

耐震裕度に関する検討について

平成20年8月6日

東京電力株式会社

設備の地震応答解析については、静的地震力による解析と動的地震力による解析があり、耐震上重要な設備（As 及び A クラス）では両方の解析を実施している。配管のように柔な設備については動的地震力による影響が大きくなるが、比較的剛な設備については動的地震力による評価より静的地震力による評価が卓越する場合がある。以下では、静的解析の保守性および動的解析の保守性について検討する。なお、動的解析については下記の項目に着目して検討を実施する。

(動的解析の保守性に係る項目)

- ①解析モデル
- ②拡張の有無
- ③解析手法
- ④減衰定数
- ⑤応力係数
- ⑥許容値
- ⑦その他（水平・上下応答の組合せ）

1. 静的解析の保守性について

1.1 機器・配管系の静的地震力による評価

耐震クラス As, A クラスについては、S1 より算定される設計用最強地震による地震力または静的地震力のいずれか大きい方の地震力に耐える設計が行われている。静的地震力としては建築基準法で定める震度の3倍が建屋の評価に用いられ、さらに、その1.2倍が機器・配管系の評価に用いられる。例えば静的水平地震力は下記水平震度より求める。

$$\text{水平震度} = 3.0C_1 \text{ (層せん断力係数)} \times 1.2 \dots \text{式(1)}$$

$$C_1 \text{ (せん断力係数)} = R_t \cdot A_i \cdot C_0 \dots \text{式(2)}$$

R_t : 建物・構築物の振動特性係数

A_i : せん断力係数の高さ方向の分布係数

C_0 : 標準せん断力係数 (=0.2)

1.2 静的地震力の大きさ

式(1)で計算される静的水平震度、S2 地震動による床加速度 ($\times 1.2$)、および中越沖地震による床加速度 ($\times 1.2$) の比較を7号機原子炉建屋について図1に示す。

設計に用いる静的水平震度は、全てのレベルにおいてS2による床加速度および

中越沖地震による床加速度より大きい。したがって、原子炉建屋の全てのレベルに設置される設備について、比較的剛であれば、静的震度による評価はS2地震動さらには中越沖地震による震度を越えた評価を実施していることを示す。

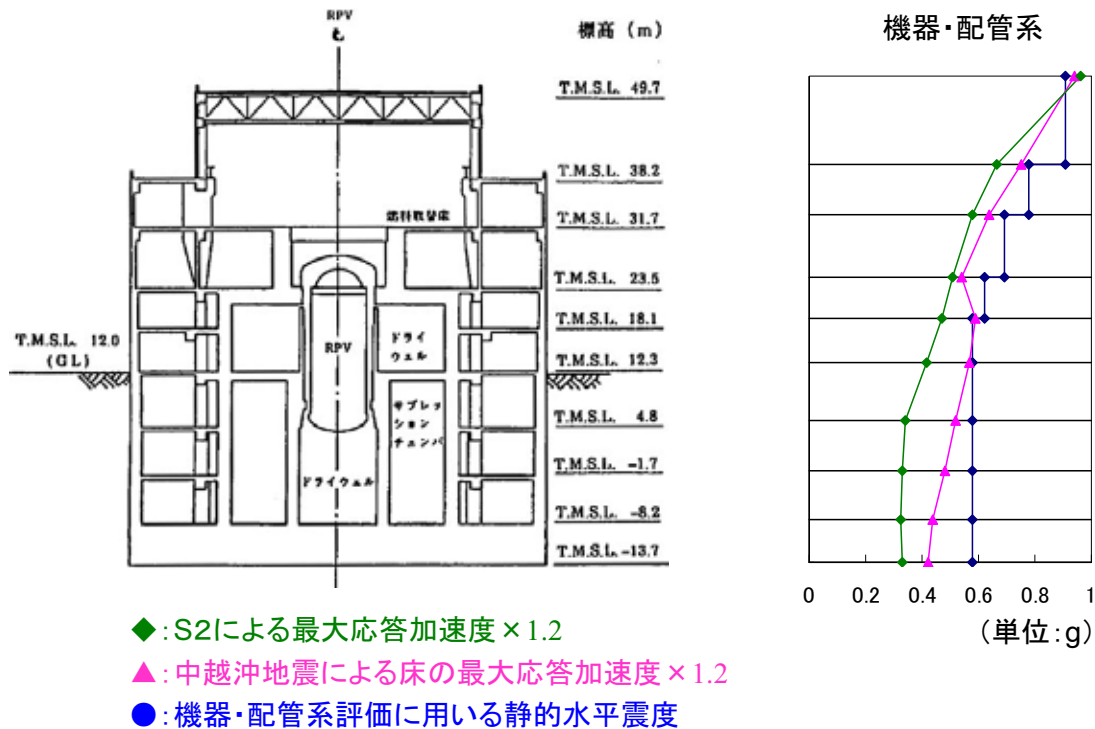


図1 S2・中越沖地震による床加速度および静的水平震度（7号機原子炉建屋）

1.3 静的解析と動的解析による評価の比較

7号機の主要設備を例にして、設計時の解析をもとに静的解析と動的解析の評価結果の比較を行った。合わせて中越沖地震による評価（動的）の結果も示した。

表1. 7号機設備の静的・動的解析の比較(例)

設備		評価部位	評価応力	発生応力 (N/mm ²)			
				静的解析	動的解析		
					S1	S2	中越沖
床置設備	残留熱除去系ポンプ	基礎ボルト	せん断	6	—	4	5
	残留熱除去系熱交換器	基礎ボルト	せん断	27	—	15	17
	原子炉隔離時冷却系ポンプ	基礎ボルト	引張	39	—	26	30
	高圧炉心注水系ポンプ	基礎ボルト	せん断	10	—	6	7
大型設備	原子炉圧力容器	基礎ボルト	引張	123	—	115	115
	炉心支持構造物	シュラウドサポートレグ	軸圧縮	49	—	40	32
	原子炉格納容器	上鏡	曲げ	20	—	19	27
配管	主蒸気系配管	配管	一次	—	267	311	136
	残留熱除去系配管	配管	一次	—	176	196	239

※：静的解析とS1による動的解析を比較して大きい方の値を記載（小さい方は「—」）。

床置きと比較的剛な設備については、静的解析、S2 による動的解析、中越沖地震による動的解析による発生応力の関係は図 1 と同様になる。大型設備については、発生応力は図 1 とは異なる傾向になるが、静的解析は S2 や中越沖地震による動的解析と同等の評価となる。配管のように柔な設備については静的地震力より動的地震力が卓越する結果となっている。つまり、比較的剛な設備については、静的解析により十分に裕度を持たせた設計となっており、また、静的解析による許容値は許容応力状態ⅢAS に基づくため、中越沖地震による評価も同様にⅢAS に基づく許容値を満足すると考えられる。

2. 動的解析の保守性について

前節で述べたように、配管のように柔な設備については静的地震力より動的地震力が大きい。ここでは、動的解析における保守性について検討する。

動的解析の保守性について、下記項目について配管系を例として検討を行う。

(動的解析の保守性に係る項目)

- ①解析モデル
- ②拡張の有無
- ③解析手法
- ④減衰定数
- ⑤応力係数
- ⑥許容値
- ⑦その他 (水平・上下応答の組合せ)

2.1 各保守性の係わりについて

解析モデル①及びその他の保守性に係る項目②～⑦の関係について説明する。

配管モデルは、図 2 のように 3 次元でビームと質点に簡素化され作成される。このモデルにて固有値解析を行い、固有周期： τ_i 、各固有周期における固有モード： $\{u\}_i$ および刺激係数： β_i (各モードの振れやすさを表す値) を求める。応力の算出までは以下のようなステップとなる。

(1) 応答加速度の導出

対象配管の減衰定数と設置位置における床加速度から床応答スペクトルを作成し、各固有周期： τ_i における応答加速度： α_i を求める。

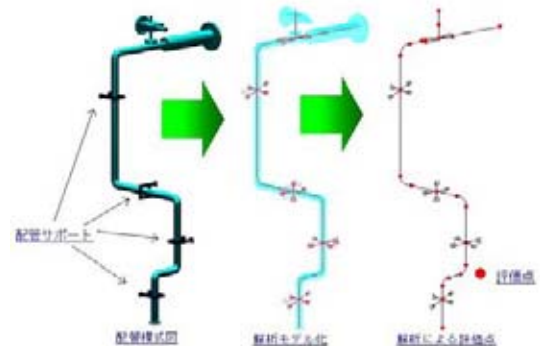


図 2 配管モデル化の例

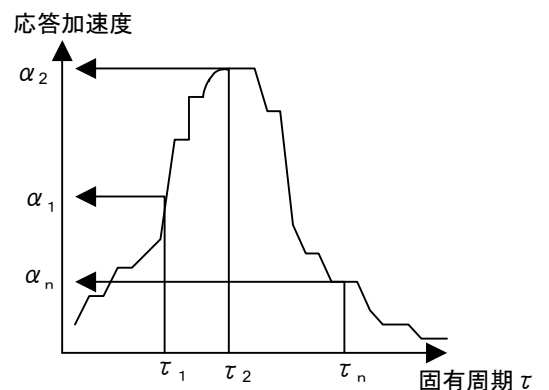


図 3 床応答スペクトルの例

配管モデルを用いた固有値解析による固有周期の算定は、床応答スペクトルからの設備の応答加速度の導出に影響し、固有周期が大小どちらにずれるのも望ましくなく、より現実に近い値となることが求められる。この意味において、配管モデルによる固有値解析自体について保守性を含ませることは考慮されない。

