

福島第一原子力発電所
福島第二原子力発電所

耐震設計上重要な機器・配管系の
耐震安全性評価（中間報告）に関する説明資料

平成22年2月22日
東京電力株式会社



東京電力

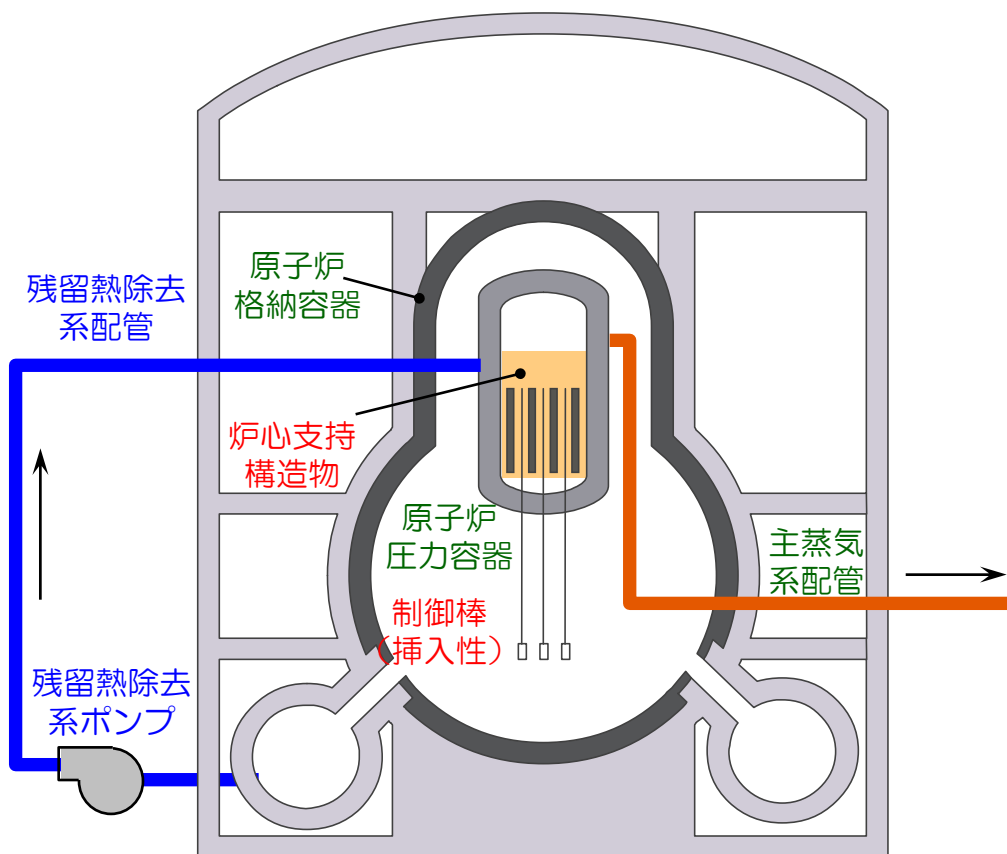
- はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・ Sh.2
- 評価対象設備・・・・・・・・・・・・・・・・ Sh.3
- 評価対象部位・・・・・・・・・・・・・・・・ Sh.4～6
- 構造強度評価の解説資料・・・・・・・・ Sh.7～19
- 機器・配管系の評価概要解説資料・・ Sh.20～29
- 制御棒挿入性評価の解説資料・・・・・ Sh.30～38
- 構造強度評価の裕度について・・・・・ Sh.39～45
- 参考資料・・・・・・・・・・・・・・・・・・ Sh.46～49

はじめに

- 本資料は、福島第一・第二原子力発電所の耐震安全性評価（中間報告）の評価方法等について、基本的な事項を補足的に説明する資料を集約している。
- 耐震安全性評価（中間報告）は、耐震設計上重要な機器・配管系について、基準地震動 S_s に対する安全機能の保持の観点から評価を実施している。
- 中間報告は、新耐震指針によるSクラスの施設のうち、原子炉を「止める」、「冷やす」、放射性物質を「閉じ込める」に係る安全上重要な機能を有する主要な施設を対象としている。

評価対象設備（福島第一・5号機の事例）

- 原子炉を「止める」，「冷やす」，放射性物質を「閉じ込める」に係る安全上重要な機能を有する次の主要な施設



「止める」

- ・ 制御棒 (挿入性)
- ・ 炉心支持構造物

「冷やす」

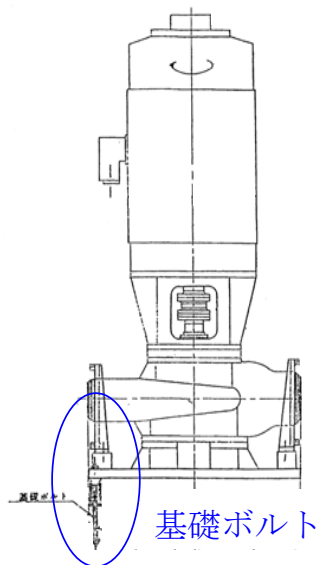
- ・ 残留熱除去系ポンプ
- ・ 残留熱除去系配管

「閉じ込める」

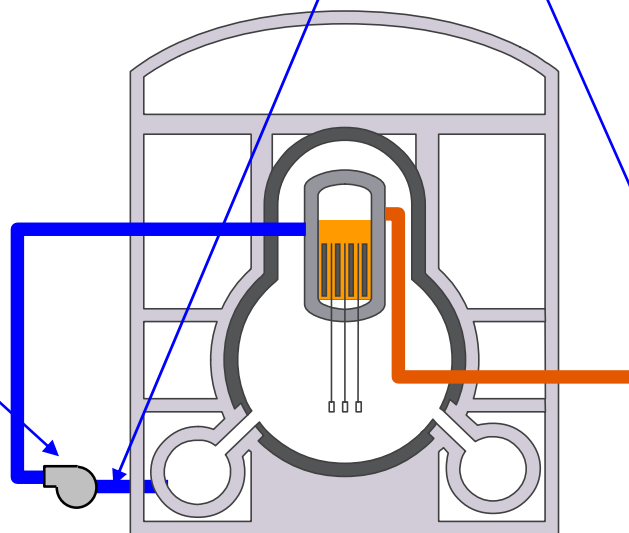
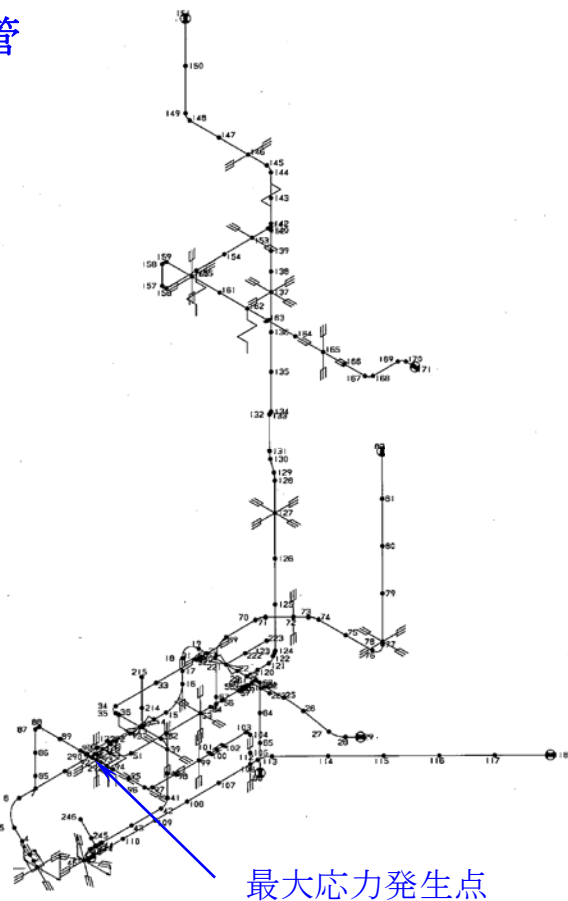
- ・ 原子炉圧力容器
- ・ 主蒸気系配管
- ・ 原子炉格納容器

■ 「冷やす」

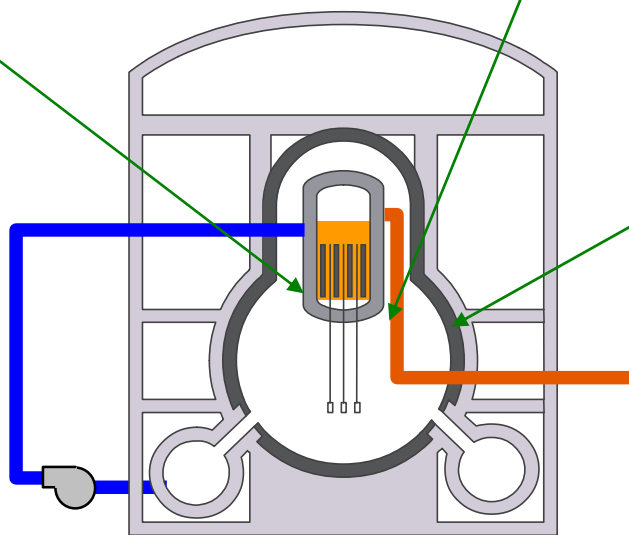
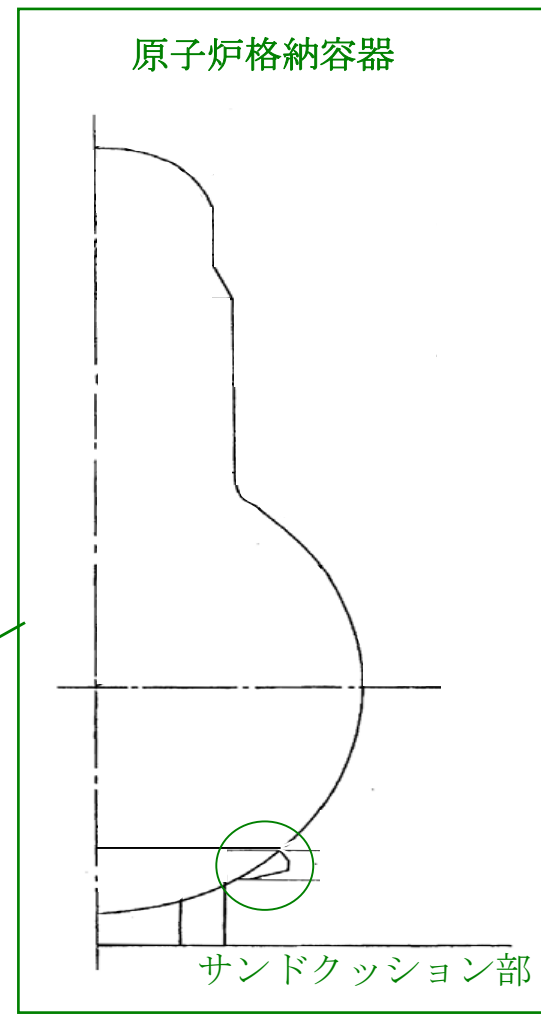
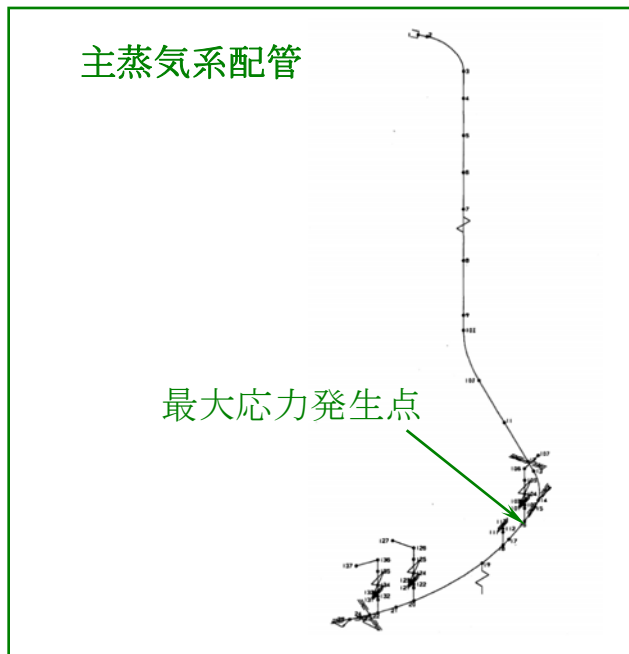
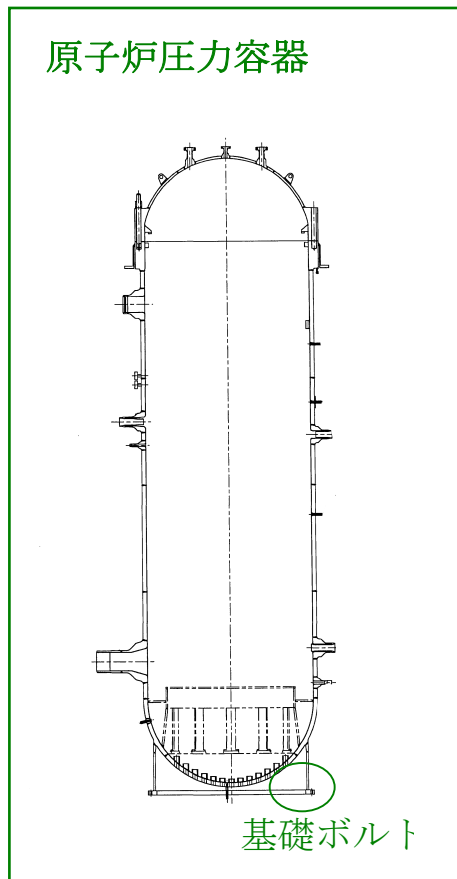
残留熱除去系ポンプ



残留熱除去系配管



■ 「閉じ込める」



構造強度評価の解説資料

- 構造強度評価の評価方法および評価基準値 Sh.8
- 構造強度評価の流れ Sh.9～10
- 応答倍率法の基本的な考え方 Sh.11
- 応答比 Sh.12
- 応答加速度比 Sh.13～14
- 応答荷重比 Sh.15～16
- 応答比を用いた評価について Sh.17
- 炉内構造物の解析モデル例 Sh.18
- 床応答スペクトル例 Sh.19

