

## 島根原子力発電所 2 号炉

後施工せん断補強筋による耐震補強

## 目次

	頁
1. 概要	1
2. PHb 工法について	1
2.1 PHb 工法の使用部位	1
2.2 PHb 工法の概要	2
3. 建設技術審査証明報告書の概要	3
3.1 PHb 工法の建設技術審査証明報告書の位置付け	3
3.2 建設技術審査証明報告書における PHb 工法の適用範囲	4
3.3 建設技術審査証明報告書における PHb 工法の設計方法	5
3.4 建設技術審査証明報告書における施工性の確認	21
4. 島根原子力発電所 2 号炉における PHb の適用性確認	24
4.1 方針	24
4.2 耐震評価に基づく補強仕様の設定	26
4.3 適用性確認項目の抽出	27
4.4 建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認	29
4.5 せん断補強効果の確認	33
4.6 施工実績・研究事例等の確認	39
4.7 PHb の施工上の確認	55
4.8 PHb の適用性確認結果	59

### 添付資料

- (添付資料 1) 建設技術審査証明書
- (添付資料 2) 解析によるせん断補強効果の確認について
- (添付資料 3) 「施工管理要領書(案)(取水槽耐震補強工事(ポストヘッドバー工法))」
- (添付資料 4) 建設技術審査証明報告書の実験条件を超えるせん断スパン比に対する PHb の適用性について

## 1. 概要

取水槽については，せん断耐力の向上を目的に耐震補強を行う。取水槽は地中構造物であり，片側からしか施工できない制限を有することから，後施工プレート定着型せん断補強鉄筋（Post-Head-bar）（以下「PHb」という）工法を採用する。

本資料は，島根原子力発電所 2 号炉取水槽特有の各種条件に対して，PHb 工法が適用性を有するか確認するものである。

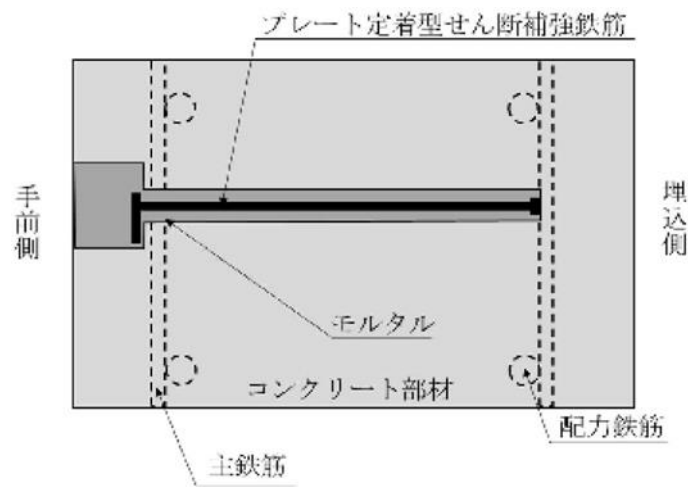
## 2. PHb 工法について

### 2.1 PHb 工法の使用部位

取水槽において，基準地震動発生時に屋外重要土木構造物としての機能（耐震安全上重要な機器・配管系の間接支持機能，若しくは非常時における海水の通水機能）を維持するためにせん断耐力を確保する必要がある。せん断耐力を向上させるためには躯体のせん断補強を実施する必要がある。部材増し厚等のせん断補強が困難な部材に対して「後施工」によるせん断補強鉄筋を追加する PHb 工法を用いる。PHb 工法は，取水槽スクリーン室の隔壁のせん断補強に用いる。

## 2.2 PHb 工法の概要

1980 年以前の土木学会コンクリート標準示方書に従って設計した構造物はせん断補強鉄筋量が相当に少なく設計されていることから、現在の耐震設計法において部材のせん断耐力が不足することが想定される。そのような供用中の鉄筋コンクリート構造物にせん断補強を行うための工法が後施工タイプのプレート定着型せん断補強鉄筋 (PHb) 工法である。既存構造物の表面からドリルで削孔を行い、その孔内にプレート定着型せん断補強鉄筋を差込み、充てん材で固定することにより、構造躯体と一体化をはかり、部材のせん断耐力を向上させる (第 13-2-1 図参照)。



第 13-2-1 図 PHb 工法の模式図

### 3. 建設技術審査証明報告書の概要

#### 3.1 PHb 工法の建設技術審査証明報告書の位置付け

取水槽のせん断補強が必要な各構造部材に設置予定の PHb については、『建設技術審査証明報告書 技術名称 後施工プレート定着型せん断補強鉄筋「Post-Head-bar」<sup>1)</sup>』（以下「建設技術審査証明報告書」という。）に適用範囲及び設計方法が示されている。

本工法は、高度な技術を有する第三者機関である一般財団法人土木研究センター（以下「PWRC」<sup>※1</sup>という。）により、試験データを用いて、PHb が受け持つせん断耐力の算定方法において、PHb の規格降伏強度を使用して求めた値に対し、適用部材の軸方向鉄筋間隔及び PHb の埋込側の必要定着長から評価される有効係数を乗じたものとして評価できることが確認された。ただし、有効係数の上限値は 0.9 としている。なお、建設技術審査証明報告書では、片側からしか補強施工できない部材について、PHb を設置する手順を設定し、この工事に必要な施工要素（補強設計に基づく PHb の配置、PHb 配置位置での削孔方法、削孔内への PHb の固定方法、PHb 設置後の仕上げ等施工性）を確認しており、それぞれの要素に対して施工上の考慮を示すなど施工性に関しても審査対象となっている。

また、建設技術審査証明報告書では、「設計・施工マニュアル」が添付され、材料及び施工に関する事項が示されている。

※1：PWRC は、国土交通大臣認可の公益法人として国土建設技術の発展向上に寄与することを目的に設立された公益法人組織であり、土木に関して、河川、道路、土質・地盤、施工、橋梁等、幅広い分野にまたがる研究開発と調査研究の受託、さらに開発された技術の普及及び技術支援に取り組んでいる。PWRC では、建設技術審査証明事業を行っており、当該審査証明技術について学識経験者及び当センターの専門技術者による「審査証明委員会」を設け、開発の趣旨、開発目標及び技術内容、既存の技術との対比、実績等について審査を行っており、高度な技術を有し、十分な信頼性を有した第三者機関である。

#### 【参考文献】

- 1) 一般財団法人土木研究センター：建設技術審査証明報告書 土木系材料・製品・技術、道路保全技術（建技審証第 0522 号） 後施工プレート定着型せん断補強鉄筋「Post-Head-bar」

### 3.2 建設技術審査証明報告書における PHb 工法の適用範囲

本工法では、地震時の変形量が限定される地中構造物など、背面に地盤などがあり片側からしか施工できない制限を有する既設コンクリート構造物に対しても、後施工によるせん断補強の目的で用いることができる。審査証明において、PHb が受け持つせん断耐力は、鉄筋の材質（SD295，SD345，SD390），径（D13～32）ごとに定め、その値は、先施工によるせん断補強鉄筋のせん断耐力の最大 0.9 倍で評価可能としている。また、せき，水門，橋台や橋脚等の既設の半地下及び地上構造物に適用する場合には、地中構造物の場合と同様にせん断補強の目的で用いるものとし、現状で曲げ破壊モードにある構造物の変形性能に寄与する補強後のせん断補強筋量の上限を定めて求めた部材の骨格曲線の範囲内にあることが必要となる。

### 3.3 建設技術審査証明報告書における PHb 工法の設計方法

#### (1) 後施工によるせん断耐力

本工法では実験により性能を確かめることで、設計方法等を設定しており、その概要を次にまとめた。

##### a. 実験方法

本工法を用いた設計で PHb のせん断耐力への寄与分を確認するために、梁試験体の正負交番繰返し静的加力試験（せん断破壊モード試験体）を実施することにより PHb を用いて補強することによるせん断耐力の向上の確認が行われている。

試験に用いられた試験体の諸元一覧を第 13-3-1 表に示す。

シリーズ 1 では、せん断補強筋のない梁試験体（CASE 1）及び異なる量の PHb によりせん断補強を行った梁試験体（CASE 2, 3）に対して正負交番繰返し加力試験を行った。

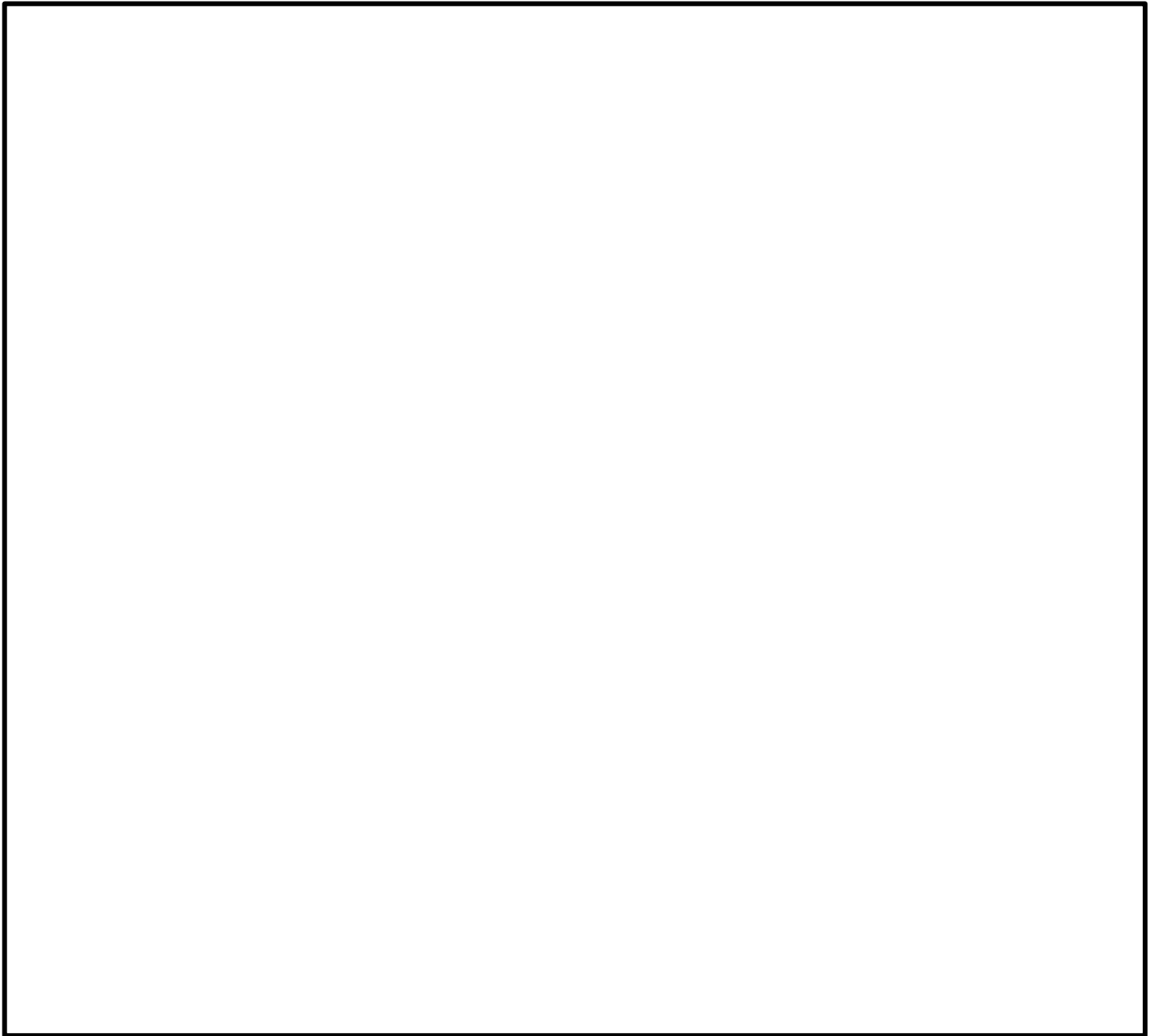
シリーズ 2 では、シリーズ 1 の CASE 2 と同じ補強条件の試験体（CASE 4）、CASE 4 の PHb 先端の埋込み深さを埋込側の主鉄筋前面から 5 mm 手前に留めた試験体（CASE 5）、CASE 5 の PHb の鉄筋量を 1.5 倍（3 列補強）とした試験体（CASE 6）に対して、各々交番繰返し加力試験を行った。

シリーズ 3 では、PHb を配置しない梁試験体 1 体（CASE 3-1）、太径（D29・SD345）の PHb を設置した梁試験体 2 体（CASE 3-2, CASE 3-3）、せん断スパン比が小さい梁試験体 1 体（CASE 3-4）、及び PHb を千鳥配置した試験体（CASE 3-5）に対して正負交番繰返し加力試験を行った。

シリーズ 4 では、高強度（D25・SD390）の PHb を設置した梁試験体（CASE 4-1）に対して、正負交番繰返し加力試験を行った。シリーズ 3 と 4 では、PHb の径及び強度以外の配筋条件は同じである。

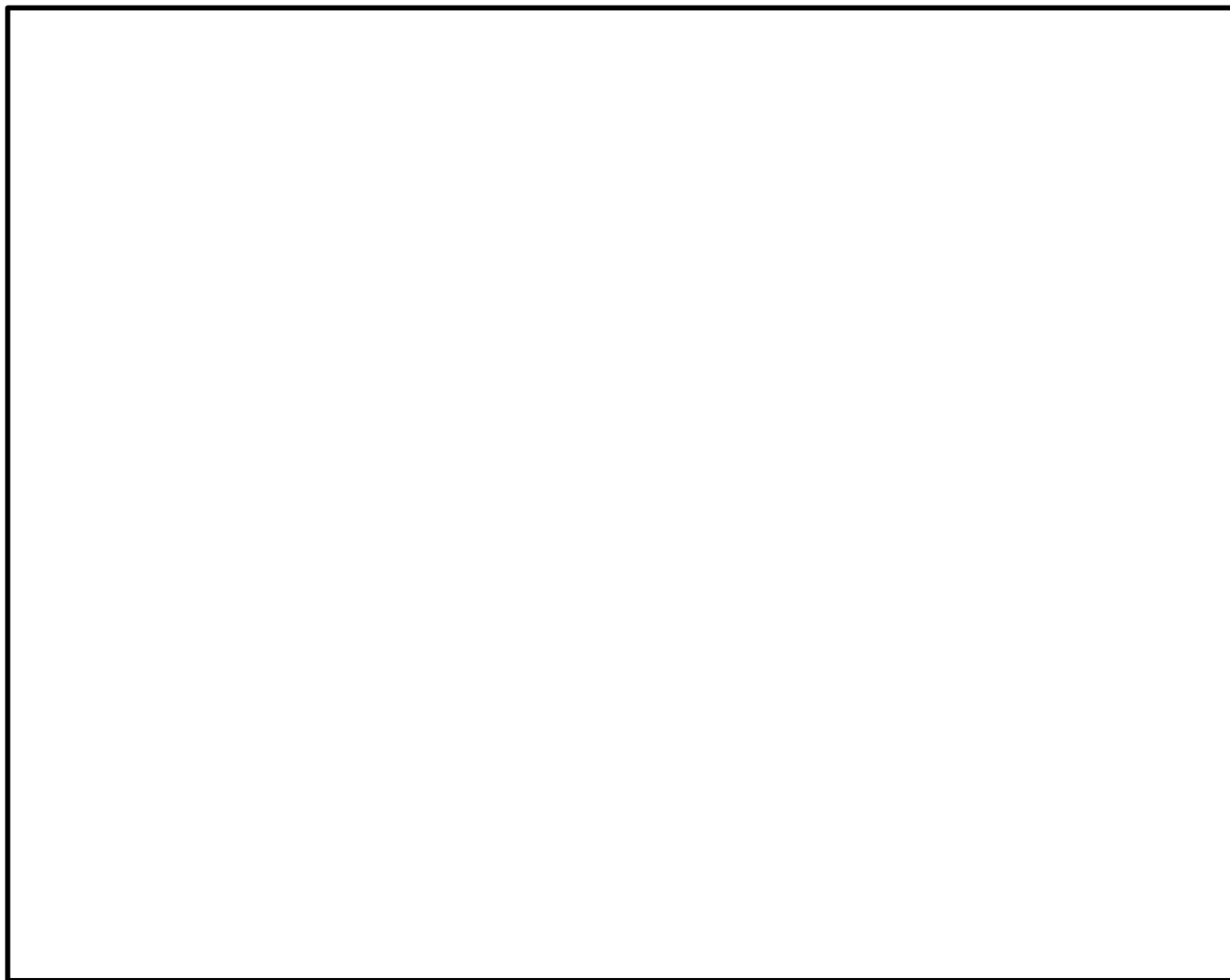
試験体及び補強方法を第 13-3-1 図に、加力要領を第 13-3-2 図に示す。

第 13-3-1 表 各ケースの試験体の諸元  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)



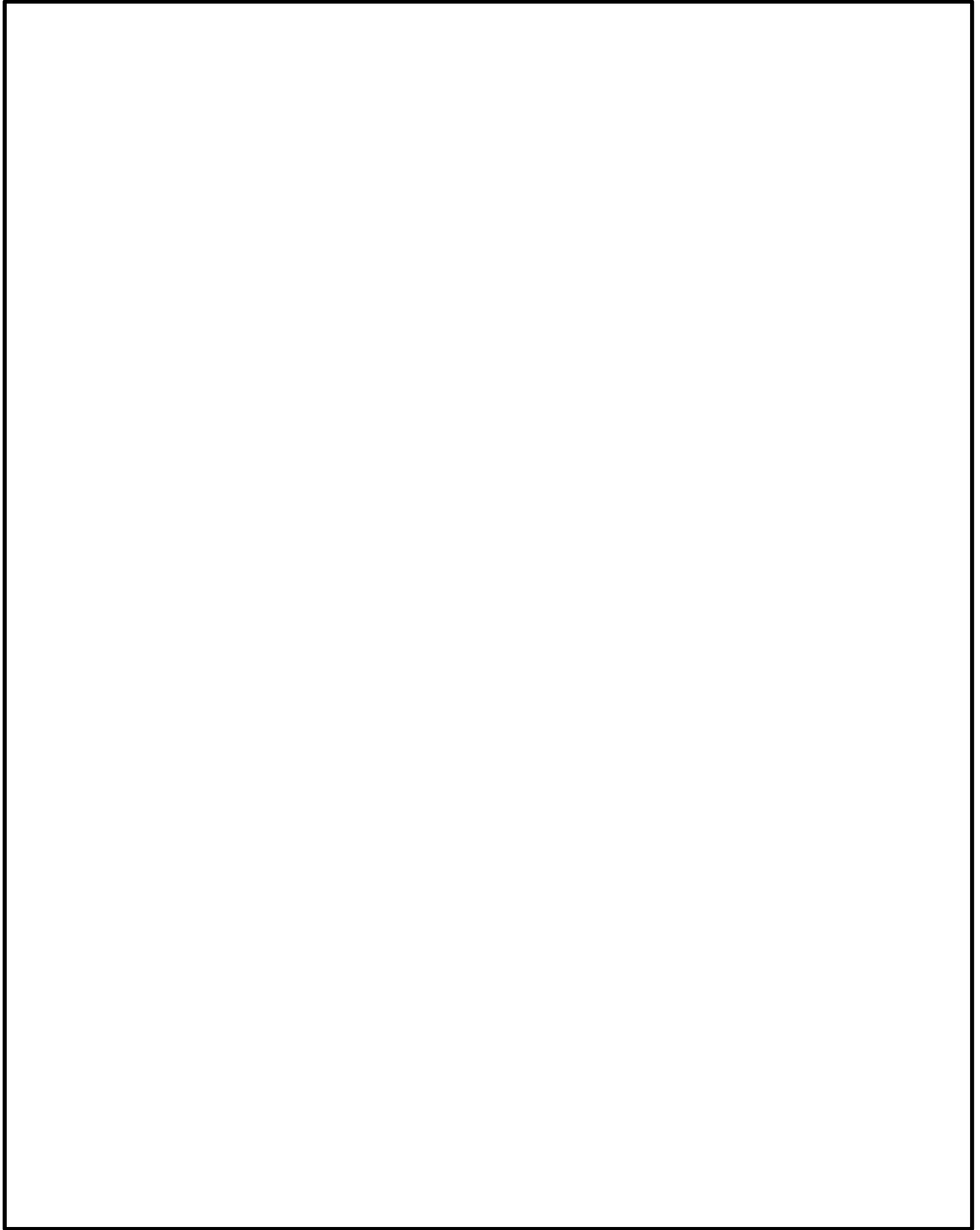
本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。





第 13-3-1 図 せん断耐力向上性能試験体の種類と補強方法(抜粋)  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

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 13-3-2 図 せん断耐力向上性能試験の加力要領  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

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。

## b. 実験結果

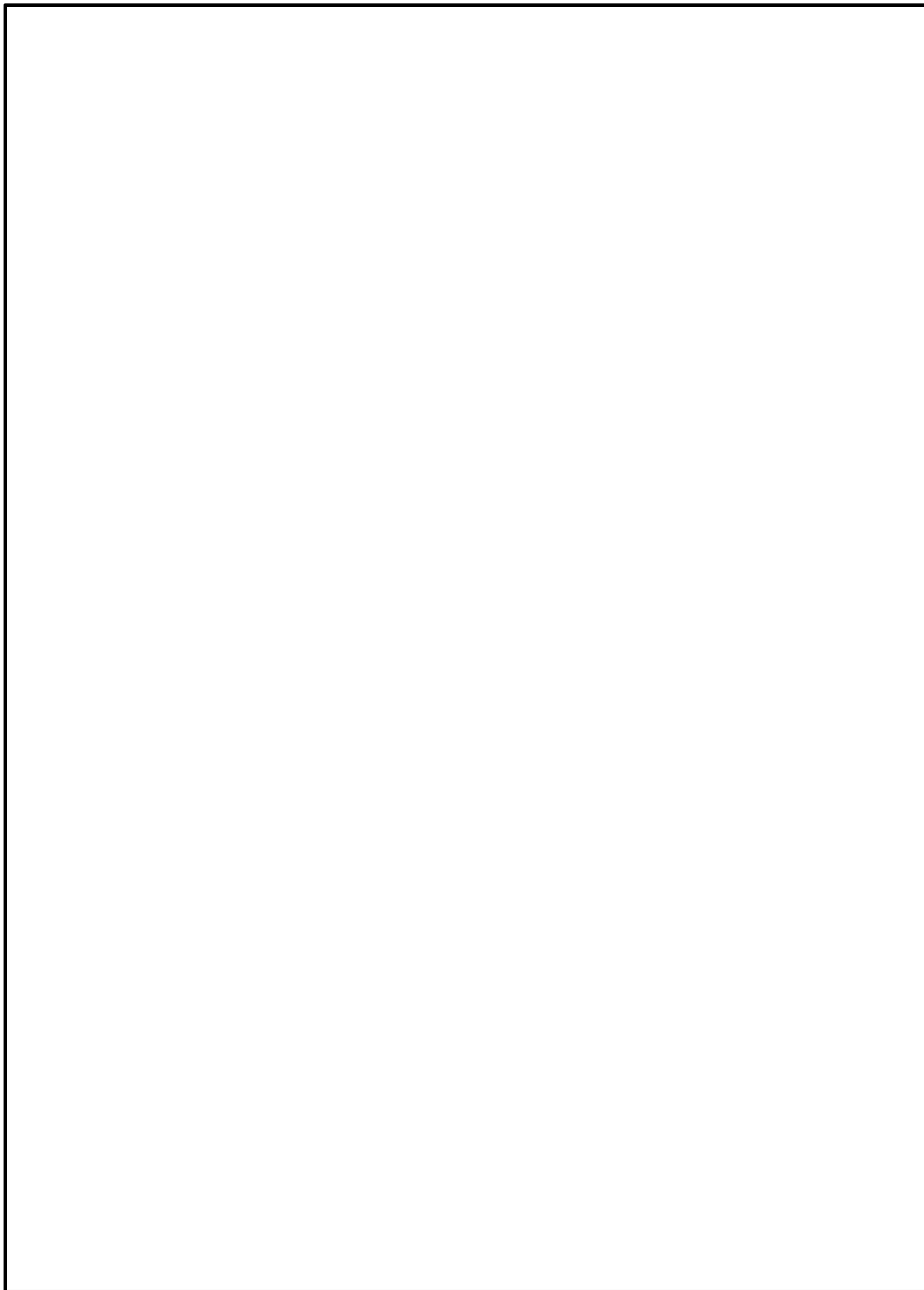
a. の試験結果を第 13-3-2 表に示す。PHb の有効係数は、PHb を通常のせん断補強鉄筋とみなして求められるせん断耐力  $V_s$  に対して PHb が分担できるせん断耐力の比率である。有効係数の算定において、コンクリートの分担するせん断力  $V_c$  はコンクリート標準示方書（安全係数 1.0）に基づく場合と、実験での斜めひび割れ発生時のせん断力を用いた場合について算定した。CASE 2 については、荷重装置の制御が不十分で大変位時に偏荷重が作用した実験条件上の理由により、検討ケースから除外した。これは、本来は 2 点の荷重点に均等に荷重がかかることで実験せん断耐力を（左右の合計荷重）／2 より算出していたが、CASE 2 については、左右で作用荷重が異なっていたため、他の実験データと比較することが不適切と判断したことによる。

第 13-3-2 表 実験結果の一覧  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

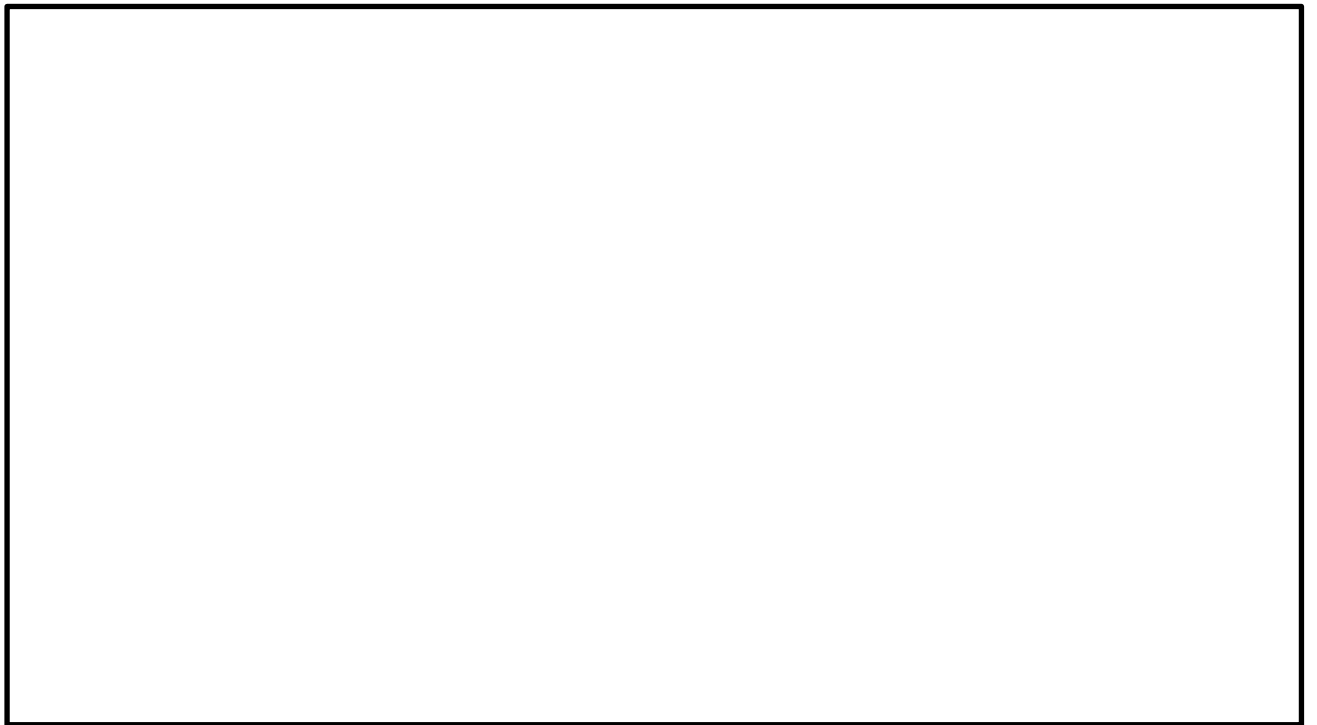
--

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。

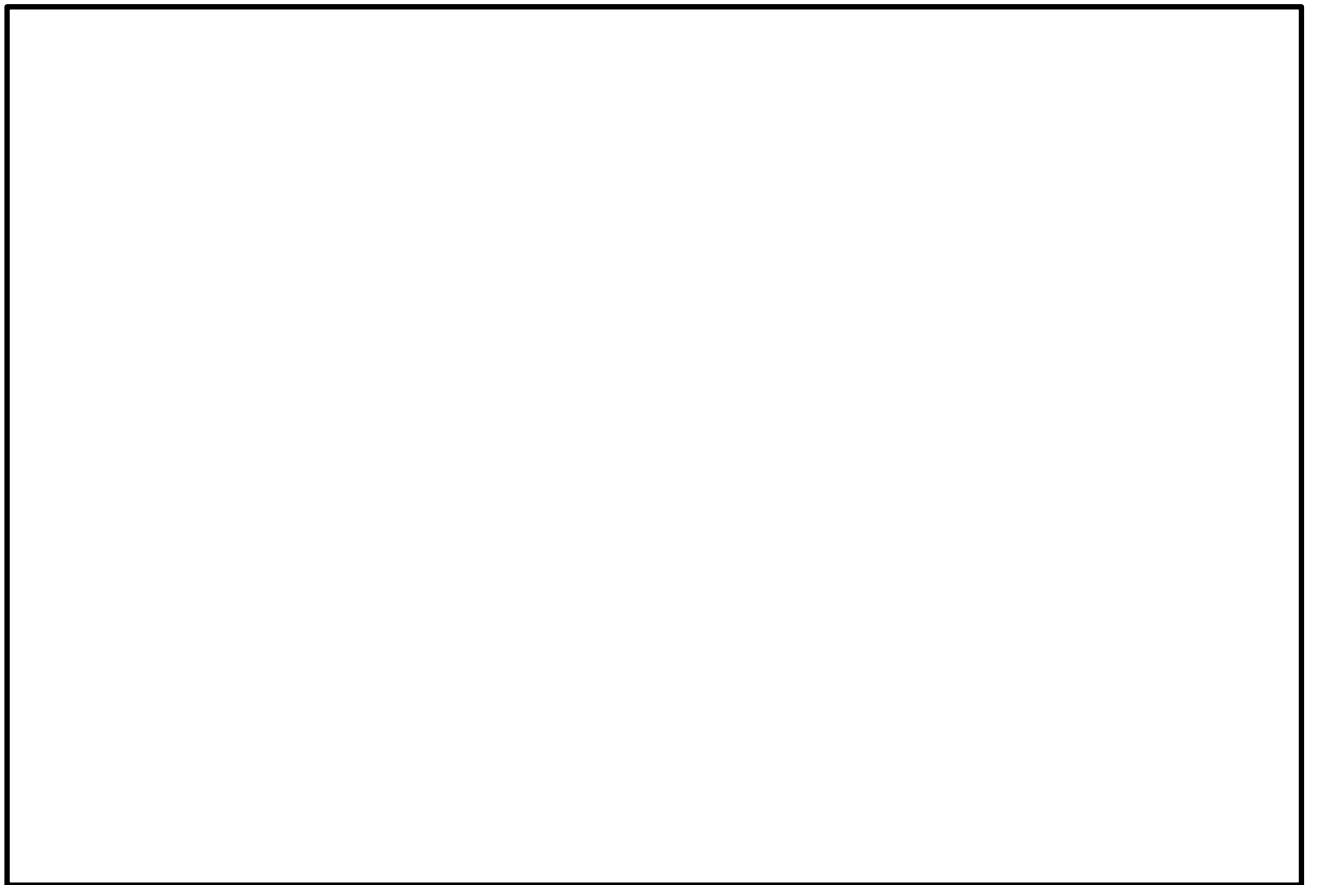
c. PHb のせん断補強の考え方



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。



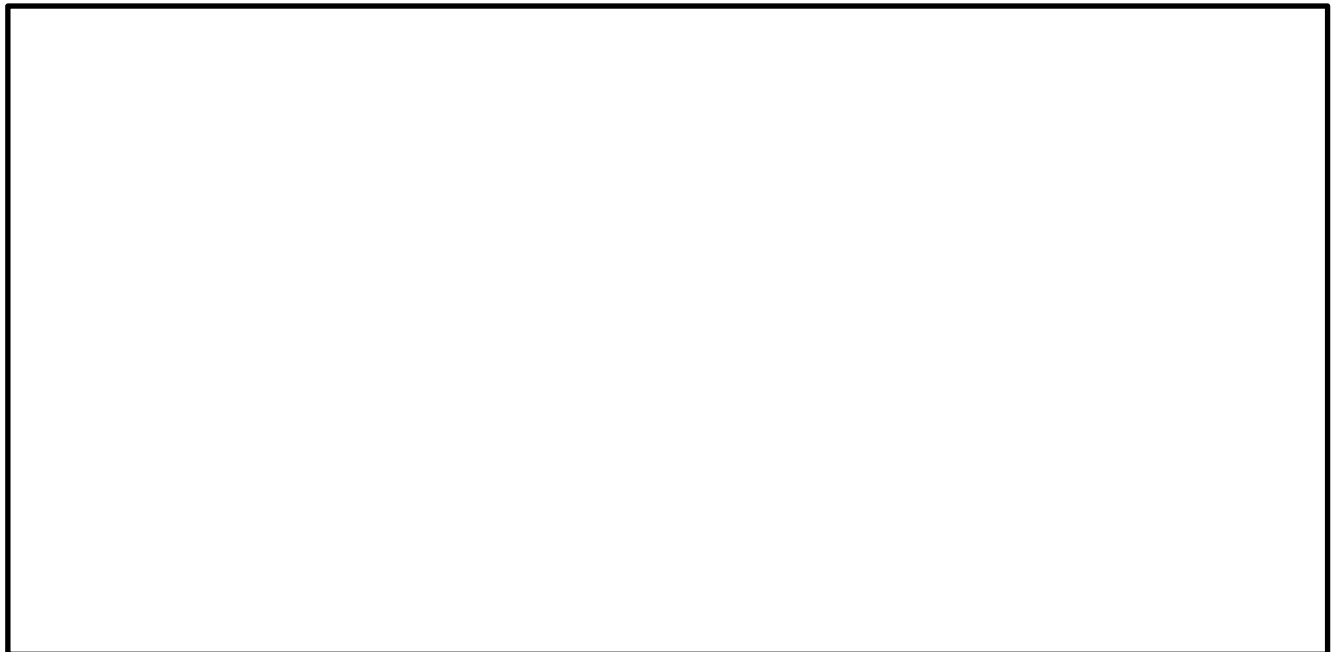
第 13-3-3 図 斜めひび割れ内の破断したせん断補強鉄筋応力  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)



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 13-3-4 図 斜めひび割れ内の後施工せん断補強鉄筋応力  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

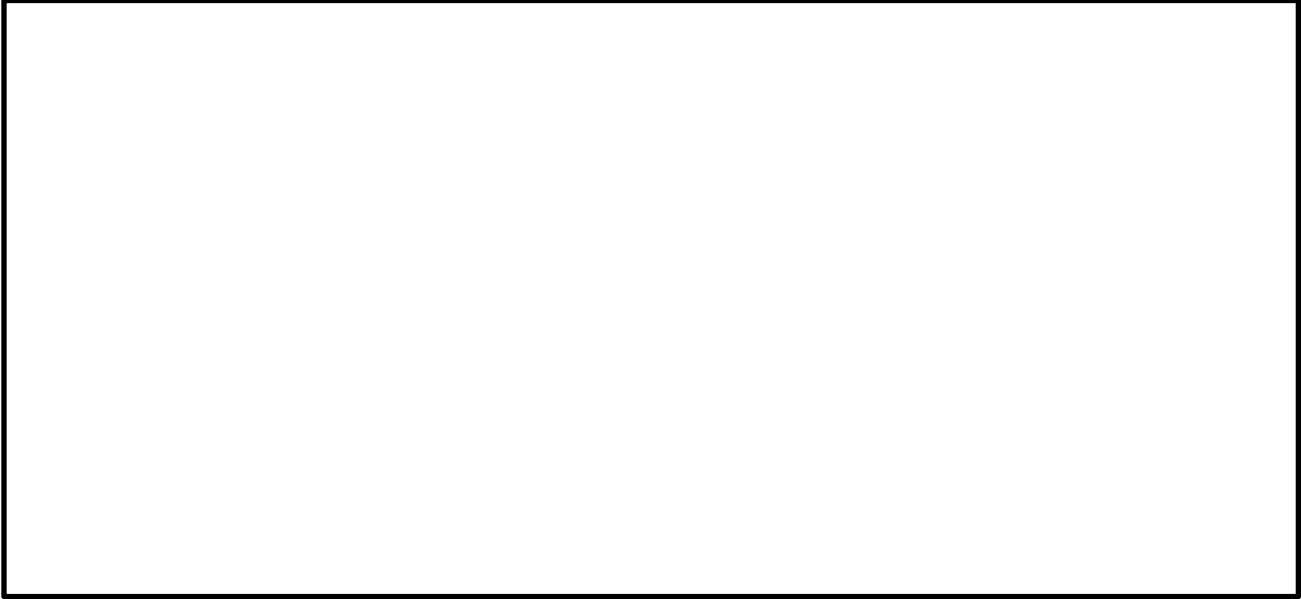


第 13-3-5 図 PHb と寸切り鉄筋の有効係数の比較

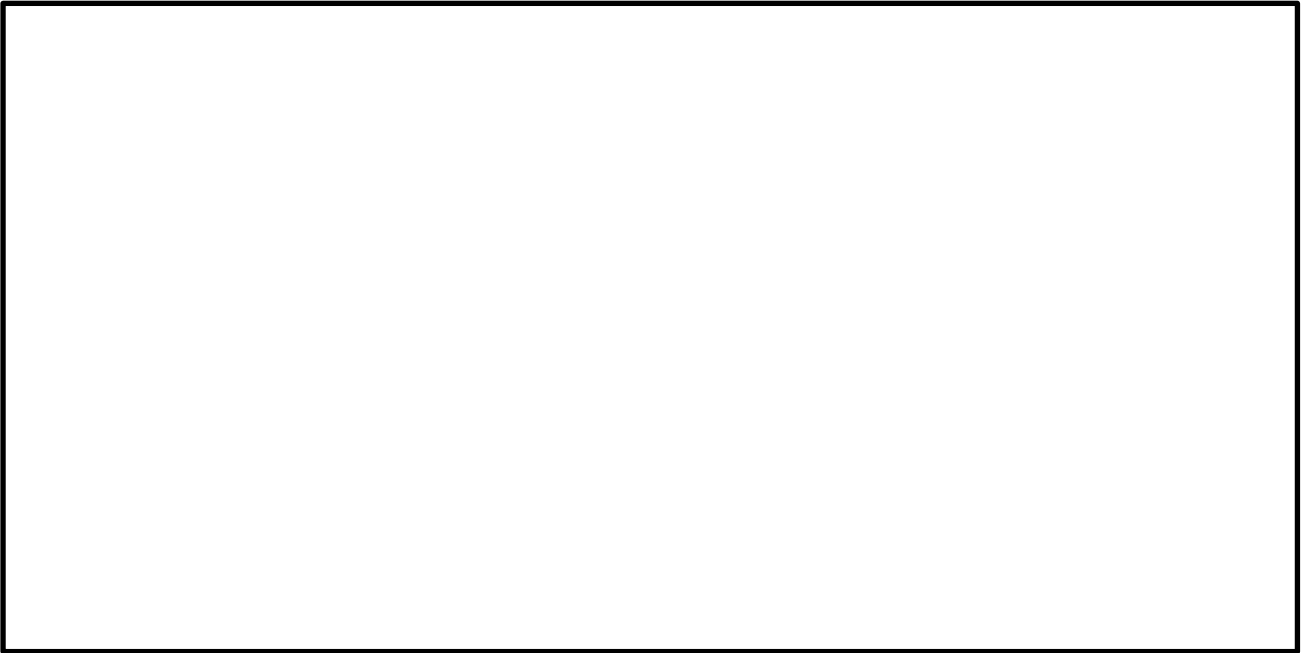
d. 実験結果に基づく PHb によるせん断補強効果の評価



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。

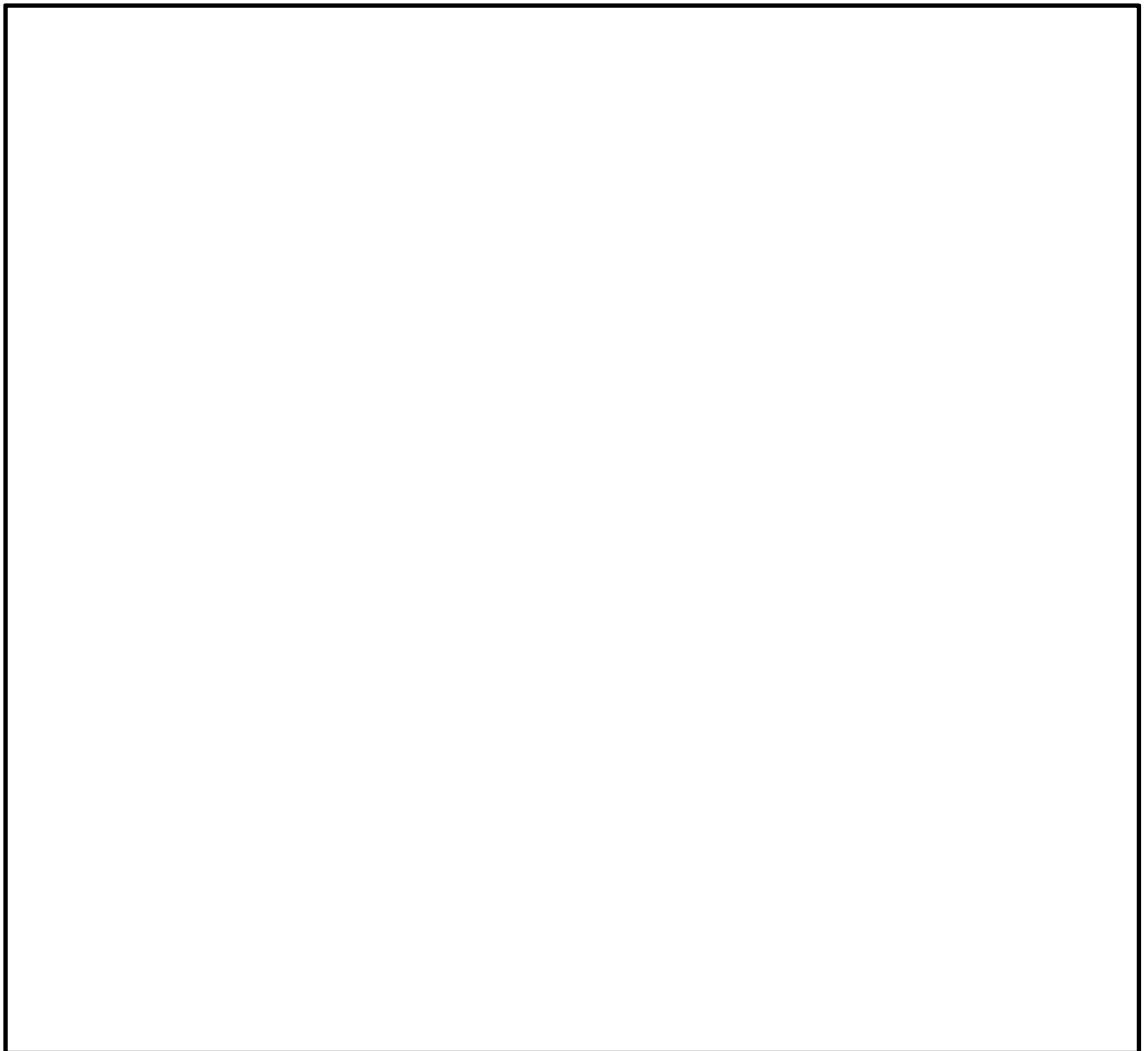


第 13-3-3 表 PHb の有効係数の比較  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)



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 13-3-6 図 圧縮鉄筋と引張鉄筋との間隔と有効係数の関係  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

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。

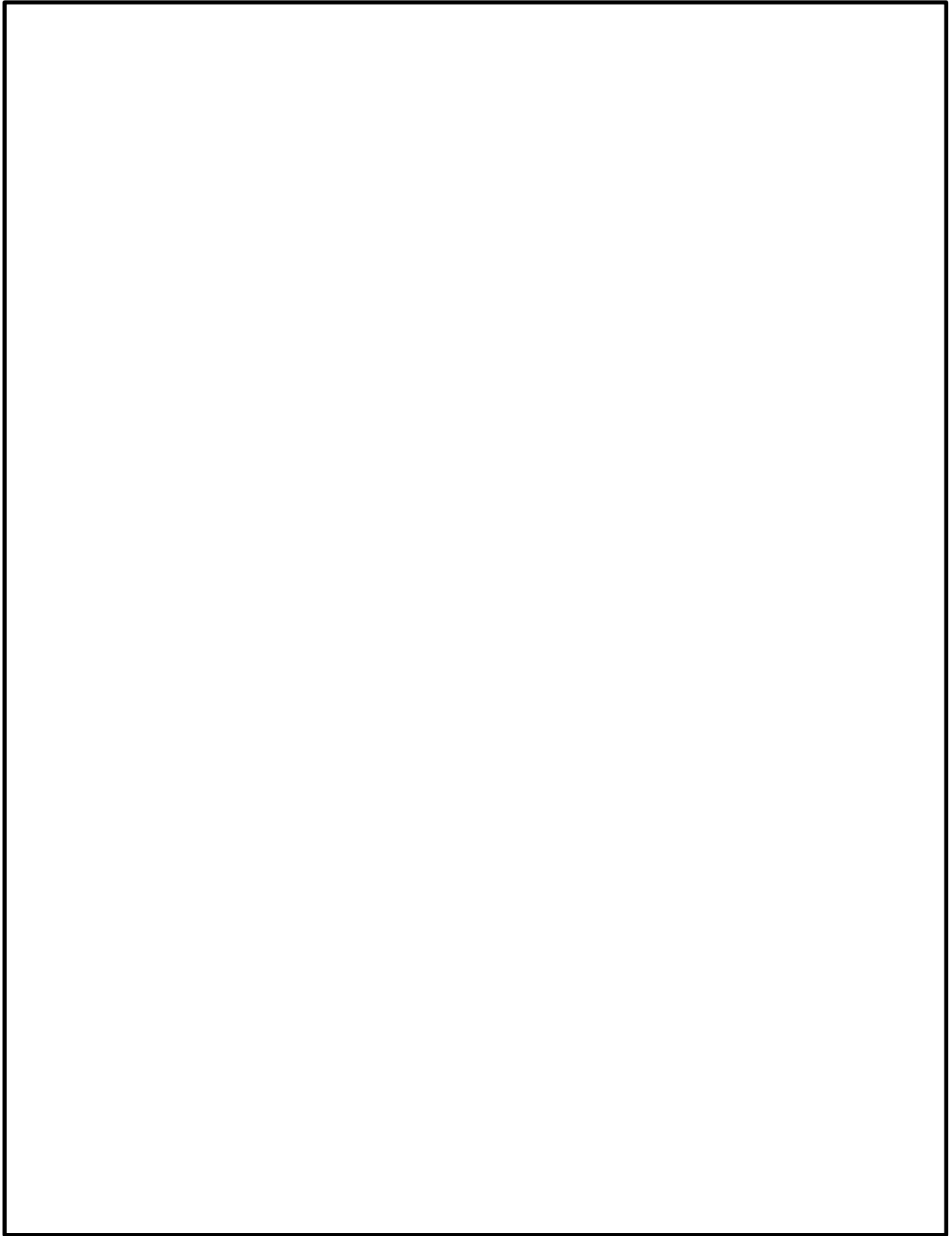
(2)使用材料・許容応力度・強度

実験を元にした本設計法では、第 13-3-7~9 図に示すとおり使用材料を定めている。今回の設計でも、これらに適合する使用材料・許容応力度・強度を用いて設計する。



第 13-3-7 図 使用材料・許容応力度・強度  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

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 13-3-8 図 使用材料・許容応力度・強度  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

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。

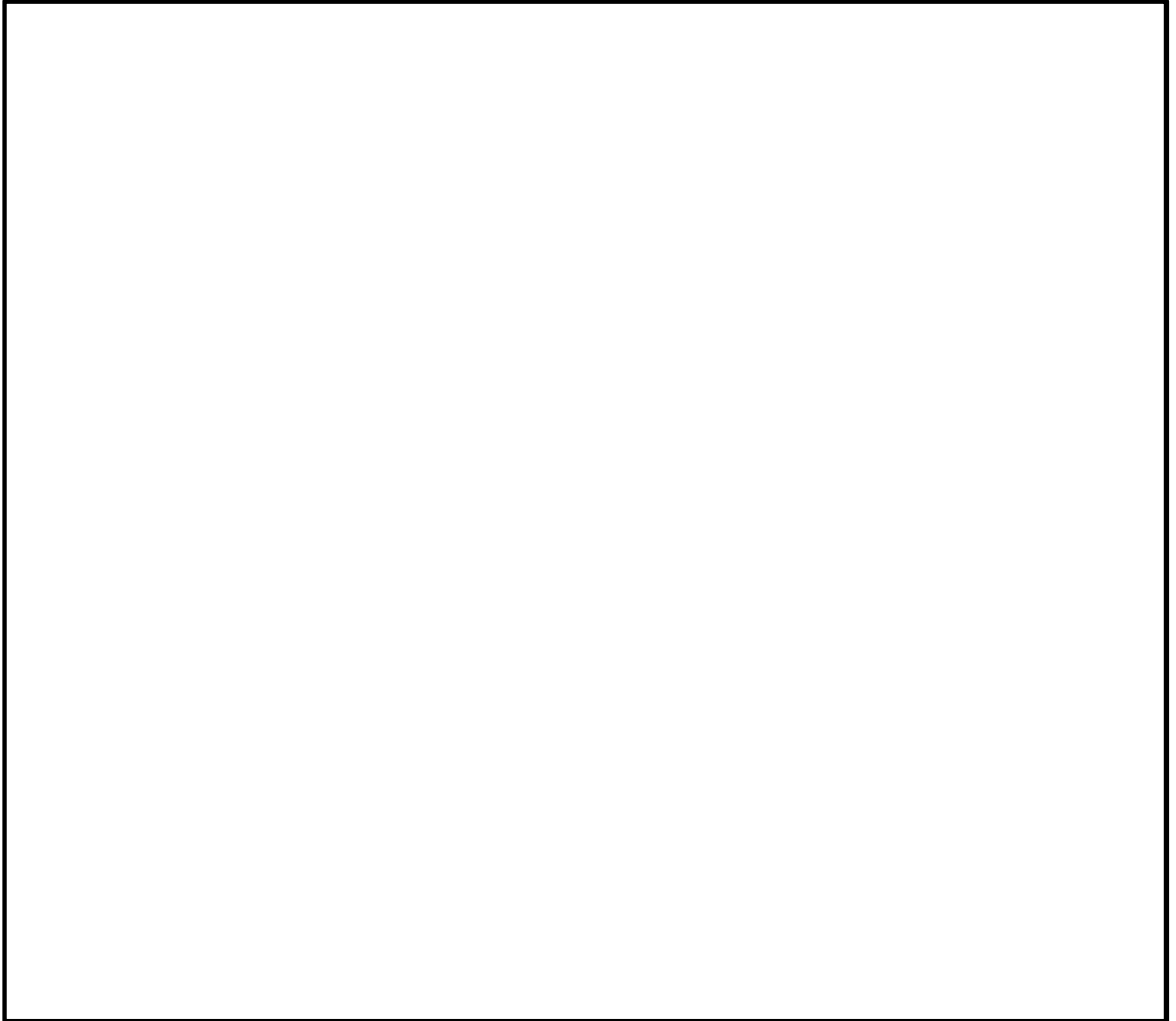


第 13-3-9 図 使用材料・許容応力度・強度  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

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) 構造部材の評価

(1)で示した基本的考え方に基づき、第13-3-10図で示す、コンクリート標準示方書の考え方を準用した設計式を用いてせん断耐力を定めている。



第13-3-10図 使用材料・許容応力度・強度  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

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) 構造細目

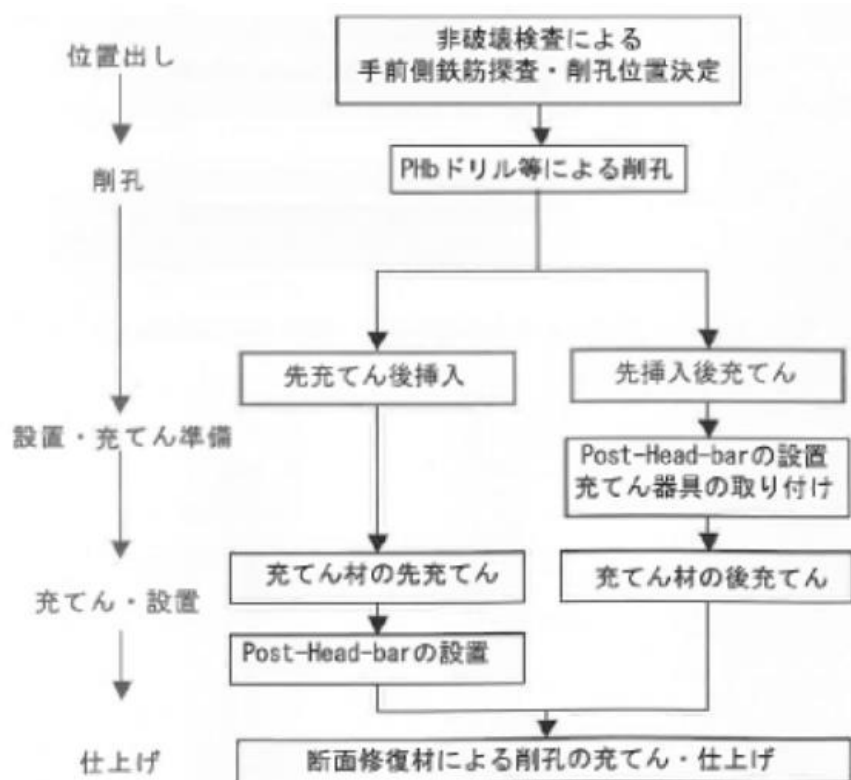
本設計方法では、想定外の破壊形式をとらない様に、第 13-3-11 図で示す構造細目を定めている。



第 13-3-11 図 構造規定（建設技術審査証明報告書より抜粋）

### 3.4 建設技術審査証明報告書における施工性の確認

建設技術審査証明報告書では、施工性に関して、片側からしか補強施工できない部材に対してもせん断補強できることを、試験施工等に基づき確認している。確認に当たっては、第 13-3-12 図に示すとおり PHb を設置する手順を設定し、この工事に必要な施工要素に対して施工性を確認している。各施工要素に対する施工性の確認内容について、概要を下記に示す。



第 13-3-12 図 PHb の施工手順

#### (1) 補強設計に基づく PHb の配置

PHb を差し込むためには、補強対象部材の手前側に設置されている主鉄筋・配力鉄筋を避けた場所に削孔位置を定める必要がある。たとえば、電磁波レーダ法を使用すれば、部材手前側の配筋の探査は容易であるので、当該主鉄筋、配力鉄筋を避けての削孔位置の決定が可能である。

## (2) PHb 配置位置での削孔方法

削孔は PHb ドリルなどにより行う。PHb ドリルによる削孔は以下のような特徴がある。

- ・切孔ではないので、鉄筋を切断することがない（鉄筋に当たった時点で停止可能）。
- ・ロッドの向きと貫入深さが作業中にわかるので、削孔方向と削孔深さの精度が確保できる。
- ・削孔内部が凸凹のある仕上がりとなる。高圧空気で清掃すれば異物の付着もない。
- ・コンプレッサによる空気圧で駆動するので、削孔部・制御部が軽量小型であり、人力による取り扱いが容易。駆動源であるコンプレッサは比較的大きいが、100m 程度以上離れた位置に設置できる。
- ・ロッド長を短くすれば、さらに狭い空間で施工可能である。
- ・削孔速度が速い。
- ・削孔に水を使用しない。
- ・削孔屑を回収することができる。
- ・削孔反力が小さいので、架台などの支保が軽微。
- ・細径及び拡幅削孔に対応した削孔ビットにより削孔が容易である。

したがって、駆動源が入らない狭い空間で、水が流せないような環境においても、最小の作業員数で、比較的軽微な仮設により（あるいは仮設なしでも）効率の良い削孔が可能である。そして、既設の鉄筋を切断することなく精度の良い位置・方向に、所定の深さに削孔が可能で、かつ削孔内を凸凹で清浄に仕上げられる。すなわち、施工性と PHb を定着固定する性能の双方の観点から PHb ドリル削孔は適した方法であると確認された。

## (3) 削孔内への PHb の固定方法

先充てん後挿入の場合、削孔内に先に充てん材を充てんした後に PHb を差し込むだけで、PHb の固定を完了する。削孔内面は、モルタル充てん直前に湿潤状態にするかあるいはドライアウト防止剤を散布し、充てん材が吸湿されないようにする。先充てん後挿入用の充てん材は、PHb モルタルを標準とするが、下向きの場合には PHb グラウトを使用してもよい。

PHb モルタルの可塑性によって、削孔内からモルタルがたれないので、この方法によって容易に PHb の削孔内への固定が可能であることを確認した。充てん材が PHb モルタルであれば、削孔内に設置した PHb の先端定着部までグラウトが密実に充てんされ、PHb とコンクリート躯体が、一体となっていることを確認した。



PHb モルタルはプレミックス材料であり，施工現場では，所定量の水を混ぜてハンドミキサで混合するだけで所定の性質のものが使用できる。所要のモルタル量も少量で，手押しのポンプで充てん可能であるので，最小限の設備と人員での PHb の設置が可能である。

#### (4)PHb 設置後の仕上げ等施工性

先充てん後挿入については，充てん材をパッカー等で抑えて養生した後に，断面修復によって削孔部分の充てん復旧を行う。断面修復材もプレミックス品であり，施工現場において必要な量を即時に練り混ぜて作ることができる。施工も左官仕上げによるので容易である。断面修復の専用材料であるので，品質の信頼性は高い。

## 4. 島根原子力発電所 2号炉における PHb の適用性確認

### 4.1 方針

PHb 工法は建設技術審査証明報告書により後施工せん断補強方法としての有効性が証明されており、また、これまでに数多くの施工実績がある。PHb 工法を島根原子力発電所 2号炉の取水槽に適用するに当たり、建設技術審査証明報告書の適用範囲やせん断補強効果等についての確認を行い、島根原子力発電所 2号炉の構造形式・諸元、地盤条件、使用環境、補強内容等が適用範囲に該当することを確認する。適用性の確認は、先行サイトとの類似点及び相違点を整理したうえで行う。確認フローを第 13-4-1 図に示す。

#### ① 適用性確認項目の抽出

後施工によるせん断補強において、せん断補強効果に影響を与えると考えられる項目を抽出する。その際、建設技術審査証明報告書に記載されている審査証明の範囲及び各種実験等から適用性確認項目を抽出する。

#### ② 建設技術審査証明報告書の適用範囲に収まっているか

島根原子力発電所 2号炉の構造物に採用する補強仕様が PHb 工法の建設技術審査証明報告書において規定されている適用範囲に収まっているかの確認をする。収まっていない場合は適用範囲内に収まる補強仕様になるように再設計を実施する。

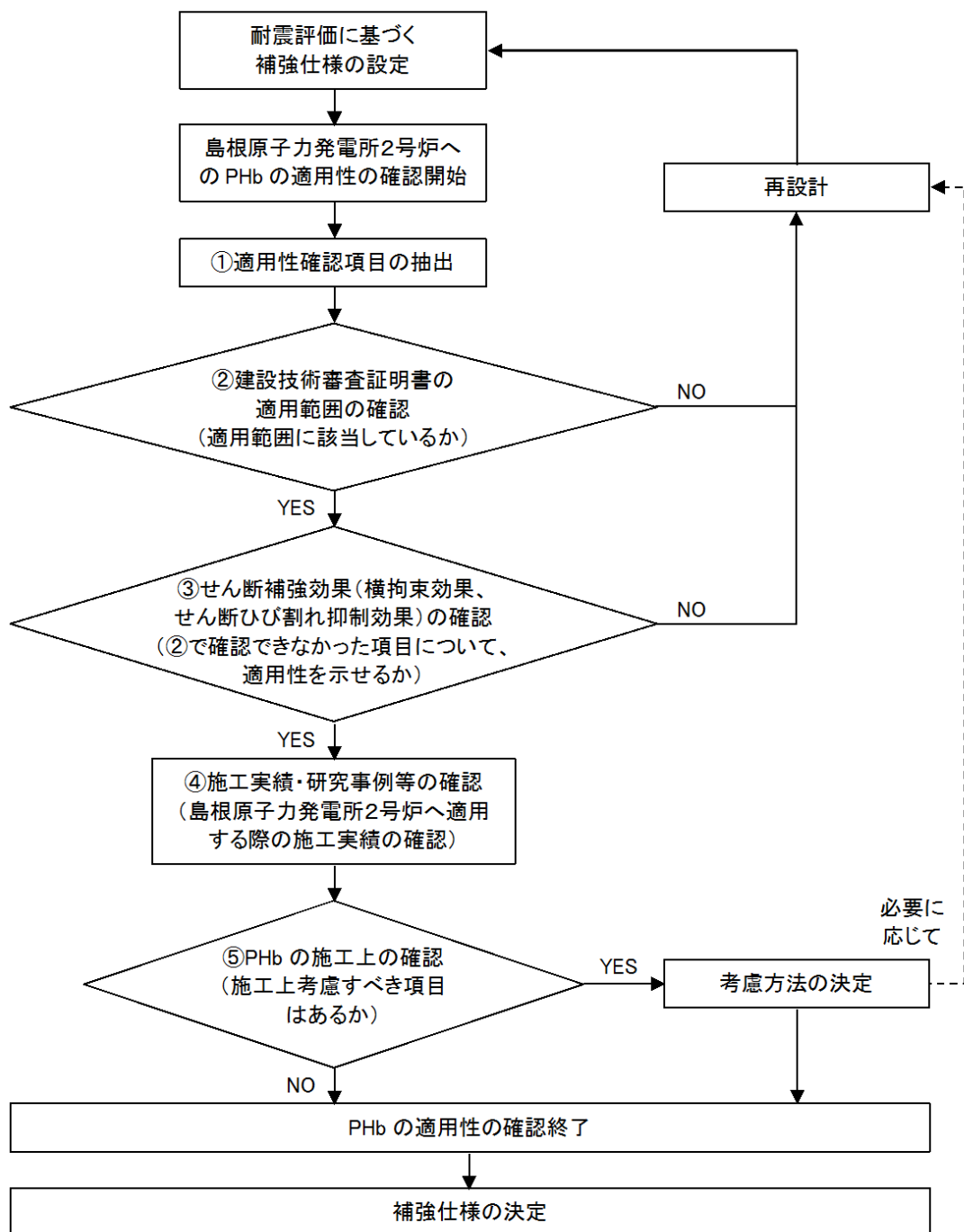
#### ③ 補強仕様に対して②以外の項目においてもせん断補強効果を期待できるか

①で挙げた適用性確認項目のうち②で確認できていない項目について、適用性の確認を実施する。適用性確認の際は、せん断補強効果が期待できるかという点について検討を実施する。

#### ④ 後施工せん断補強鉄筋に関する施工実績・研究事例について、目的、試験体諸元等を整理し、島根原子力発電所 2号炉への適用において考慮・反映すべき事項を検討する。

#### ⑤ PHb の施工において考慮すべき項目はあるか

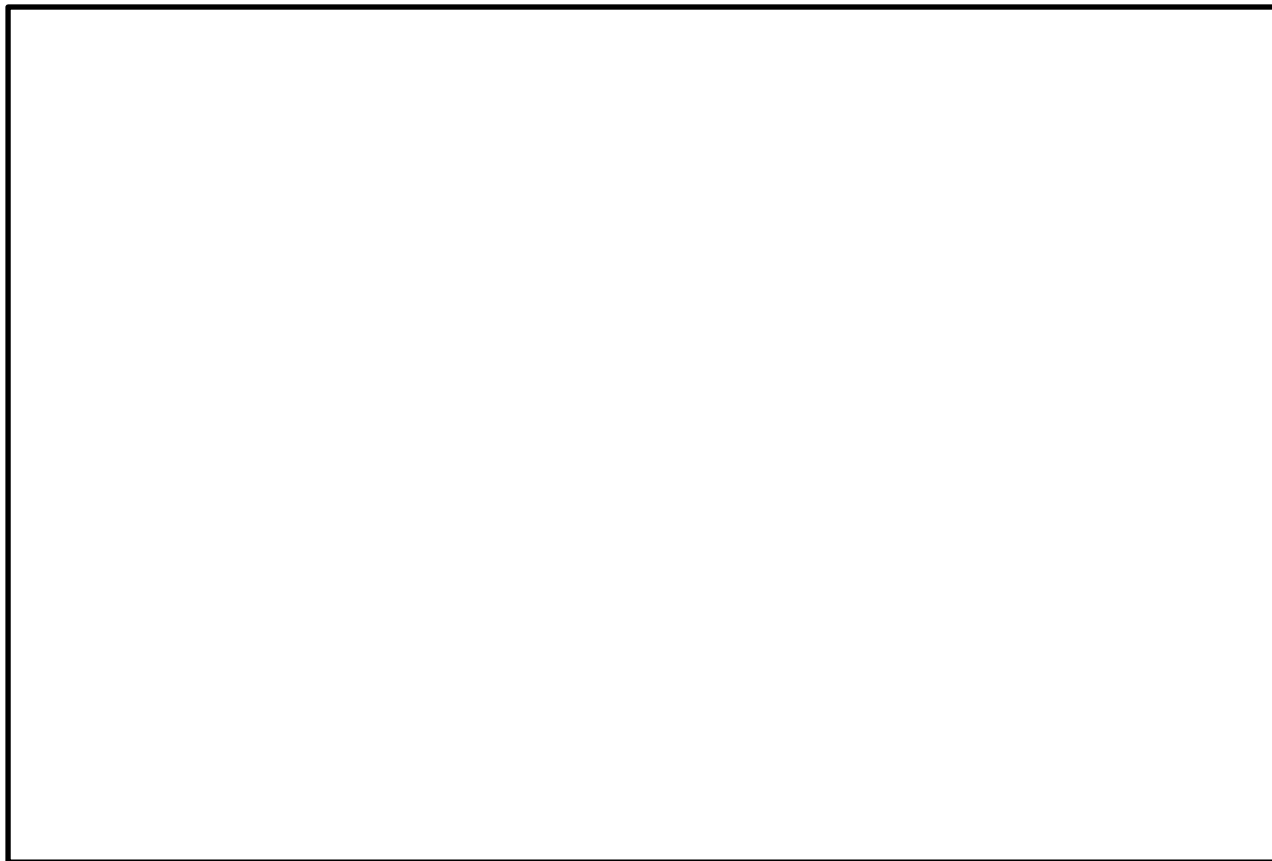
島根原子力発電所 2号炉の屋外重要土木構造物に対して PHb 工法の施工をする際に、考慮しておくべき事項がないか確認を行う。ある場合は施工上または設計上どのように考慮するかを決定したうえで考慮方法によっては再設計を実施するか適宜判断を行う。



第 13-4-1 図 確認フロー図

#### 4.2 耐震評価に基づく補強仕様の設定

耐震安全性評価を実施し、各部材において不足するせん断耐力を満足するように設定した結果、第13-4-2図のような補強仕様となった。



第13-4-2図 補強仕様

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 適用性確認項目の抽出

PHb 工法の特徴及び島根原子力発電所 2 号炉固有の条件等の観点から、適用性を確認するために必要な検討項目を抽出する。以下に確認項目を挙げる。

#### a. 使用目的

適用の前提として、審査証明の範囲として明記されている目的に該当している必要がある。

#### b. 構造形式

適用の前提として、審査証明において想定している構造形式に該当している必要がある。

#### c. 構造細目

PHb 工法では、想定外の破壊形式をとらない様に審査証明において規定している構造細目に該当している必要がある。

#### d. 部材諸元

部材厚については、建設技術審査証明報告書内の実験で適用性が確認された部材あるいは実績のある部材厚であることを確認する。

せん断スパン比，主鉄筋比，コンクリート設計基準強度については、応力伝達の観点から建設技術審査証明報告書内の実験で適用性が確認された範囲内であること，又は，範囲内でなくともせん断補強効果が期待できるかを確認する。

#### e. 使用材料（せん断補強鉄筋）

PHb に使用する鉄筋の種別・径に応じて必要な定着長が設定されているため，島根原子力発電所 2 号炉の土木構造物の補強では適用が確認された補強鉄筋を用いる必要がある。

#### f. 使用材料（プレート）

審査証明において確認されている材料を用いる必要がある。

#### g. 使用材料（充てん材）

応力伝達の観点から，構造体コンクリートと同等である必要がある。

#### h. 使用材料（断面修復材）

応力伝達の観点から，構造体コンクリートと同等である必要がある。

#### i. 載荷方法

応力伝達の観点から建設技術審査証明報告書内の実験で適用性が確認された範囲内であること，又は，範囲内でなくともせん断補強効果が期待できるかを確認する。

j. せん断補強筋の定着長

適用の前提として審査証明において設定している定着長を考慮して設計している必要がある。

k. せん断ひび割れ抑制効果

材料非線形解析を実施して、特異なひび割れが発生していないか確認する。

l. 応力状態（損傷程度）

PHbの構造の特徴として、両端の定着プレートが有効に機能する必要がある、そのために構造物がおおむね弾性範囲内であることを確認する。

m. 変形量（横拘束効果の確認）

PHbの適用範囲として「地震時の変形量が限定される地中構造物等」とされている。変形に関しては、変形に伴う曲げひび割れの影響が考えられるが、変形量に関する定量的な影響検討は行われていないため、変形量に対しては、適用確認実験の変形量を超えない必要があると考えられる。

n. 使用環境

島根原子力発電所2号炉固有の使用環境として、取水槽は海水に接することが挙げられることから海水環境下での実績があることを確認する。

#### 4.4 建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認

PHb の適用について、建設技術審査証明報告書に記載の、a. 使用目的、c. 構造細目、e～h. 使用材料及び j. せん断補強筋の定着長の確認結果を下記に示す。

##### a. 使用目的

使用目的は、先行サイト（美浜 3 号炉及び東海第二）と同様、第 13-4-1 表に示すとおり、審査証明の範囲として明記されている目的に該当していることを確認した。

第 13-4-1 表 PHb の適用範囲と適用条件（使用目的）

--

建設技術審査証明報告書の適用範囲	使用箇所及び状況
	地中構造物であり、片側からしか施工できない制限を有する既設コンクリート構造物に対して、後施工によるせん断補強の目的で用いる。
	地中構造物に適用し、せん断補強の目的で用いる。(変形性能(じん性)の向上を目的として用いているわけではないため、左記に示す変形性能に寄与する補強後のせん断補強鉄筋量の上限値の規定については不問である。)

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。

c. 構造細目

構造細目は、先行サイトと同様、第 13-4-2 表に示すとおり、審査証明において規定している構造細目に該当していることを確認した。

第 13-4-2 表の構造細目②においては、収縮ひび割れに対する用心鉄筋としての配慮であることがコンクリート標準示方書に記述されているので、収縮が収束していると考えられる部材の補強ではこの規定（せん断スパン方向の最大間隔 300mm 以下）を外すことができる。

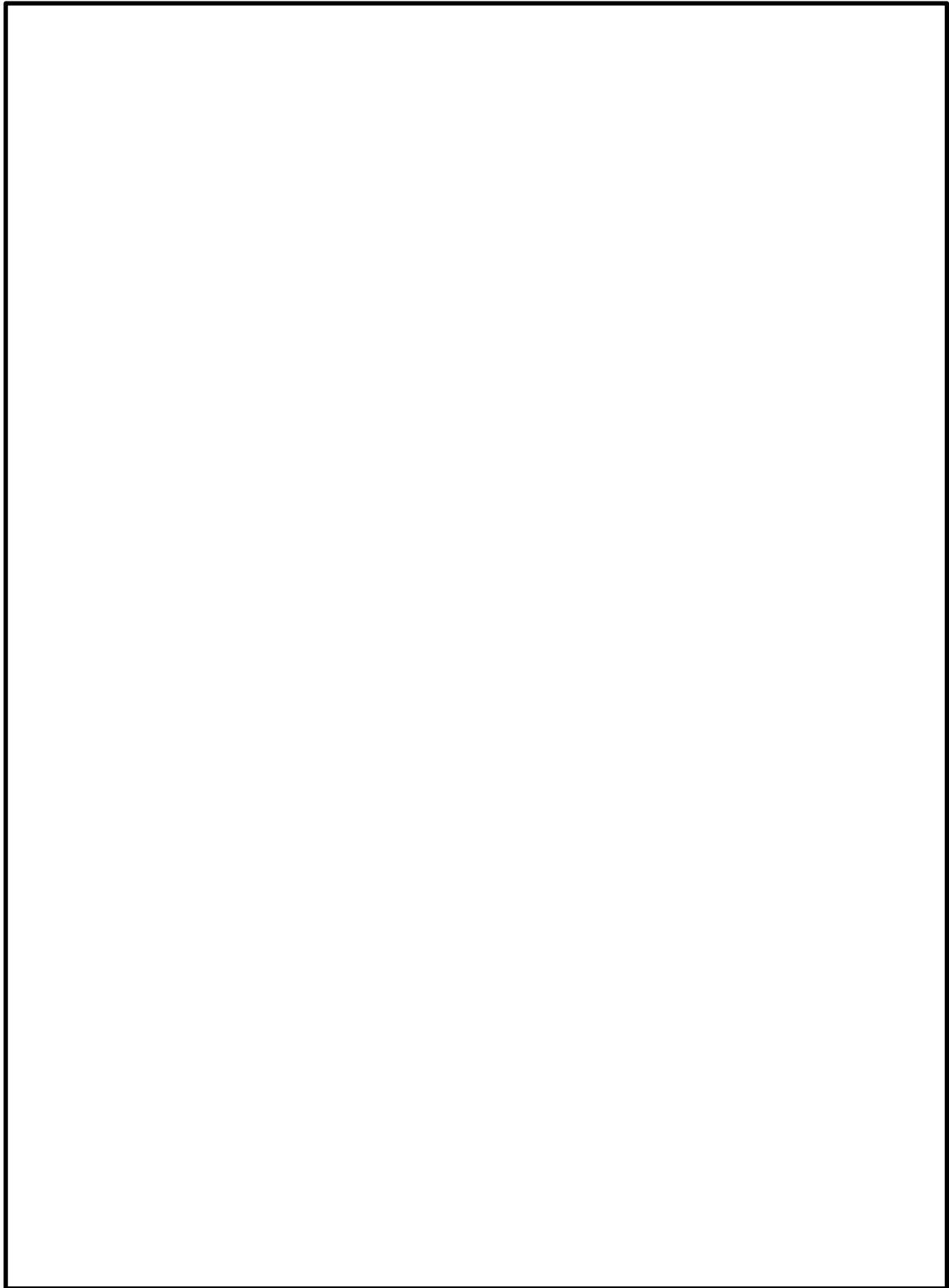
なお、PHb の配置は第 13-4-3 図に示す標準配置によるものとする。

第 13-4-2 表 PHb の適用範囲と適用条件（構造細目）

確認項目	美浜 3 号炉 (PHb 工法)	東海第二 (PHb 工法)	島根 2 号炉 (PHb 工法)	建設技術審査証明 報告書の適用範囲
構造細目① (せん断補強鉄筋の断面積比)	0.21～0.94%	0.43%	0.51%	補強前に配置されていたスターラップと Post-Head-bar を加えたせん断補強鉄筋の断面積比が 0.15% 以上。
構造細目② (PHb 配置のせん断スパン方向の最大間隔)	Post-Head-bar を配置するせん断スパン方向の最大間隔は、補強対象部材の有効高さの 1/2 倍以下で、かつ 300 mm 以下。	Post-Head-bar を配置するせん断スパン方向の最大間隔は、補強対象部材の有効高さの 1/2 倍以下で、かつ 300 mm 以下。	Post-Head-bar を配置するせん断スパン方向の最大間隔は、補強対象部材の有効高さの 1/2 倍以下で、かつ 300 mm 以下。	Post-Head-bar を配置するせん断スパン方向の最大間隔は、補強対象部材の有効高さの 1/2 倍以下で、かつ 300 mm 以下。
構造細目③ (埋込先端のかぶり)	Post-Head-bar の埋込先端は、軸方向鉄筋の位置まで配置することを原則とする。ただし、埋込先端のかぶりは、100 mm+主筋径の 1/2 とし、50 mm 以上を確保している。	Post-Head-bar の埋込先端は、軸方向鉄筋の位置まで配置することを原則とする。ただし、埋込先端のかぶりは、75 mm+主筋径の 1/2 とし、50 mm 以上を確保している。	Post-Head-bar の埋込先端は、軸方向鉄筋の位置まで配置することを原則とする。ただし、埋込先端のかぶりは、130 mm+主筋径の 1/2 とし、50 mm 以上を確保している。	Post-Head-bar の埋込先端は、軸方向鉄筋の位置まで配置することを原則とする。ただし、埋込先端のかぶりは、必要なかぶりを確保しつつ 50 mm 以上とする。

他サイトの情報に係る記載内容については、会合資料や HP 等をもとに弊社の責任において独自に解釈したものである。





第 13-4-3 図 PHb の標準配置  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

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。

e～h. 使用材料及び j. せん断補強筋の定着長

構造細目は、先行サイトと同様、第 13-4-3 表に示すとおり、審査証明に明記されている適用範囲に合致することを確認した。

第 13-4-3 表 PHb の適用範囲及び適用条件  
(使用材料及びせん断補強筋の定着長)

--	--	--

	建設技術審査証明報告書の材料範囲等	実使用材料
せん断補強筋		左記範囲内の材料を使用する。 (D19～D32 SD345)
プレート		材質は、SM490 相当を用い、品質証明書でその品質を確認する。
充てん材		躯体コンクリート以上の強度
断面修復材		躯体コンクリート以上の強度
定着長		左記の定着長を考慮して設計を実施する。

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。

#### 4.5 せん断補強効果の確認

##### (1) せん断補強効果の確認内容

「4.3 適用性確認項目の抽出」で抽出した適用性確認項目のうち、建設技術審査証明報告書では確認できなかった項目についてもせん断補強効果が期待できるかを確認する。以下に確認する項目を挙げる。PHb 工法と先施工のせん断補強鉄筋とで大きく異なる部分は、PHb 工法ではコンクリートに定着をとっていることである。したがって、コンクリート部分に関する項目が主となって、せん断補強効果に影響を及ぼすと考えられる。なお、b～f の項目については、(2)以降において、解析的にせん断補強効果が得られていることを確認する。

- b. 構造形式
- d. 部材諸元
- i. 載荷方法
- k. せん断ひび割れ抑制効果
- l. 応力状態（損傷程度）
- m. 変形量
- n. 使用環境

##### (2) せん断補強効果の確認

###### b. 構造形式

建設技術審査証明報告書に構造形式の具体的な記載はないが、使用目的として、「地震時の変形量が限定される地中構造物など」という記載があることから地中に埋設されたボックスカルバートの構造物を想定していると考えられる。

先行サイトにおいても同様の考察を行っており、島根 2 号炉取水槽は先行サイトと同様の構造形式であることから、島根 2 号炉取水槽は PHb 工法が適用可能な構造形式であると考えられる。

###### d. 部材諸元, i. 載荷方法, k. せん断ひび割れ抑制効果

PHb による補強効果については、建設技術審査証明報告書の各種実験にて検証している。建設技術審査証明報告書では、実験を上回る部材厚については、理論式により求められる有効係数  $\beta_{aw}$  を実験の部材厚で得られた値である 0.9 を上限として用いることで保守的な設計としている。（第 13-3-10 図参照）島根原子力発電所 2 号炉取水槽の部材厚は、実験で用いた部材と比べて大きいため、実験を上回る部材厚でも PHb の補強効果が期待でき適用性を有することを解析により補足する。また、部材諸元のうち、部材厚以外にもせん断スパン比、主鉄筋比及びコンクリート設計基準強度、及び載荷方法が島根原子力発電所 2 号炉取水槽で建設技術証明報告書に記載の各種実験と異なっている。したがって、先行サイトと同様、せん断ひび割れ抑制効果の確認とともに、上記の項目についても島根原子力発電所 2 号炉の実際の構造物の設計荷重等と同じ条件でもせん断補強効果が期待できるかの確認を解析により補足する。

解析の詳細については、添付資料2「解析によるせん断補強効果の確認について」に記載する。添付資料2「解析によるせん断補強効果の確認について」にて記載したとおり、実験条件と異なる項目であるb～fの項目においてもせん断補強効果を確認する。また、弾性挙動内においても特異なひび割れや変形が発生しないことを確認する。

・部材厚

項目	建設技術審査証明報告書 (実証試験)	先行原子力発電所における審査実績 (美浜3号炉)	先行原子力発電所における審査実績 (東海第二)	島根2号炉取水槽のPHb適用部材 <sup>※2</sup>
部材厚	500 mm	2,000 mm (海水ポンプ室 底板)	3,190 mm (取水ピット中頂板) 1,500 mm (左・右側壁) 1,200 mm (取水ピット底板, 隔壁) 1,000 mm (上記以外の部材)	・1,200 mm (取水槽スクリーン室隔壁)
実験または解析により得られた有効係数 $\beta_{exp}$	0.90	0.92	0.97	0.96
式 <sup>※1</sup> により計算した有効係数 $\beta_{aw}$	0.89	0.90 (上限値)	0.90 (上限値)	0.90 (上限値)

【検証結果】

- ・島根2号炉取水槽（スクリーン室）のPHb適用部材について、その部材厚は実証実験（500 mm）～審査実績（3,190 mm）の範囲内に収まっている。
- ・添付資料2の3. ②及び4. ③に示す材料非線形解析を用いた検証解析により、スクリーン室隔壁に対するPHbによるせん断補強効果を確認した。

以上より、島根2号炉取水槽（スクリーン室）のPHb適用部材に対し、部材厚の観点について適用性を有すると判断した。

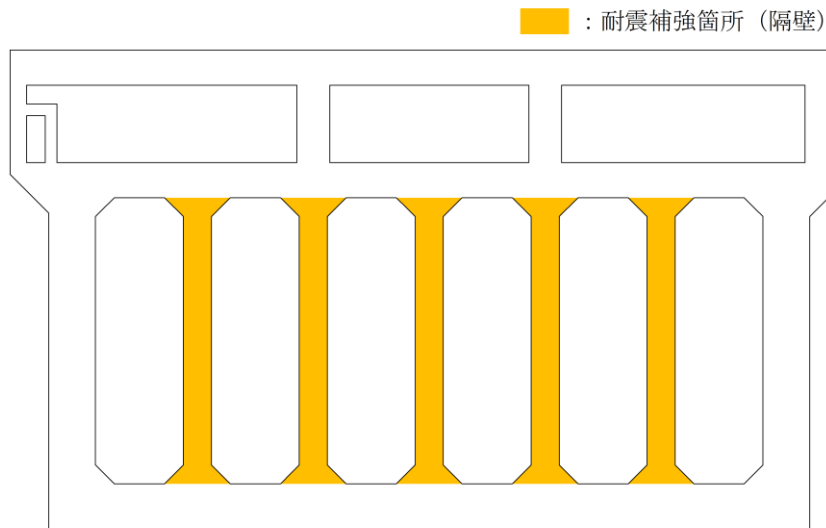
注記 ※1. 建設技術審査証明報告書における実証試験結果より設定された以下の設計式

$$\beta_{aw} = 1 - 1y / \{2(d - d')\} \quad (\text{ただし, } \beta_a \leq 0.9)$$

1y: 後施工せん断補強筋の埋込側に必要な定着長

d-d': 補強対象部材の圧縮-引張鉄筋の間隔 ( $d - d' \geq 1y$ )

※2. 取水槽（スクリーン室）の各部材配置を以下に示す。



・せん断スパン比<sup>※1</sup>

項目	建設技術審査証明報告書 (実証試験)	先行原子力発電所における審査実績 (美浜3号炉)	先行原子力発電所における審査実績 (東海第二)	島根2号炉取水槽のPHb適用部材
せん断スパン比	1.19~2.79	1.92	2.15	11.40 <sup>※2</sup>
<p><b>【検証結果】</b></p> <p>・島根2号炉取水槽（スクリーン室）のPHb適用部材のせん断スパン比は、実証試験における試験体のせん断スパン比（1.19~2.79）及び先行原子力発電所の審査実績のせん断スパン比（1.92~2.15）の範囲に収まっていないため、添付資料2の4.③に示す材料非線形解析を用いた検証解析により、せん断補強効果を確認した。</p> <p>以上より、島根2号炉取水槽（スクリーン室）のPHb適用部材に対し、せん断スパン比の観点について適用性を有すると判断した。</p>				

※1 せん断スパン比 =  $a / d$  (  $a$  : せん断スパン,  $d$  : 部材の有効高さ )

※2 取水槽スクリーン室隔壁のせん断スパン  $a = 12.2\text{m}$  ( 隔壁の全長 ), 部材の有効高さ  $d = 1.07\text{m}$  から, せん断スパン比 =  $a / d = 11.40$

・主鉄筋比

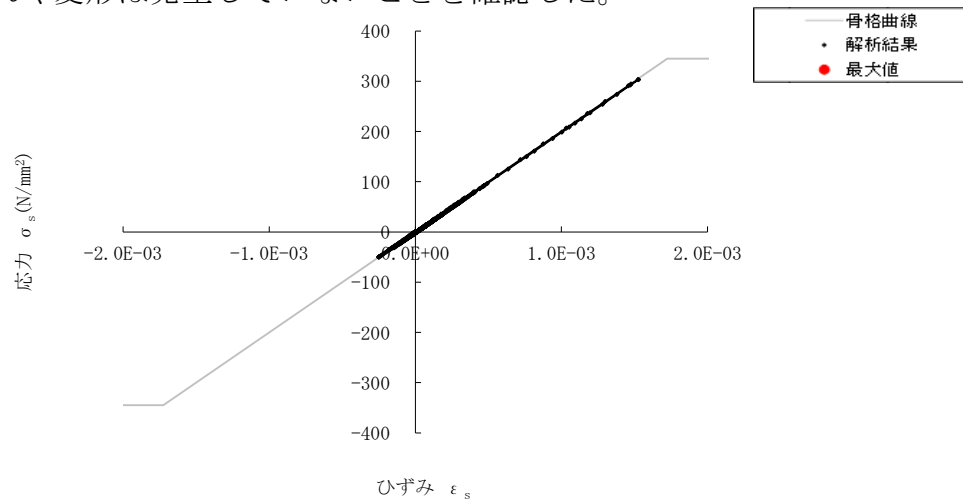
項目	建設技術審査証 明報告書 (実証試験)	先行原子力発電 所における審査 実績 (美浜3号炉)	先行原子力発電 所における審査 実績 (東海第二)	島根2号炉取水 槽のPHb適用部 材
主鉄筋比	1.48	0.47	0.46	0.85
<p><b>【検証結果】</b></p> <p>・島根2号炉取水槽（スクリーン室）のPHb適用部材の最大の主鉄筋比は、先行原子力発電所における審査実績（0.47、0.46）と比較して大きいですが、実証試験（1.48）と比較して主鉄筋比が十分に小さいため、PHbの定着性能に影響を与えるような付着割裂破壊は生じないと推察される。</p> <p>以上より、島根2号炉取水槽（スクリーン室）のPHb適用部材に対し、主鉄筋比の観点について適用性を有すると判断した。</p>				

・コンクリート強度

項目	建設技術審査証 明報告書 (実証試験)	先行原子力発電所に おける審査実績 (美浜3号炉)	先行原子力発電所 における審査実績 (東海第二)	島根2号炉取水槽 のPHb適用部材
コンクリ ート強度	32.0～38.3 (圧縮強度)	23.5 (設計基準強度)	20.6 (設計基準強度)	23.5 (設計基準強度)
<p><b>【検証結果】</b></p> <p>・島根2号炉取水槽（スクリーン室）におけるコンクリート設計基準強度は23.5N/mm<sup>2</sup>であり、先行原子力発電所における審査実績（20.6、23.5）と同等の値となっている。</p> <p>・設計基準強度23.5N/mm<sup>2</sup>の鉄筋コンクリートに対するPHbのせん断補強効果については、添付資料2の4.③に示す材料非線形解析を用いた検証解析により、その有効性を確認した。</p> <p>以上より、島根2号炉取水槽（スクリーン室）のPHb適用部材に対し、コンクリート設計基準強度の観点について適用性を有すると判断した。</p>				

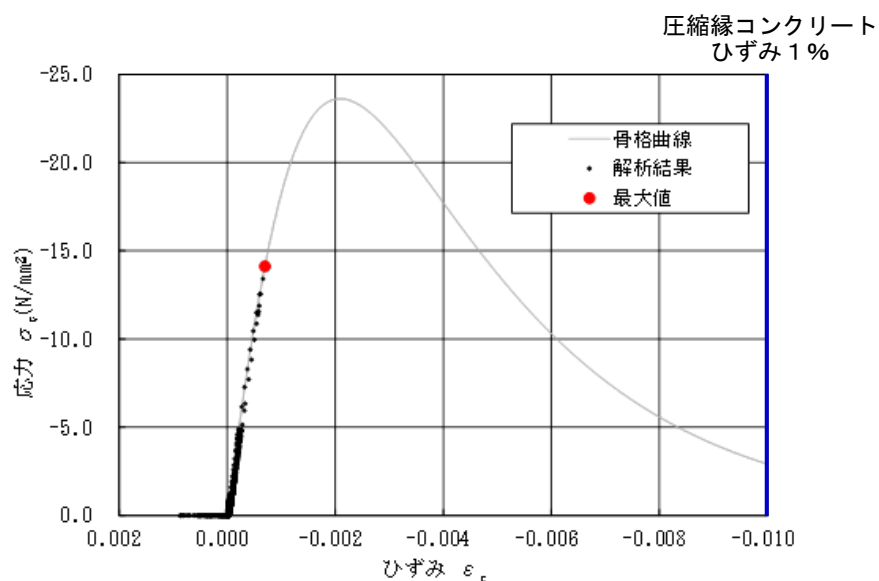
## 1. 応力状態（損傷状態）

部材の応力状態について、鉄筋コンクリートが健全であることを主鉄筋の引張応力－引張ひずみ関係の骨格曲線と解析結果により確認する。第13-4-4図に、取水槽（スクリーン室）隔壁における評価結果のうち、PHb適用部材の照査値が最も厳しくなる基準地震動S<sub>s</sub>-N1の損傷程度を示す。隔壁において、主鉄筋の引張応力度の最大値は鉄筋の降伏強度を下回ることから、コンクリートに顕著なひび割れは発生せず、健全であるといえる。なお、取水槽の圧縮縁コンクリートひずみは1%を大きく下回る0.07%程度であり、かぶりコンクリートに顕著なひび割れは発生せず、健全であることを確認した。また、添付資料2「解析によるせん断補強効果の確認について」で確認したとおり、材料非線形解析における弾性範囲内の挙動においても、在来工法である先施工のせん断補強と比べて特異なひび割れや変形は発生していないことを確認した。



第13-4-4図 取水槽の損傷図（1/2）

（主鉄筋の引張応力－引張ひずみ関係の骨格曲線と解析結果）



第13-4-4図 取水槽の損傷図（2/2）

（コンクリートの圧縮応力－圧縮ひずみ関係の骨格曲線と解析結果）

m. 変形量

変形量については、先行サイトと同様、取水槽の変形量が適用確認実験の変形量を超えないことを確認する。適用確認実験における層間変形角は0.4%程度以上であるが、取水槽においては最大でも層間変形角0.42%であり、適用確認実験の最小変形量程度であることを確認した。なお、適用実験における層間変形角は、実験において発生している変位量及びせん断スパン比から算出した。

n. 使用環境

島根原子力発電所2号炉の屋外重要土木構造物におけるPHb工法による耐震補強では、先行サイトと同様、気中及び水中の部材に対してPHb工法を適用する。PHbそのものはすべて構造物内に埋設され、かぶり部分によって腐食に対する抵抗性が確保される。また、「4.6 施工実績・研究事例等の確認」に記載のとおり、気中及び水中で数多くの施工実績があることが確認できている。



#### 4.6 施工実績・研究事例等の確認

##### (1) 施工実績の整理

PHbの施工実績としては、2018年4月1日までに、道路、浄化センター、ポンプ場、鉄道、浄水場、水門、配水路、発電所・プラントなど施工中案件を含めて711件の工事に適用され、119.2万本以上が施工されている(第13-4-4表参照)。

第13-4-4表 PHbの施工実績



PHbの施工実績を部材厚、鉄筋径ごとに整理する。部材厚ごとに整理した結果を第13-4-5表に、鉄筋径ごとに整理した結果を第13-4-6表に、使用環境ごとに整理した表を第13-4-7表に示す。なお、カウントする際は、1件の工事のうち複数にまたがって該当する場合には、各項目でそれぞれカウントしている(例 同一工事内でD13~D22の鉄筋を用いている場合はD13, 16, 19, 22の全てにカウント)。水中における施工実績のうち、鹿島共同発電所の取水路においては、海水通水部における実績として挙げられる。今回島根原子力発電所2号炉の構造物に採用する項目についてハッチングしている。表に示すとおり、十分に実績のある範囲にあることが確認できる。

また、島根原子力発電所2号炉建設時期以前に施工された構造物に対しての施工実績があることを確認している。先にも述べたとおり、後施工せん断補強鉄筋工法は、1980年以前の土木学会コンクリート標準示方書に従って設計された構造物に対してせん断補強を行うことを想定した工法である。

なお、島根原子力発電所2号炉については高経年化技術評価を行い、健全性を確認している。

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 13-4-5 表 PHb の施工実績（部材厚）（1/2）

部材厚 (mm)	件数
～500	249
501～1000	504
1001～1500	352
1501～2000	212
2001～	170

第 13-4-5 表 PHb の施工実績（部材厚）  
（上記実績のうち横向き施工）（2/2）

部材厚 (mm)	件数
～500	191
501～1000	335
1001～1500	197
1501～2000	118
2001～	118

第 13-4-6 表 PHb の施工実績（鉄筋の種類）

補強鉄筋の種類		件数
SD345	D13	199
	D16	419
	D19	334
	D22	366
	D25	222
	D29	166
	D32	123

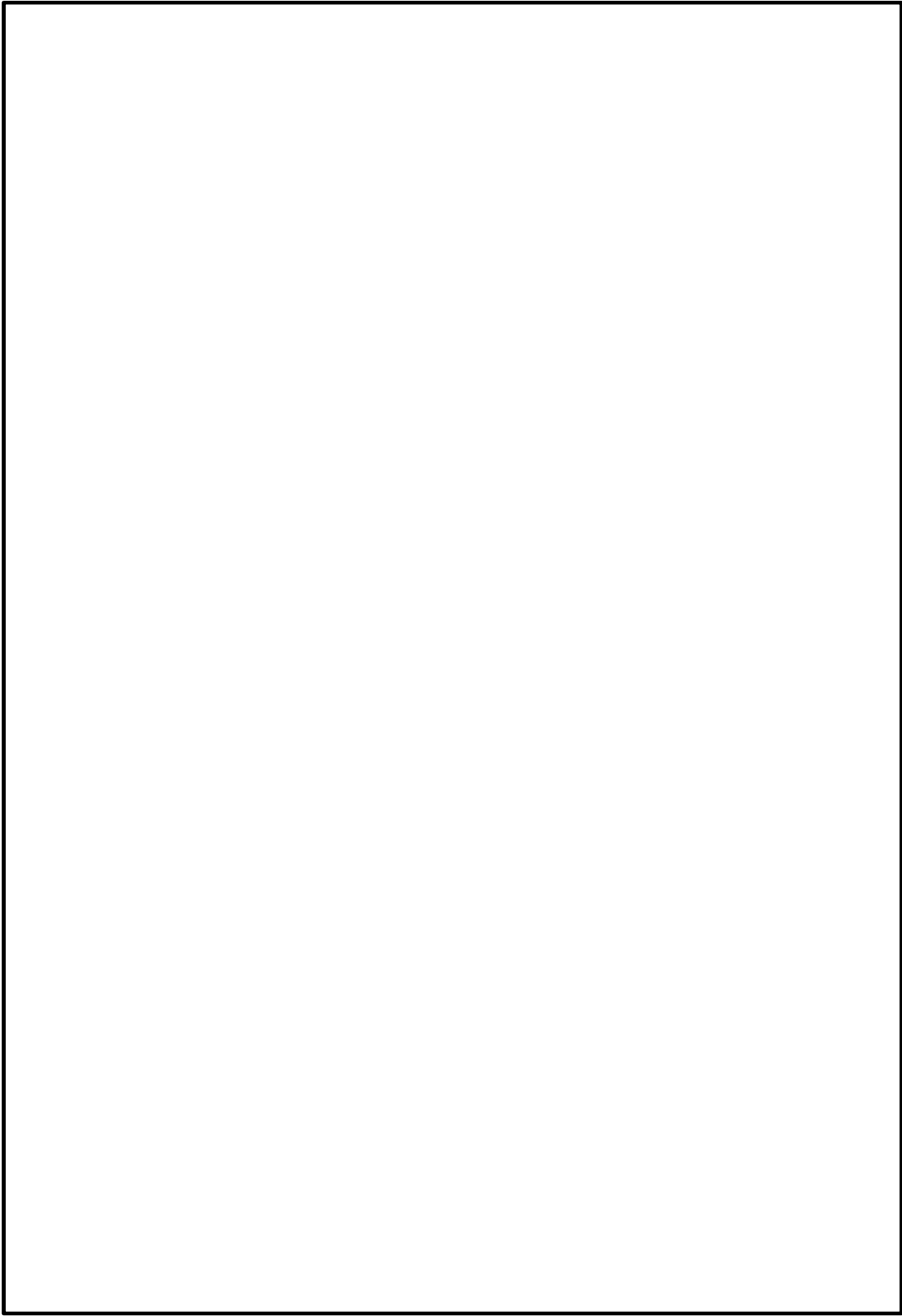
第 13-4-7 表 PHb の施工実績（使用環境）

施工場所	件数
気中	48
水中	694

## (2) 過去の地震の経験事例

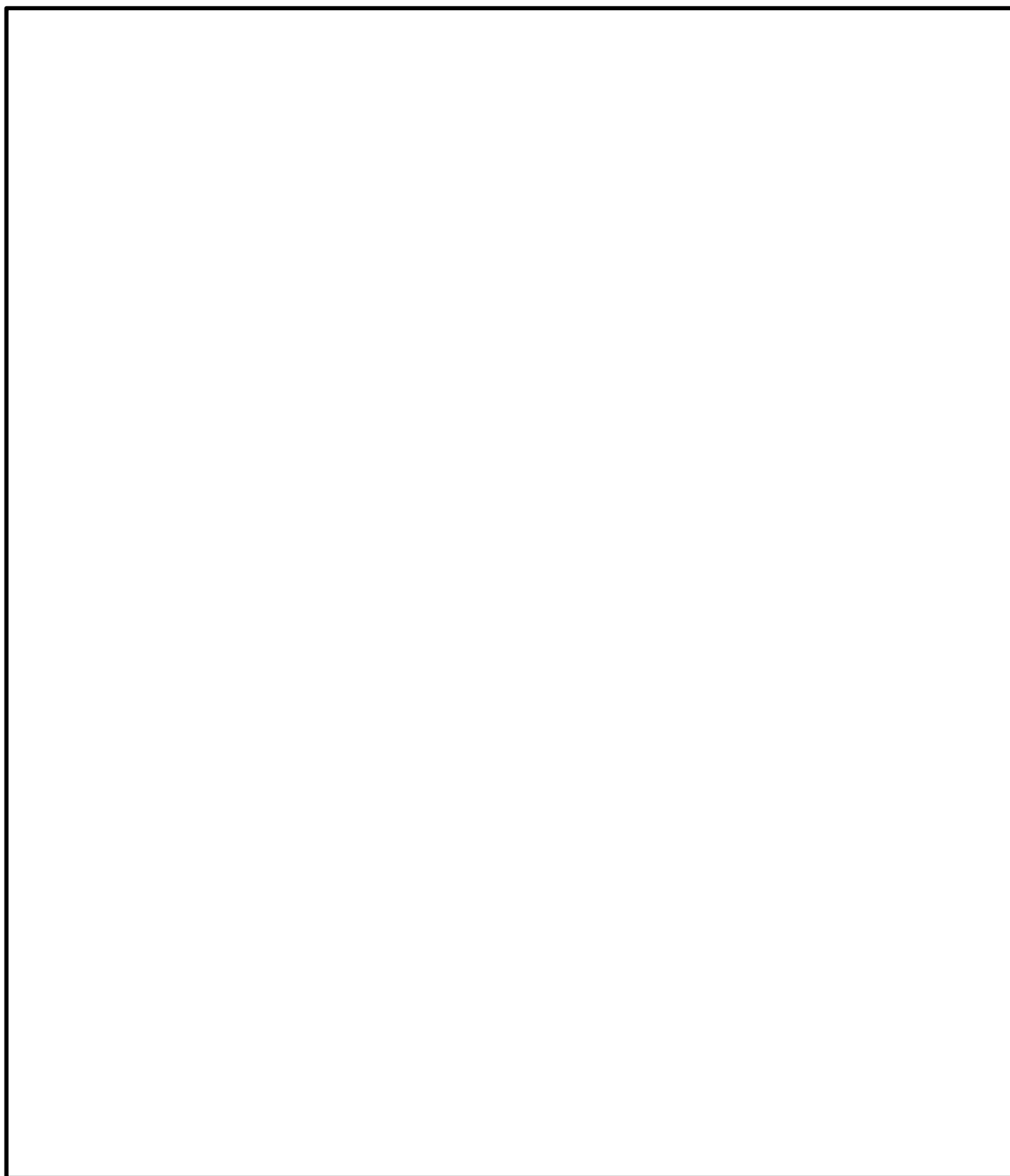
PHb 施工実績のうち、東北地方太平洋沖地震及び熊本地震において、震度 5 強以上が観測された地域にある、地震発生前に施工された実績若しくは施工中であった実績を抽出した。

東北地方太平洋沖地震及び熊本地震において K-NET または KIK-NET で観測された加速度及び PHb を施工した箇所の位置関係を第 13-4-5 図及び第 13-4-6 図に示す。東北地方太平洋沖地震においては、最大震度 6 強、熊本地震においては、最大震度 6 弱の地震を受けた事例があることを確認した。PHb 工法研究会に確認したところ、いずれの地点においても、現時点では、被害・不具合が発生したという報告はない。



第 13-4-5 図 東北地方太平洋沖地震の強震域にある施工実績

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 13-4-6 図 熊本地震の強震域にある施工実績

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) レベル2地震動を対象とした設計事例

広島空港直下を通る用倉トンネルにおいて、レベル2地震動を対象として耐震補強に鉄筋差込工法（後施工せん断補強鉄筋工法 RMA 工法）を適用したせん断補強事例が報告されている\*。本事例においては、広島空港が大都市拠点空港として空港輸送上重要な空港に位置づけられたため、耐震性能照査を行った結果、せん断耐力が不足していることが判明したものによる。用倉トンネルは現場打ちのアーチカルバートの上に20m弱の盛土をおこなった構造物である。構造形式等の詳細については、「(5)後施工せん断補強鉄筋に関する研究事例」に記載する。

#### ※参考文献

岡崎大宜：後施工型せん断補強工法を活用した広島空港地下トンネル耐震補強工事について

### (4) 後施工せん断補強鉄筋工法の比較

PHb 工法以外にも土木研究センターにおいては、類似する後施工せん断補強鉄筋工法の建設技術審査証明が実施されている。後施工せん断補強鉄筋工法の比較結果を第13-4-8表に示す。工法に差異はあるものの、コンクリート部分に付着を期待してせん断耐力の向上を期待する点は共通している。また、せん断耐力の算出方法については、工法により多少の差異は存在するもののおおむねトラス理論を基にせん断耐力の算出を行っている。

第13-4-8表 後施工せん断補強鉄筋工法の比較 (1/2)

--

※土木研究センター 建設技術審査証明関係資料に基づき作成

第13-4-8表 後施工せん断補強鉄筋工法の比較 (2/2)

--

※土木研究センター 建設技術審査証明関係資料に基づき作成



#### (5) 後施工せん断補強鉄筋に関する研究事例

後施工せん断補強鉄筋に関する施工実績・研究事例について、目的、試験体諸元等を整理し、島根原子力発電所2号炉への適用において考慮・反映すべき事項を検討する。

##### ① コンクリート構造物の後（あと）施工せん断補強技術

###### ・ 目的

挿入された鉄筋やグラウトが既存のコンクリートと一体化し、挿入鉄筋の定着長を考慮したせん断鉄筋の補強効果により、所要の地下壁構造のせん断耐力が得られることを確認する。

###### ・ 試験体諸元

部材厚：685mm

せん断補強鉄筋径：D22

荷重条件：正負交番載荷

###### ・ 特記事項

実験により得られたせん断耐力は、有効係数を用いて算出される設計せん断耐力以上であることはもちろん、標準フック筋での補強に比べ、そんな色のないせん断補強効果が得られていることを示している。

###### ・ 影響確認

島根原子力発電所2号炉では試験例として記載されている PHb 工法を採用している。

## ②耐震補強等に用いるあと施工型せん断補強技術（RMA 工法）

- ・ 目的

RMA 工法の概要及び性能確認実験，設計方法を示す。

- ・ 試験体諸元

部材厚：600mm（せん断スパン比  $a/d$ =約 2.25）

せん断補強鉄筋径：D19（SD345）

荷重条件：正負交番載荷

- ・ 特記事項

定着性能試験の結果，定着長が 4D 以上で SD345 の規格降伏強度相当の定着力を確保できる。

宮城県沿岸地域で採用された RMA 工法による補強構造物は，東日本大震災においても損傷がなかった。

- ・ 影響確認

PHb も同様の定着性能試験を実施し，定着長を設定している。

③論文 異形鉄筋の埋込みによるあと施工せん断補強効果に関するはりの載荷実験

・目的

既存構造物であるボックスカルバートやU型擁壁などの連続壁に対して、異形鉄筋を埋込むことでせん断補強部材とする方法を提案し、補強方法の有効性を確認することを目的として、はり供試体を用いたせん断実験を行った。

・試験体諸元

部材厚：460mm（せん断スパン比  $a/d$ =約 2.25）

せん断補強鉄筋径：D10（SD295）

荷重条件：単調載荷

・特記事項

実験結果より後施工は先施工と同等のせん断耐力を有することを確認した。

・影響確認

島根原子力発電所2号炉のせん断補強においては、建設技術審査証明報告書にて規定されている有効係数（上限値 0.9）を用いて低減したせん断耐力を算出し、保守的な設計をしている。

④後施工型のせん断補強工法を活用した広島空港地下トンネル耐震補強工事について

・目的、概要

広島空港の基本施設直下を通る地下構造物（用倉トンネル）において、レベル2地震動に対してせん断耐力が不足していた。用倉トンネルはアーチカルバートの上に20m弱の盛土を行った構造物であるため、この盛土部分とアーチカルバートを対象に耐震対策が必要な範囲と耐震補強工法の選定・検討を行い、RMA工法で現地施工を行った。

・構造体諸元

構造形式：アーチカルバート

補強対象部位：側壁

部材厚：1600mm

・特記事項

重要施設に対して後施工型せん断補強工法（RMA工法）による耐震補強を実施した。

・影響確認

レベル2地震動を対象とした重要構造物かつ島根原子力発電所2号炉取水槽の鉛直部材厚さ（隔壁：1200mm）相当の構造物に対しての施工実績があることを確認した。

#### ⑤地下駅舎 RC 壁のせん断力評価と耐震補強対策

##### ・目的, 概要

地中構造物の側壁隅角部を対象に載荷試験を行い, せん断スパンが正載荷・負載荷で異なることを考慮したせん断耐力算定方法を提案した。また, 前施工補強と後施工補強との耐力比較, 並びに後施工せん断補強鉄筋の埋込長の違いによる耐力比較を行った。

##### ・試験体諸元

部材厚：側壁 460mm, 底版 800mm (せん断スパン比 正側

$a/d$ =約 2.25, 負側  $a/d$ =約 3.25)

せん断補強鉄筋径：D10 (SD295)

荷重条件：正負交番載荷

##### ・特記事項

後施工によるせん断補強の場合, 設計耐力に対して最低でも 80%程度のせん断耐力が実験で得られた。

##### ・影響確認

実験で用いた補強鉄筋は端部を  $45^\circ$  にカットした直鉄筋であり, 端部に定着プレートをも有する PHb よりもせん断耐力が小さくなる。PHb では, 実験により低減係数に相当する有効係数を設定し, せん断耐力を算定している。

⑥論文 セン断補強筋の定着不良が RC はりのせん断耐力に及ぼす影響

・目的, 概要

せん断補強鉄筋の定着不良が RC はりのせん断抵抗機構に及ぼす影響を検討することを目的として, せん断補強鉄筋の定着フック及び端部付近の付着を除去したはりを作製し, せん断耐力の低下と破壊モードを実験的に検証した。また, 材料非線形解析における定着不良部のモデル化について検討した。

・試験体諸元

部材厚 : 350mm (せん断スパン比  $a/d$  = 約 3.2)

せん断補強鉄筋径 : D6

荷重条件 : 単調載荷

・特記事項

定着不良部から鋼材径の 10 倍程度を鋼材無効区間として要素内鉄筋比を等価に規定すれば, 2次元ひび割れ解析でせん断耐力を概略評価することが可能である。

・影響確認

部材厚の検討において, PHb のモデル化に本解析手法を参考とした。

⑦地下道における PHb（ポストヘッドバー）工法の採用と積雪寒冷地の施工について

・目的，概要

既設地下道を耐震補強する目的で採用した PHb 工法の実施内容及び積雪寒冷地での施工方法について報告する。充填材の温度と強度の関係を把握するための試験施工を実施した。

・試験体諸元

350mm×350mm×650mm

・特記事項

充填材料が 0℃以下の履歴を受けた場合では，強度発現が低下することが確認された。

・影響確認

充填材料が 0℃以下とならないように，施工上の管理基準（5℃以上）を設けて適切に施工する。

⑧せん断補強鉄筋埋込工法（あと施工）による東京湾第二航路海底トンネルの側壁補強

奥平幸男・岩下正美・小林亨・清宮理

・目的，概要

東京都港湾局が同工法における補強効果を確認するために行った室内せん断実験の概要と結果，設計条件と施工基準設定の考え方及び適用工事に関する施工結果について考察。

・試験体諸元

部材厚:460mm（せん断スパン比  $a/d=2.25$ ）

・特記事項

施工上予想される不具合を設計上考慮し，せん断耐力に対して低減係数 0.75 を乗じる。

・影響確認

低減係数 0.75 は 2002 年の「③論文 異形鉄筋の埋込みによるあと施工せん断補強効果に関するはりの載荷実験」でも提案されているが，その後 PHb 工法等の後施工せん断補強工法について第三者機関による審査証明が行われており，その中では施工性についても審査対象となっており，本研究事例の低減係数をそのまま設計に適用する必要はないと考えられる。なお，後述の「4.7 PHb の施工上の確認」にて施工精度の向上に向けた方策を記載する。

後施工せん断補強鉄筋に関する各研究事例を踏まえて，島根原子力発電所 2 号炉の設計，施工への反映事項を下記に示す。

- ・建設技術審査証明報告書にて規定されている有効係数（上限値 0.9）を用いて，PHb のせん断耐力を算定する。
- ・充填材の施工管理基準（5℃以上）を設ける。
- ・施工上予測される不具合の考慮については，施工精度の向上方策を講じるとともに，設計上の配慮についても検討する。



#### 4.7 PHb の施工上の確認

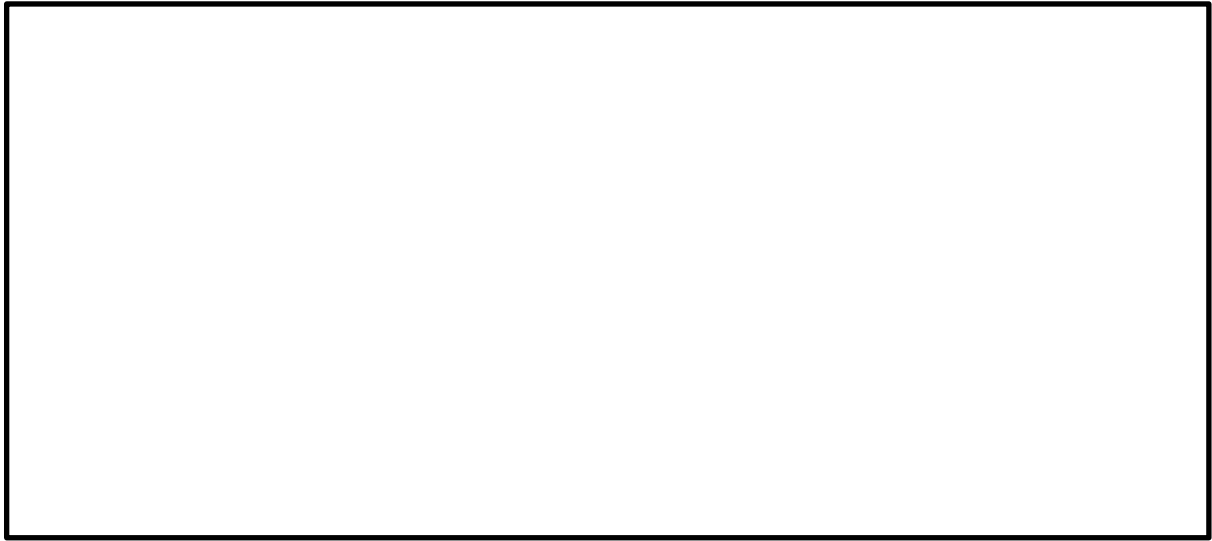
PHb 工法によるせん断補強に当たっては、既設鉄筋配置のずれ等施工のばらつきにより計画どおり施工できなかつた場合、期待するせん断補強効果に影響を及ぼす可能性がある。そこで施工上せん断補強効果に影響を及ぼす可能性がある施工のばらつきに関する項目を抽出し、適切な施工管理によりばらつきを生じさせない、若しくはせん断補強効果に大きな影響を及ぼさないことを確認する。

##### (1) 削孔角度

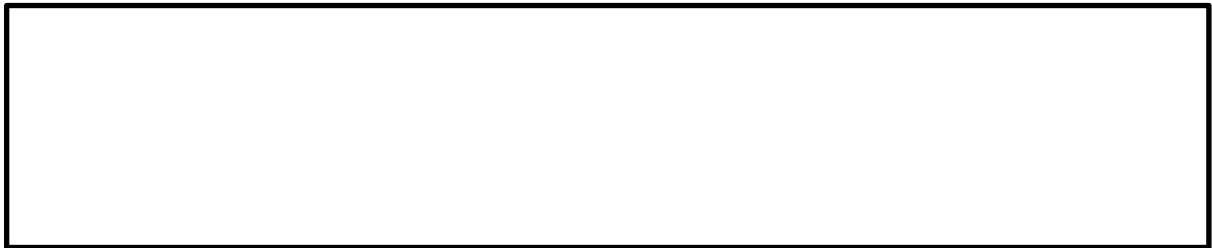
PHb 挿入計画位置をドリルにより削孔するが、削孔角度に誤差が生じた場合、PHb のせん断補強効果に影響が及ぶ可能性がある。そこで施工用架台にドリルを設置し、ドリルの鉛直方向、水平方向が削孔面に対して垂直となるようスラントルール、金尺等で確認し削孔する。第 13-4-7 図に施工用架台に設置した PHb ドリルと鉛直・水平の確認状況を示す。以上より、削孔時に施工用架台を使用することで削孔角度のばらつきは生じない。

また、「建設技術審査証明報告書 技術名称 あと施工型せん断補強用無機系モルタルカプセル及びせん断補強筋「RMA」（建技審証 第 1203 号）」ではコンクリートコアドリル長尺削孔精度確認試験を実施している（第 13-4-8 図）。コンクリートコアドリル長尺削孔精度確認試験では、幅 1,200mm×高さ 600mm×長さ 1,200mm のコンクリートブロック 4 体を削孔し、削孔位置のずれを確認した。コンクリートコアドリル長尺削孔精度の計測結果を第 13-4-9 表に示す。ここで、削孔表面から試験体 I 裏まで 1,200mm であり、島根原子力発電所 2 号炉取水槽の部材厚である隔壁 1,200mm となることから、第 13-4-9 表の試験体 I 裏の結果を参考にする。試験体 I 裏では削孔誤差は最大 15mm となり、削孔角度誤差を換算すると約  $0.7^{\circ}$  となり、十分精度あることが示されている。

さらに、論文「⑧せん断補強鉄筋埋込工法（あと施工）による東京湾第二航路海底トンネルの側壁補強」において、削孔角度誤差について記載されているが、そこではドリルによる削孔時に 2 方向より定規を添えて初期削孔を行い、途中 2～3 回確認することで施工用架台を使用せず誤差  $2^{\circ}$  以内を確保している（第 13-4-9 図）。今回は施工用架台を使用し、より精度良く削孔することが可能である。



第 13-4-7 図 削孔準備工



第 13-4-8 図 試験概要図

第 13-4-9 表 コンクリートコアドリル長尺削孔精度の計測結果



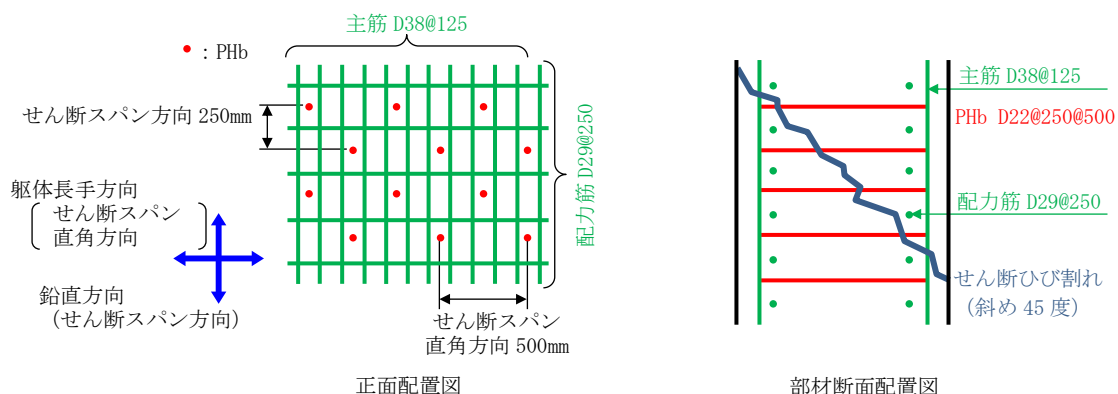
第 13-4-9 図 レッグドリルによる削孔

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) 削孔位置

PHb 挿入計画位置をドリルにより削孔するが、部材内部に障害物があり計画位置で削孔できず PHb を計画どおり配置できない可能性がある。その場合は、付近を再削孔し PHb を挿入することで設計上必要な補強鉄筋量を確保する。ただし、再削孔し PHb を配置する際は「4.4 建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認」に示す建設技術審査証明報告書に記載の構造細目を満足するものとする。なお、第 13-4-10 図に示すせん断補強筋正面配置図及び部材断面配置図のとおり、再削孔する際は削孔計画位置（赤丸）から位置をずらし、せん断補強効果に影響のない位置に削孔することが可能である。なお、孔と鉄筋の干渉を避けて再削孔を行う際、削岩機ベースの PHb ドリルでは孔をラップさせることができないため再削孔位置の選定が制限され、再削孔しても新たに別の鉄筋に干渉してしまう可能性がある。そこで、孔のラップが可能な PHb 工法指定の特殊コアドリルを必要に応じて併用することとし、再削孔時の精度向上を図る。

以上より、削孔位置にばらつきが生じても必要鉄筋量を確保するためせん断補強効果に影響を及ぼさない。



第 13-4-10 図 取水槽のせん断補強筋正面配置図及び部材断面配置図

## (3) 定着効果

充填材の定着効果については、建設技術審査証明報告書にて充填確認試験を実施しており、削孔内に設置した PHb の先端定着部までグラウトが密実に充填され、PHb とコンクリート躯体が一体となっていることを確認している。

(1)～(3)に示したとおり、施工上の配慮により、せん断補強効果に大きな影響を及ぼすような施工のばらつきは生じないと考えられる。しかし、現時点では後施工による施工のばらつきに対して施工実績に基づく十分な統計がとれていないため、施工のばらつきによる影響が生じる可能性を完全に否定することはできない。

以上を踏まえて、適切な施工管理を実施してもなお発生しうる施工のばらつきに対する設計上の配慮として、耐震評価上の裕度（たとえば照査値を 8 割程度に抑える）を持たせた設計を行うこととする。

