

〈4/27 監視チームにおける議論のまとめ〉  
3. 安全対策(地震対策)について  
② 地震対策の個別事項について  
（イ）構造強度評価における解析方法の選択の考え方

## 東海再処理施設の廃止措置計画における

### 耐震性評価での解析手法の選定と保守性の確保の考え方

#### 【概要】

東海再処理施設の廃止措置計画における、廃止措置計画用設計地震動に対する耐震評価および設計に用いる解析手法の選定の考え方並びに保守性の確保の考え方を整理した。

令和2年5月12日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

## 東海再処理施設の廃止措置計画における 耐震性評価での解析手法の選定と保守性の確保の考え方

### 1. 機器の耐震性評価での解析手法の選定の考え方

#### 1.1 基本的考え方

一般に原子力施設における機器の耐震解析手法としては、大分類として地震時の瞬間的な最大加速度を静的な荷重とみなして対象機器に負荷してその応答を評価する「静的解析」と、地震波の振動的特徴を考慮した周波数毎の応答をスペクトルとし、それに対する機器の固有モード毎の応答を合成して評価するスペクトルモーダル法、あるいは時刻歴の地震加速度波を直接作用させて時々刻々の機器の応答を評価する時刻歴解析法といった「動的解析」に二分される。

さらに、静的解析は日本電気協会の「原子力発電所耐震設計技術指針」、日本機械学会の「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」や日本建築学会の「鋼構造設計基準」、あるいは一般的な材料力学・構造力学の公式集やハンドブック等に記載されているような質点・バネ・はり・板等の単純化された構造モデルを力学方程式で表し、その解（公式）によって応力を評価するものと、はり要素や有限要素によって機器をモデル化して数値解析により応力を求める方法がある。

静的解析か動的解析かは、地震動という振動現象に対して対象機器が共振するおそれがあるかに着目して判断する。すなわち、地震動の卓越振動数の範囲に機器の固有振動数が含まれる場合、共振現象によって地震動の最大加速度を単に静的に負荷したよりも大きな応答を生じるおそれがあることから、このような振動特性を扱える動的解析法を採用する必要がある。

東海再処理施設の廃止措置計画において、廃止措置計画用設計地震動（以下、「設計地震動」という）に対する耐震評価および設計に用いる解析手法の選定の考え方の概略は図1に示す通りである。

