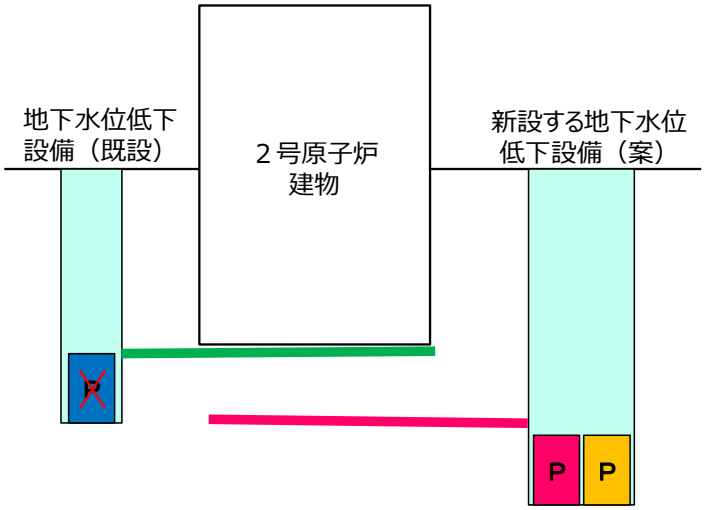
なお，地下水位低下設備は安全施設に該当しないが，設備の重要性を考慮し，故障要因等を整理したうえで信頼性向上（多重化，非常用電源確保，Ｓｓ機能維持，復旧用可搬ポンプの準備等）を図る。

本資料では，上記で述べた島根のサイト特性を踏まえ，今後の施設設計に用いる地下水位を設定するに当たり，防波壁周辺の地盤改良実施後における施設の安全性に及ぼす影響を確認し，必要な機能を保持するための信頼性確保の方針について検討した。

そのうえで，信頼性確保の方針を踏まえた設計地下水位の設定方法について整理した。

※１　地下水位低下設備（既設）は，集水機能（ドレーン：サブドレーン，集水管及び接続枡），支持・閉塞防止機能（揚水井戸：サブドレーンピット），排水機能（揚水ポンプ及び配管），監視制御機能（制御盤及び水位計）及び電源機能（電源）を有する設備である。

※２　地下水位低下設備は，地下水位低下設備（既設）のドレーンより低い位置で集水し，かつ地下水位低下設備（既設）から独立した，信頼性（耐久性・耐震性・保守管理性）を満足する設備とする。なお，配置及び構造については，詳細設計段階で確定する。

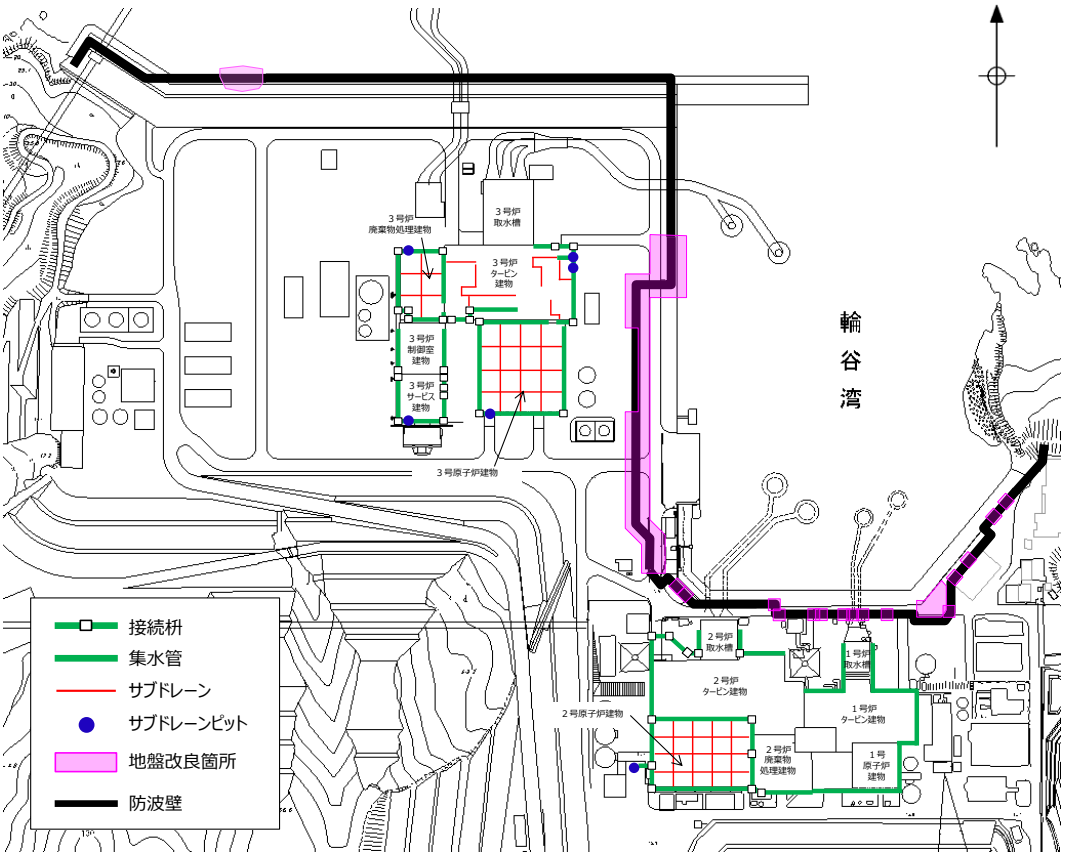


別紙17-1図　地下水位低下設備の概念図

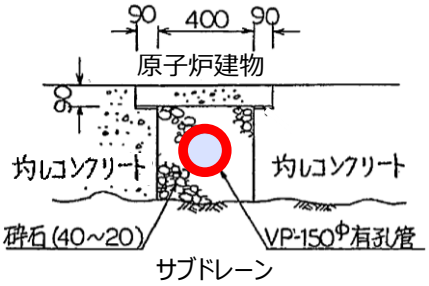
【地下水位低下設備（既設）の概要】

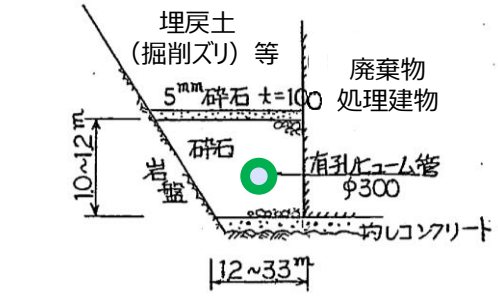
地下水位低下設備(既設)の概要を別紙17-2図に示す。

地下水位低下設備（既設）は,各施設周囲の岩盤上に設置されたサブドレーン(硬質ポリ塩化ビニル製有孔管〈φ150㎜〉），集水管（有孔遠心力鉄筋コンクリート管〈φ300㎜〉）及び接続枡を介してサブドレーンピットに集水し,揚水ポンプ・配管を介して構内排水路へ排水する構造となっている。地下水位が，通常運転状態の水位を超えるEL.－5.90m以上に上昇すると，水位センサーが検知して揚水ポンプを起動し，EL.－5.70mまで順次起動することにより，通常運転水位まで低下させる。ポンプは保守点検のルールを定めて運用しており，定期的な巡視・点検を行っている他，地震後は速やかに設備点検し状況を確認することとしている。

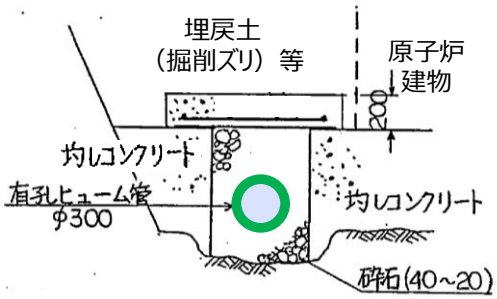


別紙 17-2(1)図　地下水位低下設備（既設）の概要



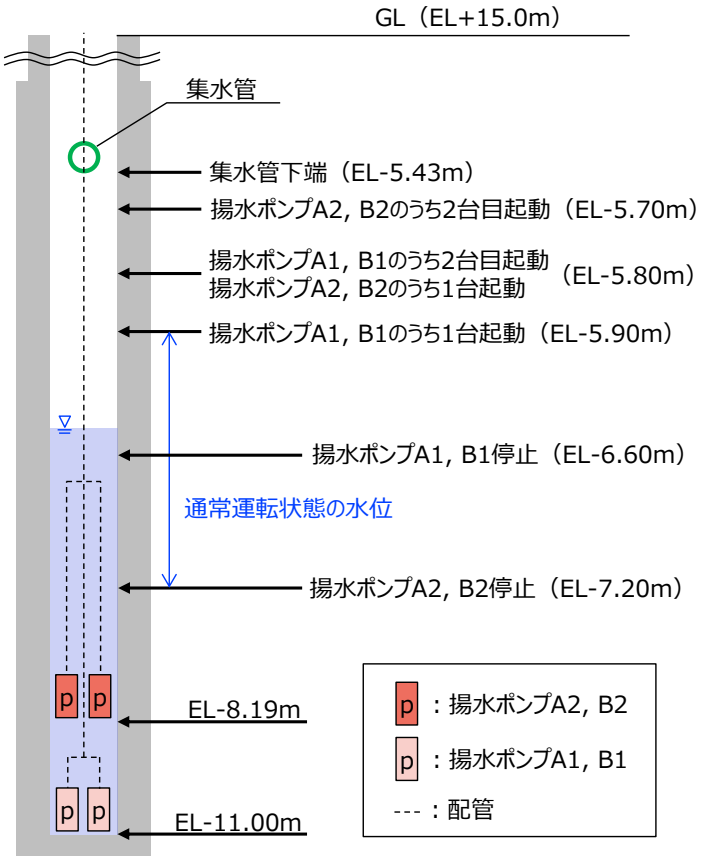


集水管（タービン建物，廃棄物処理建物周辺）

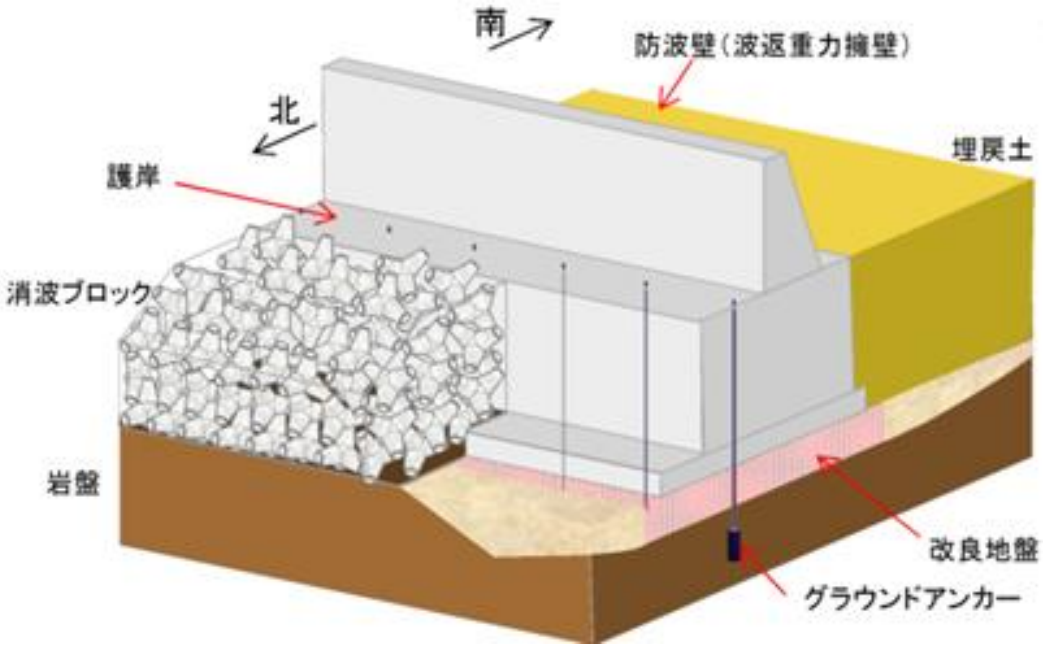


集水管（原子炉建物周辺）

別紙 17-2(2)図　地下水位低下設備（既設）のうちサブドレーン他の断面図



別紙 17-2(3)図　地下水位低下設備（既設）のうちサブドレーンピット断面図



別紙 17-3 図　防波壁（波返重力擁壁）下部の地盤改良概要

2. 設計地下水位の設定方針

2.1 基本的な考え方

前述のとおり，防波壁の設置及び防波壁周辺の地盤改良によって地下水の流れが遮断され，地下水位が上昇した場合には，揚圧力上昇及び液状化による土圧等の変化により施設等の耐震性に影響※1が及ぶ可能性がある。

このことから，施設の設計の前提が確保されるよう地下水位を一定の範囲に保持する地下水位低下設備の機能を考慮した設計地下水位を設定し，揚圧力が作用した場合及び液状化，揺すり込み沈下等の周辺地盤の変状を考慮した場合においても，当該施設の機能が損なわれるおそれがないように設計する方針とする。

地下水位低下設備の効果が及ばない範囲においては，自然水位より保守的に設定した水位又は地表面にて設計地下水位を設定し，同様に揚圧力が作用した場合及び液状化，揺すり込み沈下等の周辺地盤の変状を考慮した場合においても，当該施設の機能が損なわれるおそれがないように設計する方針とする。

地下水位低下設備の機能を考慮し，施設の設計地下水位を設定するに当たっては，地形等を適切にモデル化した浸透流解析を実施することとし，保守性を確保する方針とする。

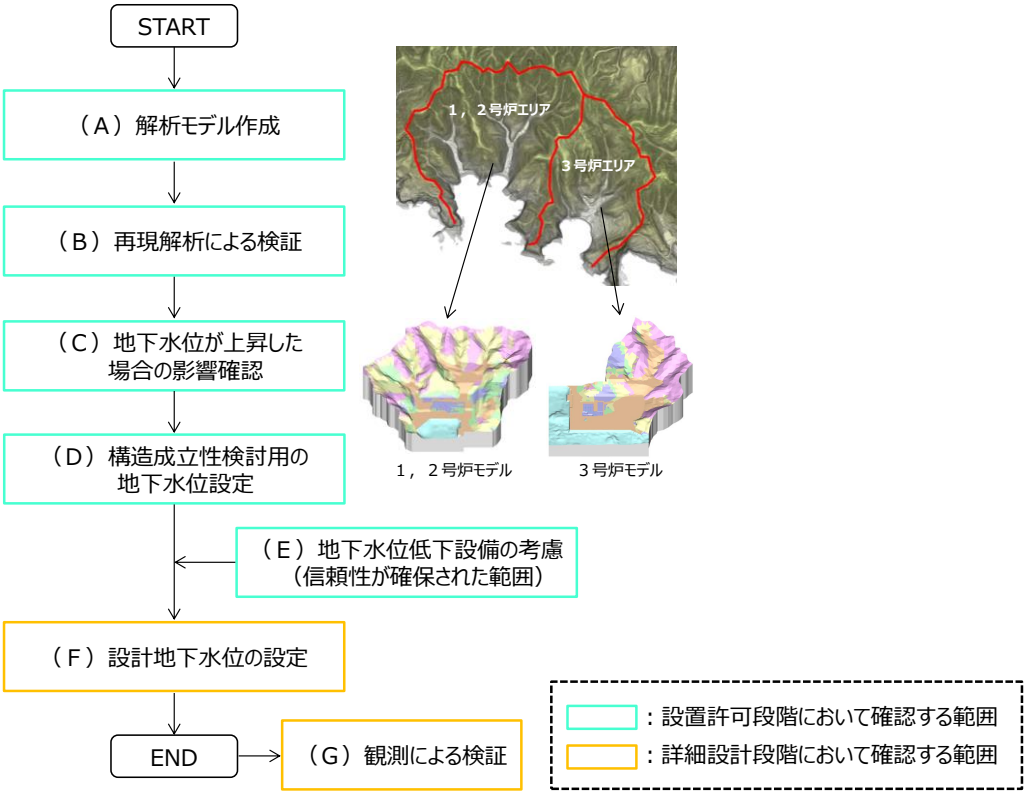
解析の保守性については，解析に用いるパラメータや解析条件の保守的な設定の他，地下水位低下設備を信頼性が確保された範囲※2に限定し考慮することにより確保する。なお，地下水位低下設備の検討に当たっては建設時工認における設計地下水位の確保を目安とする。

以上の方針に基づき，詳細設計段階において，地下水位低下設備の機能を考慮した浸透流解析の結果から設計地下水位を設定し耐震評価を行いその詳細を示す。

浸透流解析を用いた設計地下水位の設定フローを別紙 17-4 図に示す。

※1　第Ⅰ編 2.4 項に示す地下水位が上昇した場合の揚圧力影響（実用発電用原子炉及びその附属施設の位置，構造及び設備の基準に関する規則（以下，設置許可基準規則）第４条）及び液状化影響（設置許可基準規則第３条第２項）。液状化等による影響の観点から，埋戻土（掘削ズリ）・砂礫層の分布と施設の配置との関係を補足説明資料４に示す。

※2　地下水位低下設備の原子炉建物等への影響に鑑み，地下水位低下設備の機能を保持する設計とする。信頼性向上の方針は第Ⅱ編で詳述する。



別紙 17-4 図　浸透流解析を用いた設計地下水位の設定フロー

別紙 17-4 図の各プロセスにおける検討方針を以下に示す。なお，各審査段階における提示内容を添付資料２に示す。

(A)～(B) 解析モデル作成・再現解析による検証

・島根サイトの地形的特徴，計算機能力を踏まえ，適切に地下水位を評価する観点から，１，２号炉エリア及び３号炉エリアそれぞれで解析モデルを作成する。

・再現解析（定常）を実施し，解析水位と観測水位の比較結果を踏まえ，解析モデルに用いる透水係数等の解析用物性値を含めたモデルの妥当性を確認する。また，参考として再現解析（非定常）を実施し，解析水位と観測水位の比較確認を行う。

(C) 地下水位が上昇した場合の影響確認

・防波壁周辺の地盤改良により敷地内の地下水の流動場が変化することを踏まえ，耐震評価において地下水位の影響を受ける可能性のある施設等を網羅的に抽出する。この影響確認においては，降雨条件を発電所の平均年間降水量より保守的に設定するとともに，地下水位低下設備（既設）の機能に期待しないものとする。

・抽出した施設等について，地下水位の上昇により生じる影響の時系列的な変化を整理し，この影響を低減するための施設ごとの対応方針を定める。

(D) 構造成立性検討用の地下水位設定

・(C) を踏まえ，設置許可段階における構造物の構造成立性を確認するための地下水位の設定方針を示す。

(E)地下水位低下設備の考慮（第Ⅱ編及び添付資料１にて詳述）

・(C),(D)を踏まえ，地下水位低下設備（既設）の機能に期待する施設については，信頼性の確保された地下水位低下設備を新設し，その機能に期待する方針とする。

(F)設計地下水位の設定

・詳細設計段階で，(A)～(E)に基づく予測解析を実施し，各施設における設計地下水位を設定する。降雨条件は発電所の平均年間降水量より保守的に設定するとともに，地下水位低下設備（既設）の機能に期待しないものとする。なお，地下水位低下設備（既設）の機能に期待する施設については，信頼性の確保された地下水位低下設備の機能に期待する。

(G)観測による検証

・地下水位観測記録を取得し，(F)にて定める設計地下水位の検証を行う。

設計地下水位の設定に当たっては，浸透流解析において，以下に示す保守性を確保する方針とする。

①地下水位低下設備（既設）の機能に期待しない

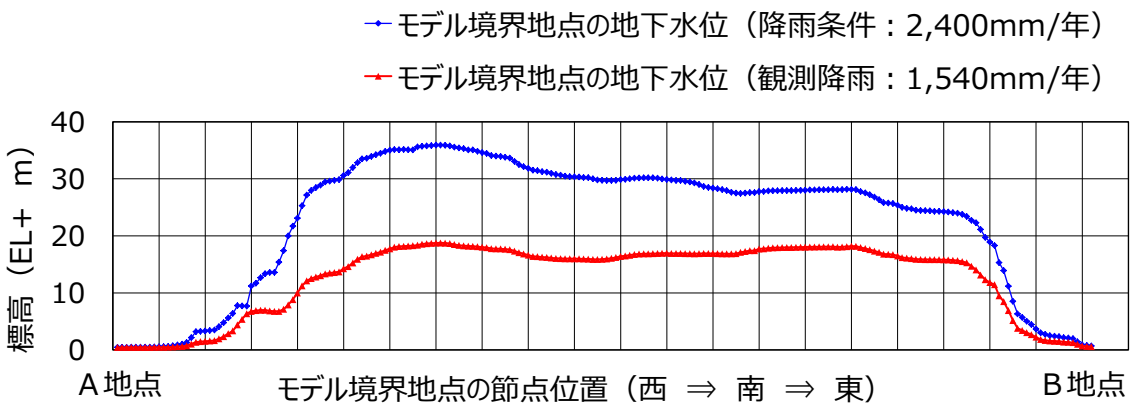
ドレーンは砕石及び土砂が流入して集水機能が低下した状態，揚水ポンプは稼働しない状態とし，揚水経路としない。

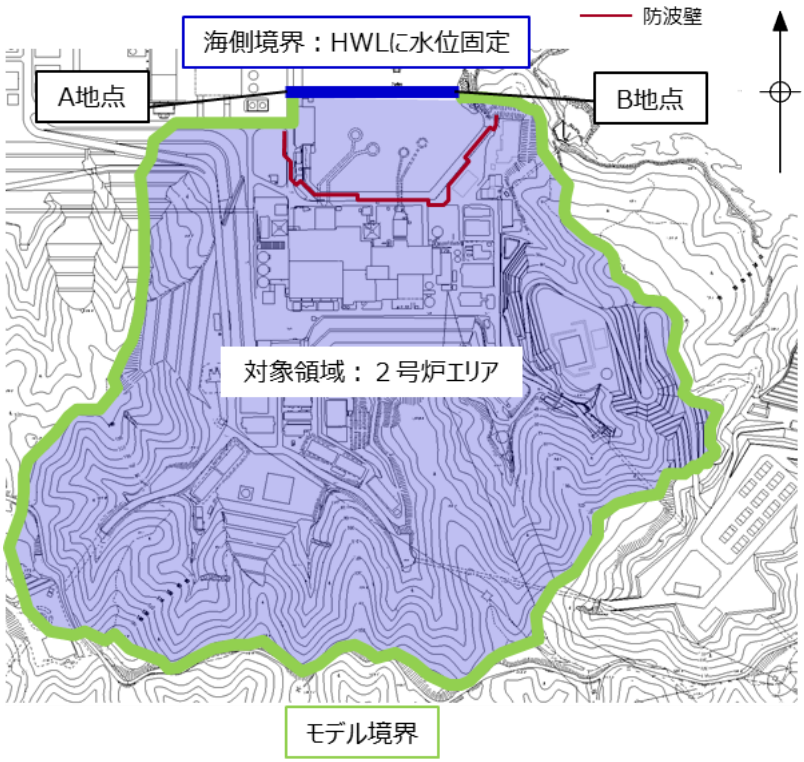
②降雨条件

島根原子力発電所での地下水位観測期間における平均年間降水量は約1,540㎜であり，気象庁松江地方気象台における年間降水量(1941～2018 年)の平均値は約 1,880㎜ である。

浸透流解析における降水量の設定条件として，上記松江地方気象台における年間降水量にばらつきを考慮した値（平均値＋１σ）に，今後の気候変動予測による降水量の変化※を加味し，降水量を設定する。別紙 17-5 図に解析用降雨条件と観測降雨条件によるモデル境界地点での水位分布を示す。

※　気象庁・環境省　「日本国内における気候変動の不確実性を考慮した結果について」より





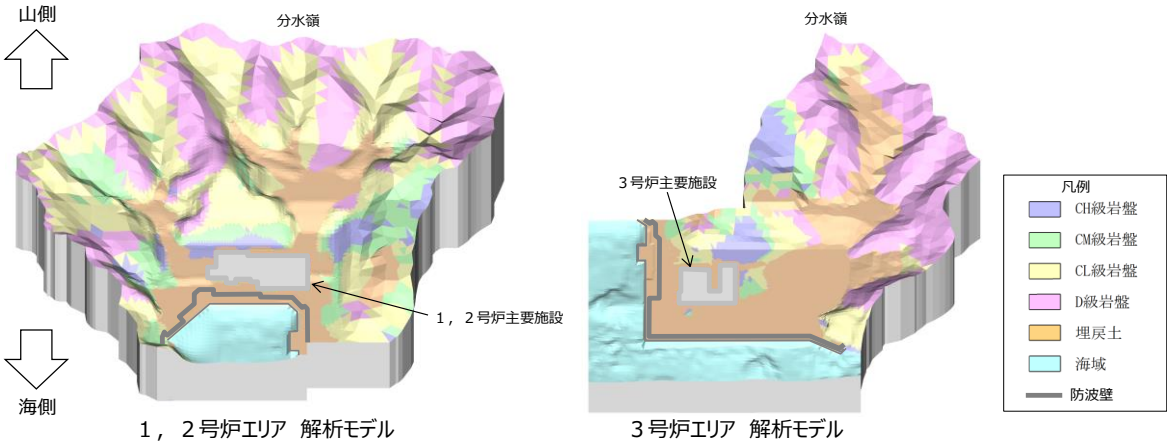
別紙 17-5 図　保守的な解析条件の設定例

2.2解析モデル作成

地下水位の評価においては,敷地を取り囲む分水嶺までを解析範囲とした三次元地形モデルを作成することから，計算機能力を踏まえて適切に地下水位を評価するため，それぞれのエリアで解析モデルを作成した(解析ソフト：Dtransu-3D・EL,バージョン：ver.2af90MP)。

なお，両モデルの境界において，重なる部分における地下水位は概ね一致することを確認している。

解析モデル鳥瞰図を別紙17-6図に,解析モデルの概要を別紙17-1表に示す。



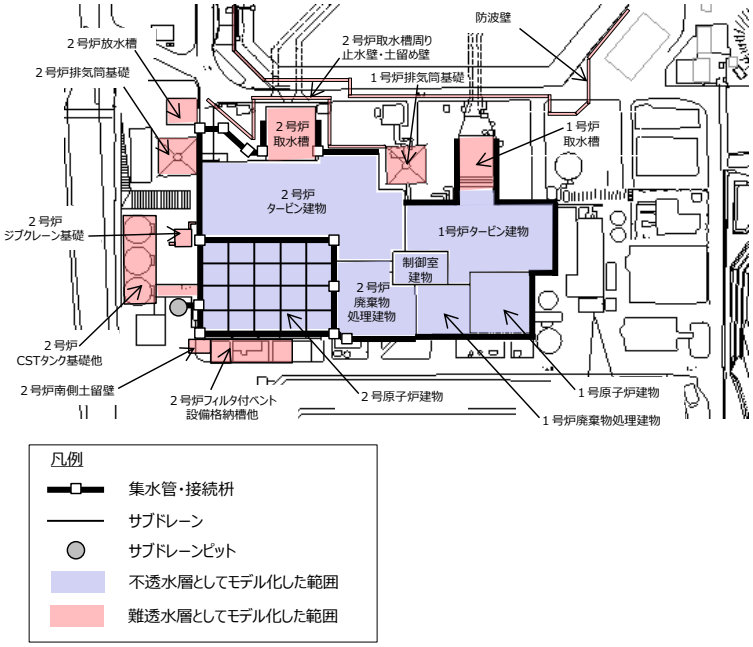
別紙 17-6 図　解析モデル鳥瞰図

別紙 17-1 表　解析モデルの概要

項目	内容
モデル化範囲等	・敷地を取り囲む分水嶺までを対象範囲とする。 ・対象領域内の構造物※をモデル化し，敷地造成時における掘削・埋戻しを反映する。

※耐震裕度向上等の目的で実施した地盤改良等は，難透水層としてモデル化する。

また，１，２号炉主要建物周辺における構造物等のモデル化方針について，別紙 17-7 図に示す。原子炉建物等の主要建物については，揚圧力影響を検証するために不透水層として設定し，主要建物周辺の地下水流に影響を及ぼすと考えられる長大な構造物等については，実際の地下水流を模擬するため，難透水層（1.0×10^{-5}(cm/s)）として設定した。



	名称
不透水層としてモデル化	２号原子炉建物
	２号炉タービン建物
	２号炉廃棄物処理建物
	制御室建物
	１号原子炉建物
	１号炉タービン建物
	１号炉廃棄物処理建物
難透水層としてモデル化	２号炉排気筒基礎
	２号炉取水槽
	２号炉放水槽
	２号炉CSTタンク基礎他
	２号炉フィルタ付ベント設備格納槽他
	１号炉排気筒基礎
	１号炉取水槽
	防波壁
	２号炉ジブクレーン基礎※
	２号炉取水槽周り止水壁・土留壁※
	２号炉南側土留壁※

※２号炉建設時の工事用仮設構造物

別紙 17-7 図　主要建物周辺における構造物等のモデル化方針

2.3再現解析による検証

(1)再現解析と観測水位との比較

再現解析の目的は,解析モデルに用いる透水係数等の解析用物性値を含めたモデルの妥当性を確認することである。

再現解析において，降雨条件を観測降雨※より求まる年平均降雨（1,540mm/年）として，敷地内の定常的な地下水位を確認するため，浸透流解析（定常解析）を実施する。また，参考として観測降雨を与える浸透流解析（非定常解析）も実施する。

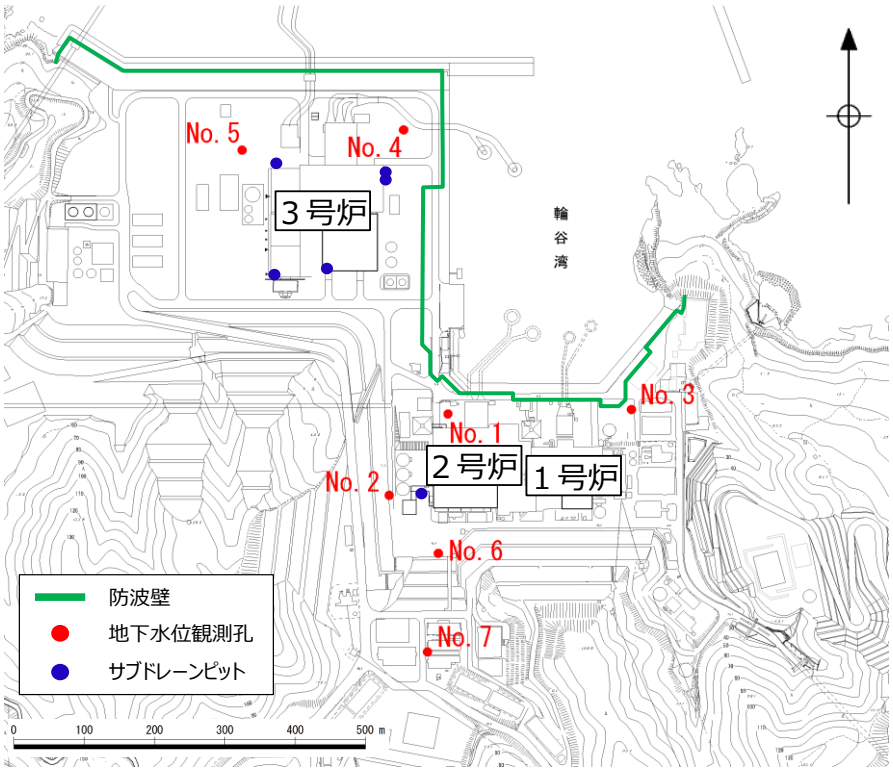
その他の解析条件として，透水係数は別紙17-2表のとおり透水試験等に基づき設定（補足説明資料２参照）し，揚水条件は既設の揚水ポンプの起動高さにおいて水位固定条件とする。

解析の妥当性は解析値（解析水位）と観測値（観測水位）を比較することにより確認することとした(水位観測時点の構造物をモデル化)。

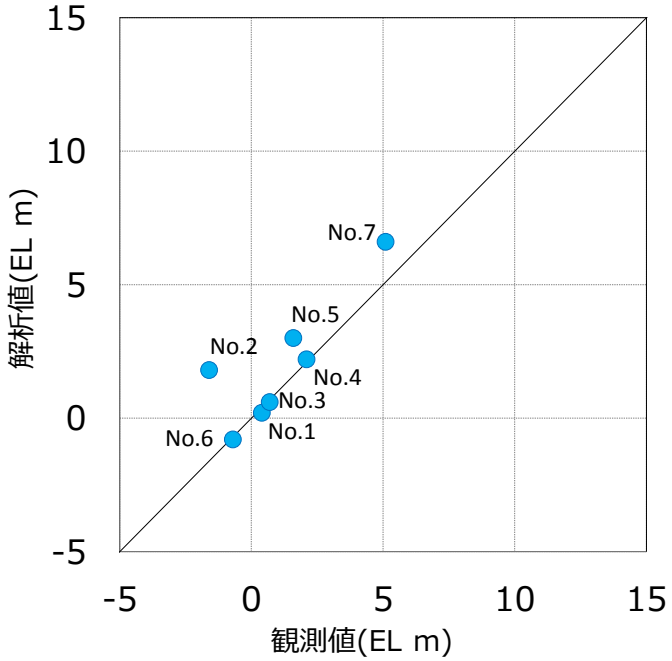
観測孔位置を別紙17-8図に,観測値と解析値の比較を別紙17-9図に示す。

再現解析（定常）の結果，観測孔位置における地下水位について，解析値は観測値と概ね一致するか上回ることから，解析モデル全体として妥当性を有することを確認した。この結果から，予測解析においても解析値が適切に評価されると判断した。なお，地下水位を観測値よりも保守的に設定するため，揚水量については解析値が観測値を若干下回っている。

※島根原子力発電所における日降水量（H28.4～H30.8）



別紙 17-8 図　観測孔位置



	揚水量(m^3/日)
観測値	969
解析値	856

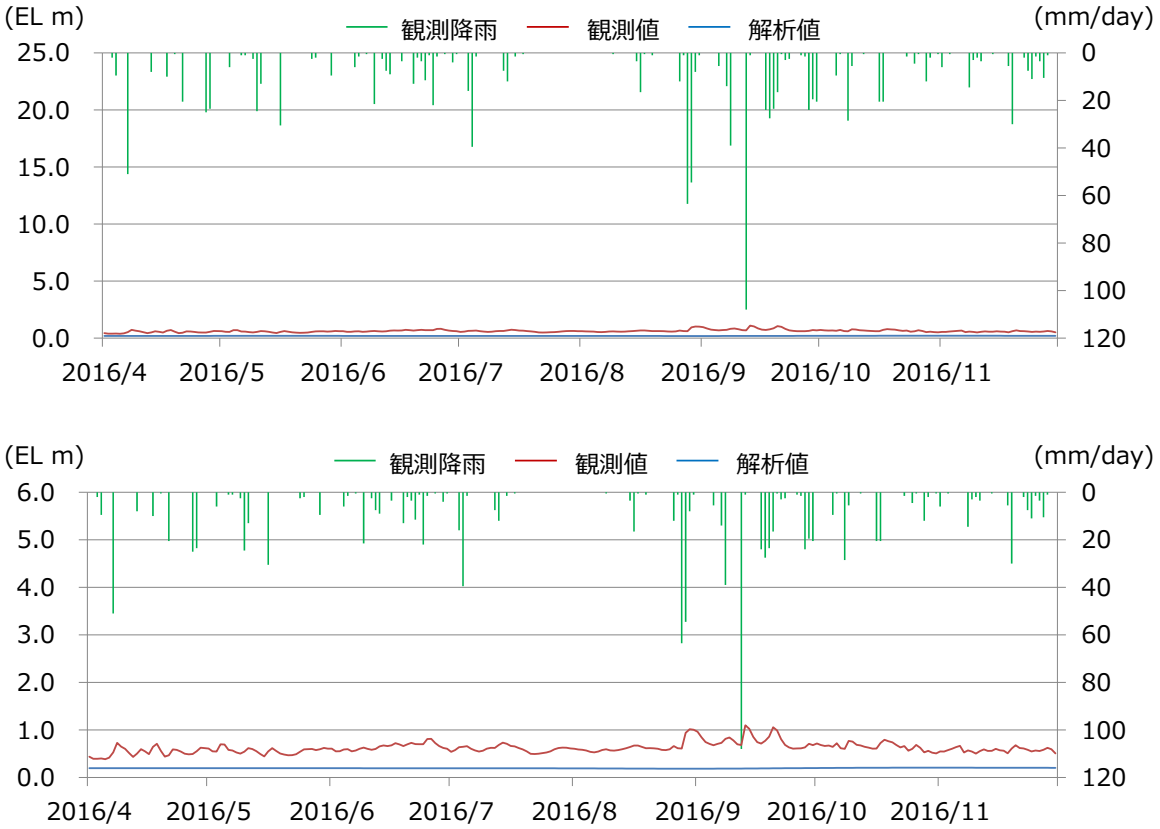
別紙 17-9 図　観測値と解析値の比較

別紙 17-2 表　透水係数

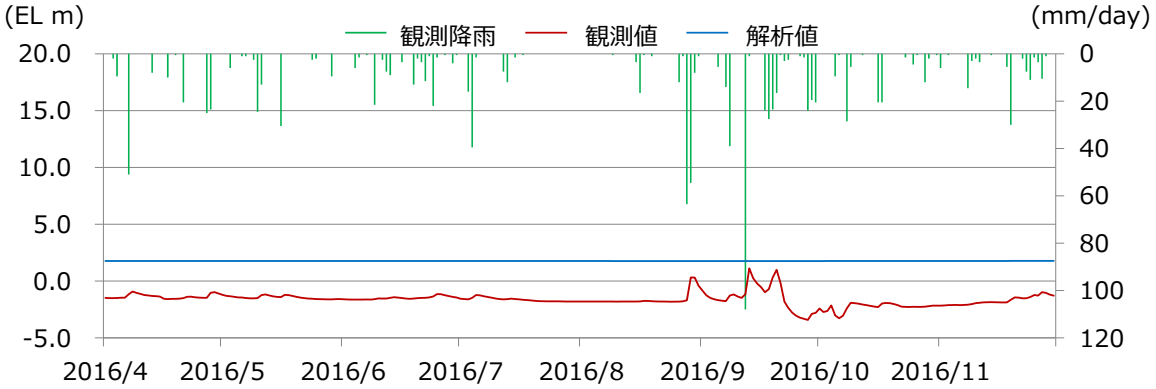
区分	透水係数 (cm/s)
C_H級	5×10^{-5}
C_M級	6×10^{-4}
C_L級	1×10^{-3}
D級	2×10^{-3}
砂礫層	4×10^{-3}
埋戻土（掘削ズリ）	2×10^{-1}
構造物，改良地盤	1×10^{-5}

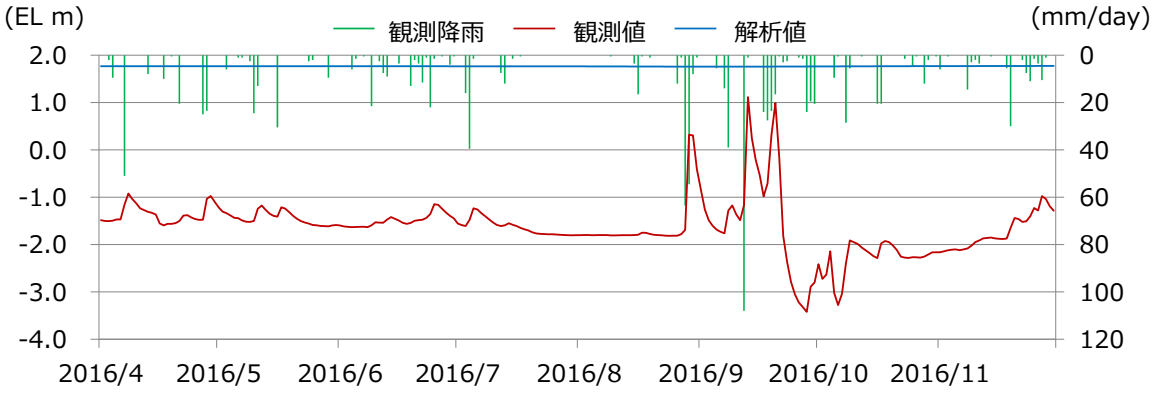
(2)水位経時変化の確認

再現解析において，参考として非定常解析を実施し，水位の経時変化について別紙 17-10 図のとおり確認した。(別紙 17-7 図参照)。

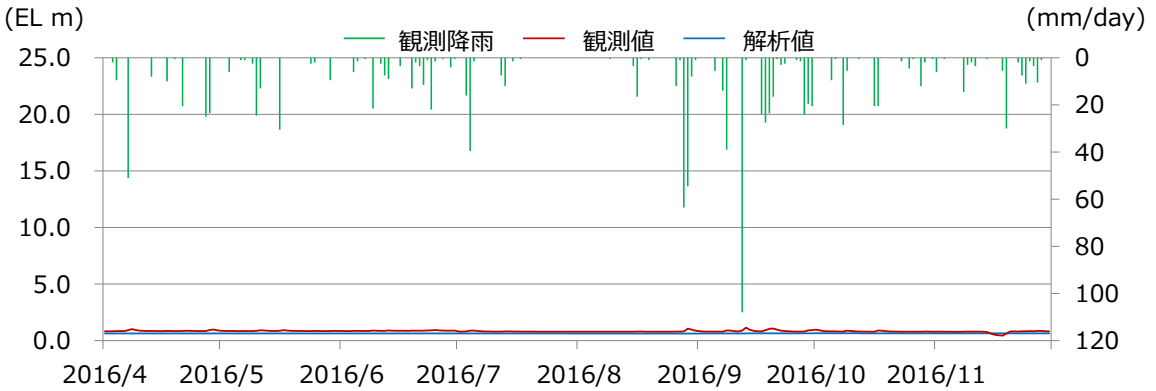


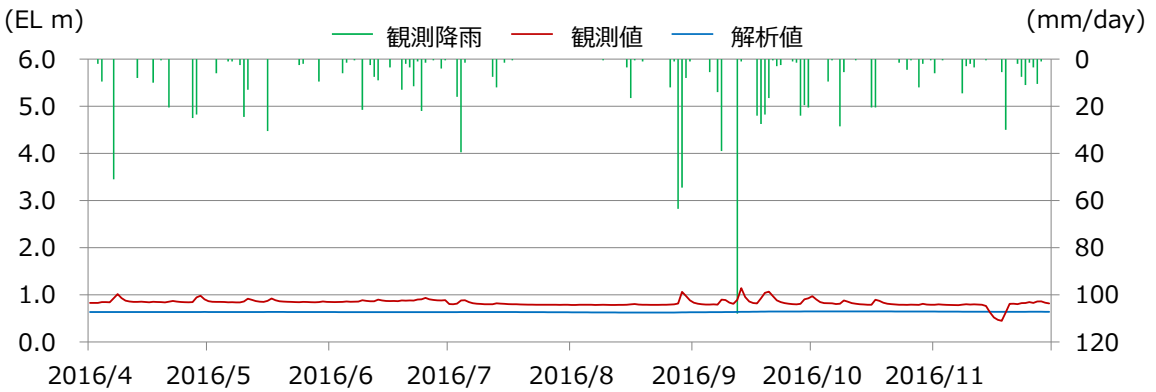
別紙 17-10(1)図　地下水位の経時変化例（No. 1 孔）



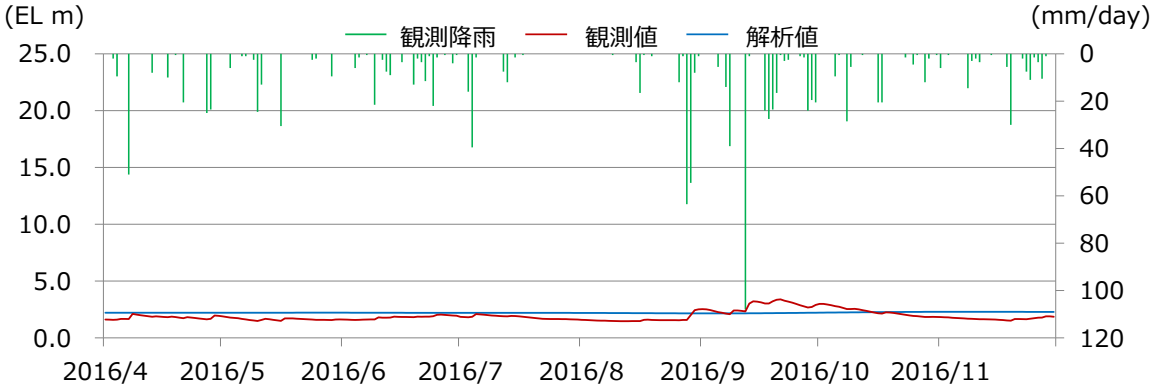


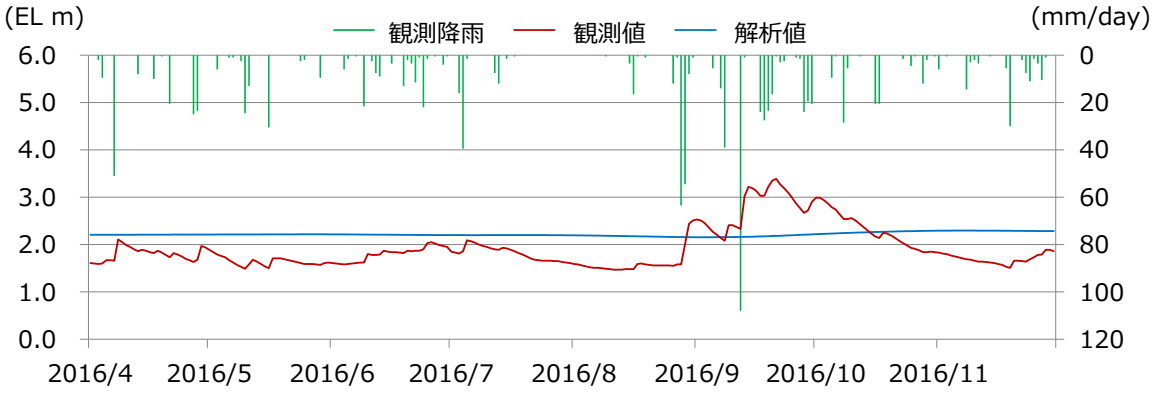
別紙 17-10(2)図　地下水位の経時変化例（No. 2 孔）



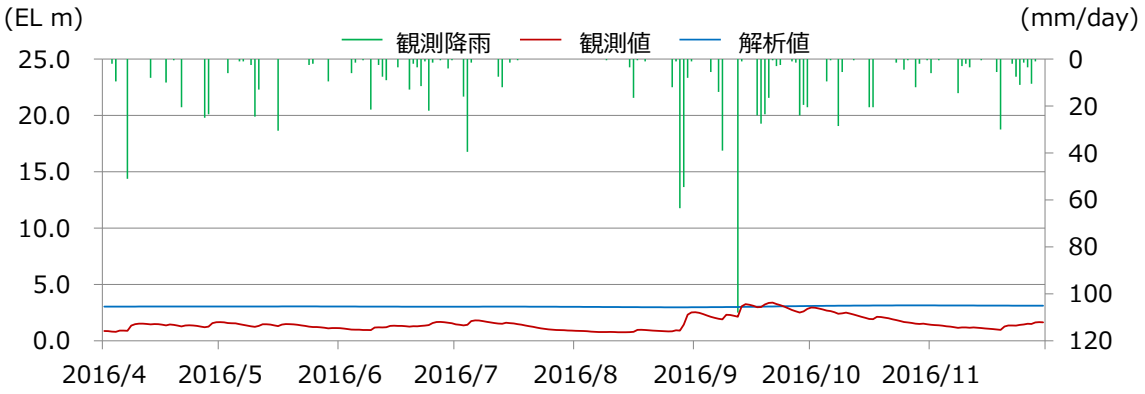


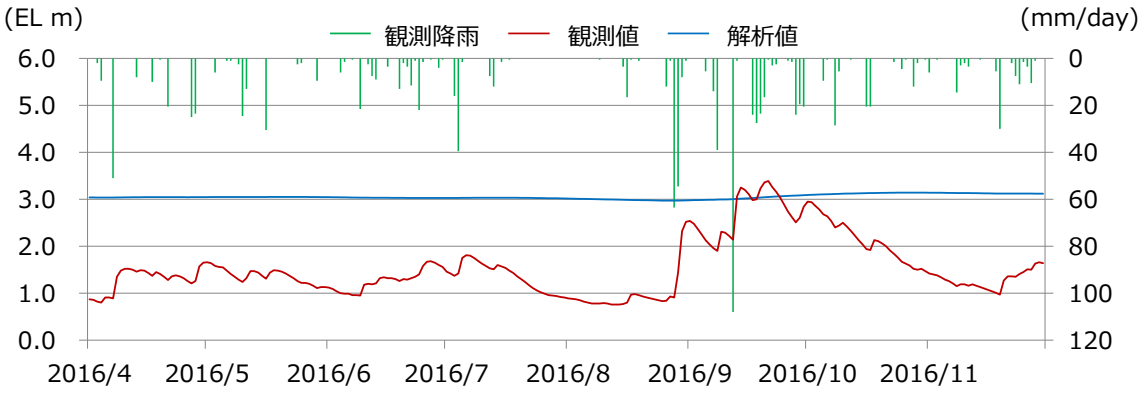
別紙 17-10(3)図　地下水位の経時変化例（No. 3 孔）



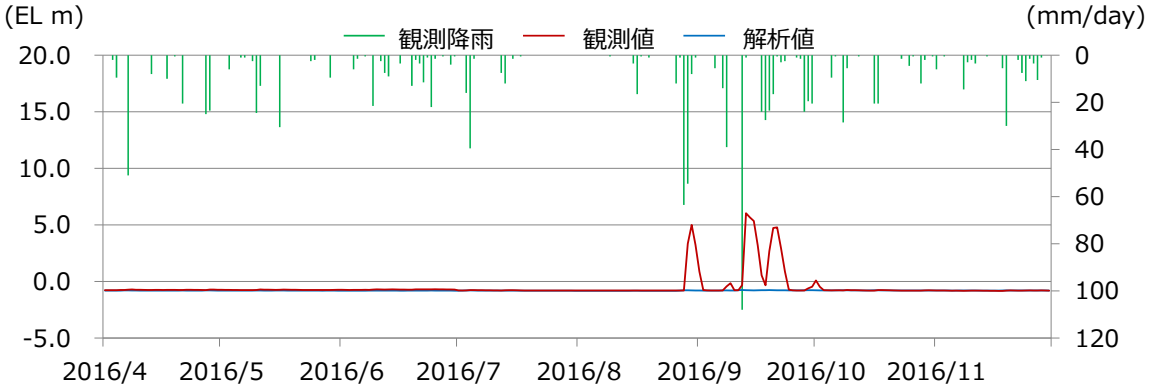


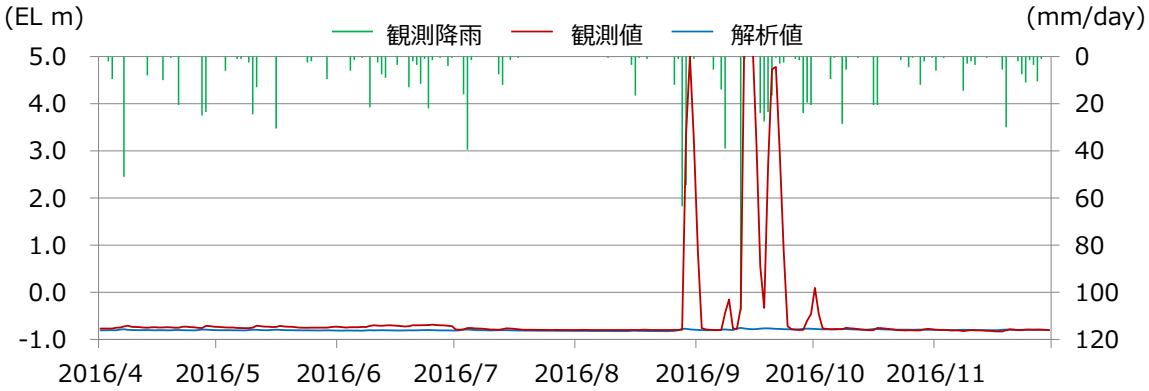
別紙 17-10(4)図　地下水位の経時変化例（No. 4 孔）



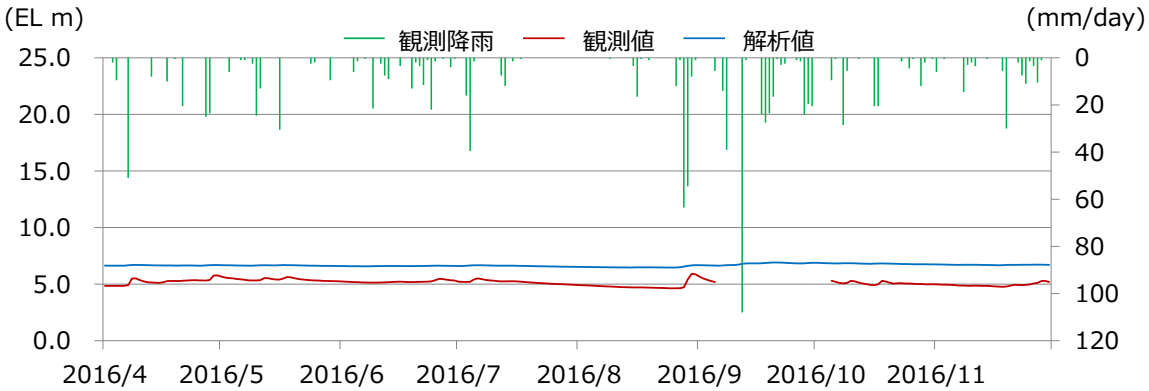


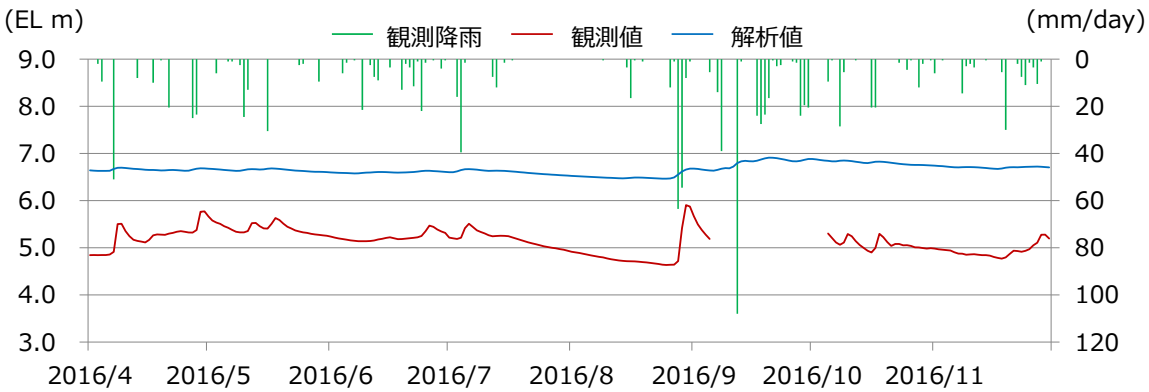
別紙 17-10(5)図　地下水位の経時変化例（No. 5 孔）





別紙 17-10(6)図　地下水位の経時変化例（No. 6 孔）





別紙 17-10(7)図　地下水位の経時変化例（No. 7 孔）

No.1,3 孔は２号炉の北側に，No.2,6 孔は２号原子炉建物近傍に，No.4,5 孔は３号炉の北側に位置し，埋戻土（掘削ズリ）の層厚の比較的薄い地点である。一方で，No.7 孔は敷地の南側に位置し，埋戻土（掘削ズリ）の層厚の比較的厚い地点である。地下水位の経時変化に係る観測値と解析値を比較すると，No.1,3,4 孔では概ね両者は同程度であり,No.2,5,7 孔では解析値が観測値を上回っている。No.6 孔では一部の降雨に対して，短期的な地下水位挙動は再現できないものの，その他の期間では観測値と解析値が概ね同程度である。

また，降雨時の地下水位の反応について観測値と解析値を比較すると，観測値は降雨と連動して地下水位が変化しているが，解析値は観測値と比較して地下水位の感度が小さい。この理由として，局所的に潜在する割れ目や水みち，主要建物周辺工事の影響等が挙げられるが，再現解析の解析モデルに反映できていない。

今後，解析モデルへの反映の可否を含めて検討し，非定常解析の位置付け及び非定常解析の信頼性を向上させるための取り組みについて，詳細設計段階で説明する。

それぞれの観測孔における地下水位の経時変化の傾向を以下に示す。

a.No.1 孔

No.1 孔の観測値によると，降雨等に伴い地下水位の上昇が認められるものの，大きな変動は確認されず，概ねEL.０～＋１ｍの間を推移している。また，解析値でも概ね同程度で推移していることを確認した。

b.No.2 孔

No.2 孔の観測値によると，観測孔近傍に設置されている地下水位低下設備（既設）の機能により，他の観測孔と比較して降雨等に伴う地下水位上昇後の低下が早い傾向があり，一部の降雨時を除くと，地下水位はEL.０ｍを超えない範囲を推移している。一方で，解析値では，それよりも高い概ねEL.＋２ｍであることを確認した。

c.No.3 孔

No.3 の観測値によると，降雨等に伴い，地下水位の上昇が認められるものの，大きな変動は確認されず，概ねEL.０～＋１ｍの間を推移している。また，解析値でも概ね同程度で推移していることを確認した。

d.No.4 孔

No.4 孔の観測値によると,既設のサブドレーンピット近傍の観測孔(No.2,No.6)と比較して，降雨等による水位上昇後，緩やかに低下する傾向があり，概ねEL.＋１～３ｍの間を推移している。また，解析値でも概ね同程度で推移していることを確認した。

e. No. 5 孔

No. 5 孔の観測値によると，既設のサブドレーンピット近傍の観測孔（No. 2, No. 6）と比較して，降雨等による水位上昇後，緩やかに低下する傾向があり，概ね EL. ＋１～３ｍの間を推移している。一方で，解析値では，それよりも高い概ね EL. ＋３ｍであることを確認した。

f. No. 6 孔

No. 6 孔の観測値によると，観測孔近傍に設置されている地下水位低下設備（既設）の機能により，他の観測孔と比較して降雨等に伴う地下水位上昇後の低下が早い傾向があり，一部の降雨時を除くと，地下水位は EL. －１～０ｍの間を推移している。また， No. 6 孔は南側の盛土斜面から地下水が流れ込むため，一部の降雨時に地下水位が短期的な挙動を示す傾向が認められる。一方で，解析値では，短期的な地下水位挙動は再現できないものの，その他の期間については，概ね同等で推移している。

g. No. 7 孔

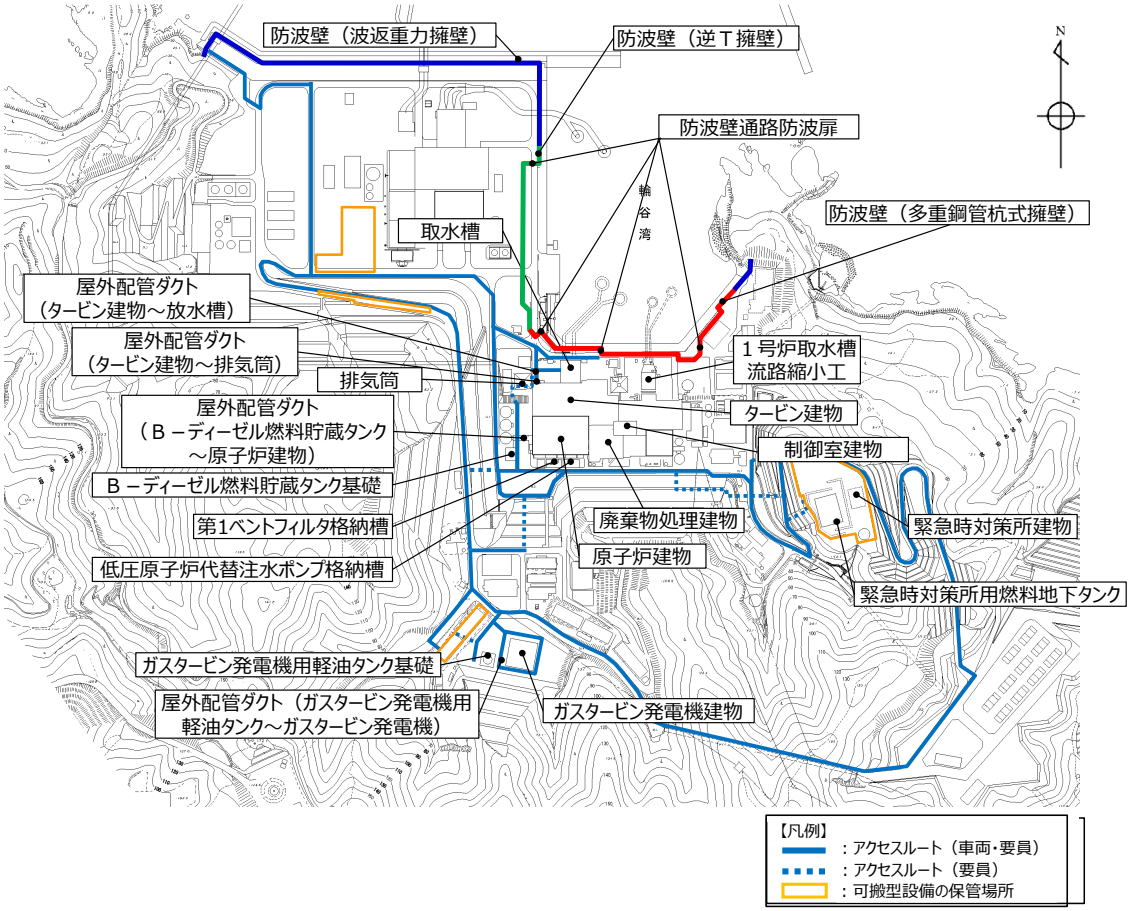
No. 7 孔の観測値によると，降雨等による水位上昇後，緩やかに低下する傾向にあり，概ね EL. ＋５～６ｍの間を推移している。一方で，解析値では，それよりも高い概ね EL. ＋６～７ｍの間を推移していることを確認した。

2.4 地下水位が上昇した場合の影響確認

(1)耐震評価において地下水位の影響を受ける可能性のある施設等の抽出

防波壁周辺の地盤改良により敷地内の地下水の流動場が変化することを踏まえ，耐震評価において地下水位の影響を受ける可能性のある施設等として，EL. ＋8.5m 盤，EL. ＋15m 盤，EL. ＋44m 盤及び EL. ＋50m 盤エリアに設置される耐震重要施設・常設重大事故等対処施設(いずれも間接支持構造物を含む)及びそれらの基礎地盤・周辺斜面，並びに車両通行性への影響の観点等から保管場所・アクセスルートを抽出した。

耐震評価において地下水位の影響を受ける可能性のある施設等の抽出結果を別紙 17-11 図及び別紙 17-3 表に示す。



別紙17-11図　耐震評価において地下水位の影響を受ける可能性のある施設等の抽出結果

別紙17-3表　耐震評価において地下水位の影響を受ける可能性のある施設等の抽出結果

設備分類		設備名称
基礎地盤・周辺斜面		基礎地盤
		周辺斜面
設計基準対象施設	建物，構築物	原子炉建物
		タービン建物
		廃棄物処理建物
		制御室建物
		排気筒
	屋外重要土木構造物	取水槽
		屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）
		Ｂ－ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎
		屋外配管ダクト（Ｂ－ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）
	津波防護施設	防波壁（多重鋼管杭式擁壁）
		防波壁（逆Ｔ擁壁）
		防波壁（波返重力擁壁）
		１号炉取水槽流路縮小工
		防波壁通路防波扉
重大事故等対処施設		第１ベントフィルタ格納槽
		低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽
		緊急時対策所建物
		緊急時対策所用燃料地下タンク
		ガスタービン発電機建物
		ガスタービン発電機用軽油タンク基礎
		屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）
保管場所・アクセスルート		保管場所
		アクセスルート

(2)地下水位の上昇による影響と対応方針

別紙 17-11 図及び別紙 17-3 表に示した耐震評価において地下水位の影響を受ける可能性のある施設等について，地下水位が上昇した場合は施設等への揚圧力影響及び液状化影響が生じる可能性を踏まえ，その影響を低減するための対応方針を整理した(補足説明資料４参照)。

a . 地下水位の影響を踏まえた評価と対策

耐震評価において地下水位の影響を受ける可能性のある施設等について，地下水位の上昇による影響を踏まえた評価と対策を別紙 17-4 表に示す。

別紙 17-4 表　地下水位の上昇による影響を踏まえた評価と対策（１/２）

地下水位の影響を受ける可能性のある施設等		地下水位の上昇による影響を踏まえた評価と対策			他サイトとの比較	
					東海第二	女川２号
基礎地盤・周辺斜面	・基礎地盤 ・周辺斜面	評価結果		**影響なし** （保守的に地表面に設定）※	**影響なし**	**影響なし**
		対策	地下水位低下設備	－	－	－
			各施設等（耐震補強）	－	－	－
建物，構築物	・原子炉建物 ・タービン建物 ・廃棄物処理建物 ・制御室建物 ・排気筒	評価結果		**影響あり** （揚圧力影響・液状化影響）	**影響あり** （揚圧力影響・液状化影響）	**影響あり** （揚圧力影響・液状化影響）
		対策	地下水位低下設備	【揚圧力対策】 ○：地下水位低下設備（既設）の設置 【液状化対策】 △：（設計地下水位の設定において前提とする）	【揚圧力対策】 ○：地下水位低下設備の設置 【液状化対策】 △：（設計地下水位の設定において前提とする）	【揚圧力対策】 ○：地下水位低下設備の設置 【液状化対策】 △：（設計地下水位の設定において前提とする）
			各施設等（耐震補強）	△：耐震評価の結果，当該施設の機能に影響が及ぶ場合は，適切な対策（地盤改良等の耐震補強）を講ずる	△：耐震評価の結果，当該施設の機能に影響が及ぶ場合は，適切な対策（地盤改良等の耐震補強）を講ずる。	△：耐震評価の結果，当該施設の機能に影響が及ぶ場合は，適切な対策（地盤改良等の耐震補強）を講ずる。
屋外重要土木構造物	・取水槽 ・屋外配管ダクト （タービン建物～排気筒） ・Ｂ－ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎 ・屋外配管ダクト （Ｂ－ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）	評価結果		**影響なし** （地下水位低下設備（既設）の機能に期待せず設計地下水位を設定）	**影響なし**	**影響あり** （揚圧力影響・液状化影響）
		対策	地下水位低下設備	－	－	△：（設計地下水位の設定において前提とする）
			各施設等（耐震補強）	－	－	△：耐震評価の結果，当該施設の機能に影響が及ぶ場合は，適切な対策（地盤改良等の耐震補強）を講ずる。

※周辺斜面の液状化範囲については，２次元浸透流解析により設定する。

先行炉の情報に係る記載内容については，会合資料等をもとに弊社の責任において独自に解釈したものです。

凡例
○：地下水位低下設備が設計上必要
△：地下水位低下設備により保持される地下水位を前提として評価・対策
－：対策不要

別紙 17-4 表　地下水位の上昇による影響を踏まえた評価と対策（２/２）

地下水位の影響を受ける可能性のある施設等		地下水位の上昇による影響を踏まえた評価と対策			他サイトとの比較	
					東海第二	女川２号
津波防護施設	・防波壁 （多重鋼管杭式擁壁） ・防波壁 （逆Ｔ擁壁） ・防波壁 （波返重力擁壁） ・１号炉取水槽流路縮小工 ・防波壁通路防波扉	評価結果		**影響なし** （地下水位低下設備（既設）の機能に期待せず設計地下水位を設定）	**影響なし**	**影響あり（一部）** （揚圧力影響・液状化影響）
		対策	地下水位低下設備	－	－	△：（設計地下水位の設定において前提とする）
			各施設等（耐震補強）	－	－	△：耐震評価の結果，当該施設の機能に影響が及ぶ場合は，適切な対策（地盤改良等の耐震補強）を講ずる。
重大事故等対処施設	・第１ベントフィルタ格納槽 ・低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 ・緊急時対策所建物 ・緊急時対策所用燃料地下タンク ・ガスタービン発電機建物 ・ガスタービン発電機用軽油タンク基礎 ・屋外配管ダクト （ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）	評価結果		**影響なし** （地下水位低下設備（既設）の機能に期待せず設計地下水位を設定）	**影響なし**	－
		対策	地下水位低下設備	－	－	－
			各施設等（耐震補強）	－	－	－
保管場所・アクセスルート	・保管場所 ・アクセスルート	評価結果		**影響なし** （地下水位低下設備（既設）の機能に期待せず設計地下水位を設定）	**影響なし**	**影響あり（一部）** （液状化影響）
		対策	地下水位低下設備	－	－	△：（地下水位低下設備が機能喪失した場合は初期水位として考慮）
			各施設等（耐震補強）	－	－	△：（アクセスルートの通行性が一定期間確保できない場合は，地盤改良等の対策・外部支援等の活用による通行性の確保）

