資 料

敦 賀 発 電 所 の 耐 震 設 計, (I)

耐 震 設 計 方 針

秋 野 金 次*, 加 藤 宗 明*, 田 村 誠 也*

(1970年 6月1日 受理)

Aseismic Design in the Tsuruga Nuclear Power Plant, (I)

Aseismic Design Principles

By Kinji AKINO, Muneaki KATO and Seiya TAMURA

The Tsuruga Nuclear Power Plant is of boiling water type.

The purpose of aseismic design is to protect the inhabitants in the plant environment and the operators of the plant from radiation hazard in the event of an earthquake. Another aim in aseismic design is to provide adequate strength to those structures or components which should be difficult to repair if damaged by earthquake.

The principles adopted for the aseismic design in the Tsuruga Plant are based on the experience in the construction of the Tokai Power Plant, and reference has also been made to design practices adopted in the west coast of the U.S.A. The principles also embody the results of discussions between the engineers of the Japan Atomic Power Co. and of the General Electric Co.

In this paper a description is given of how the design principles were established and how the aseismic design based on the principles were developed.

The present Part (I) contains a general description of the plant, an account of the progress leading to the finalization of the design principles, and the substance of the technical specifications for the aseismic design for the Tsuruga Nuclear Power Plant. A summary of the aseismic design adopted in the principal components will be given in Parts (II) and (III) to be published later.

The design principles adopted in this plant have been followed in the subsequent water cooled power reactors constructed in Japan.

ま え が き

商業用原子力発電所の耐震設計は、日本では東海発電所の設計で初めて取り上げられた。東海発電所はイギリスのコールダーホール改良型発電炉で、炉心は黒鉛を積んだ構造となっている。そのため、炉心の耐震設計ができるか否かが導入の大きな問題となり、イギリスおよび日本で解析および実験による検討が行われ、炉心構造については迂余曲折の結果全く新しい設計が行われた。

東海発電所における耐震設計の基本的な考え方は、慣用法である静的震度法に基づいて設計し、炉心など非常に重要な施設についてのみ動的検討を行うということであった⁽¹⁾。

その後、これらの経験や超高層建築の発展に伴い動力学的解析の手法は進歩し、コンピュータの発達により、複雑な構造物に対しても精度の高い解析が可能となってきた。敦賀発電所の耐震設計では、このような

* 日本原子力発電(株)(Japan Atomic Power Co.)

背景の違いおよび炉型の違いから、動的解析による設計を積極的に取り入れることにした。また、耐震設計と安全性との関係も整理され、全機器を事故解析等をもとに安全上の重要度に従って分類し、各クラスごとに、おのおののクラスの重要度に対応する耐震設計法を採用した。この耐震設計の基本方針は、当発電所の後に続く軽水炉型原子力発電所の設計で引き継がれている。

本稿では、敦賀発電所の耐震設計方針およびその確立までの経緯と設計用地震について述べ、第Ⅱ報、第Ⅲ報で設計例をあげて、その方針がどのように達成されているかを述べる。

I. 敦賀発電所の概要

敦賀発電所は、東海発電所に次ぐ日本で第2番目の商業用原子力発電所である。1966年5月に着工し、70年3月14日にすべての試験を終了し、全出力による営業運転に入った。炉型は直接サイクル強制循環軽水冷却減速沸騰水型(BWR)で、電気出力は331,000 kWである。その設備概要を第1表に示す。

敷地は福井県敦賀市の敦賀半島の先端に位置し、敷地面積 1,400,000 m² であり、発電所各施設の配置は第1図のとおりである。

第2図は原子炉建物およびタービン建物の断面を示している。原子炉建物は外径38m、地上高さ46m、地下1階地上5階の円筒形鉄筋コンクリート造建物であり、岩盤に直接基礎をおいている。また、原子炉建物は格納容器を内蔵し、格納容器内には原子炉が据え付けられている。タービン建物も岩盤上にコンクリートを打設して作った人工岩盤上に基礎を置いている。

