

本資料のうち、枠囲みの内容は、
営業秘密又は防護上の観点から
公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	補足-340-7 改 12
提出年月日	平成 30 年 9 月 28 日

工事計画に係る補足説明資料

耐震性に関する説明書のうち

補足-340-7 【水平 2 方向及び鉛直方向の適切な組合せに
関する検討について】

平成 30 年 9 月

日本原子力発電株式会社

目次

1. 検討の目的	1
2. 水平 2 方向及び鉛直方向地震力による影響評価に用いる地震動	2
2.1 東海第二発電所の基準地震動	2
2.2 水平 2 方向及び鉛直方向地震力による影響評価に用いる地震動	6
3. 各施設における水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響評価	7
3.1 建物・構築物	7
3.2 機器・配管系	<u>X</u>
3.3 屋外重要土木構造物	X
3.4 津波防護施設, 浸水防止設備及び津波監視設備	X

別紙 1 評価部位の抽出に関する説明資料

別紙 2 3次元 FEM モデルを用いた精査

別紙 3 3次元 FEM モデルによる地震応答解析

別紙 4 機器・配管系に関する説明資料

下線部：ご提出資料

3.2 機器・配管系

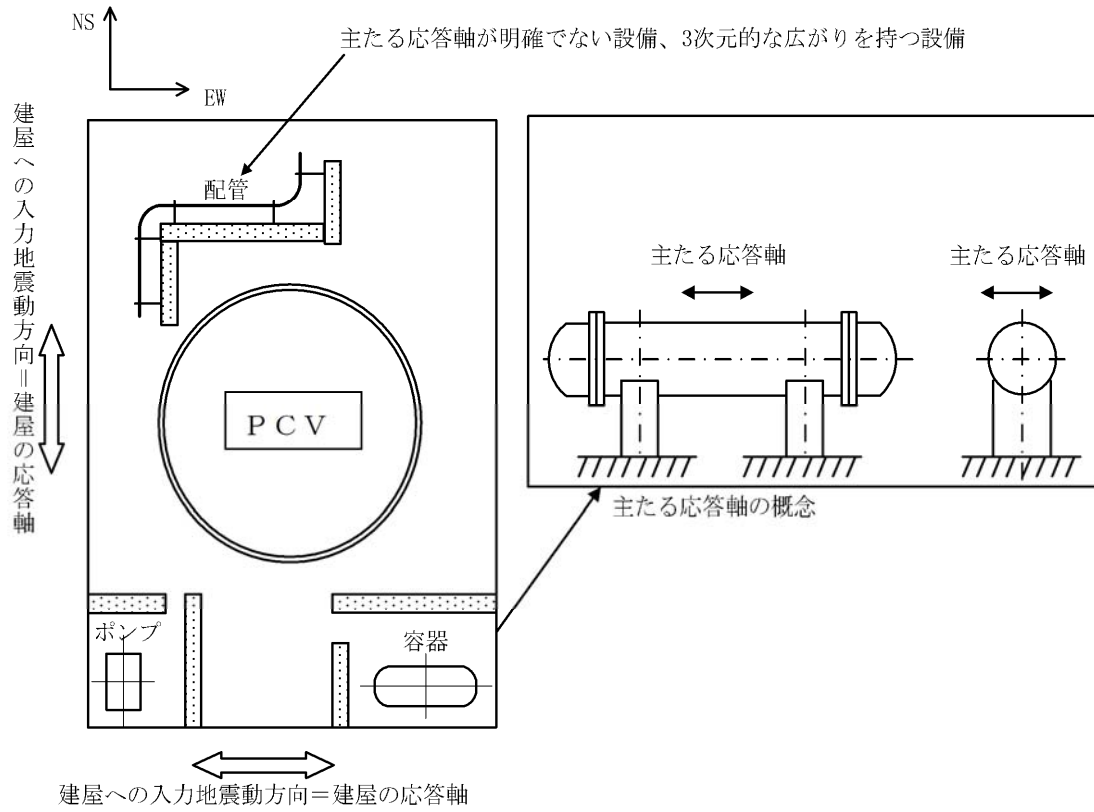
3.2.1 水平方向及び鉛直方向地震力の組合せによる従来設計の考え方

機器・配管系における従来の水平方向及び鉛直方向の組合せによる設計手法では、建物・構築物の振動特性を考慮し、変形するモードが支配的となり応答が大きくなる方向（応答軸方向）に基準地震動 S_0 を入力して得られる各方向の地震力（床応答）を用いている。

応答軸（強軸・弱軸）が明確となっている設備の耐震評価においては、水平各方向の地震力を包絡し、変形モードが支配的となる応答軸方向に入力するなど、従来評価において保守的な取り扱いを基本としている。

一方、応答軸が明確となっていない設備で3次元的な広がりを持つ設備の耐震評価においては、基本的に3次元のモデル化を行っており、建物・構築物の応答軸方向の地震力をそれぞれ入力し、この入力により算定される荷重や応力のうち大きい方を用いて評価を実施している。設備配置及び応答軸の概念図を3.2-1図に示す。

さらに、応答軸以外の振動モードが生じ難い構造の採用、応答軸以外の振動モードが生じ難いサポート設計の採用といった構造上の配慮など、水平方向の入力に対して配慮した設計としている。



第 3-2-1 図 設備配置及び応答軸の概念図

3.2.2 水平方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価方針

機器・配管系において、水平2方向及び鉛直方向地震力を考慮した場合に影響を受ける可能性がある設備（部位）の評価を行う。

評価対象は、耐震重要施設、常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故対処施設の機器・配管系、並びにこれらの施設への波及的影響防止のために耐震評価を実施する設備とする。

対象とする設備を機種ごとに分類し、それぞれの構造上の特徴により荷重の伝達方向、その荷重を受ける構造部材の配置及び構成等により水平2方向の地震力による影響を受ける可能性のある設備（部位）を抽出する。

構造上の特徴により影響を受ける可能性がある設備（部位）は、水平2方向及び鉛直方向地震力による影響の検討を実施する。水平各方向の地震力が1：1で入力された場合の発生値を、従来の評価結果の荷重又は算出応力等を水平2方向及び鉛直方向に整理して組み合わせる、又は新たな解析等により高度化した手法を用いる等により、水平2方向の地震力による設備（部位）に発生する荷重や応力を算出する。

これらの検討により、水平2方向及び鉛直方向地震力を組み合わせた荷重や応力の結果が、従来の発生値と同等である場合は影響がある設備として抽出せず、従来の発生値を超えて耐震性への影響が懸念される場合は、設備が有する耐震性への影響を確認する。

設備が有する耐震性への影響が確認された場合は、詳細な手法を用いた検討等、新たに設計上の対応策を講じる。

水平2方向及び鉛直方向地震力による影響評価は、基準地震動 S_0 を対象とするが、複数の基準地震動 S_0 における地震動の特性及び包絡関係、地震力の包絡関係を確認し、代表可能である場合は代表の基準地震動 S_0 にて評価する。また、水平各方向の地震動は、それぞれの位相を変えた地震動を用いることを基本とするが、保守的な手法を用いる場合もある。

3.2.3 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価方法

機器・配管系において、水平2方向及び鉛直方向地震力の影響を受ける可能性があり、水平1方向及び鉛直方向の従来評価に加え、更なる設計上の配慮が必要

な設備について、構造及び発生値の増分の観点から抽出し、影響を評価する。影響評価は従来設計で用いている質点系モデルによる評価結果を用いて行うことを基本とする。影響評価のフローを第 3-2-2 図に示す。

なお、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響を検討する際は、地震時に水平 2 方向及び鉛直方向それぞれの最大応答が同時に発生する可能性は極めて低いとした考え方である Square-Root-of-the-Sum-of-the-Squares 法（以下「最大応答の非同時性を考慮した SRSS 法」という。）又は組合せ係数法（1.0 : 0.4 : 0.4）を適用する。この組合せ方法については、現状の耐震評価は基本におおむね弾性範囲でとどまる体系であることに加え、国内と海外の機器の耐震解析は、基本的に線形モデルにて実施している等類似であり、水平 2 方向及び鉛直方向の位相差は機器の応答にも現れることから、米国 Regulatory Guide 1.92 の「2. Combining Effects Caused by Three Spatial Components of an Earthquake」を参考としているものである。

① 評価対象となる設備の整理

耐震重要施設、常設耐震重要重大事故防止設備又は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の機器・配管系並びにこれらの施設への波及的影響防止のために耐震評価を実施する設備を評価対象とし、代表的な機種ごとに分類し整理する（第 3-2-2 図①）。

② 構造上の特徴による抽出

機種ごとに構造上の特徴から水平 2 方向の地震力が重畳する観点、もしくは応答軸方向以外の振動モード（ねじれ振動等）が生じる観点にて検討を行い、水平 2 方向の地震力による影響の可能性がある設備を抽出する（第 3-2-2 図②）。

③ 発生値の増分による抽出

水平 2 方向の地震力による影響の可能性がある設備に対して、水平 2 方向の地震力が各方向 1 : 1 で入力された場合に各部にかかる荷重や応力を求め、従来の水平 1 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる設計に対して、水平 2 方向及び鉛直方向地震力を考慮した発生値の増分を用いて影響を検討し、耐震性への影響が懸念される設備を抽出する。

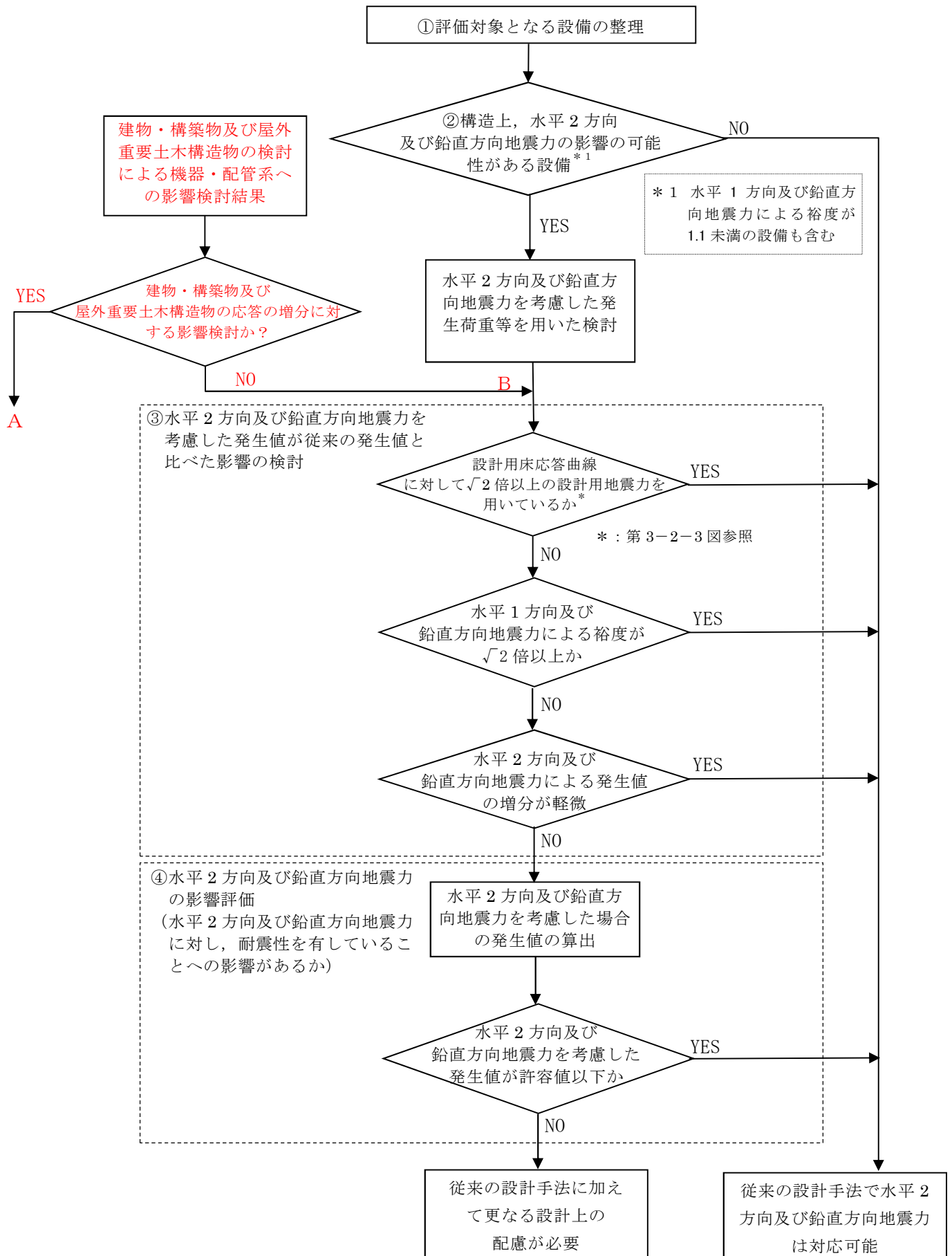
また、建物・構築物及び屋外重要土木構築物の検討により、機器・配管系への影響の可能性がある部位が抽出された場合は、機器・配管系への影響を評価し、

耐震性への影響が懸念される設備を抽出する。

影響の検討は、機種ごとの分類に対して地震力の寄与度に配慮し耐震裕度が小さい設備（部位）を対象とする（第 3-2-2 図③）。

④ 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響評価

③の検討において算出された荷重や応力を用いて、設備の耐震性への影響を確認する（第 3-2-2 図④）。



第3-2-2図 水平2方向及び鉛直方向地震力を考慮した影響評価フロー (1/2)

