

①排気筒等の基礎ボルトの減肉を仮定した耐震安全性評価を行う構築物、系統及び機器に関する動的な評価について

【説明概要】

主排気筒等の機器付基礎ボルトの減肉に係る耐震安全性評価は、動的解析を含めて工事計画認可申請と同様の解析手法を用いており、基礎ボルトの減肉の影響は、基礎ボルトの応力計算において考慮している。

②排気筒等の経年劣化を考慮した耐震安全性評価における評価条件の裕度について

【説明概要】

排気筒基礎ボルトについて、地震時の発生応力がボルトの許容応力を上回るボルト呼び径を算出し、腐食量に対して10倍以上の裕度があることを確認した。

○高経年化を考慮した基礎ボルトの耐震安全性評価：評価対象

- ・「機器付基礎ボルト」は、設置される機器の床面(コンクリート)に埋設して設置されることから、機器が一旦設置されると、定期的に交換することは困難である。一方、配管やケーブルトレイを固定する際に使用される「後打ちアンカ」は機器付基礎ボルトに比して交換は容易である。
- ・このため、機器付基礎ボルトについては、60年時点を想定した腐食による耐震安全性評価が必要となる。以下に、機器付基礎ボルトの評価対象を整理している。

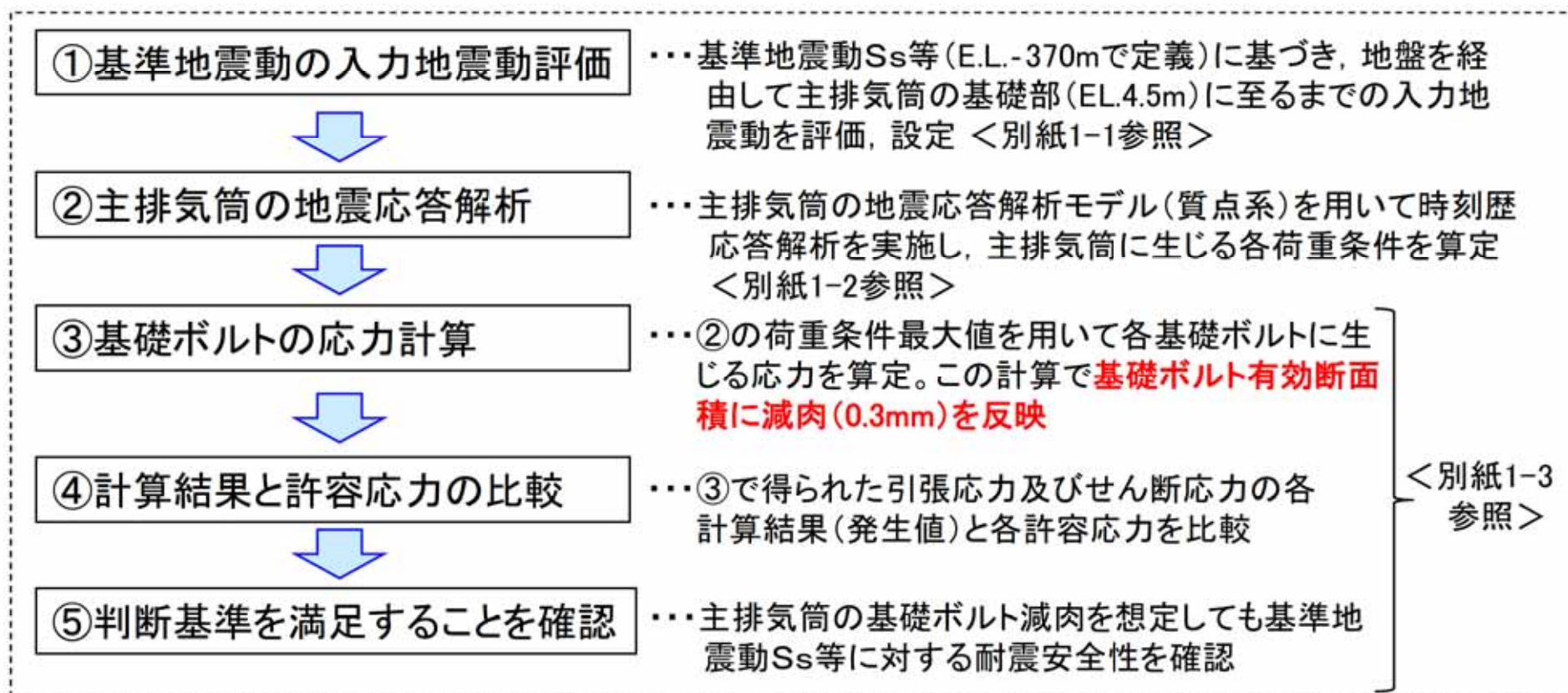
機器種別	機器付基礎ボルトの評価対象例
ポンプ	高圧炉心スプレイ系ポンプ, 残留熱除去系ポンプ 他
熱交換器	残留熱除去系熱交換器, 給水加熱器 他
ポンプモータ	残留熱除去系ポンプ 他
容器	ほう酸水注入系貯蔵タンク, 原子炉冷却材浄化系フィルタ脱塩器 他
タービン設備	主タービン, 原子炉隔離時冷却系タービン 他
計測制御設備	地震加速度計測装置
空調設備	非常用ガス再循環系排風機, 中央制御室換気系フィルタユニット 他
機械設備	非常用ディーゼル機関, 主排気筒 , 使用済燃料乾式貯蔵容器 他
電源設備	非常用ディーゼル発電機, 原子炉保護系MGセット

上記の評価対象に対して、**耐震安全性評価***を実施している。次頁より、**評価結果(発生応力と許容応力の比)**が最も厳しい**主排気筒**を代表として説明する。

* 対象設備に応じて耐震補強工事も前提としている。

○高経年化に伴う基礎ボルト等の減肉を考慮した耐震評価の流れ

- ・高経年化に伴う施設・設備の支持構造部位の減肉量はわずかであり(基礎ボルトの場合で0.3mm)、地震に対する応答(固有振動数等)に影響するものではないため、一般に、**地震応答解析までは工事計画認可申請書と同様に減肉を考慮しない評価**を行っている。
- ・これに続く耐震評価の計算は、設計時のものと同様に静的な評価式に基づき、**基礎ボルト等の支持構造部位の応力計算において、腐食による減肉影響を有効断面積の減少等で反映**している。
- ・例として、主排気筒の基礎ボルトの減肉を考慮した耐震評価の流れを以下に示す。



(2) 排気筒基礎ボルトの耐震評価に係る裕度の確認 (1/2)

- 従来実施している標準的な耐震評価手法としては、評価部材の許容応力と地震により評価部材に作用する発生応力を比較し、発生応力が許容応力を下回ることを確認している。
- 本評価では、主排気筒の基礎ボルトについて、発生応力が許容応力を上回る際のボルトの呼び径を算出し、想定している腐食量(0.3mm)と比較して裕度のあることを確認するものである。

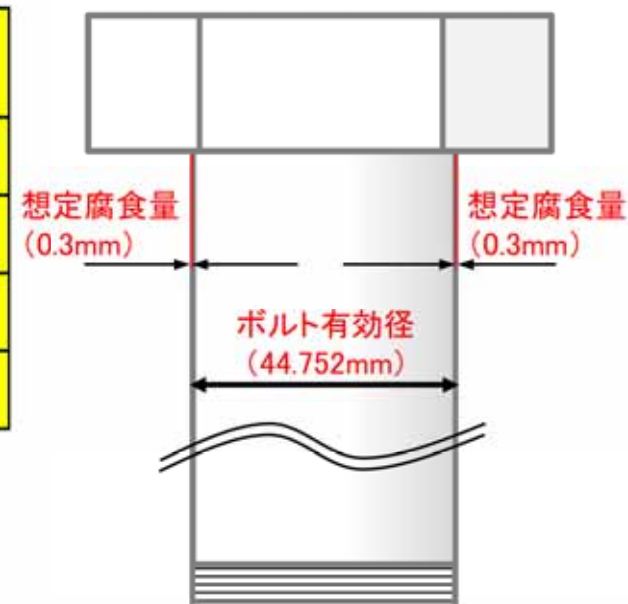
(1) 劣化状況評価時の評価結果

排気筒基礎ボルト(筒身脚部, 鉄塔脚部, 補助鉄塔脚部)の耐震評価結果を表-1に示す

表-1 排気筒基礎ボルト(筒身脚部, 鉄塔脚部, 補助鉄塔脚部)の耐震評価結果

評価部位	応力種別	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	応力比
筒身脚部基礎ボルト	引張	257	324	0.80
	せん断	12	187	0.07
鉄塔脚部基礎ボルト	引張	92	236	0.39
補助鉄塔脚部基礎ボルト	引張	164	490	0.34

計算を実施するにあたり、JIS規格に規定される使用ボルト(M48)に基づき、ボルト径は有効径(44.752mm)としている。



排気筒基礎ボルト(M48)
イメージ

(2) 排気筒基礎ボルトの耐震評価に係る裕度の確認 (2/2)

(2) 排気筒の基礎ボルトにおける発生応力が許容応力を上回る際のボルト径の算出

表-1のうち、応力比の大きい排気筒基礎ボルト(筒身脚部)の引張荷重が作用した際に、**許容応力を上回るボルト径を算出**する。

算出にあたっては、劣化状況評価における発生応力の算出に使用した算出式に許容応力 $\sigma_t = 324\text{MPa}$ としてボルト径 d_2 を算出する。

$$\sigma_t = \frac{T}{A_s} \quad 324 = \frac{367.9}{A_s} \quad \sigma_t: \text{引張応力} = 324\text{MPa}$$

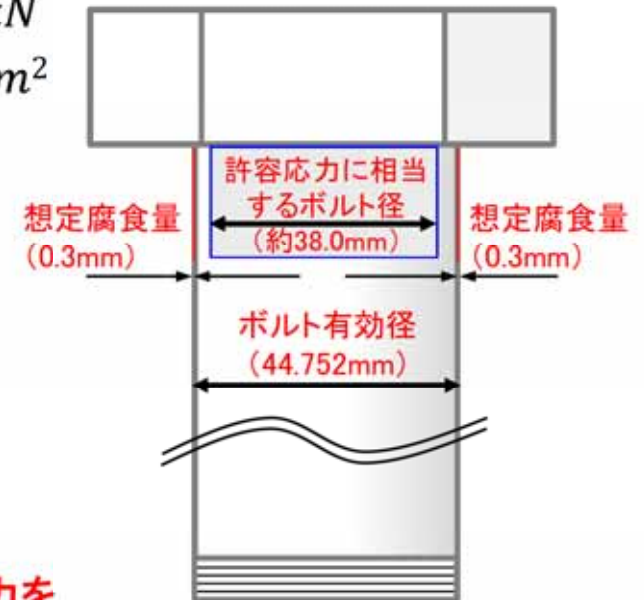
T : ボルト引抜力 = 367.9 kN
 A_s : 有効断面積 = 1135 mm²

$$A_s = \frac{367.9 \times 10^3}{324} = 1.135493 \dots \times 10^3 = 1135\text{mm}^2$$

$$A_s = \frac{\pi}{4} d_2^2 \quad 1135 = \frac{\pi}{4} d_2^2$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \times 1135}{\pi}} = 38.014 \dots$$

計算結果より、ボルト径が約38.0mmを下回ると、発生応力が許容応力を上回り、ボルトが折損する可能性があるが、ボルトの有効径(44.752mm)と想定腐食量(0.3mm)の関係から、腐食量には10倍以上の裕度があることを確認した。



排気筒基礎ボルト(M48)
許容応力限界イメージ

主排気筒の耐震クラスはCクラスに分類されるが、耐震Sクラスである非常用ガス処理系排気筒を支持していることから、主排気筒の筒身、鉄塔及び基礎部は設計基準対処施設において、「Sクラスの施設の間接支持構造物」に分類され、設置変更許可の基準地震動により定まる地震力での機能維持が求められる。

そのため、高経年化技術評価を行うにあたり、各機器の耐震重要度に応じて以下のとおり選定している。

耐震重要度	評価用地震力
Sクラス	基準地震動 S_s により定まる地震力(以下、 S_s 地震力という)
	弾性設計用地震動 S_d により定まる地震力とSクラスの機器に適用される静的地震力のいずれか大きい方(以下、「弾性設計用地震力」という)
Bクラス	Bクラスの機器に適用される静的地震力
Cクラス	Cクラスの機器に適用される静的地震力

耐震Bクラスについては、支持構造物の振動と共振のおそれのあるもの(柔の設備であるもの)については、静的地震力の他に弾性設計用地震動 S_d による地震力の1/2についても考慮している。

主排気筒の各基礎ボルトについて、評価結果を示す。

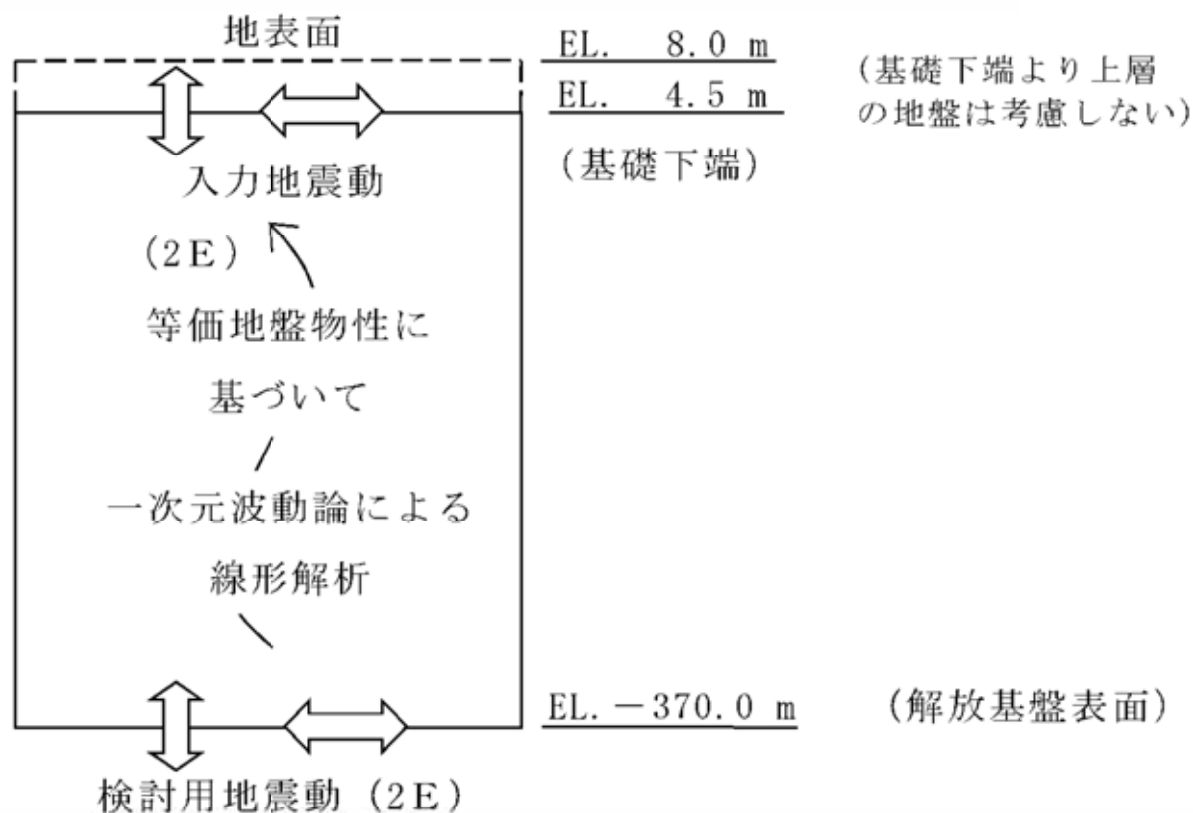
【評価結果】

引張、せん断ともに発生応力は許容応力を下回る結果となった。

（計算過程は別紙 1 - 1 ~ 3 に示す。）

評価部位		発生応力 (MPa)		許容応力 (MPa)
①筒身脚部基礎ボルト	引張	257	<	324
	せん断	12	<	187
②鉄塔脚部基礎ボルト	引張	92	<	236
③補助鉄塔脚部基礎ボルト	引張	164	<	490

- 主排気筒の上部構造物への入力地震動は、基準地震動 S_s 及び S_d (EL. -370m) をもとに、一次元波動論による等価線形解析により、地盤の各高さの物性値を用いて、主排気筒の基礎下端 (EL. 4.5m) への露頭波として求め、**上部構造物への入力地震動として設定する。**
- この解析では、**主排気筒の構造等は考慮していない。**

