

## <概要>

原子力発電所の耐震設計に当たっては、施設の安全上重要な機能を確保する観点から他産業施設の耐震設計と比較して非常に厳しい条件が要求されている。耐震設計の基本的な方針は「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日決定）」としてまとめられた。その後、2001年7月から見直し作業が進められ、2006年9月19日に最新の知見が反映された改訂耐震設計指針がまとめられた。

## <更新年月>

2008年12月

## <本文>

### 1. 耐震設計の目的

原子力発電所においては、敷地周辺の地質・地質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、供用期間中に極めてまれではあるが発生する可能性があり、施設に大きな影響を与えるおそれがあると想定することが適切な地震動（**基準地震動**という）による地震力に対して、安全上重要な施設はその機能が失われることがなく、地震に起因する外乱によって周辺の公衆に対し、著しい**放射線被ばく**の**リスク**を与えないように耐震設計が行われている。

### 2. 耐震設計における基本的考え方

原子力発電所の耐震安全性確保のため、基本的に以下の点を十分考慮し耐震設計が行われる。

#### 1) 設計段階における安全性の確認

##### a. 徹底した調査

敷地の地質・地質構造はもとより、周辺部を含め**活断層**や過去に発生した地震等を詳細に調査

##### b. 極めてまれな地震動をも考慮した設計

極めてまれながら供用期間中に発生すると想定される水平方向と鉛直方向の2方向の地震動に対しても、安全上重要な機能は失われないような設計

##### c. 詳細な解析評価

信頼性の高いコードを用いて、想定した地震動が発生した時の重要な建物・機器等の複雑な揺れについて解析し、耐震安全性を詳細にチェック

##### d. 支持地盤及び周辺斜面の安全性を確認

耐震安全上重要な施設を設置する地盤が、地震に対して十分な支持力を有していることを試験や解析を実施して確認するとともに、地震随件事象として想定される施設の周辺斜面の崩壊等によっても、原子炉施設の**安全機能**に重大な影響を与えないことを確認

##### e. 津波に対する安全性の確認

地震随件事象として想定される津波について詳細な数値シミュレーション等を実施して施設の安全機能に重大な影響を与えないことを確認

#### 2) 建設、運転段階における安全性の確保

##### a. 十分な支持性能をもつ地盤に建設

地震による揺れの振幅が小さく、十分な支持性能があり、すべりや有害な沈下等を生ずる恐れがない地盤に建設

##### b. 自動停止機能

一定以上の揺れを検出したときには、速やかに原子炉を自動停止させるシステムを装備

##### c. 振動台や加振機による耐震性の実証及び耐震限界の把握

振動台や加振機を用いて、実機や実機相当の試験体に設計を上回る地震力を加え、施設の耐震

性的実証、設計裕度の把握、設備機能の維持及び解析に用いたコードの妥当性を確認

さらに、「残余のリスク」（基準地震動を上回る地震動の発生によるリスク）の可能性に対して適切な考慮を払い、それを合理的に実行可能な限り小さくするための努力が求められている。

### 3. 耐震安全性評価の流れ

原子力発電所の耐震安全性評価の流れを図1に示す。

### 4. 耐震設計のクライテリア

原子力発電所の耐震設計クライテリアの概要を一般建築物（一般建築構造物）および高層ビル（高さ60mを超える建築物）と比較して表1に示す。

#### 4.1 構造物の特徴および設置地盤

高層ビルが柔構造であるのに対して、原子力発電所は原則として剛構造に設計されるが、改訂耐震設計指針により免震構造等の最新設計技術の導入も認められることとなった。また、建物・構築物は十分な支持性能をもつ地盤に設置させることが要求されている。

構造物設置地盤とその一般的性状の模式図を図2に示す。原子力発電所は第三紀層の岩盤に建設されているのに対して、一般建築物・高層ビル等（以下「一般建築物等」という）は各々洪積層（更新世に堆積した地層）、地表・沖積層（完新世に堆積した地層）に建設されることが多い。なお、図中の値はあくまでも大体の目安を示したものである。

#### 4.2 耐震重要度分類

原子力発電所の耐震設計においては、地震の被害により発生する可能性のある放射線による環境への影響、および原子炉の安全停止状態を維持する機能の必要性の程度から、その重要度に応じ建物・構造物および機器配管系をS、B、Cクラスに分類して、各々に対応した設計地震力を設定している。

