



平成26年(ヨ)第31号, 平成27年(モ)第38号

債権者 松田 正 外8名 (平成26年(ヨ)第31号は高橋秀典外4名)

債務者 関西電力株式会社

主張書面(13) 兼 異議審主張書面(8)

平成27年9月28日

福井地方裁判所民事第2部 御中

債務者代理人 弁護士 小 原 正 敏



弁護士 田 中 宏



弁護士 西 出 智 幸



弁護士 原 井 大 介



弁護士 森 拓 也



弁護士 辰 田 淳



弁護士 今 城 智 徳



明 喜 内 山 弁護士



祐 室 中 弁護士



目 次

第1	耐震安全性評価におけるモデル化について（追加質問事項2 第1の2）	5
1	回答	5
2	詳細説明	5
	（1）断面寸法の設定について	5
	（2）モデル化における不確定性について	7
第2	非線形応答解析の実施の有無等について（追加質問事項2 第1の3（1））	7
1	回答	7
2	詳細説明	8
	（1）地震応答解析について	8
	（2）建物・構築物における実施の有無等	9
	（3）機器・配管系における実施の有無等	12
第3	3次元の動的応答解析の実施の有無等について（追加質問事項2 第1の3（2））	15
1	回答	15
2	詳細説明	16
	（1）建物・構築物について	16
	ア 解析モデルについて	16
	イ 地震動の入力及び解析結果について	18
	（ア）従来の1次元質点系モデルによる地震応答解析	18
	（イ）新規制基準施行後に実施している解析と解析結果の比較	19
	（2）機器・配管系について	21

ア 解析モデルについて.....	21
イ 地震動の入力及び解析結果について.....	22
(ア) 従来地震応答解析.....	23
(イ) 新規規制基準施行後に実施している耐震評価.....	23
(ウ) 小括.....	27
(3) 原子力規制委員会による工事計画認可に係る審査.....	27

本書面は、御庁からの平成 27 年 9 月 18 日付「債務者に対する追加質問事項 2」のうち、第 1 の 2 及び 3 に対して回答するものである。

なお、以下では、高浜発電所 3 号機及び 4 号機を「高浜 3, 4 号機」といい、大飯発電所 3 号機及び 4 号機を「大飯 3, 4 号機」といい、高浜 3, 4 号機と大飯 3, 4 号機を総称して「本件各発電所」という。

第 1 耐震安全性評価におけるモデル化について（追加質問事項 2 第 1 の 2）

1 回答

原子炉容器等の重要な機器等の評価値を計算するために、機器等をモデル化するにあたっては、断面係数を小さく見積もることで単位面積あたりに作用する荷重（応力）が大きくなるよう、保守的な考慮を行っている。このような考慮は、応力解析で行っており、その解析結果は、常に安全側の評価になる。

また、モデル化における不確定性については、原子力発電所における設計全体の保守性によって手当てしており、地震応答解析において、床応答スペクトルを全体的に大きくなるように拡張することで不確定性を考慮していること等は、その一例である。

2 詳細説明

（1）断面寸法の設定について

債務者は、本件各発電所の耐震安全性を確保するための基準として基準地震動を策定し、この基準地震動による地震力に対して耐震安全性を備えるようにすることで、本件各発電所の地震に対する安全性を確保している。そして、基準地震動による地震力に対する機器等の耐震安全性を確認する耐震安全性評価の際に、評価値を計算するにあたっては、まず地震応答解析を行い、その上で応力解析を行う。

地震応答解析とは、地震動に対して構造物がどのように揺れるかを評価する

ために、構造物を適切なモデルに置き換え、そのモデルに地震動を入力して、構造物の揺れ方や力の働き方等を求める解析方法をいう。この解析では、各構造物のモデル化と固有周期の算出を行った上で、基準地震動により当該構造物に作用する地震力（荷重）を算出する。次に、応力解析とは、地震応答解析により得られた構造物に作用する地震力（荷重）により、構造物を構成する各部位に力がどのように作用するかを求める解析である。この解析により、各部位に作用する単位面積当たりの力（応力）を算出し、これが評価値として用いられることになる。

地震応答解析及び応力解析のいずれにおいても、機器等をモデル化するにあたって用いる部材の寸法は、通常、公称値¹であり、（２）で述べるとおり、公称値が持つ不確定性（製作誤差）については適切に考慮されている。もっとも、債務者主張書面（７）兼異議審主張書面（２）第２の１（１）イ（ア）d（41～42 頁）で述べたとおり、原子炉容器等の重要な機器等について応力解析を行う際には、当該機器等をモデル化するにあたって公称値を用いず、断面係数を小さく見積もって、応力が大きくなるよう、保守的な考慮を行っている。具体的に述べると、応力解析は、①地震応答解析の結果を用いて建物・構築物や機器・配管系の部材の各部位に生じる力の分布を求める手順、及び②各部位に生じる力の分布から各部位の断面における応力を求める手順に分けられるところ、債務者は、②の手順において、原子炉容器等の重要な機器等をモデル化するにあたり、断面係数を小さく見積もって、応力が大きくなるようにしている。このような保守的な考慮をすることにより、応力解析の結果は、常に安全側の評価になっている²。

¹ 材料の製品としての名目上の値であって、例えば、厚さ 10mm の鋼板の場合、10mm が公称値であり、実際の製品にはその公差の範囲内での誤差が許容される。

² なお、債権者らは、平成 27 年 9 月 11 日付「債務者に対する質問事項（１）」6～8 頁において、断面寸法が同じ 3 つの部材のうち 1 つの部材の断面寸法を小さくした場合に、他の部材の曲げモーメントが大きくなるとか、変位量や曲げ応力が大きくなるなどと述べている。しかし、債務者は、地震応答解析や応答解析の①の手順（各部位に生じる力の分布を求める手順）では断面係数を小さく

(2) モデル化における不確定性について

実際に製作された機器等には、公称値が持つ不確定性（製作誤差）があるため、地震応答解析及び応力解析において機器等をモデル化するにあたって公称値を用いる場合、このことのみに着目すれば、評価値を非安全側に評価する可能性がある（逆に安全側に評価する可能性もある）。しかし、機器等の製造業者における標準的な設計ノウハウでは、このような不確定性は、原子力発電所における設計全体の保守性によって手当てするものとして取り扱われてきたものであり、現に十分な手当てがなされている（乙 145, 「耐震評価において公称値を用いることの妥当性について（御回答）」）。例えば、解析モデルを構築するに際して、タンク等の重量を算出する際に最大重量（満水時重量）を用いたり、地震応答解析において、床応答スペクトルを全体的に大きくなるよう拡張して、地震力を保守的に見積もるようにしたり、応力解析の際に、地震力と組み合わせる地震以外の荷重（内圧荷重等）として、最高使用圧力を用いたりするなど、設計の各段階において様々な保守的な考慮がなされており、製作誤差の影響を手当てするに足る保守性を有している。これらのことから、仮に、地震応答解析及び応力解析において公称値を用いた結果、実際の機器等に誤差があったとしても、耐震安全性に問題はないのである。

