

女川原子力発電所 2号炉

設計基準対象施設について

(4条 地震による損傷の防止)

令和元年5月

東北電力株式会社

目次

- 4 条 地震による損傷の防止
- 5 条 津波による損傷の防止
- 6 条 外部からの衝撃による損傷の防止（その他外部事象）
- 6 条 外部からの衝撃による損傷の防止（竜巻）
- 6 条 外部からの衝撃による損傷の防止（火山）
- 6 条 外部からの衝撃による損傷の防止（外部火災）
- 7 条 発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止
- 8 条 火災による損傷の防止
- 9 条 溢水による損傷の防止等
- 10 条 誤操作の防止
- 11 条 安全避難通路等
- 12 条 安全施設
- 14 条 全交流動力電源喪失対策設備
- 16 条 燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設
- 17 条 原子炉冷却材圧力バウンダリ
- 23 条 計測制御系統施設（第 16 条に含む）
- 24 条 安全保護回路
- 26 条 原子炉制御室等
- 31 条 監視設備
- 33 条 保安電源設備
- 34 条 緊急時対策所
- 35 条 通信連絡設備

下線は、今回の提出資料を示す。

第4条：地震による損傷の防止

<目次>

第1部

1. 基本方針

1.1 要求事項の整理

1.2 追加要求事項に対する適合性

(1) 位置、構造及び設備

(2) 安全設計方針

(3) 適合性説明

1.3 気象等

1.4 設備等

1.5 手順等

第2部

1. 耐震設計の基本方針

1.1 基本方針

1.2 適用規格

2. 耐震設計上の重要度分類

2.1 重要度分類の基本方針

2.2 耐震重要度分類

3. 設計用地震力

3.1 地震力の算定法

3.2 設計用地震力

4. 荷重の組合せと許容限界

4.1 基本方針

5. 地震応答解析の方針

5.1 建物・構築物

5.2 機器・配管系

5.3 屋外重要土木構造物

5.4 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又は津波監視設備が設置された建物・構築物

6. 設計用減衰定数

7. 耐震重要施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響

8. 水平2方向及び鉛直方向の地震力の組合せに関する影響評価方針

9. 構造計画と配置計画

(別 添)

- 別添－1 設計用地震力
- 別添－2 動的機能維持の評価
- 別添－3 弾性設計用地震力 S_d ・静的地震力による評価
- 別添－4 上位クラス施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響の検討について
- 別添－5 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価方針
- 別添－6 屋外重要土木構造物等及び津波防護施設の耐震評価における断面選定の考え方
- 別添－7 主要建屋の構造概要及び解析モデルについて
- 別添－8 入力地震動について

(別 紙)

- 別紙－1 既工認との手法の相違点の整理（設置変更許可申請段階での整理）
- 別紙－2 上位クラス施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響の検討
- 別紙－3 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
- 別紙－4 サプレッションチェンバ内部水質量の考え方の変更について
- 別紙－5 竜巻防護ネットの耐震構造設計について
- 別紙－6 原子炉本体の基礎の復元力特性について
- 別紙－7 使用済燃料貯蔵ラックの減衰定数について
- 別紙－8 規格適用範囲外の動的機能維持の評価
- 別紙－9 海水ポンプ室門型クレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用
- 別紙－10 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
- 別紙－11 東北地方太平洋沖地震等による影響を踏まえた建屋耐震設計方法への反映について
- 別紙－12 埋め込まれた建屋の周辺地盤による影響について
- 別紙－13 原子炉建屋屋根トラスの解析モデルへの弾塑性解析の適用
- 別紙－14 原子炉建屋基礎版の応力解析モデルへの弾塑性解析の適用
- 別紙－15 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化について
- 別紙－16 後施工せん断補強筋による耐震補強について
- 別紙－17 液状化影響の検討方針について
- 別紙－18 地下水位低下設備について

< 概 要 >

第1部において、設計基準対象施設の設置許可基準規則、技術基準規則の追加要求事項を明確化するとともに、それら要求に対する女川原子力発電所2号炉における適合性を示す。

第2部において、設計基準対象施設について、追加要求事項に適合するために必要となる機能を達成するための設備又は運用等について説明する。

第1部

1. 基本方針

1.1 要求事項の整理

地震による損傷の防止について、設置許可基準規則第4条並びに技術基準規則第5条において、追加要求事項を明確化する（表1）。

表1 設置許可基準規則第四条並びに技術基準規則第五条 要求事項

設置許可基準規則 第四条（地震による損傷の防止）	技術基準規則 第五 条（地震による損傷の防止）	備考
<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ない。</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>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>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>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>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>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>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>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>追加要求事項</p>

1.2 追加要求事項に対する適合性

(1) 位置、構造及び設備

ロ 発電用原子炉施設の一般構造

(1) 耐震構造

本発電用原子炉施設は、次の方針に基づき耐震設計を行い、設置許可基準規則に適合するように設計する。

(i) 設計基準対象施設の耐震設計

設計基準対象施設については、耐震重要度分類に応じて、適用する地震力に対して、以下の項目に従って耐震設計を行う。

- a. 耐震重要施設は、基準地震動による地震力に対して、安全機能が損なわれるおそれがないように設計する。

- b. 設計基準対象施設は、地震により発生するおそれがある安全機能の喪失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に応じて、耐震重要度分類を以下のとおり、Sクラス、Bクラス又はCクラスに分類し、それぞれに応じた地震力に十分耐えられるように設計する。

Sクラス 地震により発生するおそれのある事象に対して、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

Bクラス 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

Cクラス Sクラスに属する施設及びBクラスに属する施設以外の一般産業施設又は公共施設と同等の安全性が要求される施設

【説明資料 (1.1(2) : P4 条-53) (2.1 : P4 条-56)】

- c. Sクラスの施設 (e.に記載のもののうち、津波防護機能を有する設備 (以下「津波防護施設」という。)、浸水防止機能を有する設備 (以下「浸水防止設備」という。)) 及び敷地における津波監視機能を有する施設 (以下「津波監視設備」という。)) を除く。)、Bクラス及びCクラスの施設は、建物・構築物については、地震層せん断力係数 C_1 に、それぞれ 3.0、1.5 及び 1.0 を乗じて求められる水平地震力、機器・配管系については、それぞれ 3.6、1.8 及び 1.2 を乗じた水平

震度から求められる水平地震力に十分に耐えられるように設計する。建物・構築物及び機器・配管系ともに、おおむね弾性状態に留まる範囲で耐えられるように設計する。

ここで、地震層せん断力係数 C_i は、標準せん断力係数 C_0 を0.2以上とし、建物・構築物の振動特性及び地盤の種類等を考慮して求められる値とする。

ただし、土木構造物の静的地震力は、Cクラスに適用される静的地震力を適用する。

Sクラスの施設（e.に記載のもののうち、津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備を除く。）については、水平地震力と鉛直地震力が同時に不利な方向の組合せで作用するものとする。鉛直地震力は、建物・構築物については、震度0.3以上を基準とし、建物・構築物の振動特性及び地盤の種類等を考慮して求められる鉛直震度、機器・配管系については、これを1.2倍した鉛直震度より算定する。ただし、鉛直震度は高さ方向に一定とする。

- d. Sクラスの施設（e.に記載のもののうち、津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備を除く。）は、基準地震動による地震力に対して安全機能が保持できるように設計する。建物・構築物については、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するように設計する。機器・配管系については、その施設に要求される機能を保持できるように設計し、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ように、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ように設計する。

また、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に対しておおむね弾性状態に留まる範囲で耐えられるように設計する。建物・構築物については、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。機器・配管系については、応答が全体的におおむね弾性状態に留まるように設計する。

なお、基準地震動及び弾性設計用地震動による地震力は、水平2方向及び鉛直方向について適切に組み合わせて算定するものとする。

基準地震動は、敷地ごとに震源を特定して策定する地震動及び震源を特定せず策定する地震動について、敷地の解放基盤表面における水平方向及び鉛直方向の地震動としてそれぞれ策定する。策定した基準地震動の応答スペクトルを第1.2-1図及び第1.2-2図に、時刻歴波形を第1.2-3図から第1.2-9図に示す。

原子炉格納施設設置位置周辺は、地質調査の結果によれば、約1.4km/sのS波速度を持つ堅硬な岩盤が十分な広がりをもって存在することが確認されており、建物・構築物はこの堅硬な岩盤に支持させる。

敷地周辺には中生界ジュラ系の砂岩、頁岩等が広く分布し、安全上重要な建

屋の設置レベルにもこの岩盤が分布していることから、解放基盤表面は、この岩盤が分布するレベルに設定する。2号炉原子炉建屋は0.P.-14.1mとしている。

また、弾性設計用地震動は、基準地震動との応答スペクトルの比率が目安として0.5を下回らないように基準地震動に係数を乗じて設定する。ここで、係数は「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）」における基準地震動S1の応答スペクトルをおおむね下回らないように配慮する。具体的には、工学的判断により、 $S_s - F1 \sim F3$ 及び $S_s - N1$ は係数0.5を乗じた地震動、 $S_s - D1 \sim D3$ は係数0.58を乗じた地震動を弾性設計用地震動として設定する。

【説明資料（3.1(2)：P4条-57)】

なお、Bクラスの施設のうち、共振のおそれのある施設については、弾性設計用地震動に2分の1を乗じた地震動によりその影響についての検討を行う。建物・構築物及び機器・配管系ともに、おおむね弾性状態に留まる範囲で耐えられるように設計する。

【説明資料（3.1(2)：P4条-57)】

- e. 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又は津波監視設備が設置された建物・構築物は、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が保持できるように設計する。

【説明資料（1.1(6)：P4条-54）（4.1(3)：P4条-61）

（4.1(4)：P4条-64)】

- f. 耐震重要施設は、耐震重要度分類の下位のクラスに属する施設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。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・検討を行い、事象選定及び影響評価を行う。なお、影響評価においては、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。

【説明資料（1.1(9)：P4条-54）（7：P4条-69)】

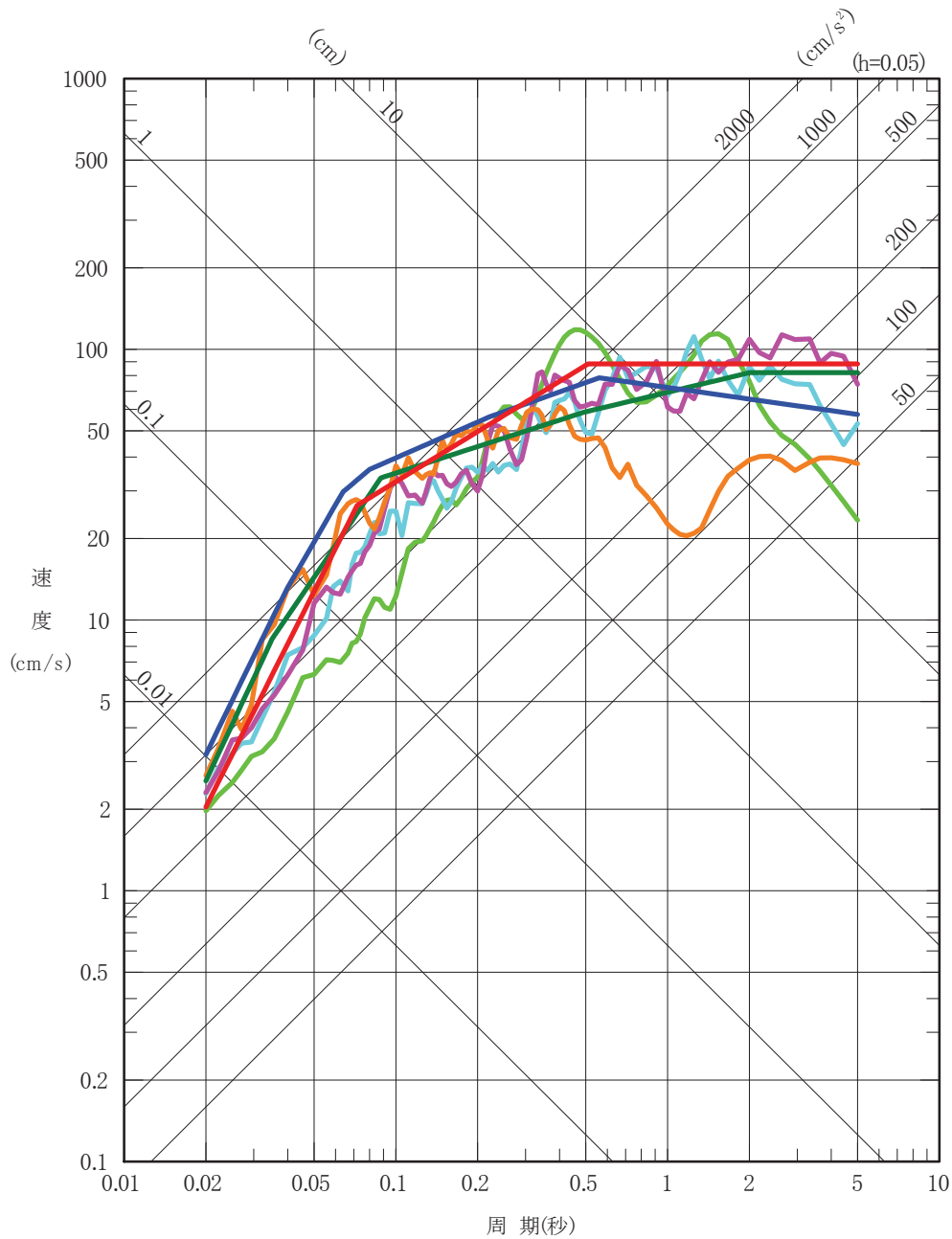
- g. 炉心内の燃料被覆材（以下「燃料被覆管」という。）の放射性物質の閉じ込めの機能については、以下のとおり設計する。

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留まるように設計する。

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に影響を及ぼさないように設計する。

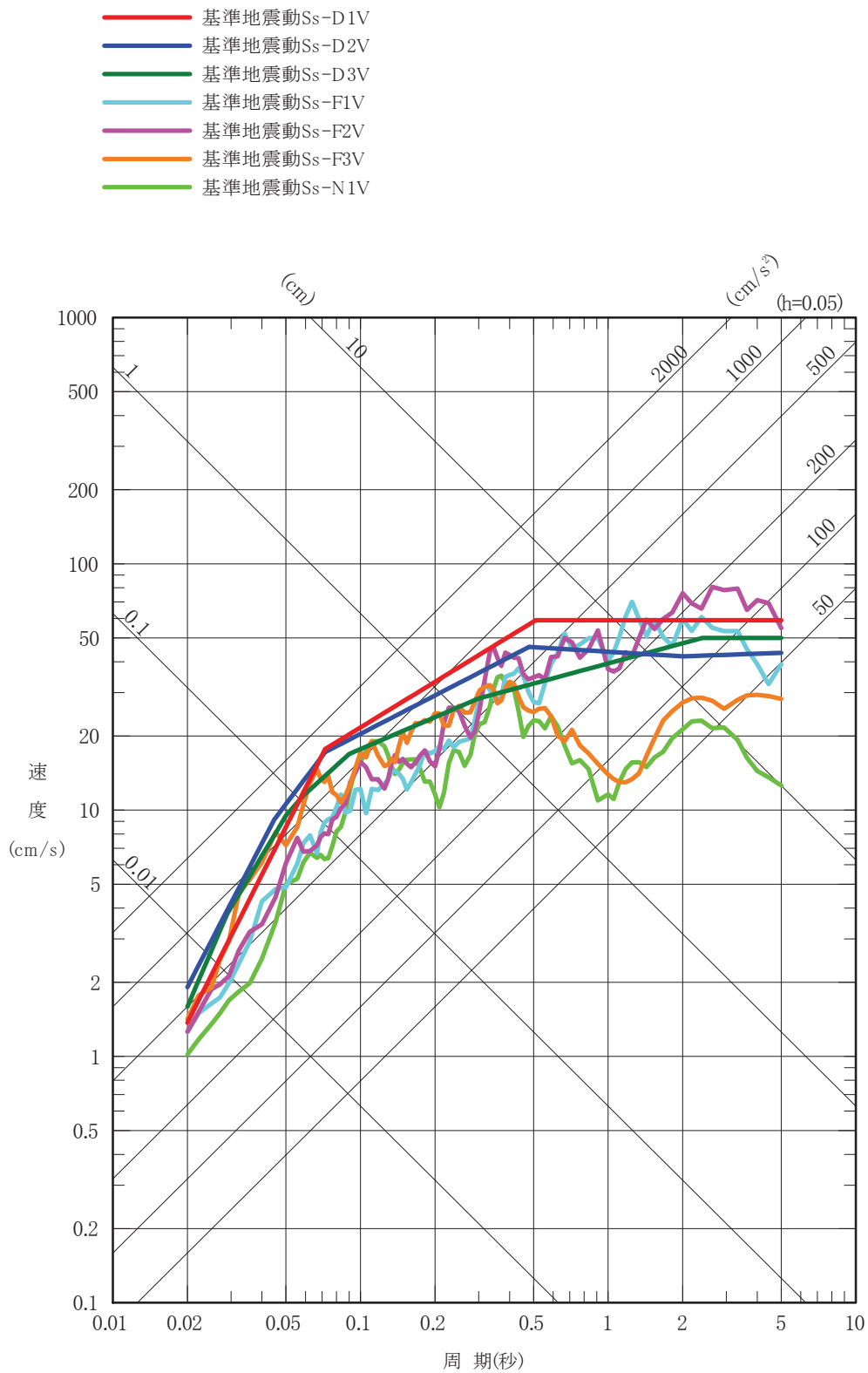
【説明資料（1.1(11)：P4条-54）（4.1(4)：P4条-63)】

- 基準地震動Ss-D1H*
- 基準地震動Ss-D2H
- 基準地震動Ss-D3H
- 基準地震動Ss-F1H
- 基準地震動Ss-F2H
- 基準地震動Ss-F3H
- 基準地震動Ss-N1H

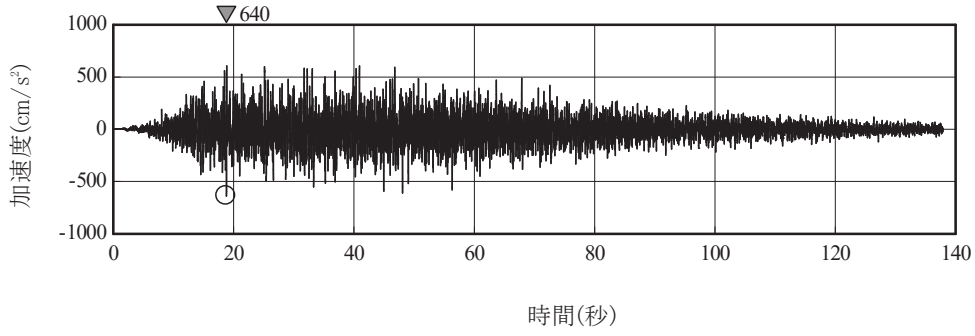


* Ss-D1~3 : 応答スペクトル手法による基準地震動, Ss-F1~3 : 断層モデル手法による基準地震動,
 Ss-N : 震源を特定せず策定する地震動

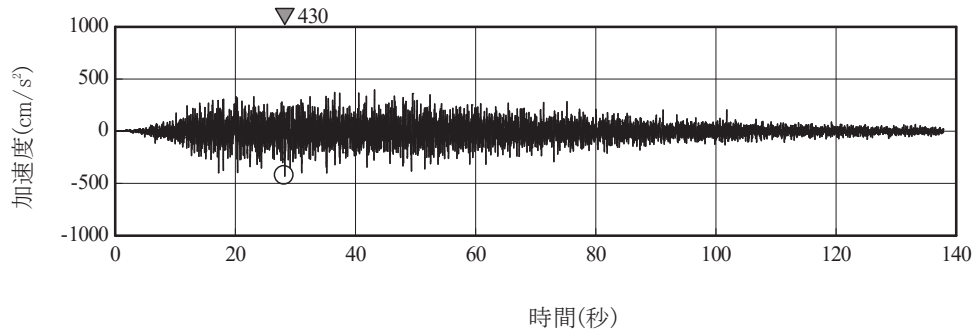
第 1.2-1 図 基準地震動 S s の応答スペクトル (水平方向)



第 1.2-2 図 基準地震動 S s の応答スペクトル (鉛直方向)

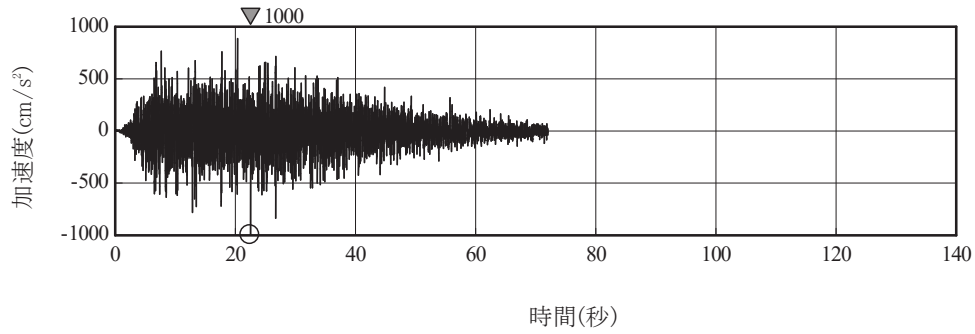


水平方向

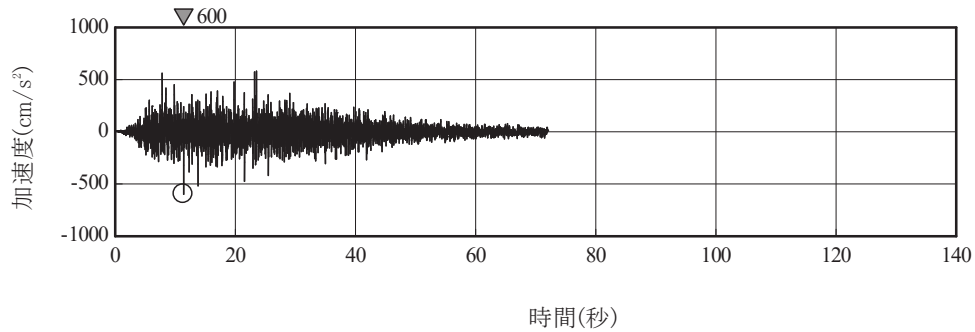


鉛直方向

第 1.2-3 図 基準地震動 S_s-D 1 の加速度時刻歴波形

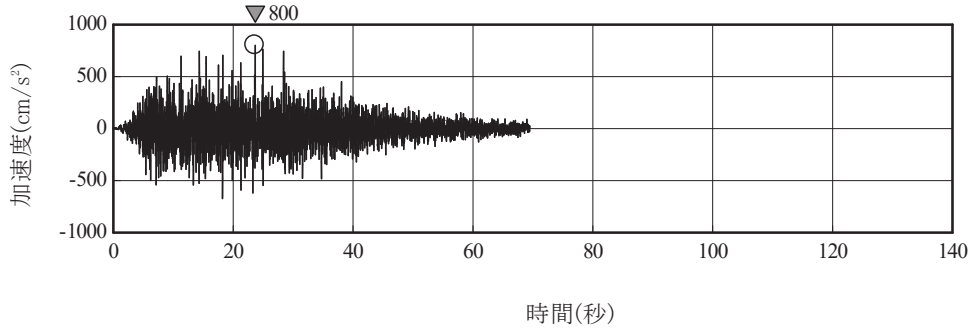


水平方向

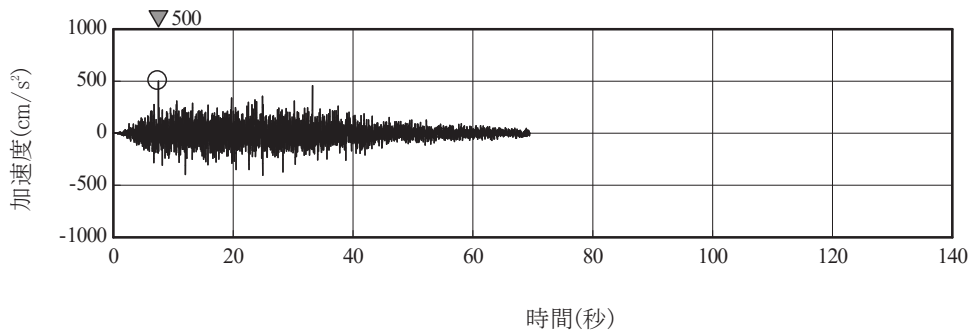


鉛直方向

第 1.2-4 図 基準地震動 S_s-D 2 の加速度時刻歴波形

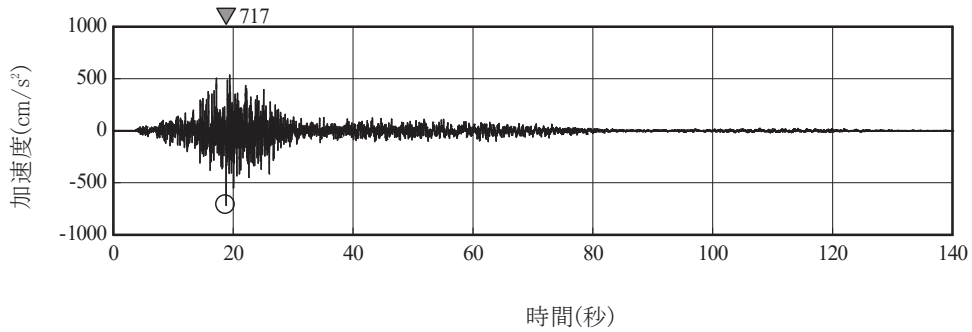


水平方向

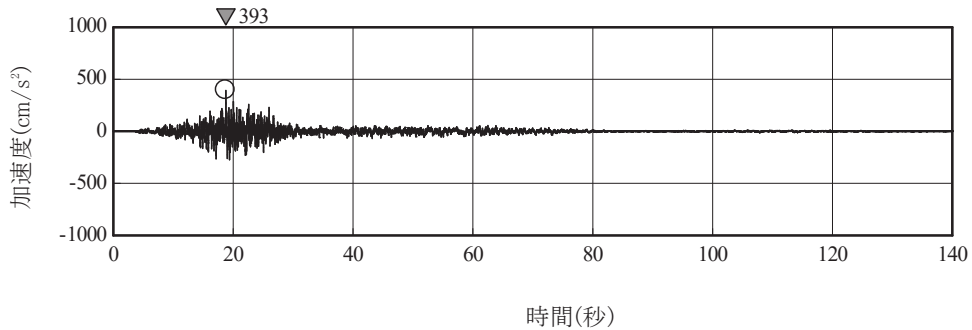


鉛直方向

第 1.2-5 図 基準地震動 S s - D 3 の加速度時刻歴波形

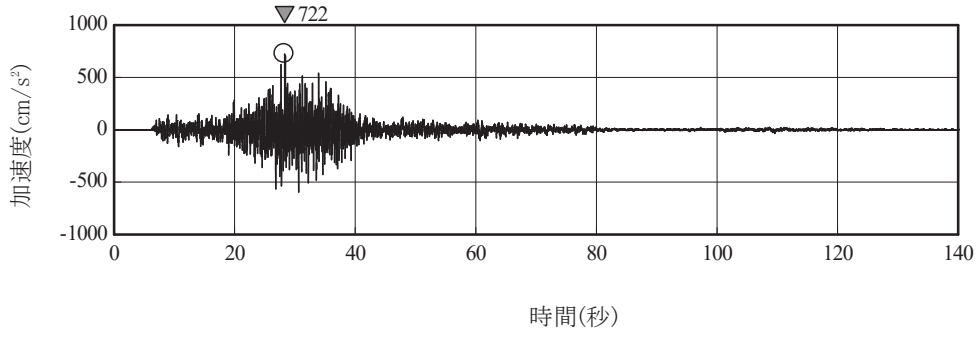


水平方向

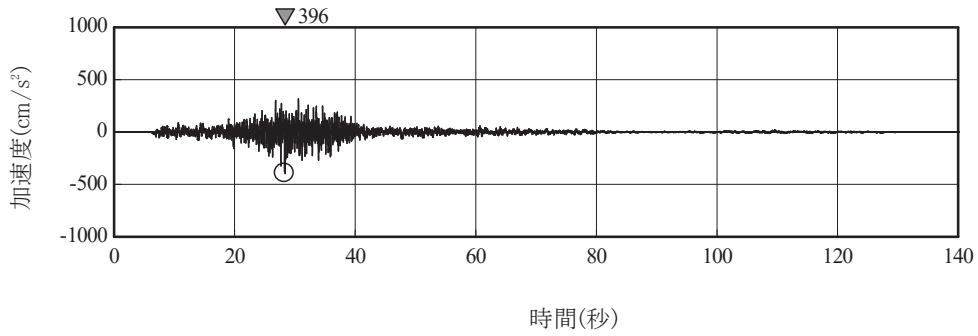


鉛直方向

第 1.2-6 図 基準地震動 S s - F 1 の加速度時刻歴波形

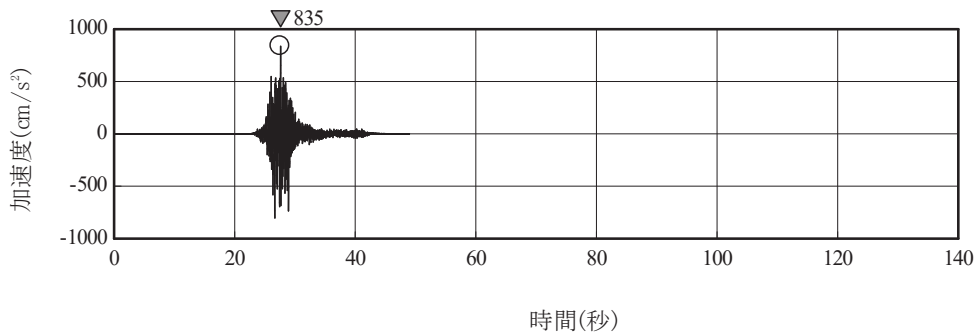


水平方向

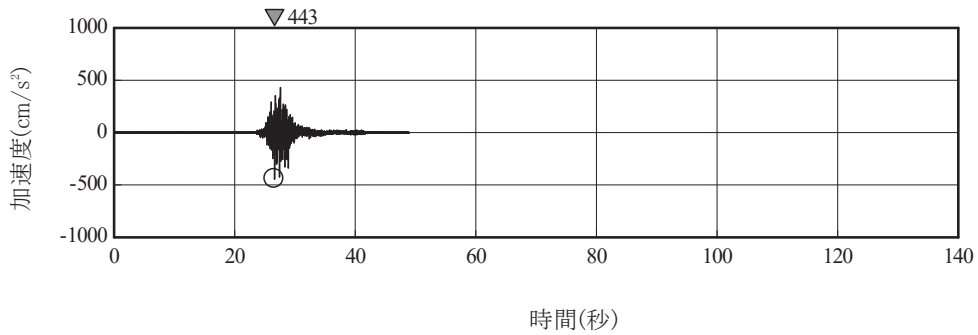


鉛直方向

第 1.2-7 図 基準地震動 S_s - F 2 の加速度時刻歴波形

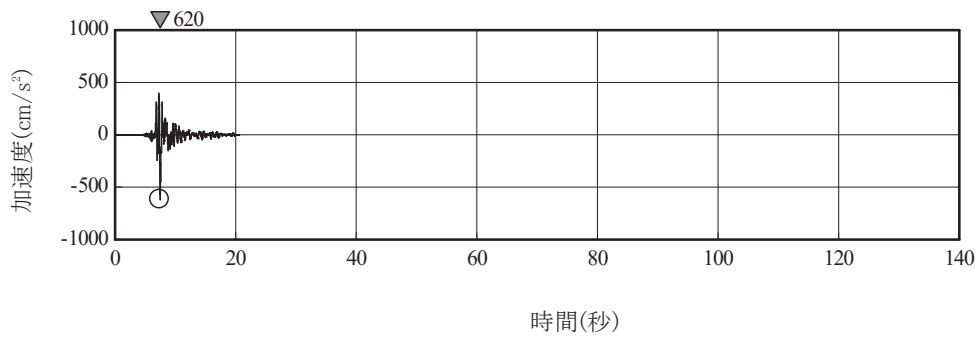


水平方向

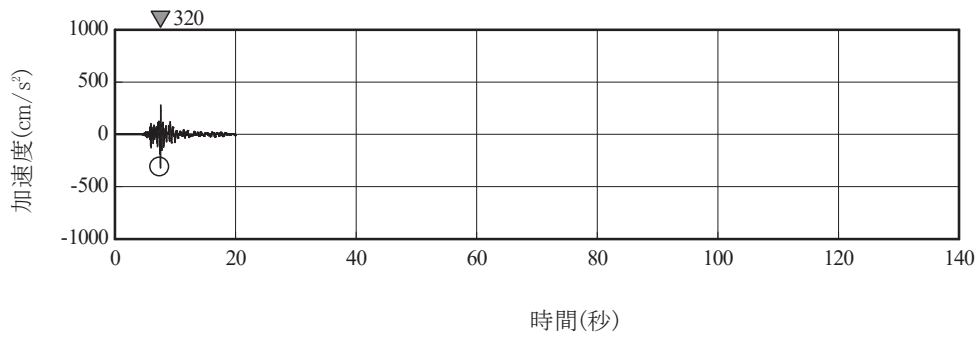


鉛直方向

第 1.2-8 図 基準地震動 S_s - F 3 の加速度時刻歴波形



水平方向



鉛直方向

第 1.2-9 図 基準地震動 S_s - N 1 の加速度時刻歴波形

(2) 安全設計方針

1.4 耐震設計

発電用原子炉施設の耐震設計は、「設置許可基準規則」に適合するように、「1.4.1 設計基準対象施設の耐震設計」、「1.4.2 重大事故等対処施設の耐震設計」、「1.4.3 主要施設の耐震構造」及び「1.4.4 地震検知による耐震安全性の確保」に従って行う。

1.4.1 設計基準対象施設の耐震設計

1.4.1.1 設計基準対象施設の耐震設計の基本方針

設計基準対象施設の耐震設計は、以下の項目に従って行う。

- (1) 地震により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。）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に対して、その安全機能が損なわれるおそれがないように設計する。
- (2) 設計基準対象施設は、地震により発生するおそれがある安全機能の喪失（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。）に応じて、耐震重要度分類をSクラス、Bクラス及びCクラスに分類し、それぞれに応じた地震力に十分耐えられるように設計する。
- (3) 建物・構築物については、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地盤に設置する。

なお、建物・構築物とは、建物、構築物及び土木構造物（屋外重要土木構造物及びその他の土木構造物）の総称とする。

また、屋外重要土木構造物とは、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求められる土木構造物をいう。

- (4) Sクラスの施設（(6)に記載のもののうち、津波防護機能を有する設備（以下「津波防護施設」という。）、浸水防止機能を有する設備（以下「浸水防止設備」という。）及び敷地における津波監視機能を有する施設（以下「津波監視設備」という。）を除く。）は、基準地震動 S_s による地震力に対してその安全機能が保持できるように設計する。

また、弾性設計用地震動 S_d 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に対しておおむね弾性状態に留まる範囲で耐えられるように設計する。

- (5) Sクラスの施設（(6)に記載のものうち、津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備を除く。）については、静的地震力は、水平地震力と鉛直地震

力が同時に不利な方向の組合せで作用するものとする。

また、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d による地震力は、水平2方向及び鉛直方向について適切に組み合わせて算定するものとする。なお、水平2方向及び鉛直方向の地震力が同時に作用し、影響が考えられる施設、設備については許容限界の範囲内に留まることを確認する。

- (6) 屋外重要土木構造物、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又は津波監視設備が設置された建物・構築物は、基準地震動 S_s による地震力に対して、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、それぞれの施設及び設備に要求される機能が保持できるように設計する。なお、基準地震動 S_s の水平2方向及び鉛直方向の地震力の組合せについては、上記(5)と同様とする。

また、重大事故等対処施設を津波から防護するための津波防護設備、浸水防止設備及び津波監視設備並びに浸水防止設備又は津波監視設備が設置された建物・構築物についても同様の設計方針とする。

- (7) Bクラスの施設は、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られるように設計する。

また、共振のおそれのある施設については、その影響についての検討を行う。その場合、検討に用いる地震動は、弾性設計用地震動 S_d に2分の1を乗じたものとする。なお、当該地震動による地震力は、水平2方向及び鉛直方向について適切に組み合わせて算定するものとし、Sクラス施設と同様に許容限界の範囲内に留まることを確認する。

- (8) Cクラスの施設は、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られるように設計する。
- (9) 耐震重要施設は、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。
- (10) 設計基準対象施設の構造計画及び配置計画に際しては、地震の影響が低減されるように考慮する。

【説明資料（1.1(10)：P4条-54）（9:P4条-71）】

- (11) 設計基準対象施設は、発電用原子炉施設周辺の地下水位を一定範囲に保持し揚圧力影響を低減するために設置する地下水位低下設備の機能を考慮して、その機能が保持できるよう設計する。

また、液状化影響の検討に当っては、揚圧力影響を低減するために設置する地下水位低下設備の機能を考慮した設計用地下水位を設定するとともに、耐震重要施設は、周辺地盤の液状化による地盤変状を考慮した場合でも、その機能が損なわれないよう所要の対策を講じる。

- (12) 炉心内の燃料被覆管の放射性物質の閉じ込めの機能については、以下のとおり設計する。

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留ま

るように設計する。

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に影響を及ぼさないように設計する。

1.4.1.2 耐震重要度分類

設計基準対象施設の耐震重要度分類を、次のように分類する。

(1) Sクラスの施設

地震により発生するおそれのある事象に対して、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な施設、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であり、次の施設を含む。

- ・原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器・配管系
- ・使用済燃料を貯蔵するための施設
- ・原子炉の緊急停止のために急激に負の反応度を付加するための施設、及び原子炉の停止状態を維持するための施設
- ・原子炉停止後、炉心から崩壊熱を除去するための施設
- ・原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故後、炉心から崩壊熱を除去するための施設
- ・原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故の際に、圧力障壁となり放射性物質の放散を直接防ぐための施設
- ・放射性物質の放出を伴うような事故の際に、その外部放散を抑制するための施設であり、上記の「放射性物質の放散を直接防ぐための施設」以外の施設
- ・津波防護施設及び浸水防止設備
- ・津波監視設備

【説明資料 (2.1(1) : P4 条-56)】

(2) Bクラスの施設

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クラスの施設と比べ小さい施設であり、次の施設を含む。

- ・原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されていて、一次冷却材を内蔵しているか又は内蔵し得る施設
- ・放射性廃棄物を内蔵している施設（ただし、内蔵量が少ない又は貯蔵方式により、その破損により公衆に与える放射線の影響が「実用発電用原子炉

の設置，運転等に関する規則（昭和 53 年通商産業省令第 77 号）」第 2 条第 2 項第 6 号に規定する「周辺監視区域」外における年間の線量限度に比べ十分小さいものは除く。）

- ・放射性廃棄物以外の放射性物質に関連した施設で，その破損により，公衆及び従事者に過大な放射線被ばくを与える可能性のある施設
- ・使用済燃料を冷却するための施設
- ・放射性物質の放出を伴うような場合に，その外部放散を抑制するための施設で，Sクラスに属さない施設

【説明資料（2.1(2)：P4 条－56)】

(3) Cクラスの施設

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である。

上記に基づくクラス別施設を第 1.4-1 表に示す。

なお，同表には当該施設を支持する構造物の支持機能が維持されることを確認する地震動及び波及的影響を考慮すべき施設に適用する地震動についても併記する。

【説明資料（2.1(3)：P4 条－56)】

1.4.1.3 地震力の算定方法

設計基準対象施設の耐震設計に用いる地震力の算定は以下の方法による。

(1) 静的地震力

静的地震力は，Sクラスの施設（津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備を除く。），Bクラス及びCクラスの施設に適用することとし，それぞれ耐震重要度分類に応じて次の地震層せん断力係数 C_i 及び震度に基づき算定する。

a. 建物・構築物

水平地震力は，地震層せん断力係数 C_i に，次に示す施設の耐震重要度分類に応じた係数を乗じ，さらに当該層以上の重量を乗じて算定するものとする。

Sクラス	3.0
Bクラス	1.5
Cクラス	1.0

ここで，地震層せん断力係数 C_i は，標準せん断力係数 C_0 を 0.2 以上とし，建物・構築物の振動特性及び地盤の種類等を考慮して求められる値とする。

また，必要保有水平耐力の算定においては，地震層せん断力係数 C_i に乘じる施設の耐震重要度分類に応じた係数は，Sクラス，Bクラス及びCクラスともに 1.0 とし，その際に用いる標準せん断力係数 C_0 は 1.0 以上とする。

Sクラスの施設については、水平地震力と鉛直地震力が同時に不利な方向の組合せで作用するものとする。鉛直地震力は、震度0.3以上を基準とし、建物・構築物の振動特性及び地盤の種類等を考慮し、高さ方向に一定として求めた鉛直震度より算定するものとする。

ただし、土木構造物の静的地震力は、安全上適切と認められる規格及び基準を参考に、Cクラスに適用される静的地震力を適用する。

b. 機器・配管系

静的地震力は、上記 a. に示す地震層せん断力係数 C_i に施設の耐震重要度分類に応じた係数を乗じたものを水平震度として、当該水平震度及び上記 a. の鉛直震度をそれぞれ20%増しとした震度より求めるものとする。

なお、Sクラスの施設については、水平地震力と鉛直地震力は同時に不利な方向の組合せで作用するものとする。ただし、鉛直震度は高さ方向に一定とする。

上記 a. 及び b. の標準せん断力係数 C_0 等の割増し係数の適用については、耐震性向上の観点から、一般産業施設及び公共施設等の耐震基準との関係を考慮して設定する。

【説明資料 (3.1(1) : P4 条-56)】

(2) 動的地震力

動的地震力は、Sクラスの施設、屋外重要土木構造物及びBクラスの施設のうち共振のおそれのあるものに適用することとし、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d から定める入力地震動を入力として、動的解析により水平2方向及び鉛直方向について適切に組み合わせで算定する。なお、構造特性から水平2方向及び鉛直方向の地震力の影響が考えられる施設、設備については、水平2方向及び鉛直方向の地震力の組合せに対して、許容限界の範囲内に留まることを確認する。

Bクラスの施設のうち共振のおそれのあるものについては、弾性設計用地震動 S_d から定める入力地震動の振幅を2分の1にしたものによる地震力を適用する。

屋外重要土木構造物、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又は津波監視設備が設置された建物・構築物については、基準地震動 S_s による地震力を適用する。

添付書類六の「5. 地震」に示す基準地震動 S_s は、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」について、解放基盤表面における水平方向及び鉛直方向の地震動としてそれぞれ策定した。「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」に基づき策定した基準地震動 $S_s - D1 \sim D3$ の年超過確率は $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 程度で、 $S_s - F1 \sim F2$ の年超過確率は、 $S_s - D1$ を超過する帯域で 10^{-6} より低くなっており、 $S_s - F$

3の年超過確率は、短周期側でおおむね 10^{-4} 程度である。「震源を特定せず策定する地震動」に基づき設定した基準地震動 $S_s - N1$ の年超過確率は $10^{-4} \sim 10^{-7}$ 程度である。また、弾性設計用地震動 S_d は、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を下回らないように基準地震動 S_s に係数を乗じて設定する。ここで、係数は工学的判断として、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⁽¹⁾を踏まえ、さらに、「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）」における2号炉の基準地震動 S_1 の応答スペクトルをおおむね下回らないよう配慮した値とする。具体的には、 $S_s - F1 \sim F3$ 及び $S_s - N1$ は係数0.5を乗じた地震動、応答スペクトルに基づく地震動評価による基準地震動 $S_s - D1 \sim D3$ に対しては更に余裕を見込み、係数0.58を乗じた地震動を弾性設計用地震動 S_d として設定する。また、建物・構築物及び機器・配管系ともに係数0.5又は0.58を採用することで、弾性設計用地震動 S_d に対する設計に一貫性をとる。弾性設計用地震動 S_d の年超過確率は短周期側で $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 程度、長周期側で $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 程度である。弾性設計用地震動 S_d の応答スペクトルを第1.4-1図に、弾性設計用地震動 S_d の時刻歴波形を第1.4-2図～第1.4-8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1.4-9図に、弾性設計用地震動 S_d と解放基盤表面における地震動の1様ハザードスペクトルの比較を第1.4-10図に示す。

【説明資料（3.1(2)：P4条-57)】

a. 入力地震動

原子炉格納施設設置位置周辺は、地質調査の結果によれば、約1.4km/sのS波速度を持つ堅硬な岩盤が十分な広がりをもって存在することが確認されており、建物・構築物はこの堅硬な岩盤に支持させる。

敷地周辺には中生界ジュラ系の砂岩、頁岩等が広く分布し、安全上重要な建屋の設置レベルにもこの岩盤が分布していることから、解放基盤表面は、この岩盤が分布するレベルに設定する。2号炉原子炉建屋はO.P.-14.1mとしている。

建物・構築物の地震応答解析における入力地震動は、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上で、必要に応じ2次元FEM解析又は1次元地盤応答解析により、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。地盤条件を考慮する場合には、地震動評価で考慮した敷地全体の地下構造との関係にも留意し、地盤の非線形応答に関する動的変形特性を考慮する。また、必要に応じ敷地における観測記録による検証や最新の科学的・技術的知見を踏まえ設定する。

b. 地震応答解析

(a) 動的解析法

i. 建物・構築物

動的解析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うえ、適切な解析法を選定するとともに、建物・構築物に応じた適切な解析条件を設定する。動的解析は、時刻歴応答解析法又は周波数応答解析法による。

建物・構築物の動的解析に当たっては、建物・構築物の剛性はそれらの形状、構造特性等を十分考慮して評価し、集中質点系等に置換した解析モデルを設定する。

動的解析には、建物・構築物と地盤との相互作用を考慮するものとし、解析モデルの地盤のばねは、基礎版の平面形状、地盤の剛性等を考慮して定める。設計用地盤定数は、原則として、弾性波試験によるものを用いる。

地盤－建物・構築物連成系の減衰定数は、振動エネルギーの地下逸散及び地震応答における各部のひずみレベルを考慮して定める。

基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d に対する応答解析において、主要構造要素がある程度以上弾性範囲を超える場合には、実験等の結果に基づき、該当する建物部分の構造特性に応じて、その弾塑性挙動を適切に模擬した復元力特性を考慮した応答解析を行う。

また、 S クラスの施設を支持する建物・構築物の支持機能を検討するための動的解析において、施設を支持する建物・構築物の主要構造要素がある程度以上弾性範囲を超える場合には、その弾塑性挙動を適切に模擬した復元力特性を考慮した応答解析を行う。

応答解析に用いる材料定数については、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、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震等の地震の影響により、建物・構築物に発生したひび割れ等を起因とする剛性の変動については、観測記録や試験データなどから適切に応答解析モデルへ反映し、保守性を確認した上で適用する。また、必要に応じて建物・構築物及び機器・配管系の設計用地震力に及ぼす影響を検討する。

液状化の影響については、地下水位低下設備を考慮の上設定した地下水位及び液状化検討対象層の分布状況を踏まえて、検討の必要性を判断する。

原子炉建屋については、3次元FEM解析等から、建物・構築物の3次元応答性状及び機器・配管系への影響を評価する。

屋外重要土木構造物の動的解析は、構造物と地盤の相互作用を考慮できる連成系の地震応答解析手法とし、地盤及び構造物の地震時における非線形挙動の有無や程度に応じて、線形、等価線形又は非線形解析のいずれかにて行う。液状化の影響については、地下水位低下設備を考慮の上設定した地下水位及び液状化検討対象層の分布状況を踏まえて、検討の必要性を

判断する。

液状化検討対象層は盛土及び旧表土とし、液状化を考慮する場合は、構造物と地盤の動的相互作用を考慮できる有効応力解析を用いて地震時の応答を算定する。

有効応力解析に用いる液状化強度特性については、敷地全体の液状化強度試験から得られる液状化強度特性を保守的に設定（下限値）することを基本とし、各施設近傍に試験結果がある場合には、その試験結果から液状化強度特性を保守的に設定（下限値）する。

なお、液状化考慮と液状化非考慮で耐震安全性評価上どちらが保守的な評価となるかを確認するため、全応力解析と有効応力解析の結果を比較して、解析手法を選定する。

また、地震力については、水平2方向及び鉛直方向について適切に組み合わせる。

【説明資料（5.1：P4条-65）（5.3：P4条-67）】

ii. 機器・配管系

動的解析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うえ、適切な解析法を選定するとともに、解析条件として考慮すべき減衰定数、剛性等の各種物性値は、適切な規格及び基準又は試験等の結果に基づき設定する。ここで、原子炉本体基礎については、鋼板とコンクリートの複合構造物として、より現実に近い適正な地震応答解析を実施する観点から、コンクリートの剛性変化を適切に考慮した復元力特性を設定する。復元力特性の設定に当たっては、既往の知見や実物の原子炉本体基礎を模擬した試験体による加力試験結果を踏まえて、妥当性、適用性を確認するとともに、設定における不確実性や保守性を考慮し、機器・配管系の設計用地震力を設定する。なお、原子炉本体基礎の構造強度は、鋼板のみで地震力に耐える設計とする。

機器の解析に当たっては、形状、構造特性等を考慮して、代表的な振動モードを適切に表現できるよう質点系モデル、有限要素モデル等に置換し、設計用床応答曲線を用いたスペクトルモーダル解析法又は時刻歴応答解析法により応答を求める。配管系についても、配管の形状や構造を考慮して、代表的な振動モードを適切に表現できるように適切なモデルを作成し、設計用床応答曲線を用いたスペクトルモーダル解析法等により応答を求める。スペクトルモーダル解析法及び時刻歴応答解析法の選択に当たっては、衝突・すべり等の非線形現象を模擬する観点、又は既往研究の知見を取り入れ実機の挙動を模擬する観点で、建物・構築物の剛性及び地盤物性等の不確かさへの配慮をしつつ時刻歴応答解析法を用いる等、解析対象とする現象、対象設備の振動特性・構造特性等

を考慮し適切に選定する。

また、設備の3次元的な広がりや踏まえ、適切に応答を評価できるモデルを用い、水平2方向及び鉛直方向の応答成分について適切に組み合わせるものとする。

なお、剛性の高い機器は、その機器の設置床面の最大応答加速度の1.2倍の加速度を震度として作用させて地震力を算定する。

【説明資料 (5.2 : P4 条-66)】

(3) 設計用減衰定数

応答解析に用いる減衰定数は、安全上適切と認められる規格及び基準、既往の振動実験、地震観測の調査結果等を考慮して適切な値を定める。

なお、建物・構築物の応答解析に用いる鉄筋コンクリートの減衰定数の設定については、既往の知見に加え、既設施設の地震観測記録により、その妥当性を確認し用いる。

また、地盤と屋外重要土木構造物の連成系地震応答解析モデルの減衰定数については、地中構造物としての特徴、同モデルの振動特性を考慮して適切に設定する。

【説明資料 (6 : P4 条-68)】

1.4.1.4 荷重の組合せと許容限界

設計基準対象施設の耐震設計における荷重の組合せと許容限界は以下による。

(1) 耐震設計上考慮する状態

地震以外に設計上考慮する状態を以下に示す。

a. 建物・構築物

(a) 運転時の状態

発電用原子炉施設が運転状態にあり、通常自然条件下におかれている状態

ただし、運転状態には通常運転時、運転時の異常な過渡変化時を含むものとする

(b) 設計基準事故時の状態

発電用原子炉施設が設計基準事故時にある状態

(c) 設計用自然条件

設計上基本的に考慮しなければならない自然条件（積雪、風等）

b. 機器・配管系

(a) 通常運転時の状態

発電用原子炉の起動，停止，出力運転，高温待機及び燃料取替等が計画的又は頻繁に行われた場合，運転条件が所定の制限値以内にある運転状態

(b) 運転時の異常な過渡変化時の状態

通常運転時に予想される機械又は器具の単一の故障若しくはその誤作動又は運転員の単一の誤操作及びこれらと類似の頻度で発生すると予想される外乱によって発生する異常な状態であって，当該状態が継続した場合には炉心又は原子炉冷却材圧力バウンダリの著しい損傷が生ずるおそれがあるものとして安全設計上想定すべき事象が発生した状態

(c) 設計基準事故時の状態

発生頻度が運転時の異常な過渡変化より低い異常な状態であって，当該状態が発生した場合には発電用原子炉施設から多量の放射性物質が放出するおそれがあるものとして安全設計上想定すべき事象が発生した状態

(d) 設計用自然条件

設計上基本的に考慮しなければならない自然条件（積雪，風等）

【説明資料（4.1：P4条－58）】

(2) 荷重の種類

a. 建物・構築物

(a) 発電用原子炉のおかれている状態に係らず常時作用している荷重，すなわち固定荷重，積載荷重，土圧，水圧並びに通常の気象条件による荷重

(b) 運転時の状態で施設に作用する荷重

(c) 設計基準事故時の状態で施設に作用する荷重

(d) 地震力，風荷重，積雪荷重等

ただし，運転時及び設計基準事故時の荷重には，機器・配管系から作用する荷重が含まれるものとし，地震力には，地震時土圧，機器・配管系からの反力，スロッシング等による荷重が含まれるものとする。

b. 機器・配管系

(a) 通常運転時の状態で施設に作用する荷重

(b) 運転時の異常な過渡変化時の状態で施設に作用する荷重

(c) 設計基準事故時の状態で施設に作用する荷重

(d) 地震力，風荷重，積雪荷重等

【説明資料（4.1：P4条－58）】

(3) 荷重の組合せ

地震力と他の荷重との組合せを以下に示す。

a. 建物・構築物（c.に記載のものを除く。）

- (a) Sクラスの建物・構築物については、常時作用している荷重及び運転時（通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時）に施設に作用する荷重と地震力とを組み合わせる。
 - (b) Sクラスの建物・構築物については、常時作用している荷重及び設計基準事故時の状態で施設に作用する荷重のうち長時間その作用が続く荷重と弾性設計用地震動S_dによる地震力又は静的地震力を組み合わせる。
 - (c) Bクラス及びCクラスの建物・構築物については、常時作用している荷重及び運転時の状態で施設に作用する荷重と動的地震力又は静的地震力とを組み合わせる。
- b. 機器・配管系（c.に記載のものを除く。）
- (a) Sクラスの機器・配管系については、通常運転時の状態で作用する荷重と地震力とを組み合わせる。
 - (b) Sクラスの機器・配管系については、運転時の異常な過渡変化時の状態及び設計基準事故時の状態のうち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と地震力とを組み合わせる。
 - (c) Sクラスの機器・配管系については、運転時の異常な過渡変化時の状態及び設計基準事故時の状態のうち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年超過確率の関係を踏まえ、適切な地震力と組み合わせる。
 - (d) Bクラス及びCクラスの機器・配管系については、通常運転時の状態で作用する荷重及び運転時の異常な過渡変化時の状態で作用する荷重と、動的地震力又は静的地震力とを組み合わせる。
 - (e) 炉心内の燃料被覆管の放射性物質の閉じ込めの機能の確認においては、通常運転時の状態で燃料被覆管に作用する荷重及び運転時の異常な過渡変化時の状態のうち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燃料被覆管に作用する荷重と地震力を組み合わせる。
- c. 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又は津波監視設備が設置された建物・構築物

- (a) 津波防護施設及び浸水防止設備又は津波監視設備が設置された建物・構築物については、常時作用している荷重及び運転時に施設に作用する荷重と基準地震動 S_s による地震力を組み合わせる。
- (b) 浸水防止設備及び津波監視設備については、常時作用している荷重及び運転時の状態で作用する荷重と基準地震動 S_s による地震力を組み合わせる。
なお、上記 c. (a), (b) については、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 S_s による地震力と津波による荷重の組合せを考慮する。また、津波以外による荷重については、「(2) 荷重の種類」に準じるものとする。
- d. 荷重の組合せ上の留意事項
- (a) Sクラスの施設に作用する地震力のうち動的地震力については、水平2方向と鉛直方向の地震力とを適切に組み合わせ算定するものとする。
- (b) ある荷重の組合せ状態での評価が明らかに厳しいことが判明している場合には、その他の荷重の組合せ状態での評価は行わないことがある。
- (c) 複数の荷重が同時に作用する場合、それらの荷重による応力の各ピークの生起時刻に明らかなずれがあることが判明しているならば、必ずしもそれぞれの応力のピーク値を重ねなくてもよいものとする。
- (d) 上位の耐震重要度分類の施設を支持する建物・構築物の当該部分の支持機能を確認する場合においては、支持される施設の耐震クラスに応じた地震力と常時作用している荷重、運転時の状態で施設に作用する荷重及びその他必要な荷重とを組み合わせる。
なお、第 1.4-1 表に、対象となる建物・構築物及びその支持機能が維持されていることを検討すべき地震動等について記載する。
- (e) 地震に組み合わせる自然現象として、風及び積雪を考慮し、風荷重及び積雪荷重については、施設の設置場所、構造等を考慮して、地震荷重と組み合わせる。

【説明資料 (4.1(3) : P4 条-60)】

(4) 許容限界

各施設の地震力と他の荷重とを組み合わせた状態に対する許容限界は次のとおりとし、安全上適切と認められる規格及び基準又は試験等で妥当性が確認されている許容応力等を用いる。

- a. 建物・構築物（c. に記載のものを除く。）
- (a) Sクラスの建物・構築物
- i. 弾性設計用地震動 S_d による地震力又は静的地震力との組合せに対する許容限界
- 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。
- ただし、冷却材喪失事故時に作用する荷重との組合せ（原子炉格納容器バウンダリにおける長期的荷重との組合せを除く。）に対しては、下記 ii. に示す許容限界を適用する。
- ii. 基準地震動 S_s による地震力との組合せに対する許容限界
- 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て妥当な安全余裕をもたせることとする。（評価項目はせん断ひずみ、応力等）。
- なお、終局耐力は、建物・構築物に対する荷重又は応力を漸次増大していくとき、その変形又はひずみが著しく増加するに至る限界の最大耐力とし、既往の実験式等に基づき適切に定めるものとする。
- (b) Bクラス及びCクラスの建物・構築物（(e), (f) に記載のものを除く。）
- 前記(a) i. の許容応力度を許容限界とする。
- (c) 耐震クラスの異なる施設を支持する建物・構築物（(e), (f) に記載のものを除く。）
- 前記(a) ii. を適用するほか、耐震クラスの異なる施設がそれを支持する建物・構築物の変形等に対して、その機能が損なわないものとする。
- なお、当該施設を支持する建物・構築物の支持機能が維持されることを確認する際の地震動は、支持される施設に適用される地震動とする。
- (d) 建物・構築物の保有水平耐力（(e), (f) に記載のものを除く。）
- 建物・構築物については、当該建物・構築物の保有水平耐力が必要保有水平耐力に対して耐震重要度分類に応じた適切な安全余裕を有していることを確認する。
- (e) 屋外重要土木構造物
- i. 静的地震力との組合せに対する許容限界
- 安全上適切と認められる規格及び基準による許容値を許容限界とする。
- ii. 基準地震動 S_s による地震力との組合せに対する許容限界
- 構造部材の曲げについては限界層間変形角又は許容応力度等、構造部材の

せん断についてはせん断耐力又は許容応力度等に対して、妥当な安全余裕を持たせることとする。3次元静的材料非線形解析により評価を行うもの等、ひずみを許容値とする場合は、構造物の要求機能に応じた許容値に対し妥当な安全余裕を持たせることとする。

(f) その他の土木構造物

安全上適切と認められる規格及び基準による許容値を許容限界とする。

b. 機器・配管系 (c. に記載のものを除く。)

(a) Sクラスの機器・配管系

i. 弾性設計用地震動 S_d による地震力又は静的地震力との組合せに対する許容限界

応答が全体的におおむね弾性状態に留まることとする（評価項目は応力等）。

ただし、冷却材喪失事故時に作用する荷重との組合せ（原子炉格納容器及び非常用炉心冷却設備等における長期的荷重との組合せを除く。）に対しては、下記(a) ii. に示す許容限界を適用する。

ii. 基準地震動 S_s による地震力との組合せに対する許容限界

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すことがないように応力、荷重等を制限する値を許容限界とする。

また、地震時又は地震後に動的機能が要求される機器等については、基準地震動 S_s による応答に対して、実証試験等により確認されている機能確認済加速度等を許容限界とする。

(b) Bクラス及びCクラスの機器・配管系

応答が全体的におおむね弾性状態に留まることとする（評価項目は応力等）。

(c) チャンネルボックス

地震時に作用する荷重に対して、燃料集合体の冷却材流路を維持できること及び過大な変形や破損等を生ずることにより制御棒の挿入が阻害されることがないことを確認する。

(d) 燃料被覆管

炉心内の燃料被覆管の放射性物質の閉じ込めの機能についてはの許容限界は、以下のとおりとする。

i. 弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力との組合せに対する許容限界

応答が全体的におおむね弾性状態に留まることとする。

ii. 基準地震動による地震力との組合せに対する許容限界

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とする。

c. 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又は津波監視設備が設置された建物・構築物

津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備が設置された建物・構築物については、当該施設及び建物・構築物が構造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するとともに、その施設に要求される機能（津波防護機能、浸水防止機能及び津波監視機能）が保持できることを確認する。（評価項目はせん断ひずみ、応力等）。

浸水防止設備及び津波監視設備については、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）が保持できることを確認する。

d. 基礎地盤の支持性能

(a) Sクラスの建物・構築物及びSクラスの機器・配管系（(b)に記載のもののうち、津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備を除く。）の基礎地盤

i. 基準地震動 S_s による地震力との組合せに対する許容限界

接地圧が、安全上適切と認められる規格及び基準等による地盤の極限支持力度に対して妥当な余裕を有することを確認する。

ii. 弾性設計用地震動 S_d による地震力又は静的地震力との組合せに対する許容限界

接地圧に対して、安全上適切と認められる規格及び基準等による地盤の短期許容支持力度を許容限界とする。

(b) 屋外重要土木構造物、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又は津波監視設備が設置された建物・構築物の基礎地盤

i. 基準地震動による地震力との組合せに対する許容限界

接地圧が、安全上適切と認められる規格及び基準等による地盤の極限支持力度に対して妥当な余裕を有することを確認する。

(c) Bクラス及びCクラスの建物・構築物、Bクラス及びCクラスの機器・配管系並びにその他の土木構造物の基礎地盤

上記 (a) ii. による許容支持力度を許容限界とする。

【説明資料 (4.1(4) : P4 条-62)】

1.4.1.5 設計における留意事項

耐震重要施設は、耐震重要度分類の下位のクラスに属する施設（以下「下位クラス施設」という。）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。

波及的影響については、耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力を適用して評価を行う。なお、地震動又は地震力の選定に当たっては、施設の配置状況、使用時間等を踏まえて適切に設定する。また、波及的影響においては水平2方向及び鉛直方向の地震力が同時に作用する場合に影響を及ぼす可能性のある施設、設備を選定し評価する。

波及的影響評価に当たっては、以下の4つの検討事項をもとに、敷地全体を俯瞰した調査・検討等を行い、耐震重要施設の安全機能への影響がないことを確認する。

なお、原子力発電所の地震被害情報をもとに、4つの検討事項以外に検討すべき事項がないか確認し、新たな検討事項が抽出された場合には、その観点を追加する。

- (1) 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
 - a. 不等沈下
耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力に対して不等沈下により、耐震重要施設の安全機能を損なわないように設計する。
 - b. 相対変位
耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力による下位クラス施設と耐震重要施設の相対変位により、耐震重要施設の安全機能へ影響がないことを確認する。
- (2) 耐震重要施設と下位クラス施設との接続部における相互影響
耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力に対して、耐震重要施設に接続する耐震重要度分類の下位のクラスに属する施設の損傷により、耐震重要施設の安全機能へ影響がないことを確認する。
- (3) 建屋内における下位クラス施設の損傷、転倒及び落下等による耐震重要施設への影響
耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力に対して、建屋内の下位クラス施設が損傷、転倒及び落下等により、耐震重要施設の安全機能へ影響がないことを確認する。
- (4) 建屋外における下位クラス施設の損傷、転倒及び落下等による耐震重要施設への影響

- a. 耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力に対して、施設の設置地盤及び周辺地盤の液状化による影響を考慮した上で、建屋外の下位クラス施設が損傷、転倒及び落下等により、耐震重要施設の安全機能へ影響がないことを確認する。
- b. 耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力に対して、耐震重要施設周辺の斜面が崩壊しないことを確認する。

なお、上記(1)～(4)の検討に当たっては、溢水及び火災の観点からも波及的影響がないことを確認する。(火災については「女川原子力発電所2号炉設計基準対象施設について」のうち「8条 火災による損傷の防止」に、溢水については「女川原子力発電所2号炉設計基準対象施設について」のうち「9条 溢水による損傷の防止等」に記載)

上記の観点で検討した波及的影響を考慮する施設を、第1.4-1表中に「波及的影響を考慮すべき施設」として記載する。

【説明資料(7:P4条-69)】

1.4.1.6 構造計画と配置計画

設計基準対象施設の構造計画及び配置計画に際しては、地震の影響が低減されるように考慮する。

建物・構築物は、原則として剛構造とし、重要な建物・構築物は、地震力に対し十分な支持性能を有する地盤に支持させる。剛構造としない建物・構築物は、剛構造と同等又はそれを上回る耐震安全性を確保する。

機器・配管系は、応答性状を適切に評価し、適用する地震力に対して構造強度を有するように設計する。配置に自由度のあるものは、耐震上の観点からできる限り重心位置を低くし、かつ、安定性のよい据付状態になるよう配置する。

また、建物・構築物の建屋間相対変位を考慮しても、建物・構築物及び機器・配管系の耐震安全性を確保する設計とする。

耐震重要度分類の下位クラス施設は原則、耐震重要施設に対して離隔をとり配置するか若しくは、基準地震動 S_s に対し構造強度を保つようにし、耐震重要施設の安全機能を損なわない設計とする。

【説明資料(9:P4条-71)】

1.4.3 主要施設の耐震構造

1.4.3.1 原子炉建屋

原子炉建屋は、中央部に地上3階、地下3階で、平面が約66m(南北方向)×約53m(東西方向)の原子炉棟があり、その周囲に地上2階、地下3階の付属棟を配置した鉄筋コンクリート造(一部鉄骨鉄筋コンクリート造及び鉄骨造)の建物である。原子炉棟と付属棟は、一体構造で同一基版上に設置され、

本建屋の平面は外側で約 77m（南北方向）×約 84m（東西方向）である。最下階床面からの高さは 59m で、地上高さは約 36m である。

原子炉棟中央部には、鋼製格納容器を含む厚さ約 2m の鉄筋コンクリート造の生体しゃへい壁があり、その外側に内部ボックス壁及び付属棟の外側である外部ボックス壁がある。

これらは、原子炉建屋の主要な耐震壁を構成し、それぞれ壁の間を強固な床板で一体に連結しているため、全体として剛な構造となっている。

1.4.3.2 タービン建屋

タービン建屋は、地上 2 階、地下 2 階で、平面が約 96m（南北方向）×約 58m（東西方向）の鉄筋コンクリート造（一部鉄骨鉄筋コンクリート造及び鉄骨造）の建物である。

建物の内部は、多くのしゃへい壁をもち、剛性が高い。したがって十分な耐震性を有する構造となっている。

1.4.3.3 制御建屋

制御建屋は、地上 3 階、地下 2 階で平面が 41m（南北方向）×40m（東西方向）の鉄筋コンクリート造（一部鉄骨造）の建物である。

1.4.3.4 防潮堤

防潮堤は、鋼管式鉛直壁（一般部）、鋼管式鉛直壁（岩盤部）及び盛土堤防の 3 種類の構造形式に区分され、敷地の前面に設置する。

鋼管式鉛直壁（一般部）は、延長約 420m、直径 2.2m 及び 2.5m の鋼管杭に天端高さ O.P. +29m の鋼製遮水壁を取り付け、周囲に背面補強工（コンクリート）、セメント改良土、改良地盤及び置換コンクリートを配置した剛な構造物であり、鋼管杭及び改良地盤を介して砂岩、頁岩、砂岩頁岩互層である荻の浜累層に着岩している。

鋼管式鉛直壁（岩盤部）は、延長約 260m、直径 2.2m 及び 2.5m の鋼管杭に天端高さ O.P. +29m の鋼製遮水壁を取り付けた剛な構造物であり、鋼管杭を介して砂岩、頁岩、砂岩頁岩互層である荻の浜累層に着岩している。

盛土堤防は、延長約 120m、天端高さ O.P. +29m のセメント改良土で盛り立てた盛土構造物であり、直接又は改良地盤を介して砂岩、頁岩、砂岩頁岩互層である荻の浜累層に着岩している。

1.4.3.5 原子炉格納容器

原子炉格納容器はドライウエルとサブプレッションチェンバから構成しており、ドライウエルは直径約 23m の円筒殻の上に、直径約 23m の半球殻をつけた約 37m の鋼製圧力容器であり、このドライウエルは、ベント管を介してサブプレッションチェンバと接続している。

半球殻上部付近にはシアラグを設けて、原子炉圧力容器から原子炉格納容器に伝えられる水平力、及び原子炉格納容器にかかる水平力の一部を周囲の生体しゃへい壁に伝える構造としている。

サブプレッションチェンバは、円環形をしており、管径約 9.4m、円環部の直径約 38m の鋼製容器である。

1.4.3.6 原子炉圧力容器

原子炉圧力容器は、外径約 5.9m、高さ約 22m、質量は原子炉圧力容器内部構造物、内部冷却材及び燃料集合体を含めて約 1,250t である。

この容器は、底部の鋼製スカートで支持し、スカートは鋼製円筒形基礎にアンカボルトで接続されている。原子炉圧力容器は、その外周の円筒状原子炉しゃへい壁頂部でスタビライザによって水平方向に支持し、原子炉しゃへい壁の頂部は鋼製フレーム（スタビライザ）によって原子炉格納容器と結合する。内部のスタビライザは地震力に対し原子炉圧力容器の上部を横方向に支持している。

つまり、原子炉圧力容器は、スカートで下端固定、スタビライザで上部ピン支持となっている。

1.4.3.7 原子炉圧力容器内部構造物

炉心に作用する水平力は、ステンレス鋼製の炉心シュラウドで支持する。炉心シュラウドは円筒形をした構造で、炉心シュラウド支持ロッド及びシュラウドサポートレグを介して圧力容器の下部に溶接する。

燃料集合体に作用する水平力は、上部格子板及び炉心支持板を通して炉心シュラウドに伝える。燃料集合体は、ジルカロイ製の細長いチャンネルボックスに納める。燃料棒は、燃料集合体頂部及び底部のタイプレートで押さえられ、中間部もスペーサによって押されるので過度の変形を生ずることはない。

気水分離器は、シュラウドヘッドに取り付けられたスタンドパイプに溶接する。蒸気乾燥器は、圧力容器に付けたブラケットで支持する。

20 台のジェットポンプは、炉心シュラウドの外周に配置する。ジェットポンプライザ管は、原子炉圧力容器を貫通して立ち上がり、上部において原子炉圧力容器にライザブレースで支持される。ジェットポンプ上部のノズルアセンブリはボルトでライザに結合する。ジェットポンプのディフューザ下部はバッフルプレートに溶接する。ディフューザ上部とスロートはスリップジョイント結合にして、縦方向に滑ることができるようにする。したがって、ジェットポンプの支持機構は、熱膨張は許すが、振動を防止することができる。

制御棒駆動機構ハウジングは、上部は圧力容器底部のスタブチューブに溶接し、下部はハウジングサポートで支持するので地震に対しても十分な強度をもつ。

1.4.3.8 原子炉再循環系

原子炉再循環ループは2ループあって、圧力容器から外径約0.52mのステンレス鋼管で下方に伸び、その下に原子炉再循環ポンプを設け、再び立ち上げてヘッダに入れ、そこから5本の外径約0.28mのステンレス鋼管に分け、圧力容器に接続する。この系の支持方法は、熱膨張による動きを拘束せず、できる限り剛な系になるように、スプリングハンガ、スナッパ等を採用する。

原子炉再循環ポンプは、ケーシングに取り付けたコンスタントハンガ等で支持する。

1.4.3.9 原子炉本体基礎

原子炉本体基礎については、内筒及び該当の円筒鋼板の間にコンクリートを充填した、鋼材とコンクリートの複合構造となっている。

1.4.3.10 その他

その他の機器、配管については、運転荷重、地震荷重、熱膨張による荷重を考慮して、必要に応じてリジットハンガ、スナッパ、その他の装置を使用して耐震的にも熱的にも十分な設計を行う。

1.4.4 地震検知による耐震安全性の確保

1.4.4.1 地震感知器

安全保護系の一つとして地震感知器を設け、ある程度以上の地震が起こった場合に原子炉を自動的に停止させる。スクラム設定値は弾性設計用地震動 S_d の加速度レベルに余裕を持たせた値とする。安全保護系は、フェイル・セーフ設備とするが、地震以外のショックによって原子炉をスクラムさせないよう配慮する。

地震感知器は、基盤の地震動をできるだけ直接的に検出するため建屋基礎版の位置、または主要な機器が設置されている代表的な床面に設置する。なお、設置に当たっては試験及び保守が可能な原子炉建屋の適切な場所に設置する。

1.4.4.2 地震観測等による耐震性の確認

発電用原子炉施設のうち安全上特に重要なものに対しては、地震観測網を適切に設置し、地震観測等による振動性状の把握を行い、それらの観測結果に基づく解析等により施設の機能に支障がないことを確認していくものとする。

地震観測を継続して実施するために、地震観測網の適切な維持管理を行う。

1.4.5 参考文献

- (1) 「静的地震力の見直し（建築編）に関する調査報告書（概要）」
（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 平成6年3月

第 1.4-1 表 クラス別施設

耐震重要度 分類	機能別分類	主要設備 注 1)		補助設備 注 2)		直接支持構造物 注 3)		間接支持構造物 注 4)		波及的影響を 考慮すべき施設 注 5)	
		適用範囲	耐震 クラス	適用範囲	耐震 クラス	適用範囲	耐震 クラス	適用範囲	検討用 地震動 注 6)	適用範囲	検討用 地震動 注 6)
Sクラス	(i) 「原子炉冷却材 圧力バウンダリ」 を構成する機器・ 配管系	・原子炉圧力容器 ・原子炉圧力容器バ ウンダリに属する 容器・配管・ポン プ・弁	S S	・隔離弁を閉とする に必要な電気及 び計装設備	S	・原子炉圧力容器支 持スカート ・機器・配管、電気 計装設備等の支 持構造物	S S	・原子炉本体の基礎 ・原子炉建屋 ・制御建屋	S s S s S s	・原子炉しゃへい壁 ・中央制御室天井照 明 ・タービン建屋 ・補助ボイラー建屋 ・1号炉制御建屋	S s S s S s S s S s
	(ii) 使用済燃料を貯 蔵するための施設	・使用済燃料プール ・使用済燃料貯蔵ラ ック	S S	—	—	・機器の支持構造物	S	・原子炉建屋	S s	・原子炉建屋クレー ン ・燃料交換機 ・タービン建屋	S s S s S s
	(iii) 原子炉の緊急停 止のために急激に 負の反応度を付加 するための設備及 び原子炉の停止状 態を維持するため の施設	・制御棒、制御棒駆 動機構及び制御 棒駆動水圧系(ス クラム機能に関 する部分)	S	・炉心支持構造物 ・電気計装設備 ・チャンネルボッ クス	S S S	・機器・配管、電気 計装設備等の支 持構造物	S	・原子炉建屋 ・制御建屋	S s S s	・中央制御室天井照 明 ・タービン建屋 ・補助ボイラー建屋 ・1号炉制御建屋	S s S s S s S s
	(iv) 原子炉停止後、 炉心から崩壊熱を 除去するための施 設	・原子炉隔離時冷却 系 ・高圧炉心スプレイ 系 ・残留熱除去系(停止 時冷却モード運 転に必要な設備) ・冷却水源としての サブプレッション チェンバ	S S S S	・当該施設の冷却系 (原子炉補機冷却 系) ・炉心支持構造物 ・非常用電源及び計 装設備(ディーゼ ル発電機及びそ の冷却系・補助施 設を含む) ・当該施設の機能維 持に必要な空調 設備	S S S S	・機器・配管、電気 計装設備等の支 持構造物	S	・原子炉建屋 ・海水ポンプ室 ・原子炉機器冷却海 水配管ダクト ・軽油タンク基礎 ・軽油タンク連絡ダ クト ・制御建屋	S s S s S s S s S s S s	・海水ポンプ室門型 クレーン ・竜巻防護ネット ・前面護岸 ・原子炉建屋クレー ン ・中央制御室天井照 明 ・タービン建屋 ・補助ボイラー建屋 ・1号炉制御建屋	S s S s S s S s S s S s S s

(つづき)

耐震重要度 分類	機能別分類	主要設備 注1)		補助設備 注2)		直接支持構造物 注3)		間接支持構造物 注4)		波及的影響を 考慮すべき施設 注5)	
		適用範囲	耐震 クラス	適用範囲	耐震 クラス	適用範囲	耐震 クラス	適用範囲	検討用 地震動 注6)	適用範囲	検討用 地震動 注6)
Sクラス	(v) 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故後、炉心から崩壊熱を除去するための施設	<ul style="list-style-type: none"> ・非常用炉心冷却系 1) 高压炉心スプレイ系 2) 低压炉心スプレイ系 3) 残留熱除去系(低压注水モード運転に必要な設備) 4) 自動減圧系 ・冷却水源としてのサブプレッションチェンバ 	S	<ul style="list-style-type: none"> ・当該施設の冷却系(原子炉補機冷却系) ・非常用電源及び計装設備(ディーゼル発電機及びその冷却系・補助施設を含む) ・中央制御室の遮蔽及び空調設備 ・当該施設の機能維持に必要な空調設備 	S	<ul style="list-style-type: none"> ・機器・配管、電気計装設備等の支持構造物 	S	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建屋 ・海水ポンプ室 ・原子炉機器冷却海水配管ダクト ・軽油タンク基礎 ・軽油タンク連絡ダクト ・制御建屋 	S s	<ul style="list-style-type: none"> ・海水ポンプ室門型クレーン ・竜巻防護ネット ・前面護岸 ・原子炉建屋クレーン ・中央制御室天井照明 ・タービン建屋 ・補助ボイラー建屋 ・1号炉制御建屋 	S s
	(vi) 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故の際に圧力障壁となり、放射性物質の拡散を直接防ぐための施設	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉格納容器 ・原子炉格納容器バウンダリに属する配管・弁 	S	<ul style="list-style-type: none"> ・隔離弁を閉とすることに必要な電気及び計装設備 	S	<ul style="list-style-type: none"> ・機器・配管、電気計装設備等の支持構造物 	S	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建屋 ・制御建屋 	S s	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉ウェルシャヘイプラグ ・中央制御室天井照明 ・タービン建屋 ・補助ボイラー建屋 ・1号炉制御建屋 	S s
	(vii) 放射性物質の放出を伴うような事故の際にその外部放散を抑制するための設備で上記(vi)以外の施設	<ul style="list-style-type: none"> ・残留熱除去系(格納容器スプレイ冷却モードの運転に必要な設備) ・可燃性ガス濃度制御系 ・原子炉建屋原子炉棟 ・非常用ガス処理系及び排気筒 ・原子炉格納容器圧力抑制装置(ベントヘッド、ダウンカム等) ・冷却水源としてのサブプレッションチェンバ 	S	<ul style="list-style-type: none"> ・当該施設の冷却系(原子炉補機冷却系) ・非常用電源及び計装設備(ディーゼル発電機及びその冷却系・補助施設を含む) ・当該施設の機能維持に必要な空調設備 	S	<ul style="list-style-type: none"> ・機器・配管、電気計装設備等の支持構造物 	S	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建屋 ・海水ポンプ室 ・原子炉機器冷却海水配管ダクト ・軽油タンク基礎 ・軽油タンク連絡ダクト ・排気筒連絡ダクト ・排気筒基礎 ・制御建屋 	S s	<ul style="list-style-type: none"> ・1号炉排気筒 ・海水ポンプ室門型クレーン ・竜巻防護ネット ・前面護岸 ・原子炉建屋クレーン ・中央制御室天井照明 ・タービン建屋 ・補助ボイラー建屋 ・1号炉制御建屋 	S s

(つづき)

耐震重要度 分類	機能別分類	主要設備 注1)		補助設備 注2)		直接支持構造物 注3)		間接支持構造物 注4)		波及的影響を 考慮すべき施設 注5)	
		適用範囲	耐震 クラス	適用範囲	耐震 クラス	適用範囲	耐震 クラス	適用範囲	検討用 地震動 注6)	適用範囲	検討用 地震動 注6)
Sクラス	(viii) 津波防護機能を有する設備及び浸水防止機能を有する設備	<ul style="list-style-type: none"> 防潮堤 防潮壁 取放水路流路縮小工 逆流防止設備 水密扉 浸水防止蓋 浸水防止壁 逆止弁付ファンネル 貫通部止水処置 	S S S S S S S S	—	—	<ul style="list-style-type: none"> 機器等の支持構造物 	S	<ul style="list-style-type: none"> 1号炉取水路 1号炉放水路 2号炉放水立坑防潮壁 3号炉海水熱交換器建屋 揚水井戸 2号炉海水ポンプ室 3号炉海水ポンプ室 	S s S s S s S s S s S s S s	<ul style="list-style-type: none"> 海水ポンプ室門型クレーン 竜巻防護ネット 3号炉取水路 北側排水路 アクセスルート タービン建屋 	S s S s S s S s S s
	(ix) 敷地における津波監視機能を有する施設	<ul style="list-style-type: none"> 津波監視カメラ 取水ピット水位計 	S S	<ul style="list-style-type: none"> 非常用電源及び計装設備(ディーゼル発電機及びその冷却系・補助施設を含む) 	S	<ul style="list-style-type: none"> 機器、配管、電気計装設備等の支持構造物 	S	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋 海水ポンプ室 原子炉機器冷却海水配管ダクト 軽油タンク基礎 軽油タンク連絡ダクト 制御建屋 	S s S s S s S s S s S s	<ul style="list-style-type: none"> 海水ポンプ室門型クレーン 竜巻防護ネット タービン建屋 中央制御室天井照明 補助ボイラー建屋 1号炉制御建屋 	S s S s S s S s S s S s
	(x) その他	<ul style="list-style-type: none"> 燃料プール水補給設備(残留熱除去系(燃料プール冷却運転に必要な設備)) ほう酸水注入系 注7) 圧力容器内部構造物 注8) 	S S S	<ul style="list-style-type: none"> 非常用電源及び計装設備(ディーゼル発電機及びその冷却系・補助施設を含む) 	S	<ul style="list-style-type: none"> 機器・配管、電気計装設備等の支持構造物 原子炉圧力容器 	S S	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋 海水ポンプ室 原子炉機器冷却海水配管ダクト 軽油タンク基礎 軽油タンク連絡ダクト 制御建屋 原子炉圧力容器ペDESTAL 	S s S s S s S s S s S s S s	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋クレーン 燃料交換機 原子炉しゃへい壁 ほう酸水注入系テスタタンク 中央制御室天井照明 海水ポンプ室門型クレーン 竜巻防護ネット 前面護岸 タービン建屋 補助ボイラー建屋 1号炉制御建屋 	S s S s S s S s S s S s S s S s S s

(つづき)

耐震重要度 分類	機能別分類	主要設備 注1)		補助設備 注2)		直接支持構造物 注3)		間接支持構造物 注4)	
		適用範囲	耐震 クラス	適用範囲	耐震 クラス	適用範囲	耐震 クラス	適用範囲	検討用 地震動 注6)
Bクラス	(i) 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	・主蒸気系(原子炉格納容器外側主蒸気隔離弁から主蒸気止め弁まで)	B 注9)	—	—	・機器・配管等の支持構造物	B 注9)	・原子炉建屋 ・タービン建屋(原子炉格納容器外側主蒸気隔離弁より主蒸気止め弁までの配管・弁を支持する部分)	S d S d
		・逃がし安全弁排気管	B 注10)	—	—	・機器・配管等の支持構造物	B 注10)	・原子炉建屋	S s
		・主蒸気系及び給水系 ・原子炉冷却材浄化系	B B			・機器・配管等の支持構造物	B	・原子炉建屋 ・タービン建屋	S _B S _B
	(ii) 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か又は貯蔵方式によりその破損によって公衆に与える放射線の影響が周辺監視区域外における年間の線量限度に比べ十分に小さいものは除く	・放射性廃棄物処理設備、ただし、Cクラスに属するものは除く	B	—	—	・機器・配管等の支持構造物	B	・原子炉建屋 ・タービン建屋 ・焼却炉建屋 ・サイトバンカ建屋	S _B S _B S _B S _B

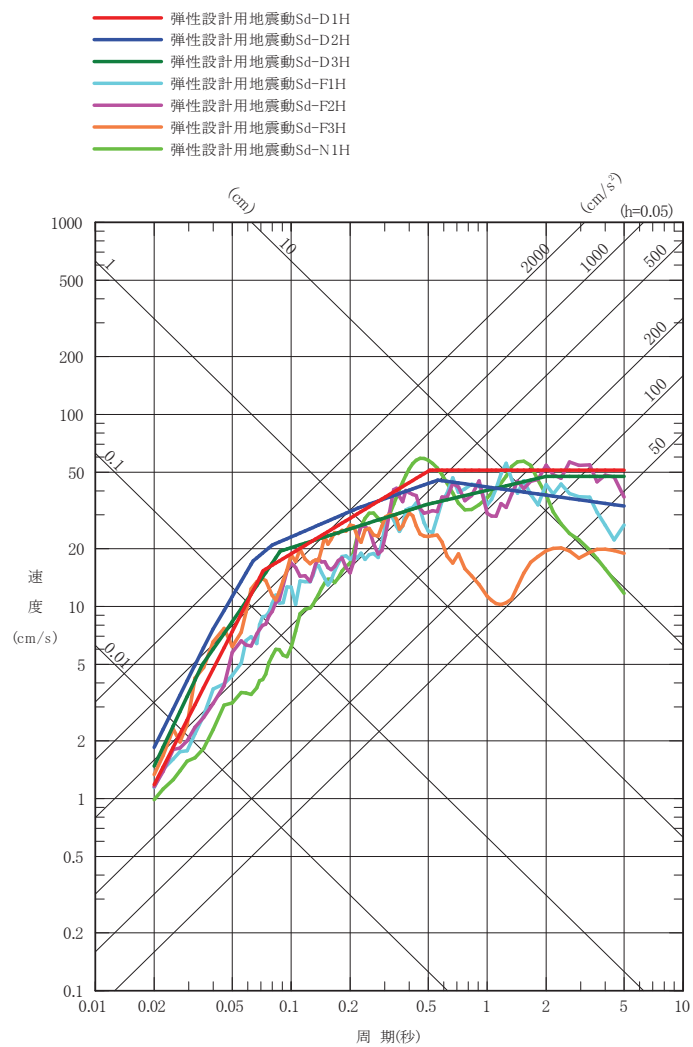
(つづき)

耐震重要度 分類	機能別分類	主要設備 注1)		補助設備 注2)		直接支持構造物 注3)		間接支持構造物 注4)	
		適用範囲	耐震 クラス	適用範囲	耐震 クラス	適用範囲	耐震 クラス	適用範囲	検討用 地震動 注6)
Bクラス	(iii) 放射性廃棄物以外の放射性物質に関連した施設で、その破損により公衆及び従業員に過大な放射線被ばくを与える可能性のある施設	<ul style="list-style-type: none"> ・蒸気タービン、湿分分離加熱器、主復水器、給水加熱器及びその主要配管 ・復水浄化系 ・復水貯蔵タンク ・燃料プール冷却浄化系 ・放射線低減効果の大きい遮蔽 ・制御棒駆動水圧系（放射性流体を内蔵する部分、ただし、スクラム機能に関するものを除く） ・原子炉建屋クレーン ・燃料取扱設備 ・制御棒貯蔵ラック 	B B B B B B B B	—	—	・機器・配管等の支持構造物	B	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建屋 ・タービン建屋 ・タービンペデスタル ・復水貯蔵タンク基礎 	S _B S _B S _B S _B
	(iv) 使用済燃料を冷却するための施設	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料プール冷却浄化系 	B	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉補機冷却系 ・電気計装設備 	B B	<ul style="list-style-type: none"> ・機器・配管、電気計装設備等の支持構造物 	B	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建屋 ・海水ポンプ室 ・原子炉機器冷却海水配管ダクト 	S _B S _B S _B
	(v) 放射性物質の放出を伴うような場合に、その外部放散を抑制するための施設で、耐震Sクラスに属さない施設	—	—	—	—	—	—	—	—

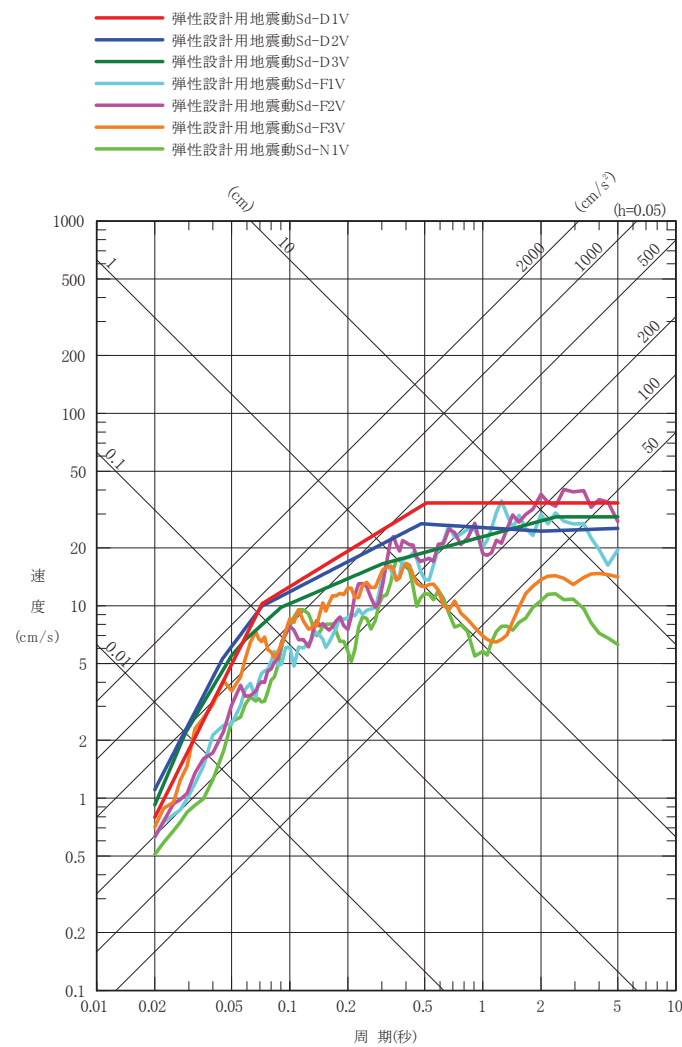
(つづき)

耐震重要度 分類	機能別分類	主要設備 注1)		補助設備 注2)		直接支持構造物 注3)		間接支持構造物 注4)	
		適用範囲	耐震 クラス	適用範囲	耐震 クラス	適用範囲	耐震 クラス	適用範囲	検討用 地震動 注6)
Cクラス	(i) 原子炉の反応度を抑制するための施設で耐震Sクラス及びBクラスに属さない施設	・原子炉再循環流量制御装置 ・制御棒駆動水圧系(Sクラス及びBクラスに属さない部分)	C C	—	—	・機器・配管, 電気計装設備等の支持構造物	C	・原子炉建屋 ・制御建屋	S _c S _c
	(ii) 放射性物質を内蔵しているか, 又はこれに関連した施設で耐震S及びBクラスに属さない施設	・試料採取系 ・固化装置より下流の固体廃棄物取扱い設備(貯蔵庫を含む) ・雑固体系 ・新燃料貯蔵設備 ・その他	C C C C C	—	—	・機器・配管等の支持構造物	C	・原子炉建屋 ・タービン建屋 ・焼却炉建屋 ・サイトバンカ建屋	S _c S _c S _c S _c
	(iii) 放射線安全に関係しない施設等	・地下水位低下設備	C 注11)	・電気計装設備	C 注11)	・機器・配管, 電気計装設備等の支持構造物	C 注11)	・原子炉建屋 ・制御建屋 ・当該施設に係る屋外コンクリート構造物	S _s S _s S _s
		・循環水系 ・タービン補機冷却系 ・補助ボイラ ・消火系 ・開閉所, 発電機, 変圧器 ・換気空調系(Sクラスの換気空調系以外のもの) ・タービン建屋クレーン ・圧縮空気系 ・その他	C C C C C C C C	—	—	・機器・配管, 電気計装設備等の支持構造物	C	・原子炉建屋 ・海水ポンプ室 ・タービン建屋 ・制御建屋 ・当該施設に係る屋外コンクリート構造物	S _c S _c S _c S _c S _c

- (注1) 主要設備とは、当該機能に直接的に関連する設備をいう。
- (注2) 補助設備とは、当該機能に間接的に関連し、主要設備の補助的役割を持つ設備をいう。
- (注3) 直接支持構造物とは、主要設備、補助設備に直接取り付けられる支持構造物、若しくはこれらの設備の荷重を直接的に受ける支持構造物をいう。
- (注4) 間接支持構造物とは、直接支持構造物から伝達される荷重を受ける構造物（建物・構築物）をいう。
- (注5) 波及的影響を考慮すべき施設とは、下位の耐震クラスに属するものの破損等によって上位の分類に属するものに波及的影響を及ぼすおそれのある施設をいう。
- (注6) S_s : 基準地震動 S_s により定まる地震力
 S_d : 弾性設計用地震動 S_d により定まる地震力
 S_B : Bクラス施設に適用される地震力
 S_C : Cクラス施設に適用される静的地震力
- (注7) ほう酸水注入系は、安全機能の重要度を考慮して、Sクラスに準じて取り扱う。
- (注8) 圧力容器内部構造物は、炉内にあることの重要度を考慮して、Sクラスに準じて取り扱う。
- (注9) Bクラスではあるが、弾性設計用地震動 S_d に対し破損しないことを確認する。
- (注10) 逃がし安全弁排気管については、基準地震動 S_s に対して破損しないことを確認することで、蒸気凝縮性能の信頼性を担保する。
- (注11) Cクラスではあるが、基準地震動 S_s に対し機能維持することを確認する。

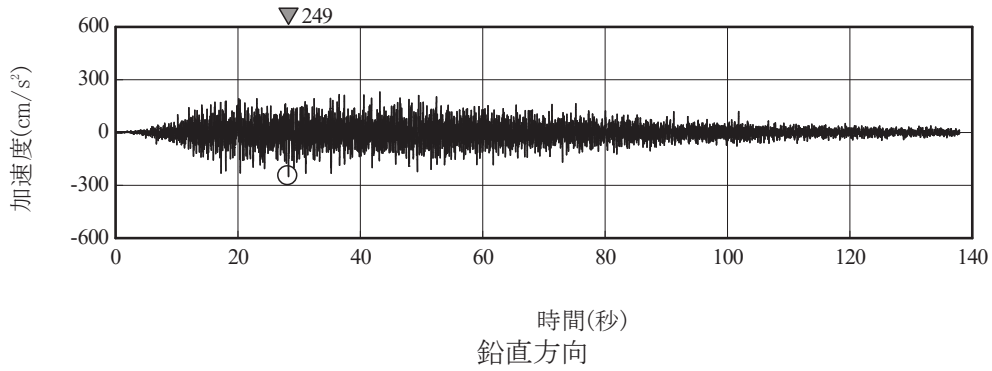
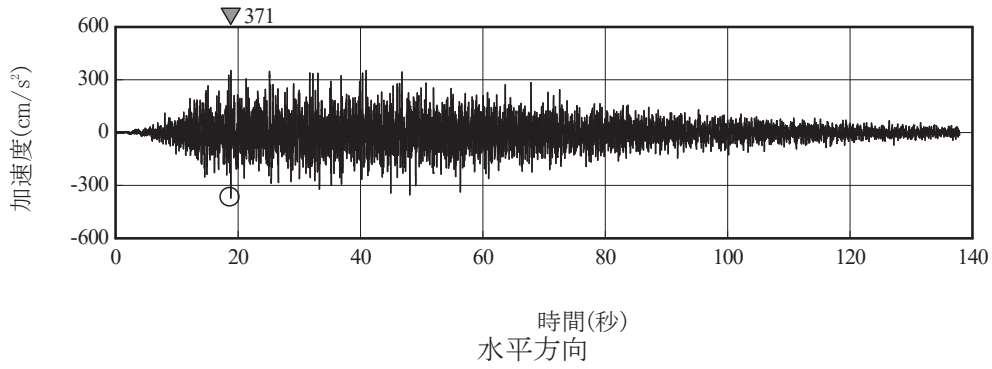


(a) 水平成分

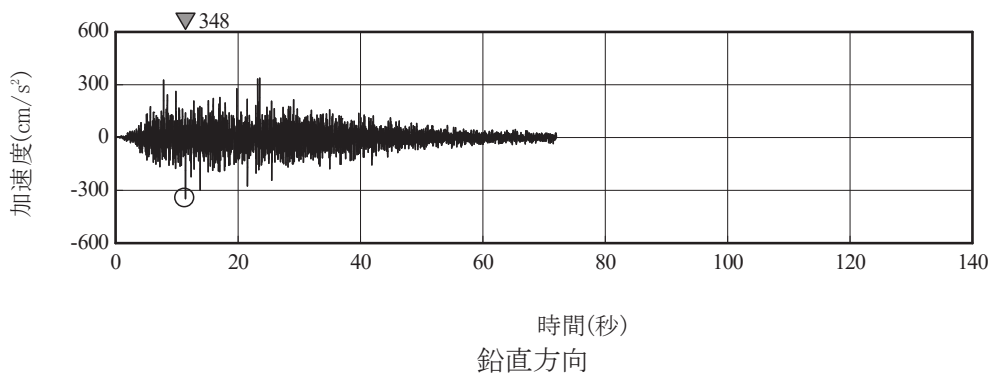
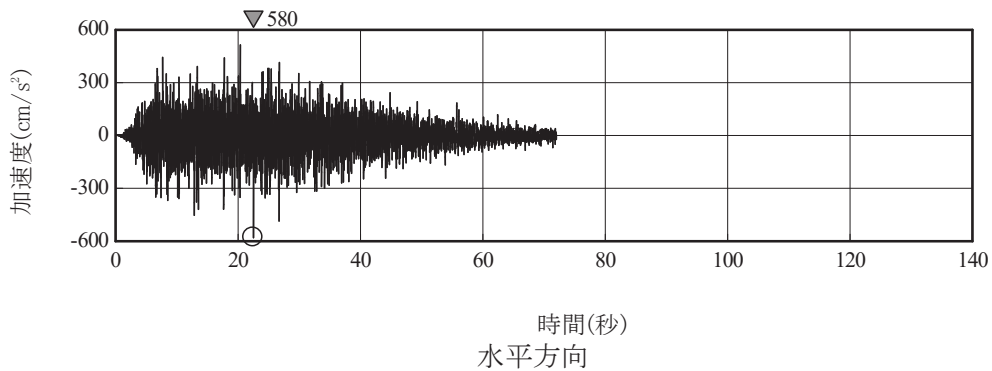


