

地震時確率論的安全評価（地震 PSA）の指針上での扱いについて

- a) 個別施設の確率論的安全評価（地震 PSA）は、評価に必要な情報の確定時期の観点からは、設備の詳細設計、施工や運用の整備が完了している燃料装荷前以降に実施するのが適切。
- b) このため、指針の枠組みに確率論的安全評価を組み込んだ場合、我が国の段階的規制体系の中で、評価結果の位置づけが不明確になるおそれがある。
- c) 一方で、安全目標に関する指標が具体化されつつある状況から、指針改訂に際して確率論に配慮することも重要と認識。
- d) 安全目標中間とりまとめ^{*}では、安全目標の適用に際して、①リスク評価技術の成熟度合いへの留意と、②試行による課題抽出の 2 つを前提として、③安全審査や指針等の技術基準といった規制活動全体に関わる事項の合理性・整合性を判断する際の参考情報的な扱い、④このような経験を積んだ上で個別施設への適用、と大まかに 2 つの適用段階を想定している。
- e) 運転開始前の個別施設を対象に、地震 PSA を実施し、（安全目標への適合性確認を視野に入れつつ）耐震安全性の妥当性を確認することを規制枠組みとするのであれば、b) に示した段階規制上の不整合、d) に示した安全目標の適用の考え方との整合に十分な配慮が必要と考えられる。
- f) なお、（新設、既設を問わず）個別の施設が安全目標を満足するかどうかの確認や、より具体的な活用方策は、事業者が安全目標適用の経験を積むとの位置づけで、d) の④として事業者自主で実施することが現実的と考える。

※「安全目標に関する調査審議状況の中間とりまとめ」 原子力安全委員会 安全目標専門委員会（平成 15 年 8 月） 「3. 今後の取り組み」より一部抜粋

これまで安全目標を活用した経験がない我が国としては、安全目標はリスク評価技術の成熟度を考慮しつつ、許認可処分等の安全規制活動の包括的評価や、許認可に係る審査指針や技術基準類の整備・改訂、定期的な規制検査計画のあり方の検討など、規制活動の合理性、整合性といった各種規制活動の全体にわたる判断の参考とすることから適用するのが適当である。また、安全目標の適用を開始するに当たっては、適用に際しての課題を抽出、解決するために、試行を実施すべきである。なお、個別の施設に対する規制等、より踏み込んだ適用を行うのは、こうした適用作業を通じて事業者側、規制側ともに経験を積んだ段階で着手するのが適切である。

原子力施設の耐震設計に内在する裕度について

1. まえがき

原子力施設の耐震設計には、地震動の作成から施設の機能確認までの各段階にそれぞれ裕度が存在し、施設は十分な耐震裕度をもっている。この耐震裕度は、不確定性が大きい自然現象に対する設計体系を確定論的に構築する上で重要なものであり、把握しておく必要がある。本資料は、耐震設計審査指針に適合するよう設計された原子力施設に対して、特に、機器・建屋・土木構造物の耐震設計の各段階に内在する裕度に着目して検討したものである。

2. 耐震設計に内在する裕度の評価方針

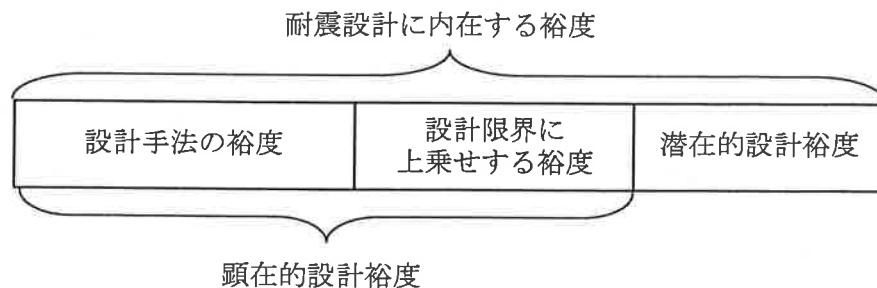
2. 1 耐震設計に内在する裕度

原子力施設の耐震設計に内在する裕度は、設計入力と施設の限界耐力の比で表されるものであり、各設計段階の裕度を総合的に表すものである。この総合的な裕度を評価するにあたり、本検討では便宜上、複数の裕度に区分し検討を行う。

具体的には、まず、解析等により定量評価が可能な“顕在的設計裕度”と定量評価が不可能な“潜在的設計裕度”の2つに分けて検討を行う。

さらに、顕在的設計裕度は、“設計手法の裕度”と“設計限界に上乗せする裕度”に分ける。このうち后者は、設計者の意図やプラントメーカの標準設計に依存するため、耐震設計に内在する裕度を評価する場合は排除すべきとの考えもあるが、これまでの設計実績から明らかに存在するものであり、本検討では、設計に内在する裕度として加えることとする。

以下に本検討において考慮する裕度のイメージを図示する。



2. 2 顕在的設計裕度の評価

(1) 評価方針

原子力施設の建屋および機器・配管系の顕在的設計裕度については、過去にPWR・BWR電力共研「原子力施設の総合的耐震安全性に関する評価」(平成5年度最終報告書)を実施し、この研究成果を基に、原子力発電耐震設計特別調査委員会で審議され、「原子力プラントシステムの総合的耐震安全性評価法に関する調査報告書(以下、「総合耐震評価」)(平成6年3月)がまとめられている。本検討では、この調査結果を基に、最近の知見等を加味して裕度を再整理し、PWR・BWRの代表プラントについて設計裕度の評価を行う。

また、総合耐震評価において土木構築物の評価は行われていなかったため、本検討では、同様の考え方にに基づき屋外重要土木構造物の設計裕度の評価を行う。

(2) 総合耐震評価

「総合耐震評価」では、各設計段階の裕度を以下のとおり分類し、定量的評価を行っており、本評価においても同様の方針により評価を行う。

M1：設計応答評価法のもつ裕度

M2：設計手法による応答計算値と許容限界の間の裕度

M3：設計許容限界のもつ裕度

$$\frac{\text{現実の安全限界}}{\text{現実的応答}} (M) = \frac{\text{設計手法による応答}}{\text{現実的応答}} (M1) \times \frac{\text{設計許容限界}}{\text{設計手法による応答}} (M2) \times \frac{\text{現実の安全限界}}{\text{設計許容限界}} (M3)$$

2. 3 潜在的設計裕度の評価

潜在的設計裕度を明確に定量化することは難しいが、機器・配管系、建屋および土木構築物のそれぞれについて裕度を生むと考えられる要因を定性的に抽出する。

3. 顕在的設計裕度

3. 1 機器・配管系

機器・配管系の顕在的設計裕度は、前述の評価方針のとおり総合耐震評価結果を基に、最近の知見及び試験結果を加味して裕度を再整理し、PWR・BWRの代表プラントについて定量的に評価した。

なお、本評価では設計用入力地震動の設定までに内在する裕度を評価対象外としている。

(1) 評価対象プラントおよび想定地震動

a. 対象プラント

BWR：1100MWe Mark II (改) 現行指針適合の代表プラント

PWR：1100MWe 4-Loop 現行指針適合の代表プラント

b. 入力地震波

BWR：低地震帯用遠距離S2地震動 (改良標準化委員会作成)

PWR：高地震帯用遠距離S2地震動 (改良標準化委員会作成)

(2) M1の評価

(a) 評価内容

現行の耐震設計では、現実的には分布するパラメータを、保守性のある単一パラメータで代表させたり、応答の多次元性を簡易に評価する保守的な設計手法が用いられている。ここではこれら評価法の裕度を以下のとおり $M1_{DMP}$ 、 $M1_M$ 、 $M1_{FRS}$ に分類して評価した。なお、この分類は「総合耐震評価 (機器編)」と同様である。

$$M1 = M1_{DMP} \times M1_M \times M1_{FRS}$$

$M1_{DMP}$ ：減衰定数による裕度

$M1_M$ ：応答解析手法による裕度

$M1_{FRS}$ ：床応答スペクトルの拡幅による裕度

ここで、M1に関するパラメータ設定法を表3-1示す。また、M1を構成する各裕度 ($M1_{DMP}$ 、 $M1_M$ 、 $M1_{FRS}$) の算出にあたり実施した解析ケース (パラメータの組合せ) を表3-2に示す。これら解析ケースは対象設備毎に評価し、各裕度を算出している。以下に、配管 (区分1保温材有り) の評価例を記す

(例) 配管 (区分1保温材有り) の評価例

○ $M1_{DMP}$

解析ケースA：減衰定数 2.5%の時刻歴応答解析

解析ケースB：減衰定数 8.0%の時刻歴応答解析

○ $M1_M$

解析ケースA：減衰定数 2.5%のスペクトルモーダル解析(拡幅なし)

解析ケースB：減衰定数 2.5%の時刻歴応答解析

○ $M1_{FRS}$

解析ケースA：減衰定数 2.5%のスペクトルモーダル解析(10%拡幅)

解析ケースB：減衰定数 2.5%のスペクトルモーダル解析(拡幅なし)