#### 4.3 地震の想定および設計用地震動

原子力発電所の設置においては、敷地周辺の地域で発生した過去の被害地震について、古文書や地震観測記録等から調査し、また活断層についてはその活動度を評価し、その大小に応じた考慮を行っている。ここで活断層とは、第四紀の後期更新世（約12～13万年前）以降に活動した断層であって将来も活動する可能性のある断層のことである。敷地からの距離に応じ、変動地形的調査、地表地質調査、地球物理学的調査手法を総合して、より詳細かつ入念な調査（ボーリング調査、試掘抗調査、弾性波探査、トレンチ調査等）を実施している。

原子力発電所の耐震設計では、基準地震動 $S_s$ として、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」と「震源を特定せず策定する地震動」の2つを考え、敷地の解放基盤表面（施設を設置する基礎部分の上の土を全て取り除いた状態の基礎表面）上での水平方向および鉛直方向の地震動をそれぞれ策定する。基準地震動 $S_s$ 策定の手順を図3に示す。

#### 4.4 設計用地震力の算定

##### (1) 水平地震力

水平地震力は、耐震重要度クラスに応じて設定されている。Sクラスについては、基準地震動 $S_s$ による動的な地震力および一般建築物で用いる静的地震力の3倍のものを、Bクラスでは一般建築物で用いる静的地震力の1.5倍のものを、またCクラスでは一般建築物で用いる静的地震力と同じ値を用いる。

また、Sクラスについては、弾性設計用地震動 $S_d$ を基準地震動 $S_s$ に基づき工学的判断により策定し、この地震力 $S_d$ に対して概ね弾性限界状態に留まることを把握することによって、基準地震動 $S_s$ による地震力に対する施設の安全機能保持を確実なものとする。

##### (2) 鉛直地震力

鉛直地震力は、Sクラスについては $S_s$ を用いて算定し、水平地震力と適切に組合せたものとして地震力を算定する。また、静的な鉛直地震力としては0.3を基準とし、建築物の振動特性、地盤の種類等を考慮して算定し、高さ方向には一定とする。

#### 4.5 地震応答解析と許容状態

原子力発電所では、高層ビルと同様に一般建築物に比べて厳密な応答解析を行い、建屋各部に発生する力、変位を用いて構造物および機器・配管系の安全性の確認を許容状態に応じて行っている（表2参照）。

各部材に生じる応力は、基準地震動 $S_s$ については、弾塑性範囲ではあるが終局耐力・終局変形に対して妥当な安全余裕を有することにより、また、弾性設計用地震動 $S_d$ については、許容状態を建築基準法で定める弾性範囲とすることにより安全性の確認を行う。

さらに、機器・配管系安全性確認の場合地震力に加えて発生する熱応力、圧力等を組み合わせた応力が許容応力以下になることにより、安全性を確認する。

（前回更新：2007年8月）

## <関連タイトル>

- 原子力発電用機器の工学試験（1）（機器・システムに関する信頼性実証試験・確認試験）（06-01-01-13）
  - 原子力発電施設の耐震信頼性実証試験（平成8年度～平成10年度）（06-01-01-14）
  - 発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針（11-03-01-05）
  - 原子力発電所の地質、地盤に関する安全審査の手引き（11-03-01-22）
  - 原子力発電所の耐震設計審査指針の改定（11-03-01-30）
- 

## <参考文献>

- （1）科学技術庁原子力安全局、原子力安全調査室（監）：「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（旧指針）原子力安全委員会安全審査指針集、大成出版社（1994年10月）」
  - （2）原子力安全委員会：発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（平成18年9月19日決定）
  - （3）東京電力：柏崎刈羽原子力発電所7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結果報告書の概要、p.6、  
[http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu08\\_j/images/081203a.pdf](http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu08_j/images/081203a.pdf)
  - （4）建設省住宅局建築指導課日本建築主事会議（監修）：建築物の構造規定-建築基準法施行令、第3章の解説と運用、（財）日本建築センター出版部（1995年5月）
  - （5）日本建築学会（編）：建築物の耐震設計資料、日本建築学会（1981年4月）
  - （6）資源エネルギー庁公益事業部原子力発電安全企画審査課（編）：地震、津波が発生した場合の安全性-「万全な対策」で「安心」を、（財）原子力発電技術機構・原子力安全解析所（1995年5月）
  - （7）原子力安全・保安院、原子力安全基盤機構：パンフレット「新しい耐震設計審査指針」
  - （8）原子力安全委員会：新耐震指針の概要
  - （9）原子力安全委員会ホームページ：耐震設計審査指針の改訂 ?最新の知見を反映し、原子力施設の耐震安全性の一層の向上へ?
  - （10）電気事業連合会：「原子力・エネルギー」図面集2008年版（2008年4月）、p.96
-