敦賀発電所は直接サイクルのため、放射性物質を含む蒸気および水の配管類が各所にあり、耐震設計を必要とする機器、配管の範囲が広い。また、建物も遮蔽を必要とする部分が多いため、厚いコンクリートの壁の多いマッシブな構造となっている。このような特徴は耐震設計の基本方針作成の前提となっている。

当発電所はターンキー方式の契約により、GE 社が日本原子力発電(株)(以下原電と呼ぶ)より請負い、建設したもので、耐震設計は、原電側で作成した設計仕様書に従って GE 社が設計したものについて原電はそのチェック・アンド・レビューを行い、設計方針の主旨の徹底と設計の監理を行なった。

調査段階から建設終了までの全体の工程と耐震関係の活動を第3,4図に示す。

第1表 設備概要

位 置	福井県敦賀市明神町 1
電気出力	331,000 kW
周波数	60サイクル
原子炉本体	
型 式	直接サイクル強制循環 軽水冷却減速沸騰水型
熱 出 力	967,000 kW
基 数	1
炉 心	燃 料 棒 UO ₂ ペレット, Zry 2 被覆 燃料集合体数 308 U 平均濃縮度 2.04% (初期炉心) 2.5 % (第2炉心 以降)
	U 重 量 約60トン 制 御 棒 十字形 B ₄ C ステンレス鋼被覆 制御棒本数 73本 冷却材, 減速材 軽水 原子炉冷却材運転圧力 70 kg/cm ² g 原子炉冷却材運転温度 285°C
原子炉圧力容器	材 料 母材: 低合金鋼 内張: ステンレス鋼 内 径 4.3m 外 高 18m
タービン発電機	
タービン	形 式 串型復流排気非再熱式 出 力 331,000 kW (設 備 容 量) 357,000 kW 回 転 数 1,800 rpm
発電機	固定子液体冷却型 3 相同期発電機
	定 格 容 量 420,000 KVA 回 転 数 1,800 rpm
原子炉制御方式	制御棒位置調整および原子 炉冷却材再循環流量調整の 2 方式の併用
原子炉格納施設	
形 式	圧力抑制式
設 計 圧 力	約 4.4 kg/cm ² g

第1図 配置図

Ⅱ. 基本方針

1. 基本方針確立までの経緯

敷地における地質調査、地震調査等と併行して、アメリカの軽水炉、BWR と PWR の調査が開始されたのは1963年である。

敦賀発電所をアメリカから導入するに際しては、すでにアメリカにおいて建設を開始した商業用原子力発電所に、大きな変更を加えることなく導入したいという基本的な立場がとられた。この基本方針を採用した場合に、耐震設計もこの方針に従い得るか否かが第1の問題となり、この検討から始められた。その際に次の事項を考慮した。

- (1) 技術的には、予期される最強地震に対して、公衆災害が起らないことを実証し、
- (2) 経済的には、不当に高価な発電所にならず、
- (3) 政策的には、法的許可が得られること。

耐震関係では GE 社と WH 社の建設中あるいは計画中の原子力発電所でどのような耐震設計がなされているかを、各種資料を取り寄せ、必要に応じては GE, WH の技術者を呼んで調査した。

アメリカ西海岸は日本と同様、環太平洋地震帯に属し大地震の起る地域である。それゆえ、特にこれらの地域に建設あるいは計画されている原子力発電所の耐震設計に注目した。

この調査の結果、アメリカ西海岸で建設中または計画中の原子力発電所の耐震設計のフィロソフィーは次

第2図 原子炉建物・タービン建物断面図

第3図 調査・契約工程表

のようであった。

- a 設計用地震の最大加速度は0.25~0.33g。
- b 重要度による分類を行なって、クラスに応じた耐震設計をする。定義は
 - クラスⅠ： 被害を受けた場合、放射線災害の原因となる機器・構築物。
 - クラスⅡ： 発電所の運転上必要であるが、被害を受けても放射線災害には至らないもの。
 - クラスⅢ： その他。
- c 特に重要な機器については、設計用地震の2倍程度の加速度の地震に対して安全性を検討する。
- d 構築物、機器・配管は原則として剛になるよう設計するが、剛にできない場合は動的に設計する。重要機器は動的に設計する。
- e 設計用地震に対するクラスⅠの許容応力は、地震を考慮しない一般荷重による場合の許容応力をそのまま適用する。