その他施工上の留意点の確認等については、添付資料3「施工管理要領書（案）（取水槽耐震補強工事（ポストヘッドバー工法）」にて実施する。

#### 4.8 PHb の適用性確認結果

「4.2 耐震評価に基づく補強仕様の設定」で設定した補強仕様が「4.1 方針」に沿って、PHb の島根原子力発電所 2 号炉の屋外重要土木構造物の耐震補強における適用性を検討した結果、PHb を採用し、建設技術審査証明報告書のとおりせん断補強効果を期待できることを確認した。決定した補強仕様を第 13-4-11 図に示す。



第 13-4-11 図 補強仕様

#### 添付資料

- (添付資料 1) 建設技術審査証明書
- (添付資料 2) 解析によるせん断補強効果の確認について
- (添付資料 3) 「施工管理要領書 (案) (取水槽耐震補強工事 (ポストヘッドバー工法))」
- (添付資料 4) 建設技術審査証明報告書の実験条件を超えるせん断スパン比に対する PHb の適用性について

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。



# 建設技術審査証明書

建技審証第 0522 号

## 技術名称 後施工プレート定着型せん断補強鉄筋 「Post-Head-bar」

(開発の趣旨)

せん断補強を構造物の内側から施工できない供用中の既設構造物においても、構造物の片側からの施工が可能で、かつ、せん断耐力の補強に限定してせん断余裕度を向上させることでせん断破壊モードから曲げ破壊モードに移行させることができる後施工せん断補強鉄筋を提供する。

(開発目標)

(1) 力学性能

① 後施工せん断補強鉄筋の定着性能

後施工せん断補強鉄筋の実降伏荷重を発揮するために必要な円形プレート側の定着長が、鉄筋種類および鉄筋径に応じて設定できること。

② 施工後のせん断耐力

「Post-Head-bar」のせん断耐力への寄与分は、新設構造物に一般に用いられている半円形フックタイプのせん断補強鉄筋が受け持つせん断耐力の算定方法において「Post-Head-bar」の規格降伏強度を使用して求めた値に対し、適用部材の軸方向鉄筋間隔および「Post-Head-bar」円形プレート側の必要定着長から評価される有効係数を乗じたものとして評価できること。また、せん断スパン比の小さい部材に対しても、SD345 以上の材質の Post-Head-bar により補強した場合には、せん断スパン比が小さい部材に適用されるせん断耐力算定式に Post-Head-bar の有効係数を用いて評価できること。

③ 施工後の変形性能

新設構造物で一般に用いられる半円形フックタイプのせん断補強鉄筋を用いた部材の軸方向鉄筋の座屈が生じるまでの変形レベルと同等のじん性率が確保されること。補強後の部材の骨格曲線は、補強後の合計せん断補強鉄筋量に上限値を考慮して設定した量のせん断補強鉄筋が配置された部材として算定できること。

(2) 施工性

① 適用部材

背面に地盤や水、機器などの障害物などがあるような制約のある施工条件においても、構造物の片側からのみの施工によりせん断補強できること。

② 施工の容易性と迅速性の評価

狭い空間や複雑な部位においても、大型機材を必要とせず、かつ、短時間に施工できる作業の容易さがあること。

一般財団法人土木研究センターの建設技術審査証明事業実施要領に基づき、依頼のあった標記の技術について下記のとおり証明する。

平成 17 年 12 月 21 日

平成 22 年 12 月 21 日 内容変更・更新 (依頼者変更)

平成 23 年 8 月 22 日 内容変更

平成 27 年 12 月 21 日 更新

平成 28 年 10 月 17 日 内容変更

建設技術審査証明事業実施機関

一般財団法人 土木研究センター

理事長

記



1. 審査証明の結果

「Post-Head-bar」は以下の性能を有することが確認された。

(1) 力学的性能

① 後施工せん断補強鉄筋の定着性能

後施工せん断補強鉄筋の実降伏荷重を発揮するために必要な円形プレート側の定着長が、鉄筋種類および鉄筋径に応じて審査証明報告書に示す値で設定できることが確認された。

② 施工後のせん断耐力

「Post-Head-bar」のせん断耐力への寄与分は、新設構造物に一般に用いられている半円形フックタイプのせん断補強鉄筋が受け持つせん断耐力の算定方法において「Post-Head-bar」の規格降伏強度を使用して求めた値に対し、適用部材の軸方向鉄筋間隔および「Post-Head-bar」円形プレート側の必要定着長から評価される有効係数を乗じたものとして評価できることが確認された。また、せん断スパン比の小さい部材に対しても、SD345 以上の材質の Post-Head-bar により補強した場合には、せん断スパン比が小さい部材に適用されるせん断耐力算定式に Post-Head-bar の有効係数を用いて評価できることが確認された。

③ 施工後の変形性能

新設構造物で一般に用いられる半円形フックタイプのせん断補強鉄筋を用いた部材の軸方向鉄筋の座屈が生じるまでの変形レベルと同等のじん性率が確保されることが確認された。

補強後の部材の骨格曲線は、補強前のせん断補強鉄筋と「Post-Head-bar」を合わせた実配型に対し、変形性能に寄与する補強後のせん断補強鉄筋量の設定値に上限を設けた部材として算定できることが確認された。

(2) 施工性

① 適用部材

背面に地盤や水、機器などの障害物などがあるような制約のある施工条件においても、構造物の片側からのみの施工によりせん断補強できることが確認された。

② 施工の容易性と迅速性の評価

狭い空間や複雑な部位においても、大型機材を必要とせず、かつ、短時間に施工できる作業の容易さがあることが確認された。

2. 審査証明の前提

(1) 本審査証明は、依頼者からの試験データ等の資料を基に審査し、確認したものである。

(2) 「Post-Head-bar」は、所定の材料を用いて、適正な品質管理のもとで製造されるものとする。

(3) 「Post-Head-bar」は、適正な補強設計によって計画されるものとする。

(4) 「Post-Head-bar」は、適正な機材および施工手順によって設置されるものとする。

(5) 「Post-Head-bar」は、適正な管理のもとで施工されるものとする。

3. 審査証明の範囲

(1) 地震時の変形量が限定される地中構造物など、背面に地盤などがあり片側からしか施工できない制約を有する既設コンクリート構造物に対して、後施工によるせん断補強の目的で用いる。

(2) 環、水門、橋台や橋脚等の既設の半地下および地上構造物に適用する場合には、地中構造物の場合と同様にせん断補強の目的で用いるものとし、曲げ破壊モードにある構造物の変形性能の改善を目的とする補強に用いてはならない。せん断補強により 2 次的に得られる変形性能を考慮する場合には、変形の応答値は変形性能に寄与する補強後のせん断補強鉄筋量の上限を「Post-Head-bar」の矩形プレート側で 0.30%、円形プレート側で 0.15% として求めた部材の骨格曲線の範囲内に限定する。

(3) 杭で支持される橋脚のワーキングのようなせん断スパン比の小さい部材に対して、後施工によるせん断補強の目的で用いる。

4. 審査証明の詳細: 建設技術審査証明報告書

6. 審査証明の有効期限 平成 32 年 12 月 20 日

7. 審査証明の依頼者

大成建設株式会社

所在地: 東京都新宿区西新宿 1-25-1

成和リニューアルワークス株式会社

所在地: 東京都港区六本木 1-6-1

## 解析によるせん断補強効果の確認について

## 1. せん断補強効果の確認

PHbによる補強効果については、建設技術審査証明報告書の各種実験にて検証している。建設技術審査証明報告書では、実験を上回る部材厚については、理論式により求められる有効係数 $\beta_{aw}$ を実験の部材厚で得られた値である0.9を上限として用いることで保守的な設計としている。島根原子力発電所2号炉取水槽の部材厚は、実験で用いた部材と比べて大きいため、実験を上回る部材厚でもPHbの補強効果が期待でき適用性を有することを解析により補足する。また、部材厚以外にもせん断スパン比、主鉄筋比、コンクリート設計基準強度、せん断ひび割れ抑制効果及び荷重載荷方法が島根原子力発電所2号炉取水槽で建設技術証明報告書に記載の各種実験と異なっている。したがって、これらの項目についても実構造物諸元相当の解析により、PHb工法のせん断補強効果に影響を及ぼすと考えられる項目が建設技術審査証明報告書における実験条件と異なっても、建設技術審査証明報告書で確認したとおりのせん断補強効果を期待できることを解析により補足する。

## 1.1 検討方針

PHbを考慮した材料非線形解析により力学的挙動を確認し、島根原子力発電所2号炉取水槽のPHbの適用性をステップ①～③により確認する（第1-1図）。

なお、比較のために、従来工法である先施工のせん断補強筋を想定した材料非線形解析も以下の各ケースで実施することとする。

## ① PHbの解析モデル上の考慮方法について検証

材料非線形解析を実施するに当たり、PHbの解析モデルへの考慮方法の妥当性を確認する必要がある。そこで、建設技術審査証明報告書におけるせん断耐力実験を対象に解析モデルを作成し、実験結果と解析結果においてせん断耐力を比較することにより、解析モデルの妥当性を検証する。

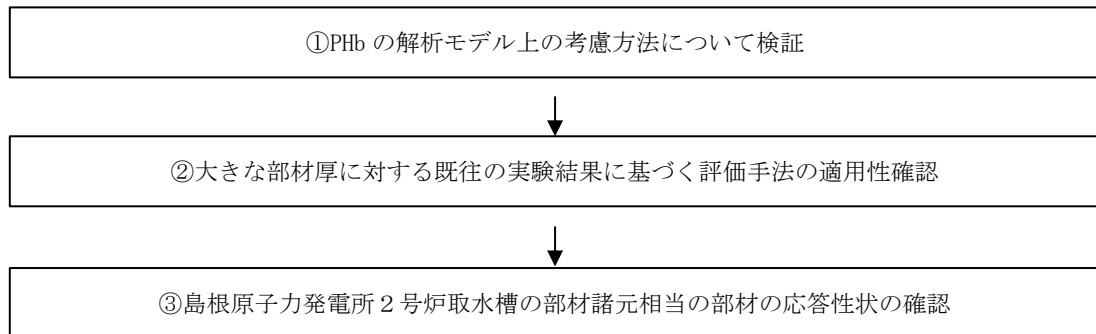
なお、先施工せん断補強鉄筋はフックを有し鉄筋に定着をとっているが、フックを有しないせん断補強鉄筋であるPHbはコンクリートに定着をとっていることから、その違いをモデル上で考慮する必要がある。そのため「コンクリート工学年次論文集 Vol. 26, No. 2, 2004 せん断補強筋の定着不良がRCはりのせん断耐力に及ぼす影響」を参考に、供試体をモデル化する際に要素内鉄筋比を0とする区間を設けることとし、実験への再現性が高い区間設定を基に②以降の検討を実施する。

②大きな部材厚に対する既往の実験結果に基づく評価手法の適用性の確認

建設技術審査証明報告書の各種実験では、部材厚の大きい供試体で実験を行っていないため、有効係数 $\beta_{aw}$ の上限値を0.9としている。そこで、部材厚が大きい対象に対しても適用可能であることを示すため、島根原子力発電所2号炉取水槽を想定した大きな部材厚を参考に、せん断スパン比がステップ①と同等となる部材寸法に対して材料非線形解析を実施する。なお、解析モデルのせん断スパン比は①と同様（相似形）とする。材料非線形解析により既往の実験結果の再現解析と比較して傾向を把握し、大きな部材厚に対してもPHbを適用できることを確認する。

③ 島根原子力発電所2号炉取水槽の部材諸元相当の部材の応答性状の確認

①、②を確認のうえ、島根原子力発電所2号炉取水槽の部材諸元相当の部材の解析モデルについて材料非線形解析（解析的実験）を実施し、PHbの適用性を確認する。適用性を確認する際には、部材の応答性状により島根原子力発電所2号炉取水槽の部材諸元相当でも変形量、ひび割れ及び設計荷重に関して特異な応答が生じていないことを確認する。



第 1-1 図 島根原子力発電所2号炉取水槽スクリーン室のPHbの適用性確認フロー



## 2. ①の解析内容

材料非線形解析にて用いる RC の構成則については種々あるが、ここでは、現在までに実務でも使用され、適用性と信頼性が確認されている「コンクリート標準示方書 設計編(土木学会 2012)」において標準とされている以下の手法とする。

- ・鉄筋とコンクリートとの一体性を前提とする分散ひび割れモデルにてモデル化する。
- ・鉄筋との複合作用が支配的な鉄筋周辺のコンクリートについては、平均化構成則を用いる。
- ・鉄筋との複合作用が及ばない領域では、コンクリートの破壊力学の概念を導入する。

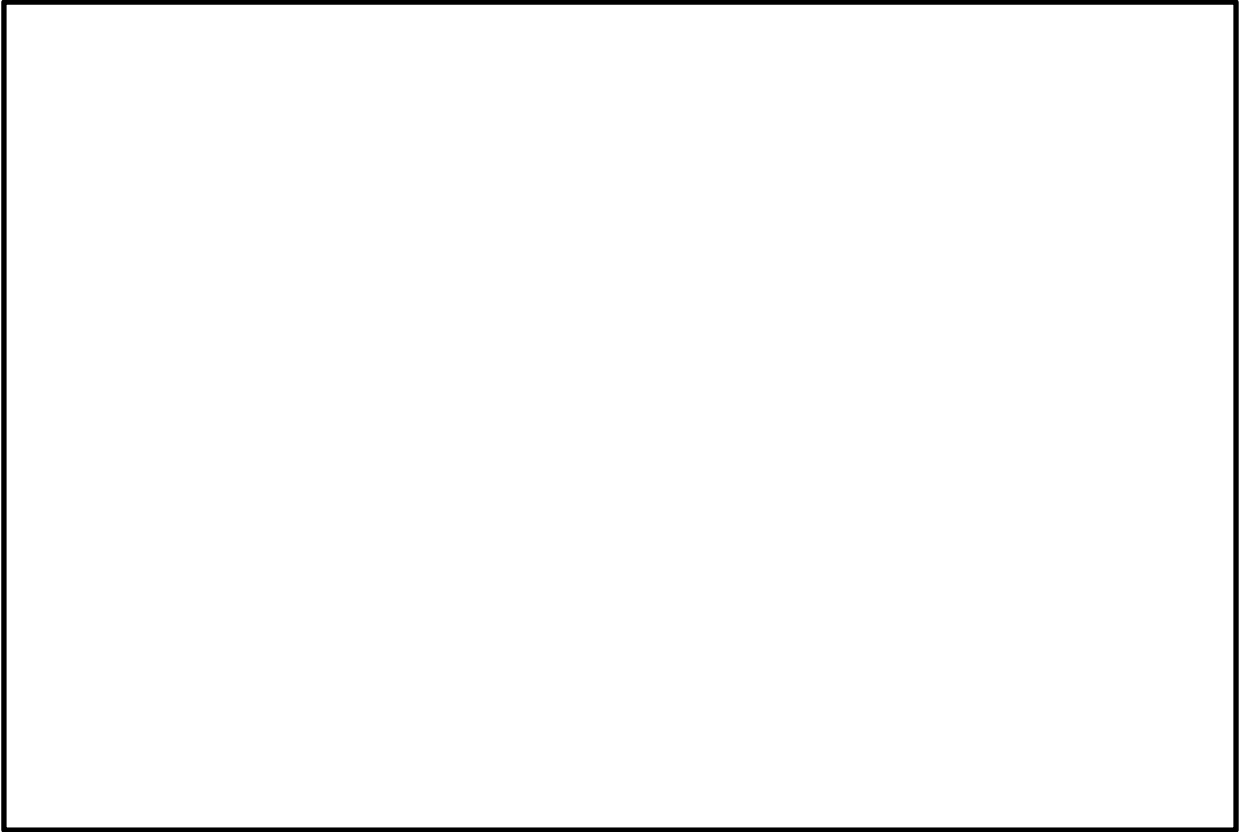
材料非線形解析について用いる解析コードは、上記の RC の構成則を有する解析コードの 1 つとして「UC-win/WCOMD ver2.01」とする。

まず、PHb の考慮の仕方を検討するための予備解析を実施した後、その考慮方法を用いて CASE5 の再現解析を実施する。

### 2.1 モデル化について

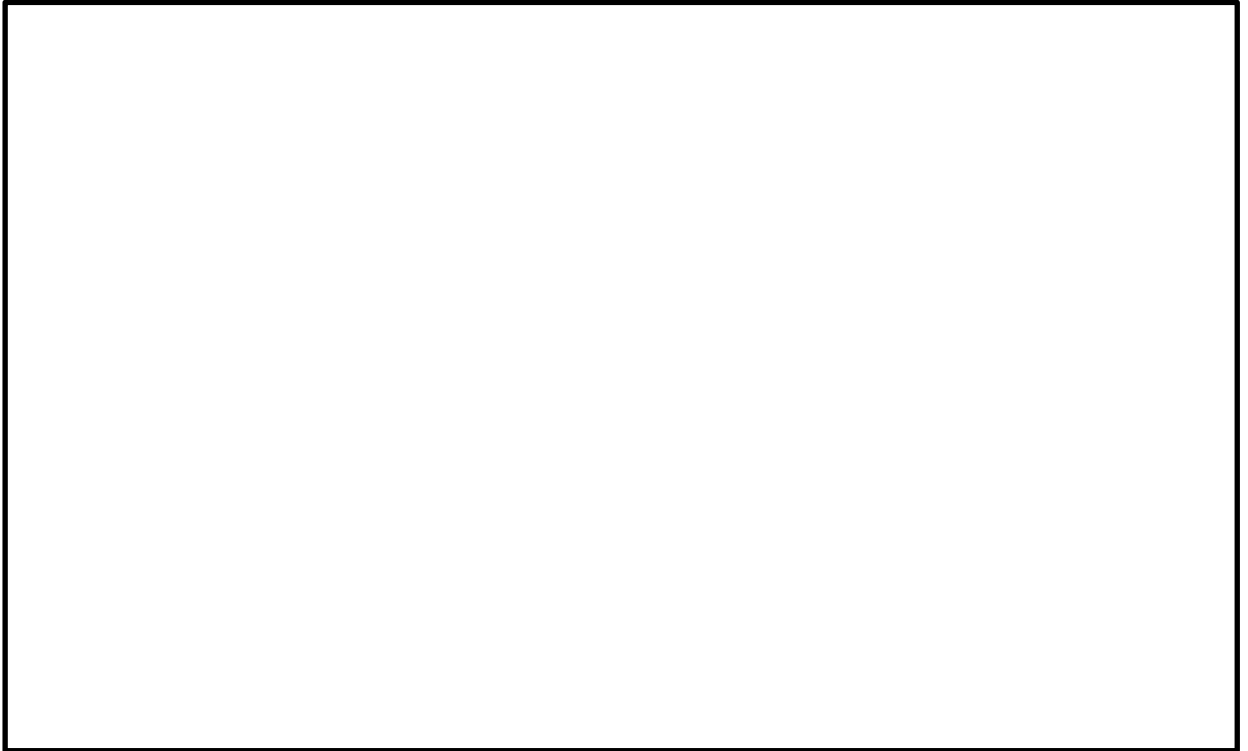
材料非線形解析では、建設技術審査証明報告書の実験で用いた試験体 (CASE 5) をモデル化する。第 2-1 図にモデル化の対象とする試験体 (CASE 5) を、第 2-2 図にせん断耐力の向上性能確認試験の加力要領を示す。なお、CASE 5 は PHb 先端位置が主鉄筋手前であり、施工時の条件と一致している。また、第 2-1 表に示すとおり、CASE 5 は破壊形態がせん断破壊先行であり、適切にせん断耐力を評価できること、かつ①の再現解析においては実験値と理論値が整合的である必要があるため、その条件を満たす CASE 5 を選定した。

構造部材をモデル化する際は、平面応力要素にてモデル化する。構造部材のモデル化に当たっては、第 2-3 図に示すとおり鉄筋の付着が有効な領域を鉄筋コンクリート要素としてモデル化し、付着の影響が及ばない領域を無筋領域としてモデル化する。主筋領域については付着領域を考慮して芯かぶりの厚さを基準として設定する。



第 2-1 図 せん断耐力向上性能試験体の種類と補強方法（抜粋）  
（建設技術審査証明報告書より抜粋）

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

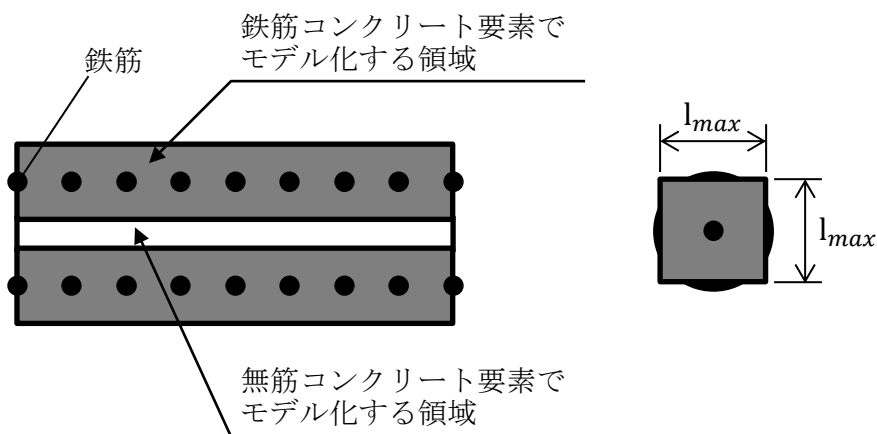


第 2-2 図 せん断耐力の向上性能確認試験の加力要領（抜粋）  
（建設技術審査証明報告書より抜粋）

第 2-1 表 各実験ケースの破壊形態

	シリーズ 1			シリーズ 2			シリーズ 3					シリーズ 4
	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5	CASE6	CASE3-1	CASE3-2	CASE3-3	CASE3-4	CASE3-5	CASE4-1
破壊形態	せん断破壊先行	せん断破壊先行	曲げ変形卓越	せん断破壊先行	せん断破壊先行	曲げ変形卓越	せん断破壊先行	せん断破壊先行	せん断破壊先行	せん断破壊先行	せん断破壊先行	せん断破壊先行

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。



$$l_{max} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} D_b \sqrt{f_y / f_t}$$

ここで、 $l_{max}$  : 鉄筋一本あたりの付着有効面積を正方形で考えた場合の一辺の長さ

$D_b$  : 鉄筋の直径

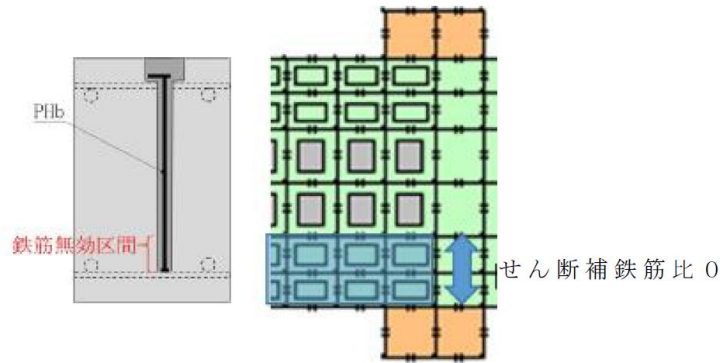
$f_y$  : 鉄筋の降伏強度

$f_t$  : コンクリートの引張強度

### 第 2-3 図 鉄筋付着有効領域と無筋領域の分割の概要

PHb を適切にモデル化するため、「コンクリート工学年次論文集 Vo1. 26, No. 2, 2004 せん断補強筋の定着不良が RC はりのせん断耐力に及ぼす影響」を参考に、PHb 先端の領域では、付着が十分ではない可能性があるため、せん断補強筋が機能しないものとして PHb のモデル化を検討する。具体的には、該当する部分のせん断補強鉄筋比を 0 としてモデル化を実施する。モデル化のイメージを第 2-4 図に示す。以上の考え方をベースに PHb のモデル化を実施する際は以下のケースを実施して PHb のモデル化手法を検討する。

- PHb 1 : 主鉄筋領域 (芯かぶりの 2 倍分) に相当する厚さ (PHb 先端から 4. 4D) のせん断補強鉄筋比を 0 とするケース
- PHb 2 : 上記のモデルをベースに PHb の必要定着長である 5D 分の厚さのせん断補強鉄筋比を 0 とするケース



第 2-4 図 PHb のモデル化イメージ

上記の予備解析の結果，実験値のせん断耐力の再現性が高い条件を用いて，以下のケースを実施する。

- ・ケース①-A：先施工によるせん断補強鉄筋を想定してモデル化するケース
- ・ケース①-B：PHb を考慮して，鉄筋無効区間を設定するケース  
(単調載荷) (PHb 1 のケースと同じ)
- ・ケース①-C：PHb を考慮して，鉄筋無効区間を設定するケース  
(交番載荷)

なお，解析の入力データとなるコンクリートの材料特性及び鉄筋の材料特性を第 2-2 表及び第 2-3 表に示す。

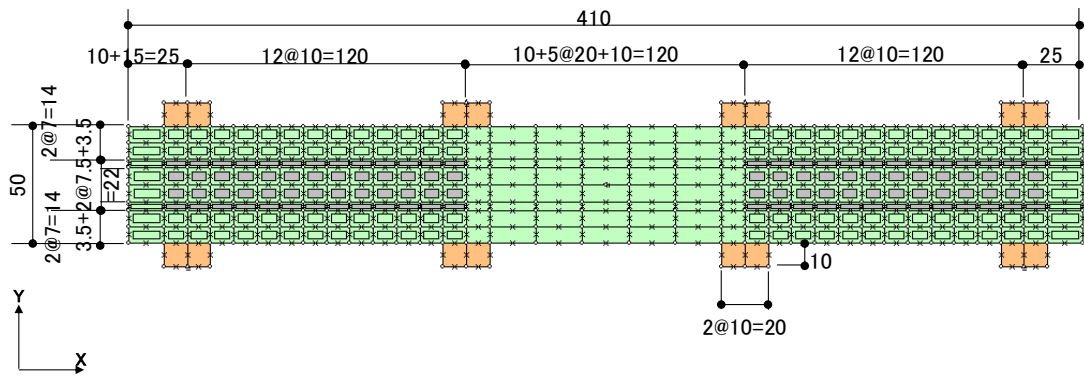
以上，条件により設定した解析モデル図を第 2-5 図に示す。

第 2-2 表 コンクリートの材料特性

項目	設定値
圧縮強度 $f'_c$	32N/mm <sup>2</sup>
引張強度 $f_t$	2.32N/mm <sup>2</sup> (小数 2 位に四捨五入) ( $=0.23 \times 32.0^{2/3} = 2.3182$ )
ヤング係数 $E_c$	WC OMD で自動計算

第 2-3 表 鉄筋の材料特性

項目	設定値
主鉄筋及びせん断補強鉄筋のヤング係数	200kN/mm <sup>2</sup>
主鉄筋の降伏強度	999N/mm <sup>2</sup>
PHb 鉄筋の降伏強度	384N/mm <sup>2</sup>
その他鉄筋 (D16, D19) の降伏強度	345N/mm <sup>2</sup>



(単位：cm)

第 2-5 図 解析モデル図

## 2.2 荷重条件

材料非線形解析にて考慮する荷重は、建設技術審査証明報告書の実験における荷重条件を模して、変位を作用位置に強制的に与える。また鉄筋コンクリートの非線形特性を考慮するため、十分小さい値を漸次荷重する。耐力の評価を主目的とするため、単調荷重とするが、実験条件である交番荷重の影響についても確認することとする。

## 2.3 破壊判定基準

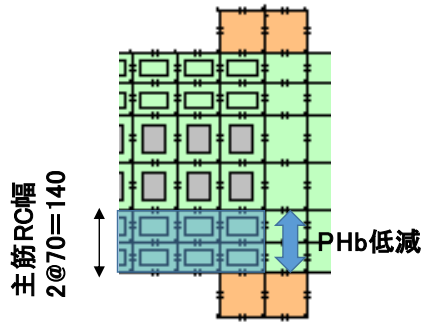
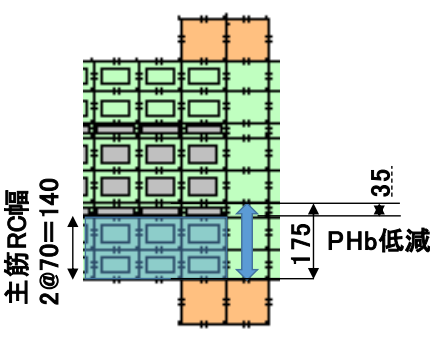
材料非線形解析における構造部材の破壊判定基準は、既往の研究事例に基づき圧縮ひずみ 1%，せん断ひずみ 2%，引張ひずみ 3%とする。(以下「1, 2, 3%破壊基準」という。)

## 2.4 PHb のモデル化の検討

PHb のモデル化検討の結果を第 2-4 表に示す。表に示すとおり、実験で得られたせん断耐力 486kN に対し、PHb 1 のケースでのせん断耐力は 477kN(実験値の 98%)、PHb 2 のケースでのせん断耐力は 341kN(実験値の 70%)であった。

評価の結果、PHb 1 のケースが実験値のせん断耐力を再現できており、PHb 2 のケースでは、実験値のせん断耐力を再現できない結果となった。材料非線形解析のモデル化では、鉄筋の付着領域を考慮してモデル化を実施するため、PHb の鉄筋径の倍数に合わせて小さい無筋要素を挿入することが有意に働かない結果となった。したがって、PHb を材料非線形解析でモデル化する際は、主筋領域(芯かぶりの 2 倍分)相当を目安として鉄筋無効区間としてモデル化することとする。なお、従来の先施工によるせん断補強鉄筋を考慮した場合の材料非線形解析も併せて実施することにより PHb の有効性を確認することとする。

第 2-4 表 PHb の定着区間のモデル化

<p>PHb 1</p>		<p>主筋領域 2 要素分 (PHb 先端から 4.4D 分) の鋼材比を 0</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実験値 (CASE 5) : 486kN</li> <li>・ 1, 2, 3 %破壊基準 : 477kN (実験値の 98%)</li> </ul>
<p>PHb 2</p>		<p>PHb 先端から必要定着長である 5D 分の要素の鋼材比を 0 とするために無筋要素を挿入</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実験値 (CASE 5) : 486kN</li> <li>・ 1, 2, 3 %破壊基準 : 341kN (実験値の 70%)</li> </ul>

## 2.5 解析結果と実験結果の比較

材料非線形解析で得られる結果と建設技術審査証明報告書における実験値を比較しておおむね整合的であることを確認する。

ケース①-A～①-Cの解析結果について第 2-6 図～第 2-8 図に、実験結果について第 2-9 図に示す。破壊基準に至るまでの最大荷重をせん断耐力とする。

実験値 (CASE 5 : 486kN) に対して、ケース①-Aは PHb の定着不良領域を設定していないため実験値に対して上回ったと考えられ、ケース①-B及びケース①-Cではせん断耐力はおおむね実験を再現できている。また、ひび割れ状況については①-Aが部材全体にひび割れが分散しているのに対し、①-Bにおいては、若干ひび割れの分散性が低下しており、スパン中央側に寄った部位に発生している。これは、参考にした論文である「コンクリート工学年次論文集 Vol. 26, No. 2, 2004 せん断補強筋の定着不良が RC はりのせん断耐力に及ぼす影響」においても同様の傾向が確認できており、PHb の定着不良分を適切にモデル化できていると考えられ、応力の伝達状況も再現できていると考えられる。一方、荷重-変位図については、解析結果は実験よりも早い段階でピークに達しており、荷重については再現性が認められるものの、変位については十分には再現できなかった。

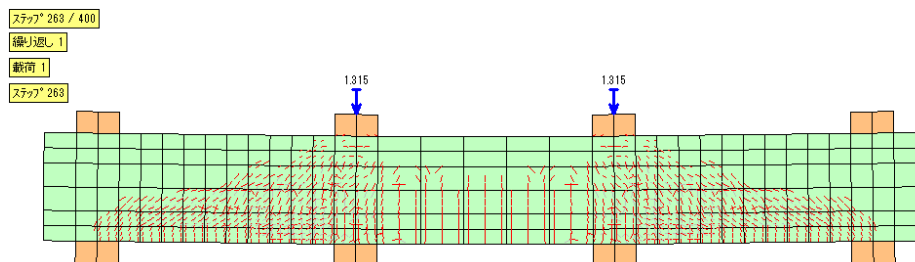
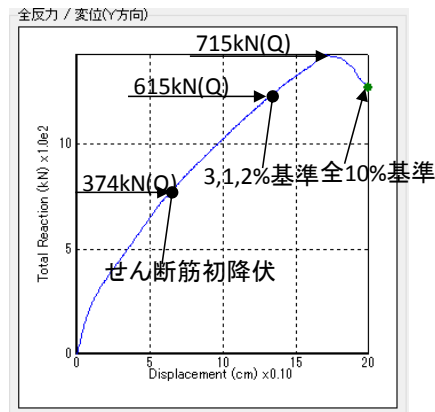
実験では正負交番荷重が行われており、再現解析においては載荷条件が模擬できることが望ましい。しかし、第 2-8 図で示すように荷重-変位曲線の再現が十分ではない現段階においては、正負交番を模した解析を実施することは必ずしも有意とは限らない。単調荷重でも荷重の再現性は確認されており、せん断耐力やひび割れの発生 (応力の伝達) 状況は良好に再現されている。なお、ケース①-

Cにおいては、破壊基準に達した時点で解析は終了しており、その後の繰返し載荷に対して剛性が低下して荷重－変位曲線の傾きが小さくなる現象までは確認できていない。

・ケース①－A

1, 2, 3 %破壊基準までの最大荷重：615kN

実験値（CASE 5）：486kN



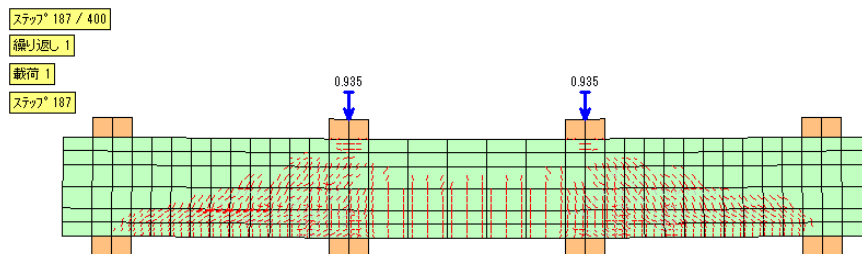
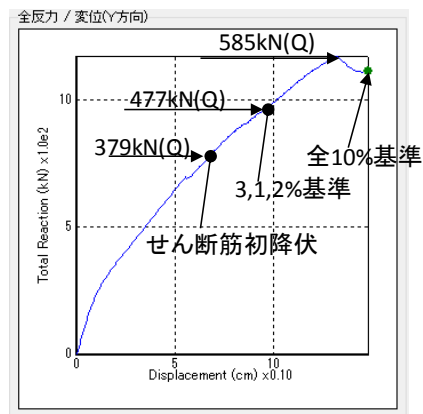
第 2-6 図 ケース①－A の荷重－変位関係とひび割れ状況



・ ケース①-B

1, 2, 3 %破壊基準までの最大荷重 : 477kN (実験値の 98%)

実験値 (CASE 5) : 486kN

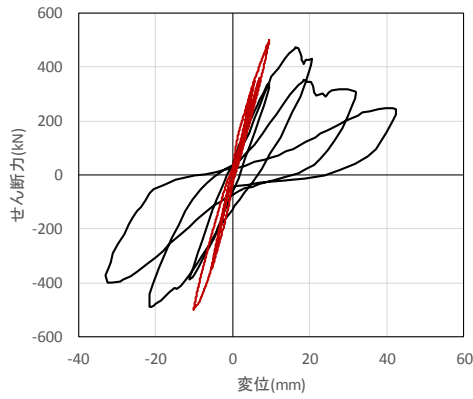
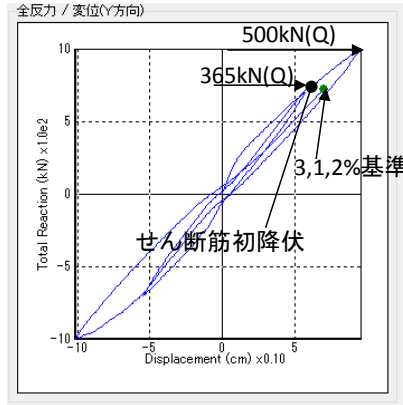


第 2-7 図 ケース①-B の荷重-変位関係とひび割れ状況

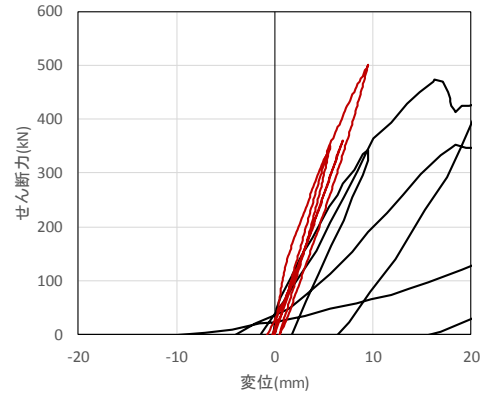
・ケース①-C

1, 2, 3 %破壊基準までの最大荷重：500kN（実験値の 103%）

実験値（CASE 5）：486kN

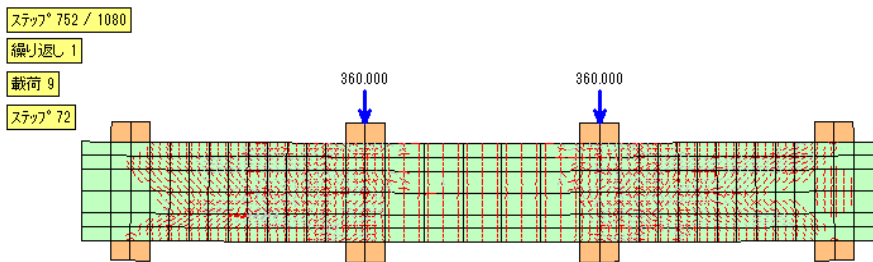


荷重変位図



荷重変位図（拡大図）

（赤：材料非線形解析 黒：実験値）



第 2-8 図 ケース①-C の荷重-変位関係とひび割れ状況

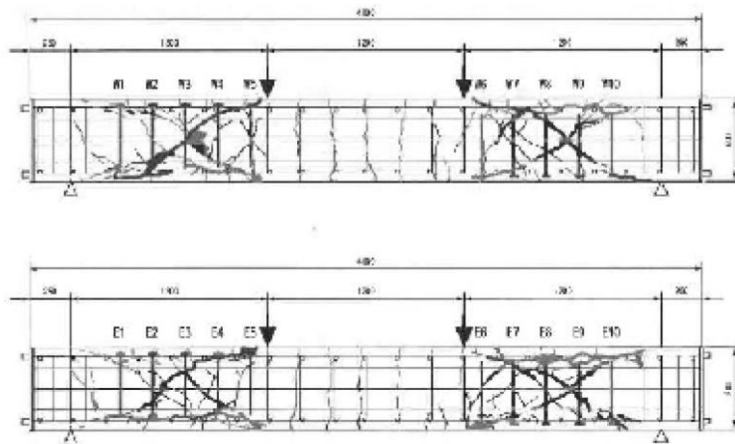
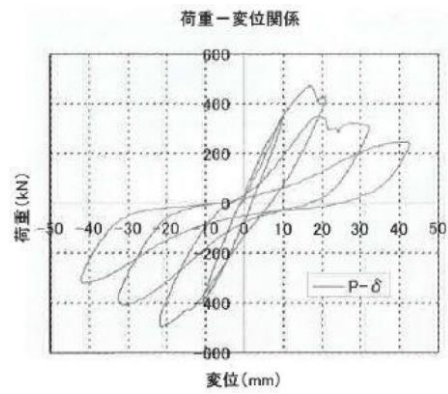


図-3.2 Post-Head-bar (2列) を後施工したばかり試験体 (先端: 主鉄筋手前) の破壊状況 (CASE5)

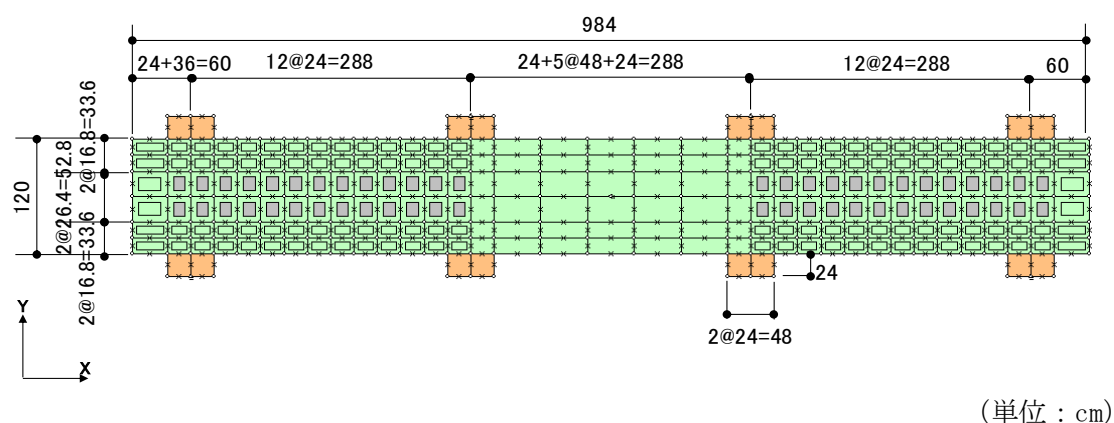
第 2-9 図 構造実験 (CASE 5) の荷重-変位関係とひび割れ状況

### 3. ②の解析内容

#### 3.1 モデル化について

部材厚は島根原子力発電所2号炉取水槽の部材を参考に設定し、せん断スパン比 ( $a/d$ ) が①と同等となるような部材寸法 (①の躯体の相似形) とする。配筋については、主鉄筋、せん断補強筋共に鉄筋比が一定となるように設定する。「2.1 モデル化について」に準じて設定する。なお、PHbの鉄筋無効区間は①で確認された主筋領域 (芯かぶりの2倍) を目安とする。また、材料物性については、構造実験と同一とする。

解析モデル図を第3-1図に示す。



第3-1図 解析モデル図

#### 3.2 荷重条件

「2.2 荷重条件」に準じて設定する。

#### 3.3 破壊判定基準

「2.3 破壊判定基準」に準じて設定する。

### 3.4 解析結果

在来工法によるせん断補強を想定したケースをケース②-Aとし、PHb 工法によるせん断補強を想定したケースをケース②-Bとする。参考に交番載荷としたケースを②-Cとする。実施するケースを第 3-1 表に示す。それぞれの結果を第 3-2～4 図に示す。ケース②-Aのせん断耐力は 1,335kN、ケース②-Bのせん断耐力は 1,235kN であり、在来工法と PHb 工法のせん断耐力の比率は約 93%となった。ここで、ケース①-Aとケース①-Bから得られるせん断耐力の比率は約 78%であった。これは、建設技術審査証明報告書における  $\beta_{aw}$  の算出する際の理論と同様の傾向であり、部材厚が大きい部材程、PHb によるせん断補強効果が大きくなることが確認できた。ひび割れ状況についても全体的にひび割れが分散しており、在来工法と顕著な差は見られなかった。ステップ①では PHb によるひび割れの分散性が低下したが、ステップ②においては、部材厚が大きくなることで PHb 端部定着の影響が小さくなったと考えられる。PHb によるせん断ひび割れ抑制効果についても在来工法と PHb 間で顕著な差は見られなかった。

また、ケース②-Cの交番載荷のケースにおけるせん断耐力は 1,200kN であり、在来工法と PHb 工法の比率は約 90%となった。ひび割れ状況についても、部材全体にひび割れが分散しており、特異な応答は確認されなかった。

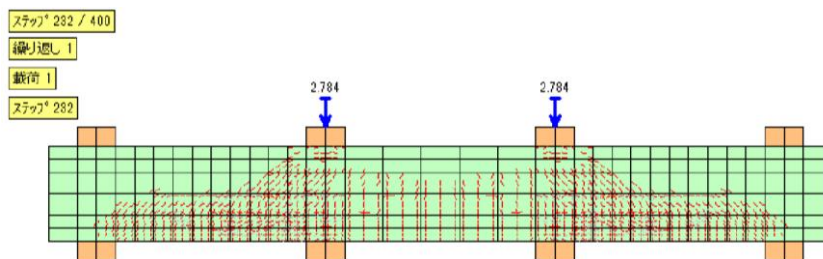
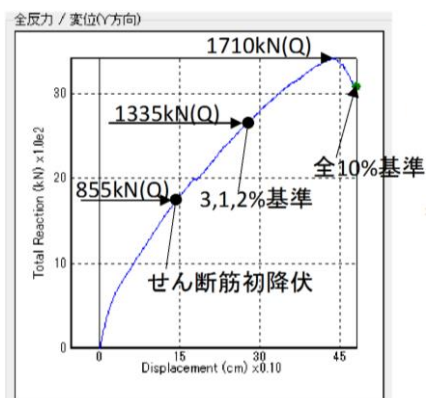
ステップ①、②の評価結果一覧を第 3-2 表に示す。また、ステップ②の解析結果を第 3-5～7 図に示す。

第 3-1 表 ケース一覧

ケース	荷重載荷方法
②-A	単調載荷
②-B	単調載荷
②-C	交番載荷

・ケース②-A

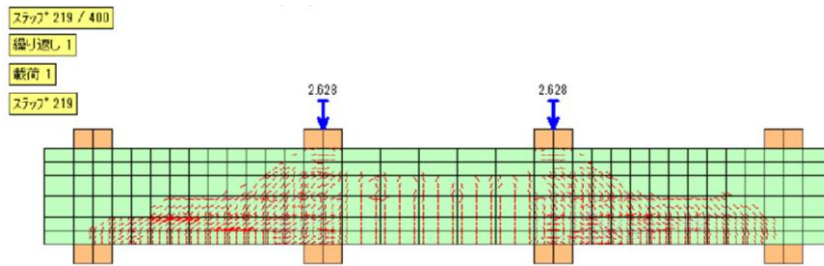
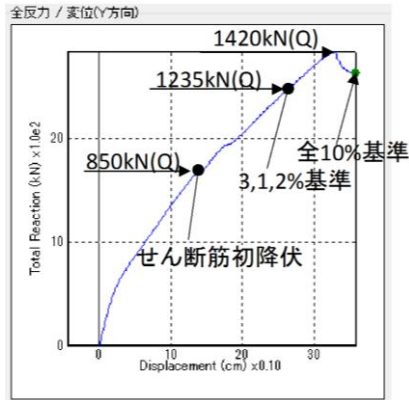
破壊基準時の最大荷重：1,335kN



第 3-2 図 ケース②-A の荷重-変位関係とひび割れ状況

・ ケース②-B

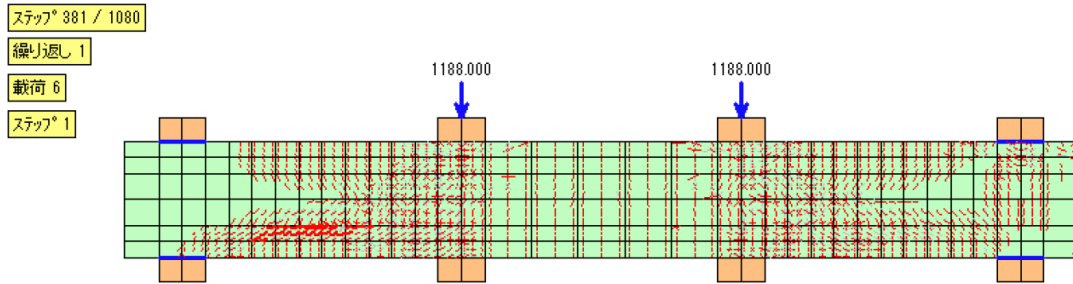
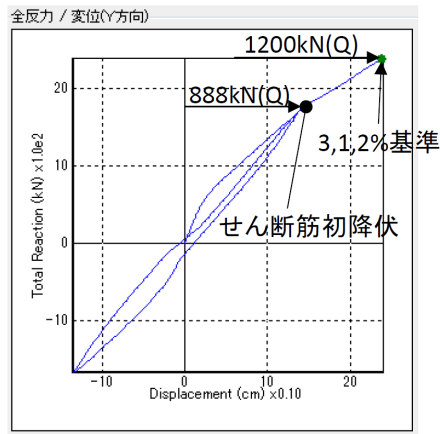
破壊基準時の最大荷重：1,235kN



第 3-3 図 ケース②-B の荷重-変位関係とひび割れ状況

・ケース②-C

破壊基準時の最大荷重：1,200kN

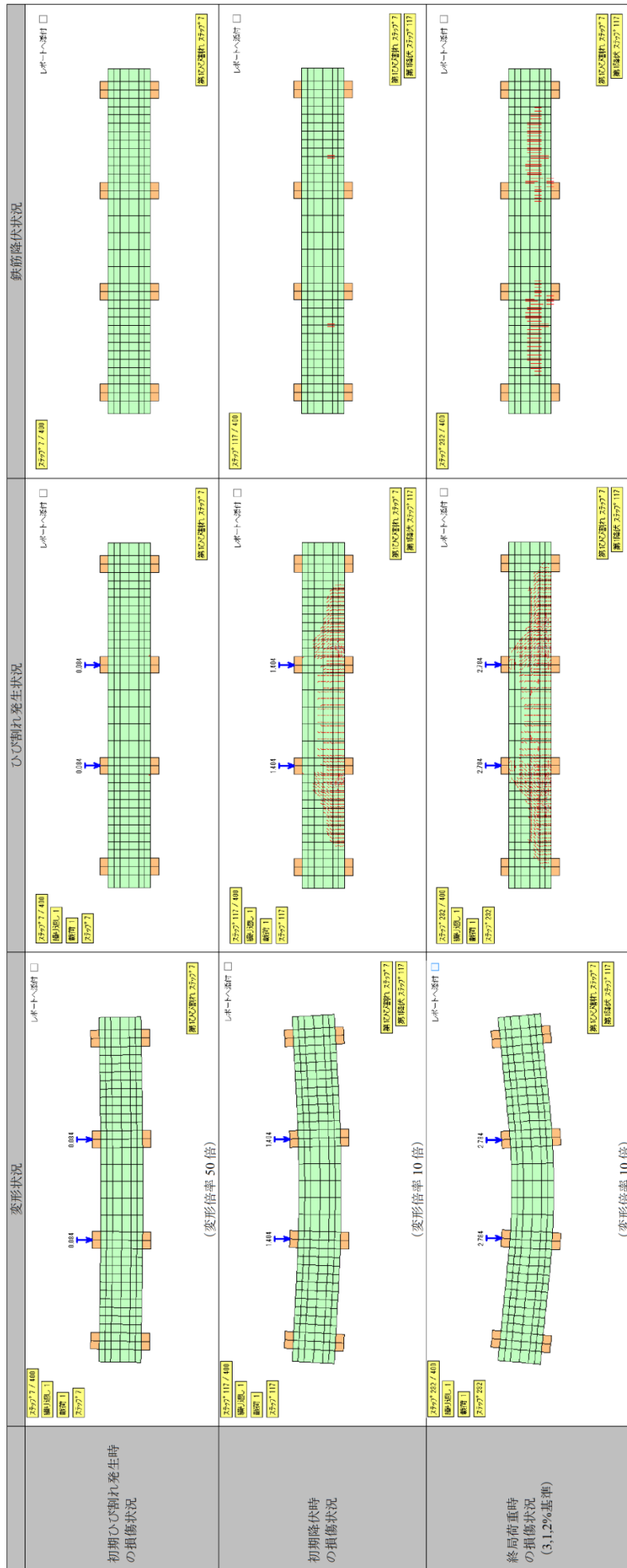


第 3-4 図 ケース②-C の荷重-変位関係とひび割れ状況

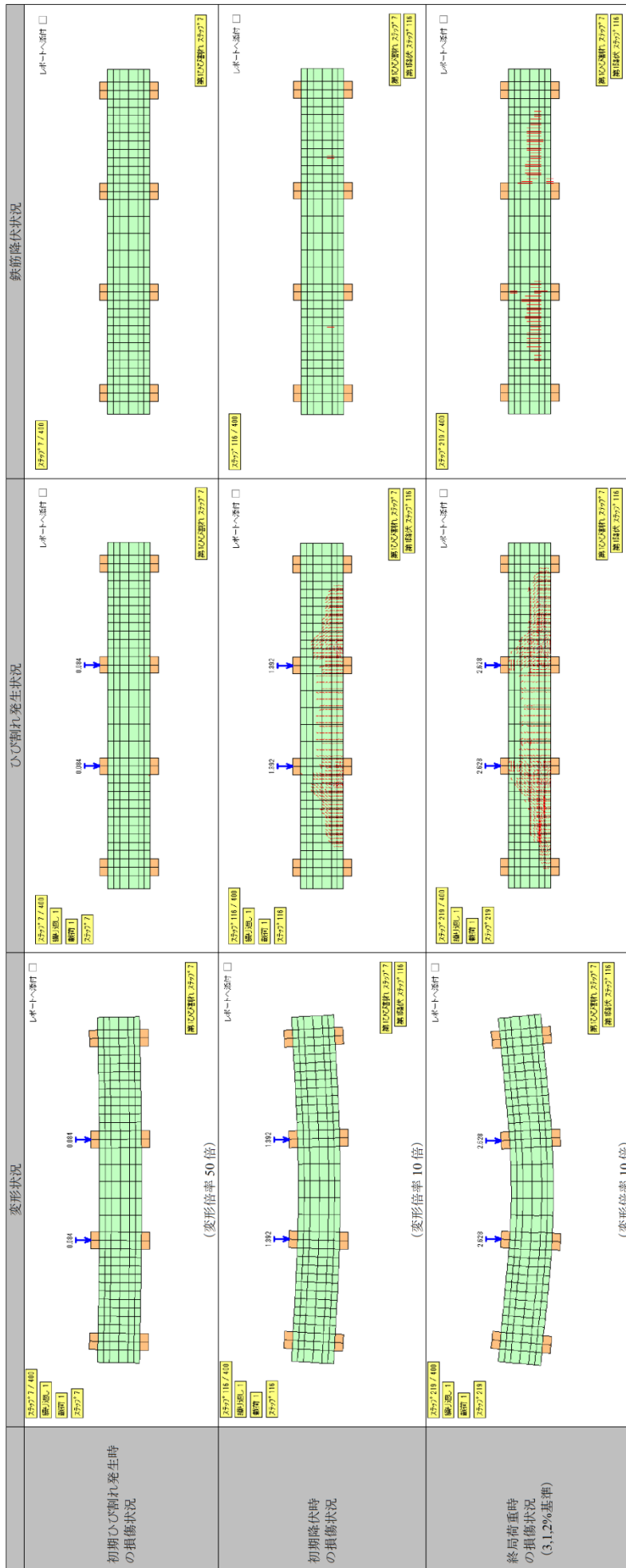
第 3-2 表 評価結果一覧

ケース	せん断耐力 (kN)	在来工法と PHb 工法の比率
①-A (在来工法)	615	—
①-B	477	0.78
①-C	500	0.81
②-A (在来工法)	1,335	—
②-B	1,235	0.93
②-C	1,200	0.90

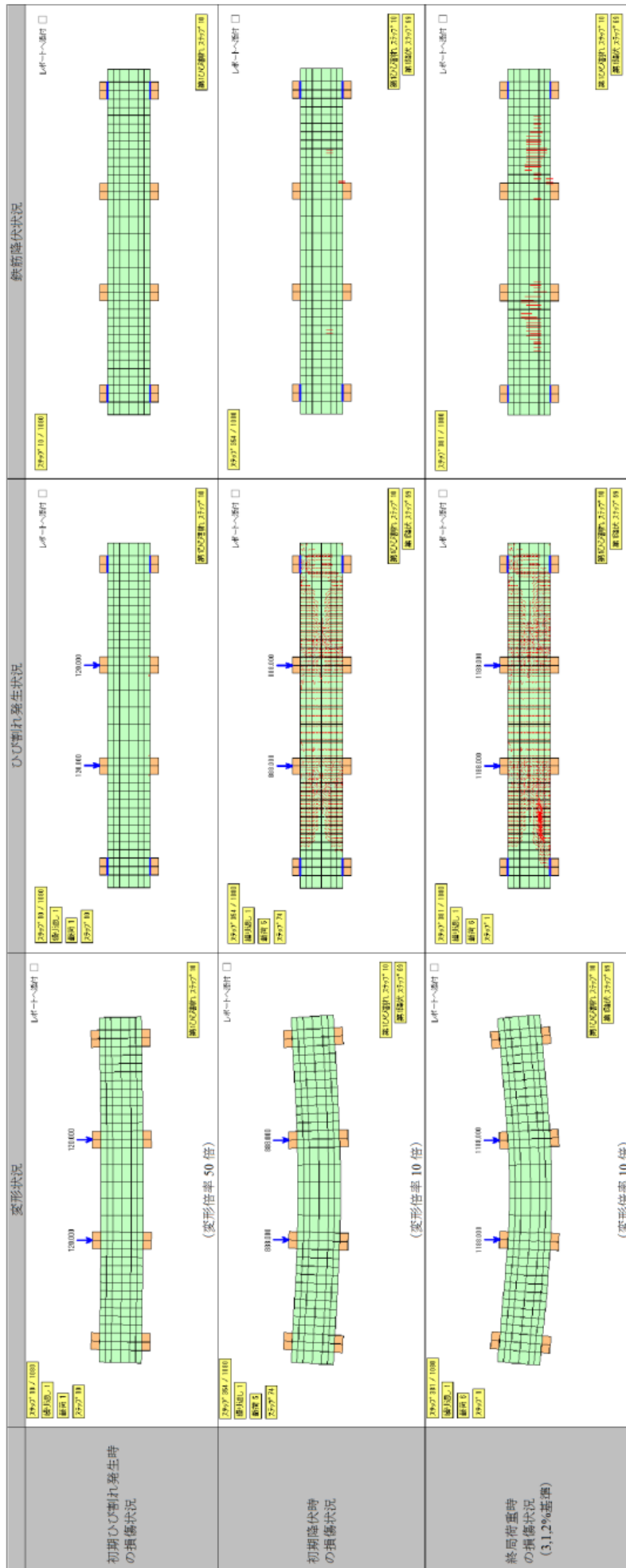




第 3-5 図 ケース②-A の解析結果



第 3-6 図 ケース②-B の解析結果



第 3-7 図 ケース②-C の解析結果

#### 4. ③の解析内容

##### 4.1 モデル化について

「2.1 モデル化について」に準じて設定する。なお、部材諸元は島根原子力発電所2号炉取水槽の隔壁とする。対象とする部位はせん断照査結果が最も厳しくなった隔壁③を対象とする。対象とする部材を第4-1図に示す。この部位に設置するPHbの径はD22である。



第4-1図 評価対象部材

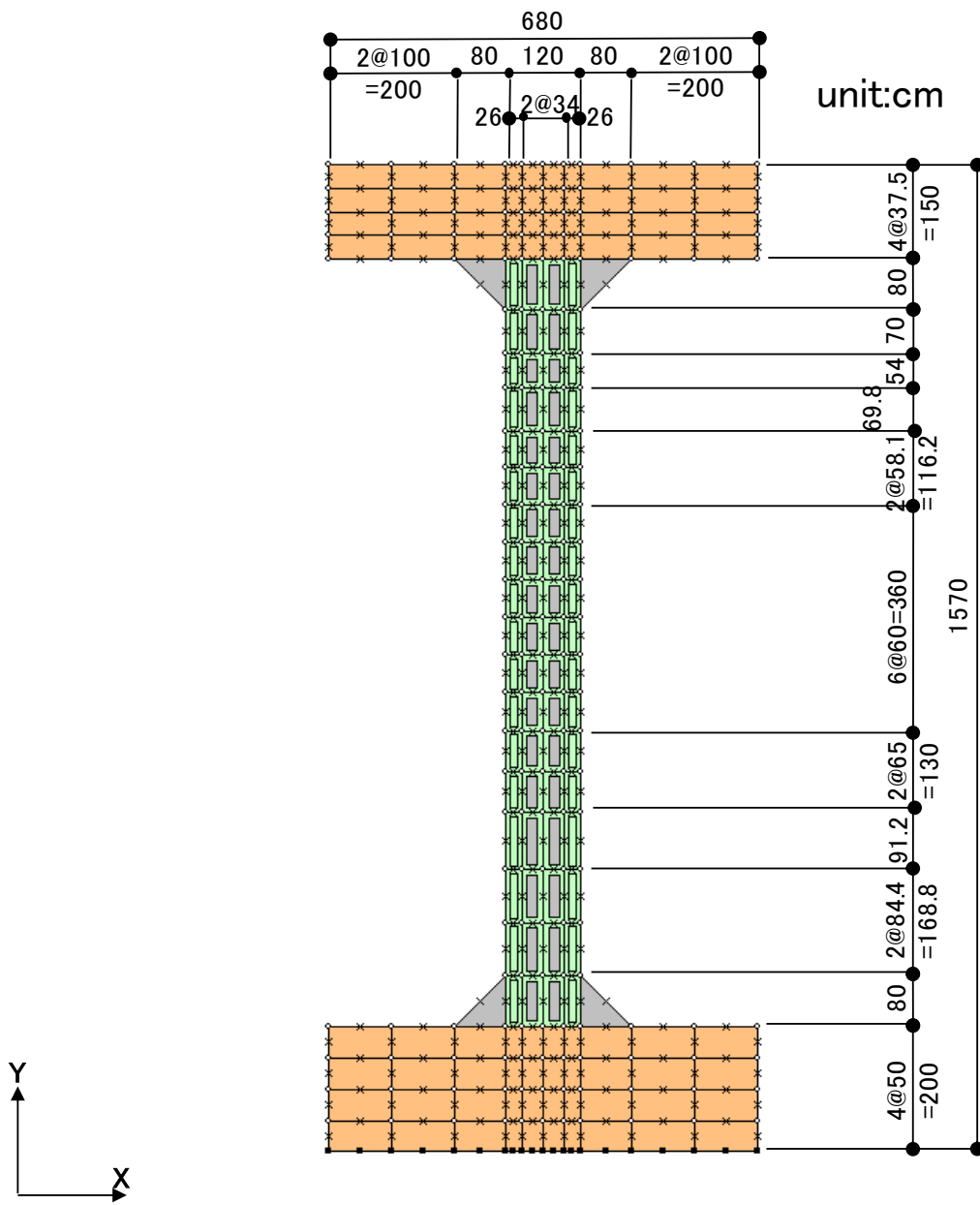
解析モデルについては、主鉄筋位置やPHbの鉄筋無効区間のモデル化を考慮して要素分割を検討する。なお、奥行き方向の厚さは100cmとする。

部材厚さ方向の分割は4分割とする。両外側2要素は、軸方向主筋が配置されることから、芯かぶり130mmの2倍の要素幅260mmとし、RC要素として設定する。

なお、要素の縦横比は1:5以下を目安に分割し、ハンチ部（上下部とも800mm×800mm）は1要素とする。

解析モデル図を第4-2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 4-2 図 解析モデル図

解析の入力データとなるコンクリートの材料特性及び鉄筋の材料特性を第 4-1 表及び第 4-2 表に示す。

ステップ②における解析モデルとステップ③における解析モデルによる違いを第 4-3 表に示す。表に示すとおり，せん断スパン比，主鉄筋比，コンクリート設計基準強度及び荷重の載荷方法についても解析により応答性状及びせん断補強効果にどの程度影響するか確認する。

第 4-1 表 コンクリートの材料特性

項目	設定値
圧縮強度 f' c	23.5N/mm <sup>2</sup>
引張強度 ft	1.91N/mm <sup>2</sup> (小数 2 位に四捨五入) (=0.23×24.0 <sup>2/3</sup> =1.91367)
ヤング係数 Ec	WC OMD で自動計算

第 4-2 表 鉄筋の材料特性

項目	設定値
主鉄筋及びせん断補強鉄筋のヤング係数	200kN/mm <sup>2</sup>
主鉄筋の降伏強度	999N/mm <sup>2</sup>
PHb 鉄筋の降伏強度	345N/mm <sup>2</sup>

第 4-3 表 解析モデルの違い

項目	ステップ②	ステップ③
部材厚	1,200mm	1,200mm
せん断スパン比	2.79	11.40
主鉄筋比	1.48	0.85
コンクリート設計基準強度	32.0N/mm <sup>2</sup>	23.5N/mm <sup>2</sup>
載荷方法	強制変位	断面力に基づく節点力

#### 4.2 荷重条件

考慮する荷重は、地震応答解析（部材非線形解析）から得られる断面力を考慮する。具体的には、地震応答解析（部材非線形解析）における断面力（曲げモーメント、軸力、せん断力）から得られる節点力を材料非線形解析モデルに作用させる。

材料非線形解析では、鉄筋コンクリートの非線形特性を考慮するため、当該節点力をそれぞれ 1/100 したものを漸次載荷する。

荷重ケースについては、隔壁の照査値が最も厳しくなる S s - N 1 を対象とする。

取水槽の照査結果一覧を第 4-4 表に示す。

第 4-4 表 取水槽の照査結果一覧

基準地震動	隔壁の照査値*
S s - D	0.37
S s - N 1	0.51
S s - N 2 (NS)	0.28
S s - N 2 (EW)	0.28
S s - F 1	0.26
S s - F 2	0.27

※照査値＝照査用せん断力／せん断耐力

ここで、照査用せん断力＝発生せん断力×構造解析係数

### 4.3 破壊判定基準

「2.3 破壊判定基準」に準じて設定する。

### 4.4 解析結果

検討ケースを第 4-5 表に示す。S<sub>s</sub>-N1 の地震時における在来工法によるせん断補強を想定したケースをケース③-A とし、PHb 工法によるせん断補強を想定したケースをケース③-B とする。ケース一覧を第 4-5 表に、せん断耐力の結果を第 4-6 表に示す。ケース③-A のせん断耐力は 1,610kN、ケース③-B のせん断耐力は 1,549kN であり、在来工法と PHb 工法の比率は約 96% となった。それぞれの結果を第 4-7 表～第 4-8 表に示す。表に示すとおり、初期ひび割れ発生時、作用荷重時のそれぞれの段階において、変形状況は在来工法と PHb 工法で顕著な差は見られず、おおむね整合的な結果となった。ひび割れ状況や鉄筋の降伏位置においても在来工法と顕著な差は見られず、ステップ①、②と同様の傾向となった。

したがって、島根原子力発電所 2 号炉の構造物に作用する荷重の範囲においては、在来工法と PHb 工法の間で PHb によるせん断補強効果に影響を与えるような特異な応答等は確認されなかった。参考に作用荷重を超える範囲における初期降伏時、終局荷重時における変形状況、ひび割れ状況、鉄筋降伏の状況についても第 4-7 表～第 4-8 表に示す。

第 4-5 表 ケース一覧

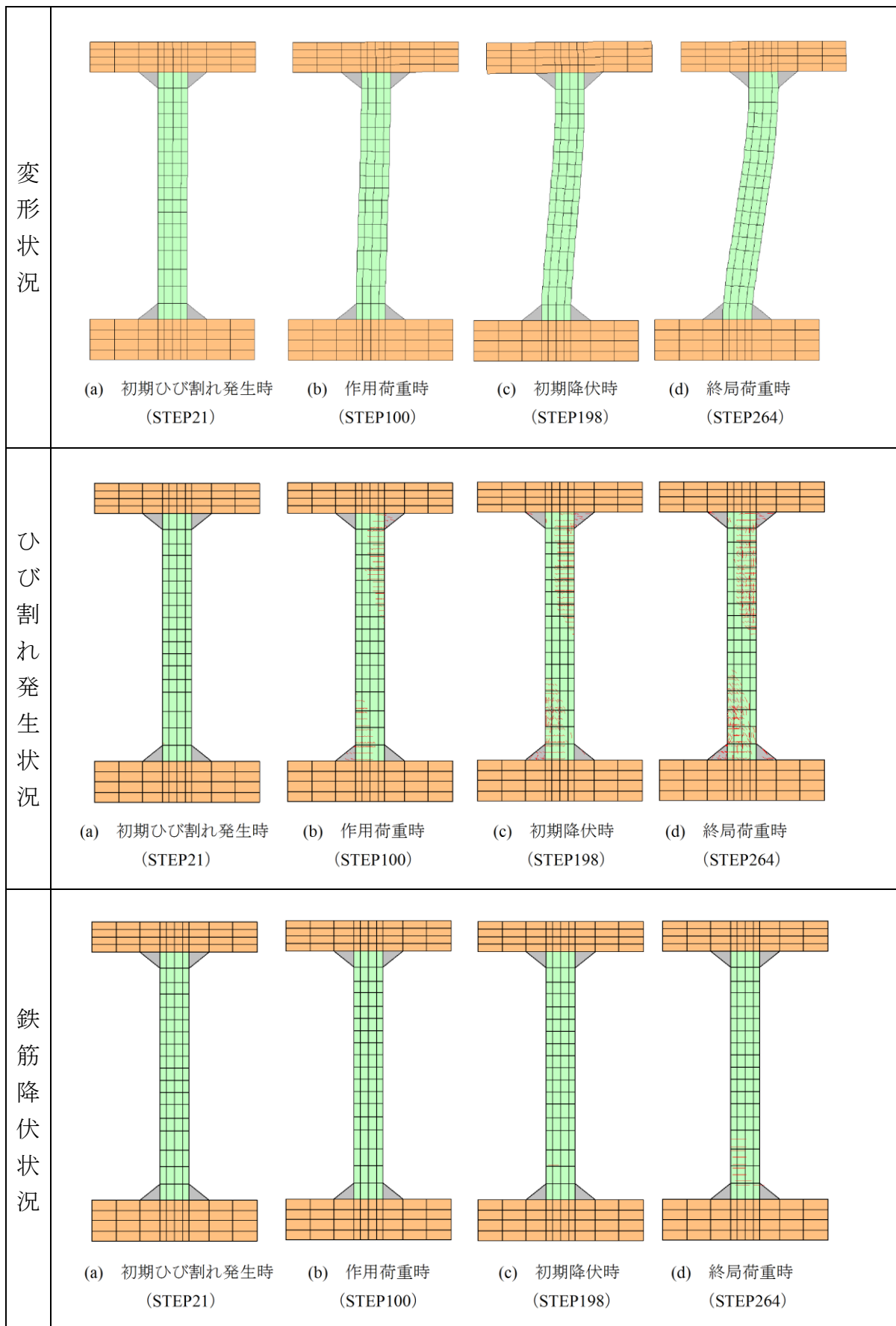
ケース	地震動	せん断補強筋設置方法
③-A	S <sub>s</sub> -N1	在来工法（先施工）
③-B	S <sub>s</sub> -N1	PHb（後施工）

第 4-6 表 せん断耐力結果一覧

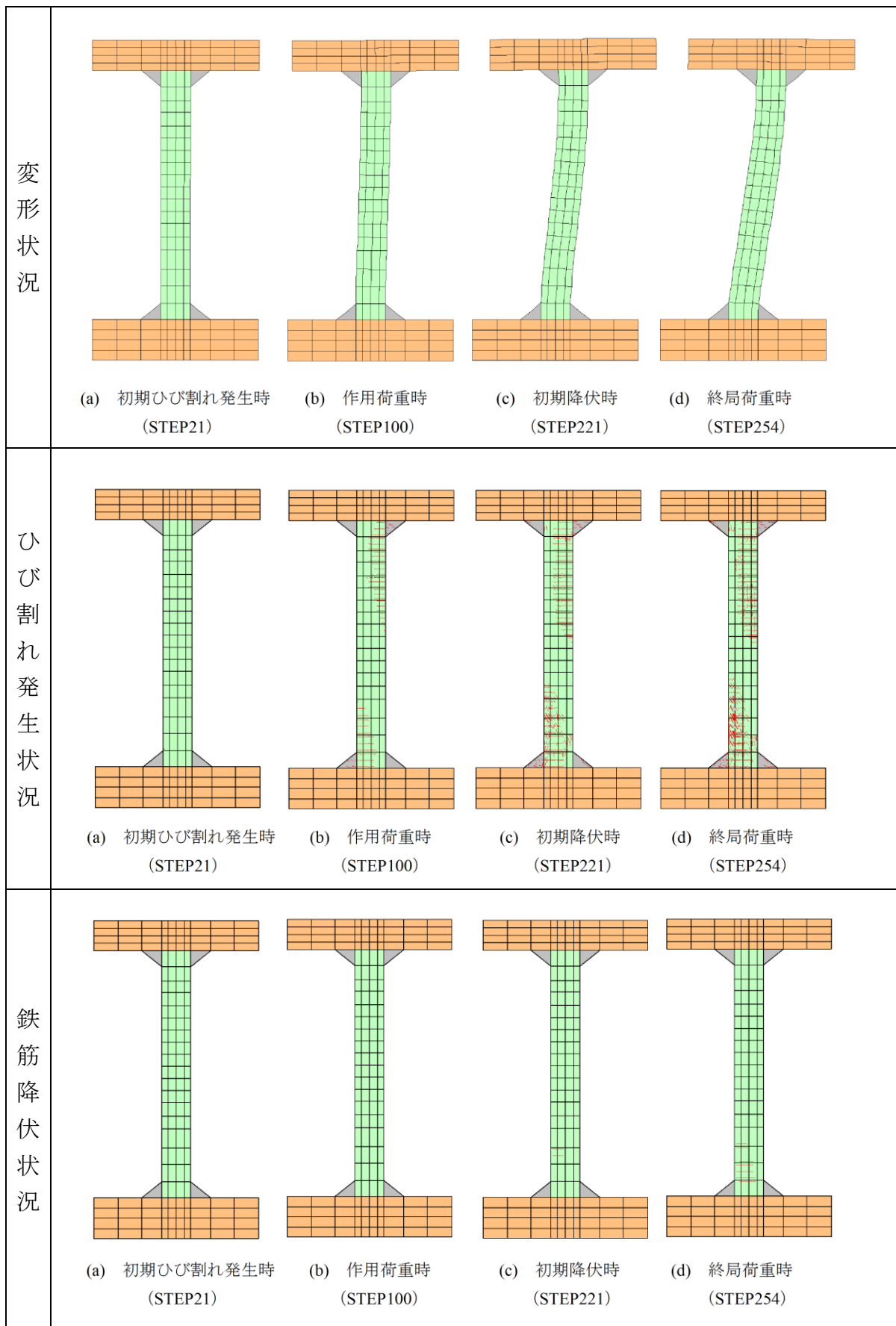
ケース	せん断耐力 (kN)	在来工法と PHb 工法の比率
①-A（在来工法）	615	—
①-B	477	0.78
①-C	500	0.81
②-A（在来工法）	1,335	—
②-B	1,235	0.93
②-C	1,200	0.90
③-A（在来工法）	1,610	—
③-B	1,549	0.96



第4-7表 ケース③-Aの解析結果



第 4-8 表 ケース③-B の解析結果



## 5. まとめ

ステップ①～③における材料非線形解析を用いて、島根原子力発電所2号炉の屋外重要土木構造物における PHb 工法の適用性の確認を実施した。解析の結果、建設技術審査証明報告書の実験を上回る部材厚に対しても応答性状に変化はないことが確認できた。また、実構造物諸元相当の解析により、PHb 工法のせん断補強効果に影響を及ぼすと考えられる項目が建設技術審査証明報告書における実験条件と異なっても、応答性状に変化はなく、建設技術審査証明報告書で確認したとおりのせん断補強効果を期待できることを確認した。

中国電力株式会社  
島根原子力発電所

施工管理要領書（案）  
（取水槽耐震補強工事（ポストヘッドバー工法））

中国電力株式会社

## 目次

	頁
1. 目的	92
2. 準拠事項	92
3. 工事の管理	92
4. 耐震補強工事	92
4.1 後施工プレート定着型せん断補強鉄筋の種類及び品質	92
4.2 注入材の種類及び品質	92
4.3 断面修復材の種類及び品質	92
4.4 品質管理及び検査	92
5. 施工要領	95
5.1 施工フロー	95

## 1. 目的

本指針は、島根原子力発電所2号炉取水槽耐震補強工事に当たり、補強する構造物が技術基準等に適合した材料及び構造を有するように施工管理を行うために、中国電力株式会社が定めた管理方法、判断基準等の大綱を示したものである。

## 2. 準拠事項

施工及び施工管理は、本要領書によるほか下記の基準等に準じて行う。

- (1) 日本工業規格（以下「JIS」という。）
- (2) 土木学会「コンクリート標準示方書」（以下「コンクリート標準示方書」という。）
- (3) 建設技術審査証明報告書（建技審証 第0522号）（以下「建設技術審査証明報告書」という。）

## 3. 工事の管理

施工及び施工管理に先立ち、作業要領書を確認したうえで本工事の管理を行う。

## 4. 耐震補強工事

### 4.1 後施工プレート定着型せん断補強鉄筋の種類及び品質

本工事に用いる後施工プレート定着型せん断補強鉄筋（Post-Head-bar）（以下「PHb」という）は、JIS、建設技術審査証明報告書の規格に適合するものとする。PHbの品質は、建設技術審査証明報告書に要求される所要の性能を有するものとする。

### 4.2 注入材の種類及び品質

注入材は、建設技術審査証明報告書の規格に適合するものとする。注入材の品質は、建設技術審査証明報告書に要求される所要の性能を有するものとする。

### 4.3 断面修復材の種類及び品質

断面修復材は、建設技術審査証明報告書の規格に適合するものとする。断面修復材の品質は、建設技術審査証明報告書に要求される所要の性能を有するものとする。

### 4.4 品質管理及び検査

耐震補強工事における各種検査は、第4-1表により行い、判定基準に適合していることを確認する。

第4-1表 後施エプレート定着型せん断補強鉄筋（PHb）品質，出来形及び検査一覧（1/2）

工程	項目	管理項目	管理水準	判定基準	検査方法	管理時期	
機材・資 材搬入	PHb	材料	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 矩形プレートの科学的性質，機械的性質は JIS G3106 規格のうち SM490A（又は同等品（SM490B， SM490C））の適合品であること。</li> <li>・ 円形プレートの科学的性質，機械的性質は JIS G4051 規格のうち S35C 若しくは S45C の適合品であること。</li> <li>・ 定着筋の科学的性質，機械的性質は JIS G3112 の適合品であること。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 各プレートの形状，寸法が， JIS G3194 に適合していること。</li> <li>・ 圧接位置がメーカーの定める基準値内であること。</li> <li>・ 鉄筋仕上がり長さがコンクリート標準示方書「施工編」『7.3 鉄筋工の検査』の基準に適合していること。</li> </ul>	ミルシート	材料搬入時	
		外観・寸法検査	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 引張強度は，矩形プレート側摩擦接合部の引張強度が鉄筋の引張強度以上であること。</li> </ul>				PHb 出来形検査表
		引張強度試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 以上であること。</li> </ul>				
削孔	注入材	材料	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ PHb モルタル-N 又は同等品であること。</li> </ul>	試験成績書	材料搬入時		
	断面修復材	材料	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ RS モルタル-P 又は同等品であること。</li> </ul>	試験成績書	材料搬入時		
削孔	削孔	削孔径	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 削孔径が設計図どおりであること。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ PHb 工法研究会の定める管理値</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 設計値以上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 試験成績書</li> <li>・ コンベックス ノギス</li> </ul>	削孔完了後
		削孔深さ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 削孔深さが設計図どおりであること。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ PHb 工法研究会の定める管理値</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ -10mm～+20mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ コンベックス ノギス</li> </ul>	削孔完了後

第 4-1 表 後施エプレート定着型せん断補強鉄筋 (PHb) 品質, 出来形及び検査一覧 (2/2)

工程	項目	管理項目	管理水準	判定基準	検査方法	管理時期
PHb 挿入	かぶり	かぶり	・かぶりが設計図どおりであること。 PHb 工法研究会の定める管理値	設計かぶり以上	コンベックス, ノギス	設置後
		注入材	フレッシュ時の性状	・フローが PHb 工法研究会の定める管理値内であること。	フロー試験	注入前
定着	断面修復材	材料温度	・材料温度が 5℃ 以上であること。		温度計	注入前
		圧縮強度試験	・躯体コンクリートの設計強度以上であること。	$\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$ 以上	圧縮強度試験	打設後 28 日
		フレッシュ時の性状	・フローが PHb 工法研究会の定める管理値内であること。	150mm±20mm	フロー試験	注入前
		材料温度	・材料温度が 5℃ 以上であること。		温度計	注入前
		圧縮強度試験	・躯体コンクリートの設計強度以上であること。	$\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$ 以上	圧縮強度試験	打設後 28 日

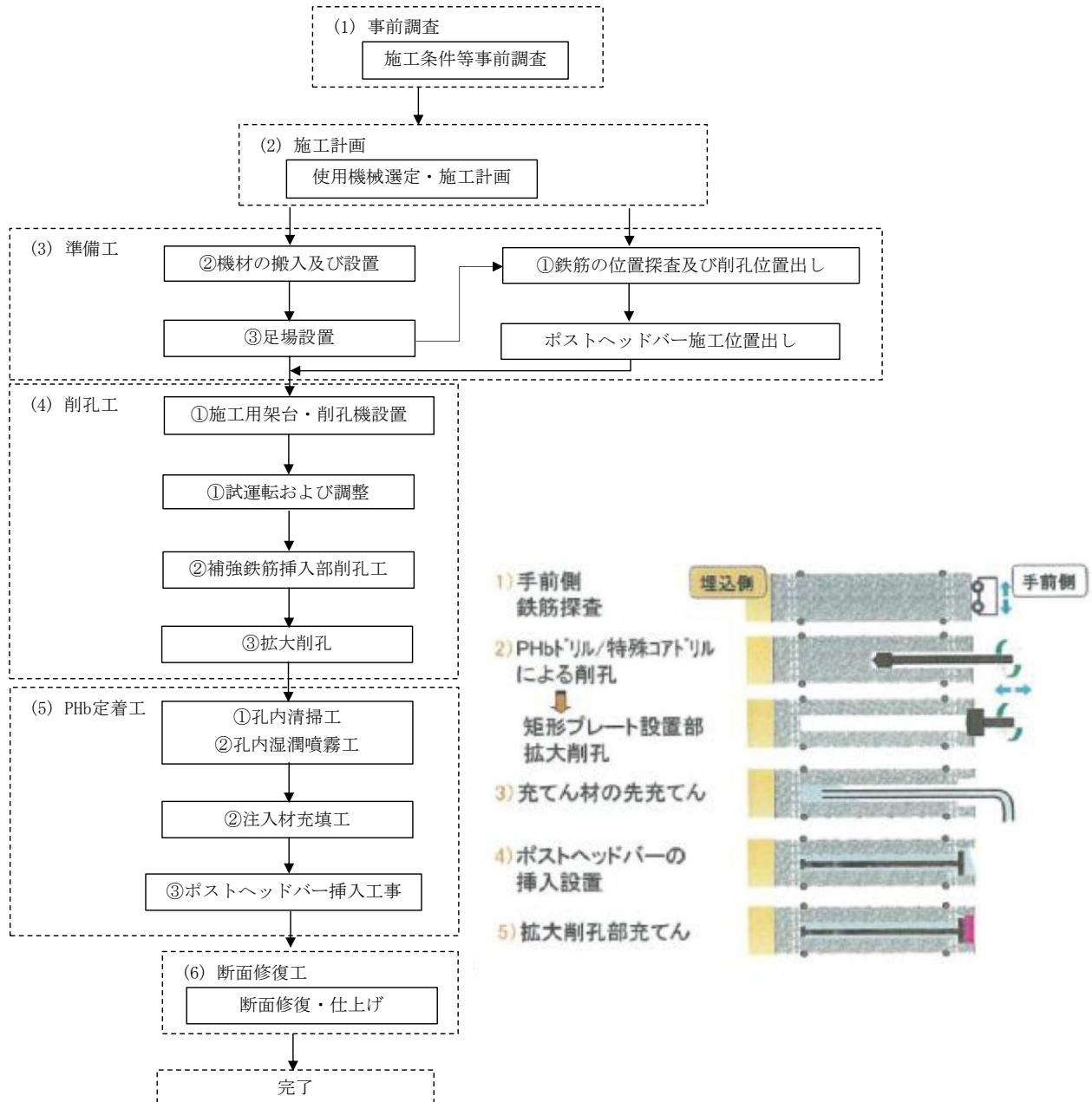
注) 引用資料・・・コンクリート標準示方書「施工編」(土木学会), 建設技術証明報告書後施工プレート定着型せん断補強鉄筋「Post-Head-bar」



## 5. 施工要領

### 5.1 施工フロー

施工フローを第 5-1-1 図に示す。



第 5-1-1 図 施工フロー

### 5.1.1 事前調査

様々な既存設備の存在が施工や資機材の搬入に対する制約となる場合がある。したがって、施工条件を把握する為に、施工に先立ち事前調査を行う。

事前調査を実施して現状を把握した結果、既存設備が施工上の制約になる場合には、当社と事前にその対策について協議する。

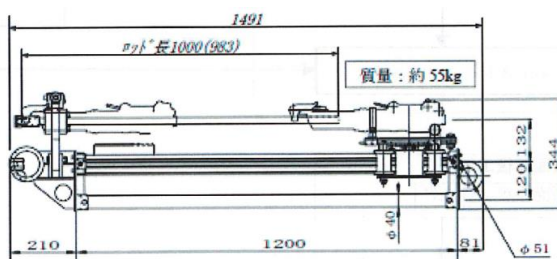
### 5.1.2 施工計画（使用機器選定）

既存設備に関する協議結果に基づいて施工計画を立案し、適切な施工機械や削孔方法を選定する。第 5-1-2-1 図に主な削孔機器として PHb ドリルと特殊コアドリルを示す。

削孔には PHb ドリルを用いることを標準とする。ただし、施工スペースが狭い場合や鉄筋が輻輳することが多いはり部やハンチ部の施工では特殊コアドリルを使用する。

PHb ドリルは、ビットの回転と打撃で削孔する機械であり、圧縮空気により作動する。特殊コアドリルは、コアビットを低トルクで高速回転させることにより、既存鉄筋などに接触した場合に瞬時にコアドリルの回転が停止する機能を備えた削孔機械であり、電力により作動する。

なお、孔と鉄筋の干渉を避けて再削孔を行う際、削岩機ベースの PHb ドリルでは孔をラップさせることができないため再削孔位置の選定が制限され、再削孔しても新たに別の鉄筋に干渉してしまう可能性がある。そこで、孔のラップが可能な PHb 工法指定の特殊コアドリルを必要に応じて併用することとし、再削孔時の精度向上を図る。



c) ベンチャードリルの諸元 (例)

第 5-1-2-1 図 削孔機械の種類

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。

### 5.1.3 準備工

#### (1) 鉄筋位置探査及び削孔位置出し

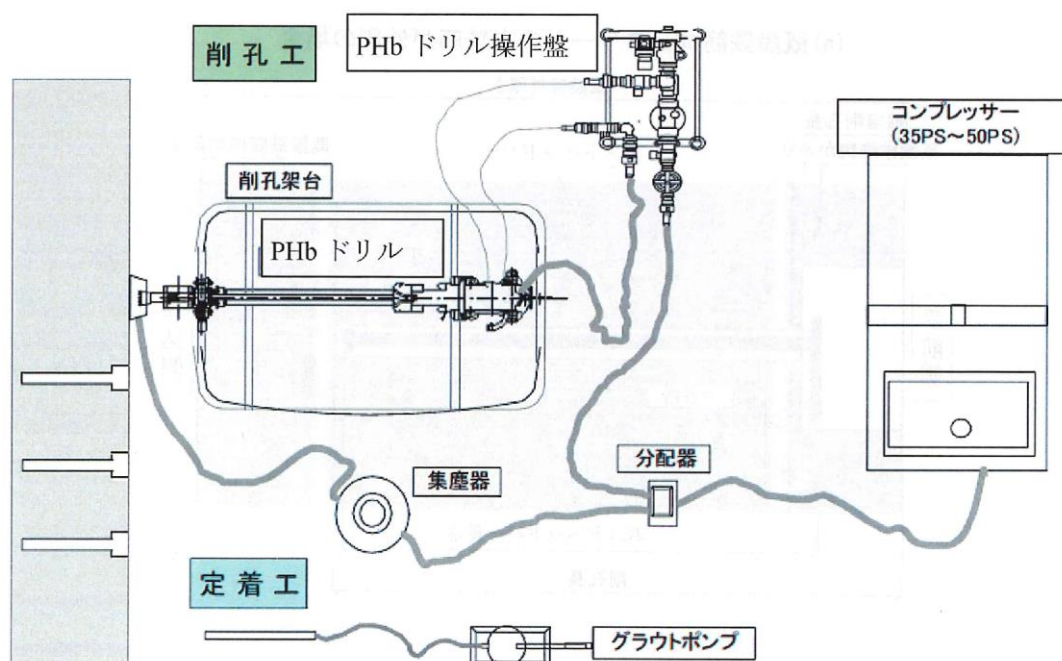
事前に PHb の設計位置を墨出し、内空側既存鉄筋の位置を鉄筋探査装置により調査する。調査結果をもとに、内空側既存鉄筋位置と PHb の設計位置とを確認し、PHb の施工位置を決定する。第 5-1-3-1 図に鉄筋探査の概要を示す。



第 5-1-3-1 図 鉄筋探査工

#### (2) 機材の搬入及び配置

第 5-1-3-2 図に主な機材とその配置を示す。



第 5-1-3-2 図 機材配置図

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。

### (3) 足場設置

高所作業の場合など施工位置に応じて必要な足場設備を設置する。

#### 5.1.4 削孔工

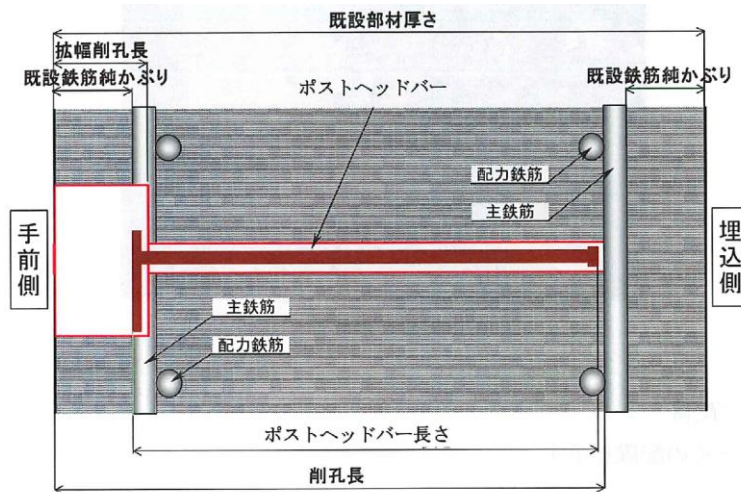
第5-1-4-1図に示すように、PHbの施工では下記の削孔深さを原則とする。

- ・補強鉄筋挿入部の削孔長

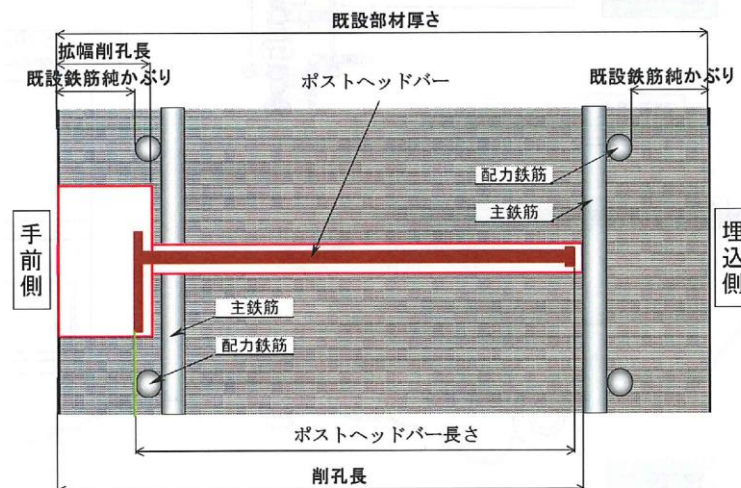
手前側削孔表面から埋込側既設主鉄筋の手前側までの距離

- ・矩形プレート部の拡幅削孔長

PHbの矩形プレートのかぶりが手前側既設鉄筋のかぶりと同様になるように設置した時、手前側削孔表面から矩形プレートの埋込側の面より5mm内側までの距離



(a) 既設鉄筋コンクリートの主鉄筋が外側の場合



(b) 既設鉄筋コンクリートの主鉄筋が内側の場合

第5-1-4-1図 PHb工法の施工概要図

(1) 施工用架台・削孔機設置及び試運転・調整

PHb ドリル施工用架台を使用し、PHb ドリルを削孔位置にあわせる。ドリルの鉛直方向、水平方向が削孔面に対して垂直となるようスラントルール、金尺等で確認しながら設置する。

第 5-1-4-2 図に施工用架台に設置した PHb ドリルと鉛直・水平の確認状況を示す。



第 5-1-4-2 図 削孔準備工

(2) 補強鉄筋挿入部削孔工

水平削孔時は、粉塵の吸出し方向が横向きあるいは下向きとなるように、下向き削孔時は、粉塵の吸出し方向が横向きとなるように集塵装置を削孔位置にセットする。

PHb ドリルで補強鉄筋挿入部を所定の深さまで削孔する。所定の深さは原則として「5.1.4 削孔工」に図示した寸法とし、削孔深さの誤差は-10mm～+20mm とする。

埋込側既存鉄筋を切断しないように、埋込側鉄筋位置の手前から、削孔スピード、回転速度を落として慎重に削孔する。削孔完了後に削孔深さを測定する。万が一地山側既存鉄筋に当たった場合は、ドリルを即時停止する。もし削孔深さの管理値を超える場合は、付近の位置で再削孔する。

第 5-1-4-3 図に補強鉄筋挿入部削孔状況を示す。



第 5-1-4-3 図 補強鉄筋挿入部削孔工

### (3) 拡大削孔工

拡大削孔用のビット及び集塵装置に取換え、所定の深さまで拡大削孔を行う。所定の深さは、原則として「5.1.4 削孔工」に示した寸法とする。

手前側既存鉄筋を切断しないように、鉄筋探査により測定した手前側既存鉄筋のかぶりの手前から削孔スピード、回転速度を落として慎重に削孔する。万が一手前側既存鉄筋に当たった場合は、ドリルを即時停止する。PHbの矩形プレートのかぶりが既存鉄筋の設計かぶりを確保できない場合は付近の位置で再削孔する、または防錆処理を実施するかを協議する。

第5-1-4-4図に拡大部削孔状況を示す。



第5-1-4-4図 拡大削孔工

### 5.1.5 PHb 定着工

PHb 定着工においては、横向き施工・下向き施工ともに、可塑性を有するPHbモルタルを使用することを標準とする。PHbモルタルは、施工性・充填性に優れており、孔内の埋込側先端まで隙間無く充填することができる。

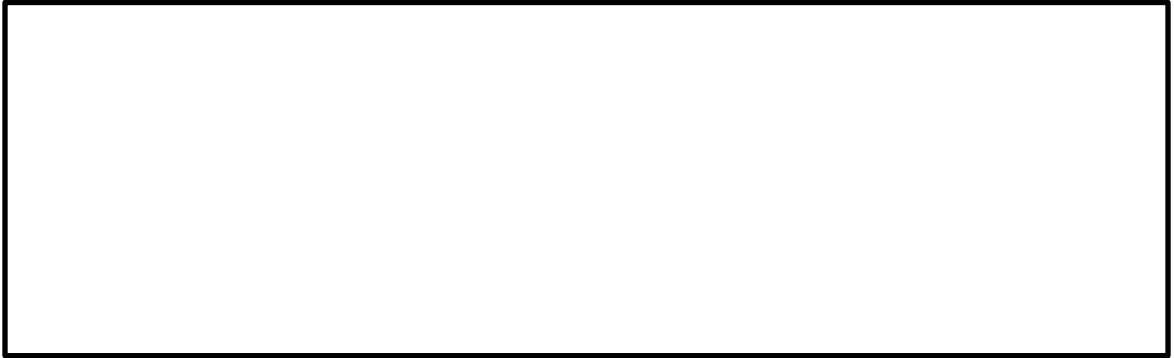
#### (1) 孔内清掃工

孔内湿潤噴霧工に先立ち、バキュームクリーナーを用いて、削孔が完了した孔内の清掃を行う。

#### (2) 孔内湿潤噴霧工

水分の逸失による注入材の粘性増加に起因して、PHbの挿入が困難あるいは不可能になることを未然に防止するために、孔内への注入材充填に先立ち、孔内の湿潤処理を行う。

第5-1-5-1図に孔内清孔工及び孔内湿潤噴霧工の概要を示す。



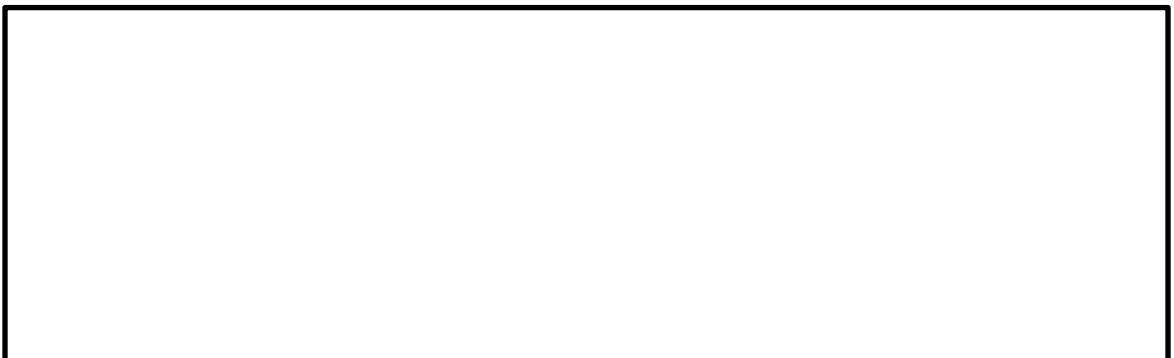
第 5-1-5-1 図 孔内清掃工及び孔内湿潤噴霧工

(3) 注入材充填工

ペール缶に所定の水を計量し、ハンドミキサーで攪拌しながら所定量の注入材料（プレミックス品）を加えて練り混ぜる。

空隙を生じさせないように孔内先端まで注入ホースを差込み、PHb 定着用の注入材を電動ポンプで注入する。

第 5-1-5-2 図に注入材充填工の概要を示す。



第 5-1-5-2 図 注入材充填工

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)PHb 挿入工

注入材で満たされた孔内に PHb を所定の位置まで人力で挿入し,余分な注入材を取り除く。

PHb の挿入後, PHb の位置ずれを防止するために手前側矩形定着プレートを抑え治具で固定する。

第 5-1-5-3 図に PHb 挿入工の概要を示す。



第 5-1-5-3 図 PHb 挿入工

#### 5.1.6 断面修復工

ペール缶に所定の水を計量し,ハンドミキサーで攪拌しながら所定量の断面修復材(プレミックス品)を加えて練り混ぜる。

拡大削孔部を断面修復材で充填する。断面修復材の充填はモルタル・グラウトの硬化後に行う。金ごてにより表面仕上げを行う。

第 5-1-6-1 図に拡大削孔部の断面修復の状況写真を示す。



第 5-1-6-1 図 断面修復工

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. 一般的な鉄筋コンクリート部材のせん断の原理

「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（土木学会，2005）」によれば，鉄筋コンクリート部材のせん断破壊の形態は，第 2-1 図に示すとおり，せん断スパン比が 3.5 以上であれば「棒部材式で想定する破壊形態」となり，せん断スパン比が 2 以下であれば「ディープビーム式で想定する破壊形態」になるとされる。せん断スパン比が 2～3.5 の場合は両者の遷移領域であり，一般的には両者が生じうる。

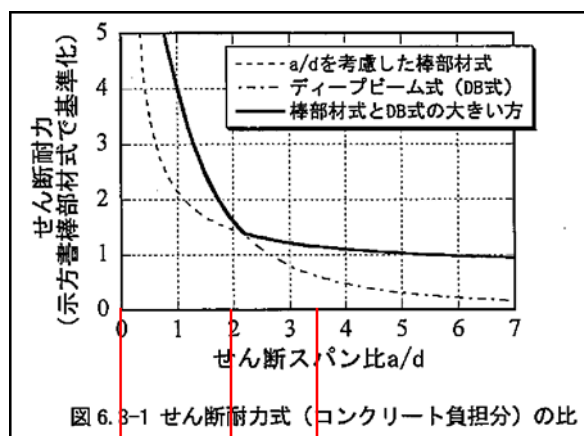
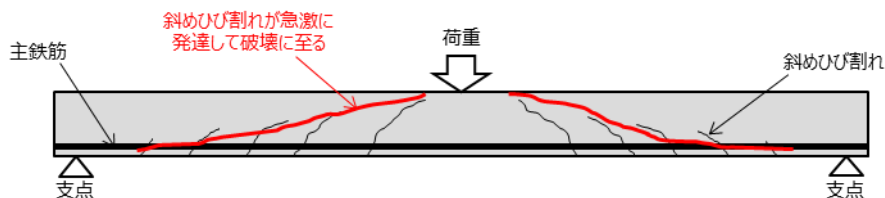


図 6.3-1 せん断耐力式（コンクリート負担分）の比  
ディープビーム式で想定する破壊形態 遷移領域 棒部材式で想定する破壊形態

### 第 2-1 図 せん断スパン比とせん断破壊形態の関係性

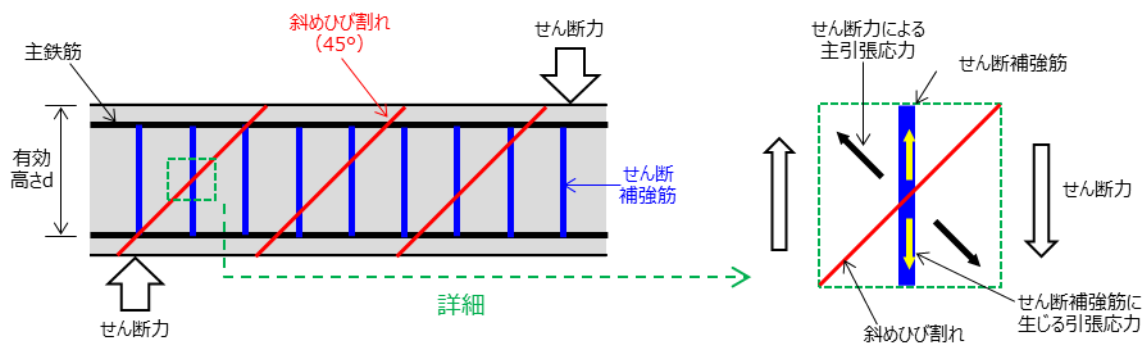
（「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（土木学会，2005）」に赤色で加筆）

島根 2 号炉取水槽（スクリーン室）隔壁は，せん断スパン比が 11.40 であることから，「棒部材式で想定する破壊形態」となる。「棒部材式で想定する破壊形態」では，第 2-2 図に示すとおり，斜めひび割れが急激に載荷点方向及び支点方向に向かって発達し，それとほぼ同時に耐力を失ってせん断破壊に至る。



第 2-2 図 棒部材式で想定するせん断破壊形態のイメージ

棒部材に発生するせん断力による斜めひび割れの角度は、第2-3図に示すとおり、コンクリート標準示方書をはじめとする基準類に示されるトラス理論により45°として評価され、せん断補強筋を部材有効高さの1/2以下の間隔で配置すれば、斜めひび割れ面とせん断補強筋が必ず交差して補強効果が発揮されることが一般に分かっている。



第2-3図 せん断力による斜めひび割れとせん断補強筋による補強効果のイメージ

### 3. PHb 工法によるせん断補強効果

PHb 工法においても、建設技術審査証明報告書によれば、先施工と同様、トラス理論により評価されるせん断補強効果が発揮できるとされている。せん断スパン比 2.79 のはり試験体の実験結果では、おおむね  $45^\circ$  の斜めひび割れが急激に発達してせん断破壊に至る棒部材的な破壊形態を示すとともに、理論式で算定されるせん断耐力が得られている。

よって、せん断スパン比が 11.40 である島根 2 号炉取水槽（スクリーン室）隔壁においても、せん断補強筋を部材有効高さの  $1/2$  以下の間隔で配置することから、先施工の原理と同様にせん断補強効果が発揮されると判断した。



(a) はり試験体のせん断補強仕様



凡例

赤青線：正負交番载荷によるひび割れ

(b) 破壊時のひび割れ状況

第 3-1 図 せん断スパン比 2.79 のはり試験体の実験結果  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

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. せん断スパン比 11.40 の部材への PHb 工法の適用性確認方法及び結果

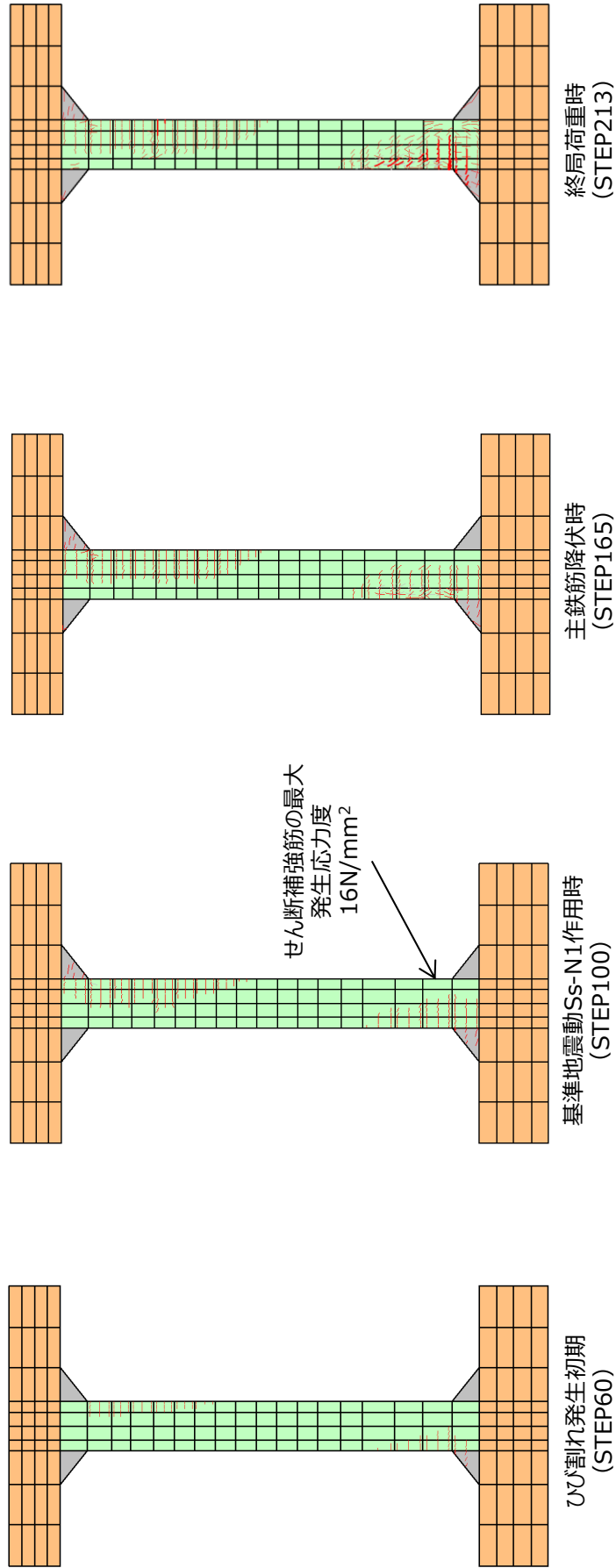
前述の考察について、島根 2 号炉取水槽（スクリーン室）隔壁の材料非線形解析により確認した。

材料非線形解析は、添付資料 2 の第 4-2 表で示したステップ③の解析条件のうち、主鉄筋の降伏強度を  $345\text{N/mm}^2$  として隔壁の照査値が最も厳しかった基準地震動  $S_s - N1$  による荷重を作用させた。

解析結果から、第 4-1 図に示すとおり、せん断補強筋の発生応力度は最大でも  $16\text{N/mm}^2$  であり、せん断補強筋は降伏強度が  $345\text{N/mm}^2$  であることから降伏しておらず、補強効果が発揮されていることを確認した。

さらに、作用荷重を超える荷重を作用させた結果、主鉄筋降伏時及び終局荷重時のひび割れ状況においても、棒部材式で想定する破壊形態である斜めひび割れの発生は認められず、せん断破壊が生じていないことを確認した。

以上のことから、建設技術審査証明報告書の実験条件を超えるせん断スパン比 11.40 の部材について、せん断の原理に基づく補強効果が発揮されており、PHb の適用性があると判断する。



第 4-1 図 取水槽（スクリーン室）隔壁の材料非線形解析結果（ひび割れ状況）

## 島根原子力発電所 2 号炉

地震時における燃料被覆管の  
閉じ込め機能の維持について

## 目 次

1. はじめに
2. 基本方針
  - 2.1 要求事項の整理
  - 2.2 追加要求事項への適合性に係る設計方針
3. 追加要求事項に係る評価項目の選定
4. 地震時の燃料被覆管閉じ込め機能評価方針
5. 追加要求事項を踏まえた燃料被覆管応力評価条件
6. 評価手法
  - 6.1 応力評価手法
  - 6.2 疲労評価手法
7. 評価結果
8. まとめ

添付資料 1 : 燃料被覆管の応力評価に考慮する応力について

添付資料 2 : 燃料被覆管下部端栓溶接部における応力の取扱いについて

添付資料 3 : 地震による応力を考慮した燃料被覆管応力評価（閉じ込め機能の維持）について

添付資料 4 : 地震による繰り返し荷重を考慮した燃料被覆管疲労評価（閉じ込め機能の維持）について

添付資料 5 : 燃料被覆管応力評価における許容応力について

添付資料 6 : 燃料被覆管応力評価におけるモンテカルロ法による統計処理について

添付資料 7 : 下部端栓溶接部の応力評価に使用する有限要素法解析コードについて

添付資料 8 : 9 × 9 燃料（B 型）における地震時鉛直方向加速度の考慮方法について

添付資料 9 : 評価部位の選定理由について

添付資料 10 : 燃料被覆管の応力評価に用いる各評価手法の保守性について

添付資料 11 : 改正規則の影響について

添付資料 12 : 燃料集合体に対する鉛直地震動の影響について

添付資料 13 : MOX 燃料の被覆管応力評価結果について



## 1. はじめに

燃料被覆管の応力評価に関しては、燃料の健全性を確認する観点から、原子炉設置（変更）許可申請書添付書類Ⅷ及び燃料体設計認可申請書添付書類Ⅱ（応力解析）において通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に発生する内外圧力差による応力、熱応力などを考慮し、解析コードを用いて燃料被覆管の応力設計比の評価を行っている。また、工事計画認可申請書及び燃料体設計認可申請書添付書類Ⅱ（耐震解析）において、崩壊熱除去可能な形状の維持の観点から、地震時の一次応力も考慮した応力評価を実施している。

一方、平成 29 年 8 月 30 日の原子力規制委員会において「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」という）及び「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」（以下、「技術基準規則」という）の改正が決定、平成 29 年 9 月 11 日に施行され、地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持についての要求が追加された。

本資料では、地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に係る設計方針並びに基準地震動  $S_s$ <sup>※1</sup> 及び弾性設計用地震動  $S_d$ <sup>※2</sup> による基準適合性の見通しについて説明する。なお、詳細評価については、適切な評価条件等を設定して実施することとし、その評価結果について工事計画認可申請段階で説明する。

※1：基準地震動  $S_s$  については、「島根原子力発電所 2 号炉 地震による損傷の防止（資料番号 EP-050 改07 令和元年 5 月 31 日提出）」に示す地震動を用いた。

※2：弾性設計用地震動  $S_d$  については、「島根原子力発電所 2 号炉 地震による損傷の防止（コメント回答）（資料 1-1, 令和元年 6 月 18 日提出）」に示す地震動を用いた。なお、弾性設計用地震動  $S_d$  の設定については審査が実施されているところである。

## 2. 基本方針

### 2.1 要求事項の整理

設置許可基準規則第 4 条及び設置許可基準規則第 4 条の解釈の記載を第 2.1-1 表に、また、技術基準規則第 5 条及び技術基準規則第 5 条の解釈の記載を第 2.1-2 表に示す。

なお、本規則改正に伴う要求事項については、「実用発電用原子炉の燃料体に対する地震の影響の考慮について（平成 29 年 2 月 15 日、原子力規制庁）」において以下のとおり示されている。

『…地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に係る評価として、より精緻化する観点から、地震力並びに地震力と重畳する可能性のある 1 次応力及び 2 次応力を加味した評価を実施することを求める必要がある。』

よって、原子力規制庁としては、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に、基準地震動  $S_s$  の地震が発生した場合でも、燃料被覆管の閉じ込め機能

が維持できることを新たに要求し、耐震重要度分類 S クラスの耐震設計の考え方になって、その判断基準として、基準地震動  $S_s$  の地震による 1 次応力を加味した運転状態における応力が設計引張強さを下回ること、また、弾性設計用地震動  $S_d$  の地震による 1 次応力を加味した運転状態における応力が設計降伏点を下回ることとしたい。』

第 2.1-1 表 設置許可基準規則第 4 条及び設置許可基準規則第 4 条の解釈

設置許可基準規則 第 4 条（地震による損傷の防止）	設置許可基準規則の解釈 第 4 条（地震による損傷の防止）	備考
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。	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。	解釈 追記
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。	—	変更 なし
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。	—	変更 なし
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。	—	変更 なし

第 2.1-1 表 設置許可基準規則第 4 条及び設置許可基準規則第 4 条の解釈（続き）

設置許可基準規則 第 4 条（地震による損傷の防止）	設置許可基準規則の解釈 第 4 条（地震による損傷の防止）	備考
<p>5 炉心内の燃料被覆材は、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ものでなければならない。</p>	<p>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。</p>	<p>追加 要求 事項</p>

第 2.1-2 表 技術基準規則第 5 条及び技術基準規則第 5 条の解釈

技術基準規則 第 5 条（地震による損傷の防止）	技術基準規則の解釈 第 5 条（地震による損傷の防止）	備考
<p>設計基準対象施設は、これに作用する地震力（設置許可基準規則第四条第二項の規定により算定する地震力をいう。）による損壊により公衆に放射線障害を及ぼさないように施設しなければならない。</p>	<p>—</p>	<p>変更なし</p>
<p>2 耐震重要施設（設置許可基準規則第三条第一項に規定する耐震重要施設をいう。以下同じ。）は、基準地震動による地震力（設置許可基準規則第四条第三項に規定する基準地震動による地震力をいう。以下同じ。）に対してその安全性が損なわれるおそれがないように施設しなければならない。</p>	<p>—</p>	<p>変更なし</p>
<p>3 耐震重要施設が設置許可基準規則第四条第三項の地震により生ずる斜面の崩壊によりその安全性が損なわれるおそれがないよう、防護措置その他の適切な措置を講じなければならない。</p>	<p>—</p>	<p>変更なし</p>
<p>4 炉心内の燃料被覆材は、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ように施設しなければならない。</p>	<p>5 第 4 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。</p>	<p>追加 要求 事項</p>

## 2.2 追加要求事項への適合性に係る設計方針

燃料被覆管については、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又は静的地震力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、炉心内の燃料被覆管の応答が全体的におおむね弾性状態にとどまる設計とする。

また、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とどまって破断延性限界に対し十分な余裕を有し、放射性物質の閉じ込めの機能に影響を及ぼさない設計とする。  
(添付資料 11 参照)

## 3. 追加要求事項に係る評価項目の選定

BWR 燃料集合体は「沸騰水型原子炉に用いられる 8 行 8 列型の燃料集合体について (昭和 49 年 12 月 25 日, 原子炉安全専門審査会)」に従い、構造強度設計で以下を考慮している。なお、損傷限界は 1 % 塑性歪及び沸騰遷移であり、それぞれ最大線出力密度と最小限界出力比を通常運転時の熱的制限値として管理することで損傷限界に至らないことを確認しているため、地震の影響は問題とならない。

- (1) 被覆管にかかる応力は、設計応力強さ限界を超えないこと。
- (2) 累積疲労サイクル数は、設計疲労寿命を超えないこと。
- (3) 使用中に燃料棒の変形等による過度の寸法変化を生じないこと。

上記のうち、(3)の燃料集合体に異常な寸法形状変化を生じさせないための以下の配慮は地震の影響が問題とならないことから評価対象としない。

- ・燃料被覆管製造時における残留応力除去
- ・スペーサによる燃料棒の間隔保持及び燃料棒の軸方向伸縮を拘束しない接触圧保持
- ・上部タイププレートを通して燃料棒の軸方向伸びを自由に逃げられるようにすること
- ・スペーサ等によるウォータロッドと燃料棒の軸方向伸びの差への処置

地震動により燃料被覆管に外力として応力が作用し、また、地震動が継続する間繰返し応力として作用するため、上記の内、(1)及び(2)について地震影響を考慮した評価を行う。

## 4. 地震時の燃料被覆管閉じ込め機能評価方針

第 4-1 図に燃料被覆管閉じ込め機能評価フロー、第 4-2 図に評価対象部位 (スペーサ間、スペーサ部及び下部端栓溶接部) を示す。

燃料被覆管閉じ込め機能の評価は、燃料棒熱・機械設計解析コードから得られる燃料被覆管温度や燃料棒内圧のほか、炉心条件、地震動に対する燃料集合体の応答加速度等を入力値とした応力評価及び疲労評価により行う。燃料被覆管温度、

燃料棒内圧，炉心条件，燃料被覆管寸法等については不確かさを考慮した値を用いる。なお，基準地震動  $S_s$  等を用いた応力評価及び疲労評価の詳細手法については工事計画認可申請段階で説明する。

また，燃料集合体の浮き上がりの可能性については，冷却材による流体力，水平方向加速度（10G），鉛直方向加速度（2G）においても，浮き上がりの影響がない（燃料支持金具から外れない）ことが過去の解析評価により確認されている<sup>[1]</sup>。上記に加え，制御棒挿入時の突き上げや燃料と上部格子板との摩擦を考慮した場合においてもほぼ同様の結果となることが別の試験及び解析で確認されている<sup>[2]</sup>。（添付資料 12 参照）

#### 5. 追加要求事項を踏まえた燃料被覆管応力評価条件

「実用発電用原子炉の燃料体に対する地震の影響の考慮について（平成 29 年 2 月 15 日，原子力規制庁）」を踏まえた燃料被覆管の応力評価条件を第 5-1 表に示す。また，あわせて参考として従来より実施している燃料被覆管の応力評価条件を示す。追加要求事項を踏まえた燃料被覆管の応力評価条件は，従来の燃料被覆管の応力評価条件に代わるものではなく，追加されるものである。

評価対象燃料は，原子炉設置変更許可済の  $9 \times 9$  燃料（A 型）， $9 \times 9$  燃料（B 型）及びウラン・プルトニウム混合酸化物燃料<sup>\*1</sup>（以下，「MOX 燃料」という）とする。

※1：工事計画認可は未取得

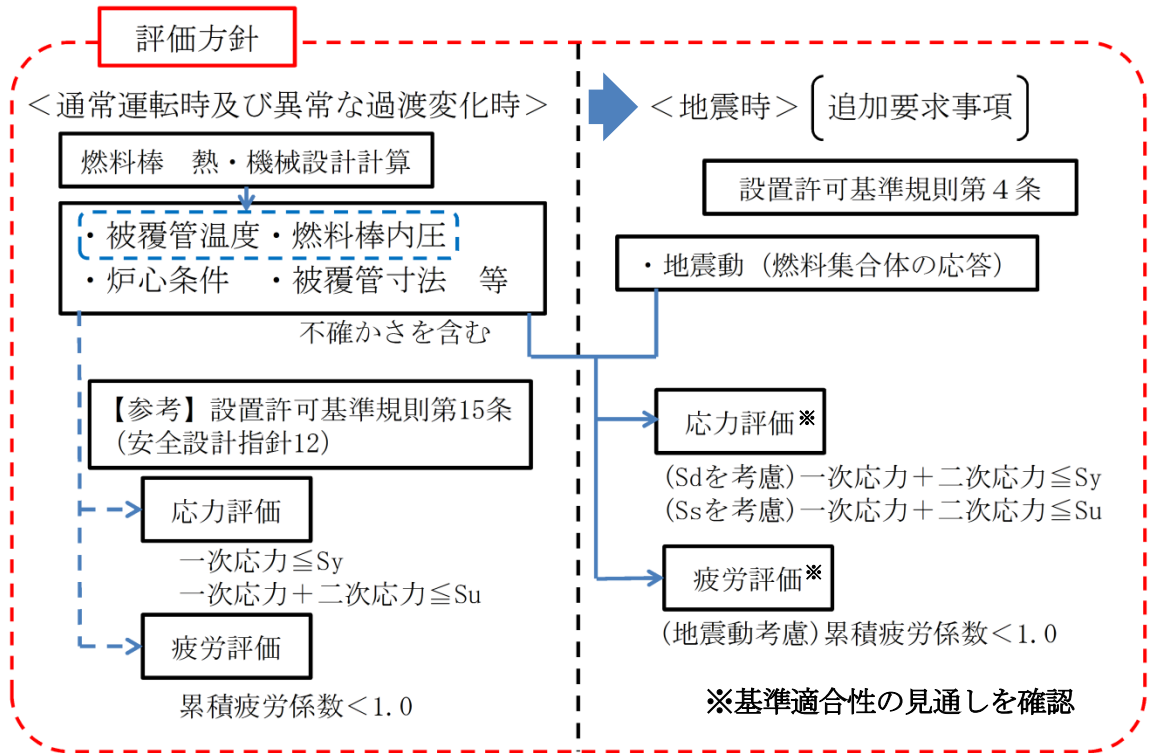
第 5-1 表 追加要求事項を踏まえた燃料被覆管の応力評価条件

運転状態	要求機能	考慮する応力と地震動 <sup>*2</sup>	許容応力
地震時	地震時における燃料被覆管の閉じ込め機能	一次応力（ $S_d$ を考慮） +二次応力（ $S_d$ を考慮）	降伏応力（ $S_y$ ）
		一次応力（ $S_s$ を考慮） +二次応力（ $S_s$ を考慮）	引張強さ（ $S_u$ ）

