

原子炉は地震に対し如何に設計されているか

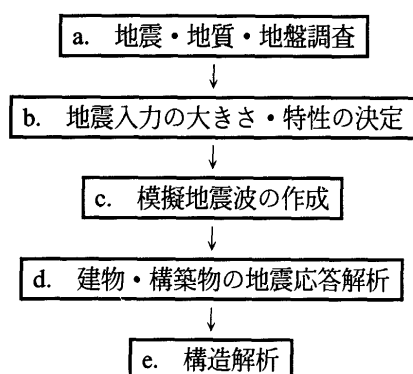
井上達也 (動燃事業団高速増殖炉もんじゅ建設所 919-12 福井県敦賀市白木2-1)

人為的であれ自然現象に対してであれ、一般に設計はある要求条件に対しそれを充足するよう行われる。速くという条件に対し高速鉄道を設計したり、地震に耐えるという要求に橋梁の耐震設計を実施したりである。特に要求が自然現象に対してである場合、自然現象の詳細な特性把握が適切な設計を実施する上で重要であり、それが厳密性を有し正確であればあるほど要求に対する適合性或いは耐力の高い設計となる。原子炉の耐震設計も自然現象に対してであるからこれと同様であって、一連の設計の中で要求条件の特性把握に相当する“想定する地震の大きさの決定”が重要である。これを含め、わが国原子力発電所の耐震設計は、学者、専門家らによって策定された国の耐震設計審査指針¹⁾によって設計されており、ここに紹介する原子炉の耐震性もそれをもとにした設計の考え方の紹介である。“原子炉”と総称したが、具体的には原子炉建屋に入力する地震動の大きさ決定に説明の主眼を置いており、それを受けて建屋、原子炉本体などの順で実施する建物・機器の解析・設計についても言及している。なお、耐震設計技術指針²⁾が同設計審査指針を解説しており、背景、算定式、評価法が詳述されている。

阪神・淡路大震災の発生により地震時の安全性に高い関心が寄せられている。関連して、原子炉の安全性は大変高いといわれているが、それは何故か。解説するよう依頼を受け説明を試みた。

1. 原子炉の耐震設計 (全般)

原子力発電所の耐震設計の流れは、つぎの図に示すように、まず、発生するであろう地震の大きさの想定のため、その地点の詳細な地震・地質・地盤調査を実施し、発電所建物・構築物に入力すべき地震の大きさ・特性を決定する。その後それに基づき模擬地震波を作成し建物・構築物に入力、固有値解析を含む地震応答解析を行って加速度または変位を得、構造解析を実施する。それにより部材断面算定或いは応力度を所定の値に制限するなどして想定した地震



に原子炉が耐えるよう設計する。これが、原子炉の耐震設計の流れおよび内容である。

この中で、発電所をいかなる地震にまで耐えるよう設計するかは、その決定のための a. 地震・地質・地盤の調査、それに基づく b. 地震入力大きさ・特性の決定が最も重要であり、原子力発電所にとってはこの決定にユニークな特徴がある。

2. 地震入力決定の二つの考え方

(1) 地震の大きさ

地震は、場所によって発生頻度、大きさの異なる地域性を有する自然現象であるが、設計上大きさを想定するには、一つは地域によらず経験的に定めたある一定の値を基準とする考えと、他には地域性に基づき詳細な歴史地震資料、地質・地盤調査を実施してその地域での地震の大きさを予測・評価する方法とがある。建築基準法³⁾でいう一般の建築物は前者によっており、原子力発電所の設計は後者によって入力地震動の大きさを定めるが、建築基準法でいう地震力の3倍の大きさも入力し、結果として大きな影響を与えることになる方を採用する設計としている。ただし、一般的には3倍の大きさと比較しても、構造物のクリティカルな部分では後者で定める地震力による応答が大きくなる。

(2) 地震の振動特性

地震の振動特性、つまり地震の周波数特性、振幅推移の経時的変化、継続時間などは、前者についてはそれらを考慮せず結果としての加速度或いは変位など一定の値を入力として用いることになるが、後者では振幅を地震の大きさとし、それら振動特性を合わせ考慮した地震動を入力する。