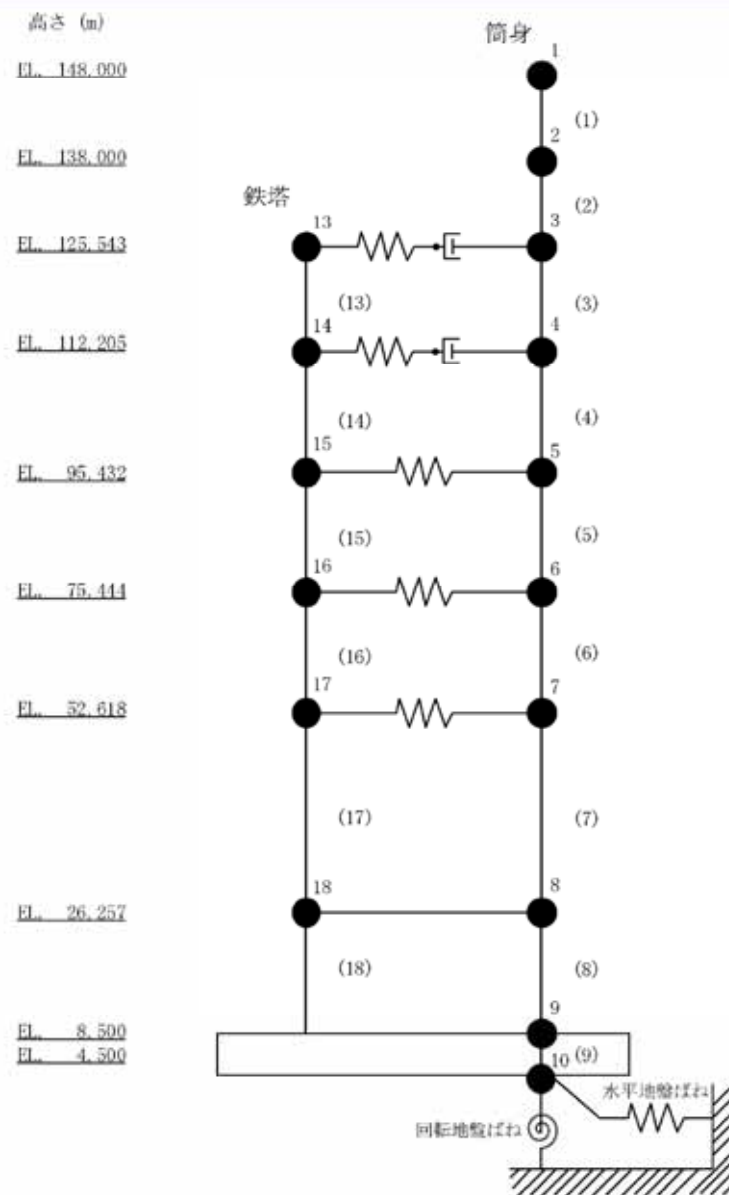


主排気筒上部構造物への入力地震動の評価の概要

- 主排気筒の地震応答解析は、**主排気筒の筒身及び鉄塔を軸変形（曲げ変形とせん断変形）**をする質点系としてモデル化する。*
- 主排気筒の時刻歴応答解析による動的解析として、解析モデルに入力地震動の時々刻々の加速度を与えて地震期間中の主排気筒の応答を計算し、**主排気筒各部位に加わる最大の引き抜き力、曲げモーメント、水平力等**を評価する。
- 本解析では主排気筒の基礎部を含めてモデル化しているが、**基礎ボルトのベースプレートとの隙間部の減肉を想定しても、固定状態及び固有振動数に影響を与えることはなく、基礎ボルトの減肉は解析上考慮していない。**
(別紙3参照)

* 解析モデルは、主排気筒の構造について、主排気筒の各高さに応じて、質点重量、せん断断面積、断面二次モーメント等をモデル化して評価を行う。

- ・ 入力地震動の入力部には、杭-地盤系との相互作用を表す地盤ばねを基礎下端位置に配置する。
- ・ 筒身及び鉄塔については、それぞれを連結するオイルダンパに減衰係数、弾塑性ダンパに弾塑性係数を考慮している。



主排気筒の地震応答解析モデル（水平方向）

筒身補強脚部基礎ボルトの評価手法及び評価結果は、以下のとおり。

1. 荷重条件

工事計画の「主排気筒の耐震性についての計算書」における機能維持検討時に発生する部材力の各成分の最大値を適用する。

引抜き力	$N_t = 17000 \text{ kN}$ 荷重ケース: S_S 波設計用荷重
曲げモーメント	$M = 5812 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 荷重ケース: S_S 波設計用荷重
水平力	$H = 1089 \text{ kN}$ 荷重ケース: S_S 波設計用荷重

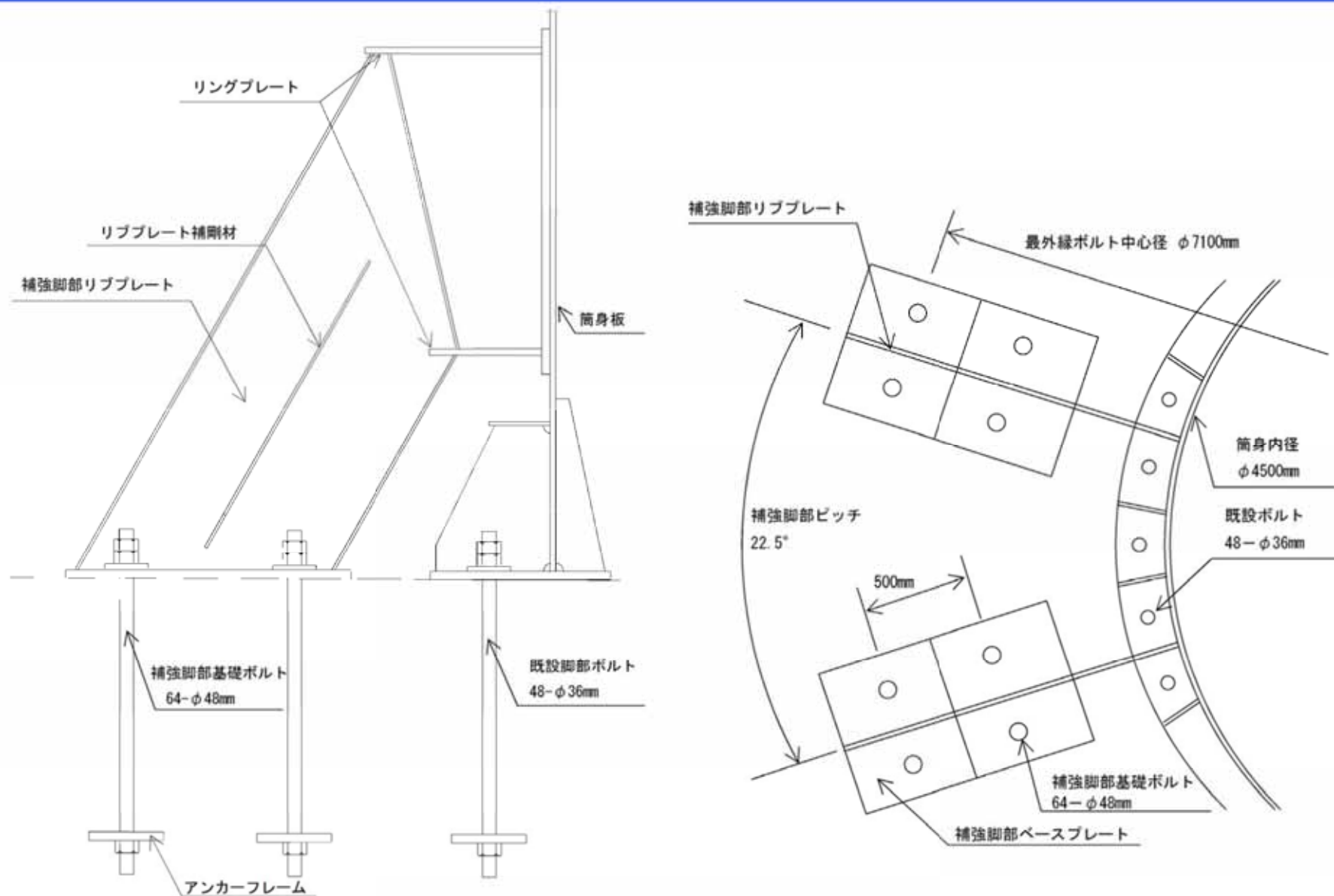
2. 算出過程

- a. 筒身補強脚部基礎ボルトの水平力に対する検討
・ボルト1本に作用するせん断力

ボルト本数 $n = 64$ 本

ボルトせん断力

$$Q = \frac{H}{n} = \frac{1089}{64} = 17.01562 \dots \rightarrow 17.0 \text{ kN}$$



筒身補強脚部概略図

論点No.180,181-11

・基礎ボルトの諸元

サイズ:M48, 材質:490材相当

有効断面積 $A_s = 1433 \text{ mm}^2$

(JIS B 1082:2009 ねじの有効断面積及び座面の負荷面積, JIS B 0205-4:2001 一般用メートルねじ第4部:基準寸法より)

$$\begin{aligned}
 A_s &= \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2 \\
 &= \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{(44.752 - 0.6) + 41.26531}{2} \right)^2 \\
 &= 1432.59262 \dots \rightarrow 1433 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_3 &= d_1 - \frac{H}{6} = (42.587 - 0.6^*) - \frac{0.866025 \times 5}{6} \\
 &= 41.26531 \dots \text{ mm} \quad \text{※想定腐食量} 0.3\text{mm} \times 2 = 0.6\text{mm} \text{ (直径)}
 \end{aligned}$$

設計基準強度

$$F = 324.5 \text{ N/mm}^2$$

(基準強度 × 1.1倍 (建設省告示第2464号第3より))

許容せん断応力(機能維持)

$$\begin{aligned}
 f_s &= \frac{F}{\sqrt{3}} = \frac{324.5}{\sqrt{3}} \\
 &= 187.35016 \dots \rightarrow 187 \text{ N/mm}^2 \text{ (MPa)}
 \end{aligned}$$

論点No.180,181-12

・ボルトに作用するせん断応力度

$$\tau = \frac{Q}{A_s} = \frac{17.0 \times 10^3}{1433}$$

$$= 11.86322 \dots \rightarrow 12 \text{ N/mm}^2 (\text{MPa})$$

b. 筒身補強脚部基礎ボルトの引張力に対する検討

・ボルト1本に作用する引抜力

補強脚部は十分剛とし、ボルトは鉛直力を等負担させるものとする。

ボルト本数

$$n = 64 \text{ 本}$$

$$T_v = \frac{N_t}{n} = \frac{17000}{64} = 265.625 \rightarrow 265.6 \text{ kN}$$

曲げモーメントによる引抜は、外側ボルト群からなる有効断面より算出する。

有効断面係数

$$Z = 8.141 \times 10^7 \text{ mm}^3$$

$$T_b = \frac{(M \cdot A_s)}{Z} = \frac{5812 \times 1433}{8.141 \times 10^7} \times 10^3 = 102.30433 \dots \rightarrow 102.3 \text{ kN}$$

ボルト引抜力

$$T = T_v + T_b = 265.6 + 102.3 = 367.9 \text{ kN}$$

・基礎ボルトの諸元

サイズ	M48
ボルト本数	$n = 64$ 本
材質	490材相当
有効断面積	$A_1 = 1433 \text{ mm}^2$
設計基準強度	$f_t = F = 324.5 \text{ N/mm}^2$
(基準強度 $\times 1.1$ 倍 (建設省告示第2464号第3より))	

許容引張応力度(機能維持)

$$\begin{aligned} f_{ts} &= \min[f_t, 1.4f_t - 1.6\tau] \\ &= \min[324.5, 1.4 \times 324.5 - 1.6 \times 12] \\ &= 324.5 \rightarrow 324 \text{ N/mm}^2 (\text{MPa}) \end{aligned}$$

・ボルトに発生する引張応力度

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \frac{T}{A_s} = \frac{367.9 \times 10^3}{1433} \\ &= 256.73412 \dots \rightarrow 257 \text{ N/mm}^2 (\text{MPa}) \end{aligned}$$

1. 荷重条件

工事計画認可の「主排気筒の耐震性についての計算書」より、電算アウトプットの支点反力を座標変換して、鉄塔脚部垂直反力の向きと支柱脚部の軸方向とを一致させ、座標変換後の垂直反力と水平反力の最大値により脚部の検討を行う。なお、水平力は刃型プレートで受けるため、引抜に対してのみ評価する。

最大引張力 $T N_T = 4807 \text{ kN}$ S_S 波設計用荷重 斜め方向

2. 算出過程

a. 鉄塔脚部基礎ボルトの引張力に対する検討

・基礎ボルト諸元

サイズ M64

ボルト本数 $n = 20$ 本

材質 SS400

有効断面積 $A_1 = 2621 \text{ mm}^2$

(JIS B 1082:2009 ねじの有効断面積及び座面の負荷面積, JIS B 0205-4:2001 一般用メートルねじ 第4部:基準寸法より)

$$\begin{aligned}
 A_S &= \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2 \\
 &= \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{(60.103 - 0.6^{**}) + 56.03897}{2} \right)^2 \\
 &= 2621.26228 \dots \rightarrow 2621 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$d_3 = d_1 - \frac{H}{6} = (57.505 - 0.6^{\ast}) - \frac{0.866025 \times 6}{6}$$

$$= 56.03897 \dots \text{ mm}$$

※想定腐食量 $0.3\text{mm} \times 2 = 0.6\text{mm}$ (直径)

設計基準強度

$$F = 236.5 \text{ N/mm}^2$$

(基準強度 $\times 1.1$ 倍 (建設省告示第2464号第3より))

許容引張応力度 (機能維持)

$$f_t = F = 236.5 \rightarrow 236 \text{ N/mm}^2 (\text{MPa})$$

・ボルトの引張に対する検討

ボルト1本に作用する引抜力

主柱引抜力

$${}_T N_T = 4807 \text{ kN}$$

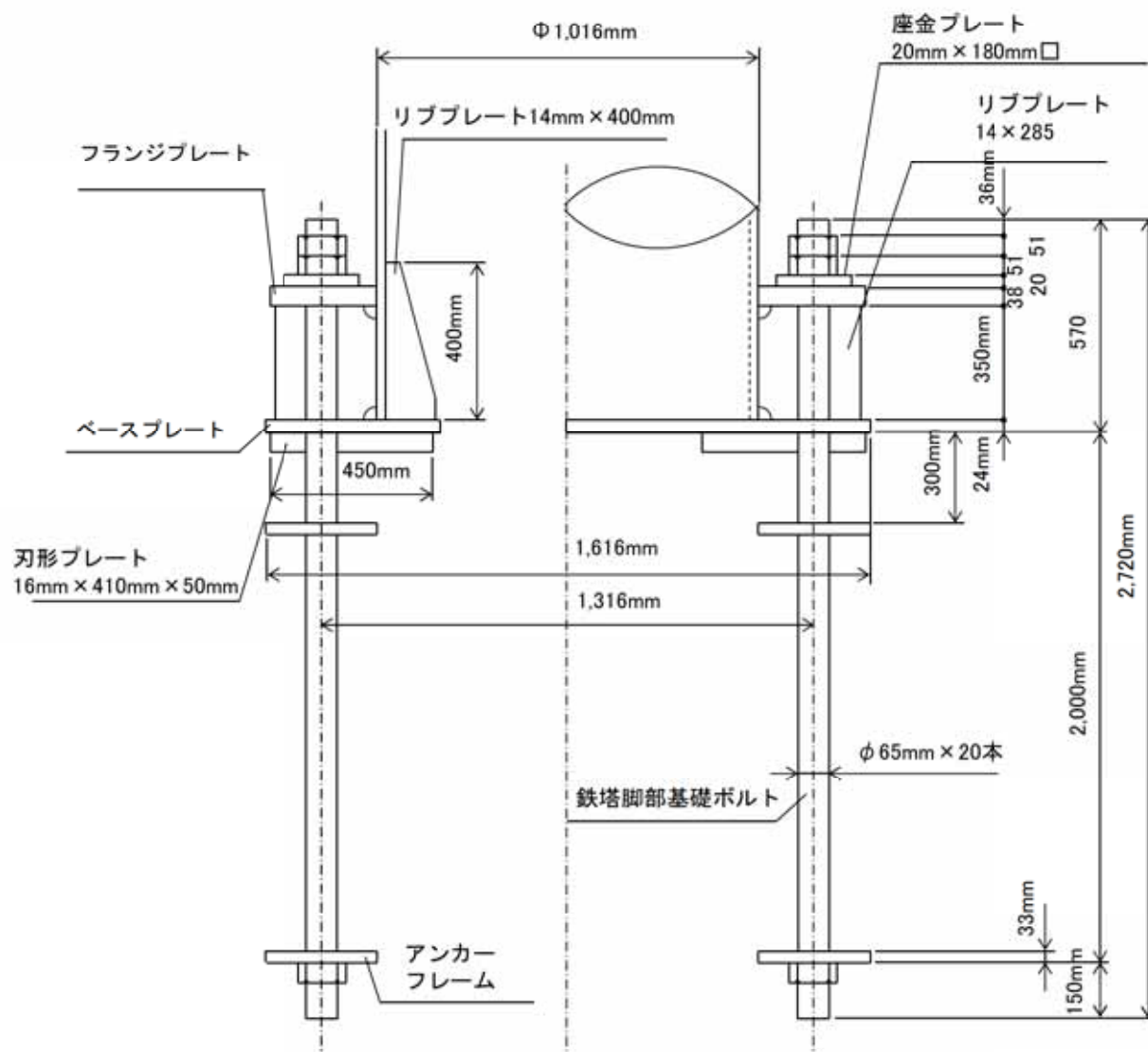
ボルト引抜力

$$T = \frac{{}_T N_T}{n} = \frac{4807}{20} = 240.35 \rightarrow 240.4 \text{ kN}$$

ボルトに作用する引張応力度

$$\sigma_t = \frac{T}{A_1} = \frac{240.4}{2621} \times 10^3$$

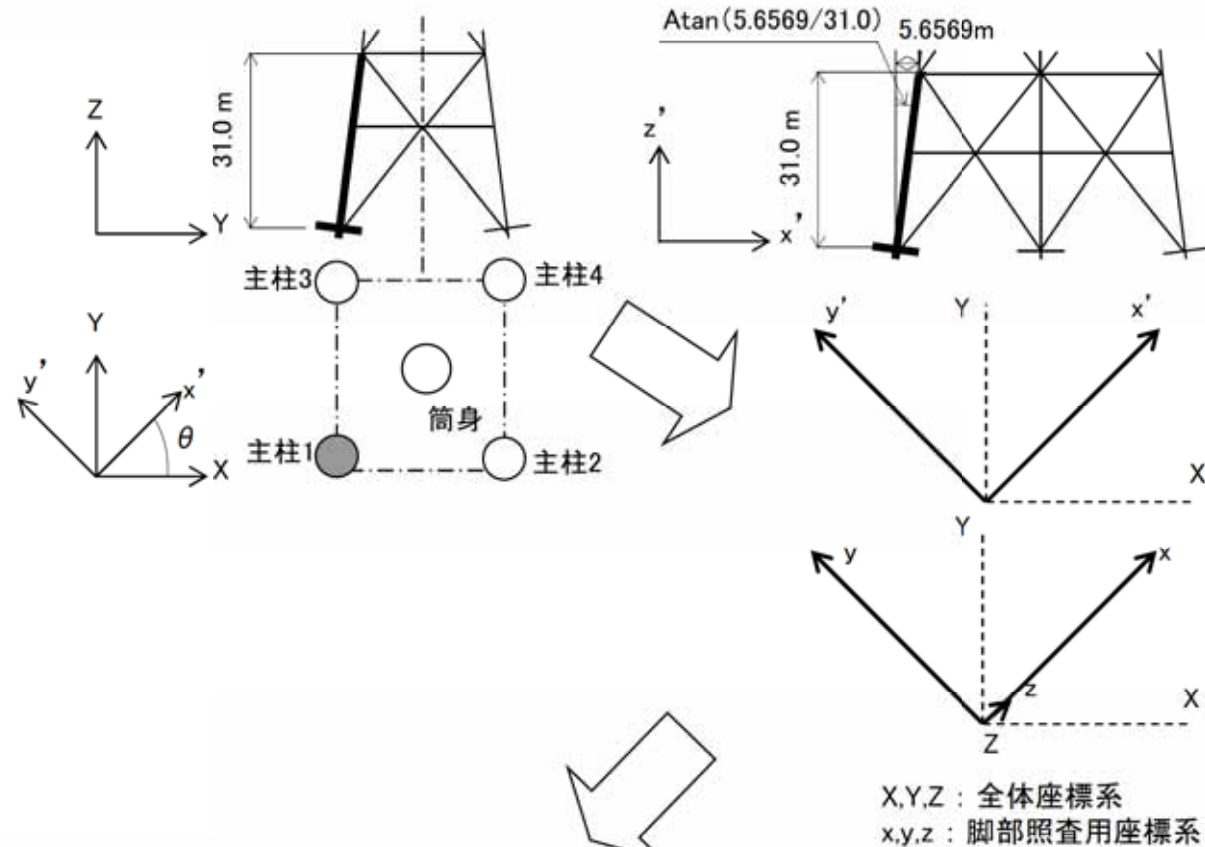
$$= 91.72071 \dots \rightarrow 92 \text{ N/mm}^2 (\text{MPa})$$