構造強度評価の評価方法および評価基準値

■ 構造強度評価の評価方法

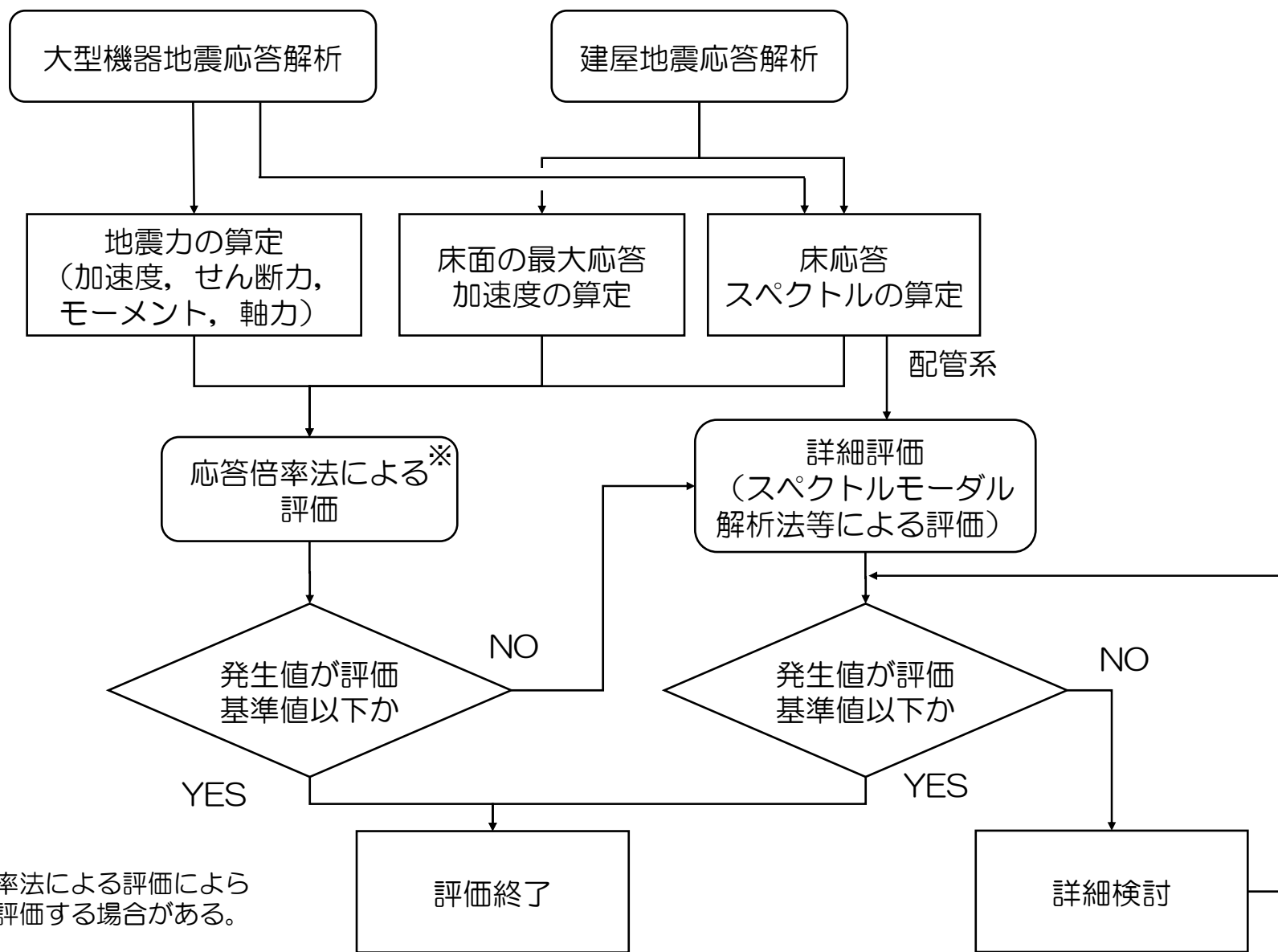
- 応答倍率法による評価や、スペクトルモーダル解析法や定式化された評価式を用いた解析法等による詳細評価を行い、基準地震動 S_s により設備に発生する応力を算出する。
- 基準地震動 S_s により設備に発生する応力※が、材料の許容される強度（評価基準値）以下であることを確認する。

※1 地震以外の荷重についても、適切に考慮した上で評価を実施する。

■ 構造強度評価基準値

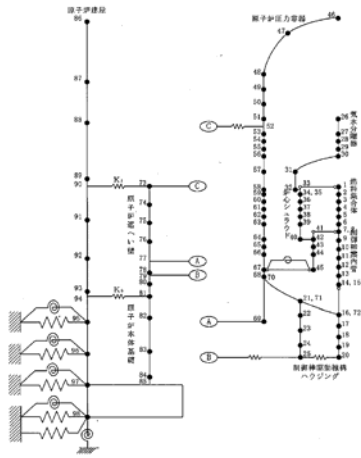
- 「原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601－補・1984，JEAG4601－1987，JEAG4601－1991追補版」および「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1－2005」に準拠するとともに、ほかの規格基準で規定されている値および実験等で妥当性が確認されている値等も用いる。

構造強度評価の流れ（1 / 2）



※応答倍率法による評価によらず、詳細評価する場合があります。

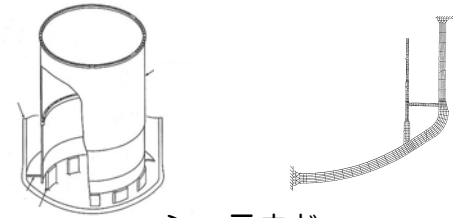
構造強度評価の流れ (2/2)



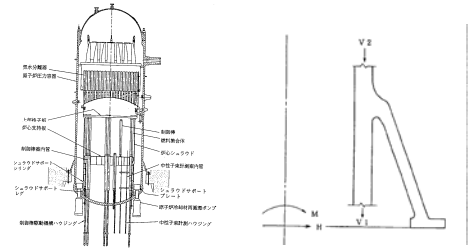
地震応答解析
(炉内構造物解析モデル)

地震荷重

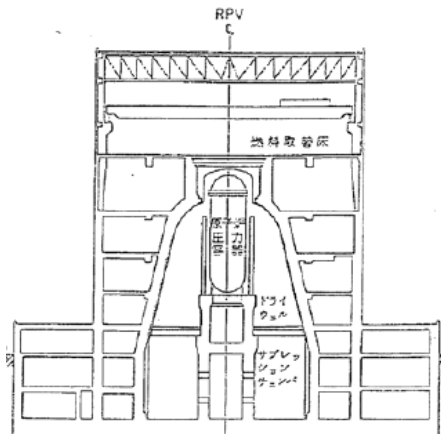
- ✓ モーメント
- ✓ せん断力
- ✓ 軸力



シュラウド



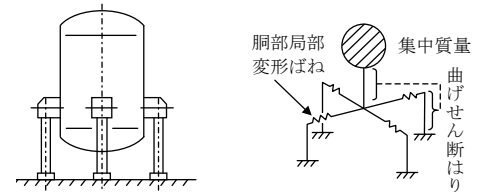
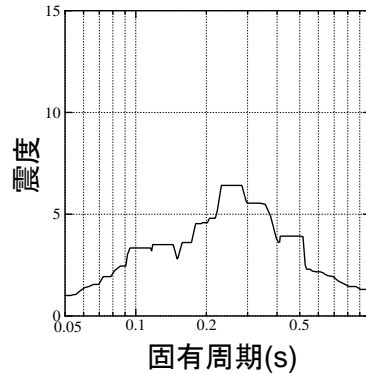
原子炉圧力容器



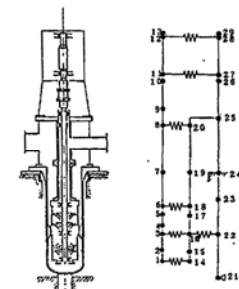
原子炉建屋模式図

加速度

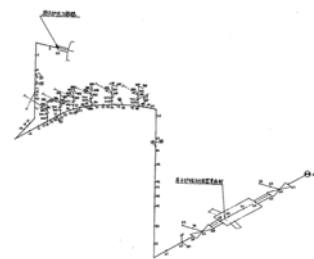
- ✓ 震度
- ✓ 応答スペクトル



容器



ポンプ



配管

応答倍率法の基本的な考え方

■ 応答倍率法とは

- ✓ 建設時の基準地震動から求めた『揺れの度合い』と基準地震動 S_s から求めた『揺れの度合い』の比率（応答比）を算定して、設計時の応力に乗じることで許容基準値を超えるかどうかの目安判定を行う方法。
- ✓ 応答倍率法による算出応力が許容値を満足するか否か、明確な判断が困難な場合については詳細評価を行う。

■ 応答倍率法の目的

- ✓ 評価作業を効率的に実施するため、設備の発生応力を簡便的に推定し、許容基準値を超えないことを速やかに確認する手法として応答倍率法を採用。
- ✓ 従って、応答倍率法で求めた発生応力は、地震による発生応力を厳密に求めて算出した値ではないが、詳細評価を行う設備を選定するスクリーニングのための値であり、便宜上、発生応力として報告書に記載。

応答比

■ 応答加速度比を用いた評価

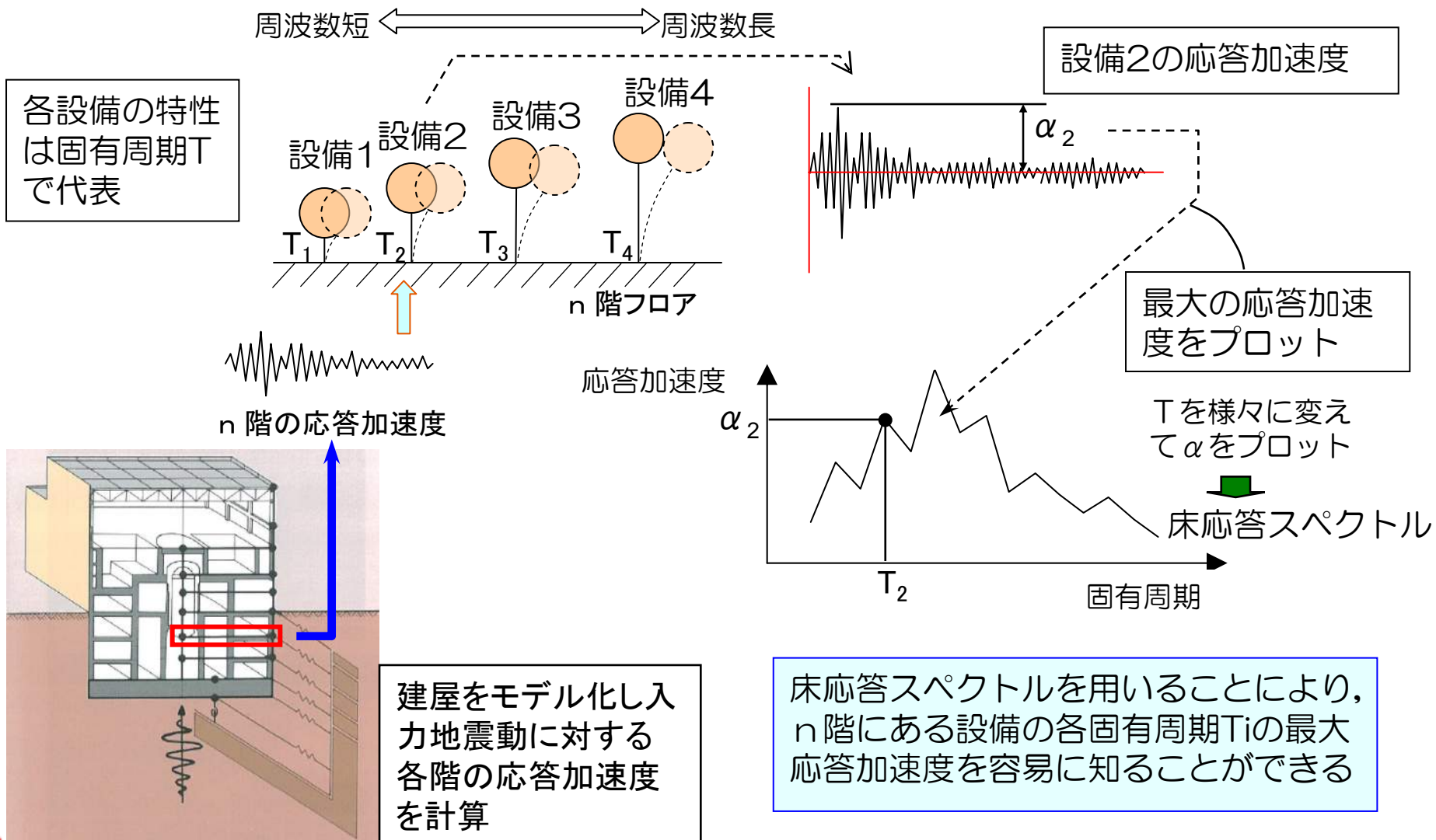
設備の発生応力値を算出するにあたり、加速度を用いる機器は、基準地震動 S_s による床応答スペクトル等からの加速度と、既往評価で用いた床応答スペクトル等からの加速度との比を応答比とする。

■ 応答荷重比を用いた評価

設備の発生応力値を算出するにあたり、せん断力、モーメント、軸力を用いる機器は、基準地震動 S_s による地震力と既往評価の地震力との比を応答比とする。

応答加速度比 (1 / 2)

■ 床応答スペクトル



応答加速度比（2 / 2）

■ 福島第一5号機，福島第二4号機

基準地震動 S_s による床応答スペクトル等からの水平加速度と鉛直加速度の二乗和平方根と，既往評価で用いた床応答スペクトル等からの水平加速度と鉛直加速度の二乗和平方根との比を応答加速度比とする。

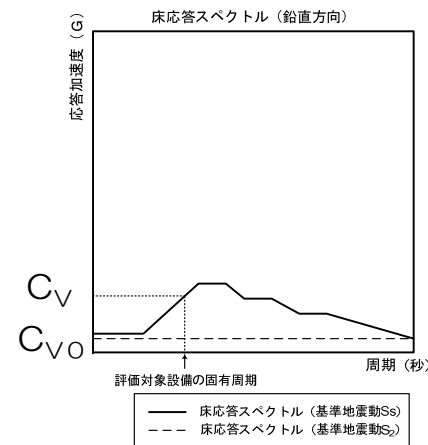
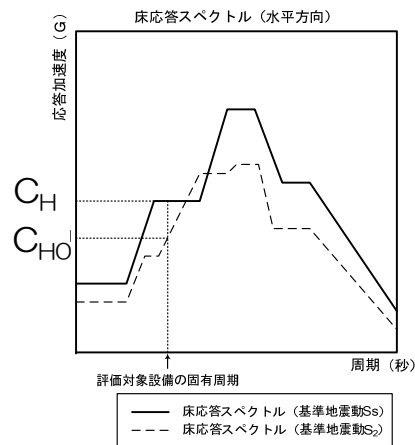
$$\text{応答比} = \frac{\sqrt{(C_H)^2 + (1 + C_V)^2}}{\sqrt{(C_{H0})^2 + (1 + C_{V0})^2}}$$

