

東海第二発電所 審査資料	
資料番号	TKK 補-III-7 改16
提出年月日	平成30年7月19日

東海第二発電所 劣化状況評価  
(耐震安全性評価)

補足説明資料

平成30年7月19日

日本原子力発電株式会社

本資料のうち、枠囲みの範囲は、営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

## 目次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
3. 評価対象と評価手法	5
(1) 評価対象	5
① 耐震安全性評価対象機器	5
② 耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象の抽出	5
(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 工事計画認可申請で用いた耐震評価手法等の反映について	11
(3) 評価用地震力	14
(4) 評価用地震動	15
(5) 代表の選定	19
4. 代表の耐震安全性評価	21
(1) 耐震安全性評価	21
① 低サイクル疲労	21
② 中性子照射脆化	21
③ 照射誘起型応力腐食割れ	21
④ 熱時効	22
⑤ 応力腐食割れ	23
⑥ 腐食（流れ加速型腐食）	24
⑦ 腐食（全面腐食）	26
⑧ 動的機能維持に係る耐震安全性評価	28
⑨ 制御棒挿入性に係る耐震安全性評価	28
⑩ 浸水防護施設の耐震安全性評価	31
⑪ 工事計画認可申請の内容を踏まえた劣化状況評価の見直し	31
(2) 現状保全	32
(3) 総合評価	32
(4) 高経年化への対応	32
5. まとめ	33
(1) 審査基準適合性	33
(2) 保守管理に関する方針として策定する事項	36

別紙 1. 低サイクル疲労を考慮した耐震安全性評価について	38
別紙 2. 震災が評価に与える影響とその考え方について	50
別紙 3. 中性子照射脆化を考慮した耐震安全性評価について	59
別紙 4. シュラウドサポートの粒界型応力腐食割れを考慮した耐震安全性評価について	71
別紙 5. 廃液濃縮器蒸発缶の応力腐食割れを考慮した耐震安全性評価について	83
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	90
別紙 7. 建設後の耐震補強の実績及び今後の予定について	135
別紙 8. 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	207
別紙 9. 後打ちアンカの腐食を考慮した耐震安全性評価について	233
別紙 10. 動的機能維持評価について	236
別紙 11. 浸水防護施設の耐震安全性評価について	258
別紙 12. 工事計画認可申請の内容を踏まえ劣化状況評価の見直しがある場合の見直し前後の相違点について	268

添付資料 1 V-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書

添付資料 2 V-2-3-3-1 燃料集合体の耐震性についての計算書



## 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 114 条の規定に基づく、劣化状況評価における耐震安全性評価の補足として耐震安全性の評価結果を説明するものである。

なお、高経年化対策に関する各機器・構造物の劣化状況評価については劣化状況評価書に取りまとめている。

劣化状況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クラス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

機器の材質、環境条件等を考慮し、発生し得る経年劣化事象に対して劣化状況評価を行った結果、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、運転期間延長認可申請の劣化状況評価の中で耐震安全性の評価を実施するものである。

耐震安全性評価に対する評価の基本方針は、評価対象機器について発生しうる経年劣化事象に対して実施した劣化状況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の運転の期間の延長の審査基準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 (1/3) 耐震安全性評価についての要求事項

審査基準, ガイド	要求事項
<p>実用発電用原子炉の運転の期間の延長の審査基準</p>	<p>&lt;耐震安全性評価&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 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。</li> <li>○ 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。</li> <li>○ 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。</li> <li>○ 経年劣化事象を考慮した、地震時の燃料集合体の変位を評価した結果、機能確認済相対変位以下であるか又は、同様に制御棒挿入時間を評価した結果、安全評価上の規定時間以下であること。</li> </ul>
<p>実用発電用原子炉の運転延長認可申請に係る運用ガイド</p>	<p>運転期間延長認可申請に伴うものとして評価を行い、その結果の記載が求められる事項は次のとおり。</p> <p style="padding-left: 20px;">①特別点検の結果を踏まえた劣化状況評価。</p> <p>運転期間延長認可申請に伴い策定するものとして記載が求められる事項は次のとおり。</p> <p style="padding-left: 20px;">①劣化状況評価を踏まえた保守管理に関する方針。</p>
<p>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</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保守管理活動において、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、保守管理要領等の文書及び保守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>実施ガイド 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>

表 1 (2/3) 耐震安全性評価についての要求事項

審査基準, ガイド	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ガイド</p>	<p>②-1 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。</p> <p>②-1 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>④ 大規模地震等による機器・構造物への直接の影響の考慮 現に発生した大規模地震等について、これによる機器・構造物への影響を踏まえた高経年化技術評価を行っているかを審査する。</p> <p>(2) 長期保守管理方針の審査 ① 長期保守管理方針の策定 すべての追加保全策について長期保守管理方針として策定されているかを審査する。</p>
<p>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</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>

表 1 (3/3) 耐震安全性評価についての要求事項

審査基準, ガイド	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ガイド</p>	<p>3.2 長期保守管理方針の策定及び変更</p> <p>長期保守管理方針の策定及び変更にあたっては、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、保守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保守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保守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

「劣化状況評価」における評価対象機器と同じ、重要度分類審査指針クラス 1, 2 及び最高使用温度が 95 °C を超える, 又は最高使用圧力が 1,900 kPa を超える環境下にある原子炉格納容器外の重要度クラス 3 の機器 (浸水防護施設を含む), 並びに常設重大事故等対処設備に属する機器・構造物とする。

上記の機器のうち, 以下の機器を耐震安全性評価 (東北地方太平洋沖地震 (以下, 「TPO 地震」という) の影響を考慮した耐震安全性評価を含む。) における評価対象機器とする。

- ・各劣化状況評価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。

##### 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, 各劣化状況評価書で評価対象機器・部位ごとに想定される経年劣化については, 以下のとおり分類される。

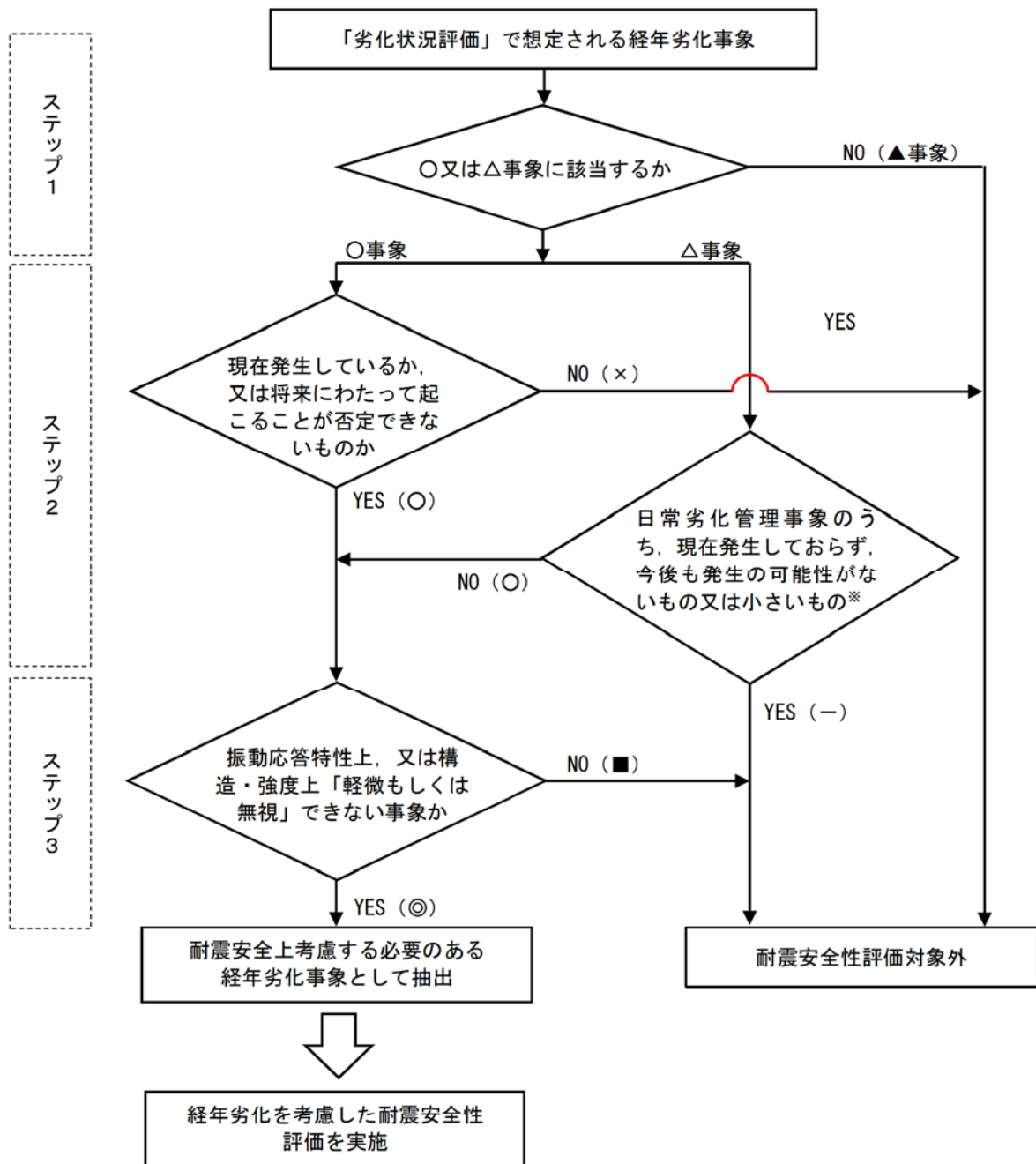
- a. 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象 (○事象)
- b. 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象 (日常劣化管理事象)  
(△事象)
- c. 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象  
(日常劣化管理事象以外) (▲事象)

このうち, 耐震安全性評価を実施する機器として, a. 及び b. のうち「現在発生しているか, 又は将来にわたって起こることが否定できないもの」で且つ「振動応答特性上, 又は構造・強度上「軽微若しくは無視」できる事象では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・構造物のうち弁, コンクリート構造物及び鉄骨構造物, 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。

また, TPO 地震の影響を考慮する必要がある経年劣化事象については, 耐震安全上考慮する必要がある経年劣化事象のうち, TPO 地震による影響を考慮した際に, 耐震評価結果が耐震安全性評価書に記載される評価結果に包含されず, 重畳される事象である低サイクル疲労とする。



【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、又は小さいものとして評価対象から除外
- ：振動応答特性上、又は構造・強度上「軽微若しくは無視」できる事象とし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
- △：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）
- ▲：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。

※ 保全活動によりその傾向が維持できていることを確認している経年劣化事象は「YES」に進む

図1 耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象の抽出フロー

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 (中性子照射 による靱性低下)	熱時効	応力腐 食割れ	腐食	
						全面 腐食	流れ 加速型 腐食
ポンプ	◎	—	—	◎	—	◎*2	—
熱交換器	—	—	—	—	—	◎*1,*2	◎
ポンプ モータ	—	—	—	—	—	—	—
容器	◎	◎	—	—	—	◎*2	—
配管	◎	—	—	—	—	◎*2	◎
弁	◎	—	—	◎	—	—	—
炉内構造 物	◎	—	◎	—	◎	—	—
ケーブル	—	—	—	—	—	◎*2	—
タービン 設備	—	—	—	—	—	◎*2	—
コンクリ ート構造 物及び鉄 骨構造物	—	—	—	—	—	—	—
計測制御 設備	—	—	—	—	—	◎*2	—
空調設備	—	—	—	—	—	◎*2	—
機械設備	—	—	—	—	◎	◎*2	◎
電源設備	—	—	—	—	—	◎*2	—

\*1：胴，伝熱管の腐食

\*2：基礎ボルト

【凡例】

◎：振動応答特性上，又は構造・強度上「軽微もしくは無視」できない事象

—：日常劣化管理事象のうち，現在発生しておらず，今後も発生の可能性がないもの，又は小さい事象

## (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)
- ・ 日本機械学会「発電用原子力設備規格 配管破損防護設計規格 JSME S ND1-2002」(以下、「配管破損防護設計規格」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)

### ② 耐震安全性評価の評価手法

#### (a) 低サイクル疲労(原子炉再循環ポンプ, 原子炉圧力容器, 配管, 弁等)

基準地震動  $S_s$  を考慮した疲労累積係数と, 運転開始後 60 年までの推定過渡回数を考慮した疲労累積係数の合計値が許容値 1 を下回ることを確認する。

#### (b) 中性子照射脆化(原子炉圧力容器胴)

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) 照射誘起型応力腐食割れ, 中性子照射による靱性低下(炉心シュラウド)

亀裂を想定し, 地震時の応力拡大係数が中性子照射を受けた材料の破壊靱性値を下回ることを確認する。

なお, 劣化状況評価「照射誘起型応力腐食割れ」にて地震荷重を含んだ評価を実施している。



(d) 熱時効（原子炉再循環ポンプのケーシング，原子炉再循環ポンプ入口弁の弁箱）  
亀裂を想定し，評価対象部位の熱時効後の材料の亀裂進展抵抗と基準地震動  $S_S$  による地震荷重を考慮した亀裂進展力を比較し，不安定破壊しないことを確認する。  
なお，劣化状況評価「熱時効」にて地震荷重を含んだ評価を実施している。

(e) 応力腐食割れ（シュラウドサポート，廃液濃縮器蒸発缶）

a. シュラウドサポート

亀裂を想定し，極限解析により算出されるシュラウドサポートの安全率を考慮した設計荷重が崩壊荷重を下回ることを確認する。

b. 廃液濃縮器蒸発缶

亀裂を想定し，地震時の発生応力が亀裂安定限界応力を下回ることを確認する。

(f) 腐食（流れ加速型腐食）（配管，熱交換器，機械設備）

a. 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又は疲労累積係数を算出し，許容値を下回ることを確認する。

耐震安全性評価フローを図 2 に示す。

b. 熱交換器

伝熱管の施栓基準である管支持板の支持間隔喪失又は伝熱管の減肉を考慮して発生応力を算出し，許容応力を下回ることを確認する。

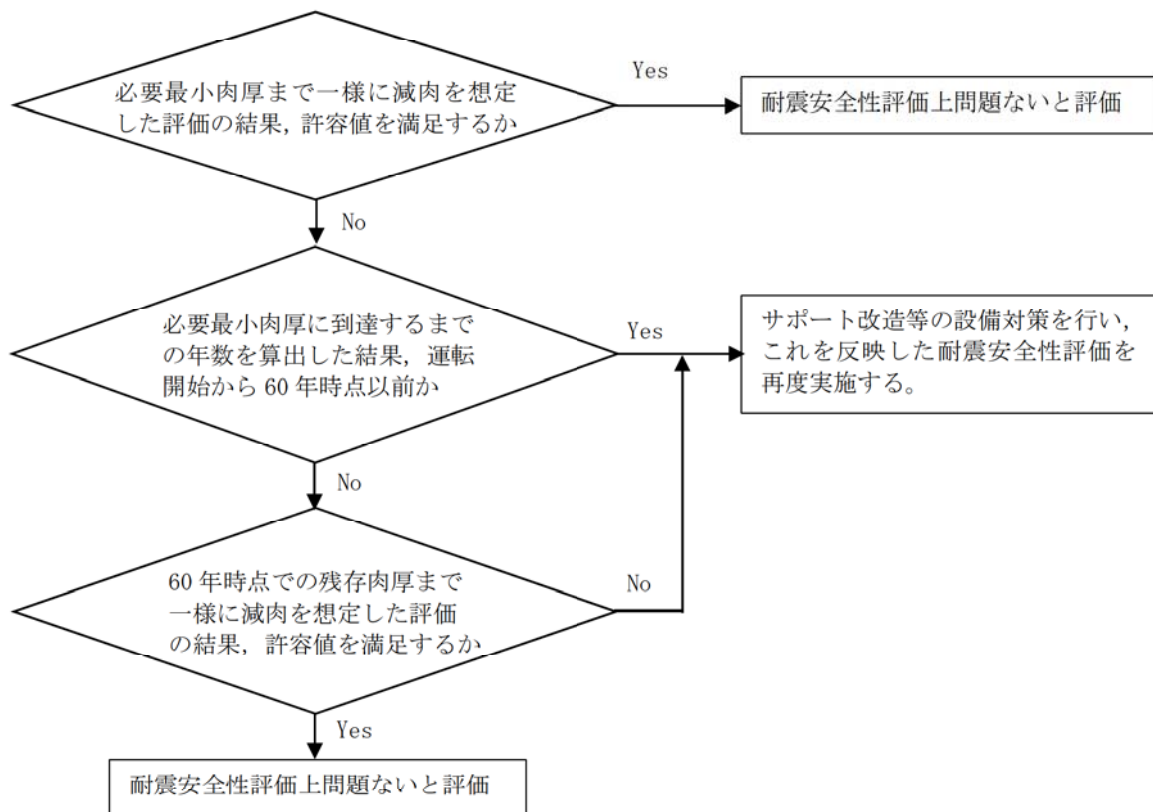


図2 腐食（流れ加速型腐食）（配管）の耐震安全性評価フロー

- (g) 腐食（全面腐食）（機器付基礎ボルト（残留熱除去系熱交換器，主排気筒），後打ちアンカ（後打ちケミカルアンカ，後打ちメカニカルアンカ）
- a. 機器付基礎ボルト
 

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。
  - b. 後打ちアンカ
 

運転開始後 60 年時点の腐食減肉を仮定して設計許容荷重負荷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。
- (h) 動的機能維持（原子炉給水逆止弁，主蒸気隔離弁，主蒸気逃がし安全弁，原子炉冷却材浄化系内側隔離弁）
- 経年劣化事象を考慮し，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が，機能確認済加速度以下であることを確認する。

(i) 制御棒挿入性（制御棒，炉内構造物，燃料集合体）

劣化状況評価の中から制御棒挿入性に影響を与える可能性のある経年劣化事象を抽出して影響評価を行い，地震時の燃料集合体の変位を評価した結果，機能確認済相対変位以下であるか又は，同様に制御棒挿入時間を評価した結果，安全評価上の規定時間以下であることを確認する。

③ 工事計画認可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，工事計画に係る設備については，工事計画認可申請（平成 30 年 2 月補正申請）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う。

また，工事計画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。

既工認と異なる評価手法について，劣化状況評価への適用の状況を表 3 に整理した。

表 3 (1/2) 既工認と異なる評価手法の劣化状況評価への反映状況

項目	概要	工事計画認可申請における対象設備	劣化状況評価への反映		
			反映	説明	
1. 先行プラントの知見反映を基本として変更する手法					
(1)	クレーンの非線形時刻歴応答解析の適用	すべり及び浮き上がりの条件を考慮した非線形時刻歴応答解析での評価	原子炉建屋 6 階天井走行クレーン及び DC*1 建屋天井クレーン	×	耐震評価対象外機器のため (耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象が想定されない)
(2)	ポンプ等の応答解析モデルの精緻化	立形ポンプにおける JEAG4601 に基づく、モデルの精緻化	立形ポンプ(高圧炉心スプレイ系ポンプ他)	○	立形ポンプの耐震安全性評価(基礎ボルトの腐食を想定した耐震安全性評価)に反映
		架台及び熱交換器本体の相互影響を精緻に評価するための多質点系はりモデルを用いた地震応答解析による評価	残留熱除去系熱交換器	○	残留熱除去系熱交換器の耐震安全性評価(基礎ボルトの腐食を想定した耐震安全性評価)に反映
		集中質量を用いる質点モデルから等分布質量としたビーム要素に変更した解析モデルを用いた地震応答解析による評価	格納容器ベント管	×	耐震評価対象外機器のため (耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象が想定されない)
(3)	容器等の応力解析への FEM モデルの適用	実機の形状をシェル要素にて模擬し、JSME 等に基づく材料諸元を与えてモデル化	原子炉格納容器本体に取付く各構造物、シュラウドヘッド、ディーゼル発電機始動用空気溜め及び燃料油デイトンク	×	原子炉格納容器本体に取付く各構造物、シュラウドヘッドは、耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象が想定されないため、耐震評価対象外機器である。ディーゼル発電機始動用空気溜め及び燃料油デイトンクの基礎ボルトの腐食を想定した耐震安全性評価は、JEAG4601 の評価式で算出できるため、FEM モデルは適用していない。
(4)	炉心シュラウド等の応力解析への公式等の評価の適用	既工認において FEM による評価にて耐震評価を実施していた設備について公式等を用いた耐震評価	炉心シュラウド、原子炉本体基礎アンカ部	×	炉心シュラウドには、低サイクル疲労及び IASCC が耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象であるが、いずれも本応力解析には用いないことから、反映を要するものではない。原子炉本体基礎アンカ部は、耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象が想定されないため、耐震評価対象外機器である。
(5)	解析コードの変更	実機形状を質点とはり要素に置き換えた多質点モデルでの応答解析	原子炉圧力容器内構造物(ジェットポンプ、炉心スプレイスパーチャ、出力領域計装検出器(LPRM))	×	耐震評価対象外機器のため (耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象が想定されない)