しかし、設計用床応答スペクトルの作成にあたっては、地盤物性、建屋剛性等の因子による地震動の変動を考慮し周期方向に±10%拡幅されている^{※1}。配管モデルによる固有周期が仮に現実と異なるとしても、この拡幅で保守性が確保されている。さらに、床応答スペクトルを作成する際に用いる減衰定数については試験の下限値で設定された規格基準値を用いており^{※2}、結果、応答加速度は保守的に大きく設定される。

※1：JEAG4601-1987 より抜粋「床応答スペクトルに変動を与える因子（地盤物性、建屋剛性、地盤ばね定数の算出式および減衰定数、模擬地震波の位相特性等）の影響を考慮して床応答スペクトルを周期軸方向に±10%拡幅している。」

※2：スナバ及び架構レストレイント支持配管の減衰定数導出は図4のデータの下限值より導出（JEAG4601-1991より抜粋）

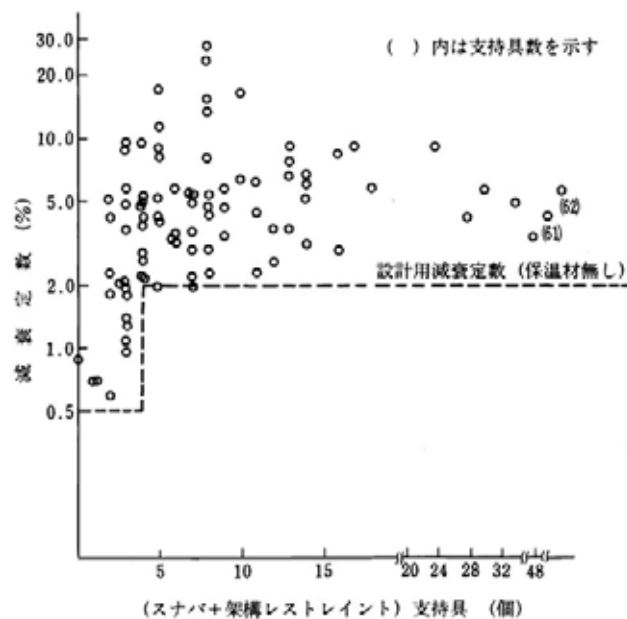


図4 減衰定数データ

(2) 各モードの重ね合わせ

固有周期 i における固有モード： $\{u\}_i$ ，刺激係数： β_i ，応答加速度： α_i によりモーメント： $\{M\}_i$ を求め、各モードでの重ね合わせを行う。

$$\{M\} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \{M\}_i^2} \quad \dots \text{式(3)}$$

スペクトルモーダル法では、図5に示すように各モードの時間的変化を考慮せず各モードの最大応答を重ね合わせてモーメントを算出する。また、この各モードの重ね合わせを水平地震動と上下地震動の各々について実施し、水平地震動によ

るモーメントと上下地震動によるモーメントを組合せて応力を算出する。つまり、水平地震動と上下地震動の応答の時間的な相違も考慮されない評価となる。

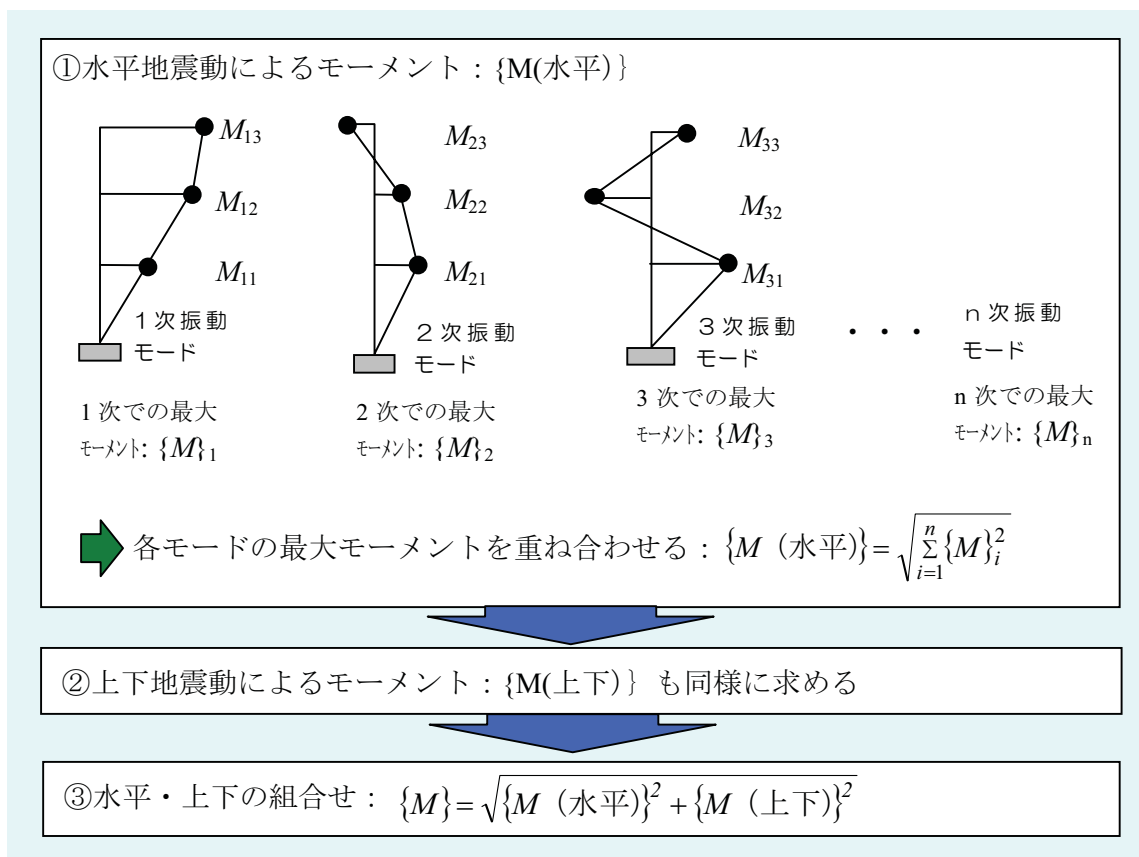
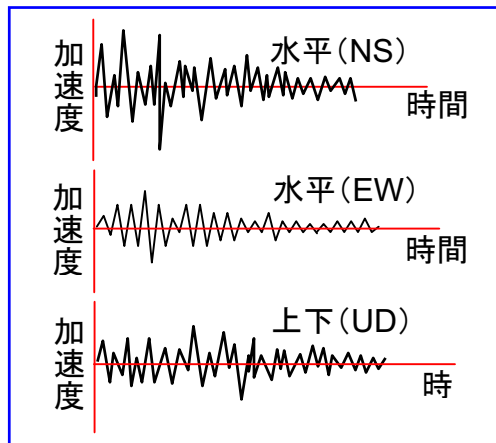


図5. スペクトルモーダル法における地震力(モーメント)の求め方

次節 2.2 では、現実の応答を模擬するために、各モードの時間的な変化や水平地震動と上下地震動の応答の時間的な相違を考慮した時刻歴解析による評価を行い、スペクトルモーダル法におけるこのようなモードの重ね合せや水平・上下地震動応答の組合せの保守性を評価する。(スペクトルモーダル法と時刻歴解析の流れの比較を図5に示す。)

また、現行 JEAG では水平地震力と上下地震力は絶対値和で組合せるとあるが、上下地震力は静的解析で求める。本評価では、上下地震力は動的解析により求めているため、絶対値和の組合せは過度に保守的であると考えられる。本文 5.2 項で述べたように上下地震力を動的に扱う場合は水平地震力と SRSS (2乗和平方根) で組合せることが現実的であるため、次節 2.2 では絶対値和の SRSS に対する保守性も定量的に評価する。

時刻歴解析



配管モデル(3次元)に入力
時刻歴解析

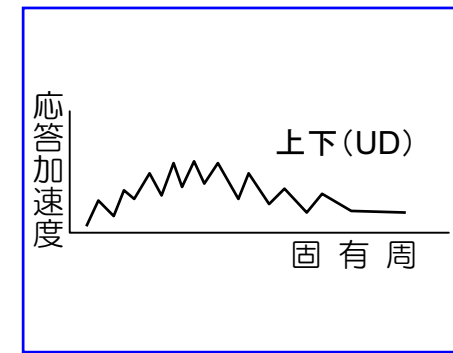
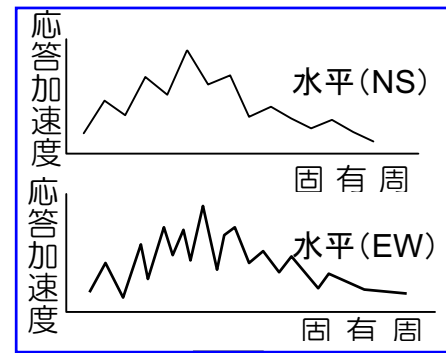
3方向モーメント成分の導出
 $M_x(t), M_y(t), M_z(t)$