先行炉の情報に係る記載内容については，会合資料等をもとに弊社の責任において独自に解釈したものです。

凡例
○：地下水位低下設備が設計上必要
△：地下水位低下設備により保持される地下水位を前提として評価・対策
－：対策不要

ｂ．地下水位の設定方針

ａ．を踏まえ，耐震評価において地下水位の影響を受ける可能性のある施設等について，地下水位の設定方針を別紙 17-5 表に示す（各審査区分における解析条件については，「2.7 解析条件及び地下水位設定方針の整理」参照）。

構造成立性検討用の地下水位設定方針については，以下のとおり。

・設置許可段階で安全性評価が要求される基礎地盤・周辺斜面については，地震時の動的解析において地下水位を地表面とする。なお，周辺斜面の液状化範囲については，二次元浸透流解析により地下水位を設定する。

・屋外重要土木構造物及び津波防護施設等は地下水位低下設備（既設）の機能に期待しない方針とし，揚水ポンプが停止した条件における三次元浸透流解析結果により地下水位を設定する。

詳細設計段階における設計地下水位の設定方針（地下水位低下設備の考慮）については，以下のとおり。

・地下水位低下設備（既設）については，保守管理性が低いため，その機能に期待しない。

・建物，構築物に作用する揚圧力及び液状化影響の低減を目的として，信頼性（耐久性・耐震性・保守管理性）を満足する地下水位低下設備を新設する。

・建物，構築物は新設する地下水位低下設備の機能に期待する方針とし，揚水ポンプが稼働した条件における三次元浸透流解析結果より保守的に設定した地下水位を設定する。

・屋外重要土木構造物及び津波防護施設等は新設する地下水位低下設備の機能に期待しない方針とし，揚水ポンプが停止した条件における三次元浸透流解析結果（自然水位）より保守的に設定した地下水位を設定する。

別紙 17-5 表　耐震評価において地下水位の影響を受ける可能性のある施設等の地下水位の設定方針

設備分類		設備名称	地下水位の設定方針
基礎地盤・周辺斜面		基礎地盤	保守的に地表面に設定※1
		周辺斜面	
設計基準対象施設	建物，構築物	原子炉建物	地下水位低下設備の機能に期待して，設計地下水位を設定する。
		タービン建物	
		廃棄物処理建物	
		制御室建物	
		排気筒	
	屋外重要土木構造物	取水槽	自然水位※2より保守的に設定した水位
		屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）	
		Ｂ－ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎	
		屋外配管ダクト（Ｂ－ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）	
	津波防護施設	防波壁（多重鋼管杭式擁壁）	
		防波壁（逆Ｔ擁壁）	
		防波壁（波返重力擁壁）	
		１号炉取水槽流路縮小工	
		防波壁通路防波扉	
重大事故等対処施設		第１ベントフィルタ格納槽	
		低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽	
		緊急時対策所建物	
		緊急時対策所用燃料地下タンク	
		ガスタービン発電機建物	
		ガスタービン発電機用軽油タンク基礎	
		屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）	
保管場所・アクセスルート		保管場所	
		アクセスルート	

※1　周辺斜面の液状化範囲については，二次元浸透流解析により設定する
※2　地下水位低下設備の機能に期待しない場合の地下水位

(3)地下水位が上昇した場合の影響評価まとめ

地下水位の影響を踏まえた評価と対応方針を踏まえ,耐震評価において地下水位の影響を受ける施設等の地下水位低下設備との関係を整理した。整理結果を別紙 17-6 表に示す(基準適合の考え方は添付資料２に示す)。

a. 地下水位低下設備の設置許可基準規則における位置付け等

別紙 17-6 表の整理を踏まえ,施設の設置許可基準規則第４条(第 39 条)への適合に当たり,施設の設計の前提条件となる地下水位を一定の範囲に保持するために必要であることから,地下水位低下設備を設計基準対象施設として位置付ける。

各施設の耐震設計については,防波壁の周辺を地盤改良するために地下水の流れが遮断され地下水位が上昇するおそれがあるという島根サイト固有の状況を踏まえ地下水位を一定の範囲に保持する地下水位低下設備の機能を考慮した水位,自然水位(地下水位低下設備の機能に期待しない場合の地下水位)より保守的に設定した水位又は地表面にて設計地下水位を設定し,揚圧力が作用した場合及び液状化,揺すり込み沈下等の周辺地盤の変状を考慮した場合においても当該施設の機能が損なわれないように設計することで基準適合が図られる。

なお,地下水位の影響を受ける施設等,及び地下水位の影響を踏まえた対策については,詳細設計段階にその詳細を示す。

b. 地下水位低下設備と対応条文の関連性等

建物, 構築物について,設置許可基準規則第 39 条は同第４条と同様の要求であり,第４条への適合をもって第 39 条への適合性を確認する。

施設等について,余震時に対する要求を含む設置許可基準規則第５条・第 40 条及び第 39 条については,第４条への適合をもって確認する。また,同第３条第２項及び第 38 条第２項,第４条及び第 39 条は,それぞれ同一の地盤,地震に対する設計基準対象施設及び重大事故等対処施設の適合性を要求しているものであり,地震時の影響については,代表的に設置許可基準規則第４条への適合性を示すことにより確認する。

以上から,地震時の影響については,代表的に設置許可基準規則第４条或いは第 39 条への適合性を示すことにより確認する。

別紙 17-6 表　耐震評価において地下水位の影響を受ける施設等の地下水位低下設備との関係並びに設置許可基準規則における対応条文の整理

設備分類		設備名称	安全性確保における地下水位低下設備の位置付け※1			関連する条文 ○は設計上必要，△は設計条件として前提とする。色分けは※4に示す 各条文の包絡関係を示す（■は■への適合性を示すことにより確認）									備考
			(A) 設計値保持のため直接的に必要	(B) 左記(A)により保持される地下水位を前提とする（必要時は対策）	(C) 不要	地盤				地震		津波・余震重畳		重大事故等対処設備	
						3条 1項	38条 1項	3条 2項※4	38条 2項※4	4条※4	39条※4	5条※4	40条※4	43条	
基礎地盤・周辺斜面		基礎地盤			○	※2	※2								
		周辺斜面			○										
設計基準対象施設	建物，構築物	原子炉建物	○					△	△	○	※3				
		タービン建物	○					△	△	○	※3				
		廃棄物処理建物	○					△	△	○	※3				
		制御室建物	○					△	△	○	※3				
		排気筒	○					△	△	○	※3				
	屋外重要土木構造物	取水槽			○										
		屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）			○										
		屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）			○										
		Ｂ－ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎			○										
		屋外配管ダクト （Ｂ－ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）			○										
	津波防護施設	防波壁（多重鋼管杭式擁壁）			○										
		防波壁（逆Ｔ擁壁）			○										
		防波壁（波返重力擁壁）			○										
		１号炉取水槽流路縮小工			○										
		防波壁通路防波扉			○										
重大事故等対処施設		第１ベントフィルタ格納槽			○										
		低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽			○										
		緊急時対策所建物			○										EL+50m盤に設置
		緊急時対策所用燃料地下タンク			○										EL+50m盤に設置
		ガスタービン発電機建物			○										EL+44m盤に設置
		ガスタービン発電機用軽油タンク基礎			○										EL+44m盤に設置
		屋外配管ダクト （ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）			○										EL+44m盤に設置
保管場所・アクセスルート		保管場所			○										
		アクセスルート			○										
		保管場所・アクセスルートにおいて評価する斜面			○										

※1　地下水位の影響を受ける施設等，及び地下水位の影響を踏まえた対策については，詳細設計段階にその詳細を示す。
※2　基礎地盤の評価に地下水位が影響しないため，条文適合上不要と整理した。なお，基礎地盤の安定性の評価条件の一つとして，地下水位の設定について設置変更許可申請書へ記載する。
※3　設置許可基準規則第39条は同規則第4条と同様の要求であり，規則第4条への適合をもって第39条への適合性を確認する。
※4　余震時に対する要求を含む設置許可基準規則第5条・第40条及び第39条については，第4条への適合をもって確認する。また，同第3条第2項，第4条及び第39条は，それぞれ同一の地盤，地震に対する設計基準対象施設及び重大事故等対処施設の適合性を要求しているものであり，地震時の影響については，代表的に設置許可基準規則第4条への適合性を示すことにより確認する。

2.5設計地下水位の設定

詳細設計段階で設定する設計地下水位の設定方法について，地下水位低下設備の機能に期待しない屋外重要土木構造物等のうち，箱型構造物及び線状構造物の設定例を示す。

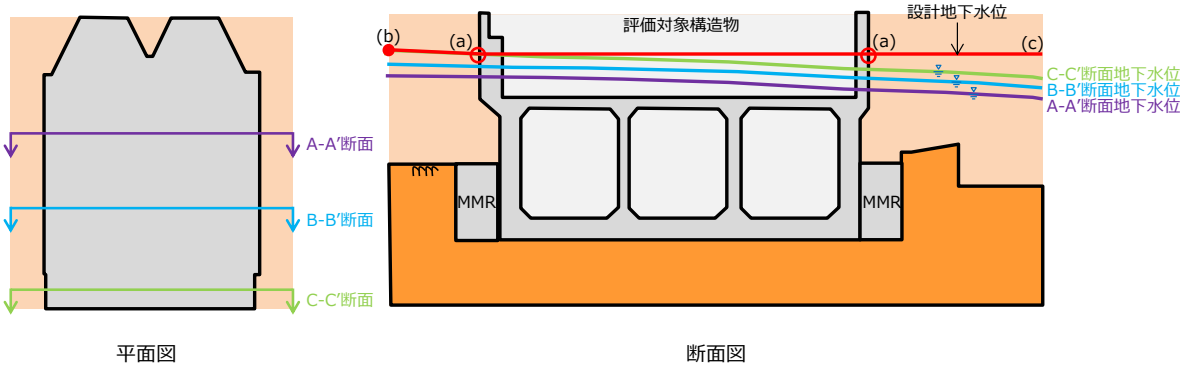
設計地下水位は解析断面における地下水位を用いて，構造物側面や解析断面境界等の各点での最高水位を結んで保守的な設定とする。

箱型構造物の設計地下水位設定の考え方について，別紙17-12図に，線状構造物の設計地下水位設定の考え方について，別紙17-13図に示す。

なお，再現解析における解析結果と観測記録の差異を踏まえ，以下に示す(a)～(c)の水位に余裕を加えて設計地下水位を設定する。

【箱型構造物】

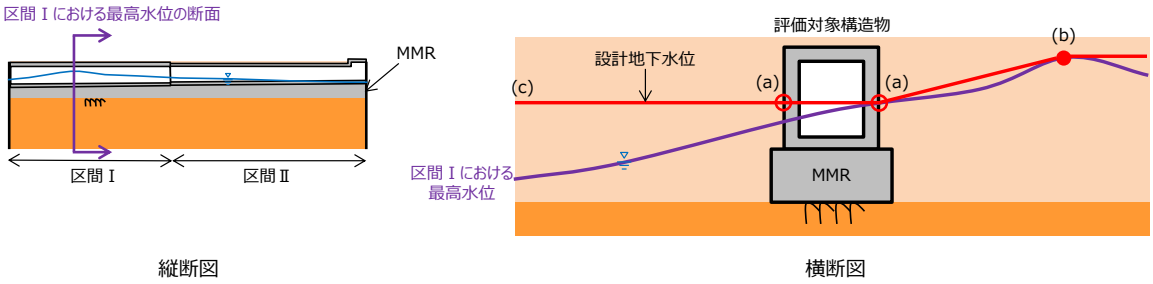
・構造物側面の地下水位は，三次元浸透流解析結果より，構造的特徴や周辺状況を踏まえて設定した各解析断面における構造物側面の最高水位(a)を採用する。
・構造物周辺地盤の地下水位は，構造物側面の水位(a)とその側方地盤の最高水位(b)を結ぶ。
・ただし，構造物周辺地盤の地下水位が構造物から離れる方向に低下しても設計地下水位は最高水位で一定(c)とする。



別紙17-12図　箱型構造物の設計地下水位設定の考え方

【線状構造物】

・構造物側面の地下水位は，三次元浸透流解析結果より，縦断図において構造的特徴や周辺状況を踏まえて設定した区間毎の最高水位(a)を採用する。
・構造物周辺地盤の地下水位は，構造物側面の水位(a)とその側方地盤の最高水位(b)を結ぶ。
・ただし，構造物周辺地盤の地下水位が構造物から離れる方向に低下しても設計地下水位は最高水位で一定(c)とする。

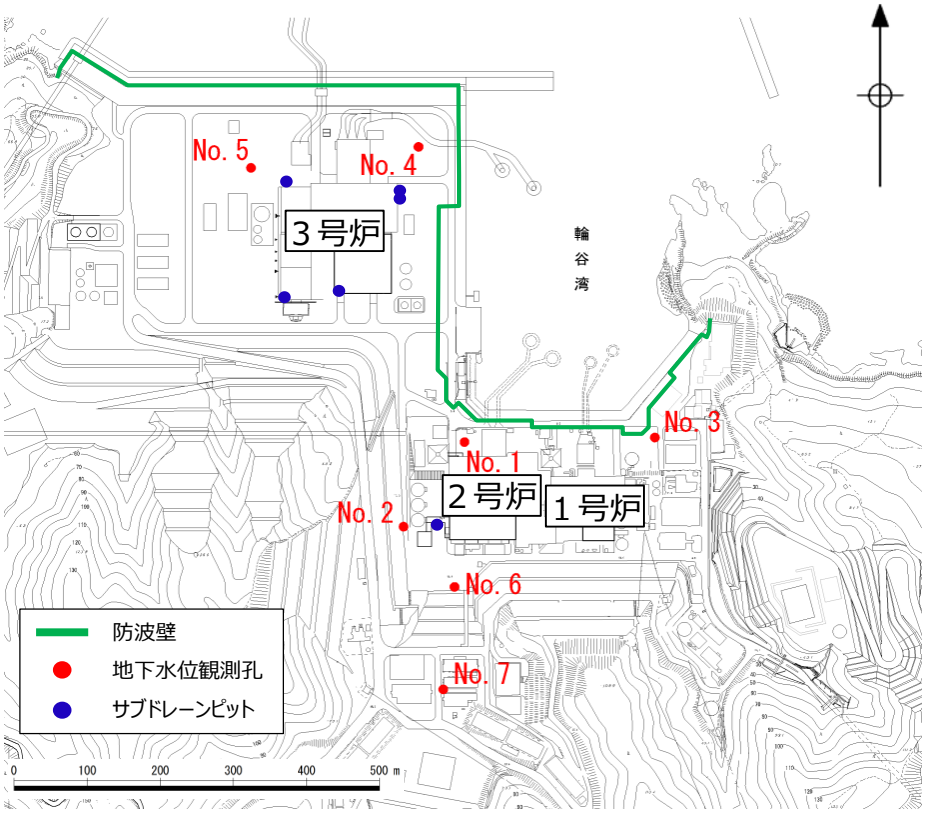


別紙17-13図　線状構造物の設計地下水位設定の考え方

2.6観測による検証

設計地下水位の設定に用いる予測解析は防波壁周辺の地盤改良完了後の状態をモデル化することから，予測解析結果の妥当性の検証として，防波壁周辺の地盤改良の工事完了後の地下水位観測記録を用いて，解析結果が観測記録に対して保守的であることを確認する。

なお，今後の地下水位設定の信頼性確認等への活用を念頭に，別紙17-14図のうち複数孔については防波壁周辺の地盤改良影響の検証後も観測を継続し，基礎データとして集積していく。



別紙 17-14 図　地下水位観測計画位置

2.7解析条件及び地下水位設定方針の整理

設置許可段階における再現解析では，年平均降雨・透水係数を設定した定常解析の結果，解析水位と観測水位が概ね一致することから，解析モデルの妥当性を確認した。

設置許可段階及び詳細設計段階における予測解析では，再現解析により妥当性を確認した解析モデルを用いて，以下の保守性を考慮する。

・発電所における年平均降水量（1,540㎜/年）よりも厳しい降雨条件（2,400㎜/年）を定常的に与える。
・地下水位低下設備（既設）のうち，ドレーンは砕石及び土砂が流入して集水機能が低下した状態，揚水ポンプは稼働しない状態とし，揚水経路としない。
・原子炉建物等の建物，構築物は信頼性のある地下水位低下設備の機能に期待するが，屋外重要土木構造物や保管場所・アクセスルート等については保守的に期待しない。

再現解析における解析結果と観測記録の差異を踏まえ，浸透流解析より求まる水位に余裕を加えて設計地下水位を設定する。

別紙17-7表　各審査区分における解析条件

<table>
<tr><td colspan="3">審査区分</td><td colspan="2">設置許可段階</td><td colspan="2">詳細設計段階</td></tr>
<tr><td colspan="3">解析区分</td><td>再現解析（定常※1）</td><td colspan="3">予測解析（定常）</td></tr>
<tr><td colspan="3">解析の目的</td><td>解析用物性値を含めた
解析モデルの妥当性確認</td><td>構造成立性検討</td><td colspan="2">設計地下水位の設定</td></tr>
<tr><td rowspan="5">解析条件</td><td colspan="2">(1)透水係数</td><td>透水試験結果等に基づき設定</td><td colspan="3">再現解析で妥当性を確認した透水係数を設定</td></tr>
<tr><td colspan="2">(2)地盤条件</td><td>一部，地盤改良未実施</td><td colspan="3">地盤改良完了後</td></tr>
<tr><td colspan="2">(3)降雨条件</td><td>1,540mm/年
（発電所 年平均降雨）</td><td>2,400mm/年</td><td>2,400mm/年</td><td>2,400mm/年</td></tr>
<tr><td rowspan="2">(4)</td><td>地下水位低下設備（既設）</td><td>機能に期待する</td><td>機能に期待しない</td><td>機能に期待しない</td><td>機能に期待しない</td></tr>
<tr><td>地下水位低下設備</td><td>－</td><td>－</td><td>機能に期待する</td><td>機能に期待しない</td></tr>
<tr><td colspan="3">解析対象</td><td>（解析水位と観測水位を比較）</td><td>・基礎地盤・周辺斜面※2
・屋外重要土木構造物
・津波防護施設
・重大事故等対処施設
・保管場所・アクセスルート</td><td>建物，構築物
（・原子炉建物
・タービン建物
・廃棄物処理建物
・制御室建物
・排気筒）</td><td>・屋外重要土木構造物
・津波防護施設
・重大事故等対処施設
・保管場所・アクセスルート</td></tr>
</table>

※1　参考として非定常解析を実施　※2　設置許可段階ですべり安定性への影響を確認

：保守的に設定した条件

第Ⅱ編　地下水位低下設備の信頼性向上の方針

1. 地下水位低下設備の目的,機能及び位置付け

地下水位低下設備の目的及び機能,また,機能維持を要求する期間は,以下のとおりである。

①地下水位低下設備の目的及び機能

- 原子力発電所の施設の機能・構造は,地盤の健全性が確保された前提で各種設計がなされている。
- 地下水位低下設備の機能は,施設の設計の前提が確保されるよう,「地下水位を一定の範囲に保持する」ことである。
- 地下水位低下設備が機能することにより，原子炉建物等の建物,構築物周辺の地下水位が一定の範囲に保持され，原子炉建物，タービン建物，廃棄物処理建物，制御室建物及び排気筒に作用する揚圧力及び液状化影響が低減される。この地下水位低下設備の機能を考慮した設計地下水位を設定し，揚圧力が作用した場合及び液状化,揺すり込み沈下等の周辺地盤の変状を考慮した場合においても機能が損なわれないよう設計する。

  また,地下水位低下設備の機能に期待しない場合は,自然水位(地下水位低下設備を考慮しない場合の地下水位)より保守的に設定した水位又は地表面にて設計地下水位を設定し,揚圧力が作用した場合及び液状化,揺すり込み沈下等の周辺地盤の変状を考慮した場合においても機能が損なわれないよう設計する。

②地下水位低下設備の機能維持を要求する期間

- 地下水位低下設備は,以下に示す原子力発電所の供用期間の全ての状態において機能維持が必要である。
  - ・通常運転時(起動時,停止時含む)
  - ・運転時の異常な過渡変化時
  - ・設計基準事故時
  - ・重大事故等時
- また,プラント供用期間中において発生を想定する大規模損壊についても,その発生要因とプラントの損壊状況を踏まえ,地下水位低下設備の設計を行ううえで配慮する。

③地下水位低下設備の位置付け

- 施設の設置許可基準規則第３条第２項及び第４条(第39条)への適合に当たり,施設の設計の前提条件となる地下水位を一定の範囲に保持するために必要であることから,地下水位低下設備を設計基準対象施設として位置付ける。

- 地下水位低下設備は重大事故等に対処するための機能は有していないため，重大事故等対処施設には位置付けない。

地下水位低下設備の目的，機能及び要求期間を踏まえ，重要安全施設への影響に鑑み地下水位低下設備の信頼性向上のための配慮項目を整理したうえで設計・運用を行う。

2.　機能喪失要因等の分析に基づく設備構成の検討

2.1　供用期間中における機能維持に必要な耐性の分析

通常運転時から大規模損壊発生時までの供用期間中の全ての状態における地下水位低下設備の信頼性を向上するために必要な耐性を検討するため,以下の分析を行う。

【分析１】

・地下水位低下設備の機能ごとに,設置許可基準規則第３条から第13条までにおいて考慮することが要求される事象を,「想定する機能喪失要因」とする。
・なお,設置許可基準規則第 14 条から第 36 条までに対しては,別紙 17-8 表のとおり,地下水位低下設備に対する機能について影響するものではないので機能喪失要因の対象とはならない。
・地下水位低下設備の構成部位が,想定する機能喪失要因により機能喪失するかを分析(別紙17-9表)する。
・分析結果を踏まえ,地下水位低下設備の機能維持の観点から必要な対策について整理する。

【分析２】

・分析１から抽出された,地下水位低下設備の機能喪失要因となる事象が発生した場合に,同時に「運転時の異常な過渡変化」,「設計基準事故」又は「重大事故等」が発生するかについて分析(別紙17-10表)する。
・分析結果を踏まえ,地下水位低下設備の機能維持の対策に加え,追加の対策が必要であるかについて整理する。

【分析３】

・「運転時の異常な過渡変化」,「設計基準事故」又は「重大事故等」発生後に,何らかの原因により地下水位低下設備が機能喪失した場合を想定し,運転時の異常な過渡変化等の事象収束に対して影響があるかを分析(別紙17-11表)する。
・分析結果を踏まえ,地下水位低下設備の機能維持の対策に加え,追加の対策が必要であるかについて整理する。

【分析４】

・大規模損壊の発生要因について,プラントの損壊状況を踏まえ,地下水位低下設備の設計を行ううえで配慮する。

2.2　関係する条文の抽出

地下水位低下設備の機能喪失要因と設置許可基準規則との関係を別紙17-8表に示す。

地下水位低下設備の各構成部位が機能喪失する可能性のある事象として，機器の故障に加え，設置許可基準規則第３条から第13条までの要求事項を踏まえ，地震（第４条），津波（第５条），外部事象（地震，津波以外）（第６条），内部火災（第８条），内部溢水（第９条）及び誤操作の防止（第10条）が考えられるため要因として抽出した。

これ以外の設置許可基準規則における設計基準対象施設に対する要求は，個別設備に対する設計要求である等の理由から機能喪失する可能性のある事象から除外した。

別紙 17-8 表　地下水位低下設備の機能喪失要因と設置許可基準規則との関係

設置許可基準基準規則の要求事項		分析対象	対象外とした理由	備考
第3条	地盤	－	・地下水位低下設備は，発電用原子炉施設の各設備を本条文に適合させるために設置するものであることから，分析の対象外	－
第4条	地震	○	－	－
第5条	津波	○	－	－
第6条	風(台風)，竜巻，凍結，降水，積雪，落雷，火山，生物学的事象，森林火災(外部火災)	○	－	２号炉で想定する外部事象として抽出した事象
第7条	不法な侵入	－	・本条文は，個別設備の設置要求であり，機能喪失要因として抽出する事項を含まないため，対象外	－
第8条	内部火災	○	－	－
第9条	内部溢水	○	－	－
第 10 条	誤操作の防止	○	－	－
第 11 条	安全避難通路等	－	・本条文は，個別設備の設置要求であり，機能喪失要因として抽出する事項を含まないため，対象外	－
第 12 条	安全施設	－	・本条文は，安全施設への要求であり，機能喪失要因として抽出する事項を含まないため，対象外	－
第 13 条	運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止	－	・本条文は，運転時の異常な過渡変化に対する要求であり，機能喪失要因として抽出する事項を含まないため，対象外	－
第 14 条	全交流動力電源喪失対策設備	－	・本条文は，個別設備の設置要求であり，機能喪失要因として抽出する事項を含まないため，対象外	－
第 15 条	炉心等	－		
第 16 条	燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設	－		
第 17 条	原子炉冷却材圧力バウンダリ	－		
第 18 条	蒸気タービン	－		
第 19 条	非常用炉心冷却設備	－		
第 20 条	一次冷却材の減少分を補給する設備	－		
第 21 条	残留熱を除去することができる設備	－		
第 22 条	最終ヒートシンクへ熱を輸送することができる設備	－		
第 23 条	計測制御系統施設	－		
第 24 条	安全保護回路	－		
第 25 条	反応度制御系統及び原子炉停止系統	－		
第 26 条	原子炉制御室等	－		
第 27 条	放射性廃棄物の処理施設	－		
第 28 条	放射性廃棄物の貯蔵施設	－		
第 29 条	工場等周辺における直接ガンマ線等からの防護	－		
第 30 条	放射線からの放射線業務従事者の防護	－		
第 31 条	監視設備	－		
第 32 条	原子炉格納施設	－		
第 33 条	保安電源設備	－		
第 34 条	緊急時対策所	－		
第 35 条	通信連絡設備	－		
第 36 条	補助ボイラー	－		

2.3　各構成部位の機能喪失要因の分析

(1)供用期間中における機能維持に必要な耐生の分析(分析１)

地下水位低下設備の各構成部位が,抽出した機能喪失要因により機能喪失が発生するかについて分析する。分析の前提条件と分析結果は以下のとおり。

〈分析１前提条件〉

・機能喪失有無の判定においては,地下水位低下設備に必要となる設計上の配慮事項を抽出する観点から,全ての構成部位に対し設計上の外部事象への配慮が講じられていない状態を前提とする。
・地下水位低下設備の全ての構成部位は,屋外に設置されている状態を前提とする。

〈分析結果〉

・分析の結果,地下水位低下設備の各構成部位に対する機能喪失要因として別紙17-9表のとおりの結果を得た。
・これらの機能喪失要因を踏まえ地下水位低下設備の設計上の信頼性を向上させる観点から別紙17-12表のとおり,設計上の配慮を行うこととする。

別紙 17-9 表　地下水位低下設備の各構成部位の機能喪失要因の分析

機能	構成部位	機器故障及び設置許可基準規則の要求を踏まえた機能喪失要因																		
		機器故障(故障モード)	地盤（３条）	地震（４条）	津波（５条）	風(台風)（６条）	竜巻（６条）	凍結（６条）	降水（６条）	積雪（６条）	落雷（６条）	火山（６条）	生物学的事象（６条）	森林火災(外部火災)（６条）	人の不法な侵入（７条）	内部火災（８条）	内部溢水（９条）	誤操作防止(10条)	安全避難通路(11条)	安全施設(12条)	過渡事故の拡大防止(13条)
集水機能	ドレーン	○※2	地下水位低下設備は，発電用原子炉施設の各設備を本条文に適合させるために設置するものであることから，機能喪失要因の分析の対象外とした	× 耐震無し	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	本条文は，機能喪失要因として抽出する事項を含まないため，分析対象外とした	○	○	—	本条文は，機能喪失要因として抽出する事項を含まないため，分析対象外とした	本条文は，機能喪失要因として抽出する事項を含まないため，分析対象外とした	本条文は，機能喪失要因として抽出する事項を含まないため，分析対象外とした
支持・閉塞防止機能	揚水井戸	○※3		× 耐震無し	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	—			
排水機能	揚水ポンプ	× 継続運転失敗・起動失敗		× 耐震無し	○	○	× 飛来物の影響の可能性有り	○	○	○	× 落雷による機能喪失の可能性有り	× 火山灰の影響により機能喪失の可能性有り	○	○		○	○	○			
	配管	× リーク・閉塞		× 耐震無し	○	○	× 飛来物の影響の可能性有り	○	○	○	○	○	○	○		○	○	—			
監視・制御機能	制御盤	× 不動作・誤動作		× 耐震無し	○	× 台風による二次的影響の可能性有り	× 飛来物の影響の可能性有り	× 制御系の低温による機能喪失の可能性有り	× 電気系統の漏水による機能喪失の可能性有り	× 積雪荷重での損傷の可能性有り	× 落雷による機能喪失の可能性有り	× 火山灰の影響により機能喪失の可能性有り	× 小動物の侵入による機能喪失の可能性有り	× 航空機と軽油タンクの重畳火災により機能喪失の可能性有り		× 地絡・短絡等を起因とする火災により機能喪失する可能性有り	× 溢水の影響により機能喪失の可能性有り	× 誤操作による機能喪失の可能性有り※4			
	水位計	× 不動作・誤動作		× 耐震無し	○	○	× 飛来物の影響の可能性有り	○	○	○	× 落雷による機能喪失の可能性有り	× 火山灰の影響により機能喪失の可能性有り	○	○		○	○	○			
電源機能	電源※1（非常用DG）	× 起動失敗		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○			

※１：外部電源はSs未満の地震により機能喪失する可能性があるため，機能喪失状態を前提とする

※２：ドレーンは岩盤内部設置しており，管内への土砂供給が非常に少ないため，閉塞の可能性は非常に小さい

※３：揚水井戸はドレーンからの土砂供給が非常に少ないため，閉塞の可能性は非常に小さい

※４：分析１では誤操作による機能喪失は機器の故障に含めた取り扱いとする

凡例○：事象に対し設備が影響を受けない

×：事象に対し設備が影響を受ける可能性あり

—：評価対象外

(2)供用期間中における機能維持に必要な耐性の分析(分析２)

地下水位低下設備の機能喪失要因により,同時に「運転時の異常な過渡変化」,「設計基準事故」又は「重大事故等」(以下,「各事象」)が発生するかについて分析を行い,事象収束にあたり追加の対策が必要かについて確認する。分析の前提条件と分析結果は以下のとおり。

〈分析２前提条件〉

・地下水位低下設備の機能喪失要因として,分析１により抽出された項目を前提とし,ここでの分析を行う。
・地下水位低下設備の全ての構成部位に対し設計上の外部事象への配慮が講じられていない状態を前提とする。
・電源に関して,非常用電源の共通要因による機能喪失は考慮しない。また,非常用DGの状態において,プラント運転中は２系列が待機状態にあることとする。
・プラント停止中は,外部電源は基準地震動Ｓｓ未満の地震により機能喪失する可能性があるため,機能喪失状態を前提とする。さらに,停止中はDG本体又は海水系片系が点検のために待機除外である状態を想定する。また,停止中の非常用DGに対しては,起動失敗等の機器の故障を考慮する。

〈分析結果〉

・別紙17-10表に示すとおり,地下水位低下設備が機能喪失する外部事象発生時には,外部事象により敷地外の送変電設備が損傷し,「運転時の異常な過渡変化(外部電源喪失)」が発生する可能性がある。
・これを防止するために,地下水位低下設備には,外部電源喪失に配慮した設計が必要となる。
・また,各事象が収束した以降も収束状態を維持する観点から,建物の安定性等の継続的な確保が必要である。
・このため,地下水位低下設備の各機能喪失要因に対する設計上の配慮を行うことで,「地下水位低下設備の機能喪失により地下水位が上昇した状態で基準地震動Ｓｓ規模の地震が発生する」という状況を回避でき,建物の安定性等が確保されることとなる。
・上記の配慮を行うことで,通常運転中の安全施設(異常発生防止系及び異常影響緩和系)への影響を防止することができている。
・別紙17-10表に示すとおり,地下水位低下設備が機能喪失する外部事象発生時には,外部事象により,同時に「全交流動力電源喪失(停止時)」が発生する。
・このことから,地下水位低下設備の機能喪失要因に配慮した対策,及び非常用電源に関する信頼性向上の観点からの常設代替交流電源から電源供給可能な設計とすることにより,地下水位低下設備の信頼性を向上させることができる。

別紙 17-10 表　地下水位低下設備の機能喪失と同時に発生の可能性がある事象の分析（１／３）

		運転時の異常な過渡変化											
		原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜き	出力運転中り制御棒の異常な引き抜き	原子炉冷却材流量の部分喪失	原子炉冷却材系の停止ループの誤起動	給水加熱喪矢	原子炉冷却材流量制御系の誤動作	負荷の喪矢	主蒸気隔離弁の誤閉止	給水制御系の故障	原子炉圧力制御系の故障	給水流量の全喪失	外部電源喪失
地下水位低下設備の機能喪失要因	機器故障	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	×
		地下水位低下設備の機能喪失により上記の過渡事象が発生することはない											※1
	地震	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	×
		地下水位低下設備が機能喪失するが，地震加速大によるスクラム信号発信及び制御棒挿入により，上記の過渡事象は発生しない											※1
	風（台風）	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	×
		地下水位低下設備は機能喪失するが，上記の過渡事象は発生しない											※1
	竜巻	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	×
		地下水位低下設備は機能喪失するが，上記の過渡事象は発生しない											※1
	凍結	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	×
		地下水位低下設備は機能喪失するが，上記の過渡事象は発生しない											※1
	降水	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	×
		地下水位低下設備は機能喪失するが，上記の過渡事象は発生しない											※1
	降雪	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	×
		地下水位低下設備は機能喪失するが，上記の過渡事象は発生しない											※1
	落雷	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	×
		地下水位低下設備は機能喪失するが，上記の過渡事象は発生しない											※1
	火山	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	×
		地下水位低下設備は機能喪失するが，上記の過渡事象は発生しない											※1
	生物学的影響	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	×
		地下水位低下設備は機能喪失するが，上記の過渡事象は発生しない											※1
	森林火災（外部火災）	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	×
		地下水位低下設備は機能喪失するが，上記の過渡事象は発生しない											※1
	内部火災	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	×
		地下水位低下設備は機能喪失するが，上記の過渡事象は発生しない											※1
	内部溢水	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	×
		地下水位低下設備は機能喪失するが，上記の過渡事象は発生しない											※1

凡例△：地下水位低下設備の機能喪失あり，ただし，過渡事象は起きない。×：地下水位低下設備の機能喪失あり，かつ，過渡事象が起きる。

※1：外部電源は発電所外の設備も含まれており，地下水位低下設備の機能喪失要因に対して耐性の確認・確保が困難であるため，
全ての機能喪失要因に対して発生すると整理した。

別紙 17-10 表　地下水位低下設備の機能喪失と同時に発生の可能性がある事象の分析（２/３）

		設計基準事故								
		原子炉冷却材喪失	原子炉冷却材流量の喪失	原子炉冷却材ポンプの軸固着	制御棒落下	放射性気体廃棄物処理施設の破損	主蒸気管破断	燃料集合体の落下	可燃性ガスの発生	動荷重の発生
地下水位低下設備の機能喪失要因	機器故障	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備の機能喪失により上記の設計基準事故が発生することはない								
	地震	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備が機能喪失するが，上記の設計基準事故は発生しない								
	風(台風)	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備が機能喪失するが，上記の設計基準事故は発生しない								
	竜巻	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備が機能喪失するが，上記の設計基準事故は発生しない								
	凍結	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備が機能喪失するが，上記の設計基準事故は発生しない								
	降水	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備が機能喪失するが，上記の設計基準事故は発生しない								
	降雪	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備が機能喪失するが，上記の設計基準事故は発生しない								
	落雷	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備が機能喪失するが，上記の設計基準事故は発生しない								
	火山	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備が機能喪失するが，上記の設計基準事故は発生しない								
	生物学的影響	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備が機能喪失するが，上記の設計基準事故は発生しない								
	森林火災（外部火災）	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備が機能喪失するが，上記の設計基準事故は発生しない								
	内部火災	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備が機能喪失するが，上記の設計基準事故は発生しない								
	内部溢水	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備が機能喪失するが，上記の設計基準事故は発生しない								

凡例△：地下水位低下設備の機能喪失あり，ただし，設計基準事故は起きない。×：地下水位低下設備の機能喪失あり，かつ，設計基準事故が起きる。

別紙 17-10 表　地下水位低下設備の機能喪失と同時に発生の可能性がある事象の分析（３／３）

		重大事故等																	
		高圧・低圧注水機能喪失	高圧注水・減圧機能喪失	全交流動力電源喪失	崩壊熱除去機能喪失	原子炉停止機能喪失	LOCA 時注水機能喪失	格納容器バイパス（ISLOCA）	雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧破損）	高圧溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱	原子炉圧力容器外の溶融燃料/冷却材相互作用	溶融炉心・コンクリート相互作用	水素燃焼	想定事故１	想定事故２	崩壊熱除去機能喪失（RHR の故障による停止時冷却機能喪失）	原子炉冷却材の流出	反応度の誤投入	全交流動力電源喪失(停止時)
地下水位低下設備の機能喪失要因	機器故障	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	×
		地下水位低下設備は機能喪失するが，地下水位低下設備の機能喪失要因により重大事故防止設備がその機能を喪失しないため，上記の重大事故等は発生しない																	※
	地震	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備は機能喪失するが，地下水位低下設備の機能喪失要因により重大事故防止設備がその機能を喪失しないため，上記の重大事故等は発生しない																	
	風(台風)	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備は機能喪失するが，地下水位低下設備の機能喪失要因により重大事故防止設備がその機能を喪失しないため，上記の重大事故等は発生しない																	
	竜巻	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備は機能喪失するが，地下水位低下設備の機能喪失要因により重大事故防止設備がその機能を喪失しないため，上記の重大事故等は発生しない																	
	凍結	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備は機能喪失するが，地下水位低下設備の機能喪失要因により重大事故防止設備がその機能を喪失しないため，上記の重大事故等は発生しない																	
	降水	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備は機能喪失するが，地下水位低下設備の機能喪失要因により重大事故防止設備がその機能を喪失しないため，上記の重大事故等は発生しない																	
	降雪	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備は機能喪失するが，地下水位低下設備の機能喪失要因により重大事故防止設備がその機能を喪失しないため，上記の重大事故等は発生しない																	
	落雷	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備は機能喪失するが，地下水位低下設備の機能喪失要因により重大事故防止設備がその機能を喪失しないため，上記の重大事故等は発生しない																	
	火山	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備は機能喪失するが，地下水位低下設備の機能喪失要因により重大事故防止設備がその機能を喪失しないため，上記の重大事故等は発生しない																	
	生物学的影響	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備は機能喪失するが，地下水位低下設備の機能喪失要因により重大事故防止設備がその機能を喪失しないため，上記の重大事故等は発生しない																	
	森林火災（外部火災）	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備は機能喪失するが，地下水位低下設備の機能喪失要因により重大事故防止設備がその機能を喪失しないため，上記の重大事故等は発生しない																	
	内部火災	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備は機能喪失するが，地下水位低下設備の機能喪失要因により重大事故防止設備がその機能を喪失しないため，上記の重大事故等は発生しない																	
	内部溢水	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		地下水位低下設備は機能喪失するが，地下水位低下設備の機能喪失要因により重大事故防止設備がその機能を喪失しないため，上記の重大事故等は発生しない																	

凡例△：地下水位低下設備の機能喪失あり，ただし，重大事故は起きない。×：地下水位低下設備の機能喪失あり，かつ，重大事故が起きる。

※：待機中の非常用 DG が起動失敗等の機器の故障により機能喪失することで発生

(3)供用期間中における機能維持に必要な耐性の分析(分析３)

「運転時の異常な過渡変化」,「設計基準事故」又は「重大事故等」が発生した状態で,地下水位低下設備が機能喪失した場合を想定し,事象収束にあたり追加の対策が必要かについて確認する。分析の前提条件と分析結果は以下のとおり。

〈分析３前提条件〉

・運転時の異常な過渡変化等の発生後に,地下水位低下設備が機能喪失する状態及び地下水位低下設備の機能喪失後に,さらに基準地震動Ｓｓ規模の地震が発生する状態に対し分析する。
・地下水位低下設備の全ての構成部位に対し外部事象への設計上の配慮が講じられていない状態を前提とする。

〈分析結果〉

・別紙17-11表に示すとおり,地下水位低下設備は,事象収束に必要な緩和機能を有していないため,事象の収束に直接は影響しない。
・しかしながら,地下水位低下設備の機能喪失により地下水位が上昇している状態で,同時に基準地震動Ｓｓ規模の地震の発生を想定した場合には,建物の安定性等に影響があることから,事象の収束に対する影響の懸念がある。
・このため,地下水位低下設備の各機能喪失要因に対する設計上の配慮を行うことで,「地下水位低下設備の機能喪失により地下水位が上昇した状態で基準地震動Ｓｓ規模の地震が発生する」という状況を回避でき,建物の安定性等が確保されることとなる。

別紙 17-11 表　「運転時の異常な過渡変化」,「設計基準事故」又は「重大事故等」が発生した状態で地下水位低下設備が機能喪失した場合の影響

	運転時の異常な過渡変化											
	原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜き	出力運転中り制御棒の異常な引き抜き	原子炉冷却材流量の部分喪失	原子炉冷却材系の停止ループの誤起動	給水加熱喪矢	原子炉冷却材流量制御系の誤動作	負荷の喪矢	主蒸気隔離弁の誤閉止	給水制御系の故障	原子炉圧力制御系の故障	給水流量の全喪失	外部電源喪失
地下水位低下設備の機能喪失のみの場合	○(影響なし)											
	低下設備は,事象収束に必要な緩和機能を有していないため,事象の収束に影響しない											
地下水位低下設備が機能喪失し地下水位が上昇した状態で地震が発生する場合	×(影響あり)											
	建物の安定性等に影響があることから,事象の収束に対する影響の懸念あり											

	設計基準事故								
	原子炉冷却材喪失	原子炉冷却材流量の喪失	原子炉冷却材ポンプの軸固着	制御棒落下	放射性気体廃棄物処理施設の破損	主蒸気管破断	燃料集合体の落下	可燃性ガスの発生	動荷重の発生
地下水位低下設備の機能喪失のみの場合	○(影響なし)								
	低下設備は,事象収束に必要な緩和機能を有していないため,事象の収束に影響しない								
地下水位低下設備が機能喪失し地下水位が上昇した状態で地震が発生する場合	×(影響あり)								
	建物の安定性等に影響があることから,事象の収束に対する影響の懸念あり								

	重大事故等																
	高圧・低圧注水機能喪失	高圧注水・減圧機能喪失	全交流動力電源喪失	崩壊熱除去機能喪失	原子炉停止機能喪失	LOCA 時注水機能喪失	格納容器バイパス(ISLOCA)	雰囲気圧力・温度による静的負荷(格納容器過圧破損)	高圧溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱	原子炉圧力容器外の溶融燃料/冷却材相互作用	溶融炉心・コンクリート相互作用	水素燃焼	想定事故 1	想定事故 2	崩壊熱除去機能喪失(RHR の故障による停止時冷却機能喪失)	原子炉冷却材の流出	反応度の誤投入	全交流動力電源喪失(停止時)
地下水位低下設備の機能喪失のみの場合	○(影響なし)																
	低下設備は,事象収束に必要な緩和機能を有していないため,事象の収束に影響しない																
地下水位低下設備が機能喪失し地下水位が上昇した状態で地震が発生する場合	×(影響あり)																
	建物の安定性等に影響があることから,事象の収束に対する影響の懸念あり																

2.4　分析結果を踏まえた信頼性向上のための配慮事項

分析１から分析４までの整理を踏まえ,原子力発電所の供用期間の全ての状態において,地下水位低下設備を機能維持する観点から,地下水位低下設備の設計に係る信頼性向上のための配慮事項は以下のとおりとなった。

なお,分析４における具体的なプラント損壊状態と設計上の配慮事項については,大規模損壊に対する対応として別途説明する。

分析１の結果から,地下水位低下設備に対して配慮すべき機能喪失要因が抽出されており,これに対する個々の対策を別紙17-12表のとおり多重化の要否を含め整理した。

別紙17-12表　機能喪失要因とこれを踏まえた設計上の配慮項目

機能	構成部位	機能喪失要因	対策	多重化要否
集水機能	ドレーン	地震	・Ss 機能維持することにより集水機能を確保	×
支持・閉塞防止機能	揚水井戸	地震	・Ss 機能維持することにより支持・閉塞防止機能を確保	×
排水機能	揚水ポンプ	機器故障（継続運転失敗・起動失敗）	・ポンプの多重化による機能維持	○
		地震	・Ss 機能維持することにより揚水ポンプの機能を確保	
		竜巻	・井戸に飛来物影響の防護が可能な蓋を設置	
		落雷	・制御盤への保安器の設置等による避雷対策,又は避雷針の保護範囲内への設置	
		火山	・井戸に対する火山灰の侵入を蓋の設置により防止	
	配管	機器故障（リーク・閉塞）	・配管の多重化による機能維持	○
		地震	・Ss 機能維持	
		竜巻	・井戸に飛来物影響の防護が可能な蓋を設置	
監視・制御機能	制御盤	機器故障（不動作・誤操作）	・多重化により機能維持	○
		地震	・Ss 機能維持	
		台風,竜巻	・屋内設置	
		凍結	・凍結防止装置を設置,又は屋内設置	
		降水	・防水処理,又は屋内設置	
		積雪	・積雪荷重を受けないように屋根等を設置,又は屋内設置	
		落雷	・制御盤への保安器の設置等による避雷対策,又は屋内設置	
		火山	・火山灰の侵入防止措置の実施,又は屋内設置	
		生物学的事象	・止水や貫通部処理による小動物の侵入防止,又は屋内設置	
		森林火災（外部火災）	・火災の影響を受けないよう屋内設置	
		内部火災	・制御盤の分離,離隔距離を確保した配置	
		内部溢水	・共通要因故障に配慮した配置	
	水位計	機器故障（不動作・誤操作）	・多重化による機能維持を図ることとし,片系が機能喪失した場合には設定水位に到達時にもう片系の水位計の検知によりバックアップ	○
		地震	・Ss 機能維持	
		竜巻	・井戸に飛来物影響の防護が可能な蓋を設置	
		落雷	・制御盤への保安器の設置等による避雷対策,又は避雷針の保護範囲内への設置	
		火山	・井戸に対する火山灰の侵入を蓋の設置により防止	
電源機能	電源（非常用 DG）	機器故障（起動失敗）	・機器故障に対しては多重化による機能維持	○

分析１の結果から抽出された個々の機能喪失要因に対する対策(別紙17-12表)を集約し,別紙17-13表のとおり整理した。

別紙17-13表　地下水位低下設備の設計に係る信頼性向上のための配慮事項

機能	構成部位	対策	備考
集水機能	ドレーン	・Ss 機能維持	・Ss 機能維持の確認方法は別紙 17-13 表参照 ・ドレーンに関する信頼性向上は「添付資料１」参照
支持・閉塞防止機能	揚水井戸	・Ss 機能維持 ・蓋の設置	・Ss 機能維持の確認方法は別紙 17-13 表参照
排水機能	揚水ポンプ	・多重化 ・Ss 機能維持	・多重化の概要は別紙 17-12 図参照 ・Ss 機能維持の確認方法は別紙 17-13 表参照
	配管	・多重化 ・Ss 機能維持	・多重化の概要は別紙 17-12 図参照 ・Ss 機能維持の確認方法は別紙 17-13 表参照
監視・制御機能	制御盤	・多重化 ・Ss 機能維持 ・隔離を確保した屋内設置 ・内部事象に起因する共通要因故障に配慮した配置	・多重化の概要は別紙 17-12 図参照 ・Ss 機能維持の確認方法は別紙 17-13 表参照
	水位計	・多重化 ・Ss 機能維持	・多重化の概要は別紙 17-12 図参照 ・Ss 機能維持の確認方法は別紙 17-13 表参照
電源機能	電源 (非常用 DG)	・多重化	・多重化の概要は別紙 17-12 図参照

分析２の結果からは分析１と同様の対策(別紙17-12表)が必要という結果を得た。また,これに加えて,停止時における全交流動力電源喪失への配慮として,常設代替交流電源からの電源供給が可能な設計とする。

分析３の結果からは,分析１と同様の対策(別紙17-12表)が必要という結果を得た。

以上のとおり,分析１から分析３を踏まえ,地下水位低下設備の信頼性向上の観点から対策を講じることとする。

なお,分析４については,分析１から分析３での対策により,設計上の配慮を行うことができる。

また,上記のような信頼性向上の観点からの対策を行ってもなお,地下水位低下設備が機能喪失する状態も考え,復旧用可搬ポンプを用いた機動的な措置について手順等の整備を行う(「4. 運用管理・保守管理上の方針」参照)。

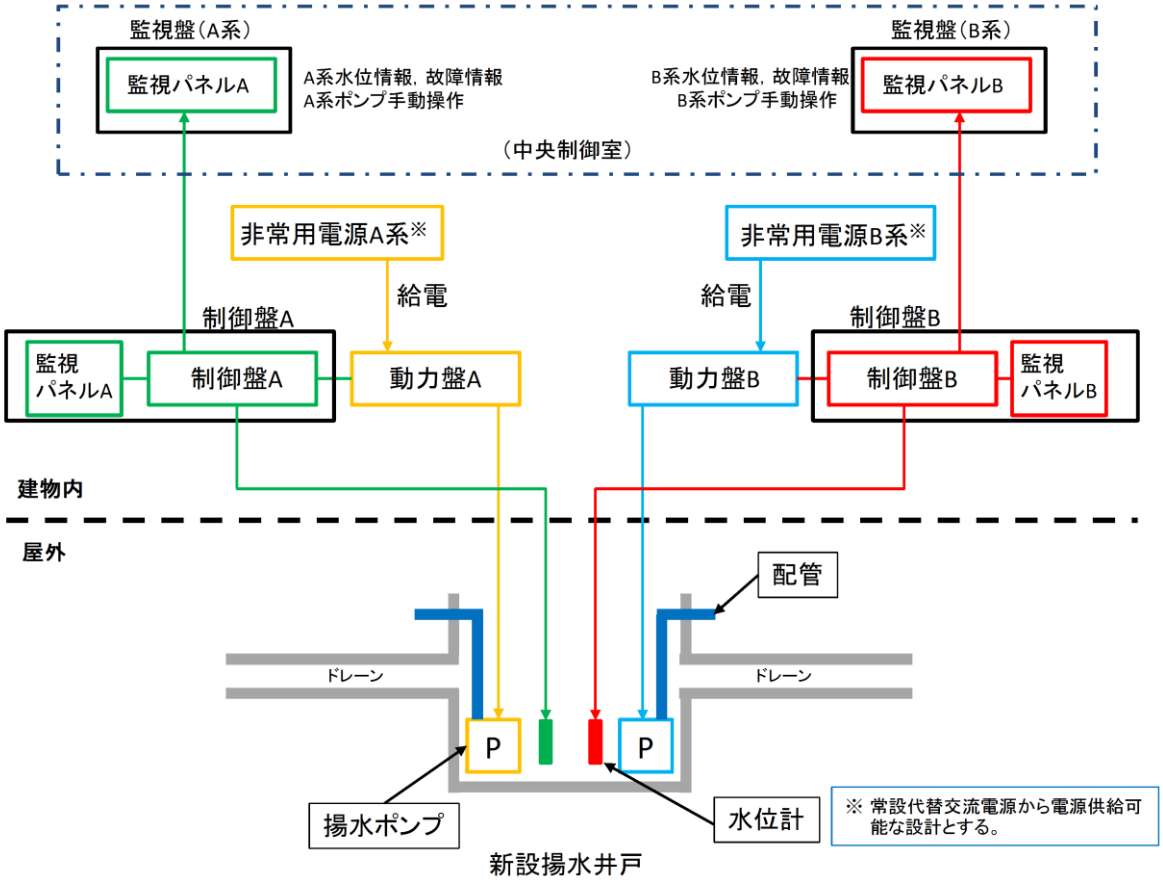
地下水位低下設備の各構成部位におけるＳｓ機能維持の確認方法を別紙17-14表に示す。

別紙17-14表　地下水位低下設備の各構成部位における
Ｓｓ機能維持の確認方法と設計方針

機能	構成部位	Ss機能維持の確認方法	
		分類	具体的な方法
集水機能	ドレーン	解析	・基準地震動 Ss に対し地下水の集水機能を維持する設計とする。
支持・閉塞防止機能	揚水井戸	解析	・基準地震動 Ss に対し機能(揚水ポンプ及び配管の支持機能並びに閉塞防止機能)を維持する設計とする。
排水機能	揚水ポンプ	解析・加振試験	・基準地震動 Ss に対し機能(地下水の排水機能)を維持する設計とする。 ・支持金物は基準地震動 Ss に対し機能(揚水ポンプの支持機能)を維持する設計とする。
	配管	解析	・基準地震動 Ss に対し揚水ポンプで汲み上げた地下水の排水経路を維持する設計とする。 ・支持金物は,基準地震動 Ss に対し機能(配管の支持機能)を維持する設計とする。
監視・制御機能	制御盤	解析・加振試験	・基準地震動 Ss に対し機能(揚水ポンプの制御機能)を維持する設計とする。
	水位計	解析・加振試験	・基準地震動 Ss に対し機能(揚水井戸内に継続的に流入する地下水位監視機能,揚水ポンプの起動停止の制御機能)を維持する設計とする。 ・支持金物は基準地震動 Ss に対し機能(水位計の支持機能)を維持する設計とする。

2.5　監視・制御機能及び電源接続の系統構成

地下水位低下設備の電源系，監視・制御系の系統構成概要を別紙17-15図に示す。井戸における揚水ポンプ，水位計，現場における監視・制御系，中央制御室の監視盤及び非常用電源からの電源供給については信頼性の向上を考慮した設計とする。



別紙17-15図　地下水位低下設備の電源系，監視・制御系の系統構成概要

2.6　信頼性の向上を考慮した設備構成の検討

ここでは，地下水位低下設備の目的，機能及び要求期間を踏まえ，原子炉建物等への影響を鑑み，集水機能（ドレーン等）及び排水機能（揚水ポンプ等）の設備構成を検討する。

なお，検討に当たっては，揚水ポンプの故障を想定することとした。

設備構成の検討においては，第Ⅰ編の整理から地下水位低下設備が機能しない場合の影響として，施設へ作用する揚圧力（設置許可基準規則第４条）及び液状化影響（設置許可基準規則第３条第２項）が抽出されているが，ここでは早期に影響が現れる建物，構築物の揚圧力影響の低減に着目し，地下水位を一定の範囲に保持する地下水位低下設備を設置することとし，集水及び排水機能に係る設備構成の検討を行った。

なお，液状化影響に対しては，地下水位を一定の範囲に保持する地下水位低下設備の機能を考慮した水位より設計地下水位を設定し，液状化，揺すり込み沈下等の周辺地盤の変状を考慮した場合においても機能が損なわれないことを確認し，機能に影響が及ぶ場合は適切な対策を講ずる設計とする。

設備構成の検討に当たっては信頼性確保が重要となることから，添付資料２に示すとおり，施設に対するドレーンの配置から期待範囲を設定し，信頼性の確保に係る３つの観点（耐久性，耐震性，保守管理性）を満たす地下水位低下設備を新設する。また，検討に当たっては，揚水ポンプを多重化することとした。

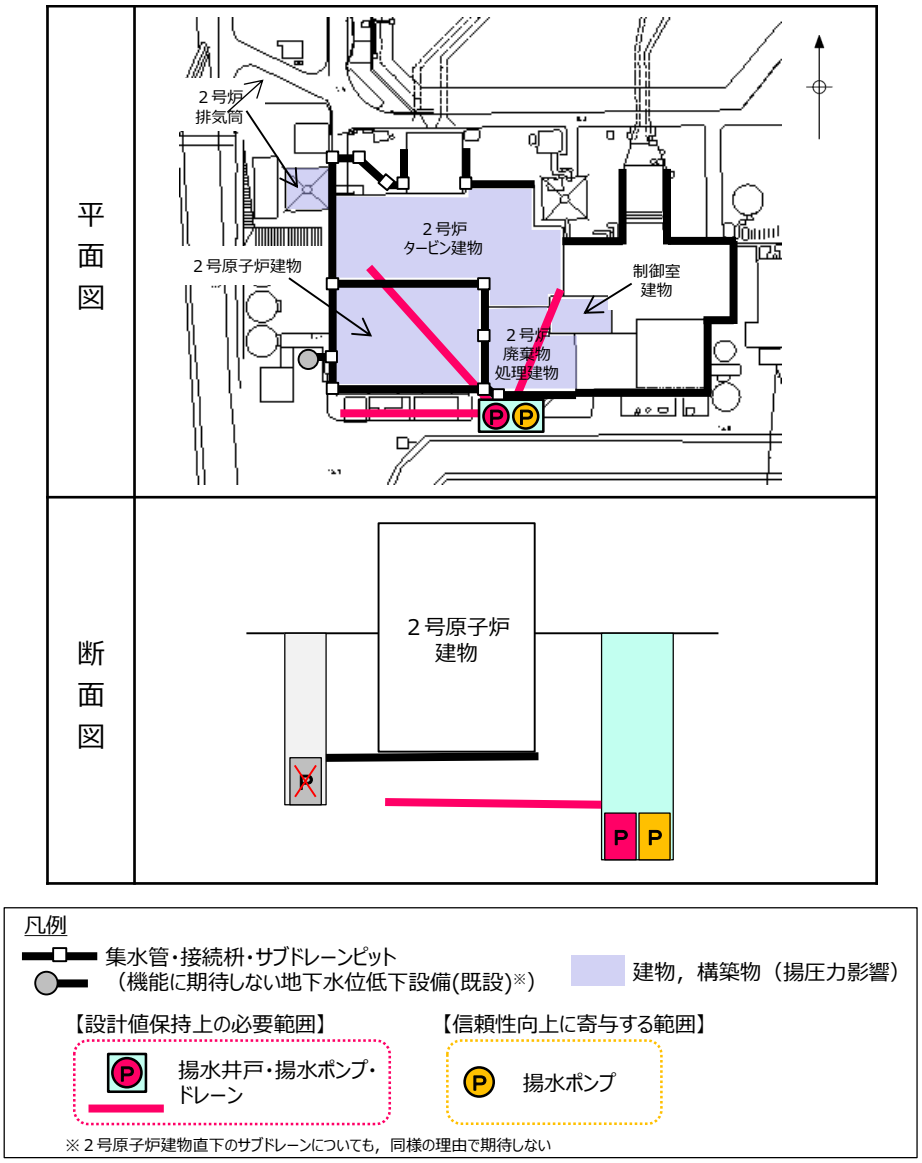
(1) 設備構成概要

主要建物周辺に新たに設置する地下水位低下設備の配置例及び構成例を別紙17-16図に示す。

これは，早期に影響が現れる揚圧力影響（設置許可基準規則第４条）の低減に着目した建物，構築物（原子炉建物，タービン建物，廃棄物処理建物，制御室建物及び排気筒）に対し，設置許可基準規則条文適合上必要な集水及び排水機能の範囲を示したものであり，設計値保持上の必要範囲（■）と，信頼性向上に寄与する範囲（■）にて構成される。

また，揚水ポンプの故障を想定し，同等の排水能力を有する揚水ポンプを設置することにより多重化した。

なお，別紙 17-16 図は揚圧力影響（設置許可基準規則第４条）の低減に着目した設備構成案であるが，液状化，揺すり込み沈下等の周辺地盤の変状を考慮した場合においても機能が損なわれないことを確認し，機能に影響が及ぶ場合は適切な対策を講ずる設計とする。



別紙17-16図　地下水位低下設備の配置例及び構成例

設置許可基準規則第３条第２項及び第４条に係る要求事項に照らし，地下水位低下設備の集水及び排水機能に係る設備構成を検討した。

詳細設計段階においては，設計上の必要範囲が機能する場合の浸透流解析を実施し，設計地下水位を設定する（第Ⅰ編及び添付資料２を参照）。

新設する地下水位低下設備の構造・配置例について補足説明資料７に示す。なお，地下水位低下設備は既設のドレーンより低い位置で集水し，かつ地下水位低下設備（既設）から独立した設備とすることとし，揚水井戸及びドレーンの配置及び構造については詳細設計段階で確定する。

3. 運用管理・保守管理上の方針

(1)運用管理及び保守管理に係る位置付け

地下水位低下設備の運用管理,保守管理に係る事項をＱＭＳ文書に定める。具体的には,運用管理については，必要な手順を整備したうえで管理していく。また,保守管理については予防保全対象として管理していく。

【運用管理の方針(案)】

- ＱＭＳ文書において,地下水位低下設備が動作可能であることを定期的に確認することを定める。
- ＱＭＳ文書において地下水位低下設備の運転管理方法を定める。

〈具体的な対応〉

・地下水位低下設備の運用に係る体制,確認項目・対応等を整備する。

・地下水位低下設備が機能喪失した場合に,復旧用可搬ポンプによる機動的な対応による復旧を行うための手順を定める。

①復旧用可搬ポンプの考え方

地下水位低下設備は,重要安全施設への影響に鑑み,高い信頼性を確保する設計とするものの,それでもなお,動作不能が発生した場合を想定し,復旧用可搬ポンプを配備する。

地下水位低下設備は,常時待機状態の緩和系とは異なり,比較的高い頻度での稼働が必要な設備である。

こうした性質を勘案して,機器の故障が発生しても,復旧用可搬ポンプでの対応が可能となるよう,必要台数を配備する。（別紙17-15表参照）

別紙17-15表　資機材の配備数

項目		配備数
復旧用可搬ポンプ	・揚水ポンプ ・発電機 等	一式

【保守管理の方針(案)】

- 保全計画の策定では,地下水位低下設備を「予防保全」の対象と位置付け管理していく。

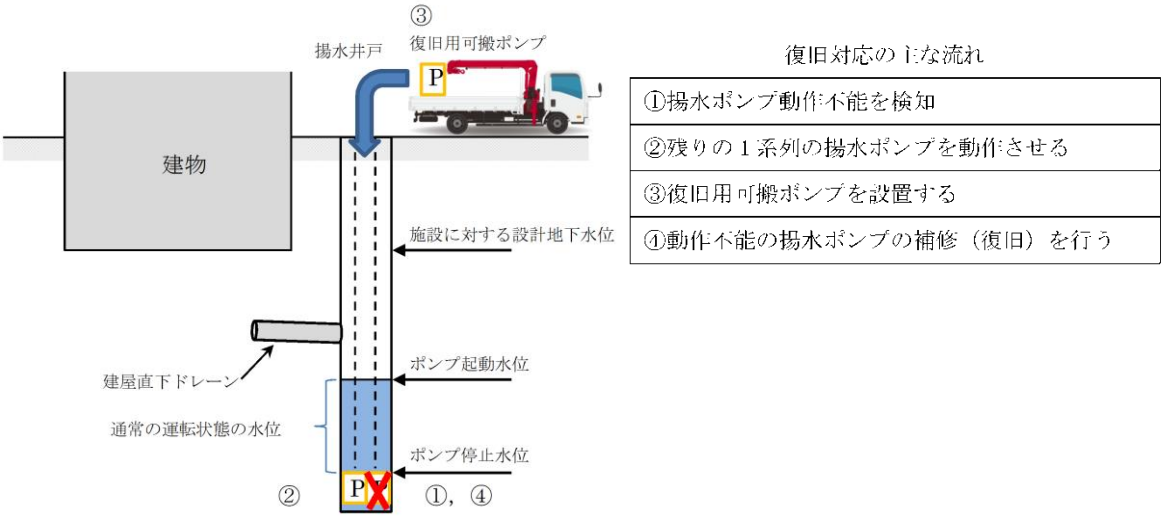
- 機能喪失した場合に備え予め復旧用可搬ポンプを確保したうえで,機能喪失時には原因調査を行い補修する。

(2)復旧対応の具体的な例

揚水ポンプ１系列が動作不能の場合における新たに設置する揚水ポンプの運用例を別紙17-17図に示す。

地下水位低下設備１系列が動作可能であれば,揚水井戸の水位を一定の範囲に保持することが可能であるが,１系列が動作不能の場合は,復旧用可搬ポンプを設置し,動作不能の揚水ポンプの補修(復旧)を行う。

上記により２系列動作可能な状態に復帰する。



別紙17-17図　新たに設置する揚水ポンプの運用例
（揚水ポンプ１系列が動作不能の場合）

(3)地下水位低下設備の具体的な試験又は検査

信頼性向上のため,試験又は検査について以下を考慮する。

・運転中に定期的に試験又は検査ができること。

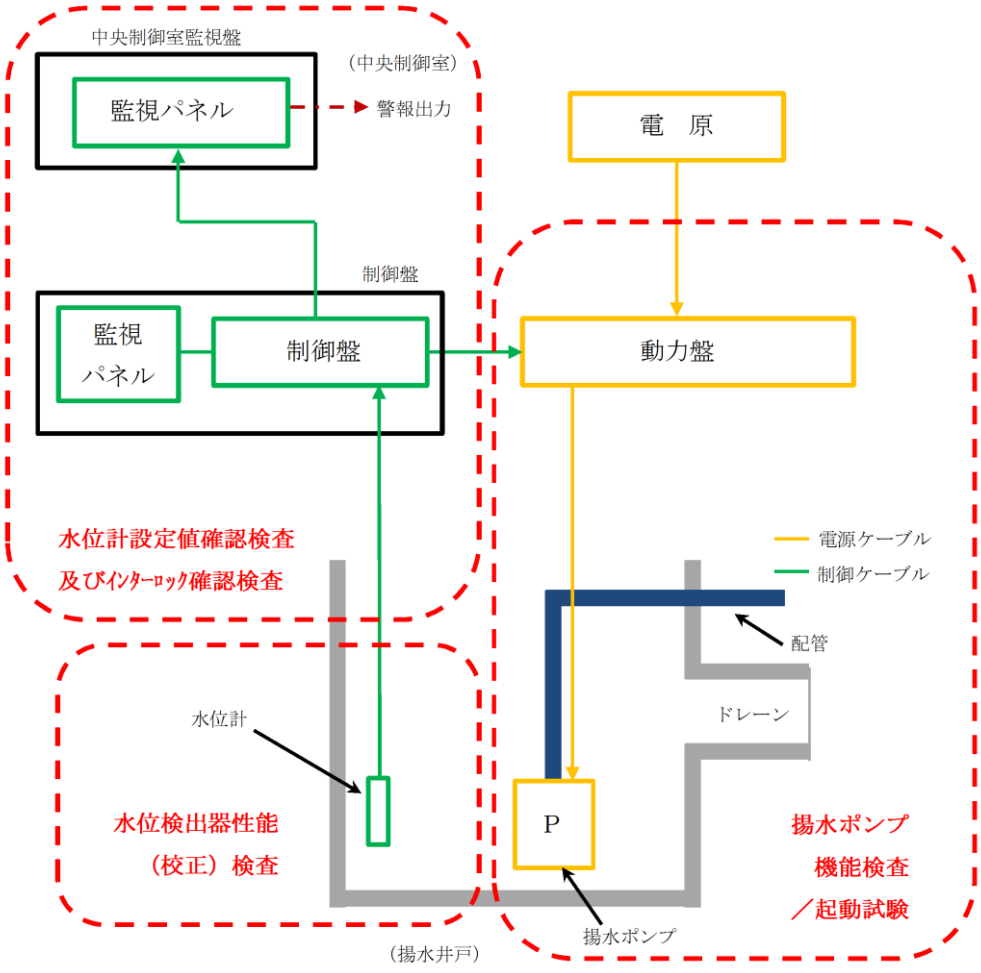
・信頼性向上の配慮により多重化した系統及び機器にあっては、各々が独立して試験又は検査ができること。

これを踏まえて,地下水位低下設備は独立して試験又は検査ができる設計とする。

地下水位低下設備に係る試験又は検査の例を別紙17-16表に,地下水位低下設備の検査項目と範囲を別紙17-18図に示す。

別紙17-16表　地下水位低下設備に係る試験又は検査の例

項目	内容	頻度
水位検出器性能（校正）検査	水位検出器の校正を行い，適切な値が伝送されることを確認する。	定期検査ごと
水位計設定値確認検査及びインターロック確認検査	水位計設定値が適切な値であること，インターロックが作動することを確認する。	定期検査ごと
揚水ポンプ機能検査	インターロックの入力信号によりポンプが起動・停止することを確認する。	定期検査ごと
揚水ポンプ起動試験	揚水ポンプが起動することを確認する。	1回／月
揚水井戸点検	ひび割れ等の変状が発生していないことを確認する。	別途，「島根原子力発電所土木建築関係設備点検手順書」にて定める
ドレーン点検	ドレーンにカメラ等を挿入し，通水面積が保持されていることを確認する。	



別紙17-18図　地下水位低下設備の試験又は検査項目と範囲

4. 信頼性向上の方針のまとめ

地下水位低下設備の設置目的と機能の重要性に鑑み, 設備構成を検討した。

さらに, 地下水位低下設備については, 機能の目的及び機能の維持期間を踏まえ, 信頼性向上に係る対策として地下水位低下設備のＳｓ機能維持及び多重化を行う。それでもなお動作不能が発生した場合を想定し, 復旧用可搬ポンプを用いて復旧を行う多段な対策によりその信頼性向上に努める。