建物・構築物及び屋外重要土木構造物の検討による機器・配管系への影響検討結果

NO
建物・構築物及び屋外重要土木構造物の応答の増分に對する影響検討か？

A YES

NO
応答増幅が考えられる場所に設置されているか？

YES

NO
柔軟設備か？

YES

NO
応答増幅のピーク (0.1~0.2秒) に合致するか？

YES

NO
詳細検討
設計震度若しくは許容値を超えるか？

YES

NO
従来の設計手法に
加えて更なる設計上の配慮が必要

従来の設計手法で水平2方向及び鉛直方向地震力は対応可能

NO
裕度が小さいか？
(2倍を下回るか？)

YES

NO
詳細検討
設計震度若しくは許容値を超えるか？

従来の設計手法に
加えて更なる設計上の配慮が必要

従来の設計手法で水平2方向及び鉛直方向地震力は対応可能

NO
裕度が小さいか？
(2倍を下回るか？)

YES

NO
詳細検討
設計震度若しくは許容値を超えるか？

従来の設計手法に
加えて更なる設計上の配慮が必要

従来の設計手法で水平2方向及び鉛直方向地震力は対応可能

第3-2-2 図 水平2方向及び鉛直方向地震力を考慮した影響評価フロー (2/2)

3.2.4 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価設備（部位）の抽出

評価対象設備を機種ごとに分類した結果を、第3-2-1表に示す。機種ごとに分類した設備の各評価部位、応力分類に対し構造上の特徴から水平2方向の地震力による影響を水平2方向の地震力が重畳する観点より検討し、影響の可能性のある設備を抽出した。

(1) 水平2方向の地震力が重畳する観点

水平1方向の地震力に加えて、さらに水平直交方向に地震力が重畳した場合、水平2方向の地震力による影響を検討し、影響が軽微な設備以外の影響検討が必要となる可能性があるものを抽出する。以下の場合には、水平2方向の地震力により影響が軽微な設備であると整理した（別紙4.1参照）。なお、ここでの影響が軽微な設備とは、構造上の観点から発生応力への影響に着目し、その増分が1割程度以下となる機器を分類しているが、水平1方向地震力による裕度（許容応力／発生応力）が1.1未満の機器については個別に検討を行うこととする。

a. 水平2方向の地震力を受けた場合でも、その構造により水平1方向の地震力しか負担しないもの

横置きの容器等は、水平2方向の地震力を想定した場合、水平1方向を拘束する構造であることや水平各方向で振動特性及び荷重の負担断面が異なる構造であることにより、特定の方向の地震力の影響を受ける部位であるため、水平1方向の地震力しか負担しないものとして分類した

b. 水平2方向の地震力を受けた場合、その構造により最大応力の発生箇所が異なるもの

一様断面を有する容器類の胴板等は、水平2方向の地震力を想定した場合、それぞれの水平方向地震力に応じて応力が最大となる箇所があることから、最大応力の発生箇所が異なり、水平2方向の地震力を組み合わせても影響が軽微であるものとして分類した。その他の設備についても同様の理由から最大応力の発生箇所が異なり、水平2方向の地震力を組み合わせても影響が軽微であるものとして分類した。

- c. 水平 2 方向の地震力を組み合わせても水平 1 方向の地震による応力と同等と言えるもの

原子炉圧力容器スタビライザ及び格納容器スタビライザは、周方向 8 箇所を支持する構造で配置されており、水平 1 方向の地震力を 6 体で支持する設計としており、水平 2 方向の地震力を想定した場合、地震力を負担する部位が増え、また、最大反力を受けもつ部位が異なることで、水平 1 方向の地震力による荷重と水平 2 方向の地震力を想定した場合における荷重が同等になるものであり、水平 2 方向の地震を組み合わせても 1 方向の地震による応力と同等のものと分類した。

スタビライザと同様の支持方式を有するその他の設備についても、同様の理由から水平 2 方向の地震を組み合わせても 1 方向の地震による応力と同様のものと分類した。

- d. 従来評価において、水平 2 方向の考慮をした評価を行っているもの

蒸気乾燥器支持ブラケット等は、従来評価において、水平 2 方向地震を考慮した評価を行っているため、水平 2 方向の影響を考慮しても影響がないものとして分類した。

- (2) 水平方向とその直交方向が相関する振動モード（ねじれ振動等）が生じる観点

水平方向とその直交方向が相関する振動モードが生じることで優位な影響が生じる可能性のある設備を抽出する。

機器・配管系設備のうち、水平方向の各軸方向に対して均等な構造となっている機器は、評価上有意なねじれ振動は生じない。

一方、3 次元的な広がりを持つ配管系等は、系全体として考えた場合、有意なねじれ振動が発生する可能性がある。しかし、水平方向とその直交方向が相関する振動が想定される設備は、従来設計より 3 次元のモデル化を行っており、その振動モードは適切に考慮した評価としているため、この観点から抽出される機器は無かった。

(3) 水平 1 方向及び鉛直方向地震力に対する水平 2 方向及び鉛直方向地震力の増分の観点

(1)及び(2)にて影響の可能性がある設備について、水平 2 方向の地震力が各方向 1:1 で入力された場合に各部にかかる荷重や応力を求め、従来の水平 1 方向及び鉛直方向地震力の設計手法による発生値と比較し、その増分により影響の程度を確認し、耐震性への影響が懸念される設備を抽出した。

水平 1 方向に対する水平 2 方向の地震力による発生値の増分の検討は、機種毎の分類に対して地震力の寄与度に配慮し耐震裕度が小さい設備（部位）を対象とする。別紙 4.4 に対象の考え方を示し、別紙 4.2 表 1 に(1)及び(2)において抽出された設備のうち対象とした部位や応力分類の詳細を示す。水平 2 方向の地震力の組合せは米国 Regulatory Guide1.92 の「2. Combining Effects Caused by Three Spatial Components of an Earthquake」を参考として非同時性を考慮した SRSS 法により組合せ、発生値の増分を算出する。増分の算出は、従来の評価で考慮している保守性により増分が低減又は包絡されることも考慮する。算出の方法を以下に示す。

- ・従来の評価データを用いた簡易的な算出では、地震・地震以外の応力に分離可能なものは地震による発生値のみを組み合わせた後、地震以外による応力と組み合わせて算出する。
- ・設備（部位）によっては解析等で求められる発生荷重より大きな設計荷重を用いているものもあるため、設計荷重が上記組合せによる発生値を上回ることを確認したものは、水平 2 方向の地震力による発生値の増分はないものとして扱う。
- ・応答軸が明確な設備で、設備の応答軸の方向あるいは厳しい応力が発生する向きへ地震力を入力している場合は、耐震性への影響が懸念されないものとして扱う。

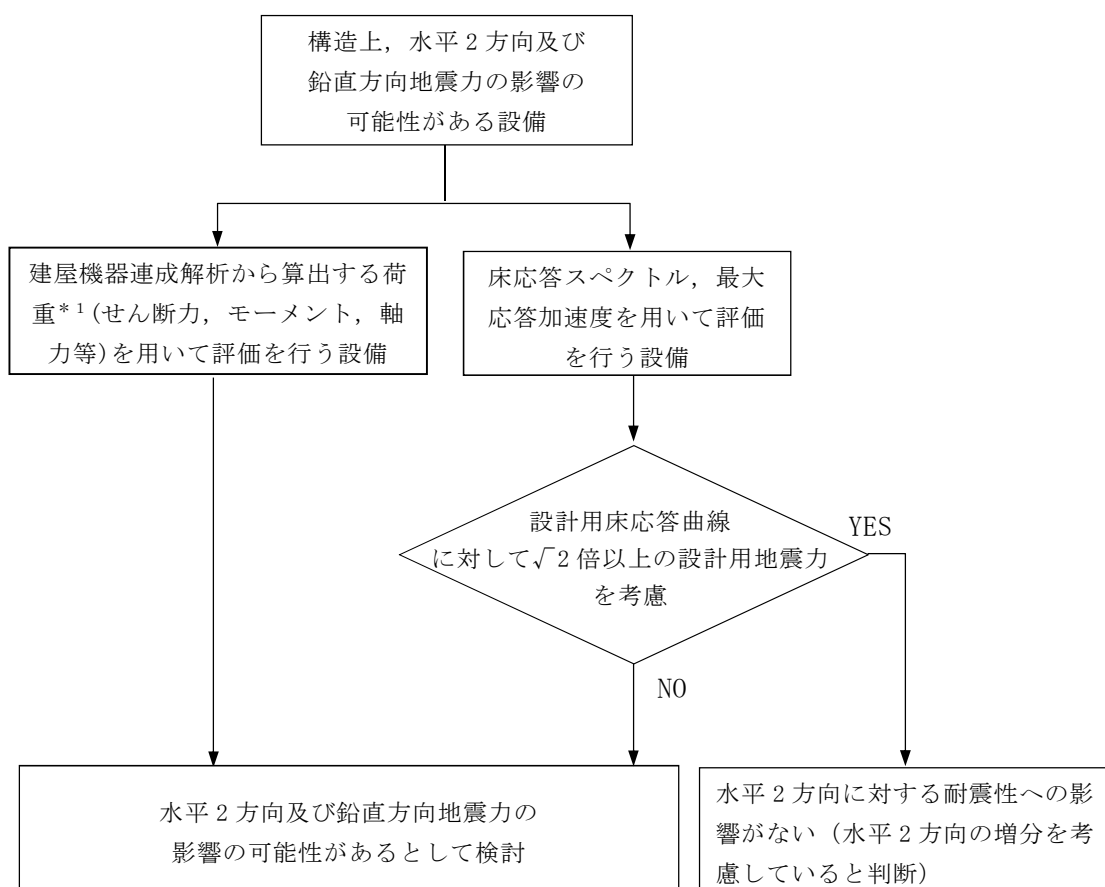
今回工認の耐震計算では、一部設備については、設計上の配慮として、建物・構築物、土木構造物及び建屋－機器連成解析モデルにおける地震応答解析から得られる最大応答加速度（ZPA）、設計用床応答曲線*に 1.5 倍した耐震評価条

件（以下、本資料では「設計用地震力」という。）を用いている。水平2方向の地震力は、水平方向の地震力に対する方向性を踏まえれば、水平1方向の地震力を $\sqrt{2}$ 倍以上した地震力を耐震評価条件とすれば、水平2方向の地震力による増分を考慮したといえる。これより、1.5倍した設計用地震力を適用した設備については、水平2方向及び鉛直方向による地震力に対する影響の懸念はないと整理する。

一方、建屋－機器連成解析から算出する荷重（せん断力、モーメント、軸力等）を用いて評価を行う設備も1.5倍の地震力を耐震条件としているが、これは時刻歴応答解析を適用することによる配慮（材料物性のばらつきの考慮）として1.5倍しているため、水平2方向及び鉛直方向地震力の影響の可能性があると検討を行う。

対応方針を第3-2-3図に示す。

注記 *：添付書類「V-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」における「3.1 地震応答解析モデル」に示す物性値及び定数を用いた地震応答解析ケース（基本ケース）であり、材料物性のばらつき等の考慮として床応答曲線を周期軸方向に $\pm 10\%$ 拡幅している。



注記 *1: 時刻歴応答解析を適用することによる配慮として1.5倍している。

第3-2-3図 設計用地震力の水平2方向に対する耐震性への影響判断フロー

3.2.5 建物・構築物及び屋外重要土木建造物の検討結果を踏まえた機器・配管系の設備の抽出

3.1 項における建物・構築物の影響評価において、原子炉建屋の 3 次元 F E M モデルによる解析結果を基に機器・配管系への影響を検討した結果、耐震性への影響が懸念される部位として、原子炉建屋 6 階の壁及び床の応答が大きくなる傾向が確認された。この傾向を踏まえ、機器・配管系への影響を検討し、影響の可能性のある設備を抽出した。

なお、3.3 項における屋外重要土木建造物の影響評価において、機器・配管系への影響を検討した結果、耐震性への影響が懸念される部位は抽出されなかった。

(1) 評価対象設備抽出の考え方

影響評価においては、応答増幅の影響が小さい位置に設置されている設備や、耐震裕度が大きい設備も含まれていることから、3 次元 F E M モデルによる影響評価として詳細検討（加速度比率と耐震裕度の比較等）を行う対象設備を、第 3-2-2 図に示すフローに基づき抽出する。フローの考え方を以下に示す。

a. 応答増幅の有無

応答の増幅が顕著に見られるのは、壁及び床の中央付近であり、壁の端部や床の端部、耐震壁直上の床については応答増幅が小さい。このため、応答増幅が小さい場所に設置される設備については、3 次元 F E M モデルによる応答増幅の影響が小さいものとして影響評価の対象から除外する。

b. 耐震裕度の大小関係

(a) 柔な設備

質点系モデルと 3 次元 F E M モデルの床応答スペクトル（以下「F R S」という。）を比較すると、3 次元 F E M モデルの応答の増幅が大きくなる周期帯は、概ね 0.1~0.2 秒の領域にあることから、この領域に固有周期を有する設備については、全て詳細検討の対象とする。

F R S の周期が 0.1 秒以下の領域では、質点系モデルに対する 3 次元 F E M モデルの応答比率が概ね 2 倍を下回り、応答増幅の影響が比較的小さいことから、この領域に固有周期を有する設備について、耐震裕度が大きい（2 倍以上）設備は詳細検討の対象から除外し、耐震裕度が小

