

島根原子力発電所 2 号炉 審査資料	
資料番号	PLM-09 改 02
提出年月日	2023 年 4 月 6 日

島根原子力発電所 2 号炉高経年化技術評価
(耐震安全性評価)

補足説明資料

2023 年 4 月 6 日

中国電力株式会社

目次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
3. 評価対象と評価手法	4
(1) 評価対象	4
①耐震安全性評価対象機器	4
②耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象の抽出	4
(2) 評価手法	8
①主な適用規格	8
②耐震安全性評価の評価手法	8
③工事計画認可補正申請で用いた耐震評価手法等の反映について	10
(3) 評価用地震力	11
(4) 評価用地震動	11
(5) 代表の選定	15
4. 代表の耐震安全性評価	16
(1) 耐震安全性評価	16
①低サイクル疲労	16
②中性子照射脆化	16
③照射誘起型応力腐食割れ	16
④熱時効	16
⑤摩耗	17
⑥腐食（流れ加速型腐食）	17
⑦腐食（全面腐食）	19
⑧動的機能維持に係る耐震安全性評価	21
⑨浸水防護施設の耐震安全性評価	22
(2) 現状保全	22
(3) 総合評価	22
5. まとめ	22
(1) 審査ガイド適合性	22
(2) 施設管理に関する方針として策定する事項	27

- 別紙 1. 建設後の耐震補強及び今後の予定について
- 別紙 2. 耐震安全性評価に用いる現行の JEAG4601 以外の値を適用したケースについて
- 別紙 3. 新規制基準適合性に係る工事計画認可等における審査内容の反映について
- 別紙 4. 低サイクル疲労を考慮した耐震安全性評価について
- 別紙 5. 中性子照射脆化を考慮した耐震安全性評価について
- 別紙 6. 流れ加速型腐食を考慮した耐震安全性評価について
- 別紙 7. 機器付基礎ボルトの腐食を考慮した耐震安全性評価について
- 別紙 8. 後打ちアンカの耐震安全性評価について
- 別紙 9. 動的機能維持評価について
- 別紙 10. 機器・配管系の耐震安全性評価に用いた地震力について

1. 概要

本資料は、「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則」第 82 条第 1 項の規定に基づき実施した高経年化技術評価のうち、耐震安全性評価の評価結果について、補足説明するものである。

なお、高経年化対策に関する各機器・構造物の技術評価（以下、「技術評価」という。）については高経年化技術評価書に取りまとめている。

高経年化評価における耐震安全性評価とは、耐震安全性に影響する可能性がある経年劣化事象について、評価対象機器・構造物の経年劣化を加味して耐震重要度分類に応じた地震力を用いた評価を行い、評価対象機器・構造物の機能維持に対する経年劣化事象の影響を評価することをいう。

2. 基本方針

各機器・構造物の材質、環境条件等を考慮し、発生し得る経年劣化事象に対して技術評価を行った結果、保全対策を講じることによっても管理ができないという経年劣化事象は抽出されていない。

したがって、耐震性を考慮した場合にも、耐震性に影響を与える経年劣化事象を保全対策により適切に管理することで、耐震安全性の確保が可能であると考えられる。

しかしながら、高経年プラントの耐震性については、上記経年劣化事象の管理の観点からも、技術的評価を実施して安全性を確認しておく必要があると考えられることから、高経年化技術評価において耐震安全性の評価を実施するものである。

耐震安全性評価の基本方針は、評価対象機器について発生し得る経年劣化事象に対して実施した技術評価に耐震性を考慮した技術的評価を実施して、運転開始後 60 年時点までの期間において「実用発電用原子炉施設における高経年化対策審査ガイド」および「実用発電用原子炉施設における高経年化対策実施ガイド」に定める要求事項に適合することを確認することである。耐震安全性を評価するにあたっての要求事項を表 1 に整理する。

表 1 (1/2) 耐震安全性評価についての要求事項

が 什	要求事項
<p>実用発電用原子炉施設における高経年化対策審査が 什</p>	<p>3. 高経年化技術評価等の審査の視点・着眼点</p> <p>(1) 高経年化技術評価の審査</p> <p>⑥動的機器（部位）の抽出</p> <p>動的機器（部位）を評価対象外としている場合、発電用原子炉設置者の施設管理活動において、材料等の経年劣化の影響から生じる性能低下の状況が的確に把握され、高経年化技術評価の開始時期以降もこれらが適切に行われることを保証しているかを、施設管理要領等の文書及び施設管理実績等により審査する。</p> <p>⑱-1 耐震安全性評価の対象となる経年劣化事象の抽出</p> <p>経年劣化の進展評価結果に基づき、耐震安全性評価の対象となる経年劣化事象を抽出していることを審査する。</p> <p>⑲-1 耐震安全上着目すべき経年劣化事象の抽出</p> <p>耐震安全上着目すべき経年劣化事象を抽出していることを審査する。</p> <p>⑳-1 耐震安全性の評価</p> <p>実施が 什 3. 1⑤に規定する期間の満了日までの期間について、経年劣化事象の発生又は進展に伴う機器・構造物の耐震安全性を評価しているかを審査する。</p> <p>㉑-1 耐震安全上の現状保全の評価</p> <p>耐震安全性に対する現状の保全策の妥当性を評価しているかを審査する。</p> <p>㉒-1 耐震安全上の追加保全策の策定</p> <p>想定した経年劣化事象に対し、耐震安全性が確保されない場合に、現状保全に追加する必要がある新たな保全策を適切に策定しているかを審査する。</p> <p>(2) 長期施設管理方針の審査</p> <p>①長期施設管理方針の策定</p> <p>すべての追加保全策について、長期施設管理方針として策定されているかを審査する。</p>

表 1 (2/2) 耐震安全性評価についての要求事項

がト	要求事項
<p>実用発電用原子炉施設における高経年化対策実施がト</p>	<p>3. 1 高経年化技術評価の実施及び見直し</p> <p>⑥ 耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象については、経年劣化を加味した機器・構造物の耐震安全性評価を行い、必要に応じ追加保全策を抽出すること。</p> <p>実用炉規則第 82 条第 1 項から第 3 項までの規定による高経年化技術評価に係る耐震安全性評価は、規制基準（当該評価を行う時点後の直近の運転開始以後 30 年、40 年又は 50 年を経過する日において適用されているものに限る。）の要求を満たすことが確認された確定した基準地震動及び弾性設計用地震動を用いた評価を行うこと。当該高経年化技術評価後に、当該評価に用いた基準地震動及び弾性設計用地震動が見直された場合には、高経年化技術評価を速やかに見直すこと。</p> <p>⑥を行うに当たっては、PLM 基準 2008 版の 6.3.4 耐震安全性評価を用いることができる。</p> <p>3. 2 長期施設管理方針の策定及び変更</p> <p>長期施設管理方針の策定及び変更に当たっては、以下の要求事項を満たすこと。</p> <p>① 高経年化技術評価の結果抽出された全ての追加保全策（発電用原子炉の運転を断続的に行うことを前提として抽出されたものと冷温停止状態が維持されることを前提として抽出されたものの全て。）について、発電用原子炉ごとに、施設管理の項目及び当該項目ごとの実施時期を規定した長期施設管理方針を策定すること。</p> <p>なお、高経年化技術評価の結果抽出された追加保全策について、発電用原子炉の運転を断続的に行うことを前提とした評価から抽出されたものと冷温停止状態が維持されることを前提とした評価から抽出されたもの間で、その対象の経年劣化事象及び機器・構造物の部位が重複するものについては、双方の追加保全策を踏まえた保守的な長期施設管理方針を策定すること。</p>

3. 評価対象と評価手法

(1) 評価対象

①耐震安全性評価対象機器

評価対象機器は、技術評価における評価対象機器と同じとする。

上記の評価対象機器のうち、以下の機器を耐震安全性評価における評価対象機器とする。

- ・各高経年化技術評価書で行った機器のグループ化における「同一グループ内での代表機器」
- ・「同一グループ内での代表機器」より耐震重要度が上位の機器

耐震安全性評価の各経年劣化事象における対象機器は表 2 に示す機器とし、「4. 代表の耐震安全性評価」にて評価を実施する。

なお、評価対象機器に対して建設後に実施した耐震補強の実績については別紙 1 に示す。

②耐震安全上考慮する必要がある経年劣化事象の抽出

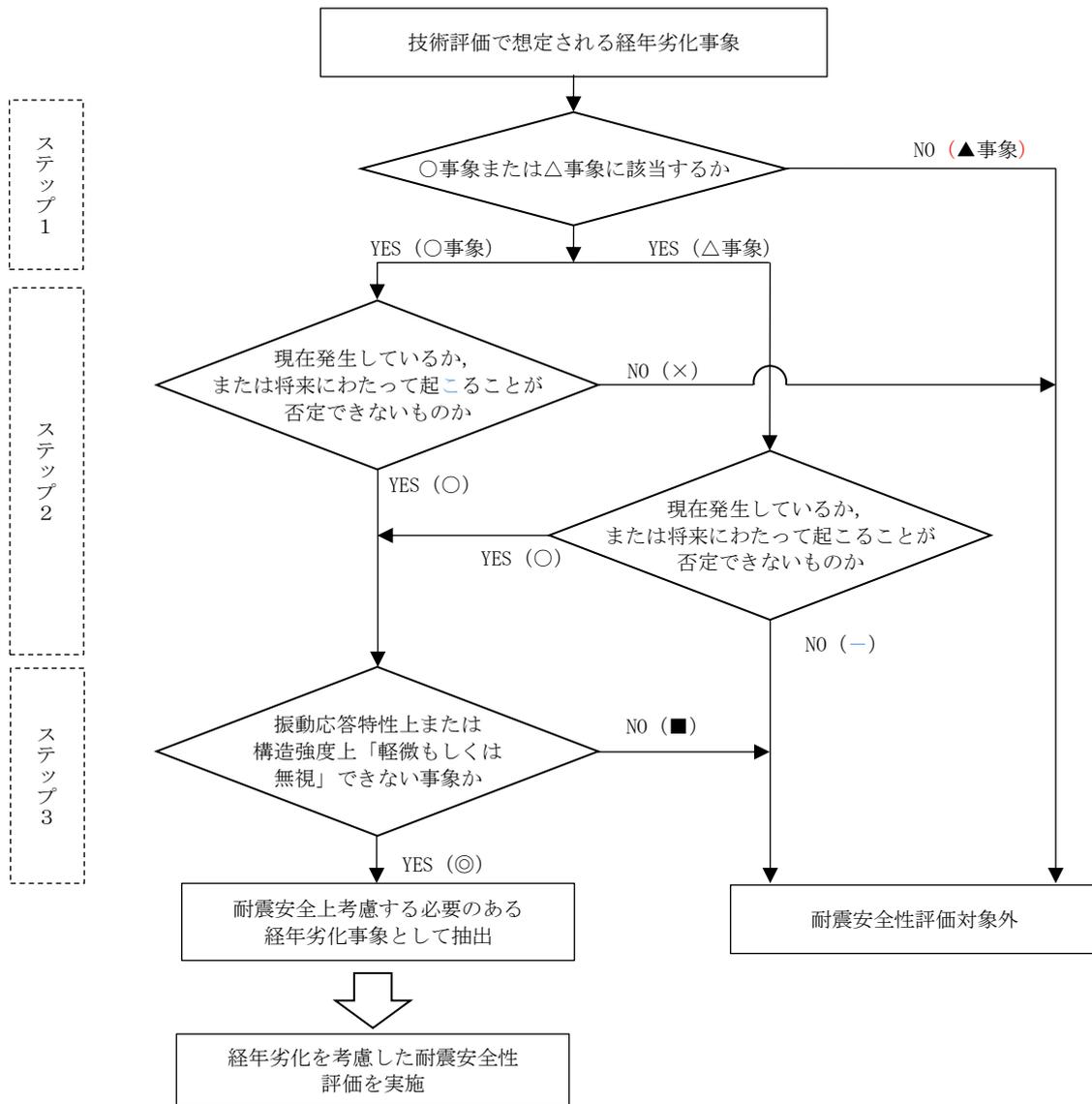
①にて抽出された耐震安全性評価対象機器において、各高経年化技術評価書で評価対象機器・部位ごとに想定される経年劣化事象については、以下のとおり分類される。

- a. 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象（○事象）
- b. 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）
- c. 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象
（日常劣化管理事象以外）（▲事象）

このうち、耐震安全性評価対象機器として、a. 及び b. のうち「現在発生しているか、または将来にわたって起こることが否定できないもの」でかつ「振動応答特性上、または構造強度上「軽微もしくは無視」できない経年劣化事象」について、耐震安全上考慮する必要がある経年劣化事象として抽出し、経年劣化を考慮した耐震安全性評価を実施する。

耐震安全上考慮する必要がある経年劣化事象の抽出フローを図 1 に示す。

浸水防護施設についても、表 2 に示す機器・構造物のうち配管、弁、コンクリート構造物および鉄骨構造物ならびに計測制御設備に分類されており、それぞれの機器に対して耐震安全上考慮する必要がある経年劣化事象を抽出する。



【凡例】

- ：評価対象として抽出
- －：評価対象から除外
- ×：現在発生しておらず、今後も発生の可能性がないもの、または小さいものとして評価対象から除外
- ：振動応答特性上または構造強度上「軽微もしくは無視」できる事象として評価対象から除外
- ◎：耐震安全上考慮する必要がある経年劣化事象として抽出
- 事象：高経年化対策上着目すべき経年劣化事象
- △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（日常劣化管理事象）
- ▲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（日常劣化管理事象以外）

YES/NO（ ）内の記号は耐震評価の分類を示す。

図1 耐震安全上考慮する必要がある経年劣化事象の抽出フロー

表2 耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象一覧

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	熱時効	摩耗	腐食		コンクリートの 強度・ 遮蔽能力低下
						流れ加速 型腐食	全面腐食	
ポンプ	◎	—	—	◎	—	—	◎*1	—
熱交換器	—	—	—	—	◎*2	◎	◎*1	—
ポンプモータ	—	—	—	—	—	—	—	—
容器	◎	◎	—	—	—	—	◎*1	—
配管	◎	—	—	—	—	◎	◎*1	—
弁	◎	—	—	◎	—	—	—	—
炉内構造物	◎	—	×	—	—	—	—	—
ケーブル	—	—	—	—	—	—	◎*1	—
タービン設備	—	—	—	—	—	—	◎*1	—
コンクリートおよび 鉄骨構造物	—	—	—	—	—	—	—	×
計測制御設備	—	—	—	—	—	—	◎*1	—
空調設備	—	—	—	—	—	—	◎*1	—
機械設備	—	—	—	—	—	—	◎*1	—
電源設備	—	—	—	—	—	—	◎*1	—

*1：基礎ボルト

*2：排ガス予熱器の管支持板に流れ加速型腐食による減肉を考慮した場合に発生する，管支持板と伝熱管外面の摩耗による減肉を考慮

【凡例】

- ◎：「現在発生しているか，または将来にわたって起こることが否定できないもの」かつ「振動応答特性上または構造強度上「軽微もしくは無視」できない事象」
- ×：高経年化対策上着目すべき経年劣化事象であるが，現在発生しておらず，今後も発生の可能性がないもの，または小さいもの
- ：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，または小さいもの

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は以下のとおり。

(a) 技術評価の結果、現在発生しておらず、今後も発生の可能性がない事象、または小さい事象

a. 炉内構造物の照射誘起型応力腐食割れ

炉心支持板、燃料支持金具及び制御棒案内管は、しきい照射量を超えないことから、照射誘起型応力腐食割れの可能性はない。

上部格子板のグリッドプレートは、しきい照射量を超えるものの、溶接部はなく、運転中の差圧、熱、自重等に起因する引張応力成分が低いことから、照射誘起型応力腐食割れの可能性はない。

炉心シュラウド溶接継手（熱影響部含む）は、しきい照射量を超える範囲について内外面にウォータージェットピーニング施工による残留応力の改善を行っていることから、照射誘起型応力腐食割れが発生する可能性はない。

炉心シュラウド中間胴の母材部は、しきい照射量を超える範囲についても、溶接による引張残留応力はなく、運転中の差圧、熱、自重等に起因する引張応力成分が低いことから、照射誘起型応力腐食割れが発生する可能性はない。

b. コンクリート構造物の熱、放射線照射、中性化、塩分浸透および機械振動による強度低下ならびに熱によるしゃ蔽能力低下

いずれの事象も高経年化技術評価における評価結果から「現在発生しておらず、今後も発生の可能性がないもの、または小さいもの」であり、耐震性への影響はない。

(b) 振動応答特性上または構造強度上「軽微もしくは無視」できる事象

a. 制御棒の照射誘起型応力腐食割れ

鉛直荷重については、スクラム荷重は地震荷重に比べ非常に大きく、地震荷重が制御棒に与える影響は極めて小さい。水平荷重については、制御棒上下に取り付けたローラが燃料集合体チャンネルボックスにあたりながら、燃料集合体の動きに呼応して挿入されることから、地震の影響は小さく、制御棒自体の健全性に影響を与えるものではない。

b. 絶縁特性低下、特性変化および導通不良

発生する部位に依らず機器の振動応答特性または構造・強度上「軽微もしくは無視」できる。

c. シール材等の劣化（気密性低下）

シール材等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。

(2) 評価手法

①主な適用規格

耐震安全性評価に用いた規格を以下に示す。

- ・日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 2005年版(2007年追補版を含む) JSME S NC1-2005(2007)」(以下、「設計・建設規格」という。)
- ・日本機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格 2008年版 JSME S NA1-2008」(以下、「維持規格」という。)
- ・日本電気協会「原子力発電所配管破損防護設計技術指針 JEAG4613-1998」(以下、「JEAG4613-1998」という。)
- ・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 JEAC4206-2007」(以下、「JEAC4206」という。)
- ・日本機械学会「発電用原子力設備規格 沸騰水型原子力発電所 配管減肉管理に関する技術規格 JSME S NH1-2006」(以下、「配管減肉管理規格」という。)
- ・日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG4601-補-1984」(以下、「JEAG4601」という。)
- ・日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987」(以下、「JEAG4601」という。)
- ・日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針追補版 JEAG4601-1991」(以下、「JEAG4601」という。)

なお、現行の JEAG4601 以外の値を適用した耐震安全性評価を実施したケースについては、別紙 2 に記載する。

②耐震安全性評価の評価手法

各劣化事象に対する耐震安全性評価手法の概要を以下に示す。なお、別紙 3 に示す新規制基準適合に係る工事計画認可等において適用された事項については、高経年化技術評価における耐震安全性評価にも適用する。

(a) 低サイクル疲労 (ポンプ, 容器, 配管, 弁, 炉内構造物)

運転開始後 60 年時点までの推定過渡回数を考慮した疲れ累積係数と基準地震動 S_s または弾性設計用地震動 S_d を考慮した疲れ累積係数の合計値が許容値 1 以下となることを確認する。

(b) 中性子照射脆化 (容器)

運転開始後 60 年時点での K_{IC} 下限包絡曲線と基準地震動 S_s の荷重を考慮した K_I 曲線を算出し、 K_{IC} 下限包絡曲線と K_I 曲線を比較した結果が $K_{IC} > K_I$ となり、許容限界を下回ることを確認する。

(c) 熱時効 (ポンプ, 弁)

き裂を想定し、評価対象部位の地震時のき裂進展力が運転開始後 60 年時点の熱時効を考慮した材料のき裂進展抵抗を下回ることを確認する。

なお、高経年化技術評価「2 相ステンレス鋼の熱時効」にて地震荷重を含んだ評価を実施している。

(d) 摩耗（熱交換器）

伝熱管の施栓基準である，管支持板の減肉による支持間隔喪失，または伝熱管内面の減肉を考慮して地震時の発生応力を算出し，許容応力を下回ることを確認する。

(e) 腐食（流れ加速型腐食）（配管，熱交換器）

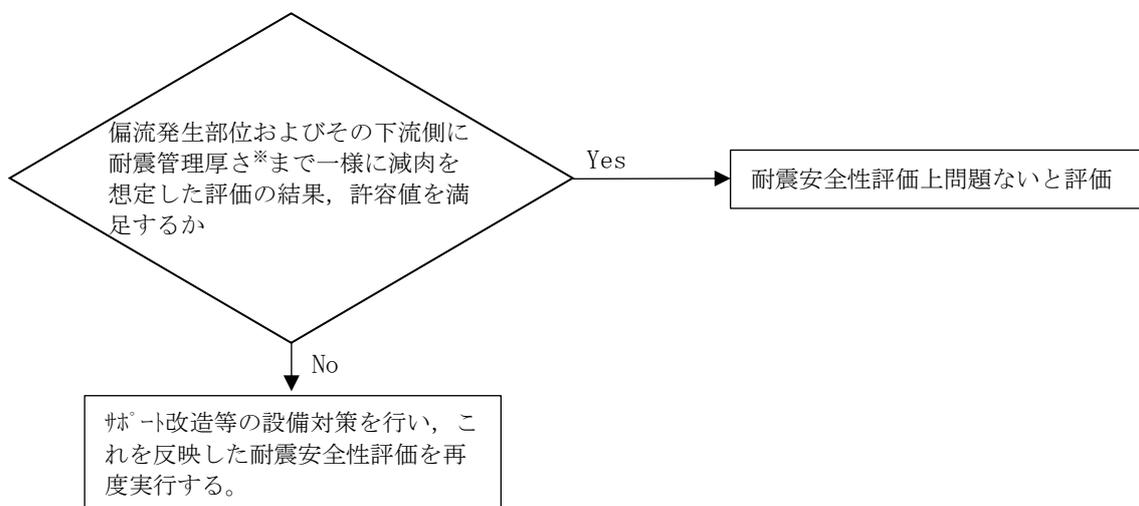
a. 熱交換器

伝熱管の施栓基準である，管支持板の減肉による支持間隔喪失，または伝熱管内面の減肉を考慮して地震時の発生応力を算出し，許容応力を下回ることを確認する。

b. 配管

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，または疲れ累積係数を算出し，許容値を下回ることを確認する。

腐食（流れ加速型腐食）（配管）の耐震安全性評価フローを図2に示す。



※ 減肉を考慮した40年目の想定厚さと公称肉厚の80%を比較し，いずれか小さい値を耐震管理厚さとして設定

図2 腐食（流れ加速型腐食）（配管）の耐震安全性評価フロー

(f) 腐食（全面腐食）（熱交換器，基礎ボルト）

運転開始後 60 年時点の腐食減肉を仮定して地震時の発生応力を算出し，許容応力を下回ることを確認する。

(g) 動的機能維持（ポンプ，ポンプモータ，弁，タービン設備，空調設備，機械設備）

地震時に動的機能維持が要求される耐震安全性評価対象機器について，耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象を整理し，振動応答特性上または構造強度上「軽微もしくは無視」できる事象か確認し，「軽微もしくは無視」できない事象については，評価を実施し耐震安全性評価上問題のないことを確認する。

③工事計画認可補正申請で用いた耐震評価手法等の反映について

現状の設備状態に基づき耐震安全性評価を行うことを基本とするが，工事計画認可補正申請（2021 年 10 月 1 日，2021 年 12 月 22 日，2022 年 3 月 28 日，2022 年 5 月 25 日，2022 年 7 月 28 日，2022 年 10 月 31 日および 2022 年 12 月 23 日の計 7 回）（以下，「工認補正」という。）に係る設備については，工認補正どおりに工事が実施されることを前提とした耐震安全性評価を行い，2023 年 2 月 28 日に工認補正申請書の内容を反映した高経年化技術評価の補正を実施した。

工事計画認可については，現在も審査中であるため，審査の過程で高経年化技術評価に影響する新たな変更が生じた場合には，高経年化技術評価側に反映する。

なお，本補足説明資料には，工認補正後に生じた変更点（モデルの変更等）を一部反映している。工事計画認可等における審査内容の反映事項については別紙 3 に示す。

また，工認補正にて適用されている地震動，評価手法等（評価方法，評価モデル等）を適切に反映した評価を実施する。

(3) 評価用地震力

耐震安全性評価に用いる評価用地震力は各機器の耐震重要度に応じて表 3 のとおり選定する。

表 3 耐震重要度に応じた耐震安全性評価に用いる評価用地震力

耐震重要度	評価用地震力
S クラス	基準地震動 S_s^{*1} 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^{*2} により定まる地震力と S クラス設備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 ^{*3*4}
C クラス	C クラスの機器に適用される静的地震力 ^{*4}

- *1 「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置，構造及び設備の基準に関する規則（平成 25 年原子力規制委員会規則第 5 号）」に基づき策定した，応答スペクトルに基づく地震動評価結果による基準地震動 (S_s -D)，断層モデルを用いた手法に基づく地震動評価結果による基準地震動 (S_s -F1, F2)，観測記録に基づく地震動評価 (S_s -N1, N2)
- *2 弾性設計用地震動 S_d は，基準地震動 S_s との応答スペクトルの比率が目安として 0.5 を下回らないよう基準地震動 S_s に係数 0.5 を乗じて設定している。さらに，「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（昭和 56 年 7 月 20 日原子力安全委員会決定，平成 13 年 3 月 29 日一部改訂）」における基準地震動 S_1 の応答スペクトルをおおむね下回らないよう配慮した地震動も弾性設計用地震動 S_d として設定している。
- *3 支持構造物の振動と共振のおそれのあるものについては，弾性設計用地震動 S_d による地震力の 1/2 についても考慮する。
- *4 S クラス設備または常設重大事故等対処設備へ波及的影響を及ぼす可能性のある B クラス設備および C クラス設備並びに溢水源としない B, C クラス設備の設計用地震力は S_s 地震力を適用する。

(4) 評価用地震動

高経年化技術評価における耐震安全性評価では，原子炉設置変更許可（2021 年 9 月 15 日）（以下、「設置変更許可」という。）にて設定されている基準地震動 S_s を用いて評価を実施する。表 4 に考慮した地震と基準地震動の最大加速度，図 3 に基準地震動の応答スペクトルを示す。

表 4 考慮した地震と地震動の最大加速度

基準地震動		最大加速度 (cm/s ²)	
		水平方向	鉛直方向
Ss-D	「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」による基準地震動 [応答スペクトル手法による基準地震動]	820	547
Ss-F1	「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」による基準地震動 [断層モデル手法による基準地震動（宍道断層による地震の短周期の地震動レベルの不確かさ（1.5 倍）破壊開始点 5）]	549 (NS) 560 (EW)	337
Ss-F2	「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」による基準地震動 [断層モデル手法による基準地震動（宍道断層による地震の短周期の地震動レベルの不確かさ（1.5 倍）破壊開始点 6）]	522 (NS) 777 (EW)	426
Ss-N1	「震源を特定せず策定する地震動」による基準地震動 [2004 年北海道留萌支庁南部地震（K-NET 港町）の検討結果に保守性を考慮した地震動]	620	320
Ss-N2	「震源を特定せず策定する地震動」による基準地震動 [2000 年鳥取県西部地震の賀祥ダム（監査廊）の観測記録]	528 (NS) 531 (EW)	485

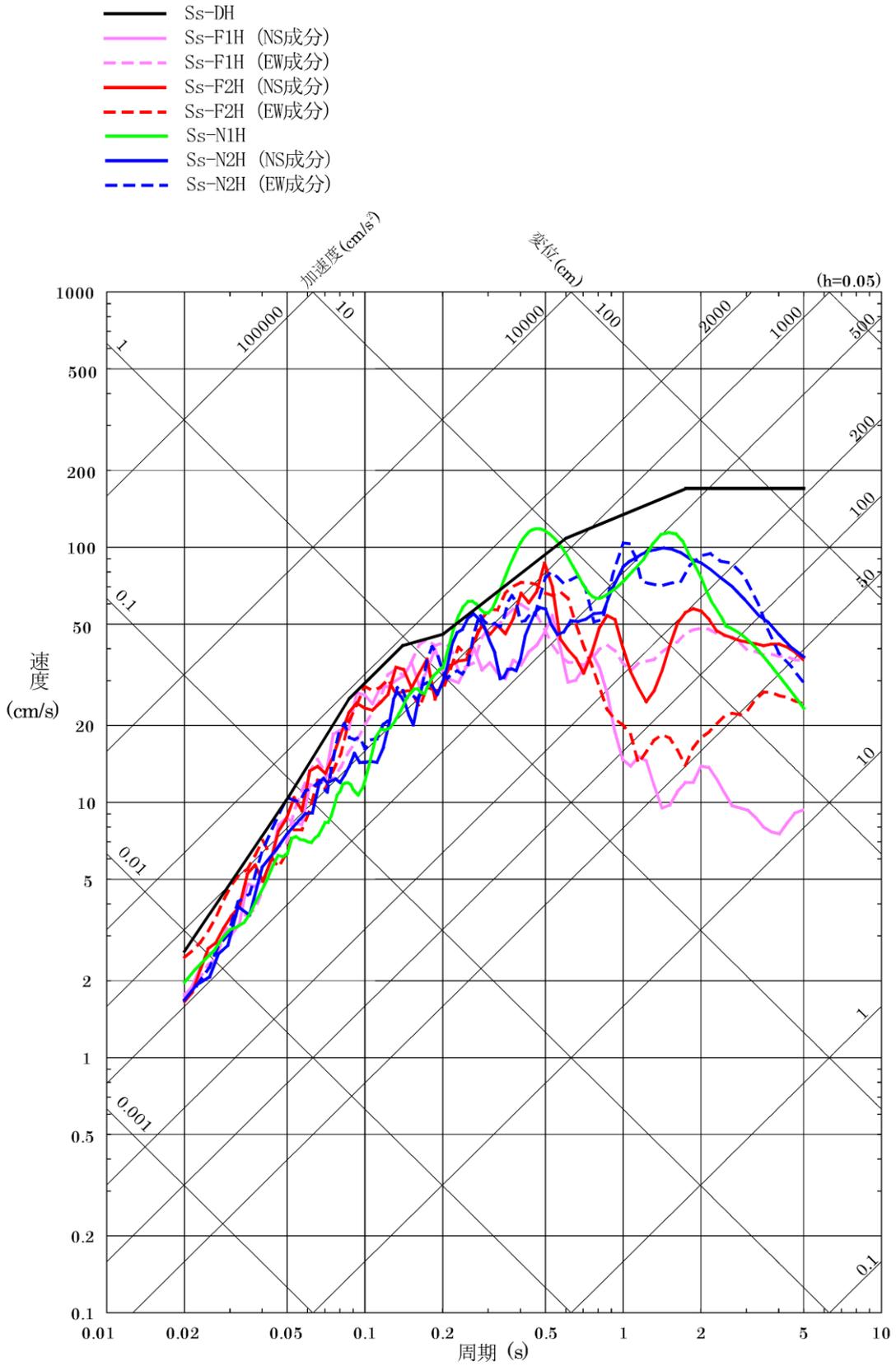


図 3(1/2) 基準地震動の応答スペクトル (水平方向)

(5) 代表の選定

耐震安全性評価においては、技術評価における評価対象機器全てを対象として耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象を抽出し、経年劣化を考慮した耐震安全性評価を実施することにより、耐震安全上問題ないことを確認している。

補足説明資料では、耐震安全性評価を実施する機器のうち、表5に示すとおり代表を選定し、詳細な評価内容について記載する。

表5 補足説明資料における代表の選定

評価項目	詳細評価内容を記載する機器・部位	選定理由
低サイクル疲労	原子炉圧力容器	プラントの安全上の重要性を考慮し、原子炉冷却材圧力バウダリの機能上最も重要である機器
中性子照射脆化	原子炉圧力容器円筒胴	中性子照射脆化を考慮した評価が必要となる機器
熱時効	原子炉再循環ポンプ（ケーシング）	熱時効を考慮する必要のある機器のうち、フェーズ量が最大の機器かつ機器に作用する応力が最大の機器
摩耗	排ガス予熱器	管支持板の腐食（流れ加速型腐食）の発生による管支持板と伝熱管外面の摩耗を考慮した耐震評価の結果、発生応力と許容応力の比が最大である機器
腐食（流れ加速型腐食）	原子炉ベントリ系配管	配管の腐食（流れ加速型腐食）による配管減肉を考慮した耐震評価の結果、発生応力と許容応力の比が最大である箇所および疲れ累積係数が最大である箇所
	原子炉補機冷却系熱交換器	耐震Sクラスかつ伝熱管の腐食（流れ加速型腐食）を考慮した耐震評価の結果、発生応力と許容応力の比が最大である機器
	排ガス予熱器	管支持板の腐食（流れ加速型腐食）の発生による管支持板と伝熱管外面の摩耗を考慮した耐震評価の結果、発生応力と許容応力の比が最大である機器
	原子炉浄化再生熱交換器 排ガス予熱器	胴の腐食（流れ加速型腐食）を考慮した耐震評価の結果、発生応力と許容応力の比が最大である機器
腐食（全面腐食）	1. 機器付基礎ボルト ・ 残留熱除去系熱交換器 ・ 原子炉浄化系補助熱交換器	・ 過去において耐震補強実績があり且つ今回の評価において補強を前提とした評価を行った機器 ・ 発生応力と許容応力の比が最大である機器 ・ 発生応力が最大である機器
	2. 後打ちケミカルカ、メカニカルカボルト	発電所構内で使用されている後打ちケミカルカ、メカニカルカボルトを抽出
動的機能維持	蒸気内側隔離弁	機器の応答加速度に影響を与える経年劣化事象である、配管の腐食（流れ加速型腐食）による減肉を考慮した耐震評価対象範囲に設置される動的機能維持対象機器

4. 代表の耐震安全性評価

(1) 耐震安全性評価

①低サイクル疲労

原子炉圧力容器給水ノズルにおける運転開始後 60 年までの推定過渡回数を考慮した疲れ累積係数に基準地震動 S_s または弾性設計用地震動 S_d による疲れ累積係数の合計値が許容値 1 を下回ることから、耐震安全性評価上問題ない。

評価結果を表 6 に、算出過程を別紙 4 にそれぞれ示す。

表 6 原子炉圧力容器給水ノズルの低サイクル疲労の耐震安全性評価結果

評価対象	運転実績回数* ¹ に基づく疲れ累積係数	地震動による疲れ累積係数* ²	合計 (許容値：1 以下)
給水ノズル	0.411	0.001	0.412

*1：過渡実績を踏まえ、運転開始後 60 年時点での推定過渡回数を保守的に想定（2015 年 7 月までの実績回数に基づく運転開始後 60 年時点での推定過渡回数を算出し、プラント運転中に発生していない過渡事象を保守的に 1 回発生するものとして加算）した疲れ累積係数

*2：基準地震動 S_s および弾性設計用地震動 S_d のうちいずれか大きい評価結果を示す。また、地震等価繰り返し回数は工認補正における条件と同様、 S_s については 150 回、 S_d については 300 回にて評価した

②中性子照射脆化

原子炉圧力容器円筒胴について運転開始後 60 年時点において、地震時に発生する応力拡大係数 K_I を評価した結果、破壊力学上の許容限界である K_{IC} を下回ることから、耐震安全性評価上問題ない。

評価結果および詳細な算出過程を別紙 5 に示す。

③照射誘起型応力腐食割れ

炉内構造物の照射誘起型応力腐食割れについては、「高経年化対策上着目すべき経年劣化事象であるが、現在発生しておらず、今後も発生の可能性が無いもの、または小さいもの」と分類し、耐震安全性評価は不要と判断している。

④熱時効

熱時効の耐震安全性評価では、技術評価の評価手法と同様に、代表評価対象部位を原子炉再循環ポンプのケーシングとし、脆化予測モデル（H3T モデル：Hyperbolic Time Temperature Toughness）を用いて決定した運転開始後 60 年時点の熱時効を考慮した材料のき裂進展抵抗 (J_{mat}) と、き裂安定性評価用想定き裂と構造系に与えられた応力（運転状態の荷重条件に基準地震動 S_s による荷重を考慮）から算出されるき裂進展力 (J_{app}) を「DUCTILE FRACTURE HANDBOOK」EPRI NP-6301-D (1989) の volime1 1 章 2 項 2. 1~2. 3 節の J 積分の解析解に基づき算出し比較した結果、き裂進展抵抗 (J_{mat}) がき裂進展力 (J_{app}) と交差し、き裂進展力 (J_{app}) がき裂進展抵抗 (J_{mat}) を下回ることから、原子炉再循環ポンプのケーシングは不安定破壊することなく、耐震安全性評価上問題ない。

図 4 に原子炉再循環ポンプのケーシングのき裂安定性評価結果を示す。

なお、詳細な算出過程は、熱時効の高経年化技術評価の補足説明資料に記載のとおりである。

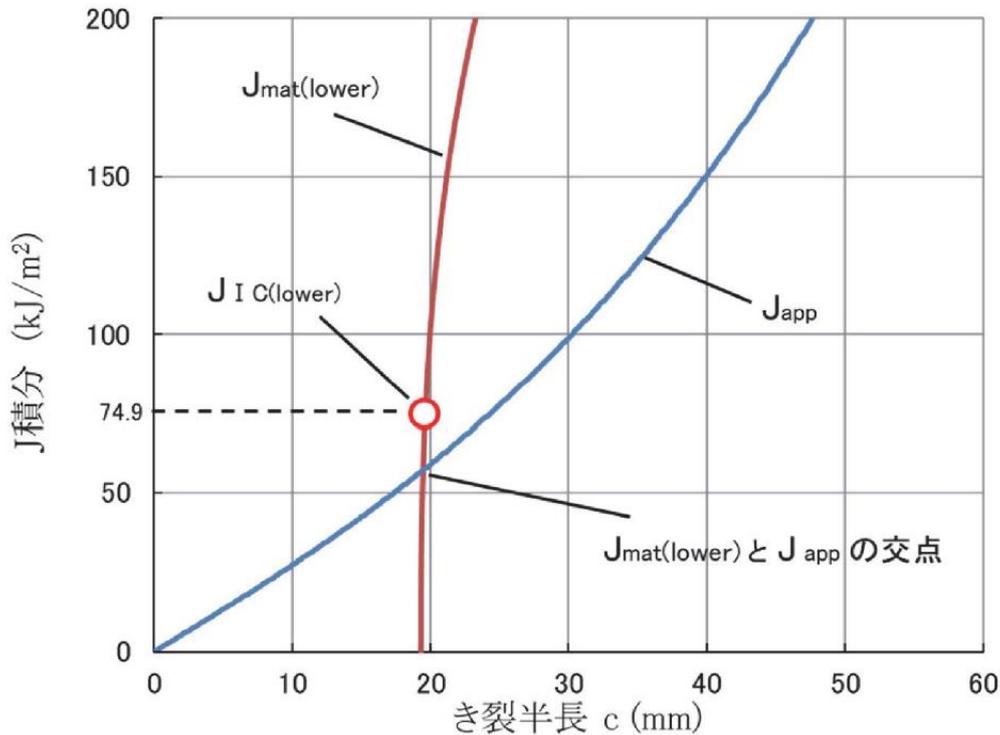


図 4 原子炉再循環ポンプのケーシングのき裂安定性評価結果

⑤ 摩耗

排ガス予熱器の伝熱管の摩耗を想定した耐震安全性評価結果については、腐食及び摩耗を考慮した評価として、⑥腐食（流れ加速型腐食）項に示す。

⑥ 腐食（流れ加速型腐食）

(a) 配管の腐食（流れ加速型腐食）

炭素鋼配管（原子炉ベントドレン系配管）の腐食（流れ加速型腐食）を想定した耐震安全性評価結果を表 7 に示す。

減肉を考慮した 40 年目の想定厚さと公称肉厚の 80%を比較し、いずれか小さい値を耐震管理厚さとした評価において、地震時の発生応力または疲労累積係数は許容値を下回ることから、耐震安全性評価上問題ない。

詳細な算出過程を別紙 6 に示す。

また、評価対象機器の建設後の耐震補強実績および工事計画認可及び今回の高経年化技術評価に伴い耐震補強を考慮して耐震評価を行った機器の補強概要を別紙 1 に示す。

表7 原子炉ベントドレン系配管の腐食（流れ加速型腐食）の耐震安全性評価結果

評価対象	区分	耐震重要度	評価地震力	許容応力状態	応力種別	発生応力*1 (MPa)	許容応力*3 (MPa)
						耐震管理厚さ*2	
原子炉ベントドレン系配管	クラス1	S	Ss	IV _A S	一次応力	166	364
					一次+二次応力	868 (疲れ累積係数：0.868)	366 (疲れ累積係数許容値：1を下回る*4)
			Sd	III _A S	一次応力	107	274
					一次+二次応力	487 (疲れ累積係数：0.171)	366 (疲れ累積係数許容値：1を下回る*4)

*1：系統内の評価対象ライン中で最大の発生応力を示す

*2：減肉を考慮した40年目の想定厚さと公称肉厚の80%を比較し、いずれか小さい値

*3：設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表1または表8、表9より求まる値

*4：JEAG4601に基づき、地震動による疲れ累積係数に通常運転時の疲れ累積係数を加えて評価する。なお、地震動による疲れ累積係数の算出に用いる等価繰返し回数は、工事計画認可と同様、一律に設定する等価繰返し回数を用いた地震動による疲れ累積係数と通常運転時の疲れ累積係数の合計が許容値1を超える場合は、個別に設定する等価繰返し回数を用いて地震動による疲れ累積係数を算出し評価する

(b) 熱交換器（伝熱管）の腐食（流れ加速型腐食）

原子炉補機冷却系熱交換器の伝熱管の腐食（流れ加速型腐食）について、伝熱管内面に施栓基準肉厚までの減肉を想定し地震時の発生応力を評価した結果、地震時の発生応力が許容応力を下回ることから、耐震安全性評価上問題ない。

また、排ガス予熱器の腐食（流れ加速型腐食）について、**摩耗による伝熱管の**施栓基準肉厚までの減肉を想定し地震時の発生応力を評価した結果、地震時の発生応力が許容応力を下回ることから、耐震安全性評価上問題ない。

評価結果を表8に、算出過程を別紙6にそれぞれ示す。

表8 原子炉補機冷却系熱交換器（伝熱管）および排ガス予熱器（伝熱管）の腐食（流れ加速型腐食）の耐震安全性評価結果

評価対象	区分	耐震重要度	評価地震力	許容応力状態	応力種別	発生応力(MPa)		許容応力*1
						管板～管支持板	管支持板～管支持板	
原子炉補機冷却系熱交換器伝熱管	クラス3	S, 重*2	Ss	IV _A S	一次応力	44	54	337
			Sd	III _A S		32	38	337
排ガス予熱器伝熱管	—*2	B	1.8Ci	B _A S	一次応力	38	38	139

*1：設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8および表9より求まる値

*2：設計・建設規格にて定められる区分としては基準外であるが、耐震評価上クラス3として扱った

(c) 熱交換器（管支持板）の腐食（流れ加速型腐食）

排ガス予熱器の管支持板の腐食（流れ加速型腐食）による伝熱管の支持間隔喪失を想定した耐震評価において、地震時の発生応力が許容応力を下回ることから、耐震安全性評価上問題ない。

評価結果を表 9 に、詳細な算出過程を別紙 6 にそれぞれ示す。

表 9 排ガス予熱器の管支持板の腐食（流れ加速型腐食）の耐震安全性評価結果

評価対象	区分	耐震重要度	評価地震力	許容応力状態	応力種別	発生応力 (MPa)		許容応力*1 (MPa)
						管板～管支持板	管支持板～管支持板	
排ガス予熱器管支持板	—*2	B	1.8Ci	B _A S	一次応力	19	19	139

*1：許容値は設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 8 および表 9 より求まる値

*2：設計・建設規格にて定められる区分としては基準外であるが、耐震評価上クラス 3 として扱った

(d) 熱交換器の胴の腐食（流れ加速型腐食）

原子炉浄化系再生熱交換器および排ガス予熱器の胴の腐食（流れ加速型腐食）による胴の 60 年分の腐食量を想定した耐震評価において、地震時の発生応力が許容応力を下回ることから、耐震安全性評価上問題ない。

評価結果を表 10 に、詳細な算出過程を別紙 6 にそれぞれ示す。

表 10 原子炉浄化系再生熱交換器（胴）および排ガス予熱器（胴）の腐食（流れ加速型腐食）の耐震安全性評価結果

評価対象	区分	耐震重要度	評価地震力	許容応力状態	応力種別	発生応力 (MPa)	許容応力*1 (MPa)
原子炉浄化系再生熱交換器胴	クラス 3	B	1.8Ci	B _A S	一次一般膜応力	126	198
					一次応力	183	198
排ガス予熱器胴	—*2	B	1.8Ci	B _A S	一次一般膜応力	34	198
					一次応力	63	198

*1：許容値は設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 8 および表 9 より求まる値

*2：設計・建設規格にて定められる区分としては基準外であるが、耐震評価上クラス 3 として扱った

⑦腐食（全面腐食）

(a) 機器付基礎ボルトの腐食（全面腐食）

残留熱除去系熱交換器および原子炉浄化系補助熱交換器の機器付基礎ボルトについて、基礎ボルトの腐食量調査結果から運転開始後 60 年時点で全周に 0.3 mm の減肉を想定した

耐震安全性評価を行い、表 11 に示すとおり運転開始後 60 年時点の腐食を想定した場合においても、地震時の発生応力が許容応力を下回ることから、耐震安全性評価上問題ない。

基礎ボルト概要図を図 5 に、詳細な算出過程を別紙 7 に示す。

また、評価対象機器の建設後の耐震補強実績及び工事計画認可に伴い、耐震補強を考慮して耐震評価を行った機器の補強概要を別紙 1 に示す。

表 11 機器付基礎ボルトの腐食の耐震安全性評価結果

評価対象	耐震重要度	周囲環境温度 (°C)	地震の種類	応力分類	算出応力 (MPa)	許容応力*1 (MPa)
残留熱除去系 熱交換器 機器付基礎ボルト	S, 重*2	DB 条件 : 66	Sd または 静的震度	引張	232	455
				せん断	発生せず	350
			Ss	引張	436	455
				せん断	発生せず	350
		SA 条件 : 140	Ss	引張	436	444
				せん断	発生せず	341
原子炉浄化系 補助熱交換器 機器付基礎ボルト	B*3	DB 条件 : 50	Ss	引張	166	201*4
				せん断	56	159

*1 : 許容値は設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 8 および表 9 より求まる値

*2 : 耐震重要度とは別に常設重大事故等対処設備の区分に応じた耐震設計が求められていることを示す

*3 : S クラス設備または常設重大事故等対処設備への波及的影響を考慮して、Ss 地震力による健全性評価を実施した

*4 : 組合せを考慮した許容引張応力 $f_{ts} = \min[1.4 \times f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}]$ により算出

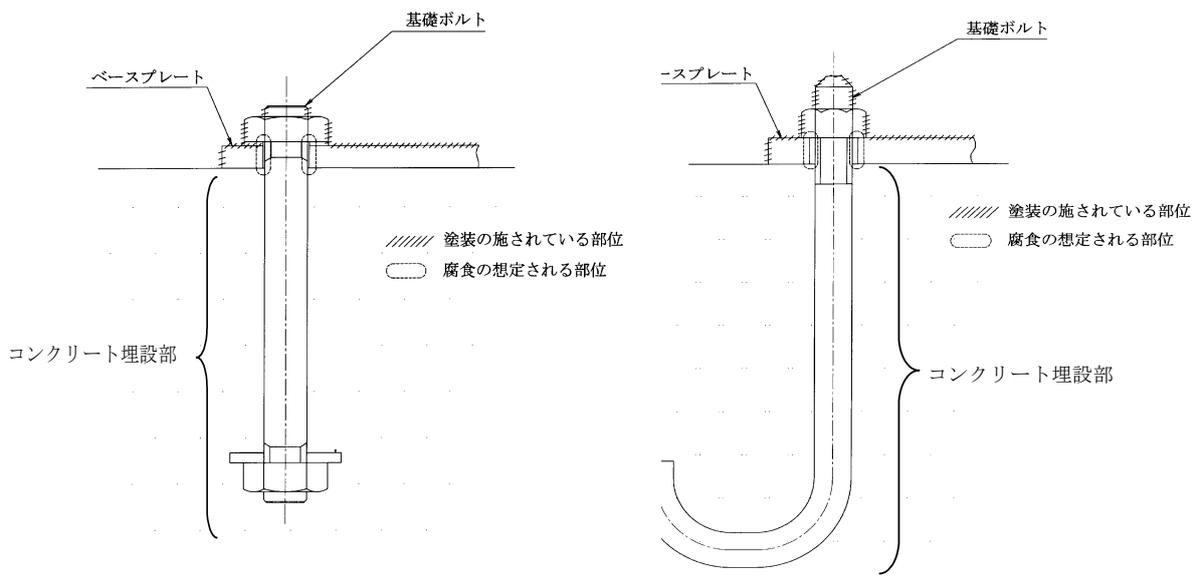


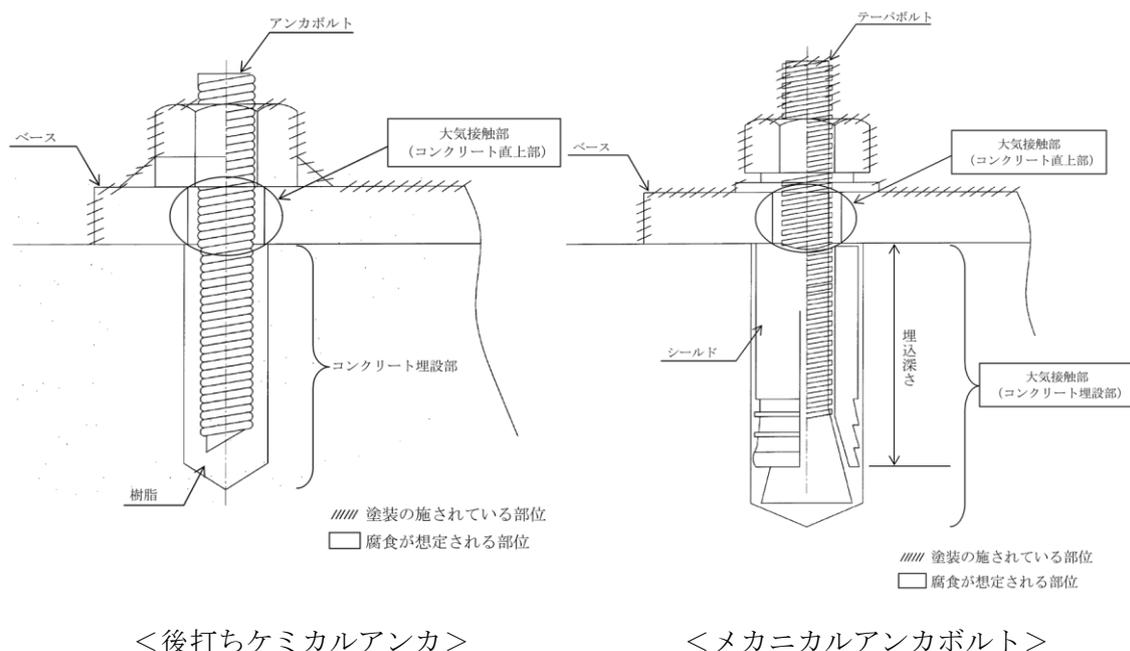
図 5 基礎ボルト概要図

(b) 後打ちアンカの腐食（全面腐食）

後打ちアンカについては、メーカーの後打ちアンカ使用基準に基づき設計許容荷重が定められており、この値以上の荷重がボルトに作用しないよう施工している。

後打ちアンカの腐食を考慮した耐震安全性評価にあたっては、機器付基礎ボルトの腐食を考慮した耐震安全性評価と同様、コンクリート直上部の全周に運転開始後 60 年時点での腐食量 (0.3 mm) を仮定し、保守的に設計許容荷重が作用した場合の応力を評価した結果、地震時の発生応力は許容応力を下回ることから耐震安全性評価上問題ない。

後打ちアンカの概要図を図 6 に、詳細な算出過程を別紙 8 に示す。



<後打ちケミカルアンカ>

<メカニカルアンカボルト>

図 6 後打ちアンカ概要図

⑧動的機能維持に係る耐震安全性評価

蒸気内側隔離弁について、接続する配管の流れ加速型腐食による振動応答特性への影響を考慮し、JEAG4601 に基づきスペクトルモーダル解析から算出される弁駆動部の応答加速度、または設置床の最大応答加速度を 1.2 倍した値 (1.2ZPA) のいずれか大きい方を動的機能維持評価に用いる加速度値として評価した結果、地震時の応答加速度が機能確認済加速度以下であることから、弁の動的機能が維持される。

また、耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象に対する耐震安全性評価の実施により、機器等における動的機能維持に必要となる部位での経年劣化事象は、機器の振動応答特性への影響が「軽微もしくは無視」できる事象であることを確認した。

蒸気内側隔離弁への動的機能維持評価結果を表 12 に、接続する配管に流れ加速型腐食に伴う減肉により応答加速度に影響を及ぼす可能性のある動的機能維持が要求される弁の評価結果および弁以外の動的機能維持対象機器の詳細な検討結果を別紙 9 に示す。

表 12 蒸気内側隔離弁の動的機能維持評価結果

地震力		蒸気内側隔離弁	
		機能維持評価用加速度 ($\times 9.8 \text{ m/s}^2$)	機能確認済加速度 ($\times 9.8 \text{ m/s}^2$)
Ss	水平	3.2	6.0
	鉛直	3.8	6.0

⑨浸水防護施設の耐震安全性評価

浸水防護施設については、耐震安全上考慮すべき経年劣化事象として機器付基礎ボルトおよび後打ちケミカルアンカの腐食（全面腐食）が抽出されているが、腐食による減肉を考慮した場合においても耐震安全性評価上問題ないことを確認した。

なお、技術評価における浸水防護施設の抽出において、他の機器と同様のプロセスで抽出し評価を実施している。

(2) 現状保全

耐震安全性評価対象機器の現状保全については、技術基準のとおりである。

(3) 総合評価

運転開始後 60 年間の供用を想定した各高経年化技術評価対象機器の耐震安全性評価については、経年劣化事象を考慮した場合においても、「実用発電用原子炉施設における高経年化対策審査ガイド」および「実用発電用原子炉施設における高経年化対策実施ガイド」の要求事項を満足し、耐震安全性に問題ないことを確認した。

また、耐震安全性評価対象機器の現状保全については、耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象を考慮した耐震評価を行い、耐震安全性評価に問題がないことを確認しており、各設備の現状保全は適切であることから、現状保全に追加すべき新たな保全策は抽出されなかった。

5. まとめ

(1) 審査ガイド適合性

「2. 基本方針」で示した要求事項について耐震安全性評価を行った結果、全ての要求を満足しており、審査ガイドに適合していることを確認した。耐震安全性評価についての要求事項との対比および評価結果の分類を表 13 および表 14 に示す。

表 13 (1/2) 耐震安全性評価についての要求事項との対比

が 什	要求事項	耐震安全性評価
実用発電用原子炉施設における高経年化対策審査が 什	3. 高経年化技術評価等の審査の視点・着眼点 (1) 高経年化技術評価の審査 ⑥ 動的機器（部位）の抽出 動的機器（部位）を評価対象外としている場合、発電用原子炉設置者の施設管理活動において、材料等の経年劣化の影響から生じる性能低下の状況が的確に把握され、高経年化技術評価の開始時期以降もこれらが適切に行われることを保証しているかを、施設管理要領等の文書及び施設管理実績等により審査する。	3. (1) ②に示すとおり、耐震安全性評価を実施する機器として、動的機器（部位）を含めて評価対象としている。
	⑱-1 耐震安全性評価の対象となる経年劣化事象の抽出 経年劣化の進展評価結果に基づき、耐震安全性評価の対象となる経年劣化事象を抽出していることを審査する。	3. (1) ①, ②に示すとおり、耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象の抽出により、耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象を抽出している。
	⑲-1 耐震安全上着目すべき経年劣化事象の抽出 耐震安全上着目すべき経年劣化事象を抽出していることを審査する。	
	⑳-1 耐震安全性の評価 実施が 什 3.1⑤に規定する期間の満了日までの期間について、経年劣化事象の発生又は進展に伴う機器・構造物の耐震安全性を評価しているかを審査する。	4. (1) に示すとおり、運転開始後 60 年時点までの経年劣化を考慮した状態における耐震安全性評価を実施している。
	㉑-1 耐震安全上の現状保全の評価 耐震安全性に対する現状の保全策の妥当性を評価しているかを審査する。	4. (2), (3) に示すとおり、想定される経年劣化事象を考慮した耐震安全性評価を実施し、審査が 什 の要求事項を満足していることから、耐震安全性に対する現状の保全策は妥当であると評価している。
	㉒-1 耐震安全上の追加保全策の策定 想定した経年劣化事象に対し、耐震安全性が確保されない場合に、現状保全に追加する必要のある新たな保全策を適切に策定しているかを審査する。	4. (3) に示すとおり、耐震安全性評価において審査が 什 の要求事項を満足していることから、現状保全に追加すべき新たな保全策はないと評価している。
	(2) 長期施設管理方針の審査 ①長期施設管理方針の策定 すべての追加保全策について長期施設管理方針として策定されているかを審査する。	4. (3) に示すとおり、追加保全策については抽出されていないため、高経年化対策の観点から長期施設管理方針に充実すべき施設管理の項目はないと評価している。

表 13 (2/2) 耐震安全性評価についての要求事項との対比

ガト	要求事項	耐震安全性評価
実用発電用原子炉施設における高経年化対策実施ガト	3.1 高経年化技術評価の実施及び見直し ⑥耐震安全上考慮する必要がある経年劣化事象については、経年劣化を加味した機器・構造物の耐震安全性評価を行い、必要に応じ追加保全策を抽出すること。	4. (1) ～ (3) に示すとおり、耐震安全上考慮する必要がある経年劣化事象については、経年劣化を加味した機器・構造物の耐震安全性評価を行い、ガトの要求事項を満足して耐震安全上問題のないことを確認している。また、現状の保全策についても妥当であることを確認しており、追加保全策はないと評価している。
	実用炉規則第 82 条第 1 項から第 3 項までの規定による高経年化技術評価に係る耐震安全性評価は、規制基準（当該評価を行う時点後の直近の運転開始以後 30 年、40 年又は 50 年を経過する日において適用されているものに限る。）の要求を満たすことが確認された確定した基準地震動及び弾性設計用地震動を用いた評価を行うこと。当該高経年化技術評価後に、当該評価に用いた基準地震動及び弾性設計用地震動が見直された場合には、高経年化技術評価を速やかに見直すこと。 ⑥を行うに当たっては、PLM 基準 2008 版の 6.3.4 耐震安全性評価を用いることができる。	3. (3) に示すとおり、設置変更許可にて規制基準の要求を満足することが確認された基準地震動 Ss および弾性設計用地震動 Sd を用いて評価を実施している。
	3.2 長期施設管理方針の策定及び変更 長期施設管理方針の策定及び変更には、以下の要求事項を満たすこと。 ①高経年化技術評価の結果抽出された全ての追加保全策（発電用原子炉の運転を断続的に行うことを前提として抽出されたもの及び冷温停止状態が維持されることを前提として抽出されたものの全て。）について、発電用原子炉ごとに、施設管理の項目及び当該項目ごとの実施時期を規定した長期施設管理方針を策定すること。 なお、高経年化技術評価の結果抽出された追加保全策について、発電用原子炉の運転を断続的に行うことを前提とした評価から抽出されたものと冷温停止状態が維持されることを前提とした評価から抽出されたもの間で、その対象の経年劣化事象及び機器・構造物の部位が重複するものについては、双方の追加保全策を踏まえた保守的な長期施設管理方針を策定すること。	4. (3) に示すとおり、追加保全策については抽出されていないため、高経年化対策の観点から長期施設管理方針に充実すべき施設管理項目はないと評価している。

表 14 耐震安全性評価についての要求事項と評価結果の分類

機器・ 構造物	耐震安全上考慮する必要がある経年劣化事象								動的機能維持 評価
	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	摩耗	腐食		コンクリートの 強度・ 遮蔽能力低下	
						流れ加速型腐食	全面腐食		
ポンプ	A2	—	—	B2-②	—	—	A1*1	—	C1
熱交換器	—	—	—	—	A1*2	A1	A1*1	—	—
ポンプモータ	—	—	—	—	—	—	—	—	C1
容器	A2	B3-①	—	—	—	—	A1*1	—	—
配管	A2	—	—	—	—	A1, A2	A1*1	—	—
弁	A2	—	—	B2-②	—	—	—	—	C1, C2
炉内構造物	A2	—	—	—	—	—	—	—	—
ケーブル	—	—	—	—	—	—	A1*1	—	—
タービン設備	—	—	—	—	—	—	A1*1	—	C1
コンクリート構造物およ び鉄骨構造物	—	—	—	—	—	—	—	—	—
計測制御設備	—	—	—	—	—	—	A1*1	—	C1*3
空調設備	—	—	—	—	—	—	A1*1	—	C1
機械設備	—	—	—	—	—	—	A1*1	—	C1
電源設備	—	—	—	—	—	—	A1*1	—	C1*3

*1：基礎ボルト

*2：排ガス予熱器の管支持板への流れ加速型腐食による減肉とあわせて評価

*3：電氣的機能維持評価を実施

審査基準の要求事項

- 経年劣化事象を考慮した機器・構造物について地震時に発生する応力及び疲れ累積係数を評価した結果、耐震設計上の許容限界を下回ること。

[分類]

A1：応力評価により耐震設計上の許容限界を下回る評価を行った事象

A2：疲れ累積係数評価により耐震設計上の許容限界を下回る評価を行った事象

- 経年劣化事象を考慮した機器・構造物について地震時に発生する応力、亀裂進展力及び応力拡大係数を評価した結果、想定亀裂（欠陥）に対する破壊力学評価上の許容限界を下回ること。

[分類]

B1：応力評価により破壊力学評価上の許容限界を下回る評価を行った事象

B2：亀裂進展力評価により破壊力学評価上の許容限界を下回る評価を行った事象

B3：応力拡大係数評価により破壊力学評価上の許容限界を下回る評価を行った事象

[破壊評価手法の分類]

①：線形破壊力学評価法

②：弾塑性破壊力学評価法

③：2倍勾配法

④：極限荷重評価法

- 経年劣化事象を考慮した、地震時に動的機能が要求される機器・構造物の地震時の応答加速度を評価した結果、機能確認済加速度以下であること。

[分類]

C1：動的機能維持に必要となる部位での経年劣化事象が、機器の振動応答特性への影響が「軽微もしくは無視」できる事象であり、地震時の応答加速度を評価した結果、機能確認済加速度以下であることを確認した機器

C2：動的機能維持に必要となる部位での経年劣化事象（接続機器の経年劣化事象を含む）が機器の振動応答特性に影響を及ぼす可能性があり、地震時の応答加速度を評価した結果、機能確認済加速度以下であることを確認した機器

(2) 施設管理に関する方針として策定する事項

耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象を考慮した耐震評価を行い、耐震安全性評価に問題がないことを確認しており、各設備の現状保全は適切であることから、現状保全に追加すべき新たな保全策はないと評価している。

建設後の耐震補強および今後の予定について

島根原子力発電所 2 号機における高経年化技術評価に係る耐震補強実績の例として、建設工認または改造工認で認可されている構造からの変更点のうち耐震性に影響がある設備のうち、耐震補強を実施または実施予定として補強後を想定した評価を実施している高経年化技術評価対象設備について、該当設備および構造変更の概要を表 1 に示す。

構造変更した設備の変更の概要について添付－1（添付図 1～添付図 2）に示す。

表 1 既工認からの構造変更実績のある設備（PLM 関係）一覧表*

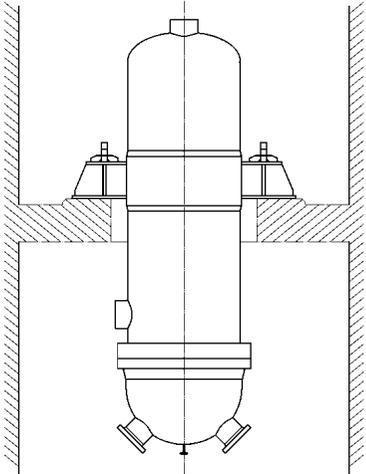
施設・設備名称	構造変更の概要	備考
残留熱除去系熱交換器	<ul style="list-style-type: none"> ・ラック周辺に支持構造物を追設 ・下部サポートを追設 	添付図 1
燃料プール冷却系熱交換器	<ul style="list-style-type: none"> ・胴の脚付け根部の当板を拡張 	添付図 2
原子炉補機冷却系熱交換器	<ul style="list-style-type: none"> ・胴の脚付け根部の当板を拡張 ・脚底板の周囲に耐震補強サポートを追設 	添付図 3
高圧炉心スプレイ補機冷却系熱交換器	<ul style="list-style-type: none"> ・胴の脚付け根部の当板を拡張 	添付図 4
非常用ディーゼル発電設備ディーゼル燃料タンク	<ul style="list-style-type: none"> ・胴の脚付け根部の当板を拡張 	添付図 5
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料タンク	<ul style="list-style-type: none"> ・胴の脚付け根部の当板を拡張 	添付図 6
原子炉浄化系補助熱交換器	<ul style="list-style-type: none"> ・胴の脚付け根部の当板を拡張 ・脚へのサポート追設 	添付図 7
配管系	<ul style="list-style-type: none"> ・サポートの補強、追設等 	添付図 8

*：工事計画認可申請（補正）に係る審査資料「NS2 補足-027-1-25 機器・配管系の設備の既工認からの構造変更について」より抜粋

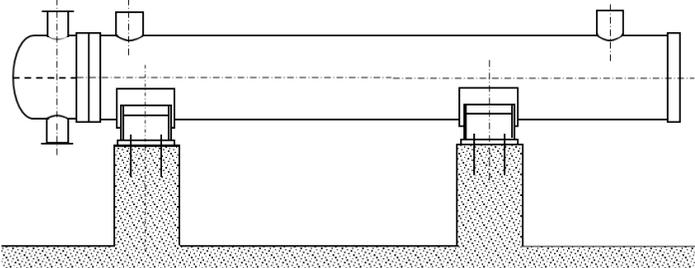
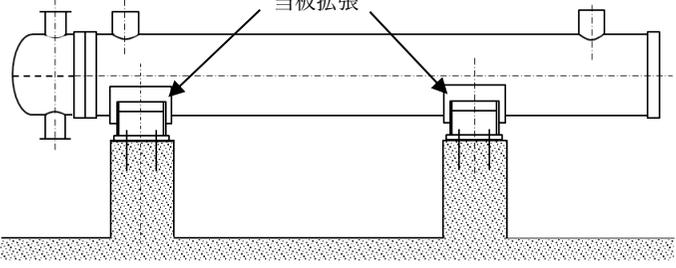
構造変更した設備の変更の概要について添付－1（添付図 1～添付図 8）に示す。

構造変更した設備の変更の概要

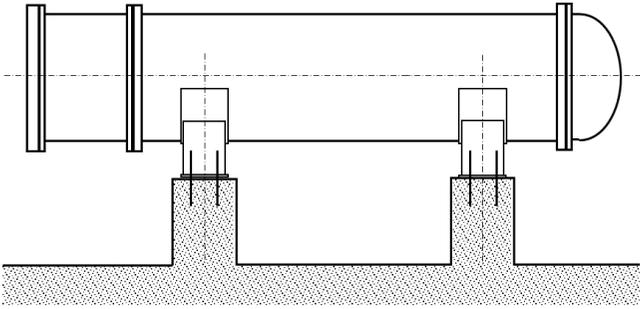
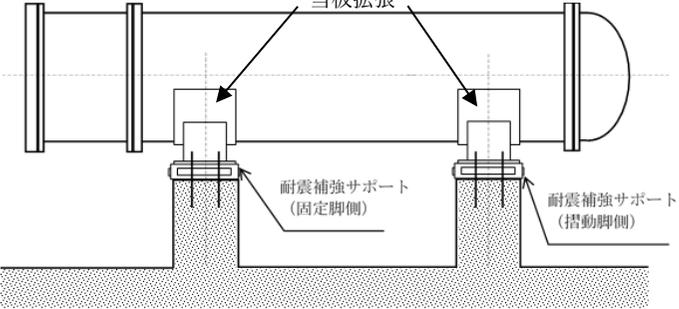
添付図 1. 残留熱除去系熱交換器

変更前	変更後	備考
		<p>耐震補強を目的とし, 以下の構造変更を実施</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ラグ周辺に耐震補強サポートを追設 (剛性向上およびラグの回転拘束) ・下部サポートを追設 (水平方向の変位拘束)

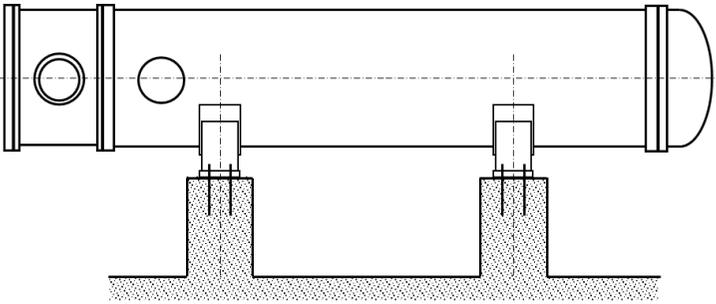
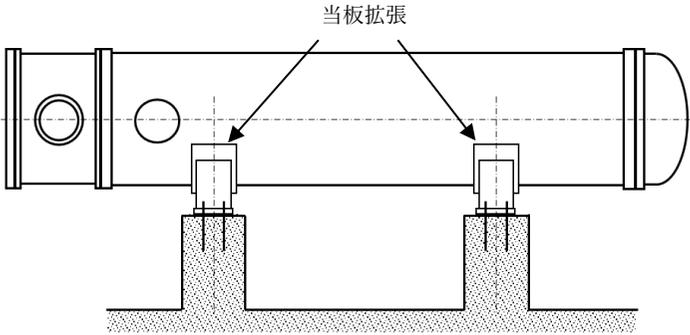
添付図 2. 燃料プール冷却系熱交換器

変更前	変更後	備考
		<p>備考</p> <p>耐震補強 (胴の脚付け根部の応力低減) を目的とし, 胴の脚付け根部の当板を拡張</p>

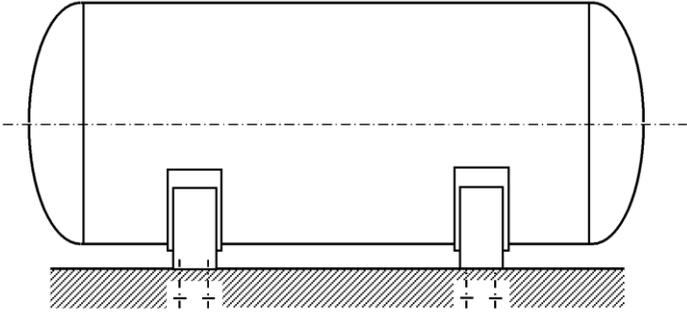
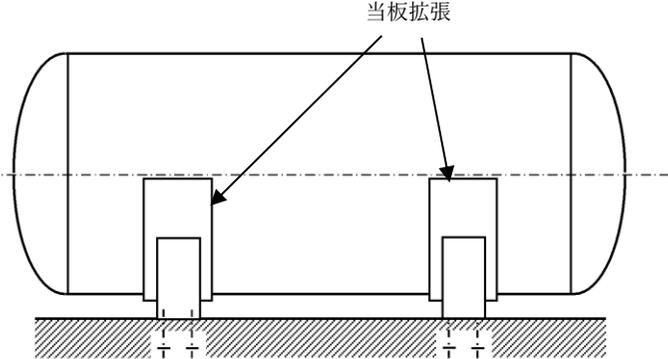
添付図 3. 原子炉補機冷却系熱交換器

変更前	変更後	備考
		<p>耐震補強を目的とし, 以下の構造変更を実施</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 胴の脚付け根部の当板を拡張 (胴の脚付け根部の応力低減) ・ 脚底板の周囲に耐震補強サポートを追設 (脚底面のせん断荷重を基礎ボルトに作用させないための補強)

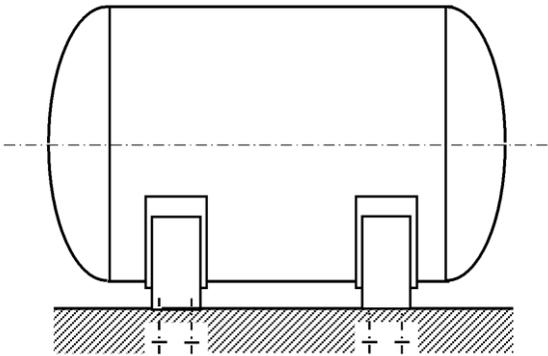
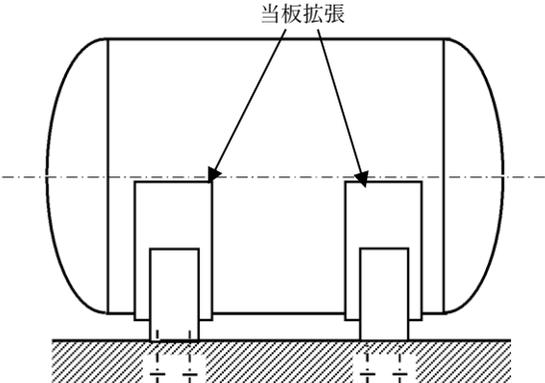
添付図4. 高圧炉心スプレイ補機冷却系熱交換器