※2：評価に当たって考慮する地震動を（ ）内に示す。

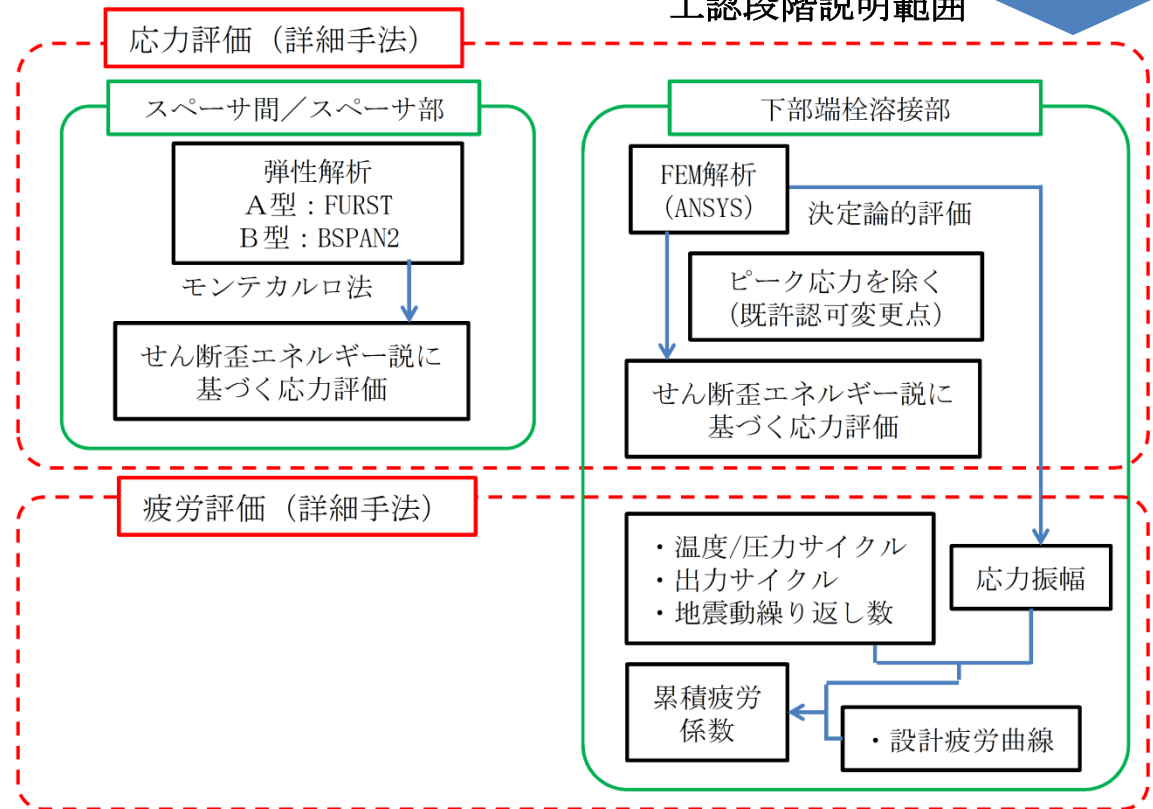
（参考） 従来の燃料被覆管の応力評価基準

運転状態	要求機能	考慮する応力と地震動	許容応力
通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時	燃料被覆管の閉じ込め機能	一次応力	降伏応力（ $S_y$ ）
		一次応力+二次応力	引張強さ（ $S_u$ ）
地震時	崩壊熱除去可能な形状の維持	一次応力	0.7 $S_u$



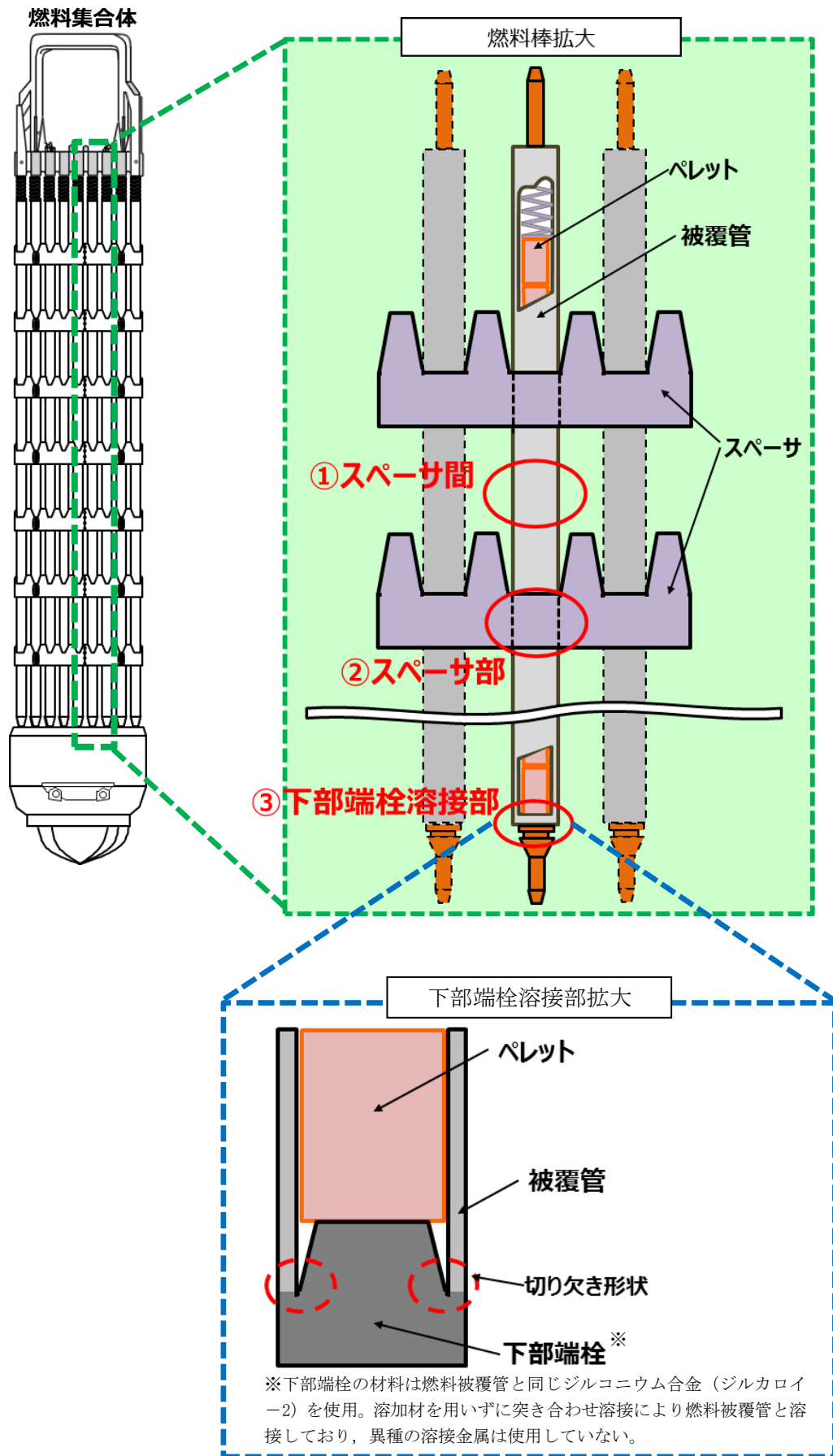
設置許可段階説明範囲

工認段階説明範囲



第 4-1 図 燃料被覆管閉じ込め機能評価フロー





第 4-2 図 評価対象部位（イメージ）

## 6. 評価手法

### 6.1 応力評価手法<sup>[3]</sup>

燃料被覆管応力評価は、燃料被覆管のスペーサ間、スペーサ部及び下部端栓溶接部の各位置において、せん断歪エネルギー説（von Mises 理論）に基づき燃料被覆管の相当応力を求め応力設計比<sup>※3</sup>を評価することにより行う。応力計算は、燃料被覆管に発生するすべての応力を三軸方向（半径方向、円周方向及び軸方向）について解析し、それらより相当応力を評価する。燃料被覆管の応力評価に考慮する応力を添付資料 1 に示す。

スペーサ間及びスペーサ部における応力評価では、燃料被覆管に発生する各応力についての厚肉円筒式を用いた弾性解析により、厚肉円筒式の入力変数の統計的分布に基づくモンテカルロ法（添付資料 6 参照）による統計評価を行う。このため応力設計比は、燃料被覆管寸法、燃料被覆管温度、燃料棒内圧、炉心条件、許容応力等の統計的入力変数の関数となる。入力変数の統計的分布は、製造実績、実機運転データ等を考慮して設定した値を用いる。モンテカルロ法による評価では、1 回の試行毎に乱数が用いられ、統計的分布に従い設定された入力条件から 1 つの応力設計比が得られる。この試行を繰り返すことにより応力設計比の 95% 確率上限値を求める。応力設計比の 95% 確率上限値が 1 以下であることで燃料の健全性を確認する。（添付資料 10 参照）

下部端栓溶接部における応力評価については、形状が複雑であることから有限要素法による決定論的評価を実施し、一次応力＋二次応力と許容応力を比較して応力設計比が 1 以下であることを確認している。なお、既許認可における下部端栓溶接部の応力評価では簡便な扱いとしてピーク応力を含んだ値を用いていたが、今回の申請ではピーク応力を含まない一次応力＋二次応力にて応力評価を行う（添付資料 2 参照）。入力変数については、保守的な条件（変数の 95% 確率上下限值）を使用している。（添付資料 10 参照）

※3： 応力設計比＝発生応力（通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時にかかる応力＋地震時にかかる応力）／許容応力

### 6.2 疲労評価手法

燃料の疲労限界に対する設計基準は、累積損傷の法則（Miner の仮説）及び Langer-0' Donnell の考え方に基づく。具体的には 9 × 9 燃料（A 型）及び 9 × 9 燃料（B 型）については炉内滞在期間 8 年を、MOX 燃料については炉内滞在期間 7 年を仮定した温度・圧力及び出力の予測サイクル<sup>※4</sup>による疲労に加え、地震動による繰り返し荷重<sup>※5</sup>を考慮し、累積疲労係数が 1.0 未満であることを確認する。疲労評価においては、一次応力と二次応力に加えてピーク応力を考慮する。また、地震荷重の繰り返し数については、原子炉建物－大型機器連成解析モデルを用いた地震応答解析に基づき算出された値を踏まえ、基準地震動 Ss は 150 回、弾性設計用地震動 Sd は 300 回として影響を確認する。なお、詳

細評価は工事計画認可申請段階にて行う。

※4：予測サイクルを以下に示す。(原子炉設置(変更)許可申請書添付書類八より)

サイクル条件	予測サイクル
室温から100%出力	～4/年
高温待機状態から100%出力	～12/年
50%出力から100%出力	～60/年
75%出力から100%出力	～250/年
100%出力から121%出力	～0.5/年

※5：地震時の荷重方向を反転させた解析結果より、主応力方向が変化する場合の応力の変化幅を計算し、その半分を応力振幅として繰り返し荷重を設定する。

## 7. 評価結果

燃料被覆管応力評価結果を添付資料3に示す。通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に発生する応力に加えて地震による応力を考慮した場合においても、応力設計比は最大で0.80(9×9燃料(A型))、0.79(9×9燃料(B型))及び0.84(MOX燃料)であり、1.0より小さいことを確認した。

燃料被覆管疲労評価結果を添付資料4に示す。地震力が繰り返された場合の応力振幅と繰り返し回数、ジルカロイの設計疲労曲線を用いて評価された疲労係数の増分は、0.00250(9×9燃料(A型))、0.00532(9×9燃料(B型))及び0.00508(MOX燃料)となった。よって、予測サイクルに基づく累積疲労係数(約0.003<sup>[4]</sup>(9×9燃料(A型))、約0.006<sup>[5]</sup>(9×9燃料(B型))及び約0.006<sup>\*6</sup>(MOX燃料))に、地震動による疲労係数の増分を加えても累積疲労係数は1.0より小さいことを確認した。

※6：島根原子力発電所2号炉におけるMOX燃料の採用に係る原子炉設置変更許可申請時のMOX燃料被覆管疲労評価結果

## 8. まとめ

地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に係る設計方針を示すとともに、基準地震動S<sub>s</sub>及び弾性設計用地震動S<sub>d</sub>による評価により、基準に適合する見通しであることを確認した。なお、詳細評価については工事計画認可申請段階で説明する。

## 参考文献

- [1] 平成 17 年度原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査機器耐力その 2 (BWR 制御棒挿入性) に係る報告書 (平成 18 年 9 月原子力安全基盤機構)
- [2] 浜岡原子力発電所 3, 4 号機「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う耐震安全性評価に関わる報告のうち耐震設計上重要な機器・配管系の耐震安全性評価 (補足説明資料) (平成 19 年 10 月 23 日 中部電力株式会社)
- [3] 発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について (昭和 63 年 5 月 12 日 原子力安全委員会了承)
- [4] 島根原子力発電所第 2 号機「燃料体設計認可申請書」(GNF 燃設認第 30 号, 平成 21 年 1 月 7 日認可)
- [5] 島根原子力発電所第 2 号機「燃料体設計認可申請書」(20 原燃東 第 805 号, 平成 21 年 2 月 12 日認可)

## 燃料被覆管の応力評価に考慮する応力について

各評価対象部位において考慮する応力を添付 1-1 表に示す。評価対象部位（スペーサ間、スペーサ部及び下部端栓溶接部）を添付 1-1 図に示す。また、燃料集合体の構造図（9×9 燃料（A 型））を添付 1-2 図に、燃料集合体の構造図（9×9 燃料（B 型））を添付 1-3 図に、燃料集合体の構造図（MOX 燃料）を添付 1-4 図に示す。9×9 燃料（A 型）は燃料棒の配列が 9 行 9 列であり、74 本の燃料棒と 2 本の太径のウォータロッドからなる。9×9 燃料（B 型）は燃料棒の配列が 9 行 9 列であり、72 本の燃料棒と 1 本の角管のウォータチャンネルからなる。MOX 燃料は燃料棒の配列が 8 行 8 列であり、60 本の燃料棒と 1 本の太径のウォータロッドからなる。なお、9×9 燃料（A 型）のみに標準燃料棒の約 2/3 の長さとなる部分長燃料棒が 8 本存在する。

添付 1-1 表 各評価対象部位において考慮する応力

考慮する応力	スペーサ間	スペーサ部	下部端栓溶接部
(1) 内外圧力差に基づく応力	○	○	○
(2) 水力振動に基づく応力	○	○ <sup>※1</sup>	—
(3) 楕円度に基づく応力	○	○	—
(4) スペーサ（支持格子）の接触力に基づく応力	—	○	—
(5) 半径方向温度差に基づく応力	○	○	○
(6) 円周方向温度差に基づく応力	○	○	○ <sup>※1</sup>
(7) 膨張スプリング等による軸方向荷重に基づく応力	○	○	○ <sup>※1</sup>
(8) ウォータチャンネルと燃料被覆管の熱膨張差による応力	○ <sup>※2</sup>	○ <sup>※2</sup>	—
(9) 端栓取付角公差による曲がりに基づく応力	—	—	○ <sup>※1</sup>
(10) スペーサ（支持格子）間の水平地震力による燃料被覆管のたわみに基づく応力 <sup>※3</sup>	○	○	○
(11) チャンネルボックスの水平地震力によるたわみに基づく応力 <sup>※3</sup>	○	○	○
(12) 鉛直方向地震加速度に基づく応力 <sup>※3</sup>	○	○	○

※1：9×9 燃料（A 型）及び MOX 燃料の場合にのみ考慮

※2：9×9 燃料（B 型）の場合にのみ考慮

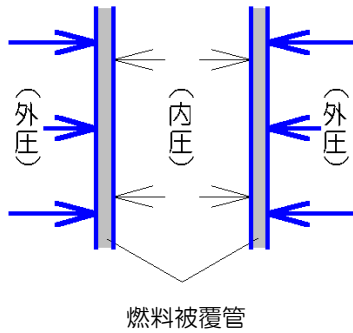
※3：地震動を考慮する場合に新たに加わる応力

[ 解 説 ]

1. 運転中（通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時）に発生する応力

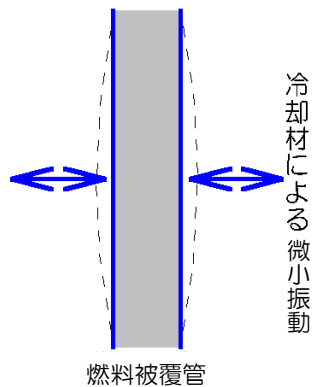
(1) 内外圧力差に基づく応力

燃料被覆管内部ガス圧と冷却材圧力の差圧により発生する応力。



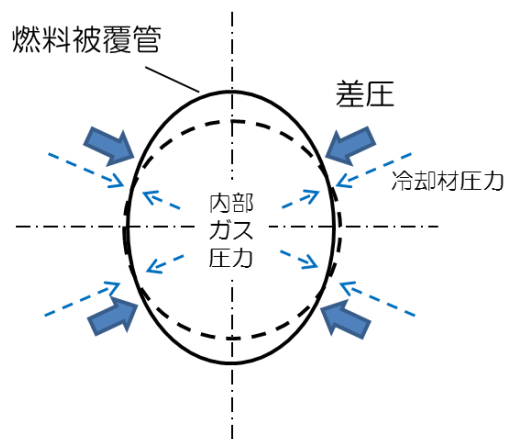
(2) 水力振動に基づく応力

冷却材の流れによって生じる燃料被覆管の微小振動に基づき発生する応力。



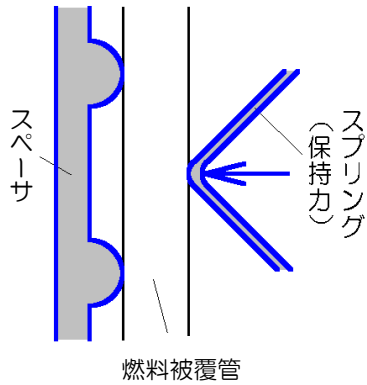
(3) 楕円度に基づく応力

燃料被覆管製作時に生じる真円からのわずかな歪みにより、燃料被覆管内部ガス圧と冷却材圧力の差圧により発生する応力。



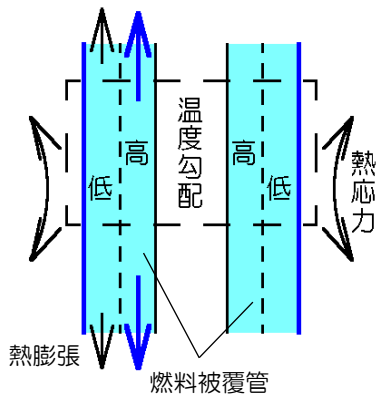
(4) スペーサ（支持格子）の接触力に基づく応力

スペーサ（支持格子）のばね押圧により、スペーサ部に発生する応力。



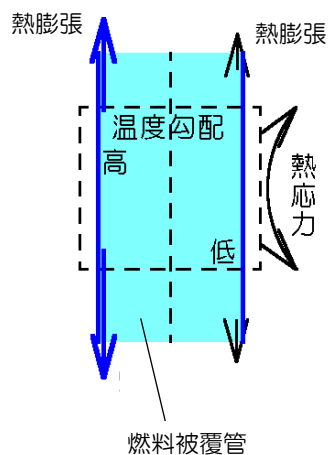
(5) 半径方向温度差に基づく応力

燃料被覆管内外面の温度差に基づく熱膨張差が拘束されることにより発生する応力。



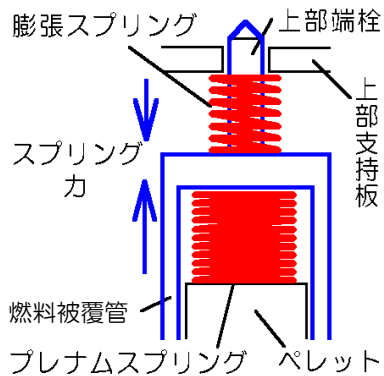
(6) 円周方向温度差に基づく応力

燃料被覆管の円周方向温度分布の不均一による燃料被覆管の湾曲がスペーサ（支持格子）により拘束されることで発生する応力。（9×9燃料（B型）の熱湾曲矯正による応力も同様の応力）



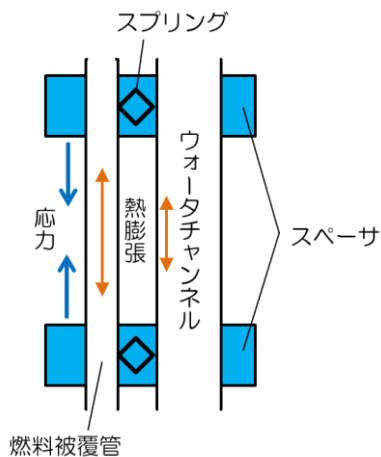
(7) 膨張スプリング等による軸方向荷重に基づく応力

膨張スプリング及びプレナムスプリング (内部スプリング) により発生する応力。  
9 × 9 燃料 (A 型) 及び MOX 燃料については、燃料自重による応力も含む。



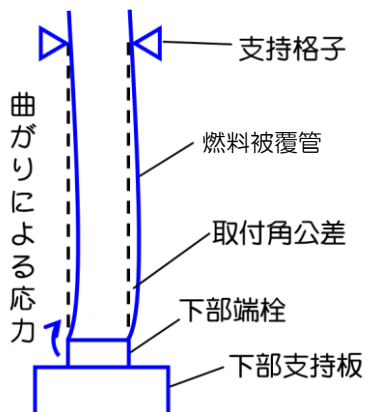
(8) ウォータチャンネルと燃料被覆管の熱膨張差による応力

燃料被覆管とウォータチャンネルの熱膨張差により、燃料被覆管の伸びが拘束されることにより発生する応力 (9 × 9 燃料 (B 型) のみ)。



(9) 端栓取付角公差による曲がりに基づく応力

下部端栓の取付角の公差により、下部端栓とスペーサ (支持格子) との間で燃料被覆管に曲げが生じることにより発生する応力 (9 × 9 燃料 (A 型) 及び MOX 燃料のみ)。

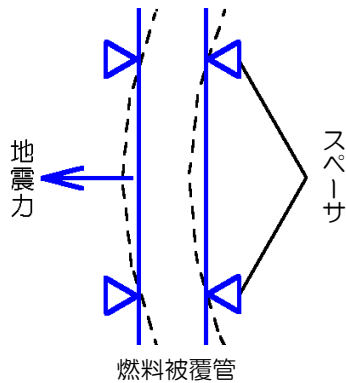




## 2. 地震時に付加される応力

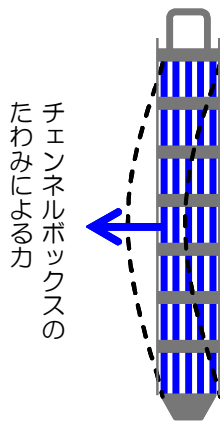
### (10) スペーサ（支持格子）間の水平地震力による燃料被覆管のたわみに基づく応力

水平地震荷重により，スペーサ（支持格子）を支持点として燃料被覆管がたわむことにより発生する応力。



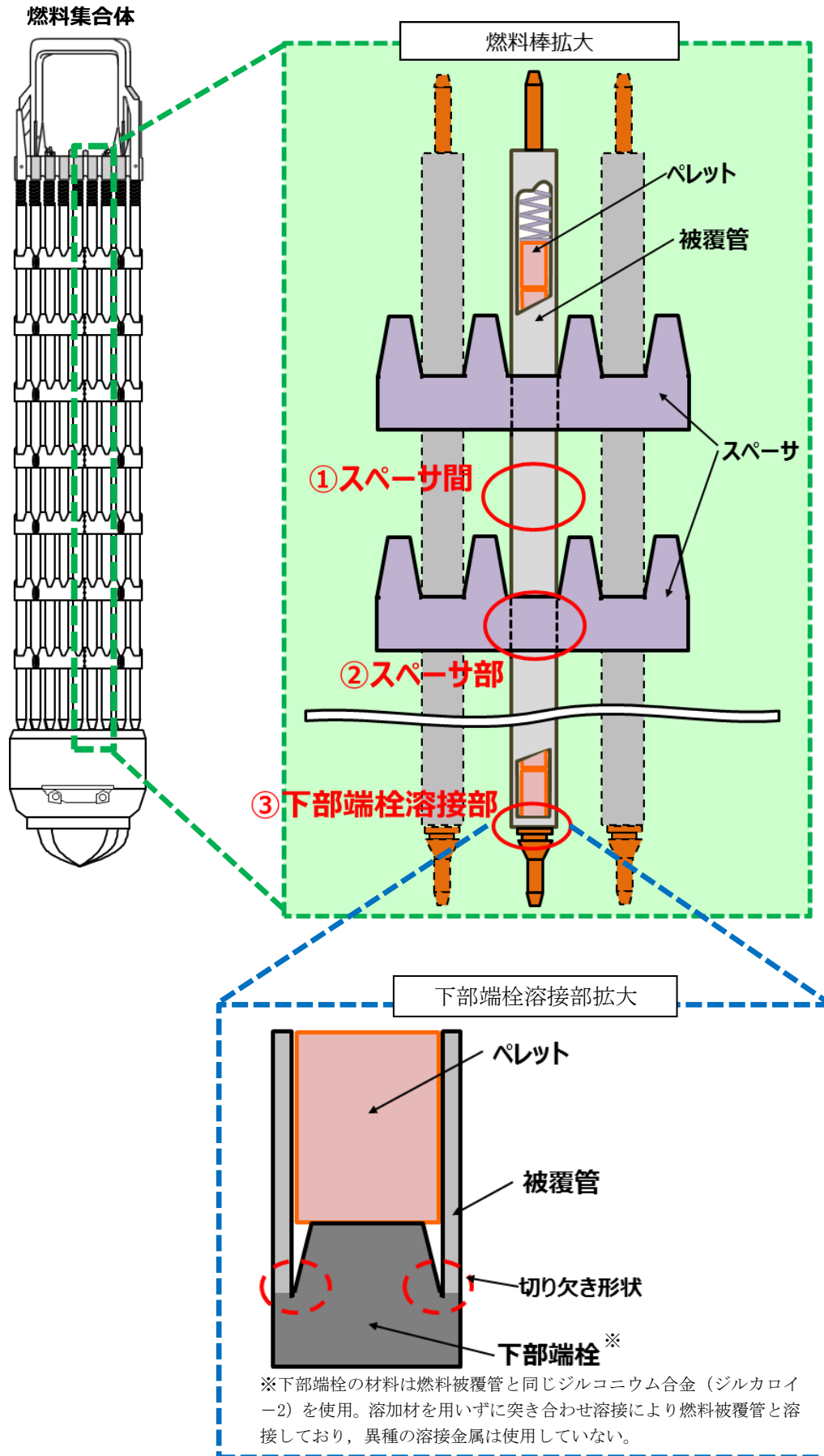
### (11) チャンネルボックスの水平地震力によるたわみに基づく応力

水平地震荷重によるチャンネルボックスのたわみに従って，燃料被覆管がたわむことにより発生する応力。



### (12) 鉛直方向地震加速度に基づく応力

鉛直方向地震加速度により，燃料被覆管に見かけの質量が軸方向に付加されることにより発生する応力。なお，9×9燃料（B型）では「(10) スペーサ（支持格子）間の水平地震力による燃料被覆管のたわみに基づく応力」に加味する形で考慮している。（添付資料8参照）



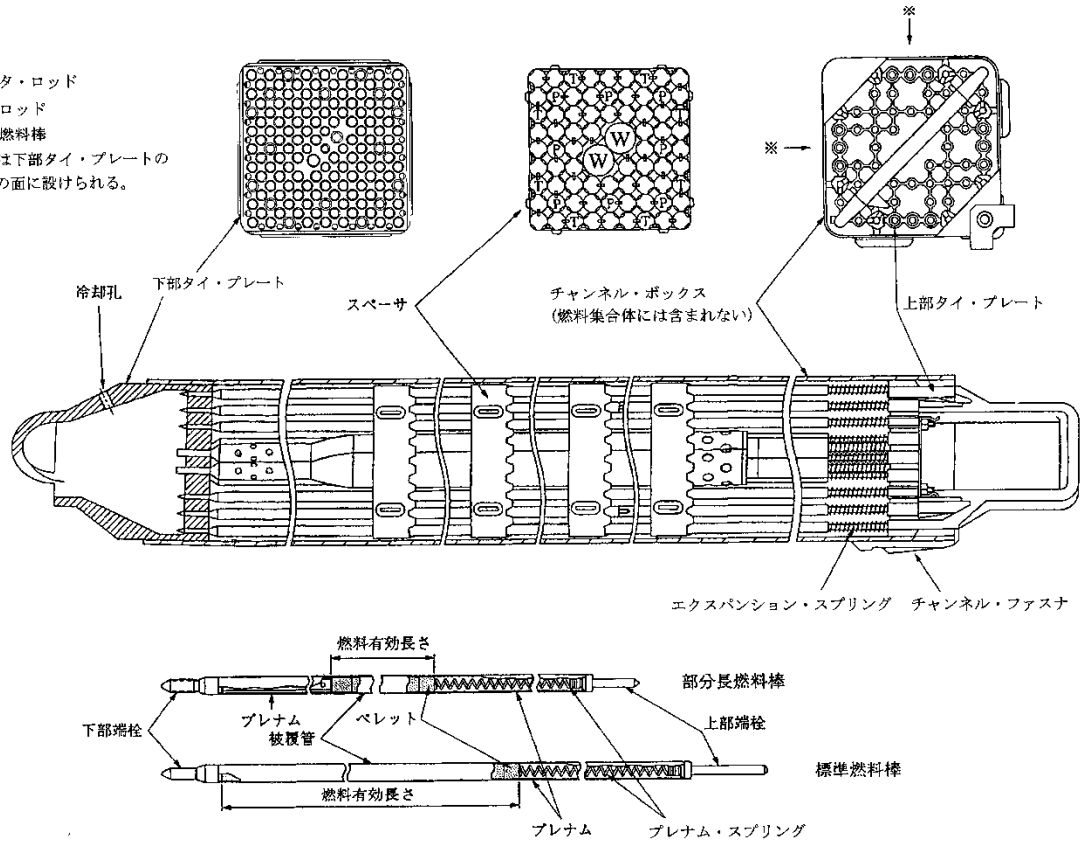
添付 1-1 図 評価対象部位（イメージ）【第 4-2 図再掲】

W : ウォータ・ロッド

T : タイ・ロッド

P : 部分長燃料棒

※ 冷却孔は下部タイ・プレートの  
一印の面に設けられる。

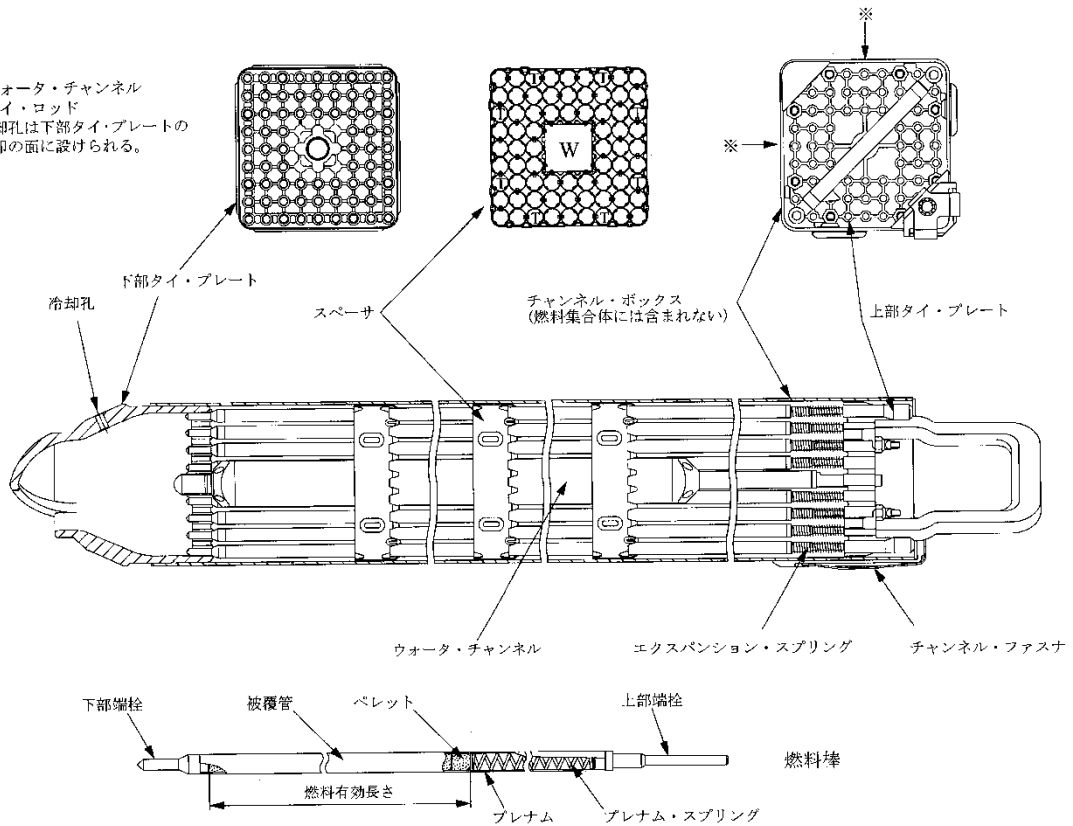


添付 1-2 図 燃料集合体の構造図(9×9燃料(A型))

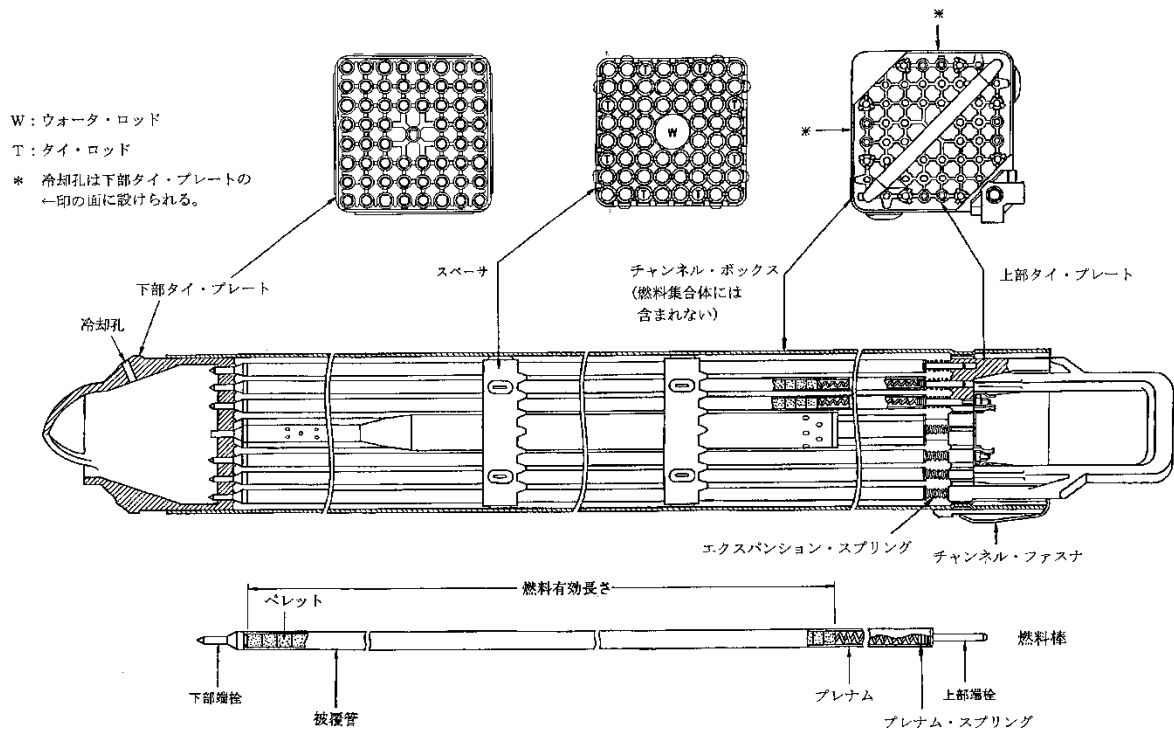
W : ウォータ・チャンネル

T : タイ・ロッド

※ 冷却孔は下部タイ・プレートの  
一印の面に設けられる。



添付 1-3 図 燃料集合体の構造図(9×9燃料(B型))



添付 1-4 図 燃料集合体の構造図(MOX 燃料)

## 燃料被覆管下部端栓溶接部における応力の取扱いについて

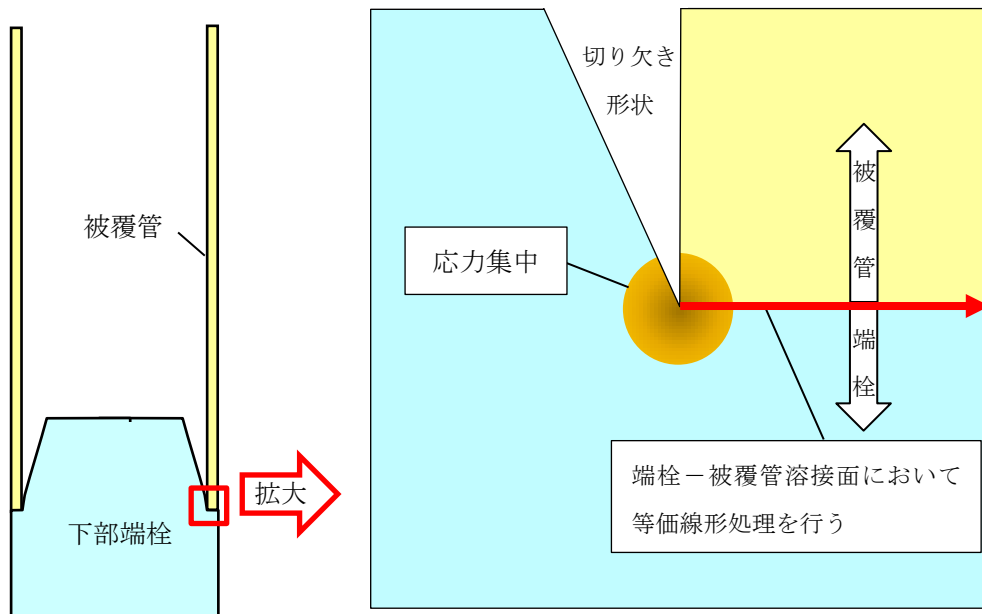
燃料被覆管下部端栓溶接部は、切り欠き形状を含む複雑な形状（添付 2-1 図参照）であるため有限要素法（以下、「FEM」という）を用いた解析により発生応力を求めており、得られる応力値には（一次応力＋二次応力＋ピーク応力）の全応力成分が含まれる（添付 2-2 図参照）。ピーク応力は、荷重の繰り返しがなければ直ちに破損につながることはなく<sup>[1]</sup>、JEAG 4601・補-1984<sup>[2]</sup>においてもピーク応力は疲労評価が対象とされている（添付 2-1 表参照）。よって、等価線形処理により FEM 解析結果から一次応力＋二次応力を求め、応力設計比の計算を行う。

等価線形処理は FEM 解析で得られた応力分布を膜応力、曲げ応力の等価直線成分及び曲げ応力の非直線成分に数値処理により分離する手法であり、圧力容器などのプラント機器の応力解析に適用されている。膜応力は肉厚方向に分布する応力の平均値に等しい応力成分、曲げ応力の等価直線成分は肉厚方向に分布する応力による正味の曲げモーメントと等しいモーメントによって生じる応力成分であり、これらが一次応力＋二次応力に相当する。これらと元の応力分布との差である曲げ応力の非直線成分がピーク応力に相当する。

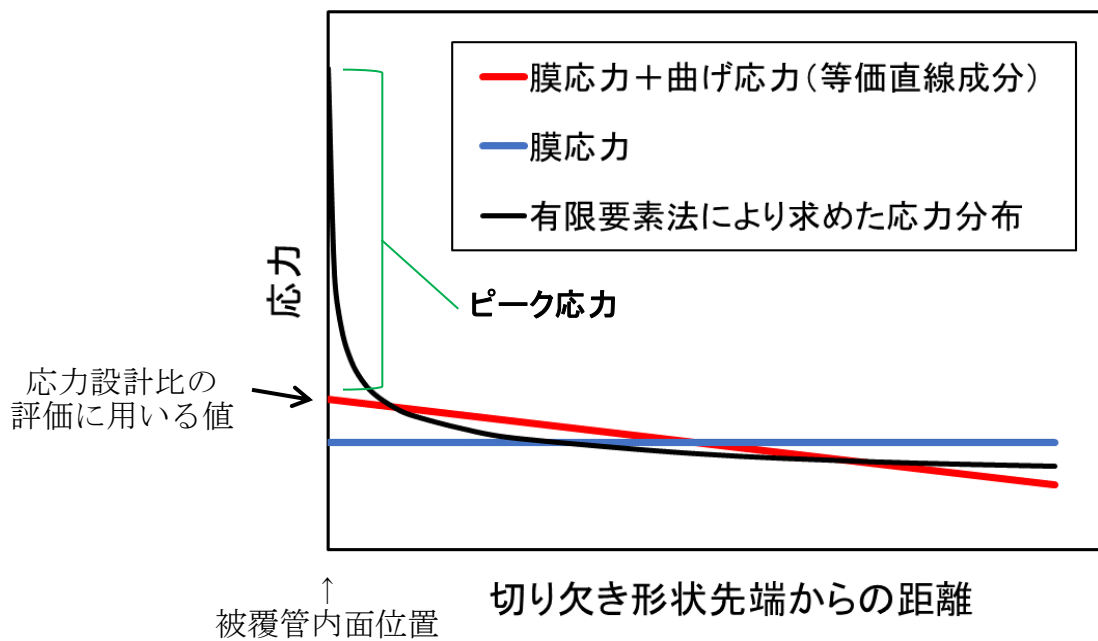
応力の考え方の模式図を添付 2-3 図に示す。応力が最も厳しい条件となるのはピーク応力の方向と正味の曲げモーメントの方向が一致するケースであり、下部端栓溶接部の応力解析では燃料被覆管内面位置が該当する。よって、応力設計比の評価には燃料被覆管内面位置での応力を用いる。

## 参考文献

- [1] 「構造解析のための有限要素法実践ハンドブック」、森北出版、第 1 版第 6 刷、2012 年
- [2] JEAG 4601・補-1984、「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編」、（社）日本電気協会
- [3] JSME S NC1-2005/2007 「発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2005 年版（2007 年追補版含む）」〈第 1 編 軽水炉規格〉、2007 年 9 月、日本機械学会



添付 2-1 図 下部端栓溶接部の有限要素法による応力解析体系（模式図）



添付 2-2 図 応力分布と等価線形処理結果の模式図

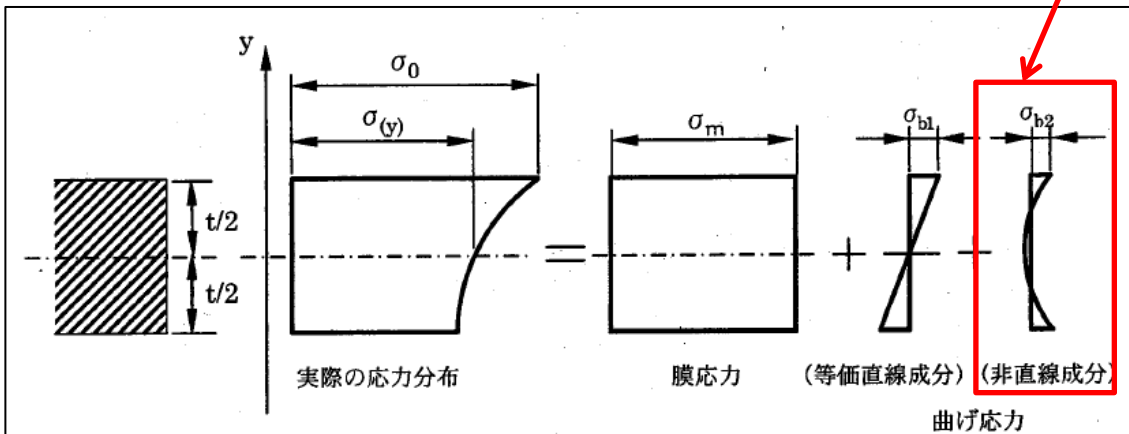
添付 2-1 表 第 1 種容器の許容応力 (JEAG 4601・補-1984<sup>[2]</sup>からの抜粋)

2.1.1 第 1 種容器の許容応力

第 1 種容器の許容応力を次に示す。

応力分類 許容 応力状態	1 次一般膜応力	1 次膜応力+ 1 次曲げ応力	1 次+ 2 次応力	1 次+ 2 次+ ピーク 応力	特別な応力限界	
					純せん断 応力	支圧応力
設計条件	$S_m$	$1.5 S_m$	—	—	—	—
I <sub>A</sub>	—	—	(1) $3 S_m$	(2) 運転状態 I 及び II における荷重 の組合せについ て疲れ解析を行 い疲れ累積係数 が 1.0 以下であ ること。	(7) $0.6 S_m$	(8)(9) $S_y$ ( $1.5 S_y$ )
II <sub>A</sub>	—	—			(7) $0.6 S_m$	(8)(9) $S_y$ ( $1.5 S_y$ )
III <sub>A</sub>	$S_y$ と $2/3 S_u$ の 小さい方。ただ しオーステナイト 系ステンレス鋼 及び高ニッケル 合金については $1.2 S_m$ とする。	左欄の 1.5 倍の値	—	—	(7) $0.6 S_m$	(8)(9) $S_y$ ( $1.5 S_y$ )
IV <sub>A</sub>	$2/3 S_u$ 。ただし オーステナイト 系ステンレス鋼 及び高ニッケル 合金については $2/3 S_u$ と $2.4 S_m$ の小さい方。	左欄の 1.5 倍の値	—	—	—	—
III <sub>A S</sub>	$S_y$ と $2/3 S_u$ の 小さい方。ただ しオーステナイト 系ステンレス 鋼及び高ニッケ ル合金について は $1.2 S_m$ とする。	左欄の 1.5 倍の値 <sup>(3)</sup>	(4) $3 S_m$ 〔 $S_1$ 又は $S_2$ 地震動のみ による応力 振幅につい て評価する。〕	(5)(6) $S_1$ 又は $S_2$ 地震 動のみによる疲 れ解析を行い疲 れ累積係数を求 め、運転状態 I, II における疲れ 累積係数との和 が 1.0 以下であ ること。	(7) $0.6 S_m$	(9) $S_y$ ( $1.5 S_y$ )
IV <sub>A S</sub>	$2/3 S_u$ 。ただし オーステナイト 系ステンレス鋼 及び高ニッケル 合金については $2/3 S_u$ と $2.4 S_m$ の小さい方。	左欄の 1.5 倍の値			(9) $0.4 S_u$	(9) $S_u$ ( $1.5 S_u$ )

ピーク応力に相当



解説図 GNR-2130-1 膜応力と曲げ応力の考え方

解説図 GNR-2130-1 において、

膜応力 ( $\sigma_m$ )

$$\sigma_m = \frac{1}{t} \int_{-t/2}^{t/2} \sigma(y) dy \quad (\text{解説 GNR-1.1})$$

曲げ応力の等価直線成分 ( $\sigma_{b1}$ )

$$\sigma_{b1} = \frac{6}{t^2} \int_{-t/2}^{t/2} y \sigma(y) dy \quad (\text{解説 GNR-1.2})$$

曲げ応力の非直線成分 ( $\sigma_{b2}$ )

$$\sigma_{b2} = \sigma_0 - \sigma_m - \sigma_{b1} \quad (\text{解説 GNR-1.3})$$

添付 2-3 図 応力の考え方 (JSME S NC1-2005/2007<sup>[3]</sup>からの抜粋)



地震による応力を考慮した燃料被覆管応力評価（閉じ込め機能の維持）について

通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に発生する応力に加え地震による応力を考慮した場合の燃料被覆管応力評価結果を以下に示す。

[ 9 × 9 燃料 (A 型), MOX 燃料の評価結果]

(1) 評価部位：スペーサ間，スペーサ部，下部端栓溶接部

(2) 解析コード：<スペーサ間，スペーサ部>

弾性解析コード FURST Ver. 5<sup>\*1</sup>（設置許可，設計認可と同じ）

<下部端栓溶接部>

有限要素法解析コード ANSYS Ver. 14<sup>\*2</sup>（添付資料 7 参照）

(3) 評価点：燃料寿命初期，中期，末期

(4) 運転状態：出力過渡（121%出力）または圧力過渡（冷却材圧力  MPa[abs]）

(5) 考慮する応力：①内外圧力差に基づく応力（一次応力）

②水力振動に基づく応力（一次応力）

③楕円度に基づく応力（一次応力）

④スペーサの接触圧に基づく応力（スペーサ部評価のみ）（二次応力）

⑤半径方向温度差に基づく熱応力（二次応力）

⑥円周方向温度差に基づく熱応力（二次応力）

⑦膨張スプリング等による軸方向荷重に基づく応力（一次応力）

⑧端栓取付角公差による曲がりに基づく応力（二次応力）

地震動による影響を評価する場合は下記応力を追加する。ここで燃料集合体の加速度（水平方向）は燃料集合体軸方向で分布を持つが，スペーサ間及びスペーサ部については最大値を固定値として入力する。

⑨スペーサ間の水平地震力による燃料被覆管のたわみに基づく応力（一次応力）

⑩チャンネルボックスの水平地震力によるたわみに基づく応力（二次応力）

⑪鉛直地震加速度に基づく応力（一次応力）

(6) 許容応力：弾性設計用地震動（Sd）において，一次+二次応力に対して降伏応力（Sy）

基準地震動（Ss）において，一次+二次応力に対して引張強さ（Su）  
（添付資料 5 参照）

(7) 地震動に係る入力値：<スペーサ間，スペーサ部>

水平加速度 4.10G（Ss 応答加速度）

鉛直加速度 1.54G<sup>\*3</sup>（同上）

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。

燃料集合体相対変位 35.0mm (Ss 応答変位)

水平加速度 3.97G (Sd 応答加速度)

鉛直加速度 0.78G (同上)

燃料集合体相対変位 33.9mm (Sd 応答変位)

<下部端栓溶接部>

水平加速度 2.21G (Ss 応答加速度)

鉛直加速度 1.54G<sup>※3</sup> (同上)

燃料集合体相対変位 35.0mm (Ss 応答変位)

水平加速度 2.20G (Sd 応答加速度)

鉛直加速度 0.78G (同上)

燃料集合体相対変位 33.9mm (Sd 応答変位)

ここで、燃料集合体に作用する水平地震加速度及び鉛直地震加速度、燃料集合体の相対変位として、基本ケースの値に加えて地盤の不確かさを考慮した値を用いる。工事計画認可申請における評価では、その他の材料物性の不確かさ等も考慮する。

また、工事計画認可申請段階の評価においては、水平2方向及び鉛直方向を考慮した評価を実施する。燃料被覆管の水平2方向の地震動を考慮した評価では、別紙10「水平2方向及び鉛直方向地震力の適切な組合せに関する検討について」参考資料3に示すとおり、島根原子力発電所の基準地震動S<sub>s</sub>のうち水平方向の地震動に方向性がないものについては、水平2方向及び鉛直方向地震動の同時入力による影響検討を行う場合、水平2方向のうち1方向について位相の異なる模擬地震波を作成し入力することを基本とする。別紙10に示すとおり、位相の異なる水平地震動を用いた場合、水平2方向の地震動によるオービットには偏りがない傾向となることから、水平2方向を考慮した場合の影響は軽微であると考えられるが、今後、工事計画認可申請で水平2方向の影響について詳細検討を実施する。

- (8) 評価結果：9×9 燃料 (A 型) の燃料被覆管応力評価結果を添付 3-1 表に、MOX 燃料の評価結果を添付 3-2 表に示す。9×9 燃料 (A 型) の応力設計比は最大で 0.80, MOX 燃料の応力設計比は最大で 0.84 であり、1.0 より小さいことを確認した。(添付資料 13 参照)

※1：地震時に燃料被覆管に発生する応力は、燃料被覆管に梁モデルを用いて、水平方向の加速度による燃料被覆管のたわみに基づく応力の計算式、チャンネルボックスのたわみにより強制変位を受けた際の応力計算式及び燃料被覆管に鉛直方向地震力が加わった場合に燃料被覆管断面にかかる圧縮及び引張応力の計算式で計算する。これは、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に発生する応力の計算式を材料力学に基づいて設定している点と同様であり、応力計算方

法は同じである。FURST はこれらの発生する応力を積算し、応力設計比が最大となるように組み合わせて計算することが可能である。

- ※2： 燃料被覆管下部端栓溶接部の切り欠き形状の先端近傍では応力集中が生じるがピーク応力は荷重の繰り返しがなければ直ちに破損につながることはないため、一次応力+二次応力を評価に用いる。また、水平地震加速度及び燃料集合体の相対変位により生じる曲げ応力と鉛直地震加速度により発生する軸方向の引張応力及び圧縮応力の組合せにあたっては、引張方向及び圧縮方向の応力がそれぞれ絶対値が個々に大きくなるように組み合わせた解析を実施する。
- ※3： 鉛直加速度が1Gを超過するため、燃料集合体が浮上がる可能性について検討した結果を添付資料12に示す。既往知見より、鉛直加速度1.5Gの場合でも燃料集合体の浮き上がりは数mm程度と小さく、浮き上がりに伴う衝突荷重の影響や冷却材流路に及ぼす影響は小さいものと考えているが、工事計画認可申請で島根2号炉の地震応答に対する燃料集合体の浮き上がりの影響について詳細検討を行う。

添付 3-1 表 燃料被覆管応力の評価結果 (9×9 燃料 (A 型))

地震動と許容応力	運転条件	評価点	スペーサ間 (応力設計比)	スペーサ部 (応力設計比)	下部端栓 溶接部 (応力設計比)
弾性設計用 地震動 Sd に 対して降伏 応力 Sy	圧力 過渡	寿命初期	0.80	0.77	0.72
		寿命中期	0.30	0.27	0.34
		寿命末期	0.26	0.25	0.26
	出力 過渡	寿命初期	0.77	0.67	0.66
		寿命中期	0.32	0.30	0.31
		寿命末期	0.27	0.25	0.24
基準地震動 Ss に対して 引張強さ Su	圧力 過渡	寿命初期	0.46	0.42	0.40
		寿命中期	0.28	0.26	0.31
		寿命末期	0.24	0.24	0.26
	出力 過渡	寿命初期	0.45	0.37	0.37
		寿命中期	0.29	0.27	0.29
		寿命末期	0.25	0.23	0.23

添付 3-2 表 燃料被覆管応力の評価結果 (MOX 燃料)

地震動と許容応力	運転条件	評価点	スペーサ間 (応力設計比)	スペーサ部 (応力設計比)	下部端栓 溶接部 (応力設計比)
弾性設計用 地震動 Sd に 対して降伏 応力 Sy	圧力 過渡	寿命初期	0.84	0.66	0.81
		寿命中期	0.34	0.33	0.38
		寿命末期	0.44	0.45	0.32
	出力 過渡	寿命初期	0.82	0.64	0.78
		寿命中期	0.44	0.44	0.37
		寿命末期	0.63	0.64	0.31
基準地震動 Ss に対して 引張強さ Su	圧力 過渡	寿命初期	0.49	0.38	0.45
		寿命中期	0.31	0.30	0.35
		寿命末期	0.37	0.37	0.31
	出力 過渡	寿命初期	0.49	0.38	0.44
		寿命中期	0.38	0.37	0.34
		寿命末期	0.50	0.49	0.30

[燃料タイプ：9×9 燃料（B 型）の評価結果]

(1) 評価部位：スペーサ間，スペーサ部，下部端栓溶接部

(2) 解析コード：<スペーサ間，スペーサ部>

弾性解析コード BSPAN2 Ver. 2.2<sup>\*1</sup>（設置許可，設計認可と同じ）  
<下部端栓溶接部>

有限要素法解析コード ANSYS Ver. 13<sup>\*2</sup>

(3) 評価点：燃料寿命初期，中期，末期

(4) 運転状態：出力過渡（121%出力）または圧力過渡（冷却材圧力  MPa[abs]）

(5) 考慮する応力：①冷却材による外圧及び燃料棒内圧によって生じる応力（一次応力）

②流力振動による応力（スペーサ間評価のみ）（一次応力）

③燃料被覆管楕円度による曲げ応力（一次応力）

④支持格子での保持力による応力（スペーサ部評価のみ）（二次応力）

⑤燃料被覆管の径方向温度勾配による応力（二次応力）

⑥燃料被覆管の周方向温度勾配による応力（二次応力）

⑦熱湾曲矯正による応力（二次応力）

⑧膨張スプリング及び内部スプリングによる応力（二次応力）

⑨ウォータチャンネルと燃料被覆管の熱膨張差による応力（二次応力）

地震による影響を評価する場合は下記応力を追加する。ここで燃料集合体の加速度（水平方向）は燃料集合体軸方向で分布を持つが，スペーサ間及びスペーサ部については最大値を固定値として入力する。

⑩支持格子間の水平地震力によるたわみに基づく応力（一次応力）

⑪チャンネルボックスの水平地震力によるたわみに基づく応力（二次応力）

なお，鉛直方向の地震加速度は燃料要素単位長質量に加速度を考慮することでみかけの質量増加として扱い，⑩に加味することで計算する。水平方向の地震加速度がおよそ  を超える範囲において，地震時鉛直加速度を直接軸方向応力として作用させる手法に対して本手法が保守的な評価となることを確認している。（添付資料 8 参照）

(6) 許容応力：弾性設計用地震動 (Sd) において一次+二次応力に対して降伏応力 (Sy) 基準地震動 (Ss) において，一次+二次応力に対して引張強さ (Su)（添付資料 5 参照）

(7) 地震動に係る入力値：<スペーサ間，スペーサ部>

水平加速度 4.10G (Ss 応答加速度)

鉛直加速度 1.54G<sup>\*3</sup> (同上)

燃料集合体相対変位 35.0mm (Ss 応答変位)

水平加速度 3.97G (Sd 応答加速度)

鉛直加速度 0.78G (同上)

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。

燃料集合体相対変位 33.9mm (Sd 応答変位)

< 下部端栓溶接部 >

水平加速度 2.21G (Ss 応答加速度)

鉛直加速度 1.54G<sup>※3</sup> (同上)

燃料集合体相対変位 35.0mm (Ss 応答変位)

水平加速度 2.20G (Sd 応答加速度)

鉛直加速度 0.78G (同上)

燃料集合体相対変位 33.9mm (Sd 応答変位)

ここで、燃料集合体に作用する水平地震加速度及び鉛直地震加速度、燃料集合体の相対変位として、基本ケースの値に加えて地盤の不確かさを考慮した値を用いる。工事計画認可申請における評価では、その他の材料物性の不確かさ等も考慮する。

また、工事計画認可申請段階の評価においては、水平2方向及び鉛直方向を考慮した評価を実施する。燃料被覆管の水平2方向の地震動を考慮した評価では、別紙10「水平2方向及び鉛直方向地震力の適切な組合せに関する検討について」参考資料3に示すとおり、島根原子力発電所の基準地震動S<sub>s</sub>のうち水平方向の地震動に方向性がないものについては、水平2方向及び鉛直方向地震動の同時入力による影響検討を行う場合、水平2方向のうち1方向について位相の異なる模擬地震波を作成し入力することを基本とする。別紙10に示すとおり、位相の異なる水平地震動を用いた場合、水平2方向の地震動によるオービットには偏りがない傾向となることから、水平2方向を考慮した場合の影響は軽微であると考えられるが、今後、工事計画認可申請で水平2方向の影響について詳細検討を実施する。

(8) 評価結果: 9×9 燃料(B型)の燃料被覆管応力評価結果を添付3-3表に示す。

9×9 燃料(B型)の応力設計比は最大で0.79であり、1.0より小さいことを確認した。

※1: 地震時に燃料被覆管に発生する応力は、燃料被覆管に梁モデルを用いて、水平方向の加速度による燃料被覆管のたわみに基づく応力の計算式、チャンネルボックスのたわみにより強制変位を受けた際の応力計算式及び燃料被覆管に鉛直方向地震力が加わった場合に燃料被覆管断面にかかる圧縮及び引張応力の計算式で計算する。これは、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に発生する応力の計算式を材料力学に基づいて設定している点と同様であり、応力計算方法は同じである。BSPAN2はこれらの発生する応力を積算し、応力設計比が最大となるように組み合わせて計算することが可能である。

- ※2：燃料被覆管下部端栓溶接部の切り欠き形状の先端近傍では応力集中が生じるがピーク応力は荷重の繰り返しがなければ直ちに破損につながることはないため、一次応力＋二次応力を評価に用いる。また、水平地震加速度及び燃料集合体の相対変位により生じる曲げ応力と鉛直地震加速度により発生する軸方向の引張応力及び圧縮応力の組合せにあたっては、引張方向及び圧縮方向の応力がそれぞれ絶対値が個々に大きくなるように組み合わせた解析を実施する。
- ※3：鉛直加速度が1Gを超過するため、燃料集合体が浮上がる可能性について検討した結果を添付資料12に示す。既往知見より、鉛直加速度1.5Gの場合でも燃料集合体の浮き上がりは数mm程度と小さく、浮き上がりに伴う衝突荷重の影響や冷却材流路に及ぼす影響は小さいものと考えているが、工事計画認可申請で島根2号炉の地震応答に対する燃料集合体の浮き上がりの影響について詳細検討を行う。

添付 3-3 表 燃料被覆管応力の評価結果 (9×9 燃料 (B 型))

地震動と 許容応力	運転 条件	評価点	スペーサ間 (応力設計比)	スペーサ部 (応力設計比)	下部端栓 溶接部 (応力設計比)
弾性設計用 地震動 Sd に 対して降伏 応力 Sy	圧力 過渡	寿命初期	0.76	0.79	0.69
		寿命中期	0.36	0.33	0.56
		寿命末期	0.31	0.29	0.52
	出力 過渡	寿命初期	0.74	0.74	0.62
		寿命中期	0.39	0.35	0.51
		寿命末期	0.30	0.27	0.47
基準地震動 Ss に対して 引張強さ Su	圧力 過渡	寿命初期	0.48	0.48	0.40
		寿命中期	0.34	0.31	0.37
		寿命末期	0.30	0.28	0.35
	出力 過渡	寿命初期	0.48	0.46	0.36
		寿命中期	0.36	0.33	0.35
		寿命末期	0.29	0.27	0.32



地震による繰り返し荷重を考慮した燃料被覆管疲労評価  
(閉じ込め機能の維持) について

地震による振動サイクルを考慮した場合の燃料被覆管疲労評価結果を以下に示す。  
燃料被覆管疲労解析の評価部位は、切り欠きと類似した形状を有し応力集中が発生する下部端栓溶接部とする。

[燃料タイプ：9×9 燃料 (A 型)，MOX 燃料の評価結果]

- (1) 評価部位：下部端栓溶接部
- (2) 解析コード：有限要素法解析コード ANSYS Ver. 14
- (3) 評価点：燃料寿命初期，中期，末期
- (4) 運転状態：評価上最も厳しい条件として圧力過渡（冷却材圧力  MPa [abs]）
- (5) 地震荷重の繰り返し数：基準地震動  $S_s$  150 回  
弾性設計用地震動  $S_d$  300 回
- (6) 許容サイクル数：ジルカロイ設計疲労曲線（添付 4-1 図参照）に基づき設定
- (7) 地震動に係る入力値：水平加速度 2.21G ( $S_s$  応答加速度)  
鉛直加速度 1.54G (同上)  
燃料集合体相対変位 35.0mm ( $S_s$  応答変位)  
水平加速度 2.20G ( $S_d$  応答加速度)  
鉛直加速度 0.78G (同上)  
燃料集合体相対変位 33.9mm ( $S_d$  応答変位)
- (8) 評価結果：9×9 燃料 (A 型) 及び MOX 燃料の地震による振動サイクルに伴う累積疲労係数の増分評価結果を添付 4-1 表及び添付 4-2 表に示す。  
9×9 燃料 (A 型) の累積疲労係数の増分は最大で 0.00250，MOX 燃料の累積疲労係数の増分は最大で 0.00508 となった。

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 4-1 表 地震による振動サイクルに伴う累積疲労係数（9×9 燃料（A 型））

地震動	評価点	応力振幅 (N/mm <sup>2</sup> )	許容 サイクル数	地震荷重の 繰り返し数	疲労係数の 増分
基準地震動 Ss	寿命初期	71	$6.4 \times 10^4$	150	0.00234
	寿命中期	70	$7.0 \times 10^4$	150	0.00214
	寿命末期	71	$6.4 \times 10^4$	150	0.00234
弾性設計用 地震動 Sd	寿命初期	66	$1.2 \times 10^5$	300	0.00250
	寿命中期	66	$1.2 \times 10^5$	300	0.00250
	寿命末期	66	$1.2 \times 10^5$	300	0.00250

添付 4-2 表 地震による振動サイクルに伴う累積疲労係数（MOX 燃料）

地震動	評価点	応力振幅 (N/mm <sup>2</sup> )	許容 サイクル数	地震荷重の 繰り返し数	疲労係数の 増分
基準地震動 Ss	寿命初期	76	$4.2 \times 10^4$	150	0.00357
	寿命中期	76	$4.2 \times 10^4$	150	0.00357
	寿命末期	76	$4.2 \times 10^4$	150	0.00357
弾性設計用 地震動 Sd	寿命初期	72	$5.9 \times 10^4$	300	0.00508
	寿命中期	71	$6.4 \times 10^4$	300	0.00469
	寿命末期	71	$6.4 \times 10^4$	300	0.00469

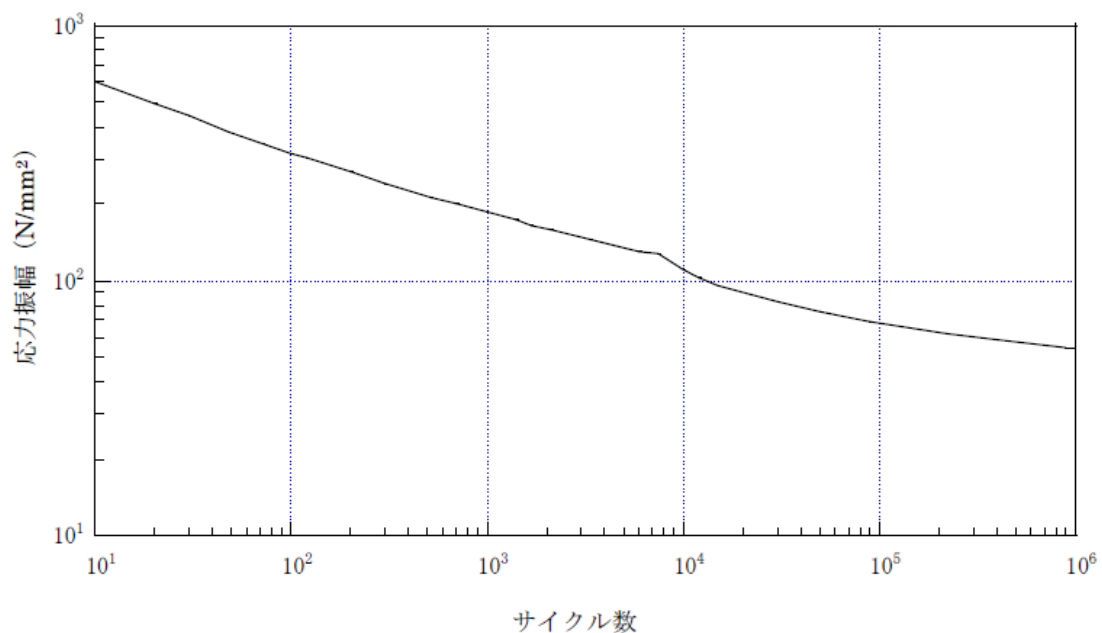
[燃料タイプ：9×9 燃料（B 型）の評価結果]

- (1) 評価部位：下部端栓溶接部
- (2) 解析コード：有限要素法解析コードANSYS Ver. 13
- (3) 評価点：燃料寿命初期，中期，末期
- (4) 運転状態：評価上最も厳しい条件として圧力過渡（冷却材圧力  MPa[abs]）
- (5) 地震荷重の繰り返し数：基準地震動Ss 150回  
弾性設計用地震動Sd 300回
- (6) 許容サイクル数：ジルカロイ設計疲労曲線（添付4-1図参照）に基づき設定
- (7) 地震動の入力値：水平加速度2.21G（Ss 応答加速度）  
鉛直加速度1.54G（同上）  
燃料集合体相対変位35.0mm（Ss 応答変位）  
水平加速度2.20G（Sd 応答加速度）  
鉛直加速度0.78G（同上）  
燃料集合体相対変位33.9mm（Sd 応答変位）
- (8) 評価結果：9×9 燃料（B 型）の地震による振動サイクルに伴う累積疲労係数の増分評価結果を添付 4-3 表に示す。9×9 燃料（B 型）の累積疲労係数の増分は最大で 0.00532 となった。

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 4-3 表 地震による振動サイクルに伴う累積疲労係数（9×9 燃料（B 型））

地震動	評価点	応力振幅 (N/mm <sup>2</sup> )	許容 サイクル数	地震荷重の 繰り返し数	疲労係数の 増分
基準地震動 Ss	寿命初期	87	$2.8 \times 10^4$	150	0.00532
	寿命中期	85	$3.0 \times 10^4$	150	0.00496
	寿命末期	84	$3.2 \times 10^4$	150	0.00476
弾性設計用 地震動 Sd	寿命初期	73	$6.6 \times 10^6$	300	0.00458
	寿命中期	71	$7.2 \times 10^6$	300	0.00416
	寿命末期	71	$7.6 \times 10^6$	300	0.00393



添付4-1図 ジルカロイの設計疲労曲線<sup>※1</sup>

※1：ジルカロイ設計疲労曲線は、ジルカロイ-2の未照射材及び照射材についての疲労試験結果をベースに、ジルカロイ-4等の機械特性及び疲労特性がジルカロイ-2とほぼ同等であることを確認し、ジルカロイ-2、3及び4共通の設計曲線として設定したものである。Langer-0' Donnell は、設計曲線を保守側に見積もるため、未照射材及び照射材それぞれについて応力を1/2、サイクル数を1/20とし、未照射材及び照射材の両者の包絡線をLanger-0' Donnell の設計疲労曲線<sup>[1]</sup>としている。ここで、異なる高速中性子照射量に対する疲労試験結果から、疲労特性の照射量依存性は小さいことが示されており、また、過去の研究<sup>[2]</sup>において、高速中性子照射量約 $1.3 \times 10^{22} \text{cm}^{-2}$ までのジルカロイ-2燃料被覆管の疲労試験データが採取され、Langer-0' Donnellの照射材疲労試験データに包絡されることが確認されている。なお、BWRの燃料被覆管はジルカロイ-2を用い

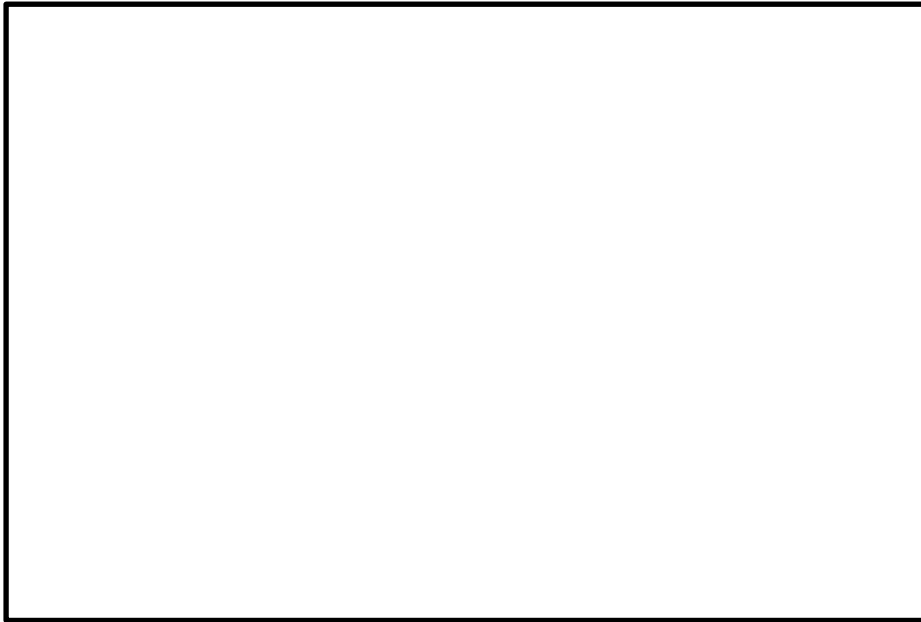
ており、疲労評価の対象部位である下部端栓溶接部の寿命末期に相当する高速中性子照射量は、上記疲労試験<sup>[1,2]</sup>の範囲内にある。

#### 参考文献

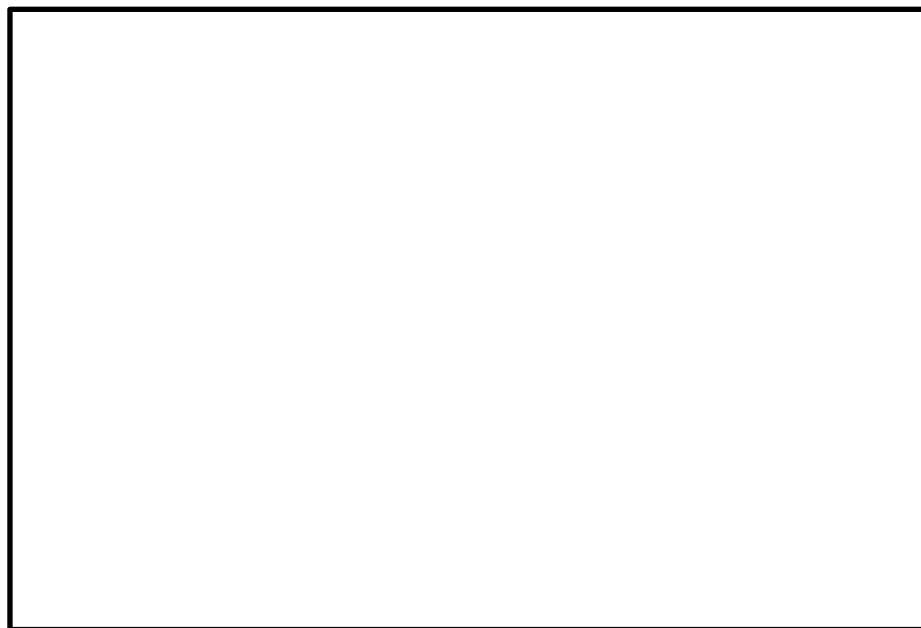
- [1] W. J. O'Donnell and B. F. Langer, "Fatigue Design Basis for Zircaloy Components", Nuclear Science and Engineering, 20, 1-12 (1964)
- [2] S. Ishimoto, et al., "Improved Zr Alloys for High Burnup BWR Fuel", Top\_Fuel 2006 (2006 International Meeting on LWR Fuel Performance, 22-26 October 2006, Salamanca, Spain)

燃料被覆管応力評価における許容応力について

燃料被覆管の許容応力（降伏応力及び引張強さ）は，中性子照射量と燃料被覆管温度に依存するため，燃料メーカーの試験結果に基づき，添付 5-1～5 図のように設定している。

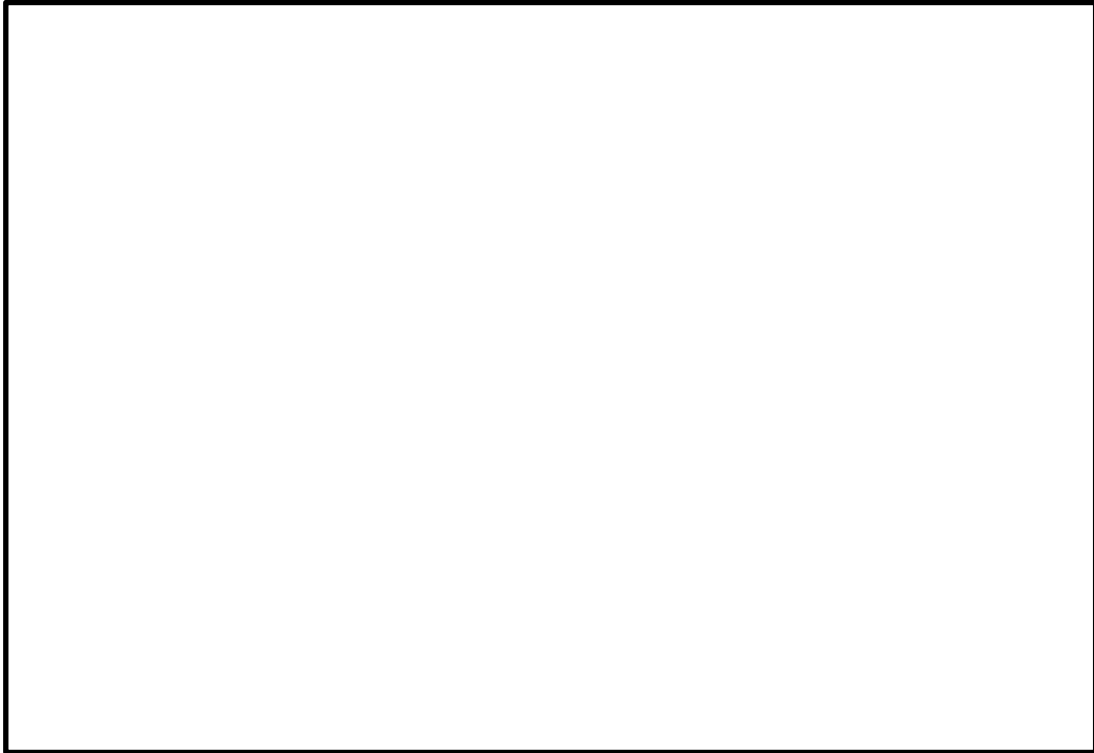


添付 5-1 図 スペーサ間，スペーサ部の引張強さ及び降伏応力設計値（公称値）  
（9×9燃料（A型），MOX燃料）

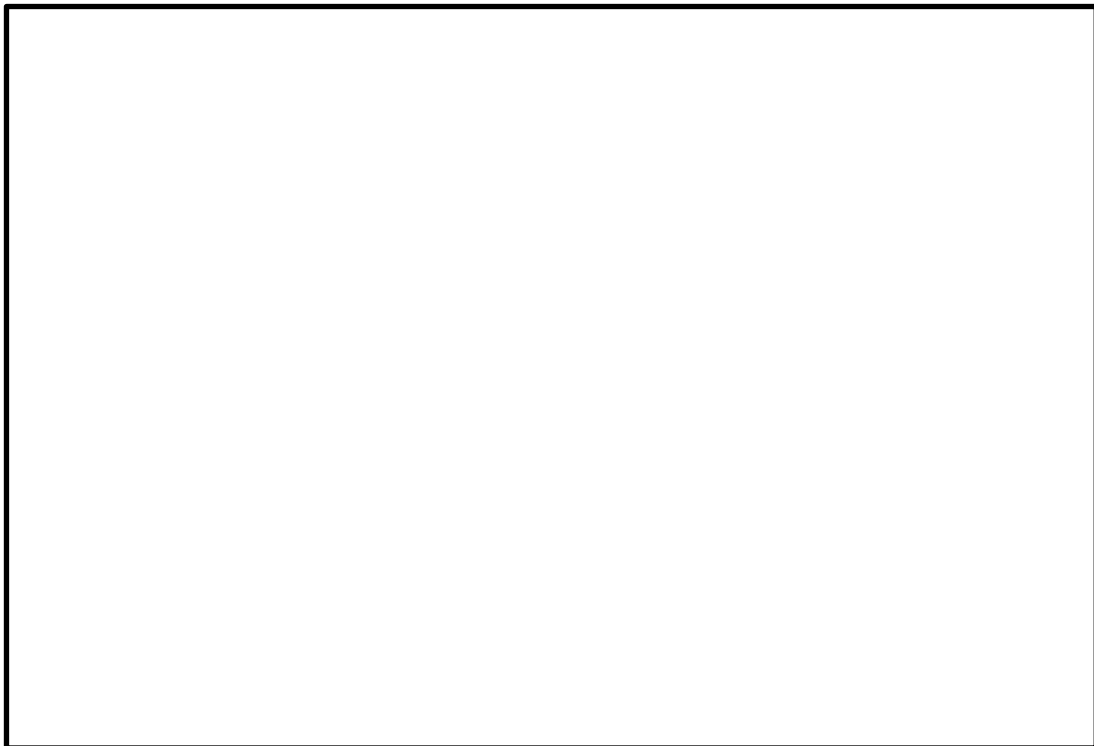


添付 5-2 図 下部端栓溶接部の降伏応力設計値（95%確率下限値）  
（9×9燃料（A型），MOX燃料）

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。

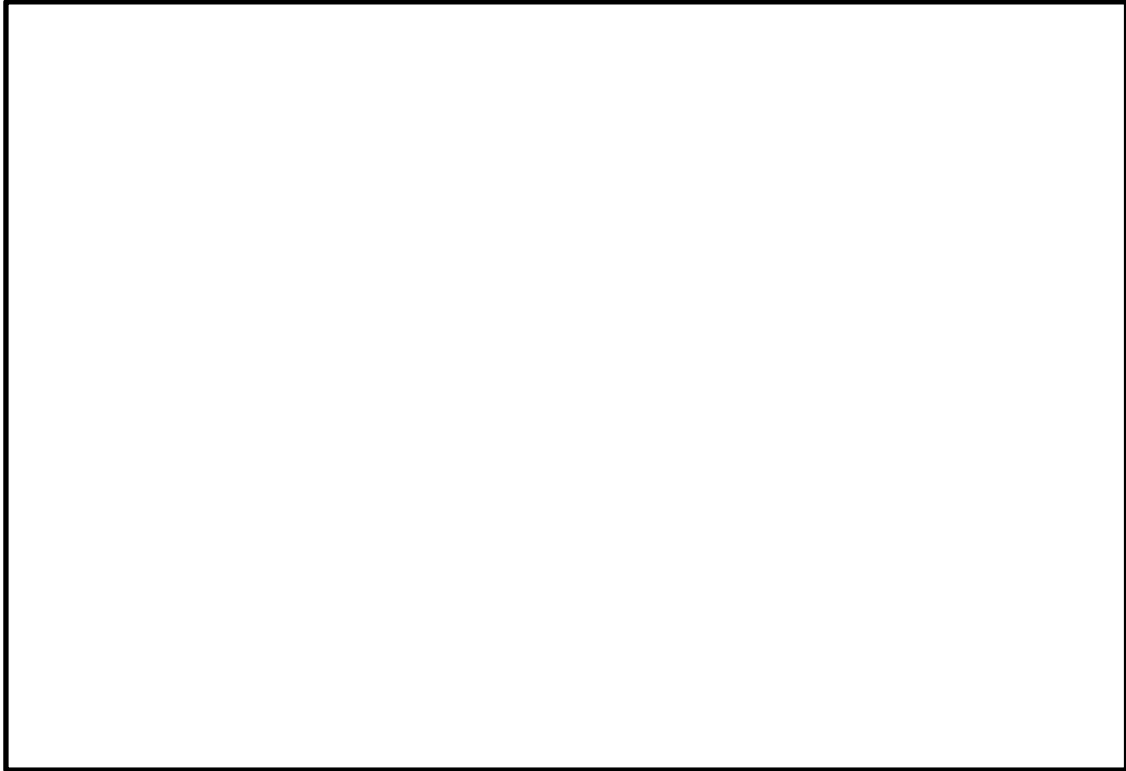


添付 5-3 図 下部端栓溶接部の引張強さ設計値 (95%確率下限値)  
(9 × 9 燃料 (A 型), MOX 燃料)



添付 5-4 図 スペーサ間, スペーサ部の引張強さ及び降伏応力設計値  
(公称値) (9 × 9 燃料 (B 型))

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。



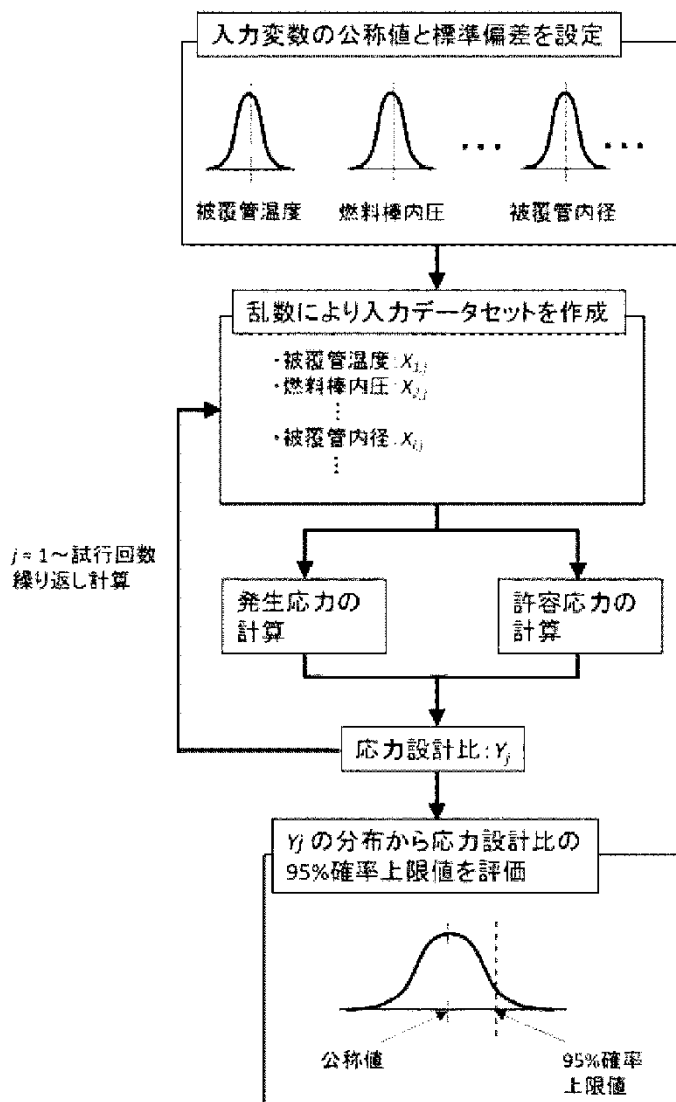
添付 5-5 図 下部端栓溶接部の引張強さ及び降伏応力設計値 (95%確率下限値)  
(9 × 9 燃料 (B 型))

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。



## 燃料被覆管応力評価におけるモンテカルロ法による統計処理について

燃料被覆管応力評価におけるモンテカルロ法による統計処理の概要フローを添付 6-1 図に示す。モンテカルロ法による統計処理では，入力変数に公称値と標準偏差を定め，一回の試行ごとに統計的分布に従った入力データセットを乱数により作成し，応力設計比を求める。本試行を繰り返すことで応力設計比の統計的分布を求め，95% 確率上限値が 1 以下であることを確認する。



添付 6-1 図 モンテカルロ法による統計処理の概要フロー

## 下部端栓溶接部の応力評価に使用する有限要素法解析コードについて

下部端栓溶接部は切り欠き形状を含む複雑形状のため、下部端栓溶接部の応力評価に当たっては、有限要素法を用いる。9×9燃料（A型）及びMOX燃料の下部端栓溶接部の応力評価に使用する有限要素法解析コードについては、既許認可の評価<sup>[1] [2]</sup>ではMARCを使用しているが、今回の評価では、汎用有限要素法解析コードの集約化のため9×9燃料（B型）の下部端栓溶接部の応力評価に用いているANSYSを使用する。

本資料では、9×9燃料（A型）及びMOX燃料の下部端栓溶接部の評価にANSYSを適用しても支障がないことを説明する。

## 1. ANSYSの使用実績

本解析コードは、スワンソン・アナリシス・システムズ（現、アンシス）により開発された有限要素法による計算機プログラムである。

本解析コードは、広範囲にわたる多目的な有限要素法による計算機プログラムであり、伝熱、構造、流体、電磁界及びマルチフィジックス解析を実施するものである。

本解析コードは、ISO9001及びASME NQA-1の認証を受けた品質保証システムのもとで開発され、アメリカ合衆国原子力規制委員会による10CFR50並びに10CFR21の要求を満たしており、数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、機械、建築、土木等の様々な分野の構造解析に広く利用されている。また、9×9燃料（B型）の原子炉設置（変更）許可申請書、燃料体設計認可申請書における下部端栓溶接部の応力評価や工事計画認可申請書における応力解析等に対し使用実績がある。

本解析コードを適用するにあたり、以下の確認を行っている。

- ・開発元のリリースノートの例題集において、多くの解析例に対する理論解と解析結果との比較により検証されている。
- ・本解析コード配布時に同梱されたANSYS Mechanical APDL Verification Testing Packageを入力とした解析により、上記例題集の検証を再現できることを確認している。
- ・本解析コードの運用環境について、開発元から提示された要件を満足していることを確認している。

## 2. 下部端栓溶接部の応力評価の方法

## 2.1 下部端栓溶接部の応力評価モデル

下部端栓溶接部の応力評価フローを添付 7-1 図に示す。下部端栓溶接部の応力評価では、最初に下部端栓溶接部近傍の下部端栓、被覆管及びペレットをモデル

化し (添付 7-2 図参照), 有限要素法を用いた熱解析により下部端栓溶接部近傍での温度分布を評価する。次に, 熱解析で得られた下部端栓溶接部近傍の温度分布を読み込み, 熱膨張差による熱応力の分布, 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における荷重条件に基づき発生する応力分布を, 有限要素法を用いた機械解析により評価する。

## 2.2 下部端栓溶接部の応力評価における解析入力値

### (1) 熱解析における入力データ

通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における下部端栓溶接部近傍の温度分布を評価するため, 以下の項目を入力している。

- ・ペレットの発熱
- ・ジルカロイ部材の $\gamma$ 発熱
- ・ペレット-被覆管ギャップ熱伝達係数
- 
- ・被覆管表面熱伝達係数
- ・ペレット及びジルカロイ部材の熱伝導率

なお, 解析モデル上下端は断熱の境界条件とし, ペレット-下部端栓接触面には熱抵抗がないものとして, 上記の保守側の入力と合わせて, 下部端栓溶接部近傍の温度分布による熱応力が大きくなるような解析を実施する。

### (2) 機械解析における入力データ

通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に下部端栓溶接部に作用する荷重として,

- ・下部端栓及び被覆管部における温度分布 (熱解析結果を読み込む)
- ・燃料棒内圧
- ・冷却材圧力
- ・内外圧力差による軸方向荷重 (軸方向応力)
- ・被覆管周方向温度差及び端栓取付角公差による初期曲がりに基づく曲げ荷重 (曲げ応力)

を考慮する。

MARC 及び ANSYS による下部端栓溶接部の応力評価における解析入力値の比較を添付 7-1 表にまとめる。同表に示すとおり, MARC と ANSYS の解析入力値は, 一部の物性値について温度依存性を関数式で入力するかテーブル形式で入力するかの差があることを除いては全て同一であり, 同等な入力条件を設定可能である。

### 2.3 設計比の評価

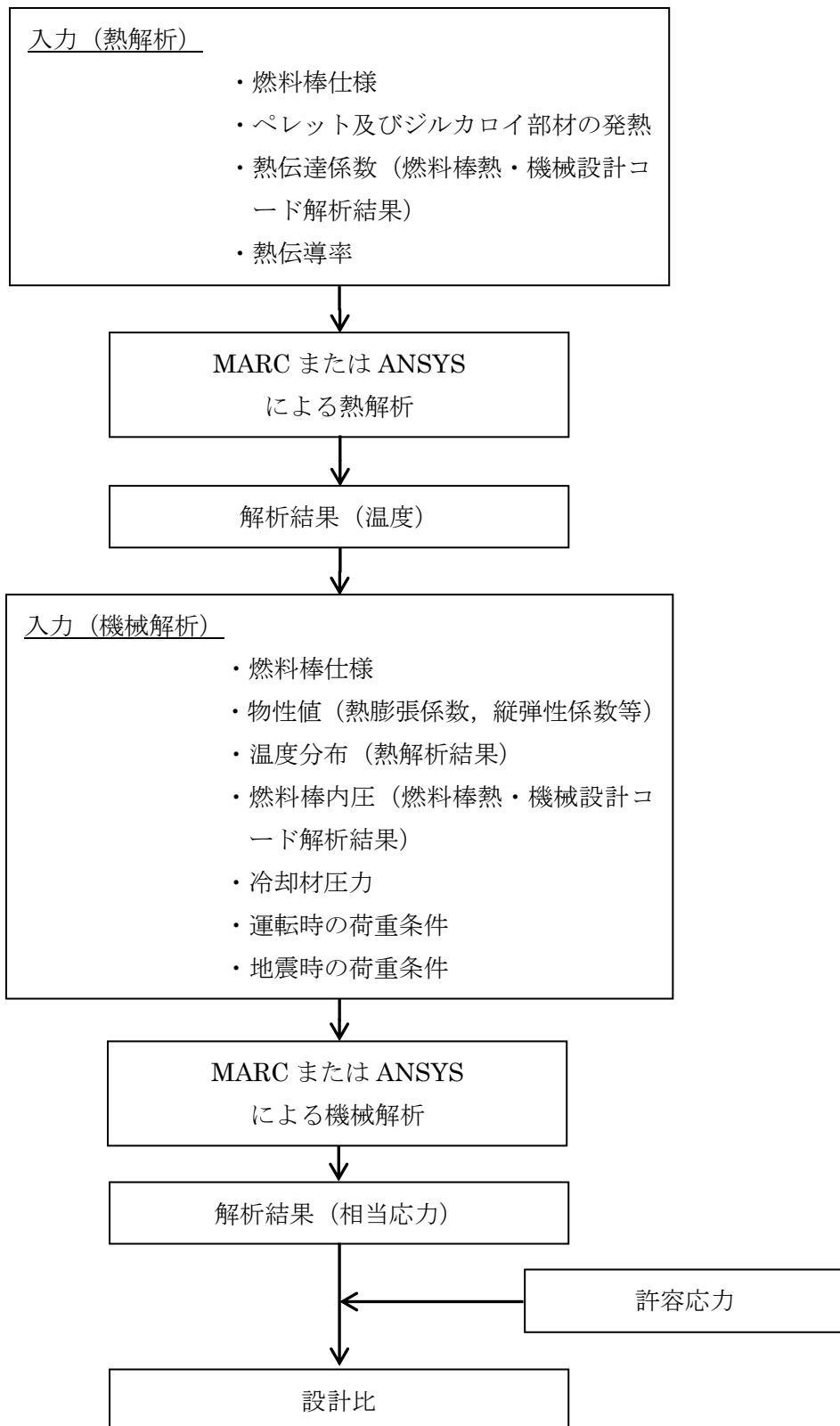
設計比の評価では、燃料被覆管温度、燃料棒内圧、炉心条件、燃料棒寸法及び許容応力の統計的分布を考慮し、それぞれの95%確率上下限值に基づき解析結果が保守側となるように設定した入力値を用いて決定論的評価を実施する。ここで、燃料被覆管温度、燃料棒内圧については、燃料棒熱・機械設計コードによる解析結果を用いる。応力計算は、下部端栓溶接部に発生する三軸方向（半径方向、円周方向及び軸方向）の応力を解析し、それらより相当応力を計算する。また、許容応力については下部端栓溶接部の温度及び照射の影響を考慮した保守側の95%確率下限値を用いる。

### 3. まとめ

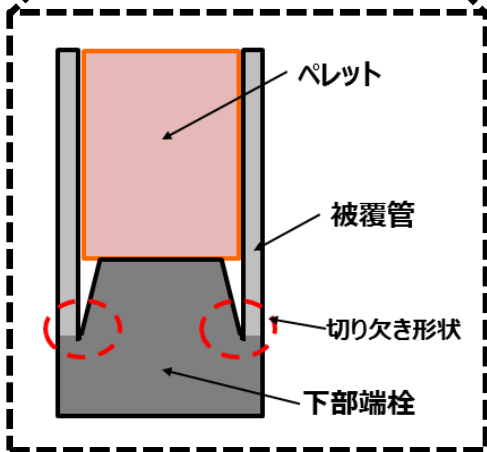
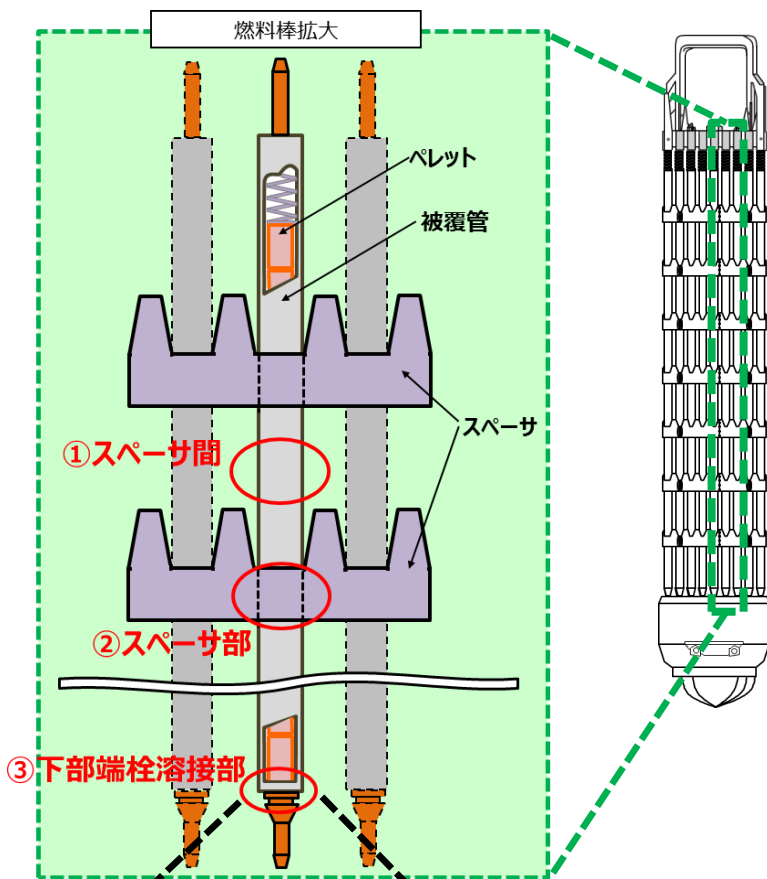
上記のとおり、ANSYSは数多くの研究機関や企業での使用実績があること、9×9燃料(B型)の下部端栓溶接部の応力評価でも使用されていること、MARCとANSYSの応力評価モデルは同一であり、解析入力条件も同等な設定が可能であることから、9×9燃料(A型)及びMOX燃料の評価にANSYSを適用しても支障はないと考える。

#### 参考文献

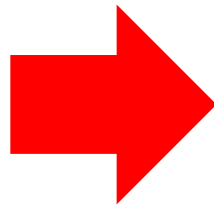
- [1] 島根原子力発電所「燃料体設計認可申請書」(GNF燃設認第30号,平成21年1月7日認可)
- [2] 島根原子力発電所原子炉設置変更許可申請書(2号原子炉施設の変更)及び同添付書類(平成18年10月23日付け申請,平成20年1月30日付け一部補正,平成20年9月5日付け一部補正)



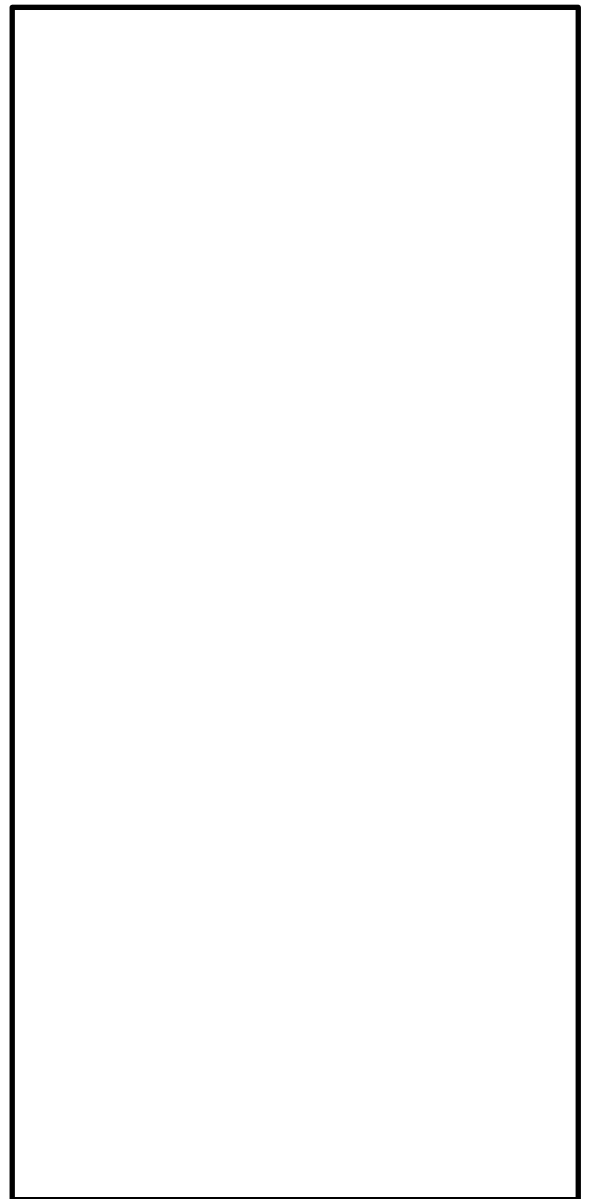
添付 7-1 図 下部端栓溶接部の応力評価のフロー



a. 下部端栓溶接部



モデル化



添付 7-2 図 下部端栓溶接部の有限要素モデル

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。

添付 7-1 表 MARC 及び ANSYS による下部端栓溶接部の  
応力評価における解析入力値 (1/2)

解 析	項 目	MARC への 入 力	ANSYS への 入 力

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 7-1 表 MARC 及び ANSYS による下部端栓溶接部の  
応力評価における解析入力値 (2/2)

解 析	項 目	MARC への 入力	ANSYS への 入力

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。



## 9 × 9 燃料 (B 型) における地震時鉛直方向加速度の考慮方法について

9 × 9 燃料 (B 型) では、地震時鉛直方向加速度を地震時水平方向加速度によるスペーサ間たわみにより発生する軸方向応力 $\sigma_2$  (式(1)) における質量増加として考慮している。

$$\boxed{\phantom{\sigma_2 = \frac{W_0 l G_h}{I D_0}}} \dots (1)$$

ただし、 $W_0$ :燃料要素単位長質量、 $l$ :スペーサ間距離、 $G_h$ :地震時水平方向加速度、 $I$ :断面二次モーメント、 $D_0$ :燃料被覆管外径とする。

なお、地震時鉛直方向加速度による見掛けの質量増加を式(2)のように定めている。

$$\boxed{\phantom{\sigma_2 = \frac{W G_v}{I D_0}}} \dots (2)$$

ただし、 $W$ :実際の燃料要素単位長質量、 $G_v$ :地震時鉛直方向加速度、 $g$ :重力加速度とする。

式(1)及び式(2)より、式(3)が得られる。

$$\boxed{\phantom{\sigma_2 = \frac{W_0 l G_h}{I D_0} + \frac{W G_v}{I D_0}}} \dots (3)$$

式(3)の右辺第二項が地震時鉛直方向加速度による応力に相当する。

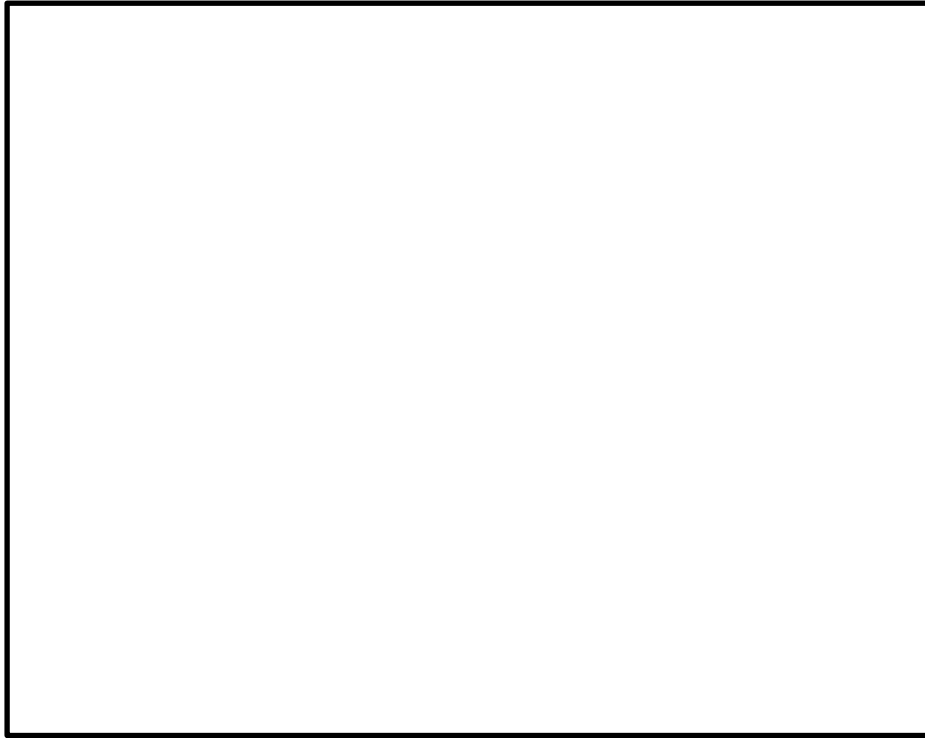
一方で、地震時鉛直方向加速度が慣性力として直接軸方向応力 $\sigma_1$ として作用すると考えると式(4)の計算式となる (9 × 9 燃料 (A 型) 及び MOX 燃料の評価方法)

$$\boxed{\phantom{\sigma_1 = \frac{W_r}{D_1}}} \dots (4)$$

ただし、 $W_r$ :燃料棒総質量、 $D_1$ :燃料被覆管内径とする。

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。

9 × 9 燃料（B 型）の地震時鉛直方向加速度の考慮方法（式(3)右辺第二項）では、地震時水平方向加速度が約  を超える条件において、直接軸方向応力として考慮する場合（式(4)）よりも保守的な評価となる（添付 8-1 図）。島根原子力発電所 2 号炉では、評価に用いた炉心内の燃料集合体の地震時水平方向加速度が 4.10G（基準地震動 Ss）であり  よりも十分大きいことから、地震時鉛直方向加速度に対する評価として十分保守的な評価となっていることを確認した。



添付 8-1 図 9 × 9 燃料（B 型）の地震時鉛直方向加速度考慮方法の保守性

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。

## 評価部位の選定理由について

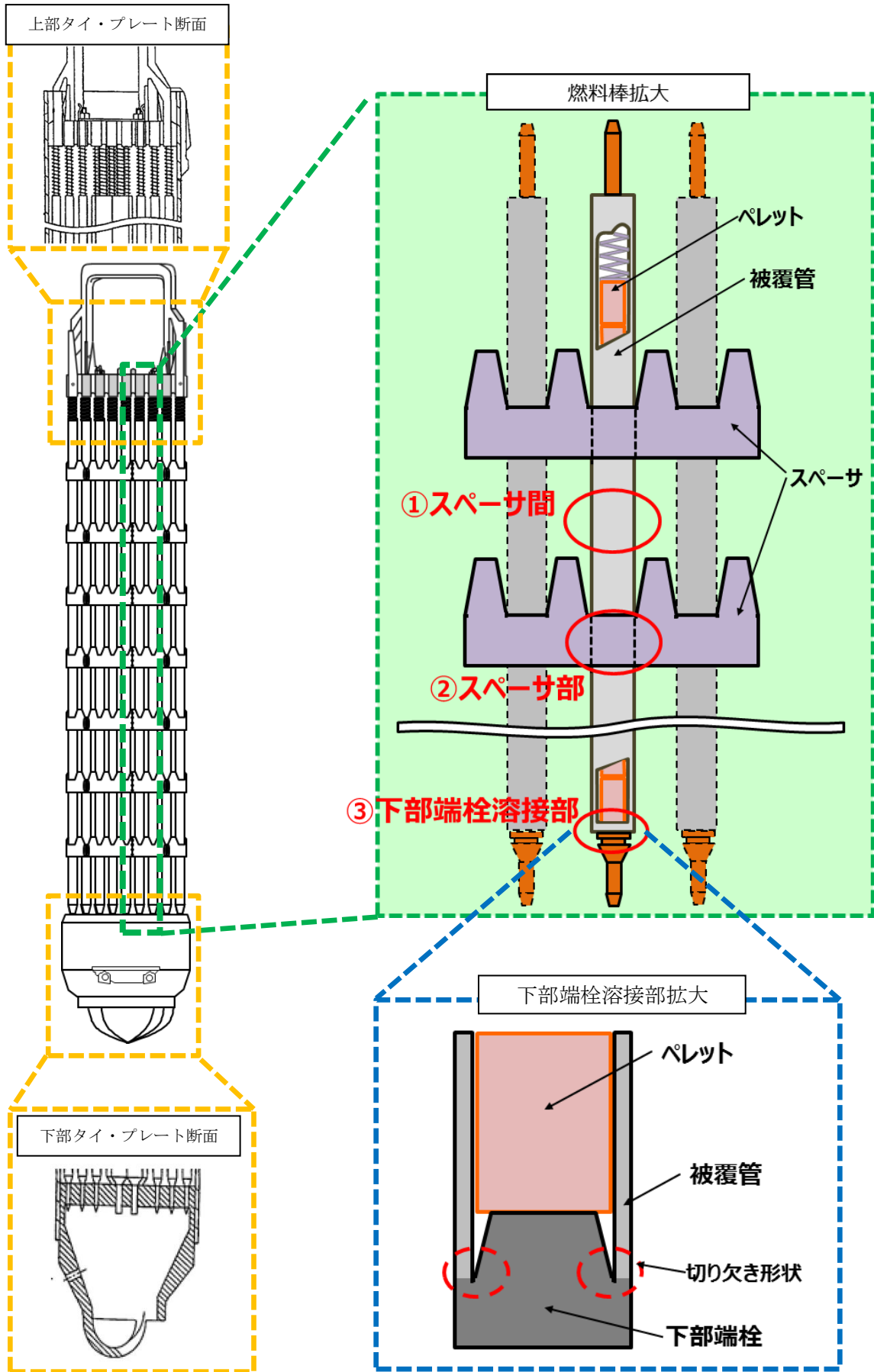
燃料被覆管はその構造から管部，上部端栓溶接部及び下部端栓溶接部に分類することができる。管部についてはスペーサと接触しない部分（スペーサ間）とスペーサと接触する部分（スペーサ部）があり，いずれもその軸方向位置によらず同じ形状である。上部端栓溶接部は中空のプレナム領域を含み重量が小さいことから地震によるたわみに基づく曲げ応力が小さいこと，また，発熱部から離れており熱応力が小さいことから下部端栓溶接部の評価結果に包絡される。これらを踏まえ，スペーサ間，スペーサ部及び下部端栓溶接部を評価部位とする。評価部位の概要図を添付 9-1 図に示す。

燃料被覆管応力評価は，J E A G 4601-1987<sup>[1]</sup>に基づき基準地震動  $S_s$  等により生じる燃料集合体位置の加速度及び燃料集合体の相対変位を用いて応力値を算出している。添付 9-2 図及び添付 9-3 図に応答算出に用いた地震応答解析モデルを示す。

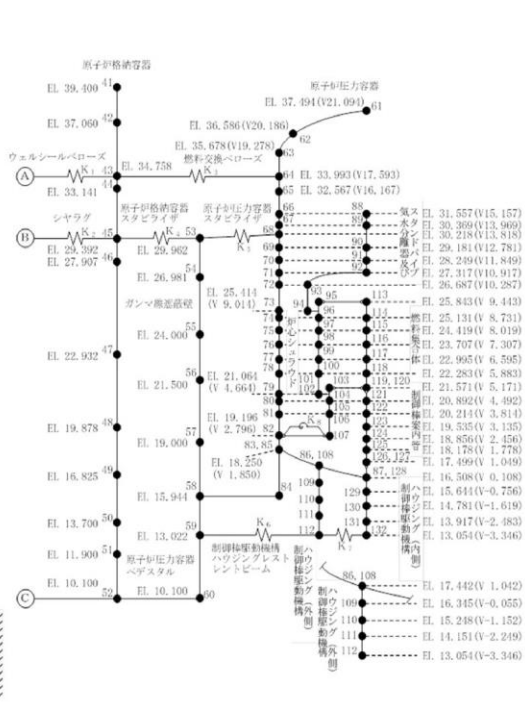
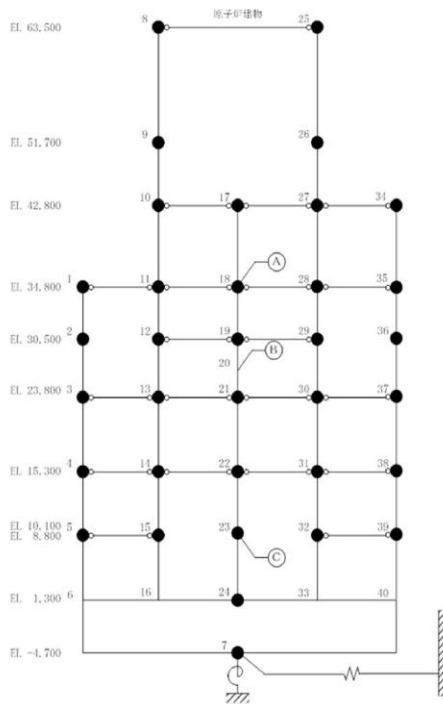
基準地震動  $S_s$  等により生じる水平方向加速度については，各質点での値の差が大きいため，スペーサ間，スペーサ部及び下部端栓溶接部とも評価部位位置の値を使用しているが，スペーサ間及びスペーサ部については，部位が複数存在することから最厳値を使用している。また，鉛直加速度については，各質点での値の差が比較的小さいため，スペーサ間，スペーサ部及び下部端栓溶接部とも全質点中の最厳値を使用している（添付 9-1 表参照）。

## 参考文献

- [1] J E A G 4601-1987 「原子力発電所耐震設計技術指針」，（社）日本電気協会



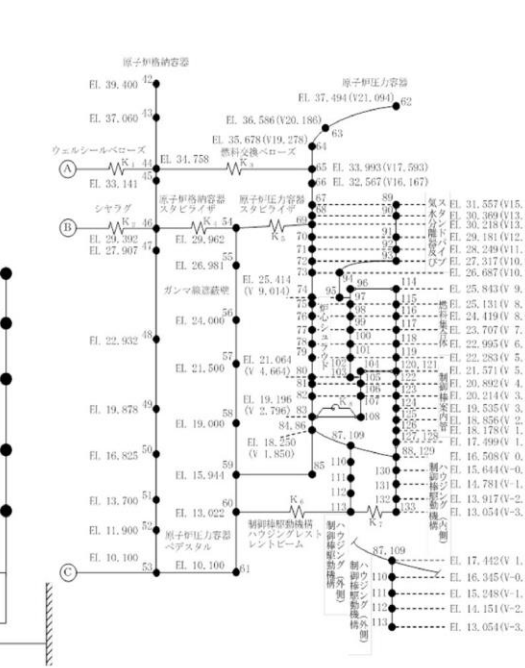
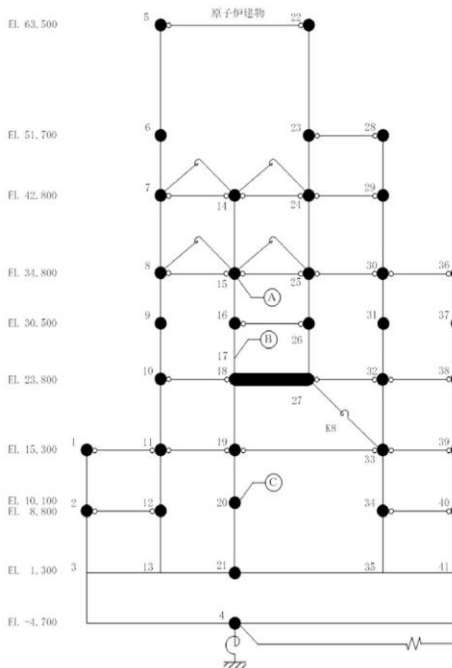
添付 9-1 図 評価部位の概要図



記号	内容
●	質点
— —	曲げ・せん断部材
— — —	水平ばね
⊕	回転ばね
○—○	剛部材 (ピン結合)

No.	ばね定数
$K_1$	$2.84 \times 10^5 \text{ kN/m}$
$K_2$	$3.43 \times 10^5 \text{ kN/m}$
$K_3$	$2.16 \times 10^5 \text{ kN/m}$
$K_4$	$3.50 \times 10^5 \text{ kN/m}$
$K_5$	$6.80 \times 10^5 \text{ kN/m}$
$K_6$	$7.16 \times 10^5 \text{ kN/m}$
$K_7$	$1.80 \times 10^5 \text{ kN/m}$
$K_8$	$1.78 \times 10^5 \text{ kN/m/rad}$

NS方向

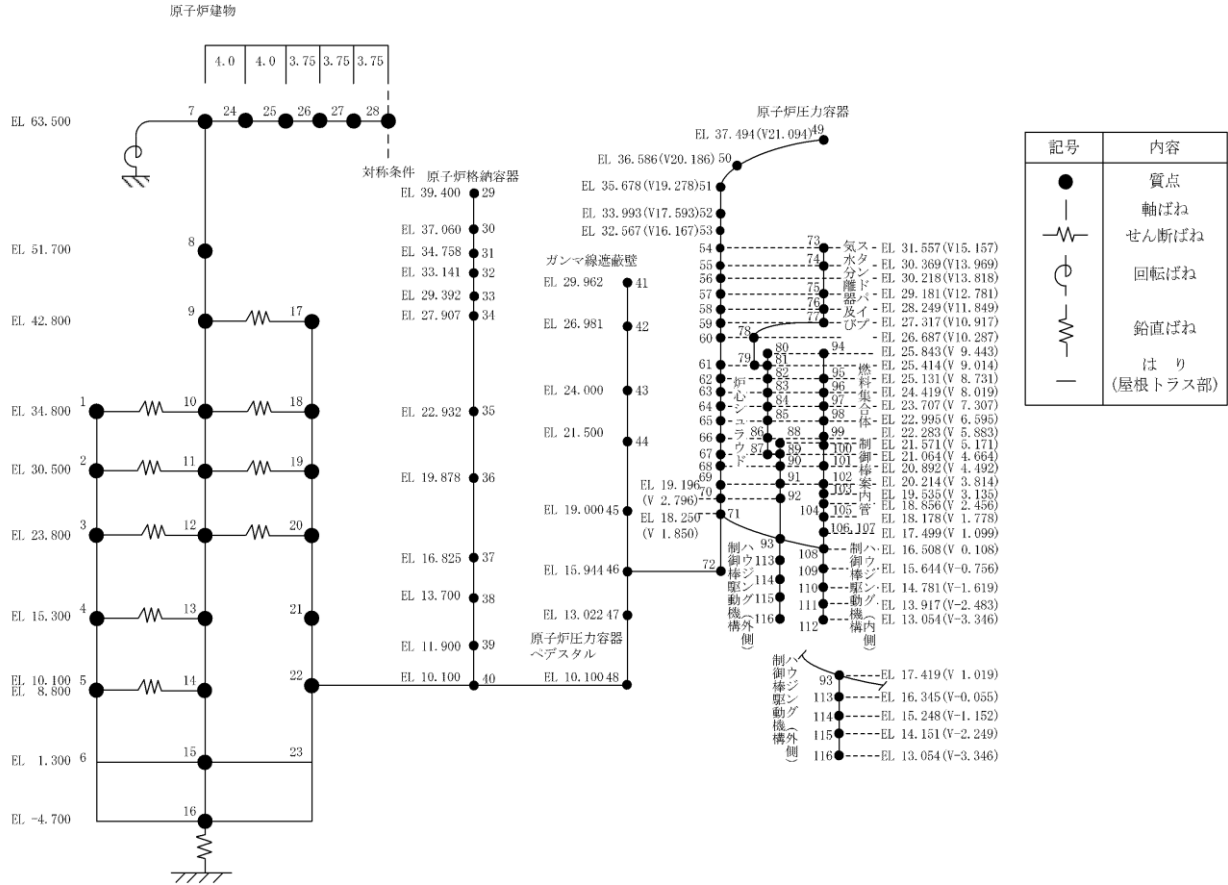


記号	内容
●	質点
— —	曲げ・せん断部材
— — —	水平ばね
⊕	回転ばね
○—○	剛部材 (ピン結合)