さい（2倍を下回る）設備は詳細検討の対象とする。

(b) 剛な設備

剛な設備については、質点系モデルに対する3次元FEMモデルの応答比率が概ね2倍を下回り、応答増幅の影響が比較的小さいことから、上述の0.1秒以下に固有周期を有する設備と同様に、耐震裕度が大きい（2倍以上）設備は詳細検討の対象から除外し、耐震裕度が小さい（2倍を下回る）設備は詳細検討の対象とする。

3.2.6 水平2方向及び鉛直方向地震力の評価部位の抽出結果

3.2.4(1)及び(2)による影響を整理した結果を別紙4.2に、3.2.4(3)による影響を整理した結果を別紙4.3に示す。なお、別紙4.3では、別紙4.2にて影響ありとされた設備、又は裕度が1.1未満の設備を抽出して記載しているが、応答軸が明確な設備、設計上の配慮として $\sqrt{2}$ 倍以上の設計用地震力を適用している設備については耐震性への影響が懸念されないものとして整理している。また、水平2方向の地震力を組み合わせる場合、発生応力は最大応答の非同時性を考慮したSRSS法では最大 $\sqrt{2}$ 倍、組合せ係数法で最大1.4倍となるため、裕度（＝許容値／発生値）が $\sqrt{2}$ 以上ある設備については、水平2方向の地震力による影響の評価は不要とし、別紙4.3には記載していない。

また、3.2.5項において整理した、建物・構築物の検討結果を踏まえた機器・配管系の設備の抽出結果を第3-2-2表に示す。ここでは、原子炉建屋6階の壁及び床の応答が大きくなる影響を踏まえ、詳細検討を実施する評価対象設備を抽出した結果を整理している。

3.2.7 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価

別紙4.2において抽出された設備について、水平2方向及び鉛直方向地震力を想定した発生値（発生荷重、発生応力、応答加速度）を以下の方法により算出する。発生値の算出における水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せは、米国Regulatory Guide 1.92の「2. Combining Effects Caused by Three Spatial Components of an Earthquake」を参考として非同時性を考慮したSRSS法を適用する。

(1) 従来評価データを用いた算出

従来の水平 1 方向及び鉛直方向地震力を組み合わせた評価結果を用いて、以下の条件により水平 2 方向及び鉛直方向の地震力に対する発生値を算出することを基本とする。

- ・水平各方向及び鉛直方向地震力をそれぞれ個別に用いて従来の発生値を算出している設備は、水平 2 方向及び鉛直方向地震力を組み合わせて水平 2 方向を考慮した発生値の算出を行う。

$$\text{水平 2 方向発生値} = \sqrt{(\text{NS 方向発生値})^2 + (\text{EW 方向発生値})^2 + (\text{UD 方向発生値})^2}$$

- ・水平 1 方向と鉛直方向の地震力を組合せた上で従来の発生値を各方向で算出している設備は、鉛直方向を含んだ水平各方向別の発生値を組み合わせ、水平 2 方向を考慮した発生値の算出を行う。

水平 2 方向発生値

$$= \sqrt{(\text{NS + UD 方向地震力による発生値})^2 + (\text{EW + UD 方向地震力による発生値})^2}$$

- ・水平各方向を包絡した床応答曲線による地震力と鉛直方向の地震力を組み合わせた上で従来の発生値を算出している設備は、鉛直方向を含んだ水平各方向同一の発生値を組み合わせ、水平 2 方向を考慮した発生値の算出を行う。

水平 2 方向発生値

$$= \sqrt{(\text{NS + UD 方向地震力による発生値})^2 + (\text{NS + UD 方向地震力による発生値})^2}$$

または、

$$= \sqrt{(\text{EW + UD 方向地震力による発生値})^2 + (\text{EW + UD 方向地震力による発生値})^2}$$

また、算出にあたっては必要に応じて以下も考慮する。

- ・発生値が地震以外の応力成分を含む場合，地震による応力成分と地震以外の応力成分を分けて算出する。
- ・建屋－機器連成解析において，1.5 倍の地震力を用いて発生値を算出しており，水平 2 方向及び鉛直方向地震力を想定した際に発生値が増加する場合は，材料物性のばらつきを考慮した地震応答解析ケースにて建屋－機器連成解析を行った結果を適用して発生値を算出する。

3.2.5 項の観点から 3.2.6 項で抽出した設備の影響評価では，以下のいずれかの方法を用いて評価を行う。評価の詳細については，別紙 4.5 に示す。

- ① 3次元FEMモデルにより得られた S_d-D1 の震度に係数を掛け，「基準地震動 S_8 による応答」及び「地盤物性等のばらつき」を考慮した震度を推定し，質点系モデルの震度に包絡されること若しくは耐震裕度に包絡されることを確認する。
- ② S_d-D1 質点系モデルに対する 3次元FEMモデルの震度比率を求め，設備の耐震裕度（地盤物性等のばらつきを考慮した裕度）に包絡されること若しくは許容値内に収まることを確認する。

3.2.8 水平2方向及び鉛直方向地震力の影響評価結果

別紙4.3において、水平2方向での発生値の増分の影響が無視できないと整理した設備について、3.2.7項の影響評価条件において算出した発生値に対して設備の耐震性への影響を確認する。評価した内容を設備（部位）毎に示し、その影響評価結果については重大事故等の状態も考慮した結果について別紙4.4に示す。

3.2.5項の観点から3.2.6項で抽出した設備について、原子炉建屋6階の壁及び床の応答が大きくなる影響を考慮した場合の設備の耐震性への影響を評価し、設備の健全性が確保できることを確認した。評価結果については、別紙4.5に示す。

3.2.9 まとめ

機器・配管系において、水平2方向の地震力の影響を受ける可能性がある設備（部位）について、従来設計手法における保守性も考慮した上で抽出し、従来の水平1方向及び鉛直方向地震力の組合せによる設計に対して影響を評価した。その結果、従来設計の発生値を超えて耐震性への影響が懸念される設備については、水平2方向及び鉛直方向地震力を想定した発生値が許容値を満足し、設備が有する耐震性に影響のないことを確認した。

本影響評価は、水平2方向及び鉛直方向地震力により設備が有する耐震性への影響を確認することを目的としている。そのため、従来設計の発生値をそのまま用いて水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せを評価しており、以下に示す保守側となる要因を含んでいる。

- ・従来設計の発生値（水平1方向及び鉛直方向地震力による応力成分と圧力等の地震以外の応力成分の組合せ）に対して、係数を乗じて水平2方向及び鉛直方向地震力を想定した発生値として算出しているため、係数倍不要な鉛直方向地震力による応力成分と圧力等の地震以外の応力成分についても係数倍されている。
- ・従来設計において水平各方向を包絡した床応答曲線を各方向に入力している設備は各方向の大きい方の地震力が水平2方向に働くことを想定した発生値として算出している。

また、建物・構築物の影響評価において、原子炉建屋3次元FEMモデルによ

る解析結果を基に機器・配管系への影響を検討した結果、耐震性への影響が懸念される部位として、原子炉建屋6階の壁及び床の応答が大きくなる傾向が確認されたが、当該応答の増幅を考慮しても、設備の健全性が確保できることを確認した。

以上のことから、水平2方向及び鉛直方向地震力については、機器・配管系が有する耐震性に影響がないことを確認した。

第 3-2-1 表 ①水平 2 方向入力の影響検討対象設備

設 備		部 位
炉心支持構造物	炉心シュラウド	上部胴 下部胴 下部胴
	シュラウドサポート	レグ シリンダ プレート 下部胴
	上部格子板	グリッドプレート
	炉心支持板	補強ビーム 支持板
	燃料支持金具	中央燃料支持金具 周辺燃料支持金具
	制御棒案内管	長手中央部 下部溶接部
原子炉圧力容器	胴板 下鏡	鏡板 下鏡 下鏡と胴板の接合部 下鏡とスカートとの接合部
	制御棒駆動機構ハウジング貫通部	スタブチューブ ハウジング 下部鏡板リガメント
	ノズル	各部位
	ブラケット類	原子炉圧力容器スタビライザブラケット スチームドライヤサポートブラケット 炉心スプレイブラケット 給水スパーチャブラケット
原子炉圧力容器 支持構造物	原子炉圧力容器支持スカート	スカート
	原子炉圧力容器基礎ボルト	基礎ボルト

設 備		部 位
原子炉圧力容器 付属構造物	原子炉圧力容器スタビライザ	各部位
	原子炉格納容器スタビライザ	ボルト
	制御棒駆動機構ハウジング支持金具	レストレイントビーム ボルト
原子炉圧力容器 内部構造物	蒸気乾燥器	ユニットサポート 耐震用ブロック
	気水分離器及びスタン ドパイプ	各部位
	シュラウドヘッド 中性子束案内管	各部位
	スパージャ 炉内配管	各部位
	ジェットポンプ	ライザ ディフューザ ライサブレース
	貯蔵ラック (共通ベース含む)	ラック部材 基礎ボルト ラック取付ボルト
乾式貯蔵容器	各部位	
四脚たて置き円筒形容器	胴板	
	脚	
横置円筒形容器	胴板	
	脚	
	基礎ボルト	
立形ポンプ	コラムパイプ バレルケーシング	
	基礎ボルト 取付ボルト	
ECCS ストレーナ	各部位	

設 備		部 位
横形ポンプ ポンプ駆動用タービン 海水ストレーナ 空調ファン 空調ユニット 空気圧縮機		基礎ボルト 取付ボルト
制御棒駆動機構		各部位
水圧制御ユニット		フレーム
		基礎ボルト
平底たて置円筒容器		胴板
		基礎ボルト
核計装設備		各部位
伝送ラック		取付ボルト
制御盤		取付ボルト
原子炉格納容器	サプレッションチェンバ底部ライナ	ライナプレート リングガータ部
	ドライウェル円錐部及びサプレッションチェンバ円筒部シェル部及びサンドクッション部	各部位
	ドライウェル上部シアラグ及びスタビライザ ドライウェル下部シアラグ及びスタビライザ	各部位
		上部シアラグと格納容器胴との接合部 下部シアラグと格納容器胴との接合部
	機器搬入用ハッチ 所員用エアロック サプレッション・チェンバアクセスハッチ	本体と補強板との接合部 補強板と格納容器胴一般部との接合部
	原子炉格納容器胴アンカー部	各部位
		コンクリート
	配管貫通部	原子炉格納容器胴とスリーブとの接合部
電気配線貫通部	スリーブ付根部	
	補強板付根部	

設 備	部 位
ダイヤフラムフロア	基礎コンクリートスラブ
	大梁
	小梁
	柱
ベント管	シアコネクタ
	上部 ブレイジング部
格納容器スプレイヘッド	スプレイ管部
	ティー部
	案内管部
可燃性ガス濃度制御系再結合装置ブロワ	ブレース
	ベース取付溶接部
ディーゼル発電機	基礎ボルト
	取付ボルト
プレート式熱交換器	側板
	脚
	基礎ボルト
ラグ支持たて置き円筒形容器	胴板
	振れ止め
	シアラグ
	取付ボルト
その他電源設備	取付ボルト
配管本体, サポート (多質点梁モデル解析)	配管, サポート
矩形構造の架構設備 (静的触媒式水素再結合装置, 架台を含む)	各部位
通信連絡設備 (アンテナ)	基礎ボルト
水位計	取付ボルト
温度計	溶接部
監視カメラ	取付ボルト
	据付部材
貫通部止水処置	シール材
浸水防止蓋	蓋
	基礎ボルト
逆流防止逆止弁	各部位
原子炉ウェル遮へいプラグ	本体
原子炉本体の基礎	円筒部
	中間スラブ

設 備	部 位
	下層円筒基部
燃料取替機	燃料取替機構造物フレーム ブリッジ脱線防止ラグ(本体) トロリ脱線防止ラグ(本体) 走行レール 横行レール
	ブリッジ脱線防止ラグ(取付ボルト) トロリ脱線防止ラグ(取付ボルト)
	吊具
建屋クレーン	クレーン本体ガーダ
	落下防止金具
	トロリストッパ
	トロリ
	吊具
原子炉遮蔽	一般胴部 開口集中部

第 3-2-2 表 建物・構築物の検討結果を踏まえた機器・配管系の設備の抽出結果

設 備	部 位	
ブローアウトパネル閉止装置	ガイドレール	
	動的機能維持	
原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設	構造部材	
原子炉建屋クレーン	落下防止金具	
	ワイヤロープ	
使用済燃料プールエリア放射線モニタ（低レンジ・高レンジ）	電氣的機能維持	
原子炉建屋換気系（ダクト）放射線モニタ	電氣的機能維持	
燃料取替機	横行レール	
使用済燃料貯蔵ラック	70 体ラック	ラック取付ボルト
	110 体ラック	ラック取付ボルト
	共通ベース	基礎ボルト

原子炉建屋 3次元 FEM解析による応答の増幅に対する設備の影響評価について

1. 概要

原子炉建屋の 3次元 FEMによる解析の結果，原子炉建屋 6階の壁及び床の応答が大きくなる傾向が確認されたことから，壁及び床に設置される設備への影響評価を実施する。