■ 福島第一5号機，福島第二4号機以外

代表プラントとして先行評価を行った福島第一5号機，福島第二4号機の国でのWGの審議等を踏まえ，今後評価を行う設備に関しては，応答加速度比を以下の方法で算出している。

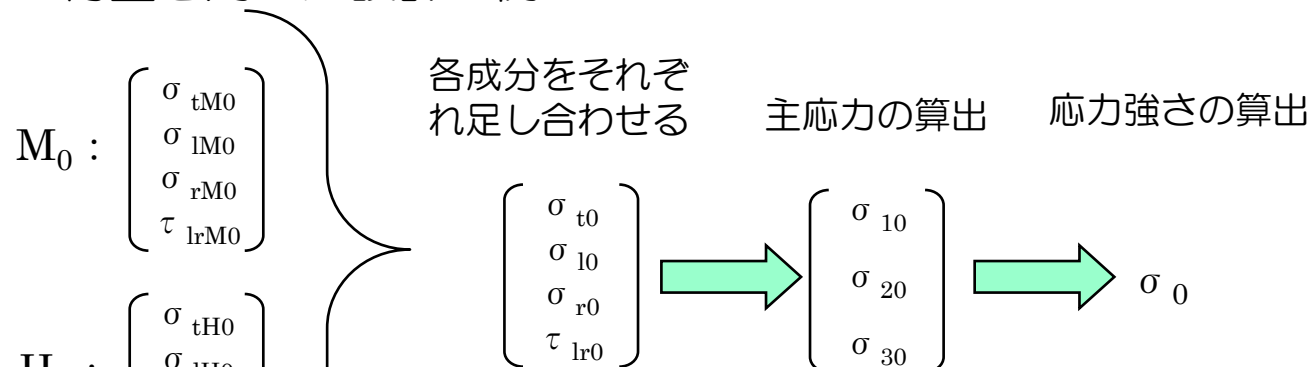
$$\text{応答比} = \text{MAX} \left(\frac{C_H}{C_{H0}}, \frac{C_V}{C_{V0}} \right)$$

C_{H0} ：既往評価による水平方向評価震度
 C_H ：基準地震動 S_s による水平方向評価震度
 C_{V0} ：既往評価による鉛直方向評価震度
 C_V ：基準地震動 S_s による鉛直方向評価震度



応答荷重比 (1 / 2)

■ 荷重を用いた設計の例



下式の解が主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ となる。

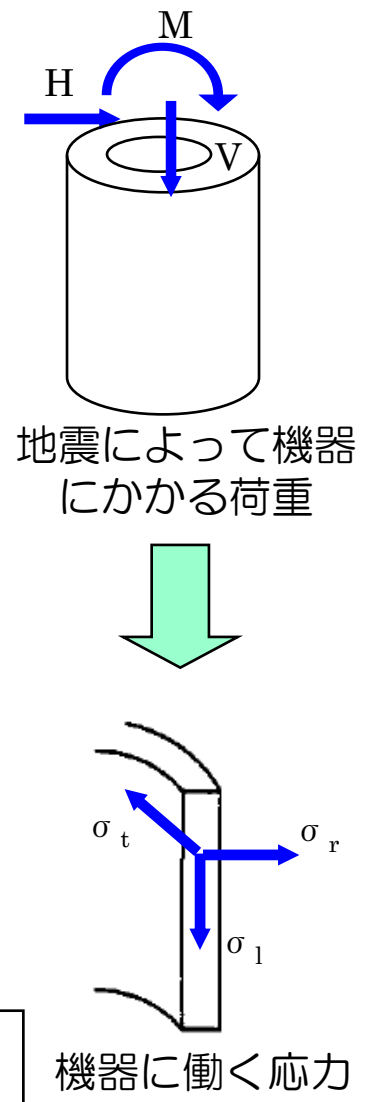
$$\sigma^3 - (\sigma_t + \sigma_l + \sigma_r) \cdot \sigma^2 + (\sigma_t \cdot \sigma_l + \sigma_l \cdot \sigma_r + \sigma_r \cdot \sigma_t - \tau_{lr}^2) \cdot \sigma - \sigma_t \cdot \sigma_l \cdot \sigma_r + \sigma_t \cdot \tau_{lr}^2 + 2\tau_{lr} = 0$$

下式により応力強さを算出する。

$$\sigma = \text{MAX}\{|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|\}$$

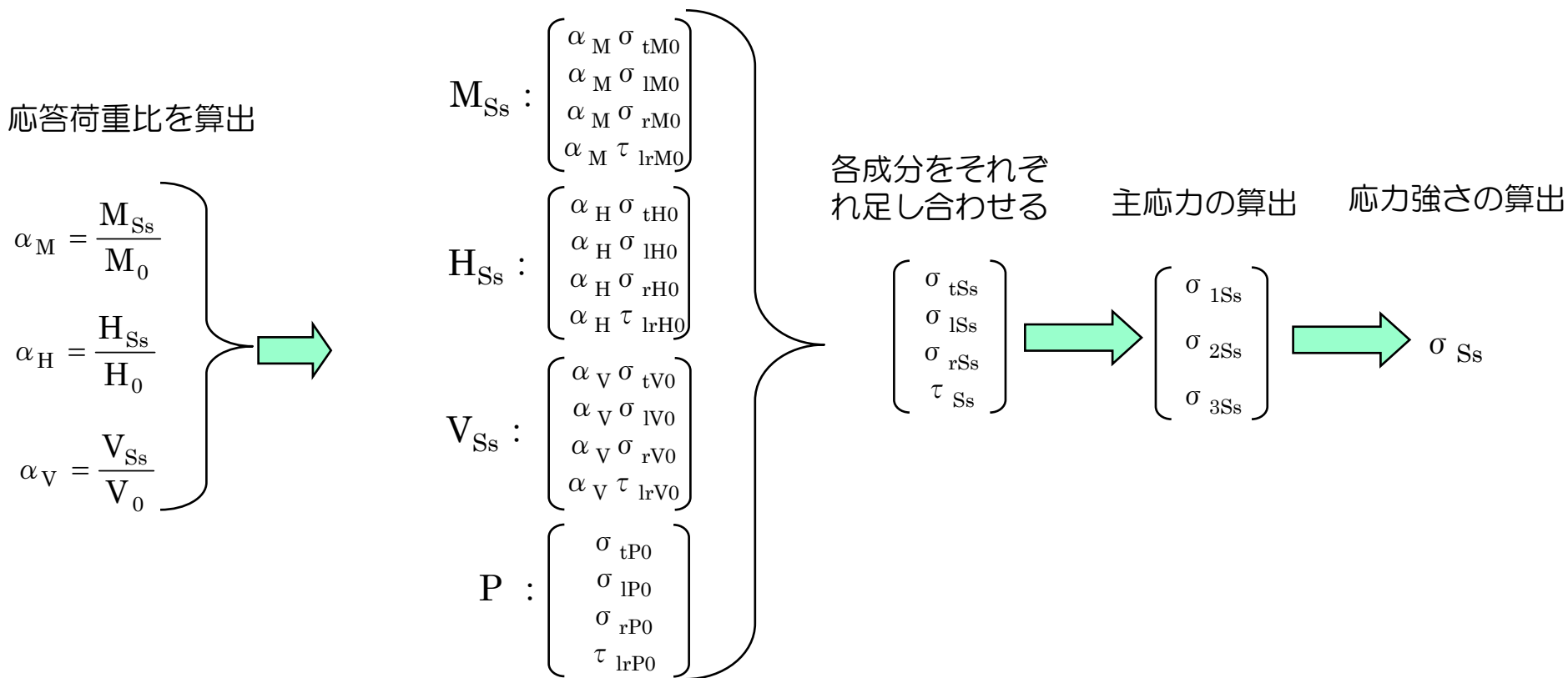
M: 設計時のモーメント
 H: 設計時の水平力
 V: 設計時の鉛直力
 P: 設計時の地震以外による荷重
 σ_t : 周方向応力
 σ_l : 軸方向応力
 σ_r : 径方向応力
 τ_{lr} : せん断応力
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 主応力
 σ : 応力強さ

・添字0は設計時の値であることを示す。
 ・添字Mはモーメントによる値, Hは水平力による値, Vは鉛直力による値, Pは地震力以外による値を示す。



応答荷重比（2 / 2）

■ ケース1：設計と同等な評価の例

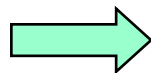


■ ケース2：応答荷重比のうち最大倍率 (α_{max}) を設計時応力強さに乗じる簡便な方法の例

応答荷重比を算出

応力強さの算出

$$\alpha_{MAX} = \text{MAX} (\alpha_M, \alpha_H, \alpha_V)$$



$$\sigma_{Ss} = \alpha_{MAX} \sigma_0$$

α ：応答荷重比

添字SsはSs評価時の値を示す。

応答比を用いた評価について

既往評価での評価方法に応じて、以下の方法①または方法②で実施

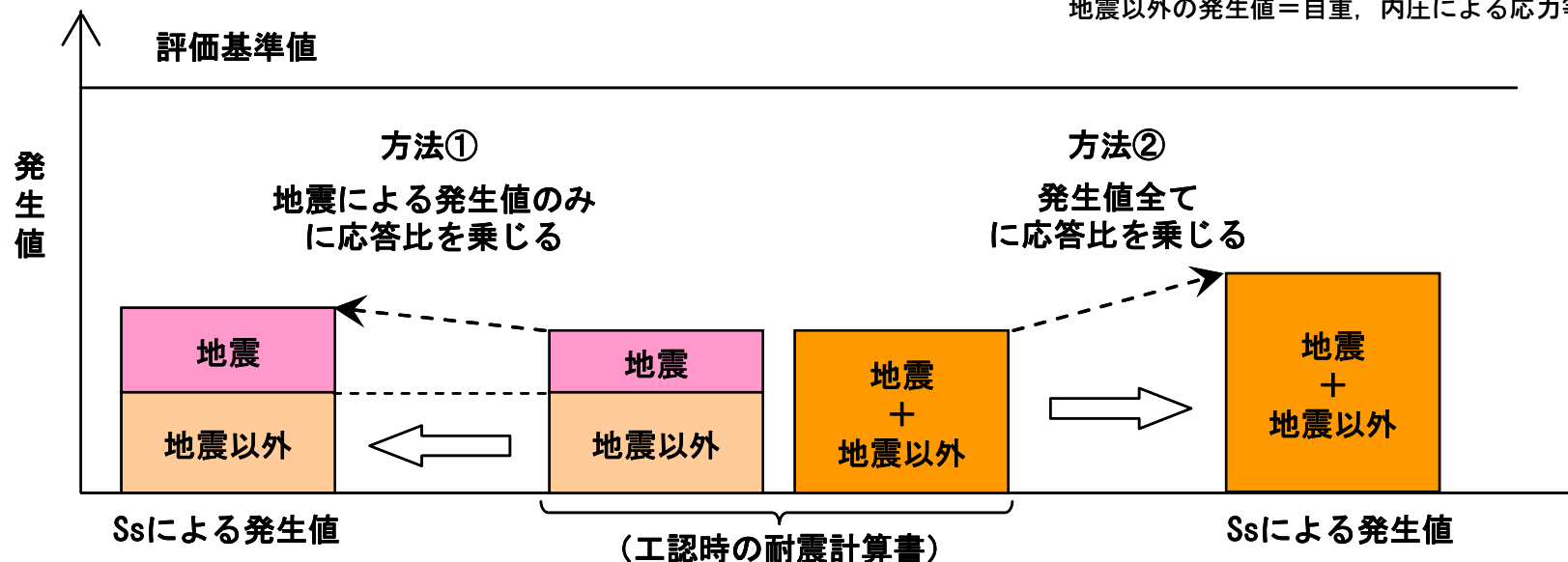
【方法①】：地震による発生値と地震以外による発生値が分離されている場合の取扱い

$$S_s\text{による発生値} = \begin{array}{c} \text{地震以外による発生値} \\ \text{(工認時の耐震計算書)} \end{array} + \begin{array}{c} \text{地震による発生値} \\ \text{(工認時の耐震計算書)} \end{array} \times \text{応答比}$$

【方法②】：地震による発生値と地震以外による発生値の合計が示されている場合の取扱い

$$S_s\text{による発生値} = \left[\begin{array}{c} \text{地震以外による発生値} + \text{地震による発生値} \\ \text{(工認時の耐震計算書)} \end{array} \right] \times \text{応答比}$$

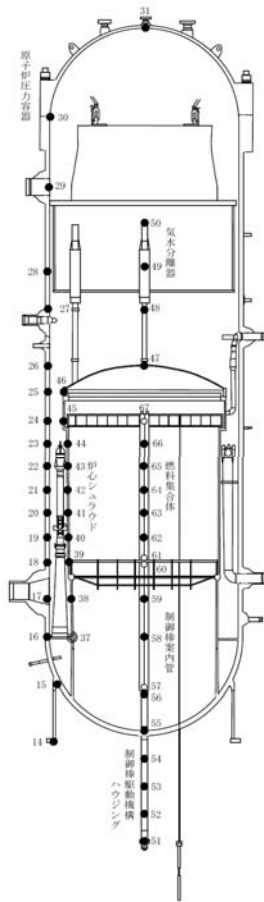
地震以外の発生値＝自重、内圧による応力等



炉内構造物の解析モデル例（福島第一原子力発電所5号機）

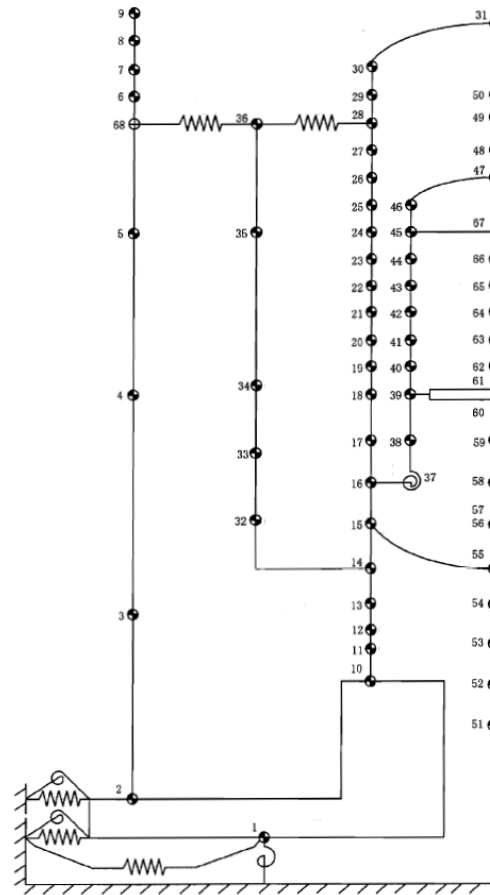
- 水平方向は，多質点モデル化し，それぞれの質点間を曲げ，せん断剛性を有するはり，ばねにより結合する。