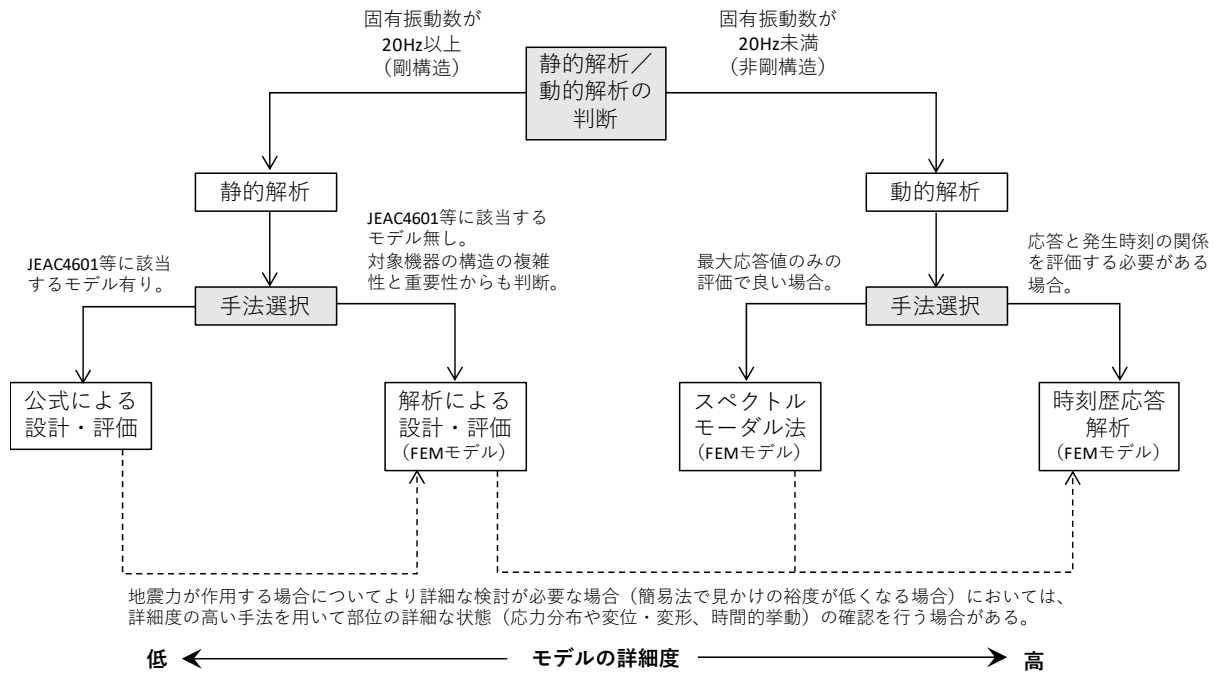


図1 設計地震動に対する耐震評価および設計に用いる解析手法の選定の考え方

## 1.2 廃止措置計画における耐震評価についての特記事項

廃止措置計画において設計用地震動に対して耐震性を確保することとした高放射性廃液貯蔵場 (HAW 施設) およびガラス固化技術開発施設 (TVF) については、上記の基本的考え方に基づき耐震性評価を行っている。

一方で、一部の機器については図1の破線に示したように、簡易評価では見かけの裕度が少なくなることから、詳細な地震時の応力発生挙動を確認し、本来の耐震強度を把握するために、より詳細な手法を用いている。

例えば、高放射性廃液貯蔵場 (HAW 施設) の中間貯槽は固有振動数が約 30Hz であることから基本的考え方に基づけば静的解析となるが、ラグ付近の曲げ変形などで応力が集中する箇所に対して地震動の高振動数成分による影響を確認し、機器本来の耐震強度を明示的にするために時刻歴解析を用いた。この際、動的解析でも簡易な方法であるスペクトルモーダル法を採用しなかったのは、振動数上限を 20Hz とし設備共通の床応答スペクトルを作成していたため、一次固有振動数が 30Hz の中間貯槽に対して当該床応答スペクトルを適用することは応答スペクトルの範囲外となり、妥当でなかったためである。

また高放射性廃液貯槽は固有振動数が約 14Hz の剛でない機器であることから、基本的考え方に基づき動的解析 (スペクトルモーダル法) を用いた評価を行っている。

## 2. 保守性の確保の考え方

廃止措置計画における耐震性評価は前章で述べた考え方に沿って実施するが、評価の各局面においては既往の原子力施設の耐震解析において考慮されてきた保守性の確保の考え方を踏襲している。表 1 にその考え方をまとめる。