表 3-1 各種評価法に設定したパラメータ

| 項目 | パラメータの設定 | |
|----------------|---|--|
| | 現行設計手法 (解析ケースA) | 現実的手法 (解析ケースB) |
| 設計用減衰定数 | 現行設計手法として用いられる減衰定数を用いる 配管 区分1 保温材有 :2.5% 保温材無 :2.0% 区分2 保温材有 :1.5% 保温材無 :1.0% 区分3 保温材有 :1.0% 保温材無 :0.5% 機器 :1.0% 電気盤 :4.0% ケーブルトレイ :5.0% 電線管 :3.0% 1次冷却材ループ(PWR) :3.0% 制御棒駆動装置(PWR) :5.0% 制御棒駆動機構(BWR) :3.5% 燃料集合体(BWR) :7.0% 燃料集合体(PWR) :10~15% | 試験データ等に基づき設定された減衰定数を用いる 配管 区分1 保温材有 :8.0% 保温材無 :7.5% 区分2 保温材有 :5.5% 保温材無 :5.0% 区分3 保温材有 :4.5% 保温材無 :4.0% 機器 :2.0% 電気盤 :7.5% ケーブルトレイ :6.8% 電線管 :7.6% 1次冷却材ループ(PWR) :4.8% 制御棒駆動装置(PWR) :5.0% 制御棒駆動機構(BWR) :3.5% 燃料集合体(BWR) :8.5% 燃料集合体(PWR) :10~15% |
| 応答解析手法 | 現行設計手法の以下の方法を用いる ・時刻歴応答解析 ・スペクトルモーダル解析(SRSS) | 時刻歴応答解析を用いる |
| 設計用床応答スペクトル拡幅法 | 現行設計手法の以下の10%拡幅の床応答スペクトルを用いる | 拡幅無しの床応答スペクトルを用いる |

表 3-2 解析ケース

| パラメータ | | 設計用減衰定数に含まれる裕度 (M_{1DMP}) | | 応答解析手法に含まれる裕度 (M_{1M}) | | 応答スペクトルの拡幅に含まれる裕度 (M_{1FRS}) | |
|-------------|-----------------------|-------------------------------|---|----------------------------|---|----------------------------------|---|
| | | A | B | A | B | A | B |
| 応答解析手法 | 現実的手法 (時刻歴応答解析) | ○ | ○ | | ● | | |
| | 現行設計手法 (スペクトルモーダル解析等) | | | ● | | ○ | ○ |
| 減衰定数 | 現実的値 | | ● | | | | |
| | 設計値 | ● | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 床応答スペクトル拡幅率 | 0% | - | - | ○ | - | | ● |
| | 10% | - | - | | - | ● | |

注) *1:各裕度は、解析A、Bの応答比により求める

*2:○および●は各パラメータの選択枝のうち●は評価対象を示し、-はそのパラメータが無関係であることを示す。

(b) 評価結果

M1_{DMP}、M1_M、M1_{FRS} およびトータルのM1の評価結果を表3-3に示す。

表3-3 M1評価結果

| 裕度分類 | スペクトルモード解析を用いる設備 (配管、剛ではない設備) | | 時刻歴解析を用いる設備 | | 静的解析を用いる設備 (剛な設備) | |
|-------|----------------------------------|--------------------|-------------|------|----------------------|------|
| | PWR | BWR | PWR | BWR | PWR | BWR |
| M1DMP | 配管：1.47 機器：1.09 | 配管：1.19 機器：1.10 | 1.01 | 1.07 | — | — |
| M1M | 配管：1.20 機器：1.20 | 配管：1.29 機器：1.04 | — | — | — | — |
| M1FRS | 配管：1.37 機器：1.15 | 配管：1.16 機器：1.10 | — | — | — | — |
| M1合計 | 配管：2.42 機器：1.50 | 配管：1.78 機器：1.26 | 1.01 | 1.07 | 1.00 | 1.00 |

(3) M2の評価について

(a) 評価内容

M2について、強度に対しては算出された応力と許容応力、動的機能に対しては応答加速度と機能確認済み加速度を比較する。なお、応力は地震により発生する応力を用い、許容応力は地震による発生応力に対して許容できる応力値を用いており、一般的に工認等の耐震計算書に示された応力や許容応力とは異なることに注意が必要である。

(b) 評価結果

M2の範囲および平均値を表3-4に示す。

表3-4 M2評価結果

| | 範囲 | 平均値 |
|-----|------------|-------|
| PWR | 1.44～66.08 | 6.45 |
| BWR | 2.47～124.3 | 13.43 |

(4) M3の評価について

(a) 評価内容

「総合耐震評価」では、M3として設計基準強度の有する裕度(M3_D)を評価するとともに、動的機器については、過去の加振試験の結果に基づき、個別機器毎に機能維持確認済み加速度に対する裕度(M3_{ACT})を評価している(詳細は表3-5参照)。本検討では新たに得られた知見を基に以下の3項目を追加した。

M3_μ：塑性エネルギー吸収を考慮した裕度

M3_{PPG}：配管の許容応力に含まれる裕度

M3_{STR}：支持構造物の許容応力に含まれる裕度

表 3-5 総合耐震評価 (機器編) M3 のまとめ

| 調査項目 | 調査文献 | M3 評価 | | 備考 |
|--------------------|---|--|--|---|
| | | 考察 | M3 | |
| 機能確認済み加速度値との比較 | 1) 助的機器の地震時機能維持に関する研究 最終報告書 (別冊 N o 1) ~立型ポンプ~ 電力共研- 2) 助的機器の地震時機能維持に関する研究 最終報告書 (別冊 N o 2) ~横型ポンプ~ 電力共研- 3) 助的機器の地震時機能維持に関する研究 最終報告書 (別冊 N o 3) ~ポンプ駆動用タービン~ 電力共研- 4) 助的機器の地震時機能維持に関する研究 最終報告書 (別冊 N o 4) ~電動機~ 電力共研- 5) 助的機器の地震時機能維持に関する研究 最終報告書 (別冊 N o 6) ~弁~ 電力共研- 6) 原子力発電施設信頼性実証試験の現状 (平成 3 年) (1. 4 非常用ディーゼル発電機システム耐震実証試験) | 1) 軸受面圧については、地震時許容値が規定されていないため常時の値を準用しており、一般に短期荷重に対する許容値割増が可能なことを考慮すると、6割以上の裕度があると推定される。 | 1. 6 以上 | 各部応答の評価基準より設定 |
| | | 2) 軸継手の伝達荷重算定には加振試験結果の応答倍率の平均値を用いており、試験結果に多少のばらつきがある。これを考慮すると裕度は6割以下と推定される。 | 1. 6 以下 | |
| | | 3) H P C I タービンは、リップル現象の進展による影響が不明であり、裕度の推定困難。R C I C タービンはヨーク部応力より、約 2 倍の裕度、A F W P タービンはボルト応力より約 2 割の裕度があると推定される。 | R C I C : 約 2. 0 (ヨーク部応力) A F W P : 約 1. 2 (ボルト応力) | |
| | | 4) 各型式ともに電動機単体としては、最小 3. 6 倍程度の裕度があるが、被動機側との軸継手部の評価が被動機側で実施されるため、個々に裕度評価が必要となる。 | 3. 6 程度 | |
| | | 5) 弁型式ごとに分けた基準値とすれば、玉形弁 8 G、仕切弁 7 G、パタフライ弁 1 0 G とすることが可能と考えられる。 | 玉形弁 : 1. 3 3 仕切弁 : 1. 1 7 パタフライ弁 : 1. 6 7 | |
| | | 6) 限界加振試験における D C 機関軸心レベルの応答加速度 1 2 4 9 G a l (1. 2 7 G) を限界加速度とみなす。 | 1. 1 5 | |
| 加振実験 (盤及び器具) 試験データ | 1) 原子力発電所用計装制御装置の耐震性に関する試験研究 - (社) 日本電気協会 - 2) B W R 6 電力及び日立・東芝による電気品加振試験 3) 盤ラック類耐震試験報告書及び耐震計算書 4) 電気・計装機器の耐震実証試験に関する共同研究最終報告書 - P 電力共研 - | (B W R) リレー類及び計装制御品類については、水平 3 G、上下 1 G の入力に対する健全性が現状設計の目安値となっており、2) によれば 2 倍以上の裕度があると考えられる。一方、筐体 (電気盤) は現状 A s クラスを 2 0 H z 以上 (剛) の設計としており、B W R プラントの Z P A として最大 1 G 程度であることから、器具類の設計条件を十分満足している。 | (B W R) 限界耐力に対して現状設計目安値は筐体 (電気盤) では 2 倍以上、リレー類及び計装制御品類 (器具) では、1 ~ 3 倍程度の裕度があると考えられる。 | (B W R) 左記の (社) 日本電気協会による試験及びメーカー社内試験を参照し、現状目安値を下記として裕度を設定する。 制御盤 : 1. 0 2 G (J E A G) 電源盤 : 1. 0 G (メーカー) リレー他器具 : 3 G (メーカー) 計装ラック : 1. 0 ~ 1. 5 G 程度 (メーカー) |
| | | (P W R) 耐震設計を行う際には、今後計画されている各プラントの床応答曲線を包絡した床応答曲線を作成し、この床応答曲線から工学的判断に基づき要求加速度値を決定する。そしてこの要求加速度値を越える加速度値での機能維持確認試験を行うことにより、盤及び器具の耐震性を確認している。したがって、この時に確認された加速度値が許容値となる。しかしながら、実験により確認されている加速度は、加振台の性能等の限界のため、必ずしも現実の安全限界の値が得られていないのが現状である。 | (P W R) 米国の地震 P S A で品質保証試験レベルの $\sqrt{2}$ 倍のレベルを中央値としていることを参考に、この値を用いる。 | (P W R) 左記の試験により確認されている機能確認済加速度は、以下のようになる。 制御盤 : 1. 4 4 ~ 2. 2 5 G 電源盤 : 1. 3 5 ~ 1. 8 5 G リレー他器具 : 5 ~ 1 0 G 計装ラック : 2 G 程度 |
| 許容限界 | 原子力発電所の耐震設計技術指針 (J E A G 4 6 0 1 補 - 1 9 8 4) 許容応力編 - (社) 日本電気協会 - | (容器) 許容応力の基になったデータが、A S M E. S e c I I I のデータなので、現在、地震 P S A 等で用いられる値を流用する。 (配管) 地震 P S A 等で用いられる値を流用する。 | (容器) M 3 = 1. 2 5 * (配管) M 3 = 1. 2 5 * | *Z I O N P r o b a b l i s t i c S a f e t y S t u d y, C o m m o n w e a l t h E d i s o n C o m p a n y, C h i c a g o, I l l i n o i s, 1 9 8 1 |