フィロソフィーは以上のとおりだが、まだ計画が詳細設計を必要とする段階に至っていないため、どのような解析がなされるかという耐震設計の実体はわからなかった。

さらに、アメリカ西海岸の発電所の耐震設計について

のコンサルタントとして、アメリカでの耐震設計に大きな影響力を持つ Housner 教授が1963年12月に来日した際、不明の点について意見を聴取した。

アメリカの耐震設計の慣行を調査し、軽水炉の構造を検討した結果次のような結論を得た。すなわち、アメリカ西海岸での設計慣行により耐震設計をした原子力発電所は前述の(1)~(3)の条件を充足し、日本においても大きな変更なしに受け入れられるし、解析手法の日米の相違等は原子炉建物の基礎を岩盤に直接置けば大きな影響はないものと判断した。

2. 入札に対する評価

上述のように、アメリカのメーカーの耐震設計に対する認識の程度と重要構造物の耐震性についての定量的評価により、彼らの設計をそのまま日本に導入したとしても一応問題は少ないと判断されたが、それらのCriteriaによる実施設計がアメリカにも存在していないという事実にかんがみ、入札の評価と契約にはなお慎重な態度をとることとした。このため原電は「耐震設計に関する評価指針」をまずメーカーに提示し、これを満たさない入札は仕様と不適格な応札であるとした。この評価指針の基本的な考え方は次のとおりである。

- (1) 原子炉建物など主要構築物は直接岩盤に支持さ

第 4 図 建設 工 程 表

せ耐震性を高める。

- (2) すべての構築物、機器・配管を安全性の観点からの重要度に応じて分類し、対応した設計を行う。
- (3) 重要な構築物、機器・配管は静的に設計し、動的に検討する。
- (4) 格納容器や原子炉停止装置のような緊要な施設は、特に大きな地震が起った場合にも、その機能を確保するように設計する。

この段階では、東海発電所と同じに静的設計—動的検討の基本方針を考えていた。しかし、設計法としては、すべての施設を分類し、それぞれの重要度に応じた設計をする方針が明確な形で打ち出された。

入札の結果、1965年9月に GE 社の BWR の導入が内定し、GE 社より提出された入札書に記載された内容等を加味して耐震設計の契約仕様書を作成した。その骨子は、構築物、主要機器については動的設計とし、解析結果のいかんにかかわらず、最小限の必要条件として静的震度を明示し、いわば、動的設計—静的検討の方針を採用し、設計用地震としては、El

Centro 1940 NS と Goldengate 1957 の 2 波を最大加速度 0.25 g に規準化して使用することになった。契約は安全審査の許可後 1966 年 5 月 14 日に調印された。

Ⅲ. 設計用地震

設計用地震の最大加速度値の決定に当っては、安全性および経済性の両者の相反する条件を勘案しなければならない。そのため次の 2 つの地震を採用する方法を考えた。

設計用地震： 発電所寿命中、敷地に実際に発生するかもしれない最強地震で設定の目安としては過去に起きた最大地震を考える。この地震に対しては機器、構築物は降伏限度内に納まるよう設計する。

仮想地震： その地域で仮想し得る最大の地震で設計地震の 1.5 倍程度のもの。この地震に対しては、公衆災害を防止するために緊要な施設は機能を保持できることを確認する。

1. 敷地周辺の地震歴

敷地周辺の震害記録の主なものを「理科年表」⁽²⁾および福井気象台編「福井県の気象」⁽³⁾から抽出して要約したのが第2表である。これらの災害記録から敦賀周辺は福井県の中でも震害の少ない地域であることがわかる。