表 3 (2/2) 既工認と異なる評価手法の劣化状況評価への反映状況

項目	概要	工事計画認可申請における対象設備	劣化状況評価への反映		
			反映	説明	
2. 鉛直方向地震の動的な取り扱いを踏まえて適用する手法					
(1)	鉛直方向地震の動的な取り扱いを踏まえて適用する手法	水平方向と鉛直方向の動的地震力の二乗和平方根による組合せ 鉛直方向応答解析モデルの追加	動的地震力を適用して耐震評価を行う機器・配管系	○	動的地震力を適用した耐震評価に対し、従来の絶対値和法並びに二乗和平方根適切に反映している。
3. より現実的な応答を模擬する観点から採用する手法					
(1)	最新知見として得られた減衰定数の適用	振動試験結果等を踏まえて設定した減衰定数の採用	原子炉建屋 6 階天井走行クレーン及び DC*1 建屋天井クレーン, 燃料取替機	×	耐震評価対象外機器のため <b>(耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象が想定されない)</b>
		新規制基準での PWR プラントでの適用実績及び BWR プラントへの適用を踏まえた検討がされた減衰定数の設定	配管系	○	機器・配管系の耐震安全性評価に反映
(2)	極限解析による評価の適用	JEAG4601 及び設計・建設規格で規定されている極限解析の適用	炉内構造物(気水分離器スタンドパイプ)	×	耐震評価対象外機器のため <b>(その他設備)</b>

\*1：使用済燃料乾式貯蔵建屋



### (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4のとおり選定する。

表4 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クラスの機器に適用される静的地震力のいずれか大きい方 <sup>*3</sup> （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 <sup>*4,*5</sup>
Cクラス	Cクラスの機器に適用される静的地震力 <sup>*5</sup>

- \*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による基準地震動 ( $S_s$ -D1), 断層モデルを用いた手法に基づく地震動評価による基準地震動 ( $S_s$ -11~14,  $S_s$ -21, 22) 及び震源を特定せず策定する基準地震動 ( $S_s$ -31)。
- \*2 弾性設計用地震動  $S_d$  の応答スペクトルは、基準地震動  $S_s$  の応答スペクトルに、それぞれ係数 0.5 を乗じて設定している。
- \*3  $S_s$  地震力及び弾性設計用地震力による評価のうち、許容値が同じものについては厳しい方の数値で代表する。  
また、許容値が異なり  $S_s$  地震力が弾性設計用地震力より大きく、 $S_s$  地震力による評価応力が弾性設計用地震力の許容応力を下回る場合は、弾性設計用地震力による評価を実施したものとみなす。
- \*4 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。
- \*5 耐震 S クラスへ波及的影響を及ぼす可能性のある耐震 B クラス及び耐震 C クラスの評価用地震力は  $S_s$  地震力を適用する。

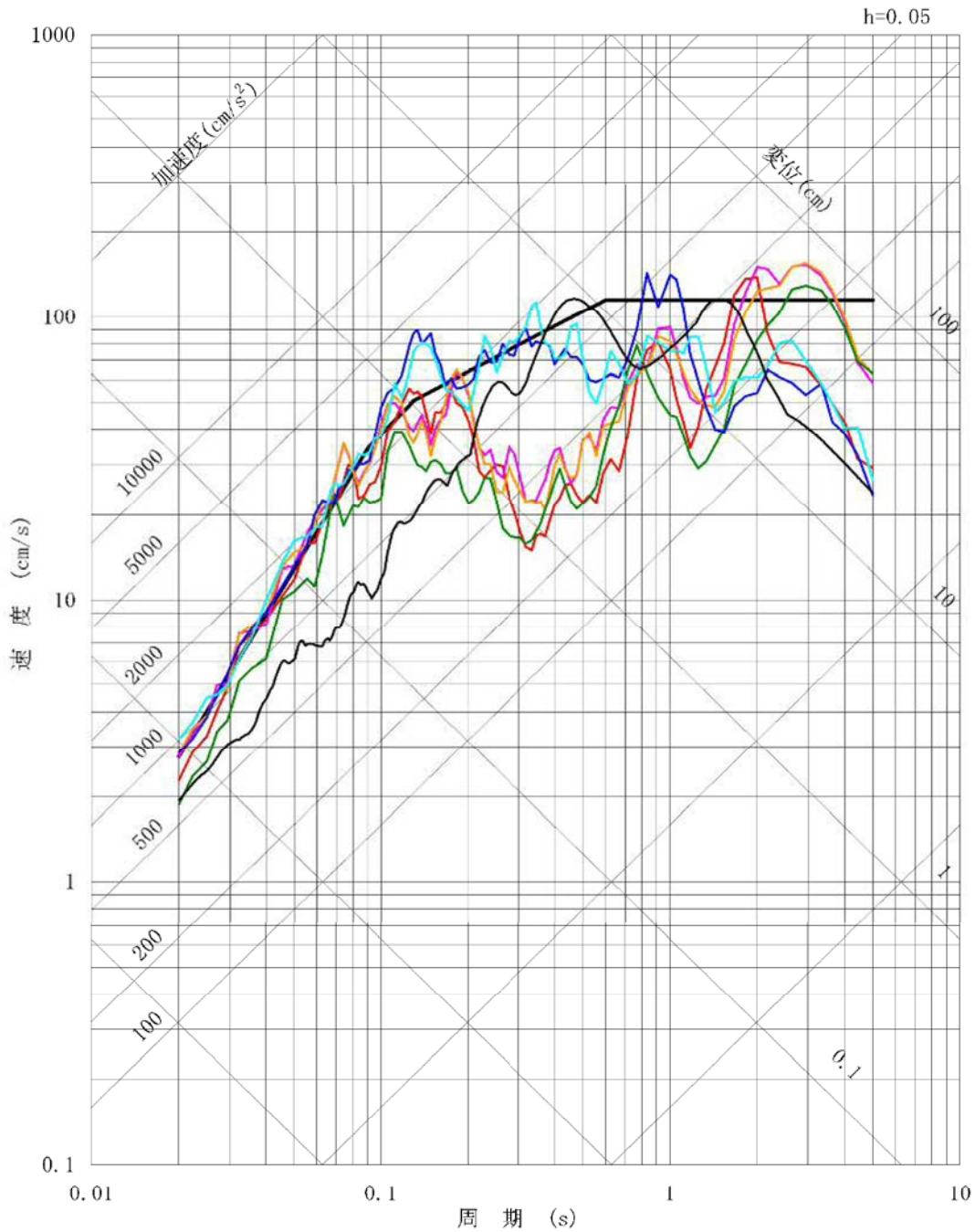
(4) 評価用地震動

劣化状況評価における耐震安全性評価では、設置変更許可申請（平成 30 年 5 月）にて設定されている基準地震動を用いて評価を実施する。

表 5 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 5 考慮した地震と地震動の最大加速度

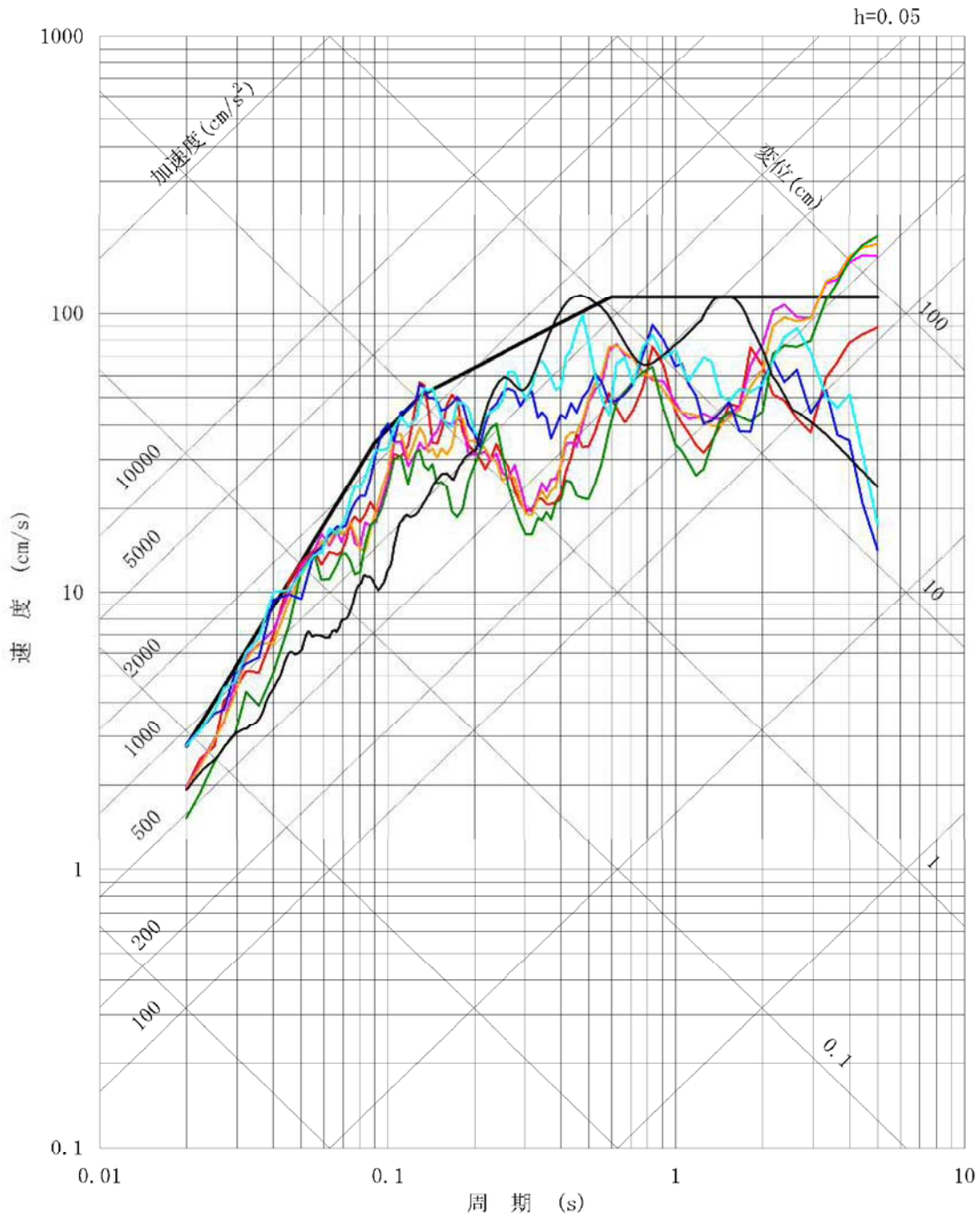
	項目	内容
基準地震動 $S_S$ 策定に考慮した地震	模擬地震波 ( $S_S$ -D1)	応答スペクトル手法による基準地震動
	内陸地殻内地震 ( $S_S$ -11~14)	F 1 断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動による地震
	プレート間地震 ( $S_S$ -21~22)	2011 年東北地方太平洋沖型地震
	震源を特定せず策定する地震動 ( $S_S$ -31)	2004 年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震
地震動の最大加速度	$S_S$ -D1	水平 (NS・EW) $870 \text{ cm/s}^2$ 鉛直 $560 \text{ cm/s}^2$
	$S_S$ -11	水平 (NS) $717 \text{ cm/s}^2$ (EW) $619 \text{ cm/s}^2$ 鉛直 $579 \text{ cm/s}^2$
	$S_S$ -12	水平 (NS) $871 \text{ cm/s}^2$ (EW) $626 \text{ cm/s}^2$ 鉛直 $602 \text{ cm/s}^2$
	$S_S$ -13	水平 (NS) $903 \text{ cm/s}^2$ (EW) $617 \text{ cm/s}^2$ 鉛直 $599 \text{ cm/s}^2$
	$S_S$ -14	水平 (NS) $586 \text{ cm/s}^2$ (EW) $482 \text{ cm/s}^2$ 鉛直 $451 \text{ cm/s}^2$
	$S_S$ -21	水平 (NS) $901 \text{ cm/s}^2$ (EW) $887 \text{ cm/s}^2$ 鉛直 $620 \text{ cm/s}^2$
	$S_S$ -22	水平 (NS) $1009 \text{ cm/s}^2$ (EW) $874 \text{ cm/s}^2$ 鉛直 $736 \text{ cm/s}^2$
	$S_S$ -31	水平 (NS・EW) $610 \text{ cm/s}^2$ 鉛直 $280 \text{ cm/s}^2$



- S<sub>s</sub>-D 1
- S<sub>s</sub>-1 1 F 1 断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点 1)
- S<sub>s</sub>-1 2 F 1 断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点 2)
- S<sub>s</sub>-1 3 F 1 断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点 3)
- S<sub>s</sub>-1 4 F 1 断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層による地震 (断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点 2)
- S<sub>s</sub>-2 1 2011 年東北地方太平洋沖型地震 (短周期レベルの不確かさ)
- S<sub>s</sub>-2 2 2011 年東北地方太平洋沖型地震 (SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重畳)
- S<sub>s</sub>-3 1 2004 年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動

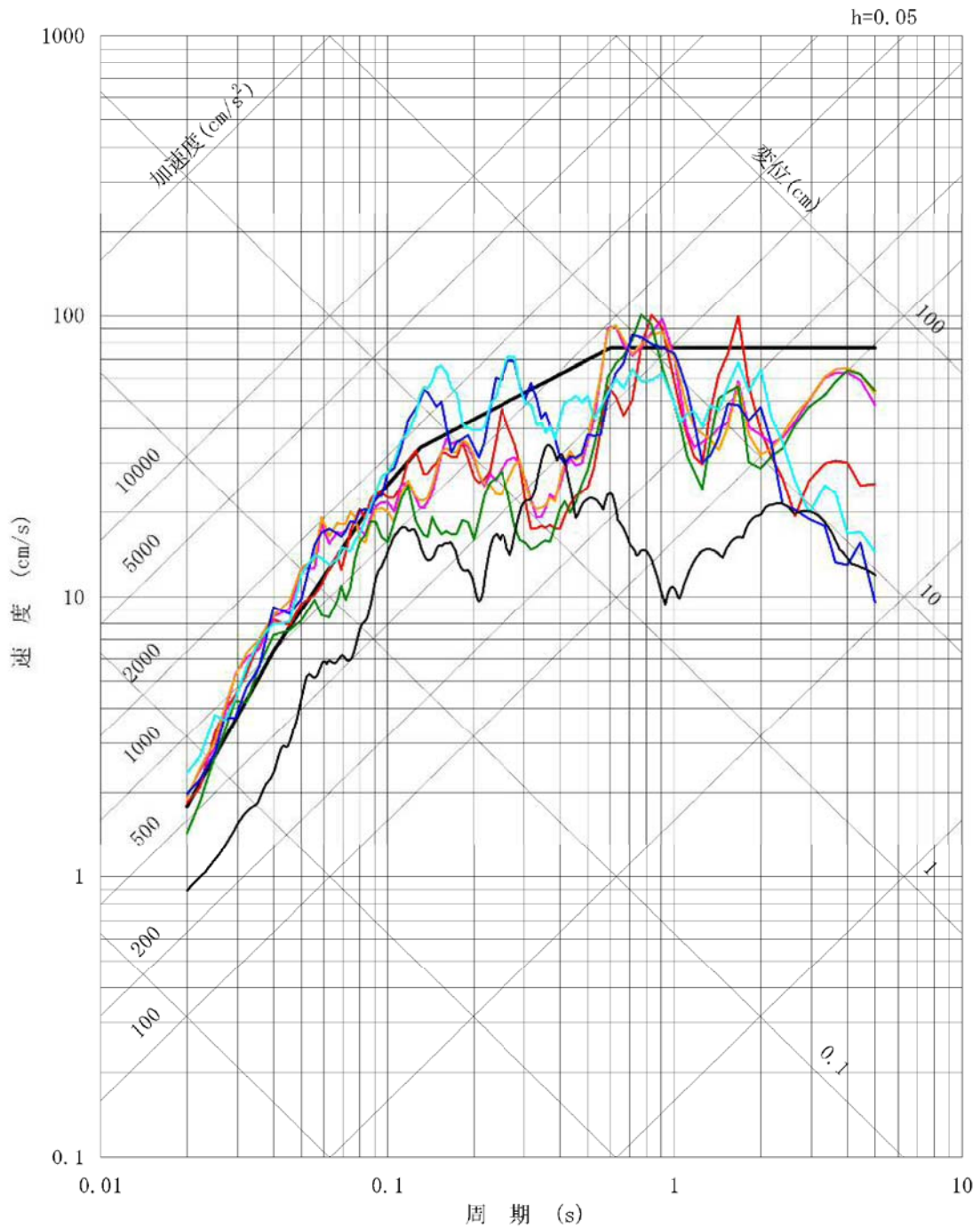
図 3(1/3) 基準地震動の応答スペクトル (水平 (NS) 方向)





- $S_s - D1$
- $S_s - 11$  F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点1)
- $S_s - 12$  F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点2)
- $S_s - 13$  F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点3)
- $S_s - 14$  F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層による地震 (断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点2)
- $S_s - 21$  2011年東北地方太平洋沖型地震 (短周期レベルの不確かさ)
- $S_s - 22$  2011年東北地方太平洋沖型地震 (SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重量)
- $S_s - 31$  2004年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動

図3(2/3) 基準地震動の応答スペクトル (水平 (EW) 方向)



- $S_s - D 1$
- $S_s - 1 1$  F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点1)
- $S_s - 1 2$  F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点2)
- $S_s - 1 3$  F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点3)
- $S_s - 1 4$  F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層による地震 (断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点2)
- $S_s - 2 1$  2011年東北地方太平洋沖型地震 (短周期レベルの不確かさ)
- $S_s - 2 2$  2011年東北地方太平洋沖型地震 (SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重畳)
- $S_s - 3 1$  2004年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動

図 3(3/3) 基準地震動の応答スペクトル (鉛直方向)

(5) 代表の選定

耐震安全性評価においては、高経年化対策に関する各機器・構造物の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6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6 (1/2) 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	炭素鋼配管（原子炉系（蒸気部））	安全上の重要度がクラス1、耐震Sクラス機器且つ地震による疲労累積係数が最も大きい機器
中性子照射脆化	原子炉圧力容器胴	中性子照射脆化を考慮した評価が必要となる機器
照射誘起型応力腐食割れ、中性子照射による靱性低下	炉心シュラウド	運転開始後60年時点でしきい照射量を超える中性子照射を受け、且つ亀裂を進展させる応力が存在する機器
熱時効	原子炉再循環ポンプのケーシング、原子炉再循環ポンプ入口弁の弁箱	熱時効を考慮する必要のある機器のうち、フェライト量が最大の機器又は機器に作用する応力が最大の機器
応力腐食割れ	シュラウドサポート（粒界型応力腐食割れ）	シュラウドサポート溶接部（H7, V8）にひび割れが確認され、ひび割れを残存させた状態で維持規格に基づく亀裂進展評価及び破壊評価を継続的に実施する箇所
	廃液濃縮器蒸発缶	機械設備において建設時から設置・使用されている設備（濃縮廃液・廃液中和スラッジ系設備）のうち、最高使用圧力が高い機器
腐食（流れ加速型腐食）	炭素鋼配管（原子炉系（蒸気部））	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及び疲労累積係数が最大である箇所
	第3給水加熱器の伝熱管	管支持板の腐食（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
	非常用ディーゼル機関（2C, 2D号機）付属設備冷却水系清水冷却器の伝熱管	内部流体が海水であり、伝熱管の腐食（流れ加速型腐食）の耐震評価の結果、発生応力と許容応力の比が最大である機器