(b) 評価結果

M3の評価結果を表3-6に示す。

表3-6 M3評価結果

| 裕度分類 | 機器 | | | 配管 | 動的機器 |
|----------|-----------------|--------------------------------------|-------|--------|----------------------------|
| | 耐圧部、 炉心支持構造物 | 1～3種支持構造物 その他の支持構造物 (主機サポート含む) | 基礎ボルト | 耐圧部 | |
| M3D | 1.25 | 1.25 | — | — | — |
| M3 μ | — | — | 1.82 | — | — |
| M3PPG | — | — | — | (3.0～) | — |
| M3STR | — | 1.25 | — | — | — |
| M3ACT | — | — | — | — | PWR:1.0～1.6 BWR:1.0～2.0 |
| M3合計 | 1.25 | 1.56 | 1.82 | (3.0～) | 1.0～2.0 |

M3 μ : 基礎ボルトについては、文献より荷重低減係数 $D_s=0.458$ が得られていることから、裕度を $1/0.458=2.18$ とした。ただし、基礎ボルトの許容応力はS2地震時 $1.2S_y$ を用いているため $2.18/1.2=1.82$ とし、総合耐震評価（機器編）にあるM3D=1.25についてはM3 μ に含まれるため考慮しないこととした。

M3_{PPG} : 電共研において配管要素試験体に対する慣性加振試験が行われているが、 $1.0S_m$ 程度でも崩壊による損傷が発生していないことから、安全余裕を3以上とした。ただしこの結果は試験結果に基づくため、M3D=1.25も含んでいることからこれは考慮しないこととした。

M3_{STR} : ASME SecIIIでは $1.5S_y$ を許容値として用いていることから、JEAGの $1.2S_y$ に対する安全率として $1.5S_y/1.2S_y=1.25$ を用いた。

(5) 総合評価

設計手法の裕度（M1×M3）と設計限界に上乗せする裕度（M2）と分類し、表3-7に示す。

表3-7 M1×M3およびM2

| | M1×M3 | M2 |
|-----|--------|------------|
| PWR | 1.25以上 | 6.45 (平均) |
| BWR | | 13.43 (平均) |

表3-7から、設計手法の裕度 (M1×M3) として1.25以上の裕度が確保され、さらにM2を見込むことで顕在的設計裕度として表3-8に示す範囲の裕度が得られることが確認された。

表3-8はMの範囲 (個別機器毎に算出されたMin (M1×M2×M3) ~Max (M1×M2×M3)) を示したものである。

表3-8 個別機器で算出されたMの範囲

| | Mの範囲 |
|-----|------------|
| PWR | 2.90～95.8 |
| BWR | 5.05～186.4 |

M2を設計裕度として見込むことに対しては議論となるところであると思われるため、M2について考察を加えることとする。実際の機器の設計においては地震以外による発生応力 (内圧や自重) が支配的な要因で設計されているものが多いが、このような場合 (α が小さい場合) 下式の関係から、設計者の判断でとられる裕度 β に対しM2は大きくなる傾向にある。

例えば、設計者がある機器を2割の裕度をもたせて耐震設計したとすると β は1.2となるが、その機器における地震による発生応力が総発生応力に対し1/4 ($\alpha = 1/4$) であった場合、M2は1.8確保されることとなる。

$$M2 = (\beta - (1 - \alpha)) / \alpha$$

α : 地震による発生応力 / 総発生応力

β : 許容応力 / 総発生応力

また、地震が支配的な要因として設計されるような支持構造物や電気品等については、通常はその部材や機器の選定において裕度をもたせて選定されるため、M2が1.0となるようなことはないと考えられる。

以上より、M2は、通常的设计でそれなりに確保されるものであり、結果論ではあるが、あるプラントの場合、表3-8に示す値程度は確保されていることが実績として示されたものと考えられる。

3.2 建屋

建屋の顕在的設計裕度は、前述の評価方針のとおり総合耐震評価結果に基づき、耐震設計に内在する裕度を整理した。

(1) 評価対象プラントおよび想定地震動

評価対象プラント、支持地盤及び想定地震動を表3-9に示す。

S2 地震時の建屋の健全性を保つために重要な構造要素は、鉄筋コンクリート造耐

震壁（以下、「RC 耐震壁」と記す）であるため、建屋の限界は耐震壁の構造限界とし、個々の RC 耐震壁について評価を行っている。また、RC 耐震壁の構造限界は、現行設計における S2 地震時機能維持検討法に従い、終局状態におけるせん断ひずみとする。

したがって、ここでの検討においては、応答値及び限界値は、せん断ひずみ度で定義している。

想定地震動は、S1 地震動にほぼ弾性限度となるように設計された原子炉建屋を想定して検討を実施するために用いる地震動であり、耐震設計上のマージンを含まないことを考慮して、S1 地震時に最大応答を示す耐震壁のせん断応力度（せん断ひずみ度）が復元力特性の骨格曲線の第一折点付近となるように、表 3-9 に示す S2 地震動を係数倍して用いている。

表 3-9 評価対象プラント及び支持地盤、S2 地震動

| 建屋 | 支持地盤のせん断波速度 | S2 地震動（改良標準化委員会作成） |
|------------------|-------------|--------------------|
| BWR 型 Mark-I 建屋 | 1000 m/s | 高地震地帯用遠距離波 |
| BWR 型 Mark-II 建屋 | 500 m/s | 低地震地帯用遠距離波 |
| PWR 型 3-Loop 建屋 | 2000 m/s | 高地震地帯用遠距離波 |
| PWR 型 4-Loop 建屋 | 1500 m/s | 高地震地帯用遠距離波 |

(2) M1 の評価

M1（応答の裕度）は、現実的応答のせん断ひずみ度と、設計モデルによる応答せん断ひずみ度の比としている。

現実的応答は、現在の知見の範囲内で、可能な限り影響因子の変動を考慮し、かつ、その影響因子に内在する安全率をできるだけ排除して評価した S2 地震時応答としている。影響因子としては、現実的応答の評価に対する影響が大きいと考えられる因子に対して感度解析を行った結果、以下の 3 因子を選定している。

- ① コンクリート強度
- ② 支持地盤のせん断波速度（地盤ばねへの反映）
- ③ RC 造耐震壁の復元力特性（ $\tau - \gamma$ 関係スケルトンカーブ）

これらの影響因子を変動させ、非線形地震応答解析により現実的応答を評価し、その中央値と設計モデルによる応答せん断ひずみ度の比を、M1 とした。

$$M1 = \text{設計応答せん断ひずみ度} / \text{現実的応答せん断ひずみ度}$$

(3) M2 の評価

M2（設計裕度）は、設計モデルにより評価される応答せん断ひずみ度と、設計用許容せん断ひずみ度（ 2×10^{-3} ）の比としている。

$$M2 = \text{設計用許容せん断ひずみ度} / \text{設計応答せん断ひずみ度}$$

(4) M3の評価

M3（限界の裕度）は、現実的限界（終局せん断ひずみ度）と設計用許容せん断ひずみ度（ 2×10^{-3} ）の比としている。

現実的限界は、過去に実施された RC 耐震壁を対象とした44体の模型試験体の静的水平加力実験結果から得られた終局せん断ひずみ度の中央値としている。また、終局せん断ひずみ度は、ボックス壁と円筒壁に分類して評価した。表3-10に実験結果から得られた終局せん断ひずみ度を示す。

$$M3 = \text{終局せん断ひずみ度の中央値} / \text{設計用許容せん断ひずみ度}$$

表3-10 RC耐震壁の終局せん断ひずみ度

| | 中央値 |
|--------------------|-----------------------|
| ボックス壁 (Mark-I, II) | 5.21×10^{-3} |
| 円筒壁 (3-, 4-Loop) | 9.30×10^{-3} |

(5) 総合評価

表3-11に安全裕度の評価結果を示す。建屋のせん断ひずみ度を評価尺度とした耐震安全性指標（M）は、15.2～22.4である。

なお、評価結果は、各建屋部材の中でMの中央値が最小となる部材について示している。

表3-11 評価結果

| 建屋 | M1 応答の裕度 | M2 設計裕度 | M3 限界の裕度 | M 全体での裕度 |
|---------|-----------------|----------------|-----------------|------------------|
| | 設計応答 / 現実的応答 | 設計限界 / 設計応答 | 現実的限界 / 設計限界 | 現実的限界 / 現実的応答 |
| MARK-I | 2.05 | 3.21 | 2.60 | 17.1 |
| MARK-II | 1.52 | 3.86 | 2.60 | 15.2 |
| 3-LOOP | 1.50 | 3.18 | 4.65 | 22.2 |
| 4-LOOP | 1.71 | 2.82 | 4.65 | 22.4 |