第5図⁽⁴⁾は、日本全国の有史以来の大地震の震央をプロットしたものである。この図にも見られるように、日本海側には大きなマグニチュードの地震は発生していないが、震央が内陸にある場合が多い。福井地震は規模としてはそれほど大きくないが、沖積地帯に震央を持ち、しかも震源が浅かったため極めて大きな地動を与え、火災の派生とともに福井市を壊滅させた。福井市周辺に地震計がなかったため正確にはわからないが、震源地付近の地表における水平最大加速度は0.5～0.6g、福井市内では同じく地表で水平0.4g、垂直0.2gと推定されている。福井地震では福井市内の建物の79%が全潰したが、近來の耐震設計法により静的震度0.2で設計した鉄筋コンクリート建物37棟のうち大破したもの3棟、中破が2棟、他のものはほとんど被害がなかった。

第5図 有史以来の大地震の震央

1963年の越前岬沖地震はマグニチュード6.5～7.0、震央距離約20kmと震央が近かったが、敦賀市内にある測候所の記録からの推定では0.1～0.15gであった。

第2表 敦賀近辺の地震度

発 震 日			震央地帯	東 経	北 緯	規 模	震 度 階		震 原 深 度	震 央 距 離	地震の程度と被害		備 考
年	月	日	(地震名)	°E	°N	M	敦賀	福井	h(km)	△(km)	敦賀近辺	福井県全体	各地の全被害概要
701	5	12	若狭湾西部	135.4	35.6	7.0	—	—	—	57	—	—	冠島沈下し、一郷覆没す、津波あり
1325	12	5	近江北部	136.1	35.6	6.7	—	—	—	24	気比神社 宮殿倒る	—	近江竹生島奥の院崩る。
1891	10	28	(濃 尾 大地震)	136.6	35.6	8.4	V	—	—	60	—	大野で14戸中3戸潰ぶれる 裂地幅1～4尺 深さ0.5～3尺 長さ3里 死者12, 全壊1,080戸 半壊1,188戸, 橋破損60	根尾谷断層できる。 死者7,273, 全潰80,000 半潰142,177
1927	3	7	(丹後地震)	135.0	35.6	7.4	IV	IV	—	92	—	—	死者3,017, 全潰4,974
1948	6	28	(福井地震)	136.3	36.1	7.2	IV	VI	20	43	—	死者3,728, 全潰35,382, 半潰10,542 山手被害なし。	死者3,895, 全潰35,420, 半壊11,449 5～60cmの断層あり
1963	3	27	(越前岬 沖地震)	135.8	35.8	～7.0	IV	IV	20	21	全潰2 半潰2	全潰10, 半潰11	同 左

† △は敷地から震央までの距離

一方、さらに震央に近い敷地付近ではほとんど被害がなく、震度階Ⅲ(弱震 0.008~0.025g)程度と推定されている⁽⁶⁾。

2. 設計用地震の決定

設計用地震の最大加速度を決めるに際して、日本海側の地震の特徴を考え、敷地が福井地震程度の地震の震央域に入るものと仮想した。福井地震の震央域の地表では史上最大級の加速度を示し、0.5~0.6g 程度と推定されている。一方、沖積層上での加速度は、地下の岩盤では一般的には $1/6$ 程度に減少すると考えられるので、震央域の岩盤では0.18~0.2g 程度であったと推定される。このことを根拠とし、安全側に見て、設計用地震の最大加速度値は0.25g とした。

安全検討用地震としては、設計地震の1.5倍の加速度、すなわち0.375g とした。

地震による応答を計算する際には、最大加速度のみならず地震波の特性も問題となる。一般に軟弱地盤上で記録された地震波は長周期成分を多く含み、硬い地盤上で記録された地震波は短周期成分を多く含んでいる。そのため1質点応答曲線を作ると、そのピークは硬い地盤では軟い地盤に比して短周期側に出てくる。そこで、El Centro, Golden Gate, Helena, 茨城, 北美濃の5波について加速度応答スペクトルを作り、これらをカバーするような設計用加速度応答スペクトルを作った(第7図)。また、上記検討の結果、El Centro と Golden Gate の2波で他の波のピークをほとんどカバーできることがわかり、個々の施設の時刻歴応答を求める場合は、上記2波を0.25g に規準化して使用することにした。