表 6 (2/2) 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
動的機能維持	原子炉給水逆止弁	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
制御棒挿入性	制御棒，炉内構造物，燃料集合体	劣化状況評価書に記載される各評価対象機器の「機能達成に必要な項目」において、制御棒挿入に係る項目（原子炉の緊急停止）、燃料集合体の支持等挿入経路の影響を与える項目（炉心の支持）及び制御棒挿入経路にある機器



#### 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

原子炉系（蒸気部）主配管における基準地震動  $S_s$ 、または弾性設計用地震動  $S_d$  を考慮した疲労累積係数と、運転開始後 60 年までの推定過渡回数を考慮した疲労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 7 に、基準地震動  $S_s$  による疲労累積係数の詳細な算出過程を別紙 1 に、TPO 地震時の影響評価を別紙 2 にそれぞれ示す。

表 7 原子炉系（蒸気部）配管の低サイクル疲労の耐震安全性評価結果

系統	運転実績回数*1 に基づく 疲労累積係数	地震動による*2 疲労累積係数 (基準地震動 $S_s$ )	合計 (許容値：1 以下)
原子炉系 (蒸気部)	0.0853	0.6558	0.7411

\*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した疲労累積係数

\*2：工事計画認可申請（平成 30 年 2 月補正申請）にて、一律に定める等価繰返し回数として設定した等価繰返し回数（160 回）を用いて算出される疲労累積係数

###### ② 中性子照射脆化

原子炉圧力容器胴について運転開始後 60 年時点における地震時に発生する応力、亀裂進展力及び応力拡大係数  $K_I$  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。

詳細な算出過程を別紙 3 に示す。

###### ③ 照射誘起型応力腐食割れ，中性子照射による靱性低下

炉心シュラウドのH4溶接継手に亀裂が発生したと仮定し、想定亀裂に作用する荷重（差圧，自重，地震荷重（軸力及びモーメント）及び溶接残留応力）による軸方向応力を考慮した応力拡大係数と維持規格に従い適切に定める破壊靱性値を比較した結果、運転開始後60年時点の中性子照射量を考慮しても不安定破壊に至ることはなく、耐震安全性評価上問題ない。

詳細な算出過程は熱時効の劣化状況評価の補足説明資料に記載のとおりである。

#### 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ケーシング及び原子炉再循環ポンプ入口弁の弁箱とし、亀裂安定性評価用想定亀裂及び脆化予測モデルを用いて決定した熱時効後の材料の亀裂進展抵抗( $J_{mat}$ )と構造系に与えられた応力（運転状態の荷重条件に  $S_s$  地震荷重を考慮した応力）と亀裂長さから算出される亀裂進展力( $J_{app}$ )を求めて、最小破壊靱性  $J(\Delta a)$  と比較して不安定破壊しないことを確認した。

図3に原子炉再循環ポンプケーシング及び原子炉再循環ポンプ入口弁の弁箱の亀裂安定性評価結果を示す。

評価の結果、亀裂進展抵抗が亀裂進展力と交差し、亀裂進展抵抗が亀裂進展力を上回ることで、及び亀裂進展抵抗と亀裂進展力の交点で亀裂進展抵抗の傾きが亀裂進展力の傾きを上回ることから、原子炉再循環ポンプケーシング及び原子炉再循環ポンプ入口弁の弁箱は不安定破壊することはないと、耐震安全性評価上問題ないことを確認した。

詳細な算出過程は熱時効の劣化状況評価の補足説明資料に記載のとおりである。

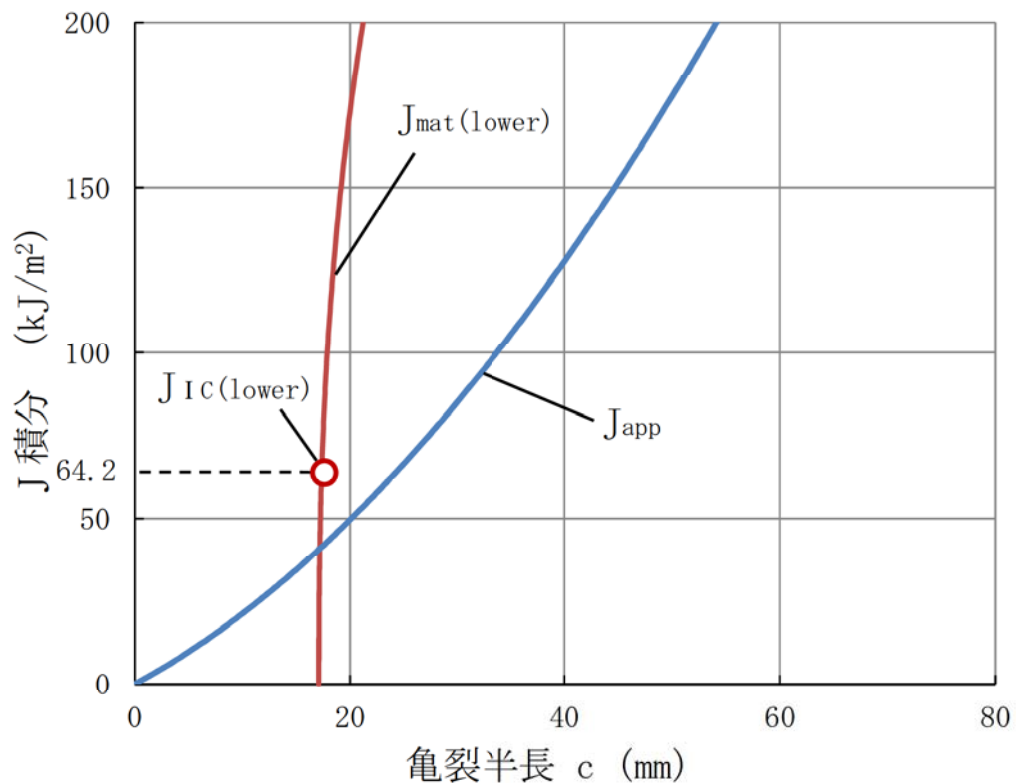


図4 (1/2) 原子炉再循環ポンプケーシングの亀裂安定性評価結果

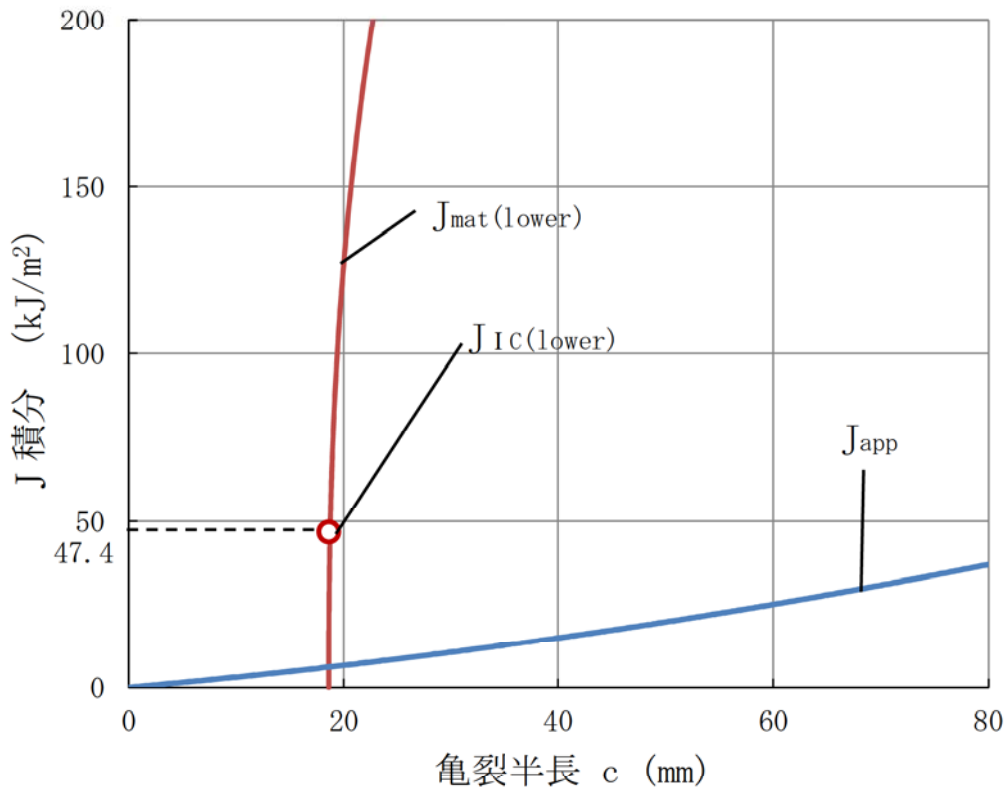


図 4 (2/2) 原子炉再循環ポンプ入口弁の弁箱の亀裂安定性評価結果

⑤ 応力腐食割れ

(a) シュラウドサポートの粒界型応力腐食割れ

第 24 回定期検査（平成 20 年 3 月）に経済産業大臣に報告している「東海第二発電所におけるシュラウドサポート溶接部のひび割れに関する評価書」における構造健全性評価にて想定したひび割れについて、第 25 回定期検査での継続検査で確認されたひび割れは構造健全性評価で想定した範囲内であることを確認したことから、従前の構造健全性評価で考慮したものと同一の想定欠陥に、死荷重、差圧及び基準地震動  $S_s$  による地震荷重（鉛直力、水平力並びにモーメントを考慮する）を用いて運転開始後 60 年時点における極限解析を実施した結果、設計荷重（地震荷重）の約 2.3 倍であり、安全率（1.5）を考慮した設計荷重（地震荷重）が崩壊荷重を下回ることから、耐震安全性評価上問題ない。

詳細な算出過程を別紙 4 に示す。

(b) 廃液濃縮器蒸発缶の応力腐食割れ

廃液濃縮器蒸発缶の胴板に応力腐食割れによる亀裂が発生したと仮定し、想定亀裂に作用する地震時応力と亀裂安定限界応力を比較した結果、地震時の発生応力が亀裂安定限界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、詳細な算出過程を別紙 5 に示す。

表8 廃液濃縮器蒸発缶の応力腐食割れに対する耐震安全性評価結果

評価対象	地震時発生応力 (MPa)	亀裂安定限界応力 (MPa)
廃液濃縮器 蒸発缶胴板	31	65

⑥ 腐食（流れ加速型腐食）

(a) 炭素鋼配管の腐食（流れ加速型腐食）

炭素鋼配管系（原子炉系（蒸気部）主蒸気ドレン配管）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9に、炭素鋼配管（原子炉冷却材浄化系）の腐食（流れ加速型腐食）を耐震安全性評価結果を表10にそれぞれ示す。

必要最小肉厚又は運転開始後60年時点肉厚の減肉を想定し、地震時の発生応力又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。

表9 炭素鋼配管（原子炉系（蒸気部））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*4 (MPa)
						必要最小肉厚*2	60年時点肉厚*3	
原子炉系 (蒸気部) 【主蒸気ドレン配管】	クラス1	S	S <sub>s</sub>	IV <sub>A</sub> S	一次応力	1031	291	364
					一次+二次応力	2770	831 (疲労累積係数: 0.3256*5,*6)	366 (疲労累積係数許容値: 1以下)
			S <sub>d</sub>	III <sub>A</sub> S	一次応力	649	225	274
					一次+二次応力	1531	556 (疲労累積係数: 0.0685*5,*6)	366 (疲労累積係数許容値: 1以下)

\*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: 配管の内圧等により決定される最小の肉厚

\*3: これまでの測定データに基づき想定した肉厚

\*4: 設計・建設規格付録図表 Part5 表1 又は表8, 表9 より求まる値

\*5: 工事計画認可申請において、一律に定める等価繰返し回数を用いた疲労累積係数が許容値1を超える場合、個別に設定する等価繰返し回数を用いて評価するとしており、通常運転時の疲労累積係数0.4580と足し合わせると許容値1を超えるため、当該配管の等価繰返し回数に裕度を考慮した70回を個別に設定する繰返し回数と設定して算出した疲労累積係数

\*6: JEAG4601に基づき原子炉起動時及び停止時のみ通気される配管について、肉厚測定結果より得られる1年あたりの減肉量から推定した60年時点肉厚を保守的に60年時点に至る評価期間中全てに適用し、その肉厚における通常運転時の疲労累積係数は0.4580であり、地震動の疲労累積係数を足し合わせても許容値1を下回る



なお、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申請（平成 30 年 2 月補正申請）及び今回の劣化状況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 7 に示す。

(b) 給水加熱器の管支持板の腐食（流れ加速型腐食）

第 3 給水加熱器の管支持板の腐食（流れ加速型腐食）による伝熱管支持間隔の喪失を想定した伝熱管の耐震評価において、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 給水加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	
第 3 給水加熱器	クラス 3	B	S <sub>d</sub>	B <sub>A</sub> S	一次応力	87	90	132

\*1：許容値は設計・建設規格付録材料図 Part5 表 5 より定まる値に 1.2 を乗じた値

(c) 非常用ディーゼル機関（2C, 2D 号機）付属設備冷却水系清水冷却器の伝熱管の腐食（流れ加速型腐食）

非常用ディーゼル機関（2C, 2D 号機）付属設備冷却水系清水冷却器の伝熱管内面の腐食による減肉を想定した耐震評価において、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 11 に、詳細な算出過程を別紙 6 にそれぞれ示す。

表 11 非常用ディーゼル機関（2C, 2D 号機）付属設備冷却水系清水冷却器の腐食（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*3 (MPa)
						管板～管支持板	管支持板～管支持板	
非常用ディーゼル機関（2C, 2D 号機）付属設備冷却水系清水冷却器	—*1	S	S <sub>S</sub> *2	IV <sub>A</sub> S	一次応力	45	105	337

\*1：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 2 として扱った

\*2：S<sub>S</sub>地震力が S<sub>d</sub>地震力及び S クラス機器に適用される静的地震力より大きく、S<sub>S</sub>地震力による評価応力が S<sub>d</sub>地震力及び S クラス機器に適用される静的地震力の許容応力を下回るため、S<sub>d</sub>地震力及び静的地震力による評価を省略した

\*3：許容値は設計・建設規格付録材料図表 Part5 表 6 より定まる値

⑦ 腐食（全面腐食）

(a) 機器付基礎ボルトの腐食（全面腐食）

評価対象機器の基礎ボルトについて、東海発電所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 0.3mm の減肉を想定した耐震安全性評価を行い、表 12 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、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 4 に、詳細な算出過程を別紙 8 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申請（平成 30 年 2 月補正申請）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 7 に示す。

なお、水平 2 方向及び鉛直方向地震力を考慮した影響評価については、工事計画認可申請（平成 30 年 2 月補正申請）において以下の機器を評価対象機器として選定しており、劣化状況評価又は耐震安全性評価対象外である。

- ・シュラウドヘッド
- ・中性子束案内管
- ・原子炉格納容器（ドライウェル円錐部及びサプレッションチェンバ円筒部シェル部及びサンドクッション部）
- ・原子炉遮へい壁

表 12 機器付基礎ボルトの腐食（全面腐食）の耐震安全性評価結果

機器名称	耐震重要度	荷重種別	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
主排気筒*1	C*2	引張	257	324
		せん断	12	187
残留熱除去系熱交換器	S, 重*3	引張	344	488*4
		せん断	85	375*4

\*1：補助鉄塔脚部，鉄塔脚部及び筒身脚部基礎ボルトを評価した結果，最も厳しい結果を示す補助鉄塔脚部基礎ボルトの評価値

\*2：非常用ガス処理系排気筒（耐震 S クラス）を支持しているため，耐震 S クラス機器の間接支持構造物に該当するため，基準地震動  $S_s$  を考慮した状態での機能維持が要求される

\*3：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ることを示す

\*4：設計・建設規格 Part5 表 8，表 9 より求まる値であり， $S_s$  地震力が  $S_d$  地震力及び S クラスの機器に適用される静的地震力より大きく， $S_s$  地震力による評価応力が III<sub>A</sub>S の許容応力を下回る機器については，S クラス機器は III<sub>A</sub>S の許容応力を示す

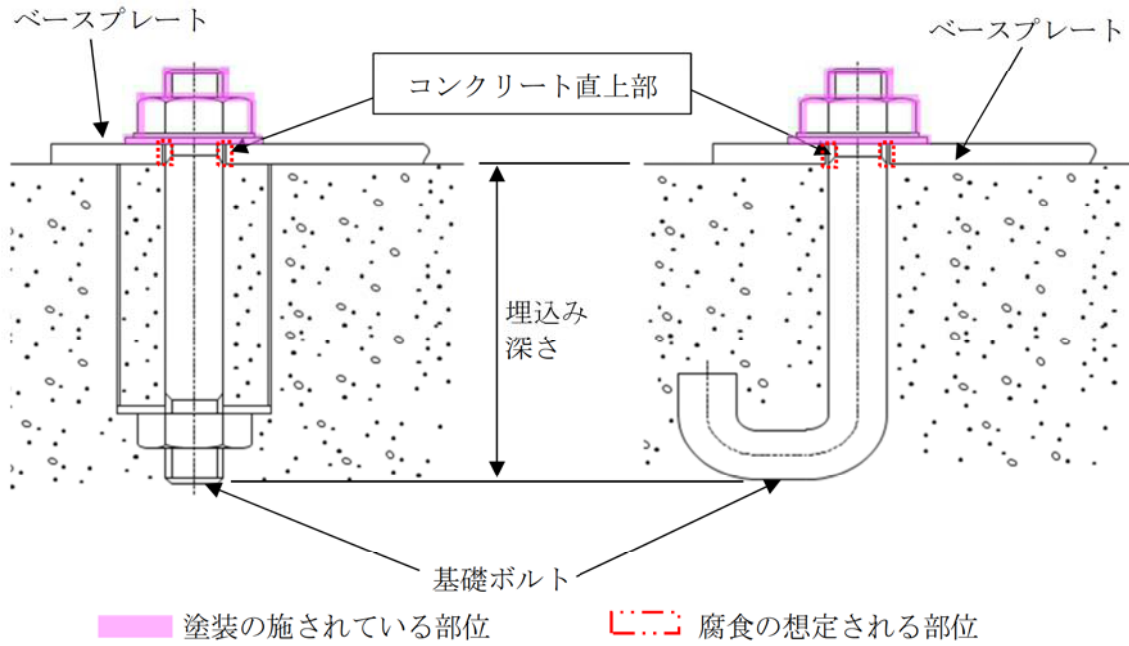


図4 基礎ボルト概要図

(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、機器付き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 (0.3mm) 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、発生応力は許容応力を下回ることを確認したことから、耐震安全性評価上問題ない。

後打ちアンカの概要図を図 5 に、詳細な算定過程を別紙 9 に示す。

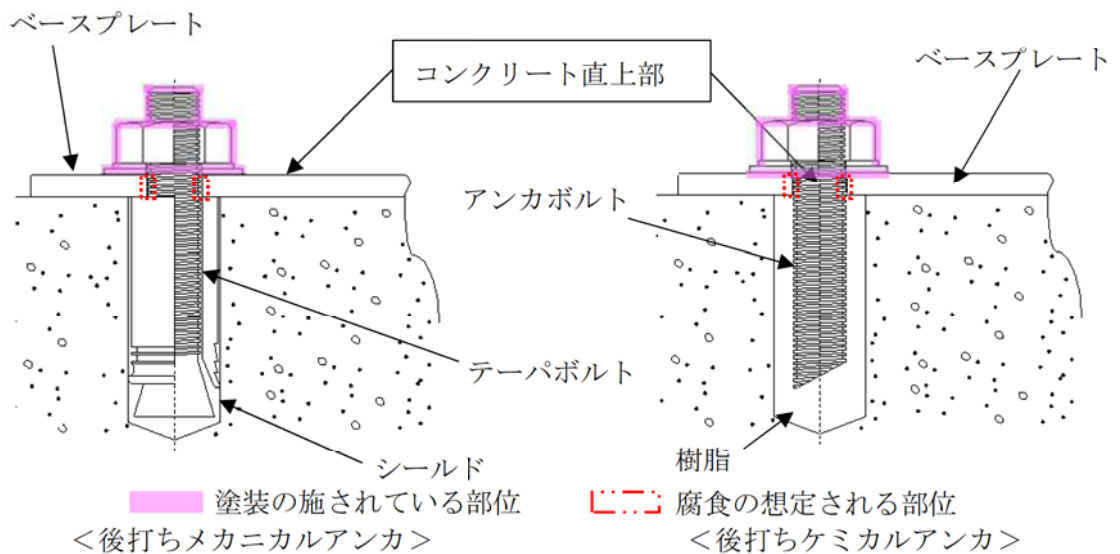


図5 後打ちアンカボルト概要図

⑧ 動的機能維持に係る耐震安全性評価

原子炉給水逆止弁について、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。

原子炉給水逆止弁の動的機能維持評価結果を表13に、詳細な算出過程を別紙10に示す。

表13 原子炉給水逆止弁の動的機能維持評価結果

地震力		振動数 (Hz)	種別	原子炉給水逆止弁	
				応答加速度 ( $\times 9.8 \text{ m/s}^2$ )	機能確認済加速度 ( $\times 9.8 \text{ m/s}^2$ )
S <sub>s</sub>	水平	50	工認値	4.80 <sup>*1</sup>	6.0
			劣化状況評価値	4.90 <sup>*1</sup>	6.0
	鉛直		工認値	3.17 <sup>*1</sup>	6.0
			劣化状況評価値	3.37 <sup>*1</sup>	6.0