鉄塔脚部概略図

論点No.180,181-17

下図のように主柱脚部の軸方向と全体座標系のZ方向は一致していないため、主柱1の電算反力をZ軸周りに $\theta = 45^\circ$ ，新しいY軸(y')周りに $\phi = 10.3416^\circ$ 回転する。



回転行列

電算反力 照査用反力

$$\begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & \cos \phi \sin \theta & -\sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ \sin \phi \cos \theta & \sin \phi \sin \theta & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} RX \\ RY \\ RZ \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Rx \\ Ry \\ Rz \end{Bmatrix}$$

1. 荷重条件

工事計画認可の「主排気筒の耐震性についての計算書」における機能維持検討時に発生する部材力の各成分の最大値を用いて検討を行う。設計荷重は、以下に示す荷重により、補助鉄塔脚部の検討を行う。なお、水平力は刃型プレートで受けるため、引抜に対してのみ評価する。

最大引張力 $T N_T = 7525 \text{ kN}$ S_S 波設計用荷重 斜め方向 算出過程

2. 算出過程

a. 補助鉄塔脚部基礎ボルトの引抜きに対する検討

・基礎ボルトの諸元

サイズ	M64	
ボルト本数		$n = 20$ 本
材質		700材相当
有効断面積		$A_1 = 2621 \text{ mm}^2$
設計基準強度		$F = 490.0 \text{ N/mm}^2$
<u>許容引張応力度(機能維持)</u>		$f_t = F = 490.0 \text{ N/mm}^2 \text{ (MPa)}$
ボルト偏心距離		$\ell = 50 \text{ mm}$

・ボルトの引張に対する検討
ボルト1本に作用する引抜力

$${}_T N_T = 7525 \text{ kN}$$

鉛直力

$$T_V = \frac{{}_T N_T}{n} = \frac{7525}{20} = 376.25 \rightarrow 376.3 \text{ kN}$$

ボルト孔ピッチ円中心と部材軸の偏心から生じる曲げによる引抜は、ボルト群からなる有効断面より算出する。

有効断面係数

$$Z = 1.857 \times 10^7 \text{ mm}^3$$

$$\begin{aligned} T_b &= \frac{({}_T N_T \cdot \ell \cdot A_1)}{Z} \\ &= \frac{7525 \times 0.05 \times 2621}{1.857 \times 10^7} \times 10^3 \\ &= 53.10453 \dots \rightarrow 53.1 \text{ kN} \end{aligned}$$

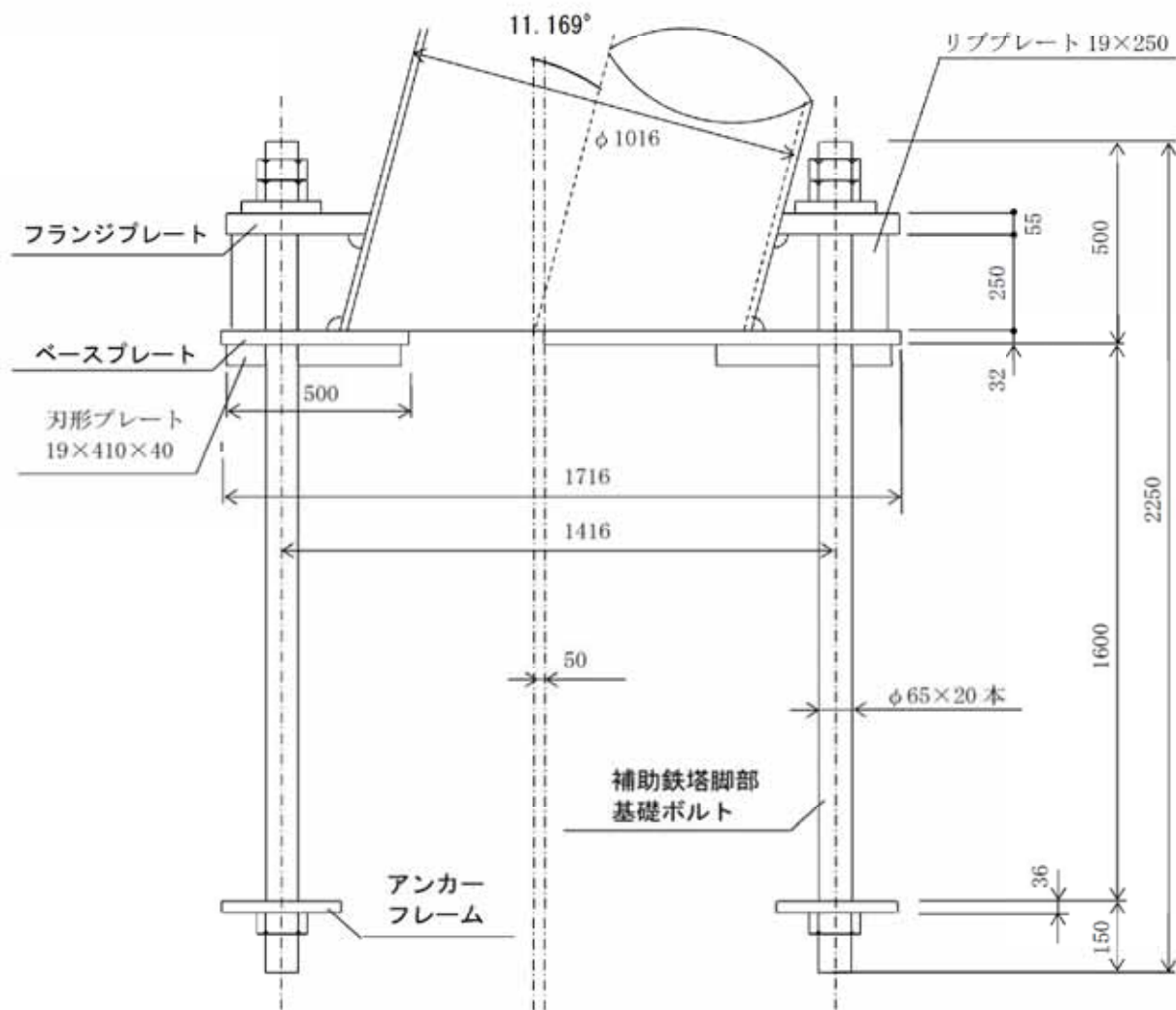
ボルト引抜力

$$T = T_V + T_b = 376.3 + 53.1 = 429.4 \text{ kN}$$

ボルトに作用する引張応力度

$$\sigma_t = \frac{T}{A_1} = \frac{429.4}{2621} \times 10^3$$

$$= 163.83059 \dots \rightarrow 164 \text{ N/mm}^2 (\text{MPa})$$



注：特記なき寸法は (mm) を示す。

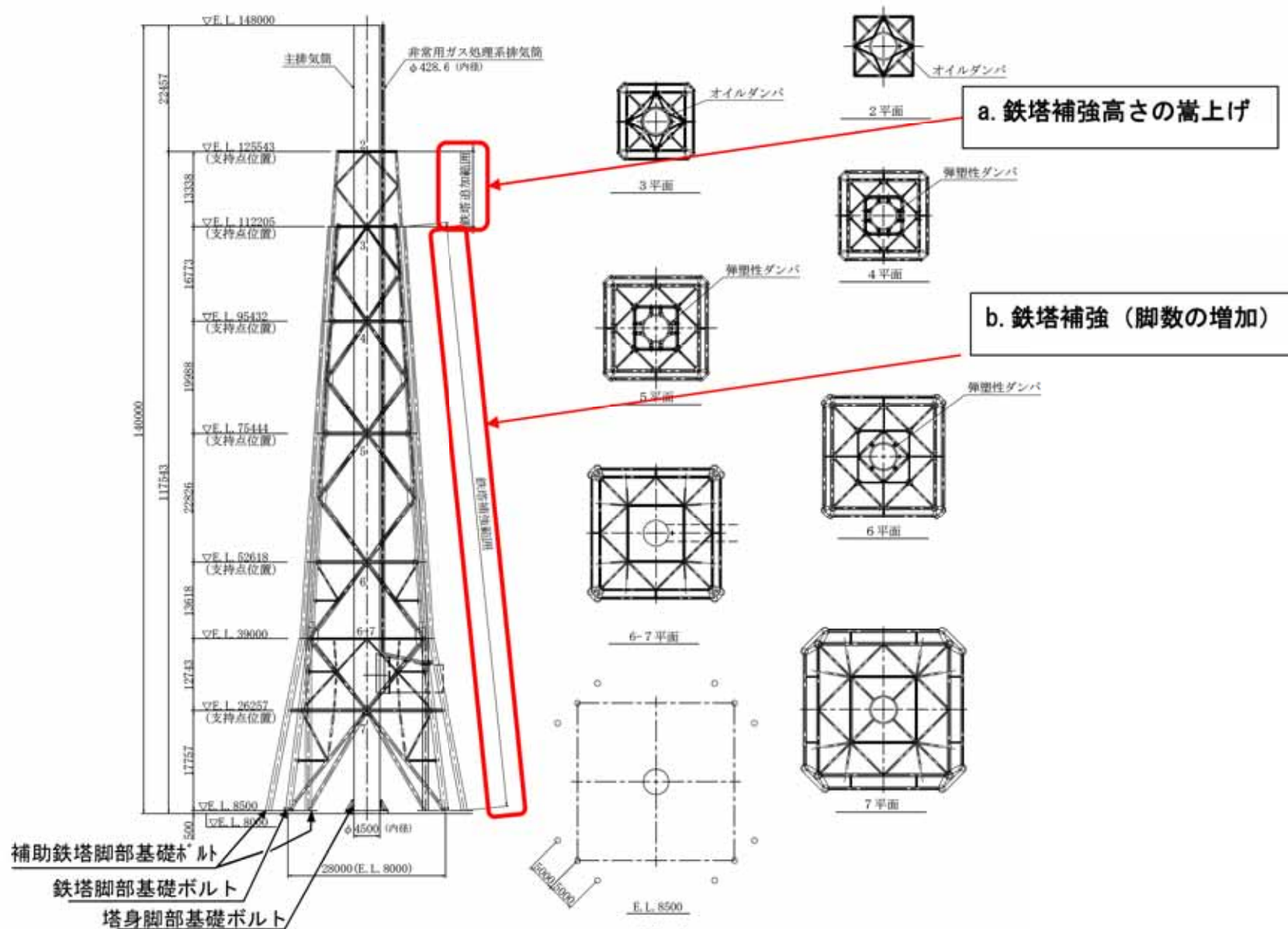
補助鉄塔脚部概略図

論点No.180,181-21

東海第二発電所の主排気筒は、中央の内径4.5m、高さ140mの筒身にかかる水平力を周囲の根開き28m、高さ104.205m(EL.112.205m)の鋼管トラスの4脚鉄塔を補強して支える構造であり、工事計画における耐震評価に伴う以下の耐震補強を予定している。

- a. 鉄塔補強高さの嵩上げ(主柱の延伸)
- b. 鉄塔補強(脚数の増加。高さ104.205m以下において8脚増加。)
- c. 基礎梁の増強, 鋼管杭の増設

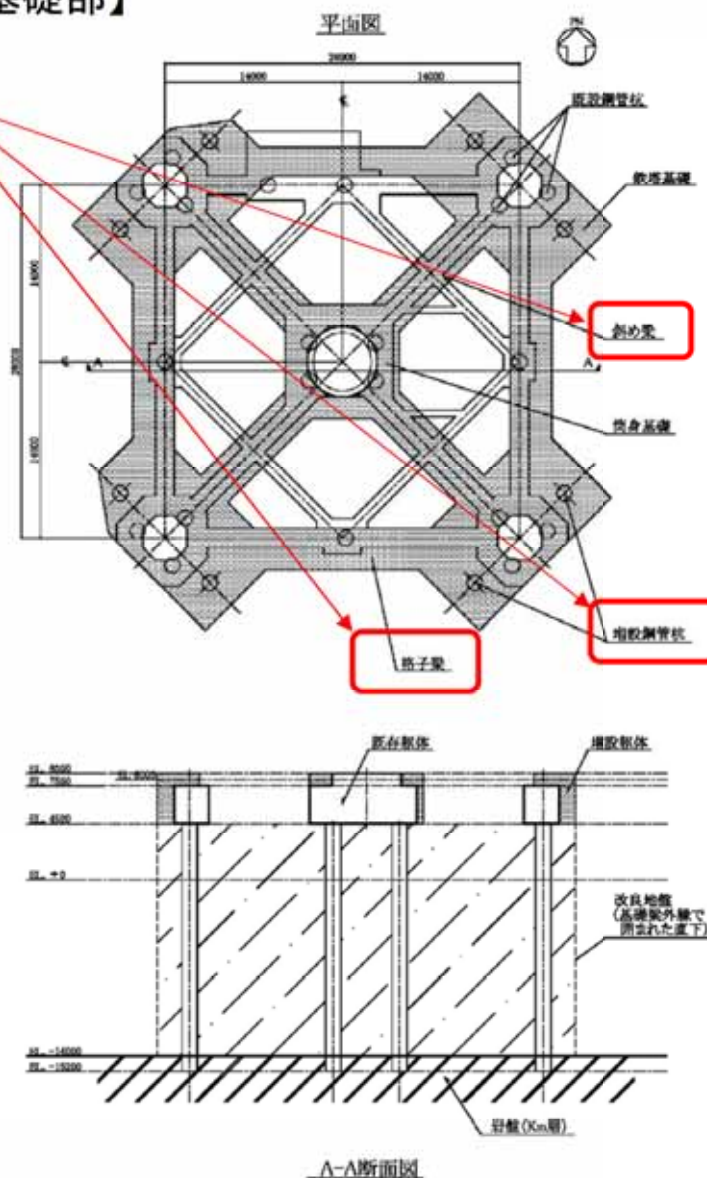
工事計画による耐震補強概要図【鉄塔部】



論点No.180,181-23

工事計画認可による耐震補強概要図【基礎部】

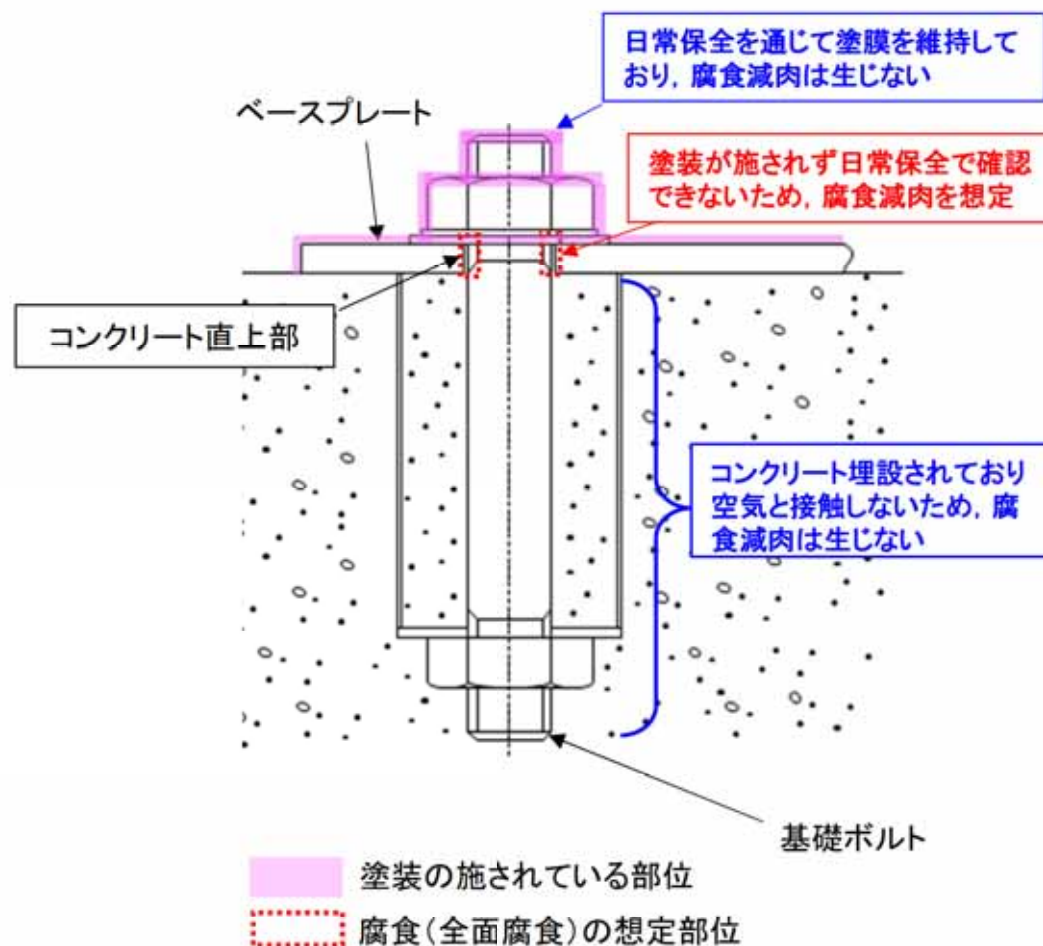
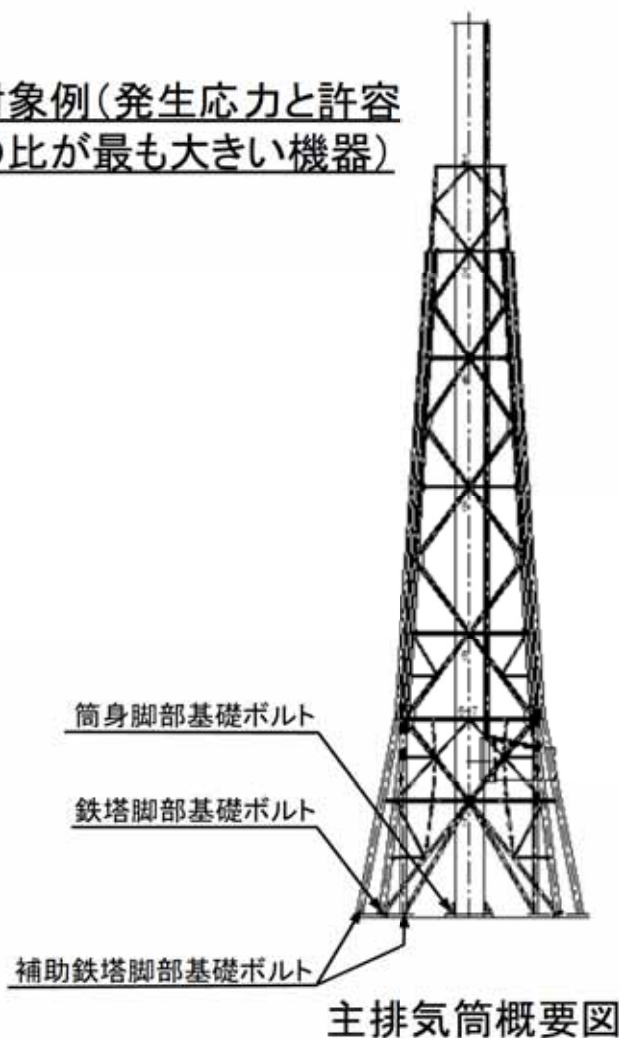
c. 鉄塔補強高さの嵩上げ