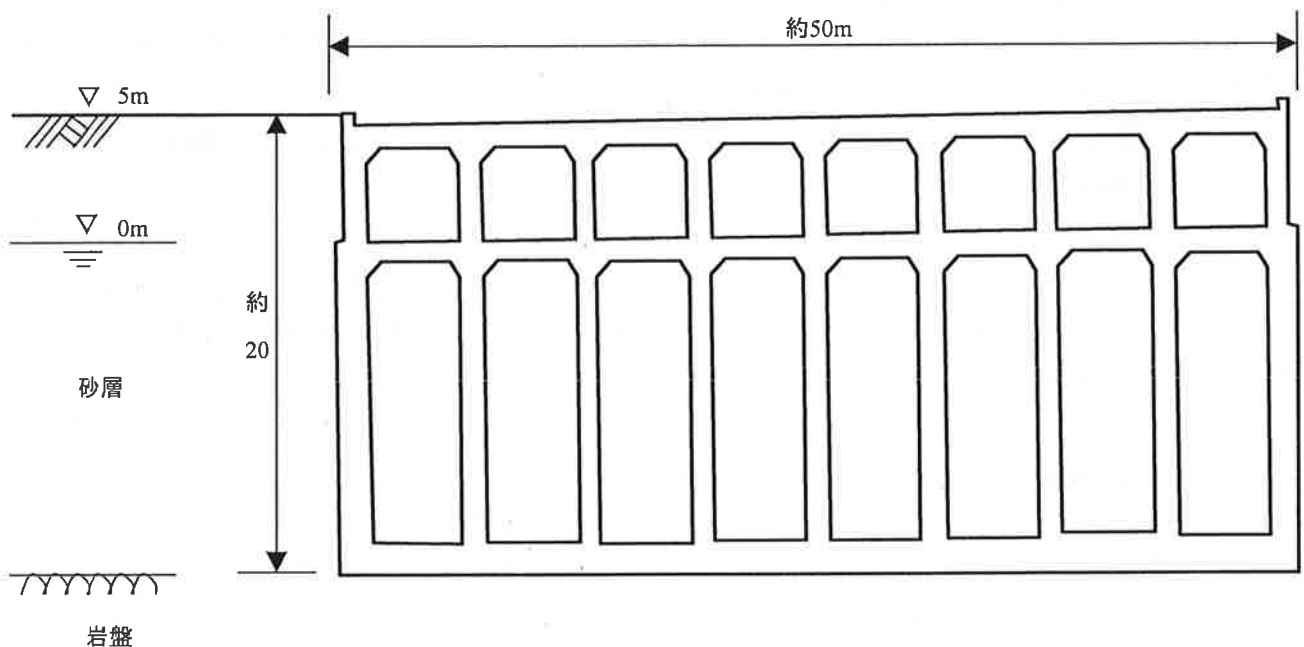
3.3 土木構築物

土木構築物については、「原子力プラントシステムの総合耐震安全性評価法に関する調査報告書」では検討対象となっていないことから、同報告書（建築編）を参考に検討を行った。

(1) 検討対象構築物および検討用地震動

土木構築物は、各サイト毎に地形・地質状況、構築物配置などが異なるため、標準的な安全裕度を定量的に把握することは困難であることから、下に示す標準的なモデルを対象に検討を実施した。

a. 検討対象構築物・・・・・・・・・・取水ピット



b. 検討用地震動・・・・・・・・・・最大加速度が 300gal 程度の地震動 最大加速度が 600gal 程度の地震動

(2) M1 の評価

応答の裕度（M1）は、設計時に与える条件（地盤物性やコンクリート強度など）の裕度といえる。設計で与える条件に関しては、建築で扱う構築物も土木で扱う構築物も大きな差はないと考えられる。しかし、土木構築物は一般に地中構築物であり、その地震時応答は地盤の応答に支配されると考えられ、設計時に与える条件による裕度が建築で扱う構築物より小さい可能性がある。

そこで、ここでの評価としては、原子力発電耐震設計特別調査委員会「（建築編）調

査報告書」に示されている最小値を参考に以下のとおりと考える。

$$M1 = 1.0 \sim 1.5$$

(3) M2の評価

設計の裕度 (M2) は、合理的な設計を実施すれば1に近い値になると考えられる。実際の設計では若干の裕度を考慮するものと考え、ここでの評価としては以下のとおりと考える。

$$M2 = 1.1$$

(4) M3の評価

土木構造物の耐震設計手法については、従来、許容応力度手法により設計されてきたが、現在では、構造物の変形性能に着目して性能照査型の設計体系へ移行されてきている。コンクリート標準示方書がよい例である。

構造物の現実の安全限界については、大型振動台を用いた実験および数値解析により検討してきたが、現状では限界の裕度 (M3) すなわち現実の安全限界を評価するのは難しいと考えられる。

したがって、ここでは各設計手法 (①許容応力度設計 [線形解析], ②耐力照査設計 [等価線形解析], ③変形性能照査設計 [非線形解析]) の間にある裕度を把握し、限界の裕度 (M3) として評価することとした。

a. ①許容応力度設計と②耐力照査設計の間の裕度

両設計手法の比較は、「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル」(土木学会 原子力土木委員会 1992.9) に記載がある。取水ピットについて同一地震動を用いて両手法により設計した場合、耐力照査設計によれば許容応力度設計に比べて断面力が低減し、鉄筋量を20%程度減らすことができるとしている。

したがって、①許容応力度設計と②耐力照査設計の間には、若干の裕度(2割程度)があると考えることができる。

b. ②耐力照査設計と③変形性能照査設計の間の裕度

最大加速度300gal程度の地震動を用いて耐力照査設計した取水ピット構造物に、最大加速度600gal程度の地震動を与えて、変形性能照査設計(「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・同マニュアル」(土木学会 原子力土木委員会 2002.5) に記載の手法)で照査することで両設計手法間の裕度を把握した。この結果、最大加速度600gal程度の地震動を与えても耐震安全性を有することを確認した。

したがって、②耐力照査設計と③変形性能照査設計の間には、地震動で少なくとも2倍程度の裕度があると考えることができる。

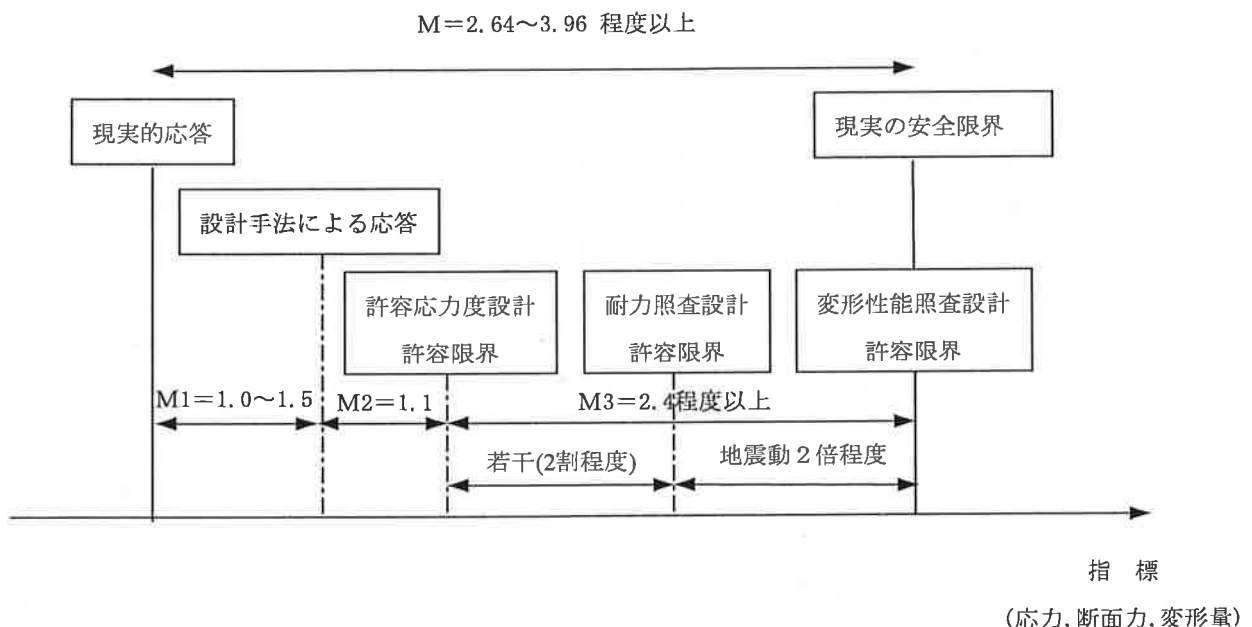
以上のことから、限界の裕度 (M3) の評価としては以下のとおりと考える。

$$M3 = 2.4 \text{ 程度}$$

(5) 総合評価

(2) ~ (4) の評価結果から、土木構造物の顕在的設計裕度は少なくとも以下のとおりと評価することができる。

$$M = 2.64 \sim 3.96 \text{ 程度以上}$$



4. 潜在的設計裕度

本項において、現状では明確に定量化することは難しいが、潜在的に保持しているものと考えられる裕度について考察する。

4. 1 機器・配管系

(1) M1に関する潜在的設計裕度

「総合耐震評価」で考慮した現実的減衰値は、既往試験事例から平均値的発想で一律で定めたものであるが、減衰のメカニズムに立ち返ると、応答変位に依存しないものと、変位の増大に伴い増減するものに区別できる。ここで、応答変位が大きくなるにつれ減衰値が増すような構造のものについては、S2相当の地震動に対し