変更前	変更後	備考
		<p>耐震補強（胴の脚付け根部の応力低減）を目的とし，胴の脚付け根部の当板を拡張</p>

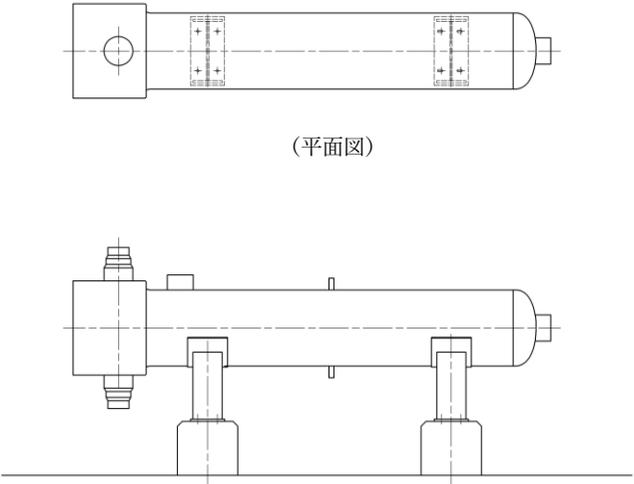
添付図5. 非常用ディーゼル発電設備ディーゼル燃料デイトンク

変更前	変更後	備考
		<p>耐震補強（胴の脚付け根部の応力低減）を目的とし、胴の脚付け根部の当板を拡張</p>

添付図6. 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料デイトンク

変更前	変更後	備考
		<p>耐震補強（胴の脚付け根部の応力低減）を目的とし、胴の脚付け根部の当板を拡張</p>

添付図 7. 原子炉浄化系補助熱交換器（波及的影響を及ぼすおそれのある設備）

変更前	変更後	備考
 <p>(平面図)</p> <p>(正面図)</p>		<p>耐震補強を目的とし、以下の構造変更を実施</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 胴の脚付け根部の当板を拡張（胴の脚付け根部の応力低減） ・ 脚への耐震補強サポート追設（基礎ボルトの荷重低減）

添付図8. 配管系

変更前	変更後	備考
		<p>耐震補強を目的とし、以下の構造変更を実施</p> <ul style="list-style-type: none">・サポートの追設、補強等 <p>(左図は復水系配管の例)</p>

新規制基準適合性に係る工事計画認可等における審査内容の反映について

新規制基準適合性に係る原子炉設置変更許可および工事計画認可において新たに採用され、高経年化技術評価において同様に用いた耐震安全性評価内容を表 1 に示す。

表 1 (1/2) 新規制基準適合性に係る工事計画認可等の反映内容 (1/2)

項目	内容	評価対象	補足
原子炉設置変更許可の反映	基準地震動 Ss および弾性設計用地震動 Sd	<ul style="list-style-type: none"> 耐震安全性評価を行った S クラス設備および共振のおそれのある B クラス設備 (Ss, Sd) 常設重大事故等対処設備 (Ss) 	補紙 (1)
	耐震重要度分類の見直し	<ul style="list-style-type: none"> 初回申請時に耐震重要度分類を B クラスから C クラスに変更していた設備について、B クラスに変更して再評価する。 	補紙 (2)
工事計画認可の反映	弁の動的機能維持評価における評価用加速度の不確かさの考慮	<ul style="list-style-type: none"> 配管の強度評価に用いる評価用加速度と同じく、1.2ZPA (従来は 1.0ZPA) とスペクトルモーダル解析による応答加速度の大きい方を評価値として扱う。なお、スペクトルモーダル解析においては、剛領域の振動モードの影響を踏まえて、20Hz を超える振動数領域まで考慮した地震応答解析により、弁駆動部の応答加速度の算定を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> 配管の流れ加速型腐食を考慮した蒸気内側隔離弁の動的機能維持評価 <p>—</p>
	水平 2 方向および鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価	<ul style="list-style-type: none"> 工事計画認可における水平 2 方向および鉛直方向地震力の組合せによる影響評価の評価部位に対し、耐震安全上考慮する必要がある経年劣化事象が想定される場合は、経年劣化事象を考慮したうえで水平 2 方向および鉛直方向地震力の組合せによる影響評価を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉圧力容器 給水ノズルの疲労割れ 原子炉格納容器 ベント管ベローズ、原子炉格納容器配管貫通部ベローズの疲労割れ 配管系の疲労割れおよび流れ加速型腐食 原子炉格納容器 (サブプレッションチェンバ) の基礎ボルトの腐食 <p>—</p>

表 1 (2/2) 新規制基準適合性に係る工事計画認可等の反映内容

項目	内容	評価対象	補足
工事計画認可の反映(続き) その他工事計画認可における評価手法等の適用	<ul style="list-style-type: none"> ・工事計画認可にて適用された評価モデル等の反映 		補紙(3)
	<ul style="list-style-type: none"> 【サブプレッションチェンバの耐震評価】 ・モデル化範囲, 内部水の考慮方法, サプレッションチェンバサポート取付部の剛性について, 工事計画認可と同様の解析モデルを用いた耐震評価を実施する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉格納容器(サブプレッションチェンバ)の基礎ボルトの腐食 	
	<ul style="list-style-type: none"> 【配管の耐震評価】 ・復水系配管および給水系配管の一部は, 上位クラス施設に対する波及的影響を考慮し, 基準地震動 Ss に対して耐震性を有するよう耐震補強を実施している。これらの配管系については, 流れ加速型腐食を考慮したうえで基準地震動 Ss による耐震評価を実施する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・復水系, 給水系配管の流れ加速型腐食 	
	<ul style="list-style-type: none"> 【縦置円筒形容器の耐震評価】 ・ラグ周辺への支持構造物の追設を反映した解析モデルを用いて基礎ボルトの腐食を考慮した耐震評価を実施する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・残留熱除去系熱交換器の基礎ボルトの腐食 	
	<ul style="list-style-type: none"> 【横置円筒形容器の耐震評価】 ・横置円筒形容器の胴の応力評価は当板の考慮可否を判断し, 評価を実施する。 ・横置円筒形容器の当板拡張工事に伴い, 設計用震度および質量条件を見直したうえで基礎ボルトの腐食を考慮した耐震評価を実施する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・排ガス予熱器および原子炉浄化系再生熱交換器の胴の流れ加速型腐食 ・燃料プール冷却系熱交換器, 非常用ディーゼル発電設備ディーゼル燃料タンク他の基礎ボルトの腐食 	
	<ul style="list-style-type: none"> 【立形ポンプの耐震評価】 ・はり要素に鉛直方向剛性を設定したうえで, 新たにバルケシングフランジ部および電動機上部軸受部について鉛直ばねを考慮するとともに, バルケシングフランジ部の剛性を回転ばねとして考慮した応答解析モデルで評価を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> ・残留熱除去ポンプ, 高圧炉心スプレッドポンプ他の基礎ボルトの腐食 	
	<ul style="list-style-type: none"> 【横形ポンプの耐震評価】 ・質量条件を見直したうえで基礎ボルトの腐食を考慮した耐震評価を実施する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料移送ポンプの基礎ボルトの腐食 	別紙(2)

基準地震動 S_s および弾性設計用地震動 S_d の適用

1. 初回申請からの変更点

初回申請では2013年12月25日付け設置変更許可申請における基準地震動 S_s および弾性設計用地震動 S_d に基づく耐震安全性評価を行っていたが、これらの地震動が変更となったことから、設置変更許可を受けた基準地震動 S_s および弾性設計用地震動 S_d* を適用することとした。基準地震動 S_s の応答スペクトルおよび加速度時刻歴波形を図1~3に、弾性設計用地震動 S_d の応答スペクトルおよび加速度時刻歴波形を図4~6に示す。

なお、新たに制定された標準応答スペクトルについては、基準地震動 S_s による応答スペクトル比を用いた検討に関する審議を受け、基準地震動が変更不要であることを認める通知を受領している(参考資料(1))。

※：弾性設計用地震動 S_d は、基準地震動 S_s との応答スペクトルの比率が目安として0.5を下回らないよう基準地震動 S_s に係数0.5を乗じて設定した。さらに、弾性設計用地震動 S_d の設定に当たっては、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針(昭和56年7月20日原子力安全委員会決定、平成13年3月29日一部改訂)」における基準地震動 S₁ の応答スペクトルをおおむね下回らないよう配慮した地震動も弾性設計用地震動 S_d として設定した。

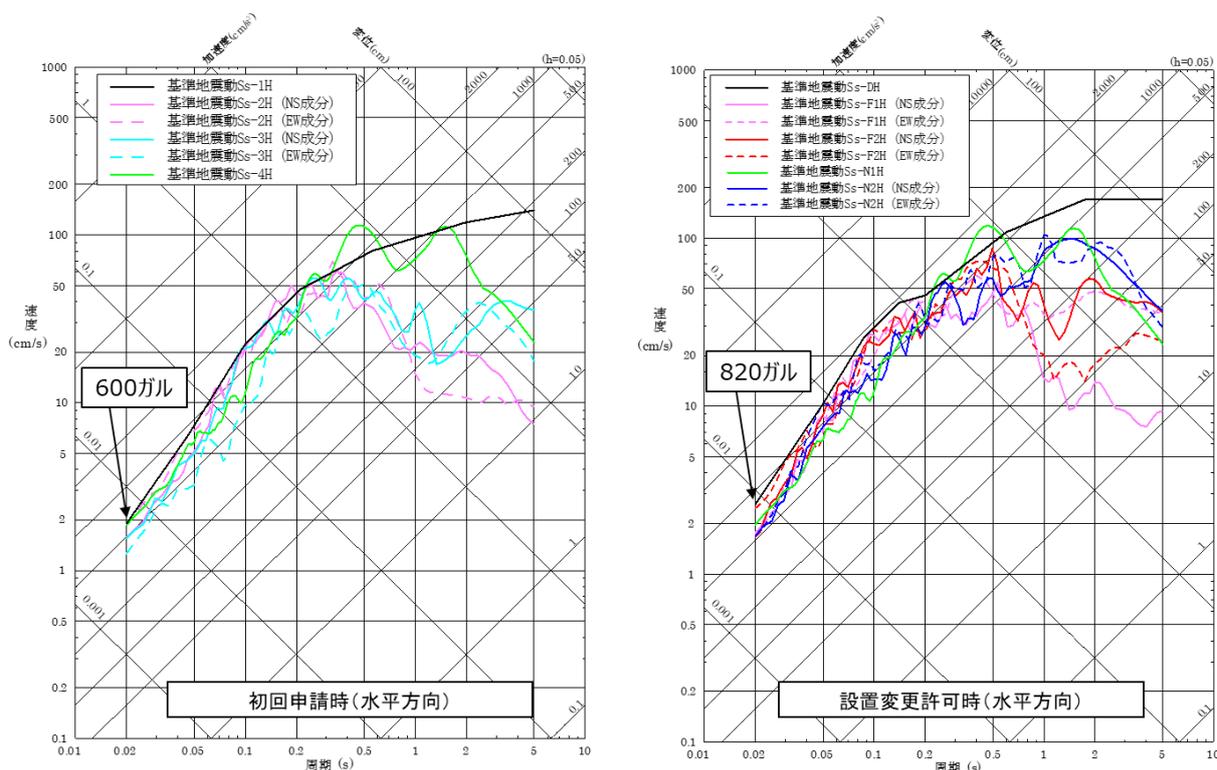


図1 基準地震動 S_s の応答スペクトル (水平方向)
(左側：初回申請時 右側：補正申請時)

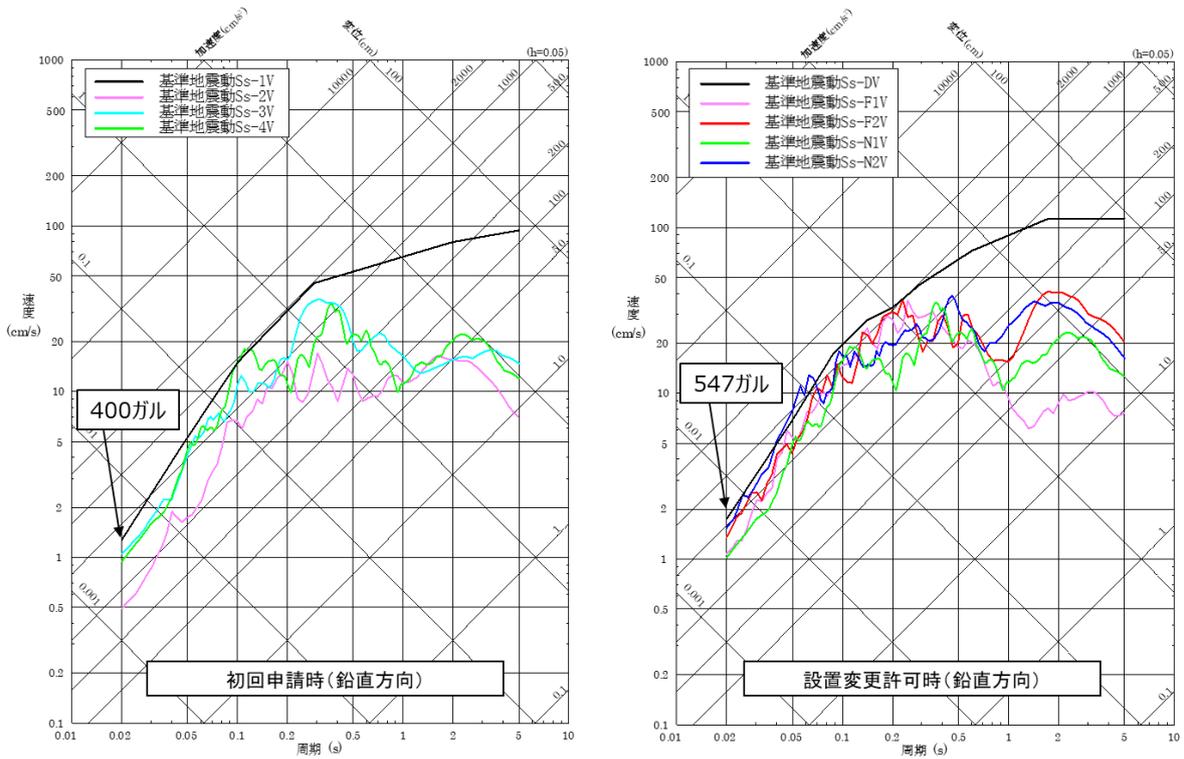


図2 基準地震動 Ss の応答スペクトル (鉛直方向)
(左側：初回申請時 右側：補正申請時)

基準地震動		水平方向 (NS成分)	水平方向 (EW成分)	鉛直方向
Ss-D	敷地ごとに震源を特定して策定する地震動による基準地震動 〔応答スペクトル手法による基準地震動〕			
Ss-F1	敷地ごとに震源を特定して策定する地震動による基準地震動 〔断層モデル手法による基準地震動〕 突道断層による地震の中越中地震の短周期レベルの不確かさ 破壊開始点5			
Ss-F2	敷地ごとに震源を特定して策定する地震動による基準地震動 〔断層モデル手法による基準地震動〕 突道断層による地震の中越中地震の短周期レベルの不確かさ 破壊開始点6			
Ss-N1	震源を特定せず策定する地震動による基準地震動 〔2004年北海道留萌支庁南部地震 (K-NET港町) の検討結果に保守性を考慮した地震動〕			
Ss-N2	震源を特定せず策定する地震動による基準地震動 〔2000年鳥取県西部地震の質祥ダム (監査廊) の観測記録〕			

※：表中のグラフは各基準地震動の加速度時刻歴波形 [縦軸：加速度 (cm/s²)，横軸：時間 (s)]

図3 基準地震動 Ss の加速度時刻歴波 (補正申請時)

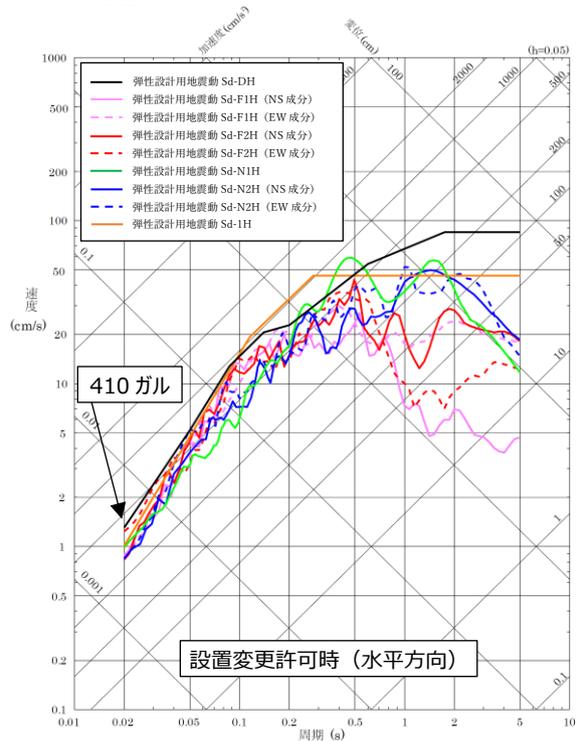
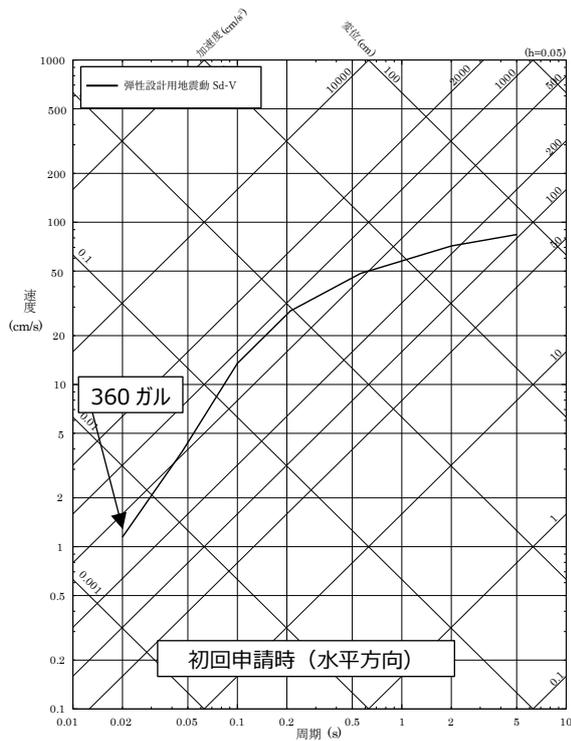


図4 弾性設計用地震動 Sd の応答スペクトル (水平方向)
(左側：初回申請時 右側：補正申請時)

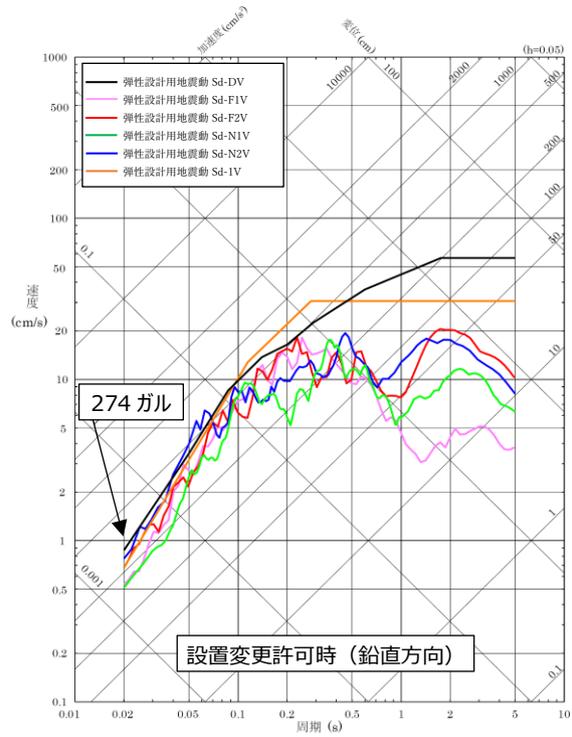
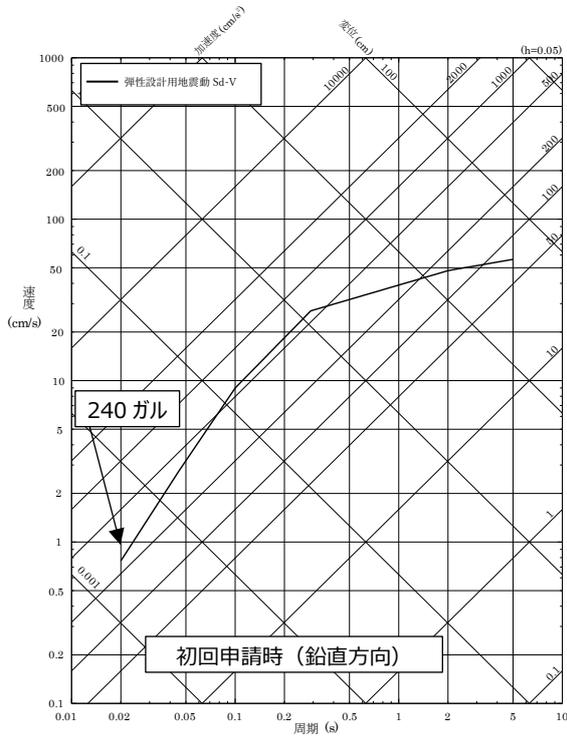
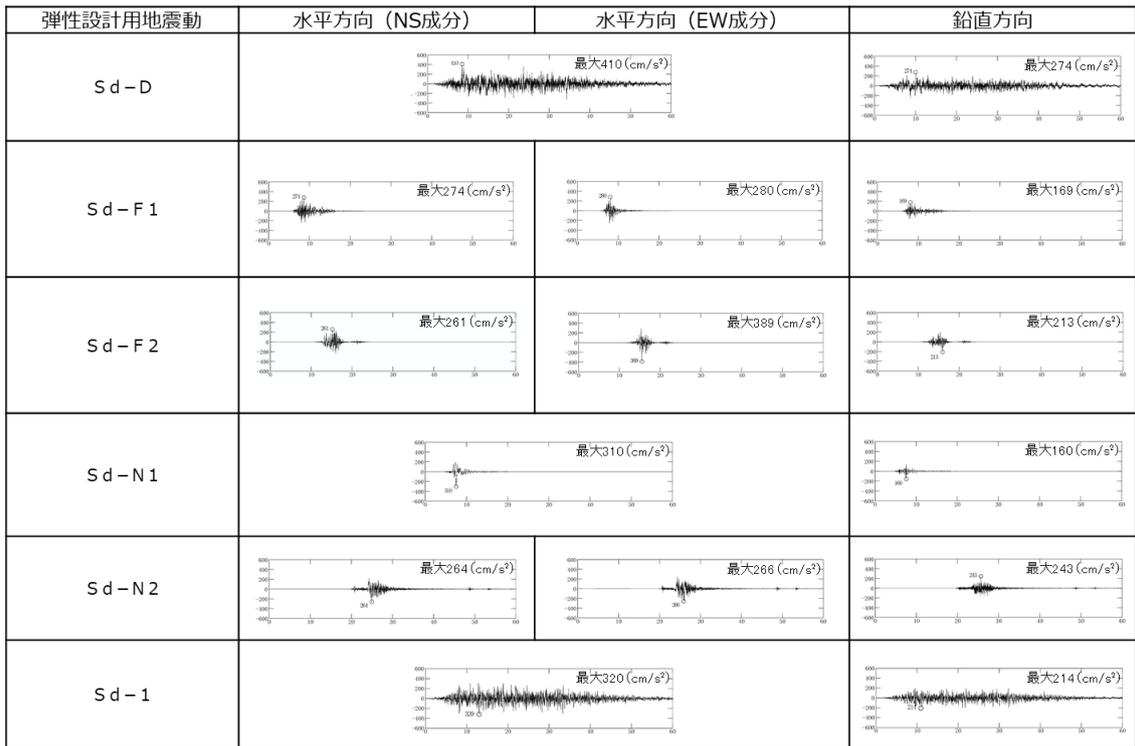


図5 弾性設計用地震動 Sd の応答スペクトル (鉛直方向)
(左側：初回申請時 右側：補正申請時)



※：表中のグラフは各弾性設計用地震動の加速度時刻歴波形【縦軸：加速度 (cm/s²)，横軸：時間 (s)】

図6 弾性設計用地震動 Sd の加速度時刻歴波 (補正申請時)

< 参考資料 >

- (1) 「標準応答スペクトルの規制への取り入れに伴う基準地震動の変更の要否に係る審議結果 (中国電力島根原子力発電所2号炉)」(令和3年12月8日 原子力規制庁)

耐震重要度分類の見直し

1. 初回申請からの変更点

平成 25 年 12 月 25 日付け設置変更許可申請では、公衆への放射線影響が小さいことが確認できた設備の耐震重要度分類を B クラスから C クラスに変更していたが、施設の耐震重要度分類の変更については、設置変更許可審査において平成 28 年 5 月 26 日および平成 28 年 7 月 12 日の審査会合を踏まえ、検討課題が多く多岐に亘る議論を要すると判断し、島根 2 号炉の新規制基準適合性審査において施設の耐震重要度分類の変更は取り止めた。

平成 25 年 12 月 25 日付け設置変更許可申請において B クラスから C クラスに変更した設備は、PLM 初回申請においても C クラスとしていたが、上記を踏まえて、耐震重要度分類を B クラスに変更した（表 1 参照）。なお、従前（平成 25 年 12 月 25 日付け設置変更許可申請以前）からの C クラス設備については、今回の補正においても C クラスとしている。

PLM 初回申請時に B クラスから C クラスに変更していた施設の耐震重要度分類の概要図を図 1 に示す。

表 1 C クラスから B クラスに見直した設備

評価書区分	設備名称	耐震重要度分類		備考
		初回申請時	補正申請時	
ポンプ	復水ポンプ	C	B	【排ガス予熱器以外】 ・基礎ボルトの減肉耐震評価 【排ガス予熱器】 ・基礎ボルト、伝熱管、胴および管支持板の減肉耐震評価
	復水昇圧ポンプ			
	制御棒駆動水圧ポンプ			
熱交換器	原子炉浄化補助熱交換器			
	第 3 給水加熱器			
	第 4 給水加熱器			
	グラント蒸気発生器			
	グラント蒸気復水器			
	排ガス予熱器			
	排ガス復水器			
容器	排ガス脱湿塔			
	原子炉建物機器ドレンサンプタンク			
	排ガス再結合器			
	原子炉浄化系サージタンク			
	復水ろ過脱塩器ストレナ			
タービン設備	低圧タービン			
機械設備	床ドレン濃縮器			
	化学廃液濃縮器復水器			
	床ドレン濃縮器復水器			
	排ガスブロワ			
	化学廃液濃縮器循環ポンプ			
	濃縮廃液タンク			
	濃縮廃液ポンプ			
	空気抽出器			
	雑固体焼却炉			
	1 次セラミックフィルタ			
	2 次セラミックフィルタ			
	排ガスフィルタ			

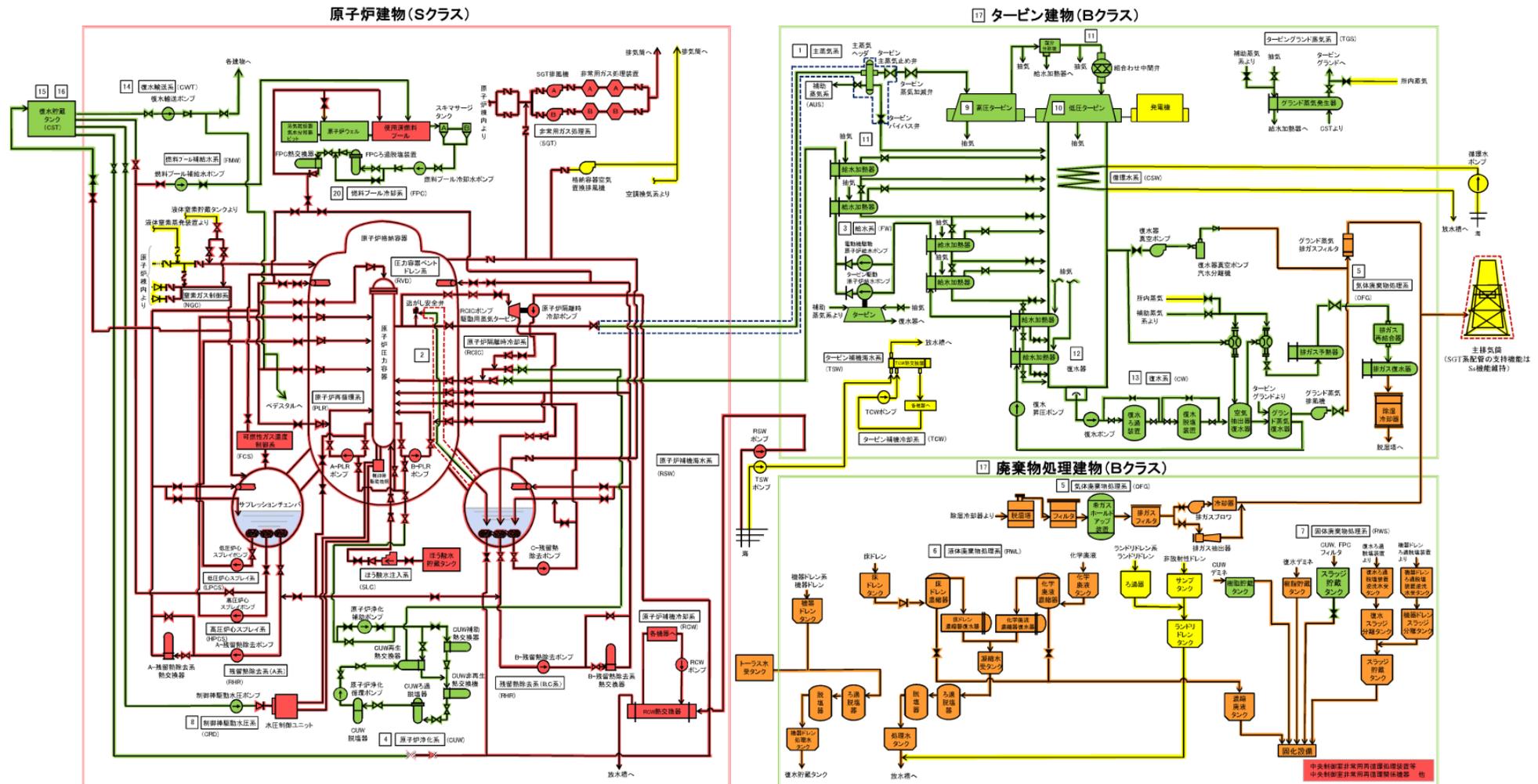
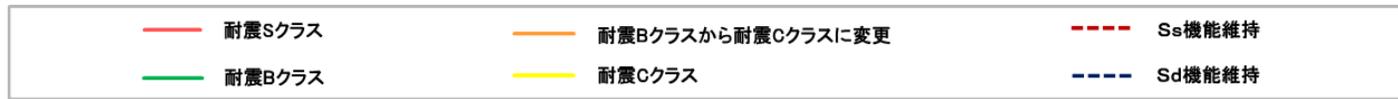


図1 島根原子力発電所2号炉 設計基準対象施設の耐震重要度分類概要図

(第379回審査会合(平成28年7月12日)資料「島根原子力発電所2号炉 施設の耐震重要度分類の変更について」より抜粋)

工事計画認可にて適用された評価モデル等の反映

1. サプレッションチェンバの耐震評価

サプレッションチェンバの基礎ボルトの腐食に対する耐震評価に用いる解析モデルについて、初回申請と補正申請の変更点を表1に、解析モデルを図1に示す。

表1 サプレッションチェンバの解析モデルの変更点

項目	初回申請	補正申請	変更理由
モデル化範囲	サプレッションチェンバの半周	サプレッションチェンバの全周	非対称に設置されたECCSストレナを適切にモデル化するため。
内部水の考慮方法	内部水全体を固定水として考慮 (スロッシング荷重は水平方向地震荷重に包含)	内部水質量に有効質量を適用 (FEMモデルにてスロッシング荷重を個別に算定)	地震応答を精緻に評価するため。
サプレッションチェンバサポート取付部の剛性	剛性が十分に高いと判断	局部変形をばね剛性として考慮	鉛直方向の地震応答を適切に表現するため。

初回申請	補正申請

図1 サプレッションチェンバの解析モデル（初回申請と補正申請の比較）

2. 配管の耐震評価

流れ加速型腐食を考慮した配管の耐震評価対象のうち、Bクラスの復水系配管および給水系配管（下位クラス配管）については、工事計画認可の審査において、基準地震動 S_s に対して十分な構造強度を有していることを確認することで、直下又は近傍に設置された上位クラス施設に対して、下位クラス配管の転倒および落下による波及的影響を及ぼさないことを説明している。耐震安全性評価においては、当該復水系配管および給水系配管に対して、流れ加速型腐食を考慮したうえで工事計画認可と同様に基準地震動 S_s による耐震評価を実施した。初回申請と補正申請における復水系配管の解析モデルの比較を図2に示す。

初回申請	補正申請

図2 復水系配管の解析モデル（初回申請と補正申請の比較）

3. 縦置円筒形容器の耐震評価

残留熱除去系熱交換器は、ラグ周辺への支持構造物の追設を反映した固有値解析モデルを用いて固有値解析を実施したうえで、基礎ボルトの腐食を考慮した耐震評価を実施した。補正申請における残留熱除去系熱交換器の固有値解析モデルを図3に、初回申請と補正申請の固有値解析結果および設計用震度の比較を表2に示す。

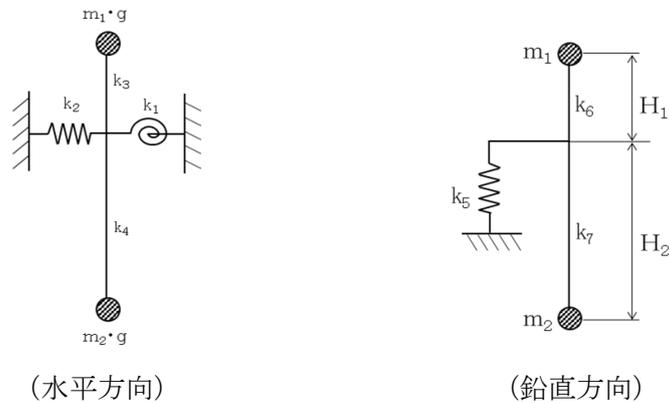


図3 残留熱除去系熱交換器の固有値解析モデル

表2 残留熱除去系熱交換器の固有値解析結果および設計用震度(初回申請と補正申請の比較)

項目		初回申請	補正申請
固有周期(s)	水平		
	鉛直		
設計用震度	弾性設計用地震動 Sd	水平	3.02 ^{※1}
		鉛直	1.10 ^{※2,3}
	基準地震動 Ss	水平	5.85 ^{※4}
		鉛直	2.07 ^{※3,5}

※1：設計用床応答スペクトルⅡ（弾性設計用地震動 Sd）より得られる震度

※2：設計用震度Ⅱ（弾性設計用地震動 Sd）

※3：最大応答加速度を 1.2 倍した震度

※4：設計用床応答スペクトルⅡ（基準地震動 Ss）より得られる震度

※5：設計用震度Ⅱ（基準地震動 Ss）

4. 横置円筒形容器の耐震評価

排ガス予熱器および原子炉浄化系再生熱交換器の胴の流れ加速型腐食を考慮した耐震評価（応力評価）は、初回申請および補正申請では、脚付け根部に取り付く当板を考慮した評価としていたが、図4に示す有効板厚 t_e の判定基準を設けることとしたため、今後、胴の応力評価においては当板を考慮せず、胴のみの板厚による応力評価を実施する。排ガス予熱器および原子炉浄化系再生熱交換器の胴の応力評価結果について、補正申請時と見直し後の値を表3に示す。

また、表4に示す横置円筒形容器については、胴の流れ加速型腐食を考慮した耐震評価は対象外だが、基礎ボルトの腐食を考慮した耐震評価の対象設備である。これらの設備については、工事計画認可の審査を踏まえて当板の拡張工事を実施しており、今後、設計用震度および質量条件を見直したうえで基礎ボルトの腐食を考慮した耐震評価結果に見直す。

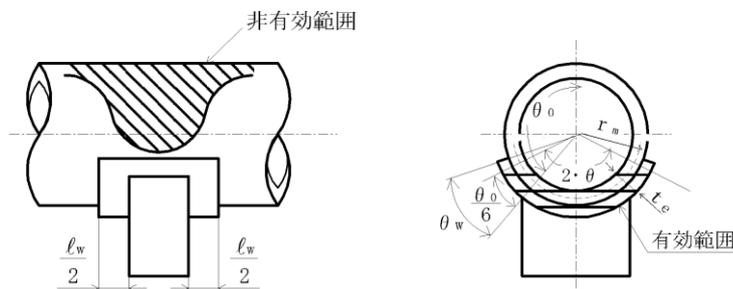


図5-2 脚付け根部の有効範囲

胴の脚付け根部に取り付く当板の大きさが

$$\text{周方向範囲} \quad \theta_w \geq \frac{\theta_0}{6} \quad \dots \quad (5.3.1.1.13)$$

$$\text{長手方向範囲} \quad \ell_w \geq 1.56 \cdot \sqrt{\left(\frac{D_i + t}{2}\right) \cdot t} \quad \dots \quad (5.3.1.1.14)$$

である場合、脚付け根部における胴の有効板厚 t_e は胴板の厚さと当板の厚さの合計とする。また、当板が上記の範囲を満たさない場合、 t_e は胴板の厚さとする。

注記*1：引用文献(1)より引用

*2：引用文献(3)より引用

7. 引用文献

(1) Stresses in Large Horizontal Cylindrical Pressure Vessels on Two Saddle Supports, Welding Research Supplement, Sep. 1951.

(3) 日本産業規格 J I S B 8 2 7 8 (2003) 「サドル支持の横置圧力容器」

図4 有効板厚 t_e の判定基準

(VI-2-1-14 「機器・配管系の計算書作成の方法 添付資料-4 横置一胴円筒形容器の耐震性についての計算書作成の基本方針」から抜粋)

表 3 横置円筒形容器の胴の流れ加速型腐食を考慮した耐震評価結果

単位：MPa

対象設備	耐震重要度	応力種別	補正申請時 ^{※1}	見直し後	許容値
排ガス予熱器	B	一次一般膜応力	29	34	198
		一次応力	35	63	198
原子炉浄化系再生熱交換器	B	一次一般膜応力	100	126	198
		一次応力	131	183	198

表 4(1/2) 横置円筒形容器の基礎ボルトの腐食を考慮した耐震評価結果

単位：MPa

対象設備	耐震重要度分類		応力種別	補正申請時		見直し後		
				発生値	許容値	発生値 ^{※1}	許容値	
燃料プール冷却系熱交換器	B, 重 ^{※2}		引張応力	68	187	57	190 ^{※3}	
			せん断応力	50	146	36	146	
非常用ディーゼル発電設備ディーゼル燃料タンク	S, 重 ^{※2}		Ss	引張応力	145	190	121	190
				せん断応力	44	146	37	146
			Sd	引張応力	64	158	58	158
				せん断応力	22	122	20	122
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料タンク	S, 重 ^{※2}		Ss	引張応力	101	190	85	190
				せん断応力	29	146	24	146
			Sd	引張応力	39	158	38	158
				せん断応力	13	122	12	122

※1：当板の拡張工事に伴い、工事計画認可と同様に設計用震度および質量条件を見直したうえで発生値を算出する。

※2：耐震重要度分類とは別に常設重大事故等対処設備の区分に応じた耐震設計が求められていることを示す。

※3：以下の理由により補正申請時から見直し後の許容値に変更する。

・せん断応力（発生値）の変更に伴い、許容組合せ応力 f_{tsi}

($f_{tsi} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{toi} - 1.6 \cdot \tau_{bi}, f_{toi}]$) が変更となる。

表 4(2/2) 横置円筒形容器の基礎ボルトの腐食を考慮した耐震評価結果

単位：MPa

対象設備	耐震重要度分類		応力種別	補正申請時		見直し後	
				発生値	許容値	発生値 ^{※1}	許容値
原子炉補機冷却系熱交換器	S, 重 ^{※2}	Ss	引張応力	201	258	146	187 ^{※3,4}
			せん断応力	発生せず	148	発生せず	144 ^{※3,4}
		Sd	引張応力	115	215	77	156 ^{※3,4}
			せん断応力	発生せず	124	発生せず	120 ^{※3,4}
高圧炉心スプレ補機冷却系熱交換器	S, 重 ^{※2}	Ss	引張応力	90	170	92	153 ^{※5}
			せん断応力	78	161	71	146 ^{※5}
		Sd	引張応力	31	176	31	176
			せん断応力	39	135	36	135
原子炉浄化系補助熱交換器	B	引張応力	275	276	166 ^{※6}	201 ^{※7}	
		せん断応力	発生せず	159	56 ^{※6}	159	

※1：当板の拡張工事に伴い、工事計画認可と同様に設計用震度および質量条件を見直したうえで発生値を算出する。

※2：耐震重要度分類とは別に常設重大事故等対処設備の区分に応じた耐震設計が求められていることを示す。

※3：補正申請時は鋼構造設計基準（AIJ）に基づき算出していたが、見直し後は工事計画認可と同様に原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG）に基づき算出する。

※4：補正申請時は 40℃で算出していたが、見直し後は工事計画認可と同様に 55℃で算出する。

※5：補正申請時は 40℃で算出していたが、見直し後は工事計画認可と同様に 100℃で算出する。

※6：工事計画認可と同様の耐震補強内容に見直す。

※7：以下の理由により補正申請時から見直し後の許容値に変更する。

・せん断応力（発生値）の変更に伴い、許容組合せ応力 f_{tsi}

$(f_{tsi} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{toi} - 1.6 \cdot \tau_{bi}, f_{toi}])$ が変更となる。

5. 立形ポンプの耐震評価

以下に示す立形ポンプについては、工事計画認可の審査を踏まえて、今後、応答解析モデルを変更（精緻化）したうえで基礎ボルトの腐食を考慮した耐震評価結果に見直す。補正申請時と見直し後の立形ポンプの応答解析モデルの変更点を表5に示す。また、代表として残留熱除去ポンプの応答解析モデルの変更前後を図5に示すが、他の立形ポンプについても同様である。

立形ポンプの基礎ボルトの腐食を考慮した耐震評価結果について、補正申請時と見直し後の値を表6に示す。なお、復水ポンプ以外のポンプについては、数値の丸め方（小数点以下第1位の切上げ）により表示する数値は変わらなかったため、評価書の見直しは行わない。

- ・残留熱除去ポンプ
- ・高圧炉心スプレイポンプ
- ・低圧炉心スプレイポンプ
- ・復水ポンプ

表5 解析モデルの変更点

No.	変更点	補正申請	見直し後
1	自由度	2自由度 ・水平 (X) ・回転 (Z 軸回り)	3自由度 ・水平 (X) ・鉛直 (Y) ・回転 (Z 軸回り)
2	鉛直方向剛性	鉛直方向は「剛」として 自由度なし	以下の鉛直方向剛性を考慮 ・ロータ、コラム、イフ およびバレルケーシング等の鉛直方向剛性（はり要素に剛性を設定） ・電動機上部軸受部の鉛直方向剛性（鉛直ばね） ・バレルケーシングフランジ部の鉛直方向剛性（鉛直ばね）
3	バレルケーシングフランジ部 回転剛性	考慮していない	考慮（回転ばね）

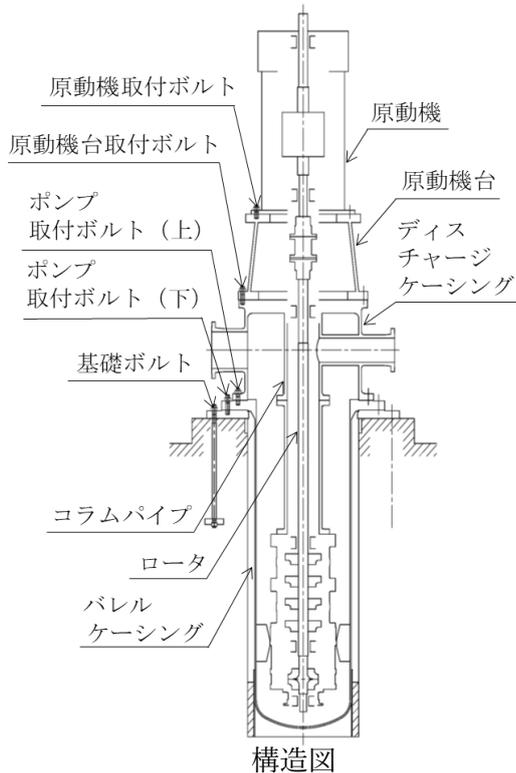


図5 残留熱除去ポンプ応答解析モデル図

表6(1/2) 立形ポンプの基礎ボルトの腐食を考慮した耐震評価結果

単位：MPa

対象設備	耐震重要度分類	応力種別	補正申請時		見直し後		
			発生値	許容値	発生値	許容値	
残留熱除去ポンプ	S, 重 ^{※1}	Ss	引張応力	40	444	40	444
			せん断応力	26	342	26	342
		Sd	引張応力	10	455	10	455
			せん断応力	14	350	14	350
高压炉心スプレッドポンプ	S, 重 ^{※1}	Ss	引張応力	58	444	58	444
			せん断応力	30	342	30	342
		Sd	引張応力	19	455	19	455
			せん断応力	16	350	16	350

※1：耐震重要度分類とは別に常設重大事故等対処設備の区分に応じた耐震設計が求められていることを示す。

表 6(2/2) 立形ポンプの基礎ボルトの腐食を考慮した耐震評価結果

単位：MPa

対象設備	耐震重要度分類		応力種別	補正申請時		見直し後	
				発生値	許容値	発生値	許容値
低圧炉心スプレポンプ	S, 重 ^{※1}	Ss	引張応力	50	444	50	444
			せん断応力	30	342	30	342
		Sd	引張応力	13	455	13	455
			せん断応力	16	350	16	350
復水ポンプ	C	引張応力	10	161	11	161	
		せん断応力	14	124	15	124	

※ 1：耐震重要度分類とは別に常設重大事故等対処設備の区分に応じた耐震設計が求められていることを示す。

6. 横形ポンプの耐震評価

横形ポンプのうち非常用ディーゼル機関付属設備の燃料移送ポンプおよびHPCSディーゼル機関付属設備のディーゼル燃料移送ポンプについては、工事計画認可の審査を踏まえて、今後、「ディーゼル燃料移送ポンプ防護対象設備」の質量を加味したうえで基礎ボルトの腐食を考慮した耐震評価結果に見直す。横形ポンプの概略構造図を図6に、基礎ボルトの腐食を考慮した耐震評価結果を表7に示す。

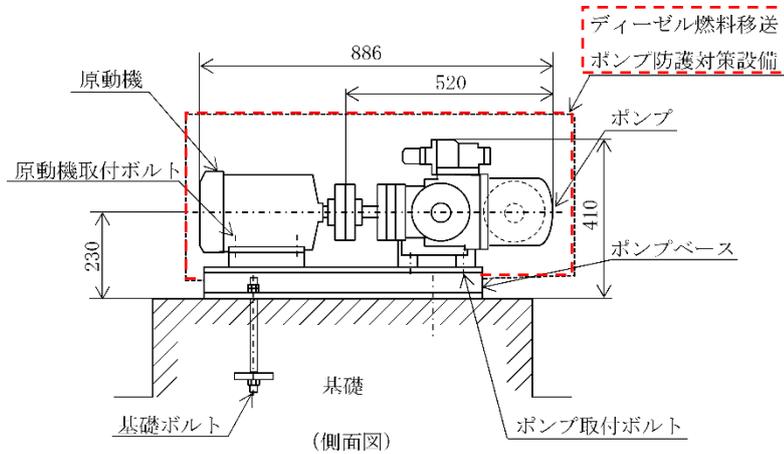


図6 燃料移送ポンプ（ディーゼル機関付属設備）の概略構造図

表7 横形ポンプの基礎ボルトの腐食を考慮した耐震評価結果

単位：MPa

対象設備	耐震重要度分類	応力種別	補正申請時		見直し後		
			発生値	許容値	発生値	許容値	
燃料移送ポンプ (非常用ディーゼル機関 付属設備)	S, 重 ^{※1}	Ss	引張応力	28	207	29	207
			せん断応力	10	159	14	159
		Sd	引張応力	12	173	13	180
			せん断応力	5	133	7	139
燃料移送ポンプ (HPCSディーゼル機関付 属設備)	S, 重 ^{※1}	Ss	引張応力	18	207	29	207
			せん断応力	10	159	14	159
		Sd	引張応力	8	180	13	180
			せん断応力	5	139	7	139

※1：耐震重要度分類とは別に常設重大事故等対処設備の区分に応じた耐震設計が求められていることを示す。

中性子照射脆化を考慮した耐震安全性評価について

原子炉圧力容器円筒胴の中性子照射脆化を考慮した耐震安全性評価を以下に示す。

1. 中性子照射脆化を考慮した耐震安全性評価の評価対象

耐震安全性評価の対象を、中性子照射脆化評価において原子炉圧力容器の代表としている炉心領域胴と低圧注水ノズルより検討する。

JEAC4206 解説-附属書 A-3220 1. (1) c. 「 K_{IC} 曲線の適用性」には、炉心領域胴及びノズルコーナ部について、地震荷重による応力は軸方向応力であり非延性破壊防止評価上支配的な応力（円周方向応力）と応力の方向が異なり、地震荷重の影響は無視できる、と規定されている。

ただし、JEAC4206 F-3000 には軸方向応力及び円周方向応力の計算例が規定されており、円筒（炉心領域胴）について適用できることから、「2. 炉心領域胴の耐震安全性評価」において、地震荷重及び仮想欠陥を想定した 4 ケースについて耐震安全性評価を実施している。

このことは、軸方向応力（円周方向欠陥想定）よりも円周方向応力（軸方向欠陥想定）の方が厳しいことを確認する位置づけであるものと考えられる。

一方、JEAC4206 FB-4100 「Paris and Sih の計算に基づく解」には、ノズルコーナ部について、軸方向応力に関する記載はなく、円筒胴の周方向応力を用いることが規定されていることから、低圧注水ノズルについては評価対象外とし、炉心領域胴を評価対象として耐震安全性評価を実施する。

2. 炉心領域胴の耐震安全性評価

(1) 炉心領域胴の圧力-温度制限曲線（P-T 線図）の算出根拠

炉心領域の円筒胴に対して、JEAC4206 FB-4100 に従い P-T 線図を作成している。P-T 線図は、中性子照射脆化評価における最低使用温度の設定において、厳しい評価となった母材に対して作成しており、その算出根拠を以下に示す。

①材料データ

a. 円筒胴（炉心領域の材料）

(a) RT_{NDT} 初期値： -40°C

(b) 運転開始後 60 年時点の ΔRT_{NDT} 予測値： 26.4°C

b. 胴体フランジ（ボルト締付荷重が作用する部分の材料）

RT_{NDT} 初期値： -29°C

②寸法

a. 円筒胴内径 D_i ： mm

b. 円筒胴の最小肉厚 t ： mm

③仮想欠陥及び荷重の想定

- a. 欠陥方向：軸方向／円周方向の2ケース
- b. 荷重：地震荷重なし／ありの2ケース
- c. 欠陥寸法：深さ $a = t/4$, 長さ $l = 1.5 \times t$

④応力値

a. 円筒胴の応力（計算においては、外面腐れ代 mm を考慮した寸法を用いる。）

(a) 円筒胴の板厚 $T = t - \text{} = \text{}$ mm

(b) 円筒胴の内半径 $R_i = D_i / 2 = \text{}$ mm

(c) 円筒胴の外半径 $R_o = R_i + T = \text{}$ mm

(d) 円筒胴の断面積 $A = \pi (R_o^2 - R_i^2) = \text{} \times 10^6 \text{mm}^2$

(e) 円筒胴の断面係数 $Z_o = \pi / 4 \times (R_o^4 - R_i^4) / R_o = \text{} \times 10^9 \text{mm}^3$

b. 円筒胴の最高使用圧力 ($P_d = 8.62 \text{MPa}$) に対する応力

(a) 円周方向応力 $\sigma_{t1m} = P_d \times R_i / T = \text{}$ MPa (一次膜応力)

(b) 軸方向応力 $\sigma_{11m} = P_d \times R_i^2 / (R_o^2 - R_i^2) = \text{}$ MPa (一次膜応力)

(c) 円周方向応力 $\sigma_{t2b} = P_d \times (1 + (R_o / R_i)^2) / ((R_o / R_i)^2 - 1) - \sigma_{t1m} = \text{}$ MPa
(二次曲げ応力)

c. 円筒胴の供用状態 A および B + 地震荷重による応力

(a) 鉛直荷重 $V = \text{}$ kN (供用状態 A 及び B) + kN (地震荷重 S_s)
 $= \text{}$ kN

(b) モーメント $M = \text{}$ kN·m (保守的にスカート下端での荷重を使用)

(c) 軸方向応力 $\sigma_{11ms} = V / A + M / Z_o = \text{}$ MPa (一次膜応力)

⑤ K_{IT} (円筒胴の板厚方向の温度勾配による応力拡大係数)

K_{IT} は、JEAC4206 附属書 F-3100 (3) 項より示される以下式により求められる。

$$K_{IT} = M t^{*1} \times \Delta T_w^{*2} = \text{} = \text{} \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$$

*1: JEAC4206 附属書図 F-3100-2 で与えられる係数 (円筒胴板厚 mm にて評価)

*2: 板厚方向の温度差の最大値 (図 1 円筒胴の温度分布解析結果による)

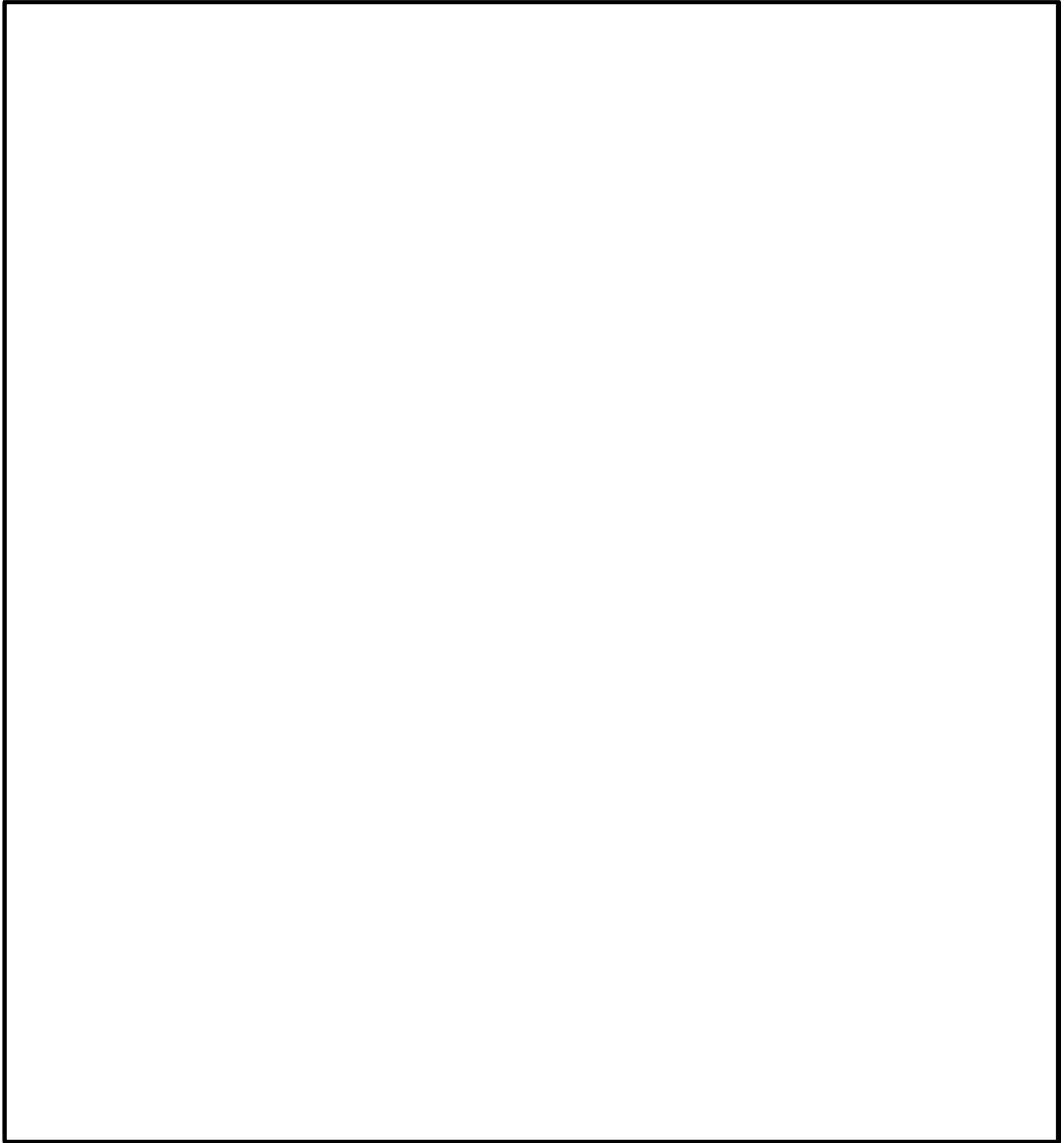


図1 円筒胴の温度分布解析結果

⑥円筒胴の破壊力学的手法による P-T 線図の想定ケース

円筒胴に対して仮想欠陥の方向および地震荷重の有無により、以下の 4 ケースを想定する。

- ケース 1：軸方向欠陥＋地震荷重なし（内圧＋熱応力のみ）
- ケース 2：軸方向欠陥＋地震荷重あり（内圧＋熱応力＋地震荷重）
- ケース 3：円周方向欠陥＋地震荷重なし（内圧＋熱応力のみ）
- ケース 4：円周方向欠陥＋地震荷重あり（内圧＋熱応力＋地震荷重）

これらの想定したケースに、JEAC4206 附属書 A の破壊力学的手法を適用し評価する。

以下に P-T 線図の作成手順を示す。

- a. 内圧による応力は、ケース 1 および 2 については、(1) ④b. で算出した最高使用圧力に対する円周方向応力 σ_{t1m} および σ_{t2b} を、ケース 3 および 4 については σ_{11m} を、圧力値の比率で補正して用いる。
これに加え、ケース 4 については (1) ④c. の供用状態 A および B＋地震荷重による軸方向応力 σ_{11ms} による K_I を考慮する。
(なお、地震による応力は、(1) ④c. に示す通り軸方向応力のみであることから、ケース 1 とケース 2 は同一の結果となる)
- b. $T-RT_{NDT}$ の算出は、JEAC4206 附属書 A-3222 (7) 式による。
- c. 各内圧に対して計算された $T-RT_{NDT}$ から、計算上必要な T (要求温度) を計算する。
 RT_{NDT} 調整値については、(1) ①の ΔRT_{NDT} 予測値を考慮するとともに、JEAC4206 表 FB-4100-1 に規定される炉心が臨界の場合のマージン 22°C を加える。

⑦最低温度要求の制限線

P-T 線図は、JEAC4206 表 FB-4100-1 に従い、「圧力・温度制限の要求」と「最低温度要求」により設定される。このうち、最低温度要求の制限線を設定するにあたり、JEAC4206 表 FB-4100-1 に基づく最低温度要求の結果を表 1 に示す。表 1 より供用状態 A および B の場合には、以下の制限線が設定される。

a. 4°C の制限線

供用前の水圧試験圧力の 20% 以下の圧力であり、炉心が臨界の場合 (BWR で通常水位内での運転がなされる場合) に対する制限線である。

b. 60°C の制限線

供用前の水圧試験圧力の 20% を超える圧力であり、炉心が臨界の場合に対する制限線である。

表 1 最低温度要求の結果

供用状態		原子炉圧力 容器の圧力	最低温度要求	
供用状態 A および B (耐圧・漏えい試験 を除く。)	炉心未臨界	$\leq 20\%$	ボルト締付荷重が作用する部分の材料 の最も高い $RT_{NDT} + 33^{\circ}\text{C}$	$-29+33= 4^{\circ}\text{C}$
	炉心未臨界	$> 20\%$	(ボルト締付荷重が作用する部分の材 料の最も高い $RT_{NDT}+67^{\circ}\text{C}$)と(ボルト締 付荷重が作用しない部分の材料の最 も高い RT_{NDT}) の高い方	$38^{\circ}\text{C} (= -29 +67)$ と -13°C の高い方
	炉心が臨界	$\leq 20\%$	沸騰水型原子炉圧力容器において、 通常水位内での運転がなされる場合 は、(ボルト締付荷重が作用する部分の 材料の最も高い $RT_{NDT} + 33^{\circ}\text{C}$)の要求 を満たすこと。	$-29 +33= 4^{\circ}\text{C}$
	炉心が臨界	$> 20\%$	(「耐圧・漏えい試験」に対して要求 される温度) と(ボルト締付荷重が作用 する部分の材料の最も高い $RT_{NDT} +$ 89°C)の高い方	9°C と 60°C ($= -29 +89$)の 高い方

(2) 炉心臨界時及び耐圧・漏えい試験時の P-T 線図について

運転開始後 60 年時点における P-T 線図を図 2 に、要求温度の計算例 (ケース 4) を表 2 に示す。

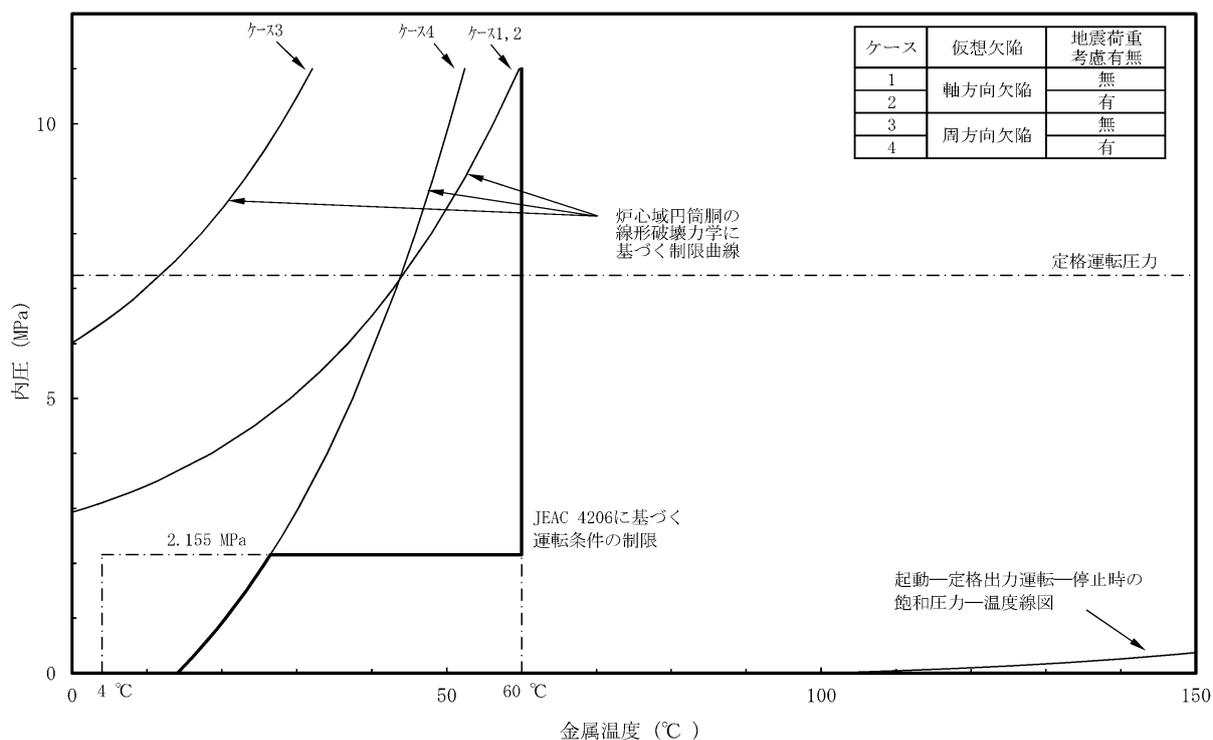


図 2 原子炉圧力容器の P-T 線図 (運転開始後 60 年時点, 運転時)

表 2 運転開始後 60 年時点における要求温度の計算例 (ケース 4)

応力成分 $\sigma \ell$
 板厚 $t = \square$ mm
 欠陥深さ $a/t = 0.25$
 安全係数 $Sf = 2$ (一次応力の K_I に関して)
 関連温度 $RT_{NDT} = -13$ °C (60年時点の推定値)
 設計降伏点 $Sy = 302$ MPa at 302°C, SQV2A

荷重組合せ	内圧 P (MPa)	応力 (MPa) *1				補正係数		温度勾配 による 応力拡大係数 $K_{I t}$ ($MPa\sqrt{m}$)	応力拡大 係数 K_I *4 ($MPa\sqrt{m}$)	計算 された $T - RT_{NDT}$ (°C)	要求 温度 T (°C)	要求温度 + 22°C マージン T + 22 (°C)
		σ_{m1}	σ_{b1}	σ_{m2}	σ_{b2}	M_m *2 (\sqrt{m})	M_b *3 (\sqrt{m})					
最高使用圧力												
死荷重 + 地震荷重												
Load Combination 1												
Load Combination 2												
Load Combination 3												
Load Combination 4												
Load Combination 5												
Load Combination 6												
Load Combination 7												
Load Combination 8												
Load Combination 9												
Load Combination 10												
Load Combination 11												
Load Combination 12												
Load Combination 13												
Load Combination 14												
Load Combination 15												
Load Combination 16												
Load Combination 17												

- *1: 内圧及び死荷重 + 地震荷重による応力
- *2: 膜応力による K_I 算出のための補正係数 (WRC Bulletin No. 175 Appendix 3tにより算出)
- *3: 曲げ応力による K_I 算出のための補正係数 (JEAC 4206-2007 附属書F-3100(2)により算出)
- *4: 内圧及び死荷重+地震荷重による応力から求められた応力拡大係数に、 $K_{I t}$ を加えたもの。

3. 評価結果

脆性防止破壊の観点から、原子炉圧力容器の運転は、P-T 線図に示す制限曲線より高温側の条件で運転温度の管理が要求される。

図 2 に参考で示す通り、原子炉圧力容器の運転は飽和圧力-温度曲線に従うことから、中性子照射脆化に対する耐震性を考慮した運転制限に対し、十分な安全性が確保されていると判断する。

流れ加速型腐食を考慮した耐震安全性評価について

腐食（流れ加速型腐食）に対する耐震安全性評価については、以下の劣化事象について実施する。

1. 配管内面の腐食（流れ加速型腐食）（炭素鋼配管）
2. 伝熱管の腐食（流れ加速型腐食）および摩耗
3. 管支持板の腐食（流れ加速型腐食）
4. 胴の腐食（流れ加速型腐食）

1. 配管内面の腐食（流れ加速型腐食）に対する耐震安全性評価

(1) 評価対象配管の抽出について

配管の腐食（流れ加速型腐食）に対する耐震安全性評価は、「発電用原子炉設備規格 沸騰水型原子力発電所 配管減肉管理に関する技術規格（2006年度版）（JSME S NH1-2006）」（以下、「減肉規格（2006年度版）」という。）において、流れ加速型腐食の可能性が否定できないとされている FAC-2, FAC-S の箇所を含むラインのうち、炭素鋼配管を評価対象ラインとして選定した。

減肉規格（2006年度版）において溶存酸素濃度を高く保つことで流れ加速型腐食による減肉を抑制している範囲と定義している FAC-1 の範囲については評価対象外とした。また、FAC-2, FAC-S の範囲のうち、流れ加速型腐食に対して耐性を有する材料（ステンレス鋼、低合金鋼等）を使用している範囲についても評価対象外とした。

(2) 評価対象モデル数

評価対象として抽出され評価を実施した配管は合計 62 モデルであり、各系統および耐震クラス毎のモデル数は表 1 に示す。

表1 配管内面の腐食（流れ加速型腐食）（炭素鋼配管）の評価対象モデル数

評価対象配管 (系統名)	耐震クラス	モデル数 ^{*1}
給水系	S	1
	B (Ss) ^{*2, *3}	1
	B	12
原子炉ベントリ系	S	2
原子炉隔離時冷却系	S	3
復水系	B (Ss) ^{*2}	2
	B	40
タービンラフト蒸気系	B	3
残留熱除去系	S	3
補助蒸気系	B	1

*1：同一モデル内に異なる系統，耐震クラスを有する管があるため，モデル数は一部重複あり

*2：S クラス設備または常設重大事故等対処設備への波及的影響を考慮して，Ss 地震力による健全性評価を実施した

*3：溢水源としないB，Cクラス設備に該当するため，Ss 地震力による健全性評価を実施した

(3) 評価対象ラインおよび解析モデル

解析モデルは，3次元多質点系はりモデルとし，減肉量を考慮した寸法以外のモデル化の条件は，工事計画認可と同等とする。解析は，計算機コード「HISAP」を使用する。

また，地震動による配管応力解析の結果，発生応力が許容応力を上回った際に実施する疲れ累積係数による評価を計算機コードにより実施する。

(4) 耐震評価条件

耐震評価を行うにあたり使用する地震動は，設置変更許可を受けた基準地震動 Ss (Ss-D, Ss-F1, Ss-F2, Ss-N1, Ss-N2) および弾性設計用地震動 Sd (Sd-D, Sd-F1, Sd-F2, Sd-N1, Sd-N2, Sd-1) に基づく入力地震動を用いた時刻歴応答解析に基づき作成された設計用床応答スペクトル I を適用する。

(5) 評価内容

配管の腐食（流れ加速型腐食）に対しては，超音波厚さ計による肉厚測定等を実施した上でその結果に基づき耐震管理厚さ^{*1}を管理基準として予寿命を管理し，配管の取替等を検討することとしている。

耐震安全性評価では，JSME 減肉管理規格において流れ加速型腐食の発生の可能性が低いとされている FAC-1 管理範囲以外で，常時流れがあり減肉の想定される範囲については，減肉が想定される部位に耐震管理厚さまで減肉が生じたと想定して地震時の発生応力を評価した。

*1：耐震管理厚さ = min (40年目の想定厚さ，公称板厚の80%の厚さ)

配管の流れ加速型腐食に対する耐震安全性評価は，原則として以下の手順で実施した。

a. 耐震管理厚さの決定

- ①実機点検結果に基づいて系統全体における肉厚管理測定箇所から、評価対象ラインの中の減肉想定範囲において流体条件が類似する箇所の実機測定データを整理して各評価箇所に保守的になるよう減肉率を設定する。
- ②①で設定した減肉率を用いて運転開始後 40 年時点までの一様な減肉を想定し、40 年目の想定厚さを算出する。
- ③公称肉厚の 80%となる厚さと②で算出した 40 年目の想定厚さを比較し、小さい方を耐震管理厚さとする。

b. 耐震管理厚さを用いた耐震評価

- ①エルボ部、分岐部、レジューサ部等の偏流発生部およびその下流部の以下に示す減肉想定範囲（JSME 減肉管理規格に規程されている測定長さ）に耐震管理厚さまで一様な減肉が生じたと想定して三次元梁モデルに反映
 - ・ 管の呼び径 125A 以下 : 300 mm
 - ・ 管の呼び径 125A を超えるもの : 500 mmただし、弁およびオリフィス下流部については以下とする（D は配管口径を示す）。
 - ・ 弁下流部 : 1D の位置が上記を超える場合は 1D
 - ・ オリフィス下流部 : 3D の位置が上記を超える場合は 3D
- ②評価対象ラインの全ての減肉想定範囲に対し①で選定した耐震管理厚さまで、全周一様な減肉を想定し、3次元多質点系はりモデルに反映
- ③評価対象ラインの耐震クラスに応じた地震力を用いて地震時の発生応力（一次応力）の評価を実施（振動試験結果を踏まえ設計評価用として安全側に設定した減衰定数を適用する。）
- ④耐震重要度 S クラスの配管については、一次+二次応力の評価を実施し、許容応力を満足しなかった場合には疲れ累積係数による評価を実施

(6) 評価結果

耐震管理厚さまでの減肉を想定し、地震時に発生する応力または疲れ累積係数が許容値を下回ることから、耐震安全性に問題ないことを確認した。

評価対象ラインの全ラインの評価結果一覧を表 2 に、疲れ累積係数による評価結果を表 3 に示す。

表2 配管の腐食（流れ加速型腐食）に対する評価結果

系統	区分	耐震重要度	評価地震力	許容応力状態	応力種別	発生応力*1 (MPa)	許容応力*2 (MPa)
給水系	クラス2	S	Ss	IV _A S	一次応力	135	380
					一次+二次応力	156	418
			Sd	III _A S	一次応力	100	209
					一次+二次応力	87	418
	クラス3	B	Ss*4,5	IV _A S	一次応力	125	382
					一次+二次応力	139	458
			S _B	B _A S	一次応力	174	218
復水系	クラス3*3	B	Ss*4	IV _A S	一次応力	218	386
					一次+二次応力	311	464
			S _B	B _A S	一次応力	220	234
原子炉ベント ドレン系	クラス1	S	Ss	IV _A S	一次応力	166	364
					一次+二次応力	868	366
			Sd	III _A S	一次応力	107	274
					一次+二次応力	487	366
	クラス3	S	Ss	IV _A S	一次応力	108	363
					一次+二次応力	193	364
			Sd	III _A S	一次応力	64	182
					一次+二次応力	96	364
原子炉隔離時 冷却系	クラス1	S	Ss	IV _A S	一次応力	138	364
					一次+二次応力	505	366
			Sd	III _A S	一次応力	89	274
					一次+二次応力	263	366
	クラス2 クラス3	S	Ss	IV _A S	一次応力	136	363
					一次+二次応力	256	364
			Sd	III _A S	一次応力	102	182
					一次+二次応力	181	364
残留熱除去系	クラス1	S	Ss	IV _A S	一次応力	96	364
					一次+二次応力	609	366
			Sd	III _A S	一次応力	78	274
					一次+二次応力	364	366
	クラス3	S	Ss	IV _A S	一次応力	160	394
					一次+二次応力	865	374
			Sd	III _A S	一次応力	114	187
					一次+二次応力	520	374
タービンゲランド 蒸気系	クラス3*3	B	S _B	B _A S	一次応力	151	210
補助蒸気系	クラス3*3	B	S _B	B _A S	一次応力	119	182