なお、設計用地震および耐震設計の基本方針は、社内に設置した第2発電所地震対策委員会(委員長: 武藤 清東大名誉教授)で充分審議した後決定した。

Ⅳ. 耐震設計仕様書

契約書に添付された耐震設計仕様書の概要を以下に述べよう。

敦賀発電所の耐震設計の基本原則は、周辺の住民および発電所の運転員を地震時あるいは地震後の放射線災害から保護し、また、修理が困難な部分には十分な強度を与えることである。

1. 重要度の分類

上述の目的を達成するために、すべての建物、構築物、機器・配管類は地震に対する発電所の安全性を考慮した重要度に応じて分類し、それぞれのクラスに応じた設計を行う。分類の定義は次のとおりである。

As クラス: 原子炉格納容器ならびに制御棒、制御棒駆動機構および液体毒物注入系のような安全対策上特に緊要な施設。

A クラス: その機能喪失が原子炉事故をひき起す施設、および周辺公衆の災害を防止するための緊要な施設。

B クラス: 高放射性物質に関連する上記 As, A クラス以外の施設。

C クラス: 上記 As, A, B クラス以外の施設。

ただし、As クラスの機器・配管類は As あるいは A クラスの建物、構築物で支持し、A クラスの機器・配管類は As, A あるいは B クラスの建物、構築物で支持する。(第6図)

第6図 重要度による分類

2. 設計方針

- (1) 建物、構築物、機器・配管類は原則として剛とする。
- (2) A クラスである原子炉建物、排気筒は岩盤に直接基礎を置く。
- (3) As, A クラスの建物、構築物、機器・配管類は、基礎底面で最大加速度0.25g の地動に充分耐えるものとする。
- (4) As クラスの機器、構築物は、基礎底面で最大加速度0.5g*の地動に対して、その機能が保持されることを確認する。

3. 設計震度

(1) 建物・構築物

* アメリカの当時の方法に従ったGEの提案を受けて契約仕様書では、安全検討用地震を設計用地震の2倍と仮定して0.5g とした。しかし敦賀発電所ではアメリカと異り、設計用地震を最強地震と定めたので安全検討用(仮想)地震はその1.5倍程度を考えれば十分であると判断し、設置許可では設計用地震の1.5倍、すなわち0.375g で申請して認可された。その後の日本の原子力発電所についてはこの1.5倍が受け入れられている。

As, A クラス: As, A クラスの建物, 構築物の水平設計震度は, 基礎底面で $0.25g$ の地動に対する動的解析の結果から決定する。ただし, 動的解析によるベースシア*が $3C_0$ によるベースシアを下廻らない(ここで, C_0 とは日本建築基準法に定める(静的)震度である)。

垂直震度は水平震度の $1/2$ とし, 水平方向と同時に不利な方向に作用するものとする。

B クラス: $1.5C_0$

C クラス: C_0

(2) 機器・配管および支持構造物

As, A クラス: 機器・配管系の固有振動数を求め, 支持構造物の固有振動数との比により次のとおり分類する。

剛領域系: $f_B/f_s > 2$

共振領域系: $2 \geq f_B/f_s \geq 0.7$

柔領域系: $f_B/f_s < 0.7$

ここに, f_B : 機器・配管類の固有振動数

f_s : 支持構造物の //

剛領域系および柔領域系の機器・配管類の設計震度は, その支持構造物の据付け位置の震度に増幅係数 1.2 以上をかけた値とするが, 少なくとも水平震度は $1.2 \times 3C_0 = 3.6C_0$ を下廻ることはないものとする。

共振領域系の設計震度は, 構築物基礎底面で $0.25g$ の地動に対する動的解析の結果から決定する。

垂直震度は $1.2 \times 3C_0 \times 1/2 = 1.8C_0$ とし, 同時に不利な方向に作用するものとする。

B クラス: 支持構造物の機器・配管据付位置における震度の 1.2 倍とし, $1.2 \times 1.5C_0 = 1.8C_0$ を下廻らないものとする。

C クラス: 耐震設計が必要と思われる系についてのみ適用する。震度は $1.2C_0$ を下廻らない。

4. 動的解析

設計用地震波としては, El Centro NS 1940 と San Francisco Golden Gate Park S80E 1957 の地震波を最大加速度 $0.25g$ に規準化して使用する。