て潜在的設計裕度を有しているものと考えられる。

また、一般の床置機器で配管が設置されている場合等、付属物の影響（例えば、タンクに接続されている配管や水位計等）で付加される減衰が期待でき、水中に設置されている構造物等は、流体による付加減衰が期待できるものと考えられる。

2 (3) c)において今回新たにM3として、材料が一部塑性変形することによりエネルギーが吸収されることによる効果について、文献により知見の得られた基礎ボルトにのみ取り込んでいるが、他の構造物についても同様な応答低減効果があるものと考えられる。

他に一般論として展開できるものではないが、個々の設備のモデル化において多くの場合安全側に設定される強度負担断面、モーメントアーム、境界条件、接合条件、内包流体の水位等による影響についても潜在的裕度のひとつとして考えられる。

(2) M3に関する潜在的設計裕度

M3に関連するものとして、機器・配管系の損傷モードは、地震による振動の一回の慣性力で崩壊するようなものではなく、交番荷重であるがゆえ、負荷は変位制御的に作用し最終的には疲労モードで破壊に至るといふ、最近得られつつある知見がある。

したがって疲労に対する裕度がクリティカルと仮定し、疲労評価における裕度に着目した場合、現行の耐震設計の疲労評価に用いられる設計用疲労曲線はベストフィット疲労曲線から、応力で2倍と回数で20倍の安全率が設けられていることを裕度として考えることができる。さらに、設計で考慮する最大発生応力の等価繰り返し回数においても、耐震設計用に作成する人工地震波が自然地震波と比較して総エネルギーが大きく設定される傾向にあることに加え、全原子力プラントの全床レベルで一律に使用できるように包絡し、かつ余裕を持たせて回数が設定されることに裕度があるものと考えられる。

4.2 建屋

建屋における潜在的設計裕度としては、M3に関連して、定量化が困難ではあるが、設計では耐震要素として考慮していない間仕切壁による耐力を現実的限界に加算できると考えられる。

4.3 土木構築物

(1) M1に関する潜在的設計裕度

土木構築物は、実際には三次元の構造であるが、保守的に二次元でモデル化して応答計算を実施することが多い。この三次元効果が潜在的な裕度と考えることができる。

(2) M3に関する潜在設計裕度

現実の限界については、数多くの実験を実施して把握するのがよいと考えられるが、現実には困難である。このため、設計のための限界値は安全側に設定せざるを得ない。今回の検討では、各設計限界値間の裕度を評価したが、実際には現実の限界までの裕度が存在している。

5. (財) 原子力発電技術機構 耐震実証試験を踏まえた裕度の考察

これまでの検討において、顕在的設計裕度は「総合耐震評価」を基にした定量的評価を、潜在的設計裕度は定性的に考察を行うことで、耐震設計に内在する裕度を検討してきた。本項では、原子力施設の重要な設備の振動試験を行ってきた耐震実証試験結果を基に耐震設計に内在する裕度を検討する。

耐震実証試験は昭和57年から(財)原子力発電技術機構(以下、NUPERC)によって行われており、表5-1のとおり設計想定を超える入力に対し、機器が損傷しないことを確認してきた。

5.1 耐震実証試験

耐震実証試験において、試験体の破損まで加振すれば、潜在的設計裕度も含めた耐震設計に内在する設計裕度を定量的に把握することが可能となる。当初の耐震実証試験における加振レベルは、振動台の加振限界等から設計想定 1.5 倍程度の加振に止まっており、破損に至っていない。一方、近年の耐震実証試験(コンクリート製原子炉格納容器および配管系終局強度)では、終局状態の把握を目的に試験体の破壊試験を実施しており、本検討に有用な試験結果が得られている。

表 5-1 NUPEC 耐震信頼性実証試験で確認された耐震裕度

| 実証試験名称 | 縮尺 | 試験体重量 | 主要構成 | 確認された耐震裕度 |
|-----------------|--------|-------|---|--|
| PWR原子炉格納容器 | 1/3.7 | 350t | 鋼製格納容器（機器搬入口、エアロック、ポーラクレーン等を含む） | 1. 5×S2水平・上下同時入力にて耐震設計上の裕度を確保 |
| BWR再循環系配管 | 1/1 | 665t | 1ループ（配管、ポンプ、バルブ、サポートを含む）、支持構造物等 | 1. 1×S2水平・上下同時入力にて耐震設計上の裕度を確保 |
| PWR炉内構造物 | 1/1 | 555t | 燃料集合体一式、炉内構造物一式、制御棒駆動装置2基、支持構造物等 | 1. 5×S2水平・上下同時入力にて耐震設計上の裕度を確保 |
| BWR炉内構造物 | 1/1 | 750t | 燃料集合体一式、炉内構造物一式、制御棒駆動装置1基、支持構造物等 | 1. 7×S2水平・上下同時入力にて耐震設計上の裕度を確保 |
| BWR原子炉格納容器 | 1/3.2 | 350t | MARK-II改良型鋼製格納容器（機器搬入口、所員用エアロック等を含む） | 1. 4×S2水平・上下同時入力にて耐震設計上の裕度を確保 |
| PWR一次冷却設備 | 1/2.5 | 525t | 1ループ（一次冷却材管、蒸気発生器、一次冷却材ポンプ、サポートを含む）、支持構造物等 | 1. 5×S2水平・上下同時入力にて耐震設計上の裕度を確保 |
| PWR原子炉容器 | 1/1.5 | 700t | 4ループ用原子炉容器（ノズル、原子炉容器、支持構造物、全体サポート等を含む） | 1. 6×S2水平・上下同時入力にて耐震設計上の裕度を確保 |
| BWR原子炉圧力容器 | 1/2 | 600t | 原子炉容器（ノズル、支持構造物、スタビライザ等を含む） | 1. 7×S2水平・上下同時入力にて耐震設計上の裕度を確保 |
| 非常用ディーゼル発電機システム | 1/1 | 450t | ディーゼル機関、発電機、付属設備、コンクリート基盤 | 1. 3×S2水平・上下同時入力にて耐震設計上の裕度を確保 |
| 電算機システム | 1/1 | 81t | 計算機システム、中操表示盤、オペレータコンソール、免震装置 | 水平・上下同時入力にて耐震設計上の裕度を確保 |
| 原子炉停止時冷却系等 | 1/1 | 294t | 計装、計装盤、制御盤、電源盤系統、機器系統設備 | 1. 5×S2水平・上下同時入力にて耐震設計上の裕度を確保 |
| 主蒸気系等 | 約1/2.5 | 約190t | 主蒸気配管、主給水配管、支持構造物等 | 1. 5×S2水平・上下同時入力にて耐震設計上の裕度を確保 |
| コンクリート製原子炉格納容器 | 約1/10 | 約760t | プレストレスコンクリート製原子炉格納容器（PCCV）（機器搬入口、エアロック、ライナ等を含む） | S2の3～8倍の水平加振実験・解析の結果からS2の約5倍の耐震設計上の裕度を確保 |
| | 約1/8 | 約560t | 鉄筋コンクリート製原子炉格納容器（RCCV）（アクセストンネル、ライナ等を含む） | S2の2～9倍の水平加振実験・解析の結果からS2の約7倍の耐震設計上の裕度を確保 |

5.2 破壊試験を踏まえた裕度の考察

NUPEC耐震実証試験では、コンクリート原子炉格納容器および配管設備の破壊試験が行われた。

コンクリート原子炉格納容器については、平成11年度原子炉発電施設耐震信頼性実証

試験に関する報告書にその成果がとりまとめられており、破壊試験結果を踏まえた解析の結果、PCCV、RCCVのS2地震動に対する耐震裕度がそれぞれ約5倍、約7倍であるとの結果が得られている。

配管設備の破壊試験は、平成15年2月に行われ現在解析等により終局強度の検討がなされているところである。試験では、S2地震動に対する許容限界の約8.5倍の応答変位を与えた加振でも健全性が確認されている。この裕度には、M2の裕度が含まれていないため、実際の配管設備には更に裕度があるものと考えられる。

6. まとめ

本検討では、耐震設計審査指針に適合するよう設計された原子力施設の耐震設計に内在する裕度について評価を行った。その結果、顕在的裕度として最低でも約3倍の裕度があることが確認した。また、全ての施設に有すると考えられる潜在的設計裕度を加味すれば、耐震設計に内在する裕度は、それ以上を見込むことが可能であり、一部の施設について行われたNUPERC耐震実証試験における破壊試験からも確認できる。

以上

免震・制振構造採用の検討に際しての概念整理

1. 剛構造について

(1) 指針の記載内容

現行の耐震設計審査指針では、「発電用原子炉施設は想定されるいかなる地震力に対してもこれが大きな事故の誘因とならないよう十分な耐震性を有していなければならない。また、建物・構築物は原則として剛構造にするとともに、重要な建物・構築物は岩盤に支持させなければならない。」と本文に記載されており、剛構造の原則の適用対象は建物・構築物と規定しているが、その具体的要件は本文、解説ともに明示されていない。

(2) 詳細設計での取り扱い

①建物・構築物

現行指針では、「剛構造」に関して明確な定義・要件は特に設けられていない。

ただし、PWR型原子炉建屋及び周辺建屋、BWR型原子炉建屋及びタービン建屋等の、A (As)、Bクラスの設備の間接支持構造物に位置付けられる建屋は、安全上重要な設備を内包する部分について、壁厚が厚い、鉄筋コンクリート造の壁式構造を採用しており、かつ、建物全体について、一般の建築物よりも厳しい地震荷重が適用されるため、結果的に一般の建築物に比してかなり剛な構造となっている。