\*1 : B22-F010A, B, B22-F032A, Bの最大値(B22-F010Aの評価値)を示す

⑨ 制御棒挿入性に係る耐震安全性評価

制御棒挿入性に影響を与える可能性のある経年劣化事象の抽出及び制御棒挿入性への影響評価を行った結果、工事計画認可申請書「V-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書」の評価に影響を与える経年劣化事象は抽出されなかった。

一方、工事計画認可申請書「V-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書」において、以下2点が確認されている。

- ・基準地震動 S<sub>s</sub> を用いて評価した燃料集合体の最大応答相対変位は 16.8\* mm であること
- ・実機を模擬した試験により、燃料集合体の相対変位が約 40 mm においても、90% ストロークスクラム時間が 3.5 秒以内であること

前述の通り、制御棒の挿入性に影響する経年劣化事象は抽出されなかったことから、経年劣化を考慮した地震時の燃料集合体の変位を評価した結果は、工事計画認可申請書で確認した 16.8 mm\* となり、機能確認済相対変位である約 40 mm 以下となる。

\* : 「V-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書」には、「V-2-3-3-1 燃料集合体の耐震性についての計算書」で解析により得られた最大応答相対変位である 11.1 mm に、裕度 (1.5 倍) を見込んだ評価用の値。



また、基準地震動  $S_s$  を考慮しても制御棒の挿入性に影響を与えることはないことから、経年劣化を考慮した地震時の制御棒挿入時間を評価した結果は、安全評価上の規定時間以下となる。

評価結果を表 14 に、影響評価検討結果一覧を表 15 に示す。

表 14 制御棒挿入性に係る耐震安全性評価結果

	経年劣化考慮前	経年劣化考慮後
燃料集合体相対変位	16.8 mm	16.8 mm
制御棒挿入時間	3.5 秒以内	3.5 秒以内

なお、工事計画認可申請書添付書類「V-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書」を添付資料 1 に示す。また、工事計画認可申請書添付書類「V-2-3-3-1 燃料集合体の耐震性についての計算書」を添付資料 2 に示す。

表 15 制御棒挿入性に影響を与える可能性のある経年劣化事象  
及び制御棒挿入性への影響評価

評価対象機器	経年劣化事象	制御棒挿入性への影響評価	制御棒挿入性に対する影響有無
制御棒	ローラ、ピンの摩耗	耐摩耗性の高いコバルト基合金、ニッケル基合金を使用されていること、且つ定期検査毎に制御棒駆動水圧系機能検査、制御棒駆動機構機能検査により動作不良が認められていないことから、制御棒の挿入性に与える影響はない。	無
	制御材被覆管、シース、タイロッド、ピン、上部ハンドルの靱性低下、照射誘起型応力腐食割れ	制御棒の動作性に問題が生じていないことを、定期検査毎に制御棒駆動水圧系機能検査、制御棒駆動機構機能検査により確認しているため、制御棒の挿入性に与える影響はない。	無
	制御材被覆管、シース、タイロッド、ソケット、ピン、上部ハンドルの粒界型応力腐食割れ		無
炉内構造物	炉心シュラウド、シュラウドサポートの疲労割れ	現状目視点検で割れが確認されておらず、また 60 年時点での疲労評価にて疲労累積係数が 1 より小さいことを確認し、疲労破壊を起こさないため、炉心支持機能に与える影響はない	無
	炉心シュラウド、シュラウドサポート、上部格子板、炉心支持板、燃料支持金具、制御棒案内管の粒界型応力腐食割れ	現状確認されているひびを保守的に拡大し健全性を評価した結果、60 年時点で破壊に至らないことを確認しており、また、ひびの方向性がは縦方向のみで変位影響を及ぼさないことから、炉心支持機能に与える影響はない。	無
		上部格子板、炉心支持板、燃料支持金具、制御棒案内管現状目視点検で割れが確認されておらず、維持規格に基づき計画的に点検を実施するため、炉心支持機能に与える影響はない。	無
	炉心シュラウド、上部格子板、炉心支持板、燃料支持金具、制御棒案内管の照射誘起型応力腐食割れ	現状目視点検で割れが確認されておらず、しきい照射量を超える炉心シュラウドと上部格子板のうち、炉心シュラウドはひび発生後から 5.23EFPY で破壊に至るが、4 定検毎に点検を実施する様計画されており、破壊を起こさない。上部格子板は溶接部がないため溶接による残留引張応力はなく、運転中の差圧、熱、自重等に起因する引張応力成分は低く、照射誘起型応力腐食割れが発生する可能性はないため、炉心支持機能に与える影響はない。その他の機器はしきい照射量に達せず、照射誘起型応力腐食割れが発生しない。	無
	炉心シュラウド、上部格子板、炉心支持板、燃料支持金具、制御棒案内管の照射スウェリング、照射下クリープ	炉心支持機能に与える影響はない。	無
	燃料支持金具（中央）、制御棒案内管の熱時効	現状目視点検で割れが確認されておらず、亀裂の原因となる経年劣化事象がなく、熱時効による破壊に至らないため、炉心支持機能に与える影響はない。	無
燃料集合体	燃料集合体の腐食減肉	燃料集合体の外周にチャンネルボックスが取り付けられており、燃焼集合体は制御棒と接触しないため、燃料集合体の照射による腐食減肉は制御棒挿入性に影響を与えない。	無

⑩ 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腐食（後打ちアンカ）が抽出され、⑦(b)で後打ちアンカに腐食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が確認されている。

浸水防護施設に該当する機器の抽出及び耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象の抽出過程を別紙 11 に示す

⑪ 工事計画認可申請の内容を踏まえた劣化状況評価の見直し

工事計画認可申請の審査の内容を踏まえて劣化状況評価における耐震安全性評価の見直しを行うものは以下のとおり。

(a) 原子炉格納容器内大型機器、機器・配管系の等価繰返し回数を見直しを反映した評価

(b) 東北地方太平洋沖地震の地震観測記録を踏まえた耐震評価

(c) 海水ポンプ室の床応答曲線及び最大応答加速度の見直しを反映した評価  
耐震安全性評価への影響範囲や見直し前後の相違点について別紙 12 に示す。

## (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、各劣化状況評価の補足説明資料に記載のとおりである。

また、運転期間延長認可申請に際して実施した特別点検において、耐震安全性評価対象機器について検査等を実施した結果、耐震安全性評価に影響を及ぼす有意な欠陥等は確認されていない。

## (3) 総合評価

運転開始後 60 年間の供用を想定した各劣化状況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、実用発電用原子炉の運転の期間の延長の審査基準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状況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。

なお、炭素鋼配管の腐食（流れ加速型腐食）については、現時点での実機測定データを用いた運転開始後 60 年時点の評価により耐震安全性に問題ないことを確認しており、今後も減肉傾向の把握及びデータの蓄積を継続して行い、減肉進展の実測データを反映した耐震安全性評価を実施する。

## (4) 高経年化への対応

炭素鋼配管の腐食（流れ加速型腐食）については、現時点での実機測定データを用いた運転開始後 60 年時点の評価により耐震安全性に問題ないことを確認しており、今後も減肉傾向の把握及びデータの蓄積を継続して行い、減肉進展の実測データを反映した耐震安全性評価を実施する。



5. まとめ

(1) 審査基準適合性

「2. 基本方針」で示した要求事項について技術評価を行った結果、すべての要求を満足しており、審査基準に適合していることを確認した。耐震安全性についての要求事項との対比を表 16 に示す。

表 16 (1/3) 耐震安全性評価についての要求事項との対比

審査基準, ガイド	要求事項	耐震安全性評価結果
実用発電用原子炉の運転の期間の延長の審査基準	○ 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を確認した。	4. (1)①, ⑥, ⑨に示すとおり、低サイクル疲労及び腐食を考慮した機器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を確認した。 低サイクル疲労については、震災時の影響を <b>加味</b> して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を確認した。
	○ 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を確認した。	4. (1)②, ③, ④, ⑤に示すとおり、中性子照射脆化、 <b>照射誘起型応力腐食割れ</b> 、 <b>中性子照射による靱性低下</b> 、 <b>熱時効</b> 及び応力腐食割れを考慮した機器について、地震時に発生する応力、亀裂進展力、応力拡大係数及び設計荷重を評価した結果、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を確認した。
	○ 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を確認した。	4. (1)⑧に示すとおり、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を確認した。
	○ 経年劣化事象を考慮した、地震時の燃料集合体の変位を評価した結果、機能確認済相対変位以下であるか又は、同様に制御棒挿入時間を評価した結果、安全評価上の規定時間以下であることを確認した。	4. (1)⑨に示すとおり、制御棒挿入性に影響を与える経年劣化事象はなく、経年劣化事象を考慮した状態での地震時の燃料集合体の変位を評価した結果、工事計画認可申請での評価結果(機能確認済相対変位以下であり、また、同様に制御棒挿入時間を評価した結果、安全評価上の規定時間以下である)に影響を与えないことを確認した。
実用発電用原子炉の運転延長認可申請に係る運用ガイド	運転期間延長認可申請に伴うものとして評価を行い、その結果の記載が求められる事項は次のとおり。 ①特別点検の結果を踏まえた劣化状況評価。	3. (1)②に示すとおり、各劣化状況評価書での評価対象機器について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により、耐震安全上考慮する必要がある経年劣化事象を抽出した結果、耐震安全性に関して特別点検によって確認する事項はない。
	運転期間延長認可申請に伴い策定するものとして記載が求められる事項は次のとおり。 ①劣化状況評価を踏まえた保守管理に関する方針。	4. (4)に示すとおり、炭素鋼配管の腐食(流れ加速型腐食)については、今後も減肉傾向の把握及びデータの蓄積を継続して行い、減肉進展の実測データを反映した耐震安全性評価を実施することを、保守管理に関する方針(長期保守管理方針)に記載した。

表 16 (2/3) 耐震安全性評価についての要求事項との対比

審査基準, ガイド	要求事項	耐震安全性評価結果
<p>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</p>	<p>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保守管理活動において、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、保守管理要領等の文書及び保守管理実績等により審査する。</p>	<p>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。</p>
	<p>⑮-1 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。</p> <p>⑰-1 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。</p>	<p>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フローにより、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。</p>
	<p>⑳-1 耐震安全性の評価                      実施ガイド 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>4. (1)①～⑩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。</p>
	<p>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。</p>	<p>4. (2), (3)に示すとおり、耐震安全性評価を実施して審査基準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。</p>
	<p>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>4. (4)に示すとおり、耐震安全評価において審査基準を満足し、耐震安全性が確保されているものの、炭素鋼配管の腐食（流れ加速型腐食）については、今後も減肉傾向の把握及びデータの蓄積を継続して行い、減肉進展の実測データを反映した耐震安全性評価を実施することを、保守管理に関する方針（長期保守管理方針）に記載した。</p>
	<p>㉓ 大規模地震等による機器・構造物への直接の影響の考慮                      現に発生した大規模地震等について、これによる機器・構造物への影響を踏まえた高経年化技術評価を行っているかを審査する。</p>	<p>4. (1)①に示すとおり、現に発生した大規模地震等による影響が蓄積され、且つ地震による影響の大きいと考えられる地震時の疲労累積係数の大きい経年劣化事象及び部位を抽出し、耐震安全性評価を実施し、許容値を下回ることを確認した。</p>
	<p>(2) 長期保守管理方針の審査                      ① 長期保守管理方針の策定                      すべての追加保全策について長期保守管理方針として策定されているかを審査する。</p>	<p>4. (4)に示すとおり、炭素鋼配管の腐食（流れ加速型腐食）については、今後も減肉傾向の把握及びデータの蓄積を継続して行い、減肉進展の実測データを反映した耐震安全性評価を実施することを、保守管理に関する方針（長期保守管理方針）に記載した。</p>

表 16 (3/3) 耐震安全性評価についての要求事項との対比

審査基準, ガイド	要求事項	耐震安全性評価結果
<p>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</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・建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>4. (1)～(4)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・建造物の耐震安全性評価を行い、審査基準を満足して耐震安全上問題のないことを確認しているとともに、炭素鋼配管の腐食（流れ加速型腐食）については、今後も減肉傾向の把握及びデータの蓄積を継続して行い、減肉進展の実測データを反映した耐震安全性評価を実施することを、保守管理に関する方針（長期保守管理方針）に記載した。</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、P L M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. (4)に示すとおり、設置変更許可申請（平成 30 年 5 月）にて規制基準の要求を満足する基準地震動及び弾性設計用地震動を用いて評価を実施している。</p>
	<p>3.2 長期保守管理方針の策定及び変更</p> <p>長期保守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全て。）について、発電用原子炉ごとに、保守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保守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・建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保守管理方針を策定すること。</p>	<p>4. (4)に示すとおり、炭素鋼配管の腐食（流れ加速型腐食）については、今後も減肉傾向の把握及びデータの蓄積を継続して行い、減肉進展の実測データを反映した耐震安全性評価を実施することを、保守管理に関する方針（長期保守管理方針）に記載した。</p>

(2) 保守管理に関する方針として策定する事項

炭素鋼配管の腐食（流れ加速型腐食）については、現時点での実機測定データを用いた運転開始後 60 年時点の評価により耐震安全性に問題ないことを確認しており、今後も減肉傾向の把握及びデータの蓄積を継続して行い、減肉進展の実測データを反映した耐震安全性評価を実施する必要があるため、保守管理に関する方針を表 17 のとおり定め、運転期間延長認可申請書の「保守管理に関する方針」にて記載するとともに、当該方針を長期保守管理に関する方針として原子炉施設保安規定に定め、確実に実施していく。

表 17 保守管理に関する方針（抜粋）

機器名	保守管理に関する方針	実施時期 <sup>*2</sup>
炭素鋼配管系	炭素鋼配管 <sup>*1</sup> の腐食（流れ加速型腐食）について、現時点での実機測定データを用いた運転開始後 60 年時点の評価により耐震安全性に問題ないことを確認したことから、今後も減肉傾向の把握及びデータの蓄積を継続して行い、減肉進展の実測データを反映した耐震安全性評価を実施する。  *1：原子炉系（蒸気部）配管 給水系配管 給水加熱器ドレン系配管	中長期

\*2：実施時期については平成 30 年 11 月 28 日からの 5 年間を「短期」、平成 30 年 11 月 28 日からの 10 年間を「中長期」、平成 30 年 11 月 28 日からの 20 年を「長期」とする。



## 別紙

- 別紙 1. 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 2. 震災が評価に与える影響とその考え方について
- 別紙 3. 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 4. シュラウドサポートの粒界型応力腐食割れを考慮した耐震安全性評価について
- 別紙 5. 廃液濃縮器蒸発缶の応力腐食割れ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. 建設後の耐震補強の実績及び今後の予定について
- 別紙 8. 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 9. 後打ちアンカの腐食を考慮した耐震安全性評価について
- 別紙 10. 動的機能維持評価について
- 別紙 11. 浸水防護施設の耐震安全性評価について
- 別紙 12. 工事計画認可申請の内容を踏まえ劣化状況評価の見直しがある場合の見直し前後の相違点について

添付資料 1 V-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書

添付資料 2 V-2-3-3-1 燃料集合体の耐震性についての計算書



## シュラウドサポートの粒界型応力腐食割れを考慮した耐震安全性評価について

## 1. 評価方針

## 1.1 はじめに

東海第二の炉内構造物であるシュラウドサポート溶接部については、第 21 回定期検査（平成 17 年度）において、粒界型応力腐食割れと推定されるひび割れが認められており、その後、第 24 回定期検査（平成 22 年度）の継続検査においても、その進展が確認されていることから、構造健全性評価を行い所定の期間（運転開始後 60 年時点までを包絡する期間）での発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令（現 実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則（以下、「技術基準」という））への適合性を確認している。

構造健全性評価の結果は、電気事業法第 55 条第 3 項（現 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第 43 条の 3 の 16 第 3 項）の設備に発見された技術基準に適合しなくなるおそれのある部分の措置に該当するため、平成 22 年 3 月に経済産業大臣に報告<sup>\*1</sup>しており、技術基準に適合しなくなると見込まれる時期は、運転開始後 60 年時点までを包絡するのに十分に安全側の時期<sup>\*2</sup>であることを報告した。

しかしながら、劣化状況評価における耐震安全性評価（以下、「耐震安全性評価」という）にあたっては、新規基準対応に伴う基準地震動の見直しがなされていることから、基準地震動  $S_s$  を用いた耐震安全性評価を実施し、所定の期間（運転開始後 60 年時点まで）での技術基準への適合性を確認する。

なお、評価にあたっては、第 25 回定期検査で実施した最新のシュラウドサポートの検査結果を考慮する。

図 1 に評価対象であるシュラウドサポートの概略図を示す。

\*1: 東海第二発電所におけるシュラウドサポート溶接部のひび割れに関する報告について（発室発第 556 号 平成 22 年 3 月 1 日：第 24 回定期検査）

\*2: 技術基準に適合しなくなると見込まれる時期は、評価時点から 45 年後（運転年数）と評価され、第 24 回定期検査は運転開始後 約 31 年であるため、運転開始後 60 年時点までを包絡できる時期となる。

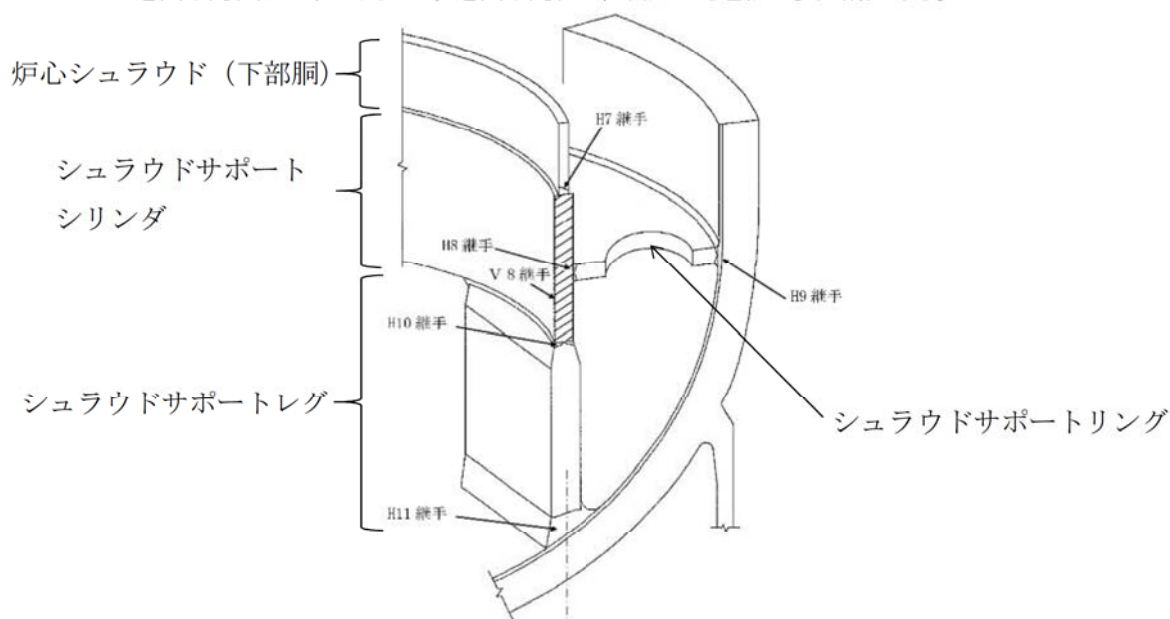


図 1 シュラウドサポート概略図

## 1.2 評価手順

第 24 回定期検査における構造健全性評価は、以下の評価①～④の順で実施している。

具体的には、経済産業省原子力安全・保安院「発電用原子力設備における破壊を引き起こすき裂その他の欠陥の解釈について」（平成 21・02・18 原院第 2 号 平成 21 年 2 月 27 日）（現原子力規制委員会「実用発電用原子炉及びその附属施設における破壊を引き起こす亀裂その他の欠陥の解釈」（平成 26 年 8 月 6 日 原規技発第 1408063 号）の別紙 3 に基づき適用する日本機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格（2008 年版）」（以下、「維持規格」という）の評価手法（以下、「極限解析」という）により、ひび割れを模擬したシュラウドサポートの解析モデルを用いて、シュラウドサポートの荷重と変位特性を有限要素法により解析し、得られた荷重変位曲線と弾性勾配の 2 倍の傾きの直線との交点を崩壊荷重とみなす 2 倍勾配法により評価している。