表 1 耐震性評価における保守性の確保

項目	静的解析		動的解析	
	公式による評価	FEM による評価	スペクトルモーダル法	時刻歴解析法
地震荷重	<ul style="list-style-type: none"> <li>一次固有振動数が 20Hz 以上の機器のみ。</li> <li>設置床の応答加速度の最大値の 1.2 倍 (1.2ZPA)</li> <li>機器が床面より上に設置されている場合は、上階の床応答を使用。</li> <li>設計地震動 3 波の中の最大値を使用。</li> <li>公式による評価で用いる評価式は、電気技術指針 原子力編 原子力発電所耐震設計技術指針および日本機械学会規格 発電用原子力設備規格 設計・建設規格に従う。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>設置床の水平方向の床応答スペクトルは、設計地震動 3 波およびそれぞれの NS/EW 方向をすべて包絡したもの。</li> <li>設置床の鉛直方向の床応答スペクトルは、設計地震動 3 波をすべて包絡したもの。</li> <li>包絡スペクトルを周期方向に±10%拡幅。</li> <li>機器が床面より上に設置されている場合は、上階の床応答を使用。</li> <li>減衰定数は電気技術指針 原子力編 原子力発電所耐震設計技術指針に基づく。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>設置床の時刻歴応答波形を使用。</li> <li>機器が床面より上に設置されている場合は、上階の床応答を使用。</li> </ul>	
その他荷重	<ul style="list-style-type: none"> <li>貯槽については、満水状態（設計容量）で評価。</li> <li>設計上の最高使用温度、最高使用圧力で評価（供用状態 Ds）。</li> </ul>			
評価結果の組合せ	<ul style="list-style-type: none"> <li>水平方向応答と鉛直方向応答は、それぞれの最大値を SRSS 法で組合せ。（時刻歴解析においても同時性を考慮せず、それぞれの方位について解析時間内の最大値を SRSS 法で組み合わせている）</li> <li>地震以外の荷重（固定荷重、機械荷重、圧力荷重）による応力は地震による応力に絶対和法で組合せ。</li> </ul>			
材料特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>日本機械学会規格 発電用原子力設備規格 材料規格の値を使用。</li> </ul>			
許容応力	<ul style="list-style-type: none"> <li>電気技術指針 原子力編 原子力発電所耐震設計技術指針および日本機械学会規格 発電用原子力設備規格 設計・建設規格の考え方に従う。</li> </ul>			

(参考) 解析手法の選定の基本的考え方の詳細

### (1) 機器の固有振動数に基づく選定

前述したように、耐震評価の対象とする機器についての固有振動数に基づき、静的解析か、動的解析かを選択する。ここでは対象機器の一次固有振動数が 20Hz 以上（一次固有周期で 0.05sec 以下）の場合、地震動による共振の影響は低い（地震動に対して剛である）と考え、静的解析を行う。

### (2) 公式による評価

静的解析を選択した機器について、評価対象部位の地震時最大応力を計算するためには日本電気協会の「原子力発電所耐震設計技術指針」、日本機械学会の「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」といった規格規準類に適用可能な公式が定められていなければならない。一般に、単純な形状で小型の槽類の胴および支持構造、同様のポンプ・排風機・盤・ラック類の支持構造といったものが該当する。また、小口径・低温の配管系統についても定ピッチスパン法（振動数基準）を用いて剛となるよう設計・評価することができる。

公式による評価の場合、入力として与える地震動は、水平・鉛直方向の床応答の最大加速度（ZPA : Zero Period Acceleration）に 1.2 倍した加速度（1.2ZPA）とする。これは剛であるために低いとみなした共振の影響（高次固有振動数や実際に作用する地震波の振動特性に依存）に対しても、保守的に考慮するためのものと考えている。水平地震動は NS 方向、EW 方向のうちの大きい加速度を採用する。また、床面より上に設置されている機器に適用する床応答は上階のものとする。評価は水平・鉛直方法で独立に行うが、得られた結果については二乗和平方根法（SRSS 法 : Square Root of Sum Squares）により組み合わせる。

本手法のメリットは、公式により見通しが効きやすく、また過去の経験により保守性が確認されていること、評価の負荷が小さいことである。デメリットとしては、機器の任意の場所や任意の時刻における発生応力の状態は評価できないことである。基本として、公式が適用できる条件であれば公式を活用し、考慮できない構造（例えば公式の標準化されたモデルでは考慮できない補強リブなどが装備されている構造である等）については、実際の構造を単純化して公式を当てはめた場合の結果から得られる見かけ上の裕度を見た上で、本来の裕度を定量的に明らかにするためにより詳細な評価を行うかについて検討する。