# 表1 一般建築構造物と原子力発電所の耐震設計の クライテリアの比較

	一般建築構造物	高層ビル(60m以上)	原子力発電所
構造の特徴	中・低層ビルの一次固有周期は、 ・RC 0.02H秒 ・鉄骨 0.03H秒 ・木造 2階 0.3秒 (Hはビルの高さ:m)	柔構造 一次固有周期は、 0.06~0.1N秒 (N:階数)	建物・構造物は剛構造 原子炉建屋の一次固有周期は0.15秒程度(ただし、地盤との連成系の一次は0.2秒程度)
設置地盤	主として地表、沖積層	洪積層に直接または杭支持	建物・構築物は十分な支持性能を持つ地盤に設置
重要度分類			原子炉施設をその重要度によりS,B,Cクラスに分類、その分類に応じた設計
地震の想定			敷地周辺の過去の被害地震、活断層などによる個々の震源を調査し、最大の影響を与える地震を想定
設計用地震動	(一次設計で震度IV~V、二次設計で震度VIを想定していると思われる)	エルセントロ、タフト、八戸など特定の強地震記録及び東京101など現地記録データ	基準地震動Ss:安全機能を確保すること 弾性設計用地震動Sd:概ね弾性限界に留まること
水平地震力の算定	・一次設計(強度設計)ベースシフト係数0.2による静的解析(振動特性係数など動的特性を簡便法として取り入れている) ・二次設計(保有耐力の確認):ベースシフト係数1.0	レベル1:最大速度振幅 25cm/sec レベル2:50cm/secの地震動による地震応答解析から求まる他震力	Sクラス:基準地震動Ssによる地震応答解析から求まる地震力と一般建築構造物の一次設計の3倍の地震力のいずれか大きい方 Bクラス:一般建築構造物の一次設計の1.5倍の地震力 Cクラス:一般建築構造物の一次設計の1.0倍の地震力
鉛直地震力の算定	(高速道路の高架、新幹線の橋梁など水平方向の1/2を考慮)		基準地震動Ssに基づいて算定
許容状態	・一次設計: 弾性範囲 ・二次設計: 部分的な破壊があっても倒壊に至らないこと(ねばりの確認)	・レベル1: 弾性範囲(層間変形角1/200) ・レベル2: 弾塑性範囲(層間変形角1/100)	・Ss地震動: 弾塑性範囲(十分な変形能力の余し、終局耐力に妥当な安全余裕を有と) ・Sd地震動:弾性範囲

下記の資料をもとに作成した

[資料提供] (財)原子力発電技術機構

## 表2 重要度分類と地震力および許容限界

### 重要度分類と地震力及び荷重の組合わせと許容限界

★S、B、Cクラスの合計3分類。(旧指針のAsとAを合わせてSとする)

★3分類に相応した荷重の組合せと許容限界

重要度分類		Sクラス		Bクラス	Cクラス
設備の例	沸騰水型原子炉 (BWR)	原子炉格納容器 制御棒 残留熱除去系 非常用発電機 原子炉压力容器	非常用炉心冷却系 (旧指針から耐震クラスを上位クラスに統合)	廃棄物処理設備 タービン整設備	発電機
	加圧水型原子炉 (PWR)	原子炉格納容器 制御棒 熱除去系 非常用発電機 原子炉容器	安全注入系 (旧指針から耐震クラスを上位クラスに統合)	廃棄物処理設備	タービン設備 発電機
建物・構築物	地震力	水平	$S_s$	$\text{Max}(S_d, 3.0C_i)$	1.5C <sub>i</sub>
		鉛直	$S_s$	$\text{Max}(S_d, C_v)$	-
	荷重の組合せ	常時荷重 + 運転時荷重 + $S_s$	常時荷重 + 運転時荷重 + 地震力(水平・鉛直)	常時荷重 + 運転時荷重 + 静的地震力	
許容限界	終局耐力に対して妥当な安全余裕を有すること		建築基準法等に基づく短期許容応力度	建築基準法に基づく短期許容応力度	
機器・配管	地震力	水平	$S_s$	$\text{Max}(S_d, 3.6C_i)$	1.8C <sub>i</sub>
		鉛直	$S_s$	$\text{Max}(S_d, 1.2C_v)$	-
	荷重の組合せ	(通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時又は事故時の荷重) + $S_s$	(通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時又は事故時の荷重) + 地震力(水平・鉛直)	(通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時) + 静的地震力	
許容限界	変形等が機能に影響しない 動的機器等は機能維持を確認した加速度等を許容限界とする		降伏応力又は同等な許容限界	降伏応力又は同等な許容限界	