これにより, 原子炉施設に対する炉心損傷又は燃料破損等のリスクの低減を図ることができる。

第Ⅲ編　設置許可段階における構造成立性検討用の地下水位の設定

耐震評価において地下水位の影響を受ける可能性のある施設等について，設置許可段階における構造成立性を確認する場合，第Ⅰ編　別紙 17-5 表「耐震評価において地下水位の影響を受ける可能性のある施設等の地下水位の設定方針」に基づき地下水位を設定する。

なお，地下水位条件については，構造成立性に係る個別の説明資料において，他の設計条件と併せて説明する。

添付資料１

ドレーンの信頼性確保の検討

1. はじめに

集水機能を担うドレーンは，通水面積の減少による機能喪失リスクを考慮する必要がある。設置状況や保守管理性を踏まえ，機能を喪失する可能性のある事象を網羅的に挙げ，それらに対する対応の考え方を整理した。ドレーンの機能喪失要因と対応の考え方を添付1-1表に示す。

ドレーン構造（有孔管）に起因し経時的に状態が変化するモードとして土砂流入が考えられるが，ドレーンは耐久性・耐震性を確保したものを使用すること，有孔部から流入する土砂は非常に緩慢※に堆積することから，管の通水面積の減少による機能喪失リスクはない。さらに，今後予防保全対象として定期的な点検を実施し，点検結果を踏まえた土砂排除を行う計画とする。

土砂流入をはじめとして，機能喪失への影響が想定される全ての事象は，設計（耐久性・耐震性の確保）並びに保守管理により対処し機能維持することが可能である。

添付 1-1 表　ドレーンの機能喪失要因と対応の考え方

機能喪失への影響が想定される事象	設計・保守管理における対応の考え方と取扱い
経年劣化や地震により損傷し，断面形状を保持できなくなる。	耐久性のある材料を採用するとともに，Ss機能維持設計とする。
ドレーンの有効範囲以外からの雨水流入，その他想定以上の雨水流入により，ドレーンの集水能力が不足する。	ドレーンの集水機能の検討に当たっては，ドレーンの有効範囲外等からの雨水流入の可能性を考慮した上で流入量を確認し，必要に応じて設計に反映する。（排水機能にも係る事項であり，ポンプ・配管設計にも反映する）
土砂流入により通水面積が減少し，集・排水機能を喪失する。	十分な余裕を有する断面を有する管径を設定するとともに，定期的な点検，土砂排除を実施する。 有孔部から管内への土砂流入は微量であり，有孔部に対し管径が十分大きく，土砂堆積による通水断面の減少は非常に緩慢※に進行することから，十分な余裕を有する断面をもつことで，機能喪失には至らない。
地盤改良工事等による目詰まり等により集・排水機能を喪失する。	施工時の規制を行う。（施工方法の検討）

※ドレーンは岩盤内に設置しているため，管内への土砂供給が非常に少ない。

2. ドレーンの機能喪失事象への信頼性確保の考え方

前頁に示すドレーンの機能喪失事象の整理より保守管理性の重要性が抽出されたことから，ドレーンの敷設状況等を踏まえた保守管理方針を整理した。ドレーンの保守管理方針を添付1-2表に示す。

保守管理方針の検討においてはドレーンの構造・形状等からドレーン範囲を区分し，点検内容と異常時の対応を整理した。

添付 1-2 表　ドレーンの保守管理方針

区分		構成部位（例）	ドレーンの点検内容		異常時の対応
			手段	点検対象と確認内容	
Ⅰ	カメラ等により部分的に確認可能	φ300mm （流末部）	目視，カメラ等	損傷等の有無，土砂堆積状況等から，通水断面が保持されていることを確認	詳細調査を行い，必要な対策を実施
Ⅱ	流末部※1の断面の確認により確認可能	φ150mm φ300mm （流末部以外）	流末部の断面をⅠにより確認※2	Ⅰより通水断面が保持されていることを確認	Ⅰの範囲と同様の状態にあるものと考え，詳細調査を行い，必要な対策を実施する

※1　流末部とは，揚水井戸とドレーンの取り合い部を表す。

※2　以下に示す理由から，ドレーンは一定の品質が確保され，供用環境も同様と考えられるため，通常時は流末部で外観点検を行うことで異常時の検知が可能である。

a. 施工方法・仕様の共通性：ドレーンは同時期に同一施工体制のもと設置されており，掘削した岩盤内に同様の施工管理基準のもと設置されている。

b. 建設時記録の信頼性：ドレーンは同時期に同一施工体制のもと設置されており，開削により露出した岩盤上に同様の施工管理基準のもと設置されている。

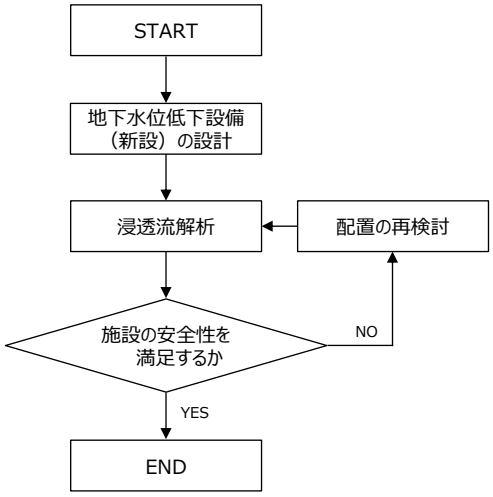
c. 耐久性・耐震性（Ss機能維持）が確保されている。

d. 安定的な使用環境にある。（岩着構造，外力（土被り）の変動が小さい，地下空間のため，紫外線等の劣化要因が少ない，流入する地下水に有害物質が含まれない等）

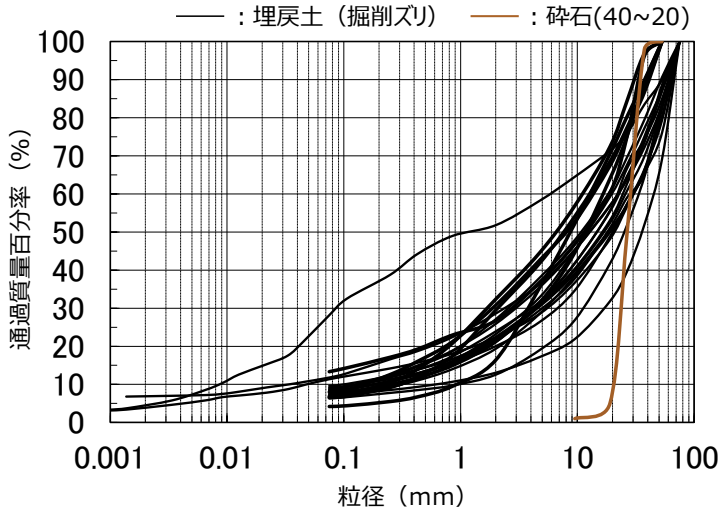
3. 集水機能の信頼性の検討

設計地下水位の算定(浸透流解析)に用いるドレーンは添付1-1図に示すフローに従い，新たなドレーンを設置することで信頼性を確保する。有効範囲設定の考え方は以下のとおりである。

- 既設のドレーン（サブドレーン，集水管及び接続桝）は，岩盤内や構造物に囲まれており，周囲を砕石で埋め戻しているため，機能に期待しない場合においては，砕石相当の透水係数を設定していた。しかしながら，万が一，経年的に周囲の埋戻土からの土砂流入により通水面積の減少が発生した場合，確実に土砂を除去できないため，砕石の間に土砂が流入した状態を仮定し，埋戻土（掘削ズリ）相当の透水係数に見直す。埋戻土（掘削ズリ）及び砕石の粒径加積曲線を添付1-2図に示す。
- 浸透流解析を踏まえ，施設の安全性を確認し，必要な範囲に新設(ドレーン及び揚水井戸)を検討する。



添付 1-1 図　集水機能の検討フロー

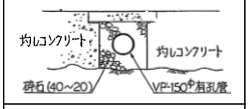
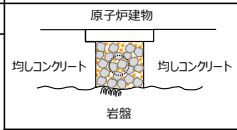
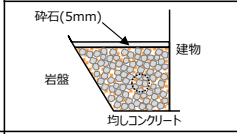
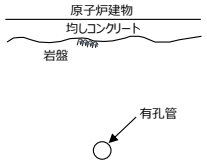


添付1-2図　埋戻土（掘削ズリ）及び砕石の粒径加積曲線

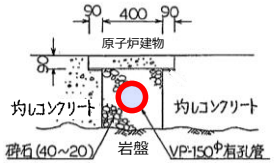
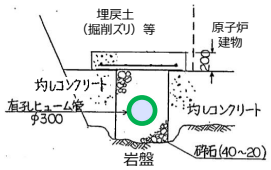
前頁の考え方から，ドレーンの状態に対応したパターンと各観点の評価の見通し，並びに浸透流解析上の取扱いについて添付1-3表に整理した。既設のドレーンは砕石及び土砂が流入して集水機能が低下した状態とする。また，新設のドレーンは，要求機能として通水性を確保するため，信頼性（耐久性・耐震性・保守管理性）を満足するものを設置する。

また，既設のドレーンが基準地震動Ｓｓに対して損傷した際に他の施設に与える波及影響について，添付1-4表のとおり整理した。なお，既設のサブドレーンピットは基準地震動Ｓｓに対して損傷しないことを確認しており，評価結果については詳細設計段階で説明する。

添付 1-3 表　ドレーンの状態に対応したパターンと浸透流解析上の取扱い

ドレーンの種類	各観点に対する評価			浸透流解析上の扱い（：土砂　：砕石（40~20））	
	耐久性	耐震性	保守管理性		
既設（サブドレーン） 	○	△ 既設のドレーンは岩盤や構造物に囲まれた範囲に設置していることから，基準地震動Ssに対して損傷しないと判断しているが，仮に損傷したものとして評価する。	× ・直接的な確認ができない。 ・万が一，土砂による通水面積の減少が発生した場合，確実に土砂を除去できない。		岩盤や構造物に囲まれており，周囲を砕石で埋め戻しているため，機能に期待しない場合においては，砕石相当の透水性を有すると判断していた。しかしながら，万が一，経年的に周囲の埋戻土からの土砂流入により通水面積の減少が発生した場合，確実に土砂を除去できないため，砕石の間に土砂が流入した状態を仮定した透水係数を設定した。
既設（集水管） 					
新設する場合（例）	○	○	○		管の耐久性・耐震性が確保され，構造を確認できることから，大気圧解放状態とする。

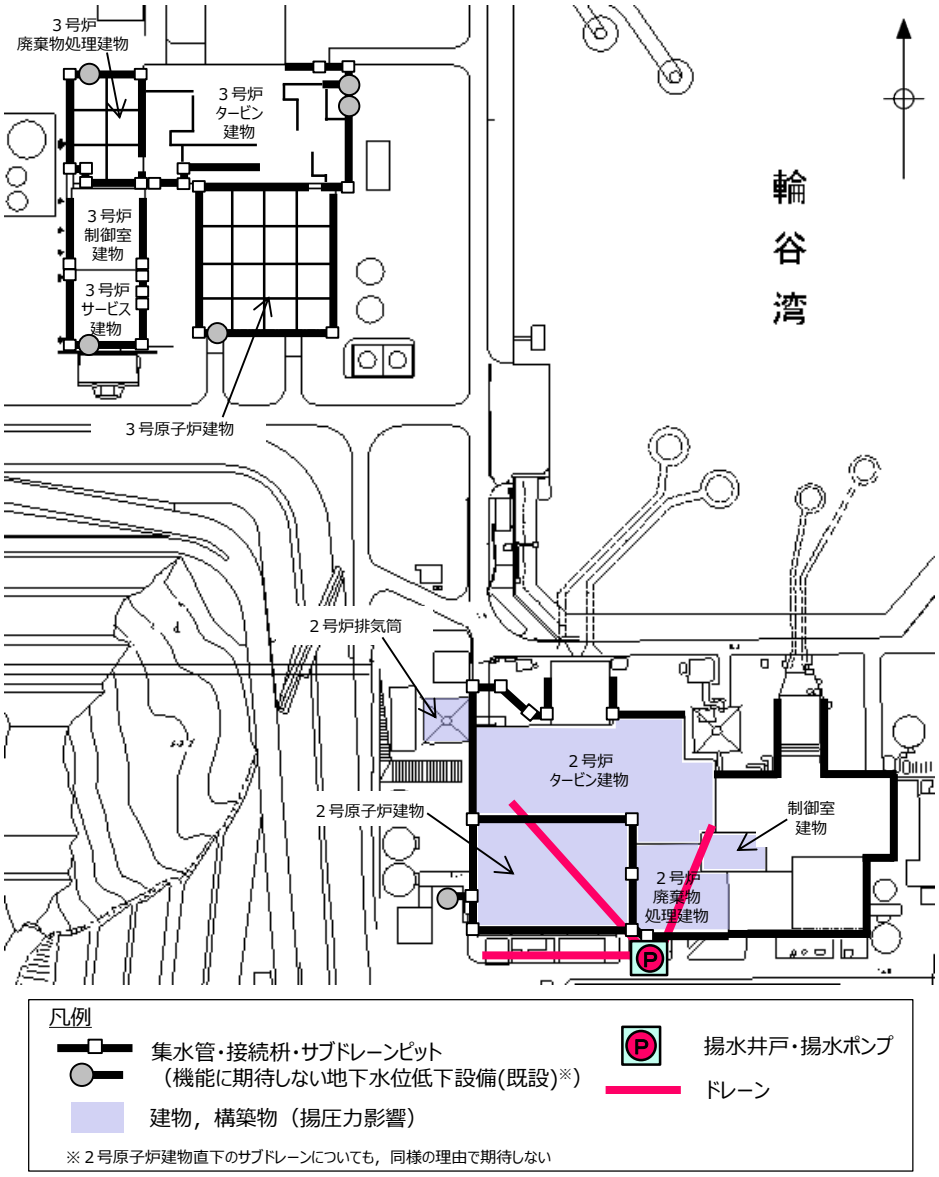
添付 1-4 表　既設のドレーンの波及影響の整理

	構造	損傷時に他の施設に与える波及影響
サブドレーン		原子炉建物直下に設置されており，周囲を岩盤や均しコンクリート，躯体に囲まれているため，基準地震動Ｓｓに対して損傷したとしても，管径が小さいことから，他の施設に波及影響を与えることはない。
集水管※（原子炉建物周辺）		原子炉建物の周囲に設置されており，周囲を岩盤や均しコンクリートで囲まれているため，基準地震動Ｓｓに対して損傷したとしても，管径が小さいことから，他の施設に波及影響を与えることはない。
集水管※（タービン建物，廃棄物処理建物周辺）		タービン建物及び廃棄物処理建物の周囲に設置されており，周囲を岩盤や均しコンクリート，躯体に囲まれているため，基準地震動Ｓｓに対して損傷したとしても，管径が小さいことから，他の施設に波及影響を与えることはない。

※接続杭を含む

添付1-1図に示す集水機能の検討フローに基づく地下水位低下設備の設定例を添付1-3図に示す。ドレーンの点検性への配慮として，カメラの挿入や土砂の除去が容易となるよう，直線状のドレーンとする。

なお，地下水位低下設備（既設）のうち，ドレーンは砕石及び土砂が流入して集水機能が低下した状態，揚水ポンプは稼働しない状態とし，揚水経路としない。



添付 1-3 図　地下水位低下設備の設定例

添付資料２

設置変更許可段階及び工事計画認可以降の提示内容

1. 設置許可基準規則における対応条文への適合の考え方

設置許可基準規則の対応条文のうち，第３条（設計基準対象施設の地盤），第 38 条（重大事故等対処施設の地盤），第４条（地震による損傷の防止）及び第 39 条（重大事故等対処施設/地震による損傷の防止）に対して，基準適合の考え方と設置変更許可申請書への反映箇所，並びに工事計画認可段階における審査項目を整理した。

設置許可基準規則第３条は添付 2-1 表，同第 38 条は添付 2-2 表，同第４条は添付 2-3 表，同第 39 条は添付 2-4 表に，それぞれ基準適合の考え方と設置変更許可申請書への反映箇所，並びに工事計画認可段階における審査項目を示す。

また，設置許可基準規則第３条の規則の解釈を添付 2-5 表，並びに同第４条の規則の解釈を添付 2-6 表及び添付 2-7 表に示す。

添付2-1表　設置許可基準規則に対する基準適合の考え方と工事計画認可段階における提示内容第３条(設計基準対象施設の地盤)

設置許可基準規則		設置許可基準規則の解釈	基準適合の考え方		設置変更許可申請書への反映箇所	詳細設計段階における提示内容
			考え方	必要な設備等		
第三条（設計基準対象施設の地盤）	設計基準対象施設は、次条第二項の規定により算定する地震力（設計基準対象施設のうち、地震の発生によって生ずるおそれがあるその安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度が特に大きいもの（以下「耐震重要施設」という。）及び兼用キャスクにあっては、同条第三項に規定する基準地震動による地震力を含む。）が作用した場合においても当該設計基準対象施設を十分に支持することができる地盤に設けなければならない。ただし、兼用キャスクにあっては、地盤により十分に支持されなくてもその安全機能が損なわれない方法により設けることができるときは、この限りでない。	（添付 3-5 表，主要箇所抜粋） 第３条第１項に規定する「設計基準対象施設を十分に支持することができる」とは、設計基準対象施設について、自重及び運転時の荷重等に加え、耐震重要度分類の各クラスに応じて算定する地震力が作用した場合においても、接地圧に対する十分な支持力を有する設計であることをいう。耐震重要施設については、基準地震動による地震力が作用することによって弱面上のずれ等が発生しないことを含め、基準地震動による地震力に対する支持性能が確保されていることを確認する。	耐震重要施設の基礎地盤 ・基礎地盤の安定性評価の条件として地下水位の設定方法を記載（基準適合はこの条件を用いた安定性評価により確認）	—	添付書類六 -地盤 -地震力に対する基礎地盤の安定性評価（地下水位）	— （設置許可段階で説明） ［地下水位低下設備の耐震性に関する説明書において地盤の支持性能に係る確認結果を記載］
	２ 耐震重要施設及び兼用キャスクは、変形した場合においてもその安全機能が損なわれるおそれがない地盤に設けなければならない。	（主要箇所抜粋） 「変形」とは、地震発生に伴う地殻変動によって生じる支持地盤の傾斜及び撓み並びに地震発生に伴う建物・構築物間の不等沈下、液状化及び揺すり込み沈下等の周辺地盤の変状をいう。	耐震重要施設の周辺地盤 ・耐震重要施設については，液状化，揺すり込み沈下等の周辺地盤の変状を考慮した場合においても，当該施設の安全機能が損なわれるおそれがないように設計する。 ・耐震重要度の設計においては，防波壁下部を地盤改良するために地下水の流れが遮断され地下水位が上昇するおそれがあるという島根サイト固有の状況を踏まえ地下水位低下設備の機能を考慮した水位，自然水位より保守的に設定した水位又は地表面にて設計地下水位を設定する。 ・耐震設計において，地震時における地盤の有効応力の変化に伴う影響を考慮する場合には，有効応力解析等を実施する。有効応力解析に用いる液状化強度特性は，敷地の原地盤における代表性及び網羅性を踏まえた上で保守性を考慮して設定する。	・常設の地下水位低下設備	添付書類六 -地盤 -周辺地盤の変状による施設への影響評価 関連 添付書類八 -安全設計/耐震設計 -耐震重要施設	・耐震性に関する説明書（第四条の審査において確認）
	３ 耐震重要施設及び兼用キャスクは、変位が生ずるおそれがない地盤に設けなければならない。ただし、兼用キャスクにあっては、地盤に変位が生じてもその安全機能が損なわれない方法により設けることができるときは、この限りでない。	（記載を省略）	— （地下水位設定とは関連しない）	—	—	—

添付2-2表　設置許可基準規則に対する基準適合の考え方と工事計画認可段階における提示内容第38条（重大事故等対処施設の地盤）

設置許可基準規則		設置許可基準規則の解釈	基準適合の考え方		設置変更許可申請書への反映箇所	詳細設計段階における提示内容
			考え方	必要な設備等		
第三十八条（重大事故等対処施設の地盤）	重大事故等対処施設は、次に掲げる施設の区分に応じ、それぞれ次に定める地盤に設けなければならない。 一 重大事故防止設備のうち常設のもの（以下「常設重大事故防止設備」という。）であって、耐震重要施設に属する設計基準事故対処設備が有する機能を代替するもの（以下「常設耐震重要重大事故防止設備」という。）が設置される重大事故等対処施設（特定重大事故等対処施設を除く。） 基準地震動による地震力が作用した場合においても当該重大事故等対処施設を十分に支持することができる地盤 二 常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備が設置される重大事故等対処施設（特定重大事故等対処施設を除く。）第四条第二項の規定により算定する地震力が作用した場合においても当該重大事故等対処施設を十分に支持することができる地盤 三 重大事故緩和設備のうち常設のもの（以下「常設重大事故緩和設備」という。）が設置される重大事故等対処施設（特定重大事故等対処施設を除く。）基準地震動による地震力が作用した場合においても当該重大事故等対処施設を十分に支持することができる地盤	1 第３８条の適用に当たっては、本規程別記１に準ずるものとする。 ※別記１：第３条（設計基準対象施設の地盤） 2 第１項第２号に規定する「第４条第２項の規定により算定する地震力」とは、本規程別記２第４条第２項から第４項までにおいて、代替する機能を有する設計基準事故対処設備が属する耐震重要度分類のクラスに適用される地震力と同等のものとする。 3 第１項第４号に規定する「第４条第２項の規定により算定する地震力」とは、本規程別記２第４条第２項第１号の耐震重要度分類のＳクラスに適用される地震力と同等のものとする。	常設重大事故等対処施設の基礎地盤 ・基礎地盤の安定性評価の条件として地下水位の設定方法を記載（基準適合はこの条件を用いた安定性評価により確認）	—	添付書類六 -地盤 -地震力に対する基礎地盤の安定性評価（地下水位）	— （設置許可段階で第三条と併せて説明）
	2 重大事故等対処施設（前項第二号の重大事故等対処施設を除く。次項及び次条第二項において同じ。）は、変形した場合においても重大事故等に対処するために必要な機能が損なわれるおそれがない地盤に設けなければならない。		常設重大事故等対処施設の周辺地盤 ・常設重大事故等対処施設については，液状化，揺すり込み沈下等の周辺地盤の変状を考慮した場合においても，当該施設の安全機能が損なわれるおそれがないように設計する。 ・常設重大事故等対処施設の設計においては，防波壁下部を地盤改良するために海側への地下水の流れが遮断され地下水位が上昇するおそれがあるという島根サイト固有の状況を踏まえ地下水位を一定の範囲に保持する地下水位低下設備の機能を考慮した水位，自然水位より保守的に設定した水位又は地表面にて設計地下水位を設定する。 ・耐震設計において，地震時における地盤の有効応力の変化に伴う影響を考慮する場合には，有効応力解析等を実施する。有効応力解析に用いる液状化強度特性は，敷地の原地盤における代表性及び網羅性を踏まえた上で保守性を考慮して設定する。	・常設の地下水位低下設備	添付書類六 -地盤 -周辺地盤の変状による施設への影響評価 関連 添付書類八 -安全設計/耐震設計 -耐震重要施設	・耐震性に関する説明書（第四条の審査において確認）
	3 重大事故等対処施設は、変位が生ずるおそれがない地盤に設けなければならない。		— （地下水位設定とは関連しない）	—	—	—

添付2-3表　設置許可基準規則に対する基準適合の考え方と工事計画認可段階における提示内容第４条(地震による損傷の防止)

設置許可基準規則		設置許可基準規則の解釈	基準適合の考え方		設置変更許可申請書への反映箇所	詳細設計段階における提示内容
			考え方	必要な設備等		
第四条（地震による損傷の防止）	設計基準対象施設は、地震力に十分に耐えることができるものでなければならない。	(添付 3-6 表，添付 3-7 表，以下主要箇所抜粋) 1 第４条第１項に規定する「地震力に十分に耐える」とは，ある地震力に対して施設全体としておおむね弾性範囲の設計がなされることをいう。	設計基準対象施設 ・設計基準対象施設は，地震力に十分耐えられる設計とする。 ・設計基準対象施設の設計においては，防波壁下部を地盤改良するために海側への地下水の流れが遮断され地下水位が上昇するおそれがあるという島根サイト固有の状況を踏まえ地下水位を一定の範囲に保持する地下水位低下設備の機能を考慮した水位，自然水位より保守的に設定した水位又は地表面にて設計地下水位を設定する。 耐震重要施設 ・耐震重要施設については，揚圧力が作用した場合において，当該施設の安全機能が損なわれるおそれがないように設計する。 あわせて，液状化，揺すり込み沈下等の周辺地盤の変状を考慮した場合においても，当該施設の安全機能が損なわれるおそれがないように設計する。 （第三条第二項をあわせて確認） ・耐震重要施設の設計においては，防波壁下部を地盤改良するために海側への地下水の流れが遮断され地下水位が上昇するおそれがあるという島根サイト固有の状況を踏まえ地下水位を一定の範囲に保持する地下水位低下設備の機能を考慮した水位，自然水位より保守的に設定した水位又は地表面にて設計地下水位を設定する。 ・耐震設計において，地震時における地盤の有効応力の変化に伴う影響を考慮する場合には，有効応力解析等を実施する。有効応力解析に用いる液状化強度特性は，敷地の原地盤における代表性及び網羅性を踏まえた上で保守性を考慮して設定する。 地下水位低下設備 ・地震に対し機能を保持する設計とする。 （Cクラス，Ss 機能維持）	・常設の地下水位低下設備	本文※ 添付書類八 -安全設計 -耐震設計/基本方針 -耐震重要施設 -その他発電用原子炉の付属設備 -地下水位低下設備 関連 添付書類六 -地盤 -周辺地盤の変状による施設への影響評価 ※ 耐震評価において地下水位低下設備の機能に期待することは島根サイト固有の事項であることから，設置目的や役割を本文に記載。	・耐震性に関する説明書（設計地下水位の設定を含む）
	2 前項の地震力は、地震の発生によって生ずるおそれがある設計基準対象施設の安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度に応じて算定しなければならない。	設計基準対象施設は，耐震重要度に応じて，以下のクラス（以下「耐震重要度分類」という。）に分類するもとする。				
	3 耐震重要施設は、その供用中に当該耐震重要施設に大きな影響を及ぼすおそれがある地震による加速度によって作用する地震力（以下「基準地震動による地震力」という。）に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。	一 耐震重要施設のうち，二以外のもの ・基準地震動による地震力に対して，その安全機能が保持できること。 二 津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備並びに浸水防止設備が設置された建物・構築物 ・基準地震動による地震力に対して，それぞれの施設及び設備に要求される機能（津波防護機能，浸水防止機能及び津波監視機能をいう。）が保持できること。				
	4 耐震重要施設は、前項の地震の発生によって生ずるおそれがある斜面の崩壊に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。		— （対象斜面なし）	—	—	—

添付2-4表　設置許可基準規則に対する基準適合の考え方と工事計画認可段階における提示内容第39条(重大事故等対処施設/地震による損傷の防止)

設置許可基準規則		設置許可基準規則の解釈	基準適合の考え方		設置変更許可申請書への反映箇所	詳細設計段階における提示内容
			考え方	必要な設備等		
第三十九条 (重大事故等対処施設/地震による損傷の防止)	重大事故等対処施設は、次に掲げる施設の区分に応じ、それぞれ次に定める要件を満たすものでなければならない。 一 常設耐震重要重大事故防止設備が設置される重大事故等対処施設(特定重大事故等対処施設を除く。) 基準地震動による地震力に対して重大事故に至るおそれがある事故に対処するために必要な機能が損なわれるおそれがないものであること。 二 常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備が設置される重大事故等対処施設(特定重大事故等対処施設を除く。) 第四条第二項の規定により算定する地震力に十分に耐えることができるものであること。 三 常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設(特定重大事故等対処施設を除く。) 基準地震動による地震力に対して重大事故に対処するために必要な機能が損なわれるおそれがないものであること。 四 特定重大事故等対処施設第四条第二項の規定により算定する地震力に十分に耐えることができ、かつ、基準地震動による地震力に対して重大事故等に対処するために必要な機能が損なわれるおそれがないものであること。	1 第３９条の適用に当たっては、本規程別記２に準ずるものとする。 ※別記２・第４条(地震による損傷の防止) 2 第１項第２号に規定する「第４条第２項の規定により算定する地震力」とは、本規程別記２第４条第２項から第４項までにおいて、代替する機能を有する設計基準事故対処設備が属する耐震重要度分類のクラスに適用される地震力と同等のものとする。 3 第１項第４号に規定する「第４条第２項の規定により算定する地震力」とは、本規程別記２第４条第２項第１号の耐震重要度分類のＳクラスに適用される地震力と同等のものとする。	常設重大事故等対処施設 ・常設重大事故等対処施設については，揚圧力が作用した場合において，当該施設の機能が損なわれるおそれがないように設計する。 あわせて，液状化，揺すり込み沈下等の周辺地盤の変状を考慮した場合においても，当該施設の機能が損なわれるおそれがないように設計する。 (第三十八条第二項をあわせて確認) ・常設重大事故等対処施設の設計においては，防波壁下部を地盤改良するために海側への地下水の流れが遮断され地下水位が上昇するおそれがあるという島根サイト固有の状況を踏まえ地下水位を一定の範囲に保持する地下水位低下設備の機能を考慮した水位，自然水位より保守的に設定した水位又は地表面にて設計地下水位を設定する。 ・耐震設計において，地震時における地盤の有効応力の変化に伴う影響を考慮する場合には，有効応力解析等を実施する。有効応力解析に用いる液状化強度特性は，敷地の原地盤における代表性及び網羅性を踏まえた上で保守性を考慮して設定する。 地下水位低下設備※2 ・地震に対し機能を保持する設計とする。 (Ｃクラス，Ss 機能維持) ※２ 地震による損傷の防止は，同一の地盤，地震に対する第４条への適合性を示すことにより確認する。	・常設の地下水位低下設備	本文※1 添付書類八 -設置許可基準規則への適合 -第三十九条 関連 添付書類八 -安全設計 -耐震設計/基本方針 -耐震重要施設 -その他発電用原子炉の付属設備 -地下水位低下設備 添付書類六 -地盤 -周辺地盤の変状による施設への影響評価 ※１ 耐震評価において地下水位低下設備の機能に期待することは島根サイト固有の事項であることから，設置目的や役割を本文に記載。	・耐震性に関する説明書(設計地下水位の設定を含む)
	2 重大事故等対処施設は、第四条第三項の地震の発生によって生ずるおそれがある斜面の崩壊に対して重大事故等に対処するために必要な機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。		― (対象斜面なし)	―	―	―

添付 2-5 表　設置許可基準規則第３条の規則の解釈

設置許可基準規則		設置許可基準規則の解釈
第三条（設計基準対象施設の地盤）	設計基準対象施設は、次条第二項の規定により算定する地震力（設計基準対象施設のうち、地震の発生によって生ずるおそれがあるその安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度が特に大きいもの（以下「耐震重要施設」という。）及び兼用キャスクにあっては、同条第三項に規定する基準地震動による地震力を含む。）が作用した場合においても当該設計基準対象施設を十分に支持することができる地盤に設けなければならない。ただし、兼用キャスクにあっては、地盤により十分に支持されなくてもその安全機能が損なわれない方法により設けることができるときは、この限りでない。	１ 第３条第１項に規定する「設計基準対象施設を十分に支持することができる」とは、設計基準対象施設について、自重及び運転時の荷重等に加え、耐震重要度分類（本規程第４条２の「耐震重要度分類」をいう。以下同じ。）の各クラスに応じて算定する地震力（第３条第１項に規定する「耐震重要施設」（本規程第４条２のＳクラスに属する施設をいう。）にあっては、第４条第３項に規定する「基準地震動による地震力」を含む。）が作用した場合においても、接地圧に対する十分な支持力を有する設計であることをいう。 なお、耐震重要施設については、上記に加え、基準地震動による地震力が作用することによって弱面上のずれ等が発生しないことを含め、基準地震動による地震力に対する支持性能が確保されていることを確認することが含まれる。
	２ 耐震重要施設及び兼用キャスクは、変形した場合においてもその安全機能が損なわれるおそれがない地盤に設けなければならない。	２ 第３条第２項に規定する「変形」とは、地震発生に伴う地殻変動によって生じる支持地盤の傾斜及び撓み並びに地震発生に伴う建物・構築物間の不等沈下、液状化及び揺すり込み沈下等の周辺地盤の変状をいう。 このうち上記の「地震発生に伴う地殻変動によって生じる支持地盤の傾斜及び撓み」については、広域的な地盤の隆起又は沈降によって生じるもののほか、局所的なものを含む。これらのうち、上記の「局所的なもの」については、支持地盤の傾斜及び撓みの安全性への影響が大きいおそれがあるため、特に留意が必要である。
	３ 耐震重要施設及び兼用キャスクは、変位が生ずるおそれがない地盤に設けなければならない。ただし、兼用キャスクにあっては、地盤に変位が生じてもその安全機能が損なわれない方法により設けることができるときは、この限りでない。	３ 第３条第３項に規定する「変位」とは、将来活動する可能性のある断層等が活動することにより、地盤に与えるずれをいう。 また、同項に規定する「変位が生ずるおそれがない地盤に設け」るとは、耐震重要施設が将来活動する可能性のある断層等の露頭がある地盤に設置された場合、その断層等の活動によって安全機能に重大な影響を与えるおそれがあるため、当該施設を将来活動する可能性のある断層等の露頭が無いことを確認した地盤に設置することをいう。 なお、上記の「将来活動する可能性のある断層等」とは、後期更新世以降（約１２～１３万年前以降）の活動が否定できない断層等とする。その認定に当たって、後期更新世（約１２～１３万年前）の地形面又は地層が欠如する等、後期更新世以降の活動性が明確に判断できない場合には、中期更新世以降（約４０万年前以降）まで遡って地形、地質・地質構造及び応力場等を総合的に検討した上で活動性を評価すること。 なお、活動性の評価に当たって、設置面での確認が困難な場合には、当該断層の延長部で確認される断層等の性状等により、安全側に判断すること。 また、「将来活動する可能性のある断層等」には、震源として考慮する活断層のほか、地震活動に伴って永久変位が生じる断層に加え、支持地盤まで変位及び変形が及ぶ地すべり面を含む。

注）「設置許可基準規則の解釈」欄は，炉心内の燃料被覆材及び兼用キャスクに係る条項の記載を省略している。

添付2-6表　設置許可基準規則第４条の規則の解釈（１／２）

設置許可基準規則		設置許可基準規則の解釈
第四条（地震による損傷の防止）	設計基準対象施設は、地震力に十分に耐えることができるものでなければならない。	別記２のとおりとする。ただし、炉心内の燃料被覆材の放射性物質の閉じ込めの機能については以下のとおりとし、兼用キャスク貯蔵施設については別記４のとおりとする。 一 第１項に規定する「地震力に十分に耐える」とは、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に生じるそれぞれの荷重と、弾性設計用地震動による地震力（本規程別記２第４条第４項第１号に規定する弾性設計用地震動による地震力をいう。）又は静的地震力（同項第２号に規定する静的地震力をいい、Ｓクラスに属する機器に対し算定されるものに限る。）のいずれか大きい方の地震力を組み合わせた荷重条件に対して、炉心内の燃料被覆材の応答が全体的におおむね弾性状態に留まることをいう。 二 第５項に規定する「基準地震動による地震力に対して放射性物質の閉じ込めの機能が損なわれるおそれがない」とは、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に生じるそれぞれの荷重と基準地震動による地震力を組み合わせた荷重条件により塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有し、放射性物質の閉じ込めの機能に影響を及ぼさないことをいう。 （別記２） １ 第４条第１項に規定する「地震力に十分に耐える」とは、ある地震力に対して施設全体としておおむね弾性範囲の設計がなされることをいう。この場合、上記の「弾性範囲の設計」とは、施設を弾性体とみなして応力解析を行い、施設各部の応力を許容限界以下に留めることをいう。また、この場合、上記の「許容限界」とは、必ずしも厳密な弾性限界ではなく、局部的に弾性限界を超える場合を容認しつつも施設全体としておおむね弾性範囲に留まり得ることをいう。
	２ 前項の地震力は、地震の発生によって生ずるおそれがある設計基準対象施設の安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度に応じて算定しなければならない。	２ 第４条第２項に規定する「地震の発生によって生ずるおそれがある設計基準対象施設の安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度」とは、地震により発生するおそれがある設計基準対象施設の安全機能の喪失（地震に伴って発生するおそれがある津波及び周辺斜面の崩壊等による安全機能の喪失を含む。）及びそれに続く放射線による公衆への影響を防止する観点から、各施設の安全機能が喪失した場合の影響の相対的な程度（以下「耐震重要度」という。）をいう。設計基準対象施設は、耐震重要度に応じて、以下のクラス（以下「耐震重要度分類」という。）に分類するものとする。 一 Ｓクラス（以下略） 二 Ｂクラス（以下略） 三 Ｃクラス Ｓクラスに属する施設及びＢクラスに属する施設以外の一般産業施設又は公共施設と同等の安全性が要求される施設をいう。 ３ 第４条第１項に規定する「地震力に十分に耐えること」を満たすために、耐震重要度分類の各クラスに属する設計基準対象施設の耐震設計に当たっては、以下の方針によること。 一 Ｓクラス（津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備を除く。）（以下略） 二 Ｂクラス（以下略） 三 Ｃクラス ・静的地震力に対しておおむね弾性状態に留まる範囲で耐えること。 ・建物・構築物については、常時作用している荷重及び運転時に作用する荷重と静的地震力を組み合わせ、その結果発生する応力に対して、建築基準法等の安全上適切と認められる規格及び基準による許容応力度を許容限界とすること。 ・機器・配管系については、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時の荷重と静的地震力を組み合わせ、その結果発生する応力に対して、応答が全体的におおむね弾性状態に留まること。 ４ 第４条第２項に規定する「地震力」の「算定」に当たっては、以下に示す方法によること。（以下略）

注）「設置許可基準規則の解釈」欄は，炉心内の燃料被覆材及び兼用キャスクに係る条項の記載を省略している。

添付2-7表　設置許可基準規則第４条の規則の解釈（２／２）

設置許可基準規則		設置許可基準規則の解釈
第四条（地震による損傷の防止）	３ 耐震重要施設は、その供用中に当該耐震重要施設に大きな影響を及ぼすおそれがある地震による加速度によって作用する地震力（以下「基準地震動による地震力」という。）に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。	５ 第４条第３項に規定する「基準地震動」は、最新の科学的・技術的知見を踏まえ、敷地及び敷地周辺の地質・地質構造、地盤構造並びに地震活動性等の地震学及び地震工学的見地から想定することが適切なものとし、次の方針により策定すること。（以下略） ６ 第４条第３項に規定する「安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない」ことを満たすために、基準地震動に対する設計基準対象施設の設計に当たっては、以下の方針によること。 一 耐震重要施設のうち、二以外のもの ・基準地震動による地震力に対して、その安全機能が保持できること。 ・建物・構築物については、常時作用している荷重及び運転時に作用する荷重と基準地震動による地震力との組合せに対して、当該建物・構築物が構造物全体としての変形能力（終局耐力時の変形）について十分な余裕を有し、建物・構築物の終局耐力に対し妥当な安全余裕を有していること。 ・機器・配管系については、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び事故時に生じるそれぞれの荷重と基準地震動による地震力を組み合わせた荷重条件に対して、その施設に要求される機能を保持すること。なお、上記により求められる荷重により塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有し、その施設に要求される機能に影響を及ぼさないこと。また、動的機器等については、基準地震動による応答に対して、その設備に要求される機能を保持すること。具体的には、実証試験等により確認されている機能維持加速度等を許容限界とすること。 なお、上記の「運転時の異常な過渡変化時及び事故時に生じるそれぞれの荷重」については、地震によって引き起こされるおそれのある事象によって作用する荷重及び地震によって引き起こされるおそれのない事象であっても、いったん事故が発生した場合、長時間継続する事象による荷重は、その事故事象の発生確率、継続時間及び地震動の超過確率の関係を踏まえ、適切な地震力と組み合わせて考慮すること。 二 津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備並びに浸水防止設備が設置された建物・構築物 ・基準地震動による地震力に対して、それぞれの施設及び設備に要求される機能（津波防護機能、浸水防止機能及び津波監視機能をいう。）が保持できること。 ・津波防護施設及び浸水防止設備が設置された建物・構築物は、常時作用している荷重及び運転時に作用する荷重と基準地震動による地震力の組合せに対して、当該施設及び建物・構築物が構造全体として変形能力（終局耐力時の変形）について十分な余裕を有するとともに、その施設に要求される機能（津波防護機能及び浸水防止機能）を保持すること。 ・浸水防止設備及び津波監視設備は、常時作用している荷重及び運転時に作用する荷重等と基準地震動による地震力の組合せに対して、その設備に要求される機能（浸水防止機能及び津波監視機能）を保持すること。 ・これらの荷重組合せに関しては、地震と津波が同時に作用する可能性について検討し、必要に応じて基準地震動による地震力と津波による荷重の組合せを考慮すること。 なお、上記の「終局耐力」とは、構造物に対する荷重を漸次増大した際、構造物の変形又は歪みが著しく増加する状態を構造物の終局状態と考え、この状態に至る限界の最大荷重負荷をいう。 また、耐震重要施設が、耐震重要度分類の下位のクラスに属するものの波及的影響によって、その安全機能を損なわないように設計すること。この波及的影響の評価に当たっては、敷地全体を俯瞰した調査・検討の内容等を含めて、事象選定及び影響評価の結果の妥当性を示すとともに、耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力を適用すること。 なお、上記の「耐震重要施設が、耐震重要度分類の下位のクラスに属するものの波及的影響によって、その安全機能を損なわない」とは、少なくとも次に示す事項について、耐震重要施設の安全機能への影響が無いことを確認すること。 ・設置地盤及び地震応答性状の相違等に起因する相対変位又は不等沈下による影響 ・耐震重要施設と下位のクラスの施設との接続部における相互影響 ・建屋内における下位のクラスの施設の損傷、転倒及び落下等による耐震重要施設への影響 ・建屋外における下位のクラスの施設の損傷、転倒及び落下等による耐震重要施設への影響 ７ 第４条第３項に規定する「基準地震動による地震力」の算定に当たっては、以下に示す方法によること。 ・基準地震動による地震力は、基準地震動を用いて、水平２方向及び鉛直方向について適切に組み合わせたものとして算定すること。なお、建物・構築物と地盤との相互作用、埋込み効果及び周辺地盤の非線形性について、必要に応じて考慮すること。 ・基準地震動による地震力の算定に当たっては、地震応答解析手法の適用性及び適用限界等を考慮の上、適切な解析法を選定するとともに、十分な調査に基づく適切な解析条件を設定すること。 ・地震力の算定過程において建物・構築物の設置位置等で評価される入力地震動については、解放基盤表面からの地震波の伝播特性を適切に考慮するとともに、必要に応じて地盤の非線形応答に関する動的変形特性を考慮すること。また、敷地における観測記録に基づくとともに、最新の科学的・技術的知見を踏まえて、その妥当性が示されていること。
	４ 耐震重要施設は、前項の地震の発生によって生ずるおそれがある斜面の崩壊に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。	８ 第４条第４項は、耐震重要施設の周辺斜面について、基準地震動による地震力を作用させた安定解析を行い、崩壊のおそれがないことを確認するとともに、崩壊のおそれがある場合には、当該部分の除去及び敷地内土木工作物による斜面の保持等の措置を講じることにより、耐震重要施設に影響を及ぼすことがないようにすることをいう。 また、安定解析に当たっては、次の方針によること。 一 安定性の評価対象としては、重要な安全機能を有する設備が内包された建屋及び重要な安全機能を有する屋外設備等に影響を与えるおそれのある斜面とすること。 二 地質・地盤の構造、地盤等級区分、液状化の可能性及び地下水の影響等を考慮して、すべり安全率等により評価すること。 三 評価に用いる地盤モデル、地盤パラメータ及び地震力の設定等は、基礎地盤の支持性能の評価に準じて行うこと。特に地下水の影響に留意すること。

注）「設置許可基準規則の解釈」欄は，炉心内の燃料被覆材及び兼用キャスクに係る条項の記載を省略している。

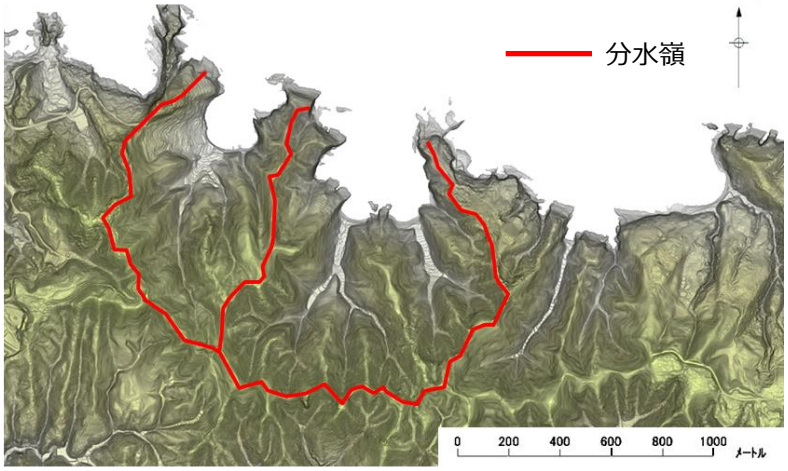
敷地の水文環境

敷地は，北側が海に面し，その他は山地に囲まれている。敷地の地形は，補足 1-1 図及び補足 1-2 図に示すとおり，沿岸低山地と後背山地に大別され，沿岸低山地は標高約 80m 以下の山地で，緩慢な山頂面から海に急傾斜している。また，後背山地は標高約 80～160m の山地で，開折谷が発達しており，中央が扇状に大きく広がっている。

山側に降った雨は，蒸発散分を除き，表面水として敷地へ流入するものと盛土や岩盤内に浸透し地下水として敷地に流入するものに分かれる。

表面水は排水路を通じて海へ排水される、また，地下水は主要建物周辺に設置した地下水位低下設備（既設）により集水後，排水路へ排水される。

主な地表水の流れを補足 1-2 図に示す。



※航空レーザー測量で取得した2mメッシュのＤＥＭデータに，空中写真により取得した旧地形のＤＥＭデータを合成して作成したもの

補足 1-1 図　発電所周辺の分水嶺等の分布状況



補足 1-2 図　発電所周辺の主な地表水の流れ

地下水位の設定に係る浸透流解析における，敷地の地下水位に影響を与える降雨条件について，保守的な評価となるよう検討する。

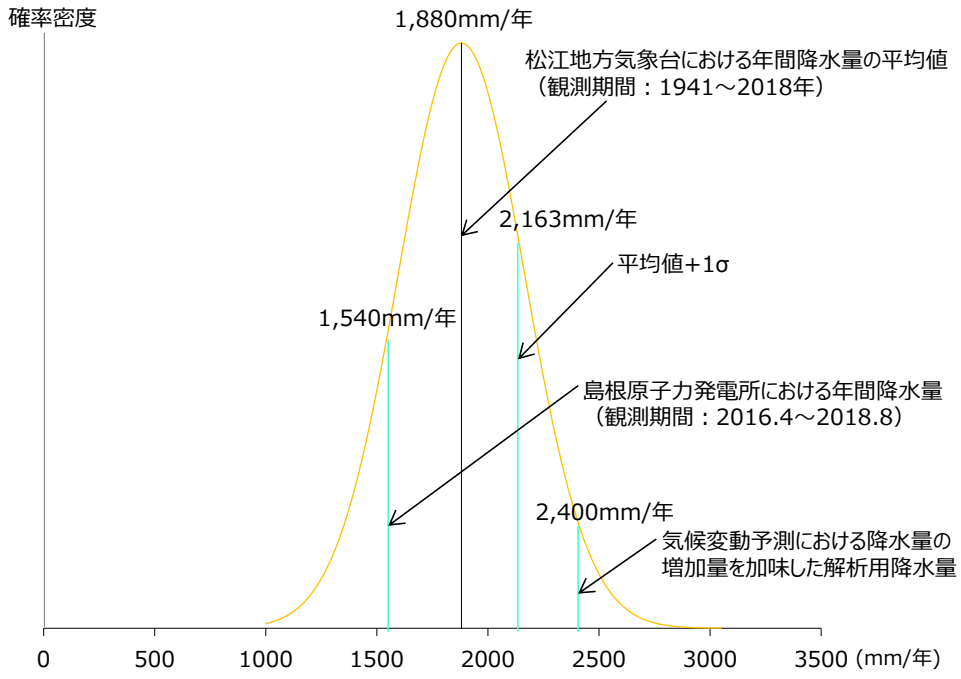
降雨条件については，島根原子力発電所が位置する島根県松江市の気象庁松江地方気象台の過去 78 年間（1941～2018 年）の年間降水量の記録に基づき，年間降水量の平均値及びばらつきを考慮する。この期間における年間降水量の平均値は，1,880mm/年であり，ばらつきを考慮した値（平均値＋１σ）は 2,163mm/年である。

また，気象庁・環境省における今後の気候変動予測に関する分析によると，西日本日本海側において，地球温暖化が深刻に進展したシナリオでは，将来的に（2080～2100 年）年間降水量が約 130mm/年増加する可能性があることが報告されている。

上記を踏まえ，地下水位の設定に係る浸透流解析を実施するに当たっては，降雨条件として，2,400mm/年を用い，定常的に与えることとする。

補足 1-1 表　浸透流解析に用いる降雨条件の考え方

	降水量 （mm/年）
（参考）島根原子力発電所における年間降水量	1,540
松江地方気象台における年間降水量の平均値	1,880
標準偏差	283
平均値+1σ	2,163
将来的な増加量	130
気候変動予測における降水量の増加量を加味した解析用降水量	2,400



補足 1-3 図　松江市の年間降水量の正規分布

建設時工認段階の浸透流解析結果

1. 解析の目的

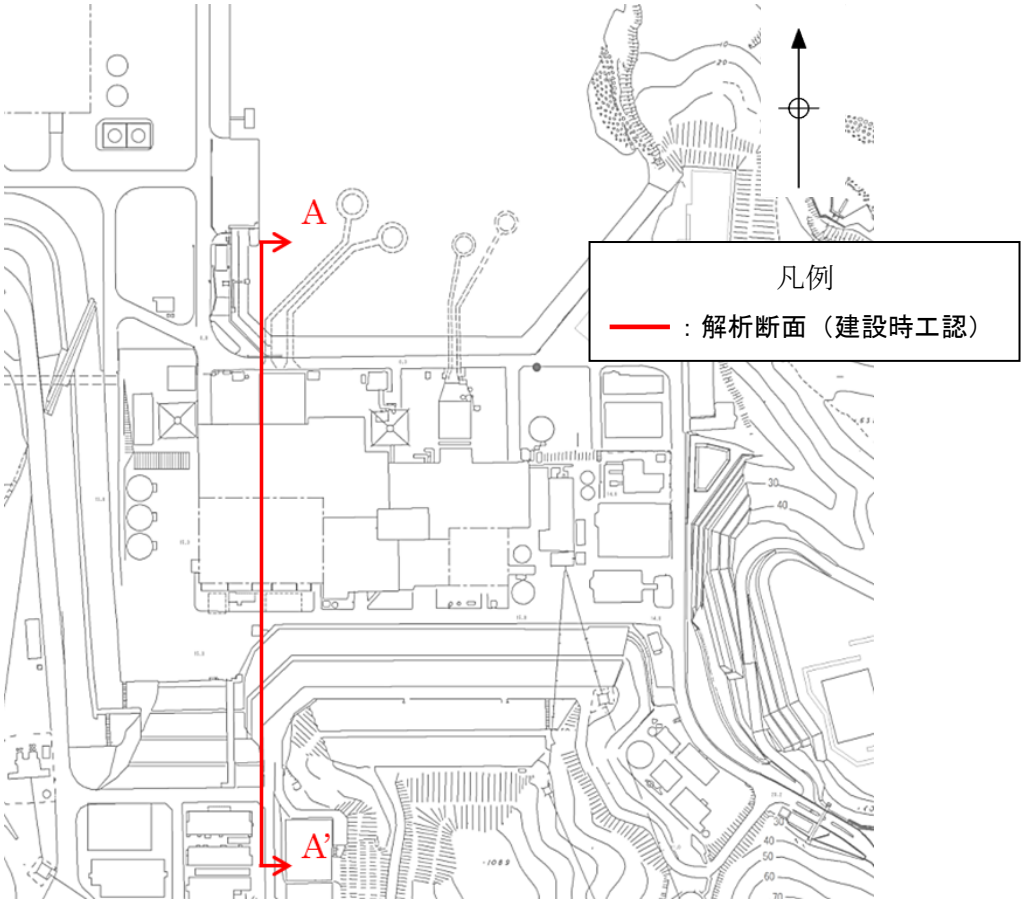
建設時工認において，以下の内容を把握するため，浸透流解析を実施している。

①地下水位低下設備（既設）の設計に使用する湧水量

②建物の設計に使用する揚圧力

③地下水位状況

地下水は海山方向の流れが支配的であることから，海山方向(補足 2-1 図の南北方向)の断面を主とした有限要素法による二次元定常解析としている。



補足 2-1 図　浸透流解析断面位置※

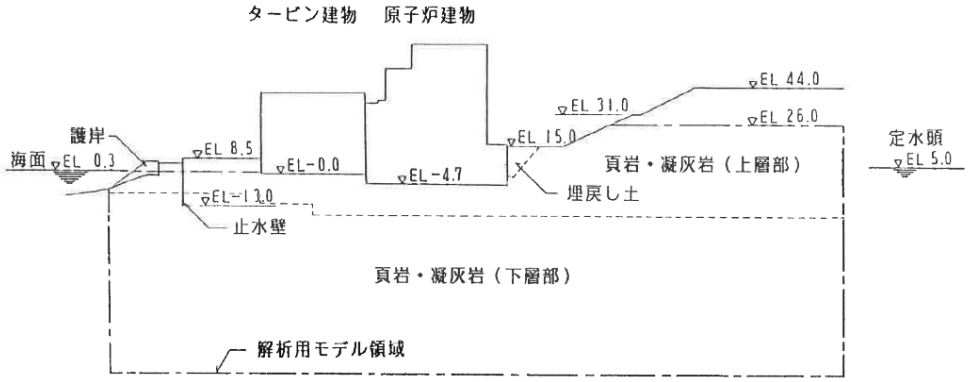
※建設時工認の浸透流解析断面は，当時の地形にてモデル化しており，現地形は異なる

2.解析条件

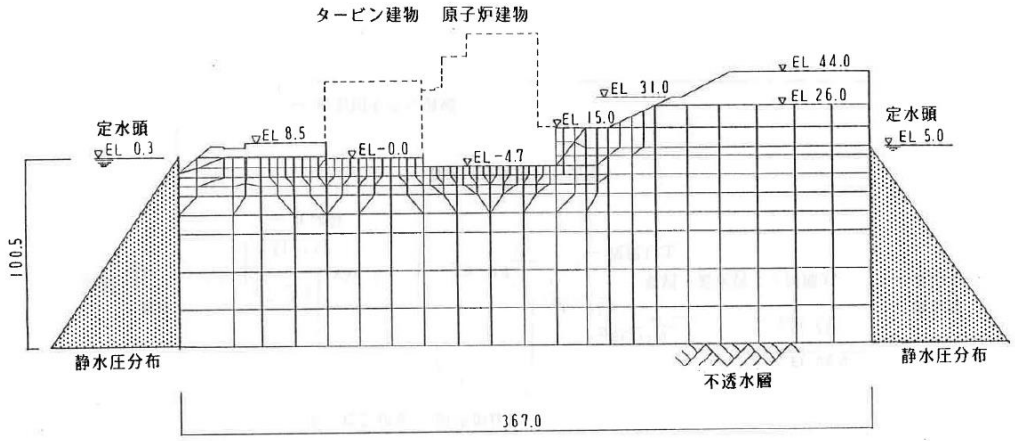
(1)境界条件

建設時工認(定常浸透流解析)の海側境界はEL.＋0.3m（建設時工認のH.W.L.），山側境界はEL.＋5.0mに水位を固定し，モデル下端は不透水境界として扱い，側方境界には静水圧を作用させている。

なお，海側には建物との間に止水壁が設置されており海水の流入を遮断する効果を考慮している。



補足2-2図　建物周辺地盤断面図(A-A'断面)



補足2-3図　浸透流解析用モデル図(A-A'断面)

(2)透水係数

浸透流解析に用いた透水係数を補足 2-1 表に示す。

透水係数は，建設時工認に実施した透水試験等により設定した。

また参考として，今回，浸透流解析を実施するに当たり，建設時工認後に実施した透水試験等に基づき設定した透水係数を補足 2-2 表に示す（詳細については補足説明資料８参照)。

補足 2-1 表　建設時工認の透水係数

材質	透水係数 (cm/s)
護岸・止水壁	1.0×10^{-8}
頁岩・凝灰岩（下層部）	2.0×10^{-4}
頁岩・凝灰岩（上層部）	5.0×10^{-4}
埋戻し土	5.0×10^{-3}

補足 2-2 表　地下水位の設定に係る透水係数

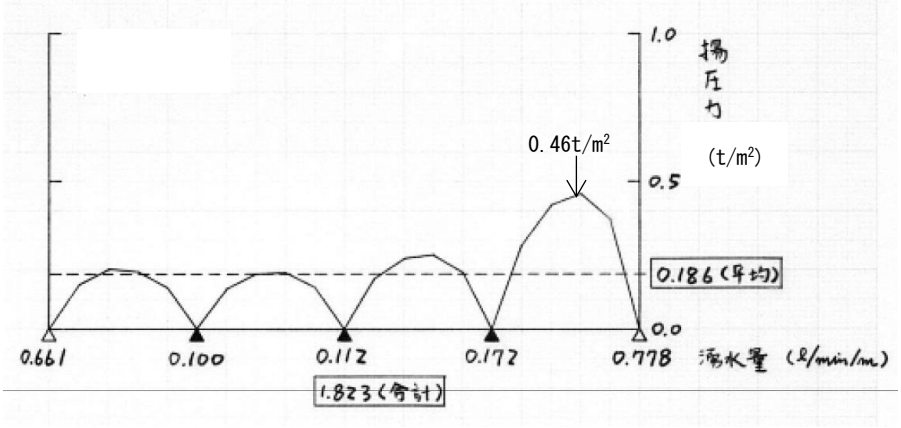
区分	解析用 透水係数 (cm/s)	設定方法	【参考】 試験結果 (cm/s)
構造物，改良地盤	1×10^{-5}	『管理型廃棄物埋立護岸　設計・施工・管理マニュアル(改訂版)※』に基づき，不透水性地層相当（難透水層）として設定した。不透水材料として透水係数が１×10^{-5}cm/s以下であり，適切な厚さを持つことで不透水性地層と同等以上の遮水の効力を発揮できるとされていることから，構造物の透水係数を不透水性地層とした。	－
C_H級	5×10^{-5}	建設時工認の岩盤の透水係数は頁岩・凝灰岩（上層部）及び（下層部）の２種類を設定していたが，今回，３次元浸透流解析を行うに当たり，解析の精度向上を目的として，敷地の岩級に合わせて透水係数を設定する。	4.5×10^{-5}
C_M級	6×10^{-4}		5.6×10^{-4}
C_L級	1×10^{-3}		1.0×10^{-3}
D級	2×10^{-3}	D級岩盤の大部分は地表付近に分布する強風化した土砂状の岩盤であり，その粒度特性を踏まえ，クレーガーの方法により2.8×10^{-4}cm/s（≒3×10^{-4}cm/s)を設定していた。しかし，D級岩盤は割れ目の発達した岩盤と風化の進行した岩盤に大別されるが，粒度試験１２試料のうち割れ目が発達した黒色頁岩は１試料のみであったため，その特性を透水係数に反映できていないと考える。黒色頁岩の粒度試験結果から設定した透水係数により，揚水量が低減する傾向が認められることから，地下水位が高く算定されると判断し，割れ目が発達したD級岩盤の影響を考慮した透水係数2×10^{-3}cm/sを採用する。	1.75×10^{-3}
砂礫層	4×10^{-3}	建設時工認では設定されていなかったが，今回，３次元浸透流解析を行うに当たり，解析の精度向上を目的として現場透水試験を実施し，透水係数を設定した。	3.6×10^{-3}
埋戻土（掘削ズリ）	2×10^{-1}	建設時工認の埋戻し土の透水係数は，工学的な観点から岩盤の透水係数より１オーダー大きな値とすることで地下水位を保守的に評価することに重点を置き，現場透水試験によらず透水係数を設定していた。今回，３次元浸透流解析を行うに当たり，解析の精度向上を目的として現場透水試験を実施し，透水係数を設定した。	1.7×10^{-1}

※ H20.8（財）港湾空間高度化環境研究センター

3.解析結果

(1)原子炉建物の揚圧力及び湧水量

原子炉建物における揚圧力分布を補足 2-4 図に示し,設計値との比較結果を補足 2-3 表に示す。建設時工認において，原子炉建物における揚圧力は，設計値を下回っていることを確認した。



補足 2-4 図　各ドレーンの湧水量及び揚水圧分布図(A-A'断面のうち原子炉建物)

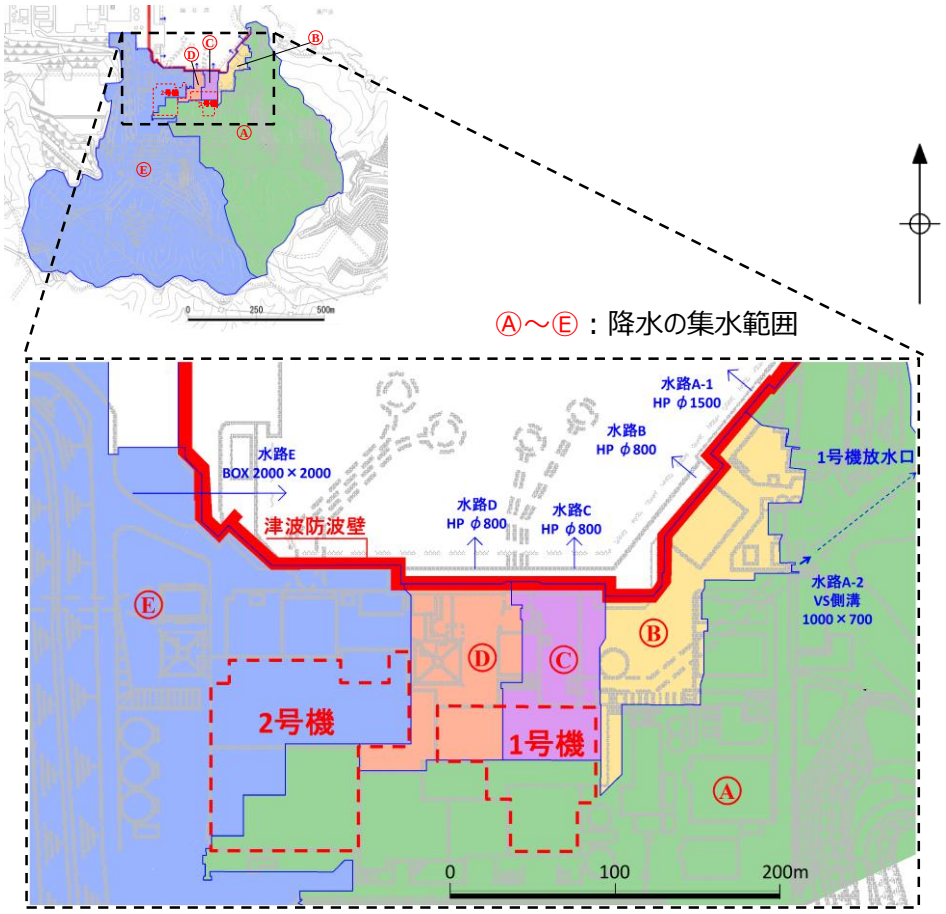
補足 2-3 表　原子炉建物にかかる揚圧力
(設計値及び解析結果)

建物名称	揚圧力 (t/m²)	
	設計値	解析結果
2 号炉原子炉建物	0.8	0.186

構内排水路の概要

発電所の敷地は，発電所敷地内の集水エリアとして補足 3-1 図に示すとおり分水嶺等を境に分割できることから，これに対応して幹線排水路を配置しており，降雨の際の表面水を構内排水路を通じて幹線排水路へ集水し，海へ排水することとしている。

補足 3-1 表に示す幹線排水路の排水能力は，気象庁松江地方気象台（松江市）における既往最大１時間雨量の 77.9㎜/h を考慮しても十分排水可能となるよう設定している。



補足 3-1 図　発電所敷地内の集水エリア

補足 3-1 表　幹線排水路の仕様と排水能力（降雨強度 77.9㎜/h）

水路	集水面積 (ha)	雨水流出量 Q （m^3/s）	排水設備	排水量 Q’ （m^3/s）	安全率 （Q’/Q）
A-1	21.03	5.40	ﾋｭｰﾑ管 φ1500	6.23	1.49
A-2			VS 側溝 B=1000,H=700	1.84	
B	1.01	0.22	ﾋｭｰﾑ管 φ800	2.41	10.95
C	0.55	0.12	ﾋｭｰﾑ管 φ800	2.41	20.08
D	0.69	0.15	ﾋｭｰﾑ管 φ800	2.41	16.07
E	41.06	7.55	BOX2000×2000	16.44	2.18

三次元浸透流解析による３号炉北側防波壁周辺の地盤改良後の影響確認

防波壁周辺の地盤改良完了後において，保主的に地下水位低下設備（既設）の機能に期待しない予測解析（Case２）を実施し，再現解析（Case１）の結果と比較することにより，現状と将来の地下水位の変化について確認を行う。

1. ３号炉北側防波壁周辺の地盤改良による影響

(1)解析条件等

a. 領域とモデル化範囲

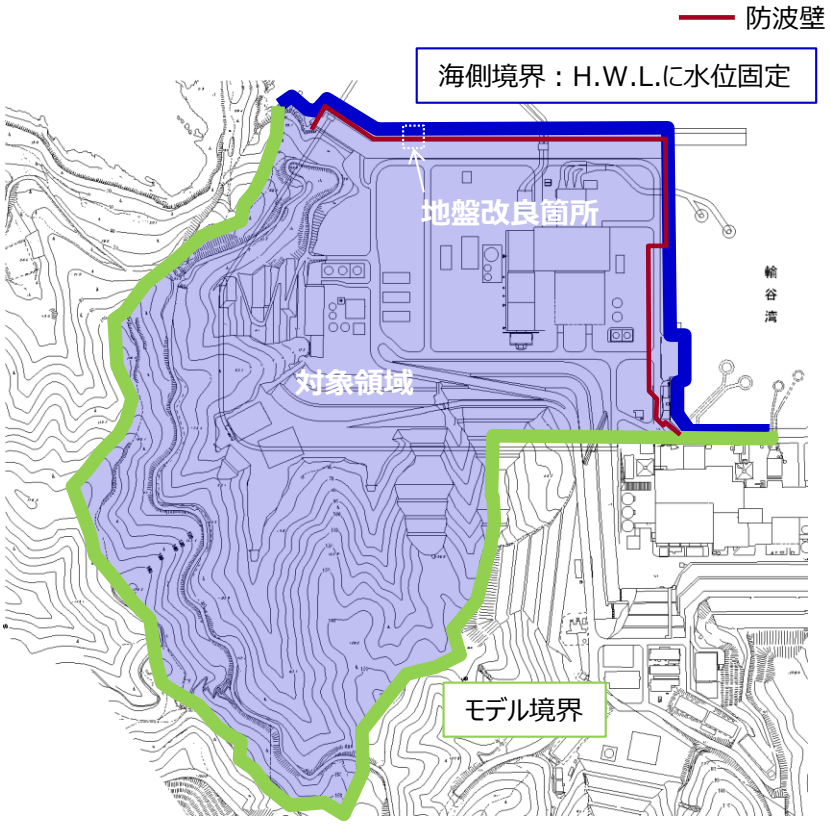
再現解析を実施した期間において，防波壁周辺の地盤改良工事が完了していない３号炉エリアを対象とし，敷地境界の分水嶺から防波壁までを解析領域とする。