2. 3次元 FEMモデルによる影響評価

2.1 評価対象設備の範囲

原子炉建屋 6階の壁及び床の応答が大きくなることが確認されたことから，原子炉建屋 6階に設置される耐震重要施設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，上位クラスの設備に波及的影響を及ぼす設備を評価対象の範囲とする。評価対象設備リストを表 1 に，評価対象設備の設置位置と 3次元 FEMモデルの節点との関係を図 1 に示す。

2.2 評価対象設備のスクリーニング

影響評価においては，応答増幅の影響が小さい位置に設置されている設備や，耐震裕度が大きい設備も含まれていることから，3次元 FEMモデルによる影響評価として詳細検討（加速度比率と耐震裕度の比較等）を行う対象設備をスクリーニングにより抽出する。評価対象設備のスクリーニングのフロー図を図 2 に示し，フローの考え方を以下に示す。

(1) 応答増幅の有無

応答の増幅が顕著に見られるのは，壁及び床の中央付近であり，壁の端部や床の端部，耐震壁直上の床については応答増幅が小さい。このため，応答増幅が小さい場所に設置される設備については，3次元 FEMモデルによる応答増幅の影響が小さいものとして影響評価の対象から除外する。

(2) 耐震裕度の大小関係

a. 柔な設備

質点系モデルと 3次元 FEMモデルの床応答スペクトル（以下「FRS」という。）を比較すると，3次元 FEMモデルの応答の増幅が大きくなる周期帯は，概ね 0.1～0.2 秒の領域にあることから，この領域に固有周期を有する設備については，全て詳細検討の対象とする。

F R S の周期が 0.1 秒以下の領域では、質点系モデルに対する 3 次元 F E M モデルの応答比率が概ね 2 倍を下回り、応答増幅の影響が比較的小さいことから、この領域に固有周期を有する設備について、耐震裕度が大きい（2 倍以上）設備は詳細検討の対象から除外し、耐震裕度が小さい（2 倍を下回る）設備は詳細検討の対象とする。

b. 剛な設備

剛な設備については、質点系モデルに対する 3 次元 F E M モデルの応答比率が概ね 2 倍を下回り、応答増幅の影響が比較的小さいことから、上述の 0.1 秒以下に固有周期を有する設備と同様に、耐震裕度が大きい（2 倍以上）設備は詳細検討の対象から除外し、耐震裕度が小さい（2 倍を下回る）設備は詳細検討の対象とする。

以上のスクリーニングの考え方にに基づき、詳細検討を実施する評価対象設備を抽出した結果を表 1 に示す。

詳細検討を実施する評価対象設備は、壁に設置される「ブローアウトパネル閉止装置」、「原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設」、「原子炉建屋クレーン」、「使用済燃料プールエリア放射線モニタ（低レンジ・高レンジ）」、「原子炉建屋換気系（ダクト）放射線モニタ」並びに床に設置される「燃料取替機」、「使用済燃料貯蔵ラック」とする。

2.2 評価方針

(1) 影響評価方法

影響評価においては、以下のいずれかの方法を用いて評価を行う。

- ① 3 次元 F E M モデルにより得られた S_d-D1 の震度に係数を掛け、「基準地震動 S_8 波による応答」及び「地盤物性等のばらつき」を考慮した震度を推定し、質点系モデルの震度に包絡されること若しくは耐震裕度に包絡されることを確認する。

【適用設備】 ・ブローアウトパネル閉止装置

- ・原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設
- ・使用済燃料プールエリア放射線モニタ（低レンジ・高レンジ）
- ・原子炉建屋換気系（ダクト）放射線モニタ

- ② S_d-D1 質点系モデルに対する 3 次元 F E M モデルの震度比率を求め、設備の耐震裕度（地盤物性等のばらつきを考慮した裕度）に包絡されること若しくは許容値内に収まることを確認する。

【適用設備】 ・原子炉建屋クレーン

- ・燃料取替機

- ・使用済燃料貯蔵ラック

(2) 評価節点の選定

評価対象設備の設置位置と3次元FEMモデルの節点との関係を図1に示す。評価に用いる節点の選定の考え方を以下に示す。

- ・ブローアウトパネル閉止装置及び原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設

ブローアウトパネル全体の応答性状を捉えるため、ブローアウトパネルの4隅の節点を評価用の節点とする。

- ・原子炉建屋クレーン

クレーンの通常待機位置（節点 No. 1, 2, 5, 6）と、波及的影響を考慮して使用済燃料プールの直上（節点 No. 3, 4, 7）を評価用の節点とする。

- ・使用済燃料プールエリア放射線モニタ（低レンジ・高レンジ）及び原子炉建屋換気系（ダクト）放射線モニタ

放射線モニタの設置位置に近接する節点（節点 1, 2）を評価用の節点とする。

- ・燃料取替機

燃料取替機の通常待機位置（節点 No. 3, 4）と、波及的影響を考慮して使用済燃料プールの直上（節点 No. 1, 2）を評価用の節点とする。

- ・使用済燃料貯蔵ラック

鉛直方向の面外方向の応答増幅が最も大きくなる使用済燃料プールの中央を評価用の節点とする。

(3) 評価用地震力の設定

各設備の評価に用いるFRS及び設置位置の最大応答加速度（以下「ZPA」という。）については、原子炉建屋の3次元FEMモデルによる応答解析の結果から、前項で設定した節点における加速度時刻歴を基に作成する。

3次元FEMモデルへの地震動の入力は1方向入力とし、各設備の評価において、3方向同時入力の影響を考慮するため、各方向に入力した際に得られる9成分（1方向入力に対しNS, EW, UD成分が得られ、3方向入力では合計9成分となる。）のうち、同一方向の3成分のFRS及びZPAを二乗和平方根（以下「SRSS」という。）で合成したFRS及びZPAを用いて評価する。このとき、FRS及びZPAの算定に用いる節点は、設備ごとに、1方向入力の面外応答が最大となる節点を抽出し、当該節点に対して、FRS及びZPAを算定する。

応答解析に用いる地震動は、全周期帯で応答が大きなスペクトル形状を有する弾性設計用地震動S_d-D1とする。3次元FEMモデルによる応答解析は線形解析であり、各節点の応答は、地震動の入力に対して比例するものと考えられることから、

S_d-D1による応答解析結果に基づき、影響評価に用いる応答比率を設定する。

なお、原子炉建屋の3次元FEMモデルの詳細は、補足説明資料「補足-340-7 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」の別紙3の「2.3次元FEMモデルの構築」に示すものと同一である。

2.3 影響評価結果

各設備の影響評価（詳細評価）の結果について、詳細評価①～⑥に示す。

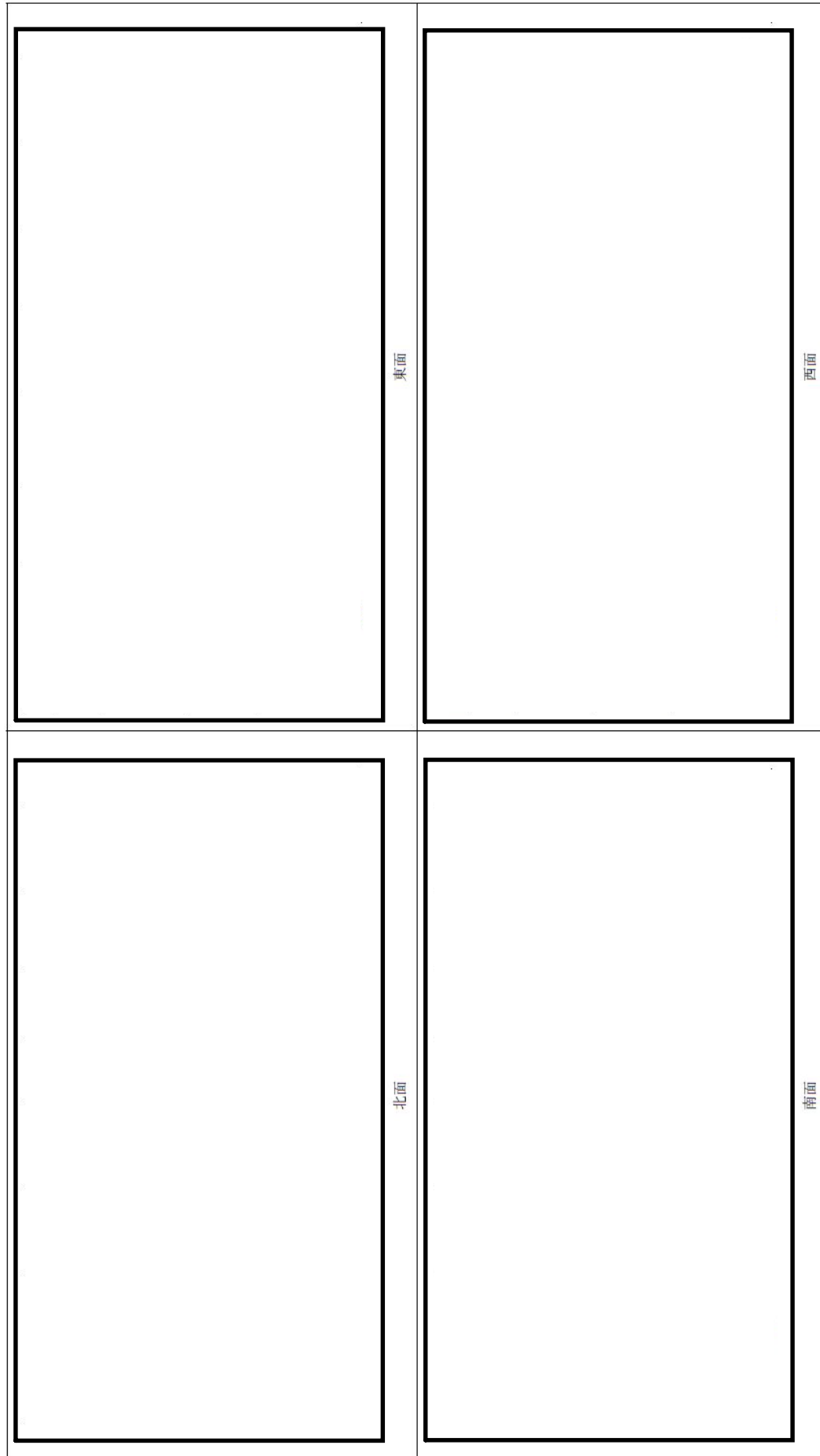
原子炉建屋の3次元FEMモデルによる応答増幅の影響評価を実施した結果、3次元FEMモデルから推定した設計用震度が、工認計算書で保守的に設定した設計用震度や機能維持確認済加速度内に包絡されるか、若しくは、質点系モデルの震度に対する3次元FEMモデルの震度比率が、工認計算書における設備の耐震裕度に包絡されることを確認した。これより、3次元FEMモデルによる応答増幅の影響を考慮しても、各設備の健全性に影響がないことを確認した。

表1 評価対象設備リスト

No.	設備名称	分類*1	設置位置		固有周期 (s)	評価部位*2	耐震裕度	フロアの分類	詳細検討の要否
			壁	床					
1	ブローアウトパネル閉止装置 (閉状態)	常設/緩和	EL. 59.08m~	壁	面外 0.069	ハンガースレーン	3.01	B	要
	ブローアウトパネル閉止装置 (開状態)		EL. 54.25m	剛		ガイドスレーン	1.35		
2	原子炉建屋外側ブローアウトパネル巻巻防護対策施設	波及的影響防止	EL. 59.08m~ EL. 54.25m	壁	面外 0.092	フレーム	1.44	B	要
3	原子炉建屋クレーン (DB)	波及的影響防止	EL. 57.0m	壁	面外 0.023	落下防止金具	5.50	B	要
4	格納容器圧力逃がし装置配管	常設/緩和	EL. 65.709m ~ EL. 48.434m	壁	0.090	配管 (1次+2次)	2.72	C	否
5	非常用ガス再循環系配管	Sクラス 常設/緩和	EL. 46.5m	壁	0.074	配管 (1次+2次)	13.26	C	否
6	静的触媒式水素再結合物	常設/緩和	EL. 49.5m	壁	0.05以下	取付ボルト	10.89	E	否
7	静的触媒式水素再結合物監視装置	常設/緩和	EL. 49.5m	壁	0.01	監視装置	5.75	E	否
8	原子炉建屋水素濃度	常設/緩和	EL. 61.46m	壁	0.027	水素濃度計	2.55	E	否
9	使用済燃料プールのエア放射線モニタ (低レンジ・高レンジ)	常設耐震/防止 常設/緩和	EL. 51.24m	壁	0.05以下	放射線モニタ	1.72	D	要
10	使用済燃料プールの監視カメラ	常設/防止 常設/緩和	EL. 51.3m	壁	0.043	スタンション	2.08	E	否
11	原子炉建屋換気系 (ダクト) 放射線モニタ	Sクラス	EL. 51.0m	壁	0.05以下	放射線モニタ	1.72	D	要
12	燃料取替機 (DB)	波及的影響防止	EL. 46.5m	床	鉛直 0.089	横行スレーン	1.12	B	要
13	使用済燃料貯蔵ラック (70体ラック)	Sクラス 常設耐震/防止 常設/緩和	EL. 34.7m	床	鉛直 0.05以下	取付ボルト	1.05	D	要
	基礎ボルト					1.06			
14	制御棒貯蔵ラック	波及的影響防止	EL. 34.7m	床	鉛直 0.009	基礎ボルト	2.39	E	否
15	制御棒貯蔵ハンガ	波及的影響防止	EL. 38.8m, EL. 46.5m	床	鉛直 0.037	ハンガ	1.90	F	否
16	代替燃料プール注水系配管	常設耐震/防止 常設/緩和	EL. 46.5m	床	0.082	配管 (1次+2次)	2.06	F	否
17	使用済燃料プールの温度	常設/防止 常設/緩和	EL. 46.5m	床	鉛直 0.05以下	架構	1.38	F	否
18	使用済燃料プールの水位・温度	常設/防止 常設/緩和	EL. 46.5m	床	鉛直 0.05以下	水位・温度計	2.12	F	否