#### 記号の説明

$S_s$ : 基準地震動 $S_{sl}$ に基づく地震力

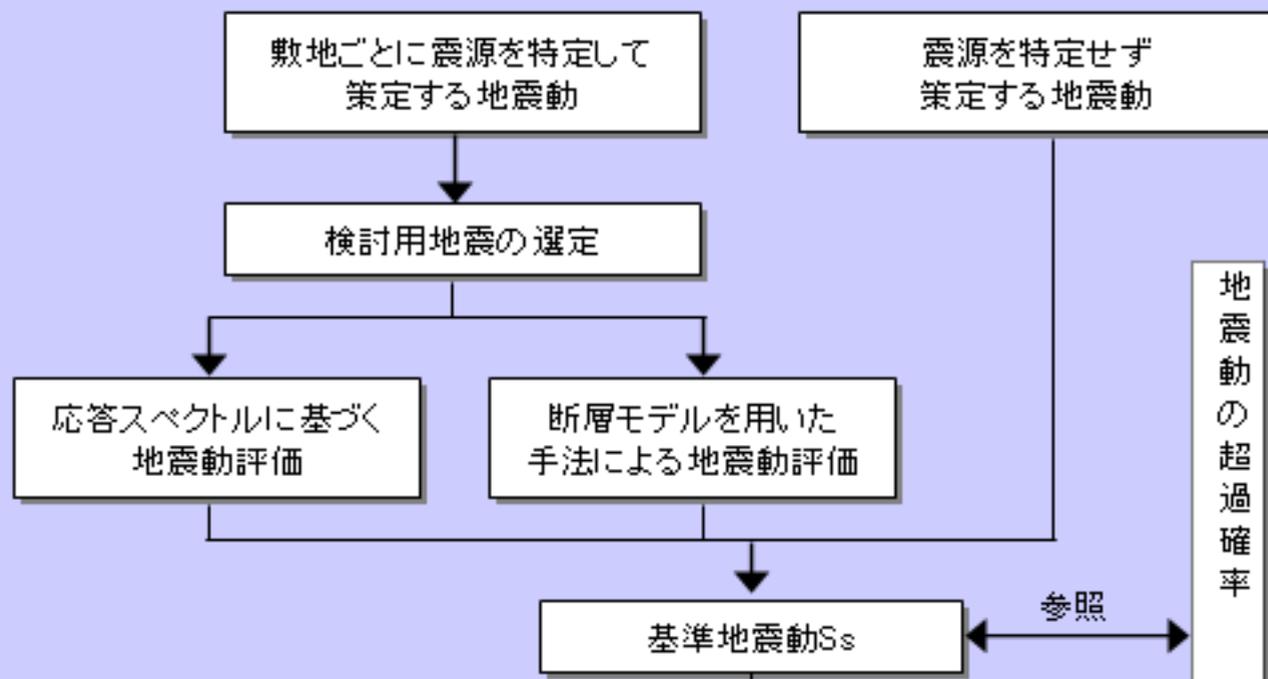
$S_d$ : 弾性設計用地震動 $S_{dl}$ に基づく地震力

3.0C<sub>i</sub>, 1.5C<sub>i</sub>, 1.0C<sub>i</sub>, 3.6C<sub>i</sub>, 1.8C<sub>i</sub>, 1.2C<sub>i</sub>: 建築基準法で定められた基準値(C<sub>i</sub>)に係数を乗じて定めた静的地震力(水平方向)

C<sub>v</sub>, 1.2C<sub>v</sub>: 鉛直震度(C<sub>v</sub>)に係数を乗じて定めた静的地震力(鉛直方向)