領域内の構造物※，地下水位低下設備（既設）をモデル化する。

３号炉北側防波壁周辺の状態は，防波壁周辺の地盤改良完了前とする。

三次元浸透流解析の範囲等を補足 4-1 図に示す。

※耐震裕度向上等の目的で実施した地盤改良等は，難透水層としてモデル化する。



補足 4-1 図　三次元浸透流解析の範囲等

b. 透水係数

透水係数は，補足 4-1 表に示すとおり，透水試験の結果等に基づき設定する。

補足 4-1 表　浸透流解析に係る透水係数設定値一覧

区分	透水係数 (cm/s)
C_H級	5×10^{-5}
C_M級	6×10^{-4}
C_L級	1×10^{-3}
D級	2×10^{-3}
砂礫層	4×10^{-3}
埋戻土（掘削ズリ）	2×10^{-1}
構造物，改良地盤	1×10^{-5}

c. 解析条件

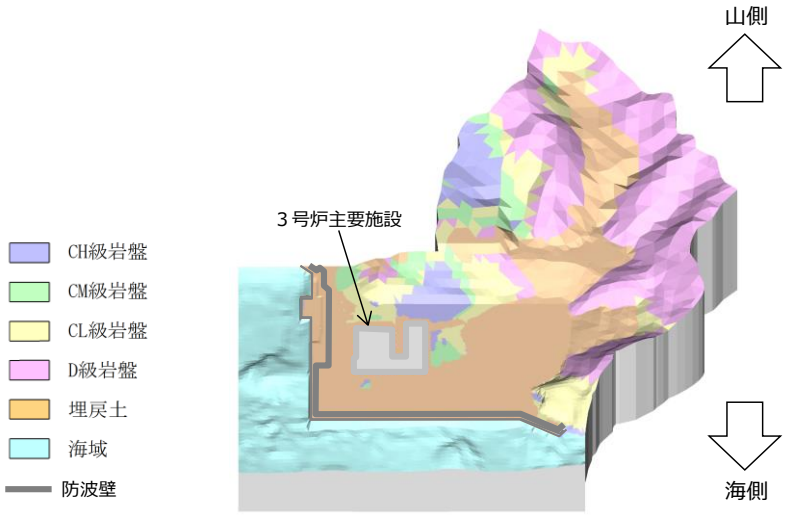
解析条件は，補足 4-2 表のとおりとする。

補足 4-2 表　解析条件一覧

	Case1（再現解析）	Case2（予測解析）
解析モデル	地盤改良前	地盤改良後
降雨条件	1,540mm/年 （発電所，年平均降雨）	2,400mm/年
海側境界	H.W.L.に水位固定	同左
地下水位低下設備（既設）の状態	稼働	非稼働
透水係数	補足4-1表のとおり	同左

(2) 解析モデル

解析モデルの概要を補足 4-2 図に示す。地盤改良完了前モデル及び地盤改良完了後モデルの違いは防波壁周辺の地盤改良の有無のみであり，他の条件は同一である。



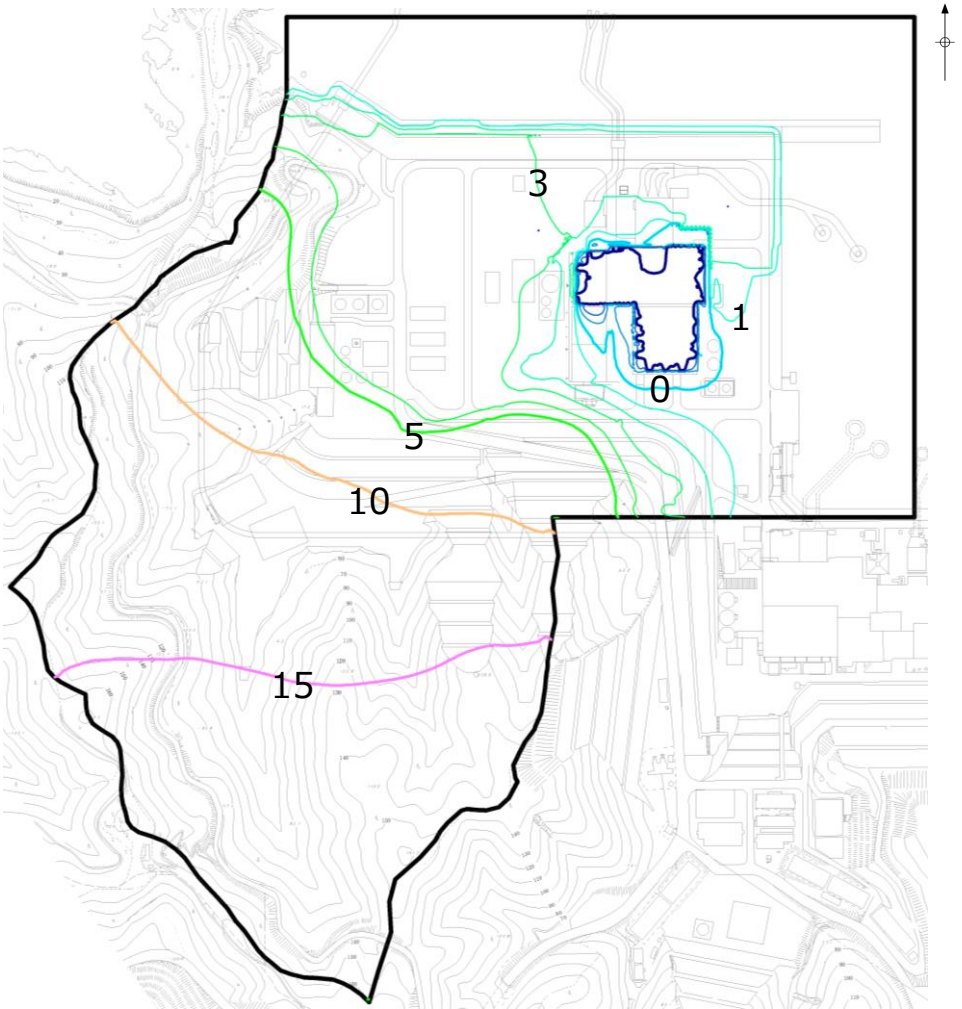
補足 4-2 図　解析モデルの概要

a. Case１（再現解析：地盤改良完了前）

３号炉北側防波壁周辺の地盤改良完了前における地下水位のコンター図を補足4-3図に示す。

これによると，解析領域境界（山側）より３号炉建物に向かって地下水位は緩やかに下降しており，地下水位低下設備（既設）による水位低下効果が確認できる。

地下水位観測記録によると，３号炉北側防波壁近傍において，地下水位は概ねEL.＋１～３m で推移している。地下水位の上昇要因は，防波壁の設置及び周辺の地盤改良並びに降雨が考えられ，一方で，下降要因として，地下水位低下設備（既設）による水位低減効果が考えられる。これらの地下水位上昇・下降要因が釣り合うことにより，地下水位が平衡状態に保持されていると考えられる。



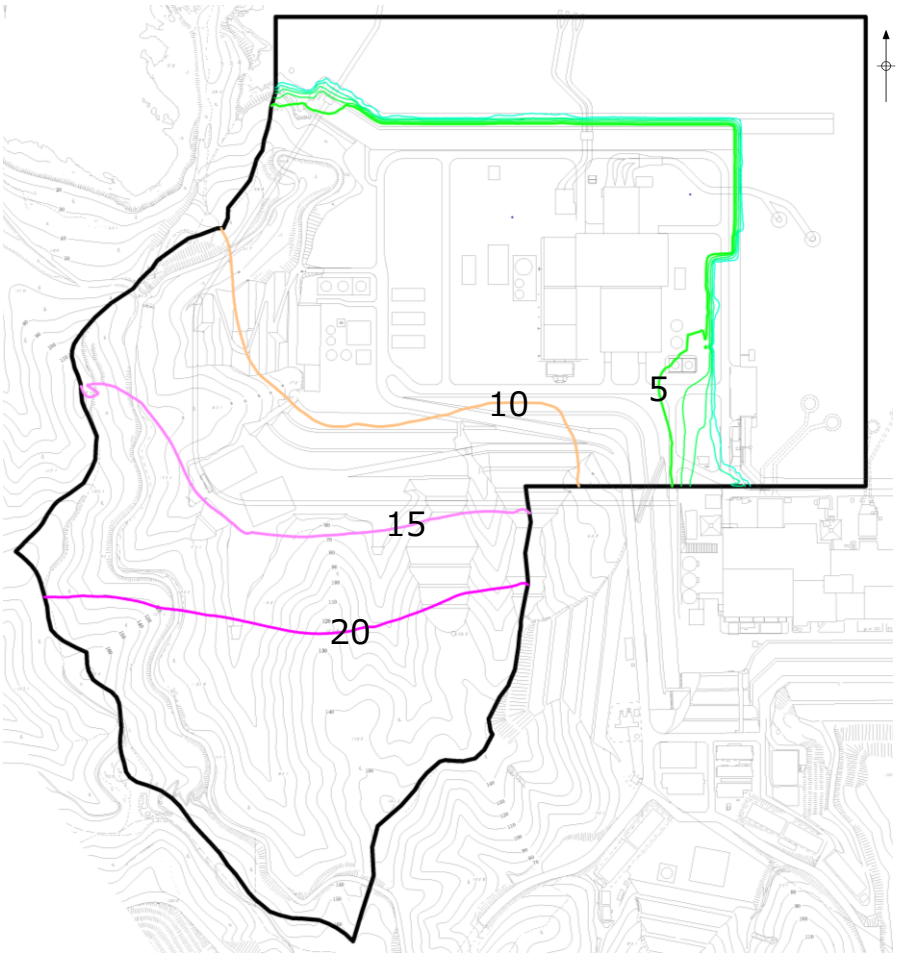
補足 4-3 図　三次元浸透流解析結果(定常状態・地盤改良完了前モデル)

b. Case２（予測解析：地盤改良完了後）

３号炉北側防波壁周辺の地盤改良完了後における地下水位のコンター図を補足4-4図に示す。

２号設置変更許可申請では，３号炉建物周辺の地下水位低下設備（既設）の機能に期待しないため，地下水位低下設備（既設）を保守的に考慮しない。また，降雨条件として，気象庁松江地方気象台における年間降水量にばらつきを考慮した値（平均値＋１σ）に，今後の気候変動予測による降水量の変化を加味し，降水量を設定した。

防波壁近傍において，地下水位は概ねEL.＋５m程度であり，地表面まで上昇しないことを確認した。



補足4-4図　三次元浸透流解析結果(定常状態・地盤改良完了後モデル)

2. 地下水位低下設備（既設）が機能しない場合の地下水位分布

地下水位低下設備（既設）が機能しない状態が継続した場合の定常的な地下水位分布を予測した浸透流解析の結果を補足 4-5 図に示す。

浸透流解析における降水量の設定条件として，気象庁松江地方気象台における年間降水量にばらつきを考慮した値（平均値＋１σ）に，今後の気候変動予測による降水量の変化を加味し，降水量を設定する。海域は H.W.L. に静水圧固定境界を設定した。また，透水係数は再現解析で保守性が確認された値とした。

防波壁周辺の地盤改良により敷地内から海側への排水経路が遮断されることから，敷地内に流入した地下水が滞留し，この結果，地下水位が上昇する。

なお，難透水層である防波壁及び防波壁下部の地盤改良を介して，敷地内と海域の水位がバランスしており，敷地の山側から海側に向かう流動場が形成されることを確認した。



１，２号炉エリア　　３号炉エリア

補足 4-5 図　地下水位低下設備（既設）が機能しない場合の
地下水位分布算定結果

3. 地下水位低下設備（既設）が機能しない場合の影響

耐震評価において地下水位の影響を受ける可能性のある施設等について，設置許可基準規則の該当条項及び審査区分と，地下水位が上昇した場合の常時及び地震時の影響を評価した（既工認の設計における地下水位との相対比較による）。

補足 4-3 表　地下水位低下設備（既設）の機能に期待しない場合の影響及び設置許可基準規則の該当条項
（基礎地盤・周辺斜面，建物，構築物）

対象施設	設置許可基準規則			適合性審査において地下水位低下設備（既設）の機能に期待しない場合の影響及び設置許可基準規則の該当条項		（参考）既設置許可における地下水位の扱い	
	3条 38条	4条4項 39条2項	43条	常時	地震時 すべり安定性への影響	設計地下水位	設計への反映事項
基礎地盤・周辺斜面※1	○ （基礎地盤）	○ （周辺斜面）	○ （周辺斜面）	—	地表面※2に設定しているため影響なし	原子炉基礎地盤の地下水位をEL0mに設定	－

施設等	耐震クラス 検討用地震動	設置許可基準規則※7	適合性審査において地下水位低下設備（既設）の機能に期待しない場合の影響及び設置許可基準規則の該当条項			（参考）建設時工認等の設計における地下水位の扱い	
			常時	地震時		設計用揚圧力	設計への反映事項
				液状化影響（周辺地盤）※7	揚圧力影響※7		
原子炉建物 （直接基礎）	S※3	4条(３条2項), 39条(38条2項)	影響小	地下外壁の設計では，地下水位が低下している状態として地下水圧を考慮していないため，基礎スラブ上面レベルを上回る地下水位となった場合には，地下水圧が上昇し，躯体の耐震性に影響が生じる可能性がある。 [4条(３条2項),39条(38条2項)]	設計地下水位（設計用揚圧力）を上回る場合には，基礎スラブの耐震性（間接支持機能）を確保できない可能性がある。 [4条,39条]	揚圧力0.8t/m^2 建物基礎底面 EL-4.7m	地下水位低下設備（既設）の機能を見込んだ地下水位を考慮して耐震評価を実施
タービン建物 （直接基礎）	B※4 (Ss)	4条(３条2項), 39条(38条2項)	影響小			揚圧力2.0t/m^2 建物基礎底面 EL0.0m	地下水位低下設備（既設）の機能を見込んだ地下水位を考慮して耐震評価を実施
廃棄物処理建物 （直接基礎）	B※4 (Ss)	4条(３条2項), 39条(38条2項)	影響小			揚圧力2.0t/m^2 建物基礎底面 EL0.0m	地下水位低下設備（既設）の機能を見込んだ地下水位を考慮して耐震評価を実施
制御室建物 （直接基礎）	S※5	4条(３条2項), 39条(38条2項)	影響小			揚圧力0.0t/m^2 建物基礎底面 EL+0.1m	地下水位低下設備（既設）の機能を見込んだ地下水位を考慮して耐震評価を実施
排気筒 （直接基礎）	S※6 C※4 (Ss)	4条(３条2項), 39条(38条2項)	影響小	設計地下水位を上回る地下水位に対して，排気筒の耐震性に影響が生じる可能性がある。 [4条(３条2項),39条(38条2項)]	設計地下水位（設計用揚圧力）を上回る地下水位に対して，排気筒基礎の耐震性（間接支持機能）を確保できない可能性がある。[4条,39条]	揚圧力0.0t/m^2 排気筒基礎底面 EL+2.0m	地下水位低下設備（既設）の機能を見込んだ地下水位を考慮して耐震評価を実施

※１　基礎地盤・周辺斜面の評価は設置許可段階において実施。
※２　原子炉建物基礎地盤の安定性評価における地下水位設定については，原子炉建物及びタービン建物の地下水位は基礎上面とし，取水槽及び周辺地盤の地下水位は保守的な評価として地表面に設定。（添付資料６）
※３　原子炉棟のみ耐震Sクラス。それ以外については，耐震Sクラス設備等の間接支持構造物。
※４　耐震Sクラス設備等の間接支持構造物。
※５　中央制御室遮蔽のみ耐震Sクラス。それ以外については，耐震Sクラス設備等の間接支持構造物。
※６　排気筒（非常用ガス処理系用）のみ耐震Sクラス。
※７　A条(B条)の表示は，A条の適合確認をもってB条の適合確認が合わせて可能であることを示す。

補足 4-3 表　地下水位低下設備（既設）の機能に期待しない場合の影響及び設置許可基準規則の該当条項
（屋外重要土木構造物，津波防護施設，重大事故等対処施設）

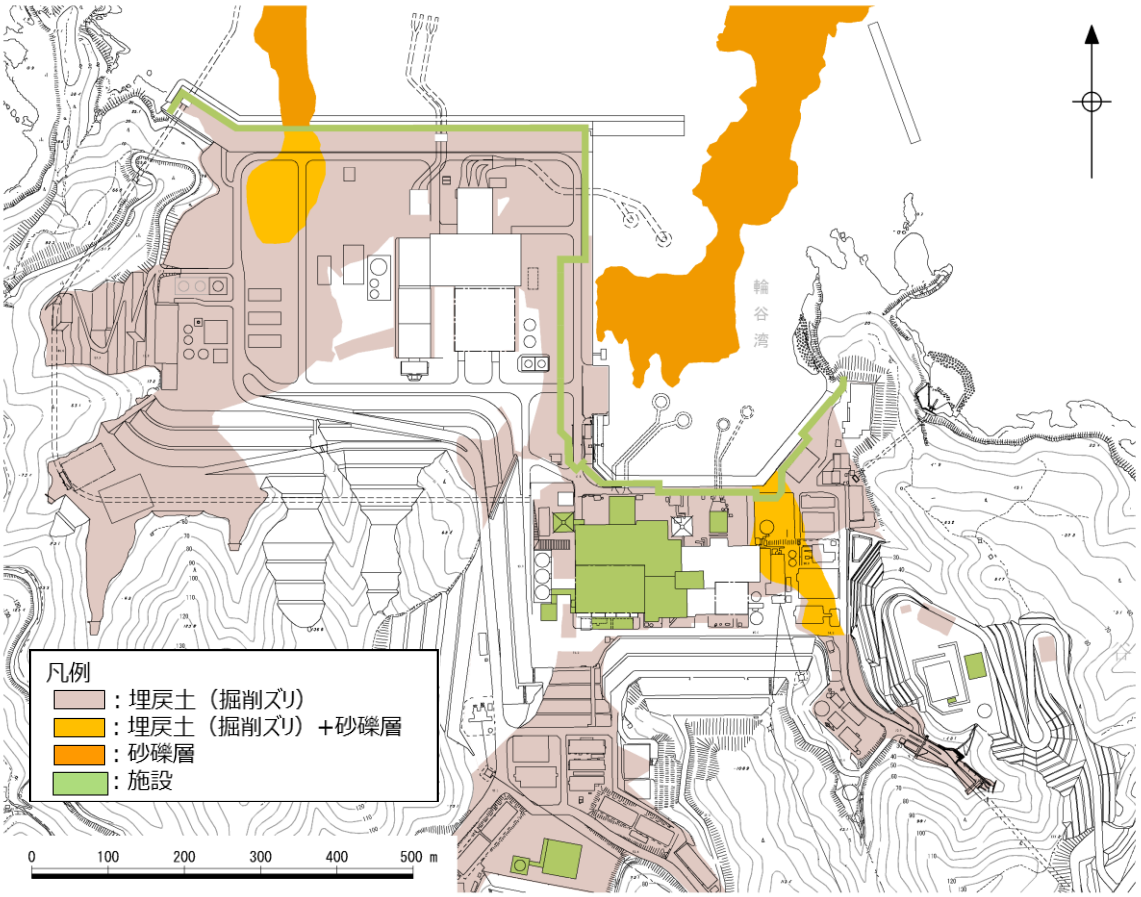
設備名称	基礎	耐震クラス検討用地震動	設置許可基準規則※4	適合性審査において地下水位低下設備（既設）の機能に期待しない場合の影響及び設置許可基準規則の該当条項		（参考）建設時工認等の設計における地下水位の扱い	
				常時	地震時 液状化影響（周辺地盤）※4	設計地下水位	設計への反映事項
取水槽	直接基礎	—※1 (Ss)	4条(３条2項), 39条(38条2項)	影響小	有効応力の減少に伴う周辺地盤の剛性低下により，土圧，加速度が変化し，耐震性に影響が生じる可能性がある。[4条(3条2項),39条(38条2項)]	EL+0.3m	耐震評価に用いる地震応答解析の解析条件として考慮
屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）	直接基礎	—※1 (Ss)	4条(３条2項), 39条(38条2項)	影響小	有効応力の減少に伴う周辺地盤の剛性低下により，土圧，加速度が変化し，耐震性に影響が生じる可能性がある。[4条(3条2項),39条(38条2項)]	EL+0.3m	耐震評価に用いる地震応答解析の解析条件として考慮
Ｂ－ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎	直接基礎	—※1 (Ss)	4条(３条2項), 39条(38条2項)	影響小	躯体周辺はマンメイドロック（ＭＭＲ）で埋め戻すため，耐震性への影響は軽微。[4条(3条2項),39条(38条2項),5条,40条]	— （既工認対象外）	
屋外配管ダクト（Ｂ－ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）	直接基礎	—※1 (Ss)	4条(３条2項), 39条(38条2項)	影響小	躯体周辺はマンメイドロック（ＭＭＲ）で埋め戻すため，耐震性への影響は軽微。[4条(3条2項),39条(38条2項),5条,40条]	— （既工認対象外）	
防波壁（多重鋼管杭式擁壁）	杭基礎	—※2 (Ss)	4条(３条2項), 39条(38条2項), 5条,40条	影響小	有効応力の減少に伴う周辺地盤の剛性低下により，土圧，加速度が変化し，耐震性に影響が生じる可能性がある。[4条(3条2項),39条(38条2項),5条,40条]	— （既工認対象外）	
防波壁（逆Ｔ擁壁）	杭基礎	—※2 (Ss)	4条(３条2項), 39条(38条2項), 5条,40条	影響小	杭周辺は改良地盤であるため，耐震性への影響は軽微。[4条(3条2項),39条(38条2項),5条,40条]	— （既工認対象外）	
防波壁（波返重力擁壁）	直接基礎	—※2 (Ss)	4条(３条2項), 39条(38条2項), 5条,40条	影響小	有効応力の減少に伴う周辺地盤の剛性低下により，土圧，加速度が変化し，耐震性に影響が生じる可能性がある。[4条(3条2項),39条(38条2項),5条,40条]	— （既工認対象外）	
１号炉取水槽流路縮小工	直接基礎	—※2 (Ss)	4条(３条2項), 39条(38条2項), 5条,40条	影響小	有効応力の減少に伴う周辺地盤の剛性低下により，土圧，加速度が変化し，耐震性に影響が生じる可能性がある。[4条(3条2項),39条(38条2項),5条,40条]	— （既工認対象外）	
防波壁通路防波扉	杭基礎	—※2 (Ss)	4条(３条2項), 39条(38条2項), 5条,40条	影響小	有効応力の減少に伴う周辺地盤の剛性低下により，土圧，加速度が変化し，耐震性に影響が生じる可能性がある。[4条(3条2項),39条(38条2項),5条,40条]	— （既工認対象外）	
第１ベントフィルタ格納槽	直接基礎	—※3 (Ss)	4条(３条2項), 39条(38条2項)	影響小	有効応力の減少に伴う周辺地盤の剛性低下により，土圧，加速度が変化し，耐震性に影響が生じる可能性がある。[4条(3条2項),39条(38条2項)]	— （既工認対象外）	
低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽	直接基礎	—※3 (Ss)	4条(３条2項), 39条(38条2項)	影響小	躯体周辺はマンメイドロック（ＭＭＲ）で埋め戻すため，耐震性への影響は軽微。[4条(3条2項),39条(38条2項)]	— （既工認対象外）	
緊急時対策所建物	直接基礎	—※3 (Ss)	4条(３条2項), 39条(38条2項)	影響なし	高台に設置されているため，影響なし。[4条(3条2項),39条(38条2項)]	— （既工認対象外）	
緊急時対策所用燃料地下タンク	直接基礎	—※3 (Ss)	4条(３条2項), 39条(38条2項)	影響なし	高台に設置されているため，影響なし。[4条(3条2項),39条(38条2項)]	— （既工認対象外）	
ガスタービン発電機建物	直接基礎	—※3 (Ss)	4条(３条2項), 39条(38条2項)	影響なし	高台に設置されているため，影響なし。[4条(3条2項),39条(38条2項)]	— （既工認対象外）	
ガスタービン発電機用軽油タンク基礎	直接基礎	—※3 (Ss)	4条(３条2項), 39条(38条2項)	影響なし	高台に設置されているため，影響なし。[4条(3条2項),39条(38条2項)]	— （既工認対象外）	
屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）	直接基礎	—※3 (Ss)	4条(３条2項), 39条(38条2項)	影響なし	高台に設置されているため，影響なし。[4条(3条2項),39条(38条2項)]	— （既工認対象外）	

※1　屋外重要土木構造物　※2　津波防護施設　※3　重大事故等対処施設　※4　A条(B条)の表示は，A条の適合確認をもってB条の適合確認が合わせて可能であることを示す。

（参考）埋戻土（掘削ズリ）・砂礫層と対象施設の配置との関係

液状化等による影響(設置許可基準規則第３条第２項)の観点から，埋戻土（掘削ズリ）・砂礫層の分布と対象施設の配置との関係を補足 4-6 図に示すとおり確認した。

なお，島根原子力発電所における埋戻土（掘削ズリ）・砂礫層は，液状化強度試験結果から「非液状化」又は「繰返し軟化（サイクリックモビリティ含む)」と分類され，有効応力が０まで低下して液体状とはならず，ひずみが漸増する粘り強い挙動を示すことが確認されている。



補足 4-6 図　施設等の配置と埋戻土（掘削ズリ）・砂礫層の分布

なお，液状化影響の評価については，「別紙 11 液状化影響の検討方針について」に基づき評価を行う方針とし，その概要は以下のとおりである。

・液状化等の周辺地盤の変状による施設への影響評価においては，施設周辺の地下水位や地盤等の状況を踏まえて，液状化検討対象施設を抽出する。
・抽出した液状化検討対象施設に対し，液状化等による影響が及ぶおそれがある場合は，有効応力解析又は全応力解析を行い，保守的な解析手法を選定する。
・液状化を考慮する場合の評価は，地盤の有効応力の変化に伴う影響を考慮した評価(有効応力解析等)によるものとし，有効応力解析に用いる液状化強度特性は，敷地の原地盤における代表性及び網羅性を踏まえたうえで保守性を考慮して設定することを基本とする。

基礎地盤の安定性評価における地下水位設定の考え方

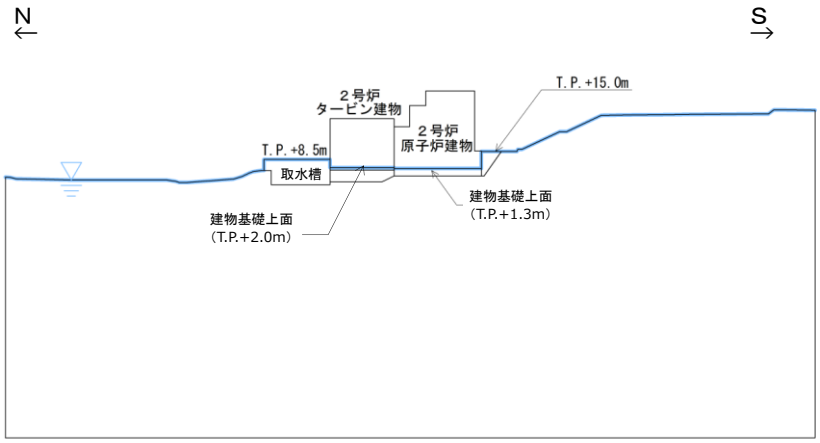
1. 地下水位の設定

補足 5-1 図に示すとおり，原子炉建物基礎地盤の安定性評価における地下水位の設定については，原子炉建物及びタービン建物の地下水位は基礎上面とし，取水槽及び周辺地盤の地下水位は保守的な評価として地表面とした。

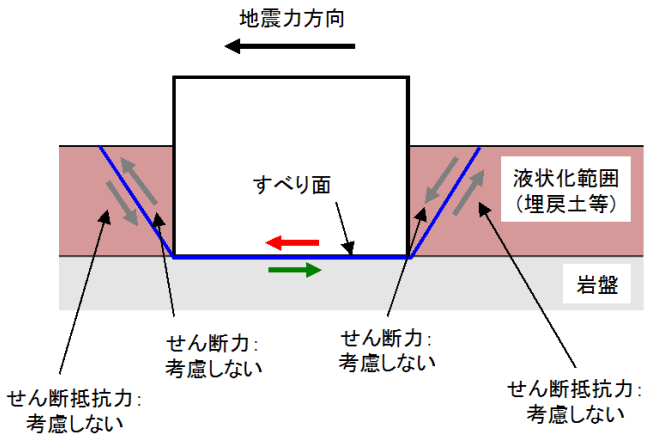
なお，その他の耐震重要施設及び重大事故等対処施設の基礎地盤の安定性評価における地下水位の設定についても同様の考え方で設定する。

基礎地盤のすべりに対する評価においては，地下水位以深の埋戻土・盛土が地震動により繰り返し軟化し強度が低下する可能性を考慮し，岩盤部のみのすべりに対する検討を実施する。（補足 5-2 図にイメージ図を示す。）

また，周辺地盤の液状化等の変状については，周辺地盤の液状化等による地盤変状を考慮した場合でも，当該施設の機能が損なわれないよう設計することとし，設置許可基準規則第４条へ適合することを確認する。



補足 5-1 図　原子炉建物基礎地盤の地下水位



補足 5-2 図　基礎地盤安定性評価のイメージ図

補足説明資料６

現行の重要度分類上の位置付けの整理

1. 設置許可基準規則における耐震重要度分類

耐震重要度分類指針の観点から地下水位低下設備に関する信頼性向上について以下のとおり整理を行った。

設置許可基準規則における耐震重要度分類の考え方を補足 6-1 表に示す。

・設計基準対象施設の耐震重要度は，設置許可基準規則上，その重要度に応じたクラス分類（Ｓ，Ｂ，Ｃ），また，それらに該当する施設が示されており，地下水位低下設備は，Ｓクラス設備及びＢクラス設備のいずれにも該当しないため，Ｃクラスに分類できる。

・第Ⅰ編に示した機能喪失時の影響確認の結果を踏まえ，原子炉建物基礎等の間接支持構造物の耐震性を確保する観点から，地下水位低下設備の耐震性については，間接支持構造物に要求される耐震性（Ｓｓ機能維持）を考慮する。

・以上を踏まえ，地下水位低下設備の耐震重要度分類については，Ｃクラスに分類し，基準地震動Ｓｓに対して機能維持させる設計とする。

補足 6-1 表　設置許可基準規則における耐震重要度分類の考え方

耐震クラス	定義	対象とする施設の例	該当
S	地震により発生するおそれがある事象に対して，原子炉を停止し，炉心を冷却するために必要な機能を持つ施設，自ら放射性物質を内蔵している施設，当該施設に直接関係しておりその機能喪失により放射性物質を外部に拡散する可能性のある施設，これらの施設の機能喪失により事故に至った場合の影響を緩和し，放射線による公衆への影響を軽減するために必要な機能を持つ施設及びこれらの重要な安全機能を支援するために必要となる施設，並びに地震に伴って発生するおそれがある津波による安全機能の喪失を防止するために必要となる施設であって，その影響が大きいもの	・原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器・配管系 ・使用済燃料を貯蔵するための施設 ・原子炉の緊急停止のために急激に負の反応度を付加するための施設，及び原子炉の停止状態を維持するための施設 ・原子炉停止後，炉心から崩壊熱を除去するための施設等	×
B	安全機能を有する施設のうち，機能喪失した場合の影響がＳクラス施設と比べ小さい施設	・原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されていて，一次冷却材を内蔵しているか又は内蔵し得る施設 ・放射性廃棄物を内蔵している施設（ただし，内蔵量が少ない又は貯蔵方式により，その破損により公衆に与える放射線の影響が実用発電用原子炉の設置，運転等に関する規則（昭和 53 年通商産業省令第 77 号）第２条第２項第６号に規定する「周辺監視区域」外における年間の線量限度に比べ十分小さいものは除く。）等	×
C	Ｓクラスに属する施設及びＢクラスに属する施設以外の一般産業施設又は公共施設と同等の安全性が要求される施設	―	○

設置許可基準規則の観点から地下水位低下設備に関する信頼性向上について以下のとおり整理を行った。

・設置許可基準規則第２条における以下の定義から，地下水位低下設備は安全機能を有するものではない。

・また，安全機能を有するものではないことから，安全施設にも該当しない。

実用発電用原子炉及びその附属施設の位置,構造及び設備の基準に関する規則における定義

第二条
五「安全機能」とは，発電用原子炉施設の安全性を確保するために必要な機能であって，次に掲げるものをいう。
イ その機能の喪失により発電用原子炉施設に運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故が発生し，これにより公衆又は従事者に放射線障害を及ぼすおそれがある機能
ロ 発電用原子炉施設の運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故の拡大を防止し，又は速やかにその事故を収束させることにより，公衆又は従事者に及ぼすおそれがある放射線障害を防止し，及び放射性物質が発電用原子炉を設置する工場又は事業所（以下「工場等」という。）外へ放出されることを抑制し，又は防止する機能
ハ 「安全施設」とは，設計基準対象施設のうち，安全機能を有するものをいう。

設置許可基準規則における安全施設に該当しないことから,地下水位低下設備が有する機能に着目し,設備の位置づけについての観点から発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針(以下「重要度分類指針」という。)に基づく整理を行った。

・地下水位低下設備が有する機能について安全機能の重要度分類指針における位置づけを確認した結果,以降に示すとおり,安全機能を有する構築物,系統及び機器に該当しないことを確認した。

2. 安全機能の重要度分類

(1) 安全機能の区分

安全機能を有する構築物，系統及び機器を，それが果たす安全機能の性質に応じて，次の２種に分類される。

①その機能の喪失により，原子炉施設を異常状態に陥れ，もって一般公衆ないし従事者に過度の放射線被ばくを及ぼすおそれのあるもの（異常発生防止系。以下「PS」という。）。

②原子炉施設の異常状態において，この拡大を防止し，又はこれを速やかに収束せしめ，もって一般公衆ないし従事者に及ぼすおそれのある過度の放射線被ばくを防止し，又は緩和する機能を有するもの（異常影響緩和系。以下「MS」という。）。

(2) 重要度分類

重要度分類指針では，PS 及び MS のそれぞれに属する構築物，系統及び機器を，その有する安全機能の重要度に応じ，それぞれクラス１，クラス２及びクラス３に分類している。安全上の機能別重要度分類を補足 6-2 表に示す。

なお，重要度分類指針においては，所要の安全機能を直接果たす構築物，系統及び機器を「当該系」，当該系が機能を果たすのに直接，間接に必要な構築物，系統及び機器を「関連系」と定義している。

補足 6-2 表　安全上の機能別重要度分類

重要度による分類	機能による分類	安全機能を有する構築物，系統及び機器		安全機能を有しない構築物，系統及び機器
		異常の発生防止の機能を有するもの（ＰＳ）	異常の影響緩和の機能を有するもの（ＭＳ）	
安全に関連する構築物，系統及び機器	クラス１	ＰＳ－１	ＭＳ－１	―
	クラス２	ＰＳ－２	ＭＳ－２	
	クラス３	ＰＳ－３	ＭＳ－３	
安全に関連しない構築物，系統及び機器		―	―	安全機能以外の機能のみを行うもの

(3)地下水位低下設備の重要度分類上の位置付け

重要度分類指針の分類に基づき,地下水位低下設備の位置付けを整理した結果,『安全に関連する構築物,系統及び機器』に分類されないため,『安全機能以外の機能のみを行うもの』と整理できる。

安全上の機能別重要度分類に係る定義及び機能と地下水位低下設備の位置付けを補足 6-3 表～補足 6-5 表に示す。

補足 6-3 表　安全上の機能別重要度分類に係る定義及び機能と地下水位低下設備の位置付け

分類		定義	機能	地下水位低下設備の位置付け
クラス１	ＰＳ－１	その損傷又は故障により発生する事象によって,(a)炉心の著しい損傷,又は(b)燃料の大量の破損を引き起こすおそれのある構築物,系統及び機器	(1)原子炉冷却材圧力バウンダリ機能	該当しない
			(2)過剰反応度の印加防止機能	該当しない
			(3)炉心形状の維持機能	該当しない
	ＭＳ－１	(1)異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し,残留熱を除去し,原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧を防止し,敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物,系統及び機器	(1)原子炉の緊急停止機能	該当しない
			(2)未臨界維持機能	該当しない
			(3)原子炉冷却材圧力バウンダリの加圧防止機能	該当しない
			(4)原子炉停止後の除熱機能	該当しない
			(5)炉心冷却機能	該当しない
			(6)放射性物質の閉じ込め機能,放射線の遮へい及び放出低減機能	該当しない
		安全上必須なその他の構築物,系統及び機器	(1)工学的安全施設及び原子炉停止系への作動信号の発生機能	該当しない
			(2)安全上特に重要な関連機能	該当しない

補足 6-4 表　安全上の機能別重要度分類に係る定義及び機能と地下水位低下設備の位置付け

分類		定義	機能	地下水位低下設備の位置付け
クラス２	ＰＳ－２	(1)その損傷又は故障により発生する事象によって,炉心の著しい損傷又は燃料の大量の破損を直ちに引き起こすおそれはないが,敷地外への過度の放射性物質の放出のおそれのある構築物,系統及び機器	(1)原子炉冷却材を内蔵する機能(ただし,原子炉冷却材圧力バウンダリから除外されている計装等の小口径のもの及びバウンダリに直接接続されていないものは除く。)	該当しない
			(2)原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されていないものであって,放射性物質を貯蔵する機能	該当しない
			(3)燃料を安全に取り扱う機能	該当しない
		(2)通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に作動を要求されるものであって,その故障により,炉心冷却が損なわれる可能性の高い構築物,系統及び機器	(1)安全弁及び逃がし弁の吹き止り機能	該当しない
	ＭＳ－２	(1)ＰＳ－２の構築物,系統及び機器の損傷又は故障により敷地周辺公衆に与える放射線の影響を十分小さくするようにする構築物,系統及び機器	(1)燃料プール水の補給機能	該当しない
			(2)放射性物質放出の防止機能	該当しない
		(2)異常状態への対応上特に重要な構築物,系統及び機器	(1)事故時のプラント状態の把握機能	該当しない
			(2)異常状態の緩和機能	該当しない
			(3)制御室外からの安全停止機能	該当しない

補足 6-5 表　安全上の機能別重要度分類に係る定義及び機能と
地下水位低下設備の位置付け

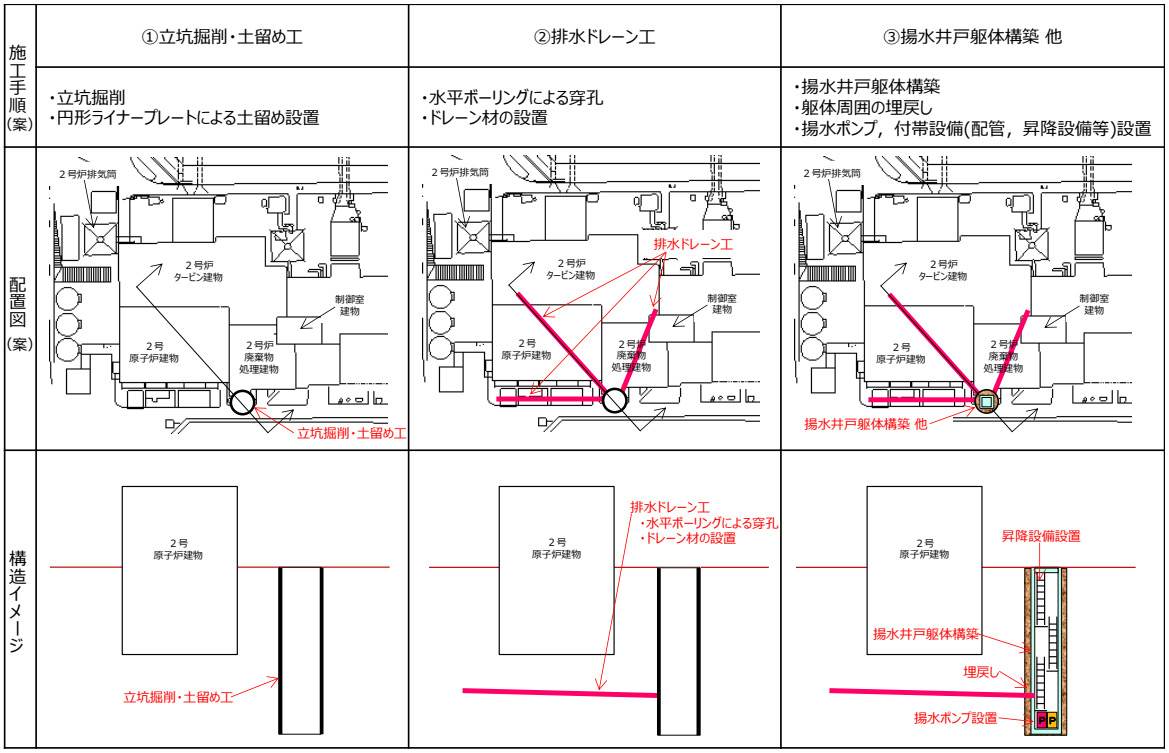
分類		定義	機能	地下水位低下設備の位置付け
クラス３	ＰＳ－３	(1)異常状態の起因事象となるものであって，ＰＳ－１及びＰＳ－２以外の構築物，系統及び機器	(1)原子炉冷却材保持機能（ＰＳ－１，ＰＳ－２以外のもの。）	該当しない
			(2)原子炉冷却材の循環機能	該当しない
			(3)放射性物質の貯蔵機能	該当しない
			(4)電源供給機能（非常用を除く。）	該当しない
			(5)プラント計測・制御機能（安全保護機能を除く。）	該当しない
			(6)プラント運転補助機能	該当しない
		(2)原子炉冷却材中放射性物質濃度を通常運転に支障のない程度に低く抑える構築物，系統及び機器	(1)核分裂生成物の原子炉冷却材中への放散防止機能	該当しない
			(2)原子炉冷却材の浄化機能	該当しない
	ＭＳ－３	(1)運転時の異常な過度変化があっても，ＭＳ－１，ＭＳ－２とあいまって，事象を緩和する構築物，系統及び機器	(1)原子炉圧力の上昇の緩和機能	該当しない
			(2)出力上昇の抑制機能	該当しない
			(3)原子炉冷却材の補給機能	該当しない
		(2)異常状態への対応上必要な構築物，系統及び機器	緊急時対策上重要なもの及び異常状態の把握機能	該当しない

新設揚水井戸・ドレーンの構造・配置及び施工例

新設するドレーンは添付資料１に示すフローに基づき，信頼性（耐久性，耐震性及び保守管理性）を満足する設計とする。また，新設する揚水井戸については，ドレーンの点検性への配慮として，揚水井戸とドレーンの取り合い部へのアクセスが容易であり，十分な作業空間を確保するよう設計する。

２号原子炉建物周辺に新設揚水井戸を新設するが，南東側に配置する場合を例とした配置，構造イメージ及び施工手順を補足 7-1 図に示す。

なお，揚水井戸及びドレーンの配置及び構造については，詳細設計段階で確定する。



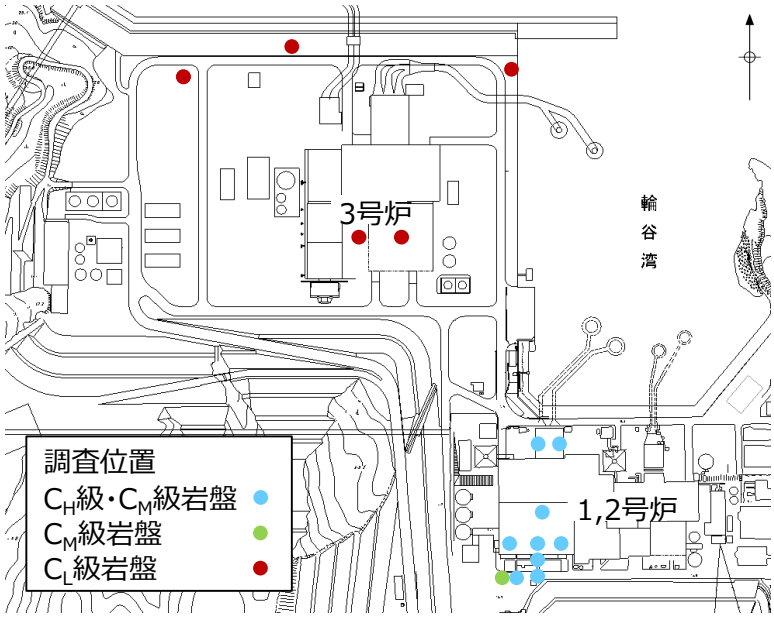
補足 7-1 図　新設揚水井戸・ドレーンの構造・配置及び施工例

透水係数の妥当性確認

1. C_H級，C_M級，C_L級岩盤

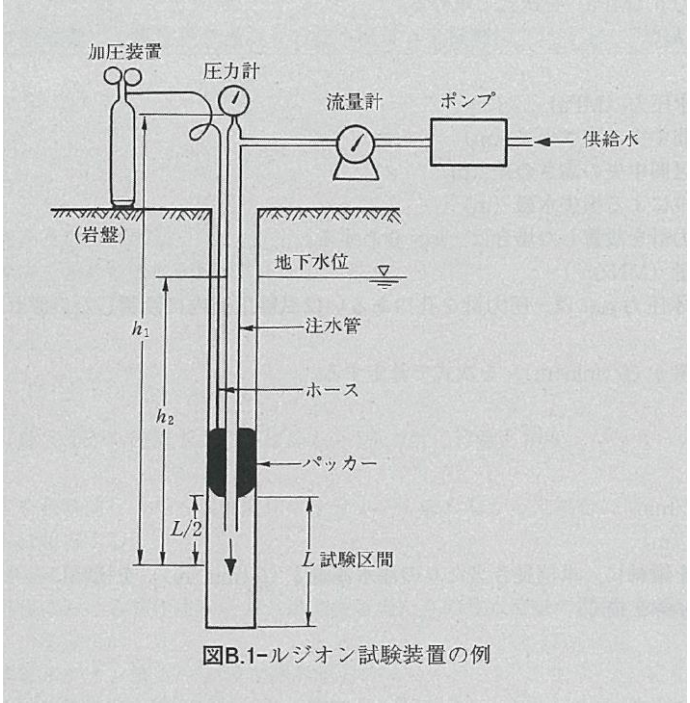
建設時工認では，原子炉建物直下に分布する頁岩・凝灰岩（上層部）及び頁岩・凝灰岩（下層部）の２種類において，地盤工学会基準の現場透水試験（ルジオン試験）に基づき透水係数を設定していた。

今回，３次元浸透流解析を行うに当たり，解析の精度向上を目的として，補足 8-1 図のとおり敷地の岩級に合わせて透水係数を設定する。C_H級，C_M級岩盤については，建設時工認の現場透水試験より透水係数を設定した。なお，C_L級岩盤については２号炉周辺岩盤に分布していないことから，３号敷地造成前の尾根部における現場透水試験より透水係数を設定した。



	透水係数（cm/s）	試験方法
C_H級	4.5×10^{-5}	ルジオン試験
C_M級	5.6×10^{-4}	
C_L級	1.0×10^{-3}	

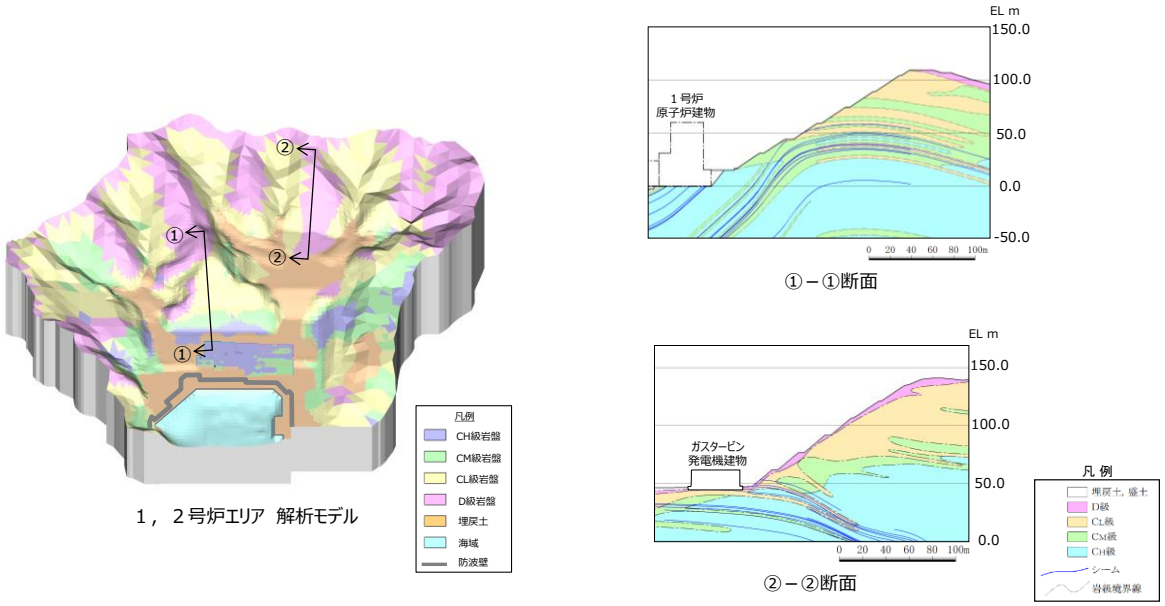
補足 8-1 図　現場透水試験結果（C_H級，C_M級及びC_L級岩盤）



補足 8-2 図　現場透水試験（ルジオン試験）の概要図（地盤調査の方法と解説(地盤工学会，2013)）

2.　D級岩盤

D級岩盤は補足 8-3 図に示すとおり，主として地山の表層に薄く分布している。地盤工学会基準の現場透水試験（ルジオン試験）の試験区間長は通常５ｍとされているが，表層は風化が進行しているため，試験区間の確保ができないことから，現場透水試験による透水係数の取得が困難である。

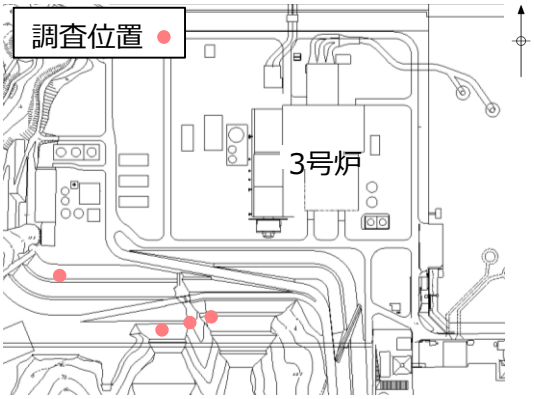


補足 8-3 図　D級岩盤の分布状況

D級岩盤は現場透水試験からの透水係数の設定が困難であることから，補足 8-4 図に示す粒径加積曲線から求めた 20%粒径 D_{20} が 0.05mm であるため，クレーガーの方法※(地盤工学会)により補足 8-5 図から推定した透水係数 2.8×10^{-4}cm/s (≒3×10^{-4}cm/s)を設定していた。

しかし，D級岩盤は補足 8-1 表に示すとおり，割れ目の発達した岩盤と風化の進行した岩盤に大別されるが，粒度試験１２試料のうち割れ目が発達した黒色頁岩は１試料のみであったため，その特性を透水係数に反映できていないと考える。

※　粒径加積曲線から求まる 20%粒径 D_{20} を用いて透水係数の概略値を推定する方法



	20%粒径（mm）	透水係数（cm/s）
D級岩盤	0.05	2.8×10^{-4}

補足 8-4 図　D級岩盤の粒度試験結果

D_{20} (mm)	k (cm/s)	D_{20} (mm)	k (cm/s)
0.005	3.0×10^{-6}	0.18	6.85×10^{-3}
0.01	1.05×10^{-5}	0.20	8.90×10^{-3}
0.02	4.00×10^{-5}	0.25	1.40×10^{-2}
0.03	8.50×10^{-5}	0.30	2.20×10^{-2}
0.04	1.75×10^{-4}	0.35	3.20×10^{-2}
0.05	2.80×10^{-4}	0.40	4.50×10^{-2}
0.06	4.60×10^{-4}	0.45	5.80×10^{-2}
0.07	6.50×10^{-4}	0.50	7.50×10^{-2}
0.08	9.00×10^{-4}	0.60	1.10×10^{-1}
0.09	1.40×10^{-3}	0.70	1.60×10^{-1}
0.10	1.75×10^{-3}	0.80	2.15×10^{-1}
0.12	2.60×10^{-3}	0.90	2.80×10^{-1}
0.14	3.80×10^{-3}	1.00	3.60×10^{-1}
0.16	5.10×10^{-3}	2.00	1.80

補足 8-5 図　クレーガーの方法（土質試験の方法と解説(地盤工学会，2000)）

補足 8-1 表　代表的なD級岩盤のコア性状

岩相	黒色頁岩	凝灰岩
コア写真	 割れ目の発達により岩級が低下 (No.19E3　G.L.-0.96～-1.80m)	 風化の進行により岩級が低下 (No.B-3(2006) G.L.-0.30～-2.15m)

以上を踏まえ，局所的に分布する黒色頁岩のような割れ目が発達したD級岩盤の場合は，粒径加積曲線から求めた 20%粒径 D_{20} が 0.10mm であるため，クレーガーの方法により補足 8-6 図から推定した透水係数は 1.75×10^{-3}cm/s（≒2×10^{-3}cm/s）となる。D級岩盤の透水係数の違いによる地下水位への影響を確認するため，補足 8-7 図のとおり浸透流解析（再現解析）を実施した結果，各観測孔位置での地下水位に大きな差異は認められなかった。

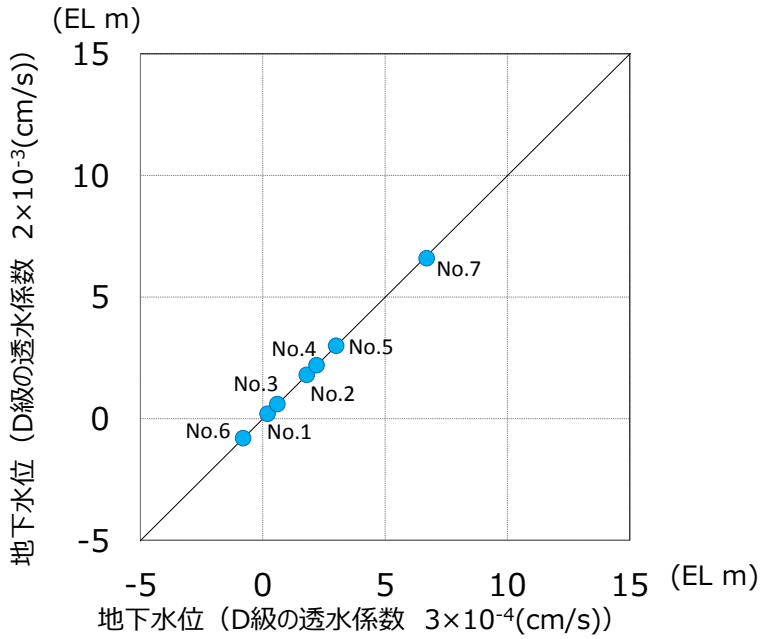
しかしながら，揚水量が低減する傾向が認められることから，地下水位が高く算定されると判断し，割れ目が発達したD級岩盤の影響を考慮した透水係数 2×10^{-3}cm/s を採用する。

補足 8-2 表　D級岩盤（黒色頁岩）の透水係数

	20%粒径（mm）	透水係数（cm/s）
D級岩盤 （黒色頁岩）	0.10	1.75×10^{-3}

D_{20} (mm)	k (cm/s)	D_{20} (mm)	k (cm/s)
0.005	3.0×10^{-6}	0.18	6.85×10^{-3}
0.01	1.05×10^{-5}	0.20	8.90×10^{-3}
0.02	4.00×10^{-5}	0.25	1.40×10^{-2}
0.03	8.50×10^{-5}	0.30	2.20×10^{-2}
0.04	1.75×10^{-4}	0.35	3.20×10^{-2}
0.05	2.80×10^{-4}	0.40	4.50×10^{-2}
0.06	4.60×10^{-4}	0.45	5.80×10^{-2}
0.07	6.50×10^{-4}	0.50	7.50×10^{-2}
0.08	9.00×10^{-4}	0.60	1.10×10^{-1}
0.09	1.40×10^{-3}	0.70	1.60×10^{-1}
0.10	1.75×10^{-3}	0.80	2.15×10^{-1}
0.12	2.60×10^{-3}	0.90	2.80×10^{-1}
0.14	3.80×10^{-3}	1.00	3.60×10^{-1}
0.16	5.10×10^{-3}	2.00	1.80

補足 8-6 図　クレーガーの方法（土質試験の方法と解説(地盤工学会，2000)）



	揚水量(m^3/日)
D級岩盤 3×10^{-4}(cm/s)	858
D級岩盤 2×10^{-3}(cm/s)	856

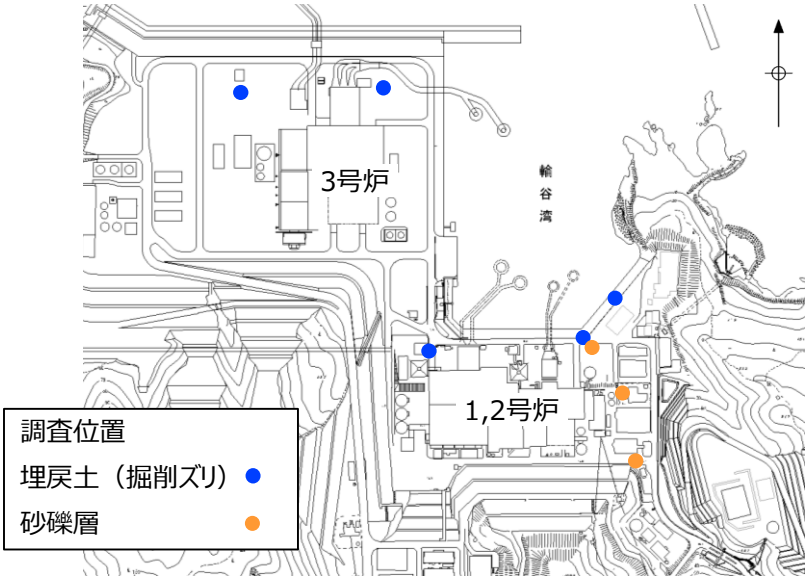
補足 8-7 図　D級岩盤の透水係数の妥当性確認（再現解析）

3. 埋戻土（掘削ズリ），砂礫層

建設時工認の埋戻し土の透水係数は，工学的な観点から岩盤の透水係数より 1 オーダー大きな値とすることで地下水位を保守的に評価することに重点を置き，現場透水試験によらず透水係数を設定していた。

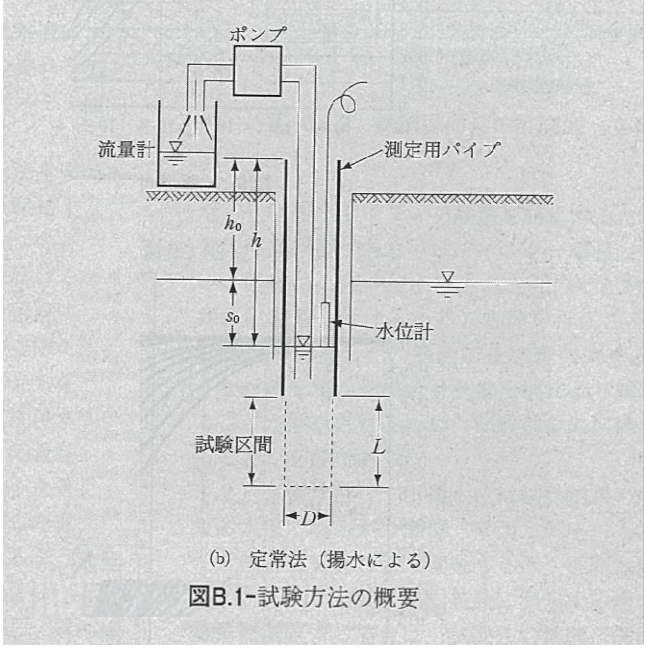
今回，埋戻土（掘削ズリ），砂礫層については，解析の精度向上を目的として，補足 8-8 図のとおり地盤工学会基準の現場透水試験（回復法）を実施し，直接的に透水係数を求めて設定した。

埋戻土（掘削ズリ）は敷地全域に分布しているため，幅広い地点で試験を実施し，砂礫層は局所的に分布している範囲内で試験を実施した。



	透水係数（cm/s）	試験方法
埋戻土 （掘削ズリ）	1.7×10^{-1}	回復法
砂礫層	3.6×10^{-3}	

補足 8-8 図　現場透水試験結果（埋戻土（掘削ズリ）及び砂礫層）



補足 8-9 図　現場透水試験（回復法）の概要図（地盤調査の方法と解説(地盤工学会，2013)）

観測孔における地下水位観測記録

島根原子力発電所では，2014 年 11 月より補足 9-1 図に示す地下水位観測孔において地下水位を記録している。各観測孔における地下水位の観測結果を補足 9-2 図に示す。また，それぞれの観測孔における地下水位の傾向を以下に示す。

a. No. 1 孔

降雨等に伴い，地下水位の上昇が認められるものの，大きな変動は確認されず，概ね EL. ０～＋１ｍの間を推移している。

b. No. 2 孔

観測孔近傍に設置されている地下水位低下設備（既設）の機能により，他の観測孔と比較して降雨等に伴う地下水位上昇後の低下が早い傾向がある。また，一部の降雨時を除くと，地下水位は EL. ０ｍを超えない範囲を推移している。

c. No. 3 孔

降雨等に伴い，地下水位の上昇が認められるものの，大きな変動は確認されず，概ね EL. ０～＋１ｍの間を推移している。なお，2015 年 6 月～2015 年 8 月にかけて，防波壁周辺の止水対策を実施したことに伴い，地下水位の変動が落ち着いている。

d. No. 4 孔

既設のサブドレーンピット近傍の観測孔（No. 2，No. 6）と比較して，降雨等による水位上昇後，緩やかに低下する傾向がある。

e. No. 5 孔

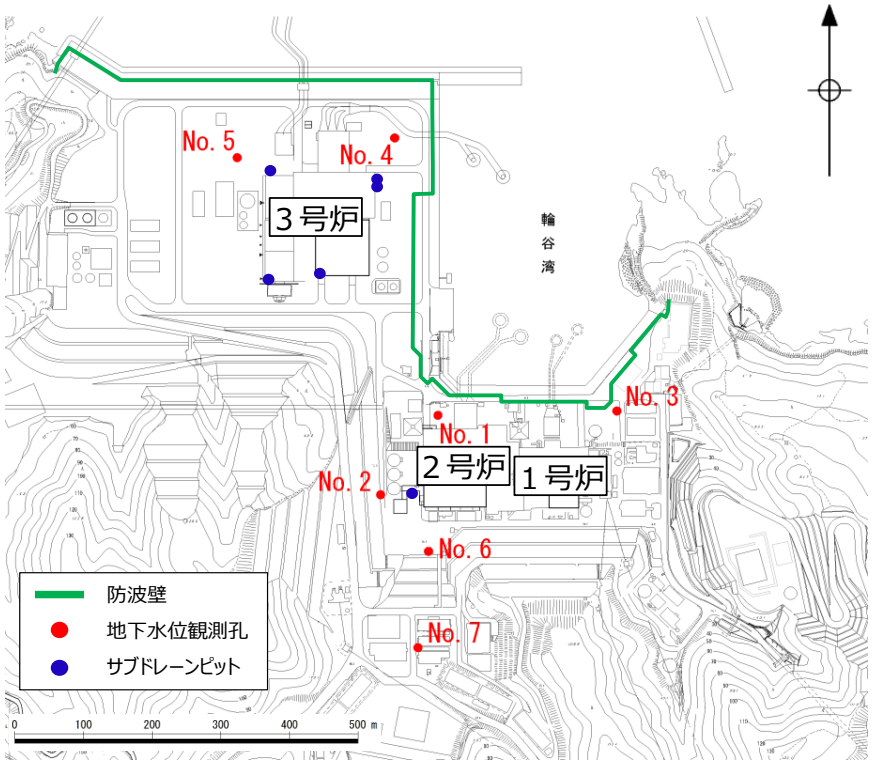
既設のサブドレーンピット近傍の観測孔（No. 2，No. 6）と比較して，降雨等による水位上昇後，緩やかに低下する傾向がある。

f. No. 6 孔

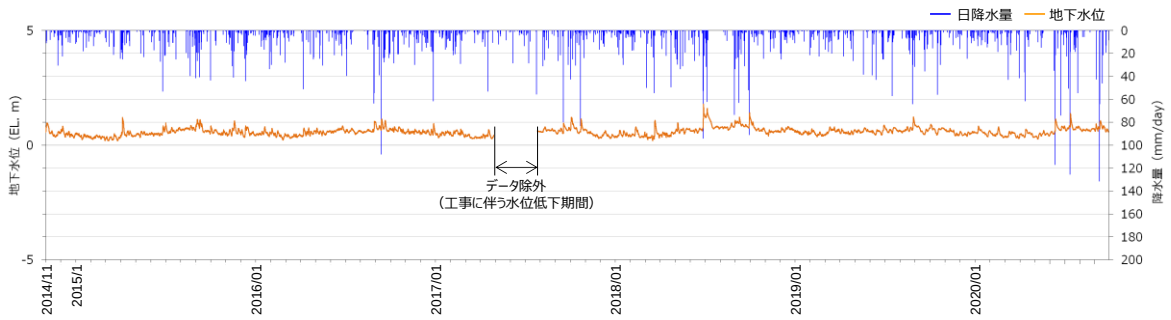
観測孔近傍に設置されている地下水位低下設備（既設）の機能により，他の観測孔と比較して降雨等に伴う地下水位上昇後の低下が早い傾向がある。また，一部の降雨時を除くと，EL. －１～０ｍの間を推移している。

g. No. 7 孔

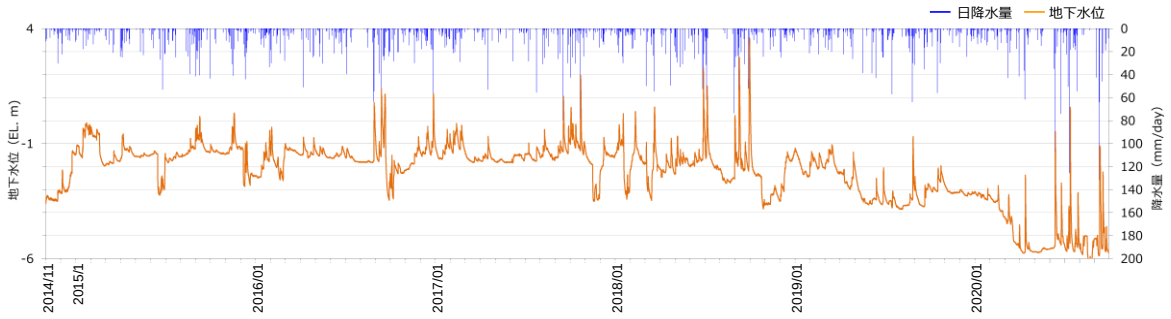
既設のサブドレーンピット近傍の観測孔（No. 2，No. 6）と比較して，降雨等による水位上昇後，緩やかに低下する傾向がある。