(b) 鉛直成分

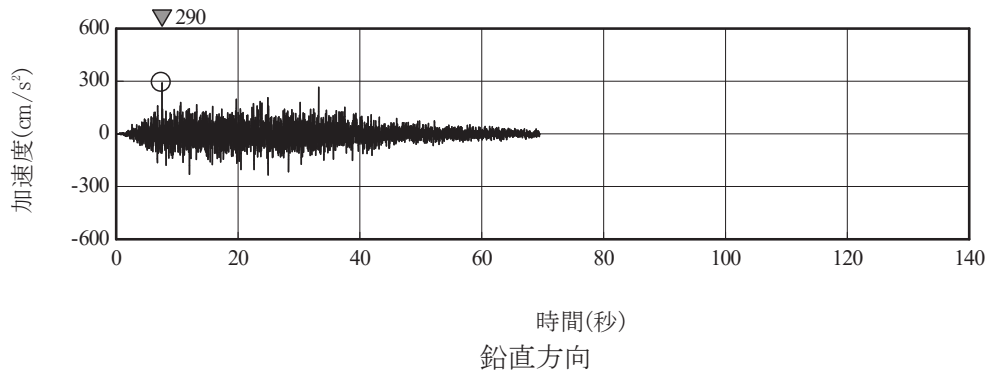
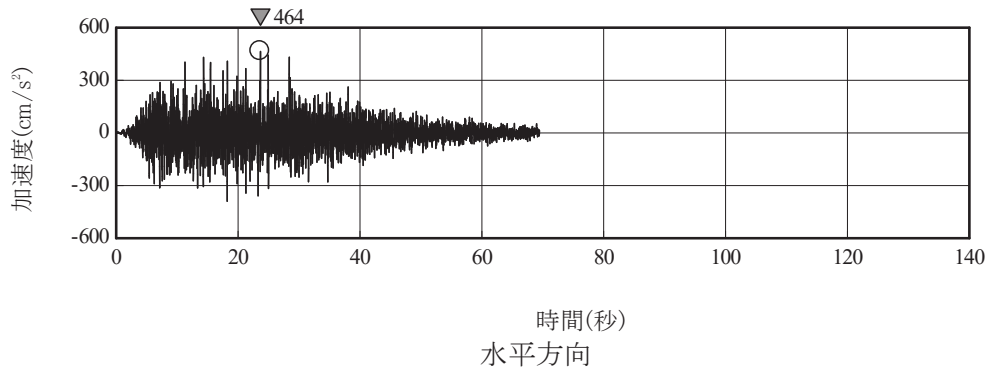
第1.3-1図 弾性設計用地震動 S d の応答スペクトル



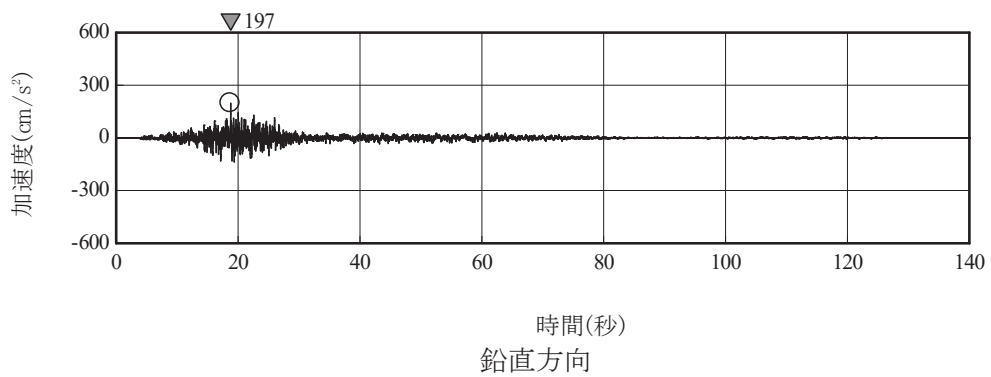
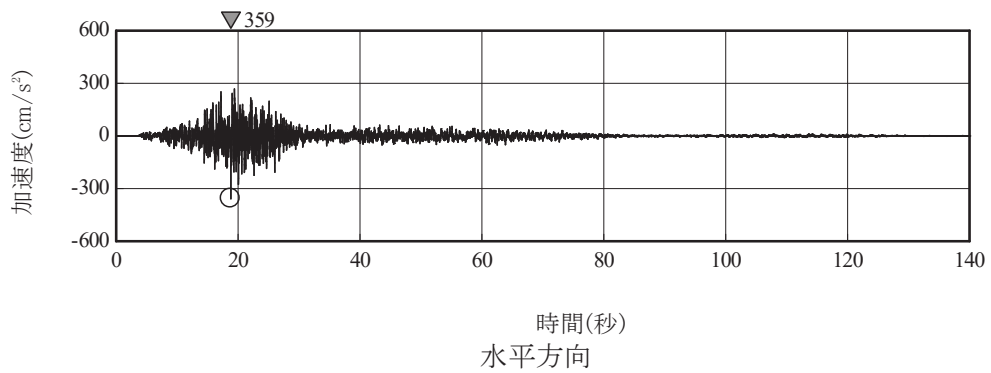
第 1. 4-2 図 弾性設計用地震動 S d - D 1 の加速度時刻歴波形



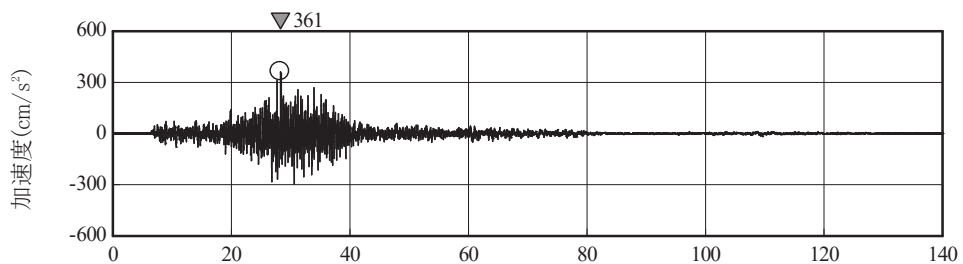
第 1. 4-3 図 弾性設計用地震動 S d - D 2 の加速度時刻歴波形



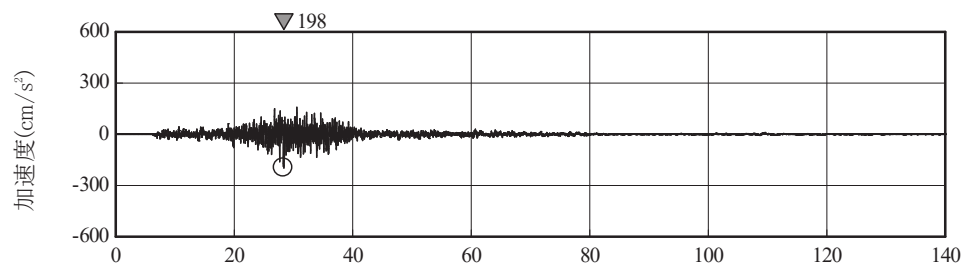
第 1. 4-4 図 弾性設計用地震動 S d - D 3 の加速度時刻歴波形



第 1. 4-5 図 弾性設計用地震動 S d - F 1 の加速度時刻歴波形

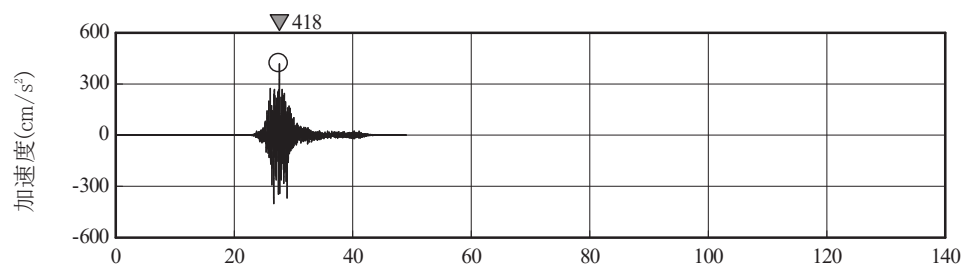


時間(秒)
水平方向

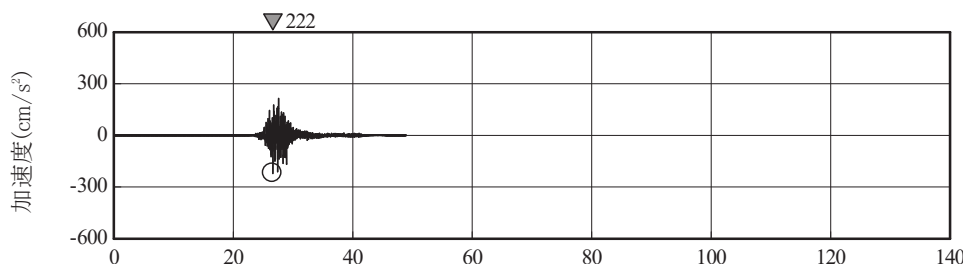


時間(秒)
鉛直方向

第 1. 4-6 図 弾性設計用地震動 S d - F 2 の加速度時刻歴波形

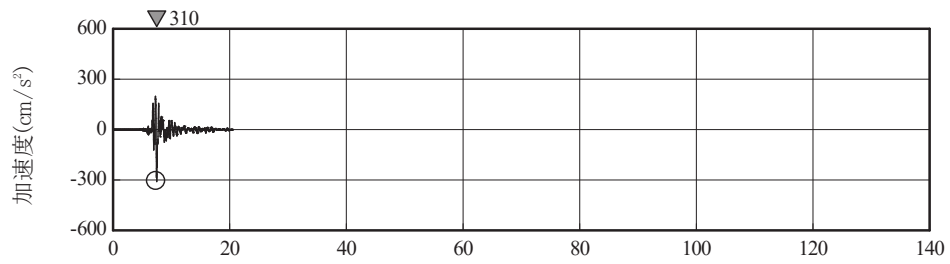


時間(秒)
水平方向

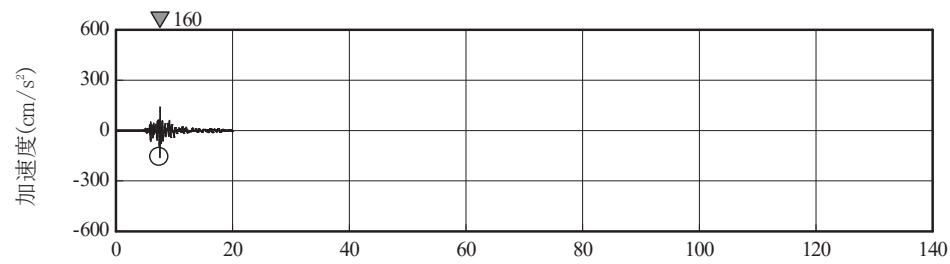


時間(秒)
鉛直方向

第 1. 4-7 図 弾性設計用地震動 S d - F 3 の加速度時刻歴波形

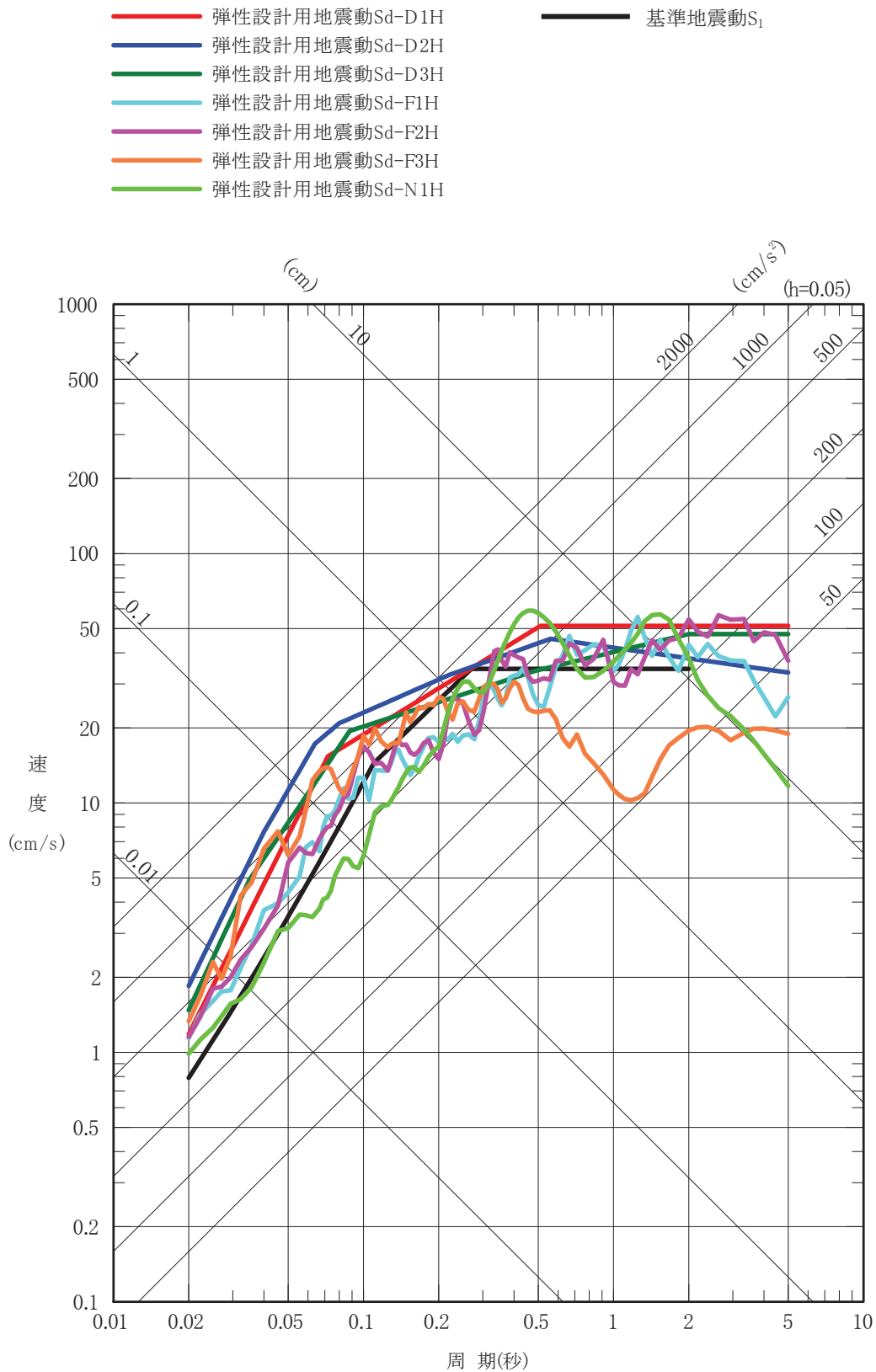


時間(秒)
水平方向



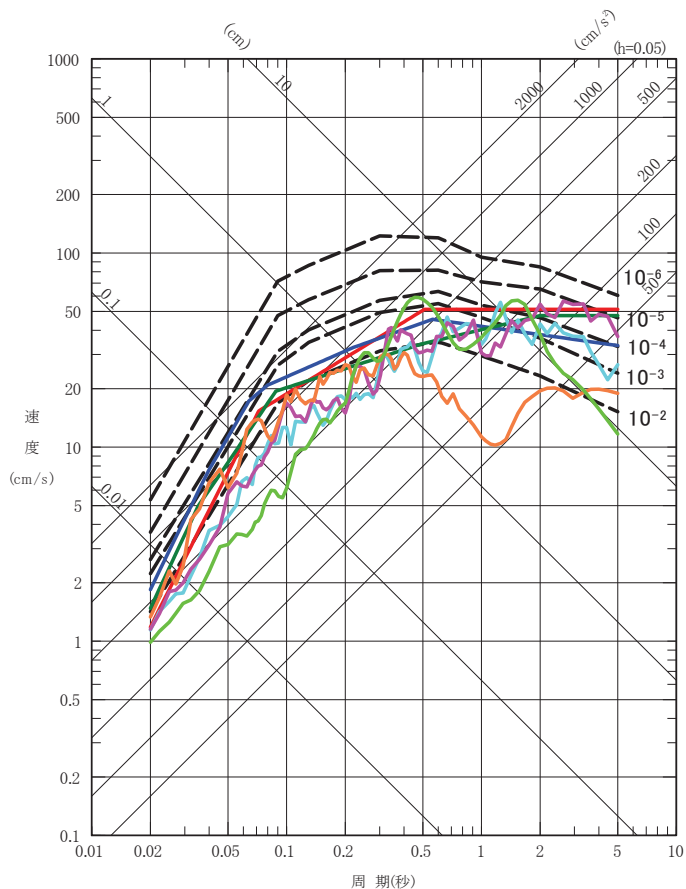
時間(秒)
鉛直方向

第 1. 4-8 図 弾性設計用地震動 S d - N 1 の加速度時刻歴波形



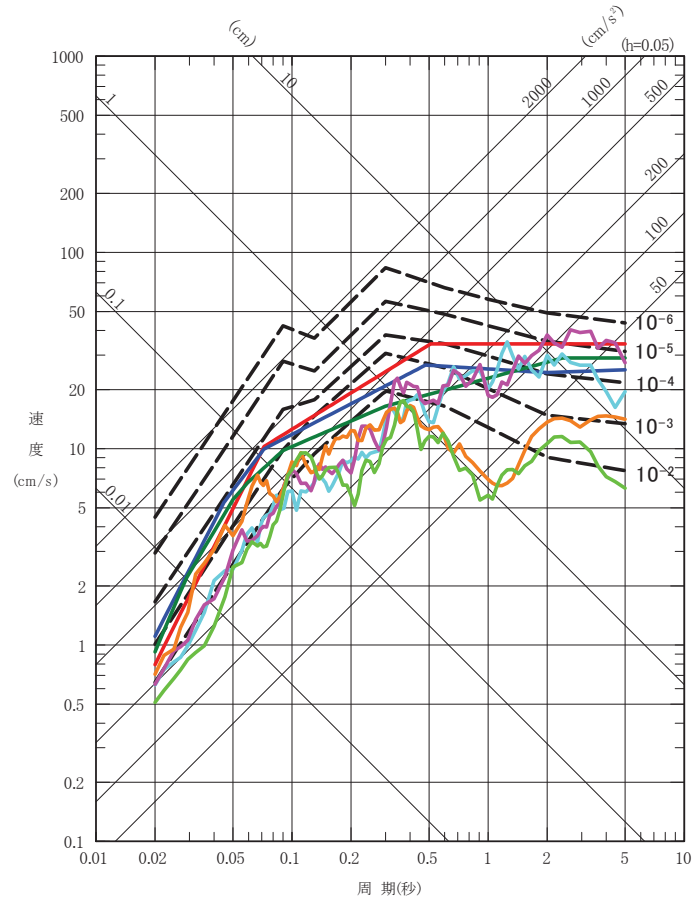
第 1.4-9 図 弹性設計用地震動 S d と基準地震動 S 1 の応答スペクトルの比較

- 弾性設計用地震動Sd-D1H
- 弾性設計用地震動Sd-D2H
- 弾性設計用地震動Sd-D3H
- 弾性設計用地震動Sd-F1H
- 弾性設計用地震動Sd-F2H
- 弾性設計用地震動Sd-F3H
- 弾性設計用地震動Sd-N1H
- 一様ハザードスペクトル



(a) 水平方向

- 弾性設計用地震動Sd-D1V
- 弾性設計用地震動Sd-D2V
- 弾性設計用地震動Sd-D3V
- 弾性設計用地震動Sd-F1V
- 弾性設計用地震動Sd-F2V
- 弾性設計用地震動Sd-F3V
- 弾性設計用地震動Sd-N1V
- 一様ハザードスペクトル



(b) 鉛直方向

第 1. 4-10 図 弾性設計用地震動 Sd の応答スペクトル及び解放基盤表面における地震動の一様ハザードスペクトル

(3) 適合性説明

(地震による損傷の防止)

第四条 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。

- 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。
- 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。
- 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。
- 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。

適合のための設計方針

1 について

設計基準対象施設は、耐震重要度分類をSクラス、Bクラス及びCクラスに分類し、それぞれに応じて設定した地震力に対しておおむね弾性範囲の設計を行う。

なお、耐震重要度分類及び地震力については、「2 について」に示すとおりである。

炉心内の燃料被覆管の放射性物質の閉じ込めの機能については、以下のとおり設計する。

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留まる設計とする。

【説明資料（1.1：P4条－53）】

2 について

設計基準対象施設は、地震により発生するおそれがある安全機能の喪失（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に応じて、以下のとおり、耐震重要度分類をSクラス、Bクラス又はCクラスに分類し、それぞれに応じた地震力を算定する。

【説明資料（2.1：P4条－56）】

(1) 耐震重要度分類

Sクラス：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。

【説明資料（2.1：P4条－56）】

Bクラス：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クラスの施設と比べ小さい施設。

【説明資料（2.1：P4条－56）】

Cクラス：Sクラスに属する施設及びBクラスに属する施設以外の一般産業施設又は公共施設と同等の安全性が要求される施設。

【説明資料（2.1：P4条－56）】

(2) 地震力

上記(1)のSクラスの施設（津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備を除く。），Bクラス及びCクラスの施設に適用する地震力は以下のとおり算定する。

なお，Sクラスの施設については，弾性設計用地震動 S_d 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適用する。

a. 静的地震力

静的地震力は，Sクラス，Bクラス及びCクラスの施設に適用することとし，それぞれの耐震重要度分類に応じて次の地震層せん断力係数 C_i 及び震度に基づき算定する。

(a) 建物・構築物

水平地震力は，地震層せん断力係数 C_i に，次に示す施設の耐震重要度分類に応じた係数を乗じ，さらに当該層以上の重量を乗じて算定する。

Sクラス 3.0

Bクラス 1.5

Cクラス 1.0

ここで，地震層せん断力係数 C_i は，標準せん断力係数 C_0 を0.2以上とし，建物・構築物の振動特性及び地盤の種類等を考慮して求められる値とする。

Sクラスの施設については，水平地震力と鉛直地震力が同時に不利な方向の組合せで作用するものとする。鉛直地震力は，震度0.3以上を基準とし，建物・構築物の振動特性及び地盤の種類等を考慮して求めた鉛直震度より算定するものとする。ただし，鉛直震度は高さ方向に一定とする。

(b) 機器・配管系

耐震重要度分類の各クラスの地震力は、上記(a)に示す地震層せん断力係数 C_i に施設の耐震重要度分類に応じた係数を乗じたものを水平震度とし、当該水平震度及び上記(a)の鉛直震度をそれぞれ 20%増しとした震度より求めるものとする。

なお、Sクラスの施設については、水平地震力と鉛直地震力は同時に不利な方向の組合せで作用するものとする。ただし、鉛直震度は高さ方向に一定とする。

【説明資料 (3.1(1) : P4 条-56)】

b. 弾性設計用地震動 S_d による地震力

弾性設計用地震動 S_d による地震力は、Sクラスの施設に適用する。

弾性設計用地震動 S_d は、添付書類六「5.地震」に示す基準地震動 S_s に工学的判断から求められる係数 0.5 又は 0.58 を乗じて設定する。

また、弾性設計用地震動 S_d による地震力は、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。

なお、Bクラスの施設のうち共振のおそれのある施設については、弾性設計用地震動 S_d を2分の1としたものによりその影響についての検討を行う。当該地震動による地震力は水平2方向及び鉛直方向について適切に組み合わせて算定するものとする。

【説明資料 (3.1(2) : P4 条-57)】

3 について

耐震重要施設（津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備は除く。）については、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地震動、すなわち添付書類六「5.地震」に示す基準地震動 S_s による地震力に対して、安全機能が損なわれない設計とする。

【説明資料 (1.1(5) : P4 条-53)】

また、屋外重要土木構造物、津波防護施設、津波防止設備及び津波監視設備並びに浸水防止設備又は津波監視設備が設置された建物・構築物については、基準地震動 S_s 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が保持できる設計とする。

【説明資料 (1.1(6) : P4 条-54)】

基準地震動 S_s による地震力は、基準地震動 S_s 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。

【説明資料 (1.1(5) : P4 条-53) (1.1(6) : P4 条-54)】

なお、耐震重要施設は、耐震重要度分類の下位のクラスに属する施設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。

【説明資料 (1.1(9) : P4 条-54)】

4 について

耐震重要施設については、基準地震動 S_s による地震力によって生ずるおそれがある斜面の崩壊に対して、その安全機能が損なわれるおそれがない場所に設置する。

【説明資料 (7(4) : P4 条-70)】

5 について

炉心内の燃料被覆管の放射性物質の閉じ込めの機能については、以下のとおり設計する。

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設計とする。

なお、燃料の機械設計においては、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対する設計方針を満足するように燃料要素の設計を行うが、上記の設計方針を満足させるための設計に当たっては、これらのうち燃料被覆管への地震力の影響を考慮すべき項目として、燃料被覆管応力及び累積疲労サイクルを評価項目とする。評価においては、内外圧力差による応力、熱応力、水力振動による応力、支持格子の接触圧による応力等の他、地震による応力を考慮し、設計疲労曲線としては、Langer and O' Donnell の曲線を使用する。

1.3 気象等
該当なし

1.4 設備等
該当なし

1.5 手順等
該当なし

第4条：地震による損傷の防止

<目次>

第2部

1. 耐震設計の基本方針
 - 1.1 基本方針
 - 1.2 適用規格
2. 耐震設計上の重要度分類
 - 2.1 重要度分類の基本方針
 - 2.2 耐震重要度分類
3. 設計用地震力
 - 3.1 地震力の算定法
 - 3.2 設計用地震力
4. 荷重の組合せと許容限界
 - 4.1 基本方針
5. 地震応答解析の方針
 - 5.1 建物・構築物
 - 5.2 機器・配管系
 - 5.3 屋外重要土木構造物
 - 5.4 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又は津波監視設備が設置された建物・構築物
6. 設計用減衰定数
7. 耐震重要施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響
8. 水平2方向及び鉛直方向の地震力の組合せに関する影響評価方針
9. 構造計画と配置計画

(別添)

- 別添－1 設計用地震力
- 別添－2 動的機能維持の評価
- 別添－3 弾性設計用地震動 S_d ・静的地震力による評価
- 別添－4 上位クラス施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響の検討について
- 別添－5 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価方針
- 別添－6 屋外重要土木構造物の耐震評価における断面選定の考え方
- 別添－7 主要建屋の構造概要及び解析モデルについて
- 別添－8 入力地震動について

第2部

1. 耐震設計の基本方針

1.1 基本方針

発電用原子炉施設の耐震設計は「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(平成25年6月28日原子力規制委員会規則第5号)」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(平成25年6月28日原子力規制委員会規則第6号)」に適合するよう以下の項目に従って行う。

- (1) 地震により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。)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に対して、その安全機能が損なわれるおそれがないように設計する。
- (2) 地震により発生するおそれがある安全機能の喪失(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。)に応じて、耐震重要度分類をSクラス、Bクラス又はCクラスに分類し、それぞれに応じた地震力に十分耐えられるように設計する。
- (3) 建物・構築物及び土木構造物(屋外重要土木構造物及びその他の土木構造物)については、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地盤に設置する。
- (4) Sクラスの施設((6)に記載のもののうち、津波防護機能を有する設備(以下「津波防護設備」という。)、浸水防止機能を有する設備(以下「浸水防止設備」という。)及び敷地における津波監視機能を有する施設(以下「津波監視設備」という。)を除く。)について、静的地震力は、水平地震力と鉛直地震力が同時に不利な方向の組合せで作用するものとする。
- (5) Sクラスの施設((6)に記載のもののうち、津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備を除く。)は、基準地震動 S_s による地震力に対してその安全機能が保持できる設計とする。建物・構築物については、構造物全体としての変形能力(終局耐力時の変形)に対して十分な余裕を有するように、機器・配管系については、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、その施設の機能を保持できるように設計する。

また、弾性設計用地震動 S_d 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に対しておおむね弾性状態に留まる範囲で耐えられる設計とする。

- (6) 屋外重要土木構造物、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又は津波監視設備が設置された建物・構築物は、基準地震動 S_s による地震力に対して、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、それぞれの施設に要求される機能が保持できる

設計とする。

屋外重要土木構造物は、構造部材の曲げについては限界層間変形角又は許容応力度等、構造部材のせん断についてはせん断耐力又は許容応力度等に対して妥当な安全余裕を持たせることとする。3次元静的材料非線形解析により評価を行うもの等、ひずみを許容値とする場合は、構造物の要求機能に応じた許容値に対し妥当な安全余裕を持たせることとする。

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又は津波監視設備が設置された建物・構築物については、(5)に示す基準地震動 S_s に対する設計方針を適用する。基準地震動 S_s による地震力は、水平2方向及び鉛直方向について適切に組み合わせて算定するものとする。

また、重大事故等対処施設を津波から防護するための津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備並びに浸水防止設備又は津波監視設備が設置された建物・構築物についても同様の設計方針とする。

- (7) Bクラスの施設は、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られるように設計する。

また、共振のおそれのある施設については、その影響についての検討を行う。その場合、検討に用いる地震動は、弾性設計用地震動 S_d を2分の1としたものとする。なお、当該地震動による地震力は、水平2方向及び鉛直方向について適切に組み合わせて算定するものとし、Sクラス施設と同様に許容限界の範囲内に留まることを確認する。

- (8) Cクラスの施設は、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られるように設計する。
- (9) 耐震重要施設は、耐震重要度分類の下位のクラスに属するもの(資機材等含む)の波及的影響によって、その安全機能を損なわない設計とする。
- (10) 設計基準対象施設の構造計画及び配置計画に際しては、地震の影響が低減されるように考慮する。
- (11) 設計基準対象施設は、発電用原子炉施設周辺の地下水位を一定範囲に保持し揚圧力影響を低減するために設置する地下水位低下設備の機能を考慮して、その機能が保持できるよう設計する。

また、液状化影響の検討に当っては、揚圧力影響を低減するために設置する地下水位低下設備の機能を考慮した設計用地下水位を設定するとともに、耐震重要施設は、周辺地盤の液状化による地盤変状を考慮した場合でも、その機能が損なわれないよう所要の対策を講じる。

- (12) 炉心内の燃料被覆管の放射性物質の閉じ込めの機能については、以下のとおり設計する。

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留まるように設計する。

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に影響を及

ばさないように設計する。

1.2 適用規格

適用する規格としては、既往工認で適用実績のある規格のほか、最新の規格基準についても技術的妥当性及び適用性を示したうえで適用可能とする。

既往工認で実績のある規格を以下に示す。

- ・原子力発電所耐震設計技術指針(重要度分類・許容応力編 JEAG4601・補-1984)
(日本電気協会 電気技術基準調査委員会 昭和 59 年 9 月)
 - ・原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG4601-1987) (日本電気協会 電気技術基準調査委員会 昭和 62 年 8 月)
 - ・原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG4601-1991 追補版) (日本電気協会 電気技術基準調査委員会 平成 3 年 12 月)
- (以降、「JEAG4601」と記載しているものは上記 3 指針を指す。)
- ・建築基準法・同施行令
 - ・鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 ((社) 日本建築学会 1999 改定)
 - ・原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 ((社) 日本建築学会 2005 制定)
 - ・鋼構造設計規準 - 許容応力度設計法 - ((社) 日本建築学会 2005 改定)
 - ・鉄骨鉄筋コンクリート構造設計規準・同解説 - 許容応力度設計と保有水平耐力 - ((社) 日本建築学会, 2001 改定)
 - ・塔状鋼構造設計指針・同解説 ((社) 日本建築学会, 1980 制定)
 - ・建築耐震設計における保有耐力と変形性能 ((社) 日本建築学会, 1990 改定)
 - ・建築基礎構造設計指針 ((社) 日本建築学会 2001 改定)
 - ・各種合成構造設計指針・同解説 ((社) 日本建築学会 2010)
 - ・発電用原子力設備規格 設計・建設規格 ((社) 日本機械学会, 2005/2007)
 - ・発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格 ((社) 日本機械学会 2003)
 - ・コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] ((社) 土木学会, 2002 年制定)
 - ・道路橋示方書 (I 共通編・IV 下部構造編)・同解説 ((社) 日本道路協会, 平成 14 年 3 月)
 - ・道路橋示方書 (V 耐震設計編)・同解説 ((社) 日本道路協会, 平成 14 年 3 月)
 - ・水道施設耐震工法指針・解説 ((社) 日本水道協会, 1997 年版)
 - ・地盤工学会基準 (JGS 1521-2003) 地盤の平板載荷試験方法
 - ・地盤工学会基準 (JGS 3521-2004) 剛体載荷板による岩盤の平板載荷試験方法

ただし、JEAG4601 に記載されている A s クラスを含む A クラスの施設を S クラスの施設と、基準地震動 S 2, S 1 をそれぞれ基準地震動 S s, 弾性設計用地震動 S d と読み替える。

また、「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」(昭和 55 年通商産業省告

示第 501 号，最終改正平成 15 年 7 月 29 日経済産業省告示第 277 号) に関する内容については，「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 I 編 軽水炉規格) JSME S NC1-2005/2007)」(日本機械学会 2007 年 9 月) に従うものとする。

2. 耐震設計上の重要度分類

2.1 重要度分類の基本方針

設計基準対象施設の耐震設計上の重要度を次のように分類する。

(1) Sクラスの施設

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，その影響が大きい施設

(2) Bクラスの施設

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クラスの施設と比べ小さい施設

(3) Cクラスの施設

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

2.2 耐震重要度分類

耐震重要度分類について第 1 部第 1.4-1 表に示す。なお，同表には当該施設を支持する構造物の支持機能が維持されることを確認する地震動及び波及的影響を考慮すべき施設に適用する地震動についても併記する。

3. 設計用地震力

3.1 地震力の算定法

耐震設計に用いる地震力の算定は以下の方法による。

(1) 静的地震力

静的地震力は，Sクラス施設（津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備を除く。），Bクラス及びCクラスの施設に適用することとし，それぞれ耐震重要度分類に応じて，以下の地震層せん断力係数 C_i 及び震度に基づき算定する。

a. 建物・構築物

水平地震力は，地震層せん断力係数 C_i に，次に示す施設の耐震重要度分類

に応じた係数を乗じ、さらに当該層以上の重量を乗じて算定するものとする。

Sクラス 3.0

Bクラス 1.5

Cクラス 1.0

ここで、地震層せん断力係数 C_i は、標準せん断力係数 C_0 を0.2以上とし、建物・構築物の振動特性及び地盤の種類等を考慮して求められる値とする。

また、必要保有水平耐力の算定においては、地震層せん断力係数 C_i に乘じる施設の耐震重要度分類に応じた係数は、Sクラス、Bクラス、Cクラスともに1.0とし、その際に用いる標準せん断力係数 C_0 は1.0以上とする。

Sクラスの施設については、水平地震力と鉛直地震力が同時に不利な方向の組合せで作用するものとする。鉛直地震力は、震度0.3以上を基準とし、建物・構築物の振動特性及び地盤の種類等を考慮し、高さ方向に一定として求めた鉛直震度より算定するものとする。

b. 機器・配管系

静的地震力は、上記 a. に示す地震層せん断力係数 C_i に施設の耐震重要度分類に応じた係数を乗じたものを水平震度として、当該水平震度及び上記 a. の鉛直震度をそれぞれ20%増しとした震度より求めるものとする。

Sクラスの施設については、水平地震力と鉛直地震力は同時に不利な方向の組合せで作用するものとする。ただし、鉛直震度は高さ方向に一定とする。

c. 土木構造物（屋外重要土木構造物及びその他の土木構造物）

土木構造物の静的地震力は、JEAG4601の規定を参考に、Cクラスの建物・構築物に適用される静的地震力を考慮する。

上記 a. 及び b. 並びに c. の標準せん断力係数 C_0 等の割増し係数は、耐震性向上の観点から、一般産業施設及び公共施設等の耐震基準との関係を考慮して設定する。

(2) 動的地震力

動的地震力は、Sクラスの施設、屋外重要土木構造物及びBクラスの施設のうち共振のおそれのある施設に適用する。Sクラスの施設（津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備を除く。）については、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d から定める入力地震動を適用する。

基準地震動 S_s は、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」について、解放基盤表面における水平方向及び鉛直方向の地震動としてそれぞれ策定した。

また、弾性設計用地震動 S_d は、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を下回らないように基準地震動 S_s に係数を乗じて設定する。ここで、係数は工学的判断として、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、さらに、「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）」における 2 号炉の基準地震動 S 1 の応答スペクトルをおおむね下回らないよう配慮した値とする。具体的には、S_s-F 1～F 3 および S_s-N 1 は係数 0.5 を乗じた地震動、応答スペクトルに基づく地震動評価による基準地震動 S_s-D 1～D 3 に対しては更に余裕を見込み、係数 0.58 を乗じた地震動を弾性設計用地震動 S_d として設定する。また、建物・構築物及び機器・配管系ともに係数 0.5 又は 0.58 を採用することで、弾性設計用地震動 S_d に対する設計に一貫性をとる。

B クラスの施設のうち共振のおそれのあるものについては、弾性設計用地震動 S_d から定める入力地震動の振幅を 2 分の 1 としたものによる地震力を適用する。

屋外重要土木構造物、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又は津波監視設備が設置された建物・構築物については、基準地震動 S_s による地震力を適用する。

動的解析においては、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。

3.2 設計用地震力

設計用地震力について別添－1 に示す。

4. 荷重の組合せと許容限界

4.1 基本方針

耐震設計における荷重の組合せと許容限界は以下による。

(1) 耐震設計上考慮する状態

地震以外に設計上考慮する状態を以下に示す。

a. 建物・構築物

以下の(a)～(c)の状態を考慮する。

(a) 運転時の状態

発電用原子炉施設が運転状態にあり、通常自然条件下におかれている状態。ただし、運転状態には通常運転時、運転時の異常な過渡変化時を含むものとする。

(b) 設計基準事故時の状態

発電用原子炉施設が設計基準事故時にある状態。

(c) 設計用自然条件

設計上基本的に考慮しなければならない自然条件（積雪、風等）。

b. 機器・配管系

以下の(a)～(d)の状態を考慮する。

(a) 通常運転時の状態

発電用原子炉の起動、停止、出力運転、高温待機及び燃料取替等が計画的又は頻繁に行われた場合、運転条件が所定の制限値内にある運転状態

(b) 運転時の異常な過渡変化時の状態

通常運転時に予想される機械又は器具の単一の故障若しくはその誤作動又は運転員の単一の誤操作及びこれらと類似の頻度で発生すると予想される外乱によって発生する異常な状態であって、当該状態が継続した場合には炉心又は原子炉冷却材圧力バウンダリの著しい損傷が生ずるおそれがあるものとして安全設計上想定すべき事象が発生した状態

(c) 設計基準事故時の状態

発生頻度が運転時の異常な過渡変化時より低い異常な状態であって、当該状態が発生した場合には発電用原子炉施設から多量の放射性物質が放出するおそれがあるものとして安全設計上想定すべき事象が発生した状態

(d) 設計用自然条件

設計上基本的に考慮しなければならない自然条件（積雪、風等）

c. 土木構造物

以下の(a)～(c)の状態を考慮する。

(a) 運転時の状態

発電用原子炉施設が運転状態にあり、通常 of 自然条件下におかれている状態。
ただし、運転状態には通常運転時、運転時の異常な過渡変化時を含むものとする。

(b) 設計基準事故時の状態

発電用原子炉施設が設計基準事故時にある状態

(c) 設計用自然条件

設計上基本的に考慮しなければならない自然条件（積雪、風等）

(2) 荷重の種類

a. 建物・構築物

以下の(a)～(d)の荷重とする。

(a) 発電用原子炉のおかれている状態に係らず常時作用している荷重、すなわち固定荷重、積載荷重、土圧、水圧及び通常 of 気象条件による荷重

(b) 運転時の状態で施設に作用する荷重

(c) 設計基準事故時の状態で施設に作用する荷重

(d) 地震力、風荷重、積雪荷重等

ただし、運転時、設計基準事故時の荷重には、機器・配管系から作用する荷重が含まれるものとし、地震力には、地震時土圧、機器・配管系からの反力、

スロッシング等による荷重が含まれるものとする。

b. 機器・配管系

以下の(a)～(d)の荷重とする。

- (a) 通常運転時の状態で施設に作用する荷重
- (b) 運転時の異常な過渡変化時の状態で施設に作用する荷重
- (c) 設計基準事故時の状態で施設に作用する荷重
- (d) 地震力，風荷重，積雪荷重等

ただし，地震力にはスロッシング等による荷重が含まれるものとする。

c. 土木構造物

以下の(a)～(d)の荷重とする。

- (a) 原子炉のおかれている状態に係らず常時作用している荷重，すなわち固定荷重，積載荷重，土圧，水圧及び通常的气象条件による荷重
- (b) 運転時の状態で施設に作用する荷重
- (c) 設計基準事故時の状態で施設に作用する荷重
- (d) 地震力，風荷重，積雪荷重等

ただし，運転時，設計基準事故時の荷重には，機器・配管系から作用する荷重が含まれるものとし，地震力には，地震時土圧，機器・配管系からの反力，スロッシング等による荷重が含まれるものとする。

(3) 荷重の組合せ

(2)に定めた地震力とほかの荷重との組合せは以下による。

a. 建物・構築物 (d. に記載のものを除く。)

- (a) Sクラスの建物・構築物については，常時作用している荷重及び運転時（通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時）に施設に作用する荷重と地震力とを組み合わせる。
- (b) Sクラスの建物・構築物については，常時作用している荷重及び設計基準事故時の状態で施設に作用する荷重のうちの長時間その作用が続く荷重と弾性設計用地震動 S_d による地震力又は静的地震力を組み合わせる。
- (c) Bクラス及びCクラスの建物・構築物については，常時作用している荷重及び運転時の状態で施設に作用する荷重と動的地震力又は静的地震力とを組み合わせる。

b. 機器・配管系 (d. に記載のものを除く。)

- (a) Sクラスの機器・配管系については，通常運転時の状態で作用する荷重と地震力とを組み合わせる。
- (b) Sクラスの機器・配管系については，運転時の異常な過渡変化時の状態及び設計基準事故時の状態のうち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と地震力とを組み合わせる。

- (c) Sクラスの機器・配管系については、運転時の異常な過渡変化時の状態及び設計基準事故時の状態のうち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年超過確率の関係を踏まえ、適切な地震力と組み合わせる。
- (d) Bクラス及びCクラスの機器・配管系については、通常運転時の状態で作用する荷重及び運転時の異常な過渡変化時の状態で作用する荷重と動的地震力又は静的地震力を組み合わせる。
- (e) 炉心内の燃料被覆管の放射性物質の閉じ込めの機能の確認においては、通常運転時の状態で燃料被覆管に作用する荷重及び運転時の異常な過渡変化時の状態のうち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燃料被覆管に作用する荷重と地震力を組み合わせる。

c. 土木構造物

- (a) 屋外重要土木構造物については、常時作用している荷重及び運転時（通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時）の状態に施設に作用する荷重と地震力とを組み合わせる。
- (b) その他の土木構造物については、常時作用している荷重及び運転時の状態に施設に作用する荷重と静的地震力を組み合わせる。

d. 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又は津波監視設備が設置された建物・構築物

- (a) 津波防護施設及び浸水防止設備又は津波監視設備が設置された建物・構築物については、常時作用している荷重及び運転時の状態に作用する荷重と基準地震動 S_s による地震力を組み合わせる。
- (b) 浸水防止設備及び津波監視設備については、常時作用している荷重及び運転時の状態に作用する荷重等と基準地震動 S_s による地震力を組み合わせる。

なお、上記 d. (a), (b)については、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 S_s による地震力と津波による荷重の組合せを考慮する。また、津波以外による荷重については、前記(2)「荷重の種類」に準じるものとする。

e. 荷重の組合せ上の留意事項

- (a) 動的地震力については、水平2方向と鉛直方向の地震力とを適切に組み合わせ、算定するものとする。
- (b) ある荷重の組合せ状態での評価が明らかに厳しい場合には、その妥当性を示した上で、その他の荷重の組合せ状態での評価は行わないことがある。
- (c) 複数の荷重が同時に作用する場合、それらの荷重による応力の各ピークの生起時刻に明らかになずれがある場合には、その妥当性を示した上で、必ずしもそ

それぞれの応力のピーク値を重ねなくてよいものとする。

- (d) 上位の耐震クラスの施設を支持する建物・構築物等の当該部分の支持機能を確認する場合においては、支持される施設の耐震重要度分類に応じた地震力と常時作用している荷重、運転時の状態で施設に作用する荷重及びその他必要な荷重とを組み合わせる。

第1部第1.4-1表に対象となる建物・構築物及びその支持性能が維持されていることを検討すべき地震動等について記載する。

- (e) 地震と組み合わせる自然現象として、風及び積雪を考慮し、風荷重及び積雪荷重については、施設の設置場所、構造等を考慮して、地震荷重と組み合わせる。

(4) 許容限界

各施設の地震力と他の荷重とを組み合わせた状態に対する許容限界は以下のとおりとし、JEAG4601等の安全上適切と認められる規格及び基準又は試験等で妥当性が確認されている値を用いる。

- a. 建物・構築物（d.に記載のもののうち、津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備を除く。）

(a) Sクラスの建物・構築物

- イ. 弾性設計用地震動 S_d による地震力又は静的地震力との組合せに対する許容限界

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。

ただし、冷却材喪失事故時に作用する荷重との組合せ（原子炉格納容器バウンダリ及び非常用炉心冷却設備等における長期的荷重との組合せを除く。）に対しては、下記ロ.に示す許容限界を適用する。

- ロ. 基準地震動 S_s による地震力との組合せに対する許容限界

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、終局耐力に対し妥当な安全余裕を持たせることとする（評価項目はせん断ひずみ、応力等）。なお、終局耐力は、建物・構築物に対する荷重又は応力を漸次増大していくとき、その変形又はひずみが著しく増加するに至る限界の最大耐力とし、既往の実験式等に基づき適切に定めるものとする。

- (b) Bクラス及びCクラスの建物・構築物

上記(a)イ.の許容応力度を許容限界とする。

- (c) 耐震重要度の異なる施設を支持する建物・構築物

上記(a)ロ.の項を適用するほか、耐震重要度の異なる施設がそれを支持する建物・構築物の変形等に対して、その支持機能を損なわないものとする。なお、

当該施設を支持する建物・構築物の支持機能が維持されることを確認する際の地震動は、支持される施設に適用される地震動とする。

(d) 建物・構築物の保有水平耐力

建物・構築物については、当該建物・構築物の保有水平耐力が必要保有水平耐力に対して、耐震重要度に応じた適切な安全余裕を有していることを確認する。

b. 機器・配管系 (d. に記載のものを除く。)

(a) Sクラスの機器・配管系

イ. 弾性設計用地震動 S_d による地震力又は静的地震力との組合せに対する許容限界

応答が全体的におおむね弾性状態に留まるものとする (評価項目は応力等)。

ただし、冷却材喪失事故時に作用する荷重との組合せ (原子炉格納容器バウンダリ及び非常用炉心冷却設備等における長期的荷重との組合せを除く。) に対しては、下記(a)ロ. に示す許容限界を適用する。

ロ. 基準地震動 S_s による地震力との組合せに対する許容限界

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すことがないように応力、荷重等を制限する。

また、地震時又は地震後に動的機能が要求される機器等については、基準地震動 S_s による応答に対して、実証試験等により確認されている機能確認済加速度等を許容限界とする。動的機能維持の評価については別添-2に示す。

(b) Bクラス及びCクラスの機器・配管系

応答が全体的におおむね弾性状態に留まることとする (評価項目は応力等)。

(c) チャンネルボックス

地震時に作用する荷重に対して、燃料集合体の冷却材流路を維持できること及び過大な変形や破損を生ずることにより制御棒の挿入が阻害されることがないことを確認する。

(d) 燃料被覆管

炉心内の燃料被覆管の放射性物質の閉じ込めの機能についての許容限界は、以下のとおりとする。

イ. 弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力との組合せに対する許容限界

応答が全体的におおむね弾性状態に留まることとする。

ロ. 基準地震動による地震力との組合せに対する許容限界

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

さないこととする。

c. 土木構造物

(a) 屋外重要土木構造物

イ. 静的地震力との組合せに対する許容限界

安全上適切と認められる規格及び基準による許容値を許容限界とする。

ロ. 基準地震動 S_s による地震力との組合せに対する許容限界

構造部材の曲げについては限界層間変形角又は許容応力度等、構造部材のせん断についてはせん断耐力又は許容応力度等に対して妥当な安全余裕を持たせることとする。3次元静的材料非線形解析により評価を行うもの等、ひずみを許容値とする場合は、構造物の要求機能に応じた許容値に対し妥当な安全余裕を持たせることとする。

(b) その他の土木構造物

安全上適切と認められる規格及び基準による許容値を許容限界とする。

d. 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又は津波監視設備が設置された建物・構築物

津波防護施設及び浸水防止設備又は津波監視設備が設置された建物・構築物については、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）及び安定性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、浸水防止機能及び津波監視機能）が保持できるものとする（評価項目はせん断ひずみ、応力等）。

浸水防止設備及び津波監視設備については、その施設に要求される機能（浸水防止機能及び津波監視機能）が保持できるものとする。

e. 基礎地盤の支持性能

(a) Sクラスの建物・構築物、Sクラスの機器・配管系（(b)に記載のものうち、津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備を除く。）の基礎地盤

イ. 基準地震動 S_s による地震力との組合せに対する許容限界

接地圧が、安全上適切と認められる規格及び基準による地盤の極限支持力度に対して妥当な余裕を有することを確認する。

ロ. 弾性設計用地震動 S_d による地震力又は静的地震力との組合せに対する許容限界

接地圧に対して、安全上適切と認められる規格及び基準による地盤の短期許容支持力度を許容限界とする。

(b) 屋外重要土木構造物、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又は津波監視設備が設置された建物・構築物の基礎地盤

イ. 基準地震動 S_s による地震力との組合せに対する許容限界

接地圧が、安全上適切と認められる規格及び基準等による地盤の極限支持

力度に対して妥当な余裕を有することを確認する。

- (c) Bクラス及びCクラスの建物・構築物、Bクラス及びCクラスの機器・配管系及びその他の土木建造物の基礎地盤

上記(a)ロ.による許容支持力度を許容限界とする。

5. 地震応答解析の方針

5.1 建物・構築物

(1) 入力地震動

建物・構築物の動的解析モデルに対する水平方向及び鉛直方向の入力地震動は、解放基盤表面で定義された基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d を用いて設定する。

原子炉格納施設設置位置周辺は、地質調査の結果によれば、約1.4km/sのS波速度を持つ堅硬な岩盤が十分な広がりをもって存在することが確認されており、建物・構築物はこの堅硬な岩盤に支持させる。

敷地周辺には中生界ジュラ系の砂岩、頁岩等が広く分布し、安全上重要な建屋の設置レベルにもこの岩盤が分布していることから、解放基盤表面は、この岩盤が分布するレベルに設定する。2号原子炉建屋はO.P.-14.1mとしている。

建物・構築物の地震応答解析における入力地震動は、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上で、必要に応じ2次元FEM解析又は1次元地盤応答解析により、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。地盤条件を考慮する場合には、地震動評価を考慮した敷地全体の地下構造との関係や対象建物・構築物位置と炉心位置での地質・速度構造の違いにも留意し、地盤の非線形応答に関する動的変形特性を考慮する。また、必要に応じ敷地における観測記録による検証や最新の科学的・技術的知見を踏まえ設定する。弾性設計用地震動 S_d ・静的地震力による評価については別添-3に示す。

また、Bクラスの建物・構築物のうち共振のおそれがあり、動的解析が必要なものに対しては、弾性設計用地震動 S_d に2分の1を乗じたものを用いる。

入力地震動の考え方については別添-8に示す。

(2) 解析方法及び解析モデル

動的解析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、建物・構築物に応じた適切な解析条件を設定する。また、原則として、建物・構築物の地震応答解析及び床応答曲線の策定は、線形解析及び非線形解析に適用可能な時刻歴応答解析法による。

建物・構築物の地震応答解析に当たっては、建物・構築物の剛性はそれらの形状、構造特性等を十分考慮して評価し、集中質点系等に置換した解析モデルを設定する。

動的解析には、建物・構築物と地盤との相互作用を考慮するものとし、解析モデルの地盤のばね定数は、基礎版の平面形状、基礎側面と地盤の接触状況及び地盤の剛性等を考慮して定める。各入力地震動が接地率に与える影響を踏まえて、地盤ばねには必要に応じて、基礎浮上りによる非線形性又は誘発上下動を考慮できる浮上り非線形性を考慮するものとする。設計用地盤定数は、原則として、弾性波試験によるものを用いる。

地震応答解析に用いる材料定数については、地盤の諸定数も含めて不確かさによる変動幅を適切に考慮する。また、必要に応じて建物・構築物及び機器・配管系の設計用地震動に及ぼす影響を検討する。平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震等の地震の影響により、建物・構築物に発生したひび割れ等を起因とする剛性の変動については、観測記録や試験データなどから適切に応答解析モデルへ反映し、保守性を確認した上で適用する。

液状化の影響については、地下水位低下設備を考慮の上設定した地下水位及び液状化検討対象層の分布状況を踏まえて、検討の必要性を判断する。

建物・構築物の 3 次元応答性状及び機器・配管系への影響については、建物・構築物の 3 次元 FEM モデルによる解析に基づき、施設の重要性、建屋規模、構造特性を考慮して評価する。3 次元応答性状等の評価は、時刻歴応答解析法による。

5.2 機器・配管系

(1) 入力地震動又は入力地震力

機器・配管系の地震応答解析における入力地震動又は入力地震力は、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d 、又は当該機器・配管系の設置床における設計用床応答曲線又は時刻歴応答波とする。弾性設計用地震動 S_d による評価については別添-3 に示す。

また、Bクラスの機器・配管系のうち共振のおそれがあり、動的解析が必要なものに対しては、弾性設計用地震動 S_d を基に作成した設計用床応答曲線の応答加速度を 2 分の 1 倍したものを用いる。

(2) 解析方法及び解析モデル

動的解析による地震動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うえ、適切な解析法を選定するとともに解析条件として考慮すべき減衰定数、剛性等の各物性値は適切な規格・基準、あるいは実験等の結果に基づき設定する。

また、評価にあたっては建物・構築物の剛性及び地盤物性等の不確かさを適切に考慮する。原子炉本体基礎については、鋼板とコンクリートの複合構造物として、より現実に近い適正な地震応答解析を実施する観点から、コンクリートの剛性変化を適切に考慮した復元力特性を設定する。復元力特性の設定に当たっては、既往の知見や実物の原子炉本体基礎を模擬した試験体による加力試験結果を踏まえて、妥当性、適用性を確認するとともに、設定における不確実性や保守性を考

慮し、機器・配管系の設計用地震力を設定する。なお、原子炉本体基礎の構造強度は、鋼板のみで地震力に耐える設計とする。

機器の解析に当たっては、形状、構造特性等を考慮して、代表的な振動モードを適切に表現できるよう質点系モデル等の有限要素モデルに置換し、設計用床応答曲線を用いたスペクトルモーダル解析法又は時刻歴応答解析法により応答を求める。

配管系については、振動モードを適切に表現できるモデルを作成し、設計用床応答曲線を用いたスペクトルモーダル解析法等により応答を求める。

スペクトルモーダル解析法及び時刻歴応答解析法の選択に当たっては、衝突・すべり等の非線形現象を模擬する場合等には時刻歴応答解析法を用いる等、解析対象とする現象、対象設備の振動特性・構造特性等を考慮し適切に選定する。

また、応答解析モデルは設備の3次元的な広がり及び当該設備の対称性を踏まえ、応答を適切に評価できる場合は1次元モデルや2次元モデルを用い、3次元的な応答性状を把握する必要がある場合は3次元的な配置をモデル化する等、その応答を適切に評価できるモデルを用いることとし、水平2方向及び鉛直方向の応答成分について適切に組み合わせるものとする。

なお、剛性の高い機器は、その機器の設置床面の最大応答加速度の1.2倍の加速度を震度として作用させて構造強度評価に用いる地震力を算定する。

5.3 屋外重要土木構造物

(1) 入力地震動

屋外重要土木構造物の地震応答解析における入力地震動は、解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s を基に、対象構造物の地盤条件を適切に考慮した上で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。地盤条件を考慮する場合には、地震動評価で考慮した敷地全体の地下構造との関係にも留意し、地盤の非線形応答に関する動的変形特性を考慮する。また、必要に応じ敷地における観測記録による検証や最新の科学的・技術的知見を踏まえ設定する。静的地震力による評価については別添—3に示す。

入力地震動の考え方については別添—8に示す。

(2) 解析方法及び解析モデル

動的解析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うえ、適切な解析法を選定するとともに、各構造物に応じた適切な解析条件を設定する。地震応答解析は、構造物と地盤の相互作用を考慮できる連成系の地震応答解析手法とし、地盤及び構造物の地震時における非線形挙動の有無や程度に応じて、線形、等価線形又は非線形解析のいずれかに行う。液状化の影響については、地下水位低下設備を考慮の上設定した地下水位及び液状化検討対象層の分布状況を踏まえて、検討の必要性を判断する。

液状化検討対象層は盛土及び旧表土とし、液状化を考慮する場合は、構造物と地盤の動的相互作用を考慮できる有効応力解析を用いて地震時の応答を算定する。

有効応力解析に用いる液状化強度特性については、敷地全体の液状化強度試験から得られる液状化強度特性を保守的に設定（下限値）することを基本とし、各施設近傍に試験結果がある場合には、その試験結果から液状化強度特性を保守的に設定（下限値）する。

なお、液状化考慮と液状化非考慮で耐震安全性評価上どちらが保守的な評価となるかを確認するため、全応力解析と有効応力解析の結果を比較して、解析手法を選定する。

また、地震応答解析では、水平地震動と鉛直地震動の同時加振とするが、構造物の応答特性により水平2方向の同時性を考慮する場合は、水平2方向の組合せについて適切に評価する。

(3) 評価対象断面

屋外重要土木構造物の評価対象断面については、構造物の形状・配置等により、耐震上の弱軸、強軸が明確である場合、構造の安定性に支配的である弱軸方向を対象とする。

また、評価対象断面位置については、構造物の配置や荷重条件等を考慮し、耐震評価上最も厳しくなると考えられる位置を評価対象とする。

屋外重要土木構造物の耐震評価における評価断面選定の考え方を別添－6に示す。

5.4 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又は津波監視設備が設置された建物・構築物

(1) 入力地震動

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又は津波監視設備が設置された建物・構築物の地震応答解析における入力地震動は、解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s を基に、構造物の基礎地盤条件等を考慮し設定する。なお、敷地内の詳細な地盤条件を考慮する場合には、地震動評価で考慮した敷地全体の地下構造との関係にも留意する。

(2) 解析方法及び解析モデル

解析方法及び解析モデルについては、5.1(2)、5.2(2)、5.3(2)によるものとする。

6. 設計用減衰定数

応答解析に用いる減衰定数は、JEAG4601に記載されている減衰定数を設備の種類、構造等により適切に選定するとともに、試験等で妥当性が確認された値も用いる。

なお、建物・構築物の応答解析に用いる鉄筋コンクリートの減衰定数の設定につ

いては、既往の知見に加え、既往施設の地震観測記録等により、その妥当性を確認し、評価に用いる。

地盤と屋外重要土木構造物の連成系地震応答解析モデルの減衰定数については、地中構造物としての特徴、同モデルの振動特性を考慮して適切に設定する。

7. 耐震重要施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響

耐震重要施設は、耐震重要度分類の下位のクラスに属する施設（以下「下位クラス施設」という。）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。

波及的影響については、耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力を適用して評価を行う。なお、地震動又は地震力の選定に当たっては、施設の配置状況、使用時間等を踏まえて適切に設定する。また、波及的影響においては水平2方向及び鉛直方向の地震力が同時に作用する場合に影響を及ぼす可能性のある施設を選定し評価する。

波及的影響については、以下に示す4つの検討事項について検討を行う。また、原子力発電所の地震被害情報等から新たに検討すべき事項が抽出された場合には、これを追加する。

(1) 設置地盤及び地震応答性状の相違等に起因する不等沈下及び相対変位による影響

a. 不等沈下

耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力に伴う不等沈下による、耐震重要施設の安全機能への影響

b. 相対変位

耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力に伴う下位クラス施設と耐震重要施設の相対変位による、耐震重要施設の安全機能への影響

(2) 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

耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力に伴う、耐震重要施設に接続する下位クラス施設の損傷による、耐震重要施設の安全機能への影響

(3) 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

耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力に伴う、建屋内の下位クラス施設の損傷、転倒及び落下等による、耐震重要施設の安全機能への影響

(4) 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

耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力に伴う、施設の設置地盤及び周辺地盤の液状化による影響を考慮した建屋外の下位クラス施設の損傷、転倒及び落下

等による，耐震重要施設の安全機能への影響

なお，上記4つの検討事項の検討に当たっては，地震に起因する溢水及び火災の観点からも波及的影響がないことを確認する。

上記の観点で抽出した下位クラス施設について，抽出した過程と結果を別添－4に示す。

8. 水平2方向及び鉛直方向の地震力の組合せに関する影響検討方針

水平2方向及び鉛直方向の地震力の組合せについて，従来の設計手法における水平1方向及び鉛直方向地震力を組み合わせた耐震計算に対して，施設の構造特性から水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響の可能性のあるものを抽出し，施設が有する耐震性に及ぼす影響を評価する。

評価に当たっては，施設の構造特性から水平2方向及び鉛直方向地震動の影響を受ける部位を抽出し，その部位について水平2方向及び鉛直方向の荷重や応力を算出し，施設が有する耐震性への影響を確認する。なお，本方針の詳細を別添－5に示す。

(1) 建物・構築物

- ・建物・構築物における耐震評価上の構成部位を整理し，各建屋において，該当する耐震評価上の構成部位を網羅的に確認する。
- ・建物・構築物における耐震評価上の構成部位について，水平2方向及び鉛直方向の地震力の影響が想定される応答特性を整理する。
- ・整理した耐震評価上の構成部位について，水平2方向及び鉛直方向地震力の影響が想定される応答特性のうち，荷重の組合せによる応答特性を検討する。水平2方向及び鉛直方向地震力に対し，荷重の組合せによる応答特性により，有する耐震性への影響が想定される部位を抽出する。
- ・3次元的な応答特性が想定される部位として抽出された部位について，3次元FEMモデルモデルを用いた精査を実施し，水平2方向及び鉛直方向地震力により，有する耐震性への影響が想定される部位を抽出する。
- ・上記で抽出されなかった部位についても，局所応答の観点から3次元FEMモデルによる精査を実施し，水平2方向及び鉛直方向地震力により，有する耐震性への影響が想定される部位を抽出する。
- ・評価対象として抽出した耐震評価上の構成部位について，構造部材の発生応力等を適切に組み合わせることで，各部位の設計上の許容値に対する評価を実施し，各部位が有する耐震性への影響を評価する。

(2) 機器・配管系

- ・基準地震動 S_s で評価を行う各設備を代表的な機種ごとに分類し，構造上の特徴から水平2方向の地震力が重複する観点，若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

る影響の可能性のある設備を抽出する。

- ・抽出された設備に対して、水平 2 方向及び鉛直方向に地震力が入力された場合の荷重や応力等を求め、従来の設計手法による設計上の配慮を踏まえて影響を検討する。

(3) 屋外重要土木構造物

- ・屋外重要土木構造物について、各構造物の構造上の特徴を踏まえ、構造形式ごとに大別する。
- ・従来設計手法における評価対象断面に対して直交する荷重を抽出する。
- ・屋外重要土木構造物は、地中に埋没された RC 構造であり、周辺の埋戻土からの土圧が耐震上支配的な荷重となることから、評価対象断面に対して直交方向に作用する土圧により水平 2 方向及び鉛直方向の地震力による影響程度が決定される。
- ・影響検討にあたっては、構造形式等の観点から水平 2 方向及び鉛直方向の地震力による影響が大きい構造として抽出した評価対象構造物に対して、評価対象断面（弱軸方向）の地震応答解析に基づく構造部材の照査において、評価対象断面に直交する断面の地震応答解析に基づく地震時荷重を適切に組み合わせることで、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる構造部材の発生応力等を算出し、耐震性への影響を確認する。

(4) 津波防護施設、浸水防止施設及び津波監視設備並びに浸水防止設備又は津波監視設備が設置された建物・構築物

- ・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又は津波監視設備が設置された建物・構築物について、各構造物の構造上の特徴を踏まえ、構造形式ごとに 8. (1)、8. (2) 及び 8. (3) により影響を検討する。

9. 構造計画と配置計画

設計基準対象施設の構造計画及び配置計画に際しては、地震の影響が低減されるように考慮する。

建物・構築物は、原則として剛構造とし、重要な建物・構築物は、地震力に対し十分な支持性能を有する地盤に支持させる。剛構造としない建物・構築物は、剛構造と同等又はそれを上回る耐震安全性を確保する。主要建屋の平面図、断面図を別添一 7 に示す。

機器・配管系は、応答性状を適切に評価し、適用する地震力に対して構造強度を有する設計とする。配置に自由度のあるものは、耐震上の観点からできる限り重心位置を低くし、かつ、安定性のよい据付状態になるよう配置する。

また、建物・構築物の建屋間相対変位を考慮しても、建物・構築物及び機器・配管系の耐震安全性を確保する設計とする。

下位クラス施設は原則、耐震重要施設に対して離隔をとり配置するか、耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力に対して耐震性を保持するか若しくは、下位

クラス施設の波及的影響を想定しても耐震重要施設の有する機能を保持する設計とする。

女川原子力発電所第2号炉

屋外重要土木構造物等及び津波防護施設
の耐震評価における断面選定の考え方

屋外重要土木構造物等及び津波防護施設の耐震評価における断面選定の考え方

1. 方針

本資料では、屋外重要土木構造物、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のうち土木構造物、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（特定重大事故等対処施設を除く）のうち土木構造物（以後、「常設重大事故等対処施設」という。）（以上の何れかに該当するか、又は兼務する構造物を「屋外重要土木構造物等」という。）及び津波防護施設の耐震評価における断面選定の考え方について示す。

本資料で記載する屋外重要土木構造物等及び津波防護施設に設置される設備の一覧表を別添 6-1.1 表に、全体配置図を別添 6-1.1 図に示す。

女川原子力発電所の屋外重要土木構造物等には、二次元地震応答解析により得られる構造物の応答に対して耐震評価を行う構造物と、二次元地震応答解析により得られる土圧等の荷重を三次元モデルに作用させて耐震評価を行う構造物がある。

延長方向への海水の通水機能や配管等の支持機能を維持するため、延長方向に対して空間を保持できるように構造部材が配置される構造物（以後、「線状構造物」という。）は、横断方向（延長方向に直交する方向）に設置される構造部材が少なく、横断方向が明確に弱軸となることから、横断方向の二次元地震応答解析により耐震評価を行う。よって、構造物の応答が耐震評価上最も厳しくなると考えられる断面を横断方向から評価対象断面として選定する。

構造物の断面が延長方向で異なり、加振方向に平行に配置される妻壁や隔壁等の面部材を耐震部材として考慮する構造物（以後、「箱形構造物」という。）は、三次元モデルを用いて水平 2 方向及び鉛直地震動の組合せの影響を考慮して耐震評価を行う。よって、三次元モデルに作用させる荷重を適切に評価することが可能な断面を直交する 2 方向から評価対象断面として選定する。

津波防護施設のうち、設備構造が複雑かつ設置範囲が長大である防潮堤及び防潮壁については、屋外重要土木構造物等と同様の考え方に加え、各部位の役割を踏まえ、津波に対する止水機能維持も含めた耐震評価を行うため、耐震・耐津波評価を行う上で厳しい断面を選定する。

上記を考慮した屋外重要土木構造物等及び津波防護施設の断面選定の考え方を別添 6-1.2 表に示す。

また、評価対象断面の選定の流れを以下に示す。

① 耐震評価候補断面の整理

以下の観点にて、耐震評価候補断面を整理する。

- ・ 要求機能及び間接支持される機器・配管系の有無及び設置位置
- ・ 構造的特徴（部材厚、内空断面、断面急変部、構造物間の連結部等）
- ・ 周辺状況（上載荷重、土被り厚、周辺地質、周辺地質変化部、隣接構造物、地下水位^{*}、断層との交差状況）

- ・地震波の伝搬特性
- ・機器・配管系への応答加速度及び応答変位算出位置

※：地下水位は浸透流解析等の地下水位に係る検討結果を踏まえて工認段階で設定する。

② 評価対象断面の選定

①にて整理した耐震評価候補断面（以後、「候補断面」という。）から以下の考えで評価対象断面を選定する。

a. 構造的特徴による選定

横断方向の二次元地震応答解析により耐震評価を実施する線状構造物については、候補断面の部材厚や内空断面等の構造的特徴を比較し、他の候補断面より耐震評価上厳しくなることが想定される候補断面を評価対象断面として選定する。同一断面となる場合には、同一断面となる区間毎に後述する他の観点で評価対象断面を選定する。

三次元モデルで耐震評価を実施する箱形構造物については、地震時荷重を算出する二次元地震応答解析を実施する断面を、構造的特徴を踏まえて選定する。

b. 周辺状況による選定

上載荷重、土被り厚、周辺地質、隣接構造物にて耐震評価上厳しくなる断面を選定する。

同一構造で延長方向に設置深さが異なる線状構造物は、上載荷重が最大となる断面や土被り厚が最大となる断面を評価対象断面として選定する。

隣接構造物については、評価対象構造物との間の埋戻し材料や、それぞれの設置状況に応じて、隣接構造物が評価対象構造物の地震時応答に与える影響を踏まえ、モデル化要否を検討した上で評価対象断面を選定する。候補断面の中で、隣接構造物との位置関係により土圧が作用しない断面と、周辺地質が盛土となる断面がある場合のように、構造物に作用する土圧が大きく評価される候補断面が明確な場合には、その候補断面を評価対象断面として選定する。隣接構造物のモデル化の方針は以下のとおりとし、評価対象構造物と隣接構造物の位置関係の例を別添 6-1.2 図に示す。

(a) 評価対象構造物と隣接構造物の間が盛土で埋め戻されている場合

地中構造物の耐震評価においては、盛土よりも剛性の大きい隣接構造物をモデル化することにより、周辺地盤の変形が抑制されると考えられる。よって、評価対象構造物に作用する土圧を保守的に評価するため、隣接構造物の設置範囲を盛土としてモデル化する。

(b) 評価対象構造物と隣接構造物の間が地盤改良されている場合

評価対象構造物と隣接構造物の間に剛性の大きい改良地盤が存在する場合には、隣接構造物の地震時応答が剛性の大きい改良地盤を介して評価対象構造物に伝達することが考えられる。よって、改良地盤を介しての隣接構造物の影響を考慮するため隣接構造物をモデル化する。

(c)評価対象構造物と隣接構造物が置換コンクリートを共有している場合
評価対象構造物が隣接構造物と置換コンクリート(以後、「MMR」という)
を共有して設置されている場合には、共有する MMR とともに互いに影響
を受けながら振動するため、隣接構造物をモデル化する。

c. 評価対象断面の絞り込み

上記の観点で選定された評価対象断面と、地下水位や地震波の伝搬特性等
に応じて整理された候補断面を比較して評価対象断面の絞り込みを行う。候
補断面によって周辺状況が異なる線状構造物や、箱形構造物のうち候補断面
によって地下水位が異なる構造物等については、地震応答解析を実施して評
価対象断面を絞り込む。

岩盤内に設置される構造物等、周辺に液状化検討対象層が分布しない構造
物については一次元全応力解析により評価対象断面の絞り込みを行い、耐震
評価上厳しい候補断面を評価対象断面として選定する。

周辺に液状化検討対象層が分布する場合には、一次元又は二次元の全応力
解析及び有効応力解析により評価対象断面の絞り込みを行い、耐震評価上
厳しい候補断面を評価対象断面として選定する。地震応答解析による評価
対象断面の絞り込み方法の例を別添 6-1.3 図に示す。

d. 周辺地質が急変した場合の影響を確認するための断面選定

周辺地質が改良地盤から盛土に急変する場合等は、その境界部にて周辺地
質の剛性が急変するため、その影響を確認するために境界部を評価対象断
面として選定する。

e. 断層の変形の影響を確認するための断面選定

構造物と断層が交差する断面については、構造物と断層の接し方や周辺地
質により、断層の変形による構造物への影響が異なると考えられるため、構
造物と断層の位置関係により以下のとおり分類し、それぞれから評価対象断
面を選定する。構造物と断層の位置関係の例について別添 6-1.4 図に示す。

- ・ 構造物の掘削底面にて MMR 又は改良地盤を介して断層と接するもの
- ・ 構造物と断層が底面で接しており、構造物周辺は盛土にて埋め戻されてい
るもの
- ・ 構造物周辺が岩盤で囲まれている状況で断層に接しているもの

評価対象断面は、断層の幅や連続性を勘案して耐震評価上構造物への影響が
厳しくなる断層を対象として選定する。

f. 床応答算出位置による選定

耐震評価上の観点以外に機器・配管系の応答加速度及び応答変位の観点か
ら、床応答算出用の断面を選定する。

以上の流れで選定した複数断面を評価対象断面とする場合と、必要に応じて、
各観点で選定された断面の保守的な条件を組合せた断面を作成し、評価対象断

面とする場合がある。

耐震評価候補断面の整理と評価対象断面の選定結果については工認段階で示す。

別添 6-1.1 表 屋外重要土木構造物等及び津波防護施設に設置される設備一覧表

名称	屋外重要土木構造物	津波防護施設	常設重大事故等対処設備	常設重大事故等対処施設	設置される設備			
					名称	耐震	津波	常設重大事故等対処設備
原子炉機器冷却海水配管ダクト	○	-	-	○	原子炉補機冷却海水系配管	○	-	○
					高圧炉心スプレイ補機冷却海水系配管	○	-	○
排気筒連絡ダクト（土砂部，岩盤部）	○	-	-	○	非常用ガス処理系配管	○	-	○
軽油タンク連絡ダクト	○	-	-	○	燃料移送系配管	○	-	○
取水路（標準部，漸拡部）	○	-	○※1	-	-	-	-	-
海水ポンプ室	○	-	○※1	○	原子炉補機冷却海水ポンプ	○	-	○
					高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ	○	-	○
軽油タンク室	○	-	-	○	軽油タンク	○	-	○
					燃料移送ポンプ	○	-	○
取水口	○	-	○※1	-	-	-	-	-
復水貯蔵タンク基礎	-	-	-	○	復水貯蔵タンク	-	-	○
ガスタービン発電設備軽油タンク室	-	-	-	○	ガスタービン発電設備軽油タンク	-	-	○
防潮堤	-	○	-※2	-	津波監視カメラ	-	○	-※2
防潮壁	-	○	-※2	-	逆流防止設備	-	○	-※2
取放水路流路縮小工	-	○	-※2	-	-	-	-	-
貯留堰	○	○	○※1, 2	-	-	-	-	-

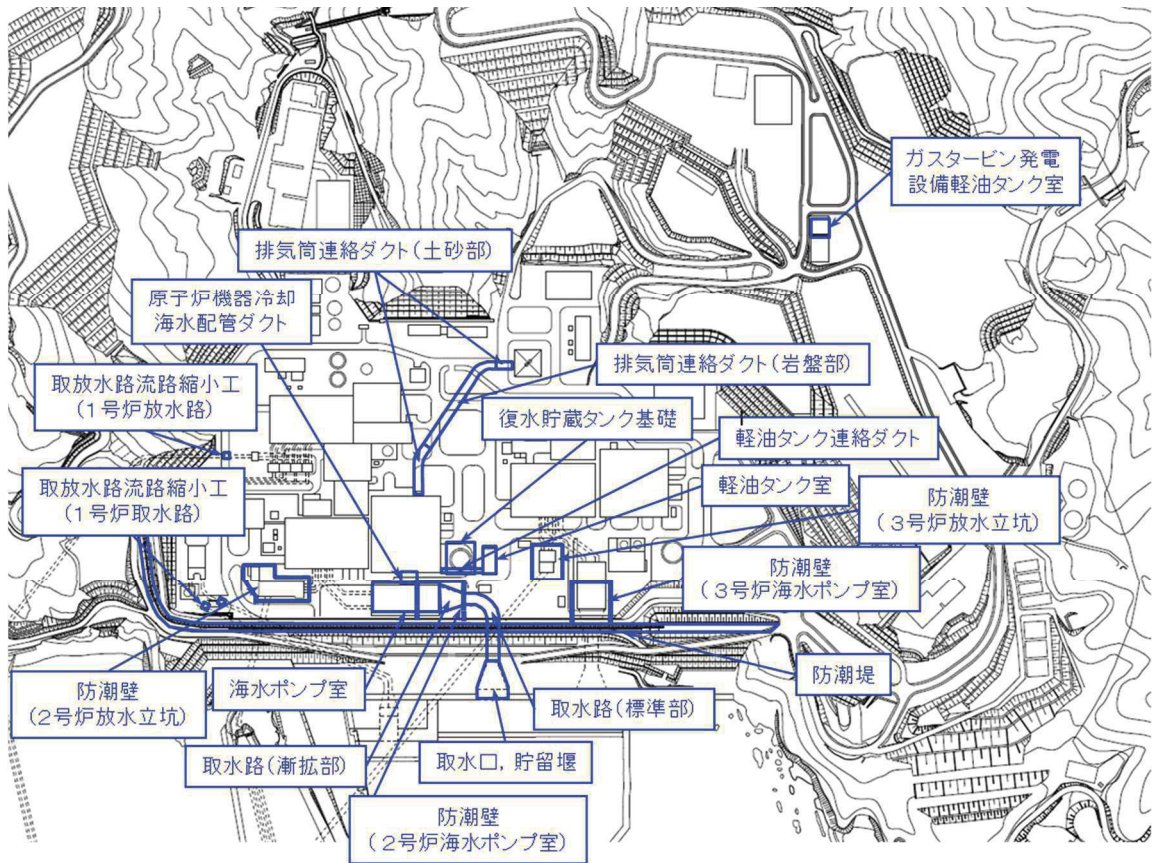
屋外重要土木構造物 : 耐震上重要な機器・配管系の間接支持機能，若しくは非常時における海水の通水機能を求められる土木構造物
 常設重大事故等対処設備 : 常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備
 常設重大事故等対処施設 : 常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設（特定重大事故等対処施設を除く）
 耐震 : 耐震重要施設（津波防護施設，浸水防止設備，津波監視設備を除く）
 津波 : 津波防護施設，浸水防止設備，津波監視設備
 ※1 : 非常用取水設備
 ※2 : 常設重大事故等対処設備に対する津波防護施設，浸水防止設備，津波監視設備

別添 6-1.2 表 屋外重要土木構造物等及び津波防護施設の断面選定の考え方

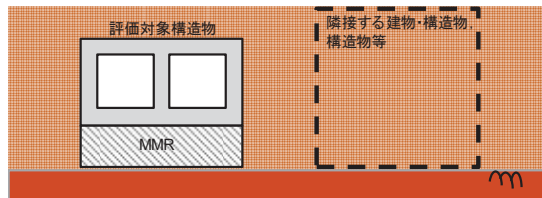
名称	断面選定の考え方		
	A: 横断方向が明確に弱軸となることから、横断方向の二次元地震応答解析により耐震評価を行う線状構造物 ⇒構造物の応答が耐震評価上最も厳しくなると考えられる位置を評価対象断面として選定する。	B: 構造物の断面が延長方向で異なり、加振方向に平行に配置される妻壁や隔壁等の面部材を耐震部材として考慮して、三次元モデルを用いて水平 2 方向及び鉛直地震動の組合せを考慮して耐震評価を行う箱形構造物 ⇒三次元モデルに作用させる荷重を適切に評価することが可能な位置を直交する 2 方向から評価対象断面として選定する。	C: 設備構造が複雑かつ設置範囲が長大で、津波に対する止水機能維持も含めた耐震評価を行う防潮堤及び防潮壁 ⇒A及びBの考え方に加え、構成する各部位の役割及び設計方針を踏まえ、耐震・耐津波評価を行う上で厳しい断面を選定する。
原子炉機器冷却海水配管ダクト	○		
排気筒連絡ダクト（土砂部、岩盤部）	○		
軽油タンク連絡ダクト	○		
取水路（標準部、漸拡部）	○		
海水ポンプ室		○	
軽油タンク室		○	
取水口		○	
復水貯蔵タンク基礎		○	
ガスタービン発電設備軽油タンク室		○	
防潮堤			○
防潮壁			○
取放水路流路縮小工	○		
貯留堰 ^{※1}		○	

※1 貯留堰の耐震評価用の三次元モデルは取水口に含まれることから、取水口と同様の方針で断面選定を行う。

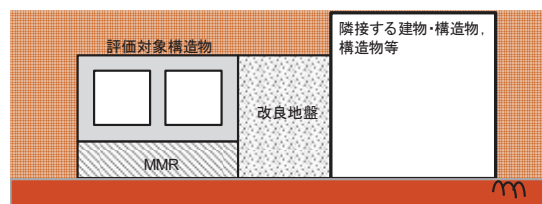
※2 複数個所に設置される鋼桁部、鋼製扉部から、構造的特徴や荷重条件（入力津波高さ等）及び地質構造等の観点で評価の代表性が説明できる場合には評価対象構造物の絞り込みを行う。



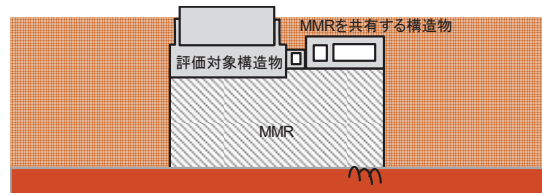
別添 6-1.1 図 全体配置図



(a) 評価対象構造物と隣接構造物の間が盛土で埋め戻されている場合



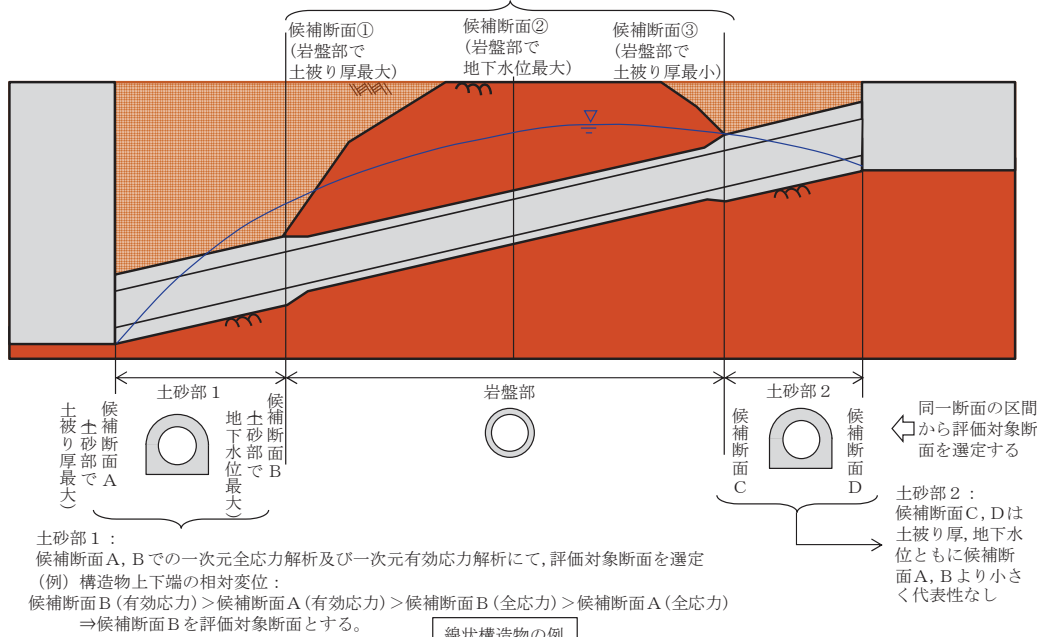
(b) 評価対象構造物と隣接構造物の間が地盤改良されている場合



(c) 評価対象構造物と隣接構造物がMMRを共有する場合

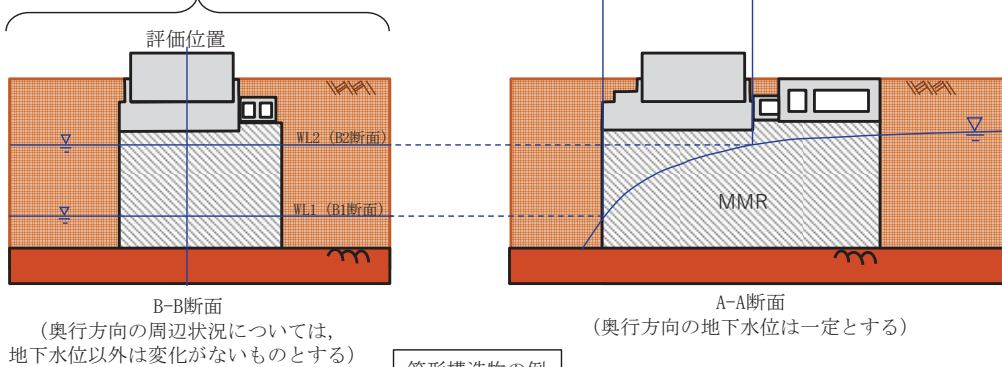
別添 6-1.2 図 隣接構造物との位置関係の例

岩盤部：①，②，③断面での一次元全応力解析にて評価対象断面を選定
 (例) 構造物上下端の相対変位：候補断面①>候補断面②>候補断面③ ⇒ 候補断面①を評価対象断面とする

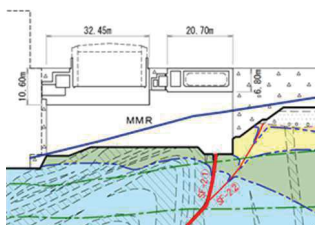


B-B方向の断面は、WL1, WL2それぞれの一次元全応力解析及び一次元有効応力解析にて耐震評価上厳しい地下水位を確認して選定する。

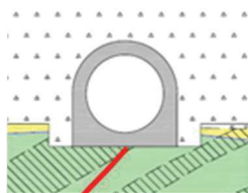
(例) 構造物上下端での相対変位
 WL2 (有効応力) > WL2 (全応力) > WL1 (有効応力) > WL1 (全応力)
 ⇒ 評価対象断面はB2断面 とする。



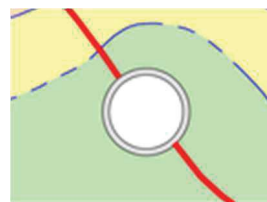
別添 6-1.3 図 評価対象断面の絞り込み方法の例



MMR等を介して断層と接するもの



断層と底面で接しており、周辺は盛土にて埋め戻されているもの



周辺が岩盤で囲まれている状況で断層と接しているもの

赤線：断層

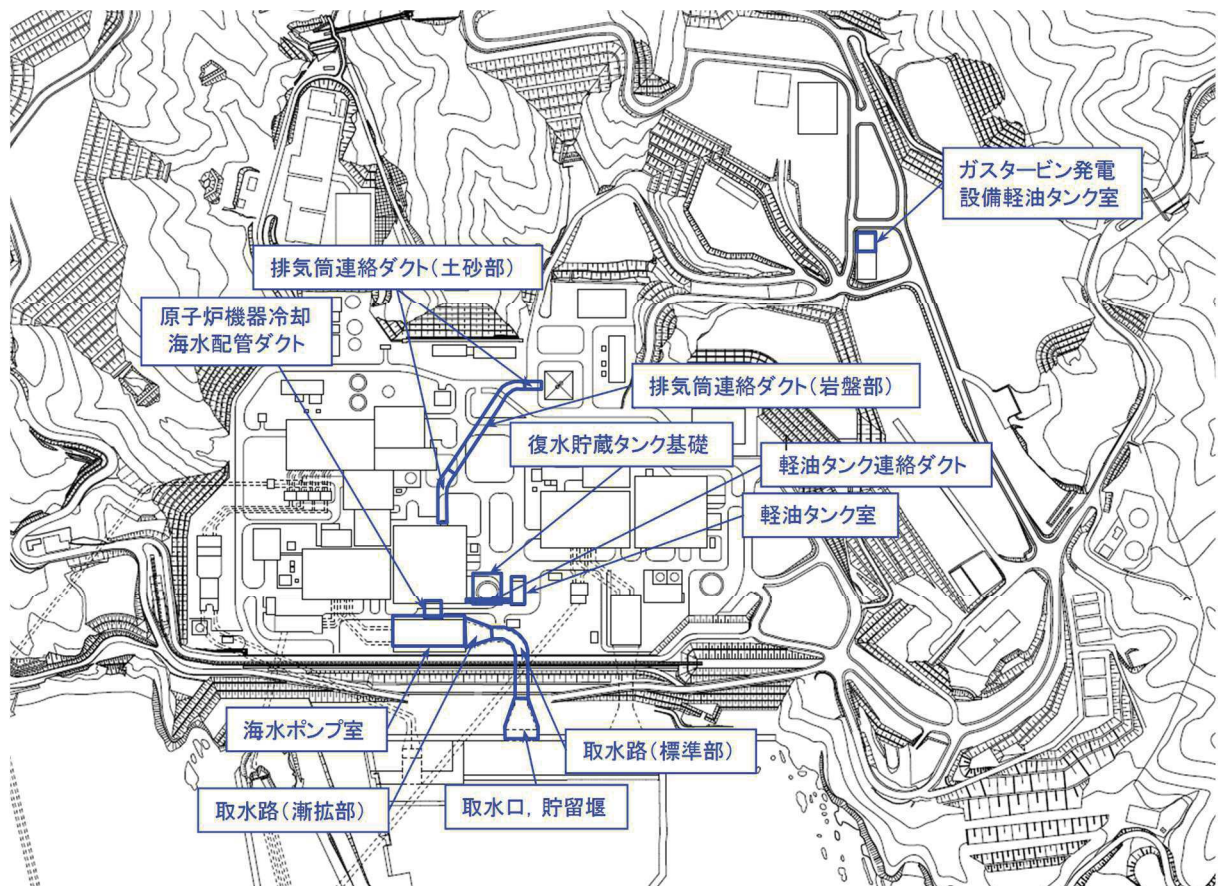
別添 6-1.4 図 構造物と断層の位置関係の例

2. 屋外重要土木構造物等の耐震評価における断面選定の考え方

2.1 各施設の配置

本章では屋外重要土木構造物等である，原子炉機器冷却海水配管ダクト，排気筒連絡ダクト，軽油タンク連絡ダクト，取水路，海水ポンプ室，軽油タンク室，取水口，貯留堰，復水貯蔵タンク基礎，ガスタービン発電設備軽油タンク室の断面選定の考え方を示す。

別添 6-2. 1. 1 図に屋外重要土木構造物等の平面配置図を示す。



別添 6-2. 1. 1 図 屋外重要土木構造物等の平面配置図

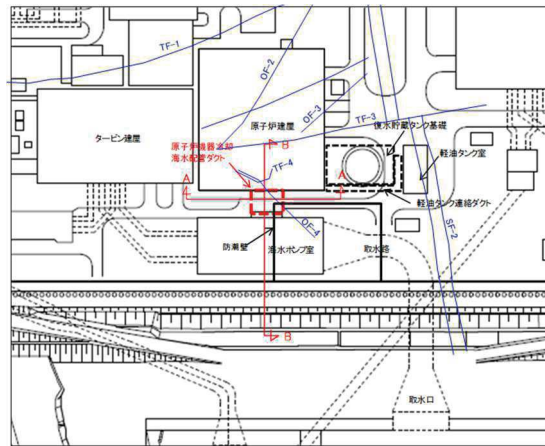
2.2 原子炉機器冷却海水配管ダクト

原子炉機器冷却海水配管ダクトの配置図を別添 6-2.2.1 図に、平面図を別添 6-2.2.2 図に、断面図を別添 6-2.2.3 図に、掘削図を別添 6-2.2.4 図に、地質断面図を別添 6-2.2.5 図、別添 6-2.2.6 図にそれぞれ示す。

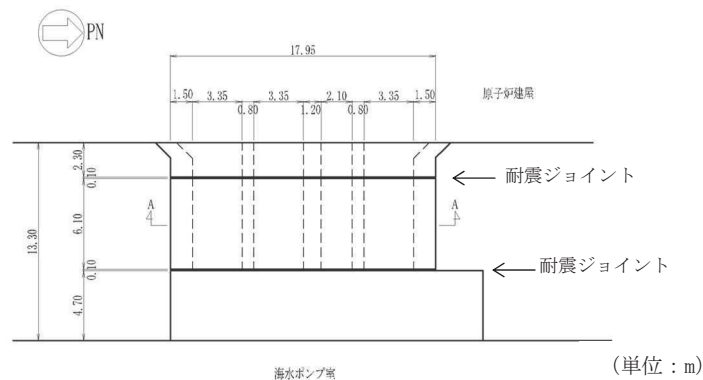
原子炉機器冷却海水配管ダクトは、耐震重要施設及び常設重大事故等対処設備である原子炉補機冷却海水系配管、高圧炉心スプレー補機冷却海水系配管を間接支持しており、支持機能が要求される。

原子炉機器冷却海水配管ダクトは延長 6.1m、内空幅 2.1m~3.35m、内空高さ 6.7m の鉄筋コンクリート造の四連地下ダクトで、延長方向に断面の変化がない線状構造物である（別添 6-2.2.2 図、別添 6-2.2.3 図）。

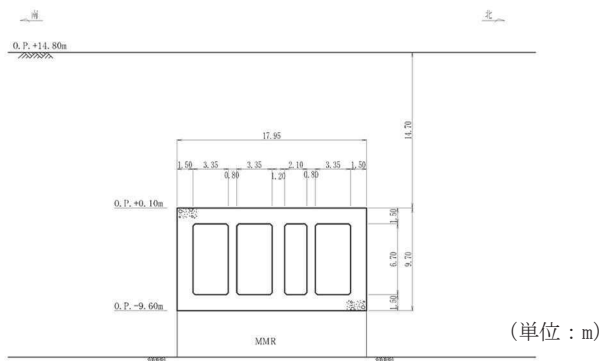
よって、二次元地震応答解析により耐震評価を行う上で、構造的特徴、周辺状況、地震力の特性等を考慮して、構造物の応答が耐震評価上最も厳しくなると考えられる断面を評価対象断面として選定する。



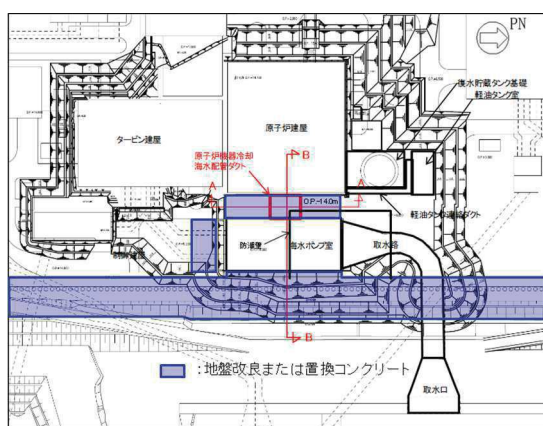
別添 6-2.2.1 図 原子炉機器冷却海水配管ダクト配置図



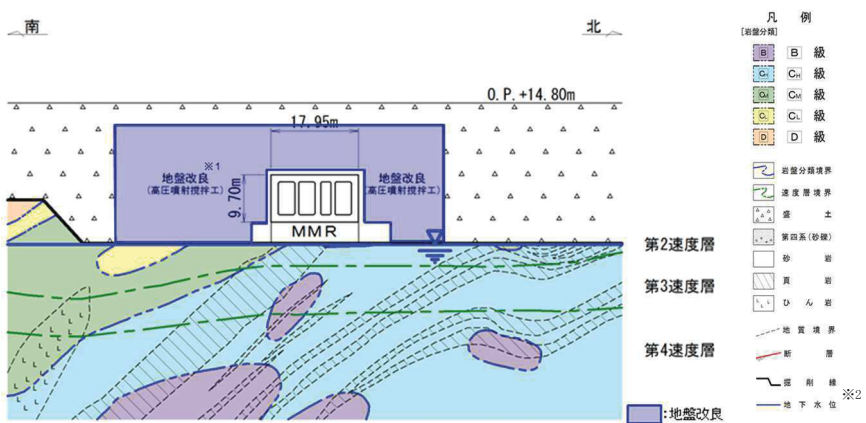
別添 6-2.2.2 図 原子炉機器冷却海水配管ダクト平面図



別添 6-2. 2. 3 図 原子炉機器冷却海水配管ダクト断面図 (A-A)

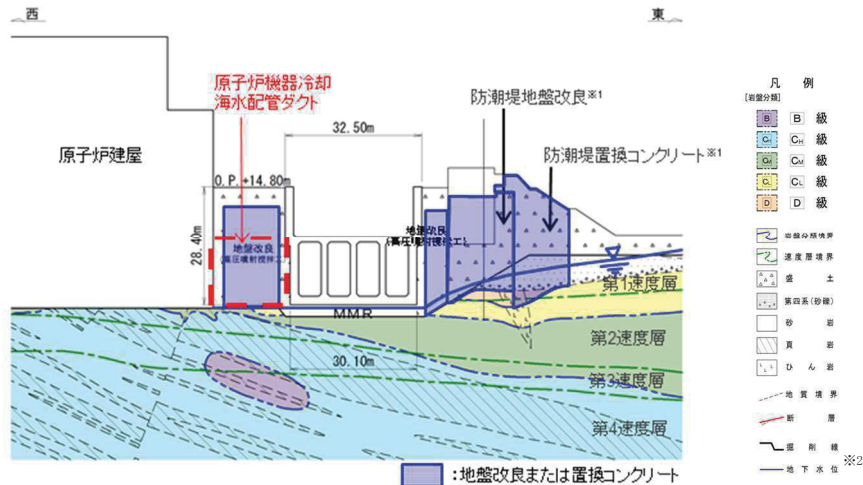


別添 6-2. 2. 4 図 原子炉機器冷却海水配管ダクト掘削図



別添 6-2. 2. 5 図 原子炉機器冷却海水配管ダクト地質断面図 (A-A)

※1 地盤改良の範囲は今後の設計進捗で変更の可能性がある。
 ※2 地下水位は、今後実施する浸透流解析等の地下水位設定に係る検討の結果を踏まえて設定する。



別添 6-2. 2. 6 図 原子炉機器冷却海水配管ダクト地質断面図 (B-B)

※1 地盤改良及び置換コンクリートの範囲は今後の設計進捗で変更の可能性がある。
 ※2 地下水位は、今後実施する浸透流解析等の地下水位設定に係る検討の結果を踏まえて設定する。