炉内構造物の概要



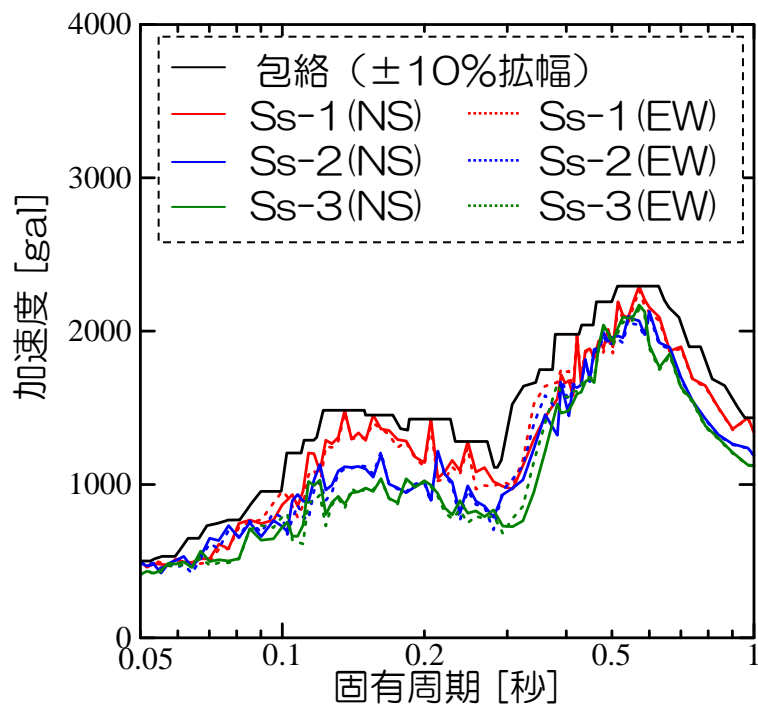
モデル化

炉内構造物のモデル化（水平方向）

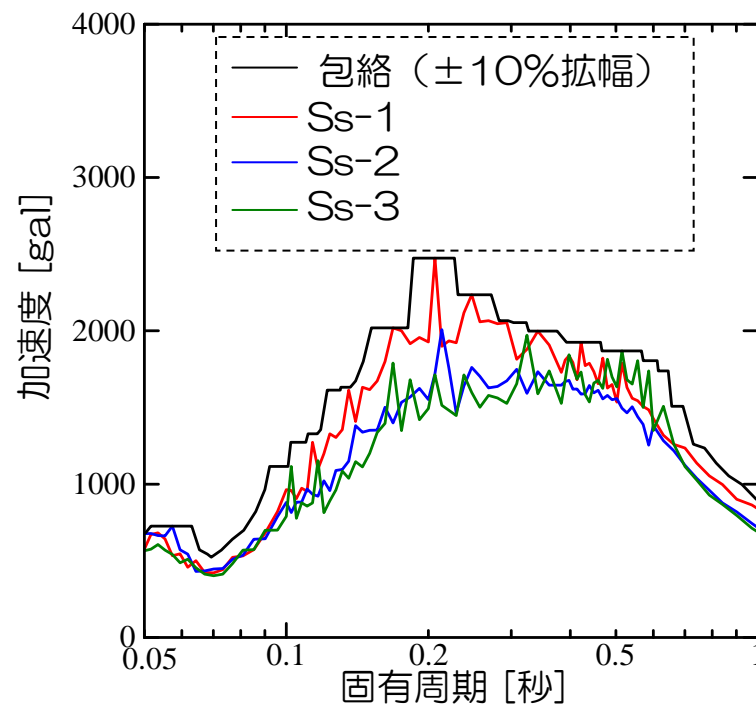


床応答スペクトル例（福島第一原子力発電所5号機）

- 建物・構築物，大型機器の地震応答解析で得られた各位置の加速度応答時刻歴を用いて水平方向および鉛直方向について算出
- 算定にあたっては，地盤や建屋の物性等のばらつきが床応答に与える影響を考慮し，「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987」等を参考に周期軸方向に±10%拡幅



福島第一5号機 原子炉建屋水平方向
(O.P.0.94m, 減衰1.0%)
(Ss3波包絡)



福島第一5号機 原子炉建屋鉛直方向
(O.P.0.94m, 減衰1.0%)
(Ss3波包絡)

福島第一・5号機の事例

- 原子炉圧力容器 Sh.2 1
- 原子炉格納容器 Sh.2 2
- 炉心支持構造物 Sh.2 3
- 残留熱除去系ポンプ Sh.2 4
- 配管系 Sh.2 5～2 9

(残留熱除去系配管, 主蒸気配管)

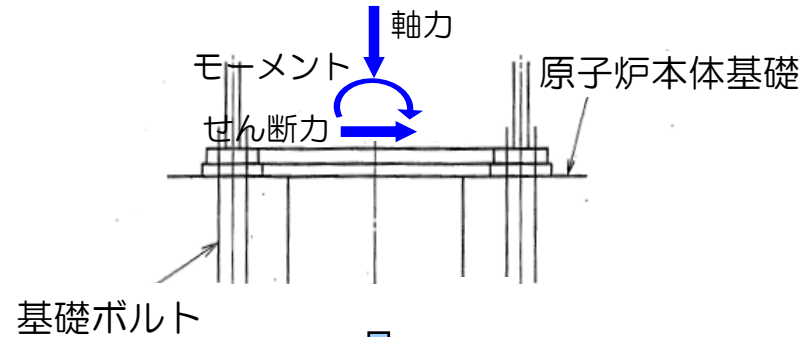
福島第一5号機 原子炉压力容器（基礎ボルト）

- 原子炉格納容器—原子炉压力容器連成解析（以下、PCV-RPV連成解析）により、地震による荷重（せん断力、モーメント、軸力）を算出する。また、地震以外の荷重については、設計時の値をそのまま用い、各荷重のつり合い計算により原子炉压力容器基礎ボルトに発生する応力値を求める。



PCV-RPV連成解析モデル

連成解析により
荷重算出



つり合い計算により
応力算出

PCV-RPV連成解析

原子炉压力容器基礎ボルトに
作用する地震荷重
(せん断力、モーメント、軸力)

原子炉压力容器基礎ボルトに
作用する地震以外の荷重
(設計時の値)
(せん断力、モーメント、軸力)

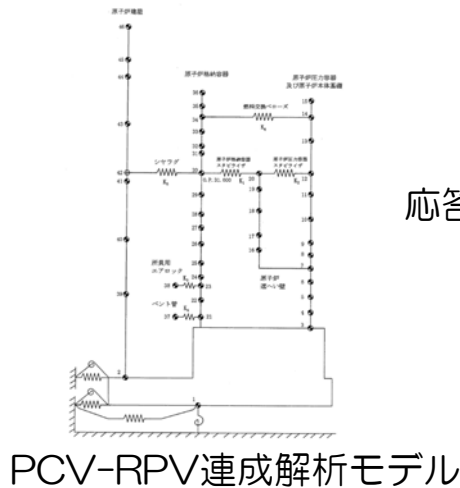
つり合い計算

応力分類	発生値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
引張	39	222

今回実施した範囲

福島第一5号機 原子炉格納容器（サンドクッション部）

- PCV-RPV連成解析により地震による荷重（せん断力，モーメント，鉛直震度）が算出される。設計時の当該荷重，耐震安全性評価時の当該荷重をそれぞれ比較することにより，水平方向応答比，鉛直方向応答比を求め，それぞれの比のうち最大の値を応答比とする。設計時の発生値に応答比を乗じ，原子炉格納容器サンドクッション部の発生値を算出する。



連成解析により
荷重算出

せん断力 H_{Ss}
モーメント M_{Ss}
鉛直震度 $C_{V_{Ss}}$

$$\text{応答比} = \text{MAX} \left(\frac{H_{Ss}}{H_0}, \frac{M_{Ss}}{M_0}, \frac{1+C_{V_{Ss}}}{1+C_{V_0}} \right)$$

$$= \text{MAX}(1.06, 1.16, 1.17)$$

$$= 1.17$$

H_0 : 設計時せん断力
 M_0 : 設計時モーメント
 C_{V_0} : 設計時鉛直震度

設計時発生値に
応答比を乗じ，
耐震安全性評価時の
発生値を算出

応力分類	設計時発生値 [MPa]	耐震安全性評価時発生値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
膜	77	90	255

参考
中間報告書においては，応答比を算出する際，分母，分子ともに鉛直方向の震度に1を足し込んでいたが，1を足し込まずに算出した場合でも，評価基準値を下回ることを確認。

$$\text{応答比} = \text{MAX} \left(\frac{H_{Ss}}{H_0}, \frac{M_{Ss}}{M_0}, \frac{C_{V_{Ss}}}{C_{V_0}} \right)$$

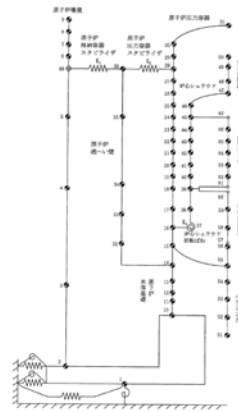
$$= \text{MAX}(1.06, 1.16, 1.88)$$

$$= 1.88$$

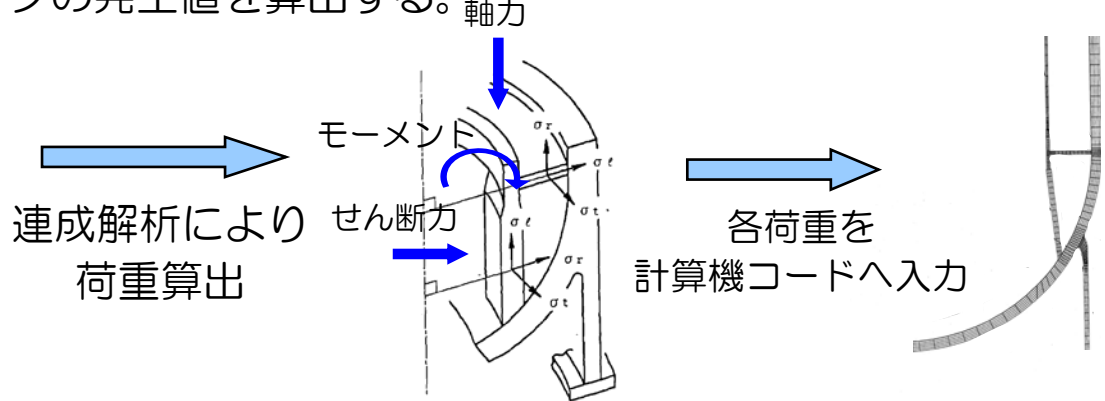
発生値 = 77×1.88
 ≈ 145 [MPa]

福島第一5号機 炉心支持構造物（シュラウドサポートレグ）

- 炉内構造物連成解析により、荷重（せん断力、モーメント、軸力）を算出し、計算機コードによる解析を実施することで地震による応力を算出する。また、地震以外の条件である内圧、差圧、外荷重については、設計時の値をそのまま用いて、それらの応力値を組合せてシュラウドサポートレグの発生値を算出する。



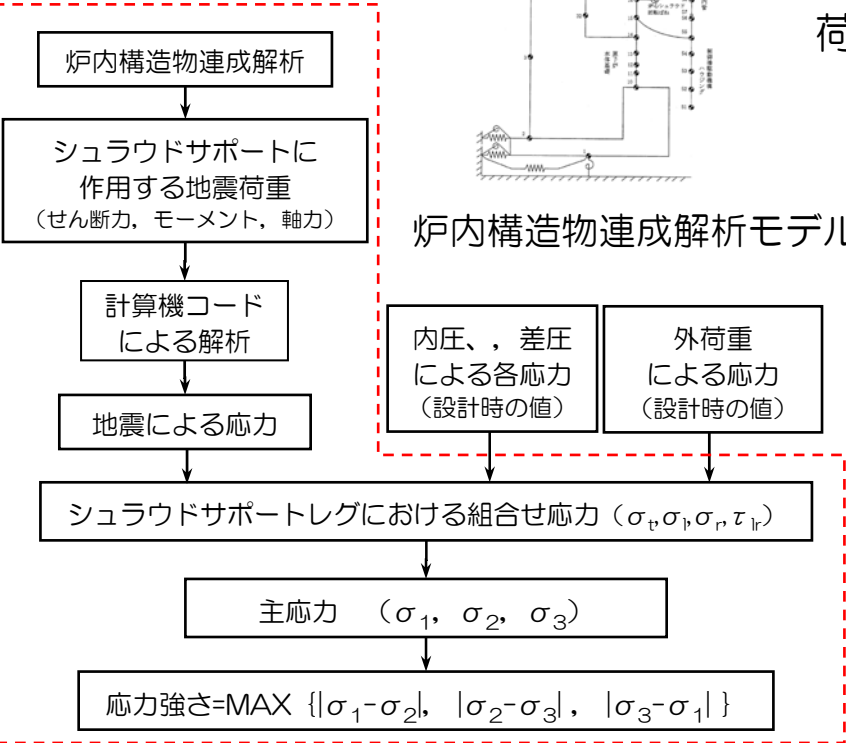
炉内構造物連成解析モデル



連成解析により
荷重算出

各荷重を
計算機コードへ入力

計算機コードによる
解析を行い、応力強
さを算出する

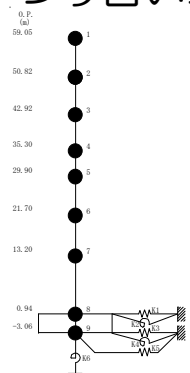


応力分類	発生値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
膜	86	300

今回実施した範囲

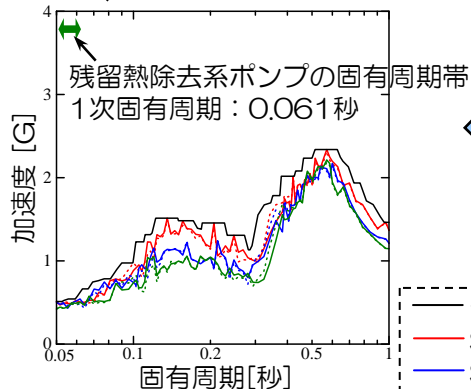
福島第一5号機 残留熱除去系ポンプ（基礎ボルト）

- 水平方向に関して残留熱除去系ポンプは柔なので、当該ポンプ設置階の床応答スペクトルに基づくスペクトルモード解析を実施し、ポンプ廻りの荷重（せん断力、モーメント）を算出する。鉛直方向に関しては剛なので、ポンプ設置階の最大応答加速度を評価用震度として評価に用いる。これらの荷重、評価用震度を踏まえた基礎ボルトに関するつり合い式により残留熱除去系ポンプ基礎ボルトの発生値を算出する。