○目的

機器を確実に固定している基礎ボルトに腐食(全面腐食)による減肉が発生した場合、地震発生時に機器を固定できず機器の損傷に至る可能性がある。そのため、基礎ボルトに腐食減肉を仮定した上で、地震で発生する応力を考慮しても、材料の許容限界に至ることなく健全であることを確認する。

評価対象例(発生応力と許容応力の比が最も大きい機器)



基礎ボルト概要図

【論点No.180】

排気筒等の基礎ボルトの減肉を仮定した耐震安全性評価を行う構造物、系統及び機器に関する動的な評価について

【委員からの指摘事項等】

No.168

指摘事項等・県民意見に下線を記載
対応する資料頁数等を 内に記載

排気筒をサポートするボルトの腐食による減肉等を考慮した上で耐震安全性を評価する場合、固有の振動数等、いろいろ考慮して動的に評価されているか。その際、評価する計算モデルは設計時と現在で同じか。

【論点No.181】

排気筒等の経年劣化を考慮した耐震安全性評価における評価条件の裕度について

【委員からの指摘事項等】

No.169

どの程度まで腐食が進むと排気筒は倒れるか等を示した上で、それに対しどの程度余裕があるかを示した方がわかりやすいのではないか。 P.4-5

指摘事項等・県民意見に下線を記載
対応する資料頁数等を 内に記載

①耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象抽出の際の振動応答特性上「軽微若しくは無視」できるか否かの具体的な判断基準・判断方法について

【説明概要】

耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象抽出の際の振動応答特性上「軽微若しくは無視」できるか否かの判断基準・判断方法は、経年劣化事象の進行による影響が剛性のある部位に対し十分小さい等を考慮し、耐震安全上『軽微若しくは無視』すると評価した。

②運転開始後60年時点における経年劣化状況を踏まえた耐震評価及びその保守性について

【説明概要】

経年劣化状況を踏まえた耐震評価として、経年劣化の影響が無視できない事象として、低サイクル疲労、中性子照射脆化、照射誘起型応力腐食割れ、熱時効、応力腐食割れ、腐食(全面腐食)及び腐食(流れ加速型腐食)を抽出し、それぞれ耐震評価を行い、運転開始後60年時点でも健全性を確保していることを確認している。

各耐震評価の保守性として、運転サイクル中の原子炉スクラム等で生じる疲労回数を実績の1.5倍見込む、各設備に与える地震加速度を評価値の1.5倍する、等の保守性を確保した評価を行っている。

③配管に係る高経年化対策及び経年劣化を考慮した耐震評価の網羅性、保守性について

【説明概要】

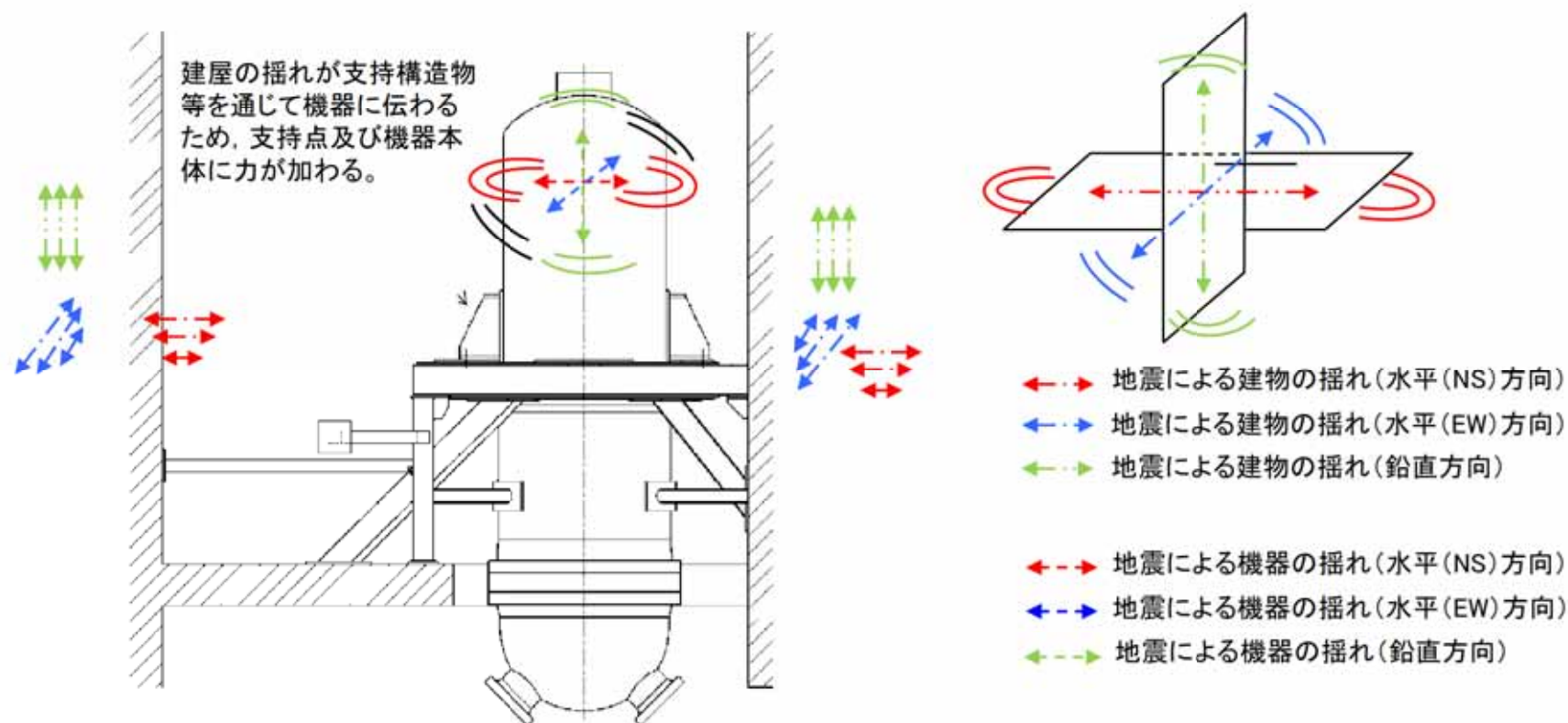
配管(溶接部を含む)に係る耐震安全上考慮すべき経年劣化事象として、配管の疲労割れ及び流れ加速型腐食を抽出し、経年影響及び地震影響に保守性を考慮した耐震評価を行い、耐震安全性に問題のないことを確認している。

①耐震評価の概要

地震が発生した際、発電所内に設置された機器には建屋の床・壁を通じて揺れが生じ、揺れによる力(発生応力)がかかる。

地震動が大きい程、機器に生じる揺れ(発生応力)が大きくなり、機器が持つ耐力(許容応力)を超過すると、機器が損傷する可能性がある。

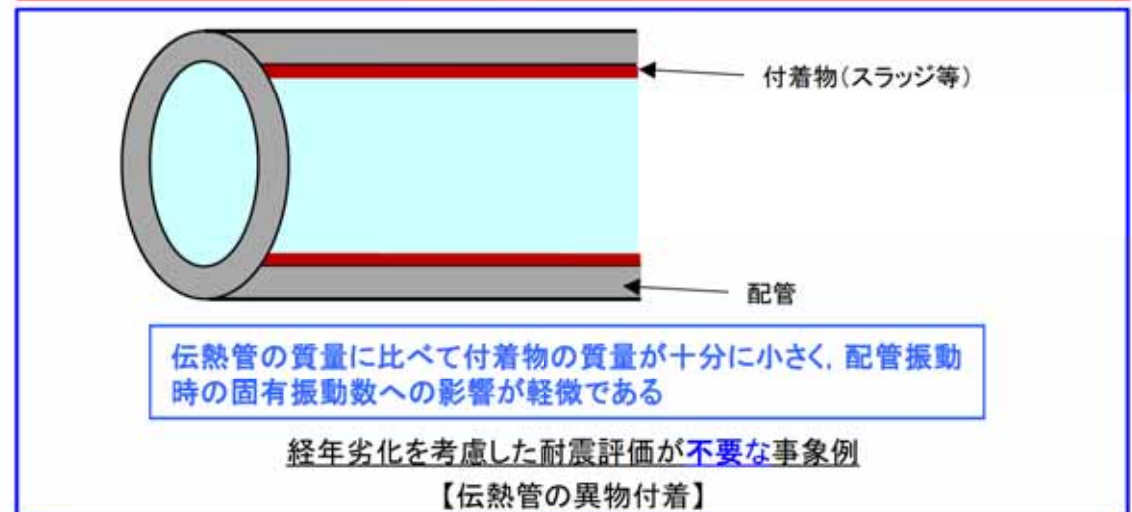
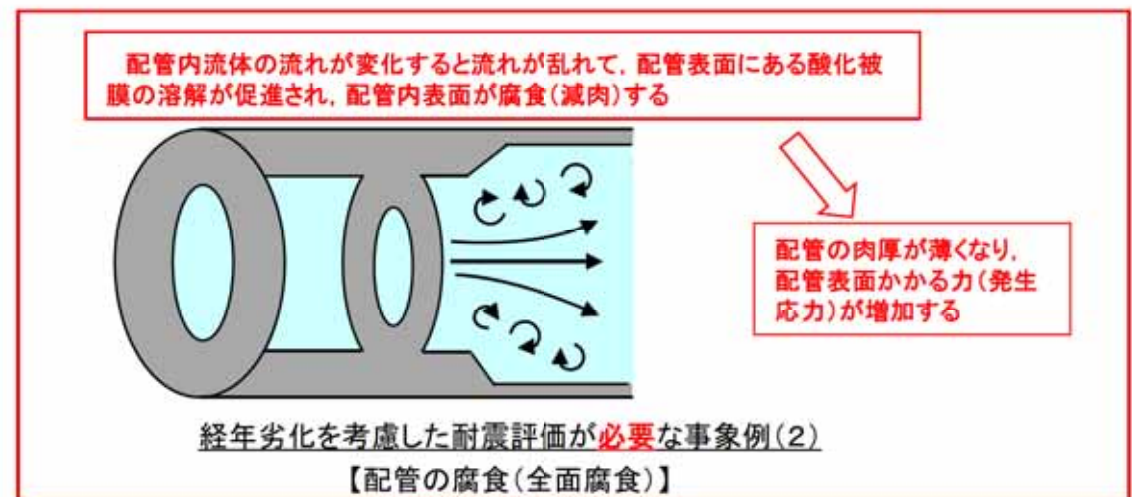
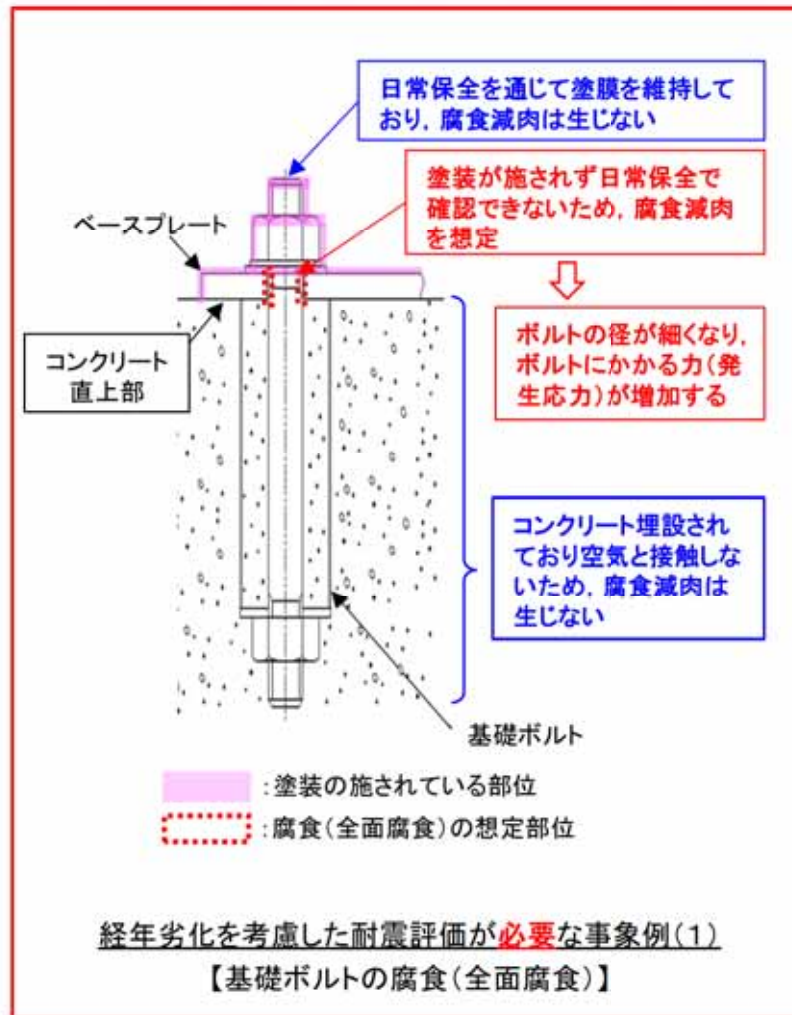
このため、実際の地震時の揺れ(地震力)の伝わり方を考慮して、機器の設置される階層ごとに機器の重要度に応じて設定される地震力(考慮する地震の揺れについては、実際と同様に鉛直及び水平方向の揺れを想定)に対して耐え得る構造であることを設計段階で確認している。



(1) 高経年化技術評価における耐震健全性評価の概要

② 経年劣化事象を考慮した耐震評価

設計段階での耐震評価から、各機器に想定される経年劣化事象のうち、定期的な点検・補修等通常の保全活動における状態維持が困難な経年劣化事象で、耐震評価を行うにあたって発生応力が上昇し、評価結果が厳しくなる(許容応力との差が小さくなる)と選定された事象について、運転開始後60年時点の経年劣化を考慮した状態でも健全性が確保されることを確認する。



(2) 耐震安全性評価の手順(評価対象となる経年劣化事象の抽出)

●耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象の抽出フロー

耐震安全性評価の対象となる経年劣化事象は、以下のフローに基づき抽出を実施し、「**軽微もしくは無視**」できると判断された事象以外の経年劣化事象は、**耐震安全上考慮することとする**。