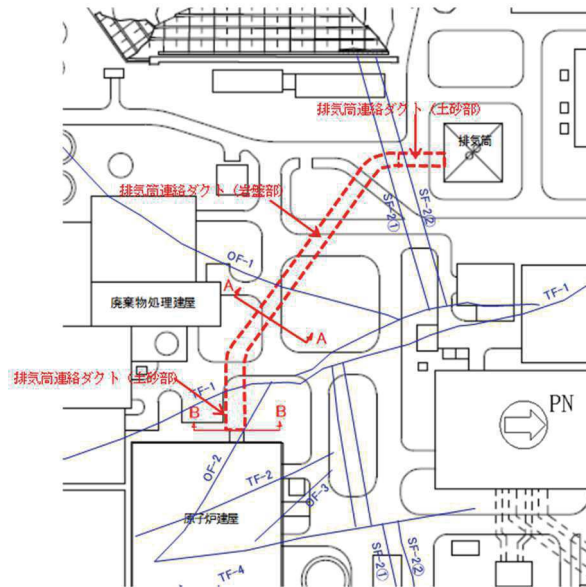
2.3 排気筒連絡ダクト (土砂部, 岩盤部)

排気筒連絡ダクトの配置図を別添 6-2.3.1 図に、平面図を別添 6-2.3.2 図に、断面図を別添 6-2.3.3 図、別添 6-2.3.4 図に、掘削図を別添 6-2.3.5 図に、地質断面図を別添 6-2.3.6 図、別添 6-2.3.7 図、別添 6-2.3.8 図にそれぞれ示す。排気筒連絡ダクトは、耐震重要施設及び常設重大事故等対処設備である非常用ガス処理系配管を間接支持しており、支持機能が要求される。

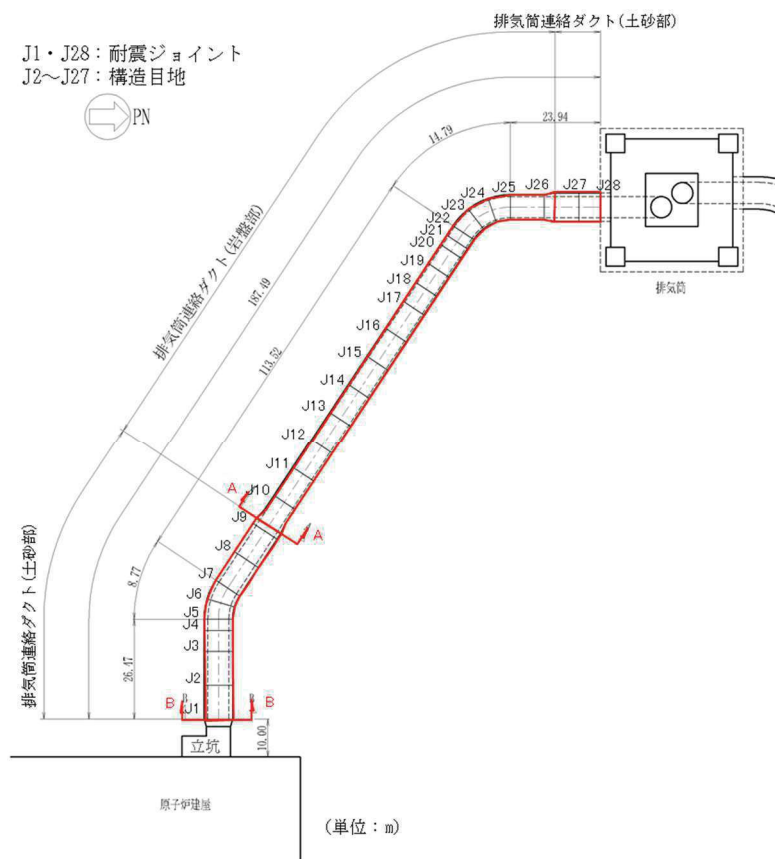
排気筒連絡ダクトは原子炉建屋と排気筒を結ぶ、延長約 187.5m、内空 の鉄筋コンクリート造の地下トンネル構造物であり、円形トンネルの岩盤部と幌形トンネルの土砂部にて構成され、それぞれの区間で延長方向に断面の変化がない線状構造物である (別添 6-2.3.2 図, 別添 6-2.3.3 図, 別添 6-2.3.4 図)。

よって、二次元地震応答解析により耐震評価を行う上で、構造的特徴, 周辺状況, 地震力の特性等を考慮して、構造物の応答が耐震評価上最も厳しくなると考えられる断面を評価対象断面として選定する。

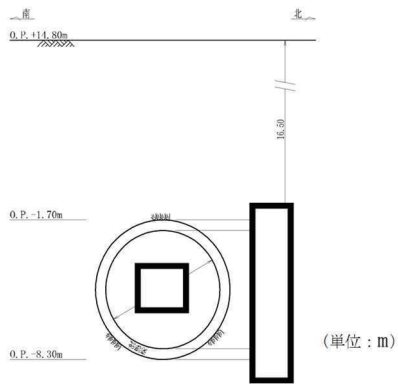
本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項又は商業機密に属しますので公開できません。



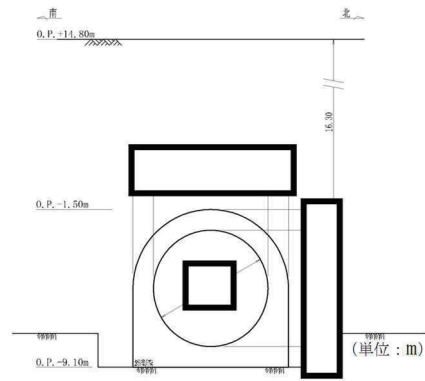
別添 6-2. 3. 1 図 排気筒連絡ダクト配置図



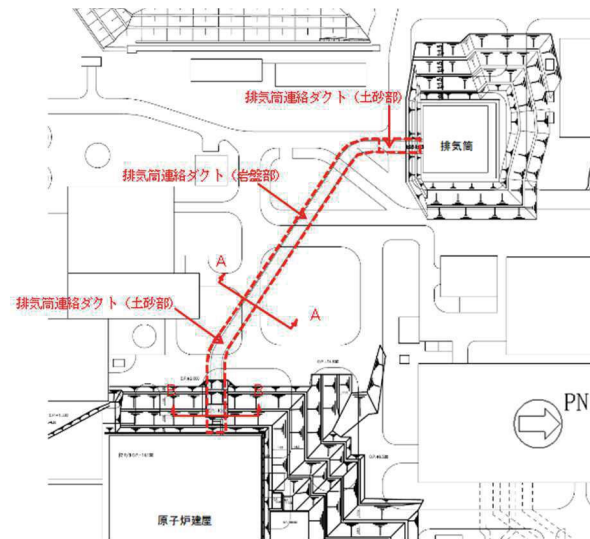
別添 6-2. 3. 2 図 排気筒連絡ダクト平面図



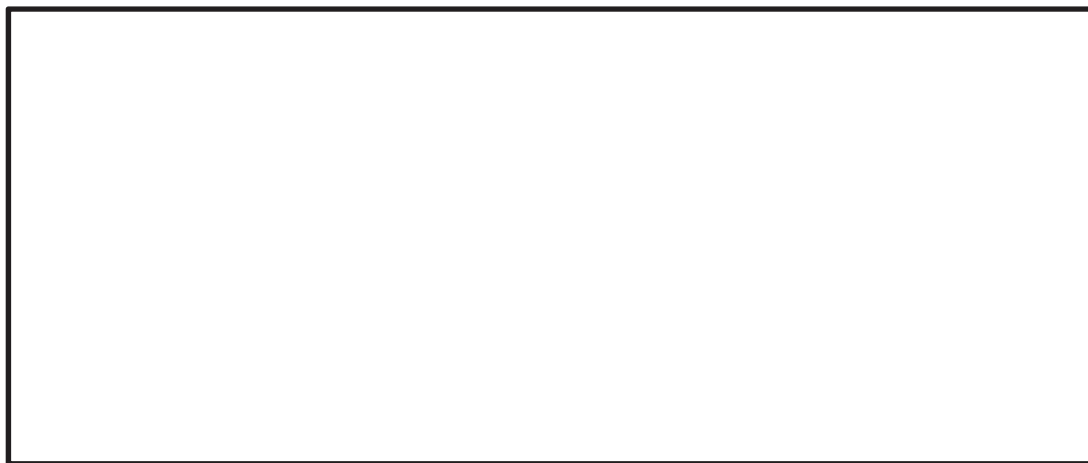
別添 6-2. 3. 3 図 排気筒連絡ダクト
断面図（岩盤部）



別添 6-2. 3. 4 図 排気筒連絡ダクト
断面図（土砂部）



別添 6-2. 3. 5 図 排気筒連絡ダクト掘削図

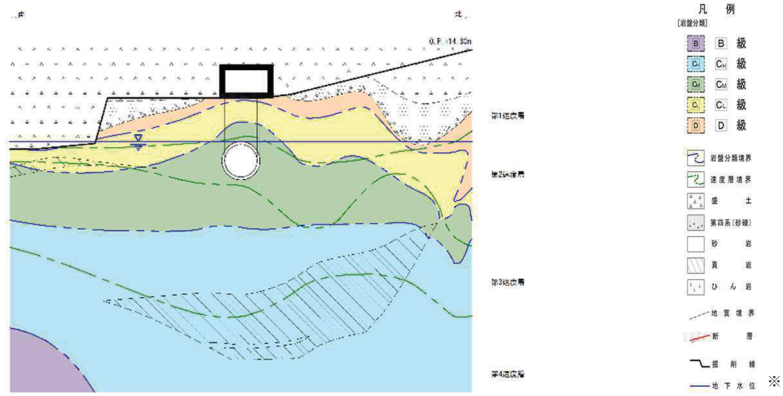


別添 6-2. 3. 6 図 排気筒連絡ダクト地質断面図（縦断）

※ 地下水位は、今後実施する浸透流解析等の地下水位設定に係る検討の結果を踏まえて設定する。

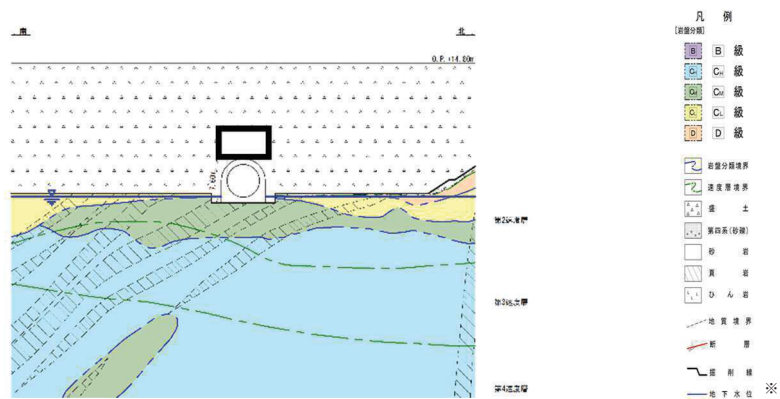
- 凡 例
- [岩盤分類]
- B 級
 - C₁ 級
 - C₂ 級
 - C₃ 級
 - D 級
- 岩盤分類境界
 - 速度層境界
 - 盛 土
 - 第四系(砂礫)
 - 砂
 - 頁 岩
 - ひ ん 岩
 - 地質境界
 - 断 層
 - 掘削線
 - 地下水位

本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項又は商業機密に属しますので公開できません。



別添 6-2. 3. 7 図 排気筒連絡ダクト地質断面図（岩盤部，A-A）

※ 地下水位は、今後実施する浸透流解析等の地下水位設定に係る検討の結果を踏まえて設定する。



別添 6-2. 3. 8 図 排気筒連絡ダクト地質断面図（土砂部，B-B）

※ 地下水位は、今後実施する浸透流解析等の地下水位設定に係る検討の結果を踏まえて設定する。

2.4 軽油タンク連絡ダクト

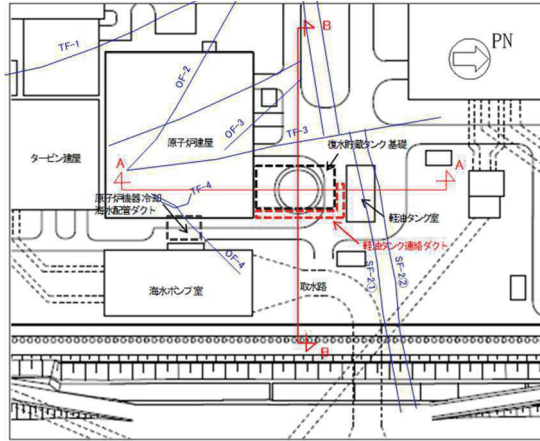
軽油タンク連絡ダクトの配置図を別添 6-2. 4. 1 図に、平面図を別添 6-2. 4. 2 図、別添 6-2. 4. 3 図に、断面図を別添 6-2. 4. 4 図に、縦断面図を別添 6-2. 4. 5 図に、掘削図を別添 6-2. 4. 6 図に、地質断面図を別添 6-2. 4. 7 図、別添 6-2. 4. 8 図にそれぞれ示す。

軽油タンク連絡ダクトは耐震重要施設及び常設重大事故等対処設備である燃料移送系配管を間接支持しており、支持機能が要求される。

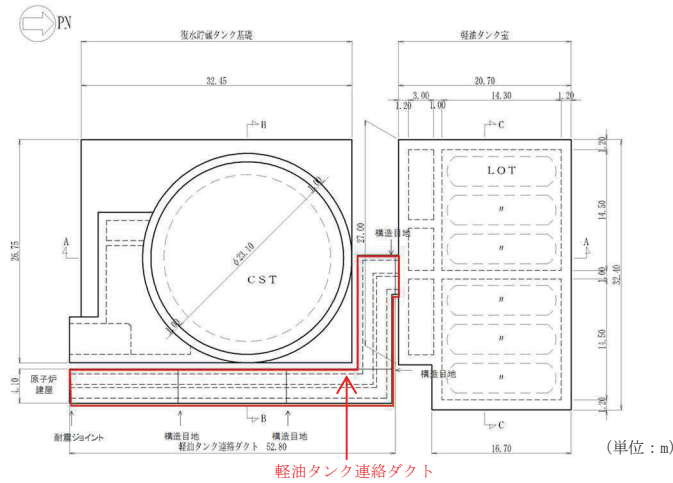
軽油タンク連絡ダクトは原子炉建屋と軽油タンク室を結ぶ、延長約 52. 3m、内空幅 1. 25m、内空高さ 2m の鉄筋コンクリート造の二連地下ダクトで、延長方向に断面の変化が小さい線状構造物である。

よって、二次元地震応答解析により耐震評価を行う上で、構造的特徴、周辺状況、地震力の特性等を考慮して、構造物の応答が耐震評価上最も厳しくなると考えられる断面を評価対象断面として選定する。

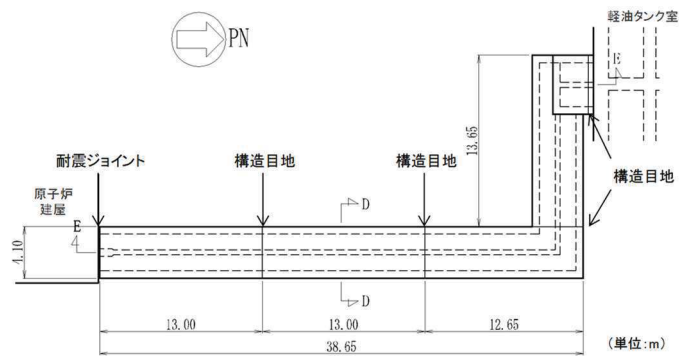
本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項又は商業機密に属しますので公開できません。



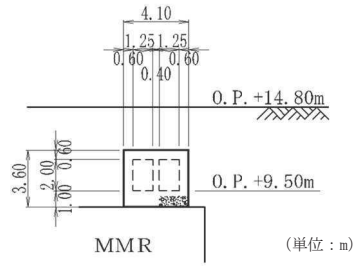
別添 6-2. 4. 1 図 軽油タンク連絡ダクト配置図



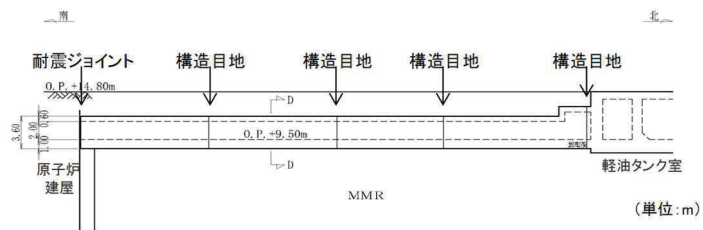
別添 6-2. 4. 2 図 軽油タンク連絡ダクト平面図



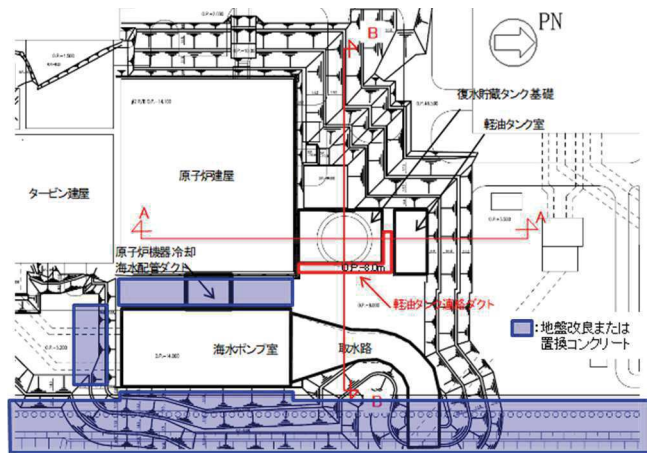
別添 6-2. 4. 3 図 軽油タンク連絡ダクト平面図 (詳細)



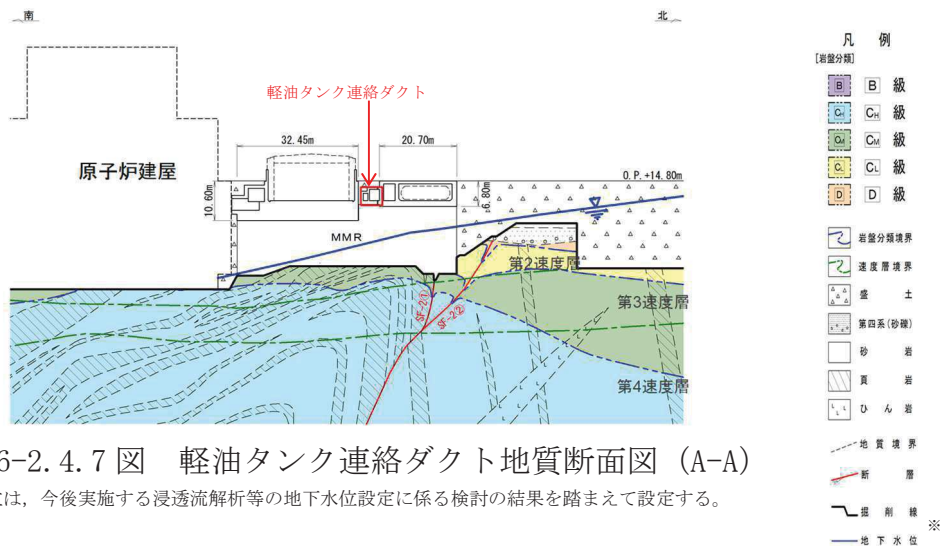
別添 6-2. 4. 4 図 軽油タンク連絡ダクト断面図 (標準部, D-D)



別添 6-2. 4. 5 図 軽油タンク連絡ダクト縦断面図

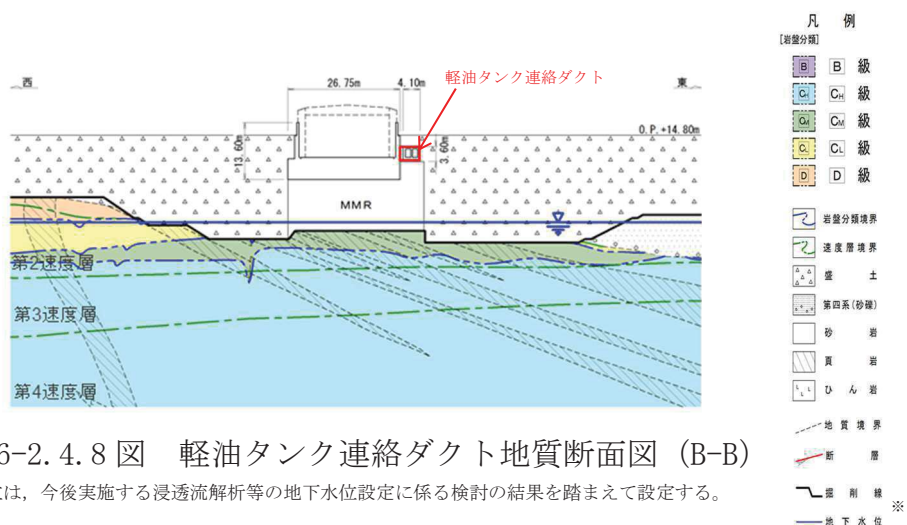


別添 6-2. 4. 6 図 軽油タンク連絡ダクト掘削図



別添 6-2. 4. 7 図 軽油タンク連絡ダクト地質断面図 (A-A)

※ 地下水位は、今後実施する浸透流解析等の地下水位設定に係る検討の結果を踏まえて設定する。



別添 6-2. 4. 8 図 軽油タンク連絡ダクト地質断面図 (B-B)

※ 地下水位は、今後実施する浸透流解析等の地下水位設定に係る検討の結果を踏まえて設定する。

2.5 取水路（標準部，漸拡部）

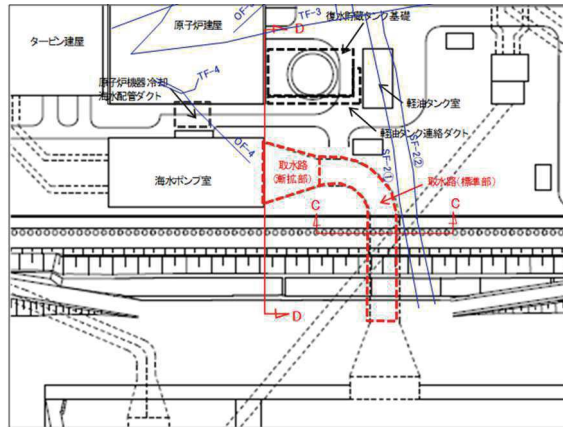
取水路の配置図を別添 6-2. 5. 1 図に，平面図を別添 6-2. 5. 2 図に，断面図を別添 6-2. 5. 3 図，別添 6-2. 5. 4 図に，掘削図を別添 6-2. 5. 5 図に，地質断面図を別添 6-2. 5. 6 図，別添 6-2. 5. 7 図，別添 6-2. 5. 8 図にそれぞれ示す。

取水路は非常用取水設備であり，通水機能及び貯水機能が要求される。

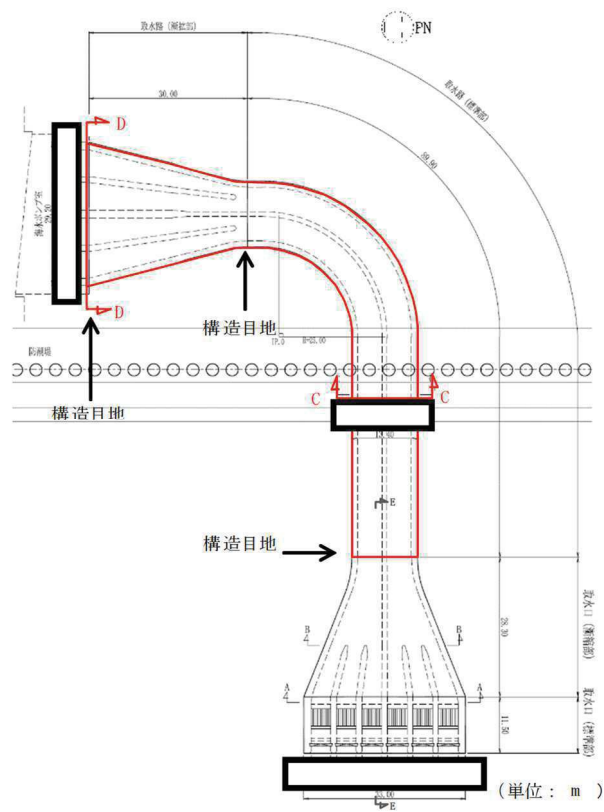
取水路は，取水口と海水ポンプ室を結ぶ，延長 119.9m の鉄筋コンクリート造の地下水路であり，内空幅 ，内空高さ の二連カルバート構造で断面一様である標準部と，四連カルバート構造で，下流に向かって内空幅 ，内空高さ まで断面が拡幅する漸拡部より構成され，延長方向に断面の変化が小さい線状構造物である（別添 6-2. 5. 2 図，別添 6-2. 5. 3 図，別添 6-2. 5. 4 図）。

よって，二次元地震応答解析により耐震評価を行う上で，構造的特徴，周辺状況，地震力の特性等を考慮して，構造物の応答が耐震評価上最も厳しくなると考えられる断面を評価対象断面として選定する。

本資料のうち，枠囲みの内容は機密事項又は商業機密に属しますので公開できません。

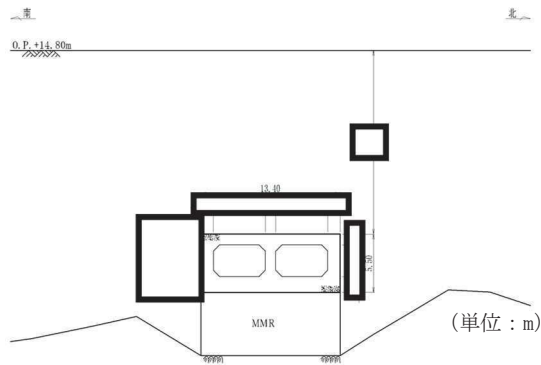


別添 6-2.5.1 図 取水路配置図

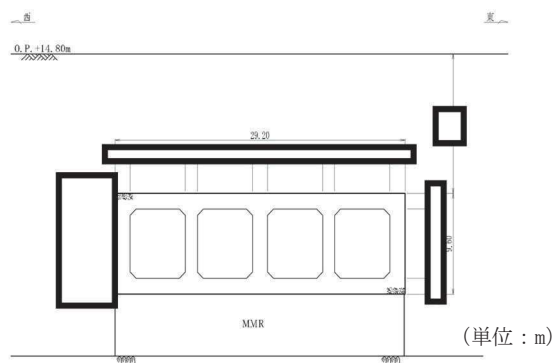


別添 6-2.5.2 図 取水路平面図

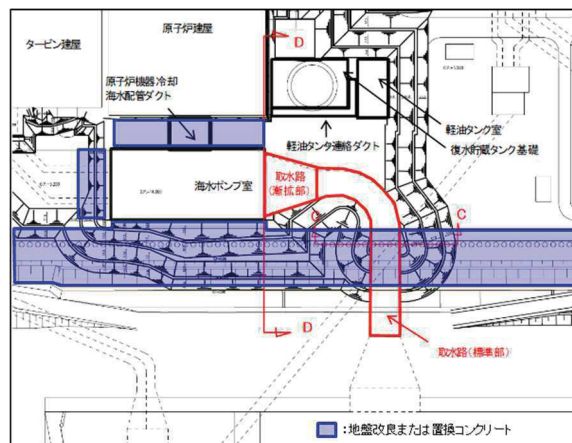
本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項又は商業機密に属しますので公開できません。



別添 6-2. 5. 3 図 取水路断面図 (標準部, C-C)

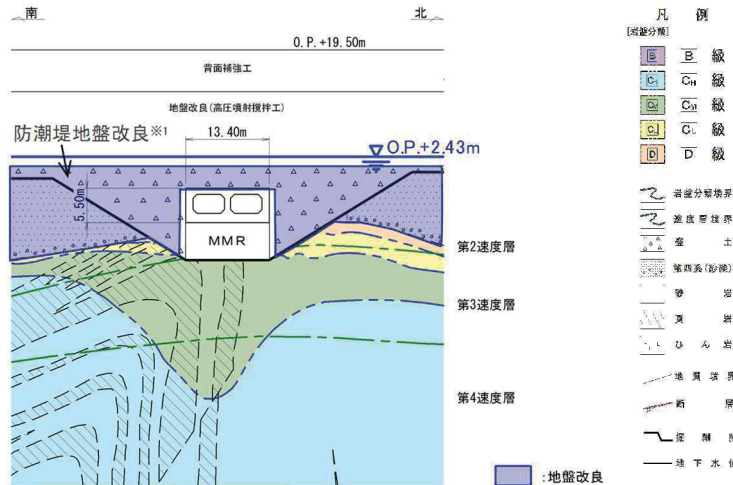


別添 6-2. 5. 4 図 取水路断面図 (漸拡部, D-D)



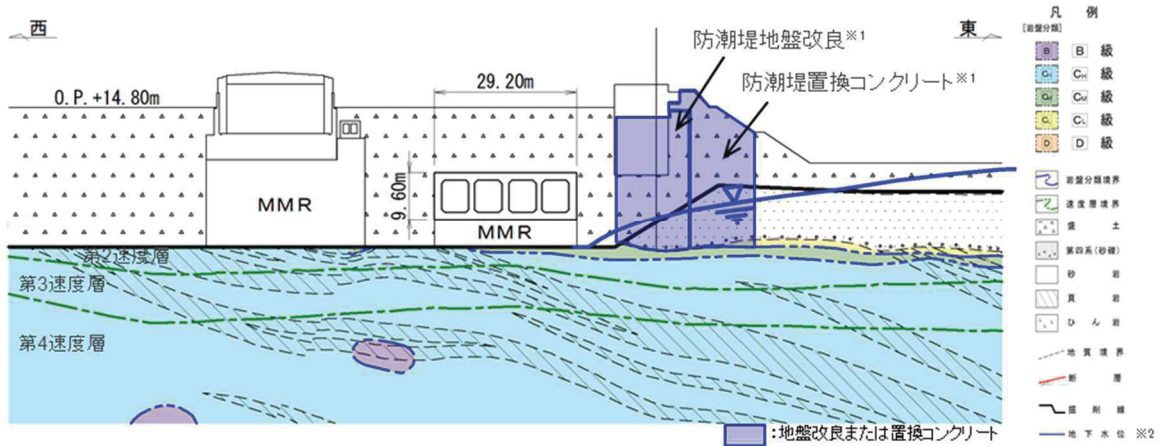
別添 6-2. 5. 5 図 取水路掘削図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項又は商業機密に属しますので公開できません。



別添 6-2. 5. 6 図 取水路地質断面図 (C-C)

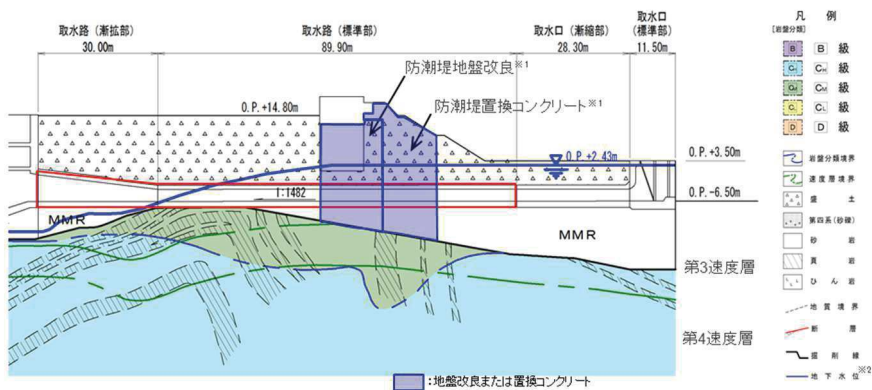
※ 地盤改良の範囲は今後の設計進捗で変更の可能性がある。



別添 6-2. 5. 7 図 取水路地質断面図 (D-D)

※1 地盤改良及び置換コンクリートの範囲は今後の設計進捗で変更の可能性がある。

※2 地下水位は、今後実施する浸透流解析等の地下水位設定に係る検討の結果を踏まえて設定する。



別添 6-2. 5. 8 図 取水路地質断面図 (縦断)

※1 地盤改良及び置換コンクリートの範囲は今後の設計進捗で変更の可能性がある。

※2 地下水位は、今後実施する浸透流解析等の地下水位設定に係る検討の結果を踏まえて設定する。

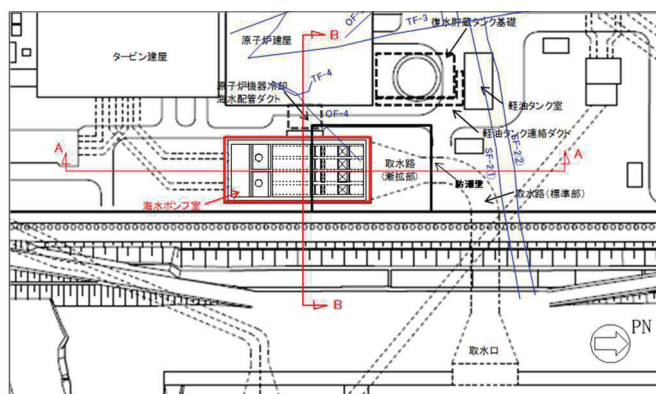
2.6 海水ポンプ室

海水ポンプ室の配置図を別添 6-2.6.1 図に，平面図を別添 6-2.6.2 図に，断面図を別添 6-2.6.3 図，別添 6-2.6.4 図に，掘削図を別添 6-2.6.5 図に，地質断面図を別添 6-2.6.6 図，別添 6-2.6.7 図にそれぞれ示す。

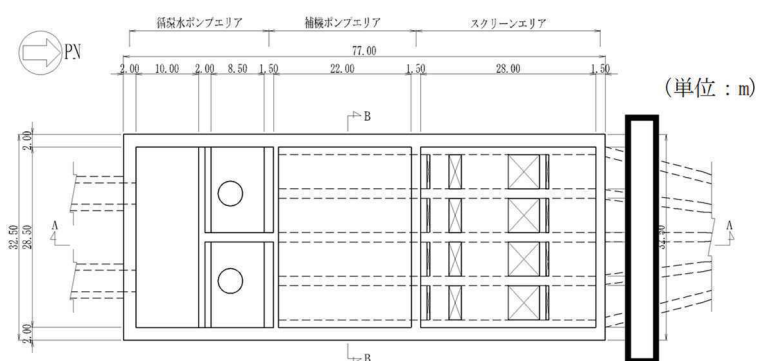
海水ポンプ室は，耐震重要施設及び常設重大事故等対処設備である原子炉補機冷却海水ポンプ等の間接支持機能と，非常用取水設備として通水，貯水機能，浸水防止のための止水機能が要求される。

海水ポンプ室は，延長 77m，幅 32.5m，高さ 28.4m の鉄筋コンクリート造の地中構造物であり，上流側より，スクリーンエリア，補機ポンプエリア，循環水ポンプエリアの 3 つのエリアにて構成され，構造物の断面が延長方向で異なり，加振方向に平行に配置される妻壁や隔壁等の面部材を有する箱形構造物である（別添 6-2.6.2 図，別添 6-2.6.3 図，別添 6-2.6.4 図）。

よって，構造的特徴，周辺状況，地震力の特性等を考慮して，三次元モデルに作用させる荷重を適切に評価することが可能な断面を直交する 2 方向から評価対象断面として選定する。

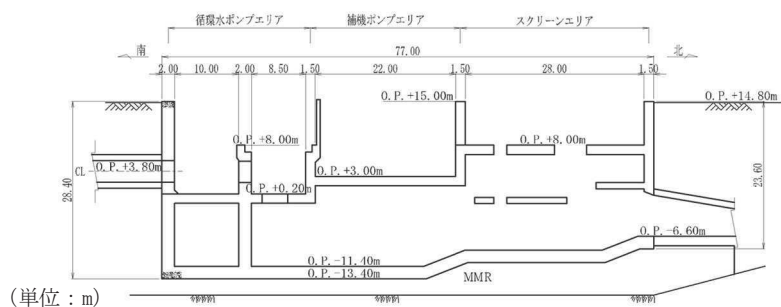


別添 6-2.6.1 図 海水ポンプ室配置図

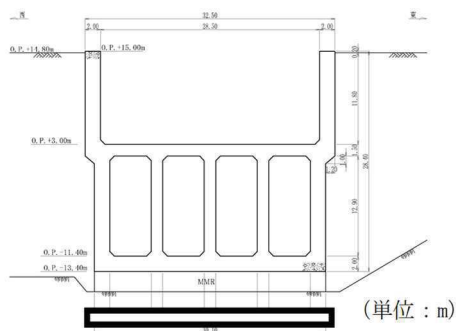


別添 6-2.6.2 図 海水ポンプ室平面図

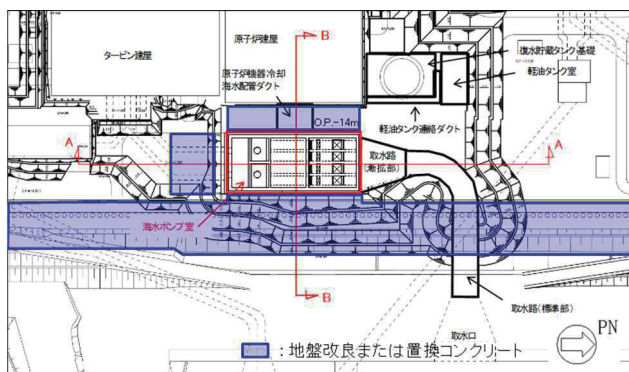
本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項又は商業機密に属しますので公開できません。



別添 6-2. 6. 3 図 海水ポンプ室縦断図 (A-A)

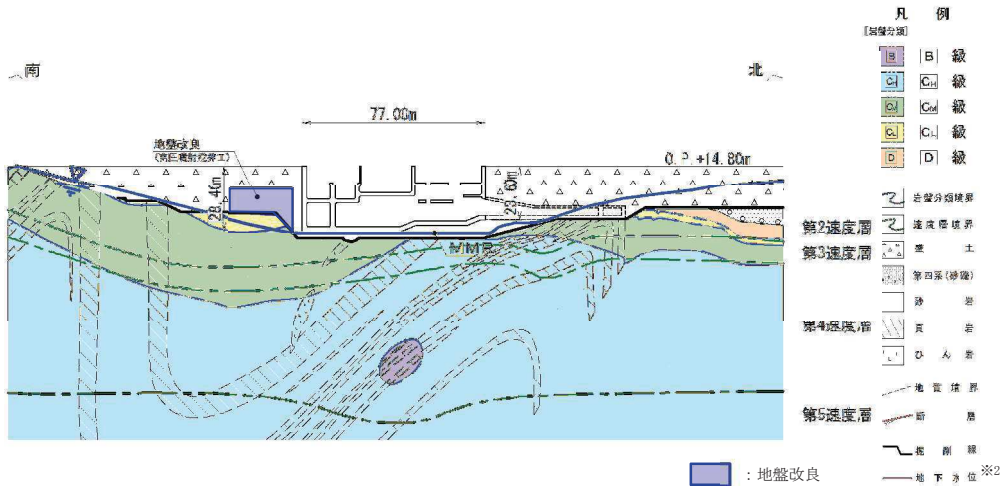


別添 6-2. 6. 4 図 海水ポンプ室断面図 (B-B)



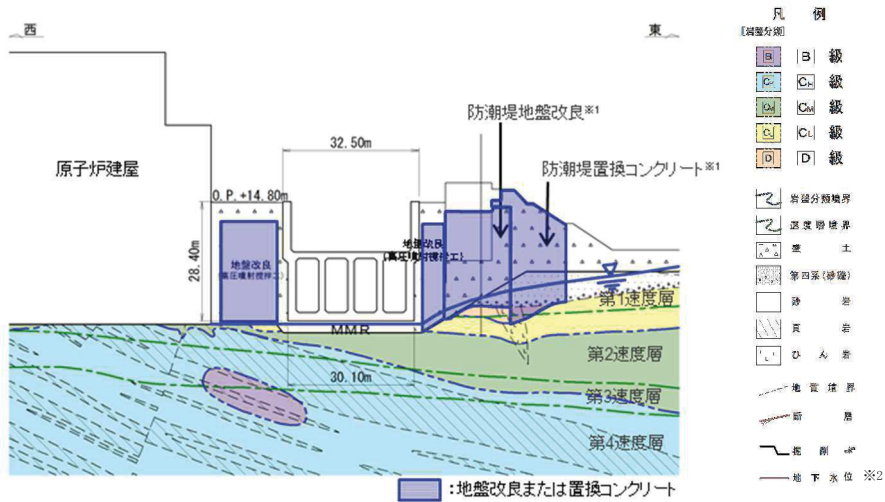
別添 6-2. 6. 5 図 海水ポンプ室掘削図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項又は商業機密に属しますので公開できません。



別添 6-2. 6. 6 図 海水ポンプ室地質断面図 (A-A)

※1 地盤改良の範囲は今後の設計進捗で変更の可能性がある。
 ※2 地下水位は、今後実施する浸透流解析等の地下水位設定に係る検討の結果を踏まえて設定する。



別添 6-2. 6. 7 図 海水ポンプ室地質断面図 (B-B)

※1 地盤改良及び置換コンクリートの範囲は今後の設計進捗で変更の可能性がある。
 ※2 地下水位は、今後実施する浸透流解析等の地下水位設定に係る検討の結果を踏まえて設定する。

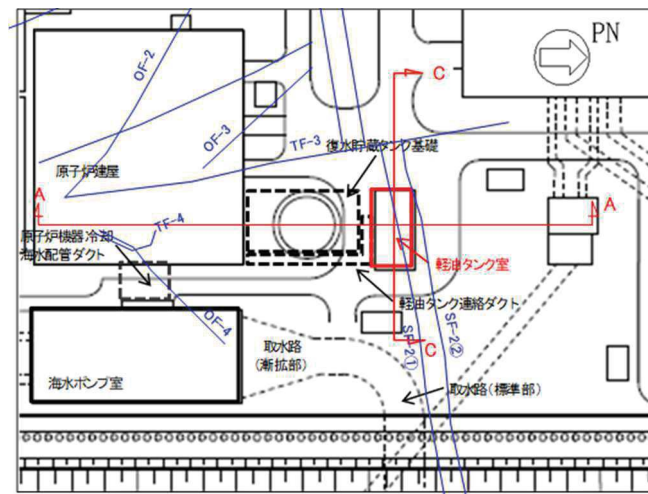
2.7 軽油タンク室

軽油タンク室の配置図を別添 6-2. 7. 1 図に、平面図を別添 6-2. 7. 2 図に、断面図を別添 6-2. 7. 3 図、別添 6-2. 7. 4 図に、掘削図を別添 6-2. 7. 5 図に、地質断面図を別添 6-2. 7. 6 図、別添 6-2. 7. 7 図にそれぞれ示す。

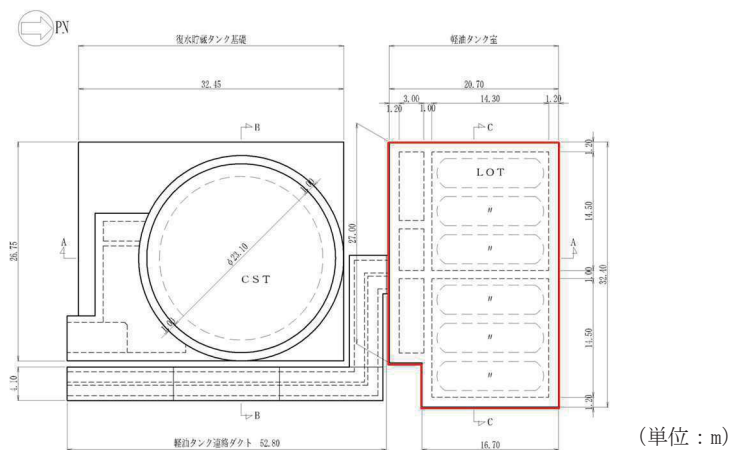
軽油タンク室は耐震重要施設及び常設重大事故等対処設備である軽油タンクや燃料移送系ポンプを間接支持しており、支持機能が要求される。

軽油タンク室は、幅 32.4m (東西方向) × 20.7m (南北方向)、高さ 6.8m の鉄筋コンクリート造の地中構造物であり、構造物の断面が延長方向で異なり、加振方向に平行に配置される妻壁や隔壁等の面部材を有する箱形構造物である (別添 6-2. 7. 2 図、別添 6-2. 7. 3 図、別添 6-2. 7. 4 図)。

よって、構造的特徴，周辺状況，地震力の特性等を考慮して，三次元モデルに作用させる荷重を適切に評価することが可能な断面を直交する2方向から評価対象断面として選定する。

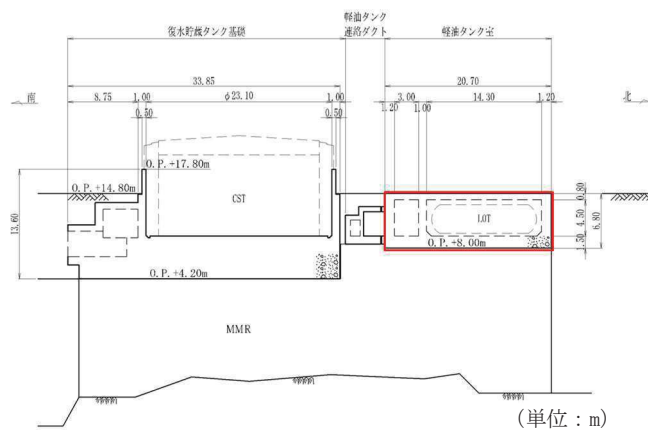


別添 6-2.7.1 図 軽油タンク室配置図



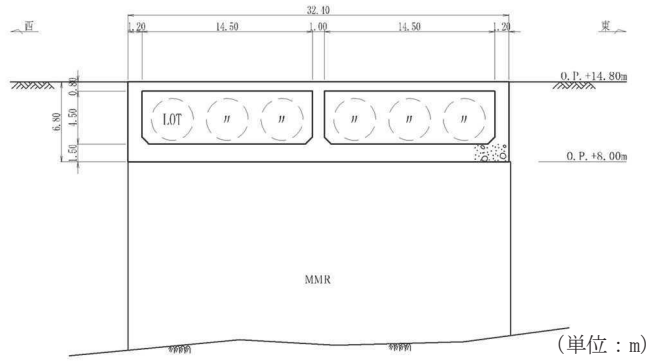
(単位：m)

別添 6-2.7.2 図 軽油タンク室平面図

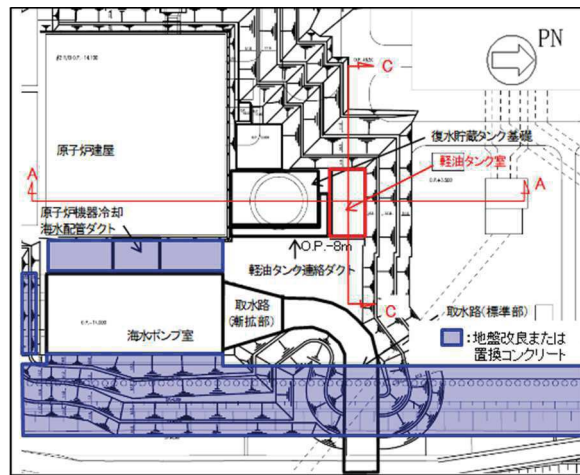


(単位：m)

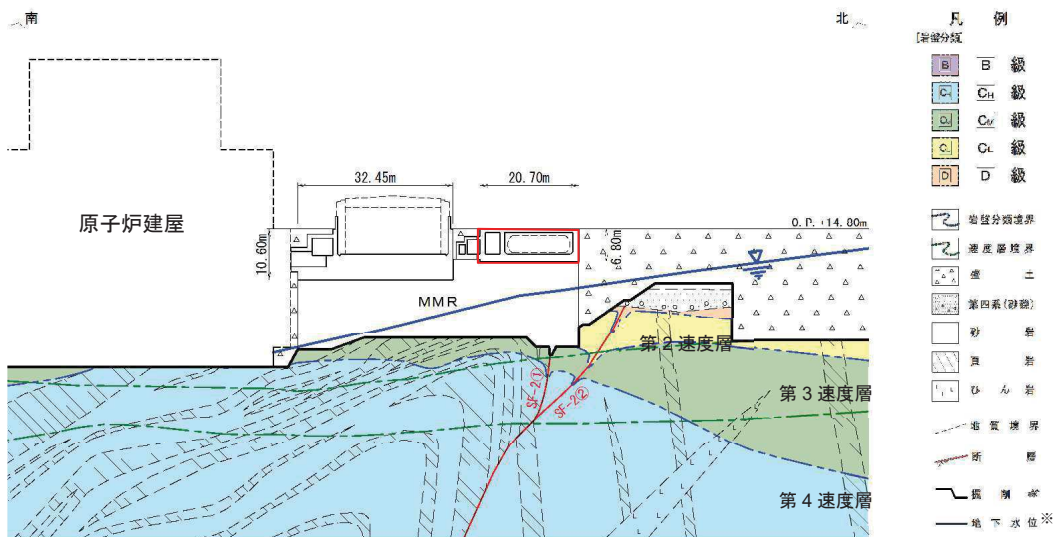
別添 6-2.7.3 図 軽油タンク室断面図 (A-A)



別添 6-2.7.4 図 軽油タンク室断面図 (C-C)

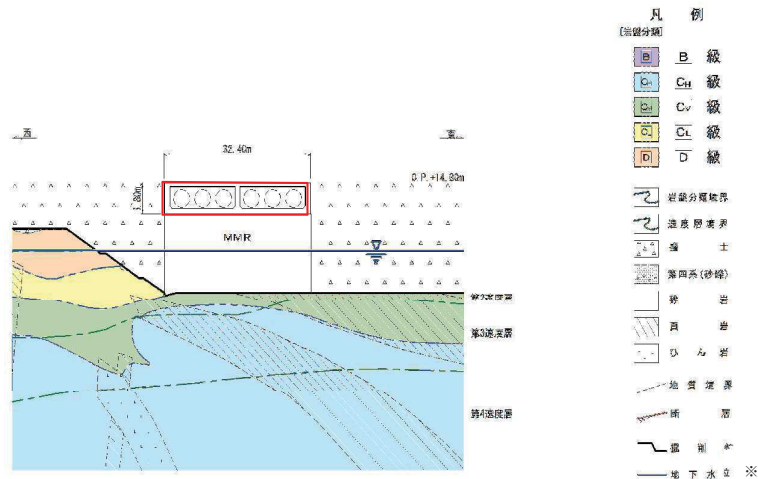


別添 6-2.7.5 図 軽油タンク室掘削図



別添 6-2.7.6 図 軽油タンク室地質断面図 (A-A)

※1 地下水位は、今後実施する浸透流解析等の地下水位設定に係る検討の結果を踏まえて設定する。



別添 6-2. 7. 7 図 軽油タンク室地質断面図 (C-C)

※1 地下水位は、今後実施する浸透流解析等の地下水位設定に係る検討の結果を踏まえて設定する。

2. 8 取水口，貯留堰

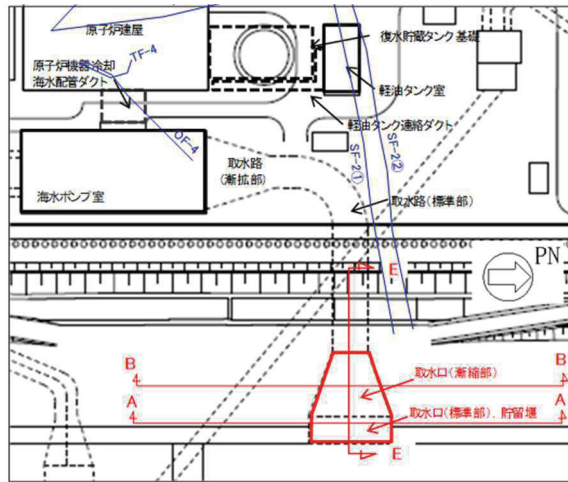
取水口及び貯留堰の配置図を別添 6-2. 8. 1 図に，平面図を別添 6-2. 8. 2 図に，断面図を別添 6-2. 8. 3 図，別添 6-2. 8. 4 図，別添 6-2. 8. 5 図に，掘削図を別添 6-2. 8. 6 図に，地質断面図を別添 6-2. 8. 7 図，別添 6-2. 8. 8 図，別添 6-2. 8. 9 図にそれぞれ示す。

取水口は非常用取水設備であり通水機能及び貯水機能が要求される。また，貯留堰は非常用取水設備及び津波防護施設であり通水機能及び貯水機能が要求される。

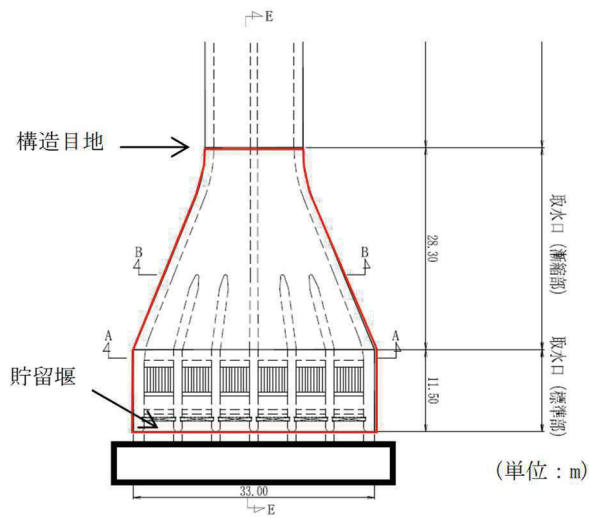
取水口は鉄筋コンクリート造の地中構造物であり，延長 11. 5m，内空幅 内空高さ の六連カルバート構造の標準部と，延長 28. 3m で内空幅 ，内空高さ の六連カルバートから内空幅 ，内空高さ の二連カルバートに断面が縮小する漸縮部より構成され，構造物の断面が延長方向で異なり，加振方向に平行に配置される妻壁や隔壁等の面部材を有する箱形構造物である（別添 6-2. 8. 2 図，別添 6-2. 8. 3 図，別添 6-2. 8. 4 図，別添 6-2. 8. 5 図）。

よって，構造的特徴，周辺状況，地震力の特性等を考慮して，三次元モデルに作用させる荷重を適切に評価することが可能な断面を直交する 2 方向から評価対象断面として選定する。

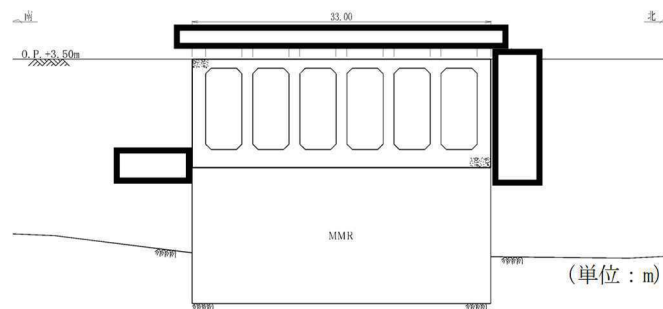
本資料のうち，枠囲みの内容は機密事項又は商業機密に属しますので公開できません。



別添 6-2.8.1 図 取水口，貯留堰配置図

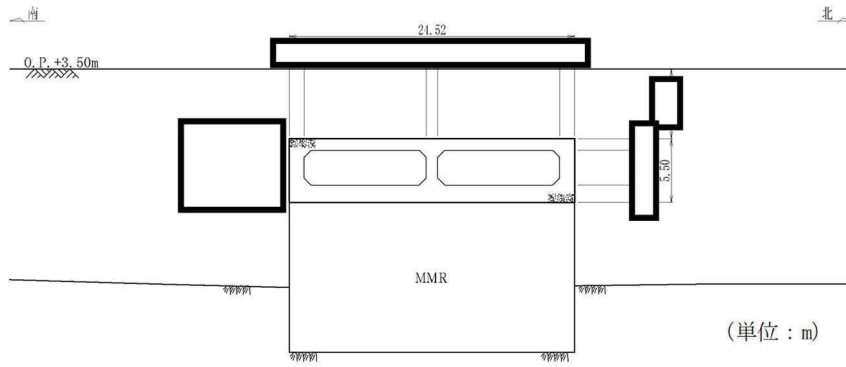


別添 6-2.8.2 図 取水口，貯留堰平面図

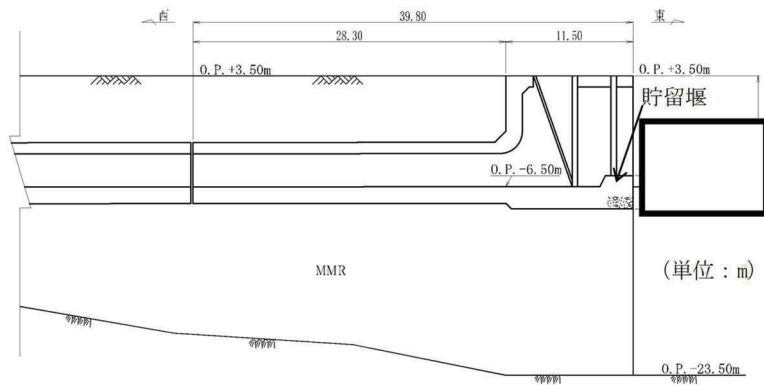


別添 6-2.8.3 図 取水口断面図（標準部，A-A）

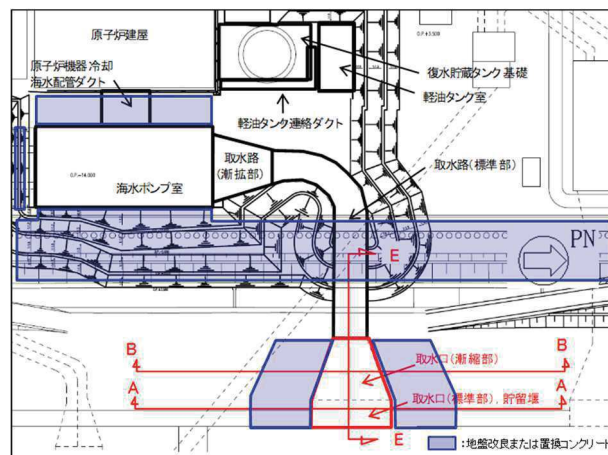
本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項又は商業機密に属しますので公開できません。



別添 6-2. 8. 4 図 取水口断面図 (漸縮部, B-B)

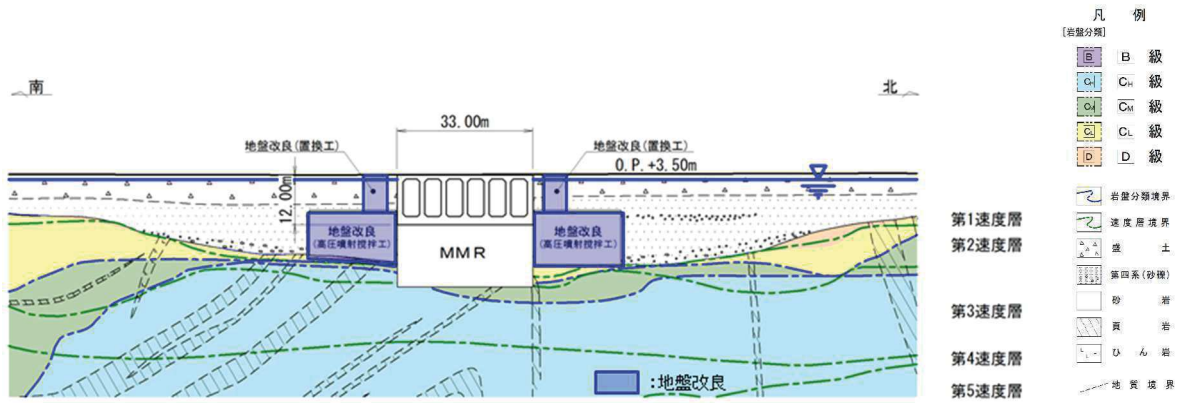


別添 6-2. 8. 5 図 取水口, 貯留堰縦断面図 (E-E)

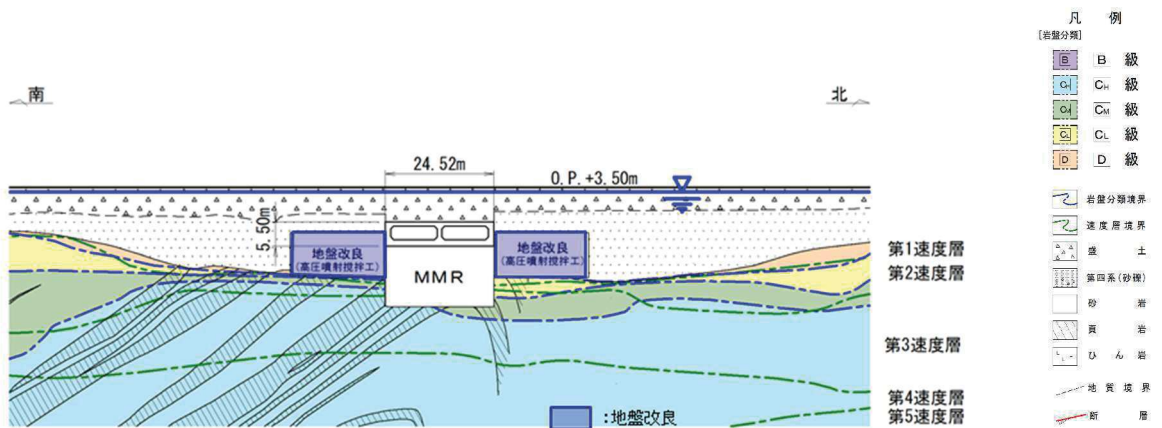


別添 6-2. 8. 6 図 取水口掘削図

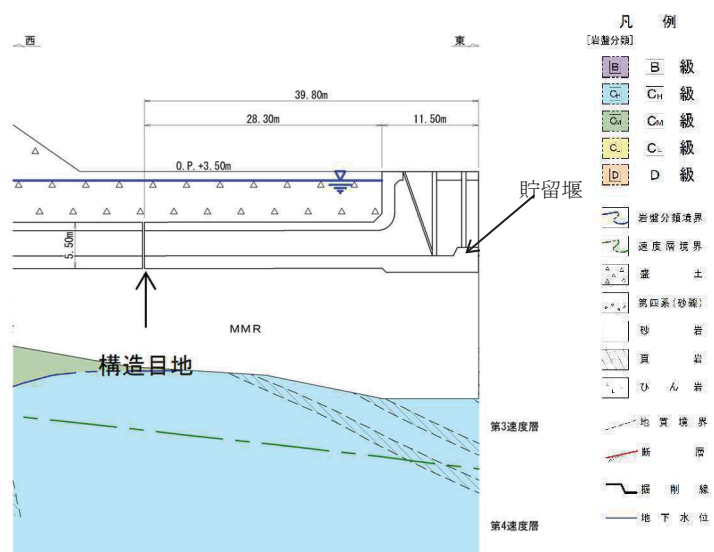
本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項又は商業機密に属しますので公開できません。



別添 6-2. 8. 7 図 取水口地質断面図 (標準部)



別添 6-2. 8. 8 図 取水口地質断面図 (漸縮部)



別添 6-2. 8. 9 図 取水口, 貯留堰地質断面図 (縦断面部)

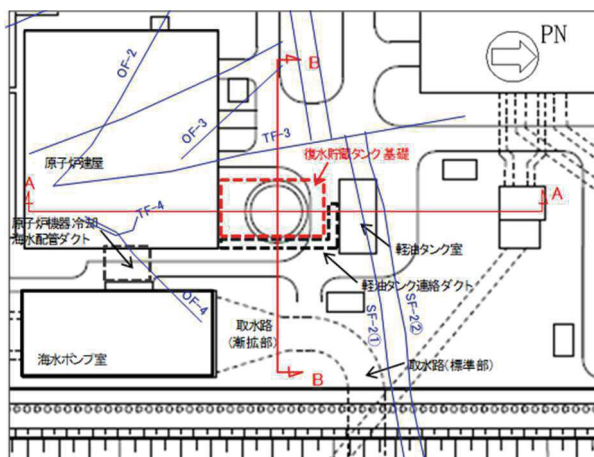
2.9 復水貯蔵タンク基礎

復水貯蔵タンク基礎の配置図を別添 6-2.9.1 図に、平面図を別添 6-2.9.2 図に、断面図を別添 6-2.9.3 図、別添 6-2.9.4 図に、掘削図を別添 6-2.9.5 図に、地質断面図を別添 6-2.9.6 図、別添 6-2.9.7 図にそれぞれ示す。

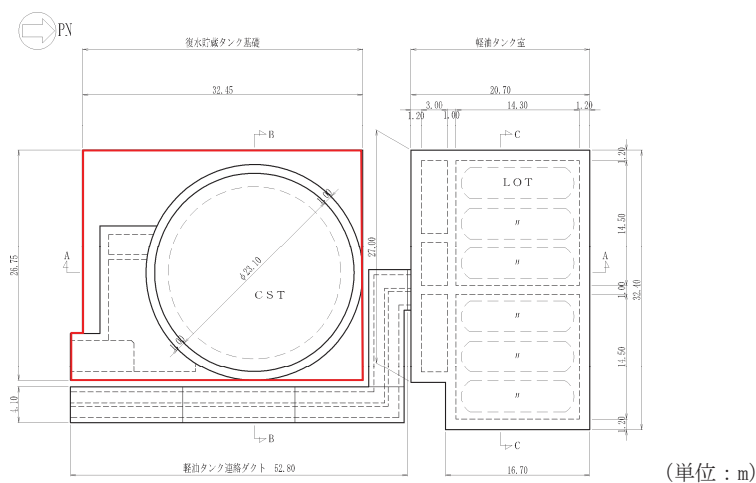
復水貯蔵タンク基礎は、常設重大事故等対処設備である復水貯蔵タンクを間接支持しており、支持機能が要求される。

復水貯蔵タンク基礎は、幅 26.75m（東西方向）×32.45m（南北方向）、高さ 13.6m の鉄筋コンクリート造の地中構造物で、復水貯蔵タンクを間接支持する基礎版と円筒形の遮蔽壁から構成され、構造物の断面が延長方向で異なり、加振方向に平行に配置される妻壁や隔壁等の面部材を有する箱形構造物である（別添 6-2.9.2 図、別添 6-2.9.3 図、別添 6-2.9.4 図）。

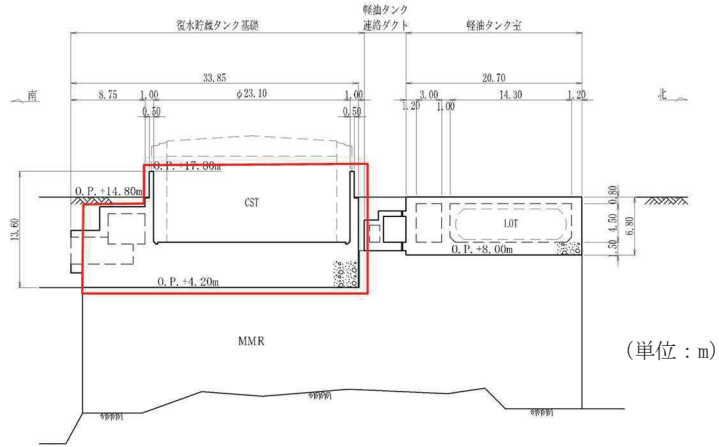
よって、構造的特徴、周辺状況、地震力の特性等を考慮して、三次元モデルに作用させる荷重を適切に評価することが可能な断面を直交する 2 方向から評価対象断面として選定する。



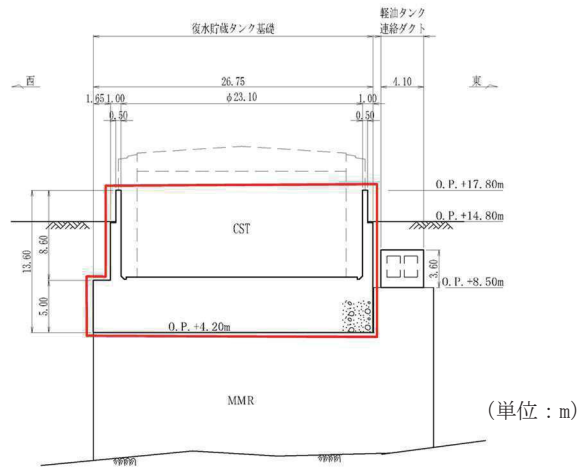
別添 6-2.9.1 図 復水貯蔵タンク基礎配置図



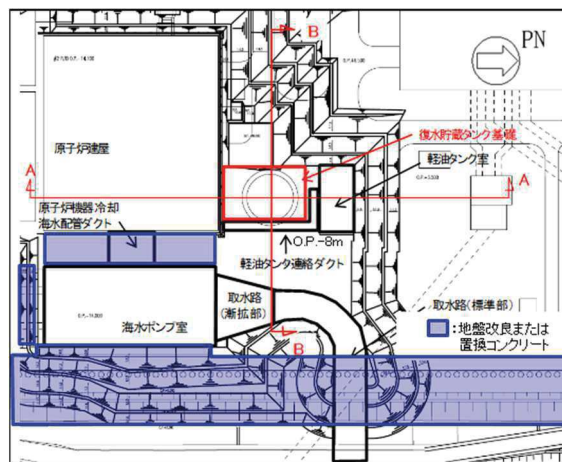
別添 6-2.9.2 図 復水貯蔵タンク基礎平面図



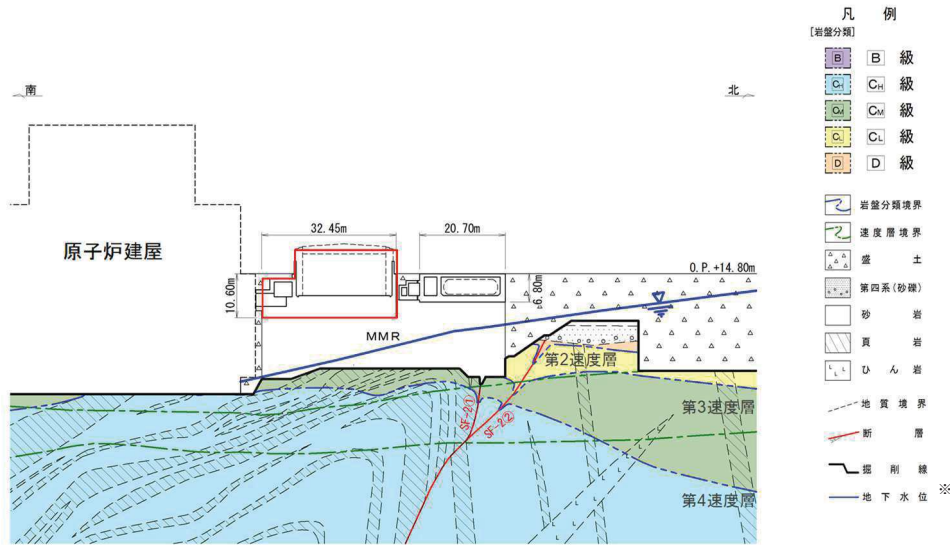
別添 6-2.9.3 図 復水貯蔵タンク基礎断面図 (A-A)



別添 6-2.9.4 図 復水貯蔵タンク基礎断面図 (B-B)

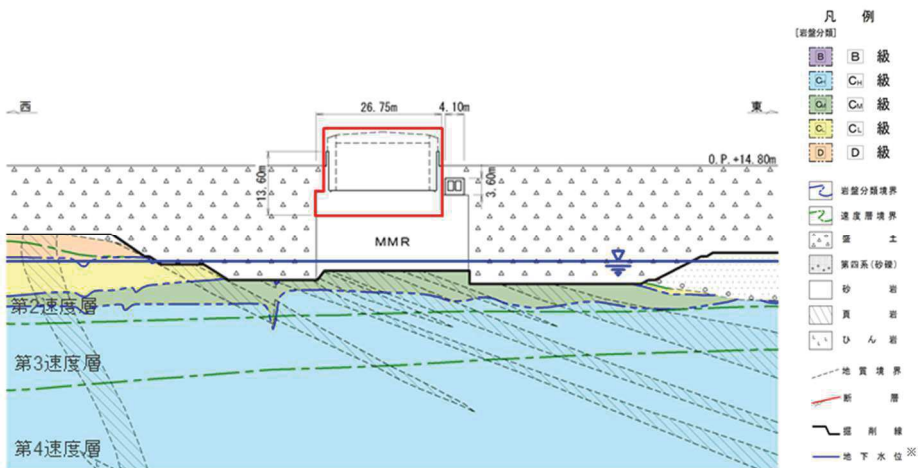


別添 6-2.9.5 図 復水貯蔵タンク基礎掘削図



別添 6-2. 9. 6 図 復水貯蔵タンク地質断面図 (A-A)

※1 地下水位は、今後実施する浸透流解析等の地下水位設定に係る検討の結果を踏まえて設定する。



別添 6-2. 9. 7 図 復水貯蔵タンク地質断面図 (B-B)

※1 地下水位は、今後実施する浸透流解析等の地下水位設定に係る検討の結果を踏まえて設定する。

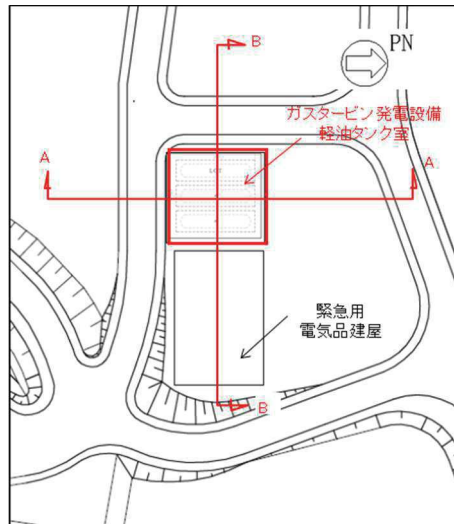
2.10 ガスタービン発電設備軽油タンク室

ガスタービン発電設備軽油タンク室の配置図を別添 6-2. 10. 1 図に、平面図を別添 6-2. 10. 2 図に、断面図を別添 6-2. 10. 3 図、別添 6-2. 10. 4 図に、掘削図を別添 6-2. 10. 5 図に、地質断面図を別添 6-2. 10. 6 図、別添 6-2. 10. 7 図にそれぞれ示す。

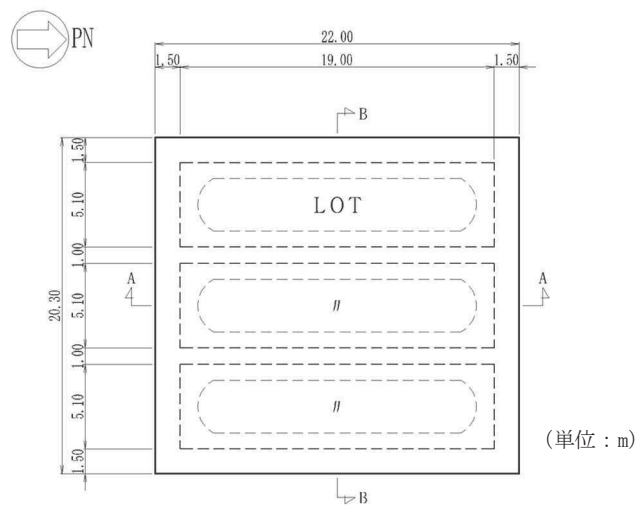
ガスタービン発電設備軽油タンク室は常設重大事故等対処設備であるガスタービン発電設備軽油タンクを間接支持しており、支持機能が要求される。

ガスタービン発電設備軽油タンク室は、幅 20.3m (東西方向) × 22m (南北方向)、高さ 7.1m の鉄筋コンクリート造の地中構造物で、構造物の断面が延長方向で異なり、加振方向に平行に配置される妻壁や隔壁等の面部材を有する箱形構造物である (別添 6-2. 10. 2 図、別添 6-2. 10. 3 図、別添 6-2. 10. 4 図)。

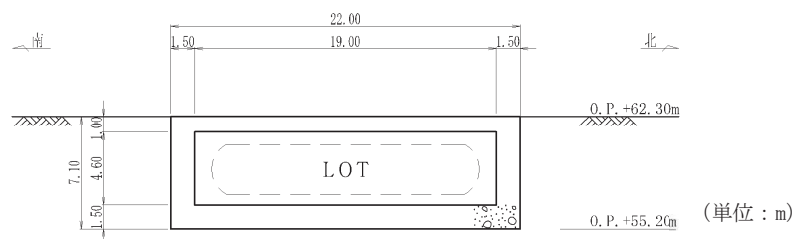
よって、構造的特徴，周辺状況，地震力の特性等を考慮して，三次元モデルに作用させる荷重を適切に評価することが可能な断面を直交する2方向から評価対象断面として選定する。



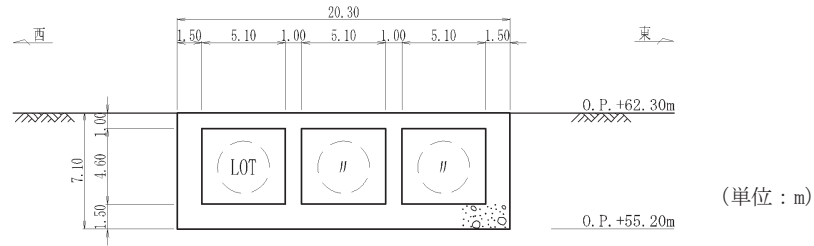
別添 6-2. 10. 1 図 ガスタービン発電設備軽油タンク室配置図



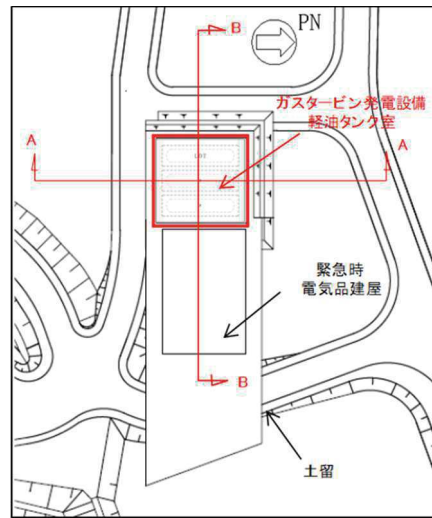
別添 6-2. 10. 2 図 ガスタービン発電設備軽油タンク室平面図



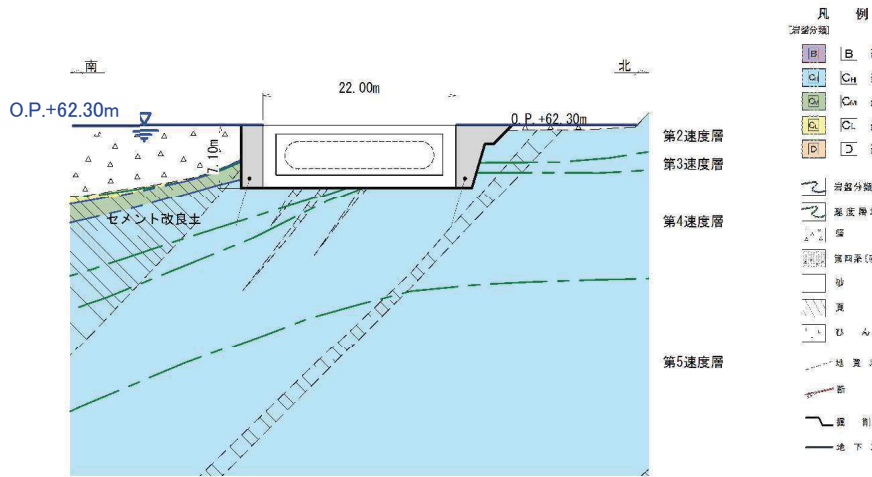
別添 6-2. 10. 3 図 ガスタービン発電設備軽油タンク室断面図 (A-A)



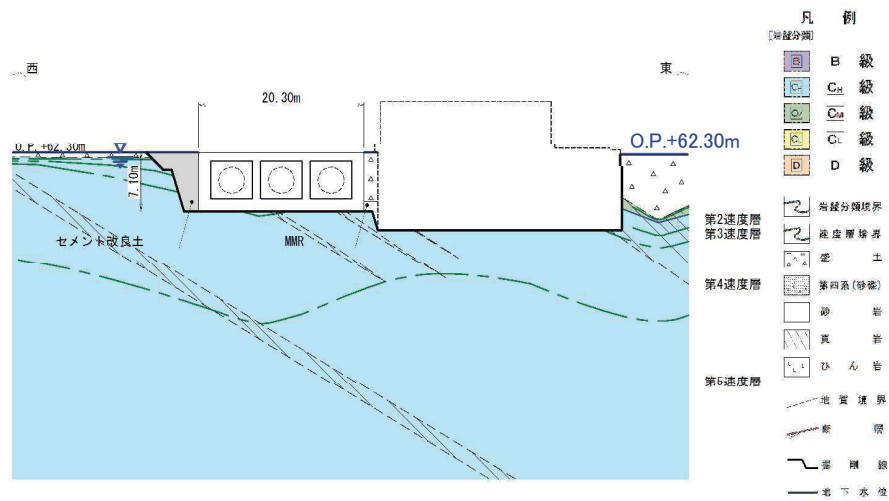
別添 6-2. 10. 4 図 ガスタービン発電設備軽油タンク室断面図 (B-B)



別添 6-2. 10. 5 図 ガスタービン発電設備軽油タンク室掘削図



別添 6-2. 10. 6 図 ガスタービン発電設備軽油タンク室地質断面図 (A-A)



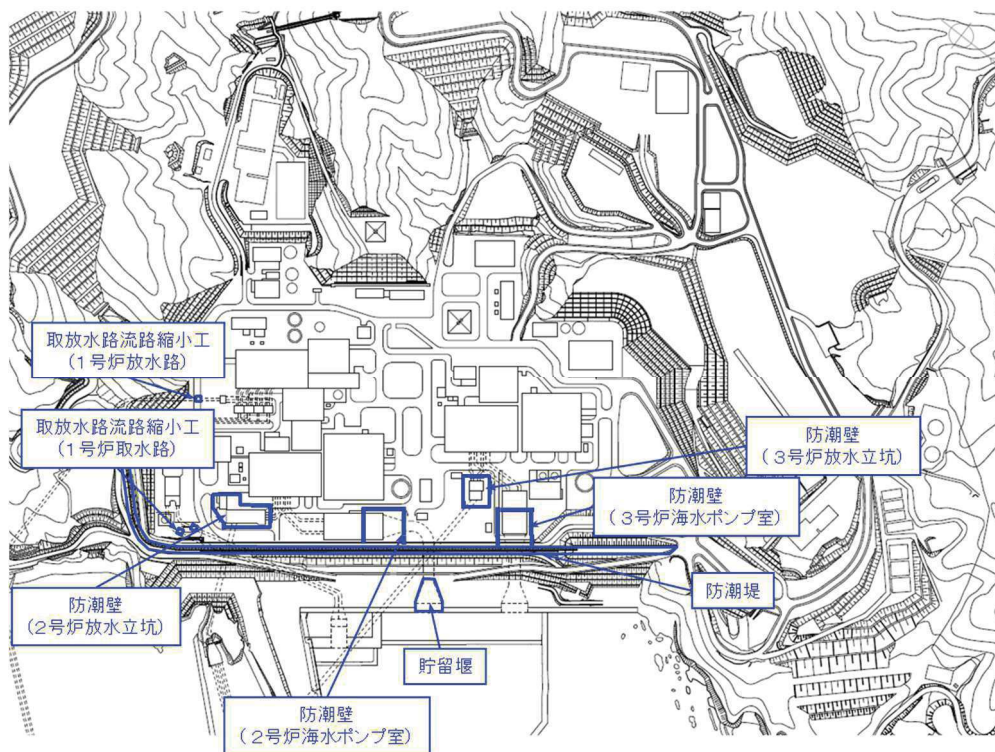
別添 6-2. 10. 7 図 ガスタービン発電設備軽油タンク室地質断面図 (B-B)

3 津波防護施設の耐震評価における断面選定の考え方

本章では、津波防護施設である、防潮堤、防潮壁及び取放水路流路縮小工の断面選定の考え方を示す。なお、貯留堰の耐震評価は、取水口と同じモデルで評価するため、取水口の断面選定の基本方針に準ずる。

別添 6-3. 1. 1 図に津波防護施設の全体配置図を示す。

なお、津波防護施設の設計においては、2011年東北地方太平洋沖地震による地殻変動に伴う、約1mの沈降を考慮する。



別添 6-3. 1. 1 図 津波防護施設の全体配置図

3.1 防潮堤

防潮堤の平面図を別添 6-3.1.2 図に、縦断図を別添 6-3.1.3 図に示す。防潮堤は、鋼管式鉛直壁（一般部）、鋼管式鉛直壁（岩盤部）及び盛土堤防に区分され、総延長は約 800m、天端高さは O. P. +29m からなる。鋼管式鉛直壁（一般部）、鋼管式鉛直壁（岩盤部）及び盛土堤防の構造を別添 6-3.1.4～別添 6-3.1.8 図に示す。

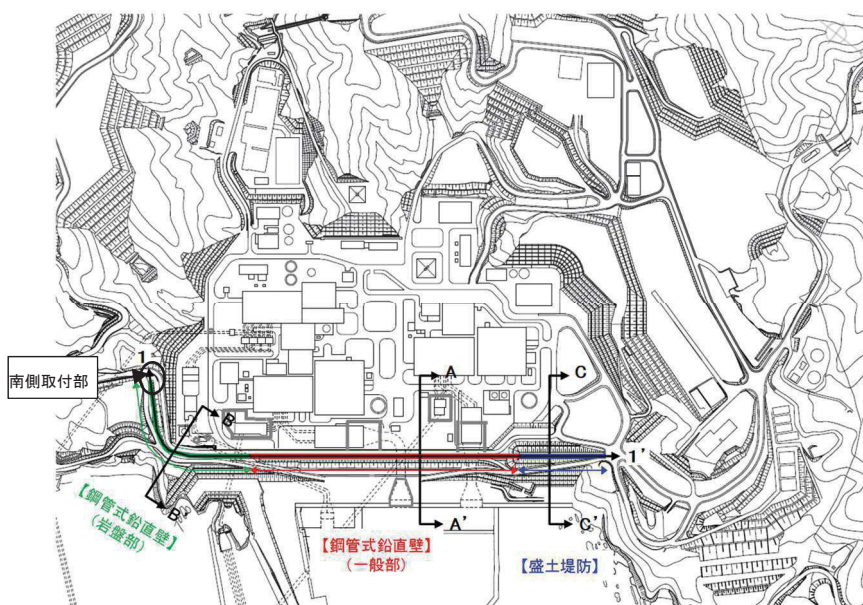
防潮堤は、屋外重要土木構造物等と同様の考え方に加え、各部位の役割及び設計方針を踏まえ、津波に対する止水機能維持も含めた耐震評価を行うため、耐震・耐津波評価を行う上で厳しい断面を選定する。

以下に断面選定に関連する評価上の留意点を示す。

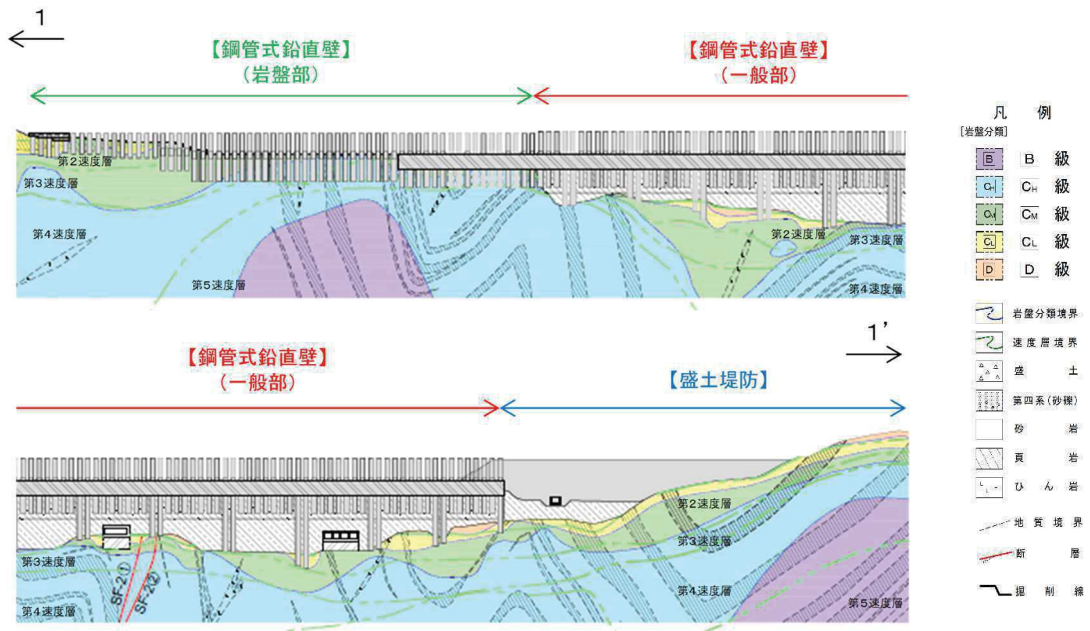
- ・ 延長方向に断面の変化がない線状構造物であり、屋外重要土木構造物等の考え方に基づき、評価対象断面を選定する*。
- ・ 鋼管式鉛直壁（一般部）と盛土堤防の境界部の断面を検討断面として追加する。
- ・ 止水機能の他に津波監視設備である津波監視カメラ（防潮堤北側エリアに今後設置予定）を間接支持することとしており、支持機能が要求される。床応答算出位置については、今後設置予定の津波監視カメラの設計方針を踏まえ、必要に応じて断面の追加を検討することとする。

各部位の役割及び設計方針並びに評価上の留意点の詳細については、審査資料「津波による損傷の防止 添付資料 2 4 防潮堤の設計方針及び構造成立性の評価結果について」に記載する。

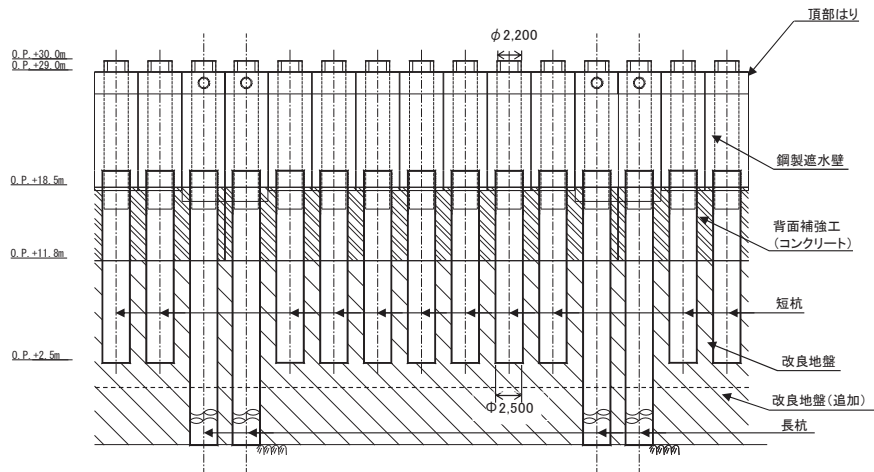
※防潮堤の審査のうち設置許可段階における構造成立性評価にて示した評価断面以外に、一次元地震応答解析結果を参照し、必要に応じて検討断面を追加する。



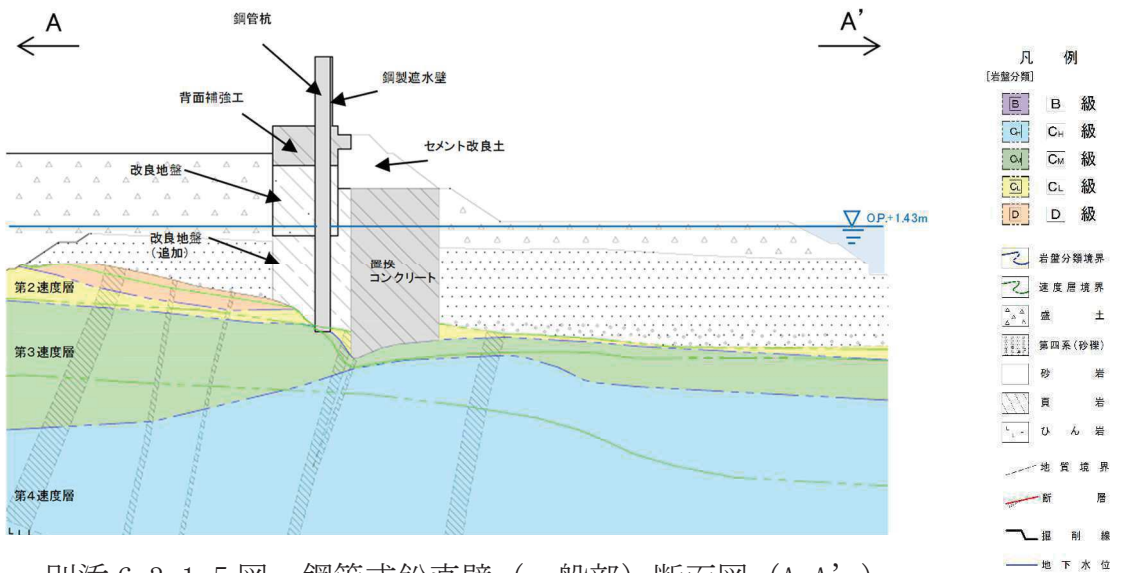
別添 6-3.1.2 図 防潮堤平面図



別添 6-3. 1. 3 図 防潮堤縦断面図

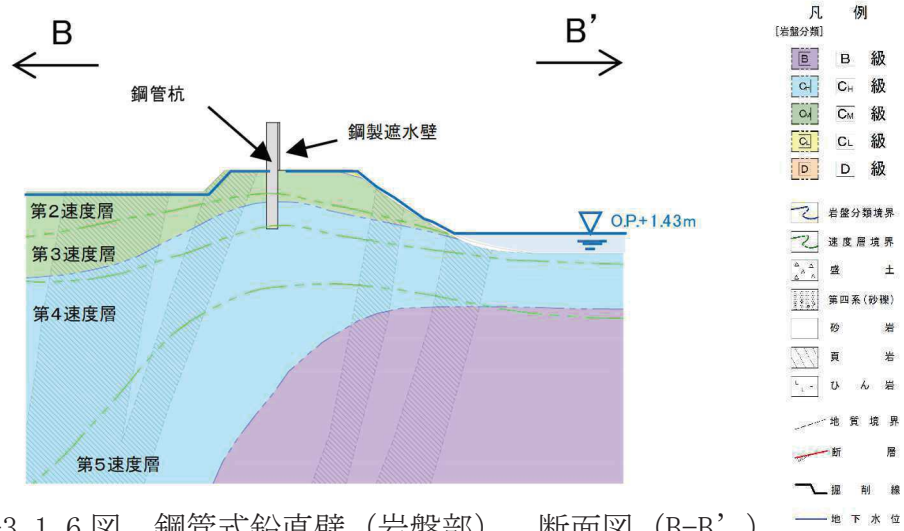


別添 6-3. 1. 4 図 鋼管式鉛直壁（一般部） 正面図

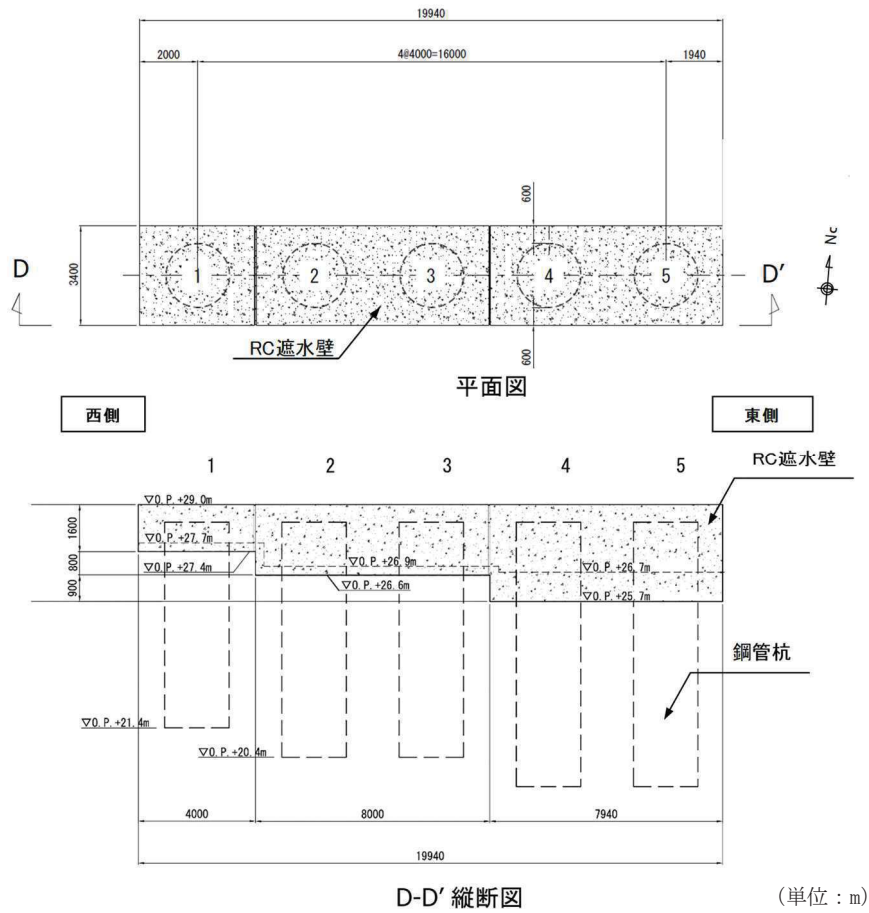


別添 6-3. 1. 5 図 鋼管式鉛直壁（一般部）断面図（A-A'）

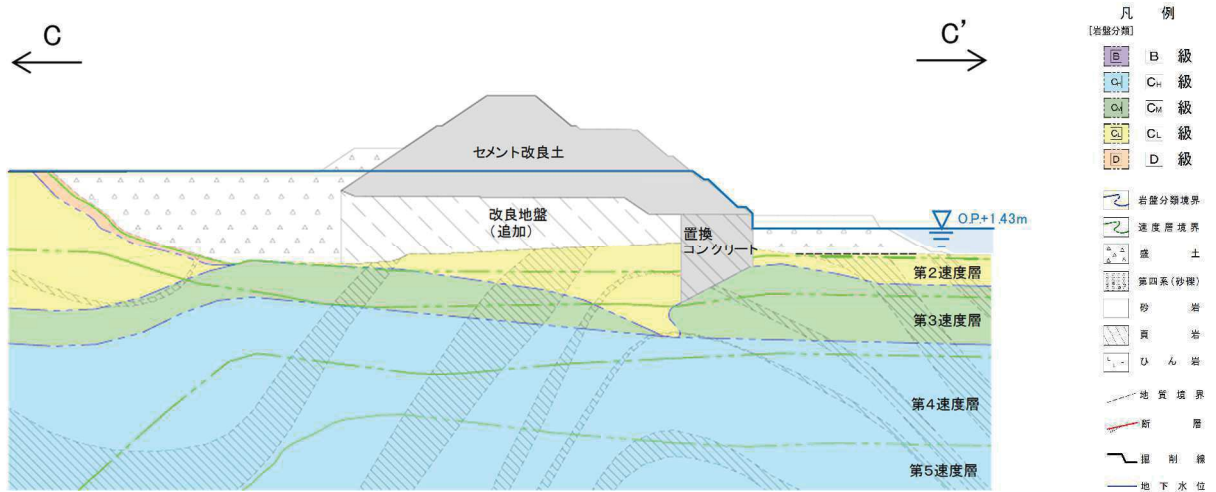
※ 地下水位は、今後実施する浸透流解析等の地下水位設定に係る検討の結果を踏まえて設定する。