第2 非線形応答解析の実施の有無等について（追加質問事項2 第1の3（1））

1 回答

- (1) 本件各発電所の基準地震動による耐震安全性を評価する際、原子炉建屋等の建物・構築物については、塑性変形を始めることを前提とした非線形応答解析を行っており、その内容は、2（2）で述べるとおりである。

見積もることはしておらず、②の手順では部材の各部位に生じる力が変わることはないのであるから、債権者らの指摘は当たらない。

一方、本件各発電所の機器・配管系については、線形応答解析での解析を行っており、塑性変形を始めることを前提とした非線形応答解析は行っていない。その理由としては、基準地震動による地震力を受けても全体としてほぼ弾性挙動を示す範囲内に収まるような設計を行っているため、線形応答解析を行えば足りること、また、機器・配管系が塑性変形する場合にも、線形応答解析は、非線形応答解析に比べて保守的な地震力を算出できることが挙げられる。

- (2) また、本件各発電所においては、以前に実施したストレステストにおいて、基準地震動を超える地震動による耐震評価を行ったが、その際にも、原子炉建屋等の建物・構築物では、上記と同様に、塑性変形を始めることを前提とした非線形応答解析を行った一方、機器・配管系では、上記と同様の理由から、塑性変形を始めることを前提とした非線形応答解析は行っていない。

2 詳細説明

(1) 地震応答解析について

基準地震動による地震力に対して耐震安全性を有するか否かを確認する耐震安全性評価においては、各設備の評価値を計算するにあたって地震応答解析を行っている³。また、本件各発電所において基準地震動を超える地震動に対する耐震性を確認したのは、以前に実施したストレステストであるところ、同テストにおいても、評価値を計算するにあたって地震応答解析を行っている（高浜3，4号機につき甲118，添付5-(1)-3(1/49)，5-(1)-3(32/49)，甲119，添付5-(1)-3(1/50)，5-(1)-3(32/50)，大飯3，4号機につき甲16の5，添付5-(1)-3(1/48)，5-(1)-3(31/48)，甲123，添付5-(1)-3(1/48)，5-(1)-3(31/48)）。

地震応答解析には、線形応答解析と非線形応答解析の2種類がある。線形応答解析とは、設備にかかる力と変形が比例する条件で行う解析をいい、非線形応答解析とは、設備にかかる力と変形が比例関係にない条件で行う解析をいう。

³ 債務者主張書面（1）第5章第3及び第4（143～154頁）を参照。

一般に、物体は、外部から力を加えると、その力の大きさに比例して変形し、力を取り除くと元の形に戻る（弾性変形）。ばねがおもりの重さに比例して伸び、おもりを外すと元の長さに戻るのは、この例である。しかし、外部から加える力が一定の値を超えると、それ以降の変形は力の大きさに比例しなくなり、力を取り除いても元の形には戻らなくなる（塑性変形）。ばねもおもりの重さが一定量を超えると、おもりの重さと伸びる長さが比例しなくなり、おもりを外してもばねは元の形に戻らなくなる。このような物理現象を踏まえて、上記の線形応答解析は、設備の変形が全体として弾性変形の範囲内⁴に収まる場合に用いられ、また、非線形応答解析は、設備の変形が弾性変形の範囲を超えて塑性変形する場合に用いられる。非線形応答解析を実施すると、構造物が弾性変形の範囲を超えた場合においても、構造物にかかる力及び変形をより現実に近い値として算出することができる。

以下では、本件各発電所において、塑性変形を始めることを前提とした非線形応答解析の実施の有無等について、建物・構築物と機器・配管系とに分けて述べる。

（２）建物・構築物における実施の有無等

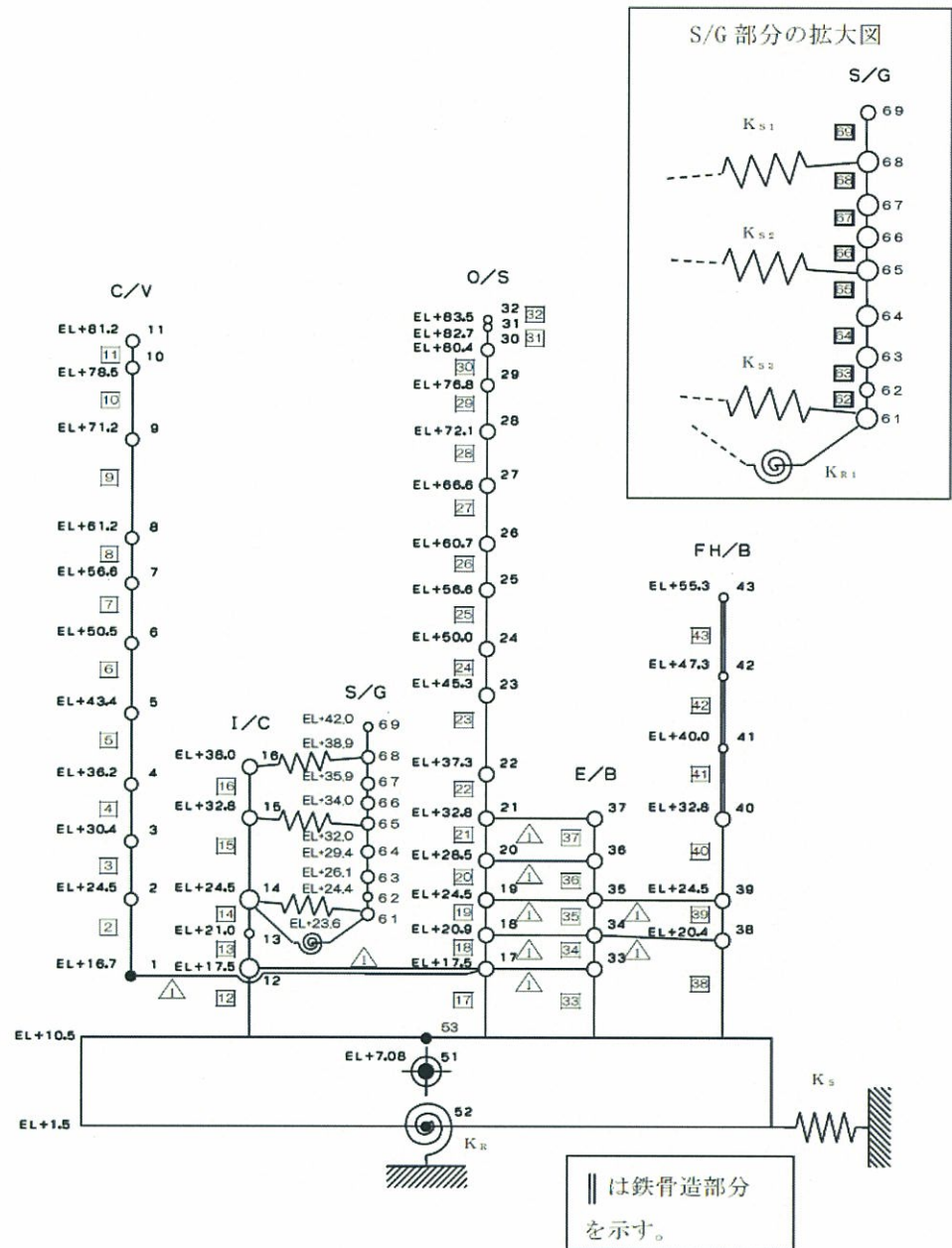
本件各発電所の基準地震動に対する原子炉建屋等の建物・構築物の耐震安全性評価においては、塑性変形を始めることを前提とした非線形応答解析を行っている。