応力評価

$$\sigma(t) = \frac{\sqrt{M_x(t)^2 + M_y(t)^2 + M_z(t)^2}}{Z}$$
 最大応力

$$\sigma_{MAX} = \sigma(t)|_{t=t_{MAX}}$$

床応答スペクトル解析



応答スペクトル解析

応答スペクトル解析

3方向モーメント成分の導出
 $M_{x(NS)}, M_{y(NS)}, M_{z(NS)}$
 $M_{x(EW)}, M_{y(EW)}, M_{z(EW)}$

3方向モーメント成分の導出
 $M_{x(UD)}, M_{y(UD)}, M_{z(UD)}$

水平・上下の組合せ

$$M_{x(xy)} = \sqrt{M_{x(NS)}^2 + M_{x(UD)}^2}, \quad M_{x(yz)} = \sqrt{M_{x(EW)}^2 + M_{x(UD)}^2}$$

$$M_{y(xy)} = \sqrt{M_{y(NS)}^2 + M_{y(UD)}^2}, \quad M_{y(yz)} = \sqrt{M_{y(EW)}^2 + M_{y(UD)}^2}$$

$$M_{z(xy)} = \sqrt{M_{z(NS)}^2 + M_{z(UD)}^2}, \quad M_{z(yz)} = \sqrt{M_{z(EW)}^2 + M_{z(UD)}^2}$$

応力評価

$$\sigma_{MAX} = \max \left(\frac{\sqrt{M_{x(xy)}^2 + M_{y(xy)}^2 + M_{z(xy)}^2}}{Z}, \frac{\sqrt{M_{x(yz)}^2 + M_{y(yz)}^2 + M_{z(yz)}^2}}{Z} \right)$$

図 5. スペクトルモーダル法と時刻歴解析

(3) 応力の算出

算出された各質点におけるモーメントにより、断面係数：Z、応力係数：B を用いて応力を算出する。第1種管の例を式(4)に示す。

$$\cdot \text{管台及び突合せ溶接式ティー} : S = \underbrace{\frac{B_1 P D_0}{2t}}_{\text{内圧による応力}} + \underbrace{\frac{B_2 b M_{bp}}{Z_b}}_{\text{分岐管の応力}} + \underbrace{\frac{B_2 r M_{rp}}{Z_r}}_{\text{主管の応力}} \quad \dots \text{式(4)}$$

$$\left[\begin{array}{ll} Z_b, Z_r & : \text{分岐管, 主管の断面係数} \\ B_1, B_2b, B_2r & : \text{応力係数} \\ D_0, t, P & : \text{管の外径, 厚さ, 圧力} \\ M_{bp}, M_{rp} & : \text{分岐管, 主管の機械的荷重 (自重, 地震) によるモーメント} \end{array} \right]$$

モーメントに配管の評価点の形状（直管，ティー，エルボ等）に応じた応力係数を乗じて応力を算出する。規格基準の応力係数については，試験結果やFEM解析等により適切に定められているが，現実的にはある程度の保守性が含まれていると考えられる。

動的解析の結果となる応力には，このように多重の保守性が施されて求められており，さらには，許容値を求めるための規格基準に定める物性値（引張り強さ，降伏点など）は，実際の材料の物性値（材料証明書で確認可）に対して保守的に設定されている。

次節では，これらの保守性について配管系を例に定量的に評価する。

2.2 動的解析における保守性の定量的評価

動的解析の保守性を確認するために，残留熱除去系配管を例に3箇所選出し，表2のケースA～Yで解析を実施した（参考資料1-1参照）。

ケースZの応力係数の保守性については，主蒸気系配管の管台部（ティー部）を例として，FEM解析にて算出された応力と，応力係数で算出された応力を比較して求めた（参考資料1-2参照）。

図6に各ケースの余裕度（＝{許容値－地震以外の応力}/地震による応力）の比較を示す。値は残留熱除去系配管3箇所の評価を平均して示したものである。また，ケースZの余裕度については，主蒸気系配管管台部の応力係数の保守性が残留熱除去系配管の応力係数の保守性と同じであると仮定して算出した。

これより，本報告書で用いた評価手法（ケースC）や規格基準の範疇での手法（ケースD）では余裕度は1.5倍程度であるが，規格基準の範疇を超えて現実的な応答と現実的な許容値を評価すれば，余裕度は3～4倍程度あると考えられる。

また，本項の冒頭で述べた①～⑦の動的解析の保守性の定量的な値については

表3のようにまとめられる。

表2. 動的解析保守性評価ケース

ケース	解析方法		減衰定数	許容値（許容応力状態Ⅲ _A S） ^{※1}	
	FRS 拡幅	水平・上下組合せ			
A	スペクトルモデル	±10%	絶対値和	2.0%	規格基準値
B		無し	絶対値和	2.0%	規格基準値
C 本評価手法		無し	SRSS	2.0%	規格基準値
D	時刻歴解析	—	代数和	2.0%	規格基準値
X	時刻歴解析	—	代数和	7.5% ^{※2}	規格基準値
Y	時刻歴解析	—	代数和	7.5% ^{※2}	材料証明書 ^{※3}
Z	主蒸気系配管管台 FEM による応力係数の保守性をケース Y に乗じて余裕度を算出				

※1：余裕度 = (許容値 - 地震以外の応力) / 地震による応力

※2：減衰定数の現実的な値としては、過去の試験等から想定される平均値として 7.5% を用いた。

※3：材料証明書より求めた $S_m=167\text{MPa}$ と 20°C での JSME 規格値 137MPa の比を規格基準による許容値 (274MPa) に乗じた

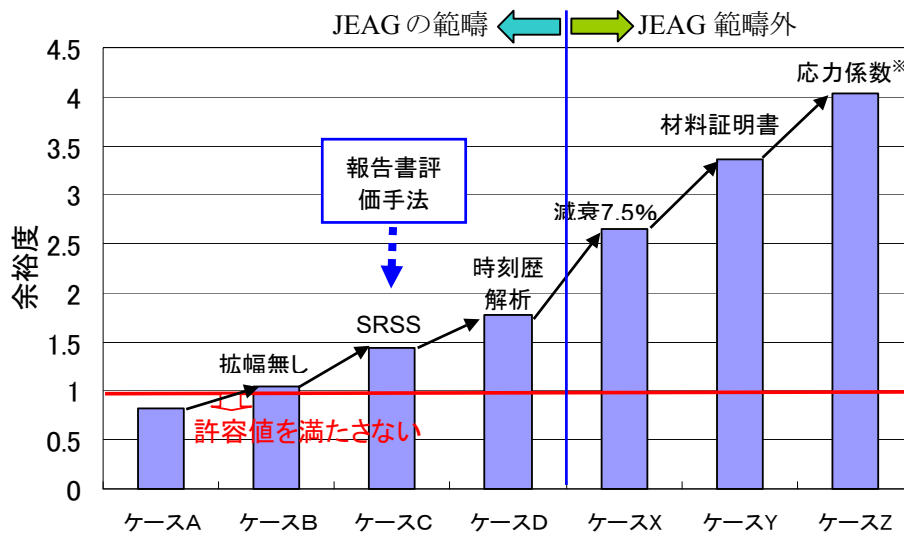


図6. 各ケースの余裕度比較 (3箇所)の平均

※：主蒸気系配管管台の FEM 評価結果と応力係数による算出結果の比をケース Y に乗じた

表 3. 動的解析の保守性

動的解析の保守性に係る項目	保守性	備考
解析モデル	—	
拡幅（床応答スペクトル±10%拡幅の保守性）	約 26%	ケース B ÷ ケース A
水平・上下応答の組合せ（SRSS に対する絶対値和の保守性）	約 38%	ケース C ÷ ケース B
解析手法（時刻歴解析に対するスペクトルモーダル法の保守性）	約 22%	ケース D ÷ ケース C
減衰定数（現実的な値に対する規格基準値の保守性）	約 50%	ケース X ÷ ケース D
許容値（材料証明書記載値に対する規格基準値の保守性）	約 26%	ケース Y ÷ ケース X
応力係数（FEM に対する応力係数の保守性）	約 20%	FEM より算出

床応答スペクトルの拡幅（±10%）については、本報告書の評価において実施していない。これは、床応答スペクトルは、観測波または観測波をもとに計算された建屋応答解析結果であるため地盤や建物に起因するずれは少ないことと、本評価は設計ではなく中越沖地震における設備応答の再現が主目的であるため、拡幅の適用は過度に保守的に値がずれると考えたことによる。

しかし、設計時と同様に±10%拡幅を考慮しても表 3 より保守性が 3 割弱減少する程度であり、規格基準の範疇での評価（ケース D）でも余裕度は 1 以上を確保でき、規格基準で定める許容値を満足する。