別添 6-3. 1. 6 図 鋼管式鉛直壁 (岩盤部) 断面図 (B-B')



別添 6-3. 1. 7 図 南側取付部 詳細図



別添 6-3.1.8 図 盛土堤防 断面図

※ 地下水位は、今後実施する浸透流解析等の地下水位設定に係る検討の結果を踏まえて設定する。

3.2 防潮壁（鋼製遮水壁（鋼板），鋼製遮水壁（鋼桁），鋼製扉，RC 遮水壁）

防潮壁の配置図を別添 6-3.2.1 図に，縦断面図を別添 6-3.2.2 図，別添 6-3.2.3 図，別添 6-3.2.4 図，別添 6-3.2.5 図に示す。防潮壁は，総延長は約 680m，天端高さは 0. P. +19. 0m 又は 0. P. +20. 0m で，上部工の構造形式により，鋼製遮水壁（鋼板），鋼製遮水壁（鋼桁），鋼製扉及び RC 遮水壁に区分される。それぞれの構造概要を別添 6-3.2.6 図，別添 6-3.2.7 図，別添 6-3.2.8 図，別添 6-3.2.9 図に示す。

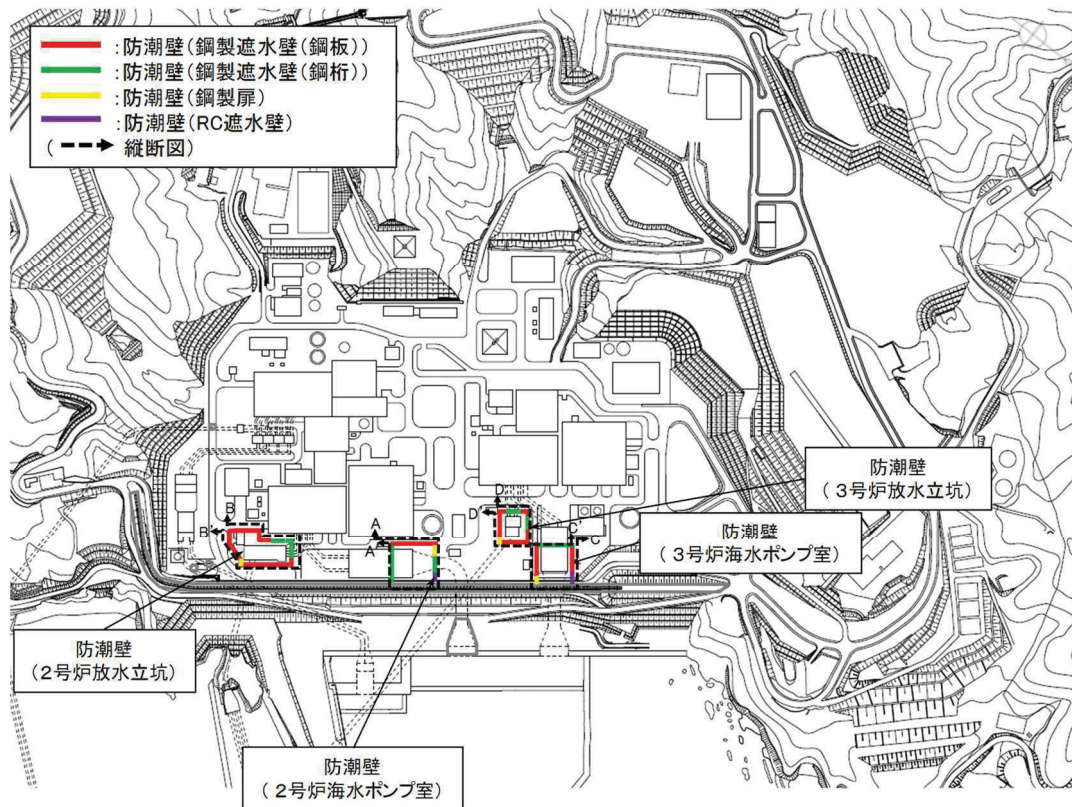
防潮壁は，鋼管杭と基礎フーチングからなる下部工と，構造形式毎に鋼製又は鉄筋コンクリート製の上部工から構成され，同一構造形式間の構造目地部や各構造形式間の接合部には変位追従性を有する止水ジョイントを設置する津波防護施設である。

よって，屋外重要土木構造物等と同様の考え方に加え，各部位の役割及び設計方針を踏まえ，津波に対する止水機能維持も含めた耐震評価を行うため，耐震・耐津波評価を行う上で厳しい断面を選定する。

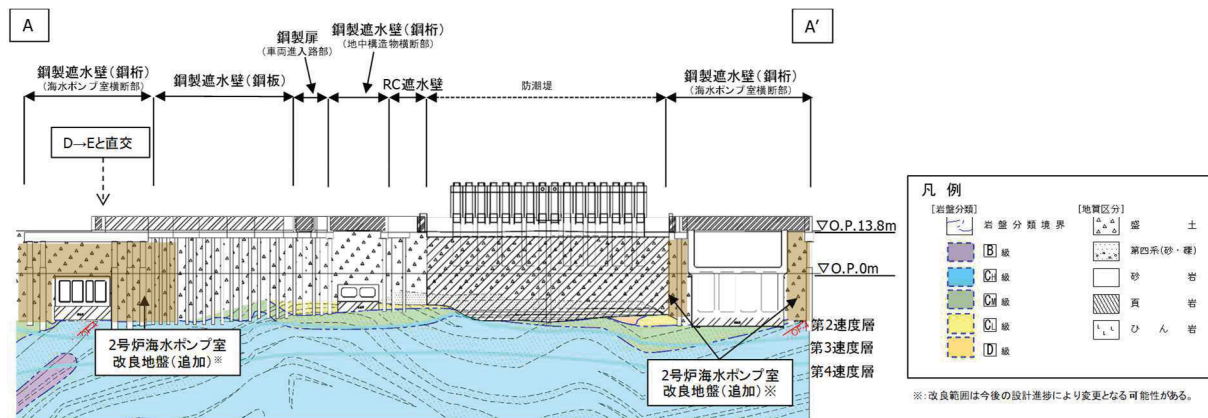
以下に断面選定に関連する評価上の留意点を示す。

- ・ 延長方向に断面の変化がない線状構造物である鋼製遮水壁（鋼板）は，屋外重要土木構造物等の考え方にに基づき，評価対象断面を選定する。
- ・ 鋼製遮水壁（鋼桁），鋼製扉及び RC 遮水壁は，構造諸元（上部工の高さ，幅等）の異なる同一構造形式が複数個所に設置されることから，次元地震応答解析等を実施し，評価の代表性が説明できる場合には，評価対象構造物の絞り込みを行う。
- ・ なお，下部工と上部工で厳しい結果となる断面が異なる可能性を踏まえ，上部工と下部工のそれぞれに与える影響を考慮して，評価対象断面の選定及び評価対象構造物の絞り込みを行う。
- ・ また，同一構造形式間の構造目地部や各構造形式間の接合部に止水ジョイントを設置することとしており，地震時の変位追従性を確認する必要があることから，地震応答解析結果等から相対変位量が大きくなる箇所を変位量評価断面として抽出する。

各部位の役割及び設計方針並びに評価上の留意点の詳細については，審査資料「津波による損傷の防止 添付資料 3 3 杭基礎構造防潮壁の設計方針について」に記載する。

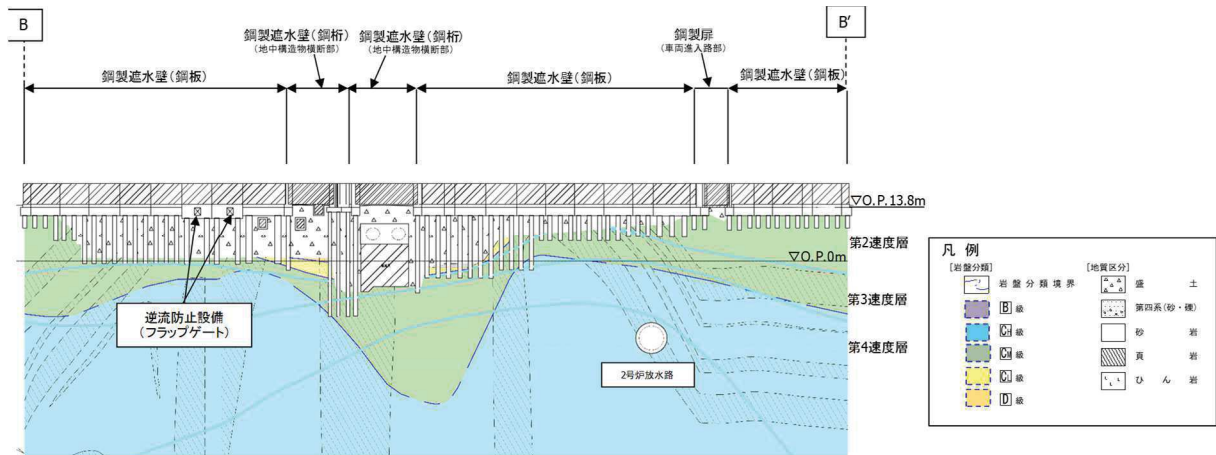


別添 6-3. 2. 1 図 防潮壁配置図



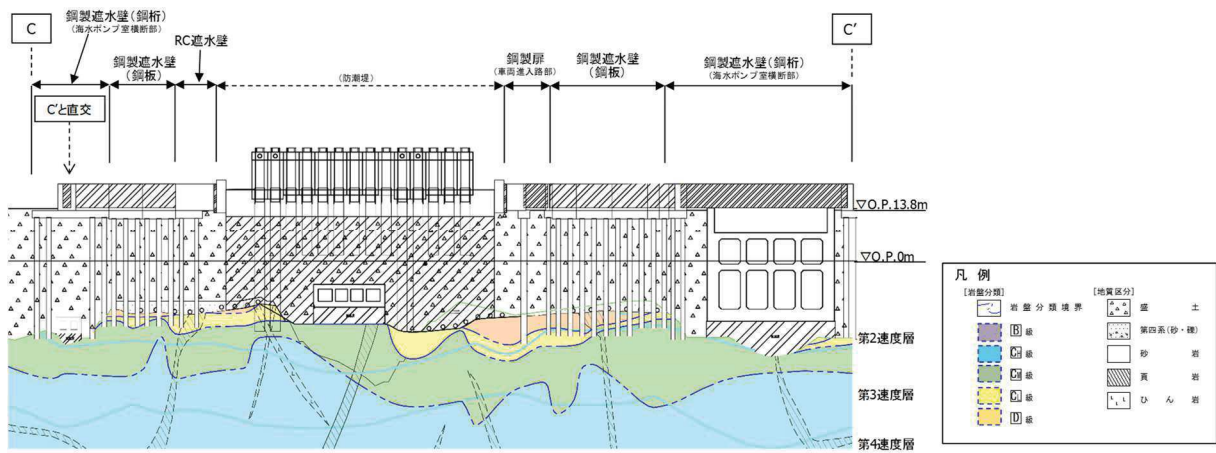
別添 6-3. 2. 2 図 防潮壁縦断面図 (2号炉海水ポンプ室)

※ 地下水位は、今後実施する浸透流解析等の地下水位設定に係る検討の結果を踏まえて設定する。



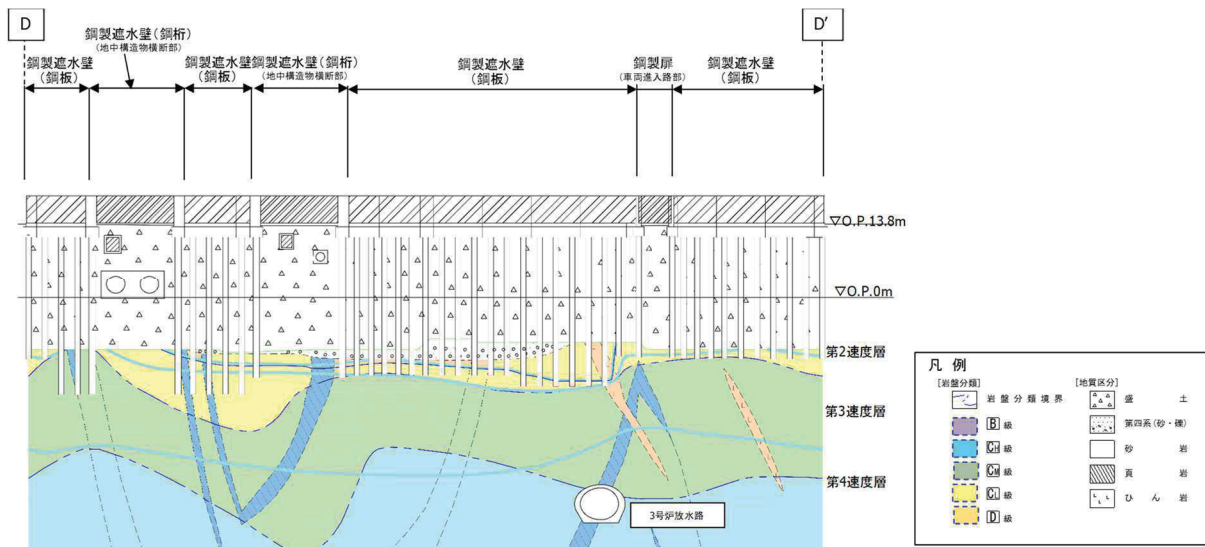
別添 6-3. 2. 3 図 防潮壁縦断面図 (2号炉放水立坑)

※ 地下水位は、今後実施する浸透流解析等の地下水位設定に係る検討の結果を踏まえて設定する。



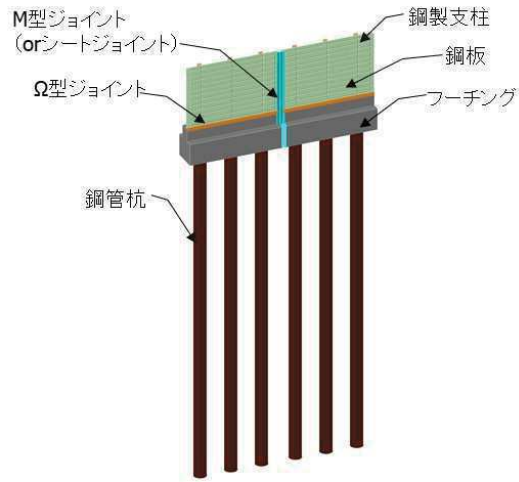
別添 6-3. 2. 4 図 防潮壁縦断面図 (3号炉海水ポンプ室)

※ 地下水位は、今後実施する浸透流解析等の地下水位設定に係る検討の結果を踏まえて設定する。

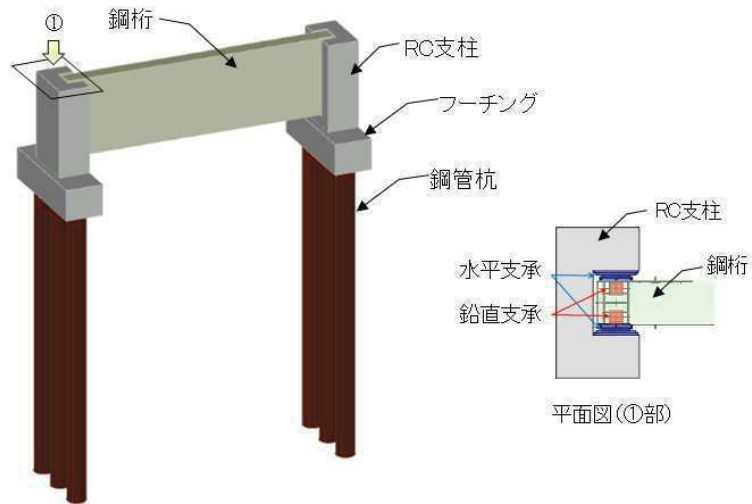


別添 6-3. 2. 5 図 防潮壁縦断面図 (3号炉放水立坑)

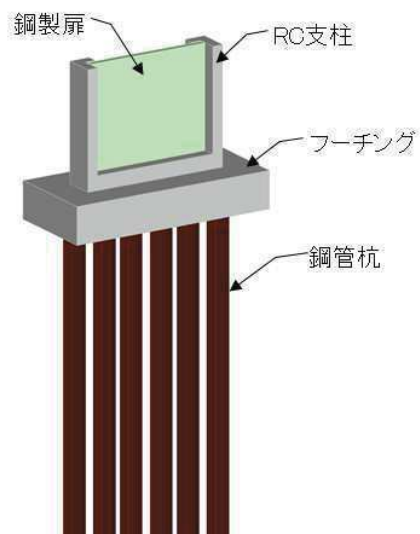
※ 地下水位は、今後実施する浸透流解析等の地下水位設定に係る検討の結果を踏まえて設定する。



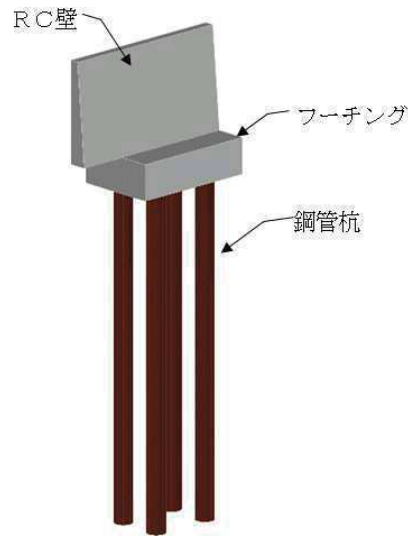
別添 6-3. 2. 6 図 鋼製遮水壁（鋼板） 概要図



別添 6-3. 2. 7 図 鋼製遮水壁（鋼桁） 概要図



別添 6-3. 2. 8 図 鋼製扉 概要図



別添 6-3. 2. 9 図 RC 遮水壁 概要図

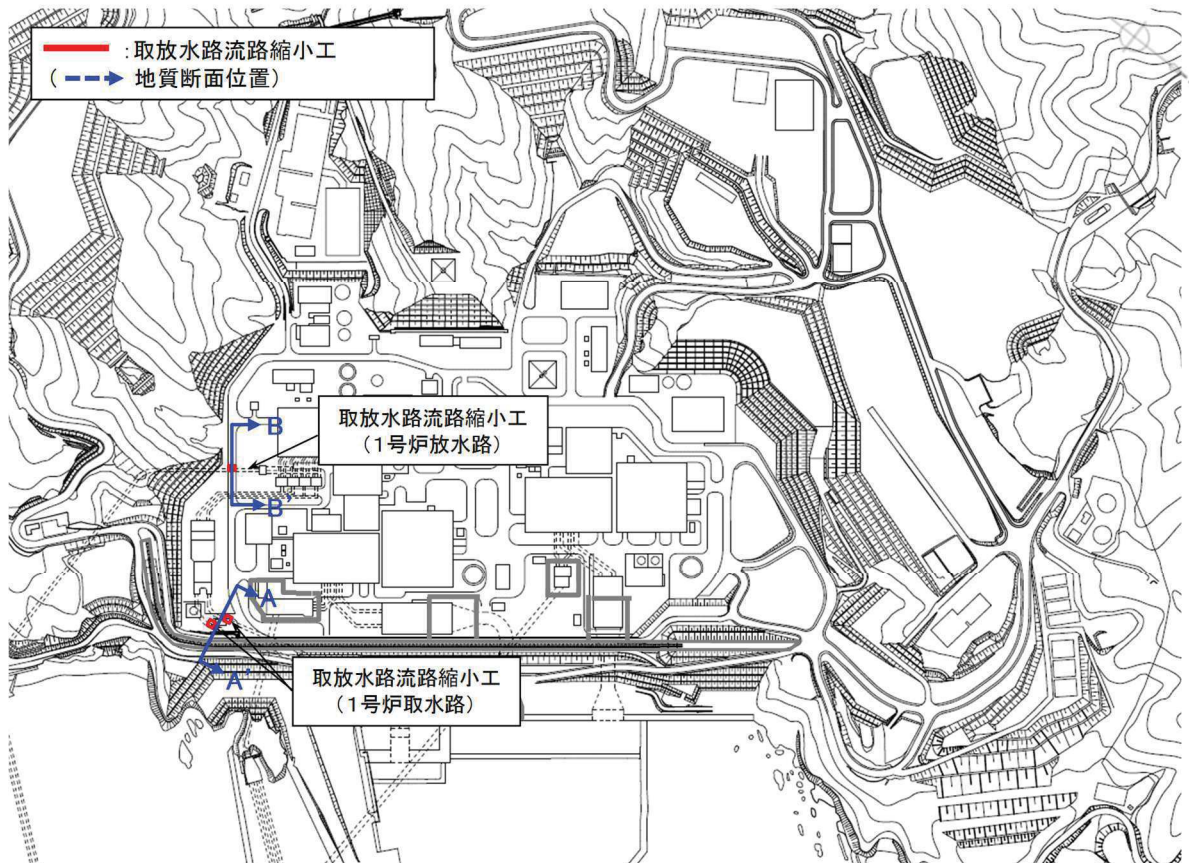
3. 3 取放水路流路縮小工

取放水路流路縮小工の平面図を別添 6-3. 3. 1 図に，断面図及び縦断図を別添 6-3. 3. 2 図，別添 6-3. 3. 3 図，別添 6-3. 3. 4 図，別添 6-3. 3. 5 図に示す。

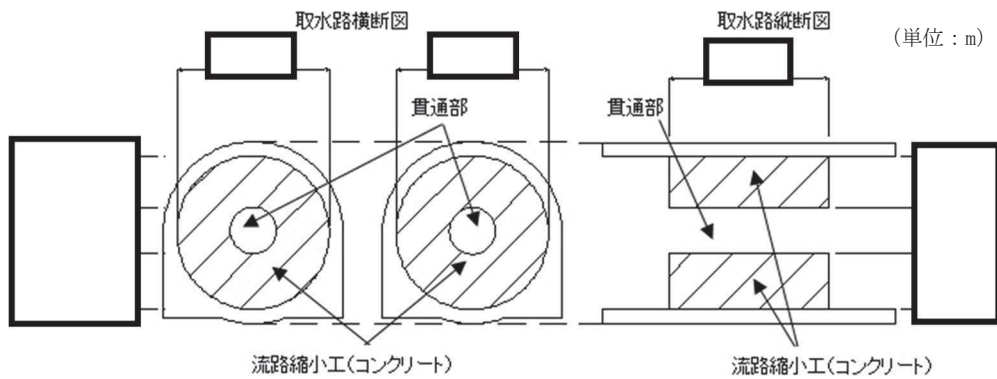
取放水路流路縮小工は， C_M 級岩盤内に設置された岩盤トンネルである既設 1 号炉取放水路を縮小する形で設置する，直径 (取水路) 及び (放水路)，延長 (取水路) 及び (放水路) のコンクリート製の躯体で，延長方向に断面の変化がない線状構造物である(別添 6-3. 3. 2 図，別添 6-3. 3. 3 図)。

二次元地震応答解析により耐震評価を行う上で，構造的特徴，周辺状況，地震力の特性等を考慮して，構造物の応答が耐震評価上最も厳しくなると考えられる位置を評価対象断面として選定する。

本資料のうち，枠囲みの内容は機密事項又は商業機密に属しますので公開できません。

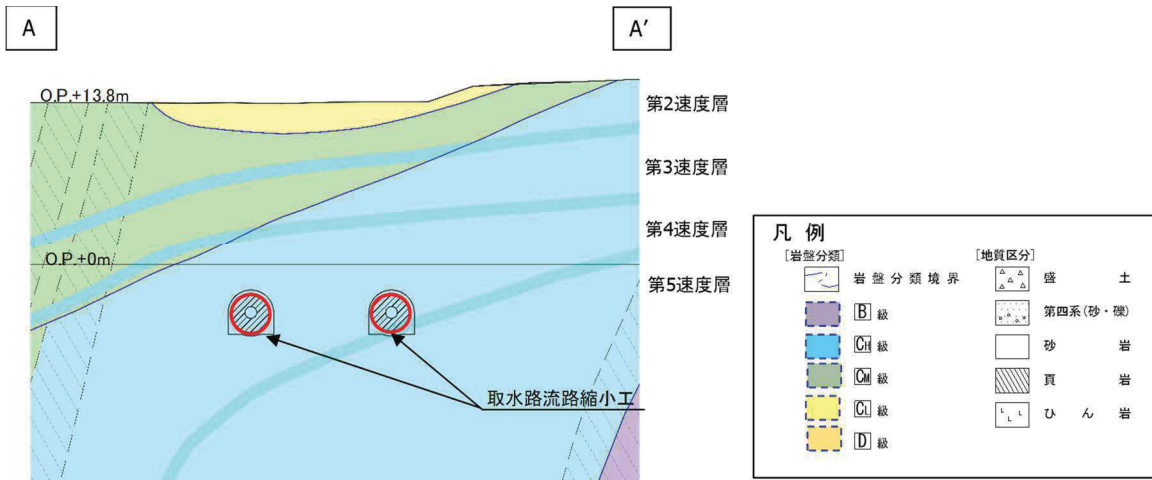


別添 6-3. 3. 1 図 流路縮小工（取水路） 平面図

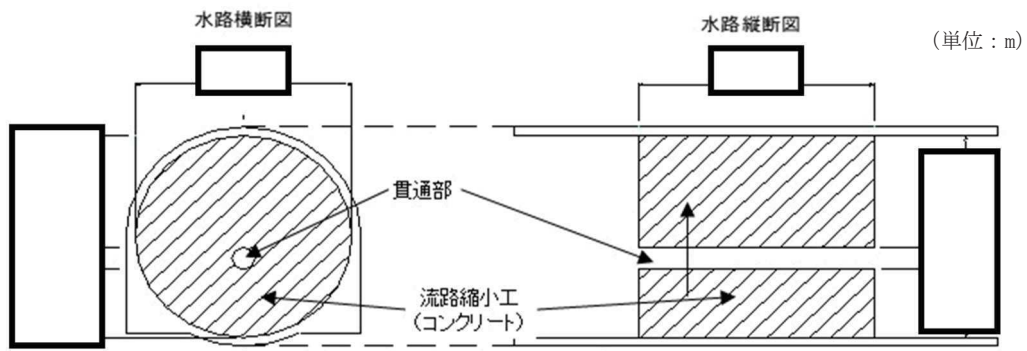


別添 6-3. 3. 2 図 流路縮小工（取水路） 構造図

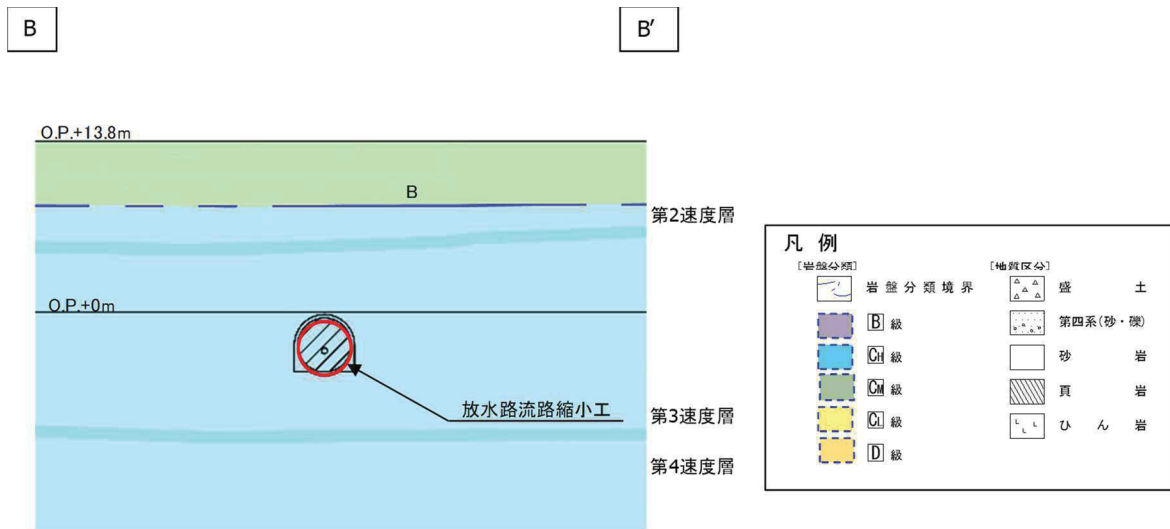
本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項又は商業機密に属しますので公開できません。



別添 6-3. 3. 3 図 流路縮小工（取水路） 断面図



別添 6-3. 3. 4 図 流路縮小工（放水路） 構造図



別添 6-3. 3. 5 図 流路縮小工（放水路） 断面図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項又は商業機密に属しますので公開できません。

女川原子力発電所 2 号炉

既工認との手法の相違点の整理
(設置変更許可申請段階での整理)

目 次

1. はじめに	1
2. 整理方針	1
3. 既工認と今回工認の手法の相違点の整理結果	1
4. 論点の重み付け評価	1
5. 工認段階での論点の概要について	10
6. 女川2号炉に特有事項における耐震設計への反映事項について	10

添 付 資 料

添付資料 1 女川 2 号炉 既工認と今回工認の手法の相違点の整理結果

添付資料 2 論点の重み付け評価結果

添付資料 3 論点の概要

参考資料 1 D1 ランク 論点の概要

参考資料 2 機器・配管系の設備の既工認からの構造変更について

参考資料 3 等価繰返し回数の評価方針について

参考資料 4 燃料集合体に対する鉛直地震動の影響について

参考資料 5 制御棒挿入性試験の概要

参考資料 6 女川原子力発電所 2 号炉 東北地方太平洋沖地震等による影響を踏まえた機器・配管系の耐震設計への反映事項について

下線部：今回提出資料

1. はじめに

本資料は、設置変更許可申請段階におけるプラントの耐震成立性確認を目的として、今後提出する女川原子力発電所2号炉の補正工認（以下「今回工認」という。）で採用する予定の手法に対して、当該号炉の既工認（以下「既工認」という。）との相違点、他社プラントの既工認（以下「他プラント既工認」という。）及び新規制審査での適用例について網羅的に整理した結果を示すものである。また、整理結果を用いて、設置変更許可申請段階での論点の抽出を重み付け評価した結果を示すものである。

2. 整理方針

(1) 整理対象

プラントの耐震成立性を確認するため、耐震Sクラス設備、耐震Sクラス設備に波及的影響を及ぼすおそれのある設備及び耐震Sクラス設備を支持する施設を対象とする。

(2) 整理方法

既工認と今回工認の手法の相違点を整理するとともに、他プラント既工認及び新規制審査での適用例の有無も整理する。

3. 既工認と今回工認の手法の相違点の整理結果

既工認との手法の相違点の整理にあたっては、既工認と今回工認との手法を比較し、相違点の抽出を行った後、分類化を実施して論点を整理する。

分類化した論点に対し、他プラントを含めた既工認での適用例があると整理したものについては、規格・基準類に基づき、プラントの仕様等によらず適用性が確認された手法、または他プラントで適用され工認実績、新規制審査実績が複数あり自プラントへの適用性について確認した手法を「共通適用例あり」、プラント個別に適用性が確認された手法を「個別適用例あり」として整理した。

整理した結果を添付資料1に示す。

4. 論点の重み付け評価

3.で抽出した論点について、第4-1図に示す評価フローに従って重み付けのランク分類を実施する。

評価フローは大きく分けて以下の3つのステップで重み付けのランクを判断することとしている。

[STEP1] 既往の実績有無で論点としての軽重を分類



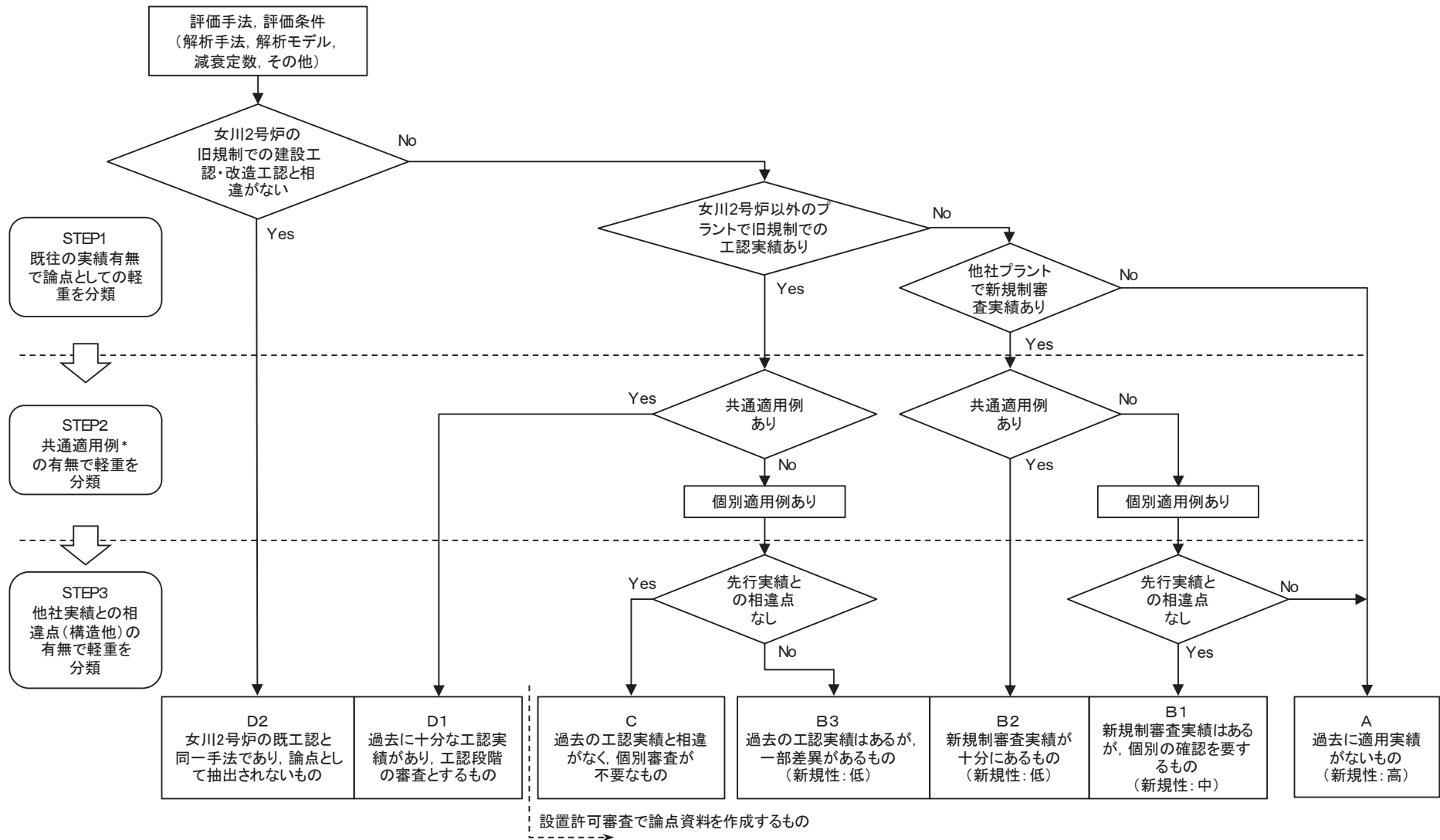
[STEP2] 共通適用例の有無で軽重を分類（共通適用例ありと判断する場合は先行実績の女川2号炉への適用性について確認する）



[STEP3] 他社実績との相違点（構造他）の有無で軽重を分類

評価フローの考え方にに基づき論点の重み付けを行った結果を添付資料2に示す。また、設置変更許可申請段階での審査論点としてはA～Cに区分したものと考えており、それらの論点概要を以下に示す。（添付資料3）

なお、評価フローに基づき論点の重み付けをDランクと判定したものについて、参考資料に判定例を示す。



* 規格・基準類に基づき, プラントの仕様等によらず適用性が確認された手法, または他プラントで適用され工認実績, 新規制審査実績が複数あり自プラントへの適用性について確認した手法

第 4-1 図 耐震論点重み付け評価フロー

(1) 機器・配管系

a. サプレッションチェンバ内部水質量の考え方変更 (⑩*)

既工認では、サプレッションチェンバ内の水全体を剛体とみなし、水の全質量を用いて地震荷重を算出していた。

今回工認では、水平方向の地震によるサプレッションチェンバの地震荷重の算出にあたり、タンクの耐震設計に一般的に用いられている有効質量の考え方を適用する。

本手法は、他プラントを含む既工認及び新規制審査での適用例はない。

b. 竜巻防護ネットへのゴム支承の適用 (⑰*)

竜巻防護対策として新たに設置する海水ポンプ補機エリアの竜巻防護ネットは、竜巻防護ネット及び海水ポンプ室への荷重を低減させるため、ゴム支承を採用する。

本構造は、他プラントを含む既工認及び新規制審査での適用例はない。

c. 原子炉本体の基礎の復元力特性の変更 (⑤*)

既工認では、原子炉建屋と原子炉本体を連成させた地震応答解析モデルの原子炉本体の基礎に対する剛性は、建設工認時の地震応答レベルを考慮し、簡便に線形として扱っていた。

今回工認では、基準地震動 S_s の増大に伴い地震応答が弾性領域を超えることから、適正な地震応答に基づく評価を行うため当該部分の剛性に復元力特性を設定する。

本手法は、他プラントを含む既工認での適用例はないが、柏崎刈羽 6, 7 号炉の新規制審査での適用例がある。

d. 使用済燃料貯蔵ラックの減衰定数の変更 (⑦*)

既工認では、使用済燃料貯蔵ラックの水平方向の減衰定数として、溶接構造物の 1% を適用していた。

今回工認では、最新の知見として得られた減衰定数として 7% を採用する。

本手法は、他プラントを含む既工認での適用例はないが、柏崎刈羽 6, 7 号炉の新規制審査での適用例がある。

e. 規格適用範囲外の動的機能維持評価の実施 (⑱*)

今回工認では、地震時又は地震後に動的機能が要求される設備については、JEAG4601 に基づき基準地震動 S_s に対する機能健全性を確認する。ただし、燃料移送ポンプは、その型式が JEAG4601 に規格化されていないことから、JEAG4601 の考え方や既往検討の知見を適用して詳細な動的機能維持評価を実施する。

本手法は、他プラントを含む既工認での適用例はないが、東海第二の新規制審

査で適用例がある。

f. 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持 (15*)

今回工認では、燃料被覆管の崩壊熱除去可能な形状維持の観点での評価に加えて、被覆管の閉じ込め機能の維持の観点から、地震荷重を考慮した一次応力＋二次応力の評価を実施する。

本手法は、他プラントを含む既工認での適用例はないが、高浜 3, 4 号炉や伊方 3 号炉の新規制審査での適用例がある。

g. 海水ポンプ室門型クレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用 (16*)

今回工認では、海水ポンプ室門型クレーンの浮き上がり及びすべり条件を考慮し、より詳細な解析手法として非線形時刻歴応答解析を適用する。

本手法は、大間 1 号炉の建設工認での原子炉建屋クレーンへの適用例があるが、女川 2 号炉の海水ポンプ室門型クレーンとの構造差異がある。

h. 一定の余裕を考慮した弁の動的機能維持評価 (20*)

今回工認では、弁等の機器の地震応答解析結果の応答加速度が当該機器を支持する配管の地震応答により増加すると考えられるときは、当該機器について、配管の地震応答の影響を考慮し、一定の余裕を見込んだ評価を行う。

本評価方法は、他プラントを含む既工認及び新規制審査での適用例はない。

(2) 建物・構築物

a. 東北地方太平洋沖地震等による影響を踏まえた建屋耐震設計方法への反映について (1, 2*)

女川原子力発電所は、2011 年東北地方太平洋沖地震及び 2011 年 4 月 7 日宮城県沖の地震の観測記録に基づく建屋シミュレーション解析を実施している。

今回工認では、シミュレーション解析から得られた知見を踏まえて、より実現象に近い応答を再現するという観点から、建屋解析モデルの初期剛性等を地震観測シミュレーション解析結果を踏まえ設定している。また、原子炉建屋の耐震補強工事の結果を建屋解析モデルに反映している。

本手法は、他プラントを含む既工認及び新規制審査での適用例はない。

b. 屋根トラスの解析モデルへの弾塑性解析の適用 (5, 6, 7, 8*)

既工認では、2次元フレームモデルによる静的応力解析による評価を実施していた。

今回工認では、入力地震動の増大に伴い、基準地震動 S_s による地震応答解析及び部材応力評価において、基本的に材料（鉄骨）の非線形特性を考慮した 3 次

元FEMモデルによる弾塑性解析を採用する。

弾塑性解析で使用する材料構成則の設定にあたっては、修正若林モデルによる特性を設定する。

本手法は、他プラントを含む既工認での適用例はないが、川内1，2号炉の新規制審査のうちタービン建屋での適用例がある。

c. 応力解析モデル（建物・構築物）への弾塑性解析の適用（⑨*）

既工認では、原子炉建屋の基礎等の鉄筋コンクリート部材の応力解析において、3次元FEMモデルを用いた弾性解析による評価を実施していた。

今回工認では、入力地震動の増大に伴い、基準地震動 S_s による検討においては、材料（コンクリート及び鉄筋）の非線形特性を考慮した弾塑性解析を採用する。

弾塑性解析で使用する材料構成則の設定にあたって、コンクリートの圧縮側についてはCEB-FIPモデル、引張側については岡村・出雲モデル、鉄筋については「発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格 JSME S NE1-2003」に基づき完全弾塑性型として設定する。

本手法は、他プラントを含む既工認での適用例はないが、柏崎刈羽6，7号炉の新規制審査での適用例がある。

d. 建屋地震応答解析における入力地震動の算定（③*）

既工認では、基準地震動 S_s を建屋基礎下に直接入力としていた。

今回工認における入力地震動は、解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s を基に、対象建屋の地盤条件を適切に考慮した上で、逐次非線形解析を用いて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している。

本手法の内、対象建屋の地盤条件を考慮して入力地震動を設定する手法は、柏崎刈羽6，7号炉の建設工認での適用例があるが、逐次非線形解析については他プラントを含む既工認及び新規制審査での適用例はない。

(3) 屋外重要土木構造物及び津波防護施設

a. 液状化影響の検討（⑭*）

屋外重要土木構造物及び津波防護施設には、防潮堤（鋼管式鉛直壁（一般部））や防潮堤（盛土堤防）のように、施設周辺に地下水位以深の盛土及び旧表土が分布しているものがある。

女川原子力発電所の盛土及び旧表土は、液状化強度試験結果から、「液状化」とならないこと（支持力を喪失しない、又は急激な流動変位が発生しない地盤であることを）確認しているが、「繰返し軟化」（繰返し载荷による間隙水圧の上昇に伴う有効応力の低下）が懸念され、側方流動や偏土圧による影響を設計上考慮す

る必要がある（この「繰返し軟化」による影響の考慮を含めて「液状化影響の検討」という。）。

液状化影響の検討については、施設ごとに、地下水位低下設備を考慮の上設定した地下水位及び液状化検討対象層の分布状況を踏まえて、検討の必要性を判断する。

液状化検討対象層は盛土及び旧表土とし、液状化を考慮する場合は、構造物と地盤の動的相互作用を考慮できる有効応力解析を用いて地震時の応答を算定する。

有効応力解析に用いる液状化強度特性については、敷地全体の液状化強度試験から得られる液状化強度特性を保守的に設定（下限値）することを基本とし、各施設近傍に試験結果がある場合には、その試験結果から液状化強度特性を保守的に設定（下限値）する。

なお、液状化考慮と液状化非考慮で耐震安全性評価上どちらが保守的な評価となるかを確認するため、全応力解析と有効応力解析の結果を比較して、解析手法を選定する。

本検討は、柏崎6, 7号炉の新規制審査等での適用例があるものの、敷地の地質に差異がある。なお、検討方針の詳細は、別紙-18 液状化影響の検討方針に示す。

b. 時刻歴応答解析（有効応力解析）の適用（①*）

「④液状化影響の検討」において、液状化の影響考慮が必要となった施設については、構造物と地盤の動的相互作用を考慮できる2次元動的有限要素解析において、有効応力を用いた時刻歴応答解析（有効応力解析）により地震時の応答を算定する。

有効応力解析に用いる液状化強度特性は液状化強度試験に基づいて設定する。

本手法は、高浜3, 4号炉の新規制審査のうち杭式防潮堤での適用例があるものの、構造に差異がある。

c. すべり安全率による評価の適用（⑤*）

防潮堤（鋼管式鉛直壁（一般部））、防潮堤（盛土堤防）及びアクセスルートの耐震評価において適用する。

防潮堤（鋼管式鉛直壁（一般部））、防潮堤（盛土堤防）及びアクセスルートについては、防潮堤の各部位の役割に対する性能目標を満足するためにすべり破壊しないこと（内的安定を保持）を確認することとし、「耐津波設計に係る工認審査ガイド」を準用して、各部位の内部に想定したすべり線に対して、すべり線上の応力状態を考慮したすべり安全率が妥当な安全裕度を有していることを確認する。

本手法は、美浜3号炉の新規制審査のうち防潮堤地盤改良部での適用例があるものの、構造に差異がある。

d. 時刻歴応答解析（質点系モデル）の適用（⑥*）

防潮壁の耐震評価においては、上部工と下部工（杭）を質点系で一体化してモデル化するとともに、下部工（杭）と自由地盤の連成を地盤バネとダッシュポットでモデル化した、上部工-下部工（杭）-地盤の連成系の質点系モデルにて地震応答解析を実施する。

なお、「⑭液状化影響の検討」にて、液状化の影響考慮が必要となった場合においては、地下水位以深の全ての盛土、旧表土層に対して地震による繰返し軟化の影響を考慮するために、一次元の有効応力解析に基づく最大過剰間隙水圧比に基づき、地盤ばね算定に用いる地盤剛性を低減させる。

本手法は、乾式キャスクを用いる使用済み燃料中間貯蔵建屋の基礎構造の設計に関する技術規程（JEAC4616-2009，日本電気協会）及び建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計（日本建築学会）に則った手法であるが、他プラントを含む既工認及び新規制審査での適用例はない。

e. 限界状態設計法の適用

時刻歴応答解析の採用に併せて限界状態設計法を適用することで、構造物の非線形性や各種要求機能に応じた設計とする。

(a) 降伏モーメント及びせん断耐力による評価（⑦*）

防潮壁の耐震評価において適用する。また、防潮壁は新たに設置する設備であることから、既工認には存在しない。

構造部材の曲げ系の破壊については、繰返しの津波荷重に対して機能を保持していることを確認することとし、部材降伏点として降伏モーメント M_y を許容限界とする。

せん断破壊については、せん断耐力に対して妥当な裕度を持つことを確認する。

本手法は、他プラントを含む既工認及び新規制審査での適用例はない。

(b) 層間変形角及びせん断耐力による評価（⑩*）

フレームモデル（部材非線形）によりモデル化した原子炉機器冷却海水配管ダクト、排気筒連絡ダクト（土砂部）、軽油タンク連絡ダクト、3号炉取水路及び北側排水路の耐震評価において適用する。

構造部材の曲げ系の破壊については限界層間変形角、せん断破壊についてはせん断耐力に対して妥当な裕度を持つことを確認することを基本とする。

せん断耐力は、せん断耐力評価式、分布荷重を受ける部材のせん断耐力評価法及び材料非線形解析を用いる方法のいずれかを用いて評価する。構造部材の照査において発生するせん断力が、せん断耐力評価式（分布荷重を受ける部材のせん断耐力評価法を含む）によるせん断耐力を上回ることが確認された場合、改めて材料非線形解析によりせん断耐力を算出し照査を行うこととする。

なお、材料非線形解析によりせん断耐力を算出する手法の適用は、二次元時刻歴応答解析により断面力を算出して耐震安全性評価を行う線状構造物とし、線状構造物のうち後施工せん断補強筋 (CCb) により耐震補強を行っている部材は適用範囲外とする。また、箱型構造物で三次元静的材料非線形解析により耐震安全性評価を行っている構造物についても適用範囲外とする。

本手法は、川内1, 2号炉の新規制審査のうち取水ピットでの適用例がある。

(c) コンクリート躯体における引張強度及びせん断強度を用いた評価 (⑭*)

取放水路流路縮小工の耐震評価は、2次元動的有限要素解析を用いた周波数応答解析及び限界状態設計法により、要求機能を保持することを確認する。

取放水路流路縮小工の要求機能は、繰り返し襲来する津波に対してその断面形状を保持することであり、耐震評価地震荷重に対して概ね弾性範囲内であることを確認することとし、コンクリート躯体が引張又はせん断破壊しないことを許容限界とする (モール・クーロンの破壊基準により確認)。

本手法は、他プラントを含む既工認及び新規制審査での適用例はない。

f. 3次元非線形モデルの適用/限界状態設計法の適用 (⑨, ⑬*)

貯留堰、海水ポンプ室、取水口及び軽油タンク室の耐震安全性評価において適用する。

既工認では、海水ポンプ室及び取水口の耐震安全性評価において、妻壁や隔壁による構造物の3次元性を考慮するため、構造物を3次元線形シェルによりモデル化し、地震時荷重に対し発生する部材の断面力を算定し、許容応力度法により部材の耐震性を評価している。また、貯留堰及び軽油タンク室については、既工認には存在しない。

今回工認では、構造物の3次元性を考慮したうえで、鉄筋コンクリートの非線形性をより精緻に考慮できるよう、貯留堰、海水ポンプ室及び取水口は3次元非線形ソリッドによりモデル化し、軽油タンク室は3次元非線形シェルによりモデル化している。これらは、地震時荷重に対し発生するひずみや断面力を3次元静的材料非線形解析により算定し、限界状態設計法により部材の耐震性を評価する。

非線形ソリッドモデル及び非線形シェルモデルでは、各部材の断面内に生じる応力やひずみを直接算出し、照査の指標とする。曲げ系の破壊については、コンクリートの主圧縮ひずみ、鉄筋のひずみ及び層間変形角 (面外)、せん断破壊については、せん断耐力及び層間変形角 (面内) を評価する。

貯水機能や止水機能が要求される構造物については、部材のひび割れ状況を評価できる非線形ソリッドモデルを採用し、支持機能のみ要求される構造物については非線形シェルモデルを採用する。

本手法は、他プラントを含む既工認及び新規制審査での適用例はない。

g. 後施工せん断補強工法（セラミックキャップバー工法）の適用（⑫*）

今回工認では、原子炉機器冷却海水配管ダクト、軽油タンク室及び3号炉取水路の耐震補強工法として、せん断耐力の向上を目的に後施工せん断補強筋（セラミックキャップバー工法）による耐震補強を採用する。

本工法は、美浜3号炉の新規制審査のうち海水ポンプ室及び海水管トレンチでの適用例があるものの、セラミックキャップバー工法による耐震補強の適用例はない。

h. 時刻歴応答解析における構造物の履歴減衰及びRayleigh減衰の適用（②, ⑩*）

時刻歴応答解析に非線形性を考慮するに当たり、現実的な挙動特性を把握することを目的として、非線形の程度に応じた減衰（履歴減衰）を考慮する。また、解析上の安定のためにモデル全体にRayleigh減衰を考慮する。

本手法は、川内1, 2号炉の新規制審査のうち取水ピットでの適用例がある。

i. 時刻歴応答解析（全応力解析）の適用（⑧*）

既工認では、原子炉機器冷却海水配管ダクト、排気筒連絡ダクト（土砂部）等の耐震評価において、構造物と地盤の動的相互作用を考慮できる2次元動的有限要素解析を用い、周波数応答解析により部材の断面力を算定し、許容応力度法により部材の耐震性を評価していた。

今回工認では、構造物や周辺地盤の非線形性を、より精緻に再現できる時刻歴非線形解析を用いて照査用応答値を算出する。

本手法は、川内1, 2号炉の新規制審査のうち取水ピットでの適用例がある。

*：添付資料1で定義している差異項目の番号に対応

5. 工認段階での論点の概要について

工認段階で説明することとしている論点のうち、設置許可段階で概要説明が必要と考えられるものについて、それぞれ以下の参考資料に示す。

- ・参考資料1 D1 ランク論点の概要
- ・参考資料2 機器・配管系の設備の既工認からの構造変更について
- ・参考資料3 等価繰返し回数の評価方針について
- ・参考資料4 燃料集合体に対する鉛直地震動の影響について
- ・参考資料5 制御棒挿入性試験の概要

6. 女川2号炉に特有事項における耐震設計への反映事項について

女川2号炉については、平成23年に発生した東北地方太平洋沖地震等を被災している発電所であることを踏まえて、地震の影響により機器・配管系の耐震設計に反映すべき事項について検討した結果を参考資料6に示す。

等価繰返し回数の評価方針について

1. 基本的な考え方

女川 2 号炉の耐震評価における疲労評価では、原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987 (以下、「JEAG4601」という。) の手順のうち、等価繰返し回数を用いた評価としている。

今回工認で用いる等価繰返し回数は、JEAG4601 のピーク応力法に基づき等価繰返し回数を算定する。等価繰返し回数は、設備のピーク応力、固有周期、減衰定数、応答変位時刻歴によって値が異なるため、保守性を持たせた「一律に設定する等価繰返し回数」を用いることを基本とする。また、より精緻に疲労評価を行う場合は、「個別に設定する等価繰返し回数」を用いる。適用する等価繰返し回数の使い分けの考え方を参考 3-1 図に示す。

なお、建設時における女川 2 号炉の等価繰返し回数は、先行 BWR プラントにおける等価繰返し回数(OBE※ 1 回当たりの繰返し回数を 10 回としてプラントライフ中 5 回発生すると仮定し、余裕をみて 6 回発生する場合の 60 回を設定)を踏襲し、60 回と設定している。また、等価繰返し回数を 60 回に設定することの確認として、JEAG4601 のピーク応力法に基づき建設時の基準地震動 S_1 及び S_2 に対する原子炉格納容器の等価繰返し回数を算出し、 S_1 に対して 回未満、 S_2 に対して 回未満であることを確認しており、疲労評価にあたっては、基準地震動 S_1 及び S_2 に対してそれぞれ等価繰返し回数 60 回を用いた評価を行っている。

※OBE : Operating basis earthquake

2. 等価繰返し回数の評価方針

2.1 評価手法

等価繰返し回数の算定方法について、JEAG4601 に「地震動の等価繰返し回数を用いる場合にはピーク応力法あるいはエネルギー換算法が用いられる」と記載されており、女川 2 号炉では、ピーク応力法を用いて算定する方針とする。

2.2 算定フロー及び算定条件

JEAG4601 に記載されているピーク応力法を用いた等価繰返し回数の算定フローを参考 3-2 図に示す。

当該フローに基づき、女川 2 号炉の耐震評価における疲労評価に用いる等価繰返し回数として「一律に設定する等価繰返し回数」又は「個別に設定する等価繰返し回数」を設定する。なお、等価繰返し回数の算定に当たっては、「昭和 55 年度 耐震設計の標準化に関する調査報告書」における等価繰返し回数の算定方法を参考とする。

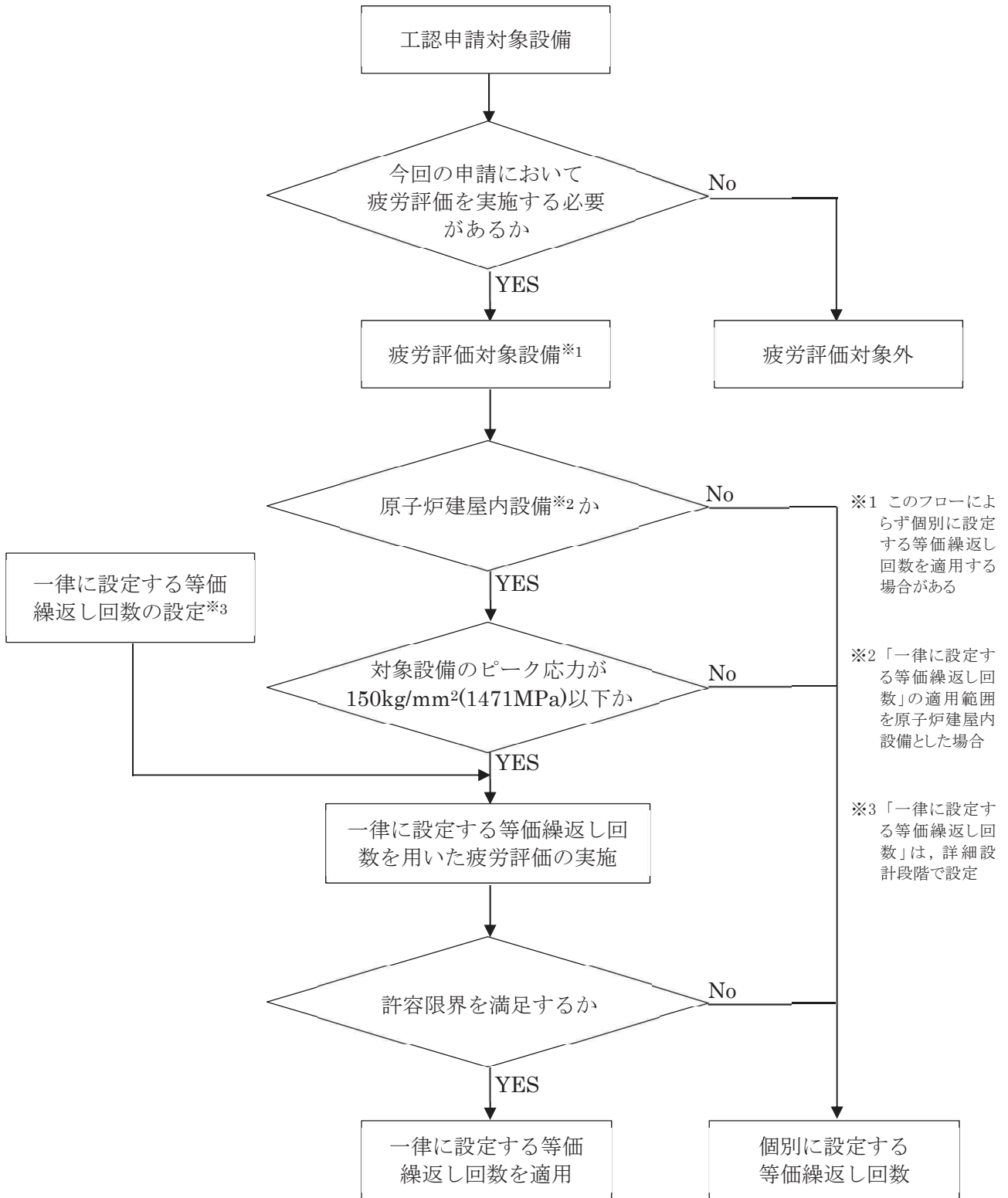
女川 2 号炉の等価繰返し回数の算定条件、「昭和 55 年度 耐震設計の標準化に関する調査報告書」及び建設時における等価繰返し回数の確認に用いた算定条件との

比較結果を参考 3-1 表に示す。

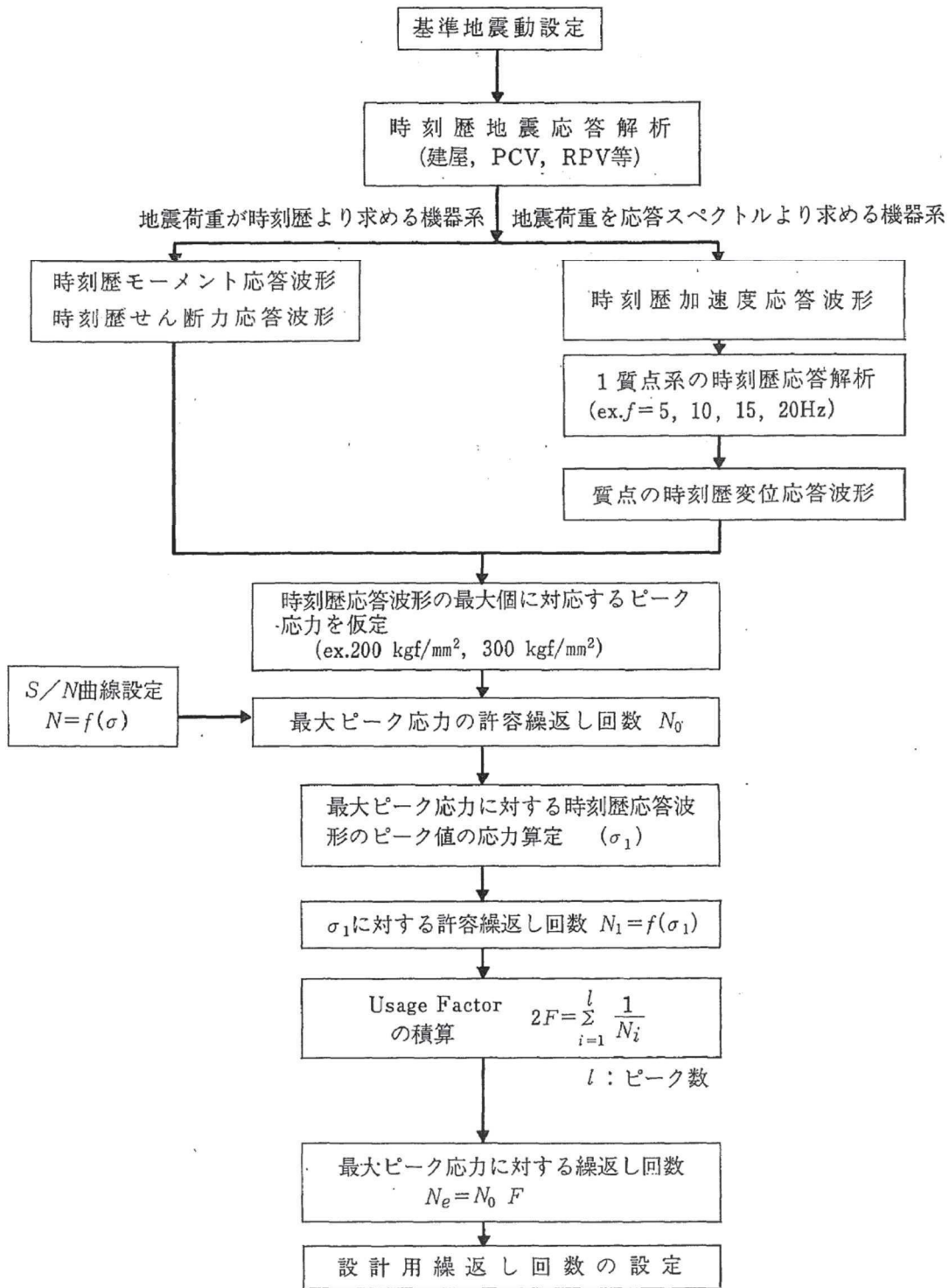
等価繰返し回数の算定結果については、詳細設計段階で示す。

3. 留意事項

東北地方太平洋沖地震等の地震による設備への疲労影響は、十分に小さいことを確認しているが、疲れ累積係数による疲労評価を実施する場合は、許容限界 ($U_f=1.0$) に対して余裕があることにも留意する。



参考 3-1 図 適用する等価繰返し回数の使い分け



参考 3-2 図 ピーク応力法を用いた地震の等価繰返し回数の算定フロー (JEAG4601 引用)

参考 3-1 表 昭和 55 年度 耐震設計の標準化に関する調査報告書及び女川 2 号炉の等価繰返し回数算定条件の比較

		昭和 55 年度 耐震設計の標準化に関する調査報告書 (標準化報告書)		女川 2 号炉		
				建設時	今回工認	
		【手法 1】	【手法 2】	建設時における等価繰返し回数	一律に設定する等価繰返し回数	個別に設定する等価繰返し回数
対象設備		原子炉圧力容器スカート	第一種配管	原子炉格納容器	原子炉建屋 ^{※1} に設置された設備	原子炉建屋 ^{※1} 以外、ピーク応力が 150kg/mm ² (1471MPa) を超える設備、疲労評価の精緻化が必要な設備
算出方法		時刻歴解析より算定される時刻歴モーメントを用いた算出方法 (JEAG4601 における左側のフロー)	建屋床応答を入力とした 1 質点系モデルによる応答時刻歴を用いた算出方法 (JEAG4601 における右側のフロー)	時刻歴解析より算定される時刻歴加速度を用いた算出方法 (JEAG4601 における左側のフロー)	時刻歴解析より算定される時刻歴荷重を用いた算出方法又は建屋床応答を入力とした 1 質点系モデルによる応答時刻歴を用いた算出方法	同左
回数算出に用いる応答時刻歴波	波形	時刻歴モーメント波形	変位応答時刻歴波	加速度時刻歴波形	時刻歴荷重波形又は変位応答時刻歴波	同左
	時刻歴最大値 (設備の最大ピーク応力)	5 種類のピーク応力 (最大 300kg/mm ²)	代表設備の最大ピーク応力を安全側に設定 (300kg/mm ²)	51kg/mm ² (原子炉格納容器材質の 1 次 + 2 次応力の III _A S 及び IV _A S の許容応力 (3S))	150kg/mm ² (1471MPa) 「昭和 55 年度 耐震設計の標準化に関する調査報告書」の検討にて十分とされる値	同左又は、対象設備のピーク応力
対象建屋・床		代表設備の設置床面	同左	代表質点 原子炉格納容器	対象設備の設置位置	同左
固有周期		時刻歴解析結果より直接算定	設備の固有周期でなく、全固有周期	建屋 - 大型機器連成解析モデルの時刻歴解析結果より直接算定	対象設備の固有周期でなく、全固有周期 ^{※2}	対象設備の固有周期
減衰定数		報告書に言及なし	同左	時刻歴解析結果より直接算定するため、減衰の設定は不要。(時刻歴解析モデルで設定されている)	0.5%	対象設備の設計用減衰定数
設計用疲労線図		代表設備材料の線図を使用	同左	炭素鋼の設計疲労線図 ^{※3}	炭素鋼の設計疲労線図 ^{※4}	対象設備の使用材料に応じて、炭素鋼又はステンレス鋼の設計疲労線図 ^{※4}
地盤条件		Vs=500, 1000, 1500m/s	Vs=1500m/s	Vs=1820m/s	同左	同左

※1 「一律に設定する等価繰返し回数」の適用範囲を原子炉建屋内設備とした場合。

※2 設備の固有周期を踏まえ固有周期帯を限定する場合がある。

※3 発電用原子力設備に関する構造等の技術基準 (通商産業省告示第 501 号) を適用。

※4 日本機械学会 設計建設規格 (JSME S NC1 2005/2007) を適用。

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へ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。

この浮上りが制御棒の挿入機能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

(1) 1. (1) の JNES の既往知見 (以下, 「JNES 知見」という。) で確認されている内容は以下のとおり。

(a) 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) であることが確認されている。燃料集合体の支持状態を表した模式図を参考 4-1 図に、鉛直地震動の影響検討結果を参考 4-2, 3 図に示す。

また、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が実施されている。

(b) 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 において最大 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と結論付けている。評価結果を参考 4-4 図に示す。

(c) 浮上り発生状態での水平地震力に対する検討

鉛直地震動及び炉水による流体力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した場合でも、燃料集合体が燃料支持金具から脱落しないことが確認されている。浮上り+水平力のイメージを参考 4-6 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、その影響を確認しているものである。

鉛直方向に 2G の加速度で 22 mm 程度の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 23 mm 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が確認されている。

なお、JNES 知見で検討した燃料集合体と女川 2 号炉の燃料集合体の仕様について比較した結果を参考 4-1 表に示す。制御棒の型式が異なるものの、中性子吸収材が相違している以外はほぼ同一の形状であり、表面を覆うシース材料や全体重量が同一であることから、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、女川 2 号炉への適用性はあるものと考えている。

(2) 1. (2) の浜岡原子力発電所における知見（以下、「浜岡知見」という。）で確認されている内容は以下のとおり。

(a) 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が確認されている。比較結果について参考 4-7 図に示す。

(b) 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が確認されている。(1.5G で 8mm 程度)。

3. 女川 2 号炉における検討

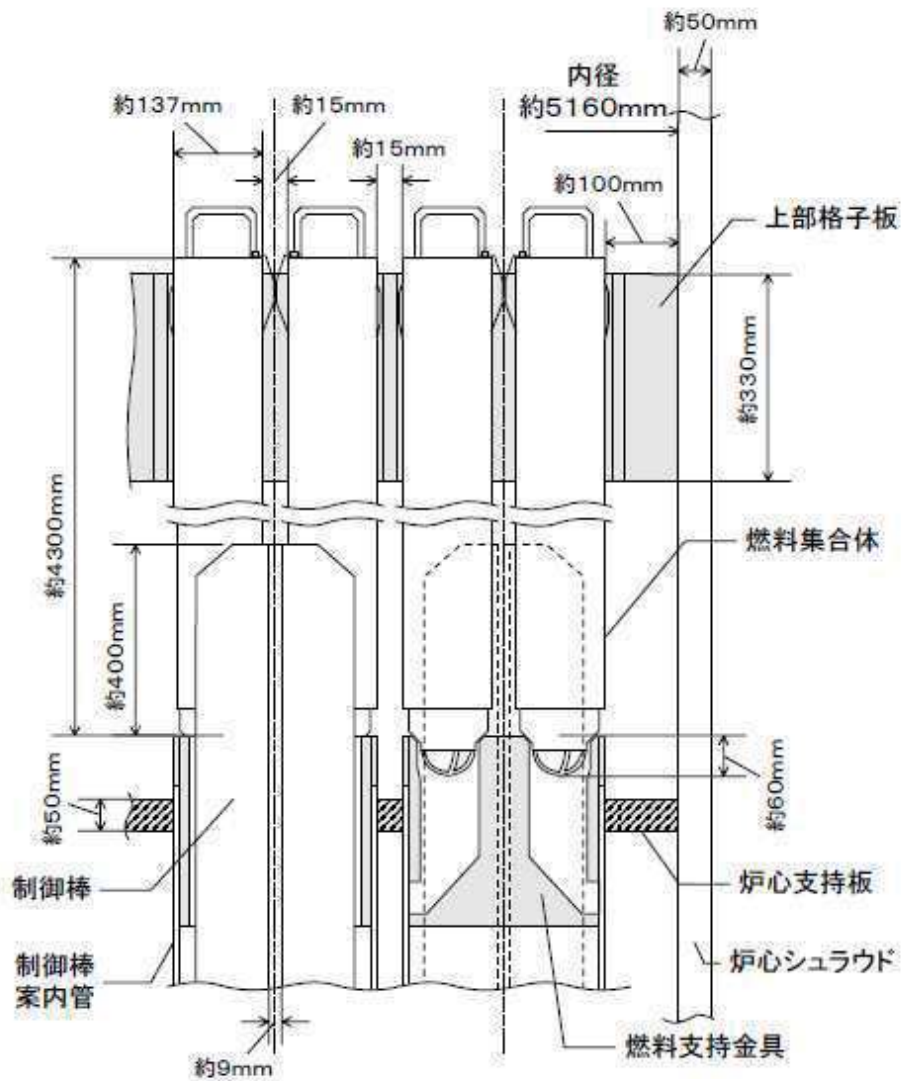
平成 25 年申請時の基準地震動 $S_s-1, 2$ における、燃料集合体（燃料支持金具）位置の鉛直方向加速度は 1.15G であり、JNES 知見や浜岡知見で検討している加速度よりも小さいことから、燃料集合体の浮上りが発生したとしても燃料支持金具から脱落は起こらない。そのため、鉛直地震動による制御棒挿入性へ及ぼす影響は軽微であると考えられる。

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、女川 2 号炉の鉛直加速度 1.15G においては、参考 4-4 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、更には参考 4-5 図及び参考 4-9 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

に小さいものであると考えられる。

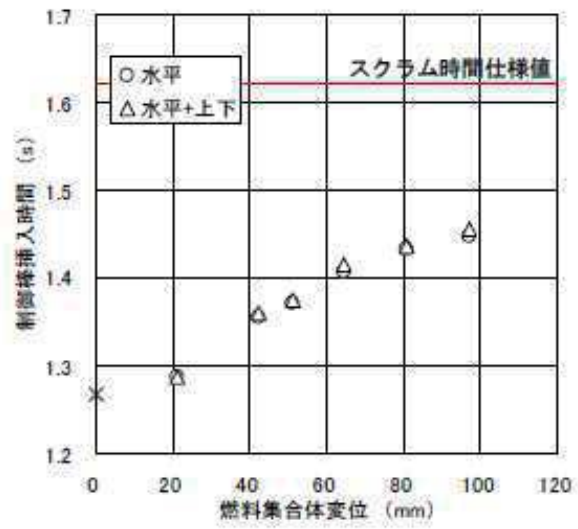
なお、燃料集合体上部においては、チャンネルボックスは外周部を上部格子板で囲まれており水平方向の移動を拘束されており、地震の影響によって、チャンネルボックスの設置状況に変化が生じることはないものと考えられる。また、参考 4-1, 4-8 図に示すとおりチャンネルボックスに取り付けられているチャンネルファスナを介して隣接するチャンネルボックスと接触している。このチャンネルファスナの上下方向における接触長さは約 mm となっていることから、数 mm 程度の浮上りでチャンネル同士の接触状況に変化が起こることは考え難い。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



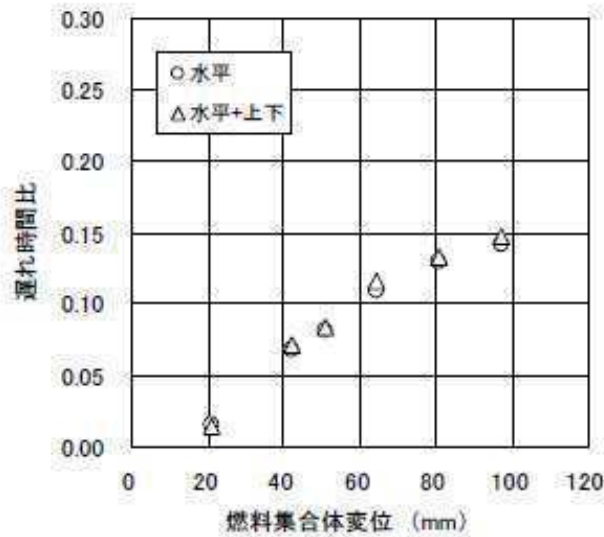
※JNES 知見より抜粋

参考 4-1 図 燃料集合体の支持状態 (制御棒挿入率 0%)



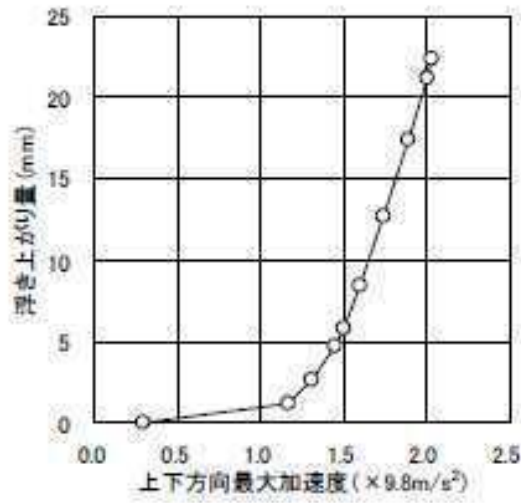
※JNES 知見より抜粋

参考 4-2 図 制御棒挿入性解析結果 (上下動影響比較)



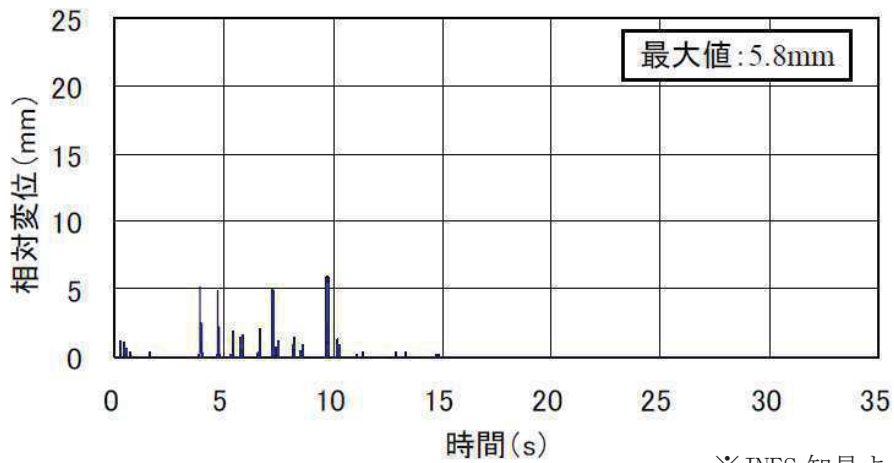
※JNES 知見より抜粋

参考 4-3 図 制御棒挿入時間遅れの比較(上下動影響比較)



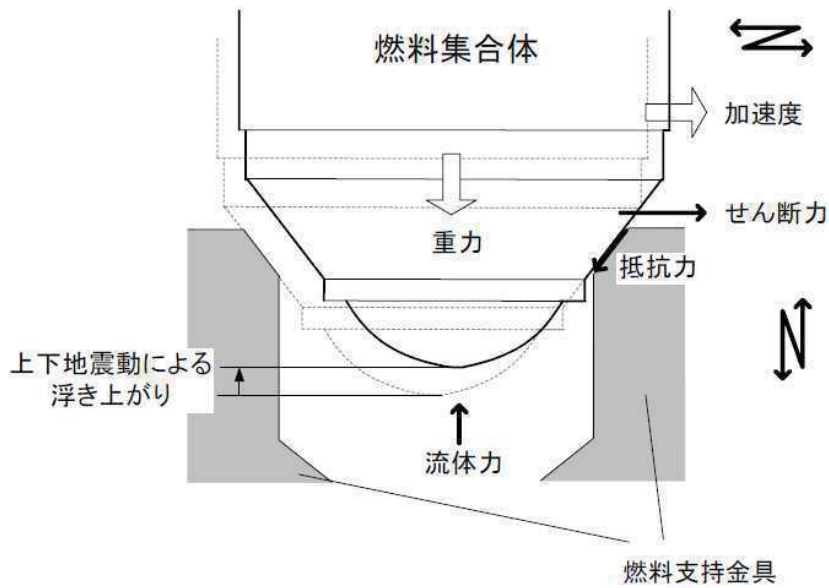
※JNES 知見より抜粋

参考 4-4 図 入力加速度と燃料集合体浮上り量の関係



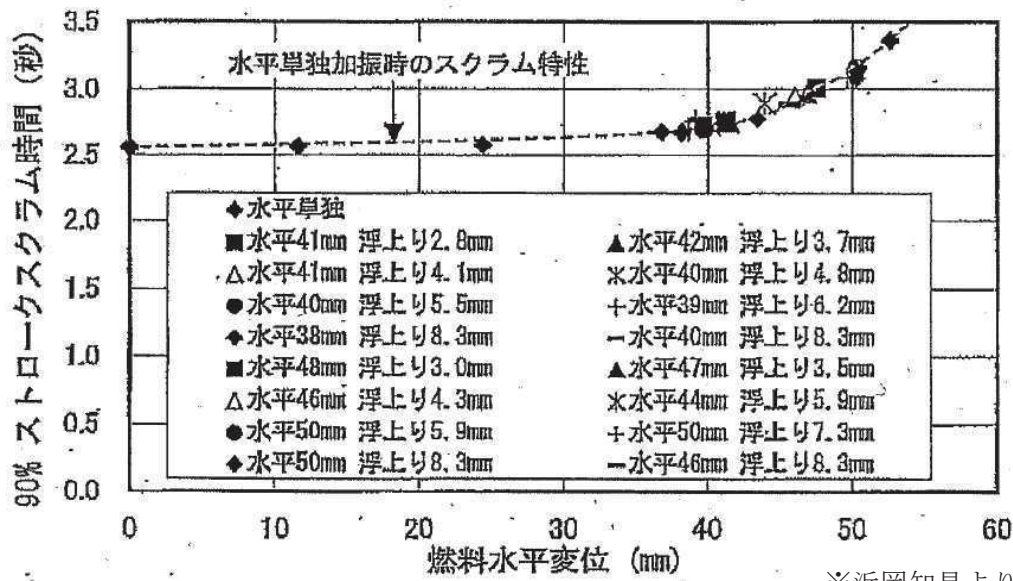
※JNES 知見より抜粋

参考 4-5 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



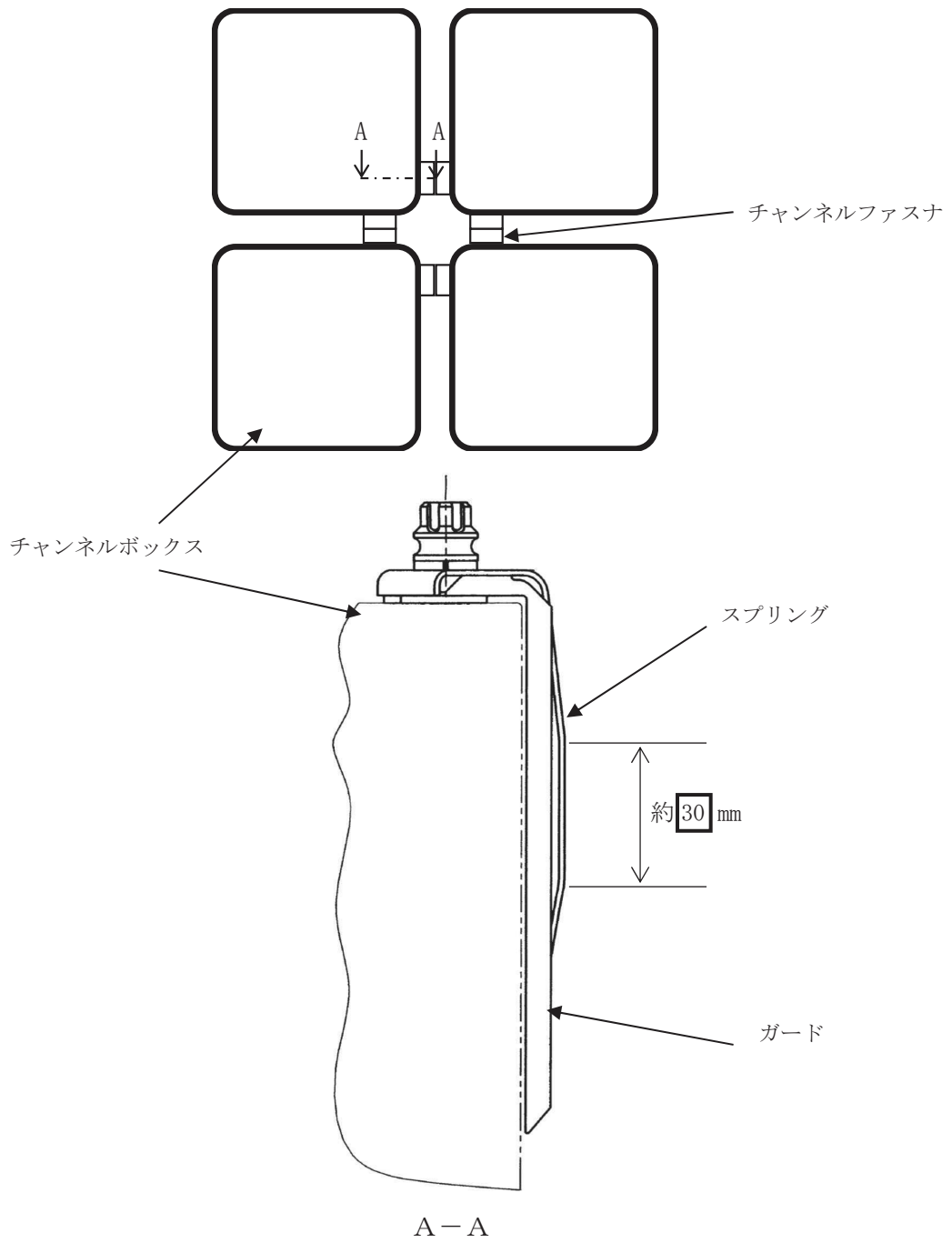
※JNES 知見より抜粋

参考 4-6 図 水平，上下方向の地震動による浮上り検討の概要図

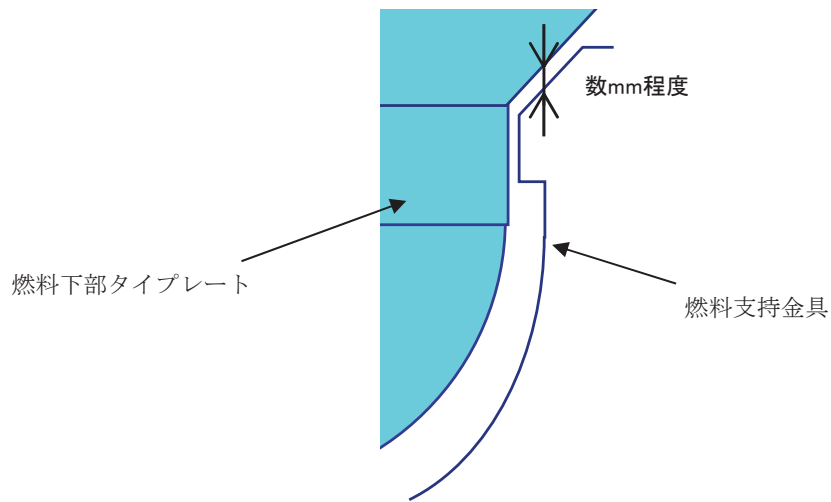


※浜岡知見より抜粋

参考 4-7 図 鉛直方向加振による制御棒挿入時間への影響



参考 4-8 図 燃料集合体上部のチャンネルファスナの設置状況



参考 4-9 図 燃料集合体下部のイメージ図

参考 4-1 表 制御棒挿入性に関連する機器の JNES 知見と女川 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	女川 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 *1	100mil	100mil	無
制御棒	ハフニウム型	B ₄ 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、鉛直方向剛性は 45.9Hz となることを確認している。

制御棒挿入性試験の概要

女川 2 号炉の既工認の制御棒挿入性に係る評価では、燃料集合体の相対変位（参考 5-15 図参照）について、既往試験（既工認）を踏まえて燃料集合体の確認済相対変位を 40 mm としていたが、新規制基準による基準地震動 S s の増大を考慮し、既往試験（既工認）と同様の制御棒挿入性試験を実施し、燃料集合体の相対変位データ範囲を拡充している。

本書では、今回実施した制御棒挿入性試験の概要として、試験条件の既工認との比較、制御棒挿入性試験結果、チャンネルボックスの健全性確認結果等を以下に示す。

1. 既工認と今回実施した制御棒挿入性試験の比較

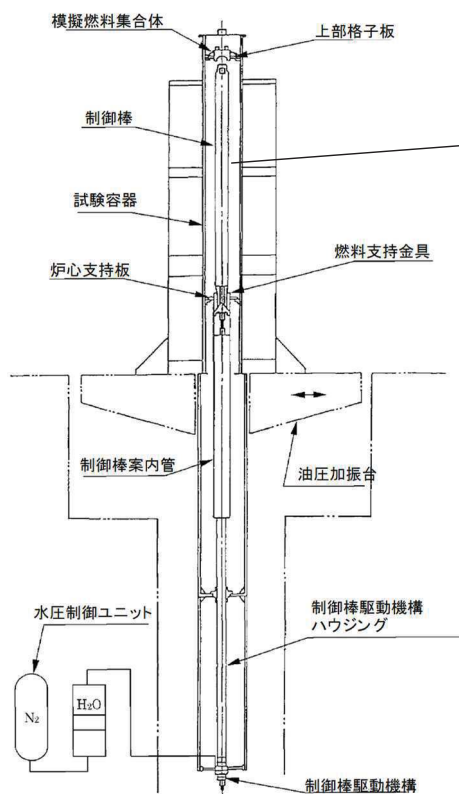
今回実施した制御棒挿入性試験は、既工認での試験条件から大きな変更点はない。ただし、既工認より大きな変位でのデータを拡充するためには加振台の性能による制限を受けることから、今回試験ではチャンネルボックスの板厚を調整することで大きな相対変位を付加した（板厚の調整方法詳細については第 2 項に示す）。

参考 5-1 表に既工認と今回試験の差異整理を示す。また、参考 5-1 図に試験装置概要、参考 5-2 図に試験装置外観を示す。

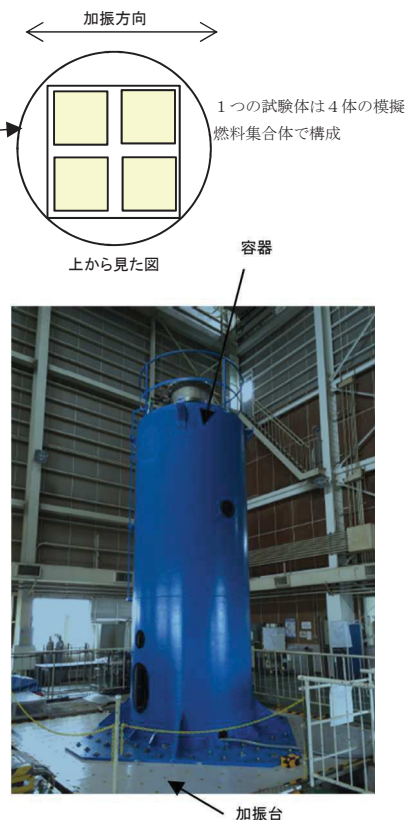
参考 5-1 表 既工認と今回試験の差異整理

条件項目	既工認	今回試験	備考
機器・装置構成	<ul style="list-style-type: none"> ・模擬燃料集合体（チャンネルボックス含む） ・制御棒 ・燃料支持金具 ・制御棒案内管 ・制御棒駆動機構 ・水圧制御ユニット 	同左	<ul style="list-style-type: none"> ・模擬燃料集合体は鉛にて質量模擬 ・その他機器は実機仕様 ・東芝エネルギーシステムズ（株）エネルギーシステム技術開発センターにて試験実施
試験方法	<ul style="list-style-type: none"> ・加振により燃料集合体に相対変位を発生させ、その状態で 75% ストロークスクラムに要する時間を計測 ・正弦波により加振 ・各相対変位（0～40 mm 範囲で 10 mm 刻みに設定）に対して 3 回試験を実施 	<ul style="list-style-type: none"> ・同左 ・同左 ・各相対変位（0～70 mm 範囲で 10 mm 刻みに設定）に対して 3 回試験を実施 	<ul style="list-style-type: none"> 「0～50mm 挿入性試験」 ・各条件での試験後に確認の結果、有意な変形はなく、再使用可能であると判断したため、同一のチャンネルボックスを使用 「60mm, 70mm 挿入性試験」 ・1 回ごとにチャンネルボックスを交換
温度	常温	同左	—
圧力	大気圧*	同左	—
チャンネルボックス板厚	100mil	□ mil	<ul style="list-style-type: none"> ・高温時の変位特性（加速度に対する変位量）と同等になるように設定 ・チャンネルボックス板厚を調整したことの配慮として、チャンネルボックス間隙を既工認と同等の条件に設定

*実機（炉圧状態）では圧力抵抗が増すため、制御棒挿入に要する時間が増加する。制御棒挿入試験は大気圧条件で実施するが、制御棒挿入圧力を調整し、ゼロスクラム時間（無加振時の 75% ストロークスクラムに要する時間）を実機と合わせることで炉圧状態を模擬している。



参考 5-1 図 試験装置概要



参考 5-2 図 試験装置外観

2. チャンネルボックス板厚の調整

今回試験では、より大きな相対変位の試験条件を設定するため、チャンネルボックスの板厚を調整し、制御棒挿入性試験を実施した。チャンネルボックスの仕様比較を参考 5-2 表、試験用チャンネルボックスの概略図を参考 5-3 図に示す。

板厚の調整に当たっては、チャンネルボックス材料（ジルカロイ）の実機使用環境（高温時）の縦弾性係数は、試験環境（常温時）と比較して約 3 割程度低くなる特徴を考慮している。ただし、試験環境（常温時）での縦弾性係数を実機使用環境（高温時）と同等に調整することは困難であることから、実機使用環境（高温時）の剛性を模擬するために実機仕様チャンネルボックスと試験用チャンネルボックスの変位特性（加速度に対する変位量）が同等になるように板厚を設定した。チャンネルボックスの相対変位-床応答加速度曲線（試験条件設定用）を参考 5-4 図に示す。

「試験用チャンネルボックス板厚決定方法」



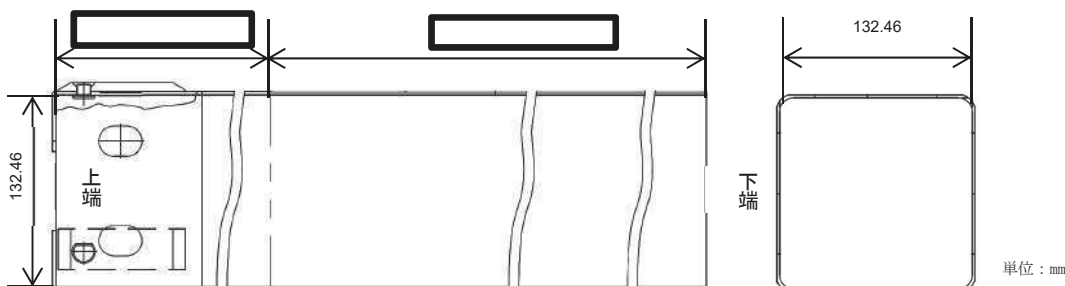
枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



なお、チャンネルボックス板厚を調整したことでチャンネルボックス間の間隙が広くなり、制御棒挿入性に影響を与えることがないように、上部格子板及び燃料支持金具の寸法を調整することでチャンネルボックス間の間隙を既工認と同等の条件に設定している。既工認と今回試験のチャンネルボックス配置図を参考 5-5 図に示す。

参考 5-2 表 チャンネルボックスの仕様比較

対象	使用温度 (°C)	縦弾性係数 (GPa)	板厚 (mm)
実機仕様チャンネルボックス	高温 (302)	77.2	2.54 (100mil)
試験用チャンネルボックス (板厚調整)	常温 (20)	98.0	 (mil)

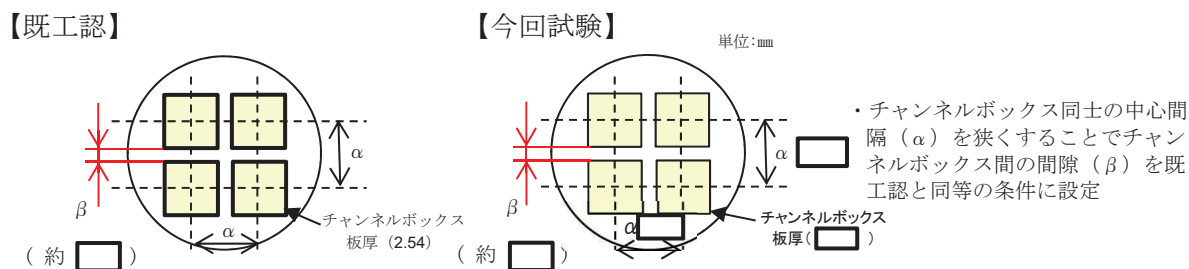


参考 5-3 図 試験用チャンネルボックスの概略図



参考 5-4 図 チャンネルボックスの相対変位-床応答加速度曲線
(試験条件設定用)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



参考 5-5 図 既工認と今回試験のチャンネルボックス配置図

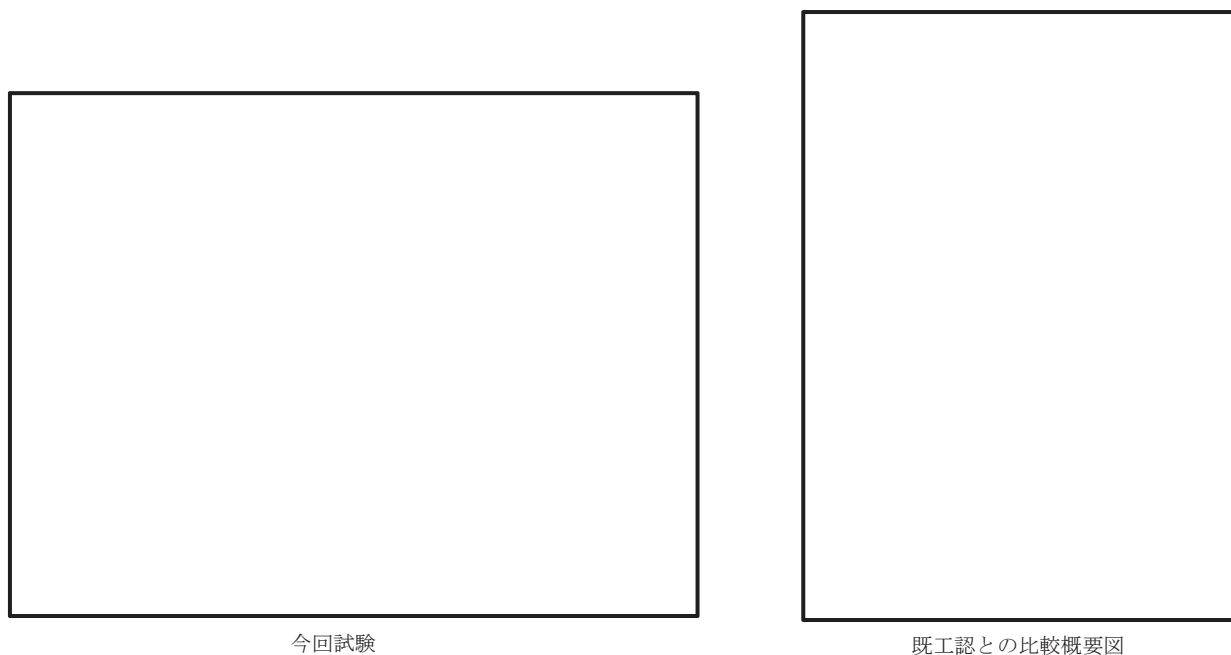
3. 制御棒挿入性試験結果

制御棒挿入性試験結果について参考 5-6 図に示す。今回の試験の結果, 75%ストロークスクラムに要する時間が規定値 (保安規定要求) である 1.62s に達する際の燃料集合体の相対変位は 60.9 mm (試験 3 回の平均値) となった。

試験結果に保守性を考慮して, 女川 2 号炉の平成 26 年 7 月工事計画認可申請では確認済相対変位を 55 mmとしている (参考 5-3 表に女川 2 号炉工事計画認可申請における制御棒挿入性評価を示す)。