この非線形応答解析では、まず、債務者主張書面（１）144～145 頁、151 頁で述べたように、地震応答解析モデルとして、建物・構築物の構成部位ごとに、質量・剛性・減衰を考慮して適切な 1 次元の質点系モデルを構築する（図表 1）

⁴ 物体に加わっている外力が取り除かれると元に戻る変形のことを弾性変形という。これに対し、塑性変形とは、物体に加わって変形を生じさせる外力が取り除かれた後も、元に戻らずに残る変形のことを塑性変形という。外力により物体に発生する応力が降伏点（物体に加える力を増していき、塑性変形するときの発生応力値）を超えると、物体の変形は、弾性変形から塑性変形に変わる。

⁵。このモデルの地盤の部分を基準地震動の波形どおりに揺らし、これによりモデルの各層に生じる時々刻々の揺れを解析することになる。そして、建物の耐震壁は、ある程度の変形（ひずみ）までは弾性変形するが、一定の変形（ひずみ）を越えると塑性変形して剛性（固さ）が変化し、建物の固有周期が変化するところ、非線形応答解析では、こうした変化を考慮した解析がなされて、建物に作用する地震力（荷重）が示されることになる。

⁵ 第3の2（1）イ（イ）bで後述するとおり、3次元の応答解析モデルでは、非線形応答解析を行っておらず、評価の段階で塑性変形領域での挙動の効果を考慮している。



【図表 1 原子炉建屋の地震応答解析モデル (質点系モデル)】

なお、債務者は、建物・構築物の 1 次元質点系モデルを作成するにあたり、社団法人日本電気協会が制定した民間規格である「原子力発電所耐震設計技術

規程「JEAC4601-2008」(乙146。以下、「JEAC4601-2008」という)⁶に定める手法を用いている(90～94頁)。

また、本件各発電所で以前に実施したストレステストにおいては、基準地震動 S_s を超える地震動(基準地震動 S_s の2倍の地震動)に対する原子炉建屋等の建物・構築物の耐震評価を行ったが、その際にも、同様に、塑性変形を始めることを前提とした非線形応答解析を行っている(高浜3, 4号機につき乙79, 32～35頁, 大飯3, 4号機につき乙71, 30～33頁)。

(3) 機器・配管系における実施の有無等

本件各発電所において機器・配管系の基準地震動に対する耐震安全性評価を行う際に、線形応答解析を実施しているが、塑性変形を始めることを前提とした非線形応答解析は実施していない。その理由は、次のとおりである。

そもそも、機器・配管系については、基準地震動による地震力を受けても、全体としてほぼ弾性挙動を示す範囲内に収まる(塑性変形が生じても小さなレベルにとどめる)ような設計を行っている。このような設計の考え方は、原子力規制委員会が制定した「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の解釈」(乙90。以下、「設置許可基準規則解釈」という)にも示されており⁷、機器・配管系の評価基準値は、ほぼ弾性挙動を示す範囲内に収まるように設定している。そして、このような設計を前提とすれば、地震応答解析については、線形応答解析で行えば足りることになる。このことは、JEAC4601-2008において、機器・配管系の地震応答解析が弾性解析(線形応答解析)で評価する体系となっていることにも合致する(乙146, 263～267

⁶ なお、JEAC4601-2008の制定にあたっては、専門家による審議がなされ、その審議過程を記録した議事録は公開され、パブリックコメントを経ている(乙146, 「はじめに」と題する頁)。

⁷ 設置許可基準規則解釈別記2第4条6項1号は、規則4条3項が基準地震動による地震力に対して耐震重要施設の安全機能が損なわれるおそれがないことを求めているのを受けて、機器・配管系の設計に当たっては、地震等の「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」を求めている(乙90, 129～130頁)。

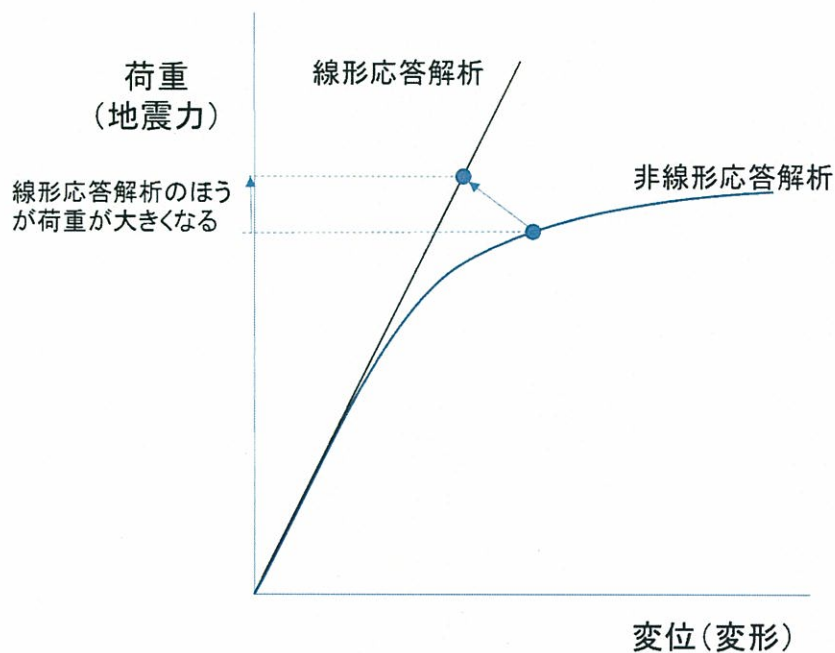
頁)。なお、この線形応答解析を基本とする耐震設計の考え方は、I A E A（国際原子力機関）の安全指針にも記載されている（乙 147 の 1 及び 2、「IAEA SAFETY STANDARDS SERIES Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants（I A E A 安全基準シリーズ 原子力発電所の耐震設計と認証）」）。