### (3) 静的解析（FEM）

剛な機器において、対応する適切な公式が無い場合や、公式による評価では単純化しすぎると考えられる場合、公式で評価する以外の部位についても詳細に評価する必要がある場合には、対象機器の幾何形状をはり要素、シェル要素、ソリッド要素を用いた有限要素法（FEM）によってモデル化し、そのモデルに公式による評価と同様の方法で地震荷重を作用させて発生応力を評価する。

入力として与える地震動は、水平・鉛直方向の床応答の最大加速度に 1.2 倍した加速度

(1.2ZPA) とする。これは剛であるために低いとみなした共振の影響（高次固有振動数や実際に作用する地震波の振動特性に依存）に対しても、保守的に考慮するためのものと考えている。水平地震動は NS 方向、EW 方向のうち大きい加速度を採用する。また、床面より上に設置されている機器に適用する床応答は上階のものとする。評価は水平・鉛直方法で独立に行うが、得られた結果については SRSS 法により組み合わせる。

本手法のメリットは、公式による評価に比べて機器の形状をより実機に合わせて正確に扱うことにより、より現実的な結果が得られること、機器全体の応力発生状況を把握することができることである。デメリットとしては、公式に比べて実機に基づく幾何形状のモデル化が必要となること、それを含み解析負荷が高いことである。なお、設計という観点では、機器の応力発生状況や構造の全体的なバランスを知ることができるため、具体的な耐震性向上方策の検討に資する情報を得ることができる。

#### (4) 動的解析

剛でない機器については、地震動の振動特性による応答の増幅を評価するために動的解析を行う。動的解析の基本的手法はスペクトルモーダル法である。スペクトルモーダル法では、有限要素等でモデル化された機器の高次固有振動数（モード）毎に最大応答を評価し、それらを SRSS 法で重ね合わせて発生応力を計算する。従って、実際の時刻歴の地震動において各モード毎の最大発生時刻がいつになるかは考慮せず、最大値を合成したものとなる（同時にモードの最大値が重なることは考えにくいいため、その影響については SRSS 法によって補正される。合成する各モードが離れている場合にはよい近似となる）。

入力として与える地震動は、機器設置床の加速度応答スペクトルであるが、計算に用いる加速度応答スペクトルは、水平方向については NS・EW の 2 方向の応答スペクトルを包絡したものとする（設計地震動が 3 種類設定されていることから、これらすべての水平動を包絡したものを用いた）。さらに水平・鉛直方向とも周期方向に±10%の拡幅を行った加速度応答スペクトルを計算への入力としている。スペクトルモーダル法では減衰定数が重要なパラメータであるが、廃止措置計画における耐震評価においては「原子力発電所耐震設計技術指針」に示された値を用いている。

スペクトルモーダル法で得られる情報は FEM を用いる静的解析と同等であるが、刺激関数やモード毎の応答などの振動特性についての情報が得られるため、入力される地震動の振動数特性との関係性の分析が可能である。その反面、時間軸に基づく情報を得ることはできないことから、そのような扱いが必要な場合には時刻歴解析を行う必要がある。

時刻歴解析によれば、最大発生応力がいつ生じるのかを明らかにすることができることから、特に発生応力の組合せにおいてスペクトルモーダル法の SRSS を用いた組合せ処理より正確な扱いができる。また、スペクトルモーダル法では床応答スペクトルを作成する際にカットされる高周波領域の応答についても評価可能である。

時刻歴解析の特徴を踏まえれば、水平 2 方向・鉛直方向の同時入力による解析が可能である。あるいはそれぞれの方角毎に解析を行った後、同時刻の発生応力を SRSS 法で組み合わせる時刻歴の合成結果を算出することもできるが、廃止措置計画における耐震評価に

おいては水平 2 方向・鉛直方向はそれぞれ別々に解析を行い、それぞれで得られた最大応答値を同時性を無視して SRSS 法で組み合わせるといふ保守的な扱いをしている。従って得られる結果はスペクトルモーダル法と大きく異ならないが、最大応答値の発生時刻が明らかになることから、各方向の最大応答値の組合せについて保守性を確認できる。

以上