3. その他保守性評価

3.1 基礎ボルト評価

設計時および本評価においては、ポンプ基礎ボルト評価等に用いられる震度について、水平、上下方向からそれぞれ最大値を取って応力の算出を行っている。

現実の状態を適切に再現するために、原子炉隔離時冷却系ポンプ基礎ボルトを例として、時々刻々の水平方向（NS, EW）震度と上下方向震度により基礎ボルトに発生する引張り応力の時系列を評価した。その結果、設計時および本評価における解析手法の保守性を確認した。（参考資料 1-3 参照）

3.2 配管レストレイント部摺動痕の評価

配管のレストレイントと接触部に摺動痕が確認されている箇所について、解析による評価を行い、現実と解析の振れ幅の比較を行った。4号機の高圧炉心注水系配管に地震による摺動痕と考えられる箇所が確認されたので、当該配管を例に評価を実施した。その結果、測定された摺動痕長さ 4mm に対して、設計と同等の解析手法（スペクトルモーダル法）で 9mm、時刻歴解析で 6mm と、解析は保守的となることを確認した。（参考資料 1-4 参照）

3.3 破損限界に対する保守的設定

現実の破損限界に対して規格基準上の許容値には十分な保守性があること、また、実際の設備と同等の試験体にて実施した耐震信頼性実証試験により、実際の設備には十分な保守性があることが確認されている。(参考資料 1-5 参照)

残留熱除去系配管による解析保守性の確認

1. 概要

残留熱除去系配管を例に，時刻歴解析を含めたより現実的な応答解析を実施し，解析のもつ保守性を評価した。

2. 検討ケース

表 1-1 は，規格基準の範疇で設定した 4 ケースの解析を示す。水平および上下方向の地震力は動的に取り扱い，スペクトルモーダル法における水平と上下の組合せについては NS-上下，EW-上下で組合せ，大きいほうの値を採用する。時刻歴解析については配管モデルに 3 方向（NS，EW，上下）の地震動を入力し時刻毎の応力を求める。表中のケース C は本評価の手法である。

また，表 1-2 に示すように，規格基準の範疇を超えてより現実に近いと考えられる条件（減衰定数，材料証明書）を考慮したケースも参考に実施した（ケース X，Y）。

評価対象となる残留熱除去系配管のモデル図と評価箇所を図 1-1 に示す。評価箇所については，地震による応力の比較的大きい①ティー部および②レデューサ部並びに発生応力が最大となる③ティー部を選定した。

表 1-1 検討ケース（規格基準範疇）

		解析方法		減衰定数 ^{※1}
		FRS 拡幅	上下・水平の組合せ	
ケース A	スペクトルモーダル	±10%	絶対値和	2.0%
ケース B		無し	絶対値和	2.0%
ケース C (本評価手法)		無し	SRSS ^{※2}	2.0%
ケース D	時刻歴解析	—	代数和	2.0%



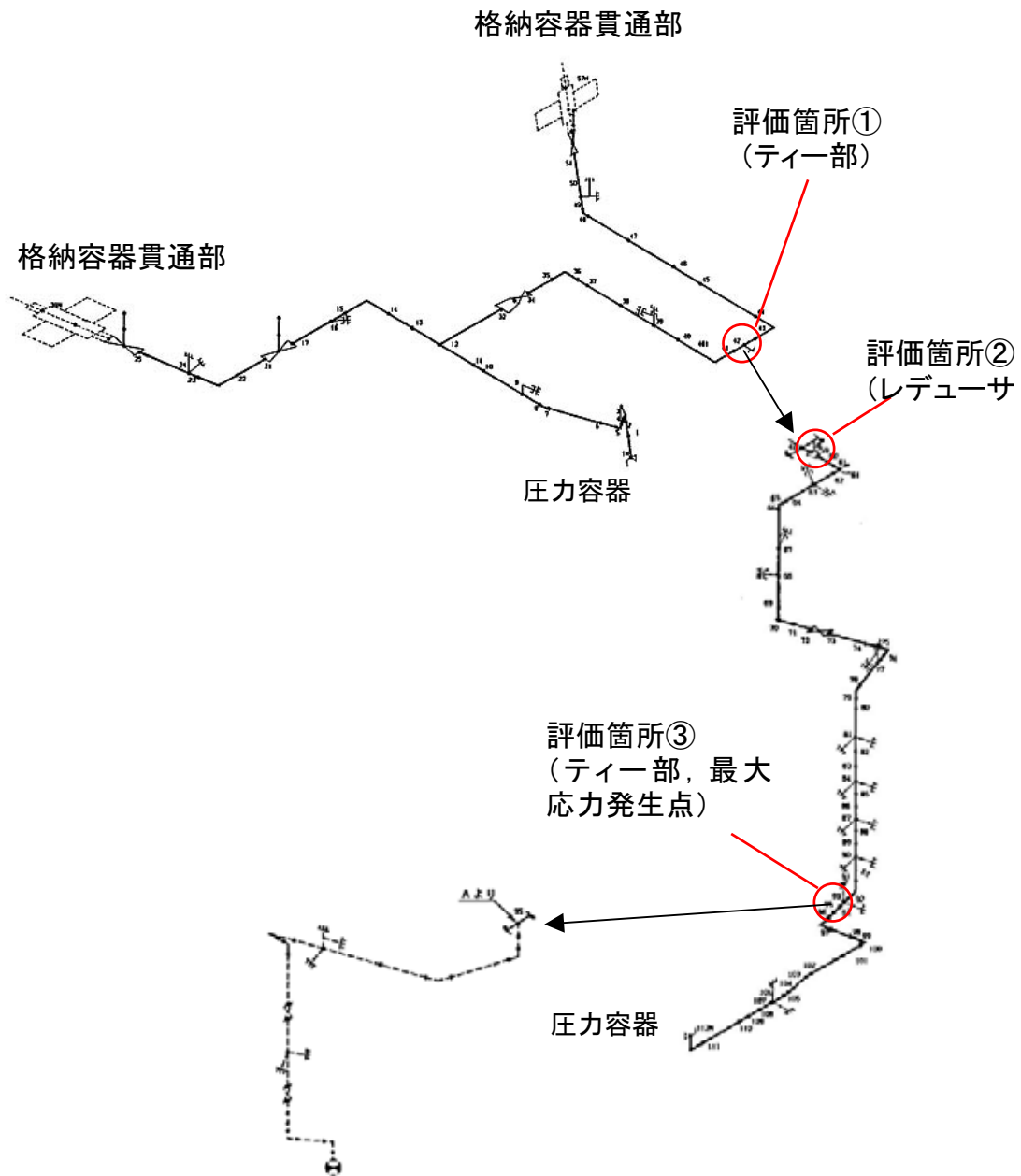
表 1-2 検討ケース（規格基準範疇外）

ケース X	ケース D に減衰 7.5% ^{※1} を適用
ケース Y	ケース X に材料証明書による許容値を適用



※1： 減衰定数 2.0%は規格基準値，7.5%は諸試験から推定した現実的な値

※2： SRSS＝二乗和平方根



評価点	1次応力 (MPa)			評価基準値(III _A S) (MPa)
	合計	地震以外による	地震による	
評価箇所① (ティー部)	205	55	150	274
評価箇所② (レデューサ部)	194	54	140	
評価箇所③ (ティー部)	239	129	110	

図 1-1 残留熱除去系配管モデル図

3. 評価結果

評価箇所①ティール部の評価結果を表 1-3, 表 1-4 および図 1-2 に, 評価箇所②レデューサ部の評価結果を表 1-5, 表 1-6 および図 1-3 に, 評価箇所③ティール部の評価結果を表 1-5, 表 1-6 および図 1-4 に示す。

本評価の算出値は, 上述したように応答を NS-上下, EW-上下に組み合わせ, 両者組合せのうち荷重が大きくなるほうを採用している。しかし, 3 方向の地震動を考慮しても時刻歴解析でより現実的な応答を解析することにより, 今回の報告値に用いた解析手法 (ケース C) には保守性があることが確認できた。

また, 規格基準の範疇外ではあるが, 減衰定数や評価基準値により現実的な値を想定したケース (X, Y) の計算結果より, 現実には解析評価には 2 倍を超える保守性が含まれていることが考えられる。

評価箇所①：ティール部

表 1-3 ①評価箇所ティール部の結果 (規格基準の範疇)

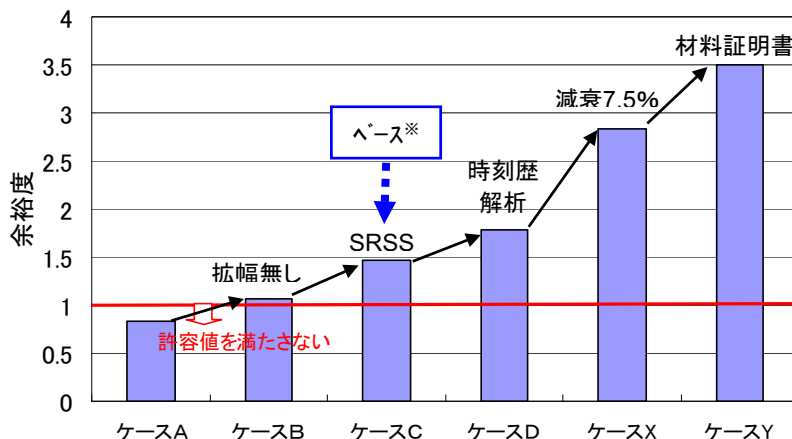
検討ケース	1 次応力 (MPa)			評価基準値 (III _A S) (MPa)	余裕度 ^{※1}
	合計	地震以外による	地震による		
ケース A	317	55	262	274	0.83
ケース B (ケース A→拡幅無し)	260		205		1.06
ケース C (ケース B→水平上下組合せに SRSS)	205		150		1.46
ケース D (時刻歴解析)	177		122		1.79