もっとも、基準地震動による地震力に見舞われた場合に、一部の機器・配管系が（小さなレベルではあるが）塑性変形することも想定しており、その場合に、非線形応答解析を用いることも不可能ではない。しかし、前述のように全体としてほぼ弾性挙動を示す範囲内での設計であることが前提であり、また、線形応答解析を用いることで、局所的に材料が塑性変形することによるエネルギー吸収効果⁸を考慮しないこととなるから、線形応答解析は、非線形応答解析に比べて保守的な地震力（荷重）を算出することができる（図表 2）⁹。

このような理由から、機器・配管系については、非線形応答解析を実施していないのである。

⁸ 設備を構成する材料が塑性変形するとより大きなエネルギー吸収が期待できる。債務者主張書面（1）第 5 章第 5 の 1（4）（156～157 頁）を参照。

⁹ 線形応答解析では、非線形応答解析に比べて、荷重は大きく算定されるが、変位は小さく算定される。そこで、変位を考慮した評価である疲労評価を行う必要がある場合には、社団法人日本機械学会「発電用原子炉設備規格 設計・建設規格」に定めるところにより、その変位を適切に評価し、非安全側にならないよう配慮している。



【図表 2 荷重と変位の関係図】

また、以前に実施したストレステストにおいて、基準地震動を超える地震動による耐震評価を行ったが、機器・配管系については、塑性変形を始めることを前提とした非線形応答解析は実施していない。これは、ストレステストの評価にあたっては、耐震安全性評価で用いる評価基準値¹⁰を超えた時点で各設備が機能喪失すると仮定しており、同テストは、基準地震動 S_s に対する耐震安全性評価と同様、評価基準値を満足するか否かを評価するものであることから、結局のところ、基準地震動に対する耐震安全性評価に関して上で述べた理由と同様の理由があてはまるためである。

なお、機器・配管系における地震応答解析では、建物・構築物の地震応答解析及び応力解析の結果を入力として用いているため、地震動の大きさによっては、建物・構築物の非線形挙動（塑性変形の挙動）の影響を相当程度受ける。

¹⁰ 債務者主張書面（11）兼異議審主張書面（6）第2（12～13頁）で述べたとおり、ストレステストにおいては、一部の機器で許容値を超える値を適用しているが、これは例外的取扱いであり、塑性変形は小さなレベルにとどまる程度のものであるから、全体としてはほぼ弾性挙動を示す範囲内での評価であることに変わりはない。

ストレステストでは、上記（２）で述べたように建物・構築物については非線形応答解析を行っており、この解析は基準地震動 S_s を超えるレベルの地震動（基準地震動 S_s の２倍の地震動）で行っているところ、建物・構築物の非線形挙動の影響は、基準地震動 S_s とその２倍の地震動によるものとは異なることになる。そこで、この影響については、ストレステストの検討の中で評価を行い、クリフエッジが変わらないことを確認している（高浜３，４号機につき乙 148、「建屋応答の非線形性が機器評価に及ぼす影響」、大飯３，４号機につき乙 149、「大飯３，４号機 原子炉建屋および原子炉補助建屋の地震応答解析について」 87～90 頁）。

第３ ３次元の動的応答解析の実施の有無等について（追加質問事項２ 第１の３（２））

１ 回答

建物・構築物については、１次元質点系モデルによる地震応答解析に加えて、３次元的な挙動が想定されるものについて、３次元の解析モデルを用いた３次元の各方向からの地震動の同時入力等による動的応答解析を行っている。この解析では、非線形応答解析は行っていないが、評価の段階で塑性変形領域での挙動の効果を考慮している。解析の内容は、２（１）で述べるとおりである。

機器・配管系については、３次元の解析モデルを用いることはあるが、３次元の各方向からの地震動の同時入力による動的応答解析は行っておらず、水平２方向（ X 軸方向及び Y 軸方向の双方）の地震動による地震力と鉛直方向（ Z 軸方向）の地震動による地震力（以下、単に「鉛直方向の地震力」又は「鉛直地震力」という）を組み合わせた地震力による耐震評価を行っている。この評価は、３次元の各方向からの地震動の同時入力による動的応答解析を行う方法と比べて、十分な保守性を有する妥当なものである。