なお、PWR型原子炉周辺建屋等の上部、BWR型タービン建屋等の上部については、部分的に鉄骨造フレーム構造が採用されており、剛構造とは考えられない部分もあるが、これらについては、上位の分類に属する設備が下部にある場合、波及事故防止の観点から、上位の分類に属する設備に適用される動的荷重を作用させても下部の設備の安全機能に影響を及ぼさない設計が成されている。

「剛構造」が原則として規定された背景には、以下があると考えられる。

- ・ 剛構造であれば、その設計概念が原点である強度抵抗型耐震設計を主体とした設計体系に基づくことが可能であること。
- ・ 大崎スペクトルの設定周期（2.0秒まで）と適合させることが可能であること。
- ・ 建屋応答の不確定性をなるべく小さくし機器設計を容易にすることであること。

②機器・配管系

詳細設計に関する具体的な手法等を規定している「原子力発電所耐震設計技術指針」(JEAG4601-1987)において、以下のような内容が記載されている。

- ・ As及びAクラスの機器の耐震設計に用いる動的地震力は、基本的に据付位置における設計用床応答スペクトルを用いた動的解析によって得られる水平地震力を適用するが、その機器が剛構造と判断される場合（例えば機器の1次固有振動数が20Hz以上、あるいは、設計用床応答スペクトルの卓越する領域より高い固有振動数を有する場合）には、その機器の据付位置における建物の応答加速度を基に定まる震度により地震力を算定する。
- ・ 配管系の耐震設計の基本的考え方として、原則的に重要な配管は、建屋の卓越固有振動

数に対し剛領域となるよう耐震支持設計を行う。

前者は、重要な機器について動的地震力の算定について、機器が剛構造と判断されれば、設置床からの地震動の増幅は小さいとして、設置床位置の震度を用いた静的解析により算定してよいとしており、一方、剛構造でないとして判断されれば、設置床位置からの応答の増幅を動的解析により算定することとしている。

後者は、重要な配管について支持点間の配管の卓越固有周期を建屋より小さくなるように支持点間隔を設定し、建屋と共振させないことを基本的な考え方としている。

総じて、機器・配管系の設計では、剛構造、もしくは建屋より剛であることにより、過大な応答を防止することを基本方針としている。また、応答解析により適切に地震力を評価できれば、剛構造以外も許容されると解釈できる。

(3)まとめ

以下に、まとめと、「剛構造」の取り扱いについての一案を示す。

- ・指針では建物・構築物を原則として剛構造とすることが規定されている。
 - ・建物・構築物の詳細設計については、剛構造に関して明確な水準要件はない。
 - ・「剛構造」が原則として規定された背景には、以下があると考えられる。
 - ①剛構造であれば、その設計概念が原点である強度抵抗型耐震設計を主体とした設計体系に基づくことが可能であること。
 - ②大崎スペクトルの設定周期（2.0秒まで）と適合させることが可能であること。
 - ③建屋応答の不確定性をなるべく小さくし機器設計を容易にすることであること。
- 建物・構築物については、剛構造の原則に関して詳細設計においても明確な要件はないが、現行の設計体系が剛構造を原則として構築されていることを踏まえ、今後の剛構造の原則の取り扱いについては、改訂指針において現行と同様の設計体系が基本的に継続されていくのであれば、剛構造の原則を引き続き規定することが適切と考える。
- 建物・構築物に免震構造が採用される場合、免震層の設置により建屋全体系の固有周期が長周期化されるため柔構造となるが、上部建屋については低減された地震力に対して従来と同様の強度抵抗型の耐震設計体系が用いられることを踏まえ、免震構造の設計が耐震設計と同等の性能を確保できることが確認できれば、剛構造の原則の例外として適用可能である旨を指針に記載することが適切と考える。
- ・機器・配管系については、指針に剛構造の原則は規定されていない。また、詳細設計においては、剛構造について何らかのめやすがあり、剛構造等とし過大な応答を防止することを基本方針としているが、剛構造を絶対的な原則をしているわけではなく、適切に応答解析を行い動的地震力が評価できれば剛構造以外も許容されると解釈できる。
- 機器・配管系については、指針の記載、設計技術指針に記載されている詳細設計の基本方針を踏まえると、現行の体系で剛構造以外も許容されていると考えられ、機器・配管系の部分免震が採用される場合、これまでと同等の耐震性能を確保できることが確認できればよいと考える。

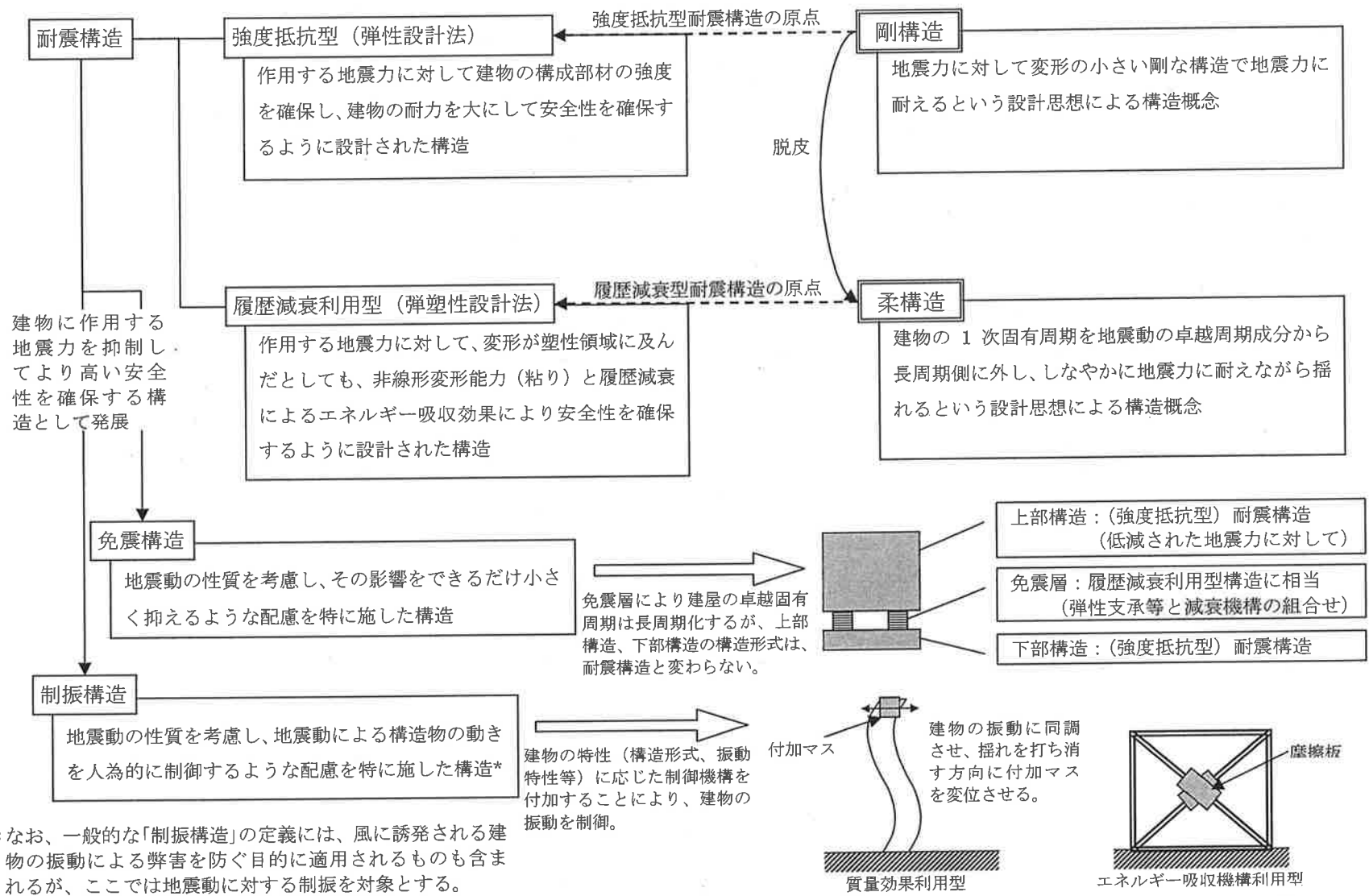
2. 免震・制振構造について

(1) 建物の構造における免震構造と制振構造の位置付け

建物の構造は、主に耐震構造、免震構造、及び制振構造の三つの形態に概ね分類することができる。これらの構造概念の概要を図-1に示す。

発電用原子炉施設の建屋は、上記の形態のうち、耐震構造に分類され、現行の安全上重要な施設を支持する建屋は、堅固な岩盤上にできるだけ剛な建物を造ることを基本的な設計方針とし、想定されるいかなる地震にも耐えられるように、一般建築に比して大きな設計用地震動を考慮して、それによる地震力に耐えられるように建屋の耐力を大きくすることにより、安全を確保している。

図-1に示すように、免震構造は、免震層より上部構造が一般的に強度抵抗型耐震構造と変わらず、免震層により低減された地震力に耐えるよう設計することは当然であるので、広義には耐震設計の対象となると考えられる。また、制振構造は、建物の特性（構造形式、振動特性等）に応じた制御機構を耐震構造に付加することにより、建物の振動を制御する構造であることから、広義には耐震設計の対象となると考えられる。