表 1-4 ①評価箇所ティール部の結果 (規格基準の範疇外)

ケース X (ケース D→減衰 7.5%)	132	55	77	274	2.84
ケース Y (ケース X&材料証明書)	132		77	約 330 ^{※2}	約 3.5

※1: 余裕度 = (評価基準値 - 地震以外による応力 55MPa) / 地震による応力

※2: 材料証明書より求めた $S_m=167\text{MPa}$ と 20°C での JSME 規格値 137MPa の比を 274MPa に乗じた値



※本報告書の評価で用いた条件

図 1-2 各検討ケースの余裕度比較 (①ティール部)

評価箇所②：レデューサ部

表 1-5 ②評価箇所レデューサ部の結果（規格基準の範疇）

検討ケース	1次応力 (MPa)			評価基準値 (III _A S) (MPa)	余裕度 ^{※1}
	合計	地震以外による	地震による		
ケース A	304	54	250	274	0.88
ケース B (ケース A→拡幅無し)	251		197		1.11
ケース C (ケース B→水平上下組合せに SRSS)	194		140		1.57
ケース D (時刻歴解析)	156		102		2.15

表 1-6 ②評価箇所レデューサ部の結果（規格基準の範疇外）

ケース X (ケース D→減衰 7.5%)	124	54	70	274	3.14
ケース Y (ケース X&材料証明書)	124		70	約 330 ^{※2}	約 3.9

※1：余裕度 = (評価基準値 - 地震以外による応力 54MPa) / 地震による応力

※2:材料証明書より求めた Sm=167MPa と 20℃での JSME 規格値 137MPa の比を 274MPa に乗じた値

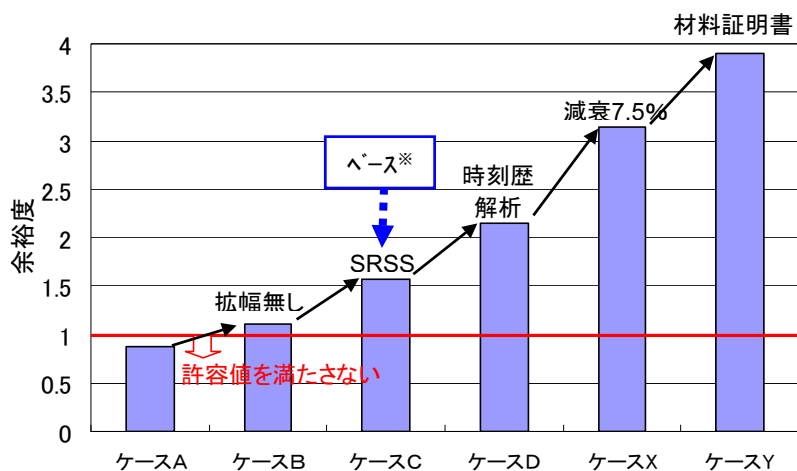


図 1-3 各検討ケースの余裕度比較 (②レデューサ部)

※本報告書の評価で用いた条件

評価箇所③：ティール部

表 1-7 評価箇所③ティール部の結果（規格基準の範疇）

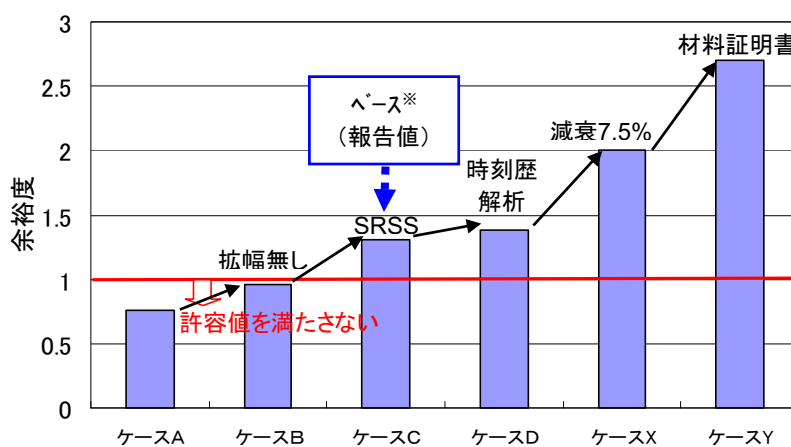
検討ケース	1次応力 (MPa)			評価基準値 (III _A S) (MPa)	余裕度 ^{※1}
	合計	地震以外による	地震による		
ケース A	319	129	190	274	0.76
ケース B (ケース A→拡幅無し)	280		151		0.96
ケース C (ケース B→水平上下組合せに SRSS)	239		110		1.31
ケース D (時刻歴解析)	234		105		1.38

表 1-8 評価箇所③ティール部の結果（規格基準の範疇外）

ケース X (ケース D→減衰 7.5%)	201	129	72	274	2.01
ケース Y (ケース X&材料証明書)	201		72	約 330 ^{※2}	約 2.7

※1：余裕度 = (評価基準値 - 地震以外による応力 129MPa) / 地震による応力

※2：材料証明書より求めた Sm=167MPa と 20℃での JSME 規格値 137MPa の比を 274MPa に乗じた値



※本報告書の評価
で用いた条件
本報告書掲載値

図 1-4 各検討ケースの余裕度比較 (③ティール部)

応力係数の保守性の検討（主蒸気系配管管台部）の評価

応力係数の保守性を確認するために主蒸気系配管管台（ティー部）について FEM 解析を行い，分岐管及び主管のモーメントに応力係数を乗じて算出された値と比較し応力係数の保守性を確認した。

分岐管のモーメント M_{bp} 及び主管のモーメント M_{rp} を入力条件として FEM 解析で得られた応力と応力係数より算出された応力（式(2-1)の第 2 項+第 3 項）の結果を表 2-1 に示す。応力係数の保守性は 20%強（=89/71）であることがわかる。

表 2-1. 応力係数と FEM 解析による算出応力の比較

	地震・自重による応力	内圧による応力	一次応力	許容値
応力係数を用いた評価	89 MPa [式(2-1)第 2 項+第 3 項]	47 MPa [式(2-1)第 1 項]	136 MPa	274 MPa
FEM 解析	71 MPa		118 MPa	

$$\cdot \text{管台(ティー部) 1 次応力} : S = \underbrace{\frac{B_1 P D_0}{2t}}_{\text{内圧による応力}} + \underbrace{\frac{B_2 b M_{bp}}{Z_b}}_{\text{分岐管の応力}} + \underbrace{\frac{B_2 r M_{rp}}{Z_r}}_{\text{主管の応力}} \quad \dots \text{式(2-1)}$$

- Z_b, Z_r : 分岐管, 主管の断面係数
- B_1, B_2b, B_2r : 応力係数
- D_0, t, P : 管の外径, 厚さ, 圧力
- M_{bp}, M_{rp} : 分岐管, 主管の機械的荷重（自重, 地震）によるモーメント

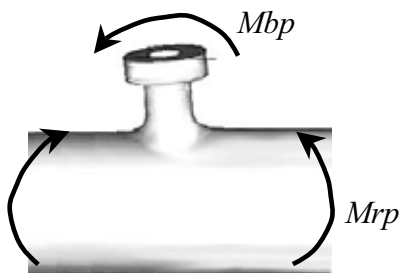


図 2-1 管台外観図

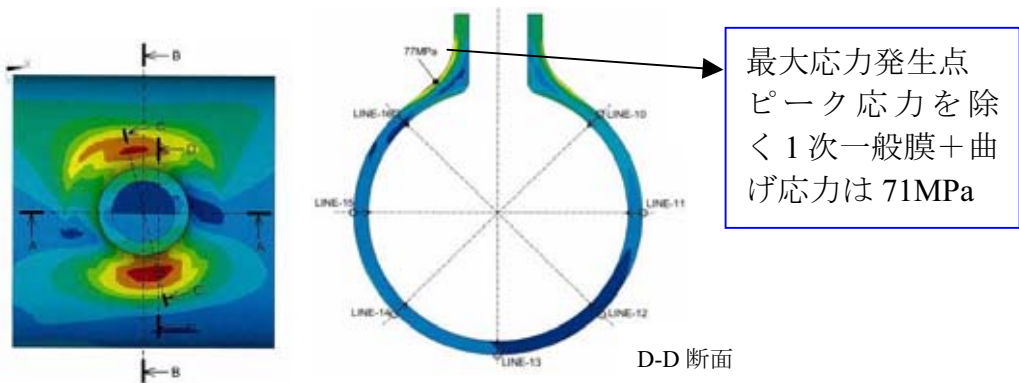


図 2-2 FEM 解析結果（応力コンター図）

基礎ボルト解析の保守性評価

1. 概要

設計時および本報告書におけるポンプ基礎ボルトの評価は、ポンプが設置されている場所の水平方向応答、上下方向応答のそれぞれから最大震度を取って応力の算出を行っている。