注記 *1: 「Sクラス」は耐震重要設備, 「常設耐震/防止」は常設耐震重要重大事故防止設備, 「常設/防止」は常設耐震重要重大事故防止設備, 「常設/緩和」は常設耐震重要重大事故緩和設備を示す。

*2: 壁及び床の面外応答が厳しくなる方向の荷重を負担する部材のうち最小裕度となる部材を記載



- ：ブローアウトパネル閉止装置，原子炉建屋外側ブローアウトパネル電巻防護対策施設
- ：原子炉建屋クレーン
- ：格納容器圧力逃がし装置配管
- ：非常用ガス再循環系配管
- ：静的触媒式水素再結合器，動作監視装置
- ：原子炉建屋水素濃度
- ：使用済燃料プールの放射線モニタ（低レンジ・高レンジ）
- ：使用済燃料プールの監視カメラ
- ：原子炉建屋換気系（ダクト）放射線モニタ

図 1 (1/2) 評価対象設備の設置位置と 3 次元 FEM モデルの節点との関係 (壁)

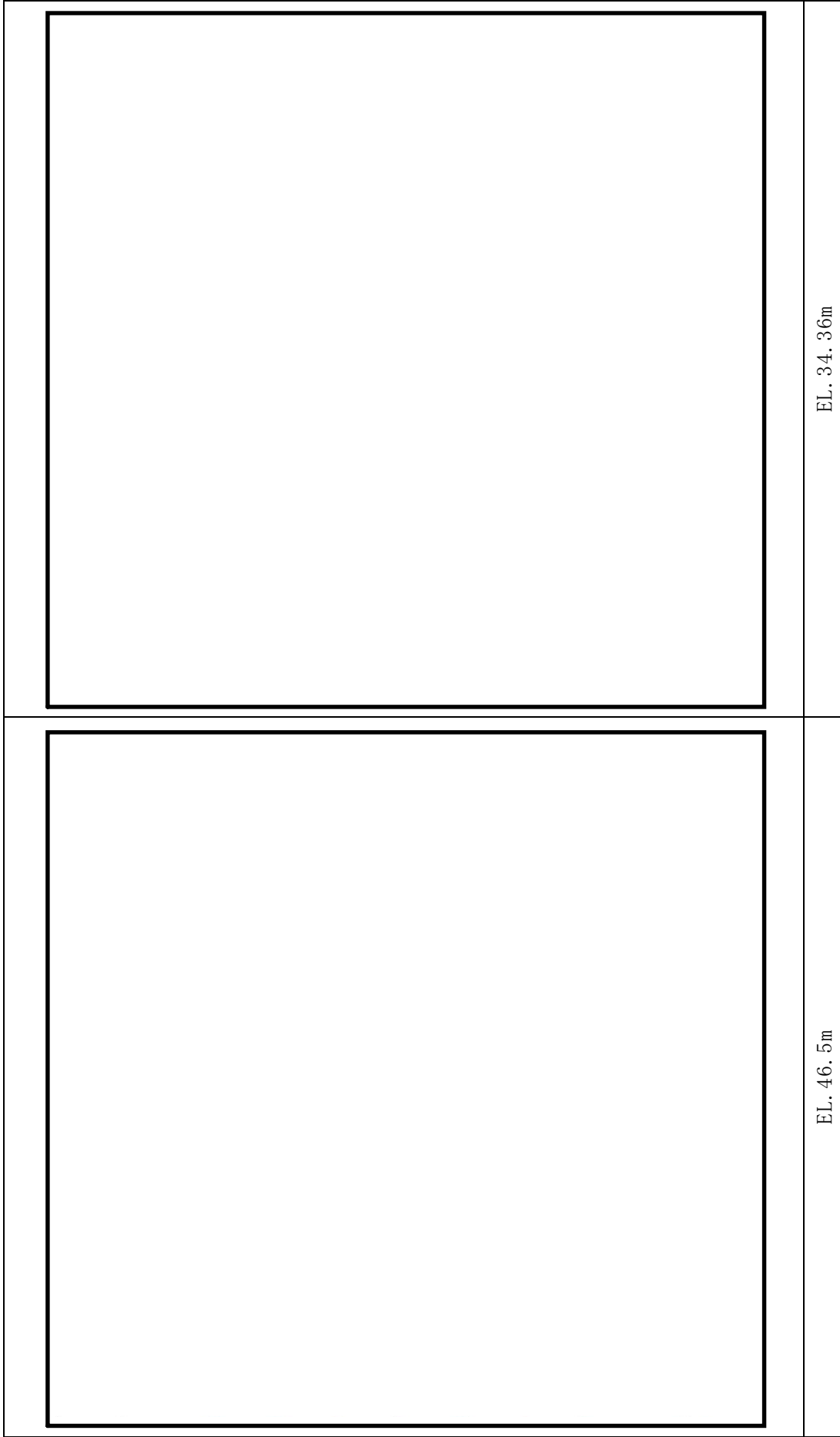


図 1 (2/2) 評価対象設備の設置位置と 3 次元 FEM モデルの節点との関係 (床)

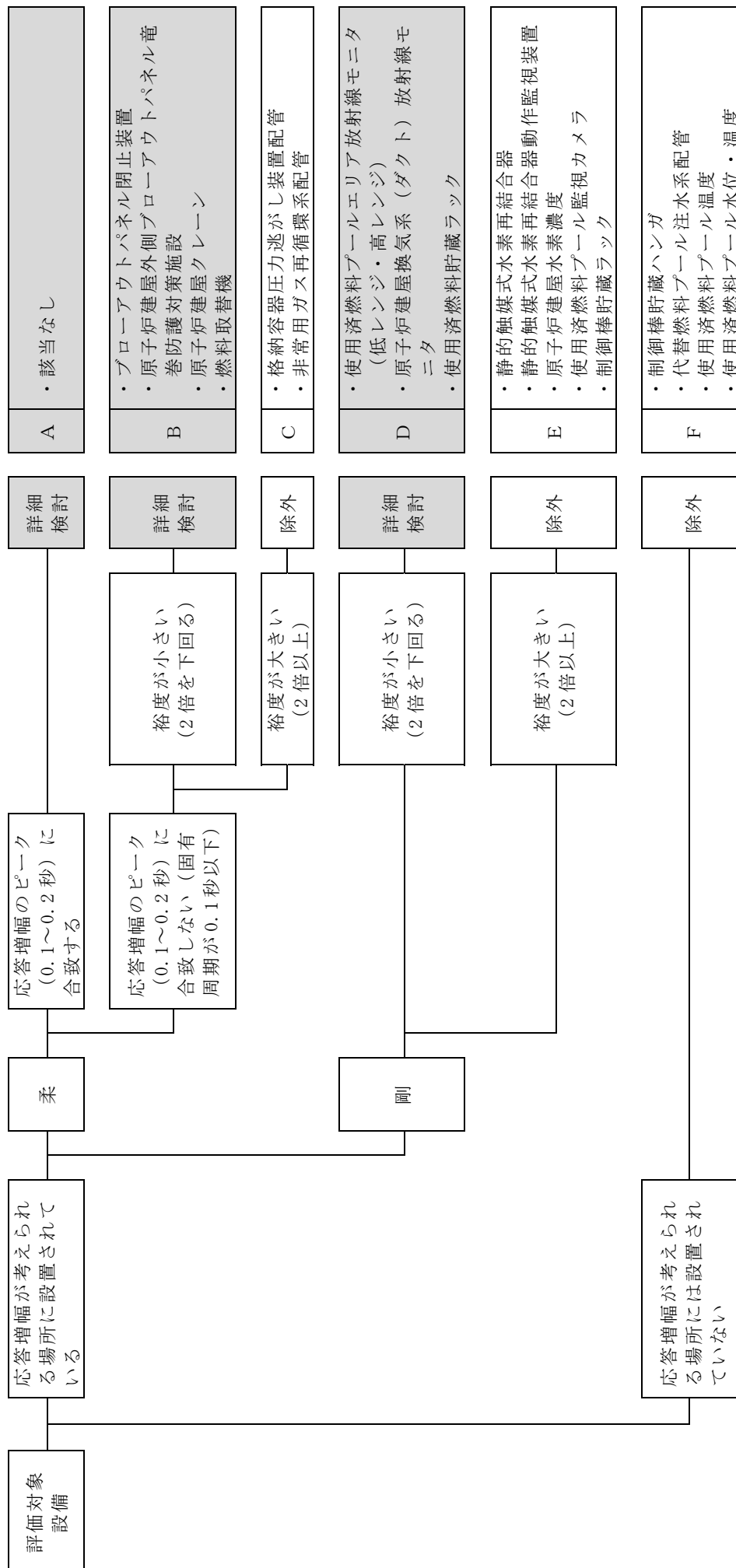


図 2 評価対象設備のスクリーニングのフロー図

壁の応答増幅を踏まえたブローアウトパネル閉止装置の影響評価

1. 目的

3次元FEMモデルによる応答解析の結果、ブローアウトパネル閉止装置の設置位置における壁の面外方向（水平）の応答が大きくなる傾向が確認されたことから、応答増幅に対する影響を評価する。

2. 影響評価結果

3次元FEMモデルによる S_d-D1 の応答解析結果から推定した評価用震度と、質点系モデルを基に設定した設計震度（工認計算書記載値）を比較した結果（影響評価結果）を表1-1及び表1-2に示す。表1-1（構造強度評価）より、扉閉状態の場合には、工認計算書の設計震度が、3次元FEMモデルから推定した面外方向の設計震度を包絡し、扉開状態の場合には包絡しないものの耐震裕度には包絡されていることを確認した。表1-2（機能維持評価）より、扉閉状態及び扉開状態のどちらにおいても、機能維持確認済加速度が3次元FEMモデルから推定した面外方向の設計震度を包絡していることを確認した。以上より、閉止装置の健全性に影響ないことを確認した。

表 1-1 影響評価結果（構造強度評価）

評価項目	評価結果	
	閉 (S_d)	開 (S_s)
扉状態（評価用地震動）	閉 (S_d)	開 (S_s)
①3次元FEMモデルによる S_d-D1 の面外方向震度* ¹	1.98* ²	1.63* ³
② S_d 8波+ばらつき考慮のための補正比率* ⁴	1.98	1.32
③ S_d から S_s へ換算するための補正比率* ⁵	—	1.85
④がたの影響を考慮するための係数(2倍)* ⁶	—	2
⑤影響評価用震度* ¹ (①×②×③×④)	3.91	7.93
⑥工認計算書の設計震度* ¹	4.18* ⁷	6.33* ⁸
⑦震度比率 (⑤/⑥)	—	1.26
⑧耐震裕度	—	1.30* ⁹
⑨評価 (⑤<⑥若しくは⑦<⑧)	○	○

注記 *1：震度は、 $G=9.80665$ (m/s^2)

*2：扉閉状態の固有周期 秒における面外方向の震度（図1-1参照）

*3：扉開状態の固有周期は0.05秒以下であるため1.2ZPAの値（表1-2参照）

*4：質点系モデルのEL.63.65mにおける、「 S_d-D1 」と「 S_d 8波+ばらつき考慮」のFRSの固有周期における震度比率（「3次元FEMでの S_d 8波+ばらつき考慮」

相当」の震度を算定)

*5: 質点系モデルの EL. 63.65m における, S_d に対する S_s の最大応答加速度比率 (3次元 FEMモデルでの S_s 評価用の震度を設定するための比率)

*6: 扉開状態での面外方向は固定されていないため, がたの影響として 2 倍を考慮

*7: EL. 63.65m における S_d 8 波+ばらつき考慮の応答スペクトルの固有周期 秒における震度 (閉止装置設置位置より高い EL. を適用し保守性を確保)

*8: EL. 63.65m における S_s 8 波+ばらつき考慮の応答スペクトルの固有周期 秒における震度 (閉止装置設置位置より高い EL. を適用し保守性を確保, 加振試験により 0.05 秒以下であり剛であることを確認しているが, 扉閉状態では 秒に固有周期があること, 秒の震度 6.33 が 1.2ZPA の 2 倍の震度 3.38 より大きいため, 6.33 を適用することで保守性を確保)