*なお、一般的な「制振構造」の定義には、風に誘発される建物の振動による被害を防ぐ目的に適用されるものも含まれるが、ここでは地震動に対する制振を対象とする。

図-1 建物の構造概念の概要

(2) 免震構造について

①免震構造とは

地震動の加速度応答スペクトルの平均的傾向と建築物の固有周期との関係を図-2 に示す。

地震動は完全なる不規則振動ではなく、一般にある特定の周期成分が卓越した地震動固有の性質を有しており、一部の例外を除いた大部分の地震動は、周期 0.2 秒から約 1.0 秒の範囲に卓越した周期成分を持っている。

原子力発電施設の建屋を含む 10 階程度以下の強度抵抗型の耐震構造建物は、建物の固有周期が地震動の加速度応答スペクトルの共振領域に入り、より長周期の建物に比して大きな地震力を受けるが、構造体の耐力を十分大きく設計して耐震安全性を確保している。

強度抵抗型の耐震構造に対して免震構造とは、上記の共振領域より長周期化した免震装置を、地震力の伝達経路（地盤→基礎→上部構造）のうち、例えば基礎に組み込んで、建物を共振させないで上部構造に伝わる地震力を低減する構造である。

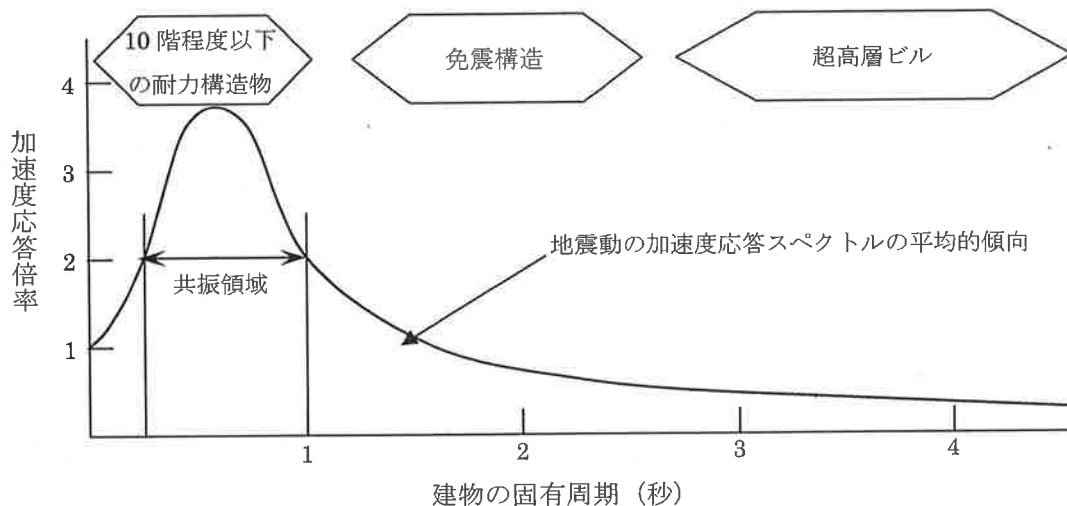


図-2 地震動の加速度応答スペクトルと建築物の固有周期との関係

②免震方式

免震方式は、以下の方式が挙げられる。

(i)全体免震

基礎を上部基礎と下部基礎に二重化し、その中間に免震層を設け、上部基礎より上部の建屋全体を免震化する方式である。個々の建屋を免震化する個別建屋免震と、複数の建屋を1ブロックとして免震化するブロック免震が選択肢として考えられる。

(ii)部分免震

- ・中間層免震：建屋の中間階の柱と床の間に免震層を設け、それより上部の建屋を免震化する方式である。
- ・床免震：建屋の一部の床の上に免震装置を介した床を設置し、特定の機器類を免震化する方式である。
- ・特定の機器の免震：機械基礎などに免震装置を組み込み、特定の単一機器のみ免震化

する方式である。

③原子炉施設に免震構造を採用する場合の意義

原子炉施設に免震構造を採用する場合、以下のメリットが期待される。

(i)耐震安全性の向上

以下の要因により、建物・構築物、及び機器・配管系は、耐震安全性が向上すると考えられる。

- ・一般的に上部構造に作用する地震力を 1/5～1/10 程度に低減することが可能である。
- ・建屋の主要構造は鉄筋コンクリート造壁式構造となっており、耐震壁の壁厚は主に放射線に対する遮蔽要求厚さが支配的となっているため、低減された地震力により耐震設計したとしても上記の低減割合ほど上部構造の耐力は低下しない。
- ・機器・配管系については、荷重組合せを考慮した設計用応力のうち地震荷重による応力の占める割合が小さくなるものが有り、地震荷重に対する裕度は向上する。

(ii)信頼性の向上

建物・構築物、及び機器・配管系の設計は、サイト特性（設計用地震動、立地点の地盤条件など）に依存するが、免震構造を採用した場合、サイト特性に依存しない設計が可能となり、設計等の標準化により信頼性をより向上させることが可能と考えられる。

(iii)復旧性の向上

地震力が大幅に低減され、大地震時の建物・構築物及び機器・配管系の損傷が最小限に食い止められるため、大地震後の発電機能がより早期に復旧されることが期待される。

EDF（フランス電力公社）による、フランスの Cruas 原子力発電所および南アフリカの Koeberg 原子力発電所の採用事例では、設計の標準化により、建設費の低減、発電コストの引下げを図ったと推測される。

欧州に比してより大きな地震が起りやすい日本においては、免震構造を採用することの意義は、コストメリットよりも耐震安全性の向上や信頼性の向上といった、トータルとしての安全性の向上にあると考える。

④原子炉施設に免震構造を採用する場合の留意点

原子炉施設に免震構造を採用する場合、以下の留意点が必要と考えられる。

- ・耐震構造の建物・構築物との取り合い部分の渡り配管等に生じる相対変位に対して、適切な配慮がなされること。
- ・免震装置、建屋の上部構造、及び内包する設備は、建屋の上下振動、ロッキング振動を考慮した設計を行うこと。
- ・入力地震動の特性のうち、免震構造に影響の大きな、やや長周期成分が卓越するような地震動を適切に考慮すること。
- ・免震装置の長期の健全性を確保するための維持、管理計画を定め、運用すること。
- ・免震層を別の用途（電気品室等）にも使用する場合は、建築基準法に従い、その用途、区画などに応じて、耐火構造とすること。

⑤免震構造の適用条件

(i)免震層より上部の制約

免震構造を採用した場合、免震層より上部は、免震層の振動特性が支配的となり固有周期が長くなるため、なるべく剛として、その固有周期を免震層の固有周期から短周期

側に遠ざけることが、免震構造の応答低減効果を発揮させるために必要がある。

(ii)免震層より下部の制約

免震層より下部の建物・構築物及び地盤は、免震層に伝達される地震動の周期成分のうち、やや長周期成分が増幅しないようになるべく剛であることが、免震構造の応答低減効果を発揮させるために必要がある。

免震装置は一般的に固有周期を2秒程度としており、免震層については柔構造であると言えるが、上記(i)、(ii)より、免震構造の応答低減効果を発揮させるためには、免震層以外の建物・構築物、機器・配管系はなるべく剛であることと、支持させる地盤はなるべく固いことが、好ましいと考えられる。

⑥免震構造の適用範囲と基本方針

「原子力発電所免震構造設計技術指針」(JEAG4614-2000)では、以下の適用範囲と基本方針が記載されており、限定した条件下での検討が行われている。

- ・積層ゴム免震要素を用いて、建屋全体を水平方向に免震する発電用原子炉施設に適用。
- ・免震型発電用原子炉施設のうち重要な建物・構築物は原則として岩盤に支持。
- ・免震装置に支持される上部構造は免震機能が発揮されるように十分な剛性を確保。

上記を踏まえ、耐震設計審査指針の検討に際して、建屋についての適用範囲と基本方針は以下が適切であると考ええる。

(i)岩盤上に支持させる。(図-3)

免震装置の機能を最大限に発揮させるため、支持地盤での入力地震動のやや長周期成分を抑える。支持方式については、べた基礎以外に杭基礎も可能性として考えられ、その詳細は設置許可における安全審査の段階で事業者が選定すべきと考える。なお、第四紀層地盤立地と重畳させるケースについては、将来的な可能性としては考えられるが、現状での知見、検討状況について把握できる材料があるか、ニーズはあるか等を調査した上で判断していくべきである。

(ii)上部構造は十分な剛性を有していなければならない。

免震装置の機能を最大限に発揮させるため、上部構造の1次固有周期を免震層の水平方向卓越周期から離す。

(iii)免震装置については、設置許可における安全審査の段階で事業者が選定すべきと考える。

一般での採用実績、及び原子力分野での研究実績から積層ゴム免震装置の適用の可能性が高いと推測するが、すべり支承についてもコスト的に有利であること、軸力の変動に対して特性変化が極めて小さいことから、採用の可能性を否定すべきではない。

(iv)免震方式については、設置許可における安全審査の段階で事業者が選定すべきと考える。(図-4)

建屋全体免震方式が採用の可能性が高いと推測する。ただし、サイト条件、建屋によっては、設計の標準化と成立性を両立させるために中間層免震方式建屋を採用することも可能性が有るため、これも想定する。中間層免震方式の場合も全体免震方式も基本的な要件は同じと考える。