本検証では、地震の観測記録よりポンプ基礎ボルトに発生する応力を時系列で評価し、設計時および本報告書におけるポンプ基礎ボルト評価の保守性を検証する。評価対象は、地震記録が取れている基礎版上に設置される原子炉隔離時冷却系ポンプの基礎ボルトの引張応力とする。

2. 評価方法

NS、EW 方向ごとに地震による転倒モーメントにより基礎ボルトに発生する引張応力を算出した。評価式を以下に示す。ポンプ図を図 3-1 に示す。

- ・ NS 方向転倒モーメントにより基礎ボルトに発生する引張応力

$$\sigma_{NS} = \frac{W \cdot (C_H + C_p) \cdot h + M_p - W(1 - C_v - C_p) \cdot L_1}{N(L_1 + L_2) \cdot A} \quad \dots \text{式(3-1)}$$

- ・ EW 方向転倒モーメントにより基礎ボルトに発生する引張応力

$$\sigma_{EW} = \frac{W \cdot (C_H + C_p) \cdot h - W(1 - C_v - C_p) \cdot l_1}{n(l_1 + l_2) \cdot A} \quad \dots \text{式(3-2)}$$

なお、 C_H は保守的に NS 方向震度 (C_{H_NS}) と EW 方向震度 (C_{H_EW}) の 2 乗和平方とする。

$$C_H = \sqrt{(C_{H_NS})^2 + (C_{H_EW})^2} \quad \dots \text{式(3-3)}$$

W	: ポンプ重量
h	: 重心までの高さ
C_v	: 上下方向地震動による震度
N, n	: 評価上引張力を受けるとして期待するボルト本数 (N=2, n=2)
A	: 基礎ボルト断面積

3. 評価結果

評価結果を表 1 に示す。本地震における水平方向震度、上下方向震度の最大値は両者とも 0.44 であり、応答倍率法で算出した引張応力は 30MPa となる。

一方、地震時にポンプは停止していたためポンプ振動による震度を考慮しない場合の計算を行うと 6.3MPa となる。

さらに、現実的な評価として地震観測記録を用いて基礎ボルト引張り応力の時

系列を評価すると引張り応力が発生しない結果となった（図 3-2 参照）。これは、水平方向震度と上下方向震度が同時に最大とならないことから、転倒モーメントがポンプ自重によるモーメントを上回らないためと考えられる。

したがって水平方向および上下方向の最大震度が同時に発生すると仮定した設計時および報告書における評価方法は保守的であるといえる。

表 3-1 評価結果

		水平震度 : C_H	上下震度 : C_V	ポンプ振動 による震度 : C_p	引張応力 (MPa)	許容値 (MPa)
設計時		0.33	0.28	0.37	25.5	456
中越沖 地震 評価	報告書算出値	0.44	0.44	0.37	30 ^{※1}	
	地震時のポンプ停止を考慮	0.44	0.44	0	6.3	
	時系列評価 (図 2)	0.44 ^{※2}	0.13 ^{※2}	0	引張応力は発生せず	

※1：設計時震度と中越沖地震により求まる震度比 1.14 を設計時の応力に乗じた値

※2：最大の転倒モーメントが発生する時刻における震度

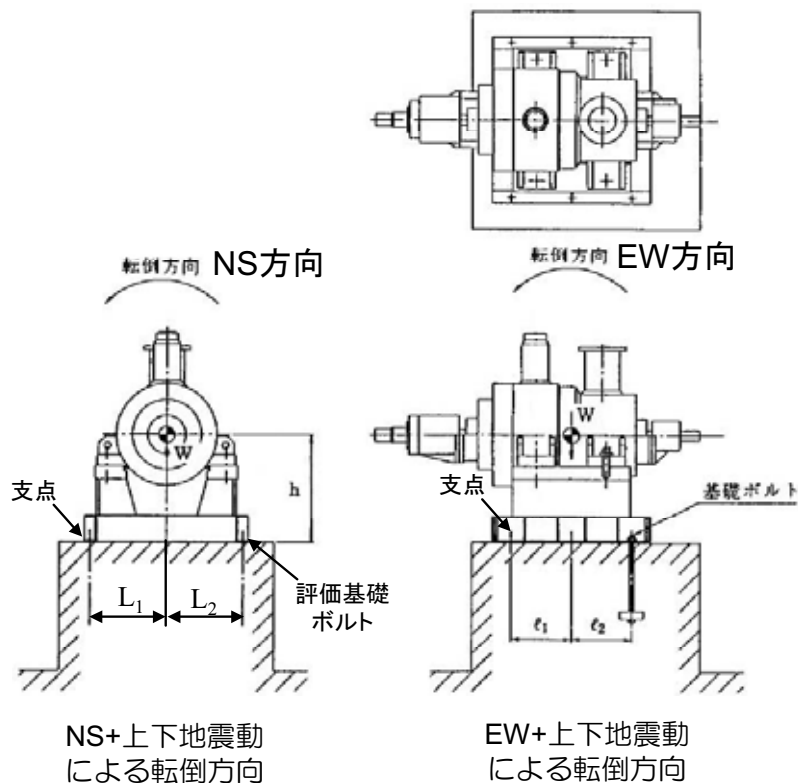
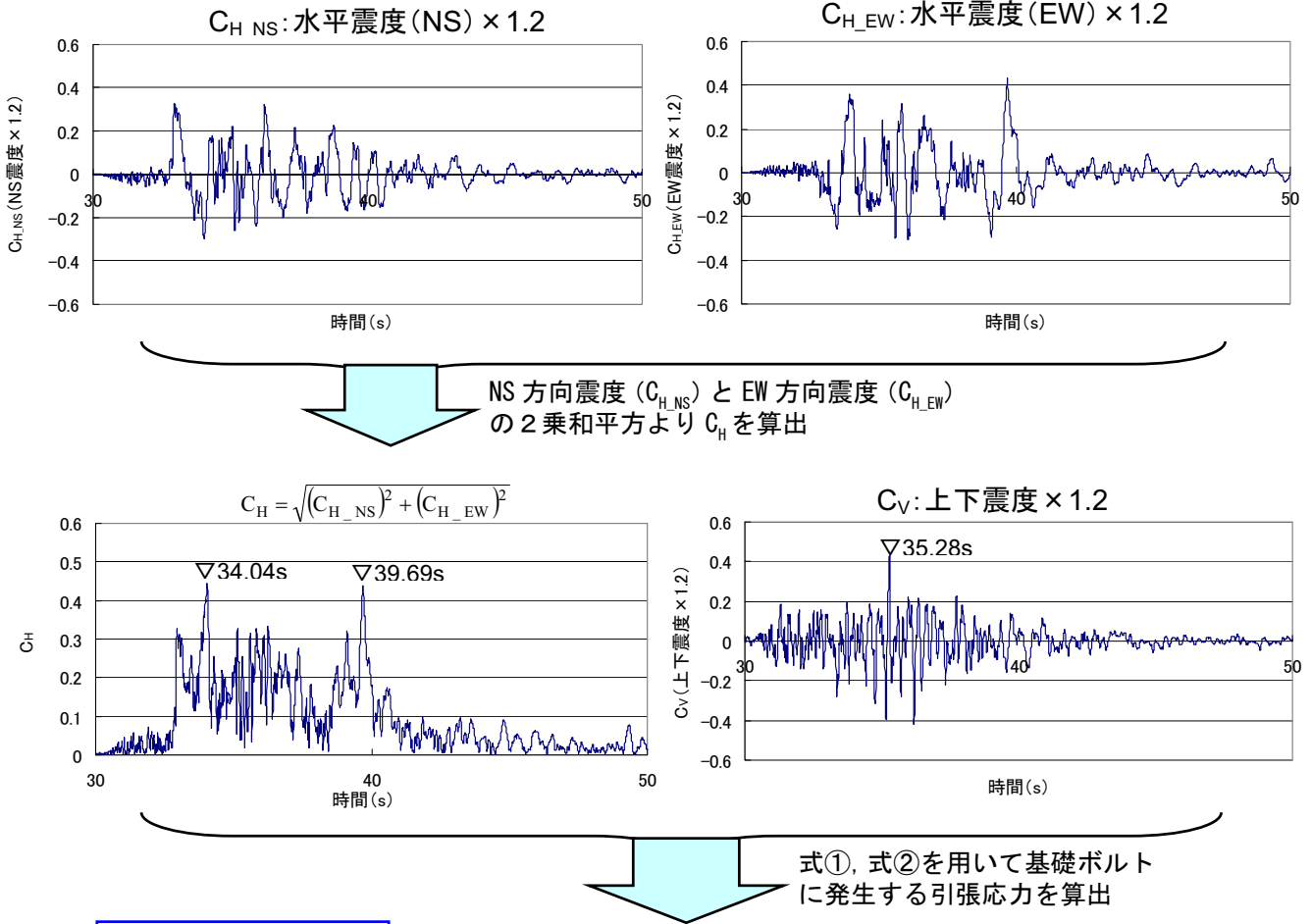