なお, 相対変位 45 mm程度までのデータ範囲において, 今回試験と既工認時の制御棒挿入性については同様な傾向を示している。今回試験では, チャンネル板厚の違いから挿入抵抗は小さくなるが, 相対変位 45 mm程度では, チャンネルボックスと制御棒の変形に起因する抵抗が小さく, 差が生じなかったものと考えられる。

また, 制御棒挿入性試験時の各燃料集合体中央部の変位データより, 試験体を構成する 4 つの燃料集合体が同位相で動いていることを確認した (参考 5-7 図)。

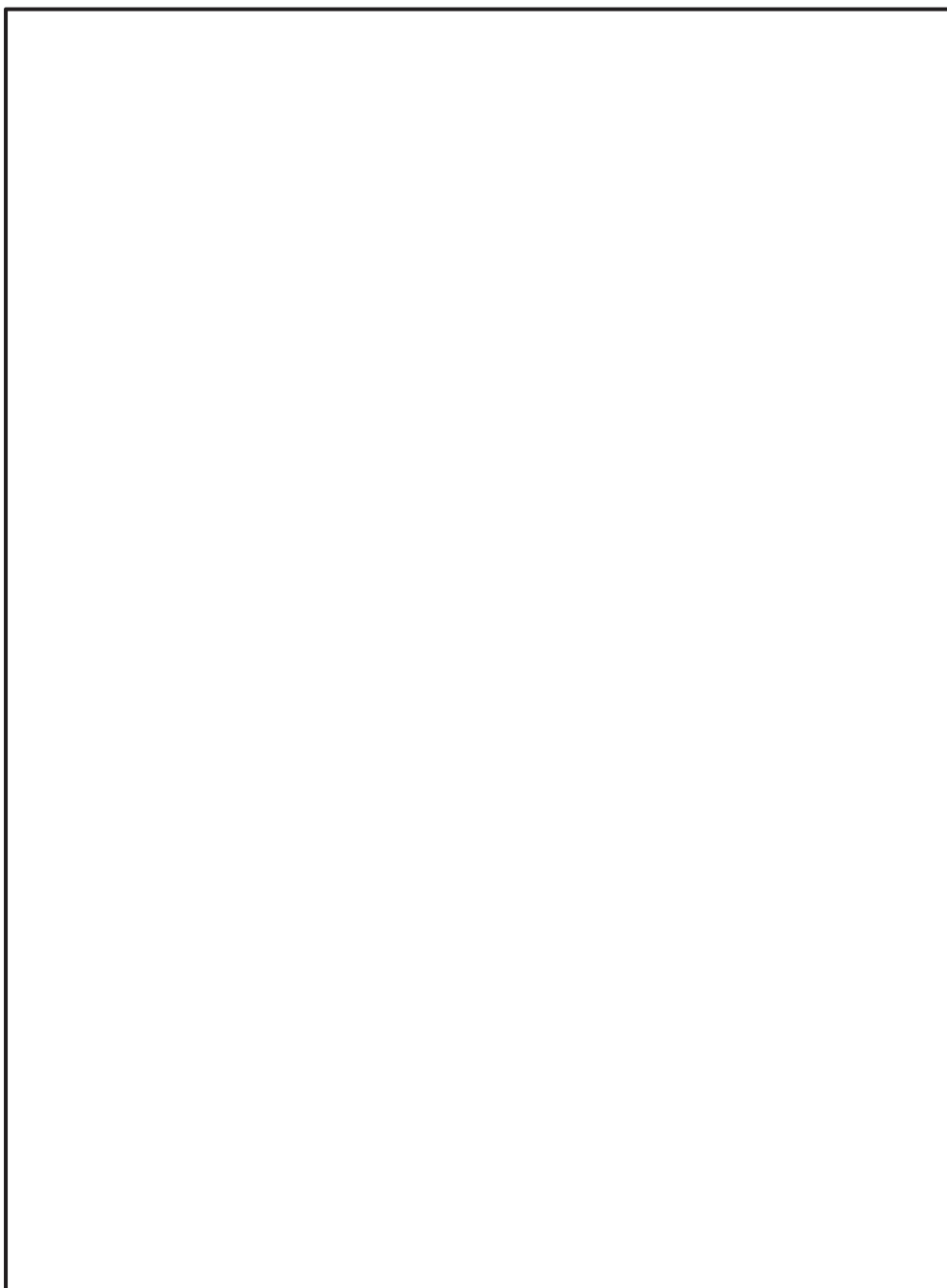


参考 5-6 図 制御棒挿入性試験結果

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

参考 5-3 表 女川 2 号炉工事計画認可申請における制御棒挿入性評価

制御棒 挿入性	工事計画 認可申請	基準地震動	燃料集合体 相対変位 (mm)	確認済 相対変位 (mm)
	既工認	S ₁ , S ₂	29.1	40
	平成 26 年 7 月申請	S s -1, 2	45.3	55



参考 5-7 図 燃料集合体中央部変位データ（燃料集合体目標変位 60 mm試験実施時）

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4. チャンネルボックス健全性確認結果

今回試験では、挿入性試験後、チャンネルボックスの外観点検を行い、制御棒の挿入性に影響を与える損傷がないことを確認した。

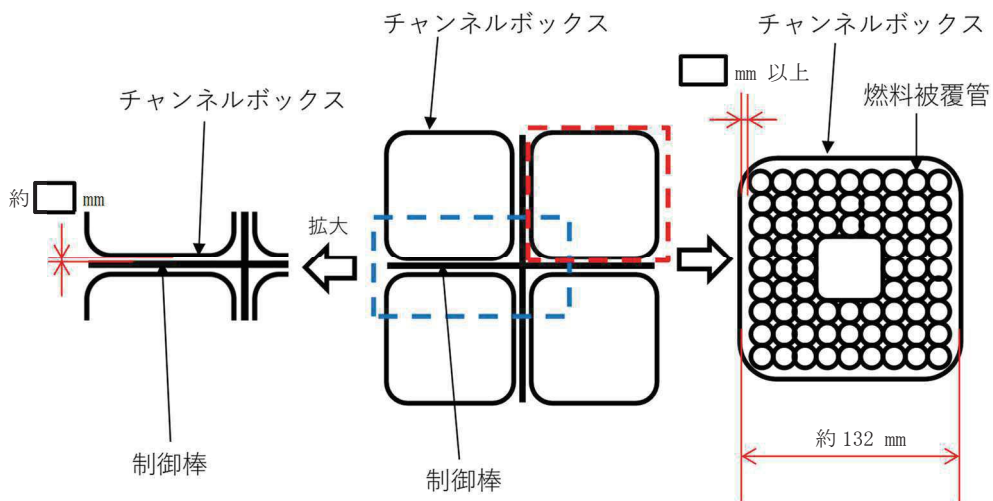
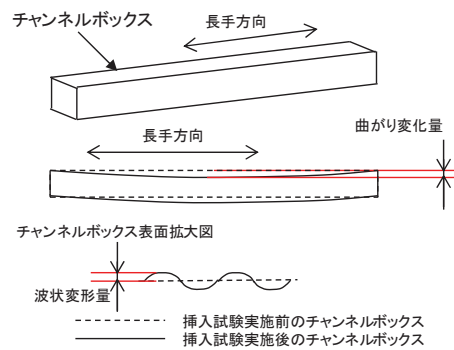
また、チャンネルボックスの詳細な測定の結果、長手の曲がり変化量が \square mm* 及び波状変形量が \square mm* であり、チャンネルボックスと制御棒との間隙（約 \square mm）及びチャンネルボックスと燃料被覆管との間隙（ \square mm 以上）に対して十分に小さいため、冷却材流路や燃料集合体に影響を及ぼすものではないことを確認した。参考 5-4 表にチャンネルボックス詳細測定結果、参考 5-8 図にチャンネルボックス周りの位置関係図を示す。

なお、チャンネルボックスと制御棒との間隙（約 \square mm）は常温時の値であるが、高温時は上部格子板の熱膨張の影響によりチャンネルボックスと制御棒との間隙が広がり、制御棒挿入抵抗が小さくなるため、制御棒の挿入性や冷却材流路に影響を及ぼすものではない。

* : 60 mm挿入性試験実施後の 3 回平均値

参考 5-4 表 チャンネルボックス詳細測定結果

測定対象	曲がり変化量 (mm)	波状変形量 (mm)
チャンネルボックス (60 mm挿入性試験 実施後 3 回平均値)	\square	\square



参考 5-8 図 チャンネルボックス周りの位置関係図

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

5. 制御棒健全性確認結果

今回の制御棒挿入性試験実施後、制御棒の外観点検を行った結果は、制御棒のブレード、タイロッドに変形等は認められたものの、いずれの試験条件においても制御棒を構成するブレード（シース、中性子吸収棒）、タイロッド、ローラ等の健全性に影響を与える有意な損傷がないことを確認した。

また、制御棒ブレードの厚さ測定の結果（参考 5-5 表）、局所的なシースの膨れが一部の試験条件において確認されたものの、ブレード全体にわたって仕様値を超えるものではなく、中性子吸収棒を支持する上下端位置でのブレード厚さは仕様値以内であり、シース内の中性子吸収棒が移動することはなく、制御棒の機能に影響はない。なお、シースの膨れの状況は、ブレードの長手方向（上端～下端）及び横方向（ブレード中央部～翼端）の局所的な範囲に納まっており、ブレード厚さが最大（ mm）となった箇所においても制御棒とチャンネルボックスが接触してチャンネルボックスとの間隙を閉塞するものではない。さらに、シースが変形してブレード厚さが増加しても、制御棒の構造上、シースの冷却孔を通じて冷却材が流れるため、冷却材流量への影響もない（参考 5-8～10 図参照）。

参考 5-5 表 制御棒ブレードの厚さ測定結果^{*1}

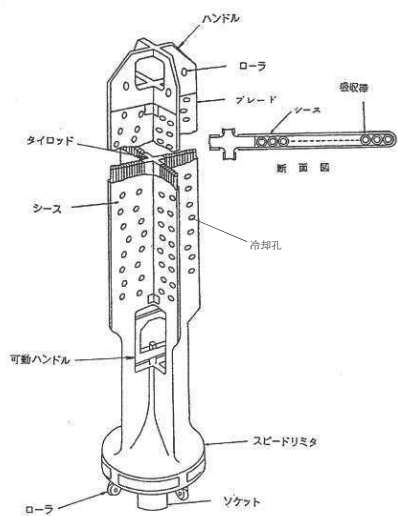
ブレード厚さ	仕様値 ^{*2}	測定位置 ^{*3}								
		上端部			下端部			膨れ部 ^{*4}		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C

*1：相対変位 60 mm 目標における試験実施時（制御棒 3 体の平均値）

*2：寸法（ mm）は、中性子吸収棒を内包する制御棒として炉心格子から決まる値。公差（ mm）はメーカーの製造能力により設定される値。

*3： A：ブレードの翼端，B：ブレード中央部，C：タイロッド部

*4：ブレード長手方向における最大値の平均値



参考 5-9 図 制御棒構造図



参考 5-10 図 制御棒ブレード厚さ測定位置

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

6. 既往知見を踏まえた今回試験結果の適用性確認

制御棒挿入性に係る検討を実施した既往知見として以下を調査し、制御棒挿入時間と弾塑性特性の観点で比較することにより、今回試験結果の適用性を確認した。

- (a) 平成 16 年度 原子力発電施設耐震信頼性実証に関する報告書 機器耐力その 2 (制御棒挿入性) (05 基構報-0003, (独) 原子力安全基盤機構)
- (b) 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 (05 基構報-0014, (独) 原子力安全基盤機構)

(1) 制御棒挿入時間

既往知見及び女川 2 号炉制御棒挿入性試験の全体概要を参考 5-11 図に示す。

既往知見では、実機試験（常温状態）を模擬した制御棒挿入性解析を行い、大入力での地震に対しても制御棒挿入挙動を予測できることを確認するとともに、その解析手法を用いて、実機プラント条件（実機運転温度、圧力）における制御棒挿入性の限界状態を解析・評価している。

既往知見の解析結果（常温状態、実機プラント状態）は、女川 2 号炉の試験結果に対して、いずれも大きな変形領域において制御棒の挿入時間が短くなっている。この差異は、女川 2 号炉の制御棒挿入性試験は、保守的な試験条件の設定として、最大相対変位を繰り返し付加する正弦波加振であることに対して、既往知見の制御棒挿入性試験は、ランダム波を用いた加振であることによるものと考えられる。

ここで既往知見の結果を女川 2 号炉の制御棒挿入性に係る評価に適用することも可能と考えられるが、制御棒の挿入時間は加振波の特性に依存するため、既往知見の加振波であるランダム波と女川 2 号炉の基準地震動 S_s (7 波) との関係を検討する必要がある。また、今回試験の加振波として基準地震動 S_s を用いる場合、全ての基準地震動 S_s に対して、各相対変位条件における制御棒挿入性試験が必要になり現実的ではない。このため、女川 2 号炉の今回試験では、既工認と同様、保守的に正弦波加振とすることにより制御棒挿入性試験の簡便化を図り、相対変位データの拡充を行った。

(2) 弾塑性特性

より大きな相対変位における制御棒の挿入状態でチャンネルボックスの塑性化が考えられることについて、既往知見の制御棒挿入性解析では、材料試験に基づくチャンネルボックスの弾塑性特性（参考 5-12 図）を考慮しており、高温時でより大きな相対変位の条件では、常温時よりチャンネルボックスの剛性が低下するため、制御棒の挿入抵抗が減少し、制御棒の挿入時間が短くなると考察されている。一方、女川 2 号炉の制御棒挿入性試験では、チャンネルボックスの高温時と常温時の縦弾

性係数を考慮して板厚を調整した試験体を用いて、大きな相対変位を付加した試験であることから、チャンネルボックスの弾塑性特性が試験体実際に反映された結果となる。女川 2 号炉の今回試験における振動台加速度と相対変位の関係（参考 5-13 図）によれば、相対変位が 40mm 程度を超える領域で塑性挙動が始まっている。女川 2 号炉の今回試験は常温で実施しているためチャンネルボックスの耐力（降伏点）は高温時のチャンネルボックスと差異があるが、高温時の縦弾性係数を考慮して板厚を調整したことにより、塑性挙動が始まる変位は、既往知見に示されている高温時の塑性開始変位（参考 5-12 図）とおおむね一致する結果になっているものと考えられる。

なお、チャンネルボックスと燃料集合体の間には炉水が存在し、チャンネルボックスの温度は炉水温度に依存することから、実機運転状態における炉心上部と下部の炉水温度差は約 10°C（参考 5-14 図）と小さいことを考慮すると、チャンネルボックスの長手方向で大きく温度分布及び弾塑性特性が異なることはないと考えられる。

既往知見に示されている高温時のチャンネルボックスの弾塑性特性（参考 5-12 図）は、4 点曲げ試験という静荷重条件による試験であり、変位が 40mm 程度を超える領域から、曲げモーメントの増加とともに大きく変位量が増加している。一方、女川 2 号炉の今回試験においては、振動台加速度と相対変位の関係（参考 5-13 図）から分かるように、チャンネルボックスの相対変位が 40mm 程度を超える領域に入っても相対変位が極端に増加することはなく、振動台加速度を上げても変位が増加しにくくなる傾向が見られる。これは、既往知見の弾塑性特性は静的な荷重を負荷してチャンネルボックスを変形させた場合のものであるのに対して、女川 2 号炉の制御棒挿入性試験では、地震と同様の交番荷重による慣性加振で行われているため、チャンネルボックスが塑性領域に入ったことによる履歴減衰の効果や振動挙動（固有周期）の変化などが要因となり、変位の増加が抑えられたと考えられる。

女川 2 号炉の地震応答解析では、チャンネルボックスを線形でモデル化し、燃料集合体の相対変位を評価しているが、チャンネルボックスが塑性領域に入った場合においても、上記のとおり履歴減衰の効果を得られることなどから、チャンネルボックスの地震応答傾向に及ぼす弾塑性特性の影響は、線形モデルでおおむね把握可能な程度になると推定している。

7. まとめ

女川 2 号炉の制御棒挿入性に係る評価に当たり、燃料集合体の相対変位データを拡充するため、チャンネルボックスの変位特性を考慮し、チャンネルボックスの板厚を調整した試験体を用いて既往試験（既工認）と同様の制御棒挿入性試験を実施した。

制御棒挿入性試験の結果、75%ストロークスクラムに要する時間が規定値（1.62s）に達する際の燃料集合体の相対変位として 60.9 mm（試験 3 回の平均値）が得られ

た。また、制御棒挿入性試験後のチャンネルボックス及び制御棒の健全性に問題はなく、制御棒の挿入性に係る機能に影響を及ぼすものではないことを確認した。

なお、女川2号炉の制御棒挿入性に係る評価については、より詳細な検討結果（チャンネルボックスの弾塑性特性を考慮した場合の燃料集合体相対変位、挿入性への影響含む）を工認段階で説明する。

【既往知見】

制御棒挿入性試験（実機試験）

【試験条件】
 機器・装置構成：実機仕様
 温度：常温
 圧力：大気圧
 CB板厚：100mil
 加振波：ランダム波

【結果】
 燃料集合体変位
 約 80mm に対して
 制御棒挿入時間は
 1.62s 以内

制御棒挿入性解析（常温状態）

【解析条件】
 温度：常温
 圧力：大気圧
 CB板厚：100mil
 加振波：ランダム波
 材料特性
 : CB 弾塑性特性
(常温) を考慮

【結果】
 解析結果は実機
 制御棒挿入性
 試験と一致

制御棒挿入性解析（実機プラント条件）

【解析条件】
 温度：実機運転温度
 圧力：実機運転圧力
 CB板厚：100mil
 加振波：ランダム波
 材料特性
 : CB 弾塑性特性
(高温) を考慮

【結果】
 燃料集合体変位
 約 100mm に対して
 制御棒挿入時間は
 1.62s 以内

解析手法
の検証

実機プラント
条件への拡張

【女川 2 号炉】

制御棒挿入性試験（既工認）

【試験条件】
 機器・装置構成：実機仕様
 温度：常温*
 圧力：大気圧*
 CB板厚：100mil
 加振波：正弦波

【結果】
 燃料集合体変位約 45mm に
 対して制御棒挿入時間は
 1.62s 以内

CB 変位特性から
板厚を調整

相対変位データの拡充

制御棒挿入性試験（今回試験）

【試験条件】
 機器・装置構成：実機仕様
 温度：常温
 圧力：大気圧*
 CB板厚： mil
 加振波：正弦波

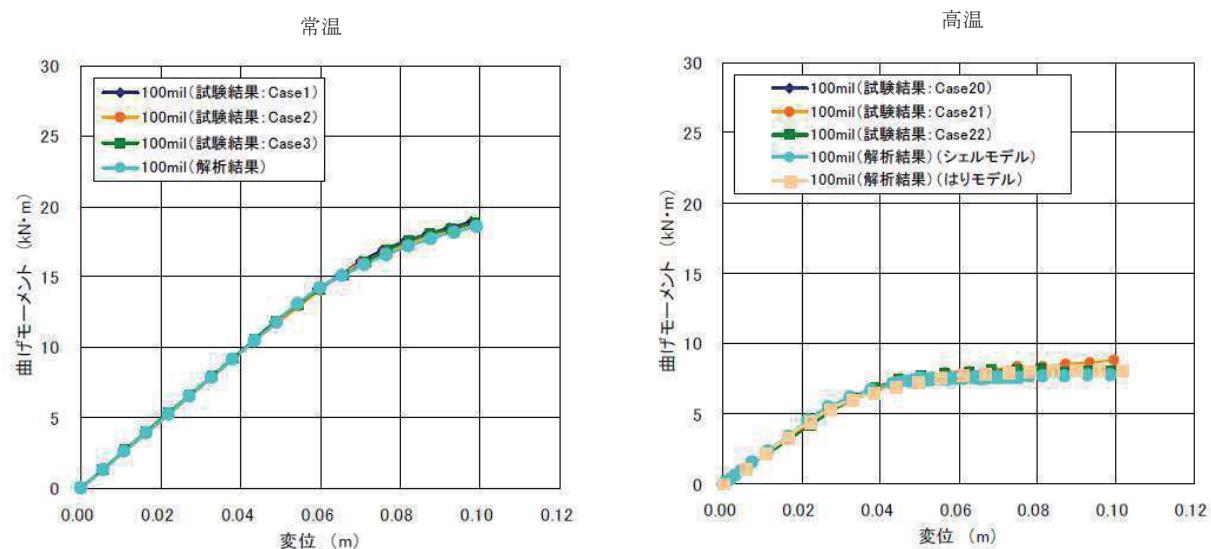
【結果】
 燃料集合体変位約 60mm に
 対して制御棒挿入時間は
 1.62s 以内

*：炉圧模擬

*：炉圧模擬

参考 5-11 図 既往知見及び女川 2 号炉制御棒挿入性試験の全体概要

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



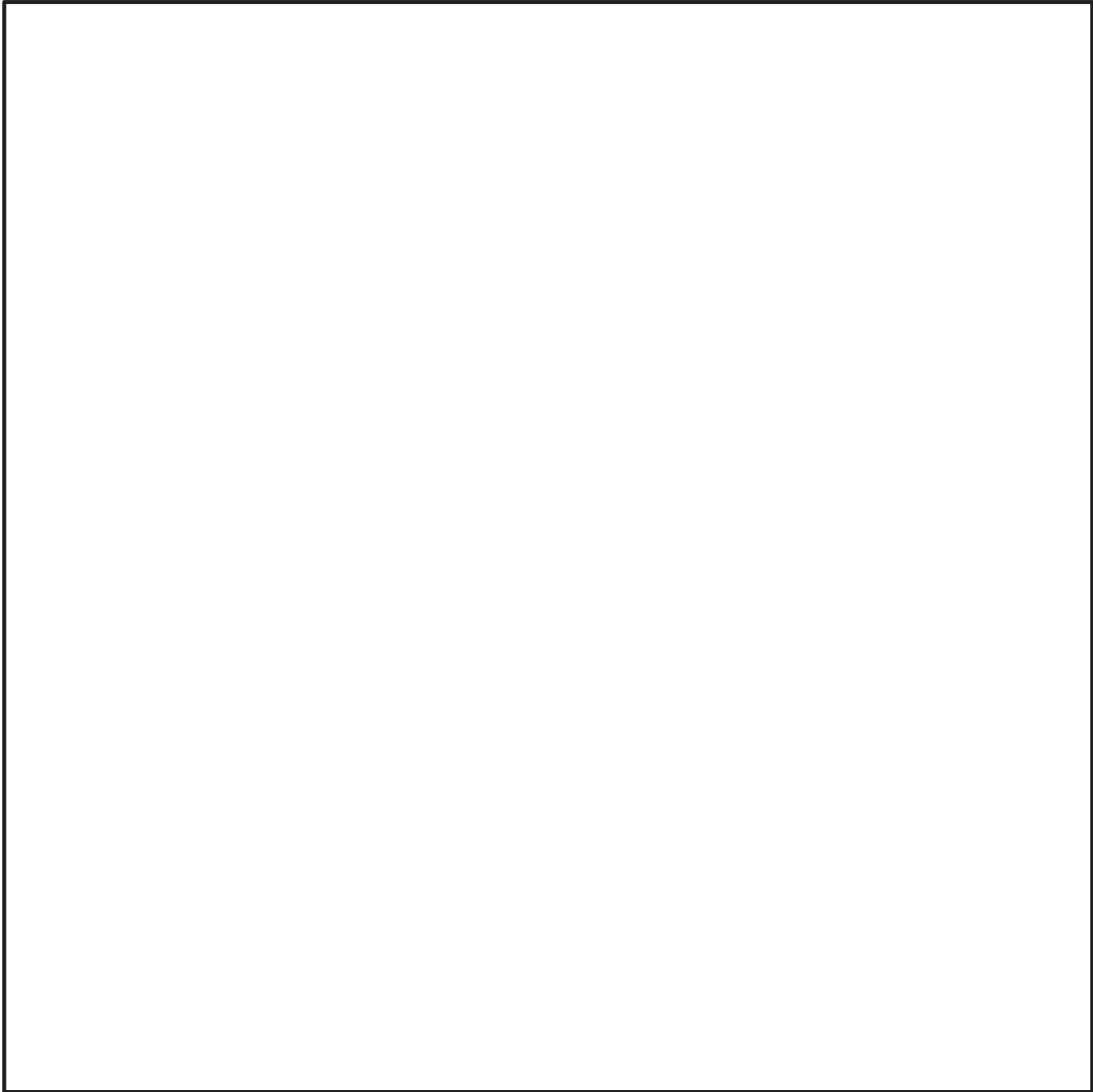
※既往知見より抜粋

参考 5-12 図 チャンネルボックス弾塑性特性 (常温及び高温)



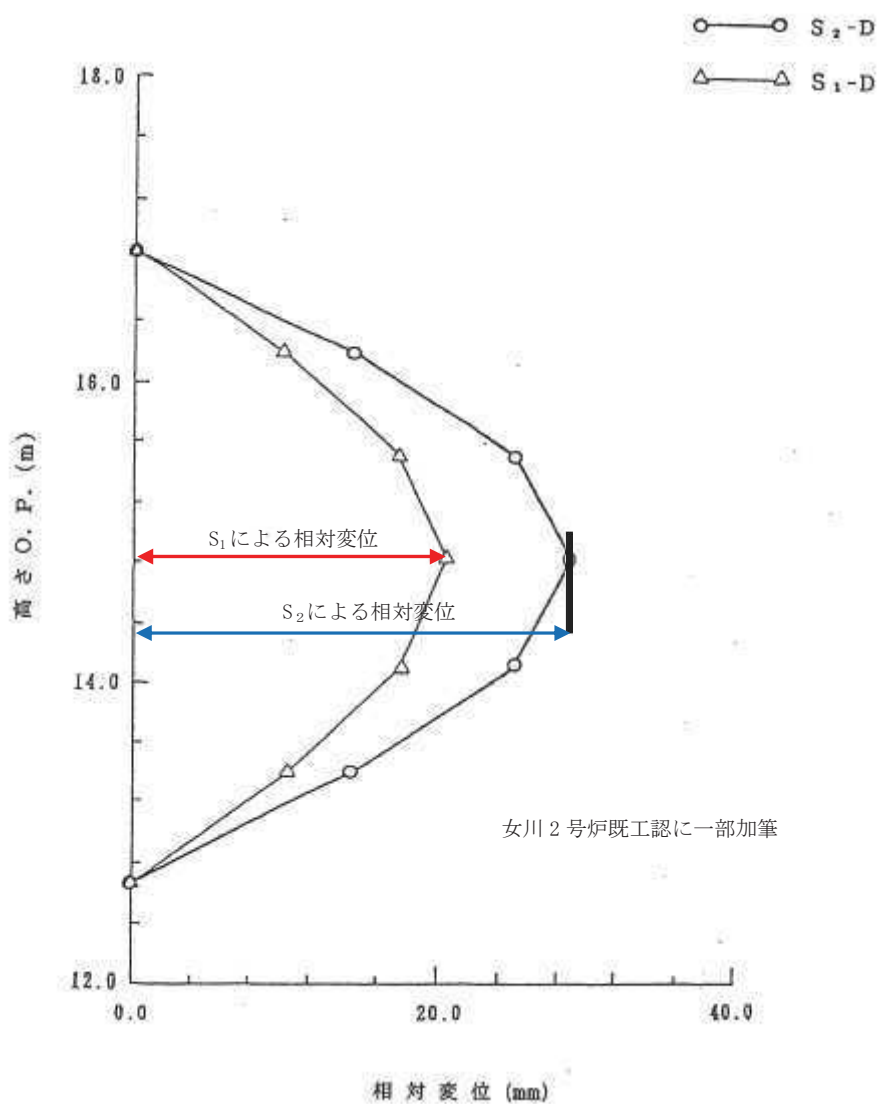
参考 5-13 図 振動台加速度と相対変位の関係図

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



参考 5-14 図 原子炉系ヒートバランスより算出した炉水温度

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



(燃料集合体の上下端の変位を0とした場合の中央部の最大変位)

参考 5-15 図 燃料集合体の相対変位

女川原子力発電所 2 号炉 東北地方太平洋沖地震等による影響を踏まえた
機器・配管系の耐震設計への反映事項について

1. はじめに

本資料では、東北地方太平洋沖地震等（3.11/4.7 地震）の影響を踏まえた女川 2 号炉の機器・配管系の耐震設計に反映すべき事項について、検討を実施した。

2. 機器・配管系の耐震設計に反映すべき事項の検討方針

東北地方太平洋沖地震等（3.11/4.7 地震）の影響を踏まえた女川 2 号炉の機器・配管系の耐震設計に反映すべき事項は、「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則」（以下「実用炉規則」という。）に基づき実施した地震後の設備健全性確認^{※1}（特別な保全計画）における設備点検結果及び地震応答解析結果を考慮するとともに、機器・配管系が設置される建物・構築物の地震影響を踏まえ、検討する。

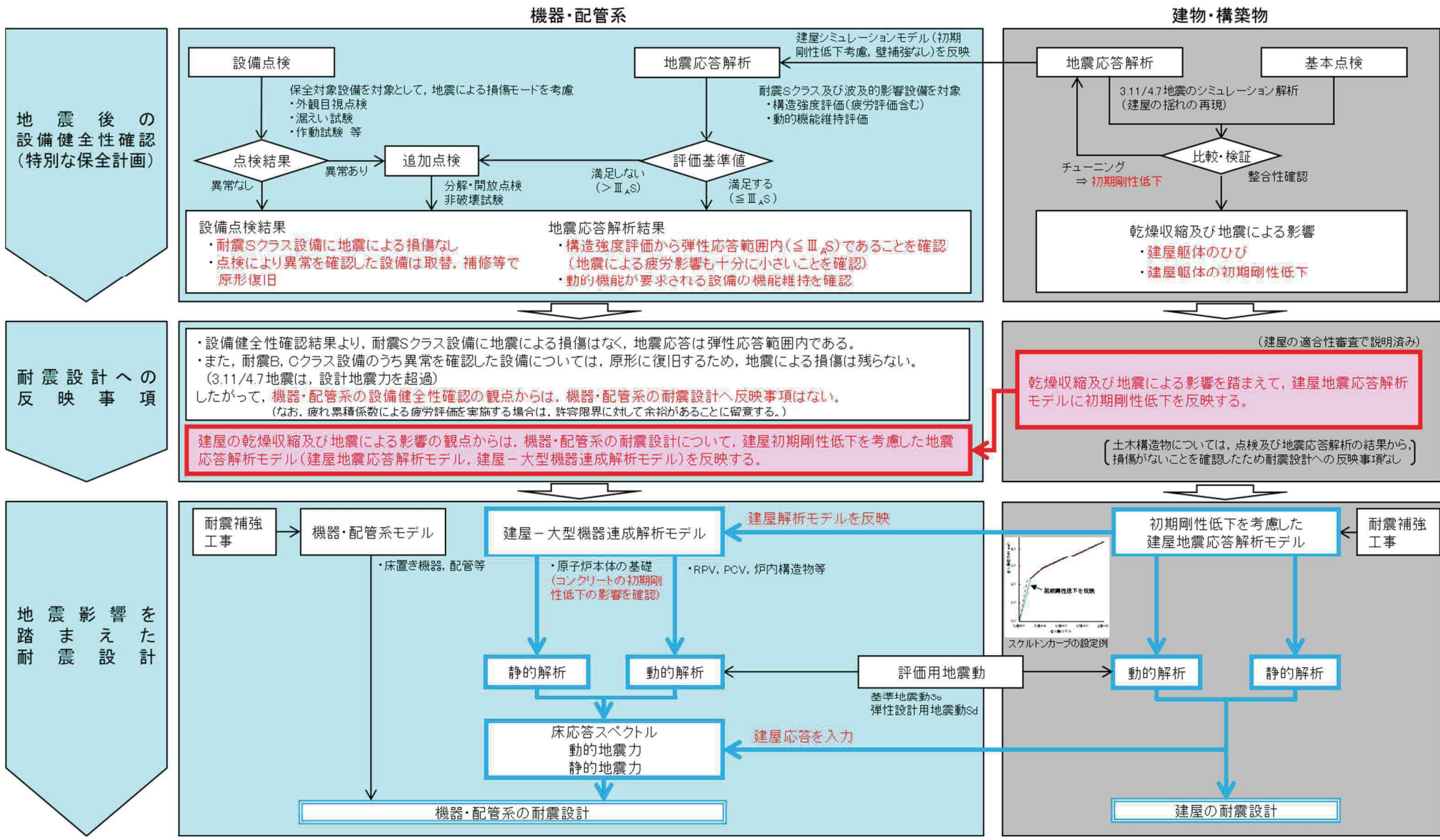
機器・配管系の耐震設計へ反映が必要となるのは、施設が地震影響によって損傷（変形、割れなど）し、補修、取替等が困難で、その状態のまま再使用する場合であって、その損傷が地震応答解析及び構造強度評価に影響を与える場合である。

機器・配管系の耐震設計への反映事項の検討概要を参考 6-1 図に、建物・構築物及び土木構造物を含む耐震設計への反映事項の判断フローを参考 6-2 図に示す。

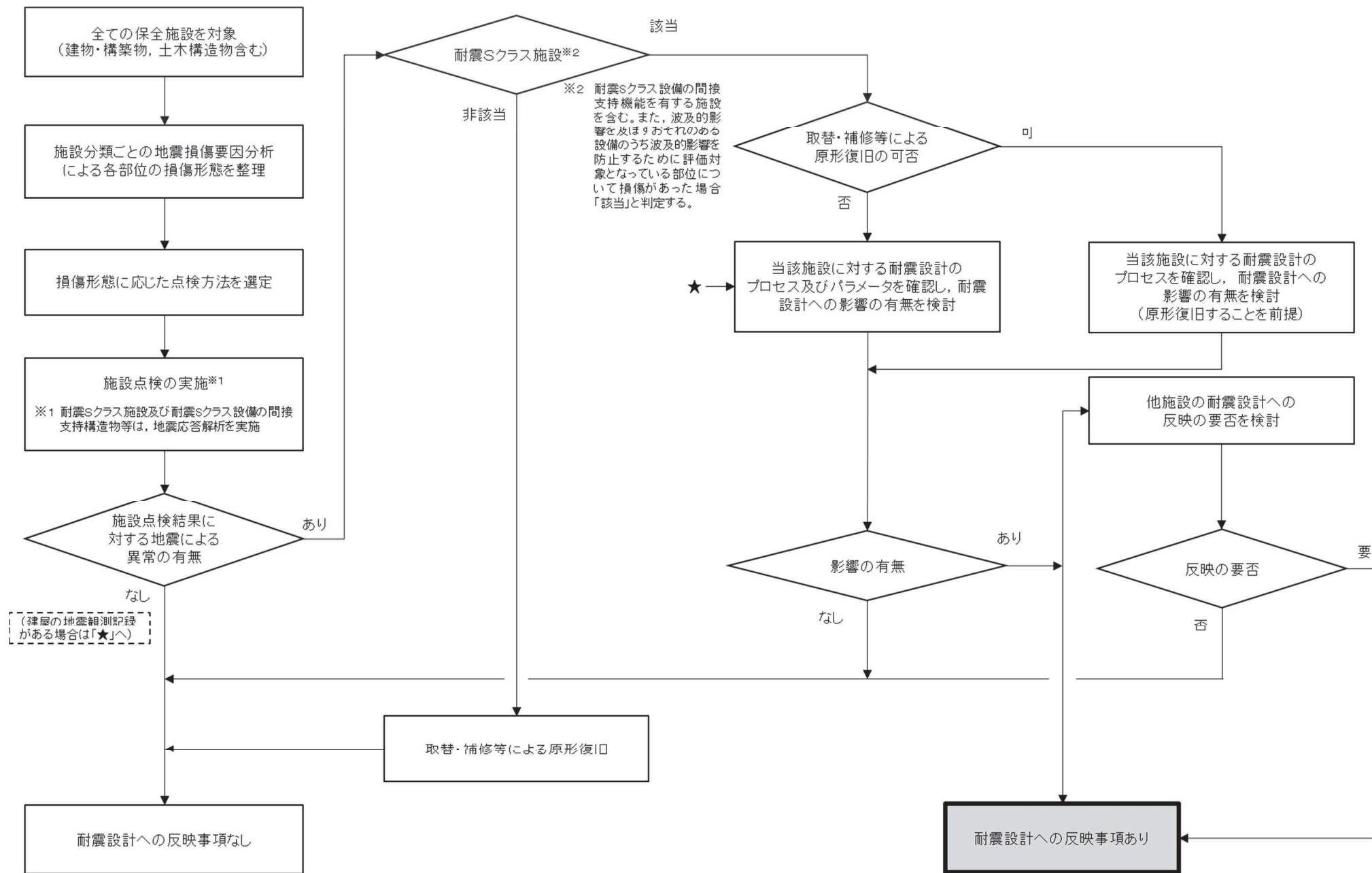
耐震設計への反映事項の判断に当たっては、まず、全ての保全施設を対象とし、施設分類ごとの損傷形態に応じた点検方法を選定し、施設点検（一部施設の地震応答解析を含む）を実施する。次に、施設点検結果において耐震 S クラス施設（耐震 S クラス設備の間接支持機能を有する施設等を含む）に地震による異常がある場合は、耐震設計への影響を検討するとともに、他施設の耐震設計への反映の要否を検討する。施設点検結果に異常がない場合や、異常があった施設が耐震 S クラス施設（耐震 S クラス設備の間接支持機能を有する施設等を含む）に該当せず取替・補修等による原形復旧を行う場合は、耐震設計への反映事項はないものと判断する。なお、地震による異常がない場合でも、建屋の地震観測記録がある場合は、耐震設計への影響の有無を検討する。

次項以降に設備点検及び地震応答解析に係る検討詳細を示す。

※1 実用炉規則に基づき実施した地震後の設備健全性確認の結果は、発電所における保安検査等にて確認するとの見解が示されている（第 68 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合、平成 26 年 1 月 16 日）



参考 6-1 図 機器・配管系の耐震設計への反映事項の検討概要図



参考 6-2 図 東北地方太平洋沖地震等による影響を踏まえた耐震設計への反映事項の判断フロー (建物・構築物, 土木構造物含む)

3. 機器・配管系の地震後の設備点検

地震後の設備健全性確認（特別な保全計画）の概要及び設備点検結果の概要を添付資料に示す。

これまで実施した機器・配管系の地震後の設備健全性確認において、耐震Sクラス設備に損傷はなく、プラントの安全性に影響を与える所見はないことを確認した。

設備点検において異常を確認した耐震B, Cクラス設備については、いずれも原子炉安全を阻害する可能性はなく、取替, 補修, 手入れにより原形に復旧している。

また、耐震B, Cクラスの異常により、耐震Sクラス設備への波及的影響がないことを確認した。

4. 機器・配管系の東北地方太平洋沖地震等（3.11/4.7地震）による地震応答解析

地震応答解析を実施する機器・配管系の評価対象設備の考え方及び評価方法の概要を以下に示す。

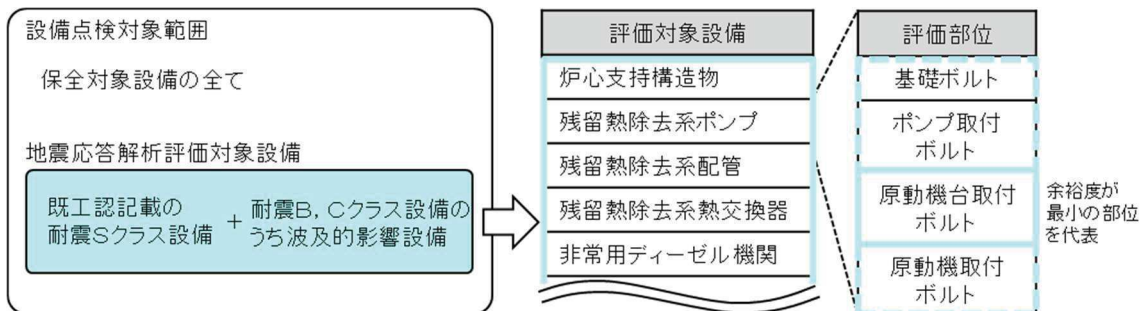
(1) 評価対象選定の考え方

評価対象設備は、既工認記載の耐震Sクラス設備及び耐震B, Cクラス設備のうち波及的影響設備とする。評価対象設備のうち、同一の設備が複数存在するポンプ等は、据付床の床応答を考慮して、厳しい条件の設備を選定する。また、配管等は、系統毎に設計時又は既往の評価における余裕度の小さい設備を選定する。

評価部位は、設計時又は既往の評価における余裕度（＝許容応力／発生応力）の最も小さい部位を代表部位とする。（代表部位以外についても評価する場合もある。）

地震の継続時間が比較的長かったことを考慮して、疲労の影響が大きいと考えられる配管等を選定し、3.11/4.7地震に対する疲労評価（疲れ累積係数）を実施する。

地震時に動的機能が要求される動的機器（ポンプ、弁等）を選定し、動的機能維持評価を実施する。



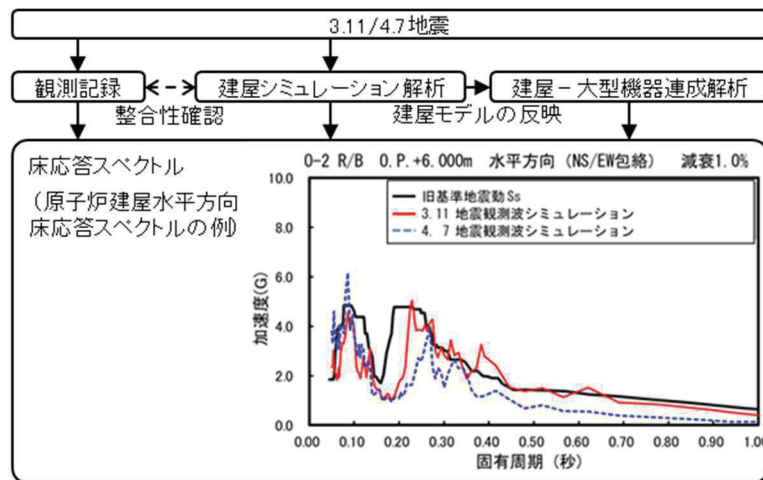
参考 6-3 図 評価対象選定の考え方の概要図

(2) 評価方法の概要

a. 地震応答解析に用いる建屋応答

地震応答解析は、地震観測記録との整合性を確認した建屋シミュレーション解析モデル（初期剛性低下等を反映）を用いることを基本とし、建屋内に設置された地震計による観測記録も考慮する。

なお、床応答スペクトルは、シミュレーション解析による建屋応答及び地震観測記録を反映しているため、拡幅は行わない。



参考 6-4 図 地震応答解析に用いる建屋応答の例

b. 構造強度評価

構造強度評価は、段階的な評価手順とする。

- ①設計時及び既往の評価結果において比較的余裕度の大きな設備については、簡易評価（応答倍率法による評価）を行う。
- ②簡易評価において算出値が評価基準値を満足しない場合には、設計時と同等の評価を行う。
- ③設計時と同等の評価において算出値が評価基準値を満足しない場合には詳細評価（時刻歴応答解析等）を行う。

構造強度評価の評価基準値は、地震による影響の有無を確認する観点から「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601・補-1984」に規定される許容応力状態Ⅲ_AS（弾性応答範囲内）における許容応力を基本とする。

地震応答解析及び耐震評価は、設計時の評価条件と同条件にて評価することを基本とするが、3.11/4.7地震に対する地震影響を詳しく確認するため、より実態にあった評価条件として、地震時におけるプラント状態（女川2号炉は、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震時は原子炉起動中、同年4月7日宮城県沖の地震時は冷温停止中）等を考慮した評価を実施する場合がある。

また、地震の継続時間が比較的長かったことを考慮して、疲労の影響が大きいと考えられる配管等については、時刻歴応答解析で求めたピーク応力強さの時刻歴と設計疲労線図に基づき、疲労評価を実施する。

c. 動的機能維持評価

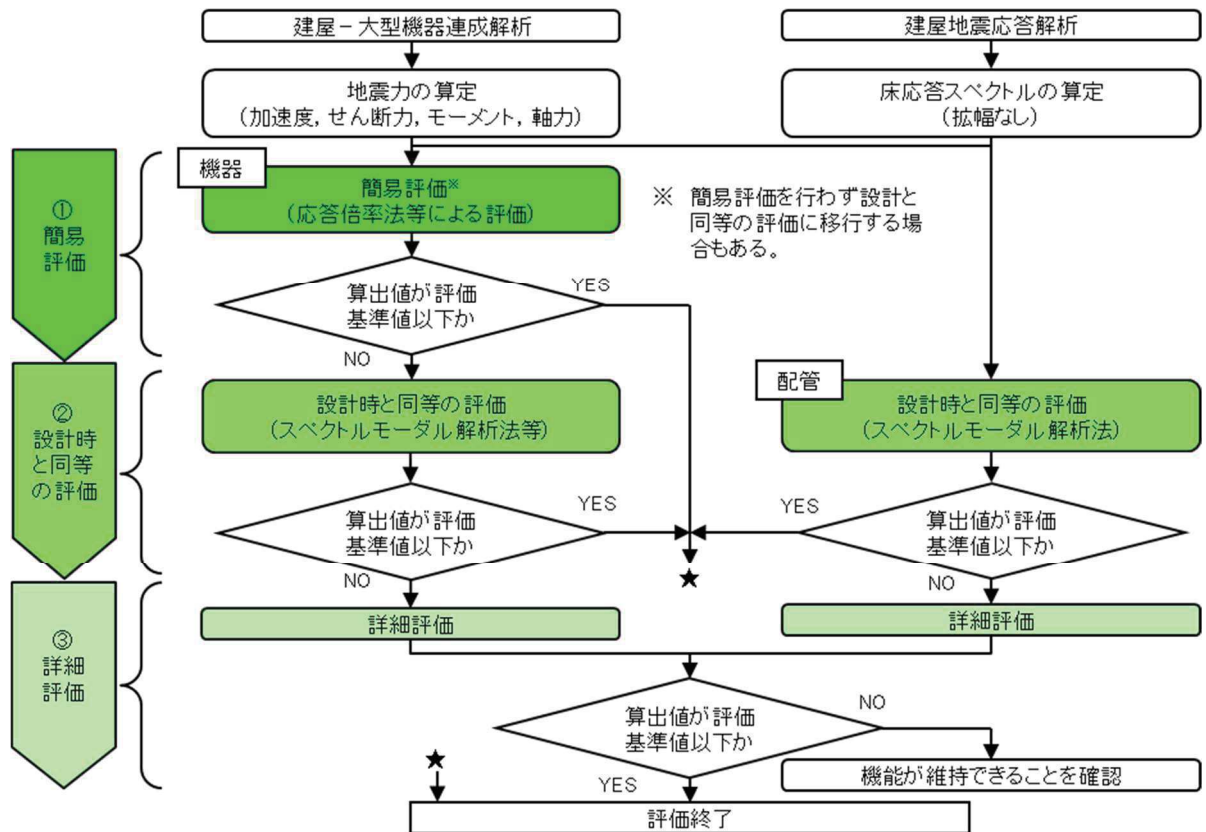
弁、ポンプ等の動的機能維持の評価は、地震応答解析に基づき評価対象設備の応答加速度を求め、評価基準値である機能確認済加速度以下であることを確認する。また、応答加速度が機能確認済加速度を上回る設備については、詳細評価を実施する。

制御棒の挿入性は、地震応答解析により燃料集合体の相対変位を求め、試験により制御棒の挿入性が確認された相対変位以下であることを確認する。

評価基準値の機能確認済加速度は、JEAG4601-1991 追補版に準拠するとともに、試験等で妥当性が確認された値も用いる。

(3) 段階的な構造強度評価の概要

a. 評価フロー



b. 応答倍率法の概要

応答倍率法による算出値の求め方の例

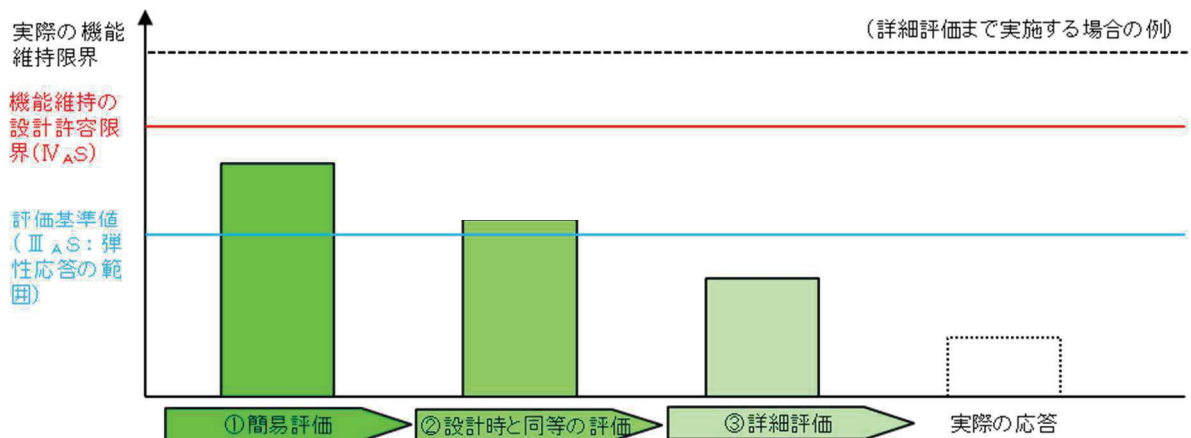
ケース1 算出値 = 設計時又は既往評価での全体応力 × 応答比
(地震及び地震以外による応力)

ケース2 算出値 = 設計時又は既往評価での地震以外による応力
+ 設計時又は既往評価での地震による応力 × 応答比

上記における 応答比 の求め方の例

- ・原子炉圧力容器や炉内構造物等，算出値を求めるにあたり，加速度，せん断力，モーメント，軸力を用いる機器
3. 11/4. 7 地震時の地震力と設計時又は既往評価での地震力の比
(加速度，せん断力，モーメント，軸力ごとに応答比を算出)
- ・ポンプの基礎ボルト等，算出値を求めるにあたり，水平加速度，鉛直加速度を用いる機器
3. 11/4. 7 地震時の加速度と設計時又は既往評価での加速度の比
(水平加速度，鉛直加速度ごとに応答比を算出)

c. 構造強度評価の各段階における実際の応答に対する保守性（イメージ）



(4) 地震応答解析結果

構造強度評価の結果を参考 6-1 表に，疲労評価の結果を参考 6-2 表に，動的機能維持評価の結果を参考 6-3 表に示す。

東北地方太平洋沖地震等（3. 11/4. 7 地震）の建屋シミュレーション解析を踏まえ，耐震 S クラス等の設備に対する構造強度評価の結果，弾性応答範囲内であること，地震による疲労影響は十分に小さいことを確認した。

また，動的機能維持評価の結果，動的機能が要求される設備の機能が維持されることを確認した。

参考 6-1 表 構造強度評価結果 (1/16)

評価対象設備及び評価箇所		評価用 地震動	評価部位	評価項目 (応力分類)	算出値 [MPa]	評価 基準値 [MPa]	評価 結果	評価 方法*	
原子炉 本体	原子炉 圧力 容器	胴板	3.11地震	胴板	一次一般膜応力	176	303	○	①
			4.7地震	胴板	一次一般膜応力	191	303	○	①
		下部鏡板	3.11地震	下部鏡板	一次一般膜応力	115	303	○	①
			4.7地震	下部鏡板	一次一般膜応力	125	303	○	①
		制御棒駆動機構 ハウジング貫通孔	3.11地震	スタブチューブ	一次膜＋ 一次曲げ応力	193	271	○	①
			4.7地震	スタブチューブ	一次膜＋ 一次曲げ応力	199	271	○	①
		再循環水入口ノズル (N2)	3.11地震	ノズル セーフエンド	一次膜＋ 一次曲げ応力	153	193	○	①
			4.7地震	ノズル セーフエンド	一次膜＋ 一次曲げ応力	189	193	○	①
		給水ノズル (N4)	3.11地震	ノズル セーフエンド	一次膜＋ 一次曲げ応力	135	253	○	①
			4.7地震	ノズル セーフエンド	一次膜＋ 一次曲げ応力	179	253	○	①
		低圧注入ノズル (N6)	3.11地震	ノズル セーフエンド	一次膜＋ 一次曲げ応力	140	253	○	①
			4.7地震	ノズル セーフエンド	一次膜＋ 一次曲げ応力	147	253	○	①
		ベントノズル (N8)	3.11地震	ノズルエンド	一次膜＋ 一次曲げ応力	141	418	○	①
			4.7地震	ノズルエンド	一次膜＋ 一次曲げ応力	169	418	○	①
		ブラケット類	3.11地震	蒸気乾燥器 支持ブラケット	一次膜＋ 一次曲げ応力	147	213	○	②
			4.7地震	蒸気乾燥器 支持ブラケット	一次膜＋ 一次曲げ応力	169	213	○	②

※ 評価方法

- ①：簡易評価
- ②：設計時と同等の評価
- ③：詳細評価

参考 6-1 表 構造強度評価結果 (2/16)

評価対象設備及び評価箇所		評価用 地震動	評価部位	評価項目 (応力分類)	算出値 [MPa]	評価 基準値 [MPa]	評価 結果	評価 方法※		
原子炉本体	原子炉圧力容器 支持力容器	原子炉圧力容器 基礎ボルト	3.11地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	105	499	○	②	
			4.7地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	91	499	○	②	
		原子炉圧力容器 支持スカート	3.11地震	スカート	軸圧縮応力	0.35 (単位なし)	1 (単位なし)	○	②	
			4.7地震	スカート	軸圧縮応力	0.32 (単位なし)	1 (単位なし)	○	②	
	原子炉格納容器 スタビライザ	原子炉圧力容器 スタビライザ	3.11地震	ブラケット	一次応力 (組合せ)	110	198	○	②	
			4.7地震	ブラケット	一次応力 (組合せ)	118	198	○	②	
		原子炉格納容器 スタビライザ	3.11地震	外側フィニッシュ シヤラグ本体	一次応力 (組合せ)	143	176	○	②	
			4.7地震	ガセットプレート	一次応力 (組合せ)	116	176	○	②	
		制御棒駆動機構 ハウジング支持金具	3.11地震	レストレイントビーム	強軸曲げ応力	81	201	○	①	
			4.7地震	レストレイントビーム	強軸曲げ応力	103	201	○	①	
		差圧検出・ほう酸水注入系 配管 (ティーよりN11ノズルまで の外管)	3.11地震	パイプ	一次一般膜応力	42	114	○	①	
			4.7地震	パイプ	一次一般膜応力	43	114	○	①	
		原子炉圧力容器 内部構造物	蒸気乾燥器	3.11地震	耐震用ブロック 溶接部	純せん断応力	24	47	○	②
				4.7地震	耐震用ブロック 溶接部	純せん断応力	27	47	○	②
	シュラウドヘッド		3.11地震	シュラウドヘッド	一次膜＋ 一次曲げ応力	232	265	○	③	
			4.7地震	シュラウドヘッド	一次膜＋ 一次曲げ応力	248	265	○	③	
	気水分離器及び スタンドパイプ		3.11地震	スタンドパイプ	一次膜＋ 一次曲げ応力	93	106	○	②	
			4.7地震	スタンドパイプ	一次膜＋ 一次曲げ応力	100	106	○	②	

※ 評価方法

- ①：簡易評価
- ②：設計時と同等の評価
- ③：詳細評価

参考 6-1 表 構造強度評価結果 (3/16)

評価対象設備及び評価箇所		評価用 地震動	評価部位	評価項目 (応力分類)	算出値 [MPa]	評価 基準値 [MPa]	評価 結果	評価 方法※	
原子炉本体	原子炉圧力容器内部構造物	給水スパー ज्या	3.11地震	ヘッド	一次膜+ 一次曲げ応力	25	139	○	①
			4.7地震	ヘッド	一次膜+ 一次曲げ応力	28	139	○	①
		高圧及び低圧炉心 スプレイスパー ज्या	3.11地震	ティー	一次一般膜応力	10	92	○	①
			4.7地震	ティー	一次一般膜応力	15	92	○	①
		ジェットポンプ	3.11地震	ライザ	一次膜+ 一次曲げ応力	69	174	○	①
			4.7地震	ライザ	一次膜+ 一次曲げ応力	82	174	○	①
		残留熱除去系配管 (原子炉圧力容器内部)	3.11地震	リング	一次一般膜応力	15	57	○	①
			4.7地震	リング	一次一般膜応力	17	57	○	①
		高圧及び低圧炉心 スプレイ系配管 (原子炉圧力容器内部)	3.11地震	パイプ	一次膜+ 一次曲げ応力	36	214	○	①
			4.7地震	パイプ	一次膜+ 一次曲げ応力	54	214	○	①
		差圧検出・ほう酸水 注入系配管 (原子炉圧力容器内部)	3.11地震	パイプ	一次膜+ 一次曲げ応力	30	139	○	①
			4.7地震	パイプ	一次膜+ 一次曲げ応力	49	139	○	①
	中性子束計測案内管	3.11地震	中性子束案内管 下部	一次膜+ 一次曲げ応力	34	172	○	②	
		4.7地震	中性子束案内管 下部	一次膜+ 一次曲げ応力	25	172	○	②	
	炉心支持構造物	炉心シュラウド	3.11地震	下部胴	一次一般膜応力	69	92	○	②
			4.7地震	下部胴	一次一般膜応力	71	92	○	②
		シュラウドサポート レグ	3.11地震	シュラウドサポート レグ	軸圧縮応力	175	198	○	①
			4.7地震	シュラウドサポート レグ	軸圧縮応力	177	198	○	①

※ 評価方法

- ①：簡易評価
- ②：設計時と同等の評価
- ③：詳細評価

参考 6-1 表 構造強度評価結果 (4/16)

評価対象設備及び評価箇所		評価用 地震動	評価部位	評価項目 (応力分類)	算出値 [MPa]	評価 基準値 [MPa]	評価 結果	評価 方法*	
原子炉本体	炉心支持構造物	炉心シュラウド 支持ロッド	3.11地震	上部タイロッド	一次膜＋ 一次曲げ応力	366	455	○	②
			4.7地震	上部タイロッド	一次膜＋ 一次曲げ応力	366	455	○	②
		上部格子板	3.11地震	グリッドプレート	一次膜＋ 一次曲げ応力	65	214	○	②
			4.7地震	グリッドプレート	一次膜＋ 一次曲げ応力	45	214	○	②
		炉心支持板	3.11地震	支持板	一次膜＋ 一次曲げ応力	130	268	○	②
			4.7地震	支持板	一次膜＋ 一次曲げ応力	87	268	○	②
		制御棒案内管	3.11地震	長手中央部	一次一般膜応力	39	143	○	②
			4.7地震	長手中央部	一次一般膜応力	35	143	○	②
	原子炉本体の基礎	外筒、内筒、縦リブ	3.11地震	外筒	一次応力 (組合せ)	262	427	○	②
			4.7地震	外筒	一次応力 (組合せ)	206	427	○	②
		CRD開口部	3.11地震	CRD開口部	一次応力 (せん断)	127	246	○	②
			4.7地震	CRD開口部	一次応力 (せん断)	99	246	○	②
		アンカボルト	3.11地震	アンカボルト	定着力	874 (kN/本)	1523 (kN/本)	○	②
			4.7地震	アンカボルト	定着力	654 (kN/本)	1523 (kN/本)	○	②
スカートフランジ		3.11地震	スカート フランジ	一次応力 (曲げ)	247	492	○	②	
		4.7地震	スカート フランジ	一次応力 (曲げ)	187	492	○	②	

※ 評価方法

- ①：簡易評価
- ②：設計時と同等の評価
- ③：詳細評価

参考 6-1 表 構造強度評価結果 (5/16)

評価対象設備及び評価箇所		評価用 地震動	評価部位	評価項目 (応力分類)	算出値 [MPa]	評価 基準値 [MPa]	評価 結果	評価 方法 [※]	
計測制御系統施設	制御材	制御棒中性子吸収棒	3.11地震	中性子吸収棒	一次一般膜応力	35	142	○	②
			4.7地震	中性子吸収棒	一次一般膜応力	35	142	○	②
	駆動装置	水圧制御ユニット	3.11地震	取付ボルト	一次応力 (引張)	169	475	○	①
			4.7地震	取付ボルト	一次応力 (引張)	149	475	○	①
	ほう酸水注入設備	ほう酸水注入系 ポンプ	3.11地震	ポンプ取付ボルト	一次応力 (せん断)	33	118	○	①
			4.7地震	ポンプ取付ボルト	一次応力 (せん断)	43	118	○	①
		ほう酸水注入系 貯蔵タンク	3.11地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	47	173	○	②
			4.7地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	47	173	○	②
	計測装置	起動領域モニタ ドライチューブ	3.11地震	パイプ	一次膜＋ 一次曲げ応力	120	308	○	②
			4.7地震	パイプ	一次膜＋ 一次曲げ応力	91	308	○	②
		局部出力領域モニタ 検出器集合体	3.11地震	カバーチューブ	一次膜＋ 一次曲げ応力	109	200	○	②
			4.7地震	カバーチューブ	一次膜＋ 一次曲げ応力	88	200	○	②
		直立型制御盤	3.11地震	取付ボルト	一次応力 (引張)	21	173	○	②
			4.7地震	取付ボルト	一次応力 (引張)	24	173	○	②
		ベンチ型制御盤	3.11地震	取付ボルト	一次応力 (引張)	16	173	○	②
			4.7地震	取付ボルト	一次応力 (引張)	18	173	○	②
		現場盤	3.11地震	取付ボルト	一次応力 (引張)	23	173	○	①
			4.7地震	取付ボルト	一次応力 (引張)	30	173	○	①

※ 評価方法

- ①：簡易評価
- ②：設計時と同等の評価
- ③：詳細評価

参考 6-1 表 構造強度評価結果 (6/16)

評価対象設備及び評価箇所			評価用 地震動	評価部位	評価項目 (応力分類)	算出値 [MPa]	評価 基準値 [MPa]	評価 結果	評価 方法*
原子炉冷却系統施設	残留熱除去設備	残留熱除去系 熱交換器	3.11地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	82	147	○	②
			4.7地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	56	169	○	②
		残留熱除去系 ポンプ	3.11地震	原動機台 取付ボルト	一次応力 (引張)	26	444	○	①
			4.7地震	原動機台 取付ボルト	一次応力 (引張)	25	444	○	①
	原子炉冷却材補給設備	原子炉隔離時冷却系 ポンプ	3.11地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	20	169	○	①
			4.7地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	19	169	○	①
		原子炉隔離時冷却系 ポンプ駆動用タービン	3.11地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	45	169	○	①
			4.7地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	44	169	○	①
原子炉冷却系統施設	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 ポンプ	3.11地震	原動機取付ボルト	一次応力 (引張)	27	455	○	①
			4.7地震	原動機取付ボルト	一次応力 (引張)	26	455	○	①
		低圧炉心スプレイ系 ポンプ	3.11地震	原動機取付ボルト	一次応力 (引張)	29	491	○	①
			4.7地震	原動機取付ボルト	一次応力 (引張)	28	491	○	①
	原子炉冷却材の循環設備	主蒸気逃がし安全弁 逃がし弁機能用 アキュムレータ	3.11地震	ラグ	一次応力 (組合せ)	45	203	○	②
			4.7地震	ラグ	一次応力 (組合せ)	61	203	○	②
		主蒸気逃がし安全弁 自動減圧機能用 アキュムレータ	3.11地震	ラグ	一次応力 (組合せ)	74	203	○	②
			4.7地震	ラグ	一次応力 (組合せ)	100	203	○	②

※ 評価方法

- ①：簡易評価
- ②：設計時と同等の評価
- ③：詳細評価

参考 6-1 表 構造強度評価結果 (7/16)

評価対象設備及び評価箇所		評価用 地震動	評価部位	評価項目 (応力分類)	算出値 [MPa]	評価 基準値 [MPa]	評価 結果	評価 方法 [※]	
原子炉冷却系統施設	原子炉補機冷却設備	原子炉補機冷却水系 熱交換器	3.11地震	胴板	一次応力	176	415	○	②
			4.7地震	胴板	一次応力	157	415	○	②
		原子炉補機冷却水 ポンプ	3.11地震	原動機取付ボルト	一次応力 (せん断)	16	122	○	①
			4.7地震	原動機取付ボルト	一次応力 (せん断)	15	122	○	①
		原子炉補機冷却海水 ポンプ	3.11地震	原動機取付ボルト	一次応力 (引張)	95	475	○	①
			4.7地震	原動機取付ボルト	一次応力 (引張)	126	475	○	①
		原子炉補機冷却水 サージタンク	3.11地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	40	169	○	②
			4.7地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	42	169	○	②
		原子炉補機冷却海水系 ストレータ	3.11地震	胴板	一次応力	38	346	○	②
			4.7地震	胴板	一次応力	33	346	○	②
		高圧炉心スプレイ 補機冷却水系熱交換器	3.11地震	基礎ボルト	一次応力 (せん断)	29	133	○	②
			4.7地震	胴板	一次応力	82	415	○	②
		高圧炉心スプレイ 補機冷却水ポンプ	3.11地震	原動機取付ボルト	一次応力 (せん断)	8	133	○	①
			4.7地震	原動機取付ボルト	一次応力 (せん断)	8	133	○	①
		高圧炉心スプレイ 補機冷却海水ポンプ	3.11地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	12	153	○	①
			4.7地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	14	153	○	①
		高圧炉心スプレイ 補機冷却水サージタンク	3.11地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	29	175	○	②
			4.7地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	29	175	○	②

※ 評価方法

- ①：簡易評価
- ②：設計時と同等の評価
- ③：詳細評価

参考 6-1 表 構造強度評価結果 (8/16)

評価対象設備及び評価箇所		評価用 地震動	評価部位	評価項目 (応力分類)	算出値 [MPa]	評価 基準値 [MPa]	評価 結果	評価 方法※	
原子 炉格 納施 設	原子 炉格 納容 器	ドライウエル	3.11地震	サントクッション部	座屈	0.48 (単位なし)	1 (単位なし)	○	②
			4.7地震	サントクッション部	座屈	0.37 (単位なし)	1 (単位なし)	○	②
		ドライウエル ベント開口部	3.11地震	D/Wベント開口部	一次膜＋ 一次曲げ応力	166	495	○	①
			4.7地震	D/Wベント開口部	一次膜＋ 一次曲げ応力	184	495	○	①
		サブプレッションチェンバ	3.11地震	胴エビ継手部底部	一次膜＋ 一次曲げ応力	174	356	○	①
			4.7地震	胴エビ継手部底部	一次膜＋ 一次曲げ応力	170	356	○	①
		ベント管	3.11地震	ベントヘッド接続部	一次膜＋ 一次曲げ応力	74	344	○	①
			4.7地震	ベントヘッド接続部	一次膜＋ 一次曲げ応力	82	344	○	①
		ベント管ベローズ	3.11地震	ベント管ベローズ	疲労	0.001以下 (単位なし)	1 (単位なし)	○	①
			4.7地震	ベント管ベローズ	疲労	0.001以下 (単位なし)	1 (単位なし)	○	①
		機器搬出入用ハッチ	3.11地震	機器搬出入用 ハッチ取付部	一次膜＋ 一次曲げ応力	111	495	○	①
			4.7地震	機器搬出入用 ハッチ取付部	一次膜＋ 一次曲げ応力	156	495	○	①
		逃がし安全弁搬出入口	3.11地震	逃がし安全弁 搬出入口取付部	一次膜＋ 一次曲げ応力	120	495	○	①
			4.7地震	逃がし安全弁 搬出入口取付部	一次膜＋ 一次曲げ応力	223	495	○	①
		所員用エアロック	3.11地震	所員用エアロック 取付部	一次膜＋ 一次曲げ応力	153	495	○	①
			4.7地震	所員用エアロック 取付部	一次膜＋ 一次曲げ応力	285	495	○	①
		制御棒駆動機構 搬出入口	3.11地震	制御棒駆動機構 搬出入口取付部	一次膜＋ 一次曲げ応力	131	495	○	①
			4.7地震	制御棒駆動機構 搬出入口取付部	一次膜＋ 一次曲げ応力	147	495	○	①
		ボックスサポート	3.11地震	フランジプレート	一次応力 (組合せ)	178	192	○	②
			4.7地震	フランジプレート	一次応力 (組合せ)	123	192	○	②

※ 評価方法

- ①：簡易評価
- ②：設計時と同等の評価
- ③：詳細評価

参考 6-1 表 構造強度評価結果 (9/16)

評価対象設備及び評価箇所		評価用 地震動	評価部位	評価項目 (応力分類)	算出値 [MPa]	評価 基準値 [MPa]	評価 結果	評価 方法※	
原子炉格納施設	原子炉格納容器	配管貫通部	3.11地震	X-82B	一次モーメント	9024 (kN・mm)	14680 (kN・mm)	○	③
			4.7地震	X-82B	一次モーメント	11090 (kN・mm)	14680 (kN・mm)	○	③
		電気配線貫通部	3.11地震	X-105A	一次モーメント	77190 (kN・mm)	245600 (kN・mm)	○	③
			4.7地震	X-105A	一次モーメント	106000 (kN・mm)	245600 (kN・mm)	○	③
	その圧力の低減設備	ベントヘッダ	3.11地震	ベントヘッダ サポート	圧縮応力	43	63	○	②
			4.7地震	ベントヘッダ サポート	圧縮応力	47	63	○	②
		ダウンコマ	3.11地震	ベントヘッダ 接続部	一次膜＋ 一次曲げ応力	153	229	○	①
			4.7地震	ベントヘッダ 接続部	一次膜＋ 一次曲げ応力	171	229	○	①
		サプレッションチェンバ スプレイ管	3.11地震	スプレイ管	一次応力	107	219	○	②
			4.7地震	スプレイ管	一次応力	98	219	○	②
		可燃性ガス濃度制御系 再結合装置	3.11地震	基礎ボルト	一次応力 (せん断)	126	350	○	①
			4.7地震	基礎ボルト	一次応力 (せん断)	167	350	○	①
		可燃性ガス濃度制御系 再結合装置プロウ	3.11地震	ベース取付 溶接部	一次応力 (せん断)	43	116	○	①
			4.7地震	ベース取付 溶接部	一次応力 (せん断)	57	116	○	①
		非常用ガス処理系 排風機	3.11地震	排風機取付ボルト	一次応力 (引張)	43	150	○	②
			4.7地震	排風機取付ボルト	一次応力 (引張)	39	150	○	②
		非常用ガス処理系 フィルタ装置	3.11地震	スライドボルト	一次応力 (せん断)	135	342	○	②
			4.7地震	スライドボルト	一次応力 (せん断)	113	342	○	②
		非常用ガス処理系 空気乾燥装置	3.11地震	スライドボルト	一次応力 (せん断)	37	342	○	②
			4.7地震	スライドボルト	一次応力 (せん断)	31	342	○	②

※ 評価方法

- ①：簡易評価
- ②：設計時と同等の評価
- ③：詳細評価

参考 6-1 表 構造強度評価結果 (10/16)

評価対象設備及び評価箇所		評価用 地震動	評価部位	評価項目 (応力分類)	算出値 [MPa]	評価 基準値 [MPa]	評価 結果	評価 方法*	
放射線管理施設	換気設備	中央制御室 送風機	3.11地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	13	173	○	②
			4.7地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	13	173	○	②
		中央制御室 排風機	3.11地震	原動機取付ボルト	一次応力 (引張)	16	180	○	②
			4.7地震	原動機取付ボルト	一次応力 (引張)	17	180	○	②
		中央制御室 再循環送風機	3.11地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	7	173	○	②
			4.7地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	7	173	○	②
	中央制御室 再循環フィルタ装置	3.11地震	基礎ボルト	一次応力 (せん断)	22	133	○	②	
		4.7地震	基礎ボルト	一次応力 (せん断)	22	133	○	②	
	計測装置 放射線用線	燃料取替エリア 放射線モニタ	3.11地震	取付ボルト	一次応力 (引張)	9	180	○	①
			4.7地震	取付ボルト	一次応力 (引張)	11	180	○	①
	生体遮蔽	原子炉しゃへい壁	3.11地震	開口集中部	一次応力 (組合せ)	120	235	○	②
			4.7地震	開口集中部	一次応力 (組合せ)	115	235	○	②
計測制御系統	計測装置	格納容器内 雰囲気モニタ	3.11地震	水素ガス濃度 検出器取付板 取付ボルト	一次応力 (引張)	10	180	○	①
			4.7地震	水素ガス濃度 検出器取付板 取付ボルト	一次応力 (引張)	13	180	○	①

※ 評価方法

- ①：簡易評価
- ②：設計時と同等の評価
- ③：詳細評価

参考 6-1 表 構造強度評価結果 (11/16)

評価対象設備及び評価箇所			評価用 地震動	評価部位	評価項目 (応力分類)	算出値 [MPa]	評価 基準値 [MPa]	評価 結果	評価 方法 [※]
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	使用済燃料貯蔵ラック (110体ラック)	3.11地震	ラック本体	一次応力 (組合せ)	59	205	○	①
			4.7地震	ラック本体	一次応力 (組合せ)	61	205	○	①
		使用済燃料貯蔵ラック (170体ラック)	3.11地震	ラック本体	一次応力 (組合せ)	79	205	○	①
			4.7地震	ラック本体	一次応力 (組合せ)	99	205	○	①
		制御棒・破損燃料 貯蔵ラック	3.11地震	ラック本体	一次応力 (組合せ)	39	108	○	①
			4.7地震	ラック本体	一次応力 (組合せ)	47	108	○	①
	燃料取扱設備	燃料交換機	3.11地震	構造物フレーム	一次応力 (組合せ)	212	231	○	③
			4.7地震	構造物フレーム	一次応力 (組合せ)	206	231	○	③
		原子炉建屋クレーン	3.11地震	脱線防止ラグ	圧縮応力	117	309	○	③
			4.7地震	脱線防止ラグ	圧縮応力	129	309	○	③
その他発電用原子炉の附属施設	非常用発電装置	非常用ディーゼル 発電設備 ディーゼル機関	3.11地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	79	254	○	②
			4.7地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	50	254	○	②
		非常用ディーゼル 発電設備 ディーゼル発電機	3.11地震	軸受台取付ボルト	一次応力 (引張)	65	180	○	①
			4.7地震	軸受台取付ボルト	一次応力 (引張)	67	180	○	①
		非常用ディーゼル 発電設備 燃料デイトンク	3.11地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	33	158	○	②
			4.7地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	34	158	○	②
		非常用ディーゼル 発電設備 空気だめ	3.11地震	胴板	一次一般膜 応力	91	241	○	①
			4.7地震	胴板	一次一般膜 応力	91	241	○	①

※ 評価方法

- ①：簡易評価
- ②：設計時と同等の評価
- ③：詳細評価

参考 6-1 表 構造強度評価結果 (12/16)

評価対象設備及び評価箇所		評価用 地震動	評価部位	評価項目 (応力分類)	算出値 [MPa]	評価 基準値 [MPa]	評価 結果	評価 方法 [※]	
その他発電用原子炉の附属施設	非常用発電装置	高圧炉心スプレイ系 ディーゼル発電設備 ディーゼル機関	3.11地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	123	254	○	②
			4.7地震	基礎ボルト	一次応力 (引張)	89	254	○	②
		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	3.11地震	基礎ボルト	一次応力 (せん断)	58	195	○	①
			4.7地震	基礎ボルト	一次応力 (せん断)	63	195	○	①
		高圧炉心スプレイ系 ディーゼル発電設備 燃料デイトンク	3.11地震	スカート	座屈	0.31 (単位なし)	1 (単位なし)	○	①
			4.7地震	スカート	座屈	0.42 (単位なし)	1 (単位なし)	○	①
	高圧炉心スプレイ系 ディーゼル発電設備 空気だめ	3.11地震	胴板	一次一般膜応力	91	241	○	①	
		4.7地震	胴板	一次一般膜応力	91	241	○	①	
	その他の電源装置	125V蓄電池2A (2個並び1段2列)	3.11地震	取付ボルト	一次応力 (せん断)	19	133	○	①
			4.7地震	取付ボルト	一次応力 (せん断)	25	133	○	①
		125V蓄電池2H (15個並び1段1列)	3.11地震	取付ボルト	一次応力 (せん断)	19	133	○	①
			4.7地震	取付ボルト	一次応力 (せん断)	24	133	○	①
		125V充電器2A	3.11地震	取付ボルト	一次応力 (せん断)	14	133	○	①
			4.7地震	取付ボルト	一次応力 (せん断)	15	133	○	①
125V充電器2H		3.11地震	取付ボルト	一次応力 (引張)	22	173	○	①	
		4.7地震	取付ボルト	一次応力 (引張)	25	173	○	①	
静止形無停電 電源装置		3.11地震	取付ボルト	一次応力 (せん断)	12	133	○	①	
		4.7地震	取付ボルト	一次応力 (せん断)	13	133	○	①	

※ 評価方法

- ①：簡易評価
- ②：設計時と同等の評価
- ③：詳細評価

参考 6-1 表 構造強度評価結果 (13/16)

評価対象設備及び評価箇所		評価用 地震動	評価部位	評価項目 (応力分類)	算出値 [MPa]	評価 基準値 [MPa]	評価 結果	評価 方法※
配管	主蒸気系配管	3.11地震	配管本体	一次応力	141	198	○	②
		4.7地震	配管本体	一次応力	183	198	○	②
		3.11地震	配管サポート	反力	36 (kN)	90 (kN)	○	②
		4.7地震	配管サポート	反力	49 (kN)	90 (kN)	○	②
	原子炉再循環系配管	3.11地震	配管本体	一次応力	156	265	○	②
		4.7地震	配管本体	一次応力	198	265	○	②
		3.11地震	配管サポート	反力	184 (kN)	375 (kN)	○	②
		4.7地震	配管サポート	反力	241 (kN)	375 (kN)	○	②
	復水給水系配管	3.11地震	配管本体	一次応力	116	182	○	②
		4.7地震	配管本体	一次応力	174	182	○	②
		3.11地震	配管サポート	反力	58 (kN)	112 (kN)	○	②
		4.7地震	配管サポート	反力	95 (kN)	112 (kN)	○	②
	原子炉冷却材浄化系配管	3.11地震	配管本体	一次応力	56	274	○	②
		4.7地震	配管本体	一次応力	59	274	○	②
		3.11地震	配管サポート	一次応力	42	234	○	②
		4.7地震	配管サポート	一次応力	49	234	○	②
	残留熱除去系配管	3.11地震	配管本体	一次応力	117	274	○	②
		4.7地震	配管本体	一次応力	144	274	○	②
		3.11地震	配管サポート	反力	8 (kN)	45 (kN)	○	②
		4.7地震	配管サポート	反力	10 (kN)	45 (kN)	○	②

※ 評価方法

- ①：簡易評価
- ②：設計時と同等の評価
- ③：詳細評価

参考 6-1 表 構造強度評価結果 (14/16)

評価対象設備及び評価箇所		評価用 地震動	評価部位	評価項目 (応力分類)	算出値 [MPa]	評価 基準値 [MPa]	評価 結果	評価 方法※
配管	原子炉隔離時冷却系配管	3.11地震	配管本体	一次応力	92	188	○	②
		4.7地震	配管本体	一次応力	118	188	○	②
		3.11地震	配管サポート	一次応力	111	245	○	②
		4.7地震	配管サポート	一次応力	144	245	○	②
	高圧炉心スプレイ系配管	3.11地震	配管本体	一次応力	147	199	○	②
		4.7地震	配管本体	一次応力	160	199	○	②
		3.11地震	配管サポート	一次応力	44 (kN)	87 (kN)	○	②
		4.7地震	配管サポート	一次応力	59 (kN)	87 (kN)	○	②
	低圧炉心スプレイ系配管	3.11地震	配管本体	一次応力	104	220	○	②
		4.7地震	配管本体	一次応力	137	220	○	②
		3.11地震	配管サポート	一次応力	22.7 (kN)	24 (kN)	○	②
		4.7地震	配管サポート	一次応力	23.6 (kN)	24 (kN)	○	②
	原子炉補機冷却水系配管	3.11地震	配管本体	一次応力	181	229	○	③
		4.7地震	配管本体	一次応力	201	229	○	③
		3.11地震	配管サポート	一次応力	165	245	○	③
		4.7地震	配管サポート	一次応力	235	245	○	③
	原子炉補機冷却海水系配管	3.11地震	配管本体	一次応力	200	241	○	②
		4.7地震	配管本体	一次応力	196	241	○	②
		3.11地震	配管サポート	一次応力	159	245	○	②
		4.7地震	配管サポート	一次応力	145	245	○	②

※ 評価方法

- ①：簡易評価
- ②：設計時と同等の評価
- ③：詳細評価

参考 6-1 表 構造強度評価結果 (15/16)

評価対象設備及び評価箇所		評価用 地震動	評価部位	評価項目 (応力分類)	算出値 [MPa]	評価 基準値 [MPa]	評価 結果	評価 方法※
配管	制御棒駆動水圧系配管	3.11地震	配管本体	一次応力	74	159	○	②
		4.7地震	配管本体	一次応力	92	159	○	②
		3.11地震	配管サポート	一次応力	75	118	○	②
		4.7地震	配管サポート	一次応力	102	118	○	②
	ほう酸水注入系配管	3.11地震	配管本体	一次応力	103	175	○	②
		4.7地震	配管本体	一次応力	140	175	○	②
		3.11地震	配管サポート	一次応力	39	234	○	②
		4.7地震	配管サポート	一次応力	51	234	○	②
	燃料プール冷却浄化系配管	3.11地震	配管本体	一次応力	48	188	○	③
		4.7地震	配管本体	一次応力	67	188	○	③
		3.11地震	配管サポート	一次応力	110	205	○	③
		4.7地震	配管サポート	一次応力	129	205	○	③
	非常用ガス処理系配管	3.11地震	配管本体	一次応力	73	220	○	③
		4.7地震	配管本体	一次応力	94	220	○	③
		3.11地震	配管サポート	一次応力	204	245	○	③
		4.7地震	配管サポート	一次応力	225	245	○	③
原子炉格納容器調気系配管	3.11地震	配管本体	一次応力	141	245	○	②	
	4.7地震	配管本体	一次応力	220	245	○	②	
	3.11地震	配管サポート	反力	67 (kN)	112 (kN)	○	②	
	4.7地震	配管サポート	反力	74 (kN)	112 (kN)	○	②	

※ 評価方法

- ①：簡易評価
- ②：設計時と同等の評価
- ③：詳細評価

参考 6-1 表 構造強度評価結果 (16/16)

評価対象設備及び評価箇所	評価用地震動	評価部位	評価項目(応力分類)	算出値 [MPa]	評価基準値 [MPa]	評価結果	評価方法※	
配管	放射性ドレン移送系配管	3.11地震	配管本体	一次応力	128	199	○	②
		4.7地震	配管本体	一次応力	151	199	○	②
		3.11地震	配管サポート	反力	2 (kN)	4 (kN)	○	②
		4.7地震	配管サポート	反力	2 (kN)	4 (kN)	○	②
	サブプレッションプール水貯蔵系配管	3.11地震	配管本体	一次応力	66	219	○	②
		4.7地震	配管本体	一次応力	92	219	○	②
		3.11地震	配管サポート	一次応力	23	245	○	②
		4.7地震	配管サポート	一次応力	29	245	○	②
	可燃性ガス濃度制御系配管	3.11地震	配管本体	一次応力	154	211	○	②
		4.7地震	配管本体	一次応力	128	150	○	②
		3.11地震	配管サポート	一次応力	183	245	○	②
		4.7地震	配管サポート	一次応力	212	245	○	②
	高圧炉心スプレー補機冷却水系配管	3.11地震	配管本体	一次応力	147	229	○	③
		4.7地震	配管本体	一次応力	178	229	○	③
		3.11地震	配管サポート	一次応力	172	245	○	③
		4.7地震	配管サポート	一次応力	178	245	○	③
高圧炉心スプレー補機冷却海水系配管	3.11地震	配管本体	一次応力	101	239	○	②	
	4.7地震	配管本体	一次応力	146	239	○	②	
	3.11地震	配管サポート	一次応力	7 (kN)	16 (kN)	○	②	
	4.7地震	配管サポート	一次応力	10 (kN)	16 (kN)	○	②	

※ 評価方法

- ①：簡易評価
- ②：設計時と同等の評価
- ③：詳細評価

参考 6-2 表 疲労評価結果

対象設備	評価用地震動	地震による疲れ累積係数[-]	合計[-]	評価結果
給水系配管	3.11 地震	0.0001	0.0002	○
	4.7 地震	0.0001		
残留熱除去系配管	3.11 地震	0.0027	0.0036	○
	4.7 地震	0.0009		
原子炉補機冷却海水系配管	3.11 地震	0.0008	0.0014	○
	4.7 地震	0.0006		
給水ノズル	3.11 地震	0.0002	0.0019	○
	4.7 地震	0.0017		

参考 6-3 表 動的機能維持評価結果 (1/7)

評価対象設備及び評価箇所			評価用 地震動	評価項目	算出値 (mm)	評価基準値 (mm)	評価 結果
原子 炉 本 体	燃料集合体	制御棒挿入性	3.11地震	燃料集合体 相対変位	18.2	40.0	○
			4.7地震	燃料集合体 相対変位	8.5	40.0	○

参考 6-3 表 動的機能維持評価結果 (2/7)

評価対象設備及び評価箇所			評価用 地震動	評価位置	水平加速度(G)		鉛直加速度(G)		評価 結果
					応答加速度	機能確認済 加速度	応答加速度	機能確認済 加速度	
原子炉冷却系統施設	残留熱除去設備	残留熱除去系ポンプ	3.11地震	コラム先端部	0.62	10.0	0.40	1.0	○
			4.7地震	コラム先端部	0.40	10.0	0.39	1.0	○
		残留熱除去系ポンプ 原動機	3.11地震	軸受部	0.62	2.5	0.40	1.0	○
			4.7地震	軸受部	0.40	2.5	0.39	1.0	○
	非常用炉心 冷却設備 その他原子 炉注水設備	高压炉心スプレイ系ポンプ	3.11地震	コラム先端部	0.62	10.0	0.40	1.0	○
			4.7地震	コラム先端部	0.40	10.0	0.39	1.0	○
		高压炉心スプレイ系ポンプ 原動機	3.11地震	軸受部	0.62	2.5	0.40	1.0	○
			4.7地震	軸受部	0.40	2.5	0.39	1.0	○
		低压炉心スプレイ系ポンプ	3.11地震	コラム先端	0.62	10.0	0.40	1.0	○
			4.7地震	コラム先端	0.40	10.0	0.39	1.0	○
		低压炉心スプレイ系ポンプ 原動機	3.11地震	軸受部	0.62	2.5	0.40	1.0	○
			4.7地震	軸受部	0.40	2.5	0.39	1.0	○
	原子炉冷却 材補給設備	原子炉隔離時冷却系ポンプ	3.11地震	軸位置 (軸方向)	0.61	1.4	0.39	1.0	○
			4.7地震	軸位置 (軸方向)	0.41	1.4	0.39	1.0	○
		原子炉隔離時冷却系ポン プ駆動用タービン	3.11地震	重心位置	0.62	2.4	0.39	1.0	○
			4.7地震	重心位置	0.41	2.4	0.39	1.0	○

参考 6-3 表 動的機能維持評価結果 (3/7)

評価対象設備及び評価箇所		評価用 地震動	評価位置	水平加速度(G)		鉛直加速度(G)		評価 結果	
				応答加速度	機能確認済 加速度	応答加速度	機能確認済 加速度		
原子炉冷却系統施設	原子炉補機冷却設備	原子炉補機冷却水ポンプ	3.11地震	軸位置 (軸方向)	0.62	1.4	0.40	1.0	○
			4.7地震	軸位置 (軸方向)	0.40	1.4	0.39	1.0	○
		原子炉補機冷却水ポンプ 原動機	3.11地震	軸受部	0.62	4.7	0.40	1.0	○
			4.7地震	軸受部	0.40	4.7	0.39	1.0	○
		原子炉補機冷却海水ポンプ	3.11地震	コラム先端部	5.07	10.0	0.67	1.0	○
			4.7地震	コラム先端部	6.71	10.0	0.73	1.0	○
		原子炉補機冷却海水 ポンプ原動機	3.11地震	軸受部	4.23	14.0	0.67	1.0	○
			4.7地震	軸受部	5.60	14.0	0.73	1.0	○
		高圧炉心スプレイ補機 冷却水ポンプ	3.11地震	軸位置 (軸方向)	0.62	1.4	0.40	1.0	○
			4.7地震	軸位置 (軸方向)	0.40	1.4	0.39	1.0	○
		高圧炉心スプレイ補機 冷却水ポンプ原動機	3.11地震	軸受部	0.62	4.7	0.40	1.0	○
			4.7地震	軸受部	0.40	4.7	0.39	1.0	○
		高圧炉心スプレイ補機 冷却海水ポンプ	3.11地震	コラム先端部	2.33	10.0	0.67	1.0	○
			4.7地震	コラム先端部	2.85	10.0	0.73	1.0	○
		高圧炉心スプレイ補機 冷却海水ポンプ原動機	3.11地震	軸受部	0.83	2.5	0.67	1.0	○
			4.7地震	軸受部	0.68	2.5	0.73	1.0	○

参考 6-3 表 動的機能維持評価結果 (4/7)

評価対象設備及び評価箇所		評価用 地震動	評価位置	水平加速度(G)		鉛直加速度(G)		評価 結果			
				応答加速度	機能確認済 加速度	応答加速度	機能確認済 加速度				
放射線 管理 施設	換気設備	中央制御室送風機	3.11地震	軸受部及びメカニカルシールケーシング*	0.64	2.3	0.34	1.0	○		
			4.7地震	軸受部及びメカニカルシールケーシング*	0.64	2.3	0.39	1.0	○		
		中央制御室送風機 原動機	3.11地震	軸受部	0.64	4.7	0.34	1.0	○		
			4.7地震	軸受部	0.64	4.7	0.39	1.0	○		
		中央制御室排風機	3.11地震	軸受部	0.64	2.6	0.34	1.0	○		
			4.7地震	軸受部	0.64	2.6	0.39	1.0	○		
		中央制御室排風機 原動機	3.11地震	軸受部	0.64	4.7	0.34	1.0	○		
			4.7地震	軸受部	0.64	4.7	0.39	1.0	○		
		中央制御室再循環送風機	3.11地震	軸受部及びメカニカルシールケーシング*	0.64	2.3	0.34	1.0	○		
			4.7地震	軸受部及びメカニカルシールケーシング*	0.64	2.3	0.39	1.0	○		
		中央制御室再循環送風機 原動機	3.11地震	軸受部	0.64	4.7	0.34	1.0	○		
			4.7地震	軸受部	0.64	4.7	0.39	1.0	○		
		原子炉 格納 施設	圧力低減設備 その他の安全 設備	非常用ガス処理系排風機	3.11地震	軸受部及びメカニカルシールケーシング*	0.94	2.3	0.67	1.0	○
					4.7地震	軸受部及びメカニカルシールケーシング*	0.78	2.3	0.89	1.0	○
				非常用ガス処理系排風機 原動機	3.11地震	軸受部	0.94	4.7	0.67	1.0	○
					4.7地震	軸受部	0.78	4.7	0.89	1.0	○
可燃性ガス濃度制御系再 結合装置ブロフ	3.11地震			軸受部	0.92	2.6	0.66	1.0	○		
	4.7地震			軸受部	0.76	2.6	0.87	1.0	○		
可燃性ガス濃度制御系再 結合装置ブロフ 原動機	3.11地震			軸受部	0.92	4.7	0.66	1.0	○		
	4.7地震			軸受部	0.76	4.7	0.87	1.0	○		

参考 6-3 表 動的機能維持評価結果 (5/7)

評価対象設備及び評価箇所		評価用 地震動	評価位置	水平加速度(G)		鉛直加速度(G)		評価 結果	
				応答加速度	機能確認済 加速度	応答加速度	機能確認済 加速度		
その他発電用 原子炉の 付属施設	非常用発電 装置	非常用ディーゼル発電設備 ディーゼル機関	3.11地震	機関重心位置	0.84	1.1	0.59	1.0	○
			4.7地震	機関重心位置	0.58	1.1	0.63	1.0	○
		非常用ディーゼル発電設備 ディーゼル発電機	3.11地震	軸受部	0.83	1.1	0.58	1.0	○
			4.7地震	軸受部	0.55	1.1	0.59	1.0	○
		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	3.11地震	機関重心位置	0.85	1.1	0.59	1.0	○
			4.7地震	機関重心位置	0.58	1.1	0.63	1.0	○
	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	3.11地震	軸受部	0.85	1.1	0.60	1.0	○	
		4.7地震	軸受部	0.59	1.1	0.64	1.0	○	

参考 6-3 表 動的機能維持評価結果 (6/7)

評価対象設備及び評価箇所			評価用地震動	評価位置	水平加速度(G)		鉛直加速度(G)		評価結果
					応答加速度	機能確認済加速度	応答加速度	機能確認済加速度	
弁	燃料プール冷却浄化系	燃料プール冷却浄化系弁	3.11地震	駆動部	1.49	6.0	0.77	6.0	○
			4.7地震	駆動部	1.35	6.0	1.02	6.0	○
	主蒸気系	主蒸気隔離弁	3.11地震	駆動部	3.03	10.0	3.37	6.2	○
			4.7地震	弁本体※	発生値(MPa) 774		評価基準値(MPa) 785		○
		主蒸気逃がし安全弁	3.11地震	駆動部	2.86	9.6	1.56	6.1	○
			4.7地震	駆動部	5.07	9.6	2.57	6.1	○
	復水給水系	復水給水系弁	3.11地震	駆動部	2.56	6.0	1.71	6.0	○
			4.7地震	駆動部	4.32	6.0	4.82	6.0	○
	残留熱除去系	残留熱除去系弁	3.11地震	駆動部※	発生値(G) 7.43		評価基準値(G) 41.9		○
			4.7地震	駆動部※	発生値(G) 13.17		評価基準値(G) 41.9		○
	高压炉心スプレイ系	高压炉心スプレイ系弁	3.11地震	駆動部	3.80	6.0	1.36	6.0	○
			4.7地震	駆動部	5.23	6.0	2.16	6.0	○
	低压炉心スプレイ系	低压炉心スプレイ系弁	3.11地震	駆動部	2.96	6.0	1.98	6.0	○
			4.7地震	駆動部	4.30	6.0	3.05	6.0	○
	原子炉隔離冷却系	原子炉隔離冷却系弁	3.11地震	駆動部	2.81	6.0	1.59	6.0	○
			4.7地震	駆動部	5.17	6.0	2.79	6.0	○
	原子炉補機冷却系	原子炉補機冷却系弁	3.11地震	駆動部	3.63	6.0	1.53	6.0	○
			4.7地震	駆動部	5.24	6.0	2.22	6.0	○
	原子炉補機冷却海水系	原子炉補機冷却海水系弁	3.11地震	駆動部	4.79	6.0	2.77	6.0	○
			4.7地震	駆動部	5.30	6.0	4.11	6.0	○
原子炉冷却材浄化系	原子炉冷却材浄化系弁	3.11地震	駆動部	2.01	6.0	1.95	6.0	○	
		4.7地震	駆動部	3.61	6.0	3.51	6.0	○	

※ 詳細評価

参考 6-3 表 動的機能維持評価結果 (7/7)

評価対象設備及び評価箇所			評価用 地震動	評価位置	水平加速度(G)		鉛直加速度(G)		評価 結果
					応答加速度	機能確認済 加速度	応答加速度	機能確認済 加速度	
弁	制御棒駆動系	制御棒駆動系スクラム弁	3.11地震	駆動部	0.83	6.0	0.58	6.0	○
			4.7地震	駆動部	0.57	6.0	0.59	6.0	○
	ほう酸水注入系	ほう酸水注入系弁	3.11地震	駆動部	2.62	6.0	2.34	6.0	○
			4.7地震	駆動部	4.47	6.0	5.48	6.0	○
	放射性トレン 移送系	放射性トレン移送系弁	3.11地震	駆動部	3.50	6.0	2.73	6.0	○
			4.7地震	駆動部	5.63	6.0	5.20	6.0	○
	非常用ガス処 理系	非常用ガス処理系弁	3.11地震	駆動部	3.76	6.0	2.04	6.0	○
			4.7地震	駆動部	5.67	6.0	3.54	6.0	○
	原子炉格納 容器調気系	原子炉格納容器調気系弁	3.11地震	駆動部	3.78	6.0	2.41	6.0	○
			4.7地震	駆動部※	3.00	9.5	6.43	6.8	○
	可燃性ガス濃 度制御系	可燃性ガス濃度制御系弁	3.11地震	駆動部	3.31	6.0	5.99	6.0	○
			4.7地震	弁本体※	発生値(G) 8.62		評価基準値(G) 9.50		○
	高圧炉心スプ レイ補機冷却 海水系	高圧炉心スプレイ補機冷却 海水系弁	3.11地震	駆動部	2.88	6.0	3.47	6.0	○
			4.7地震	駆動部	3.49	6.0	4.16	6.0	○

※ 詳細評価

5. 機器・配管系の耐震設計への反映事項の検討

地震後の設備点検結果及び地震応答解析結果を踏まえ、東北地方太平洋沖地震等(3.11/4.7地震)による機器・配管系の耐震設計への反映事項を検討するとともに、その後の新規規制基準施行に伴い新たに基準地震動 S_s での評価が必要となった既設耐震B、Cクラス施設に対する設計反映事項について整理する。

(1) 地震後の設備点検結果及び地震応答解析を踏まえた機器・配管系の耐震設計への反映事項(耐震Sクラス施設)

機器・配管系の耐震設計への反映事項の検討結果等を参考6-1図及び参考6-5図に示す。参考6-5図は、参考6-2図に記載の耐震設計への反映事項の判断フローに基づき、3.11/4.7地震を踏まえて、機器・配管系、土木構造物及び建物・構築物それぞれに対する耐震設計への反映事項の検討結果を示したものである。

a. 機器・配管系

機器・配管系は、耐震Sクラス設備(波及的影響を及ぼすおそれのある設備のうち波及的影響を防止するために評価対象となっている部位を含む)に地震による異常はなく、地震応答は弾性応答範囲内であること、また、耐震B、Cクラス設備のうち異常を確認した設備については、原形復旧し、地震による損傷は残らないため、設備健全性確認の観点からは設計反映事項はない。なお、疲労評価については、3.11/4.7地震を受けたことを踏まえ、疲れ累積係数による疲労評価を実施する場合は、許容限界に対して余裕があることに留意する。

b. 土木構造物

土木構造物については、耐震Sクラス設備の間接支持機能を有する施設に地震による異常はなく、耐震B、Cクラス施設のうち異常を確認した施設については、補修により機能回復しているため、設備健全性確認の観点からは土木構造物の耐震設計への反映事項はなく、機器・配管系への耐震設計への反映事項もない。

c. 建物・構築物

建物・構築物については、地震による異常はなかったものの、建屋の地震観測記録及び建屋シミュレーションから設計反映事項として、別紙11「東北地方太平洋沖地震等による影響を踏まえた建屋耐震設計方法への反映について」に示す建屋の初期剛性低下を建物・構築物の耐震設計に反映するとともに、他施設の耐震設計への反映の要否を検討した結果として、機器・配管系の耐震設計において建屋初期剛性低下を考慮した地震応答解析モデルを用いることとする。