## A. 地質調査の実施・活断層の評価

## B. 基準地震動 $S_s$ の策定



## C. 施設等の耐震安全性評価

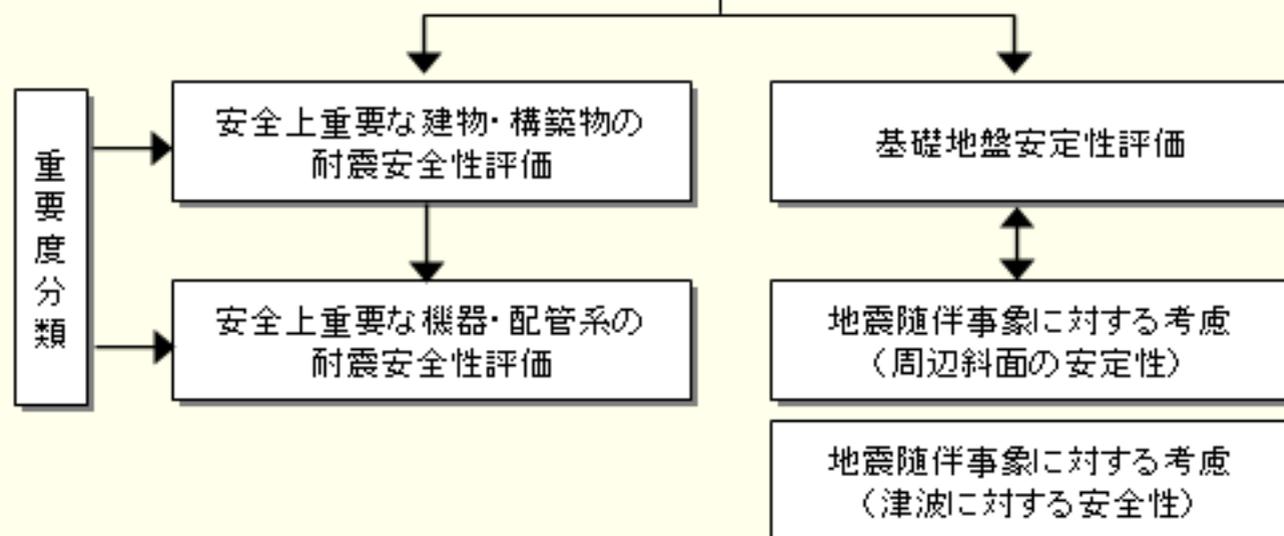


図1 原子力発電所の耐震安全性評価の流れ



# 基準地震動の策定

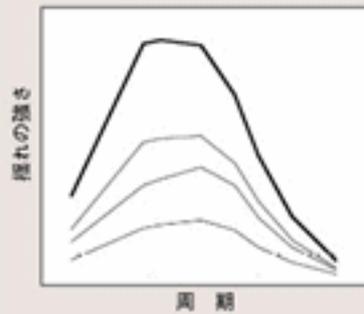
★基準地震動Ssに一本化。鉛直方向についても地震動を策定する。但し、「弾性設計用地震動Sd」として基準地震動Ssに係数（0.5以上）を乗じて設定する。

## 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

- 震源の設定（複数）  
敷地周辺の活断層及び地震の発生状況から、複数の検討用地震を選定
- ①内陸地殻内地震（後期更新世以降（12～13万年前位）の活動が否定できない活断層を考慮）
- ②プレート間地震
- ③海洋プレート内地震

- 検討用地震に対して応答スペクトルに基づく地震動評価
- 検討用地震に対して断層モデルを用いた手法による地震動評価

### 応答スペクトルに基づく地震動評価

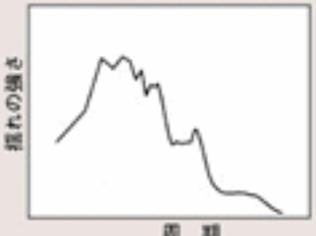


▲応答スペクトル（例）

### 断層モデルを用いた手法による地震動評価



▲断層モデルによる時刻歴地震波（例）



▲断層モデルによる応答スペクトル（例）

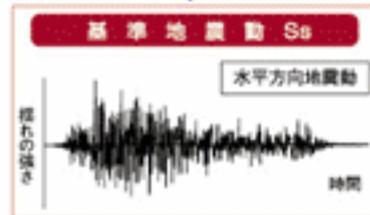
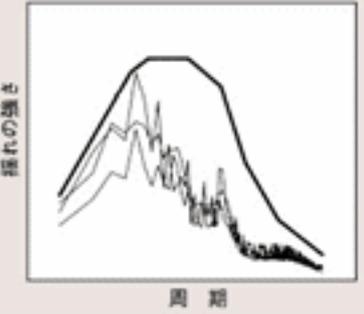
## 水平方向 基準地震動Ssの策定

### 震源を特定せず策定する地震動

敷地近傍における詳細な調査にかかわらず、全ての敷地で考慮すべき地震動

- 震源と活断層を関連づけることが困難な過去の内陸地殻内地震の震源近傍における観測記録から地震動（応答スペクトル）を評価

### 震源を特定せず策定する地震動（例）



## 鉛直方向 基準地震動Ssの策定 ※水平方向と同手順により策定

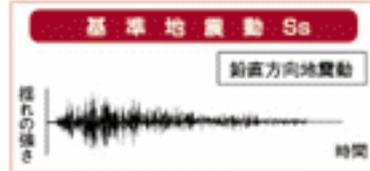


図3 基準地震動の策定の手順