No.	ばね定数
$K_1$	$2.84 \times 10^5 \text{ kN/m}$
$K_2$	$3.43 \times 10^5 \text{ kN/m}$
$K_3$	$2.16 \times 10^5 \text{ kN/m}$
$K_4$	$3.50 \times 10^5 \text{ kN/m}$
$K_5$	$6.80 \times 10^5 \text{ kN/m}$
$K_6$	$7.16 \times 10^5 \text{ kN/m}$
$K_7$	$1.80 \times 10^5 \text{ kN/m}$
$K_8$	$1.78 \times 10^5 \text{ kN/m/rad}$

EW方向

添付9-2 図 大型機器系地震応答解析モデル (水平方向)



添付 9-3 図 大型機器系地震応答解析モデル (鉛直方向)

添付 9-1 表 基準地震動 Ss 等による燃料集合体の評価用加速度

方向	標高 (m)	評価用加速度 (G)		適用評価部位
		基準地震動 Ss	弾性設計用地震動 Sd	
水平方向	25.843	1.74	1.27	—
	25.131	2.78	2.51	—
	24.419	3.83	3.63	—
	23.707	4.10	3.97	スペーサ間及び スペーサ部
	22.995	3.45	3.42	—
	22.283	2.21	2.20	下部端栓溶接部
	21.571	1.56	0.89	—
鉛直方向	25.843	1.54	0.78	スペーサ間, ス ペーサ部及び下 部端栓溶接部
	25.131	1.53	0.77	—
	24.419	1.52	0.77	—
	23.707	1.50	0.76	—
	22.995	1.48	0.75	—
	22.283	1.46	0.74	—
	21.571	1.44	0.73	—

## 燃料被覆管の応力評価に用いる各評価手法の保守性について

## 1. はじめに

燃料被覆管の応力評価においては、高燃焼度 8×8 燃料の導入以降、スペーサ間及びスペーサ部の弾性解析ではモンテカルロ法を、下部端栓溶接部の FEM 解析では決定論的手法を用いて応力設計比（＝発生応力／許容応力）を評価している。

## 2. モンテカルロ法と決定論的手法の保守性の考え方

燃料被覆管（スペーサ間，スペーサ部，下部端栓溶接部）の応力評価における応力設計比は，燃料被覆管寸法，燃料被覆管温度，燃料棒内圧，炉心条件，許容応力等を入力変数とした関数となっている。また，これらの入力変数の不確かさを考慮するため，製造実績，実機運転データ等を考慮し，それぞれの公称値を中央値として統計的分布を設定している。

## (1) スペーサ間及びスペーサ部

モンテカルロ法では，1回の試行ごとに乱数を用いて，各入力変数の統計的分布から各入力条件を選定し，厚肉円筒式による弾性解析を行い，応力設計比を評価する。この試行を繰り返し実施することにより応力設計比の統計的分布を求め，95%確率上限値における応力設計比が1以下であることで当該部位の健全性を確認するとともに，評価結果に保守性を持たせている（添付 10-1 図参照）。

## (2) 下部端栓溶接部

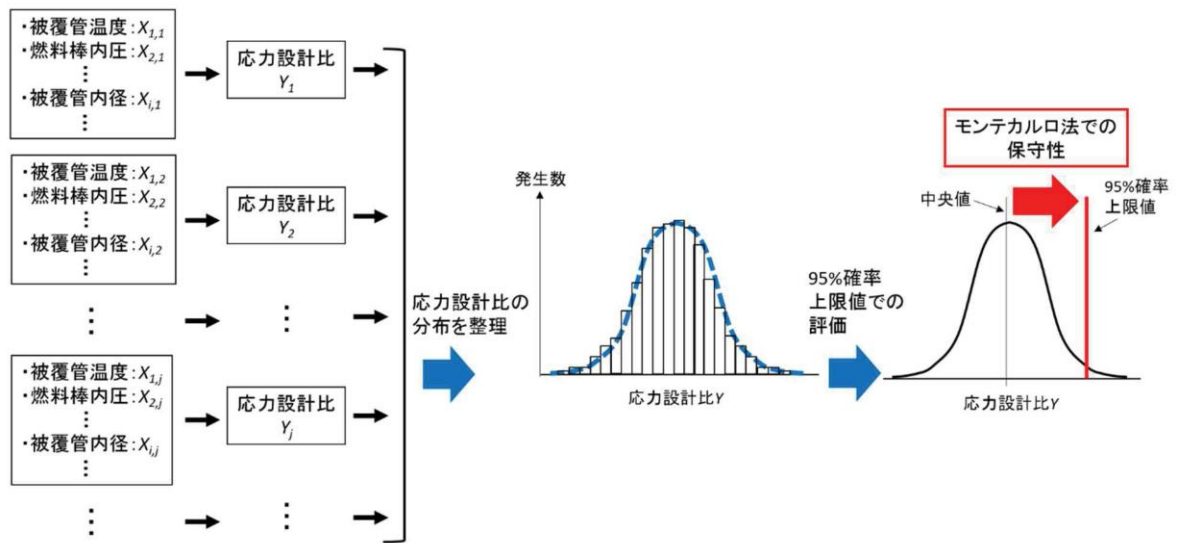
下部端栓溶接部は，切り欠き形状を含んだ複雑形状のため，FEM 解析により応力設計比を評価する。ここで，スペーサ間及びスペーサ部と同様にモンテカルロ法を用いるとすると，入力変数となる燃料被覆管寸法等を変動させる都度，FEM 解析モデルの修正が必要であり，対応が膨大となるため現実的ではない。よって，下部端栓溶接部の応力設計比の評価については，決定論的手法を適用することとし，各入力変数に統計的分布における 95%確率上下限界を用いることで保守性を持たせている（添付 10-1 図参照）。

以上のとおり，スペーサ間及びスペーサ部，下部端栓溶接部ともに結果が保守的になるような評価を行っている。

なお，スペーサ間及びスペーサ部の弾性解析にモンテカルロ法，下部端栓溶接部の FEM 解析に決定論的手法をそれぞれ用いることは，「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について（昭和 63 年 5 月 12 日，原子力安全委員会了承）」において妥当と判断されており，原子炉設置（変更）許可申請書添付書類八及び燃料体設計認可申請書添付書類Ⅱ（応力解析）において許認可実績を有している。

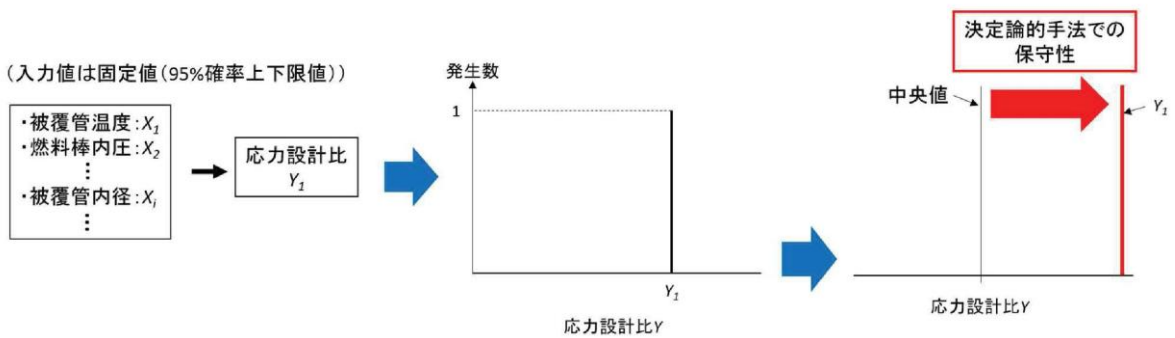


(入力値は統計分布に従いランダムに生成)



(a) モンテカルロ法 (スペーサ間及びスペーサ部)

(入力値は固定値(95%確率上下限值))



(b) 決定論的手法 (下部端栓溶接部)

添付 10-1 図 モンテカルロ法及び決定論的手法における保守性の概念図

## 改正規則の影響について

地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に関する規則改正においては、要求事項が追加された第四条に加えて、第十五条についても要求事項に変更のない記載の適正化が行われている。

本規則改正に対する第四条への基準適合性は「2.2 追加要求事項への適合性に係る設計方針」に示したとおりであり、第十五条については以下のとおり基準適合性確認に影響を与えるものではない。

(炉心等)

第十五条 設計基準対象施設は、原子炉固有の出力抑制特性を有するとともに、発電用原子炉の反応度を制御することにより核分裂の連鎖反応を制御できる能力を有するものでなければならない。

2 炉心は、通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時に発電用原子炉の運転に支障が生ずる場合において、原子炉冷却系統、原子炉停止系統、反応度制御系統、計測制御系統及び安全保護回路の機能と併せて機能することにより燃料要素の許容損傷限界を超えないものでなければならない。

3 燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物は、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時において、発電用原子炉を安全に停止し、かつ、停止後に炉心の冷却機能を維持できるものでなければならない。

4 燃料体及び反射材並びに炉心支持構造物、熱遮蔽材並びに一次冷却系統に係る容器、管、ポンプ及び弁は、一次冷却材又は二次冷却材の循環、沸騰その他の一次冷却材又は二次冷却材の挙動により生ずる流体振動又は温度差のある流体の混合その他の一次冷却材又は二次冷却材の挙動により生ずる温度変動により損傷を受けないものでなければならない。

5 燃料体は、通常運転時における圧力、温度及び放射線に起因する最も厳しい条件において、必要な物理的及び化学的性質を保持するものでなければならない。

6 燃料体は、次に掲げるものでなければならない。

- 一 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における発電用原子炉内の圧力、自重、附加荷重その他の燃料体に加わる負荷に耐えるものとする。
- 二 輸送中又は取扱中において、著しい変形を生じないものとする。

規則への適合性

地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に係る変更においては、既存設備の変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、炉心等に係る基準適合性確認に影響を与えるものではない。

ただし、本規則改正に伴い第十五条第6項の記載は適正化されていることから（要求事項の変更はない。）、規則への適合のための設計方針について、以下のとおり記載の適正化を図る。

#### 適合のための設計方針

##### 5及び6の一について

燃料体は、発電用原子炉内における使用期間中を通じ、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時においても、燃料棒の内外圧差、燃料棒及び他の材料の照射、負荷の変化により起こる圧力・温度の変化、化学的効果、静的・動的荷重、燃料ペレットの変形、燃料棒内封入ガスの組成の変化等を考慮して、各構成要素が、十分な強度を有し、その機能が保持できる設計とし、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における発電用原子炉内の圧力、自重、附加荷重、核分裂生成物の蓄積による燃料被覆材の内圧上昇、熱応力等の荷重に耐える設計とする。

燃料集合体には燃料棒を保護する機能を持つチャンネルボックスをかぶせる。

また、上記設計方針に対する燃料集合体の機械設計について、従前より通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時を考慮した設計を行っており、その具体的な設計方針（評価結果含む）は、発電用原子炉設置変更許可申請書の添付書類八、3.2 機械設計に記載している。なお、「3. 追加要求事項に係る評価項目の選定」にて言及した燃料被覆管応力、累積疲労サイクル、過度の寸法変化防止についても上記設計方針に含まれており、これらに適合するように燃料体の設計を行っている。

## 燃料集合体に対する鉛直地震動の影響について

燃料集合体は、燃料取替の観点から上向きに拘束されておらず燃料支持金具に差し込まれ自重によって支持される構造となっている。従って、1Gを超過する鉛直地震動の影響で、燃料集合体が浮上る可能性がある。

この浮上りが燃料集合体に及ぼす影響について、既往知見を調査し、検討した結果を以下に示す。

## 1. 既往知見調査

鉛直地震動による燃料集合体への影響を検討した既往知見として以下を調査した。

- (1) 平成17年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 機器耐力 その2 (BWR 制御棒挿入性)に係る報告書(平成18年9月, 原子力安全基盤機構)
- (2) 浜岡原子力発電所3, 4号機「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う耐震安全性評価に関わる報告のうち耐震設計上重要な機器・配管系の耐震安全性評価(補足説明資料)(平成19年10月23日, 中部電力株式会社)

## 2. 既往知見の検討内容

## 2.1 原子力安全基盤機構の知見

原子力安全基盤機構の知見(以下、「JNES知見」という)で確認している内容は以下のとおり。

## (1) 制御棒挿入性への鉛直地震動の影響

制御棒挿入解析モデルを用いた解析によって、水平地震動のみをインプットとした場合と、水平+鉛直地震動(最大1G程度)をインプットとした場合の挿入時間を比較し、その差が0.01秒と極めて影響は軽微(要求機能:75%挿入で1.62秒以内)であることを確認している。燃料集合体の支持状態を表した模式図を添付12-1図に、鉛直地震動の影響検討結果を添付12-2,3図に示す。

なお、挿入解析においては、流体抵抗力や浮力などの水の影響を考慮する他に、燃料集合体と制御棒の接触、摩擦による相互影響も考慮した解析となっている。

## (2) 鉛直地震動による燃料集合体浮上りの検討

鉛直地震動による浮上りは、炉水の流れによる上方向への流体力を考慮した状態で、鉛直加速度2Gで最大22mm程度となるが、燃料集合体は燃料支持金具に60mm程度差し込まれているため、燃料支持金具から脱落するような現象は起こらない。評価結果を添付12-4図に示す。

## (3) 浮上り発生状態での水平地震力に対する検討

鉛直地震動による浮上りが発生している状態で、水平地震動による水平力が負

荷された場合でも、燃料集合体が燃料支持金具から脱落しないことを確認している。浮上り+水平力のイメージを添付12-6図に示すが、水平方向のせん断力によって燃料集合体が燃料支持金具に乗り上げる力が働くため、その影響を確認する。

鉛直方向に2Gの加速度で22mm程度浮上った状態で水平方向に10Gの加速度を入力した場合でも、水平力による燃料集合体の浮上りは1.3mmとなることから鉛直と合算しても23mm程度となり、燃料集合体の差し込み深さ60mmに対して十分に余裕がある結果となっている。

なお、JNES知見で検討した燃料集合体と島根2号炉の燃料集合体の仕様について比較した結果を添付12-1表に示す。島根2号炉では、ハフニウム型制御棒とB4C型制御棒を使用している。ハフニウム型制御棒とB4C型制御棒では、中性子吸収材が相違している以外はほぼ同一の形状で、質量もほぼ同等であり、表面を覆うシース材料も同じであることから、制御棒型式の違いによる影響は軽微と判断できるため、JNES知見について、島根2号炉への適用性はあるものと考えている。

## 2.2 浜岡原子力発電所3, 4号機での知見

浜岡原子力発電所3, 4号機での知見（以下、「浜岡知見」という）で確認している内容は以下のとおり。

### (1) 制御棒挿入性への鉛直地震動の影響

水平地震動のみの加振試験結果と水平+鉛直地震動を用いた加振試験結果の比較から、制御棒の挿入時間に影響がないことを確認している。比較結果を添付12-7図に示す。

### (2) 鉛直地震動による燃料集合体浮上りの検討

シミュレーション解析によって、鉛直地震動による浮上りが小さいことを確認している（1.5Gで8mm程度）。

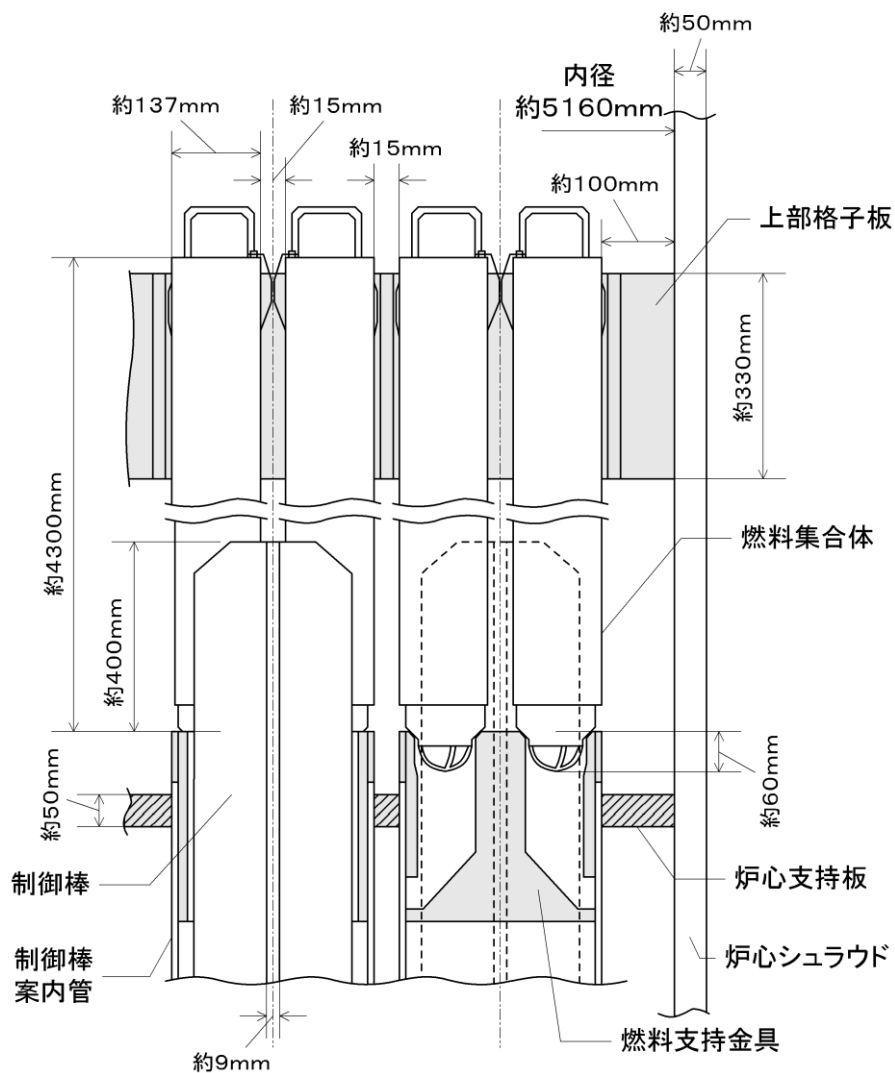
## 3. 島根2号炉における検討

基準地震動 $S_s$ による燃料集合体（燃料支持金具）位置の鉛直方向加速度は1.54Gであり、JNES知見で検討している加速度よりも小さく、浜岡知見で検討している加速度とほぼ同等であることから、燃料集合体の浮上りが発生したとしても燃料支持金具から脱落は起こらない。そのため、鉛直地震動による制御棒挿入性への影響は軽微であると考えられる。

浮上に伴って燃料集合体と燃料支持金具との衝突が発生するが、島根2号炉の鉛直加速度1.54Gにおいては、添付12-4図より浮上り高さは数mm程度になると想定されるため、衝突荷重による影響は小さいものと考えられる。また、冷却材流量については、燃料集合体と燃料支持金具の間の流量が増加し、燃料集合体内の流量に影響を与える可能性が考えられるが、鉛直地震動が1Gを超過する規模の地震が発生した場合には、地震動によって原子炉はスクラムすることから炉心の出力は速やかに低下し、更には添付12-5図に示すとおり、燃料集合体の浮上り量が数mm程度であり、浮上り時

間もごく僅かであることから、その影響は非常に小さいものと考えられる。

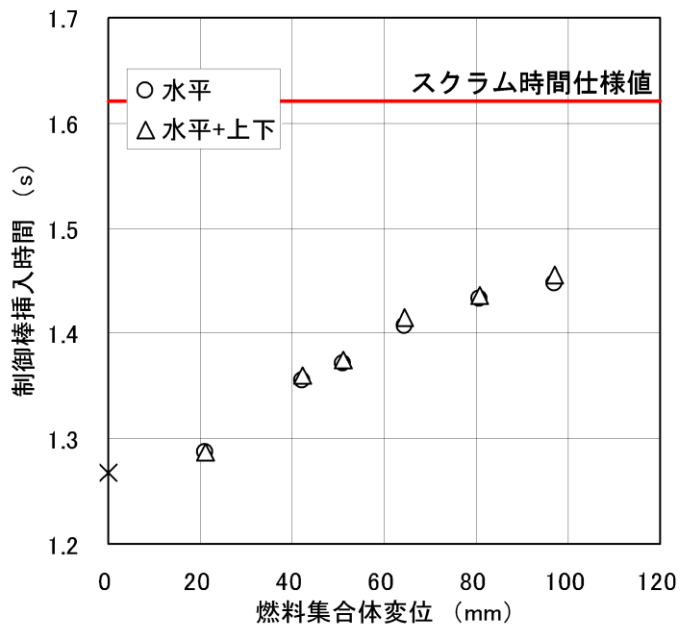
なお、燃料集合体上部においては、チャンネルボックスは外周部を上部格子板で囲まれ水平方向の移動を拘束されていることから、地震の影響によって、チャンネルボックスの設置状況に変化が生じることはないものと考えられる。また、添付12-1図及び添付12-8 図に示すとおり、チャンネルボックスは側面に取り付けられたチャンネルファスナを介して隣接するチャンネルボックスと接触している。このチャンネルファスナの上下方向における接触長さは約    mmとなっていることから、数mm程度の浮上りでチャンネル同士の接触状況に変化が起こることは考えにくい。



※JNES 知見より抜粋

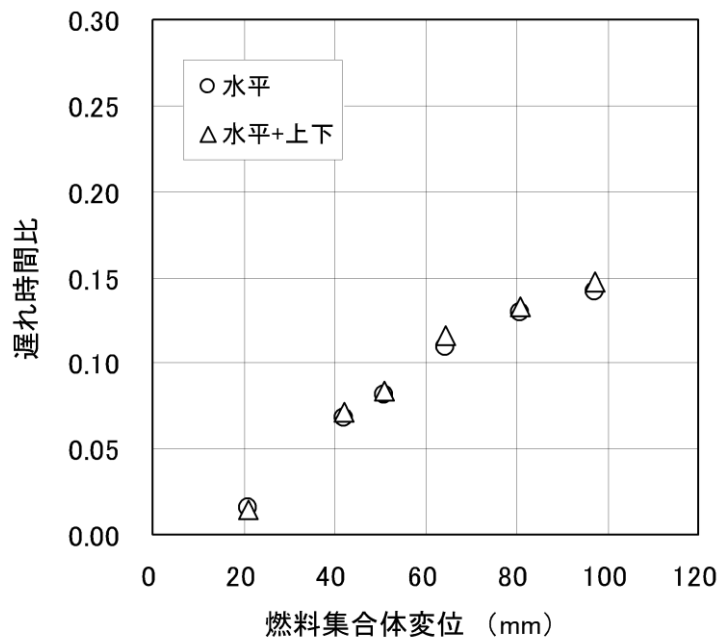
添付12-1図 燃料集合体の支持状態（制御棒挿入率0%）

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。



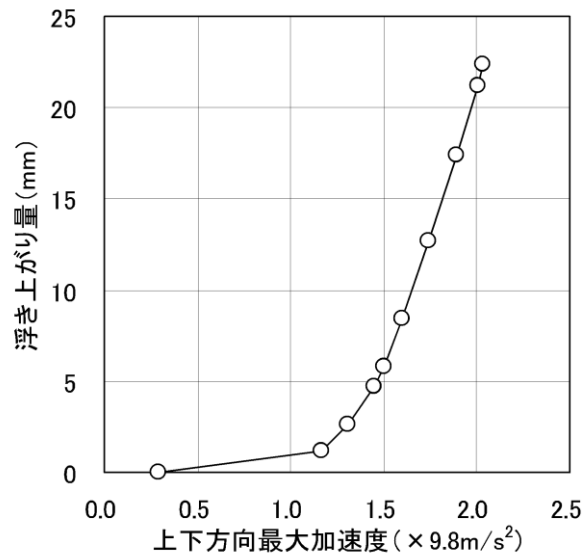
※JNES 知見より抜粋

添付12-2図 制御棒挿入性解析結果（上下動影響比較）



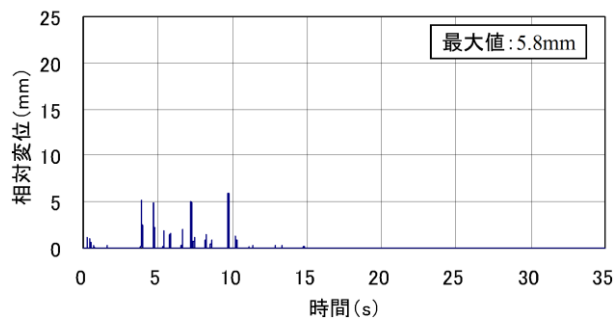
※JNES 知見より抜粋

添付12-3 図 制御棒挿入時間遅れの比較（上下動影響比較）



※JNES 知見より抜粋

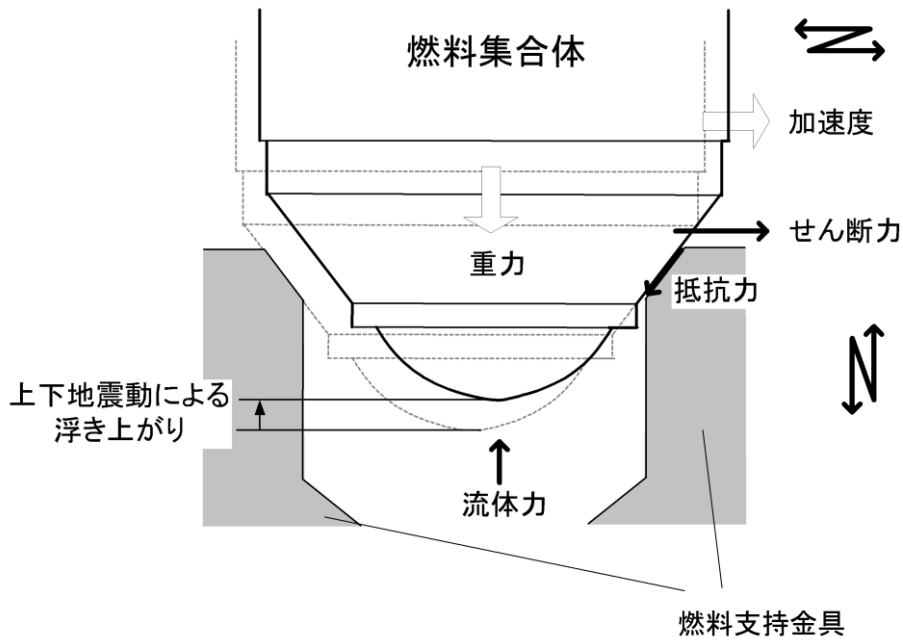
添付12-4 図 入力加速度と燃料集合体浮上り量の関係



※JNES 知見より抜粋

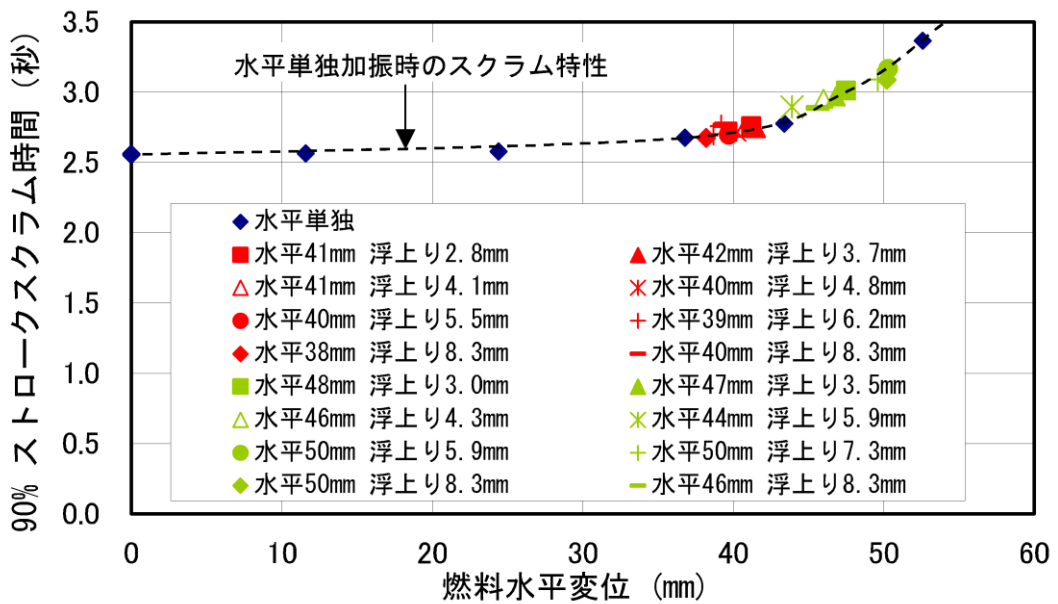
添付12-5 図 炉心支持板加速度1.5G における燃料集合体と炉心支持板の  
相対変位時刻歴





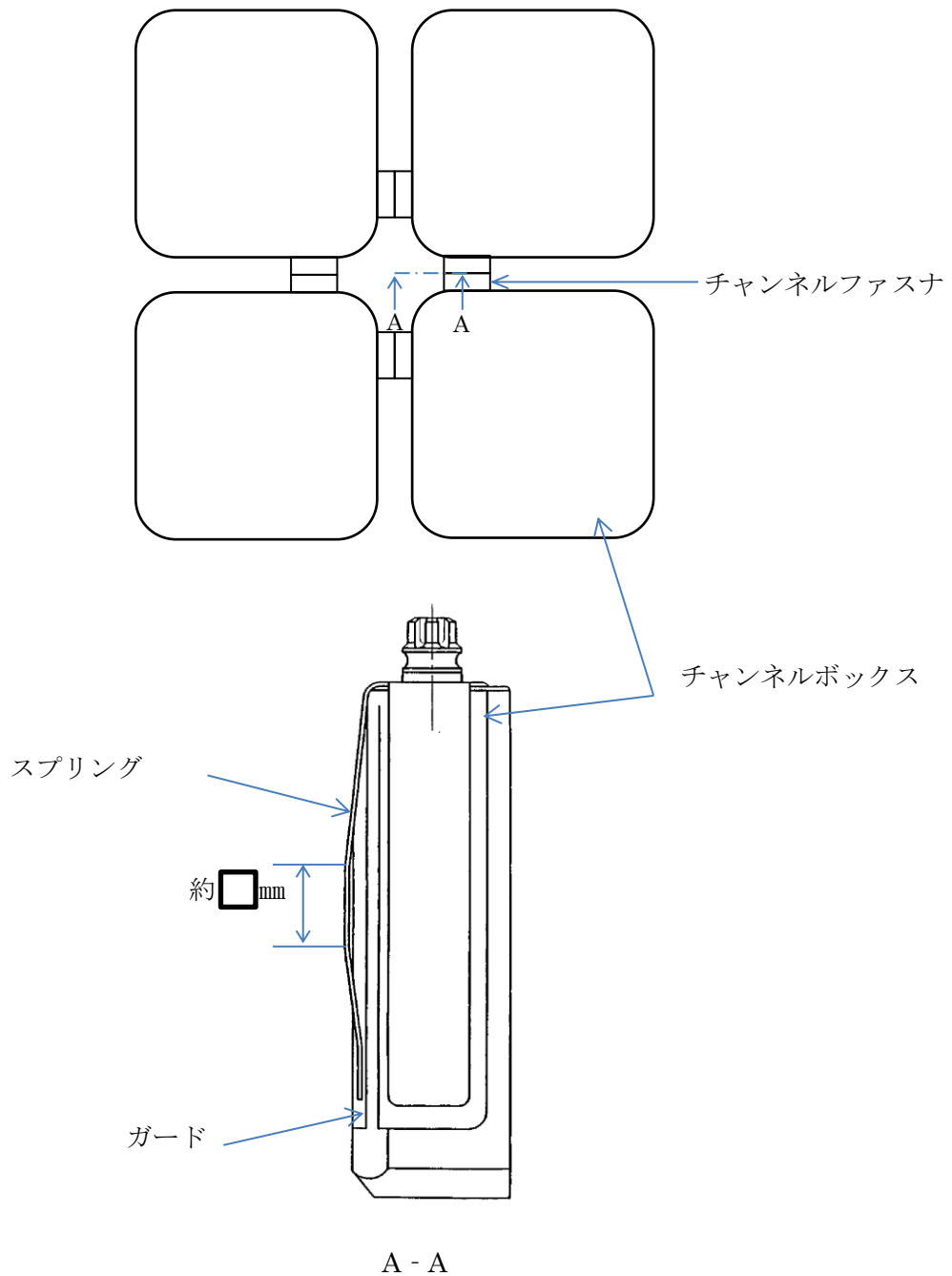
※JNES 知見より抜粋

添付12-6 図 水平，上下方向の地震動による浮上り検討の概要図



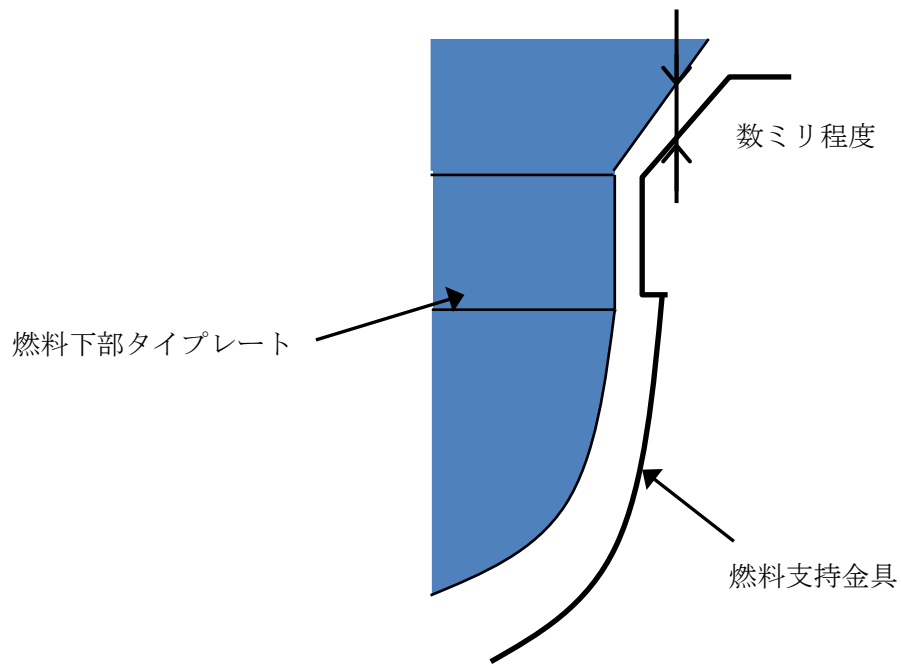
※浜岡知見より抜粋

添付12-7 図 鉛直方向加振による制御棒挿入時間への影響



添付12-8 図 燃料集合体上部のチャンネルファスナの設置状況

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12-9 図 燃料集合体下部のイメージ図

添付12-1 表 制御棒挿入性に関連する機器のJNES 知見と島根2号炉での仕様比較について

評価機器	JNES 知見で適用した型式	島根2号炉の型式	相違の有無
燃料体*	9×9 燃料	9×9 燃料	無
チャンネルボックス	100mil	120mil	有
制御棒	ハフニウム型	ハフニウム型 及びB <sub>4</sub> C型	有
上部格子板	S 格子	S格子	無
制御棒駆動機構	FSCRD	FSCRD	無

\* 燃料集合体の固有値解析の結果、鉛直方向の固有振動数は20Hz以上となることを確認している。

## MOX 燃料の燃料被覆管応力評価結果について

9 × 9 燃料(A 型)と MOX 燃料の燃料被覆管応力評価結果の比較について考察する。添付 13-1～3 表に応力設計比が最大となる圧力過渡状態における弾性設計用地震動 Sd に対する 9 × 9 燃料 (A 型) 及び MOX 燃料の燃料被覆管応力評価結果を示す。

また、燃料被覆管の応力評価にあたり各評価対象部位において考慮する応力を添付 13-4 表に、9 × 9 燃料 (A 型) 及び MOX 燃料の燃料仕様概要を添付 13-5 表に示す。

## (1) スペーサ間

個々の発生応力については燃料タイプにより傾向が異なるものがあるが、応力設計比については、(1)内外圧力差に基づく応力の影響が大きいため、燃料棒の初期 H e 加圧量が小さく燃料被覆管の内外圧力差の大きい MOX 燃料の方が大きくなっている。

なお、寿命末期では、MOX 燃料の線出力密度が 9 × 9 燃料 (A 型) より高いことから燃料被覆管温度が高く、許容応力が小さくなるため、応力設計比の差が大きくなっている。

## (2) スペーサ部

スペーサ部で特徴的な応力は、(4) スペーサの接触力に基づく応力である。このスペーサの接触力は寿命初期が最大で、照射の進行とともに大きく緩和するため寿命中期及び寿命末期の応力は寿命初期の 2 割以下に低下する。

スペーサの接触力に基づく応力は   するため、スペーサの接触力の大きい寿命初期においては、燃料被覆管肉厚の小さい 9 × 9 燃料 (A 型) の応力設計比が MOX 燃料より大きくなっている。スペーサの接触力が小さくなる寿命初期以外では、スペーサ間と同様に MOX 燃料が大きくなっている。

## (3) 下部端栓溶接部

下部端栓溶接部については、MOX 燃料の初期 H e 加圧量が小さいためスペーサ間と同様に内外圧差に基づく応力が大きくなる。また、9 × 9 燃料 (A 型) では下部端栓に接している燃料有効長最下端が天然ウランであるのに対し、MOX 燃料棒は燃料有効長最下端も MOX ペレットであるため、MOX 燃料棒の最下端部の出力が 9 × 9 燃料 (A 型) より高くなる。このため、MOX 燃料の方が下部端栓溶接部の温度が高くなり、熱応力が大きくなるとともに、許容応力 (降伏応力及び引張強さ) も小さくなることから、MOX 燃料の応力設計比の方が大きくなっている。

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 13-1 表 燃料被覆管応力の評価結果（スペーサ間）

地震動と許容応力	運転条件	評価点	9 × 9 燃料 (A 型)	MOX 燃料
弾性設計用地震動 Sd に対して降伏応力 Sy	圧力過渡	寿命初期	0.80	0.84
		寿命中期	0.30	0.34
		寿命末期	0.26	0.44

添付 13-2 表 燃料被覆管応力の評価結果（スペーサ部）

地震動と許容応力	運転条件	評価点	9 × 9 燃料 (A 型)	MOX 燃料
弾性設計用地震動 Sd に対して降伏応力 Sy	圧力過渡	寿命初期	0.77	0.66
		寿命中期	0.27	0.33
		寿命末期	0.25	0.45

添付 13-3 表 燃料被覆管応力の評価結果（下部端栓溶接部）

地震動と許容応力	運転条件	評価点	9 × 9 燃料 (A 型)	MOX 燃料
弾性設計用地震動 Sd に対して降伏応力 Sy	圧力過渡	寿命初期	0.72	0.81
		寿命中期	0.34	0.38
		寿命末期	0.26	0.32

添付 13-4 表 各評価対象部位において考慮する応力

考慮する応力	スペーサ間	スペーサ部	下部端栓 溶接部
(1)内外圧力差に基づく応力	○	○	○
(2)水力振動に基づく応力	○	○	—
(3)楕円度に基づく応力	○	○	—
(4)スペーサ（支持格子）の接触力に基づく応力	—	○	—
(5)半径方向温度差に基づく応力	○	○	○
(6)円周方向温度差に基づく応力	○	○	○
(7)膨張スプリング等による軸方向荷重に基づく応力	○	○	○
(8)端栓取付角公差による曲がりに基づく応力	—	—	○
(9)スペーサ（支持格子）間の水平地震力による燃料被覆管のたわみに基づく応力*	○	○	○
(10)チャンネルボックスの水平地震力によるたわみに基づく応力*	○	○	○
(11)鉛直方向地震加速度に基づく応力*	○	○	○

※：地震動を考慮する場合に新たに加わる応力

添付 13-5 表 9 × 9 燃料 (A 型) 及び MOX 燃料の燃料仕様概要

	9 × 9 燃料 (A 型)	MOX 燃料
ペレット直径	約0.96cm	約1.04cm
ペレット長さ	約1.0cm	MOX焼結ペレット 約1.2cm UO <sub>2</sub> 焼結ペレット 約1.0cm
ペレット密度	理論密度の約97%	MOX燃料棒 理論密度の約95% ウラン燃料棒 理論密度の約97%
ペレット材	UO <sub>2</sub> , UO <sub>2</sub> -Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	UO <sub>2</sub> , UO <sub>2</sub> -PuO <sub>2</sub> , UO <sub>2</sub> -Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
被覆管外径	約1.12cm	約1.23cm
被覆管厚さ	約0.71mm (うちジルコニウム内張約0.1mm)	約0.86mm (うちジルコニウム内張約0.1mm)
被覆管材料	ジルカロイ-2 (ジルコニウム内張)	ジルカロイ-2 (ジルコニウム内張)
燃料集合体全長 (つかみ部分を含む)	約4.47m	約4.47m
燃料棒有効長さ	標準燃料棒 約3.71m 部分長燃料棒 約2.16m	MOX燃料棒 約3.55m ウラン燃料棒 約3.71m
ペレット-被覆管間隙	約0.20mm	約0.20mm
プレナム体積比	標準燃料棒 約0.09 部分長燃料棒 約0.17	MOX燃料棒 約0.13 ウラン燃料棒 約0.08
ウラン235濃縮度 取替燃料集合体平均	約3.7wt%	約1.0~1.2wt%
プルトニウム含有率 燃料集合体平均プルトニウム含有率 ペレット最大プルトニウム含有率 ペレット最大核分裂性プルトニウム富 化度 プルトニウム組成比	—	約2.9~5.8wt% 10wt%以下 6wt%以下 原子炉級
燃 焼 度 取替燃料集合体平均 燃料集合体最高	約45,000MWd/t 55,000MWd/t	約33,000MWd/t 40,000MWd/t
最大線出力密度	44.0kW/m	44.0kW/m
ペレット最高温度 (設計線出力密度)	約1,550°C (UO <sub>2</sub> ) 約1,650°C (5.0wt%Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 入り)	約1,660°C (10wt%PuO <sub>2</sub> 入り) 約1,800°C (2.0wt%Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 入り)
被覆管外面最高温度	約310°C	約310°C
ヘリウム封入圧	約1.0MPa	約0.5MPa
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 濃度	3~5wt%程度	3wt%程度以下
ウォータ・ロッド外径	約2.49cm	約3.40cm
ウォータ・チャンネル外幅	—	—

# 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、工認段階で詳細評価の内容を説明する。

実用発電用原子炉及びその附属設備の技術基準に関する規則の解釈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 $S_s$ を用いた地震応答解析結果の応答値が動的機能保持に関する評価基準値を超えていないことを確認する。

##### 【確認内容】

動的機能については以下を確認する。

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

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

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

動的機能維持評価において、原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版(以下「JEAG4601」という。)に定められた適用範囲から外れ新たな検討又は加振試験が必要な設備，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氣的機能維持を確認することから、動的機能維持評価の検討対象設備から除いている。

(2) 新たな検討，詳細検討又は加振試験が必要な設備の抽出

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

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

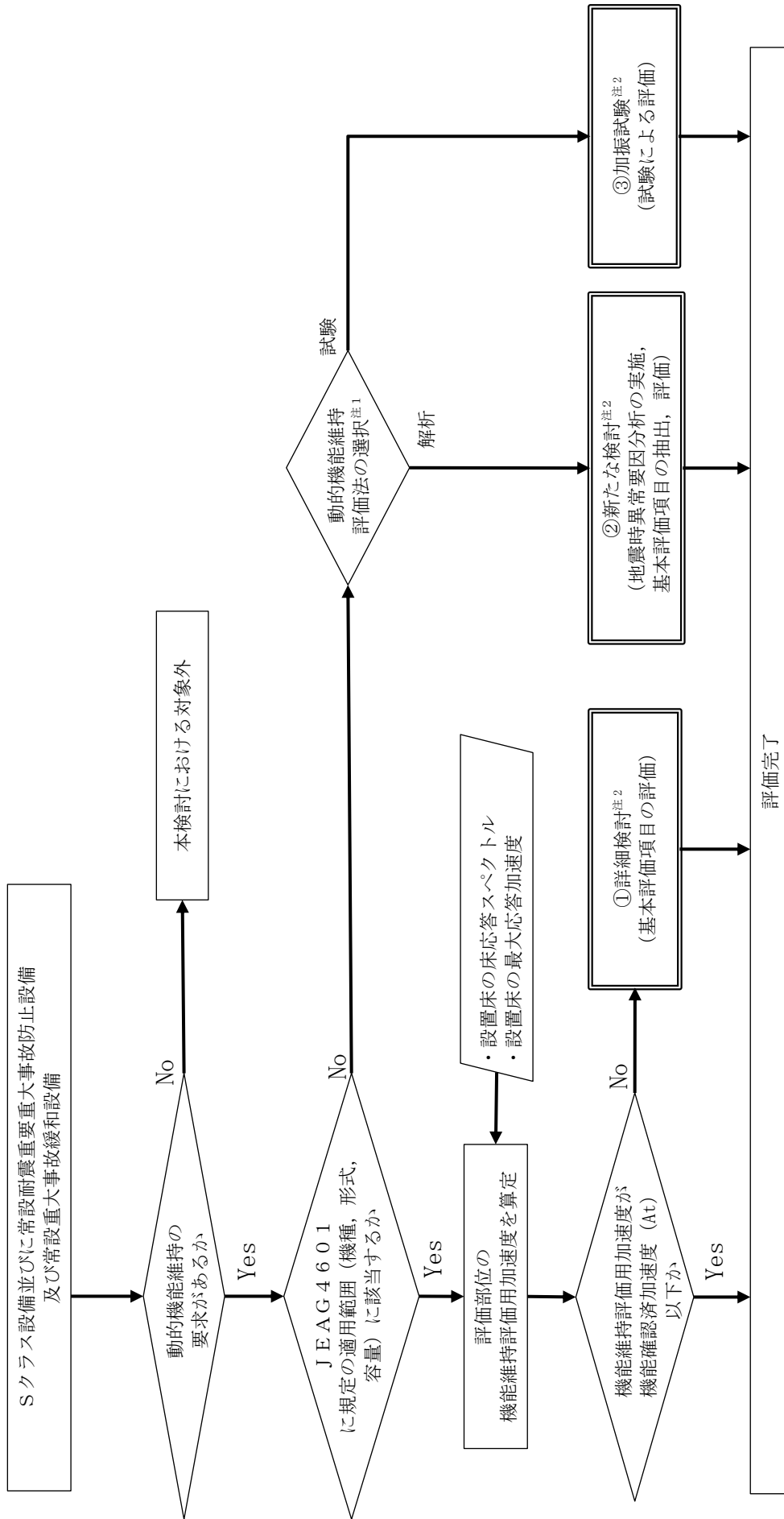
さらに、機能維持評価用加速度が J E A G 4 6 0 1 及び既往の研究<sup>※</sup>等により妥当性が確認されている機能確認済加速度（A t）以下であることの確認を行い、機能確認済加速度を超える設備については詳細検討（基本評価項目の評価）が必要な設備として抽出する。

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

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

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

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



注1：対象物の複雑さ，加振試験の可否等により選択

注2：評価の成立性が確認できない場合，対策による検討を実施

第3-1 図 動的機能維持評価の検討フロー

### (3) 抽出結果

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

#### ① 詳細検討(基本評価項目の評価)が必要な設備

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

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

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

新たな検討が必要な設備としては、以下の設備が該当する。

##### <スクリー式ポンプ>

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

##### <ガスタービン機関>

- ・ガスタービン発電機

#### ③ 加振試験(試験による評価)が必要な設備

加振試験が必要な設備としては、以下の設備が該当する。

- ・高圧原子炉代替注水ポンプ

第3-1表 新たな検討又は詳細検討が必要な設備の抽出結果(1/2)

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



第3-1表 新たな検討又は詳細検討が必要な設備の抽出結果(2/2)

機種名	設備名称	JEAG4601の適用性確認 ○:適用可 ×:適用外 (新たな検討が必要)	At確認 <sup>注1</sup> ○:At以下 (評価完了) ×:At超過 (詳細検討が必要) -:対象外, 評価中
電動機	中央制御室送風機用電動機	○	○
	中央制御室非常用再循環送風機用電動機	○	○
	非常用ガス処理系排風機用電動機	○	×
	可燃性ガス濃度制御系再結合装置ブロウ用電動機	○	×
	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ウ	○	×
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)	○	○ <sup>注2</sup>

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

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

#### 4. 新たな検討が必要な設備における動的機能維持評価の検討

##### 4.1 新たな検討が必要な設備における動的機能維持の検討方針

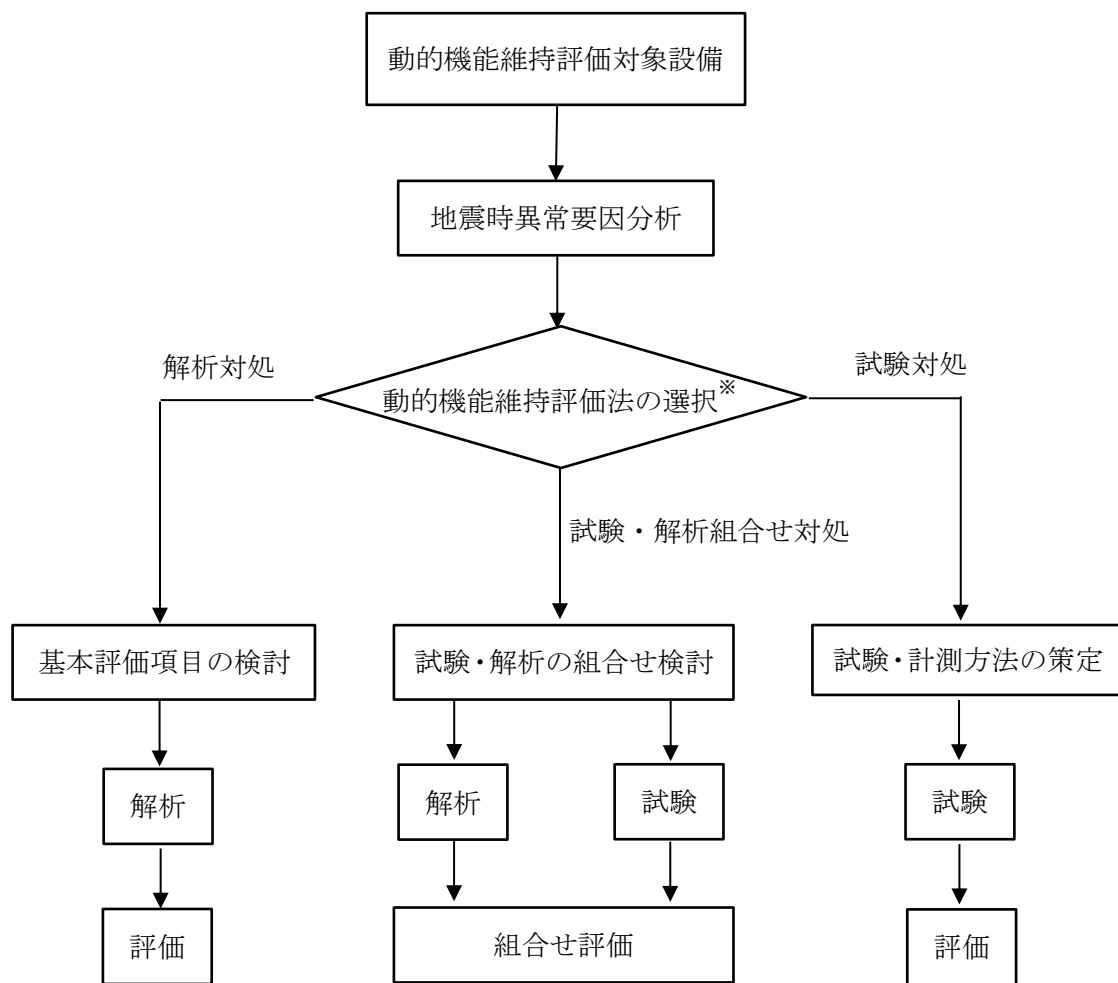
検討対象設備のうち、3.(3)②に示す機器については、J E A G 4 6 0 1に定められた機種及び適用形式から外れ、機能確認済加速度との比較による評価方法が適用できないことから、新たに評価項目の検討が必要となる設備である。

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

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

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

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



※対象物の複雑さ等で選択

第 4.1-1 図 動的機能維持評価フロー

## 4.2 スクリュー式ポンプに対する検討

### 4.2.1 検討対象設備の概要

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

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

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

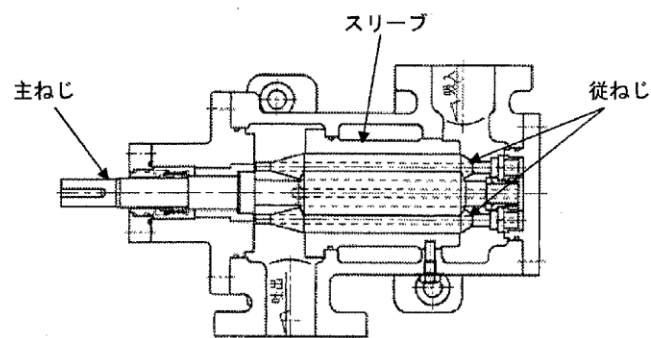
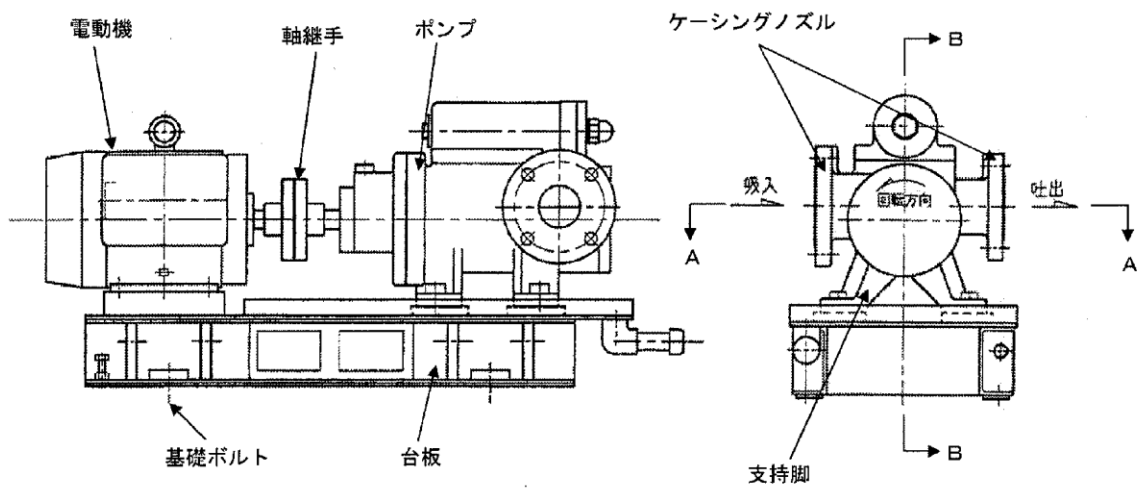
また、固定方法については、基礎ボルトで周囲を固定した架台の上に、駆動機器である横形ころがり軸受の電動機とポンプが取付ボルトにより設置され、地震荷重は主軸、軸受を通してケーシングに伝達されることから、基本構造は同じと言える。さらに、電動機からの動力は軸継手を介してポンプ側に伝達する方式であることから、作動原理についても同じと言える。

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

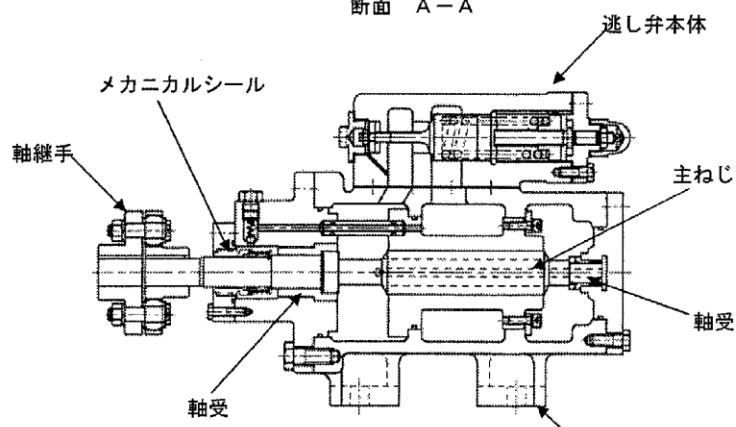
なお、ガスタービン発電設備燃料移送ポンプ、非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備燃料移送ポンプについては、新規制基準により新たに動的機能要求が必要となり、評価する設備となる。

第 4.2.1-1 表 新たな検討が必要な設備において参考とする機種／形式

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

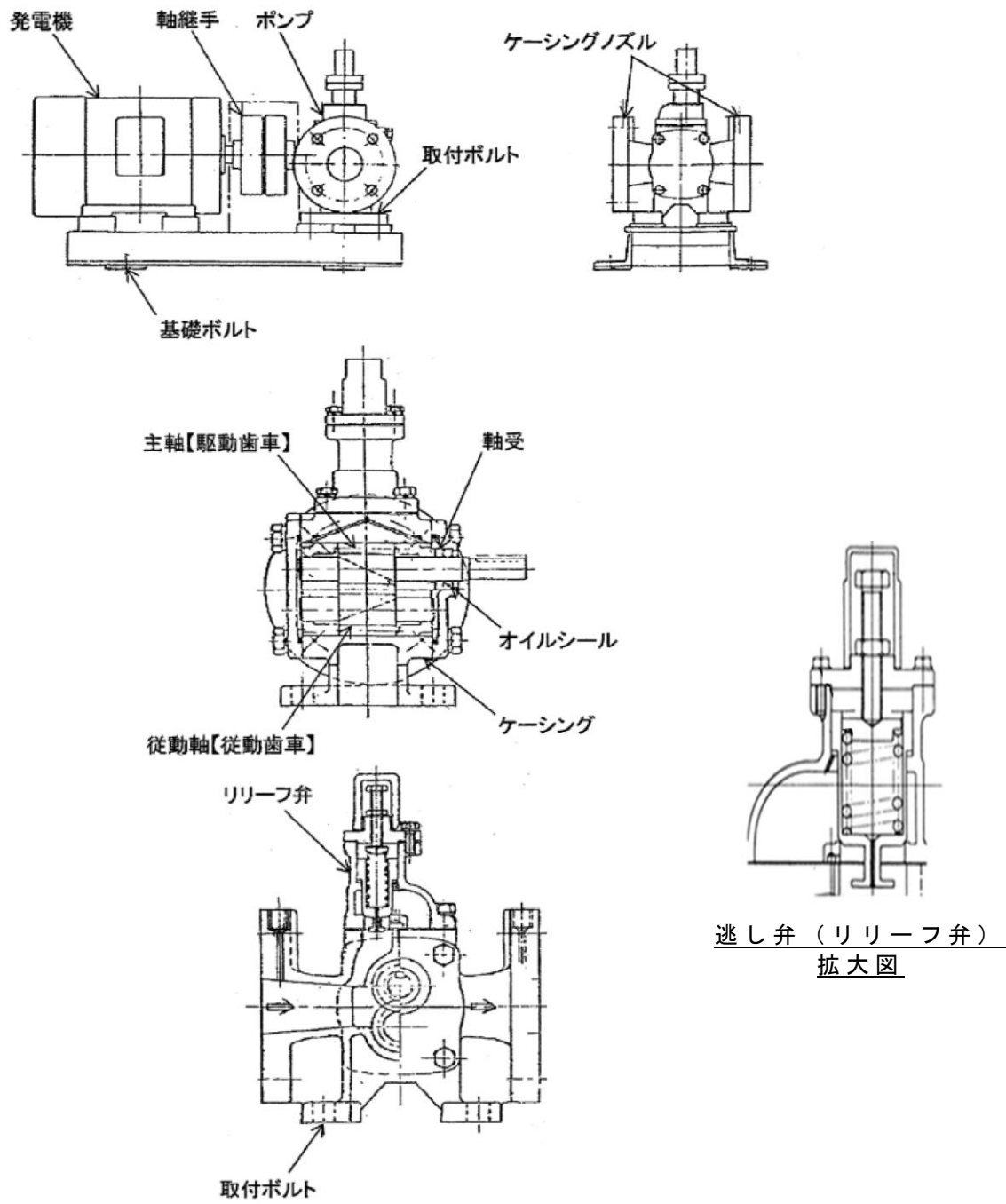


断面 A-A

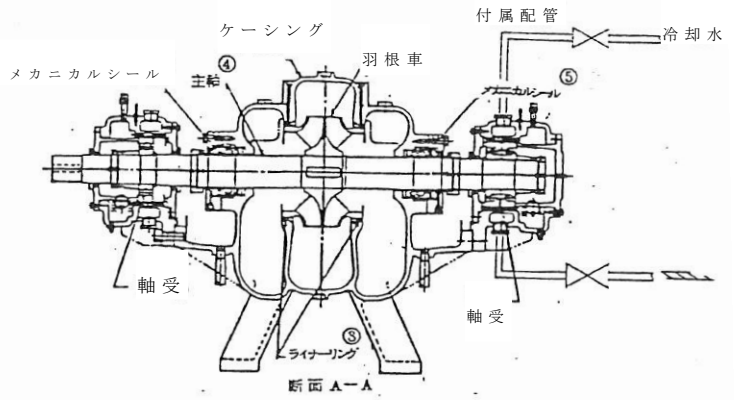
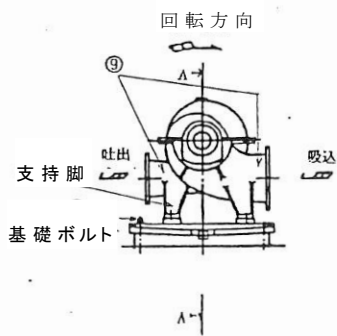
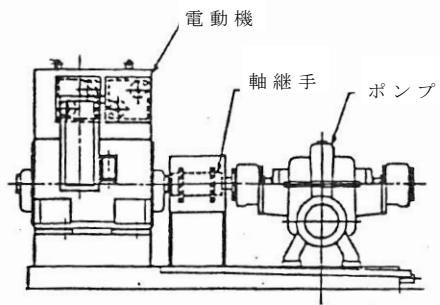


断面 B-B

第 4.2.1-1 図 スクリュー式ポンプ構造概要図



第 4. 2. 1-2 図 ギヤ式ポンプ構造概要図

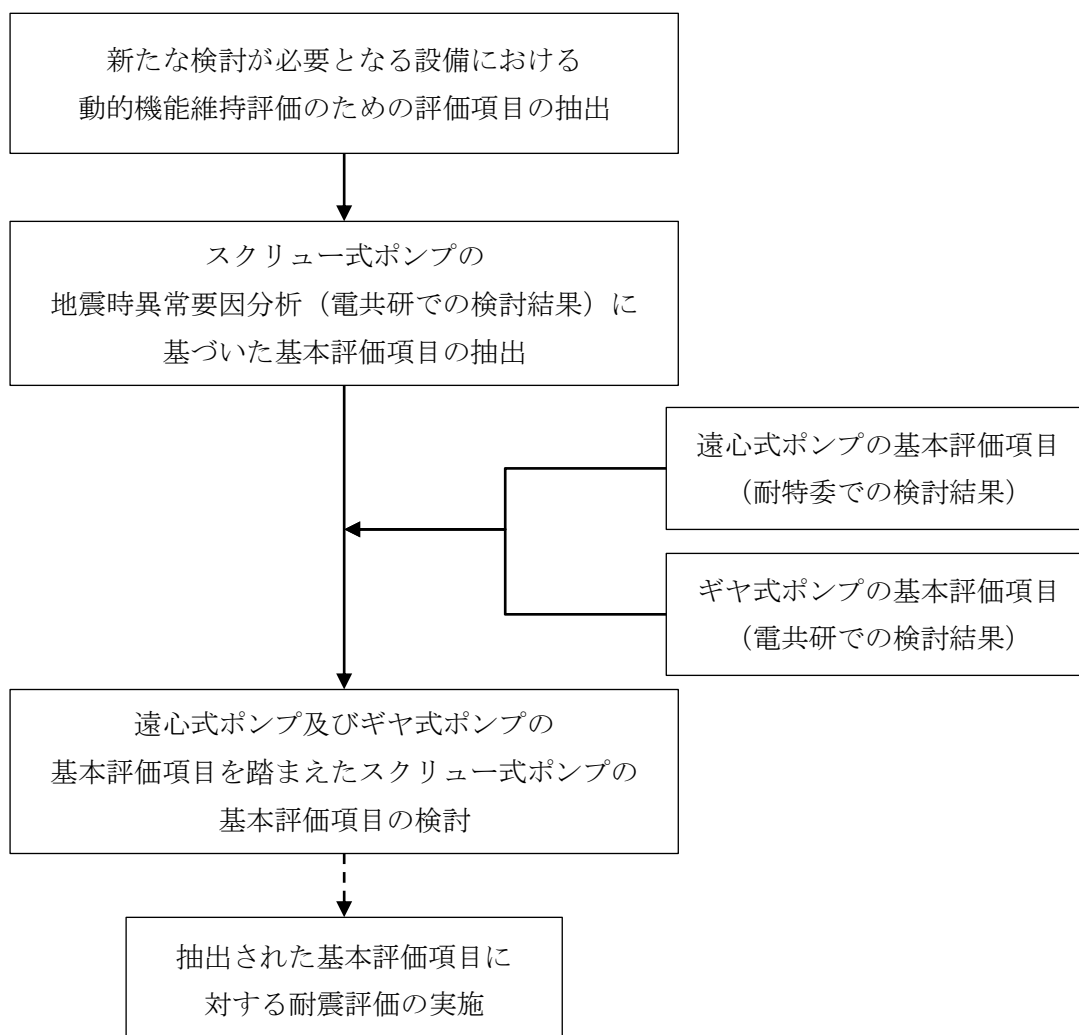


第 4.2.1-3 図 遠心式ポンプ構造概要図

#### 4.2.2 スクリュー式ポンプの動的機能維持評価項目の抽出

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

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



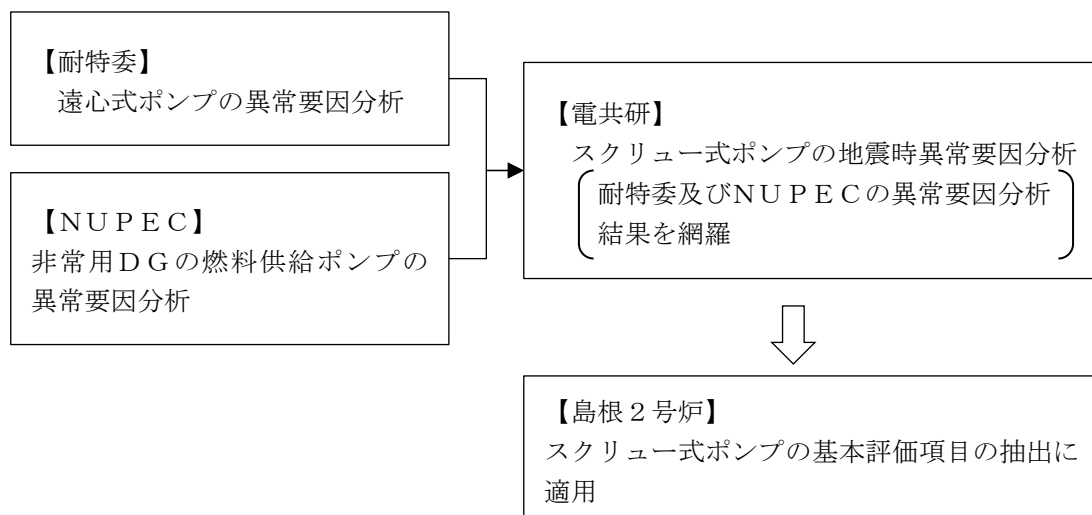
第4.2.2-1図 スクリュー式ポンプにおける動的機能維持評価のための基本評価項目の抽出フロー



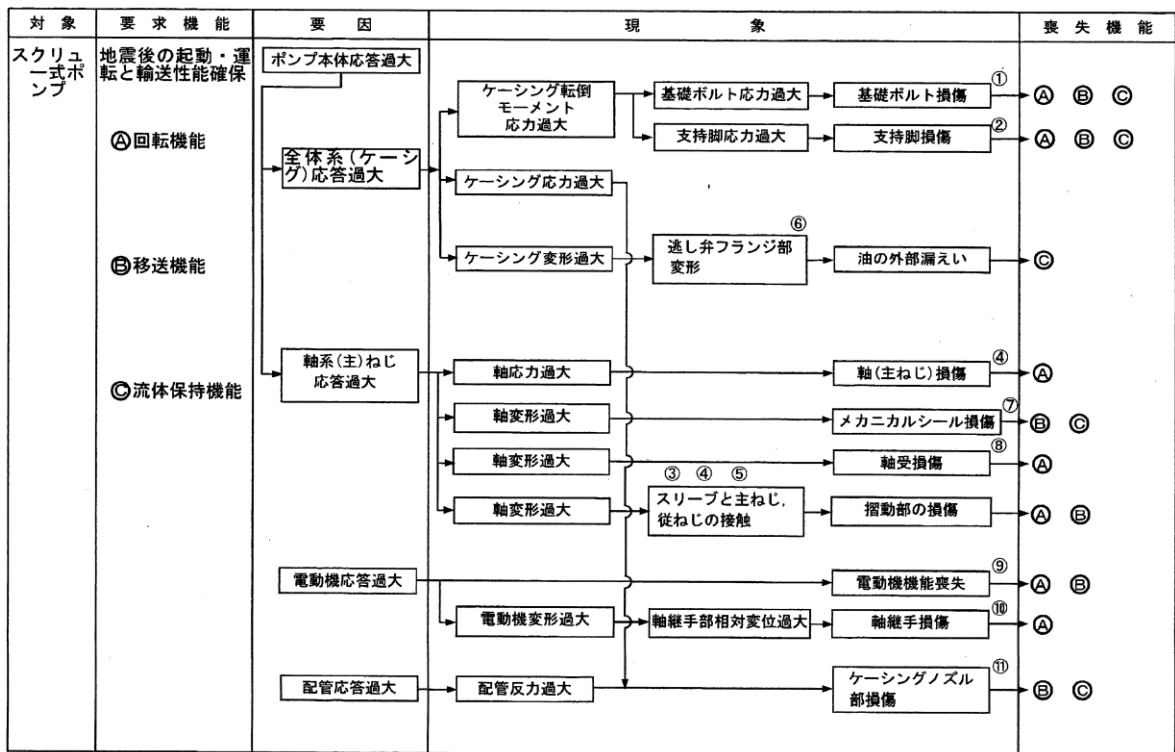
スクリー式ポンプの地震時異常要因分析図(以下「異常要因分析図」という。)及び基本評価項目は、電共研<sup>※</sup>での検討内容を用いる。電共研では第 4.2.2-2 図に示すとおり、耐特委における遠心式ポンプ及びNUPECにおける非常用ディーゼル発電機の燃料供給ポンプに対する異常要因分析結果(非常用ディーゼル発電機システム耐震実証試験(1992年3月))を網羅するように、スクリー式ポンプに対する地震時異常要因分析を行い、基本評価項目を抽出している。

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

※動的機器の地震時機能維持の耐震余裕に関する研究(平成 25 年 3 月)



第 4.2.2-2 図 地震時異常要因分析の適用 (スクリー式ポンプ)



第 4.2.2-3 図 スクリュー式ポンプの地震時異常要因分析図

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

No.	基本評価項目	異常要因
①	基礎ボルト (取付ボルト含む)	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。

要求機能	要因	現象	喪失機能
地震後の運転と 水力性能確保  ① 回転機能 ② 水力特性機能 ③ 流体保持機能	ポンプ本体 応答過大	ケーシング転倒モーメント過大	基礎ボルト応力過大 → 基礎ボルト損傷 ① → (A), (B), (C)
	全体系(ケーシング) 応答過大	ケーシング応力過大	支持脚応力過大 → 支持脚損傷 ② → (A), (B), (C)
		ケーシング変形過大	ケーシングとロータの接触 → 摺動部(ライナーリング部)の損傷 ③ → (A), (B)
		軸系(ロータ) 応答過大	軸応力過大
	軸変形過大		メカニカルシール損傷 ⑤ → (B), (C)
	軸受荷重過大		軸受損傷 ⑥ → (A)
	電動機応答過大	電動機変形過大	電動機機能喪失 ⑦ → (A), (B)
			軸継手荷重過大 → 軸継手損傷 ⑧ → (A)
	配管応答過大	配管反力過大	ケーシングノズル部損傷 ⑨ → (B), (C)
	冷却水配管応答過大	冷却水配管応力過大	冷却水配管損傷 ⑩ → 軸受冷却不能 (A)

\* 駆動用タービンの場合も同様。また、増速機も含む。

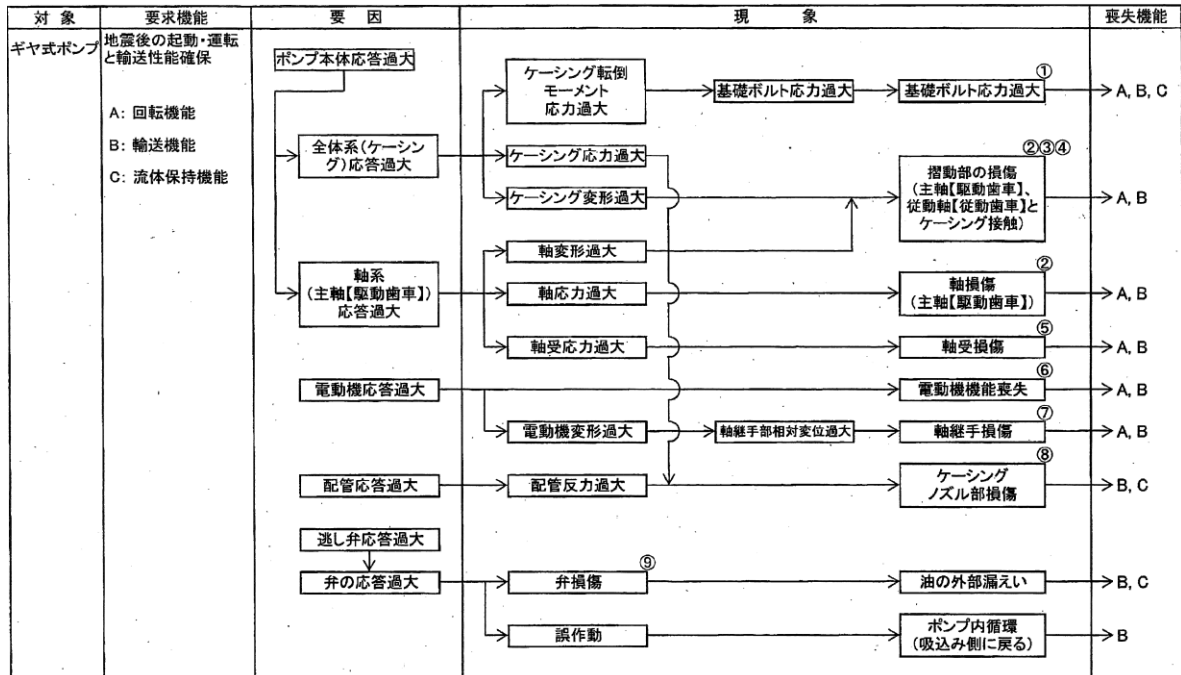
第4.2.3-1図 遠心式ポンプの地震時異常要因分析図

第 4.2.3-1 表 遠心式ポンプの要因分析図から抽出された基本評価項目

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

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

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



第4.2.4-1図 ギヤ式ポンプの地震時異常要因分析図

第 4.2.4-1 表 ギヤ式ポンプの要因分析図から抽出された基本評価項目

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

#### 4.2.5 スクリュー式ポンプの基本評価項目の検討

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

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

第4.2.5-1表 スクリュー式ポンプにおける基本評価項目の整理結果

○：既往知見における評価項目，－：対象外

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



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

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

No. I : 基礎ボルト (取付ボルト含む)

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

No. II : 支持脚

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

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

No. III : 摺動部

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

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

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

#### No. IV : 軸系

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

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

#### No. V : 逃がし弁フランジ部 (漏えい防止)

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

#### No. VI: 逃がし弁 (移送機能)

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

#### No. VII : メカニカルシール

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

#### No. VIII : 軸受

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

#### No. IX:電動機

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

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

#### No. X:軸継手

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

よって、軸継手は動的機能維持評価の対象外とする。

#### No. XI:ケーシングノズル

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

よって、ケーシングノズルは動的機能維持評価の対象外とする。

#### No. XII:軸冷却水配管

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

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

#### 4.2.6 スクリュー式ポンプの動的機能維持評価項目の検討結果

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

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

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

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

○：評価対象（計算書対象），－：対象外

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

#### 4.3 ガスタービン発電機に対する検討

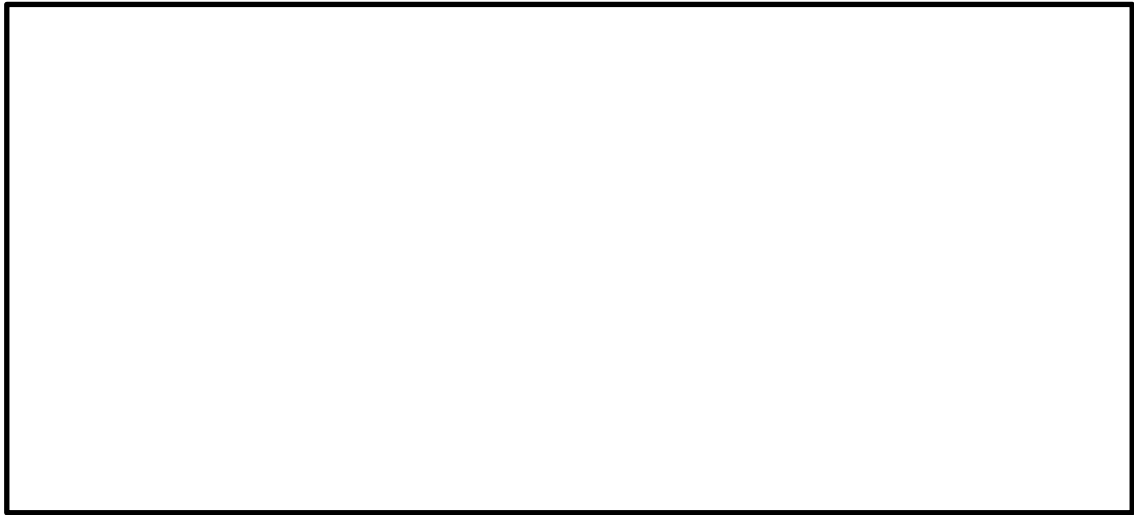
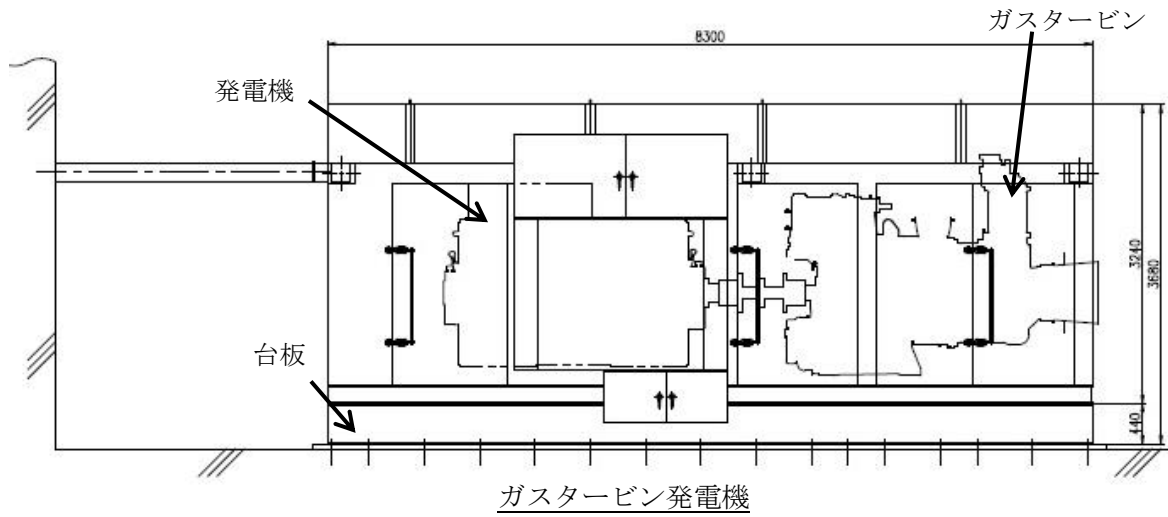
##### 4.3.1 検討対象設備の概要

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

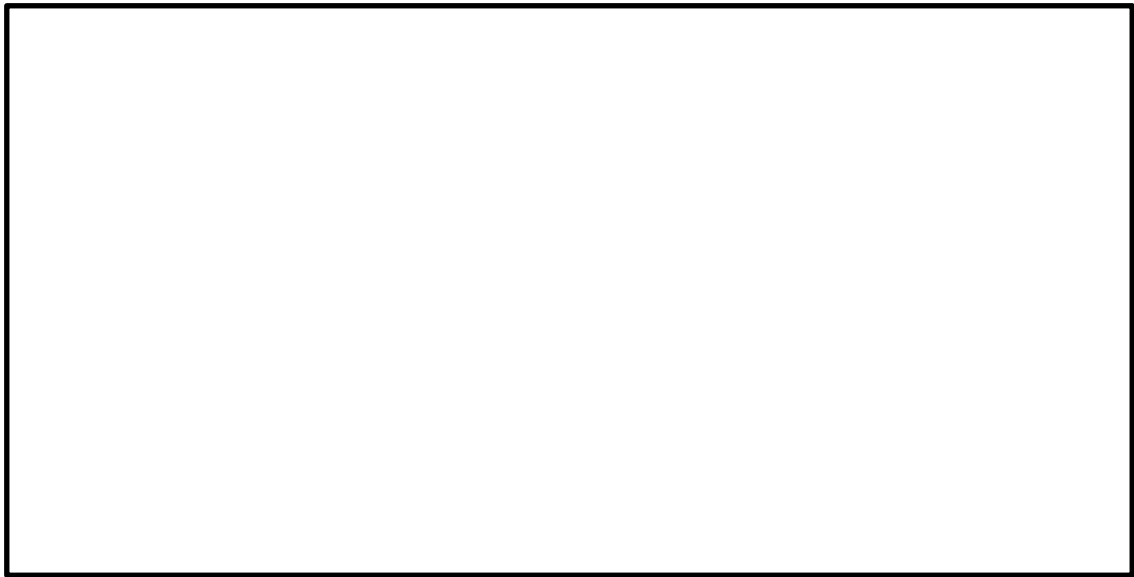
ガスタービン発電機は第 4.3.1-1 図に示すように、同一の台板上にガスタービンと発電機が据え付けられた構造となっている。ガスタービンと発電機は、軸継手によって連結されており、ガスタービンによって出力軸を回転させ、軸継手を介して発電機回転子を回転させて発電を行っている。ガスタービン発電機には、運転に必要な空気の取り込み、排出を行うために、伸縮継手を介して専用のダクト（吸排気設備）を設けている。

第 4.3.1-1 表 新たな検討が必要な設備において参考とする機種／形式

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



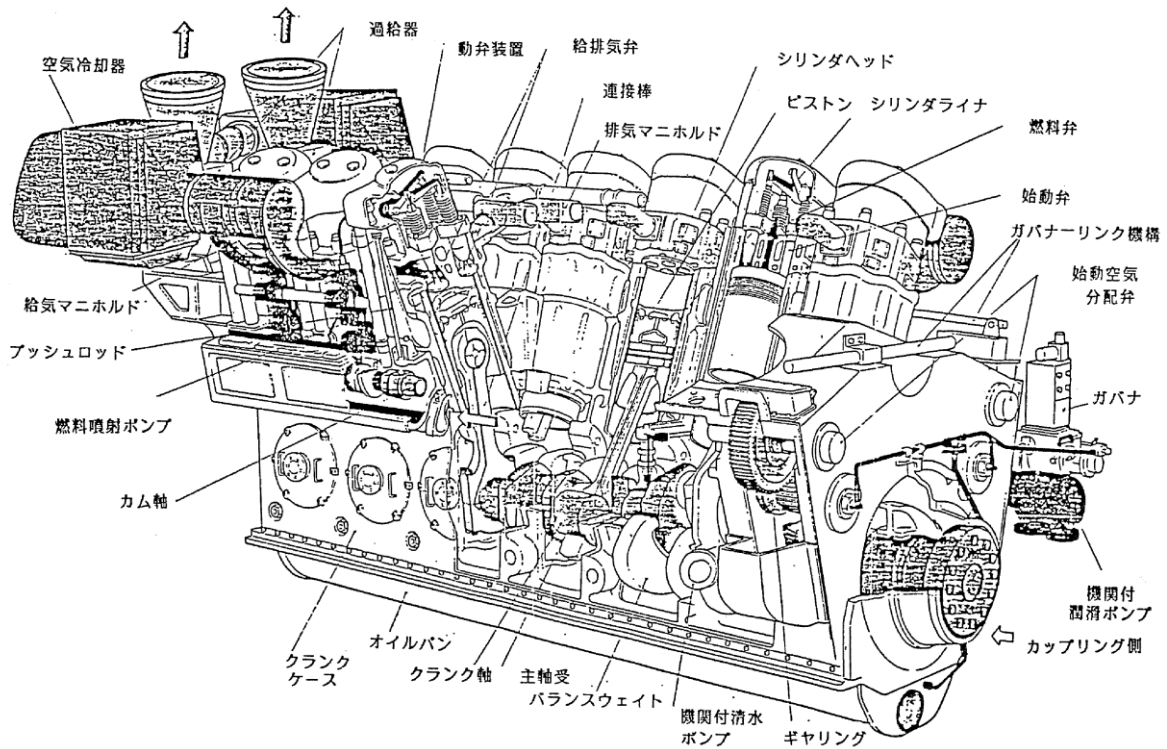
ガスタービン



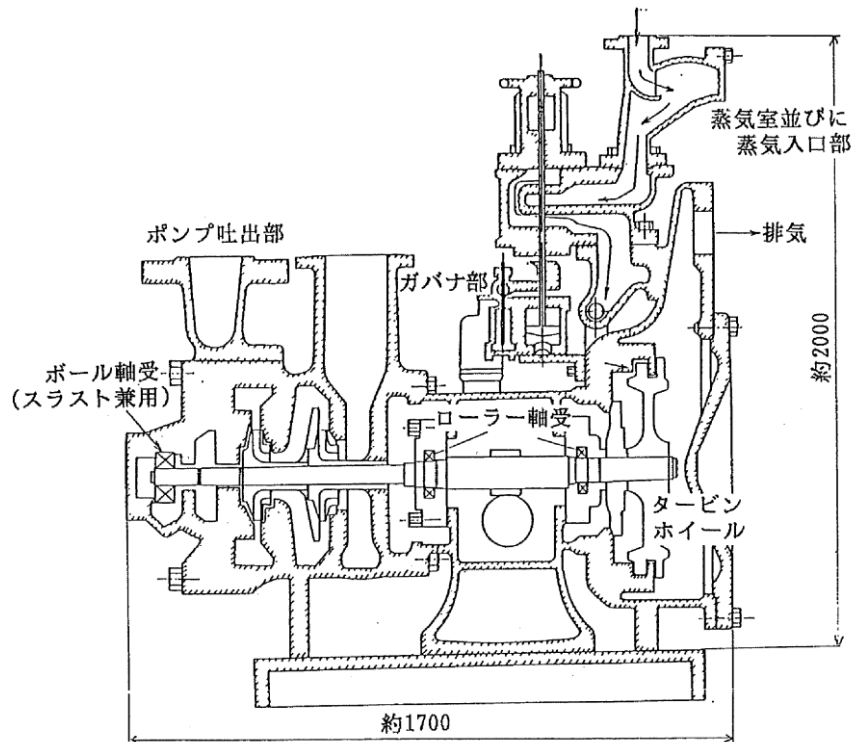
ガスタービン機関

第 4.3.1-1 図 ガスタービン発電機構造概要図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



第 4.3.1-2 図 非常用ディーゼル発電機構造概要図



第 4.3.1-3 図 ポンプ駆動用タービン (AFWP用) 構造概要図



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

#### (1) 非常用ディーゼル発電機

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

##### a. ガスタービン（機関）

非常用ディーゼル発電機の過給機と以下の点において類似性を有する。

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

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

##### b. ガスタービン（減速機）

非常用ディーゼル発電機のギヤリングと以下の点において類似性を有する。

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

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

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

#### c. ガスタービン付きポンプ（主燃料油ポンプ、潤滑油ポンプ）

非常用ディーゼル発電機の潤滑油ポンプと以下の点において類似性を有する。

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

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

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

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

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

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

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

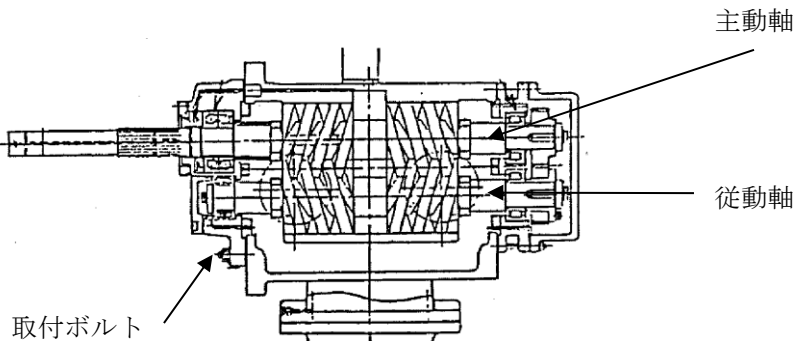
第 4.3.1-4 図 非常用ディーゼル発電機の過給機とガスタービン (機関) の比較

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

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

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

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

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

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

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

## (2) ポンプ駆動用タービン

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

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

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

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

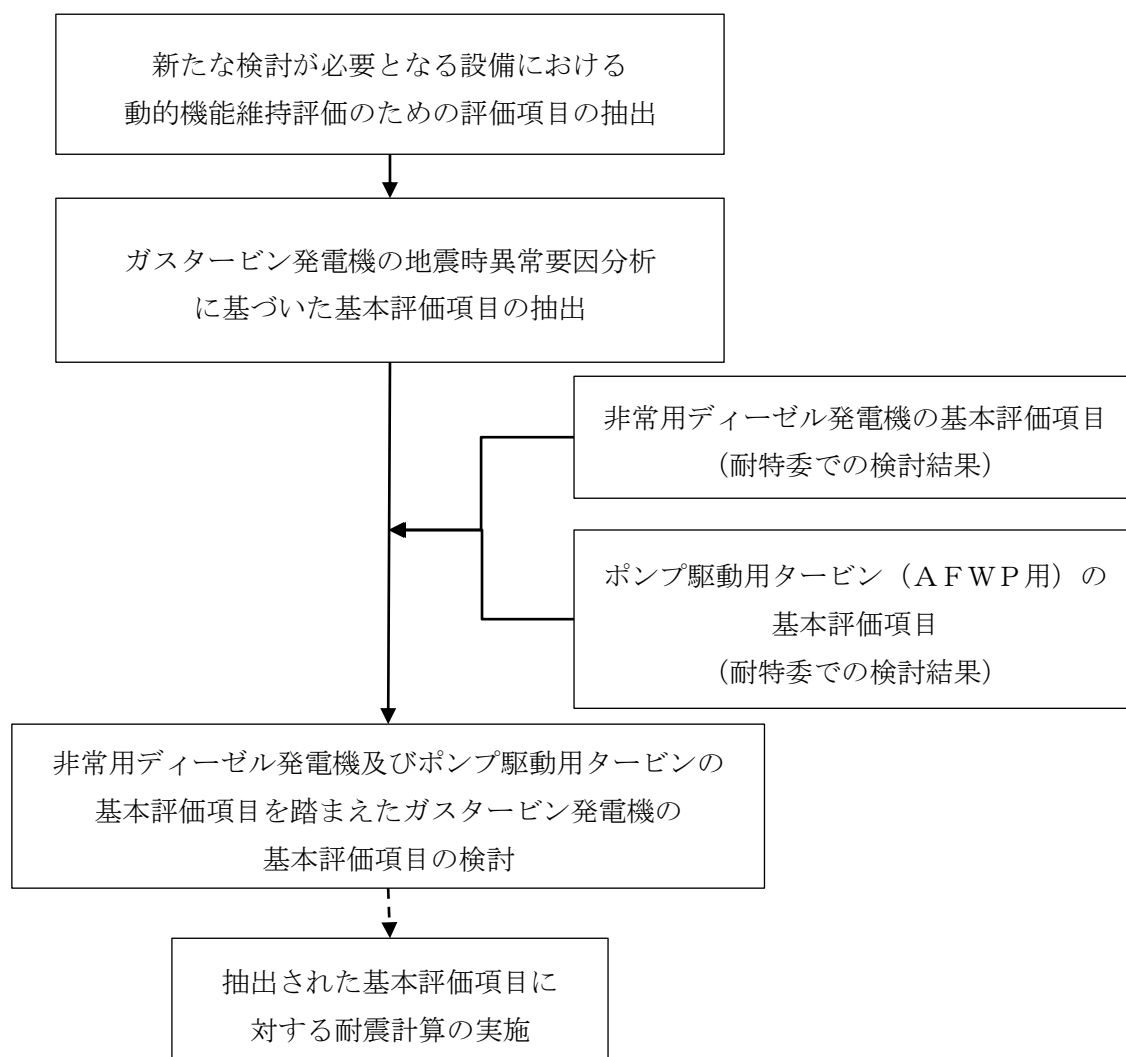
第 4.3.1-7 図 ポンプ駆動用タービンとガスタービン (機関) の比較

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

#### 4.3.2 ガスタービン発電機の動的機能維持評価項目の抽出

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

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



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



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

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

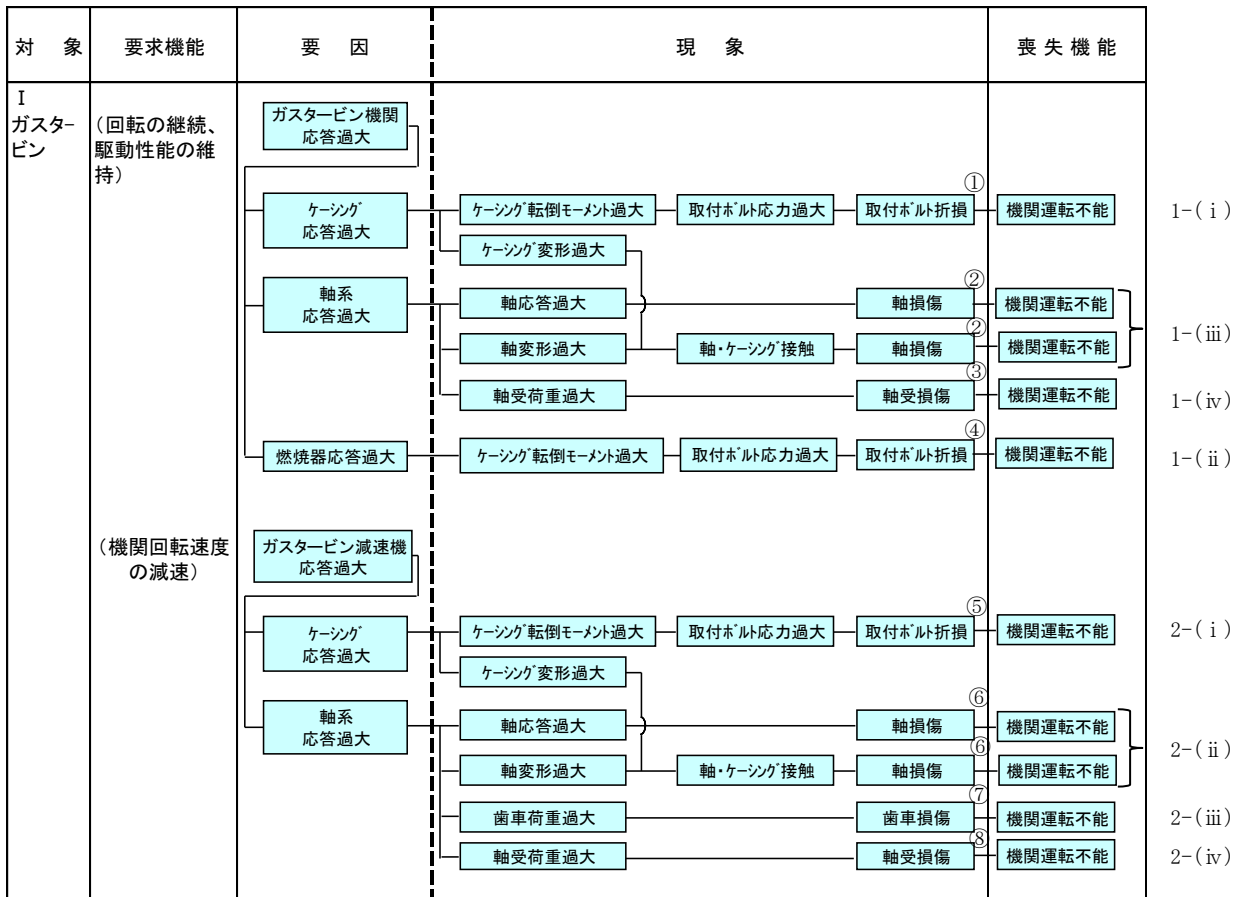
ガスタービン発電機の異常要因分析図を第 4.3.2-2 図～第 4.3.2-7 図に示す。要因分析図に基づき抽出されるガスタービンの基本評価項目は、第 4.3.2-1 表のとおりである。なお、ガスタービンの異常要因分析は以下の区分に分類し実施した。

#### <異常要因分析の検討区分>

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

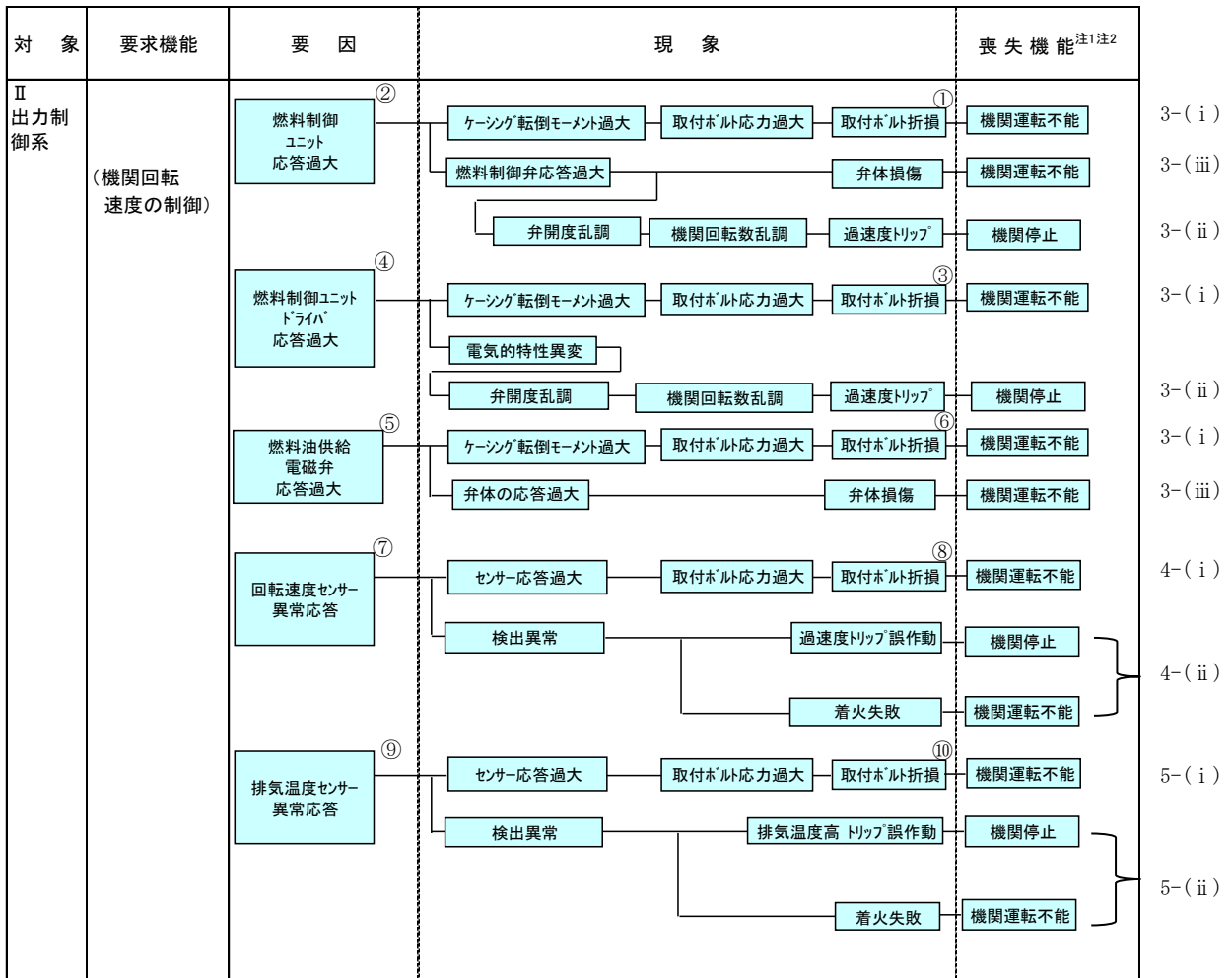
なお、ガスタービン（機関）等の軸応答過大による軸損傷は、次の理由により基本評価項目から除外した。

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



第 4.3.2-2 図 異常要因分析図と構造図 (ガスタービン)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

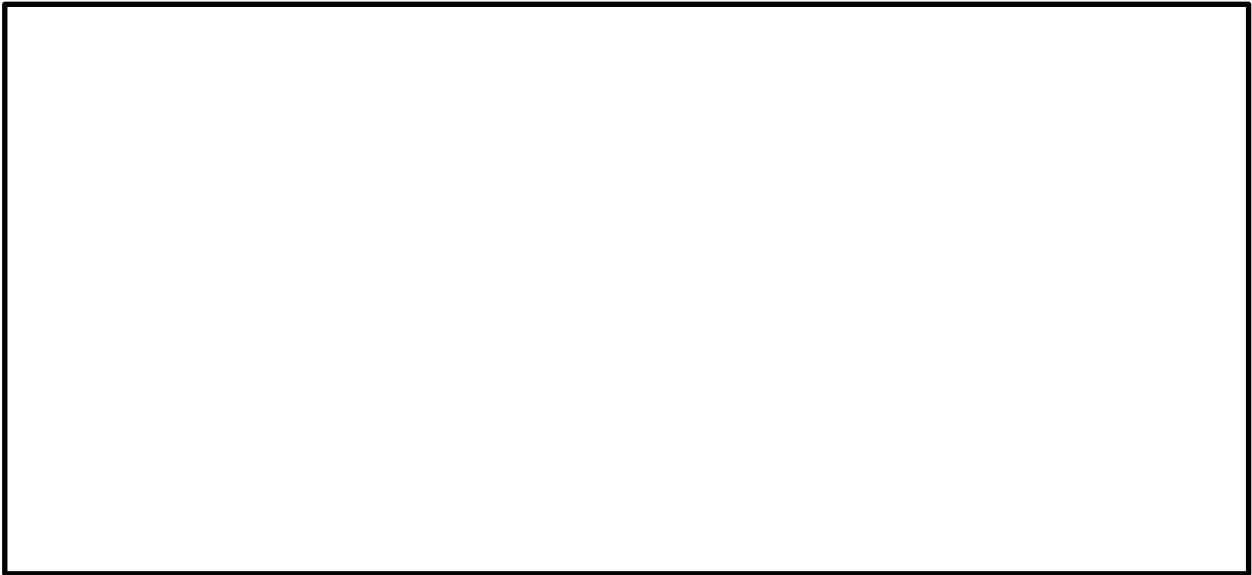
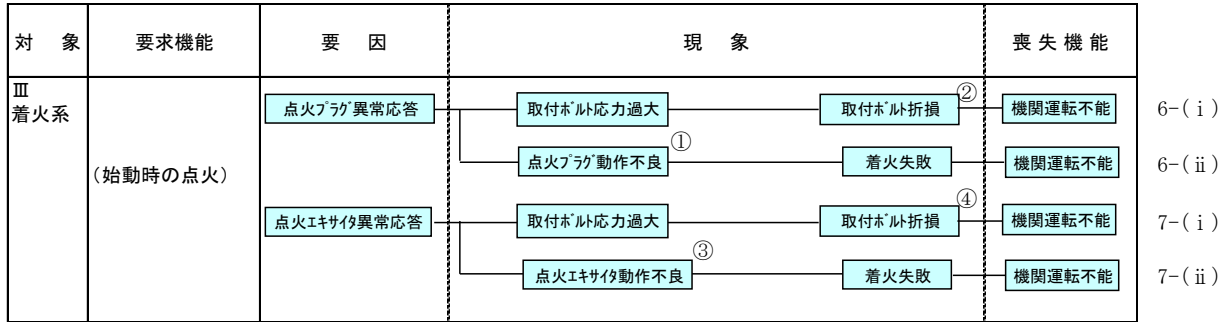


注1 機関運転不能：構成機器の損傷や動作不良により運転が不能となる

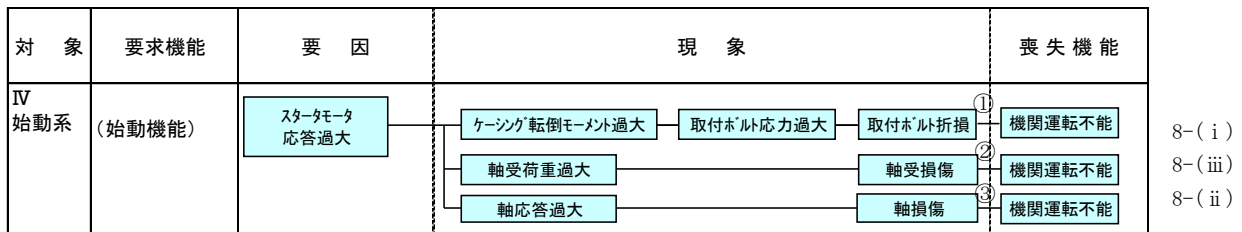
注2 機関停止：誤信号によるトリップにより運転が停止する（損傷に至らない）

第 4.3.2-3 図 異常要因分析図と構造図（出力制御系）

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



第 4.3.2-4 図 異常要因分析図と構造図 (着火系)



第 4.3.2-5 図 異常要因分析図と構造図 (始動系)

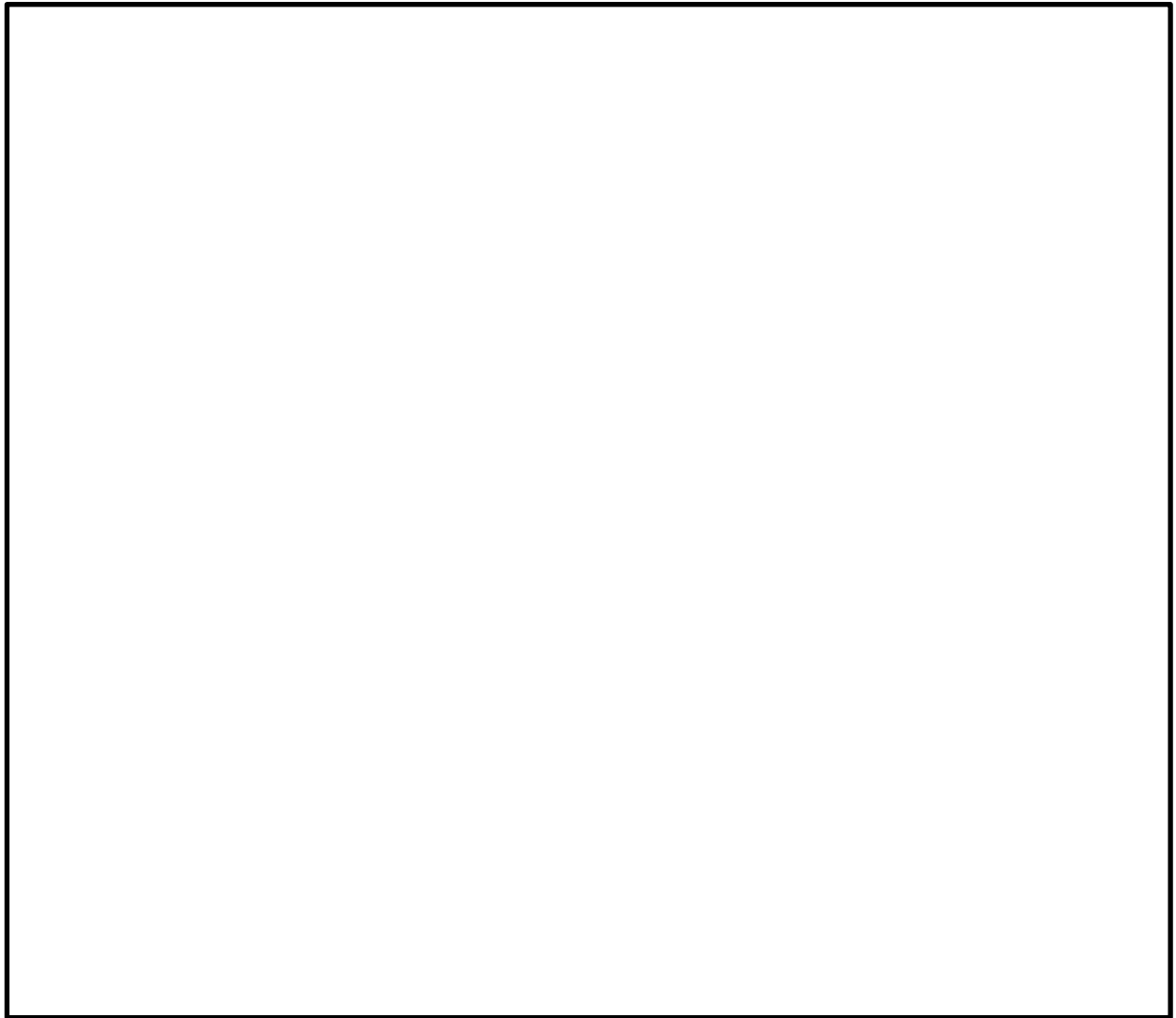
本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

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

第 4.3.2-6 図 異常要因分析図と構造図 (燃料油系)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

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



第 4.3.2-7 図 異常要因分析図と構造図（潤滑油系）

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

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

No.	基本評価項目	異常要因
1-(i)	ケーシング取付ボルト	ガスタービン（機関）の地震応答が過大となると、転倒モーメントによるガスタービン（機関）の取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、機関ケーシング部が脱落し、回転の継続及び駆動性能の維持機能を喪失する。
1-(ii)	燃焼器取付ボルト	燃焼器の地震応答が過大となると、転倒モーメントによる取付ボルトの応力が過大となり損傷に至る。その結果、燃焼器が脱落し、燃焼ガスを保持できなくなり機関の回転の継続及び駆動性能の維持機能を喪失する。
1-(iii)	ガスタービン機関摺動部（軸とケーシングとのクリアランス）	ガスタービン（機関）の地震応答が過大となると、回転軸の応答が過大となり、軸部の変形によりケーシングに付随する静止部と接触する。その結果、軸部が損傷に至り、回転の継続及び駆動性能の維持機能を喪失する。なお、クリアランスを形成する静止部は軸よりも外径側にあり、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、始動時に電氣的動作不良が発生すると、点火機能を喪失し、着火失敗に至る。
7-(i)	点火エキサイタ取付ボルト	点火エキサイタの地震応答が過大となることで、転倒モーメントによる点火エキサイタの取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、点火エキサイタが脱落することで始動時の点火機能を喪失する。
7-(ii)	点火エキサイタ	点火エキサイタの地震応答が過大となることで、電氣的動作不良が発生し、着火失敗に至る。その結果、始動時の点火機能を喪失する。
8-(i)	スタータモータ取付ボルト	スタータモータの地震応答が過大となることで、転倒モーメントによる取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、スタータモータが転倒することで始動機能を機能喪失する。

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

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

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

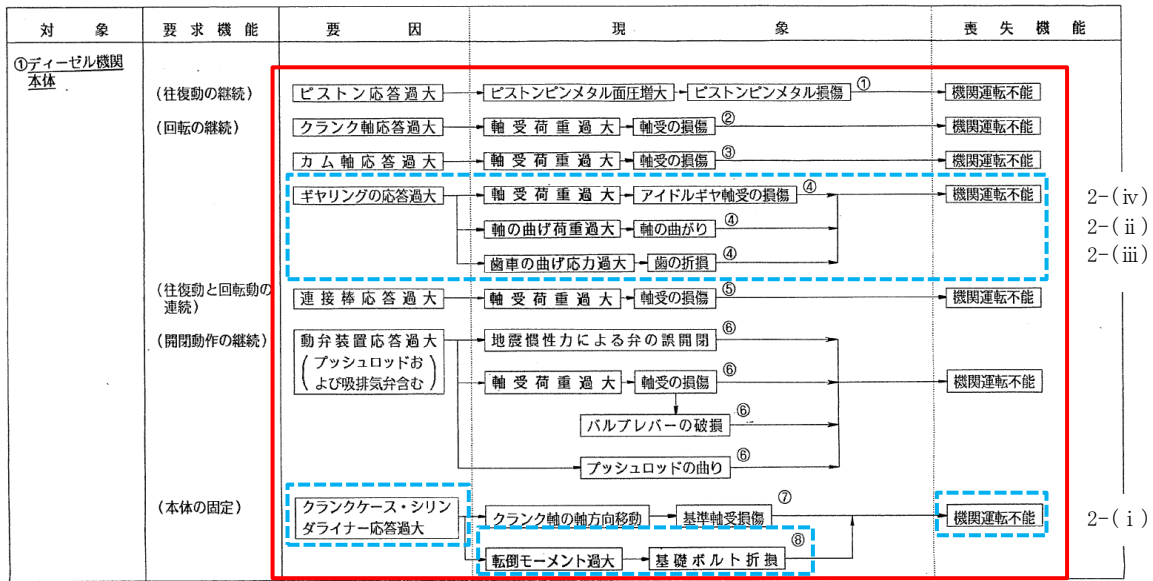
No.	基本評価項目	異常要因
11-(i)	始動用燃料油ポンプ用モータ取付ボルト	始動用燃料油ポンプ用モータの地震応答が過大となることで、転倒モーメントによる取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、転倒することでモータの回転機能を喪失し、燃料油供給機能を喪失する。
11-(ii)	始動用燃料油ポンプ用モータ 摺動部 (軸とケーシングのクリアランス)	始動用燃料油ポンプ用モータの地震応答が過大となることで、回転軸の応答が過大となり、軸部の変形によりケーシングと接触する。その結果、軸が損傷に至り、モータの回転機能を喪失し、燃料油供給機能を喪失する。
11-(iii)	始動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

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

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

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

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

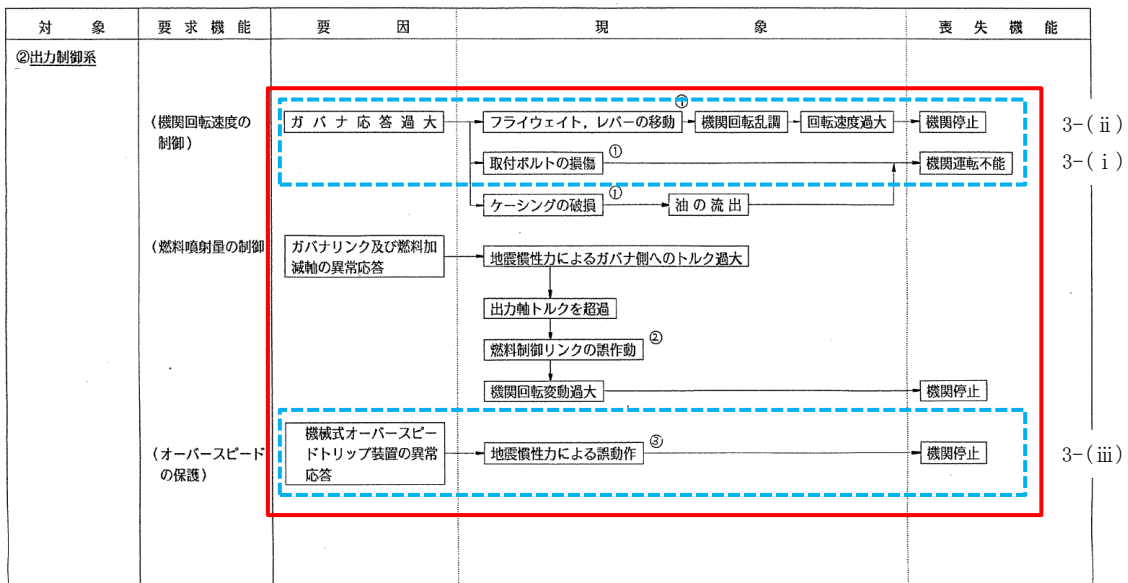


2-(iv)  
2-(ii)  
2-(iii)

2-(i)

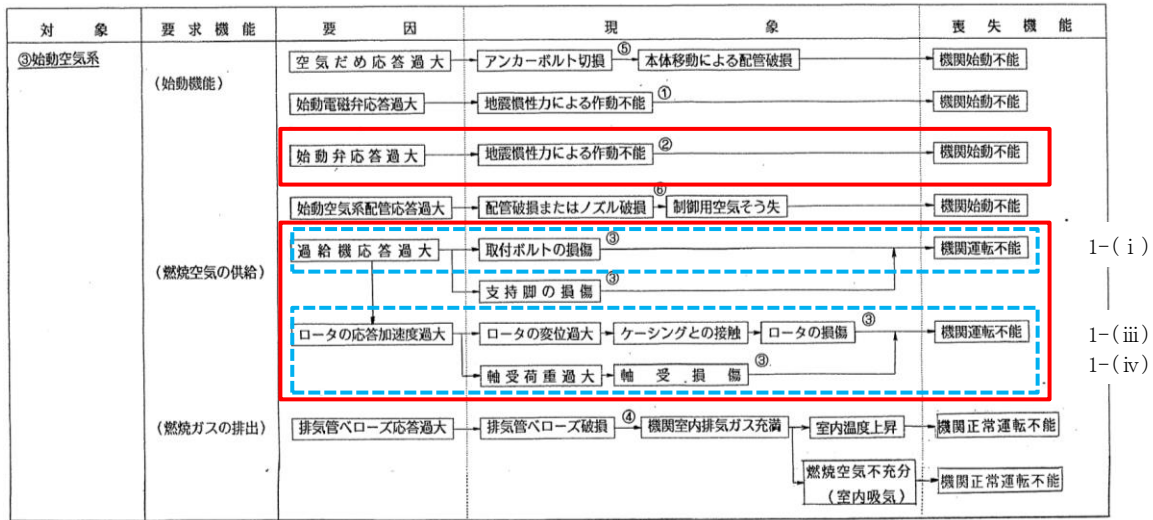
□ : 非常用ディーゼル発電機のうち機関及び機関付き機器の項目  
 □ : ガスタービンとの類似評価項目

第 4.3.3-1 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)



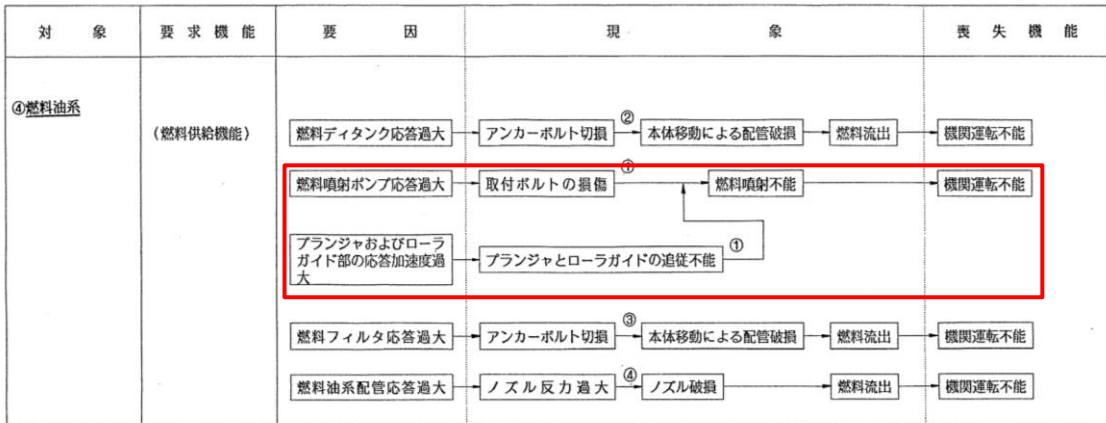
□ : 非常用ディーゼル発電機のうち機関及び機関付き機器の項目  
 □ : ガスタービンとの類似評価項目

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)