また、構造健全性の判断は、維持規格の添付 EJB-B-2-2（シュラウドの最小必要断面積の算出手法）で求められる安全率 1.5 より、安全率を考慮した設計荷重が 2 倍勾配法によって得られた崩壊荷重を下回れば健全性は確保されると判断している。

耐震安全性評価としては、評価①～③を実施することで運転開始後 60 年時点までの技術基準への適合性を確認できることから、構造健全性評価で実施した評価①～③を基に、解析モデルで模擬されているひび割れの包絡性を確認するとともに、変更となる地震荷重を評価条件に反映し耐震安全性評価を実施した。

### <第 24 回定期検査 構造健全性評価のプロセス>

評価①：ひび割れの形状、大きさを特定

評価②：ひび割れの進展予測

評価③：所定の期間（運転開始後 60 年時点までを包絡する期間）での技術基準への適合確認

評価④：技術基準に適合しなくなる時期の評価

## 2. 評価内容

### 2.1 第 24 回定期検査の構造健全性評価について

耐震安全性評価における極限解析の前提としている第 24 回定期検査の構造健全性評価の内容を記載する。

#### 2.1.1 評価①：ひび割れの形状，大きさを特定

評価①では，目視検査（MVT-1）によりひび割れを検出し，体積検査（UT）によりひび割れの長さ及び深さを測定することで，ひび割れを特定している。

第 24 回定期検査で検出されたひび割れの状況を表 1 に示す。

表 1 第 24 回定期検査で検出されたひび割れの状況

溶接部位	数量	検出部位	方向
H7	33 個 [検査範囲 47 %] ↓ 126 個*1	内面	軸方向
V8	8 個	内面及び外面	軸方向 周方向（ほう酸注入配管サポート溶接部）

\*1：日本原子力技術協会「BWR 炉内構造物点検評価ガイドライン [シュラウドサポート] (第 3 版)」の「未点検範囲の欠陥想定」に基づき算出したもの

#### 2.1.2 評価②：ひび割れの進展予測

評価①で検出された H7 及び V8 の軸方向及び周方向（ほう酸注入配管サポート）のひび割れは，溶接部において全て貫通するものとしている。

また，H7 については，検査範囲と溶接残留応力の観点から，周方向ひび割れの発生が否定できないため，保守的に周方向亀裂が発生したものと仮定し，維持規格の添付 EJG-B-2-1 シュラウドの欠陥評価 3. (4)a. (a)i. (i)に基づき，深さ 1 mm，長さ 10 mm の周方向半楕円の初期欠陥を設定し，残留応力を考慮した上で維持規格の低炭素系ステンレス鋼の亀裂進展速度を用いて，進展評価を実施している。（維持規格 添付 E-5 [応力拡大係数の算出] 5.3(6)a.，添付 E-2 [亀裂進展速度] 図 添付 E-2-SA-2）

進展評価の結果から，所定の期間（運転開始後 60 年時点までを包絡する期間）での亀裂深さは  mm に設定している。

図 2 にひび割れ深さと運転年数の関係を示す。

なお，第 24 回定期検査は運転開始後約 31 年であり，そこから 30 年（運転年数）を想定すると運転開始後 60 年時点を保絡する期間となる。

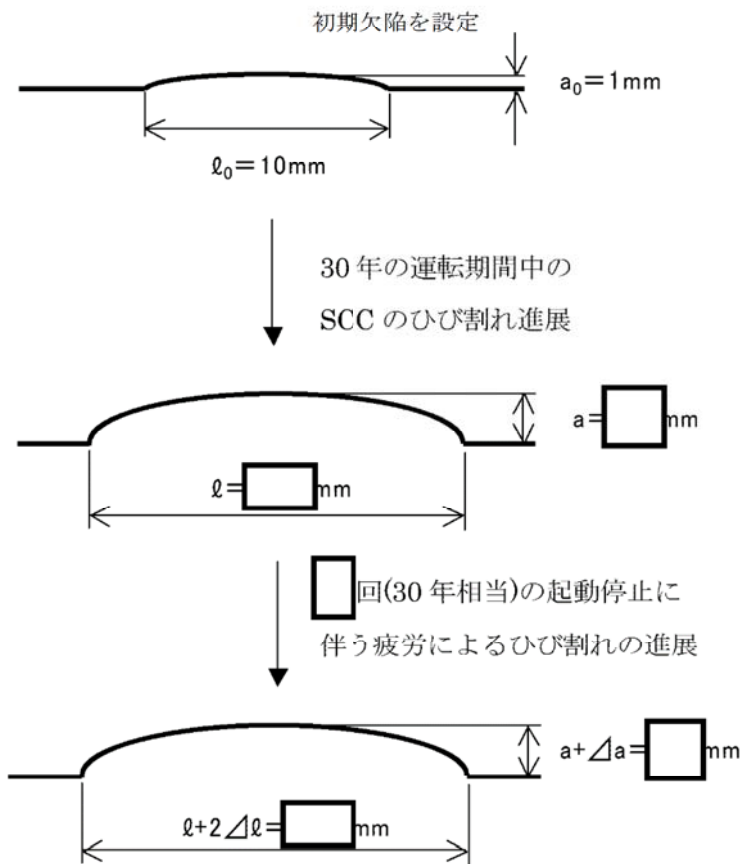


図2 ひび割れの深さと運転年数の関係 (1/2)

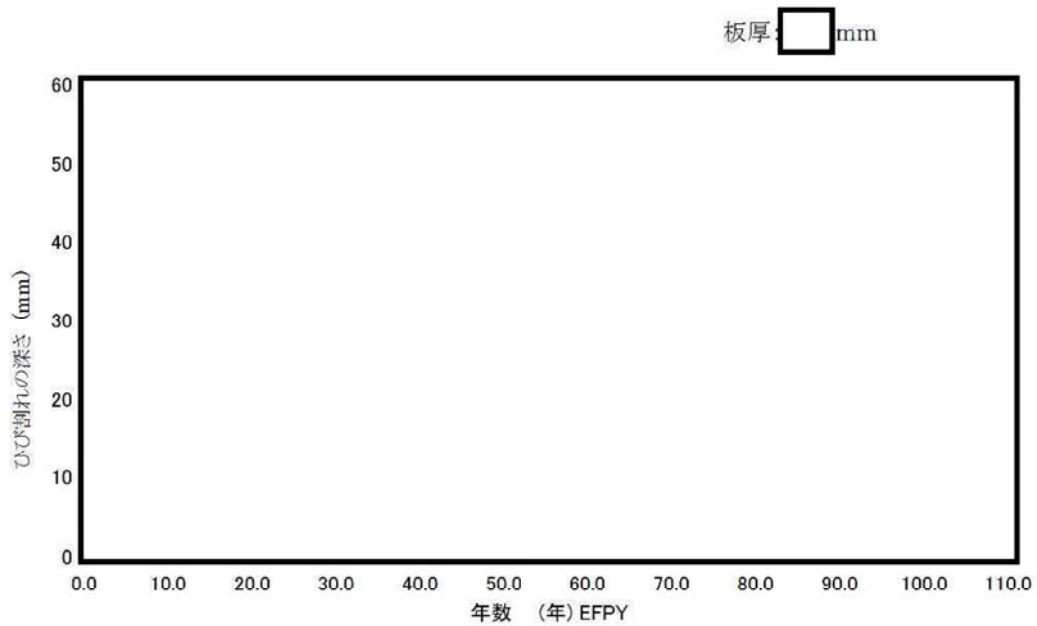


図2 ひび割れの深さと運転年数の関係 (2/2)

2.1.3 評価③：所定の期間（運転開始後 60 年時点までを包絡する期間）での技術基準への適合確認

(1) 解析モデル

解析モデルは評価対象が H7 及び V8 近傍であることからシュラウドサポートから炉心シュラウド下部胴までを模擬し、三次元シェル要素による全周モデルとしている。

解析モデルを図 3 に示す。

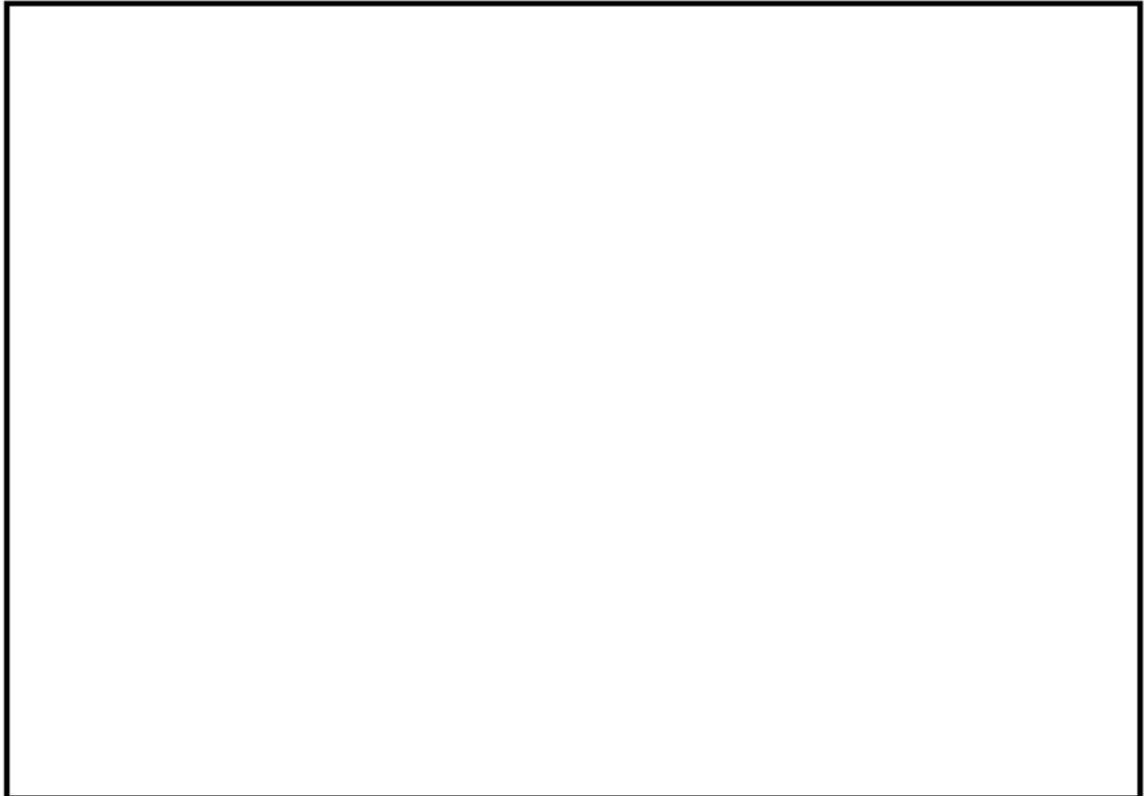


図 3 解析モデル

(2) ひび割れ（亀裂）の付与位置

解析モデル上のひび割れは、シュラウドサポートシリンダの V8 長手方向溶接部については、全 4 箇所（ $0^{\circ}$ 、 $90^{\circ}$ 、 $180^{\circ}$ 、 $270^{\circ}$ ）にシュラウドサポートシリンダの頂部からシュラウドサポートレグ接続部まで全長貫通亀裂（幅  mm の短形開口）を設定している。また、ほう酸注入配管サポート溶接部の上部に水平長さ  mm の周方向貫通亀裂（スリット）を設定している。

H7 周方向溶接部については、軸方向貫通亀裂（スリット）を  $1^{\circ}$  間隔で設定するとともに、溶接熱影響部の全周に周方向亀裂（内表面に深さ  mm、幅  mm）を設定している。

解析モデルにおけるひび割れの付与位置を図 4 に示す。



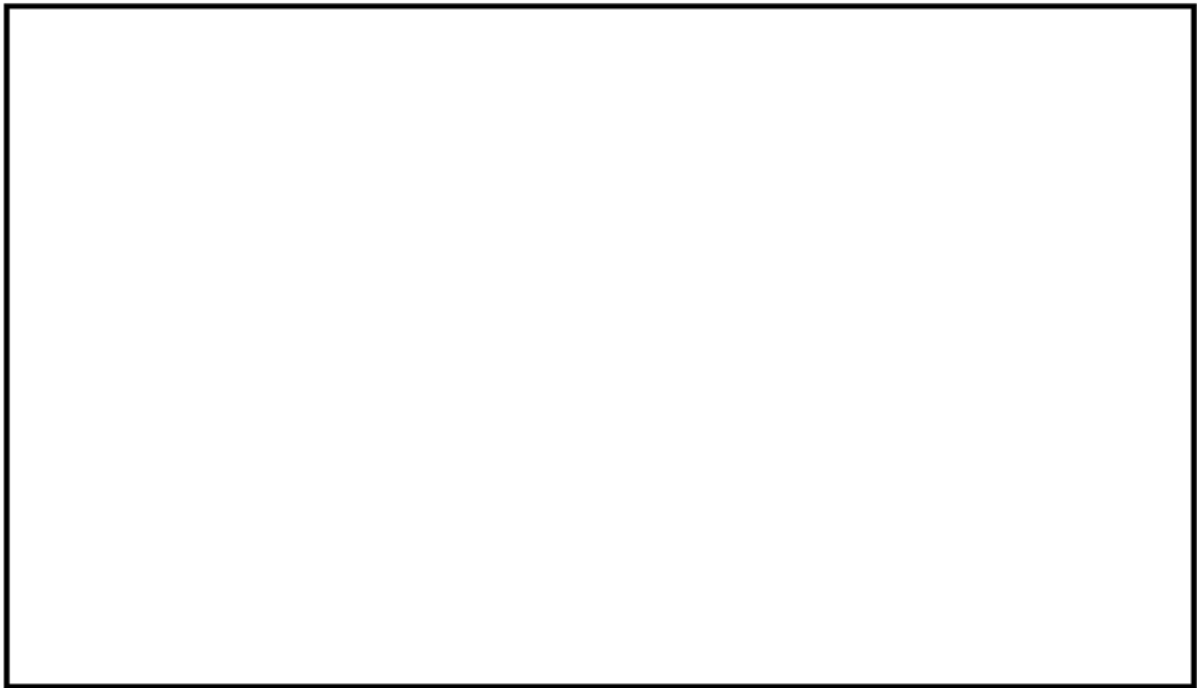


図4 ひび割れの付与位置

(3) 解析コード

三次元汎用有限要素法解析コード「MARC」を用いた。

(4) 荷重条件

解析に用いた供用状態 A, B の荷重（死荷重及び差圧）及び地震荷重を表 2 に示す。

供用状態 A, B の荷重（死荷重及び差圧）を負荷後，地震荷重を比例負荷し，設計上の地震に対する負荷荷重の比率（荷重倍率）と変位の関係を求め，2 倍勾配法により崩壊時の荷重倍率を求めている。

また，水平荷重の負荷方向は，90° ピッチで同じひびがある場合，180° 付近のほう酸注入配管サポート溶接部の上部に  mm の周方向貫通亀裂（ が中心）を加えているため，荷重負荷方向を  から  の方向とした場合が，周方向のひび割れをもっとも開口し易い地震荷重負荷方向となることから，構造健全性評価における地震荷重負荷は  から  の方向に設定している。

表 2 荷重条件

荷重	種類	鉛直力 V (kN)	水平力 H (kN)	モーメント M (kN・m)	圧力 P (MPa)
供用状態 A, B の荷重	死荷重		—	—	—
	差圧	—	—	—	
地震時の荷重	地震荷重 S <sub>1</sub> *				—
	地震荷重 S <sub>2</sub>				—

S<sub>1</sub>\* : 水平地震力は動的解析結果から得られた地震力と静的震度から得られた地震力のうちいずれか大きい方の値を、鉛直地震力は鉛直地震動により定まる値を示す。

(5) 物性値

解析に用いた物性値を表 3 に示す。

表 3 解析に用いた物性値

材質	温度 (°C)	Sm (MPa)	弾完全塑性体の 降伏点 (MPa)	縦弾性係数 E (MPa)	加工硬化係数 (MPa)
SUS304L (シュラウド下部胴)	302	96.8	S <sub>1</sub> * : 1.5Sm=145		
			S <sub>2</sub> : 2.3Sm=222 (注 1) 0.7Su=253		
NCF600-P (シュラウドサポート)	302	164	S <sub>1</sub> * : 1.5Sm=246		
			S <sub>2</sub> : 2.3Sm=377 (注 1) 0.7Su=350		

(注 1) : 2.3Sm と 0.7Su のいずれか小さい方を用いる。

(注 2) : 加工硬化係数は、応力-塑性ひずみ曲線の傾きとして定義される係数である。弾完全塑性体を用いる極限解析において、解析応力が降伏応力を超えると、荷重とひずみのバランスが不安定となり解析の収束が難しくなるため、極めて小さな加工硬化係数 (=E/1000) を与えることにより、降伏後の解析の収束性を上げている。

(6) 評価結果

保守的にひび割れを付与した解析モデルを用いて極限解析を実施した結果、崩壊荷重は設計上の地震荷重に対して余裕を有していることが確認されたことから、所定の期間（運転開始後 60 年時点までを包絡する期間）において、技術基準に適合しないものではないと評価している。（維持規格 添付 EJJ-B-2-2）

図 5 に評価結果がより厳しい地震荷重 S<sub>2</sub> の極限解析結果を示す。

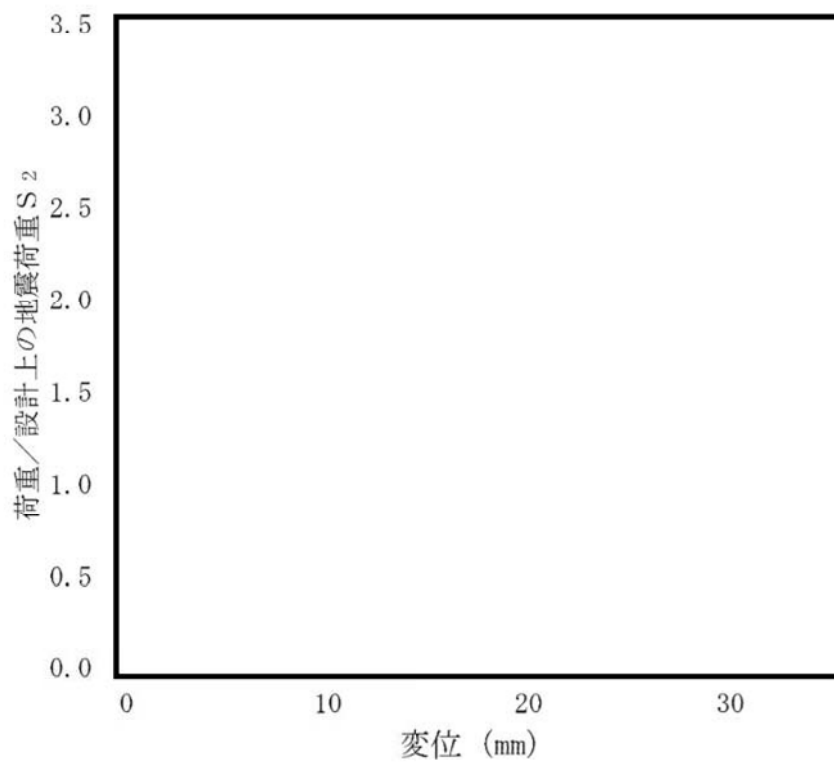


図5 極限解析結果 (地震荷重  $S_2$ )