*9: 耐震裕度が最小となるガイドレールの耐震裕度

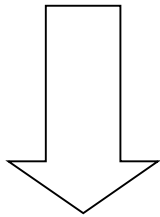
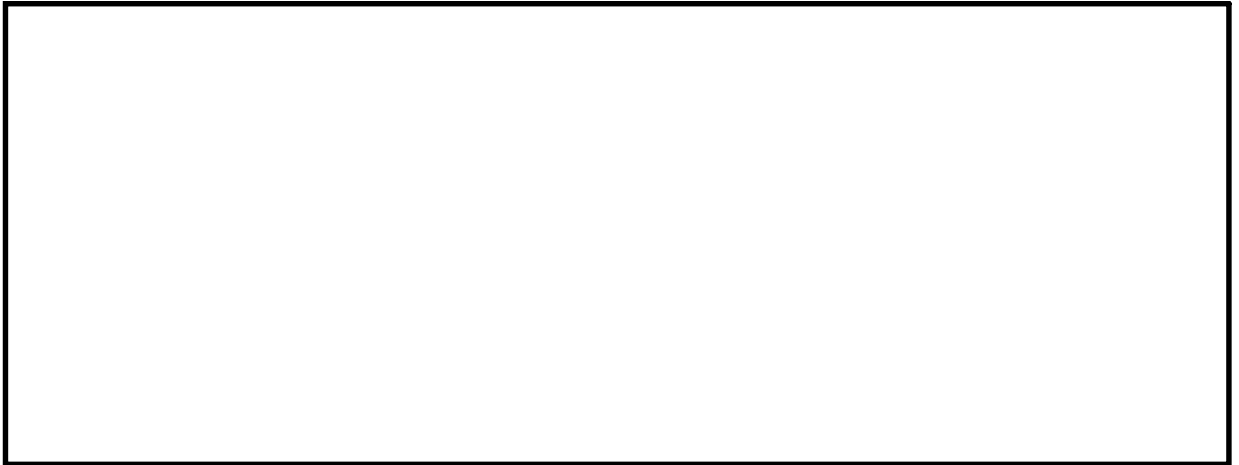
表 1-2 影響評価結果 (機能維持評価)

評価項目	評価結果	
	閉 (S_d)	開 (S_s)
扉状態 (評価用地震動)		
①3次元 FEMモデルによる S_d -D1 の面外方向震度* ¹	1.36* ¹⁰	1.36* ¹⁰
② S_d 8 波+ばらつき考慮のための補正比率* ⁴	1.32	1.32
③ S_d から S_s へ換算するための補正比率* ⁵	—	1.85
④影響評価用震度* ¹ (①×②×③)	1.79	3.31
⑤工認計算書の機能維持確認済加速度 (震度) * ¹	3.96* ¹¹	3.96* ¹¹
⑥評価 (④<⑤)	○	○

注記 *10: 面外方向の 1.0ZPA (表 1-3 参照)

*11: 加振試験により得られた BOP 閉止装置上端の最大応答加速度。BOP 閉止装置の扉は, 閉止装置上部のハンガーレールから吊り下げる方式であり, 開閉するための電動機等の駆動系も装置の上部に設置されていることから, 装置上端の最大応答加速度を適用。

1 方向入力時の面外方向の応答スペクトル



【F R S の選定】

南北面の節点のうち 秒で最大応答を示す節点 (No. 3) を抽出

東西面の節点のうち 秒で最大応答を示す節点 (No. 12) を抽出

【3 方向入力の考慮】

3 方向入力による面外成分の 3 つの F R S を S R S S で合成して算出

3 方向入力時の面外方向の応答スペクトル

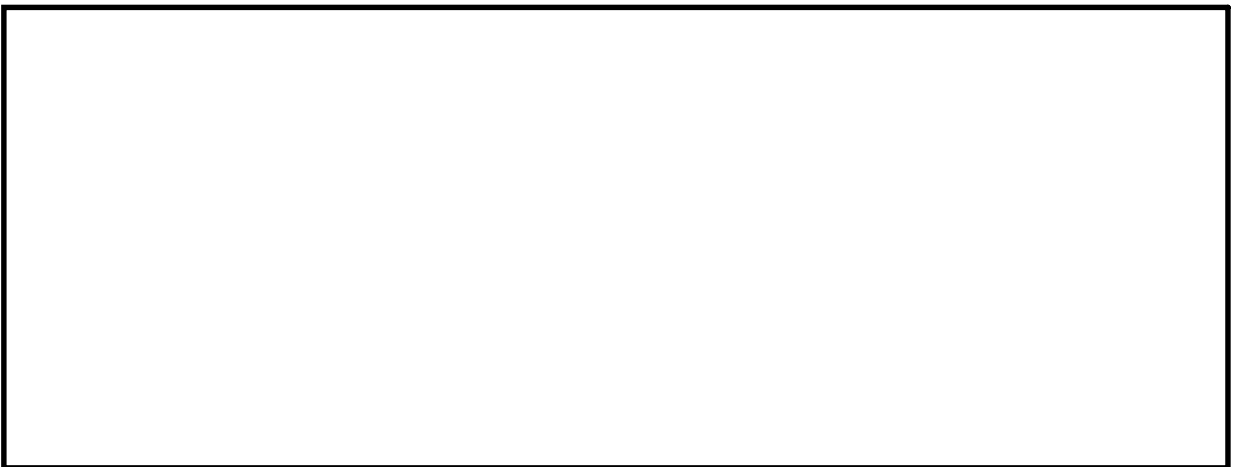


図 1-1 扉閉状態の面外方向の震度の設定方法

表 1-3 扉開状態の面外方向の震度の設定方法

評価節点	1 方向入力の ZPA	3 方向考慮の ZPA (SRSS)	3 方向考慮の 1.2ZPA (SRSS)
No. 17 1 方向入力 最大 Z P A となる節点	1. 267	1. 356	1. 627

以 上

壁の応答増幅を踏まえた原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設の影響評価

1. 目的

3次元FEMモデルによる応答解析の結果，原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設（以下「BOP竜巻防護施設」という。）の設置位置における壁の面外方向（水平）の応答が大きくなる傾向が確認されたことから，応答増幅に対する影響を評価する。

2. 影響評価結果

3次元FEMモデルによる S_d-D1 の応答解析結果から推定した評価用震度と，質点系モデルを基に設定した設計震度（工認計算書記載値）を比較した結果（影響評価結果）を表2-1に示す。表2-1より，工認計算書の設計震度は，3次元FEMモデルから推定した面外方向の設計震度を包絡していることを確認した。これより，BOP竜巻防護施設の健全性に影響ないことを確認した。

表 2-1 影響評価結果

評価項目	評価結果
①3次元FEMモデルによる S_d-D1 の面外方向震度* ¹	3.38* ²
② S_d 8波+ばらつき考慮のための補正比率* ³	1.43
③ S_d から S_s へ換算するための補正比率* ⁴	1.85
④影響評価用震度* ² （①×②×③）	8.95
⑤工認計算書の設計震度* ²	9.43* ⁵
⑥評価（④<⑤）	○

注記 *1：震度は， $G=9.80665$ （ m/s^2 ）

*2：固有周期0.092秒における面外方向の震度（図2-1参照）

*3：質点系モデルのEL.63.65mにおける，「 S_d-D1 」と「 S_d 8波+ばらつき考慮」のFRSの固有周期における震度比率（「3次元FEMでの S_d 8波+ばらつき考慮相当」の震度を算定）

*4：質点系モデルのEL.63.65mにおける， S_d に対する S_s の最大応答加速度比率（3次元FEMモデルでの S_s 評価用の震度を設定するための比率）

*5：EL.63.65mにおける「 S_s 8波+ばらつき考慮」のFRSの固有周期0.092秒における震度（BOP竜巻防護施設設置位置より高いEL.を適用し保守性を確保）

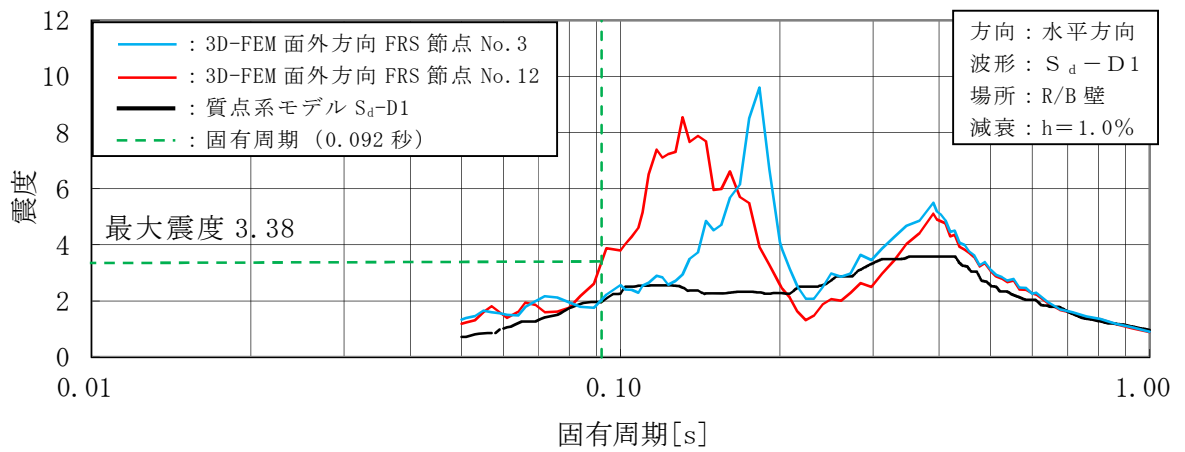


図 2-1 BOP 竜巻防護施設の面外方向の震度の設定方法

以上

壁の応答増幅を踏まえた原子炉建屋クレーンの影響評価

1. 目的

3次元FEMモデルによる応答解析の結果，原子炉建屋クレーンの設置位置における壁の面外方向（水平）の応答が大きくなる傾向が確認されたことから，応答増幅に対する影響を評価する。また，ロッキングによる鉛直動の増幅の影響についても確認する。

2. 影響評価結果

質点系モデルによるS_a-D1の震度と，3次元FEMモデルによる面外方向の震度を整理した結果を表3-1に示す。表3-1より，工認計算書の設計震度は，3次元FEMの面外方向（EW方向）の設計震度を包絡していないことから，耐震裕度との比較を行う。

表 3-1 原子炉建屋クレーンの固有周期，固有周期における震度及び震度比率

	固有周期 (s) *1			震度*3		
	走行方向 (NS*2)	横行方向 (EW*2)	鉛直方向 (UD*2)	走行方向	横行方向	鉛直方向
質点系モデル	—			0.075*4	0.80*5	0.83*6
3次元FEM モデル	—			0.075*4	1.80*5	1.17*6
震度比率				1.00	2.25	1.19*7

注記 *1：設計基準対象施設（DB）の評価では，クレーンのトロリが中央にある条件で，重大事故等対処設備（SA）の評価では，クレーンのトロリが端部にある状態で固有周期を算出

*2：原子炉建屋クレーンは，原子炉建屋6階の東面と西面にレールが設置されており，NS方向が走行方向，EW方向が横行方向となる。

*3：弾性設計用地震動S_a-D1による応答解析により得られた震度

*4：最大静止摩擦係数より求めた水平方向設計震度であり建屋応答に依存しない値

*5：固有周期が0.05秒以下の剛構造であるため，据付場所での最大応答加速度（ZPA）の1.2倍の値を記載（節点No.2）

*6：設計基準対象施設（DB）では吊荷有りの条件で評価し，重大事故等対処設備（SA）では吊荷無しの条件で評価するため，評価上厳しい設計基準対象施設（DB）での固有周期におけるFRSの震度を記載（節点No.7，図3-1参照，時刻歴解析のため±10%の拡幅考慮として，応答が厳しい側に固有周期の-10%シフト（0.423秒）を考慮した震度を適用）

*7：鉛直方向荷重を評価するため自重（+1G）を考慮して算定

評価部位は、工認計算書に記載されている評価部位のうち、水平及び鉛直方向の各々で最小裕度となる評価部位として、落下防止金具とワイヤロープを対象とした。原子炉建屋クレーンの影響評価部位を図 3-2 に示す。

評価部位の震度比率と設計裕度を比較した結果、設計裕度の方が大きいことを確認した*8。評価結果を表 3-2 に示す。以上より、面外方向の応答増幅やロッキングの影響を考慮しても、原子炉建屋クレーンの健全性に影響ないことを確認した。