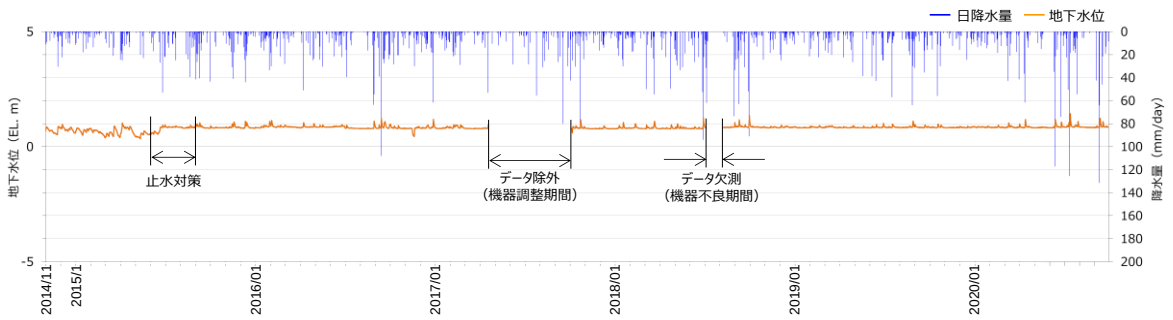
補足 9-1 図　観測孔位置



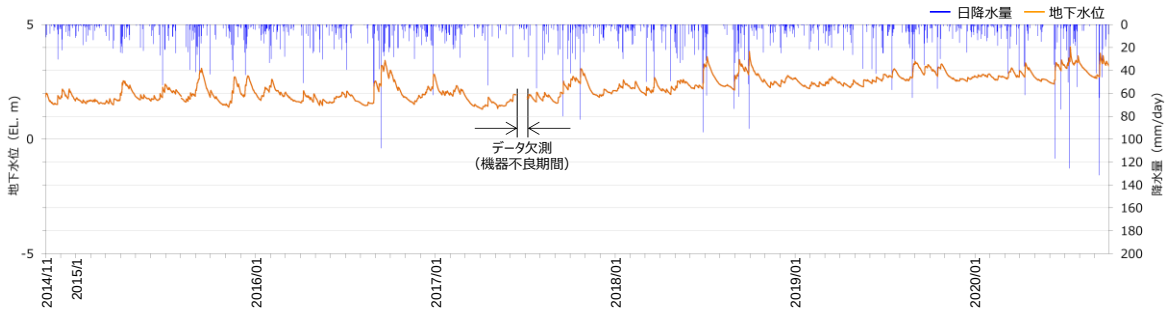
補足 9-2(1)図　地下水位観測記録（No. 1 孔）



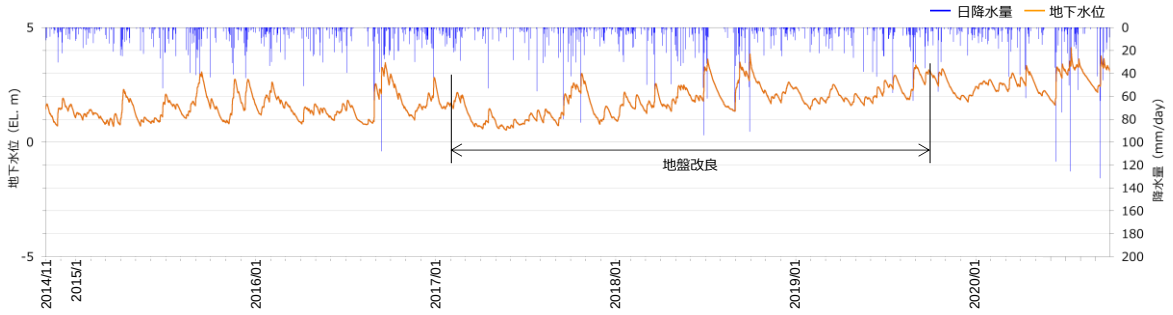
補足 9-2(2)図　地下水位観測記録（No. 2 孔）



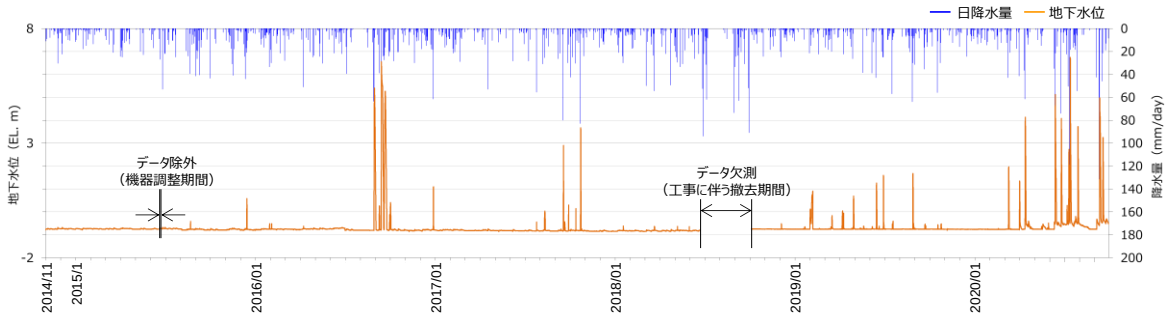
補足 9-2(3)図　地下水位観測記録（No. 3 孔）



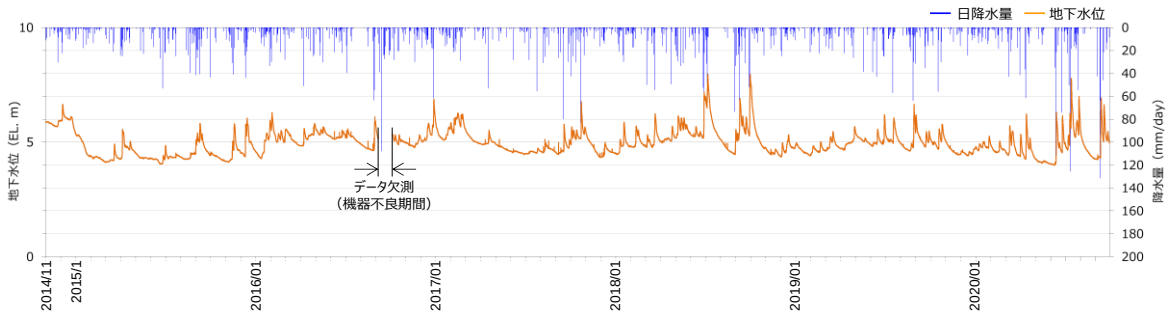
補足 9-2(4)図　地下水位観測記録（No. 4 孔）



補足 9-2(5)図　地下水位観測記録（No. 5 孔）



補足 9-2(6)図　地下水位観測記録（No. 6 孔）



補足 9-2(7)図　地下水位観測記録（No.7 孔）

別紙－18

島根原子力発電所２号炉

機器・配管系への制震装置の適用について

目　次

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

添　付　資　料

1－1　制震装置の減衰性能に影響する検討項目の抽出
1－2　既工認実績のある制震装置との差異の整理
1－3　Time History Broadening の概要
1－4　新規制基準適合性審査の実績等を踏まえた検討事項に対する考察
1－5　制震装置に応じた減衰性能の表現及びモデル化

2－1　取水槽ガントリクレーンに設置する制震装置の選定
2－2　単軸粘性ダンパの性能試験方法
2－3　単軸粘性ダンパの特性試験
2－4　単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの地震応答解析手法
2－5　単軸粘性ダンパの減衰性能と取水槽ガントリクレーンの応答の関係

3－1　三軸粘性ダンパの低速移動時の拘束力
3－2　配管系に設置する制震装置の選定
3－3　三軸粘性ダンパに関する ASME Boiler and Pressure Vessel Code の記載
3－4　三軸粘性ダンパを設置した配管系の加振試験の概要
3－5　三軸粘性ダンパの減衰性能及び解析モデルによる表現
3－6　三軸粘性ダンパの特性試験
3－7　三軸粘性ダンパの据付公差による減衰性能への影響
3－8　三軸粘性ダンパの性能試験方法
3－9　三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析手法
3－10 三軸粘性ダンパの減衰性能と配管系の応答の関係
3－11 三軸粘性ダンパの配管への取付部の設計について
3－12 三軸粘性ダンパの耐震評価方法に関する海外実績との比較

1.　概要

島根２号炉において,波及的影響を防止するための対策を行う取水槽ガントリクレーン及びＢクラスの配管系に,耐震性向上を目的として制震装置を設置する。大きな地震力が作用する機器・配管系に対して，耐震構造による補強では設計及び施工が困難となる場合,制震装置の設置により地震応答を低減することは有効な耐震補強の手法のひとつである。

制震装置の適用にあたっては，その減衰性能を適切にモデル化し，制震装置を組み込んだ機器・配管系の地震応答解析を実施する必要がある。本資料では，制震装置の構造，作動原理等を示した上で，制震装置の減衰性能を適切に考慮したモデル化及び地震応答解析手法について説明する。また，取水槽ガントリクレーンの車輪部のすべり,浮上り等の非線形挙動のモデル化及び解析手法については,別紙－７　添付資料－2「取水槽ガントリクレーンへの非線形時刻歴解析の適用について」に示す。

なお，制震装置（単軸粘性ダンパ）の設置は，島根２号炉，島根３号炉及び柏崎６／７号炉等の排気筒で実績がある。

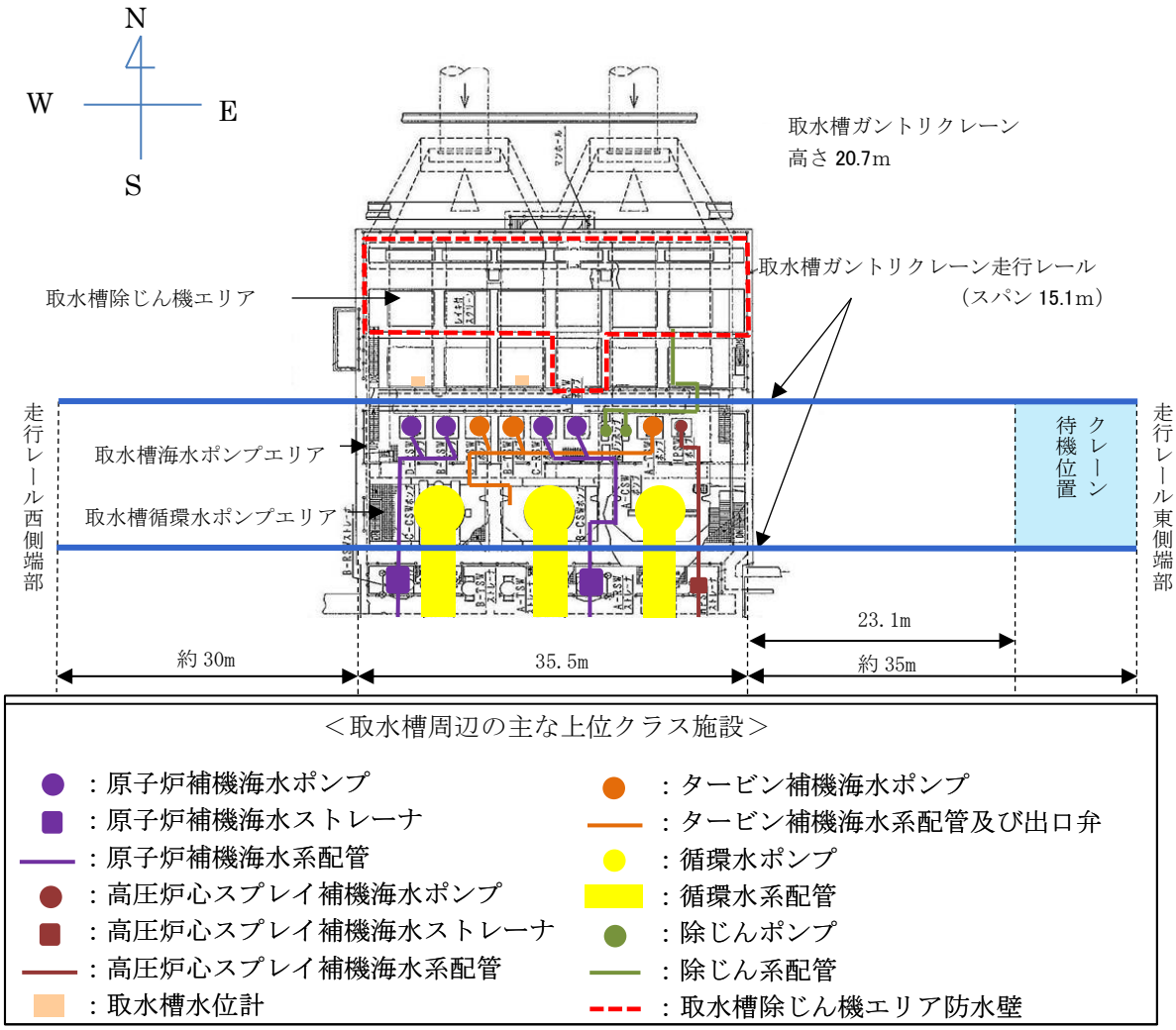
2.　単軸粘性ダンパの取水槽ガントリクレーンへの設置

2.1　基本方針

2.1.1　要求事項

取水槽ガントリクレーンは,取水槽海水ポンプエリア及び取水槽循環水ポンプエリアを跨いで設置されており,原子炉補機海水ポンプ等のメンテナンスに使用される設備である。取水槽ガントリクレーンの設置位置及び取水槽周辺の上位クラス施設概要を第 2－1 図に示す。

発電所の運転中などメンテナンスを実施しない期間は,取水槽ガントリクレーンは待機位置に待機しており,周辺の上位クラス施設とは十分な離隔距離があることから波及的影響を及ぼすおそれはない。一方で，定期検査中など原子炉補機海水ポンプ等のメンテナンスを実施する期間には,上位クラス施設が設置されている取水槽海水ポンプエリア付近に位置することとなるため,基準地震動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

2.1.2　構造の概要

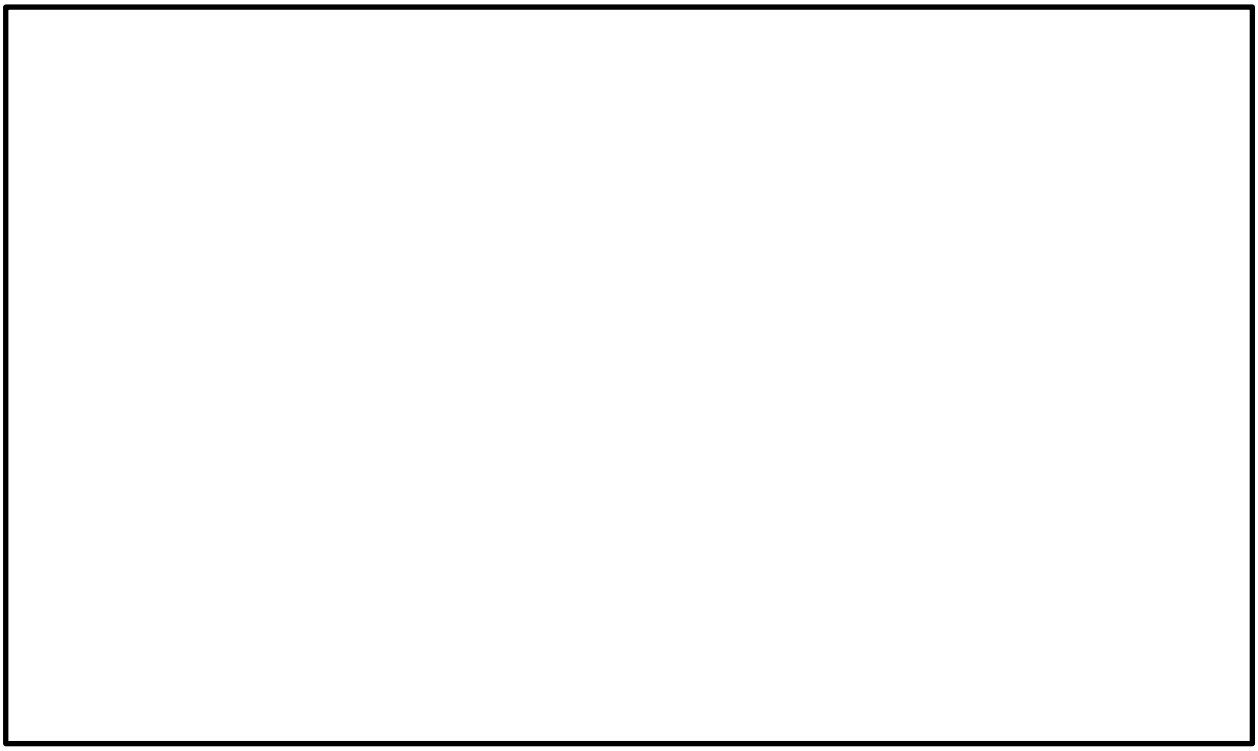
(1) 取水槽ガントリクレーンの構造概要

取水槽ガントリクレーンの構造を第2－2図に示す。脚はガーダを支持し，下部には走行車輪が設置されている。ガーダは脚の上部にあり，その上面にトロリが移動するための横行レールが設置されており，下部にはホイストレールが設置されている。原子炉補機海水ポンプ等のメンテナンス時には，トロリに設置された巻上げ装置（主巻），又はホイストを使用して，ワイヤロープ及びフックを介し，吊荷の吊上げ，吊下げ，移動等の作業を実施する。

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

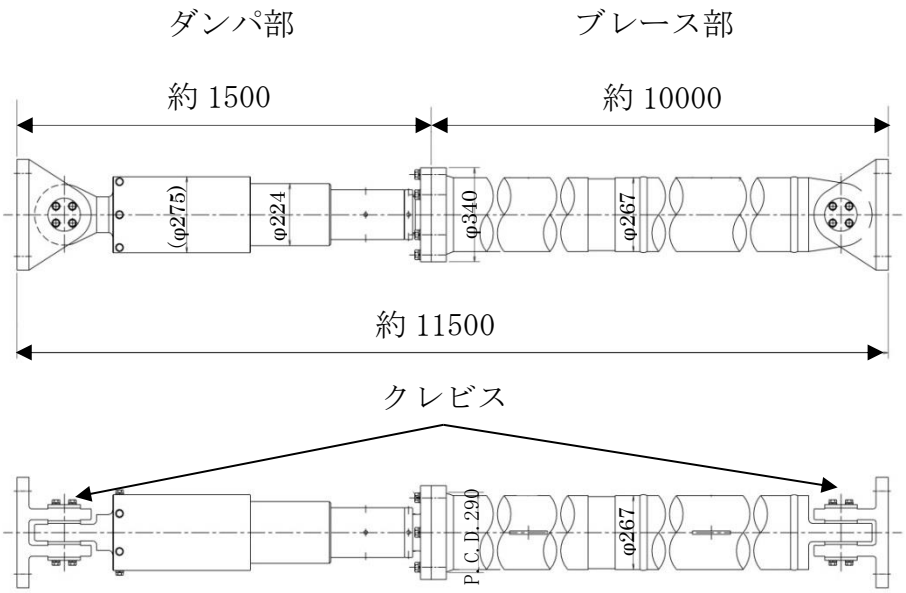
３号炉及び柏崎６／７号炉等の排気筒で実績がある。

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



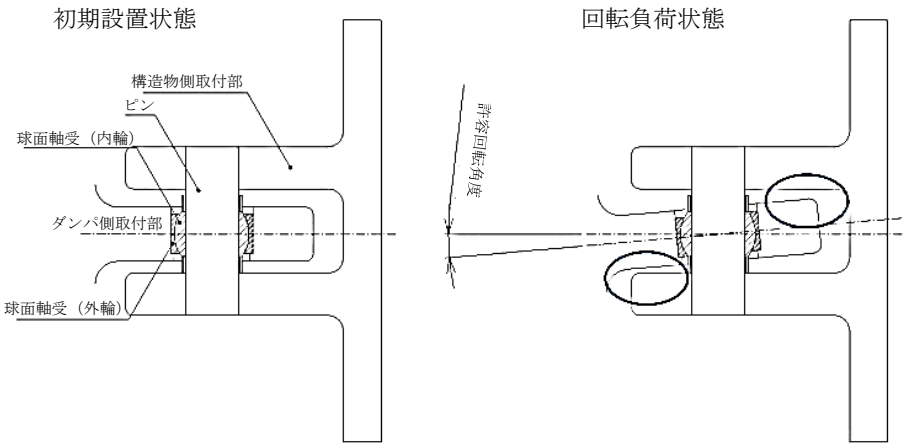
第 2－2 図　取水槽ガントリクレーンの構造

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



単位：(mm)

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

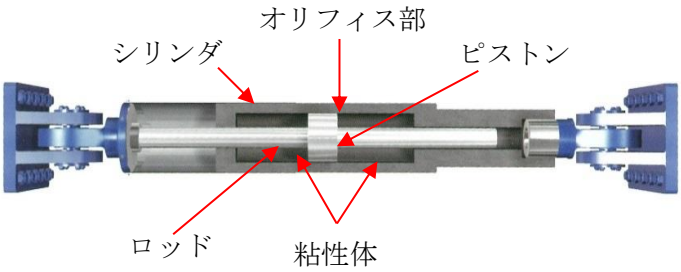


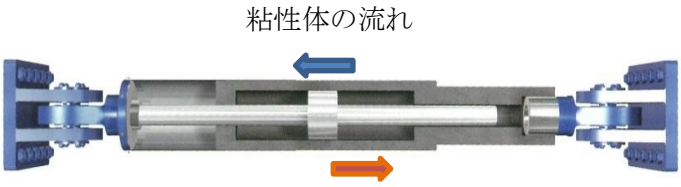
単軸粘性ダンパの外観（橋梁への設置例）

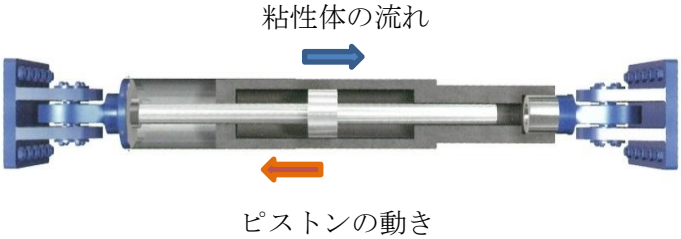


単軸粘性ダンパの構造

第 2－4 図　単軸粘性ダンパの外観及び構造





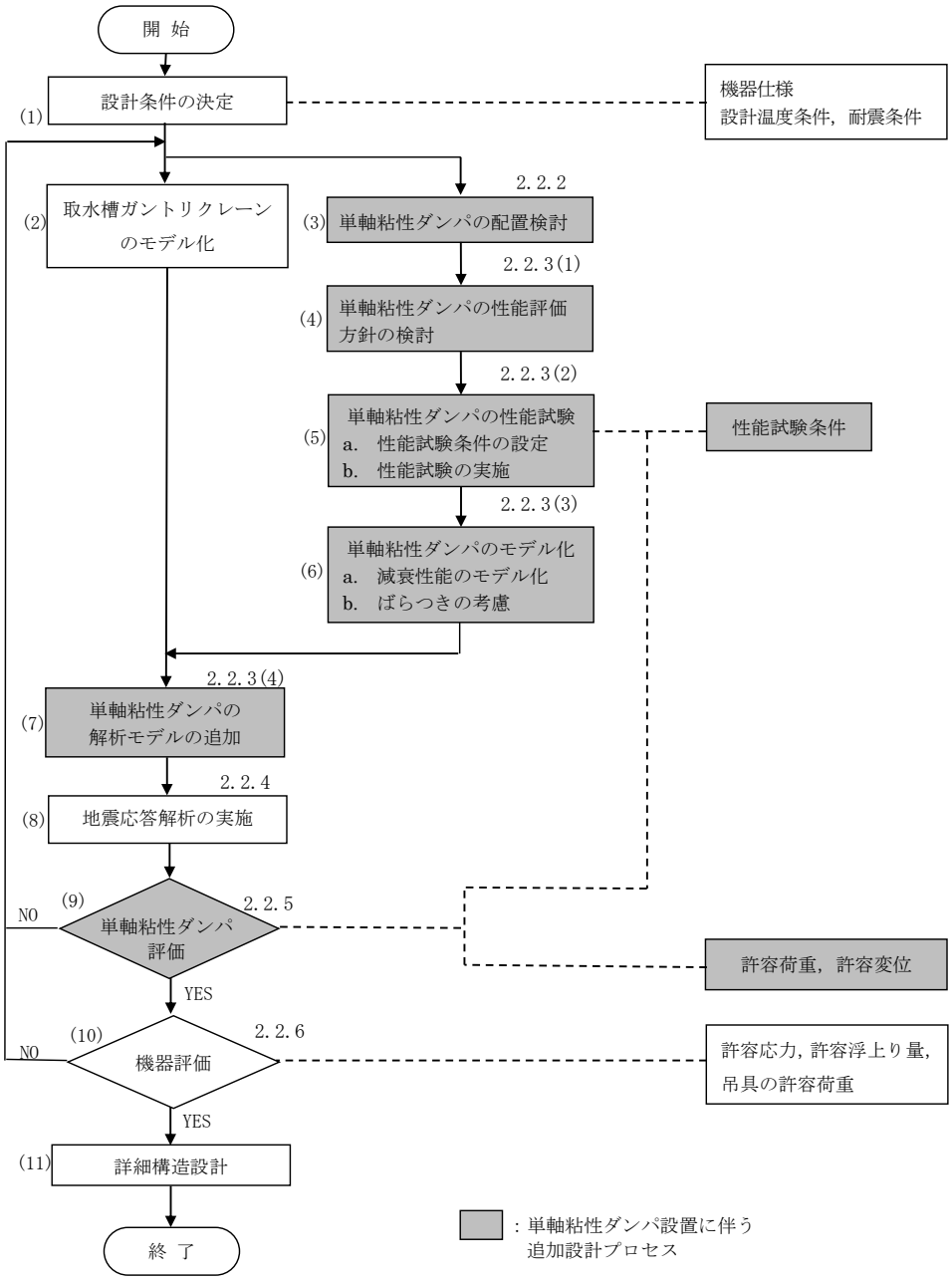


第 2－5 図　単軸粘性ダンパの動作原理

2.1.3　設計方針

単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの耐震設計フローを第2－6 図に，設計プロセスを第 2－2 表に示す。また，単軸粘性ダンパ設置前の取水槽ガントリクレーンと単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデルを第 2－7 図に示す。単軸粘性ダンパ設置前の地震応答解析モデルに制震装置を適切にモデル化して追加するという考え方は，既工認実績のある排気筒のモデル化の考え方と同様である。

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

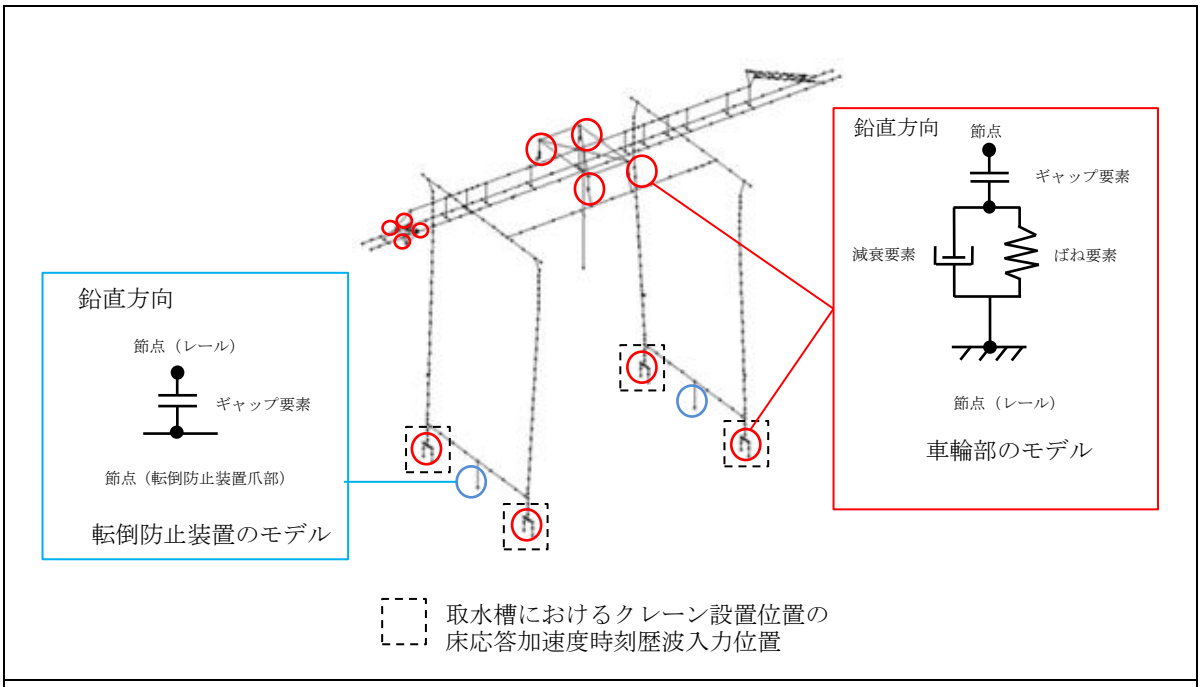


第2－6図　単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの耐震設計フロー

第2－2表　単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの設計プロセス

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

※1：番号は第2－6図の耐震設計フローの番号に対応している。



単軸粘性ダンパを設置前の取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデル

単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデル

第 2－7 図　取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデル

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

2.1.4　適用規格

取水槽ガントリクレーンの設計には，以下の規格（以下「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）

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="3">ＪＥＡＧ４６０１等</td><td rowspan="3">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></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。

2.2.2　単軸粘性ダンパの配置検討

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

2.2.3　性能試験及び解析モデル

(1)単軸粘性ダンパの性能評価方針の検討

単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの評価においては単軸粘性ダンパの減衰性能を適切に取得して設定することが重要であるため，単軸粘性ダンパの性能試験及びモデル化にあたって，減衰性能への影響の検討を要する項目を「免震構造の審査手引きの提案（平成26年1月）　独立行政法人原子力安全基盤機構」を参照して抽出した（添付資料1－1参照）。減衰性能への影響の検討結果を第2－4表に示す。減衰性能に影響する項目については，減衰性能を取得するための性能試験条件の設定において適切に考慮する，若しくは地震応答解析においてばらつきとして考慮する方針とする。

第2－4表　減衰性能への影響の検討結果（単軸粘性ダンパ）

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

(2)単軸粘性ダンパの性能試験

a．性能試験条件の設定

単軸粘性ダンパの実機使用条件を踏まえ，性能試験条件を設定する。

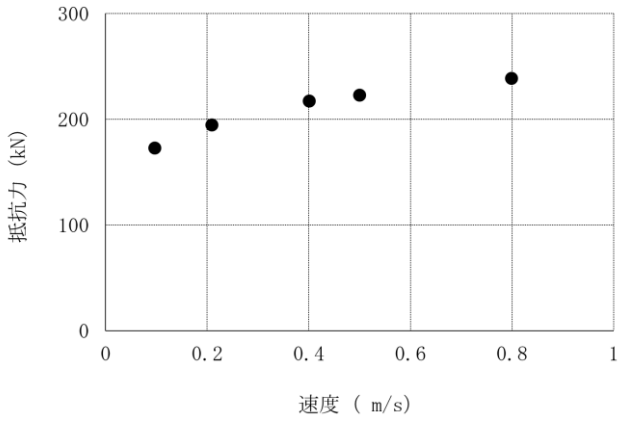
加振振動数による単軸粘性ダンパの減衰性能の変動は比較的小さいことを踏まえ，単軸粘性ダンパの許容変位100mmの中で実機使用条件を含む幅広い試験速度（0.1～0.8m/s）を設定して性能試験を実施する。単軸粘性ダンパの性能試験条件を第2－5表に示す。

b.　性能試験の実施

設定した性能試験条件により，単軸粘性ダンパの性能試験を実施する。性能試験の詳細について添付資料2－2に示す。地震応答解析に適用する単軸粘性ダンパの減衰性能は，実機に設置する単軸粘性ダンパについて性能試験を実施のうえ設定する。単軸粘性ダンパは抵抗力が速度の0.1乗に比例するように設計されており，非線形の挙動を示すことから，その減衰性能は抵抗力と速度の関係で把握する。性能試験結果により取得した減衰性能を第2－8図に示す。

第 2－5 表　単軸粘性ダンパの性能試験条件

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



第 2－8 図　性能試験結果

(3)単軸粘性ダンパのモデル化

a.　減衰性能のモデル化

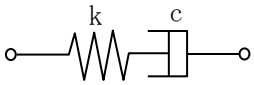
性能試験の結果に基づき，単軸粘性ダンパの減衰性能をモデル化する。

単軸粘性ダンパは，加振速度の変化に対して抵抗力の変化が小さく，振動数依存性も比較的小さいことから，速度の 0.1 乗に比例するダッシュポットを組み込んだ 2 パラメータの Maxwell モデルを用いる。単軸粘性ダンパの減衰性能を模擬する Maxwell モデルを第 2－9 図に示す。加振振動数 1.6Hz の場合の Maxwell モデルによる計算値と性能試験結果の比較を第 2－10 図に示す。この図から，速度と抵抗力の関係及び履歴曲線で囲まれる面積に相当する散逸エネルギーのいずれに関しても，Maxwell モデルにより減衰性能を精度良く表現できることが分かる。

b.　ばらつきの考慮

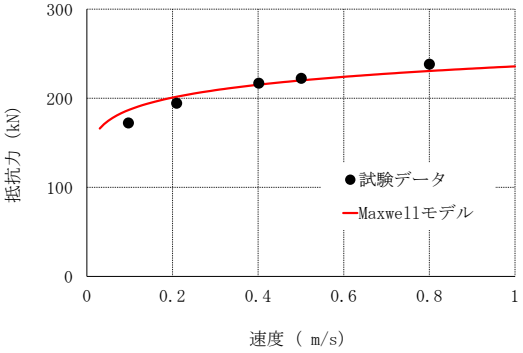
単軸粘性ダンパの減衰性能のばらつきを考慮して，地震応答解析に用いる解析モデルを設定する。性能試験結果に基づいてモデル化した単軸粘性ダンパの減衰性能に対して，第 2－4 表に基づき，振動数による±10％の変動と，製造公差による±10％のばらつきを合わせて±20％のばらつきを考慮する。単軸粘性ダンパの減衰性能は，ばらつきを考慮して標準性能＋20％，標準性能，標準性能－20％の 3 段階設定する。標準性能＋20%の減衰性能を設定す

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

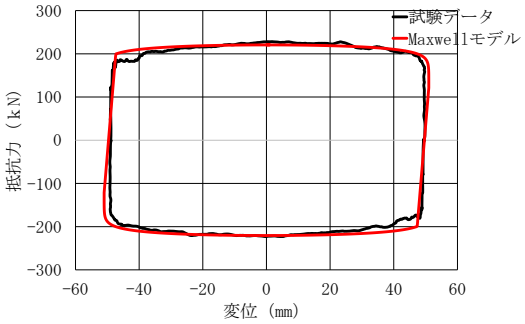


k：ばね剛性
c：速度の 0.1 乗に比例する
ダッシュポットの減衰係数

第 2－9 図　単軸粘性ダンパの Maxwell モデル

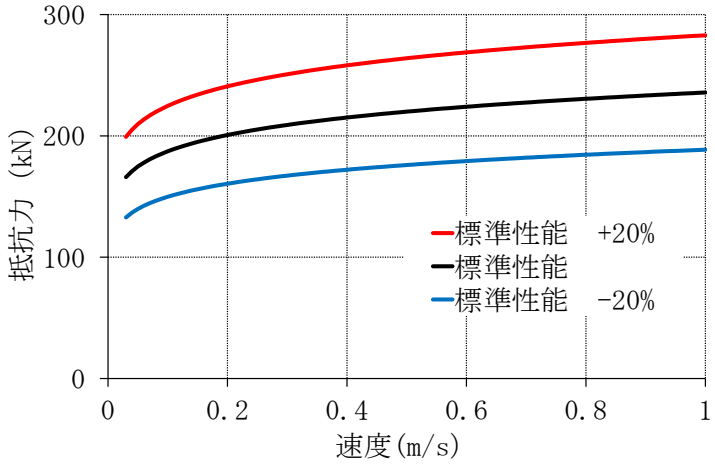


速度と抵抗力の関係



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



第 2－11 図　地震応答解析モデルにおける段階的な減衰性能の設定

(4) 単軸粘性ダンパの解析モデルの追加

単軸粘性ダンパをモデル化した Maxwell モデルを取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデルに追加することにより，単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデルを作成する。

2.2.4　地震応答解析手法

取水槽ガントリクレーンは，地震時に浮上りが発生する可能性があるため，浮上り状況を適切に評価するために３次元ＦＥＭ解析モデルによる非線形時刻歴応答解析を適用する（添付資料 2－4 参照)。標準性能＋20%，標準性能，標準性能－20%の３段階の減衰性能に対応した地震応答解析を行い，これらの最大応答を用いて耐震評価を行う（第 2－11 図参照)。

取水槽ガントリクレーンの減衰定数については，既往の研究等によって妥当性が確認され，クレーン類に適用実績のある値として水平，鉛直方向ともに別紙－７添付資料－6「最新知見として得られた減衰定数の採用について」に示す原子炉建物天井クレーンの減衰定数 2.0%を適用する。

スペクトルモーダル解析では，床応答加速度は地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動を考慮して周期方向に±10%拡幅した設計用床応答曲線を用いている。取水槽ガントリクレーンの地震応答解析では，時刻歴応答解析を採用することから，地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動の影響を考慮し，機器評価への影響が大きい地震動に対し，ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION Ⅲ，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。

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）

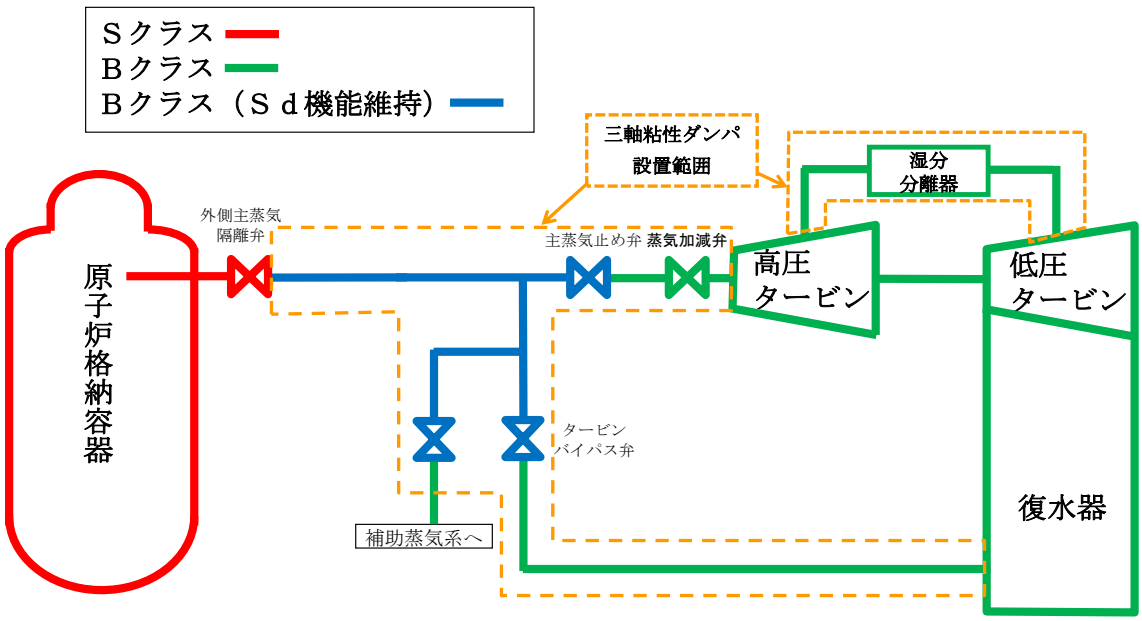
3.　三軸粘性ダンパの配管系への設置

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。

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

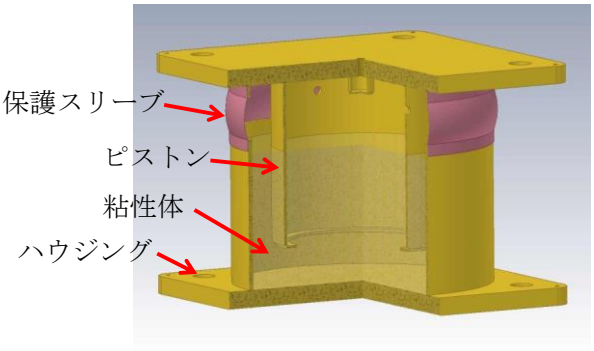
三軸粘性ダンパの外観及び構造を第 3－3 図に，仕様を第 3－1 表に，動作機構を第 3－4 図に示す。三軸粘性ダンパは，主にピストン，ハウジング及び粘性体から構成されており，粘性体への異物等の混入防止のために保護スリーブが取り付けられている。三軸粘性ダンパの粘性体は化学的に安定であり，消防法で定められている危険物に該当しない。三軸粘性ダンパは，粘性体の入ったハウジングにピストンが挿入された構造であり，粘性体とピストンの間に相対運動が生じることで，相対運動の方向と逆向きに流動抵抗力による減衰性能を発揮する。水平方向については回転対称な構造であるため，方向による減衰性能の違いはないが，鉛直方向については動作機構が異なるため，水平方向とは減衰性能が異なる。三軸粘性ダンパは自重等の静的荷重は支持せず，熱膨張のような低速度の運動を拘束しない。

三軸粘性ダンパは，原子力発電所に用いることができる制震装置としてASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION Ⅲ，DIVISION1－Subsection NF－Supports に記載されており（添付資料 3－3 参照），海外の原子力発電所において振動対策及び地震対策として設置実績がある。海外の原子力発電所における三軸粘性ダンパの設置例を第 3－5 図に示す。なお，国内においては原子力分野以外で，石油プラントの配管系（口径 300A），コンサートホール等の大規

模建物の制振システム及び振動台等の機械装置の防振対策等への採用実績があり，採用実績の例を第 3－6 図に示す。

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





第 3－3 図　三軸粘性ダンパの外観及び構造

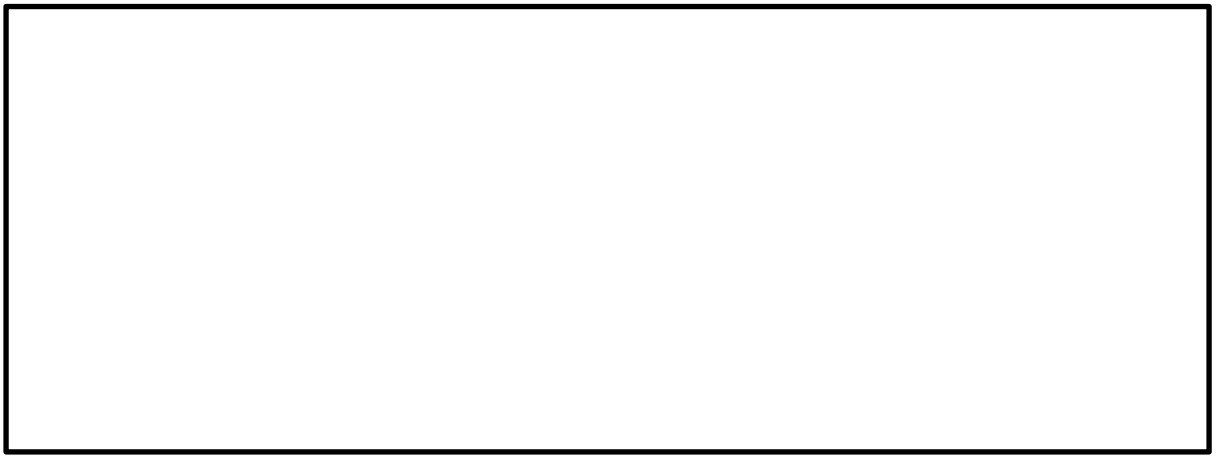
第 3－1 表　三軸粘性ダンパの仕様

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

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



第 3－4 図　三軸粘性ダンパの動作機構



第 3－5 図　海外の原子力発電所における三軸粘性ダンパの設置例



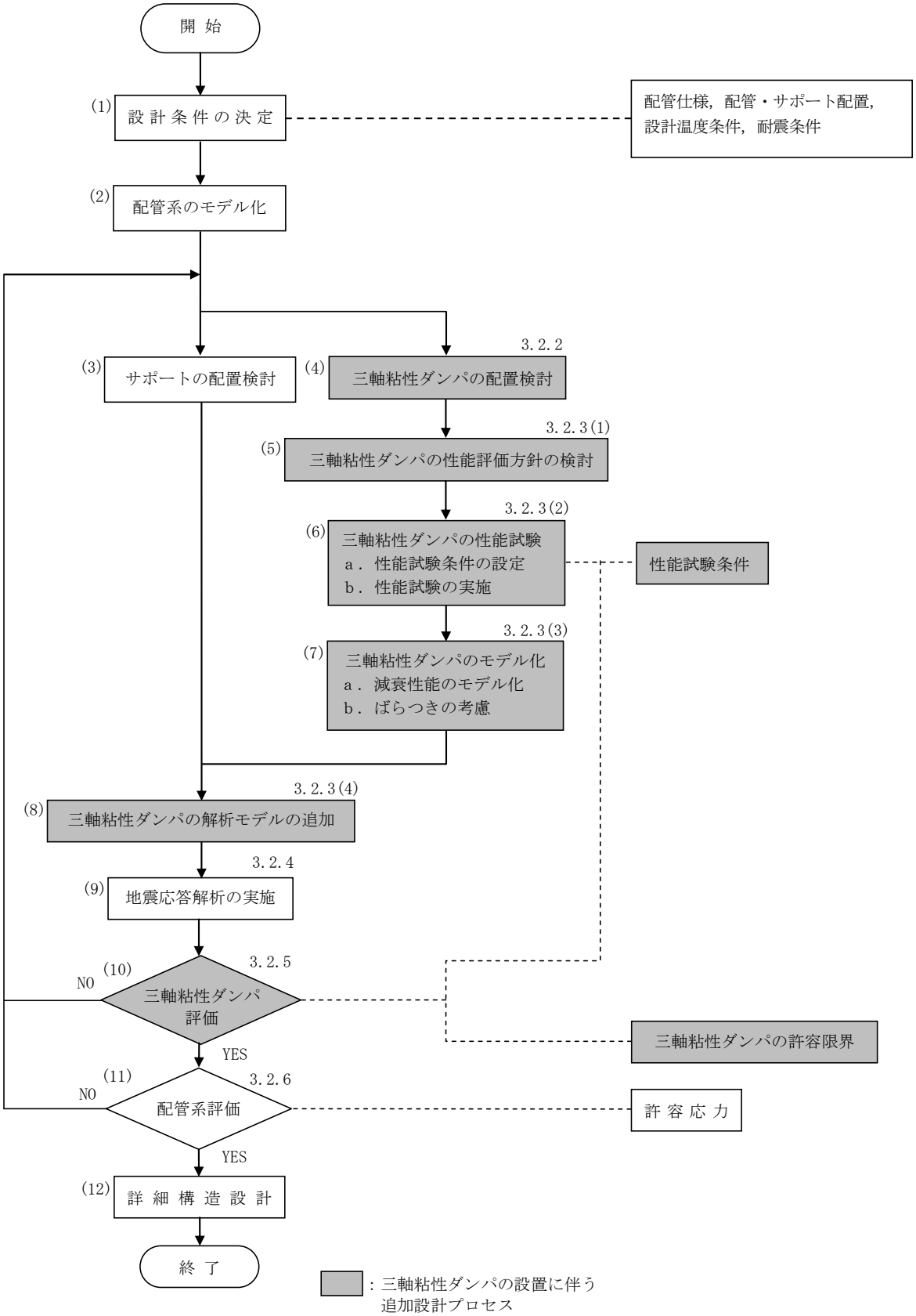
第 3－6 図　国内における三軸粘性ダンパの採用実績の例

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

3.1.3　設計方針

三軸粘性ダンパを設置した配管系の耐震設計フローを第3－7図に，設計プロセスを第3－2表に示す。また，三軸粘性ダンパ設置前の配管系と三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析モデルの一例を第3－8図に示す。三軸粘性ダンパ設置前の地震応答解析モデルに制震装置を適切にモデル化して追加するという考え方は，既工認実績のある排気筒のモデル化の考え方と同様である。また，４パラメータ Maxwell モデルによる三軸粘性ダンパのモデル化は，海外の原子力発電所において実績のあるモデル化手法である。

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

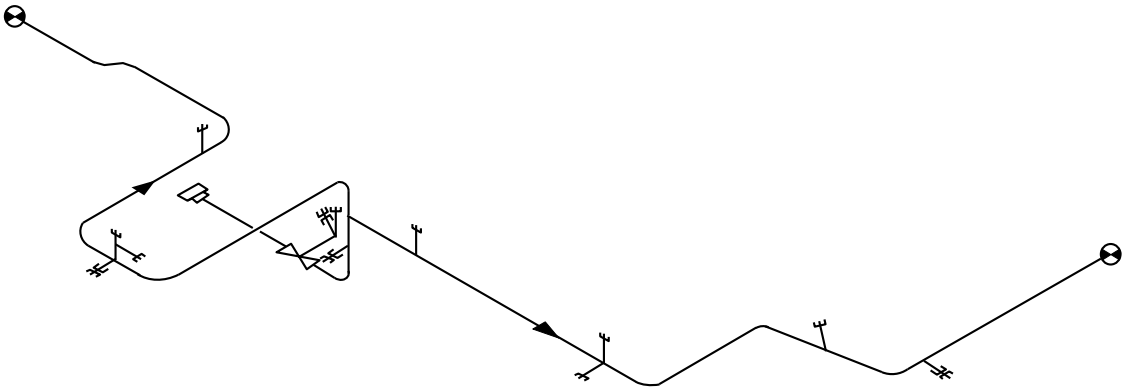


第 3－7 図　三軸粘性ダンパを設置した配管系の耐震設計フロー

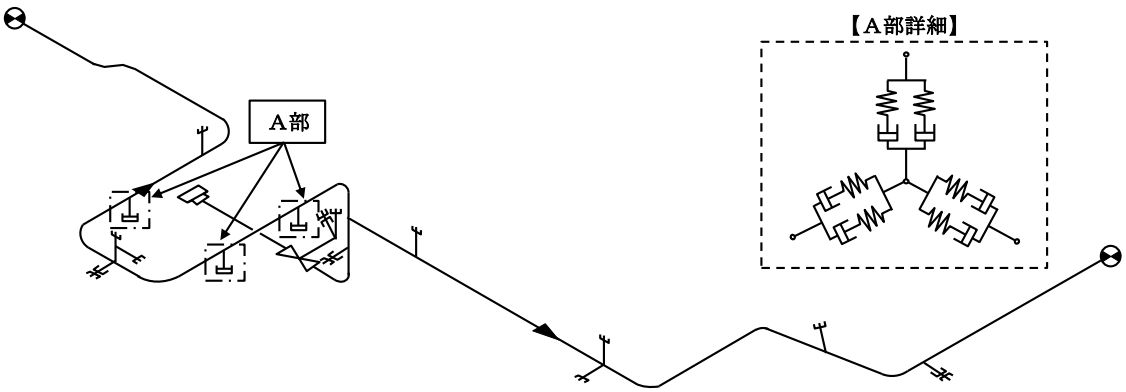
第 3－2 表　三軸粘性ダンパを設置した配管系の設計プロセス

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

※１：番号は第 3－7 図の耐震設計フローの番号に対応している。



三軸粘性ダンパ設置前の配管系の地震応答解析モデル



三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析モデル

第 3－8 図　配管系の地震応答解析モデル

3.1.4　適用規格

配管系の設計に用いる規格としては,原子力発電所の施設設計に用いる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="4">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></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>

3.2　耐震評価方法

3.2.1　評価方針

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

まず,配管系の地震荷重の低減に効果的な三軸粘性ダンパの配置を検討する。次に，三軸粘性ダンパの減衰性能への影響の検討を要する項目を抽出し，性能試験及びモデル化における対応方針の検討を行う。三軸粘性ダンパのモデル化を行うために，実機使用条件を踏まえた性能試験条件により，三軸粘性ダンパを用いた性能試験を実施する。性能試験の結果に基づき減衰性能を設定し，三軸粘性ダンパを4パラメータMaxwellモデルによりモデル化する。この4パラメータMaxwellモデルを配管系の地震応答解析モデルに追加し,地震応答解析を行う。三軸粘性ダンパの評価として，地震応答解析により得られた応答値が性能試験条件の範囲内であること及び三軸粘性ダンパの許容限界が満たされ

ていることを確認する。

3.2.2　三軸粘性ダンパの配置検討

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

3.2.3　性能試験及び解析モデル

(1)三軸粘性ダンパの性能評価方針の検討

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

三軸粘性ダンパを設置した配管系の評価においては三軸粘性ダンパの減衰性能を適切に取得して設定することが重要であるため，三軸粘性ダンパの性能試験及びモデル化にあたって，減衰性能への影響の検討を要する項目を「免震構造の審査手引きの提案（平成 26 年 1 月）　独立行政法人原子力安全基盤機構」を参照して抽出した（添付資料 1－1 参照)。抽出した項目と減衰性能への影響の検討結果を第 3－4 表に示す。減衰性能に影響する項目については，減衰性能を取得するための性能試験条件の設定において適切に考慮する，若しくは地震応答解析においてばらつきとして考慮する方針とする。

第3－4表　減衰性能への影響の検討結果（三軸粘性ダンパ）

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

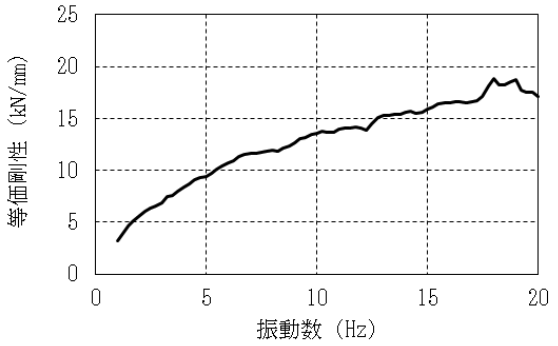
設定した性能試験条件により，三軸粘性ダンパの性能試験を実施する。性能試験の詳細について添付資料3－8に示す。地震応答解析に適用する三軸粘性ダンパの減衰性能は，実機に設置する各型式の三軸粘性ダンパについて性能試験を実施のうえ設定する。

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。

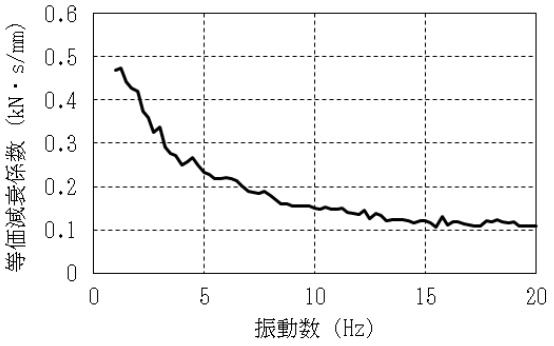
第3－5表　三軸粘性ダンパの性能試験条件の設定

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

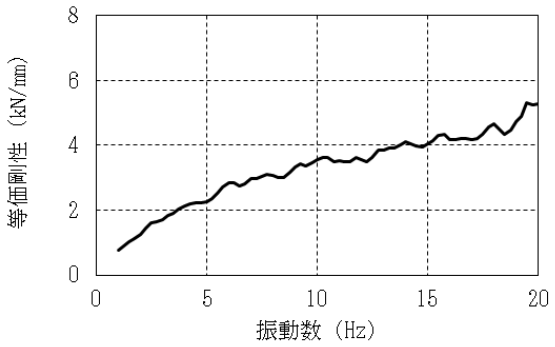
※１：実機使用条件を想定して設定する。



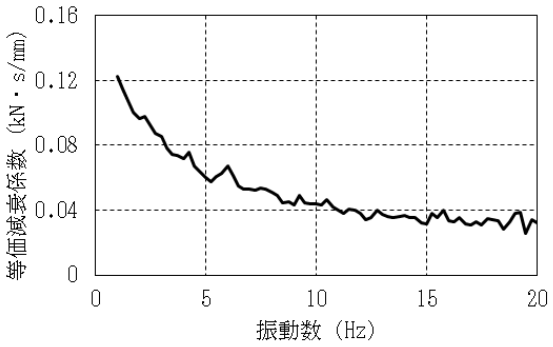
（H－1）等価剛性 K_{High}（水平方向）



（H－2）等価減衰係数 C_{High}（水平方向）

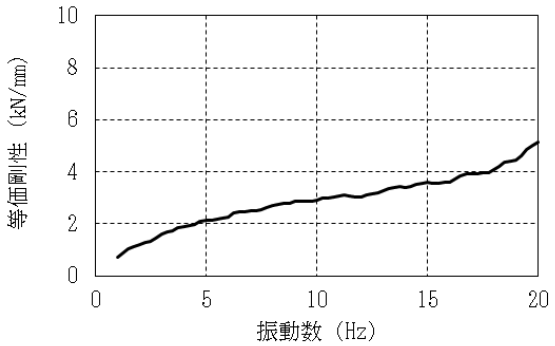


（V－1）等価剛性 K_{High}（鉛直方向）

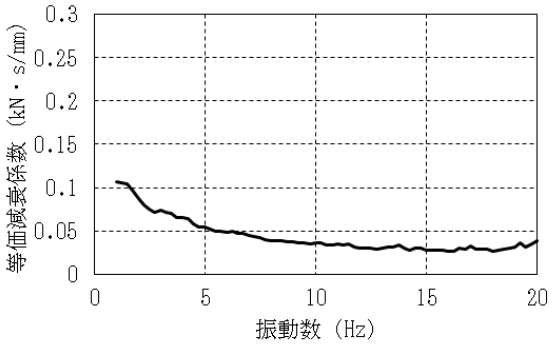


（V－2）等価減衰係数 C_{High}（鉛直方向）

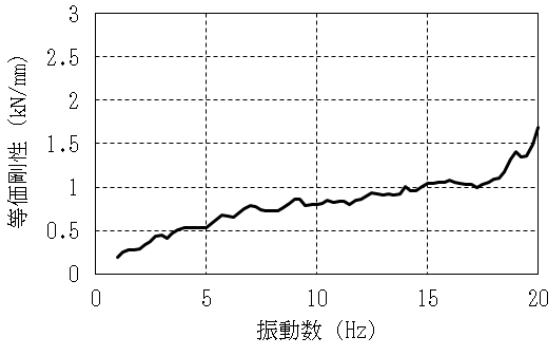
第 3－9 図　高側ダンパ試験性能（中型の例）



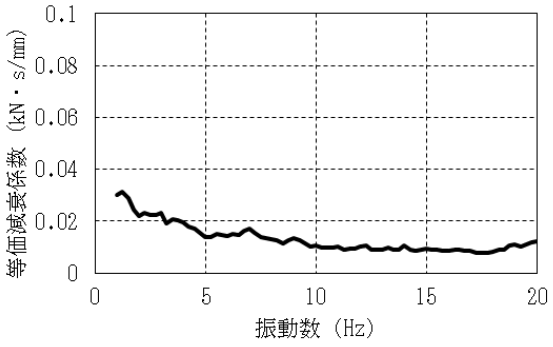
（H－1）等価剛性 K_{Low}（水平方向）



（H－2）等価減衰係数 C_{Low}（水平方向）



（V－1）等価剛性 K_{Low}（鉛直方向）



（V－2）等価減衰係数 C_{Low}（鉛直方向）

第 3－10 図　低側ダンパ試験性能（中型の例）

(3)三軸粘性ダンパのモデル化

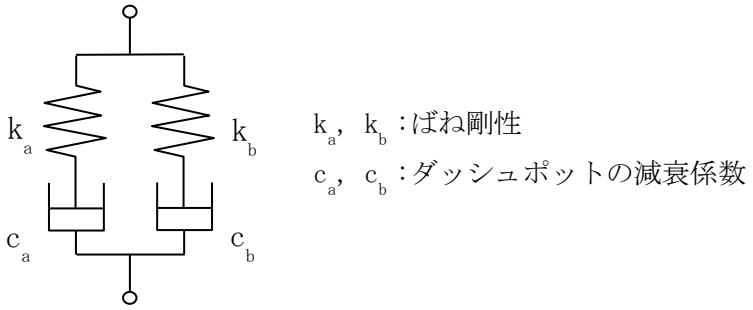
ａ．減衰性能のモデル化

性能試験の結果に基づき，三軸粘性ダンパの減衰性能をモデル化する。三軸粘性ダンパの等価剛性 K 及び等価減衰係数 C は振動数依存性を有しているが，４パラメータ Maxwell モデルにより，その振動数特性を精度良くモデル化できる。４パラメータ Maxwell モデルを第 3－11 図に，４パラメータ Maxwell モデルによる性能試験結果のモデル化を第 3－12 図及び第 3－13 図に示す。

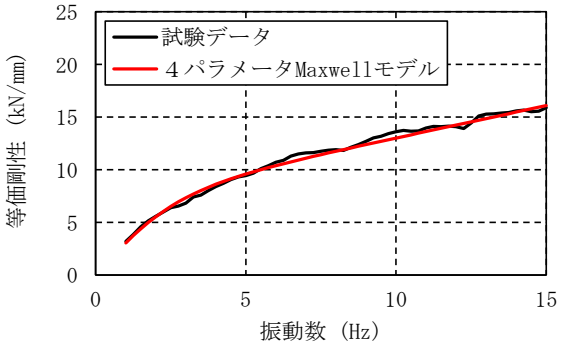
三軸粘性ダンパの減衰性能は，水平方向及び鉛直方向でそれぞれ高側ダンパ試験性能（K_{High}，C_{High}）及び低側ダンパ試験性能（K_{Low}，C_{Low}）を性能試験により取得するため，４パラメータ Maxwell モデルは各方向に対して高側及び低側を設定する。

ｂ．ばらつきの考慮

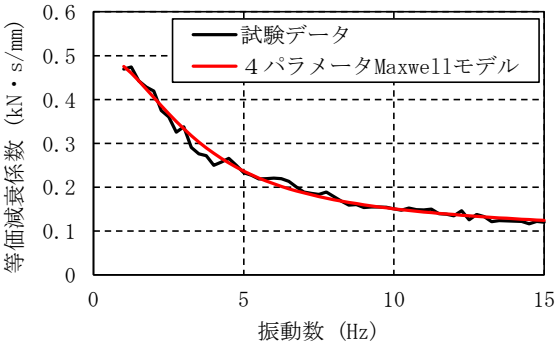
三軸粘性ダンパの減衰性能のばらつきを考慮して，地震応答解析に用いる解析モデルを設定する。性能試験結果に基づいてモデル化した三軸粘性ダンパの高側及び低側の減衰性能に対して，更に第 3－4 表のうち製造公差による±10％のばらつきと，据付公差による±20％のばらつきを合わせて±30％のばらつきとして考慮し，解析上の減衰性能の上限（$K_1=1.3\times K_{High}$，$C_1=1.3\times C_{High}$）及び下限（$K_5=0.7\times K_{Low}$，$C_5=0.7\times C_{Low}$）を第 3－14 図のように設定する。また，保守的に変動及びばらつき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。



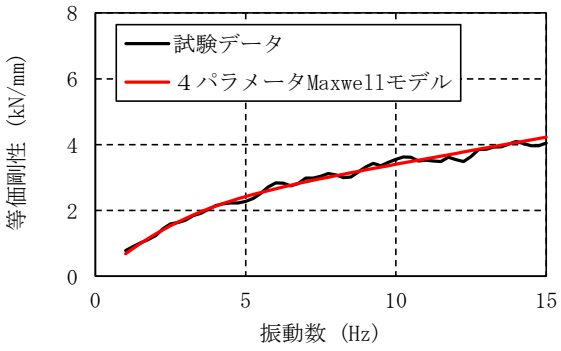
第 3－11 図　三軸粘性ダンパの４パラメータ Maxwell モデル



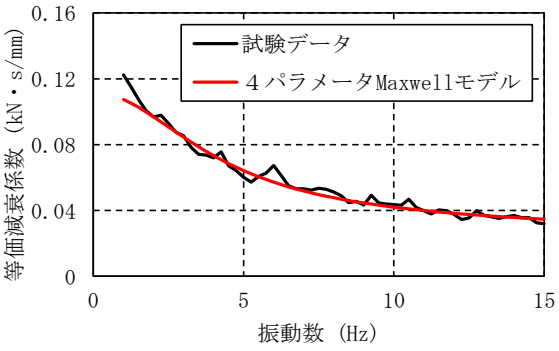
（H－1）等価剛性 K_{High}（水平方向）



（H－2）等価減衰係数 C_{High}（水平方向）

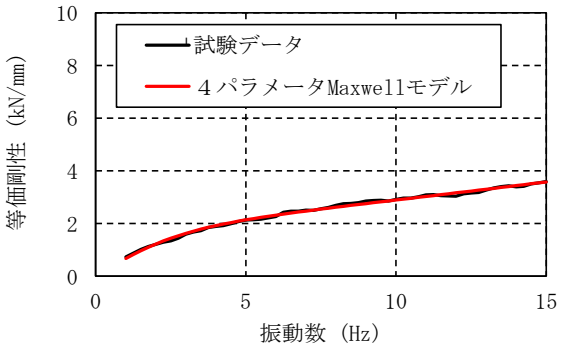


（V－1）等価剛性 K_{High}（鉛直方向）

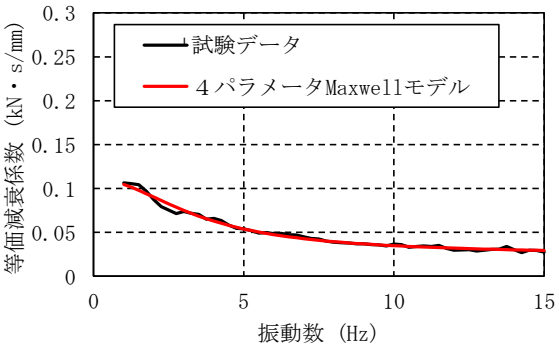


（V－2）等価減衰係数 C_{High}（鉛直方向）

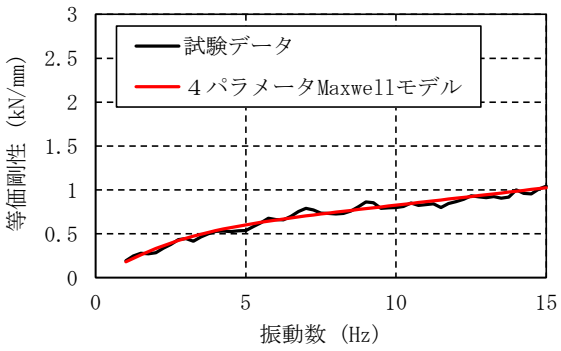
第 3－12 図　高側ダンパ試験性能のモデル化（中型の例）



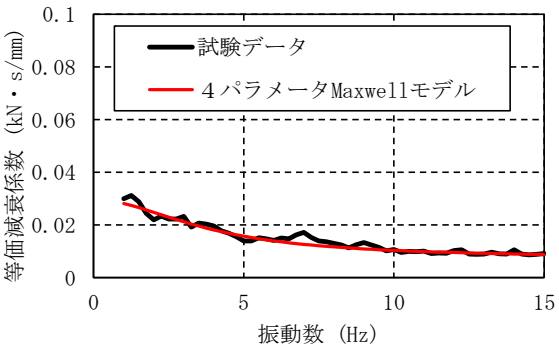
（H－1）等価剛性 K_{Low}（水平方向）



（H－2）等価減衰係数 C_{Low}（水平方向）



（V－1）等価剛性 K_{Low}（鉛直方向）

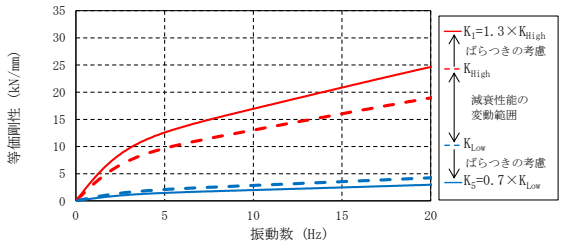


（V－2）等価減衰係数 C_{Low}（鉛直方向）

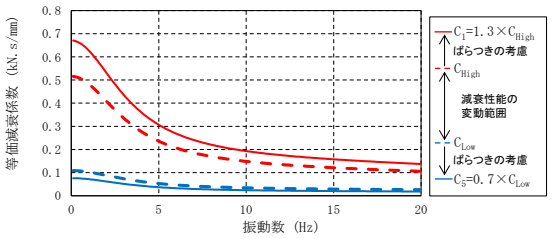
第 3－13 図　低側ダンパ試験性能のモデル化（中型の例）

第 3－6 表　地震応答解析モデルにおける減衰性能の設定

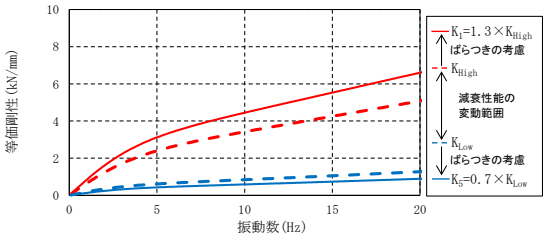
解析モデル	減衰性能
1	K_1，C_1（上限）
2	均等に内挿
3	
4	
5	K_5，C_5（下限）



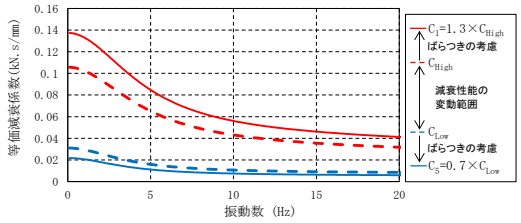
（H－1）等価剛性（水平方向）



（H－2）等価減衰係数（水平方向）

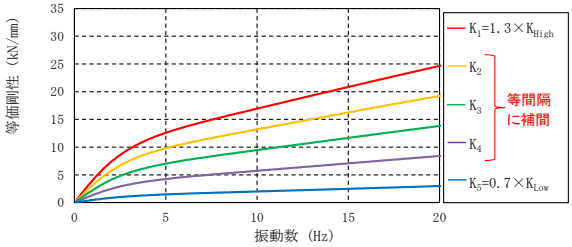


（V－1）等価剛性（鉛直方向）

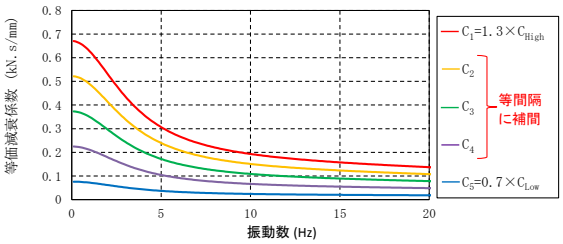


（V－2）等価減衰係数（鉛直方向）

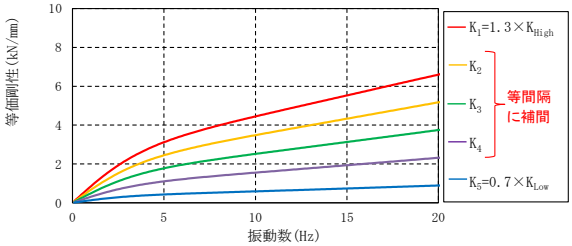
第 3－14 図　性能試験による減衰性能の上限と下限の設定（中型の例）



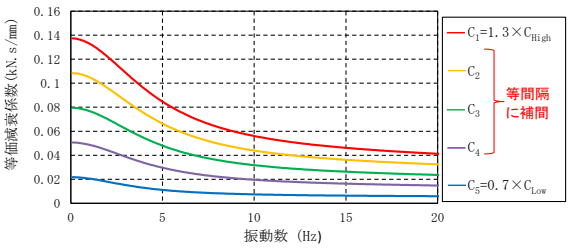
（H－1）等価剛性（水平方向）



（H－2）等価減衰係数（水平方向）



（V－1）等価剛性（鉛直方向）



（V－2）等価減衰係数（鉛直方向）

第 3－15 図　地震応答解析モデルにおける段階的な減衰性能の設定（中型の例）

(3)三軸粘性ダンパの解析モデルの追加

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

3.2.4　地震応答解析手法

三軸粘性ダンパを設置した配管系は減衰が大きくなるため，地震応答解析手法としてスペクトルモーダル解析は適用できず，時刻歴応答解析を適用する（添付資料 3－9 参照)。三軸粘性ダンパの減衰性能の上限と下限を含めた 5 段階の減衰性能に対応した地震応答解析を行い，これらの最大応答を用いて耐震評価を行う。