(2) 既設耐震B，Cクラス施設のうち，新規制基準に伴い基準地震動S_sでの耐震評価が必要な施設への設計反映事項

既設耐震B，Cクラス施設のうち，新規制基準において重大事故等対処施設及び波及的影響施設等の機能要求により基準地震動S_sでの耐震評価が必要となった施設の耐震設計への反映事項の有無については，施設点検結果から以下のとおり整理した。

a. 機器・配管系

地震による異常があった既設耐震B，Cクラス設備は，新規制基準により重大事故等対処設備及び波及的影響設備となる設備も含めて原形復旧しているため耐震設計への反映事項はない。なお，新規制基準での要求事項については，基準地震動S_sでの耐震評価を行い，必要に応じて耐震補強工事を実施し適合性を確保する。

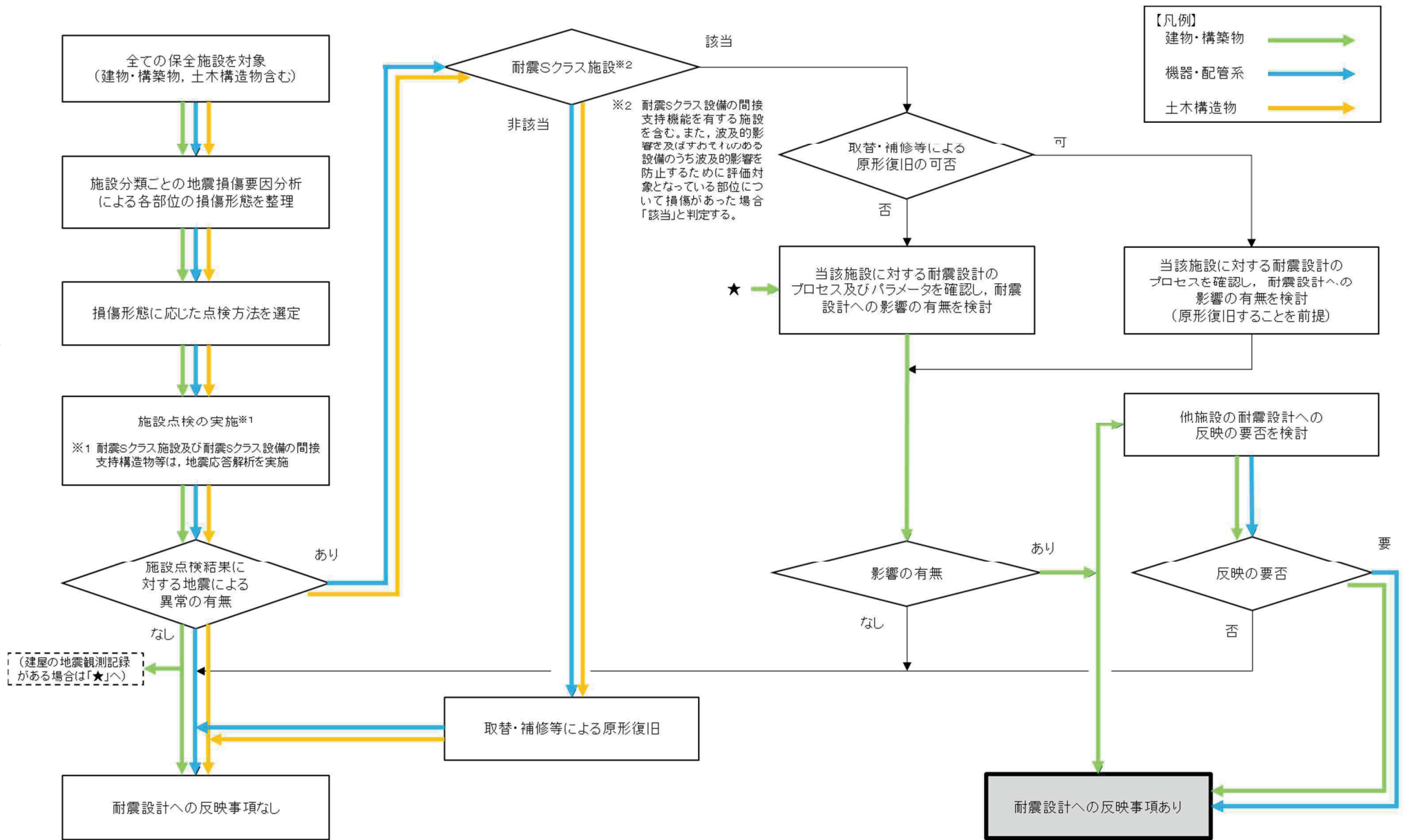
b. 土木構造物

新規制基準に伴い基準地震動S_sでの耐震評価が必要となった軽油タンク室，軽油タンク連絡ダクト，復水貯蔵タンク基礎は，地震による異常がなかったため耐震設計への反映事項はない。

c. 建物・構築物

新規制基準に伴い基準地震動S_sでの耐震評価が必要となったタービン建屋，補助ボイラー建屋は，地震による異常がなかったものの，初期剛性低下の影響を確認し，その影響を設計反映する。

なお，新規制基準に基づく基準地震動S_sに対して耐震性向上の観点から，耐震補強工事を実施する施設については，その工事内容を耐震設計に反映する。



参考 6-5 図 耐震設計への反映事項の検討結果

6. まとめ（機器・配管系の耐震設計に反映すべき事項の検討結果）

地震後の設備点検結果及び地震応答解析結果より、耐震Sクラス設備に地震による損傷はなく、地震応答は弾性応答範囲内であること、また、耐震B、Cクラス設備のうち異常を確認した設備については、原形に復旧するため、地震による損傷は残らないことから、機器・配管系の設備健全性確認の観点からは、機器・配管系の耐震設計へ反映すべき事項はない。（なお、疲れ累積係数による疲労評価を実施する場合は、許容限界に対して余裕があることに留意する。）

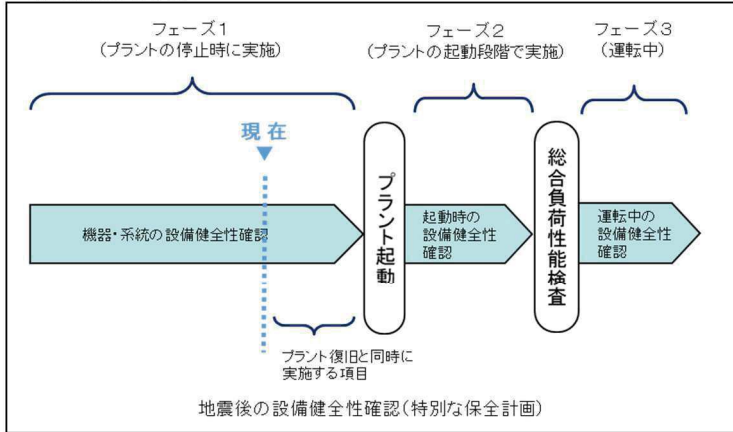
一方で、建屋の乾燥収縮及び地震による影響の観点からは、機器・配管系の耐震設計について、建屋初期剛性低下を考慮した地震応答解析モデル（建屋地震応答解析モデル、建屋－大型機器連成解析モデル）を反映する。

なお、今回実施した機器・配管系の耐震設計への反映事項に係る検討の妥当性確認の観点で、新規基準に基づく工認対象設備（耐震Sクラスの未改造設備）について、耐震裕度を工認段階で確認し、今回選定した評価対象設備への影響を考察する。

添付資料 地震後の設備健全性確認（特別な保全計画）の概要及び設備点検結果の概要

【地震後の設備健全性確認(特別な保全計画)の全体像】

プラントの状態に応じて、段階的に地震後の設備健全性を確認
 ・フェーズ1: プラントの停止期間中における機器・システムレベルの点検・評価
 ・フェーズ2: プラントの起動段階におけるプラント全体の健全性確認
 ・フェーズ3: 運転期間中における地震影響の継続監視(データ採取)
 (設備点検の全体像)



【機器レベルの点検結果】

- ・これまで実施した機器・配管系の地震後の設備健全性確認において、耐震Sクラス設備に損傷はなく、プラントの安全性に影響を与える所見はない
- ・設備点検において異常を確認した設備については、いずれも原子炉安全を阻害する可能性はなく、取替、補修、手入れにより原形に復旧
- ・下位クラスの異常により、耐震Sクラス設備への波及的影響がないことを確認

地震による異常を確認した代表的な設備

確認内容	耐震クラス
蒸気タービン動翼の損傷	B
蒸気タービン中間軸受箱の基礎バルト曲がり	B
蒸気タービン中間軸受箱の基礎の損傷	B
原子炉建屋クレーン運転席鋼材等の損傷	B
原子炉格納容器内遮へい扉 留め具の変形	B
制御棒駆動系ハウジング支持金具サポートバーのずれ	C
変圧器選圧弁の油面変動に伴う動作	C
起動用変圧器放熱器油漏れ	C

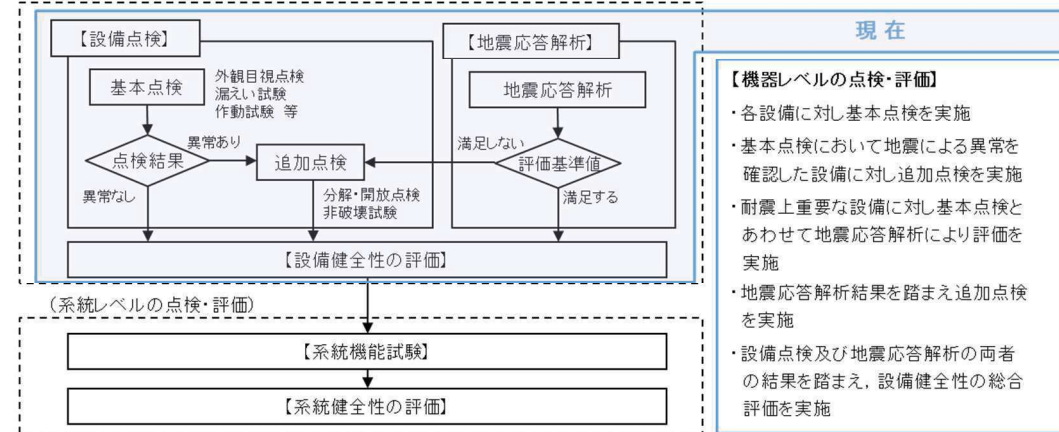
機器レベルの点検・評価の状況

項目	対象数	状況
基本点検	約 33,000設備	完了※1
地震応答解析	構造強度評価: 125設備 動的機能維持評価: 35設備	完了※2

※1 今後のプラント復旧と同時に実施する点検(例: 復水給水系の漏えい試験)を除く
 ※2 参考2参照

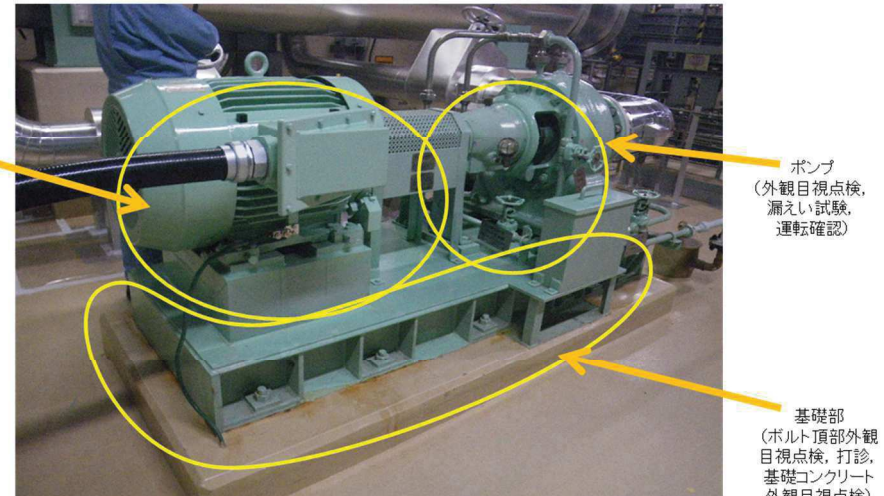
【機器・配管系の地震後の設備健全性確認(フェーズ1)の概要】

個々の機器に対する「機器レベルの点検・評価」、機器の組合せによる「システムレベルの点検・評価」により健全性を確認
 ・耐震安全上重要な機器について、設備点検と地震応答解析を実施し、両者の結果を照合し健全性を評価
 ・基本点検で異常が確認された場合、あるいは地震応答解析で評価基準値を満足しない場合は、追加点検を実施
 ・設備の健全性評価後、システム単位による機能試験を実施し、システムの健全性を評価
 (機器レベルの点検・評価)



【点検の概要】

- ・各設備に共通して実施する基礎部及び本体の外観目視点検、動的機器の軸受損傷を考慮した運転確認など、地震の影響が及ぶ可能性のある部位に着目した基本点検を実施
- ・点検の結果、異常を確認した場合、分解点検、非破壊試験などの追加点検を実施



横型ポンプの基本点検箇所と点検内容の例

女川原子力発電所 2号炉

上位クラス施設の安全機能への下位クラス 施設の波及的影響の検討

目 次

1. 概要	1
2. 波及的影響に関する評価方針	2
2.1 基本方針	2
2.2 下位クラス施設の抽出方法	4
2.3 影響評価方法	5
2.4 プラント運転状態による評価対象の考え方	5
3. 事象検討	7
3.1 別記2に記載された事項に基づく事象検討	7
3.2 地震被害事例に基づく事象の検討	7
3.2.1 被害事例とその要因の整理	7
3.2.2 追加考慮すべき事象の検討	8
3.3 津波、火災及び溢水による影響評価	9
3.4 周辺斜面の崩壊による影響評価	10
3.5 液状化による影響評価	10
4. 上位クラス施設の確認	11
5. 下位クラス施設の抽出及び影響評価方法	20
5.1 相対変位又は不等沈下による影響	20
5.2 接続部における相互影響	24
5.3 建屋内における施設の損傷、転倒及び落下等による影響	33
5.4 建屋外における施設の損傷、転倒及び落下等による影響	35
6. 下位クラス施設の検討結果	37
6.1 相対変位又は不等沈下による影響検討結果	37
6.1.1 抽出手順	37
6.1.2 下位クラス施設の抽出結果	37
6.1.3 影響評価方針	37
6.2 接続部における相互影響検討結果	44
6.2.1 抽出手順	44
6.2.2 接続部の抽出結果及び影響評価対象の選定結果	44
6.2.3 影響評価結果	44
6.3 建屋内における施設の損傷、転倒及び落下等による影響検討結果	64
6.3.1 抽出手順	64

6.3.2 下位クラス施設の抽出結果	64
6.3.3 耐震評価方針	64
6.4 建屋外における施設の損傷, 転倒及び落下等による影響検討結果	113
6.4.1 抽出手順	113
6.4.2 下位クラス施設の抽出結果	113
6.4.3 耐震評価方針	113

添 付 資 料

- 添付資料 1-1 波及的影響評価に係る現地調査の実施要領
- 添付資料 1-2 波及的影響評価に係る現地調査記録
- 添付資料 2 原子力発電所における地震被害事例の要因整理
- 添付資料 3 周辺斜面の崩壊等による上位クラス施設への影響
- 添付資料 4 上位クラス施設に隣接する下位クラス施設の支持地盤について
- 添付資料 5 設置予定施設及び撤去予定施設に対する波及的影響評価の考え方について
- 添付資料 6 原子炉補機冷却海水系通水機能への下位クラス施設の波及的影響の検討について
- 添付資料 7 防潮堤・防潮壁への下位クラス施設の波及的影響の検討について

- 参考資料 1 原子炉建屋の大物搬入口について
- 参考資料 2 下位クラス配管の損傷形態の検討について

原子炉建屋の大物搬入口について

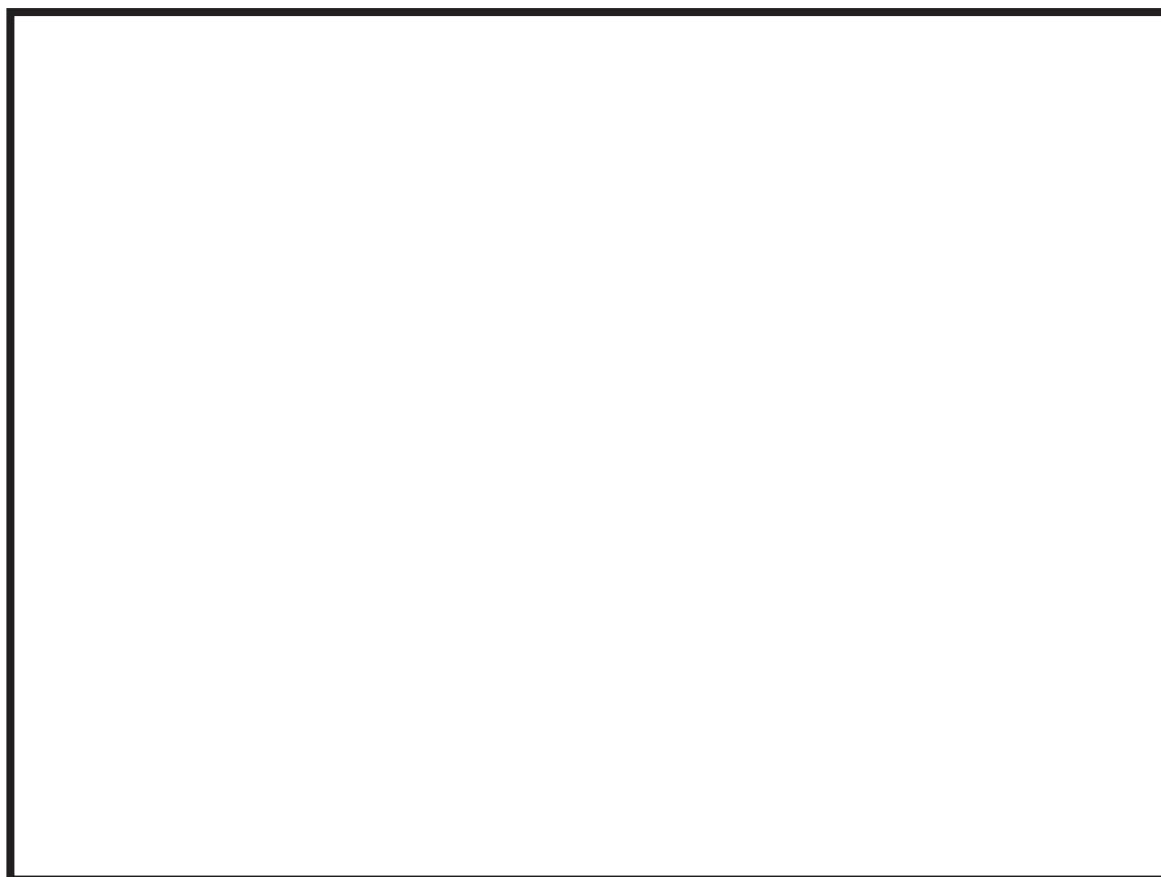
1. 概要

女川 2 号炉原子炉建屋の大物搬入口は、二次格納施設としての原子炉建屋原子炉棟（S クラス範囲）の一部となっており、上位クラスへの波及的影響対象施設には該当しない。原子炉建屋大物搬入口の概要を以下に示す。

2. 原子炉建屋の大物搬入口の概要

2.1 原子炉建屋原子炉棟の範囲

原子炉建屋の二次格納施設としての原子炉建屋原子炉棟の S クラス範囲を参考 1-1 図に示す。大物搬入口は、外扉までが S クラス範囲と設定している。



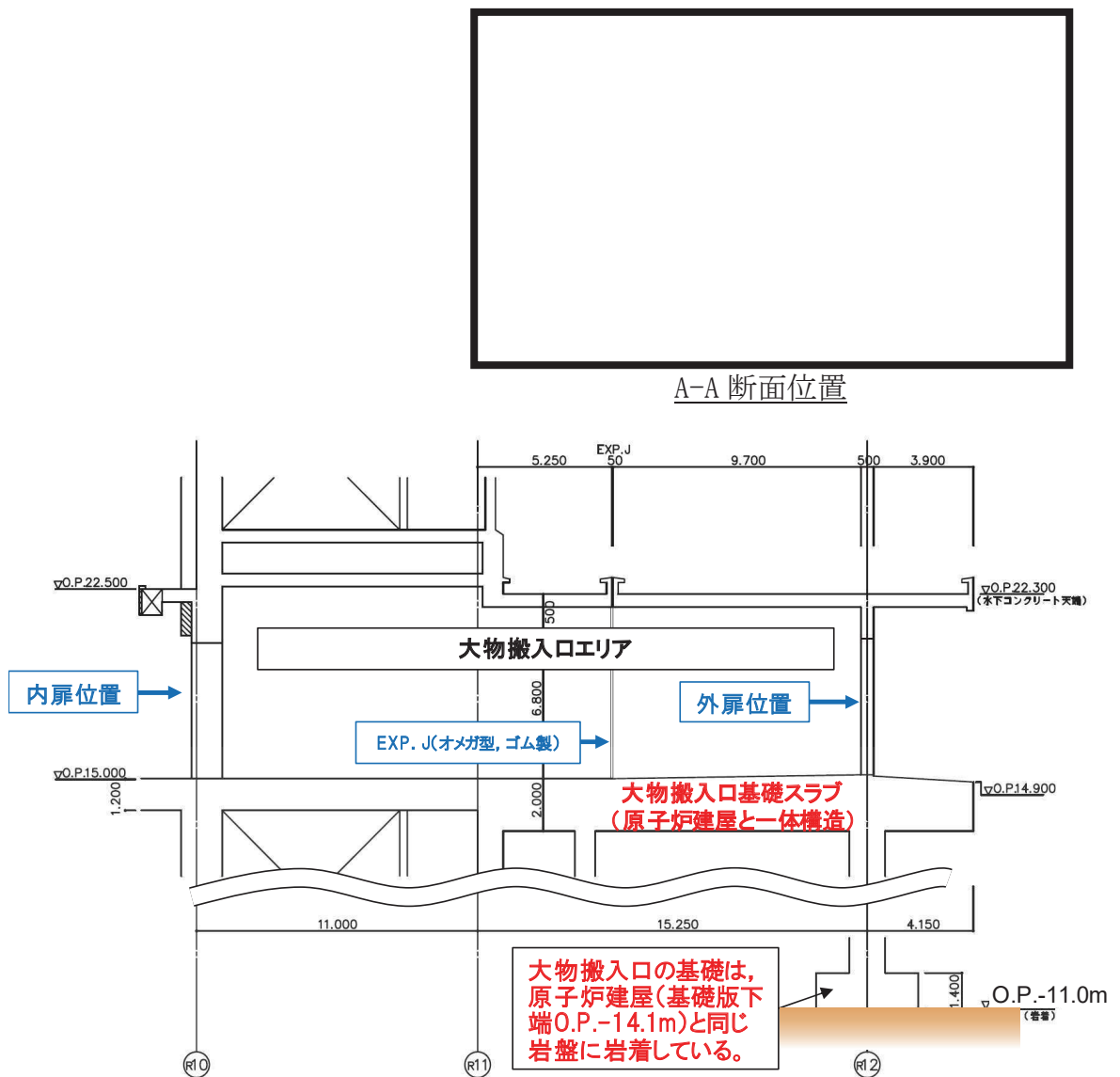
参考 1-1 図 原子炉建屋原子炉棟境界図（原子炉建屋 1 階）

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません。

2.2 原子炉建屋の大物搬入口エリアの構造

原子炉建屋の大物搬入口エリアの構造を参考 1-2 図に示す。

大物搬入口エリアの外扉位置までが原子炉建屋原子炉棟の一部であり、大物搬入口の基礎スラブは、原子炉建屋の1階床面と連続した一体構造となっており、大物搬入口の上部躯体の壁および屋根についてはEXP. Jを介して原子炉建屋と接続されている。また、大物搬入口の基礎は、原子炉建屋と同じ岩盤に支持されており、岩着している。



参考 1-2 図 大物搬入口エリアの構造 (原子炉建屋, A-A 断面)

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません。

3. 大物搬入口の機能維持の評価方針

女川 2 号炉原子炉建屋の大物搬入口は、原子炉建屋原子炉棟の一部であるため、基準地震動に対して二次格納施設のバウンダリを構成する躯体が気密性の要求機能を確保するように以下の点を確認する。

- ① 二次格納施設のバウンダリを構成する躯体の気密性については、面内方向の荷重に対して、おおむね弾性状態であることを確認する。おおむね弾性状態を超える場合には、せん断ひずみ 2.0×10^{-3} での漏えい量が換気能力を下回ることを確認し、気密性の許容値をせん断ひずみ 2.0×10^{-3} と設定した上で、最大せん断ひずみが 2.0×10^{-3} 以下であることを確認する。また、面外方向の荷重に対しては、鉄筋が降伏しないこと（鋼材の基準強度 1.1 倍を超えないこと）を確認する（鉄筋が降伏する場合は別途詳細検討を行う）。
- ② 原子炉建屋と一体化している部分の力の伝達による影響や局所的な応力集中による影響、周辺地盤の液状化影響の有無を含めた基礎躯体部分と周辺地盤の相互作用の影響についても考慮した上で気密性を確認する。
- ③ 上記検討において、既設躯体のみで気密性を確保できない場合には、補強等の対策を実施する。

4. まとめ

原子炉建屋の大物搬入口は、二次格納施設としての原子炉建屋原子炉棟（S クラス範囲）の一部となっており、上位クラスへの波及的影響対象施設には該当せず、原子炉建屋として上位クラスに分類される。

女川原子力発電所２号炉

サプレッションチェンバ内部水質量の
考え方の変更について

目 次

1. 概要	1
2. 既工認と今回工認の耐震評価手法	1
2.1 サプレッションチェンバの構造	1
2.2 有効質量の概要	4
2.3 既工認と今回工認の耐震評価手法の比較	4
2.3.1 水の有効質量の適用及びスロッシング荷重の考慮	7
2.3.2 地震応答解析手法の変更	7
2.4 有効質量を適用する目的と効果	8
3. 有効質量の適用方針	9
3.1 概要	9
3.2 円環形状容器の有効質量算出の妥当性検証	9
3.3 耐震評価に用いる有効質量の設定	10
4. 円環形状容器の有効質量算出の妥当性検証	12
4.1 構造解析による有効質量比の算出	12
4.1.1 検討対象	12
4.1.2 解析モデル	12
4.1.3 解析結果	12
4.2 振動試験	13
4.2.1 試験体	13
4.2.2 計測項目及び計測機器設置位置	14
4.2.3 試験条件	15
4.2.4 試験結果	16
4.3 流体解析による有効質量比の算出	19
4.3.1 解析モデル	19
4.3.2 解析条件	19
4.3.3 解析結果及び有効質量比の確認	19
4.4 妥当性検証	21
5. 耐震評価に用いる有効質量の設定	22
5.1 実機の有効質量比の算出	22
5.1.1 NASTRANの実機解析モデル	22
5.1.2 OpenFOAMの実機解析モデル	23
5.1.3 解析結果	23
5.2 実機評価に適用する有効質量	24
6. 今回工認の地震応答解析	25
7. まとめ	29

- 別紙 1 規格類における有効質量の適用例
- 別紙 2 有効質量の概要
- 別紙 3 サプレッションチェンバ内部水のスロッシング荷重について
- 別紙 4 振動試験の全データ
- 別紙 5 サプレッションチェンバ内部水の地震応答解析モデルへの設定方法について

- 参考資料 1 地震時におけるトラス型容器内部水の有効質量に係る研究の概要について
- 参考資料 2 有効質量比に対するスロッシング影響について
- 参考資料 3 有効質量比に対する入力地震動の影響について
- 参考資料 4 規格基準における有効質量比との比較について
- 参考資料 5 計算機コードの概要について
- 参考資料 6 有効質量を適用する設備について
- 参考資料 7 サプレッションチェンバ・ボックスサポートの耐震評価について
- 参考資料 8 原子炉建屋基礎版上における地震応答を用いる妥当性について
- 参考資料 9 機器・配管系設備の既工認からの構造変更について(ボックスサポート)
- 参考資料 10 評価に用いた地震動の応答加速度スペクトルについて
- 参考資料 11 方向性を考慮していない水平方向地震動における模擬地震波の作成方針
- 参考資料 12 サプレッションチェンバの水位条件について

下線部：今回提出資料

1. 概要

女川原子力発電所2号炉（以下「女川2号炉」という。）の既工認では、サプレッションチェンバへ加わる地震荷重のうち、内部水による荷重の算出に当たっては、内部水全体を剛体とみなし、容器とともに一体で挙動するものとして内部水の全質量を用いていたが、容器の内部水が自由表面を有する場合、実際に地震荷重として付加される内部水の質量は一部であることから、女川2号炉の今回工認では、これを考慮して地震荷重を算出する。

ここで、他産業における球形タンクや円筒タンクの耐震設計では、容器内の水が自由表面を有する場合、実際に地震荷重として付加される質量は、有効質量（又は付加質量、仮想質量等）として定義され、一般的に適用されている。

本資料では、女川2号炉の今回工認において円環形状容器であるサプレッションチェンバ内部水に対して有効質量を適用することの考え方及びその妥当性について説明する。

2. 既工認と今回工認の耐震評価手法

2.1 サプレッションチェンバの構造

原子炉格納容器の全体概要図を図 2.1-1 に、サプレッションチェンバの概要図を図 2.1-2 に、サプレッションチェンバ断面概要図を図 2.1-3 に示す。また、サプレッションチェンバの諸元を表 2.1-1 に示す。

サプレッションチェンバは、16 セグメントの円筒を繋ぎ合わせた円環形状容器であり、各セグメントの継ぎ目に2箇所ずつ設けられた全 32 箇所の支持脚（以下「ボックスサポート」という。）により、原子炉建屋基礎版上に自立している。

ボックスサポートは、半径方向に対してサプレッションチェンバの熱膨張により可動する構造であり、周方向に対してサプレッションチェンバの地震荷重を原子炉建屋基礎版に伝達させる構造である。

また、サプレッションチェンバは、ドライウエルとベント管を介して接続されるが、ベント管に設けられたベント管ベローズにより相対変位を吸収する構造となっている。

このため、サプレッションチェンバの耐震評価に当たっては、ドライウエルの地震応答と切り離し、原子炉建屋基礎版上における地震応答を用いている（参考資料8参照）。

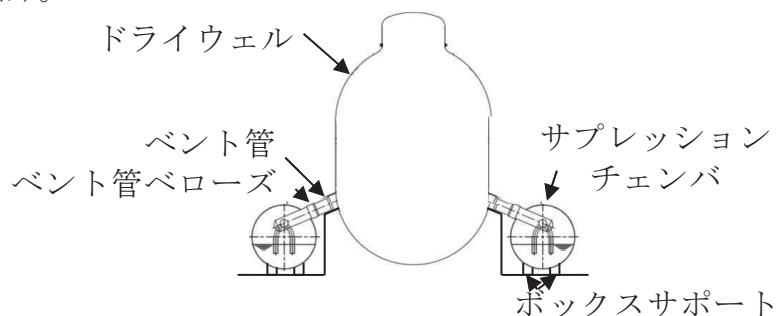


図 2.1-1 原子炉格納容器全体概要図

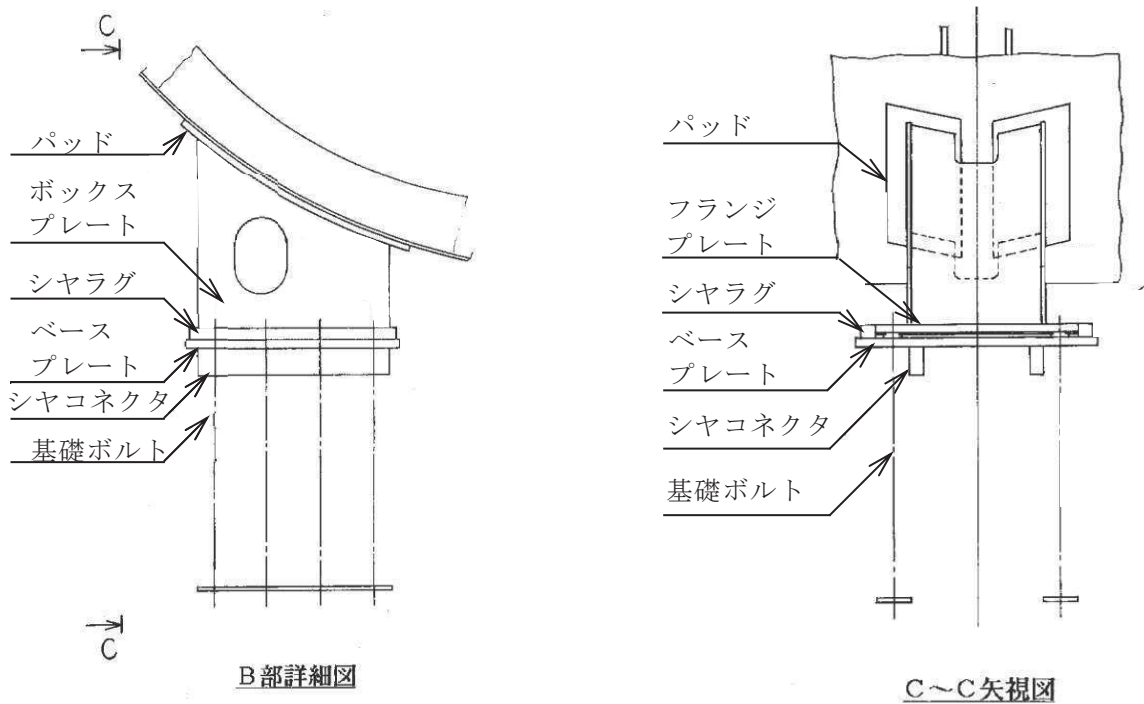
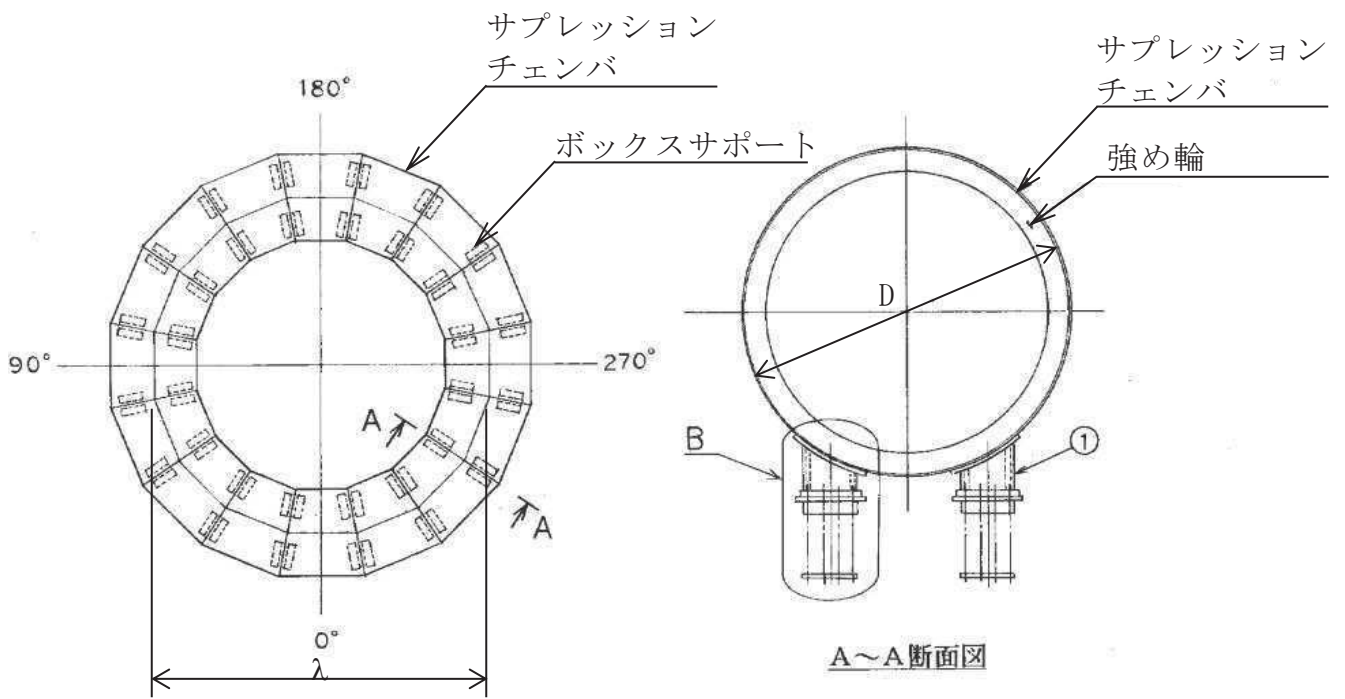


図 2.1-2 サプレッションチェンバ・ボックスサポート概要図

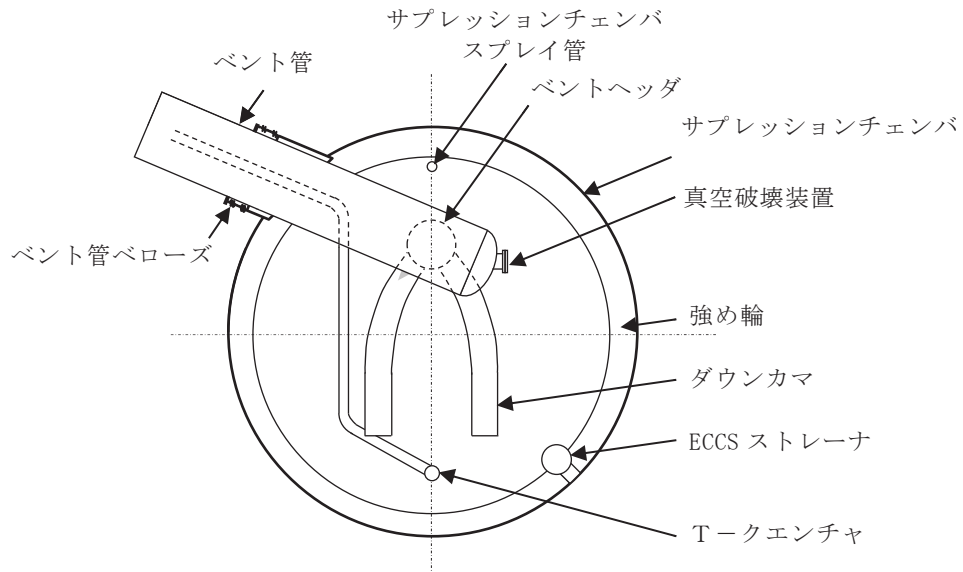


図 2.1-3 サプレッションチェンバ断面概要図

表 2.1-1 女川 2 号炉サプレッションチェンバ諸元

項目		内容	備考
耐震クラス		Sクラス	
設置建屋		原子炉建屋	
設置高さ		O. P. -8, 100	基礎版上
主要寸法	D	9,400 mm	記号は図 2.1-2 に示す
	λ	37,860 mm	
	t	19 mm	
	θ	22.5°	
サプレッションチェンバ質量 (内部水及びボックスサポート含む)		約 4,200 ton	通常運転水位における質量
		約 5,470 ton	重大事故時水位における質量
内部水質量		約 2,900 ton	通常運転水位における質量
		約 4,170 ton	重大事故時水位における質量

2.2 有効質量の概要

有効質量については、他産業の球形タンクや円筒タンク等の容器の耐震設計に一般的に用いられている考え方である（別紙1参照）。

また、有効質量は、容器の内部水が自由表面を有する場合、水平方向の揺れによる動液圧分布を考慮して、地震荷重として付加される容器の内部水の質量として設定される（別紙2参照）。

なお、有効質量は容器の形状と水位が既知であれば、汎用構造解析プログラム NASTRAN を用いて算出することが可能である。

2.3 既工認と今回工認の耐震評価手法の比較

女川2号炉のサプレッションチェンバの耐震評価における既工認と今回工認の比較を表2.3-1に、既工認及び今回工認の動的地震力による耐震評価のフローを図2.3-1及び図2.3-2に並びに静的地震力による耐震評価のフローを図2.3-3及び図2.3-4に示す。

既工認からの変更点は、水平地震荷重算出における質量の扱い（有効質量の適用）及びこれに伴うスロッシング荷重の個別評価、地震応答解析手法の変更（動的解析（スペクトルモーダル解析等））である。

表 2.3-1 女川2号炉のサプレッションチェンバの耐震評価における
既工認と今回工認の比較

項目		既工認	今回工認*1	変更理由	
荷重評価	地震荷重算出に考慮する質量	水平	鋼材質量＋ 水質量（全質量）	鋼材質量＋ <u>水質量（有効質量）</u>	現実的な水の地震荷重を評価するため、水の有効質量を適用
		鉛直	鋼材質量＋ 水質量（全質量）	同左	—
	スロッシング荷重	*2	<u>個別評価</u>	有効質量の適用に伴いスロッシング荷重を個別評価	
	死荷重（自重）に考慮する質量	鋼材質量＋ 水質量（全質量）	同左	—	
	地震荷重解析手法	水平	静的解析	<u>動的解析（スペクトルモーダル解析等）</u>	より詳細な地震応答解析を実施
鉛直		静的解析	静的解析	—	
応力評価	応力評価手法	サプレッションチェンバシェル（数値解析） ボックスサポート（定型式）	同左	—	
	許容応力	JEAG4601に基づく	同左	—	

注) 下線部は既工認からの変更点を示す

*1 静的地震力による評価は、水質量（全質量）を用いて既工認と同様に評価

*2 サプレッションチェンバ内部水全体を剛体とみなし保守的に地震荷重を考慮しており、スロッシング荷重は水平地震荷重に包含される

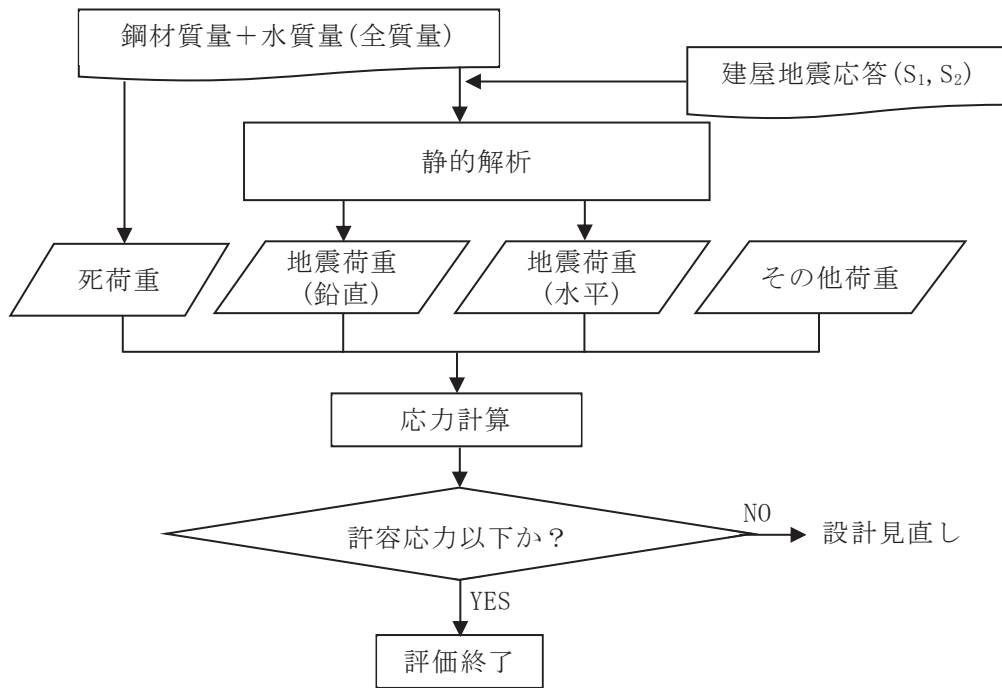


図 2.3-1 既工認におけるサプレッションチェンバの動的地震力による耐震評価フロー

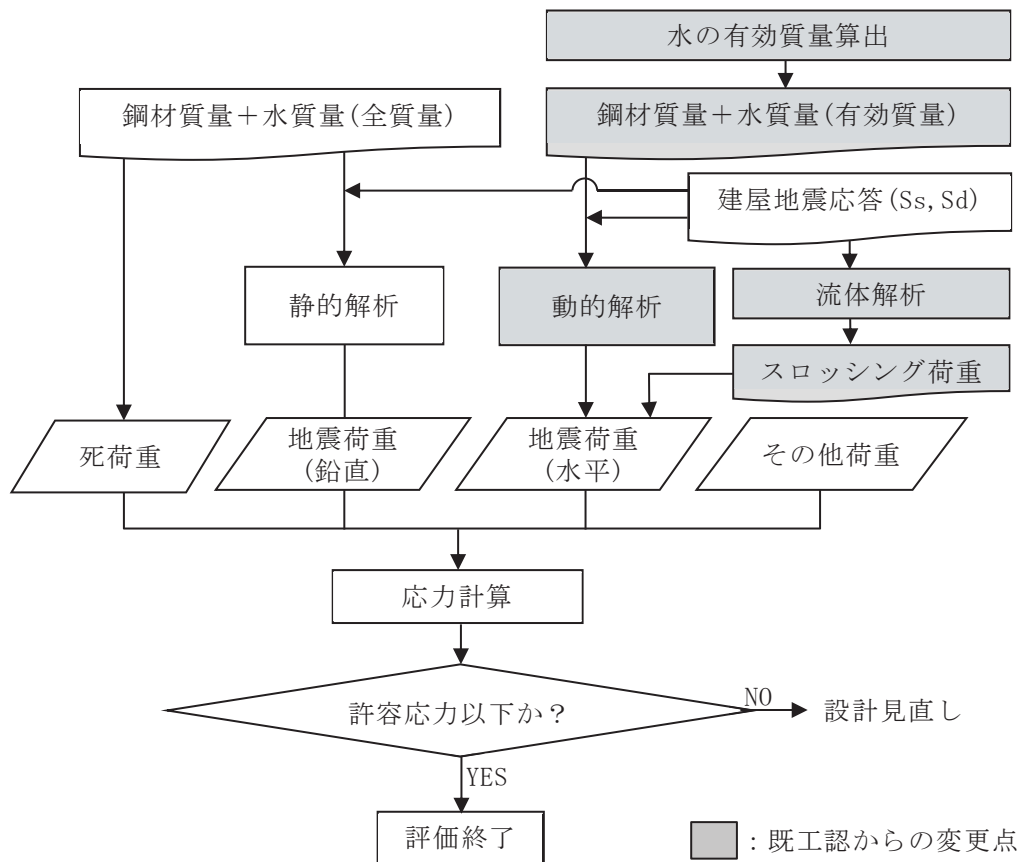


図 2.3-2 今回工認におけるサプレッションチェンバの動的地震力による耐震評価フロー

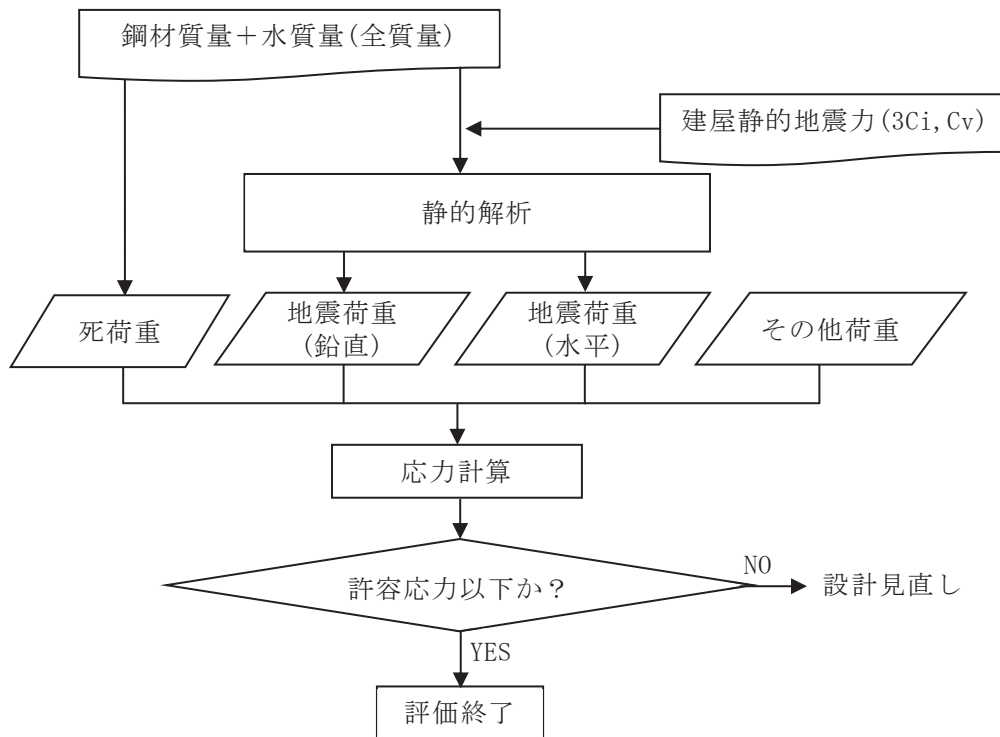


図 2.3-3 既工認におけるサプレッションチェンバの静的地震力による耐震評価フロー

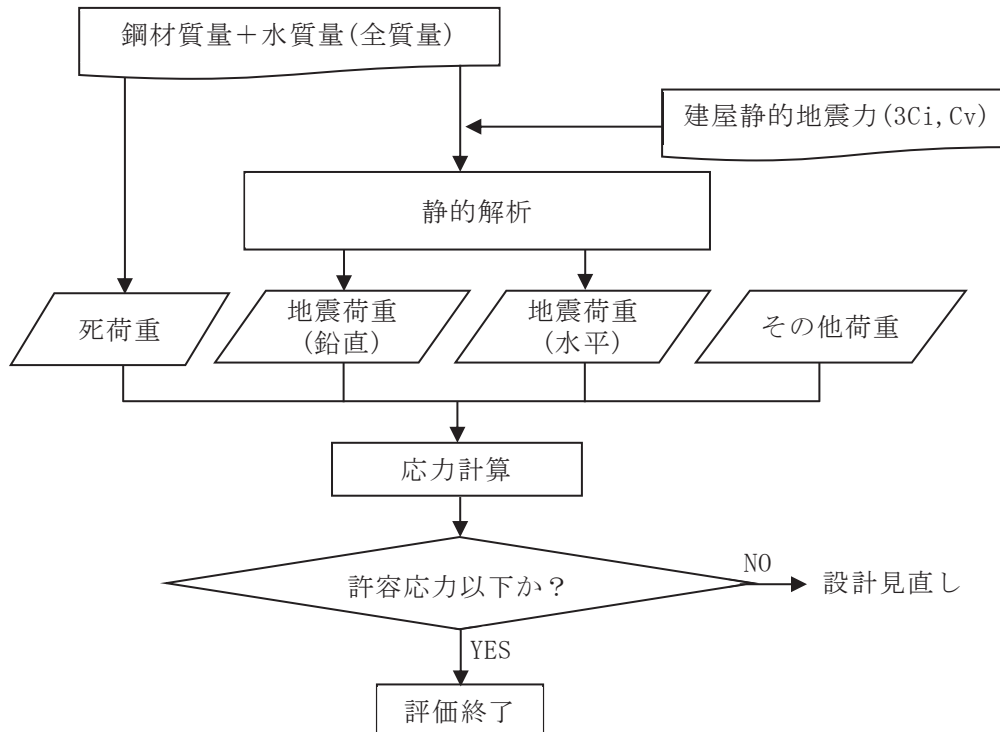


図 2.3-4 今回工認におけるサプレッションチェンバの静的地震力による耐震評価フロー(既工認と変更なし)

2.3.1 水の有効質量の適用及びスロッシング荷重の考慮

サプレッションチェンバの耐震評価は、死荷重（自重）、水平及び鉛直方向の地震荷重、地震と同時に作用することが想定される圧力によるその他荷重を組み合わせて行う。

既工認では、簡便な扱いとしてサプレッションチェンバの内部水全体を剛体と仮定し、地震荷重算出に内部水の全質量を用いていたが、今回工認では流体としての特性を考慮し、水平方向の地震荷重算出にあたってはサプレッションチェンバ内部水質量として有効質量の考え方を適用する。

また、スロッシングによる荷重については、既工認ではサプレッションチェンバ内部水全体を剛体としていたため、水平方向の地震荷重に包含される扱いとしていたが、今回工認では水平方向の地震荷重算出に有効質量を適用するため、地震時の内部水の挙動を考慮し、スロッシング荷重を流体解析により算出する（別紙3，参考資料6参照）。

2.3.2 地震応答解析手法の変更

既工認では、地震応答解析手法として水を含めたサプレッションチェンバ全体を剛とみなして静解析を実施していたが、今回工認では重大事故時のサプレッションチェンバの水位上昇に伴う内部水の質量増加を踏まえ、より詳細な地震応答解析を実施するため、動的解析（3次元はりモデルを用いたスペクトルモーダル解析等）に変更する。

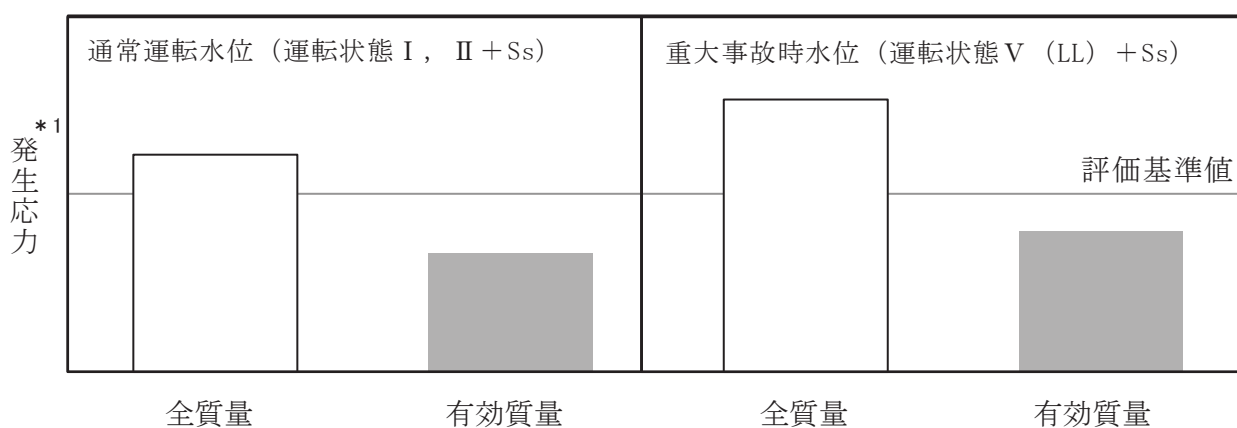
なお、3次元はりモデルによるスペクトルモーダル解析は、配管等の地震応答解析で用いられている一般的な手法である。

2.4 有効質量を適用する目的と効果

容器の内部水が自由表面を有する場合、実際に地震荷重として付加される内部水の質量は、内部水の全質量でなく一部の質量（有効質量）であることが知られている。

これらの知見に基づいて、女川2号炉の今回工認では、より現実に近いサプレッションチェンバの内部水の挙動を考慮した評価を行うことを目的に、耐震計算における内部水の扱いとして、振動試験や流体解析によりその妥当性を検証した汎用構造解析プログラムNASTRANを用いて算出した有効質量を適用する。

なお、本有効質量を用いて、サプレッションチェンバボックスサポートの構造強度評価を実施する場合、発生応力が低減すると考えられる（図2.4-1）。



*1 いずれの条件に対しても補強工事を考慮（参考資料9参照）

図 2.4-1 通常運転状態及び重大事故時のボックスサポートの評価の見通し

3. 有効質量の適用方針

3.1 概要

女川2号炉のサブプレッションチェンバの耐震評価に適用する有効質量は、汎用構造解析プログラム NASTRAN（参考資料5参照）にて算出する。

円環形状容器であるサブプレッションチェンバの有効質量の算出に NASTRAN を用いるため、その妥当性検証として、サブプレッションチェンバの内部構造物を除いた円環形状容器のモデルに対して NASTRAN にて有効質量を求め、実機を縮小模擬した試験体（前述の NASTRAN の解析モデルと同様）を用いた振動試験及び流体解析（汎用流体解析コード OpenFOAM（参考資料5参照））により算出した有効質量と比較、検証を行う。

女川2号炉のサブプレッションチェンバの耐震評価に用いる有効質量は、先に検証した NASTRAN により算出した値に対して、内部構造物を含む解析モデルに対する流体解析（汎用流体解析コード OpenFOAM）により算出した値と比較、検証した上で、解析プログラム間の値の差異や試験結果との差異等を踏まえて NASTRAN で算出された値の保守性を検討し、設定する。

NASTRAN によるサブプレッションチェンバ内部水の有効質量算出の妥当性検証及び女川2号炉のサブプレッションチェンバの耐震評価に用いる有効質量の設定の流れを図 3.1-1 に示す。なお、有効質量の評価においては、内部水の全質量に対する有効質量の割合（以下「有効質量比」という。）を用いる。

3.2 円環形状容器の有効質量算出の妥当性検証

円環形状容器の有効質量算出に汎用構造解析プログラム NASTRAN を用いることの妥当性検証として、振動試験及び汎用流体解析コード OpenFOAM により算出した有効質量比と比較する。

- ① NASTRAN による試験体解析モデルの有効質量比の算出（第 4.1 項にて説明）
振動試験に用いた試験体の構造解析モデルを作成し、NASTRAN により有効質量比を算出する。
- ② 振動試験による有効質量比の確認（第 4.2 項にて説明）
実機を縮小模擬した円環形状容器の試験体を用いて振動試験を行い、試験データから有効質量比を算出する。
- ③ OpenFOAM による試験体解析モデルの有効質量比の算出（第 4.3 項にて説明）
振動試験に用いた試験体の流体解析モデルを作成し、OpenFOAM により有効質量比を算出する。

④ 妥当性検証（第 4.4 項にて説明）

上記①～③で得られた有効質量比を比較し、NASTRAN で算出した円環形状容器の内部水の有効質量比の妥当性を検証する。

3.3 耐震評価に用いる有効質量の設定

女川 2 号炉の実機評価に適用する有効質量は、実機解析モデルに対する NASTRAN と内部構造物を含む実機解析モデルに対する OpenFOAM による有効質量比を比較し、その妥当性を検証した上で、解析プログラム間の値の差異や試験結果との差異等を踏まえて NASTRAN で算出された値の保守性を検討し、設定する。

① NASTRAN による実機の有効質量比の算出（第 5.1 項にて説明）

第 3.2 項により妥当性を確認した NASTRAN を用いて、女川 2 号炉の実機解析モデルにより有効質量比を算出する。

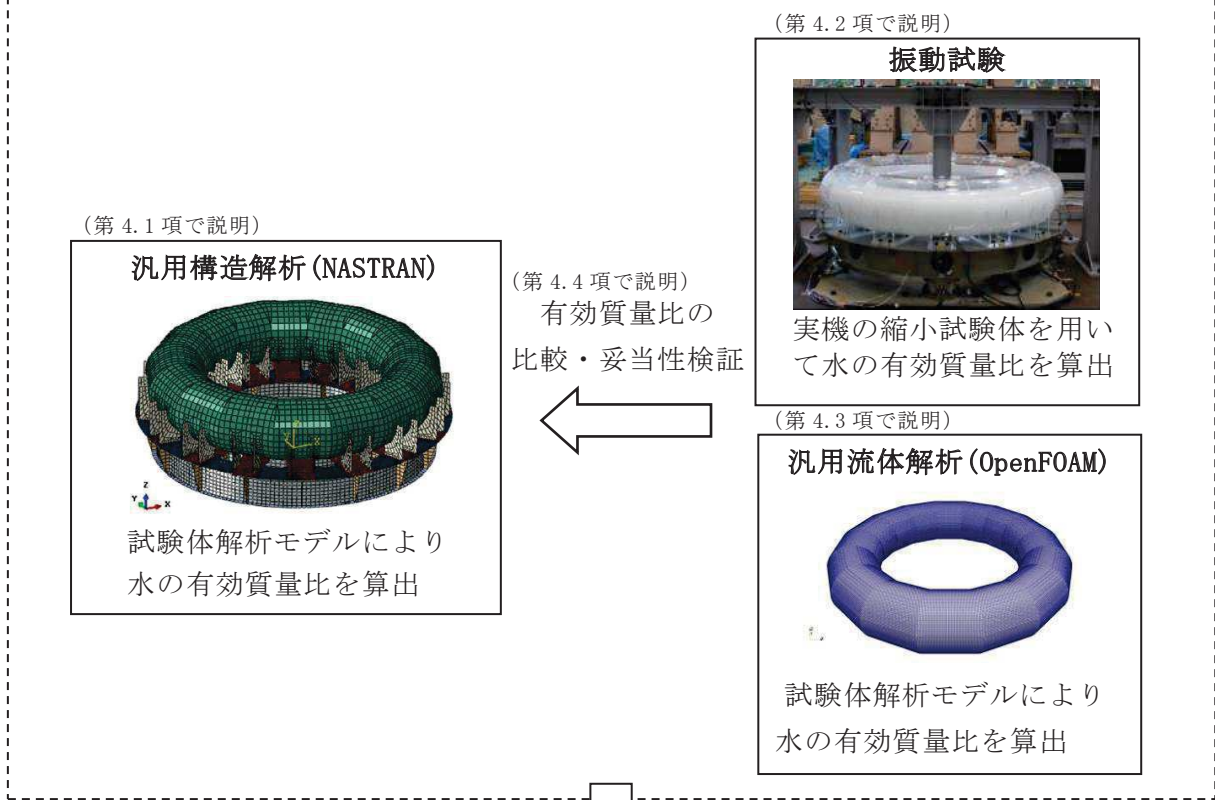
② 流体解析による実機の有効質量比の算出（第 5.1 項にて説明）

NASTRAN の実機解析の妥当性を検証するため、OpenFOAM を用いて、女川 2 号炉の主要な内部構造物をモデル化した実機解析モデルにより有効質量比を算出し比較する。

③ 不確かさを踏まえた耐震評価用の有効質量の設定（第 5.2 項にて説明）

NASTRAN に対する流体解析及び振動試験の値の差異等を踏まえ、NASTRAN で算出された値の保守性を検討し、女川 2 号炉の実機評価に適用する有効質量を設定する。

【円環形状容器の有効質量算出の妥当性検証】



【耐震評価で用いる有効質量の設定】

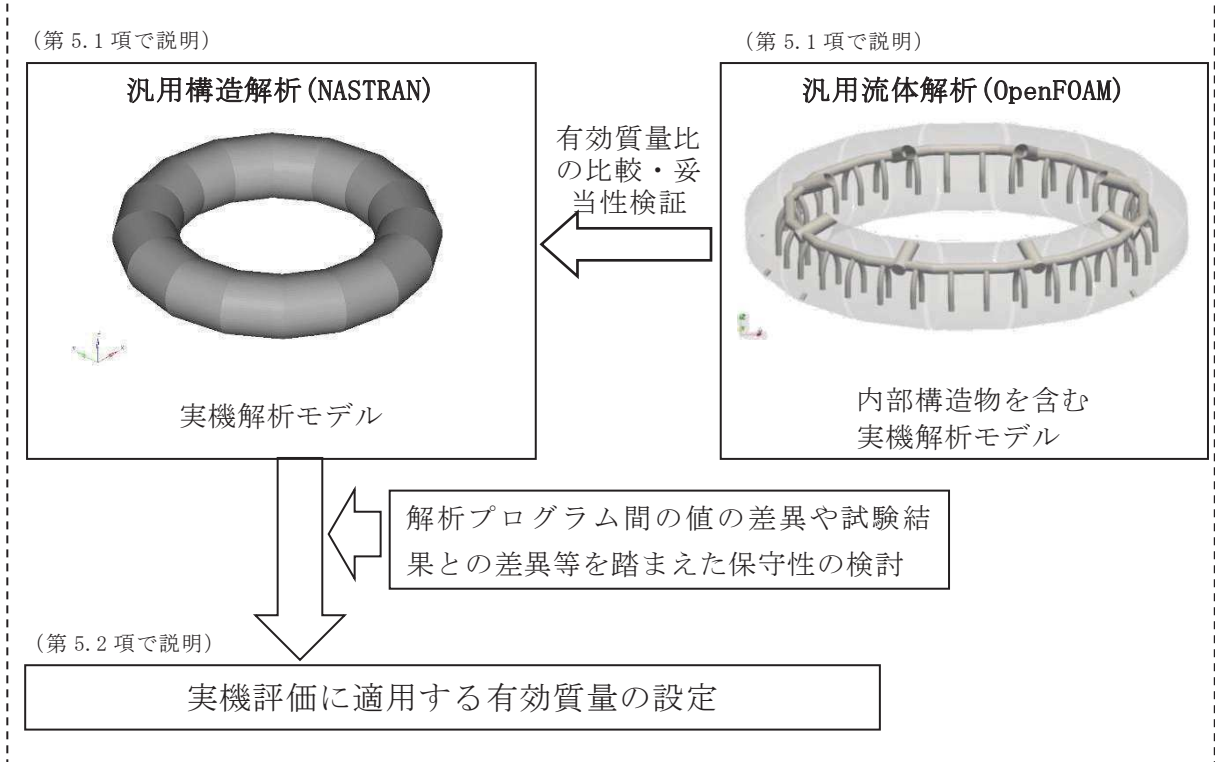


図 3.1-1 NASTRAN によるサブプレッションチェンバ内部水の有効質量算出の妥当性検証及び女川 2 号炉のサブプレッションチェンバの耐震評価に用いる有効質量の設定の流れ

4. 円環形状容器の有効質量算出の妥当性検証

4.1 構造解析による有効質量比の算出

円環形状容器の内部水の有効質量は、NASTRAN で算出可能であり、入力波によらず、容器の構造（形状及び寸法）と内部水の水位により有効質量が定まる。また、NASTRAN では、内部水のスロッシングを評価しないため、スロッシング荷重は考慮されない。

4.1.1 検討対象

女川 2 号炉のサプレッションチェンバを対象とし、NASTRAN による有効質量算出の妥当性検証のために実施する振動試験と同様（第 4.2 項参照）に実機サプレッションチェンバを縮小模擬した円環形状とする（実機寸法の約 1/25）。

4.1.2 解析モデル

振動試験に用いた試験体及び架台をもとにシェル要素で作成した構造解析モデルを図 4.1-1 に示す。水位は、実機サプレッションチェンバの運転状態を考慮し、4 段階（低、中、高、高高）（参考資料 1 2 参照）を設定する。

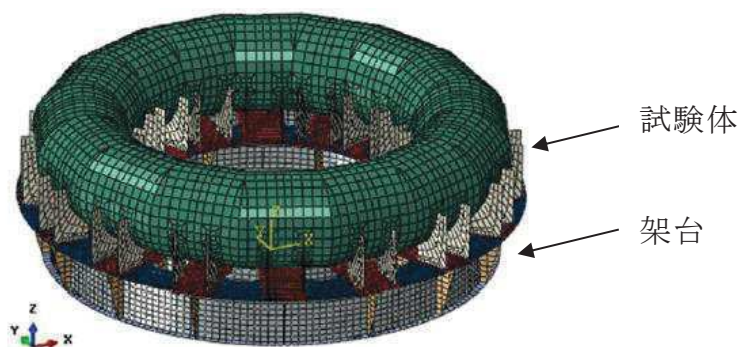


図 4.1-1 構造解析モデル（試験体解析モデル）

4.1.3 解析結果

NASTRAN による有効質量及び有効質量比の算出結果を表 4.1-1 に示す。有効質量比は水位とともに増加する傾向が確認された。

表 4.1-1 NASTRAN による有効質量及び有効質量比の算出結果

水位*1	水の全質量 M_W [kg]	水の有効質量*2 M_E [kg]	有効質量比 M_E/M_W [-]	備考
低 (146mm)	189.2	28.6	0.15	通常運転水位
中 (203mm)	292.4	64.4	0.22	
高 (259mm)	389.7	115.1	0.30	真空破壊装置上端水位*3
高高 (325mm)	486.4	199.3	0.41	

*1 試験体底面からの高さ（第 4.2 項参照）

*2 各シェル要素で得られた有効質量の合算値

*3 重大事故時水位より高い水位

4.2 振動試験

円環形状容器の内部水の有効質量算出に NASTRAN を用いることの妥当性を検証するため、試験体を作成して振動試験を行い、NASTRAN による有効質量比との比較を行う（参考資料 1 参照）。

4.2.1 試験体

試験体の寸法は、女川 2 号炉のサプレッションチェンバの実機寸法の約 1/25 に設定し、材質は内部水の挙動を確認するためアクリルとした。表 4.2-1 に試験体と実機の相似比を示す。なお、解析手法の検証という目的を踏まえ、内部水の流動現象を単純化させるため、強め輪やダウンコマ等の内部構造物は、試験体に模擬していない。

振動台上に試験体を支持する架台を設け、架台の脚部には水平及び鉛直方向の反力を測定可能な分力計を 4 台設置した。架台は、内部水からの荷重を分力計に確実に伝達させるため強固なものとし、ボックスサポートは模擬していない。試験装置の概要を図 4.2-1 に、写真を図 4.2-2 に示す。

表 4.2-1 試験体と実機との相似比

物理量	相似比*1	設定値
長さ	1/L	1/24.7
加速度	1/1	1
時間	1/√L	1/√24.7

*1 L：実機と試験体の縮尺比（ $L=9,400/380=24.7$ ）

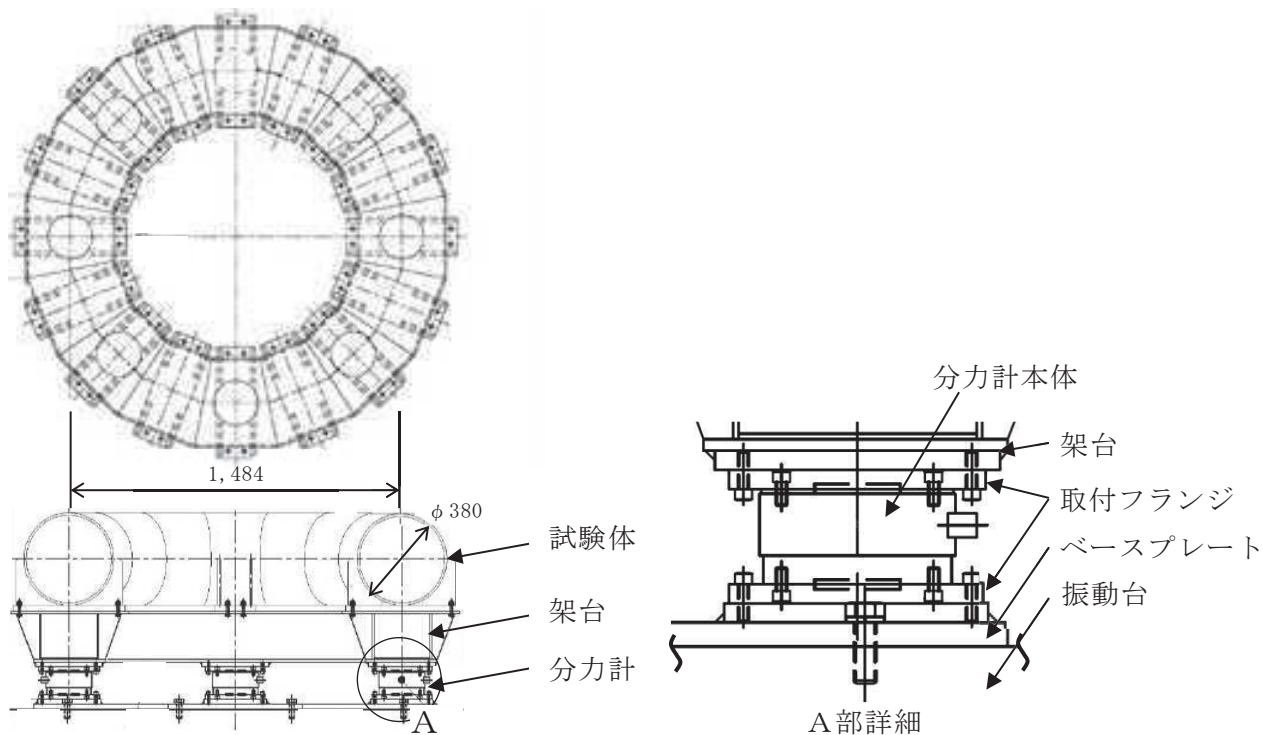


図 4.2-1 試験装置概要

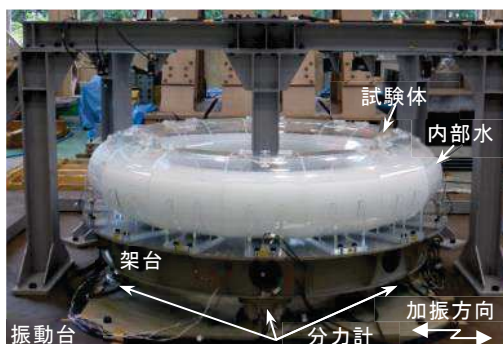


図 4.2-2 試験装置写真

4.2.2 計測項目及び計測機器設置位置

表 4.2-2 に計測項目を示す。これらのうち内部水の有効質量を評価する上で重要な計測項目は振動台上の加速度，試験体への入力となる架台上の加速度及び反力である。図 4.2-3 に計測機器設置位置を示す。

表 4.2-2 計測項目

計測項目	計測機器	位置	計測チャンネル数 (設置位置)
反力	分力計	架台下方	3 成分 (X, Y, Z) : 4 (0° , 90° , 180° , 270°)
加速度	加速度計	振動台上	X 成分 : 2 (0° , 180°) Y 成分 : 2 (90° , 270°) Z 成分 : 4 (0° , 90° , 180° , 270°)
		架台上	X 成分 : 2 (0° , 180°) Y 成分 : 2 (90° , 270°) Z 成分 : 4 (0° , 90° , 180° , 270°)
		試験体上	X 成分 : 4 (0° , 45° , 135° , 180°) Y 成分 : 4 (45° , 90° , 135° , 270°) Z 成分 : 6 (0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 270°)

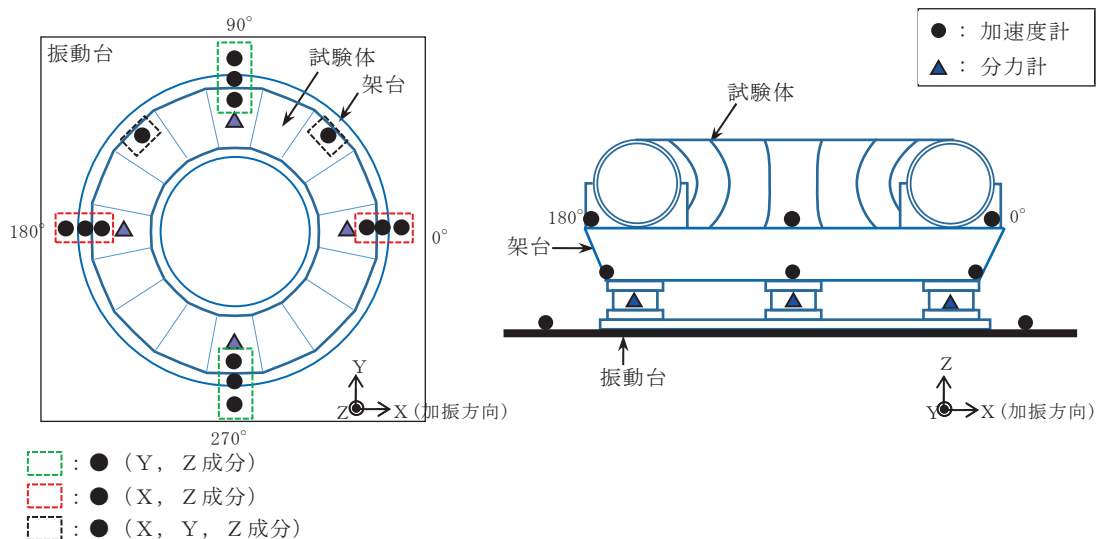


図 4.2-3 計測機器設置位置

4.2.3 試験条件

振動台への入力波は、女川2号炉のサブプレッションチェンバ設置床（原子炉建屋基礎版上）における基準地震動 S_s 相当*の応答加速度時刻歴波を、表 4.2-1 に示した相似比で時間軸を圧縮している。また、振動台の加振限界振動数以上の成分については、応答加速度時刻歴波の圧縮時に 7.5Hz ローパスフィルタ処理（時間軸圧縮後約 38Hz）を実施している。なお、圧縮後の応答加速度時刻歴波には、試験体のスロッシング周期成分が含まる。

加振方向は水平1方向とし、入力波倍率は、上記の応答加速度時刻歴波の 0.5 倍、1.0 倍及び 1.5 倍の 3 ケースとする。サブプレッションチェンバ設置床における基準地震動 S_s 相当の応答加速度時刻歴波形及び応答加速度スペクトルを図 4.2-4 及び図 4.2-6、振動台への入力波に対するものを図 4.2-5 及び図 4.2-7 に示す。

*平成25年12月設置変更許可申請時基準地震動 S_s のうち試験体内部水のスロッシングの固有周期帯で応答加速度が大きい S_s-2 を採用

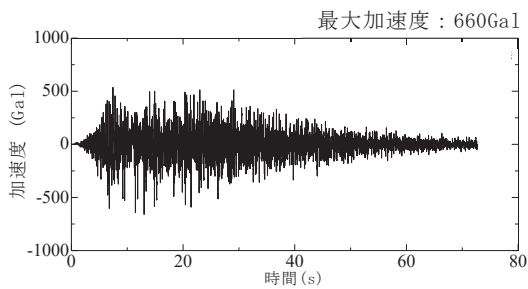


図 4.2-4 基準地震動 S_s 相当の
応答加速度時刻歴波形

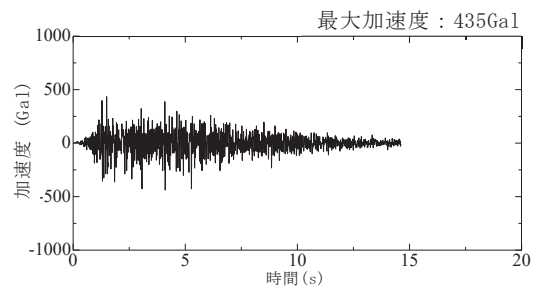


図 4.2-5 振動台入力加速度時刻歴波形
(相似則適用)

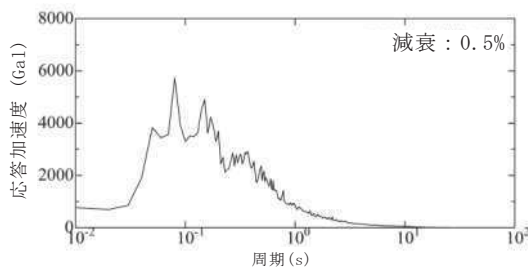


図 4.2-6 基準地震動 S_s 相当の
応答加速度スペクトル

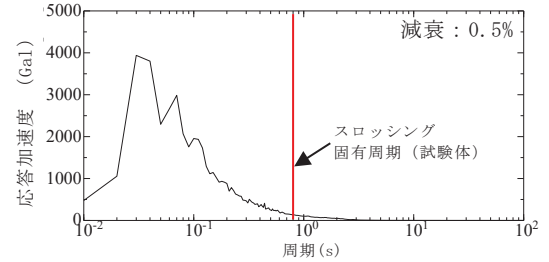


図 4.2-7 振動台入力応答加速度
スペクトル(相似則適用)

試験水位レベルは、水を入れない空、低、中、高、高高の計 5 ケースとする（図 4.2-8）。試験回数は 1 ケースにつき 3 回以上実施する。

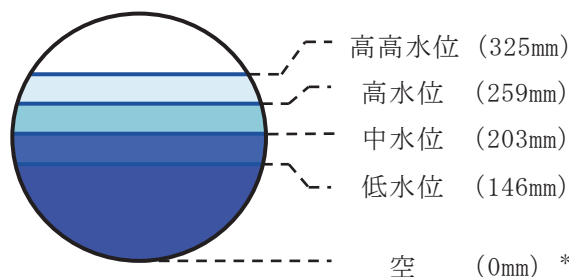


図 4.2-8 試験水位レベル

* 試験体底面からの高さ

4.2.4 試験結果

1.0 倍入力，低水位の試験ケースにおける計測荷重の時刻歴を図 4.2-9 に，架台上の計測加速度に対する荷重をプロットしたものを図 4.2-10 に示す。

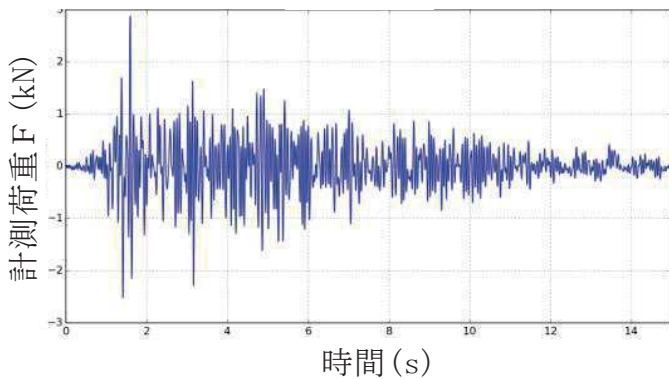


図 4.2-9 計測荷重の時刻歴

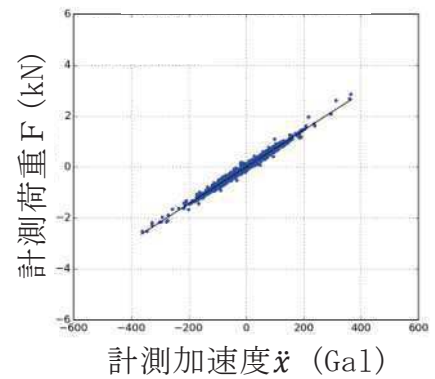


図 4.2-10 計測加速度と計測荷重の関係

図 4.2-10 において，計測荷重 F と架台上の計測加速度（＝試験体への入力加速度） \ddot{x} との関係は，運動方程式から下式で表される。

$$F = (M + M_E)\ddot{x}$$

ここで，

M ：試験体（構造体）の質量

M_E ：内部水の有効質量

上式のとおり，試験体（構造体）の質量と内部水の有効質量の合計値は，計測加速度に対する計測荷重の比として表されることから，水有りの試験結果及び空の試験結果の計測加速度と計測荷重の関係から回帰直線の傾きを求め，両者の回帰直線の傾きの差から内部水の有効質量が算出される（図 4.2-11 参照）。

なお，有効質量の算出においては，計測荷重 F について 2Hz のハイパスフィルター処理を行い，スロッシング周期成分を取り除いている（参考資料 2 参照）。

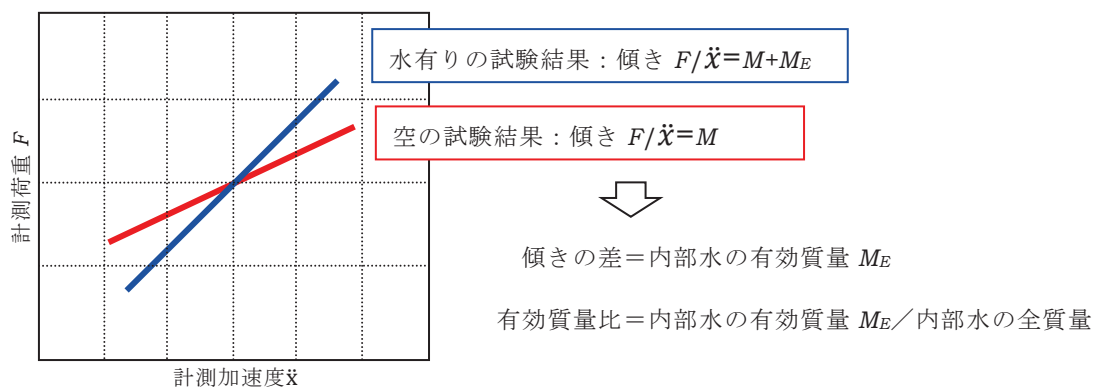


図 4.2-11 内部水の有効質量 M_E 及び有効質量比の算出方法

各ケースの試験結果から算出した有効質量比を表 4.2-3 及び図 4.2-12 に示す。なお、各ケースの試験結果は、再現性があり、ばらつきがほとんどないことを確認している。各ケースの試験結果の全データを別紙 4 に示す。また、図 4.2-13 に示す計測荷重 F のフーリエスペクトルから、約 0.8 秒（実機寸法では約 4 秒）にピークを確認したことから、振動試験においてスロッシングによる荷重が発生している。

各ケースの試験結果から、水位の増加に伴い有効質量比も増加すること、入力波倍率の違いによる有効質量比の差は小さいことを確認した。

表 4.2-3 振動試験結果から算出した有効質量比

水位	入力波倍率*		
	0.5 倍	1.0 倍	1.5 倍
低 (146mm)	0.14 (0.0047)	0.12 (0.0212)	0.14 (0.0161)
中 (203mm)	0.20 (0.0047)	0.21 (0.0080)	0.21 (0.0074)
高 (259mm)	0.28 (0.0032)	0.28 (0.0015)	0.28 (0.0040)
高高 (325mm)	0.41 (0.0029)	0.42 (0.0032)	0.41 (0.0040)

* 括弧内は、複数回実施した試験結果から得られた有効質量比の標準偏差

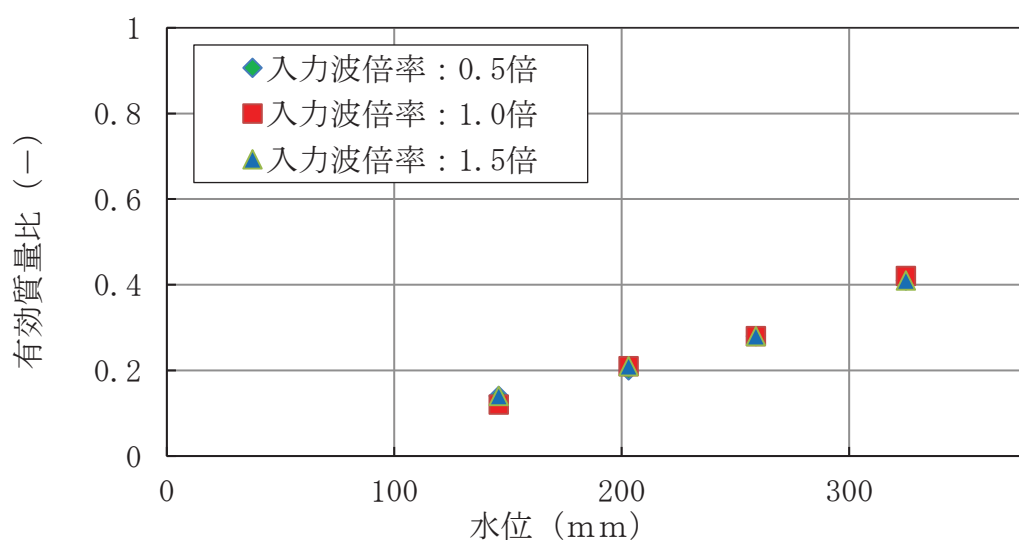


図 4.2-12 振動試験における水位と有効質量比の関係

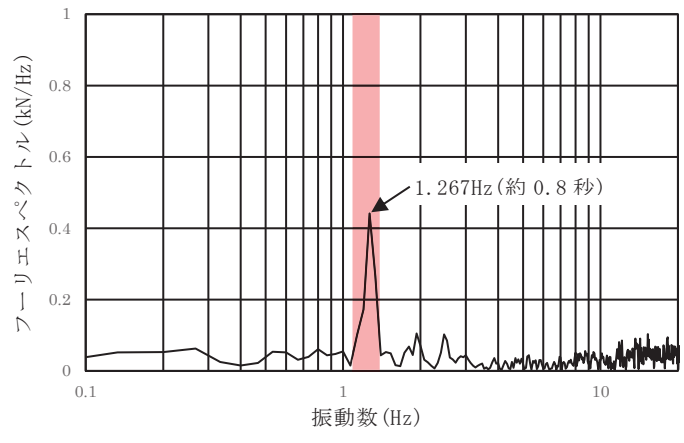


図 4.2-13 計測荷重のフーリエスペクトル（低水位，入力倍率 1.0 倍）

4.3 流体解析による有効質量比の算出

円環形状容器の内部水の有効質量算出に NASTRAN を用いることの妥当性を検証するため、第 4.2 項の振動試験に加えて、汎用流体解析コード OpenFOAM により有効質量比を算出する。

4.3.1 解析モデル

振動試験にて用いた試験体をもとに作成した流体解析モデルを図 4.3-1 に示す。



図 4.3-1 流体解析モデル（試験体解析モデル）

4.3.2 解析条件

流体解析に用いる入力波は、振動試験で計測された試験体への入力波（架台上で計測された加速度時刻歴波）とする。水位は、代表として低水位及び高水位とする。

4.3.3 解析結果及び有効質量比の確認

1.0 倍入力、低水位の解析条件に対して流体解析により算出した荷重時刻歴を図 4.3-2 に、入力加速度に対する荷重をプロットしたものを図 4.3-3 に示す。また、図 4.3-3 の入力加速度と荷重の関係から回帰直線の傾きを求め、内部水の有効質量比を算出した結果を表 4.3-1 に示す。

なお、有効質量比の算出においては、荷重時刻歴波形について 2 Hz のハイパスフィルター処理を行い、スロッシング周期成分を取り除いている。

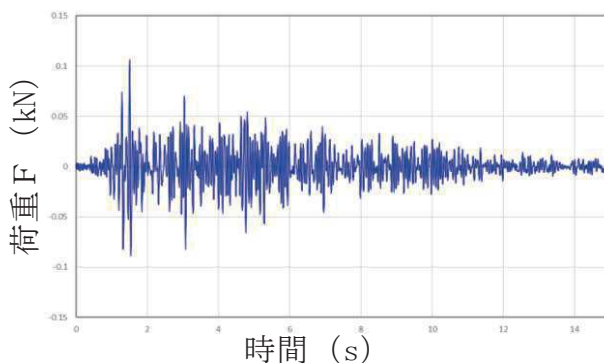


図 4.3-2 荷重時刻歴

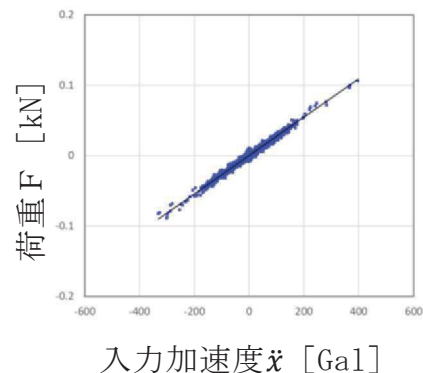


図 4.3-3 入力加速度と荷重の関係

表 4.3-1 OpenFOAM により算出した有効質量比

水位	有効質量比[-]
低 (146mm)	0.14
高 (259mm)	0.28

4.4 妥当性検証

第 4.1 項～第 4.3 項に示した NASTRAN, 振動試験及び OpenFOAM により算出した有効質量比を整理して表 4.4-1 及び図 4.4-1 に示す。

入力波の特性に関係なく, 容器の形状及び水位により有効質量比が定まる NASTRAN により算出した有効質量比に対し (参考資料 3 参照), 内部水の流動を直接考慮した振動試験及び OpenFOAM から算出した有効質量比が同等であることを確認したことから, NASTRAN により算出される有効質量比は妥当であると考えられる。

また, 有効質量比は, 振動試験の結果から再現性があり, ばらつきがほとんどないことを確認した。

表 4.4-1 各方法による有効質量比の評価結果

水位	NASTRAN	振動試験*	OpenFOAM
低 (146mm)	0.15	0.12	0.14
中 (203mm)	0.22	0.21	
高 (259mm)	0.30	0.28	0.28
高高 (325mm)	0.41	0.42	

* 入力波倍率 1.0 倍ケースの値

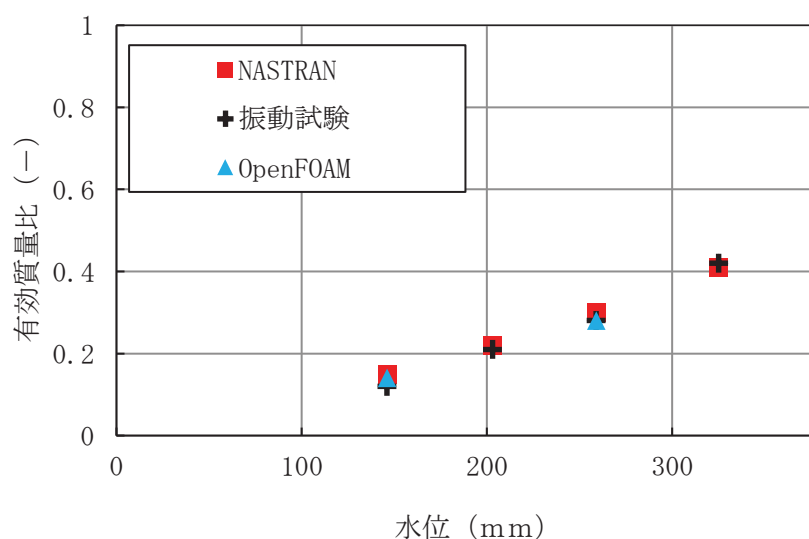


図 4.4-1 各手法の有効質量比の評価結果

5. 耐震評価に用いる有効質量の設定

第4項で妥当性を確認した NASTRAN を用いて、女川2号炉のサブプレッションチェンバ内部水の有効質量を算出する。また、実機の内部構造物による内部水の流動影響を確認するため、第4.3項同様 OpenFOAM により算出した有効質量比と比較し、妥当性を確認する。

5.1 実機の有効質量比の算出

5.1.1 NASTRAN の実機解析モデル

NASTRAN の実機解析モデルを図 5.1-1 に示す。

女川2号炉の実機解析モデルは、サブプレッションチェンバ(強め輪を含む)の寸法、剛性を模擬したシェル要素とし、内部水の水位を設定する。なお、本解析モデルは、サブプレッションチェンバの内部水の有効質量の算出に用いるものであり、ボックスサポートは模擬していない。

内部水の水位は、図 5.1-2 に示すとおり、通常運転水位及び重大事故時水位より高い水位(真空破壊装置下端水位)の2ケースとする。

なお、重大事故時水位は、重大事故後の状態で弾性設計用地震動 S_d 及び基準地震動 S_s による地震力と組み合わせる水位である。

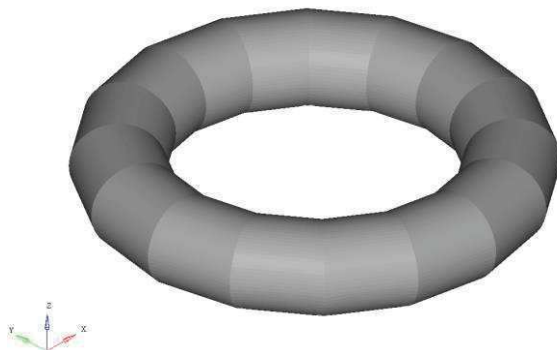


図 5.1-1 NASTRAN の実機解析モデル

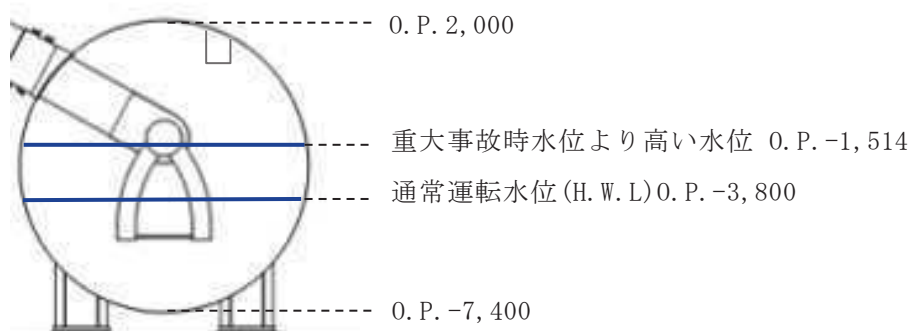


図 5.1-2 解析水位ケース

5.1.2 OpenFOAM の実機解析モデル

OpenFOAM における女川 2 号炉の実機解析モデルは、主要な内部構造物をモデル化し、水位条件は、NASTRAN と同じである (図 5.1-3)。また、入力地震動は、基準地震動 S_s の特徴を踏まえ、スロッシングの固有周期帯の応答加速度が比較的大きく、継続時間が長い S_s -D1、スロッシングの固有周期帯の応答加速度が比較的大きく、設備の固有周期帯の応答加速度が大きい S_s -D2 及びスロッシングの固有周期帯の応答加速度が大きい S_s -F2 を用いた (別紙 3, 参考資料 10 参照)。

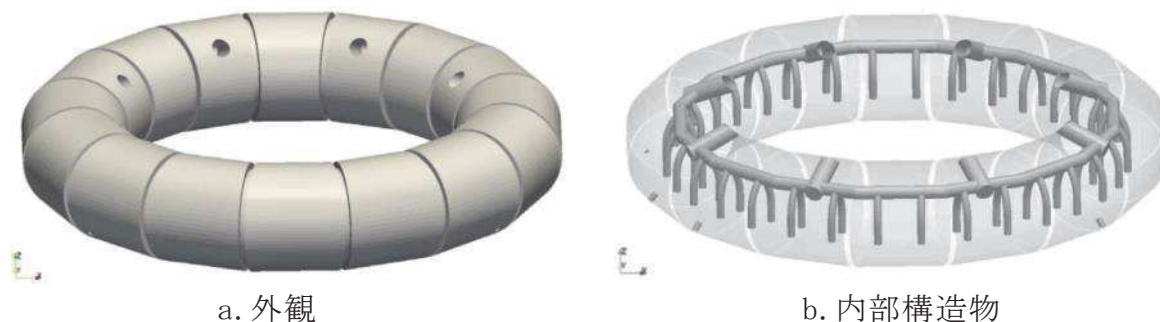


図 5.1-3 OpenFOAM の実機解析モデル

5.1.3 解析結果

NASTRAN 及び OpenFOAM による女川 2 号炉の実機サプレッションチェンバ内部水の有効質量比の算出結果を表 5.1-1 に示す。有効質量比は、水位が同条件の場合には、地震動によらず一定であり、各水位において NASTRAN により算出した有効質量比の方がやや大きい値となっている。この差異は、有効質量比の算出において、容器の形状と水位から一義的に求まる (内部水の流動を考慮しない) NASTRAN に対し、OpenFOAM では内部水の流動が考慮されることから、液面変動による効果によりこのような傾向となるものと推定される。また、本傾向は、第 4.4 項に示す NASTRAN の妥当性検証における NASTRAN の有効質量比と振動試験及び OpenFOAM の有効質量比の比較結果と整合している。