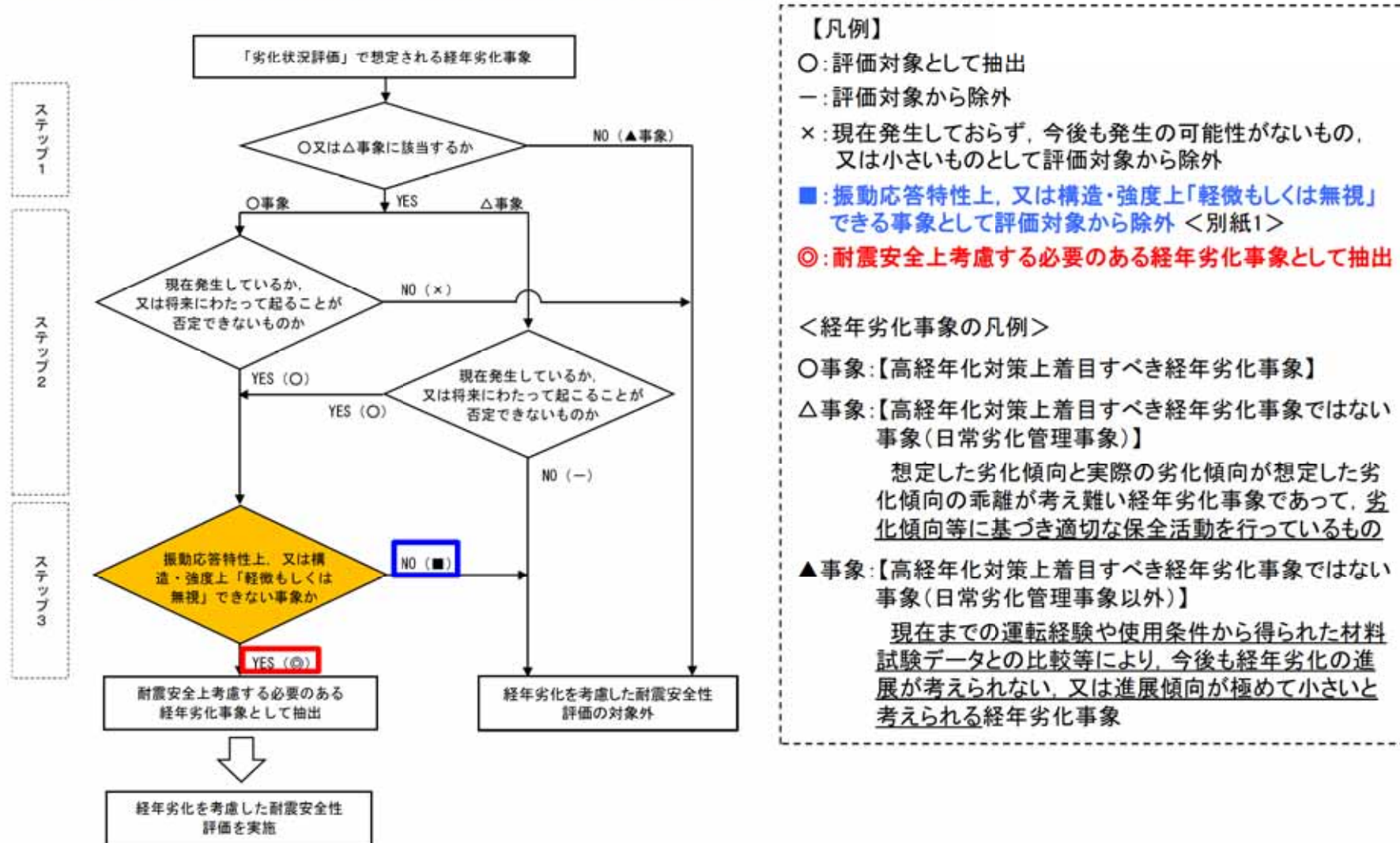


図1 耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象の抽出フロー

(2) 耐震安全性評価の手順(評価対象となる経年劣化事象の抽出)

下表のとおり、前項のフローに基づき抽出された、**耐震安全上考慮する必要のある各経年劣化事象に対応した個別の機器・構造物を同定する。**

機器・構造物	耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象						
	低サイクル疲労	中性子照射脆化	照射誘起型応力腐食割れ ^{*1}	熱時効	応力腐食割れ	腐食	
						流れ加速型腐食	全面腐食
ポンプ	◎	—	—	◎	—	—	◎ ^{*3}
熱交換器	—	—	—	—	—	◎	◎ ^{*2,*3}
ポンプモータ	—	—	—	—	—	—	—
容器	◎	◎	—	—	—	—	◎ ^{*3}
配管	◎	—	—	—	—	◎	◎ ^{*3}
弁	◎	—	—	◎	—	—	—
炉内構造物	◎	—	◎	—	◎	—	—
ケーブル	—	—	—	—	—	—	◎ ^{*3}
タービン設備	—	—	—	—	—	—	◎ ^{*3}
コンクリート構造物及び鉄骨構造物	—	—	—	—	—	—	—
計測制御設備	—	—	—	—	—	—	◎ ^{*3}
空調設備	—	—	—	—	—	—	◎ ^{*3}
機械設備	—	—	—	—	◎	◎	◎ ^{*3}
電源設備	—	—	—	—	—	—	◎ ^{*3}

*1: 中性子照射による靱性低下も考慮している *2: 胴、伝熱管の腐食 *3: 基礎ボルト

【凡例】

- ◎: 振動応答特性上、又は構造・強度上「軽微もしくは無視」できない事象
- : 日常劣化管理事象のうち、現在発生しておらず、今後も発生の可能性がないもの、又は小さい事象

- *4: 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象(○事象)のうち、図1の耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象の抽出フローにて、耐震安全上考慮不要となる経年劣化事象
- (a) 技術評価の結果、現在発生しているか、又は将来にわたって起こることが否定できない事象ではない事象
 - a. 上部格子板等の照射誘起型応力腐食割れ
 - b. コンクリート構造物の熱、放射線照射、中性化、塩分浸透及び機械振動による強度低下並びに熱による遮へい能力低下
 - (b) 振動応答特性上、又は構造・強度上「軽微もしくは無視」できない事象ではない事象
 - c. 絶縁特性低下、計測制御設備等の特性変化、導通不良
 - d. シール部、Oリング(電気ペネトレーション)の気密性の低下

(3) 振動応答特性・構造強度で「軽微もしくは無視」できない事象判断の具体例

● 耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象について判断した具体例(1/2)

抽出フローに基づき、明らかに「軽微もしくは無視」できると判断*された事象以外の経年劣化事象は、耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象として抽出

* 高経年化に係る国内外の知見や東海第二発電所の過去の高経年化技術評価等に基づき判断

① 高経年化対策上考慮すべき経年劣化事象(○事象)

➤ ◎振動応答特性上、又は構造強度上「軽微もしくは無視」できない事象と機器の具体例

経年劣化事象 (【 】内は機器・部位を示す)	判断根拠
<ul style="list-style-type: none"> ・低サイクル熱疲労 <別紙2> 【熱過渡を受ける機器(原子炉压力容器, 炉内構造物, ポンプ, 配管, 弁, 原子炉格納容器のうち機械ペネトレーション)】 ・中性子照射脆化 <別紙3> 【原子炉压力容器胴板】 ・照射誘起型応力腐食割れ <別紙4> 【炉心シュラウド】 ・熱時効 <別紙5> 【高温となる箇所では2相ステンレス鋼を使用している機器(ポンプ, 弁)】 	<p>材料の持つ強度の変化や延性の低下を伴うと判断している。なお、中性子照射脆化は金属材料が中性子の照射を受けると靱性(破壊に対する抵抗)の低下を生じる事象をいい、その際、金属材料は硬化し強度は上昇する。</p>

➤ ■振動応答特性上、又は構造強度上「軽微もしくは無視」できる事象と機器の具体例

経年劣化事象 (【 】内は機器・部位を示す)	判断根拠
<ul style="list-style-type: none"> ・絶縁特性低下, 計測制御設備等の特性変化, 導通不良 	<p>質量等に変動を及ぼさないことから、発生する部位によらず機器の振動応答特性又は構造・強度への影響が「軽微もしくは無視」できると判断している。</p>

(3) 振動応答特性・構造強度で「軽微もしくは無視」できない事象判断の具体例

● 耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象について判断した具体例(2/2)

抽出フローに基づき、明らかに「軽微もしくは無視」できると判断*された事象以外の経年劣化事象は、耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象として抽出

* 高経年化に係る国内外の知見や東海第二発電所の過去の高経年化技術評価等に基づき判断

② 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象(日常劣化管理事象)(△事象)

➤ ◎ 振動応答特性上、又は構造強度上「軽微もしくは無視」できない事象と機器の具体例

経年劣化事象 (【 】内は機器・部位を示す)	判断根拠
・流れ加速型腐食 【炭素鋼配管, 熱交換器伝熱管(内面)】	部材の断面減少による固有振動数の変化を伴う経年劣化事象
・全面腐食 <別紙6> 【基礎ボルト】 ・応力腐食割れ <別紙7> 【炉内構造物, 機械設備】	部材の断面減少による強度低下を伴う経年劣化事象

➤ ■ 振動応答特性上、又は構造強度上「軽微もしくは無視」できる事象と機器の主な具体例

経年劣化事象 (【 】内は機器・部位を示す)	判断根拠
・異物付着 【熱交換器伝熱管】	経年劣化による質量変動分が機器本体の質量に比較して十分小さく、剛性の変動がほとんどないと判断している。
・摩耗【減速機歯車等】 ・全面腐食【減速機歯車, 弁体・弁座等】 <別紙1>	内部構成品の一部に想定される減肉事象で、地震時に機器構成部品が一体となって挙動するため当該部品にはほとんど相対変位が発生しないと判断している。
・腐食【ポンプケーシング, 弁座等】 <別紙1> ・摩耗【ポンプ主軸, 弁体・弁座等】 <別紙1>	十分な剛性を有している部位に対しての減肉であり、厚肉のため剛性の変動がほとんどないと判断している。
・シール部, Oリング【電気ペネトレーション】の気密性の低下	シール部, Oリングは、構造・強度部材ではないことから耐震性への影響はないと判断している。

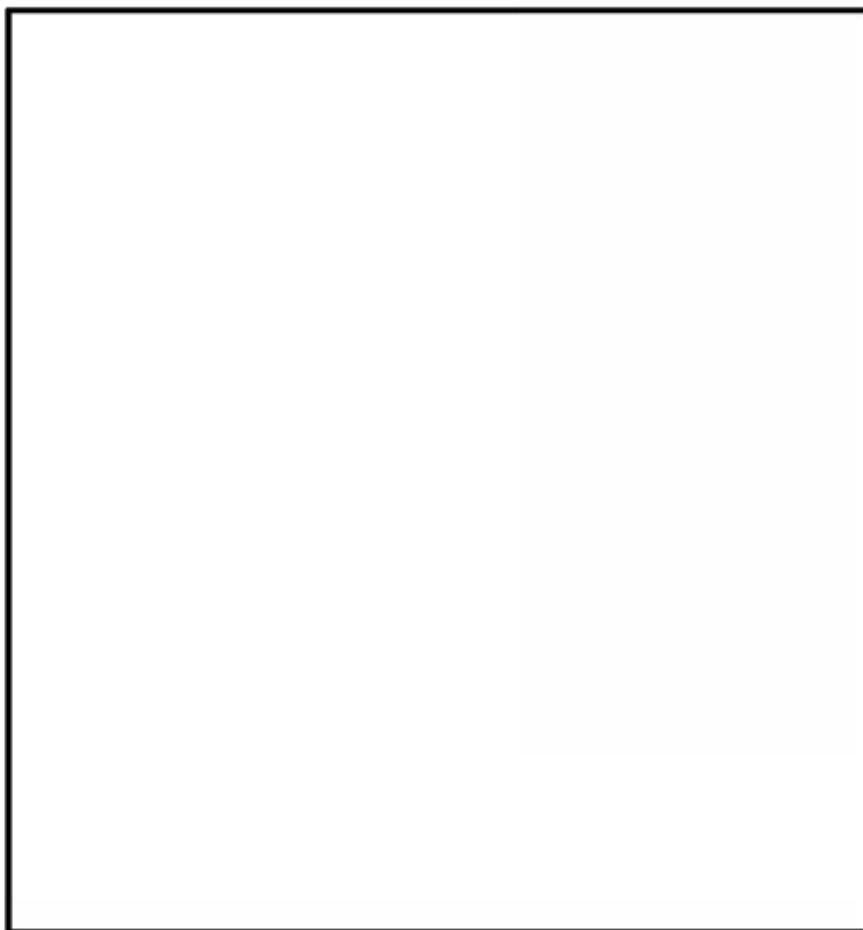
(4) 耐震安全上考慮すべき経年劣化事象における耐震評価時の裕度

- 耐震安全性評価及び耐震健全性評価で考慮している裕度として、**過渡事象の回数を多めに見積もる、運転期間中の稼働率を高めに見積もる、現状で発生のない割れを考慮する、1.5倍の裕度を考慮した地震時床応答加速度を用いる等、各種の裕度を考慮している。**一覧を下表に示す。

経年劣化事象	健全性評価時の裕度 (各経年劣化事象の説明より抜粋)	耐震安全性評価時の裕度
低サイクル疲労(ポンプ, 容器, 配管, 弁, 炉内構造物)	<ul style="list-style-type: none"> ・運転期間延長認可後から60年時点まで疲労累積係数を「実績×1.5倍」の過渡回数を見込んで算出 ・実績のない過渡回数については1と設定 	地震動による劣化を算出するために使用している機器の据付高さ(床面高さ)に応じた床応答曲線に1.5倍の裕度を考慮した「設備評価用床応答曲線」を用いることにより、評価値を算出 (次頁参照)
中性子照射脆化	運転期間延長認可後から60年時点までの稼働率を保守的に算出。また、現状発生していない割れを考慮して算出	
照射誘起型応力腐食割れ(炉内構造物)	運転期間延長認可後から60年時点までの稼働率を保守的に算出。また、現状発生していない割れ(全周き裂)を考慮して算出	
熱時効(ポンプ, 弁)	運転期間延長認可後から60年時点までの稼働率を保守的に算出。また、現状発生していない割れ(貫通き裂)を考慮して算出	
応力腐食割れ(炉内構造物, 機械設備)	現状発生していない割れを考慮して算出。シュラウドサポートについては、ひび割れの確認された箇所に保守性を見込んだ箇所数を考慮して算出	
腐食(流れ加速型腐食)(配管, 熱交換器, 機械設備, 弁(地震時動的機能要求対象))	必要最小板厚(1部配管では60年時点での板厚)を適用しており発生応力を算出	
腐食(全面腐食)(熱交換器, 基礎ボルト)	運転開始後60年時点での腐食減肉量を保守的に適用して発生応力を算出	

●耐震安全性評価時の裕度

地震動による劣化を算出するため使用している機器の据付高さ(床面高さ)に応じた床応答曲線に**1.5倍の裕度を考慮した「設備評価用床応答曲線」**を用いることにより、評価値を算出している。〈別紙8〉



プラント名：東海第二発電所
構造物名：ペDESTAL
方向：水平方向
波形名：S_d-D1, S_d-11, S_d-12, S_d-13, S_d-14, S_d-21, S_d-22及びS_d-31
標高：EL19.856m
減衰：2.0(%)

- 地震の持つ周期と、機器が据え付けられている建物の持つ固有周期及び建物に振動が伝わる際に地震力が減少する減衰率を用いて解析により算出した各固有周期での揺れの強さ(震度)を床応答曲線という。
- 建物の評価高さや揺れの方向(水平・鉛直)により揺れの強さ(震度)が異なるため、建物の床面高さ毎に方向を考慮した床応答曲線を、機器の耐震評価に用いている。
- 今回の新規制基準に対応した工事計画認可申請及び運転期間延長認可申請では、裕度を見込んで上記の床応答曲線の**震度を1.5倍とした「設備評価用床応答曲線」**を用いて耐震評価を実施している

「設備評価用床応答曲線」の例

(5) 配管における耐震安全上考慮すべき経年劣化事象の抽出

- 配管系について、各配管材質(ステンレス鋼、炭素鋼及び低合金鋼)における全ての経年劣化事象を対象として<別紙9>、耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象の抽出フローに基づき抽出した結果、以下の2事象が抽出された。

* 配管系における「高経年化対策上着目すべき経年劣化事象」、「高経年化対策上着目すべきではない経年劣化事象」の区分は(2)、(3)を参照

①配管(溶接部を含む。)の疲労割れ

- ・ステンレス鋼配管系
- ・炭素鋼配管系

②配管(溶接部を含む。)の腐食(流れ加速型腐食)

- ・炭素鋼配管系

なお、耐震安全性評価を行うにあたっては、

- ・経年劣化事象の抽出時に選定した代表機器(系統)
- ・非代表機器(系統)のうち、規格・運転経験等に基づいて選定した機器(系統)

を対象として評価を実施した。

(5) 配管における耐震安全上考慮すべき経年劣化事象の抽出

①配管(溶接部を含む。)の疲労割れの評価

- ・ステンレス鋼配管系
- ・炭素鋼配管系

○配管系に対して、耐震安全性について経年使用により評価結果(疲労)が足し合わされる劣化事象として、**疲労割れ(低サイクル疲労)**を抽出している。

○東北地方太平洋沖地震を踏まえた影響評価として、基準地震動 S_S による疲労累積係数の一番大きい系統に対して、**運転実績と今後の運転期間による過渡回数に地震動の影響を足し合わせた結果、疲労累積係数の和は許容値1以下であり、配管の疲労割れは耐震安全性に問題のないことを確認している。**

原子炉系(蒸気系)配管の低サイクル疲労評価(地震影響含む)

- ①経年使用による過渡回数での疲労累積係数
- ②地震動(基準地震動 S_S)による疲労累積係数
- ③東北地方太平洋沖地震の地震動を用いて算出した疲労累積係数

**疲労累積係数の和
 $0.741 < 1$ (許容値)**

* 耐震評価方法及び裕度の考え方の詳細は「<別紙2>耐震安全性評価ー低サイクル疲労割れ」参照

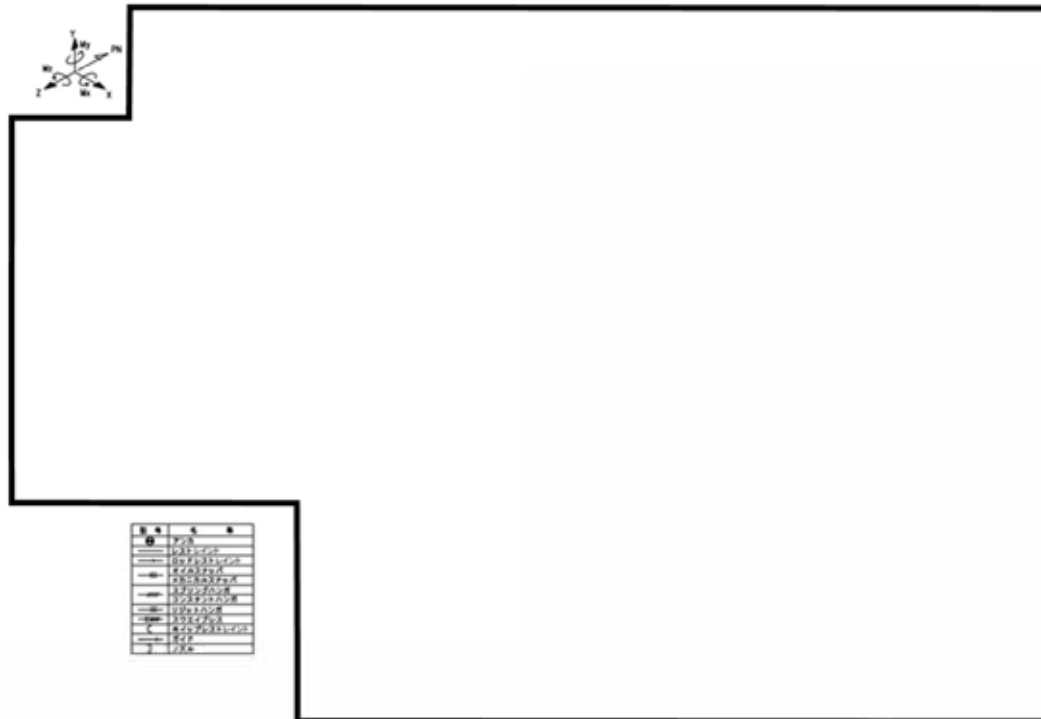
(5) 配管における耐震安全上考慮すべき経年劣化事象の抽出

②配管(溶接部を含む。)の腐食(流れ加速型腐食) ・炭素鋼配管系

- 配管系に対して、耐震安全性について経年使用により部材断面減少等の影響が生じ得る劣化事象として、配管中の水・蒸気等の流体による流れ加速型腐食を抽出している。
- 流れ加速型腐食が想定される部位について、運転実績と今後の運転期間等を考慮した過渡回数と配管減肉を考慮した解析モデルで地震動の影響を評価した結果、発生応力及び疲労累積係数は許容値以下であり、配管の流れ加速型腐食は耐震安全性に問題のないことを確認している。