3. 地震入力大きさの決定

原子力発電所の耐震設計に特徴的な地震入力大きさの決定は以下のとおりである。

(1) 地震発生メカニズム⁴⁾

地震の発生メカニズムは、いくつかあるうち、現在、太平洋、ユーラシアなど7大プレートといくつかの小プレートの運動で、例えば密度の大きいプレート(大洋プレート)が密度の小さいプレート(大陸プレート)の下に沈み込み、大陸プレートに歪みが蓄積され、それが解放される際地震が発生するとする、所謂プレート・テクトニクス説との関連で説明するのが定説である。大陸プレートは大洋プレートの移動でその先端が最も大きく変形を受けるから、大陸プレートに蓄積される歪みはプレート境界で大きく、内陸に向かうに従い小さくなる。このため、境界近傍で発生する地震—海域型(プレート型)地震—は解放され

る歪み量が大きく、マグニチュードは7から8に及ぶことも多いが、境界から離れた内陸ともなれば解放される歪み量は小さく、海域に比べ発生する地震の大きさは小さい傾向となる。以前は地震の結果として活断層が生じるとされたが、現在の地震学ではその逆で活断層が地震を引き起こすと考えられている。歪みの解放に伴う地盤のせん断ずれが活断層の活動であり、その際発生するエネルギーによる地震波動の伝播が地震というわけである。

(2) 基準地震動 S_1 および基準地震動 S_2

地震入力の大きさ決定の流れという観点からは必ずしも説明を要せず、むしろ複雑となることから言及を避けたいところであるが、こと原子力発電所の耐震設計の説明となると避けて通れないことから、敢えて基準地震動 S_1 および基準地震動 S_2 について説明しておく。原子力発電所は、放射線による環境への影響の観点から各施設を四つのクラスに分類し、最上位 A_s クラスおよびつぎの A クラスの各施設はそれぞれ、設計用限界地震および設計用最強地震による地震力に耐えなければならないとされる。基準地震動とは、多少正確さを欠くが耐震設計上原子力発電所の建物基礎面で考える地震動をいい、定義として設計用最強地震がもたらす地震を基準地震動 S_1 、設計用限界地震がもたらす地震を基準地震動 S_2 としている。基準地震動 S_1 は工学的見地から起こることを予期することが適切と考えられる地震からその振動特性を定めることとしており、基準地震動 S_2 は念のため更にその上の地震を想定しておくとの思想から考慮するものである。なお、設備としては、原子炉の停止、冷却、放射性物質の放散防止・抑制設備などが A_s クラスに、原子炉冷却材漏えい事故時に作動させる設備などを A クラスに、放射性廃棄物処理設備などを B クラスに、およびその他一般の構築物と同等の安全性を有すればよい設備を C クラスとして分類している。

(3) 地震発生推定のいくつかのアプローチ^{2,5)}

原子力発電所の耐震設計は、地震が活断層により誘発されるとされる現代の地震学・地質学の知見をもとにして、立地点における地震の発生・大きさの推定を見誤ることがないように、活断層を中心としたあらゆる角度から地震動を評価する方法を採っている。基準地震動 S_1 、基準地震動 S_2 のそれぞれについて、その発生・大きさの予測はそれぞれ以下の観点から実施する。

基準地震動 S_1 :

- 歴史地震
- 活断層（活動度大）
- 統計的期待値

基準地震動 S_2 :

- 活断層（活動度小）
- 地震地体構造
- 直下地震

このうち、a 歴史地震については、立地点からの距離半

径約 150~200 km 以内に発生した有史以来の地震を古文書、大日本地震資料、日本地震資料、理科年表など地震資料による被害発生記録から気象庁震度階 V (強震) 以上の地震を抽出する。活断層によって地震がもたらされるとするが、活断層調査のみならず、見落としがないよう活断層との関連で生じたであろう地震についても隈なく調査しておくとの思想である。その後の設計用基準地震動策定のためには、各地震をマグニチュードと震央距離（震源直上~評価点間地表距離）とで整理しておく。b および d の活断層は、今から 180 万年前以降第四紀に活動した断層であって将来も活動する可能性がある断層と定義し、平均変位速度 1 mm/年以上、0.1~1mm/年および 0.1 mm/年以下をそれぞれ A 、 B および C 級に分類して、 A 級活断層に属し 10,000 年以前以降活動したもの、または地震の再来期間が 10,000 年未満のものを活動度大とし、その他の A 級活断層および B 、 C 級に属し 50,000 年前以降活動したもの、または地震の再来期間が 50,000 年未満のものを活動度小としている。同様に、いずれもマグニチュードと震央距離とで整理するが、マグニチュード M については活断層長さを L km とした松田式⁶⁾