配管系の減衰定数については，別紙－７添付資料－6「最新知見として得られた減衰定数の採用について」に示す配管系の減衰定数を適用する。

スペクトルモーダル解析では,床応答加速度は地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動を考慮して周期方向に±10％拡幅した設計用床応答曲線を用いている。三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析では，時刻歴応答解析を採用することから,地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動の影響を考慮し,機器評価への影響が大きい地震動に対し,ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION Ⅲ, DIVISION1－NONMANDATORY APPENDIX N (ARTICLE N－1222.3 Time History Broadening)に規定された手法等により検討を行う（添付資料 1－3 参照)。

3.2.5　三軸粘性ダンパ評価

三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析によって得られた応答値が，三軸粘性ダンパの減衰性能を取得した性能試験の試験条件の範囲内であることを確認する。

また，三軸粘性ダンパが許容限界を満足し，地震時にその機能を維持する設計とするため,三軸粘性ダンパは許容荷重及び許容変位を満たすように設計する。なお，許容変位の評価においては配管系の熱移動も考慮する。

3.2.6　配管系評価

三軸粘性ダンパを設置する外側主蒸気隔離弁から低圧タービン,復水器までの主蒸気系配管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。

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ＢＡＳの許容応力
		支持構造物	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。	許容応力状態ＢＡＳの許容応力
		三軸粘性ダンパ	三軸粘性ダンパの荷重及び変位が許容限界を超えないことを確認する。	許容荷重及び許容変位
	弾性設計用地震動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ＢＡＳの許容応力
		支持構造物	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。	許容応力状態ＢＡＳの許容応力
		三軸粘性ダンパ	三軸粘性ダンパの荷重及び変位が許容限界を超えないことを確認する。	許容荷重及び許容変位

3.3　耐震評価結果

3.3.1　評価条件

(1)評価対象配管モデル

外側主蒸気隔離弁から高圧タービン，復水器までの配管系を対象として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。

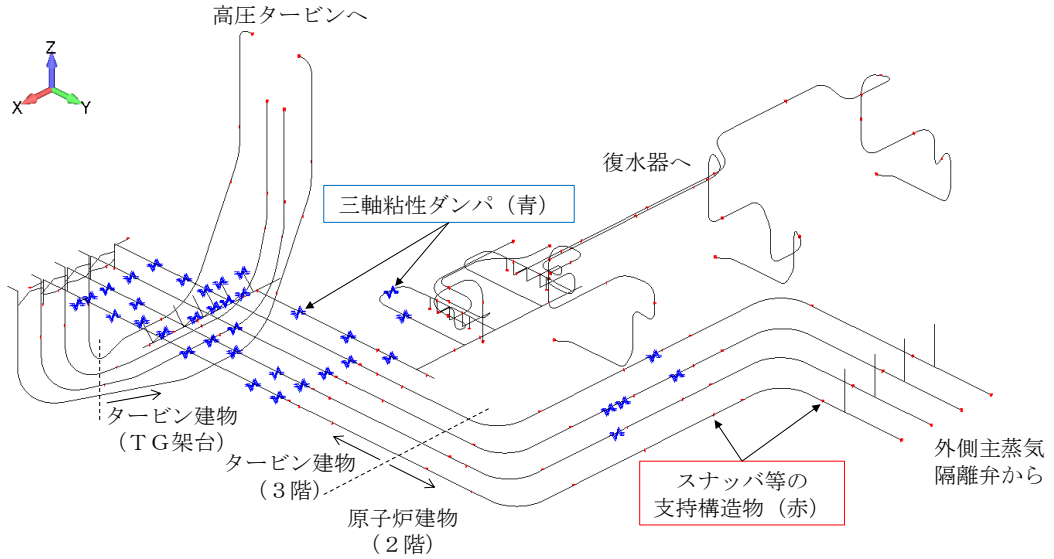
(2)入力地震動

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。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。

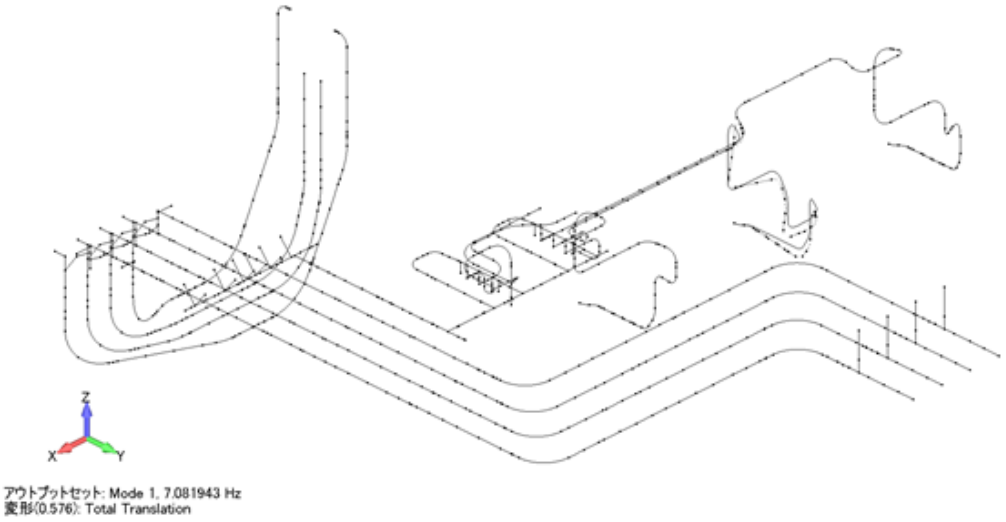


第 3－16 図　評価対象の配管モデル

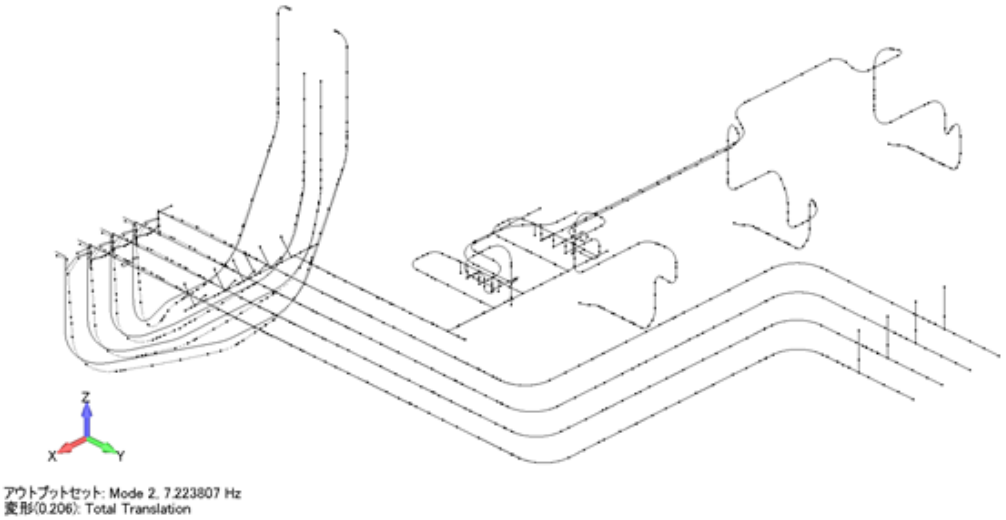
第 3－8 表　固有周期及び刺激係数

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

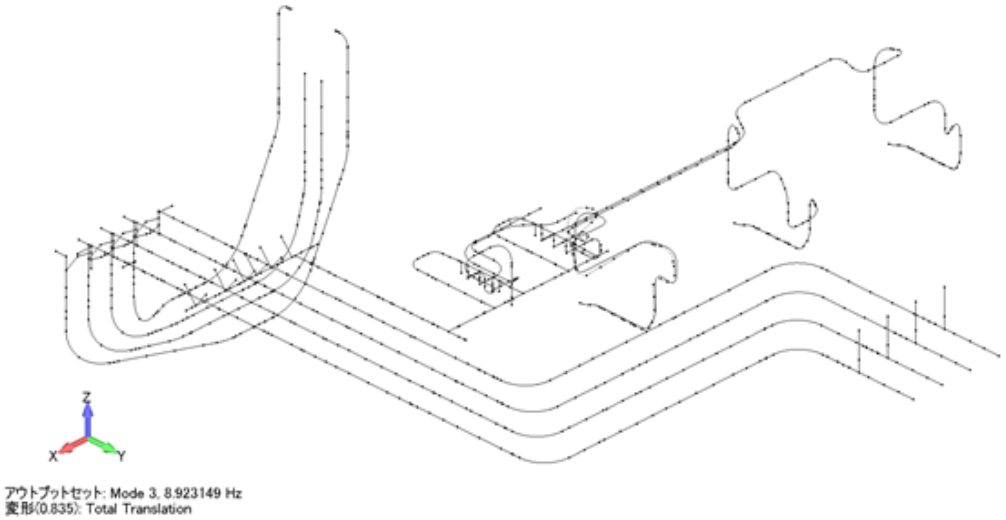
※1 ：モード質量が 1 となるように固有ベクトルを正規化して算出



（ａ） １次モード

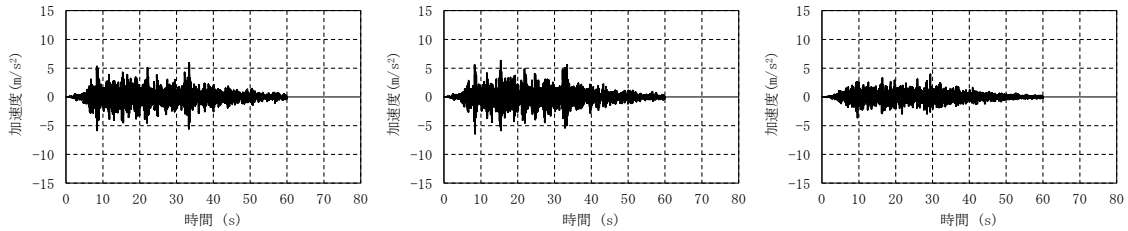


（ｂ） ２次モード



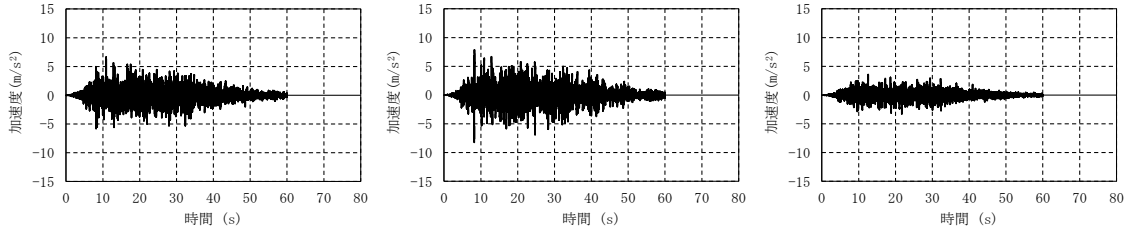
（ｃ） ３次モード

第 3－17 図　振動モード図



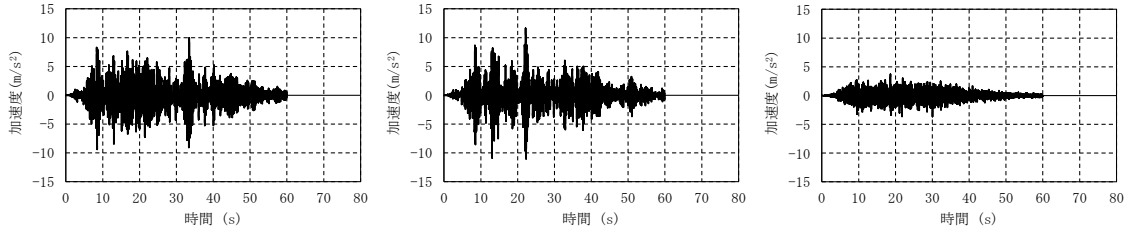
（ａ）ＮＳ方向　　（ｂ）ＥＷ方向　　（ｃ）鉛直方向

第 3－18 図　原子炉建物（２階：EL. 23800）の加速度時刻歴



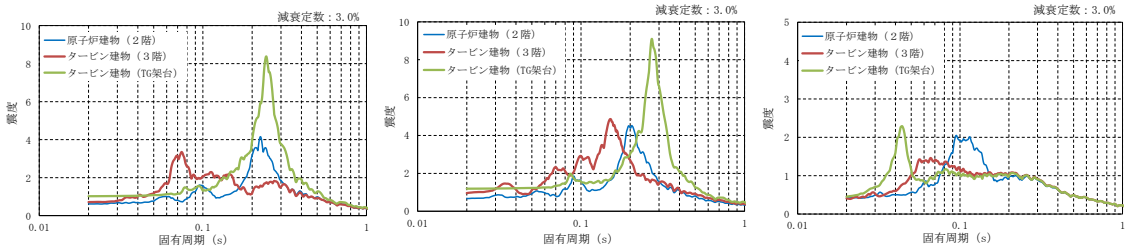
（ａ）ＮＳ方向　　（ｂ）ＥＷ方向　　（ｃ）鉛直方向

第 3－19 図　タービン建物（３階：EL. 20600）の加速度時刻歴



（ａ）ＮＳ方向　　（ｂ）ＥＷ方向　　（ｃ）鉛直方向

第 3－20 図　タービン建物（TG 架台：EL. 20480）の加速度時刻歴



（ａ）ＮＳ方向　　（ｂ）ＥＷ方向　　（ｃ）鉛直方向

第 3－21 図　床応答スペクトル

第 3－9 表　配管の構造強度評価結果

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

第 3－10 表　三軸粘性ダンパの構造強度評価結果

評価項目		発生値	許容限界
最大荷重※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)

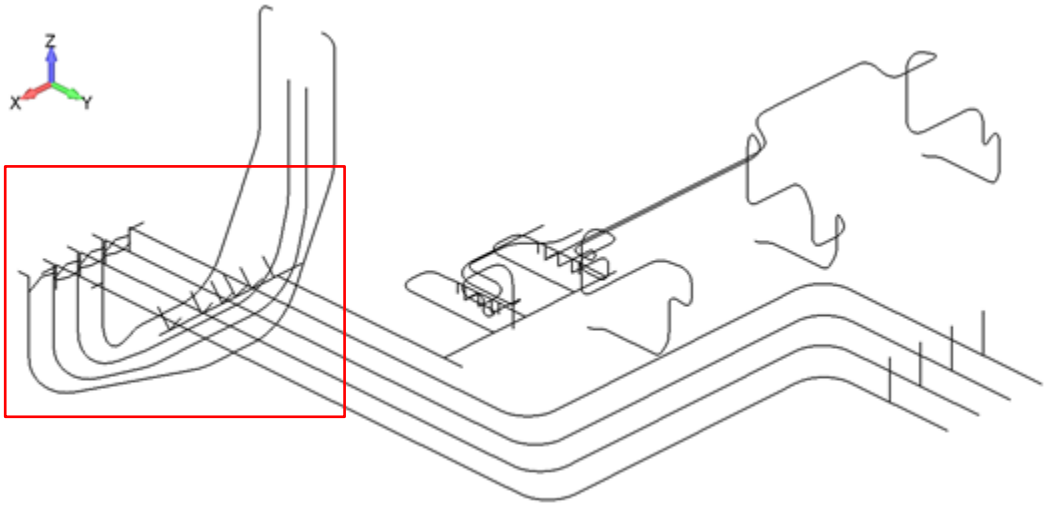
※1：最も厳しい結果を記載

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

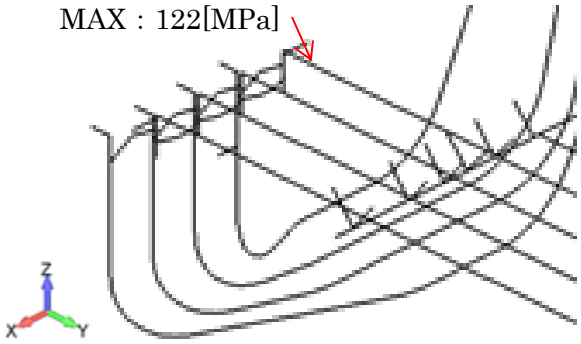
評価項目		発生値	解析条件
最大変位※1	水平	4.3(mm)	
	鉛直	2.7(mm)	
累積消費エネルギー※1	水平	12.3(kJ)	
	鉛直	3.6(kJ)	

※1：最も厳しい結果を記載

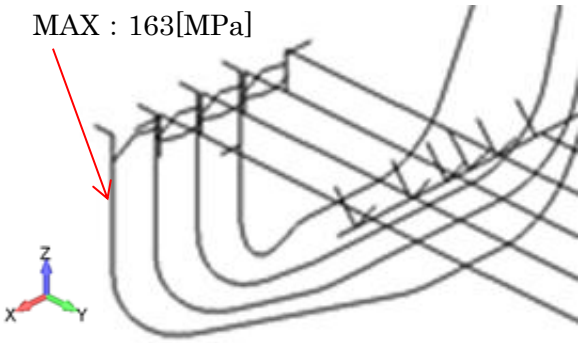
本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



（ａ） 全体図



（ｂ） 一次応力発生箇所拡大図



（ｃ） 一次＋二次応力発生箇所拡大図

第 3－22 図　配管の最大応力発生箇所

4.　実績との比較

既工認実績のある制震装置との差異に着目し，機器・配管系への適用性や減衰性能への影響の観点から検討を要する項目を整理した。その結果，追加の検討項目は抽出されず，必要な検討が行われていることを確認した。既工認実績との差異の確認結果について，詳細は添付資料 1－2 に示す。

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

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

5.　まとめ

単軸粘性ダンパ及び三軸粘性ダンパは，その減衰性能を Maxwell モデルにより精度良くモデル化できる。単軸粘性ダンパ及び三軸粘性ダンパの減衰性能の表現方法及びモデル化の考え方について，添付資料 1－5 で比較して示した。また，単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーン及び三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析では，減衰性能の変動及びばらつきを踏まえて段階的に設定した減衰性能に対応した地震応答解析を行い，これらの最大応答を用いて耐震評価を行う。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 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.

添付資料 1－1　制震装置の減衰性能に影響する検討項目の抽出

制震装置の減衰性能の設定において考慮すべき事項について「免震構造の審査手引きの提案（平成 26 年 1 月）　独立行政法人原子力安全基盤機構」を参照して第 1－1－1 添表に整理した。各項目について単軸粘性ダンパ及び三軸粘性ダンパの構造，使用条件，性能試験方法等を踏まえて，減衰性能への影響の検討要否を第 1－1－2 添表に整理した。第 1－1－2 添表で検討要となった項目については，制震装置のモデル化にあたって減衰性能への影響を検討する。

第 1－1－1 添表　免震構造の審査手引きの提案における検討項目 (1/3)

項目	内容	記載箇所
①制震装置に応じた減衰性能の設定	制震装置に応じた減衰性能の設定方法について検討する。	【本文】5.4.8(機器免震に係る考慮事項)(2) 免震装置の構造に起因する応答特性の考慮 p.31 【解説】5.4.8(機器免震に係る考慮事項)(2)免震装置の構造に起因する応答特性の考慮 p.38 【審査等のポイント】5.4.8(機器免震に係る考慮事項)(2)免震装置の構造に起因する応答特性の考慮 p.42
②地震入力方向	地震入力方向による減衰性能の変化について検討する。	【本文】5.4.8(機器免震に係る考慮事項)(1)地震入力方向による免震特性変化の考慮 p.31 【解説】5.4.8(機器免震に係る考慮事項)(1)地震入力方向による免震特性変化の考慮 p.38 【審査等のポイント】5.4.8(機器免震に係る考慮事項)(1)地震入力方向による免震特性変化の考慮 p.42
③使用環境	使用環境を踏まえて減衰性能を設定する。	【本文】5.4.6 p.30 【解説】5.4.6 p.33

第1－1－1添表　免震構造の審査手引きの提案における検討項目（2/3）

項目	内容	記載箇所
④温度	減衰性能の変化要因として温度による影響を検討する。	【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〇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〇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〇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〇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〇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〇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〇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〇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〇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〇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〇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〇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〇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〇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〇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〇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〇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〇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

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使用環境条件	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。
	⑧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。
⑤速度		－	単軸粘性ダンパは非線形の挙動を示すことから，減衰性能は速度と抵抗力の関係として把握し，これを適切にモデル化する。	○	速度（振幅）※2による減衰性能への影響を確認する。
⑦連続加振		○	連続加振による減衰性能への影響を確認する。	○	連続加振による減衰性能への影響を確認する。
ばらつき	⑨製造公差	○	製造公差による減衰性能のばらつきが生じる。	○	製造公差による減衰性能のばらつきが生じる。
	⑩据付公差	－	単軸粘性ダンパはオリ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小さい。また，据付時にシムによりピストン位置を調整するため，据付公差は小さい。	○	据付公差による減衰性能のばらつきが生じる。
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，擁壁，塵埃防止カバー等の制震装置の動作を制限するものは設置しておらず，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結露しない。	－	変位防止用ストッパー，台座，擁壁等の制震装置の動作を制限するものは設置しておらず，塵埃防止カバーにあたる保護スリーブは柔軟性を有しておりピストンの動作に影響するものではないため，減衰性能に影響はない。また，屋内で使用し，使用環境において結露は生じない。
⑫地震以外の外的事象		－	津波対策の実施により津波の敷地内への流入は防止しており，津波による減衰性能への影響を考慮する必要はない。なお，シリンダは密閉構造であるため，雨水の影響はない。また，単軸粘性ダンパは円筒形状であり，風及び積雪により受ける荷重は小さく，動作への影響はない。	－	屋内で使用するため，津波，風，積雪等の外的事象による減衰性能への影響はない。

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

※2：三軸粘性ダンパの減衰性能は振動数に応じて表現しており，ある振動数において加振速度を変更することは加振振幅を変更することと等しいため，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。

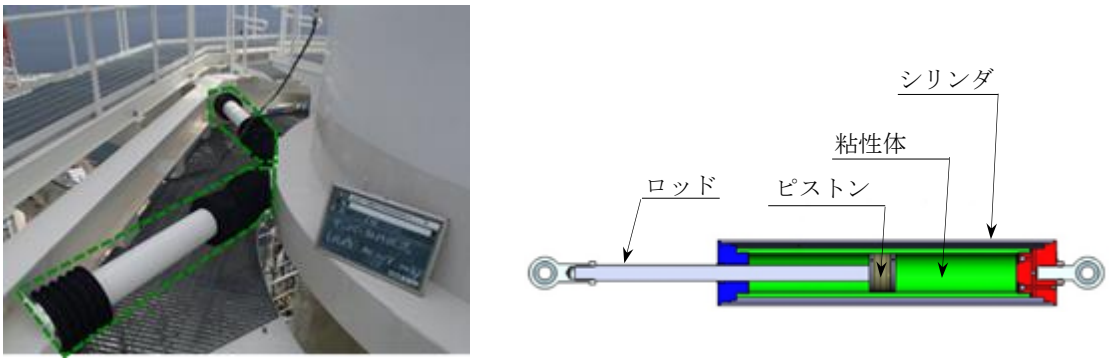
添付資料 1－2　既工認実績のある制震装置との差異の整理

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	－	－

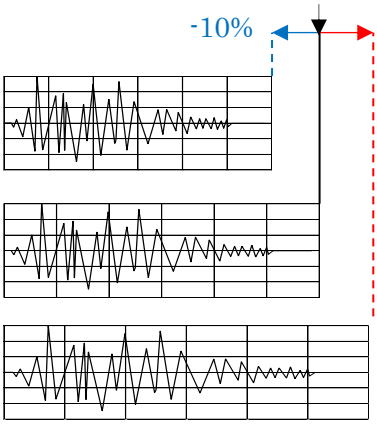
第1－2－3添表　適用実績のある制震装置との差異の整理（三軸粘性ダンパ）

		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	－	－

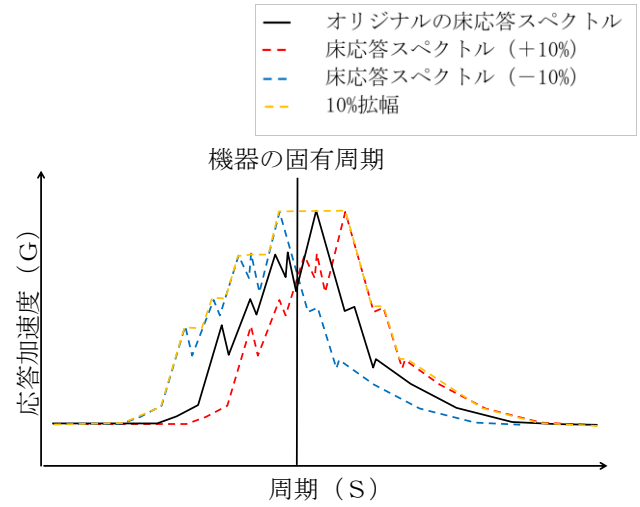
添付資料１－３　Time History Broadening の概要

ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION Ⅲ, DIVISION1－NONMANDATORY APPENDIX N（ARTICLE N－1222.3 Time History Broadening）より引用



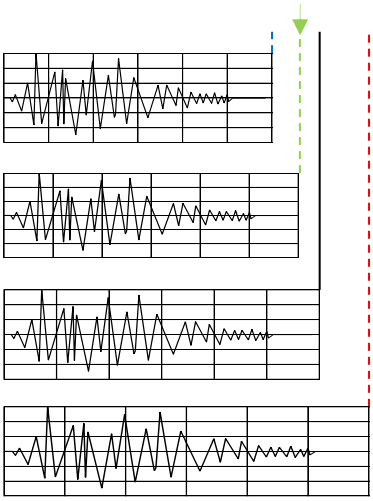


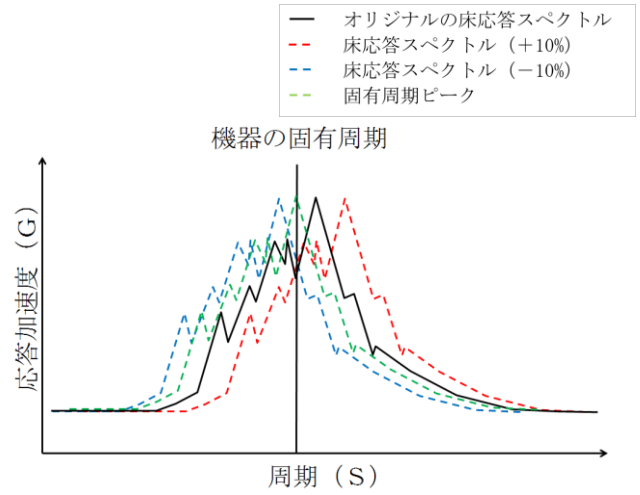
・オリジナルの床応答の時刻歴波に加えて時間刻みを±10％シフトさせた時刻歴波を作成



各時刻歴波を床応答スペクトル化

固有周期と合致するよう調整した時刻歴波





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

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

添付資料1－4　新規制基準適合性審査の実績等を踏まえた検討事項に対する考察

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

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

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

検討事項（工認審査ガイド 4. 機器・配管系に関する事項）	工認審査ガイドに対応した耐震評価方法の設定にあたっての検討内容		追加検討事項の有無（○：有 ―：無）
	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）

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。	地震応答解析手法は，工認審査ガイドに例示されている規格及び基準等を参考に設定する。 配管系の地震応答解析モデルは，工認審査ガイドに例示されている規格及び基準等を参考に設定する。また，三軸粘性ダンパの減衰性能は，性能試験結果に基づいてモデル化し，減衰性能の変動及びばらつきを考慮する。 配管系の水平方向及び鉛直方向の減衰定数については，最新の知見を反映して設定する。詳細は，別紙－7添付資料－6「最新知見として得られた減衰定数の採用について」に示す。	― （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（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		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	
４．４．２ 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		追加検討 事項の有無 （○：有 ―：無）
	単軸粘性ダンパを設置する取水槽ガントリクレーン	三軸粘性ダンパを設置する配管系	
4．6 基準地震動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】

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。

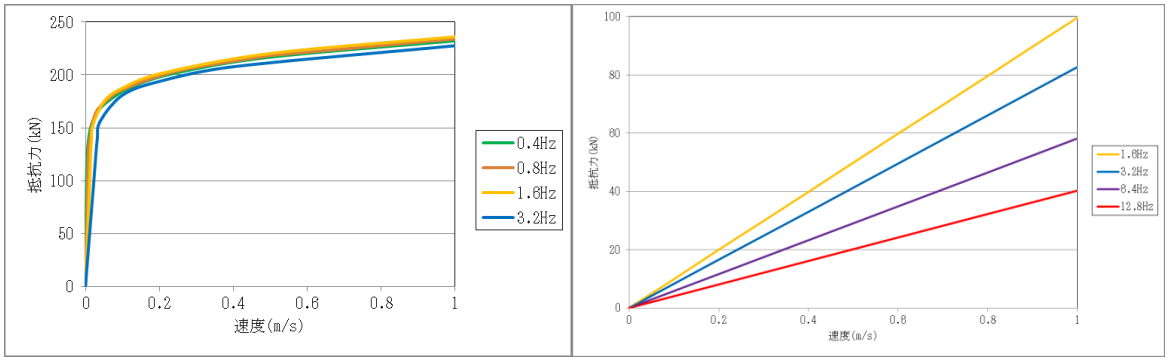
2.　単軸粘性ダンパの減衰性能のモデル化

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

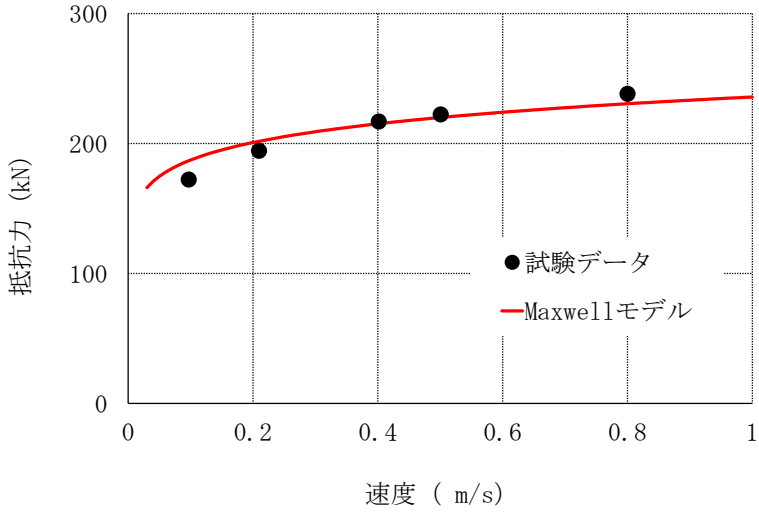
三軸粘性ダンパは減衰性能の振動数依存性が大きいことから，各振動数における等価剛性及び等価減衰係数により減衰性能を表現する。また，解析モデルとしては減衰性能の振動数特性を表現できる Maxwell モデルを使用する。

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）。

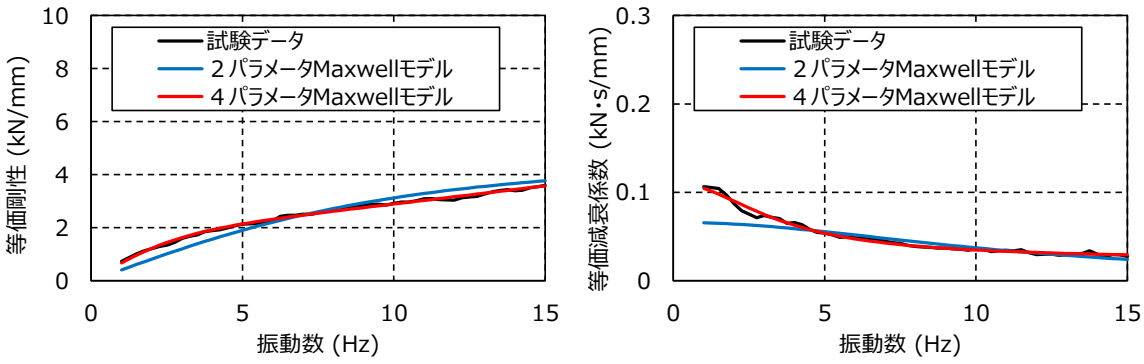


（ａ）単軸粘性ダンパ　　（ｂ）三軸粘性ダンパ

第１－５－１ 添図　振動数を変化させた場合の速度と抵抗力の関係



第１－５－２ 添図　単軸粘性ダンパの減衰性能のモデル化



(H－1) 等価剛性（水平方向）　　(H－2) 等価減衰係数（水平方向）

第１－５－３ 添図　三軸粘性ダンパの減衰性能のモデル化

添付資料2－1　取水槽ガントリクレーンに設置する制震装置の選定

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

第2－1－1添表　取水槽ガントリクレーンに設置する制震装置の検討

分類		ダンパの種類	原理	作動方向	支持荷重	抵抗力の特性	原子力施設における適用実績	適用性	理由
履歴型		弾塑性ダンパ	材料の弾塑性挙動を利用してエネルギーを吸収するダンパ	1方向又は2方向	熱膨張 地震荷重	抵抗力は，材料の初期剛性，二次剛性で決まる。	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変化する。また，ダンパの剛性が高いため，クレーンの剛性が高くなる。
		摩擦ダンパ	摩擦抵抗力を利用してエネルギーを吸収するダンパ			抵抗力は，摩擦材の締め付け力等で決定し，履歴曲線は矩形に近い。		○	粘性ダンパと特性は類似しているが，加振繰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	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。
	三軸	粘性ダンパ	粘性体の流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ	3方向		抵抗力は速度に比例し，履歴曲線は楕円に近い。	海外での適用例あり	△	取水槽ガントリクレーンは1軸方向の地震荷重の低減を必要としているため，3方向の減衰は必要ない。

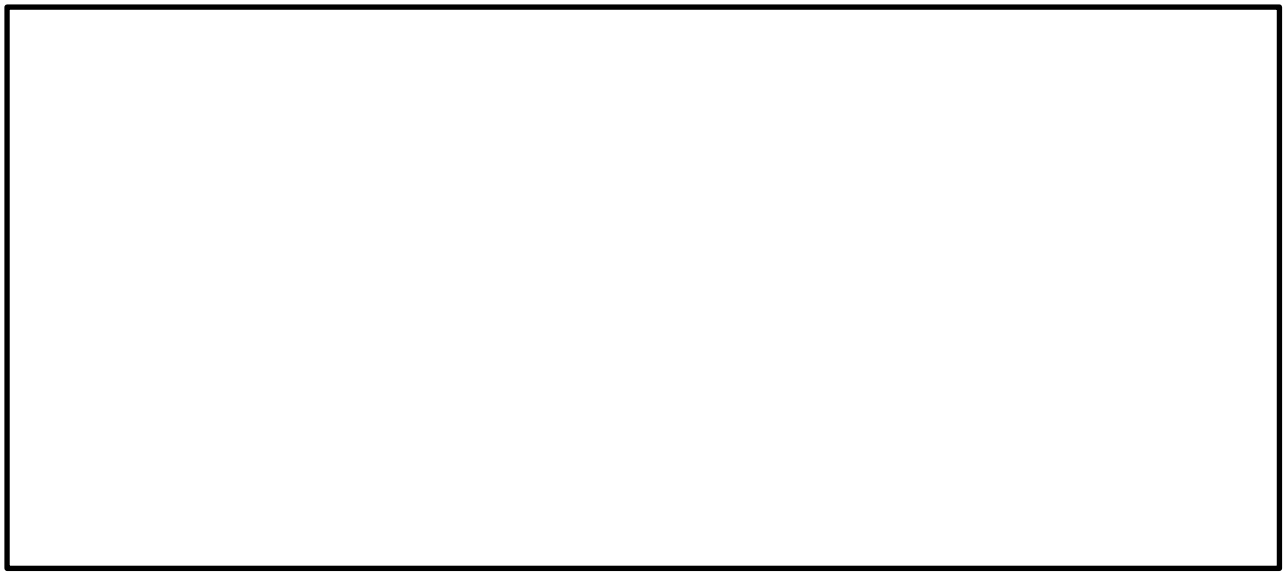
凡例　◎：適用可能（有効性が最も高い）　○：適用可能　△：適用するために課題がある　×：適用不可

添付資料 2－2　単軸粘性ダンパの性能試験方法

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

1. 単軸粘性ダンパの性能試験方法

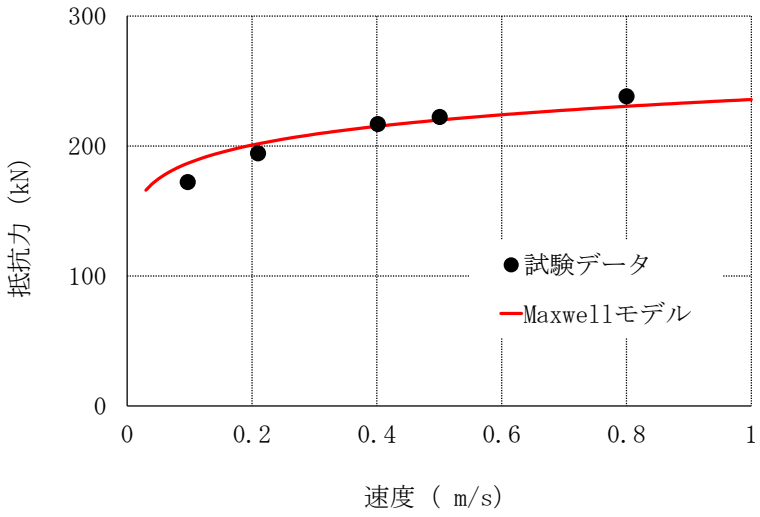
単軸粘性ダンパの性能試験装置の構成を第 2－2－1 添図に示す。単軸粘性ダンパの性能試験では，アクチュエータを用いて単軸粘性ダンパを所定の正弦波により加振し，加振中の変位及び荷重を測定する。性能試験条件を第 2－2－1 添表に示す。加振振動数による単軸粘性ダンパの減衰性能の変動は小さいことを踏まえ，単軸粘性ダンパのストローク 100mm の中で実機使用条件を含む幅広い試験速度（0.1～0.8m/s）を設定して性能試験を実施する。単軸粘性ダンパ設置前の取水槽ガントリクレーンの固有振動数（1.03Hz）及び予備解析における単軸粘性ダンパの入力波形の主要な振動数（0.8Hz～2.0Hz 程度）を考慮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



第 2－2－1 添図　単軸粘性ダンパの性能試験装置の構成

第 2－2－1 添表　単軸粘性ダンパの性能試験条件

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



第 2－2－2 添図　単軸粘性ダンパの性能試験結果

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

添付資料２－３　単軸粘性ダンパの特性試験

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

＜試験項目＞

（１）加振振動数を変更した特性試験

（２）連続加振試験

（３）温度依存性試験

1．加振振動数を変更した特性試験

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

1.1　試験条件

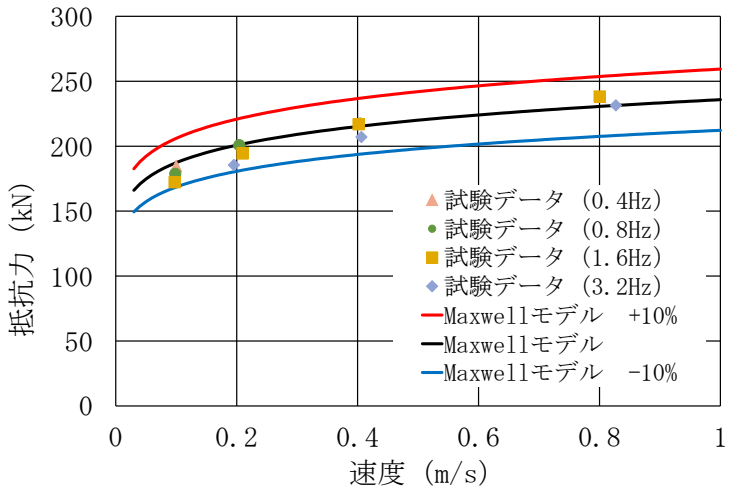
４段階の加振速度を設定し，同一の加振速度で振動数を変更した正弦波により特性試験を実施した。試験条件を第2－3－1添表に示す。

第2－3－1添表　加振振動数を変更した特性試験の試験条件

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

1.2　試験結果

試験結果を第 2－3－1 添図に示す。この図には，加振振動数 1.6Hz の時の Maxwell モデルによる計算値を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

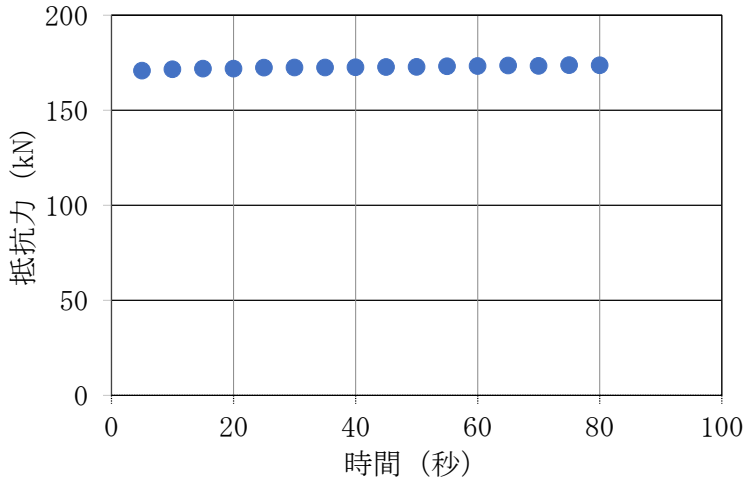
第2－3－2添表に試験条件を示す。試験条件は，取水槽ガントリクレーンにおける単軸粘性ダンパの散逸エネルギーを上回る条件として設定した。

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（mm）	加振時間（秒）
正弦波	1	10	80以上

2.2　試験結果

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



第 2－3－2 添図　連続加振試験結果

3.　温度依存性試験

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

3.1　試験条件

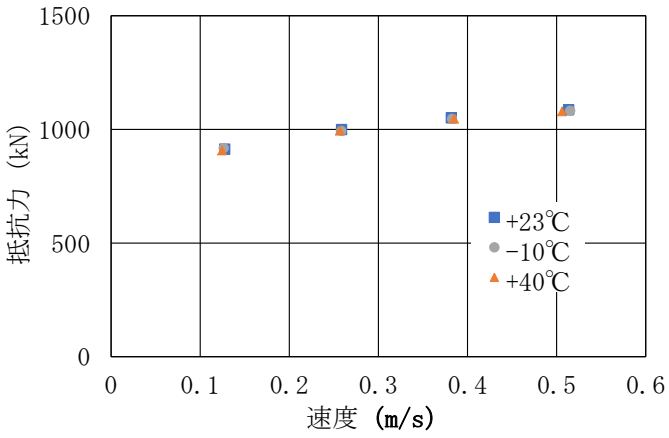
試験条件を第 2－3－3 添表に示す。屋外に設置することから，温度は－10℃，23℃，40℃の 3 段階とした。

第 2－3－3 添表　温度依存性試験の試験条件

No.	振動数（Hz）	加振速度（m/s）	温度（℃）
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。



第 2－3－3 添図　温度依存性試験結果

添付資料 2－4　単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの地震応答解析手法

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

1.　地震応答解析

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

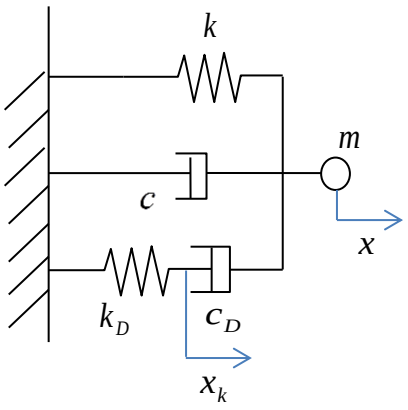
$$[M]\{\ddot{x}\}+[C]\{\dot{x}\}+[K]\{x\}+[C_D]\left[\dot{X}_D{}^{0.1}\right]\{I\}=-[M]\{I\}\ddot{y} \qquad (1)$$

$[M]$，$[C]$，$[K]$：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

$$\{x\}=\begin{pmatrix} x \\ x_k \end{pmatrix} \tag{2}$$

とすると，この系の運動方程式は以下となる。

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

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

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$[C_D]\left[\dot{x}_D{}^{0.1}\right]\{I\}$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。

$$[C]=\alpha[M]+\beta[K] \tag{5}$$

$[C]$：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。

$$h=\frac{\alpha}{2\omega_n}+\frac{\beta\omega_n}{2} \tag{6}$$

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

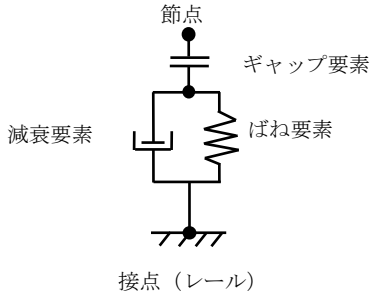
2.3　車輪部の非線形要素

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

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

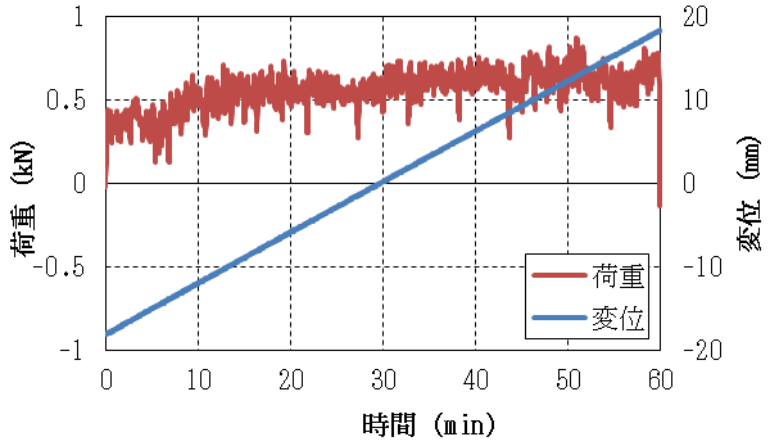
低速移動試験の試験条件を第 3－1－1 添表に示す。熱膨張が大きい主蒸気系配管等がプラント起動時に約 4.5 時間で通常運転温度まで昇温することから，大型ダンパの水平方向許容変位 72mm と等しい熱変位が約 4.5 時間で生じることを想定した場合の速度 0.005mm/s に余裕をみて，試験条件は 0.01mm/s とした。

第 3－1－1 添表　低速移動試験の試験条件

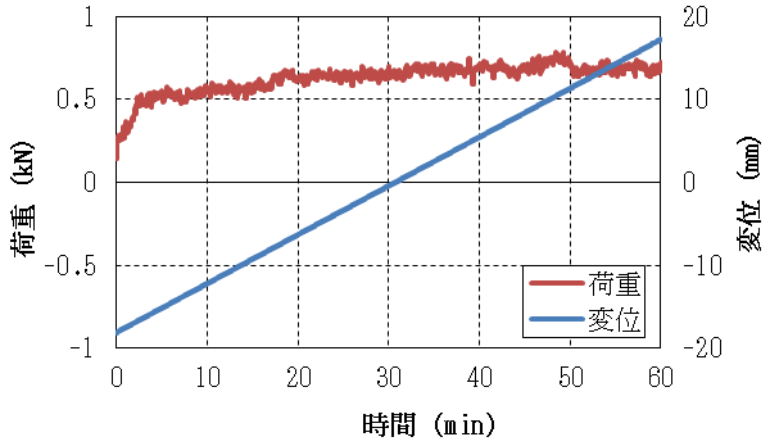
試験体	速度
大型	0.01mm/s

3.　試験結果

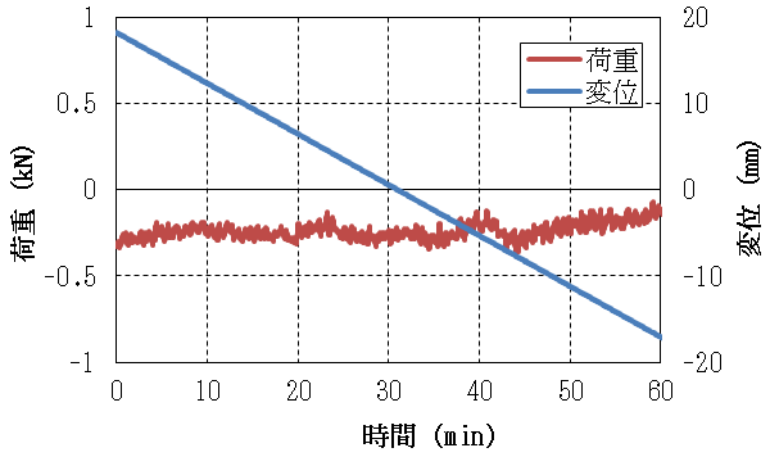
試験結果を第 3－1－1 添図～第 3－1－3 添図に示す。熱膨張を想定した低速移動に対して三軸粘性ダンパの発生荷重は 1kN を下回る十分に小さな値となり，三軸粘性ダンパは熱膨張のような低速度の運動を拘束しないことが確認された。



第 3－1－1 添図　水平方向の低速移動に対する発生荷重



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



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

添付資料 3－2　配管系に設置する制震装置の選定

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

第 3－2－1 添表　配管系に設置する制震装置の検討

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

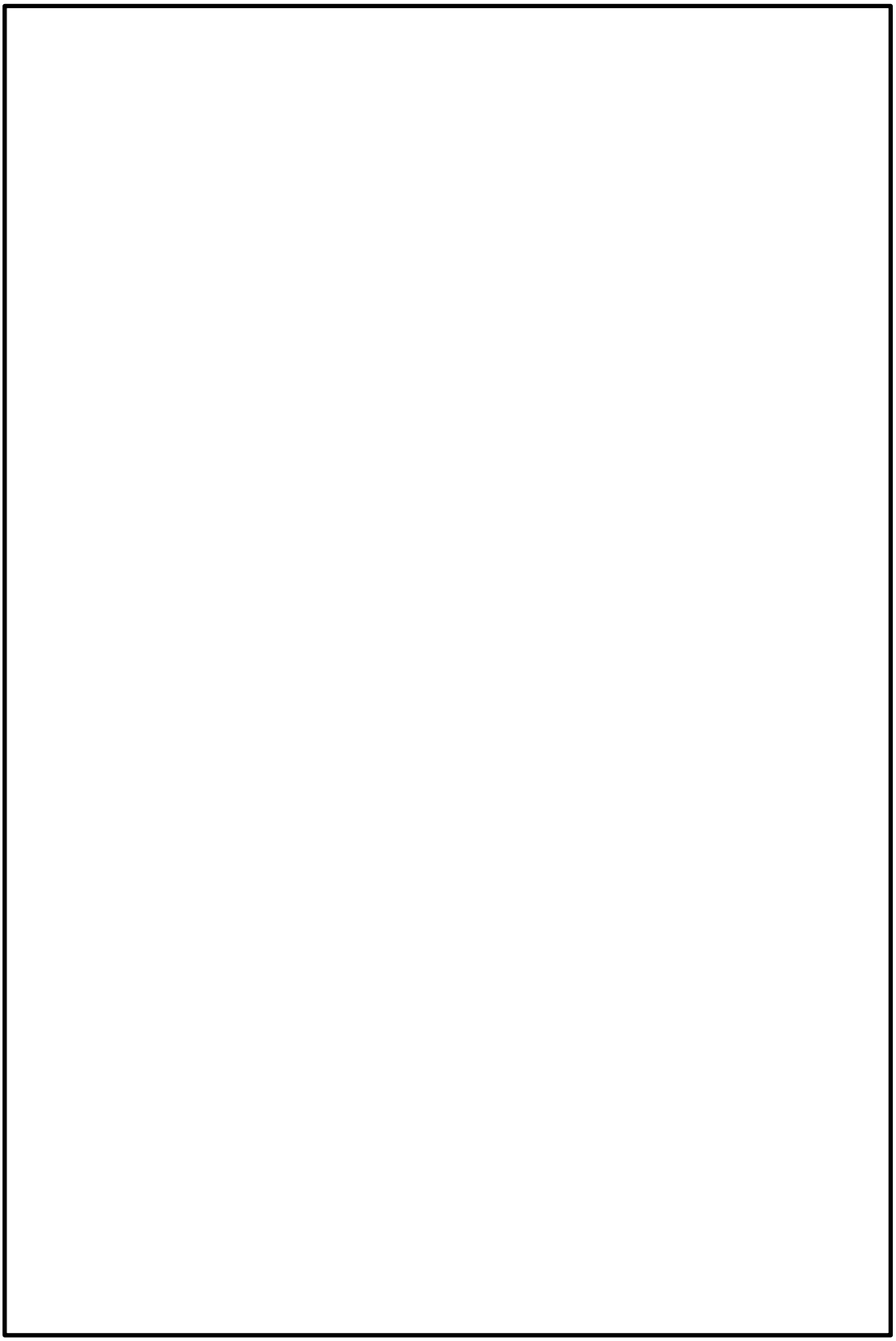
凡例　◎：適用可能（有効性が最も高い）　○：適用可能　△：適用するために課題がある　×：適用不可

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

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

第3－3－1添表　ASME Boiler and Pressure Vessel Code 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）。
NONMANDATORY　APPENDIX NF-E DAMPERS,ENERGY ABSORBERS, AND SNUBBERS ARTICLE NF-E-1000	NF-E-1210 DAMPERS	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。
		NF-E-1240 MODELING		ダンパは動的な支持装置であり静的荷重に対しては機能しないことが記載されている。また，機器・配管系にダンパを設置した場合の数値解析法として，モーダル解析及び時刻歴解析が記載されている。



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

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

添付資料３－４　三軸粘性ダンパを設置した配管系の加振試験の概要

1.　試験の概要

配管系に三軸粘性ダンパを設置した場合の効果を検証するため，配管系の加振試験を実施し，配管応答の低減効果を確認した。試験の概要を第３－４－１添表に，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

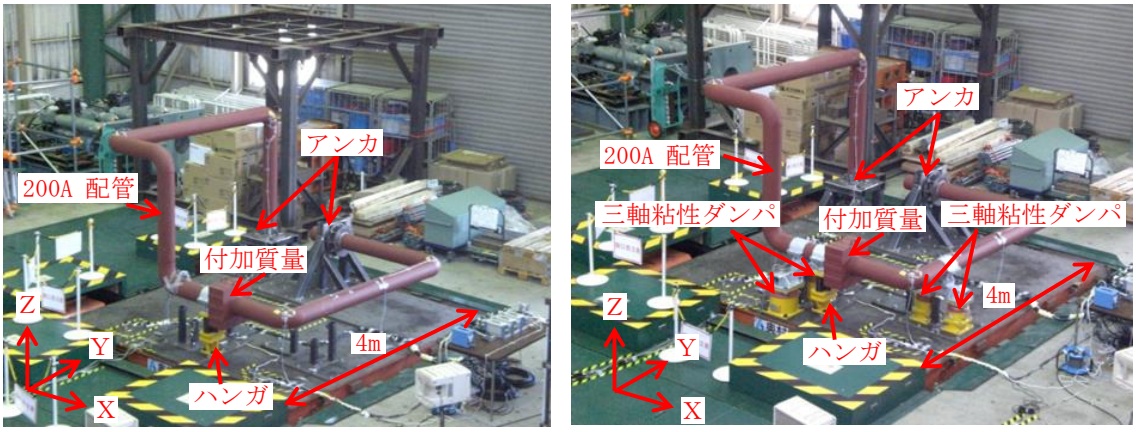
寸法		4m×4m
最大積載量		60t
運転周波数帯域		DC-70Hz
最大加速度※1	水平	3G
	鉛直	3G

※１：定格積載量（20t）での最大加速度を示す。

2.　加振試験条件

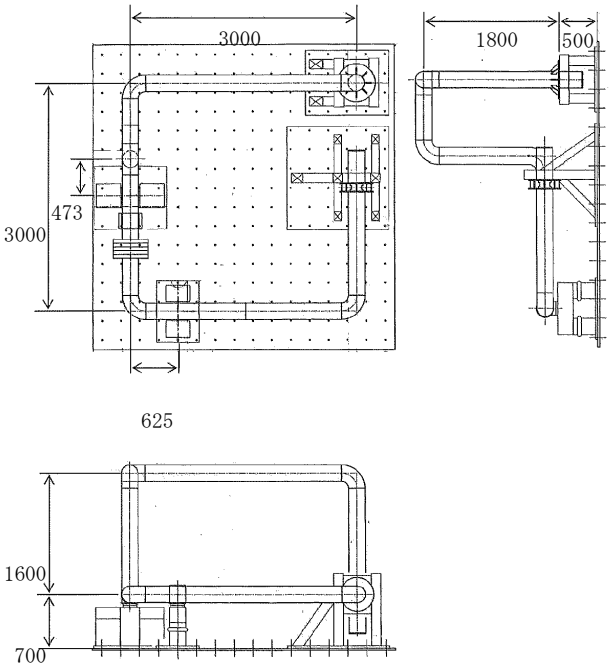
2.1　試験体

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。



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

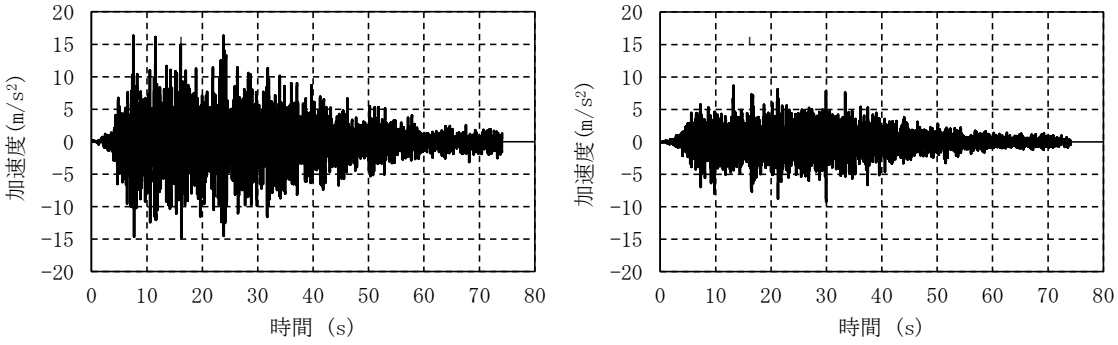
2.2　入力地震波

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

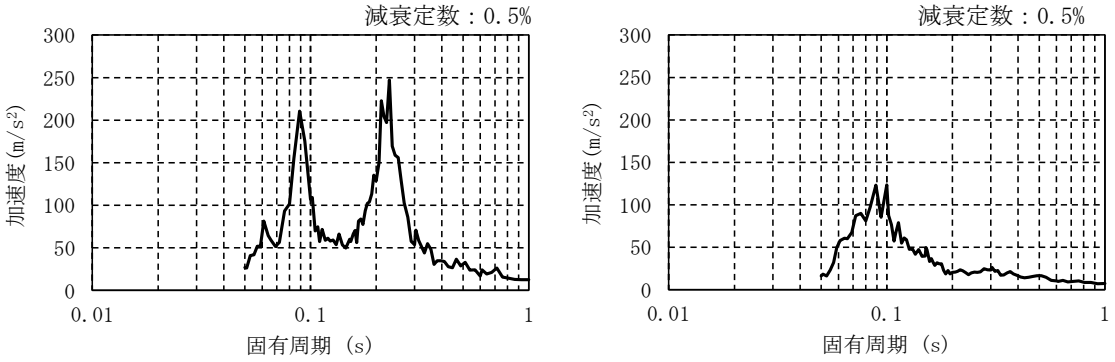
いて実施した。

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。



（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

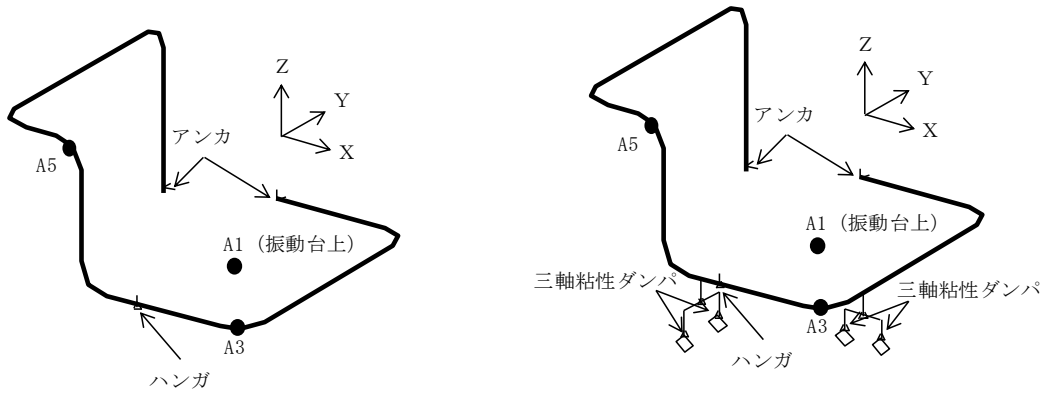
No.	試験体条件	加速度レベル(m/s²)	
		Ｘ方向	Ｚ方向
1	ダンパ無配管	1.5	0.84
2		2.5	1.41
3	ダンパ設置配管	2.5	1.41
4		10	5.6
5		18	10.1

3.　加振試験結果

3.1　正弦波掃引試験結果

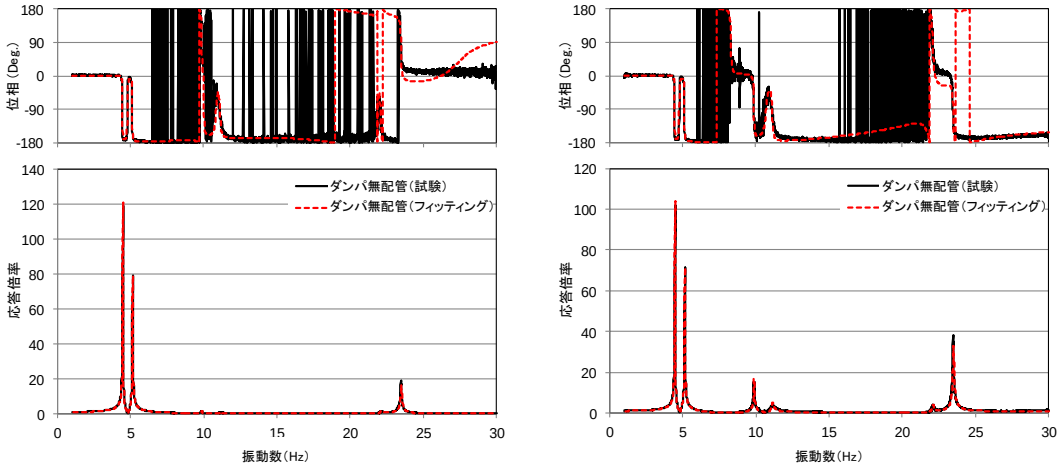
配管系試験体の概略図を第 3－4－5 添図に示す。また，ダンパ無配管におけるＸ方向の正弦波掃引試験結果について，振動台上の加振方向の加速度に対する配管位置の加振方向の応答加速度の振動伝達特性を第 3－4－6 添図に，カーブフィ

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。



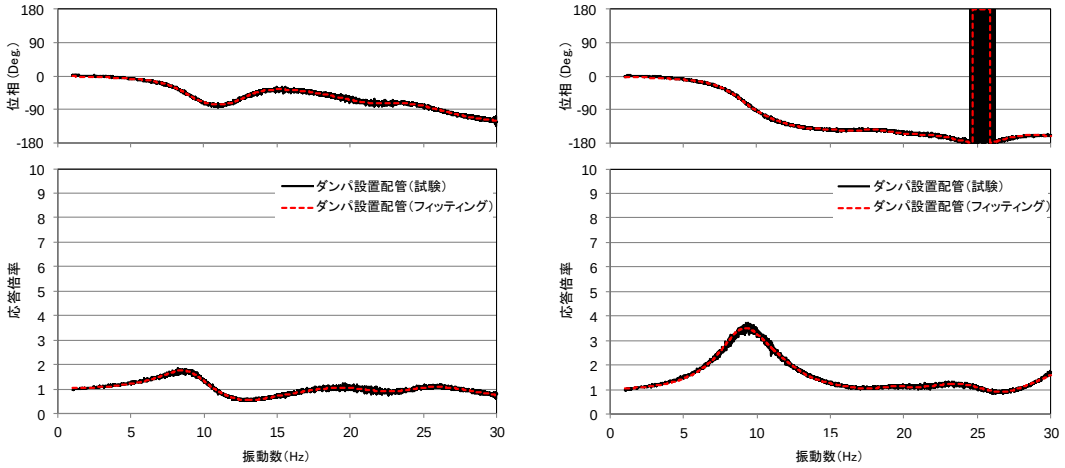
配管系試験体（ダンパ無配管）　　配管系試験体（ダンパ設置配管）

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)

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）

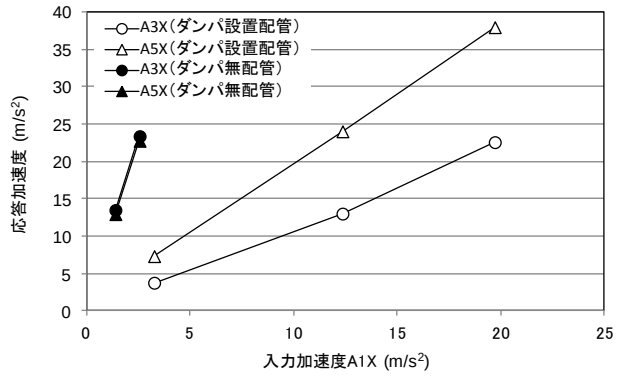
No.	固有振動数(Hz)	モード減衰比(%)
1	9	20
2	13	20
3	17	20
4	19	20
5	23	20
6	25	20

3.2　地震波加振の試験結果

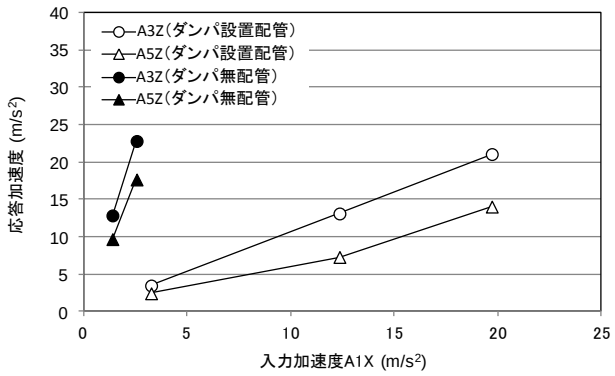
入力地震波（Ｘ＋Ｚ方向）により加振した場合のダンパ無配管とダンパ設置配管の配管応答加速度を第 3－4－8 添図及び第 3－4－9 添図に示す。第 3－4－8 添図では，ダンパ無配管の応答倍率（応答／入力）が A3 及び A5 の位置で 10 倍程度であるのに対し，ダンパ設置配管の場合の応答倍率は A3 の位置で１倍程度，A5 の位置で２倍程度であり，応答がそれぞれ 1/10，1/5 に低減されている。また，第 3－4－9 添図では，ダンパ無配管の応答倍率が A3 及び A5 の位置で 10 倍程度であるのに対し，ダンパ設置配管の場合の応答倍率は A3 の位置で１倍程度，A5 の位置で 0.7 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，床応答スペクトルの低下率よりも大きく低減されている。また，Ｚ方向では床応答スペクトルの値は大きくなっているにも関わらず応答倍率は 1/10，7/100 に低減されている。床応答スペクトルの変化よりも大きく応答倍率が低減されていることは，三軸粘性ダンパの設置による減衰の効果と考えられる。

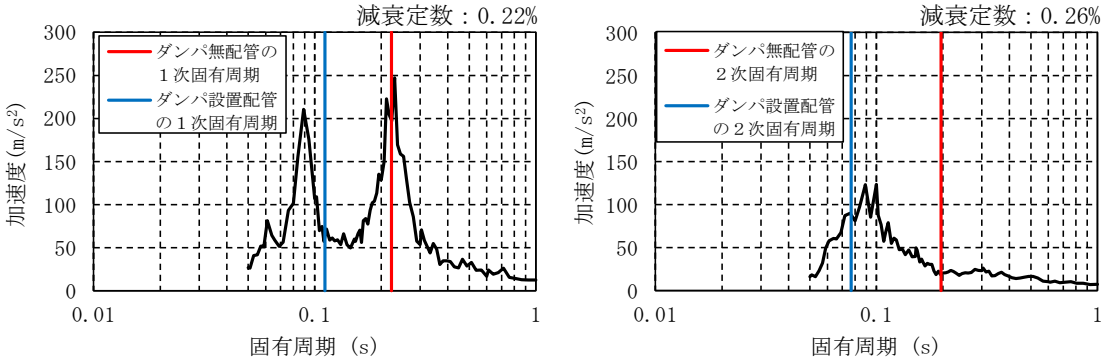
以上より，正弦波掃引試験により確認された三軸粘性ダンパの応答低減効果は，地震波加振試験の結果においても確認された。