なお、上記の解析等にあたっては、JEAC4601-2008 等の民間規格を活用してお

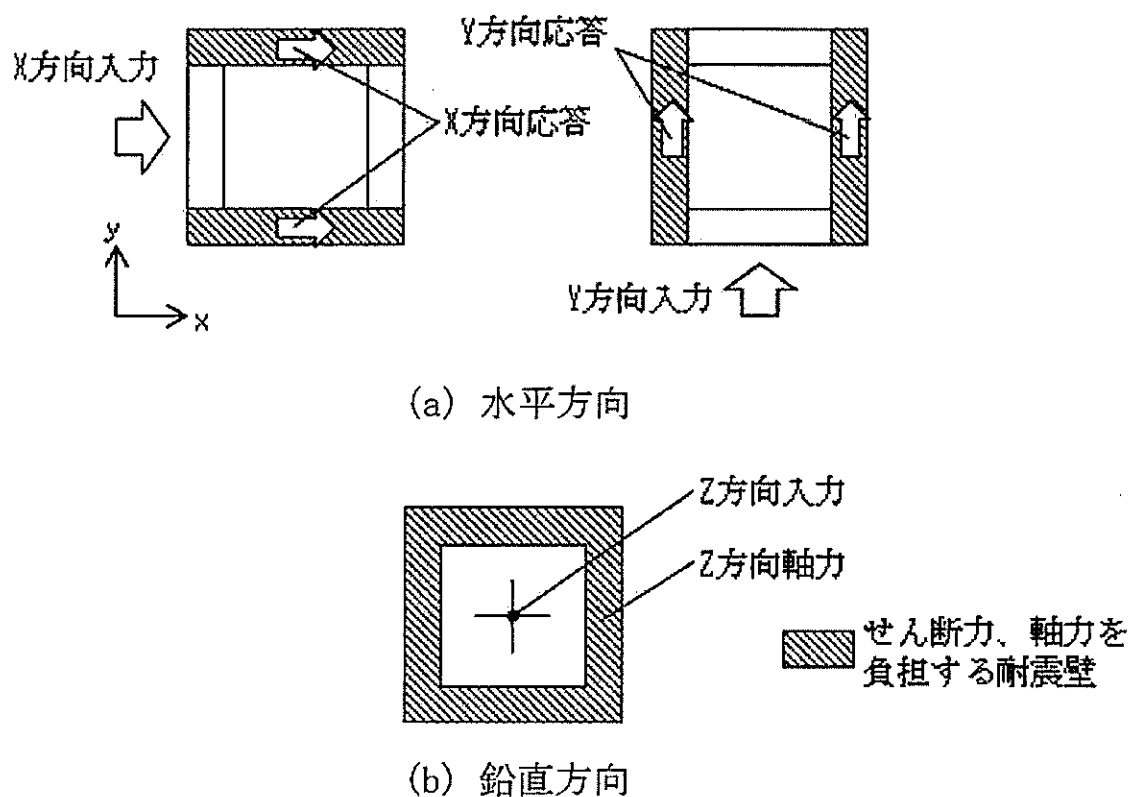
り、原子力規制委員会における新規制基準適合性審査において、その妥当性が確認されている。

2 詳細説明

(1) 建物・構築物について

ア 解析モデルについて

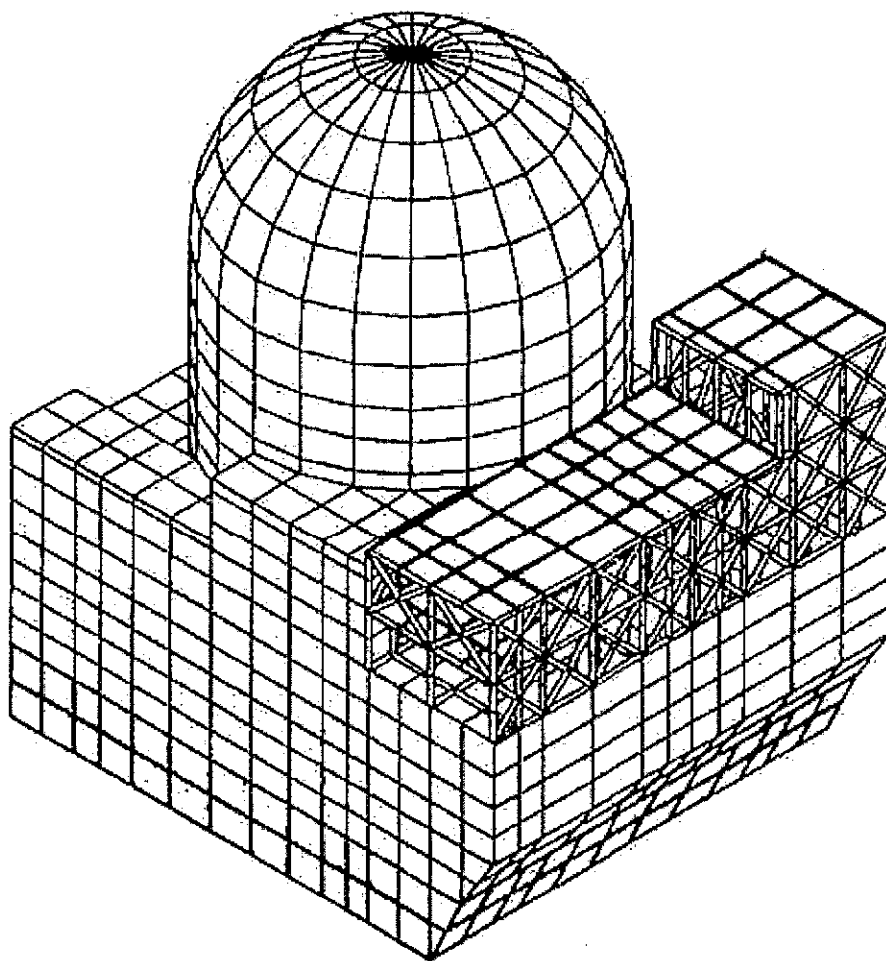
債務者は、建物・構築物の地震応答解析を行うに際し、第2の2(2)で述べたような1次元質点系モデルを構築している。この1次元質点系モデルは、1棟の建物・構築物につき、東西方向、南北方向及び鉛直方向の各方向ごとに構築しているが、東西方向のモデルを構築する際には東西方向の耐震壁のみを考慮し、南北方向のモデルを構築する際には南北方向の耐震壁のみを考慮している。これは、一般に、建物・構築物が地震によって揺れた場合、その揺れと同じ方向に配置された耐震壁が主に抵抗するからである（図表3）。



【図表 3 入力方向ごとの耐震壁の考慮】

なお、1次元質点系モデルについては、後述のように3次元の応答解析モデルとの間で線形応答解析結果の比較がなされ、その妥当性が確認されている。加えて、1次元質点系モデルには非線形挙動の特性も加味できるため、建物・構築物の挙動をよく模擬できるモデルであると言える。

また、債務者は、建物・構築物の構造上、地震によって建物がねじれるように揺れるなどの3次元的な挙動が想定される建物・構築物（高浜発電所3号機の例では、原子炉格納施設と緊急時対策所施設）については、上記の1次元質点系モデルに加えて、3次元の応答解析モデルを構築している（図表4）。



【図表4 3次元の応答解析モデルの例】

イ 地震動の入力及び解析結果について

債務者は、上記アで構築した解析モデルに地震動を入力して、地震応答解析を行っている。

(ア) 従来の1次元質点系モデルによる地震応答解析

従来から、債務者は、上記アで構築した1次元質点系モデルによる解析を行っている。すなわち、東西方向、南北方向及び鉛直方向の各方向のモデルに、それぞれの方向に対応する地震動を入力して非線形応答解析を行い、当該建物・構築物に作用する地震力（荷重）を算出している。