注記*8：影響評価の結果、鉛直方向の震度比率がワイヤロープの設計裕度を上回ることから、強度の強い材質に変更し、健全性を確認した。

表 3-2 評価結果

方向	評価部位	震度比率	設計裕度	評価
水平（横行方向）	落下防止金具	2.45	5.23	○
鉛直	ワイヤロープ	1.19	1.47	○

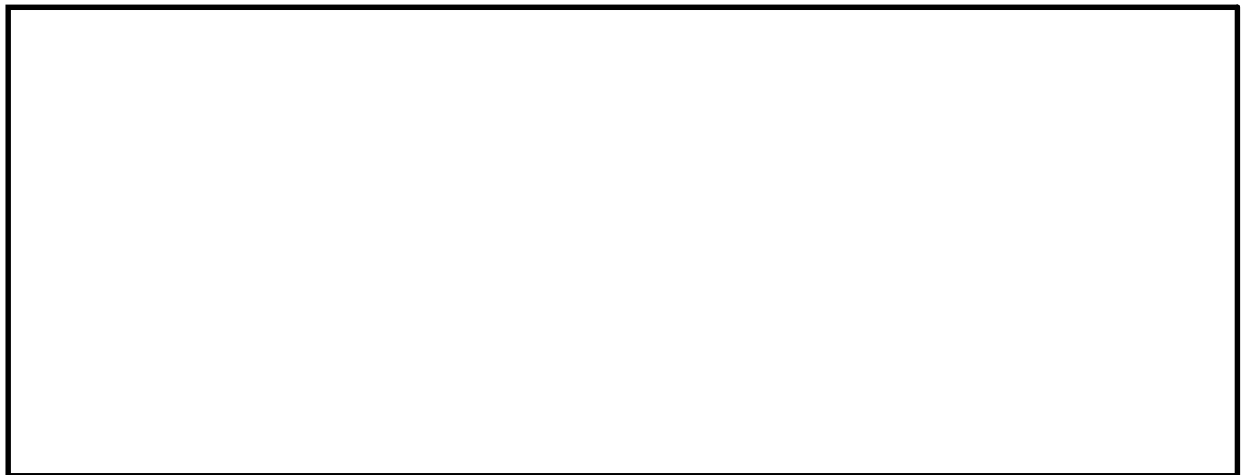


図 3-1 原子炉建屋クレーンの鉛直方向の震度の設定方法

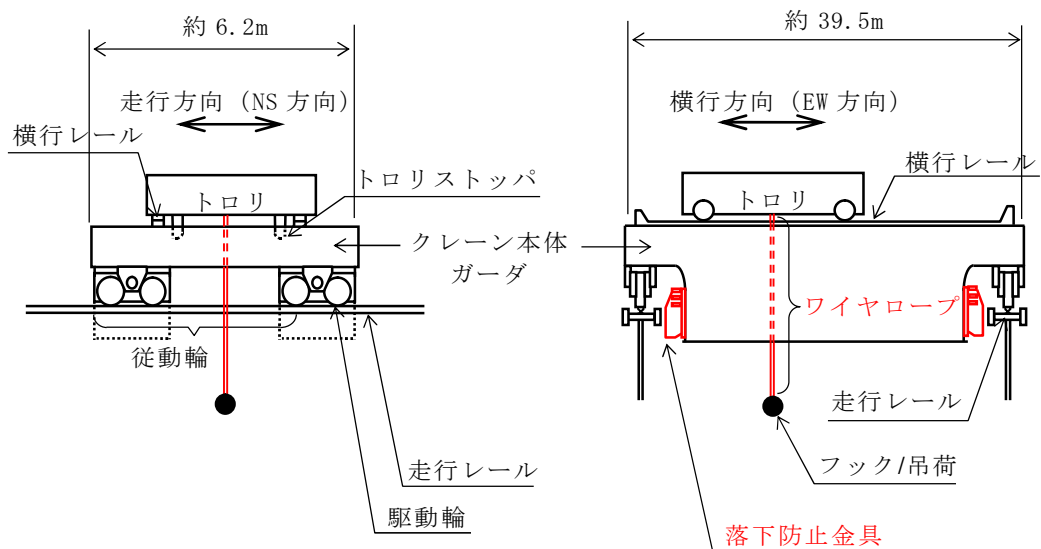


図 3-2 原子炉建屋クレーンの影響評価部位（落下防止金具，ワイヤロープ）

以上

壁の応答増幅を踏まえた使用済燃料プールエリア放射線モニタ（低レンジ・高レンジ）及び原子炉建屋換気系（ダクト）放射線モニタの影響評価

1. 目的

3次元FEMモデルによる応答解析の結果、使用済燃料プールエリア放射線モニタ（低レンジ・高レンジ）（以下「SFPモニタ」という。）及び原子炉建屋換気系（ダクト）放射線モニタ（以下「換気系モニタ」という。）の設置位置における壁の面外方向（水平）の応答が大きくなる傾向が確認されたことから、応答増幅に対する影響を評価する。

2. 影響評価結果

3次元FEMモデルによる S_d-D1 の応答解析結果から推定した評価用震度と、各放射線モニタの機能維持確認済加速度を比較した結果（影響評価結果）を表4-1に示す。表4-1より、SFPモニタ及び換気系モニタの機能維持確認済加速度は、3次元FEMモデルから推定した面外方向の設計震度を包絡していることを確認した。これより、面外方向の応答増幅を考慮しても、SFPモニタ及び換気系モニタの健全性に影響ないことを確認した。

表4-1 影響評価結果

評価項目	評価結果	
	SFPモニタ	換気系モニタ
①3次元FEMモデルによる S_d-D1 の面外方向震度* ¹	1.13* ²	1.14* ²
② S_d 8波+ばらつき考慮のための補正比率* ³	1.31	1.31
③ S_d から S_s へ換算するための補正比率* ⁴	1.76	1.76
④影響評価用震度* ¹ （①×②×③）	2.59	2.61
⑤工認計算書の機能維持確認済加速度（震度）* ¹		
⑥評価（④<⑤）	○	○

注記 *1：震度は、 $G=9.80665$ (m/s²)

*2：面外方向の1.0ZPA（SFPモニタ：節点No.1，換気系モニタ：節点No.1）

*3：質点系モデルのEL.57.00mにおける、「 S_d-D1 」と「 S_d 8波+ばらつき考慮」のZPAの比率（「3次元FEMでの S_d 8波+ばらつき考慮相当」の震度を算定）

*4：質点系モデルのEL.57.00mにおける、 S_d に対する S_s の最大応答加速度比率（3次元FEMモデルでの S_s 評価用の震度を設定するための比率）

以上

床の応答増幅を踏まえた燃料取替機の影響評価

1. 目的

3次元FEMモデルによる応答解析の結果、燃料取替機の設置位置における床の面外方向（鉛直）の応答が大きくなる傾向が確認されたことから、応答増幅に対する影響を評価する。

2. 影響評価結果

質点系モデルによる S_a-D1 の震度と、3次元FEMモデルによる面外方向の震度を整理した結果を表5-1に示す。表5-1より、燃料取替機の工認計算書の設計震度は、3次元FEMモデルの面外方向の設計震度を包絡していないことから、詳細評価を行う。

表 5-1 燃料取替機の固有周期，固有周期における震度及び震度比率

	固有周期 (s) *1	震度 *2
	鉛直方向	鉛直方向
質点系モデル		1.35 *3
3次元FEMモデル		1.51 *3
震度比率		1.12

注記 *1：設計基準対象施設（DB）の評価では、クレーンのトロリが中央にある条件で、重大事故等対処設備（SA）の評価では、クレーンのトロリが端部にある状態で固有周期を算出

*2：弾性設計用地震動 S_a-D1 による応答解析により得られた震度

*3：震度が大きくなる設計基準対象施設（DB）の固有周期 0.089 秒における震度を記載（図 3-1 参照）（節点 No. 2）

評価部位は、工認計算書に記載されている評価部位のうち、最小裕度となる評価部位として、横行レールを対象とした。燃料取替機の影響評価部位を図 5-2 に示す。

鉛直方向の震度の増分を考慮したトロリに掛かる地震時荷重を計算し、横行レールの発生応力を算出した結果、許容応力に収まることを確認した*4。評価結果を表 5-2 に示す。以上より、面外方向の応答増幅を考慮しても、燃料取替機の健全性に影響ないことを確認した。

注記 *4：当初は、燃料取替機のうち最小裕度となるトロリ脱線防止ラグ取付ボルトを評価対象としたが、評価の結果、算出応力が許容応力を上回ることから、ボルトを強い材質のものに変更し、健全性を確認した。これに伴い、最小裕度の部位が、トロリ脱線防止ラグ取付ボルトから横行レールに変更となった。

表 5-2 評価結果

(単位：MPa)

評価部位	応力	算出応力	許容応力	評価
横行レール	組合せ (曲げ+せん断)	475	483	○

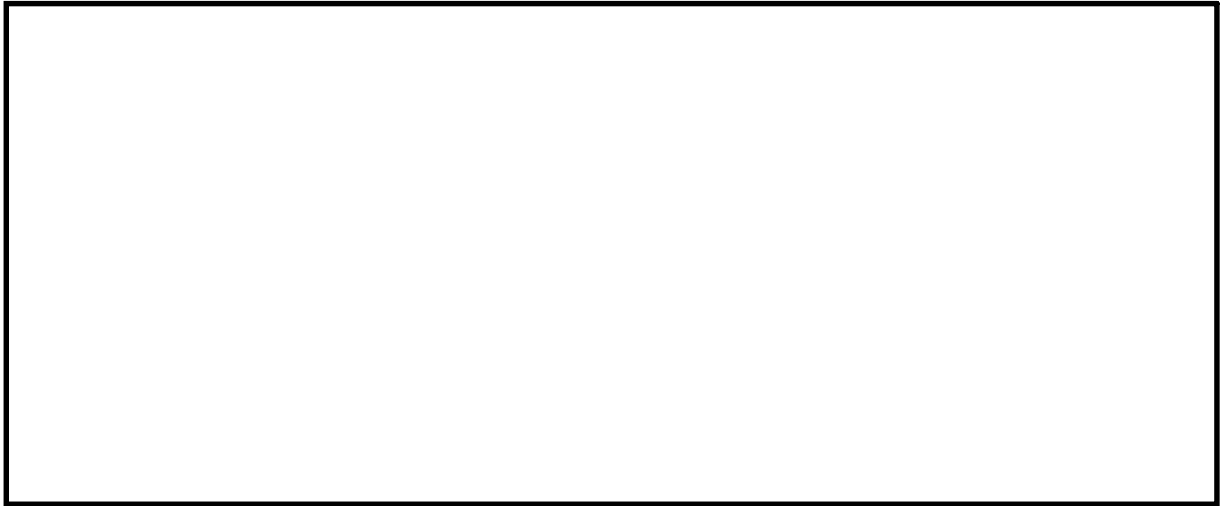


図 5-1 燃料取替機の面外方向の震度の設定方法

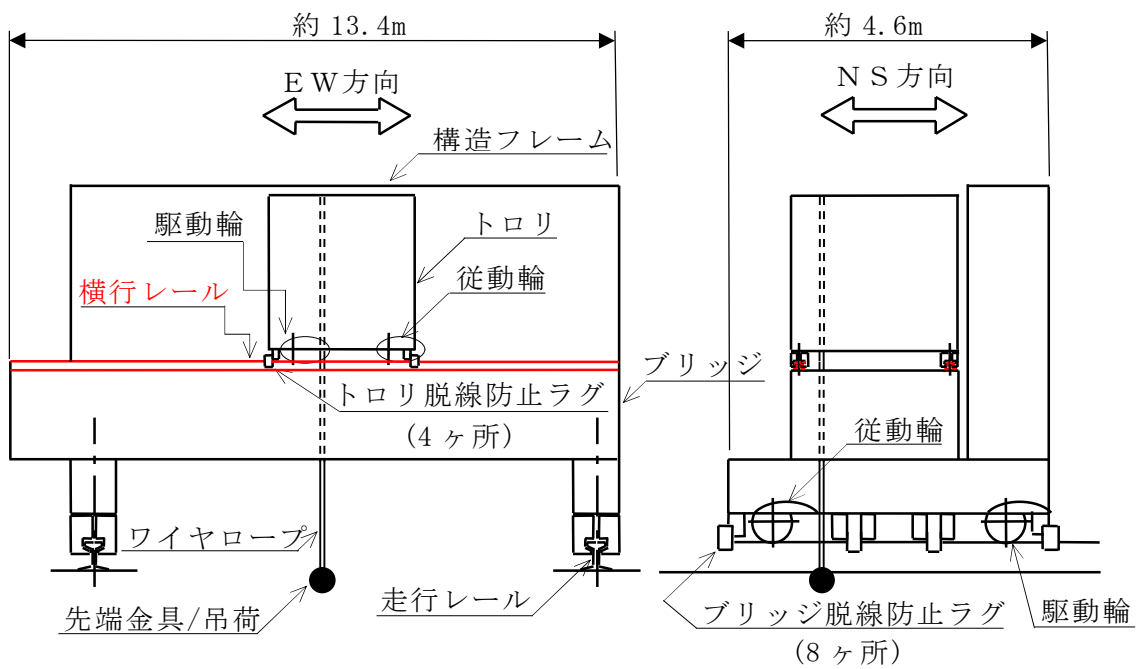


図 5-2 燃料取替機の影響評価部位 (横行レール)

以上

床の応答増幅を踏まえた使用済燃料貯蔵ラックの影響評価

1. 目的

3次元FEMモデルによる応答解析の結果、使用済燃料貯蔵ラックの設置位置における床の面外方向（鉛直）の応答が大きくなる傾向が確認されたことから、応答増幅に対する影響を評価する。

2. 影響評価結果

質点系モデルによるS_a-D1の震度と、3次元FEMモデルによる面外方向の震度を整理した結果を表6-1に示す。表6-1より、使用済燃料貯蔵ラックの工認計算書の設計震度は、3次元FEMモデルの面外方向の設計震度を包絡していないことから、詳細評価を行う。

表 6-1 使用済燃料貯蔵ラックの固有周期，固有周期における震度及び震度比率

	固有周期 (s)	震度* ¹
	鉛直方向	鉛直方向
質点系モデル	0.05 秒以下 (70 体ラック)	0.36* ²
3次元FEMモデル		0.91* ²
震度比率		2.53

注記 *1：弾性設計用地震動S_a-D1による応答解析により得られた震度

*2：固有周期が0.05秒以下の剛構造であるため、据付場所での最大応答加速度（ZPA）を記載（節点No.1）

評価部位は、工認計算書に記載されている評価部位のうち、設計裕度が少ない評価部位として、ラック取付ボルト及び基礎ボルトを対象とした。使用済燃料貯蔵ラックの影響評価部位を図6-1に示す。

鉛直方向の震度の増分を考慮した使用済燃料貯蔵ラックの転倒モーメントに対するラック取付ボルト及び基礎ボルトの発生応力を算出した結果、許容応力に収まることを確認した*³。評価結果を表6-2に示す。以上より、面外方向の応答増幅を考慮しても、使用済燃料貯蔵ラックの健全性に影響ないことを確認した。