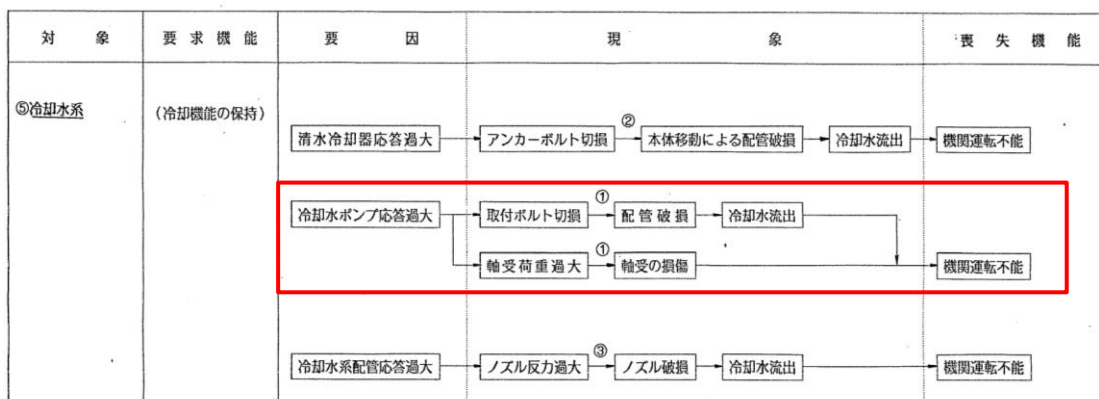
□ : 非常用ディーゼル発電機のうち機関及び機関付き機器の項目  
□ : ガスタービンとの類似評価項目

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)



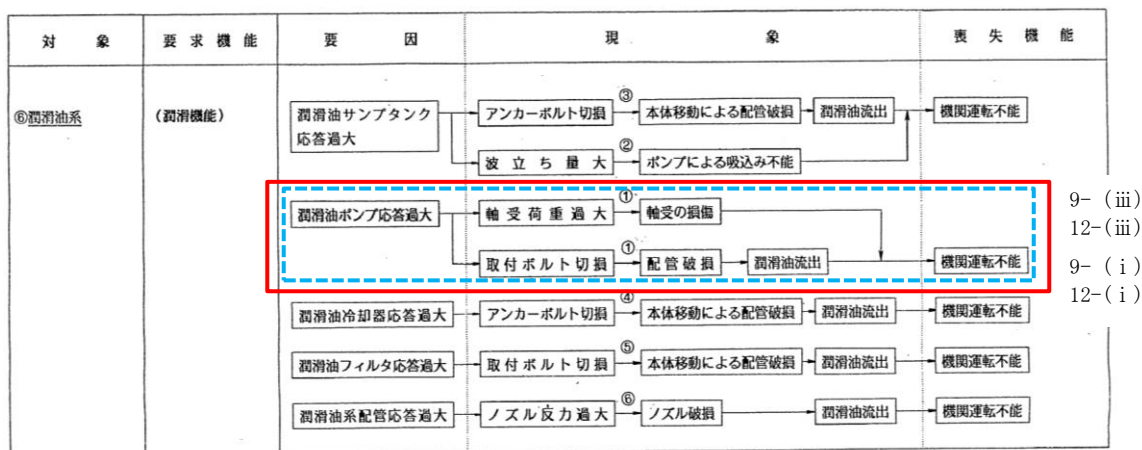
□ : 非常用ディーゼル発電機のうち機関及び機関付き機器の項目  
□ : ガスタービンとの類似評価項目

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)



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

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

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

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

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



4.3.3-1 表 非常用ディーゼル発電機とガスタービン発電機の評価

項目比較 (出力制御系)

No.	非常用ディーゼル発電機			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	フライウエイト, レバーの移動	ガバナの健全性評価 (地震時の機能維持確認)	3-(ii)	燃料制御ユニット, 燃料制御ユニットドライバ	
		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  コントロールラック中の燃料加減軸のつかえ有無	—	該当なし	
				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
11	オーバーバースピードトリップ装置	地震慣性力による誤作動				

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

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

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

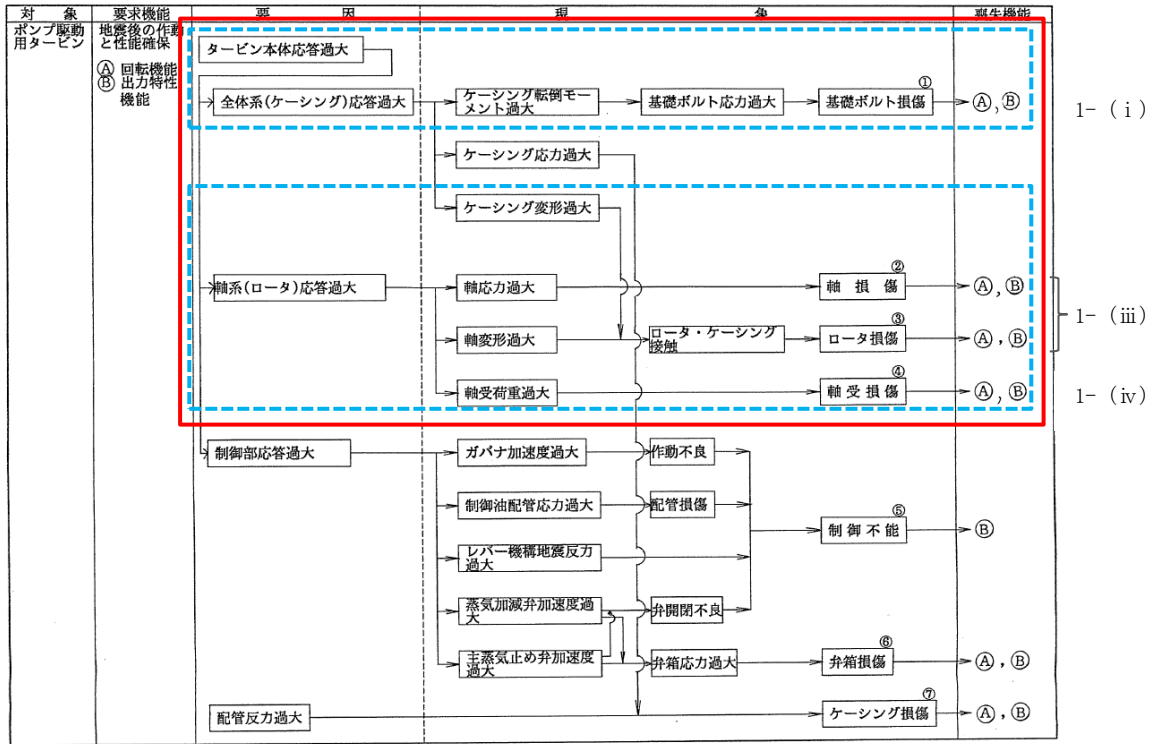
No.		非常用ディーゼル発電機		ガスタービン発電機		
機器名称		異常要因分析 該当項目	評価項目	No.	評価項目	
潤滑油系						
16	潤滑油 ポンプ	取付ボルト折損	取付ボルトの強度	9-(i)	主燃料油ポンプ取付ボルト	
				12-(i)	潤滑油ポンプ取付ボルト	
		軸受荷重過大	軸受強度	9-(iii)	主燃料油ポンプ軸受	
				12-(iii)	潤滑油ポンプ軸受	
				軸とケーシングのクリ アランス	9-(ii)	主燃料油ポンプ摺動部（軸とケーシングのクリ アランス）
					12-(ii)	潤滑油ポンプ摺動部（軸とケーシングのクリ アランス）

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

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

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

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



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

第 4.3.4-1 図 ポンプ駆動用タービンの異常要因分析図

第4.3.4-1表 ポンプ駆動用タービンとガスタービン発電機の評価項目比較

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

#### 4.3.5 ガスタービン発電機の基本評価項目の検討

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

No.	基本評価項目	評価対象	理由
6-(i)	点火プラグ 取付ボルト	×	取付ボルトについては、減速機取付ボルトに対して裕度が大きいいため、評価対象外とした。
6-(ii)	点火プラグ	×	点火プラグは、下記理由により、取付部の健全性を確認することで、電氣的機能維持を確保できるため、評価対象外とした。 ①点火プラグにはスパークプラグが用いられており動作部がない。 ②軽量かつ単純構造であり、地震力により発生する荷重が小さく、構造強度について十分な裕度を持っている。 ③J E A G 4 6 0 1 -1987 の電気計装機器のうち、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いため、評価対象外とした。
7-(ii)	点火エキサイタ	×	点火エキサイタは、下記理由により、取付部の健全性を確認することで、電氣的機能維持を確保できるため、評価対象外とした。 ①点火エキサイタには Capacitor Discharge Ignition 方式の点火装置が用いられており動作部がない。 ②軽量かつ単純構造であり、地震力により発生する荷重が小さく、構造強度について十分な裕度を持っている。 ③J E A G 4 6 0 1 -1987 の電気計装機器のうち、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いため、評価対象外とした。
8-(ii)	スタータモータ摺動部 (軸とケーシングのクリアランス)	×	ガスタービン付きポンプはガスタービン(機関)に比べて小型軽量であり、軸に発生する応力が比較的小さいことから、評価対象外とした。
8-(iii)	スタータモータ軸受	×	ガスタービン(機関)の軸受に対して裕度が大きいいため、評価対象外とした。
9-(i)	主燃料油ポンプ取付ボルト	×	取付ボルトについては、減速機取付ボルトに対して裕度が大きいいため、評価対象外とした。
9-(ii)	主燃料油ポンプ摺動部 (軸とケーシングのクリアランス)	×	ガスタービン付きポンプはガスタービン(機関)に比べて小型軽量であり、軸に発生する応力が比較的小さいことから、評価対象外とした。
9-(iii)	主燃料油ポンプ軸受	×	ガスタービン(機関)の軸受に対して裕度が大きいいため、評価対象外とした。
10-(i)	始動用燃料油ポンプ取付ボルト	×	取付ボルトについては、減速機取付ボルトに対して裕度が大きいいため、評価対象外とした。
10-(ii)	始動用燃料油ポンプ摺動部 (軸とケーシングのクリアランス)	×	ガスタービン付きポンプはガスタービン(機関)に比べて小型軽量であり、軸に発生する応力が比較的小さいことから、評価対象外とした。
10-(iii)	始動用燃料油ポンプ軸受	×	ガスタービン(機関)の軸受に対して裕度が大きいいため、評価対象外とした。
11-(i)	始動用燃料油ポンプ用モータ取付ボルト	×	取付ボルトについては、減速機取付ボルトに対して裕度が大きいいため、評価対象外とした。
11-(ii)	始動用燃料油ポンプ用モータ 摺動部 (軸とケーシングのクリアランス)	×	ガスタービン付きポンプはガスタービン(機関)に比べて小型軽量であり、軸に発生する応力が比較的小さいことから、評価対象外とした。

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

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

#### 4.3.6 ガスタービン発電機の動的機能維持評価項目の検討結果

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

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

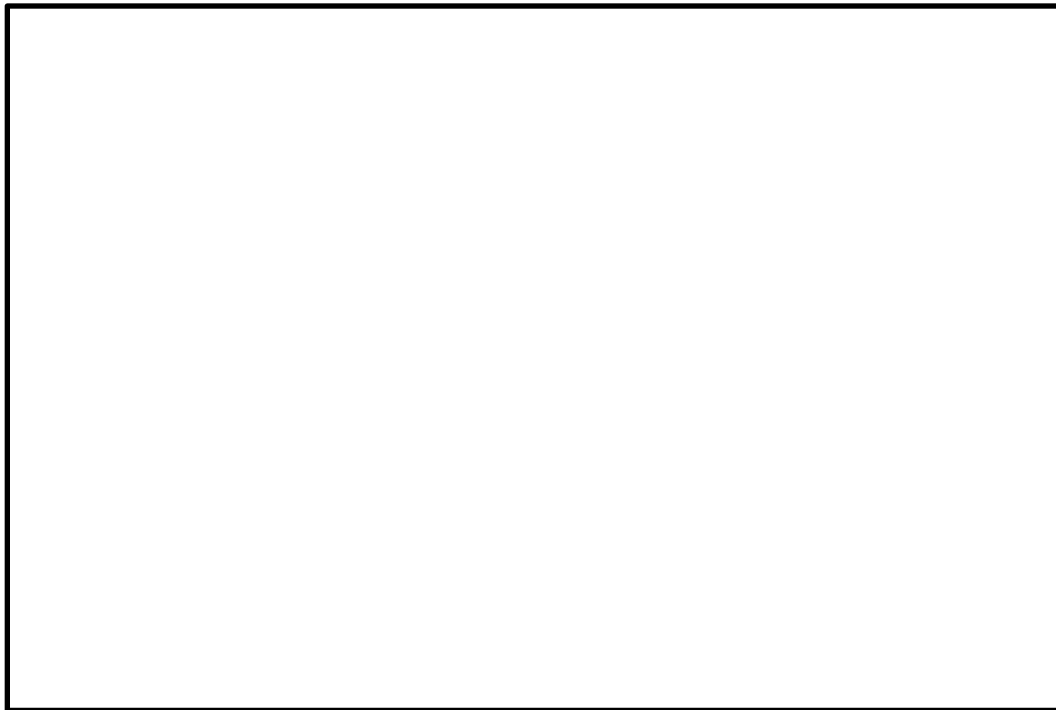
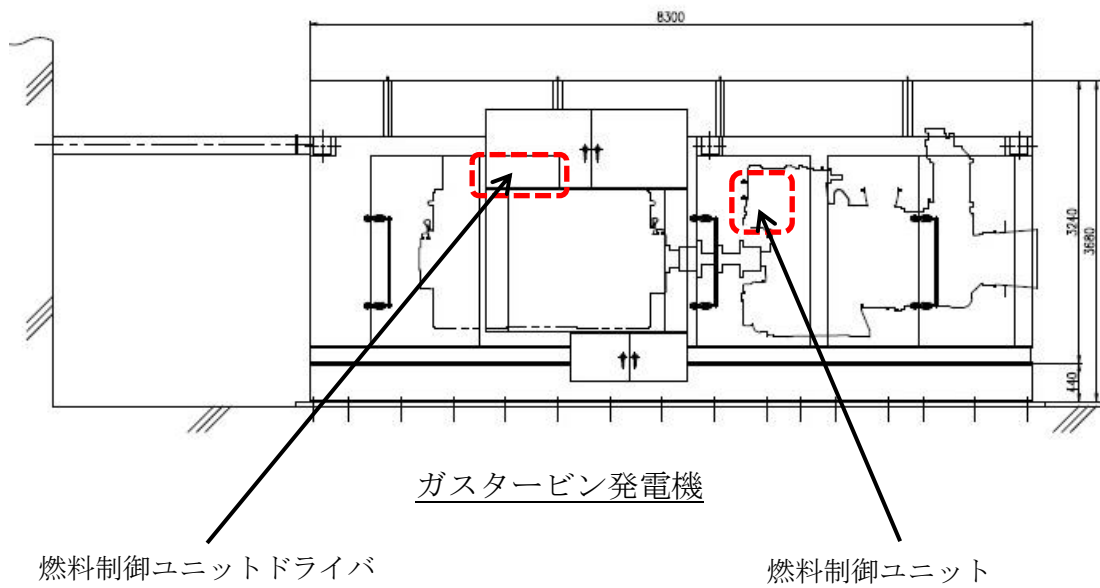
第 4.3.6-1 表 島根 2 号炉のガスタービンにおける動的機能維持評価の  
評価項目の検討結果(1/2)

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



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

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



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、J E A G 4 6 0 1 及び耐特委報告書にて、動的機能維持の評価上必要な基本評価項目が地震時異常要因分析に基づき選定されている（第5-1表）。

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

第 5-1 表 各設備における基本評価項目 (1/2)

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

第5-1表 各設備における基本評価項目(2/2)

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

6. 加振試験が必要な設備における動的機能維持評価の検討

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



第6-1図 高圧原子炉代替注水ポンプの構造概要図

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

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

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

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

## 7. 弁の動的機能維持評価に用いる配管系の応答値について

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

### (1) 規格基準に基づく設計手順の整理

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

### (2) 今回工認における島根2号炉の設計手順

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

#### a. 剛の場合

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

#### b. 柔の場合

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

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

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

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

第7-1表 弁の動的機能維持評価の耐震設計手順の比較

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

注1：高周波数領域の振動モードまで考慮した地震応答解析を行う。

(5) 地震応答解析

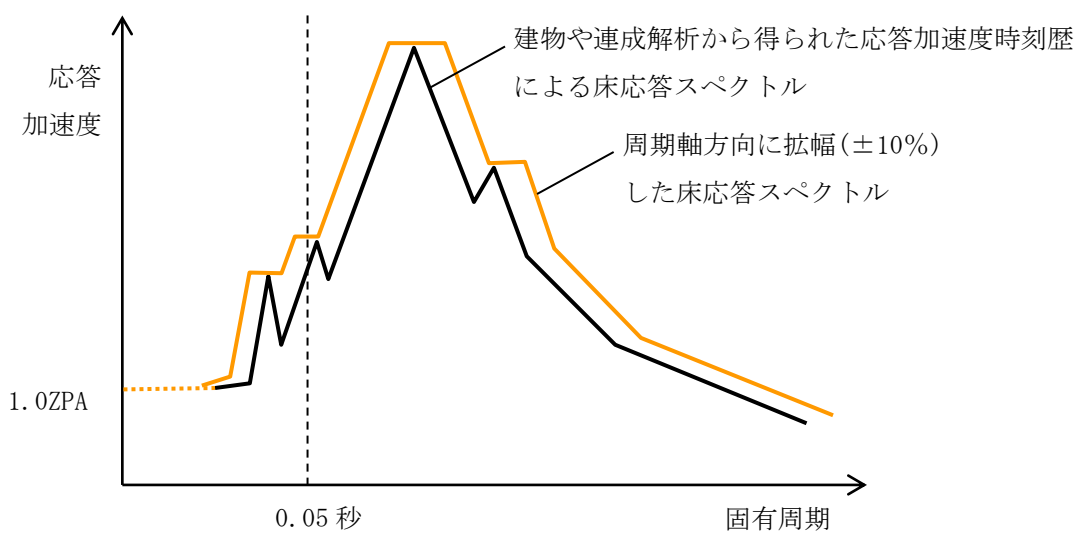
弁の地震応答を算出するに当たり、(4)項で作成した弁モデルを配管系モデルに組み込み、地震応答解析を実施する。この場合の解析方法は、配管系の固有値に応じて静的応答解析法あるいはスペクトルモーダル応答解析法を用いる。

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

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

第7-1図 J E A G 4 6 0 1-1991 抜粋





第 7-2 図 弁の動的機能維持評価に適用する床応答スペクトル(イメージ)

別表1 検討対象設備の抽出結果(1/4)

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

別表1 検討対象設備の抽出結果(2/4)

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

別表1 検討対象設備の抽出結果(3/4)

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

別表1 検討対象設備の抽出結果(4/4)

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

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

注2:弁の確認結果については、詳細設計段階にて示す。

## 高圧原子炉代替注水ポンプの加振試験について

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

## 1. 試験概要

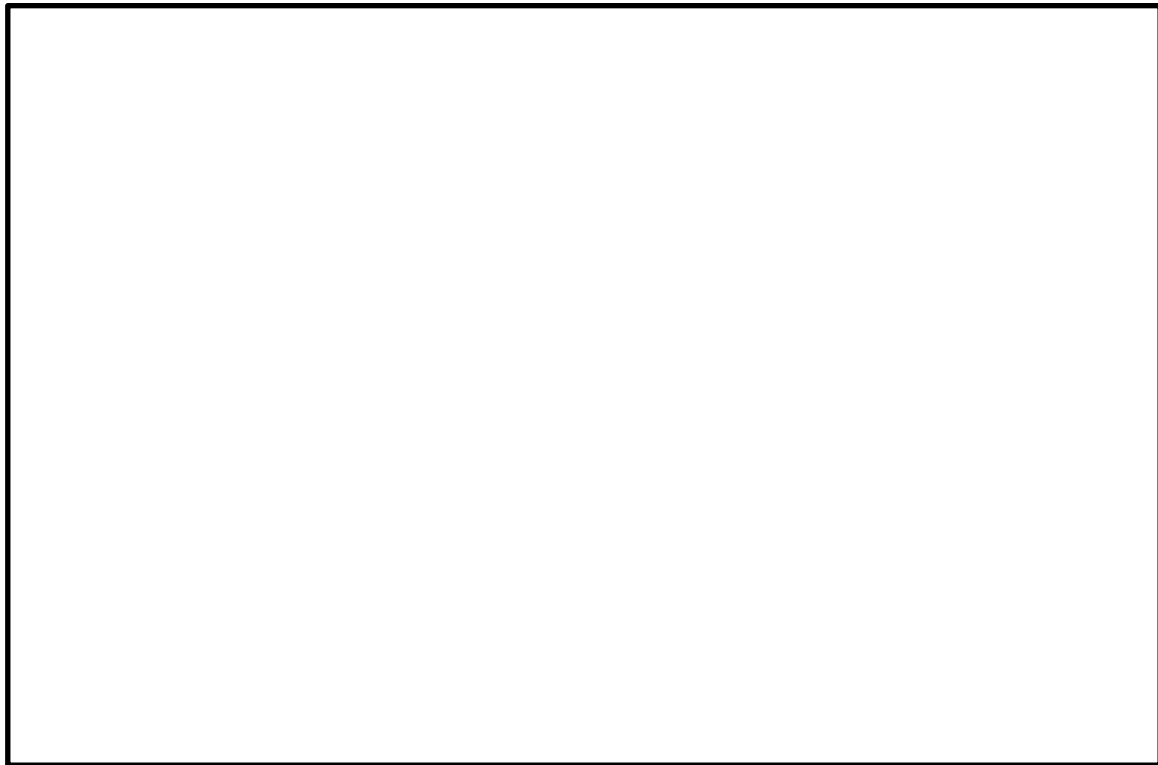
高圧原子炉代替注水ポンプはタービンと一体構造であるため、ガバナ等の付属品を含む形で試験を実施した。ポンプ断面イメージ図を第 1-1 図に示す。

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



第 1-1 図 ポンプ断面イメージ図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



第 1-2 図 振動試験装置外観

第 1-1 表 加振台仕様

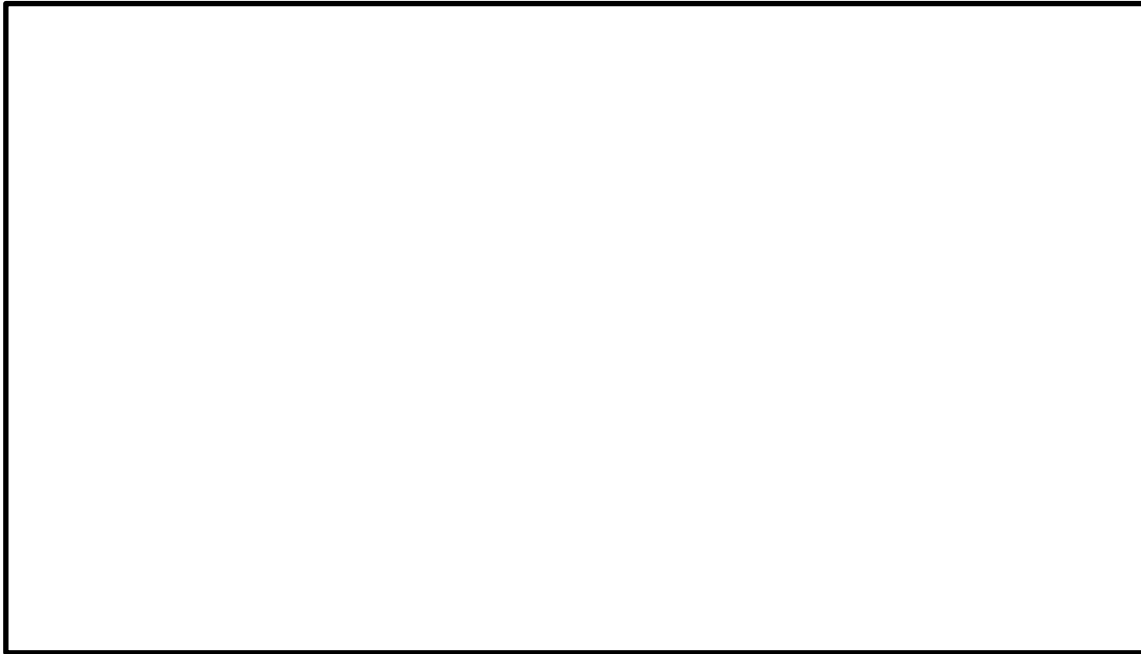
寸法		
最大積載量		
運転周波数帯域		
最大加速度	水平	
	鉛直	

## 2. 振動特性把握試験

### 2.1 試験条件

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

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



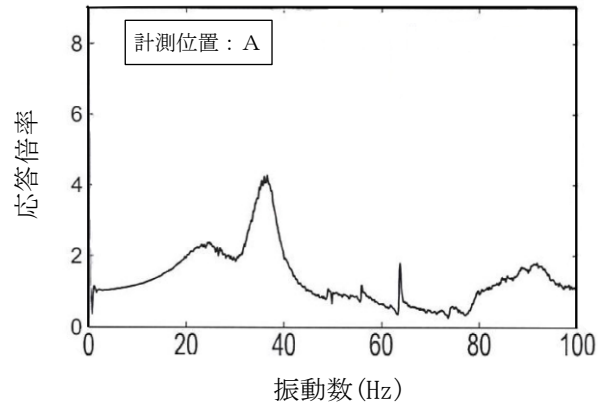
第 2.1-1 図 計測センサー取付位置

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

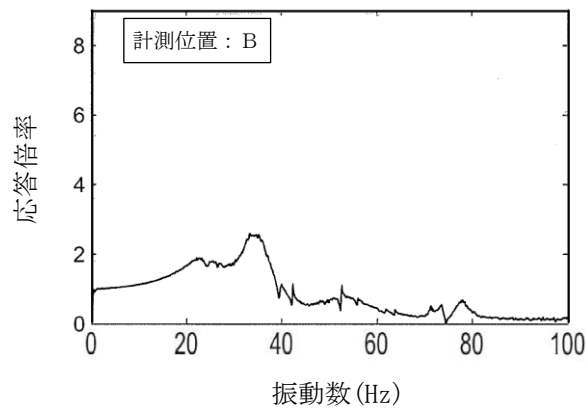


## 2.2 試験結果

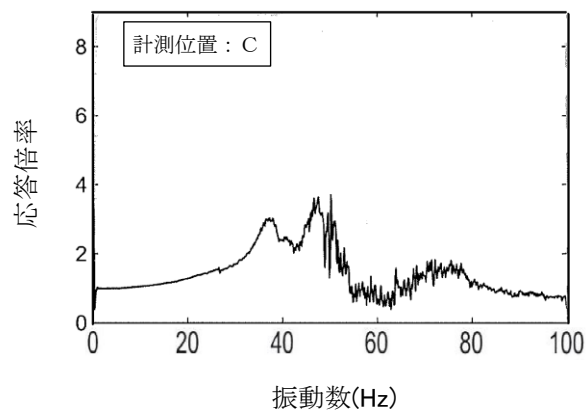
試験結果として得られた周波数応答関数を第 2.2-1 図に、各軸方向の固有振動数を第 2.2-1 表より、各軸方向について剛構造と見なせる固有周期 0.05 秒を十分に下回る結果が得られた。



X方向



Y方向



Z方向

第 2.2-1 図 周波数応答関数

第 2.2-1 表 各軸方向の固有振動数

方向	固有周期 [s]	固有振動数 [Hz]
X		
Y		
Z		

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

### 3. 加振試験

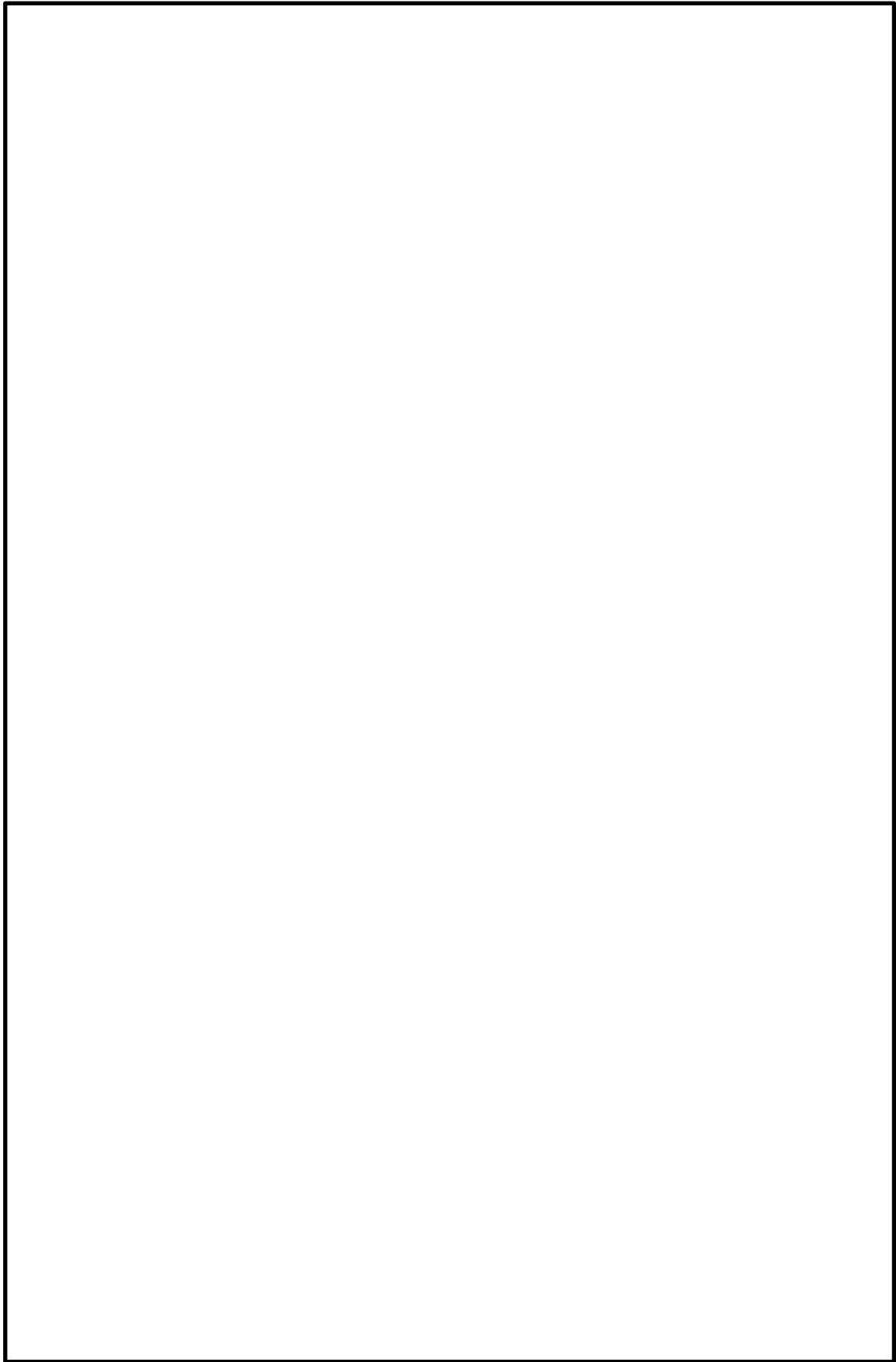
#### 3.1 試験条件

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

第 3.1-1 表 加振試験条件

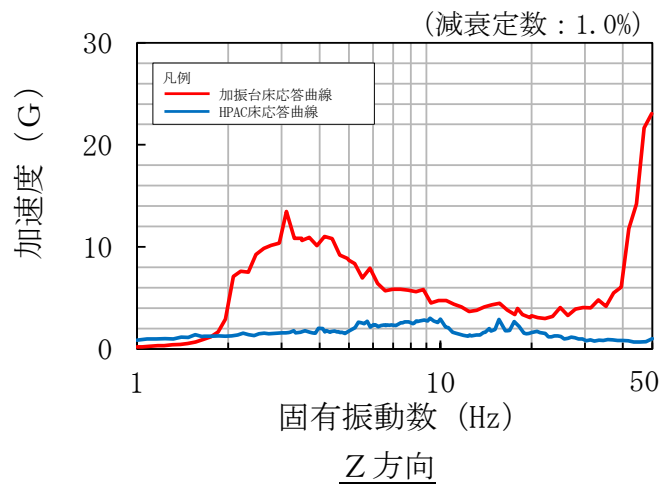
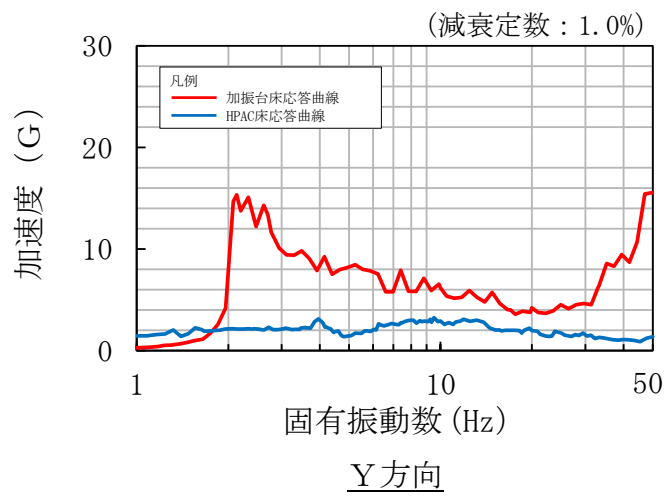
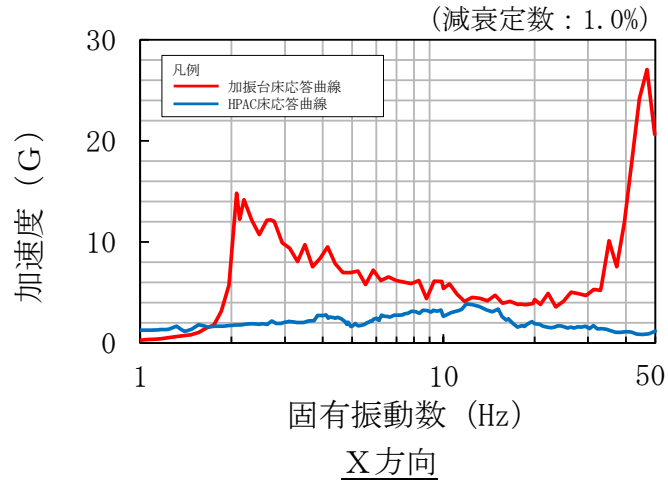
項目	試験条件
加振地震波	ランダム波
加振方向	水平 2 方向 + 鉛直方向の 3 軸同時加振試験
運転状態	停止中加振 <sup>注1</sup> （満水状態）
取付条件	振動台上に設置された台板にボルトにて取り付け

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



第 3.1-1 図 加振台上の加速度時刻歴波形

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



第 3.1-2 図 加振台床応答曲線と HPAC 床応答曲線の比較

### 3.2 試験結果

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

- (1) 漏えいのないこと。
- (2) 構造上損傷のないこと。
- (3) 加振中にガバナが  以上変位しないこと。
- (4) トリップ装置が誤作動しないこと。
- (5) 動作試験として、加振試験前後の性能比較を実施し、機器の健全性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。

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

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

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

第 3.2-2 表 高圧原子炉代替注水ポンプの主な仕様の比較

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

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

ガスタービン発電機の加振試験について

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

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

1. US-APWR ガスタービン加振試験

1.1 試験概要

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

外 観	
構 造	

第 1.1-1 図 US-APWR ガスタービンの構造概要

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



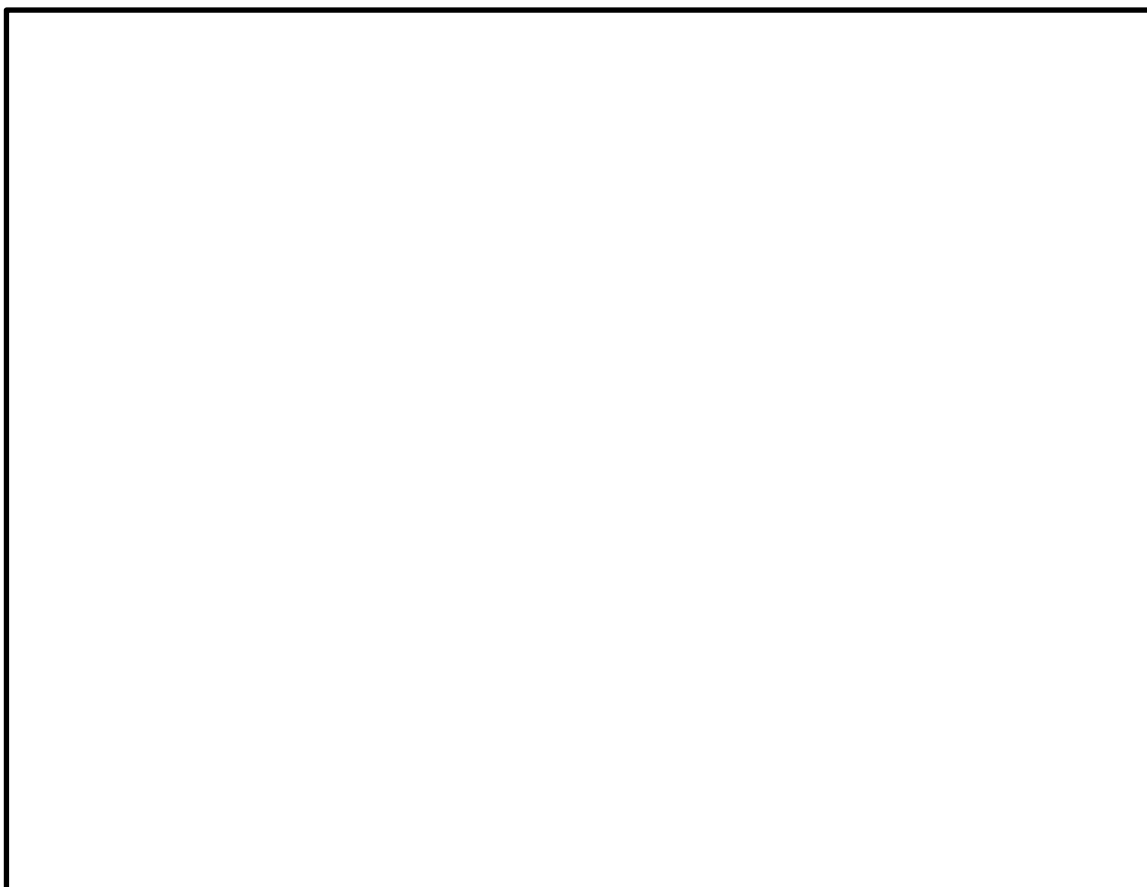
## 1.2 振動特性把握試験

### 1.2.1 試験条件

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

第 1.2.1-1 表 正弦波掃引加振の試験条件

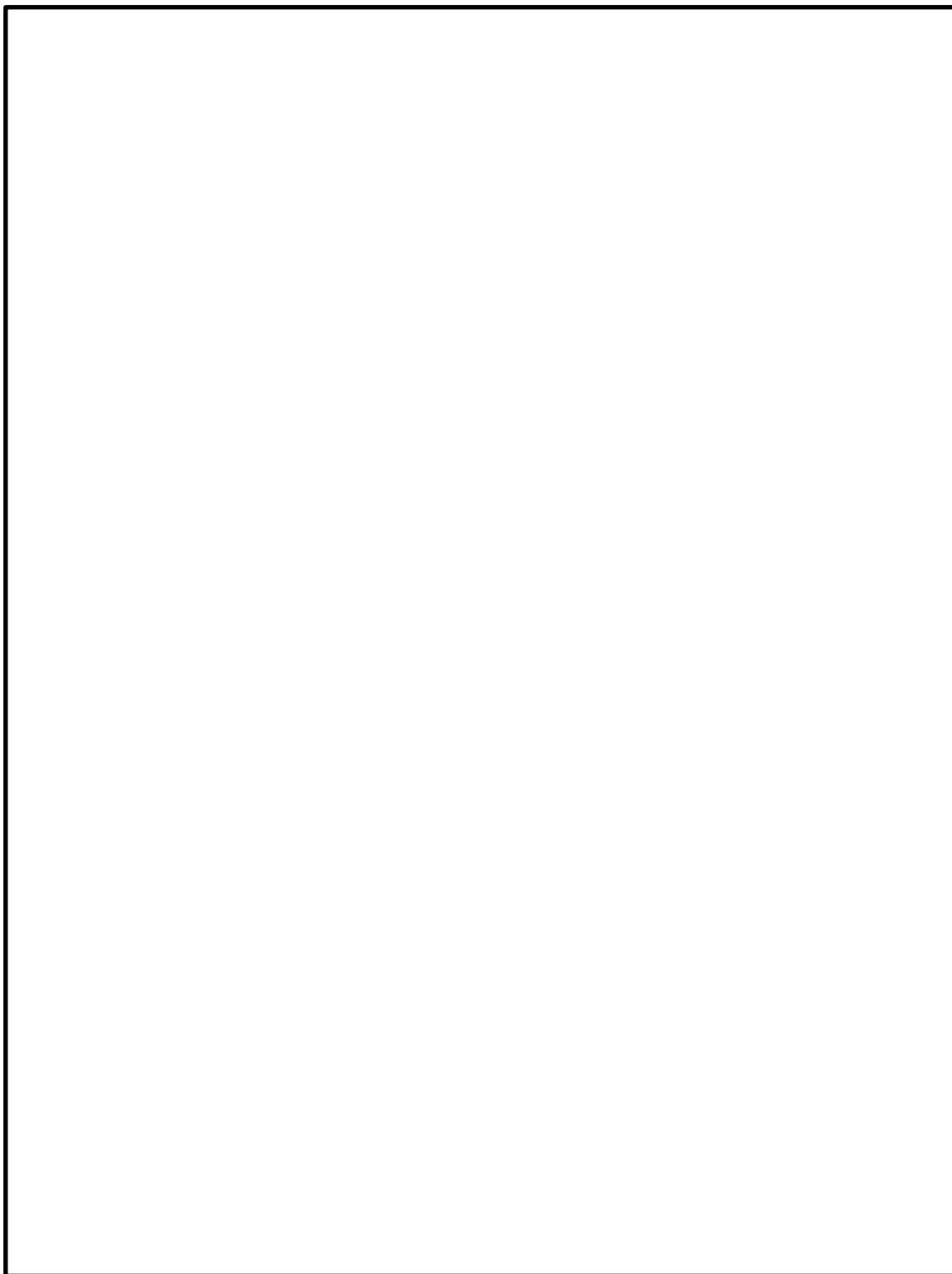
項目	試験条件
掃引振動数	1～50Hz
加振レベル	0.1G
加振方向	水平（軸方向，軸直方向）及び鉛直方向単独



第 1.2.1-1 図 計測センサー取付位置

### 1.2.2 試験結果

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



第 1.2.2-1 図 周波数応答関数

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

第 1.2.2-1 表 各軸方向の固有振動数

--

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

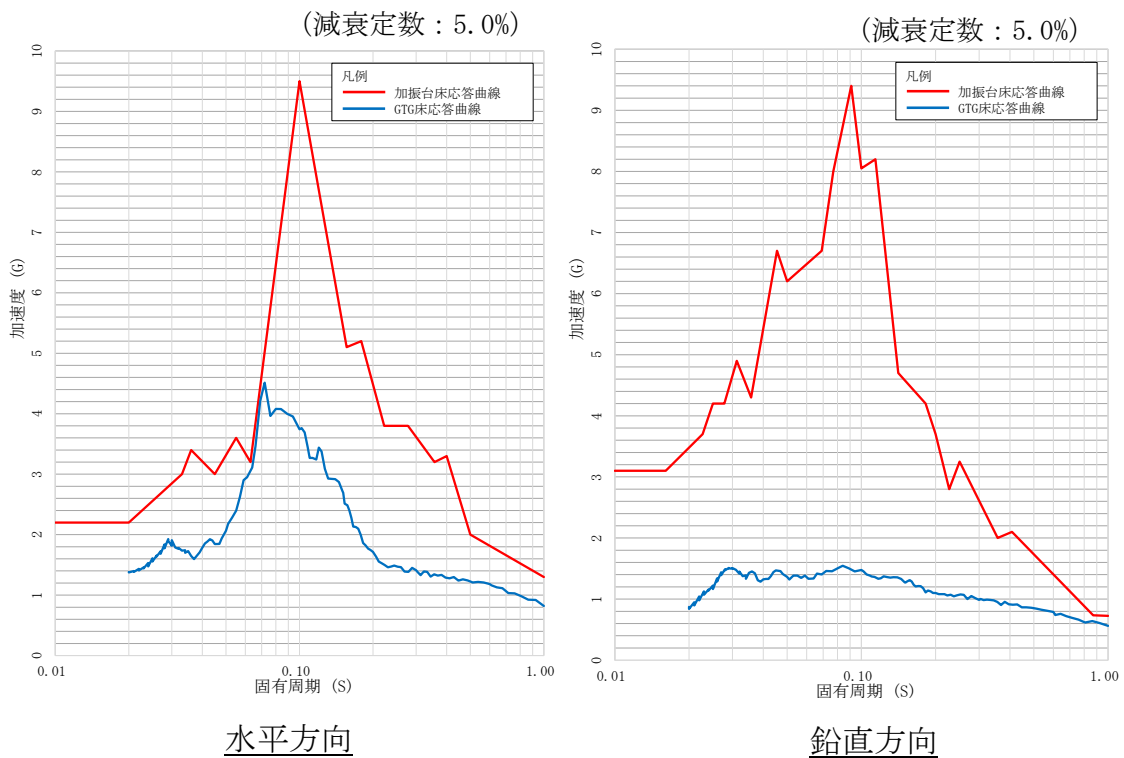
### 1.3 加振試験

#### 1.3.1 試験条件

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

第 1.3.1-1 表 加振試験条件

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



第 1.3.1-1 図 加振台床応答曲線と GTG 床応答曲線の比較

### 1.3.2 試験結果

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

第 1.3.2-1 表 加振試験結果

項目		試験結果
最大 加速度	水平	2.2G
	鉛直	3.1G
試験結果		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 <sup>-1</sup>	同左
始動方式		空気始動方式	電気始動方式

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

US-APWR ガスタービン	島根 2 号炉ガスタービン

第 2-1 図 ガスタービン機関の構造概要の比較

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

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

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

【参考文献】

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

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

## 島根原子力発電所 2 号炉

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 $S_s$ 及び弾性設計用地震動 $S_d$ 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）	<p>(NS方向)</p>	<p>(NS方向)</p> <p>※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。</p>
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]	<ul style="list-style-type: none"> <li>引下げ：1次元波動論[SHAKE]</li> <li>引上げ：2次元FEM解析 [VESL-DYN]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>引下げ：1次元波動論[SHAKE]</li> <li>引上げ：2次元FEM解析 [SuperFLUSH]</li> </ul>
入力地震動の解析モデル		
モデル化範囲	<ul style="list-style-type: none"> <li>引下げ：解放基盤表面(T.P. -10m)からT.P. -215mまでをモデル化</li> <li>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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>引下げ：同左</li> <li>引上げ：同左</li> </ul>
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 <sup>注1</sup>	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 <sup>(1)</sup> 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 <sup>注2</sup> (2次元FEM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>底面：粘性境界</li> <li>側面：粘性境界</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>底面：粘性境界</li> <li>側面：エネルギー伝達境界*</li> </ul> <p>※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</p>
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。

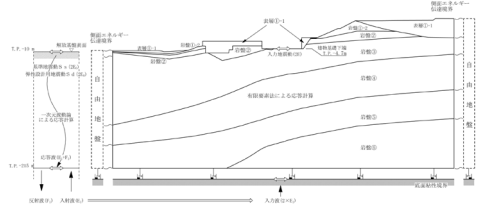
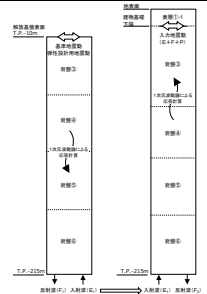
3. 建物・構築物の入力地震動の算定に用いる解析モデルの詳細設計における適用方針について

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]	<ul style="list-style-type: none"> <li>引下げ：1次元波動論[SHAKE]</li> <li>引上げ：2次元FEM解析[SuperFLUSH]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>引下げ：1次元波動論[SHAKE]</li> <li>引上げ：1次元波動論[SHAKE]</li> </ul>
解析モデル		
モデル化範囲	<ul style="list-style-type: none"> <li>引下げ：解放基盤表面(T.P.-10m)からT.P.-215mまでをモデル化</li> <li>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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>引下げ：解放基盤表面(T.P.-10m)からT.P.-215mまでをモデル化</li> <li>引上げ：T.P.-215m以浅の地盤を水平成層にモデル化</li> </ul>
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 $S_s$ 及び弾性設計用地震動 $S_d$ 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

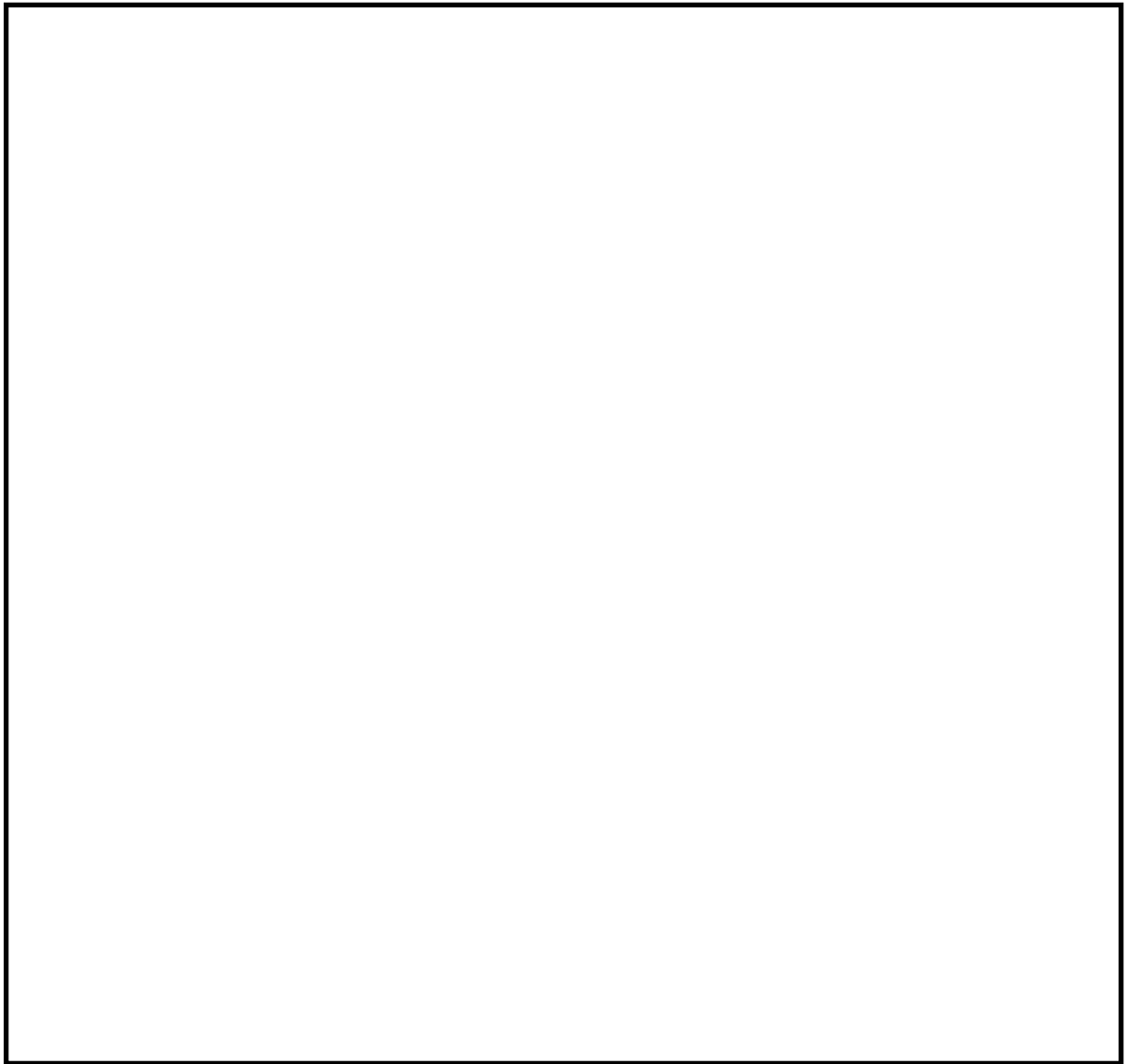
建物・構築物及び土木構造物における、既工認と今回工認の入力地震動の評価手法の比較を第3-1表及び第3-2表に示す。

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。

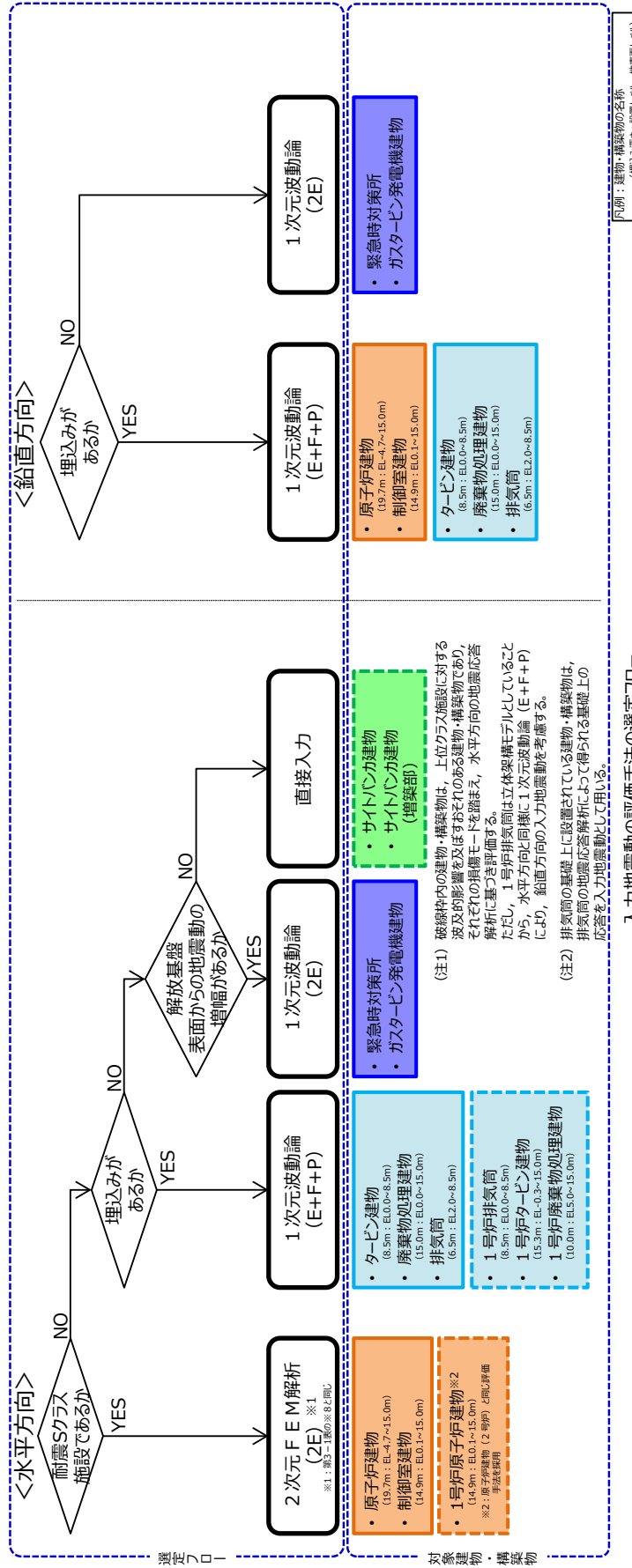
#### 4. 1次元波動論モデルの速度層の設定例

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

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。



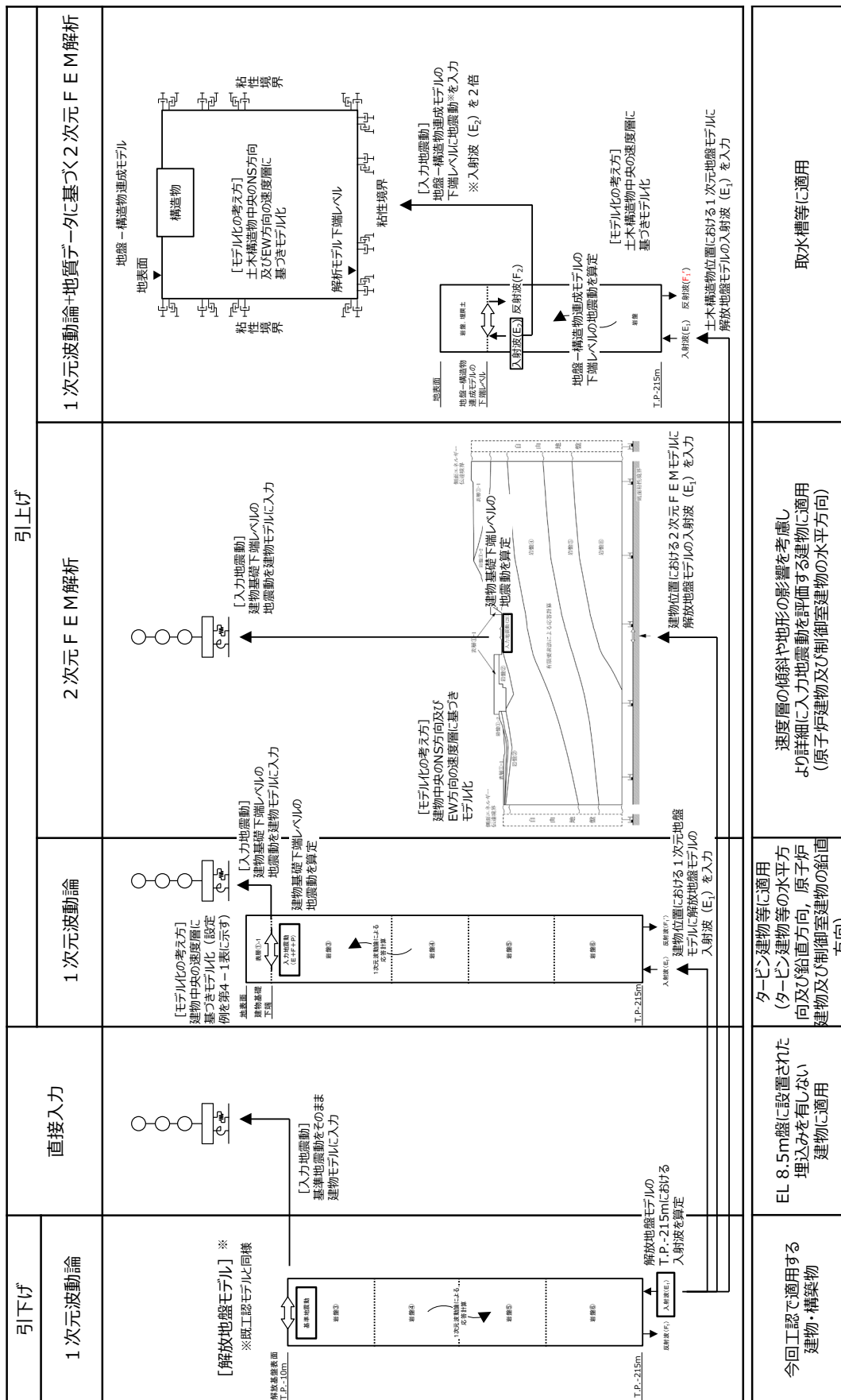
第1-2図 入力地震動の評価手法の選定フロー  
4条-別紙16-参1-3

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	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉建物</li> <li>制御室建物</li> <li>1号炉原子炉建物※1</li> </ul>	2次元FEM (2E) ※2	1次元波動論 (E+F+P)	<p>【水平方向】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> <li>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</li> <li>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</li> </ul> <p>【鉛直方向】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> </ul>
			1次元波動論 (E+F+P)	<p>【水平方向】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>タービン建物</li> <li>廃棄物処理建物</li> <li>排気筒</li> <li>1号炉タービン建物</li> <li>1号炉廃棄物処理建物</li> <li>1号炉排気筒</li> </ul> <p>【鉛直方向】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>建物の設置状況が「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</li> <li>タービン建物 : 同上</li> <li>廃棄物処理建物 : 同上</li> <li>1号炉タービン建物 : 「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</li> <li>1号炉廃棄物処理建物 : 「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</li> <li>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</li> </ul>	
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 高台 (EL44m盤) もしくは (EL50m盤)	<ul style="list-style-type: none"> <li>緊急時対策所</li> <li>ガスタタービン発電機建物</li> </ul>	1次元波動論 (2E)	1次元波動論 (2E)	<p>【水平、鉛直方向】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>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「解放基礎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</li> <li>ガスタ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「解放基礎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</li> </ul>
			直接入力	<p>【水平方向】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>サイトバンガ建物</li> <li>サイトバンガ建物(増築部)</li> </ul> <p>【鉛直方向】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>建物の設置状況が「埋込みあり」として、埋込みを考慮した1次元波動論(E+F+P)を採用</li> </ul>	
	埋込みなし 解放基礎 相当の岩盤 (EL8.5m盤)	<ul style="list-style-type: none"> <li>サイトバンガ建物※1</li> <li>サイトバンガ建物(増築部) ※1</li> </ul>	排気筒の基礎 上の地震応答 解析結果を 用いる	排気筒の基礎 上の地震応答 解析結果を 用いる	<p>【水平方向】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2号炉排気筒モータ室 : 「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</li> <li>燃料移送ポンプエリア電巻防護対策設備 : 同上</li> </ul>

※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、それぞれの評価モードを踏まえ、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橋モデルとしており、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 <sup>※5</sup>
		水平	鉛直	水平	鉛直	水平	鉛直		水平 <sup>※4</sup>	鉛直	
Sクラス施設の間接支持構造及びSクラス施設	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 <sup>※8</sup>	(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 <sup>※8</sup>	(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、J E A G 4 6 0 1 - 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、J E A G 4 6 0 1 - 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 <sup>※1</sup> E+F+P	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論 <sup>※1</sup> 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S A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 <sup>※2</sup>	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論 2E <sup>※2</sup>	—	—	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 <sup>※3</sup>	(引下げ, 引上げ) 1次元波動論 2E <sup>※3</sup>	—	—	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 <sup>※6</sup>	—	—	—	—	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 <sup>※6</sup>	—	—	—	—	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 <sup>※7</sup>	—	—	—	—	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電巻防護対策設備	—	—	排気筒の基礎上の地震応答解析結果を用いる <sup>※7</sup>	—	—	—	—	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		
（Sクラス施設の間接構造物を含む） 屋外重要土木構造物	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
	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 (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ペントフィルタ 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

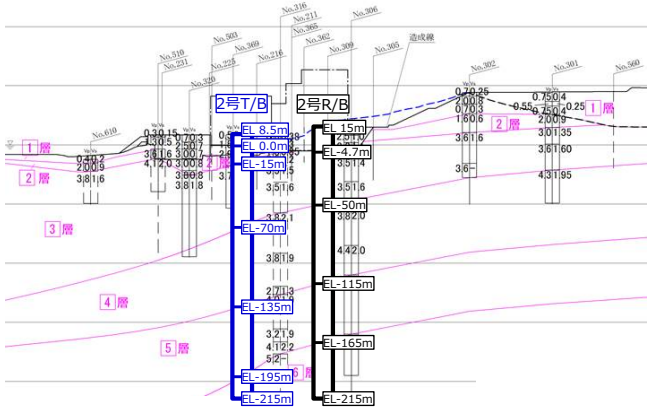
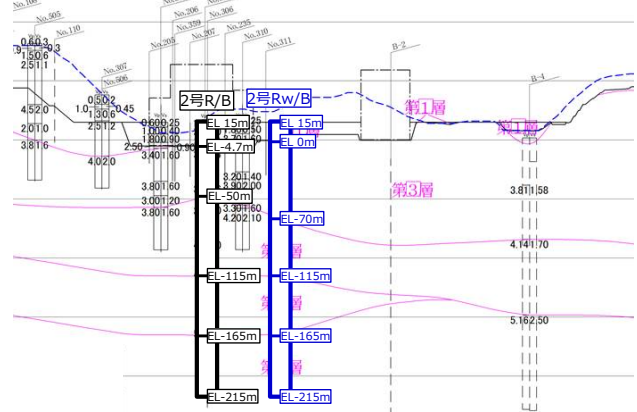
※1： 代表的な設置レベルを示す。

※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

(例1) タービン建物		(例2) 廃棄物処理建物	
	<p>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</p>		<p>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</p>
<p>設定根拠</p>		<p>設定根拠</p>	



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<sub>L</sub> 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 S<sub>s</sub> 及び弾性設計用地震動 S<sub>d</sub> 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 S<sub>1</sub> 及び S<sub>2</sub> 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 <sup>注1</sup>		S 波速度 Vs (m/s)	P 波速度 Vp (m/s)	単位体積 重量 <sup>注3</sup> γ (kN/m <sup>3</sup> )	ポアソン 比 ν (-)	ヤング係数 <sup>注3</sup> E (×10 <sup>9</sup> kN/m <sup>2</sup> )	せん断 弾性係数 <sup>注3</sup> G (×10 <sup>9</sup> kN/m <sup>2</sup> )	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 <sup>注2</sup>
②	②	900	2100	23.0	0.388	52.9	19.0	3 <sup>注2</sup>
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<sup>(1)</sup>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（ $S_s$ ， $S_d$ ）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

	既工認	今回工認
埋戻土のせん断剛性及び減衰定数のひずみ依存性		<p>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</p>
設定根拠	文献 <sup>(1)</sup> に基づく標準的な砂質土のひずみ依存性	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
評価フロー	<p>・2号炉原子炉建物の1次元波動論モデルに基づき設定</p> <p>・表層地盤の初期せん断弾性係数(<math>G_0</math>)、ひずみ依存性(<math>G/G_0-\gamma</math>, <math>h-\gamma</math>)を設定</p> <p>等価線形解析による収束計算 ← 基準地震動 S1, S2</p> <p>・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、等価せん断弾性係数(G)を設定</p> <p>・各建物の表層地盤の物性値に設定</p> <p>表層地盤の有効ひずみ、剛性及び減衰  <math>G(\text{平均}) = \sum H_0 / \sum H</math>          剛性低下率<math>= G(\text{平均}) / G_0</math>          ※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</p>	<p>・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</p> <p>・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(<math>G_0</math>)、ひずみ依存性(<math>G/G_0-\gamma</math>, <math>h-\gamma</math>)を設定</p> <p>等価線形解析による収束計算 ← 基準地震動 S s, 弾性設計用地震動 S d</p> <p>・S s, S d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、S s, S dそれぞれの等価せん断弾性係数(G)及び減衰定数(h)を設定</p> <p>・各建物の表層地盤の物性値に設定</p>
等価物性値	基準地震動 S1, S2	
	せん断剛性 (G)	減衰定数 (h)
	0.65 (t/cm <sup>2</sup> ) (剛性低下率 $G/G_0$ 0.485)	5% (慣用値)
	基準地震動 S s, 弾性設計用地震動 S d	
	せん断剛性 (G)	減衰定数 (h)
	詳細設計段階で S s, S d それぞれの等価線形解析に基づき設定	

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。

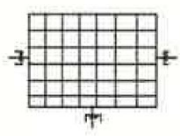
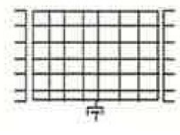
側面の境界条件はFEM部分から側方地盤への波動の逸散を考慮したものであり、粘性境界は隣接する側方地盤との変位の関係から、エネルギー伝達境界はFEM部分と側方地盤全体の変位分布の関係からこの逸散を考慮している。

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<sup>(1)</sup>

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S<sub>s</sub>-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。

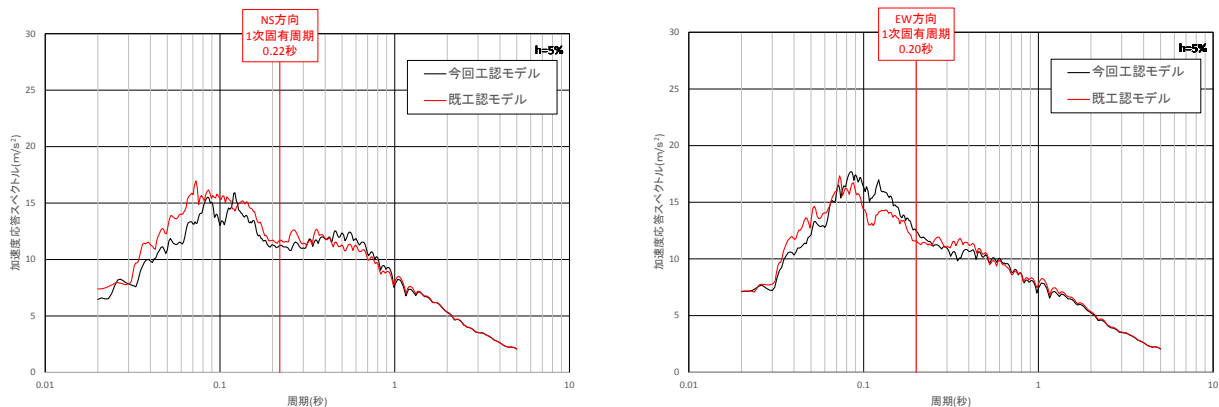
解析プログラムは、既工認モデル及び今回工認モデルともに SuperFLUSH を用いる。

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 J E A G 4 6 0 1 -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)

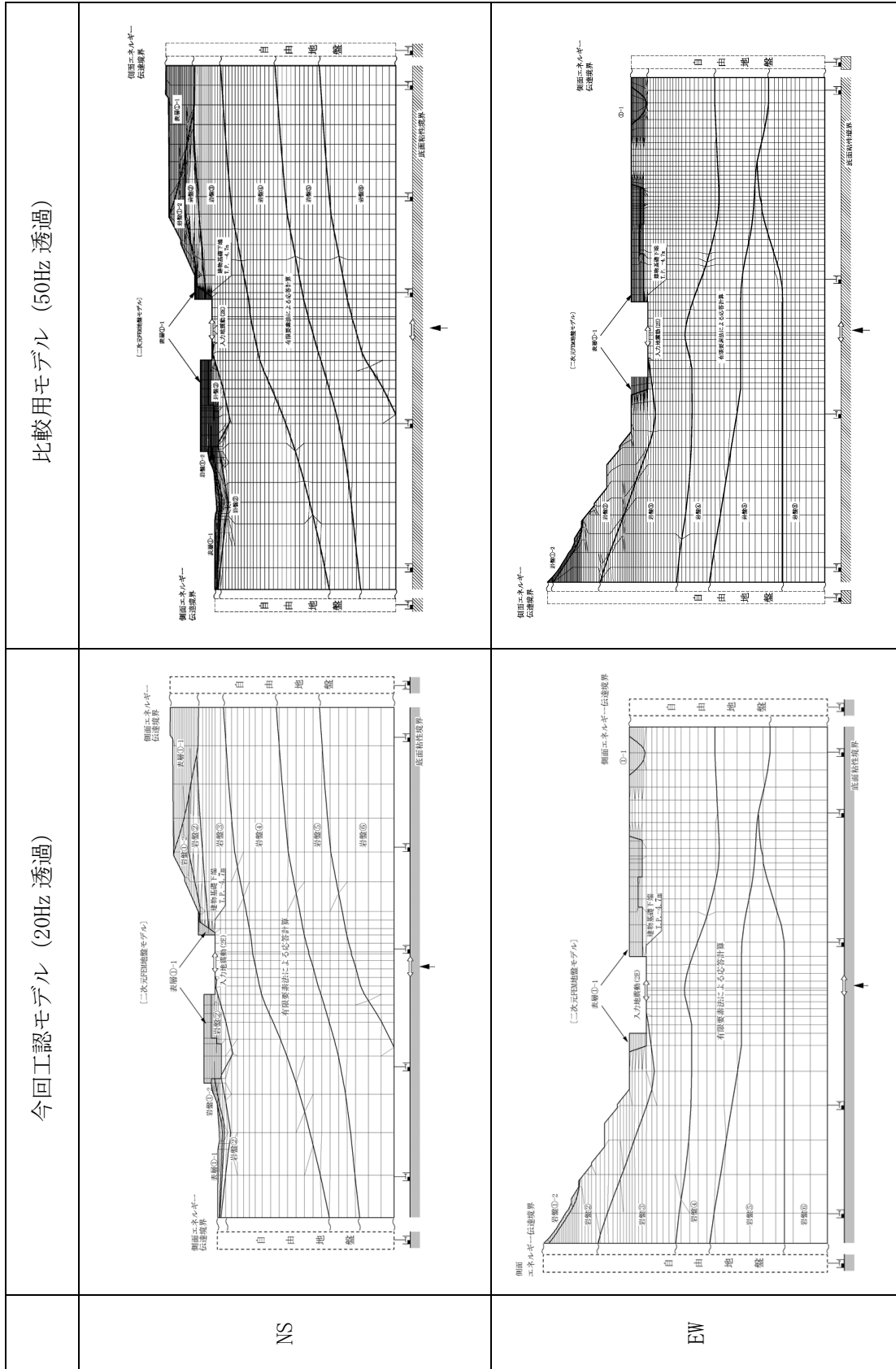
## 2. メッシュ分割高さの違いによる影響検討

## 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

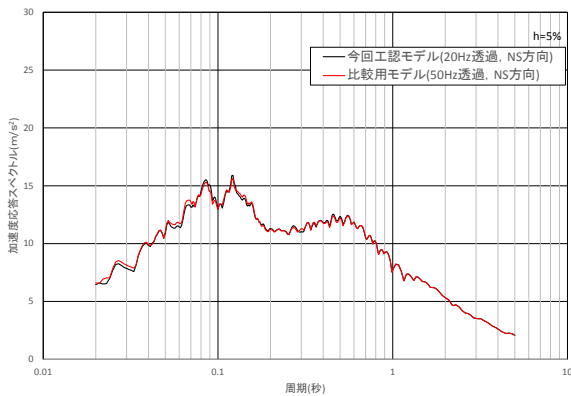


## 2.2 検討結果

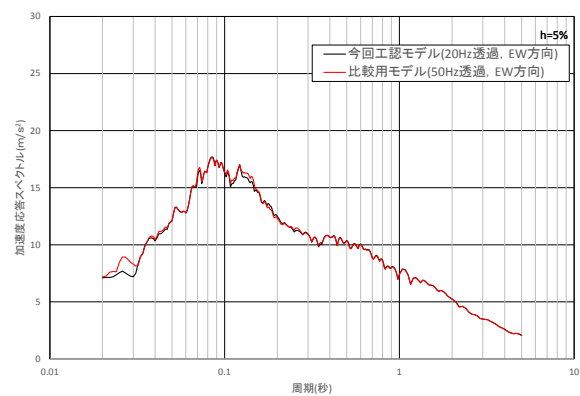
基準地震動  $S_s - D$  による入力地震動の加速度応答スペクトルの比較を第 2-1 図に示す。

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・構築物を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  $S_s - D$  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S<sub>s</sub>-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

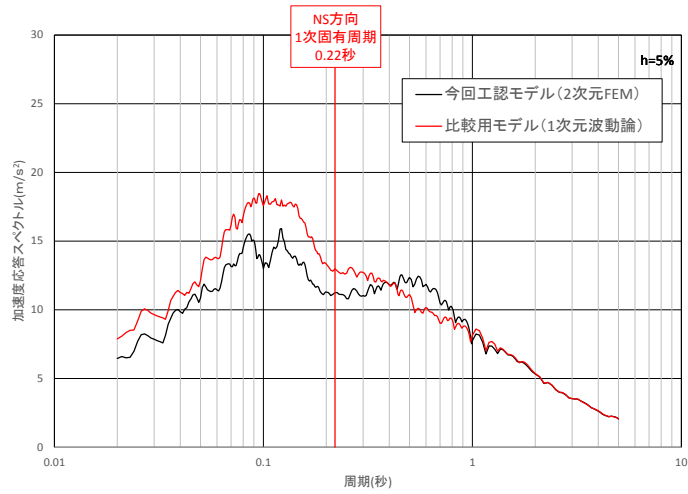
入力地震動の加速度応答スペクトルの比較を第2-1図に示す。

## 2.1 水平方向

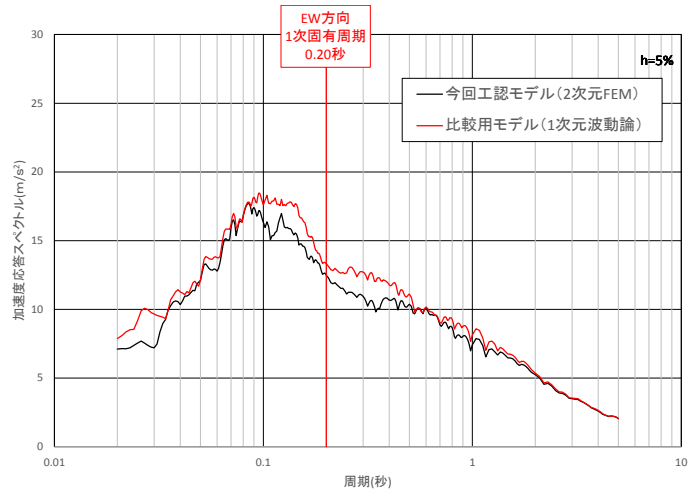
水平方向は、2次元FEMモデル及び1次元波動論モデルで多少の差異が認められ、また、地盤の傾斜をモデル化しているNS方向においてその差が大きくなっているが、2次元FEMモデルでは地盤の速度層の傾斜及び建物周辺の地形の影響等をより詳細に評価できると考えられることから、原子炉建物の既工認と同様に、水平方向の解析において2次元FEMモデルによって求められる入力地震動を用いることは適切である。

## 2.2 鉛直方向

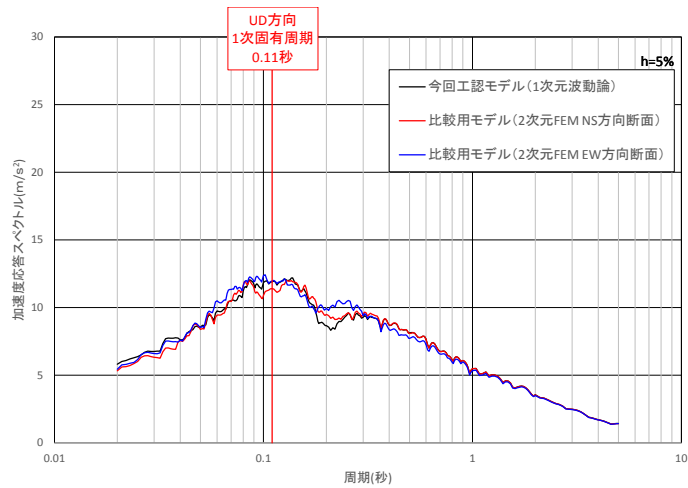
鉛直方向は、建物直下地盤による影響が大きく、1次元波動論モデルと2次元FEMモデルの加速度応答スペクトルは概ね一致している。また、それぞれの建物の固有周期における加速度応答スペクトルの値に大きな差はない。よって、モデルの違いによる入力地震動への影響は軽微であり、鉛直方向の解析において1次元波動論モデルによって求められる入力地震動を用いることは適切である。



(水平方向 (NS方向))

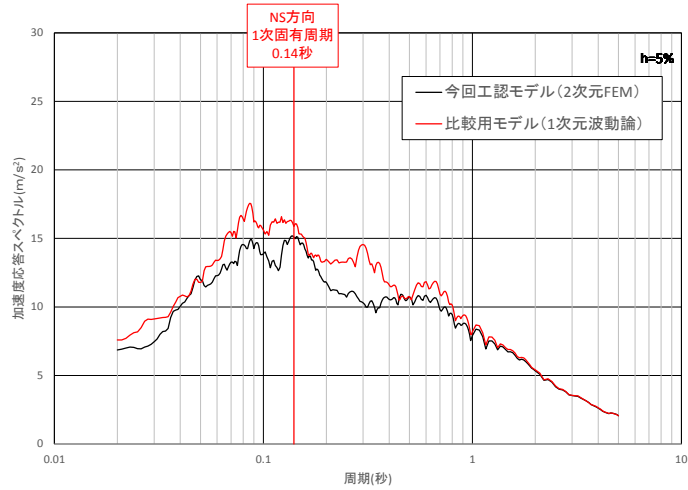


(水平方向 (EW方向))

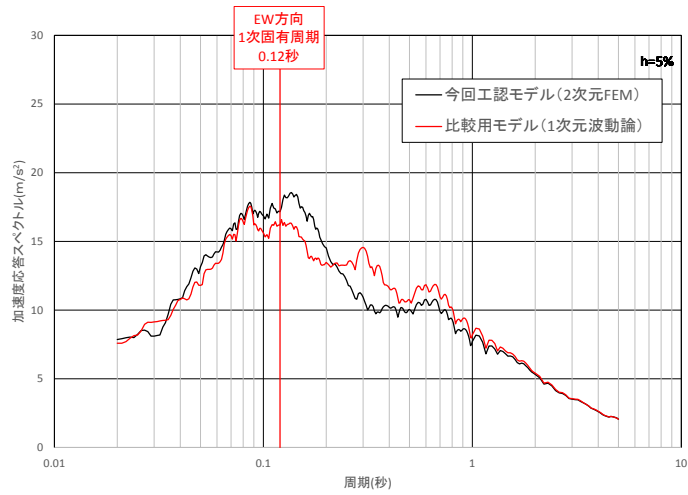


(鉛直方向)

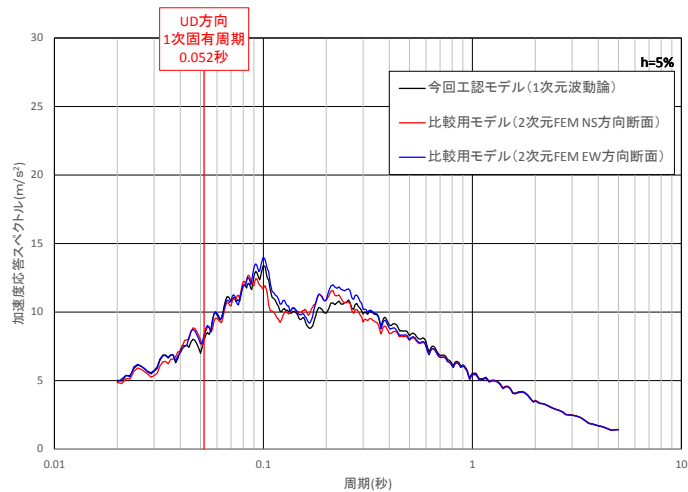
第2-1(1)図 1次元波動論及び2次元FEMによる入力地震動の比較  
(原子炉建物)



(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)

# 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）<sup>\*1</sup>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、集水管及び接続柵）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<sup>\*2</sup>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、

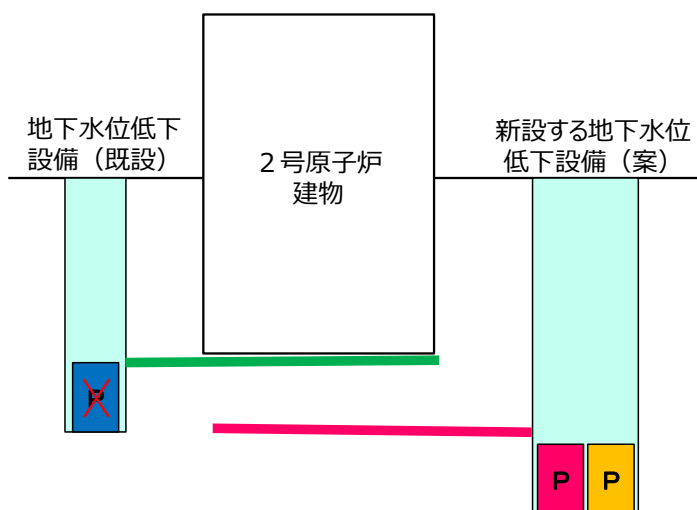
原子炉建物等の設計の前提条件となる地下水位を一定の範囲に保持するために必要であることから、地下水位低下設備を設計基準対象施設（Cクラス：S s 機能維持）として位置付ける。

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，S s 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，集水管及び接続柵），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。

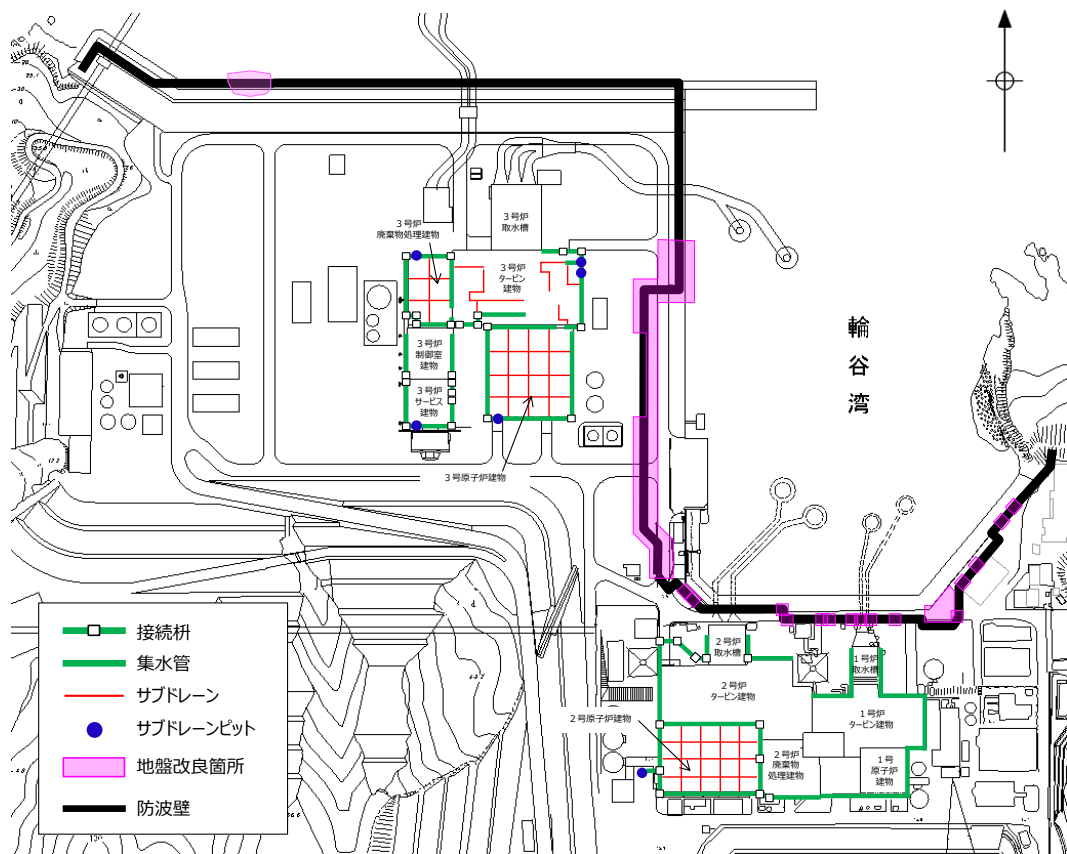


別紙17-1図 地下水位低下設備の概念図

### 【地下水位低下設備（既設）の概要】

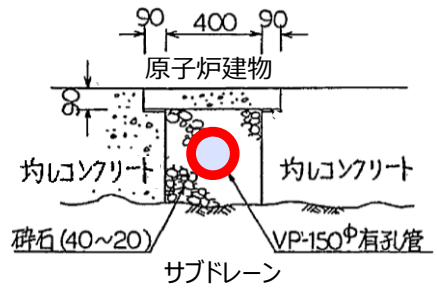
地下水位低下設備（既設）の概要を別紙17-2図に示す。

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〈φ150mm〉）、集水管（有孔遠心力鉄筋コンクリート管〈φ300mm〉）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。

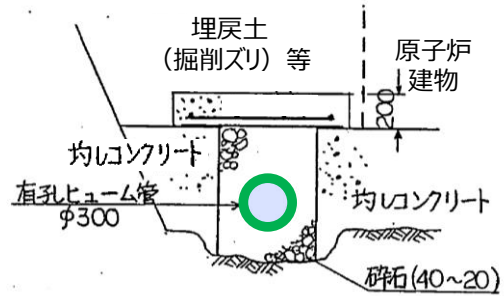


別紙 17-2(1) 図 地下水位低下設備（既設）の概要



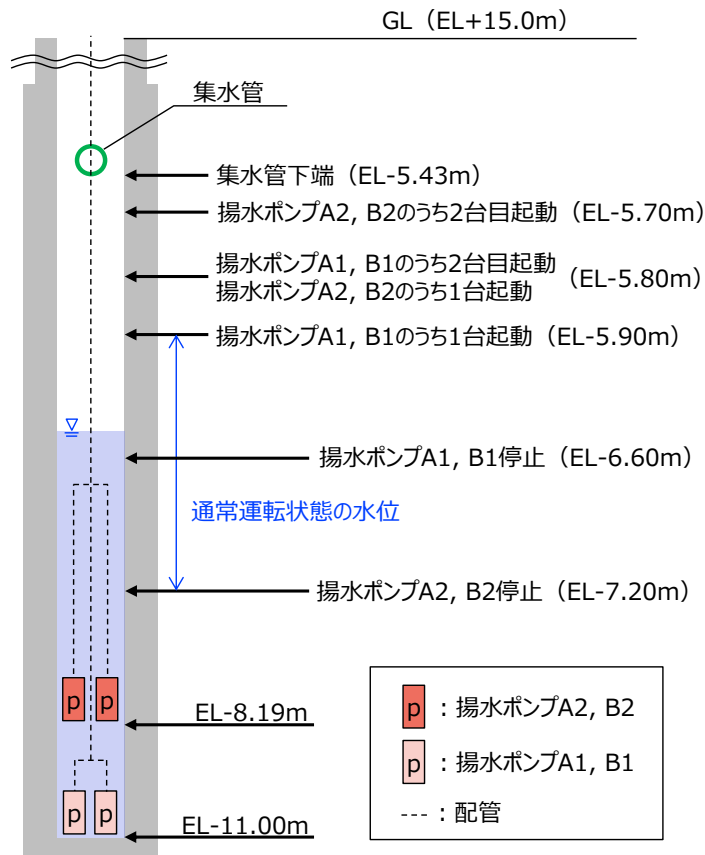


集水管 (タービン建物, 廃棄物処理建物周辺)

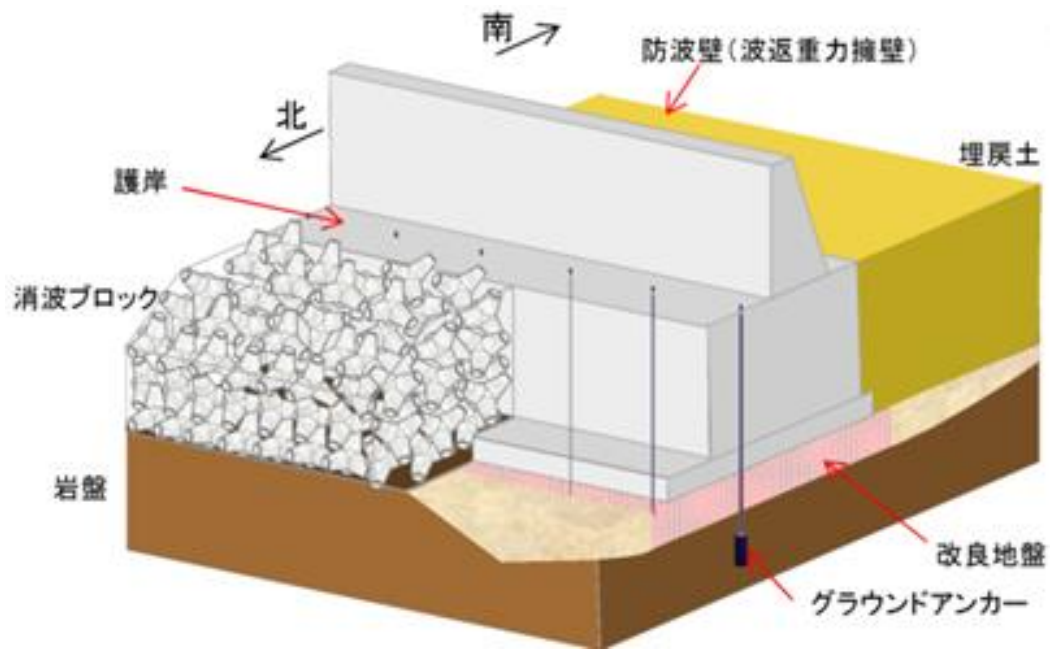


集水管 (原子炉建物周辺)

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<sup>\*1</sup>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。

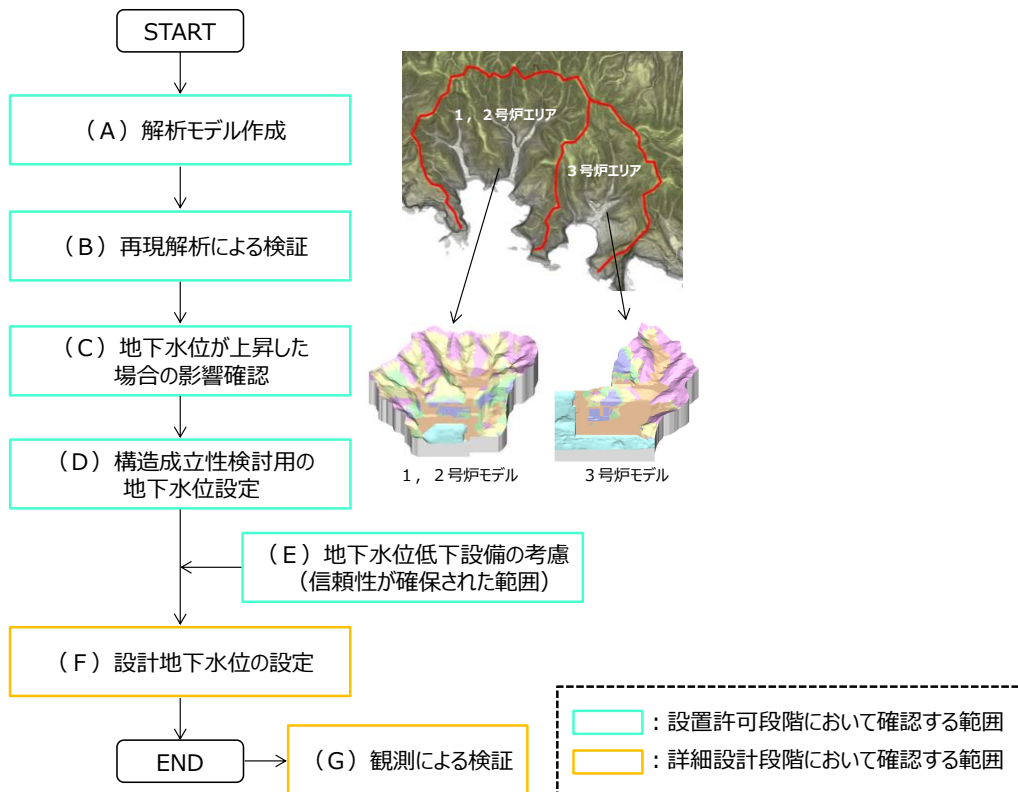
地下水位低下設備の機能を考慮し、施設の設計地下水位を設定するに当たっては、地形等を適切にモデル化した浸透流解析を実施することとし、保守性を確保する方針とする。

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<sup>\*2</sup>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

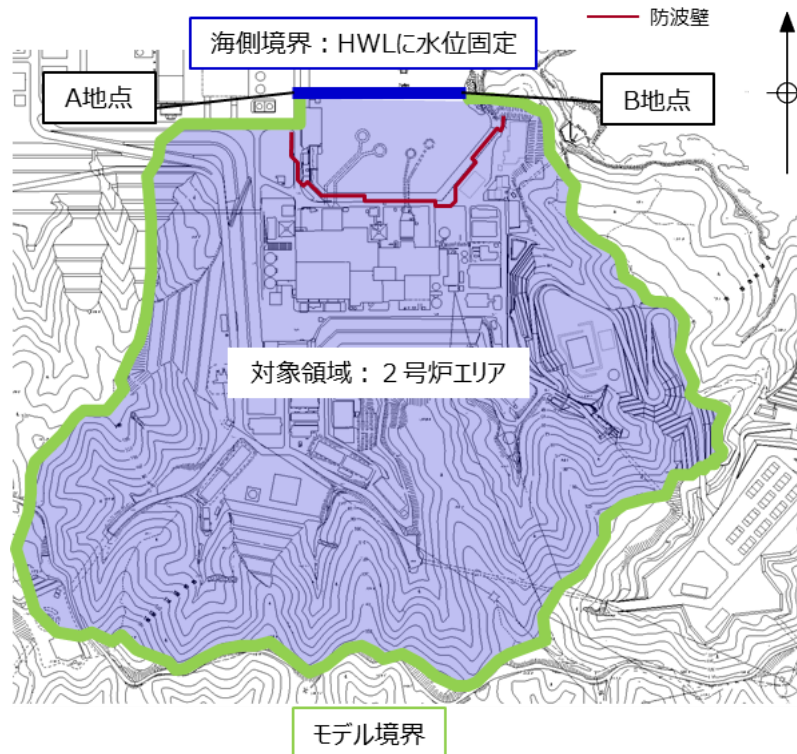
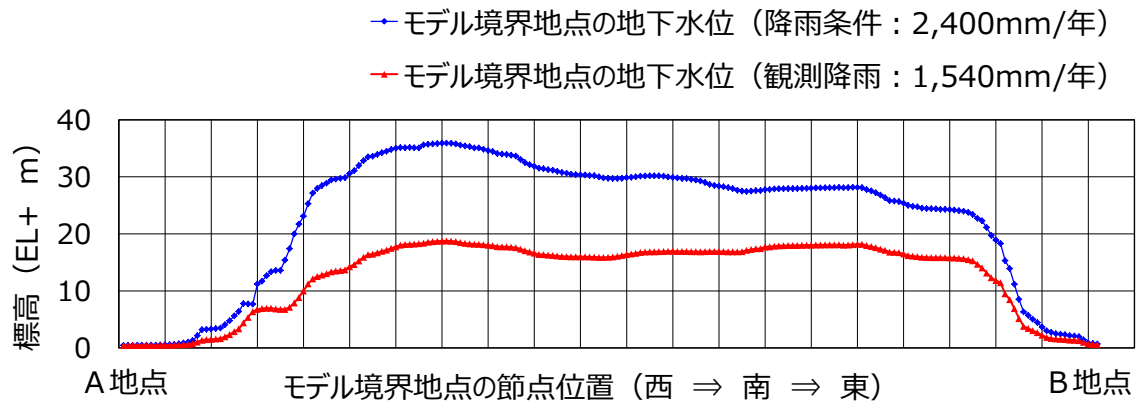
ドレーンは碎石及び土砂が流入して集水機能が低下した状態、揚水ポンプは稼働しない状態とし、揚水経路としない。

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1,540mm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1,880mm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+1 $\sigma$ )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



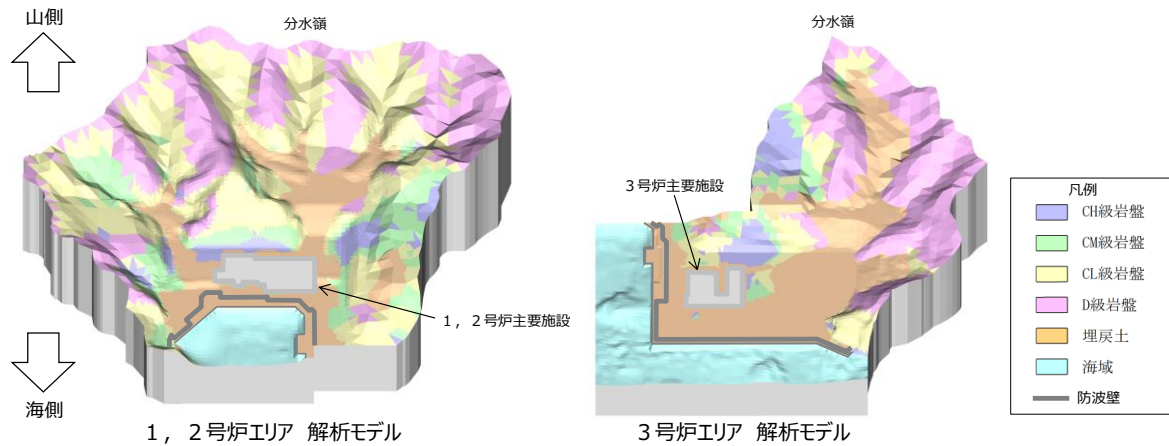
別紙 17-5 図 保守的な解析条件の設定例

## 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。



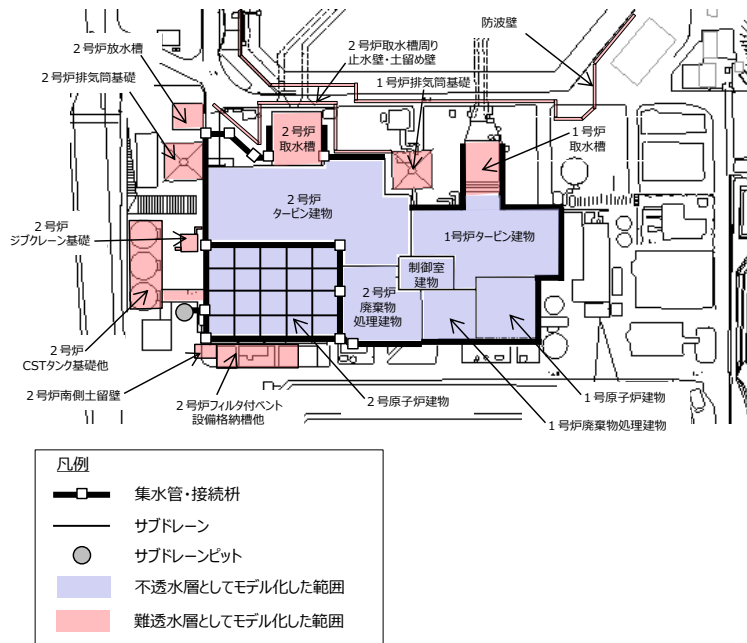
別紙 17-6 図 解析モデル鳥瞰図

別紙 17-1 表 解析モデルの概要

項目	内容
モデル化範囲等	<ul style="list-style-type: none"> <li>敷地を取り囲む分水嶺までを対象範囲とする。</li> <li>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。</li> </ul>

※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（ $1.0 \times 10^{-5}(\text{cm/s})$ ）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
難透水層としてモデル化	1号炉タービン建物
	1号炉廃棄物処理建物
	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<sup>\*</sup>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。

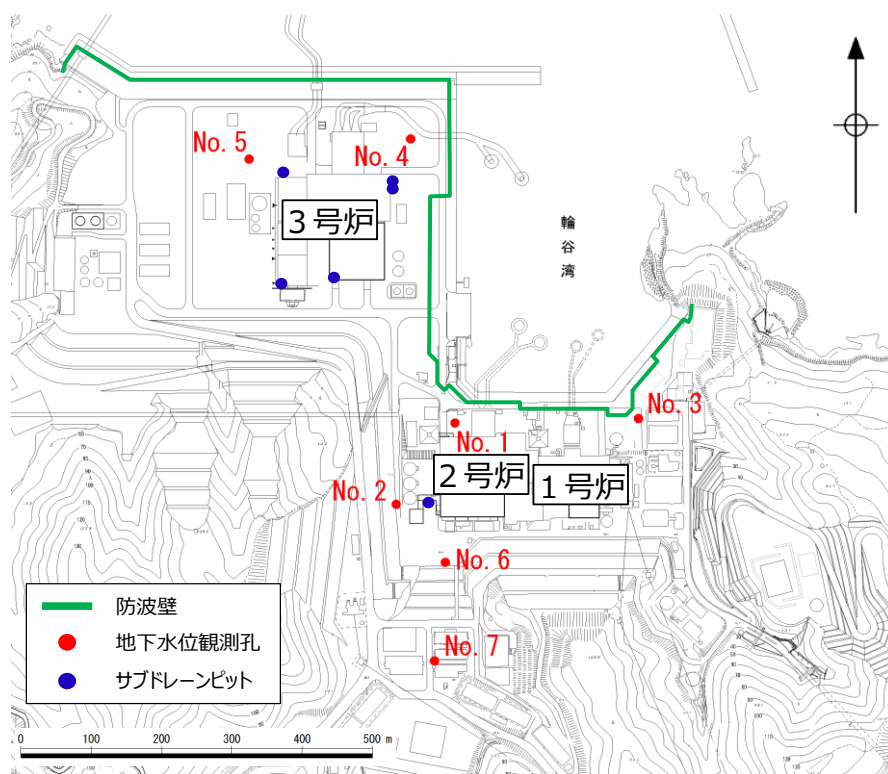
その他の解析条件として、透水係数は別紙17-2表のとおり透水試験等に基づき設定（補足説明資料2参照）し、揚水条件は既設の揚水ポンプの起動高さにおいて水位固定条件とする。

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）。

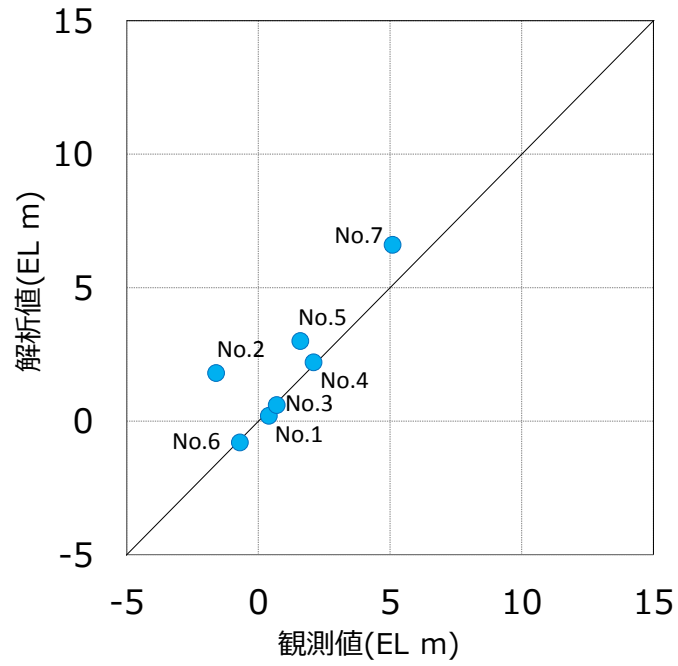
観測孔位置を別紙17-8図に、観測値と解析値の比較を別紙17-9図に示す。

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 <sup>3</sup> /日)
観測値	969
解析値	856

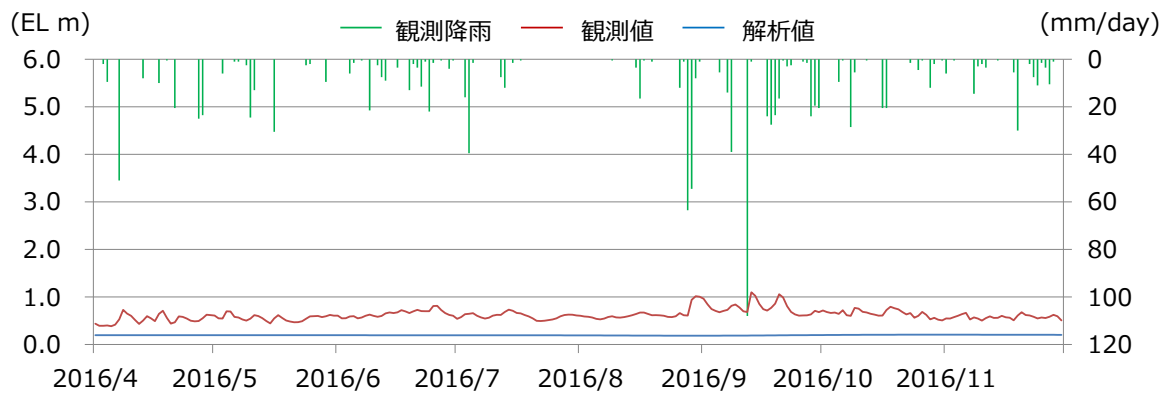
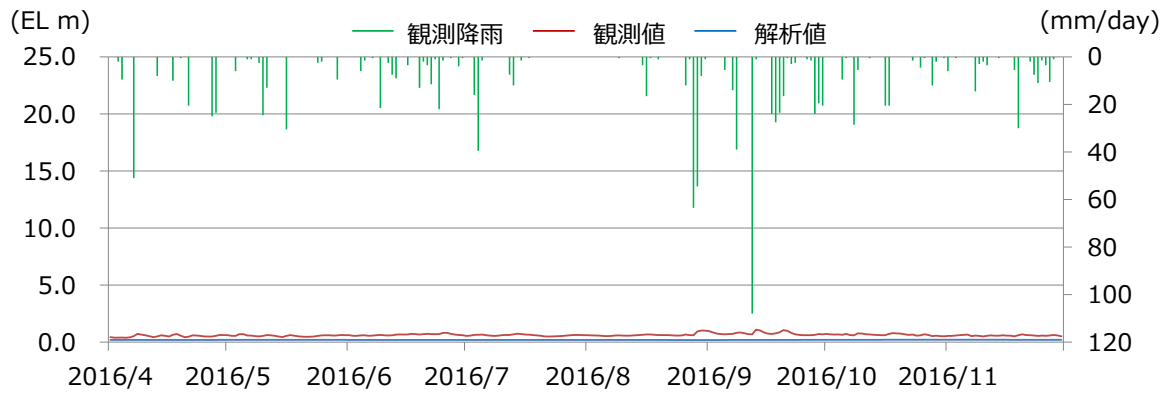
別紙 17-9 図 観測値と解析値の比較

別紙 17-2 表 透水係数

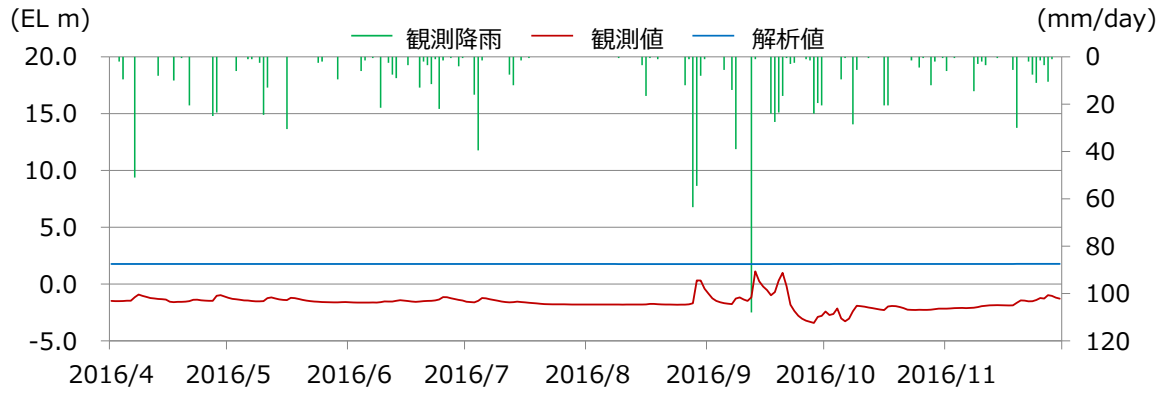
区分	透水係数 (cm/s)
C <sub>H</sub> 級	$5 \times 10^{-5}$
C <sub>M</sub> 級	$6 \times 10^{-4}$
C <sub>L</sub> 級	$1 \times 10^{-3}$
D級	$2 \times 10^{-3}$
砂礫層	$4 \times 10^{-3}$
埋戻土 (掘削ズリ)	$2 \times 10^{-1}$
構造物, 改良地盤	$1 \times 10^{-5}$

(2) 水位経時変化の確認

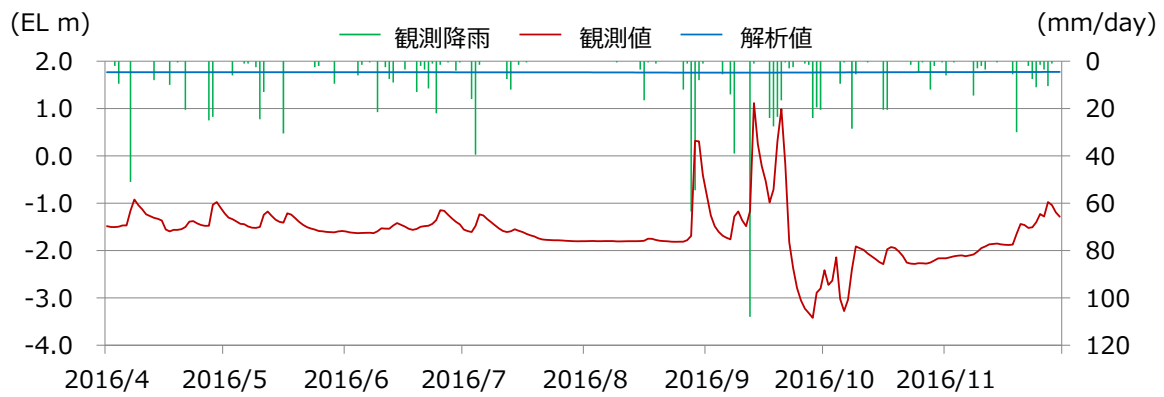
再現解析において、参考として非定常解析を実施し、水位の経時変化について別紙 17-10 図のとおり確認した。(別紙 17-7 図参照)。



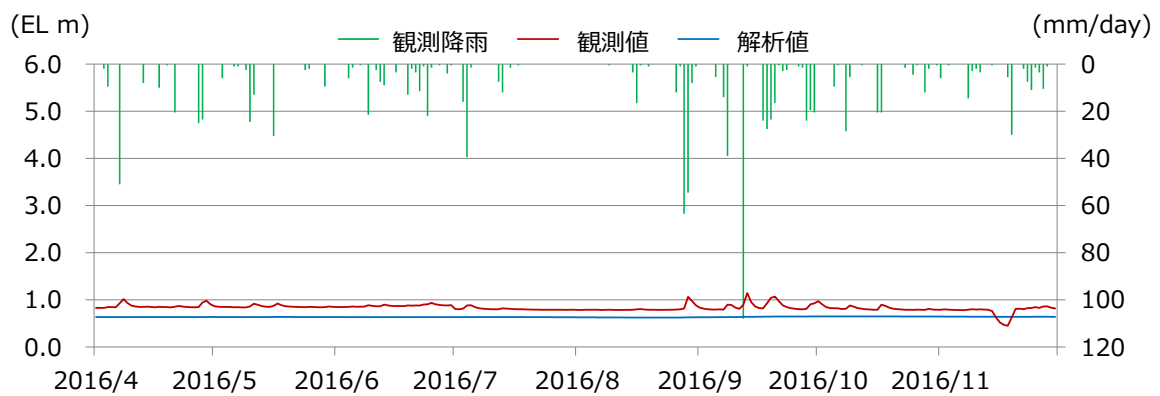
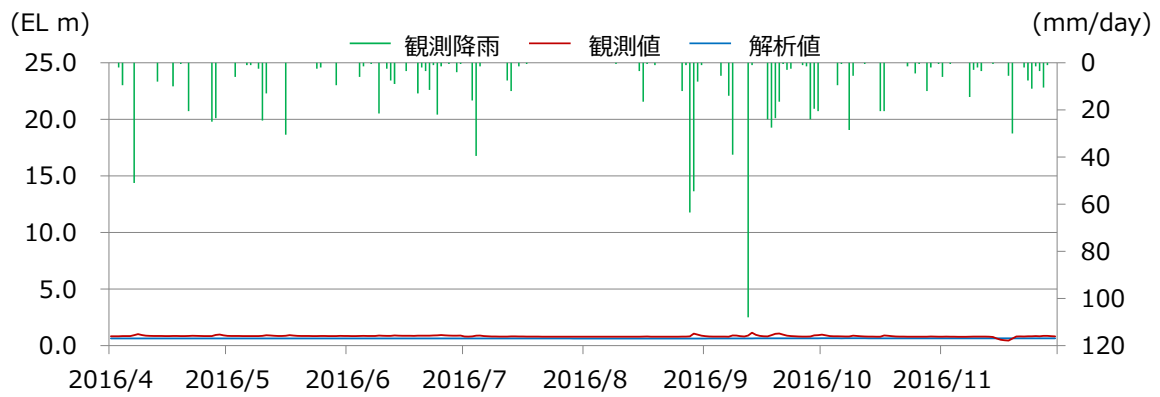
別紙 17-10(1)図 地下水位の経時変化例 (No. 1 孔)

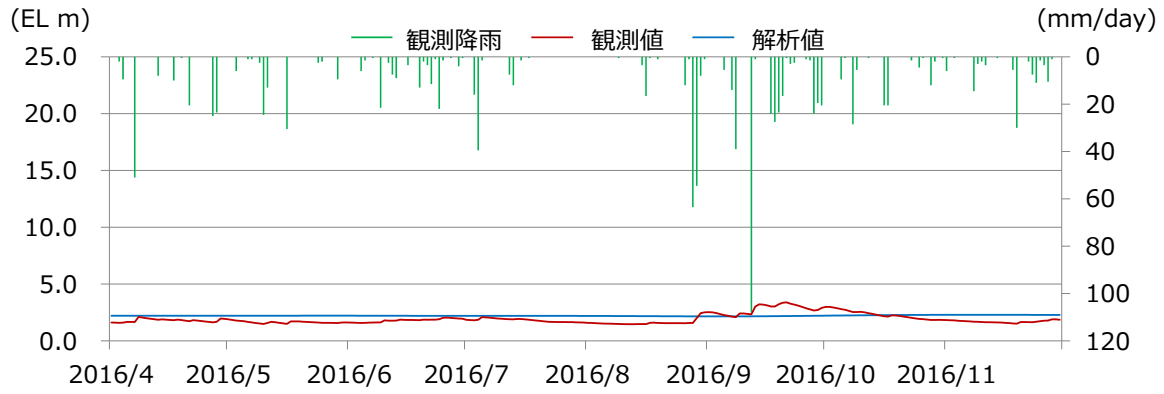


別紙 17-10(2) 図 地下水位の経時変化例 (No. 2 孔)

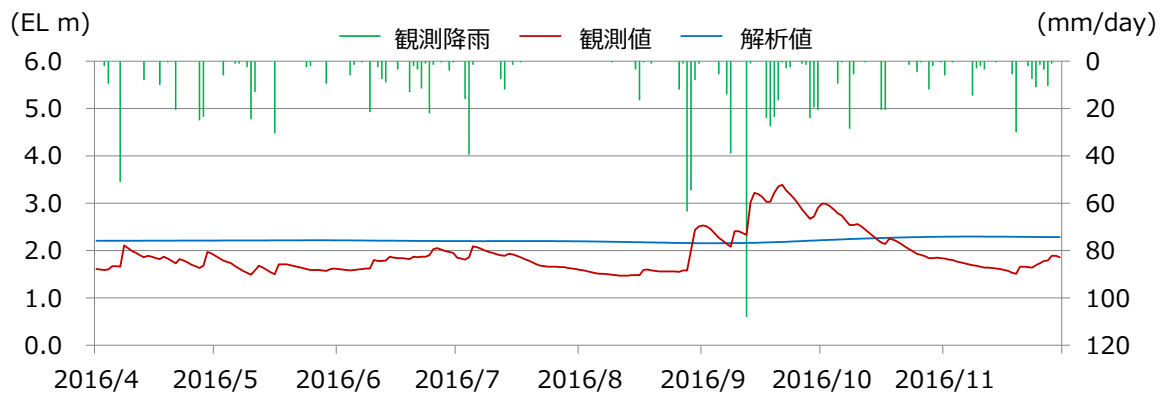


別紙 17-10(3) 図 地下水位の経時変化例 (No. 3 孔)

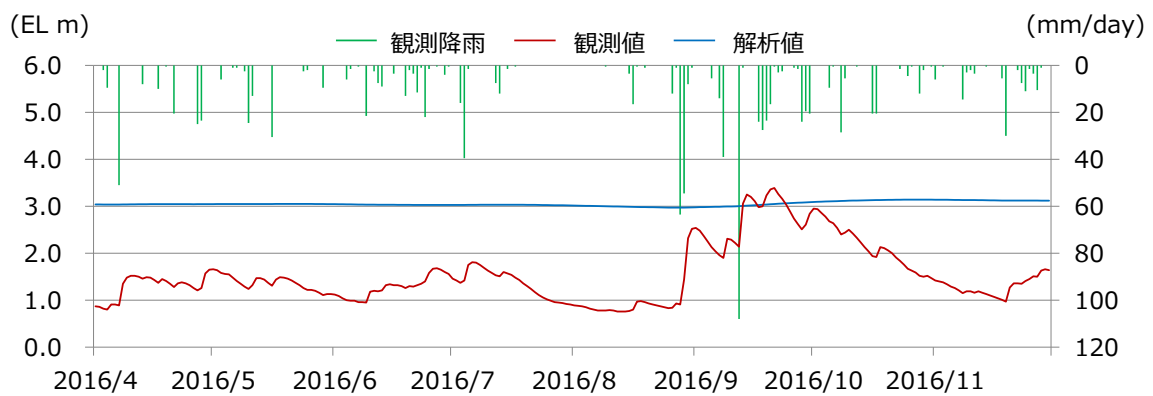
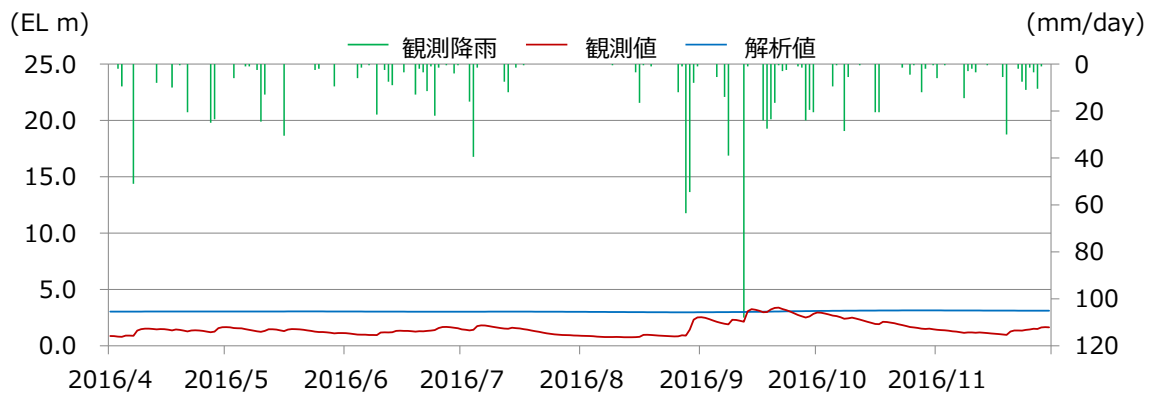