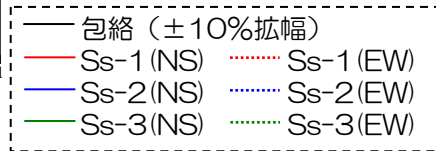


原子炉建屋解析モデル

床応答
スペクトル作成

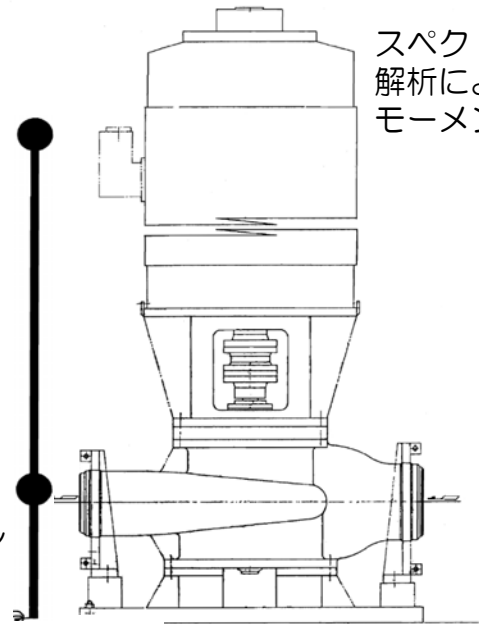


床応答スペクトル



解析モデル
に入力

ポンプ解析モデル



スペクトルモード
解析によりせん断力、
モーメント算出

- ・せん断力
- ・モーメント

・鉛直震度 ← ポンプ設置階の最大応答加速度より算出

つり合いの式により応力算出

応力分類	発生値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
引張	29	202

配管系の評価方法（1 / 3）

■配管系の評価

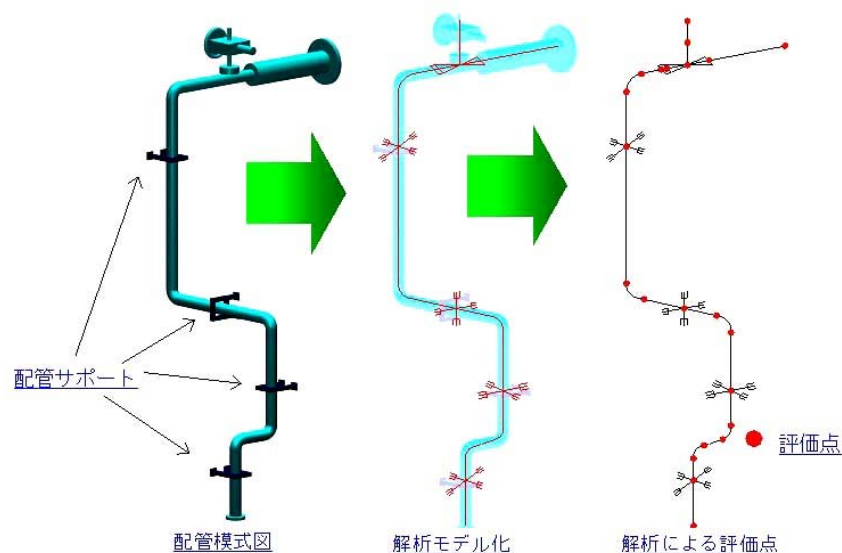
（1）モデル化

- ✓3次元多質点系モデルとする。
- ✓同一モデルに含める範囲は、アンカ※点からアンカ点までとする。

※アンカは3方向の動きや回転を拘束するもの

（2）評価方法

- ✓スペクトルモーダル解析法を用いる。



配管の解析モデル化の例

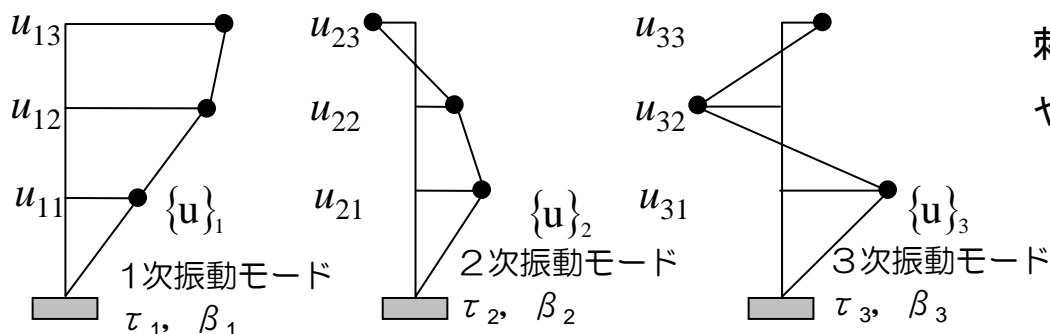
配管系の評価方法 (2/3)

■ スペクトルモーダル法で評価

①固有値解析：配管を3次元多質点モデルで解析し以下を求める

- ✓固有モード： $\{u_i\}$ $\{ \}$ ：ベクトルを示す
- ✓各固有モードにおける固有周期： τ_i ， 刺激係数： β_i

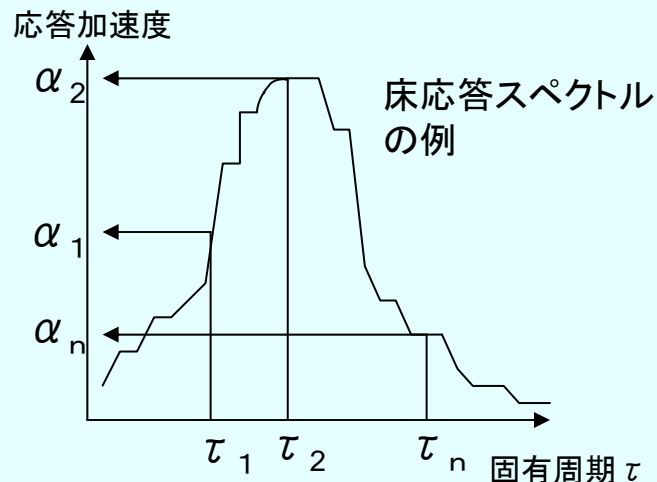
(3自由度の例)



刺激係数 β_i ：各モードの振れやすさを表す値

②スペクトルモーダル法

- 床応答スペクトルを作成
 - ✓配管の設置位置における建屋応答と評価対象の配管の減衰定数から作成
- 床応答スペクトルから各固有周期(τ_i)における応答加速度(α_i)を読み取る



配管系の評価方法 (3 / 3)

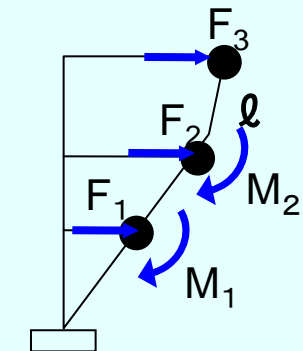
③各モードの重ね合わせ

- スペクトルモーダル法により、各モードの荷重、モーメントを算出

【荷重の例】

$$\{F\}_i = m \cdot \{u\}_i \cdot \alpha_i \cdot \beta_i \quad m: \text{質量マトリクス}$$

- モードの重ね合わせ (2乗和平方根) : $\{M\} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \{M\}_i^2}$



荷重のつり合いの例



④応力の計算

- 地震による荷重、内圧、自重等考慮し下式により1次応力を求める (第1種管の例)

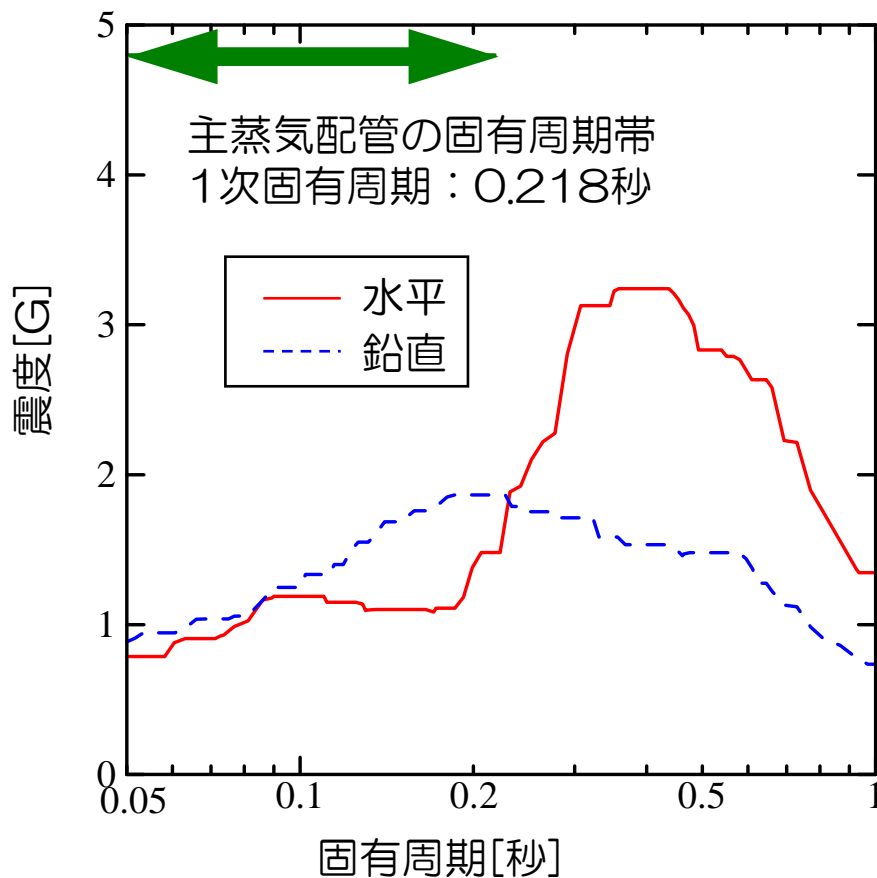
✓ 直管部
$$: S = \frac{B_1 P D_0}{2t} + \frac{B_2 M_{ip}}{Z_i}$$

✓ 管台及び突合せ溶接式ティール
$$: S = \frac{B_1 P D_0}{2t} + \frac{B_2 b M_{bp}}{Z_b} + \frac{B_2 r M_{rp}}{Z_r}$$

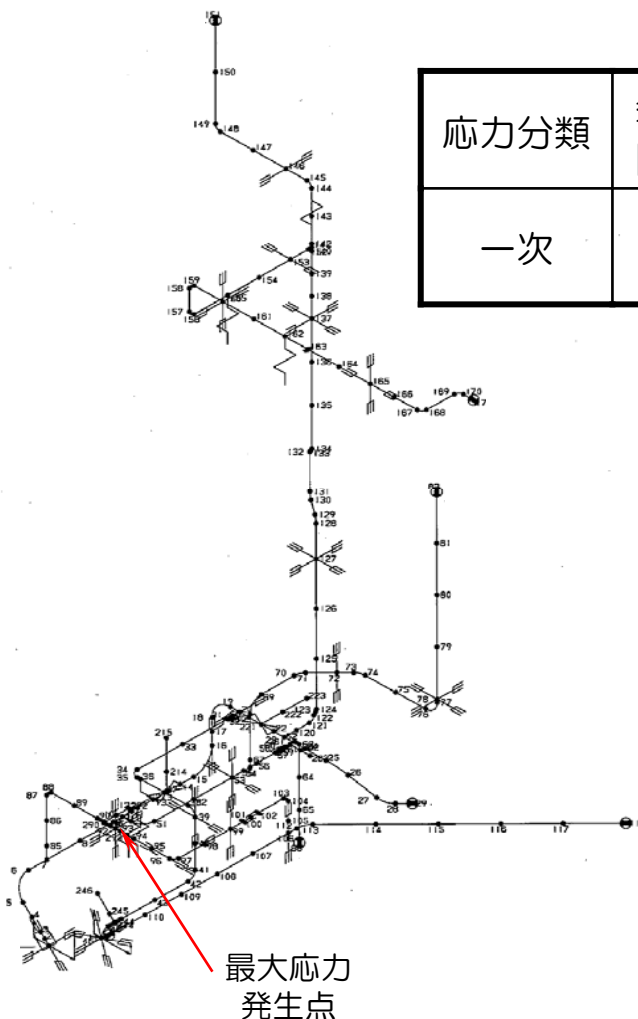
Z_i : 管の断面係数
 Z_b, Z_r : 分岐管, 主管の断面係数
 B_1, B_2, B_2b, B_2r : 応力係数
 D_0, t : 管の外径, 厚さ
 P : 圧力
 M_{ip} : 機械的荷重(自重, 地震)によるモーメント
 M_{bp}, M_{rp} : 分岐管, 主管の 機械的荷重によるモーメント