*1：評価モデル内の最大発生応力を示す

*2：日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2005年版（2007年追補版を含む））＜第I篇 軽水炉規格＞ JSME S NC1-2005/2007」付録材料図表Part5 表8, 表9より求まる値

*3：設計・建設規格区分としては基準外であるが、耐震評価上クラス3として扱った

*4：Sクラス設備または常設重大事故等対処設備への波及的影響を考慮して、Ss地震力による健全性評価を実施した

*5：溢水源としないB, Cクラス設備に該当するため、Ss地震力による健全性評価を実施した

表3 配管の腐食に対する評価結果（疲れ累積係数による評価結果）

系統	区分	耐震 重要度	評価 地震力	許容応力 状態	疲れ累積係数*1 (許容値：1以下)
原子炉ベントリ系	クラス1	S	Ss	IV _A S	0.868
			Sd	III _A S	0.171
原子炉隔離時冷却系	クラス1	S	Ss	IV _A S	0.087
			Sd	III _A S	0.010
残留熱除去系	クラス1	S	Ss	IV _A S	0.260
			Sd	III _A S	0.025
	クラス3	S	Ss	IV _A S	0.474
			Sd	III _A S	0.073

*1：評価モデル内の1次+2次応力最大の疲れ累積係数

2. 伝熱管の腐食（流れ加速型腐食）に対する耐震安全性評価

(1) 評価対象部位の抽出について

伝熱管の腐食（流れ加速型腐食）に対する耐震安全性評価は、PLM 技術評価書対象機器のうち熱交換器の伝熱管内部流体による腐食（流れ加速型腐食）が想定される部位であって、現状保全によって管理される減肉を想定した場合に固有振動数および構造強度評価への影響が有意であると判断したものを評価対象とした結果、原子炉補機冷却系熱交換器の伝熱管を評価対象部位として選定した。

また、熱交換器の伝熱管については、管支持板との摩耗による減肉を想定した場合に固有振動数および構造強度評価への影響が有意であると判断したものを評価対象とした結果、気体廃棄物処理系排ガス予熱器の伝熱管を評価対象部位として選定した。

(2) 算出過程

① 原子炉補機冷却系熱交換器

原子炉補機冷却系熱交換器はSクラスであり、原子炉建物 EL. 15.300 に設置されている。熱交換器の構造を踏まえ支持条件ごとに評価モデルを作成し、伝熱管厚さに対し管内面側から50%減肉したものとして、JEAG4601 および機械工学便覧に定める式に基づき、固有振動数を求めた結果、いずれのモデルにおいても剛構造であることを確認した。

評価モデルと各モデルの固有振動数を表4に示す。

表4 原子炉補機冷却系熱交換器の評価モデルと伝熱管腐食時の伝熱管の固有振動数

評価モデル		固有振動数[Hz]
管板－管支持板	片側固定・他端支持 はりモデル	
管支持板－管支持板	両端支持 はりモデル	

a. 応力成分

原子炉補機冷却系熱交換器の伝熱管について、伝熱管厚さに対し管内面側から50%減肉したものとして、JEAG4601 および機械工学便覧に定める式に基づき、以下(a)～(f)の各成分を算出し地震時に発生する応力を求めた。算出に用いた各記号の説明は表5に示す。

表5 計算に使用する記号の説明 (1/3)

記号	記号の説明	単位
A_{stbc}	減肉を考慮した場合の伝熱管のせん断断面積	mm ²
A_{tbco}	減肉を考慮した場合の伝熱管断面積	mm ²
C_H	水平方向設計震度	—
C_V	鉛直方向設計震度	—
D_{ico}	減肉を考慮した場合の伝熱管内径	mm

表5 計算に使用する記号の説明 (2/3)

記号	記号の説明	単位
D_o	伝熱管外径	mm
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s ²
L_{an}	管板－管支持板間の長さ	mm
L_{ho}	管支持板－管支持板間の長さ	mm
m_{ec}	減肉を考慮した場合の伝熱管相当質量	kg/m
M_{anc}	減肉を考慮した場合の管板－管支持板間における自重による曲げモーメント	N・mm
M_{Haanc}	減肉を考慮した場合の管板－管支持板間における水平方向地震荷重による曲げモーメント	N・mm
M_{Hahoc}	減肉を考慮した場合の管支持板－管支持板間における水平方向地震荷重による曲げモーメント	N・mm
M_{hoc}	減肉を考慮した場合の管支持板－管支持板間における自重による曲げモーメント	N・mm
M_{Vaanc}	減肉を考慮した場合の管板－管支持板間における鉛直方向地震荷重による曲げモーメント	N・mm
M_{Vahoc}	減肉を考慮した場合の管支持板－管支持板間における鉛直方向地震荷重による曲げモーメント	N・mm
P_{ig}	最高使用圧力	MPa
t_{co}	伝熱管減肉厚さ	mm
t_{tb}	伝熱管厚さ	mm
Z_{tbc}	減肉を考慮した場合の伝熱管の断面係数	mm ³
π	円周率	—
σ_{anc}	減肉を考慮した場合の管板－管支持板間における組合せ一次応力	MPa
σ_{hoc}	減肉を考慮した場合の管支持板－管支持板間における組合せ一次応力	MPa
$\sigma_{Hx3hanc}$	減肉を考慮した場合の管板－管支持板間における水平方向地震荷重による曲げ応力	MPa
$\sigma_{Hx3hhoc}$	減肉を考慮した場合の管支持板－管支持板間における水平方向地震荷重による曲げ応力	MPa
$\sigma_{Vx3hanc}$	減肉を考慮した場合の管板－管支持板間における鉛直方向地震荷重による曲げ応力	MPa
$\sigma_{Vx3hhoc}$	減肉を考慮した場合の管支持板－管支持板間における鉛直方向地震荷重による曲げ応力	MPa
σ_{x1c}	減肉を考慮した場合の伝熱管における内圧により生じる軸方向応力	MPa
σ_{x2ganc}	減肉を考慮した場合の管板－管支持板間における自重による曲げ応力	MPa
σ_{x2ghoc}	減肉を考慮した場合の管支持板－管支持板間における自重による曲げ応力	MPa

表5 計算に使用する記号の説明 (3/3)

記号	記号の説明	単位
σ_{xanc}	減肉を考慮した場合の管板－管支持板間における軸方向一次応力の和	MPa
σ_{xhoc}	減肉を考慮した場合の管支持板－管支持板間における軸方向一次応力の和	MPa
$\sigma_{\phi anc}$	減肉を考慮した場合の管板－管支持板間における周方向一次応力の和	MPa
$\sigma_{\phi 1c}$	減肉を考慮した場合の伝熱管における内圧により生じる周方向応力	MPa
$\sigma_{\phi hoc}$	減肉を考慮した場合の管支持板－管支持板間における周方向一次応力の和	MPa
τ_{anc}	減肉を考慮した場合の管板－管支持板間におけるせん断方向一次応力の和	MPa
τ_{hoc}	減肉を考慮した場合の管支持板－管支持板間におけるせん断方向一次応力の和	MPa
τ_{H1anhc}	減肉を考慮した場合の管板－管支持板間における水平方向地震荷重によるせん断応力	MPa
τ_{H1hohc}	減肉を考慮した場合の管支持板－管支持板間における水平方向地震荷重によるせん断応力	MPa
τ_{V1anhc}	減肉を考慮した場合の管板－管支持板間における鉛直方向地震荷重によるせん断応力	MPa
τ_{V1hohc}	減肉を考慮した場合の管支持板－管支持板間における鉛直方向地震荷重によるせん断応力	MPa

(a) 内圧により生じる膜応力成分

内圧により生じる膜応力は、以下の式により算出した。

$$\text{周方向} : \sigma_{\phi 1c} = \frac{P_{ig} \cdot [D_{ico} + 1.2(t_{tb} - t_{co})]}{2 \cdot (t_{tb} - t_{co})}$$

$$\text{軸方向} : \sigma_{x1c} = \frac{P_{ig} \cdot [D_{ico} + 1.2(t_{tb} - t_{co})]}{4 \cdot (t_{tb} - t_{co})}$$

(b) 自重により生じる曲げ応力成分

自重により生じる曲げ応力は、以下の式により算出した。

$$\text{管板－管支持板} : \sigma_{x2ganc} = \frac{M_{anc}}{Z_{tbc}}$$

$$\text{管支持板－管支持板} : \sigma_{x2ghoc} = \frac{M_{hoc}}{Z_{tbc}}$$

なお、 M_{anc} 、 M_{hoc} および Z_{tbc} は以下の式により算出した。

$$M_{anc} = \frac{3 \cdot (m_{ec} \cdot L_{an} \cdot g) \cdot L_{an}}{16}$$

$$M_{hoc} = \frac{(m_{ec} \cdot L_{ho} \cdot g) \cdot L_{ho}}{4}$$

$$Z_{tbc} = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(D_o^4 - D_{ico}^4)}{D_o}$$

(c) 水平地震荷重により生じる曲げ応力成分

水平地震荷重により生じる曲げ応力は、以下の式により算出した。

$$\text{管板 - 管支持板} : \sigma_{Hx3hanc} = \frac{M_{Haanc}}{Z_{tbc}}$$

$$\text{管支持板 - 管支持板} : \sigma_{Hx3hhoc} = \frac{M_{Hahoc}}{Z_{tbc}}$$

なお、 M_{Haanc} および M_{Hahoc} は以下の式により算出した。

$$M_{Haanc} = C_H \cdot \frac{3 \cdot (m_{ec} \cdot L_{an} \cdot g) \cdot L_{an}}{16}$$

$$M_{Hahoc} = C_H \cdot \frac{(m_{ec} \cdot L_{ho} \cdot g) \cdot L_{ho}}{4}$$

(d) 水平地震荷重により生じるせん断応力成分

水平地震荷重により生じるせん断応力は、以下の式により算出した。

$$\text{管板 - 管支持板} : \tau_{H1anhc} = C_H \cdot \frac{m_{ec} \cdot L_{an} \cdot g}{A_{stbc}}$$

$$\text{管支持板 - 管支持板} : \tau_{H1hohc} = C_H \cdot \frac{m_{ec} \cdot L_{ho} \cdot g}{A_{stbc}}$$

なお、 A_{stbc} は以下の式により算出した。

$$A_{stbc} = \frac{3 \cdot \left[\left(\frac{D_o}{2} \right)^2 + \left(\frac{D_{ico}}{2} \right)^2 \right]}{4 \left[\left(\frac{D_o}{2} \right)^2 + \left(\frac{D_o}{2} \right) \cdot \left(\frac{D_{ico}}{2} \right) + \left(\frac{D_{ico}}{2} \right)^2 \right]} \cdot A_{tbco}$$

(e) 鉛直地震荷重により生じる曲げ応力成分

鉛直地震荷重により生じる曲げ応力は、以下の式により算出した。

$$\text{管板 - 管支持板} : \sigma_{Vx3hanc} = \frac{M_{Vaanc}}{Z_{tbc}}$$

$$\text{管支持板 - 管支持板} : \sigma_{Vx3hhoc} = \frac{M_{Vahoc}}{Z_{tbc}}$$

なお、 M_{Vaanc} および M_{Vahoc} は以下の式により算出した。

$$M_{Vaanc} = C_V \cdot \frac{3 \cdot (m_{ec} \cdot L_{an} \cdot g) \cdot L_{an}}{16}$$

$$M_{Vahoc} = C_V \cdot \frac{(m_{ec} \cdot L_{ho} \cdot g) \cdot L_{ho}}{4}$$

(f) 鉛直地震荷重により生じるせん断応力成分

鉛直地震荷重により生じるせん断応力は、以下の式により算出した。

$$\text{管板 - 管支持板} \quad : \tau_{V1anhc} = C_V \cdot \frac{m_{ec} \cdot L_{an} \cdot g}{A_{stbc}}$$

$$\text{管支持板 - 管支持板} : \tau_{V1hohc} = C_V \cdot \frac{m_{ec} \cdot L_{ho} \cdot g}{A_{stbc}}$$

b. 組合せ応力

一次応力は、以下の式により組み合わせた。

$$\text{管板 - 管支持板} \quad : \sigma_{anc} = \frac{1}{2} \left[\sigma_{\phi anc} + \sigma_{xanc} + \sqrt{(\sigma_{\phi anc} - \sigma_{xanc})^2 + 4 \cdot \tau_{anc}^2} \right]$$

$$\text{管支持板 - 管支持板} : \sigma_{hoc} = \frac{1}{2} \left[\sigma_{\phi hoc} + \sigma_{xhoc} + \sqrt{(\sigma_{\phi hoc} - \sigma_{xhoc})^2 + 4 \cdot \tau_{hoc}^2} \right]$$

なお、各方向の応力は算出した各成分を用いて以下のとおりとした。

$$\text{周方向応力} : \sigma_{\phi anc} = \sigma_{\phi 1c}, \quad \sigma_{\phi hoc} = \sigma_{\phi 1c}$$

$$\text{軸方向応力} : \sigma_{xanc} = \sigma_{x1c} + \sigma_{x2ganc} + \sigma_{Hx3hanc} + \sigma_{Vx3hanc}$$

$$\sigma_{xhoc} = \sigma_{x1c} + \sigma_{x2ghoc} + \sigma_{Hx3hhoc} + \sigma_{Vx3hhoc}$$

$$\text{せん断応力} : \tau_{anc} = \tau_{H1anhc} + \tau_{V1anhc}, \quad \tau_{hoc} = \tau_{H1hohc} + \tau_{V1hohc}$$

c. 許容応力

伝熱管の一次応力に対する許容応力は、使用材料により設計・建設規格 JSME S NC1-2005 付録材料図表 Part5 表 8, 9 より得られる S_y , S_u に基づき、JEAG4601 に規定されている横置円筒型容器の胴（容器）の許容応力を適用した。なお、許容応力は基準地震動 S_s については許容応力状態 $IV_A S$, 弾性設計用地震動 S_d については許容応力状態 $III_A S$ に基づいた値とした。

② 気体廃棄物処理系排ガス予熱器

気体廃棄物処理系排ガス予熱器は B クラスであり、タービン建物 EL. 12.500 に設置されている。原子炉補機冷却系熱交換器と同様の考え方でモデルを作成し固有振動数を求めた結果、いずれのモデルにおいても剛構造であることを確認した。

評価モデルと各モデルの固有振動数を表 6 に示す。

表 6 気体廃棄物処理系排ガス予熱器の評価モデルと伝熱管腐食時の伝熱管の固有振動数

評価モデル		固有振動数 [Hz]
管板 - 管支持板	片側固定・他端支持 はりモデル	
管支持板 - 管支持板	両端支持 はりモデル	

a. 応力成分

発生応力は原子炉補機冷却系熱交換器と同様の手法で算出した。ただし、Bクラス機器であるため地震荷重は水平方向のみ考慮することから、①a. (e)および(f)は対象外とした。

b. 組合せ応力

一次応力の組合せ応力は原子炉補機冷却系熱交換器と同様の手法で算出した。ただし、前述の通り鉛直方向の荷重を考慮しないため、 $\sigma_{Vx3hanc} = \tau_{V1hohc} = 0$ とした。

c. 許容応力

伝熱管の一次応力に対する許容応力は、使用材料により設計・建設規格 JSME S NC1-2005 付録材料図表 Part5 表 8 より求まる S_y に基づき、JEAG4601 に規定されている横置円筒型容器の胴（容器）の許容応力を適用した。

(3) 評価結果

熱交換器伝熱管の腐食（流れ加速型腐食）を考慮した耐震安全性評価結果を表 7 に示す。評価の結果、発生応力は許容応力を下回り、耐震安全性に問題ないことを確認した。

表 7 熱交換器の伝熱管の腐食（流れ加速型腐食）を考慮した耐震安全性評価結果

評価対象	区分	耐震重要度	評価地震力	許容応力状態	応力種別	発生応力 (MPa)		許容応力*1
						管板～管支持板	管支持板～管支持板	
原子炉補機冷却系熱交換器伝熱管	クラス 3	S	Ss	IV _A S	一次応力	44	54	337
			Sd	III _A S		32	38	337
気体廃棄物処理系排ガス予熱器伝熱管	—*2	B	1.8Ci	B _A S	一次応力	38	38	139

*1：設計・建設規格 JSME S NC1-2005 付録材料図表 Part5 表 8 および表 9 より求まる値

*2：設計・建設規格にて定められる区分としては基準外であるが、耐震評価上クラス 3 として扱った

3. 管支持板の腐食（流れ加速型腐食）に対する耐震安全性評価

(1) 評価対象部位の抽出について

気体廃棄物処理系排ガス予熱器については、経年劣化事象として管支持板の腐食（流れ加速型腐食）が想定され、伝熱管支持間隔の拡大により、伝熱管の耐震安全性に影響を及ぼす可能性があるため、耐震安全性評価を実施した。

なお、管支持板の評価モデルは2.における排ガス予熱器と同様とし、「管板（固定端）から管支持板」、「管支持板から管支持板」までのそれぞれの伝熱管の管支持板について、腐食により管支持機能が1箇所喪失する場合を想定して評価を実施した。

(2) 算出過程

気体廃棄物処理系排ガス予熱器の耐震重要度分類等の条件は2.のとおりであり、各モデルで管支持機能の喪失による固有振動数を求めた結果、いずれのモデルにおいても剛構造であることを確認した。

評価モデルと各モデルの固有振動数を表8に示す。

表8 気体廃棄物処理系排ガス予熱器の評価モデルと管支持機能の喪失時の伝熱管の固有振動数

評価モデル		固有振動数[Hz]
管板－管支持板	片側固定・他端支持 はりモデル	
管支持板－管支持板	両端支持 はりモデル	

a. 応力成分

気体廃棄物処理系排ガス予熱器の伝熱管について、管支持板の腐食により1箇所の管支持機能を喪失したものとして、JEAG4601 および機械工学便覧に定める式に基づき、以下(a)～(d)の各成分を算出し地震時に発生する応力を求めた。算出に用いた各記号のうち、表5にて記載していない記号の説明を表9に示す。

表9 計算に使用する記号の説明 (1/2)

記号	記号の説明	単位
A_{stb}	伝熱管のせん断断面積	mm ²
A_{tb}	伝熱管断面積	mm ²
D_i	伝熱管内径	mm
l'_{an}	管支持機能の1箇所喪失を考慮した場合の管板－管支持板間の最長長さ	mm
l'_{ho}	管支持機能の1箇所喪失を考慮した場合の管支持板－管支持板間の最長長さ	mm
m_e	伝熱管相当質量（伝熱管の単位長さ当たり質量および伝熱管内外の流体の単位長さ当たり質量の和）	kg/m
M_{an}	管板－管支持板間における自重による曲げモーメント	N・mm

表9 計算に使用する記号の説明 (2/2)

記号	記号の説明	単位
M_{aan}	管板－管支持板間における水平方向地震荷重による曲げモーメント	N・mm
M_{aho}	管支持板－管支持板間における水平方向地震荷重による曲げモーメント	N・mm
M_{ho}	管支持板－管支持板間における自重による曲げモーメント	N・mm
Z_{tb}	伝熱管の断面係数	mm ³
σ_{an}	管板－管支持板間における組合せ一次応力	MPa
σ_{ho}	管支持板－管支持板間における組合せ一次応力	MPa
σ_{x3han}	管板－管支持板間における水平方向地震荷重による曲げ応力	MPa
σ_{x3hho}	管支持板－管支持板間における水平方向地震荷重による曲げ応力	MPa
σ_{x1}	伝熱管における内圧により生じる軸方向応力	MPa
σ_{x2gan}	管板－管支持板間における自重による曲げ応力	MPa
σ_{x2gho}	管支持板－管支持板間における自重による曲げ応力	MPa
σ_{xan}	管板－管支持板間における軸方向一次応力の和	MPa
σ_{xho}	管支持板－管支持板間における軸方向一次応力の和	MPa
$\sigma_{\phi an}$	管板－管支持板間における周方向一次応力の和	MPa
$\sigma_{\phi 1}$	伝熱管における内圧により生じる周方向応力	MPa
$\sigma_{\phi ho}$	管支持板－管支持板間における周方向一次応力の和	MPa
τ_{an}	管板－管支持板間におけるせん断方向一次応力の和	MPa
τ_{ho}	管支持板－管支持板間におけるせん断方向一次応力の和	MPa
τ_{1anh}	管板－管支持板間における水平方向地震荷重によるせん断応力	MPa
τ_{1hoh}	管支持板－管支持板間における水平方向地震荷重によるせん断応力	MPa

(a) 内圧により生じる膜応力成分

内圧により生じる膜応力は、以下の式により算出した。

$$\text{周方向} : \sigma_{\phi 1} = \frac{P_{ig} \cdot [D_i + 1.2t_{tb}]}{2 \cdot t_{tb}}$$

$$\text{軸方向} : \sigma_{x1} = \frac{P_{ig} \cdot [D_i + 1.2t_{tb}]}{4 \cdot t_{tb}}$$

(b) 自重により生じる曲げ応力成分

自重により生じる曲げ応力は、以下の式により算出した。

$$\text{管板－管支持板} : \sigma_{x2gan} = \frac{M_{an}}{Z_{tb}}$$

$$\text{管支持板－管支持板} : \sigma_{x2gho} = \frac{M_{ho}}{Z_{tb}}$$

なお、 M_{an} 、 M_{ho} および Z_{tb} は以下の式により算出した。

$$M_{an} = \frac{3 \cdot (m_e \cdot L'_{an} \cdot g) \cdot L'_{an}}{16}$$

$$M_{ho} = \frac{(m_e \cdot L'_{ho} \cdot g) \cdot L'_{ho}}{4}$$

$$Z_{tb} = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(D_o^4 - D_i^4)}{D_o}$$

(c) 水平地震荷重により生じる曲げ応力成分

水平地震荷重により生じる曲げ応力は、以下の式により算出した。

$$\text{管板 - 管支持板} \quad : \sigma_{x3han} = \frac{M_{aan}}{Z_{tb}}$$

$$\text{管支持板 - 管支持板} : \sigma_{x3hho} = \frac{M_{aho}}{Z_{tb}}$$

なお、 M_{aan} および M_{aho} は以下の式により算出した。

$$M_{aan} = C_H \cdot \frac{3 \cdot (m_e \cdot L'_{an} \cdot g) \cdot L'_{an}}{16}$$

$$M_{aho} = C_H \cdot \frac{(m_e \cdot L'_{ho} \cdot g) \cdot L'_{ho}}{4}$$

(d) 水平地震荷重により生じるせん断応力成分

水平地震荷重により生じるせん断応力は、以下の式により算出した。

$$\text{管板 - 管支持板} \quad : \tau_{1anh} = C_H \cdot \frac{m_e \cdot L'_{an} \cdot g}{A_{stb}}$$

$$\text{管支持板 - 管支持板} : \tau_{1hoh} = C_H \cdot \frac{m_e \cdot L'_{ho} \cdot g}{A_{stb}}$$

なお、 A_{stb} は以下の式により算出した。

$$A_{stb} = \frac{3 \cdot \left[\left(\left(\frac{D_o}{2} \right)^2 + \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \right) \right]}{4 \left[\left(\frac{D_o}{2} \right)^2 + \left(\frac{D_o}{2} \right) \cdot \left(\frac{D_i}{2} \right) + \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \right]} \cdot A_{tb}$$

b. 組合せ応力

一次応力は、以下の式により組み合わせた。

$$\text{管板 - 管支持板} \quad : \sigma_{an} = \frac{1}{2} \left[\sigma_{\varphi an} + \sigma_{xan} + \sqrt{(\sigma_{\varphi an} - \sigma_{xan})^2 + 4 \cdot \tau_{an}^2} \right]$$

$$\text{管支持板 - 管支持板} : \sigma_{ho} = \frac{1}{2} \left[\sigma_{\varphi ho} + \sigma_{xho} + \sqrt{(\sigma_{\varphi ho} - \sigma_{xho})^2 + 4 \cdot \tau_{ho}^2} \right]$$

なお、各方向の応力は算出した各成分を用いて以下のとおりとした。

$$\text{周方向応力} : \sigma_{\varphi an} = \sigma_{\varphi 1}, \quad \sigma_{\varphi ho} = \sigma_{\varphi 1}$$

$$\text{軸方向応力} : \sigma_{xan} = \sigma_{x1} + \sigma_{x2gan} + \sigma_{x3han}, \quad \sigma_{xho} = \sigma_{x1} + \sigma_{x2gho} + \sigma_{x3hho}$$

$$\text{せん断応力} : \tau_{an} = \tau_{1anh}, \quad \tau_{ho} = \tau_{1hoh}$$

c. 許容応力

気体廃棄物処理系排ガス予熱器の伝熱管の一次応力に対する許容応力は、2.にて算出済みの値と同値とした。

(3) 評価結果

気体廃棄物処理系排ガス予熱器の管支持板の腐食（流れ加速型腐食）による管支持機能の喪失を考慮した伝熱管の耐震安全性評価結果を表 10 に示す。評価の結果、発生応力は許容応力を下回り、耐震安全性に問題ないことを確認した。

表 10 排ガス予熱器の管支持板の腐食（流れ加速型腐食）の耐震安全性評価結果

評価対象	区分	耐震重要度	評価地震力	許容応力状態	応力種別	発生応力 (MPa)		許容応力*1 (MPa)
						管板～管支持板	管支持板～管支持板	
気体廃棄物処理系排ガス予熱器管支持板	—*2	B	1.8Ci	B _A S	一次応力	19	19	139

*1：許容値は設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 8 および表 9 より求まる値

*2：設計・建設規格にて定められる区分としては基準外であるが、耐震評価上クラス 3 として扱った

4. 胴の腐食（流れ加速型腐食）に対する耐震安全性評価

(1) 評価対象機器の抽出について

胴の腐食（流れ加速型腐食）に対する耐震安全性評価は、PLM 技術評価書対象機器のうち熱交換器、容器等の胴部分に腐食（流れ加速型腐食）が想定される部位であって、現状保全によって管理される減肉を考慮した場合に固有振動数および構造強度評価への影響が有意であると判断したものを評価対象とした結果、原子炉浄化系再生熱交換器および気体廃棄物処理系排ガス予熱器の胴を評価対象部位として選定した。

(2) 算出過程

① 原子炉浄化系再生熱交換器

原子炉浄化系再生熱交換器は B クラスであり、原子炉建物 EL. 23. 800 に設置されている。熱交換器本体を 2 次元多質点系はりモデルとし、公称板厚から 1.47mm の腐食量を想定して有限要素法で固有振動数および胴板と脚の付け根部に作用する荷重とモーメントを算出した。固有値解析結果を表 11 に示す。

表 11 原子炉浄化系再生熱交換器の胴の腐食時の固有値解析結果

支配モード		固有振動数 [Hz]
一次	水平	

a. 応力評価

原子炉浄化系再生熱交換器の胴の応力評価は、添付資料(1)に示す工認耐震計算書の基本方針と同様の手法にて許容応力および発生応力を算出した。

② 気体廃棄物処理系排ガス予熱器

気体廃棄物処理系排ガス予熱器は耐震重要度分類 B クラスであり、タービン建物 EL. 12.500 に設置されている。熱交換器の形状が JEAG4601 に示されている横置円筒型容器であるため、公称板厚から 0.58mm の腐食量を想定して JEAG の手法に基づき評価を実施した。固有振動数の算出結果を表 12 に示す。

表 12 気体廃棄物処理系排ガス予熱器の胴の腐食時の固有振動数

	固有振動数[Hz]
水平方向（長手方向）	
水平方向（横方向）	
鉛直方向	

a. 応力評価

気体廃棄物処理系排ガス予熱器の胴の応力評価は、添付資料(1)に示す工認耐震計算書の基本方針と同様の手法にて許容応力および発生応力を算出した。

(3) 評価結果

原子炉浄化系再生熱交換器および気体廃棄物処理系排ガス予熱器の胴の腐食（流れ加速型腐食）を考慮した耐震安全性評価結果を表 13 に示す。評価の結果、発生応力は許容応力を下回り、耐震安全性に問題ないことを確認した。

表 13 熱交換器の胴の腐食（流れ加速型腐食）を考慮した耐震安全性評価結果

評価対象	区分	耐震重要度	評価地震力	許容応力状態	応力種別	発生応力 (MPa)	許容応力*1 (MPa)
原子炉浄化系再生熱交換器	クラス3	B	1.8Ci	B _A S	一次一般膜応力	126	198
					一次応力	183	198
排ガス予熱器	—*2	B	1.8Ci	B _A S	一次一般膜応力	34	198
					一次応力	63	198

*1：日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2005年版（2007年追補版を含む））＜第 I 篇 軽水炉規格＞ JSME S NC1-2005/2007」付録材料図表Part5 表8, 表9より求まる値

*2：日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2005年版（2007年追補版を含む））＜第 I 篇 軽水炉規格＞ JSME S NC1-2005/2007」にて定められる区分としては基準外であるが、耐震評価上クラス3として扱った

5. 添付資料

- (1) VI-2-1-14 「機器・配管系の計算書作成の方法 添付資料-4 横置一胴円筒形容器の耐震性についての計算書作成の基本方針」

添付資料-4 横置一胴円筒形容器の耐震性についての
計算書作成の基本方針

目 次

1. 概要	1
2. 一般事項	1
2.1 評価方針	1
2.2 適用規格・基準等	2
2.3 記号の説明	3
2.4 計算精度と数値の丸め方	8
3. 評価部位	9
4. 固有周期	9
4.1 固有周期の計算方法	9
5. 構造強度評価	12
5.1 構造強度評価方法	12
5.2 設計用地震力	12
5.3 計算方法	12
5.4 応力の評価	26
6. 耐震計算書のフォーマット	28
7. 引用文献	28

1. 概要

本資料は、VI-2-1-1「耐震設計の基本方針」に基づき、耐震性に関する説明書が求められている横置一胴円筒形容器（耐震重要度分類Sクラス又はS_s機能維持の計算を行うもの）が、十分な耐震性を有していることを確認するための耐震計算の方法について記載したものである。

解析の方針及び減衰定数については、VI-2-1-6「地震応答解析の基本方針」に従うものとする。

ただし、本基本方針が適用できない横置一胴円筒形容器にあつては、個別耐震計算書にその耐震計算方法を含めて記載する。

2. 一般事項

2.1 評価方針

横置一胴円筒形容器の応力評価は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定した荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界に基づき、「3. 評価部位」にて設定する箇所において、「4. 固有周期」で算出した固有周期に基づく設計用地震力による応力等が許容限界内に収まることを、「5. 構造強度評価」にて示す方法にて確認することで実施する。確認結果を「6. 耐震計算書のフォーマット」に示す。

横置一胴円筒形容器の耐震評価フローを図2-1に示す。

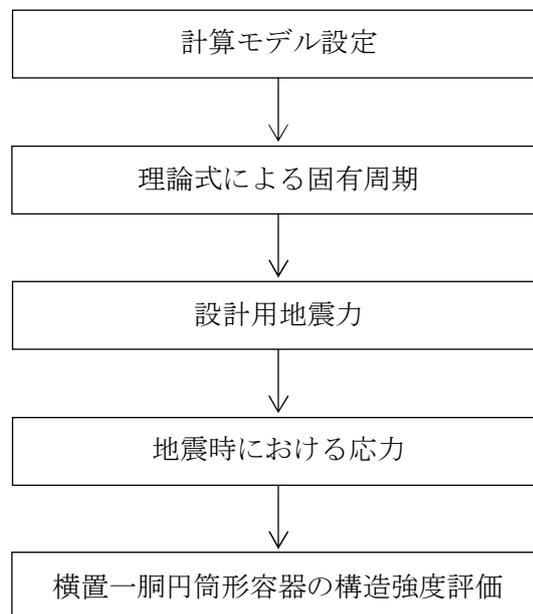


図2-1 横置一胴円筒形容器の耐震評価フロー

2.2 適用規格・基準等

本評価において適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984
（（社）日本電気協会）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 （（社）日本電気協会）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版（（社）日本電気協会）
- ・発電用原子力設備規格 設計・建設規格（（社）日本機械学会，2005/2007）（以下「設計・建設規格」という。）

2.3 記号の説明

記号	記号の説明	単位
A_b	基礎ボルトの軸断面積	mm^2
A_s	第1脚の断面積	mm^2
A_{s1}	第1脚の長手方向に対する有効せん断断面積	mm^2
A_{s2}	第1脚の横方向に対する有効せん断断面積	mm^2
A_{s3}	第1脚の長手方向に対するせん断断面積	mm^2
A_{s4}	第1脚の横方向に対するせん断断面積	mm^2
a	第1脚底板の長手方向幅	mm
b	第1脚底板の横方向幅	mm
C_1	第1脚の胴付け根部のアタッチメントの幅の2分の1 (胴の横方向)	mm
C_2	第1脚の胴付け根部のアタッチメントの幅の2分の1 (胴の長手方向)	mm
C_{cj}	周方向モーメントによる応力の補正係数 (引用文献(2)より得られる値) ($j=1$: 周方向応力, $j=2$: 軸方向応力)	—
C_H	水平方向設計震度	—
C_{lj}	軸方向モーメントによる応力の補正係数 (引用文献(2)より得られる値) ($j=1$: 周方向応力, $j=2$: 軸方向応力)	—
C_v	鉛直方向設計震度	—
D_i	胴の内径	mm
d	基礎ボルトの呼び径	mm
d_1	第1脚底板端面から基礎ボルト中心までの長手方向の距離	mm
d_2	第1脚底板端面から基礎ボルト (外側) 中心までの横方向の距離	mm
d_3	第1脚底板端面から基礎ボルト (内側) 中心までの横方向の距離	mm
E_s	脚の縦弾性係数	MPa
e	第1脚中心から偏心荷重作用点までの距離	mm
F	設計・建設規格 SSB-3121.1(1)に定める値	MPa
F^*	設計・建設規格 SSB-3121.3又はSSB-3133に定める値	MPa
F_b	基礎ボルトに作用する引張力	N
f_{sb}	せん断力のみを受ける基礎ボルトの許容せん断応力	MPa
f_t	脚の許容引張応力	MPa
f_{to}	引張力のみを受ける基礎ボルトの許容引張応力	MPa
f_{ts}	引張力とせん断力を同時に受ける基礎ボルトの許容引張応力	MPa
G_s	脚のせん断弾性係数	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s^2
H	水頭	mm
h_1	基礎から第1脚の胴付け根部までの高さ	mm
h_2	基礎から胴の中心までの高さ	mm
I_{sx}	第1脚の長手方向軸に対する断面二次モーメント	mm^4

記号	記号の説明	単位
$I_{s y}$	第1脚の横方向軸に対する断面二次モーメント	mm^4
j_1	荷重分布で分割する荷重の数	—
j_2	第1脚より第2脚と反対の方向に作用する荷重の数（第1脚上の荷重は含まない。）	—
j_3	第2脚より第1脚と反対の方向に作用する荷重の数（第2脚上の荷重は含まない。）	—
$K_{1 j}, K_{2 j}$	引用文献(2)によるアタッチメントパラメータの補正係数 ($j=1$: 周方向応力, $j=2$: 軸方向応力)	—
K_c	第1脚のばね定数（胴の横方向に水平力が作用する場合）	N/m
K_ℓ	第1脚のばね定数（胴の長手方向に水平力が作用する場合）	N/m
K_v	第1脚のばね定数（胴に鉛直力が作用する場合）	N/m
$K_{c j}, K_{\ell j}$	引用文献(2)によるアタッチメントパラメータの補正係数 ($j=1$: 周方向応力, $j=2$: 軸方向応力)	—
ℓ_0	脚中心間距離	mm
ℓ_i	第1脚より各荷重までの距離（ここで第2脚側の距離は正, その反対側は負とする。） ($i=1, 2, 3 \dots j_1$)	mm
ℓ_w	当板における脚の取り付けられない部分の長手方向長さ	mm
M	第1脚底板に作用するモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
M_1	第1脚付け根部における胴の運転時質量によるモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
M_2	第2脚付け根部における胴の運転時質量によるモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
M_c	横方向地震により胴の第1脚付け根部に作用するモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
$M_{c 1}$	横方向地震により第1脚底面に作用するモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
M_ℓ	長手方向地震により胴の第1脚付け根部に作用するモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
$M_{\ell 1}$	長手方向地震により第1脚底面に作用するモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
M_x	胴に生じる軸方向の曲げモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}/\text{mm}$
M_ϕ	胴に生じる周方向の曲げモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}/\text{mm}$
m_0	容器の運転時質量	kg
m_i	容器各部の質量 ($i=1, 2, 3 \dots j_1$)	kg
$m_{s 1}$	第1脚の質量	kg
$m_{s 2}$	第2脚の質量	kg
N_x	胴に生じる軸方向の膜力	N/mm
N_ϕ	胴に生じる周方向の膜力	N/mm
n	脚1個当たりの基礎ボルトの本数	—
n_1	長手方向及び鉛直方向地震時に引張りを受ける基礎ボルトの本数	—
n_2	横方向及び鉛直方向地震時に引張りを受ける基礎ボルトの本数	—
P	運転時質量により胴の第1脚付け根部に作用する反力	N
P_e	鉛直方向地震により胴の第1脚付け根部に作用する反力	N
P_ℓ	長手方向地震により胴の第1脚付け根部に作用する鉛直荷重	N
P_r	最高使用圧力	MPa
P_s	長手方向及び鉛直方向地震により第1脚底部に作用する鉛直荷重	N

記号	記号の説明	単位
P_{s1}	横方向及び鉛直方向地震により第1脚底部に作用する鉛直荷重	N
R_1	第1脚の受ける荷重	N
R_2	第2脚の受ける荷重	N
r_m	第1脚付け根部における胴の平均半径	mm
r_o	第1脚付け根部における胴の外半径	mm
S	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表5に定める値	MPa
S_a	胴の許容応力	MPa
S_u	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表9に定める値	MPa
S_y	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める値	MPa
$S_y(RT)$	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める材料の40°Cにおける値	MPa
s	基礎ボルトと基礎の縦弾性係数比	—
T_1	長手方向固有周期	s
T_2	横方向固有周期	s
T_3	鉛直方向固有周期	s
t	第1脚側胴板の厚さ	mm
t_e	第1脚付け根部における胴の有効板厚	mm
X_n	基礎が圧縮力を受ける幅	mm
Z	引用文献(1)による胴の断面係数	mm ³
Z_{sx}	第1脚の長手方向軸に対する断面係数	mm ³
Z_{sy}	第1脚の横方向軸に対する断面係数	mm ³
β, β_1, β_2	引用文献(2)によるアタッチメントパラメータ	—
γ	引用文献(2)によるシェルパラメータ	—
θ	引用文献(1)による胴の有効範囲角の2分の1	rad
θ_o	胴の第1脚端部より鉛直軸までの角度	rad
θ_w	胴の第1脚端部より当板端部までの角度	Rad
π	円周率	—
ρ	液体の密度 (=比重×10 ⁻⁶)	kg/mm ³
σ_o	胴の組合せ一次一般膜応力の最大値	MPa
σ_{oc}	横方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の組合せ一次一般膜応力	MPa
σ_{ocx}	横方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の軸方向一次一般膜応力の和	MPa
$\sigma_{oc\phi}$	横方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の周方向一次一般膜応力の和	MPa
σ_{ol}	長手方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の組合せ一次一般膜応力	MPa
σ_{olx}	長手方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の軸方向一次一般膜応力の和	MPa

記号	記号の説明	単位
$\sigma_{ol\phi}$	長手方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の周方向一次一般膜応力の和	MPa
σ_1	胴の組合せ一次応力の最大値	MPa
σ_{1c}	横方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の組合せ一次応力	MPa
σ_{1cx}	横方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の軸方向一次応力の和	MPa
$\sigma_{1c\phi}$	横方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の周方向一次応力の和	MPa
σ_{1l}	長手方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の組合せ一次応力	MPa
σ_{1lx}	長手方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の軸方向一次応力の和	MPa
$\sigma_{1l\phi}$	長手方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の周方向一次応力の和	MPa
σ_2	地震動のみによる胴の組合せ一次応力と二次応力の和の変動値の最大値	MPa
σ_{2c}	横方向及び鉛直方向地震のみによる胴の組合せ一次応力と二次応力の和	MPa
σ_{2cx}	横方向及び鉛直方向地震のみによる胴の軸方向一次応力と二次応力の和	MPa
$\sigma_{2c\phi}$	横方向及び鉛直方向地震のみによる胴の周方向一次応力と二次応力の和	MPa
σ_{2l}	長手方向及び鉛直方向地震のみによる胴の組合せ一次応力と二次応力の和	MPa
σ_{2lx}	長手方向及び鉛直方向地震のみによる胴の軸方向一次応力と二次応力の和	MPa
$\sigma_{2l\phi}$	長手方向及び鉛直方向地震のみによる胴の周方向一次応力と二次応力の和	MPa
σ_b	基礎ボルトに生じる引張応力の最大値	MPa
σ_{b1}	長手方向及び鉛直方向地震により基礎ボルトに生じる引張応力	MPa
σ_{b2}	横方向及び鉛直方向地震により基礎ボルトに生じる引張応力	MPa
σ_s	第1脚の組合せ応力の最大値	MPa
σ_{sc}	横方向及び鉛直方向地震が作用した場合の第1脚の組合せ応力	MPa
σ_{sl}	鉛直方向と長手方向地震が作用した場合の第1脚の組合せ応力	MPa
σ_{s1}	運転時質量により第1脚に生じる圧縮応力	MPa
σ_{s2}	長手方向地震により第1脚に生じる曲げ及び圧縮応力の和	MPa
σ_{s3}	横方向地震により第1脚に生じる曲げ応力	MPa
σ_{s4}	鉛直方向地震により第1脚に生じる圧縮応力	MPa
σ_{x1}	内圧又は静水頭により胴に生じる軸方向一次応力	MPa
σ_{x2}	運転時質量による長手方向曲げモーメントにより胴の第1脚付け根部に生じる軸方向一次応力	MPa
σ_{x3}	運転時質量により胴の第1脚付け根部に生じる軸方向一次応力	MPa

記号	記号の説明	単位
$\sigma_{x41}, \sigma_{x42}$	長手方向地震により胴の第1脚付け根部に生じる軸方向一次応力の和及び二次応力の和	MPa
$\sigma_{x411}, \sigma_{x421}$	長手方向地震による曲げモーメントにより胴の第1脚付け根部に生じる軸方向一次応力及び二次応力	MPa
$\sigma_{x412}, \sigma_{x422}$	長手方向地震による鉛直荷重により胴の第1脚付け根部に生じる軸方向一次応力及び二次応力	MPa
σ_{x413}	長手方向地震による水平方向荷重により胴に生じる軸方向一次応力	MPa
$\sigma_{x51}, \sigma_{x52}$	横方向地震による曲げモーメントにより胴の第1脚付け根部に生じる軸方向一次応力及び二次応力	MPa
σ_{x6}	鉛直方向地震による長手方向曲げモーメントにより胴の第1脚付け根部に生じる軸方向一次応力	MPa
$\sigma_{x71}, \sigma_{x72}$	鉛直方向地震により胴の第1脚付け根部に生じる軸方向一次応力及び二次応力	MPa
$\sigma_{\phi 1}$	内圧又は静水頭により胴に生じる周方向一次応力	MPa
$\sigma_{\phi 2}$	静水頭に鉛直地震力が加わり胴に生じる周方向一次応力	MPa
$\sigma_{\phi 3}$	運転時質量により胴の第1脚付け根部に生じる周方向一次応力	MPa
$\sigma_{\phi 41}, \sigma_{\phi 42}$	長手方向地震により胴の第1脚付け根部に生じる周方向一次応力の和及び二次応力の和	MPa
$\sigma_{\phi 411}, \sigma_{\phi 421}$	長手方向地震による曲げモーメントにより胴の第1脚付け根部に生じる周方向一次応力及び二次応力	MPa
$\sigma_{\phi 412}, \sigma_{\phi 422}$	長手方向地震による鉛直荷重により胴の第1脚付け根部に生じる周方向一次応力及び二次応力	MPa
$\sigma_{\phi 51}, \sigma_{\phi 52}$	横方向地震による曲げモーメントにより胴の第1脚付け根部に生じる周方向一次応力及び二次応力	MPa
$\sigma_{\phi 71}, \sigma_{\phi 72}$	鉛直方向地震により胴の第1脚付け根部に生じる周方向一次応力及び二次応力	MPa
τ_b	基礎ボルトに生じるせん断応力の最大値	MPa
τ_{b1}	長手方向地震により基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa
τ_{b2}	横方向地震により基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa
τ_c	横方向地震により胴の第1脚付け根部に生じるせん断応力	MPa
τ_ℓ	長手方向地震により胴の第1脚付け根部に生じるせん断応力	MPa
τ_{s2}	長手方向地震により第1脚に生じるせん断応力	MPa
τ_{s3}	横方向地震により第1脚に生じるせん断応力	MPa

2.4 計算精度と数値の丸め方

精度は、有効数字6桁以上を確保する。

表示する数値の丸め方は表2-1に示すとおりである。

表2-1 表示する数値の丸め方

数値の種類		単位	処理桁	処理方法	表示桁
固有周期		s	小数点以下第4位	四捨五入	小数点以下第3位
震度		—	小数点以下第3位	切上げ	小数点以下第2位
最高使用圧力		MPa	—	—	小数点以下第2位
温度		℃	—	—	整数位
比重		—	小数点以下第3位	四捨五入	小数点以下第2位
質量		kg	—	—	整数位
長さ	下記以外の長さ	mm	—	—	整数位 ^{*1}
	胴板の厚さ	mm	—	—	小数点以下第1位
面積		mm ²	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁 ^{*2}
モーメント		N・mm	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁 ^{*2}
力		N	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁 ^{*2}
角度		rad	小数点以下第4位	四捨五入	小数点以下第3位
算出応力		MPa	小数点以下第1位	切上げ	整数位
許容応力 ^{*3}		MPa	小数点以下第1位	切捨て	整数位

注記*1：設計上定める値が小数点以下第1位の場合は、小数点以下第1位表示とする。

*2：絶対値が1000以上のときは、べき数表示とする。

*3：設計・建設規格 付録材料図表に記載された温度の中間における引張強さ及び降伏点は、比例法により補間した値の小数点以下第1位を切り捨て、整数位までの値とする。

3. 評価部位

横置一胴円筒形容器の耐震評価は「5.1 構造強度評価方法」に示す条件に基づき、耐震評価上厳しくなる胴、脚及び基礎ボルトについて評価を実施する。

4. 固有周期

4.1 固有周期の計算方法

(1) 計算モデル

モデル化に当たっては次の条件で行う。

- a. 容器及び内容物の質量は胴の中心軸に集中するものとする。
- b. 容器の胴は2個の脚で支持され、脚はそれぞれ基礎ボルトで基礎に固定されており、固定端とする。
- c. 胴は剛体とし、脚をはりと考え、変形モードは脚の曲げ及びせん断変形を考慮する。
- d. 脚が長手方向に変形する場合、脚を基礎に取り付ける基礎ボルトが、脚の変形方向に直角な方向より見て脚1個につき1列の場合は下端を単純支持とする。
その他の場合は、固定とする。
- e. 第2脚は長手方向にスライドできるものとし、その方向の力はすべて第1脚で受けるものとする。
- f. 耐震計算に用いる寸法は、公称値を使用する。

本容器の荷重状態及び胴に生じるモーメントを図4-1～図4-4に示す。

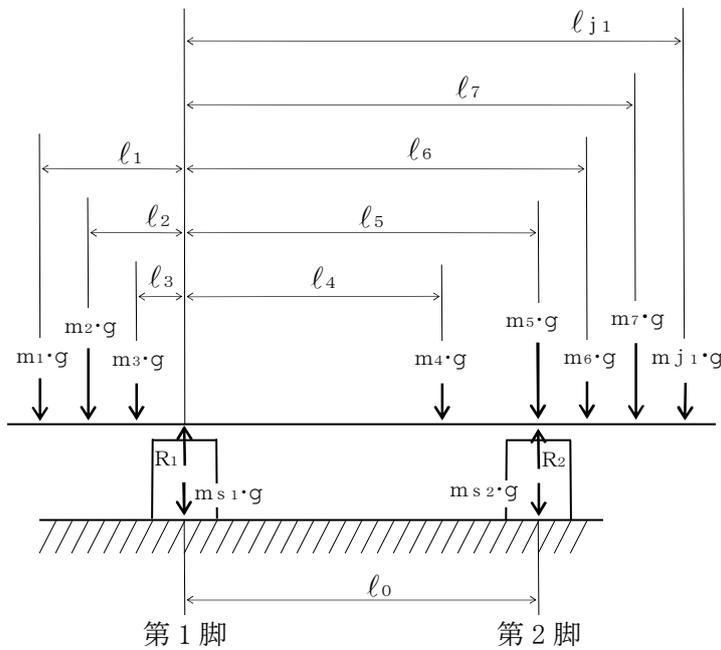


図4-1 荷重状態

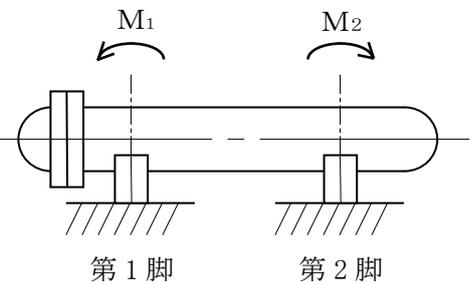


図4-2 脚の位置での曲げモーメント

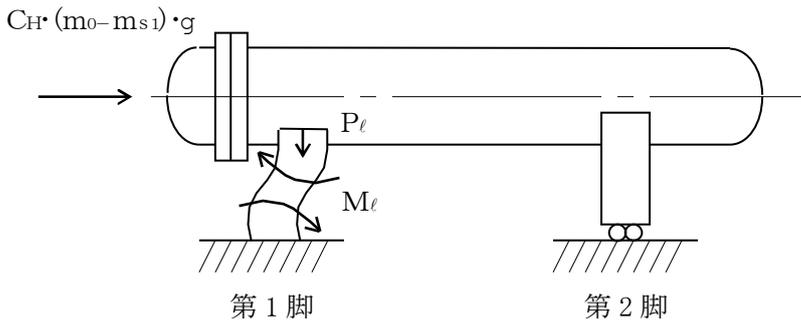


図4-3 長手方向荷重による胴の第1脚付け根部のモーメント及び鉛直荷重

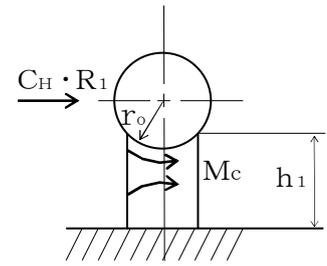


図4-4 横方向荷重による胴の第1脚付け根部のモーメント

本容器は、前記の条件より図4-5、図4-6及び図4-7のような1質点系振動モデルとして考える。

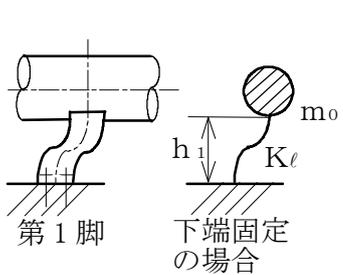


図4-5 長手方向の固有周期計算モデル

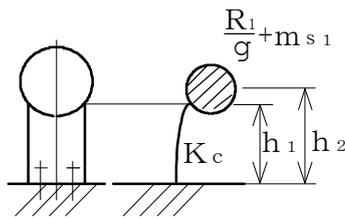


図4-6 横方向の固有周期計算モデル

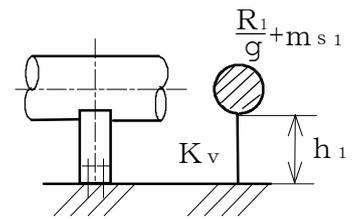


図4-7 鉛直方向の固有周期計算モデル

(2) 脚の受ける荷重

脚の受ける荷重はモーメントの釣合いより求める。図4-1において第1脚回りのモーメントの釣合いは次式で求める。

$$\sum_{i=1}^{j1} m_i \cdot g \cdot l_i - R_2 \cdot l_0 = 0 \quad \dots \dots \dots (4.1.1)$$

したがって、脚の受ける荷重は次式で求める。

$$R_2 = \sum_{i=1}^{j1} m_i \cdot g \cdot l_i / l_0 \quad \dots \dots \dots (4.1.2)$$

$$R_1 = \sum_{i=1}^{j1} m_i \cdot g - R_2 \quad \dots \dots \dots (4.1.3)$$

(3) 長手方向の固有周期

図4-5におけるばね定数は次式で求める。

$$K_{\ell} = \frac{1000}{\frac{h_1^3}{12 \cdot E_s \cdot I_{s y}} + \frac{h_1}{G_s \cdot A_{s 1}}} \dots\dots\dots (4.1.4)$$

固有周期は次式で求める。

$$T_1 = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m_0}{K_{\ell}}} \dots\dots\dots (4.1.5)$$

(4) 横方向の固有周期

図4-6におけるばね定数は次式で求める。

$$K_c = \frac{1000}{\frac{h_1^2 \cdot (3 \cdot h_2 - h_1)}{6 \cdot E_s \cdot I_{s x}} + \frac{(h_2 - h_1) \cdot h_1 \cdot (h_2 - h_1 / 2)}{E_s \cdot I_{s x}} + \frac{h_1}{G_s \cdot A_{s 2}}} \dots\dots\dots (4.1.6)$$

固有周期は次式で求める。

$$T_2 = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\frac{R_1}{g} + m_{s 1}}{K_c}} \dots\dots\dots (4.1.7)$$

ただし、脚の受ける荷重が $R_2 > R_1$ となる場合は、 R_1 を R_2 に置き換える。

(5) 鉛直方向の固有周期

図4-7におけるばね定数は次式で求める。

$$K_v = \frac{1000}{\frac{h_1}{A_s \cdot E_s}} \dots\dots\dots (4.1.8)$$

固有周期は次式で求める。

$$T_3 = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\frac{R_1}{g} + m_{s 1}}{K_v}} \dots\dots\dots (4.1.9)$$

ただし、脚の受ける荷重が $R_2 > R_1$ となる場合は、 R_1 を R_2 に置き換える。

5. 構造強度評価

5.1 構造強度評価方法

4.1(1)項a.～f.のほか、次の条件で計算する。概要図を図5-1に示す。

- (1) 地震力は容器に対して水平方向及び鉛直方向から作用するものとする。ここで、水平方向地震力は胴の長手方向に作用する場合と胴の横方向に作用する場合を考慮する。
- (2) 第1脚と第2脚は同形状であり、受ける荷重の大きい方の脚についての評価を計算書に記載する。

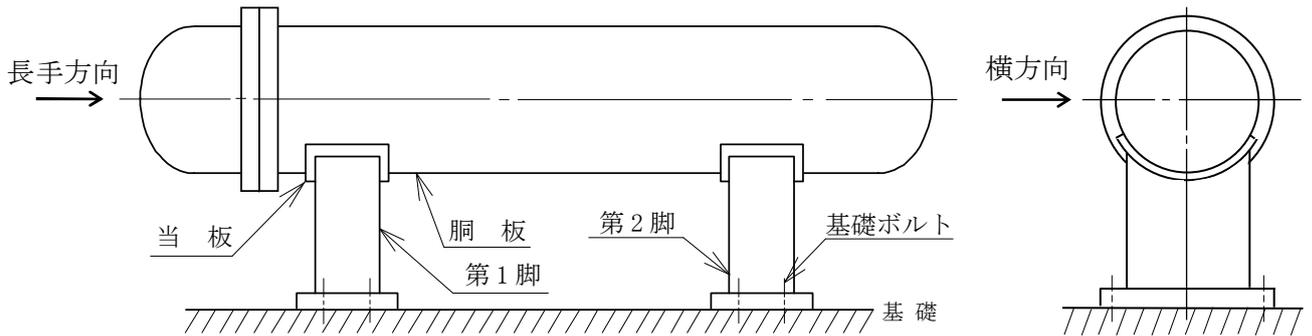


図5-1 概要図

5.2 設計用地震力

「弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度」及び「基準地震動 S_s 」による地震力は、VI-2-1-7「設計用床応答スペクトルの作成方針」に基づき設定する。

5.3 計算方法

5.3.1 応力の計算方法

応力計算における水平方向と鉛直方向の組合せについて、静的地震力を用いる場合は絶対値和を用いる。動的地震力を用いる場合は、絶対値和又はSRSS法を用いる。

5.3.1.1 胴の計算方法

(1) 曲げモーメント

図4-1に示すように胴を集中荷重を受けるはりとして考える。

図4-2において脚付け根部における曲げモーメント M_1 及び M_2 は次式で求める。

$$M_1 = \sum_{i=1}^{j_2} m_i \cdot g \cdot |l_i| \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.1)$$

$$M_2 = \sum_{i=j_1-j_3+1}^{j_1} m_i \cdot g \cdot |l_i - l_0| \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.2)$$

(2) 静水頭又は内圧による応力

静水頭による場合（鉛直方向地震時を含む。）

$$\sigma_{\phi 1} = \frac{\rho' \cdot g \cdot H \cdot D_i}{2 \cdot t} \dots\dots\dots (5.3.1.1.3)$$

$$\sigma_{\phi 2} = \frac{\rho' \cdot g \cdot H \cdot D_i \cdot C_v}{2 \cdot t} \dots\dots\dots (5.3.1.1.4)$$

$$\sigma_{x 1} = \frac{\rho' \cdot g \cdot H \cdot D_i}{4 \cdot t} \dots\dots\dots (5.3.1.1.5)$$

内圧による場合

$$\sigma_{\phi 1} = \frac{P_r \cdot (D_i + 1.2 \cdot t)}{2 \cdot t} \dots\dots\dots (5.3.1.1.6)$$

$$\sigma_{\phi 2} = 0 \dots\dots\dots (5.3.1.1.7)$$

$$\sigma_{x 1} = \frac{P_r \cdot (D_i + 1.2 \cdot t)}{4 \cdot t} \dots\dots\dots (5.3.1.1.8)$$

(3) 運転時質量及び鉛直方向地震により生じる長手方向曲げモーメントによる応力

(1)で求めた曲げモーメントにより胴の第1脚付け根部に生じる応力は次のように求める。

引用文献(1)によれば、この曲げモーメントは胴の断面に対して一様に作用するものではなく、脚取付部において円周方向の曲げモーメントに置き換えられ、胴の局部変形を生じさせようとする。

長手方向の曲げモーメントによる胴の応力の影響範囲を脚上 $\frac{\theta_0}{6}$ の点とすると長手方向曲げモーメントに対する胴の有効断面積は図5-2に $2 \cdot \theta$ で示される円殻である。したがって、運転時質量による応力は次式で求める。

$$\sigma_{x 2} = \frac{M_1}{Z} \dots\dots\dots (5.3.1.1.9)$$

また、鉛直方向地震による応力は次式で求める。

$$\sigma_{x 6} = \frac{M_1}{Z} \cdot C_v \dots\dots\dots (5.3.1.1.10)$$

ここで,

$$r_m = \frac{D_i + t_e}{2} \dots\dots\dots (5.3.1.1.11)$$

$$Z = r_m^2 \cdot t_e \cdot \left\{ \frac{\theta + \sin \theta \cdot \cos \theta - 2 \cdot \sin^2 \theta / \theta}{(\sin \theta / \theta) - \cos \theta} \right\} \dots\dots\dots (5.3.1.1.12)$$

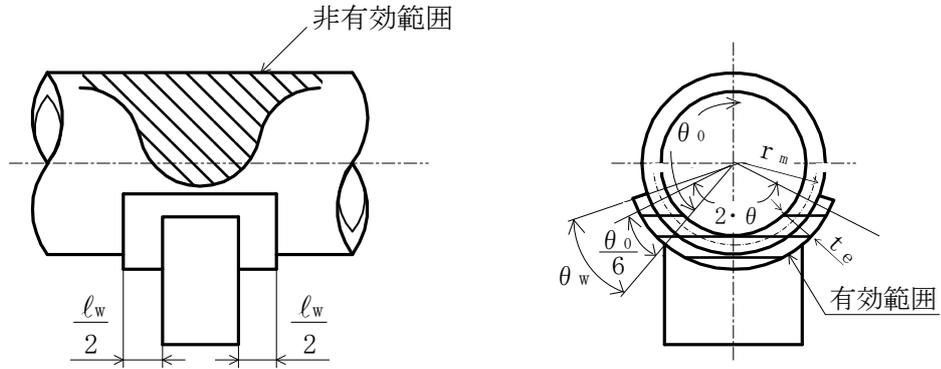


図 5-2 脚付け根部の有効範囲

胴の脚付け根部に取り付く当板の大きさが

周方向範囲 $\theta_w \geq \frac{\theta_0^{*1}}{6} \dots\dots\dots (5.3.1.1.13)$

長手方向範囲 $l_w \geq 1.56 \cdot \sqrt{\left(\frac{D_i + t}{2}\right) \cdot t}^{*2} \dots\dots\dots (5.3.1.1.14)$

である場合、脚付け根部における胴の有効板厚 t_e は胴板の厚さと当板の厚さの合計とする。また、当板が上記の範囲を満たさない場合、 t_e は胴板の厚さとする。

注記*1：引用文献(1)より引用

*2：引用文献(3)より引用

(4) 運転時質量及び鉛直方向地震による脚付け根部の応力

脚の受ける荷重が $R_2 > R_1$ となる場合は、 R_1 を R_2 に置き換える。

胴の脚付け根部には脚反力による周方向応力及び軸方向応力が生じる。胴の第1脚付け根部に作用する反力は次式で求める。

運転時質量による反力は、

$$P = R_1 \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.15)$$

鉛直方向地震による反力は、

$$P_e = C_v \cdot R_1 \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.16)$$

この反力 P 及び P_e により生じる胴の周方向応力及び軸方向応力は、引用文献(2)により次のように求める。

脚が胴に及ぼす力の関係を図5-3に示す。

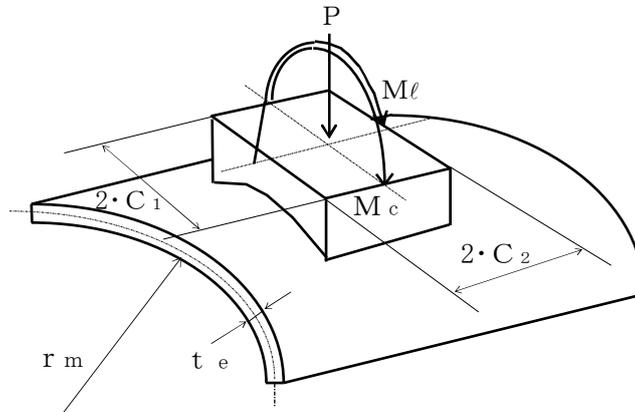


図5-3 脚が胴に及ぼす力の関係

ここで、シェルパラメータ γ 及びアタッチメントパラメータ β は以下のように定義する。

$$\gamma = r_m / t_e \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.17)$$

$$\beta_1 = C_1 / r_m \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.18)$$

$$\beta_2 = C_2 / r_m \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.19)$$

$4 \geq \beta_1 / \beta_2 \geq 1$ のとき

$$\beta = \left\{ 1 - \frac{1}{3} \cdot (\beta_1 / \beta_2 - 1) \cdot (1 - K_{1j}) \right\} \cdot \sqrt{\beta_1 \cdot \beta_2} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.20)$$

ただし、 $\beta \leq 0.5$

$\frac{1}{4} \leq \beta_1 / \beta_2 < 1$ のとき

$$\beta = \left\{ 1 - \frac{4}{3} \cdot (1 - \beta_1 / \beta_2) \cdot (1 - K_{2j}) \right\} \cdot \sqrt{\beta_1 \cdot \beta_2} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.21)$$

ただし、 $\beta \leq 0.5$

シェルパラメータ γ 及びアタッチメントパラメータ β によって引用文献(2)の図より値（以下*を付記するもの）を求めることにより応力は次式で求める。

反力 P による応力は、

一次応力

$$\sigma_{\phi 3} = \left(\frac{N_{\phi}}{P / r_m} \right)^* \cdot \left(\frac{P}{r_m \cdot t_e} \right) \dots\dots\dots (5.3.1.1.22)$$

$$\sigma_{x 3} = \left(\frac{N_x}{P / r_m} \right)^* \cdot \left(\frac{P}{r_m \cdot t_e} \right) \dots\dots\dots (5.3.1.1.23)$$

反力 P_e による応力は、

一次応力

$$\sigma_{\phi 71} = \left(\frac{N_{\phi}}{P_e / r_m} \right)^* \cdot \left(\frac{P_e}{r_m \cdot t_e} \right) \dots\dots\dots (5.3.1.1.24)$$

$$\sigma_{x 71} = \left(\frac{N_x}{P_e / r_m} \right)^* \cdot \left(\frac{P_e}{r_m \cdot t_e} \right) \dots\dots\dots (5.3.1.1.25)$$

二次応力

$$\sigma_{\phi 72} = \left(\frac{M_{\phi}}{P_e} \right)^* \cdot \left(\frac{6 \cdot P_e}{t_e^2} \right) \dots\dots\dots (5.3.1.1.26)$$

$$\sigma_{x 72} = \left(\frac{M_x}{P_e} \right)^* \cdot \left(\frac{6 \cdot P_e}{t_e^2} \right) \dots\dots\dots (5.3.1.1.27)$$

(5) 長手方向地震による脚付け根部の応力

第2脚は長手方向に自由にスライドできるので第1脚は図4-3のように変形し、脚付け根部に生じる曲げモーメント及び鉛直荷重は次式で求める。

$$M_{\ell} = \frac{1}{2} \cdot C_H \cdot (m_0 - m_{s1}) \cdot g \cdot h_1 \dots\dots\dots (5.3.1.1.28)$$

$$P_{\ell} = C_H \cdot (m_0 - m_{s1}) \cdot g \cdot \frac{h_2 - \frac{1}{2} \cdot h_1}{\ell_0} \dots\dots\dots (5.3.1.1.29)$$

曲げモーメント M_{ℓ} と鉛直荷重 P_{ℓ} により生じる胴の周方向応力及び軸方向応力は、シェルパラメータ γ 及びアタッチメントパラメータ β によって引用文献(2)の図より値（以下*を付記するもの）を求めることにより（5.3.1.1.31）式～（5.3.1.1.38）式で求める。

ここで、シェルパラメータ γ 及び P_{ℓ} の場合のアタッチメントパラメータ β は(4)と同じであるが、 M_{ℓ} の場合のアタッチメントパラメータ β は次式による。

ただし、二次応力を求める場合は更に $K_{\ell j}$ を乗じた値とする。

$$\beta = \sqrt[3]{\beta_1 \cdot \beta_2^2} \dots\dots\dots (5.3.1.1.30)$$

ただし、 $\beta \leq 0.5$

曲げモーメント M_ℓ により生じる応力は次式で求める。

一次応力

$$\sigma_{\phi 411} = \left\{ \frac{N_\phi}{M_\ell / (r m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{M_\ell}{r m^2 \cdot \beta \cdot t_e} \right) \cdot C_{\ell 1} \quad \dots \quad (5.3.1.1.31)$$

$$\sigma_{x 411} = \left\{ \frac{N_x}{M_\ell / (r m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{M_\ell}{r m^2 \cdot \beta \cdot t_e} \right) \cdot C_{\ell 2} \quad \dots \quad (5.3.1.1.32)$$

二次応力

$$\sigma_{\phi 421} = \left\{ \frac{M_\phi}{M_\ell / (r m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6 \cdot M_\ell}{r m \cdot \beta \cdot t_e^2} \right) \quad \dots \quad (5.3.1.1.33)$$

$$\sigma_{x 421} = \left\{ \frac{M_x}{M_\ell / (r m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6 \cdot M_\ell}{r m \cdot \beta \cdot t_e^2} \right) \quad \dots \quad (5.3.1.1.34)$$

鉛直荷重 P_ℓ により生じる応力は次式で求める。

一次応力

$$\sigma_{\phi 412} = \left(\frac{N_\phi}{P_\ell / r m} \right)^* \cdot \left(\frac{P_\ell}{r m \cdot t_e} \right) \quad \dots \quad (5.3.1.1.35)$$

$$\sigma_{x 412} = \left(\frac{N_x}{P_\ell / r m} \right)^* \cdot \left(\frac{P_\ell}{r m \cdot t_e} \right) \quad \dots \quad (5.3.1.1.36)$$

二次応力

$$\sigma_{\phi 422} = \left(\frac{M_\phi}{P_\ell} \right)^* \cdot \left(\frac{6 \cdot P_\ell}{t_e^2} \right) \quad \dots \quad (5.3.1.1.37)$$

$$\sigma_{x 422} = \left(\frac{M_x}{P_\ell} \right)^* \cdot \left(\frac{6 \cdot P_\ell}{t_e^2} \right) \quad \dots \quad (5.3.1.1.38)$$

また、水平方向荷重により胴には、次式で求める引張応力が生じる。

$$\sigma_{x 413} = \frac{C_H \cdot (m_0 - m_{s1}) \cdot g}{\pi \cdot (D_i + t) \cdot t} \quad \dots \quad (5.3.1.1.39)$$

したがって、曲げモーメント M_ℓ 、鉛直荷重 P_ℓ 及び水平方向荷重により生じる胴の応力は次式で求める。

一次応力

$$\sigma_{\phi 41} = \sigma_{\phi 411} + \sigma_{\phi 412} \quad \dots \quad (5.3.1.1.40)$$

$$\sigma_{x 41} = \sigma_{x 411} + \sigma_{x 412} + \sigma_{x 413} \quad \dots \quad (5.3.1.1.41)$$

二次応力

$$\sigma_{\phi 42} = \sigma_{\phi 421} + \sigma_{\phi 422} \quad \dots \quad (5.3.1.1.42)$$

$$\sigma_{x 42} = \sigma_{x 421} + \sigma_{x 422} \quad \dots \quad (5.3.1.1.43)$$

また、長手方向地震が作用した場合、第1脚付け根部に生じるせん断応力は次式で求める。

$$\tau_\ell = \frac{C_H \cdot (m_0 - m_{s1}) \cdot g}{4 \cdot C_2 \cdot t} \quad \dots \quad (5.3.1.1.44)$$

(6) 横方向地震による脚付け根部の応力

脚の受ける荷重が $R_2 > R_1$ となる場合は、 R_1 を R_2 に置き換える。

横方向地震が作用した場合、第1脚の付け根部に生じる曲げモーメント M_c は次式で求める。

$$M_c = C_H \cdot R_1 \cdot r_o \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.45)$$

$$r_o = \frac{D_i}{2} + t_e \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.46)$$

この曲げモーメント M_c により生じる胴の周方向応力及び軸方向応力は、シェルパラメータ γ 及びアタッチメントパラメータ β によって引用文献(2)の図より値（以下*を付記するもの）を求めることにより (5.3.1.1.48) 式～ (5.3.1.1.51) 式で求める。

ここで、シェルパラメータ γ は(4)と同じであるが、アタッチメントパラメータ β は次式による。ただし、二次応力を求める場合は更に K_{c_j} を乗じた値とする。

$$\beta = \sqrt[3]{\beta_1^2 \cdot \beta_2} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.47)$$

ただし、 $\beta \leq 0.5$

したがって、応力は次式で求める。

一次応力

$$\sigma_{\phi 51} = \left\{ \frac{N_\phi}{M_c / (r m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{M_c}{r m^2 \cdot \beta \cdot t_e} \right) \cdot C_{c1} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.48)$$

$$\sigma_{x 51} = \left\{ \frac{N_x}{M_c / (r m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{M_c}{r m^2 \cdot \beta \cdot t_e} \right) \cdot C_{c2} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.49)$$

二次応力

$$\sigma_{\phi 52} = \left\{ \frac{M_\phi}{M_c / (r m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6 \cdot M_c}{r m \cdot \beta \cdot t_e^2} \right) \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.50)$$

$$\sigma_{x 52} = \left\{ \frac{M_x}{M_c / (r m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6 \cdot M_c}{r m \cdot \beta \cdot t_e^2} \right) \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.51)$$

また、横方向地震が作用した場合、第1脚付け根部に生じるせん断応力は次式で求める。

$$\tau_c = \frac{C_H \cdot R_1}{4 \cdot C_1 \cdot t} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.52)$$

(7) 組合せ応力

(2)～(6)によって求めた第1脚付け根部に生じる胴の応力は以下のように組み合わせる。

a. 一次一般膜応力

鉛直方向と長手方向地震が作用した場合

$$\sigma_{0\ell} = \text{Max} \{ \text{周方向応力}(\sigma_{0\ell\phi}), \text{軸方向応力}(\sigma_{0\ell x}) \} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.53)$$

ここで,

$$\sigma_{0\ell\phi} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 2} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.54)$$

【絶対値和】

$$\sigma_{0\ell x} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sigma_{x 6} + \sigma_{x 4 1 3} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.55)$$

【S R S S法】

$$\sigma_{0\ell x} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sqrt{\sigma_{x 6}^2 + \sigma_{x 4 1 3}^2} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.56)$$

鉛直方向と横方向地震が作用した場合

$$\sigma_{0c} = \text{Max} \{ \text{周方向応力}(\sigma_{0c\phi}), \text{軸方向応力}(\sigma_{0cx}) \} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.57)$$

ここで,

$$\sigma_{0c\phi} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 2} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.58)$$

【絶対値和】

$$\sigma_{0cx} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sigma_{x 6} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.59)$$

【S R S S法】

$$\sigma_{0cx} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sigma_{x 6} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.60)$$