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



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



（ａ）Ｘ方向入力　　（ｂ）Ｚ向入力

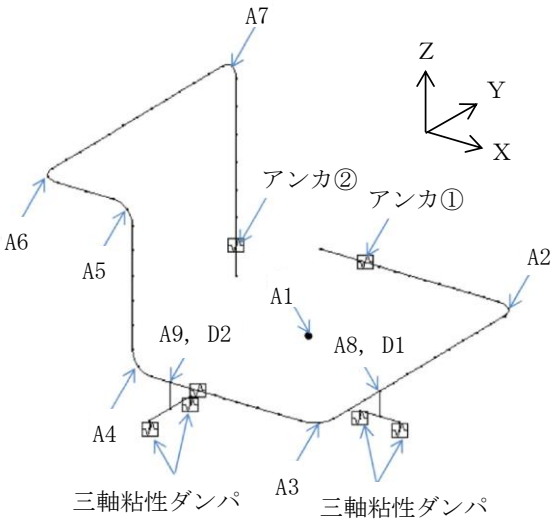
第3－4－10添図　卓越モードの固有周期における応答スペクトルの比較

4.　三軸粘性ダンパを適用した配管系の加振試験結果による妥当性確認

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

4.1　解析モデル

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

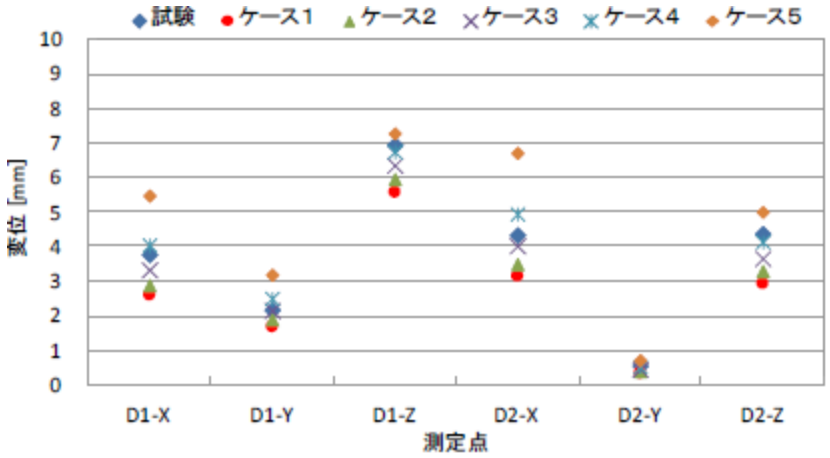
「3.2.3 項(3)b.ばらつきの考慮」に基づき，三軸粘性ダンパの減衰性能のばらつきを考慮して設定した上限の減衰性能（K_1，C_1），下限の減衰性能（K_5，C_5）及びその間の３つの内挿点の計５ケースの減衰性能により地震応答解析を実施した。地震応答解析ケースを第 3－4－6 添表に示す。なお，地震応答解析の対象とする試験ケースは，Ｘ方向及びＺ方向の最大加振ケース（Ｘ方向：19.7m/s^2，Ｚ方向：10.6m/s^2）とした。

第3－4－6添表　解析ケース

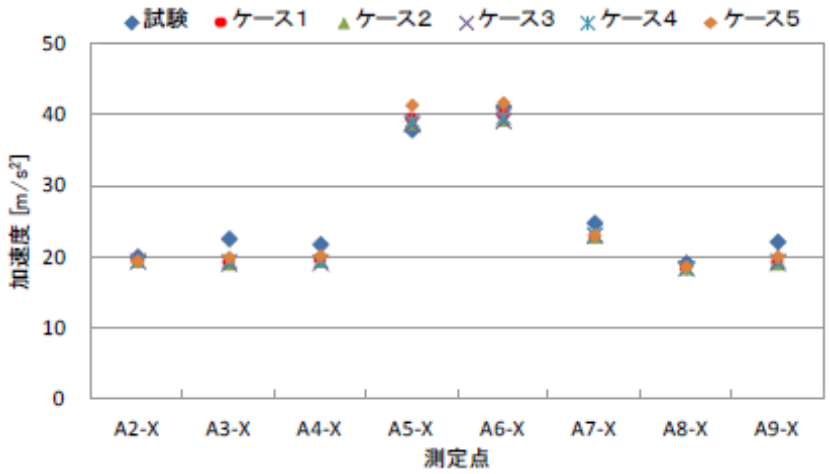
解析ケース	減衰性能
1	K_1，C_1（上限）
2	均等に内挿
3	
4	
5	K_5，C_5（下限）

4.3　解析結果

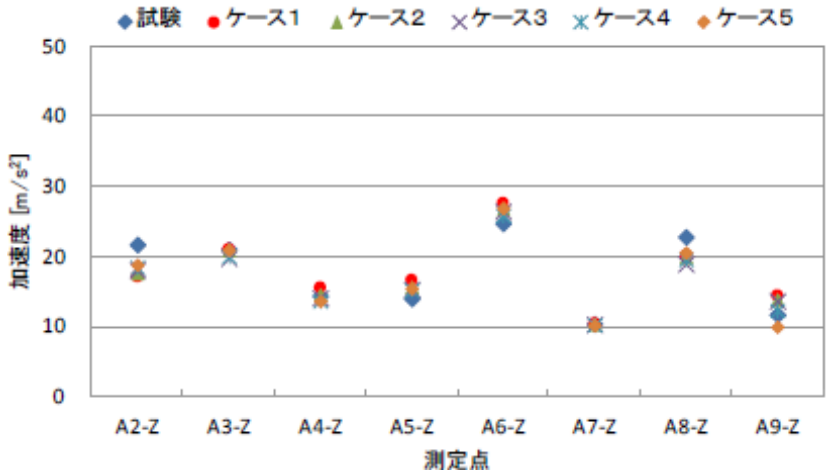
三軸粘性ダンパの最大応答変位の試験結果と解析結果を第3－4－12添図に示す。Ｘ方向及びＺ方向の最大応答加速度の試験結果と解析結果を第3－4－13添図に示す。三軸粘性ダンパの最大応答変位の解析結果は，試験結果を上回る保守的な評価となっている。また，配管最大応答加速度の解析結果は，試験結果に対して－10%程度以上の精度で一致している。



第3－4－12添図　三軸粘性ダンパ最大応答変位



（ａ） Ｘ方向



（ｂ） Ｚ方向

第3－4－13添図　最大応答加速度

4.4　解析結果の考察

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

添付資料３－５　三軸粘性ダンパの減衰性能及び解析モデルによる表現

1.　三軸粘性ダンパの性能の表し方

三軸粘性ダンパに使用される粘性体は粘弾性を有しており，三軸粘性ダンパの減衰性能は粘弾性を表すパラメータにより表現される。一般に粘弾性体を式（１）に示す正弦波変位 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。

$$\gamma(\mathrm{t}) = \gamma_0 \cos \omega t \qquad (1)$$

$$\sigma(\mathrm{t}) = \sigma_0 \cos(\omega t + \delta) \qquad (2)$$

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

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

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

式（３）の最大変位 γ_0と最大荷重 σ_0 の比 σ_0/γ_0 を等価剛性Ｋと呼ぶ。等価剛性Ｋは粘弾性体の剛性を定量的に定義する一般的なパラメータである。

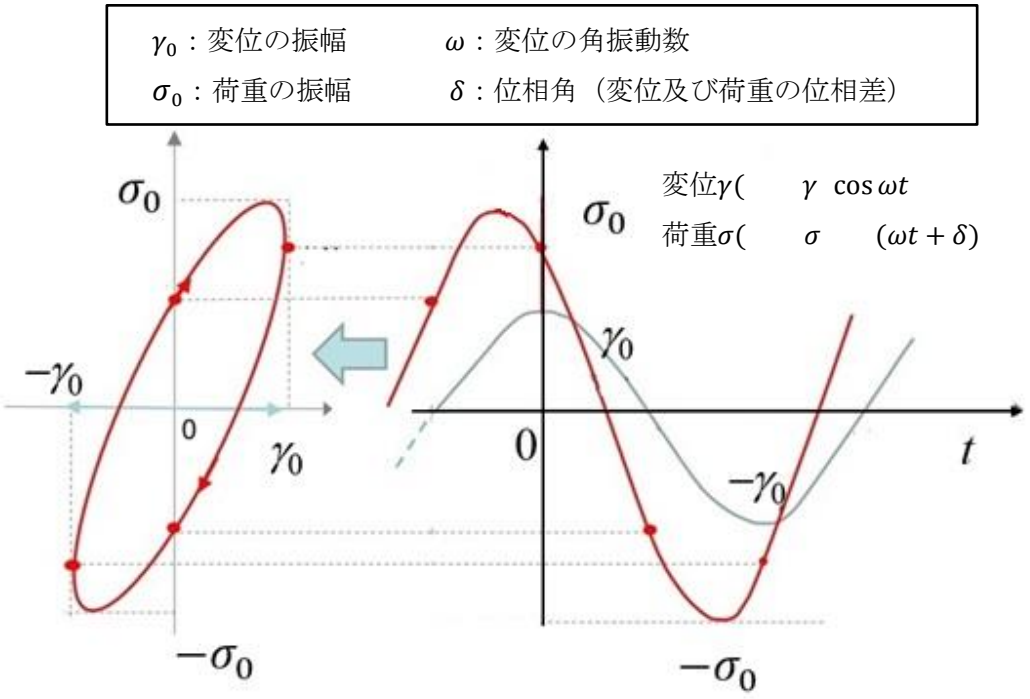
荷重の式（３）に対して一周期分の積分を行うと変位成分に比例する弾性応答成分の項は０，速度成分に比例する粘性応答成分の項は $\pi\sigma_0\gamma_0 \sin\delta$ となり，粘性応答成分による散逸エネルギーが求められる。散逸エネルギーは第３－５－１添図のリサージュ曲線で囲まれる面積に相当する。このような減衰性能を定量的に定義するため，粘弾性体を散逸エネルギーの等しい理想的な粘性体である速度比例型ダッシュポットに置き換えた場合の比例係数を等価減衰係数Ｃと定義する。一周期分の変位 $\gamma(\mathrm{t})$ を減衰係数Ｃのダッシュポットに入力した場合の散逸エネル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

$$\pi\sigma_0\gamma_0 sin\delta = \mathrm{C}\gamma^2{}_0\,\omega\pi \qquad (4)$$

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

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

三軸粘性ダンパの等価剛性 K 及び等価減衰係数 C は振動数依存性を有しており，一般に振動数が高いほど等価剛性 K は大きく，等価減衰係数 C は小さくなる傾向がある。



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

2.　三軸粘性ダンパの解析モデル

粘弾性体のモデル化には，Voigt モデル，Maxwell モデル及びそれらを混合したモデル等が一般的に用いられている。三軸粘性ダンパの減衰性能は振動数依存性を有するため，その振動数特性を表現できる Maxwell モデルを採用する。Maxwell モデルは，第 3－5－2 添図に示すばね剛性（＝k）とダッシュポットの減衰係数（＝c）を直列につないだものである。また，k/c を Maxwell モデルの特性振動数（＝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$\left(=\tan^{-1}\left(K_v/K_e\right)\right)$

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

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

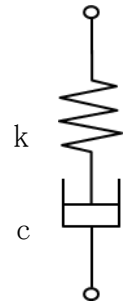
k ：Maxwell モデルのばね剛性　ω_0：Maxwell モデルの特性振動数

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。

$$K_e = K_a(\omega/\omega_a)^2/(1+(\omega/\omega_a)^2) + K_b(\omega/\omega_b)^2/(1+(\omega/\omega_b)^2)$$
$$K_v = K_a(\omega/\omega_a)/(1+(\omega/\omega_a)^2) + K_b(\omega/\omega_b)/(1+(\omega/\omega_b)^2) \qquad (9)$$

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

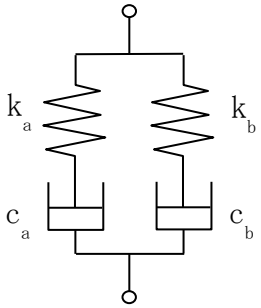
４パラメータ Maxwell モデルのパラメータは，三軸粘性ダンパの性能試験結果に基づいて設定する。



k:ばね剛性

c:ダッシュポットの減衰係数

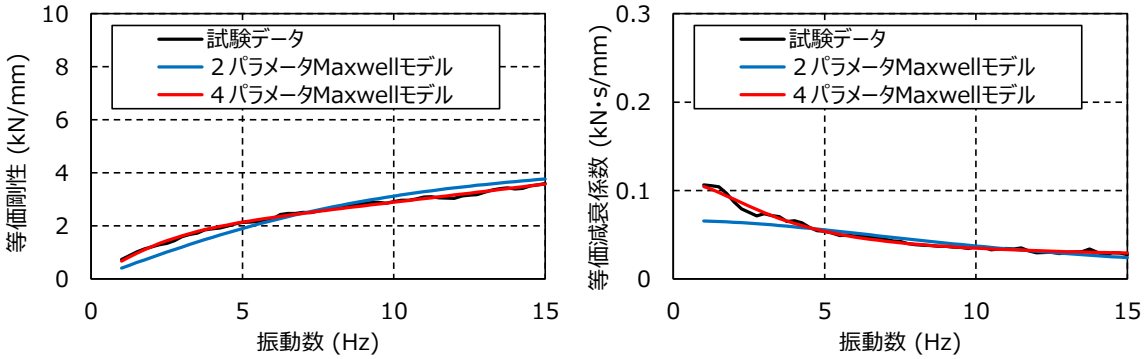
第 3－5－2 添図　Maxwell モデル



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 3－5－3 添図　４パラメータ Maxwell モデル



（H－1）等価剛性（水平方向）　　（H－2）等価減衰係数（水平方向）

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

添付資料３－６　三軸粘性ダンパの特性試験

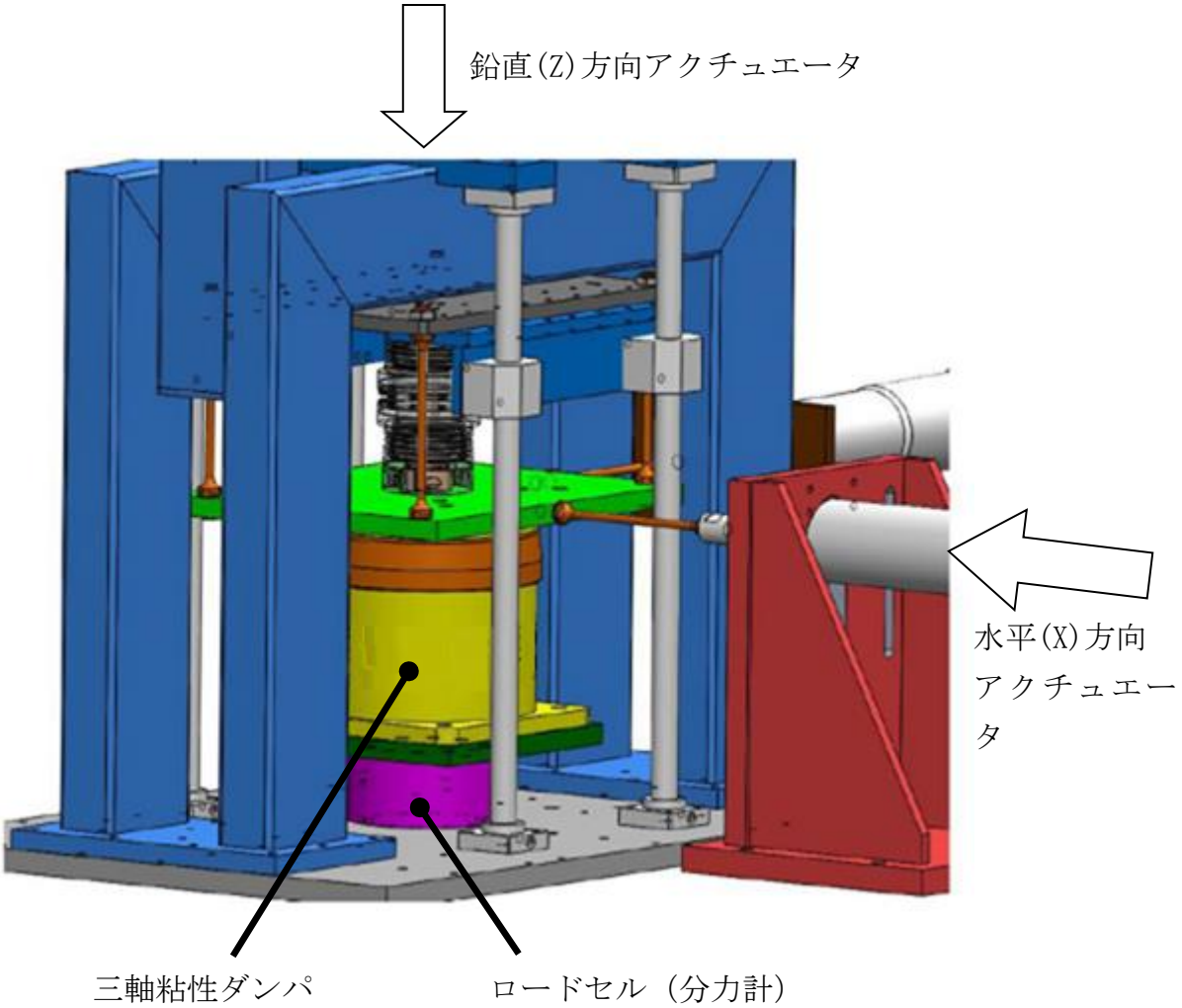
三軸粘性ダンパの減衰性能に影響する特性を把握するために実施した特性試験の結果を以下に示す。なお，三軸粘性ダンパは型式によらず構造は同じであり，使用する粘性体も同一であることから，特性試験結果については，中型及び小型（実機適用なし）の試験結果で代表して示す。

＜試験項目＞

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

1.　水平・鉛直同時加振試験

三軸粘性ダンパの性能試験は，水平，鉛直の各方向で１方向加振を行う方法により実施する。一方，地震時に三軸粘性ダンパは３方向同時加振されることから，水平方向加振と鉛直方向加振で相互に減衰性能に影響を及ぼす場合は，性能試験で取得した減衰性能と地震時の減衰性能に差が生じる可能性がある。そのため，水平方向及び鉛直方向の同時加振と１方向加振との減衰性能の比較を行った。水平・鉛直同時加振試験の概略図を第 3－6－1 添図に示す。試験条件を第 3－6－1 添表に，変位の時刻歴波形を第 3－6－2 添図に，試験結果を第 3－6－3 添図に示す。第 3－6－3 添図のとおり，水平方向及び鉛直方向の同時加振と１方向加振では減衰性能に差がないことを確認した。



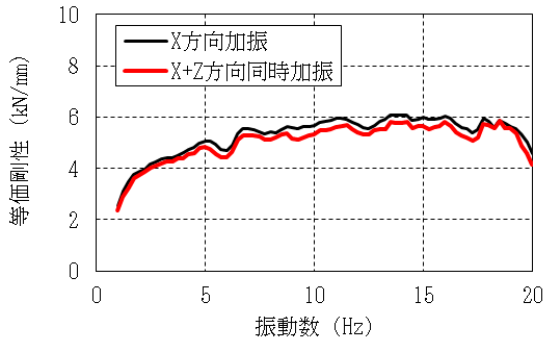
第 3－6－1 添図　水平・鉛直同時加振試験

第 3－6－1 添表　水平・鉛直同時加振試験条件

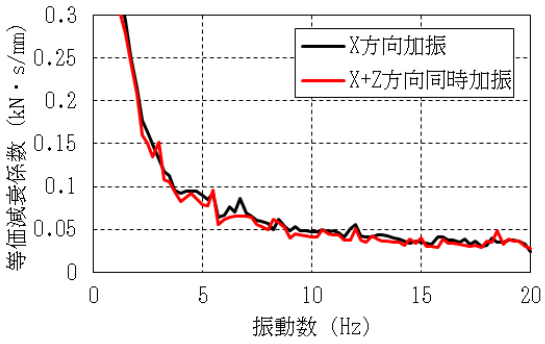
No.	型式	温度（℃）	加振方向	入力波形	振幅（mm）	継続時間（s）
1	中型	20	水平	ランダム波	3	32
2			鉛直			
3			水平・鉛直			

（H）水平方向　　（V）鉛直方向

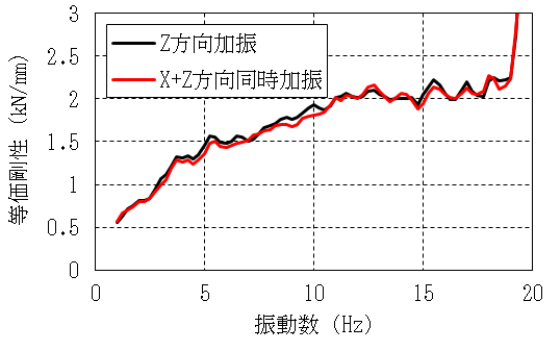
第 3－6－2 添図　変位の時刻歴波形



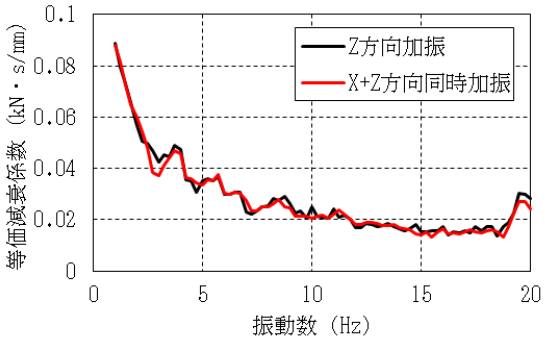
（H－1）等価剛性（水平単独と比較）



（H－2）等価減衰係数（水平単独と比較）



（V－1）等価剛性（鉛直単独と比較）



（V－2）等価減衰係数（鉛直単独と比較）

第 3－6－3 添図　水平・鉛直同時加振による減衰性能への影響確認結果

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

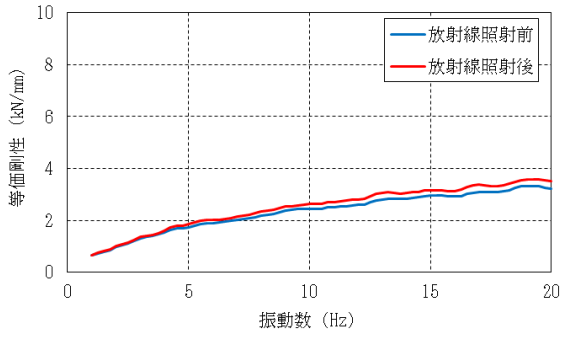
2.　放射線照射試験

放射線による三軸粘性ダンパの減衰性能への影響を確認するため，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。

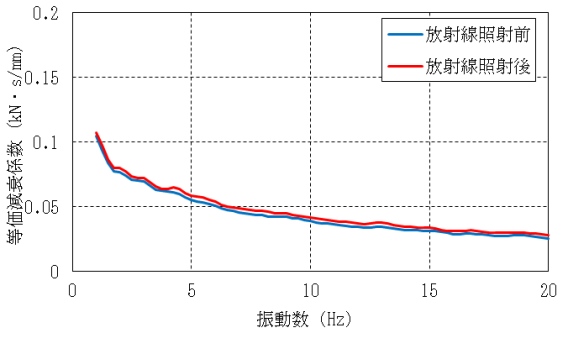
結果を第 3－6－4 添図に示す。第 3－6－4 添図のとおり，1kGy の照射では減衰性能は変化しておらず，影響がないことが確認された。

第 3－6－2 添表　放射線照射試験条件

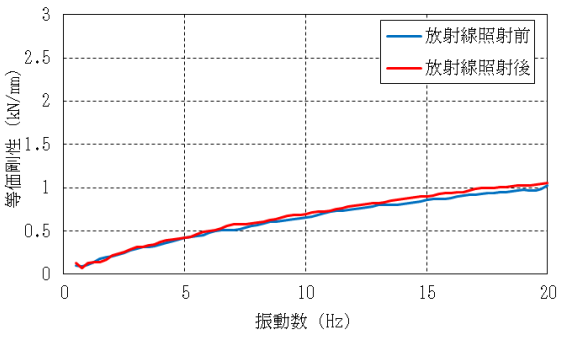
No.	型式	温度（℃）	加振方向	入力波形	振幅（mm）	継続時間（s）	γ線照射量
1	小型	20	水平	ランダム波	1	32	照射なし
2							1kGy
3			鉛直				照射なし
4							1kGy



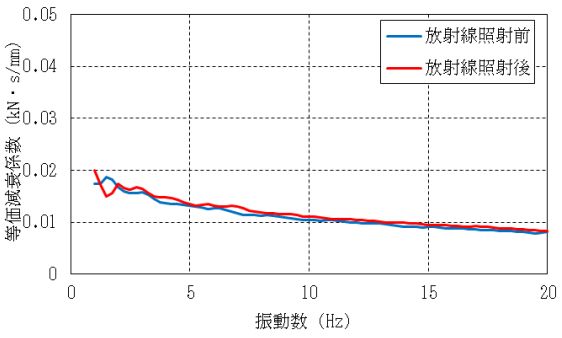
（H－1）等価剛性（水平方向）



（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

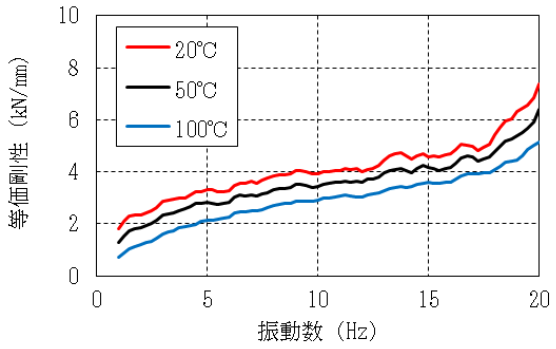
3.　粘性体温度を変えた性能試験

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。

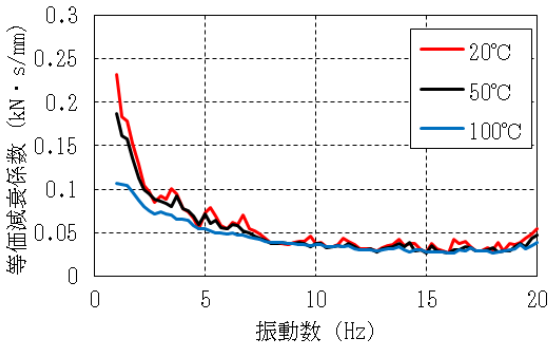
試験結果を第 3－6－5 添図に示す。第 3－6－5 添図のとおり，粘性体温度が高くなるほど三軸粘性ダンパの減衰性能が低下することが確認された。これは，粘性体の温度が上昇するほどその粘度が低下することが要因と考えられる。

第 3－6－3 添表　粘性体温度を変えた性能試験条件

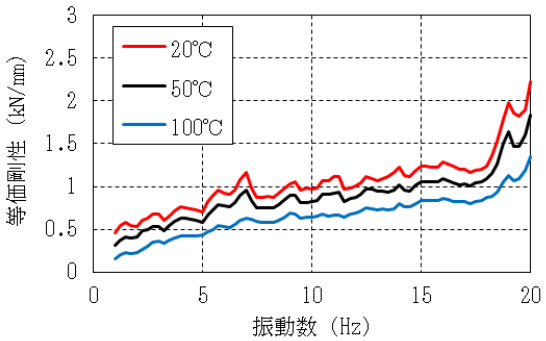
No.	型式	温度（℃）	加振方向	入力波形	振幅（mm）	継続時間（s）
1	中型	20	水平	ランダム波	6	32
2		50				
3		100				
4		20	鉛直			
5		50				
6		100				



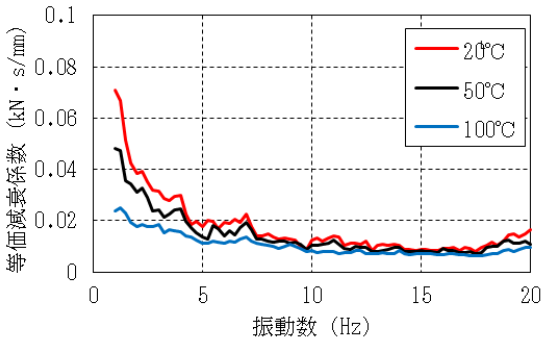
（H－1）等価剛性（水平方向）



（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

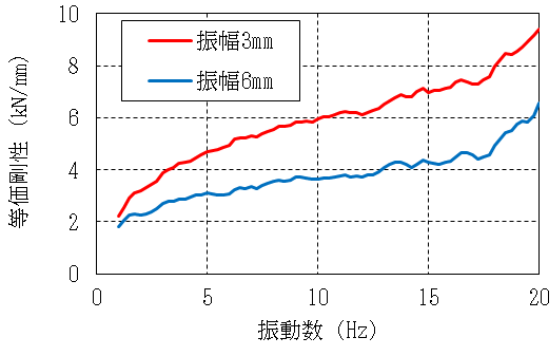
4.　加振振幅を変えた性能試験

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。

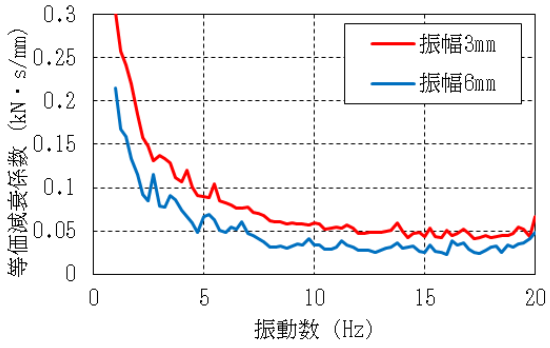
試験結果を第 3－6－6 添図に示す。第 3－6－6 添図のとおり，振幅が大きいほど三軸粘性ダンパの減衰性能が低下することが確認された。これは，三軸粘性ダンパで消費されたエネルギーにより粘性体温度が上昇したこと，粘性体が内部で流動し，ダンパピストンとの接触状態が変化したことが要因と考えられる。

第 3－6－4 添表　加振振幅を変えた性能試験条件

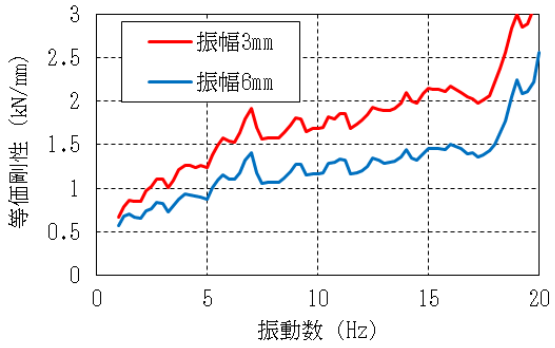
No.	型式	温度（℃）	加振方向	入力波形	振幅（mm）	継続時間（s）
1	中型	20	水平	ランダム波	3	32
2			鉛直			
3			水平		6	
4			鉛直			



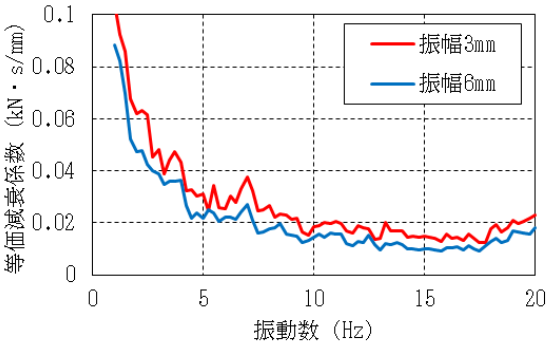
（H－1）等価剛性（水平方向）



（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。

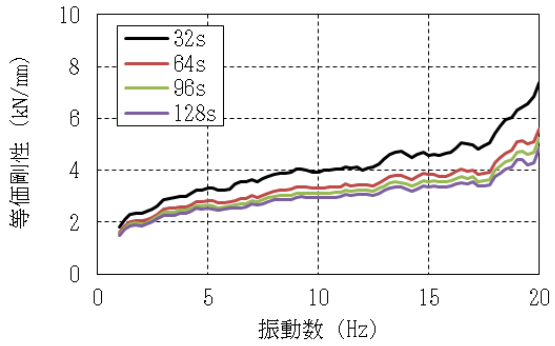
$$W = \int_0^T F(t)\frac{dx(t)}{dt}dt \qquad (1)$$

ここで，

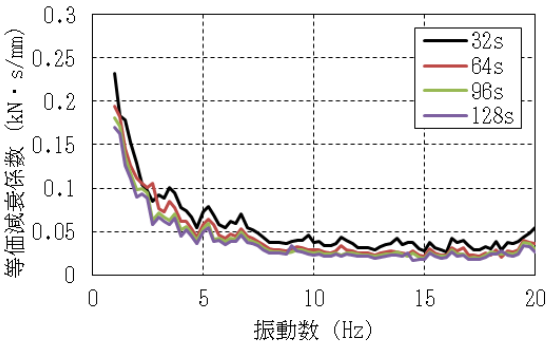
F(t)：三軸粘性ダンパ反力，x(t)：三軸粘性ダンパ変位，T：加振継続時間

第3－6－5添表　連続加振試験条件

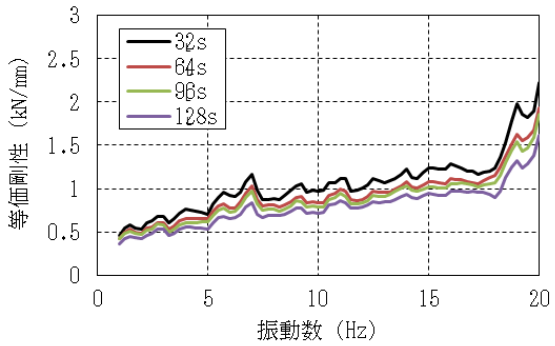
No.	型式	温度 (℃)	加振 方向	入力波形	振幅 (mm)	継続時間 (s)
1	中型	20	水平	ランダム波	6	32
2			鉛直			
3			水平			64
4			鉛直			
5			水平			96
6			鉛直			
7			水平			128
8			鉛直			



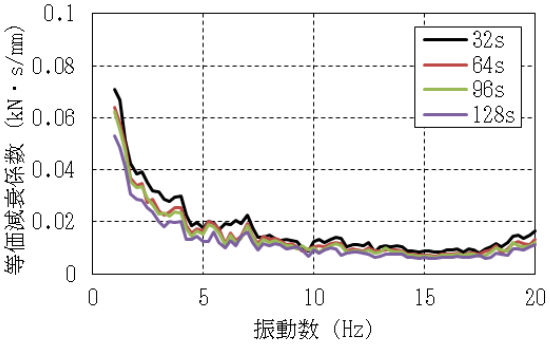
（H－1）等価剛性（水平方向）



（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

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。

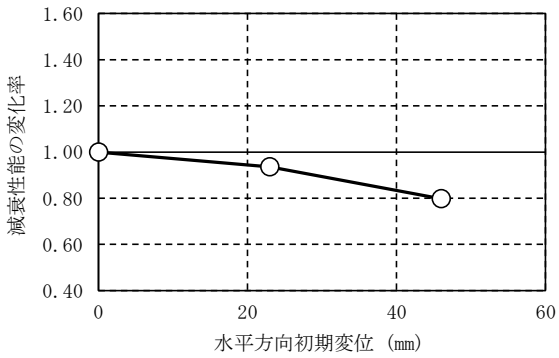
三軸粘性ダンパの初期変位による減衰性能への影響確認試験の試験ケースを第 3－7－1 添表に，試験結果を第 3－7－1 添図～第 3－7－2 添図に示す。三軸粘性ダンパの減衰性能は振動数依存性を有するため，減衰性能の変化率は 5～15Hz の平均値で示す。また，等価剛性及び等価減衰係数のうち，より大きい変化率を減衰性能の変化率と整理する。

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。

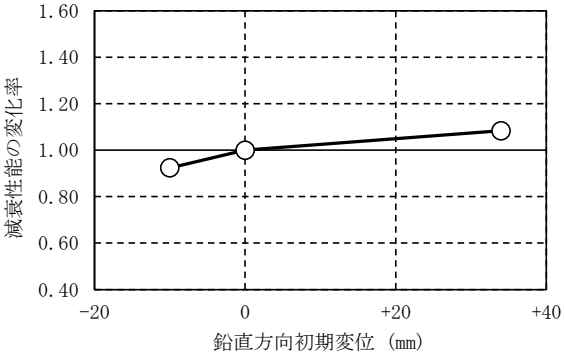
第 3－7－1 添表　初期変位の影響確認試験条件

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。

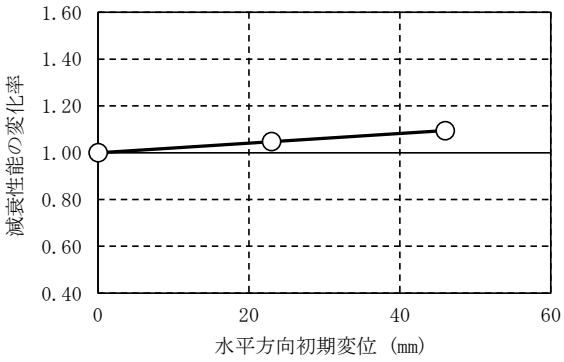


(H) 水平方向初期変位

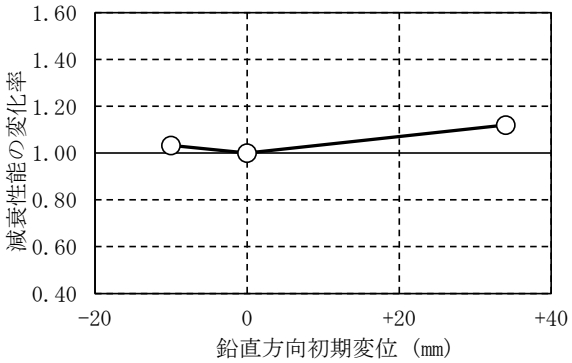


(V) 鉛直方向初期変位

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（-10㎜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）。

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。

第 3－8－1 添表　三軸粘性ダンパの性能試験条件の例

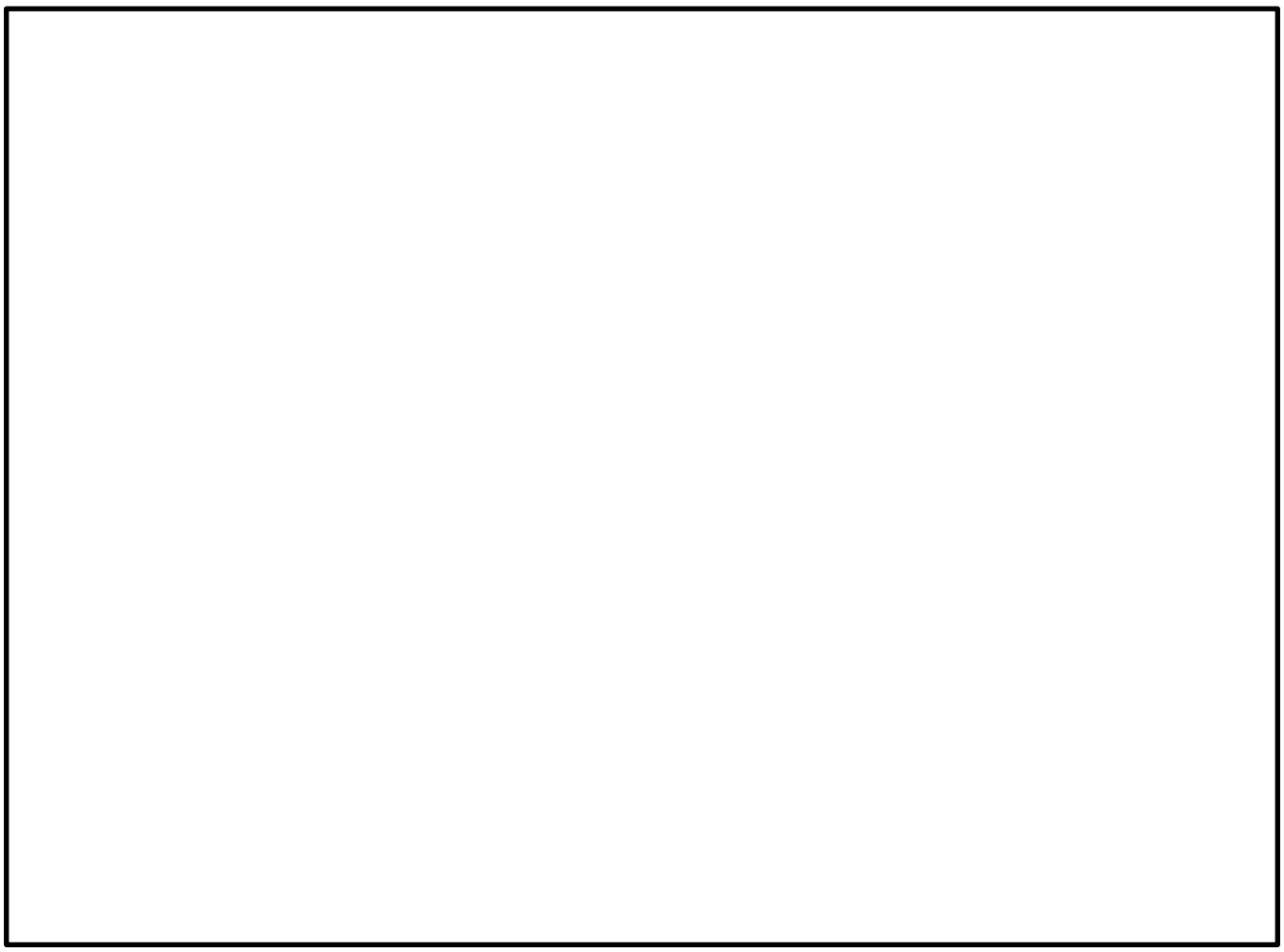
本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

第 3－8－1 添図　性能試験フロー(1/3)

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

第 3－8－1 添図　性能試験フロー(2/3)

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



第 3－8－1 添図　性能試験フロー(3/3)

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

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。

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

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。

$$[C]=[C_P]+[C_D] \qquad (7)$$

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。

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

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

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

$\{x_a\}$ ：基準入力点に対する配管系の相対変位ベクトル

$\{x_b\}$ ：基準入力点に対する入力点の相対変位ベクトル

y_0 ：基準入力点の絶対変位

$[\tilde{C}]$ ：入力点の相対速度に対応した減衰マトリクス

$[\tilde{K}]$ ：入力点の相対変位に対応した剛性マトリクス

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

【参考文献】

(1)　MSC.Nastran ユーザーガイド　基礎動解析

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

添付資料 3－11　三軸粘性ダンパの配管への取付部の設計について

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

１．ラグの設計について

１．１　構造概要

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

１．２　荷重の伝達機構

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

１．３　構造成立性について

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

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

２．クランプの設計について

２．１　構造概要

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

２．２　荷重の伝達機構

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

向の荷重伝達機構を以下に示す。

【クランプから配管への荷重伝達機構】

（１）水平方向

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

ａ．配管軸方向

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

ｂ．配管軸直方向

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

（２）鉛直方向

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

２．３　構造成立性について

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

（１）水平方向荷重に対するクランプの構造成立性

水平方向の荷重はクランプと配管の摩擦によって制限されるため，クランプの最大摩擦力と等しくなる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 3－11－7 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。

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

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。

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

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，

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

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。

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

この圧力p_lが角度$-\alpha \le \theta \le \alpha$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。

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

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。

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

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。

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

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。

$$\begin{aligned} F_f \cdot \frac{D}{2} &= F_a \cdot L_m \\ F_a &= \frac{F_f D}{2L_m} \end{aligned} \qquad (8)$$

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。

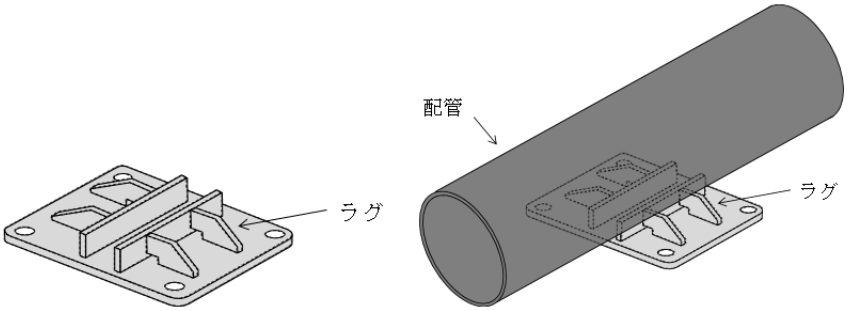
（2）鉛直方向荷重に対するクランプの構造成立性

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

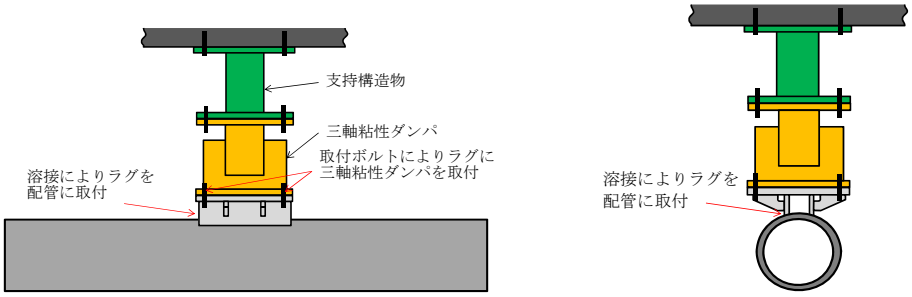
と同じ 140(kN)に設定する。三軸粘性ダンパ及びクランプ共通の許容荷重 140(kN)に対して，クランプの構成部品の中で余裕が小さいと想定される評価対象部位としてクランプボルトの構造強度評価をＪＥＡＧ４６０１等に基づいて実施した。評価の結果は第 3－11－3 添表のとおりであり，構造成立性を確認した。

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

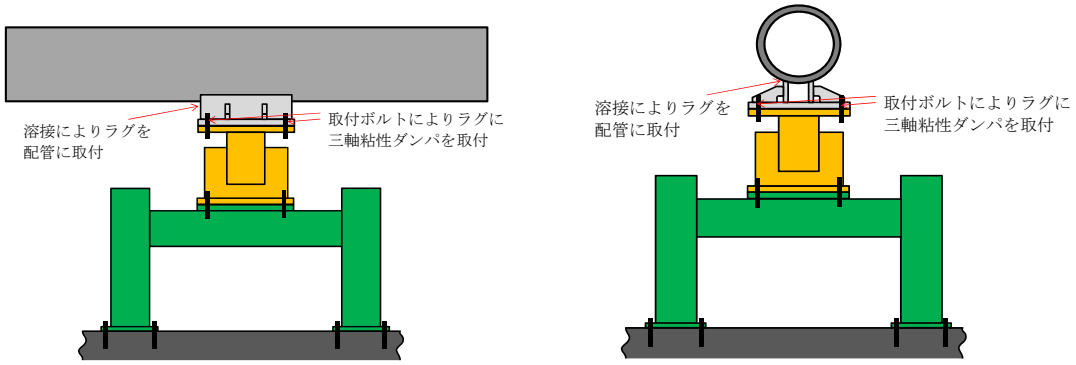
三軸粘性ダンパは，配管への取付方法としてラグ又はクランプを選択可能であり，配管の上部及び下部のいずれの位置にも設置することができる。配管への取付方法及び設置位置は設置スペース，干渉物，施工性等を考慮して現場状況に応じて選択することから，配置計画の成立性に問題はないと判断している。



第 3－11－1 添図　ラグの構造概要

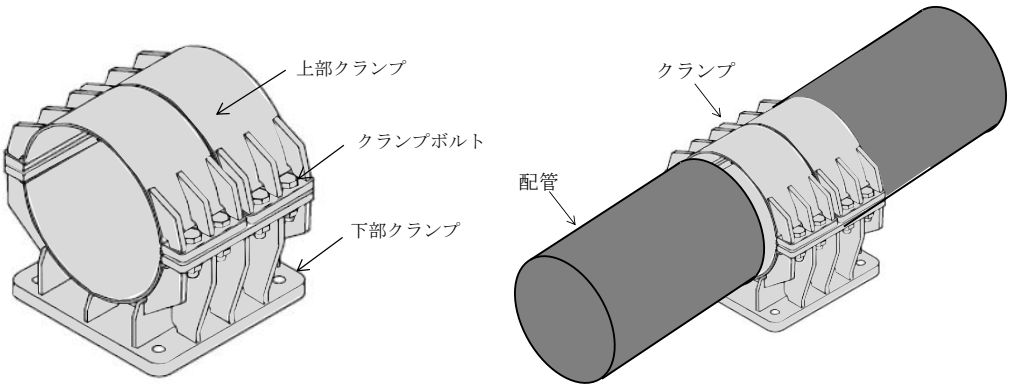


（ａ）配管上部への設置の例

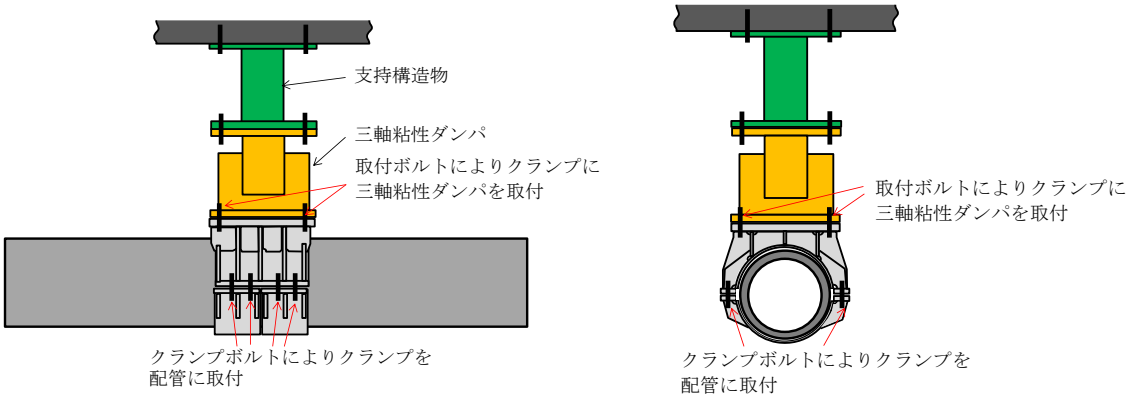


（ｂ）配管下部への設置の例

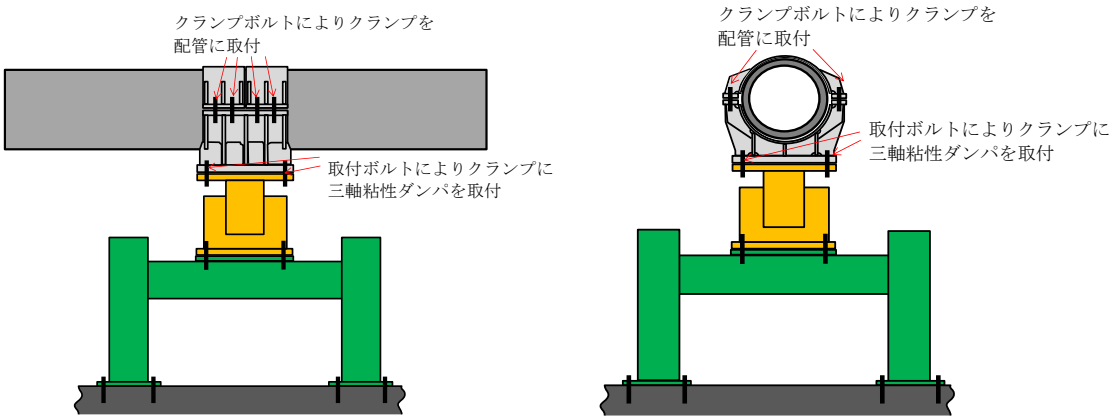
第 3－11－2 添図　ラグの配管への取付及び三軸粘性ダンパへの接続



第 3－11－3 添図　クランプの構造概要

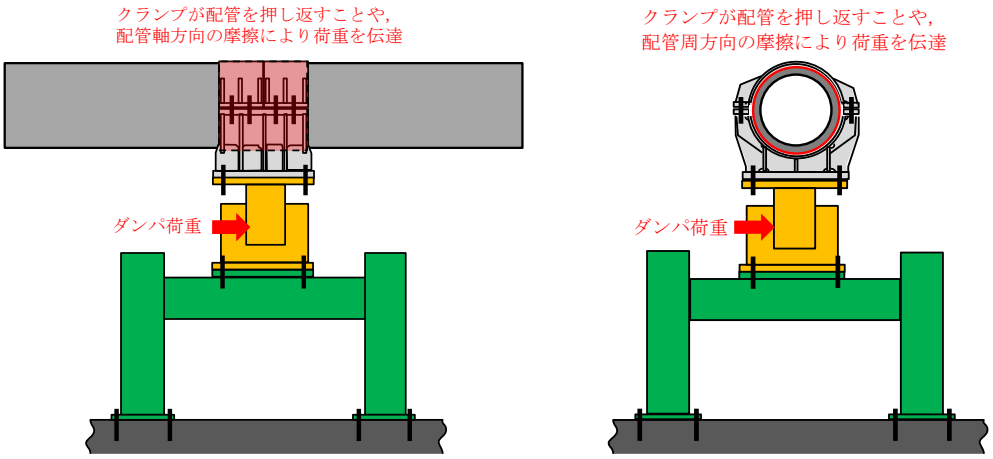


（ａ）配管上部への設置の例



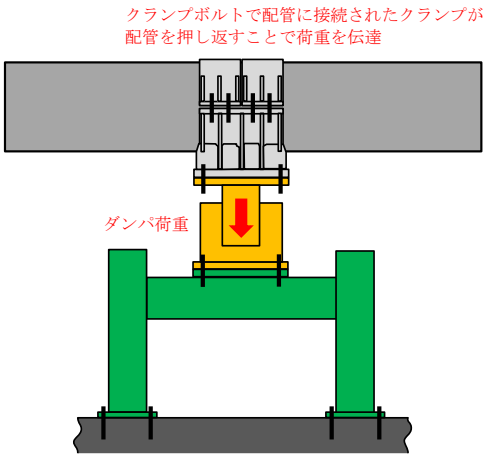
（ｂ）配管下部への設置の例

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

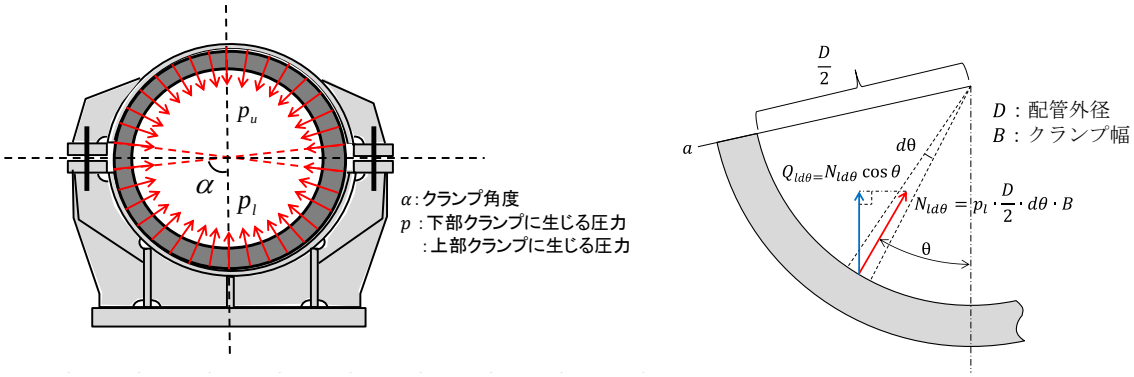


（ａ）配管軸方向荷重の伝達　　（ｂ）配管軸直方向荷重の伝達

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



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

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。

別紙－19

島根原子力発電所２号炉

弾性設計用地震動Ｓｄの設定について

目　次

1.　はじめに

2.　弾性設計用地震動Ｓｄの設定について

2.1　弾性設計用地震動Ｓｄと基準地震動Ｓｓとの応答スペクトルの比率に関する知見の整理

2.2　弾性設計用地震動Ｓｄの役割を踏まえた設定の考え方

2.3　基準地震動S_1の果たしてきた役割を踏まえた設定の考え方

2.4　弾性設計用地震動Ｓｄの設定

2.5　弾性設計用地震動Ｓｄの年超過確率の参照

3.　弾性設計用地震動Ｓｄの設定方法の妥当性について

4.　参考文献

添付資料－１　弾性設計用地震動Ｓｄ－１を設定した理由及びＳｄ－１を設定するメリット・デメリットについて

添付資料－２　弾性設計用地震動Ｓｄ－１の模擬地震波の作成

1.　はじめに

本資料は，弾性設計用地震動Ｓｄの設定について説明するものである。

弾性設計用地震動Ｓｄは，設置許可基準規則解釈 別記２及び審査ガイドにおいて，「基準地震動との応答スペクトルの比率の値が，目安として 0.5 を下回らないような値で，工学的判断に基づいて設定すること。」とされている。

ここでは，弾性設計用地震動Ｓｄと基準地震動Ｓｓとの応答スペクトルの比率に関する知見，弾性設計用地震動Ｓｄの役割及び基準地震動S_1の果たしてきた役割を踏まえ，島根２号炉における弾性設計用地震動Ｓｄを設定し，設定した弾性設計用地震動Ｓｄの年超過確率を参照する。

また，弾性設計用地震動Ｓｄの設定根拠に関する総合的な比較・整理を行い，島根２号炉における設定方法の妥当性を示す。

2.　弾性設計用地震動Ｓｄの設定について

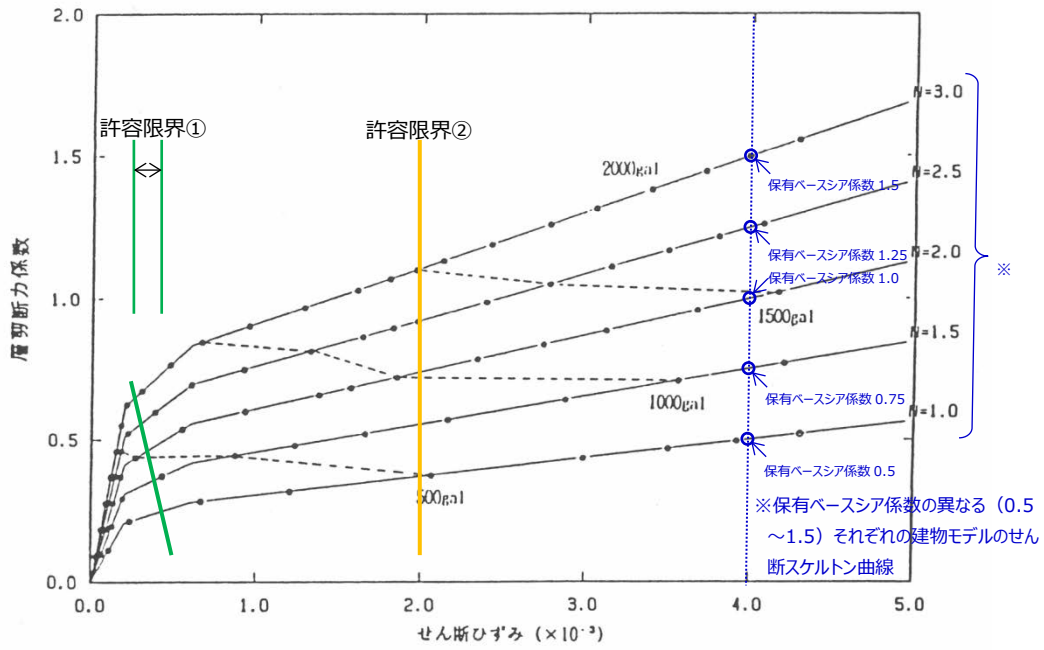
2.1　弾性設計用地震動Ｓｄと基準地震動Ｓｓとの応答スペクトルの比率に関する知見の整理

安全機能限界に対応する入力荷重と弾性限界に対応する入力荷重の比率としての係数αについて，日本電気協会の調査報告[(1)]を参照して評価する。日本電気協会の調査報告には，鉄筋コンクリート造壁式構造の建物を２質点系の簡易なスウェイ・ロッキングモデル（原子炉建物の規模を参考に，建物の耐力レベルを変動させた５種類の建物モデル）に置換し，入力地震動を 100Gal ずつ順次増加して非線形地震応答解析を行って求められたせん断ひずみと層せん断力係数の関係を示した図があり，この図に許容限界①と許容限界②を加筆したものを第 2.1－1 図に示す。

ここで，許容限界②は，建物はある程度の損傷を受けるがその程度は小さく，終局に対して余裕のある基準地震動Ｓｓの許容限界（せん断ひずみ度で 2.0×10^{-3}）を示しており，許容限界①は許容限界②の入力加速度を 1/2 倍とした場合の応答値を示している。

許容限界①の応答値は短期許容応力度相当と考えられ，設置許可基準規則解釈 別記２でいう弾性設計用地震動Ｓｄに求められる「おおむね弾性範囲の設計」と考えられる。

以上より，許容限界①を弾性限界，許容限界②を安全機能限界と捉えた場合，安全機能限界に対応する入力荷重と弾性限界に対応する入力荷重の比率としてのαは 0.5 程度の値となる。

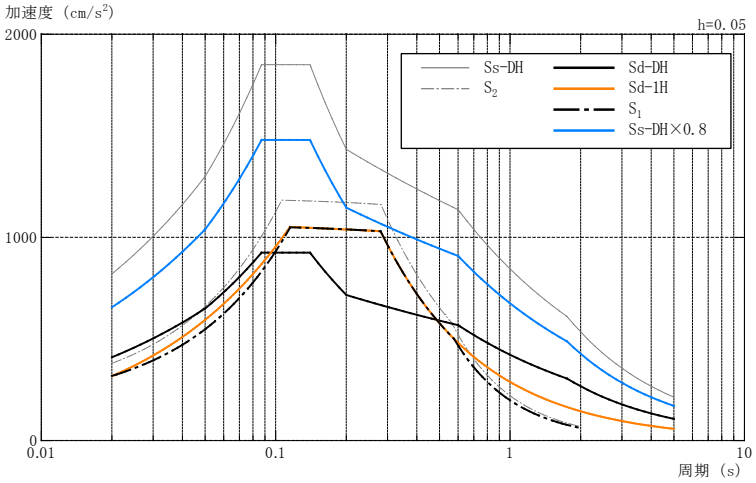


第 2.1－1 図　最大入力加速度とスケルトン上の最大応答
（参考文献(1)より引用，加筆）

2.2　弾性設計用地震動Ｓｄの役割を踏まえた設定の考え方

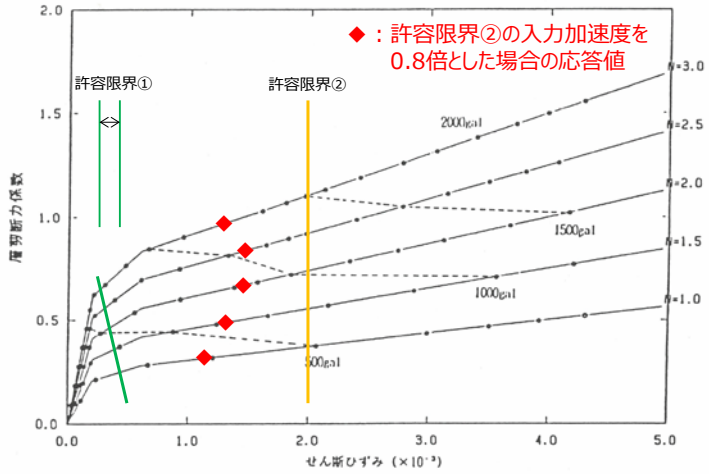
先行プラントの審査実績における設定方法と同じように，「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（昭和 56 年 7 月 20 日 原子力安全委員会決定，平成 13 年 3 月 29 日 一部改訂)」（以下「旧指針」という。）における基準地震動Ｓ$_1$を弾性設計用地震動Ｓｄで包絡させる考え方とした場合，基準地震動Ｓｓ－Ｄの約 0.8 倍となり，弾性設計用地震動Ｓｄが基準地震動Ｓｓに近づき，基準地震動Ｓｓに対する安全機能の保持をより高い精度で確認するという耐震設計上果たすべき役割から乖離する（基準地震動Ｓｓに対する安全機能保持を確実にするための弾性設計用地震動Ｓｄによる弾性設計ではなく，弾性設計用地震動Ｓｄによって構造設計が決定される)。

第 2.2－1 図に示す通り，基準地震動Ｓ$_1$は，880 年出雲の地震（M7.4）に基づく大崎スペクトルにより設定されたもので，旧指針の基準地震動Ｓ$_2$に対する基準地震動Ｓ$_1$の比率も約 8 割～9 割と大きい。また，基準地震動Ｓ$_1$と基準地震動Ｓｓ－Ｄ（宍道断層による地震等を考慮して策定した基準地震動）のスペクトル形状は異なっており，基準地震動Ｓ$_1$を包絡する基準地震動Ｓｓ－ＤＨ×0.8 の短周期側は基準地震動Ｓ$_1$の約 1.5～2 倍程度になる。



第 2.2－1 図　基準地震動Ｓｓ－ＤＨ×0.8 のスペクトル

日本電気協会の調査報告による弾性限界（許容限界①），安全機能限界（許容限界②）の関係図（第 2.2－2 図）に，許容限界②の入力加速度を 0.8 倍とした場合の応答値を◆で示す。これによると，設置許可基準規則解釈 別記２でいう弾性設計用地震動Ｓｄに求められる「おおむね弾性範囲の設計」とは対応しない。



第 2.2－2 図　弾性限界と安全機能限界の関係図
（参考文献(1)より引用，加筆）

仮に，弾性設計用地震動Ｓｄを基準地震動Ｓｓ－Ｄの 0.8 倍と設定し弾性設計を行う場合，基準地震動Ｓｓによる応答は安全機能限界以下となると考えられるが，弾性設計用地震動Ｓｄによる弾性設計を行うことで基準地震動Ｓｓに対する安全機能保持をより高い精度で確実にするという役割からすると，過大なレベルであると考えられる。

弾性設計用地震動Ｓｄを基準地震動Ｓｓ－Ｄの 0.8 倍と設定した場合の耐震評価を，基準地震動Ｓｓに対する安全機能が保持できる見込みの設備において概算すると，第 2.2－1 表に示す通り，基準地震動Ｓｓ－Ｄ×0.8 では弾性限界の目安を超え耐震強化が困難な設備がでる見込みであり，弾性設計用地震動Ｓｄとするには過大なレベルで，合理的な設計が出来ないと考えている。

第 2.2－1 表　耐震評価の概算

代表設備	地震動	主な評価項目	判定（弾性限界）	備考
炉内構造物（ブラケット）	Ｓｄ－Ｄ	一次応力	目安値以下	１次固有周期： 0.11s（水平方向） ※原子炉圧力容器の１次固有周期を示す。
	Ｓｓ－Ｄ×0.8		目安値を超える見込み（注１）	
制御室建物（中央制御室遮蔽壁）	Ｓｄ－Ｄ	せん断ひずみ，応力度	目安値以下	１次固有周期： 0.14s（ＮＳ方向） 0.12s（ＥＷ方向）
	Ｓｓ－Ｄ×0.8		目安値を超える見込み（注２）	

（注１）Ｓｓ－Ｄ×0.8 によるブラケットの発生応力を評価（Ｓｄ－Ｄ（＝Ｓｓ－Ｄ×0.5）による発生応力の割増による概算）した結果，一次応力が許容応力を超える見込みであるが，当該ブラケットは原子炉圧力容器内部の溶接構造物であり，原子炉圧力容器内での照射された材料の溶接による補強は施工上困難。

（注２）Ｓｓ－Ｄ×0.8 による鉄筋の応力度を評価（Ｓｄ－Ｄ（＝Ｓｓ－Ｄ×0.5）による応力度の割増による概算）した結果，せん断応力度が短期許容応力度を超える見込みであるが，中央制御室遮蔽壁（制御室建物の耐震壁を兼ねる）の耐震補強（鉄筋の追加や取替え等）は隣接建物との干渉や施工スペースが狭隘なことから施工上困難。

従って，単純に基準地震動Ｓｓの係数倍で基準地震動Ｓ１を包絡した弾性設計用地震動Ｓｄを設定することは過大な地震動となり合理的な設計が出来ないことから，弾性設計用地震動Ｓｄは，弾性設計用地震動Ｓｄと基準地震動Ｓｓとの応答スペクトルの比率に関する知見及び弾性設計用地震動Ｓｄの役割を踏まえ，基準地震動Ｓｓに係数 0.5 を乗じて設定する。