福島第一5号機 残留熱除去系配管

- スペクトルモーダル解析により配管の応力発生値を算出する。



床応答スペクトル（減衰定数2.5%）

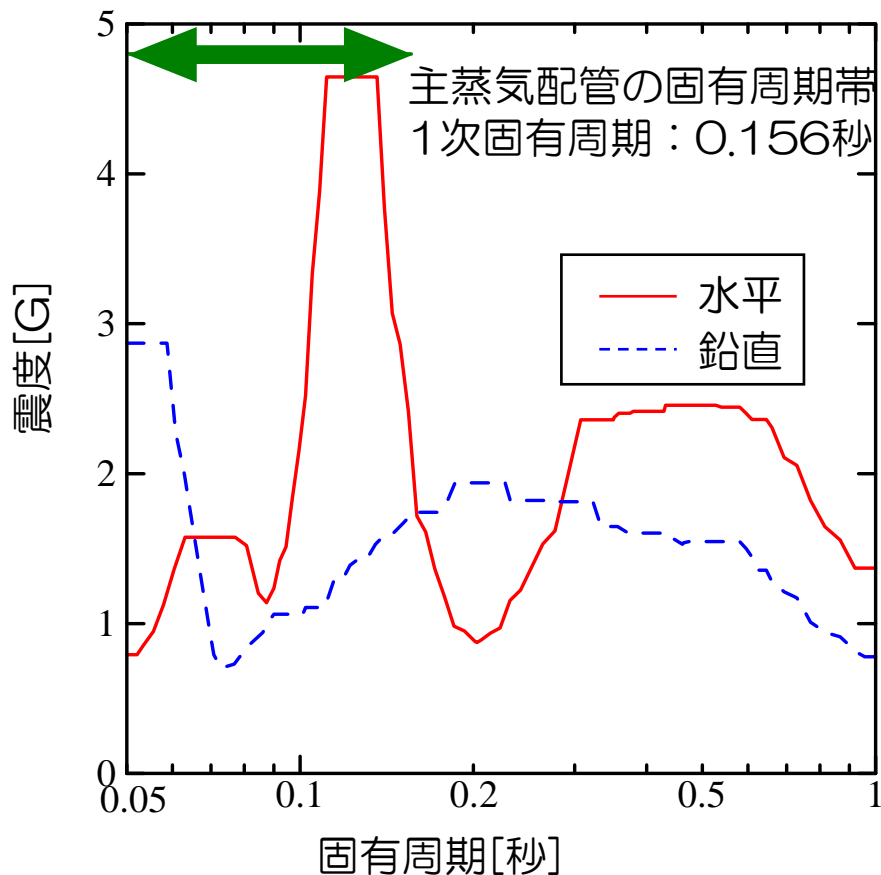


残留熱除去系配管モデル

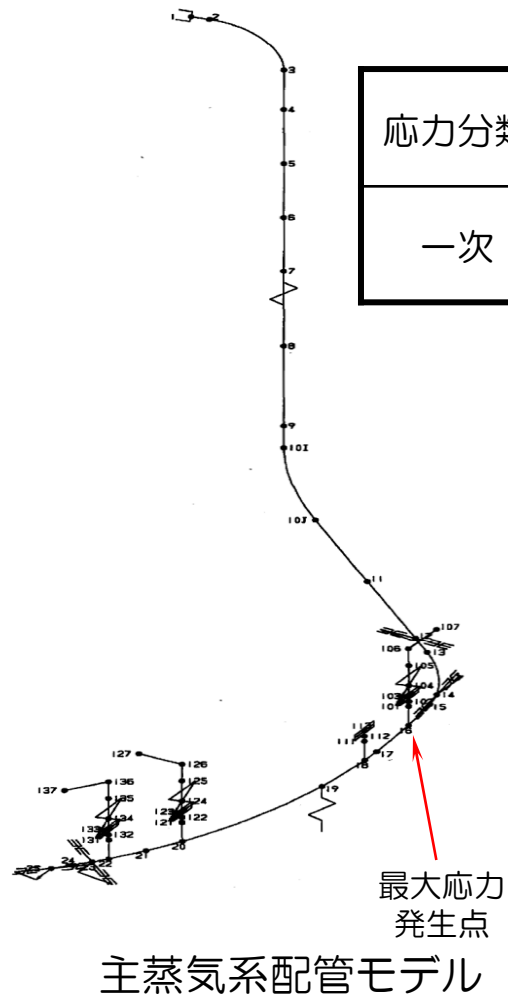
応力分類	発生値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
一次	197	364

福島第一5号機 主蒸気系配管

- スペクトルモーダル解析により配管の応力発生値を算出する。



床応答スペクトル（減衰定数2%）

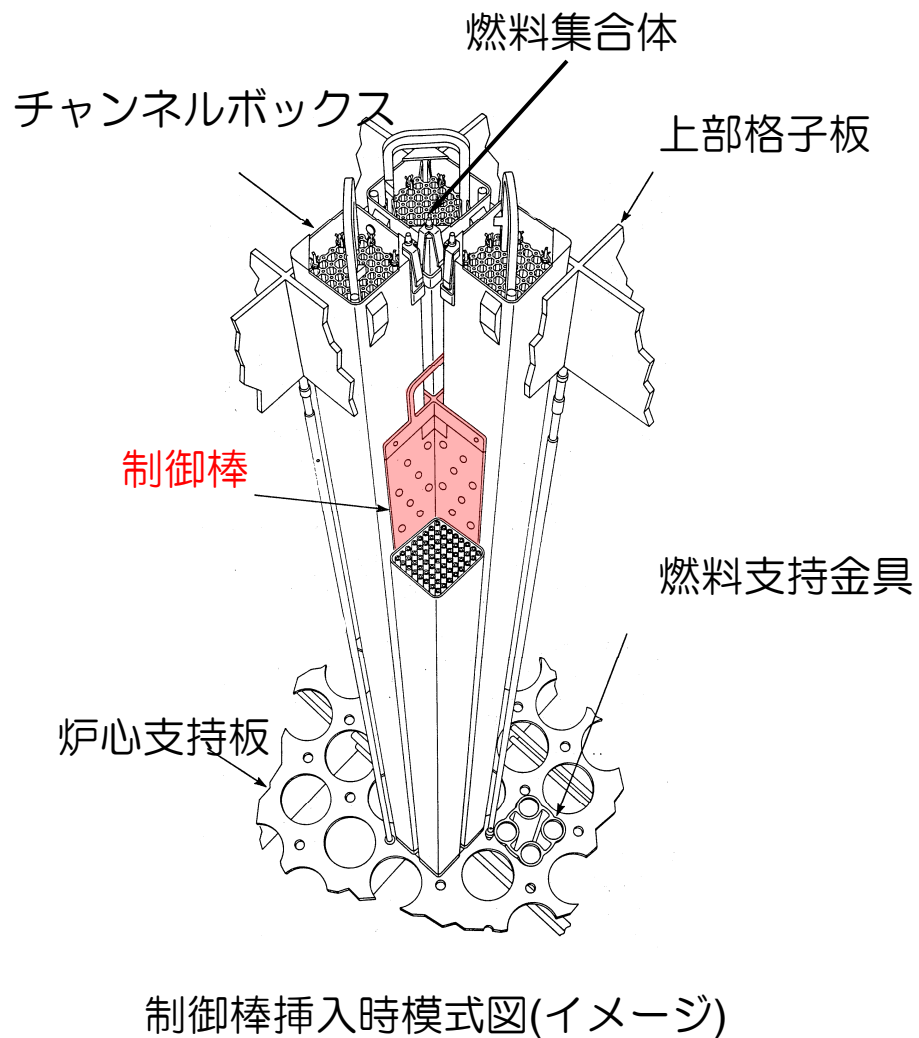
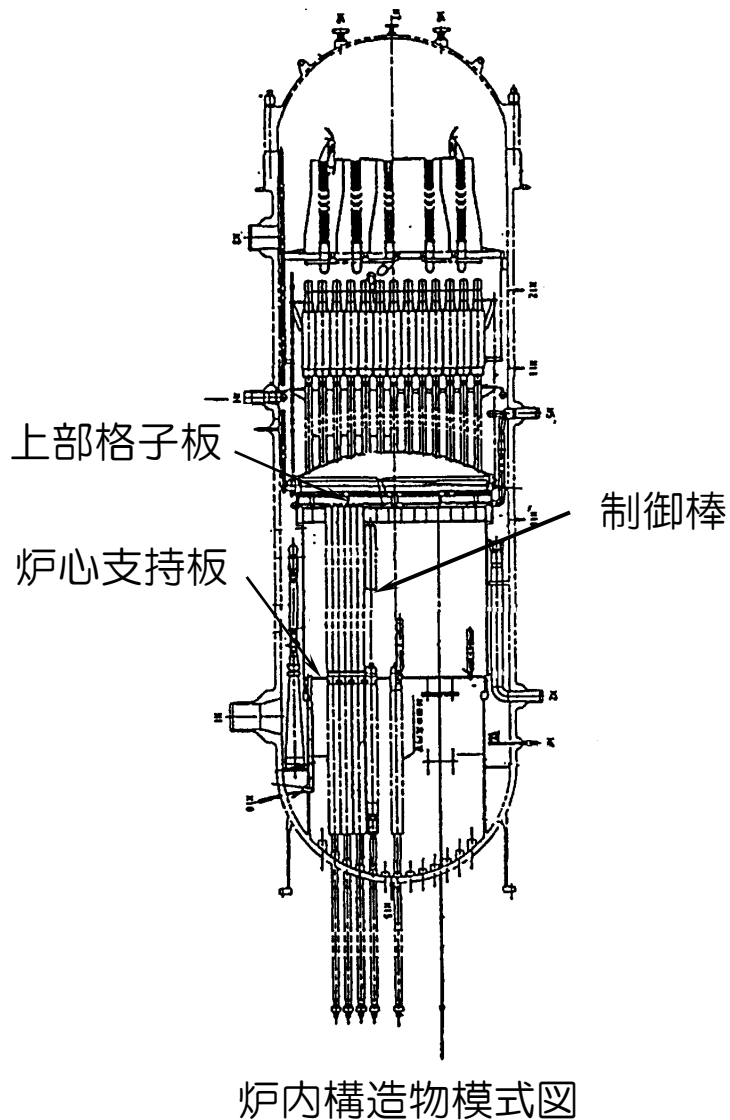


応力分類	発生値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
一次	356	417

制御棒挿入性評価の解説

- 制御棒挿入性関係模式図 Sh.3 1
- 設計時の制御棒挿入試験 Sh.3 2～3 4
- 制御棒挿入性の評価方法および評価基準値 . . Sh.3 5
- 制御棒挿入性の評価の流れ Sh.3 6
- 制御棒相対変位計算 Sh.3 7
- 制御棒挿入性評価結果 Sh.3 8

制御棒挿入性関係模式図



設計時の制御棒挿入試験(1/3)

■ 福島第一原子力発電所5号機の制御棒について試験

✓ ボロンカーバイド型

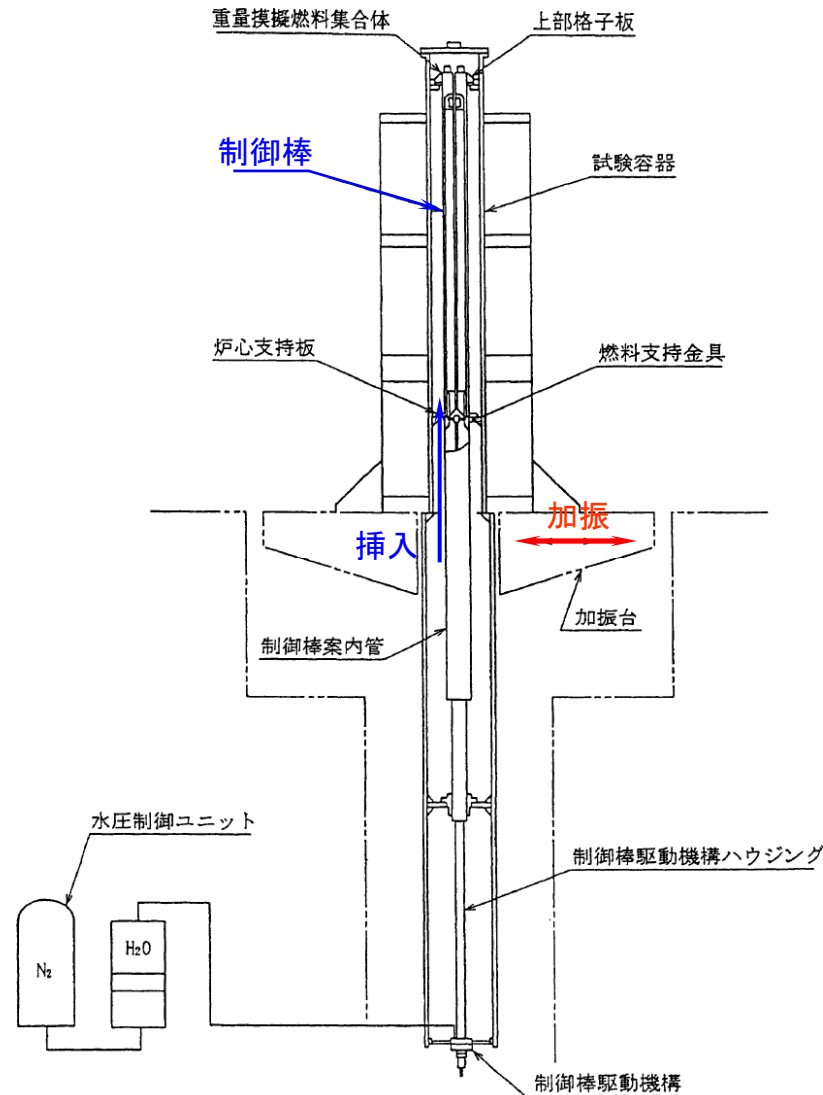
■ 試験条件

項目	条件
温度	常温
圧力	常圧 *1
加振条件	加振方向：水平方向  加振振幅：燃料集合体の最大振幅が0~40mmの範囲 加振振動数：約5~6 Hz (燃料集合体の水中固有振動数相当) 加振波形：正弦波
スクラム開始時の制御棒位置	全引き抜き状態

注記 *1：アキュムレータ圧力の調整により原子炉定格圧力(6.93MPa [gage]) 時のスクラムを模擬。

設計時の制御棒挿入試験(2/3)

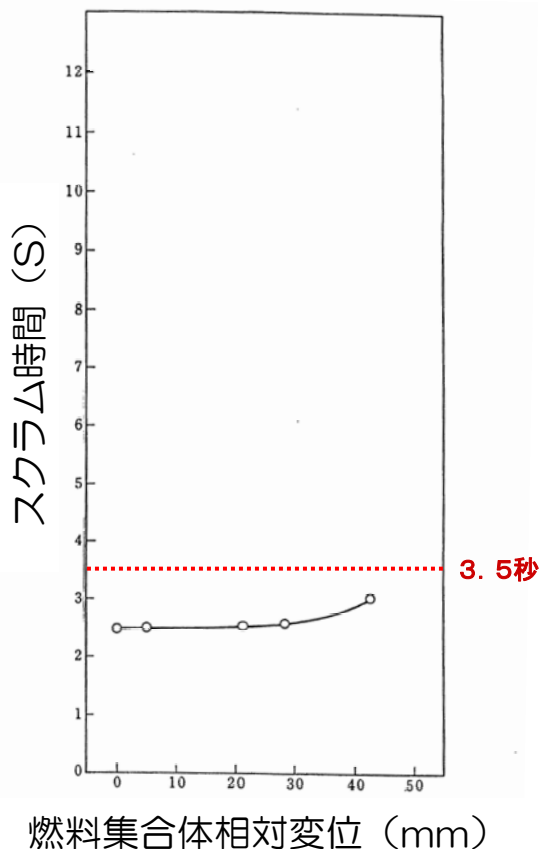
■ 試験装置の例



設計時の制御棒挿入試験(3/3)

■ 試験結果

- 燃料集合体の相対変位が約40mmにおいて通常運転時のスクラム仕様値である90%ストローク3.5秒以内であることが確認でき、試験後において制御棒の外観に有意な変化がないことを確認。