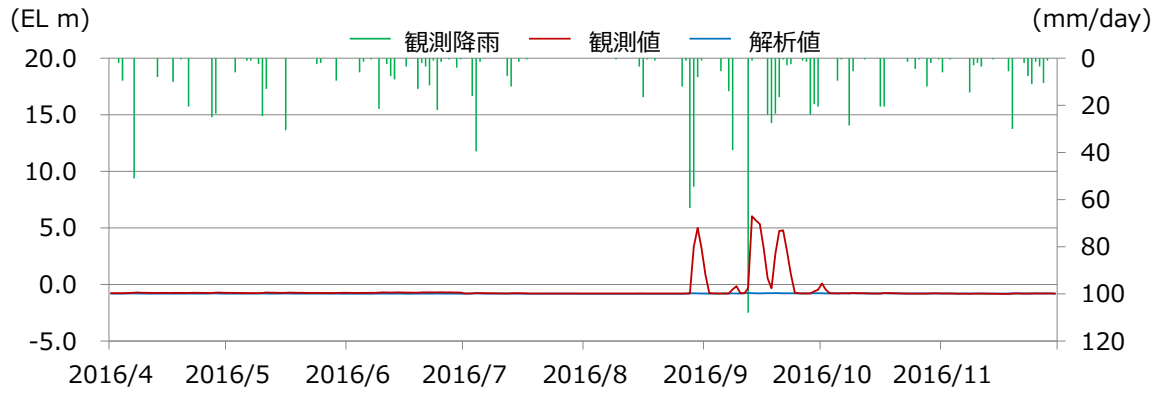


別紙 17-10(4) 図 地下水位の経時変化例 (No. 4 孔)

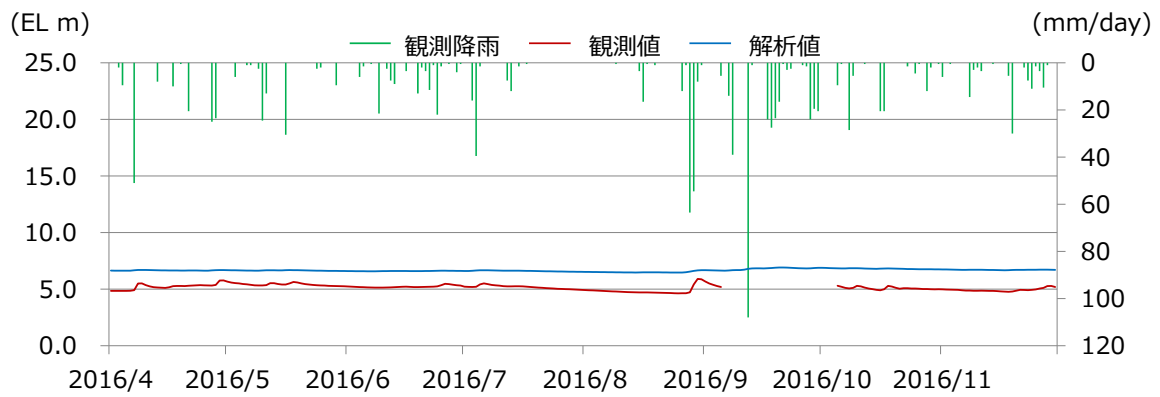
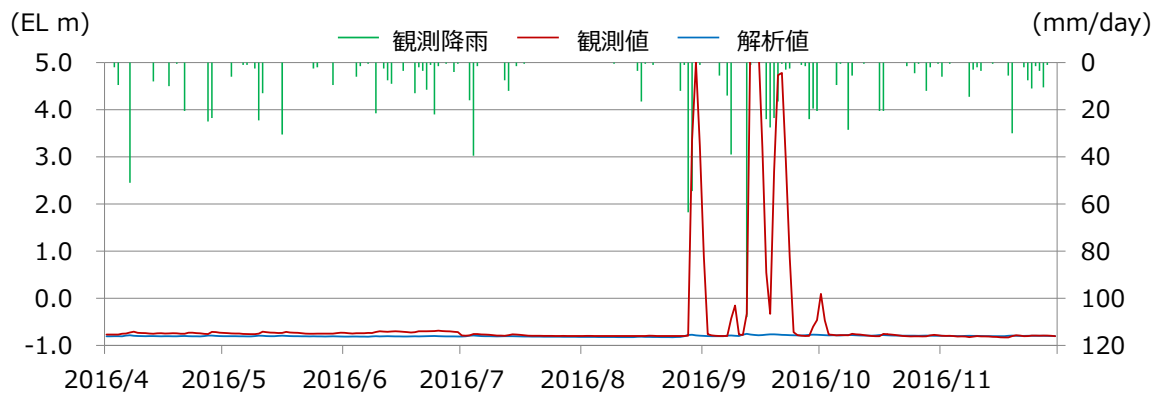


別紙 17-10(5) 図 地下水位の経時変化例 (No. 5 孔)

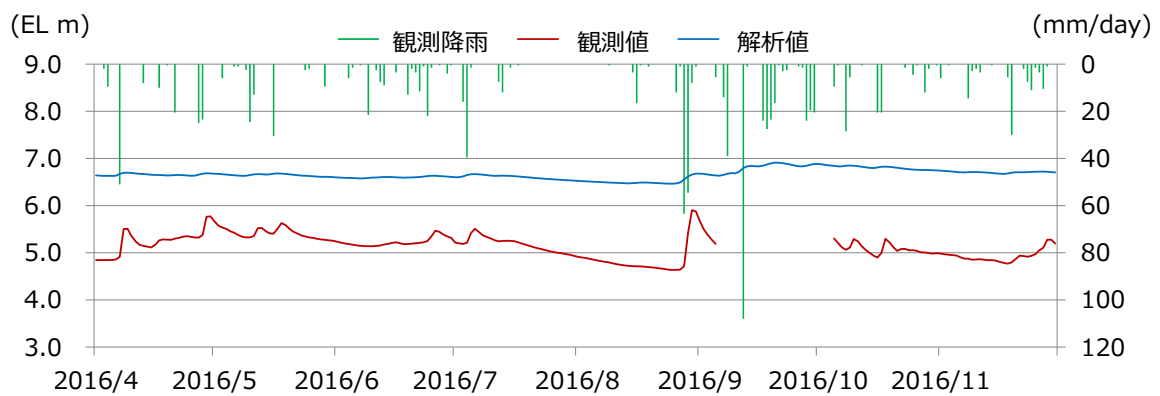




別紙 17-10(6) 図 地下水位の経時変化例 (No. 6 孔)



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 ~ 3 m 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. + 3 m 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 ~ 0 m 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 ~ 6 m 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 ~ 7 m 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

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)
		ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎
		屋外配管ダクト (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
		防波扉 (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 17-10 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 各施設等 (耐震補強)	【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) △：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。	【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) △：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。
屋外重要土木構築物	・取水槽 ・屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) ・ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎 ・屋外配管ダクト (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 各施設等 (耐震補強)	- -	△：(設計地下水位の設定において前提とする) △：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。

※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。

<p>凡例</p> <p>○：地下水位低下設備が設計上必要</p> <p>△：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</p> <p>-：対策不要</p>
--

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 ・防波扉 (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 各施設等 (耐震補強)	- -	△：(設計地下水位の設定において前提とする) △：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。
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 各施設等 (耐震補強)	- -	△：(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) △：(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。

<p>凡例</p> <p>○：地下水位低下設備が設計上必要</p> <p>△：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</p> <p>-：対策不要</p>
--

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、2次元浸透流解析により設定する。
- ・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。

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、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し、建物、構築物はその機能に期待して地下水位を設定する。
- ・なお、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の機能にも期待せず、自然水位\*より保守的に設定した水位に基づき、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 <sup>※1</sup>	
	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 <sup>※2</sup> 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）	
		ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎	
	津波防護施設	屋外配管ダクト（ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）	
		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	
	重大事故等対処施設	防波扉（防波壁通路防波扉）	
		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、2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化化、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掲とする、色分けは※4に示す 各条文の色絡関係を示す (■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 る地下水位を前掲とする (必要時は対策)	(C) 不要	地盤	地震	津波・余震重量	重大事 故等対 処設備					
基礎施設・ 周辺斜面	基礎地盤			○	※2								
	周辺斜面			○									
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	○				△	△	△	△	△	△	△	
設計 基準 特 異 条 文 施 設	排気筒	○				△	△	△	△	△	△	△	
	取水槽												
	屋外配管タクト(タービン建物～排気筒)												
	屋外配管タクト(タービン建物～放水槽)												
	ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎												
	ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物												
	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												
津波防護 施設	防波壁通路防波扉												
	第1バントフィルタ格納槽												
重大事故等 対処施設	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												
保管場所・ アクセスルート	ガスタービン発電機用軽油タンク基礎												
	屋外配管タクト (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 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対策については、詳細設計規則にその詳細を示す。

※2 周辺地盤の許容地下水位が影響しないため、条文適合上不要と判断した。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は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、別規則第4条への適合を以て第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条への適合性を確認する。また、同規則第3条第2項、第4条及び第39条は、それぞれ同一の地震、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。

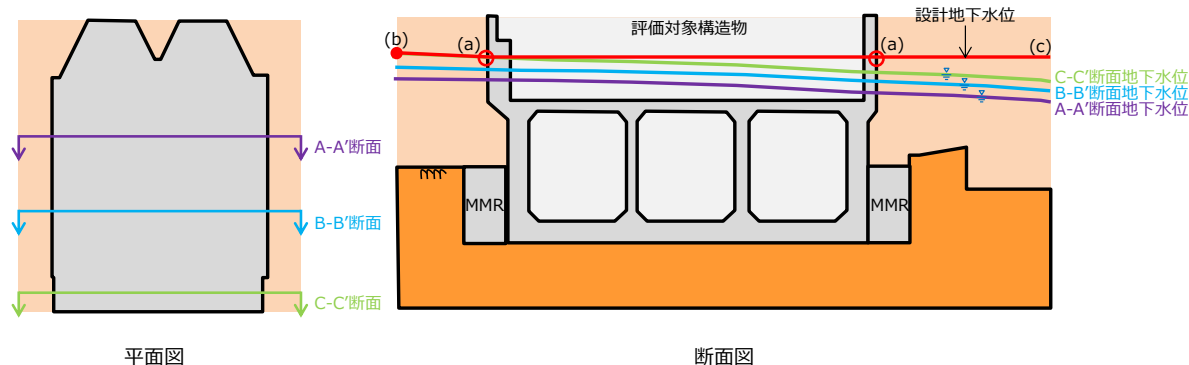
設計地下水位は解析断面における地下水位を用いて、構造物側面や解析断面境界等の各点での最高水位を結んで保守的な設定とする。

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】

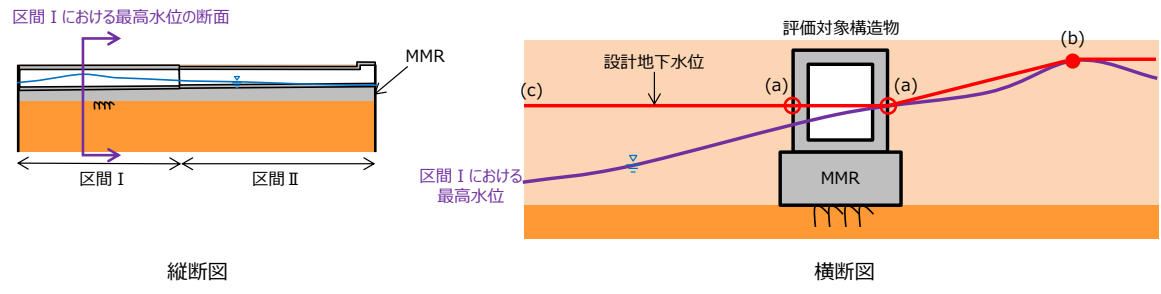
- ・ 構造物側面の地下水位は、三次元浸透流解析結果より、構造物的特徴や周辺状況を踏まえて設定した各解析断面における構造物側面の最高水位(a)を採用する。
- ・ 構造物周辺地盤の地下水位は、構造物側面の水位(a)とその側方地盤の最高水位(b)を結ぶ。
- ・ ただし、構造物周辺地盤の地下水位が構造物から離れる方向に低下しても設計地下水位は最高水位で一定(c)とする。



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物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。



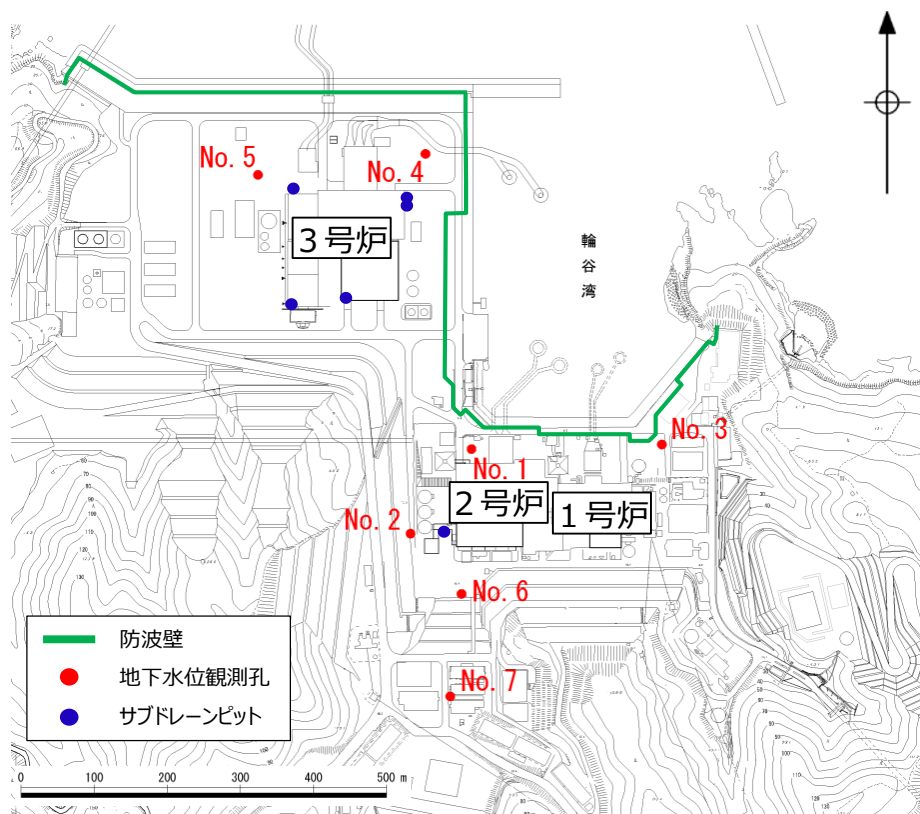
別紙17-13図 線状構造物の設計地下水位設定の考え方



## 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（1,540mm/年）よりも厳しい降雨条件（2,400mm/年）を定常的に与える。
- ・地下水位低下設備（既設）のうち、ドレーンは碎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

審査区分		設置許可段階		詳細設計段階			
解析区分		再現解析（定常※1）		予測解析（定常）			
解析の目的		解析用物性値を含めた解析モデルの妥当性確認		構造成立性検討	設計地下水位の設定		
解析条件	(1)透水係数	透水試験結果等に基づき設定		再現解析で妥当性を確認した透水係数を設定			
	(2)地盤条件	一部、地盤改良未実施		地盤改良完了後			
	(3)降雨条件	1,540mm/年 (発電所 年平均降雨)		2,400mm/年	2,400mm/年	2,400mm/年	
	(4)	地下水位低下設備（既設）	機能に期待する		機能に期待しない	機能に期待しない	機能に期待しない
		地下水位低下設備	-		-	機能に期待する	機能に期待しない
解析対象		(解析水位と観測水位を比較)		<ul style="list-style-type: none"> <li>・基礎地盤・周辺斜面※2</li> <li>・屋外重要土木構造物</li> <li>・津波防護施設</li> <li>・重大事故等対処施設</li> <li>・保管場所・アクセスルート</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>建物、構築物</li> <li>・原子炉建物</li> <li>・タービン建物</li> <li>・廃棄物処理建物</li> <li>・制御室建物</li> <li>・排気筒</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・屋外重要土木構造物</li> <li>・津波防護施設</li> <li>・重大事故等対処施設</li> <li>・保管場所・アクセスルート</li> </ul>	

※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	地震	-	・地下水低下設備は、発電用原子炉施設の各設備を本条文中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、盛水、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	-	・本条文中は、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	-	・本条文中は、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	-	・本条文中は、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	-	・本条文中は、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	-		
第15条	炉心等	-		
第16条	燃料体等の取捨施設及び貯蔵施設	-		
第17条	原子炉格納圧力バウンダリ	-		
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務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	-		

## 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 地下水水位低下設備の各構成部位の機能喪失要因の分析

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																										
機能	構成部位	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)	内部漏水(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	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
																								耐震無し		
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	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
																									耐震無し	
																									飛来物の影響の可能性有り	
配管	配管	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
																										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	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
																										耐震無し
																										台風による二次的影響の可能性有り
電源機能	電源*1(非常用DC)	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
																										耐震無し
																										飛来物の影響の可能性有り

※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  
 一：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S<sub>s</sub>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S<sub>s</sub>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のある事象の分析 ( 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	給水加熱喪失	原子炉冷却材流量制御系の誤動作	負荷の喪失	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	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	× ※1
	地震	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	× ※1
	風(台風)	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	× ※1
	竜巻	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	× ※1
	凍結	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	× ※1
	降水	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	× ※1
	降雪	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	× ※1
	落雷	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	× ※1
	火山	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	× ※1
	生物学的影響	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	× ※1
	森林火災(外部火災)	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	× ※1
	内部火災	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	× ※1
	内部溢水	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	× ※1

凡例△：地下水位低下設備の機能喪失は起きない。×：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	
機器故障	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
地震	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
風(台風)	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
竜巻	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
凍結	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
降水	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
降雪	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
落雷	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
火山	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
生物学的影響	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
森林火災(外部火災)	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
内部火災	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
内部溢水	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△

凡例△：地下水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 地下水低下設備の機能喪失と同時に発生する事象の分析 (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 (SILOCA)	冷却能力・温度による静的負荷 (格納容器過圧圧破損)	高圧溶融炉放出/格納容器冷却/燃料/冷却材相互作用	原子炉圧力容器外心・コンクリート相互作用	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 (RRR) 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)
機器故障	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	×
地震	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
風 (台風)	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
竜巻	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
凍結	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
降水	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
降雪	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
落雷	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
火山	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
生物学的影響	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
森林火災 (外部火災)	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
内部火災	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
内部溢水	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△

凡例△：地下水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による

### (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S<sub>s</sub>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S<sub>s</sub>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S<sub>s</sub>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	出力運転中制御棒の異常な引き抜き	原子炉冷却材流量の異常な引き抜き	原子炉冷却材流量の停止ループの再起動	原子炉冷却材流量の部分喪失	原子炉冷却材流量の完全喪失	原子炉冷却材流量制御系の活動作	負荷の喪失	主蒸気隔離弁の閉鎖	給水制御系の故障	原子炉圧力制御系の故障	給水流量の完全喪失	外部電源喪失
<p>○(影響なし)</p> <p>×(影響あり)</p> <p>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</p> <p>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</p>												
設計基準事故												
<p>○(影響なし)</p> <p>×(影響あり)</p> <p>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</p> <p>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</p>												
設計基準事故等												
<p>○(影響なし)</p> <p>×(影響あり)</p> <p>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</p> <p>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</p>												
重大事故等												
<p>○(影響なし)</p> <p>×(影響あり)</p> <p>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</p> <p>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</p>												

## 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、隔離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)。

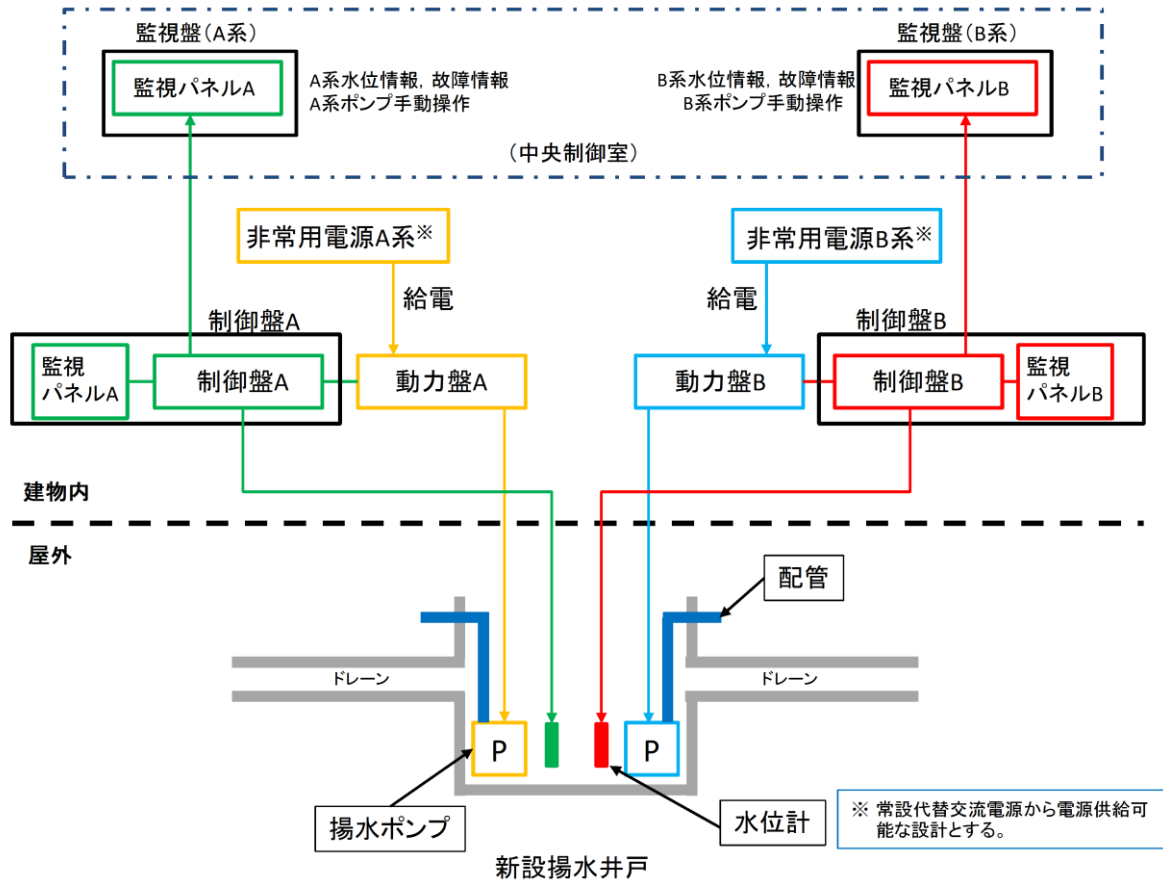
地下水位低下設備の各構成部位におけるS<sub>s</sub>機能維持の確認方法を別紙17-14表に示す。

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

機能	構成部位	S <sub>s</sub> 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 S <sub>s</sub> 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 S <sub>s</sub> 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 S <sub>s</sub> 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 S <sub>s</sub> 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 S <sub>s</sub> 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 S <sub>s</sub> 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 S <sub>s</sub> 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 S <sub>s</sub> 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 S <sub>s</sub> 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。

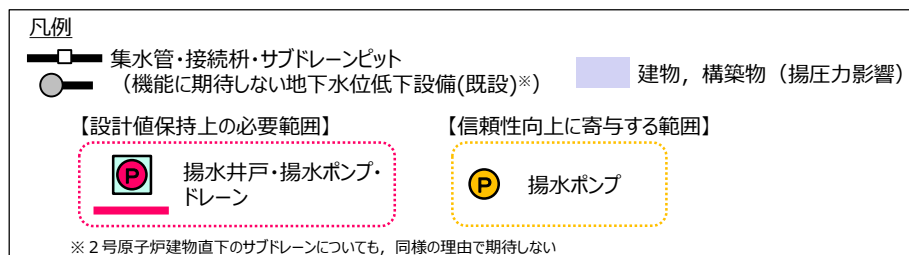
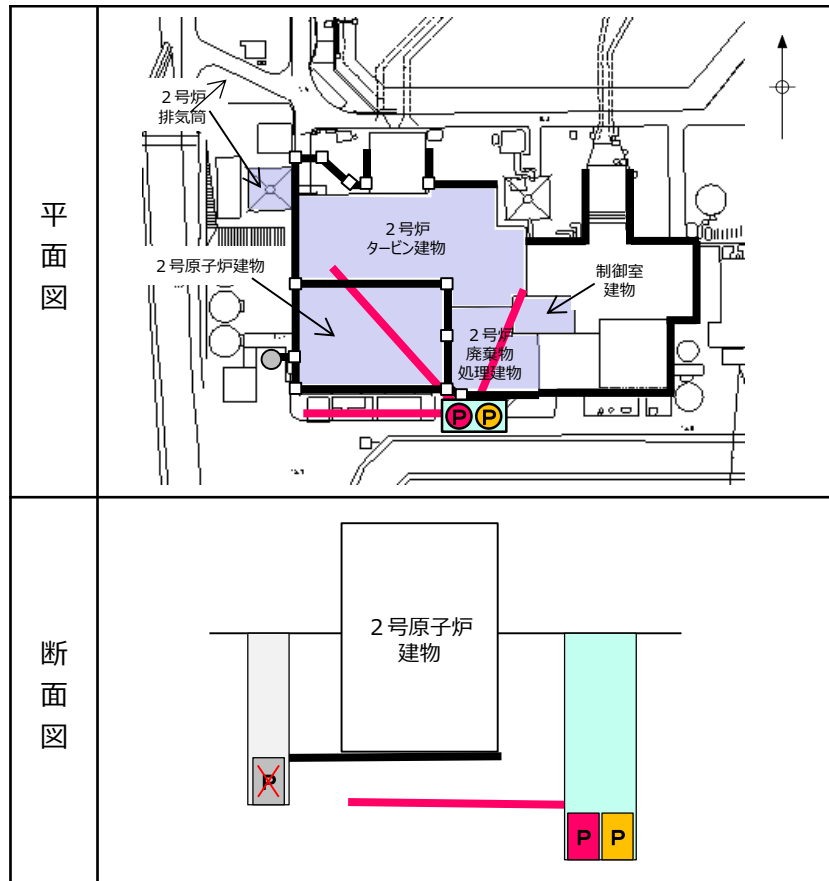
### (1) 設備構成概要

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を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)】

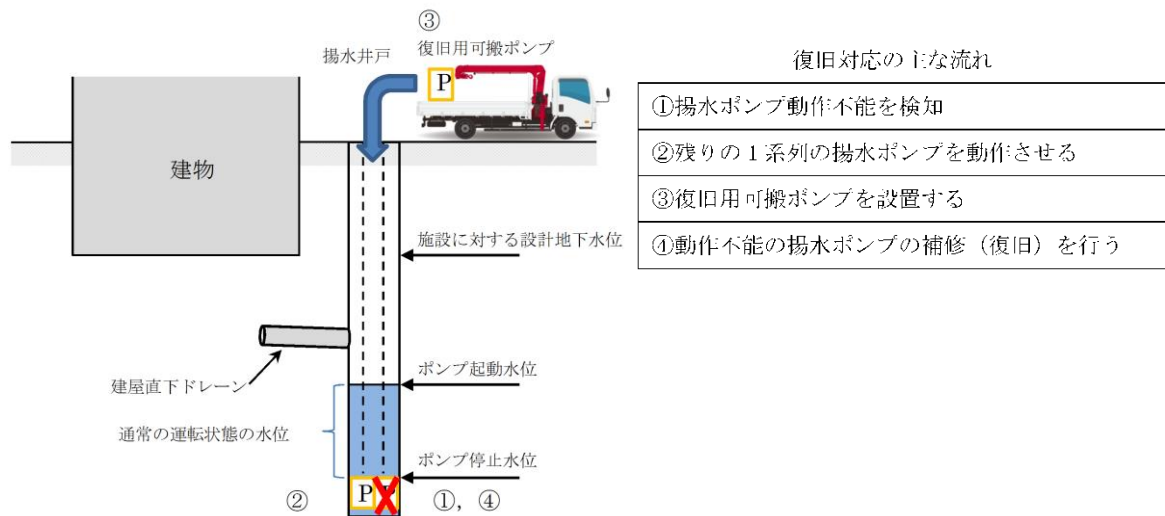
- 保全計画の策定では, 地下水位低下設備を「予防保全」の対象と位置付け管理していく。
- 機能喪失した場合に備え予め復旧用可搬ポンプを確保したうえで, 機能喪失時には原因調査を行い補修する。

## (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。

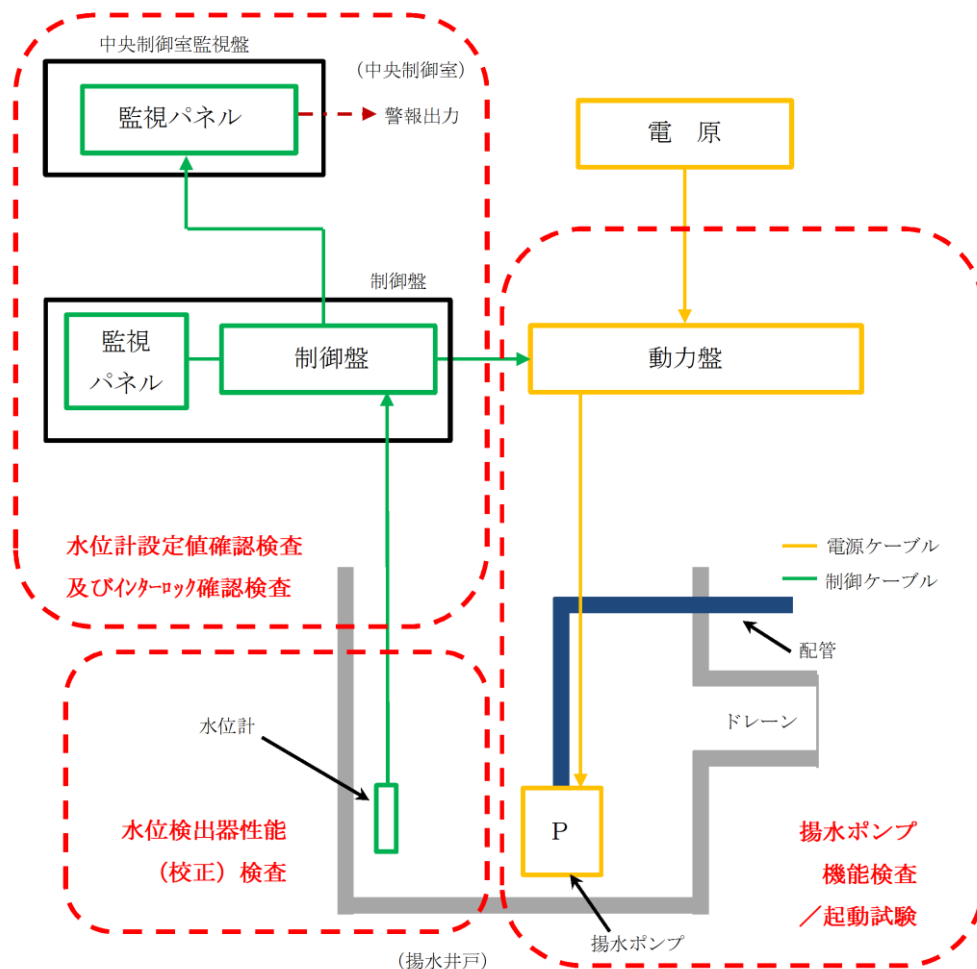
- ・ 運転中に定期的に試験又は検査ができること。
- ・ 信頼性向上の配慮により多重化した系統及び機器にあつては、各々が独立して試験又は検査ができること。

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S s 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。

## 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 <sup>※1</sup> 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 <sup>※2</sup>	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付け部を表す。

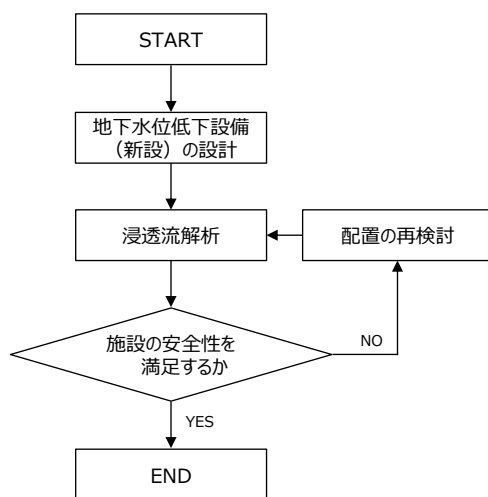
※2 以下に示す理由から、ドレーンは一定の品質が確保され、供用環境も同様と考えられるため、通常時は流末部で外観点検を行うことで異常時の検知が可能である。

- 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）

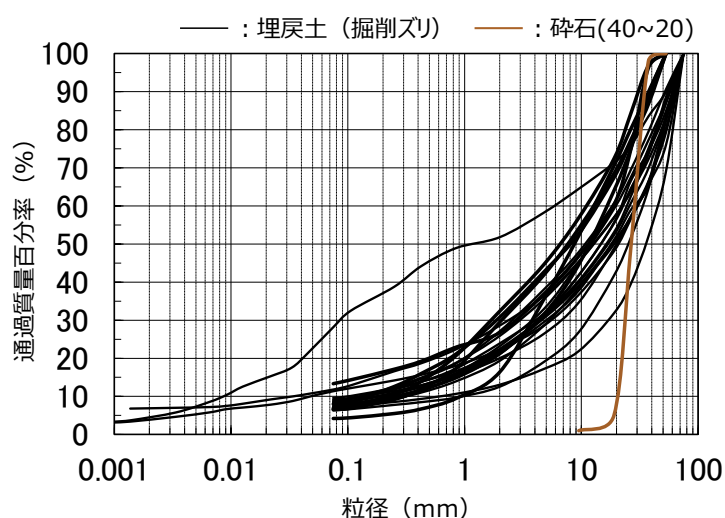
### 3. 集水機能の信頼性の検討

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、集水管及び接続柵)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

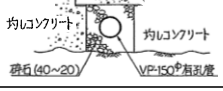
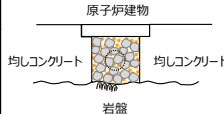

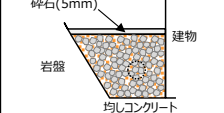
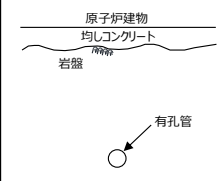
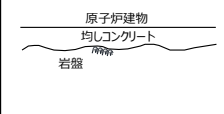


添付1-2図 埋戻土(掘削ズリ)及び砕石の粒径加積曲線

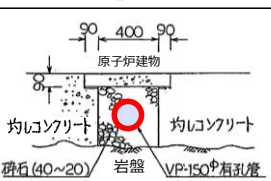

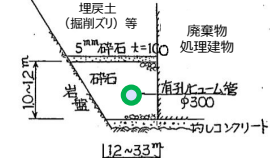
前頁の考え方から、ドレーンの状態に対応したパターンと各観点の評価の見通し、並びに浸透流解析上の取扱いについて添付1-3表に整理した。既設のドレーンは碎石及び土砂が流入して集水機能が低下した状態とする。また、新設のドレーンは、要求機能として通水性を確保するため、信頼性（耐久性・耐震性・保守管理性）を満足するものを設置する。

また、既設のドレーンが基準地震動  $S_s$  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  $S_s$  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	
	耐久性	耐震性	保守管理性	土砂	碎石 (40~20)
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 $S_s$ に対して損傷しないと判断しているが、仮に損傷したもとして評価する。	× ・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。	原子炉建物 	岩盤や構造物に囲まれており、周囲を碎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、碎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、碎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) 				原子炉建物 	
新設する場合 (例) 	○	○	○	原子炉建物 	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。

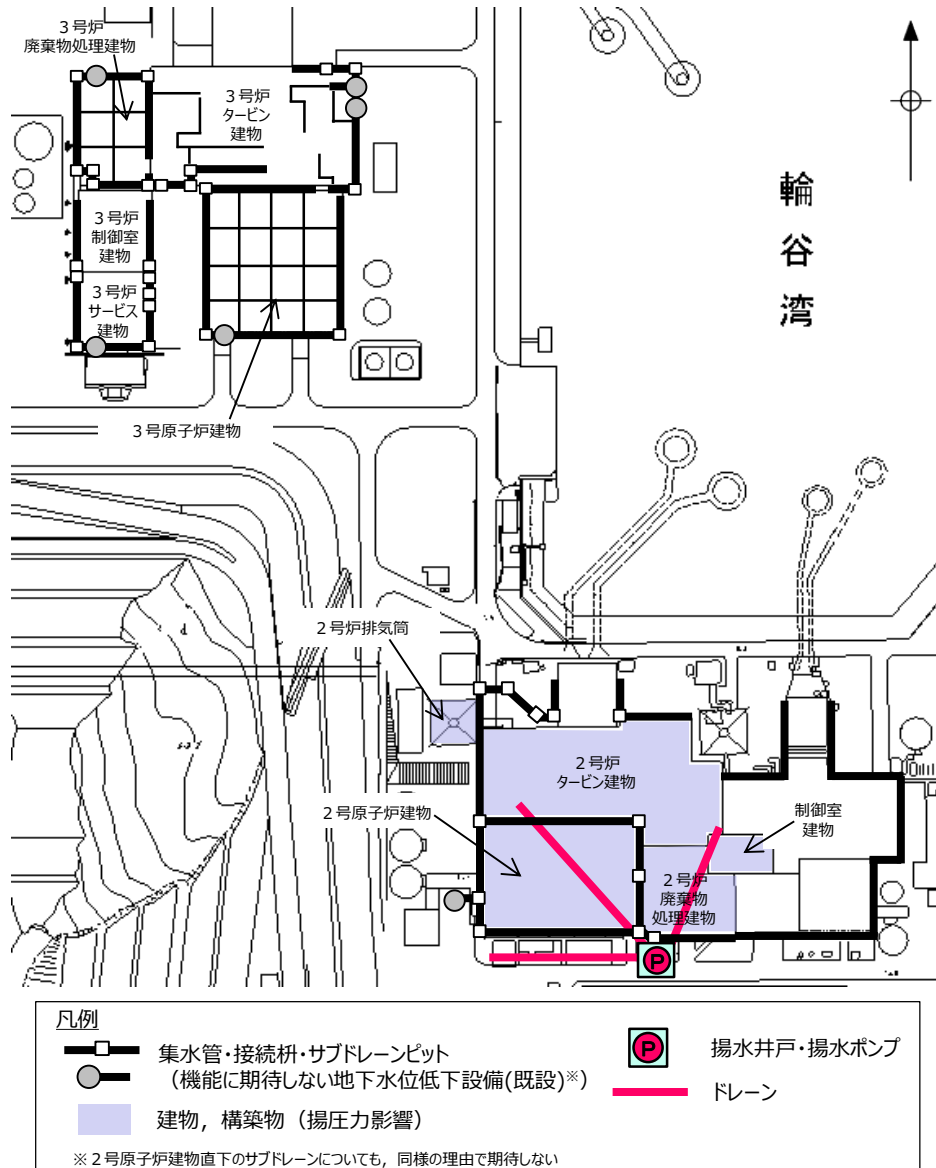
添付 1-4 表 既設のドレーンの波及影響の整理

	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 $S_s$ 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 $S_s$ 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 $S_s$ 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。

※接続柵を含む

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、ドレーンは碎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

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			
	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]	
第三条(設計基準対象施設の地盤)	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・構造物間の不等沈下、液状化及び掃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、掃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)	<p>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。</p> <p>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</p> <p>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</p> <p>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</p>	<p>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。</p> <p>※別記1:第3条(設計基準対象施設の地盤)</p> <p>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。</p> <p>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。</p>	<p>常設重大事故等対処施設の基礎地盤</p> <p>・基礎地盤の安定性評価の条件として地下水の設定方法を記載(基準適合はこの条件を用いた安定性評価により確認)</p>	—	<p>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)</p>	<p>— (設置許可段階で第三条と併せて説明)</p>
	<p>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。</p>		<p>常設重大事故等対処施設の周辺地盤</p> <p>・常設重大事故等対処施設については、液状化、掃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。</p> <p>・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。</p> <p>・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。</p>	<p>・常設の地下水位低下設備</p>	<p>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</p> <p>関連 添付書類八 -安全設計/耐震設計 -耐震重要施設</p>	<p>・耐震性に関する説明書(第四条の審査において確認)</p>
	<p>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。</p>		— (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、地震力に十分に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水位を一定の範囲に保持する地下水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、挿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)	・常設の地下水水位低下設備	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 -地下水水位低下設備	・耐震性に関する説明書(設計地下水水位の設定を含む)
	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。)に分類するものとする。	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、挿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、挿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)	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。	
	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。	・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水位を一定の範囲に保持する地下水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)			
	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		
<p>第三十九条 (重大事故等対処施設/地震による損傷の防止)</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>	<p>1 第三十九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。</p> <p>※別記2・第4条(地震による損傷の防止)</p> <p>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。</p> <p>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。</p>	<p>常設重大事故等対処施設</p> <p>・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。</p> <p>あわせて、液状化、挿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。</p> <p>(第三十八条第二項をあわせて確認)</p> <p>・常設重大事故等対処施設の設計においては、防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。</p> <p>・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。</p> <p>地下水低下設備<sup>※2</sup></p> <p>・地震に対し機能を保持する設計とする。</p> <p>(Cクラス、Ss機能維持)</p> <p>※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。</p>	<p>・常設の地下水低下設備</p>	<p>本文<sup>※1</sup></p> <p>添付書類八 -設置許可基準規則への適合 -第三十九条</p> <p>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</p> <p>-その他発電用原子炉の付属設備 -地下水低下設備</p> <p>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</p> <p>※1 耐震評価において地下水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。</p>	<p>・耐震性に関する説明書(設計地下水位の設定を含む)</p>
		<p>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。</p>		<p>— (対象斜面なし)</p>	<p>—</p>

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
<p>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。</p>	<p>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。</p> <p>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。</p>
<p>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ないおそれがない地盤に設けなければならない。</p>	<p>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、液状化及び掃すり込み沈下等の周辺地盤の変状をいう。</p> <p>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。</p>
<p>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。</p>	<p>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。</p> <p>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」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。</p> <p>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 1 2 ～ 1 3 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 1 2 ～ 1 3 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 4 0 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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>

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
<p>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ぬ。</p>	<p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>(別記2)</p> <p>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。</p>
<p>第四条（地震による損傷の防止）</p> <p>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。</p>	<p>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。</p> <p>一 Sクラス（以下略）</p> <p>二 Bクラス（以下略）</p> <p>三 Cクラス</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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）</p> <p>二 Bクラス（以下略）</p> <p>三 Cクラス</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul> <p>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）</p>

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
<p>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。</p> <p>第四条 (地震による損傷の防止)</p>	<p>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)</p> <p>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。</p> <p>一 耐震重要施設のうち、二以外のもの</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul> <p>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。</p> <p>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</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> <li>・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</li> <li>・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</li> <li>・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</li> </ul> <p>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。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul>
<p>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。</p>	<p>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。</p> <p>また、安定解析に当たっては、次の方針によること。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>

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。

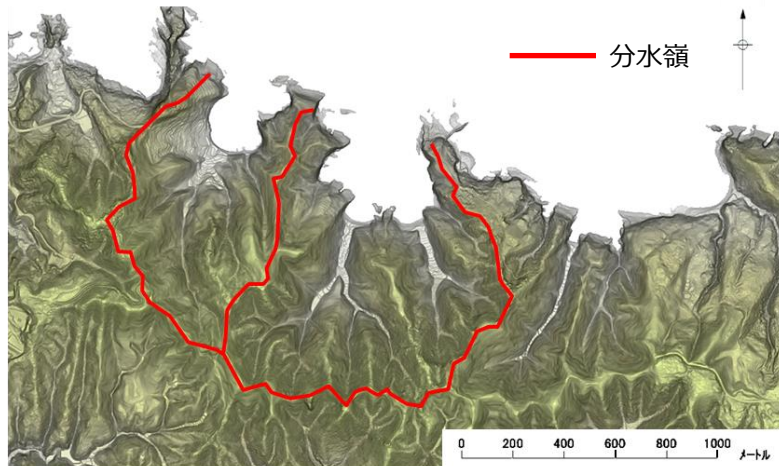
敷地の水文環境

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



.....➡ 主な地表水の流れ 島根原子力発電所周辺の空中写真  
出典：国土地理院（2009年撮影）

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。

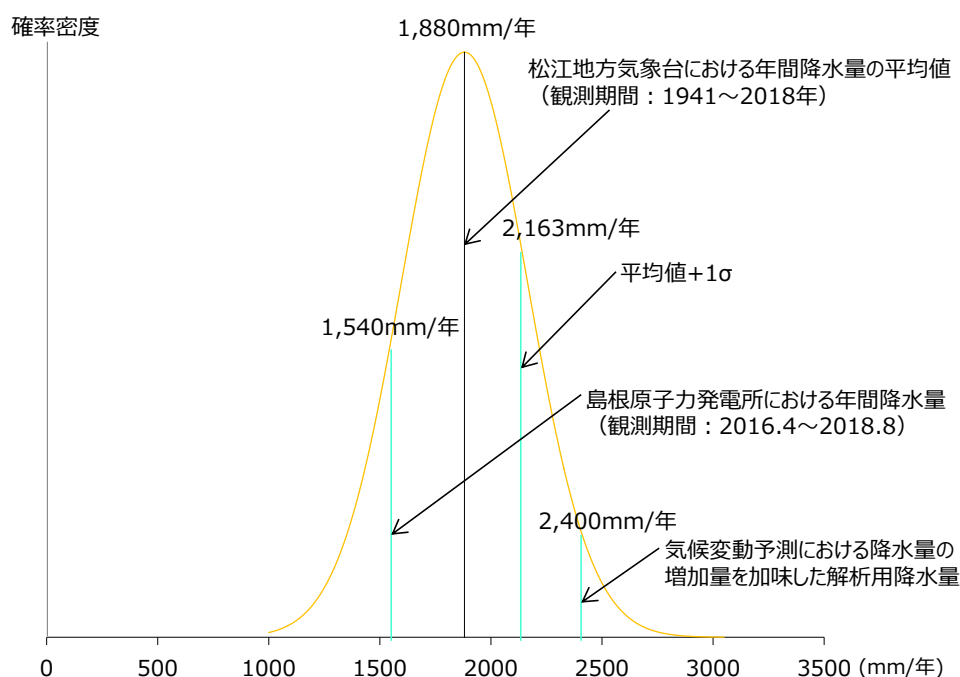
降雨条件については、島根原子力発電所が位置する島根県松江市の気象庁松江地方気象台の過去78年間（1941～2018年）の年間降水量の記録に基づき、年間降水量の平均値及びばらつきを考慮する。この期間における年間降水量の平均値は、1,880mm/年であり、ばらつきを考慮した値（平均値+1σ）は2,163mm/年である。

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

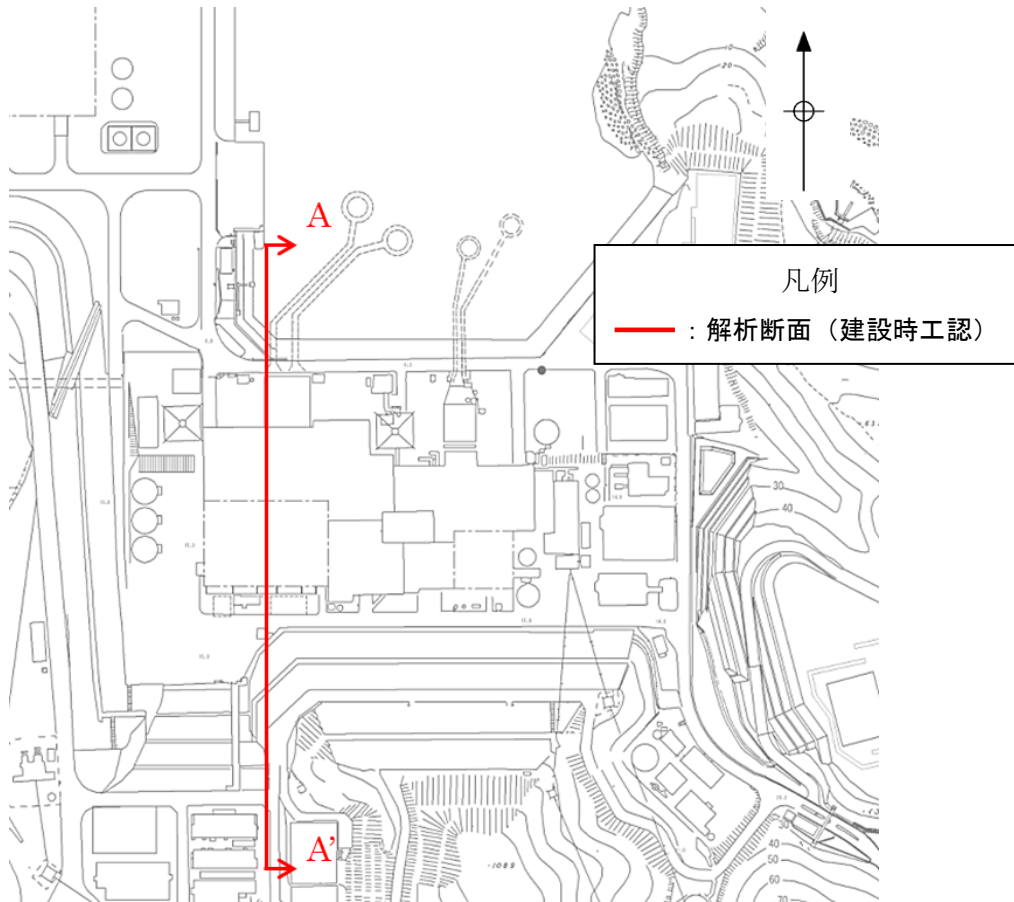
建設時工認段階の浸透流解析結果

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\*

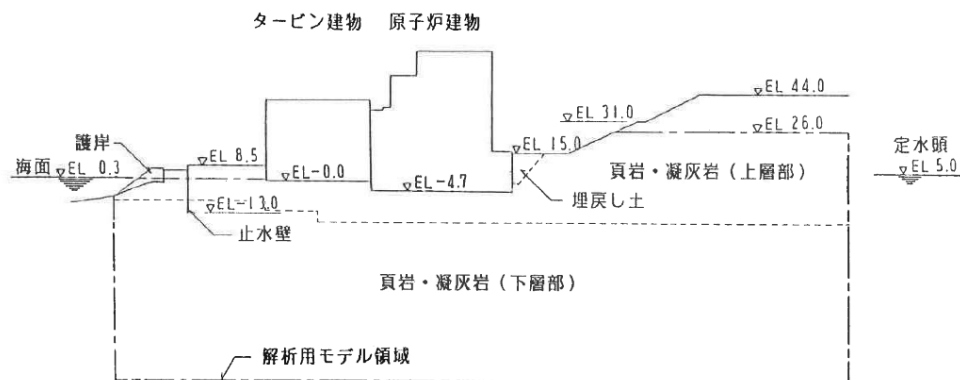
※建設時工認の浸透流解析断面は、当時の地形にてモデル化しており、現地形は異なる

## 2. 解析条件

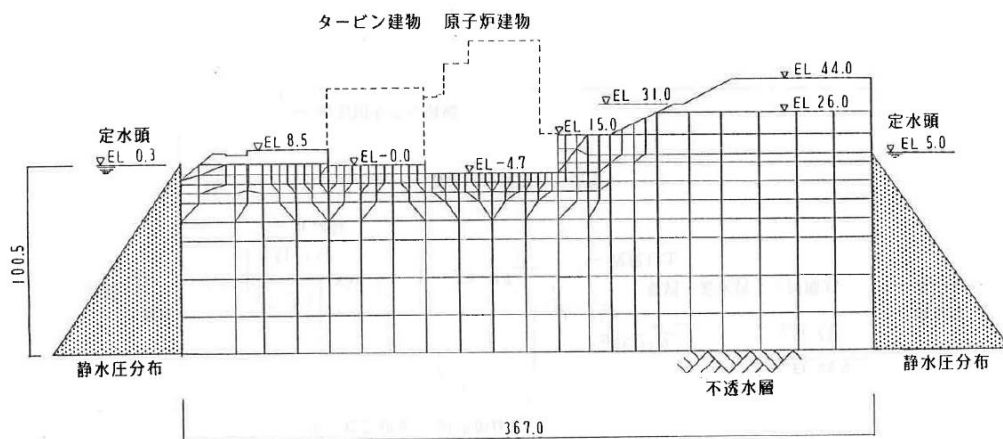
### (1) 境界条件

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	$1.0 \times 10^{-8}$
頁岩・凝灰岩（下層部）	$2.0 \times 10^{-4}$
頁岩・凝灰岩（上層部）	$5.0 \times 10^{-4}$
埋戻し土	$5.0 \times 10^{-3}$

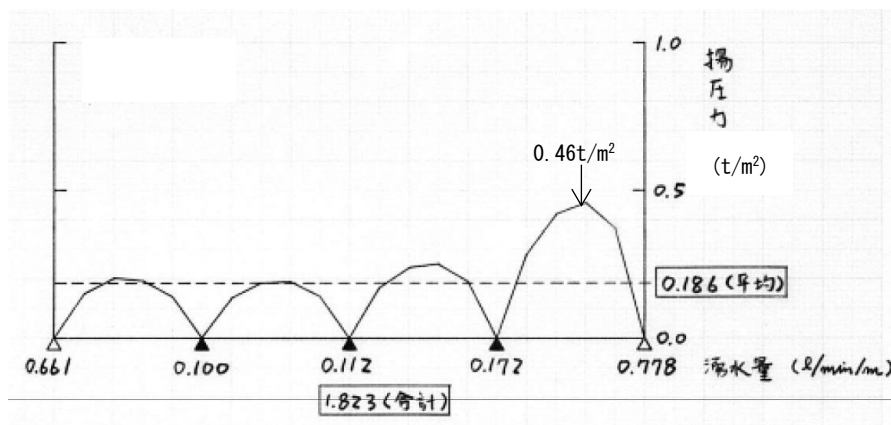
(参考)補足 2-2 表 地下水位の設定に係る透水係数

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	$1 \times 10^{-5}$	『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（難透水性層）として設定した。不透水材料として透水係数が $1 \times 10^{-5}$ 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 <sub>H</sub> 級	$5 \times 10^{-5}$	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。	$4.5 \times 10^{-5}$
C <sub>M</sub> 級	$6 \times 10^{-4}$		$5.6 \times 10^{-4}$
C <sub>L</sub> 級	$1 \times 10^{-3}$		$1.0 \times 10^{-3}$
D級	$2 \times 10^{-3}$	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 $2.8 \times 10^{-4}$ cm/s ( $\approx 3 \times 10^{-4}$ 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 1 2 試料のうち割れ目が発達した黒色頁岩等は 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 $2 \times 10^{-3}$ cm/sを採用する。	$1.75 \times 10^{-3}$
砂礫層	$4 \times 10^{-3}$	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。	$3.6 \times 10^{-3}$
埋戻し土 (掘削ズリ)	$2 \times 10^{-1}$	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。	$1.7 \times 10^{-1}$

### 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)

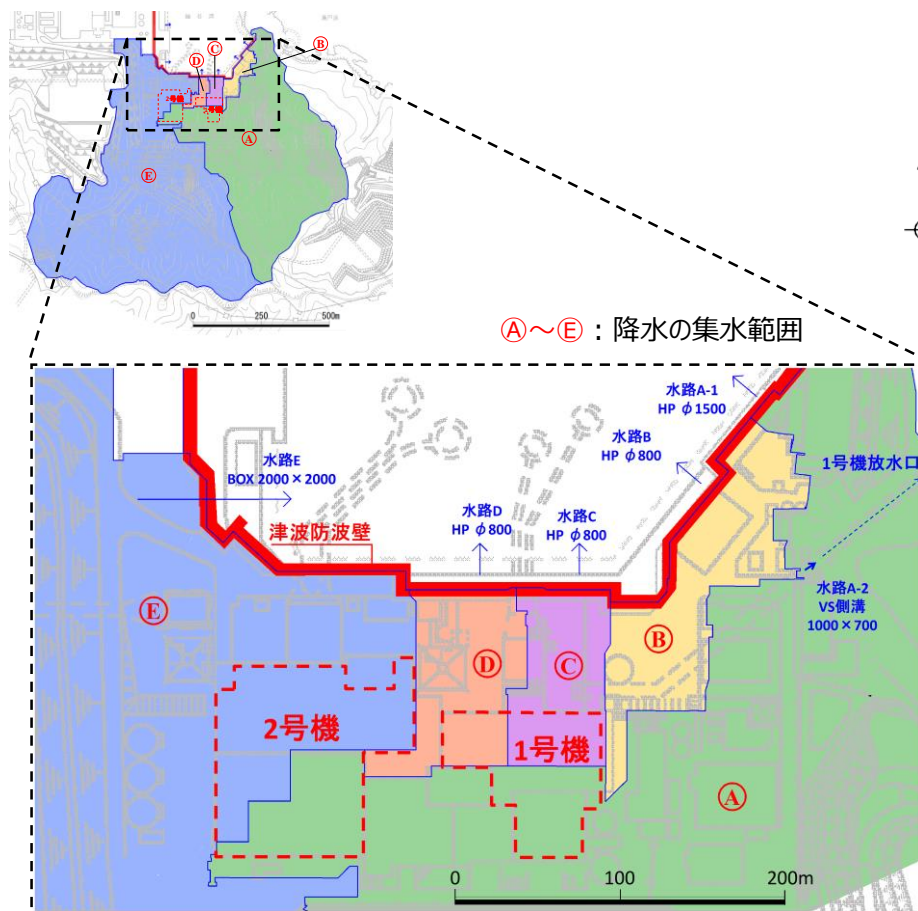
補足 2-3 表 原子炉建物にかかる揚圧力  
(設計値及び解析結果)

建物名称	揚圧力 (t/m <sup>2</sup> )	
	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、気象庁松江地方气象台（松江市）における既往最大1時間雨量の77.9mm/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 77.9mm/h)

水路	集水面積 (ha)	雨水流出量 Q (m <sup>3</sup> /s)	排水設備	排水量 Q' (m <sup>3</sup> /s)	安全率 (Q'/Q)
A-1	21.03	5.40	ヒューム管 φ 1500	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 φ 800	2.41	10.95
C	0.55	0.12	ヒューム管 φ 800	2.41	20.08
D	0.69	0.15	ヒューム管 φ 800	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（Case 2）を実施し、再現解析（Case 1）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

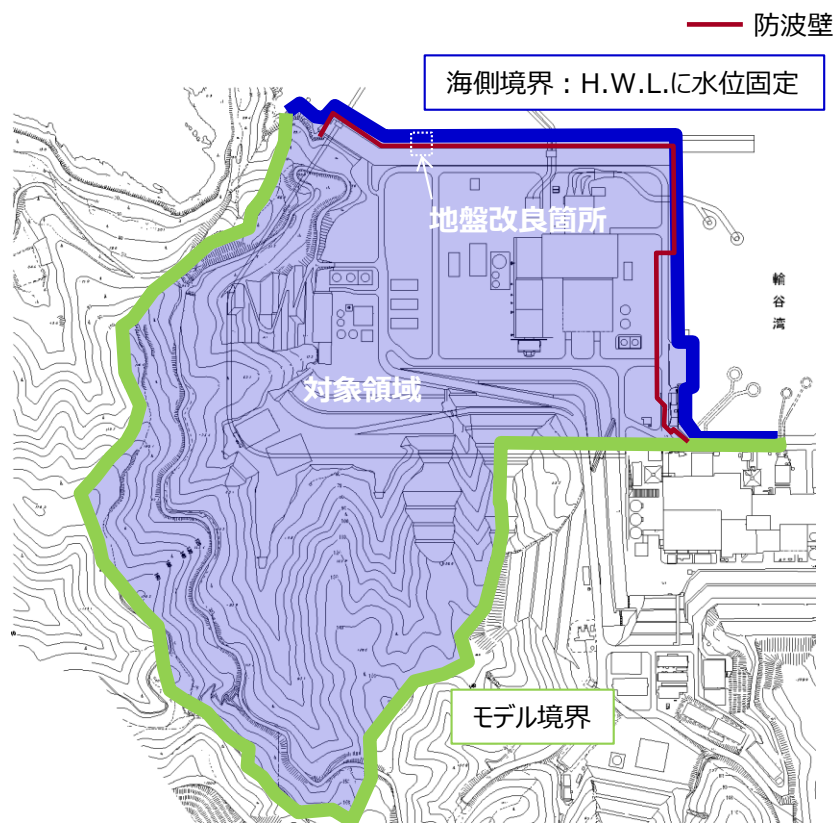
再現解析を実施した期間において、防波壁周辺の地盤改良工事が完了していない 3 号炉エリアを対象とし、敷地境界の分水嶺から防波壁までを解析領域とする。

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 <sub>H</sub> 級	$5 \times 10^{-5}$
C <sub>M</sub> 級	$6 \times 10^{-4}$
C <sub>L</sub> 級	$1 \times 10^{-3}$
D級	$2 \times 10^{-3}$
砂礫層	$4 \times 10^{-3}$
埋戻土 (掘削ズリ)	$2 \times 10^{-1}$
構造物, 改良地盤	$1 \times 10^{-5}$

c. 解析条件

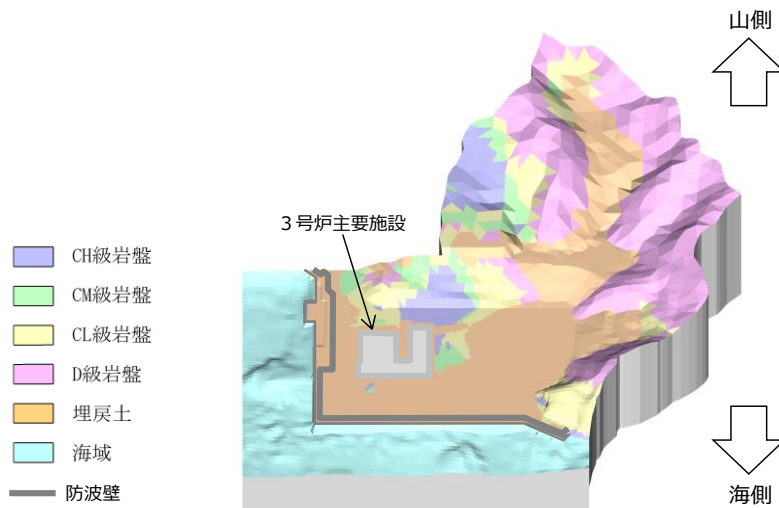
解析条件は、補足 4-2 表のとおりとする。

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。



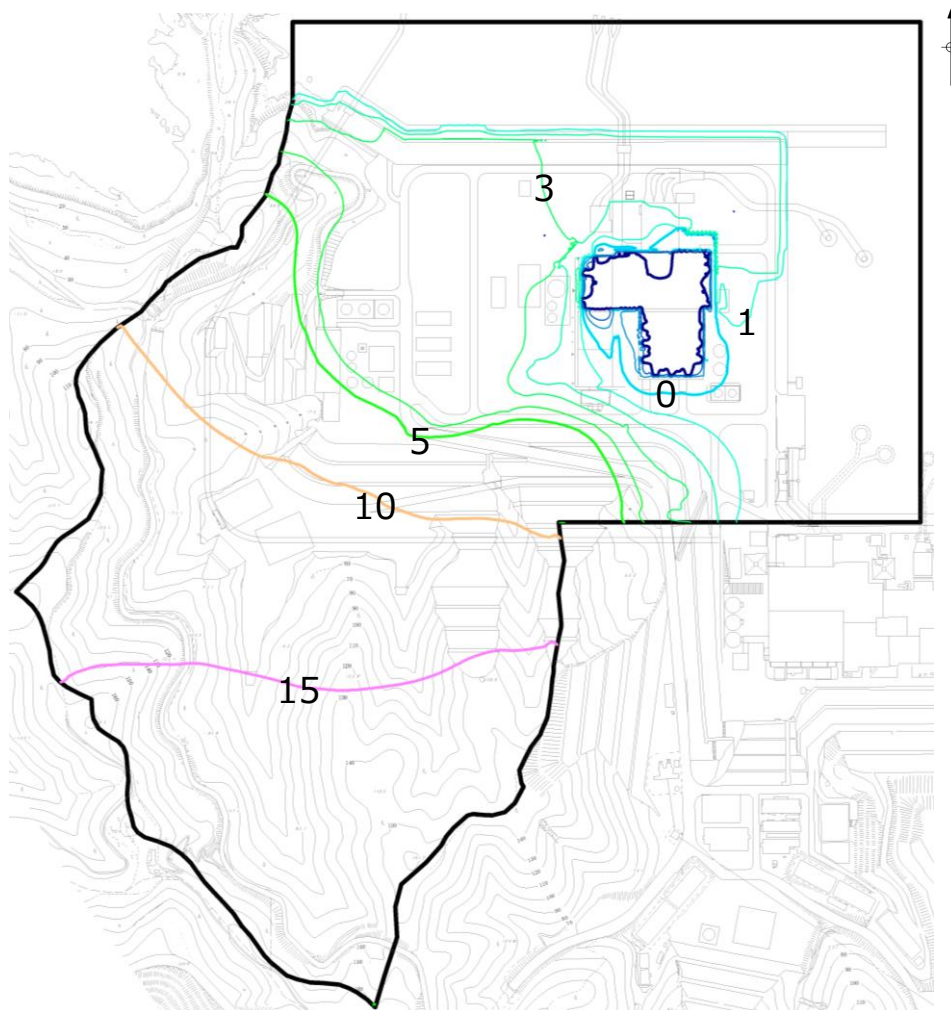
補足 4-2 図 解析モデルの概要

a. Case 1 (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。



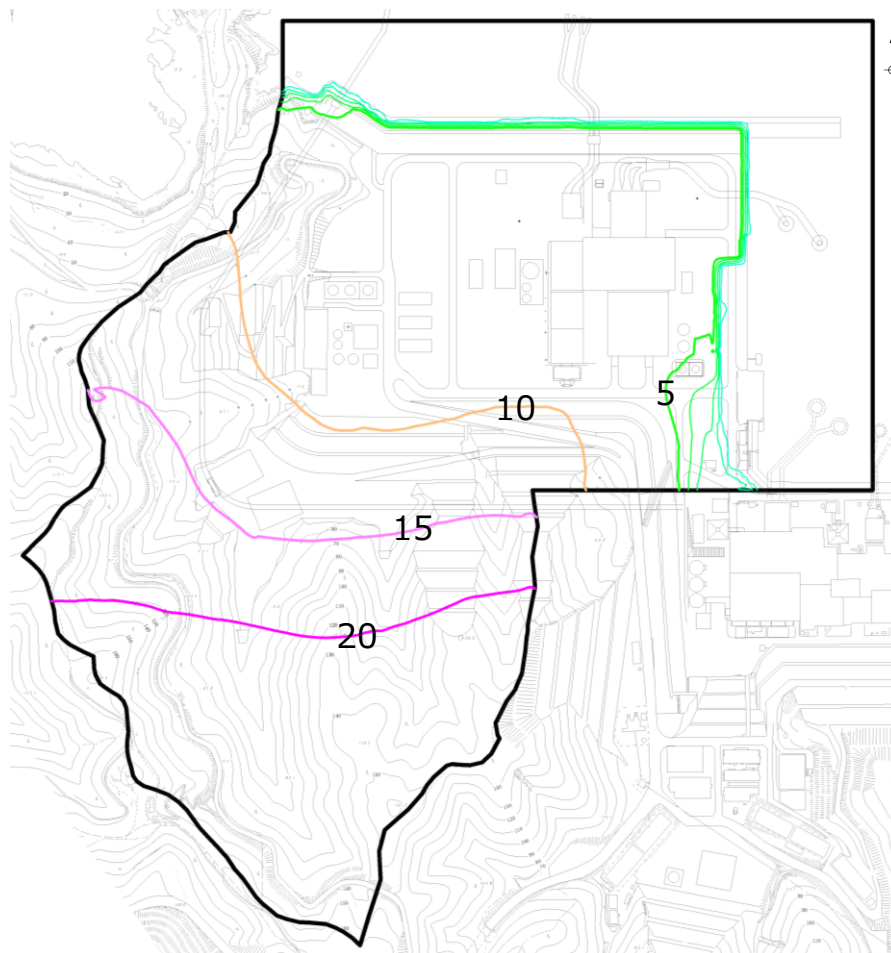
補足 4-3 図 三次元浸透流解析結果(定常状態・地盤改良完了前モデル)

b. Case 2（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+1 $\sigma$ ）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)

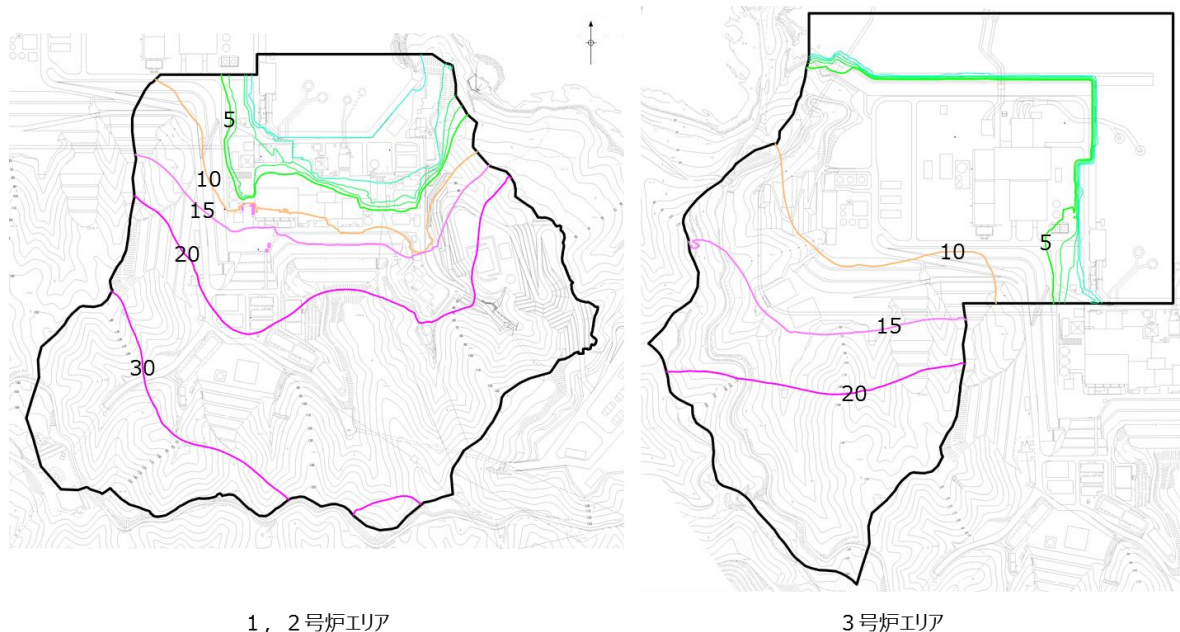
## 2. 地下水位低下設備（既設）が機能しない場合の地下水位分布

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 + 1 $\sigma$ ）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。



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）

施設等	耐震クラス 検討用地震動	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		既設置許可における地下水位の扱い （参考）		
		3条 38条	4条4項 39条2項	43条	常時	地震時	設計地下水位	設計への 反映事項
原子炉建物 （直接基礎）	S <sup>※3</sup>	○ （基礎地盤）	○ （周辺斜面）	○ （周辺斜面）	—	常時 すべり安定性への影響	設計地下水位	設計への 反映事項
タービン建物 （直接基礎）	B <sup>※4</sup> (Ss)	○ （基礎地盤）	○ （周辺斜面）	○ （周辺斜面）	—	地震時 地表面 <sup>※2</sup> 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	—
廃棄物処理建物 （直接基礎）	B <sup>※4</sup> (Ss)	○ （基礎地盤）	○ （周辺斜面）	○ （周辺斜面）	—	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	（参考） 建設時工認等の設計における地下水位の扱い
制御室建物 （直接基礎）	S <sup>※5</sup>	○ （基礎地盤）	○ （周辺斜面）	○ （周辺斜面）	—	常時 液状化影響（周辺地盤） <sup>※7</sup>	設計用揚圧力	設計への反映事項
排気筒 （直接基礎）	S <sup>※6</sup> C <sup>※4</sup> (Ss)	○ （基礎地盤）	○ （周辺斜面）	○ （周辺斜面）	—	地震時 揚圧力影響 <sup>※7</sup>	揚圧力0.8t/m <sup>2</sup> 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
							揚圧力2.0t/m <sup>2</sup> 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
							揚圧力2.0t/m <sup>2</sup> 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
							揚圧力0.0t/m <sup>2</sup> 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
							揚圧力0.0t/m <sup>2</sup> 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 原子炉棟のみ耐震クラス。それ以外については、耐震クラス設備等の間接支持構造物。  
 ※4 耐震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クラス。それ以外については、耐震クラス設備等の間接支持構造物。  
 ※6 排気筒（非常用が処理系用）のみ耐震クラス。  
 ※7 A条(B条)の表示は、A条の適合確認をもってB条の適合確認がか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、重大事故等対応施設）

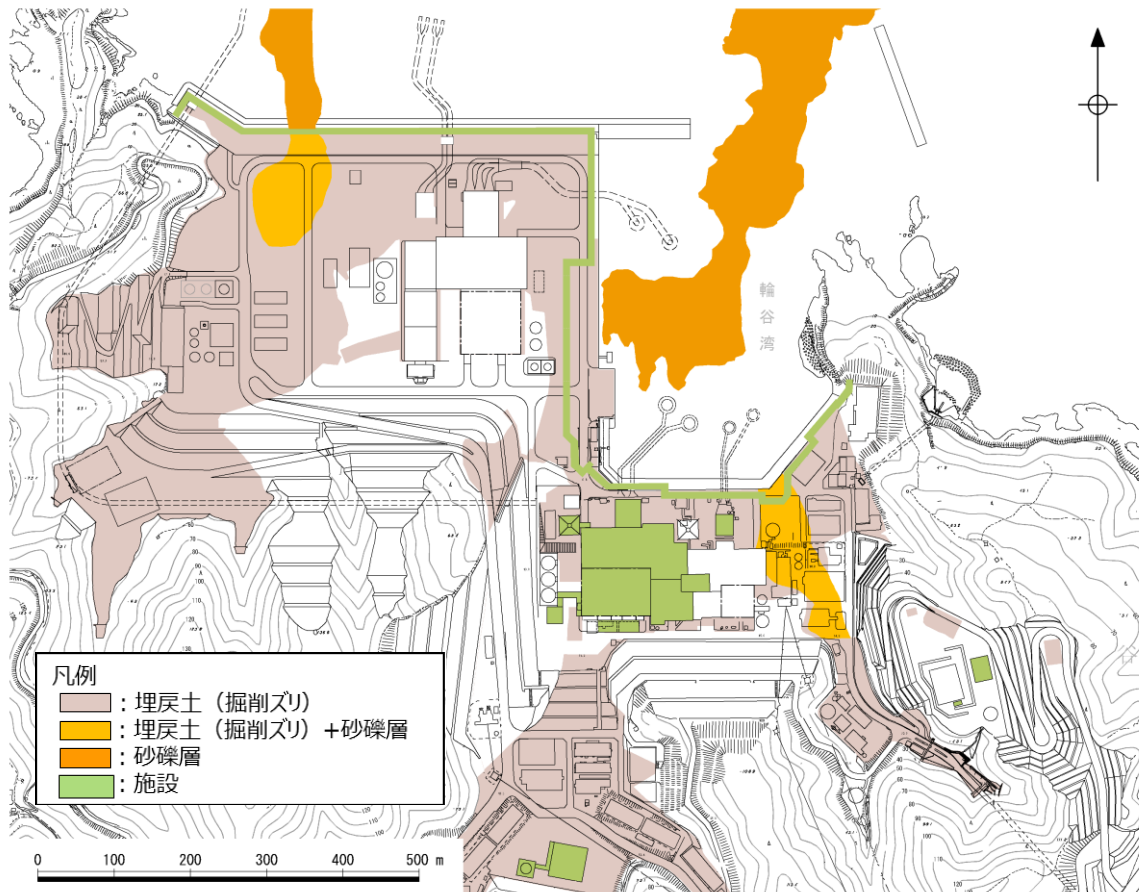
設備名称	基礎	耐震クラス 検討用 地震動	設置許可基準規則※4	適合性審査において地下水位低下設備（既設）の機能に期待しない場合の影響及び設置許可基準規則の該当条項		(参考) 建設時工認等の設計における 地下水位の扱い
				常時	地震時 液化化影響（周辺地盤）※4	
取水槽	直接基礎	※1 (Ss)	4条(3条2項), 39条(38条2項)	影響小	有効応力の減少に伴う周辺地盤の剛性低下により、土圧、加速度が変化し、耐震性に影響が生じる可能性がある。[4条(3条2項),39条(38条2項)]	設計地下水位 El+0.3m 耐震評価に用いる地震応答解析の解析条件として考慮
屋外配管タクト （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
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)
屋外配管タクト （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)
防波扉（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ペンフレイト格納槽	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)
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)
屋外配管タクト （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 重大事故等対応施設 ※4 A条(B条)の表示は、A条(B条)の適合性確認をもってB条の適合性確認が合ひ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

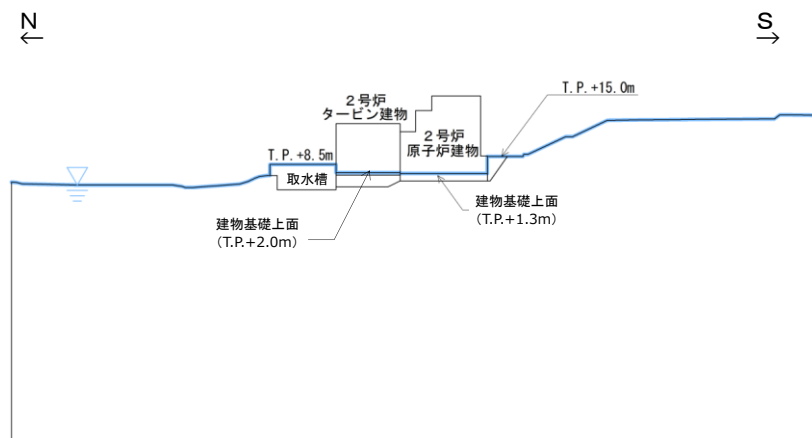
1. 地下水位の設定

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。

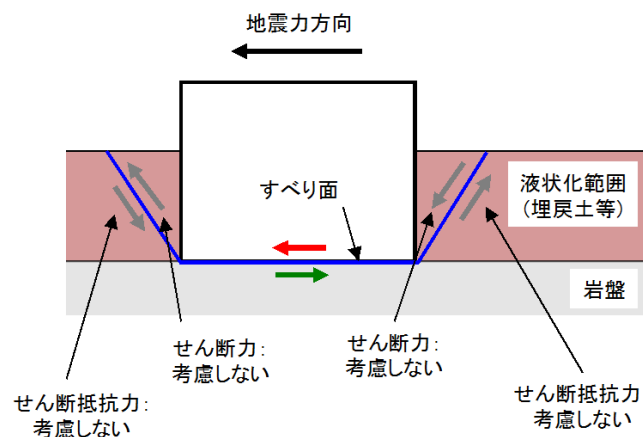
なお、その他の耐震重要施設及び重大事故等対処施設の基礎地盤の安定性評価における地下水位の設定についても同様の考え方で設定する。

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

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(S s 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 S s 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	<ul style="list-style-type: none"> <li>・原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器・配管系</li> <li>・使用済燃料を貯蔵するための施設</li> <li>・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</li> <li>・原子炉停止後、炉心から崩壊熱を除去するための施設等</li> </ul>	×
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	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> <li>・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</li> </ul>	×
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つて、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
	安全上必須なその他の構築物, 系統及び機器	(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
		(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	(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
		(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
	MS-2 (2) 異常状態への対応上特に重要な構築物, 系統及び機器	(2) 放射性物質放出の防止機能	該当しない
(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

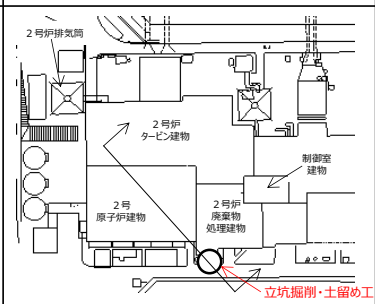
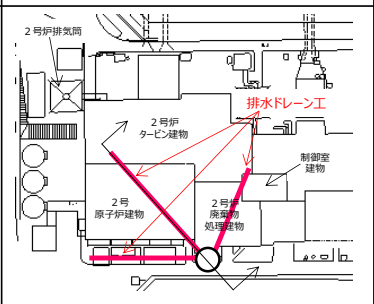
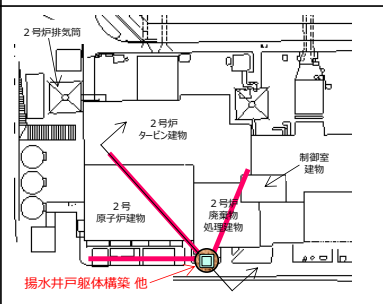
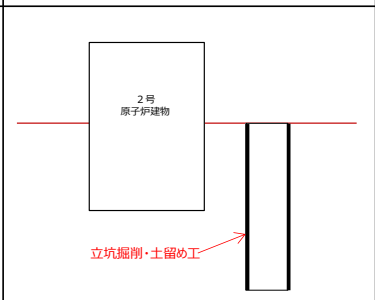
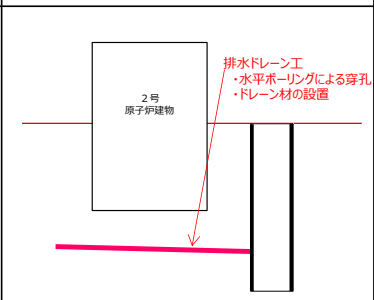
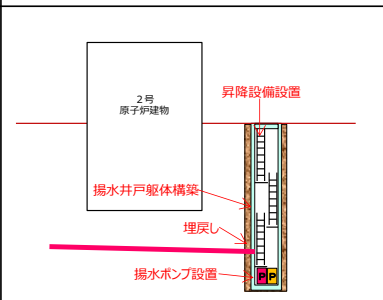
分類	定義	機能	地下水位低下設備の位置付け	
クラス 3	(1) 異常状態の起因事象となるものであって、P S - 1 及び P S - 2 以外の構築物、系統及び機器	(1) 原子炉冷却材保持機能 (P S - 1, P S - 2 以外のもの。)	該当しない	
		(2) 原子炉冷却材の循環機能	該当しない	
		(3) 放射性物質の貯蔵機能	該当しない	
		(4) 電源供給機能 (非常用を除く。)	該当しない	
		(5) プラント計測・制御機能 (安全保護機能を除く。)	該当しない	
		(6) プラント運転補助機能	該当しない	
	(2) 原子炉冷却材中放射性物質濃度を通常運転に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) 異常状態への対応に必要な構築物、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。

施工手順 (案)	①立坑掘削・土留め工	②排水ドレーン工	③揚水井戸躯体構築 他
配置図 (案)	<ul style="list-style-type: none"> <li>立坑掘削</li> <li>円形ライナープレートによる土留め設置</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>水平ボーリングによる穿孔</li> <li>ドレーン材の設置</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>揚水井戸躯体構築</li> <li>躯体周囲の埋戻し</li> <li>揚水ポンプ、付帯設備(配管, 昇降設備等)設置</li> </ul> 
構造イメージ	 <p>立坑掘削・土留め工</p>	 <p>排水ドレーン工 ・水平ボーリングによる穿孔 ・ドレーン材の設置</p>	 <p>昇降設備設置 揚水井戸躯体構築 埋戻し 揚水ポンプ設置</p>

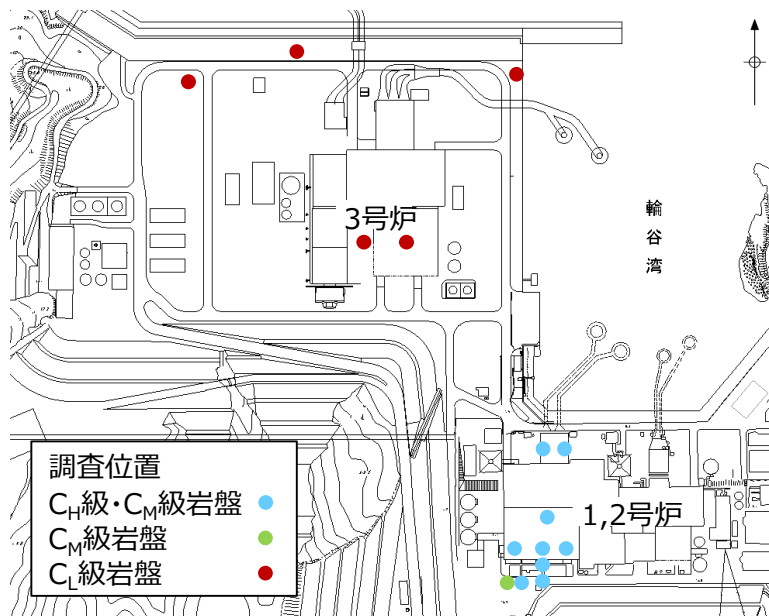
補足 7-1 図 新設揚水井戸・ドレーンの構造・配置及び施工例

透水係数の妥当性確認

1. C<sub>H</sub>級, C<sub>M</sub>級, C<sub>L</sub>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。

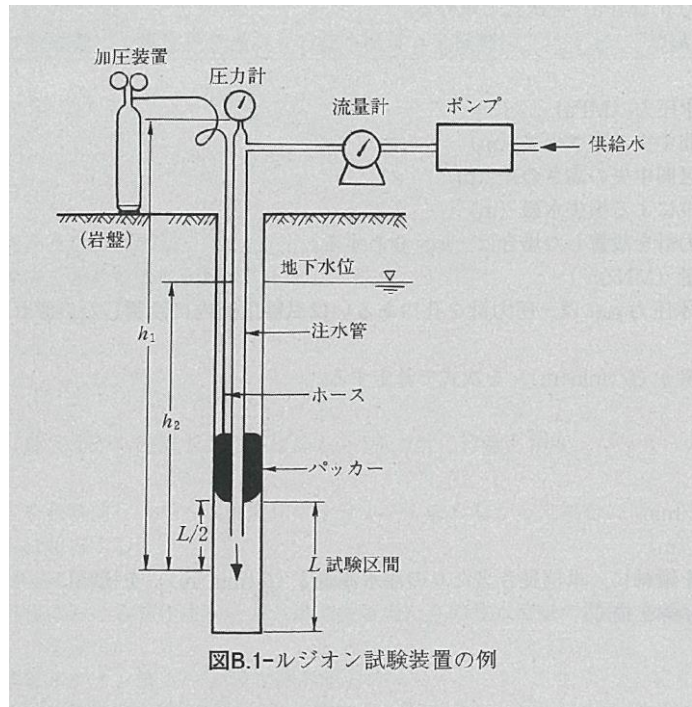
今回、3次元浸透流解析を行うに当たり、解析の精度向上を目的として、補足8-1図のとおり敷地の岩級に合わせて透水係数を設定する。C<sub>H</sub>級, C<sub>M</sub>級岩盤については、建設時工認の現場透水試験より透水係数を設定した。なお、C<sub>L</sub>級岩盤については2号炉周辺岩盤に分布していないことから、3号敷地造成前の尾根部における現場透水試験より透水係数を設定した。



	透水係数 (cm/s)	試験方法
C <sub>H</sub> 級	$4.5 \times 10^{-5}$	ルジオン試験
C <sub>M</sub> 級	$5.6 \times 10^{-4}$	
C <sub>L</sub> 級	$1.0 \times 10^{-3}$	

補足 8-1 図 現場透水試験結果 (C<sub>H</sub>級, C<sub>M</sub>級及びC<sub>L</sub>級岩盤)

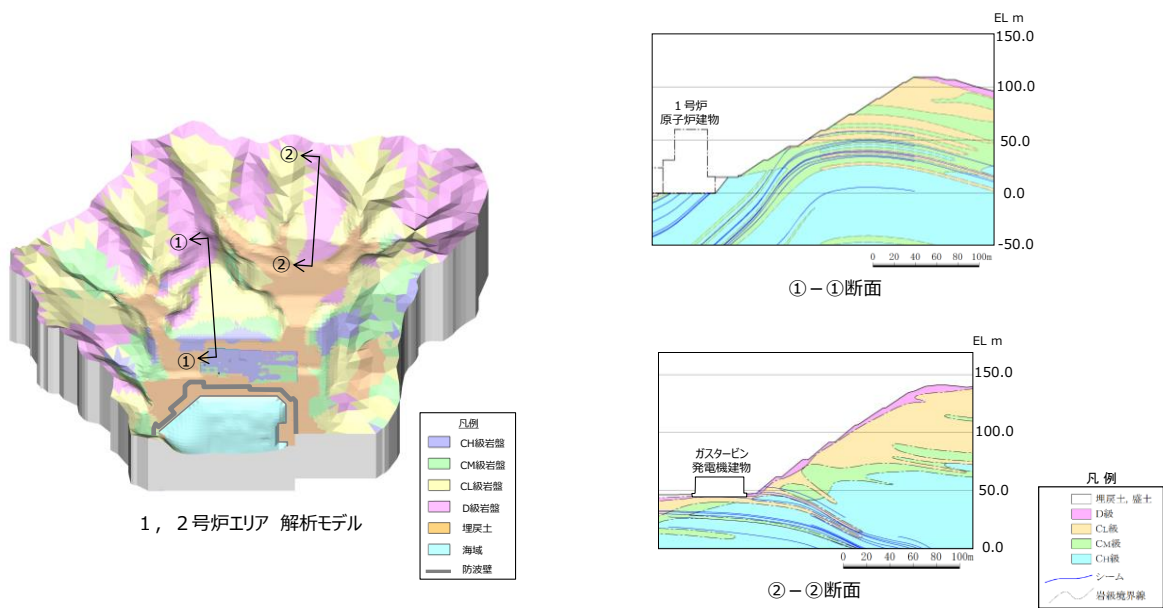




補足 8-2 図 現場透水試験（ルジオン試験）の概要図（地盤調査の方法と解説（地盤工学会，2013））

## 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。

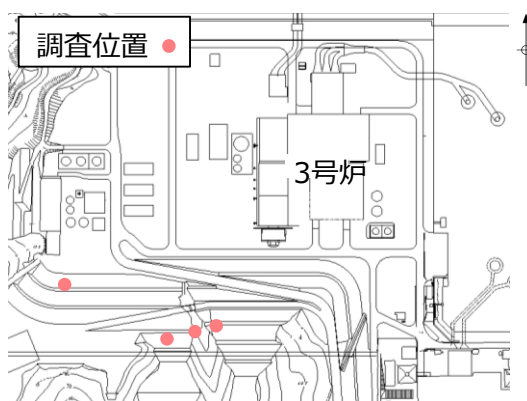


補足 8-3 図 D級岩盤の分布状況

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  $2.8 \times 10^{-4} \text{cm/s}$  ( $\approx 3 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ )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 1 2 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	$2.8 \times 10^{-4}$

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	$3.0 \times 10^{-6}$	0.18	$6.85 \times 10^{-3}$
0.01	$1.05 \times 10^{-5}$	0.20	$8.90 \times 10^{-3}$
0.02	$4.00 \times 10^{-5}$	0.25	$1.40 \times 10^{-2}$
0.03	$8.50 \times 10^{-5}$	0.30	$2.20 \times 10^{-2}$
0.04	$1.75 \times 10^{-4}$	0.35	$3.20 \times 10^{-2}$
0.05	$2.80 \times 10^{-4}$	0.40	$4.50 \times 10^{-2}$
0.06	$4.60 \times 10^{-4}$	0.45	$5.80 \times 10^{-2}$
0.07	$6.50 \times 10^{-4}$	0.50	$7.50 \times 10^{-2}$
0.08	$9.00 \times 10^{-4}$	0.60	$1.10 \times 10^{-1}$
0.09	$1.40 \times 10^{-3}$	0.70	$1.60 \times 10^{-1}$
0.10	$1.75 \times 10^{-3}$	0.80	$2.15 \times 10^{-1}$
0.12	$2.60 \times 10^{-3}$	0.90	$2.80 \times 10^{-1}$
0.14	$3.80 \times 10^{-3}$	1.00	$3.60 \times 10^{-1}$
0.16	$5.10 \times 10^{-3}$	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	 <p>割れ目の発達により岩級が低下 (No.19E3 G.L.-0.96~-1.80m)</p>	 <p>風化の進行により岩級が低下 (No.B-3(2006) G.L.-0.30~-2.15m)</p>

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  $1.75 \times 10^{-3} \text{cm/s}$  ( $\div 2 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ )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。

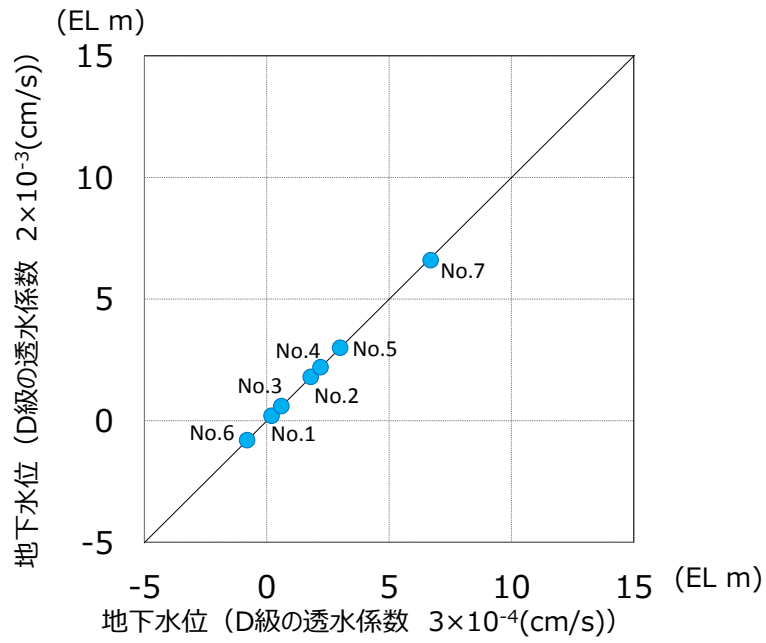
しかしながら、揚水量が低減する傾向が認められることから、地下水位が高く算定されると判断し、割れ目が発達したD級岩盤の影響を考慮した透水係数  $2 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ を採用する。

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	$1.75 \times 10^{-3}$

$D_{20}$ (mm)	$k$ (cm/s)	$D_{20}$ (mm)	$k$ (cm/s)
0.005	$3.0 \times 10^{-6}$	0.18	$6.85 \times 10^{-3}$
0.01	$1.05 \times 10^{-5}$	0.20	$8.90 \times 10^{-3}$
0.02	$4.00 \times 10^{-5}$	0.25	$1.40 \times 10^{-2}$
0.03	$8.50 \times 10^{-5}$	0.30	$2.20 \times 10^{-2}$
0.04	$1.75 \times 10^{-4}$	0.35	$3.20 \times 10^{-2}$
0.05	$2.80 \times 10^{-4}$	0.40	$4.50 \times 10^{-2}$
0.06	$4.60 \times 10^{-4}$	0.45	$5.80 \times 10^{-2}$
0.07	$6.50 \times 10^{-4}$	0.50	$7.50 \times 10^{-2}$
0.08	$9.00 \times 10^{-4}$	0.60	$1.10 \times 10^{-1}$
0.09	$1.40 \times 10^{-3}$	0.70	$1.60 \times 10^{-1}$
0.10	$1.75 \times 10^{-3}$	0.80	$2.15 \times 10^{-1}$
0.12	$2.60 \times 10^{-3}$	0.90	$2.80 \times 10^{-1}$
0.14	$3.80 \times 10^{-3}$	1.00	$3.60 \times 10^{-1}$
0.16	$5.10 \times 10^{-3}$	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 <sup>3</sup> /日)
D級岩盤 $3 \times 10^{-4} \text{ (cm/s)}$	858
D級岩盤 $2 \times 10^{-3} \text{ (cm/s)}$	856

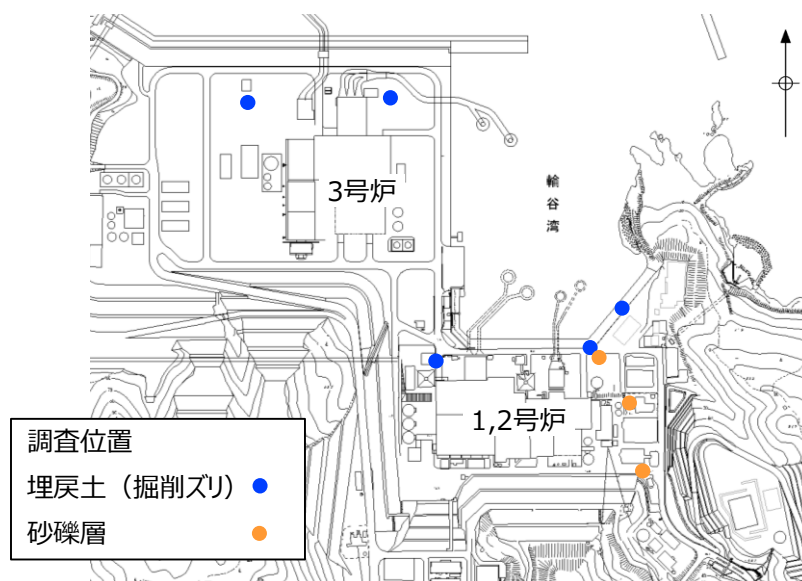
補足 8-7 図 D級岩盤の透水係数の妥当性確認 (再現解析)

### 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。

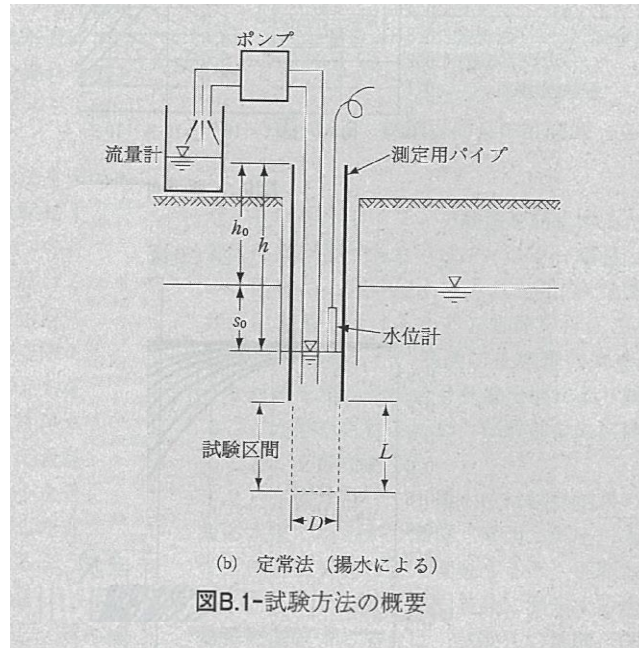
今回、埋戻土（掘削ズリ）、砂礫層については、解析の精度向上を目的として、補足 8-8 図のとおり地盤工学会基準の現場透水試験（回復法）を実施し、直接的に透水係数を求めて設定した。

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)	$1.7 \times 10^{-1}$	回復法
砂礫層	$3.6 \times 10^{-3}$	

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

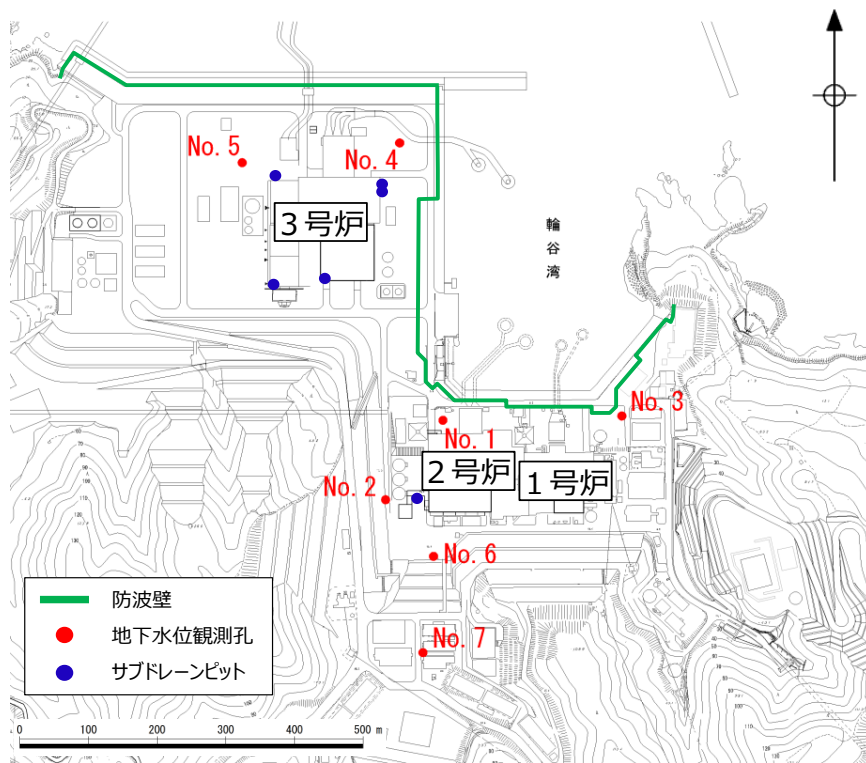
既設のサブドレーンピット近傍の観測孔（No. 2, No. 6）と比較して、降雨等による水位上昇後、緩やかに低下する傾向がある。

## f. No. 6 孔

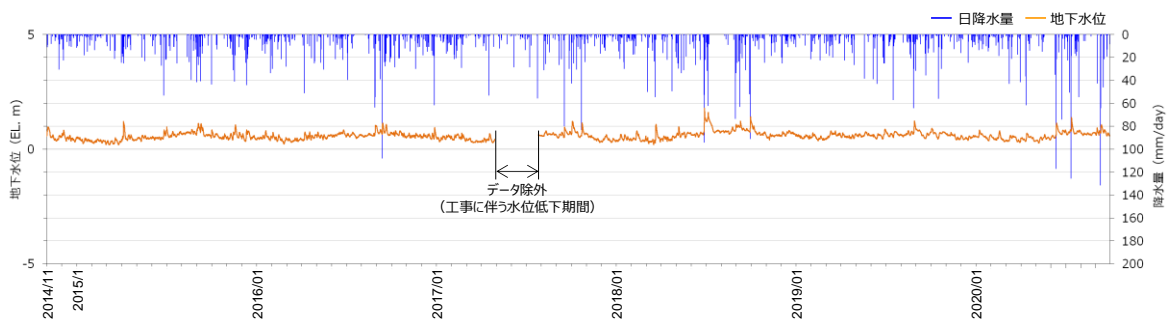
観測孔近傍に設置されている地下水位低下設備（既設）の機能により、他の観測孔と比較して降雨等に伴う地下水位上昇後の低下が早い傾向がある。また、一部の降雨時を除くと、EL. -1～0m の間を推移している。

## g. No. 7 孔

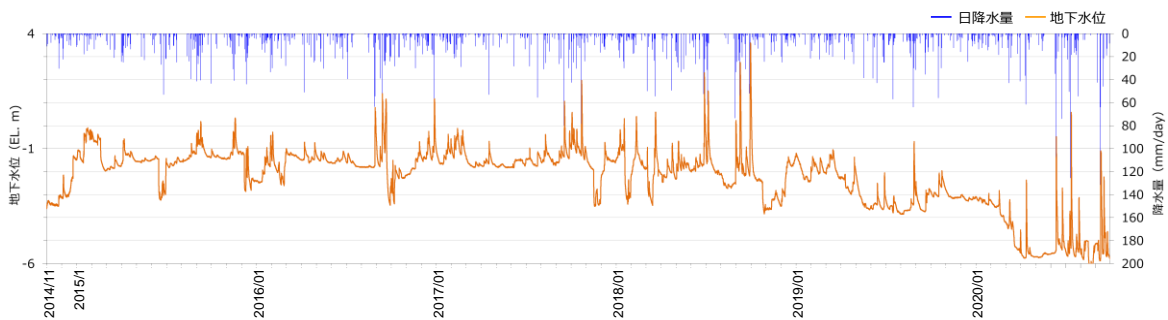
既設のサブドレーンピット近傍の観測孔（No. 2, No. 6）と比較して、降雨等による水位上昇後、緩やかに低下する傾向がある。



補足 9-1 図 観測孔位置

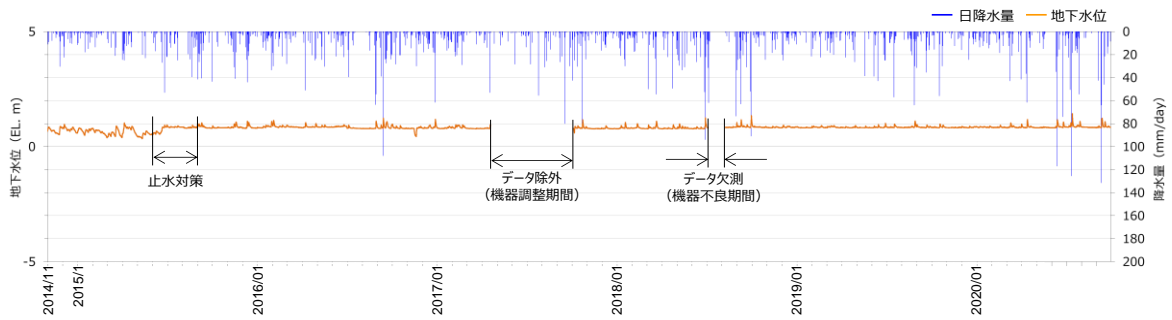


補足 9-2(1) 図 地下水位観測記録 (No. 1 孔)

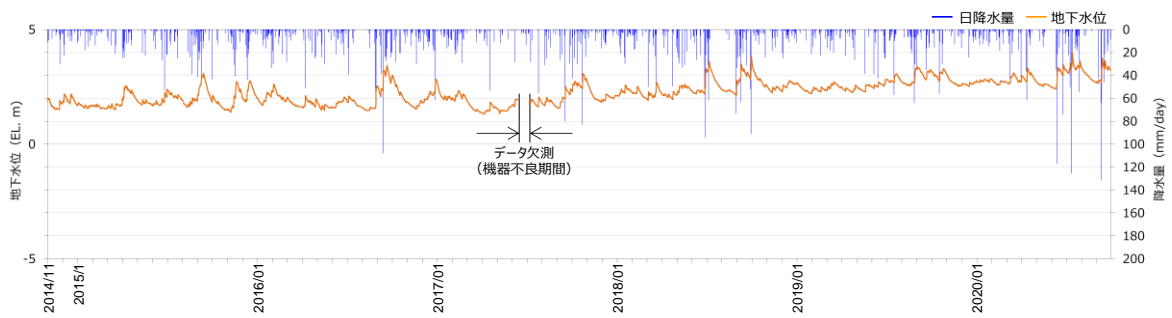


補足 9-2(2) 図 地下水位観測記録 (No. 2 孔)

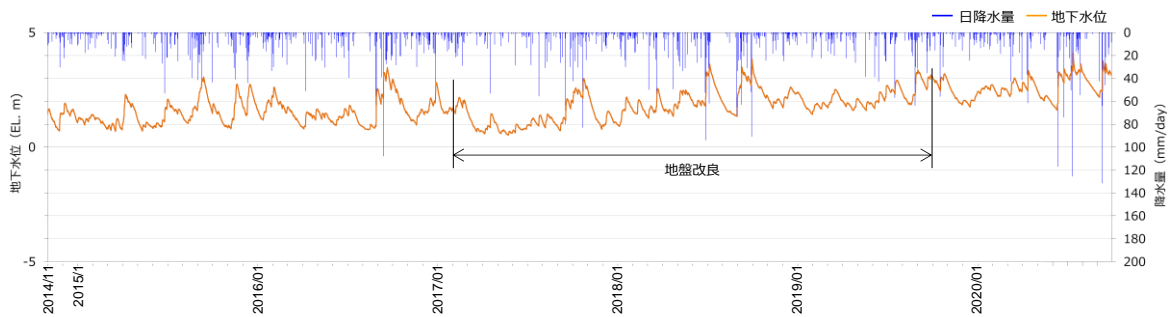




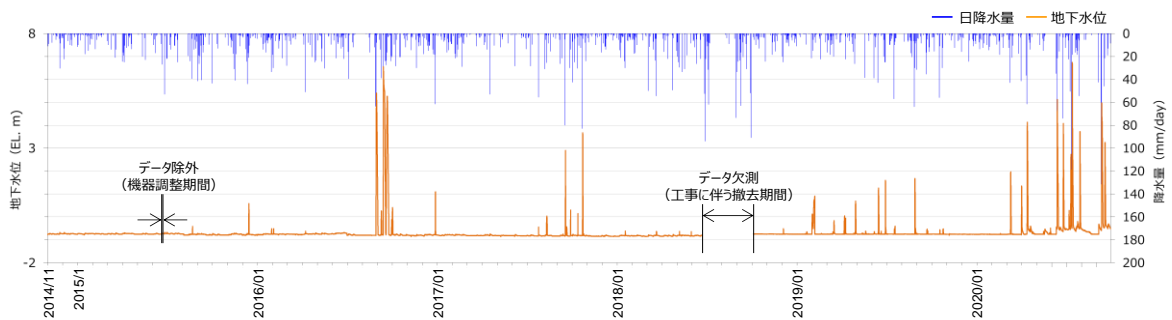
補足 9-2(3)図 地下水位観測記録 (No. 3 孔)



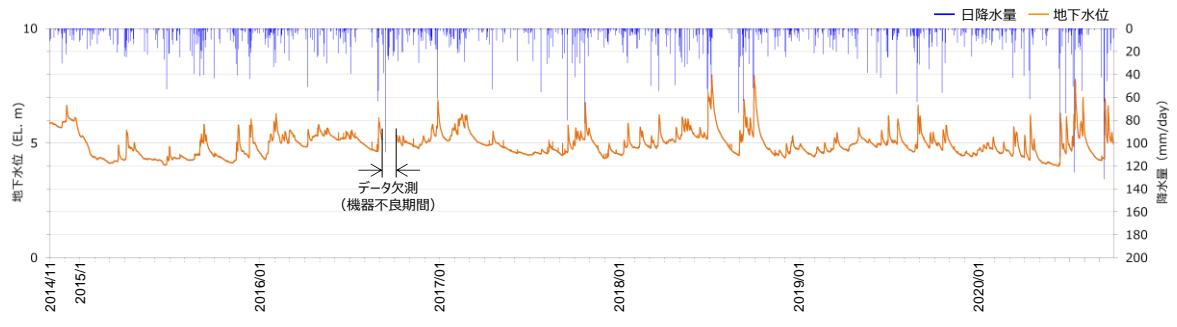
補足 9-2(4)図 地下水位観測記録 (No. 4 孔)



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)

## 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。

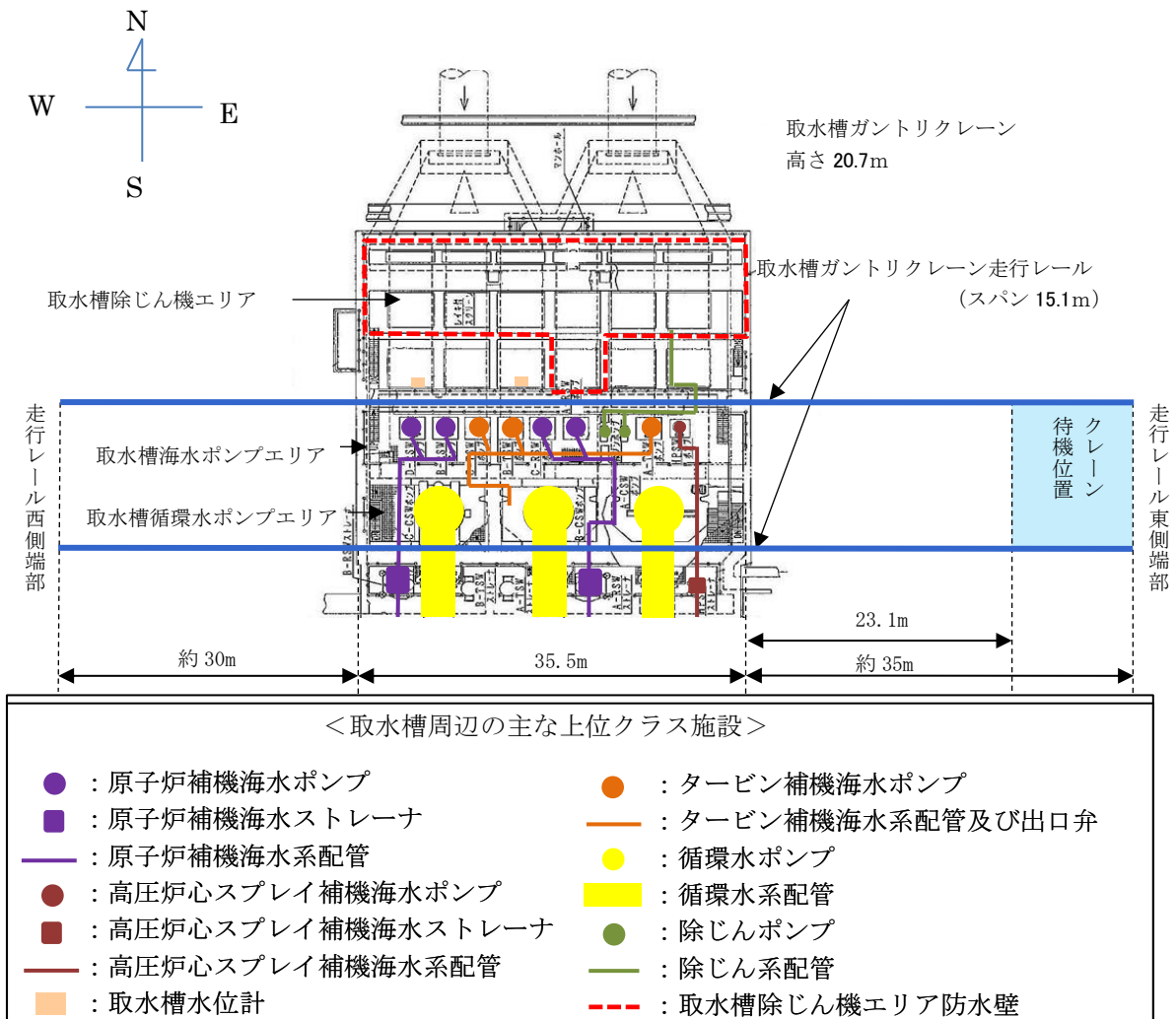
## 2. 単軸粘性ダンパの取水槽ガントリクレーンへの設置

### 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 $S_s$ による地震力に対して取水槽ガントリクレーンが損傷、転倒及び落下することで、上位クラス施設へ波及的影響を及ぼさないことが要求される。



第2-1図 取水槽ガントリクレーンの設置位置及び  
取水槽周辺の上位クラス施設概要

## 2.1.2 構造の概要

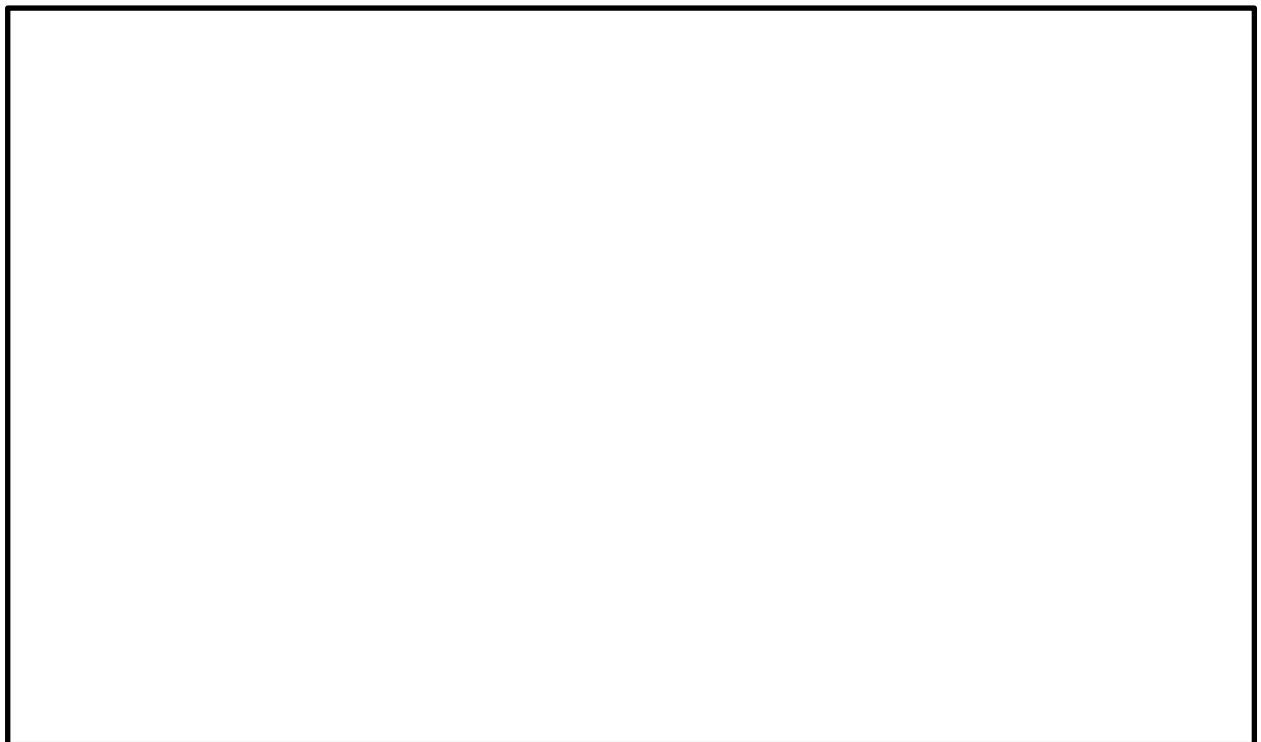
### (1) 取水槽ガントリクレーンの構造概要

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

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

3号炉及び柏崎6／7号炉等の排気筒で実績がある。

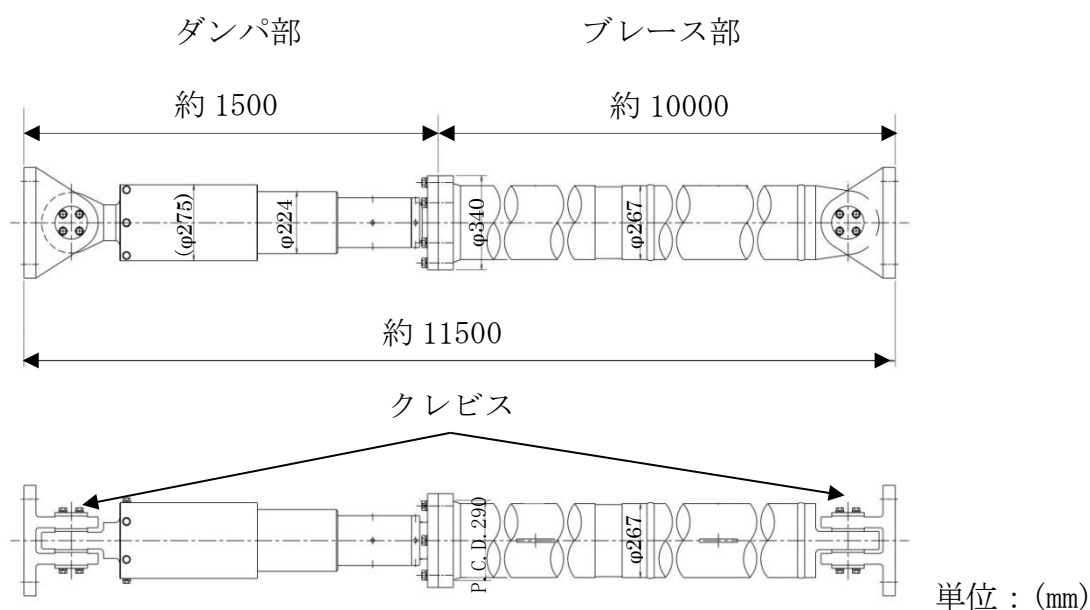
単軸粘性ダンパ取付部の構造を第2-3図に示す。ダンパ本体の長さは標準設計の約1.5mとし、これに約10mのブレースを接続している。単軸粘性ダンパとガーダの接続部、ブレースと脚の接続部にはクレビスと呼ぶ回転部を設けている。このクレビスは単軸粘性ダンパの伸縮方向と直交する一方向にはピンを軸として自由に回転可能となっている。また、ピンの軸受部は球面軸受となっており、クレビスの回転方向以外の方向にも約3度の許容回転角度を有することで、単軸粘性ダンパに伸縮方向以外の荷重が加わらない構造としている。単軸粘性ダンパ及び取付部材の質量は適切に地震応答解析モデルに反映する。