$$M = (1/0.6)(\log L + 2.9)$$

によって、また、震央距離は活断層中央を震央として算定する。c 統計的期待値とは、日本被害地震総覧の地震データの統計処理、河角マップ、金井マップなど地震の強さの統計的研究の成果に基づき震度、加速度または速度を推定するものである。速度をパラメータとした地震データの統計的速度期待値は、速度振幅 v の頻度スペクトルを $N(v)$ とし、統計年間 Y のうち期待年間 y における最大速度振幅の期待値 U を

$$\frac{y}{Y} \sum_v N(v) = 1$$

によって計算する。マグニチュード、震央距離を介さず、直接設計用基準地震動策定の考察に用いる速度が得られる。e 地震地体構造とは、地震規模、震源深さ、発震機構、地震発生頻度などに着目するとき、地震の発生の仕方に共通の性質をもったある拡がりの地域が存在することから、その地域の地質構造を指し、それによってもたらされると考えられる地震を評価するものである。具体的には、地震の大きさ(マグニチュード)を各地域で起こり得る地震の最大規模を示した図 1 表マップ⁷⁾ (表俊一郎, 1980) から定め、その震央位置を活断層または過去の地震との関連から定める。最後の f 直下地震は、直下地震も予め考慮するというものである。直下地震は、本来その地域の地震地体構造や地震の生起状況によって設定するのが望ましいが、地震規模、震源位置を決定することが困難なことが多いことから、実際に起こる地震との関連からよりも、むしろごく近傍である程度の規模の地震が発生したとしても安全性が保たれるようにとの考えから設定されたものである。マグニチュ