燃料集合体相対変位のスクラム時間に与える影響

制御棒挿入性の評価方法および評価基準値

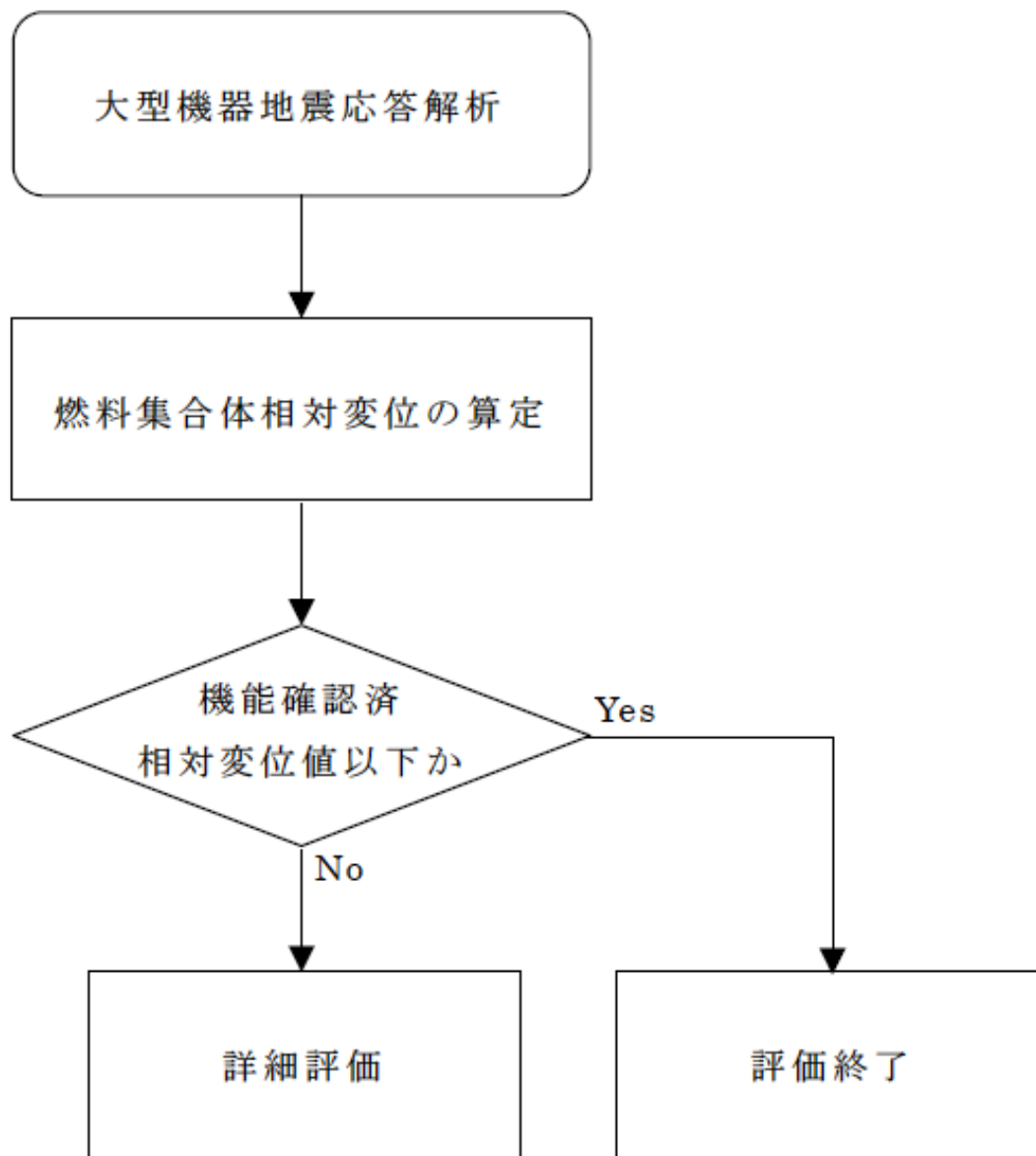
■ 制御棒挿入性の評価方法

- 制御棒の挿入性については、実規模大の試験装置により、実際に揺らした状態で確認しており、最大振幅40mmまでの揺れでも規定時間に余裕をもって制御棒が挿入されることを確認している。
- 評価では、基準地震動 S_s による燃料集合体の相対変位を求め、その相対変位が試験により挿入性が確認された相対変位以下であることを確認。

■ 制御棒挿入性の評価基準値

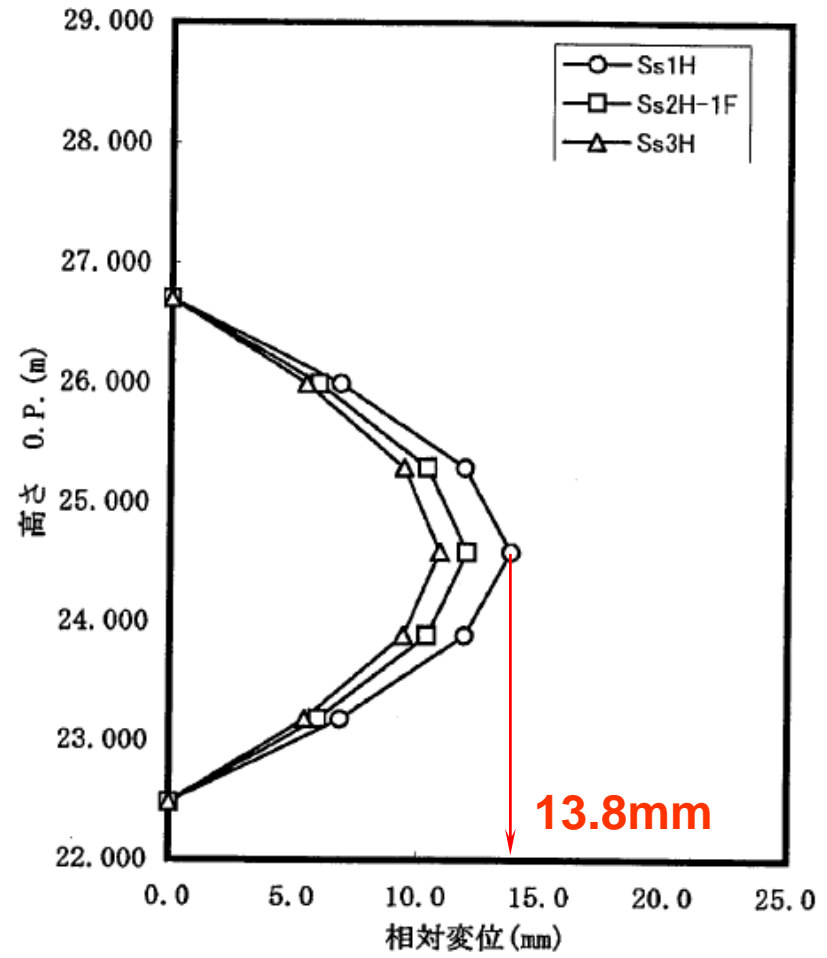
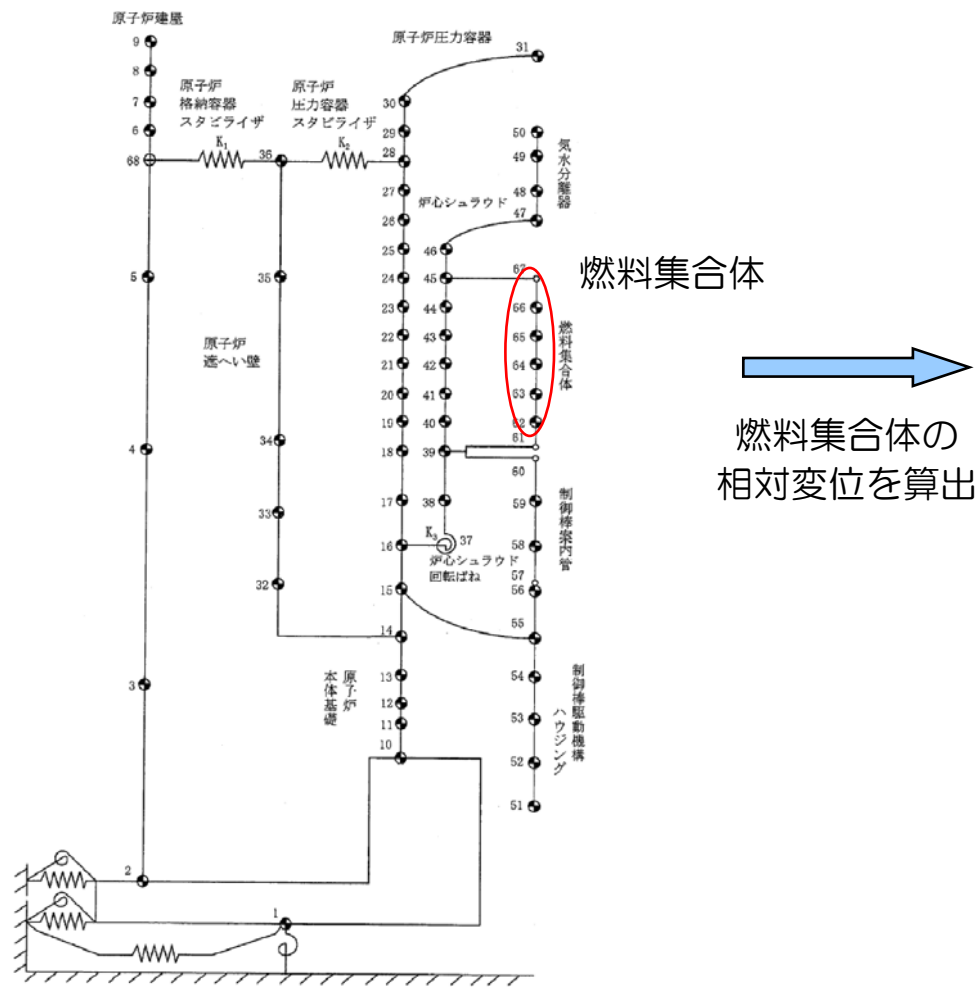
- 制御棒挿入性評価に用いる評価基準値は、試験により挿入性が確認されている最大振幅40mmを用いている。

制御棒挿入性の評価の流れ



福島第一-5号機 制御棒相對変位計算

- 炉内構造物練成解析モデルを用いて、基準地震動発生時における燃料集合体の相對変位を算出。



炉内構造物連成解析モデル

地震時燃料相對變位

制御棒挿入性評価結果

- 制御棒の地震時挿入性については、地震による燃料集合体の相対変位が試験により挿入性が確認された相対変位以下であることを確認した。

評価対象設備	地震時の相対変位 (mm)	評価基準値（相対変位） (mm)
制御棒 (地震時の挿入性)	13.8	40.0※ ¹

※¹ 常温における挿入試験により、規定時間内に制御棒が挿入されたことが確認された燃料変位

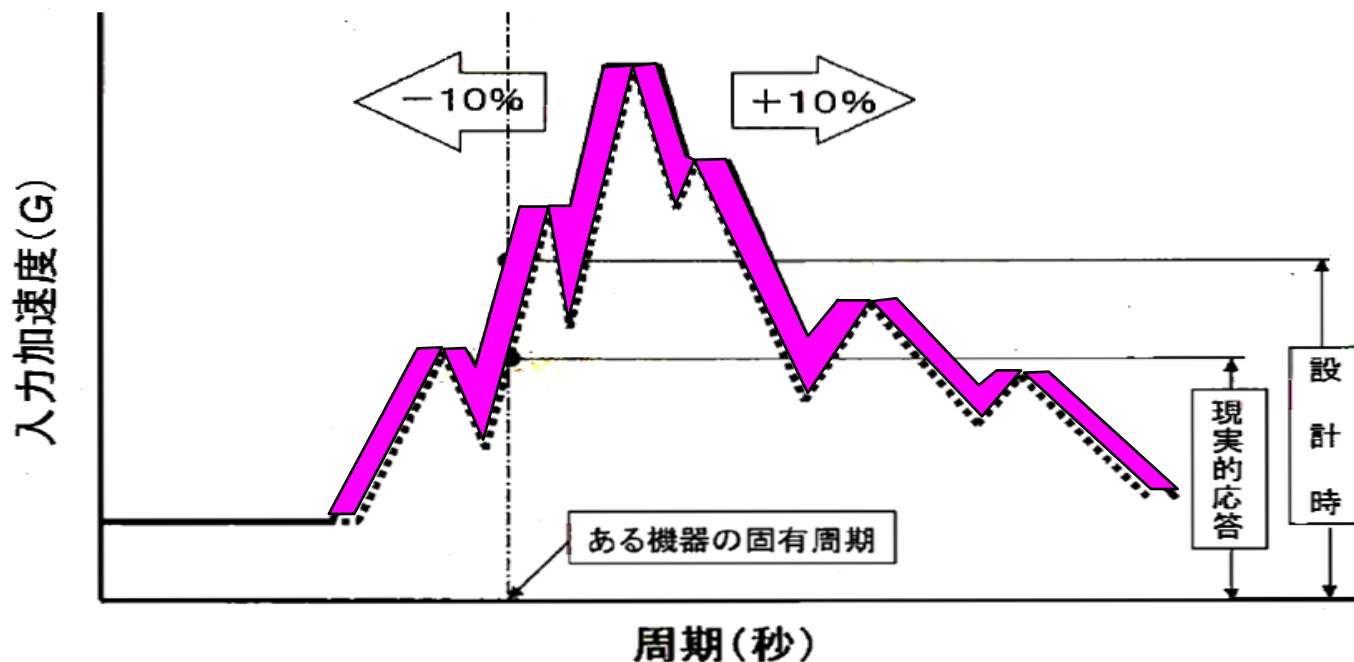
構造強度評価の裕度について

- スペクトルモーダル法による解析 Sh.40~41
- 減衰定数に関する説明 Sh.42
- 解析モデルに関する説明 Sh.43
- 材料強度に関する説明 Sh.44
- 耐震設計裕度に関する実証試験 Sh.45

スペクトルモーダル法による解析 (1/2)

■ スペクトルモーダル法を用いた設計手法の裕度について

- 各モードの時間変化は考えず、設備の各固有周期の最大応答を自乗和平方根
- 得られた床応答スペクトルを $\pm 10\%$ 拡幅したものでより設備の各固有周期の最大応答加速度を求めている
 - ✓ 10%の根拠 \Rightarrow 床応答スペクトルに影響を与える因子(地盤物性, 建屋剛性等)の変動をカバーできる

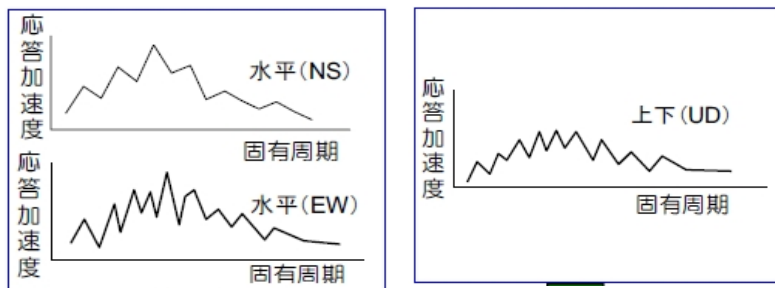


スペクトルモーダル法による解析 (2/2)