図 3-1 原子炉隔離時冷却系ポンプ外形図

震度の時刻歴データ



引張応力評価

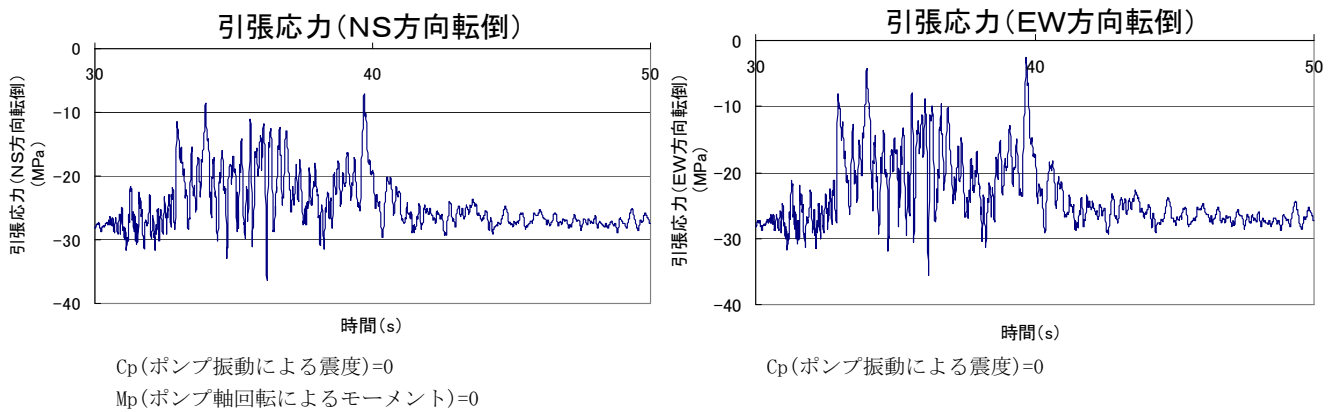


図 3-2 基礎ボルト引張応力の算出結果

配管レストレイント部摺動痕の評価

1. 配管レストレイント部摺動痕の確認

高圧炉心スプレイ系配管についてサポートとの接触部に摺動痕を確認した（図 4-1 参照。配管軸方向に 4mm。）

当該部は通常常温であるため熱膨張が原因とは考えにくく、中越沖地震による摺動痕である可能性が高いため、本事象を解析で評価し摺動痕実測値との比較を行った。



図 4-1. 摺動痕確認状況

2. 高圧炉心スプレイ系配管摺動痕の解析評価

本評価の解析手法については、設計時と同じスペクトルモーダル法および時刻歴解析の 2 通りを実施した。設計時と本評価の解析条件を表 1 に示す。

表 4-1. 設計時と本評価の解析条件

	設計時	本評価	
解析条件	スペクトルモーダル法	スペクトルモーダル法	時刻歴解析
圧力条件	14kg/cm ² (摺動部)	同左	
温度条件	100℃ (摺動部)	同左	
材料	SM400C (摺動部)	同左	
減衰定数	2.0%	同左	
入力条件	静的震度, 設計用地震動	中越沖地震観測波 (基礎版上 TMSL-32.5m) 拡幅無し	
水平・上下組合せ	水平方向(動的)・上下方向(静的)の荷重の組合せは絶対値和	水平方向・上下方向(両者とも動的)の荷重の組合せは SRSS	3 方向の応答荷重を代数和

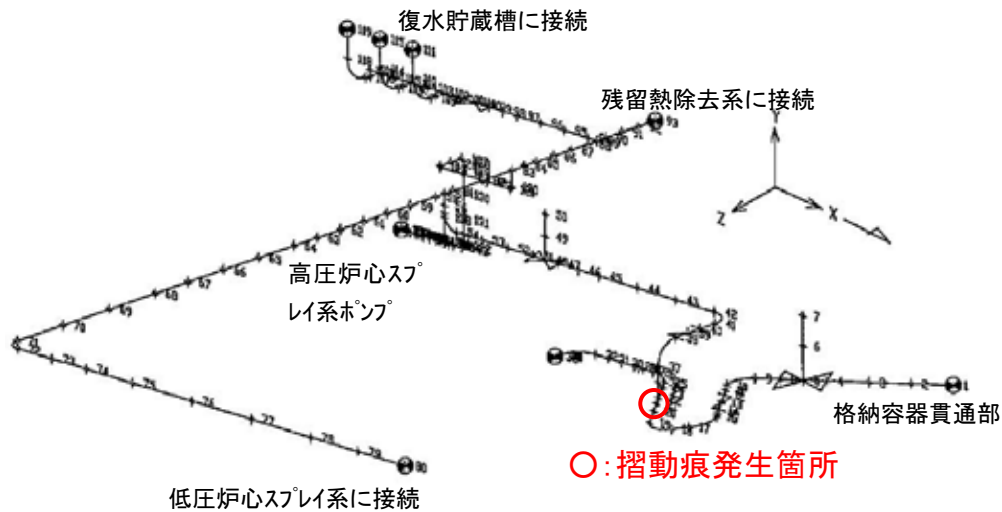


図 4-2 高圧炉心スプレイ系配管のモデル化

3. 評価結果

解析結果を表 2 に示す。実測値に対して解析は保守性を有することが確認された。また、スペクトルモーダル法（設計時手法）は時刻歴解析よりも保守性を有した適切な評価手法であることを確認した。

表 4-2 評価結果

	スペクトルモーダル法	時刻歴解析	現地摺動痕測定値
管軸方向変位	9mm	6mm	4mm

表 4-3 に固有周期と刺激係数を示す。水平方向（NS, EW）の応答が大きいモードは 1 次であり、本モードが摺動痕を発生させた主要モードと考えられる。

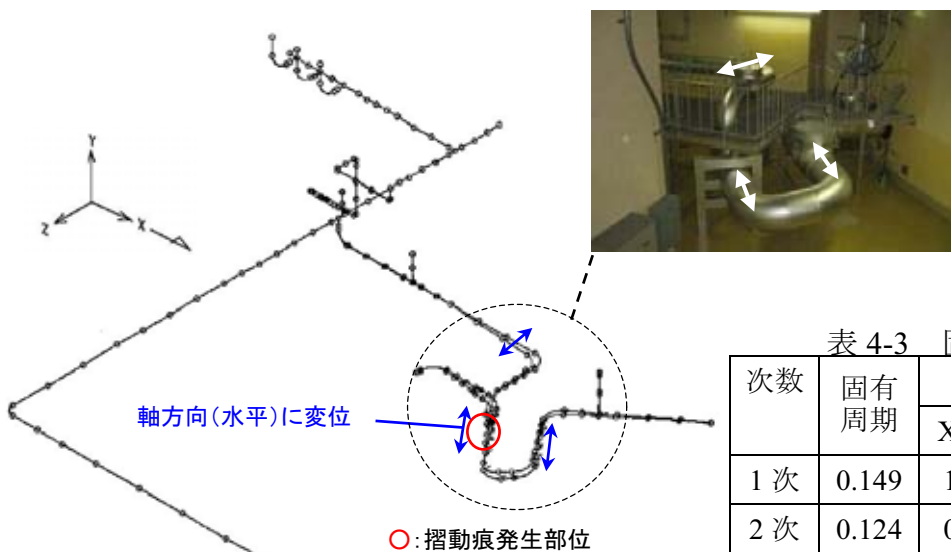


図4-3. モード図（1次）

表 4-3 固有周期、刺激係数

次数	固有周期	刺激係数		
		X(NS)	Z(EW)	Y(上下)
1 次	0.149	1.773	2.562	0.296
2 次	0.124	0.995	0.288	-1.397
3 次	0.122	0.245	0.147	-1.038
4 次	0.109	0.012	0.416	0.022
5 次	0.104	-0.360	0.106	-2.205

破損限界に対する保守的設定

本文 1 項, 2 項では解析の持つ保守性について示したが (イメージ: 図 5-1 の①) ここでは, 破損限界に対する裕度 (耐震裕度, イメージ: 図 5-1 の②) を確認した既往試験の内容 (材料試験による実強度, および, 実際の設備と同等の試験体にて実施した耐震信頼性実証試験) をまとめた。