したがって、胴に生じる一次一般膜応力の最大値は、絶対値和、S R S S法、それぞれに対して、

$$\sigma_0 = \text{Max} \{ \text{長手方向地震時応力}(\sigma_{0\ell}), \text{横方向地震時応力}(\sigma_{0c}) \} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.61)$$

とする。

b. 一次応力

鉛直方向と長手方向地震が作用した場合

$$\sigma_{1l} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ (\sigma_{1l\phi} + \sigma_{1lx}) + \sqrt{(\sigma_{1l\phi} - \sigma_{1lx})^2 + 4 \cdot \tau_l^2} \right\} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.62)$$

ここで,

【絶対値和】

$$\sigma_{1l\phi} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 3} + \sigma_{\phi 41} + \sigma_{\phi 71} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.63)$$

$$\sigma_{1lx} = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} + \sigma_{x3} + \sigma_{x41} + \sigma_{x6} + \sigma_{x71} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.64)$$

【SRSS法】

$$\sigma_{1l\phi} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 3} + \sqrt{\sigma_{\phi 41}^2 + (\sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 71})^2} \quad \dots\dots (5.3.1.1.65)$$

$$\sigma_{1lx} = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} + \sigma_{x3} + \sqrt{\sigma_{x41}^2 + (\sigma_{x6} + \sigma_{x71})^2} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.66)$$

鉛直方向と横方向地震が作用した場合

$$\sigma_{1c} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ (\sigma_{1c\phi} + \sigma_{1cx}) + \sqrt{(\sigma_{1c\phi} - \sigma_{1cx})^2 + 4 \cdot \tau_c^2} \right\} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.67)$$

ここで,

【絶対値和】

$$\sigma_{1c\phi} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 3} + \sigma_{\phi 51} + \sigma_{\phi 71} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.68)$$

$$\sigma_{1cx} = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} + \sigma_{x3} + \sigma_{x51} + \sigma_{x6} + \sigma_{x71} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.69)$$

【SRSS法】

$$\sigma_{1c\phi} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 3} + \sqrt{\sigma_{\phi 51}^2 + (\sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 71})^2} \quad \dots\dots (5.3.1.1.70)$$

$$\sigma_{1cx} = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} + \sigma_{x3} + \sqrt{\sigma_{x51}^2 + (\sigma_{x6} + \sigma_{x71})^2} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.71)$$

したがって、胴に生じる一次応力の最大値は、絶対値和、SRSS法、それぞれに対して、

$$\sigma_1 = \text{Max} \{ \text{長手方向地震時応力}(\sigma_{1l}), \text{横方向地震時応力}(\sigma_{1c}) \} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.72)$$

とする。

- c. 地震動のみによる一次応力と二次応力の和の変動値
鉛直方向と長手方向地震が作用した場合の変動値

$$\sigma_{2l} = (\sigma_{2l\phi} + \sigma_{2lx}) + \sqrt{(\sigma_{2l\phi} - \sigma_{2lx})^2 + 4 \cdot \tau_l^2} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.73)$$

ここで,

【絶対値和】

$$\sigma_{2l\phi} = \sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 41} + \sigma_{\phi 42} + \sigma_{\phi 71} + \sigma_{\phi 72} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.74)$$

$$\sigma_{2lx} = \sigma_{x41} + \sigma_{x42} + \sigma_{x6} + \sigma_{x71} + \sigma_{x72} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.75)$$

【S R S S法】

$$\sigma_{2l\phi} = \sqrt{(\sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 71} + \sigma_{\phi 72})^2 + (\sigma_{\phi 41} + \sigma_{\phi 42})^2} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.76)$$

$$\sigma_{2lx} = \sqrt{(\sigma_{x41} + \sigma_{x42})^2 + (\sigma_{x6} + \sigma_{x71} + \sigma_{x72})^2} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.77)$$

鉛直方向と横方向地震が作用した場合の変動値

$$\sigma_{2c} = (\sigma_{2c\phi} + \sigma_{2cx}) + \sqrt{(\sigma_{2c\phi} - \sigma_{2cx})^2 + 4 \cdot \tau_c^2} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.78)$$

ここで,

【絶対値和】

$$\sigma_{2c\phi} = \sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 51} + \sigma_{\phi 52} + \sigma_{\phi 71} + \sigma_{\phi 72} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.79)$$

$$\sigma_{2cx} = \sigma_{x51} + \sigma_{x52} + \sigma_{x6} + \sigma_{x71} + \sigma_{x72} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.80)$$

【S R S S法】

$$\sigma_{2c\phi} = \sqrt{(\sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 71} + \sigma_{\phi 72})^2 + (\sigma_{\phi 51} + \sigma_{\phi 52})^2} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.81)$$

$$\sigma_{2cx} = \sqrt{(\sigma_{x51} + \sigma_{x52})^2 + (\sigma_{x6} + \sigma_{x71} + \sigma_{x72})^2} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.82)$$

したがって、胴に生じる地震動のみによる一次応力と二次応力の和の変動値の最大値は、絶対値和，S R S S法，それぞれに対して，

$$\sigma_2 = \text{Max} \{ \text{長手方向地震時応力}(\sigma_{2l}), \text{横方向地震時応力}(\sigma_{2c}) \} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1.83)$$

とする。

5.3.1.2 脚の計算方法

脚の受ける荷重が $R_2 > R_1$ となる場合は、 R_1 を R_2 に置き換える。

- (1) 運転時荷重による応力

$$\sigma_{s1} = \frac{R_1 + m_{s1} \cdot g}{A_s} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.2.1)$$

- (2) 鉛直方向地震による応力

$$\sigma_{s4} = \frac{R_1 + m_{s1} \cdot g}{A_s} \cdot C_v \quad \dots\dots\dots (5.3.1.2.2)$$

- (3) 長手方向地震による応力

曲げ及び圧縮応力は次式で求める。

$$\sigma_{s2} = \frac{M_{\ell 1}}{Z_{s y}} + \frac{P_{\ell}}{A_s} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.2.3)$$

ここで、

$$M_{\ell 1} = \frac{1}{2} \cdot C_H \cdot m_0 \cdot g \cdot h_1 \quad \dots\dots\dots (5.3.1.2.4)$$

せん断応力は次式で求める。

$$\tau_{s2} = \frac{C_H \cdot m_0 \cdot g}{A_{s3}} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.2.5)$$

- (4) 横方向地震による応力

曲げ応力は次式で求める。

$$\sigma_{s3} = \frac{C_H \cdot (R_1 + m_{s1} \cdot g) \cdot h_2}{Z_{s x}} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.2.6)$$

せん断応力は次式で求める。

$$\tau_{s3} = \frac{C_H \cdot (R_1 + m_{s1} \cdot g)}{A_{s4}} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.2.7)$$

- (5) 組合せ応力

鉛直方向と長手方向地震が作用した場合

【絶対値和】

$$\sigma_{s\ell} = \sqrt{(\sigma_{s1} + \sigma_{s2} + \sigma_{s4})^2 + 3 \cdot \tau_{s2}^2} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.2.8)$$

【S R S S 法】

$$\sigma_{s\ell} = \sqrt{(\sigma_{s1} + \sqrt{\sigma_{s2}^2 + \sigma_{s4}^2})^2 + 3 \cdot \tau_{s2}^2} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.2.9)$$

鉛直方向と横方向地震が作用した場合

【絶対値和】

$$\sigma_{sc} = \sqrt{(\sigma_{s1} + \sigma_{s3} + \sigma_{s4})^2 + 3 \cdot \tau_{s3}^2} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.2.10)$$

【S R S S 法】

$$\sigma_{sc} = \sqrt{(\sigma_{s1} + \sqrt{\sigma_{s3}^2 + \sigma_{s4}^2})^2 + 3 \cdot \tau_{s3}^2} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.2.11)$$

したがって、脚に生じる最大応力は、絶対値和、S R S S 法、それぞれに対して、

$$\sigma_s = \text{Max} \{ \text{長手方向地震時応力}(\sigma_{s\ell}), \text{横方向地震時応力}(\sigma_{sc}) \} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.2.12)$$

とする。

5.3.1.3 基礎ボルトの計算方法

(1) 鉛直方向と長手方向地震が作用した場合

a. 引張応力

長手方向地震が作用した場合に脚底面に作用するモーメントは次式で求める。

$$M = M_{\ell 1} \quad \dots \dots \dots (5.3.1.3.1)$$

鉛直荷重は

【絶対値和】

$$P_s = (1 - C_v) \cdot (R_1 + m_{s1} \cdot g) - P_{\ell} \quad \dots \dots \dots (5.3.1.3.2)$$

【SRSS法】

$$P_s = R_1 + m_{s1} \cdot g - \sqrt{\{C_v \cdot (R_1 + m_{s1} \cdot g)\}^2 + P_{\ell}^2} \quad \dots \dots \dots (5.3.1.3.3)$$

である。ここで、モーメントと鉛直荷重の比を

$$e = M / P_s \quad \dots \dots \dots (5.3.1.3.4)$$

とする。

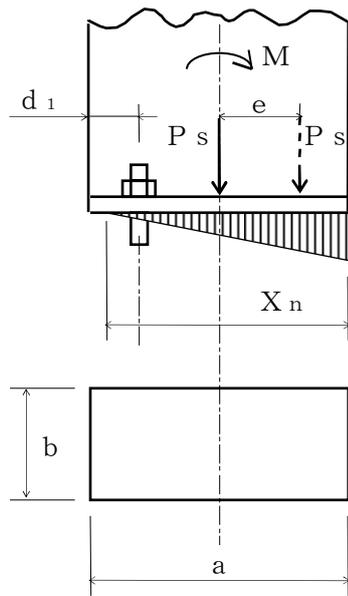


図5-4 基礎部に作用する外荷重より生じる荷重の関係 (その1)

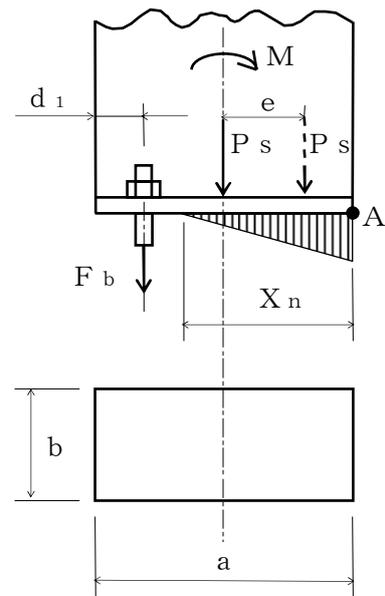


図5-5 基礎部に作用する外荷重より生じる荷重の関係 (その2)

図5-4のように脚底面においてボルト位置に圧縮荷重がかかる状況では基礎ボルトに引張力は作用しないため、引張力の評価は行わない。

一方、図5-5のように、ボルト位置に圧縮荷重がかからない状況に相当する

$$e > \frac{a}{6} + \frac{d_1}{3} \quad \dots \dots \dots (5.3.1.3.5)$$

のとき、基礎ボルトに引張力が生じる。

このとき図5-5において、鉛直荷重の釣合い、A点回りのモーメントの釣合い、基礎ボルトの伸びと基礎の縮みの関係から中立軸の位置 X_n は

$$X_n^3 + 3 \cdot \left(e - \frac{a}{2}\right) \cdot X_n^2 - \frac{6 \cdot s \cdot A_b \cdot n_1}{b} \cdot \left(e + \frac{a}{2} - d_1\right) \cdot (a - d_1 - X_n) = 0 \quad \dots\dots\dots (5.3.1.3.6)$$

より求めることができ、基礎ボルトに生じる引張力は

$$F_b = \frac{P_s \cdot \left(e - \frac{a}{2} + \frac{X_n}{3}\right)}{a - d_1 - \frac{X_n}{3}} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.3.7)$$

となる。

したがって、基礎ボルトに生じる引張応力は次のようになる。

$$\sigma_{b1} = \frac{F_b}{n_1 \cdot A_b} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.3.8)$$

ここで、基礎ボルトの軸断面積 A_b は次式により求める。

$$A_b = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad \dots\dots\dots (5.3.1.3.9)$$

b. せん断応力

$$\tau_{b1} = \frac{C_H \cdot m_0 \cdot g}{n \cdot A_b} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.3.10)$$

(2) 鉛直方向と横方向地震が作用した場合

脚の受ける荷重が $R_2 > R_1$ となる場合は、

R_1 を R_2 に置き換える。

a. 引張応力

(a) 長手方向から見て図5-6のように応力を2列の基礎ボルトで受ける場合

鉛直方向と横方向地震が作用した場合に脚底面に作用するモーメントは

$$M_{c1} = C_H \cdot (R_1 + m_{s1} \cdot g) \cdot h_2 \quad \dots\dots\dots (5.3.1.3.11)$$

鉛直荷重は

$$P_{s1} = (1 - C_v) \cdot (R_1 + m_{s1} \cdot g) \quad \dots\dots\dots (5.3.1.3.12)$$

で求める。

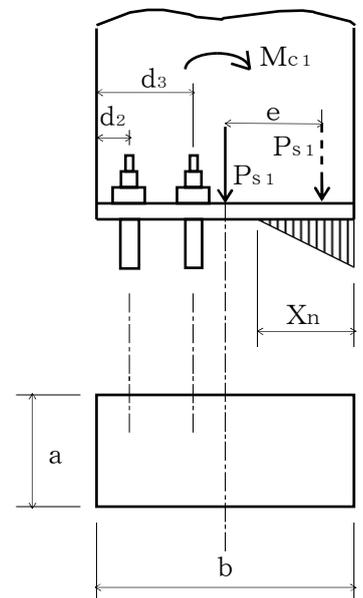


図5-6 基礎部に作用する外荷重より生じる荷重の関係 (その3)

(1)と同様にして中立軸の位置 X_n を

$$X_n^3 + 3 \cdot \left(e - \frac{b}{2}\right) \cdot X_n^2 - \frac{6 \cdot s \cdot A_b \cdot n_2}{a} \cdot X_n + \left\{ \left(e + \frac{b}{2} - d_2\right) \cdot (b - X_n - d_2) + \left(e + \frac{b}{2} - d_3\right) \cdot (b - X_n - d_3) \right\} = 0$$

..... (5.3.1.3.13)

ただし

$$e = M_{c1} / P_{s1} \text{ (5.3.1.3.14)}$$

より求めると、基礎ボルトに生じる引張力は

$$F_b = \frac{P_{s1} \cdot \left(e - \frac{b}{2} + \frac{X_n}{3}\right) \cdot (b - X_n - d_2)}{\left(b - d_2 - \frac{X_n}{3}\right) \cdot (b - X_n - d_2) + \left(b - d_3 - \frac{X_n}{3}\right) \cdot (b - X_n - d_3)}$$

..... (5.3.1.3.15)

となる。

したがって、基礎ボルトに生じる引張応力は次のようになる。

$$\sigma_{b2} = \frac{F_b}{n_2 \cdot A_b} \text{ (5.3.1.3.16)}$$

(b) 長手方向から見て応力を1列の基礎ボルトで受ける場合

(1)と同様にして引張応力は求められるが、 M を M_{c1} 、 P_s を P_{s1} 、 d_1 を d_2 、 a を b 、 b を a 及び n_1 を n_2 に置き換え、得られた基礎ボルトの応力を σ_{b2} とする。

b. せん断応力

$$\tau_{b2} = \frac{C_H \cdot (R_1 + m_{s1} \cdot g)}{n \cdot A_b} \text{ (5.3.1.3.17)}$$

(3) 基礎ボルトに生じる最大応力

(1)及び(2)より求められた基礎ボルトの応力のうち最大のものを σ_b 及び τ_b とする。

a. 基礎ボルトの最大引張応力

$$\sigma_b = \text{Max} \{ \text{長手方向地震時応力}(\sigma_{b1}), \text{横方向地震時応力}(\sigma_{b2}) \}$$

..... (5.3.1.3.18)

b. 基礎ボルトの最大せん断応力

$$\tau_b = \text{Max} \{ \text{長手方向地震時応力}(\tau_{b1}), \text{横方向地震時応力}(\tau_{b2}) \}$$

..... (5.3.1.3.19)

5.4 応力の評価

5.4.1 胴の応力評価

5.3.1.1項で求めた組合せ応力が胴の最高使用温度における許容応力 S_a 以下であること。ただし、 S_a は下表による。

応力の種類	許容応力 S_a	
	弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度による 荷重との組合せの場合	基準地震動 S_s による 荷重との組合せの場合
一次一般膜応力	設計降伏点 S_y と設計引張強さ S_u の0.6倍のいずれか小さい方の値。ただし、オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金にあっては許容引張応力 S の1.2倍の方が大きい場合は、この大きい方の値とする。	設計引張強さ S_u の0.6倍
一次応力	上記の1.5倍の値	上記の1.5倍の値
一次応力と二次応力の和	地震動のみによる一次応力と二次応力の和の変動値が設計降伏点 S_y の2倍以下であれば、疲労解析は不要とする。	

5.4.2 脚の応力評価

5.3.1.2項で求めた脚の組合せ応力が許容引張応力 f_t 以下であること。

ただし、 f_t は下表による。

	弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度による 荷重との組合せの場合	基準地震動 S_s による 荷重との組合せの場合
許容引張応力 f_t	$\frac{F}{1.5} \cdot 1.5$	$\frac{F^*}{1.5} \cdot 1.5$

5.4.3 基礎ボルトの応力評価

5.3.1.3項で求めた基礎ボルトの引張応力 σ_b は次式より求めた許容引張応力 f_{ts} 以下であること。ただし、 f_{to} は下表による。

$$f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}] \quad \dots\dots\dots (5.4.3.1)$$

せん断応力 τ_b はせん断力のみ受ける基礎ボルトの許容せん断応力 f_{sb} 以下であること。ただし、 f_{sb} は下表による。

	弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度による 荷重との組合せの場合	基準地震動 S_s による 荷重との組合せの場合
許容引張応力 f_{to}	$\frac{F}{2} \cdot 1.5$	$\frac{F^*}{2} \cdot 1.5$
許容せん断応力 f_{sb}	$\frac{F}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

6. 耐震計算書のフォーマット

横置一胴円筒形容器の耐震計算書のフォーマットは、以下のとおりである。

[設計基準対象施設及び重大事故等対処設備の場合]

フォーマットⅠ 設計基準対象施設としての評価結果

フォーマットⅡ 重大事故等対処設備としての評価結果

[重大事故等対処設備単独の場合]

フォーマットⅡ 重大事故等対処設備としての評価結果*

注記*：重大事故等対処設備単独の場合は、設計基準対象施設及び重大事故等対処設備に示すフォーマットⅡを使用するものとする。ただし、評価結果表に記載の章番を「2.」から「1.」とする。

7. 引用文献

- (1) Stresses in Large Horizontal Cylindrical Pressure Vessels on Two Saddle Supports, Welding Research Supplement, Sep. 1951.
- (2) Wichman, K.R. et al.:Local Stresses in Spherical and Cylindrical Shells due to External Loadings, Welding Research Council bulletin, March 1979 revision of WRC bulletin 107 / August 1965.
- (3) 日本産業規格 J I S B 8 2 7 8 (2003)「サドル支持の横置圧力容器」

【フォーマット I 設計基準対象施設としての評価結果】

【〇〇〇〇〇タンクの耐震性についての計算結果】

1. 設計基準対象施設

1.1 設計条件

機器名称	耐震重要度分類	据付場所及び床面高さ (m)	固有周期(s)		弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s		最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)
			水平方向	鉛直方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度			
		〇〇建物 EL *1			C _H = *2	C _V = *2	C _H = *3	C _V = *3			

注記*1：基準床レベルを示す。

*2：設計用震度 I（弾性設計用地震動 S_d）又は静的震度のいずれか大きい方、若しくはこれを上回る設計震度

*3：設計用震度 I（基準地震動 S_s）又はこれを上回る設計震度

1.2 機器要目

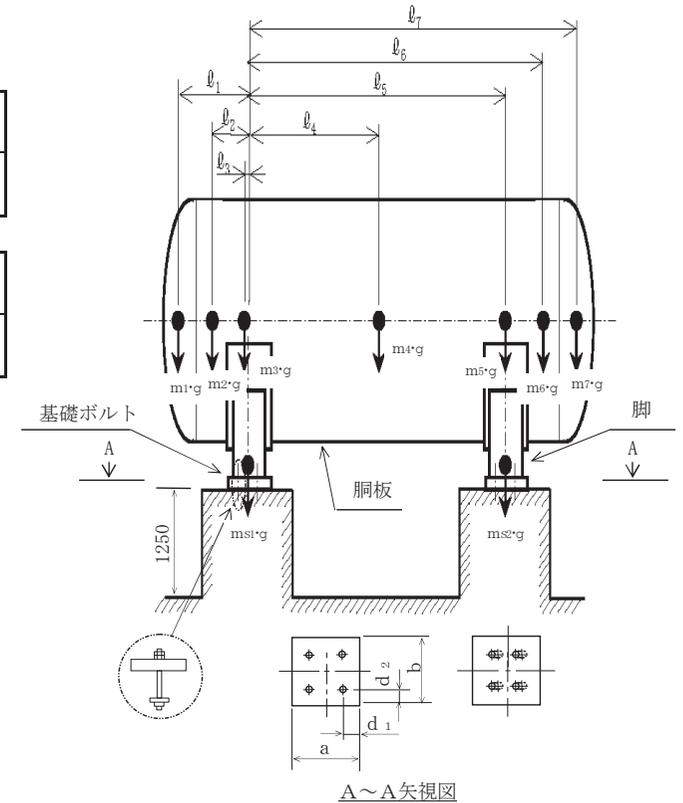
m ₁ (kg)	m ₂ (kg)	m ₃ (kg)	m ₄ (kg)	m ₅ (kg)	m ₆ (kg)	m ₇ (kg)

29

ℓ ₁ (mm)	ℓ ₂ (mm)	ℓ ₃ (mm)	ℓ ₄ (mm)	ℓ ₅ (mm)	ℓ ₆ (mm)	ℓ ₇ (mm)	M ₁ (N・mm)	M ₂ (N・mm)	R ₁ (N)	R ₂ (N)

m ₀ (kg)	m _{s1} (kg)	m _{s2} (kg)	D _i (mm)	t (mm)	t _e (mm)	ℓ ₀ (mm)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	θ _w (rad)	ℓ _w (mm)
					*1					

C ₁ (mm)	C ₂ (mm)	I _{sx} (mm ⁴)	I _{sy} (mm ⁴)	Z _{sx} (mm ³)	Z _{sy} (mm ³)	θ ₀ (rad)	θ (rad)



A _s (mm ³)	E _s (MPa)	G _s (MPa)	A _{s1} (mm ²)	A _{s2} (mm ²)	A _{s3} (mm ³)	A _{s4} (mm ²)
	*4	*4				

K ₁₁ *2	K ₁₂ *2	K ₂₁ *2	K ₂₂ *2	K _{ℓ1}	K _{ℓ2}	K _{c1}	K _{c2}	C _{ℓ1}	C _{ℓ2}	C _{c1}	C _{c2}

s	n	n ₁	n ₂	a (mm)	b (mm)	d (mm)	A _b (mm ²)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)
						(M)			

S _y (胴板) (MPa)	S _u (胴板) (MPa)	S (胴板) (MPa)	S _y (脚) (MPa)	S _u (脚) (MPa)	F (脚) (MPa)	F* (脚) (MPa)	S _y (基礎ボルト) (MPa)	S _u (基礎ボルト) (MPa)	F (基礎ボルト) (MPa)	F* (基礎ボルト) (MPa)
*3	*3	*3	*4	*4			*4	*4		

注記*1：本計算においては当板を有効とした。

*2：表中で上段は一次応力，下段は二次応力の係数とする。

*3：最高使用温度で算出

*4：周囲環境温度で算出

胴板と当板の材料が異なる場合
当板のS_y，S_u及びS値を記載する。

S _y (胴板) (MPa)	S _u (胴板) (MPa)	S (胴板) (MPa)	F (基礎ボルト) (MPa)
*3 (*5)	*3 (*5)	*3 (*5)	

注記

*1：本計算においては当板を有効とした。

*2：表中で上段は一次応力，下段は二次応力の係数とする。

*3：最高使用温度で算出

*4：周囲環境温度で算出

*5：当板の材料を示す。

1.3 計算数値

1.3.1 胴に生じる応力

(1) 一次一般膜応力

(単位：MPa)

地震の種類 地震の方向 応力の方向	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度				基準地震動 S _s			
	長手方向		横方向		長手方向		横方向	
	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力
内圧による応力	$\sigma_{\phi 1} =$	$\sigma_{x 1} =$	$\sigma_{\phi 1} =$	$\sigma_{x 1} =$	$\sigma_{\phi 1} =$	$\sigma_{x 1} =$	$\sigma_{\phi 1} =$	$\sigma_{x 1} =$
内圧による応力 (鉛直方向地震時)	$\sigma_{\phi 2} =$	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—
運転時質量による長手方向曲げ モーメントにより生じる応力	—	$\sigma_{x 2} =$	—	$\sigma_{x 2} =$	—	$\sigma_{x 2} =$	—	$\sigma_{x 2} =$
鉛直方向地震による長手方向曲げ モーメントにより生じる応力	—	$\sigma_{x 6} =$	—	$\sigma_{x 6} =$	—	$\sigma_{x 6} =$	—	$\sigma_{x 6} =$
長手方向地震により胴軸断面 全面に生じる引張応力	—	$\sigma_{x 413} =$	—	—	—	$\sigma_{x 413} =$	—	—
組合せ応力	$\sigma_{of} =$		$\sigma_{oc} =$		$\sigma_{of} =$		$\sigma_{oc} =$	

(2) 一次応力

(単位：MPa)

31

地震の種類 地震の方向 応力の方向	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度				基準地震動 S _s				
	長手方向		横方向		長手方向		横方向		
	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	
内圧による応力	$\sigma_{\phi 1} =$	$\sigma_{x 1} =$	$\sigma_{\phi 1} =$	$\sigma_{x 1} =$	$\sigma_{\phi 1} =$	$\sigma_{x 1} =$	$\sigma_{\phi 1} =$	$\sigma_{x 1} =$	
内圧による応力 (鉛直方向地震時)	$\sigma_{\phi 2} =$	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—	
運転時質量による長手方向曲げ モーメントにより生じる応力	—	$\sigma_{x 2} =$	—	$\sigma_{x 2} =$	—	$\sigma_{x 2} =$	—	$\sigma_{x 2} =$	
鉛直方向地震による長手方向曲げ モーメントにより生じる応力	—	$\sigma_{x 6} =$	—	$\sigma_{x 6} =$	—	$\sigma_{x 6} =$	—	$\sigma_{x 6} =$	
運転時質量による脚反力 により生じる応力	$\sigma_{\phi 3} =$	$\sigma_{x 3} =$	$\sigma_{\phi 3} =$	$\sigma_{x 3} =$	$\sigma_{\phi 3} =$	$\sigma_{x 3} =$	$\sigma_{\phi 3} =$	$\sigma_{x 3} =$	
鉛直方向地震による脚反力 により生じる応力	$\sigma_{\phi 71} =$	$\sigma_{x 71} =$	$\sigma_{\phi 71} =$	$\sigma_{x 71} =$	$\sigma_{\phi 71} =$	$\sigma_{x 71} =$	$\sigma_{\phi 71} =$	$\sigma_{x 71} =$	
水平方向地震 による応力	引張り	$\sigma_{\phi 411} =$	$\sigma_{x 411} =$	$\sigma_{\phi 51} =$	$\sigma_{x 51} =$	$\sigma_{\phi 411} =$	$\sigma_{x 411} =$	$\sigma_{\phi 51} =$	$\sigma_{x 51} =$
		$\sigma_{\phi 412} =$	$\sigma_{x 412} =$			$\sigma_{\phi 412} =$	$\sigma_{x 412} =$		
		$\sigma_{\phi 41} =$	$\sigma_{x 41} =$			$\sigma_{\phi 41} =$	$\sigma_{x 41} =$		
	せん断	$\tau_{\ell} =$		$\tau_{c} =$		$\tau_{\ell} =$		$\tau_{c} =$	
組合せ応力	$\sigma_{1\ell} =$		$\sigma_{1c} =$		$\sigma_{1\ell} =$		$\sigma_{1c} =$		

(3) 地震動のみによる一次応力と二次応力の和の変動値

(単位：MPa)

地震の種類 地震の方向 応力の方向		弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度				基準地震動 S _s			
		長手方向		横方向		長手方向		横方向	
		周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力
内圧による応力 (鉛直方向地震時)		$\sigma_{\phi 2} =$	—						
鉛直方向地震による長手方向 曲げモーメントにより生じる応力		—	$\sigma_{x 6} =$						
鉛直方向地震による脚反力 により生じる応力		$\sigma_{\phi 71} =$ $\sigma_{\phi 72} =$	$\sigma_{x 71} =$ $\sigma_{x 72} =$	$\sigma_{\phi 71} =$ $\sigma_{\phi 72} =$	$\sigma_{x 71} =$ $\sigma_{x 72} =$	$\sigma_{\phi 71} =$ $\sigma_{\phi 72} =$	$\sigma_{x 71} =$ $\sigma_{x 72} =$	$\sigma_{\phi 71} =$ $\sigma_{\phi 72} =$	$\sigma_{x 71} =$ $\sigma_{x 72} =$
水平方向地震 による応力	引張り	$\sigma_{\phi 41} =$	$\sigma_{x 41} =$	$\sigma_{\phi 51} =$	$\sigma_{x 51} =$	$\sigma_{\phi 41} =$	$\sigma_{x 41} =$	$\sigma_{\phi 51} =$	$\sigma_{x 51} =$
		$\sigma_{\phi 421} =$	$\sigma_{x 421} =$	$\sigma_{\phi 52} =$	$\sigma_{x 52} =$	$\sigma_{\phi 421} =$	$\sigma_{x 421} =$	$\sigma_{\phi 52} =$	$\sigma_{x 52} =$
		$\sigma_{\phi 422} =$	$\sigma_{x 422} =$			$\sigma_{\phi 422} =$	$\sigma_{x 422} =$		
	$\sigma_{\phi 42} =$	$\sigma_{x 42} =$	$\sigma_{\phi 42} =$	$\sigma_{x 42} =$					
せん断	$\tau_{\ell} =$		$\tau_{c} =$		$\tau_{\ell} =$		$\tau_{c} =$		
組合せ応力		$\sigma_{2\ell} =$		$\sigma_{2c} =$		$\sigma_{2\ell} =$		$\sigma_{2c} =$	

1.3.2 脚に生じる応力

(単位：MPa)

32

地震の種類 地震の方向		弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s	
		長手方向	横方向	長手方向	横方向
運転時質量による応力	圧縮	$\sigma_{s1} =$	$\sigma_{s1} =$	$\sigma_{s1} =$	$\sigma_{s1} =$
鉛直方向地震による応力	圧縮	$\sigma_{s4} =$	$\sigma_{s4} =$	$\sigma_{s4} =$	$\sigma_{s4} =$
水平方向地震による応力	曲げ	$\sigma_{s2} =$	$\sigma_{s3} =$	$\sigma_{s2} =$	$\sigma_{s3} =$
	せん断	$\tau_{s2} =$	$\tau_{s3} =$	$\tau_{s2} =$	$\tau_{s3} =$
組合せ応力		$\sigma_{s\ell} =$	$\sigma_{sc} =$	$\sigma_{s\ell} =$	$\sigma_{sc} =$

1.3.3 基礎ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

地震の種類 地震の方向		弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s	
		長手方向	横方向	長手方向	横方向
鉛直方向地震及び水 平方向地震による応力	引張り	$\sigma_{b1} =$	$\sigma_{b2} =$	$\sigma_{b1} =$	$\sigma_{b2} =$
水平方向地震による 応力	せん断	$\tau_{b1} =$	$\tau_{b2} =$	$\tau_{b1} =$	$\tau_{b2} =$

1.4 結論

1.4.1 固有周期 (単位：s)

方向	固有周期
長手方向	$T_1 =$
横方向	$T_2 =$
鉛直方向	$T_3 =$

1.4.2 応力

(単位：MPa)

部材	材料	応力	弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度		基準地震動 S_s	
			算出応力	許容応力	算出応力	許容応力
胴板		一次一般膜	$\sigma_0 =$	$S_a =$	$\sigma_0 =$	$S_a =$
		一次	$\sigma_1 =$	$S_a =$	$\sigma_1 =$	$S_a =$
		一次+二次	$\sigma_2 =$	$S_a =$	$\sigma_2 =$	$S_a =$
脚		組合せ	$\sigma_s =$	$f_t =$	$\sigma_s =$	$f_t =$
基礎ボルト		引張り	$\sigma_b =$	$f_{ts} = *$	$\sigma_b =$	$f_{ts} = *$
		せん断	$\tau_b =$	$f_{sb} =$	$\tau_b =$	$f_{sb} =$

すべて許容応力以下である。

注記*： $f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}]$

胴板と当板の材料が異なる場合、当板の材料名及び許容応力を記載する。

1.4.2 応力 (単位：MPa)

部材	材料	許容応力
胴板	(*1)	$S_a =$ (*1)
		$S_a =$ (*1)
脚		$f_t =$
基礎ボルト		$f_{ts} =$ *2
		$f_{sb} =$

注記*1：当板の材料を示す。

*2： $f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}]$

【○○○○○タンクの耐震性についての計算結果】

【静水頭の場合】

別紙

1. 設計基準対象施設

1.1 設計条件

機器名称	耐震重要度分類	据付場所及び床面高さ (m)	固有周期(s)		弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s		最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)	比重
			水平方向	鉛直方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度				
		○○建物 EL *1			C _H = *2	C _V = *2	C _H = *3	C _V = *3	静水頭			

注記*1：基準床レベルを示す。

*2：設計用震度 I（弾性設計用地震動 S_d）又は静的震度のいずれか大きい方、若しくはこれを上回る設計震度

*3：設計用震度 I（基準地震動 S_s）又はこれを上回る設計震度

1.2 機器要目

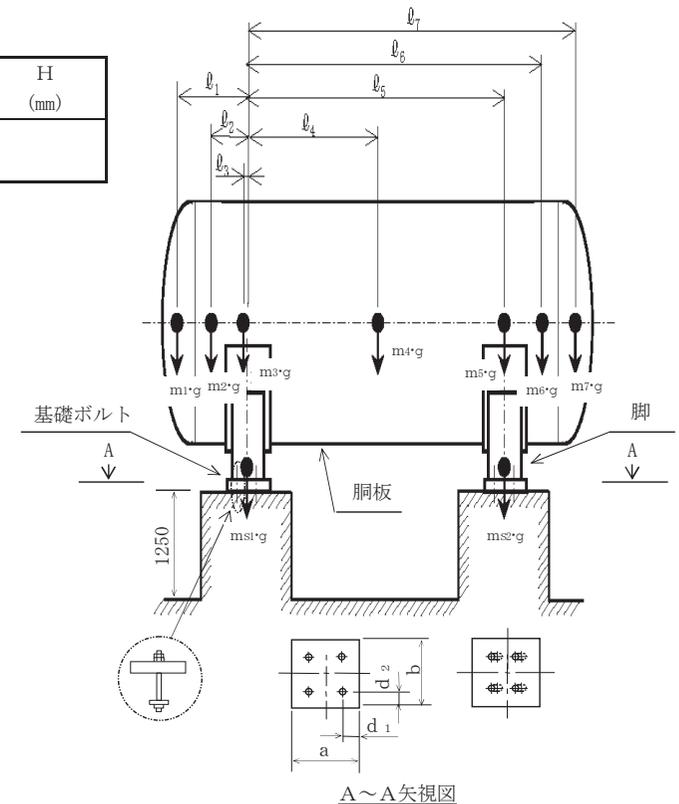
m ₁ (kg)	m ₂ (kg)	m ₃ (kg)	m ₄ (kg)	m ₅ (kg)	m ₆ (kg)	m ₇ (kg)

34

ℓ ₁ (mm)	ℓ ₂ (mm)	ℓ ₃ (mm)	ℓ ₄ (mm)	ℓ ₅ (mm)	ℓ ₆ (mm)	ℓ ₇ (mm)	M ₁ (N・mm)	M ₂ (N・mm)	R ₁ (N)	R ₂ (N)	H (mm)

m ₀ (kg)	m _{s1} (kg)	m _{s2} (kg)	D _i (mm)	t (mm)	t _e (mm)	ℓ ₀ (mm)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	θ _w (rad)	ℓ _w (mm)
					*1					

C ₁ (mm)	C ₂ (mm)	I _{sx} (mm ⁴)	I _{sy} (mm ⁴)	Z _{sx} (mm ³)	Z _{sy} (mm ³)	θ ₀ (rad)	θ (rad)



1.3 計算数値

1.3.1 胴に生じる応力

(1) 一次一般膜応力

(単位：MPa)

地震の種類 地震の方向 応力の方向	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度				基準地震動 S _s			
	長手方向		横方向		長手方向		横方向	
	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力
静水頭による応力	$\sigma_{\phi 1} =$	$\sigma_{x 1} =$	$\sigma_{\phi 1} =$	$\sigma_{x 1} =$	$\sigma_{\phi 1} =$	$\sigma_{x 1} =$	$\sigma_{\phi 1} =$	$\sigma_{x 1} =$
静水頭による応力 (鉛直方向地震時)	$\sigma_{\phi 2} =$	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—
運転時質量による長手方向曲げ モーメントにより生じる応力	—	$\sigma_{x 2} =$	—	$\sigma_{x 2} =$	—	$\sigma_{x 2} =$	—	$\sigma_{x 2} =$
鉛直方向地震による長手方向曲げ モーメントにより生じる応力	—	$\sigma_{x 6} =$	—	$\sigma_{x 6} =$	—	$\sigma_{x 6} =$	—	$\sigma_{x 6} =$
長手方向地震により胴軸断面 全面に生じる引張応力	—	$\sigma_{x 413} =$	—	—	—	$\sigma_{x 413} =$	—	—
組合せ応力	$\sigma_{of} =$		$\sigma_{oc} =$		$\sigma_{of} =$		$\sigma_{oc} =$	

(2) 一次応力

(単位：MPa)

35

地震の種類 地震の方向 応力の方向	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度				基準地震動 S _s				
	長手方向		横方向		長手方向		横方向		
	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	
静水頭による応力	$\sigma_{\phi 1} =$	$\sigma_{x 1} =$	$\sigma_{\phi 1} =$	$\sigma_{x 1} =$	$\sigma_{\phi 1} =$	$\sigma_{x 1} =$	$\sigma_{\phi 1} =$	$\sigma_{x 1} =$	
静水頭による応力 (鉛直方向地震時)	$\sigma_{\phi 2} =$	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—	
運転時質量による長手方向曲げ モーメントにより生じる応力	—	$\sigma_{x 2} =$	—	$\sigma_{x 2} =$	—	$\sigma_{x 2} =$	—	$\sigma_{x 2} =$	
鉛直方向地震による長手方向曲げ モーメントにより生じる応力	—	$\sigma_{x 6} =$	—	$\sigma_{x 6} =$	—	$\sigma_{x 6} =$	—	$\sigma_{x 6} =$	
運転時質量による脚反力 により生じる応力	$\sigma_{\phi 3} =$	$\sigma_{x 3} =$	$\sigma_{\phi 3} =$	$\sigma_{x 3} =$	$\sigma_{\phi 3} =$	$\sigma_{x 3} =$	$\sigma_{\phi 3} =$	$\sigma_{x 3} =$	
鉛直方向地震による脚反力 により生じる応力	$\sigma_{\phi 71} =$	$\sigma_{x 71} =$	$\sigma_{\phi 71} =$	$\sigma_{x 71} =$	$\sigma_{\phi 71} =$	$\sigma_{x 71} =$	$\sigma_{\phi 71} =$	$\sigma_{x 71} =$	
水平方向地震 による応力	引張り	$\sigma_{\phi 411} =$	$\sigma_{x 411} =$	$\sigma_{\phi 51} =$	$\sigma_{x 51} =$	$\sigma_{\phi 411} =$	$\sigma_{x 411} =$	$\sigma_{\phi 51} =$	$\sigma_{x 51} =$
		$\sigma_{\phi 412} =$	$\sigma_{x 412} =$			$\sigma_{\phi 412} =$	$\sigma_{x 412} =$		
		$\sigma_{\phi 41} =$	$\sigma_{x 41} =$			$\sigma_{\phi 41} =$	$\sigma_{x 41} =$		
せん断	$\tau_{\ell} =$		$\tau_{c} =$		$\tau_{\ell} =$		$\tau_{c} =$		
	$\sigma_{1\ell} =$		$\sigma_{1c} =$		$\sigma_{1\ell} =$		$\sigma_{1c} =$		
組合せ応力	$\sigma_{1\ell} =$		$\sigma_{1c} =$		$\sigma_{1\ell} =$		$\sigma_{1c} =$		

(3) 地震動のみによる一次応力と二次応力の和の変動値

(単位：MPa)

地震の種類 地震の方向 応力の方向	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度				基準地震動 S s				
	長手方向		横方向		長手方向		横方向		
	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	
静水頭による応力 (鉛直方向地震時)	$\sigma_{\phi 2} =$	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—	
鉛直方向地震による長手方向 曲げモーメントにより生じる応力	—	$\sigma_{x 6} =$	—	$\sigma_{x 6} =$	—	$\sigma_{x 6} =$	—	$\sigma_{x 6} =$	
鉛直方向地震による脚反力 により生じる応力	$\sigma_{\phi 71} =$	$\sigma_{x 71} =$	$\sigma_{\phi 71} =$	$\sigma_{x 71} =$	$\sigma_{\phi 71} =$	$\sigma_{x 71} =$	$\sigma_{\phi 71} =$	$\sigma_{x 71} =$	
	$\sigma_{\phi 72} =$	$\sigma_{x 72} =$	$\sigma_{\phi 72} =$	$\sigma_{x 72} =$	$\sigma_{\phi 72} =$	$\sigma_{x 72} =$	$\sigma_{\phi 72} =$	$\sigma_{x 72} =$	
水平方向地震 による応力	引張り	$\sigma_{\phi 41} =$	$\sigma_{x 41} =$	$\sigma_{\phi 51} =$	$\sigma_{x 51} =$	$\sigma_{\phi 41} =$	$\sigma_{x 41} =$	$\sigma_{\phi 51} =$	$\sigma_{x 51} =$
		$\sigma_{\phi 421} =$	$\sigma_{x 421} =$	$\sigma_{\phi 52} =$	$\sigma_{x 52} =$	$\sigma_{\phi 421} =$	$\sigma_{x 421} =$	$\sigma_{\phi 52} =$	$\sigma_{x 52} =$
		$\sigma_{\phi 422} =$	$\sigma_{x 422} =$			$\sigma_{\phi 422} =$	$\sigma_{x 422} =$		
	せん断	$\sigma_{\phi 42} =$	$\sigma_{x 42} =$	$\sigma_{\phi 42} =$	$\sigma_{x 42} =$				
組合せ応力	$\tau_{\ell} =$		$\tau_{c} =$		$\tau_{\ell} =$		$\tau_{c} =$		
組合せ応力	$\sigma_{2\ell} =$		$\sigma_{2c} =$		$\sigma_{2\ell} =$		$\sigma_{2c} =$		

36

1.3.2 脚に生じる応力

(単位：MPa)

地震の種類 地震の方向	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度		基準地震動 S s	
	長手方向	横方向	長手方向	横方向
運転時質量による応力	圧縮	$\sigma_{s1} =$	$\sigma_{s1} =$	$\sigma_{s1} =$
鉛直方向地震による応力	圧縮	$\sigma_{s4} =$	$\sigma_{s4} =$	$\sigma_{s4} =$
水平方向地震による応力	曲げ	$\sigma_{s2} =$	$\sigma_{s3} =$	$\sigma_{s2} =$
	せん断	$\tau_{s2} =$	$\tau_{s3} =$	$\tau_{s2} =$
組合せ応力	$\sigma_{s\ell} =$	$\sigma_{sc} =$	$\sigma_{s\ell} =$	$\sigma_{sc} =$

1.3.3 基礎ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

地震の種類 地震の方向	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度		基準地震動 S s	
	長手方向	横方向	長手方向	横方向
鉛直方向地震及び水 平方向地震による応力	引張り	$\sigma_{b1} =$	$\sigma_{b2} =$	$\sigma_{b1} =$
水平方向地震による 応力	せん断	$\tau_{b1} =$	$\tau_{b2} =$	$\tau_{b1} =$

【フォーマットⅡ 重大事故等対処設備としての評価結果】

2. 重大事故等対処設備

2.1 設計条件

機器名称	設備分類	据付場所及び床面高さ (m)	固有周期(s)		弾性設計用地震動S _d 又は静的震度		基準地震動S _s		最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)
			水平方向	鉛直方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度			
		〇〇建物 EL *1			—	—	C _H = *2	C _V = *2			

注記*1：基準床レベルを示す。

*2：設計用震度 I（基準地震動S_s）又はこれを上回る設計震度

2.2 機器要目

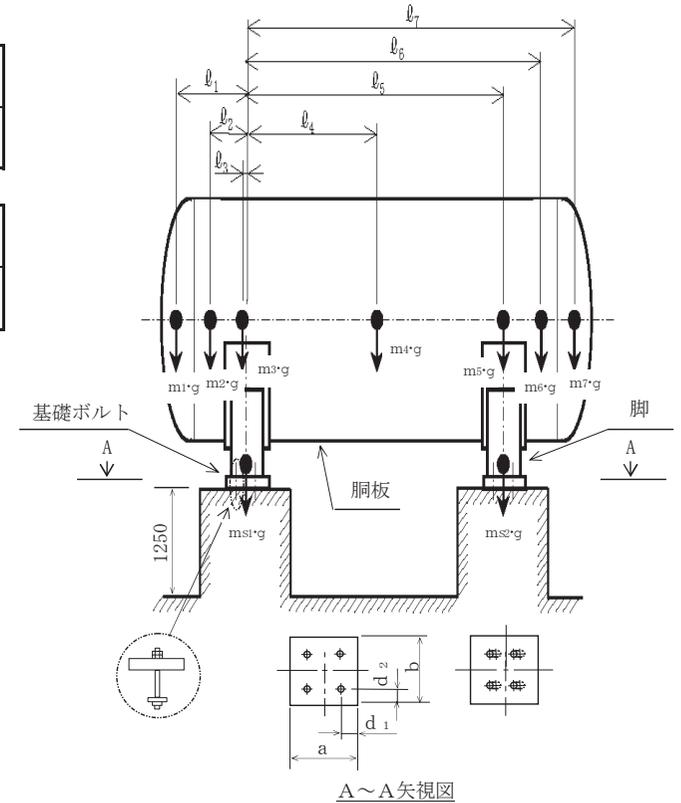
m ₁ (kg)	m ₂ (kg)	m ₃ (kg)	m ₄ (kg)	m ₅ (kg)	m ₆ (kg)	m ₇ (kg)

37

ℓ ₁ (mm)	ℓ ₂ (mm)	ℓ ₃ (mm)	ℓ ₄ (mm)	ℓ ₅ (mm)	ℓ ₆ (mm)	ℓ ₇ (mm)	M ₁ (N・mm)	M ₂ (N・mm)	R ₁ (N)	R ₂ (N)

m ₀ (kg)	m _{s1} (kg)	m _{s2} (kg)	D _i (mm)	t (mm)	t _e (mm)	ℓ ₀ (mm)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	θ _w (rad)	ℓ _w (mm)
					*1					

C ₁ (mm)	C ₂ (mm)	I _{sx} (mm ⁴)	I _{sy} (mm ⁴)	Z _{sx} (mm ³)	Z _{sy} (mm ³)	θ _o (rad)	θ (rad)



A_s (mm^2)	E_s (MPa)	G_s (MPa)	A_{s1} (mm^2)	A_{s2} (mm^2)	A_{s3} (mm^2)	A_{s4} (mm^2)
	*4	*4				

K_{11}^{*2}	K_{12}^{*2}	K_{21}^{*2}	K_{22}^{*2}	K_{l1}	K_{l2}	K_{c1}	K_{c2}	C_{l1}	C_{l2}	C_{c1}	C_{c2}

s	n	n_1	n_2	a (mm)	b (mm)	d (mm)	A_b (mm^2)	d_1 (mm)	d_2 (mm)
						(M)			

38

S_y (胴板) (MPa)	S_u (胴板) (MPa)	S (胴板) (MPa)	S_y (脚) (MPa)	S_u (脚) (MPa)	F (脚) (MPa)	F^* (脚) (MPa)	S_y (基礎ボルト) (MPa)	S_u (基礎ボルト) (MPa)	F (基礎ボルト) (MPa)	F^* (基礎ボルト) (MPa)
*3	*3	—	*4	*4	—		*4	*4	—	

注記*1：本計算においては当板を有効とした。

*2：表中で上段は一次応力，下段は二次応力の係数とする。

*3：最高使用温度で算出

*4：周囲環境温度で算出

胴板と当板の材料が異なる場合
当板の S_y 、 S_u 及び S 値を記載する。

S_y (胴板) (MPa)	S_u (胴板) (MPa)	S (胴板) (MPa)	F^* (基礎ボルト) (MPa)
(*3 *5)	(*3 *5)	(*3 *5)	

注記

*1：本計算においては当板を有効とした。

*2：表中で上段は一次応力，下段は二次応力の係数とする。

*3：最高使用温度で算出

*4：周囲環境温度で算出

*5：当板の材料を示す。

2.3 計算数値

2.3.1 胴に生じる応力

(1) 一次一般膜応力

(単位：MPa)

地震の種類 地震の方向 応力の方向	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度				基準地震動 S _s			
	長手方向		横方向		長手方向		横方向	
	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力
内圧による応力	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 1} =$	$\sigma_{x 1} =$	$\sigma_{\phi 1} =$	$\sigma_{x 1} =$
内圧による応力 (鉛直方向地震時)	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—
運転時質量による長手方向曲げ モーメントにより生じる応力	—	—	—	—	—	$\sigma_{x 2} =$	—	$\sigma_{x 2} =$
鉛直方向地震による長手方向曲げ モーメントにより生じる応力	—	—	—	—	—	$\sigma_{x 6} =$	—	$\sigma_{x 6} =$
長手方向地震により胴軸断面 全面に生じる引張応力	—	—	—	—	—	$\sigma_{x 4 1 3} =$	—	—
組合せ応力	—		—		$\sigma_{o l} =$		$\sigma_{o c} =$	

(2) 一次応力

(単位：MPa)

39

地震の種類 地震の方向 応力の方向	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度				基準地震動 S _s				
	長手方向		横方向		長手方向		横方向		
	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	
内圧による応力	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 1} =$	$\sigma_{x 1} =$	$\sigma_{\phi 1} =$	$\sigma_{x 1} =$	
内圧による応力 (鉛直方向地震時)	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—	
運転時質量による長手方向曲げ モーメントにより生じる応力	—	—	—	—	—	$\sigma_{x 2} =$	—	$\sigma_{x 2} =$	
鉛直方向地震による長手方向曲げ モーメントにより生じる応力	—	—	—	—	—	$\sigma_{x 6} =$	—	$\sigma_{x 6} =$	
運転時質量による脚反力 により生じる応力	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 3} =$	$\sigma_{x 3} =$	$\sigma_{\phi 3} =$	$\sigma_{x 3} =$	
鉛直方向地震による脚反力 により生じる応力	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 7 1} =$	$\sigma_{x 7 1} =$	$\sigma_{\phi 7 1} =$	$\sigma_{x 7 1} =$	
水平方向地震 による応力	引張り	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 4 1 1} =$	$\sigma_{x 4 1 1} =$	$\sigma_{\phi 5 1} =$	$\sigma_{x 5 1} =$
		—	—			$\sigma_{\phi 4 1 2} =$	$\sigma_{x 4 1 2} =$		
		—	—			$\sigma_{\phi 4 1} =$	$\sigma_{x 4 1} =$		
	せん断	—		—		$\tau_{\ell} =$		$\tau_{c} =$	
組合せ応力	—		—		$\sigma_{1 \ell} =$		$\sigma_{1 c} =$		

(3) 地震動のみによる一次応力と二次応力の和の変動値

(単位：MPa)

地震の種類 地震の方向 応力の方向	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度				基準地震動 S s				
	長手方向		横方向		長手方向		横方向		
	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	
内圧による応力 (鉛直方向地震時)	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—	
鉛直方向地震による長手方向 曲げモーメントにより生じる応力	—	—	—	—	—	$\sigma_{x 6} =$	—	$\sigma_{x 6} =$	
鉛直方向地震による脚反力 により生じる応力	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 7 1} =$ $\sigma_{\phi 7 2} =$	$\sigma_{x 7 1} =$ $\sigma_{x 7 2} =$	$\sigma_{\phi 7 1} =$ $\sigma_{\phi 7 2} =$	$\sigma_{x 7 1} =$ $\sigma_{x 7 2} =$	
水平方向地震 による応力	引張り	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 4 1} =$	$\sigma_{x 4 1} =$	$\sigma_{\phi 5 1} =$	$\sigma_{x 5 1} =$
		—	—	—	—	$\sigma_{\phi 4 2 1} =$ $\sigma_{\phi 4 2 2} =$	$\sigma_{x 4 2 1} =$ $\sigma_{x 4 2 2} =$	$\sigma_{\phi 5 2} =$	$\sigma_{x 5 2} =$
		—	—			$\sigma_{\phi 4 2} =$	$\sigma_{x 4 2} =$		
せん断	—	—	—	—	$\tau_{\ell} =$	$\tau_{c} =$			
組合せ応力	—	—	—	—	$\sigma_{2\ell} =$	$\sigma_{2c} =$			

40

2.3.2 脚に生じる応力

(単位：MPa)

地震の種類 地震の方向	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度	基準地震動 S s			
		長手方向	横方向	長手方向	横方向
運転時質量による応力	圧縮	—	—	$\sigma_{s 1} =$	$\sigma_{s 1} =$
鉛直方向地震による応力	圧縮	—	—	$\sigma_{s 4} =$	$\sigma_{s 4} =$
水平方向地震による応力	曲げ	—	—	$\sigma_{s 2} =$	$\sigma_{s 3} =$
	せん断	—	—	$\tau_{s 2} =$	$\tau_{s 3} =$
組合せ応力	—	—	—	$\sigma_{s \ell} =$	$\sigma_{s c} =$

2.3.3 基礎ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

地震の種類 地震の方向	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度	基準地震動 S s			
		長手方向	横方向	長手方向	横方向
鉛直方向地震及び水 平方向地震による応力	引張り	—	—	$\sigma_{b 1} =$	$\sigma_{b 2} =$
水平方向地震による 応力	せん断	—	—	$\tau_{b 1} =$	$\tau_{b 2} =$

2.4 結論

2.4.1 固有周期 (単位：s)

方向	固有周期
長手方向	$T_1 =$
横方向	$T_2 =$
鉛直方向	$T_3 =$

2.4.2 応力

(単位：MPa)

部材	材料	応力	弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度		基準地震動 S_s	
			算出応力	許容応力	算出応力	許容応力
胴板		一次一般膜	—	—	$\sigma_o =$	$S_a =$
		一次	—	—	$\sigma_1 =$	$S_a =$
		一次+二次	—	—	$\sigma_2 =$	$S_a =$
脚		組合せ	—	—	$\sigma_s =$	$f_t =$
基礎ボルト		引張り	—	—	$\sigma_b =$	$f_{ts} = *$
		せん断	—	—	$\tau_b =$	$f_{sb} =$

すべて許容応力以下である。

注記*： $f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}]$

胴板と当板の材料が異なる場合、当板の材料名及び許容応力を記載する。

2.4.2 応力 (単位：MPa)

部材	材料	許容応力
胴板	(*1)	$S_a =$ (*1)
		$S_a =$ (*1)
脚		$f_t =$
基礎ボルト		$f_{ts} = *2$
		$f_{sb} =$

注記*1：当板の材料を示す。

*2： $f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}]$

【静水頭の場合】
(圧力容器と様式が異なるページのみ掲載)

別紙

2. 重大事故等対処設備

2.1 設計条件

機器名称	設備分類	据付場所及び床面高さ (m)	固有周期 (s)		弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s		最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)	比重
			水平方向	鉛直方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度				
		○○建物 EL *1			—	—	C _H = *2	C _V = *2	静水頭			

注記*1：基準床レベルを示す。

*2：設計用震度 I（基準地震動 S_s）又はこれを上回る設計震度

2.2 機器要目

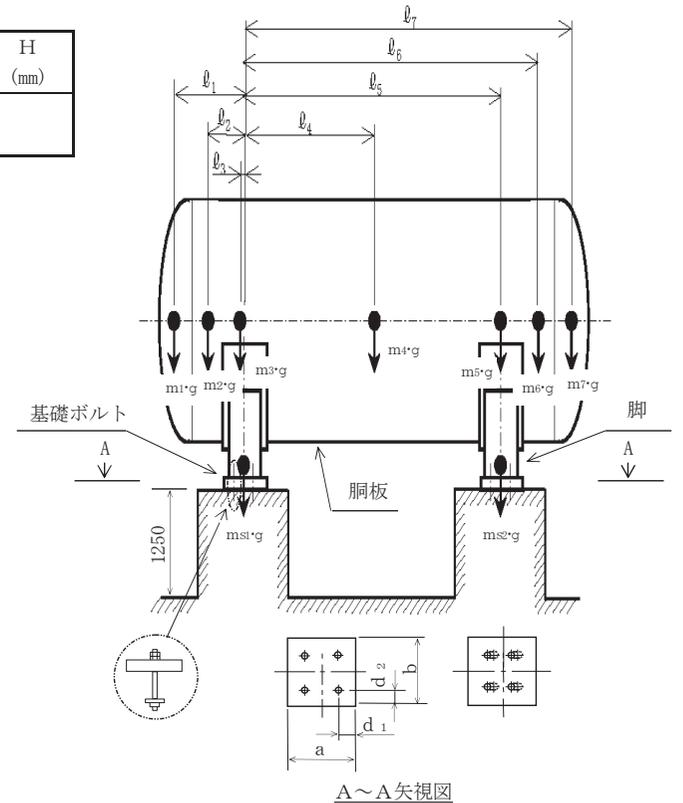
m ₁ (kg)	m ₂ (kg)	m ₃ (kg)	m ₄ (kg)	m ₅ (kg)	m ₆ (kg)	m ₇ (kg)

42

ℓ ₁ (mm)	ℓ ₂ (mm)	ℓ ₃ (mm)	ℓ ₄ (mm)	ℓ ₅ (mm)	ℓ ₆ (mm)	ℓ ₇ (mm)	M ₁ (N・mm)	M ₂ (N・mm)	R ₁ (N)	R ₂ (N)	H (mm)

m ₀ (kg)	m _{s1} (kg)	m _{s2} (kg)	D _i (mm)	t (mm)	t _e (mm)	ℓ ₀ (mm)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	θ _w (rad)	ℓ _w (mm)
					*1					

C ₁ (mm)	C ₂ (mm)	I _{sx} (mm ⁴)	I _{sy} (mm ⁴)	Z _{sx} (mm ³)	Z _{sy} (mm ³)	θ ₀ (rad)	θ (rad)



2.3 計算数値

2.3.1 胴に生じる応力

(1) 一次一般膜応力

(単位：MPa)

地震の種類 地震の方向 応力の方向	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度				基準地震動 S _s			
	長手方向		横方向		長手方向		横方向	
	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力
静水頭による応力	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 1} =$	$\sigma_{x 1} =$	$\sigma_{\phi 1} =$	$\sigma_{x 1} =$
静水頭による応力 (鉛直方向地震時)	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—
運転時質量による長手方向曲げ モーメントにより生じる応力	—	—	—	—	—	$\sigma_{x 2} =$	—	$\sigma_{x 2} =$
鉛直方向地震による長手方向曲げ モーメントにより生じる応力	—	—	—	—	—	$\sigma_{x 6} =$	—	$\sigma_{x 6} =$
長手方向地震により胴軸断面 全面に生じる引張応力	—	—	—	—	—	$\sigma_{x 4 1 3} =$	—	—
組合せ応力	—		—		$\sigma_{o l} =$		$\sigma_{o c} =$	

(2) 一次応力

(単位：MPa)

43

地震の種類 地震の方向 応力の方向	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度				基準地震動 S _s				
	長手方向		横方向		長手方向		横方向		
	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	
静水頭による応力	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 1} =$	$\sigma_{x 1} =$	$\sigma_{\phi 1} =$	$\sigma_{x 1} =$	
静水頭による応力 (鉛直方向地震時)	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—	
運転時質量による長手方向曲げ モーメントにより生じる応力	—	—	—	—	—	$\sigma_{x 2} =$	—	$\sigma_{x 2} =$	
鉛直方向地震による長手方向曲げ モーメントにより生じる応力	—	—	—	—	—	$\sigma_{x 6} =$	—	$\sigma_{x 6} =$	
運転時質量による脚反力 により生じる応力	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 3} =$	$\sigma_{x 3} =$	$\sigma_{\phi 3} =$	$\sigma_{x 3} =$	
鉛直方向地震による脚反力 により生じる応力	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 7 1} =$	$\sigma_{x 7 1} =$	$\sigma_{\phi 7 1} =$	$\sigma_{x 7 1} =$	
水平方向地震 による応力	引張り	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 4 1 1} =$	$\sigma_{x 4 1 1} =$	$\sigma_{\phi 5 1} =$	$\sigma_{x 5 1} =$
		—	—			$\sigma_{\phi 4 1 2} =$	$\sigma_{x 4 1 2} =$		
		—	—			$\sigma_{\phi 4 1} =$	$\sigma_{x 4 1} =$		
せん断	—		—		$\tau_{\ell} =$		$\tau_{c} =$		
組合せ応力	—		—		$\sigma_{1 \ell} =$		$\sigma_{1 c} =$		

(3) 地震動のみによる一次応力と二次応力の和の変動値

(単位：MPa)

地震の種類 地震の方向 応力の方向		弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度				基準地震動 S _s			
		長手方向		横方向		長手方向		横方向	
		周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力
静水頭による応力 (鉛直方向地震時)		—	—	—	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—	$\sigma_{\phi 2} =$	—
鉛直方向地震による長手方向 曲げモーメントにより生じる応力		—	—	—	—	—	$\sigma_{x 6} =$	—	$\sigma_{x 6} =$
鉛直方向地震による脚反力 により生じる応力		—	—	—	—	$\sigma_{\phi 71} =$ $\sigma_{\phi 72} =$	$\sigma_{x 71} =$ $\sigma_{x 72} =$	$\sigma_{\phi 71} =$ $\sigma_{\phi 72} =$	$\sigma_{x 71} =$ $\sigma_{x 72} =$
水平方向地震 による応力	引張り	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 41} =$	$\sigma_{x 41} =$	$\sigma_{\phi 51} =$	$\sigma_{x 51} =$
		—	—	—	—	$\sigma_{\phi 421} =$ $\sigma_{\phi 422} =$	$\sigma_{x 421} =$ $\sigma_{x 422} =$	$\sigma_{\phi 52} =$	$\sigma_{x 52} =$
		—	—	—	—	$\sigma_{\phi 42} =$	$\sigma_{x 42} =$		
	せん断	—		—		$\tau_{\ell} =$		$\tau_c =$	
組合せ応力		—		—		$\sigma_{2\ell} =$		$\sigma_{2c} =$	

2.3.2 脚に生じる応力

(単位：MPa)

地震の種類 地震の方向		弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s	
		長手方向	横方向	長手方向	横方向
運転時質量による応力	圧縮	—	—	$\sigma_{s1} =$	$\sigma_{s1} =$
鉛直方向地震による応力	圧縮	—	—	$\sigma_{s4} =$	$\sigma_{s4} =$
水平方向地震による応力	曲げ	—	—	$\sigma_{s2} =$	$\sigma_{s3} =$
	せん断	—	—	$\tau_{s2} =$	$\tau_{s3} =$
組合せ応力		—	—	$\sigma_{s\ell} =$	$\sigma_{sc} =$

2.3.3 基礎ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

地震の種類 地震の方向		弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s	
		長手方向	横方向	長手方向	横方向
鉛直方向地震及び水 平方向地震による応力	引張り	—	—	$\sigma_{b1} =$	$\sigma_{b2} =$
水平方向地震による 応力	せん断	—	—	$\tau_{b1} =$	$\tau_{b2} =$

機器付基礎ボルトの腐食を考慮した耐震安全性評価について

耐震安全性評価書における基礎ボルトの腐食を考慮した耐震安全性評価に伴う計算過程については、表 1 に示す理由により代表機器を選定して説明する。また、腐食を考慮しない代表機器の発生応力の算出過程については、添付資料(1)、(2)に示す耐震計算書の通り。

表 1 補足説明代表機器の選定

補足説明資料として 代表する機器	選定理由	添付資料 番号
残留熱除去系熱交換器	・耐震補強工事を前提とした耐震安全性評価を実施しており、評価結果（発生応力と許容応力の比）が最も厳しい機器であるため。	(1)
原子炉浄化系補助熱交換器	・耐震補強工事を前提とした耐震安全性評価を実施しており、基礎ボルトの発生応力が最も大きい機器であるため。	(2)

1. 基礎ボルトの設計降伏点および設計引張強さ

代表機器の基礎ボルトに使用されている材料の設計降伏点 S_y および設計引張強さ S_u を表 2 に示す。

表 2 代表機器の基礎ボルト使用材料の S_y , S_u *1

材料	最小引張強さ (MPa)	最小降伏点 (MPa)	S_y , S_u	温度 (°C)			
				-30~40	75	100	150
SCM435 直径 ≤ 60mm							
SS400 (SS41) 16mm < 厚さ ≤ 40mm							

*1 : JSME S NC1 2005 付録材料図表 Part5 表 8 および表 9 より抜粋

各代表機器の周囲環境温度を踏まえ、計算に使用する S_y , S_u を表 3 に示す。なお、 S_y , S_u は「JSME S NC1 2005 付録材料図表 Part5 表 8 および表 9」に定められている各温度での数値を周囲環境温度で線形補完して算出した。

表3 代表機器基礎ボルトの Sy, Su 算出値

代表機器	材料	周囲環境温度 (°C)	設計降伏点 Sy (MPa)	設計引張強さ Su (MPa)
残留熱除去系 熱交換器	SCM435	DB 条件 : 66	730	868
	直径 ≤ 60mm	SA 条件 : 140	659	847
原子炉浄化系 補助熱交換器	SS41 16mm < 厚さ ≤ 40mm	50	231	394

2. 発生応力の算出

発生応力の算出に用いる耐震条件に関しては、設置変更許可を受けた基準地震動 Ss および弾性設計用地震動 Sd をもとに、工認で耐震条件として設定した設計用条件 I または II に基づき、評価に用いる耐震条件を設定している。

残留熱除去系熱交換器の基礎ボルトについて、基礎ボルトの腐食による減肉を考慮しない場合の評価については添付資料(1)に示す耐震計算書にて耐震安全上問題ないことが確認できる。ここで、最大引張応力 σ_b および最大せん断応力 τ_b は、解析等により得られた水平力および鉛直力に対して引張力またはせん断力を受ける基礎ボルトの軸断面積 A_b で除することで算出している。したがって、腐食による減肉を考慮した場合の基礎ボルトに生じる最大引張応力および最大せん断応力は、評価に用いる耐震条件が耐震計算書と同じである場合、腐食を考慮した場合の基礎ボルトの引張応力およびせん断応力は、腐食を考慮しない場合の引張応力 σ_b 、せん断応力 τ_b および減肉を考慮したボルト断面積 A'_b を用いて表4のとおり算出できる。

表4 残留熱除去系熱交換器の基礎ボルトに生じる最大引張応力
および最大せん断応力の算出方法

応力分類	腐食考慮なし*1	腐食考慮あり
引張応力	σ_b (5.4.1.3.1)式	$\sigma_b \times \frac{A_b}{A'_b}$
せん断応力	τ_b (5.4.1.3.2)式	$\tau_b \times \frac{A_b}{A'_b}$

*1：腐食を考慮しない場合の基礎ボルトの最大引張応力 σ_b および最大せん断応力 τ_b の算出方法は、添付資料(1)に記載されている式番号を記載。

原子炉浄化系補助熱交換器の基礎ボルトについては、減肉を考慮した耐震安全性評価に用いる地震力は、原子炉設置変更許可にて設定されている基準地震動 Ss (設計用条件 I) を用いて評価を実施した。原子炉浄化系補助熱交換器基礎ボルトの腐食を考慮した発生応力を算出した結果を表5に示す。

なお、計算式および地震力を除く寸法等の条件については添付資料(2)に示す耐震計算書と同様であり、表5における算出式、式番号および各記号の説明については、添付資料(2)と対応している。

表 5 原子炉浄化系補助熱交換器の基礎ボルトに生じる最大引張応力，最大せん断応力の算出方法

鉛直方向と長手方向地震が作用した場合					
算出	e	X n	F _b	σ _{b1}	τ _{b1}
算出式	$e = \frac{M}{P_s}$	$X_n^3 + 3 \cdot \left(e - \frac{a}{2}\right) \cdot X_n^2 - \frac{6 \cdot s \cdot A_b \cdot n_1}{b} \cdot \left(e + \frac{a}{2} - d_1\right) \cdot (a - d_1 - X_n) = 0$	$F_b = \frac{P_s \cdot \left(e - \frac{a}{2} + \frac{X_n}{3}\right)}{a - d_1 - \frac{X_n}{3}}$	$\sigma_{b1} = \frac{F_b}{n_1 \cdot A_b}$	$\tau_{b1} = \frac{F_{tb}}{n \cdot A_b} + \frac{M_{2b}}{n \cdot A_b \cdot \sqrt{\left(\frac{a - 2 \cdot d_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{b - 2 \cdot d_2}{2}\right)^2}}$
式番号	(4.6.1.3.1)	(4.6.1.3.3)	(4.6.1.3.4)	(4.6.1.3.5)	(4.6.1.3.7)
諸元および算出結果					
	e = -493.302390468223 = -493.302 [mm]	X n = 57.7529252747668 = 57.7529 [mm]	F _b = 84663.55379 = 84663.6 [N]	σ _{b1} = 143.2099382 = 143.210 [MPa]	τ _{b1} = 44.40884812 = 44.4089 [MPa]
鉛直方向と横方向地震が作用した場合					
算出	e	X n	F _b	σ _{b2}	τ _{b2}
算出式	$e = \frac{M_{c1}}{P_{s1}}$	$X_n^3 + 3 \cdot \left(e - \frac{b}{2}\right) \cdot X_n^2 - \frac{6 \cdot s \cdot A_b \cdot n_2}{a} \cdot \left(e + \frac{b}{2} - d_2\right) \cdot (b - d_2 - X_n) = 0$	$F_b = \frac{P_{s1} \cdot \left(e - \frac{b}{2} + \frac{X_n}{3}\right)}{b - d_2 - \frac{X_n}{3}}$	$\sigma_{b2} = \frac{F_b}{n_2 \cdot A_b}$	$\tau_{b2} = \frac{F_{cb}}{n \cdot A_b} + \frac{M_{3b}}{n \cdot A_b \cdot \sqrt{\left(\frac{a - 2 \cdot d_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{b - 2 \cdot d_2}{2}\right)^2}}$
式番号	(4.6.1.3.1)	(4.6.1.3.3)	(4.6.1.3.4)	(4.6.1.3.5)	(4.6.1.3.8)
諸元および算出結果					
	e = -1296.39339356599 = -1296.39 [mm]	X n = 121.726201856726 = 121.7262 [mm]	F _b = 98175.2044 = 98175.2 [N]	σ _{b2} = 166.0651405 = 166.066 [MPa]	τ _{b2} = 55.48992127 = 55.4900 [MPa]

表 4 および表 5 に従い、代表機器の基礎ボルトの腐食を考慮した引張応力、せん断応力の算出結果および算出過程を表 6 に示す。

表 6 基礎ボルトの腐食を考慮した引張応力、せん断応力

代表機器	地震の種類	応力分類	算出応力 (MPa)	算出過程
残留熱除去系熱交換器	Sd または 静的震度	引張	232	$\sigma_b \times \frac{A_b}{A'_b} = 226 \times \frac{(48 \div 2)^2 \times \pi}{\{(48 - 0.6) \div 2\}^2 \times \pi} = 231.7 \rightarrow 232 \text{MPa}$
		せん断	0	ラグの回転が拘束されており、基礎ボルトはせん断方向の応力が発生しない
	Ss	引張	436	$\sigma_b \times \frac{A_b}{A'_b} = 424 \times \frac{(48 \div 2)^2 \times \pi}{\{(48 - 0.6) \div 2\}^2 \times \pi} = 435.2 \rightarrow 436 \text{MPa}$
		せん断	0	ラグの回転が拘束されており、基礎ボルトはせん断方向の応力が発生しない
原子炉浄化系補助熱交換器	Ss	引張	166	$\sigma_b = \max(\sigma_{b1}, \sigma_{b2}) = 166 \text{MPa}$
		せん断	56	$\tau_b = \max(\tau_{b1}, \tau_{b2}) = 56 \text{MPa}$

3 許容応力の算出

3.1 残留熱除去系熱交換器

表 3 より、基礎ボルトの許容応力算定用基準値 F 、 F^* は以下の通りであり、DB 条件、SA 条件それぞれの許容応力状態での基準値をもとに許容引張応力 (f_{to})、許容せん断応力 (f_{sb}) および組合せを考慮した許容引張応力 (f_{ts}) を以下の(1)～(3)の算出式にて算出する。

【DB 条件】

<許容応力状態 III_{AS}>

$$F = \min[S_y, 0.7S_u]$$

$$= \min[730.7, 0.7 \times 868.3] = \min[730.7, 607.8] = 607 \text{MPa}$$

<許容応力状態 IV_{AS}>

$$F^* = \min[1.2S_y, 0.7S_u]$$

$$= \min[1.2 \times 730.7, 0.7 \times 868.3] = \min[876.8, 607.8] = 607 \text{MPa}$$