2.3　基準地震動Ｓ1の果たしてきた役割を踏まえた設定の考え方

平成１８年の耐震設計審査指針の改訂に伴いＡクラスがＳクラスに格上げされたことに鑑み，旧指針において，基準地震動Ｓ1がＡクラス施設の耐震性を担保（基準地震動Ｓ1と組み合わせる荷重の考慮を含む）してきたことを踏まえ，基準地震動Ｓ1の応答スペクトルを概ね下回らないよう配慮した地震動も弾性設計用地震動Ｓｄとして追加設定する。

基準地震動Ｓ1と弾性設計用地震動Ｓｄ－１の地震動の特徴や新旧設計体系の比較，及び基準地震動Ｓ1をそのまま用いるのではなく新たに弾性設計用地震動Ｓｄ－１（水平・鉛直）を設定した理由を添付資料－１に示す。設計体系の違い及び地震動の特徴を踏まえ，設定した弾性設計用地震動Ｓｄ－１が基準地震動Ｓ1の果たしてきた役割を果たせるものと判断した。

2.4　弾性設計用地震動Ｓｄの設定

(1)　弾性設計用地震動Ｓｄの役割を踏まえた設定

弾性設計用地震動Ｓｄは，設置許可基準規則及び審査ガイドの要求事項に従って，基準地震動Ｓｓとの応答スペクトルの比率が目安として 0.5 を下回らないよう基準地震動Ｓｓに係数 0.5 を乗じて設定した。なお，係数 0.5 は，工学的判断として，発電用原子炉施設の安全機能限界と弾性限界に対する入力荷重の比率が 0.5 程度であるという知見を踏まえて設定した。

以上の方法に基づき設定した弾性設計用地震動Ｓｄを以下に示す。

弾性設計用地震動Ｓｄ：Ｓｄ－Ｄ，Ｆ１，Ｆ２，Ｎ１，Ｎ２

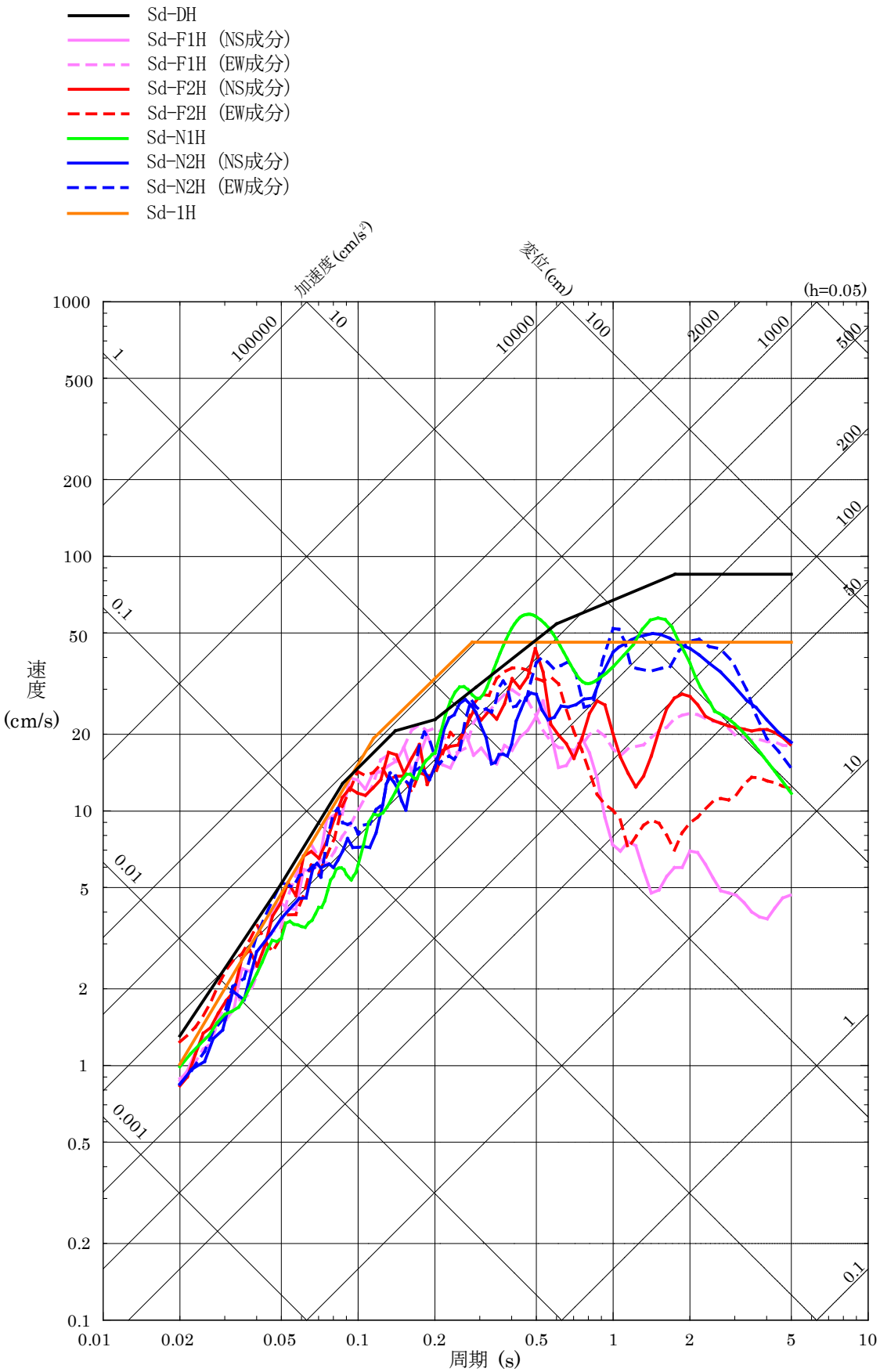
(2)　基準地震動Ｓ1の果たしてきた役割を踏まえた設定

基準地震動Ｓ1の果たしてきた役割を踏まえ，旧指針における基準地震動Ｓ1の応答スペクトルを概ね下回らないよう配慮した地震動も弾性設計用地震動Ｓｄとして設定した。

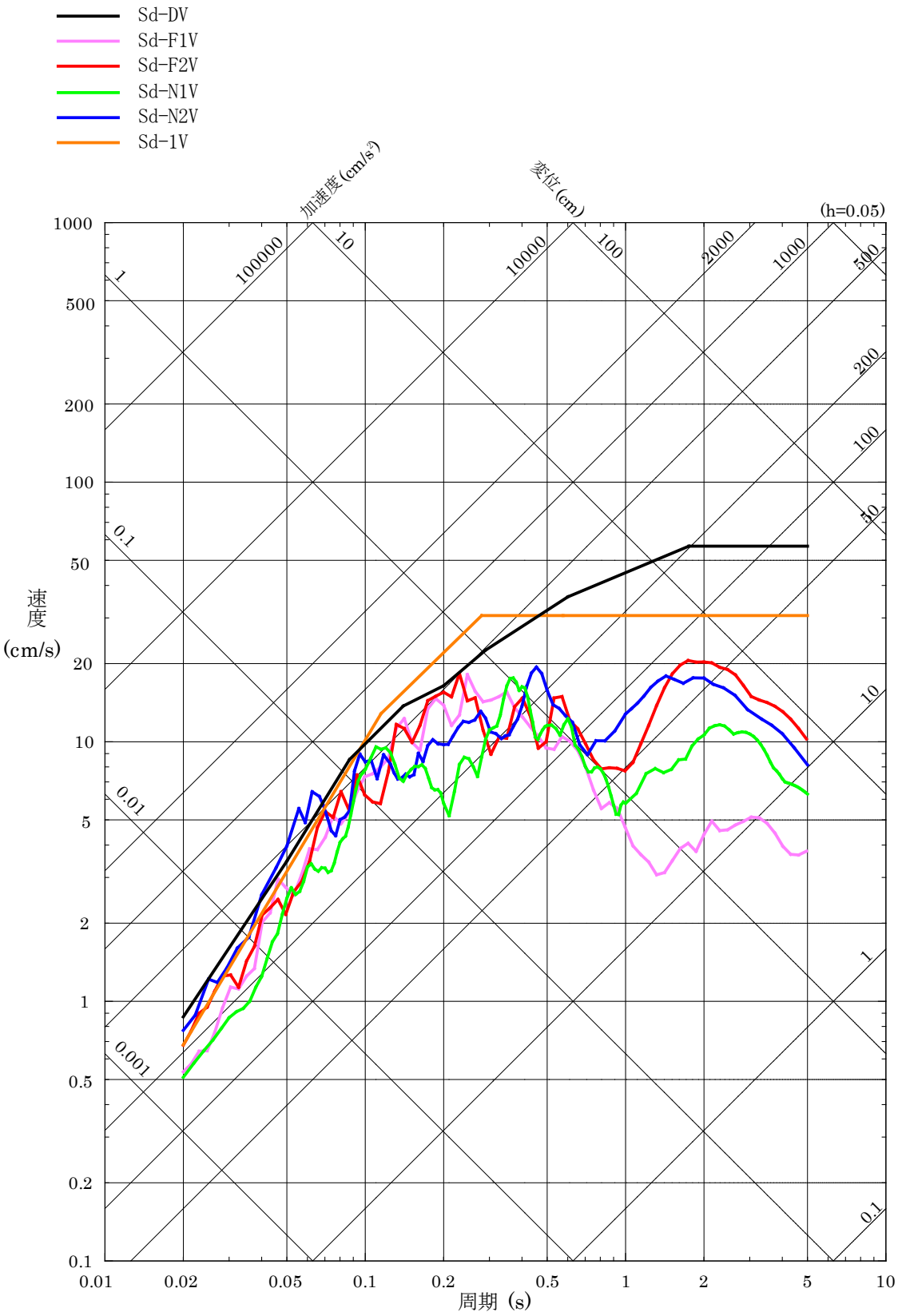
設定した弾性設計用地震動Ｓｄを以下に示す。

弾性設計用地震動Ｓｄ：Ｓｄ－１

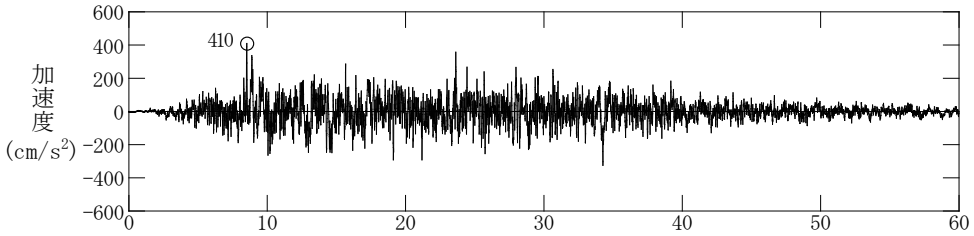
設定した弾性設計用地震動Ｓｄの応答スペクトルを第 2.4－1 図及び第 2.4－2 図に，加速度時刻歴波形を第 2.4－3 図～第 2.4－8 図に，弾性設計用地震動Ｓｄと基準地震動Ｓ1の応答スペクトルの比較を第 2.4－9 図に示す。弾性設計用地震動Ｓｄ－１の模擬地震波の作成条件等を添付資料－２に示す。



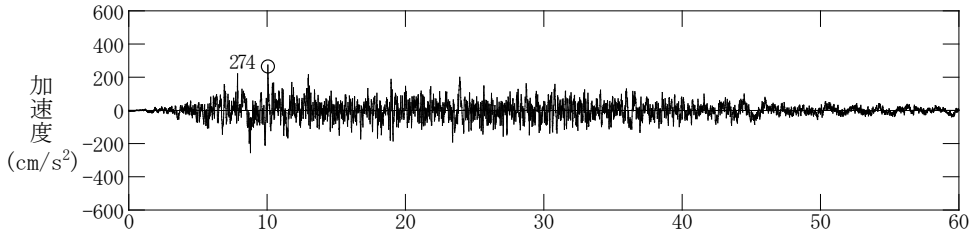
第 2.4－1 図　弾性設計用地震動Ｓｄの応答スペクトル（水平方向）



第 2.4－2 図　弾性設計用地震動Ｓｄの応答スペクトル（鉛直方向）

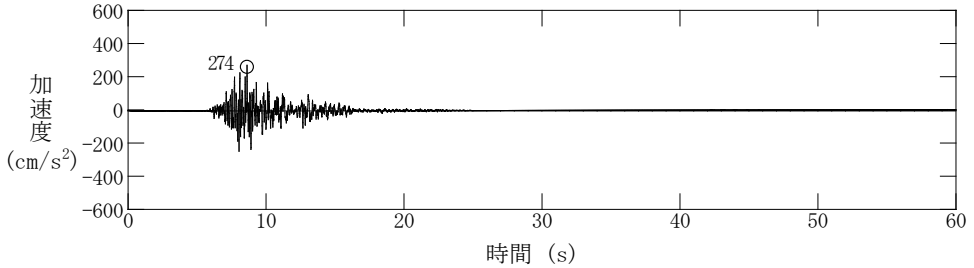


水平方向：Ｓｄ－ＤＨ

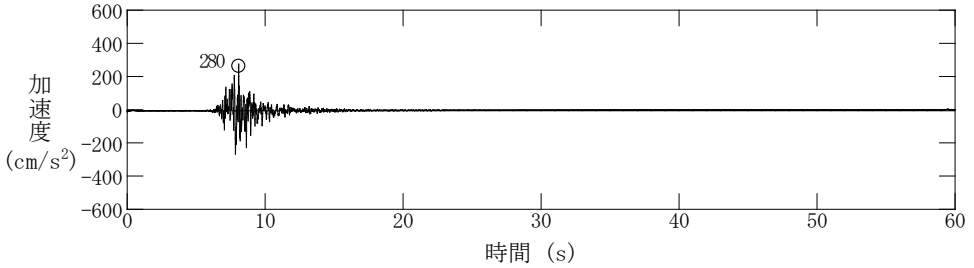


鉛直方向：Ｓｄ－ＤＶ

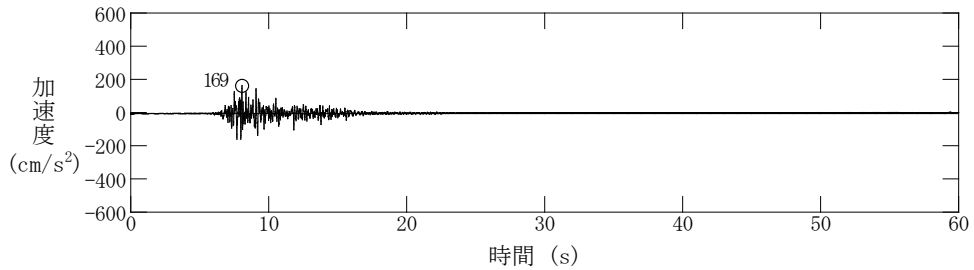
第 2.4－3 図　弾性設計用地震動Ｓｄ－Ｄの設計用模擬地震波の加速度時刻歴波形



水平方向：Ｓｄ－Ｆ１Ｈ（ＮＳ成分）

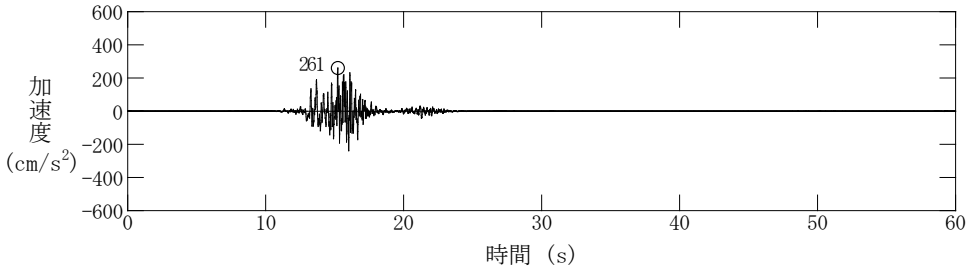


水平方向：Ｓｄ－Ｆ１Ｈ（ＥＷ成分）

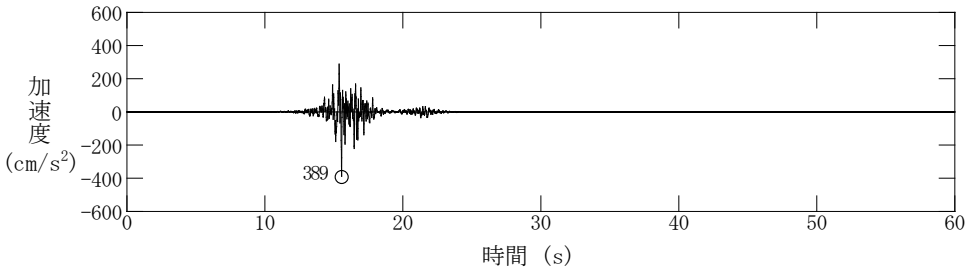


鉛直方向：Ｓｄ－Ｆ１Ｖ

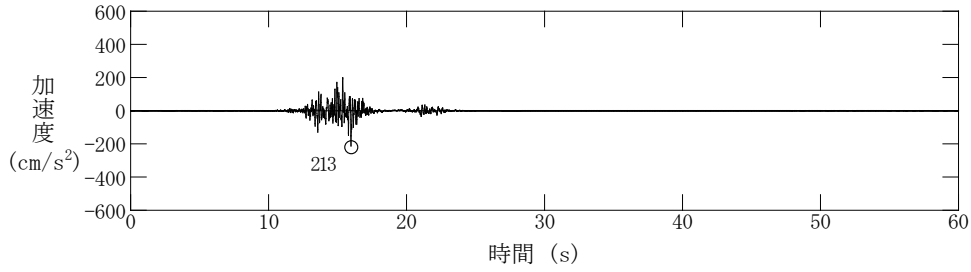
第 2.4－4 図　弾性設計用地震動Ｓｄ－Ｆ１の加速度時刻歴波形



水平方向：Ｓｄ－Ｆ２Ｈ（ＮＳ成分）

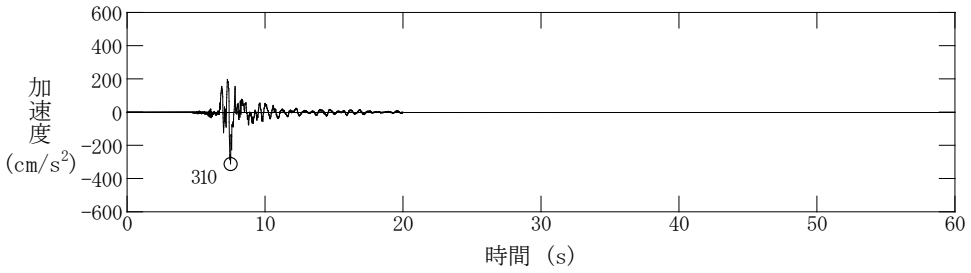


水平方向：Ｓｄ－Ｆ２Ｈ（ＥＷ成分）

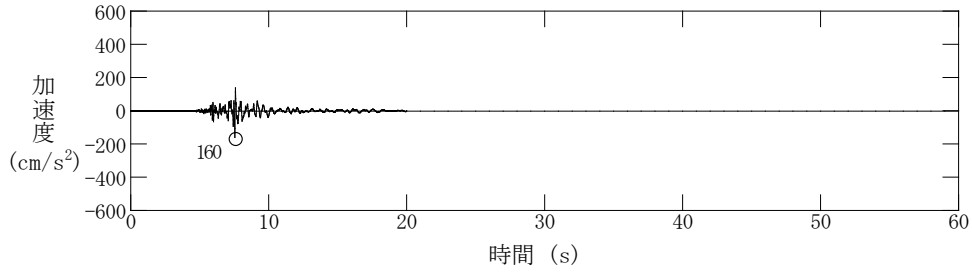


鉛直方向：Ｓｄ－Ｆ２Ｖ

第 2.4－5 図　弾性設計用地震動Ｓｄ－Ｆ２の加速度時刻歴波形

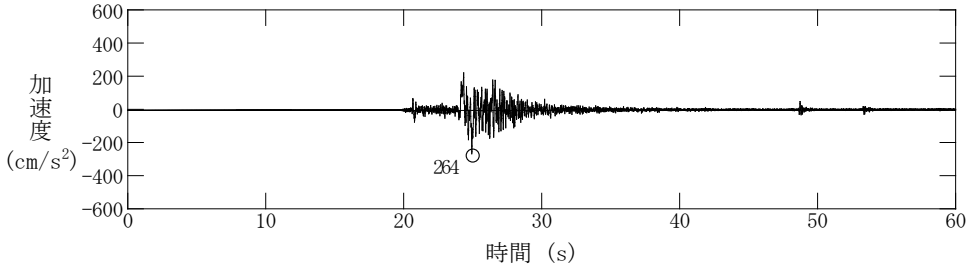


水平方向：Ｓｄ－Ｎ１Ｈ

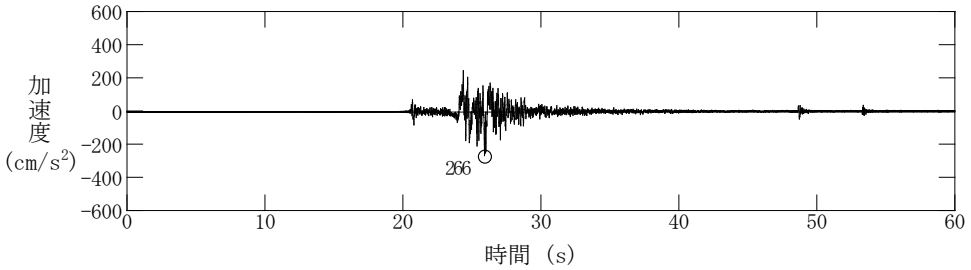


鉛直方向：Ｓｄ－Ｎ１Ｖ

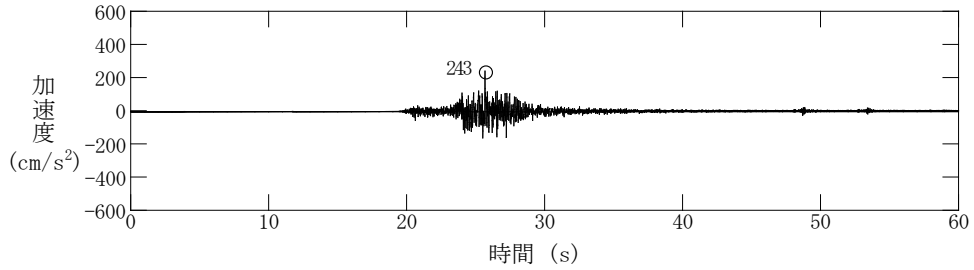
第 2.4－6 図　弾性設計用地震動Ｓｄ－Ｎ１の加速度時刻歴波形



水平方向：Ｓｄ－Ｎ２Ｈ（ＮＳ成分）

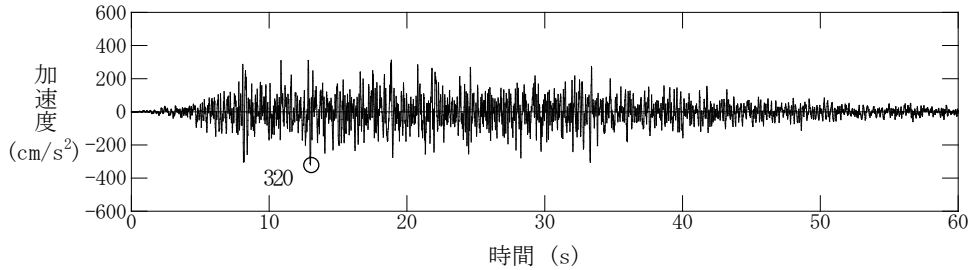


水平方向：Ｓｄ－Ｎ２Ｈ（ＥＷ成分）

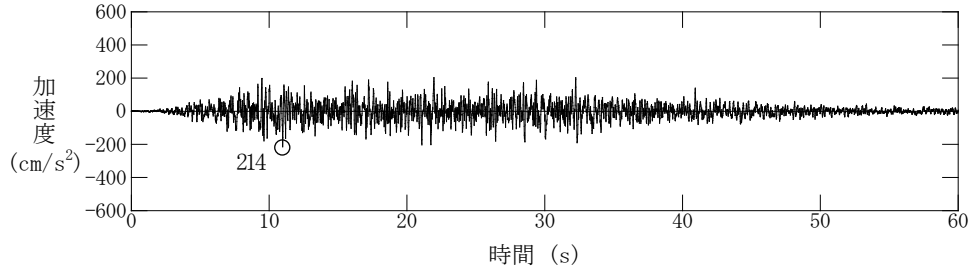


鉛直方向：Ｓｄ－Ｎ２Ｖ

第 2.4－7 図　弾性設計用地震動Ｓｄ－Ｎ２の加速度時刻歴波形

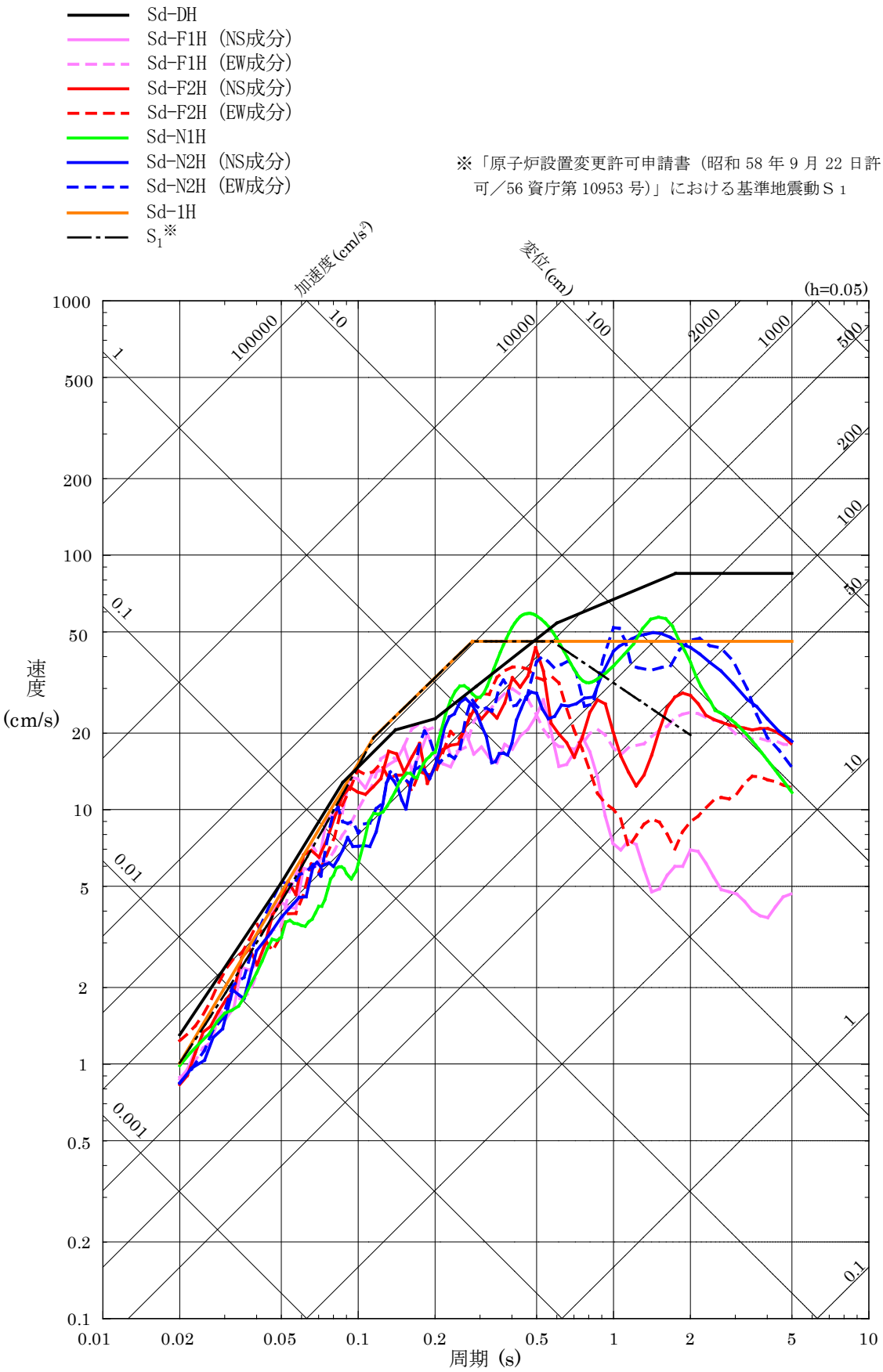


水平方向：Ｓｄ－１Ｈ



鉛直方向：Ｓｄ－１Ｖ

第 2.4－8 図　弾性設計用地震動Ｓｄ－１の設計用模擬地震波の加速度時刻歴波形



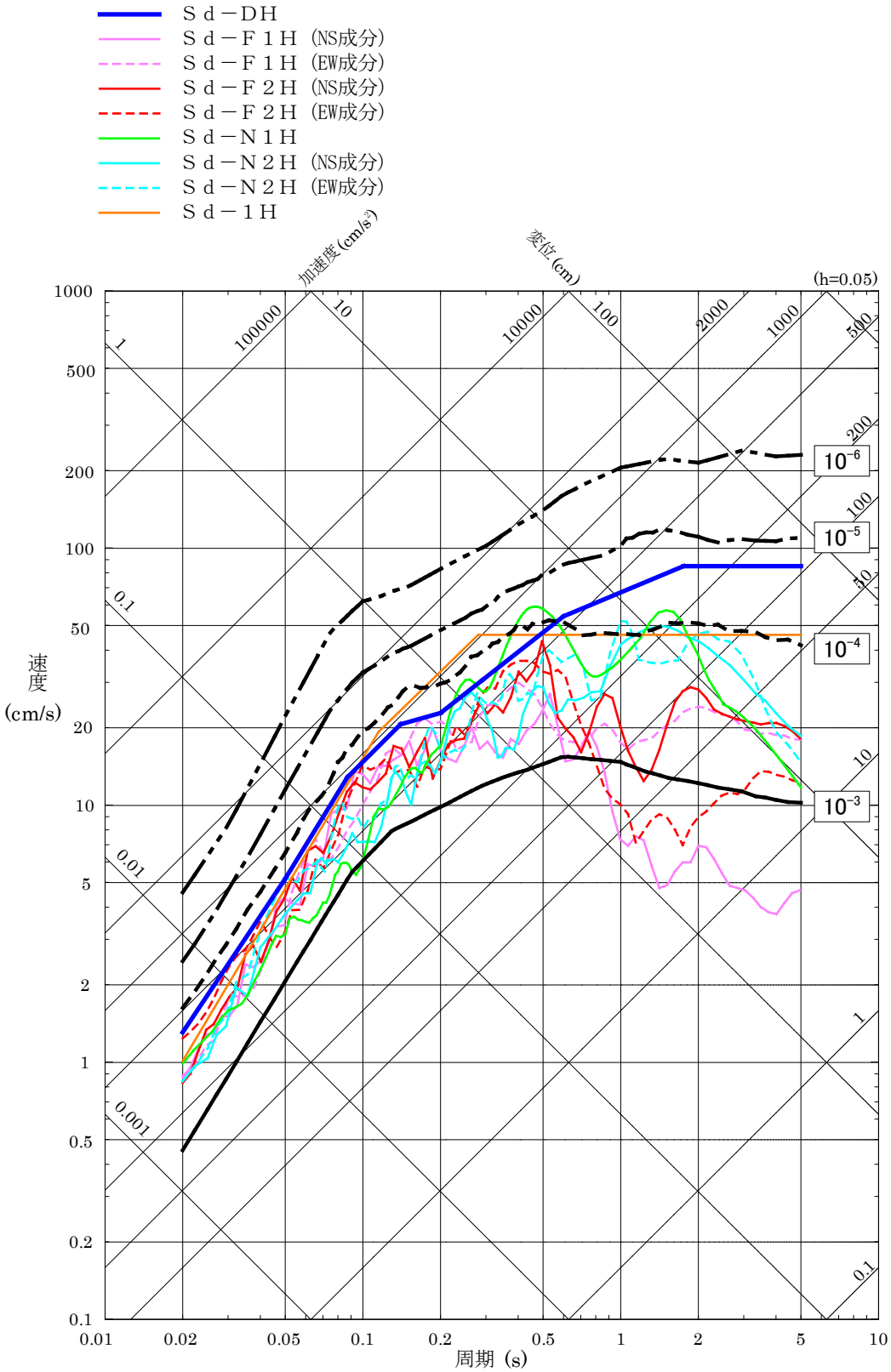
第 2.4－9 図　弾性設計用地震動Ｓｄと基準地震動Ｓ１の
応答スペクトルの比較（水平方向）

2.5　弾性設計用地震動Ｓｄの年超過確率の参照

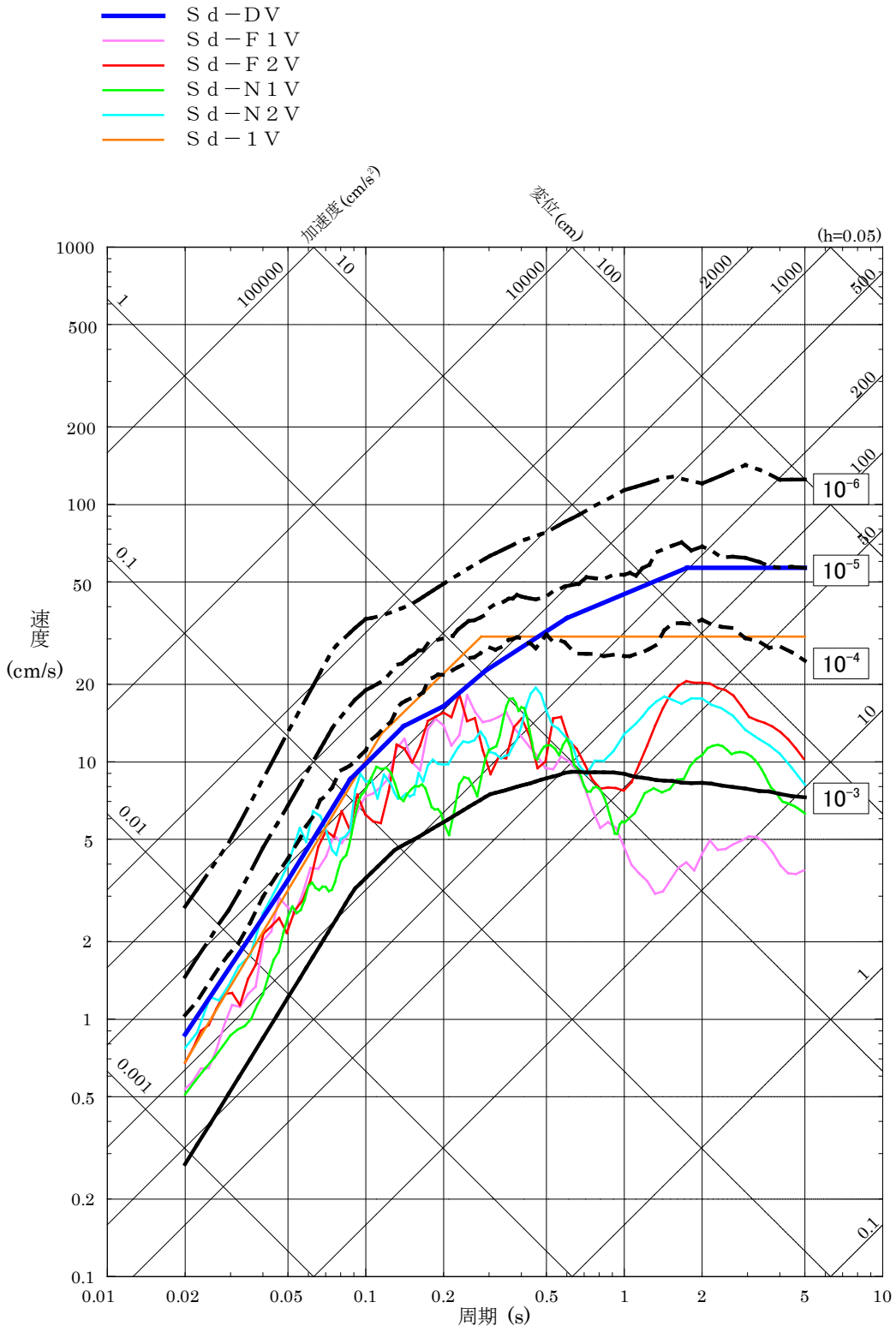
設定した弾性設計用地震動Ｓｄの年超過確率を参照し，発生確率が妥当な範囲にあることを確認する。弾性設計用地震動Ｓｄの応答スペクトル及び解放基盤表面における地震動の一様ハザードスペクトルの比較を第 2.5－1 図及び第 2.5－2 図に示す。弾性設計用地震動Ｓｄ－Ｄの年超過確率は 10^{-3}～10^{-5} 程度，弾性設計用地震動Ｓｄ－Ｆ１，Ｓｄ－Ｆ２，Ｓｄ－Ｎ１及びＳｄ－Ｎ２は 10^{-3}～10^{-4} 程度，弾性設計用地震動Ｓｄ－１は 10^{-3}～10^{-4} 程度である。

「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」[(2)]（以下「ＪＥＡＧ４６０１・補－1984」という。）によると，弾性設計用地震動Ｓｄの発生確率は 10^{-2}～5×10^{-4} とされている[(注１)]。運転状態と地震による荷重の組合せの検討にあたっては，弾性設計用地震動Ｓｄの年超過確率を 10^{-2} として設定しており，設定した弾性設計用地震動Ｓｄの発生確率はこれを大きく下回っている。

（注１）ＪＥＡＧ４６０１・補－1984 に記載されている地震動の発生確率 S_1 をＳｄに読み替えた。



第 2.5－1 図　弾性設計用地震動Ｓｄの応答スペクトル及び解放基盤表面における地震動の一様ハザードスペクトルの比較（水平方向）



第 2.5－2 図　弾性設計用地震動Ｓｄの応答スペクトル及び解放基盤表面における地震動の一様ハザードスペクトルの比較（鉛直方向）

3.　弾性設計用地震動Ｓｄの設定方法の妥当性について

弾性設計用地震動Ｓｄの設定根拠に関する総合的な比較・整理を行い，島根２号炉における設定方法の妥当性を第3－1表に示す。

第3－1表　弾性設計用地震動Ｓｄの設定根拠に関する総合的な比較・整理

		島根２号炉における設定方法	先行プラントの審査実績における設定方法の場合（Ｓｓ－Ｄの約0.8倍）
評価項目	①設置許可基準規則及び審査ガイドの要求事項（基準地震動Ｓｓに対する係数）に適合しているか。	◎（基準地震動Ｓｓに対する係数 0.5）	◎（基準地震動Ｓｓに対する係数 約0.8）
	②基準地震動Ｓｓによる地震力に対する施設の安全機能の保持をより高い精度で確認するという弾性設計用地震動Ｓｄの役割を踏まえた設定となっているか。	◎	×（弾性設計用地震動Ｓｄが耐震設計上果たすべき役割から乖離し，合理的な設計が出来ない）
	③基準地震動Ｓ１の果たしてきた役割を考慮しているか。（基準地震動Ｓ１が施設の耐震性を担保してきたことを踏まえた設定となっているか。）	◎（基準地震動Ｓ１の応答スペクトルを概ね下回らないよう配慮した地震動Ｓｄ－１を追加設定）	◎
	④弾性設計用地震動Ｓｄの年超過確率を参照し，発生確率が妥当な範囲にあるか。	◎	○
総合評価		◎⇒採用	×⇒採用しない

4.　参考文献

(1)（社）日本電気協会　電気技術調査委員会　原子力発電耐震設計特別調査委員会　建築部会：静的地震力の見直し（建築編）に関する調査報告書（概要），平成６年３月

(2)（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

弾性設計用地震動Ｓｄ－１を設定した理由及び Ｓｄ－１を設定するメリット・デメリットについて

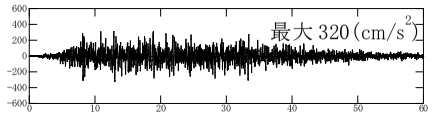
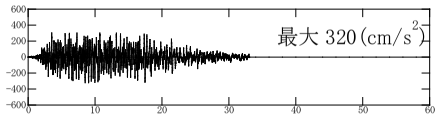
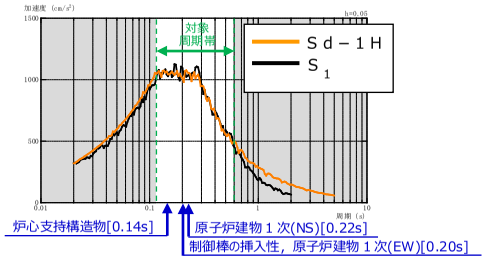
1. 概要

本資料では，基準地震動Ｓ$_1$の果たしてきた役割を踏まえ，弾性設計用地震動Ｓｄ－１を設定した理由及び弾性設計用地震動Ｓｄ－１を設定するメリット・デメリットについて説明する。

2. 弾性設計用地震動Ｓｄ－１を設定した理由

基準地震動Ｓ$_1$と弾性設計用地震動Ｓｄ－１の違いについて，それぞれの地震動の特徴や新旧設計体系の違いを踏まえて比較し，基準地震動Ｓ$_1$をそのまま用いるのではなく新たに弾性設計用地震動Ｓｄ－１（水平・鉛直）を設定した理由を第2－1表に示す。

第2－1表　弾性設計用地震動Ｓｄ－１と基準地震動Ｓ１の比較及びＳｄ－１設定の考え方

		Ｓｄ－１	Ｓ１（既許可）	設定の考え方
設計体系	準拠基準（耐震設計審査指針）	・設置許可基準規則及び審査ガイド（平成１８年耐震設計審査指針）	・昭和５６年耐震設計審査指針	－
	鉛直地震動の扱い	・鉛直方向の地震動を設定	・動的な鉛直動なし（静的に考慮）	設置許可基準規則及び審査ガイドに基づき，水平方向及び鉛直方向の地震力を適切に組み合わせるため，弾性設計用地震動Ｓｄとして鉛直方向の動的な地震動を設定した。
	水平・鉛直の組合せ	・Ｓｄによる地震力は，水平方向及び鉛直方向について適切に組み合わせる。	・Ｓ１による水平地震力を，最大加速度振幅の1/2の値を鉛直震度として求めた鉛直地震力と同時に不利な方向の組合せで作用させる。ただし，鉛直震度は高さ方向に一定とする。	
地震動の設定方法	応答スペクトル（コントロールポイント，対象周期）	・添付資料－２のＡ～Ｆの６ポイント ・0.02 ～ 5.0ｓ ※擬似速度応答スペクトルが両対数軸目盛で直線に設定。 ※コントロールポイントＤ以降の周期帯で擬似速度応答スペクトルを周期５秒まで一定に設定。	・添付資料－２のＡ～Ｄ，Ｅ[注]の５ポイント ・0.02 ～ 2.0ｓ ※大崎スペクトルによりコントロールポイントＡＢ間の擬似加速度応答スペクトルが両算術目盛で直線，Ｂ～Ｅ間は擬似速度応答スペクトルが両対数軸目盛で直線に設定。 注：コントロールポイントＥは大崎スペクトルにより，pSv=19.69cm/s としていた。	大崎の方法ではなく，以下に示す審査実績のある考え方に基づき設定した。 [応答スペクトル] ・Ｓｄ－１はＳ１を下回らないようにコントロールポイントを設定し，Ｓｓ－Ｄと同様に擬似速度応答スペクトルが両対数軸目盛で直線に設定。 ・Ｓｓ－Ｄや他のＳｄに合わせて周期５秒まで設定し，コントロールポイントＤ以降の周期帯で擬似速度応答スペクトルを一定に設定。 [経時特性] ・Ｓｄ－１は主要動の長さ及び継続時間が最も長いＳｓ－Ｄに合わせて，継続時間を60.0秒，振幅包絡線の継時的変化を耐専の方法により設定し，Ｓ１よりも長く設定。
	経時特性（継続時間，振幅包絡線の経時的変化）	・６０．０秒 ・耐専の方法 ※基準地震動Ｓｓ－Ｄと同様に設定	・３３．１秒 ・大崎の方法	
模擬地震波（水平方向）				Ｓｄ－１の最大加速度値はＳ１と同様に 320gal に設定した。
模擬地震波の応答スペクトル（水平方向）の比較				・Ｓｄ－１の応答スペクトルはＳ１の応答スペクトルを概ね下回らないことを確認した。 ・Ｓ１がＳｄ－１を上回る周期ポイントがある（下回る周期ポイントも混在）が，模擬波作成時の適合精度によるものであり，Ｓｄ－１の模擬地震波は設定したＳｄ－１のスペクトル形状への適合条件を満足している。 ・Ｓ１がＳｄ－１を上回る周期ポイントの混在する周期帯（約0.12～0.6秒）に固有周期を有する主要な施設（原子炉建物及び炉内構造物等）について，それぞれの周期毎の応答スペクトル比（Ｓ１／Ｓｄ－１）を確認した結果，最大で1.08（制御棒の挿入性）であり，その違いは数パーセントである。また，既設（Ｓクラス）施設は，Ｓ１による地震力に対して設計していることから，応答スペクトル比の違いが施設に与える影響は軽微と判断した。

3.　弾性設計用地震動Ｓｄ－１を設定するメリット・デメリット

基準地震動Ｓ1をそのまま用いるのではなく新たに弾性設計用地震動Ｓｄ－１（水平・鉛直）を設定するメリット・デメリットを第3－1表に示す。

また，旧指針においてＡｓクラス及びＡクラスとしていた施設（第3－2表参照）は，基準地震動Ｓ1による地震力に対して設計している。

なお，弾性設計用地震動Ｓｄ－１の設定の考え方は審査実績が無いものであり，弾性設計用地震動Ｓｄ－１の応答スペクトルは一部周期で基準地震動Ｓ1の応答スペクトルを下回っていることから，弾性設計用地震動Ｓｄ－１の適用性については，詳細設計段階において新旧設計体系の違いを踏まえて対象を適切に選定した上で，説明性向上の観点から弾性設計用地震動Ｓｄ－１と基準地震動Ｓ1の比較照査を行い，要因分析を行う。

第3−1表　弾性設計用地震動Ｓｄ－１（水平・鉛直）を設定するメリット・デメリット

		Ｓｄ－１設定のメリット	Ｓｄ－１設定のデメリット	備考
設計体系	準拠基準 （耐震設計審査指針）	設置許可基準規則及び審査ガイドに基づき，水平方向及び鉛直方向の地震力を適切に組み合わせた評価が行える。	なし	－
	鉛直地震動の扱い			
	水平・鉛直の組合せ			
地震動の設定方法	応答スペクトル （コントロールポイント，対象周期）	基準地震動Ｓｓの審査実績を踏まえた設定が行える。 [応答スペクトル] ・Ｓｄ－１はS_1を下回らないようにコントロールポイントを設定 ・周期５秒まで設定 [経時特性] ・継続時間は基準地震動Ｓｓ－Ｄと同様に設定 ・振幅包絡線の継時的変化は耐専の方法に基づき設定	なし	－
	経時特性 （継続時間，振幅包絡線の経時的変化）			
模擬地震波（水平方向）		Ｓｄ－１の最大加速度値はS_1と同様に320galに設定し，S_1の果たしてきた役割を踏まえた設定が行える。	なし	－
模擬地震波の応答スペクトル（水平方向）の比較		・Ｓｄ－１の応答スペクトルはS_1の応答スペクトルを概ね下回らない。	・S_1がＳｄ－１を上回る周期ポイントがある（下回る周期ポイントも混在）※1。 ・S_1がＳｄ－１を上回る周期ポイントの混在する周期帯（約0.12～0.6秒）に固有周期を有する主要な施設（原子炉建物及び炉内構造物等）がある※2。	※１：模擬波作成時の適合精度によるものである。 ※２：それぞれの周期毎の応答スペクトル比（S_1／Ｓｄ－１）を確認した結果，最大で1.08（制御棒の挿入性）であり，その違いは数パーセントである。また，既設（Ｓクラス）施設は，S_1による地震力に対して設計している。

第3−2表(1)　既工認における耐震設計の基本方針（1/2）

表2−1　原子炉施設の耐震設計上の重要度分類

重要度分類及び定義	機能別分類	主要設備		補助設備		直接支持構造物		間接支持構造物		相互影響を考慮すべき設備	
		適用範囲	重要度分類	適用範囲	重要度分類	適用範囲	重要度分類	適用範囲	検討用地震動等	適用範囲	検討用地震動等
Asクラス その破損により冷却材喪失をひき起こすおそれのあるもの，原子炉を緊急停止させ，かつ安全停止状態に維持するために必要なもの，使用済燃料を貯蔵するための施設及び原子炉格納容器	(i)「原子炉冷却材圧力バウンダリ」（「軽水炉についての安全設計に関する審査指針について」に記載されている定義と同じ）を構成する配管及び機器	①原子炉圧力容器 ②原子炉冷却材圧力バウンダリに属する容器・配管・ポンプ・弁	As As	①隔離弁を閉とするに必要な電気及び計装設備	As	1)原子炉圧力容器支持スカート 2)機器・配管及び電気計装設備等の支持構造物	As As	1)原子炉圧力容器ペデスタル 2)原子炉建物 3)ガンマ線しゃへい壁 4)制御室建物 5)廃棄物処理建物 6)当該設備の支持構造物	S_2 S_2 S_2 S_2 S_2 S_2		
	(ii)使用済燃料を貯蔵するための設備	①燃料プール ②使用済燃料貯蔵ラック	As As			1)当該設備の支持構造物	As	1)原子炉建物	S_2	1)原子炉建物天井クレーン 2)燃料取扱い設備	S_1 ＊1 S_2 ＊2
	(iii)原子炉の緊急停止のために急激に負の反応度を付加するための設備及び原子炉の停止状態を維持する設備	①制御棒及び制御棒駆動系（スクラム機能に関する部分）	As	①炉心支持構造物 ②電気計装設備	As As	1)機器・配管及び電気計装設備等の支持構造物	As	1)原子炉建物 2)当該設備の支持構造物	S_2 S_2		
	(iv)原子炉停止後，炉心から崩壊熱を除去するための設備	①逃がし安全弁 ②原子炉隔離時冷却系 ③高圧炉心スプレイ系 ④残留熱除去系（停止時冷却モード運転に必要な設備） ⑤冷却水源としてのサプレッションチェンバ	As As As As As	①炉心支持構造物 ②当該主要設備の冷却系 ③非常用電源及び計装設備	As As As	1)機器・配管及び電気計装設備等の支持構造物	As	1)原子炉建物 2)制御室建物 3)タービン建物 4)廃棄物処理建物 5)当該設備に係る屋外コンクリートダクト及び海水ポンプ支持構造物 6)当該設備の支持構造物	S_2 S_2 S_2 S_2 S_2 S_2		
	(v)原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故の際に圧力障壁となり，放射性物質の拡散を直接防ぐための設備	①原子炉格納容器 ②格納容器バウンダリに属する配管・弁 ＊3	As As			1)機器・配管等の支持構造物	As	1)原子炉建物	S_2	1)原子炉ウェルシールドプラグ	S_2 ＊2
				①隔離弁を閉とするに必要な電気及び計装設備	A	1)電気計装設備等の支持構造物	A	1)原子炉建物 2)制御室建物 3)廃棄物処理建物 4)当該設備の支持構造物	S_1 S_1 S_1 S_1		

※「島根原子力発電所第2号機　第1回工事計画認可申請（昭和59年2月24日認可／58資庁第15180号）」における添付書類「Ⅳ-2-1 耐震設計の基本方針」より抜粋

第3−2表(2)　既工認における耐震設計の基本方針（2/2）

重要度分類及び定義	機能別分類	主要設備		補助設備		直接支持構造物		間接支持構造物		相互影響を考慮すべき設備	
		適用範囲	重要度分類	適用範囲	重要度分類	適用範囲	重要度分類	適用範囲	検討用地震動等	適用範囲	検討用地震動等
Aクラス 原子炉事故時の際に放射線障害から公衆を守るために必要なもの及びその機能喪失が公衆に放射線障害を及ぼす恐れのあるものでAsクラスに属する以外のもの	(i)原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故後，炉心から崩壊熱を除去するために必要な設備	①非常用炉心冷却系 1)高圧炉心スプレイ系 2)低圧炉心スプレイ系 3)残留熱除去系（低圧炉心注水モード運転に必要な設備） 4)自動減圧系 ②冷却水源としてのサプレッションチェンバ	A A	①当該主要設備の冷却系 ②非常用電源及び計装設備 ③中央制御室空調換気系としゃへい壁	A A A	1)機器・配管及び電気計装設備等の支持構造物	A	1)原子炉建物 2)制御室建物 3)廃棄物処理建物 4)コンクリートダクト海水ポンプ支持構造物 5)タービン建物 6)当該設備の支持構造物	S_1 S_1 S_1 S_1 S_1 S_1		
	(ii)放射性物質の放出を伴なうような事故の際にその外部放散を抑制するための設備でAsクラス(v)以外の設備	①残留熱除去系（格納容器冷却モード及びスプレイモード運転に必要な設備） ②可燃性ガス濃度制御系 ③原子炉建物原子炉棟 ④非常用ガス処理系及び排気口 ⑤原子炉格納容器圧力低減装置 ⑥主蒸気隔離弁漏えい制御系 ⑦冷却水源としてのサプレッションチェンバ	A A A A A A A	①当該主要設備の冷却系 ②非常用電源及び計装設備 ③原子炉格納容器雰囲気放射線モニタ	A A A	1)機器・配管及び電気計装設備等の支持構造物	A	1)原子炉建物 2)排気筒及びその基礎 3)制御室建物 4)廃棄物処理建物 5)タービン建物 6)当該設備に係る屋外コンクリートダクト及び海水ポンプ支持構造物 7)当該設備の支持構造物	S_1 S_1 S_1 S_1 S_1 S_1 S_1		
	(iii)その他　*4	①燃料プール水補給設備（非常用） ②ほう酸水注入系	A A	①非常用電源及び計装設備	A	1)機器・配管及び電気計装設備等の支持構造物	A	1)原子炉建物 2)制御室建物 3)廃棄物処理建物 4)タービン建物 5)当該設備の支持構造物	S_1 S_1 S_1 S_1 S_1		
		③炉内構造物	A			1)原子炉圧力容器	A	1)原子炉建物 2)原子炉圧力容器ペデスタル	S_1 S_1		

※「島根原子力発電所第2号機　第1回工事計画認可申請（昭和59年2月24日認可／58資庁第15180号）」における添付書類「Ⅳ-2-1 耐震設計の基本方針」より抜粋

弾性設計用地震動Ｓｄ－１の模擬地震波の作成

1. 概要

本資料では，弾性設計用地震動Ｓｄ－１の模擬地震波の作成及び作成した模擬地震波の適合確認について説明する。

2. 弾性設計用地震動Ｓｄ－１の模擬地震波の作成

2.1 応答スペクトルのコントロールポイント

弾性設計用地震動Ｓｄ－１のコントロールポイントを第2－1表に示す。

水平方向の弾性設計用地震動Ｓｄ－１Ｈは，基準地震動Ｓ1の応答スペクトルを下回らないようにコントロールポイントを設定する。鉛直方向の弾性設計用地震動Ｓｄ－１Ｖは，水平方向の2/3倍を下回らないようにコントロールポイントを設定する。

第2－1表　弾性設計用地震動Ｓｄ－１のコントロールポイント

Ｓｄ－１コントロールポイント（注１）	周期(s)		A 0.02	B 0.115	C 0.280	D 0.575	E 2.00	F 5.00
	Ｓｄ－１Ｈ	速度 (cm/s)	1.01	19.26	45.94	45.94	45.94	45.94
	Ｓｄ－１Ｖ	速度 (cm/s)	0.68	12.84	30.63	30.63	30.63	30.63

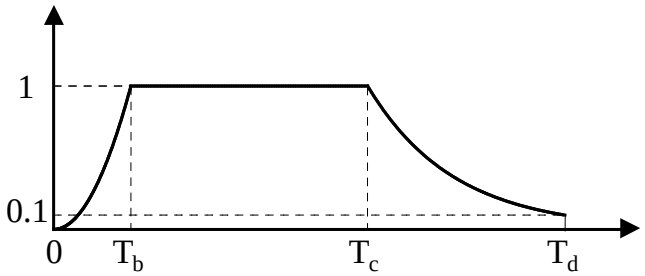
（注１）Ｓ1は大崎スペクトルによりＡＢ間の擬似加速度応答スペクトルが両算術目盛で直線であったが，Ｓｄ－１はこれを包絡するように擬似速度応答スペクトルが両対数軸目盛で直線とする。また，Ｓ1は880年出雲の地震（M7.4）の諸元を基に大崎スペクトルにより周期2秒まで設定していたが，Ｓｄ－１はコントロールポイントＤ以降の周期帯で擬似速度応答スペクトルを周期5秒まで一定に設定する。

2.2　振幅包絡線の経時的変化

弾性設計用地震動Ｓｄ－１の応答スペクトルに適合する模擬地震波を，乱数の位相を持つ正弦波の重ね合わせによって作成する。振幅包絡線の経時的変化は，主要動の長さ及び継続時間が最も長い基準地震動Ｓｓ－Ｄの模擬地震波と同様とする。弾性設計用地震動Ｓｄ－１の模擬地震波の振幅包絡線の経時的変化を第2－1図に示す。

模擬地震波	最大加速度 (cm/s^2)	振幅包絡線の経時的変化（ｓ）		
		T_b	T_c	T_d（継続時間）
Ｓｄ－１Ｈ	320	8.3	28.7	60.0
Ｓｄ－１Ｖ	214			

（注１）S_1は880年出雲の地震（M7.4）の諸元を基に大崎の方法により，継続時間を33.1秒，振幅包絡線の継時的変化を設定していたが，Ｓｄ－１はＳｓ－Ｄと同様に継続時間を60.0秒，振幅包絡線の継時的変化を耐専の方法により設定する。



第2－1図　弾性設計用地震動Ｓｄ－１の模擬地震波の
振幅包絡線の経時的変化

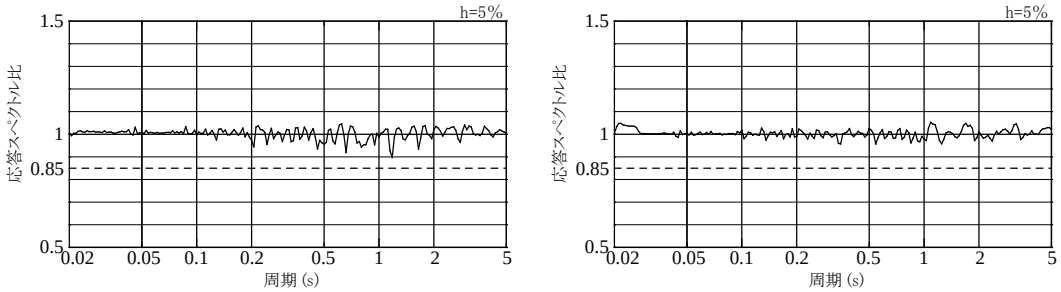
3.　作成した模擬地震波の適合確認

作成した弾性設計用地震動Ｓｄ－１の模擬地震波が，基準地震動Ｓｓ－Ｄ策定の際と同様に,日本電気協会(2008)[(1)]に示される以下の適合度の条件を満足していることを確認する。

（ｉ）目標とする応答スペクトル値に対する模擬地震波の応答スペクトル値の比が全周期帯で0.85以上

（ⅱ）応答スペクトル強さの比（ＳＩ比）が1.0以上

適合度の確認結果を第3－1図及び第3－1表に示す。作成した模擬地震波が適合度の条件を満足していることを確認した。



（水平方向：Ｓｄ－１Ｈ）　　（鉛直方向：Ｓｄ－１Ｖ）

第 3－1 図　弾性設計用地震動Ｓｄ－１の応答スペクトル比

第 3－1 表　弾性設計用地震動Ｓｄ－１の応答スペクトル強さの比（ＳＩ比）

応答スペクトル	ＳＩ比 （周期 0.1～2.5 秒）
Ｓｄ－１Ｈ	1.00
Ｓｄ－１Ｖ	1.00

$$\text{ＳＩ比}：\frac{\int_{0.1}^{2.5} S_v(T)\mathrm{d}t}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_v(T)\mathrm{d}t}$$

ＳＩ　：応答スペクトル強さ（減衰定数ｈ＝5%）
$S_v(T)$　：模擬地震波の速度応答スペクトル（cm/s）
$\bar{S}_v(T)$　：目標とする速度応答スペクトル（cm/s）
T　：固有周期（秒）

4.　参考文献

(1) (社) 日本電気協会 : 原子力発電所耐震設計技術指針ＪＥＡＧ４６０１－2008

別紙－20

島根原子力発電所２号炉

基礎地盤傾斜が 1/2,000 を超えることに対する耐震設計方針について

目　次

1.　概要

2.　基礎地盤傾斜に対する影響検討

2.1　影響検討対象

2.2　影響検討方針

2.3　影響検討結果

2.4　基礎底面の傾斜による防波壁の設計方針

1.　概要

「基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド」に「許容される傾斜が各建物及び構築物に対する要求性能に応じて設定されており、動的解析の結果に基づいて求められた基礎の最大不等沈下量及び残留不等沈下量による傾斜が許容値を超えてないことを確認する。一般建築物の構造的な障害が発生する限界（亀裂の発生率、発生区間等により判断）として建物の変形角を施設の傾斜に対する評価の目安に、1/2,000 以下となる旨の評価していることを確認する。」との記載がある。島根原子力発電所２号炉においては，動的解析に基づき，原子炉建物等の耐震重要施設及び重大事故等対処施設基礎地盤の傾斜が基準地震動Ｓｓに対し，評価基準値の目安の 1/2,000 を超えないことを確認する。評価の結果，施設における基礎底面の最大傾斜が評価基準値を超える場合には，施設の詳細設計段階において，傾斜を考慮した場合においても，施設の機能が損なわれるおそれがないように設計する。

2.　　基礎地盤傾斜に対する影響検討

2.1　影響検討対象

基礎地盤傾斜の影響は，耐震重要施設及び重大事故等対処施設を対象として検討する。

2.2　影響検討方針

基礎地盤傾斜の影響検討フローを図１に示す。

検討対象に対して，基準地震動による地震時の最大傾斜と地殻変動による最大傾斜を算定し，合算値が目安値である 1/2,000 を超えるかを判断する。傾斜が 1/2,000 を超える対象については，傾斜を考慮した場合においても，施設の機能が損なわれるおそれがないように設計する。

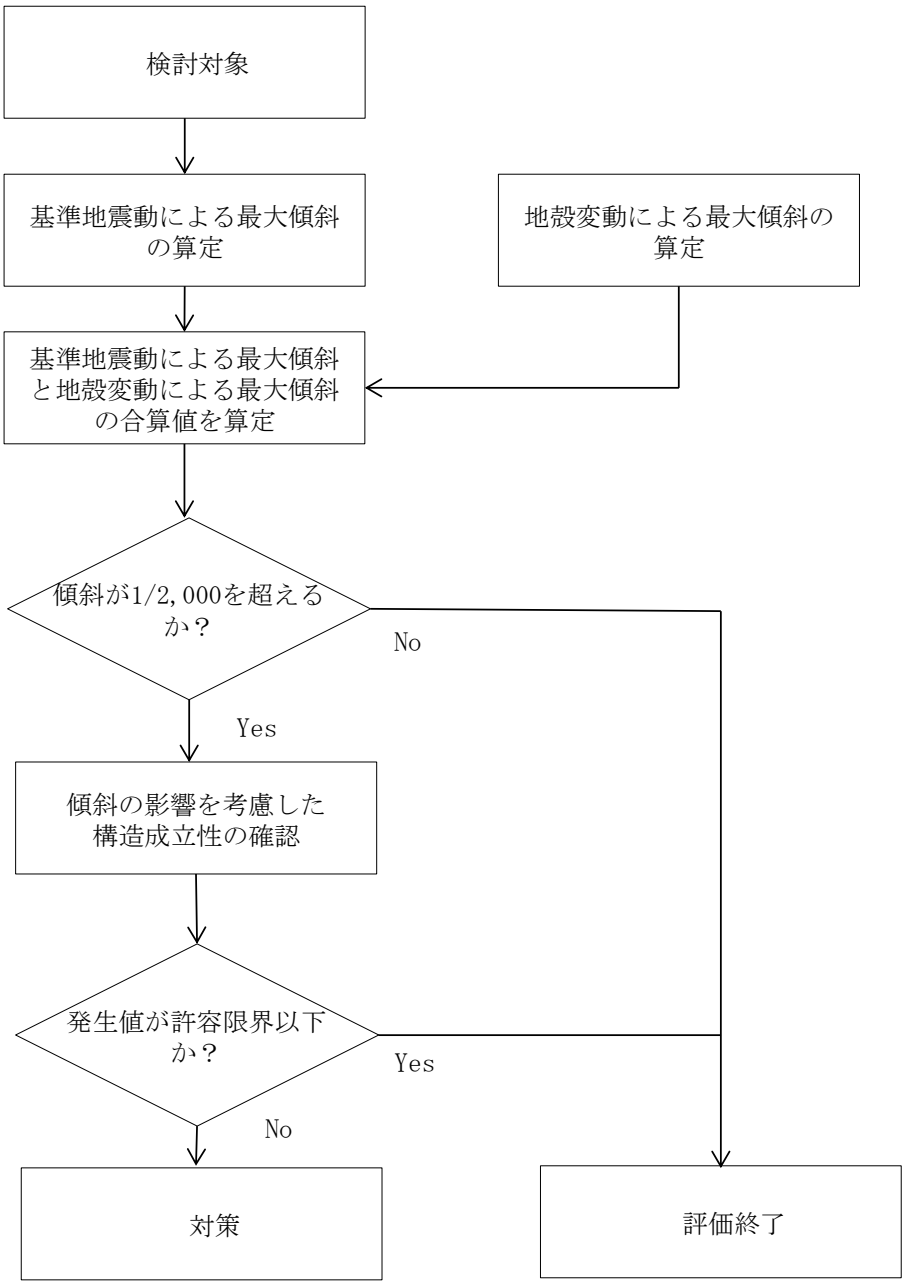


図１　基礎地盤傾斜の影響検討フロー

2.3　影響検討結果

基礎地盤の安定性評価において，地殻変動解析による最大傾斜及び地震動による最大傾斜の重ね合わせ結果を表１に示す。防波壁（逆Ｔ擁壁）については，最大傾斜が評価基準値の目安を上回っていることを確認したことから，「５条 別添資料１ 添付資料 44　基礎底面の傾斜による防波壁の構造成立性について」において，基礎底面の傾斜による防波壁（逆Ｔ擁壁）の照査を行い，基礎底面の傾斜を考慮しても防波壁は構造成立することを確認した。

表１　地殻変動解析による最大傾斜及び地震動による最大傾斜の重ね合わせ結果

対象断層	評価施設	①地殻変動による傾斜		②地震動による最大傾斜		①＋② 地殻変動及び地震動を考慮した最大傾斜※
		最大傾斜	傾斜方向	最大傾斜	傾斜方向	
陸域活断層 （宍道断層）	２号炉原子炉建物	1/17,000 （不確かさケース（断層傾斜角））	西方向	1/22,000 （Ｓｓ－Ｄ）	北方向	1/9,000
	ガスタービン発電機建物	1/15,000 （不確かさケース（断層傾斜角））	西方向	1/28,000 （Ｓｓ－Ｄ）	北方向	1/9,000
海域活断層 （F-Ⅲ～F-Ⅴ断層）	２号炉原子炉建物	1/19,000 （下降最大ケース）	東方向	1/22,000 （Ｓｓ－Ｄ）	北方向	1/10,000
	ガスタービン発電機建物	1/18,000 （下降最大ケース）	東方向	1/28,000 （Ｓｓ－Ｄ）	北方向	1/10,000
陸域活断層 （宍道断層）	防波壁 （多重鋼管杭式擁壁）	1/22,000 （不確かさケース（すべり角））	北方向	1/39,000 （Ｓｓ－Ｄ）	北方向	1/14,000
	防波壁 （逆Ｔ擁壁）	1/17,000 （不確かさケース（断層傾斜角））	東方向	1/158 （Ｓｓ－Ｄ）	東方向	1/156
海域活断層 （F-Ⅲ～F-Ⅴ断層）	防波壁 （多重鋼管杭式擁壁）	1/22,000 （上昇最大ケース）	北方向	1/39,000 （Ｓｓ－Ｄ）	北方向	1/14,000
	防波壁 （逆Ｔ擁壁）	1/17,000 （下降最大ケース）	西方向	1/158 （Ｓｓ－Ｄ）	東方向	1/156

※　①と②の傾斜方向が異なる場合も，保守的に①と②の傾斜を足し合わせることにより評価を実施する。

2.4　基礎底面の傾斜による防波壁の設計方針

詳細設計段階において，以下の事項に対応したうえで，基礎底面の傾斜により防波壁（逆Ｔ擁壁）の要求機能を喪失しないことを確認する。

・三軸圧縮試験等の室内試験及び原位置試験により，管理目標値としての物理特性，強度特性及び変形特性が確保されていることを確認する。
・グラウンドアンカーをモデルへ考慮し，グラウンドアンカーによる変形抑制効果を踏まえた設計を実施する。