機器・配管系については、部分免震方式のうち、床免震、機器単独免震などの採用が想定されるが、適用範囲と基本方針は上記の建屋と基本的に同じである。

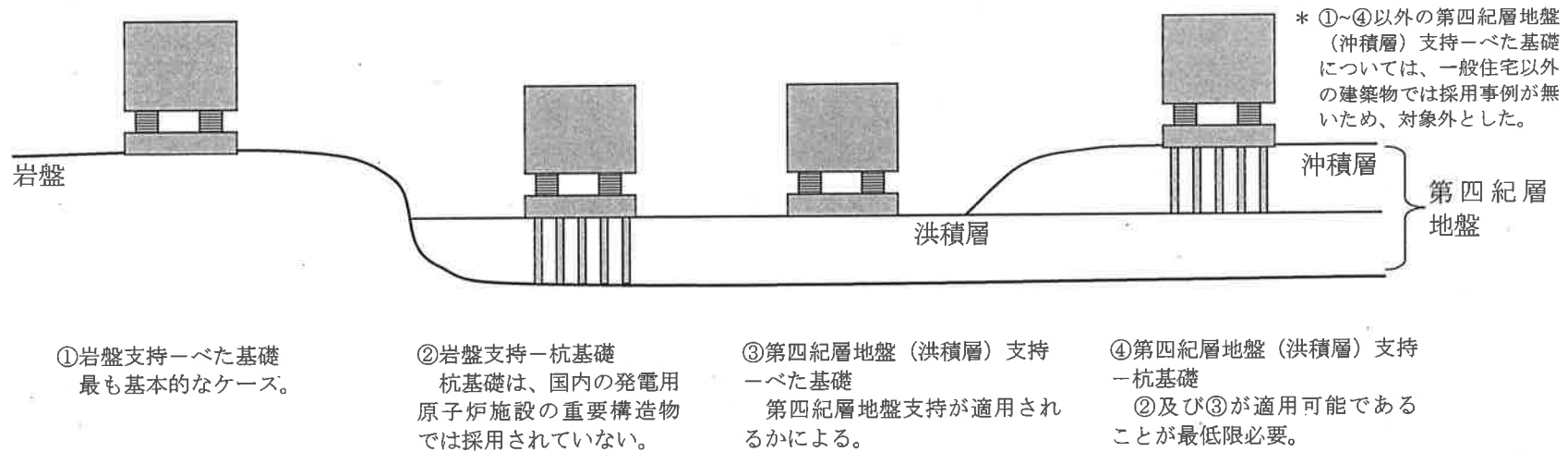


図-3 免震構造とする場合の支持地盤と基礎形式（可能性として考えられるもの）

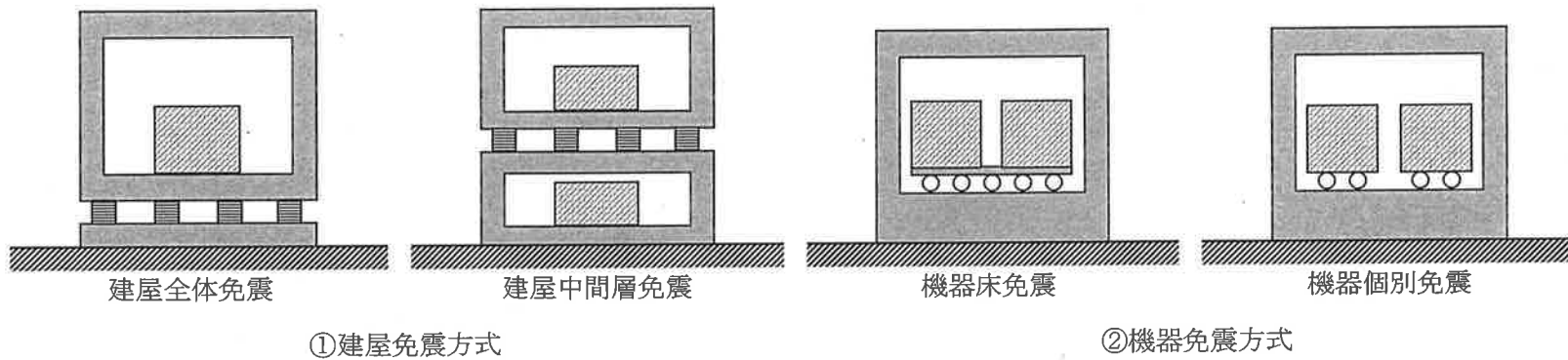


図-4 建屋及び機器の免震方式

(3) 制振構造について

①制振構造とは

制振構造は、建物の特性（構造形式、振動特性等）に応じて構造物の内部に機械的な装置を設置し、それにより地震や風による建物等の揺れを吸収しようとするもので、大きくはパッシブ制振とアクティブ制振に分けられる。

パッシブ制振とは電源等のエネルギーの供給なしに制振効果を発揮するもので、建物の周期と同じ周期で揺れる重りを利用した TMD (Tuned Mass Damper) や建物が振動する時に変位が生じる 2 点間をダンパーでつなぐ付加ダンパーなどがある。

一方、アクティブ制振は油圧・電気等で駆動するアクチュエータをコンピュータ制御することにより、より高い制振効果を発揮するもので、重りをアクチュエータで動かし、その反力で建物の揺れを抑える AMD (Active Mass Damper) などがある。

②制振機構

制振機構とその一般的な適用例を表-1 に示す。

表-1 制振機構とその一般的な適用例

| | | パッシブ制御機構 | | | | アクティブ 制御機構 |
|------------|-----|-----------|-------|-------|--------|---------------|
| | | エネルギー吸収機構 | | | 質量効果機構 | |
| 構造物 | 外乱 | 履歴減衰型 | 粘性減衰型 | 摩擦減衰型 | TMD 等 | AMD 等 |
| 超高層ビル | 地震 | ○ | ○ | ○ | | |
| | 風 | | ○ | | ○ | ○ |
| 展望台 ・鉄塔 | 地震 | ○ | | | ○ | |
| | 風 | | | | ○ | |
| 大径間 構造物 | 地震 | ○ | ○ | | | |
| | 微振動 | | | | ○ | ○ |
| 橋梁 | 地震 | ○ | ○ | | | |
| | 風 | | | | ○ | |
| | 微振動 | | | | ○ | |

一般的に TMD は超高層ビルなどの長周期構造物の風による揺れを抑えるのには効果的であるが、地震に対する制振効果はあまり望めない。また、AMD は超高層ビルなどの長周期構造物の風や中小地震までの揺れに有効である。大地震時の揺れを効果的に抑えるにはエネルギー吸収機能を持つ付加ダンパー方式が適している。

③原子炉施設に制振構造を採用する場合の意義

原子炉施設に制振構造を採用する場合、地震力の低減により耐震安全性の向上が期待される。

④適用条件

付加ダンパー方式については、エネルギー吸収機構を効果的に作用させるためには、接続する 2 点間にある程度の相対変位が必要である。

TMD、AMD については、付加マスの設置やアクチュエータの制動力等の制限から、軽量

かつ一定の周期で振動する構造物であることが、制振効果を発揮させるために必要である。

⑤制振構造の適用範囲と基本方針

耐震設計審査指針の検討に際して、建屋についての適用範囲と基本方針は以下が適切であると考ええる。

(i)エネルギー吸収機構を用いたパッシブ制振を対象とする。

鉄骨造部分や排気筒の制震として、エネルギー吸収機構を用いたパッシブ制震の適用が考えられる。また、一般建築では、既存の建物に対して、この方式を既存の構造部材に置き換えたり付加することにより耐震補強を施すケースが見られるようになっており、原子力発電施設の建屋についても、このような適用も可能と考える。

TMD、AMD については、原子力発電施設の建屋は超高層ビルなどに比して振動性状が複雑で、かつ重量構造物であるため、効果的に設置することは困難であると推測される。ただし、排気塔の TMD or AMD、鉄骨トラスの上下 TMD などについては、ニーズがあるかどうか調査が必要である。

機器・配管系の制振については、民間において、「配管系の制振構造設計法に関する調査報告書」（平成 5 年 3 月 （社）日本電気協会 電気技術基準調査委員会）、「重機器の制振設計法に関する調査報告書」（平成 6 年 6 月 （社）日本電気協会 電気技術基準調査委員会）など、配管系や PWR 1 次ループを対象とした、エネルギー吸収機構を用いたパッシブ制振が既に検討されており、これらの適用が考えられ、制振方式の対象は建物と同様である。ただし、質量効果を利用した制振構造などについては、今後の中長期的（10 年程度）ニーズを調査した上で適用対象とするか検討することが必要である。

(4) まとめ

- ・免震構造及び制振構造は、耐震設計する上での（従来の耐震構造と同等の）構造の選択肢であると考え、これらの構造を採用する場合は、従来の耐震構造と同等の安全性を確保するための要件について、耐震設計審査指針の中で付記すれば良いと考える。
- ・免震構造について、耐震設計審査指針の検討に際して、建物・構築物及び機器・配管系についての適用範囲と基本方針は以下が適切であると考ええる。

(i)建屋は岩盤上に支持させる。

(ii)免震層より上部の構造は十分な剛性を有していなければならない。

（建物・構築物については、剛構造の原則が継続して適用される場合は、剛構造の原則により、上記方針は担保される。）

(iii)免震装置については、設置許可における安全審査の段階で事業者が選定すべきと考える。

(iv)免震方式については、設置許可における安全審査の段階で事業者が選定すべきと考える。

- ・制振構造について、耐震設計審査指針の検討に際して、建物・構築物及び機器・配管系についての適用範囲は、エネルギー吸収機構を用いたパッシブ制振とすることが適切であると考ええる。
- ・機器・配管系の制振についての適用範囲の詳細については、今後の中長期的（10 年程度）ニーズを調査した上で検討する必要がある。