【SA 条件】

<許容応力状態 IV_{AS}>

$$F^* = \min[1.2S_y, 0.7S_u]$$

$$= \min[1.2 \times 659.4, 0.7 \times 847.0] = \min[791.2, 592.9] = 592 \text{MPa}$$

(1) 許容引張応力 (f_{to}) の算出

【DB 条件】

<許容応力状態 III_{AS}, IV_{AS}>

$$f_{to} = \frac{F}{2} \cdot 1.5 = \frac{607}{2} \times 1.5 = 455.2 \quad \doteq \quad 455 \text{ MPa}$$

【SA 条件】

<許容応力状態 IV_{AS}>

$$f_{to} = \frac{F^*}{2} \cdot 1.5 = \frac{592}{2} \times 1.5 = 444.0 \quad \doteq \quad 444 \text{ MPa}$$

(2) 許容せん断応力 (f_{sb}) の算出

【DB 条件】

<許容応力状態 III_{AS}, IV_{AS}>

$$f_{sb} = \frac{F}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5 = \frac{607}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \times 1.5 = 350.4 \quad \doteq \quad 350 \text{ MPa}$$

【SA 条件】

<許容応力状態 IV_{AS}>

$$f_{sb} = \frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5 = \frac{592}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \times 1.5 = 341.7 \quad \doteq \quad 341 \text{ MPa}$$

(3) 組合せを考慮した許容引張応力 (f_{ts}) の算出

$$\begin{aligned} \text{【DB 条件】 } f_{ts} &= \min[1.4 \times f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}] = \min[1.4 \times 455.2 - 1.6 \times 0, 455.2] \\ &= \min[637.28, 455.2] \\ &= 455 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{【SA 条件】 } f_{ts} &= \min[1.4 \times f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}] = \min[1.4 \times 444.0 - 1.6 \times 0, 444.0] \\ &= \min[621.6, 444.0] \\ &= 444 \text{ MPa} \end{aligned}$$

3.2 原子炉浄化系補助熱交換器

表 3 より、基礎ボルトの許容応力算定用基準値 F^* は以下の通りであり、許容応力状態 IV_{AS} の条件下での基準値をもとに許容引張応力 (f_{to})、許容せん断応力 (f_{sb}) および組合せを考慮した許容引張応力 (f_{ts}) を以下の(1)～(3)の算出式にて算出する。

なお、原子炉浄化系補助熱交換器は本来耐震 B クラス設備だが、地震時に本設備が損傷または転倒した場合に上位クラス施設である原子炉補機冷却系配管に対して波及的影響を及ぼすおそれがあることから、基準地震動 S_s による健全性評価を実施している。

<許容応力状態 IV_{AS}>

$$\begin{aligned} F^* &= \min[1.2S_y, 0.7S_u] \\ &= \min[1.2 \times 231.2, 0.7 \times 394.5] = \min[277.4, 276.1] = 276 \text{ MPa} \end{aligned}$$

(1) 許容引張応力 (f_{to}) の算出

$$f_{to} = \frac{F^*}{2} \cdot 1.5 = \frac{276}{2} \times 1.5 = 207.0 \cong 207 \text{ MPa}$$

(2) 許容せん断応力 (f_{sb}) の算出

$$f_{sb} = \frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5 = \frac{276}{1.5 \times \sqrt{3}} \times 1.5 = 159.3 \cong 159 \text{ MPa}$$

(3) 組合せを考慮した許容引張応力 (f_{ts}) の算出

$$\begin{aligned} f_{ts} &= \min[1.4 \times f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}] = \min[1.4 \times 207.0 - 1.6 \times 55.49, 207.0] \\ &= \min[201.0, 207.0] \\ &= 201 \text{ MPa} \end{aligned}$$

3. 評価結果

表7に代表機器の機器付基礎ボルトの腐食を考慮した耐震安全性評価結果を示す。算出結果より、いずれの代表機器も引張、せん断ともに発生応力は、許容応力以下であることを確認した。

表7 機器付基礎ボルトの腐食を考慮した耐震安全性評価結果

代表機器	周囲環境温度 (°C)	地震の 種類	応力 分類	算出応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
残留熱除去系 熱交換器	DB 条件 : 66	Sd または 静的震度	引張	232	455
			せん断	0	350
		Ss	引張	436	455
			せん断	0	350
	SA 条件 : 140	Ss	引張	436	444
			せん断	0	341
原子炉浄化系 補助熱交換器	DB 条件 : 50	Ss	引張	166	201 ^{*1}
			せん断	56	159

*1 : 組合せを考慮した許容引張応力 $f_{ts} = \min[1.4 \times f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}]$ により算出

4. 添付資料

- (1) VI-2-5-4-1-1_残留熱除去系熱交換器の耐震性についての計算書
- (2) VI-2-11-2-7-7_原子炉浄化系補助熱交換器の耐震性についての計算書

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添 2-005-06
提出年月日	2023年1月19日

VI-2-5-4-1-1 残留熱除去系熱交換器の耐震性についての計算書

S2 補 VI-2-5-4-1-1 R0

2023年1月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

目 次

1. 概要	1
2. 一般事項	1
2.1 構造計画	1
2.2 評価方針	4
2.3 適用規格・基準等	5
2.4 記号の説明	6
2.5 計算精度と数値の丸め方	13
3. 評価部位	13
4. 固有周期	14
4.1 固有周期の計算方法	14
4.2 固有周期の計算条件	22
4.3 固有周期の計算結果	22
5. 構造強度評価	22
5.1 構造強度評価方法	22
5.2 荷重の組合せ及び許容応力	22
5.3 設計用地震力	27
5.4 計算方法	28
5.5 計算条件	45
5.6 応力の評価	45
6. 評価結果	46
6.1 設計基準対象施設としての評価結果	46
6.2 重大事故等対処設備としての評価結果	47
7. 引用文献	47

1. 概要

本計算書は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定している構造強度の設計方針に基づき、残留熱除去系熱交換器が設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを説明するものである。

残留熱除去系熱交換器は、設計基準対象施設においてはSクラス施設に、重大事故等対処設備においては常設重大事故防止設備（設計基準拡張）に分類される。以下、設計基準対象施設及び重大事故等対処設備としての構造強度評価を示す。

2. 一般事項

2.1 構造計画

残留熱除去系熱交換器の構造計画を表 2-1 及び表 2-2 に示す。胴の水平方向の変位を拘束する下部サポートは、固有周期の計算及び構造強度評価において考慮しない。

表 2-1 構造計画 (その 1)

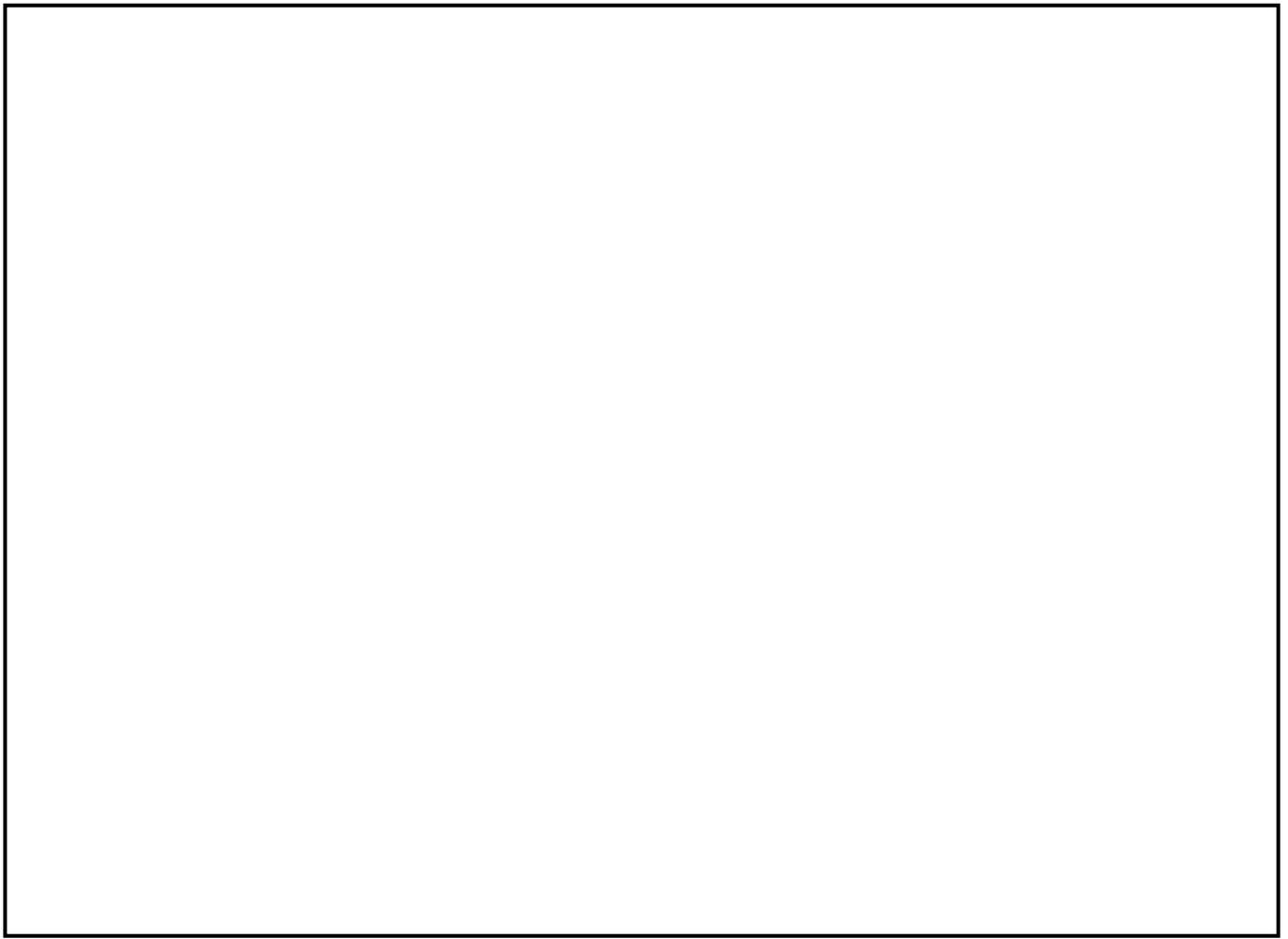
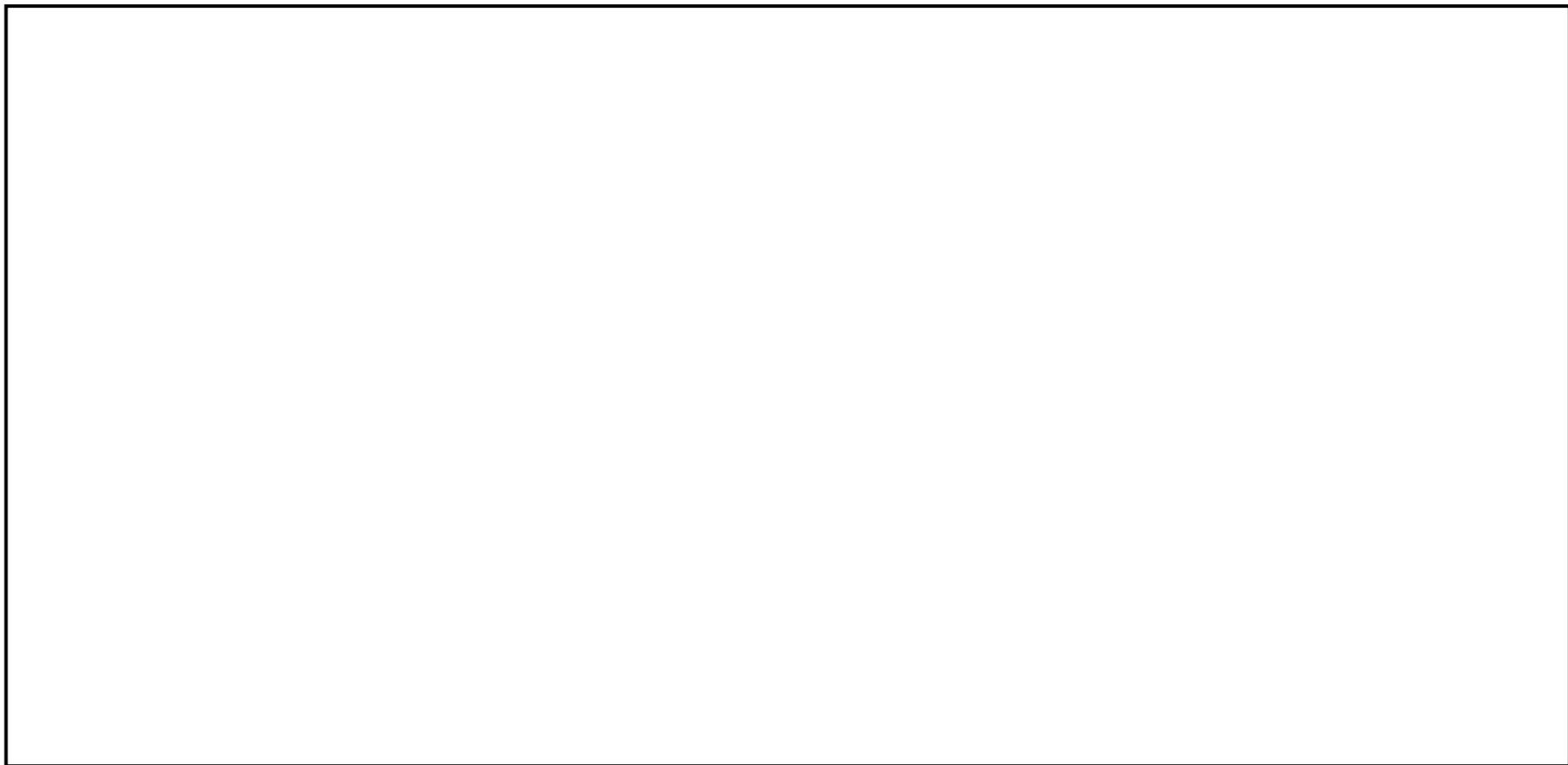
計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
<p> 胴は 4 個のラグで支持され、下部サポートにより水平方向の変位を拘束される。ラグは基礎ボルトで基礎に据え付けるとともに、ラグの回転を拘束する耐震補強サポートに支持される。耐震補強サポートは追設基礎ボルトで基礎に据え付ける。 </p>	<p> たて置 U 字管式 (ラグ支持たて置円筒形容器) </p>	

表 2-2 構造計画 (その 2)

概略構造図



2.2 評価方針

残留熱除去系熱交換器の応力評価は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定した荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界に基づき、「2.1 構造計画」にて示す残留熱除去系熱交換器の部位を踏まえ「3. 評価部位」にて設定する箇所において、「4. 固有周期」で算出した固有周期に基づく設計用地震力による応力等が許容限界内に収まることを、「5. 構造強度評価」にて示す方法にて確認することで実施する。確認結果を「6. 評価結果」に示す。

残留熱除去系熱交換器の耐震評価フローを図2-1に示す。

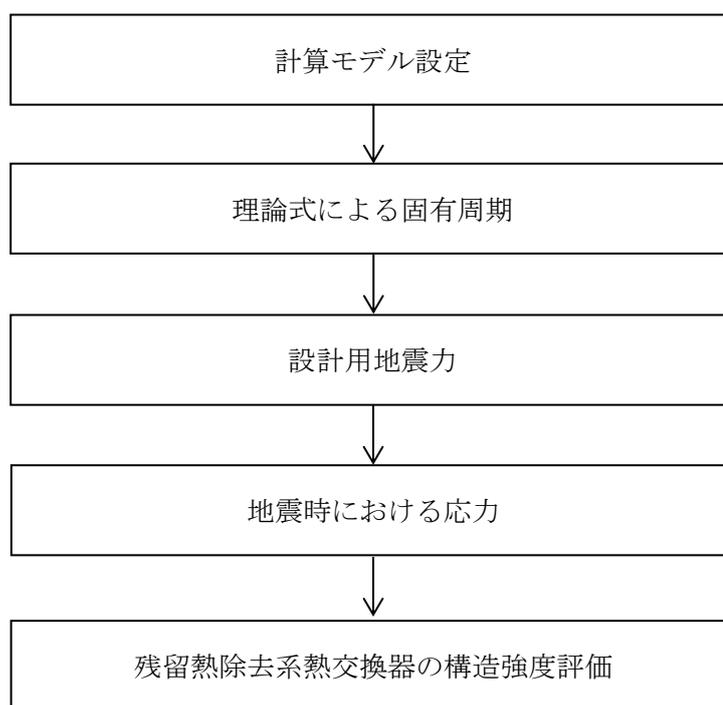


図2-1 残留熱除去系熱交換器の耐震評価フロー

2.3 適用規格・基準等

本評価において適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984
（（社）日本電気協会）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 （（社）日本電気協会）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版（（社）日本電気協会）
- ・発電用原子力設備規格 設計・建設規格（（社）日本機械学会，2005/2007）（以下「設計・建設規格」という。）

2.4 記号の説明

記号	記号の説明	単位
A	胴の断面積	mm ²
A _a	追設基礎ボルトの軸断面積	mm ²
A _b	基礎ボルトの軸断面積	mm ²
A _{b e}	基礎ボルトの有効断面積	mm ²
A _e	胴の有効せん断断面積	mm ²
A _{s 1}	鉛直方向荷重に対するラグのせん断断面積	mm ²
A _{s 2}	円周方向荷重に対するラグのせん断断面積	mm ²
a	ラグの半径方向端面から胴板の厚さの中心までの距離	mm
b	ラグの半径方向端面から基礎ボルト中心までの距離	mm
C ₁	ラグの胴付け根部のアタッチメントの幅の2分の1（胴の周方向）	mm
C ₂	ラグの胴付け根部のアタッチメントの幅の2分の1（胴の軸方向）	mm
C _H	水平方向設計震度	—
C _V	鉛直方向設計震度	—
C _{c j}	周方向モーメントによる応力の補正係数（引用文献(2)より得られる値）（j=1：周方向応力， j=2：軸方向応力）	—
C _i	静的震度	—
C _{ℓ j}	鉛直方向モーメントによる応力の補正係数（引用文献(2)より得られる値）（j=1：周方向応力， j=2：軸方向応力）	—
c	基礎端面から基礎ボルト中心までの距離	mm
D _i	胴の内径	mm
d	基礎ボルト中心間の距離	mm
E	胴の縦弾性係数	MPa
E _b	基礎ボルトの縦弾性係数	MPa
e	ラグ底板幅の2分の1	mm
F	設計・建設規格 SSB-3121.1(1)又はSSB-3131に定める値	MPa
F [*]	設計・建設規格 SSB-3121.3又はSSB-3133に定める値	MPa
F ₀	振動モデル系における水平力	N
F ₁	振動モデル系の上部重心における水平力	N
F ₂	振動モデル系の下部重心における水平力	N
F _{0 1}	運転時質量により基礎ボルトに作用する鉛直方向反力	N
F _{0 1D}	鉛直下向き地震力により基礎ボルトに作用する鉛直方向反力	N
F _{0 1U}	鉛直上向き地震力により基礎ボルトに作用する鉛直方向反力	N
F _{0 1V}	鉛直方向地震力により基礎ボルトに作用する鉛直方向反力	N
F _{0 2}	運転時質量により基礎端面に作用する鉛直方向反力	N
F _{0 2U}	鉛直上向き地震力により基礎端面に作用する鉛直方向反力	N
F _{1 1}	水平力F ₁ 及びF ₂ により第1ラグの基礎ボルトに作用する鉛直方向反力	N

記号	記号の説明	単位
F_{12}	水平力 F_1 及び F_2 により第1ラグの半径方向端面に作用する鉛直方向反力	N
F_{21}	水平力 F_1 及び F_2 による第3ラグの基礎ボルトに作用する鉛直方向反力	N
F_{22}	水平力 F_1 及び F_2 による第3ラグの半径方向端面に作用する鉛直方向反力	N
F_{31}, F_{32}	水平力 F_1 及び F_2 による第2ラグ及び第4ラグの基礎ボルトに作用する鉛直方向反力	N
F_a	耐震補強サポートの質量により作用する水平力	N
F_v	単位鉛直力	N
f_{sb}	せん断力のみを受ける基礎ボルトの許容せん断応力	MPa
f_{sba}	せん断力のみを受ける追設基礎ボルトの許容せん断応力	MPa
f_{tm}	ラグの許容引張応力	MPa
f_{to}	引張力のみを受ける基礎ボルトの許容引張応力	MPa
f_{ts}	引張力とせん断力を同時に受ける基礎ボルトの許容引張応力 (許容組合せ応力)	MPa
G	胴のせん断弾性係数	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s ²
H_1	ラグのアタッチメント中心より上部重心までの距離	mm
H_2	ラグのアタッチメント中心より下部重心までの距離	mm
I	胴の断面二次モーメント	mm ⁴
K_c	胴のラグ付け根部における周方向曲げモーメントに対する局部ばね定数 (引用文献(1)より得られる値)	—
K_ℓ	胴のラグ付け根部における長手方向曲げモーメントに対する局部ばね定数 (引用文献(1)より得られる値)	—
k_1	胴の中心軸の傾きに対するばね定数	N・mm/rad
k_2	胴の中心軸の水平移動に対するばね定数	N/mm
k_3	上部胴の曲げ及びせん断による変形ばね定数	N/mm
k_4	下部胴の曲げ及びせん断による変形ばね定数	N/mm
k_5	胴の鉛直方向変位に対するばね定数	N/mm
k_6	鉛直荷重による上部胴の伸び変形によるばね定数	N/mm
k_7	鉛直荷重による下部胴の伸び変形によるばね定数	N/mm
k_{cj}	引用文献(2)によるアタッチメントパラメータの周方向の補正係数 ($j=1$: 周方向応力, $j=2$: 軸方向応力)	—
$k_{\ell j}$	引用文献(2)によるアタッチメントパラメータの軸方向の補正係数 ($j=1$: 周方向応力, $j=2$: 軸方向応力)	—
L_b	基礎ボルトの有効長さ	mm
M_0	鉛直方向荷重による胴のラグ付け根部の鉛直方向モーメント	N・mm
M_1, M_2	水平力 F_1 及び F_2 による胴のラグ付け根部の鉛直方向モーメント	N・mm
M_3	水平力 F_1 及び F_2 による胴のラグ付け根部のねじりモーメント	N・mm

記号	記号の説明	単位
M_c	水平力 F_1 及び F_2 による胴のラグ付け根部の周方向モーメント	N・mm
M_ℓ	運転時質量による胴のラグ付け根部の鉛直方向モーメント	N・mm
$M_{\ell D}$	鉛直下向き地震力による胴のラグ付け根部の鉛直方向モーメント	N・mm
$M_{\ell U}$	鉛直上向き地震力による胴のラグ付け根部の鉛直方向モーメント	N・mm
$M_{\ell V}$	鉛直方向地震力による胴のラグ付け根部の鉛直方向モーメント	N・mm
M_x	胴に生じる軸方向の曲げモーメント	N・mm
M_ϕ	胴に生じる周方向の曲げモーメント	N・mm
m_a	耐震補強サポート1枚当たりの質量	kg
m_o	容器の運転時質量	kg
m_1	ラグのアタッチメント中心より上部の運転時質量	kg
m_2	ラグのアタッチメント中心より下部の運転時質量	kg
N_x	胴に生じる軸方向の膜力	N/mm
N_ϕ	胴に生じる周方向の膜力	N/mm
n	ラグ1個当たりの基礎ボルトの本数	—
n_a	耐震補強サポート1枚当たりの追設基礎ボルトの本数	—
P_r	最高使用圧力	MPa
Q	水平力 F_1 及び F_2 による胴のラグ付け根部の周方向荷重	N
R	運転時質量によるラグ付け根部の鉛直方向反力	N
R_o	鉛直方向荷重によるラグ付け根部の鉛直方向反力	N
R_1	水平力 F_1 及び F_2 によるラグ付け根部の鉛直方向反力	N
R_D	鉛直下向き地震力によるラグ付け根部の鉛直方向反力	N
R_U	鉛直上向き地震力によるラグ付け根部の鉛直方向反力	N
R_V	鉛直方向地震力によるラグ付け根部の鉛直方向反力	N
r_m	胴の平均半径	mm
S	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表5に定める値	MPa
S_a	胴の許容応力	MPa
S_u	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表9に定める値	MPa
S_y	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める値	MPa
$S_y(RT)$	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める材料の40°Cにおける値	MPa
T_H	2質点系振動の固有周期(水平方向)	s
T_{H1}	2質点系振動の1次固有周期(水平方向)	s
T_{H2}	2質点系振動の2次固有周期(水平方向)	s
T_V	2質点系振動の固有周期(鉛直方向)	s
t	胴の厚さ	mm
Z_{sl}	ラグの半径方向軸に対する断面係数	mm ³
Z_{sp}	ラグのねじり断面係数	mm ³
Z_{st}	ラグの周方向軸に対する断面係数	mm ³

記号	記号の説明	単位
$\beta, \beta_1,$ $\beta_2, \beta_c, \beta_l$	引用文献(1)又は(2)によるアタッチメントパラメータ	—
γ	引用文献(1)又は(2)によるシェルパラメータ	—
Δ_{x1}	水平力 F_1 及び F_2 による胴の中心軸の水平方向変位量	mm
Δ_{x2}	水平力 F_1 による上部胴の曲げ及びせん断変形による水平方向変位量	mm
Δ_{x3}	水平力 F_2 による下部胴の曲げ及びせん断変形による水平方向変位量	mm
δ_{11}	上部重心へ単位水平力をかけた場合の上部重心の水平方向変位量	mm
δ_{11V}	上部重心へ単位鉛直力をかけた場合の上部重心の鉛直方向変位量	mm
δ_{12}	上部重心へ単位水平力をかけた場合の下部重心の水平方向変位量	mm
δ_{12V}	上部重心へ単位鉛直力をかけた場合の下部重心の鉛直方向変位量	mm
δ_{21}	下部重心へ単位水平力をかけた場合の上部重心の水平方向変位量	mm
δ_{21V}	下部重心へ単位鉛直力をかけた場合の上部重心の鉛直方向変位量	mm
δ_{22}	下部重心へ単位水平力をかけた場合の下部重心の水平方向変位量	mm
δ_{22V}	下部重心へ単位鉛直力をかけた場合の下部重心の鉛直方向変位量	mm
ε	拘束係数 (ラグの回転を拘束する場合: 1, ラグの回転を拘束しない場合: 0)	—
θ	水平力 F_1 及び F_2 による胴の中心軸の傾き角	rad
θ_0	運転時質量による胴のラグ付け根部の局部傾き角	rad
θ_{0U}	鉛直上向き地震力による胴のラグ付け根部の局部傾き角	rad
θ_1	水平力 F_1 及び F_2 による胴の第1ラグ付け根部の局部傾き角	rad
θ_2	水平力 F_1 及び F_2 による胴の第3ラグ付け根部の局部傾き角	rad
θ_3	水平力 F_1 及び F_2 による第2ラグ及び第4ラグの周方向ねじれ角	rad
θ_{s0}	運転時質量によるラグの基礎に対する傾き角	rad
θ_{s0U}	鉛直上向き地震力によるラグの基礎に対する傾き角	rad
θ_{s1}	水平力 F_1 及び F_2 による第1ラグの基礎に対する傾き角	rad
θ_{s2}	水平力 F_1 及び F_2 による第3ラグの基礎に対する傾き角	rad
π	円周率	—
σ_0	胴の組合せ一次一般膜応力の最大値	MPa
$\sigma_{0\phi}$	胴の周方向一次一般膜応力	MPa
σ_{0x}	胴の軸方向一次一般膜応力	MPa
σ_1	胴の一次応力の最大値	MPa
$\sigma_{11} \sim \sigma_{16}$	水平方向地震力 (Z方向) 及び鉛直方向地震力が作用した場合の胴の組合せ一次応力	MPa

記号	記号の説明	単位
$\sigma_{17} \sim \sigma_{110}$	水平方向地震力（X方向）及び鉛直方向地震力が作用した場合の胴の組合せ一次応力	MPa
σ_2	地震力のみによる胴の組合せ一次応力と二次応力の和の変動値の最大値	MPa
$\sigma_{21} \sim \sigma_{26}$	水平方向地震力（Z方向）及び鉛直方向地震力が作用した場合の胴の組合せ一次+二次応力の変動値	MPa
$\sigma_{27} \sim \sigma_{210}$	水平方向地震力（X方向）及び鉛直方向地震力が作用した場合の胴の組合せ一次+二次応力の変動値	MPa
σ_b	基礎ボルトに生じる引張応力の最大値	MPa
$\sigma_{b1} \sim \sigma_{b3}$	水平方向地震力（Z方向）及び鉛直方向地震力により基礎ボルトに生じる引張応力	MPa
σ_{b4}, σ_{b5}	水平方向地震力（X方向）及び鉛直方向地震力により基礎ボルトに生じる引張応力	MPa
$\sigma_{1s} \sim \sigma_{3s}$	水平方向地震力（Z方向）及び鉛直方向地震力が作用した場合のラグの組合せ応力	MPa
σ_{4s}, σ_{5s}	水平方向地震力（X方向）及び鉛直方向地震力が作用した場合のラグの組合せ応力	MPa
σ_s	ラグの組合せ応力の最大値	MPa
σ_{s1}	運転時質量によるラグの曲げ応力	MPa
$\sigma_{s2} \sim \sigma_{s4}$	水平方向地震力（Z方向）によるラグの曲げ応力	MPa
σ_{s5}, σ_{s6}	水平方向地震力（X方向）によるラグの曲げ応力	MPa
σ_{s7}	鉛直方向地震力によるラグの曲げ応力	MPa
$\sigma_{xx1} \sim \sigma_{xx4}$	水平方向地震力（X方向）及び鉛直方向地震力が作用した場合の胴の軸方向一次応力の和	MPa
$\sigma_{xz1} \sim \sigma_{xz6}$	水平方向地震力（Z方向）及び鉛直方向地震力が作用した場合の胴の軸方向一次応力の和	MPa
$\sigma_{\phi x1} \sim \sigma_{\phi x4}$	水平方向地震力（X方向）及び鉛直方向地震力が作用した場合の胴の周方向一次応力の和	MPa
$\sigma_{\phi z1} \sim \sigma_{\phi z6}$	水平方向地震力（Z方向）及び鉛直方向地震力が作用した場合の胴の周方向一次応力の和	MPa
$\sigma_{2xx1} \sim \sigma_{2xx4}$	水平方向地震力（X方向）及び鉛直方向地震力が作用した場合の胴の軸方向一次応力+二次応力	MPa
$\sigma_{2xz1} \sim \sigma_{2xz6}$	水平方向地震力（Z方向）及び鉛直方向地震力が作用した場合の胴の軸方向一次応力+二次応力	MPa
$\sigma_{2\phi x1} \sim \sigma_{2\phi x4}$	水平方向地震力（X方向）及び鉛直方向地震力が作用した場合の胴の周方向一次応力+二次応力	MPa
$\sigma_{2\phi z1} \sim \sigma_{2\phi z6}$	水平方向地震力（Z方向）及び鉛直方向地震力が作用した場合の胴の周方向一次応力+二次応力	MPa
$\sigma_{\phi 1}, \sigma_{x1}$	内圧による胴の周方向及び軸方向応力	MPa
$\sigma_{\phi 2}$	静水頭に作用する鉛直方向地震力による胴の周方向応力	MPa
σ_{x2}	運転時質量による胴の軸方向応力	MPa
$\sigma_{\phi 3}, \sigma_{x3}$	運転時質量により生じる鉛直方向モーメントによる胴の周方向及び軸方向応力	MPa
σ_{x4}	水平方向地震力が作用した場合の転倒モーメントによる胴の軸方向応力	MPa

記号	記号の説明	単位
$\sigma_{\phi 5}, \sigma_{x 5}$	水平方向地震力（Z方向）が作用した場合の鉛直方向モーメントによる第1ラグ付け根部の胴の周方向及び軸方向一次応力	MPa
$\sigma_{2\phi 5}, \sigma_{2x 5}$	水平方向地震力（Z方向）が作用した場合の鉛直方向モーメントによる第1ラグ付け根部の胴の周方向及び軸方向二次応力	MPa
$\sigma_{\phi 6}, \sigma_{x 6}$	水平方向地震力（Z方向）が作用した場合の鉛直方向モーメントによる第3ラグ付け根部の胴の周方向及び軸方向一次応力	MPa
$\sigma_{2\phi 6}, \sigma_{2x 6}$	水平方向地震力（Z方向）が作用した場合の鉛直方向モーメントによる第3ラグ付け根部の胴の周方向及び軸方向二次応力	MPa
$\sigma_{\phi 7}, \sigma_{x 7}$	水平方向地震力（Z方向）が作用した場合の周方向モーメントによる第2及び第4ラグ付け根部の胴の周方向及び軸方向一次応力	MPa
$\sigma_{2\phi 7}, \sigma_{2x 7}$	水平方向地震力（Z方向）が作用した場合の周方向モーメントによる第2及び第4ラグ付け根部の胴の周方向及び軸方向二次応力	MPa
$\sigma_{\phi 8}, \sigma_{x 8}$	水平方向地震力（X方向）が作用した場合の鉛直方向モーメントによる第1及び第4ラグ付け根部の胴の周方向及び軸方向一次応力	MPa
$\sigma_{2\phi 8}, \sigma_{2x 8}$	水平方向地震力（X方向）が作用した場合の鉛直方向モーメントによる第1及び第4ラグ付け根部の胴の周方向及び軸方向二次応力	MPa
$\sigma_{\phi 9}, \sigma_{x 9}$	水平方向地震力（X方向）が作用した場合の鉛直方向モーメントによる第2及び第3ラグ付け根部の胴の周方向及び軸方向一次応力	MPa
$\sigma_{2\phi 9}, \sigma_{2x 9}$	水平方向地震力（X方向）が作用した場合の鉛直方向モーメントによる第2及び第3ラグ付け根部の胴の周方向及び軸方向二次応力	MPa
$\sigma_{\phi 10}, \sigma_{x 10}$	水平方向地震力（X方向）が作用した場合の周方向モーメントによるラグ付け根部の胴の周方向及び軸方向一次応力	MPa
$\sigma_{2\phi 10}, \sigma_{2x 10}$	水平方向地震力（X方向）が作用した場合の周方向モーメントによるラグ付け根部の周方向及び軸方向二次応力	MPa
$\sigma_{x 11}$	鉛直方向地震力による胴断面に生じる引張応力	MPa
$\sigma_{\phi 12D}, \sigma_{x 12D}$	鉛直下向き地震力により生じる鉛直方向モーメントによる胴の周方向及び軸方向の一次応力	MPa
$\sigma_{\phi 12U}, \sigma_{x 12U}$	鉛直上向き地震力により生じる鉛直方向モーメントによる胴の周方向及び軸方向の一次応力	MPa
$\sigma_{\phi 12}, \sigma_{x 12}$	鉛直方向地震力により生じる鉛直方向モーメントによる胴の周方向及び軸方向の一次応力	MPa
$\sigma_{2\phi 12D}, \sigma_{2x 12D}$	鉛直下向き地震力により生じる鉛直方向モーメントによる胴の周方向及び軸方向の二次応力	MPa
$\sigma_{2\phi 12U}, \sigma_{2x 12U}$	鉛直上向き地震力により生じる鉛直方向モーメントによる胴の周方向及び軸方向の二次応力	MPa
$\sigma_{2\phi 12}, \sigma_{2x 12}$	鉛直方向地震力により生じる鉛直方向モーメントによる胴の周方向及び軸方向の二次応力	MPa
τ_3	水平方向地震力（Z方向）により胴のラグ付け根部に生じるねじりモーメントによるせん断応力	MPa

記号	記号の説明	単位
τ_6	水平方向地震力（X方向）により胴のラグ付け根部に生じるねじりモーメントによるせん断応力	MPa
τ_a	追設基礎ボルトに生じるせん断応力の最大値	MPa
τ_b	基礎ボルトに生じるせん断応力の最大値	MPa
τ_{b2}	水平方向地震力（Z方向）及び鉛直方向地震力により基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa
τ_{b4}, τ_{b5}	水平方向地震力（X方向）及び鉛直方向地震力により基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa
τ_{c1}	水平方向地震力（Z方向）により胴のラグ付け根部に生じる周方向せん断応力	MPa
τ_{c4}	水平方向地震力（X方向）により胴のラグ付け根部に生じる周方向せん断応力	MPa
τ_{l1}	運転時質量により胴のラグ付け根部に生じる軸方向せん断応力	MPa
τ_{l2}	水平方向地震力（Z方向）により胴のラグ付け根部に生じる軸方向せん断応力	MPa
τ_{l5}	水平方向地震力（X方向）により胴のラグ付け根部に生じる軸方向せん断応力	MPa
τ_{l6D}	鉛直下向き地震力により胴のラグ付け根部に生じる軸方向せん断応力	MPa
τ_{l6U}	鉛直上向き地震力により胴のラグ付け根部に生じる軸方向せん断応力	MPa
τ_{l6}	鉛直方向地震力により胴のラグ付け根部に生じる軸方向せん断応力	MPa
τ_{s1}	運転時質量によるラグのせん断応力	MPa
$\tau_{s2} \sim \tau_{s4}$	水平方向地震力（Z方向）によるラグのせん断応力	MPa
$\tau_{s5} \sim \tau_{s6}$	水平方向地震力（X方向）によるラグのせん断応力	MPa
τ_{s7}	鉛直方向地震力によるラグのせん断応力	MPa
ω_H	水平方向振動系の角速度	rad/s
ω_V	鉛直方向振動系の角速度	rad/s

2.5 計算精度と数値の丸め方

精度は、有効数字6桁以上を確保する。

表示する数値の丸め方は表2-3に示すとおりである。

表2-3 表示する数値の丸め方

数値の種類	単位	処理桁	処理方法	表示桁
固有周期	s	小数点以下第4位	四捨五入	小数点以下第3位
震度	—	小数点以下第3位	切上げ	小数点以下第2位
最高使用圧力	MPa	—	—	小数点以下第2位
温度	℃	—	—	整数位
質量	kg	—	—	整数位
長さ	下記以外の長さ	mm	—	整数位 ^{*1}
	胴板の厚さ	mm	—	小数点以下第1位
面積	mm ²	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁 ^{*2}
モーメント	N・mm	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁 ^{*2}
力	N	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁 ^{*2}
角度	rad	小数点以下第4位	四捨五入	小数点以下第3位
縦弾性係数	MPa	有効数字4桁目	四捨五入	有効数字3桁
算出応力	MPa	小数点以下第1位	切上げ	整数位
許容応力 ^{*3}	MPa	小数点以下第1位	切捨て	整数位

注記*1：設計上定める値が小数点以下第1位の場合は、小数点以下第1位表示とする。

*2：絶対値が1000以上のときは、べき数表示とする。

*3：設計・建設規格 付録材料図表に記載された温度の中間における引張強さ及び降伏点は、比例法により補間した値の小数点以下第1位を切り捨て、整数位までの値とする。

3. 評価部位

残留熱除去系熱交換器の耐震評価は「5.1 構造強度評価方法」に示す条件に基づき、耐震評価上厳しくなる胴、ラグ、基礎ボルト及び追設基礎ボルトについて評価を実施する。残留熱除去系熱交換器の耐震評価部位については、表2-1及び表2-2の概略構造図に示す。

4. 固有周期

4.1 固有周期の計算方法

(1) 計算モデル

モデル化に当たっては次の条件で行う。

- a. 容器及び内容物の質量はラグの中心を基準にして、上部側、下部側に分け、それぞれの全質量が、それぞれの重心に集中するものとする。
- b. ラグの基礎への据え付けは、基礎ボルトで行っており、鉛直方向荷重に対しては、ラグと基礎との据え付け部でボルトの伸びを考慮する。
- c. ラグは、胴の半径方向にスライドすることから半径方向の荷重は受けもたない。
- d. 本機器は、ラグが外部サポートの支持により回転しない構造となっているため、ラグの回転を無視する。
- e. 水平方向は、胴をはりと考え、変形モードは胴の曲げ及びせん断変形を考慮する。
- f. 胴板とラグの付け根部において胴板の局部変形を考慮する。
- g. 耐震計算に用いる寸法は、公称値を使用する。

計算モデルを図4-1に示す。

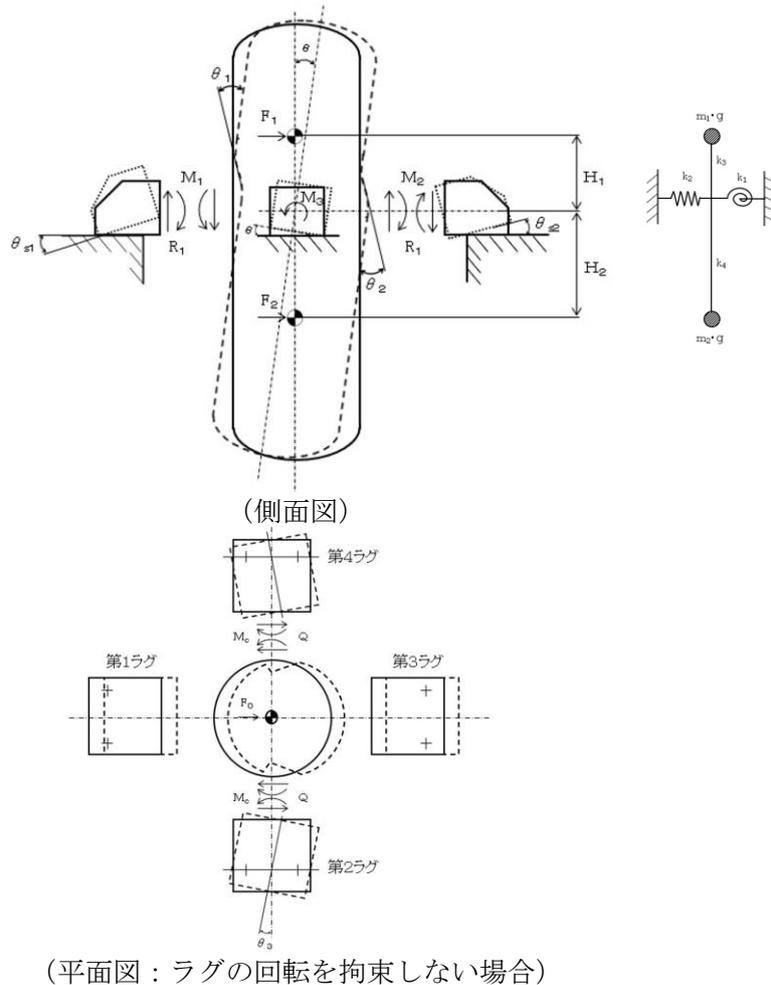


図4-1 水平方向変形モード及び計算モデル図

(2) 水平方向の固有周期

2 質点系振動の固有周期は次式で求める。

$$T_H = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_H} \dots\dots\dots (4.1.1)$$

水平方向振動系における角速度 ω_H は 2 質点系の自由振動の式より求める。

$$10^{-6} \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot (\delta_{11} \cdot \delta_{22} - \delta_{12} \cdot \delta_{21}) \cdot \omega_H^4 - 10^{-3} \cdot (\delta_{11} \cdot m_1 + \delta_{22} \cdot m_2) \cdot \omega_H^2 + 1 = 0 \dots\dots\dots (4.1.2)$$

ここで、(4.1.1) 式と (4.1.2) 式で求めた T_H のうち、大きい方の固有周期を T_{H1} 、小さい方の固有周期を T_{H2} とする。

δ_{11} 及び δ_{21} は容器上部重心の位置へ単位水平力をかけた場合の上部及び下部重心の水平変位量で、 δ_{12} 及び δ_{22} は容器下部重心の位置へ単位水平力をかけた場合の上部及び下部重心の水平変位量である。これらは、次式で表すことができる。

$$\delta_{11} = \frac{H_1^2}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} \dots\dots\dots (4.1.3)$$

$$\delta_{21} = \delta_{12} = \frac{1}{k_2} - \frac{H_1 \cdot H_2}{k_1} \dots\dots\dots (4.1.4)$$

$$\delta_{22} = \frac{H_2^2}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_4} \dots\dots\dots (4.1.5)$$

ばね定数 k_1 、 k_2 、 k_3 及び k_4 は次により求める。

a) ばね定数 k_1

胴の中心軸の傾きに対するばね定数 k_1 は、次式で表される。

$$k_1 = \frac{|F_1 \cdot H_1 - F_2 \cdot H_2|}{\theta} \dots\dots\dots (4.1.6)$$

ここで、 θ はラグ、基礎ボルト及び胴について、それぞれの荷重、モーメント及び変位量の釣合い条件の方程式を作ることにより、次のようにして求める。

a. 胴への荷重、モーメント及び胴の変位量の釣合い条件の方程式

水平力の釣合いより

$$F_0 = F_1 + F_2 = 2 \cdot Q \dots\dots\dots (4.1.7)$$

転倒モーメントの釣合いより

$$F_1 \cdot H_1 - F_2 \cdot H_2 - M_1 - M_2 + 2 \cdot M_3 - 2 \cdot R_1 \cdot r_m = 0 \dots\dots (4.1.8)$$

ここで、 r_m は次による。

$$r_m = \frac{D_i + t}{2} \dots\dots\dots (4.1.9)$$

転倒モーメントによる第1ラグ及び第3ラグの胴の付け根部の局部傾き角は、シェルパラメータ γ 及びアタッチメントパラメータ β によって、引用文献(1)の表より値を求めることにより、次のようにして求めることができる。

$$\gamma = \frac{r_m}{t} \dots\dots\dots (4.1.10)$$

$$\beta_1 = \frac{C_1}{r_m} \dots\dots\dots (4.1.11)$$

$$\beta_2 = \frac{C_2}{r_m} \dots\dots\dots (4.1.12)$$

$$\beta_\ell = k_\ell \cdot \sqrt[3]{\beta_1 \cdot \beta_2^2} \dots\dots\dots (4.1.13)$$

局部傾き角は次式で求められる。

$$\theta_1 = \frac{-M_1 \cdot K_\ell}{r_m^3 \cdot \beta_\ell^2 \cdot E} \dots\dots\dots (4.1.14)$$

$$\theta_2 = \frac{-M_2 \cdot K_\ell}{r_m^3 \cdot \beta_\ell^2 \cdot E} \dots\dots\dots (4.1.15)$$

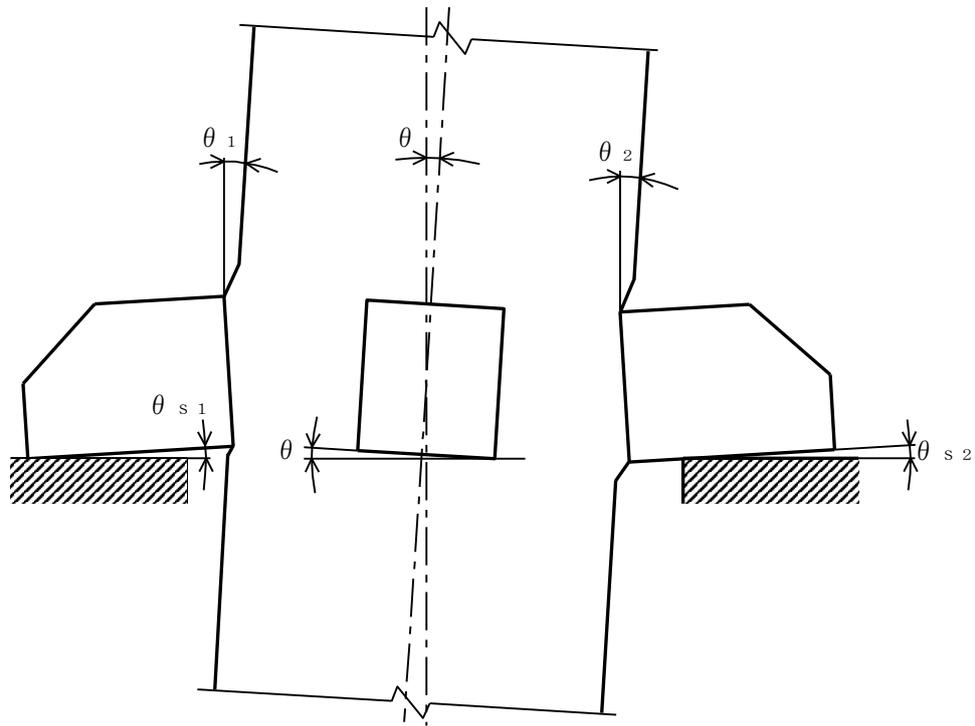


図4-2 転倒モーメントによる胴及びラグの傾き角

b. 第1ラグのモーメントと鉛直力の釣合い条件の方程式

モーメントの釣合いより

$$F_{12} \cdot (a-b-c) - F_{11} \cdot (a-b) + M_1 = 0 \quad \dots\dots\dots (4.1.16)$$

鉛直力の釣合いより

$$F_{12} - F_{11} + R_1 = 0 \quad \dots\dots\dots (4.1.17)$$

c. 第3ラグのモーメントと鉛直力の釣合い条件の方程式

モーメントの釣合いより

$$F_{21} \cdot (a-b) - F_{22} \cdot a + M_2 = 0 \quad \dots\dots\dots (4.1.18)$$

鉛直力の釣合いより

$$F_{22} - F_{21} - R_1 = 0 \quad \dots\dots\dots (4.1.19)$$

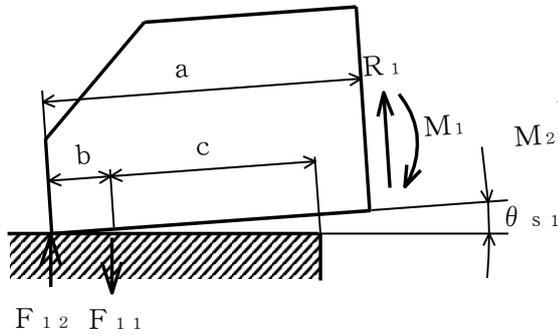


図4-3 第1ラグに作用するモーメントと力

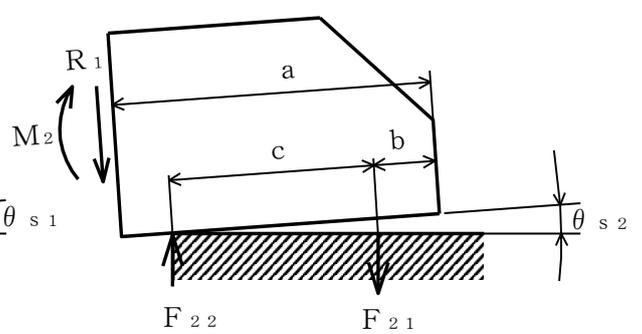


図4-4 第3ラグに作用するモーメントと力

d. 第2及び第4ラグのモーメント及び鉛直力の釣合い条件の方程式

モーメントの釣合いより

$$-F_{31} \cdot \frac{d}{2} + F_{32} \cdot \frac{d}{2} + (F_{31} + F_{32}) \cdot e + M_3 = 0 \quad \dots\dots\dots (4.1.20)$$

基礎ボルトの伸びと力の関係より

$$\frac{F_{31}}{e - \frac{d}{2}} = \frac{F_{32}}{e + \frac{d}{2}} \quad \dots\dots\dots (4.1.21)$$

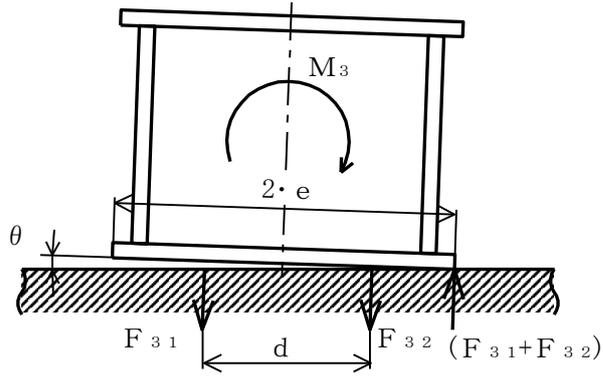


図4-5 第2ラグ及び第4ラグに作用するモーメントと力

ラグの基礎に対する傾き角は，ボルトの伸びと力の平衡条件より求められる。

第1ラグについて

$$\theta_{s1} = \frac{F_{11} \cdot L_b}{n \cdot A_{be} \cdot E_b \cdot c} \quad \dots \quad (4.1.22)$$

第3ラグについて

$$\theta_{s2} = \frac{F_{21} \cdot L_b}{n \cdot A_{be} \cdot E_b \cdot b} \quad \dots \quad (4.1.23)$$

第2及び第4ラグについて

$$\theta = \frac{F_{32} \cdot L_b}{A_{be} \cdot E_b \cdot \left(e + \frac{d}{2} \right)} \quad \dots \quad (4.1.24)$$

胴中心軸の傾き角 θ ，ラグ付け根部の局部傾き角 θ_1 及び θ_2 並びにラグの基礎に対する傾き角 θ_{s1} 及び θ_{s2} の間には次の関係が成立する。

$$\theta_{s1} - \theta_1 + \theta = 0 \quad \dots \quad (4.1.25)$$

$$\theta_{s2} - \theta_2 + \theta = 0 \quad \dots \quad (4.1.26)$$

$$(a - b - c) \cdot \theta_{s1} - 2r_m \cdot \theta + a \cdot \theta_{s2} = 0 \quad \dots \quad (4.1.27)$$

胴中心軸の傾き角 θ は以上の式を連立させて解くことにより求められる。

b) ばね定数 k_2

胴の水平方向移動に対するばね定数 k_2 は，次式で表される。

$$k_2 = \frac{F_0}{\Delta_{x1}} \quad \dots \quad (4.1.28)$$

胴の水平方向移動に対するばね定数 k_2 の逆数は，(4.1.31) 式～(4.1.33) 式より次式で表される。

$$\frac{1}{k_2} = \frac{Q}{F_0} \cdot \frac{(a-b)^2 \cdot K_c}{r_m^3 \cdot \beta_c^2 \cdot E} \cdot (1-\varepsilon) \quad \dots\dots\dots (4.1.29)$$

本機器は耐震補強サポートの支持によりラグが回転しない構造となっているため、拘束係数 $\varepsilon = 1$ とする。

したがって、

$$\frac{1}{k_2} = 0 \quad \dots\dots\dots (4.1.30)$$

となる。

ここで、 F_0 は (4.1.7) 式で求められる値を用い、 Δ_{x1} は

$$\Delta_{x1} = (a-b) \cdot \theta_3 \quad \dots\dots\dots (4.1.31)$$

θ_3 は (4.1.7) 式で求められる Q の値を用いることにより以下により求める。

第2ラグ及び第4ラグの曲げモーメントの釣合いより

$$M_c = Q \cdot (a-b) \cdot (1-\varepsilon) \quad \dots\dots\dots (4.1.32)$$

水平力による第2ラグ及び第4ラグの胴の付け根部の局部傾き角は、(4.1.14) 式の θ_1 又は (4.1.15) 式の θ_2 と同様にして、シェルパラメータ γ 及びアタッチメントパラメータ β によって、引用文献(2)の表より値を求めることにより、次式で求められる。

$$\theta_3 = \frac{M_c \cdot K_c}{r_m^3 \cdot \beta_c^2 \cdot E} \quad \dots\dots\dots (4.1.33)$$

ここで、 β_c は次による。

$$\beta_c = k_c \cdot \sqrt[3]{\beta_1^2 \cdot \beta_2} \quad \dots\dots\dots (4.1.34)$$

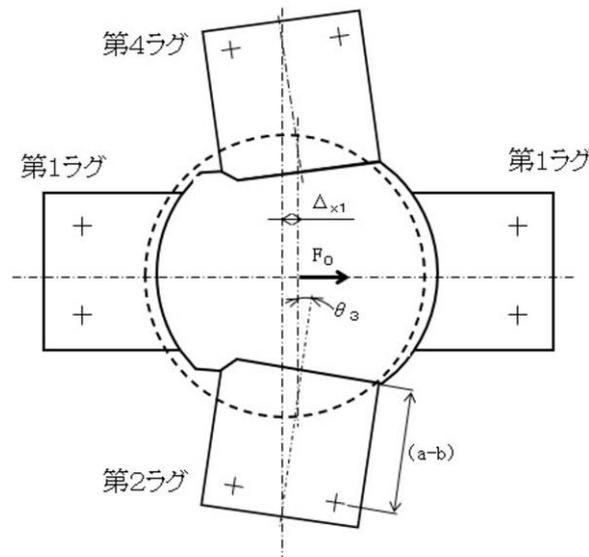


図4-6 水平力による胴中心軸の変位量
(ラグの回転を拘束しない場合)

c) ばね定数 k_3

水平力による上部胴の曲げ及びせん断による変形ばね定数 k_3 は、次式で表される。

$$k_3 = \frac{F_1}{\Delta_{x2}} \quad \dots\dots\dots (4.1.35)$$

ここで、 Δ_{x2} は

$$\Delta_{x2} = \frac{F_1 \cdot H_1^3}{3 \cdot E \cdot I} + \frac{F_1 \cdot H_1}{G \cdot A_e} \quad \dots\dots\dots (4.1.36)$$

胴の断面二次モーメント及び有効せん断断面積は、それぞれ次のように表される。

$$I = \frac{\pi}{8} \cdot (D_i + t)^3 \cdot t \quad \dots\dots\dots (4.1.37)$$

$$A_e = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot (D_i + t) \cdot t \quad \dots\dots\dots (4.1.38)$$

d) ばね定数 k_4

水平力による下部胴の曲げ及びせん断による変形ばね定数 k_4 は、次式で表される。

$$k_4 = \frac{F_2}{\Delta_{x3}} \quad \dots\dots\dots (4.1.39)$$

ここで、 Δ_{x3} は以下による。

$$\Delta_{x3} = \frac{F_2 \cdot H_2^3}{3 \cdot E \cdot I} + \frac{F_2 \cdot H_2}{G \cdot A_e} \quad \dots\dots\dots (4.1.40)$$

(3) 鉛直方向の固有周期

2質点系振動の固有周期は次式で求める。

$$T_V = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_V} \quad \dots\dots\dots (4.1.41)$$

$$10^{-6} \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot (\delta_{11V} \cdot \delta_{22V} - \delta_{12V} \cdot \delta_{21V}) \cdot \omega_V^4 - 10^{-3} \cdot (\delta_{11V} \cdot m_1 + \delta_{22V} \cdot m_2) \cdot \omega_V^2 + 1 = 0 \quad \dots\dots\dots (4.1.42)$$

ここで、 δ_{11V} 及び δ_{21V} は容器上部重心の位置へ単位鉛直力をかけた場合の上部及び下部重心の鉛直変位量で、 δ_{12V} 及び δ_{22V} は容器下部重心の位置へ単位鉛直力をかけた場合の上部及び下部重心の鉛直変位量である。これらは、次式で表すことができる。

$$\delta_{11V} = \frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_6} \quad \dots\dots\dots (4.1.43)$$

$$\delta_{21V} = \delta_{12V} = \frac{1}{k_5} \quad \dots\dots\dots (4.1.44)$$

$$\delta_{22V} = \frac{1}{k_5} - \frac{1}{k_7} \quad \dots\dots\dots (4.1.45)$$

a) ばね定数 k_5

鉛直方向変位に対するばね定数 k_5 は、鉛直方向の力の釣合いより

$$4 \cdot R_0 - F_V = 0 \quad \dots\dots\dots (4.1.46)$$

ラグについて、モーメントと力の平衡条件より

$$(a-b-c) \cdot F_{02} - (a-b) \cdot F_{01} - M_0 = 0 \quad \dots\dots\dots (4.1.47)$$

$$F_{02} - F_{01} - R_0 = 0 \quad \dots\dots\dots (4.1.48)$$

ラグ付け根部の局部傾き及びラグの基礎に対する傾き角は次式で表すことができる。

$$\theta_0 = \frac{M_0 \cdot K_\ell}{r_m^2 \cdot \beta_\ell^2 \cdot E} \quad \dots\dots\dots (4.1.49)$$

$$\theta_{s0} = \frac{F_{01} \cdot L_b}{n \cdot A_{be} \cdot E_b \cdot c} \quad \dots\dots\dots (4.1.50)$$

ラグ付け根部の局部傾きとラグの基礎に対する傾き角は等しいから

$$\theta_0 = \theta_{s0} \quad \dots\dots\dots (4.1.51)$$

以上の式を連立させて解くことより θ_{s0} が得られる。したがって、鉛直方向変位に対するばね定数 k_5 は、次式により与えられる。

$$k_5 = \frac{F_V}{(a-b-c) \cdot \theta_{s0}} \quad \dots\dots\dots (4.1.52)$$

b) ばね定数 k_6

鉛直荷重による上部胴の伸び変形によるばね定数 k_6 は、次式により与えられる。

$$\frac{1}{k_6} = \frac{H_1}{A \cdot E} \quad \dots\dots\dots (4.1.53)$$

ここで、胴の断面積は次のように表される。

$$A = \pi \cdot (D_i + t) \cdot t \quad \dots\dots\dots (4.1.54)$$

c) ばね定数 k_7

鉛直荷重による下部胴の伸び変形によるばね定数 k_7 は、次式により与えられる。

$$\frac{1}{k_7} = \frac{H_2}{A \cdot E} \quad \dots\dots\dots (4.1.55)$$

4.2 固有周期の計算条件

固有周期の計算に用いる計算条件は、本計算書の【残留熱除去系熱交換器の耐震性についての計算結果】の機器要目に示す。

4.3 固有周期の計算結果

固有周期の計算結果を表 4-1 に示す。固有周期は、0.05 秒を超えており、柔構造であることを確認した。また、鉛直方向は 2 次モード以降で卓越し、固有周期は 0.05 秒以下であることを確認した。

表 4-1 固有周期 (単位: s)

水平方向(1次)	
水平方向(2次)	
鉛直方向	

5. 構造強度評価

5.1 構造強度評価方法

4.1(1)項a.～c.のほか、次の条件で計算する。

- (1) 地震力は、容器に対して水平方向及び鉛直方向から個別に作用するものとし、原則として強度評価において組み合わせる。なお、基礎ボルト及び追設基礎ボルトは、作用する荷重の算出において組み合わせる。
- (2) 水平方向及び鉛直方向の動的地震力による荷重の組合せには、S R S S法を用いる。

5.2 荷重の組合せ及び許容応力

5.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態

残留熱除去系熱交換器の荷重の組合せ及び許容応力状態のうち設計基準対象施設の評価に用いるものを表 5-1 に、重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 5-2 に示す。

5.2.2 許容応力

残留熱除去系熱交換器の許容応力は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき表 5-3 及び表 5-4 に示す。

5.2.3 使用材料の許容応力評価条件

残留熱除去系熱交換器の使用材料の許容応力評価条件のうち設計基準対象施設の評価に用いるものを表 5-5 に、重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 5-6 に示す。

表 5-1 荷重の組合せ及び許容応力状態（設計基準対象施設）

施設区分		機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉冷却 系統施設	残留熱除去 設備	残留熱除去系 熱交換器	S	クラス 2 容器*	$D + P_D + M_D + S_d^*$	ⅢA S
					$D + P_D + M_D + S_s$	ⅣA S

注記*：クラス 2 容器の支持構造物を含む。

表 5-2 荷重の組合せ及び許容応力状態（重大事故等対処設備）

施設区分		機器名称	設備分類* ¹	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉冷却 系統施設	残留熱除去 設備	残留熱除去系 熱交換器	常設／防止 (DB 拡張)	重大事故等* ² クラス 2 容器	$D + P_D + M_D + S_s^{*3}$	ⅣA S
					$D + P_{SAD} + M_{SAD} + S_s$	V _A S (V _A S として ⅣA S の許容限界を 用いる。)

注記*¹：「常設／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備を示す。

*²：重大事故等クラス 2 容器の支持構造物を含む。

*³：「 $D + P_{SAD} + M_{SAD} + S_s$ 」の評価に包絡されるため、評価結果の記載を省略する。

表5-3 許容応力 (クラス2, 3容器及び重大事故等クラス2容器)

許容応力状態	許容限界*1			
	一次一般膜応力	一次膜応力+ 一次曲げ応力	一次+二次応力	一次+二次+ ピーク応力
III _A S	S _y と0.6・S _u の小さい方。 ただし、オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については上記値と1.2・Sのうち大きい方とする。	左欄の1.5倍の値	*2 弾性設計用地震動S _d 又は基準地震動S _s のみによる疲労解析を行い、疲労累積係数が1.0以下であること。 ただし、地震動のみによる一次+二次応力の変動値が2・S _y 以下であれば疲労解析は不要。	
IV _A S				
V _A S (V _A SとしてIV _A Sの許容限界を用いる。)	0.6・S _u	左欄の1.5倍の値	*2 基準地震動S _s のみによる疲労解析を行い、疲労累積係数が1.0以下であること。 ただし、地震動のみによる一次+二次応力の変動値が2・S _y 以下であれば疲労解析は不要。	

注記*1：当該の応力が生じない場合，規格基準で省略可能とされている場合及び他の応力で代表可能である場合は評価を省略する。

*2：2・S_yを超えるときは弾塑性解析を行う。この場合，設計・建設規格 PVB-3300 (PVB-3313を除く。S_mは2/3・S_yと読み替える。)の簡易弾塑性解析を用いる。

表5-4 許容応力（クラス2，3支持構造物及び重大事故等クラス2支持構造物）

許容応力状態	許容限界 ^{*1, *2} (ボルト等以外)		許容限界 ^{*1, *2} (ボルト等)	
	一次応力		一次応力	
	組合せ		引張	せん断
Ⅲ _A S	$1.5 \cdot f_t$		$1.5 \cdot f_t$	$1.5 \cdot f_s$
Ⅳ _A S	$1.5 \cdot f_t^*$		$1.5 \cdot f_t^*$	
V _A S (V _A SとしてⅣ _A Sの許容限界を用いる)				

注記*1：応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対しても評価を行う。

*2：当該の応力が生じない場合，規格基準で省略可能とされている場合及び他の応力で代表可能である場合は評価を省略する。

表 5-5 使用材料の許容応力 (設計基準対象施設)

評価部材	材料	温度条件 (°C)		S (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (RT) (MPa)
		最高使用温度					
胴板	SGV49* ¹	最高使用温度	85	—	242	441	—
ラグ	SM41A* ² (40mm<厚さ≤75mm)	最高使用温度	85	—	199	377	—
基礎ボルト	SCM435 (径≤60mm)	周囲環境温度	66	—	730	868	—
追設基礎 ボルト	SCM435 (径≤60mm)	周囲環境温度	66	—	730	868	—

注記*1 : SGV480 相当

*2 : SM400A 相当

表 5-6 使用材料の許容応力 (重大事故等対処設備)

評価部材	材料	温度条件 (°C)		S (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (RT) (MPa)
		最高使用温度					
胴板	SGV49* ¹	最高使用温度	140	—	233	425	—
ラグ	SM41A* ² (40mm<厚さ≤75mm)	最高使用温度	140	—	183	373	—
基礎ボルト	SCM435 (径≤60mm)	周囲環境温度	140	—	659	847	—
追設基礎 ボルト	SCM435 (径≤60mm)	周囲環境温度	140	—	659	847	—

注記*1 : SGV480 相当

*2 : SM400A 相当

5.3 設計用地震力

評価に用いる設計用地震力を表 5-7 及び表 5-8 に示す。

「弾性設計用地震動 S d 又は静的震度」及び「基準地震動 S s」による地震力は、VI-2-1-7「設計用床応答スペクトルの作成方針」に基づき設定する。また、減衰定数はVI-2-1-6「地震応答解析の基本方針」に記載の減衰定数を用いる。

表 5-7 設計用地震力（設計基準対象施設）

据付場所及び床面高さ (m)		原子炉建物 EL 23.8* ¹					
固有周期 (s)		[]					
減衰定数 (%)		水平：1.0 鉛直：—					
地震力		弾性設計用地震動 S d 又は静的震度			基準地震動 S s		
モード* ³	固有周期 (s)	応答水平震度* ⁴		応答鉛直震度* ⁴	応答水平震度* ⁵		応答鉛直震度* ⁵
		NS方向	EW方向		NS方向	EW方向	
1次	[]	3.02	2.56	—	5.85	5.16	—
動的震度* ⁶ , * ⁷		1.10	1.19	1.10	1.73	1.71	2.07
静的震度* ⁸		0.75	0.76	0.29	—	—	—

注記*1：基準床レベルを示す。

*2：1次固有周期について記載

*3：固有周期が0.050s以上のモードを示す。なお、0.020s以上0.050s未満のモードに対しては、最大応答加速度又はこれを上回る震度を適用する。

*4：設計用床応答スペクトルⅡ（弾性設計用地震動 S d）より得られる震度

*5：設計用床応答スペクトルⅡ（基準地震動 S s）より得られる震度

*6：設計用震度Ⅱ（弾性設計用地震動 S d）及び設計用震度Ⅱ（基準地震動 S s）

*7：最大応答加速度を1.2倍した震度

*8： $3.6 \cdot C_i$ 及び $1.2 \cdot C_v$ より定めた震度

表 5-8 設計用地震力（重大事故等対処設備）

据付場所及び床面高さ (m)		原子炉建物 EL 23.8*1					
固有周期 (s)		[]					
減衰定数 (%)		水平：1.0 鉛直：—					
地震力		弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度			基準地震動 S _s		
モード*3	固有周期 (s)	応答水平震度		応答鉛直震度	応答水平震度*4		応答鉛直震度*4
		NS方向	EW方向		NS方向	EW方向	
1次	[]	—	—	—	5.85	5.16	—
動的震度*5, *6		—	—	—	1.73	1.71	2.07
静的震度		—	—	—	—	—	—

注記*1：基準床レベルを示す。

*2：1次固有周期について記載

*3：固有周期が0.050s以上のモードを示す。なお、0.020s以上0.050s未満のモードに対しては、最大応答加速度又はこれを上回る震度を適用する。

*4：設計用床応答スペクトルⅡ（基準地震動S_s）より得られる震度

*5：設計用震度Ⅱ（基準地震動S_s）

*6：最大応答加速度を1.2倍した震度

5.4 計算方法

5.4.1 応力の計算方法

5.4.1.1 胴の応力

(1) 内圧による応力

$$\sigma_{\phi 1} = \frac{P_r \cdot (D_i + 1.2 \cdot t)}{2 \cdot t} \dots\dots\dots (5.4.1.1.1)$$

$$\sigma_{\phi 2} = 0 \dots\dots\dots (5.4.1.1.2)$$

$$\sigma_{x 1} = \frac{P_r \cdot (D_i + 1.2 \cdot t)}{4 \cdot t} \dots\dots\dots (5.4.1.1.3)$$

(2) 運転時質量による応力

$$\sigma_{x 2} = \frac{m_o \cdot g}{\pi \cdot (D_i + t) \cdot t} \dots\dots\dots (5.4.1.1.4)$$

(3) 鉛直方向地震力により胴断面に生じる引張応力

$$\sigma_{x 11} = \frac{m_o \cdot g \cdot C_v}{\pi \cdot (D_i + t) \cdot t} \dots\dots\dots (5.4.1.1.5)$$

(4) 運転時質量による胴のラグ付け根部の応力

運転時質量 m_0 による鉛直方向の力の平衡条件より

$$4 \cdot R - m_0 \cdot g = 0 \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.6)$$

上式を変形して

$$R = \frac{m_0 \cdot g}{4} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.7)$$

また、ラグについて図5-1のように傾いたとき、モーメントと力の平衡条件より

$$F_{02} \cdot (a - b - c) - F_{01} \cdot (a - b) - M_\ell = 0 \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.8)$$

$$F_{02} - F_{01} - R = 0 \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.9)$$

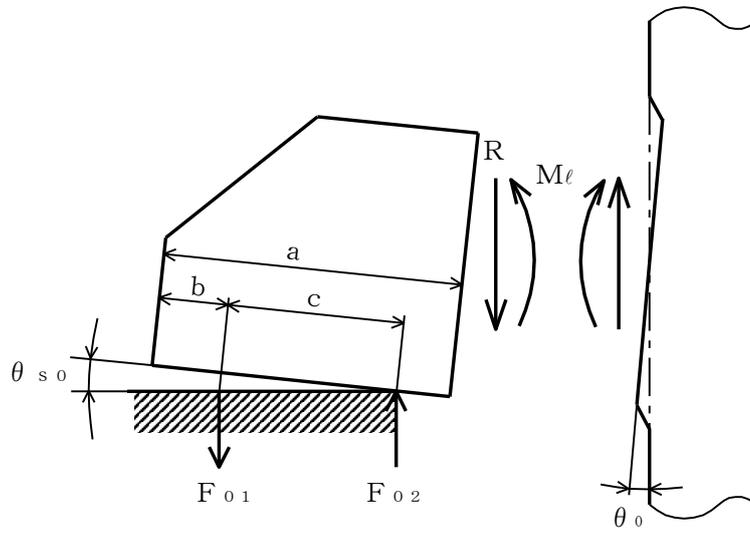


図5-1 鉛直荷重により胴及びラグに作用するモーメントと力

(5.4.1.1.8) 式へ (5.4.1.1.9) 式を代入して

$$F_{01} = \frac{R \cdot (a - b - c) - M_\ell}{c} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.10)$$

運転時質量によるラグの付け根部の傾き角 θ_0 は次式で求める。

$$\theta_0 = \frac{M_\ell \cdot K_\ell}{r_m^3 \cdot \beta_\ell^2 \cdot E} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.11)$$

運転時質量によるラグの基礎に対する傾き角 θ_{s0} は次式で求める。

$$\theta_{s0} = \frac{F_{01} \cdot L_b}{n \cdot A_{be} \cdot E_b \cdot c} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.12)$$

ここで、ラグ付け根部の局部傾き角 θ_0 とラグの傾き角 θ_{s0} は等しいから

$$\theta_0 = \theta_{s0} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.13)$$