そして、前述のとおり、建物・構築物が揺れた場合、その揺れと同じ方向に配置された耐震壁が主に抵抗するため、東西方向の地震動による地震力（以下、単に「東西方向の地震力」という）は東西方向の耐震壁で、南北方向の地震動による地震力（以下、単に「南北方向の地震力」という）は南北方向の耐震壁でそれぞれ負担すること、鉛直方向の地震動による地震力は、全ての耐震壁で負担することを踏まえ、応力解析を行う際の地震力として、東西方向の地震力と鉛直方向の地震力を同時に作用させる組合せと、南北方向の地震力と鉛直方向の地震力を同時に作用させる組合せを算出している。このような評価手法は、JEAC4601-2008 に沿うものである（乙 146, 73～74 頁）。

（イ）新規制基準施行後に実施している解析と解析結果の比較

債務者は、新規制基準の施行を機に、水平 2 方向（東西方向及び南北方向の双方）の地震動による地震力（（イ）において、以下、単に「水平 2 方向の地震力」という）及び鉛直方向の地震力の組合せに関する検討を行った。これについて、以下で述べる。

a 1 次元質点系モデルによる水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の組合せ検討

直交する水平 2 方向の地震力（荷重）により応力の集中する部位を有するなど、水平 2 方向の地震力による影響を受ける可能性がある部位を有する建物・構築物（高浜発電所 3 号機では、外部しゃへい建屋、使用済燃料ピット等）については、上記（ア）の解析に加えて、水平 2 方向の地震力と鉛直方向の地震力を同時に作用させる組合せについても検討、評価した。

これらの建物・構築物について評価を行った結果、水平 2 方向の地

震力及び鉛直方向の地震力の組合せから計算した評価値が評価基準値を超えることはなく、建物・構築物の耐震安全性への影響がないことを確認した。

b 3次元の応答解析モデルによる検討

前述した3次元の応答解析モデルを構築した建物・構築物については、地震応答解析として、(i) 水平方向のうち1方向（東西方向又は南北方向。以下、「水平1方向」という）の地震動を入力する解析、及び(ii) 水平2方向及び鉛直方向の地震動を同時に入力する解析を実施した。また、比較対象とするべく、(iii) 当該建築物に係る1次元質点系モデルに水平1方向の地震動を入力する地震応答解析を実施した¹¹。さらに、(iv) 水平2方向及び鉛直方向の地震動の同時入力の効果と、塑性変形領域での挙動の効果を共に考慮した耐震安全性評価¹²を実施した。

これらの解析及び評価の結果、①上記(i)と(iii)（両者とも水平1方向入力の解析）から、3次元の応答解析モデルと1次元質点系モデルで算出される地震力が同等であること、②上記(i)と(ii)から、3次元の応答解析モデルにおける水平1方向の地震動入力による解析結果と水平2方向及び鉛直方向の入力による解析結果の差は小さいこと、③上記(iv)から、上記(i)よりも(ii)のほうが地震力が大きい場合であっても、評価値は評価基準値を満足し、建物・構築物の耐震安全性への影響がないこと、を確認した。

¹¹ 3次元の地震応答解析の制約を踏まえ、上記(i)から(iii)までにおける入力地震動は、当該建物・構築物が弾性挙動の範囲内にとどまる程度の大きさ（基準地震動の0.5倍）とし、いずれも線形応答解析を行った。

¹² 上記(i)（水平1方向）の解析結果の地震力に対する上記(ii)（水平2方向及び鉛直方向）の解析結果の地震力の比率（応答補正比率）を、1次元質点系モデルに水平1方向の基準地震動を入力した非線形応答解析の結果の地震力に乗じて、水平2方向及び鉛直方向の地震力の影響と塑性変形領域での挙動の影響を共に考慮した値を算出した。

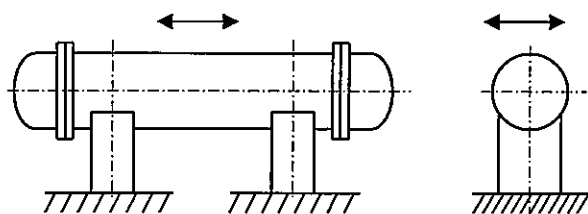
c 小括

以上の検討より，1次元質点系モデルと3次元の応答解析モデルの解析結果の地震力が概ね同等であること，また水平2方向及び鉛直方向の地震動入力の応答への影響は小さいことから，上記（ア）のように1次元質点系モデルによる地震応答解析を行い，水平1方向（東西方向又は南北方向）の地震力と鉛直方向の地震力を組み合わせて耐震安全性評価を行うことに問題がないことを確認した。また，水平2方向及び鉛直方向の入力の効果と塑性変形領域での挙動の効果をともに考慮した場合でも，耐震安全性への影響がないことを確認した。

（2）機器・配管系について

ア 解析モデルについて

機器・配管系の地震応答解析では，解析対象である機器・配管系の振動性状に応じて，1次元又は3次元の解析モデルを用いている。例えば，図表5のタンクのように，その形状が左右対称の構造である機器については，揺れやすい方向が前後方向及び左右方向であることが明らかであり，地震動による前後方向・左右方向のそれぞれの方向の振動を表現できればよいことから，それぞれの方向ごとに構築した1次元の解析モデルを用いて地震応答解析を行えばよいことになる。他方，配管のように，建屋内に3次元的に敷設され，その形状が対称ではない設備については，揺れやすい方向が必ずしも明らかではないから，これを適切に模擬するために3次元の解析モデルを用いた地震応答解析を行うことになる。



【図表 5 タンクの振動性状】

このように、機器・配管系の解析モデルを、解析対象設備の振動性状に応じて使い分けるのは、JEAC4601-2008 が定める、原子力発電所における機器・配管系の解析モデルの作成方針に沿うものである。同規格には、機器・配管系の「地震応答解析モデルは、解析する機器・配管系の振動特性に応じ、地震により発生する代表的な振動モードが表現でき、かつ強度評価および機能維持評価に用いる地震力を算定できるように作成する」と記載されており（乙 146, 363 頁）、1次元の解析モデルの例も示されている（同 445 頁）。

イ 地震動の入力及び解析結果について

上で述べた解析モデルに地震動を入力して、地震応答解析の結果を得ることになるところ、債務者は、3次元の各方向（X軸方向、Y軸方向及び鉛直方向）の地震動を同時に入力する解析は行っていないが、水平2方向（X軸方向及びY軸方向の双方）の地震動による地震力（イにおいて、以下、単に「水平2方向の地震力」という）と鉛直方向の地震動による地震力を組み合わせた地震力による耐震評価を行っている。

以下では、まず、本件各発電所の機器・配管系について、従来実施している地震応答解析の手法及び新規制基準の施行を契機に新たに実施している耐震評価について述べた上で、本件各発電所の機器・配管系に係る耐震評価が、3次元の各方向の地震動を同時に入力する解析を用いた場合に比べても