## 2.2. 耐震安全性評価について

### 2.2.1 評価①：ひび割れの形状、大きさを特定

最新のシュラウドサポートの検査結果である、第25回定期検査での検査結果を確認した。確認の結果、検出されたひび割れは、以下に示す通り、第24回定期検査の構造健全性評価で想定している範囲内にとどまっていることが確認されている。

第25回定期検査で検出されたひび割れの状況を表4に示す。

①H7及びV8のひび割れの発生・進展は、予測した範囲にとどまっていた。

(H7及びV8に確認されたひび割れは、いずれも母材への発生・進展はなく、解析モデルに付与した想定ひび割れの範囲に包含されている)

②H7溶接金属に周方向のひび割れは発生・進展していなかった。

③H7軸方向のひび割れは、360個を超えないと評価された。

表4 第25回定期検査で検出されたひび割れの状況

溶接部位	数量	検出部位	方向
H7	59 個 [検査範囲 65.2 %] ↓ 91 個*1	内面	軸方向
V8	8 個	内面及び外面	軸方向 周方向 (ほう酸注入配管サポート溶接部)

\*1：日本原子力技術協会「BWR 炉内構造物点検評価ガイドライン [シュラウドサポート] (第3版)」の「未点検範囲の欠陥想定」に基づき算出したもの。

### 2.2.2 評価②：ひび割れの進展予測

第25回定期検査においては、ひび割れの進展は認められるものの、検出されたひび割れは、第24回定期検査の構造健全性評価で想定している範囲に包絡されることから、耐震安全性評価においては、第24回定期検査の評価と同条件で評価するものとした。

### 2.2.3 評価③：所定の期間（運転開始後60年時点まで）での技術基準への適合確認

#### (1) 解析モデル

耐震安全性評価では、第24回定期検査での評価と同一の解析モデルを用いた。

#### (2) ひび割れの付与位置

耐震安全性評価では、第24回定期検査での評価の付与位置と同一とした。

評価モデル及びひび割れの付与位置を図6に示す。



図 6 解析モデル及びひび割れの付与位置



(3) 解析コード

三次元汎用有限要素法解析コード「ABAQUS 6.13-1」を用いた。

(4) 荷重条件

耐震安全性評価で解析に用いた供用状態 A, B の荷重（死荷重及び差圧）及び地震荷重を表 5 に示す。

このうち、供用荷重 A, B の荷重は、第 24 回定期検査の評価と同一である。

一方、地震荷重については基準地震動  $S_s$  による地震荷重 ( $S_s$  8 波包絡荷重条件) を用いた。

表 5 耐震安全性評価で用いた荷重条件

荷重	種類	鉛直力 V (kN)	水平力 H (kN)	モーメント M (kN・m)	圧力 P (MPa)
供用状態 A, B の荷重	死荷重		—	—	—
	差圧	—	—	—	
地震時の荷重	基準地震動 $S_s$	*1	*2	*2	—

\*1 :  $S_s$ -21 による算出結果

\*2 :  $S_s$ -22 による算出結果

(5) 物性値

耐震安全性評価で解析に用いた物性値を表 6 に示す。

表 6 解析に用いた物性値

材質	温度 (°C)	$S_m$ (MPa)	弾完全塑性体の 降伏点 (MPa)	縦弾性係数 E (MPa)	加工硬化係数 (MPa)
SUS304L (シュラウド下部胴)	301 (注 1)	96.9	$S_s$ : $2.3S_m=222$ (注 2) $0.7S_u=253$		(注 3)
NCF600-P (シュラウドサポート)	301 (注 1)	164	$S_s$ : $2.3S_m=377$ (注 2) $0.7S_u=350$		(注 3)

(注 1) : 供用状態 A, B の最高温度を用いた。

(注 2) :  $2.3S_m$  と  $0.7S_u$  のいずれか小さい方を用いる。

(注 3) : 加工硬化係数は、応力-塑性ひずみ曲線の傾きとして定義される係数である。弾完全塑性体を用いる極限解析において、解析応力が降伏応力を超えると、荷重とひずみのバランスが不安定となり解析の収束が難しくなるため、極めて小さな加工硬化係数 ( $=E/1000$ ) を与えることにより、降伏後の解析の収束性を上げている。

(6) 評価結果

保守的にひび割れを付与した解析モデルを用いて極限解析を実施した結果、安全率を考慮した設計荷重が崩壊荷重を下回ることから、所定の期間（運転開始後 60 年時点まで）において、技術基準に適合しないものではないと評価した。（維持規格 添付 EJV-B-2-2）

基準地震動  $S_s$  ( $S_s$  8 波包絡荷重条件) における極限解析結果を図 7 に示す。

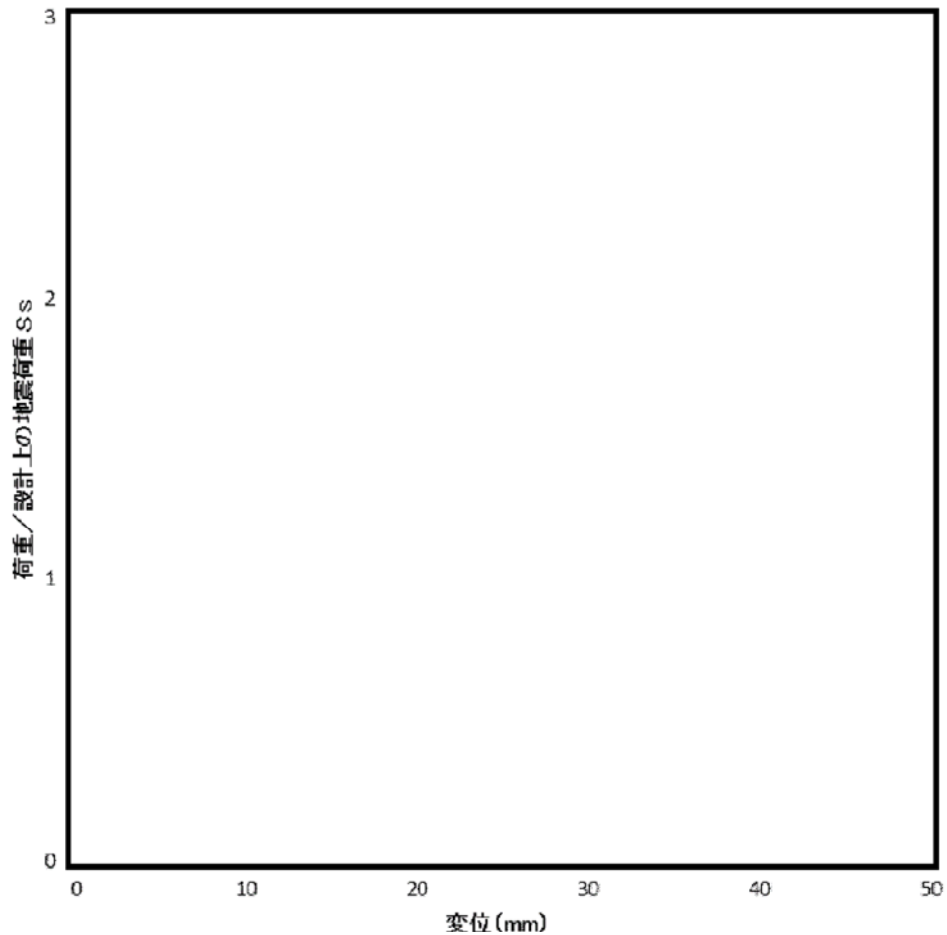


図 7 極限解析結果（基準地震動  $S_s$ ）

3. 耐震安全性評価結果

耐震安全性評価における極限解析の結果、運転開始後 60 年時点において、シュラウドサポートの安全率を考慮した設計荷重が崩壊荷重を下回るため、耐震安全性評価上問題ない。

## 流れ加速型腐食を考慮した耐震安全評価について

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. 管支持板の腐食（流れ加速型腐食）（第3給水加熱器）
3. 伝熱管の腐食（流れ加速型腐食）（非常用ディーゼル機関及び付属設備／高圧炉心スプレイ系ディーゼル機関及び付属設備）

## 1. 配管内面の腐食（流れ加速型腐食）（炭素鋼配管）に対する耐震安全性評価

## (1) 評価対象ラインの抽出について

東海第二の劣化状況評価における、「配管の腐食（流れ加速型腐食）」に対する耐震安全性評価は、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、JSME 減肉管理規格という）において、流れ加速型腐食の可能性が小さいとされている FAC-1 管理範囲以外の箇所を含むライン、原子炉系（蒸気部）主蒸気配管及び原子炉水への水素注入に伴う配管内表面の酸化被膜減少による配管減肉の想定される原子炉冷却材浄化系配管を評価対象ラインとして選定した。

## (2) 評価対象ライン数

評価対象として抽出され評価を実施したライン数は合計 31 ラインであり、系統分類毎に以下のとおりである。

・原子炉系（蒸気部）	4 ライン
・原子炉系（純水系）	2 ライン
・給水系	5 ライン
・復水系	18 ライン
・給水加熱器ドレン系	3 ライン
・原子炉冷却材浄化系	1 ライン

## (3) 評価対象ライン

評価対象ラインの概略図を図 1 に、評価対象ラインのうち、劣化状況評価書に評価結果を記載した代表ラインの解析モデル図を図 2～図 12 に示す。

解析モデルは、3次元多質点系モデルとし、その他のモデル化の条件は、工事計画認可申請の評価と同等とする。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労累積係数の評価を計算機コードにより実施する。

#### (4) 使用する地震動

耐震評価を行うにあたり使用する地震動は、東海第二発電所設置変更許可申請書（平成 29 年 11 月 8 日補正）及び工事計画認可申請書（平成 29 年 11 月 24 日補正）で記載される基準地震動  $S_s$  ( $S_s$ -D1,  $S_s$ -11~14,  $S_s$ -21~22,  $S_s$ -31) の 8 波 (1.5 倍の裕度考慮), 弾性設計用地震動  $S_d$  等を用いて原子炉建屋, タービン建屋各床レベルの地震応答解析結果に基づき作成された床応答スペクトルを包絡したスペクトル波にて評価を行った。

#### (5) 評価内容

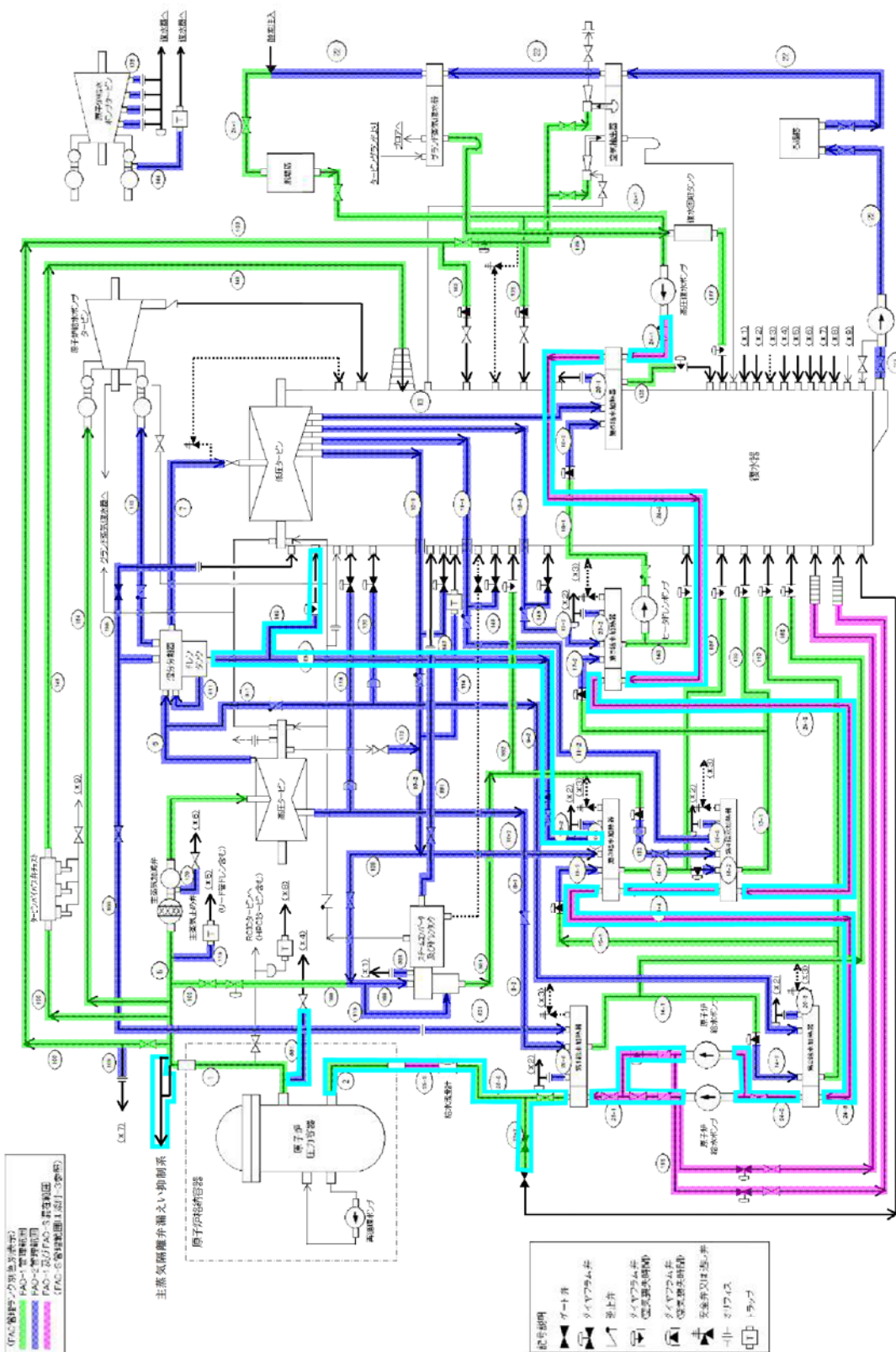
エルボ部, 分岐部, レジューサ等の偏流発生部位及びその下流側に周方向及び軸方向一様に必要最小肉厚まで減肉を想定した評価を実施する。評価結果が許容値を超える系統については実測データに基づく運転開始後 60 年時点の減肉を想定した応力評価及び疲労解析による評価を実施する。

#### (6) 評価結果

必要最小肉厚又は運転開始後 60 年時点までの減肉を想定し, 地震時に発生する応力又は疲労累積係数を評価した結果, 許容値を下回ることを確認した。

評価対象ラインのうち, 補足説明資料の代表機器である原子炉系 (蒸気部) 配管の 60 年時点肉厚における疲労累積係数の算出結果を表 1 に, また, 詳細な算出過程を添付番号 1 に示す。





(FAC) 配管の種別  
 (FAC) 配管の種別  
 (FAC) 配管の種別  
 (FAC) 配管の種別  
 (FAC) 配管の種別

記号説明  
 ゲート弁  
 ダイアフラム弁  
 止弁  
 ダイアフラム弁  
 電気駆動弁  
 ダイアフラム弁  
 電気駆動弁  
 気動機  
 電動機  
 電動機  
 電動機

(記号凡用)  
 ..... (本系統) ..... (配管管理対象範囲)  
 ..... (本系統) ..... (配管管理対象範囲)  
 ..... (本系統) ..... (配管管理対象範囲)

図 GA-1000-1 FAC管理範囲図(概略系統図)

図 1 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

□ : 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

(JSM S NHI-2006 図 CA-1000-1 (追加筆))



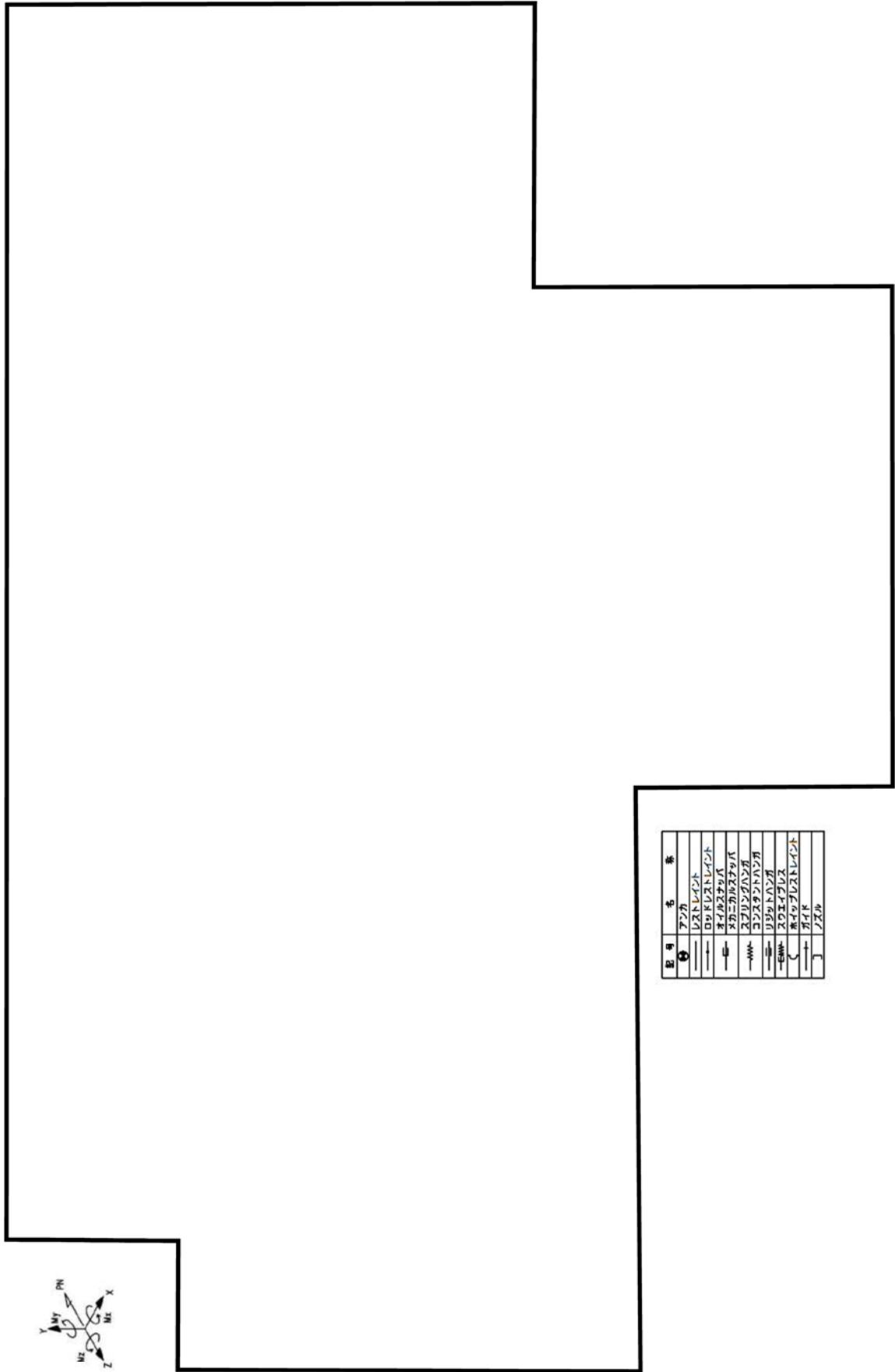
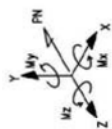
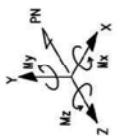
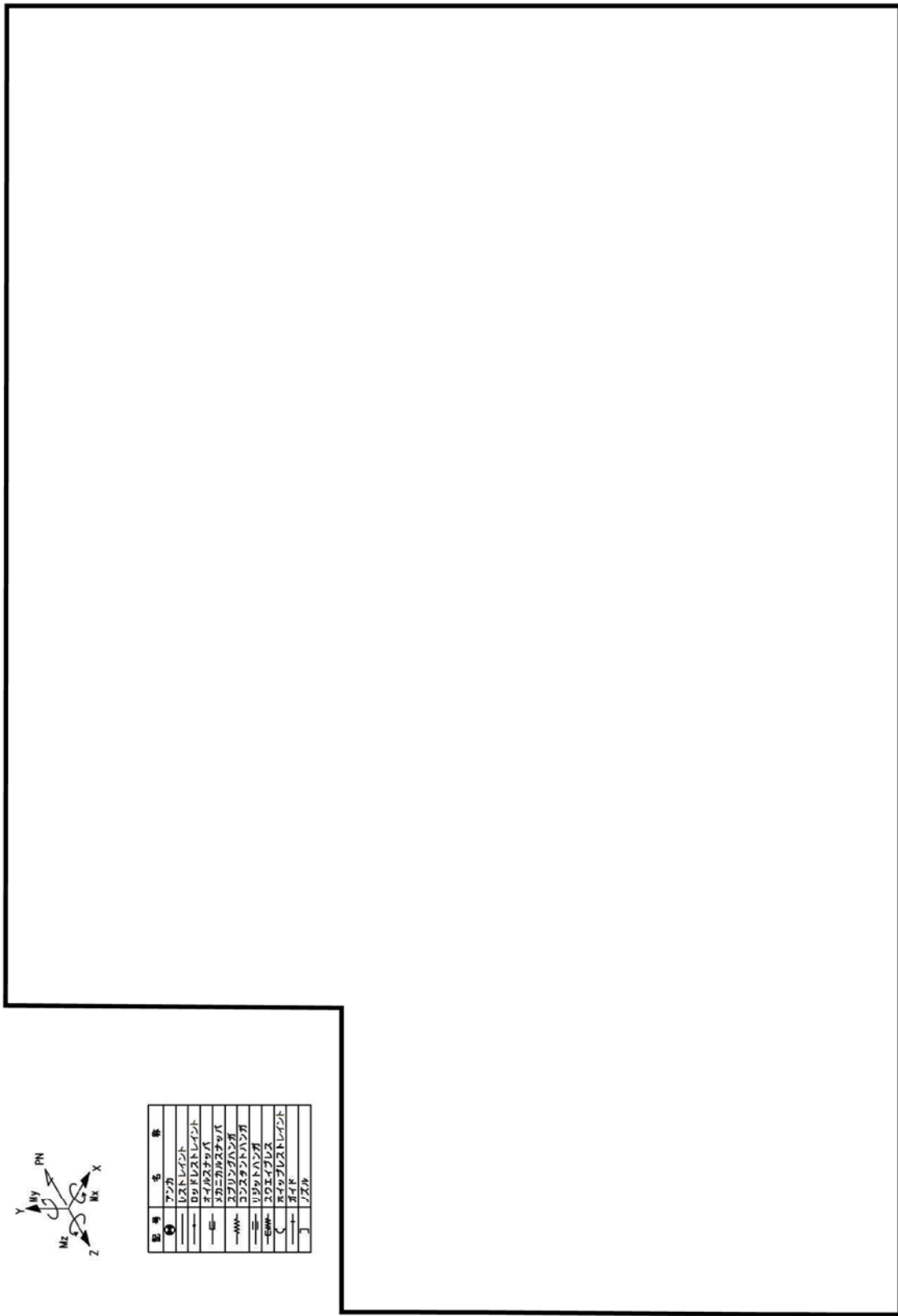