以上の式を連立させて解くことにより、次式が求まる。

$$M_{\ell} = \frac{R \cdot (a - b - c)}{1 + \frac{n \cdot A_{be} \cdot E_b \cdot K_{\ell} \cdot c^2}{r_{m^3} \cdot \beta_{\ell}^2 \cdot E \cdot L_b}} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.14)$$

運転時質量による鉛直方向曲げモーメント M_{ℓ} により生じる胴の周方向応力及び軸方向応力は、パラメータ γ 及びアタッチメントパラメータ β によって、引用文献(2)の表より値を求める(以下、*を付記する)ことにより、次式で求めることができる。

$$\sigma_{\phi 3} = \left\{ \frac{N_{\phi}}{M_{\ell} / (r_{m^2} \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{M_{\ell}}{r_{m^2} \cdot t \cdot \beta_{\ell}} \right) \cdot C_{\ell 1} \quad \dots\dots (5.4.1.1.15)$$

$$\sigma_{x 3} = \left\{ \frac{N_x}{M_{\ell} / (r_{m^2} \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{M_{\ell}}{r_{m^2} \cdot t \cdot \beta_{\ell}} \right) \cdot C_{\ell 2} \quad \dots\dots (5.4.1.1.16)$$

ここで、アタッチメントパラメータ β_{ℓ} は次式で表される。

$$\beta_{\ell} = \sqrt[3]{\beta_1 \cdot \beta_2^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.17)$$

反力 R によるせん断応力は

$$\tau_{\ell 1} = \frac{R}{4 \cdot C_2 \cdot t} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.18)$$

(5) 鉛直方向地震力による胴のラグ付け根部の応力

鉛直方向地震力による胴のラグ付け根部の応力は、下記 (a) 項及び (b) 項より得られる

$\sigma_{\phi 1 2 D}$, $\sigma_{\phi 1 2 U}$, $\sigma_{x 1 2 D}$, $\sigma_{x 1 2 U}$, $\sigma_{2 \phi 1 2 D}$, $\sigma_{2 \phi 1 2 U}$, $\sigma_{2 x 1 2 D}$, $\sigma_{2 x 1 2 U}$, $\tau_{\ell 6 D}$, $\tau_{\ell 6 U}$ を用いて下記のように求める。

一次応力

$$\sigma_{\phi 1 2} = \text{Max} \left[\left| \sigma_{\phi 1 2 D} \right|, \left| \sigma_{\phi 1 2 U} \right| \right] \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.19)$$

$$\sigma_{x 1 2} = \text{Max} \left[\left| \sigma_{x 1 2 D} \right|, \left| \sigma_{x 1 2 U} \right| \right] \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.20)$$

二次応力

$$\sigma_{2 \phi 1 2} = \text{Max} \left[\left| \sigma_{2 \phi 1 2 D} \right|, \left| \sigma_{2 \phi 1 2 U} \right| \right] \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.21)$$

$$\sigma_{2 x 1 2} = \text{Max} \left[\left| \sigma_{2 x 1 2 D} \right|, \left| \sigma_{2 x 1 2 U} \right| \right] \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.22)$$

反力によるせん断応力

$$\tau_{\ell 6} = \text{Max} \left[\tau_{\ell 6 D}, \tau_{\ell 6 U} \right] \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.23)$$

(a) 鉛直下向き地震力による胴のラグ付け根部の応力

鉛直下向き地震荷重により生じる応力は5.4.1.1(4)で与えられた連立方程式において、 $m_0 \cdot g$ を $m_0 \cdot g \cdot C_v$ に置き換えて解くことにより求められる。

$$R_D = \frac{m_0 \cdot g \cdot C_v}{4} \dots\dots\dots (5.4.1.1.24)$$

$$M_{\ell D} = \frac{R_D \cdot (a - b - c)}{1 + \frac{n \cdot A_{be} \cdot E_b \cdot K_{\ell} \cdot c^2}{r_m^3 \cdot \beta_{\ell}^2 \cdot E \cdot L_b}} \dots\dots\dots (5.4.1.1.25)$$

$$F_{01D} = \frac{R_D \cdot (a - b - c) - M_{\ell D}}{c} \dots\dots\dots (5.4.1.1.26)$$

鉛直方向地震力による鉛直方向曲げモーメント $M_{\ell D}$ により生じる周方向応力及び軸方向応力はシェルパラメータ γ 及びアタッチメントパラメータ β_{ℓ} によって引用文献(2)の表より値を求める(以下、*を付記する)ことにより、次式で求める。

一次応力

$$\sigma_{\phi 12D} = \left\{ \frac{N_{\phi}}{M_{\ell D} / (r_m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{M_{\ell D}}{r_m^2 \cdot \beta_{\ell} \cdot t} \right) \cdot C_{\ell 1} \dots (5.4.1.1.27)$$

$$\sigma_{x 12D} = \left\{ \frac{N_x}{M_{\ell D} / (r_m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{M_{\ell D}}{r_m^2 \cdot \beta_{\ell} \cdot t} \right) \cdot C_{\ell 2} \dots (5.4.1.1.28)$$

二次応力

$$\sigma_{2\phi 12D} = \left\{ \frac{N_{\phi}}{M_{\ell D} / (r_m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6M_{\ell D}}{r_m \cdot \beta_{\ell} \cdot t^2} \right) \dots\dots\dots (5.4.1.1.29)$$

$$\sigma_{2x 12D} = \left\{ \frac{N_x}{M_{\ell D} / (r_m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6M_{\ell D}}{r_m \cdot \beta_{\ell} \cdot t^2} \right) \dots\dots\dots (5.4.1.1.30)$$

ここで、アタッチメントパラメータ β_{ℓ} は次式で表される。ただし、二次応力を求める場合は更に k_{ℓ} を乗じた値とする。

$$\beta_{\ell} = \sqrt[3]{\beta_1 \cdot \beta_2^2} \dots\dots\dots (5.4.1.1.31)$$

反力 R_D によるせん断応力は次式で表される。

$$\tau_{\ell 6D} = \frac{R_D}{4 \cdot C_2 \cdot t} \dots\dots\dots (5.4.1.1.32)$$

(b) 鉛直上向き地震力による胴のラグ付け根部の応力

鉛直上向き地震力 $(C_V - 1) \cdot m_0 \cdot g$ による鉛直方向の力の平衡条件より

$$4 \cdot R_U - (C_V - 1) \cdot m_0 \cdot g = 0 \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.33)$$

また、ラグについて図5-2のように傾いたとき、モーメントと力の平衡条件より

$$F_{02U} \cdot a - F_{01U} \cdot (a - b) + M_{\ell U} = 0 \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.34)$$

$$F_{02U} - F_{01U} + R_U = 0 \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.35)$$

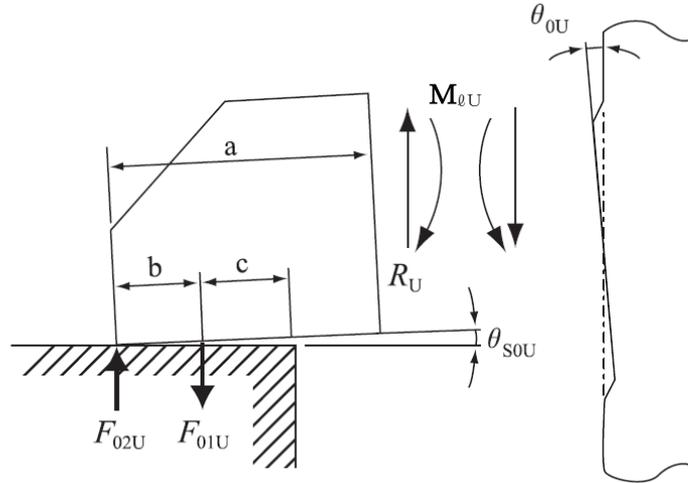


図5-2 鉛直上向き荷重により胴及びラグに作用するモーメントと力

ラグ付け根部の局部傾き角 θ_{0U} は、

$$\theta_{0U} = \frac{M_{\ell U} \cdot K_{\ell}}{r m^3 \cdot \beta_{\ell}^2 \cdot E} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.36)$$

ラグの基礎に対する傾き角 θ_{s0U} は、

$$\theta_{s0U} = \frac{F_{01U} \cdot L_b}{n \cdot A_{be} \cdot E_b \cdot b} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.37)$$

ここで、ラグ付け根部の局部傾き角 θ_{0U} とラグの基礎に対する傾き角 θ_{s0U} は等しいから

$$\theta_{0U} = \theta_{s0U} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.38)$$

以上の式を連立させて解くことにより R_U 、 $M_{\ell U}$ 、 F_{01U} は次式で求める。

$$R_U = \frac{(C_V - 1) \cdot m_0 \cdot g}{4} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.39)$$

$$M_{\ell U} = \frac{R_U \cdot a}{1 + \frac{n \cdot A_{be} \cdot E_b \cdot K_{\ell} \cdot b^2}{r m^3 \cdot \beta_{\ell}^2 \cdot E \cdot L_b}} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.40)$$

$$F_{01U} = \frac{-R_U \cdot a + M_{\ell U}}{b} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.41)$$

鉛直上向き地震力による鉛直方向曲げモーメント $M_{\ell U}$ により生じる周方向応力及び軸方向応力は、シェルパラメータ γ 及びアタッチメントパラメータ β_{ℓ} によって引用文献(2)の表より値を求める(以下、*を付記する)ことによって、次式で求められる。

一次応力

$$\sigma_{\phi 1 2 U} = \left\{ \frac{N_{\phi}}{M_{\ell U} / (r_m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{M_{\ell U}}{r_m^2 \cdot \beta_{\ell} \cdot t} \right) \cdot C_{\ell 1} \quad (5.4.1.1.42)$$

$$\sigma_{x 1 2 U} = \left\{ \frac{N_x}{M_{\ell U} / (r_m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{M_{\ell U}}{r_m^2 \cdot \beta_{\ell} \cdot t} \right) \cdot C_{\ell 2} \quad (5.4.1.1.43)$$

二次応力

$$\sigma_{2 \phi 1 2 U} = \left\{ \frac{M_{\phi}}{M_{\ell U} / (r_m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6 \cdot M_{\ell U}}{r_m \cdot \beta_{\ell} \cdot t^2} \right) \cdots \quad (5.4.1.1.44)$$

$$\sigma_{2 x 1 2 U} = \left\{ \frac{M_x}{M_{\ell U} / (r_m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6 \cdot M_{\ell U}}{r_m \cdot \beta_{\ell} \cdot t^2} \right) \cdots \quad (5.4.1.1.45)$$

ここで、アタッチメントパラメータ β_{ℓ} は次式で表される。ただし、二次応力を求める場合は更に k_{ℓ} を乗じた値とする。

$$\beta_{\ell} = \sqrt[3]{\beta_1 \cdot \beta_2^2} \quad \cdots \quad (5.4.1.1.46)$$

反力 R_U によるせん断応力は次式で表される。

$$\tau_{\ell 6 U} = \frac{R_U}{4 \cdot C_2 \cdot t} \quad \cdots \quad (5.4.1.1.47)$$

(6) 水平方向地震による胴の曲げ応力

$$\sigma_{x 4} = \frac{C_H \cdot m_2 \cdot g \cdot H_2 \cdot (D_i + 2 \cdot t)}{2 \cdot I} \quad \cdots \quad (5.4.1.1.48)$$

ここで、胴の断面二次モーメント I は次のように求める。

$$I = \frac{\pi}{8} \cdot (D_i + t)^3 \cdot t \quad \cdots \quad (5.4.1.1.49)$$

(7) 水平方向地震力(Z方向)による胴のラグ付け根部に作用する荷重及びモーメント

「4.1 固有周期の計算方法」における水平力 F_1 を $C_H \cdot m_1 \cdot g$ 、 F_2 を $C_H \cdot m_2 \cdot g$ に置き換えて得られる M_1 、 M_2 、 R_1 及び M_3 の値を使用する。

鉛直方向モーメント M_1 及び M_2 により生じる胴の周方向応力及び軸方向応力は
(5.4.1.1.15) 式の $\sigma_{\phi 3}$ 及び(5.4.1.1.16) 式の $\sigma_{x 3}$ と同様にして

一次応力

$$\sigma_{\phi 5} = \left\{ \frac{N_{\phi}}{M_1 / (r_m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{|M_1|}{r_m^2 \cdot \beta_{\ell} \cdot t} \right) \cdot C_{\ell 1} \quad \dots \quad (5.4.1.1.50)$$

$$\sigma_{x 5} = \left\{ \frac{N_x}{M_1 / (r_m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{|M_1|}{r_m^2 \cdot \beta_{\ell} \cdot t} \right) \cdot C_{\ell 2} \quad \dots \quad (5.4.1.1.51)$$

二次応力

$$\sigma_{2\phi 5} = \left\{ \frac{M_{\phi}}{M_1 / (r_m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6 \cdot |M_1|}{r_m \cdot \beta_{\ell} \cdot t^2} \right) \quad \dots \quad (5.4.1.1.52)$$

$$\sigma_{2x 5} = \left\{ \frac{M_x}{M_1 / (r_m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6 \cdot |M_1|}{r_m \cdot \beta_{\ell} \cdot t^2} \right) \quad \dots \quad (5.4.1.1.53)$$

一次応力

$$\sigma_{\phi 6} = \left\{ \frac{N_{\phi}}{M_2 / (r_m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{|M_2|}{r_m^2 \cdot \beta_{\ell} \cdot t} \right) \cdot C_{\ell 1} \quad \dots \quad (5.4.1.1.54)$$

$$\sigma_{x 6} = \left\{ \frac{N_x}{M_2 / (r_m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{|M_2|}{r_m^2 \cdot \beta_{\ell} \cdot t} \right) \cdot C_{\ell 2} \quad \dots \quad (5.4.1.1.55)$$

二次応力

$$\sigma_{2\phi 6} = \left\{ \frac{M_{\phi}}{M_2 / (r_m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6 \cdot |M_2|}{r_m \cdot \beta_{\ell} \cdot t^2} \right) \quad \dots \quad (5.4.1.1.56)$$

$$\sigma_{2x 6} = \left\{ \frac{M_x}{M_2 / (r_m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6 \cdot |M_2|}{r_m \cdot \beta_{\ell} \cdot t^2} \right) \quad \dots \quad (5.4.1.1.57)$$

ここで、アタッチメントパラメータ β_{ℓ} は次式で表される。ただし、二次応力を求める場合は更に k_{ℓ} を乗じた値とする。

$$\beta_{\ell} = \sqrt[3]{\beta_1 \cdot \beta_2^2} \quad \dots \quad (5.4.1.1.58)$$

周方向曲げモーメント M_c により生じる胴の周方向応力及び軸方向応力は
一次応力

$$\sigma_{\phi 7} = \left\{ \frac{N_{\phi}}{M_c / (r_m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{|M_c|}{r_m^2 \cdot \beta_c \cdot t} \right) \cdot C_{c1} \quad \cdot \quad (5.4.1.1.59)$$

$$\sigma_{x 7} = \left\{ \frac{N_x}{M_c / (r_m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{|M_c|}{r_m^2 \cdot \beta_c \cdot t} \right) \cdot C_{c2} \quad \cdot \quad (5.4.1.1.60)$$

二次応力

$$\sigma_{2\phi 7} = \left\{ \frac{M_{\phi}}{M_c / (r_m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6 \cdot |M_c|}{r_m \cdot \beta_c \cdot t^2} \right) \quad \cdots \quad (5.4.1.1.61)$$

$$\sigma_{2x 7} = \left\{ \frac{M_x}{M_c / (r_m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6 \cdot |M_c|}{r_m \cdot \beta_c \cdot t^2} \right) \quad \cdots \quad (5.4.1.1.62)$$

ここで、アタッチメントパラメータ β_c は次式で表される。ただし、二次応力を求める場合は更に k_c を乗じた値とする。

$$\beta_c = \sqrt[3]{\beta_1^2 \cdot \beta_2} \quad \cdots \cdots \cdots (5.4.1.1.63)$$

周方向せん断力 Q によるせん断応力は

$$\tau_{c1} = \frac{|Q|}{4 \cdot C_1 \cdot t} \quad \cdots \cdots \cdots (5.4.1.1.64)$$

鉛直方向せん断力 R_1 によるせん断応力

$$\tau_{l2} = \frac{|R_1|}{4 \cdot C_2 \cdot t} \quad \cdots \cdots \cdots (5.4.1.1.65)$$

モーメント M_3 により生じる胴のせん断応力は

$$\tau_3 = \frac{|M_3|}{2 \cdot \pi \cdot C_1^2 \cdot t} \quad \cdots \cdots \cdots (5.4.1.1.66)$$

(8) 水平方向地震力 (X方向) による胴のラグ付け根部の応力

鉛直方向曲げモーメント M_1 により生じる胴の周方向応力及び軸応力は

$$\sigma_{\phi 8} = \sigma_{\phi 5} / \sqrt{2}, \quad \sigma_{x 8} = \sigma_{x 5} / \sqrt{2},$$

$$\sigma_{2\phi 8} = \sigma_{2\phi 5} / \sqrt{2}, \quad \sigma_{2x 8} = \sigma_{2x 5} / \sqrt{2}$$

鉛直方向曲げモーメント M_2 により生じる胴の周方向応力及び軸応力は

$$\sigma_{\phi 9} = \sigma_{\phi 6} / \sqrt{2}, \quad \sigma_{x 9} = \sigma_{x 6} / \sqrt{2},$$

$$\sigma_{2\phi 9} = \sigma_{2\phi 6} / \sqrt{2}, \quad \sigma_{2x 9} = \sigma_{2x 6} / \sqrt{2}$$

周方向曲げモーメント M_c により生じる胴の周方向応力及び軸応力は

$$\sigma_{\phi 10} = \sigma_{\phi 7} / \sqrt{2}, \quad \sigma_{x 10} = \sigma_{x 7} / \sqrt{2},$$

$$\sigma_{2\phi 10} = \sigma_{2\phi 7} / \sqrt{2}, \quad \sigma_{2x 10} = \sigma_{2x 7} / \sqrt{2}$$

周方向せん断力Qによるせん断応力は

$$\tau_{c4} = \tau_{c1} / \sqrt{2}$$

鉛直方向せん断力R₁によるせん断応力は

$$\tau_{l5} = \tau_{l2} / \sqrt{2}$$

ねじりモーメントM₃による胴のせん断応力は

$$\tau_6 = \tau_3 / \sqrt{2}$$

(9) 組合せ応力

(1)～(9)によって算出される胴のラグ付け根部に生じる応力は、以下により組み合わせられる。

a. 一次一般膜応力

$$\sigma_0 = \text{Max}[\sigma_{0\phi}, \sigma_{0x}] \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.67)$$

$$\sigma_{0\phi} = \sigma_{\phi1} + \sigma_{\phi2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.68)$$

$$\sigma_{0x} = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} + \sqrt{\sigma_{x11}^2 + \sigma_{x4}^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.69)$$

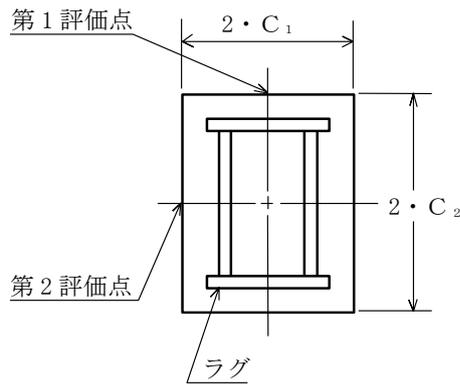


図5-3 胴の評価点

b. 一次応力

$$\sigma_1 = \text{Max} (\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{14}, \sigma_{15}, \sigma_{16}, \sigma_{17}, \sigma_{18}, \sigma_{19}, \sigma_{110}) \dots \dots \dots (5.4.1.1.70)$$

a) 水平方向地震力 (Z方向) 及び鉛直方向地震力が作用した場合の一次応力

(a) 第1ラグの付け根部

第1評価点については

$$\sigma_{\phi z 1} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 3} + \sqrt{\sigma_{\phi 5}^2 + (\sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 12})^2} \dots \dots \dots (5.4.1.1.71)$$

$$\sigma_{x z 1} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sigma_{x 3} + \sqrt{(\sigma_{x 4} + \sigma_{x 5})^2 + (\sigma_{x 11} + \sigma_{x 12})^2} \dots (5.4.1.1.72)$$

$$\sigma_{11} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \sigma_{\phi z 1} + \sigma_{x z 1} + \sqrt{(\sigma_{\phi z 1} - \sigma_{x z 1})^2} \right\} \dots \dots \dots (5.4.1.1.73)$$

第2評価点については

$$\sigma_{\phi z 2} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 2} \dots \dots \dots (5.4.1.1.74)$$

$$\sigma_{x z 2} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sqrt{\sigma_{x 4}^2 + \sigma_{x 11}^2} \dots \dots \dots (5.4.1.1.75)$$

$$\sigma_{12} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \sigma_{\phi z 2} + \sigma_{x z 2} + \sqrt{(\sigma_{\phi z 2} - \sigma_{x z 2})^2 + (4 \cdot [\tau_{\ell 1} + \sqrt{\tau_{\ell 2}^2 + \tau_{\ell 6}^2}]^2) \right\} \dots (5.4.1.1.76)$$

(b) 第2ラグ及び第4ラグの付け根部

第1評価点については

$$\sigma_{\phi z 3} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 3} + \sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 12} \dots \dots \dots (5.4.1.1.77)$$

$$\sigma_{x z 3} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sigma_{x 3} + \sigma_{x 11} + \sigma_{x 12} \dots \dots \dots (5.4.1.1.78)$$

$$\sigma_{13} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \sigma_{\phi z 3} + \sigma_{x z 3} + \sqrt{(\sigma_{\phi z 3} - \sigma_{x z 3})^2 + 4 \cdot (\tau_{c 1} + \tau_3)^2} \right\} \dots (5.4.1.1.79)$$

第2評価点については

$$\sigma_{\phi z 4} = \sigma_{\phi 1} + \sqrt{\sigma_{\phi 7}^2 + \sigma_{\phi 2}^2} \dots \dots \dots (5.4.1.1.80)$$

$$\sigma_{x z 4} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sqrt{\sigma_{x 7}^2 + \sigma_{x 11}^2} \dots \dots \dots (5.4.1.1.81)$$

$$\sigma_{14} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \sigma_{\phi z 4} + \sigma_{x z 4} + \sqrt{(\sigma_{\phi z 4} - \sigma_{x z 4})^2 + 4 \cdot (\tau_{\ell 1} + \sqrt{\tau_3^2 + \tau_{\ell 6}^2})^2} \right\} \dots (5.4.1.1.82)$$

(c) 第3ラグの付け根部

第1評価点については

$$\sigma_{\phi z 5} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 3} + \sqrt{\sigma_{\phi 6}^2 + (\sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 12})^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.83)$$

$$\sigma_{x z 5} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sigma_{x 3} + \sqrt{(\sigma_{x 4} + \sigma_{x 6})^2 + (\sigma_{x 11} + \sigma_{x 12})^2} \quad (5.4.1.1.84)$$

$$\sigma_{15} = \frac{1}{2} \cdot \{ \sigma_{\phi z 5} + \sigma_{x z 5} + \sqrt{(\sigma_{\phi z 5} - \sigma_{x z 5})^2} \} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.85)$$

第2評価点については

$$\sigma_{\phi z 6} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.86)$$

$$\sigma_{x z 6} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sqrt{\sigma_{x 4}^2 + \sigma_{x 11}^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.87)$$

$$\sigma_{16} = \frac{1}{2} \cdot \{ \sigma_{\phi z 6} + \sigma_{x z 6} + \sqrt{(\sigma_{\phi z 6} - \sigma_{x z 6})^2 + 4 \cdot (\tau_{\ell 1} + \sqrt{\tau_{\ell 2}^2 + \tau_{\ell 6}^2})^2} \} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.88)$$

b) 水平方向地震力（X方向）及び鉛直方向地震力が作用した場合の組合せ一次応力

(a) 第1ラグ及び第4ラグの付け根部

第1評価点については

$$\sigma_{\phi x 1} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 3} + \sqrt{\sigma_{\phi 8}^2 + (\sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 12})^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.89)$$

$$\sigma_{x x 1} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sigma_{x 3} + \sqrt{(\sigma_{x 4} + \sigma_{x 8})^2 + (\sigma_{x 11} + \sigma_{x 12})^2} \quad (5.4.1.1.90)$$

$$\sigma_{17} = \frac{1}{2} \cdot \{ \sigma_{\phi x 1} + \sigma_{x x 1} + \sqrt{(\sigma_{\phi x 1} - \sigma_{x x 1})^2 + 4 \cdot (\tau_{c 4} + \tau_6)^2} \} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.91)$$

第2評価点については

$$\sigma_{\phi x 2} = \sigma_{\phi 1} + \sqrt{\sigma_{\phi 10}^2 + \sigma_{\phi 2}^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.92)$$

$$\sigma_{x x 2} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sqrt{(\sigma_{x 4} + \sigma_{x 10})^2 + \sigma_{x 11}^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.93)$$

$$\sigma_{18} = \frac{1}{2} \cdot \{ \sigma_{\phi x 2} + \sigma_{x x 2} + \sqrt{(\sigma_{\phi x 2} - \sigma_{x x 2})^2 + 4 \cdot (\tau_{\ell 1} + \sqrt{(\tau_{\ell 5} + \tau_6)^2 + \tau_{\ell 6}^2})^2} \} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.94)$$

(b) 第2ラグ及び第3ラグの付け根部

第1評価点については

$$\sigma_{\phi x 3} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 3} + \sqrt{\sigma_{\phi 9}^2 + (\sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 12})^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.95)$$

$$\sigma_{x x 3} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sigma_{x 3} + \sqrt{(\sigma_{x 4} + \sigma_{x 9})^2 + (\sigma_{x 11} + \sigma_{x 12})^2} \quad (5.4.1.1.96)$$

$$\sigma_{19} = \frac{1}{2} \cdot \{ \sigma_{\phi x 3} + \sigma_{x x 3} + \sqrt{(\sigma_{\phi x 3} - \sigma_{x x 3})^2 + 4 \cdot (\tau_{c 4} + \tau_6)^2} \} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.97)$$

第2評価点については

$$\sigma_{\phi x 4} = \sigma_{\phi 1} + \sqrt{\sigma_{\phi 1 0}^2 + \sigma_{\phi 2}^2} \dots\dots\dots (5.4.1.1.98)$$

$$\sigma_{x x 4} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sqrt{(\sigma_{x 4} + \sigma_{x 1 0})^2 + \sigma_{x 1 1}^2} \dots\dots\dots (5.4.1.1.99)$$

$$\sigma_{110} = \frac{1}{2} \cdot \{ \sigma_{\phi x 4} + \sigma_{x x 4} + \sqrt{(\sigma_{\phi x 4} - \sigma_{x x 4})^2 + 4 \cdot (\tau_{\ell 1} + \sqrt{(\tau_{\ell 5} + \tau_6)^2 + \tau_{\ell 6}^2})^2} \} \dots\dots\dots (5.4.1.1.100)$$

c. 一次+二次応力の変動値

$$\sigma_2 = \text{Max} (\sigma_{21}, \sigma_{22}, \sigma_{23}, \sigma_{24}, \sigma_{25}, \sigma_{26}, \sigma_{27}, \sigma_{28}, \sigma_{29}, \sigma_{210}) \dots\dots\dots (5.4.1.1.101)$$

a) 水平方向地震力 (Z方向) 及び鉛直方向地震力が作用した場合の地震のみによる
一次+二次応力の変動値

(a) 第1ラグの付け根部

第1評価点については

$$\sigma_{2\phi z 1} = \sqrt{(\sigma_{\phi 5} + \sigma_{2\phi 5})^2 + (\sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 1 2} + \sigma_{2\phi 1 2})^2} \dots\dots (5.4.1.1.102)$$

$$\sigma_{2x z 1} = \sqrt{(\sigma_{x 4} + \sigma_{x 5} + \sigma_{2x 5})^2 + (\sigma_{x 1 1} + \sigma_{x 1 2} + \sigma_{2x 1 2})^2} \dots\dots (5.4.1.1.103)$$

$$\sigma_{21} = \sigma_{2\phi z 1} + \sigma_{2x z 1} + \sqrt{(\sigma_{2\phi z 1} - \sigma_{2x z 1})^2} \dots\dots\dots (5.4.1.1.104)$$

第2評価点について

$$\sigma_{2\phi z 2} = \sigma_{\phi 2} \dots\dots\dots (5.4.1.1.105)$$

$$\sigma_{2x z 2} = \sqrt{\sigma_{x 4}^2 + \sigma_{x 1 1}^2} \dots\dots\dots (5.4.1.1.106)$$

$$\sigma_{22} = \sigma_{2\phi z 2} + \sigma_{2x z 2} + \sqrt{(\sigma_{2\phi z 2} - \sigma_{2x z 2})^2 + 4 \cdot (\tau_{\ell 6}^2 + \tau_{\ell 2}^2)} \dots\dots\dots (5.4.1.1.107)$$

(b) 第2ラグ及び第4ラグの付け根部

第1評価点については

$$\sigma_{2\phi z 3} = \sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 1 2} + \sigma_{2\phi 1 2} \dots\dots\dots (5.4.1.1.108)$$

$$\sigma_{2x z 3} = \sigma_{x 1 1} + \sigma_{x 1 2} + \sigma_{2x 1 2} \dots\dots\dots (5.4.1.1.109)$$

$$\sigma_{23} = \sigma_{2\phi z 3} + \sigma_{2x z 3} + \sqrt{(\sigma_{2\phi z 3} - \sigma_{2x z 3})^2 + 4 \cdot (\tau_{c 1} + \tau_3)^2} \dots\dots\dots (5.4.1.1.110)$$

第2評価点については

$$\sigma_{2\phi z 4} = \sqrt{(\sigma_{\phi 7} + \sigma_{2\phi 7})^2 + \sigma_{\phi 2}^2} \dots\dots\dots (5.4.1.1.111)$$

$$\sigma_{2x z 4} = \sqrt{(\sigma_{x 7} + \sigma_{2x 7})^2 + \sigma_{x 1 1}^2} \dots\dots\dots (5.4.1.1.112)$$

$$\sigma_{24} = \sigma_{2\phi z 4} + \sigma_{2x z 4} + \sqrt{(\sigma_{2\phi z 4} - \sigma_{2x z 4})^2 + 4 \cdot (\tau_{\ell 6}^2 + \tau_3^2)} \dots\dots\dots (5.4.1.1.113)$$

(c) 第3ラグの付け根部

第1評価点については

$$\sigma_{2\phi z 5} = \sqrt{(\sigma_{\phi 6} + \sigma_{2\phi 6})^2 + (\sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 12} + \sigma_{2\phi 12})^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.114)$$

$$\sigma_{2xz 5} = \sqrt{(\sigma_{x 4} + \sigma_{x 6} + \sigma_{2x 6})^2 + (\sigma_{x 11} + \sigma_{x 12} + \sigma_{2x 12})^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.115)$$

$$\sigma_{25} = \sigma_{2\phi z 5} + \sigma_{2xz 5} + \sqrt{(\sigma_{2\phi z 5} - \sigma_{2xz 5})^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.116)$$

第2評価点については

$$\sigma_{2\phi z 6} = \sigma_{\phi 2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.117)$$

$$\sigma_{2xz 6} = \sqrt{\sigma_{x 4}^2 + \sigma_{x 11}^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.118)$$

$$\sigma_{26} = \sigma_{2\phi z 6} + \sigma_{2xz 6} + \sqrt{(\sigma_{2\phi z 6} - \sigma_{2xz 6})^2 + 4 \cdot (\tau_{\ell 6}^2 + \tau_{\ell 2}^2)} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.119)$$

b) 水平方向地震力（X方向）及び鉛直方向地震力が作用した場合の地震力のみによる
一次+二次応力の変動値

(a) 第1ラグ及び第4ラグの付け根部

第1評価点については

$$\sigma_{2\phi x 1} = \sqrt{(\sigma_{\phi 8} + \sigma_{2\phi 8})^2 + (\sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 12} + \sigma_{2\phi 12})^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.120)$$

$$\sigma_{2xx 1} = \sqrt{(\sigma_{x 4} + \sigma_{x 8} + \sigma_{2x 8})^2 + (\sigma_{x 11} + \sigma_{x 12} + \sigma_{2x 12})^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.121)$$

$$\sigma_{27} = \sigma_{2\phi x 1} + \sigma_{2xx 1} + \sqrt{(\sigma_{2\phi x 1} - \sigma_{2xx 1})^2 + 4 \cdot (\tau_{c 4} + \tau_6)^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.122)$$

第2評価点については

$$\sigma_{2\phi x 2} = \sqrt{(\sigma_{\phi 10} + \sigma_{2\phi 10})^2 + \sigma_{\phi 2}^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.123)$$

$$\sigma_{2xx 2} = \sqrt{(\sigma_{x 4} + \sigma_{x 10} + \sigma_{2x 10})^2 + \sigma_{x 11}^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.124)$$

$$\sigma_{28} = \sigma_{2\phi x 2} + \sigma_{2xx 2} + \sqrt{(\sigma_{2\phi x 2} - \sigma_{2xx 2})^2 + 4 \cdot (\tau_6 + \tau_{\ell 5} + \tau_{\ell 6})^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.125)$$

(b) 第2ラグ及び第3ラグの付け根部

第1評価点については

$$\sigma_{2\phi x 3} = \sqrt{(\sigma_{\phi 9} + \sigma_{2\phi 9})^2 + (\sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 1 2} + \sigma_{2\phi 1 2})^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.126)$$

$$\sigma_{2xx 3} = \sqrt{(\sigma_{x 4} + \sigma_{x 9} + \sigma_{2x 9})^2 + (\sigma_{x 1 1} + \sigma_{x 1 2} + \sigma_{2x 1 2})^2} \quad (5.4.1.1.127)$$

$$\sigma_{2 9} = \sigma_{2\phi x 3} + \sigma_{2xx 3} + \sqrt{(\sigma_{2\phi x 3} - \sigma_{2xx 3})^2 + 4 \cdot (\tau_{c 4} + \tau_6)^2} \quad (5.4.1.1.128)$$

第2評価点については

$$\sigma_{2\phi x 4} = \sqrt{(\sigma_{\phi 1 0} + \sigma_{2\phi 1 0})^2 + \sigma_{\phi 2}^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.129)$$

$$\sigma_{2xx 4} = \sqrt{(\sigma_{x 4} + \sigma_{x 1 0} + \sigma_{2x 1 0})^2 + \sigma_{x 1 1}^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.130)$$

$$\sigma_{2 1 0} = \sigma_{2\phi x 4} + \sigma_{2xx 4} + \sqrt{(\sigma_{2\phi x 4} - \sigma_{2xx 4})^2 + 4 \cdot (\tau_6 + \tau_{\ell 5} + \tau_{\ell 6})^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.131)$$

5.4.1.2 ラグの応力

(1) 運転時質量による応力

$$\sigma_{s 1} = \frac{M_{\ell}}{Z_{s t}} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.2.1)$$

$$\tau_{s 1} = \frac{R}{A_{s 1}} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.2.2)$$

(2) 鉛直方向地震力による応力

$$\sigma_{s 7} = \frac{M_{\ell V}}{Z_{s t}} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.2.3)$$

$$\tau_{s 7} = \frac{R_V}{A_{s 1}} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.2.4)$$

ここで、 $M_{\ell V}$ 、 R_V は5.4.1.1(4)で得られた $M_{\ell D}$ 、 $M_{\ell U}$ 、 R_D 、 R_U を用いて下式より求める。

$$M_{\ell V} = \text{Max}(|M_{\ell D}|, |M_{\ell U}|) \quad \dots\dots\dots (5.4.1.2.5)$$

$$R_V = \text{Max}(|R_D|, |R_U|) \quad \dots\dots\dots (5.4.1.2.6)$$

(3) 水平方向地震力 (Z方向) による応力

第1ラグについて

$$\sigma_{s2} = \frac{|M_1|}{Z_{st}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.7)$$

$$\tau_{s2} = \frac{|R_1|}{A_{s1}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.8)$$

第2ラグ及び第4ラグについて

$$\sigma_{s3} = \frac{|M_c|}{Z_{sl}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.9)$$

$$\tau_{s3} = \frac{|M_3|}{Z_{sp}} + \frac{|Q|}{A_{s2}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.10)$$

第3ラグについて

$$\sigma_{s4} = \frac{|M_2|}{Z_{st}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.11)$$

$$\tau_{s4} = \frac{|R_1|}{A_{s1}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.12)$$

(4) 水平方向地震力 (X方向) による応力

第1ラグ及び第4ラグについて

$$\sigma_{s5} = \frac{|M_1|}{\sqrt{2} \cdot Z_{st}} + \frac{|M_c|}{\sqrt{2} \cdot Z_{sl}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.13)$$

$$\tau_{s5} = \frac{|R_1|}{\sqrt{2} \cdot A_{s1}} + \frac{|M_3|}{\sqrt{2} \cdot Z_{sp}} + \frac{|Q|}{\sqrt{2} \cdot A_{s2}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.14)$$

第2ラグ及び第3ラグについて

$$\sigma_{s6} = \frac{|M_2|}{\sqrt{2} \cdot Z_{st}} + \frac{|M_c|}{\sqrt{2} \cdot Z_{sl}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.15)$$

$$\tau_{s6} = \frac{|R_1|}{\sqrt{2} \cdot A_{s1}} + \frac{|M_3|}{\sqrt{2} \cdot Z_{sp}} + \frac{|Q|}{\sqrt{2} \cdot A_{s2}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.16)$$

(5) 組合せ応力

ラグの最大応力は次式で求める。

$$\sigma_s = \text{Max}(\sigma_{1s}, \sigma_{2s}, \sigma_{3s}, \sigma_{4s}, \sigma_{5s}) \quad \dots\dots\dots (5.4.1.2.17)$$

- a. 水平方向地震力（Z方向）及び鉛直方向地震力が作用した場合
第1ラグについて

$$\sigma_{1s} = \sqrt{\left(\sigma_{s1} + \sqrt{\sigma_{s2}^2 + \sigma_{s7}^2}\right)^2 + 3 \cdot \left(\tau_{s1} + \sqrt{\tau_{s2}^2 + \tau_{s7}^2}\right)^2} \quad \dots (5.4.1.2.18)$$

第2ラグ及び第4ラグについて

$$\sigma_{2s} = \sqrt{\left(\sigma_{s1} + \sqrt{\sigma_{s3}^2 + \sigma_{s7}^2}\right)^2 + 3 \cdot \left(\tau_{s1} + \sqrt{\tau_{s3}^2 + \tau_{s7}^2}\right)^2} \quad \dots (5.4.1.2.19)$$

第3ラグについて

$$\sigma_{3s} = \sqrt{\left(\sigma_{s1} + \sqrt{\sigma_{s4}^2 + \sigma_{s7}^2}\right)^2 + 3 \cdot \left(\tau_{s1} + \sqrt{\tau_{s4}^2 + \tau_{s7}^2}\right)^2} \quad \dots (5.4.1.2.20)$$

- b. 水平方向地震力（X方向）及び鉛直方向地震力が作用した場合
第1及び第4ラグについて

$$\sigma_{4s} = \sqrt{\left(\sigma_{s1} + \sqrt{\sigma_{s5}^2 + \sigma_{s7}^2}\right)^2 + 3 \cdot \left(\tau_{s1} + \sqrt{\tau_{s5}^2 + \tau_{s7}^2}\right)^2} \quad \dots (5.4.1.2.21)$$

第2ラグ及び第3ラグについて

$$\sigma_{5s} = \sqrt{\left(\sigma_{s1} + \sqrt{\sigma_{s6}^2 + \sigma_{s7}^2}\right)^2 + 3 \cdot \left(\tau_{s1} + \sqrt{\tau_{s6}^2 + \tau_{s7}^2}\right)^2} \quad \dots (5.4.1.2.22)$$

5.4.1.3 基礎ボルトの応力

基礎ボルトの最大引張応力及び最大せん断応力は次式で求める。

$$\sigma_b = \text{Max}(\sigma_{b1}, \sigma_{b2}, \sigma_{b3}, \sigma_{b4}, \sigma_{b5}) \quad \dots\dots\dots (5.4.1.3.1)$$

$$\tau_b = \text{Max}(\tau_{b2}, \tau_{b4}, \tau_{b5}) \quad \dots\dots\dots (5.4.1.3.2)$$

- (1) 水平方向地震力（Z方向）及び鉛直方向地震力が作用した場合
第1ラグについて

$$\sigma_{b1} = \frac{F_{01} + \sqrt{F_{11}^2 + F_{01V}^2}}{n \cdot A_b} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.3.3)$$

第2ラグ及び第4ラグについて

$$\sigma_{b2} = \sqrt{\left(\frac{\text{Max}[|F_{31}|, |F_{32}|]}{A_b}\right)^2 + \left(\frac{F_{01V}}{n \cdot A_b}\right)^2} + \frac{F_{01}}{n \cdot A_b} \quad \dots \quad (5.4.1.3.4)$$

$$\tau_{b2} = \frac{|Q| \cdot (1 - \varepsilon)}{n \cdot A_b} \quad \dots \quad (5.4.1.3.5)$$

第3ラグについて

$$\sigma_{b3} = \frac{F_{01} + \sqrt{F_{21}^2 + F_{01V}^2}}{n \cdot A_b} \quad \dots \quad (5.4.1.3.6)$$

(2) 水平方向地震力（X方向）及び鉛直方向地震力が作用した場合

第1ラグ及び第4ラグについて

$$\sigma_{b4} = \sqrt{\left(\frac{|F_{11}|}{\sqrt{2} \cdot n \cdot A_b} + \frac{\text{Max}[|F_{31}|, |F_{32}|]}{\sqrt{2} \cdot A_b}\right)^2 + \left(\frac{F_{01V}}{n \cdot A_b}\right)^2} + \frac{F_{01}}{n \cdot A_b} \quad \dots \quad (5.4.1.3.7)$$

$$\tau_{b4} = \frac{|Q| \cdot (1 - \varepsilon)}{\sqrt{2} \cdot n \cdot A_b} \quad \dots \quad (5.4.1.3.8)$$

第2ラグ及び第3ラグについて

$$\sigma_{b5} = \sqrt{\left(\frac{|F_{21}|}{\sqrt{2} \cdot n \cdot A_b} + \frac{\text{Max}[|F_{31}|, |F_{32}|]}{\sqrt{2} \cdot A_b}\right)^2 + \left(\frac{F_{01V}}{n \cdot A_b}\right)^2} + \frac{F_{01}}{n \cdot A_b} \quad \dots \quad (5.4.1.3.9)$$

$$\tau_{b5} = \frac{|Q| \cdot (1 - \varepsilon)}{\sqrt{2} \cdot n \cdot A_b} \quad \dots \quad (5.4.1.3.10)$$

5.4.1.4 追設基礎ボルトの応力

耐震補強サポートは、ラグから周方向荷重Qを水平方向荷重として受ける。また、耐震補強サポートの質量により作用する力は、水平方向地震力により以下の式で求める。

$$F_a = m_a \cdot g \cdot C_H \quad \dots \quad (5.4.1.4.1)$$

したがって、追設基礎ボルトに生じる最大せん断応力 τ_{a1} は以下の式となる。

$$\tau_a = \frac{Q + F_a}{n_a \cdot A_a} \quad \dots \quad (5.4.1.4.2)$$

5.5 計算条件

応力計算に用いる計算条件は、本計算書の【残留熱除去系熱交換器の耐震性についての計算結果】の設計条件及び機器要目に示す。

5.6 応力の評価

5.6.1 胴の応力評価

5.4.1.1項で求めた胴の組合せ応力が最高使用温度における許容応力 S_a 以下であること。ただし、 S_a は下表による。

応力の種類	許 容 応 力 S_a	
	弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度による 荷重との組合せの場合	基準地震動 S_s による荷重との 組合せの場合
一次一般膜応力	S_y と $0.6 \cdot S_u$ のいずれか小さい方の値。ただし、オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金にあつては許容引張応力 $1.2 \cdot S$ の方が大きい場合はこの大きい方の値とする。	$0.6 \cdot S_u$
一 次 応 力	上記の1.5倍の値	
一次応力と二次応力の和	地震動のみによる一次応力と二次応力の和の変動値が $2 \cdot S_y$ 以下であれば、疲労解析は不要とする。	

5.6.2 ラグの応力評価

5.4.1.2項で求めたラグの組合せ応力が許容引張応力 f_{tm} 以下であること。ただし、 f_{tm} は下表による。

	弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度による 荷重との組合せの場合	基準地震動 S_s による 荷重との組合せの場合
許容引張応力 f_{tm}	$\frac{F}{1.5} \cdot 1.5$	$\frac{F^*}{1.5} \cdot 1.5$

5.6.3 基礎ボルトの応力評価

5.4.1.3項で求めた基礎ボルトの引張応力 σ_b は次式より求めた許容組合せ応力 f_{ts} 以下であること。ただし、 f_{to} は下表による。

$$f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}] \dots\dots\dots (5.6.3.1)$$

せん断応力 τ_b はせん断力のみ受ける基礎ボルトの許容せん断応力 f_{sb} 以下であること。ただし、 f_{sb} は下表による。

	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度による 荷重との組合せの場合	基準地震動 S _s による 荷重との組合せの場合 *
許容引張応力 f_{to}	$\frac{F}{2} \cdot 1.5$	$\frac{F}{2} \cdot 1.5$ *
許容せん断応力 f_{sb}	$\frac{F}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$	$\frac{F}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

5.6.4 追設基礎ボルトの応力評価

5.4.1.4項で求めた追設基礎ボルトのせん断応力 τ_a はせん断力のみ受ける基礎ボルトの許容せん断応力 f_{sba} 以下であること。ただし、 f_{sba} は下表による。

	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度による 荷重との組合せの場合	基準地震動 S _s による 荷重との組合せの場合
許容せん断応力 f_{sba}	$\frac{F}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

6. 評価結果

6.1 設計基準対象施設としての評価結果

残留熱除去系熱交換器の設計基準対象施設としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は許容限界を満足しており、設計用地震力に対して十分な構造強度を有することを確認した。

(1) 構造強度評価結果

構造強度評価の結果を次頁以降の表に示す。

6.2 重大事故等対処設備としての評価結果

残留熱除去系熱交換器の重大事故等対処設備としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は許容限界を満足しており、設計用地震力に対して十分な構造強度を有することを確認した。

(1) 構造強度評価結果

構造強度評価の結果を次頁以降の表に示す。

7. 引用文献

- (1) Stresses from Radial Loads and External Moments in Cylindrical Pressure Vessels, The Welding Journal, 34(12), Research Supplement, 1955.
- (2) Local Stress in Spherical and Cylindrical Shells due to External Loadings, Welding Research Council bulletin, March 1979 revision of WRC bulletin 107/August 1965.

【残留熱除去系熱交換器の耐震性についての計算結果】

1. 設計基準対象施設

1.1 設計条件

機器名称	耐震重要度分類	据付場所及び床面高さ (m)	固有周期 (s)		弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s		最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)
			水平方向	鉛直方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度			
残留熱除去系 熱交換器	S	原子炉建物 EL 23.8*1			C _H =1.19*2 又は*3	C _V =1.10*2	C _H =1.73*4 又は*5	C _V =2.07*4	1.37	85	66

注記*1：基準床レベルを示す。

*2：設計用震度Ⅱ（弾性設計用地震動 S_d）又は静的震度

*3：設計用床応答スペクトルⅡ（弾性設計用地震動 S_d）より得られる震度

*4：設計用震度Ⅱ（基準地震動 S_s）

*5：設計用床応答スペクトルⅡ（基準地震動 S_s）より得られる震度

1.2 機器要目

m ₀ (kg)	m ₁ (kg)	m ₂ (kg)	D _i (mm)	t (mm)	E*1 (MPa)	E _b *2 (MPa)	G*1 (MPa)	H ₁ (mm)	H ₂ (mm)	C ₁ (mm)	C ₂ (mm)	e (mm)
			1800	38.0	199000	202000	76500	1048	1929	600	300	600

ε	A _{s1} (mm ²)	A _{s2} (mm ²)	Z _{sp} (mm ³)	Z _{sθ} (mm ³)	Z _{st} (mm ³)	k _{g1}	k _{g2}	k _{c1}	k _{c2}	C _{g1}	C _{g2}	C _{c1}	C _{c2}
1	4.688×10 ⁴	8.363×10 ⁴	5.470×10 ⁷	4.454×10 ⁷	3.110×10 ⁷								

n	n _a	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)	L _b (mm)	A _b (mm ²)	A _{b e} (mm ²)	A _a (mm ²)	m _a (kg)
2		906	325	312.5	850	715	1810	1470		

S _y (胴板) (MPa)	S _u (胴板) (MPa)	S _y (ラグ) (MPa)	S _u (ラグ) (MPa)	F (ラグ) (MPa)	F* (ラグ) (MPa)
242*1	441*1	199*1 (40mm<厚さ≤75mm)	377*1 (40mm<厚さ≤75mm)	199	239

S _y (基礎ボルト) (MPa)	S _u (基礎ボルト) (MPa)	F (基礎ボルト) (MPa)	F* (基礎ボルト) (MPa)	S _y (追設基礎ボルト) (MPa)	S _u (追設基礎ボルト) (MPa)	F (追設基礎ボルト) (MPa)	F* (追設基礎ボルト) (MPa)
730*2 (径≤60mm)	868*2 (径≤60mm)	607	607	730*2 (径≤60mm)	868*2 (径≤60mm)	607	607

注記*1：最高使用温度で算出

*2：周囲環境温度で算出

S2 補 VI-2-5-4-1-1 R0

1.3 計算数値

1.3.1 胴に生じる応力

(1) 胴に生じる応力一次一般膜応力 (弾性設計用地震動 S d 又は静的震度)

(単位: MPa)

応力	静水頭又は内圧による応力	運転時質量による応力	水平方向地震による応力	鉛直方向地震による応力	組合せ一次一般膜応力
		自重による応力	転倒モーメントによる応力	鉛直方向荷重による応力	
周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	—	—	$\sigma_0 = 38$
軸方向	$\sigma_{x 1} = 17$	$\sigma_{x 2} = 2$	$\sigma_{x 4} = 19$	$\sigma_{x 1 1} = 3$	

(2) 胴に生じる応力一次一般膜応力 (基準地震動 S s)

(単位: MPa)

応力	静水頭又は内圧による応力	運転時質量による応力	水平方向地震による応力	鉛直方向地震による応力	組合せ一次一般膜応力
		自重による応力	転倒モーメントによる応力	鉛直方向荷重による応力	
周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	—	—	$\sigma_0 = 55$
軸方向	$\sigma_{x 1} = 17$	$\sigma_{x 2} = 2$	$\sigma_{x 4} = 36$	$\sigma_{x 1 1} = 4$	

S2 補 VI-2-5-4-1-1 R0

(3) 胴に生じる一次応力 (弾性設計用地震動 S d 又は静的震度)

(単位: MPa)

地震の種類	地震の方向	評価点	応力	静水頭又は内圧による応力	運転時質量による応力		水平方向地震による応力			鉛直方向地震による応力		組合せ一次応力			
					自重による応力	曲げモーメントによる応力	転倒モーメントによる応力	鉛直方向モーメントによる応力	周方向モーメントによる応力	鉛直方向荷重による応力	鉛直方向モーメントによる応力				
弾性設計用地震動 S d 又は静的震度	Z 方向及び鉛直方向	第一ラグ側	第一評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	$\sigma_{\phi 3} = 2$	—	$\sigma_{\phi 5} = 8$	—	—	$\sigma_{\phi 12} = 2$	$\sigma_{11} = 43$		
				軸方向	$\sigma_{x1} = 17$	$\sigma_{x2} = 2$	$\sigma_{x3} = 1$	$\sigma_{x4} = 19$	$\sigma_{x5} = 4$	—	$\sigma_{x11} = 3$	$\sigma_{x12} = 1$			
			第二評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	—	—	—	—	—	—		—	$\sigma_{12} = 46$
				軸方向	$\sigma_{x1} = 17$	$\sigma_{x2} = 2$	—	$\sigma_{x4} = 19$	—	—	$\sigma_{x11} = 3$	—			
				せん断	—	$\tau_{\theta 1} = 3$		$\tau_{\theta 2} = 7$			$\tau_{\theta 6} = 3$				
			第二及び第四ラグ側	第一評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	$\sigma_{\phi 3} = 2$	—	—	—	—		$\sigma_{\phi 12} = 2$	$\sigma_{13} = 54$
		軸方向			$\sigma_{x1} = 17$	$\sigma_{x2} = 2$	$\sigma_{x3} = 1$	—	—	—	$\sigma_{x11} = 3$	$\sigma_{x12} = 1$			
		せん断			—	—		$\tau_3 = 17, \tau_{c1} = 7$			—				
		第二評価点		周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 7} = 0$	—	—	$\sigma_{14} = 47$		
				軸方向	$\sigma_{x1} = 17$	$\sigma_{x2} = 2$	—	—	—	$\sigma_{x7} = 0$	$\sigma_{x11} = 3$	—			
				せん断	—	$\tau_{\theta 1} = 3$		$\tau_3 = 17$			$\tau_{\theta 6} = 3$				
		第三ラグ側	第一評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	$\sigma_{\phi 3} = 2$	—	$\sigma_{\phi 6} = 17$	—	—	$\sigma_{\phi 12} = 2$	$\sigma_{15} = 52$		
				軸方向	$\sigma_{x1} = 17$	$\sigma_{x2} = 2$	$\sigma_{x3} = 1$	$\sigma_{x4} = 19$	$\sigma_{x6} = 8$	—	$\sigma_{x11} = 3$	$\sigma_{x12} = 1$			
			第二評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	—	—	—	—	—	—	$\sigma_{16} = 46$		
				軸方向	$\sigma_{x1} = 17$	$\sigma_{x2} = 2$	—	$\sigma_{x4} = 19$	—	—	$\sigma_{x11} = 3$	—			
				せん断	—	$\tau_{\theta 1} = 3$		$\tau_{\theta 2} = 7$			$\tau_{\theta 6} = 3$				
				せん断	—	$\tau_{\theta 1} = 3$		$\tau_{\theta 2} = 7$			$\tau_{\theta 6} = 3$				

S2 補 VI-2-5-4-1-1 R0

地震の種類	地震の方向	評価点		応力	静水頭又は内圧による応力	運転時質量による応力		水平方向地震による応力			鉛直方向地震による応力		組合せ一次応力
						自重による応力	曲げモーメントによる応力	転倒モーメントによる応力	鉛直方向モーメントによる応力	周方向モーメントによる応力	鉛直方向荷重による応力	鉛直方向モーメントによる応力	
弾性設計用地震動 S d 又は静的震度	X 方向及び鉛直方向	第一及び第四ラグ側	第一評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	$\sigma_{\phi 3} = 2$	—	$\sigma_{\phi 8} = 6$	—	—	$\sigma_{\phi 12} = 2$	$\sigma_{17} = 57$
				軸方向	$\sigma_{x1} = 17$	$\sigma_{x2} = 2$	$\sigma_{x3} = 1$	$\sigma_{x4} = 19$	$\sigma_{x8} = 3$	—	$\sigma_{x11} = 3$	$\sigma_{x12} = 1$	
				せん断	—	—		$\tau_{c4} = 5, \tau_6 = 12$			—		
		第二及び第三ラグ側	第二評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 10} = 0$	—	—	$\sigma_{18} = 55$
				軸方向	$\sigma_{x1} = 17$	$\sigma_{x2} = 2$	—	$\sigma_{x4} = 19$	—	$\sigma_{x10} = 0$	$\sigma_{x11} = 3$	—	
				せん断	—	$\tau_{\theta 1} = 3$		$\tau_{\theta 5} = 5, \tau_6 = 12$			$\tau_{\theta 6} = 3$		
	第二及び第三ラグ側	第一評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	$\sigma_{\phi 3} = 2$	—	$\sigma_{\phi 9} = 12$	—	—	$\sigma_{\phi 12} = 2$	$\sigma_{19} = 62$	
			軸方向	$\sigma_{x1} = 17$	$\sigma_{x2} = 2$	$\sigma_{x3} = 1$	$\sigma_{x4} = 19$	$\sigma_{x9} = 6$	—	$\sigma_{x11} = 3$	$\sigma_{x12} = 1$		
			せん断	—	—		$\tau_{c4} = 5, \tau_6 = 12$			—			
	第二及び第三ラグ側	第二評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 10} = 0$	—	—	$\sigma_{110} = 55$	
			軸方向	$\sigma_{x1} = 17$	$\sigma_{x2} = 2$	—	$\sigma_{x4} = 19$	—	$\sigma_{x10} = 0$	$\sigma_{x11} = 3$	—		
			せん断	—	$\tau_{\theta 1} = 3$		$\tau_{\theta 5} = 5, \tau_6 = 12$			$\tau_{\theta 6} = 3$			

S2 補 VI-2-5-4-1-1 R0

(4) 胴に生じる一次応力 (基準地震動 S s)

(単位: MPa)

地震の種類	地震の方向	評価点	応力	静水頭又は内圧による応力	運転時質量による応力		水平方向地震による応力			鉛直方向地震による応力		組合せ一次応力	
					自重による応力	曲げモーメントによる応力	転倒モーメントによる応力	鉛直方向モーメントによる応力	周方向モーメントによる応力	鉛直方向荷重による応力	鉛直方向モーメントによる応力		
基準地震動 S s	Z 方向及び鉛直方向	第一ラゲ側	第一評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	$\sigma_{\phi 3} = 2$	—	$\sigma_{\phi 5} = 15$	—	—	$\sigma_{\phi 12} = 5$	$\sigma_{11} = 62$
			軸方向	$\sigma_{x1} = 17$	$\sigma_{x2} = 2$	$\sigma_{x3} = 1$	$\sigma_{x4} = 36$	$\sigma_{x5} = 7$	—	$\sigma_{x11} = 4$	$\sigma_{x12} = 3$		
		第二評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	—	—	—	—	—	—	—	$\sigma_{12} = 64$
			軸方向	$\sigma_{x1} = 17$	$\sigma_{x2} = 2$	—	$\sigma_{x4} = 36$	—	—	$\sigma_{x11} = 4$	—		
			せん断	—	$\tau_{\theta 1} = 3$		$\tau_{\theta 2} = 14$			$\tau_{\theta 6} = 5$			
		第二及び第四ラゲ側	第一評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	$\sigma_{\phi 3} = 2$	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 12} = 5$	$\sigma_{13} = 79$
			軸方向	$\sigma_{x1} = 17$	$\sigma_{x2} = 2$	$\sigma_{x3} = 1$	—	—	—	$\sigma_{x11} = 4$	$\sigma_{x12} = 3$		
			せん断	—	—		$\tau_3 = 32, \tau_{c1} = 14$			—			
		第二評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 7} = 0$	—	—	$\sigma_{14} = 63$	
			軸方向	$\sigma_{x1} = 17$	$\sigma_{x2} = 2$	—	—	—	$\sigma_{x7} = 0$	$\sigma_{x11} = 4$	—		
			せん断	—	$\tau_{\theta 1} = 3$		$\tau_3 = 32$			$\tau_{\theta 6} = 5$			
		第三ラゲ側	第一評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	$\sigma_{\phi 3} = 2$	—	$\sigma_{\phi 6} = 33$	—	—	$\sigma_{\phi 12} = 5$	$\sigma_{15} = 70$
				軸方向	$\sigma_{x1} = 17$	$\sigma_{x2} = 2$	$\sigma_{x3} = 1$	$\sigma_{x4} = 36$	$\sigma_{x6} = 14$	—	$\sigma_{x11} = 4$	$\sigma_{x12} = 3$	
			第二評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	—	—	—	—	—	—	$\sigma_{16} = 64$
				軸方向	$\sigma_{x1} = 17$	$\sigma_{x2} = 2$	—	$\sigma_{x4} = 36$	—	—	$\sigma_{x11} = 4$	—	
				せん断	—	$\tau_{\theta 1} = 3$		$\tau_{\theta 2} = 14$			$\tau_{\theta 6} = 5$		

S2 補 VI-2-5-4-1-1 R0

地震の種類	地震の方向	評価点		応力	静水頭又は内圧による応力	運転時質量による応力		水平方向地震による応力			鉛直方向地震による応力		組合せ一次応力
						自重による応力	曲げモーメントによる応力	転倒モーメントによる応力	鉛直方向モーメントによる応力	周方向モーメントによる応力	鉛直方向荷重による応力	鉛直方向モーメントによる応力	
基準地震動 S _s	X方向及び鉛直方向	第一及び第四ラグ側	第一評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	$\sigma_{\phi 3} = 2$	—	$\sigma_{\phi 8} = 10$	—	—	$\sigma_{\phi 12} = 5$	$\sigma_{17} = 86$
			軸方向	$\sigma_{x1} = 17$	$\sigma_{x2} = 2$	$\sigma_{x3} = 1$	$\sigma_{x4} = 36$	$\sigma_{x8} = 5$	—	$\sigma_{x11} = 4$	$\sigma_{x12} = 3$		
			せん断	—	—		$\tau_{c4} = 10, \tau_6 = 23$			—			
		第二評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 10} = 0$	—	—	$\sigma_{18} = 81$	
		軸方向	$\sigma_{x1} = 17$	$\sigma_{x2} = 2$	—	$\sigma_{x4} = 36$	—	$\sigma_{x10} = 0$	$\sigma_{x11} = 4$	—			
		せん断	—	$\tau_{\theta 1} = 3$		$\tau_{\theta 5} = 10, \tau_6 = 23$			$\tau_{\theta 6} = 5$				
	第二及び第三ラグ側	第一評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	$\sigma_{\phi 3} = 2$	—	$\sigma_{\phi 9} = 23$	—	—	$\sigma_{\phi 12} = 5$	$\sigma_{19} = 95$	
			軸方向	$\sigma_{x1} = 17$	$\sigma_{x2} = 2$	$\sigma_{x3} = 1$	$\sigma_{x4} = 36$	$\sigma_{x9} = 10$	—	$\sigma_{x11} = 4$	$\sigma_{x12} = 3$		
			せん断	—	—		$\tau_{c4} = 10, \tau_6 = 23$			—			
		第二評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 10} = 0$	—	—		$\sigma_{110} = 81$
			軸方向	$\sigma_{x1} = 17$	$\sigma_{x2} = 2$	—	$\sigma_{x4} = 36$	—	$\sigma_{x10} = 0$	$\sigma_{x11} = 4$	—		
			せん断	—	$\tau_{\theta 1} = 3$		$\tau_{\theta 5} = 10, \tau_6 = 23$			$\tau_{\theta 6} = 5$			

S2 補 VI-2-5-4-1-1 R0

(5) 胴に生じる地震動のみによる一次+二次応力 (弾性設計用地震動 S d 又は静的震度)

(単位: MPa)

地震の種類	地震の方向	評価点	応力	鉛直方向地震による応力		水平方向地震による応力			組合せ一次+二次応力 (変動値)	
				自重による応力	曲げモーメントによる応力	転倒モーメントによる応力	鉛直方向モーメントによる応力	周方向モーメントによる応力		
弾性設計用地震動 S d 又は静的震度	Z 方向及び鉛直方向	第一ラゲ側	第一評価点	周方向	—	$\sigma_{\phi 12} = 2, \sigma_{2\phi 12} = 2$	—	$\sigma_{\phi 5} = 8, \sigma_{2\phi 5} = 9$	—	$\sigma_{21} = 81$
			軸方向	$\sigma_{x11} = 3$	$\sigma_{x12} = 1, \sigma_{2x12} = 4$	$\sigma_{x4} = 19$	$\sigma_{x5} = 4, \sigma_{2x5} = 18$	—		
			第二評価点	軸方向	$\sigma_{x11} = 3$	—	$\sigma_{x4} = 19$	—	—	$\sigma_{22} = 46$
			せん断	$\tau_{\theta 6} = 3$		$\tau_{\theta 2} = 7$				
		第二及び四ラゲ側	第一評価点	周方向	—	$\sigma_{\phi 12} = 2, \sigma_{2\phi 12} = 2$	—	—	—	$\sigma_{23} = 57$
				軸方向	$\sigma_{x11} = 3$	$\sigma_{x12} = 1, \sigma_{2x12} = 4$	—	—	—	
				せん断	—		$\tau_3 = 17, \tau_{c1} = 7$			
			第二評価点	周方向	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 7} = 0, \sigma_{2\phi 7} = 0$	$\sigma_{24} = 41$
				軸方向	$\sigma_{x11} = 3$	—	—	—	$\sigma_{x7} = 0, \sigma_{2x7} = 0$	
				せん断	—		$\tau_3 = 17, \tau_6 = 12$			
		第三ラゲ側	第一評価点	周方向	—	$\sigma_{\phi 12} = 2, \sigma_{2\phi 12} = 2$	—	$\sigma_{\phi 6} = 17, \sigma_{2\phi 6} = 20$	—	$\sigma_{25} = 135$
				軸方向	$\sigma_{x11} = 3$	$\sigma_{x12} = 1, \sigma_{2x12} = 4$	$\sigma_{x4} = 19$	$\sigma_{x6} = 8, \sigma_{2x6} = 40$	—	
			第二評価点	軸方向	$\sigma_{x11} = 3$	—	$\sigma_{x4} = 19$	—	—	$\sigma_{26} = 46$
				せん断	$\tau_{\theta 6} = 3$		$\tau_{\theta 2} = 7$			

S2 補 VI-2-5-4-1-1 R0

地震の種類	地震の方向	評価点		応力	鉛直方向地震による応力		水平方向地震による応力			組合せ 一次+二次応力 (変動値)
					自重による応力	曲げモーメントによる応力	転倒モーメント による応力	鉛直方向モーメントによる応力	周方向モーメント による応力	
弾性設計用地震動 S d 又は静的震度	X 方向及び鉛直方向	第一及び第四ラグ側	第一評価点	周方向	—	$\sigma_{\phi 12} = 2, \sigma_{2\phi 12} = 2$	—	$\sigma_{\phi 8} = 6, \sigma_{2\phi 8} = 7$	—	$\sigma_{27} = 87$
			軸方向	$\sigma_{x11} = 3$	$\sigma_{x12} = 1, \sigma_{2x12} = 4$	$\sigma_{x4} = 19$	$\sigma_{x8} = 3, \sigma_{2x8} = 13$	—		
			せん断	—		$\tau_{c4} = 5, \tau_6 = 12$				
		第二評価点	周方向	—	—	—	$\sigma_{\phi 10} = 0, \sigma_{2\phi 10} = 0$	—	$\sigma_{28} = 62$	
		軸方向	$\sigma_{x11} = 3$	—	$\sigma_{x4} = 19$	$\sigma_{x10} = 0, \sigma_{2x10} = 0$	—			
		せん断	$\tau_{\theta 6} = 3$		$\tau_{\theta 5} = 5, \tau_6 = 12$					
	第二及び第三ラグ側	第一評価点	周方向	—	$\sigma_{\phi 12} = 2, \sigma_{2\phi 12} = 2$	—	$\sigma_{\phi 9} = 12, \sigma_{2\phi 9} = 14$	—	$\sigma_{29} = 123$	
			軸方向	$\sigma_{x11} = 3$	$\sigma_{x12} = 1, \sigma_{2x12} = 4$	$\sigma_{x4} = 19$	$\sigma_{x9} = 6, \sigma_{2x9} = 30$	—		
			せん断	—		$\tau_{c4} = 5, \tau_6 = 12$				
		第二評価点	周方向	—	—	—	$\sigma_{\phi 10} = 0, \sigma_{2\phi 10} = 0$	—	$\sigma_{210} = 62$	
		軸方向	$\sigma_{x11} = 3$	—	$\sigma_{x4} = 19$	$\sigma_{x10} = 0, \sigma_{2x10} = 0$	—			
		せん断	$\tau_{\theta 6} = 3$		$\tau_{\theta 5} = 5, \tau_6 = 12$					

S2 補 VI-2-5-4-1-1 R0

(6) 洞に生じる地震動のみによる一次+二次応力 (基準地震動 S s)

(単位: MPa)

地震の種類	地震の方向	評価点	応力	鉛直方向地震による応力		水平方向地震による応力			組合せ一次+二次応力 (変動値)		
				自重による応力	曲げモーメントによる応力	転倒モーメントによる応力	鉛直方向モーメントによる応力	周方向モーメントによる応力			
基準地震動 S s	Z 方向及び鉛直方向	第一ラゲ側	第一評価点	周方向	—	$\sigma_{\phi 12} = 5, \sigma_{2\phi 12} = 6$	—	$\sigma_{\phi 5} = 15, \sigma_{2\phi 5} = 17$	—	$\sigma_{21} = 159$	
			第一評価点	軸方向	$\sigma_{x11} = 4$	$\sigma_{x12} = 3, \sigma_{2x12} = 12$	$\sigma_{x4} = 36$	$\sigma_{x5} = 7, \sigma_{2x5} = 35$	—		
			第二評価点	軸方向	$\sigma_{x11} = 4$	—	$\sigma_{x4} = 36$	—	—		$\sigma_{22} = 88$
			第二評価点	せん断	$\tau_{\theta 6} = 5$		$\tau_{\theta 2} = 14$				
		第二及び四ラゲ側	第一評価点	第一評価点	周方向	—	$\sigma_{\phi 12} = 5, \sigma_{2\phi 12} = 6$	—	—	—	$\sigma_{23} = 120$
				第一評価点	軸方向	$\sigma_{x11} = 4$	$\sigma_{x12} = 3, \sigma_{2x12} = 12$	—	—	—	
				第一評価点	せん断	—		$\tau_3 = 32, \tau_{c1} = 14$			
			第二評価点	第二評価点	周方向	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 7} = 0, \sigma_{2\phi 7} = 0$	$\sigma_{24} = 78$
				第二評価点	軸方向	$\sigma_{x11} = 4$	—	—	—	$\sigma_{x7} = 0, \sigma_{2x7} = 0$	
				第二評価点	せん断	—		$\tau_3 = 32, \tau_6 = 23$			
		第三ラゲ側	第一評価点	第一評価点	周方向	—	$\sigma_{\phi 12} = 5, \sigma_{2\phi 12} = 6$	—	$\sigma_{\phi 6} = 33, \sigma_{2\phi 6} = 39$	—	$\sigma_{25} = 263$
				第一評価点	軸方向	$\sigma_{x11} = 4$	$\sigma_{x12} = 3, \sigma_{2x12} = 12$	$\sigma_{x4} = 36$	$\sigma_{x6} = 14, \sigma_{2x6} = 80$	—	
			第二評価点	第二評価点	軸方向	$\sigma_{x11} = 4$	—	$\sigma_{x4} = 36$	—	—	$\sigma_{26} = 88$
				第二評価点	せん断	$\tau_{\theta 6} = 5$		$\tau_{\theta 2} = 14$			

S2 補 VI-2-5-4-1-1 R0

地震の種類	地震の方向	評価点		応力	鉛直方向地震による応力		水平方向地震による応力			組合せ 一次+二次応力 (変動値)
					自重による応力	曲げモーメントによる応力	転倒モーメント による応力	鉛直方向モーメントによる応力	周方向モーメント による応力	
基準地震動 S s	X 方向及び鉛直方向	第一及び第四ラグ側	第一評価点	周方向	—	$\sigma_{\phi 12} = 5, \sigma_{2\phi 12} = 6$	—	$\sigma_{\phi 8} = 10, \sigma_{2\phi 8} = 12$	—	$\sigma_{27} = 170$
			軸方向	$\sigma_{x11} = 4$	$\sigma_{x12} = 3, \sigma_{2x12} = 12$	$\sigma_{x4} = 36$	$\sigma_{x8} = 5, \sigma_{2x8} = 25$	—		
			せん断	—		$\tau_{c4} = 10, \tau_6 = 23$				
		第二評価点	周方向	—	—	—	$\sigma_{\phi 10} = 0, \sigma_{2\phi 10} = 0$	—	$\sigma_{28} = 119$	
		軸方向	$\sigma_{x11} = 4$	—	$\sigma_{x4} = 36$	$\sigma_{x10} = 0, \sigma_{2x10} = 0$	—			
		せん断	$\tau_{\theta 6} = 5$		$\tau_{\theta 5} = 10, \tau_6 = 23$					
	第二及び第三ラグ側	第一評価点	周方向	—	$\sigma_{\phi 12} = 5, \sigma_{2\phi 12} = 6$	—	$\sigma_{\phi 9} = 23, \sigma_{2\phi 9} = 28$	—	$\sigma_{29} = 239$	
			軸方向	$\sigma_{x11} = 4$	$\sigma_{x12} = 3, \sigma_{2x12} = 12$	$\sigma_{x4} = 36$	$\sigma_{x9} = 10, \sigma_{2x9} = 57$	—		
			せん断	—		$\tau_{c4} = 10, \tau_6 = 23$				
		第二評価点	周方向	—	—	—	$\sigma_{\phi 10} = 0, \sigma_{2\phi 10} = 0$	—	$\sigma_{210} = 119$	
		軸方向	$\sigma_{x11} = 4$	—	$\sigma_{x4} = 36$	$\sigma_{x10} = 0, \sigma_{2x10} = 0$	—			
		せん断	$\tau_{\theta 6} = 5$		$\tau_{\theta 5} = 10, \tau_6 = 23$					

1.3.2 ラグに生じる応力

(単位：MPa)