➤ 発生応力算出時の考え方

* 耐震評価の詳細は次頁以降を参照



配管減肉を考慮した解析モデル例(流れ加速型腐食)

<評価条件の保守性と裕度>

- ・炭素鋼配管系のうち、流れ加速型腐食が想定される系統の部位について、配管減肉(必要最小板厚又は60年時点想定板厚)を考慮した解析モデルにて評価(←肉厚測定及び余寿命評価を行い、必要最小板厚または60年時点想定板厚到達前に交換を行うため裕度を有した評価となっている)
- ・地震動による劣化を算出するために使用している機器の据付高さ(床面高さ)に応じた床応答曲線に1.5倍の裕度を考慮した「設備評価用床応答曲線」を用いて応力拡大係数を算出(←裕度)

(5) 配管における耐震安全上考慮すべき経年劣化事象の抽出

➤ 評価結果(流れ加速型腐食を考慮した耐震評価)

(発生応力と許容応力の比が最大かつ疲労累積係数が最大の箇所をもつ原子炉系配管を例示)

評価対象	区分	耐震重要度	評価地震力	許容応力状態 ^{※1}	応力種別	①発生応力(MPa)	②許容応力(MPa)
						60年時点肉厚	
原子炉系 (蒸気部) [ドレン配管]	クラス 1	S	S _s	IV _A S	一次応力 ^{※2}	291	< 364
					一次応力+ 二次応力 ^{※3}	831 (③疲労累積係数 :0.3256)	< 366 (疲労累積係数許容値 :1以下)
			S _d	III _A S	一次応力 ^{※2}	225	< 274
					一次応力+ 二次応力 ^{※3}	556 (③疲労累積係数 :0.3132)	< 366 (疲労累積係数許容値 :1以下)

※1:許容応力状態については下表による。

許容応力状態 III _A S	運転状態 III ^{*1} に対応する原子炉圧力容器の温度、圧力の変動による荷重 (許容応力状態 III _A) + 地震(S _d)により生ずる応力
許容応力状態 IV _A S	運転状態 IV ^{*2} に対応する原子炉圧力容器の温度、圧力の変動による荷重 (許容応力状態 IV _A) + 地震(S _s)により生ずる応力

*1:原子炉施設の故障、誤作動等により原子炉の運転の停止が緊急に必要とされる状態

*2:原子炉施設の安全設計上想定される異常な事態が生じている状態

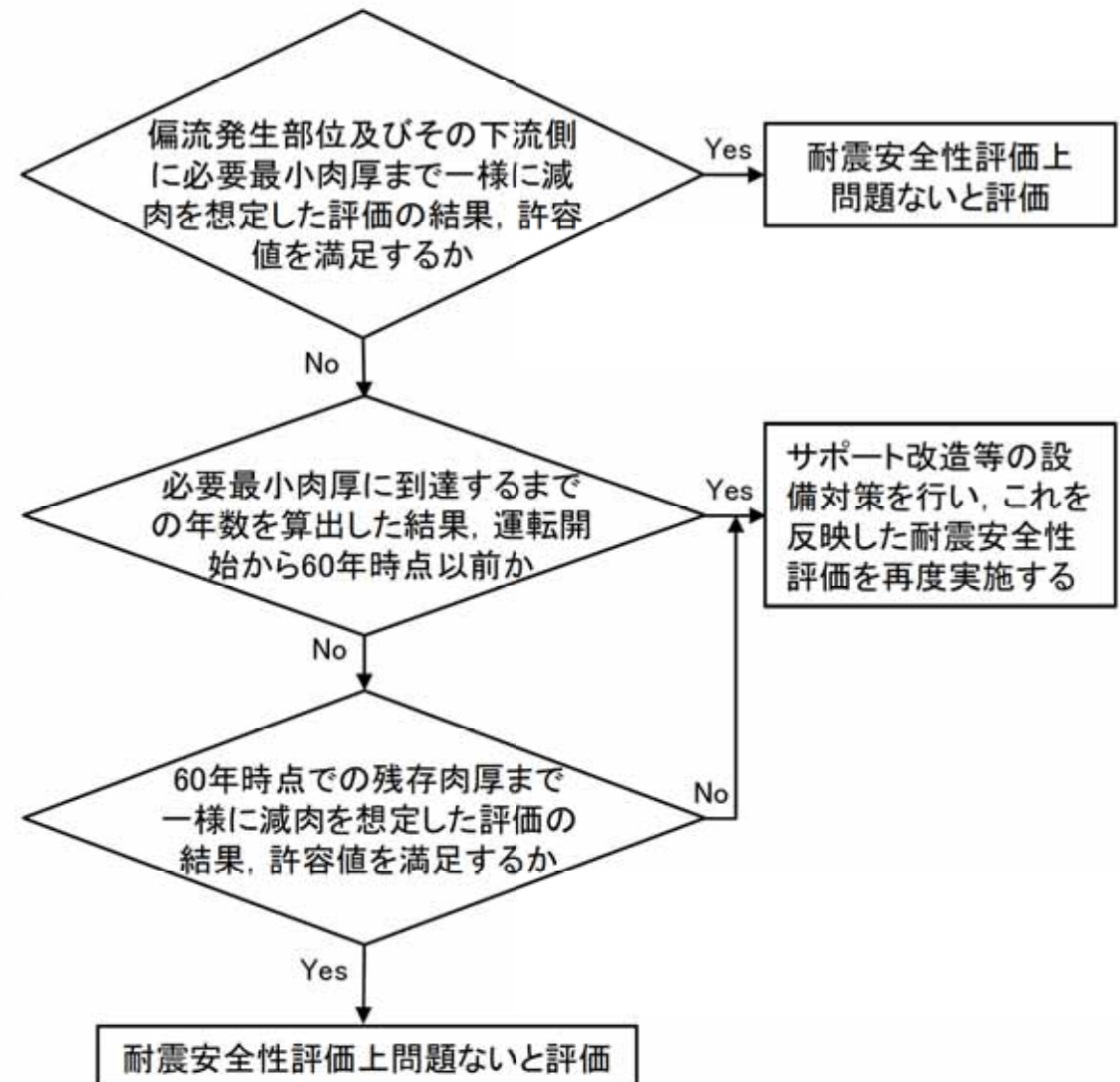
※2:内圧等により配管の内壁に一様に加わる荷重によって発生する応力(曲げ応力、膜応力)及び地震荷重による応力

※3:配管の熱膨張の際に、支持金具で拘束されることで生じる応力(熱応力)

(5) 配管における耐震安全上考慮すべき経年劣化事象の抽出

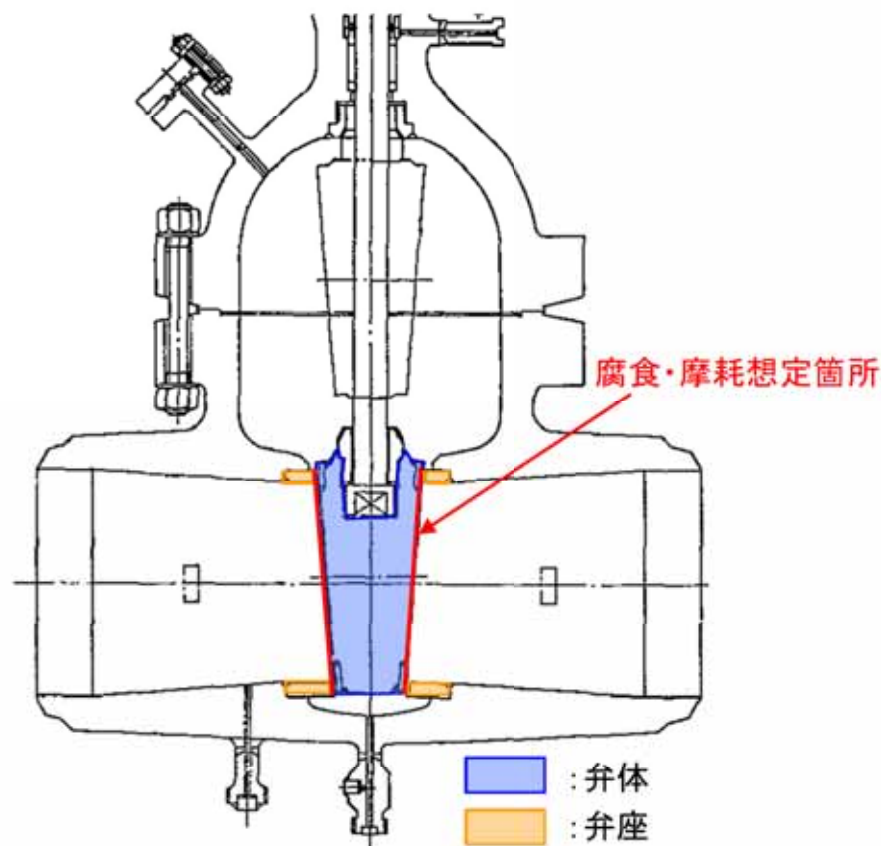
経年劣化事象	腐食(流れ加速型腐食)
想定部位	配管(エルボ部, 分岐部, レジューサ部等(原子炉系(蒸気部)ドレン配管))
耐震安全性評価内容	保全活動の範囲内で発生する可能性のある減肉を考慮して地震時の発生応力, 又は疲労累積係数を算出し, 許容値を下回ることを確認する。
耐震安全性評価結果	<ul style="list-style-type: none"> ・「発生応力 < 許容応力」であること。 ・「許容応力 < 発生応力」である場合, 疲労解析を行い, 疲労累積係数が許容値1以下であること。^{*1} を確認し, 耐震安全性に問題のないことを確認している。

*1: 原子力発電所耐震設計技術指針
重要度分類・許容応力編より



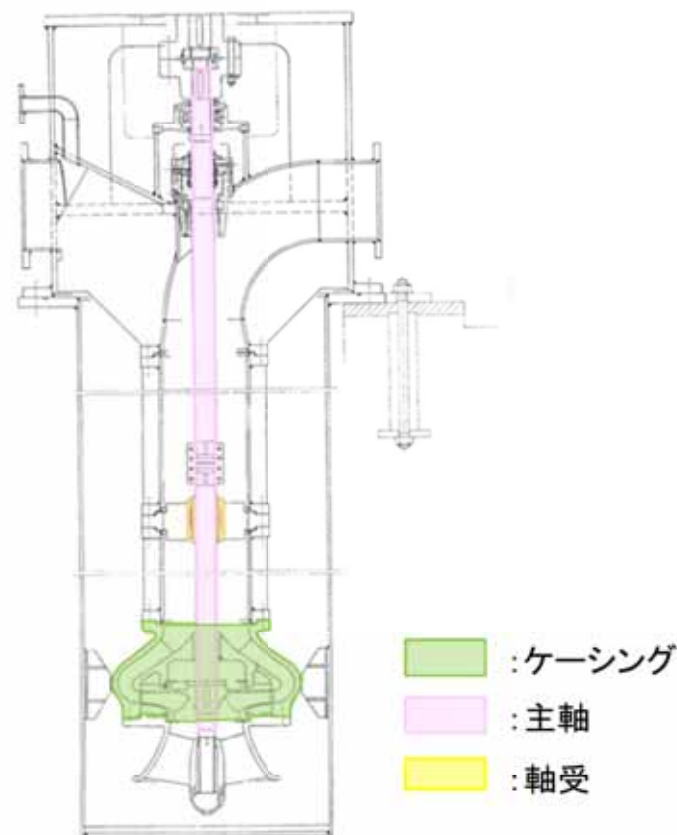
腐食(流れ加速型腐食)(配管)の耐震安全性評価フロー

➤ 振動応答特性上, 又は構造強度上「軽微若しくは無視」できる事象とした具体例



弁体, 弁座は内部流体に接液しており, また弁開閉時の接触のため腐食や摩耗が発生するが, 表面のみで全体質量に影響のない程度であること, 厚肉で剛性の大きい部位の表面腐食であること及び部材と同一に振動するため相対変位を生じない。

弁の全面腐食(弁体・弁座等), 摩耗(弁体・弁座等)



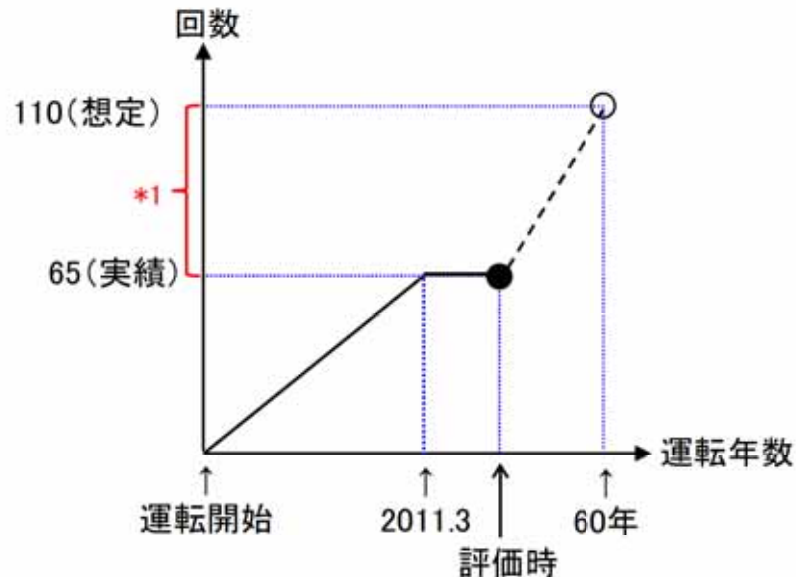
ケーシングは内面・外面が内部流体に接液しており, またポンプ運転時に主軸と軸受が接触して摩耗が発生するが, 全体質量に影響のない程度であること, 厚肉で剛性の大きい部位の表面腐食・摩耗である。

ポンプの腐食(ケーシング等), 摩耗(主軸)

<別紙2>耐震安全性評価－低サイクル疲労評価

➤ 60年時点の推定過渡回数算出時の考え方

*2 実績のない運転過渡については1回を想定(一裕度)



*1 = 実績回数から得られた1年あたりの回数
× 残りの年数 × 1.5倍(一裕度)

60年時点の推定過渡回数算出イメージ

運転条件	評価時点までの実績過渡回数	運転開始後60年時点までの推定過渡回数
ボルト締付け	26	48
耐圧試験	72	132
起動(昇温)	65	110
起動(タービン起動)	65	110
夜間低出力運転(出力75%)	67	120
週末低出力運転(出力50%)	115	165
制御棒パターン変更	96	176
給水加熱機能喪失(発電機トリップ)*2	0	1
給水加熱機能喪失(給水加熱器部分バイパス)*2	0	1
スクラム(タービントリップ)	16	22
スクラム(原子炉給水ポンプ停止)	3	6
スクラム(その他)	20	24
停止	65	111
ボルト取外し	26	49

➤ 評価結果(地震動の影響が最も大きい原子炉系(蒸気部)配管を例示)

機器	低サイクル疲労評価	地震動の影響を考慮した評価	①+② 合計値	許容値
	①60年時点の疲労累積係数	②地震動による疲労累積係数(基準地震動Ss)		
原子炉系(蒸気部)配管	0.0853	+	0.6558	= 0.7411 < 1

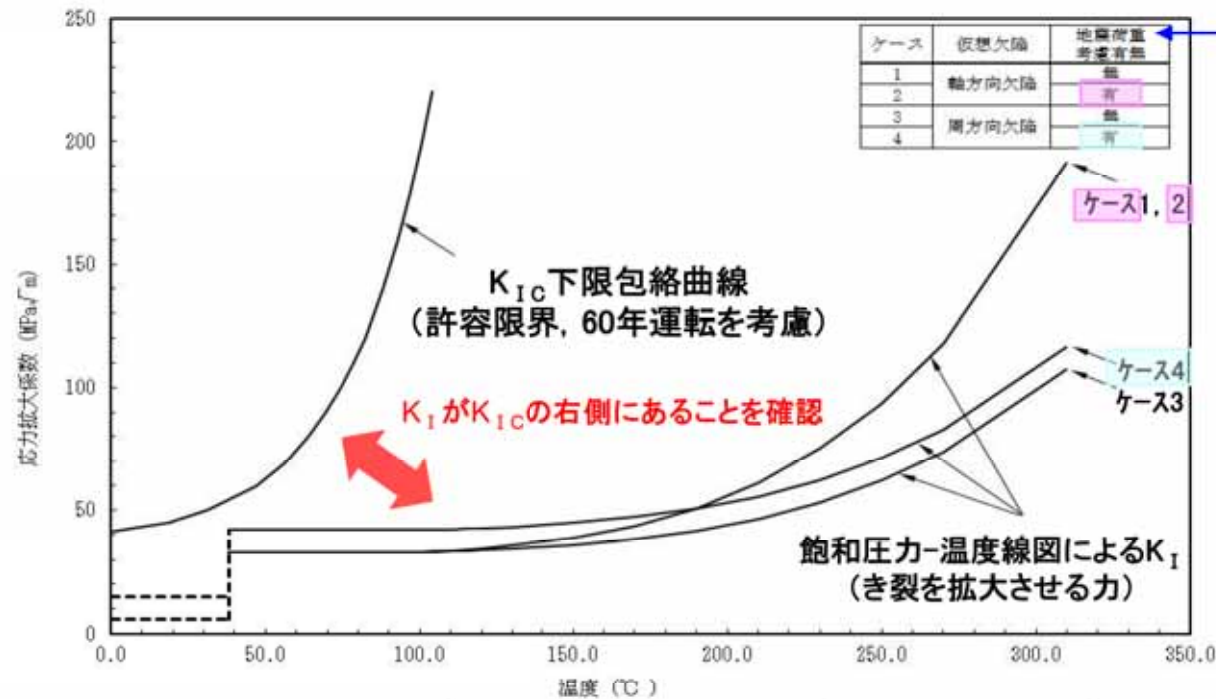
*1, *2の裕度を考慮した数値

地震動による劣化を算出するために使用している機器の据付高さ(床面高さ)に応じた床応答曲線に1.5倍の裕度を考慮した「設備評価用床応答曲線」を用いて疲労累積係数を算出(一裕度)