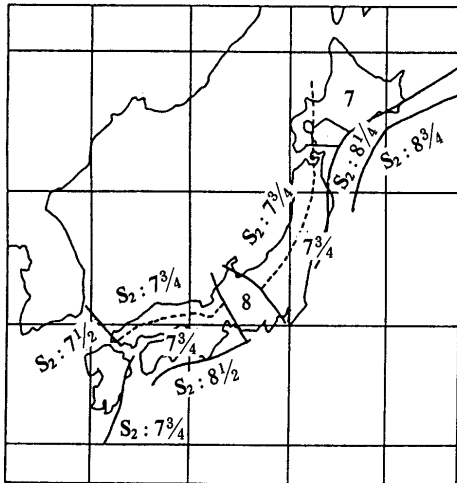


図1 日本で起こり得る地震の最大規模⁷⁾

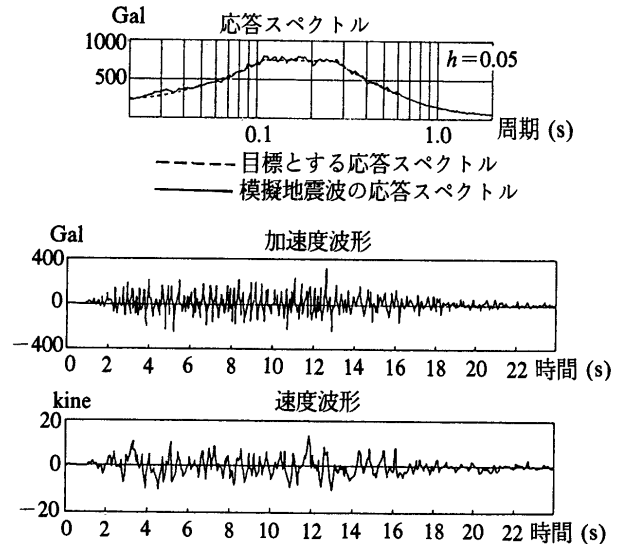


図3 応答スペクトルと模擬地震波の作成例²⁾

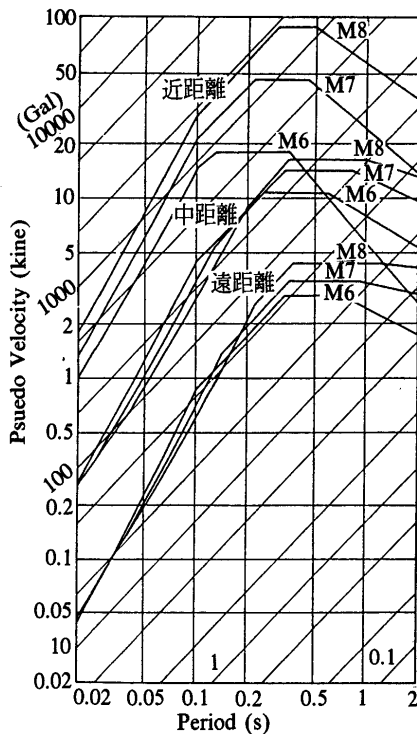


図2 地震最大速度に金井式を用いた大崎スペクトル⁹⁾

ード6.5の大きさを震源距離10kmの位置に考慮するが、地震の発生に見落としがないようにとの観点からの総ざらいの意味合いも含まれたものと考えられる。

(4) 基準地震動の応答スペクトル

(3) 項において地震の発生の可能性を地震学・地質学のあらゆる観点から評価し、各地震をマグニチュードと震央距離のデータセットとして用意した。設計に用いる基準地震動はそれらを最大速度振幅と地震周波数のスペクトルで表す。最大速度振幅 V_{max} は金井式⁹⁾により求める。エネルギー放出中心深さ $D = 10^{0.353M - 1.435}$ と震央距離 L から震源距離 $X = \sqrt{L^2 + D^2}$ を求め、パラメータ $P = 1.66 + 3.60/X$, $Q = 0.631 + 1.83/X$ とすれば、

$$V_{max} = 10^{0.61M - P \log X - Q}$$

から計算される。応答スペクトルについては、大崎らが国

内外の地震加速度記録を整理しスペクトル化した図2⁹⁾を用い、各地震のマグニチュード、震央距離を内挿して応答スペクトルとして表す。大崎スペクトルは速度10kine (kine=cm/s)で規準化されており、当該各地震の応答スペクトルとしてはこれに金井式で求めた最大速度振幅を乗じる。なお、地震動の振幅は、以前、速度ではなく加速度を用いていた。現行の速度に変えた理由は、地震による構造物などの変形・倒壊が力によるものよりも、エネルギーである速度により強い相関があることからと解釈できる。

(5) 模擬地震波の作成²⁾

模擬地震波とは、建物・構築物の底面に入力する設計用人工地震波をいうが、その作成は設計用基準地震動の応答スペクトルに適合するよう正弦波の重ね合わせで作成する。振幅包絡線を $E(t)$ とすれば、

$$\ddot{u}(t) = E(t) \sum_{i=1}^N A_i \cdot \sin(\omega_i t + \phi_i)$$

で表される。位相角 ϕ_i には一様乱数を用いる。応答スペクトルと模擬地震波の作成例²⁾を図3に示す。これで地震入力大きさが決定された。

4. 地震応答解析および構造解析

設計用地震波を入力して建物・構築物およびそれに収納する機器・配管の耐震設計を実施する。地震波を入力して施設の応答を見るための応答解析には、

- a. 直接積分法
- b. 時刻歴モーダル法
- c. スペクトルモーダル法

の各方法があるが、建物・構築物は収納する機器・配管の入力波を作成する必要があることから、応答波が得られる直接積分法または時刻歴モーダル法が、機器・配管では非線形計算の必要がなければスペクトルモーダル法が用いられる。モーダル法の場合には重ね合わせのための固有モード $\{\Phi\}$ が必要となることから、固有値を ω とし先ず固

有振動方程式

$$([K] - \omega^2[M])\{\phi\} = 0$$

を解く。得られた固有モードを用いれば、振動方程式

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = -[M]\{c\}\ddot{U}_0(t)$$

は1質点系の振動方程式

$$\ddot{q}_n + 2h_n\omega_n\dot{q}_n + \omega_n^2q_n = -\ddot{U}_0(t)$$

の解の重ね合わせとして解けることになる。

地震応答解析により変位または加速度が得られれば、構造物の部材断面算定を実施したり、力と変位の関係から構造物に発生する応力を求め、それを所定の値に制限することにより所要の耐震性を有する構造物とすることができる。