地震力の種類	地震の方向		運転時質量による応力		水平方向地震による応力		鉛直方向地震による応力		組合せ応力
			曲 げ	せん断	曲 げ	せん断	曲 げ	せん断	
弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	Z 方向及び鉛直方向	第 1 ラグ側	$\sigma_{s1} = 1$	$\tau_{s1} = 3$	$\sigma_{s2} = 3$	$\tau_{s2} = 7$	$\sigma_{s7} = 1$	$\tau_{s7} = 3$	$\sigma_{1s} = 17$
		第 2 及び第 4 ラグ側	$\sigma_{s1} = 1$	$\tau_{s1} = 3$	$\sigma_{s3} = 0$	$\tau_{s3} = 15$	$\sigma_{s7} = 1$	$\tau_{s7} = 3$	$\sigma_{2s} = 29$
		第 3 ラグ側	$\sigma_{s1} = 1$	$\tau_{s1} = 3$	$\sigma_{s4} = 5$	$\tau_{s4} = 7$	$\sigma_{s7} = 1$	$\tau_{s7} = 3$	$\sigma_{3s} = 17$
	X 方向及び鉛直方向	第 1 及び第 4 ラグ側	$\sigma_{s1} = 1$	$\tau_{s1} = 3$	$\sigma_{s5} = 2$	$\tau_{s5} = 15$	$\sigma_{s7} = 1$	$\tau_{s7} = 3$	$\sigma_{4s} = 30$
		第 2 及び第 3 ラグ側	$\sigma_{s1} = 1$	$\tau_{s1} = 3$	$\sigma_{s6} = 4$	$\tau_{s6} = 15$	$\sigma_{s7} = 1$	$\tau_{s7} = 3$	$\sigma_{5s} = 30$
基準地震動 S _s	Z 方向及び鉛直方向	第 1 ラグ側	$\sigma_{s1} = 1$	$\tau_{s1} = 3$	$\sigma_{s2} = 4$	$\tau_{s2} = 13$	$\sigma_{s7} = 2$	$\tau_{s7} = 5$	$\sigma_{1s} = 29$
		第 2 及び第 4 ラグ側	$\sigma_{s1} = 1$	$\tau_{s1} = 3$	$\sigma_{s3} = 0$	$\tau_{s3} = 28$	$\sigma_{s7} = 2$	$\tau_{s7} = 5$	$\sigma_{2s} = 52$
		第 3 ラグ側	$\sigma_{s1} = 1$	$\tau_{s1} = 3$	$\sigma_{s4} = 10$	$\tau_{s4} = 13$	$\sigma_{s7} = 2$	$\tau_{s7} = 5$	$\sigma_{3s} = 30$
	X 方向及び鉛直方向	第 1 及び第 4 ラグ側	$\sigma_{s1} = 1$	$\tau_{s1} = 3$	$\sigma_{s5} = 3$	$\tau_{s5} = 29$	$\sigma_{s7} = 2$	$\tau_{s7} = 5$	$\sigma_{4s} = 54$
		第 2 及び第 3 ラグ側	$\sigma_{s1} = 1$	$\tau_{s1} = 3$	$\sigma_{s6} = 7$	$\tau_{s6} = 29$	$\sigma_{s7} = 2$	$\tau_{s7} = 5$	$\sigma_{5s} = 55$

1.3.3 基礎ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

地震力の種類	地震の方向		引張応力	せん断応力
弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	Z 方向及び鉛直方向	第 1 ラグ側	$\sigma_{b1} = 37$	—
		第 2 及び第 4 ラグ側	$\sigma_{b2} = 200$	$\tau_{b2} = 0$
		第 3 ラグ側	$\sigma_{b3} = 129$	—
	X 方向及び鉛直方向	第 1 及び第 4 ラグ側	$\sigma_{b4} = 158$	$\tau_{b4} = 0$
		第 2 及び第 3 ラグ側	$\sigma_{b5} = 226$	$\tau_{b5} = 0$
基準地震動 S _s	Z 方向及び鉛直方向	第 1 ラグ側	$\sigma_{b1} = 57$	—
		第 2 及び第 4 ラグ側	$\sigma_{b2} = 374$	$\tau_{b2} = 0$
		第 3 ラグ側	$\sigma_{b3} = 237$	—
	X 方向及び鉛直方向	第 1 及び第 4 ラグ側	$\sigma_{b4} = 292$	$\tau_{b4} = 0$
		第 2 及び第 3 ラグ側	$\sigma_{b5} = 425$	$\tau_{b5} = 0$

1.3.4 追設基礎ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

地震力の種類	せん断応力
弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	$\tau_a = 92$
基準地震動 S _s	$\tau_a = 178$

1.4 結論

1.4.1 固有周期 (単位: s)

水平方向(1次)	
水平方向(2次)	
鉛直方向	

1.4.2 応力

(単位: MPa)

部材	材料	応力	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s	
			算出応力	許容応力	算出応力	許容応力
胴板	SGV49	一次一般膜	$\sigma_0 = 38$	$S_a = 242$	$\sigma_0 = 55$	$S_a = 265$
		一次	$\sigma_1 = 62$	$S_a = 364$	$\sigma_1 = 95$	$S_a = 397$
		一次+二次	$\sigma_2 = 135$	$S_a = 485$	$\sigma_2 = 263$	$S_a = 485$
ラグ	SM41A	組合せ	$\sigma_s = 30$	$f_{tm} = 199$	$\sigma_s = 55$	$f_{tm} = 239$
基礎ボルト	SCM435	引張	$\sigma_b = 226$	$f_{ts} = 455^*$	$\sigma_b = 425$	$f_{ts} = 455^*$
		せん断	$\tau_b = 0$	$f_{sb} = 350$	$\tau_b = 0$	$f_{sb} = 350$
追設基礎ボルト	SCM435	せん断	$\tau_a = 92$	$f_{sba} = 280$	$\tau_a = 178$	$f_{sba} = 280$

すべて許容応力以下である。

注記*: $f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{t0} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{t0}]$

2. 重大事故等対処設備

2.1 設計条件

機器名称	設備分類	据付場所及び床面高さ (m)	固有周期(s)		弾性設計用地震動 S d 又は静的震度		基準地震動 S s		最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)
			水平方向	鉛直方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度			
残留熱除去系 熱交換器	常設/防止 (DB拡張)	原子炉建物 EL 23.8*1			—	—	C _H =1.73*2 又は*3	C _V =2.07*2	1.37	140	140

注記*1: 基準床レベルを示す。

*2: 設計用震度Ⅱ (基準地震動 S s)

*3: 設計用床応答スペクトルⅡ (基準地震動 S s) より得られる震度

2.2 機器要目

m ₀ (kg)	m ₁ (kg)	m ₂ (kg)	D _i (mm)	t (mm)	E*1 (MPa)	E _b *2 (MPa)	G*1 (MPa)	H ₁ (mm)	H ₂ (mm)	C ₁ (mm)	C ₂ (mm)	e (mm)
			1800	38.0	195000	197000	75000	1048	1929	600	300	600

ε	A _{s1} (mm ²)	A _{s2} (mm ²)	Z _{sp} (mm ³)	Z _{sδ} (mm ³)	Z _{st} (mm ³)	k _{δ1}	k _{δ2}	k _{c1}	k _{c2}	C _{δ1}	C _{δ2}	C _{c1}	C _{c2}
1	4.688×10 ⁴	8.363×10 ⁴	5.470×10 ⁷	4.454×10 ⁷	3.110×10 ⁷								

n	n _a	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)	L _b (mm)	A _b (mm ²)	A _{b e} (mm ²)	A _a (mm ²)	m _a (kg)
2		906	325	312.5	850	715	1810	1470		

S _y (胴板) (MPa)	S _u (胴板) (MPa)	S _y (ラグ) (MPa)	S _u (ラグ) (MPa)	F (ラグ) (MPa)	F* (ラグ) (MPa)
233*1	425*1	183*1 (40mm<厚さ≤75mm)	373*1 (40mm<厚さ≤75mm)	—	220

S _y (基礎ボルト) (MPa)	S _u (基礎ボルト) (MPa)	F (基礎ボルト) (MPa)	F* (基礎ボルト) (MPa)	S _y (追設基礎ボルト) (MPa)	S _u (追設基礎ボルト) (MPa)	F (追設基礎ボルト) (MPa)	F* (追設基礎ボルト) (MPa)
659*2 (径≤60mm)	847*2 (径≤60mm)	—	592	659*2 (径≤60mm)	847*2 (径≤60mm)	—	592

注記*1: 最高使用温度で算出

*2: 周囲環境温度で算出

2.3 計算数値

2.3.1 胴に生じる応力

(1) 胴に生じる応力一次一般膜応力 (基準地震動 S s)

(単位: MPa)

応力	静水頭又は内圧による応力	運転時質量による応力	水平方向地震による応力	鉛直方向地震による応力	組合せ一次一般膜応力
		自重による応力	転倒モーメントによる応力	鉛直方向荷重による応力	
周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	—	—	$\sigma_0 = 55$
軸方向	$\sigma_{x 1} = 17$	$\sigma_{x 2} = 2$	$\sigma_{x 4} = 36$	$\sigma_{x 11} = 4$	

(2) 胴に生じる一次応力 (基準地震動 S s)

(単位: MPa)

地震の種類	地震の方向	評価点	応力	静水頭又は内圧による応力	運転時質量による応力		水平方向地震による応力			鉛直方向地震による応力		組合せ一次応力	
					自重による応力	曲げモーメントによる応力	転倒モーメントによる応力	鉛直方向モーメントによる応力	周方向モーメントによる応力	鉛直方向荷重による応力	鉛直方向モーメントによる応力		
基準地震動 S s	Z 方向及び鉛直方向	第一ラゲ側	第一評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	$\sigma_{\phi 3} = 2$	—	$\sigma_{\phi 5} = 15$	—	—	$\sigma_{\phi 12} = 5$	$\sigma_{11} = 62$
			軸方向	$\sigma_{x 1} = 17$	$\sigma_{x 2} = 2$	$\sigma_{x 3} = 1$	$\sigma_{x 4} = 36$	$\sigma_{x 5} = 7$	—	$\sigma_{x 11} = 4$	$\sigma_{x 12} = 3$		
			第二評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	—	—	—	—	—	—	$\sigma_{12} = 64$
			軸方向	$\sigma_{x 1} = 17$	$\sigma_{x 2} = 2$	—	$\sigma_{x 4} = 36$	—	—	$\sigma_{x 11} = 4$	—		
			せん断	—	$\tau_{\theta 1} = 3$		$\tau_{\theta 2} = 14$			$\tau_{\theta 6} = 5$			
		第二及び第四ラゲ側	第一評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	$\sigma_{\phi 3} = 2$	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 12} = 5$	$\sigma_{13} = 79$
		軸方向	$\sigma_{x 1} = 17$	$\sigma_{x 2} = 2$	$\sigma_{x 3} = 1$	—	—	—	$\sigma_{x 11} = 4$	$\sigma_{x 12} = 3$			
		せん断	—	—		$\tau_3 = 32, \tau_{c 1} = 14$			—				
		第二評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 7} = 0$	—	—	$\sigma_{14} = 63$	
		軸方向	$\sigma_{x 1} = 17$	$\sigma_{x 2} = 2$	—	—	—	$\sigma_{x 7} = 0$	$\sigma_{x 11} = 4$	—			
		せん断	—	$\tau_{\theta 1} = 3$		$\tau_3 = 32$			$\tau_{\theta 6} = 5$				
		第三ラゲ側	第一評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	$\sigma_{\phi 3} = 2$	—	$\sigma_{\phi 6} = 33$	—	—	$\sigma_{\phi 12} = 5$	$\sigma_{15} = 70$
		軸方向	$\sigma_{x 1} = 17$	$\sigma_{x 2} = 2$	$\sigma_{x 3} = 1$	$\sigma_{x 4} = 36$	$\sigma_{x 6} = 14$	—	$\sigma_{x 11} = 4$	$\sigma_{x 12} = 3$			
		第二評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	—	—	—	—	—	—	$\sigma_{16} = 64$	
		軸方向	$\sigma_{x 1} = 17$	$\sigma_{x 2} = 2$	—	$\sigma_{x 4} = 36$	—	—	$\sigma_{x 11} = 4$	—			
せん断	—	$\tau_{\theta 1} = 3$		$\tau_{\theta 2} = 14$			$\tau_{\theta 6} = 5$						

S2 補 VI-2-5-4-1-1 R0

地震の種類	地震の方向	評価点		応力	静水頭又は内圧による応力	運転時質量による応力		水平方向地震による応力			鉛直方向地震による応力		組合せ一次応力
						自重による応力	曲げモーメントによる応力	転倒モーメントによる応力	鉛直方向モーメントによる応力	周方向モーメントによる応力	鉛直方向荷重による応力	鉛直方向モーメントによる応力	
基準地震動 S s	X方向及び鉛直方向	第一及び第四ラグ側	第一評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	$\sigma_{\phi 3} = 2$	—	$\sigma_{\phi 8} = 11$	—	—	$\sigma_{\phi 12} = 5$	$\sigma_{17} = 86$
			軸方向	$\sigma_{x1} = 17$	$\sigma_{x2} = 2$	$\sigma_{x3} = 1$	$\sigma_{x4} = 36$	$\sigma_{x8} = 5$	—	$\sigma_{x11} = 4$	$\sigma_{x12} = 3$		
			せん断	—	—		$\tau_{c4} = 10, \tau_6 = 23$		—				
		第二評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 10} = 0$	—	—	$\sigma_{18} = 81$	
		軸方向	$\sigma_{x1} = 17$	$\sigma_{x2} = 2$	—	$\sigma_{x4} = 36$	—	$\sigma_{x10} = 0$	$\sigma_{x11} = 4$	—			
		せん断	—	$\tau_{\theta 1} = 3$		$\tau_{\theta 5} = 10, \tau_6 = 23$		$\tau_{\theta 6} = 5$					
	第二及び第三ラグ側	第一評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	$\sigma_{\phi 3} = 2$	—	$\sigma_{\phi 9} = 23$	—	—	$\sigma_{\phi 12} = 5$	$\sigma_{19} = 95$	
			軸方向	$\sigma_{x1} = 17$	$\sigma_{x2} = 2$	$\sigma_{x3} = 1$	$\sigma_{x4} = 36$	$\sigma_{x9} = 10$	—	$\sigma_{x11} = 4$	$\sigma_{x12} = 3$		
			せん断	—	—		$\tau_{c4} = 10, \tau_6 = 23$		—				
		第二評価点	周方向	$\sigma_{\phi 1} = 34$	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 10} = 0$	—	—	$\sigma_{110} = 81$	
		軸方向	$\sigma_{x1} = 17$	$\sigma_{x2} = 2$	—	$\sigma_{x4} = 36$	—	$\sigma_{x10} = 0$	$\sigma_{x11} = 4$	—			
		せん断	—	$\tau_{\theta 1} = 3$		$\tau_{\theta 5} = 10, \tau_6 = 23$		$\tau_{\theta 6} = 5$					

S2 補 VI-2-5-4-1-1 R0

(3) 胴に生じる地震動のみによる一次+二次応力 (基準地震動 S s)

(単位: MPa)

地震の種類	地震の方向	評価点	応力	鉛直方向地震による応力		水平方向地震による応力			組合せ一次+二次応力 (変動値)		
				自重による応力	曲げモーメントによる応力	転倒モーメントによる応力	鉛直方向モーメントによる応力	周方向モーメントによる応力			
基準地震動 S s	Z 方向及び鉛直方向	第一ラゲ側	第一評価点	周方向	—	$\sigma_{\phi 12} = 5, \sigma_{2\phi 12} = 6$	—	$\sigma_{\phi 5} = 15, \sigma_{2\phi 5} = 17$	—	$\sigma_{21} = 159$	
			第一評価点	軸方向	$\sigma_{x11} = 4$	$\sigma_{x12} = 3, \sigma_{2x12} = 12$	$\sigma_{x4} = 36$	$\sigma_{x5} = 7, \sigma_{2x5} = 35$	—		
			第二評価点	軸方向	$\sigma_{x11} = 4$	—	$\sigma_{x4} = 36$	—	—		$\sigma_{22} = 88$
			第二評価点	せん断	$\tau_{\theta 6} = 5$		$\tau_{\theta 2} = 14$				
		第二及び四ラゲ側	第一評価点	第一評価点	周方向	—	$\sigma_{\phi 12} = 5, \sigma_{2\phi 12} = 6$	—	—	—	$\sigma_{23} = 120$
				第一評価点	軸方向	$\sigma_{x11} = 4$	$\sigma_{x12} = 3, \sigma_{2x12} = 12$	—	—	—	
				第一評価点	せん断	—		$\tau_3 = 32, \tau_{c1} = 14$			
			第二評価点	第二評価点	周方向	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 7} = 0, \sigma_{2\phi 7} = 0$	$\sigma_{24} = 78$
				第二評価点	軸方向	$\sigma_{x11} = 4$	—	—	—	$\sigma_{x7} = 0, \sigma_{2x7} = 0$	
				第二評価点	せん断	—		$\tau_3 = 32, \tau_6 = 23$			
		第三ラゲ側	第一評価点	第一評価点	周方向	—	$\sigma_{\phi 12} = 5, \sigma_{2\phi 12} = 6$	—	$\sigma_{\phi 6} = 33, \sigma_{2\phi 6} = 39$	—	$\sigma_{25} = 263$
				第一評価点	軸方向	$\sigma_{x11} = 4$	$\sigma_{x12} = 3, \sigma_{2x12} = 12$	$\sigma_{x4} = 36$	$\sigma_{x6} = 14, \sigma_{2x6} = 80$	—	
			第二評価点	第二評価点	軸方向	$\sigma_{x11} = 4$	—	$\sigma_{x4} = 36$	—	—	$\sigma_{26} = 88$
				第二評価点	せん断	$\tau_{\theta 6} = 5$		$\tau_{\theta 2} = 14$			

S2 補 VI-2-5-4-1-1 R0

地震の種類	地震の方向	評価点		応力	鉛直方向地震による応力		水平方向地震による応力			組合せ 一次+二次応力 (変動値)
					自重による応力	曲げモーメントによる応力	転倒モーメントによる応力	鉛直方向モーメントによる応力	周方向モーメントによる応力	
基準地震動 S s	X 方向及び鉛直方向	第一及び第四ラグ側	第一評価点	周方向	—	$\sigma_{\phi 12} = 5, \sigma_{2\phi 12} = 6$	—	$\sigma_{\phi 8} = 11, \sigma_{2\phi 8} = 12$	—	$\sigma_{27} = 170$
				軸方向	$\sigma_{x11} = 4$	$\sigma_{x12} = 3, \sigma_{2x12} = 12$	$\sigma_{x4} = 36$	$\sigma_{x8} = 5, \sigma_{2x8} = 25$	—	
				せん断	—		$\tau_{c4} = 10, \tau_6 = 23$			
		第二評価点	周方向	—	—	—	$\sigma_{\phi 10} = 0, \sigma_{2\phi 10} = 0$	—	$\sigma_{28} = 119$	
			軸方向	$\sigma_{x11} = 4$	—	$\sigma_{x4} = 36$	$\sigma_{x10} = 0, \sigma_{2x10} = 0$	—		
			せん断	$\tau_{\theta 6} = 5$		$\tau_{\theta 5} = 10, \tau_6 = 23$				
	第二及び第三ラグ側	第一評価点	周方向	—	$\sigma_{\phi 12} = 5, \sigma_{2\phi 12} = 6$	—	$\sigma_{\phi 9} = 23, \sigma_{2\phi 9} = 28$	—	$\sigma_{29} = 239$	
			軸方向	$\sigma_{x11} = 4$	$\sigma_{x12} = 3, \sigma_{2x12} = 12$	$\sigma_{x4} = 36$	$\sigma_{x9} = 10, \sigma_{2x9} = 57$	—		
			せん断	—		$\tau_{c4} = 10, \tau_6 = 23$				
		第二評価点	周方向	—	—	—	$\sigma_{\phi 10} = 0, \sigma_{2\phi 10} = 0$	—	$\sigma_{210} = 119$	
			軸方向	$\sigma_{x11} = 4$	—	$\sigma_{x4} = 36$	$\sigma_{x10} = 0, \sigma_{2x10} = 0$	—		
			せん断	$\tau_{\theta 6} = 5$		$\tau_{\theta 5} = 10, \tau_6 = 23$				

2.3.2 ラグに生じる応力

(単位：MPa)

地震力の種類	地震の方向		運転時質量による応力		水平方向地震による応力		鉛直方向地震による応力		組合せ応力
			曲 げ	せん断	曲 げ	せん断	曲 げ	せん断	
基準地震動 S _s	Z方向及び 鉛直方向	第1ラグ側	$\sigma_{s1} = 1$	$\tau_{s1} = 3$	$\sigma_{s2} = 5$	$\tau_{s2} = 13$	$\sigma_{s7} = 2$	$\tau_{s7} = 5$	$\sigma_{1s} = 29$
		第2及び第4ラグ側	$\sigma_{s1} = 1$	$\tau_{s1} = 3$	$\sigma_{s3} = 0$	$\tau_{s3} = 28$	$\sigma_{s7} = 2$	$\tau_{s7} = 5$	$\sigma_{2s} = 52$
		第3ラグ側	$\sigma_{s1} = 1$	$\tau_{s1} = 3$	$\sigma_{s4} = 10$	$\tau_{s4} = 13$	$\sigma_{s7} = 2$	$\tau_{s7} = 5$	$\sigma_{3s} = 30$
	X方向及び 鉛直方向	第1及び第4ラグ側	$\sigma_{s1} = 1$	$\tau_{s1} = 3$	$\sigma_{s5} = 3$	$\tau_{s5} = 29$	$\sigma_{s7} = 2$	$\tau_{s7} = 5$	$\sigma_{4s} = 54$
		第2及び第3ラグ側	$\sigma_{s1} = 1$	$\tau_{s1} = 3$	$\sigma_{s6} = 7$	$\tau_{s6} = 29$	$\sigma_{s7} = 2$	$\tau_{s7} = 5$	$\sigma_{5s} = 55$

2.3.3 基礎ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

地震力の種類	地震の方向		引張応力	せん断応力
			第1ラグ側	$\sigma_{b1} = 57$
基準地震動 S _s	Z方向及び 鉛直方向	第2及び第4ラグ側	$\sigma_{b2} = 373$	$\tau_{b2} = 0$
		第3ラグ側	$\sigma_{b3} = 237$	—
		X方向及び 鉛直方向	第1及び第4ラグ側	$\sigma_{b4} = 291$
	第2及び第3ラグ側		$\sigma_{b5} = 424$	$\tau_{b5} = 0$

2.3.4 追設基礎ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

地震力の種類	せん断応力
基準地震動S _s	$\tau_a = 178$

2.4 結論

2.4.1 固有周期 (単位: s)

水平方向(1次)	
水平方向(2次)	
鉛直方向	

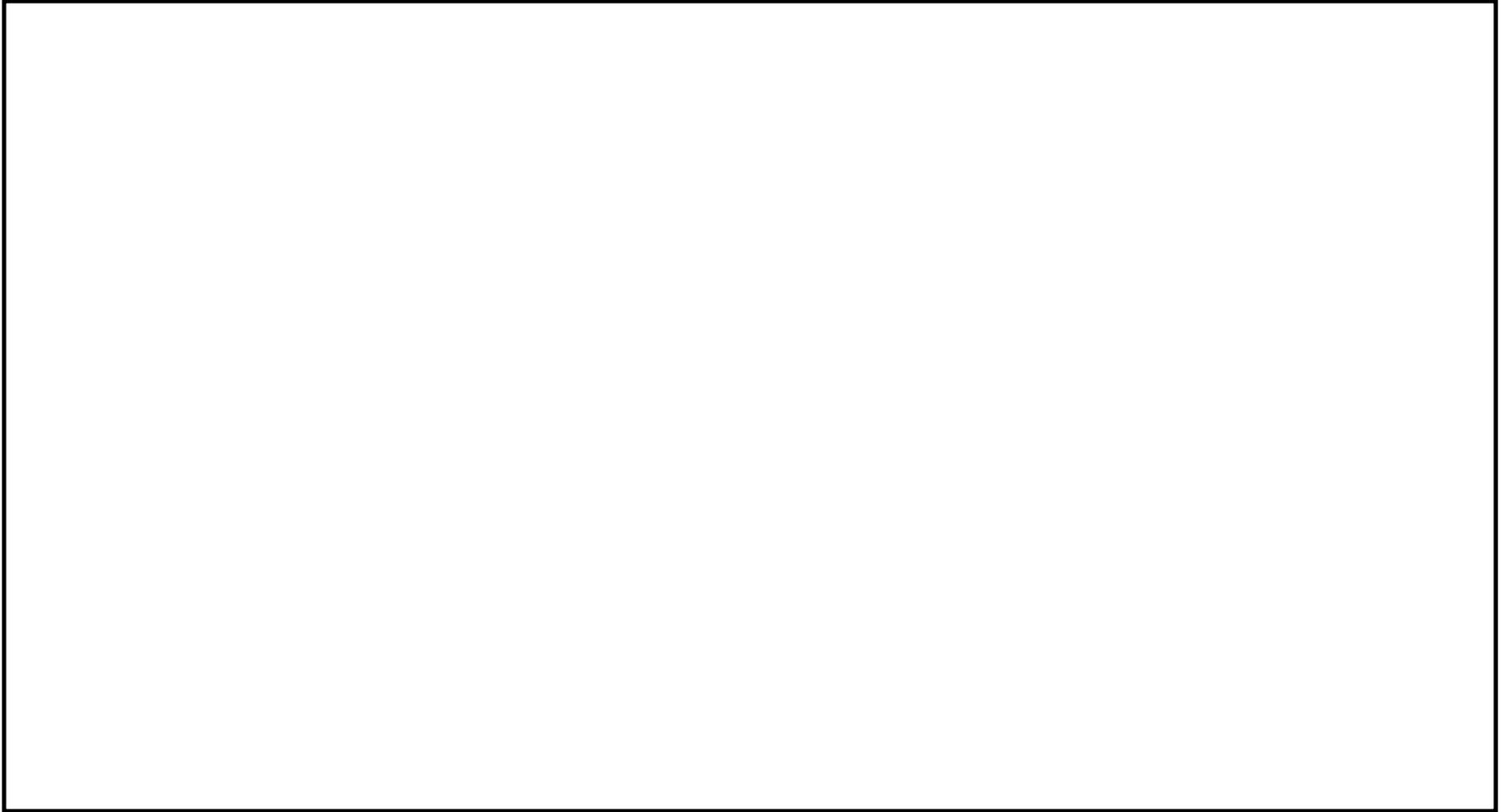
2.4.2 応力 (単位: MPa)

部材	材料	応力	基準地震動 S_s	
			算出応力	許容応力
胴板	SGV49	一次一般膜	$\sigma_0 = 55$	$S_a = 255$
		一次	$\sigma_1 = 95$	$S_a = 382$
		一次+二次	$\sigma_2 = 263$	$S_a = 466$
ラグ	SM41A	組合せ	$\sigma_s = 55$	$f_{tm} = 220$
基礎ボルト	SCM435	引張	$\sigma_b = 424$	$f_{ts} = 444^*$
		せん断	$\tau_b = 0$	$f_{sb} = 341$
追設基礎ボルト	SCM435	せん断	$\tau_a = 178$	$f_{sba} = 272$

すべて許容応力以下である。

注記*: $f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}]$

S2 補 VI-2-5-4-1-1 R0E



島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添 2-014-22
提出年月日	2023年1月19日

VI-2-11-2-7-7 原子炉浄化系補助熱交換器の耐震性についての計算書

S2 補 VI-2-11-2-7-7 R0

2023年1月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

目 次

1. 概要	1
2. 一般事項	1
2.1 配置概要	1
2.2 構造計画	1
2.3 評価方針	3
2.4 適用規格・基準等	4
2.5 記号の説明	5
2.6 計算精度と数値の丸め方	12
3. 評価部位	13
4. 地震応答解析及び構造強度評価	13
4.1 地震応答解析及び構造強度評価方法	13
4.2 荷重の組合せ及び許容応力	13
4.3 解析モデル及び諸元	16
4.4 固有周期	17
4.5 設計用地震力	18
4.6 計算方法	19
4.7 計算条件	33
4.8 応力の評価	33
5. 評価結果	35
5.1 設計基準対象施設としての評価結果	35
6. 引用文献	35

1. 概要

本計算書は、VI-2-11-1「波及的影響を及ぼすおそれのある下位クラス施設の耐震評価方針」の耐震評価方針に基づき、下位クラス施設である原子炉浄化系補助熱交換器（Bクラス施設）が基準地震動 S_s に対して十分な構造強度を有していることを確認することで、接続している上位クラス施設である原子炉補機冷却系配管に対して、波及的影響を及ぼさないことを説明するものである。

2. 一般事項

2.1 配置概要

原子炉浄化系補助熱交換器は、原子炉建物2階に設置されている。原子炉浄化系補助熱交換器は、図2-1の位置関係図に示すように、上位クラス施設である原子炉補機冷却系配管が接続していることから、地震時に本機器が損傷又は転倒した場合は原子炉補機冷却系配管に対して波及的影響を及ぼすおそれがある。

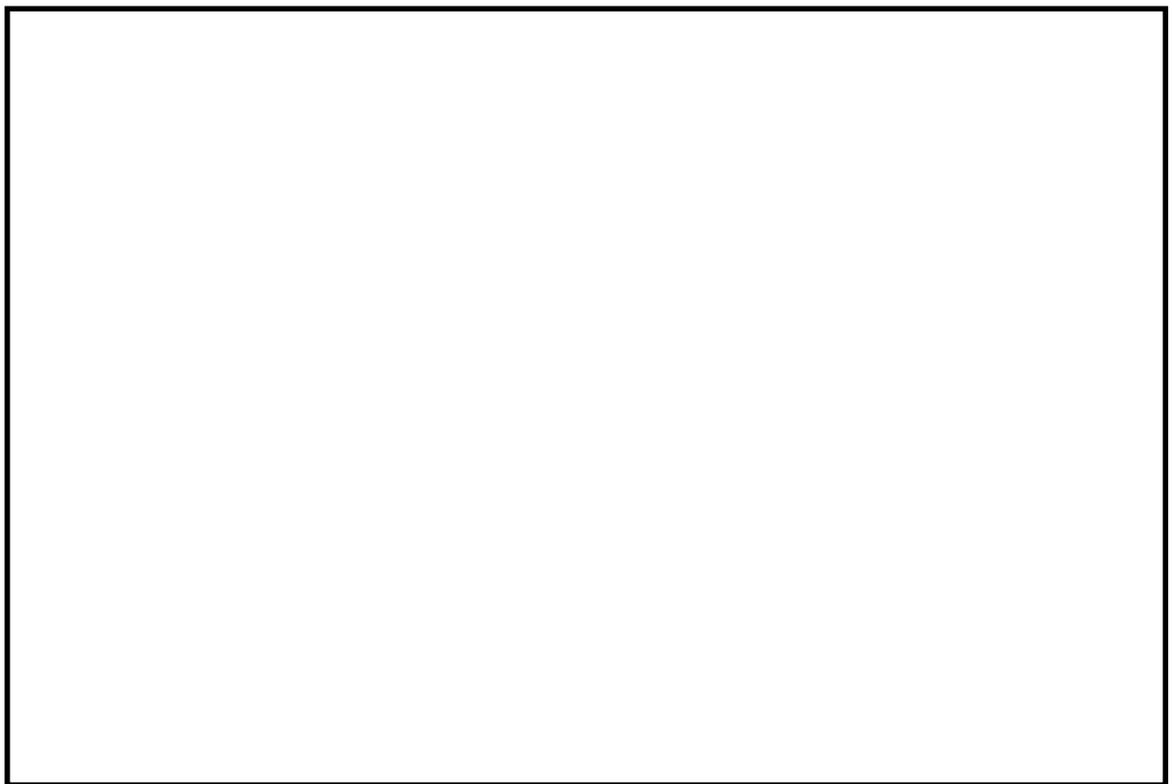
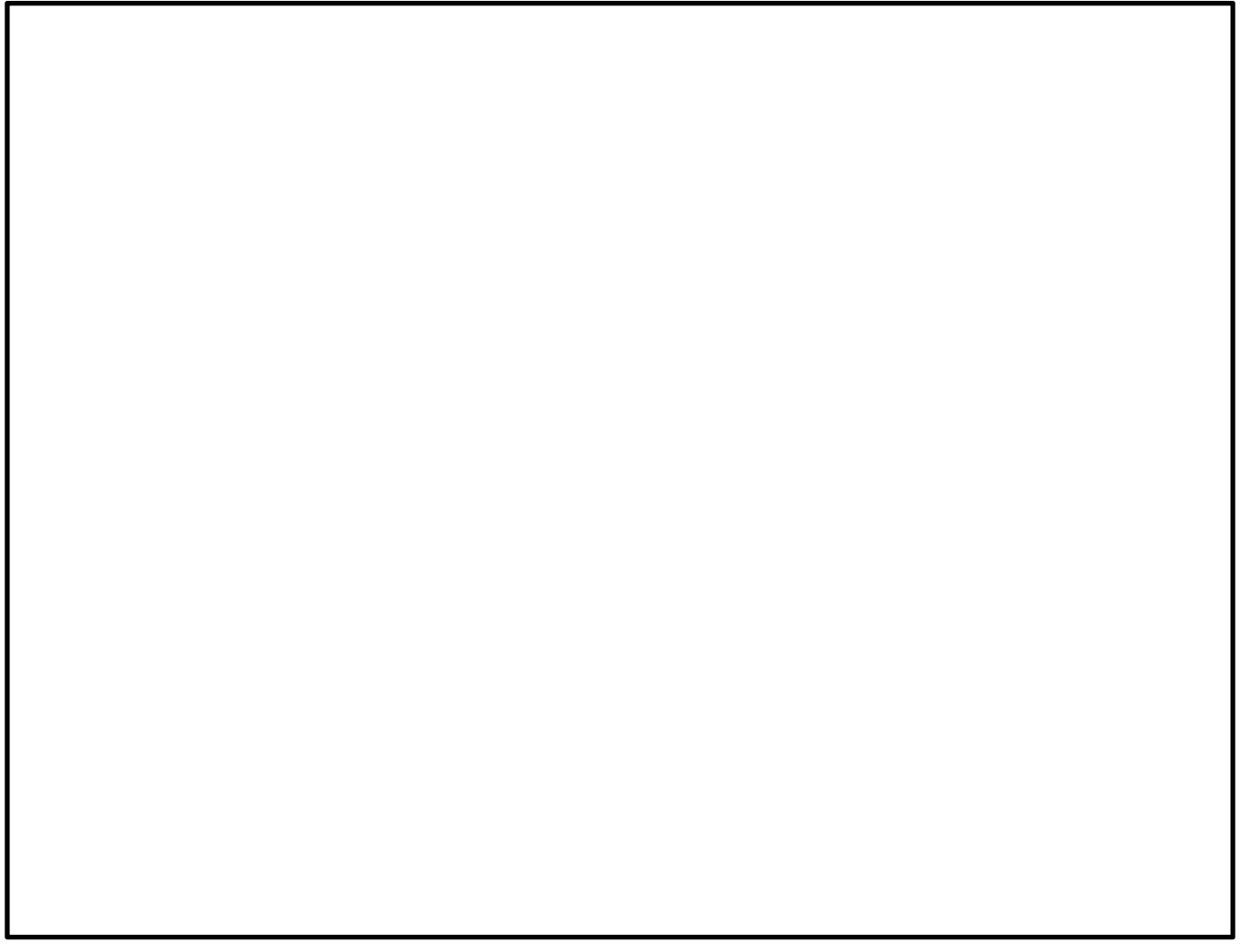


図2-1 原子炉浄化系補助熱交換器と上位クラス施設の位置関係図

2.2 構造計画

原子炉浄化系補助熱交換器の構造計画を表2-1に示す。

表 2-1 構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
<p> 胴は当板を介して2個の脚で支持する。脚は基礎ボルトで基礎に据え付ける。 また、耐震補強サポートは脚を支持し、追設基礎ボルトで床面に固定する。 </p>	<p> 横置 U 字管式 (横置一胴円筒形容器) </p>	

2.3 評価方針

原子炉浄化系補助熱交換器の応力評価は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定した荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界に基づき、「2.2 構造計画」にて示す原子炉浄化系補助熱交換器の部位を踏まえ「3. 評価部位」にて設定する箇所において、「4.3 解析モデル及び諸元」及び「4.4 固有周期」で算出した固有周期に基づく設計用地震力による応力等が許容限界内に収まることを、「4. 地震応答解析及び構造強度評価」にて示す方法にて確認することで実施する。確認結果を「5. 評価結果」に示す。

原子炉浄化系補助熱交換器の耐震評価フローを図 2-2 に示す。

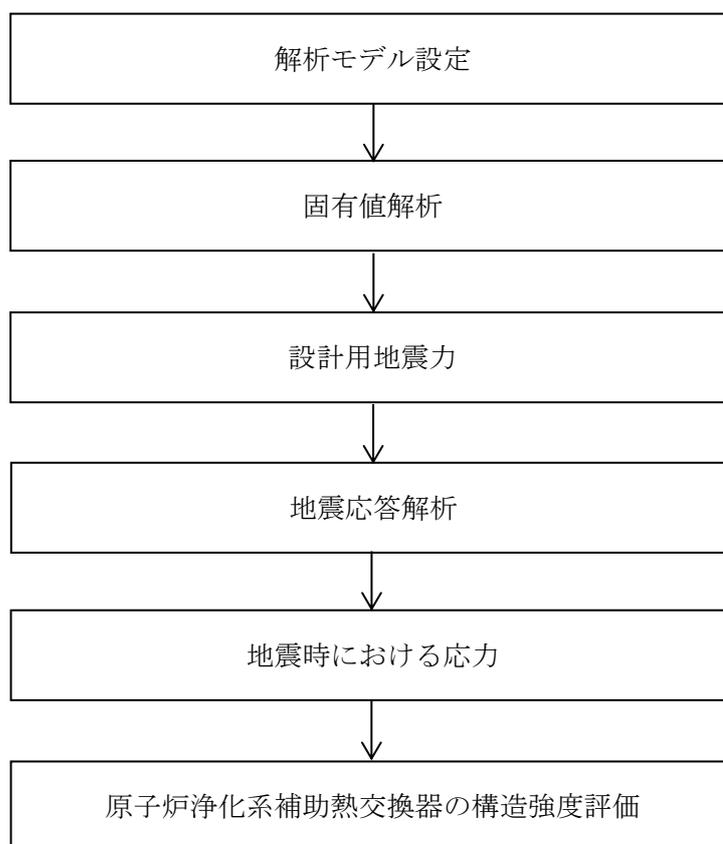


図 2-2 原子炉浄化系補助熱交換器の耐震評価フロー

2.4 適用規格・基準等

本評価において適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984
（（社）日本電気協会）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 （（社）日本電気協会）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版（（社）日本電気協会）
- ・発電用原子力設備規格 設計・建設規格（（社）日本機械学会，2005/2007）（以下「設計・建設規格」という。）

2.5 記号の説明

記号	記号の説明	単位
A _b	基礎ボルトの軸断面積	mm ²
A _{b a}	追設基礎ボルトの軸断面積	mm ²
A _s	第1脚の断面積	mm ²
A _{s 1}	第1脚の長手方向に対する有効せん断断面積	mm ²
A _{s 2}	第1脚の横方向に対する有効せん断断面積	mm ²
A _{s 3}	第1脚の長手方向に対するせん断断面積	mm ²
A _{s 4}	第1脚の横方向に対するせん断断面積	mm ²
a	第1脚底板の長手方向幅	mm
b	第1脚底板の横方向幅	mm
C ₁	第1脚の胴付け根部のアタッチメントの幅の2分の1 (胴の横方向)	mm
C ₂	第1脚の胴付け根部のアタッチメントの幅の2分の1 (胴の長手方向)	mm
C _{c j}	周方向モーメントによる応力の補正係数 (引用文献(2)より得られる値) (j=1: 周方向応力, j=2: 軸方向応力)	—
C _{HNS}	水平方向設計震度 (NS方向)	—
C _{HEW}	水平方向設計震度 (EW方向)	—
C _{ℓ j}	軸方向モーメントによる応力の補正係数 (引用文献(2)より得られる値) (j=1: 周方向応力, j=2: 軸方向応力)	—
C _v	鉛直方向設計震度	—
D _i	胴の内径	mm
d	基礎ボルトの呼び径	mm
d ₁	第1脚底板端面から基礎ボルト中心までの長手方向の距離	mm
d ₂	第1脚底板端面から基礎ボルト中心までの横方向の距離	mm
d _a	追設基礎ボルトの呼び径	mm
E	胴の縦弾性係数	MPa
E _s	脚の縦弾性係数	MPa
e	第1脚中心から偏心荷重作用点までの距離	mm
F [*]	設計・建設規格 SSB-3121.3又はSSB-3133に定める値	MPa
F _{1 1}	運転時質量により第1脚底面に作用する長手方向荷重	N
F _{1 2}	運転時質量により第1脚底面に作用する横方向荷重	N
F _{1 v 1}	鉛直方向地震により第1脚底面に作用する長手方向荷重	N
F _{1 v 2}	鉛直方向地震により第1脚底面に作用する横方向荷重	N
F _{1 x}	長手方向及び鉛直方向地震により追設基礎ボルト部の耐震補強サポートに作用する長手方向荷重	N
F _{1 y}	長手方向及び鉛直方向地震により追設基礎ボルト部の耐震補強サポートに作用する横方向荷重	N
F _{1 z}	長手方向及び鉛直方向地震により追設基礎ボルト部の耐震補強サポートに作用する鉛直方向荷重	N
F _{2 x}	横方向及び鉛直方向地震により追設基礎ボルト部の耐震補強サポートに作用する長手方向荷重	N

記号	記号の説明	単位
F_{2Y}	横方向及び鉛直方向地震により追設基礎ボルト部の耐震補強サポ ートに作用する横方向荷重	N
F_{2Z}	横方向及び鉛直方向地震により追設基礎ボルト部の耐震補強サポ ートに作用する鉛直方向荷重	N
F_b	基礎ボルトに作用する引張力	N
F_c	横方向地震により胴の第1脚付け根部に作用する水平方向荷重	N
F_{cb}	横方向及び鉛直方向地震により第1脚底面に作用する水平方向荷重	N
F_{cs1}	横方向地震により第1脚底面に作用する長手方向荷重	N
F_{cs2}	横方向地震により第1脚底面に作用する横方向荷重	N
F_l	長手方向地震により胴に作用する鉛直方向荷重	N
F_{l1}	長手方向地震により胴に作用する引張荷重	N
F_{l2}	長手方向地震により胴の第1脚付け根部に作用する水平方向荷重	N
F_{lb}	長手方向及び鉛直方向地震により第1脚底面に作用する水平方向荷 重	N
F_{ls1}	長手方向地震により第1脚底面に作用する長手方向荷重	N
F_{ls2}	長手方向地震により第1脚底面に作用する横方向荷重	N
f_{sb}	せん断力のみを受ける基礎ボルトの許容せん断応力	MPa
f_{sba}	せん断力のみを受ける追設基礎ボルトの許容せん断応力	MPa
f_{to}	引張力のみを受ける基礎ボルトの許容引張応力	MPa
f_{toa}	引張力のみを受ける追設基礎ボルトの許容引張応力	MPa
f_{tm}	脚の許容引張応力	MPa
f_{ts}	引張力とせん断力を同時に受ける基礎ボルトの許容引張応力（許 容組合せ応力）	MPa
f_{tsa}	引張力とせん断力を同時に受ける追設基礎ボルトの許容引張応力 （許容組合せ応力）	MPa
g	重力加速度（=9.80665）	m/s^2
h_1	基礎から第1脚の胴付け根部までの高さ	mm
h_2	基礎から胴の中心までの高さ	mm
I_{sx}	第1脚の長手方向軸に対する断面二次モーメント	mm^4
I_{sy}	第1脚の横方向軸に対する断面二次モーメント	mm^4
j_1	荷重分布で分割する荷重の数	—
K_{1j}, K_{2j}	引用文献(2)によるアタッチメントパラメータの補正係数 （ $j=1$:周方向応力, $j=2$:軸方向応力）	—
K_{cj}, K_{lj}	引用文献(2)によるアタッチメントパラメータの補正係数 （ $j=1$:周方向応力, $j=2$:軸方向応力）	—
l_0	脚中心間距離	mm
l_i	第1脚より各荷重までの距離（ここで第2脚側の距離は正, その反 対側は負とする。）（ $i=1, 2, 3\cdots j_1$ ）	mm
l_w	当板における脚の取り付けかない部分の長手方向長さ	mm
l_{1a}	長手方向の追設基礎ボルト間距離	mm
l_{2a}	横方向の追設基礎ボルト間距離	mm
M	長手方向及び鉛直方向地震により第1脚底面に作用するモーメント	$N\cdot mm$

記号	記号の説明	単位
M_1	第1脚付け根部における胴の運転時質量によるモーメント	N・mm
M_{11}	長手方向地震により胴に作用する長手方向曲げモーメント	N・mm
M_{12}	横方向地震により胴に作用する横方向曲げモーメント	N・mm
M_{13}	横方向地震により胴に作用するねじりモーメント	N・mm
M_{14}	運転時質量により第1脚底面に作用する長手方向曲げモーメント	N・mm
M_{14v}	鉛直方向地震により第1脚底面に作用する長手方向曲げモーメント	N・mm
M_{15}	運転時質量により第1脚底面に作用する横方向曲げモーメント	N・mm
M_{15v}	鉛直方向地震により第1脚底面に作用する横方向曲げモーメント	N・mm
M_{1s}	運転時質量により第1脚底面に作用するねじりモーメント	N・mm
M_{2b}	長手方向及び鉛直方向地震により第1脚底面に作用するねじりモーメント	N・mm
M_{2s}	長手方向地震により第1脚底面に作用するねじりモーメント	N・mm
M_3	胴の脚付け根部に作用するねじりモーメント	N・mm
M_{3b}	横方向及び鉛直方向地震により第1脚底面に作用するねじりモーメント	N・mm
M_{3s}	横方向地震により第1脚底面に作用するねじりモーメント	N・mm
M_{4s}	鉛直方向地震により第1脚底面に作用するねじりモーメント	N・mm
M_{1x}	長手方向及び鉛直方向地震により追設基礎ボルト部の耐震補強サポートに作用する長手方向軸周りのモーメント	N・mm
M_{1y}	長手方向及び鉛直方向地震により追設基礎ボルト部の耐震補強サポートに作用する横方向軸周りのモーメント	N・mm
M_{1z}	長手方向及び鉛直方向地震により追設基礎ボルト部の耐震補強サポートに作用する鉛直方向軸周りのモーメント	N・mm
M_{2x}	横方向及び鉛直方向地震により追設基礎ボルト部の耐震補強サポートに作用する長手方向軸周りのモーメント	N・mm
M_{2y}	横方向及び鉛直方向地震により追設基礎ボルト部の耐震補強サポートに作用する横方向軸周りのモーメント	N・mm
M_{2z}	横方向及び鉛直方向地震により追設基礎ボルト部の耐震補強サポートに作用する鉛直方向軸周りのモーメント	N・mm
M_c	横方向地震により胴の第1脚付け根部に作用するモーメント	N・mm
M_{c1}	横方向及び鉛直方向地震により第1脚底面に作用するモーメント	N・mm
M_{cs1}	横方向地震により第1脚底面に作用する長手方向モーメント	N・mm
M_{cs2}	横方向地震により第1脚底面に作用する横方向モーメント	N・mm
M_ℓ	長手方向地震により胴の第1脚付け根部に作用するモーメント	N・mm
$M_{\ell s1}$	長手方向地震により第1脚底面に作用する長手方向モーメント	N・mm
$M_{\ell s2}$	長手方向地震により第1脚底面に作用する横方向モーメント	N・mm
M_x	胴に生じる軸方向の曲げモーメント	N・mm/mm
M_ϕ	胴に生じる周方向の曲げモーメント	N・mm/mm
m_0	容器の運転時質量	kg
m_i	容器各部の質量 ($i=1, 2, 3 \dots j_1$)	kg
m_{s1}	第1脚の質量	kg
m_{s2}	第2脚の質量	kg

記号	記号の説明	単位
N_x	胴に生じる軸方向の膜力	N/mm
N_ϕ	胴に生じる周方向の膜力	N/mm
n	脚1個当たりの基礎ボルトの本数	—
n_a	せん断力を受ける追設基礎ボルトの本数	—
n_1	長手方向及び鉛直方向地震時に引張を受ける基礎ボルトの本数	—
n_{1aX}	長手方向及び鉛直方向地震時に追設基礎ボルト部の耐震補強サポートに作用する長手方向軸周りのモーメントにより引張を受ける追設基礎ボルトの本数	—
n_{1aY}	長手方向及び鉛直方向地震時に追設基礎ボルト部の耐震補強サポートに作用する横方向軸周りのモーメントにより引張を受ける追設基礎ボルトの本数	—
n_{1aZ}	長手方向及び鉛直方向地震時に追設基礎ボルト部の耐震補強サポートに作用する鉛直方向軸周りのモーメントにより引張を受ける追設基礎ボルトの本数	—
n_2	横方向及び鉛直方向地震時に引張を受ける基礎ボルトの本数	—
n_{2aX}	横方向及び鉛直方向地震時に追設基礎ボルト部の耐震補強サポートに作用する長手方向軸周りのモーメントにより引張を受ける追設基礎ボルトの本数	—
n_{2aY}	横方向及び鉛直方向地震時に追設基礎ボルト部の耐震補強サポートに作用する横方向軸周りのモーメントにより引張を受ける追設基礎ボルトの本数	—
n_{2aZ}	横方向及び鉛直方向地震時に追設基礎ボルト部の耐震補強サポートに作用する鉛直方向軸周りのモーメントにより引張を受ける追設基礎ボルトの本数	—
P	運転時質量により胴の第1脚付け根部に作用する反力	N
P_c	横方向地震により第1脚底部に作用する鉛直方向荷重	N
P_e	鉛直方向地震により胴の第1脚付け根部に作用する反力	N
P_ℓ	長手方向地震により胴の第1脚付け根部に作用する鉛直方向荷重	N
$P_{\ell 1}$	長手方向地震により第1脚底部に作用する鉛直方向荷重	N
P_r	最高使用圧力	MPa
P_s	長手方向及び鉛直方向地震により第1脚底部に作用する鉛直方向荷重	N
P_{s1}	横方向及び鉛直方向地震により第1脚底部に作用する鉛直方向荷重	N
R_1	第1脚の受ける荷重	N
R_{1v}	鉛直方向地震により第1脚の受ける荷重	N
r_m	第1脚付け根部における胴の平均半径	mm
S	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表5に定める値	MPa
S_a	胴の許容応力	MPa
S_u	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表9に定める値	MPa
S_y	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める値	MPa
$S_y(RT)$	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める材料の40℃における値	MPa
s	基礎ボルトと基礎の縦弾性係数比	—
T_1	長手方向固有周期	s

記号	記号の説明	単位
T_2	横方向固有周期	s
T_3	鉛直方向固有周期	s
t	第1脚側胴板の厚さ	mm
t_e	第1脚付け根部における胴の有効板厚	mm
X_n	基礎が圧縮力を受ける幅	mm
X_{na}	床が圧縮力を受ける幅	mm
Z	引用文献(1)による胴の断面係数	mm ³
Z_{sx}	第1脚の長手方向軸に対する断面係数	mm ³
Z_{sy}	第1脚の横方向軸に対する断面係数	mm ³
Z_{sp}	第1脚のねじり断面係数	mm ³
β, β_1, β_2	引用文献(2)によるアタッチメントパラメータ	—
γ	引用文献(2)によるシェルパラメータ	—
θ	引用文献(1)による胴の有効範囲角の2分の1	rad
θ_0	胴の第1脚端部より鉛直軸までの角度	rad
θ_w	胴の第1脚端部より当板端部までの角度	rad
π	円周率	—
σ_0	胴の組合せ一次一般膜応力の最大値	MPa
σ_{0c}	横方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の組合せ一次一般膜応力	MPa
σ_{0cx}	横方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の軸方向一次一般膜応力の和	MPa
$\sigma_{0c\phi}$	横方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の周方向一次一般膜応力の和	MPa
$\sigma_{0\ell}$	長手方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の組合せ一次一般膜応力	MPa
$\sigma_{0\ell x}$	長手方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の軸方向一次一般膜応力の和	MPa
$\sigma_{0\ell\phi}$	長手方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の周方向一次一般膜応力の和	MPa
σ_1	胴の組合せ一次応力の最大値	MPa
σ_{1c}	横方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の組合せ一次応力	MPa
σ_{1cx}	横方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の軸方向一次応力の和	MPa
$\sigma_{1c\phi}$	横方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の周方向一次応力の和	MPa
$\sigma_{1\ell}$	長手方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の組合せ一次応力	MPa
$\sigma_{1\ell x}$	長手方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の軸方向一次応力の和	MPa
$\sigma_{1\ell\phi}$	長手方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の周方向一次応力の和	MPa
σ_2	地震動のみによる胴の組合せ一次応力と二次応力の和の変動値の最大値	MPa
σ_{2c}	横方向及び鉛直方向地震のみによる胴の組合せ一次応力と二次応力の和	MPa

記号	記号の説明	単位
σ_{2cx}	横方向及び鉛直方向地震のみによる胴の軸方向一次応力と二次応力の和	MPa
$\sigma_{2c\phi}$	横方向及び鉛直方向地震のみによる胴の周方向一次応力と二次応力の和	MPa
$\sigma_{2\ell}$	長手方向及び鉛直方向地震のみによる胴の組合せ一次応力と二次応力の和	MPa
$\sigma_{2\ell x}$	長手方向及び鉛直方向地震のみによる胴の軸方向一次応力と二次応力の和	MPa
$\sigma_{2\ell\phi}$	長手方向及び鉛直方向地震のみによる胴の周方向一次応力と二次応力の和	MPa
σ_b	基礎ボルトに生じる引張応力の最大値	MPa
σ_{b1}	長手方向及び鉛直方向地震により基礎ボルトに生じる引張応力	MPa
σ_{b2}	横方向及び鉛直方向地震により基礎ボルトに生じる引張応力	MPa
σ_{ba}	追設基礎ボルトに生じる引張応力の最大値	MPa
σ_{ba1}	長手方向及び鉛直方向地震により追設基礎ボルトに生じる引張応力	MPa
σ_{ba2}	横方向及び鉛直方向地震により追設基礎ボルトに生じる引張応力	MPa
σ_s	第1脚の組合せ応力の最大値	MPa
σ_{sc}	横方向及び鉛直方向地震が作用した場合の第1脚の組合せ応力	MPa
$\sigma_{s\ell}$	鉛直方向と長手方向地震が作用した場合の第1脚の組合せ応力	MPa
σ_{s1}	運転時質量により第1脚に生じる曲げ及び圧縮応力の和	MPa
σ_{s2}	長手方向地震により第1脚に生じる曲げ及び圧縮応力の和	MPa
σ_{s3}	横方向地震により第1脚に生じる曲げ及び圧縮応力の和	MPa
σ_{s4}	鉛直方向地震により第1脚に生じる曲げ及び圧縮応力の和	MPa
σ_{x1}	内圧により胴に生じる軸方向一次応力	MPa
σ_{x2}	運転時質量による長手方向曲げモーメントにより胴の第1脚付け根部に生じる軸方向一次応力	MPa
σ_{x21}	長手方向地震による長手方向曲げモーメントにより胴の第1脚付け根部に生じる軸方向一次応力	MPa
σ_{x22}	横方向地震による横方向曲げモーメントにより胴の第1脚付け根部に生じる軸方向一次応力	MPa
σ_{x3}	運転時質量により胴の第1脚付け根部に生じる軸方向一次応力	MPa
$\sigma_{x41}, \sigma_{x42}$	長手方向地震により胴の第1脚付け根部に生じる軸方向一次応力の和及び二次応力の和	MPa
$\sigma_{x411}, \sigma_{x421}$	長手方向地震による曲げモーメントにより胴の第1脚付け根部に生じる軸方向一次応力及び二次応力	MPa
$\sigma_{x412}, \sigma_{x422}$	長手方向地震による鉛直方向荷重により胴の第1脚付け根部に生じる軸方向一次応力及び二次応力	MPa
σ_{x413}	長手方向地震による水平方向荷重により胴に生じる軸方向一次応力	MPa
$\sigma_{x51}, \sigma_{x52}$	横方向地震による曲げモーメントにより胴の第1脚付け根部に生じる軸方向一次応力及び二次応力	MPa
σ_{x6}	鉛直方向地震による長手方向曲げモーメントにより胴の第1脚付け根部に生じる軸方向一次応力	MPa
$\sigma_{x71}, \sigma_{x72}$	鉛直方向地震により胴の第1脚付け根部に生じる軸方向一次応力及び二次応力	MPa
$\sigma_{\phi 1}$	内圧により胴に生じる周方向一次応力	MPa

記号	記号の説明	単位
$\sigma_{\phi 2}$	静水頭に鉛直地震力が加わり胴に生じる周方向一次応力	MPa
$\sigma_{\phi 3}$	運転時質量により胴の第1脚付け根部に生じる周方向一次応力	MPa
$\sigma_{\phi 41}, \sigma_{\phi 42}$	長手方向地震により胴の第1脚付け根部に生じる周方向一次応力の和及び二次応力の和	MPa
$\sigma_{\phi 411}, \sigma_{\phi 421}$	長手方向地震による曲げモーメントにより胴の第1脚付け根部に生じる周方向一次応力及び二次応力	MPa
$\sigma_{\phi 412}, \sigma_{\phi 422}$	長手方向地震による鉛直荷重により胴の第1脚付け根部に生じる周方向一次応力及び二次応力	MPa
$\sigma_{\phi 51}, \sigma_{\phi 52}$	横方向地震による曲げモーメントにより胴の第1脚付け根部に生じる周方向一次応力及び二次応力	MPa
$\sigma_{\phi 71}, \sigma_{\phi 72}$	鉛直方向地震により胴の第1脚付け根部に生じる周方向一次応力及び二次応力	MPa
τ_b	基礎ボルトに生じるせん断応力の最大値	MPa
τ_{b1}	長手方向地震により基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa
τ_{b2}	横方向地震により基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa
τ_{ba}	追設基礎ボルトに生じるせん断応力の最大値	MPa
τ_{ba1}	長手方向地震により追設基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa
τ_{ba2}	横方向地震により追設基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa
τ_c	横方向地震により胴の第1脚付け根部に生じるせん断応力	MPa
τ_{c1}	横方向地震により胴に作用するねじりモーメントにより第1脚付け根部に生じるせん断応力	MPa
τ_{c2}	横方向地震により脚に作用するねじりモーメントにより第1脚付け根部に生じるせん断応力	MPa
τ_{ℓ}	長手方向地震により胴の第1脚付け根部に生じるせん断応力	MPa
$\tau_{\ell 1}$	長手方向地震により胴に作用する鉛直方向荷重により生じるせん断応力	MPa
τ_{s1}	運転時質量により第1脚に生じるせん断応力	MPa
τ_{s2}	長手方向地震により第1脚に生じるせん断応力	MPa
τ_{s3}	横方向地震により第1脚に生じるせん断応力	MPa
τ_{s4}	鉛直方向地震により第1脚に生じるせん断応力	MPa

2.6 計算精度と数値の丸め方

精度は、有効数字6桁以上を確保する。

表示する数値の丸め方は表2-2に示すとおりである。

表2-2 表示する数値の丸め方

数値の種類		単位	処理桁	処理方法	表示桁
固有周期		s	小数点以下第4位	四捨五入	小数点以下第3位
震度		—	小数点以下第3位	切上げ	小数点以下第2位
最高使用圧力		MPa	—	—	小数点以下第2位
温度		℃	—	—	整数位
質量		kg	—	—	整数位
長さ	下記以外の長さ	mm	—	—	整数位*1
	胴板の厚さ	mm	—	—	小数点以下第1位
面積		mm ²	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁*2
モーメント		N・mm	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁*2
力		N	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁*2
角度		rad	小数点以下第4位	四捨五入	小数点以下第3位
縦弾性係数		MPa	有効数字4桁目	四捨五入	有効数字3桁
算出応力		MPa	小数点以下第1位	切上げ	整数位
許容応力*3		MPa	小数点以下第1位	切捨て	整数位

注記*1：設計上定める値が小数点以下第1位の場合は、小数点以下第1位表示とする。

*2：絶対値が1000以上のときはべき数表示とする。

*3：設計・建設規格 付録材料図表に記載された温度の間における引張強さ及び降伏点は、比例法により補間した値の小数点以下第1位を切り捨て、整数位までの値とする。

3. 評価部位

原子炉浄化系補助熱交換器の耐震評価は「4.1 地震応答解析及び構造強度評価方法」に示す条件に基づき、原子炉浄化系補助熱交換器の損傷や転倒により、上位クラス施設が損傷することを防止するために、耐震評価上厳しくなる胴、脚、基礎ボルト及び追設基礎ボルトについて評価を実施する。原子炉浄化系補助熱交換器の耐震評価部位については、表 2-1 の概略構造図に示す。

4. 地震応答解析及び構造強度評価

4.1 地震応答解析及び構造強度評価方法

- (1) 「4.3 解析モデル及び諸元」に示す解析モデルにより固有周期を求める。
- (2) 「4.3 解析モデル及び諸元」に示す解析モデルにより求めた地震時の評価荷重（各部の反力及びモーメント）をもとに、胴、脚、基礎ボルト及び追設基礎ボルトの応力評価を行う。
- (3) 地震力は、原子炉浄化系補助熱交換器に対して水平方向及び鉛直方向から個別に作用するものとし、応力の算出において組み合わせるものとする。ここで、水平方向地震力は胴の長手方向に作用する場合と胴の横方向に作用する場合を考慮する。また、水平方向及び鉛直方向の動的地震力による荷重の組合せには、S R S S法を適用する。
- (4) 脚は同形状であるため、作用する荷重の大きい脚についての評価を計算書に記載する。
- (5) 追設基礎ボルトについては、計算結果の厳しい箇所（許容値／発生値の小さい箇所をいう。）を評価対象とする。
- (6) 耐震計算に用いる寸法は、公称値を使用する。

4.2 荷重の組合せ及び許容応力

4.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態

原子炉浄化系補助熱交換器の荷重の組合せ及び許容応力状態のうち設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4-1 に示す。

4.2.2 許容応力

原子炉浄化系補助熱交換器の許容応力は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき表 4-2 及び表 4-3 に示す。

4.2.3 使用材料の許容応力評価条件

原子炉浄化系補助熱交換器の使用材料の許容応力評価条件のうち設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4-4 に示す。

表 4-1 荷重の組合せ及び許容応力状態（設計基準対象施設）

施設区分		機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉冷却 系統施設	原子炉冷却材 浄化設備	原子炉浄化系補助 熱交換器	B	クラス 3 容器*	$D + P_D + M_D + S_s$	IVAS

注記*：クラス 3 容器の支持構造物を含む。

表 4-2 許容応力（クラス 2， 3 容器）

許容応力状態	許容限界*1			
	一次一般膜応力	一次膜応力+ 一次曲げ応力	一次+二次応力	一次+ 二次+ピーク応力
IVAS	$0.6 \cdot S_u$	左欄の 1.5 倍の値	<p>*2 弾性設計用地震動 S_d 又は基準地震動 S_s のみによる疲労解析を行い、疲労累積係数が 1.0 以下であること。 ただし、地震動のみによる一次+二次応力の変動値が $2 \cdot S_y$ 以下であれば疲労解析は不要</p>	

注記*1：当該の応力が生じない場合、規格基準で省略可能とされている場合及び他の応力で代表可能である場合は評価を省略する。

*2： $2 \cdot S_y$ を超えるときは弾塑性解析を行う。この場合、設計・建設規格 PVB-3300（PVB-3313 を除く。 S_m は $2/3 \cdot S_y$ と読み替える。）の簡易弾塑性解析を用いる。

表 4-3 許容応力 (クラス 2, 3 支持構造物)

許容応力状態	許容限界*1, *2 (ボルト等以外)	許容限界*1, *2 (ボルト等)	
	一次応力	一次応力	
	組合せ	引張	せん断
IVAS	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_s^*$

注記*1：応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対しても評価を行う。

*2：当該の応力が生じない場合，規格基準で省略可能とされている場合及び他の応力で代表可能である場合は評価を省略する。

表 4-4 使用材料の許容応力評価条件 (設計基準対象施設)

評価部材	材料	温度条件 (°C)		S (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (RT) (MPa)
胴板	SB42*1	最高使用温度	85	—	205	394	—
脚	SM41A*2 (16mm<厚さ≤40mm)	最高使用温度	85	—	218	377	—
基礎ボルト	SS41*3 (16mm<径≤40mm)	周囲環境温度	50	—	231	394	—
追設基礎ボルト	SS400 (16mm<径≤40mm)	周囲環境温度	50	—	231	394	—

注記*1：SB410 相当

*2：SM400A 相当

*3：SS400 相当

4.3 解析モデル及び諸元

原子炉浄化系補助熱交換器の解析モデルを図4-1に、解析モデルの概要を以下に示す。また、機器の諸元を本計算書の【原子炉浄化系補助熱交換器の耐震性についての計算結果】の機器要目及びその他の機器要目に示す。

- (1) 原子炉浄化系補助熱交換器の胴、脚及び耐震補強サポートをはり要素でモデル化したFEMモデルを用いる。



- (4) 解析コードは、「SAP-IV」を使用し、固有値と各要素に発生する荷重及びモーメントを求める。なお、評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

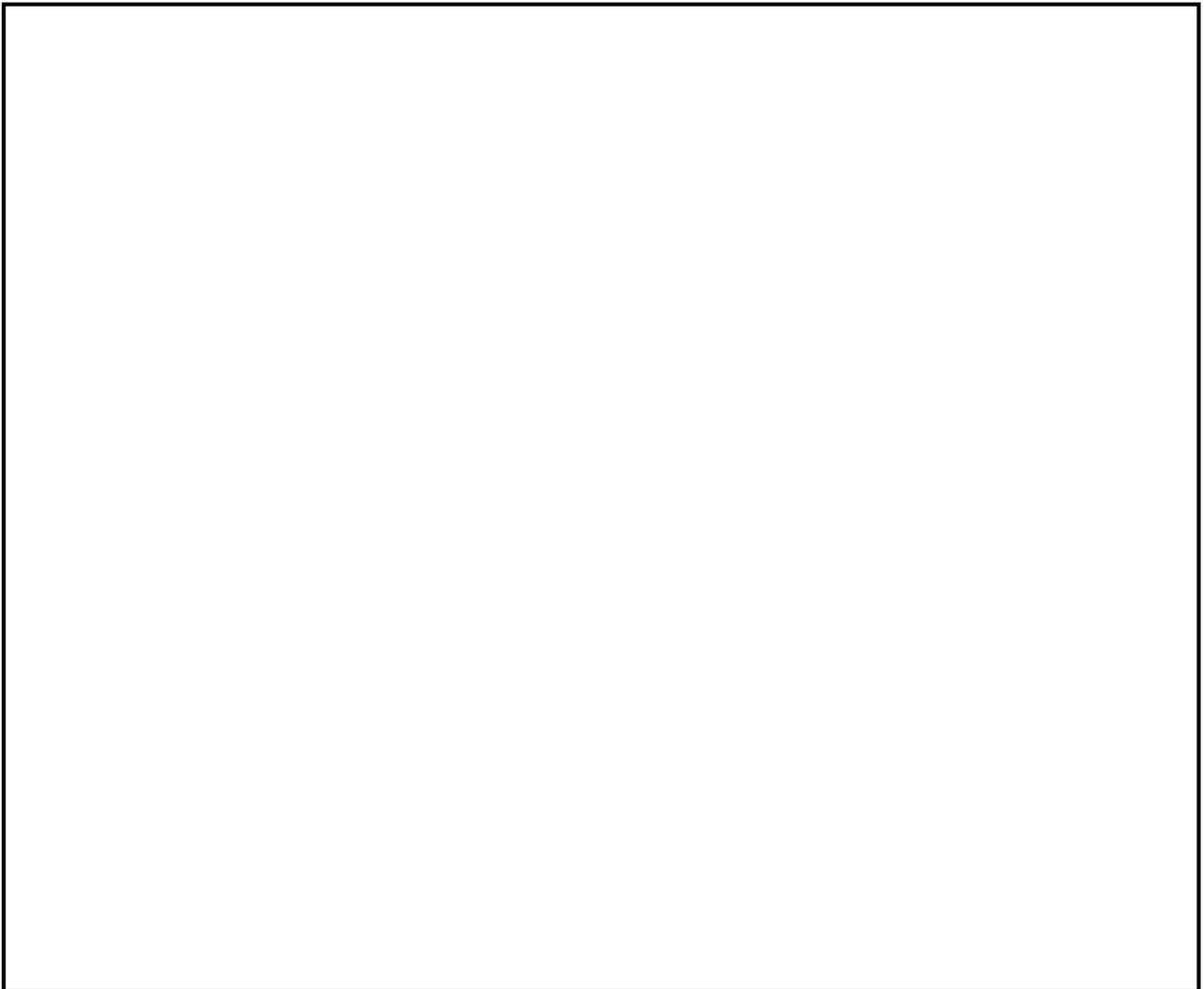


図4-1 原子炉浄化系補助熱交換器解析モデル

4.4 固有周期

解析モデルでの固有値解析の結果を表 4-5, 振動モード図を図 4-2 に示す。固有周期は, 0.05 秒以下であり, 剛構造であることを確認した。

表 4-5 固有値解析結果

モード	卓越方向	固有周期 (s)	水平方向刺激係数		鉛直方向 刺激係数
			X方向	Y方向	
1次			—	—	—



図 4-2 振動モード図 (1次モード)

4.5 設計用地震力

評価に用いる設計用地震力を表 4-6 に示す。

「基準地震動 S_s 」による地震力は、VI-2-1-7「設計用床応答スペクトルの作成方針」に基づき設定する。

表 4-6 設計用地震力（設計基準対象施設）

据付場所 及び 床面高さ (m)	固有周期(s)		弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度		基準地震動 S_s	
	水平 方向	鉛直 方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度
原子炉建物 EL 23.8 ^{*1}		0.05 以下	—	—	$C_{HNS}=1.44^{*2}$ $C_{HEW}=1.73^{*2}$	$C_V=1.54^{*2}$

注記*1：基準床レベルを示す。

*2：設計用震度 I（基準地震動 S_s ）を上回る震度

4.6 計算方法

4.6.1 応力の計算方法

4.6.1.1 胴の計算方法

(1) 内圧による応力

$$\sigma_{\phi 1} = \frac{P_r \cdot (D_i + 1.2 \cdot t)}{2 \cdot t} \dots\dots\dots (4.6.1.1.1)$$

$$\sigma_{\phi 2} = 0 \dots\dots\dots (4.6.1.1.2)$$

$$\sigma_{x 1} = \frac{P_r \cdot (D_i + 1.2 \cdot t)}{4 \cdot t} \dots\dots\dots (4.6.1.1.3)$$

(2) 運転時質量及び鉛直方向地震により生じる長手方向曲げモーメントによる応力

第1脚付け根部における胴の運転時質量による曲げモーメントM₁は解析による計算で求める。

解析による計算で求めた曲げモーメントM₁により胴の第1脚付け根部に生じる応力は次のように求める。

引用文献(1)によれば、この曲げモーメントM₁は胴の断面に対して一様に作用するものではなく、脚取付部において円周方向の曲げモーメントに置き換えられ、胴の局部変形を生じさせようとする。

長手方向の曲げモーメントによる胴の応力の影響範囲を脚上 $\frac{\theta_0}{6}$ の点とすると長手方向曲げモーメントに対する胴の有効断面積は図4-3に $2 \cdot \theta$ で示される円殻である。したがって、運転時質量による応力は次式で求める。

$$\sigma_{x 2} = \frac{M_1}{Z} \dots\dots\dots (4.6.1.1.4)$$

また、鉛直方向地震による応力は次式で求める。

$$\sigma_{x 6} = \frac{M_1}{Z} \cdot C_v \dots\dots\dots (4.6.1.1.5)$$

ここで、

$$r_m = \frac{D_i + t_e}{2} \dots\dots\dots (4.6.1.1.6)$$

$$Z = r_m^2 \cdot t_e \cdot \left\{ \frac{\theta + \sin \theta \cdot \cos \theta - 2 \cdot \sin^2 \theta / \theta}{(\sin \theta / \theta) - \cos \theta} \right\} \dots\dots\dots (4.6.1.1.7)$$

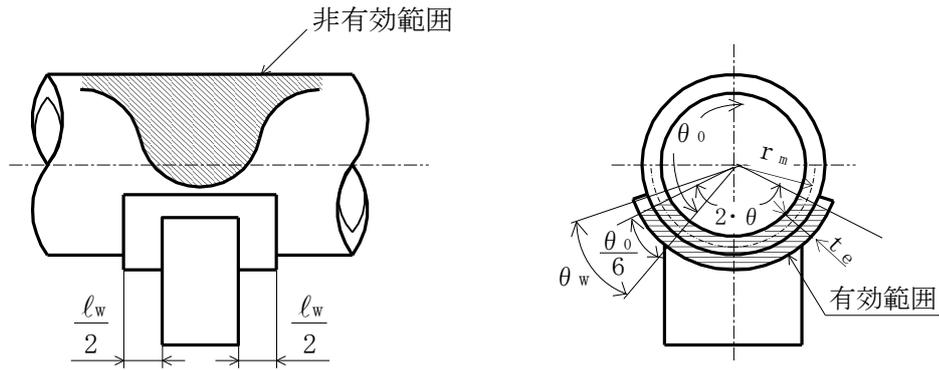


図 4-3 脚付け根部の有効範囲

胴の脚付け根部に取り付く当板の大きさが

$$\text{周方向範囲} \quad \theta_w \geq \frac{\theta_0^{*1}}{6} \quad \dots\dots\dots (4.6.1.1.8)$$

$$\text{長手方向範囲} \quad \ell_w \geq 1.56 \cdot \sqrt{\left(\frac{D_i + t}{2}\right) \cdot t}^{*2} \quad \dots\dots\dots (4.6.1.1.9)$$