十分な保守性を有するものであることを述べる。なお、上記第2の2（3）で述べたとおり、機器・配管系については塑性変形に伴う挙動については評価していない。

（ア）従来の地震応答解析

本件各発電所における従来の地震応答解析では、まず、水平2方向（X軸方向、Y軸方向）及び鉛直方向のそれぞれの方向ごとに地震動を入力して応答解析を行い、当該機器・配管系に作用する地震力（荷重）を算出している。そして、水平2方向の地震力のうち大きいほうの地震力（水平地震力）と鉛直方向の地震力（鉛直地震力）を同時に作用させて評価値を計算している。

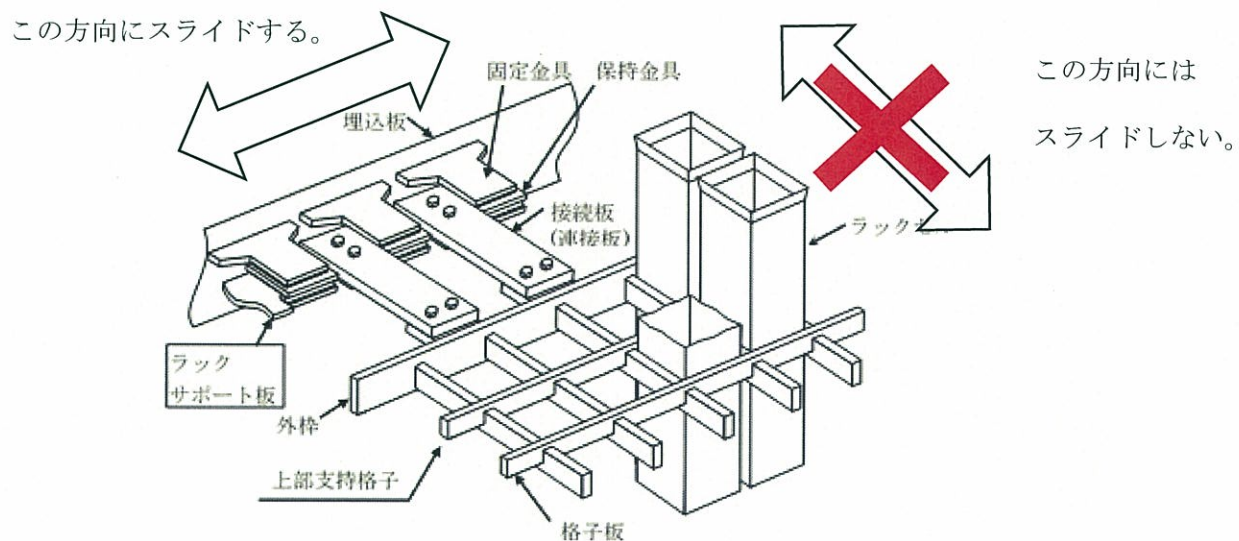
このように、機器・配管系の地震応答解析においては、水平2方向及び鉛直方向のそれぞれの方向ごとに地震動を入力して地震力を算出し、水平地震力と鉛直地震力を組み合わせる評価手法を採用しており、この評価手法は、JEAC4601-2008に沿うものである（乙150、「水平地震力と鉛直地震力の組み合わせ方法について」）。

（イ）新規制基準施行後に実施している耐震評価

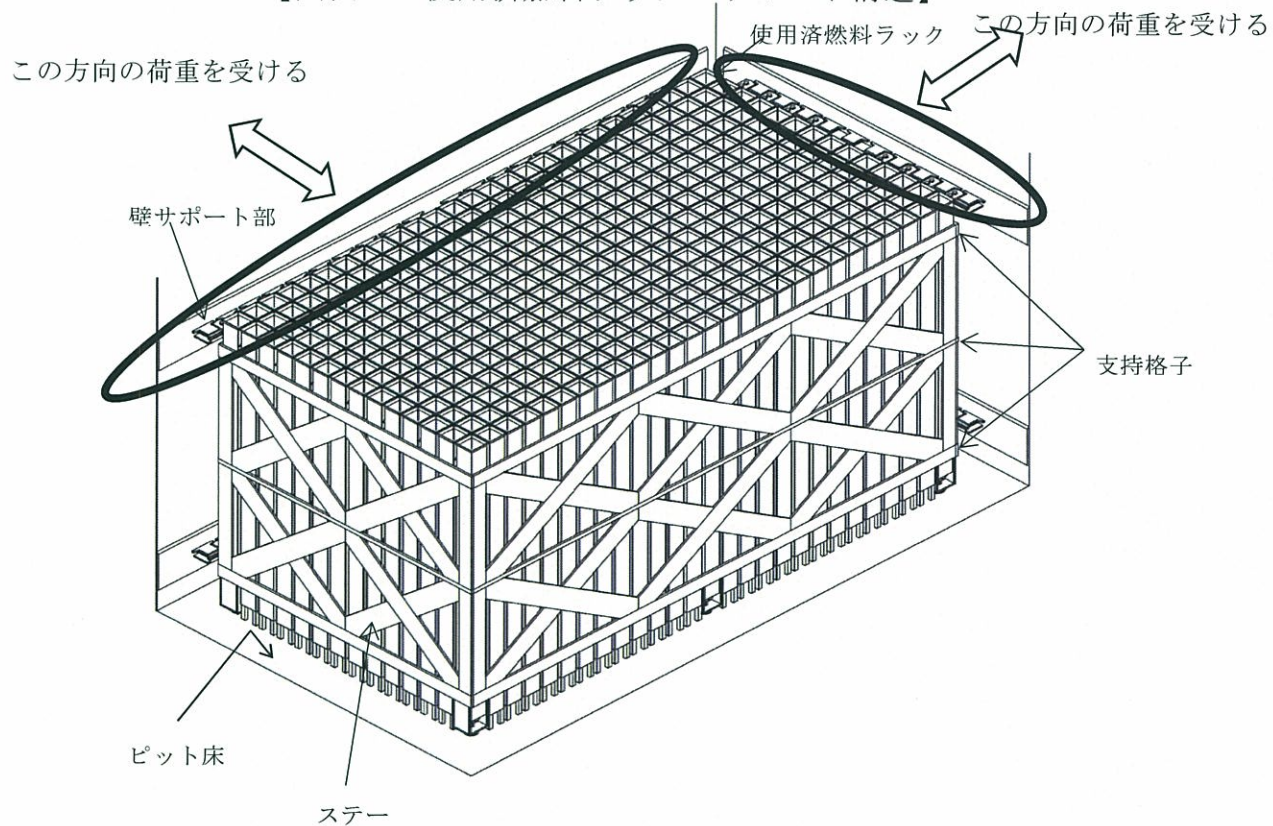
債務者は、新規制基準の施行を機に、従来の水平地震力と鉛直地震力を組み合わせた地震力による耐震評価に加えて、水平2方向の地震力と鉛直地震力を組み合わせた地震力による耐震評価を行っている。以下、この新たに実施している耐震評価について述べる。