裕度を考慮した疲労累積係数に「設備評価用床応答曲線」から算出した地震動による疲労累積係数を足し合わせた合計値が許容値1を下回るため、耐震安全性上問題ないと評価した。

<別紙3>耐震安全性評価—中性子照射脆化評価

➤ 応力拡大係数 (K_I) 算出時の考え方



地震動による劣化を算出するために使用している機器の据付高さ(床面高さ)に応じた床応答曲線に1.5倍の裕度を考慮した「設備評価用床応答曲線」を用いて応力拡大係数を算出(←裕度)

K_{IC} 下限包絡曲線と K_I 曲線(原子炉圧力容器胴:炉心臨界時)

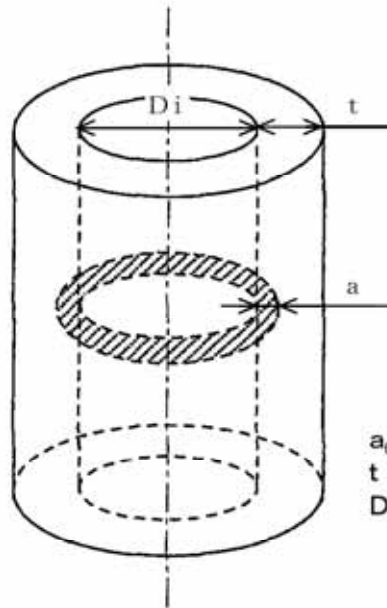
- ・日本電気協会「原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法」に基づき、**評価対象機器の点検で確認されていない板厚の1/4深さの仮想欠陥を想定(←裕度)**
- ・ K_I 曲線の入力条件である運転期間延長認可後の設備利用率を、これまでの**実績の70%程度を包含する80%で設定(←裕度)**

➤ 評価結果

裕度を考慮した K_I に「設備評価用床応答曲線」から算出した地震荷重を足し合わせた K_I 線曲線が K_{IC} 下限包絡曲線を下回るため、耐震安全性上問題ないと評価した。

<別紙4>耐震安全性評価－照射誘起型応力腐食割れ

➤ 応力拡大係数算出時の考え方



a_0 : 亀裂深さ(=1.0[mm])
 t : 炉心シュラウドの板厚
 D_i : 炉心シュラウドの内径

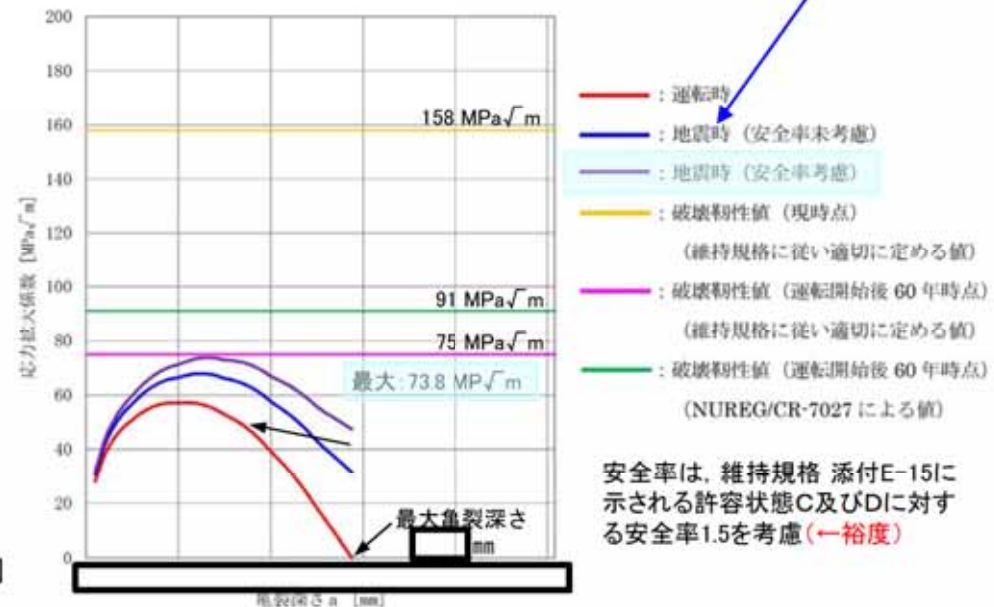
- ・運転期間延長認可後の設備利用率をこれまでの実績の70%程度を包含する80%として応力拡大係数を算出(←裕度)
- ・溶接残留応力を考慮すると、応力拡大係数は板厚中央近傍でゼロとなる見込みであるが、表面は大きな値となり、周方向の亀裂進展が想定されること及び周方向に複数の応力腐食割れの発生を想定し、点検で確認されていない内表面全周亀裂を想定した評価を実施した。(←裕度)

<亀裂想定位置及び評価モデル>

➤ 評価結果

- ・日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格(2008)(以下、「維持規格」という。)に基づく解析により算出した応力拡大係数(73.8MPa√m)と、維持規格に基づき運転開始後60年時点の照射量に応じて算出した破壊靱性値(75MPa√m)と比較した結果、応力拡大係数は破壊靱性値を下回るため、不安定破壊に至らず、耐震安全上問題ないと評価した。

地震動による劣化を算出するために使用している機器の据付高さ(床面高さ)に応じた床応答曲線に1.5倍の裕度を考慮した「設備評価用床応答曲線」を用いて応力拡大係数を算出(←裕度)



内面全周亀裂を想定した評価による応力拡大係数

<別紙5>耐震安全性評価－熱時効

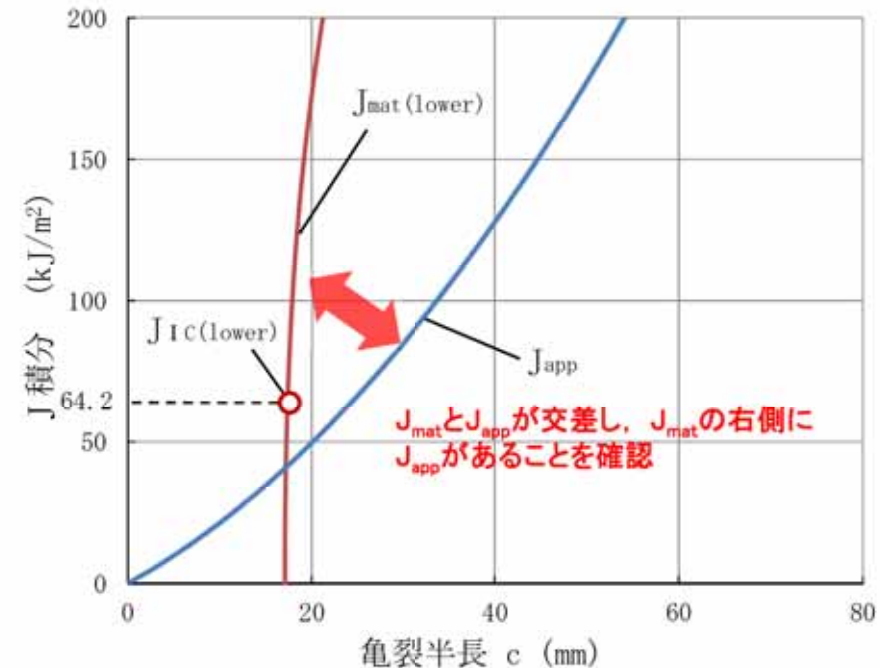
➤ 脆化を考慮した亀裂進展抵抗(J_{mat})と、地震を考慮した応力により生ずる亀裂進展力(J_{app})算出時の考え方

① 運転期間延長認可後の設備利用率をこれまでの実績の70%程度を包含する80%とした評価対象期間(←裕度)における脆化予測
 J_{mat} を脆化予測モデル(H3Tモデル)を用いて予測

② 評価用想定亀裂の設定
 点検で確認されていない初期欠陥を設定し、疲労により60年時点での亀裂進展を評価。さらに保守的な亀裂形状を設定(←裕度)

③ 亀裂進展力の評価
 地震動による劣化を算出するために使用している機器の据付高さ(床面高さ)に応じた床応答曲線に1.5倍の裕度を考慮した「設備評価用床応答曲線」を考慮し、 J_{app} をJ積分の解析解により算出

④ 亀裂安定性評価
 ①～③で得られた J_{mat} と J_{app} がグラフ上交差する、すなわち亀裂進展力に対して亀裂進展抵抗が上回ることで、不安定破壊しないことを確認する。



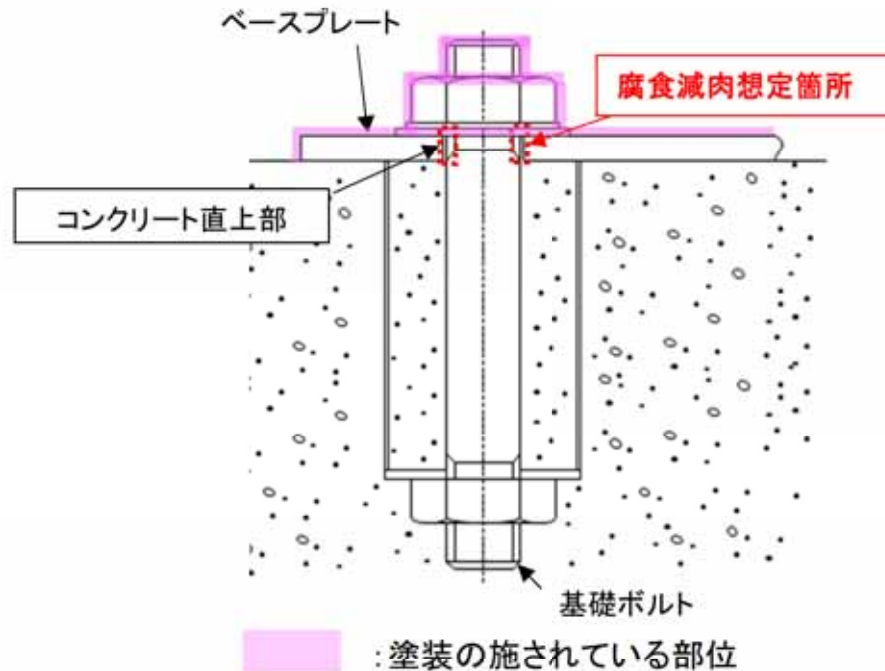
亀裂安定性評価結果(例)

➤ 評価結果

亀裂進展抵抗が亀裂進展力と交差し、亀裂進展抵抗が亀裂進展力を上回ることで及び亀裂進展抵抗と亀裂進展力の交点で亀裂進展抵抗の傾きが亀裂進展力の傾きを上回ることから、不安定破壊することはないと評価した。

<別紙6>耐震安全性評価—腐食(全面腐食)

➤ 発生応力算出時の考え方



<基礎ボルト概要図>

- 機器を確実に固定している基礎ボルトに腐食(全面腐食)による減肉が発生した場合、地震発生時に機器を固定できず機器の損傷に至る可能性がある。そのため、他プラントにて実施した基礎ボルト腐食量調査結果より設定した腐食量(0.3mm←裕度)を基礎ボルトに仮定する。
- 地震動による劣化を算出するために使用している機器の据付高さ(床面高さ)に応じた床応答曲線に1.5倍の裕度を考慮した「設備評価用床応答曲線」を用いて応力拡大係数を算出(←裕度)

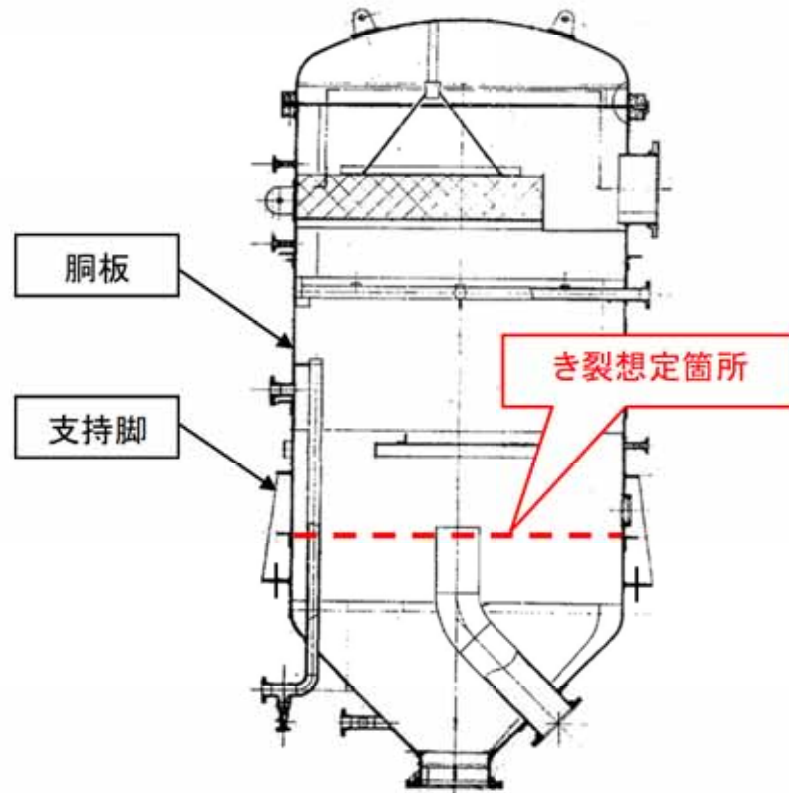
➤ 評価結果(排気筒の耐震評価結果を例示)

評価部位		発生応力(MPa)		許容応力(MPa)
①筒身脚部基礎ボルト	引張	257	<	324
	せん断	12	<	187
②鉄塔脚部基礎ボルト	引張	92	<	236
③補助鉄塔脚部基礎ボルト	引張	164	<	490

裕度を考慮した地震時の発生応力が許容応力を下回ることから、耐震安全上問題ないと評価した。

<別紙7>耐震安全性評価－応力腐食割れ

➤ 発生応力算出時の考え方



廃液濃縮器蒸発缶構造図

- ・日本電気協会 原子力発電所配管破損防護設計技術指針(JEAG 4613-1998)に基づき、点検で確認されていない60年時点のき裂として半周の貫通き裂を仮定して、地震時の発生応力を算出した。(←裕度)
- ・地震動による劣化を算出するために使用している機器の据付高さ(床面高さ)に応じた床応答曲線に1.5倍の裕度を考慮した「設備評価用床応答曲線」を用いて応力拡大係数を算出(←裕度)

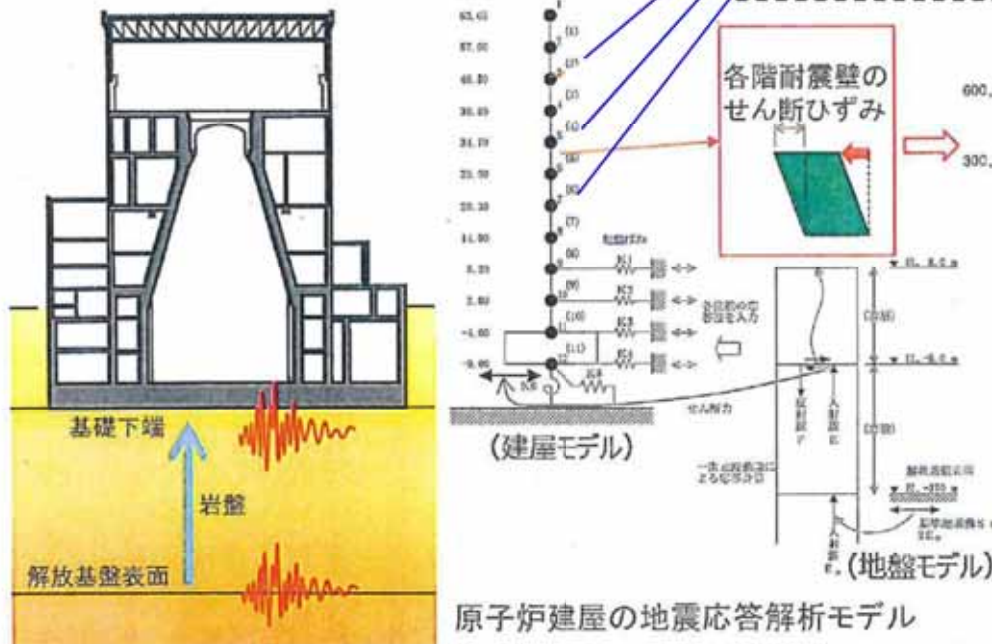
➤ 評価結果

評価対象	発生応力(MPa)	許容応力(MPa)
廃液濃縮器蒸発缶胴板	31	< 65

裕度を考慮した地震時の発生応力が許容応力を下回ることから、耐震安全上問題ないと評価した。

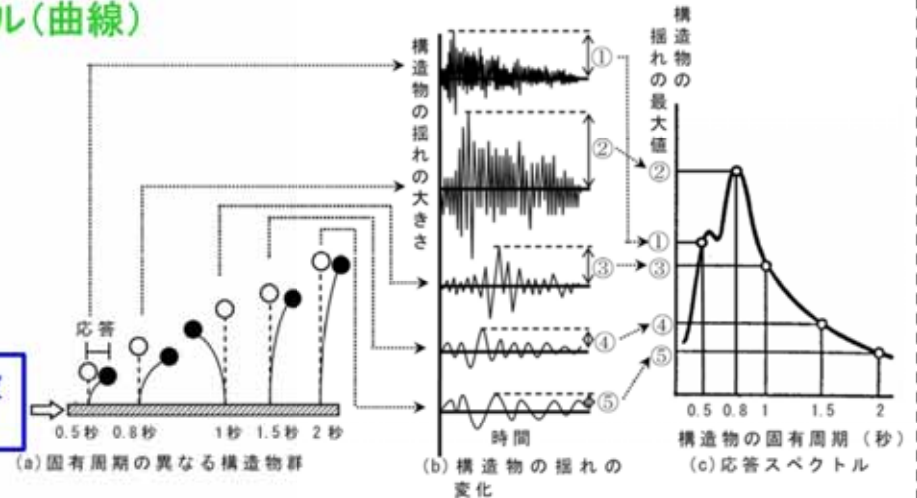
(1) 基準地震動から床応答スペクトル(曲線)までの流れ(イメージ)