である場合、脚付け根部における胴の有効板厚 t_e は胴板の厚さと当板の厚さの合計とする。

本計算においては上記の有効範囲を満たすため、有効板厚 t_e は胴板の厚さと当板の厚さの合計とする。

注記*1：引用文献(1)より引用

*2：引用文献(3)より引用

- (3) 長手方向地震により生じる長手方向曲げモーメント及び鉛直方向荷重による応力
 長手方向地震により胴に作用する長手方向曲げモーメント M_{11} により胴の脚付け根部に生じる応力は次式で求める。なお、 M_{11} は解析による計算で求める。

$$\sigma_{x21} = \frac{M_{11}}{Z} \quad \dots\dots\dots (4.6.1.1.10)$$

また、長手方向地震により胴に作用する鉛直方向荷重 F_ℓ によるせん断応力は次式で求める。 F_ℓ は解析による計算で求める。

$$\tau_{\ell 1} = \frac{2 \cdot F_\ell}{\pi \cdot (D_i + t) \cdot t} \quad \dots\dots\dots (4.6.1.1.11)$$

- (4) 横方向地震により生じる横方向曲げモーメント及びねじりモーメントによる応力
 横方向地震により胴に作用する横方向曲げモーメント M_{12} 及びねじりモーメント M_{13} により胴に生じる応力は次式で求める。なお、 M_{12} 及び M_{13} は解析による計算で求める。

$$\sigma_{x22} = \frac{4 \cdot M_{12}}{\pi \cdot (D_i + t)^2 \cdot t} \quad \dots\dots\dots (4.6.1.1.12)$$

$$\tau_{c1} = \frac{2 \cdot M_{13}}{\pi \cdot (D_i + t)^2 \cdot t} \dots\dots\dots (4.6.1.1.13)$$

(5) 運転時質量及び鉛直方向地震による脚付け根部の応力

胴の脚付け根部には脚反力による周方向応力及び軸方向応力が生じる。胴の脚付け根部作用する反力 R_1 は解析による計算で求める。

胴の脚付け根部に作用する反力は次のように求める。

運転時質量による反力は,

$$P = R_1 \dots\dots\dots (4.6.1.1.14)$$

鉛直方向地震による反力は,

$$P_e = C_v \cdot R_1 \dots\dots\dots (4.6.1.1.15)$$

この反力 P 及び P_e により生じる胴の周方向応力及び軸方向応力は、引用文献(2)により次のように求める。

脚が胴に及ぼす力の関係を図4-4に示す。

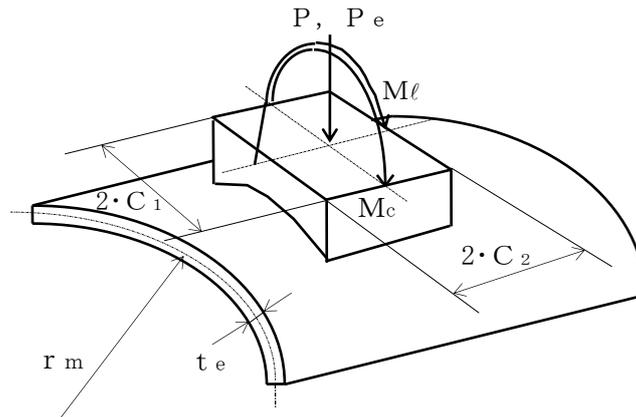


図4-4 脚が胴に及ぼす力の関係

ここで、シェルパラメータ γ 及びアタッチメントパラメータ β は以下のように定義する。

$$\gamma = r_m / t_e \dots\dots\dots (4.6.1.1.16)$$

$$\beta_1 = C_1 / r_m \dots\dots\dots (4.6.1.1.17)$$

$$\beta_2 = C_2 / r_m \dots\dots\dots (4.6.1.1.18)$$

$4 \geq \beta_1 / \beta_2 \geq 1$ のとき

$$\beta = \left\{ 1 - \frac{1}{3} \cdot (\beta_1 / \beta_2 - 1) \cdot (1 - K_{1j}) \right\} \cdot \sqrt{\beta_1 \cdot \beta_2} \dots\dots\dots (4.6.1.1.19)$$

ただし、 $\beta \leq 0.5$

$\frac{1}{4} \leq \beta_1 / \beta_2 < 1$ のとき

$$\beta = \left\{ 1 - \frac{4}{3} \cdot (1 - \beta_1 / \beta_2) \cdot (1 - K_{2j}) \right\} \cdot \sqrt{\beta_1 \cdot \beta_2} \dots\dots\dots (4.6.1.1.20)$$

ただし、 $\beta \leq 0.5$

シェルパラメータ γ 及びアタッチメントパラメータ β によって引用文献(2)の図より値（以下*を付記するもの）を求めることにより応力は次式で求める。

反力 P による応力は、

一次応力

$$\sigma_{\phi 3} = \left(\frac{N_{\phi}}{P / r_m} \right)^* \cdot \left(\frac{P}{r_m \cdot t_e} \right) \dots\dots\dots (4.6.1.1.21)$$

$$\sigma_{x 3} = \left(\frac{N_x}{P / r_m} \right)^* \cdot \left(\frac{P}{r_m \cdot t_e} \right) \dots\dots\dots (4.6.1.1.22)$$

反力 P_e による応力は、

一次応力

$$\sigma_{\phi 71} = \left(\frac{N_{\phi}}{P_e / r_m} \right)^* \cdot \left(\frac{P_e}{r_m \cdot t_e} \right) \dots\dots\dots (4.6.1.1.23)$$

$$\sigma_{x 71} = \left(\frac{N_x}{P_e / r_m} \right)^* \cdot \left(\frac{P_e}{r_m \cdot t_e} \right) \dots\dots\dots (4.6.1.1.24)$$

二次応力

$$\sigma_{\phi 72} = \left(\frac{M_{\phi}}{P_e} \right)^* \cdot \left(\frac{6 \cdot P_e}{t_e^2} \right) \dots\dots\dots (4.6.1.1.25)$$

$$\sigma_{x 72} = \left(\frac{M_x}{P_e} \right)^* \cdot \left(\frac{6 \cdot P_e}{t_e^2} \right) \dots\dots\dots (4.6.1.1.26)$$

(6) 長手方向地震による脚付け根部の応力

長手方向地震が作用した場合、曲げモーメント M_{ℓ} 及び鉛直荷重 P_{ℓ} は解析による計算で求める。

曲げモーメント M_{ℓ} と鉛直荷重 P_{ℓ} により生じる胴の周方向応力及び軸方向応力は、シェルパラメータ γ 及びアタッチメントパラメータ β によって引用文献(2)の図より値（以下*を付記するもの）を求めることにより次式で求める。

ここで、シェルパラメータ γ 及び P_{ℓ} の場合のアタッチメントパラメータ β は(5)と同じであるが、 M_{ℓ} の場合のアタッチメントパラメータ β は次式による。

ただし、二次応力を求める場合は更に $K_{\ell j}$ を乗じた値とする。

$$\beta = \sqrt[3]{\beta_1 \cdot \beta_2^2} \dots\dots\dots (4.6.1.1.27)$$

ただし、 $\beta \leq 0.5$

曲げモーメント M_{ℓ} により生じる応力は次式で求める。

一次応力

$$\sigma_{\phi 411} = \left\{ \frac{N_{\phi}}{M_{\ell} / (r_m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{M_{\ell}}{r_m^2 \cdot \beta \cdot t_e} \right) \cdot C_{\ell 1} \dots\dots (4.6.1.1.28)$$

$$\sigma_{x 411} = \left\{ \frac{N_x}{M_{\ell} / (r_m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{M_{\ell}}{r_m^2 \cdot \beta \cdot t_e} \right) \cdot C_{\ell 2} \dots\dots (4.6.1.1.29)$$

二次応力

$$\sigma_{\phi 421} = \left\{ \frac{M_{\phi}}{M_{\ell}/(r_m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6 \cdot M_{\ell}}{r_m \cdot \beta \cdot t_e^2} \right) \dots\dots\dots (4.6.1.1.30)$$

$$\sigma_{x 421} = \left\{ \frac{M_x}{M_{\ell}/(r_m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6 \cdot M_{\ell}}{r_m \cdot \beta \cdot t_e^2} \right) \dots\dots\dots (4.6.1.1.31)$$

鉛直荷重 P_{ℓ} により生じる応力は次式で求める。

一次応力

$$\sigma_{\phi 412} = \left(\frac{N_{\phi}}{P_{\ell}/r_m} \right)^* \cdot \left(\frac{P_{\ell}}{r_m \cdot t_e} \right) \dots\dots\dots (4.6.1.1.32)$$

$$\sigma_{x 412} = \left(\frac{N_x}{P_{\ell}/r_m} \right)^* \cdot \left(\frac{P_{\ell}}{r_m \cdot t_e} \right) \dots\dots\dots (4.6.1.1.33)$$

二次応力

$$\sigma_{\phi 422} = \left(\frac{M_{\phi}}{P_{\ell}} \right)^* \cdot \left(\frac{6 \cdot P_{\ell}}{t_e^2} \right) \dots\dots\dots (4.6.1.1.34)$$

$$\sigma_{x 422} = \left(\frac{M_x}{P_{\ell}} \right)^* \cdot \left(\frac{6 \cdot P_{\ell}}{t_e^2} \right) \dots\dots\dots (4.6.1.1.35)$$

長手方向地震により胴に生じる引張荷重 $F_{\ell 1}$ は解析による計算で求める。

胴に生じる引張応力は次式で求める。

$$\sigma_{x 413} = \frac{F_{\ell 1}}{\pi \cdot (D_i + t) \cdot t} \dots\dots\dots (4.6.1.1.36)$$

したがって、曲げモーメント、鉛直荷重及び水平方向荷重により生じる胴の応力は次式で求める。

一次応力

$$\sigma_{\phi 41} = \sigma_{\phi 411} + \sigma_{\phi 412} \dots\dots\dots (4.6.1.1.37)$$

$$\sigma_{x 41} = \sigma_{x 411} + \sigma_{x 412} + \sigma_{x 413} \dots\dots\dots (4.6.1.1.38)$$

二次応力

$$\sigma_{\phi 42} = \sigma_{\phi 421} + \sigma_{\phi 422} \dots\dots\dots (4.6.1.1.39)$$

$$\sigma_{x 42} = \sigma_{x 421} + \sigma_{x 422} \dots\dots\dots (4.6.1.1.40)$$

また、長手方向地震が作用した場合、第1脚付け根部に生じるせん断応力は次式で求める。なお、脚付け根部に生じる水平方向荷重 $F_{\ell 2}$ は解析による計算で求める。

$$\tau_{\ell} = \frac{F_{\ell 2}}{4 \cdot C_2 \cdot t} \dots\dots\dots (4.6.1.1.41)$$

(7) 横方向地震による脚付け根部の応力

横方向地震が作用した場合、曲げモーメント M_c は解析による計算で求める。

この曲げモーメント M_c により生じる胴の周方向応力及び軸方向応力は、シェルパラメータ γ 及びアタッチメントパラメータ β によって引用文献(2)の図より値(以下*を付記するもの)を求めることにより次式で求める。

ここで、シェルパラメータ γ は(5)と同じであるが、アタッチメントパラメータ β は次式による。ただし、二次応力を求める場合は更に K_{c_j} を乗じた値とする。

$$\beta = \sqrt[3]{\beta_1^2 \cdot \beta_2} \dots\dots\dots (4.6.1.1.42)$$

ただし、 $\beta \leq 0.5$

したがって、応力は次式で求める。

一次応力

$$\sigma_{\phi 51} = \left\{ \frac{N_\phi}{M_c / (r m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{M_c}{r m^2 \cdot \beta \cdot t e} \right) \cdot C_{c1} \dots (4.6.1.1.43)$$

$$\sigma_{x 51} = \left\{ \frac{N_x}{M_c / (r m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{M_c}{r m^2 \cdot \beta \cdot t e} \right) \cdot C_{c2} \dots (4.6.1.1.44)$$

二次応力

$$\sigma_{\phi 52} = \left\{ \frac{M_\phi}{M_c / (r m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6 \cdot M_c}{r m \cdot \beta \cdot t e^2} \right) \dots\dots\dots (4.6.1.1.45)$$

$$\sigma_{x 52} = \left\{ \frac{M_x}{M_c / (r m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6 \cdot M_c}{r m \cdot \beta \cdot t e^2} \right) \dots\dots\dots (4.6.1.1.46)$$

また、胴の脚付け根部に生じるせん断荷重 F_c 及び胴の脚付け根部に生じるねじりモーメント M_3 は、解析による計算で求める。

せん断荷重により脚付け根部に生じるせん断応力は次式で求める。

$$\tau_{c1} = \frac{F_c}{4 \cdot C_1 \cdot t} \dots\dots\dots (4.6.1.1.47)$$

ねじりモーメントにより脚付け根部に生じるせん断応力は次式で求める。

$$\tau_{c2} = \frac{M_3}{2 \cdot \pi \cdot \text{Min}(C_1, C_2)^2 \cdot t} \dots\dots\dots (4.6.1.1.48)$$

(8) 組合せ応力

(1)～(7)によって求めた脚付け根部に生じる胴の応力は以下のように組み合わせる。

a. 一次一般膜応力

鉛直方向と長手方向地震が作用した場合

$$\sigma_{ol} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ (\sigma_{ol\phi} + \sigma_{olx}) + \sqrt{(\sigma_{ol\phi} - \sigma_{olx})^2 + 4 \cdot \tau_{l1}^2} \right\} \dots\dots\dots (4.6.1.1.49)$$

ここで,

$$\sigma_{ol\phi} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 2} \dots\dots\dots (4.6.1.1.50)$$

$$\sigma_{olx} = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} + \sqrt{\sigma_{x6}^2 + (\sigma_{x413} + \sigma_{x21})^2} \dots\dots\dots (4.6.1.1.51)$$

鉛直方向と横方向地震が作用した場合

$$\sigma_{oc} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ (\sigma_{oc\phi} + \sigma_{ocx}) + \sqrt{(\sigma_{oc\phi} - \sigma_{ocx})^2 + 4 \cdot \tau_{c1}^2} \right\} \dots\dots\dots (4.6.1.1.52)$$

ここで,

$$\sigma_{oc\phi} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 2} \dots\dots\dots (4.6.1.1.53)$$

$$\sigma_{ocx} = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} + \sqrt{\sigma_{x6}^2 + \sigma_{x22}^2} \dots\dots\dots (4.6.1.1.54)$$

したがって、胴に生じる一次一般膜応力の最大値は,

$$\sigma_o = \text{Max} \{ \text{長手方向地震時応力} (\sigma_{ol}), \text{横方向地震時応力} (\sigma_{oc}) \} \dots\dots\dots (4.6.1.1.55)$$

とする。

b. 一次応力

鉛直方向と長手方向地震が作用した場合

$$\sigma_{1l} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ (\sigma_{1l\phi} + \sigma_{1lx}) + \sqrt{(\sigma_{1l\phi} - \sigma_{1lx})^2 + 4 \cdot (\tau_{l1} + \tau_{l1})^2} \right\} \dots\dots\dots (4.6.1.1.56)$$

ここで,

$$\sigma_{1l\phi} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 3} + \sqrt{\sigma_{\phi 41}^2 + (\sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 71})^2} \dots\dots\dots (4.6.1.1.57)$$

$$\sigma_{1lx} = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} + \sigma_{x3} + \sqrt{(\sigma_{x41} + \sigma_{x21})^2 + (\sigma_{x6} + \sigma_{x71})^2} \dots\dots\dots (4.6.1.1.58)$$

鉛直方向と横方向地震が作用した場合

$$\sigma_{1c} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ (\sigma_{1c\phi} + \sigma_{1cx}) + \sqrt{(\sigma_{1c\phi} - \sigma_{1cx})^2 + 4 \cdot (\tau_c + \tau_{c1} + \tau_{c2})^2} \right\} \quad \dots\dots\dots (4.6.1.1.59)$$

ここで,

$$\sigma_{1c\phi} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 3} + \sqrt{\sigma_{\phi 51}^2 + (\sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 71})^2} \quad \dots\dots\dots (4.6.1.1.60)$$

$$\sigma_{1cx} = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} + \sigma_{x3} + \sqrt{(\sigma_{x51} + \sigma_{x22})^2 + (\sigma_{x6} + \sigma_{x71})^2} \quad \dots\dots\dots (4.6.1.1.61)$$

したがって、胴に生じる一次応力の最大値は,

$$\sigma_1 = \text{Max} \{ \text{長手方向地震時応力}(\sigma_{1\ell}), \text{横方向地震時応力}(\sigma_{1c}) \} \quad \dots\dots\dots (4.6.1.1.62)$$

とする。

c. 地震動のみによる一次応力と二次応力の和の変動値

鉛直方向と長手方向地震が作用した場合の変動値

$$\sigma_{2\ell} = (\sigma_{2\ell\phi} + \sigma_{2\ell x}) + \sqrt{(\sigma_{2\ell\phi} - \sigma_{2\ell x})^2 + 4 \cdot (\tau_{\ell} + \tau_{\ell 1})^2} \quad \dots\dots\dots (4.6.1.1.63)$$

ここで,

$$\sigma_{2\ell\phi} = \sqrt{(\sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 71} + \sigma_{\phi 72})^2 + (\sigma_{\phi 41} + \sigma_{\phi 42})^2} \quad \dots\dots\dots (4.6.1.1.64)$$

$$\sigma_{2\ell x} = \sqrt{(\sigma_{x41} + \sigma_{x42} + \sigma_{x21})^2 + (\sigma_{x6} + \sigma_{x71} + \sigma_{x72})^2} \quad \dots\dots\dots (4.6.1.1.65)$$

鉛直方向と横方向地震が作用した場合の変動値

$$\sigma_{2c} = (\sigma_{2c\phi} + \sigma_{2cx}) + \sqrt{(\sigma_{2c\phi} - \sigma_{2cx})^2 + 4 \cdot (\tau_c + \tau_{c1} + \tau_{c2})^2} \quad \dots\dots\dots (4.6.1.1.66)$$

ここで,

$$\sigma_{2c\phi} = \sqrt{(\sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 71} + \sigma_{\phi 72})^2 + (\sigma_{\phi 51} + \sigma_{\phi 52})^2} \quad \dots\dots\dots (4.6.1.1.67)$$

$$\sigma_{2cx} = \sqrt{(\sigma_{x51} + \sigma_{x52} + \sigma_{x22})^2 + (\sigma_{x6} + \sigma_{x71} + \sigma_{x72})^2} \quad \dots\dots\dots (4.6.1.1.68)$$

したがって、胴に生じる地震動のみによる一次応力と二次応力の和の変動値の最大値は,

$$\sigma_2 = \text{Max} \{ \text{長手方向地震時応力}(\sigma_{2\ell}), \text{横方向地震時応力}(\sigma_{2c}) \} \quad \dots\dots\dots (4.6.1.1.69)$$

とする。

4.6.1.2 脚の計算方法

解析による計算で得られる各要素端での荷重 $R_1, R_{1v}, P_{\ell 1}, P_c, F_{11}, F_{12}, F_{1v1}, F_{1v2}, F_{\ell s1}, F_{\ell s2}, F_{cs1}, F_{cs2}$, 曲げモーメント $M_{14}, M_{15}, M_{14v}, M_{15v}, M_{\ell s1}, M_{\ell s2}, M_{cs1}, M_{cs2}$ 及びねじりモーメント $M_{1s}, M_{2s}, M_{3s}, M_{4s}$ より各応力を次のように求める。

(1) 運転時質量による応力

曲げ及び圧縮応力は、次式で求める。

$$\sigma_{s1} = \frac{M_{14}}{Z_{sy}} + \frac{M_{15}}{Z_{sx}} + \frac{R_1}{A_s} \quad \dots\dots\dots (4.6.1.2.1)$$

せん断応力は次式で求める。

$$\tau_{s1} = \frac{M_{1s}}{Z_{sp}} + \sqrt{\left(\frac{F_{11}}{A_{s3}}\right)^2 + \left(\frac{F_{12}}{A_{s4}}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (4.6.1.2.2)$$

(2) 鉛直方向地震による応力

曲げ及び圧縮応力は、次式で求める。

$$\sigma_{s4} = \frac{M_{14v}}{Z_{sy}} + \frac{M_{15v}}{Z_{sx}} + \frac{R_{1v}}{A_s} \quad \dots\dots\dots (4.6.1.2.3)$$

せん断応力は次式で求める。

$$\tau_{s4} = \frac{M_{4s}}{Z_{sp}} + \sqrt{\left(\frac{F_{1v1}}{A_{s3}}\right)^2 + \left(\frac{F_{1v2}}{A_{s4}}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (4.6.1.2.4)$$

(3) 長手方向地震による応力

曲げ及び圧縮応力は、次式で求める。

$$\sigma_{s2} = \frac{M_{\ell s1}}{Z_{sy}} + \frac{M_{\ell s2}}{Z_{sx}} + \frac{P_{\ell 1}}{A_s} \quad \dots\dots\dots (4.6.1.2.5)$$

せん断応力は次式で求める。

$$\tau_{s2} = \frac{M_{2s}}{Z_{sp}} + \sqrt{\left(\frac{F_{\ell s1}}{A_{s3}}\right)^2 + \left(\frac{F_{\ell s2}}{A_{s4}}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (4.6.1.2.6)$$

(4) 横方向地震による応力

曲げ及び圧縮応力は、次式で求める。

$$\sigma_{s3} = \frac{M_{cs1}}{Z_{sy}} + \frac{M_{cs2}}{Z_{sx}} + \frac{P_c}{A_s} \quad \dots\dots\dots (4.6.1.2.7)$$

せん断応力は次式で求める。

$$\tau_{s3} = \frac{M_{3s}}{Z_{sp}} + \sqrt{\left(\frac{F_{cs1}}{A_{s3}}\right)^2 + \left(\frac{F_{cs2}}{A_{s4}}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (4.6.1.2.8)$$

(5) 組合せ応力

鉛直方向と長手方向地震が作用した場合

$$\sigma_{s\ell} = \sqrt{(\sigma_{s1} + \sqrt{\sigma_{s2}^2 + \sigma_{s4}^2})^2 + 3 \cdot (\tau_{s1} + \sqrt{\tau_{s2}^2 + \tau_{s4}^2})^2}$$

..... (4.6.1.2.9)

鉛直方向と横方向地震が作用した場合

$$\sigma_{sc} = \sqrt{(\sigma_{s1} + \sqrt{\sigma_{s3}^2 + \sigma_{s4}^2})^2 + 3 \cdot (\tau_{s1} + \sqrt{\tau_{s3}^2 + \tau_{s4}^2})^2}$$

..... (4.6.1.2.10)

したがって、脚に生じる最大応力は、

$$\sigma_s = \text{Max} \{ \text{長手方向地震時応力}(\sigma_{s\ell}), \text{横方向地震時応力}(\sigma_{sc}) \}$$

..... (4.6.1.2.11)

とする。

4.6.1.3 基礎ボルトの計算方法

(1) 鉛直方向と長手方向地震が作用した場合

a. 引張応力

脚底面に作用するモーメントMと鉛直荷重P_sの比を

$$e = M / P_s \dots\dots\dots (4.6.1.3.1)$$

とする。なお、M及びP_sは解析による計算で求める。

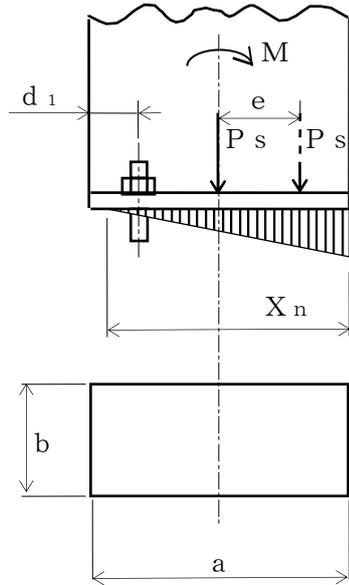


図4-5 基礎部に作用する外荷重より生じる荷重の関係 (その1)

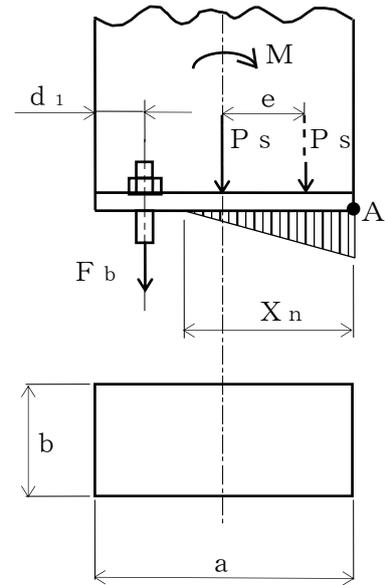


図4-6 基礎部に作用する外荷重より生じる荷重の関係 (その2)

図4-5のように脚底面においてボルト位置に圧縮荷重がかかる状況では基礎ボルトに引張力は作用しないため、引張力の評価は行わない。

一方、図4-6のように、ボルト位置に圧縮荷重がかからない状況に相当する

$$e > \frac{a}{6} + \frac{d_1}{3} \dots\dots\dots (4.6.1.3.2)$$

の場合及びeが負の場合に、基礎ボルトに引張力が生じる。

このとき図4-6において、鉛直方向荷重の釣合い、A点回りのモーメントの釣合い、基礎ボルトの伸びと基礎の縮みの関係から中立軸の位置X_nは

$$X_n^3 + 3 \cdot \left(e - \frac{a}{2}\right) \cdot X_n^2 - \frac{6 \cdot s \cdot A_b \cdot n_1}{b} \cdot \left(e + \frac{a}{2} - d_1\right) \cdot (a - d_1 - X_n) = 0 \dots\dots\dots (4.6.1.3.3)$$

より求めることができ、基礎ボルトに生じる引張力は

$$F_b = \frac{P_s \cdot \left(e - \frac{a}{2} + \frac{X_n}{3}\right)}{a - d_1 - \frac{X_n}{3}} \dots\dots\dots (4.6.1.3.4)$$

となる。

したがって、基礎ボルトに生じる引張応力は次のようになる。

$$\sigma_{b1} = \frac{F_b}{n_1 \cdot A_b} \dots\dots\dots (4.6.1.3.5)$$

ここで、基礎ボルトの軸断面積 A_b は次式により求める。

$$A_b = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \dots\dots\dots (4.6.1.3.6)$$

b. せん断応力

長手方向及び鉛直方向地震が作用した場合に脚底面に生じるせん断力 $F_{\ell b}$ 及びねじりモーメント M_{2b} は、解析による計算で求める。このとき基礎ボルトに生じるせん断応力は次のようになる。

$$\tau_{b1} = \frac{F_{\ell b}}{n \cdot A_b} + \frac{M_{2b}}{n \cdot A_b \cdot \sqrt{\left(\frac{a - 2 \cdot d_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{b - 2 \cdot d_2}{2}\right)^2}} \dots\dots\dots (4.6.1.3.7)$$

(2) 鉛直方向と横方向地震が作用した場合

a. 引張応力

(1)と同様にして求められるが、 M を M_{c1} 、 P_s を P_{s1} 、 d_1 を d_2 、 a を b 、 b を a 及び n_1 を n_2 に置き換え、得られた基礎ボルトの応力を σ_{b2} とする。なお、 M_{c1} 及び P_{s1} は解析による計算で求める。

b. せん断応力

横方向及び鉛直方向地震が作用した場合に脚底面に生じるせん断力 F_{cb} 及びねじりモーメント M_{3b} は、解析による計算で求める。このとき基礎ボルトに生じるせん断応力は次のようになる。

$$\tau_{b2} = \frac{F_{cb}}{n \cdot A_b} + \frac{M_{3b}}{n \cdot A_b \cdot \sqrt{\left(\frac{a - 2 \cdot d_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{b - 2 \cdot d_2}{2}\right)^2}} \dots\dots\dots (4.6.1.3.8)$$

(3) 基礎ボルトに生じる最大応力

(1)及び(2)より求められた基礎ボルトの応力のうち最大のものを σ_b 及び τ_b とする。

a. 基礎ボルトの最大引張応力

$$\sigma_b = \text{Max} \{ \text{長手方向地震時応力} (\sigma_{b1}), \text{横方向地震時応力} (\sigma_{b2}) \} \dots\dots\dots (4.6.1.3.9)$$

b. 基礎ボルトの最大せん断応力

$$\tau_b = \text{Max} \{ \text{長手方向地震時応力} (\tau_{b1}), \text{横方向地震時応力} (\tau_{b2}) \} \dots\dots\dots (4.6.1.3.10)$$

4.6.1.4 追設基礎ボルトの計算方法

追設基礎ボルトの応力は、解析で得られた荷重及びモーメントから理論式により、引張応力及びせん断応力を算出する。

(1) 鉛直方向と長手方向地震が作用した場合

計算モデルを図4-7に、解析で得られた追設基礎ボルト部の耐震補強サポートに作用する荷重とモーメントを表4-7に示す。



図4-7 追設基礎ボルトの計算モデル

表4-7 追設基礎ボルト部の耐震補強サポートに作用する荷重とモーメント (その1)

荷重 (N)			モーメント (N・mm)		
F _{1x}	F _{1y}	F _{1z}	M _{1x}	M _{1y}	M _{1z}

a. 引張応力

長手方向及び鉛直方向地震により追設基礎ボルトに生じる引張応力は、次式により求める。

$$\sigma_{ba1} = \frac{F_{1z}}{n_{1az} \cdot A_{ba}} + \frac{M_{1x}}{l_{2a} \cdot n_{1ax} \cdot A_{ba}} + \frac{M_{1y}}{l_{1a} \cdot n_{1ay} \cdot A_{ba}} \dots\dots\dots (4.6.1.4.1)$$

ここで、追設基礎ボルトの軸断面積A_{ba}は次式により求める。

$$A_{ba} = \frac{\pi}{4} \cdot d_a^2 \dots\dots\dots (4.6.1.4.2)$$

b. せん断応力

長手方向及び鉛直方向地震により追設基礎ボルトに生じるせん断応力は、次式により求める。

$$\tau_{ba1} = \frac{\sqrt{F_{1X}^2 + F_{1Y}^2}}{n_a \cdot A_{ba}} + \frac{M_{1Z}}{n_a \cdot A_{ba} \cdot \frac{l_{1a}}{2}}$$

..... (4.6.1.4.3)

(2) 鉛直方向と横方向地震が作用した場合

計算モデルは図4-7と同様だが、 F_{1X} を F_{2X} 、 F_{1Y} を F_{2Y} 、 F_{1Z} を F_{2Z} 、 M_{1X} を M_{2X} 、 M_{1Y} を M_{2Y} 及び M_{1Z} を M_{2Z} に置き換える。解析で得られた追設基礎ボルト部の耐震補強サポートに作用する荷重とモーメントを表4-8に示す。

表4-8 追設基礎ボルト部の耐震補強サポートに作用する荷重とモーメント (その2)

荷重 (N)			モーメント (N・mm)		
F_{2X}	F_{2Y}	F_{2Z}	M_{2X}	M_{2Y}	M_{2Z}

a. 引張応力

(1) a. と同様にして求められるが、 F_{1Z} を F_{2Z} 、 M_{1X} を M_{2X} 、 M_{1Y} を M_{2Y} 、 n_{1aX} を n_{2aX} 、 n_{1aY} を n_{2aY} 及び n_{1aZ} を n_{2aZ} に置き換え、得られた追設基礎ボルトの応力を σ_{ba2} とする。

b. せん断応力

(1) b. と同様にして求められるが、 M_{1Z} を M_{2Z} 、 F_{1X} を F_{2X} 、 F_{1Y} を F_{2Y} に置き換え、得られた追設基礎ボルトの応力を τ_{ba2} とする。

(3) 追設基礎ボルトに生じる最大応力

(1)及び(2)より求められた追設基礎ボルトの応力のうち最大のを σ_{ba} 及び τ_{ba} とする。

a. 追設基礎ボルトの最大引張応力

$$\sigma_{ba} = \text{Max} \{ \text{長手方向地震時応力}(\sigma_{ba1}), \text{横方向地震時応力}(\sigma_{ba2}) \}$$

..... (4.6.1.4.4)

b. 追設基礎ボルトの最大せん断応力

$$\tau_{ba} = \text{Max} \{ \text{長手方向地震時応力}(\tau_{ba1}), \text{横方向地震時応力}(\tau_{ba2}) \}$$

..... (4.6.1.4.5)

4.7 計算条件

応力解析に用いる計算条件は、本計算書の【原子炉浄化系補助熱交換器の耐震性についての計算結果】の設計条件及び機器要目に示す。

4.8 応力の評価

4.8.1 胴の応力評価

4.6.1.1項で求めた組合せ応力が胴の最高使用温度における許容応力 S_a 以下であること。ただし、 S_a は下表による。

応力の種類	許容応力 S_a
	基準地震動 S_s による 荷重との組合せの場合
一次一般膜応力	$0.6 \cdot S_u$
一次応力 (一次膜応力+ 一次曲げ応力)	上記の 1.5 倍の値
一次+二次応力	地震動のみによる一次応力と二次応力の和の変動値が $2 \cdot S_y$ 以下であれば、疲労解析は不要とする。
一次+二次 +ピーク応力	

4.8.2 脚の応力評価

4.6.1.2項で求めた脚の組合せ応力が許容引張応力 f_{tm} 以下であること。ただし、 f_{tm} は下表による。

	基準地震動 S_s による 荷重との組合せの場合
許容引張応力 f_{tm}	$\frac{F^*}{1.5} \cdot 1.5$

4.8.3 基礎ボルトの応力評価

4.6.1.3項で求めた基礎ボルトの引張応力 σ_b は次式より求めた許容組合せ応力 f_{ts} 以下であること。ただし、 f_{to} は下表による。

$$f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}] \quad \dots\dots\dots (4.8.3.1)$$

せん断応力 τ_b はせん断力のみ受ける基礎ボルトの許容せん断応力 f_{sb} 以下であること。ただし、 f_{sb} は下表による。

	基準地震動 S_s による荷重との組合せの場合
許容引張応力 f_{to}	$\frac{F^*}{2} \cdot 1.5$
許容せん断応力 f_{sb}	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

4.8.4 追設基礎ボルトの応力評価

4.6.1.4項で求めた追設基礎ボルトの引張応力 σ_{ba} は次式より求めた許容組合せ応力 f_{tsa} 以下であること。ただし、 f_{toa} は下表による。

$$f_{tsa} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{toa} - 1.6 \cdot \tau_{ba}, f_{toa}] \quad \dots\dots\dots (4.8.4.1)$$

せん断応力 τ_{ba} はせん断力のみ受ける追設基礎ボルトの許容せん断応力 f_{sba} 以下であること。ただし、 f_{sba} は下表による。

	基準地震動 S_s による荷重との組合せの場合
許容引張応力 f_{toa}	$\frac{F^*}{2} \cdot 1.5$
許容せん断応力 f_{sba}	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

5. 評価結果

5.1 設計基準対象施設としての評価結果

原子炉浄化系補助熱交換器の設計基準対象施設としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は許容限界を満足しており、設計用地震力に対して十分な構造強度を有することを確認した。

(1) 構造強度評価結果

構造強度評価の結果を次頁以降の表に示す。

6. 引用文献

(1) Stresses in Large Horizontal Cylindrical Pressure Vessels on Two Saddle Supports, Welding Research Supplement, Sep. 1951.

(2) Wichman, K.R. et al.: Local Stresses in Spherical and Cylindrical Shells due to External Loadings, Welding Research Council bulletin, March 1979 revision of WRC bulletin 107 / August 1965.

(3) 日本産業規格 J I S B 8 2 7 8 (2003) 「サドル支持の横置圧力容器」

【原子炉浄化系補助熱交換器の耐震性についての計算結果】

1. 設計基準対象施設

1.1 設計条件

機器名称	耐震重要度分類	据付場所及び床面高さ (m)	固有周期 (s)		弾性設計用地震動 S d 又は静的震度		基準地震動 S s		最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)
			水平方向	鉛直方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度			
原子炉浄化系補助 熱交換器	B	原子炉建物 EL 23.8*1		0.05 以下	—	—	$C_{HNS}=1.44^{*2}$ $C_{HEW}=1.73^{*2}$	$C_v=1.54^{*2}$	1.37	85	50

注記*1: 基準床レベルを示す。

*2: 設計用震度 I (基準地震動 S s) を上回る震度

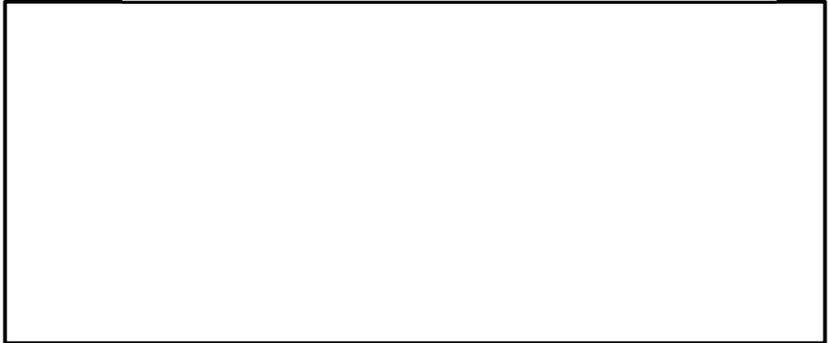
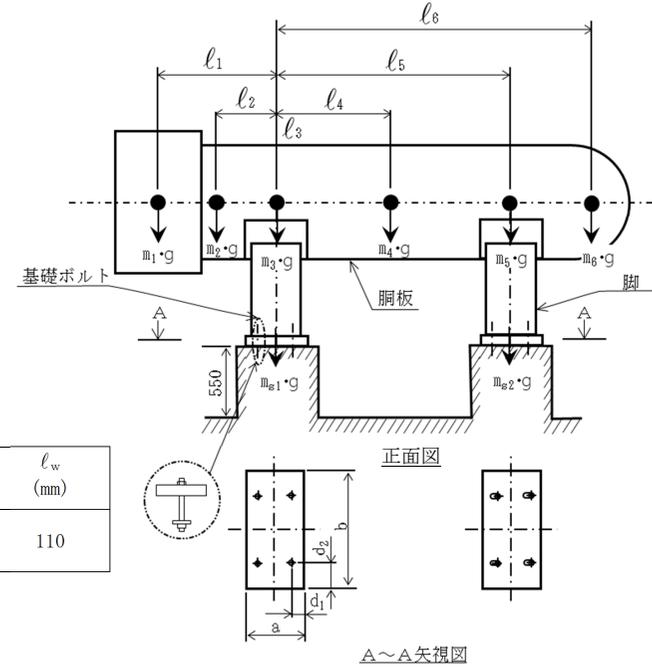
1.2 機器要目

m_1 (kg)	m_2 (kg)	m_3 (kg)	m_4 (kg)	m_5 (kg)	m_6 (kg)

l_1 (mm)	l_2 (mm)	l_3 (mm)	l_4 (mm)	l_5 (mm)	l_6 (mm)
-1037	-501	0	1249	2500	3049

m_0 (kg)	m_{s1} (kg)	m_{s2} (kg)	D_i (mm)	t (mm)	t e (mm)	l_0 (mm)	h_1 (mm)	h_2 (mm)	θ_w (rad)	l_w (mm)
			750	12.0	24.0*1	2500	719	950	0.366	110

C_1 (mm)	C_2 (mm)	$I_{s,x}$ (mm ⁴)	$I_{s,y}$ (mm ⁴)	$Z_{s,x}$ (mm ³)	$Z_{s,y}$ (mm ³)	$Z_{s,p}$ (mm ³)	θ_0 (rad)	θ (rad)
325	150	1.710×10^9	9.954×10^7	5.262×10^6	6.636×10^5	1.945×10^5	2.190	1.317



S2 補 VI-2-11-2-7-7 R0

A_s (mm^2)	E (MPa)	E_s (MPa)	A_{s1} (mm^2)	A_{s2} (mm^2)	A_{s3} (mm^2)	A_{s4} (mm^2)
2.653×10^4	199000^{*2}	199000^{*2}	1.274×10^4	1.390×10^4	8.897×10^3	1.221×10^4

K_{11}^{*4}	K_{12}^{*4}	K_{21}	K_{22}	$K_{\ell 1}$	$K_{\ell 2}$	K_{c1}	K_{c2}	$C_{\ell 1}$	$C_{\ell 2}$	C_{c1}	C_{c2}

s	n	n_1	n_2	a (mm)	b (mm)	d (mm)	A_b (mm^2)	d_1 (mm)	d_2 (mm)
15	4	2	2	350	700	20 (M20)	314.2	75	150

n_a	n_{1aX}	n_{1aY}	n_{1aZ}	n_{2aX}	n_{2aY}	n_{2aZ}	ℓ_{1a} (mm)	ℓ_{2a} (mm)	d_a (mm)	A_{ba} (mm^2)

S_y (胴板) (MPa)	S_u (胴板) (MPa)	S_y (脚) (MPa)	S_u (脚) (MPa)	F^* (脚) (MPa)
205^{*2}	394^{*2}	218^{*2} ($16\text{mm} < \text{厚さ} \leq 40\text{mm}$)	377^{*2} ($16\text{mm} < \text{厚さ} \leq 40\text{mm}$)	261

S_y (基礎ボルト) (MPa)	S_u (基礎ボルト) (MPa)	F^* (基礎ボルト) (MPa)	S_y (追設基礎ボルト) (MPa)	S_u (追設基礎ボルト) (MPa)	F^* (追設基礎ボルト) (MPa)
231^{*3} ($16\text{mm} < \text{径} \leq 40\text{mm}$)	394^{*3} ($16\text{mm} < \text{径} \leq 40\text{mm}$)	276	231^{*3} ($16\text{mm} < \text{径} \leq 40\text{mm}$)	394^{*3} ($16\text{mm} < \text{径} \leq 40\text{mm}$)	276

注記*1：本計算においては当板を有効とした。

*2：最高使用温度で算出

*3：周囲環境温度で算出

*4：表中で上段は一次応力，下段は二次応力の係数とする。

1.3 計算数値

1.3.1 胴に生じる応力

(1) 一次一般膜応力

(単位：MPa)

	地震の種類	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度				基準地震動 S _s			
	地震の方向	長手方向		横方向		長手方向		横方向	
	応力の方向	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力
内圧による応力		—	—	—	—	$\sigma_{\phi 1} = 44$	$\sigma_{x 1} = 22$	$\sigma_{\phi 1} = 44$	$\sigma_{x 1} = 22$
内圧による応力 (鉛直方向地震時)		—	—	—	—	$\sigma_{\phi 2} = 0$	—	$\sigma_{\phi 2} = 0$	—
運転時質量による 長手方向曲げモーメントにより生じる応力		—	—	—	—	—	$\sigma_{x 2} = 28$	—	$\sigma_{x 2} = 28$
鉛直方向地震による 長手方向曲げモーメントにより生じる応力		—	—	—	—	—	$\sigma_{x 6} = 43$	—	$\sigma_{x 6} = 43$
長手方向地震により 胴軸断面全面に生じる 応力	引張	—	—	—	—	—	$\sigma_{x 2 1} = 46$ $\sigma_{x 4 1 3} = 5$	—	—
	せん断	—	—	—	—	$\tau_{\theta 1} = 2$		$\tau_{c 1} = 1$	
組合せ応力		—	—	—	—	$\sigma_{0 \theta} = 115$		$\sigma_{0 c} = 93$	

(2) 一次応力

(単位：MPa)

	地震の種類	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度				基準地震動 S _s			
	地震の方向	長手方向		横方向		長手方向		横方向	
	応力の方向	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力
内圧による応力		—	—	—	—	$\sigma_{\phi 1} = 44$	$\sigma_{x 1} = 22$	$\sigma_{\phi 1} = 44$	$\sigma_{x 1} = 22$
内圧による応力 (鉛直方向地震時)		—	—	—	—	$\sigma_{\phi 2} = 0$	—	$\sigma_{\phi 2} = 0$	—
運転時質量による 長手方向曲げモーメントにより生じる応力		—	—	—	—	—	$\sigma_{x 2} = 28$	—	$\sigma_{x 2} = 28$
鉛直方向地震による 長手方向曲げモーメントにより生じる応力		—	—	—	—	—	$\sigma_{x 6} = 43$	—	$\sigma_{x 6} = 43$
運転時質量による 脚反力により生じる応力		—	—	—	—	$\sigma_{\phi 3} = 11$	$\sigma_{x 3} = 11$	$\sigma_{\phi 3} = 11$	$\sigma_{x 3} = 11$
鉛直方向地震による 脚反力により生じる応力		—	—	—	—	$\sigma_{\phi 7 1} = 17$	$\sigma_{x 7 1} = 17$	$\sigma_{\phi 7 1} = 17$	$\sigma_{x 7 1} = 17$
長手方向地震による 長手方向曲げモーメントにより生じる応力		—	—	—	—	—	$\sigma_{x 2 1} = 46$	—	—
横方向地震による 横方向曲げモーメントにより生じる応力		—	—	—	—	—	—	—	$\sigma_{x 2 2} = 8$
水平方向地震による応力	引張	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 4 1 1} = 11$ $\sigma_{\phi 4 1 2} = 4$	$\sigma_{x 4 1 1} = 5$ $\sigma_{x 4 1 2} = 4$ $\sigma_{x 4 1 3} = 5$	$\sigma_{\phi 5 1} = 9$	$\sigma_{x 5 1} = 20$
	せん断	—	—	—	—	$\tau_{\theta} = 17, \tau_{\theta 1} = 2$		$\tau_c = 6, \tau_{c 1} = 1$	
組合せ応力		—	—	—	—	$\sigma_{1 \theta} = 147$		$\sigma_{1 c} = 126$	

(3) 地震動のみによる一次応力と二次応力の和の変動値

(単位：MPa)

	地震の種類	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度				基準地震動 S s			
	地震の方向	長手方向		横方向		長手方向		横方向	
	応力の方向	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力
内圧による応力 (鉛直方向地震時)		—	—	—	—	$\sigma_{\phi 2} = 0$	—	$\sigma_{\phi 2} = 0$	—
鉛直方向地震による 長手方向曲げモーメントにより生じる応力		—	—	—	—	—	$\sigma_{x 6} = 43$	—	$\sigma_{x 6} = 43$
鉛直方向地震による 脚反力により生じる応力		—	—	—	—	$\sigma_{\phi 7 1} = 17$ $\sigma_{\phi 7 2} = 55$	$\sigma_{x 7 1} = 17$ $\sigma_{x 7 2} = 31$	$\sigma_{\phi 7 1} = 17$ $\sigma_{\phi 7 2} = 55$	$\sigma_{x 7 1} = 17$ $\sigma_{x 7 2} = 31$
長手方向地震による 長手方向曲げモーメントにより生じる応力		—	—	—	—	—	$\sigma_{x 2 1} = 46$	—	—
横方向地震による 横方向曲げモーメントにより生じる応力		—	—	—	—	—	—	—	$\sigma_{x 2 2} = 8$
水平方向地震による応力	引張	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 4 1} = 14$	$\sigma_{x 4 1} = 12$	$\sigma_{\phi 5 1} = 9$ $\sigma_{\phi 5 2} = 56$	$\sigma_{x 5 1} = 20$ $\sigma_{x 5 2} = 26$
		—	—	—	—	$\sigma_{\phi 4 2 1} = 13$ $\sigma_{\phi 4 2 2} = 12$	$\sigma_{x 4 2 1} = 24$ $\sigma_{x 4 2 2} = 7$		
		—	—	—	—	$\sigma_{\phi 4 2} = 25$	$\sigma_{x 4 2} = 30$		
	せん断	—	—	—	—	$\tau_{\theta} = 17, \tau_{\theta 1} = 2$		$\tau_{c} = 6, \tau_{c 1} = 1, \tau_{c 2} = 0$	
組合せ応力		—	—	—	—	$\sigma_{2 \theta} = 263$		$\sigma_{2 c} = 214$	

1.3.2 脚に生じる応力

(単位：MPa)

	地震の種類	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度		基準地震動 S s	
	地震の方向	長手方向	横方向	長手方向	横方向
運転時質量による応力	圧縮	—	—	$\sigma_{s1} = 3$	$\sigma_{s1} = 3$
	せん断	—	—	$\tau_{s1} = 1$	$\tau_{s1} = 1$
鉛直方向地震による応力	圧縮	—	—	$\sigma_{s4} = 4$	$\sigma_{s4} = 4$
	せん断	—	—	$\tau_{s4} = 1$	$\tau_{s4} = 1$
水平方向地震による応力	曲げ	—	—	$\sigma_{s2} = 37$	$\sigma_{s3} = 11$
	せん断	—	—	$\tau_{s2} = 9$	$\tau_{s3} = 7$
組合せ応力		—	—	$\sigma_{s\theta} = 42$	$\sigma_{sc} = 18$

1.3.3 基礎ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

	地震の種類	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度		基準地震動 S s	
	地震の方向	長手方向	横方向	長手方向	横方向
鉛直方向地震及び 水平方向地震による応力	引張	—	—	$\sigma_{b1} = 187$	$\sigma_{b2} = 179$
	せん断	—	—	$\tau_{b1} = 62$	$\tau_{b2} = 61$

1.3.4 追設基礎ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

	地震の種類	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度		基準地震動 S s	
	地震の方向	長手方向	横方向	長手方向	横方向
鉛直方向地震及び 水平方向地震による応力	引張	—	—	$\sigma_{ba1} = 30$	$\sigma_{ba2} = 17$
	せん断	—	—	$\tau_{ba1} = 9$	$\tau_{ba2} = 3$

1.4 結論

1.4.1 固有周期 (単位: s)

方向	固有周期
長手方向	
横方向	
鉛直方向	$T_3 = 0.05$ 以下

1.4.2 応力

(単位: MPa)

部材	材料	応力	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s	
			算出応力	許容応力	算出応力	許容応力
胴板	SB42	一次一般膜	—	—	$\sigma_0 = 115$	$S_a = 236$
		一次	—	—	$\sigma_1 = 147$	$S_a = 355$
		一次+二次	—	—	$\sigma_2 = 263$	$S_a = 410$
脚	SM41A	組合せ	—	—	$\sigma_s = 42$	$f_{tm} = 261$
基礎ボルト	SS41	引張	—	—	$\sigma_b = 187$	$f_{ts} = 191^{*1}$
		せん断	—	—	$\tau_b = 62$	$f_{sb} = 159$
追設基礎ボルト	SS400	引張	—	—	$\sigma_{ba} = 30$	$f_{tsa} = 165^{*2}$
		せん断	—	—	$\tau_{ba} = 9$	$f_{sba} = 127$

すべて許容応力以下である。

注記*1: $f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}]$

*2: $f_{tsa} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{toa} - 1.6 \cdot \tau_{ba}, f_{toa}]$

1.5 その他の機器要目

項目	記号	単位	入力値
ポアソン比	ν	—	0.3
要素数	—	個	135
節点数	—	個	172

動的機能維持評価について

1. 動的機能維持評価の対象機器・整理方法について

地震時に動的機能維持が要求される機器については、地震時の応答加速度が機器の機能確認済加速度以下であること等により動的機能が維持されることを確認しているが、想定される経年劣化を考慮した場合においても動的機能が維持されることを確認する。

(1) 対象機器の整理

高経年化対策実施ガイドで要求されている動的機能維持評価の対象は、“地震時または地震後に動的機能維持が要求される機器の振動特性に有意な影響を及ぼす経年劣化事象”が想定される機器である。また、動的機能の維持が要求される機器については、工事計画認可で対象機器を整理している。

したがって、耐震安全性評価で抽出した振動応答特性上または構造強度上、「軽微もしくは無視」できない事象（弁の場合は接続される配管の経年劣化を含む）のうち、工事計画認可で動的機能維持が要求される機器を動的機能維持の評価対象機器とする。

動的機能維持評価対象機器の抽出フローを図1に、抽出手順を表1に示す。

(2) 整理結果

前項にて抽出された機器の動的機能維持評価の実施要否について、以下のとおり検討した。

a. 配管、弁

想定される経年劣化事象として低サイクル疲労割れおよび腐食（流れ加速型腐食）がある。

低サイクル疲労割れについては、運転開始後60年時点での推定過渡回数を考慮して算出した疲れ累積係数（接液部は環境疲労を考慮した疲れ累積係数）を基準地震動 S_s または弾性設計用地震動 S_d を考慮した疲れ累積係数が1を下回り、疲労割れが発生しないことから振動応答特性への影響はなく、地震時の動的機能は維持される。

腐食（流れ加速型腐食）については、動的機能の維持が要求される弁に接続する配管の流れ加速型腐食による振動応答特性への影響を考慮した場合、地震時の応答加速度に影響を及ぼす可能性があるため、配管減肉を考慮した耐震評価を行う際に得られる弁の地震時応答加速度が機能確認済加速度以下であることを確認する。

b. ポンプ、熱交換器、容器、炉内構造物、機械設備

評価対象機器のうち、熱交換器、容器および炉内構造物については、経年劣化事象が想定されるが、動的機能維持要求のない機器であり評価は不要と判断した。

評価対象機器のうち、ポンプおよび機械設備等については動的機能維持要求があるが、基礎ボルトの腐食（全面腐食）を想定したうえで、60年時点での経年劣化を考慮した耐震安全性評価の結果、発生応力が許容応力を下回り、現状の保全対策により機器等に与える影響が十分小さいことを確認した。

これより経年劣化を考慮しても、地震時に動的機能の維持が要求される機器等における地震時の応答加速度は各機器の機能確認済加速度を上回るものではないと考えられ、地震時の動的機能について維持されると判断する。上記を踏まえた動的機能維持評価対象機器の整理結果を表2に示す。

2. 動的機能維持評価の結果

経年劣化事象による影響を考慮した動的機能維持評価結果を表3に示す。経年劣化事象による振動応答特性への影響を考慮しても、地震時の応答加速度が機能確認済加速度以下であることから、動的機能が維持されることを確認した。

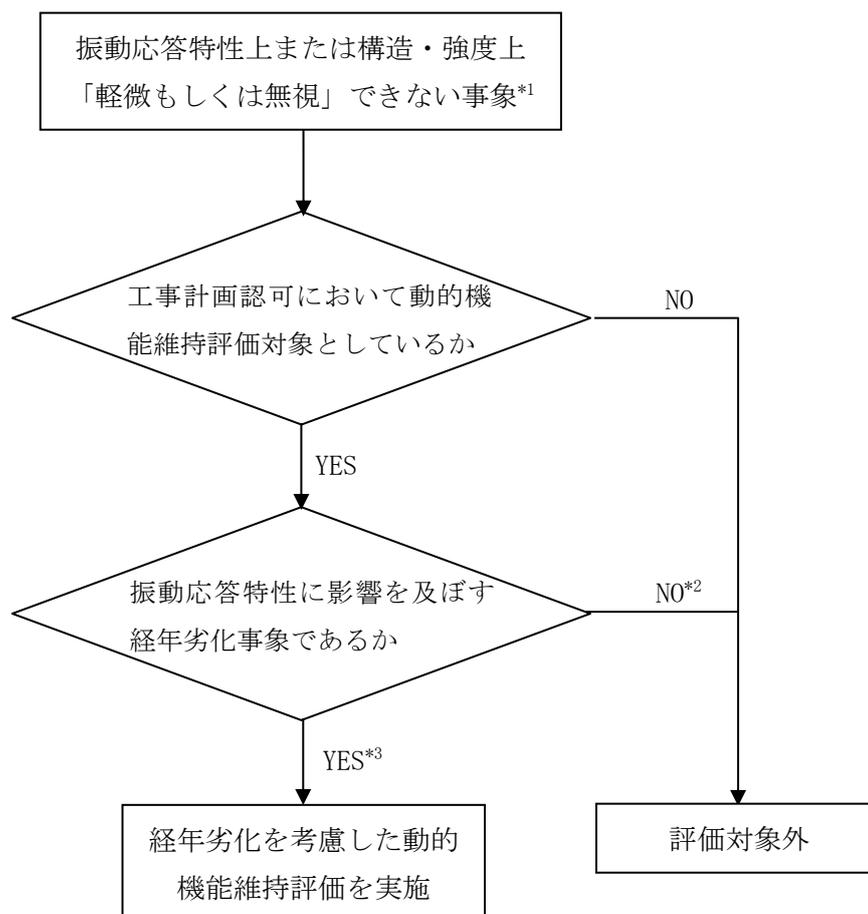


図1 動的機能維持評価対象機器の抽出フロー

- *1：現在発生しているか、または将来にわたって起こることが否定できない事象のうち、振動応答特性上または構造・強度上「軽微もしくは無視」できない事象（◎事象）
- *2：低サイクル疲労、基礎ボルトの全面腐食について発生値が許容値（疲れ累積係数または許容応力）を下回ることを確認しているため振動応答特性に影響を与える経年劣化事象ではない。
- *3：弁の接続配管に流れ加速型腐食が生じた場合は、配管の振動応答特性の変化が弁の応答加速度に影響すると考えられるため、弁については動的機能維持評価対象として整理する。

表1 耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象の抽出までの手順

技術評価で想定される経年劣化事象		ステップ1	ステップ2		ステップ3	
高経年化対策上着目すべき経年劣化事象	下記①, ②を除く経年劣化事象	○	i	高経年化対策上着目すべき経年劣化事象であるが、現在発生しておらず、今後も発生の可能性がないもの、または小さいもの	×	×
			ii	現在発生しているか、または将来にわたって起こることが否定できないもの	○	振動応答特性上または構造・強度上「軽微もしくは無視」できない事象 振動応答特性上または構造・強度上「軽微もしくは無視」できる事象
高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象	① 想定した劣化傾向と実際の劣化傾向の乖離が考え難い経年劣化事象であって、想定した劣化傾向等に基づき適切な保全活動を行っているもの (日常劣化管理事象_△事象)	○	i	日常劣化管理事象であるが、現在発生しておらず、今後も発生の可能性がないもの、または小さいもの	—	—
			ii	現在発生しているか、または将来にわたって起こることが否定できないもの	○	振動応答特性上または構造・強度上「軽微もしくは無視」できない事象 振動応答特性上または構造・強度上「軽微もしくは無視」できる事象
	② 現在までの運転経験や使用条件から得られた材料試験データとの比較等により、今後も経年劣化の進展が考えられない、または進展傾向が極めて小さいと考えられる経年劣化事象 (日常劣化管理事象以外_▲事象)	—	—	—	—	—

○：評価対象として抽出。

—：高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象であり、日常劣化管理事象以外であるもの、あるいは日常劣化管理事象であるが、現在発生しておらず、今後も発生の可能性がないもの、または小さいものとして評価対象から除外。

×：高経年化対策上着目すべき経年劣化事象であるが、現在発生しておらず、今後も発生の可能性がないもの、または小さいものとして評価対象から除外。

■：振動応答特性上または構造・強度上「軽微もしくは無視」できる事象として評価対象から除外。

◎：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。

表2 動的機能維持評価対象機器の抽出に関する整理 (1/3)

機種	機器	耐震重要度	部位	振動応答特性に有意な影響を及ぼす経年劣化事象	耐震評価	動的機能要求有無	評価要否	判断した理由
ポンプ	原子炉再循環ポンプ	S	ケーシング	低サイクル疲労	◎	無※	否	①
				熱時効	◎	無※	否	①
熱交換器	原子炉補機冷却系熱交換器	S	伝熱管	流れ加速型腐食	◎	無	否	①
	排ガス予熱器	B	伝熱管	摩耗	◎	無	否	①
			胴	流れ加速型腐食	◎	無	否	①
			管支持板	流れ加速型腐食	◎	無	否	①
	原子炉浄化系再生熱交換器	B	胴	流れ加速型腐食	◎	無	否	①
高压炉心スプレ補機冷却系熱交換器	S	伝熱管	流れ加速型腐食	◎	無	否	①	
容器	原子炉圧力容器	S	ノズル等	低サイクル疲労	◎	無	否	①
			円筒胴	中性子照射脆化	◎	無	否	①
	原子炉格納容器	S	ベント管ヘローズ	低サイクル疲労	◎	無	否	①
	機械ネトレーション	S	主蒸気系配管貫通部ヘローズ	低サイクル疲労	◎	無	否	①
			給水系配管貫通部ヘローズ	低サイクル疲労	◎	無	否	①

①：動的機能要求の無い機器のため評価不要

②：経年劣化を考慮した耐震安全性評価の結果、許容値を下回ることを確認している機器のため評価不要

③：経年劣化を考慮した場合に、振動応答特性に影響を及ぼす可能性があるため影響評価を行う必要がある

※：回転機器であるが、原子炉圧力容器のバウンダリ機能維持の要求のみ有りのため、動的機能維持の要求は無い

表 2 動的機能維持評価対象機器の抽出に関する整理 (2/3)

機種	機器		耐震 重要度	部位	振動応答特性に有意な影響 を及ぼす経年劣化事象	耐震評価	動的機能 要求有無	評価要否	判断した 理由
配管 (接続弁※ 含む)	ステンレス鋼 配管	原子炉再循環系	S	配管	低サイクル疲労	◎	無	否	①
		原子炉浄化系	S	配管	低サイクル疲労	◎	有	否	②
		残留熱除去系	S	配管	低サイクル疲労	◎	無	否	①
	炭素鋼 配管	給水系	S	配管	低サイクル疲労	◎	有	否	②
		主蒸気系	S	配管	低サイクル疲労	◎	有	否	②
		原子炉浄化系	S	配管	低サイクル疲労	◎	無	否	①
		原子炉隔離時冷却系	S	配管	低サイクル疲労	◎	有	否	②
		残留熱除去系	S	配管	低サイクル疲労	◎	有	否	②
		低圧炉心スプレイ系	S	配管	低サイクル疲労	◎	有	否	②
		高圧炉心スプレイ系	S	配管	低サイクル疲労	◎	有	否	②
	給水系	S	配管	流れ加速型腐食	◎	無	否	①	
	復水系	B	配管	流れ加速型腐食	◎	無	否	①	
	原子炉ヘントリ系	S	配管	流れ加速型腐食	◎	無	否	①	
	原子炉隔離時冷却系	S	配管	流れ加速型腐食	◎	有	要	③	
	残留熱除去系	S	配管	流れ加速型腐食	◎	無	否	①	
	タービンラント蒸気系	B	配管	流れ加速型腐食	◎	無	否	①	
補助蒸気系	B	配管	流れ加速型腐食	◎	無	否	①		

①：動的機能要求の無い機器のため評価不要

②：経年劣化を考慮した耐震安全性評価の結果、許容値を下回ることを確認している機器のため評価不要

③：経年劣化を考慮した場合に、振動応答特性に影響を及ぼす可能性があるため影響評価を行う必要がある

※：接続先に動的機能要求の弁が有る場合

表 2 動的機能維持評価対象機器の抽出に関する整理 (3/3)

機種	機器	耐震 重要度	部位	振動応答特性に有意な影 響を及ぼす経年劣化事象	耐震評価	動的機能 要求有無	評価要否	否とした 理由	
弁	原子炉再循環ポンプ 出口弁	S	弁箱	低サイクル疲労	◎	無	否	①	
				熱時効	◎	無	否	①	
	残留熱除去ポンプ 炉水戻り弁	S	弁箱	低サイクル疲労	◎	有	否	②	
	原子炉給水内側隔離逆止弁	S	弁箱	低サイクル疲労	◎	有	否	②	
	主蒸気隔離弁	S	弁箱	低サイクル疲労	◎	有	否	②	
	仕切弁	原子炉再循環系	S	弁箱	低サイクル疲労	◎	無	否	①
		原子炉浄化系	S	弁箱	低サイクル疲労	◎	有	否	②
		残留熱除去系	S	弁箱	低サイクル疲労	◎	有	否	②
		低圧炉心スプレイ系	S	弁箱	低サイクル疲労	◎	有	否	②
		高圧炉心スプレイ系	S	弁箱	低サイクル疲労	◎	有	否	②
	逆止弁	給水系	S	弁箱	低サイクル疲労	◎	有	否	②
		残留熱除去系	S	弁箱	低サイクル疲労	◎	有	否	②
		低圧炉心スプレイ系	S	弁箱	低サイクル疲労	◎	有	否	②
		高圧炉心スプレイ系	S	弁箱	低サイクル疲労	◎	有	否	②
炉内構造物	炉心シュラウド	S	上部胴, 中間胴, 下部胴, リング	低サイクル疲労	◎	無	否	①	
	シュラウドサポート	S	シリンダ, プレート, レグ	低サイクル疲労				①	
機械設備	基礎ボルト	S	基礎ボルト	全面腐食	◎	有	否	②	

- ①：動的機能要求の無い機器のため評価不要
 ②：経年劣化を考慮した耐震安全性評価の結果、許容値を下回ることを確認している機器のため評価不要
 ③：経年劣化を考慮した場合に、振動応答特性に影響を及ぼす可能性があるため影響評価を行う必要がある

表3 経年劣化事象を考慮した動的機能維持評価結果

経年劣化事象	地震力		仕切弁	
			蒸気内側隔離弁	
			機能維持評価用加速度 ($\times 9.8\text{m/s}^2$)	機能確認済加速度 ($\times 9.8\text{m/s}^2$)
流れ加速型腐食	Ss	水平	3.2	6.0
		鉛直	3.8	6.0

弁に接続する配管の経年劣化事象（流れ加速型腐食）による弁の振動応答特性への影響を考慮しても、弁の地震時の応答加速度が機能確認済加速度以下であることから、弁の動的機能が維持されることを確認した。

機器・配管系の耐震安全性評価に用いた地震力について

機器・配管系の耐震安全性評価において適用する耐震評価条件の概要を以下に示す。

なお、本資料は以下の工事計画認可申請（補正）の耐震計算書の内容を抜粋して作成した。

- ・ VI-2-1-7 設計用床応答スペクトルの作成方針
- ・ VI-2-1-9 機能維持の基本方針
- ・ VI-2-2-1 炉心，原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉本体の基礎の地震応答計算書

1. 耐震評価条件の基本方針

(1) 設計用床応答スペクトル

- ① 各原子炉施設の解析モデルに対して，基準地震動 S_s ，弾性設計用地震動 S_d に基づく入力地震動を用いた時刻歴応答解析を行い，各質点位置における加速度応答時刻歴を求める。
 - ② ①で求めた各質点の加速度応答時刻歴を入力として，減衰付 1 自由度系の応答スペクトルを求め，床応答スペクトルを作成する。
 - ③ ②で求めた床応答スペクトルに対し，各施設の固有周期のシフトを考慮し，周期方向に $\pm 10\%$ の拡幅を行う。
 - ④ ③で求めた床応答スペクトルに対し，材料物性の不確かさを考慮した条件を「設計用床応答スペクトルⅠ」とする。
 - ⑤ ③で求めた床応答スペクトルに対し，震度に 1.5 以上の係数を乗じて設定した，設計用床応答スペクトルⅠに対して余裕のある条件を「設計用床応答スペクトルⅡ」とする。
 - ⑥ ④および⑤以外の条件を適用する場合，全ての固有周期における震度が「設計用床応答スペクトルⅠ」以上となる床応答スペクトルを適用する。
- 以上，④～⑥で得られた床応答スペクトルを総称して「設計用床応答スペクトル」という。

(2) 設計用震度

- ① 1. (1)①で求めた各質点の加速度応答時刻歴の最大値（最大応答加速度）に対し，材料物性の不確かさを考慮して設定した条件を「設計用震度Ⅰ」とする。
- ② 1. (1)①で求めた各質点の最大応答加速度に 1.5 以上の係数を乗じて設定した，設計用床応答スペクトルⅠに対して余裕のある条件を「設計用震度Ⅱ」とする。
- ③ ①および②以外の条件を適用する場合，「設計用震度Ⅰ」以上となる床応答スペクトルを適用する。

以上，①～③の震度を総称して「設計用震度」という。

(3) 設計用荷重

炉心，原子炉圧力容器，原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉格納容器ペデスタル等（大型機器系）の解析モデルを用いて，基準地震動 S_s および弾性設計用地震動 S_d による地震応答解析から得られた地震力を 1.2 倍した値および材料物性の不確かさを考慮した地震応答解析から得られた地震力を 1.0 倍した値を包絡した地震力を「設計用荷重 I」という。

2. 設計用地震力

機器・配管系の耐震安全性評価について，耐震重要度に応じて表 1 に示す設計用地震力にて評価を実施している。

表 1 機器・配管系の設計用地震力

耐震重要度 分類	静的地震力*1		動的地震力*1, *2	
	水平	鉛直	水平	鉛直
S	$3.6 C_i^{*3}$	$1.2 C_v^{*4}$ (0.29)	S_s, S_d	S_s, S_d
B	$1.8 C_i^{*3}$	—	$S_d \times 1/2^{*5}$	$S_d \times 1/2^{*5}$
C	$1.2 C_i^{*3}$	—	—	—
重大事故等 対処施設	<ul style="list-style-type: none"> ・常設耐震重要重大事故防止設備は，基準地震動 S_s による地震力 ・常設重大事故緩和設備は，基準地震動 S_s による地震力 			

*1：機器・配管系については設置された床の応答を入力とする。

*2： S_s ：基準地震動 S_s により定まる地震力， S_d ：弾性設計用地震動 S_d により定まる地震力

*3：地震層せん断力係数 C_i は標準せん断力係数を 0.2 とし，建物・構築物の振動特性，地盤の種類等を考慮して求められる値で次式に基づく。

$$C_i = R_t \cdot A_i \cdot C_o \quad (R_t: \text{振動特性係数 } 0.8, A_i: C_i \text{ の分布係数}, C_o: \text{標準せん断力係数 } 0.2)$$

*4：震度 0.3 とし，建物・構築物の振動特性，地盤の種類等を考慮し，高さ方向に一定とする。また次式により求めた値を表に記載した。

$$C_v = 0.3 \cdot R_v \quad (R_v: \text{鉛直方向振動特性係数 } 0.8)$$

*5：地震動に対して共振のおそれのある施設について適用する。

3. 初回申請時からの変更要否の確認

前述の手法に基づき設定した設計用条件に対して，評価対象機器ごとに以下の通り耐震安全性評価に用いる震度等を分類しており，一部の機器については初回申請時に保守的な条件で評価していたことから，初回申請時の評価結果をそのまま適用している。

(例：設計用震度にて評価する場合)

- ・設計用震度 I
- ・設計用震度 I を上回る設計震度
- ・設計用震度 II

・設計用震度Ⅱを上回る設計震度

初回申請時の評価用条件にて評価成立と判断した機器について、その考え方を以下に示す。

(1) 耐震重要度分類の見直し (C→B) に伴う影響

別紙3に記載の通り、初回申請時に耐震重要度分類をBクラスからCクラスに変更していた設備について、Bクラスとして再評価した。耐震重要度分類見直しに伴い評価用条件が変更となるが、一部機器については、初回申請当時のCクラスでの評価時点で保守的な条件にて評価していたため、初回申請時の評価条件が補正申請におけるBクラスの評価条件を包絡していることを確認し、初回申請時の評価用条件にて耐震安全性評価上問題ないと判断した。

初回申請時の評価条件で包絡していることを確認した機器の、基礎ボルトの腐食を考慮した耐震安全性評価の例を表2に示す。

表 2 基礎ボルトの腐食を考慮した耐震安全性評価（初回申請時の評価条件で包絡していることを確認した機器）

評価機器・ 部位	初回申請					補正申請					
	耐震 重要度	評価に用いた 震度	荷重 種別	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	耐震 重要度*1	設計用震度 I（弾性設計 用地震動 $S_d \times 1/2$ ） および静的震度	評価に用いた 震度	荷重 種別	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
復水ポンプ 基礎ボルト	C	$C_H=0.46$	引張 応力	10	158	B (柔)	$C_H^{*2}=0.30$ $1.8C_i(NS)=0.29$ $1.8C_i(EW)=0.29$	$C_H=0.46$	引張 応力	10	161*3
			せん断 応力	14	122				せん断 応力	14	124*3
排ガス 再結合器 基礎ボルト	C	$C_H=0.42$	引張 応力	16	173	B (剛)	$1.8C_i(NS)=0.34$ $1.8C_i(EW)=0.33$	$C_H=0.42$	引張 応力	16	173
			せん断 応力	5	133				せん断 応力	5	133

*1：耐震重要度分類にあわせ、括弧書きで以下事項を示す

(柔)：柔構造（1次固有周期が0.05秒超過）

(剛)：剛構造（1次固有周期が0.05秒以下）

*2：動的震度であり、最大応答加速度を1.2倍した震度

*3：その他の変更として、環境温度の見直し（50℃→40℃）を実施しているため許容応力が初回申請から変更となった

(2) 原子炉圧力容器中間胴の中性子照射脆化を考慮した耐震安全性評価

原子炉圧力容器中間胴の中性子照射脆化を考慮した耐震安全性評価においては設計用荷重 I を上回る荷重で評価している。(詳細な算出過程等は別紙 5 参照)

初回申請時に原子炉圧力容器中間胴の中性子照射脆化を考慮した耐震安全性評価を実施した荷重条件に対して、設計用荷重 I における荷重条件を比較した結果、初回申請時の条件が設計用荷重 I を包絡していることを確認し、初回申請時の評価用条件にて耐震安全性評価上問題ないと判断した。

初回申請時および補正申請時の評価に用いた荷重と、設計用荷重 I の比較を表 3 に示す。

表 3 原子炉圧力容器中間胴の中性子照射脆化を考慮した評価条件

評価機器・部位	耐震 重要度	設計用荷重 I			初回申請および補正申請の 評価に用いた荷重*1		
		水平力 (kN)	鉛直力 (kN)	モーメント (kN・m)	水平力 (kN)	鉛直力 (kN)	モーメント (kN・m)
原子炉圧力容器 中間胴	S						

*1：荷重は絶対値を記載