減衰定数は次の値を用いる。

鉄筋コンクリート構造	5.0%
ボルト, リベット構造	2.0%
溶接構造	1.0%
ポンプ, ファン, 機械類	1.0%
重要配管	0.5%

モデル解析をする場合は第 7 図の応答スペクトル

第 7 図 地震応答スペクトル

を使用する。

5. 荷重の組合せおよび許容応力

(1) 建物および構築物

荷重の組合せは建築基準法によるが, 許容応力は As, A クラスについては地震時の割り増しなし(すなわち, 長期許容応力)とし, B, C クラスについては建築基準法どおりとする。

(2) 機器・配管類

As, A クラス

圧力のあるもの: ASME Sec I, VIII 相当, ASA (格納容器を含む) B31.1, 1955 相当, および同等の日本のコードを適用する。

圧力のないもの:

炉心構造物: ASME Sec I 相当

その他: 地震時の許容応力の割り増しなしとして該当するコードを適用する。

B, C クラス:

地震荷重と常時荷重の組合せにより生ずる 1 次応力は弾性限度とする。

1 次応力, 2 次応力, 局部応力等の合成応力は降伏点に達してもよいが, 過大の歪を生じてはならない。

6. 安全性の検討

As クラスである原子炉格納容器, 制御棒および同駆動機構のように, 安全対策上特に緊要な施設は, 原子炉建物の基礎底面で最大加速度 $0.5g$ の地動に対しても格納容器の機能が保持され, かつ安全に炉の停止ができることを確認する。

上記仕様書による耐震設計の手順を流れ線図で第 8 図に示す。

* ベースシアとは建物基礎部におけるせん断力であり, 建物頂部から基礎部までの間にかかる水平力を積分した値である。これにより地震荷重による応力の全般的な比較ができる。

第 8 図 耐震設計の手順

仕様書では動的設計の方針を出したが、当時は建物を除いては、設計手法、解析コード等は確立されていなかった。そのため、設計の段階では仕様書の主旨をより良く具体化する設計手法、計算コードを原電の指導の下でメーカーが逐次開発していった。

機器・配管については、その固有振動数と支持構造の固有振動数との比により分類して震度を決めること(Ⅳ.3.(2)参照)を考えていたが、建物各床の応答時刻歴を入力として作成した各床における応答スペクトル(床応答スペクトルと呼ぶ)を震度決定に使用したため、上記条項はほとんど適用しなかった。

機器・配管に対する地震時の許容応力については、仕様書作成当時は法規あるいは基準がなかったため、原則的なことのみを定めていた。建設途上で、一般運転荷重状態の場合には ASME Sec.Ⅲ等の斬新な応力の取扱いを敦賀発電所でも準用した方が合理的と判断したが、地震荷重状態に対しては、その運用は時期尚

早と考えた。したがって、機器・配管の一般運転荷重状態に対する当時の適用コードによる許容応力値を地震荷重を含めた場合にもそのまま適用してもよいという解釈をつけて、仕様書の原則を多少拡張した程度にとどめた。

その後、アメリカでは配管に対しては USAS B31.7等の原子力発電所の配管に対するコードが作られ、国内でも地震荷重に対する許容応力値の検討が進められている。

— 参 考 文 献 —

- (1) 武藤 清: コールダー・ホール改良型発電炉の耐震設計, (I), 本誌, 1[7], 447 (1967).
- (2) 東京天文台編: 理科年表, (1965).
- (3) 福井地方気象台編: 福井県の気象, (昭38.10).
- (4) 河角 広: わが国における地震危険度の分布, 建築雑誌, 66[773]号, (1951.4.).
- (5) 敦賀測候所: 越前岬沖地震調査, (昭38.4).