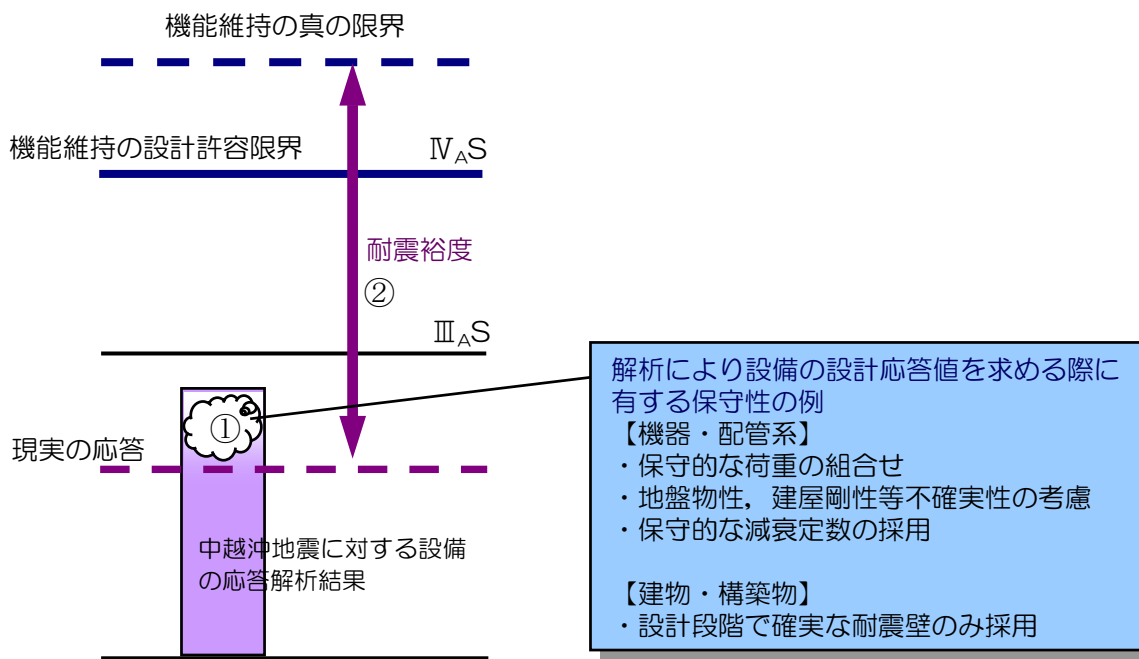


図5-1. 設備の応答値と設計許容限界等との関係 (7号機のイメージ)

1. 現実の破損限界に対する許容値の保守性

図 5-2 に低合金鋼の引張曲線および規格基準上の引張り強さ (S_u)・降伏点 (S_y), を示す。実際の引張り強さ・降伏点に比べて規格基準の $S_u \cdot S_y$ 保守的に設定されている。

また, 疲労強度については, 図 5-3 に示すように, 応力振幅に対する許容繰返し回数のデータのベストフィットカーブに対して, 繰返し回数について 20 倍, 応力振幅に対して 2 倍の保守性を考慮して設計疲労曲線を定めている。

このように規格基準で定める許容値については, 現実の材料の破損限界に対して十分な裕度を有している。

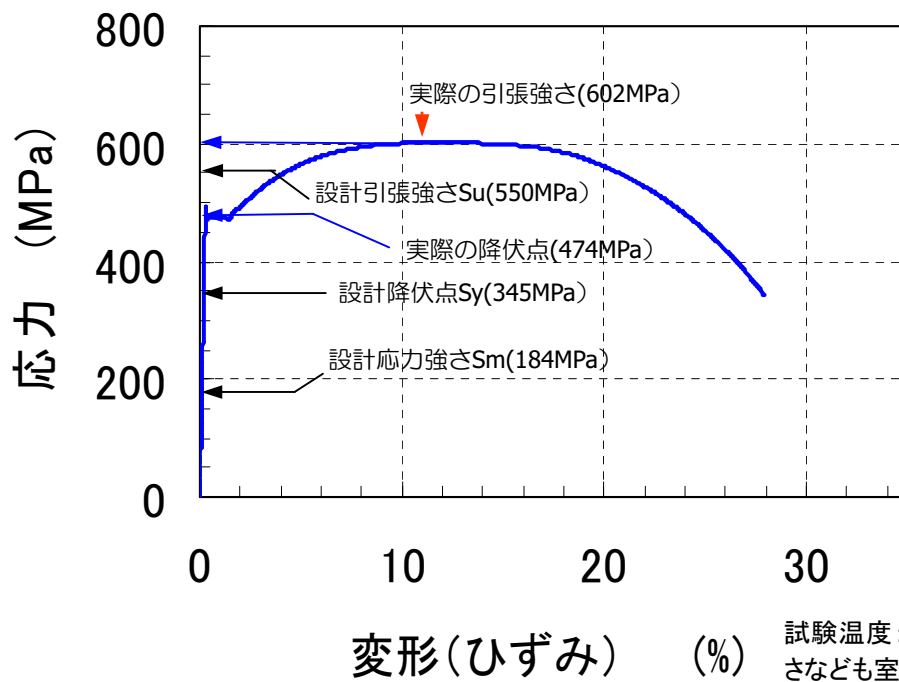


図 5-2. 低合金鋼の引張曲線

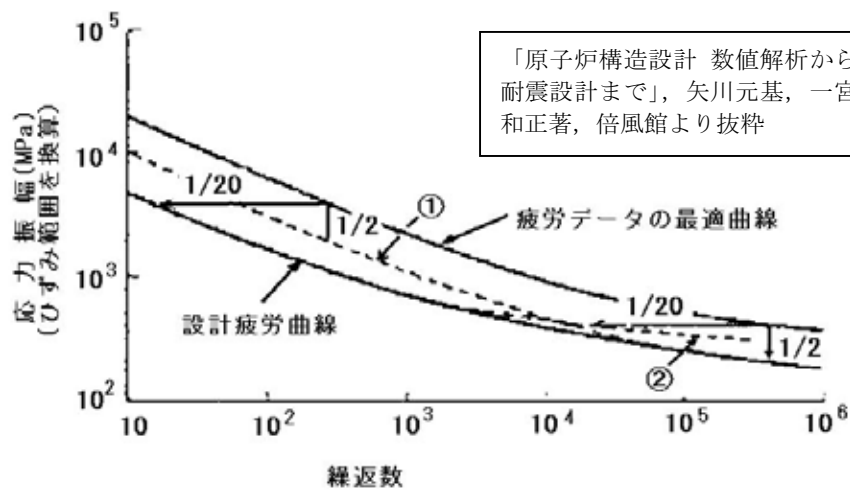


図 5-3. 設計疲労曲線の定め方

2. 原子力発電施設耐震信頼性実証試験による原子力設備の安全性評価

2-1. 耐震信頼性実証試験の概要

(財)原子力発電技術機構（NUPEC）では昭和 55 年度から平成 16 年度にかけて（平成 15～16 年度は独立行政法人原子力安全基盤機構（JNES））、耐震上重要な施設に対して、多渡津・大型高性能振動台を用いて耐震信頼性実証試験を実施しており、次に示すように地震に対する安全性を実証的に明示するよう計画されている。

- (1)原子力発電所の安全上重要な設備については、耐震設計上強度的に十分な余裕を持たせてあるが、試験体について巨大地震時に相当する加震試験を実施することにより、その余裕度を確認する。
- (2)巨大地震の際に機能維持を必要とする安全上重要な機器・配管，構造物を模擬した試験体を加振中に機能させて、所要の機能が発揮できることを実証する。

本試験は、実機と同一あるいは実機に近い縮尺模型試験体を用いて設備の耐震安全性及び耐震余裕度を確認した試験としての特徴を有し、貴重な試験データを提供するものとなっている。

2-2. 耐震信頼性実証試験例

(1) BWR 炉内構造物

- ・縮尺：1/1（炉心機器は実機大）
- ・構造：シュラウド等炉内構造物，制御棒駆動装置，燃料集合体等から構成。炉内構造物と炉心系機器の配置と相対寸法は実機と同様

（試験概要）

- ・制御棒挿入試験では、設計用地震動（S1，S2）の入力地震波で加振を行い、加振中に制御棒を挿入させ、規定時間内に制御棒が炉内に挿入できることを確認。
- ・S2の1.7倍に相当する入力地震波で、水平と上下2方向同時の加振試験を行い、制御棒の挿入性や耐震設計上の安全余裕のあること確認。



(2) BWR原子炉格納容器

- ・縮尺：1/3.2
- ・構造：格納容器本体，ドライウエル，サブプレッションチェンバー，機器ハッチ，エアロック等から構成

（試験概要）

- ・加振試験の前と後に漏洩率試験（空気）を行い格納容器の機能である機密性が損なわれないこと、水の振動による耐震性への影響の無いことを確認。



- ・S2の1.4倍に相当する入力地震波で、水平と上下2方向同時に加振試験を行い、耐震設計上の安全余裕のあることを確認。

(3) 原子炉圧力容器

- ・縮尺：1/2
- ・構造：原子炉圧力容器，スカート，スタビライザから構成

(試験概要)

- ・S2の1.7倍に相当する入力地震波で、水平と上下2方向同時加振試験を行い、耐震設計上の安全余裕のあることについて確認。



(4) 配管終局強度試験

- ・実機配管系を模擬した3次元配管系モデル(200A, Sch40, 水圧 10.7 MPa)
- ・付加質量 (弁), レストレイント, ティー, エルボ付き

(試験概要)

- ・詳細解析で、1回の地震で破損する入力地震動： S_A を求め、 S_A で加振したところ、5回目（繰返し回数は60回）の加振で疲労き裂が貫通。
- ・設計と同様の評価で応力が規格基準上の許容値（許容応力状態 IV_{AS} ）に達する地震動： S_B を求めたところ、 S_B は S_A に対して1/10以下（現行の設計の保守性は10倍以上）であることを確認。