① 基準地震動Ss8波等に対して, 地盤モデルを用いて, 解放基盤表面から建屋基礎下端までの岩盤中の地震波の伝播を計算し, これを入力とした建屋モデルにより建屋全体の応答を計算し, 各階床面における応答波を求める。



床応答スペクトル(曲線)

各階床面の応答波(加速度時刻歴)



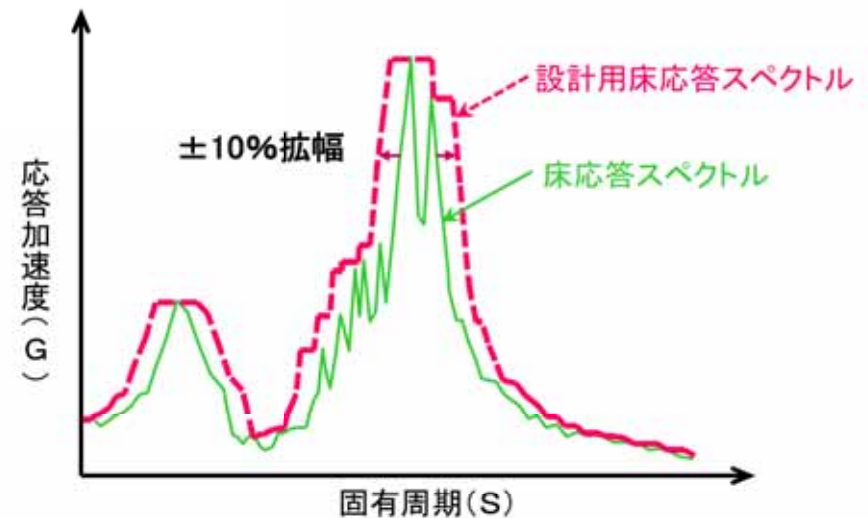
② ①で求めたそれぞれの各階床面の応答波ごとに, 短周期から長周期までの種々の固有周期に対して得られる最大応答加速度を求め, 基準地震動Ss8波等の各応答を包含するように結んだ床応答スペクトル(曲線)を作成する。

(2) 設計用床応答スペクトル(曲線)と設備評価用床応答曲線(イメージ)

床応答スペクトル(曲線)

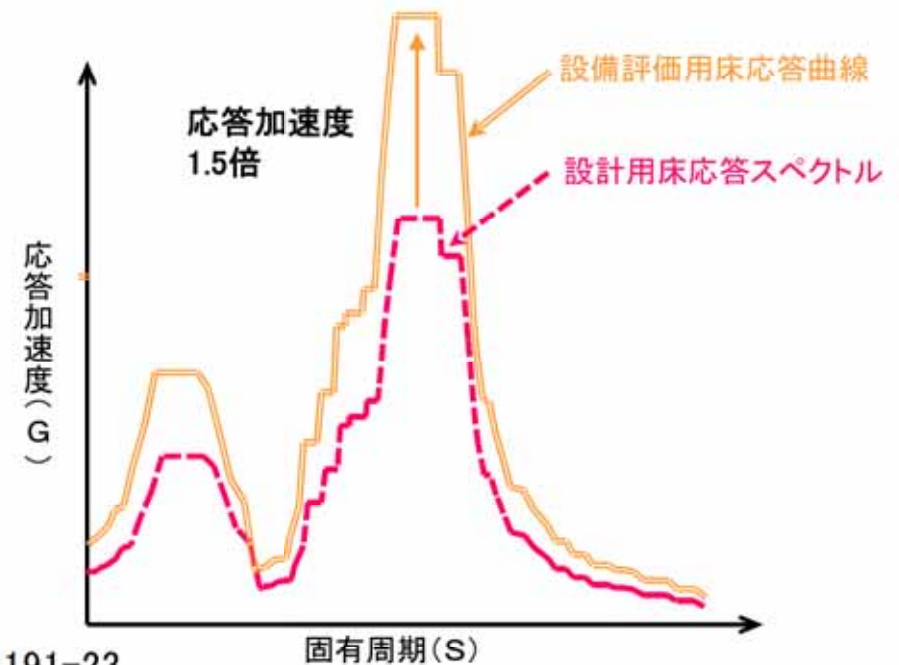
③ ②で作成した床応答スペクトル(曲線)に変動因子による影響*を踏まえて周期軸方向に対して±10%拡幅することで、設計用床応答スペクトル(曲線)とする。

- * 以下の変動因子を考慮
- ・地盤物性、建屋剛性
 - ・地盤ばね定数の算出式及び減衰定数
 - ・模擬地震波の位相特性、機器の固有周期のずれ 等



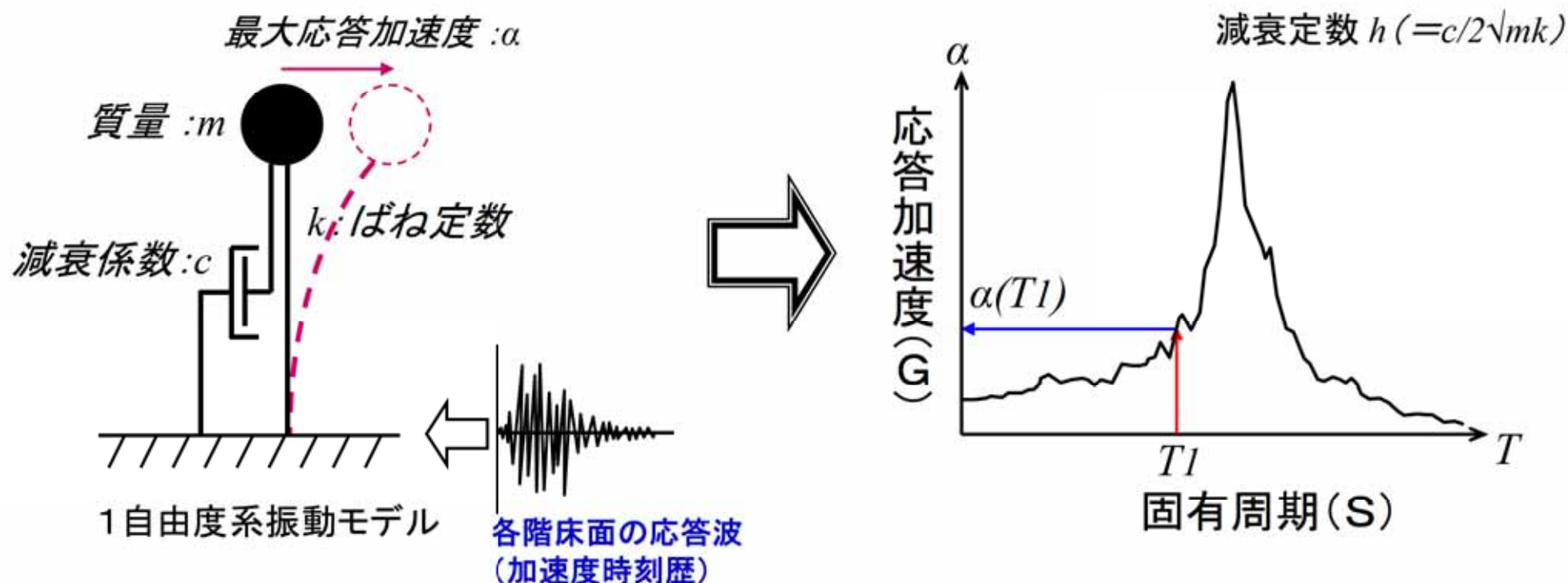
設計用床応答スペクトル(曲線)

④ 設計用床応答スペクトル(曲線)に裕度として応答加速度(震度)に1.5倍を見込み、設備評価用床応答曲線を作成する。



設備評価用床応答曲線

別図



- ① 質量(m)とばね定数(k)の関係から1自由度系振動モデルの固有周期($T1$)を定める。
- ② 1自由度系振動モデルの応答解析により固有周期($T1$)における最大応答加速度($\alpha(T1)$)を算出する。
- ③ 固有周期の一定の幅(例:0.05s~1.0s)に対して、①~②を繰り返して行う。
- ④ 必要な減衰定数(例: $h=0.5\% \sim 5.0\%$)に対して、①~③を繰り返して行う。

<別紙9> 配管における高経年化対策上考慮すべき経年劣化事象

○高経年化技術評価において、着目すべき、若しくは着目すべきではない経年劣化事象として抽出した経年劣化事象を以下のとおり配管材質ごとに整理している。

なお、溶接部について考慮すべき経年劣化事象については、配管同等として評価を行っている。

①ステンレス鋼配管の経年劣化事象

高経年化対策上着目すべき経年劣化事象	配管の疲労割れ*
高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象	温度計ウェルの高サイクル疲労割れ
	オリフィスの異物付着
	埋込金物(コンクリート埋設部)の腐食
	基礎ボルトの樹脂の劣化(後打ちケミカルアンカ)
	基礎ボルトの腐食(全面腐食)
	配管の貫粒型応力腐食割れ
	フランジボルト・ナットの腐食(全面腐食)
	オイルスナツバ、ハンガ及びレストレイントの腐食(全面腐食)
	埋込金物(大気接触部)の腐食(全面腐食)
	サポート取付ボルト・ナットの腐食(全面腐食)
	配管及び温度計ウェルの粒界型応力腐食割れ
	配管の腐食(全面腐食)
	オイルスナツバ及びハンガの機能低下
ラグ及びレストレイントの疲労割れ	

*耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象として抽出

②炭素鋼配管の経年劣化事象

高経年化対策上着目すべき経年劣化事象	配管の疲労割れ*
高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象	オリフィス及びフローノズルの異物付着
	埋込金物(コンクリート埋設部)の腐食
	基礎ボルトの樹脂の劣化(後打ちケミカルアンカ)
	基礎ボルトの腐食(全面腐食)
	配管の腐食(流れ加速型腐食)*
	配管及びクローザージョイントの外表面及び内表面腐食(全面腐食)
	配管の外表面腐食(隙間腐食)
	二重管の外表面及び内表面腐食(全面腐食)
	埋込金物(大気接触部)の腐食(全面腐食)
	ラグ, レストレイント, オイルスナツバ, メカニカルスナツバ, ばね防振器及びハンガの腐食(全面腐食)
	フランジボルト・ナットの腐食(全面腐食)
	サポート取付ボルト・ナットの腐食(全面腐食)
	オイルスナツバ, メカニカルスナツバ, ばね防振器及びハンガの機能低下
	配管の内表面腐食(全面腐食)
	ラグ及びレストレイントの疲労割れ

* 耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象として抽出

③低合金鋼配管の経年劣化事象

高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象	配管の高サイクル疲労割れ
	配管のクリープ
	埋込金物(コンクリート埋設部)の腐食
	基礎ボルトの樹脂の劣化(後打ちケミカルアンカ)
	基礎ボルトの腐食(全面腐食)
	配管の腐食(液滴衝撃エロージョン)
	サポート取付ボルト・ナットの腐食(全面腐食)
	埋込金物(大気接触部)の腐食(全面腐食)
	オイルスナツバ, ハンガ, ラグ及びレストレイントの腐食(全面腐食)
	配管の腐食(流れ加速型腐食)
	オイルスナツバ及びハンガの機能低下
	ラグ及びレストレイントの疲労割れ

【論点No.188】

耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象抽出の際の振動応答特性上「軽微若しくは無視」できるか否かの具体的な判断基準・判断方法について

【委員からの指摘事項等】

No.179

指摘事項等・県民意見に下線を記載
対応する資料頁数等を 内に記載

耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象について、振動応答特性上、又は強度上無視できない事象の場合抽出する旨記載されているが、剛性に関する振動応答特性についてどのように判断するのか。

【論点No.189】

運転開始後60年時点における経年劣化状況を踏まえた耐震評価及びその保守性について

【県民意見(頂いたご意見・特に関心のある事項)】

指摘事項等・県民意見に下線を記載
対応する資料頁数等を 内に記載

No.279

P.8,9

「特別点検, 劣化状況評価及び保守管理方針」
劣化状況評価参照

原子力発電所の寿命40+20年において, 安全に稼働が維持出来るかどうか。特に地震等の予期しない外力が加わった時コントロール不能の状態にならないか, 大変心配しています。(どの時点で地震の外力が加わるかによって, 耐力に違いが生じるのではないのでしょうか。)弱点を有する施設(配管・ケーブル・炉心に直結したセンサーの劣化が一番心配です

「特別点検, 劣化状況評価及び保守管理方針」
劣化状況評価参照

No.924

2. P66

試験不可のボルトとは?

試験しなくても大丈夫なのですか?

「特別点検, 劣化状況評価及び保守管理方針」
特別点検参照

何万本位あるのですか?

* 委員指摘事項等及び県民意見は第15回ワーキングチーム
(令和元年6月26日)資料3-1及び資料3-2に基づく

【論点No.191】

配管に係る高経年化対策及び経年劣化を考慮した耐震評価の網羅性、保守性について

【県民意見(頂いたご意見・特に関心のある事項)】

No.1064

4. 配管の接続部についての評価がされていない。

P.10-14, 25-27

指摘事項等・県民意見に下線を記載
対応する資料頁数等を 内に記載

【県民意見(頂いたご意見・特に関心のある事項)】

No.1132

指摘事項等・県民意見に下線を記載
対応する資料頁数等を 内に記載

・80kmの配管の摩耗, 25000カ所の溶接箇所劣化による切断の可能性: 2010年5月26日の報告では, 配管の誤接続により微量のトリチウムを含んだ水が排水されたと報告がありました。

原子炉は「パイプのお化け」で, 総延長80kmもの長い配管が25000カ所で溶接箇所されています。(p30)配管の誤接続だけでなく, 地震やテロで一カ所でも破損すれば, 冷却水が漏れ出します。冷却できなければ空焚き状態になります。電源や防波堤に問題がなくてもフクシマを再現する可能性があります。建築時に熟練の溶接工がすべての溶接を行っていないとの情報もあります。40年を経過して再稼働し続け, 溶接箇所をすべて問題なく管理することが可能でしょうか。加圧水型軽水炉と呼ばれるタイプの原子炉は, …(略)… 配管の中は157気圧, 320度という熱水が流れています。直径20センチ, 肉厚2センチの特殊合金パイプが20年持たずに摩耗していたのです。地震などが発生したら, 溶接部, とくに原子炉との接合部が切断される危険性が指摘されています。(p31)

加圧水型軽水炉も 沸騰水型原子炉も, 原子炉で蒸気を発生させて発電タービンを回す点や, 非常時に原子炉を停止させ冷却に移行させる過程は同じですので, 配管内部の摩耗も大きな違いはないものと思われ, 80kmに及ぶ特殊合金パイプの摩耗状態の判断の難しさもあります。

※日本の発電用原子炉は, 沸騰水型原子炉(BWR)と加圧水型原子炉(PWR)があります。沸騰水型原子炉(BWR)である東海第二発電所原子炉施設は, 原子炉で熱した水を沸騰させ, その蒸気(放射性物質を含む)でタービンを回し, 発電機で発電します。タービンを回し終わった蒸気は, 復水器にてパイプ内の軽水(普通の水)で冷やされて水に戻り, 原子炉容器に戻され, 循環します。

参考資料は以下

<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B2%B8%E9%A8%B0%E6%B0%B4%E5%9E%8B%E5%8E%9F%E5%AD%90%E7%82%89#/media/File:BoilingWaterReactor.gif>

* 委員指摘事項等及び県民意見は第15回ワーキングチーム
(令和元年6月26日)資料3-1及び資料3-2に基づく

【県民意見(頂いたご意見・特に関心のある事項)】

No.1140

2. 運転期間の延長において、問題なのはパイプの溶接個所(数万カ所ある)の信頼性です。SUS材自体の組成のばらつきに加えて、溶接技術のばらつきを含めての複合信頼性の検証は出来ていないでしょう。SUS材の溶接のばらつきは技能熟練レベルによって大きく、日立製作所はこのために熟練技能者の育成のために、会社内の学校に溶接科を設けたほどです。

今後、別資料(論点No.200)で説明

No.1181

P.10-14, 25-27

原子力発電所には数え切れないほど無数の配管があります。その配管の接続部分は溶接ですから、古くなると腐食し、放射線が当たる部分はなおのこと劣化が激しくひび割れ等を起こすと思います。また、原子力発電所施設全体の基準地震動が同じではありませんし、地震動は場所によって伝わり方が一律ではありませんから、溶接部分は特に危険が高くなると考えます。

P.22-24

P.10-14, 25-27

まして、東海第二は古い原発です。また、配管の全てをチェックすることは不可能です。このように、配管の危険性を考えると、そのチェックが完璧にできない限り地震による破壊の可能性を否定できないのではないのでしょうか。何よりも怖いのは配管ですし、福島第一原発においても、地震による配管への影響はまだ確認・検証されていません。東海第二は福島と同じタイプですので、この検証なしには再稼働は到底認められません。

P.10-14, 25-27

* 委員指摘事項等及び県民意見は第15回ワーキングチーム
(令和元年6月26日)資料3-1及び資料3-2に基づく