まず、基準地震動による評価が必要な機器・配管系から、その構造上、上記（ア）で述べたような従来の水平地震力と鉛直地震力を組み合わせた地震力による評価に加えて、水平2方向の地震力と鉛直地震力を組み合わせた地震力による評価をする必要がないと考えられる設備を除外した。例えば、設備の構造上、水平方向で1方向の地震動による地震力しか影響を受けないも

のについては、そもそも水平2方向の地震力の影響を考慮する必要がないため、対象から除外している。この例としては、使用済燃料ピット内にある燃料を貯蔵するラックのサポートがある。同設備は、図表6及び7に示すとおり、ラックサポート板が左右方向にスライドするため、前後方向の地震動による地震力の影響は受けるが、左右方向の地震動による地震力の影響をサポート自体が受けることはない。



【図表6 使用済燃料ラックのサポート構造】



【図表7 使用済燃料ラックが受ける地震荷重の方向】

このような考えの下に除外した設備以外の設備について、水平2方向の地震力及び鉛直地震力を組み合わせた地震力による評価値を算定した。この算定にあたっては、従来の地震応答解析における算定結果を用いつつ、保守的な手法を採用している。例えば、従来の地震応答解析においては、前述のとおり、水平2方向の地震力のうち大きい地震力と鉛直地震力を組み合わせた地震力を算出していることを踏まえ、水平2方向のそれぞれの地震力と鉛直地震力を組み合わせた地震力から、(X軸方向及びY軸方向の)それぞれの評価値を算出し、この評価値を組み合わせたものを、水平2方向の地震力と鉛直地震力を組み合わせた地震力による評価値(水平2方向評価値)とした。これを式で示すと次のとおりとなる¹³。

水平2方向評価値

$$=\sqrt{\{(X+Z \text{ 方向地震力による評価値})^2+(Y+Z \text{ 方向地震力による評価値})^2\}}$$

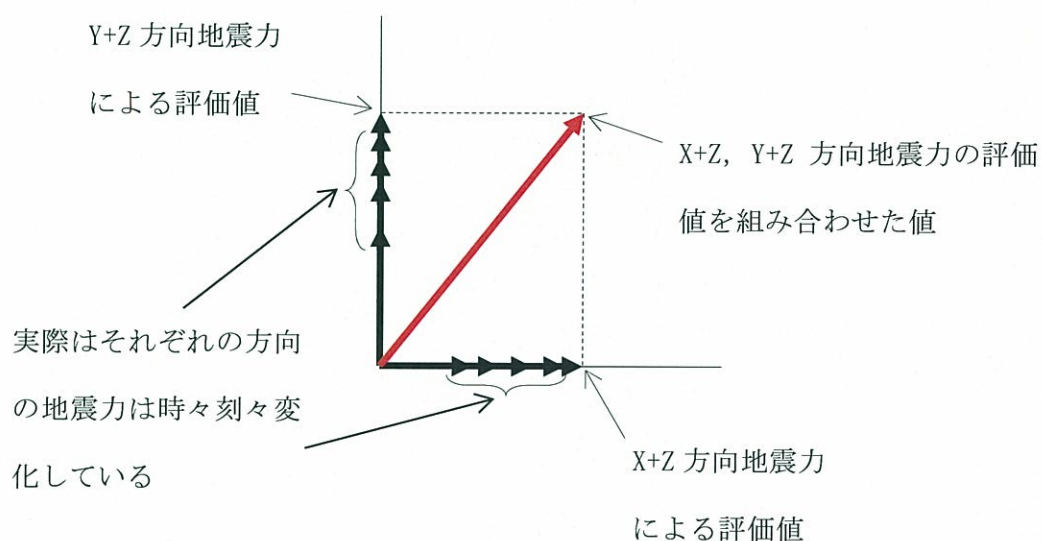
このように、鉛直(Z軸)方向の地震力が両方の項に付加されており、鉛直方向の地震力がもたらす影響が二重に考慮されているから、この式により算定される評価値は、保守的であることが分かる。

また、この計算方法は、X軸方向の地震力と鉛直方向の地震力を組み合わせた地震力による評価値と、Y軸方向の地震力と鉛直方向の地震力を組み合わせた地震力による評価値を組み合わせたものであるが、これは、図表8のとおり、方向性の違うそれぞれの評価値の最大値が同時に発生することを前提としている。しかし、実際の地震動及びこれに対する応力は、時々刻々と変化することから、方向性の違う評価値の最大値が同時に発生することはま

¹³ X+Z 方向地震力とは、X軸方向の地震力と鉛直(Z軸)方向の地震力を組み合わせた地震力をい
い、Y+Z 方向地震力とは、Y軸方向の地震力と鉛直(Z軸)方向の地震力を組み合わせた地震力を
いう。

ず考えられない。

したがって、この計算方法は、3次元の各方向の地震動を同時に入力する方法と比べても十分保守的なものといえるのである。



【図表 8 実際の地震力と X+Z, Y+Z 方向地震力の組合せの関係】

債務者は、以上によって得られた保守的な評価値と評価基準値を比較したところ、評価値が評価基準値を上回らないことを確認した。

(ウ) 小括

このように、債務者の実施している耐震評価は、3次元の動的応答解析（3次元の各方向の地震動を同時に入力した地震応答解析）を行う方法と比べても、十分な保守性を有するものであり、妥当なものである。

(3) 原子力規制委員会による工事計画認可に係る審査

なお、上記（1）及び（2）に関して、原子力規制委員会による高浜発電所3号機の工事計画認可に係る審査においては、「水平2方向及び鉛直方向の地

震力の組合せによる応力等は、水平 1 方向及び鉛直方向の地震力の組合せに対し、同等又は増加する傾向であったが、応力等が増加する場合でも、水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の組合せによる応力等が許容値を満足することを確認した」とされている（乙 120, 16 頁）。

また、高浜発電所 4 号機及び大飯 3, 4 号機についても、原子力規制委員会による工事計画認可に係る審査を経ることになる。

以 上