5. 原子力発電所耐震設計のその他の特徴

以上、原子力発電所の耐震設計に特徴的な入力地震動の決定について述べた。以下、その他、十分な耐震性を持たせるためのいくつかの特徴について述べる。

(1) 岩 着

耐震設計審査指針において、原子力発電所の重要な建物・構築物は岩盤に支持させることが要求される。岩盤の表層を覆う堆積層に立地させた場合、堆積層は一般に軟質のため震動は増幅されることから建物・構築物に大きな地震入力加わることになり、厳しい耐震設計が要求されるか耐震性が低下することが考えられる。このため岩盤上に立地させることとしており、これも原子力発電所の耐震性を高める特徴の一つとなっている。

(2) 剛構造

同様に、耐震設計審査指針において、建物・構築物は原則として剛構造、つまり、剛性の高い構造とすることが要求される。構造物の揺れは、地震動の周波数特性、波動伝播の媒体としての地盤の柔軟特性および構築物の剛性の各組み合わせによって多様に変化するが、剛構造との思想は、構造物の卓越振動数を高め、地震動および地盤の卓越振動数から離し、共振による弊害などを避けようとするものである。ある意味では古典的な耐震設計の方法でもあり、機器・配管など設備の耐震設計もこの思想によっている。

(3) 安全保護系による原子炉の自動停止

原子力発電所はその地点での発生が想定される地震動に対し十分な耐震性を有するが、更に安全性を確保するため、念のため震度V程度の地震を感知した場合、原子炉を自動的に停止するよう地震感知器を備えている。

(4) 試験による妥当性の確認

本稿は主としてその背景、考え、手順など設計面の言及に留まったが、それらの妥当性を数多くの実験・試験によ

って確認している点も原子力発電所の耐震設計の特徴と言える。建物・構築物は、建設と並行して立地岩盤の上に建物を想定したコンクリートブロックを設置、振動させ、地盤と建物の相互作用について設計の妥当性を確認し、建物が完成した後は起振機により建物全体を振動させ、地震応答解析の妥当性を確認している。機器・配管についても、応答解析のモデル化に際してはモックアップを作成し、固有値、振動形など性状を確認し、制御棒駆動機構のように安全上重要な設備については地震時の挿入性も試験し製作している。また、国では大型の振動台で耐震上重要な設備の振動試験を実施し、耐震安全性の確認も行っている。

6. まとめ

単に手順に沿って設計の手法を示すのではなく、できる限りその主旨を述べることによって原子炉の耐震設計が理解願えるよう努めた。地震は地域性のある自然現象であり、地震学・地質学の知見を十分に活用して、その地域に発生するであろう地震の大きさ・特性を予測し得るか否かが耐震安全性を左右することになる。その意味で、事前に詳細な地震・地質・地盤の調査を行い、あらゆる角度から地震発生・大きさを的確に推定し、現代計算技術の粋を尽くし施設に十分な耐震性を持たせる原子力発電所の耐震設計は、各種設計の中でも優れた設計手法の一つと判断している。

執筆にあたり、動燃事業団国際部担当役加納巖氏から適切なご助言・ご指導をいただいたことを記し謝意を表する。

参考文献

- 1) 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（昭和56年7月20日）。
- 2) 日本電気協会：JEAG 4601-1987、原子力発電所耐震設計技術指針（1987）。
- 3) 法第201号、昭和25年5月24日。
- 4) 宇津徳治：地震学（共立出版、1977）。
- 5) 大崎順彦、渡部 丹：原子炉施設の耐震設計（産業技術出版、1987）。
- 6) 松田、杉村、藤田、垣見編：断層と地震、地質学論集第12号。
- 7) S. Omote, et al.: Japanese Practice for Estimating the Expected Maximum Earthquake Force at Nuclear Power Plant Site, Bull. New Zealand Nat. Soc. Earthquake Eng. 13 (1980)。
- 8) 金井 清：地震動の振動特性に関する実験式、第2回日本地震工学シンポジウム（1966）。
- 9) T. Hisada, Y. Ohsaki, M. Watabe and T. Ohta: Design Spectra for Stiff Structures on Rock, 2nd Int. Conf. Microzonation, Vol. 2 (1978)。

非会員著者の紹介：井上達也氏は1946年東京生まれ。1969年芝浦工大電気工学卒。1980年米国ワシントン大学大学院原子核工学修士課程就学。現在、動燃事業団技術開発部長代理。専門は高速増殖炉流動伝熱・構造強度・耐震設計。