なお、NASTRAN による実機解析モデルの有効質量比に対する試験体解析モデルの有効質量比の差は、強め輪の有無によるものであり、内部水の断面積に対する強め輪の面積の割合が大きいほど、大きくなると考えられる。そのため、重大事故時水位より高い水位に対して通常運転水位の試験体解析モデルに対する実機解析モデルの有効質量比の増加割合が大きくなると考えられる。

表 5.1-1 女川 2 号炉の実機有効質量比算出結果

水位	実機解析モデル			試験体解析モデル	
	NASTRAN	OpenFOAM		NASTRAN	
		Ss-D1	Ss-D2		Ss-F2
通常運転水位 (H. W. L)	0.22	0.17	0.17	0.17	0.15
重大事故時水位	0.32	0.28	0.28	0.28	0.30*

* 重大事故時水位より高い水位

5.2 実機評価に適用する有効質量

女川 2 号炉の実機評価に適用する有効質量の設定にあたり、NASTRAN により算出される有効質量比に対する解析プログラム間の値の差異や試験結果との差異等を踏まえ、NASTRAN により算出される有効質量に係る保守性を検討する。

試験体モデルに対する有効質量比は、表 4.4-1 のとおり、NASTRAN、振動試験及び OpenFOAM により算出した有効質量比は同等であり、概ね NASTRAN の値が保守的な傾向を示す。また、有効質量比は、振動試験の結果から、再現性があり、ほとんどばらつきがなく算出できることを確認した。

実機解析モデルに対する有効質量比は、表 5.1-1 のとおり、NASTRAN により算出される有効質量比は、内部水の流動による有効質量比の低減が反映されないため、OpenFOAM により算出される有効質量比よりも保守的な値となっている。

また、容器構造設計指針・同解説に記載されている球形タンク及び円筒タンクの有効質量比に対して、NASTRAN を用いて有効質量比の確認解析を実施したところ、いずれのタンクに対しても有効質量比がほぼ一致している、又は NASTRAN の値が保守的な傾向となっている（参考資料 4 参照）。

したがって、女川 2 号炉の地震応答解析に考慮する有効質量は、NASTRAN により算出される有効質量比が、他評価手法及び容器構造設計指針に対して一致もしくはおおむね保守的な傾向（有効質量比が大きくなる）を示すことから、NASTRAN により算出される有効質量を適用する。

なお、評価手法の違い（NASTRAN と OpenFOAM）による有効質量比の差異によって、サプレッションチェンバの固有周期が変動するため、工認段階においては、耐震評価に用いる床応答スペクトルとの関係にも配慮し、地震荷重を算出する。

6. 今回工認の地震応答解析

女川2号炉サプレッションチェンバの地震応答解析モデル（動的地震力）を図6-1及び図6-2に示す。

今回工認では、重大事故時のサプレッションチェンバの水位上昇に伴う内部水の質量増加を踏まえ、より詳細な地震応答解析を実施するため、他の設備を含め適用実績が豊富なはり要素による3次元解析モデルを構築し、動的解析（スペクトルモーダル解析等）により地震荷重を算出する（参考資料7参照）。

解析モデルの設定に当たっては、サプレッションチェンバの各部材（サプレッションチェンバシェル、ボックスサポート）に対する剛性、質量等を適切に反映したはり要素でモデル化し、サプレッションチェンバシェルとボックスサポートは、剛体要素で結合させる。ボックスサポート下端の構造（半径方向に熱伸びを考慮した構造）であることを踏まえ、地震応答解析モデルのボックスサポートの下端位置の境界条件を、ボックスサポートの周方向を固定、半径方向に自由としている。

水平方向の地震応答解析においては、サプレッションチェンバ内部水について第5.1.1項に示したNASTRAN（実機解析モデル）により算出される各要素の有効質量及び位置（高さ）が考慮されるNASTRANの機能であるGuyan縮約法を用いて、サプレッションチェンバシェル（はり要素による3次元解析モデル）の各質点に付加する（別紙5参照）。

また、水平方向の地震荷重に考慮するスロッシング荷重は、流体解析により個別評価する（別紙3参照）。

以上の既工認からの変更点に対して、実機と今回評価に用いる解析モデルの相違点を抽出し、この相違点に対する設計反映事項を表6-1のとおり整理し、得られた結果を今回工認における評価に反映する。

鉛直方向の地震応答解析は、既工認同様、サプレッションチェンバの内部水全体を剛体として扱う。この場合、サプレッションチェンバの内部水は、動的解析モデルの質点に全質量を考慮する。

なお、静的地震力（ $3C_i$, C_v ）に対するサプレッションチェンバの静的解析においては、既工認同様、サプレッションチェンバの内部水全体を剛体として扱う。この場合、サプレッションチェンバが円環形状のため、外側の容積が大きいことから、内部水の重心位置は外側にオフセットした位置に設定される。地震応答解析モデル（静的地震力）を図6-3及び図6-4に示す。

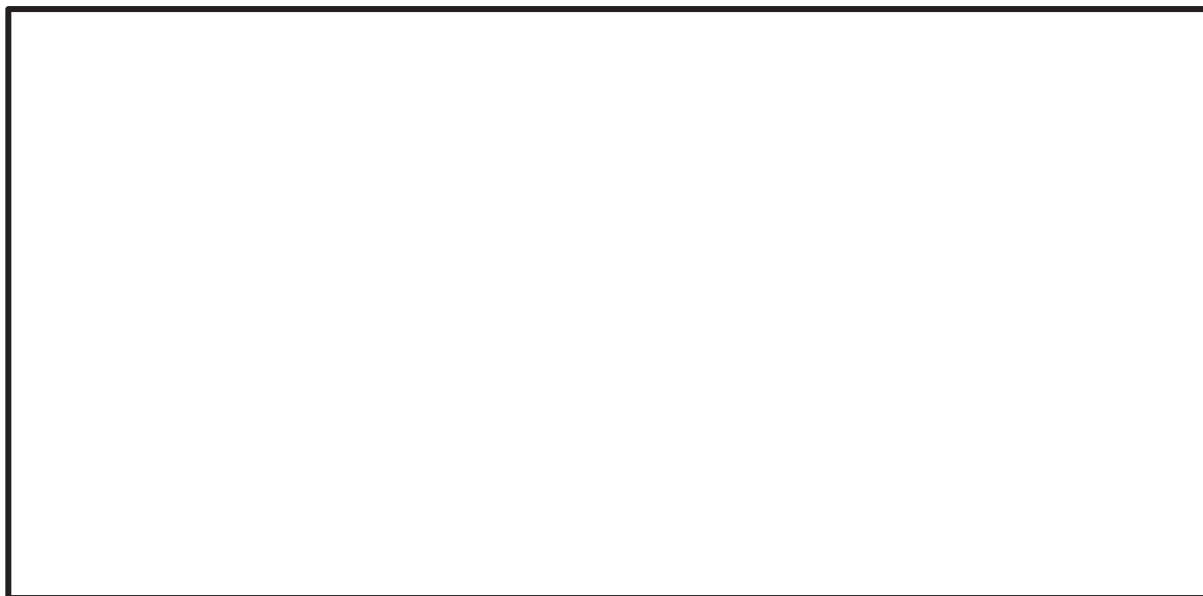


図 6-1 サプレッションチェンバ地震応答解析モデル全体図
(動的地震力)



図 6-2 サプレッションチェンバ地震応答解析モデル断面概略図
(動的地震力)

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



図 6-3 サプレッションチェンバ地震応答解析モデル全体図
(静的地震力)



図 6-4 サプレッションチェンバ地震応答解析モデル断面概略図
(静的地震力)

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

表 6-1 実機と今回評価に用いる解析モデルの相違点を踏まえた設計反映事項

既工認からの変更点	実機と今回評価に用いる解析モデルの相違点						設計への反映事項
	寸法・形状	内部構造物		水位	流動	地震動	
		強め輪	左記以外				
① 有効質量の適用 ①-1 円環形状容器の有効質量算出の妥当性検証  NASTRAN (振動試験体モデル)	相違あり 縮小モデルで実施 有効質量への 影響なし : 容器の形状及び水位により定まる (「4.4 妥当性検証」参照)	相違あり 強め輪なし 有効質量への 影響なし : 実機解析で強め輪をモデル化 (「5.1.1 NASTRANの実機解析モデル」参照)	相違あり 内部構造物なし 有効質量への 影響なし : 実機解析(OpenFOAM)で内部構造物の有無による影響がないことを確認 (「別紙3 4.3.3.3 内部構造物による影響」参照)	相違あり 設計で想定される水位よりも高い水位まで実施 有効質量への 影響なし : 実機解析で水位をモデル化 (「5.1.1 NASTRANの実機解析モデル」参照)	相違あり 考慮しない 有効質量への 影響有り(保守的) : 流動を考慮できる振動試験及びOpenFOAMよりも保守的に算出 (「4.4 妥当性検証」参照)	相違あり 考慮しない 有効質量への 影響なし : 加速度振幅、周期特性の違い、鉛直地震動による影響を確認 (「参考資料3 有効質量比に対する入力地震動の影響について」及び「別紙3 4.3.3.1 鉛直方向地震動による影響」参照)	実機と今回評価に用いる解析モデルの相違点に対する検討結果から、NASTRANにより算出される有効質量は、保守的に算出されるため、地震応答解析には、NASTRANにより算出される有効質量を適用し、地震荷重を算出する 有効質量が保守的に算出されることを踏まえると、サブプレッションチェンバの固有周期が変動することが考えられるため、地震応答解析に用いる床応答スペクトルとの関係にも配慮する
①-2 耐震評価で用いる有効質量の設定  NASTRAN (実機解析モデル)	相違なし	相違なし	相違あり 内部構造物なし 有効質量への 影響なし : OpenFOAMで内部構造物の有無による影響がないことを確認 (「別紙3 4.3.3.3 内部構造物による影響」参照)	相違あり DB: 通常運転水位 SA: 重大事故時水位よりも高く設定 有効質量への 影響有り(保守的) : 重大事故時水位よりも保守的に算出 (「4.4 妥当性検証」及び「5.1.3 解析結果」参照)	相違あり 考慮しない 有効質量への 影響有り(保守的) : 流動を考慮できるOpenFOAMよりも保守的に算出 (「5.1.3 解析結果」参照)	相違あり 考慮しない 有効質量への 影響なし : 地震動の違いによる影響がないことを確認 (「5.1.3 解析結果」参照)	有効質量が保守的に算出されることを踏まえると、サブプレッションチェンバの固有周期が変動することが考えられるため、地震応答解析に用いる床応答スペクトルとの関係にも配慮する
② 地震応答解析手法の変更  NASTRAN (実機解析モデル)	相違なし	相違あり 強め輪なし 地震応答解析への 影響なし : 強め輪の効果・質量を考慮しサブプレッションチェンバシェンバ部をモデル化 (「参考資料7」参照)	相違あり 内部構造物なし 地震応答解析への 影響なし : ベント管(ベントヘッダ、ダウンカマ含む)は、ベント管ベローズを介して接続されており、地震応答に与える影響は軽微であることを確認。それ以外の内部構造物は、質量として考慮 (「参考資料8」参照)	相違あり Guyan縮約法を用いて有効質量を縮約しモデル化 地震応答解析への 影響なし : 振動試験の再現解析等により、Guyan縮約法を用いた地震応答解析モデルは、妥当であることを確認 (「別紙5 サプレッションチェンバ内部水の地震応答解析モデルへの設定方法について」参照)	相違あり 考慮しない 地震応答解析への 影響なし : 水平方向の地震荷重に考慮するスロッシング荷重は、OpenFOAMにより個別に算出 (「6. 今回工認の地震応答解析」及び「別紙3 サプレッションチェンバ内部水のスロッシング荷重について」参照)	相違なし	地震応答解析への反映事項はない 地震応答解析では流動を考慮しないため、水平方向の地震荷重に考慮するスロッシング荷重をOpenFOAMにより個別に算出する
③ スロッシング荷重の個別評価  OpenFOAM (実機解析モデル)	相違なし	相違なし	相違なし	相違あり DB: 通常運転水位 SA: 重大事故時水位よりも高く設定 スロッシング荷重への 影響有り(保守的) : 重大事故時水位よりも保守的に算出 (「別紙3 4.3.2 スロッシング荷重算定結果」参照)	相違なし	相違あり 水平1方向+鉛直方向 スロッシング荷重への 影響有り(保守的) : 水平1方向+鉛直方向によるスロッシング荷重の $\sqrt{2}$ 倍は、水平2方向+鉛直方向のスロッシング荷重よりも保守的に算出 (「別紙3 4.3.3 スロッシング荷重及び有効質量に与える各種影響検討」参照)	実機と今回評価に用いる解析モデルの相違点に対する検討結果から、OpenFOAMにより算出されるスロッシング荷重は、水平1方向+鉛直方向のスロッシング荷重の $\sqrt{2}$ 倍の荷重を考慮することにより保守的に評価する

* サプレッションチェンバの耐震設計については、4条だけでなく、39条にも該当するため、重大事故時の設計条件も考慮。

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

7. まとめ

女川2号炉のサブプレッションチェンバの耐震評価について、容器の内部水が自由表面を有する場合、実際に地震荷重として付加される内部水は、その全質量でなく、一部の質量（有効質量）であることを踏まえ、サブプレッションチェンバの内部水に対して有効質量を適用することの妥当性を確認した。

具体的には、サブプレッションチェンバの内部水の有効質量は、汎用構造解析プログラム NASTRAN を用いて算出するため、実機を縮小模擬した試験体を用いた振動試験及び汎用流体解析コード OpenFOAM による流体解析から算出される有効質量、また、実機解析モデルに対する流体解析から算出される有効質量、さらには、容器構造設計指針・同解析の球形タンク等の有効質量比と比較・検証した結果、NASTRAN による算出される有効質量が試験及び他の評価手法と同等もしくは概ね保守的な傾向を示すことを確認した。

以上のことから、女川2号炉の今回工認においては、サブプレッションチェンバの内部水に対して有効質量を適用した耐震評価を実施する。

サブプレッションチェンバの内部水に対して有効質量を適用するに伴い、より詳細な地震応答解析を実施するため、水平方向の地震応答解析は、3次元はりモデルを用いた動的解析（スペクトルモーダル解析等）を実施する。

また、サブプレッションチェンバの評価に用いるスロッシング荷重は、流体解析により個別評価する。

サブプレッションチェンバ内部水の地震応答解析モデルへの設定方法について

1. 概要

第 6 項に示した女川 2 号炉のサブプレッションチェンバ地震応答解析モデル（はり要素を用いた 3 次元多質点モデル）における内部水の有効質量は，第 5.1.1 項に示した NASTRAN（シェル要素を用いた実機解析モデル）により算出される各要素の有効質量及びその位置（高さ）を考慮し，地震応答解析モデルの各質点に縮約して設定する。

本資料では，その設定方法の考え方について説明する。

2. 縮約

縮約とは，膨大な数のデータを扱う有限要素法などの解析において，行列の大きさ（次元）を小さくする解析上のテクニックであり，その手法として，Guyan の縮約法（Guyan's Reduction）が広く一般的に使われている。

サブプレッションチェンバの内部水に対する有効質量を地震応答解析モデルに設定するにあたり，この手法を用いて，NASTRAN により算出されるサブプレッションチェンバシェルの各要素の有効質量及びその位置（高さ）を，地震応答解析モデルの各質点に縮約する（図-別紙-5-1 参照）。

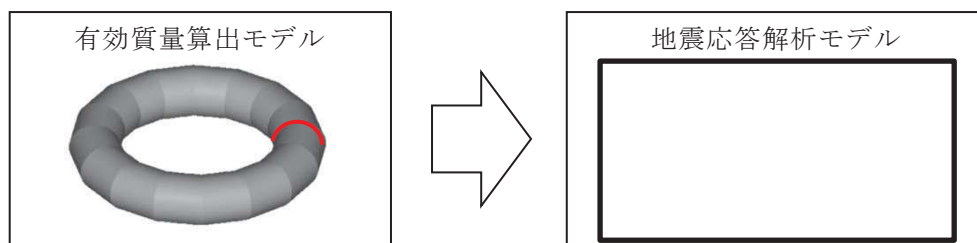


図-別紙-5-1 有効質量の縮約

3. 地震応答解析モデルへの設定方法

NASTRAN により算出されるサブプレッションチェンバシェルの各要素の有効質量及びその位置（高さ）を，地震応答解析モデルのサブプレッションチェンバの各質点に設定する方法（Guyan の縮約法）のイメージを図-別紙-5-2 に示す。

① NASTRAN から算出されるサブプレッションチェンバの内部水の有効質量

NASTRAN ではサブプレッションチェンバシェルの各要素に対する内部水の有効質量が算出されており，解析モデルの一断面を考えた場合，有効質量算出モデルの 1 要素における有効質量 m_i は，水平方向及び鉛直方向の有効質量 (m_{xi} , m_{zi}) に分解できる。

なお，水平方向の有効質量 m_{xi} をサブプレッションチェンバ全体に積分するとサブプレッションチェンバの内部水に対する有効質量と一致し，また，鉛直

4 条-別紙 4-別 5-1

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

方向の有効質量 m_{zi} をサブプレッションチェンバ全体に積分した場合、サブプレッションチェンバシエルの底面圧力による荷重と一致する。

- ② 地震応答解析モデルのはり要素（1質点）への縮約（1要素の有効質量）
上記①で示した水平方向及び鉛直方向の有効質量 (m_{xi} , m_{zi})、その位置（高さ）を考慮し、それらが地震応答解析モデルのはり要素（1質点）における質量及びモーメントが等価となるように、並進質量 (m_x , m_z) 及び回転質量 (Rm_x , Rm_z) を設定する。

なお、回転質量 Rm_z は、サブプレッションチェンバシエルの底面圧力によるモーメントとして考慮される。

- ③ 地震応答解析モデルのはり要素（1質点）への縮約（全要素の有効質量）
NASTRAN により算出されるサブプレッションチェンバシエル全要素の有効質量に対して、上記②の考え方を3次元の位置関係を考慮して展開し、地震応答解析モデルのはり要素（1質点）における並進質量 (m_x , m_y , m_z) 及び回転質量 (Rm_x , Rm_y , Rm_z) に縮約する。

- ④ 地震応答解析モデル（全質点）における有効質量の設定

地震応答解析モデルのにおけるはり要素の全質点に対して、上記③の考え方を展開し、並進質量 (m_x , m_y , m_z) 及び回転質量 (Rm_x , Rm_y , Rm_z) が設定される。



図-別紙-5-2 Guyan の縮約法のイメージ

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

ここで、今回工認に用いるサブプレッションチェンバの地震応答解析モデルを図-別紙 5-3 に示す。また、重大事故時水位条件で X 方向(水平)及び Z 方向(鉛直)の地震応答解析モデルの各質点位置に縮約される有効質量を表-別紙-5-1 及び表-別紙-5-2 に示す。

X 方向の有効質量の合計値は、 kg であり、また、Z 方向の全質量 kg に対する比率は、有効質量比 0.32(=) となる。この有効質量比は、まとめ資料本文表 5.1-1 における NASTRAN による実機解析モデル(重大事故時水位)の有効質量比(0.32)と一致する。

X 方向の並進質量 m_x は、Y 方向よりも X 方向(質点:1,17)に質量が集中する傾向があり、流体解析コード OpenFOAM による圧力分布(参考資料 7 図 3 参照)とも整合している。また、回転質量 Rm_y は、隣り合う質点の関係として回転質量の増減が表れるが、これは直管部(偶数の質点)と接続部(奇数の質点)の質点位置における容器形状の違いによるものと考えられる。なお、それ以外の並進質量 m_y , m_z 及び回転質量 Rm_x , Rm_z は、容器形状に応じた分布があるが、加振方向に対して容器構造が軸対称となっているため、合計値は、0 となる。

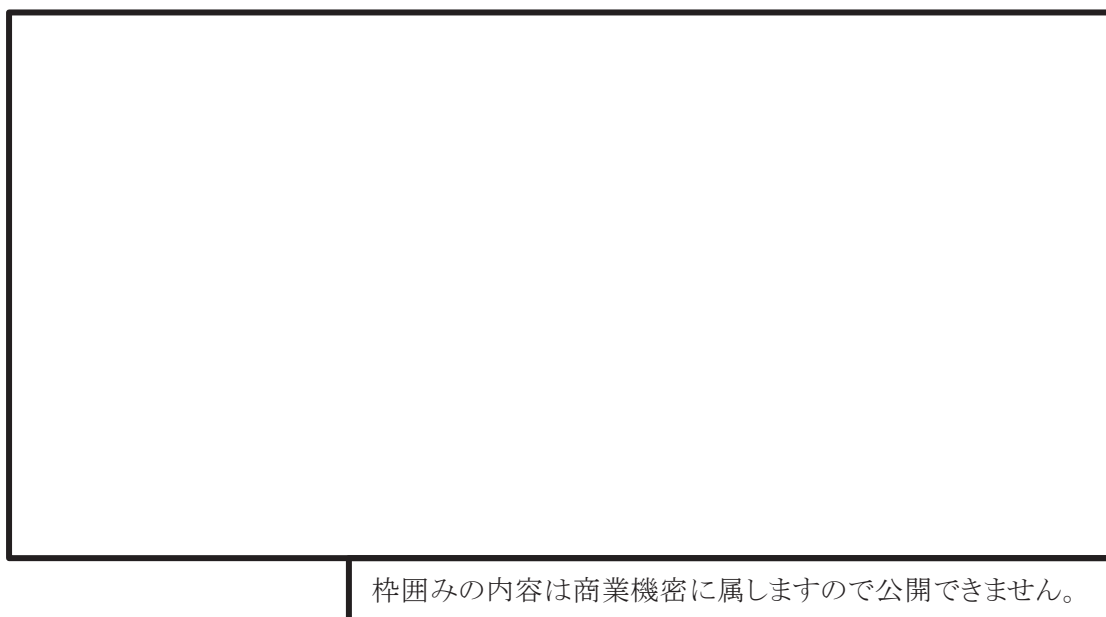


図-別紙 5-3 サプレッションチェンバ地震応答解析モデル

表-別紙-5-1 縮約した有効質量（重大事故時水位，X方向）

質点 番号	並進質量			回転質量		
	m_x ($\times 10^3$ kg)	m_z ($\times 10^3$ kg)	m_y ($\times 10^3$ kg)	Rm_x ($\times 10^3$ kg・m)	Rm_z ($\times 10^3$ kg・m)	Rm_y ($\times 10^3$ kg・m)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						
31						
32						
合計						

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

表-別紙-5-2 縮約した有効質量（重大事故時水位，Z方向）

質点 番号	並進質量			回転質量		
	m_x ($\times 10^3$ kg)	m_z ($\times 10^3$ kg)	m_y ($\times 10^3$ kg)	Rm_x ($\times 10^3$ kg・m)	Rm_z ($\times 10^3$ kg・m)	Rm_y ($\times 10^3$ kg・m)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						
31						
32						
合計						

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

4. Guyan の縮約法の妥当性確認

4.1 自由表面を有する円筒容器評価モデルを用いた妥当性確認

4.1.1 妥当性確認方針

NASTRAN による Guyan の縮約法の妥当性確認にあたっては、計算を簡単にするため、自由表面を有する円筒容器評価モデル（1 質点系）（質量位置の上下方向のオフセットの検討）として、NASTRAN の Guyan の縮約法（容器の重心位置に縮約）と FEM から直接的に求めた質点位置（有効質量に対する等価高さ）における有効質量、地震荷重及び回転質量を比較する。

また、参考として、Housner 理論による方法で求めた有効質量及び地震荷重も比較する。ここで、上記 3 つの手法による水平反力及び回転モーメントは、NASTRAN を用いて水平 1G 負荷による静的解析で算出している。

(1) 評価モデル

評価モデルを図-別紙-5-4、評価モデルの諸元を表-別紙-5-3 に示す

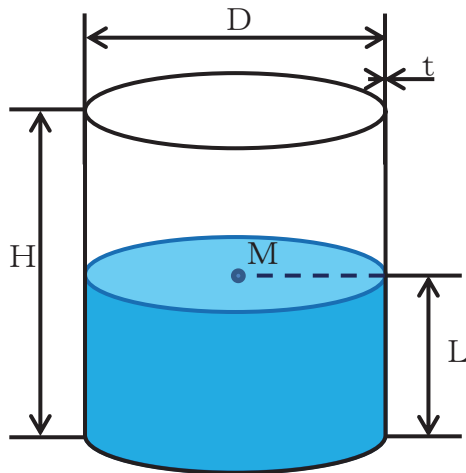


図-別紙-5-4 評価モデル

表-別紙-5-3 評価モデルの諸元

部位	寸法
容器直径 D	1000mm
容器板厚 t	50mm
容器高さ H	2000mm
容器重心高さ M	1000mm
水位 L	1000mm
水の密度 ρ	$10^{-6}\text{kg}/\text{mm}^3$

(2) 解析モデル

NASTRAN の評価に用いる解析モデルを図-別紙-5-5 に示す。

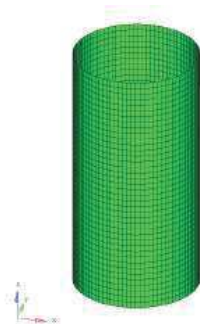


図-別紙-5-5 NASTRAN 解析モデル

4条-別紙 4-別 5-6

(3) 検討条件

検討条件を表-別紙-5-4, 検討モデルのイメージを図-別紙-5-6 に示す。

表-別紙-5-4 検討条件

検討条件	検討モデル	
	容器のモデル化	内部水のモデル化
Guyan 縮約	1 質点系モデル	Guyan の縮約法により容器の質点位置に有効質量を付加
直接的評価	1 質点系モデル	FEM から直接的に求めた等価高さに有効質量を付加
Housner 理論	1 質点系モデル	Housner 理論に基づく有効質量に対する等価高さ*に有効質量を付加

※Housner 理論による底面圧力を考慮した評価式を用いて等価高さを算出

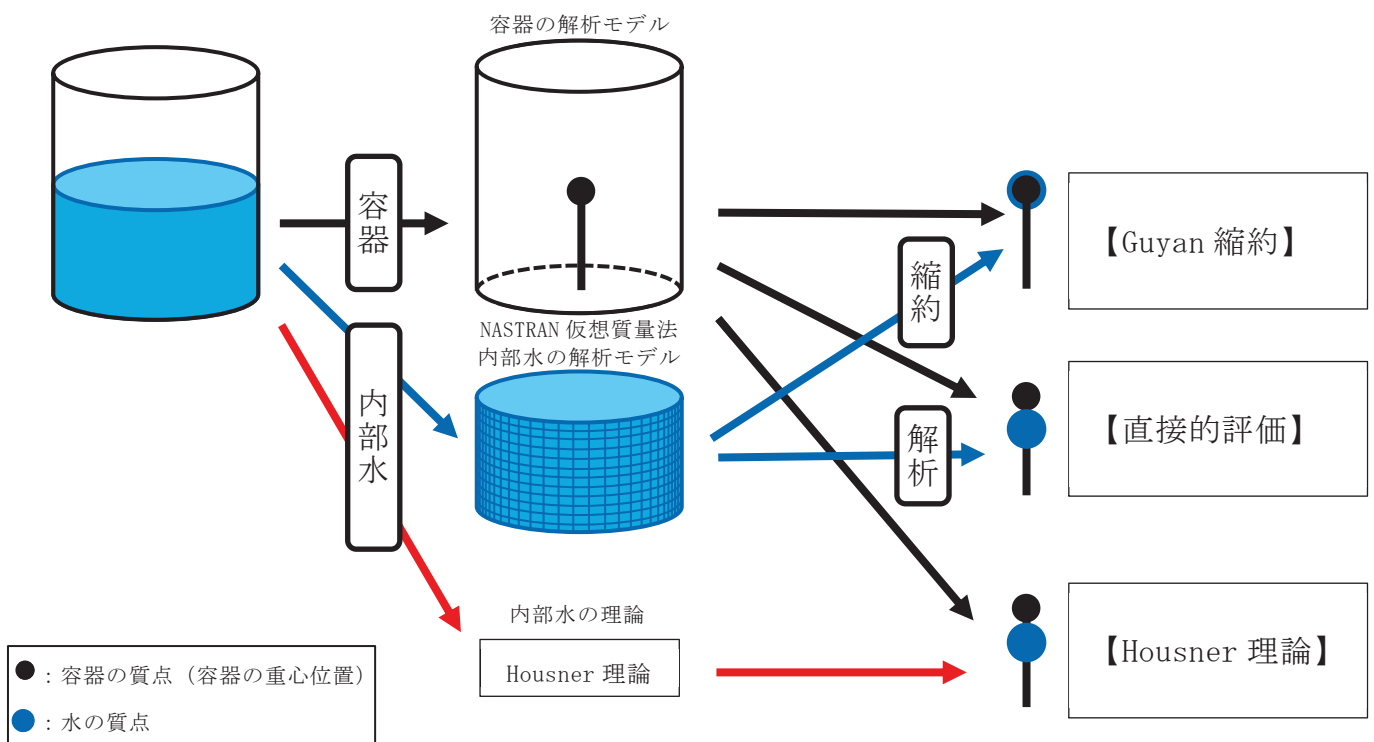


図-別紙-5-6 妥当性確認に用いる検討モデルのイメージ

4.1.2 妥当性確認結果

NASTRAN の Guyan の縮約法と直接的評価による単位加速度 1G に対する有効質量，地震荷重及び回転質量を表-別紙-5-5，有効質量に対する水平反力等のイメージを図-別紙-5-7 に示す。比較結果から NASTRAN の Guyan の縮約法と直接的評価の有効質量，地震荷重及び回転質量は一致しており，NASTRAN の Guyan の縮約法が妥当であることを確認した。なお，本評価モデルでの回転質量は，内部水の有効質量を等価高さから容器重心高さにオフセットしたため，負の回転質量となるが，容器重心位置よりも内部水の有効質量の等価高さが高い場合は，正の回転質量となる。

なお，Housner 理論による有効質量及び地震荷重も NASTRAN の Guyan の縮約法による有効質量及び地震荷重とほぼ一致していることを確認した。

表-別紙-5-5 Guyan による縮約法の妥当性確認結果

	有効質量 (kg)	等価高さ (mm)	地震荷重 (1 G)		回転質量 (kg・m)
			水平反力 (N)	回転モーメント (N・mm)	
Guyan 縮約	603.591	—	3.010×10^4	2.714×10^7	-302.613 ^{*1}
直接的評価	603.591	498.646	3.010×10^4	2.714×10^7	- ^{*2}
Housner 理論	614.000	506.000	3.021×10^4	2.723×10^7	-

*1 Guyan の縮約法後の水の質量マトリクスにおける回転質量の値

*2 直接的評価から求めた有効質量及び等価高さにより算定 (図-別紙-5-6 有効質量に対する水平反力等のイメージ参照)

- : 内部水質量
- : 容器質量 (容器重心位置)
- : 水平反力
- ↻ : 回転モーメント
- ↻ : 回転質量

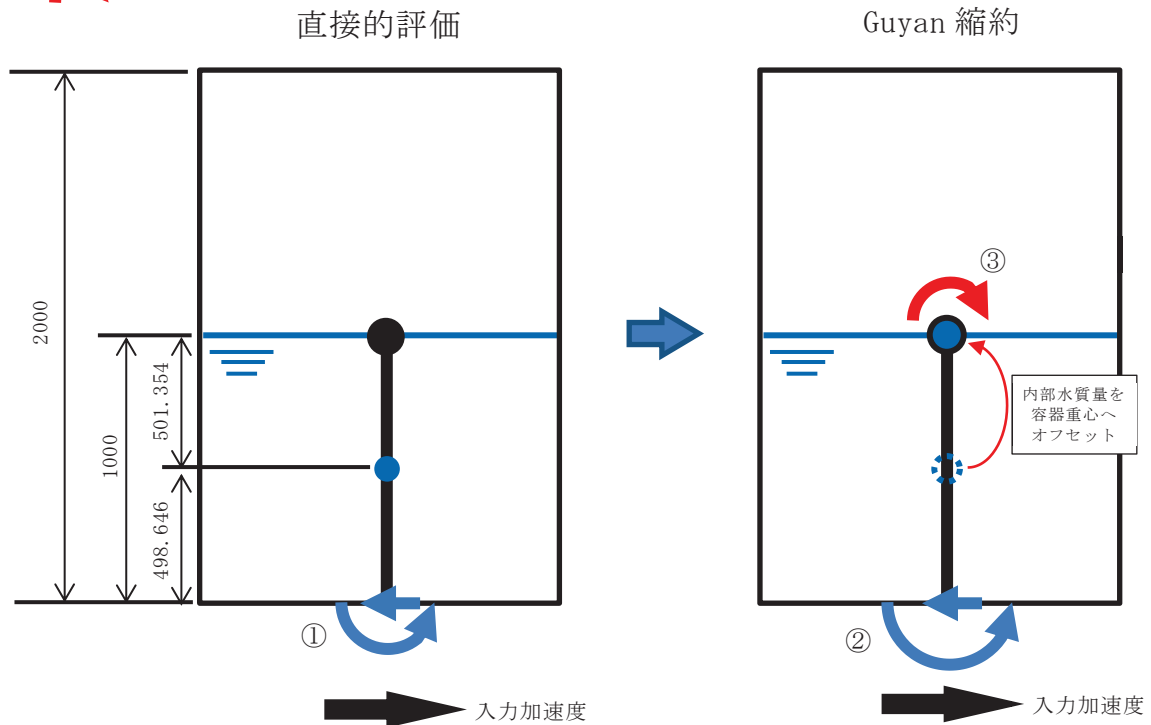


図-別紙-5-7 有効質量に対する水平反力等のイメージ

〈回転質量の算出〉

直接的評価による有効質量及び等価高さから回転質量を算出し，Guyan 縮約から求めた回転質量と比較する。

- ① 直接的評価による有効質量及び等価高さから容器底部での回転モーメントを算出。

$$603.591 \times 0.498646 \times 9.80665 = 2,951.588 (\text{N} \cdot \text{m})$$

- ② 直接的評価による有効質量を容器重心位置 (Guyan 縮約による内部水質量の縮約位置) にオフセットし，容器底部での回転モーメントを算出。

$$603.591 \times 1 \quad \times 9.80665 = 5,919.206 (\text{N} \cdot \text{m})$$

- ③ ①と②の回転モーメントの差を重力加速度で除した値が回転質量となる。

$$(2,951.588 - 5,919.206) / 9.80665 = -302.613 (\text{kg} \cdot \text{m})$$

上記回転質量-302.613 (kg・m) は，Guyan 縮約から求めた回転質量-302.613 (kg・m) と一致するため，内部水を Guyan の縮約によりはりモデルへ縮約する手法は，妥当である。

<補足>

Housner 理論による水の有効質量及び等価高さ

Housner^[1]の論文による手法を用いて、円筒タンクに対する水の有効質量及び等価高さについて算出する。

(1) 評価モデル

評価諸元を表 1、円筒タンクの概略図を図 1 に示す。

Housner^[1]の論文 (6.5) の評価条件から、 $h/R=1000/500=2>1.5$ であるため $h' = 1.5R$ とおき、 h' より浅い部分と深い部分に分けて計算を行う。

表 1 評価諸元

	記号	値	単位
タンク半径	R	500	mm
タンク底面から液面までの高さ	h	1000	mm
1.5R (水面～ h')	h'	750	mm
h' より深い部分の高さ ($h' \sim$ 底面)	$h-h'$	250	mm
高さ h' の流体質量	$W_0(h')$	589 ($\pi \times R^2 \times h'$) \times 水密度 ^{※2}	kg

※2：水の密度は $1 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ とする。

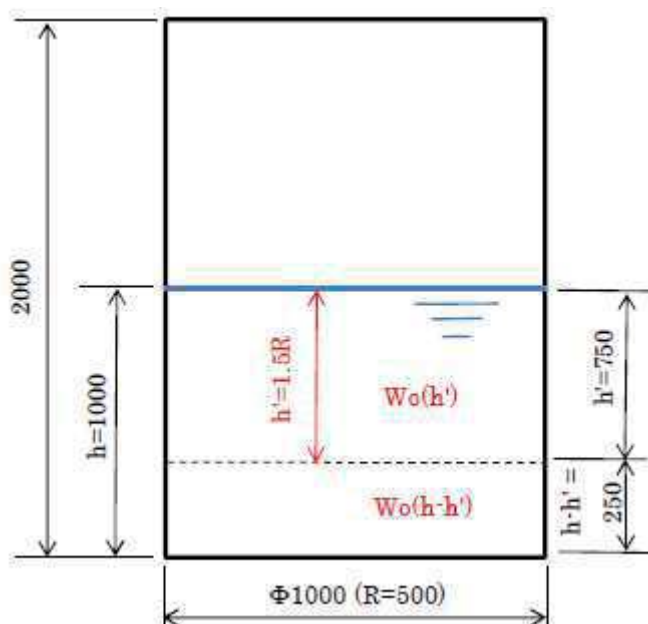


図 1 円筒タンク概要図

参考文献 [1] : Housner, G. W. : Nuclear Reactors And Earthquakes, TID Rep. 7024, 1963.
4条-別紙 4-別 5-10

(2) 有効質量の算出

以下①～③式により、有効質量 $W_o(\text{all})$ を算出する。なお、タンク重量は含まないものとする。

$$W_o(h') = \frac{\tanh\left(\sqrt{3}\frac{R}{h'}\right)}{\left(\sqrt{3}\frac{R}{h'}\right)} Wh' \quad \text{①}$$
$$= 418 \text{ kg}$$

$$W_o(h-h') = \pi \times R^2 \times (h-h') \times \rho \quad \text{②}$$
$$= 196 \text{ kg}$$

$$W_o(\text{all}) = W_o(h') + W_o(h-h') \quad \text{③}$$
$$= 418 + 196$$
$$= 614 \text{ kg}$$

(3) 等価高さの算出

以下④～⑤式により、等価高さ $h_o(\text{all})$ を算出する。

$$h_o(h') = (h-h') + \frac{h'}{8} \left\{ \frac{4}{\frac{\tanh\left(\sqrt{3}\frac{R}{h'}\right)}{\left(\sqrt{3}\frac{R}{h'}\right)} - 1} \right\} \quad \text{④}$$
$$= 685 \text{ mm}$$

$$h_o(h-h') = \frac{h-h'}{2} \quad \text{⑤}$$
$$= 125 \text{ mm}$$

$$h_o(\text{all}) = \frac{W_o(h') \times h_o(h') + W_o(h-h') \times h_o(h-h')}{W_o(\text{all})} \quad \text{⑥}$$
$$= \frac{418 \times 685 + 196 \times 125}{614}$$
$$= 506 \text{ mm}$$

(4) 算出結果

(2), (3)の算出結果を表 2 に示す。

表 2 Housner の式で算出した水の有効質量及び等価高さ

	記号	値	単位
水の有効質量	Wo(all)	614	kg
水の等価高さ	ho(all)	506	mm

4.2 振動試験データを用いた妥当性確認

4.2.1 妥当性確認方針

サブプレッションチェンバの地震応答解析モデルにおいては、内部水の重心位置を適切に考慮するため、NASTRAN の機能である Guyan 縮約法により算出される有効質量を 3 次元はりモデルの質点位置に設定しており、NASTRAN の Guyan 縮約法を用いて縮約した水平方向の有効質量については、「3. 地震応答解析モデルへの設定方法」にて、Guyan 縮約法を適用していない NASTRAN（3 次元シェルモデル）から算出した有効質量と同等であることを確認している。

また、「4.1 自由表面を有する円筒容器評価モデルを用いた妥当性確認」にて、円筒容器における Guyan 縮約法を用いて縮約した有効質量による底面反力について、3 次元シェルモデルから算出した底面反力及び理論的に求めた底面反力と同等であることを確認している。

本検討ではさらに、Guyan 縮約法を用いて縮約した有効質量による底面反力の妥当性を確認するため、内部水をシェル要素に付加した解析モデルと Guyan 縮約法を用いてはり要素に付加した解析モデルによる鉛直荷重を比較する。また、水平方向の有効質量の妥当性検証を目的として実施した振動試験において参考値として計測した鉛直荷重と比較する。

(1) 解析モデル

振動試験データを用いた検討を行うため、解析モデルは、実機を縮小模擬した振動試験体とし、3 次元シェルおよび 3 次元はりにてモデル化した。振動試験体のモデル化に当たっては、振動試験体及び架台は、設計図面をベースとしてモデル化を行い、減衰定数は、JEAG4601 に記載の溶接構造物に対する設計用減衰定数 1 % を適用した。

① 3 次元シェルモデル

NASTRAN で算定した有効質量を試験体のシェル要素に付加した 3 次元シェルモデル

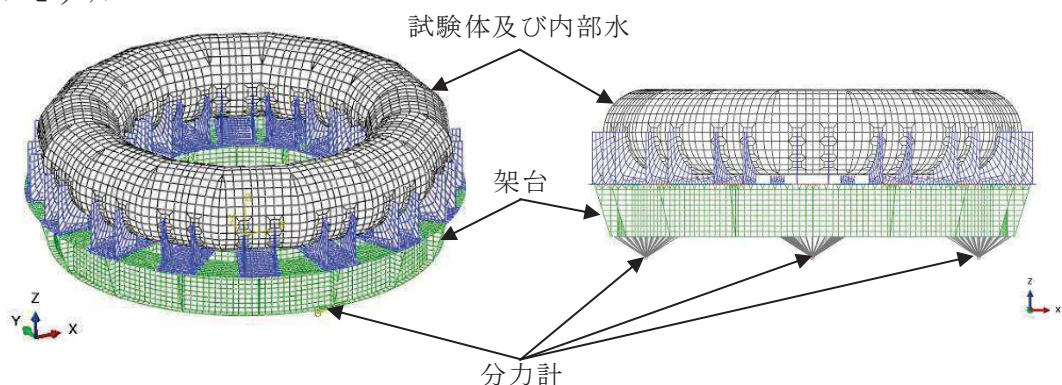


図-別紙-5-8 3次元シェルモデル

② 3次元はりモデル

NASTRAN で算定した有効質量を Guyan 縮約法を用いて試験体のはり要素に付加した 3次元はりモデル（今回工認におけるサブプレッションチェンバの地震応答解析モデル設定と同様）

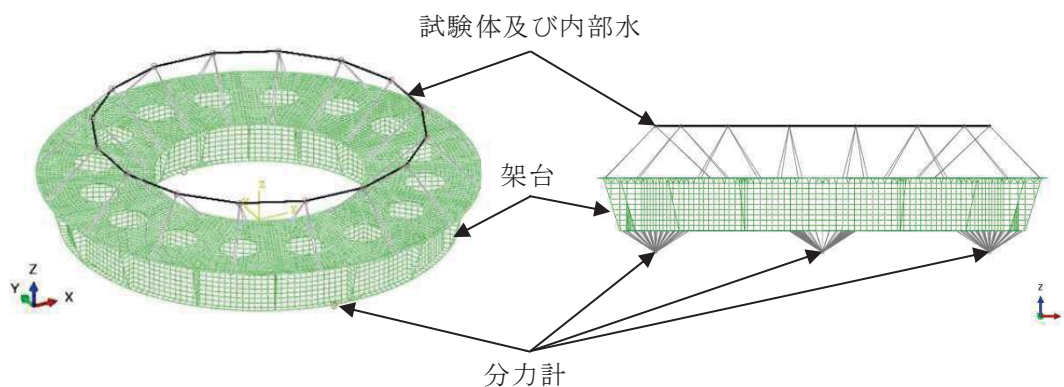


図-別紙-5-9 3次元はりモデル

(2) 解析条件

地震応答解析条件を表-別紙-5-6 に示す。

表-別紙-5-6 解析条件

項目		内容	
解析モデル		3次元シェルモデル	3次元はりモデル
モデル	試験体	シェル要素	はり要素
	架台	シェル要素	
	分力計	剛体要素 荷重計測位置（分力計の中心位置）～架台	
内部水の有効質量の算定方法		NASTRAN の仮想質量法により有効質量を算定	
内部水の有効質量のモデル化		試験体のシェル要素に付加	Guyan 縮約法を用いて試験体のはり要素に付加
減衰定数		1%（振動試験体，架台）	
境界条件		試験体と架台，架台と分力計：剛結合	
水位条件		高水位	
入力加速度		架台上の加速度時刻歴を模擬 (水平方向 (X 方向)，鉛直方向 (Z 方向))	
加速度入力位置		分力計の荷重計測位置	
解析コード		N A S T R A N	

(3) 入力加速度及び荷重比較対象

地震応答解析における入力加速度は、荷重計測位置よりも低い位置である振動台上で計測された加速度を用いる。振動台上で計測された加速度を用いて地震応答解析を行った結果、振動試験で架台上で計測された加速度よりも地震応答解析での架台上の加速度が小さいことを確認した。これは、振動試験は、水平方向の有効質量に着目した試験であり、内部水（有効質量）からの地震荷重を、分力計へ適切に伝達させる観点から架台の剛性を高く設計しているため、試験体の実際の減衰定数が設計用減衰定数よりも小さかったことによるものと推定される。

本検討では、Guyan の縮約法を用いてはり要素に付加した解析モデルとシェル要素に付加した解析モデルとの鉛直荷重を比較することにより Guyan の縮約法の妥当性確認を目的としているため、振動台から内部水に加わる加速度をより適切に入力するため、内部水と最も近接している架台上で計測された加速度を模擬するように、振動台上で計測された加速度時刻歴を係数倍（水平：1.10倍、鉛直：1.03倍）し、3次元シェルモデル及び3次元はりモデルに入力した。

地震応答解析における荷重の比較対象は、水平方向（X方向）の加振に伴う内部水の有効質量による鉛直荷重は、加振直交方向（Y方向）を軸として、加振方向（X方向）に設置された分力計に作用するため、加振方向の分力計の荷重とした（図-別紙-5-10）。

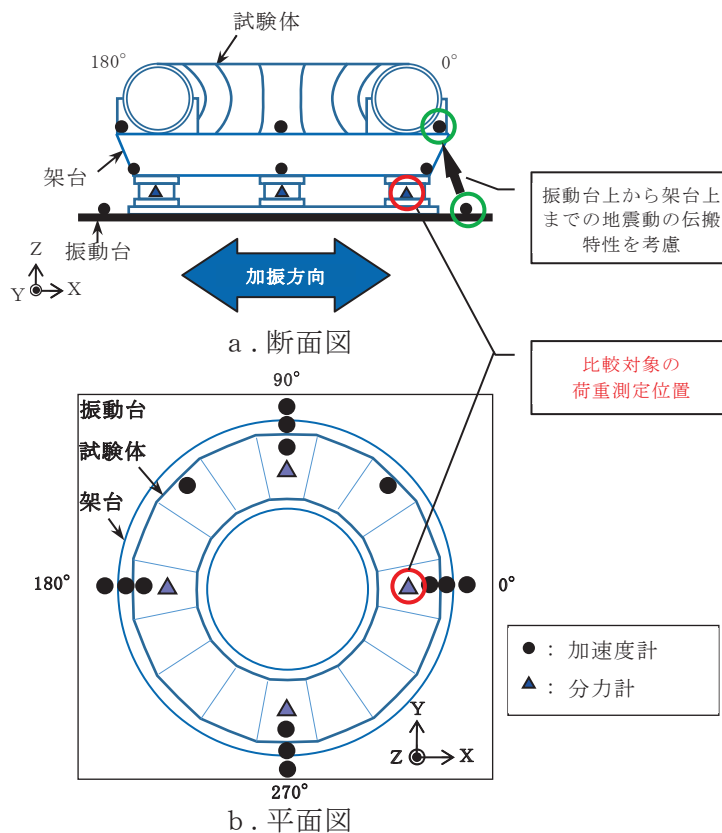


図-別紙-5-10 荷重の比較位置

4.2.2 解析結果

(1) 架台上の加速度時刻歴

地震応答解析における架台上の加速度時刻歴が振動試験にて計測された架台上の加速度時刻歴を模擬できていることの確認として、振動試験で計測された架台上の加速度時刻歴、3次元シェルモデル及び3次元はりモデルによる架台上の水平加速度時刻歴及び鉛直加速度時刻歴の比較を図-別紙-5-11 及び図-別紙-5-12 に示す。

比較の結果、3次元シェルモデル及び3次元はりモデルにて解析した架台上の加速度時刻歴は、振動試験で計測された架台上の加速度時刻歴をおおむね模擬できていることを確認した。

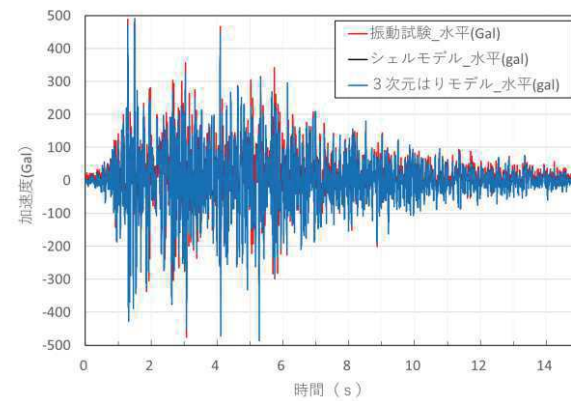
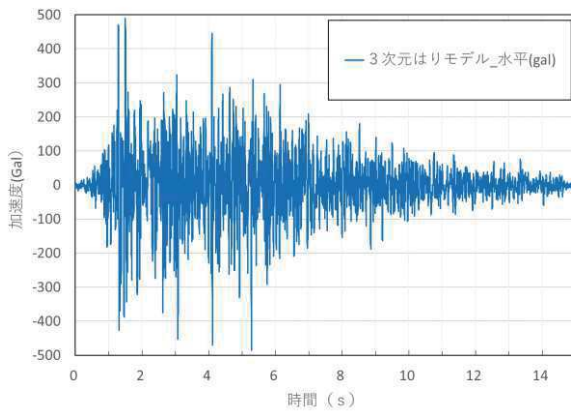
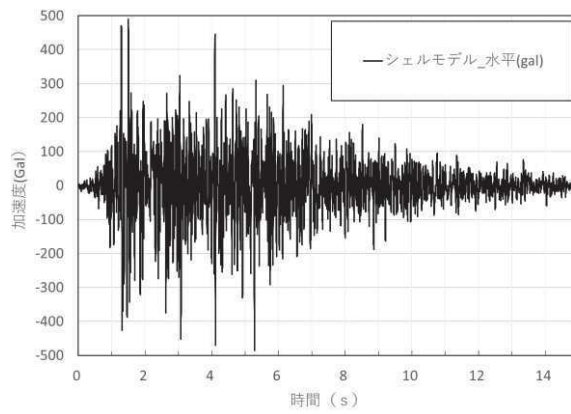
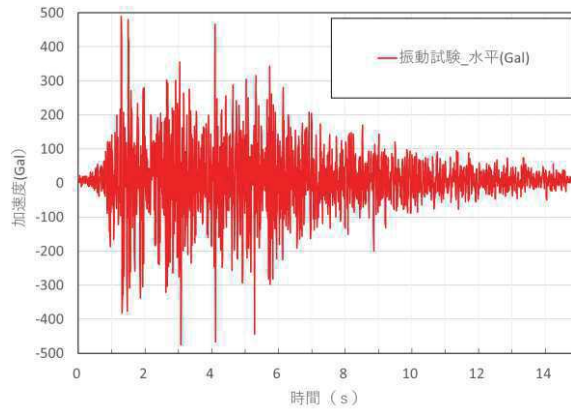


図-別紙-5-11 架台上の水平加速度時刻歴 (X 方向) の比較
4条-別紙 4-別 5-17

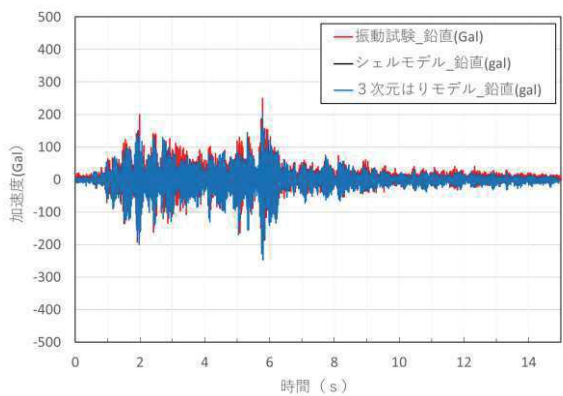
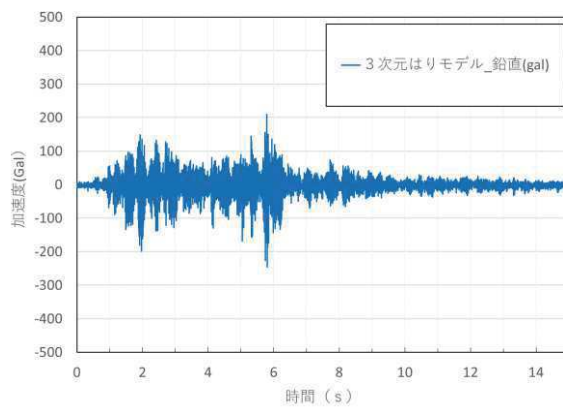
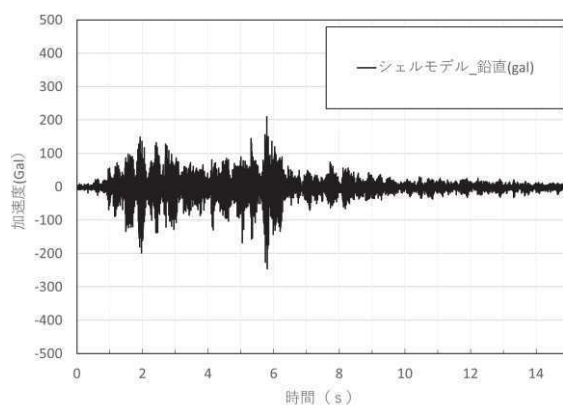
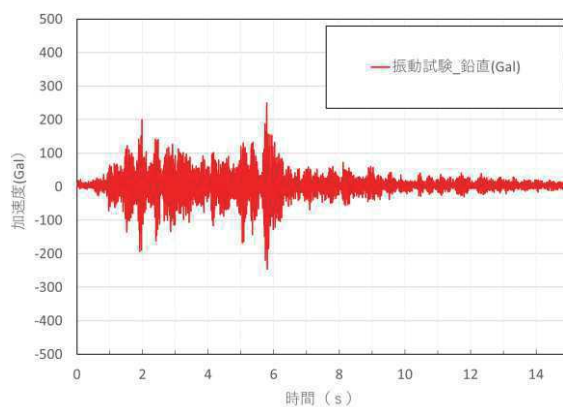


図-別紙-5-12 架台上の鉛直加速度時刻歴 (Z 方向) の比較
4条-別紙 4-別 5-18

(2) 荷重時刻歴

NASTRAN で算定した有効質量を円環形状容器のシェル要素に付加した 3次元シェルモデル，NASTRAN で算定した有効質量を Guyan 縮約法を用いて円環形状容器のはり要素に付加した 3次元はりモデルによる水平荷重時刻歴及び鉛直荷重時刻歴の比較結果を図-別紙-5-13 と図-別紙-5-14 に示す。

3次元シェルモデルと 3次元はりモデルによる水平及び鉛直荷重の解析結果は，よく一致している。

3次元シェルモデルによる水平荷重時刻歴及び鉛直荷重時刻歴，振動試験で計測された荷重時刻歴の比較結果を図-別紙-5-15 と図-別紙-5-16 に示す。

3次元シェルモデルによる水平及び鉛直荷重の解析結果は，振動試験で得られた計測荷重時刻歴とおおむね一致している。

3次元はりモデルによる水平荷重時刻歴及び鉛直荷重時刻歴，振動試験で計測された荷重時刻歴の比較結果を図-別紙-5-17 と図-別紙-5-18 に示す。

3次元はりモデルによる水平及び鉛直荷重の解析結果は，3次元シェルモデルと同様に振動試験で得られた計測荷重時刻歴とおおむね一致している。

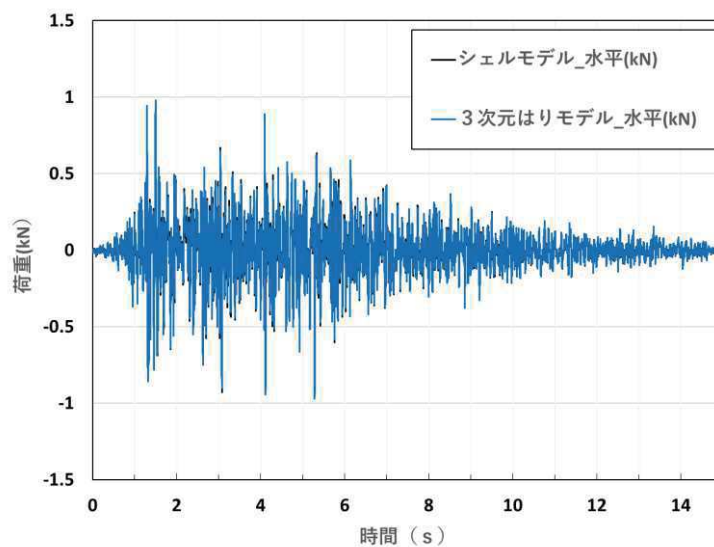
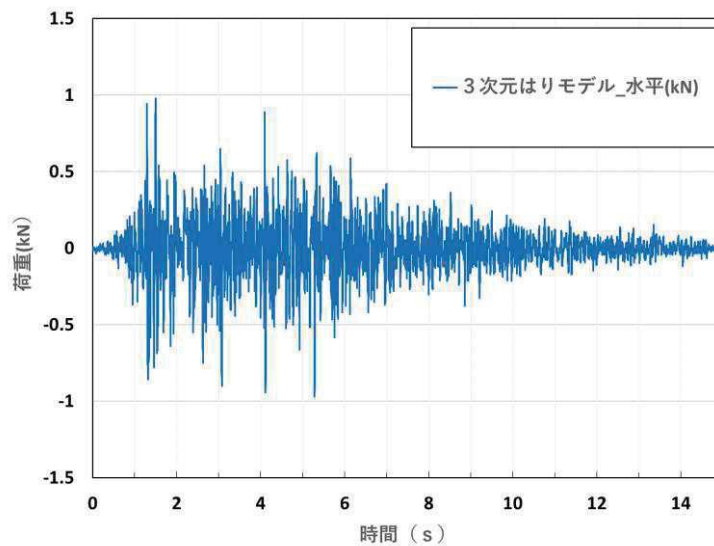
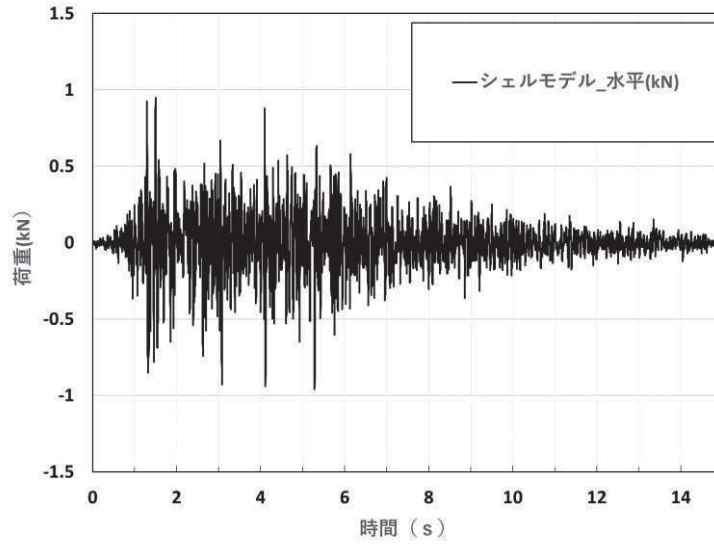


図-別紙-5-13 水平荷重時刻歴 (X 方向) の比較
 (3次元シェルモデル, 3次元はりモデル)
 4条-別紙 4-別 5-20

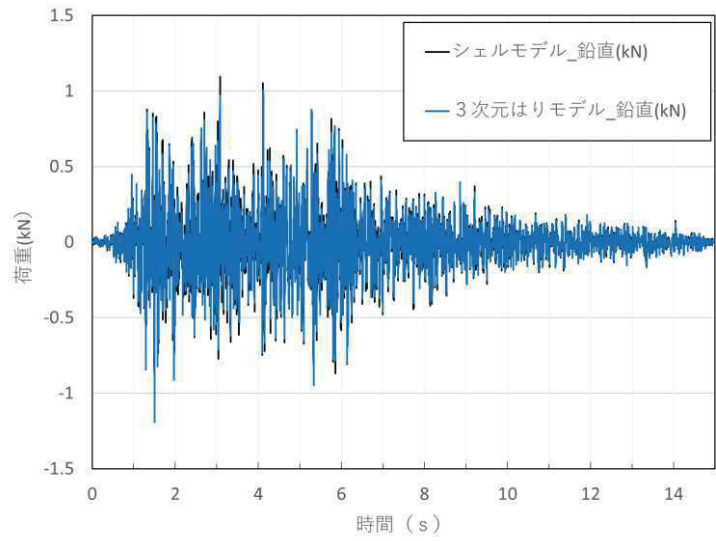
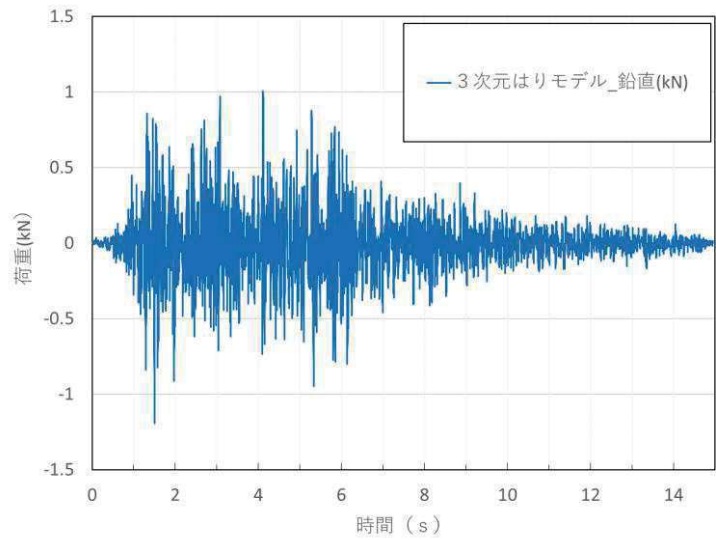
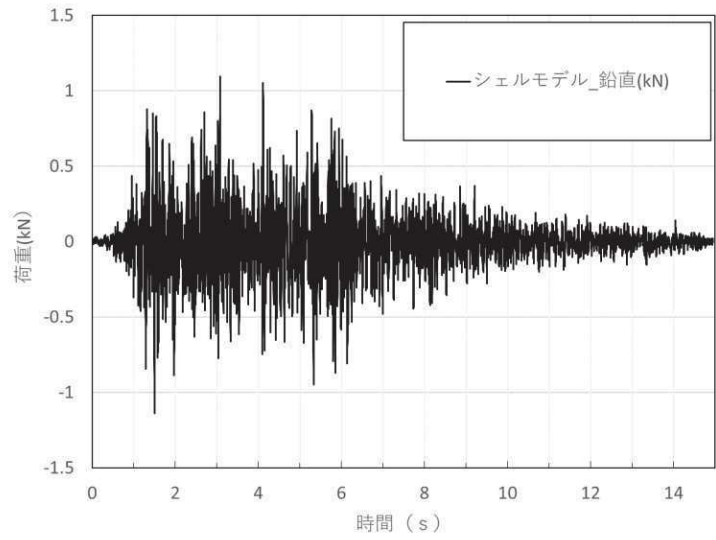


図-別紙-5-14 鉛直荷重時刻歴 (Z方向) の比較
 (3次元シェルモデル, 3次元はりモデル)
 4条-別紙 4-別 5-21

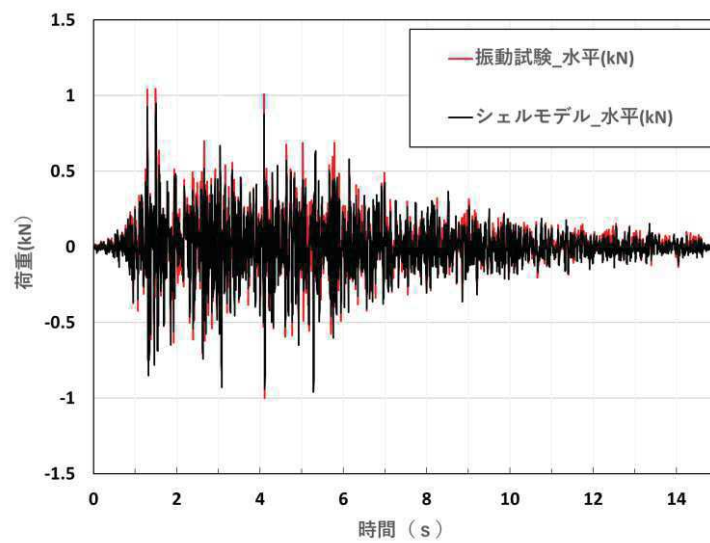
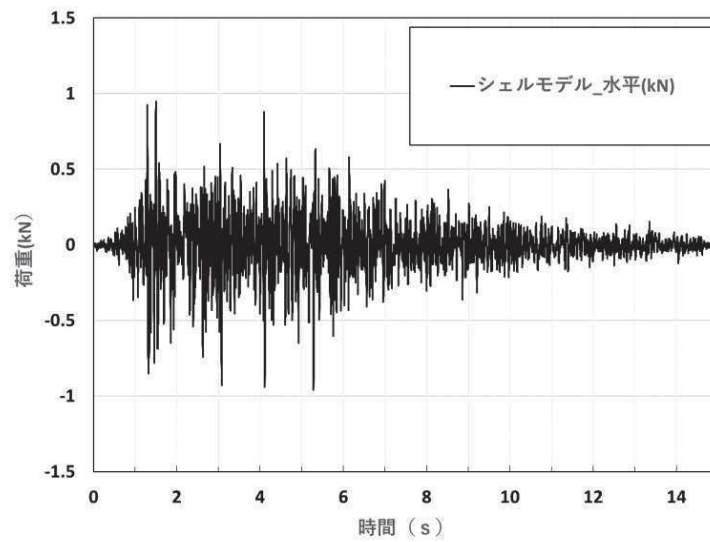
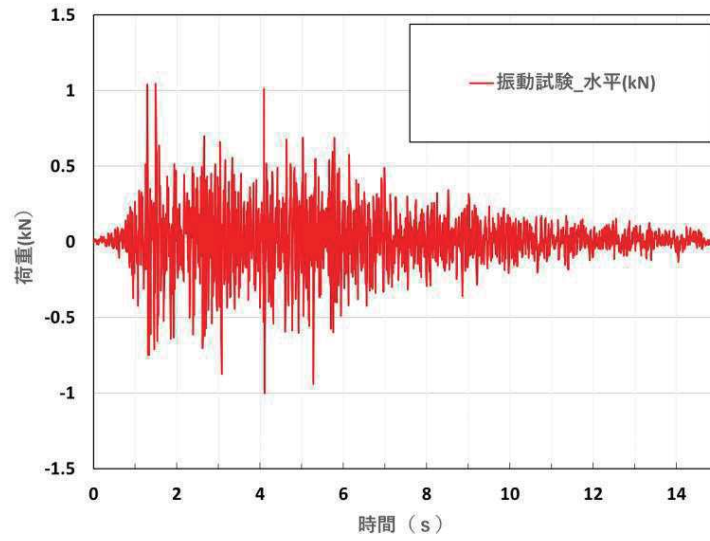


図-別紙-5-15 水平荷重時刻歴 (X 方向) の比較
 (振動試験, 3次元シェルモデル)
 4条-別紙 4-別 5-22

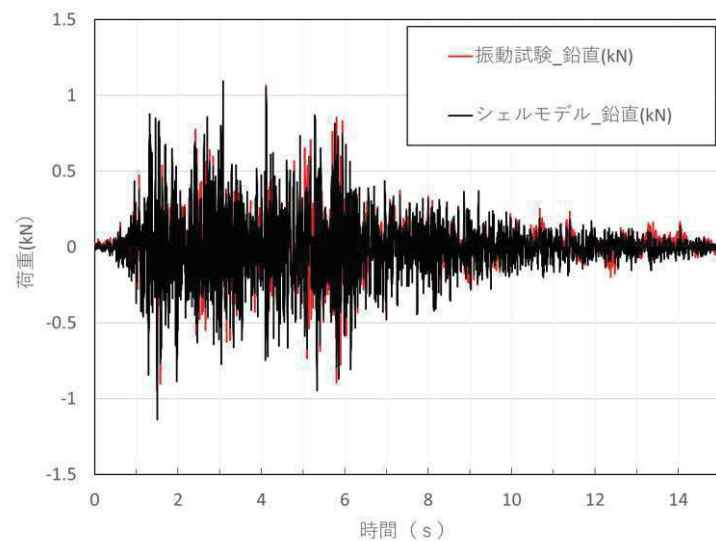
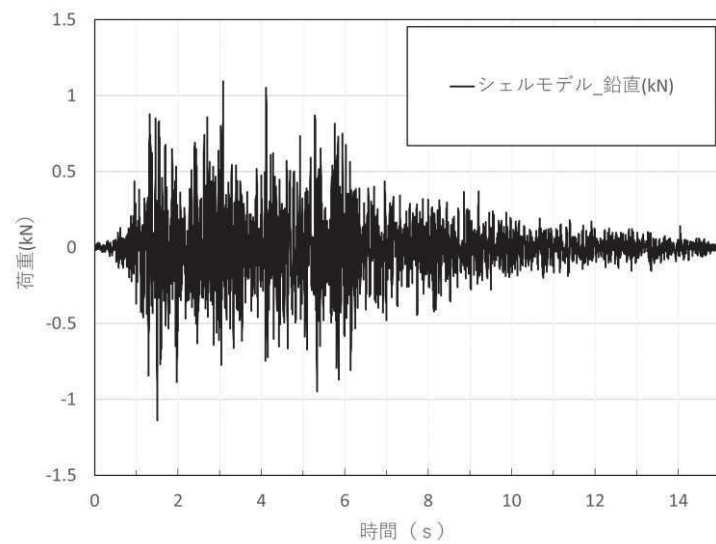
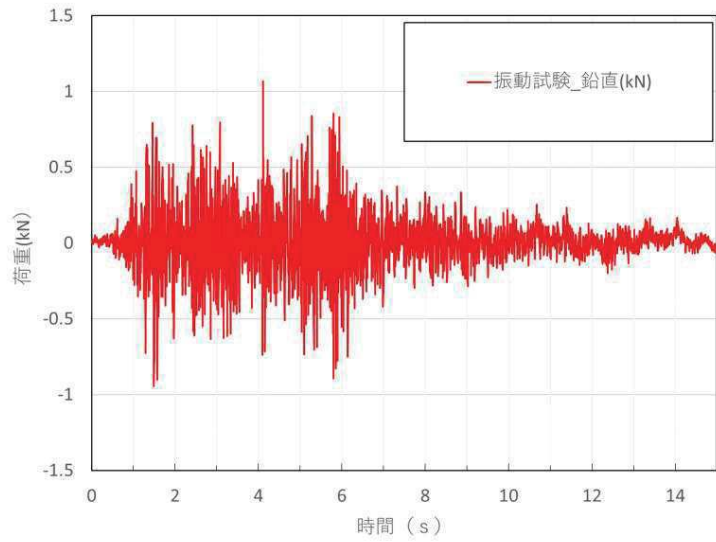


図-別紙-5-16 鉛直荷重時刻歴 (Z 方向) の比較
 (振動試験, 3次元シェルモデル)
 4条-別紙 4-別 5-23

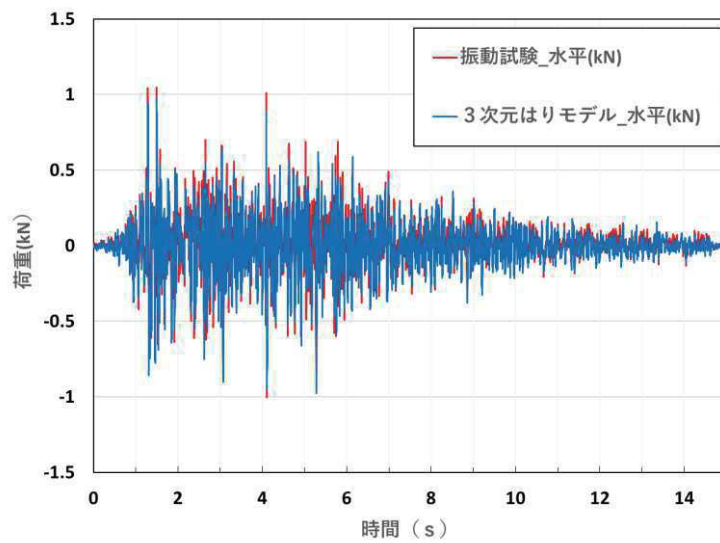
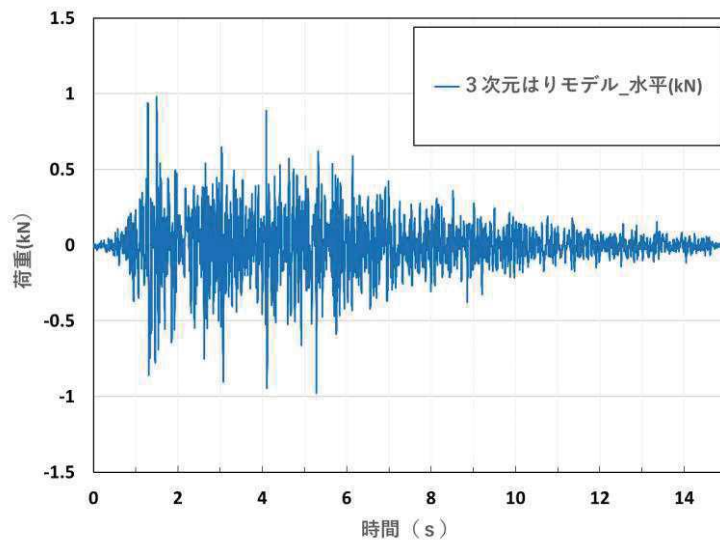
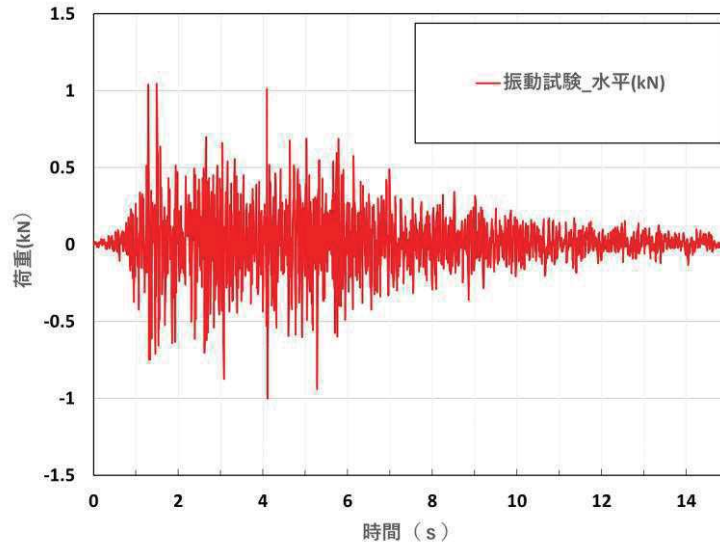


図-別紙-5-17 水平荷重時刻歴 (X 方向) の比較
(振動試験, 3次元はりモデル)
4条-別紙 4-別 5-24

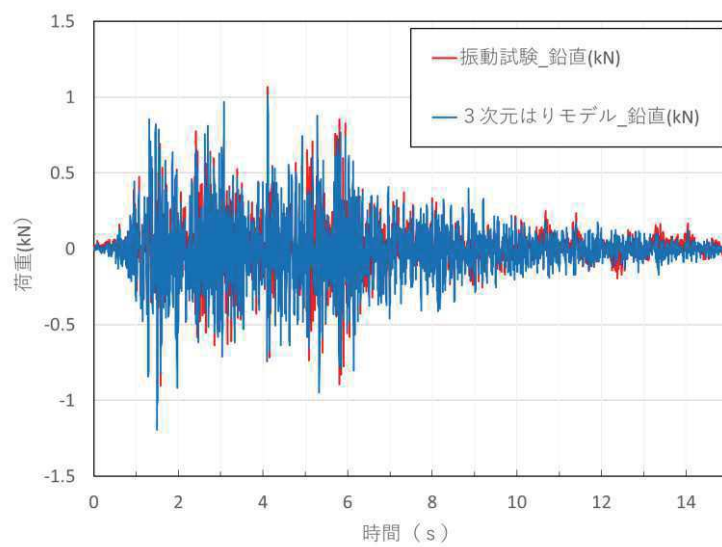
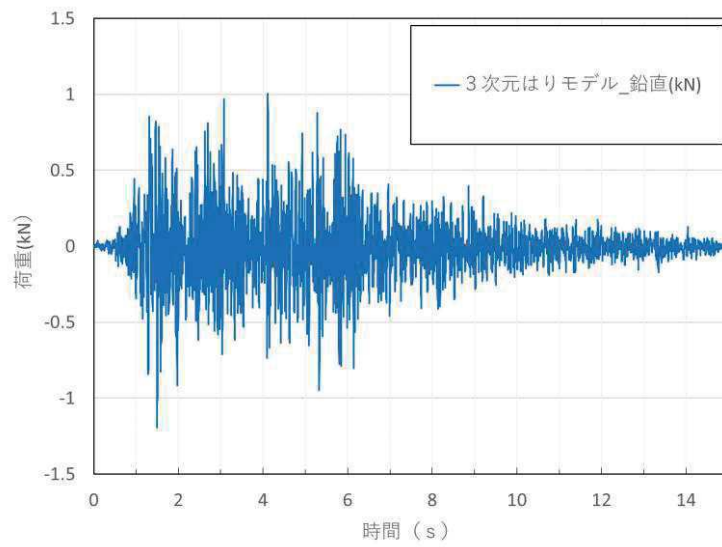
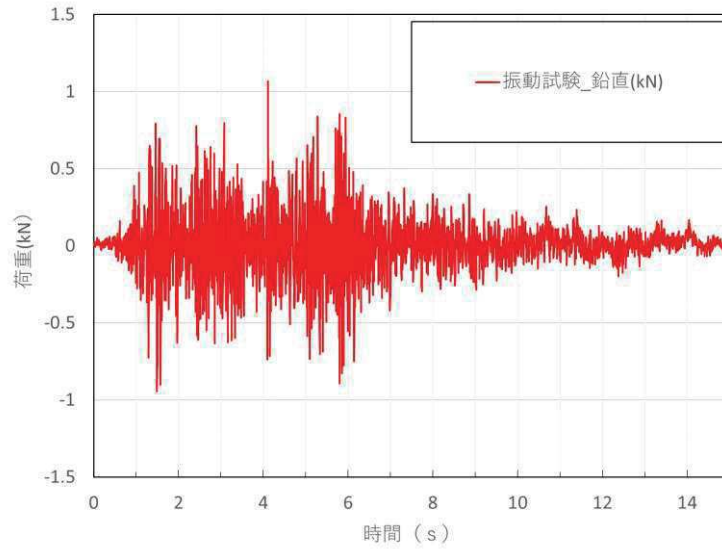


図-別紙-5-18 鉛直荷重時刻歴 (Z 方向) の比較
 (振動試験, 3次元はりモデル)
 4条-別紙 4-別 5-25

(3) 最大荷重

3次元シェルモデル及び3次元はりモデルによる水平荷重及び鉛直荷重の最大値、振動試験で計測された水平荷重及び鉛直荷重の最大値の比較結果を表-別紙-5-7に示す。

3次元シェルモデル及び3次元はりモデルによる荷重の解析結果の最大値は、水平及び鉛直方向ともによく一致している。また、振動試験で計測された荷重の最大値に対して3次元シェルモデル及び3次元はりモデルによる荷重の解析結果の最大値は、水平及び鉛直方向ともにおおむね一致している。

ここで、水平方向の最大荷重について、地震応答解析（3次元シェルモデル及び3次元はりモデル）が振動試験よりもわずかに小さくなった要因は、振動試験ではスロッシング荷重も含んでいることに対して、地震応答解析はスロッシング荷重を含まず、有効質量による地震荷重のみを評価するためと考えられる。なお、実機の耐震評価では、個別にスロッシング荷重を算出し、地震応答解析に考慮するため、これは実機の耐震評価に影響を与えるものではない。

また、鉛直方向の最大荷重における地震応答解析と振動試験のわずかな差異の要因については、地震応答解析における架台等のモデル化（設計図面ベース、分力計を剛体で模擬等）によるものと推定されるが、3次元シェルモデルと3次元はりモデルによる鉛直荷重がよく一致していることを踏まえれば、実機耐震評価に影響を与えるものではない。

表-別紙-5-7 最大荷重の比較

		① 3次元 シェルモデル	② 3次元 はりモデル	③ 振動試験	荷重比		
					②/①	①/③	②/③
最大 荷重 (kN)	水平方向 (X方向)	0.96	0.98	1.05	1.02	0.92	0.94
	鉛直方向 (Z方向)	1.14	1.20	1.07	1.05	1.07	1.12

4.2.3 妥当性確認結果

4.2.2の解析結果から、3次元シェルモデルと3次元はりモデルの荷重時刻歴及び最大荷重がよく一致していることから、サプレッションチェンバに対する耐震評価におけるNASTRANのGuyan縮約法を用いた3次元はりモデルは妥当である。

原子炉建屋基礎版の
応力解析モデルへの弾塑性解析の適用

目 次

1. 概要
2. 原子炉建屋基礎版の概要
 - 2.1 原子炉建屋基礎版の構造概要
 - 2.2 基礎版における地震観測
3. 既工認モデルと今回工認で採用予定のモデルの差異に対する扱い
 - 3.1 既工認モデルと今回工認で採用予定のモデルの差異について
 - 3.2 既工認との差異の扱い
4. 弾塑性解析採用の論点に対する対応について
 - 4.1 弾塑性解析を採用する目的とその効果
 - 4.2 弾塑性解析を採用するに当たっての具体的論点
5. 材料構成則の妥当性・適用性について
 - 5.1 コンクリート（引張側）
 - 5.2 コンクリート（圧縮側）
 - 5.3 鉄筋（引張側，圧縮側）
6. 既往研究に基づく弾塑性解析の妥当性・適用性
7. まとめ

添付 1 CCV 規格等における許容限界設定の考え方について

添付 2 シェル壁内部の構造物から基礎版に伝達される荷重等の考え方について

添付 3 基礎版と耐震壁の剛性の組合せの考え方について

参考資料 1 2号炉原子炉建屋 地震計配置

参考資料 2 弾塑性解析の適用に関する先行プラントとの比較

参考資料 3 地震観測記録に基づく基礎版の剛性低下に係る試検討

下線は，今回の提出資料を示す。

シェル壁内部の構造物から基礎版に伝達される荷重等の考え方について

1. はじめに

原子炉建屋基礎版の応力解析において、シェル壁内部の構造物に関するモデル化、及び基礎版へ伝達する荷重の考え方を以下に示す。

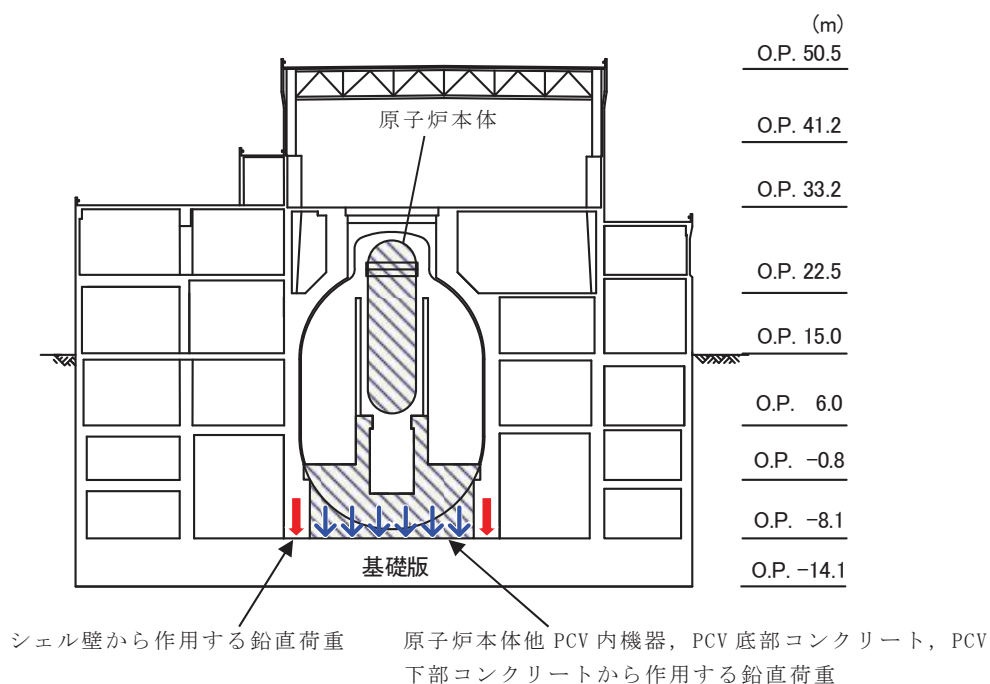
2. 基礎版モデルの考え方

基礎版の解析モデルでは、基礎版は一律 6m の厚さとしてモデル化しており、原子炉本体他 PCV 内機器や PCV 底部コンクリート、PCV 下部コンクリートの剛性についてはモデル化上は考慮せず、これらの常時荷重、地震時の慣性力は考慮している。これは既工認と同様の考え方である。

3. 基礎版へ伝達する荷重の考え方

(1) 鉛直荷重の考え方

シェル壁内部の鉛直荷重については、基礎に作用する荷重を当該作用位置に応じて入力する。シェル壁から作用する鉛直荷重については、当該壁位置に入力している。原子炉本体他 PCV 内機器、PCV 底部コンクリート、PCV 下部コンクリートの自重および鉛直地震荷重（質点系モデルによる応答結果に基づき設定）は、基礎版に直接作用する荷重として入力しており、第 3-1 図に鉛直荷重の考え方を示す。また、シェル壁内部以外の荷重についても考え方は同様である。



第 3-1 図 シェル壁内部の鉛直荷重の考え方

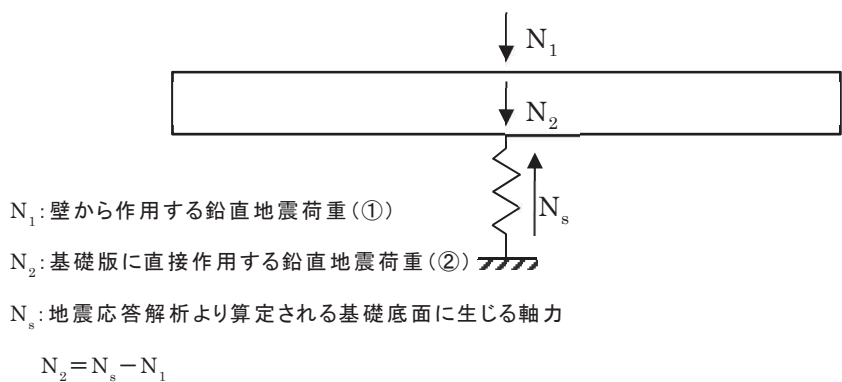
具体的な鉛直地震荷重の設定方法は次のとおり。

① 壁から作用する鉛直地震荷重

壁から作用する鉛直地震荷重は、基礎版の解析モデルにおいて当該部分が支える重量（原子炉本体他 PCV 内機器、PCV 底部コンクリート、PCV 下部コンクリートは含まない）に係数を乗じて算定する。算定に用いる係数は、一軸の質点系モデルによる鉛直方向の地震応答解析より算定される基礎版直上の軸力を、質点系モデルにおいて当該部分が支える重量で除して求める。ここで、鉛直方向の質点系モデルの質点重量は水平方向の質点系モデルの質点重量と整合した値としている。

② 基礎版に直接作用する鉛直地震荷重

基礎版に直接作用する鉛直地震荷重は、質点系モデルによる鉛直方向の地震応答解析より算定される基礎底面地盤ばねの軸力から、壁から作用する鉛直地震荷重を差し引いた値を、基礎版各部に直接作用する重量（原子炉本体他 PCV 内機器、PCV 底部コンクリート、PCV 下部コンクリートの他、基礎版の自重を含む）に応じて分配する。すなわち、基礎版の解析モデルにおける鉛直方向地盤ばねの反力の総和と、質点系モデルの基礎底面ばねの軸力が等価になるように設定する。第 3-2 図に基礎版に直接作用する鉛直地震荷重の算定の考え方を示す。



第 3-2 図 基礎版に直接作用する鉛直地震荷重の算定の考え方

(2) 水平荷重の考え方

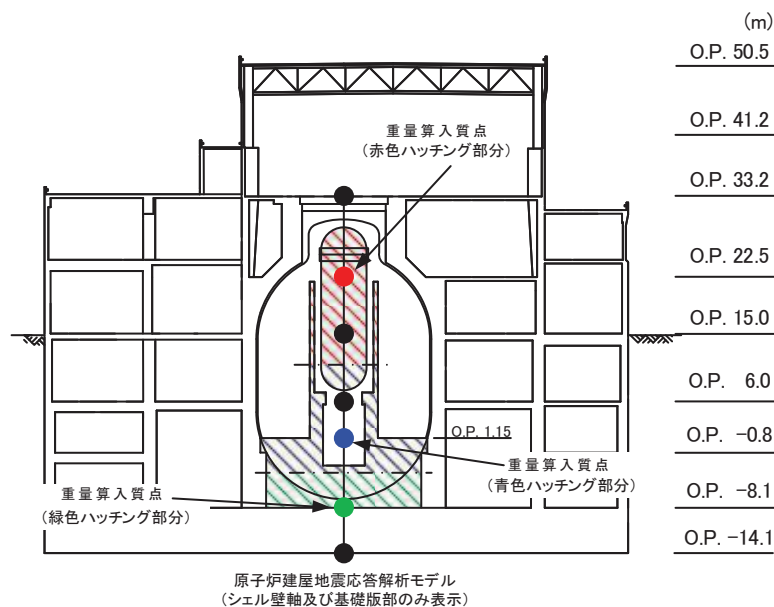
シェル壁内部の水平荷重については、質点系モデルによる地震応答解析結果より得られるシェル壁脚部のせん断力、曲げモーメントを用い、基礎上端(O.P. -8.1m)と基礎版のモデル化位置である基礎版中心(O.P. -11.1m)との離間距離により付加される曲げモーメント分についても考慮のうえ、シェル壁位置に入力^{*}する。

質点系モデルでは、原子炉本体他 PCV 内機器、PCV 底部コンクリート、PCV 下部コンクリートの重量は、シェル壁軸の質点重量に集約している。重量を算入する質点レベルは、RPV スタビライザや原子炉本体基礎脚部の位置を考慮して、第 3-3 図に示すように算入している。

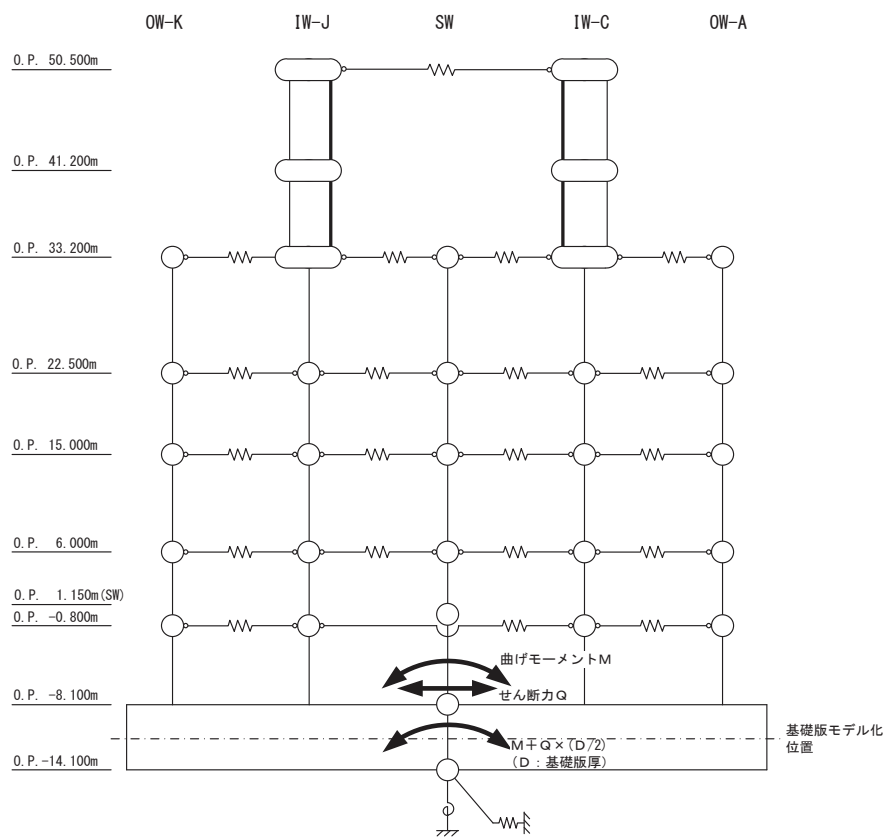
このため、シェル壁内部の構造物に作用する水平地震時慣性力は、原子炉建屋地震応答解析により得られるシェル壁軸の応答（せん断力、曲げモーメント）に含まれ、曲げモーメントは各重量算入質点の高さを考慮した値として得られる。

曲げモーメントの補正方法を第 3-4 図に、シェル壁から伝達する水平地震荷重の基礎版解析における入力イメージを第 3-5 図に示す。また、シェル壁内部以外の荷重についても考え方は同様である。

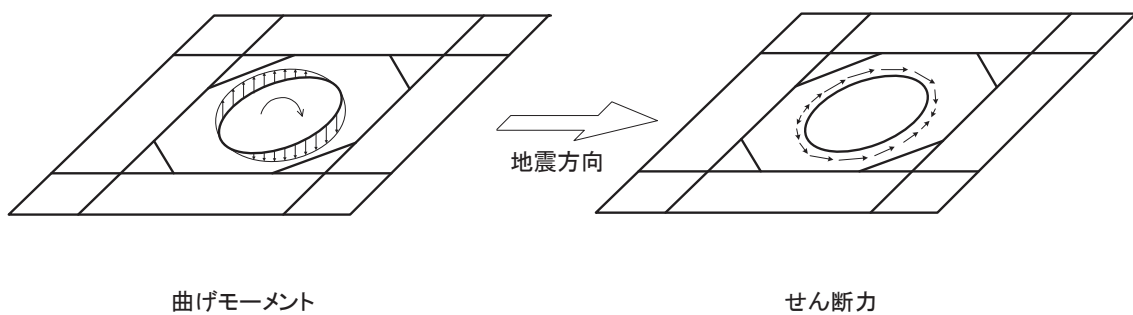
※耐震設計上、当該レベルの耐震要素として評価しているシェル壁部で地震力を負担することとしているが、原子炉本体基礎からの反力等についてはその影響に応じて詳細設計段階で検討していく。



第 3-3 図 原子炉本体他 PCV 内機器、PCV 底部コンクリート、PCV 下部コンクリートの重量算入質点の考え方



第 3-4 図 基礎版の解析モデルに用いる曲げモーメントの補正方法



第 3-5 図 シェル壁から伝達する水平地震荷重の基礎版の解析モデルにおける入力イメージ

女川原子力発電所 2 号炉

土木構造物の解析手法及び
解析モデルの精緻化について

目次

第Ⅰ編 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化.....	1
1. 屋外重要土木構造物の評価手法の概要.....	1
2. 解析手法.....	1
2.1 曲げ照査に係る土木学会マニュアルの適用性について.....	2
2.2 せん断照査に係る土木学会マニュアルの適用性について.....	6
2.2.1 せん断耐力評価式.....	6
2.2.2 材料非線形解析を用いたせん断耐力評価.....	12
3. 屋外重要土木構造物の減衰定数.....	24
3.1 減衰定数の設定について.....	24
3.2 建設工認と今回工認の相違について.....	26
4. 参考文献.....	26
第Ⅱ編 三次元静的材料非線形解析の適用性.....	27
1. はじめに.....	27
1.1 三次元静的材料非線形解析を用いる目的.....	27
1.2 対象構造物.....	29
1.3 照査体系.....	35
2. 建設工認からの変更点.....	37
2.1 照査体系の変更点.....	37
2.2 耐震性評価手法の変更点.....	39
2.3 新規採用手法の概要.....	43
2.4 三次元静的材料非線形解析の得失.....	44
2.5 二次元地震応答解析手法の変更による影響.....	46
2.6 三次元モデルの変更による影響.....	47
3. 三次元静的材料非線形解析の評価手順.....	55
3.1 耐震性の評価フロー.....	55
3.2 三次元モデルの作成.....	57
3.3 常時解析.....	58
3.4 二次元地震応答解析.....	59
3.5 地震時荷重の算定.....	62
3.6 地震時解析.....	62
3.6.1 1方向載荷.....	62
3.6.2 水平2方向載荷.....	64
3.7 耐震安全性評価.....	64
4. 評価方法に係る課題の抽出.....	68

5. 地震応答解析に係る課題の検討.....	73
5.1 【課題 1-1】に対する検討	73
5.2 【課題 1-2】に対する検討	74
5.3 【課題 1-3】に対する検討	77
6. 構造解析に係る課題の検討.....	83
6.1 【課題 2-1】に対する検討	83
6.1.1 解析コードの概要	83
6.1.2 解析コードの適用性	86
6.2 【課題 2-2】に対する検討	88
6.3 【課題 2-3】に対する検討	93
6.4 【課題 2-4】に対する検討	97
6.4.1 既設の機器・配管等の考慮方法	97
6.4.2 竜巻防護ネットの評価手順	98
6.4.3 動的相互作用の影響	100
6.5 【課題 2-5】に対する検討	101
7. 許容限界に係る課題の検討.....	108
7.1 通水機能.....	110
7.2 支持機能.....	112
7.3 貯水機能.....	115
7.4 止水機能.....	119
8. 安全係数に係る課題の検討.....	121
8.1 安全係数の考え方.....	121
8.1.1 地震応答解析における安全係数	124
8.1.2 変形による照査における安全係数	125
8.1.3 断面力による照査における安全係数	126
8.2 規格・基準類との比較.....	127
8.3 コンクリートの材料係数の考え方.....	132
9. まとめ.....	135