図2 原子炉系（純水部）[クラス1耐震Sクラス] アイソメモ



記号	名称
	アソシ
	レストレスト
	レストレストレスト
	レストレストレスト
	レストレストレストレスト
	レストレストレストレストレスト
	レストレストレストレストレスト
	レストレストレストレストレストレスト
	レストレストレストレストレストレストレスト
	レストレストレストレストレストレストレストレスト
	レストレストレストレストレストレストレストレストレスト
	レストレストレストレストレストレストレストレストレストレスト
	レストレストレストレストレストレストレストレストレストレストレスト
	レストレストレストレストレストレストレストレストレストレストレストレスト
	レストレストレストレストレストレストレストレストレストレストレストレストレスト
	レストレストレストレストレストレストレストレストレストレストレストレストレストレスト
	レストレストレストレストレストレストレストレストレストレストレストレストレストレストレスト
	レストレストレストレストレストレストレストレストレストレストレストレストレストレストレストレスト

図3 原子炉系（純水部）[クラス2-耐震Sクラス] アイソメ図



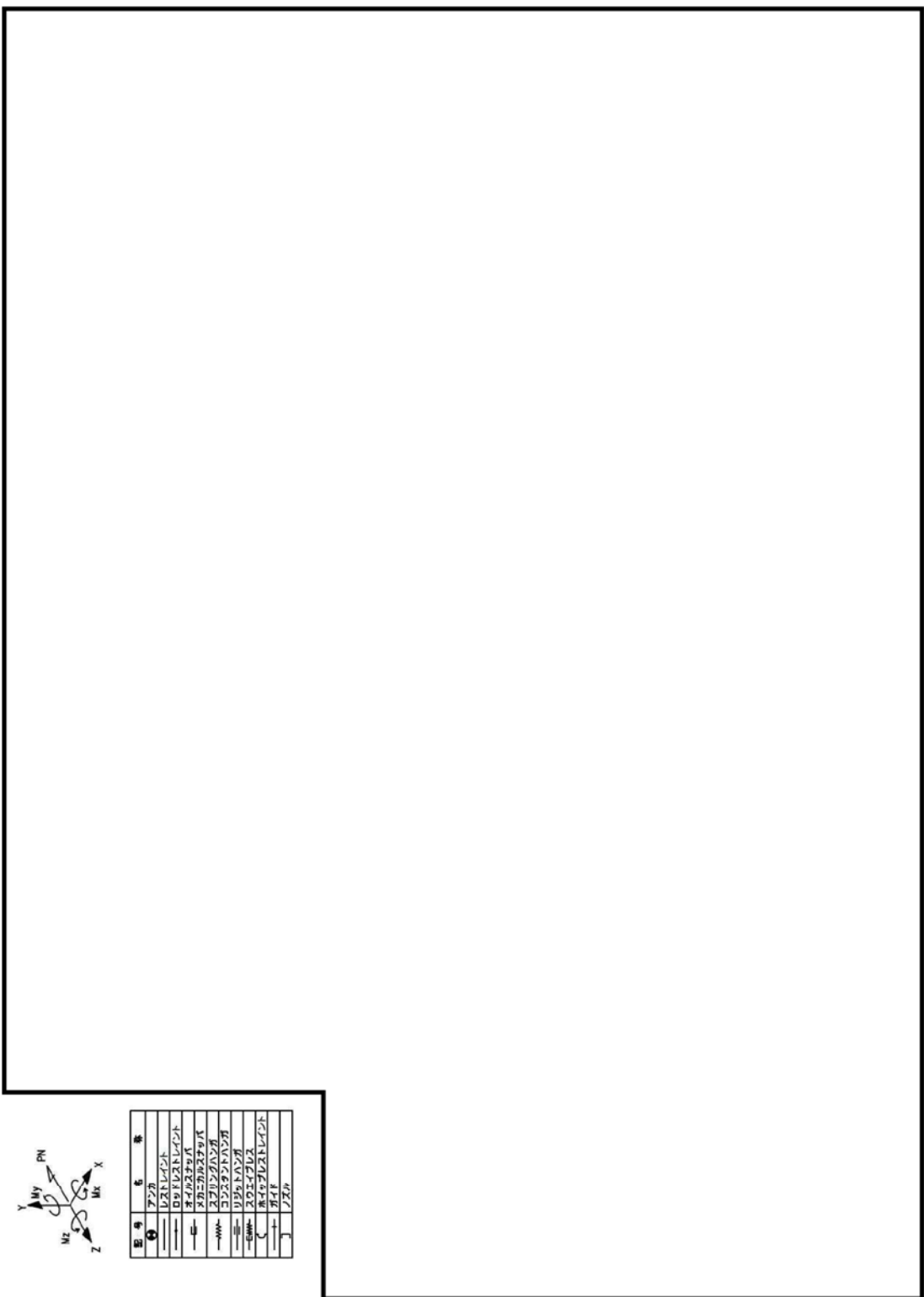
記号	名 称
①	アーク
②	バネ
③	バネ
④	バネ
⑤	バネ
⑥	バネ
⑦	バネ
⑧	バネ
⑨	バネ
⑩	バネ
⑪	バネ
⑫	バネ
⑬	バネ
⑭	バネ
⑮	バネ
⑯	バネ
⑰	バネ
⑱	バネ
⑲	バネ
⑳	バネ
㉑	バネ
㉒	バネ
㉓	バネ
㉔	バネ
㉕	バネ
㉖	バネ
㉗	バネ
㉘	バネ
㉙	バネ
㉚	バネ
㉛	バネ
㉜	バネ
㉝	バネ
㉞	バネ
㉟	バネ
㊱	バネ
㊲	バネ
㊳	バネ
㊴	バネ
㊵	バネ
㊶	バネ
㊷	バネ
㊸	バネ
㊹	バネ
㊺	バネ
㊻	バネ
㊼	バネ
㊽	バネ
㊾	バネ
㊿	バネ

図 4 (1/2) 原子炉系 (蒸気部) [クラス 1-耐震 S クラス] アイソメ図



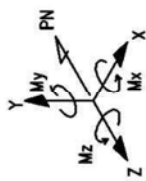






記号	記号	名称
	ア	ア
	レ	レ
	ウ	ウ
	エ	エ
	カ	カ
	キ	キ
	ク	ク
	ケ	ケ
	コ	コ
	サ	サ
	シ	シ
	ス	ス
	セ	セ
	ソ	ソ
	タ	タ
	チ	チ
	ツ	ツ
	テ	テ
	ト	ト
	ナ	ナ
	ニ	ニ
	ノ	ノ

図6 復水系 [クラス3-耐震Bクラス] アイソメ図



記号	名称
●	アンカ
—	レストレイント
—	ロックレストレイント
—	オイルスタンプ
—	メカニカルスタンプ
—	スプリングハンガ
—	コンスタントハンガ
—	リフトハンガ
—	スウェイブレス
—	ホイップレストレイント
—	ガイド
—	ワズル

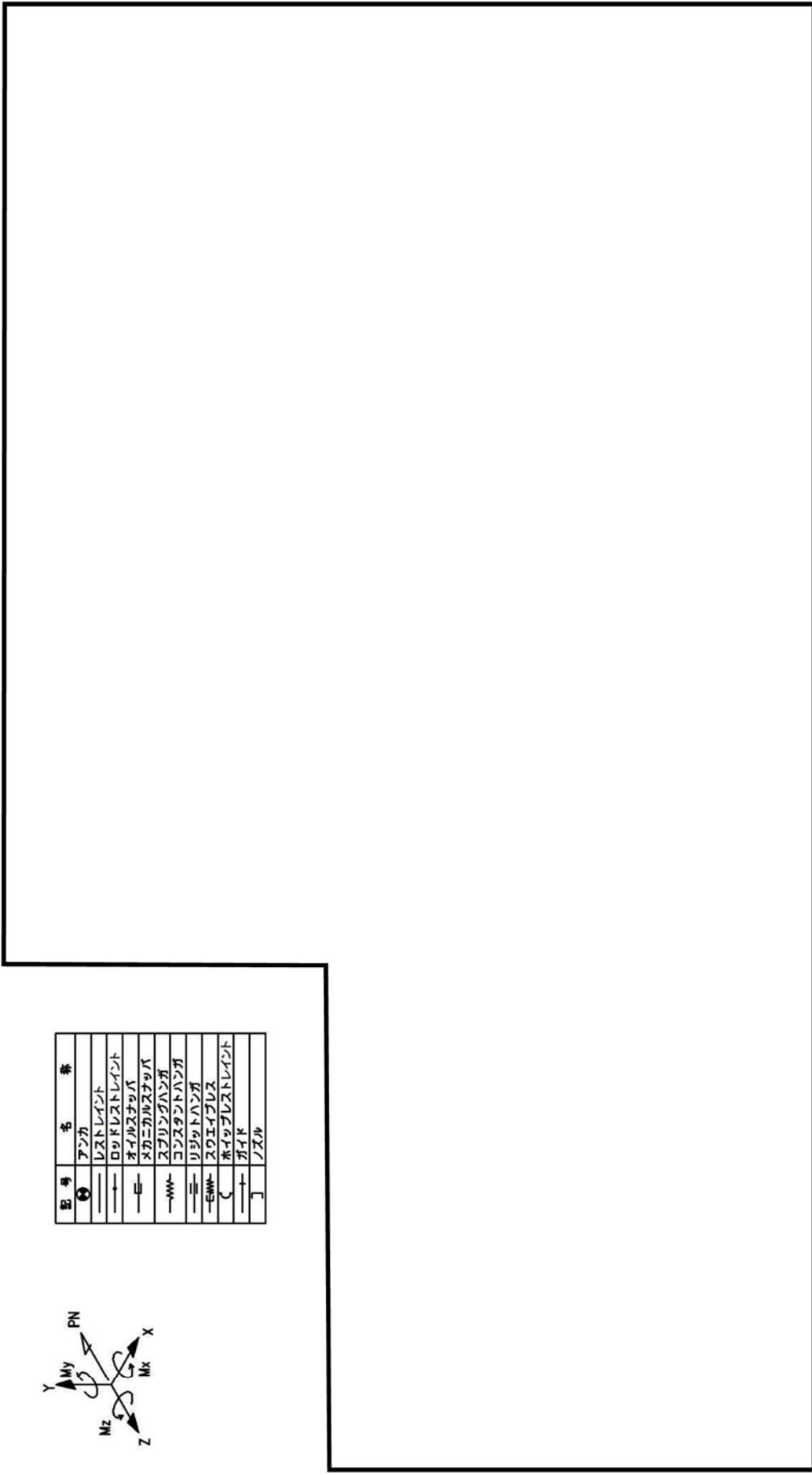


図7 給水系 [クラス2-耐震Sクラス] アイソメ図



記号	名称
⊕	アング
—	レストレイト
—	ロッドレストレイト
—	オイルスタンプ
—	メカニカルスタンプ
—	スプリングハンダ
—	コンタクトハンダ
—	リソットハンダ
—	スウェイプレス
⌋	ホイップレストレイト
—	ガイド
⌋	ノズル

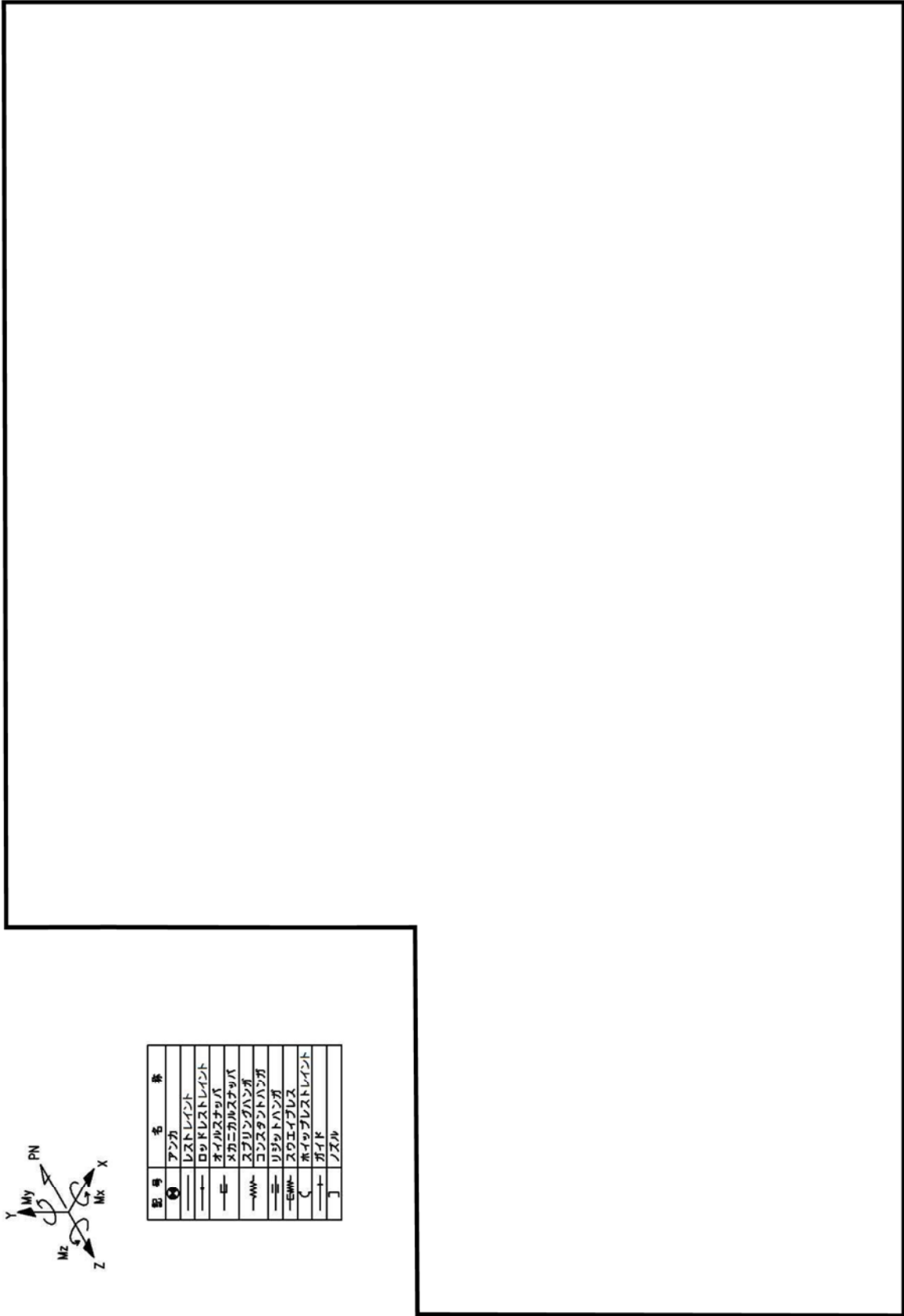
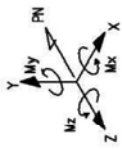


図8 給水系 [クラス2-耐震Bクラス] アイソメ図



記号	名称
①	アング
②	レストレイント
③	ロッドレストレイント
④	スライダジョイント
⑤	スプリングジョイント
⑥	コネクタジョイント
⑦	リフトジョイント
⑧	スウェーブルジョイント
⑨	スライダレストレイント
⑩	ジョイント
⑪	リスト