時々刻々変化する荷重を，機器の固有周期における最大荷重の重ね合わせとして設定し解析を行うことで，保守性を確保

スペクトルモーダル法

設計時は，設備数が膨大であり，簡便な設計手法を採用



応答スペクトル解析

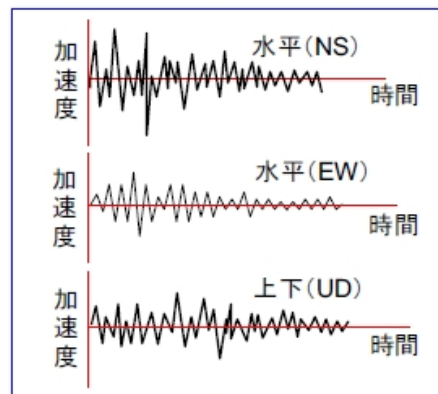
応答スペクトル解析

水平NS-上下と水平EW-上下で
組合せ大きい値を採用

最大応力算出

時刻歴解析

時間を考慮して3次元データを入力するため，より現実に近い解析が可能

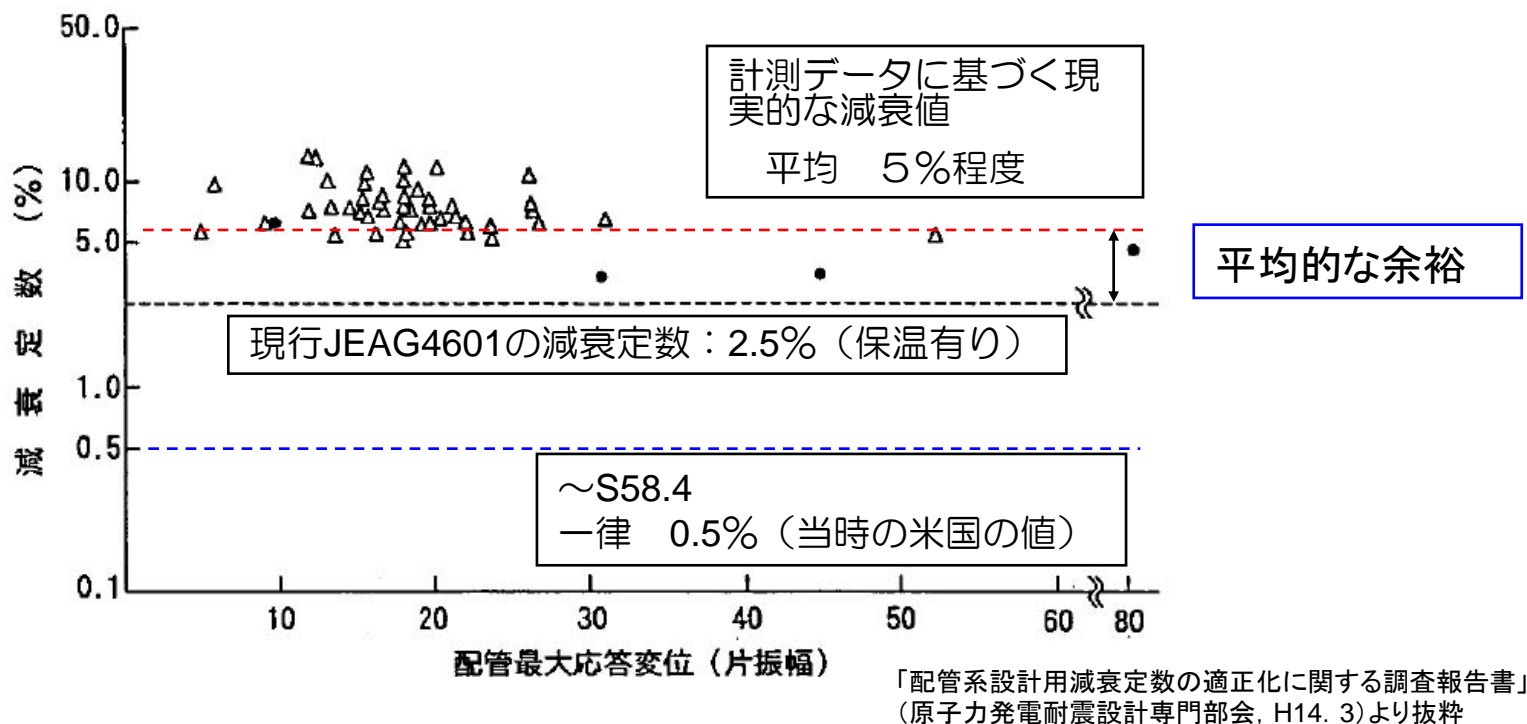


配管モデル (3次元) に入力
時刻歴解析

最大応力算出

減衰定数に関する説明

- 配管の減衰定数の例（配管区分 I：スナツバ主体，保温材あり）
 - JEAGで規定される減衰定数は計測データの下限值で定められている



解析モデルに関する説明

解析モデル

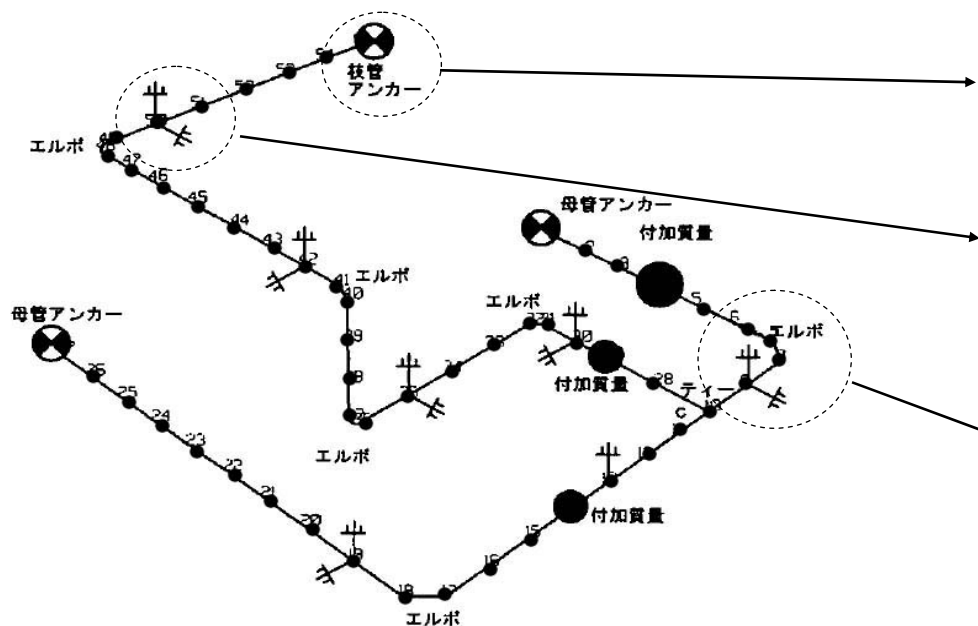
プラント建設に当たっては、設備数が膨大であるため、簡便な設計手法を採用している（配管系の例）

現行解析モデル

- 質点ばね系の簡易モデル
- サポートの剛性は一律標準剛性
- 機器取合い部固定点（アンカ）扱い

現実的な解析モデル

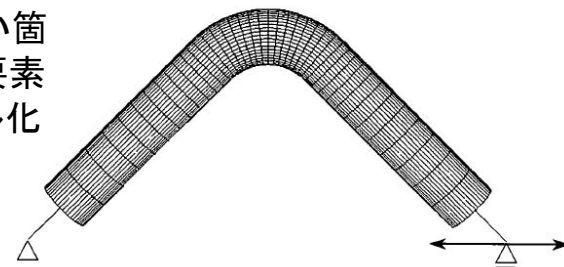
- シェル要素によるモデル化
- サポート個々の実剛性を反映
- 機器取合い部剛性を考慮



機器取合い部をアンカ(固定点)とせず、剛性を反映

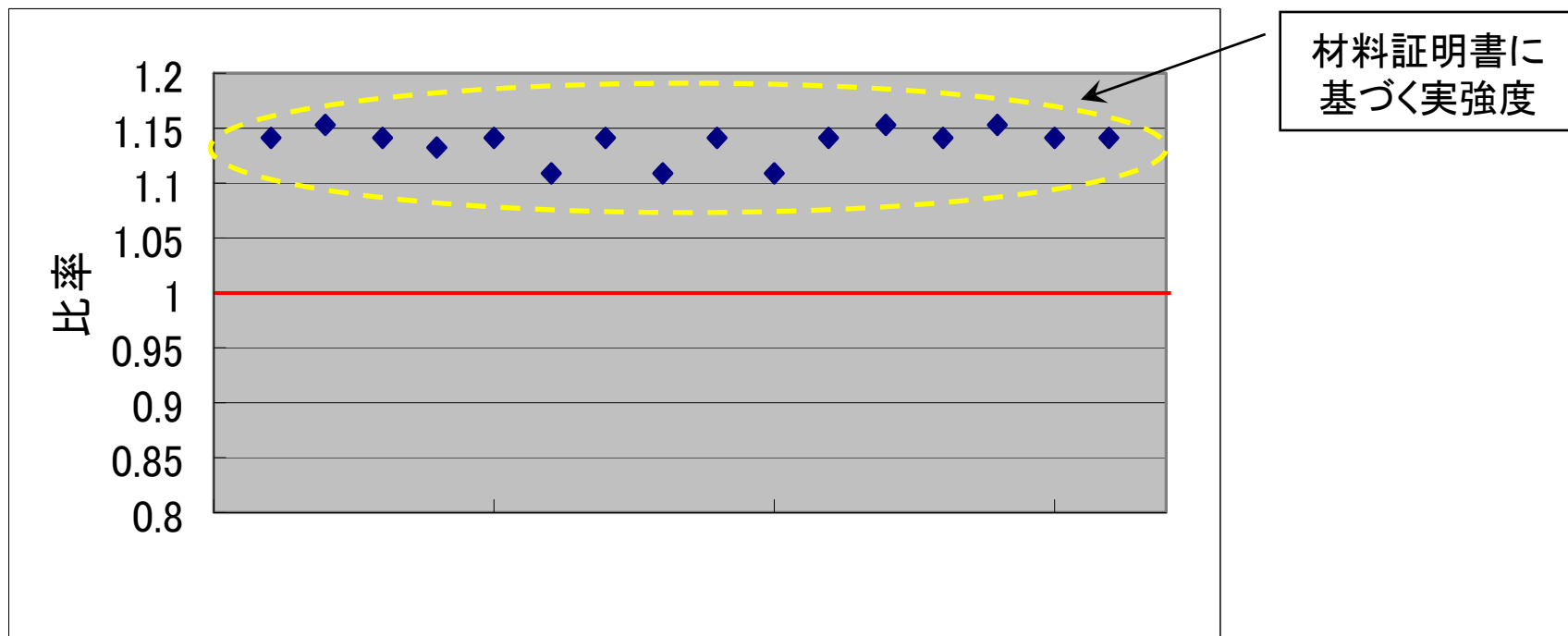
サポート剛性に一律標準値を用いず個々の実剛性を反映

応力の厳しい箇所はシェル要素によるモデル化



材料強度に関する説明

鋼材等は設計値を上回るように製作するために、部材の実強度は設計で用いる強度に対して保守性を確保



2F-4号機 原子炉压力容器基礎ボルト他の設計基準強度と実強度の比率

※2F4 原子炉压力容器基礎ボルト他材料試験成績表（抜粋）より作成

耐震設計裕度に関する実証試験



設計手法の確認試験体

試験時期	縮尺	試験体重量
2002年	1/1	約200[t]

✓試験体は耐震上重要な実機配管系の構造的特徴及び振動特性を模擬したもので、一般的な特徴を有する配管（200A、Sch40※¹）に水圧をかけた状態で加振して、配管の振動、曲がり部の変形、応力等を計測。

✓設計用基準地震動S2に対する許容応力及びそれを上回る応力※²を発生させる地震波で加振を行い、配管破損による漏水がないことを確認。

※¹ 配管用鋼管の肉厚に関する指標（JIS規格等）。200A、Sch40では肉厚8.2mm。

※² 許容応力の1.5～4倍以上となる加振試験を実施。

参考文献「多度津工学試験所の歴史と役割（財団法人 原子力発電機構）」

参考資料

応力に及ぼす地震力の影響について

耐震安全性評価（中間報告）における、福島第一4号機の発生応力について、評価基準値を100とした場合の荷重毎の発生応力の割合を以下に示す。

地震力の影響（1F-4）

評価対象設備	評価部位	考慮すべき荷重※1		発生応力※1	裕度※1
		地震力以外※2	地震力		
原子炉圧力容器	基礎ボルト	0	30	30	70
原子炉格納容器	ドライウェル	11	28	39	61
炉心支持構造物	シュラウド サポート	3	49	52	48
残留熱除去系ポンプ	基礎ボルト	0	47	47	53
残留熱除去系配管	配管本体	16	25	41	59
主蒸気系配管	配管本体	68	28	96	4

※1 許容応力を100とした場合の応力の割合(%)

※2 スクラム反力等の活荷重を含む

応力に及ぼす地震力の影響について

耐震安全性評価（中間報告）における、福島第一5号機の発生応力について、評価基準値を100とした場合の荷重毎の発生応力の割合を以下に示す。

地震力の影響（1F-5）

評価対象設備	評価部位	考慮すべき荷重※1			発生応力※1	裕度※1
		自重※2	圧力	地震力		
原子炉圧力容器	基礎ボルト	4	0	14	18	82
原子炉格納容器	ドライウェル	11	0	25	36	64
炉心支持構造物	シュラウド サポート	4	0	25	29	71
残留熱除去系ポンプ	基礎ボルト	2	0	13	15	85
残留熱除去系配管	配管本体	4	10	40	54	46
主蒸気系配管	配管本体	20	11	54	85	15

※1 許容応力を100とした場合の応力の割合(%)

※2 スクラム反力等の活荷重を含む

応力に及ぼす地震力の影響について

耐震安全性評価（中間報告）における、福島第二4号機の発生応力について、評価基準値を100とした場合の荷重毎の発生応力の割合を以下に示す。

地震力の影響（2F-4）

評価対象設備	評価部位	考慮すべき荷重※1			発生応力※1	裕度※1
		自重※2	圧力	地震力		
原子炉圧力容器	基礎ボルト	0	0	2	2	98
原子炉格納容器	ドライウェル	4	0	6	10	90
炉心支持構造物	シュラウド サポート	2	0	34	36	64
残留熱除去系ポンプ	基礎ボルト	0	0	1	1	99
残留熱除去系配管	配管本体	11	3	38	52	48
主蒸気系配管	配管本体	3	6	42	51	49

※1 許容応力を100とした場合の応力の割合(%)

※2 スクラム反力等の活荷重を含む