注記 *3：ボルトの応力計算において、絶対値和法を用いた評価を行ったところ、許容値を満足しないことから、応力評価の方法を絶対値和法から二乗和平方根（SRSS）に変更し、健全性を確認した。

表 6-2 評価結果

(単位：MPa)

評価部位		応力	算出応力*4	許容応力	評価
ラック取付ボルト	70体ラック	引張り	134	153	○
	110体ラック	引張り	105	153	○
基礎ボルト	共通ベース	引張り	130	153	○

注記 *4：NS，EW方向により評価結果が異なるため，算出応力の大きい方を記載

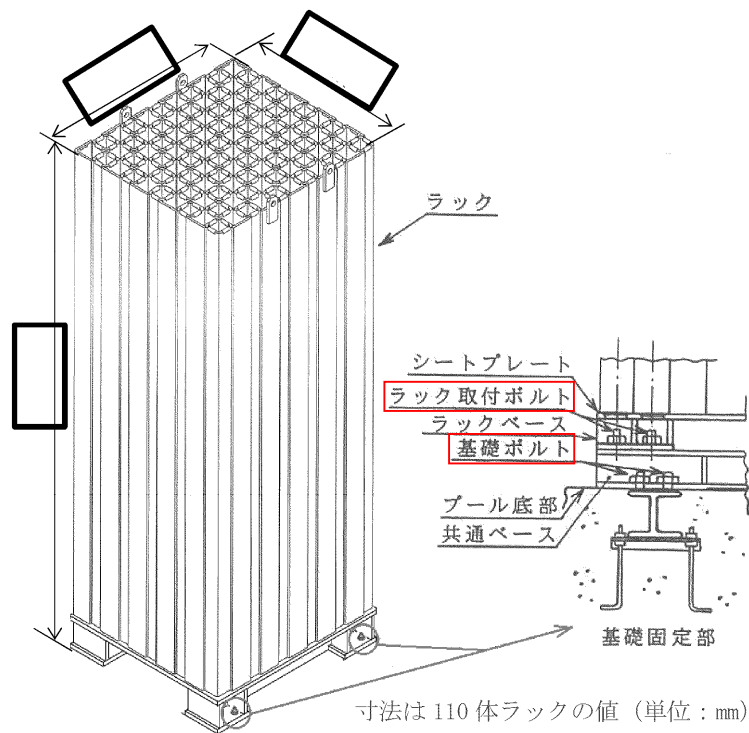


図 6-1 使用済燃料貯蔵ラックの影響評価部位 (ラック取付ボルト，基礎ボルト)

以上

3 方向同時入力考慮時の面外応答成分の組合せの考え方について

1. 概要

3次元FEMモデルへの地震動の入力は1方向入力としているため、各設備の評価においては、3方向同時入力の影響を考慮するため、各方向に入力した際に得られる9成分のうち、同一方向の3成分のFRS及びZPAを組合せた地震力で評価を行う必要がある。この組合せを考慮する際、時刻歴での足し合わせを行うと、各成分の加速度の向きによっては、1方向入力時の応答を下回る場合や、ばらつき等による位相のずれを考慮すると応答が上下することが考えられる。本件の対応方針について以下に整理する。

2. 対応方針

(1) ばらつきの考慮

工認計算書に用いる地震力は、地盤や建屋剛性のばらつきを考慮した応答解析の結果を考慮するため、基本ケースのFRSに対して1.5倍の割増を行うか、基本ケースのFRSにばらつきのFRSを組合せて、設備評価用のFRSやZPAを設定している。

今回の影響評価では、これらのばらつきが考慮されたFRSやZPAを用いて耐震評価を実施した結果を用いていることから、ばらつきを考慮した影響評価となっている。具体的には、3次元FEMモデルから評価用の震度を推定する手法では、地盤物性等のばらつきを考慮した係数を適用していること、また、質点系モデルと3次元FEMモデルの震度比率と耐震裕度を比較する手法では、評価対象設備の耐震評価ですでに地盤物性等のばらつきを考慮している。

このため、3次元FEMモデルによる面外応答成分の組合せの際に、1方向入力の応答と比べて3方向入力の応答が上下するような影響についても、上記のばらつきの中で考慮がされているものと考えられる。

(2) 面外応答成分の組合せ

上述のとおり、面外応答成分を組合せる際には、時刻歴の代数和で問題ないと考えられるが、今回の影響評価では、設計上の保守性を確保するために、各成分の時刻歴の代数和を取る前に、個別にFRS及びZPAを算定し、このFRS及びZPAをSRSSにより合成する手法を適用することとする。これにより、面外方向成分の組合せの際に、1方向入力の応答より小さくなることは無く、保守性を確保できるものとする。

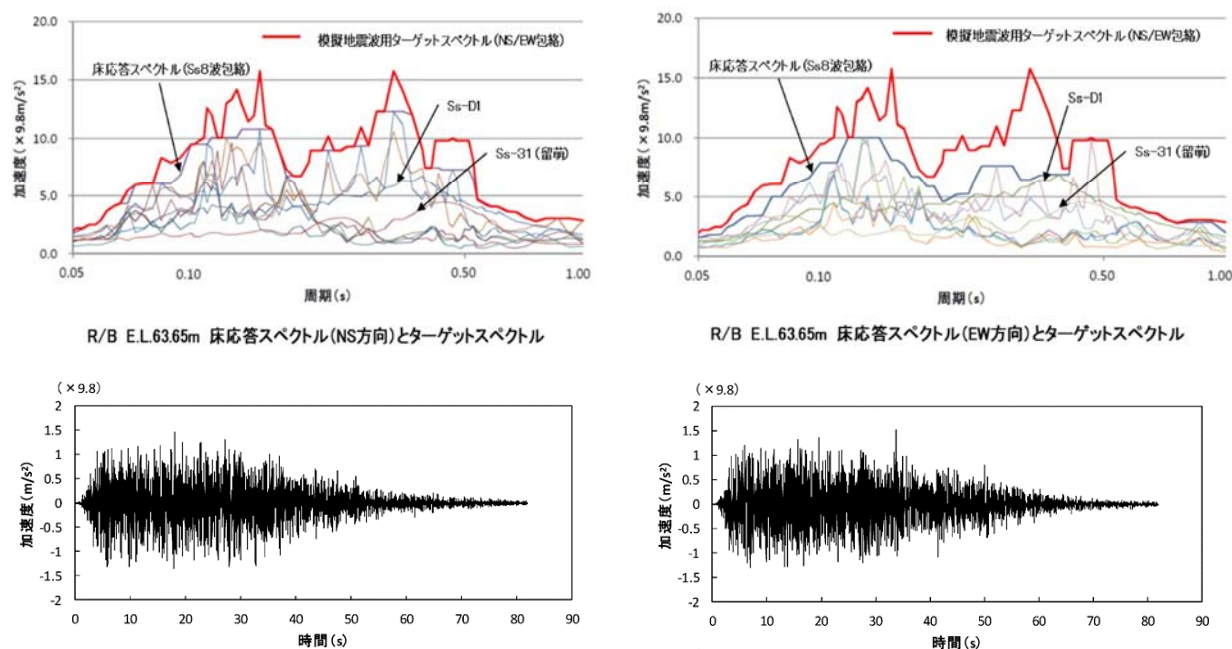
以上

ブローアウトパネル閉止装置の加振試験について

1. 加振波の作成方法

B O P 閉止装置の加振試験では、B O P 閉止装置の設置位置より上方の原子炉建屋 EL. 63.65m の質点モデルから算出された N S 方向及び E W 方向の両方を包絡する F R S (参考図 2-1 の赤線) を作成し、これをターゲットスペクトルとして時刻歴波を作成し、加振波として用いた。

この加振波は、応答加速度が大きくなる B O P 閉止装置の設置位置より上方の F R S を基に作成していることから、実際の B O P 閉止装置の設置位置における F R S を包絡する F R S となっており、この加振波を用いた加振試験により、閉止装置の機能を確認するための試験として成立することを確認している。



(1) N S 方向時刻歴波

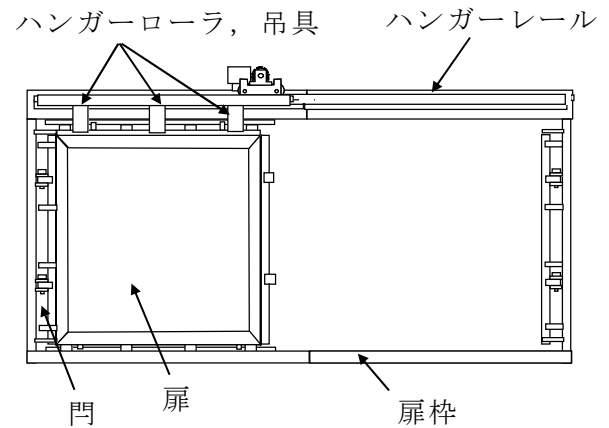
(2) E W 方向時刻歴波

参考図 2-1 B O P 加振試験に用いた入力波のスペクトルと時刻歴波

2. BOP閉止装置の機能維持確認済加速度

2.1 機能維持確認済加速度の設定位置

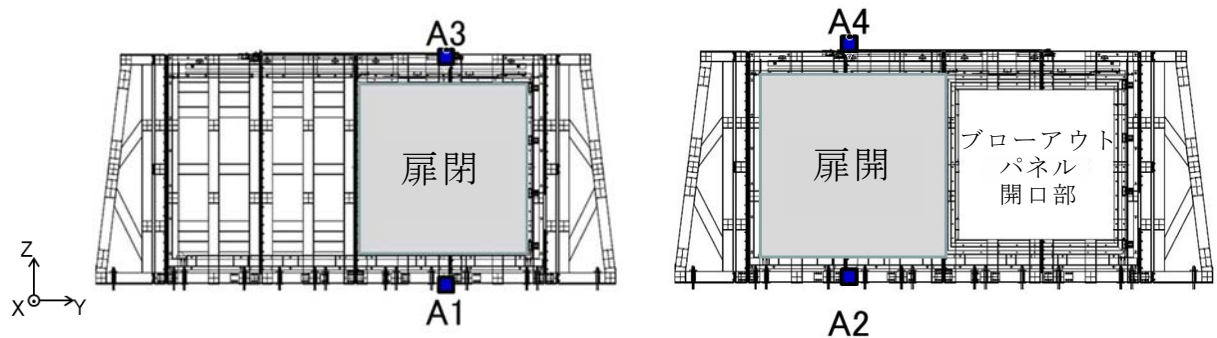
BOP閉止装置の構造概略図は、参考図 2-2 のとおり。BOP閉止装置の扉は、閉止装置上部のハンガーレールから吊り下げる方式であり、開閉するための電動機等の駆動系も装置の上部に設置されていることから、機能維持確認済加速度の設定位置は閉止装置上端の最大応答加速度とする。



参考図 2-2 BOP閉止装置の構造概略図

2.2 機能維持確認済加速度

加振試験（平成 30 年 7 月 31 日）により得られた、機能維持確認済加速度について以下に示す。



参考図 2-3 加振試験時の加速計設置位置

(1) 機能維持確認済加速度

BOP閉止装置上端での最大応答加速度は、参考表 2-1 に示す通り、扉閉状態で 扉開状態で であった。これより、 を機能維持確認済加速度と設定する。

参考表 2-1 BOP閉止装置上端での最大応答加速度（震度）

方向	扉状態	最大応答加速度 ($\times 9.8 \text{ m/s}^2$)
X方向 (面外方向)	閉	<input type="text"/> (上端 A 3)
	開	<input type="text"/> (上端 A 4)

3. 3次元FEM解析により得られた応答に対する健全性評価

工認計算書における評価内容及び3次元FEM解析により得られた応答を考慮し、BOP閉止装置の構造強度評価及び機能維持評価への影響評価を行った。

この際、構造強度評価については、設計用震度に対する各部材の応力評価を行い、発生応力が許容応力内に収まることにより、構造健全性が確保されることを確認する。また、機能維持評価については、加振試験で確認した機能維持確認済加速度が、設計用震度を包絡することを確認することで、BOP閉止装置の動的機能が維持されることを確認する。

3.1 構造強度評価

参考表 2-2 に示す通り、扉閉状態の場合には、工認計算書の設計震度が、3次元FEM解析から推定した面外方向の設計震度を包絡し、扉開状態の場合には包絡しないものの耐震裕度には包絡されていることを確認したことから、構造健全性は確保される。

参考表 2-2 影響評価結果（構造強度評価）

	扉閉	扉開
考慮する地震動	S_d	S_s
区分（固有周期）		1.2 Z P A
①3次元FEMを基にした推定震度	3.91	7.93（ガタ考慮）
②工認計算書設計用震度	4.18	6.33
③震度比率	—	1.26
④耐震裕度	—	1.30
評価（①<②若しくは③<④）	○	○

3.2 機能維持評価

参考表 2-3 に示す通り、扉閉状態及び扉開状態のどちらにおいても、機能維持確認済加速度が3次元FEM解析から推定した面外方向の設計震度を包絡していることを確認したことから、BOP閉止装置の動的機能は維持される。

参考表 2-3 影響評価結果（機能維持評価）

	扉閉	扉開
考慮する地震動	S_d	S_s
区分（固有周期）	1.0 Z P A	1.0 Z P A
①3次元FEMを基にした推定震度	1.79	3.31
②機能維持確認済加速度（震度）	3.96	3.96
評価（①<②）	○	○

以上