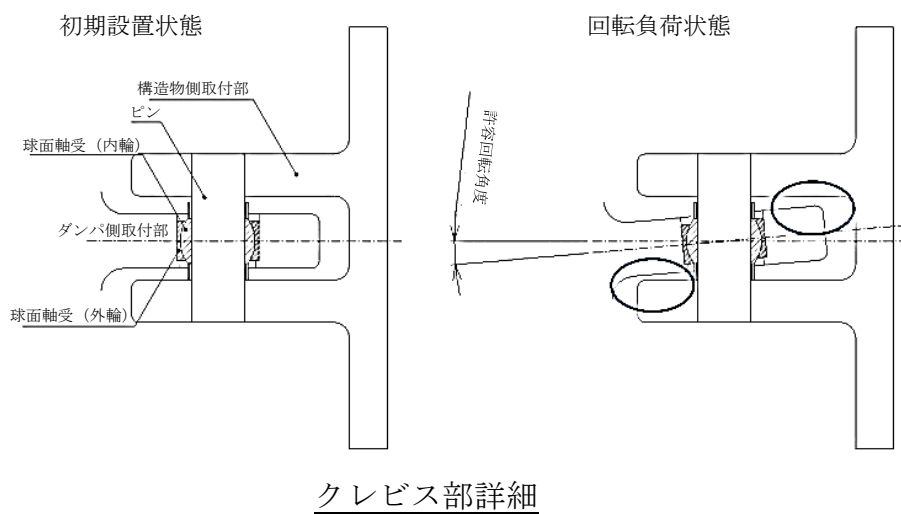
第2-2図 取水槽ガントリクレーンの構造

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。





### 単軸粘性ダンパ及びブレーズの構造



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

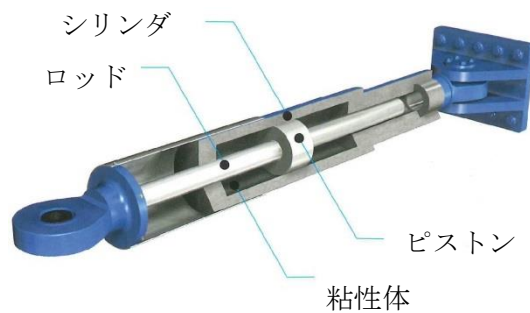
に形成されるオリフィス部を粘性体が流れ、その抵抗力により減衰性能を発揮するものであり、自重等の静的荷重は支持しない。

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

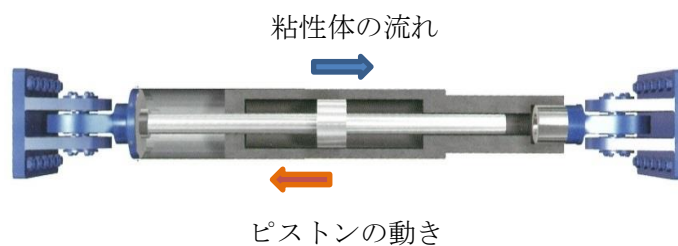
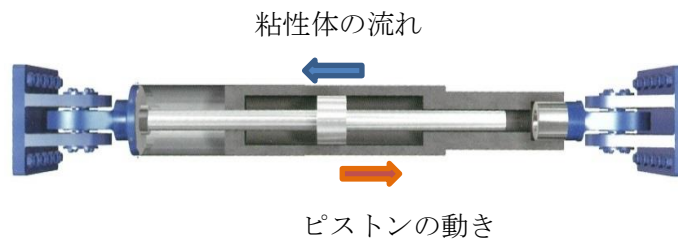
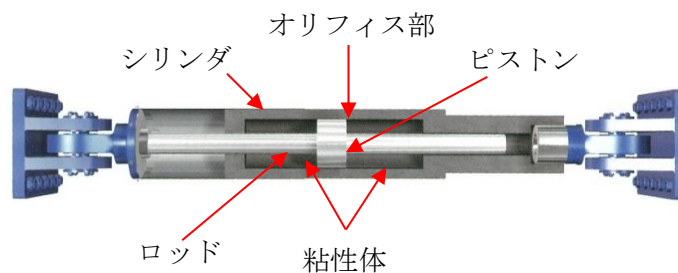


単軸粘性ダンパの外観（橋梁への設置例）



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

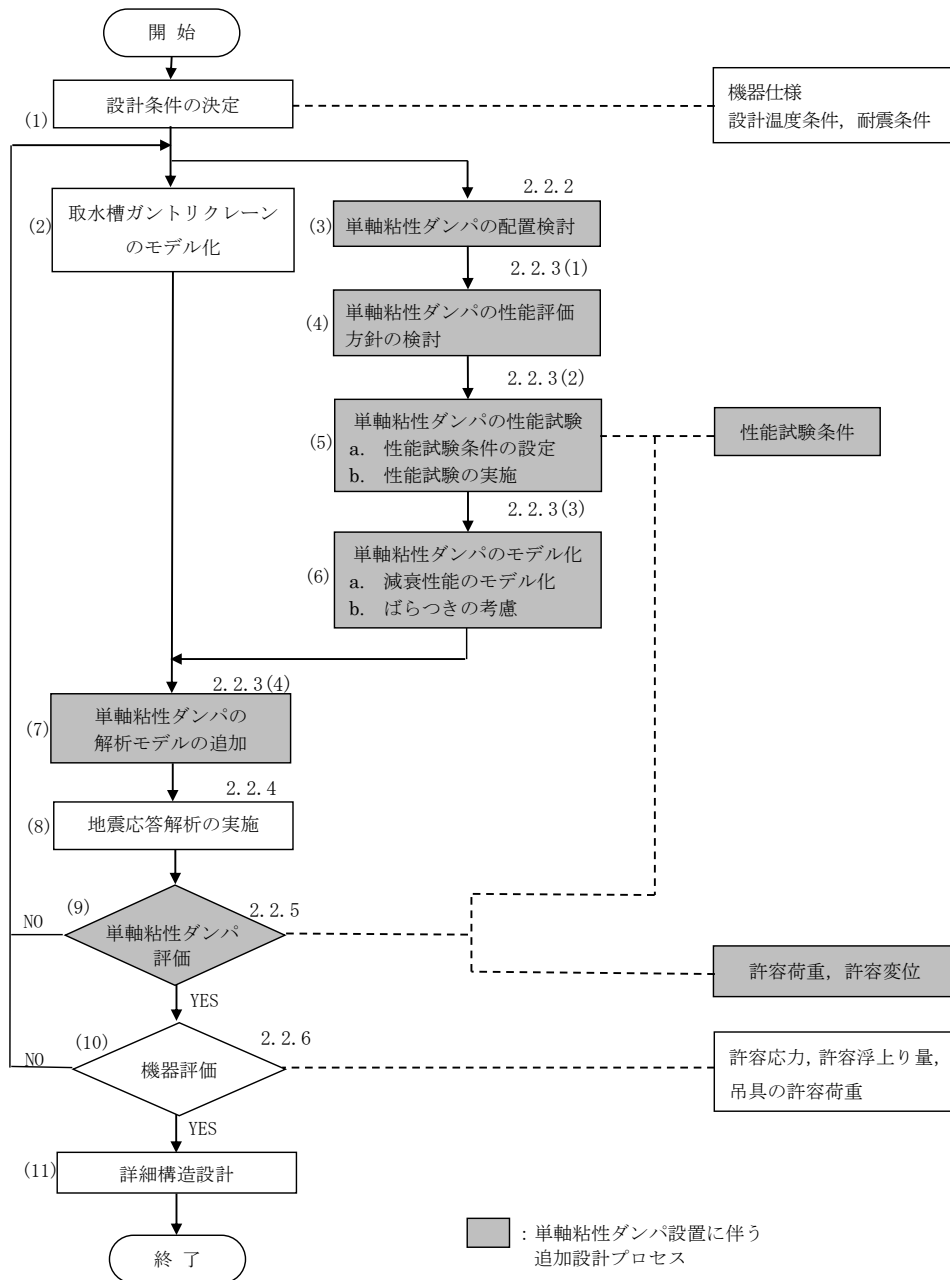


第2-5図 単軸粘性ダンパの動作原理

### 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。

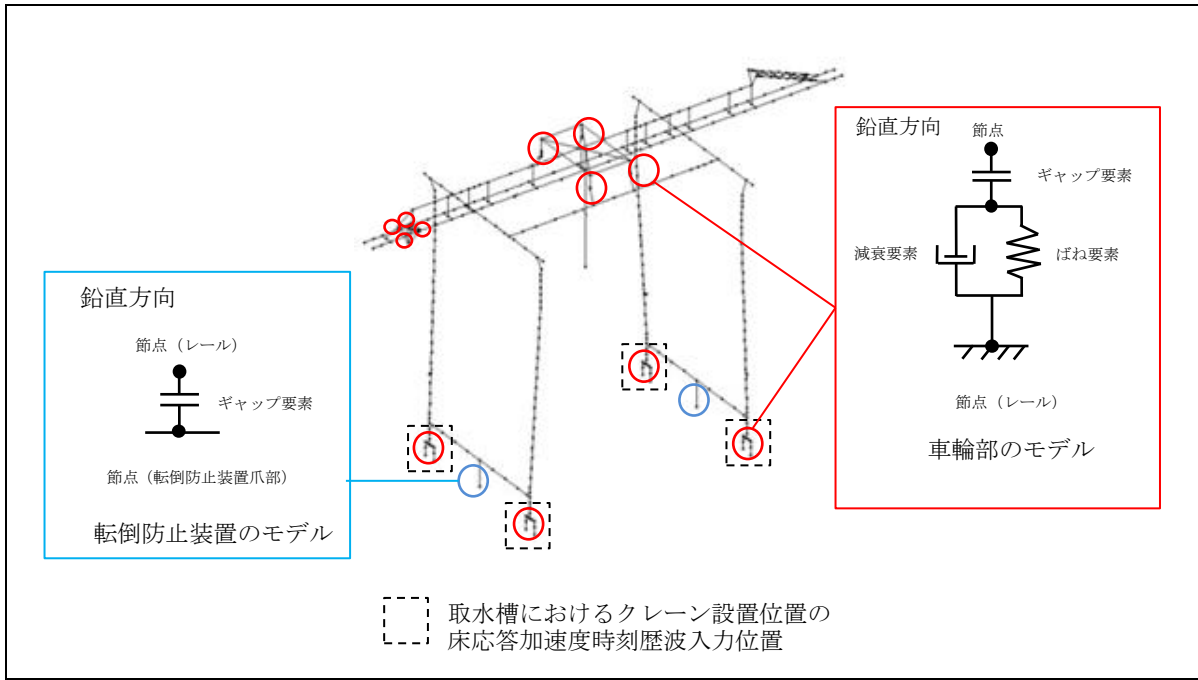


第2-6図 単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの耐震設計フロー

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「J E A G 4 6 0 1 等」という。）を適用する。

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

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

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

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

## 2.2 耐震評価方法

### 2.2.1 評価方針

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

まず、取水槽ガントリクレーンの構造を考慮して、地震荷重の低減に効果的な単軸粘性ダンパの配置を検討する。次に、単軸粘性ダンパの減衰性能への影響の検討を要する項目を抽出し、性能試験及びモデル化における対応方針を検討する。単軸粘性ダンパのモデル化を行うために、実機使用条件を踏まえた性能試験条件により、実機に設置する単軸粘性ダンパを用いた性能試験を実施する。性能試験の結果に基づき減衰性能を設定し、単軸粘性ダンパを Maxwell モデルによりモデル化する。この Maxwell モデルを取水槽ガントリクレーンの地震応答解析モデルに追加し、地震応答解析を行う。単軸粘性ダンパの評価として、地震応答解析により得られた応答値が性能試験条件の範囲内であること及び単軸粘性ダンパの許容限界が満たされていることを確認する。

### 2.2.2 単軸粘性ダンパの配置検討

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

### 2.2.3 性能試験及び解析モデル

#### (1) 単軸粘性ダンパの性能評価方針の検討

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

第2-4表 減衰性能への影響の検討結果（単軸粘性ダンパ）

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

(2) 単軸粘性ダンパの性能試験

a. 性能試験条件の設定

単軸粘性ダンパの実機使用条件を踏まえ、性能試験条件を設定する。

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

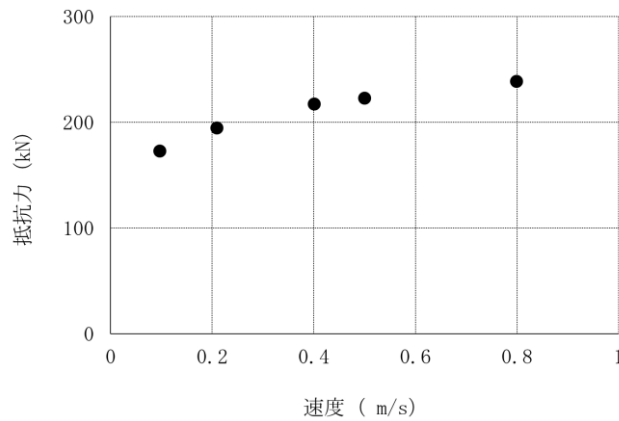
b. 性能試験の実施

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



第2-5表 単軸粘性ダンパの性能試験条件

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



第2-8図 性能試験結果

(3) 単軸粘性ダンパのモデル化

a. 減衰性能のモデル化

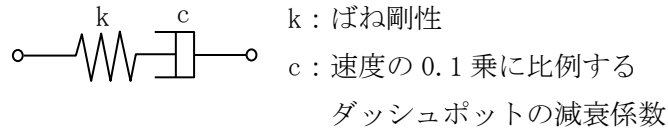
性能試験の結果に基づき、単軸粘性ダンパの減衰性能をモデル化する。

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

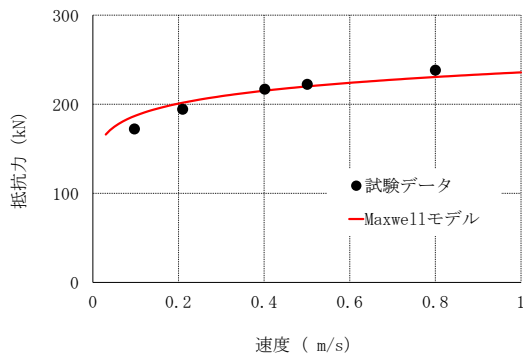
b. ばらつきの考慮

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

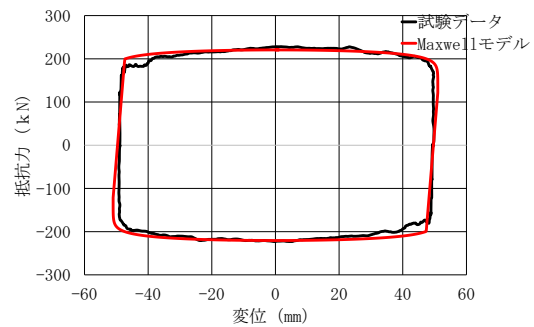
る理由は、単軸粘性ダンパの取付部材の設計においては減衰性能が高く抵抗力が大きい場合の荷重を適用するためである。地震応答解析モデルにおける減衰性能の設定を第2-11図に示す。



第2-9図 単軸粘性ダンパのMaxwellモデル

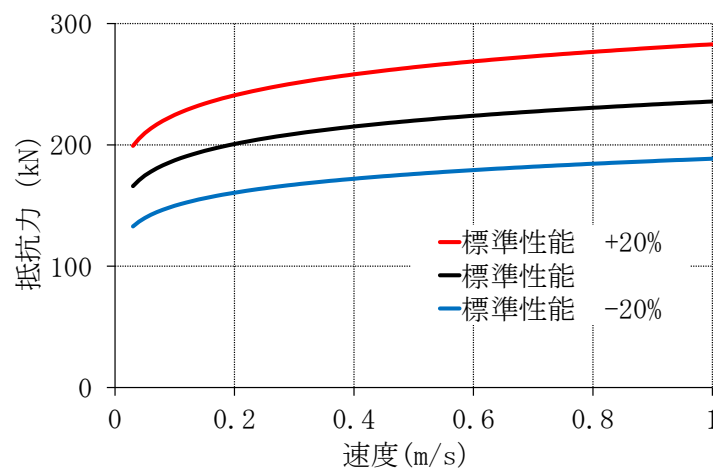


速度と抵抗力の関係



速度0.5m/sにおける  
正弦波1周期分の履歴曲線

第2-10図 Maxwellモデルによる計算値と性能試験結果の比較



第2-11図 地震応答解析モデルにおける段階的な減衰性能の設定

#### (4) 単軸粘性ダンパの解析モデルの追加

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

#### 2.2.4 地震応答解析手法

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

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

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

#### 2.2.5 単軸粘性ダンパ評価

単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの地震応答解析によって得られた応答値が、単軸粘性ダンパの減衰性能を取得した性能試験の試験条件の範囲内であることを確認する。

また、単軸粘性ダンパが許容限界を満足し、地震時にその機能を維持する設計とするため、単軸粘性ダンパは許容荷重及び許容変位を満たすように設計する。

## 2.2.6 機器評価

取水槽ガントリクレーンは、地震に伴う損傷、落下によって上位クラス施設へ波及的影響を及ぼさないことが要求されるため、機器評価における評価方法及び許容限界は第2-6表のとおりとする。許容限界は、J E A G 4 6 0 1等に基づき設定することを基本とする。

第2-6表 機器評価における評価方法及び許容限界

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

### 2.3 耐震評価結果

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

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

第2-7表 単軸粘性ダンパの応答値と解析上の前提条件の比較

	発生値	解析条件
最大速度	0.47 (m/s)	0.8 (m/s)

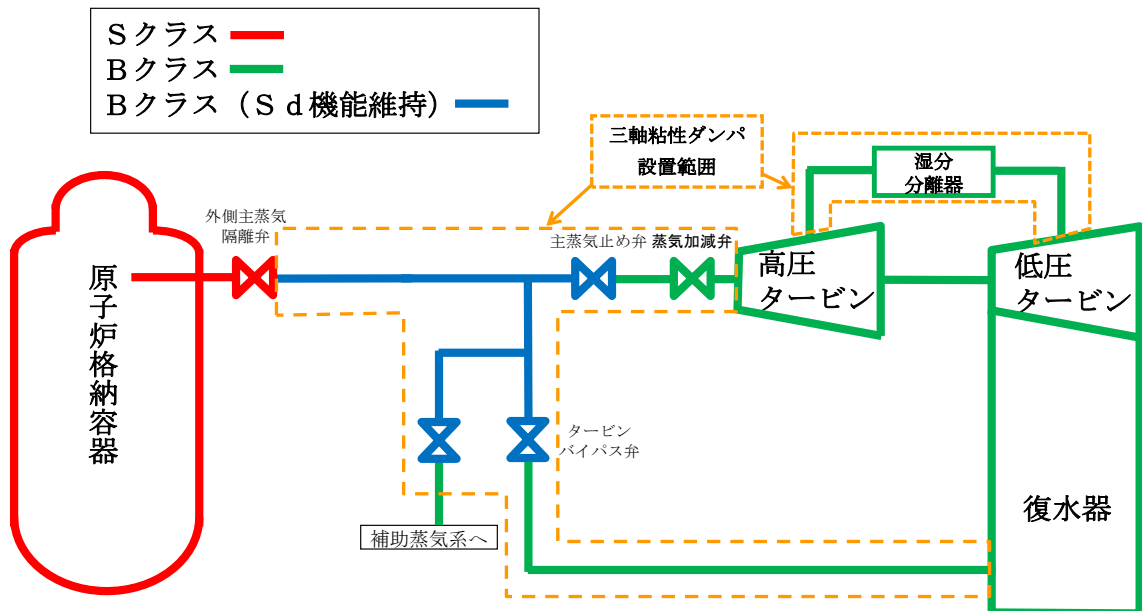
### 3. 三軸粘性ダンパの配管系への設置

#### 3.1 基本方針

##### 3.1.1 要求事項

三軸粘性ダンパは外側主蒸気隔離弁から低圧タービン、復水器までの主蒸気系配管に設置する。三軸粘性ダンパの設置範囲を第3-1図に示す。当該配管の耐震重要度分類はBクラスである。また、外側主蒸気隔離弁から主蒸気止め弁までの範囲はS d機能維持設計とする。

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



第3-1図 三軸粘性ダンパの設置範囲及び耐震クラス

##### 3.1.2 構造の概要

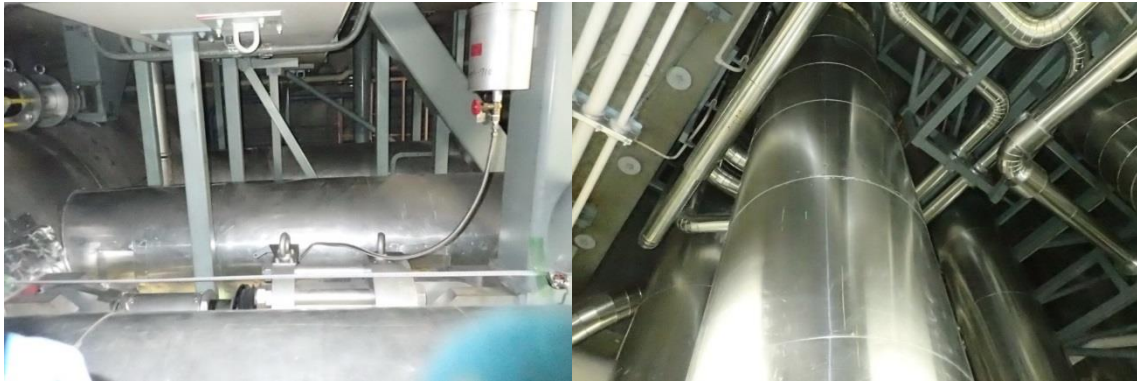
###### (1) 主蒸気系配管の構造概要

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

配管系の応答は、複数の振動モードの重ね合わせであり、応答の方向も部位により異なるため、3方向に減衰性能を発揮し、熱膨張による低速度の運動を

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

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



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

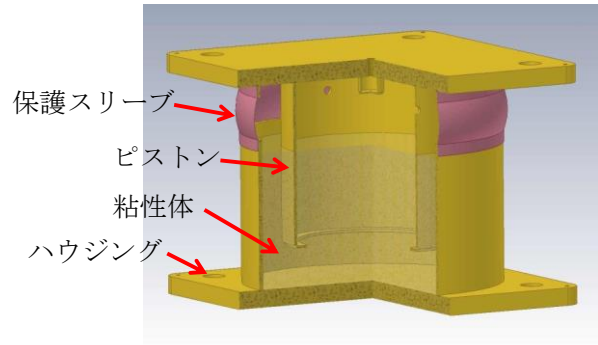
第 3-2 図 三軸粘性ダンパ設置範囲の主蒸気系配管(代表箇所)

## (2) 三軸粘性ダンパの構造概要

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

三軸粘性ダンパは、原子力発電所に用いることができる制震装置として ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION III, DIVISION1-Subsection NF-Supports に記載されており(添付資料 3-3 参照)、海外の原子力発電所において振動対策及び地震対策として設置実績がある。海外の原子力発電所における三軸粘性ダンパの設置例を第 3-5 図に示す。なお、国内においては原子力分野以外で、石油プラントの配管系(口径 300A)、コンサートホール等の大規模建物の制振システム及び振動台等の機械装置の防振対策等への採用実績があり、採用実績の例を第 3-6 図に示す。

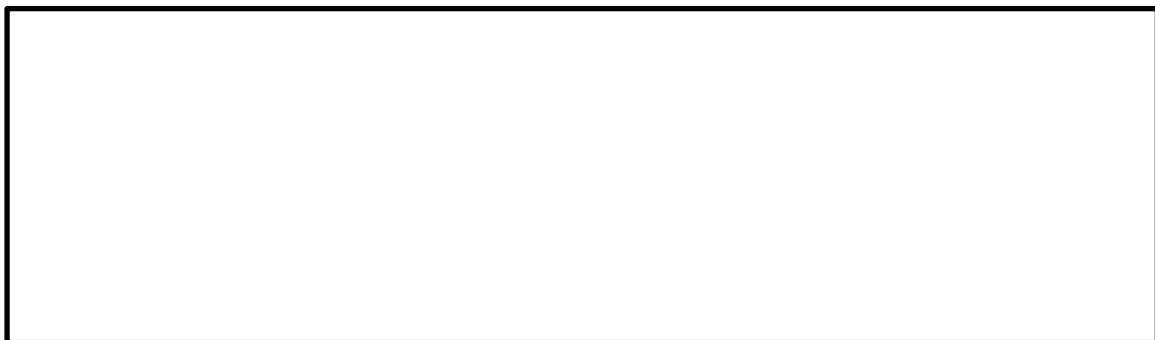
また，三軸粘性ダンパを配管系に設置した場合の有効性を確認するため，配管系を対象とした加振試験を実施し，地震応答の低減に有効であることを確認した。加振試験の詳細は添付資料 3-4 に示す。



第 3-3 図 三軸粘性ダンパの外観及び構造

第 3-1 表 三軸粘性ダンパの仕様

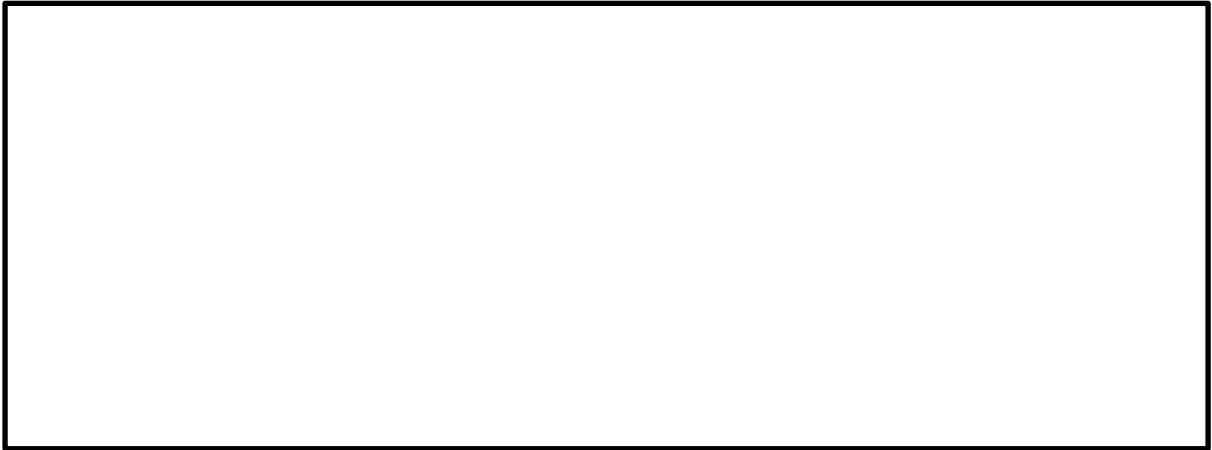
型式	外径 (mm)	高さ (mm)	質量 (kg)	許容荷重 (kN)		許容変位 (mm)	
				水平	鉛直	水平	鉛直
中型	325	343	111	68	27		
大型	630	586	691	350	140		



第 3-4 図 三軸粘性ダンパの動作機構

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。





第3-5図 海外の原子力発電所における三軸粘性ダンパの設置例



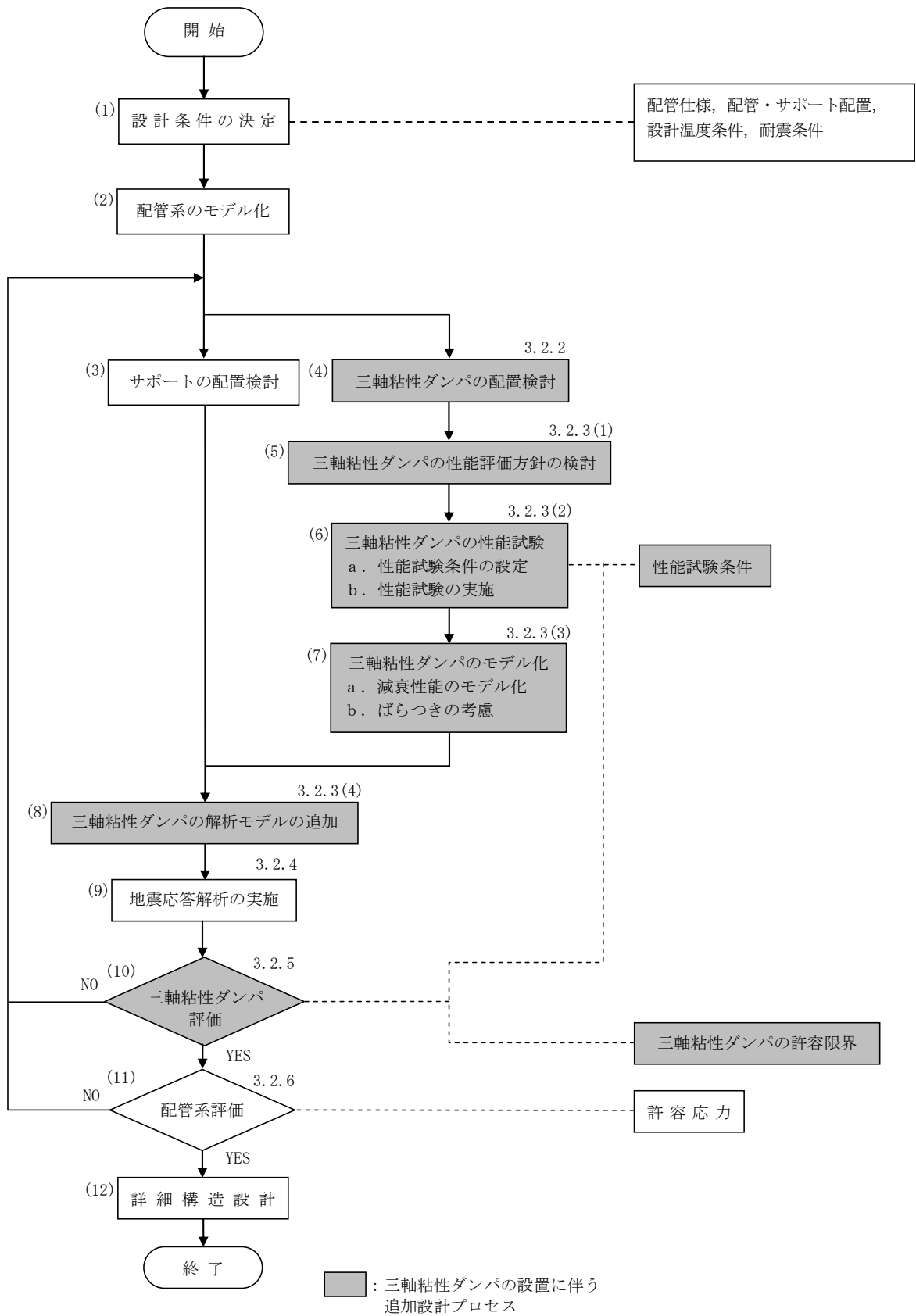
第3-6図 国内における三軸粘性ダンパの採用実績の例

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

### 3.1.3 設計方針

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

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

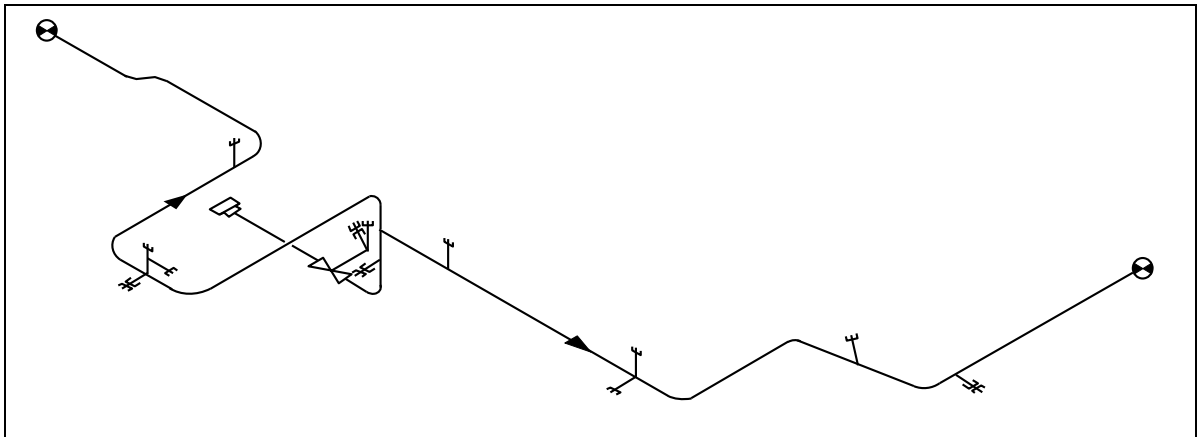


第3-7図 三軸粘性ダンパを設置した配管系の耐震設計フロー

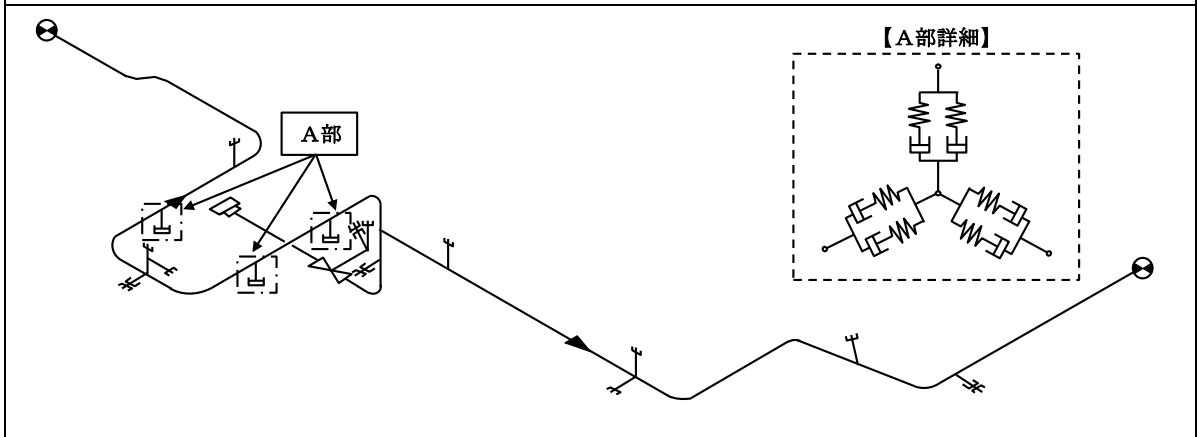
第3-2表 三軸粘性ダンパを設置した配管系の設計プロセス

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

※1 : 番号は第3-7図の耐震設計フローの番号に対応している。



三軸粘性ダンパ設置前の配管系の地震応答解析モデル



三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析モデル

第3-8図 配管系の地震応答解析モデル

### 3.1.4 適用規格

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

第 3-3 表 三軸粘性ダンパを設置した配管系の適用規格及び適用範囲

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

## 3.2 耐震評価方法

### 3.2.1 評価方針

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

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

ていることを確認する。

### 3.2.2 三軸粘性ダンパの配置検討

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

### 3.2.3 性能試験及び解析モデル

#### (1) 三軸粘性ダンパの性能評価方針の検討

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

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

第3-4表 減衰性能への影響の検討結果（三軸粘性ダンパ）

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

(2) 三軸粘性ダンパの性能試験

a. 性能試験条件の設定

三軸粘性ダンパの実機使用条件を踏まえ、性能試験条件を設定する。三軸粘性ダンパはその構造から水平方向加振に対する減衰性能は各方向で等しいが、水平方向加振と鉛直方向加振では減衰性能が異なるため、水平方向及び鉛直方向でそれぞれ性能試験を実施する。

減衰性能への影響の検討結果（第3-4表参照）に基づき、三軸粘性ダンパの減衰性能については、変動及びばらつきを包絡するように減衰性能の上限と下限を設定する。第3-4表のうち温度、振幅及び連続加振による変動を踏まえた第3-5表に示す性能試験条件により、高側ダンパ試験性能 ( $K_{High}$ ,  $C_{High}$ ) と、



低側ダンパ試験性能 ( $K_{Low}$ ,  $C_{Low}$ ) を性能試験で取得する。具体的な性能試験条件の設定例について添付資料 3-8 に示す。なお、減衰性能の設定において上限及び下限を設定する理由は、減衰性能が低いほど配管系の応答は大きくなる傾向であるが、三軸粘性ダンパを支持する構造物の設計においては上限の減衰性能に基づく最大荷重を適用するためである。

#### b. 性能試験の実施

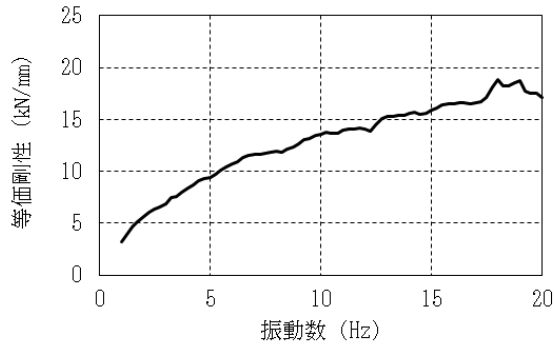
設定した性能試験条件により、三軸粘性ダンパの性能試験を実施する。性能試験の詳細について添付資料 3-8 に示す。地震応答解析に適用する三軸粘性ダンパの減衰性能は、実機に設置する各型式の三軸粘性ダンパについて性能試験を実施のうえ設定する。

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

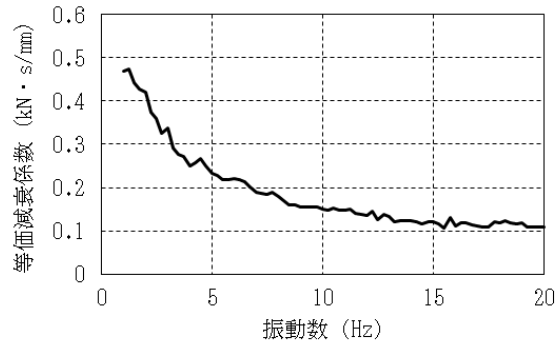
第 3-5 表 三軸粘性ダンパの性能試験条件の設定

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

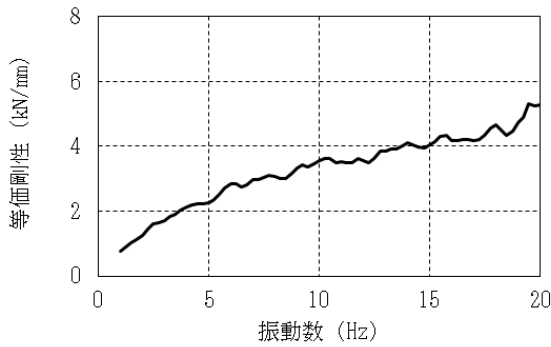
※1：実機使用条件を想定して設定する。



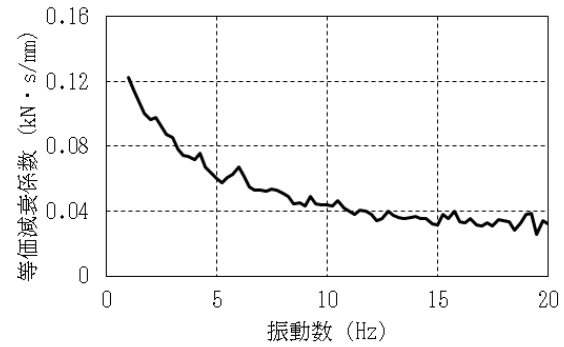
(H-1) 等価剛性  $K_{High}$  (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数  $C_{High}$  (水平方向)

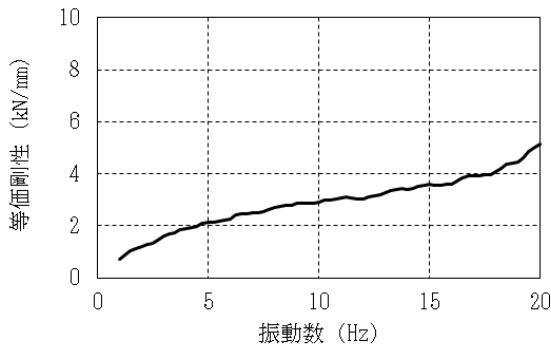


(V-1) 等価剛性  $K_{High}$  (鉛直方向)

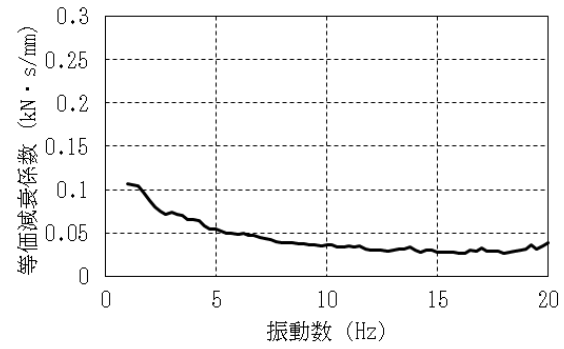


(V-2) 等価減衰係数  $C_{High}$  (鉛直方向)

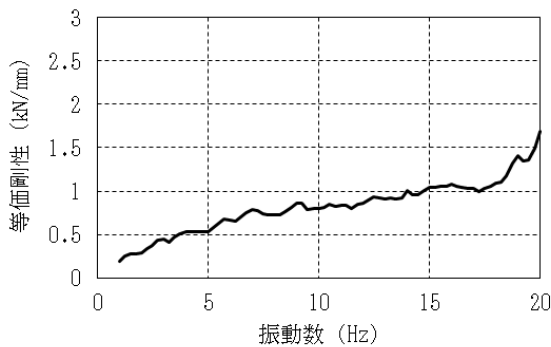
第3-9図 高側ダンパ試験性能 (中型の例)



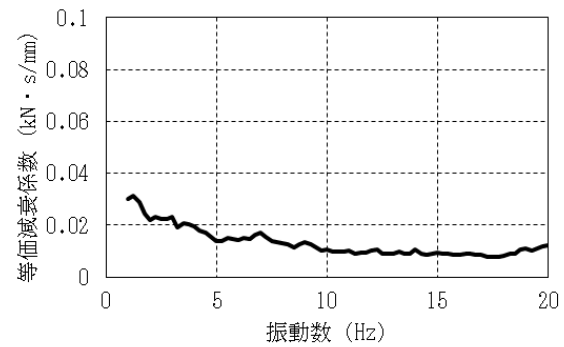
(H-1) 等価剛性  $K_{Low}$  (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数  $C_{Low}$  (水平方向)



(V-1) 等価剛性  $K_{Low}$  (鉛直方向)



(V-2) 等価減衰係数  $C_{Low}$  (鉛直方向)

第3-10図 低側ダンパ試験性能 (中型の例)

### (3) 三軸粘性ダンパのモデル化

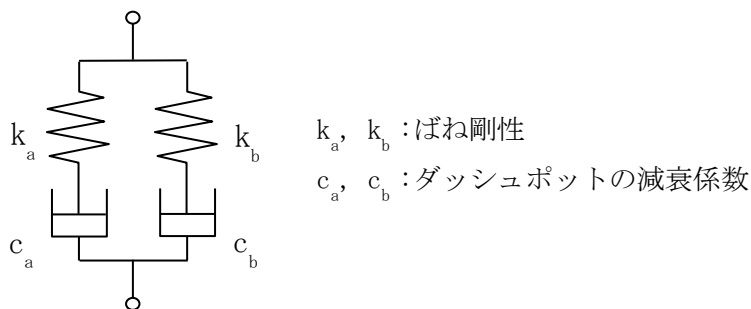
#### a. 減衰性能のモデル化

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

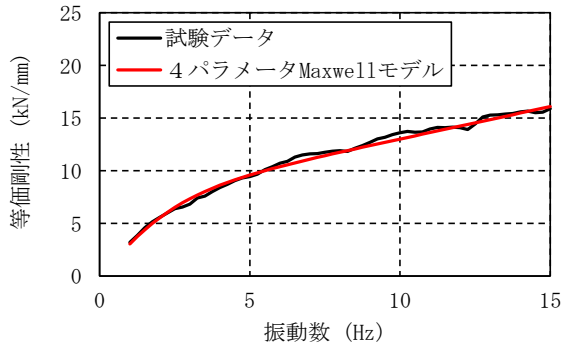
三軸粘性ダンパの減衰性能は、水平方向及び鉛直方向でそれぞれ高側ダンパ試験性能 ( $K_{\text{High}}, C_{\text{High}}$ ) 及び低側ダンパ試験性能 ( $K_{\text{Low}}, C_{\text{Low}}$ ) を性能試験により取得するため、4パラメータ Maxwell モデルは各方向に対して高側及び低側を設定する。

#### b. ばらつきの考慮

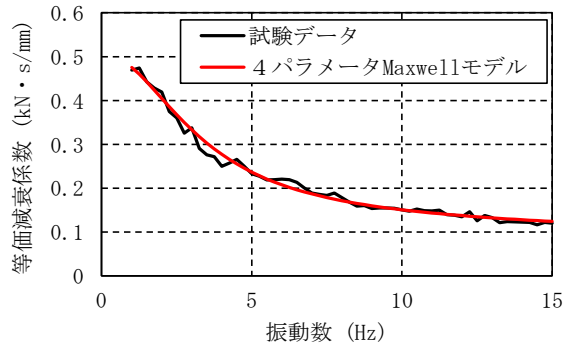
三軸粘性ダンパの減衰性能のばらつきを考慮して、地震応答解析に用いる解析モデルを設定する。性能試験結果に基づいてモデル化した三軸粘性ダンパの高側及び低側の減衰性能に対して、更に第3-4表のうち製造公差による $\pm 10\%$ のばらつきと、据付公差による $\pm 20\%$ のばらつきを合わせて $\pm 30\%$ のばらつきとして考慮し、解析上の減衰性能の上限 ( $K_1=1.3 \times K_{\text{High}}, C_1=1.3 \times C_{\text{High}}$ ) 及び下限 ( $K_5=0.7 \times K_{\text{Low}}, C_5=0.7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



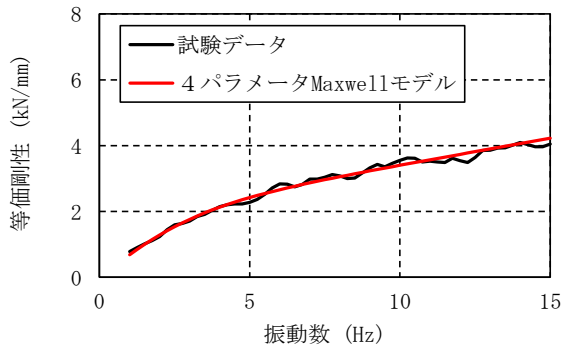
第3-11図 三軸粘性ダンパの4パラメータ Maxwell モデル



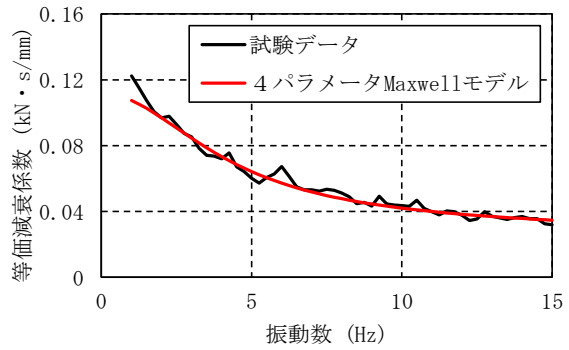
(H-1) 等価剛性  $K_{High}$  (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数  $C_{High}$  (水平方向)

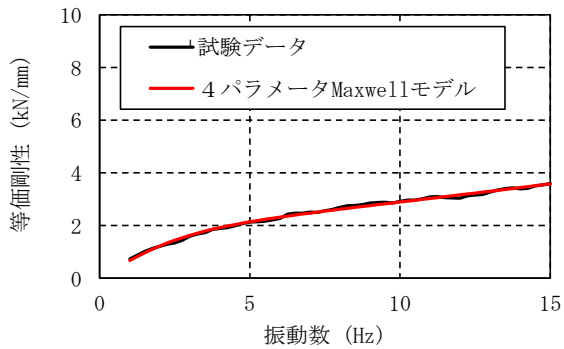


(V-1) 等価剛性  $K_{High}$  (鉛直方向)

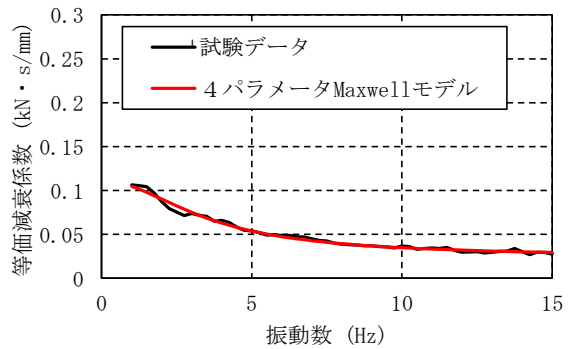


(V-2) 等価減衰係数  $C_{High}$  (鉛直方向)

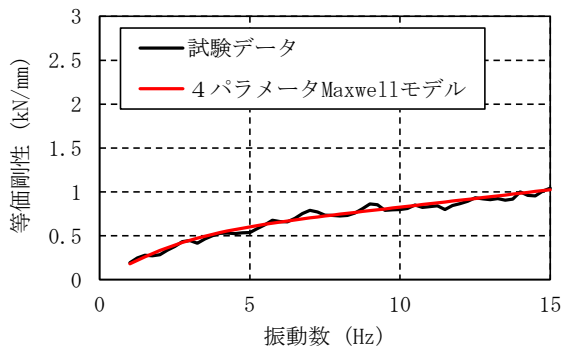
第 3-12 図 高側ダンパ試験性能のモデル化 (中型の例)



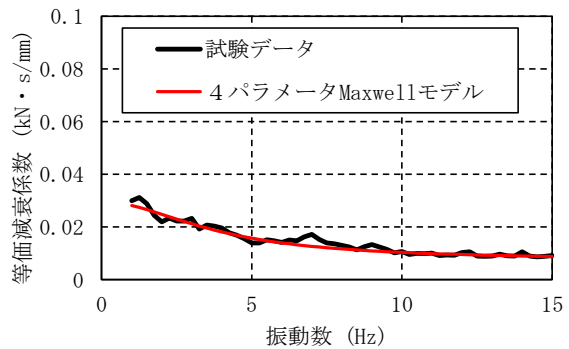
(H-1) 等価剛性  $K_{Low}$  (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数  $C_{Low}$  (水平方向)



(V-1) 等価剛性  $K_{Low}$  (鉛直方向)

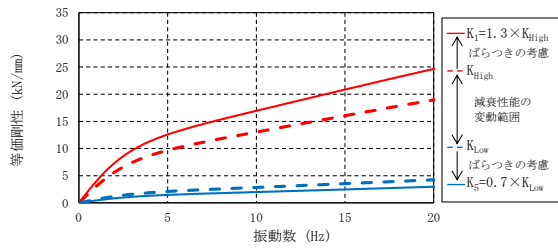


(V-2) 等価減衰係数  $C_{Low}$  (鉛直方向)

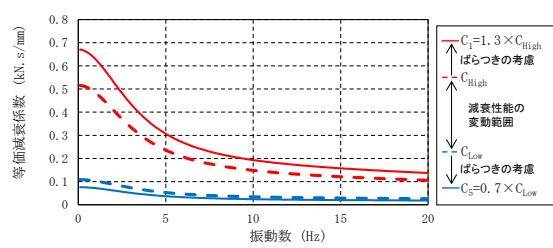
第 3-13 図 低側ダンパ試験性能のモデル化 (中型の例)

第3-6表 地震応答解析モデルにおける減衰性能の設定

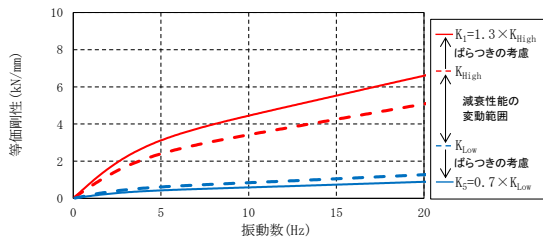
解析モデル	減衰性能
1	$K_1, C_1$ (上限)
2	均等に内挿
3	
4	
5	$K_5, C_5$ (下限)



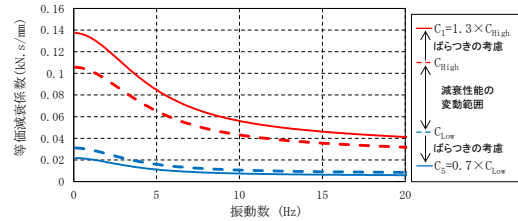
(H-1) 等価剛性 (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)

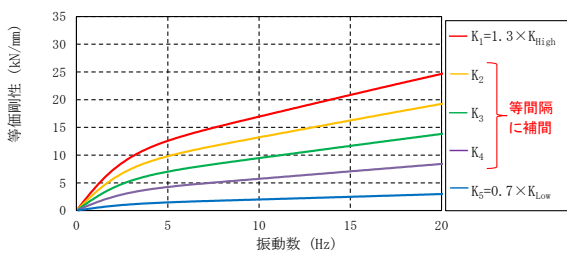


(V-1) 等価剛性 (鉛直方向)

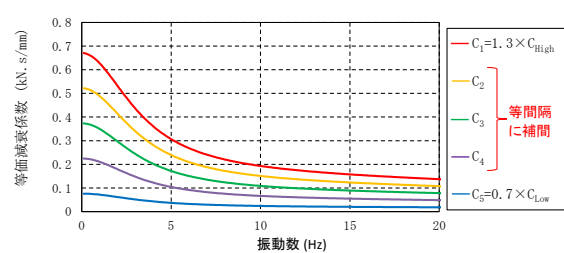


(V-2) 等価減衰係数 (鉛直方向)

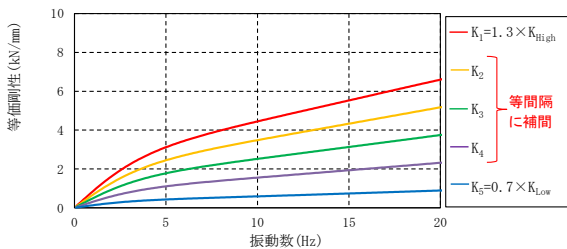
第3-14図 性能試験による減衰性能の上限と下限の設定 (中型の例)



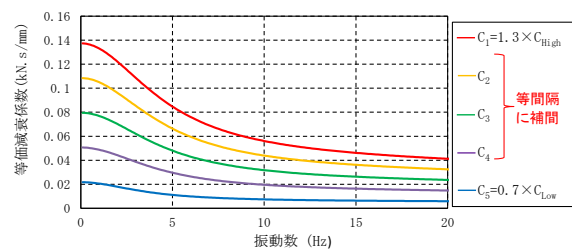
(H-1) 等価剛性 (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)



(V-1) 等価剛性 (鉛直方向)



(V-2) 等価減衰係数 (鉛直方向)

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

### (3) 三軸粘性ダンパの解析モデルの追加

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

#### 3.2.4 地震応答解析手法

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

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

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

#### 3.2.5 三軸粘性ダンパ評価

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

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

#### 3.2.6 配管系評価

三軸粘性ダンパを設置する外側主蒸気隔離弁から低圧タービン、復水器までの主蒸気系配管の耐震重要度分類はBクラスであり、外側主蒸気隔離弁から主蒸気止め弁までの範囲はS d機能維持設計とするため、応力評価等における許容限界は第3-7表のとおりとする。許容限界は、J E A G 4 6 0 1等に基づき設定することを基本とする。

第3-7表 配管系評価における評価方法及び許容限界

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

### 3.3 耐震評価結果

#### 3.3.1 評価条件

##### (1) 評価対象配管モデル

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

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

##### (2) 入力地震動

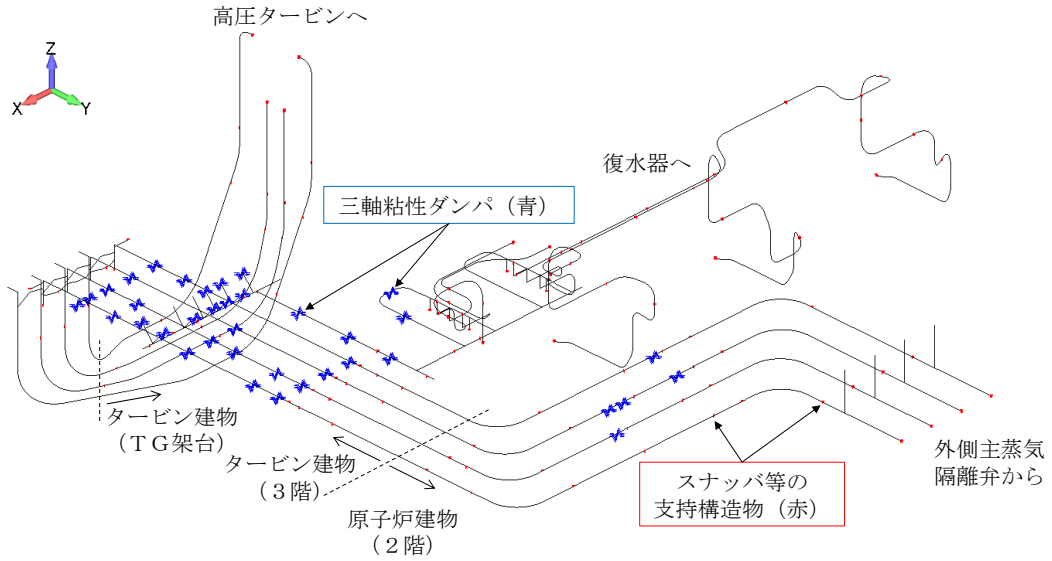
弾性設計用地震動S d-1, S d-D, S d-F 1, S d-F 2, S d-N 1, S d-N 2のうち最も評価上厳しいと考えられるS d-1を入力地震動とする。なお詳細設計段階においては、弾性設計用地震動の6波を考慮して、耐震評価を実施する。S d-1の加速度時刻歴及び床応答スペクトルを第3-18図～第3-21図に示す。評価対象配管は原子炉建物及びタービン建物に支持されるため、各支持点（三軸粘性ダンパ及びスナッパ等の支持構造物）に対応した各建物の加速度時刻歴を入力する。なお、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せを考慮して、解析は三方向同時入力により実施する。

#### 3.3.2 評価結果

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

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



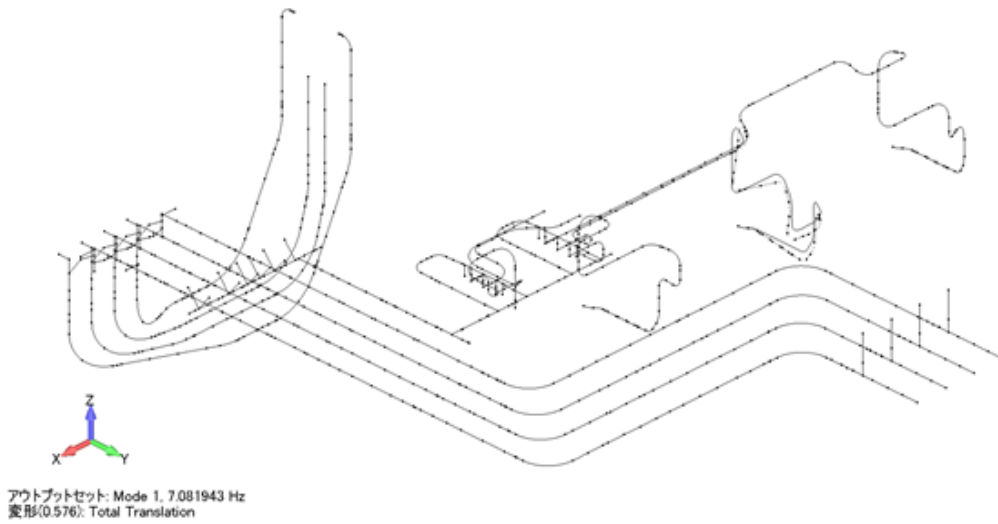


第3-16図 評価対象の配管モデル

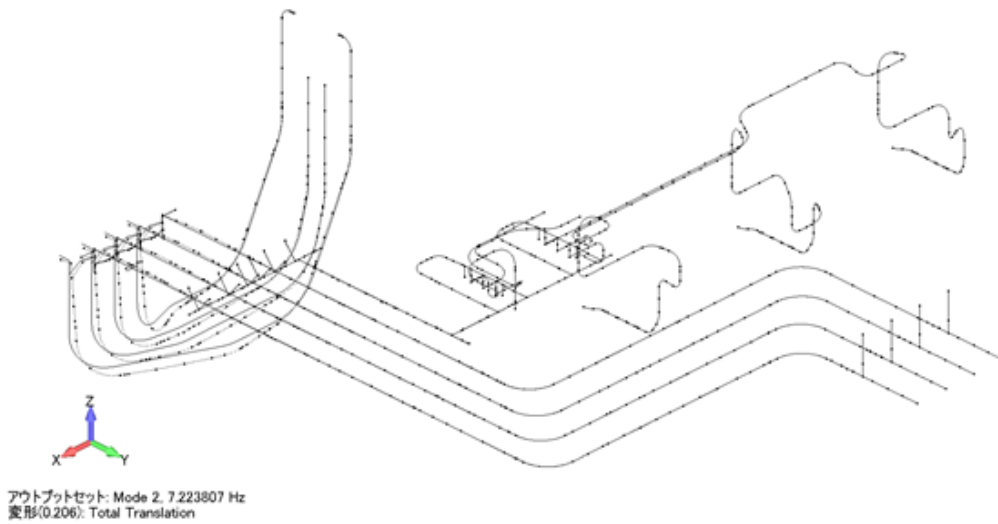
第3-8表 固有周期及び刺激係数

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

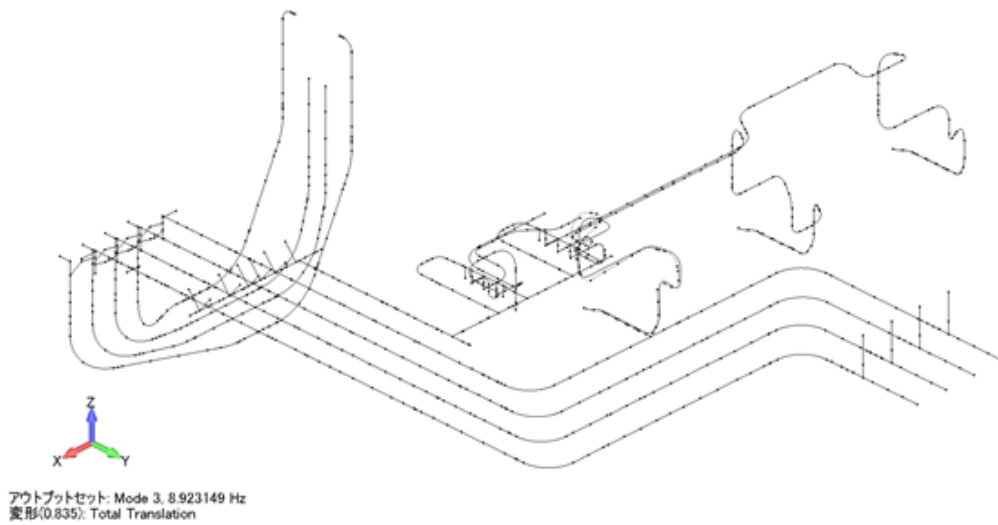
※1：モード質量が1となるように固有ベクトルを正規化して算出



(a) 1次モード

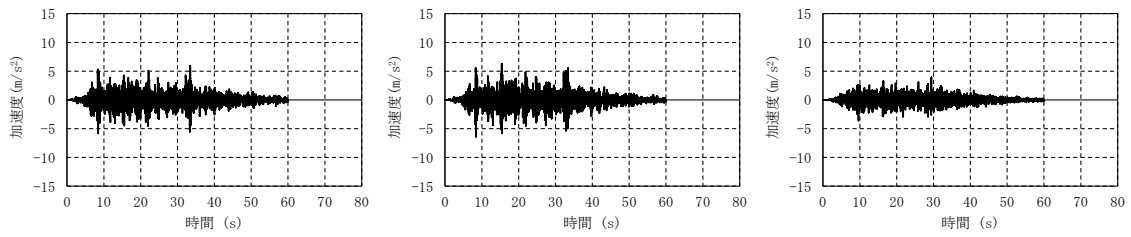


(b) 2次モード



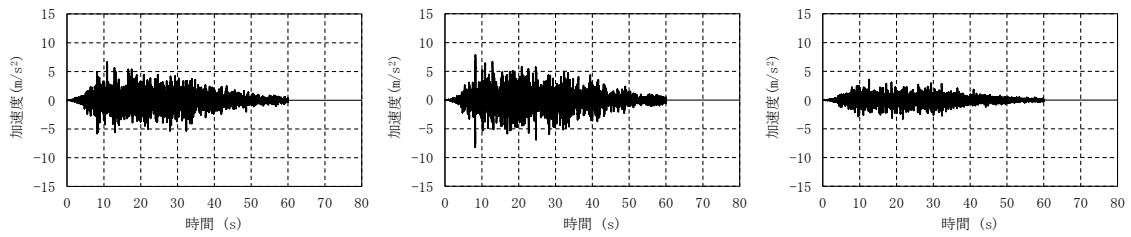
(c) 3次モード

第3-17図 振動モード図



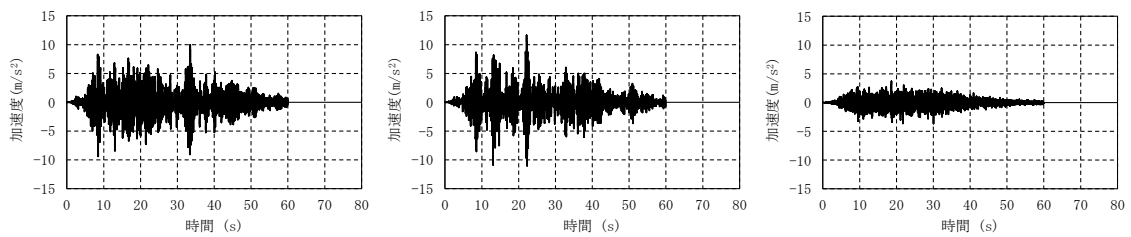
(a) NS方向 (b) EW方向 (c) 鉛直方向

第3-18図 原子炉建物（2階：EL. 23800）の加速度時刻歴



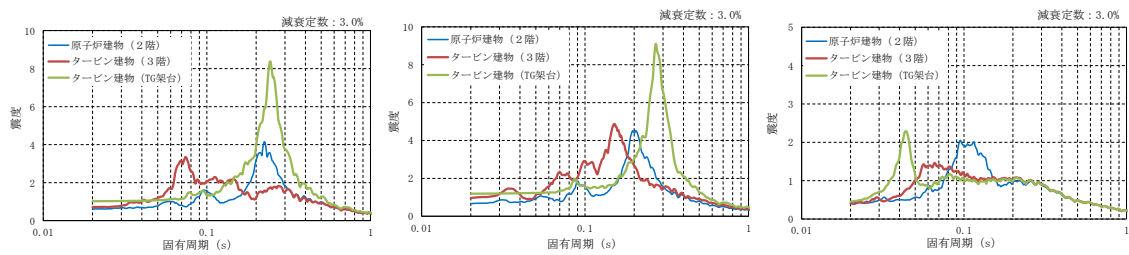
(a) NS方向 (b) EW方向 (c) 鉛直方向

第3-19図 タービン建物（3階：EL. 20600）の加速度時刻歴



(a) NS方向 (b) EW方向 (c) 鉛直方向

第3-20図 タービン建物（TG架台：EL. 20480）の加速度時刻歴



(a) NS方向 (b) EW方向 (c) 鉛直方向

第3-21図 床応答スペクトル

第3-9表 配管の構造強度評価結果

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

第3-10表 三軸粘性ダンパの構造強度評価結果

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

※1：最も厳しい結果を記載

第3-11表 三軸粘性ダンパ取付部（クランプ）の構造強度評価結果

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

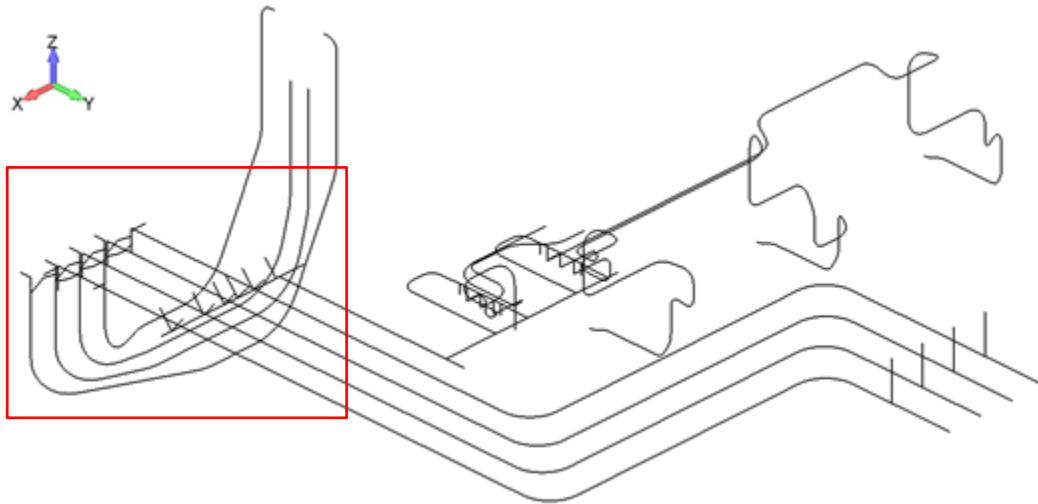
※1：最も厳しい結果を記載

第3-12表 三軸粘性ダンパの応答値と解析上の前提条件の比較

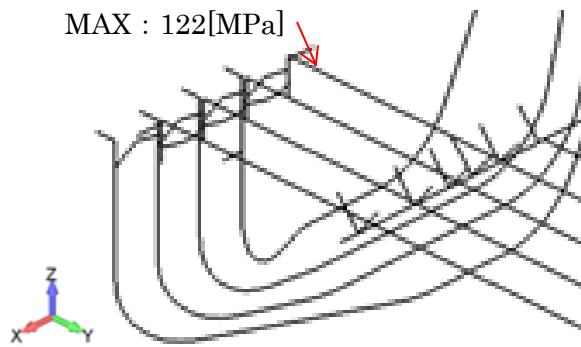
評価項目		発生値	解析条件
最大変位 <sup>※1</sup>	水平	4.3 (mm)	
	鉛直	2.7 (mm)	
累積消費 エネルギー <sup>※1</sup>	水平	12.3 (kJ)	
	鉛直	3.6 (kJ)	

※1：最も厳しい結果を記載

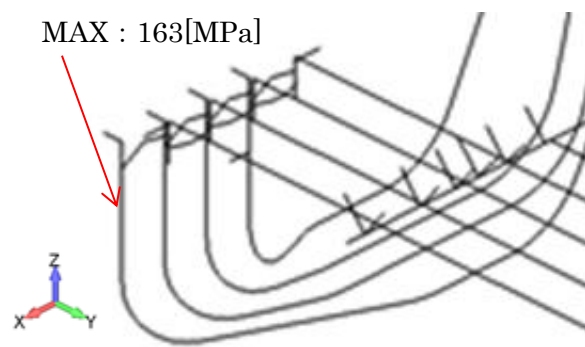
本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



(a) 全体図



(b) 一次応力発生箇所拡大図



(c) 一次+二次応力発生箇所拡大図

第3-22図 配管の最大応力発生箇所

#### 4. 実績との比較

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

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

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

#### 5. まとめ

単軸粘性ダンパ及び三軸粘性ダンパは、その減衰性能を Maxwell モデルにより精度良くモデル化できる。単軸粘性ダンパ及び三軸粘性ダンパの減衰性能の表現方法及びモデル化の考え方について、添付資料 1-5 で比較して示した。また、単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーン及び三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析では、減衰性能の変動及びばらつきを踏まえて段階的に設定した減衰性能に対応した地震応答解析を行い、これらの最大応答を用いて耐震評価を行う。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 卷, 第 9 号, 2016
- (9) Masaya Aoyama, Toshiaki Itou, Kouji Yamamoto, Hiroki Matsunaga, Ryouta Inoue, Shuhei Kaneko, “Development and Design of System to Control Vibrations due to Human Rhythmic Action of Concert Audiences using Floating Mass Damper,” Proceedings of the 7<sup>th</sup> Structural Engineers World Congress 2019 Architecture and Structure : From Past to Future, Istanbul, Turkey, April 24-26, 2019.

添付資料 1-1 制震装置の減衰性能に影響する検討項目の抽出

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

第 1-1-1 添表 免震構造の審査手引きの提案における検討項目（1/3）

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



第1-1-1 添表 免震構造の審査手引きの提案における検討項目 (2/3)

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

第1-1-1 添表 免震構造の審査手引きの提案における検討項目 (3/3)

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

第1-1-2 添表 減衰性能への影響の検討項目の抽出

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

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

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

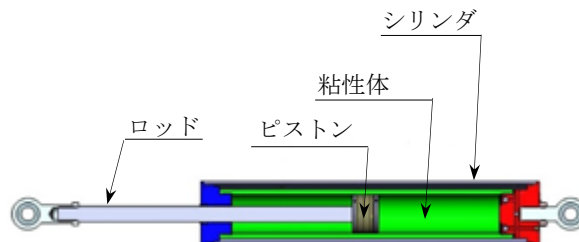
## 添付資料 1-2 既工認実績のある制震装置との差異の整理

### 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）

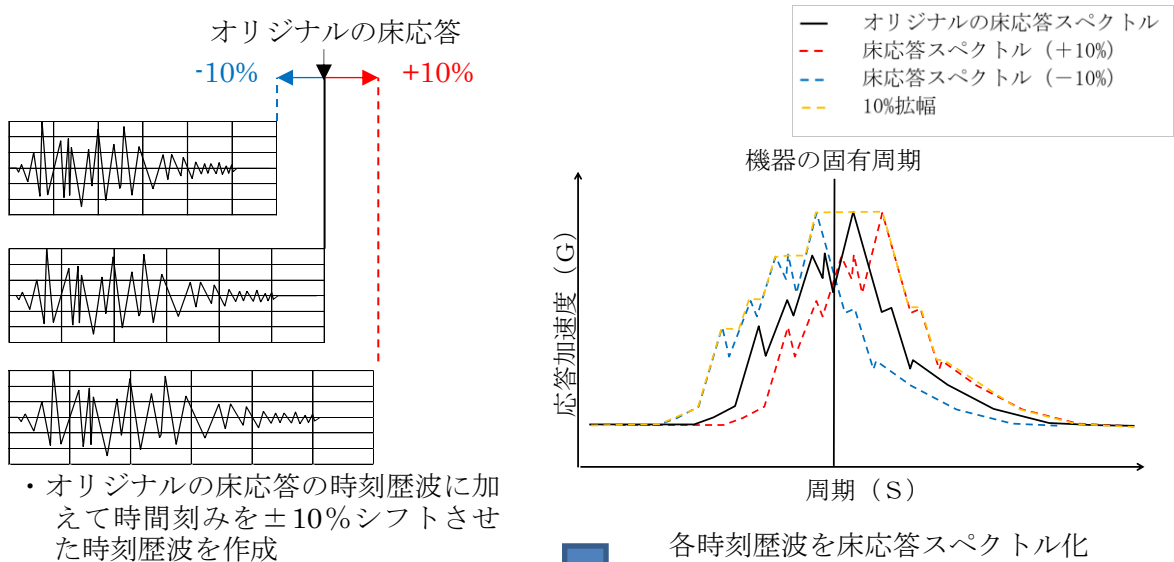
	単軸粘性 ダンパ 【島根2号 炉排気筒】	単軸粘性 ダンパ 【取水槽ガ ントリクレ ーン】	差異	検討内容
適用対象	排気筒	取水槽ガ ントリクレ ーン	○	適用対象のモデル化の 方法を検討（2.1.3 参照）
環境条件	屋外	屋外	—	—
制震 装置	単軸線形 タイプ	単軸非線形 タイプ	○	制震装置のモデル化の 方法を検討（2.2.3 参照）
解 析	制震 装置 モデル	Maxwell モデル	—	—
	解析 手法	時刻歴 応答解析	—	—

第1-2-3 添表 適用実績のある制震装置との差異の整理 (三軸粘性ダンパ)

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

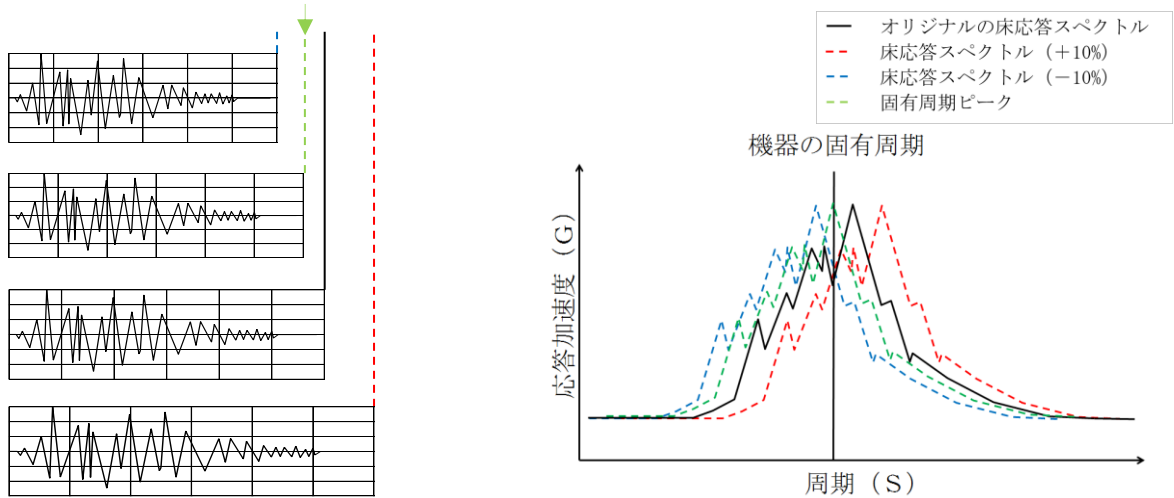
添付資料 1-3 Time History Broadening の概要

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



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

固有周期と合致するよう調整した時刻歴波



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

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

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

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

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

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

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

<p>検討事項                      (工認審査ガイド                      4. 機器・配管系                      に関する事項)</p>	<p>工認審査ガイドに対応した耐震評価方法の設定にあたっての検討内容</p>	<p>追加検討                      事項の有無                      (○：有                      ー：無)</p>
<p>4.4.2                      入力地震力</p>	<p>単軸粘性ダンパを設置する取水槽ガントリクレーン                      入力地震力は、取水槽ガントリクレーン設置位置の応答波を用                      いる。</p>	<p>三軸粘性ダンパを設置する配管系                      入力地震力は、配管系設置位置の応答波を用いる。                      —                      (考慮済)</p>
<p>4.5                      構造設計手法                      4.5.1                      構造解析手法及                      び構造解析モデ                      ル</p>	<p>構造解析手法及び構造解析モデルは、工認審査ガイドに例示さ                      れている規格及び基準等並びに新規制審査実績を参考に設定す                      る。構造解析モデルの材料定数は、「4.1 使用材料及び材料定                      数」による。</p>	<p>同左                      —                      (考慮済)</p>
<p>4.5.2                      水平方向及び鉛                      直方向地震力の                      組合せ</p>	<p>水平2方向及び鉛直方向の動的地震力の組合せに関しては、三                      方向同時入力により地震応答解析を行う。</p>	<p>同左                      —                      (考慮済)</p>

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

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

## 添付資料 1-5 制震装置に応じた減衰性能の表現及びモデル化

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

### 1. 制震装置の減衰性能の振動数依存性

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

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

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

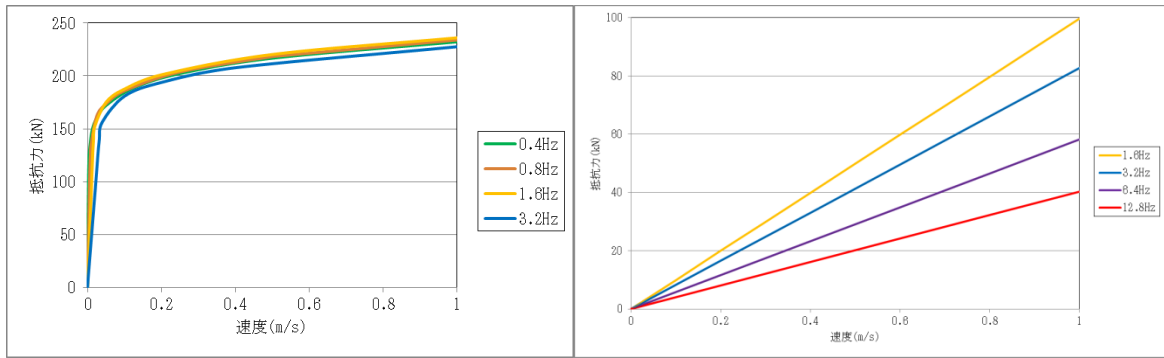
### 2. 単軸粘性ダンパの減衰性能のモデル化

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

### 3. 三軸粘性ダンパの減衰性能のモデル化

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

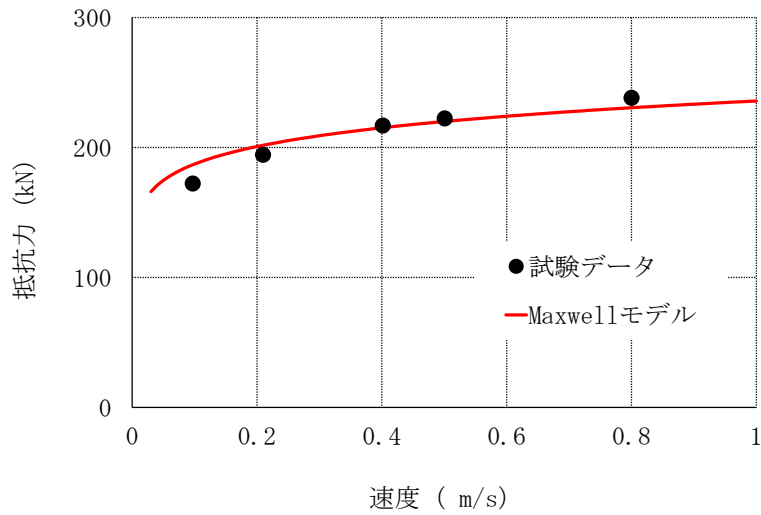
一般的な Maxwell モデルのパラメータ数は 2 つであるが、精度良く振動数特性を表現することを目的として、パラメータ数を増やした 4 パラメータ Maxwell モデルを使用する（第 1-5-3 添図参照）。



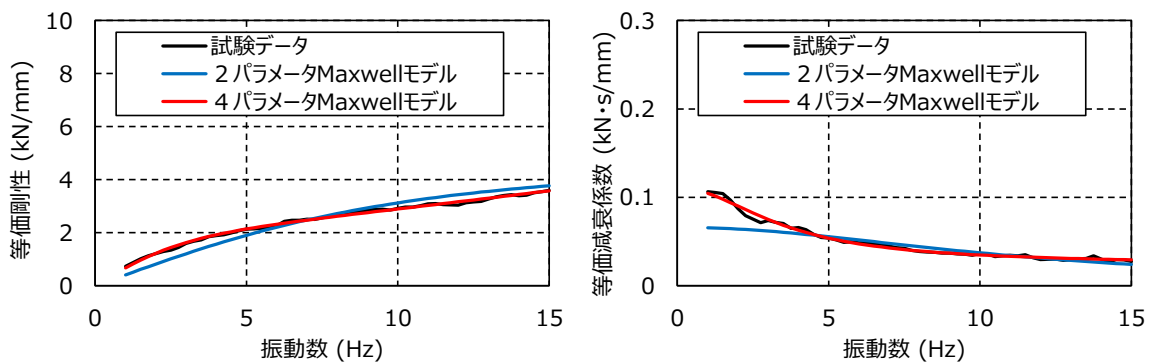
(a) 単軸粘性ダンパ

(b) 三軸粘性ダンパ

第1-5-1 添図 振動数を変化させた場合の速度と抵抗力の関係



第1-5-2 添図 単軸粘性ダンパの減衰性能のモデル化



(H-1) 等価剛性 (水平方向)

(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)

第1-5-3 添図 三軸粘性ダンパの減衰性能のモデル化

添付資料 2-1 取水槽ガントリクレーンに設置する制震装置の選定

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

第2-1-1添表 取水槽ガントリクレーンに設置する制震装置の検討

分類	ダンパの種類	原理	作動方向	支持荷重	抵抗力の特性	原子力施設における適用実績	適用性	理由
履歴型	弾塑性ダンパ	材料の弾塑性挙動を利用してエネルギーを吸収するダンパ	1方向 又は 2方向	熱膨張 地震 荷重	抵抗力は、材料の初期剛性、二次剛性で決まる。		△	塑性変形で地震エネルギーを吸収しており、繰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。			
	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	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
		粘性体の流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ			抵抗力は速度に比例し、履歴曲線は楕円に近い。			
		オイルの流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ			抵抗力は速度のべき乗(0.4~1)に比例し、履歴曲線は楕円に近い。			
三軸	粘性ダンパ	粘性体の流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ	3方向		抵抗力は速度に比例し、履歴曲線は楕円に近い。	海外での適用例あり	△	取水槽ガントリクレーンは1軸方向の地震荷重の低減を必要としているため、3方向の減衰は必要ない。

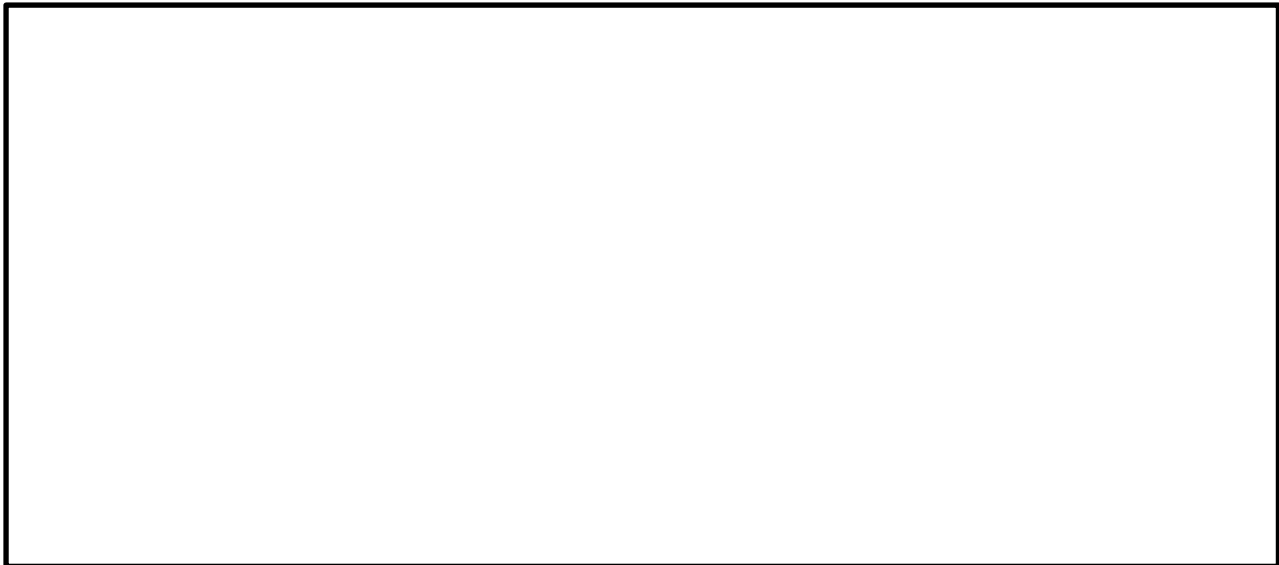
凡例 ◎：適用可能(有効性が最も高い) ○：適用可能 △：適用するため課題がある ×：適用不可

## 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

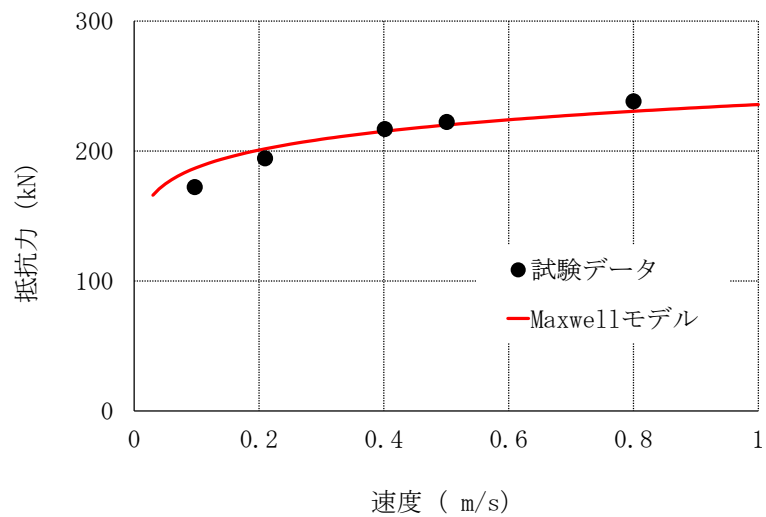
単軸粘性ダンパの性能試験装置の構成を第 2-2-1 添図に示す。単軸粘性ダンパの性能試験では、アクチュエータを用いて単軸粘性ダンパを所定の正弦波により加振し、加振中の変位及び荷重を測定する。性能試験条件を第 2-2-1 添表に示す。加振振動数による単軸粘性ダンパの減衰性能の変動は小さいことを踏まえ、単軸粘性ダンパのストローク 100mm の中で実機使用条件を含む幅広い試験速度 (0.1~0.8m/s) を設定して性能試験を実施する。単軸粘性ダンパ設置前の取水槽ガントリクレーンの固有振動数 (1.03Hz) 及び予備解析における単軸粘性ダンパの入力波形の主要な振動数 (0.8Hz~2.0Hz 程度) 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

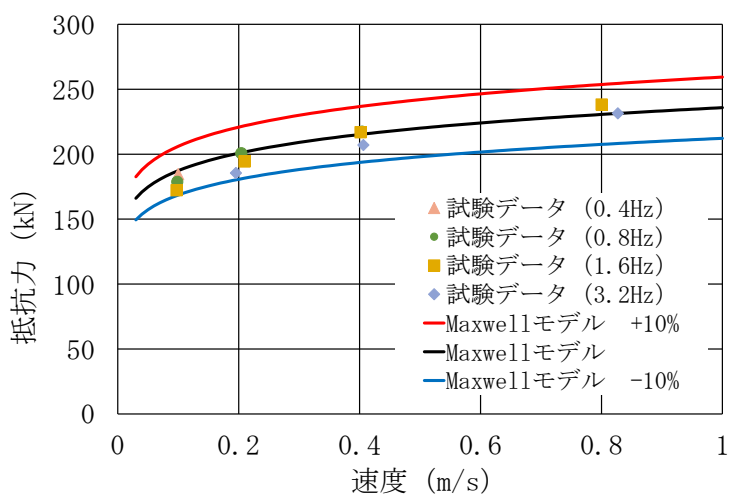
4段階の加振速度を設定し、同一の加振速度で振動数を変更した正弦波により特性試験を実施した。試験条件を第2-3-1添表に示す。

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

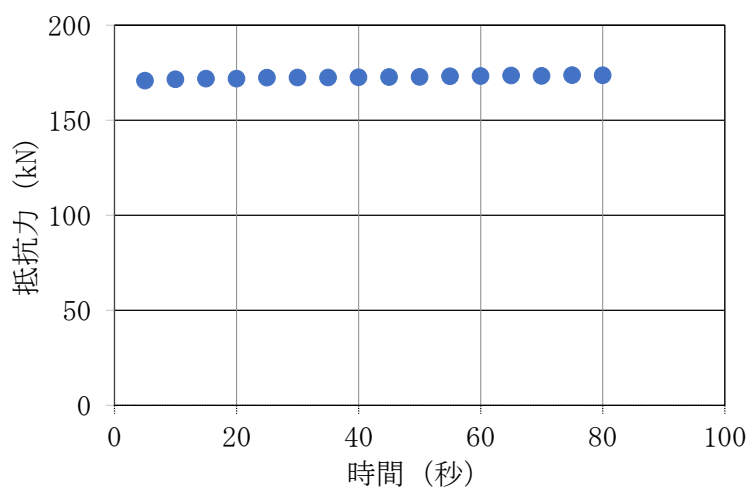
第2-3-2添表に試験条件を示す。試験条件は、取水槽ガントリクレーンにおける単軸粘性ダンパの散逸エネルギーを上回る条件として設定した。

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

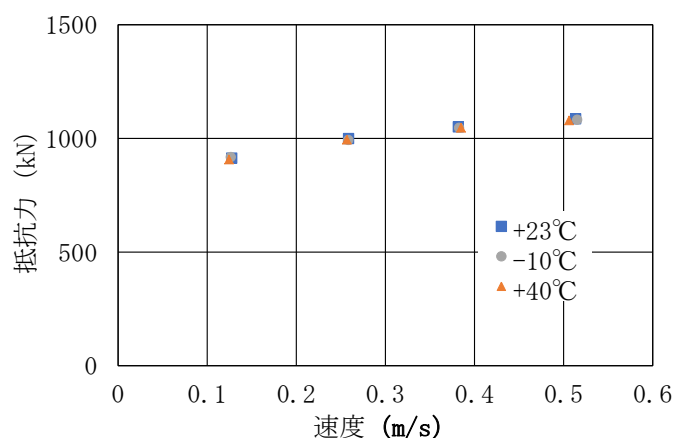
試験条件を第2-3-3添表に示す。屋外に設置することから、温度は-10℃、23℃、40℃の3段階とした。

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 (°C)
1	1.0	0.13	-10
2			23
3			40
4		0.26	-10
5			23
6			40
7		0.39	-10
8			23
9			40
10		0.52	-10
11			23
12			40

#### 3.2 試験結果

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



第2-3-3添図 温度依存性試験結果

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

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

1. 地震応答解析

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

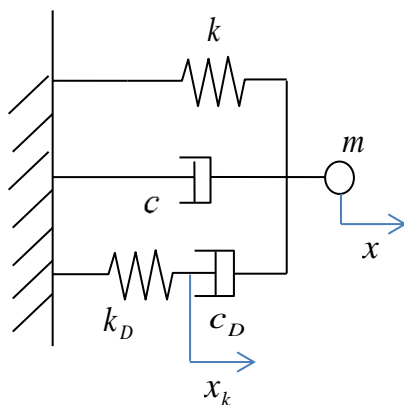
$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} + [C_D]\left[\dot{X}_D^{0.1}\right]\{I\} = -[M]\{I\}\ddot{y} \quad (1)$$

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

2. 個別要素のモデル化

2.1 単軸粘性ダンパの減衰

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



第 2-4-1 添図 単軸粘性ダンパを接続した 1 質点系のモデル

ここで(1)式の  $\{x\}$  を

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

とすると、この系の運動方程式は以下となる。

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

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

単軸粘性ダンパを設置した取水槽ガントリクレーンの地震応答解析では、単軸粘性ダンパの抵抗力の速度に対する非線形性を表す $[c_D][\dot{x}_D^{0.1}]\{I\}$ の項が存在することから、直接積分による時刻歴応答解析を採用する。

## 2.2 取水槽ガントリクレーンの構造減衰

取水槽ガントリクレーンの解析に適用する減衰定数については、既往の研究等によって妥当性が確認され、クレーン類に適用実績のある値として水平、鉛直方向ともに2.0%とし、レイリー減衰を設定する。レイリー減衰は、質量マトリクス及び剛性マトリクスの線形結合により、以下の式で表される。

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

$[C]$  : 減衰マトリクス

$[M]$  : 質量マトリクス

$[K]$  : 剛性マトリクス

$\alpha, \beta$  : 係数

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

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

$h$  : 減衰比

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

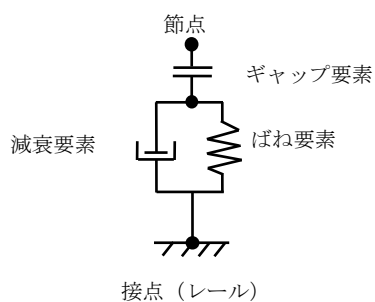
## 2.3 車輪部の非線形要素

取水槽ガントリクレーンは、地震時に浮上りが発生する可能性があり、浮上り状況を適切に評価するために3次元FEM解析モデルによる非線形時刻歴応答解

析を適用する。

取水槽ガントリクレーン車輪部のモデル化では、すべり、浮上り及び衝突の挙動を模擬するためギャップ要素を用いる。また、接触部位の局所変形による接触剛性をばね要素で、衝突による減衰効果を減衰要素で模擬し、第 2-4-2 添図に示すように、ギャップ要素と直列に配置する。

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



第 2-4-2 添図 車輪部の非線形要素

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

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

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

第 2-5-1 添表 取水槽ガントリクレーンの荷重

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

第 2-5-2 添表 単軸粘性ダンパの荷重及び変位

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



## 添付資料 3-1 三軸粘性ダンパの低速移動時の拘束力

### 1. 概要

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

### 2. 試験条件

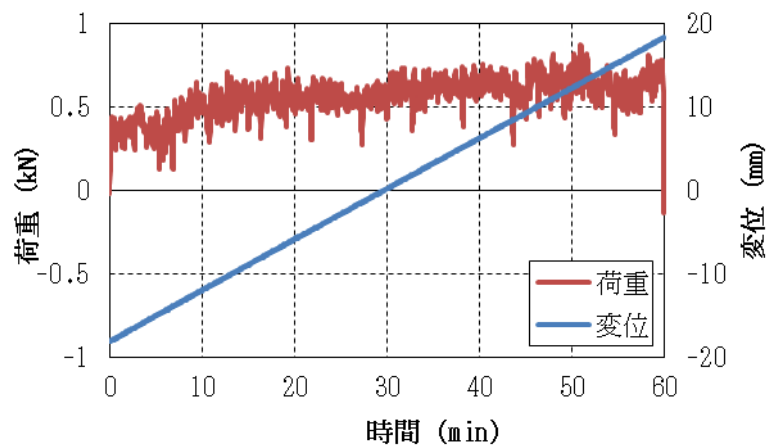
低速移動試験の試験条件を第 3-1-1 添表に示す。熱膨張が大きい主蒸気配管がプラント起動時に約 4.5 時間で通常運転温度まで昇温することから、大型ダンパの水平方向許容変位 72mm と等しい熱変位が約 4.5 時間で生じることを想定した場合の速度 0.005mm/s に余裕をみて、試験条件は 0.01mm/s とした。

第 3-1-1 添表 低速移動試験の試験条件

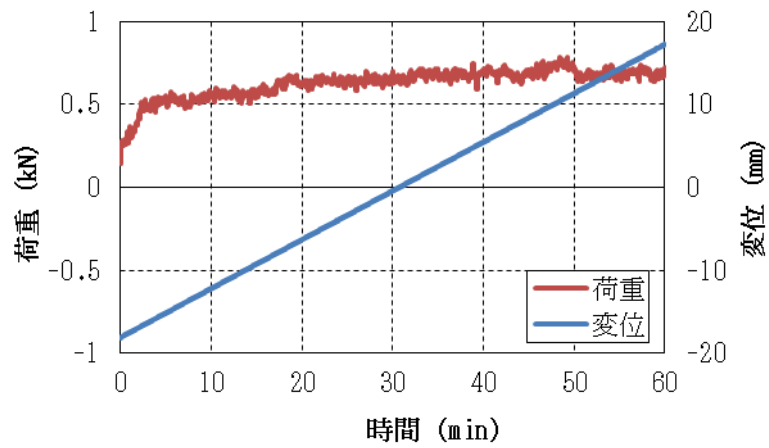
試験体	速度
大型	0.01mm/s

### 3. 試験結果

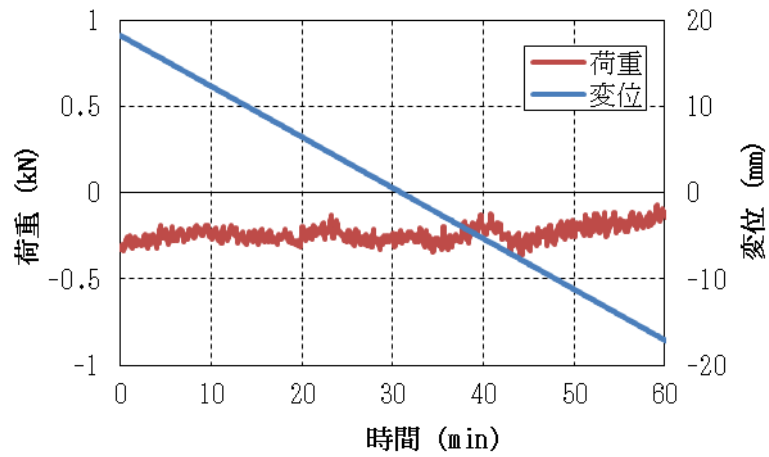
試験結果を第 3-1-1 添図～第 3-1-3 添図に示す。熱膨張を想定した低速移動に対して三軸粘性ダンパの発生荷重は 1kN を下回る十分に小さな値となり、三軸粘性ダンパは熱膨張のような低速度の運動を拘束しないことが確認された。



第 3-1-1 添図 水平方向の低速移動に対する発生荷重



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



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

添付資料 3-2 配管系に設置する制震装置の選定

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

第 3-2-1 添表 配管系に設置する制震装置の検討

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

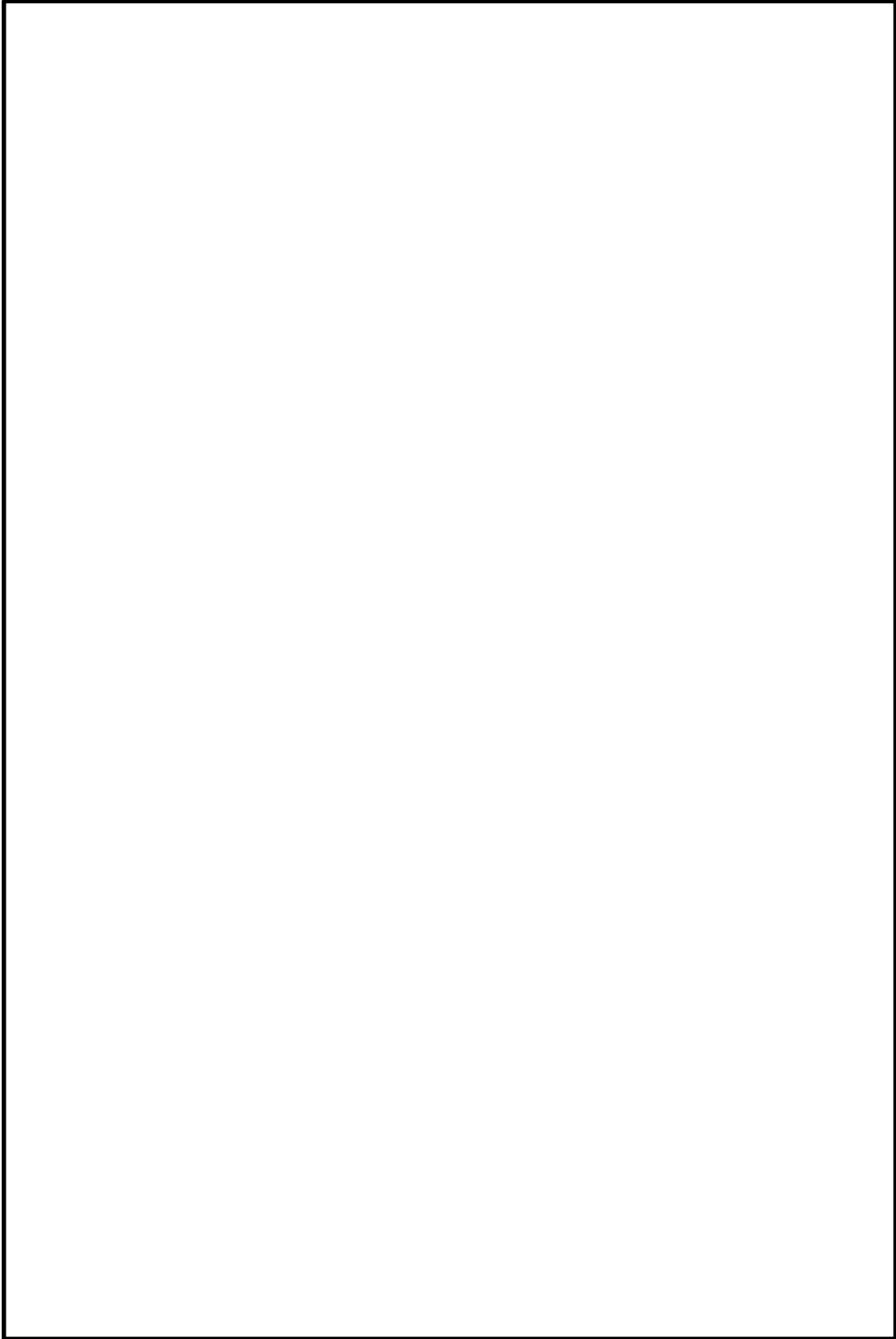
凡例 ◎：適用可能 (有効性が最も高い) ○：適用可能 △：適用するため課題がある ×：適用不可

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

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

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

主な記載箇所			記載内容
ARTICLE NF-1000 INTRODUCTION	NF-1100 SCOPE AND GENERAL REQUIREMENTS	NF-1130 BOUNDARIES OF JURISDICTION	NF-1132 Boundary Between Supports and the Building Structure  NF-1214 Standard Supports
	NF-1200 TYPES OF SUPPORTS AND ATTACHMENTS	NF-1210 TYPES OF SUPPORTS	
NONMANDATORY NF-E DAMPERS, ENERGY ABSORBERS, AND SNUBBERS ARTICLE NF-E-1000	NF-E-1210 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。  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-1220 FUNCTION	
		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

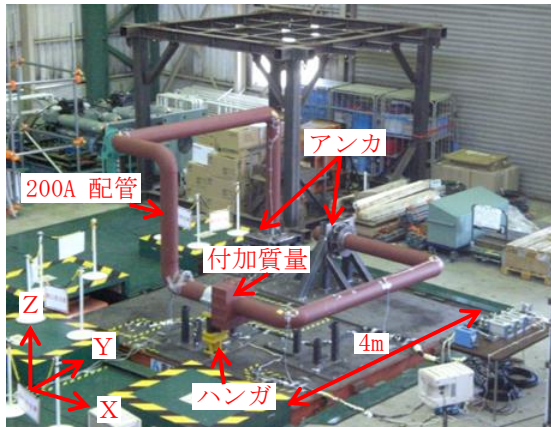
寸法	4m×4m	
最大積載量	60t	
運転周波数帯域	DC-70Hz	
最大加速度 <sup>※1</sup>	水平	3G
	鉛直	3G

※ 1 : 定格積載量 (20t) での最大加速度を示す。

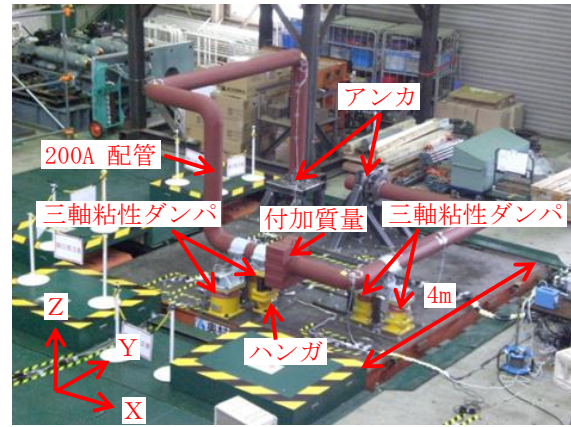
### 2. 加振試験条件

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



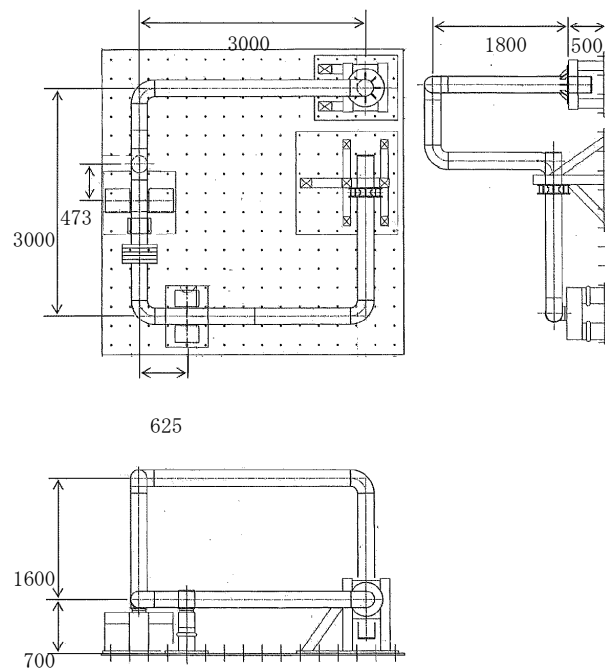
配管系試験体（ダンパ無配管）



配管系試験体（ダンパ設置配管）

第3-4-1添図

配管系試験体



第3-4-2添図 配管系試験体の構造図

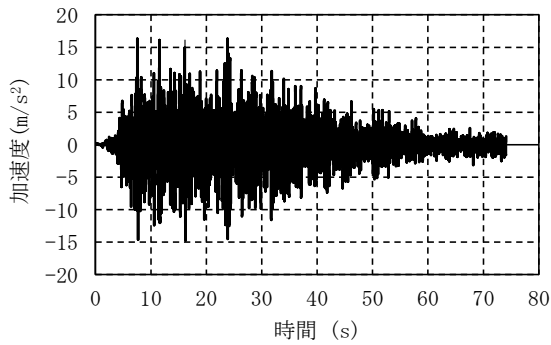
## 2.2 入力地震波

地震波加振における入力地震波は、耐震バックチェック評価用地震動  $S_s - 1$  (600gal) に対して島根原子力発電所2号炉原子炉建物の地震応答解析により算出した床応答波を参考に設定した地震波を用いた。入力地震波の加速度時刻歴波形を第3-4-3添図に、応答スペクトルを第3-4-4添図に示す。加振レベルは、配管系が弾性域に留まり、三軸粘性ダンパ設置位置の変位及び荷重が三軸粘性ダンパの許容範囲内となる最大加振レベルを目安として設定した。

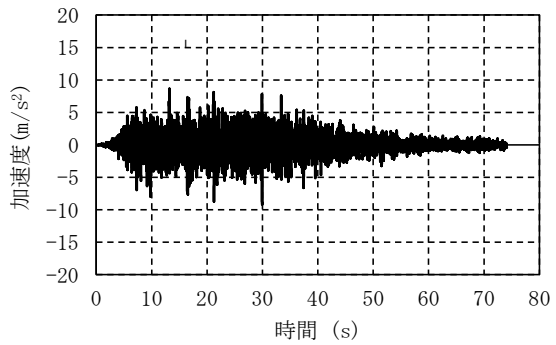
配管系試験体はY方向加振時の応答よりもX方向加振時の応答が大きくなる傾向があるため、水平方向加振はX方向を代表とし、地震波加振はX+Z方向につ

いて実施した。

各試験ケースにおける加速度レベルを第3-4-3添表に示す。

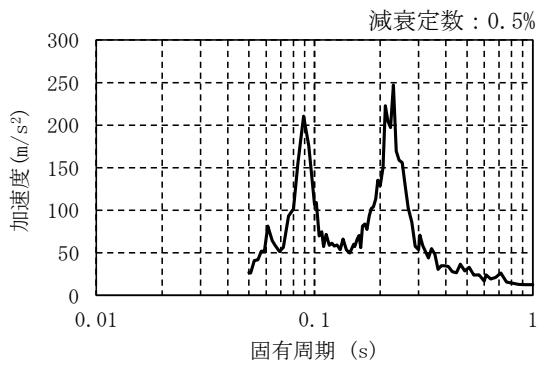


(a) 水平方向 (X方向)

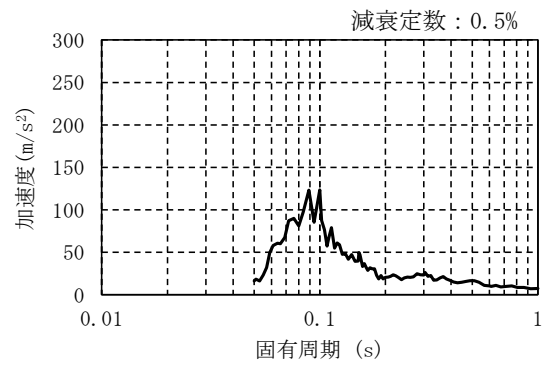


(b) 鉛直方向 (Z方向)

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/s <sup>2</sup> )	
		X方向	Z方向
1	ダンパ無配管	1.5	0.84
2		2.5	1.41
3	ダンパ設置配管	2.5	1.41
4		10	5.6
5		18	10.1

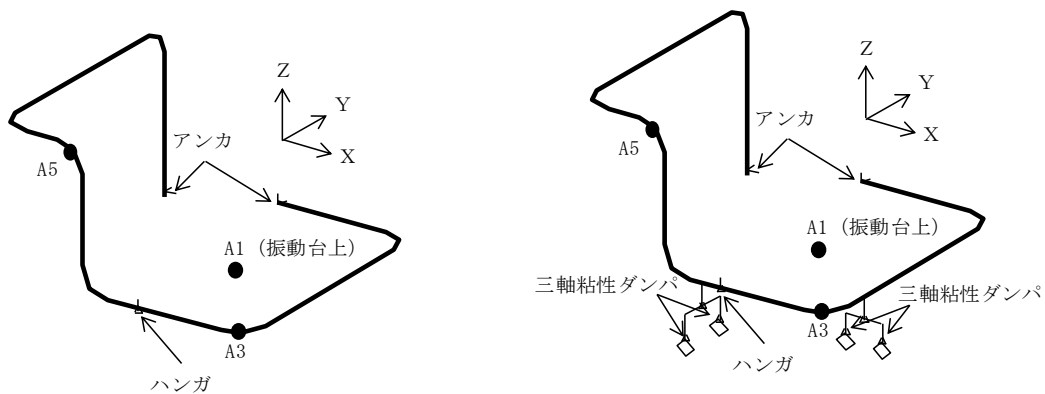
### 3. 加振試験結果

#### 3.1 正弦波掃引試験結果

配管系試験体の概略図を第3-4-5添図に示す。また、ダンパ無配管におけるX方向の正弦波掃引試験結果について、振動台上の加振方向の加速度に対する配管位置の加振方向の応答加速度の振動伝達特性を第3-4-6添図に、カーブフィ



ットにより得られた配管系試験体の固有振動数とモード減衰比を第 3-4-4 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。

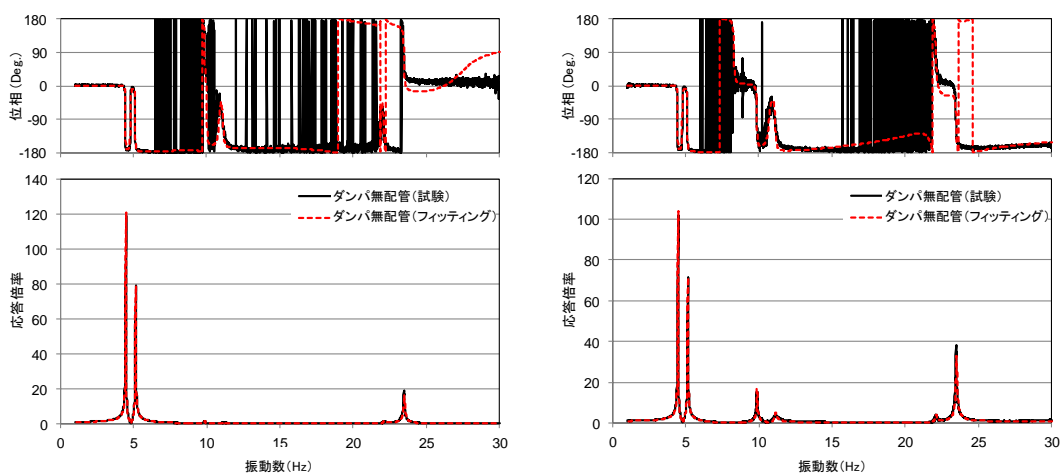


配管系試験体 (ダンパ無配管)

配管系試験体 (ダンパ設置配管)

第 3-4-5 添図

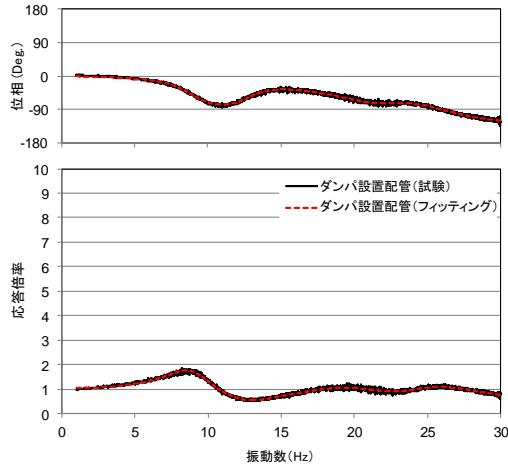
配管系試験体の概略図



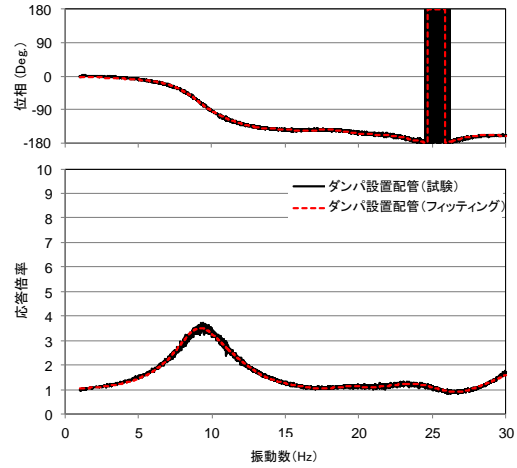
(1) A3X/A1X

(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<sup>2</sup>)



(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<sup>2</sup>)

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)

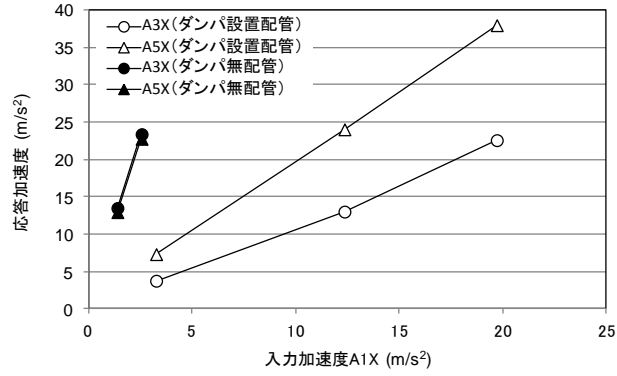
No.	固有振動数(Hz)	モード減衰比(%)
1	9	20
2	13	20
3	17	20
4	19	20
5	23	20
6	25	20

### 3.2 地震波加振の試験結果

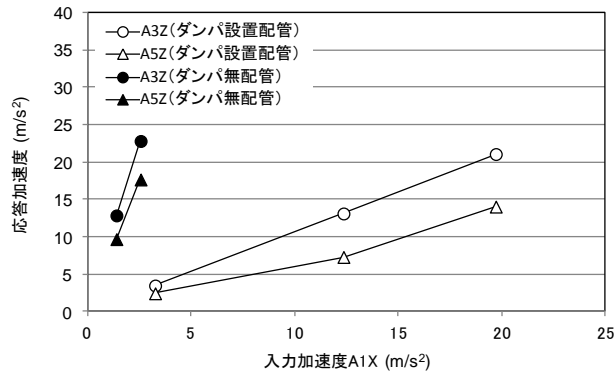
入力地震波（X＋Z方向）により加振した場合のダンパ無配管とダンパ設置配管の配管応答加速度を第3-4-8添図及び第3-4-9添図に示す。第3-4-8添図では、ダンパ無配管の応答倍率（応答／入力）がA3及びA5の位置で10倍程度であるのに対し、ダンパ設置配管の場合の応答倍率はA3の位置で1倍程度、A5の位置で2倍程度であり、応答がそれぞれ1/10、1/5に低減されている。また、第3-4-9添図では、ダンパ無配管の応答倍率がA3及びA5の位置で10倍程度であるのに対し、ダンパ設置配管の場合の応答倍率はA3の位置で1倍程度、A5の位置で0.7倍程度であり、応答がそれぞれ1/10、7/100に低減されて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