添付資料 1 支持機能に関する実験

添付資料 2 止水機能が要求される部材のひび割れ影響評価方法

下線部：今回提出資料

第 I 編 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化

本編では、線状構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化（時刻歴応答解析及び限界状態設計法の適用、減衰定数の変更）について説明する。

海水ポンプ室等の箱型構造物の構造解析に用いる三次元静的材料非線形解析の適用性については「第 II 編 三次元静的材料非線形解析の適用性」にて説明する。

1. 屋外重要土木構造物の評価手法の概要

屋外重要土木構造物の耐震評価について、今回申請では、屋外重要土木構造物の変位や変形をより実状に近い応答に適正化することを目的に、評価手法の高度化として、解析手法と減衰定数の変更を予定している。女川原子力発電所 2 号炉の工事計画認可（平成 3 年 6 月 19 日及び平成 4 年 1 月 13 日）（以下「建設工認」という。）と今回工認との手法の比較を別紙 15-1 表に示す。

建設工認との相違点のうち、解析手法として適用している「時刻歴応答解析、限界状態設計法」は、新規制基準対応工認にて適用例がある手法である。

なお、土木構造物の地震時の挙動は、地盤の影響を受けることを踏まえると、地盤特性を適切にモデル化することにより、実応答に近い形で評価できるものと考えられる。このため、コンクリート強度は、建設工認と同じく設計基準強度を採用する方針とする。

別紙 15-1 表 建設工認と今回工認の手法との比較

	解析手法	解析モデル	減衰定数	コンクリート強度
建設工認	周波数応答解析 許容応力度法	地質データに基づく FEM モデル	構造物の減衰 5%	設計基準強度
今回工認	時刻歴応答解析 限界状態設計法又は 許容応力度法	地質データに基づく FEM モデル	構造物の履歴減衰* +Rayleigh 減衰	設計基準強度
比較結果	●異なる	○同じ	●異なる	○同じ
適用例	○あり	○あり	○あり	○あり

※：構造物を線形でモデル化する場合は、Rayleigh 減衰のみとする。

2. 解析手法

屋外重要土木構造物の耐震安全性評価については、建設工認では、地震応答解析手法として周波数応答解析を採用し、許容応力度法による設計として、構造部材の曲げ及びせん断について許容応力度に対して妥当な裕度を持つことを確認することを基本としていた。

今回工認では、屋外重要土木構造物の地震応答解析手法に時刻歴応答解析を適用した限界状態設計法による設計を採用する。減衰定数は、構造物の履歴減衰及び Rayleigh 減衰とする。なお、構造物を線形でモデル化する場合は、Rayleigh 減衰のみとする。構造部材の曲げについては限界層間変形角又は許容応力度に対して十分な安全余裕を持つこと、せん断についてはせん断耐力又は許容応力度に対して妥当

な安全余裕を持つことを確認する。また、各設備の要求機能（支持機能、通水機能、貯水機能）及び構造物が間接支持する機器・配管の機能維持のための与条件（変位や傾斜等）を踏まえて照査項目・内容を追加する。

以下では、今回工認で採用する限界状態設計法のうち、構造部材の曲げ照査に係る「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）」（以下「土木学会マニュアル」という。）の適用性及びせん断照査に係る土木学会マニュアルの適用性について検討を行う。

2.1 曲げ照査に係る土木学会マニュアルの適用性について

今回工認申請における曲げに対する照査は、土木学会マニュアルに基づき、照査用層間変形角が限界層間変形角を超えないことを確認する。

「コンクリート標準示方書[構造性能照査編]（土木学会，2002年制定）」（以下「コンクリート標準示方書 2002」という。）では、構造部材の終局変位は、部材の荷重－変位関係の骨格曲線において、荷重が降伏荷重を下回らない最大の変位として求めてよいとしている。コンクリート標準示方書 2002 による構造部材の終局変位の考え方を別紙 15-1 図に示す。

一方、土木学会マニュアルでは、以下の考え方に基づいている。屋外重要土木構造物を模したラーメン構造の破壊実験の結果より、かぶりコンクリートが剥落すると荷重が低下し始める。層間変形角 $1/100$ に至る状態は、かぶりコンクリートの剥落が発生する前の状態であることを確認しており^{(1), (2)}、荷重が低下しない範囲にある。当該限界値を限界状態とすることで、構造全体としての安定性が確保できるものとして設定されたものである。ラーメン構造の破壊実験の例を別紙 15-2 図に示す。

したがって、土木学会マニュアルによる曲げ照査手法は、コンクリート標準示方書 2002 による照査よりも安全側の評価を与えるため、適用性を有している。

さらに、土木学会マニュアルでは、日本建築学会「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針（案）・同解説（1997）」にて記載されている設計限界変形 $1/100$ 、終局限界変形 $1/80$ 等を基準値として参照している。

対象は同じラーメン構造であり、軸力比（軸応力度／コンクリート圧縮強度比）は建築物よりも屋外重要土木構造物の方が小さいと考えられることから、変形性能がより大きくなる傾向にあり、層間変形角 $1/100$ は安全側であると考ええる。機能維持確保の観点からも耐荷性能が確保されることが担保できるため限界値として適切である。

参考に、建築学会における曲げ降伏先行型の部材について、復元力特性と限界状態（損傷度）の関係の概念図を別紙 15-3 図に、土木学会マニュアルにおける鉄筋コンクリートはり部材の荷重変位関係と損傷状態に対する概念図を別紙 15-4 図に示す。建築学会と土木学会マニュアルにおいて概ね対応が取れており、土木学会マニュアルの各損傷状態の設定は妥当であると考えられる。別紙 15-4 図において層間

変形角 $1/100$ は第 4 折れ点よりも手前にあり，屋外重要土木構造物の限界状態に至っていないと考えられる。また，第 3 折れ点は層間変形角 $1/100$ よりも更に手前にある。

耐震安全性評価では，当該許容限界値に対して，妥当な安全裕度を確保するため，構造部材の照査の過程において複数の安全係数と，地盤物性及び材料物性のばらつきの影響を考慮する。安全係数は，材料係数，部材係数，荷重係数，構造解析係数及び構造物係数の 5 種に分けられる。それぞれの安全係数の考え方を別紙 15-5 図に示す。

また，地盤物性及び材料物性のばらつきについては，これらの影響を見込んだ照査を，工事計画認可段階において実施する。地盤物性のばらつきは，周辺地盤の変形特性について，平均値を基本ケースとした場合に，平均値 $\pm 1.0 \times$ 標準偏差(σ)のケースについて確認を行う。材料物性のばらつきについては，構造物のせん断変形量を定義するコンクリート部材の変形特性であるヤング係数が，コンクリートの設計基準強度に対応して定まることを踏まえ，コンクリートの設計基準強度を基本ケースとし，コンクリートの実強度に対応して定めたケースについて確認を行う。

耐震安全性評価において，基準地震動 S_s 全波 (7 波) を用いて基本ケースでの評価を実施し，基本ケースにおいて，曲げに対する照査が厳しい (許容限界に対する余裕が小さい) 地震動を用い，地盤物性及び材料物性のばらつきを考慮した確認を行う。

曲げに対する照査において考慮している安全係数は別紙 15-2 表に示すとおり，材料係数，部材係数，荷重係数，構造解析係数，構造物係数がある。これらの安全係数は土木学会マニュアルにおいて以下の考えにより定められている。

(1) 材料係数

コンクリート強度の特性値は，製造において，その値を下回る強度が発現する確率が 5%以内となるように設定する。また，鉄筋の機械的性質の特性値に関しても，日本工業規格 (JIS) の規格範囲の下限値を設定してよいとしている。このように，双方とも特性値の段階で実強度に対して小さい値を設定しており，応答値・限界値ともに安全側の照査がなされているため，材料係数は 1.0 としている。

(2) 部材係数

安全側に配慮した設定を行っていることから，部材係数は 1.0 としている。

(3) 荷重係数

地震の影響以外の荷重の評価精度は，かなり高いものと考えられ，地震の影響については入力地震動そのものが最近の研究成果に基づいて設定されるため，荷重係数は 1.0 としている。

(4) 構造解析係数

限られた条件での実験であること，地盤パラメータの設定が応答解析結果に及

ばす影響などを考え併せて、構造解析係数は 1.2 以上を標準としている。

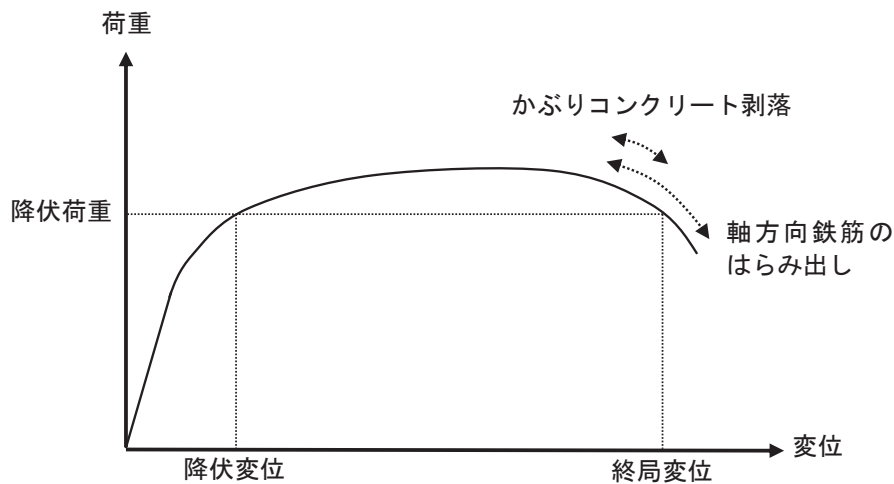
(5) 構造物係数

屋外重要土木構造物は重要度ごとに適切な地震動が設定される。したがって、構造物係数により更に構造物の重要性を考慮する必要はなく、耐震性能照査における構造物係数は 1.0 としている。

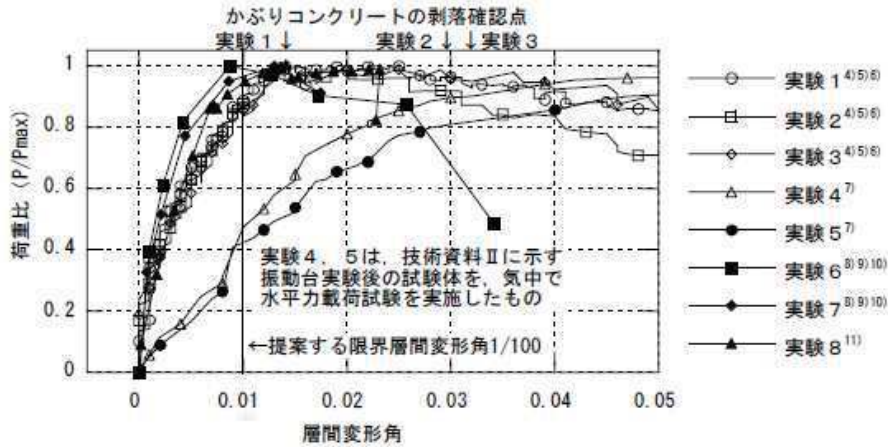
以上のことから、土木学会マニュアルによる曲げ照査手法は、コンクリート標準示方書 2002 による照査よりも安全側の評価を与えるため、技術的妥当性及び適用性を有するとともに適切な余裕が確保されていると判断できる。

別紙 15-2 表 曲げ評価において考慮している安全係数

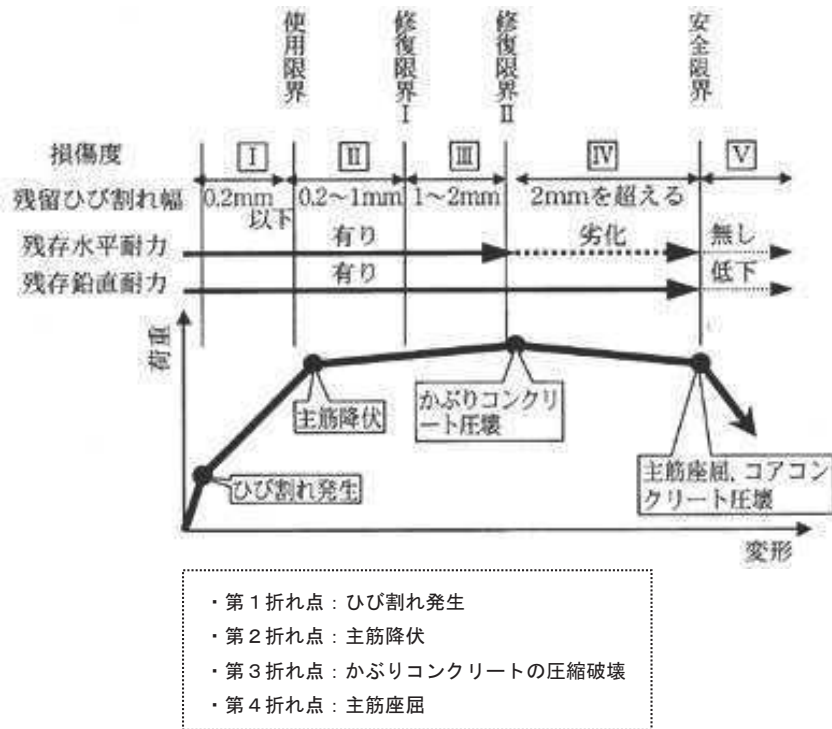
安全係数		曲げ照査	
		応答値算定	限界値算定
材料係数	コンクリート	1.0	1.0
	鉄筋	1.0	1.0
	地盤	1.0	—
部材係数		—	1.0
荷重係数		1.0	—
構造解析係数		1.2	—
構造物係数		1.0	



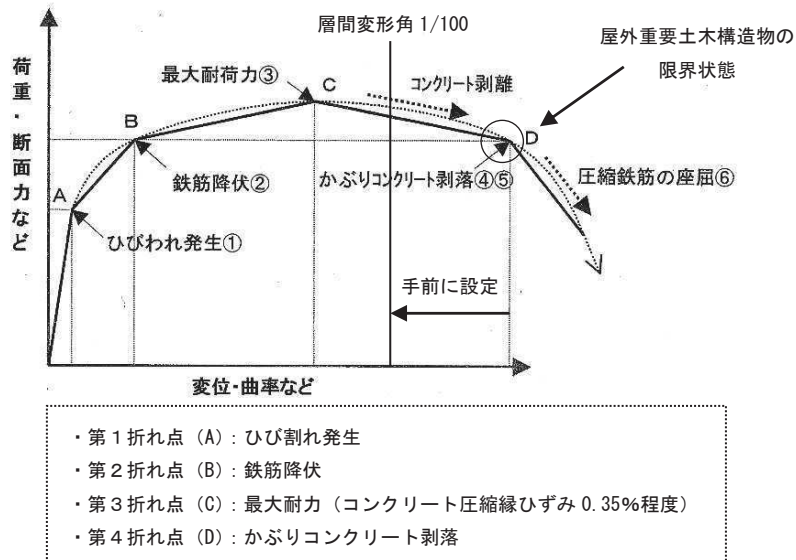
別紙 15-1 図 コンクリート標準示方書 2002 による構造部材の終局変位の考え方



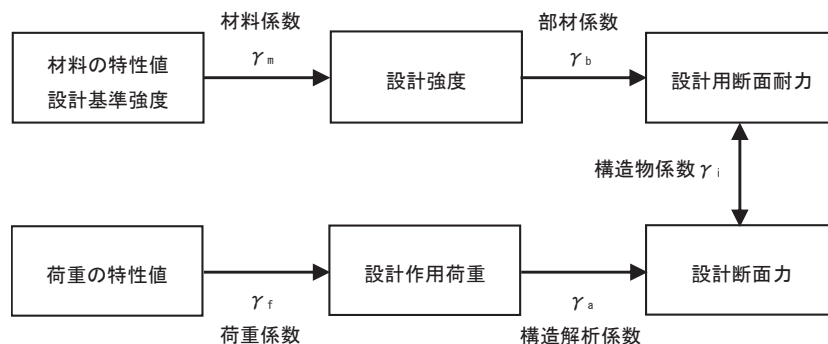
別紙 15-2 図 鉄筋コンクリート製ラーメン構造の破壊実験 (1), (2)
(土木学会マニュアル)



別紙 15-3 図 曲げ降伏先行型の部材の復元力特性と限界状態 (損傷度) の
関係の概念図 (建築学会)



別紙 15-4 図 鉄筋コンクリートはり部材の荷重変位関係と損傷状態に対する概念図（土木学会マニュアル）



別紙 15-5 図 安全係数の考え方

2.2 せん断照査に係る土木学会マニュアルの適用性について

今回工認申請におけるせん断に対する照査は、土木学会マニュアルに基づき、照査用せん断力が、せん断耐力を下回ることを確認する。

なお、せん断耐力は、せん断耐力評価式（分布荷重を受ける部材のせん断耐力評価法を含む）及び材料非線形解析を用いる方法のいずれかを用いて評価する。

2.2.1 せん断耐力評価式

コンクリート標準示方書 2002 では、棒部材及びディープビームについて別紙 15-3 表に示すと通りのせん断耐力式を定義している。このうち、ディープビームについては、コンクリート標準示方書 2002 及び土木学会マニュアルにおいて同様の評価式となっている。

土木学会マニュアルでは、コンクリート標準示方書 2002 におけるせん断耐力

式のうち棒部材式において、等価せん断スパンにより設定可能な係数 β_a を考慮している。これは屋外重要土木構造物が地中に埋設されたラーメン構造で、土圧、水圧、地震時慣性力等の多数の分布荷重が作用していることによる分布荷重が卓越し、スパン内に反曲点が存在する等の載荷形態にある条件下では、せん断耐力が増大するという実験的知見を踏まえ、より合理的なせん断耐力を与えるよう、コンクリート標準示方書 2002 のせん断耐力式を精緻化したものである。当該せん断耐力式は、別紙 15-7 図に示すとおり、屋外重要土木構造物を模した破壊試験より得られるせん断耐力と整合的であり、合理的な評価が可能であることを確認されている^{(3), (4)}。

また、これら多数の荷重の複合作用を個々に分解することは困難であることから、せん断耐力の算定時に個々の荷重作用を区分せず最終的な設計用断面力分布を用いて合理的なせん断耐力を算定することとしている⁽³⁾。

耐震安全性評価では、当該許容限界値に対して、妥当な安全余裕を確保するため、構造部材の照査の過程において複数の安全係数と、地盤物性及び材料物性のばらつきの影響を考慮する。安全係数は、材料係数、部材係数、荷重係数、構造解析係数及び構造物係数の 5 種に分けられる。それぞれの安全係数の考え方を別紙 15-6 図に示す。

また、地盤物性及び材料物性のばらつきについては、これらの影響を見込んだ照査を、工事計画認可段階において実施する。地盤物性のばらつきは、周辺地盤の変形特性について、平均値を基本ケースとした場合に、平均値 $\pm 1.0 \times$ 標準偏差(σ)のケースについて確認を行う。材料物性のばらつきについては、構造物のせん断変形量を定義するコンクリート部材の変形特性であるヤング係数が、コンクリートの設計基準強度に対応して定まることを踏まえ、コンクリートの設計基準強度を基本ケースとし、コンクリートの実強度に対応して定めたケースについて確認を行う。耐震安全性評価において、基準地震動 S_s 全波 (7 波) を用いて基本ケースでの評価を実施し、基本ケースにおいて、せん断に対する照査が厳しい (許容限界に対する余裕が小さい) 地震動を用い、地盤物性及び材料物性のばらつきを考慮した確認を行う。

せん断に対する照査において考慮している安全係数は別紙 15-4 表に示すとおり、材料係数、部材係数、荷重係数、構造解析係数、構造物係数がある。これらの安全係数は土木学会マニュアルにおいて以下の考えにより定められている。

(1) 材料係数

限界値算定時に適用する材料係数はコンクリート標準示方書 2002 に準拠して、コンクリートに対して 1.3^{*}、鉄筋に対して 1.0 としている。応答値算定時に適用する材料係数は、コンクリートと鉄筋の物性値が、特性値の段階で実強度に対して小さい値を設定していることから安全側の照査がなされているため、材料係数は 1.0 としている。

※：材料係数は1.3を標準とするが、既設構造物において、強度等の材料特性のばらつきを考慮して特性値が設定されていることを実測値により確認した場合は1.0～1.3の間で低減する。

(2) 部材係数

コンクリート標準示方書2002に準拠して、コンクリート寄与分に対して1.3、鉄筋寄与分に対して1.1としている。

(3) 荷重係数

地震の影響以外の荷重の評価精度は、かなり高いものと考えられ、地震の影響については入力地震動そのものが最近の研究成果に基づいて設定されるため、荷重係数は1.0としている。

(4) 構造解析係数

変形に関する応答値の評価精度に比較して、断面力に関する応答値の評価精度は高いと考えられることから、変形照査の場合より低減させて1.05としている。

(5) 構造物係数

基準地震動は地点ごとにサイト特性を考慮して設定され、重要度分類に対応して入力地震動が選定される。したがって、構造物係数より更に構造物の重要性を考慮する必要はなく、耐震性能照査における構造物係数は1.0としている。

以上のことから、土木学会マニュアルによるせん断照査手法は、屋外重要土木構造物の構造的特徴を踏まえ設定された手法であるため、技術的妥当性及び適用性を有すると判断できる。

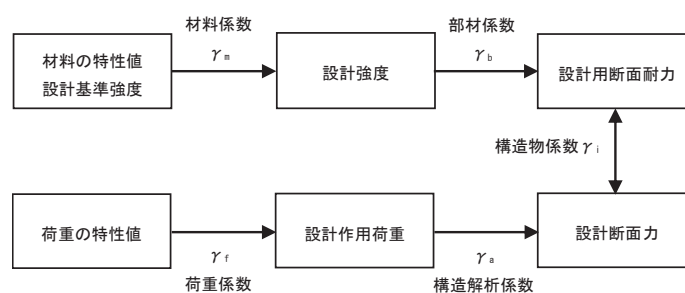
別紙 15-3 表 せん断耐力式の比較表

	コンクリート標準示方書	土木学会マニュアル
棒部材	$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd}$ V_{yd} : せん断耐力 V_{cd} : コンクリート負担 V_{sd} : せん断補強筋負担 $V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$ β_d, β_p : 構造寸法や鉄筋量で決まる係数 β_n : 発生曲げモーメントで決まる係数 f_{vcd} : 設計基準強度, 安全係数等で決まる b_w : 腹部の幅 d : 有効高さ γ_b : 安全係数	$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd}$ V_{yd} : せん断耐力 V_{cd} : コンクリート負担 V_{sd} : せん断補強筋負担 $V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot \beta_a \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$ β_d, β_p : 構造寸法や鉄筋量で決まる係数 β_n : 発生曲げモーメントで決まる係数 $\beta_a = 0.75 + \frac{1.4}{a/d}$ a : せん断スパン長 f_{vcd} : 設計基準強度, 安全係数等で決まる b_w : 腹部の幅 d : 有効高さ γ_b : 安全係数
	せん断スパンより設定される係数を考慮し, コンクリート標準示方書のせん断耐力式を精緻化	
デュープビーム	$V_{yda} = V_{cda} + V_{sda}$ V_{yda} : せん断耐力 V_{cda} : コンクリート負担 V_{sda} : せん断補強筋負担 $V_{cda} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot f_{da} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$ $\beta_a = \frac{5}{1 + (a_v/d)^2}$ a_v : 荷重作用点から支承前面までの距離 f_{da} : 設計基準強度, 安全係数等で決まる	$V_{yda} = V_{cda} + V_{sda}$ V_{yda} : せん断耐力 V_{cda} : コンクリート負担 V_{sda} : せん断補強筋負担 $V_{cda} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot f_{da} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$ $\beta_a = \frac{5}{1 + (a_v/d)^2}$ a_v : 荷重作用点から支承前面までの距離 f_{da} : 設計基準強度, 安全係数等で決まる
	コンクリート標準示方書と土木学会マニュアルにおいて同一の評価式となっている	

別紙 15-4 表 せん断耐力評価において考慮している安全係数

安全係数		せん断照査	
		応答値算定	限界値算定
材料係数	コンクリート	1.0	1.3 [※]
	鉄筋	1.0	1.0
	地盤	1.0	—
部材係数	コンクリート	—	1.3
	鉄筋	—	1.1
荷重係数		1.0	—
構造解析係数		1.05	—
構造物係数		1.0	

※：材料係数は 1.3 を標準とするが，既設構造物において，強度等の材料特性のばらつきを考慮して特性値が設定されていることを実測値により確認した場合は 1.0～1.3 の間で低減する。



別紙 15-6 図 安全係数の考え方
(別紙 15-5 図の再掲)

○コンクリート標準示方書におけるせん断耐力評価式 $V_{yd} = \beta_a \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$

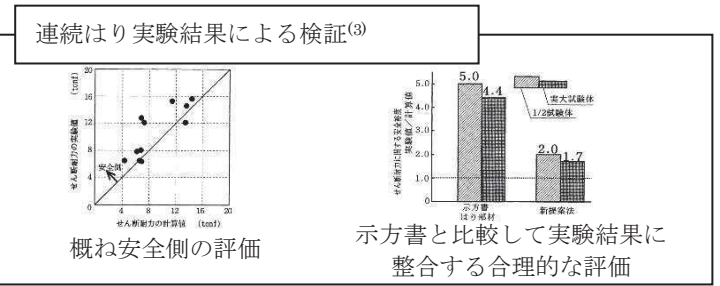
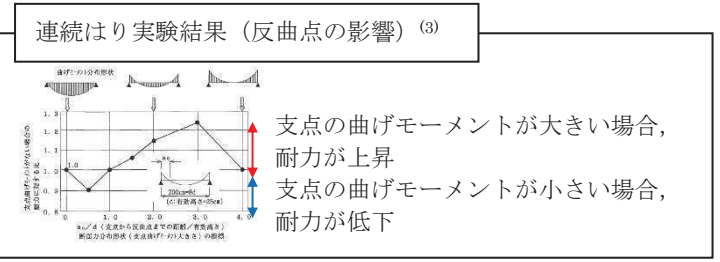
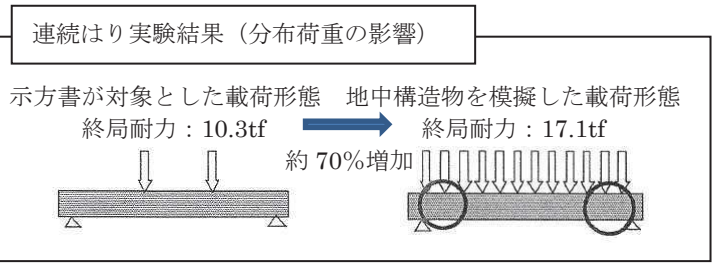
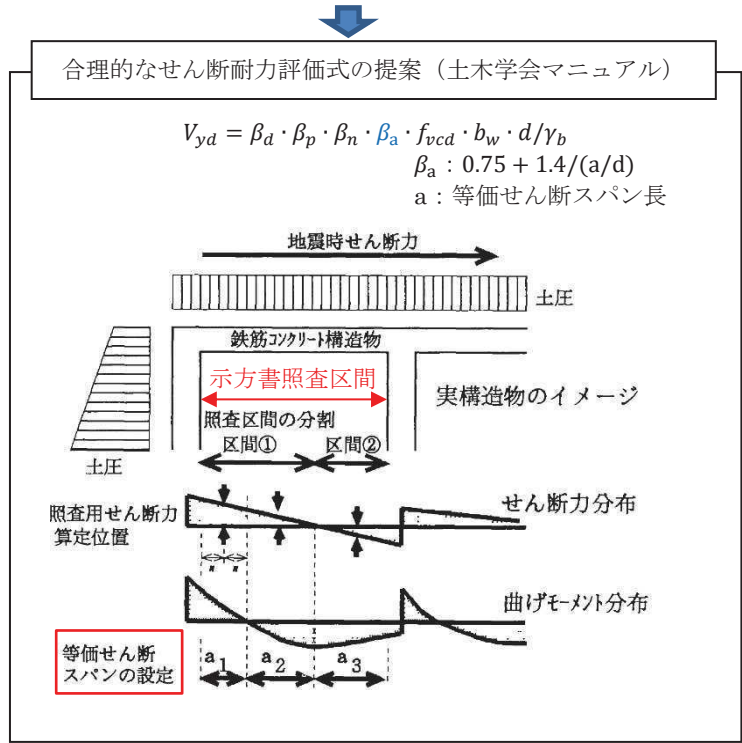
2点载荷の単純はりの実験結果に基づいた単純な载荷形態あるいは単純な断面力分布は精度良くせん断耐力を評価する。

<問題点>

・分布荷重が卓越する場合、支点付近に大きな荷重が加わる場合および支点反力が大きい場合において、せん断耐力を過小評価する。

○地中構造物を模擬した実験によるせん断耐力評価式

地中に埋設されたラーメン構造で、分布荷重が卓越、スパン内に反曲点が存在する等複雑な载荷形態を考慮してせん断耐力を評価する。



別紙 15-7 図 土木学会マニュアルによるせん断耐力式評価の設定経緯

2.2.2 材料非線形解析を用いたせん断耐力評価

構造部材の照査において発生するせん断力が、せん断耐力式によるせん断耐力を上回る部材については、以下で示す材料非線形解析を用いたせん断耐力評価を実施する。

(1) 評価条件

2.2.1 で示したせん断耐力式は、既往の実験等から一般化されたものであることから、構造部材の形状、作用荷重及び鉄筋コンクリートの非線形特性を踏まえた材料非線形解析を実施することにより、より高い精度でせん断耐力を求め、構造部材のせん断照査を行う。

別紙 15-5 表及び別紙 15-6 表に材料非線形解析の概要を示す。

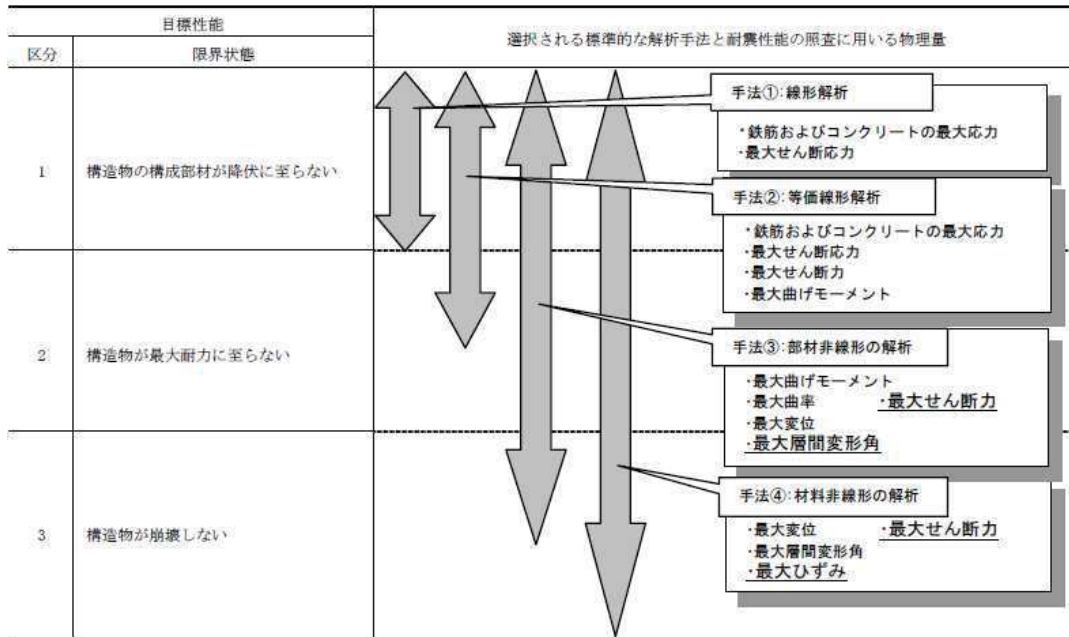
材料非線形解析は、90年代までに、ひび割れの進展モデルや破壊エネルギーの概念等、基本となるモデルが提示され、様々な問題に適用されながら有効性と信頼性を高めており、「コンクリート標準示方書 設計編（土木学会，2012）」（以下「コンクリート標準示方書 2012」という。）や土木学会マニュアル等で取り扱われている。

材料非線形解析にて用いる鉄筋コンクリート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おり、コンクリート標準示方書 2012 において標準とされる以下の手法とする。

- ① 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。
- ② 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。
- ③ 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。

なお、材料非線形解析の適用に当たっては、当該構造物の構造的な特徴や荷重条件が類似する既往の実験等から得られたせん断耐力と、材料非線形解析によるせん断耐力を比較し、その適用性を判断した上で、モデル化や各種パラメータの設定に係る解析者の差を考慮した安全係数を設定する。

別紙 15-5 表 材料非線形解析の位置付け（土木学会マニュアル）



別紙 15-6 表 部材非線形解析と材料非線形解析の特徴

	部材非線形解析		材料非線形解析	
モデル化	骨組モデル		有限要素	
解析次元	1次元		2次元	3次元
構成則	M- Φ , M- θ 等	応力-ひずみ関係		
要素	はり要素	ファイバー要素	平面ひずみ要素	立体要素
特徴	(汎用性)	狭い ← → 広い		
	(解析時間)	短い ← → 長い		

a. 適用基準

材料非線形解析については、土木学会マニュアル、コンクリート標準示方書 2012 等に基づき実施する。基準と異なる設定を用いる場合には、設定根拠の妥当性を確認する。

別紙 15-7 表に参考とする主な基準・文献を示す。

別紙 15-7 表 参考とする主な基準等

項目	参考とする主な基準等	備考
材料定数 ・材料特性	・コンクリート標準示方書2012 ・土木学会マニュアル	—
許容限界	—	・せん断力-相対変位関係より設定した許容限界（破壊基準）が、部材係数の設定における材料非線形解析にて、実験結果と概ね整合的であることを確認。

b. 材料定数

耐震安全性評価に用いる材料定数は、設計図書及び文献等を基に設定する。コンクリート及び鉄筋の材料定数を別紙 15-8 表及び別紙 15-9 表に示す。

別紙 15-8 表 コンクリートの材料定数

	設定値	諸元
単位体積重量	0.0 kN/m ³	材料非線形解析による荷重に含まれることから考慮しない
圧縮強度	15.8 N/mm ²	設計基準強度(設計図書20.5N/mm ²) / 材料係数*
引張強度	1.33 N/mm ²	引張強度 / 材料係数*
圧縮ピークひずみ	0.2%	コンクリート標準示方書2012
ひび割れ-せん断伝達係数	1.0	コンクリート標準示方書2012
破壊エネルギー	0.0681 N/mm	コンクリート標準示方書2012

※：材料係数を 1.3 として算出

別紙 15-9 表 鉄筋の材料定数

		設定値	諸元
単位体積重量		0.0 kN/m ³	材料非線形解析による荷重に含まれることから考慮しない
ヤング係数		200 kN/mm ²	コンクリート標準示方書2012
降伏強度	主鉄筋	2000 N/mm ²	せん断破壊先行型の破壊形態となるよう曲げ耐力が増大するように設定
	せん断補強筋	345 N/mm ²	設計図書 (SD345)

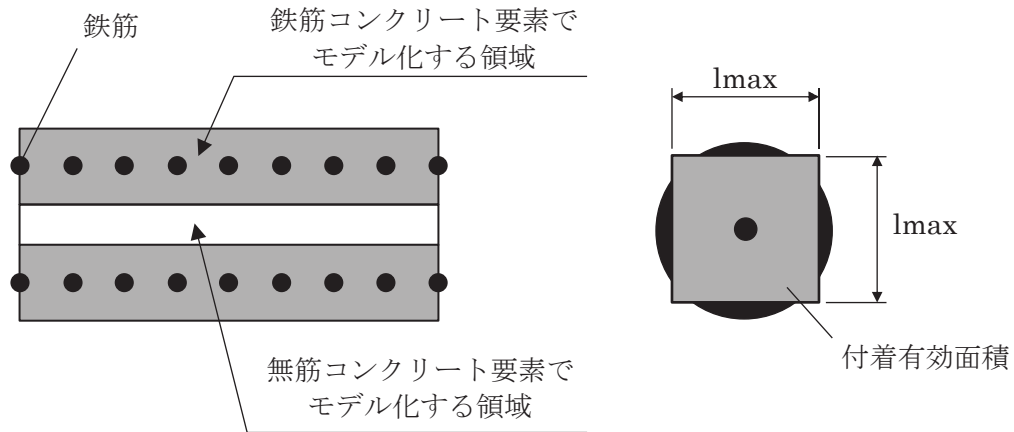
c. 解析モデルの要素分割

材料非線形解析の対象とする構造部材を平面ひずみ要素でモデル化する。構造部材のモデル化に当たっては、別紙 15-8 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コンクリート要素としてモデル化する。

部材厚方向の要素分割数については、鉄筋を含む要素と無筋要素を明確に指定できる分割数が望ましいこと、及び 3 層以上の分割数をとる場合、解析結果に大きな差異が生じないことから 3 層以上に設定することとする。

具体的には、鉄筋を含む要素は、鉄筋を中心としてかぶり厚さの 2 倍とし、無筋領域については、要素形状が極端に扁平とならないように分割する。

なお、対象とする構造部材に接合する部材は、弾性要素でモデル化し、モデル下端を固定境界とする。



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

ここに、

- l_{max} : 鉄筋一本当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

別紙 15-8 図 鉄筋付着有効領域と無筋領域の分割の概要

d. コンクリートの非線形特性

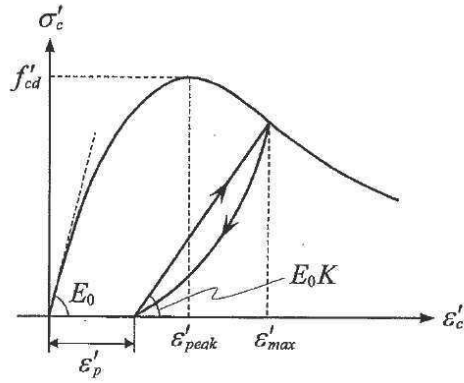
耐震安全性評価に用いる要素は鉄筋コンクリート要素及び無筋コンクリート要素に分類されるが、それぞれの非線形特性は同一の考え方で表される。

・圧縮応力下における応力-ひずみ関係

別紙 15-9 図に一軸圧縮応力下における応力-ひずみ関係を示す。

圧縮応力下の応力-ひずみの骨格曲線は、最大応力点までの硬化域と、最大応力点を超えた軟化域で表され、残留塑性ひずみと除荷再載荷時の剛性低下を考慮している。

また、ひび割れ発生後のコンクリートの圧縮強度については、別紙 15-10 図に示す、低減係数を破壊パラメータに乗じることで、ひび割れ発生後の圧縮強度の低下を考慮する。



$$\sigma'_c = E_0 K (\epsilon'_c - \epsilon'_p) \geq 0$$

$$E_0 = \frac{2 \cdot f'_{cd}}{\epsilon'_{peak}}$$

$$K = \exp \left\{ -0.73 \frac{\epsilon'_{max}}{\epsilon'_{peak}} \left(1 - \exp \left(-1.25 \frac{\epsilon'_{max}}{\epsilon'_{peak}} \right) \right) \right\}$$

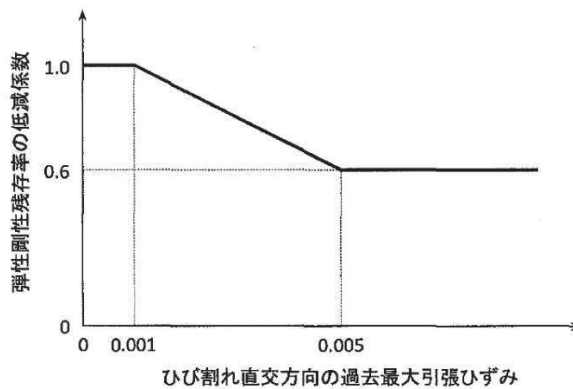
$$\epsilon'_p = \epsilon'_{max} - 2.86 \cdot \epsilon'_{peak} \left\{ 1 - \exp \left(-0.35 \frac{\epsilon'_{max}}{\epsilon'_{peak}} \right) \right\}$$

$$f'_{cd} = f'_{ck} / \gamma_c$$

ここに、

- ϵ'_{peak} : 圧縮強度に対応するひずみ (一般に、0.002 としてもよい)
- ϵ'_{max} : 過去に受けた圧縮ひずみの最大値
- ϵ'_p : 塑性ひずみ
- K : 弾性剛性残存率

別紙 15-9 図 圧縮応力下におけるコンクリートの非線形特性

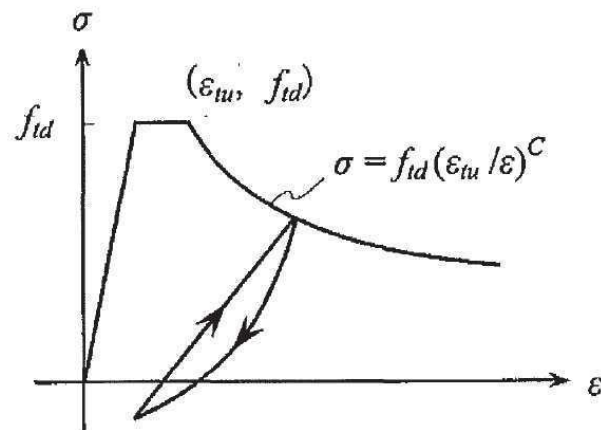


別紙 15-10 図 弾性剛性残存率の低減係数

・引張応力下における応力-ひずみ関係

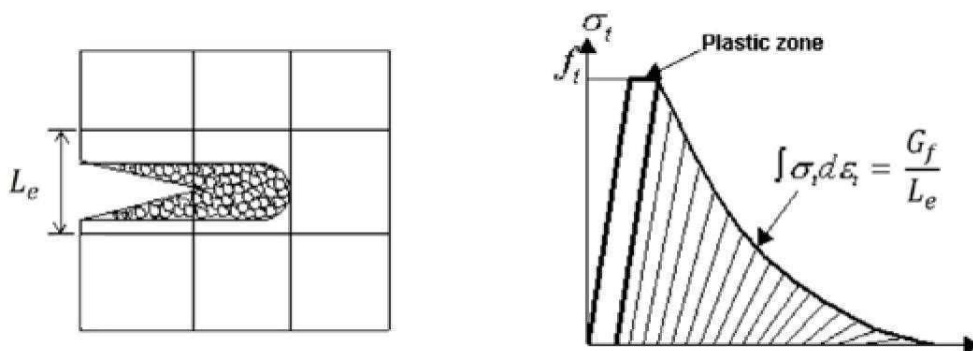
引張応力下における応力-ひずみ関係は、ひび割れ発生までは線形弾性とし、ひび割れ強度以降は、鉄筋とコンクリートの付着の影響等を考慮し、別紙 15-11 図に示す骨格曲線を用いて、ひび割れ間のコンクリートに引張応力分担を考慮する。

引張力を受ける無筋コンクリート要素では、引張軟化挙動は、破壊エネルギー (G_f) によって定義する。引張軟化挙動の考慮に当たっては、別紙 15-12 図に示すひび割れ発生後の軟化曲線とひび割れ発生点からの除荷曲線とで囲まれる面積が G_f/L_e (要素寸法) に一致するように、軟化特性を表す係数 C を用いる。



- f_{td} : 設計引張強度
- ϵ_{tu} : 引張軟化開始ひずみ
- C : 引張軟化特性を表す係数

別紙 15-11 図 引張対応力下における鉄筋とコンクリートの付着効果を考慮した応力-ひずみ関係

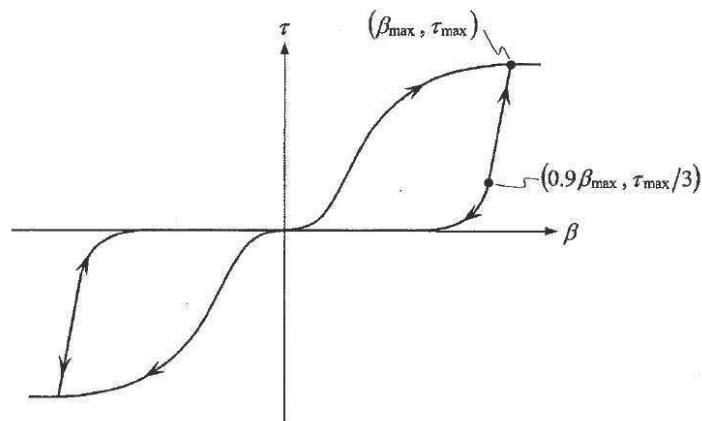


別紙 15-12 図 応力-ひずみ曲線と破壊エネルギー G_f の関係

・ ひび割れ面でのせん断伝達関係

コンクリートのひび割れ発生後にひび割れ角度を固定する固定ひび割れモデルでは、ひび割れ面のずれによるせん断応力伝達特性を考慮する必要がある。

ひび割れ面でのせん断伝達挙動は、斜めひび割れの発生に伴う剛性低下や破壊を評価するため、別紙 15-13 図に示すとおり、ひび割れ面におけるせん断ひずみ γ とひび割れ開口ひずみ ε の比をパラメータとし、コンクリートの剛性低下を考慮するモデルを用いる。

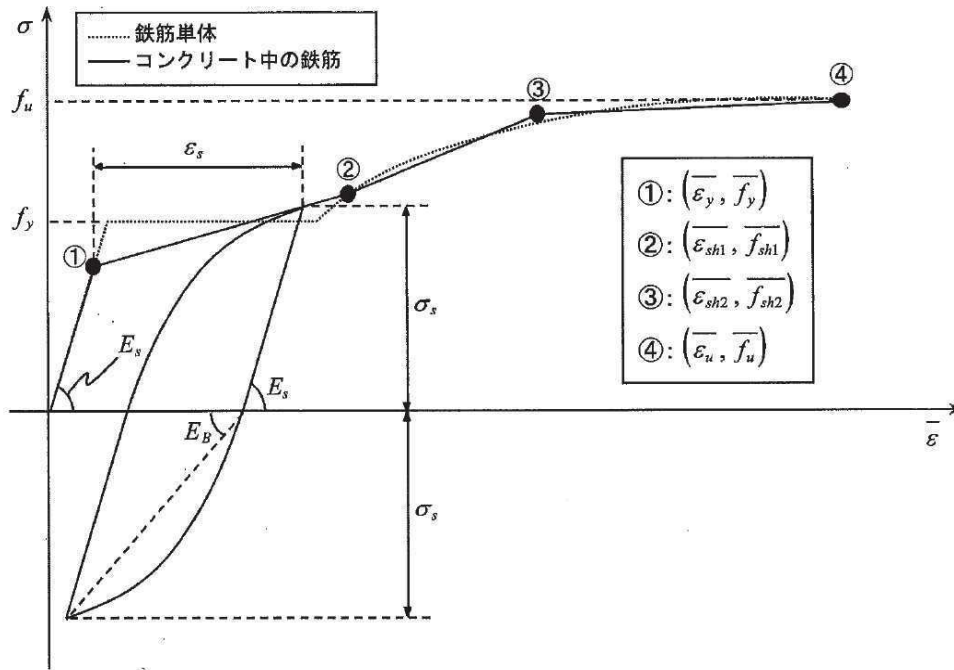


- β : ひび割れ面におけるせん断ひずみ γ とひび割れ開口ひずみ ε の比 (γ / ε)
- τ : ひび割れ面でのせん断応力
- τ_{max} : 除荷開始時せん断応力
- β_{max} : 除荷開始時せん断ひずみ γ とひび割れ開口ひずみ ε の比

別紙 15-13 図 ひび割れ面でのせん断伝達モデル

e. 鉄筋の非線形特性

ひび割れを複数含む領域におけるコンクリート中の鉄筋の平均応力ー平均ひずみ関係は、単体鉄筋の応力ーひずみ関係と異なり、別紙 15-14 図に示すひずみ硬化特性を考慮する。



別紙 15-14 図 ひずみ硬化域までモデル化した鉄筋の
平均応力-平均ひずみ関係

f. 鉄筋コンクリートとしてのモデル化

コンクリートと鉄筋の界面の付着特性をテンションスティフニング効果（引張特性が硬化する現象）として、鉄筋コンクリート要素の中に取り込むことにより、鉄筋コンクリートの構成則を直接与える。

鉄筋コンクリートの引張応力下の平均応力は、以下の式で表される。

$$\bar{\sigma}_{RC} = \frac{A_S}{A_{RC}} \bar{\sigma}_S + \frac{A_C}{A_{RC}} \bar{\sigma}_C$$

ここに、 $\bar{\sigma}_S$, $\bar{\sigma}_C$: それぞれ鉄筋とコンクリートの平均応力

A_S , A_C : それぞれ鉄筋とコンクリートの断面積, $A_{RC} = A_S + A_C$

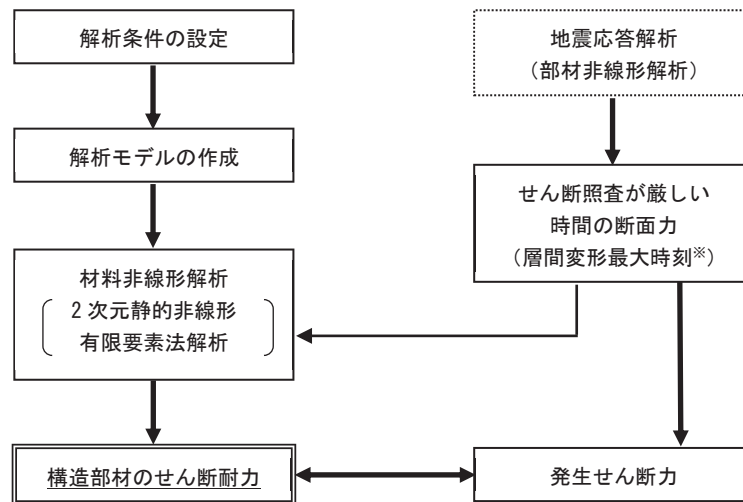
g. 荷重の組合せ

材料非線形解析においては、地震応答解析（部材非線形解析）により得られた荷重を用いることから、荷重の組み合わせは、地震応答解析と同様である。

(2) 評価方法

a. 耐震安全性評価フロー

材料非線形解析を用いたせん断耐力評価の評価フローを別紙 15-15 図に示す。



※：層間変形角が最大となる時刻と、せん断力が最大となる時刻の整合性は、補足確認する。

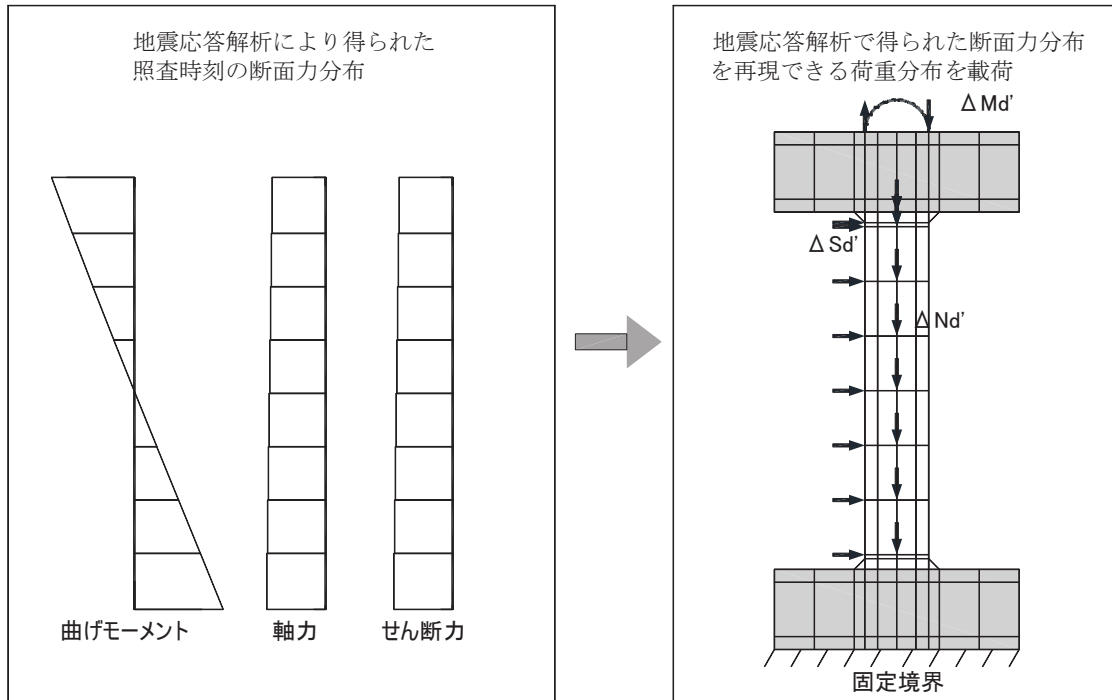
別紙 15-15 図 材料非線形解析の耐震安全性評価フロー

b. 荷重の設定

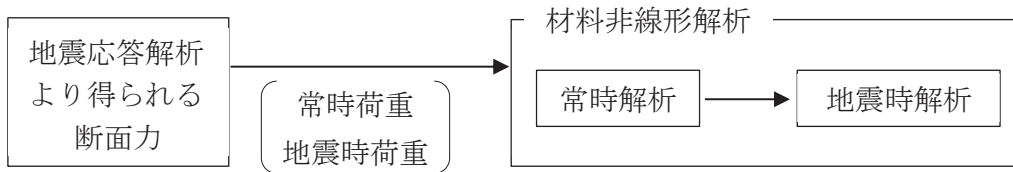
材料非線形解析にて考慮する荷重は、地震応答解析（部材非線形解析）から得られる荷重を考慮する。具体的には、地震応答解析（部材非線形解析）で評価対象部材のせん断照査結果が厳しくなる時刻（層間変形角最大時）における断面力（曲げモーメント、軸力、せん断力）を材料非線形解析モデルに別紙 15-16 図に示すとおり作用させる。

材料非線形解析では、部材非線形解析で得られた照査時刻の断面力分布を再現できる荷重分布を算出し、この荷重比率を維持しながら漸増载荷する。

作用荷重は、常時荷重及び地震時荷重に分けて、別紙 15-17 図に示すとおり常時解析と地震時解析に分けて実施する。



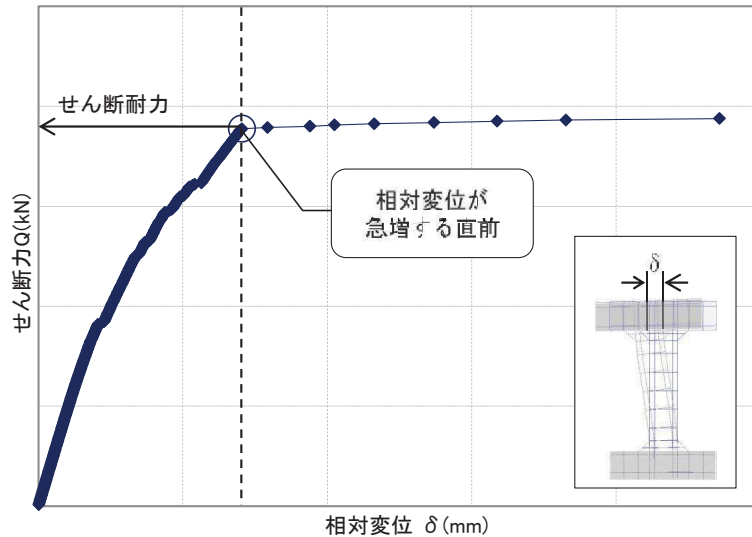
別紙 15-16 図 材料非線形解析における載荷状況



別紙 15-17 図 荷重の作用手順

c. せん断耐力

材料非線形解析を用いたせん断耐力は、材料非線形解析におけるせん断力-相対変位関係から設定する。具体的には、別紙 15-18 図に示す例のとおり、せん断力-相対変位関係においてせん断力の増分に対して相対変位が急増する直前の点又はせん断力が最大となる点を部材のせん断耐力と判断する。



別紙 15-18 図 材料非線形解析を用いたせん断耐力の設定例

d. 安全係数の設定

材料非線形解析では、地震応答解析（部材非線形解析）で得られる断面力（曲げモーメント、軸力、せん断力）を材料非線形解析に作用させた時のせん断力 V と材料非線形解析で得られるせん断耐力 V_y に、下記のとおり部材係数 γ_{b1} 、 γ_{b2} 、構造解析係数 γ_a 、構造物係数 γ_i を考慮し、照査用せん断力 V_d 、設計せん断耐力 V_{yd} を算定する。

$$V_d = \gamma_i \cdot \gamma_a \cdot V$$

$$V_{yd} = V_y / (\gamma_{b1} \cdot \gamma_{b2})$$

考慮する安全係数の設定例を別紙 15-10 表に示す。ここで、部材係数 γ_{b1} については、実験又はせん断耐力式により得られるせん断耐力と材料非線形解析により得られるせん断耐力との比率により設定することとし、解析における構成則の相違や、要素の種類、要素分割、材料物性の設定、入力増分等、多岐にわたる解析者間の差を考慮する。

具体的には、土木学会マニュアルに示される 17 ケースの材料非線形解析を実施し、実験又はせん断耐力との差が最も大きい Case No. 7 の部材係数 1.13 を設定する（別紙 15-11 表）。

別紙 15-10 表 考慮する安全係数の設定例

安全係数		値	設定根拠
部材係数	γ_{b1}	1.13	別途実施する材料非線形解析により設定
	γ_{b2}	1.0	地震応答解析による層間変形角より設定
構造物係数	γ_i	1.0	構造物の重要度は、基準地震動 S_s により評価することで包絡されていると判断
構造解析係数	γ_a	1.05	各種文献より保守的に設定

別紙 15-11 表 部材係数 γ_{b1} の設定例

Case No.	試験結果	解析結果	部材係数 (解析結果/ 実験結果) (②/①)	備考
	せん断耐力 (kN) ①	せん断耐力 (kN) ②		
1	475	422.8	0.89	
2	1187	1258.2	1.06	
3	324	356.4	1.10	
4	294	308.7	1.05	
5	581	511.3	0.88	
6	329	335.6	1.02	
7	1587	1793.3	1.13	最大値
8	350	392.0	1.12	
9	855	880.7	1.03	
10	165	102.3	0.62	
11	333	316.4	0.95	
12	127	100.3	0.79	
13	188	118.4	0.63	
14	163	117.4	0.72	
15	273	177.5	0.65	
16	356	291.9	0.82	
17	432	246.2	0.57	

(3) 適用範囲

二次元時刻歴応答解析により断面力等を算出して耐震安全性評価を行う線状構造物とし、線状構造物のうち後施工せん断補強筋 (CCb) により耐震補強を行っている部材は適用範囲外とする。

3. 屋外重要土木構造物の減衰定数

3.1 減衰定数の設定について

今回工認で採用している時刻歴応答解析において、地盤及び構造物の減衰定数は、粘性減衰と履歴減衰とで考慮している。

粘性減衰は、固有値解析にて求められる固有周期と各材料の減衰比に基づき、質量マトリックス及び剛性マトリックスの線形結合で表される以下の Rayleigh 減衰を解析モデル全体に与える。

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K]$$

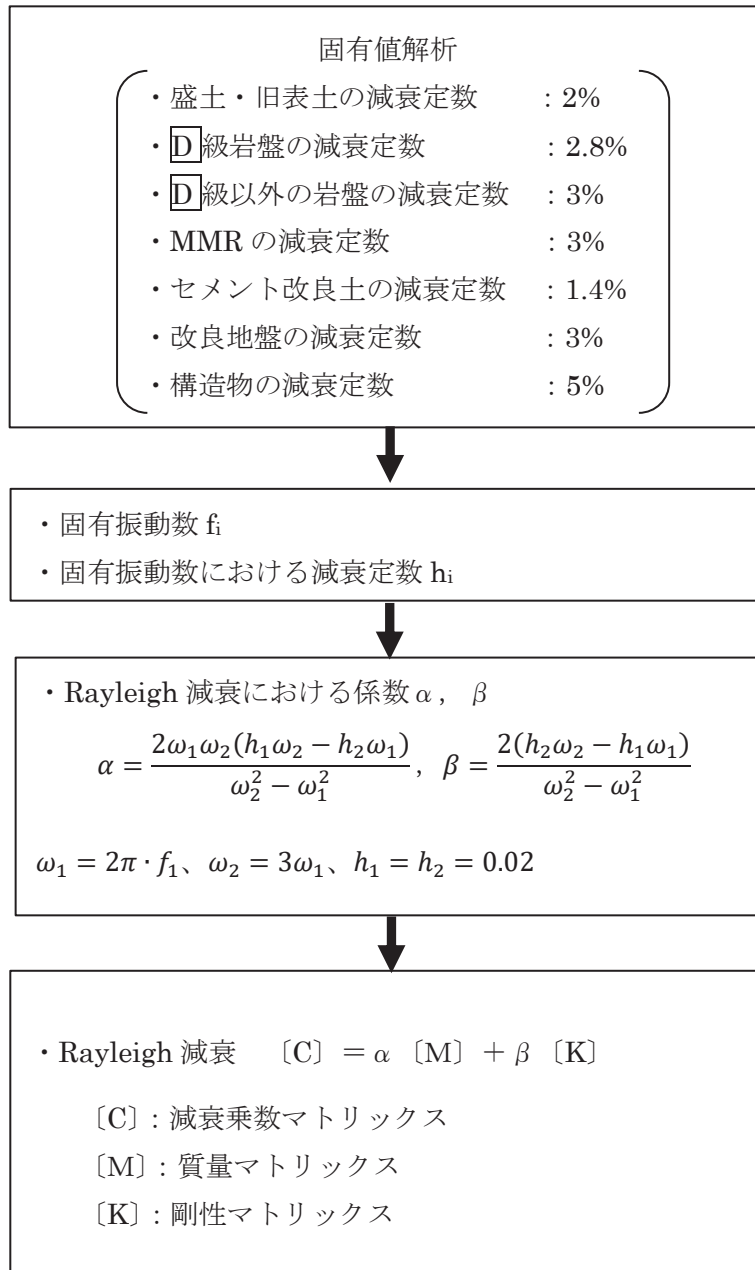
[C]：減衰係数マトリックス，[M]：質量マトリックス，

[K]：剛性マトリックス， α ， β ：係数

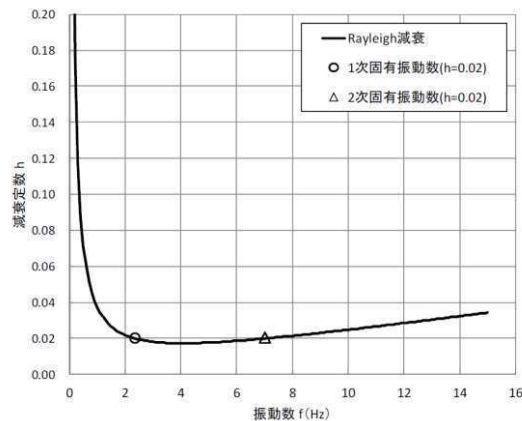
係数 α ， β を定めるにあたり、水平成層地盤の二次固有振動数が一次固有振動数の3倍であることから、二次モードの固有円振動数 ω_2 は一次モードの固有円振動数 ω_1 の3倍としている。地中構造物を対象としていることから地震応答解析の解析モデルに占める割合の大きい盛土及び旧表土の挙動に支配されるため、一次固有振動数は、解析モデルの固有値解析結果より得られる一次モードの振動数とし、減衰定数は2% (0.02) としている。

なお、構造部材を線形でモデル化する場合も非線形でモデル化する場合も、係数 α ， β の設定方法は同一である。

Rayleigh 減衰の設定フローを別紙 15-19 図に、Rayleigh 減衰の設定イメージを別紙 15-20 図に示す。



別紙 15-19 図 Rayleigh 減衰の設定フロー



別紙 15-20 図 Rayleigh 減衰の設定イメージ

履歴減衰による減衰は、構造部材の部材非線形性（曲げモーメントー曲率関係又はコンクリート、鉄筋の応力ーひずみ関係）における非線形の程度に応じた値となる。なお、構造物を線形でモデル化する場合は、Rayleigh 減衰のみ設定する。

3.2 建設工認と今回工認の相違について

今回工認における構造物の粘性減衰は、履歴モデルにより構造物の履歴減衰を用いる場合は、履歴減衰が生じない状態等における解析上の安定のためになるべく小さい値として一次固有振動数及び二次固有振動数に対して減衰 2%となる Rayleigh 減衰を採用している。

建設工認では、周波数応答解析における構造物の減衰定数は 5%を用いた (JEAG4601-1987 記載)。

時刻歴非線形解析における粘性減衰の値は、道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 (平成 14 年)⁽⁵⁾において、構造部材の非線形性として履歴モデルを用いる場合には、この部材の履歴減衰は履歴モデルによって自動的に解析に取り入れられるため、履歴モデルにより構造物の履歴減衰を用いる場合には、コンクリート部材は 2% (0.02) 程度、鋼構造部材は 1% (0.01) 程度とするのがよいとされている。

最新の道路橋示方書・同解説 (平成 29 年)⁽⁶⁾においても、履歴モデルにより構造物の履歴減衰を用いる場合の粘性減衰について、鉄筋コンクリート橋脚は 2% (0.02) とされている。

以上のように、粘性減衰は、履歴減衰が生じない状態等における解析上の安定のために設定される値であるため、履歴減衰を用いる場合においては、なるべく小さい値として 2%を採用している。

4. 参考文献

- (1) 松尾ら：コンクリート製地中構造物の合理的な耐震性能評価指標に関する検討，土木学会地震工学論文集，2003
- (2) 石川ら：鉄筋コンクリート製地中構造物の変形性状と損傷状態に関わる実験的考察，第 26 回地震工学研究発表会講演論文集，pp885-888
- (3) 原子力土木委員会・限界状態設計部会：原子力発電所・鉄筋コンクリート製屋外重要土木構造物への限界状態設計法の適用・安全性照査マニュアルの提案，土木学会論文集 No. 442/V-16
- (4) 遠藤ら：鉄筋コンクリート製地中構造物の限界状態に用いるせん断耐力評価法，電力中央研究所報告
- (5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 平成 14 年 3 月
- (6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 平成 29 年 11 月

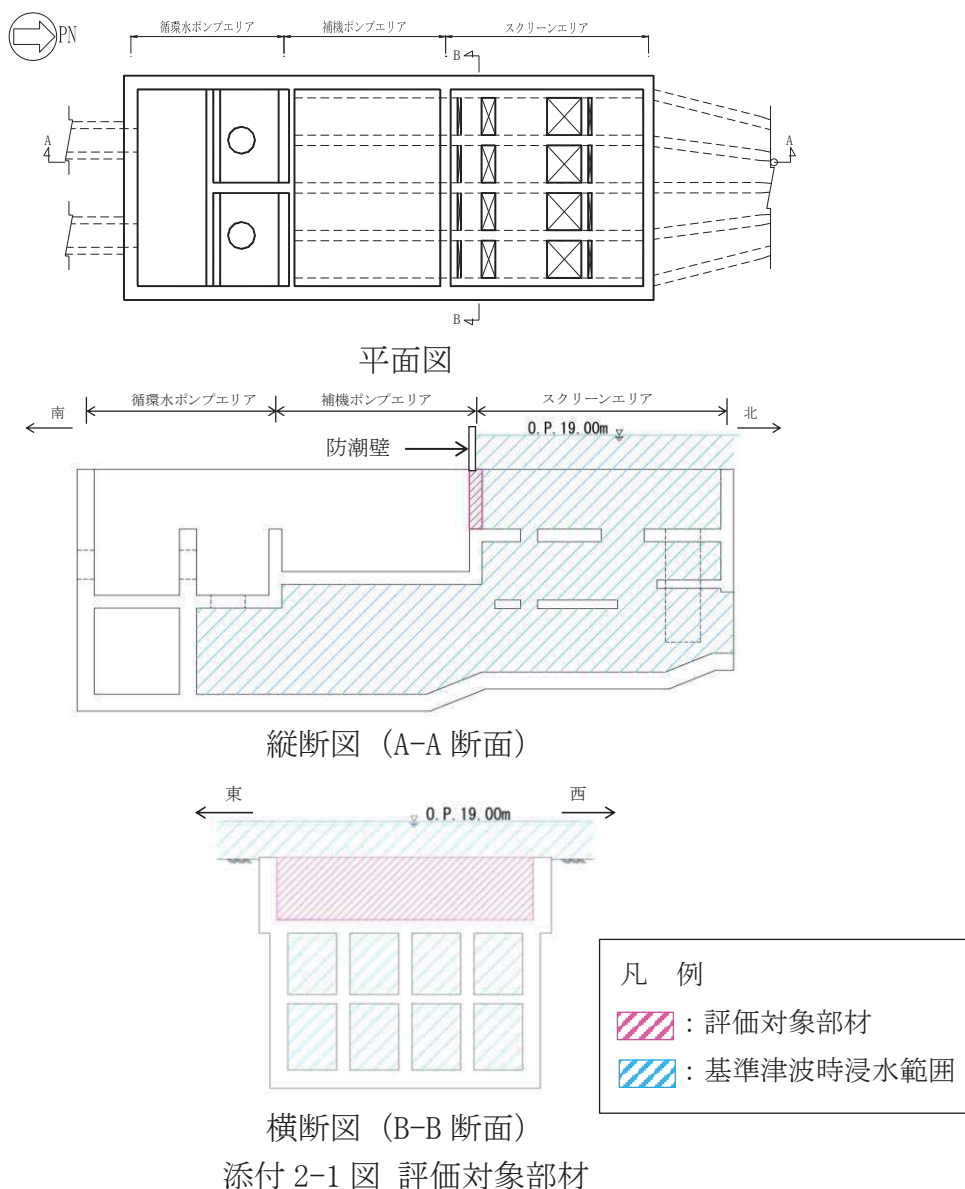
止水機能が要求される部材のひび割れ影響評価方法

1. はじめに

止水機能に対する面外変形の許容限界として、おおむね弾性範囲（コンクリートの圧縮強度に対応するひずみ：2000 μ ，鉄筋の降伏強度に対応するひずみ：1725 μ ）であること，発生せん断力がせん断耐力以下であることを許容限界として設定し，海水ポンプ室隔壁等の RC 部材のみで止水性が要求される部材については，止水機能に影響を及ぼすような顕著なひび割れが発生していないことを解析等により確認する方針としている。

本資料は，解析より得られる応答から止水性を評価する方法は先行プラントでの実績が無いことから，評価方針として面外荷重を受ける止水機能が要求される部材の止水性の評価方法を示すと共に，解析から得られる応答に保守性を見込んだうえでの試算の結果を例示し，部材のおおむね弾性範囲下における面外荷重に対する止水機能の見通しを示すものである。

本資料では，津波時（押波）に止水機能が要求される部材の代表として，添付 2-1 図に示す海水ポンプ室のスクリーンエリアー補機ポンプエリア間の隔壁（以下，隔壁という。）を例に，止水機能に影響を及ぼすような顕著なひび割れが発生していないことの評価方法を示す。また，評価方法に基づき保守的に評価した試算の結果を合わせて示す。



2. 評価方法

2.1 評価フロー

評価の方法として、基準地震動 S_s を経験した後に基準津波が襲来し、海水ポンプ室スクリーンエリアの水位が上昇し、水位が最高水位 (0. P. +19.00m) となった状態に余震が重畳することを想定する。

評価フローを添付 2-2 図に示す。

step1 として基準地震動 S_s を経験した後のひび割れ状態を再現するために、基準地震動 S_s に対する三次元静的材料非線形解析を行う。

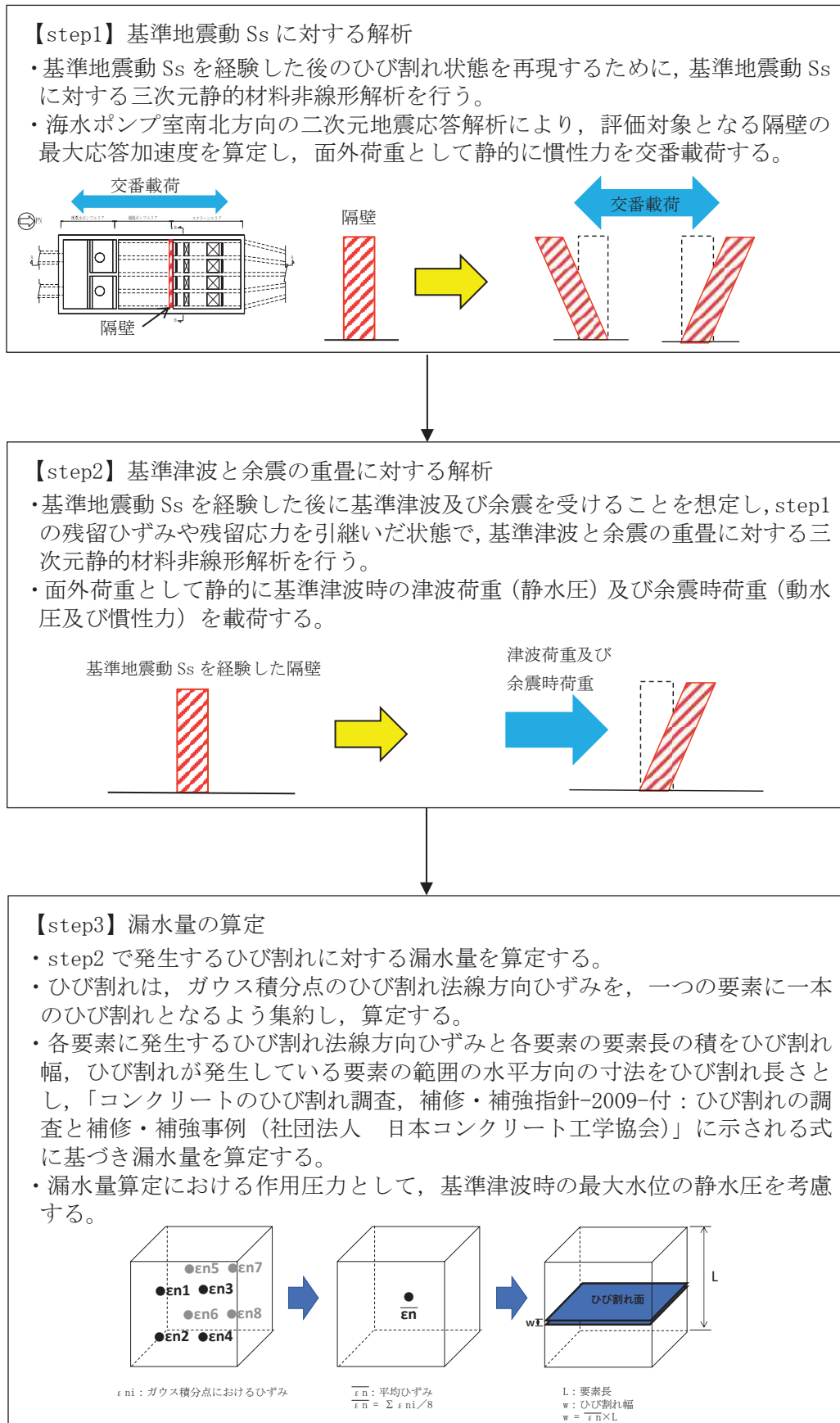
次に step2 として基準地震動 S_s を経験した後に基準津波及び余震を受けることを想定し、step1 の残留ひずみや残留応力を引継いだ状態で、基準津波と余震の重畳に対する三次元静的材料非線形解析を行う。

最後に step3 として step2 で発生するガウス積分点でのひび割れ面に直交する

ひずみ（以下，ひび割れ法線方向ひずみという。）より，ひび割れ幅及びひび割れ長さを算定し，ひび割れに対する漏水量を算定する。

添付 2-2 図に示す評価フローに従った評価方法による試算の結果を「3. 評価例」に示す。

なお，ここでは，先行プラントで実績の無い面外荷重を受ける部材の止水性評価方法を示すため面外荷重のみを考慮しているが，工事計画認可段階では水平 2 方向同時入力の影響検討において，面内荷重も考慮して評価する。

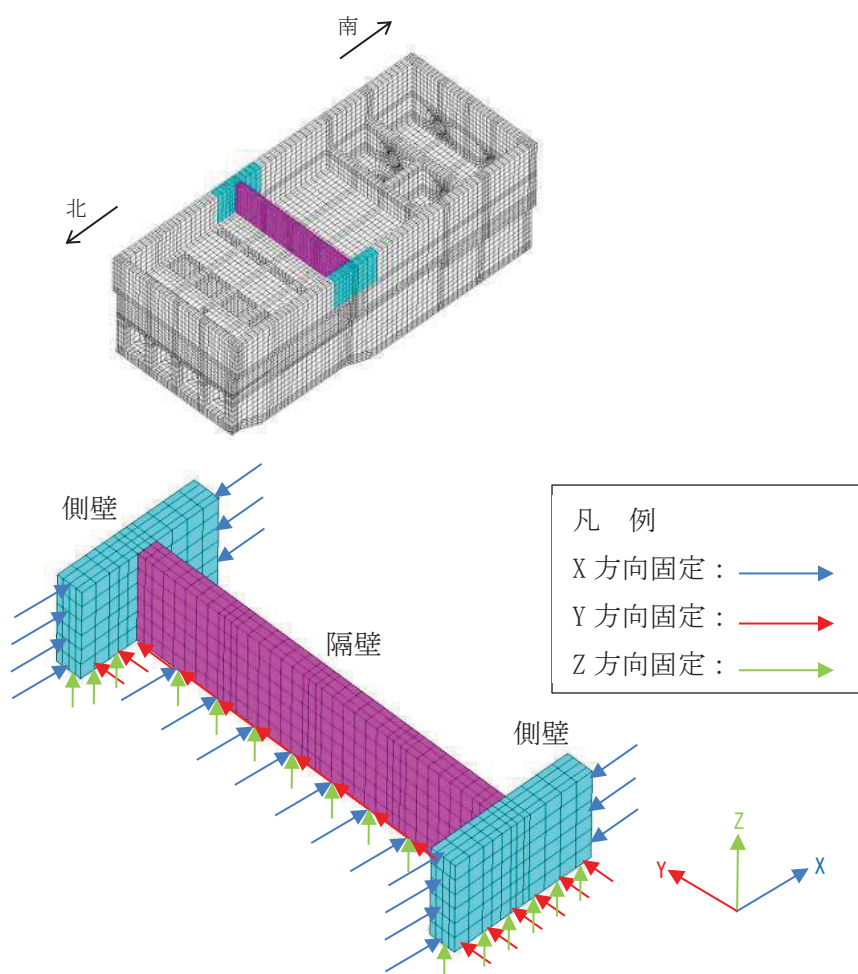


添付 2-2 評価フロー図

2.2 解析モデル

三次元静的材料非線形解析の解析モデルは、評価対象である隔壁及び隔壁と直交する壁（以下、側壁という。）の一部をモデル化する。三次元静的材料非線形解析により、隔壁のひび割れ法線方向ひずみを算出し、ひび割れ法線方向ひずみからひび割れ幅を算定することが目的であるため、隔壁を材料非線形要素でモデル化する。境界条件は、底面固定とし、側壁側面は延長方向（X方向）のみ固定とする。解析モデルを添付 2-3 図に示す。

ここでは、試計算のため隔壁と側壁の一部をモデル化して評価するが、工事計画認可段階では、海水ポンプ室全体の三次元モデルにより評価する。



添付 2-3 図 解析モデル

3. 評価例

評価例として、海水ポンプ室縦断方向の応答が大きくなると考えられる基準地震動 S_s -D2 を検討地震動とした試計算の結果を示す。ここに示す結果は、試計算であるため、算定した荷重を保守的に簡略化して載荷させるなどして評価を行っている。

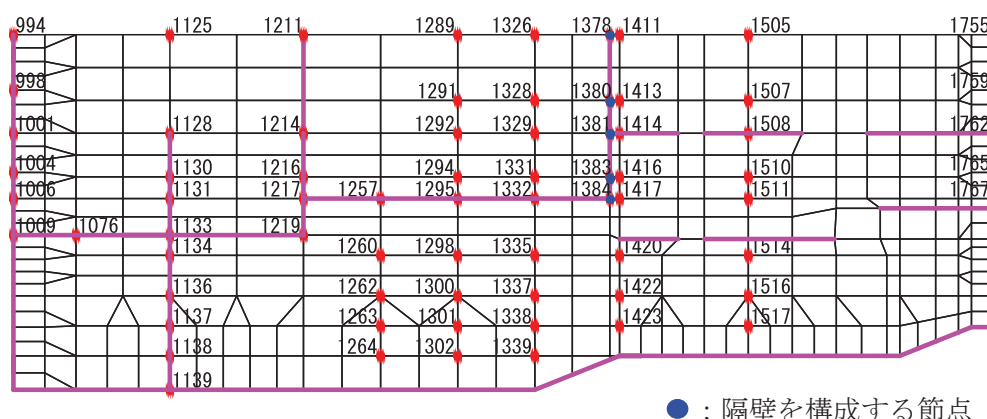
解析モデルは「2.2 解析モデル」に記載のとおりモデル化した。なお、側壁につ

いては照査対象ではなく、隔壁の面外方向荷重に対して非線形化することは無いと考えられるため、線形要素でモデル化した。

評価フローに従い、step1 として基準地震動 S_s に対する解析を行った。海水ポンプ室の縦断方向について、基準地震動 S_s を入力した二次元地震応答解析により、評価対象となる隔壁の応答加速度を算出した。隔壁を構成する節点の応答加速度を添付 2-1 表及び添付 2-4 図に示す。隔壁の上部に行くほど応答加速度は大きくなり、最大応答加速度は隔壁天端の節点で 737gal であった。今回の試算では、737gal を保守的に丸めて最大加速度 1000gal として交番載荷を行った。

添付 2-1 表 隔壁の応答加速度

節点番号	水平方向 最大加速度 (gal)
1378	737.5
1380	684.3
1381	657.0
1383	620.7
1384	601.5



添付 2-4 図 応答加速度算出節点

評価フローの step2 として、交番載荷による残留ひずみや残留応力を引継いだ状態で、基準津波と余震の重畳に対する解析を行った。津波荷重として、基準津波の最高水位 (O. P. +19.00m) における静水圧を考慮した。静水圧は荷重の入力を簡略化するため、隔壁に作用する総荷重が等しくなるような一様荷重とした。また、余震時荷重として、基準津波の最高水位 (O. P. +19.00m) における動水圧と余震時の慣性力を考慮した。動水圧は下式の Westergaard 式から算定することとし、保守的に隔壁下端深度で算定した荷重を一様に載荷した。静水圧及び動水圧の載荷イメージを添付 2-5 図に示す。慣性力は、基準地震動 S_s -D2 に係数 0.58 を

乗じた地震動が弾性設計用地震動であることから、保守的に水平加速度を 600gal (1000gal×0.6) として算定し、一様に载荷した。

(Westergaard 式)

$$p_w = \frac{7}{8} \times c \times \gamma_w \times \sqrt{(h \times y)} \times Kh$$

ここに、

p_w : 動水圧 (tf/m²)

Kh : 水平震度

c : 補正係数

$L/h < 1.5$ の場合 : $c=L/(1.5h)$

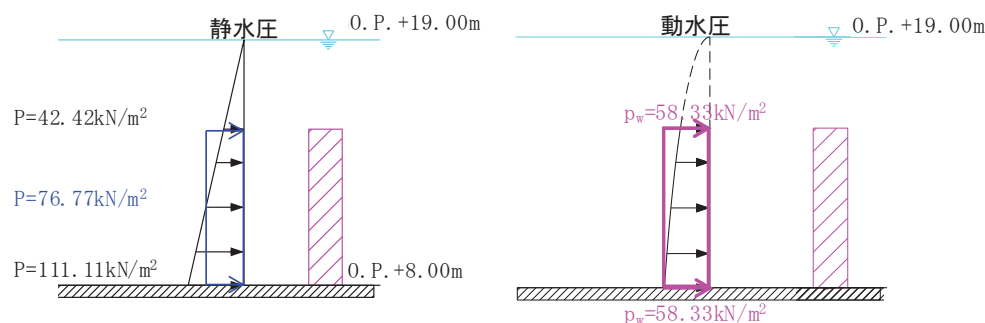
$L/h \geq 1.5$ の場合 : $c=1.0$

L : 水路幅 (m)

γ_w : 内水の単位体積重量 (tf/m³)

h : 水深 (m)

y : 水面から動水圧を求める点までの深さ (m)



静水圧は隔壁上端で 42.42kN/m²、隔壁下端で 111.11kN/m²であるが、荷重の入力を簡略化するため、総荷重が等しい一様荷重となるよう 76.77 kN/m² の一様荷重として载荷した。

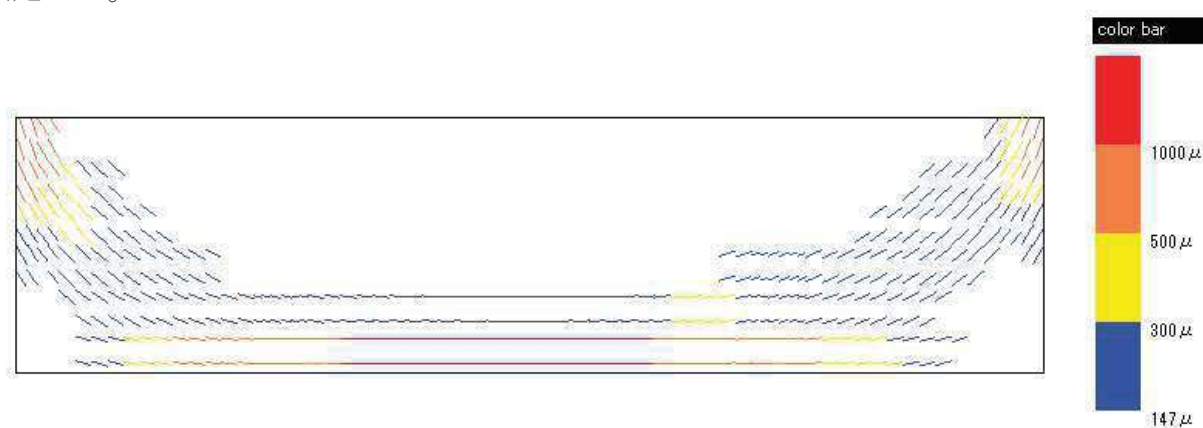
動水圧は保守的に隔壁下端深度で算定した 58.33kN/m² の一様荷重として载荷した。

添付 2-5 図 静水圧及び動水圧の载荷イメージ

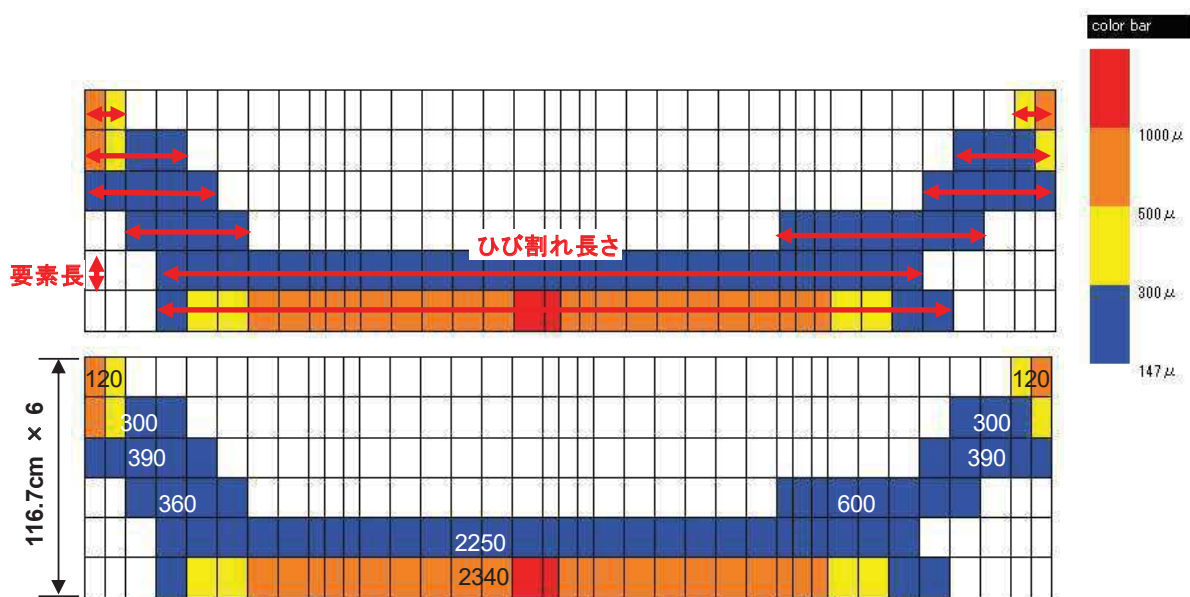
評価フローの step3 として、基準津波と余震の重畳に対する解析により発生したひび割れに対する漏水量の算定を行った。基準津波と余震の重畳に対する解析結果を添付 2-6 図に示す。添付 2-6 図はガウス積分点で算出したひび割れ法線方向ひずみを示している。ひび割れ幅やひび割れ長さを算定するために、ガウス積分点で算出したひび割れ法線方向ひずみを、1 要素につき 1 本のひび割れとなるよう集約した。要素ごとのひび割れ法線方向ひずみに集約したコンター図を添付 2-7 図に示す。添付 2-7 図における各要素のひび割れ法線方向ひずみは、ガウス積

分点で算出したひび割れ法線方向ひずみの平均値を示している。

添付 2-7 図における各要素の鉛直方向の寸法を要素長とし、各要素に発生するひび割れ法線方向ひずみと要素長の積としてひび割れ幅を算定した。ひび割れ幅の算定方法を添付 2-8 図に示す。また、ひび割れが発生している要素の範囲の水平方向の寸法をひび割れ長さとした。ここでは、全てのひび割れが水平方向に発生しているものと仮定した。ひび割れ幅を算定する際は、添付 2-7 図の横方向 1 段ごとに一樣なひずみを想定して算定した。例えば、添付 2-7 図の最下段は 500 μ のコンターが主体的であるため、保守的に 1000 μ で一樣なひずみと想定した。ひび割れ幅及びひび割れ長さの算定結果を添付 2-2 表に示す。ここに示す結果は、隔壁表面の要素に発生するひび割れ幅及びひび割れ長さであるが、保守的に壁厚方向全ての要素に同じひび割れ幅及びひび割れ長さが発生しているものと仮定した。

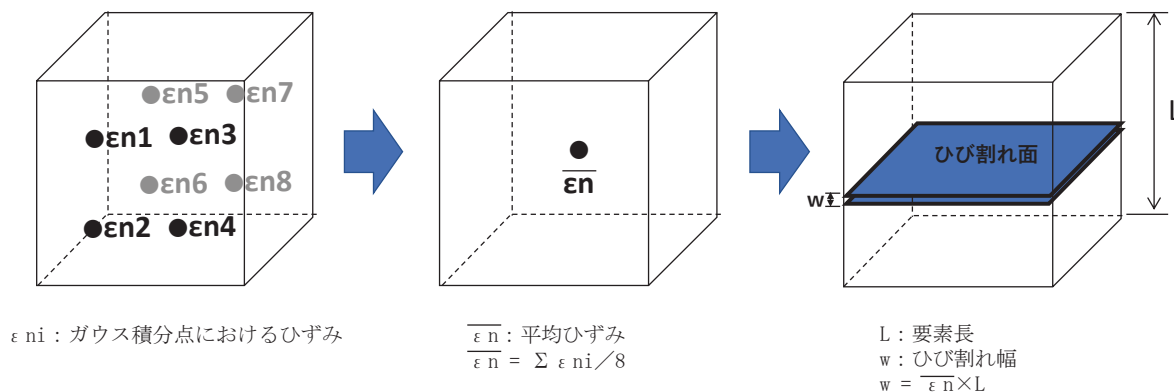


添付 2-6 図 ガウス積分点のひび割れ法線方向ひずみ



※図中の数字はひび割れ長さを示す（単位は cm）。

添付 2-7 図 要素ごとのひび割れ法線方向ひずみ



添付 2-8 図 ひび割れ幅の算定方法

添付 2-2 表 ひび割れ幅及びひび割れ長さ算定結果

ひび割れひずみ (μ)	1000	500	300
要素長 (mm)	1167	1167	1167
ひび割れ幅 (mm)	1.167	0.584	0.350
ひび割れ延長 (m)	25.80	6.00	39.90

算定したひび割れ幅及びひび割れ長さから、「コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針-2009-付：ひび割れの調査と補修・補強事例（社団法人 日本コンクリート工学協会）」に示される下式に基づき漏水量を算定した。

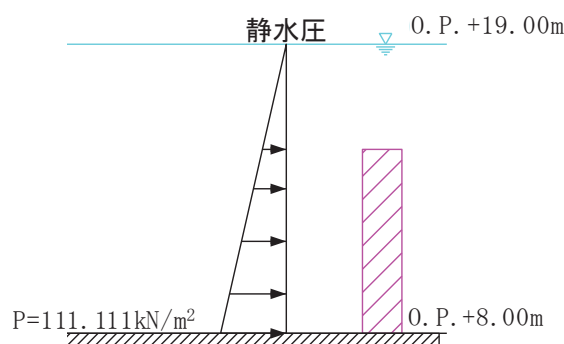
(漏水量算定式)

$$Q = C_w \frac{L \cdot w^3 \cdot \Delta p}{12\nu \cdot t}$$

ここに，

- Q : 漏水量 (mm^3/s)
- C_w : 低減係数
- L : ひび割れ長さ (mm)
- w : ひび割れ幅 (mm)
- Δp : 作用圧力 (N/mm^2)
- ν : 水の粘性係数 (Ns/mm^2)
- t : 部材の厚さ (ひび割れ深さ) (mm)

漏水量算定時の作用圧力は、作用時間の短い動水圧は考慮せず、基準津波の最高水位（O. P. +19.00m）の静水圧（添付 2-9 図）とした。単位時間当たりの漏水量を算定すると添付 2-3 表のとおりとなった。



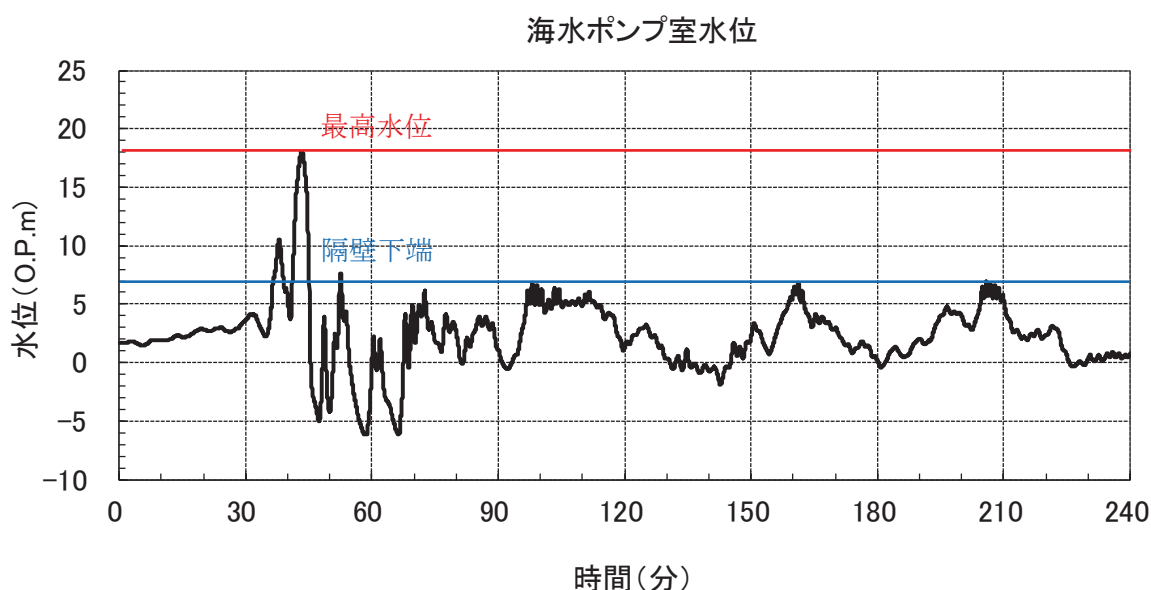
添付 2-9 図 漏水量算定時の作用圧力

添付 2-3 表 単位時間当たりの漏水量

ひび割れひずみ (μ)		1000	500	300
w	ひび割れ幅 (mm)	1.167	0.584	0.350
L	ひび割れ延長 (m)	25.80	6.00	39.90
Cw	低減係数	0.010	0.016	0.031
ν	水の粘性係数 ($N \cdot s/mm^2$)	1.14E-09		
Δp	作用圧力 (N/mm^2)	0.111	0.111	0.111
t	部材の厚さ (ひび割れ深さ) (mm)	1500	1500	1500
Q	単位時間当たりの漏水量 (m^3/s)	0.00213	0.00010	0.00029
	単位時間当たりの総漏水量 (m^3/s)	0.00252		

作用圧力の継続時間を設定するため、津波時の海水ポンプ室における水位の時刻歴波形を添付 2-10 図に示す。なお、添付 2-10 図に示す水位は、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震による地殻変動に伴い、牡鹿半島全体で約 1 m の沈降が発生していることを考慮した記載となっている。基準津波が最高水位となるのは一瞬であるが、保守的に水位が隔壁下端を超える時間（7 分間）を作用圧力の継続時間と設定した。漏水量を算定すると総漏水量は $1.059m^3$ となる。

仮に隔壁からの漏水が補機ポンプエリアに浸水した場合、補機ポンプエリアの面積は約 $604m^2$ であり、浸水高さは 0.002m となる。浸水範囲に設置される原子炉補機冷却海水ポンプのコンクリート基礎高さは 0.275m であるため、試算からは漏水による影響は無いものと判断できる。



添付 2-10 図 海水ポンプ室における水位の時刻歴波形

4. まとめ

解析による止水性評価方針として、津波時に止水機能が要求される海水ポンプ室のスクリーンエリアー補機ポンプエリア間の隔壁を例に、具体的な評価方法と試計算の結果を示した。このように三次元材料非線形解析より得られる応答に基づき、既工認実績のある評価式で漏水量を評価することにより、止水性に影響を及ぼすような顕著なひび割れの有無を確認できると考えられる。

なお、ここで示した試計算の結果は、以下に示す保守的な条件に基づくものであり、工事計画認可段階ではより精緻に評価することとしている。

試計算で考慮した保守性

- ・ step1 における応答加速度を保守的に丸めている。(737gal を保守的に丸めて 1000gal として評価)
- ・ step2 における動水圧を隔壁下端深度で算定した荷重を一様に载荷している。
- ・ step2 における慣性力を保守的に算定し载荷している。
- ・ step3 におけるひび割れ幅算定時に、コンター図の横方向 1 段ごとに一様なひずみを保守的に想定している。(例：500 μ ～1000 μ のコンターが主体的である場合は 1000 μ で一様なひずみと想定)
- ・ step3 において隔壁表面に発生するひび割れを貫通しているものとして評価している。
- ・ step3 における漏水量算定時に、最高水位の継続時間を、水位が隔壁下端を超える時間としている。