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。

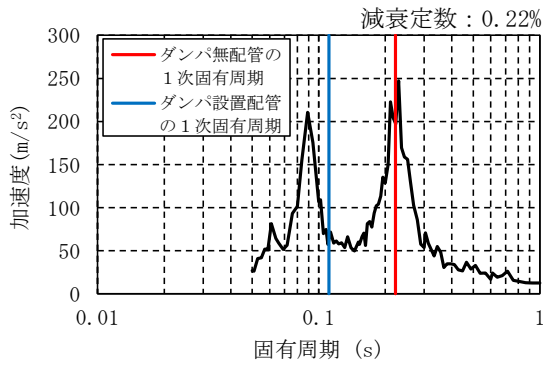
以上より、正弦波掃引試験により確認された三軸粘性ダンパの応答低減効果は、地震波加振試験の結果においても確認された。



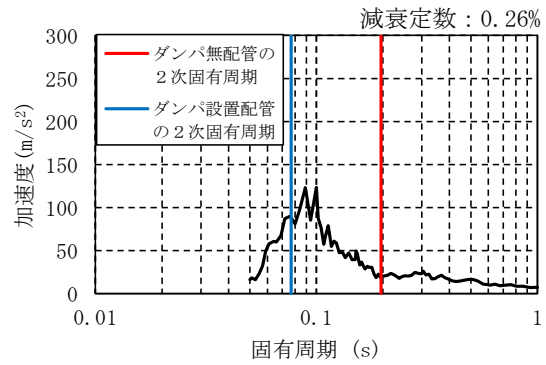
第3-4-8添図 入力加速度 A1X に対する X 方向の応答加速度  
(地震波 X + Z 方向加振)



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

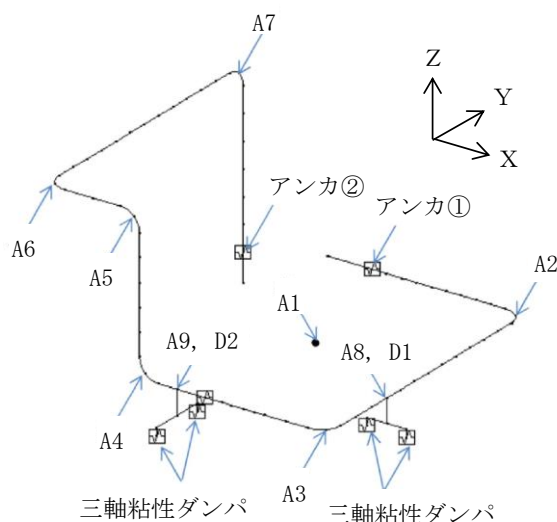
第3-4-10添図 卓越モードの固有周期における応答スペクトルの比較

#### 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

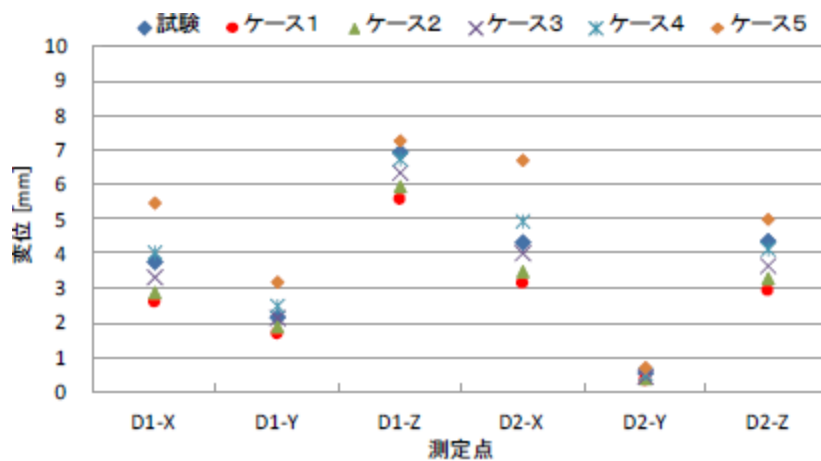
「3.2.3 項(3)b. ばらつきの考慮」に基づき、三軸粘性ダンパの減衰性能のばらつきを考慮して設定した上限の減衰性能 ( $K_1, C_1$ ), 下限の減衰性能 ( $K_5, C_5$ ) 及びその間の3つの内挿点の計5ケースの減衰性能により地震応答解析を実施した。地震応答解析ケースを第3-4-6添表に示す。なお、地震応答解析の対象とする試験ケースは、X方向及びZ方向の最大加振ケース (X方向:  $19.7\text{m/s}^2$ , Z方向:  $10.6\text{m/s}^2$ ) とした。

第3-4-6添表 解析ケース

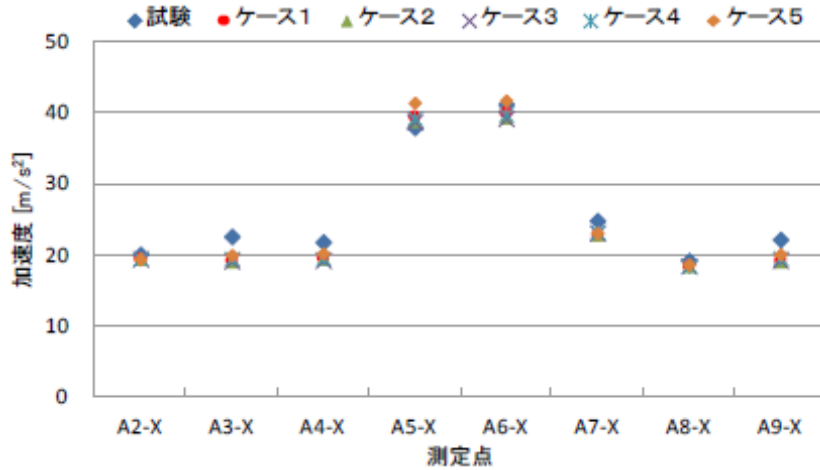
解析ケース	減衰性能
1	$K_1, C_1$ (上限)
2	均等に内挿
3	
4	
5	$K_5, C_5$ (下限)

### 4.3 解析結果

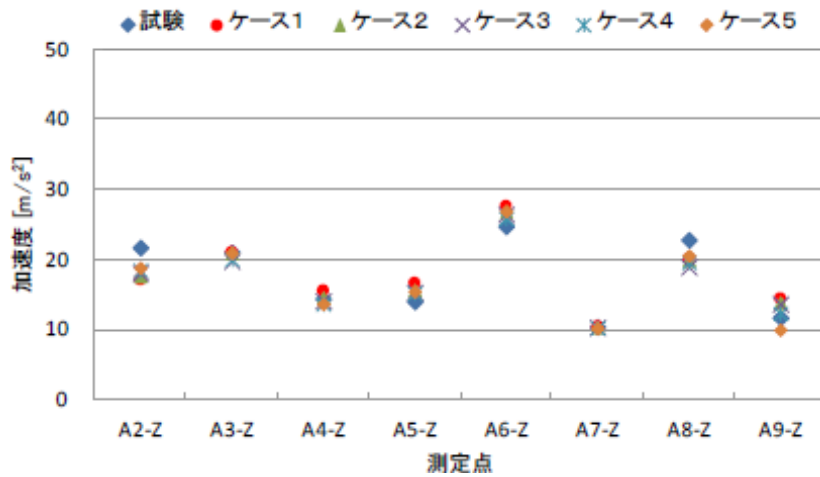
三軸粘性ダンパの最大応答変位の試験結果と解析結果を第3-4-12添図に示す。X方向及びZ方向の最大応答加速度の試験結果と解析結果を第3-4-13添図に示す。三軸粘性ダンパの最大応答変位の解析結果は、試験結果を上回る保守的な評価となっている。また、配管最大応答加速度の解析結果は、試験結果に対して-10%程度以上の精度で一致している。



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  $\gamma(t)$  で加振すると、第3-5-1添図に示すように位相が変位に対して  $\delta$  ( $0 \sim \pi/2$ ) 進んだ荷重  $\sigma(t)$  (式(2)) が生じる。

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

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

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

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

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

式(3)の最大変位  $\gamma_0$  と最大荷重  $\sigma_0$  の比  $\sigma_0/\gamma_0$  を等価剛性  $K$  と呼ぶ。等価剛性  $K$  は粘弾性体の剛性を定量的に定義する一般的なパラメータである。

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

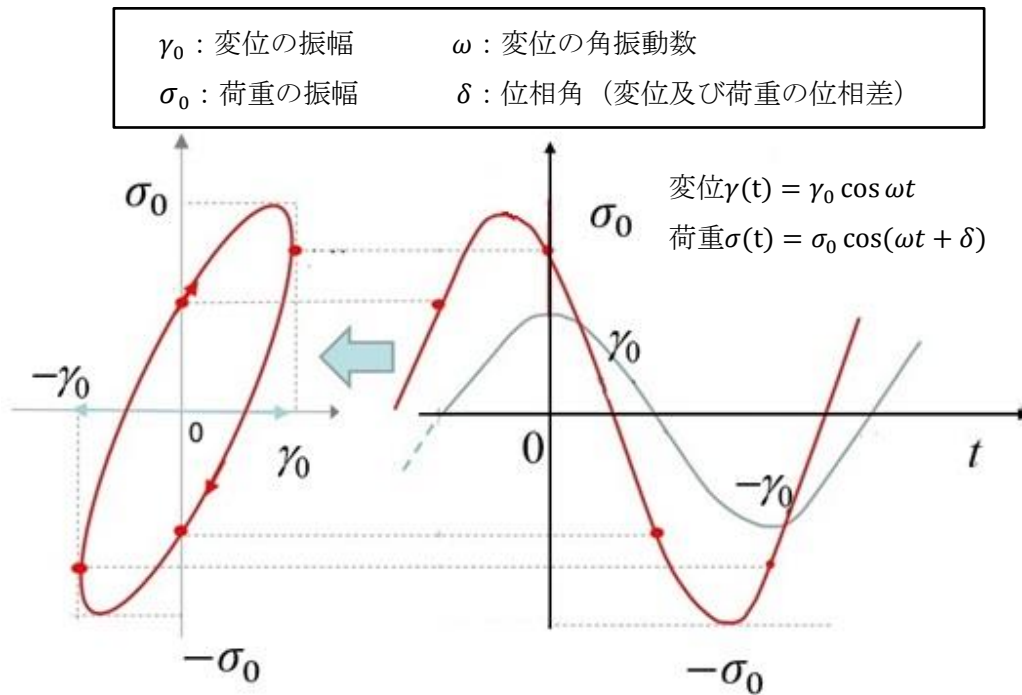
$$\pi \sigma_0 \gamma_0 \sin \delta = C \gamma_0^2 \omega \pi \quad (4)$$

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

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



三軸粘性ダンパの等価剛性  $K$  及び等価減衰係数  $C$  は振動数依存性を有しており、一般に振動数が高いほど等価剛性  $K$  は大きく、等価減衰係数  $C$  は小さくなる傾向がある。



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

## 2. 三軸粘性ダンパの解析モデル

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

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

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

又は,

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

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

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

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

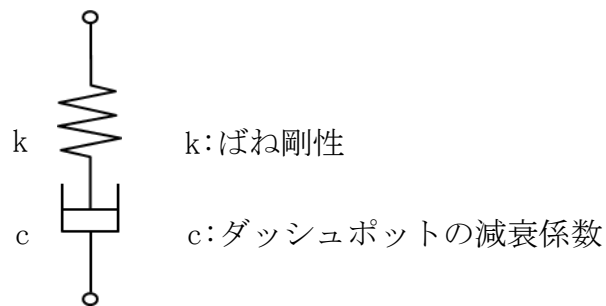
k : Maxwell モデルのばね剛性     $\omega_0$  : Maxwell モデルの特性振動数

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

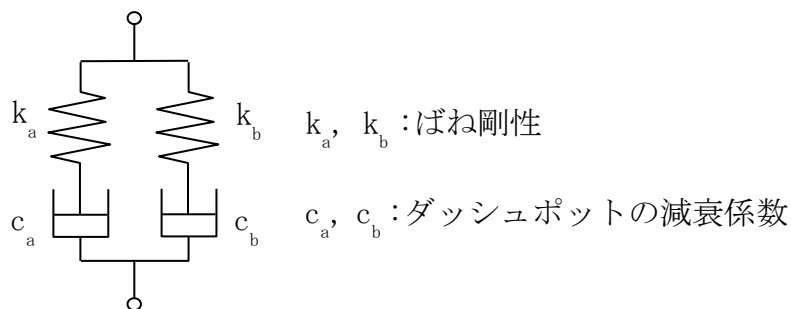
$$\begin{aligned}
 K_e &= K_a(\omega/\omega_a)^2 / (1+(\omega/\omega_a)^2) + K_b(\omega/\omega_b)^2 / (1+(\omega/\omega_b)^2) \\
 K_v &= K_a(\omega/\omega_a) / (1+(\omega/\omega_a)^2) + K_b(\omega/\omega_b) / (1+(\omega/\omega_b)^2)
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

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

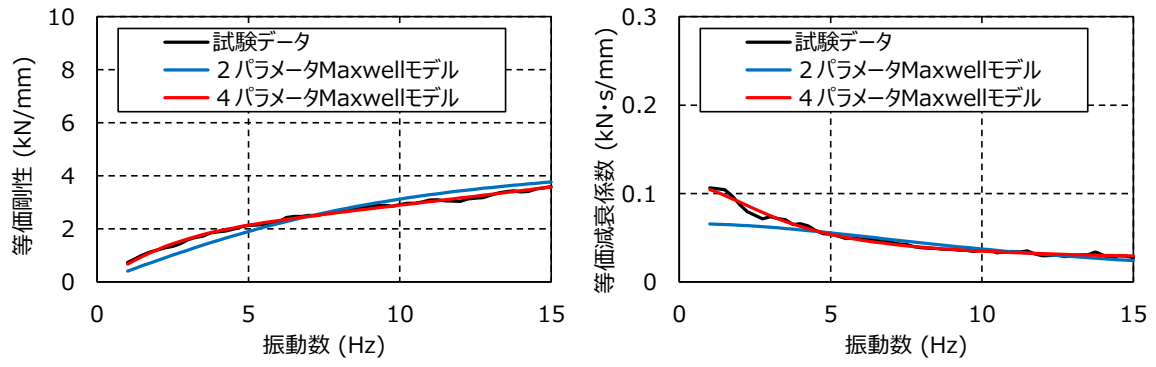
4パラメータ Maxwell モデルのパラメータは、三軸粘性ダンパの性能試験結果に基づいて設定する。



第3-5-2 添図 Maxwell モデル



第3-5-3 添図 4パラメータ Maxwell モデル



(H-1) 等価剛性 (水平方向)      (H-2) 等価減衰係数 (水平方向)

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

### 添付資料 3-6 三軸粘性ダンパの特性試験

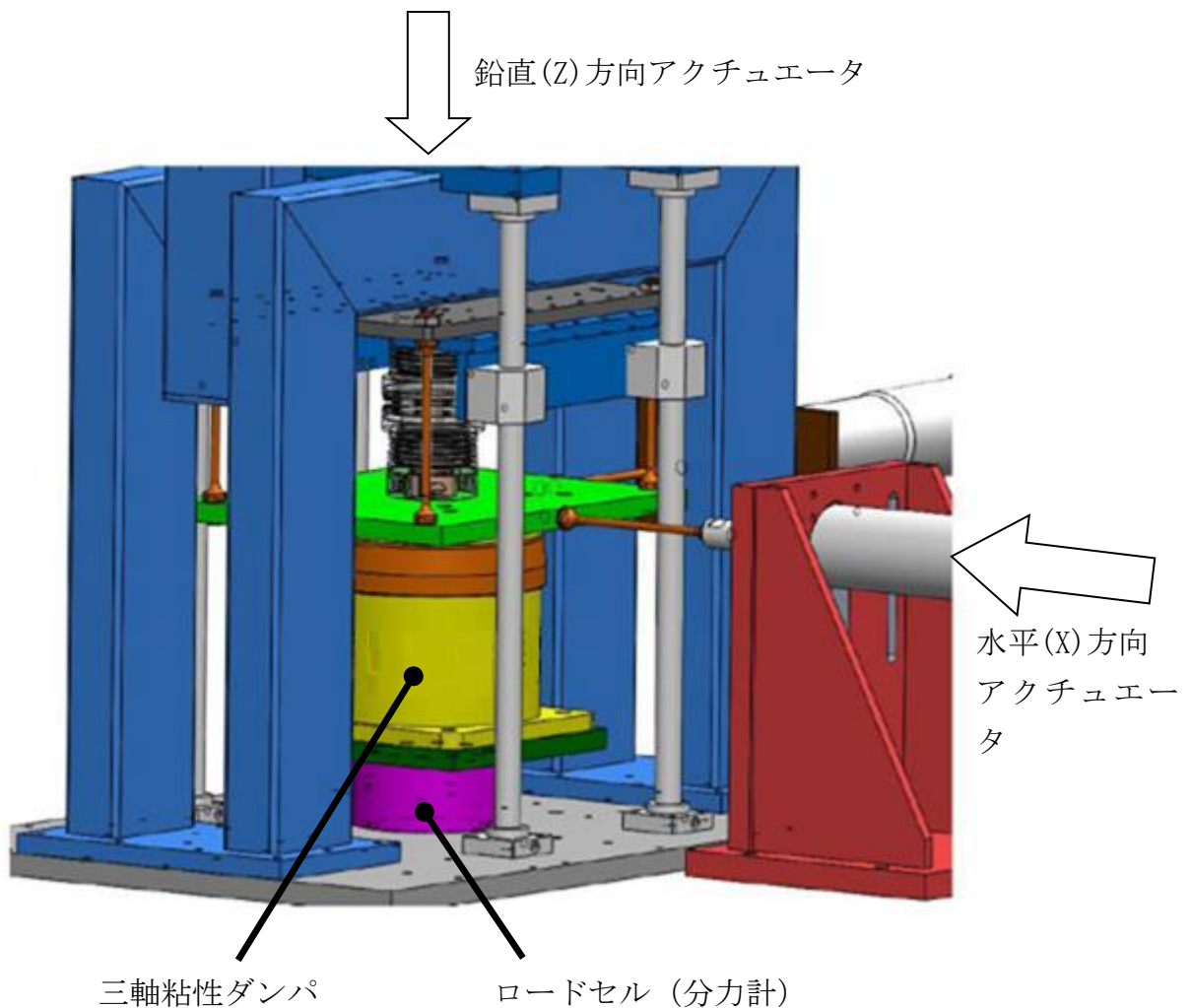
三軸粘性ダンパの減衰性能に影響する特性を把握するために実施した特性試験の結果を以下に示す。なお、三軸粘性ダンパは型式によらず構造は同じであり、使用する粘性体も同一であることから、特性試験結果については、中型及び小型（実機適用なし）の試験結果で代表して示す。

#### <試験項目>

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

### 1. 水平・鉛直同時加振試験

三軸粘性ダンパの性能試験は、水平、鉛直の各方向で1方向加振を行う方法により実施する。一方、地震時に三軸粘性ダンパは3方向同時加振されることから、水平方向加振と鉛直方向加振で相互に減衰性能に影響を及ぼす場合は、性能試験で取得した減衰性能と地震時の減衰性能に差が生じる可能性がある。そのため、水平方向及び鉛直方向の同時加振と1方向加振との減衰性能の比較を行った。水平・鉛直同時加振試験の概略図を第3-6-1添図に示す。試験条件を第3-6-1添表に、変位の時刻歴波形を第3-6-2添図に、試験結果を第3-6-3添図に示す。第3-6-3添図のとおり、水平方向及び鉛直方向の同時加振と1方向加振では減衰性能に差がないことを確認した。



第3-6-1添図 水平・鉛直同時加振試験

第3-6-1 添表 水平・鉛直同時加振試験条件

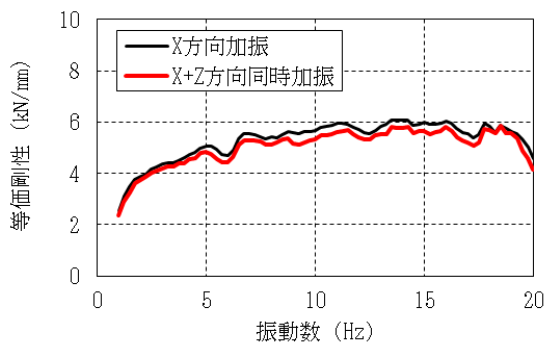
No.	型式	温度 (°C)	加振 方向	入力波形	振幅 (mm)	継続時間 (s)
1	中型	20	水平	ランダム波	3	32
2			鉛直			
3			水平 ・ 鉛直			



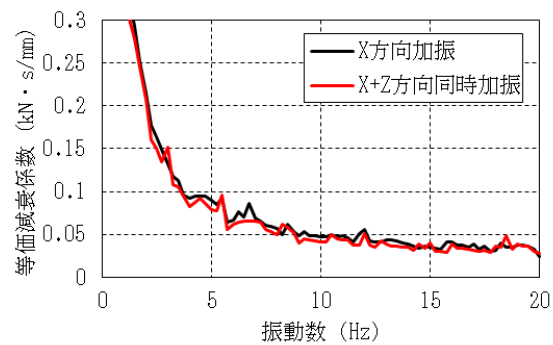
(H) 水平方向

(V) 鉛直方向

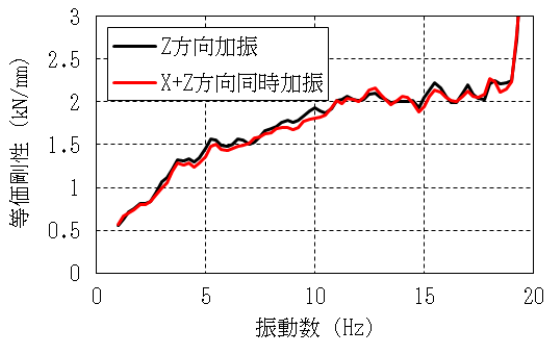
第3-6-2 添図 変位の時刻歴波形



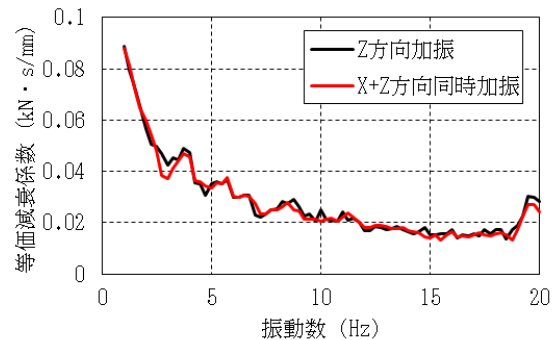
(H-1) 等価剛性 (水平単独と比較)



(H-2) 等価減衰係数 (水平単独と比較)



(V-1) 等価剛性 (鉛直単独と比較)



(V-2) 等価減衰係数 (鉛直単独と比較)

第3-6-3 添図 水平・鉛直同時加振による減衰性能への影響確認結果

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

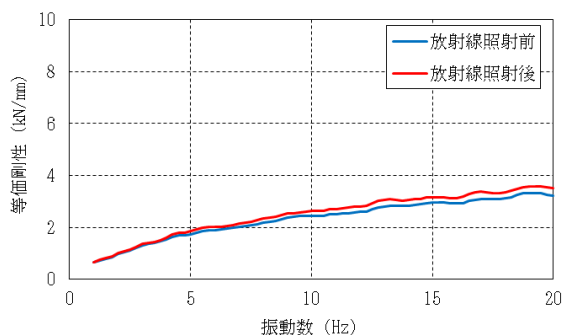
## 2. 放射線照射試験

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

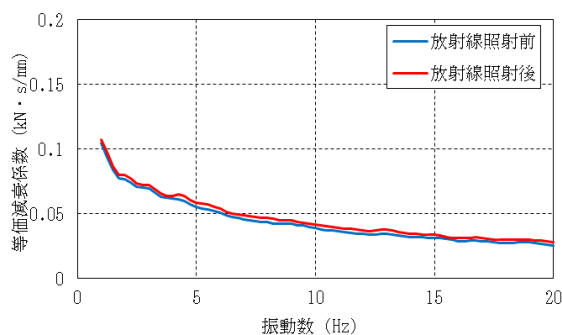
結果を第3-6-4添図に示す。第3-6-4添図のとおり、1kGyの照射では減衰性能は変化しておらず、影響がないことが確認された。

第3-6-2添表 放射線照射試験条件

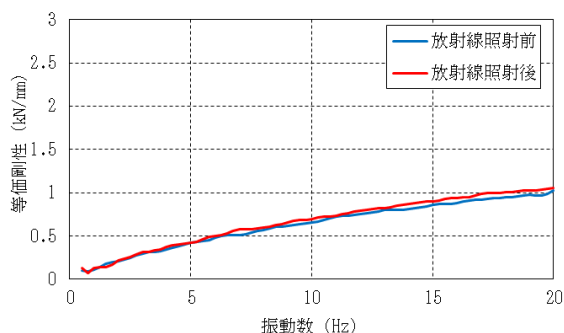
No.	型式	温度(°C)	加振方向	入力波形	振幅(mm)	継続時間(s)	$\gamma$ 線照射量
1	小型	20	水平	ランダム波	1	32	照射なし
2							1kGy
3			鉛直				照射なし
4							1kGy



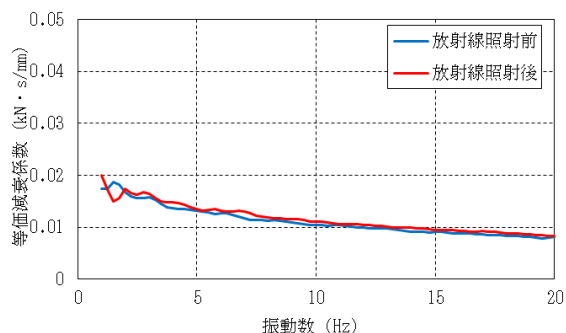
(H-1) 等価剛性 (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)



(V-1) 等価剛性 (鉛直方向)



(V-2) 等価減衰係数 (鉛直方向)

第3-6-4添図 放射線による減衰性能への影響確認結果

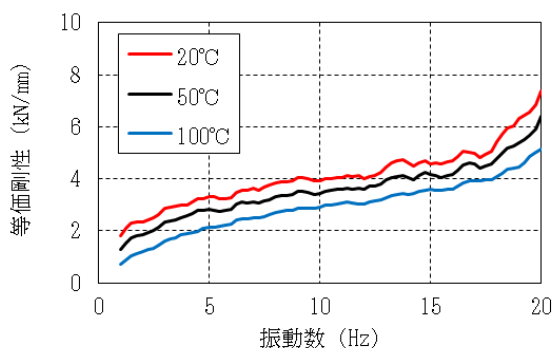
### 3. 粘性体温度を変えた性能試験

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

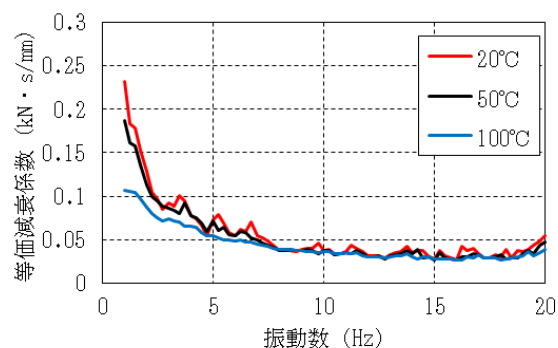
試験結果を第 3-6-5 添図に示す。第 3-6-5 添図のとおり、粘性体温度が高くなるほど三軸粘性ダンパの減衰性能が低下することが確認された。これは、粘性体の温度が上昇するほどその粘度が低下することが要因と考えられる。

第 3-6-3 添表 粘性体温度を変えた性能試験条件

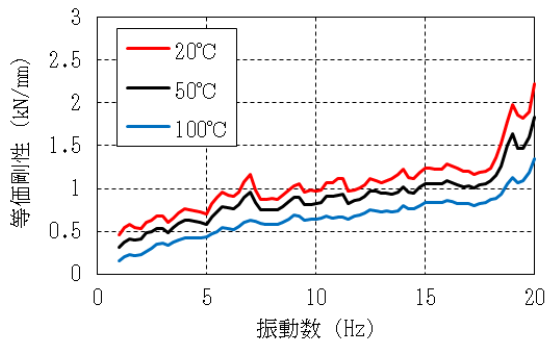
No.	型式	温度 (°C)	加振方向	入力波形	振幅 (mm)	継続時間 (s)
1	中型	20	水平	ランダム波	6	32
2		50				
3		100				
4		20	鉛直			
5		50				
6		100				



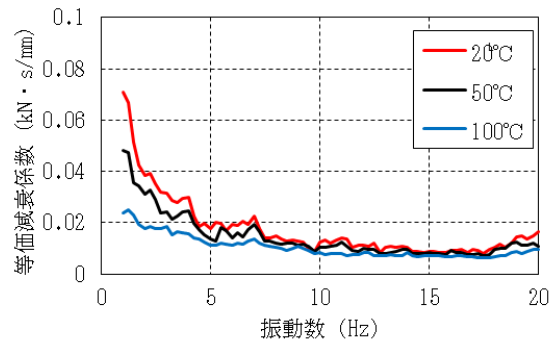
(H-1) 等価剛性 (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)



(V-1) 等価剛性 (鉛直方向)



(V-2) 等価減衰係数 (鉛直方向)

第 3-6-5 添図 粘性体温度による減衰性能への影響確認結果



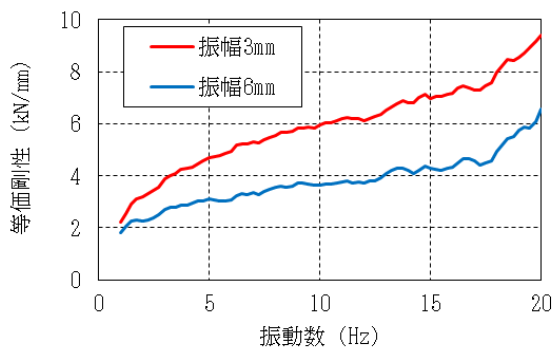
#### 4. 加振振幅を変えた性能試験

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

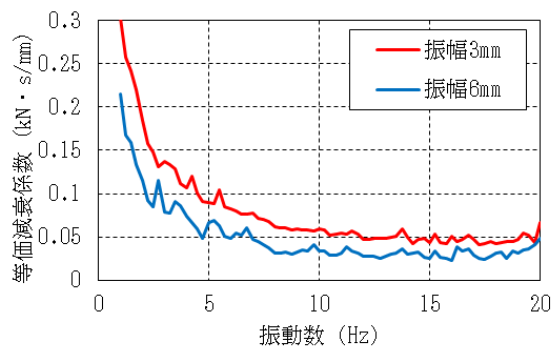
試験結果を第3-6-6添図に示す。第3-6-6添図のとおり、振幅が大きいほど三軸粘性ダンパの減衰性能が低下することが確認された。これは、三軸粘性ダンパで消費されたエネルギーにより粘性体温度が上昇したこと、粘性体が内部で流動し、ダンパピストンとの接触状態が変化したことが要因と考えられる。

第3-6-4添表 加振振幅を変えた性能試験条件

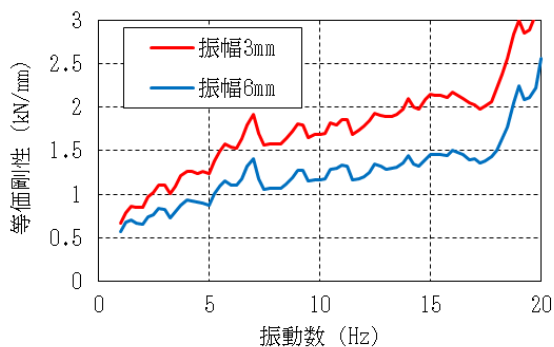
No.	型式	温度 (°C)	加振方向	入力波形	振幅 (mm)	継続時間 (s)
1	中型	20	水平	ランダム波	3	32
2			鉛直			
3			水平		6	
4			鉛直			



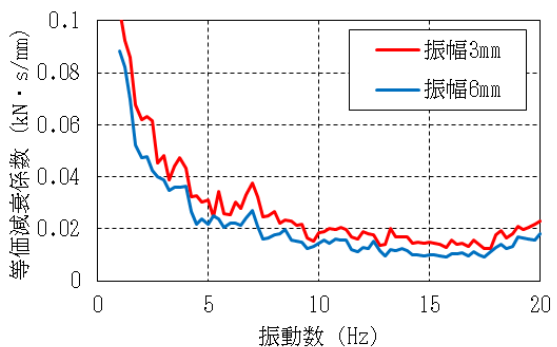
(H-1) 等価剛性 (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)



(V-1) 等価剛性 (鉛直方向)



(V-2) 等価減衰係数 (鉛直方向)

第3-6-6添図 振幅による減衰性能への影響確認結果

## 5. 連続加振試験

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

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

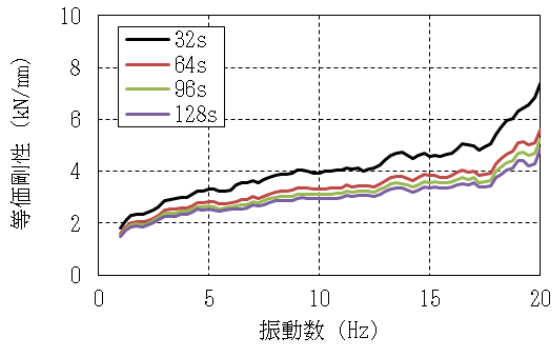
$$W = \int_0^T F(t) \frac{dx(t)}{dt} dt \quad (1)$$

ここで、

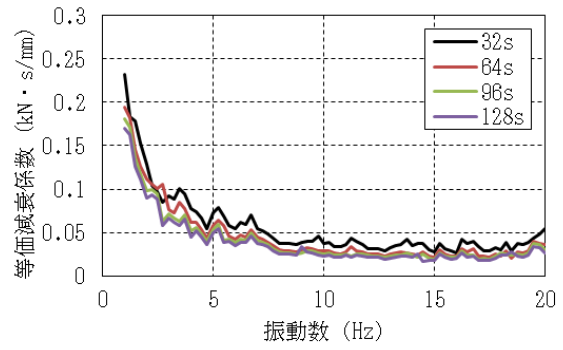
$F(t)$  : 三軸粘性ダンパ反力,  $x(t)$  : 三軸粘性ダンパ変位,  $T$  : 加振継続時間

第3-6-5添表 連続加振試験条件

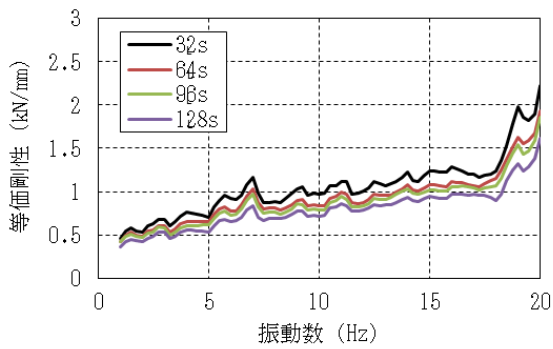
No.	型式	温度 (°C)	加振 方向	入力波形	振幅 (mm)	継続時間 (s)
1	中型	20	水平	ランダム波	6	32
2			鉛直			
3			水平			64
4			鉛直			
5			水平			96
6			鉛直			
7			水平			128
8			鉛直			



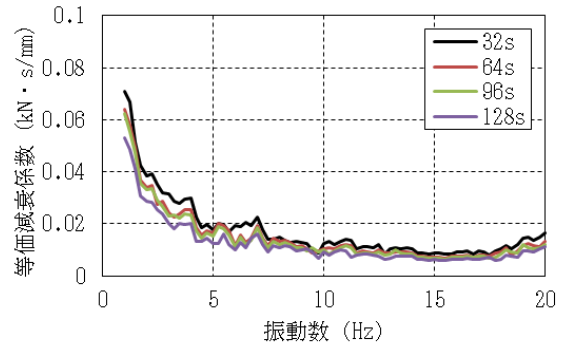
(H-1) 等価剛性 (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)



(V-1) 等価剛性 (鉛直方向)



(V-2) 等価減衰係数 (鉛直方向)

第3-6-7添図 連続加振による減衰性能への影響確認結果

添付資料 3-7 三軸粘性ダンパの据付公差による減衰性能への影響

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

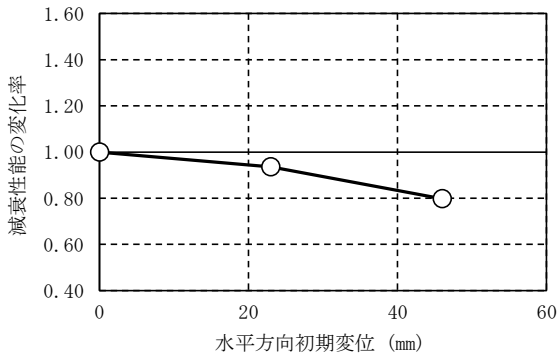
三軸粘性ダンパの初期変位による減衰性能への影響確認試験の試験ケースを第 3-7-1 添表に、試験結果を第 3-7-1 添図～第 3-7-2 添図に示す。三軸粘性ダンパの減衰性能は振動数依存性を有するため、減衰性能の変化率は 5～15Hz の平均値で示す。また、等価剛性及び等価減衰係数のうち、より大きい変化率を減衰性能の変化率と整理する。

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

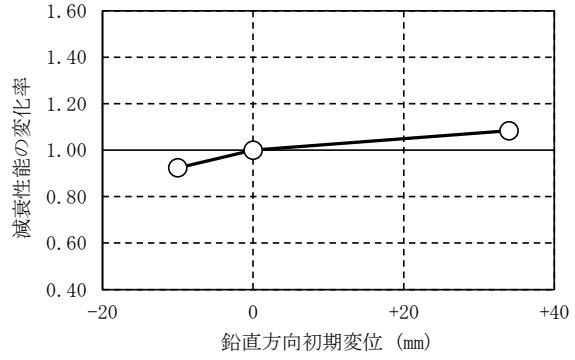
第 3-7-1 添表 初期変位の影響確認試験条件

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

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

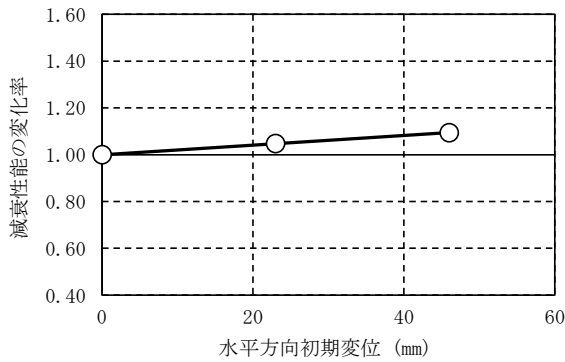


(H) 水平方向初期変位

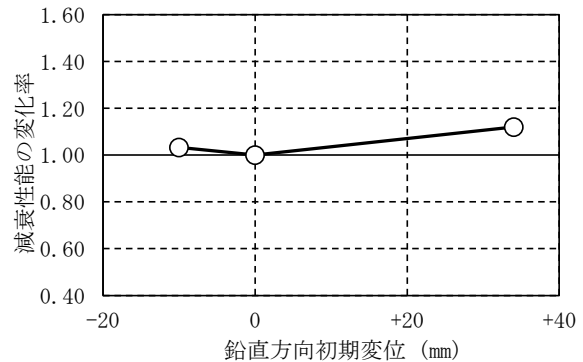


(V) 鉛直方向初期変位

第3-7-1 添図 水平方向の減衰性能の変化



(H) 水平方向初期変位



(V) 鉛直方向初期変位

第3-7-2 添図 鉛直方向の減衰性能の変化

第3-7-2 添表 三軸粘性ダンパの初期変位による減衰性能への影響

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

## 添付資料 3-8 三軸粘性ダンパの性能試験方法

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

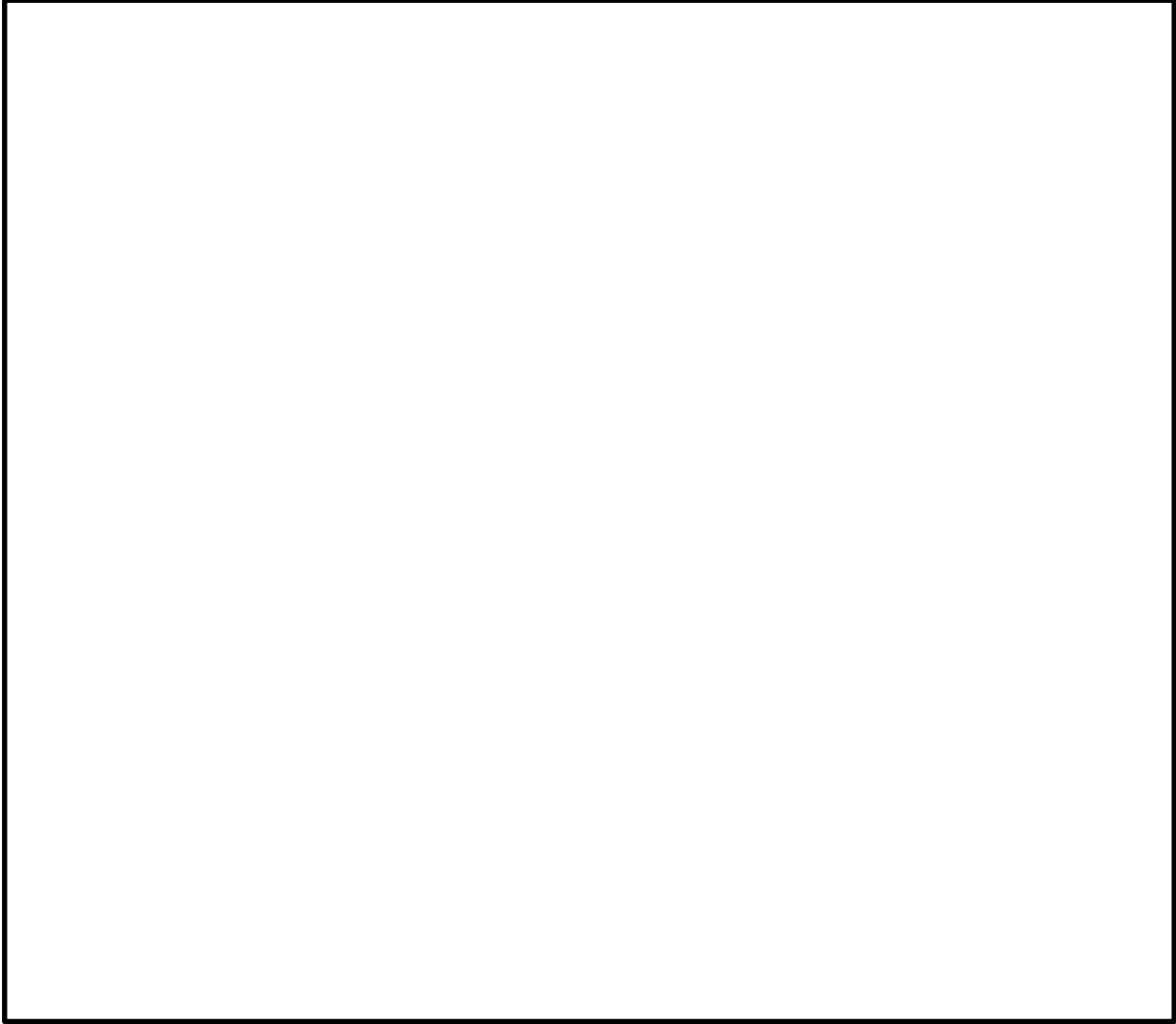
### 1. 性能試験方法

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

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

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

第3-8-1 添表 三軸粘性ダンパの性能試験条件の例



本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

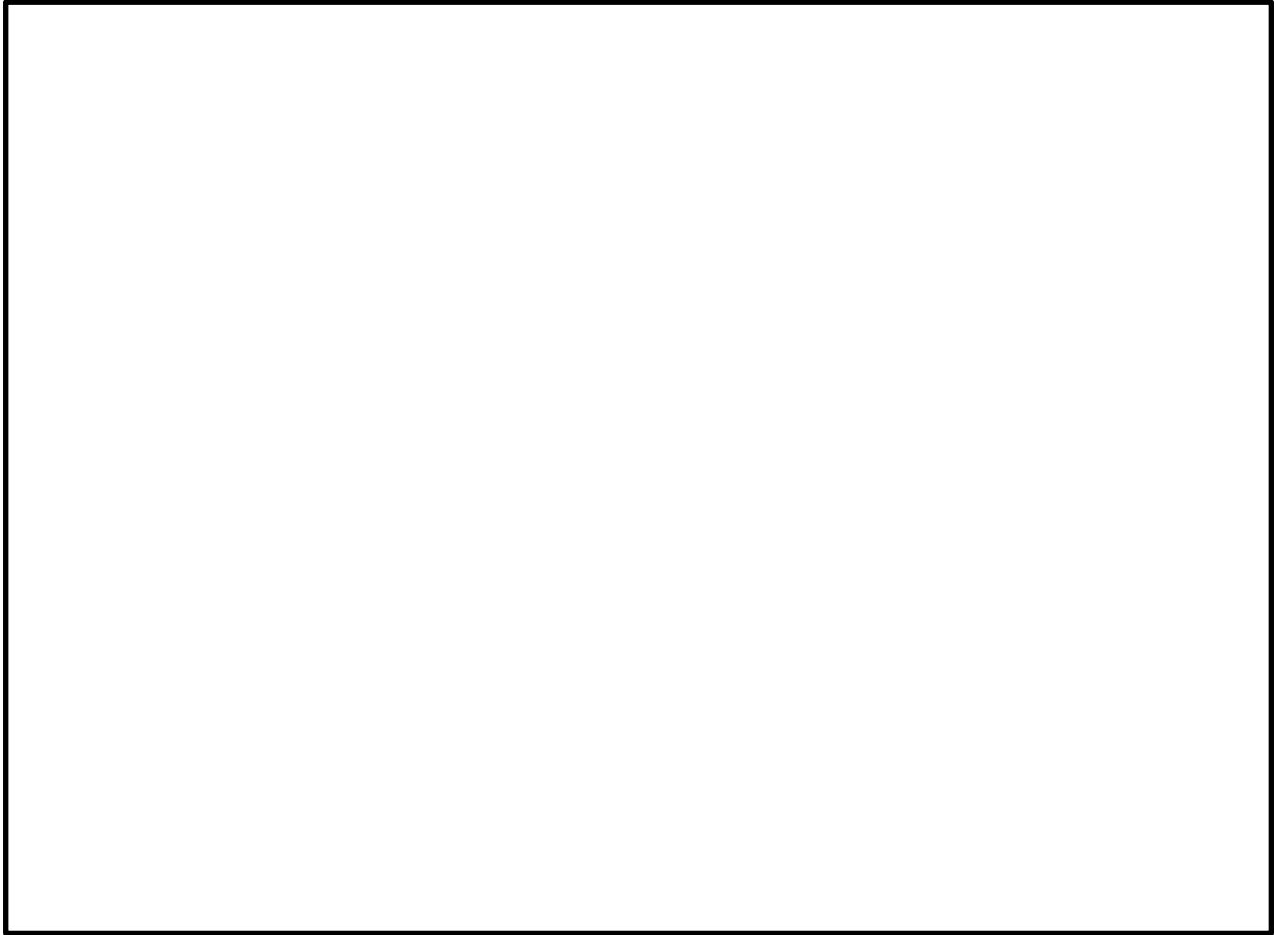
第 3-8-1 添図 性能試験フロー(1/3)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



第 3-8-1 添図 性能試験フロー (2/3)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



第3-8-1 添図 性能試験フロー(3/3)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

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

地震による慣性力を受ける配管系の運動方程式を以下に示す。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

式(5)は式(6)に示すモード空間での非連成の運動方程式となる。

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

ここで、

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

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 $\beta_i$ 及び $i$ 次モードの固有角振動数 $\omega_i$ の応答スペクトル値を用いて、スペクトルモーダル解析を行うことができる。

一方で、配管系に三軸粘性ダンパを設置した場合、減衰マトリックス $[C]$ が大きな値となり対角化できず、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ の3つのマトリッ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<sup>(4)</sup>。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ックス $[C]$ 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ックス $[C_D]$ 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ックス $[C_P]$ の和として式(7)のように設定することが可能である。

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

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

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

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

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

$\{x_a\}$  : 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 <sup>※1</sup>	K <sub>1</sub> , C <sub>1</sub>	3.19 × 10 <sup>5</sup> (N・m)
	K <sub>2</sub> , C <sub>2</sub>	3.27 × 10 <sup>5</sup> (N・m)
	K <sub>3</sub> , C <sub>3</sub>	3.30 × 10 <sup>5</sup> (N・m)
	K <sub>4</sub> , C <sub>4</sub>	3.38 × 10 <sup>5</sup> (N・m)
	K <sub>5</sub> , C <sub>5</sub>	3.59 × 10 <sup>5</sup> (N・m)

※1：最も厳しい結果を記載

第 3-10-2 添表 三軸粘性ダンパの荷重及び変位

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

※1：最も厳しい結果を記載

## 添付資料 3-11 三軸粘性ダンパの配管への取付部の設計について

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

### 1. ラグの設計について

#### 1. 1 構造概要

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

#### 1. 2 荷重の伝達機構

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

#### 1. 3 構造成立性について

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

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

### 2. クランプの設計について

#### 2. 1 構造概要

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

#### 2. 2 荷重の伝達機構

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

向の荷重伝達機構を以下に示す。

### 【クランプから配管への荷重伝達機構】

#### (1) 水平方向

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

##### a. 配管軸方向

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

##### b. 配管軸直方向

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

#### (2) 鉛直方向

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

## 2. 3 構造成立性について

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

### (1) 水平方向荷重に対するクランプの構造成立性

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

配管軸方向の拘束については  $F_f$  が許容荷重となる。

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

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

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

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

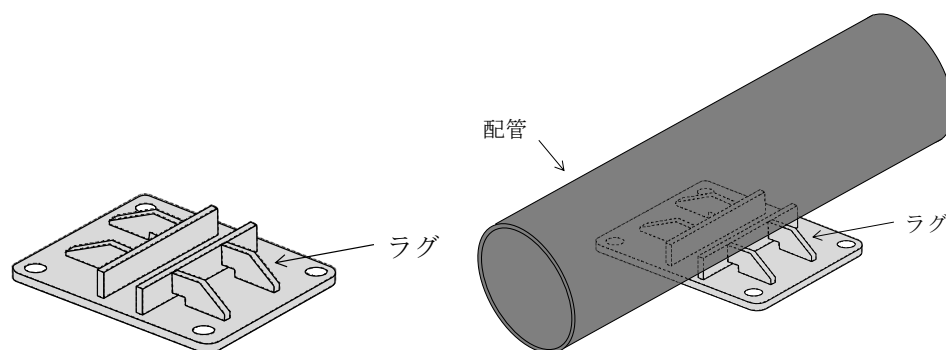
## (2) 鉛直方向荷重に対するクランプの構造成立性

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

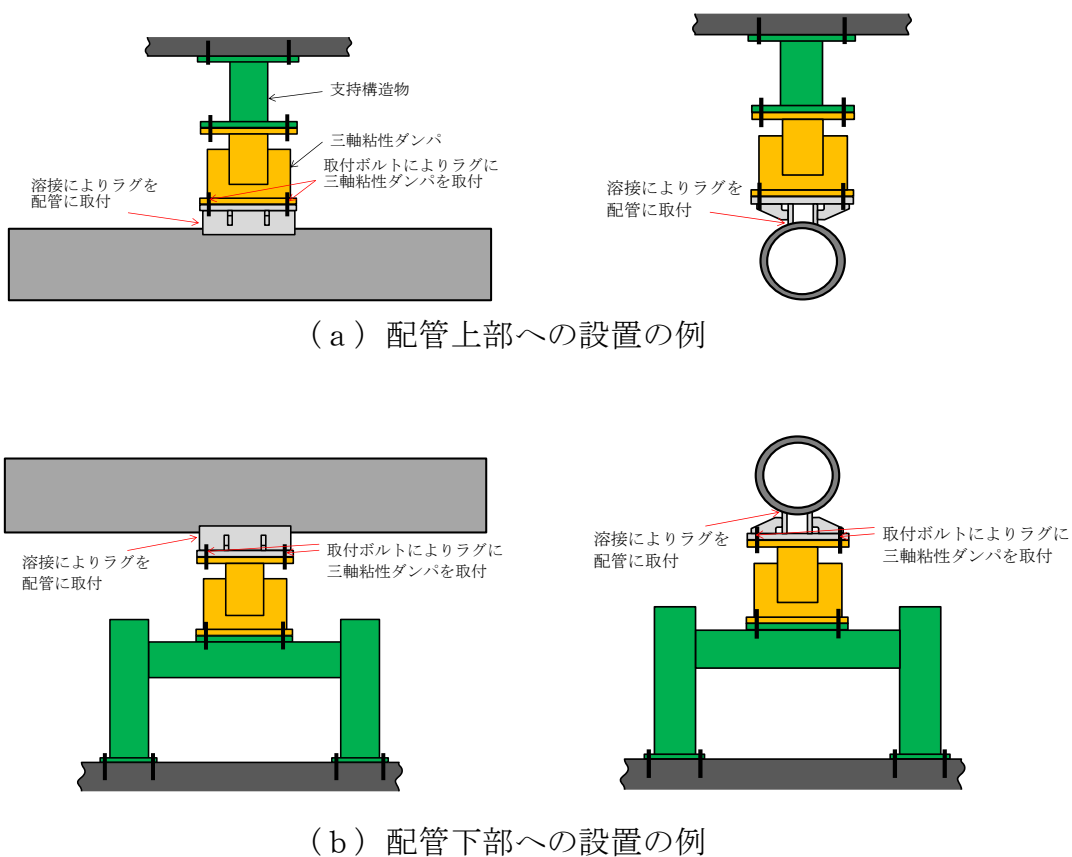
と同じ 140 (kN) に設定する。三軸粘性ダンパ及びクランプ共通の許容荷重 140 (kN) に対して、クランプの構成部品の中で余裕が小さいと想定される評価対象部位としてクランプボルトの構造強度評価を J E A G 4 6 0 1 等に基づいて実施した。評価の結果は第 3-11-3 添表のとおりであり、構造成立性を確認した。

### 3. 配管系への三軸粘性ダンパの配置計画の成立性について

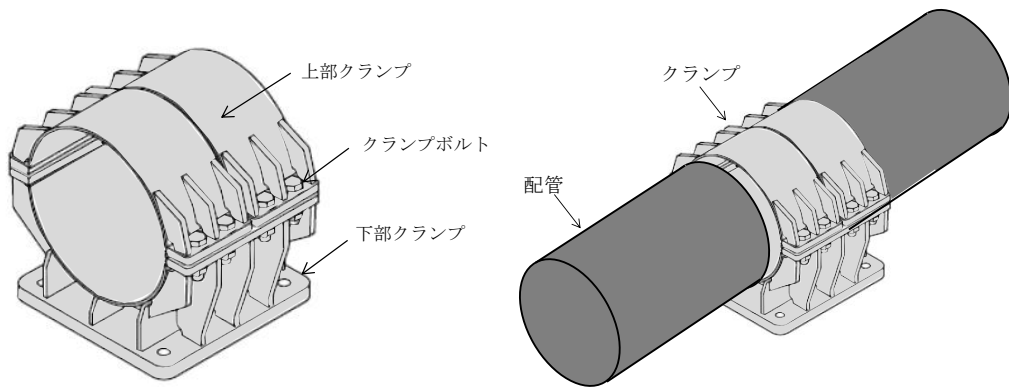
三軸粘性ダンパは、配管への取付方法としてラグ又はクランプを選択可能であり、配管の上部及び下部のいずれの位置にも設置することができる。配管への取付方法及び設置位置は設置スペース、干渉物、施工性等を考慮して現場状況に応じて選択することから、配置計画の成立性に問題はないと判断している。



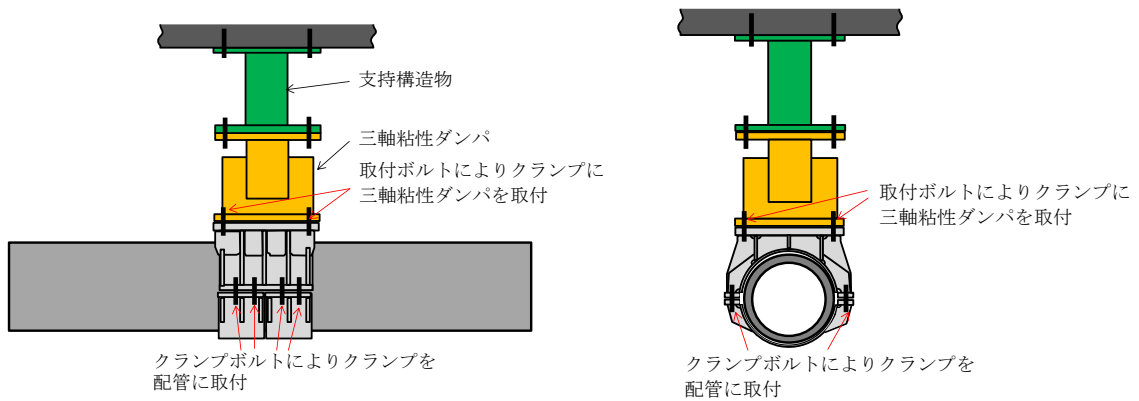
第 3-11-1 添図 ラグの構造概要



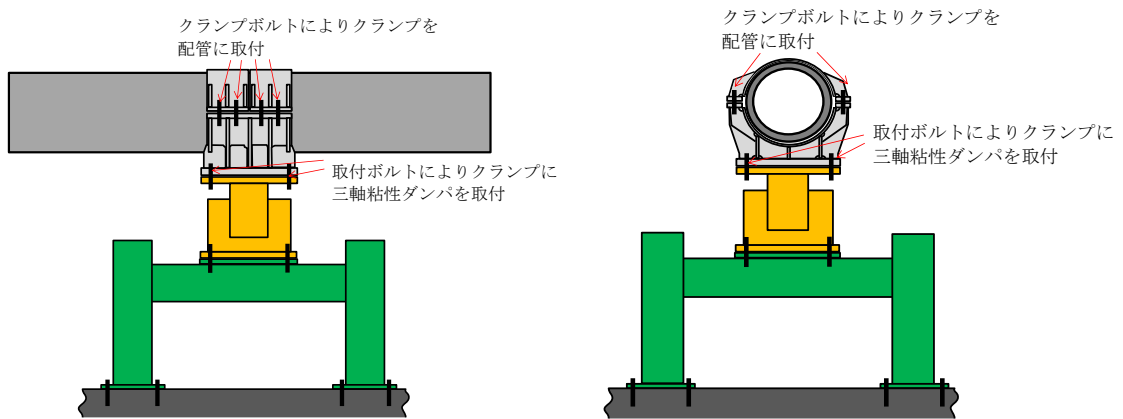
第 3-11-2 添図 ラグの配管への取付及び三軸粘性ダンパへの接続



第3-11-3 添図 クランプの構造概要

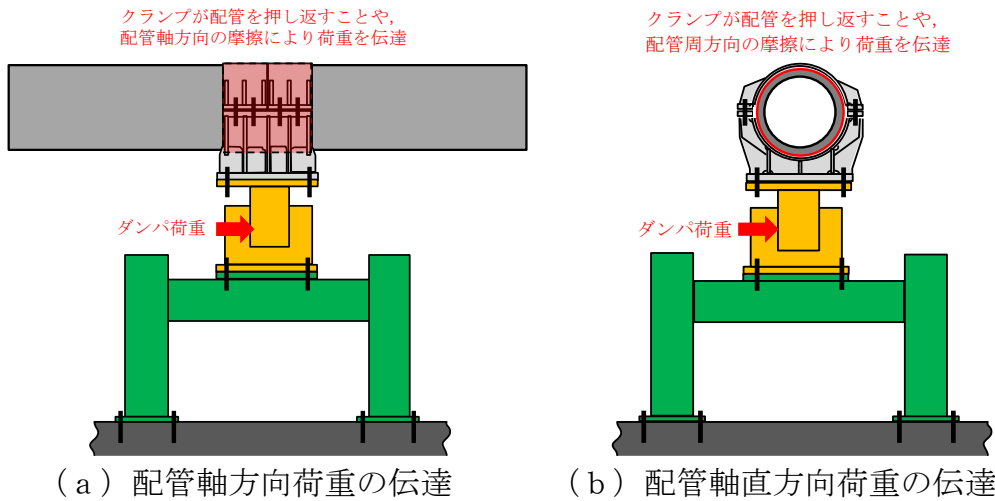


(a) 配管上部への設置の例

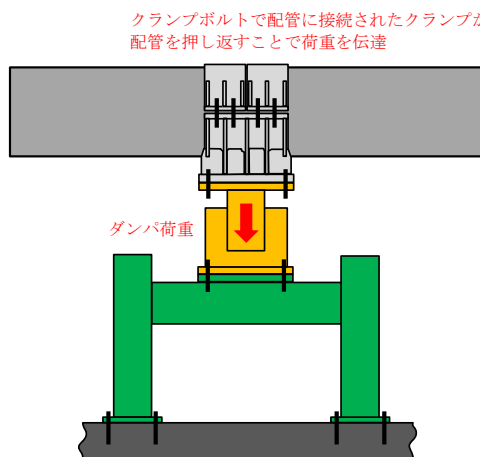


(b) 配管下部への設置の例

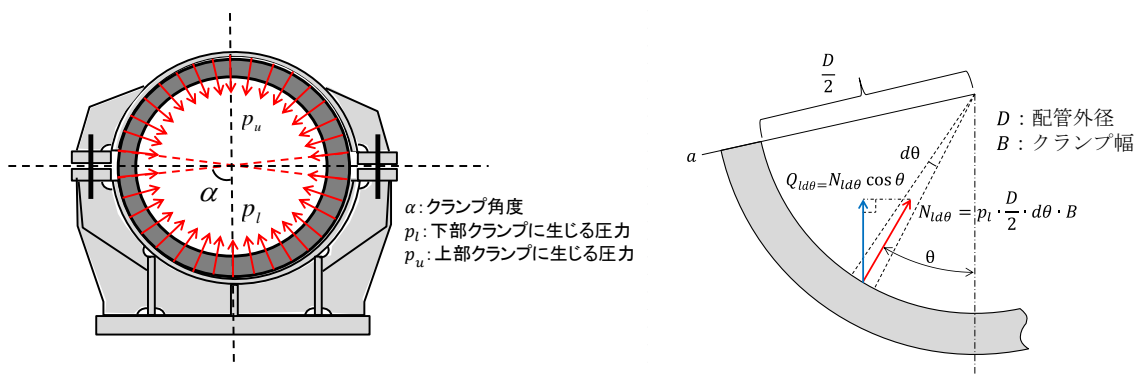
第3-11-4 添図 クランプの配管への取付及び三軸粘性ダンパへの接続



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

第3-11-2 添表 クランプの許容荷重

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

※1：より厳しい配管軸直角方向の許容荷重に合わせて設定

※2：三軸粘性ダンパの鉛直方向の許容荷重に合わせて設定

第3-11-3 添表 鉛直方向許容荷重によるクランプボルトの評価結果

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

※1：許容応力状態  $B_A S$  の許容応力

添付資料 3-12 三軸粘性ダンパの耐震評価方法に関する海外実績との比較

三軸粘性ダンパを設置した配管系の耐震評価方法について、海外実績と島根 2 号炉の比較を第 3-12-1 添表に示す。第 3-12-1 添表に示すとおり、三軸粘性ダンパを設置する場合の耐震評価方法は同様である。島根 2 号炉では、海外実績における耐震評価方法に加えて減衰性能の変動及びばらつきを考慮しているが、これは「免震構造の審査手引きの提案（平成 26 年 1 月） 独立行政法人原子力安全基盤機構」及び工認審査ガイドを踏まえて考慮することとしたものである。

第 3-12-1 添表 海外実績と島根 2 号炉における耐震評価方法の比較

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

## 島根原子力発電所 2 号炉

弾性設計用地震動 S d の設定

について

## 目 次

1. はじめに
  2. 弾性設計用地震動  $S_d$  の設定について
    - 2.1 弾性設計用地震動  $S_d$  と基準地震動  $S_s$  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  $S_d$  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  $S_d$  の設定
    - 2.5 弾性設計用地震動  $S_d$  の年超過確率の参照
  3. 弾性設計用地震動  $S_d$  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  $S_{d-1}$  を設定した理由及び  
 $S_{d-1}$  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  $S_{d-1}$  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  $S_d$  の設定について説明するものである。

弾性設計用地震動  $S_d$  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  $S_d$  と基準地震動  $S_s$  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  $S_d$  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  $S_d$  を設定し、設定した弾性設計用地震動  $S_d$  の年超過確率を参照する。

また、弾性設計用地震動  $S_d$  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 $S_d$ の設定について

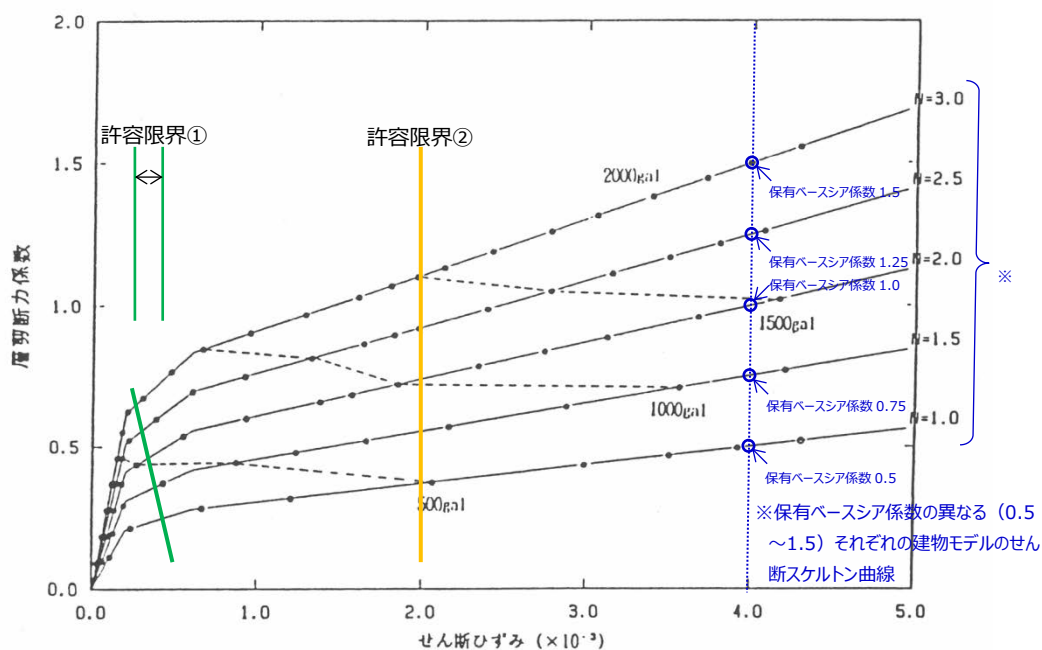
### 2.1 弾性設計用地震動 $S_d$ と基準地震動 $S_s$ との応答スペクトルの比率に関する知見の整理

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  $\alpha$  について、日本電気協会の調査報告<sup>(1)</sup>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  $S_s$  の許容限界（せん断ひずみ度で  $2.0 \times 10^{-3}$ ）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  $S_d$  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  $\alpha$  は 0.5 程度の値となる。

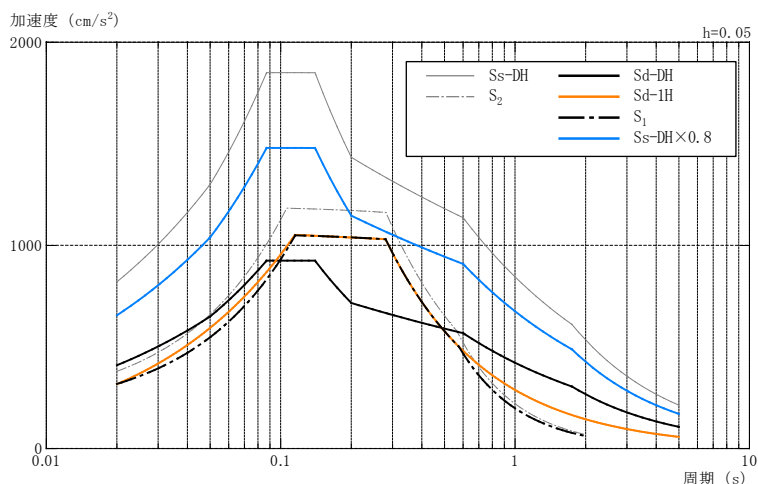


第 2.1-1 図 最大入力加速度とスケルトン上の最大応答  
(参考文献(1)より引用，加筆)

## 2.2 弾性設計用地震動 S<sub>d</sub> の役割を踏まえた設定の考え方

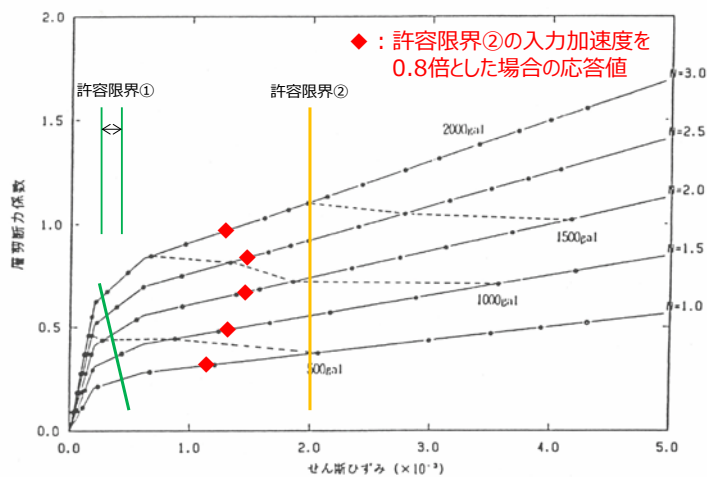
先行プラントの審査実績における設定方法と同じように、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（昭和 56 年 7 月 20 日 原子力安全委員会決定，平成 13 年 3 月 29 日 一部改訂）」（以下「旧指針」という。）における基準地震動 S<sub>1</sub> を弾性設計用地震動 S<sub>d</sub> で包絡させる考え方とした場合，基準地震動 S<sub>s-D</sub> の約 0.8 倍となり，弾性設計用地震動 S<sub>d</sub> が基準地震動 S<sub>s</sub> に近づき，基準地震動 S<sub>s</sub> に対する安全機能の保持をより高い精度で確認す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 S<sub>s</sub> 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 S<sub>d</sub> による弾性設計ではなく，弾性設計用地震動 S<sub>d</sub> 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<sub>1</sub> 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<sub>2</sub> に対する基準地震動 S<sub>1</sub> の比率も約 8 割～9 割と大きい。また，基準地震動 S<sub>1</sub> と基準地震動 S<sub>s-D</sub>（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<sub>1</sub> を包絡する基準地震動 S<sub>s-D</sub>H×0.8 の短周期側は基準地震動 S<sub>1</sub> の約 1.5～2 倍程度になる。



第 2.2-1 図 基準地震動  $S_s - DH \times 0.8$  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 という弾性設計用地震動  $S_d$  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  $S_d$  を基準地震動  $S_{s-D}$  の 0.8 倍と設定し弾性設計を行う場合、基準地震動  $S_s$  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  $S_d$  による弾性設計を行うことで基準地震動  $S_s$  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  $S_d$  を基準地震動  $S_{s-D}$  の 0.8 倍と設定した場合の耐震評価を、基準地震動  $S_s$  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  $S_{s-D} \times 0.8$  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  $S_d$  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)	$S_{d-D}$	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。
	$S_{s-D} \times 0.8$		目安値を 超える 見込み <sup>(注1)</sup>	
制御室建物 (中央制御室 遮蔽壁)	$S_{d-D}$	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)
	$S_{s-D} \times 0.8$		目安値を 超える 見込み <sup>(注2)</sup>	

(注1)  $S_{s-D} \times 0.8$  によるブラケットの発生応力を評価 ( $S_{d-D} (=S_{s-D} \times 0.5)$  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)  $S_{s-D} \times 0.8$  による鉄筋の応力度を評価 ( $S_{d-D} (=S_{s-D} \times 0.5)$  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  $S_s$  の係数倍で基準地震動  $S_1$  を包絡した弾性設計用地震動  $S_d$  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  $S_d$  は、弾性設計用地震動  $S_d$  と基準地震動  $S_s$  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  $S_d$  の役割を踏まえ、基準地震動  $S_s$  に係数 0.5 を乗じて設定する。

## 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

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  $S_1$  がAクラス施設の耐震性を担保（基準地震動  $S_1$  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  $S_1$  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  $S_d$  として追加設定する。

基準地震動  $S_1$  と弾性設計用地震動  $S_{d-1}$  の地震動の特徴や新旧設計体系の比較、及び基準地震動  $S_1$  をそのまま用いるのではなく新たに弾性設計用地震動  $S_{d-1}$ （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  $S_{d-1}$  が基準地震動  $S_1$  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 $S_d$ の設定

### (1) 弾性設計用地震動 $S_d$ の役割を踏まえた設定

弾性設計用地震動  $S_d$  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  $S_s$  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  $S_s$  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  $S_d$  を以下に示す。

弾性設計用地震動  $S_d$  :  $S_{d-D}$ ,  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $N_1$ ,  $N_2$

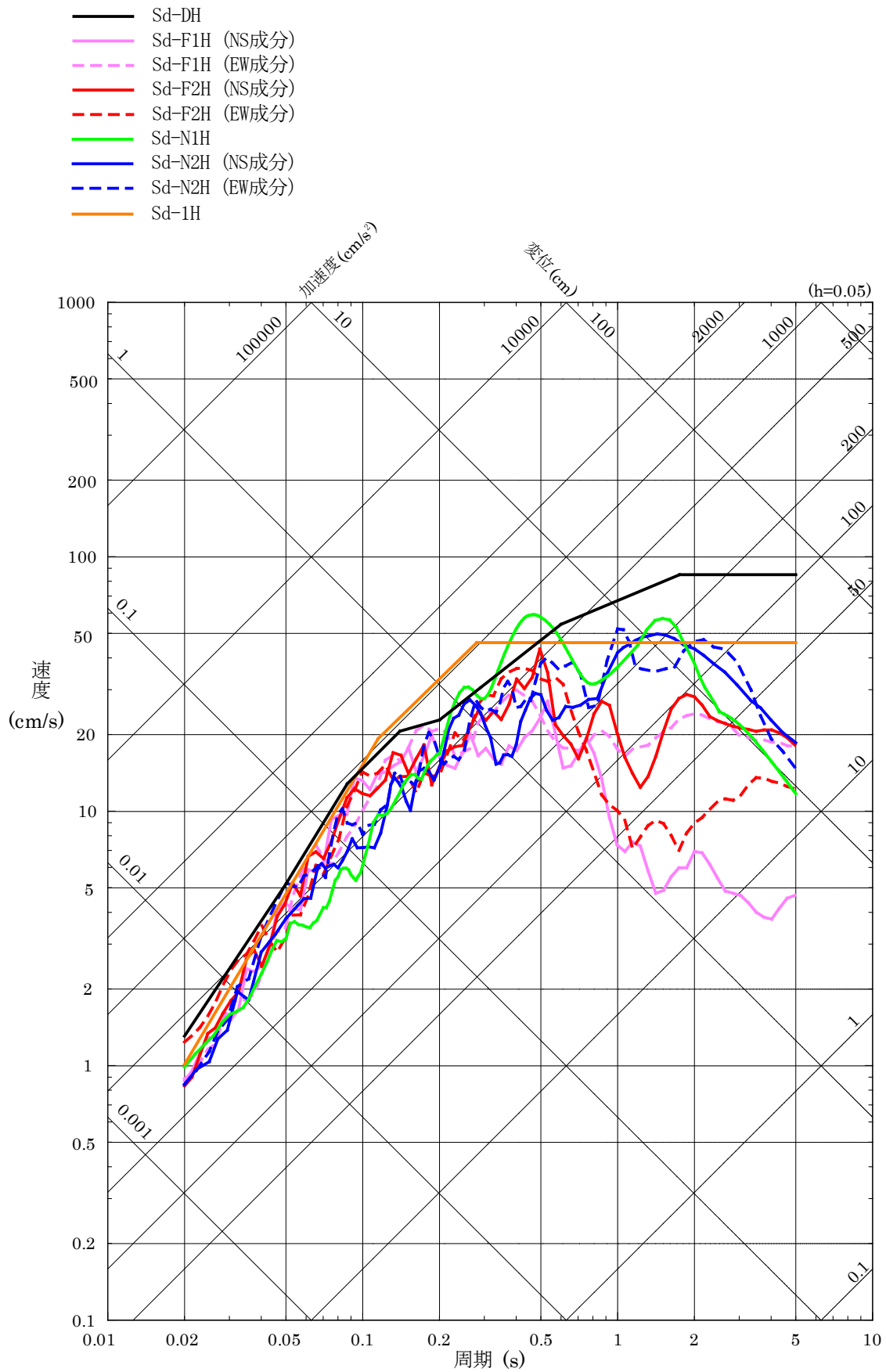
### (2) 基準地震動 $S_1$ の果たしてきた役割を踏まえた設定

基準地震動  $S_1$  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  $S_1$  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  $S_d$  として設定した。

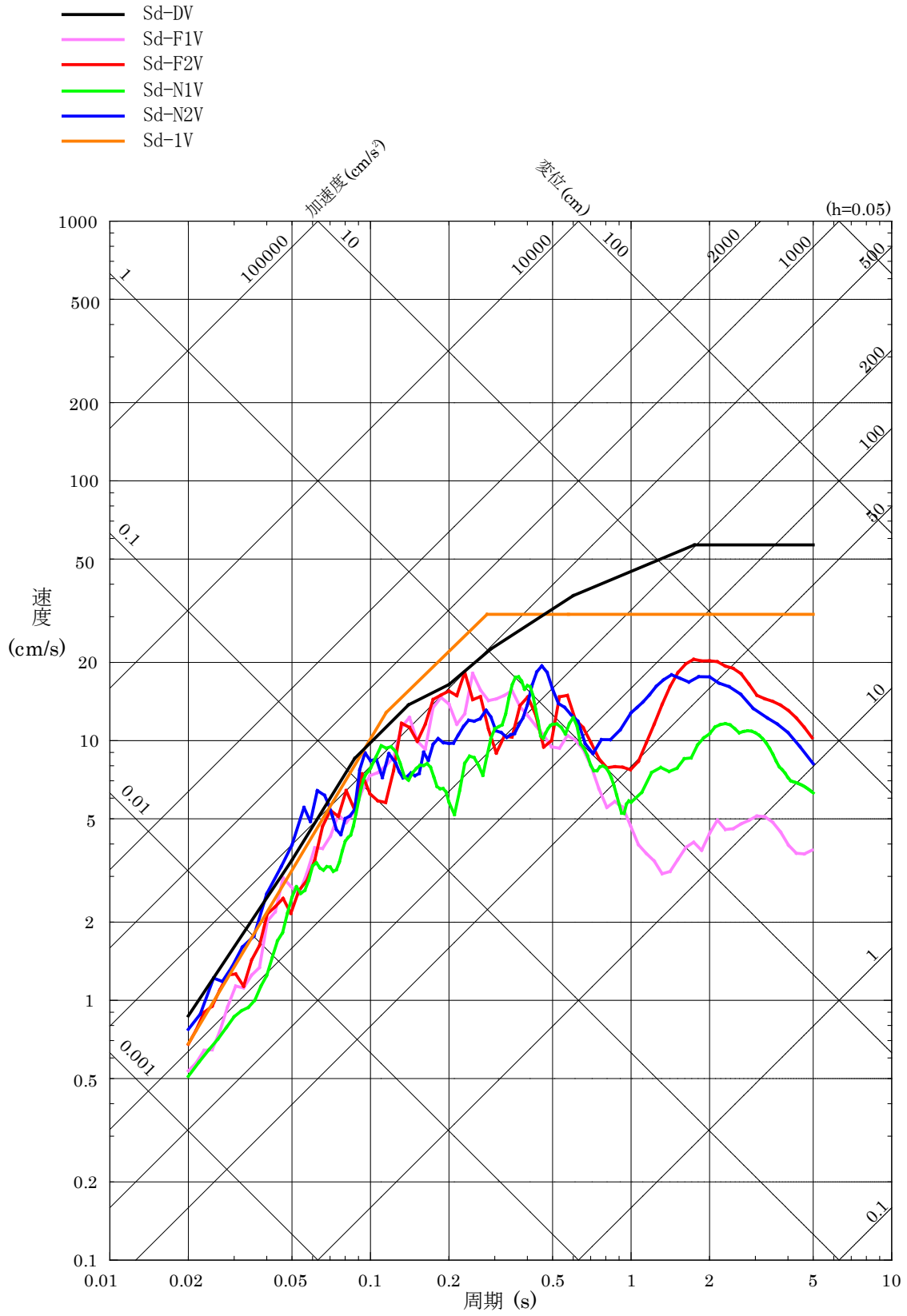
設定した弾性設計用地震動  $S_d$  を以下に示す。

弾性設計用地震動  $S_d$  :  $S_{d-1}$

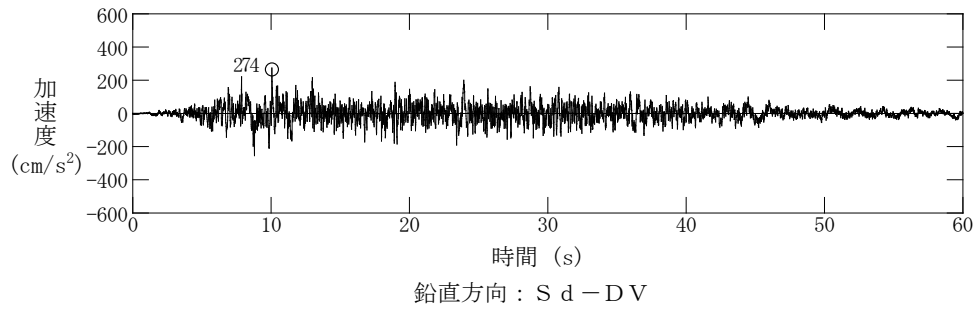
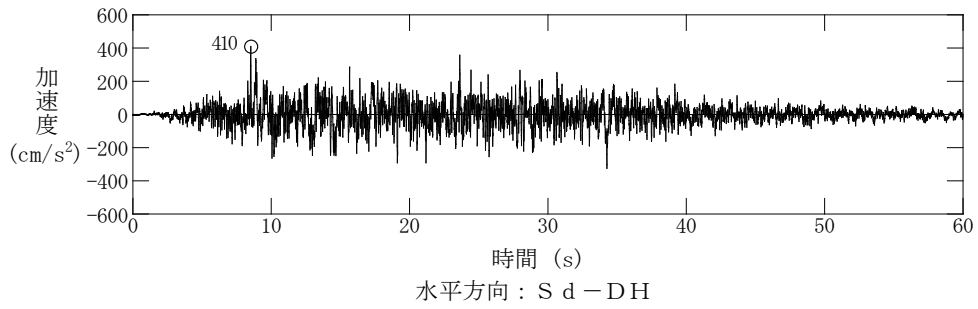
設定した弾性設計用地震動  $S_d$  の応答スペクトルを第2.4-1図及び第2.4-2図に、加速度時刻歴波形を第2.4-3図～第2.4-8図に、弾性設計用地震動  $S_d$  と基準地震動  $S_1$  の応答スペクトルの比較を第2.4-9図に示す。弾性設計用地震動  $S_{d-1}$  の模擬地震波の作成条件等を添付資料-2に示す。



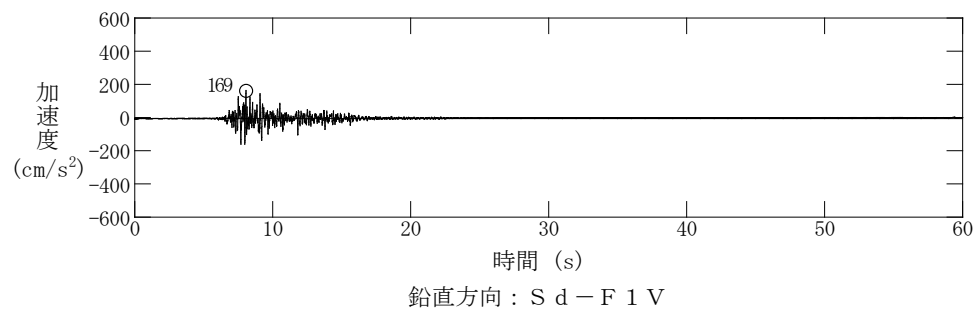
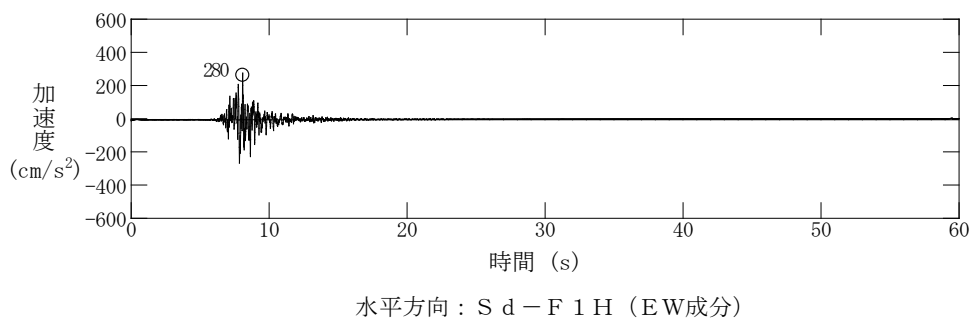
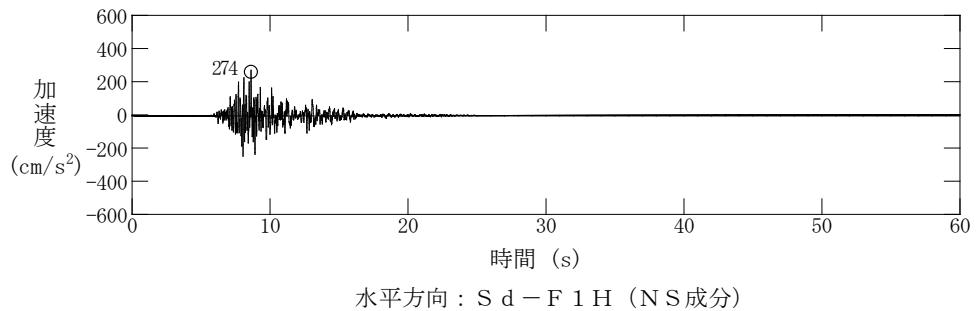
第 2.4-1 図 弾性設計用地震動 S d の応答スペクトル (水平方向)



第 2.4-2 図 弾性設計用地震動  $S_d$  の応答スペクトル (鉛直方向)

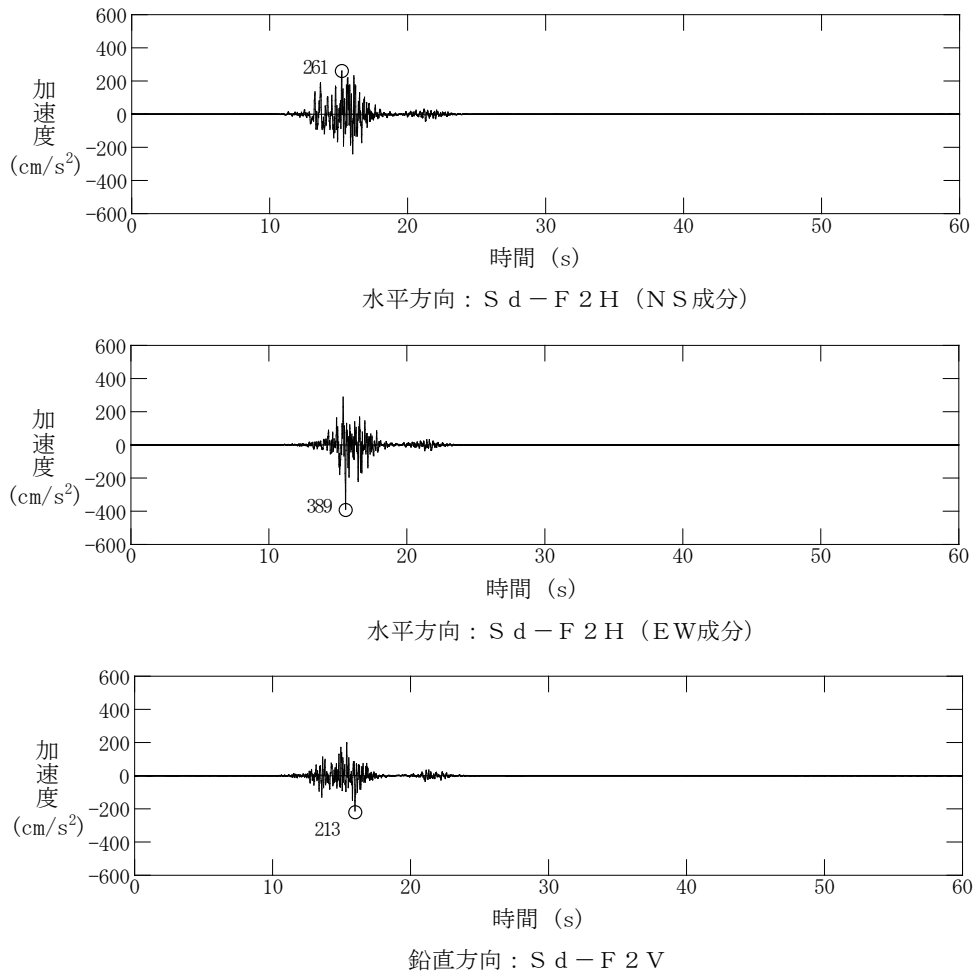


第 2.4-3 図 弾性設計用地震動 S d - D の設計用模擬地震波の  
加速度時刻歴波形

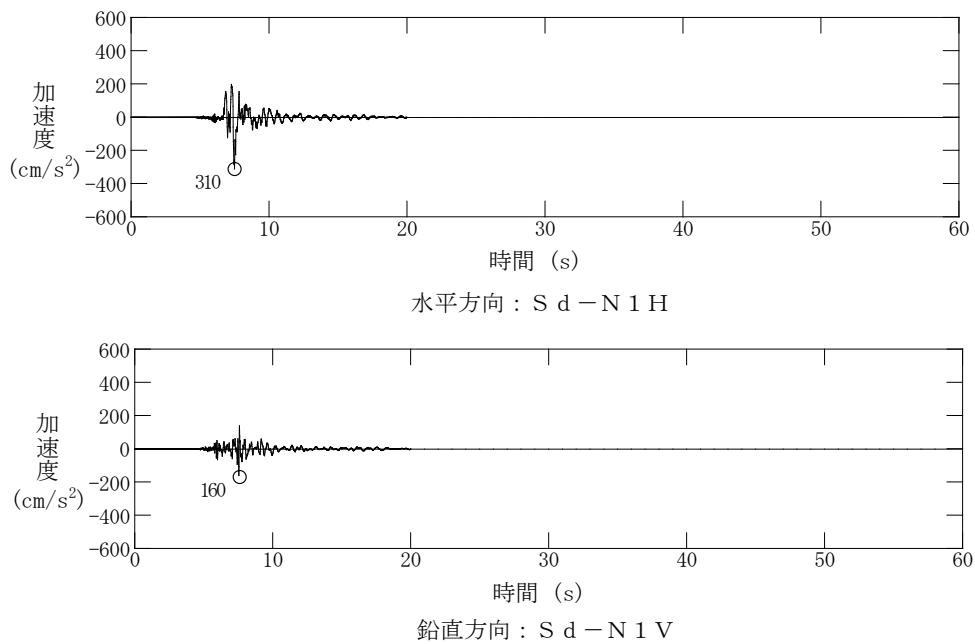


第 2.4-4 図 弾性設計用地震動 S d - F 1 の加速度時刻歴波形  
4 条-別紙 19-8

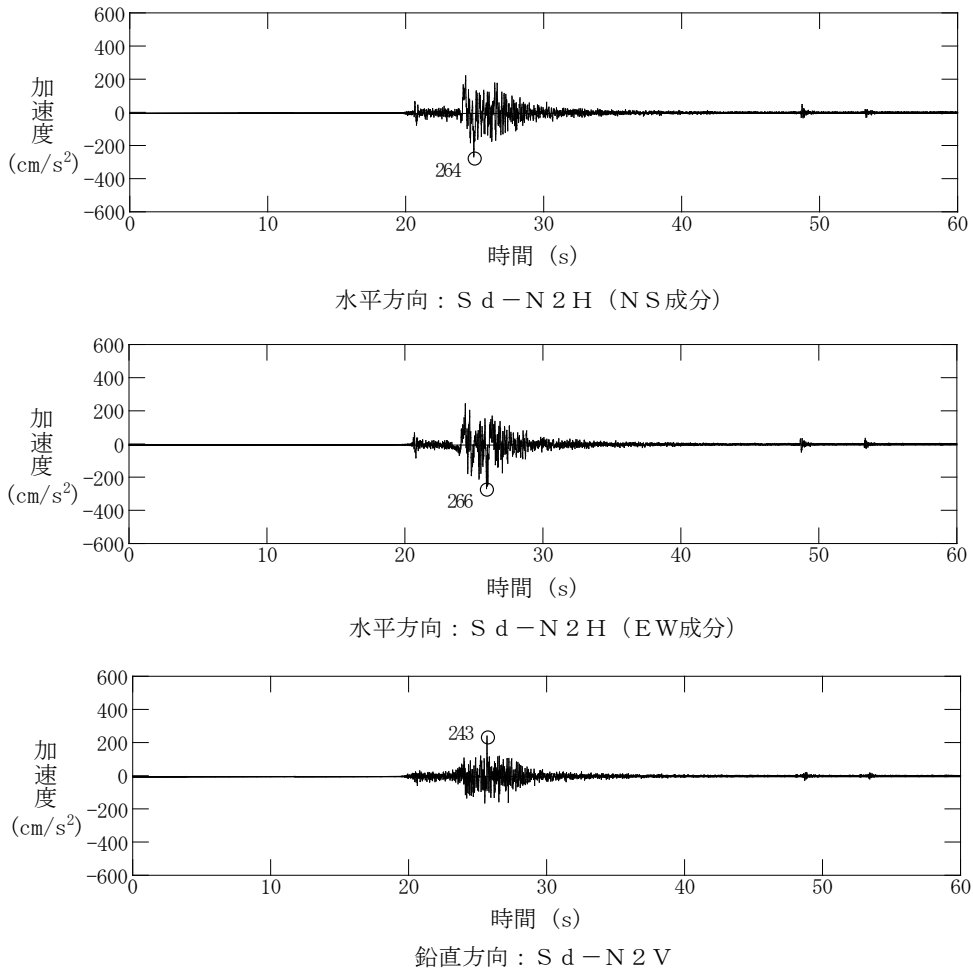




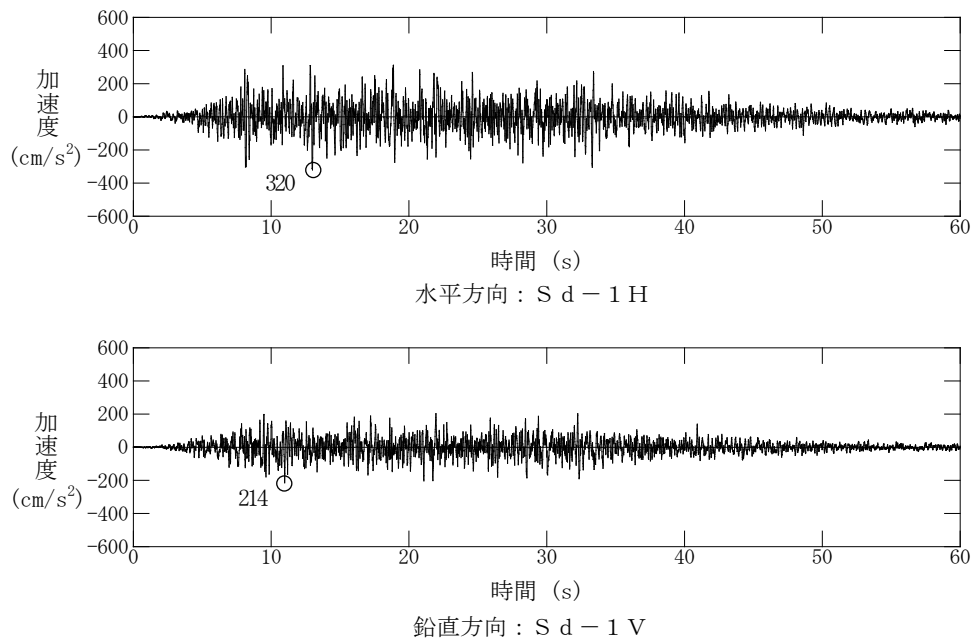
第 2.4-5 図 弾性設計用地震動 S d - F 2 の加速度時刻歴波形



第 2.4-6 図 弾性設計用地震動 S d - N 1 の加速度時刻歴波形



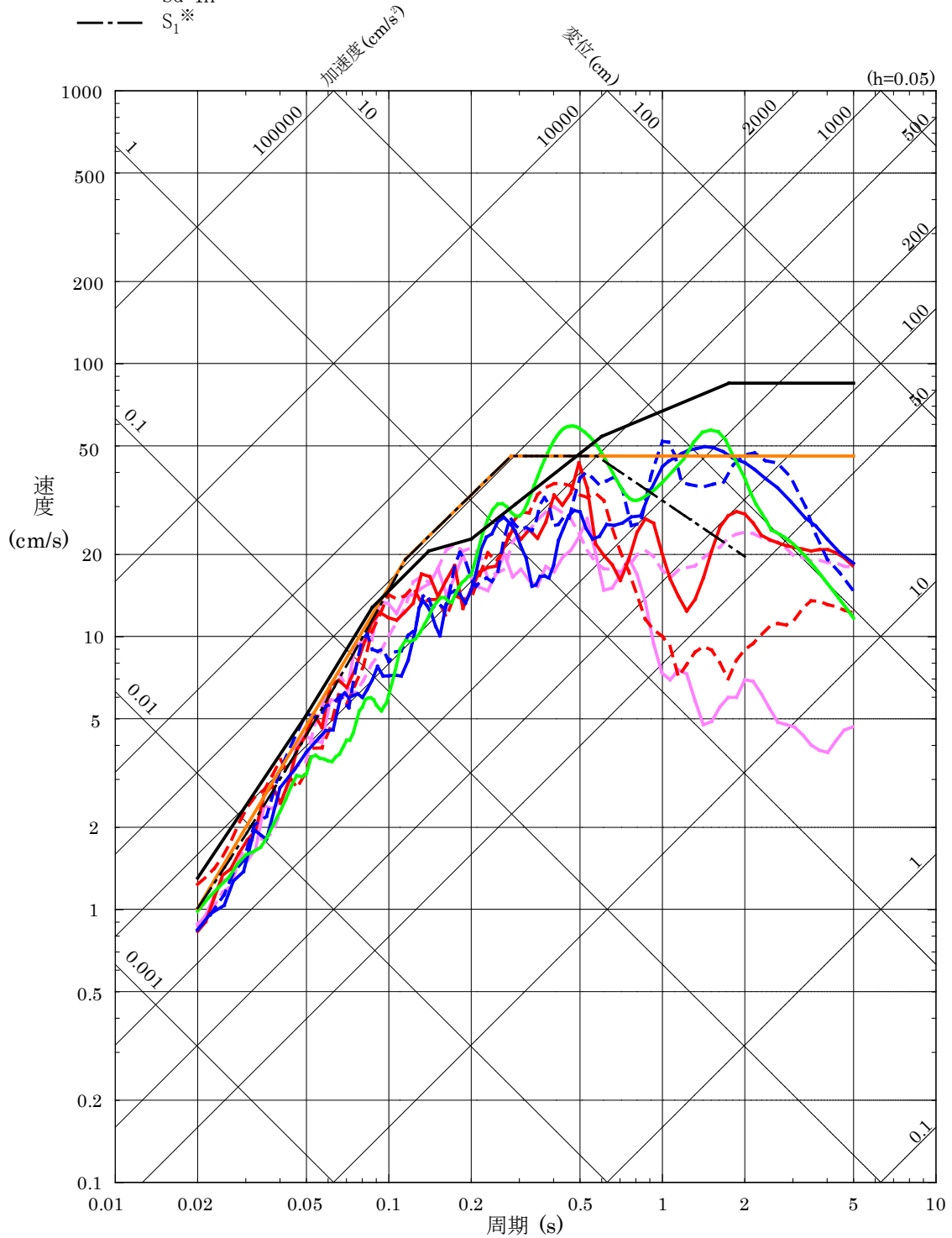
第 2.4-7 図 弾性設計用地震動 S d - N 2 の加速度時刻歴波形



第 2.4-8 図 弾性設計用地震動 S d - 1 の設計用模擬地震波の  
加速度時刻歴波形

- Sd-DH
- Sd-F1H (NS成分)
- - Sd-F1H (EW成分)
- Sd-F2H (NS成分)
- - Sd-F2H (EW成分)
- Sd-N1H
- Sd-N2H (NS成分)
- - Sd-N2H (EW成分)
- Sd-1H
- - S<sub>1</sub>\*

※「原子炉設置変更許可申請書（昭和 58 年 9 月 22 日許可/56 資庁第 10953 号）」における基準地震動 S<sub>1</sub>



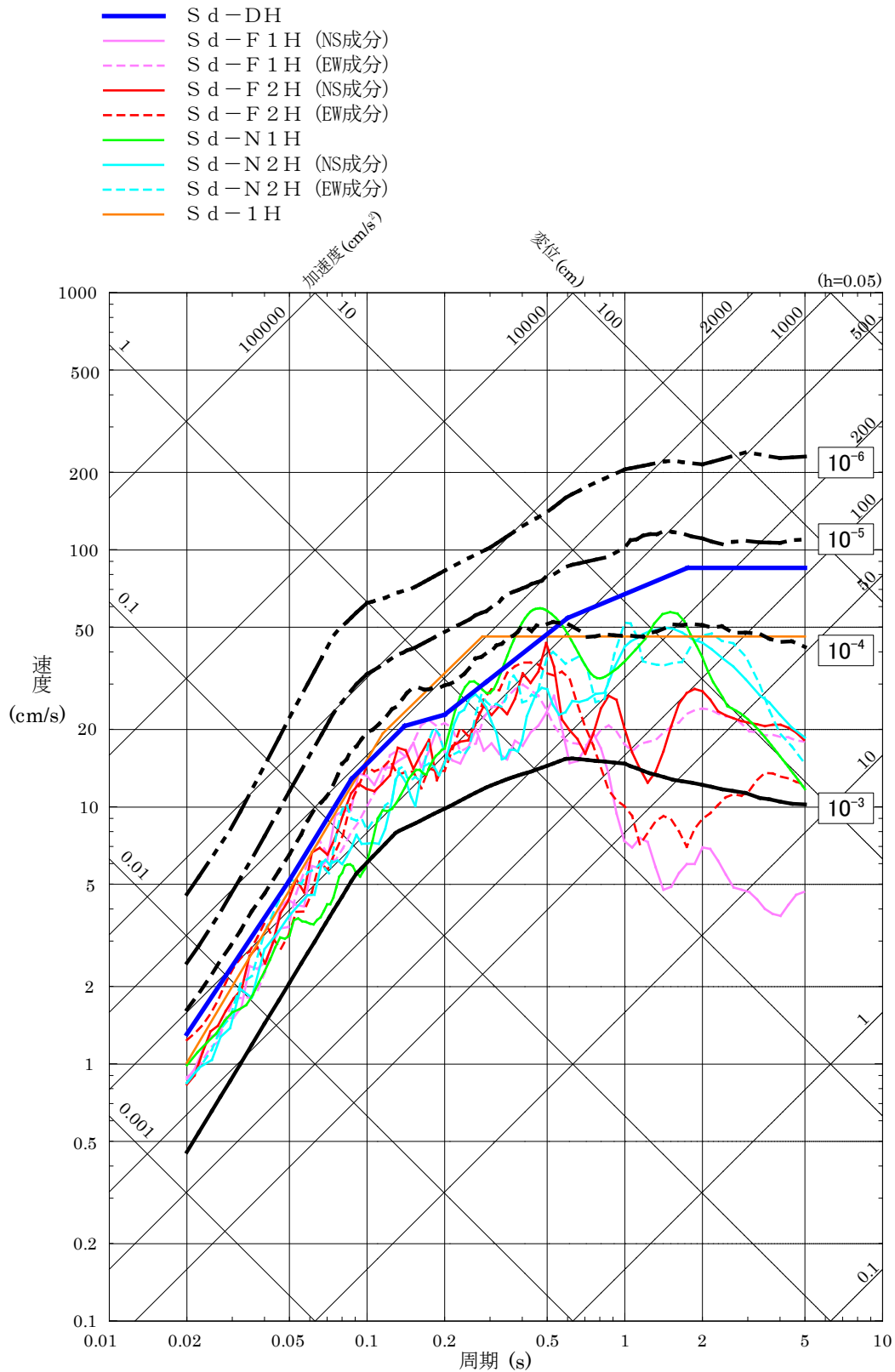
第 2.4-9 図 弾性設計用地震動 S<sub>d</sub> と基準地震動 S<sub>1</sub> の  
応答スペクトルの比較（水平方向）

## 2.5 弾性設計用地震動 $S_d$ の年超過確率の参照

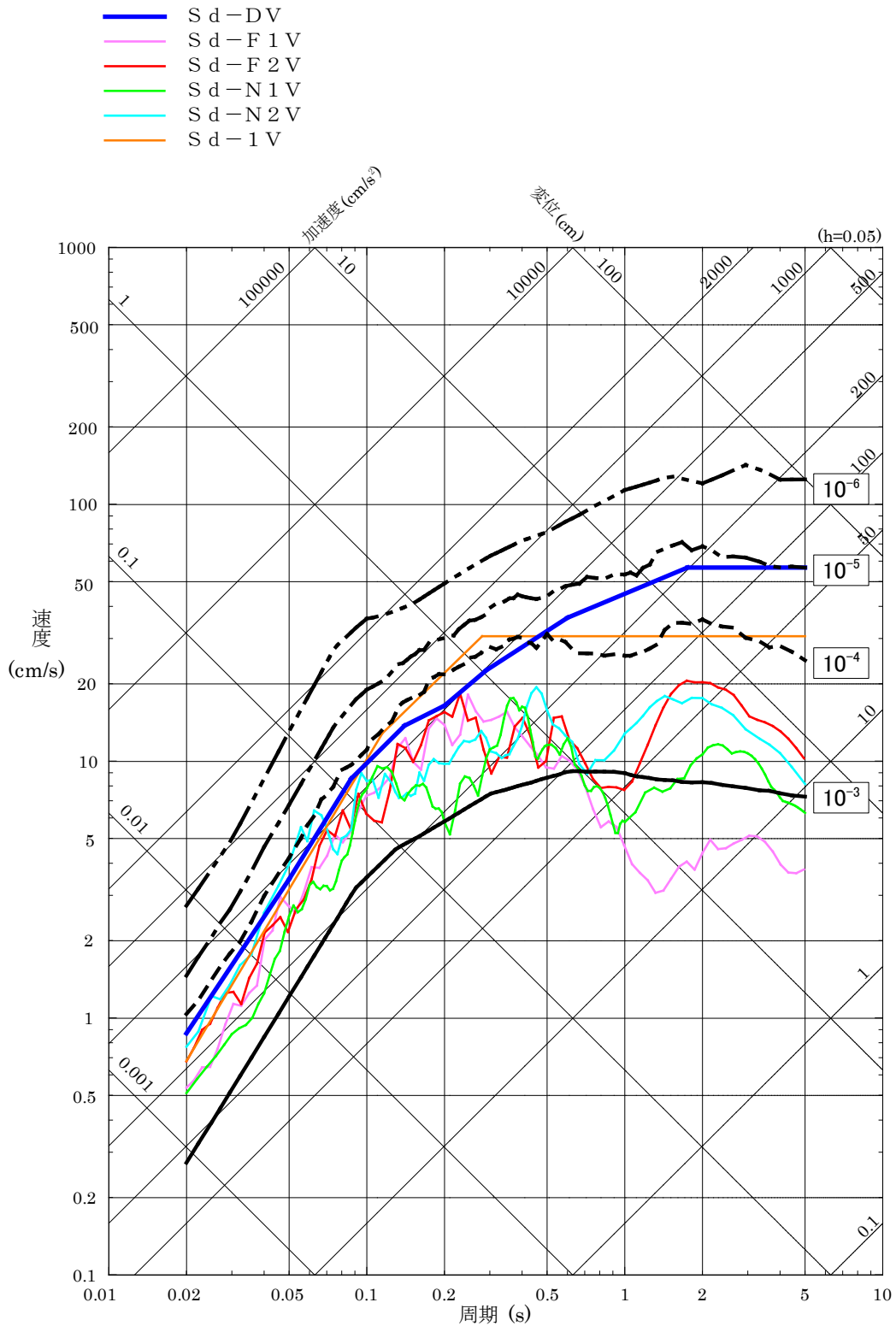
設定した弾性設計用地震動  $S_d$  の年超過確率を参照し、発生確率が妥当な範囲にあることを確認する。弾性設計用地震動  $S_d$  の応答スペクトル及び解放基盤表面における地震動の一樣ハザードスペクトルの比較を第 2.5-1 図及び第 2.5-2 図に示す。弾性設計用地震動  $S_d-D$  の年超過確率は  $10^{-3} \sim 10^{-5}$  程度、弾性設計用地震動  $S_d-F1$ ,  $S_d-F2$ ,  $S_d-N1$  及び  $S_d-N2$  は  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  程度、弾性設計用地震動  $S_d-1$  は  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  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 J E A G 4 6 0 1・補-1984」<sup>(2)</sup> (以下「J E A G 4 6 0 1・補-1984」という。)によると、弾性設計用地震動  $S_d$  の発生確率は  $10^{-2} \sim 5 \times 10^{-4}$  とされている<sup>(注1)</sup>。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  $S_d$  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  $S_d$  の発生確率はこれを大きく下回っている。

(注1) J E A G 4 6 0 1・補-1984 に記載されている地震動の発生確率  $S_1$  を  $S_d$  に読み替えた。



第 2.5-1 図 弾性設計用地震動 S d 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樣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 S d 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 S d の設定方法の妥当性について

弾性設計用地震動 S d 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 S d 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 (S s - 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 S s に対する係数）に適合しているか。	◎ (基準地震動 S s に対する係数 0.5)	◎ (基準地震動 S s に対する係数 約 0.8)
	②基準地震動 S s 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 S d 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 S d 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 S 1 の果たしてきた役割を考慮しているか。 (基準地震動 S 1 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 S 1 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 S d - 1 を追加設定)	◎
	④弾性設計用地震動 S d 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 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984

弾性設計用地震動  $S_d - 1$  を設定した理由及び  
 $S_d - 1$  を設定するメリット・デメリットについて

1. 概要

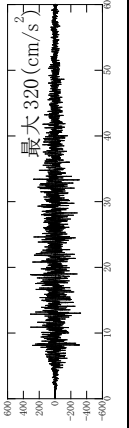
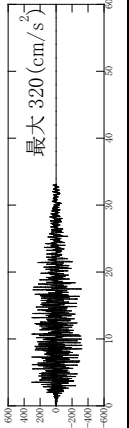
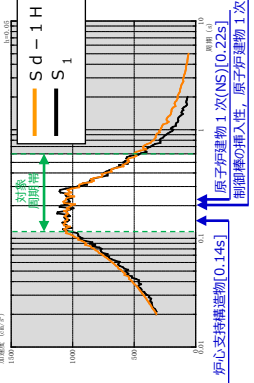
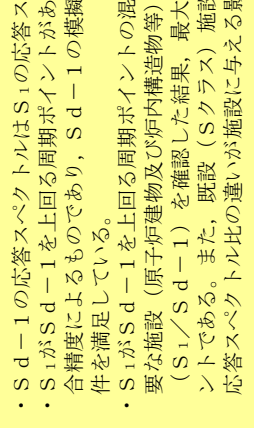
本資料では、基準地震動  $S_1$  の果たしてきた役割を踏まえ、弾性設計用地震動  $S_d - 1$  を設定した理由及び弾性設計用地震動  $S_d - 1$  を設定するメリット・デメリットについて説明する。

2. 弾性設計用地震動  $S_d - 1$  を設定した理由

基準地震動  $S_1$  と弾性設計用地震動  $S_d - 1$  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  $S_d - 1$ （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。
地震動の設定方法	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。	
	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 ~ 5.0 s ※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 <sup>注</sup> の5ポイント ・0.02 ~ 2.0 s ※大崎スペクトルによりコントロールポイントA~B間の擬似加速度応答スペクトルが両対数軸目盛で直線、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 (継続時間、振幅包絡線の経時変化)	・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	[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、振幅包絡線の経時変化を耐専の方法により設定し、S1よりも長く設定。
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			<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	

### 3. 弾性設計用地震動 $S_d-1$ を設定するメリット・デメリット

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  $S_d-1$  (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  $A_s$  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  $S_1$  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  $S_d-1$  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  $S_d-1$  の応答スペクトルは一部周期で基準地震動  $S_1$  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  $S_d-1$  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  $S_d-1$  と基準地震動  $S_1$  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

設計体系		Sd-1 設定のメリット	Sd-1 設定のデメリット	備考
準拠基準 (耐震設計審査指針) 鉛直地震動の扱い 水平・鉛直の組合せ	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		—
	標準地震動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S1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 ・振幅包絡線の経時的変化は耐専の方法に基づき設定	なし		—
	応答スペクトル (コントロールポイント、対象周期) 経時特性 (継続時間、振幅包絡線の経時的変化)	Sd-1の最大加速度値はS1と同様に320galに設定し、S1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 (水平方向) 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。	・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) ※1。 ・S1がSd-1を上回る周期ポイントに固混在する周期帯 (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 (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。	

### 第3-2表(1) 既工認における耐震設計の基本方針 (1/2)

表2-1-1 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		検計用地震動等	相互影響を考慮すべき設備 適用範囲	検計用地震動等	
		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	重要度分類				
A s 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を緊急停止させ、かつ安全停止状態に維持するためには、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一)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	A s A s	① 隔離弁を閉鎖するに必要な電気及び計装設備	A s	① 原子炉圧力容器支持カート ② 機器・配管及び電気計装設備等の支持構造物	A s A s	① 原子炉圧力容器 ② 原子炉建物 ③ ガンマ線しゃげい壁 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 <sub>2</sub> S <sub>2</sub> S <sub>2</sub> S <sub>2</sub> S <sub>2</sub> S <sub>2</sub>				
	(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	A s A s			① 当該設備の支持構造物	A s	① 原子炉建物	S <sub>2</sub>	① 原子炉建物天井 ② 燃料取扱設備	S <sub>1</sub> *1 S <sub>2</sub> *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格納容器を維持する設備	① 制御棒及び制御棒駆動系 (スクラム機能に属する部分)	A s	① 炉心支持構造物 ② 電気計装設備	A s A s	① 機器・配管及び電気計装設備等の支持構造物	A s	① 原子炉建物 ② 当該設備の支持構造物	S <sub>2</sub> S <sub>2</sub>				
(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 高圧炉心スプレイレイ 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ブプレッションポンプ	A s A s A s A s A s	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	A s A s A s	① 機器・配管及び電気計装設備等の支持構造物	A s	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 <sub>2</sub> S <sub>2</sub> S <sub>2</sub> S <sub>2</sub> S <sub>2</sub>					
	(v) 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故の際に圧力降壁となり、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	A s A s	① 隔離弁を閉鎖するに必要な電気及び計装設備	A	① 機器・配管等の支持構造物 ② 電気計装設備等の支持構造物	A s A	① 原子炉建物 ② 原子炉建物 ③ 制御室建物 ④ 廃棄物処理建物 ⑤ 当該設備の支持構造物	S <sub>2</sub> S <sub>1</sub> S <sub>1</sub> S <sub>1</sub>	① 原子炉ウエルシー ② ドアラック	S <sub>2</sub> *2		

※「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		検討用 地震動等	検討用 地震動等	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	重要度 分類	適用範囲			
Aクラス 原子炉事故 時の際に放射 熱を除去するた めに必要な設備	(I)原子炉冷却材圧力 バウンダリー破損事 故後、炉心から閉 鎖熱を除去するた めに必要な設備	A	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 サブプレッシャ ンポンプ	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	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 クラフト海水ポン プ支持構造物 5)タービン建 物 6)当該設備の支 持構造物	S1 S1 S1 S1 S1 S1		
	(II)放射性物質の放出 を伴うよりな事 故の際にその外部 に放射能を抑制す るための設備でA sクラス(V)以外の 設備	A	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 サブプレッシャ ンポンプ	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 器密閉気射 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 ートクラフト及び海 水ポンプ支持構 造物 7)当該設備の支 持構造物	S1 S1 S1 S1 S1 S1 S1		
	④その他 *4	A A	① 燃料プールの水補給 設備 (非常用) ② 圧力喪水注入系	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	S1 S1 S1 S1 S1		
	③炉内構造物	A							1)原子炉建物 2)原子炉圧力容 器 ベテスタル	S1 S1		

※「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 S d - 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 S d - 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 S d - 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 S d - 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 S d - 1 H は、基準地震動 S<sub>1</sub> 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 S d - 1 V 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 S d - 1 のコントロールポイント

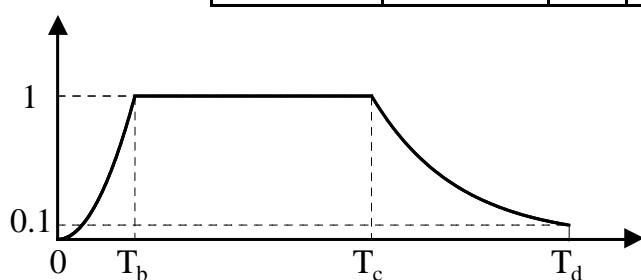
S d - 1 コントロール ポイント (注1)	周期 (s)		A	B	C	D	E	F
			0.02	0.115	0.280	0.575	2.00	5.00
S d - 1 H	速度 (cm/s)		1.01	19.26	45.94	45.94	45.94	45.94
	S d - 1 V	速度 (cm/s)	0.68	12.84	30.63	30.63	30.63	30.63

(注1) S<sub>1</sub>は大崎スペクトルにより A B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、S d - 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、S<sub>1</sub>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、S d - 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 S d - 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。振幅包絡線の経時の変化は、主要動の長さ及び継続時間が最も長い基準地震動 S s - D の模擬地震波と同様とする。弾性設計用地震動 S d - 1 の模擬地震波の振幅包絡線の経時の変化を第 2-1 図に示す。

模擬地震波	最大加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	振幅包絡線の経時の変化 (s)		
		T <sub>b</sub>	T <sub>c</sub>	T <sub>d</sub> (継続時間)
S d - 1 H	320	8.3	28.7	60.0
S d - 1 V	214			



(注 1) S<sub>1</sub>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、振幅包絡線の経時の変化を設定していたが、S d - 1 は S s - D と同様に継続時間を 60.0 秒、振幅包絡線の経時の変化を耐専の方法により設定する。

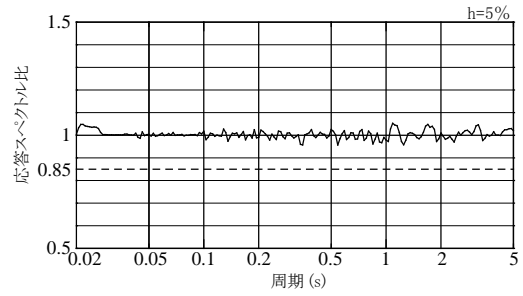
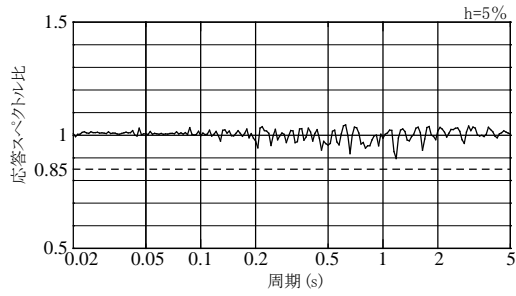
第 2-1 図 弾性設計用地震動 S d - 1 の模擬地震波の振幅包絡線の経時の変化

## 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 S d - 1 の模擬地震波が、基準地震動 S s - D 策定の際と同様に、日本電気協会 (2008)<sup>(1)</sup>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 (S I 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 : S d - 1 H)

(鉛直方向 : S d - 1 V)

第 3-1 図 弾性設計用地震動 S d - 1 の応答スペクトル比

第 3-1 表 弾性設計用地震動 S d - 1 の応答スペクトル強さの比 (S I 比)

応答スペクトル	S I 比 (周期 0.1~2.5 秒)
S d - 1 H	1.00
S d - 1 V	1.00

$$S I \text{ 比} : \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_v(T) dt}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_v(T) dt}$$

S I : 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 J E A G 4 6 0 1 - 2008