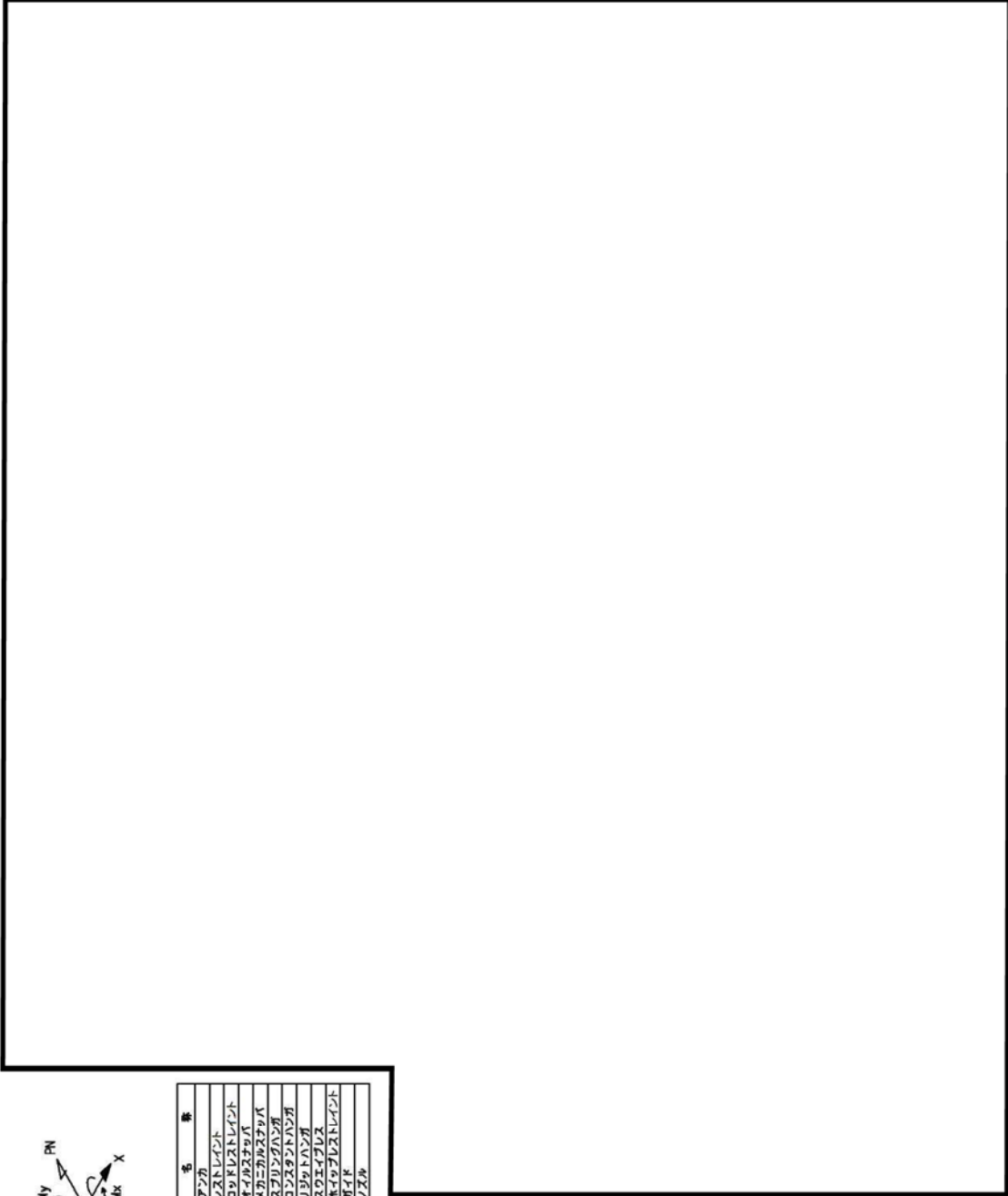
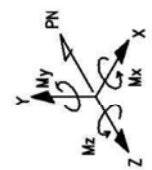


図9 給水系 [クラス 3-耐震 B クラス] アイソメ図



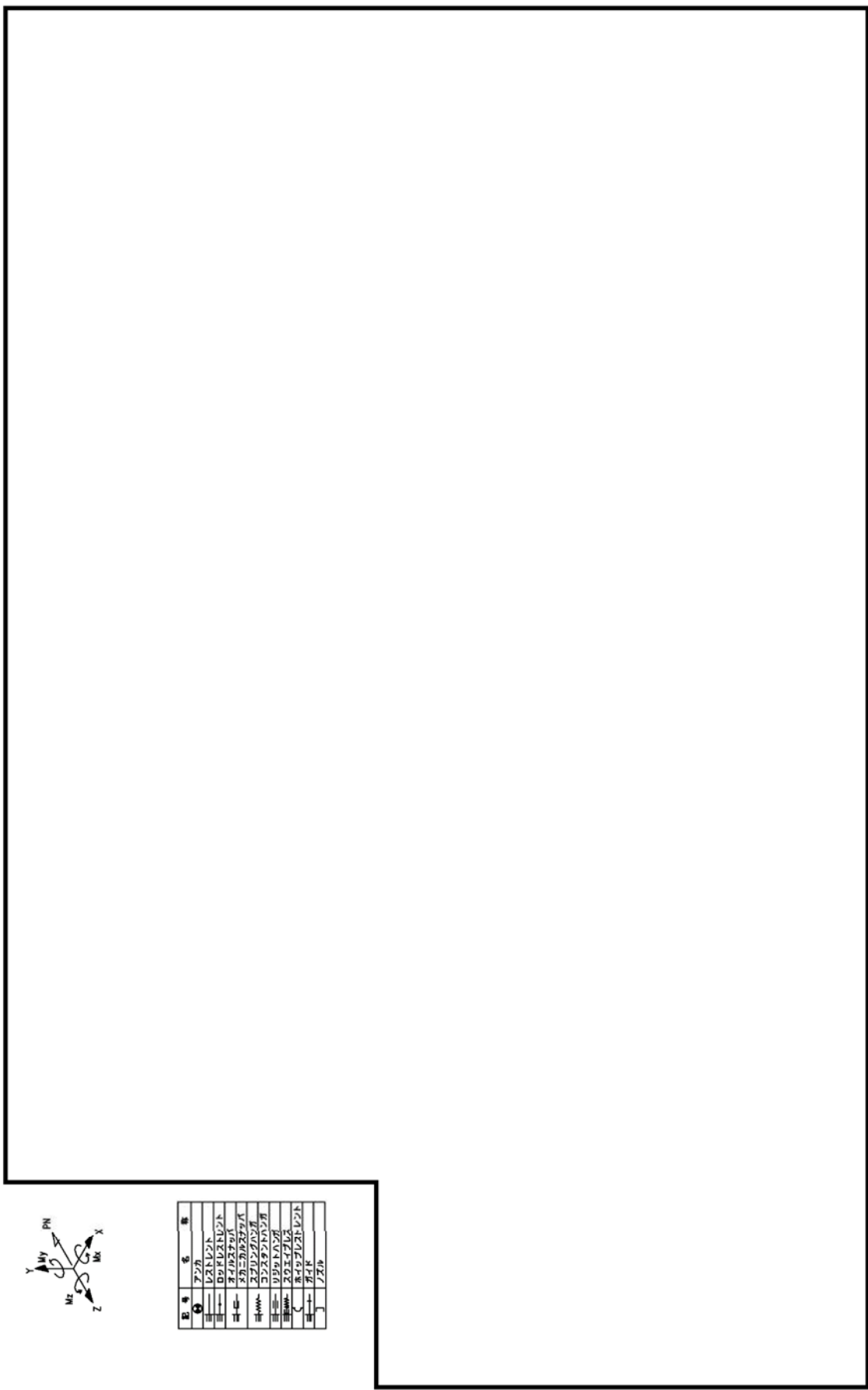
記号	名称
④	アンカ
—	レストレイト
—	ロッドレストレイト
—	ネイルスナック
—	ボルトナック
—	スクリューナック
—	コンクリートナック
—	リフトナック
—	スロイブレ
—	ワイプレストレイト
—	ワイプ
—	ワズル



図 10 給水加熱器ドレン系 [クラス 3-耐震 B クラス] アイソメ図



評価中のため追々とさせていただきます。



記号	名称	番号
○	ポンプ	
—	パイプ	
—	バルブ	
—	フリンジ	
—	フラッグ	
—	パイプサポーター	
—	パイプハンガー	
—	パイプスラスト	
—	パイプステップ	
—	パイプジョイント	

図 12 原子炉冷却材浄化系 (炭素鋼配管部) 配管アイコンメ図

表 1 原子炉系 (蒸気部) 配管の 60 年時点肉厚における疲労累積係数の算出結果

系統	主蒸気系	配管モデル名	MSS-17	評価点No.	118	
(1) 熱サイクルによる疲労評価の計算パラメータ及び結果						
No.	事象毎の組合せ					
	名称	番号	運転温度(°C)	始点	終点	
		始点	終点	Sp	MPa	
				Sn	MPa	
				Ke	—	
				SL	MPa	
				SL'	MPa	
				E	MPa	
				MPa	MPa	
1				実回数	許容回数	
2				実回数	許容回数	
3				実回数	許容回数	
4				実回数	許容回数	
5				実回数	許容回数	
6				実回数	許容回数	
7				実回数	許容回数	
8				実回数	許容回数	
9				実回数	許容回数	
10				実回数	許容回数	
11				実回数	許容回数	
12				実回数	許容回数	
13				実回数	許容回数	
14				実回数	許容回数	
15				実回数	許容回数	
16				実回数	許容回数	
17				実回数	許容回数	
18				実回数	許容回数	
19				実回数	許容回数	
20				実回数	許容回数	
21				実回数	許容回数	
22				実回数	許容回数	
23				実回数	許容回数	
24				実回数	許容回数	
25				実回数	許容回数	
26				実回数	許容回数	
27				実回数	許容回数	
					疲労累積係数総合計	0.4580

(2) 地震による疲労評価の計算パラメータ及び結果											
No.	事象毎の組合せ										
	名称	番号	運転温度(°C)	始点	終点	Sp	MPa	Sn	MPa	Ke	—
						556	556	556	501	1.80	—
						831	831	831	915	2.20	—
						—	—	—	567.201	567.201	—
						—	—	—	1035.906	1035.906	—
						—	—	—	70	1.022	—
						—	—	—	70	2.15	—
						—	—	—	0.0685	0.0685	—
						—	—	—	0.3256	0.3256	—

## 1. 原子炉系（蒸気部）配管の 60 年時点肉厚における疲労累積係数の算出過程

## (1) 評価仕様

① 原子炉系（蒸気部）配管のクラス区分はクラス 1 管に該当することから，原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601-1987）6.3.3 項 管の許容応力に基づき，地震動のみによる疲労累積係数に通常運転時における疲労累積係数を加えて評価する。

なお，疲労累積係数の算出には，これまでの測定データに基づき想定した 60 年時点の肉厚による一様減肉を仮定した評価モデルを用いて算出する。

疲労累積係数の算出に用いる配管仕様を表 1 に示す。

表 1 原子炉系（蒸気部）配管の配管仕様

項目	単位	評価対象配管	
		原子炉系（蒸気部）	
		評価点 118	
		主管	分岐管
配管口径 $D_o$	mm		
配管肉厚 $t$	mm	( ) *1	( ) *1
材質	—	STPT42	
縦弾性係数	MPa	182840*2	
最高使用圧力	MPa	8.62	
最高使用温度	℃	302	
設計応力強さ ( $S_m$ )	MPa	122*3	

\*1：（ ）内の数値は減肉前の公称肉厚を示す

\*2：設計・建設規格（2005/2007）付録材料図表 Part6 表 1 の値を最高使用温度の値に線形補間したもの

\*3：設計・建設規格（2005/2007）付録材料図表 Part5 表 1 の値を最高使用温度の値に線形補間したもの

(2) 算出過程

① 原子炉系（蒸気部）配管の60年時点肉厚における疲労累積係数の算出過程を以降に示す。

なお、ここでは疲労累積係数の算出ケースのうち、疲労累積係数が最も大きいSs地震動による算出過程を示す。

算出に用いた諸元を表2に示す。

表2 原子炉系（蒸気部）配管の諸元

記号	諸元	単位	説明
原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601-1984）2.2.1項 第1種管の許容応力の解説より			
$Z_r$		mm <sup>3</sup>	主管の断面係数
$Z_b$		mm <sup>3</sup>	分岐管の断面係数
$C_{2r}$	3.48	—	主管の応力係数
$K_{2r}$	1.00	—	主管の応力係数
$C_{2b}$	3.48	—	分岐管の応力係数
$K_{2b}$	1.00	—	分岐管の応力係数
$S_n$	—	MPa	一次+二次応力変動値
$S_p$	—	MPa	ピーク応力強さ
$S_l$	—	MPa	繰り返しピーク応力強さ
$M_{rs}$		N・mm	主管の地震のみによる慣性力と相対変位により生ずるモーメントの全振幅
$M_{bs}$		N・mm	分岐管の地震のみによる慣性力と相対変位により生ずるモーメントの全振幅
$K$	—	—	$S_p / S_n$
$K_e$	—	—	$K_e$ 係数
設計・建設規格（2005/2007）第4章 添付4-2より			
$S_l'$	—	MPa	繰り返しピーク応力強さ（縦弾性係数補正後）
$E$	1.82840E+05	MPa	材料の使用温度における縦弾性係数
$S_a$	—	MPa	任意の点の繰り返しピーク応力強さ
$N_a$	—	—	$S_a$ に対応する許容繰り返し回数
$S_1$	—	MPa	（表 添付4-2-1）中の $S_a$ より低く、かつ、最も近い繰り返しピーク応力強さ
$S_2$	—	MPa	（表 添付4-2-1）中の $S_a$ より高く、かつ、最も近い繰り返しピーク応力強さ
$N_1$	—	—	$S_1$ に対応する許容繰り返し回数
$N_2$	—	—	$S_2$ に対応する許容繰り返し回数

注：諸元欄の“—”は計算結果を参照



② S<sub>s</sub>地震動による疲労累積係数の算出過程

➤ 一次+二次応力を算出する。

JEAG4601 2.2.1項 第1種管の許容応力の解説(6)

“a. 管台及び突合せ溶接式テーパー”より

$$\begin{aligned}
 S_n &= \frac{C_{2b} \cdot M_{bs}}{Z_b} + \frac{C_{2r} \cdot M_{rs}}{Z_r} \\
 &= \frac{3.48 \times \boxed{\phantom{000000}}}{\boxed{\phantom{000000}}} + \frac{3.48 \times \boxed{\phantom{000000}}}{\boxed{\phantom{000000}}} \\
 &= \boxed{\phantom{000000}} \rightarrow 831 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

➤ ピーク応力強さを算出する。

JEAG4601 2.2.1項 第1種管の許容応力の解説(8)

“a. 管台及び突合せ溶接式テーパー”より

$$\begin{aligned}
 S_p &= \frac{K_{2b} \cdot C_{2b} \cdot M_{bs}}{Z_b} + \frac{K_{2r} \cdot C_{2r} \cdot M_{rs}}{Z_r} \\
 &= \frac{1.0 \times 3.48 \times \boxed{\phantom{000000}}}{\boxed{\phantom{000000}}} + \frac{1.0 \times 3.48 \times \boxed{\phantom{000000}}}{\boxed{\phantom{000000}}} \\
 &= \boxed{\phantom{000000}} \rightarrow 831 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

➤ 繰り返しピーク応力強さを算出する。

JEAG4601 2.2.1項 第1種管の許容応力の解説(7)より

$$S_l = \frac{K_e \cdot S_p}{2} \dots A$$

A式のK<sub>e</sub>係数を算出する。

JSME 設計・建設規格 PVB-3315 簡易弾塑性評価方法 (2) より

$$K = \frac{S_p}{S_n} = \frac{831}{831} = 1.0$$

$$B_0 = 2.59$$

よって、K < B<sub>0</sub> となる。

$$\frac{S_n}{3S_m} = \frac{831}{366} = 2.270 \dots \textcircled{1}$$

表 PVB-3315-1 より

材料の種類	炭素鋼
q	3.1
A <sub>o</sub>	0.66
B <sub>o</sub>	2.59

a.  $K < B_0$  のとき

$$\begin{aligned} & \frac{\left(q + \frac{A_0}{K} - 1\right) - \sqrt{\left(q + \frac{A_0}{K} - 1\right)^2 - 4A_0(q - 1)}}{2A_0} \\ &= \frac{\left(3.1 + \frac{0.66}{1.0} - 1\right) - \sqrt{\left(3.1 + \frac{0.66}{1.0} - 1\right)^2 - 4 \times 0.66(3.1 - 1)}}{2 \times 0.66} \\ &= 1.0 \quad \dots \quad \textcircled{2} \end{aligned}$$

①式  $\geq$  ②式より (b) の  $K_e$  式を使用する。

$$\begin{aligned} \text{(b) } K_e = K_e' &= 1 + (q - 1) \left(1 - \frac{3S_m}{S_n}\right) && \text{(PVB - 84)式} \\ &= 1 + (3.1 - 1) \left(1 - \frac{366}{831}\right) \\ &= 2.17509 \dots \rightarrow 2.20 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_l &= \frac{K_e \cdot S_p}{2} \\ &= \frac{2.20 \times 831}{2} \\ &= 914.1 \rightarrow 915 \text{ MPa} \quad (\text{縦弾性係数補正前}) \end{aligned}$$

➤ 設計疲労線図より許容繰り返し回数を算出する。

JSME 設計・建設規格 第4章 添付 4-2 より

繰り返しピーク応力強さの縦弾性係数による補正

( $E$  は使用温度である  $302^\circ\text{C}$  の値)

$$\begin{aligned} E &= 1.82840\text{E} + 05 \\ S_l' &= \frac{2.07\text{E} + 05}{E} \cdot S_l \\ &= \frac{2.07\text{E} + 05}{1.82840\text{E} + 05} \times 915 \\ &= 1035.90571 \dots \rightarrow 1035.906 \text{ MPa} \quad (\text{縦弾性係数補正後}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_a &= N_2 \times \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^{\frac{\log S_2/S_a}{\log S_2/S_1}} \\
&= 2.00E + 02 \times \left( \frac{5.00E + 02}{2.00E + 02} \right)^{(\log(1069/1035.906)/\log(1069/724))} \\
&= 215.3493 \rightarrow 215
\end{aligned}$$

➤ 疲労累積係数（UF）を算出する。

$$\begin{aligned}
UF_{160} &= \frac{\text{地震繰返し回数}}{\text{許容繰返し回数}} = \frac{160^{*1}}{215} \\
&= 0.744186 \dots \rightarrow 0.7442
\end{aligned}$$

\*1：地震繰返し回数の160回は、工事計画認可申請（平成30年2月補正申請）において、一律に定める等価繰返し回数として当初設定したものである。

工事計画認可申請において、一律に定める等価繰返し回数を用いた疲労累積係数が許容値1を超える場合、個別に設定する等価繰返し回数を用いて評価するとしており、通常運転時の疲労累積係数0.4580と足し合わせると許容値1を超えるため、当該配管の等価繰返し回数に裕度を考慮した70回を個別に設定する繰返し回数と設定し疲労累積係数を算出する。

$$\begin{aligned}
UF_{70} &= \frac{\text{地震繰返し回数}}{\text{許容繰返し回数}} = \frac{70}{215} \\
&= 0.325581 \dots \rightarrow 0.3256
\end{aligned}$$

### (3) 評価結果

原子炉系（蒸気部）配管の60年時点肉厚における疲労累積係数を表3に示す。

評価の結果、疲労累積係数は許容値1を下回ることから、耐震安全性評価上問題ない。

表3 原子炉系（蒸気部）配管の60年時点肉厚における疲労累積係数

	地震動による 疲労累積係数	通常運転時の 疲労累積係数	合計	許容値
S <sub>d</sub> 地震時	0.0685	0.4580*1	0.5265	1以下
S <sub>s</sub> 地震時	0.3256	0.4580*1	0.7836	

\*1：JEAG4601に基づき原子炉起動時及び停止時のみ通気される配管について、肉厚測定結果より1年あたりの減肉量を算出し、60年継続したと仮定して算出した60年時点肉厚を保守的に60年時点に至る評価期間中全てに適用し、その肉厚における通常運転時の疲労累積係数は0.4580であり、地震動の疲労累積係数を足し合わせても許容値1を下回る。

## 2. 原子炉系（蒸気部）主蒸気配管及び原子炉冷却材浄化系配管の腐食減肉を考慮した耐震評価

他プラントにおける類似配管の減肉事象を踏まえて、原子炉系（蒸気部）主蒸気配管並びに原子炉内への水素注入による炭素鋼配管内表面の酸化被膜低減による腐食量増加の可能性がある原子炉冷却材浄化系配管において、腐食減肉を想定した耐震評価を実施した。

### (1) 評価対象配管

原子炉系（蒸気部）主蒸気配管及び原子炉冷却材浄化系配管の評価対象を以下のとおり選定した。

#### ① 原子炉系（蒸気部）主蒸気配管

原子炉系（蒸気部）主蒸気配管の A～D 系配管のうち、工事計画認可申請（平成 30 年 2 月補正）の主蒸気隔離弁及び主蒸気逃がし安全弁の動的機能維持評価における地震時の加速度評価において、加速度が最も高い値を示した B 系配管を選定した。

#### ② 原子炉冷却材浄化系配管

原子炉冷却材浄化系配管のうち酸化被膜低減による影響を考慮する必要のある炭素鋼配管であり、耐震 S クラスで耐震重要度が高い原子炉圧力容器底部ノズル～原子炉再循環系からの取出配管合流部までを選定した。

### (2) 評価条件

#### ① 配管肉厚

原子炉系（蒸気部）主蒸気配管及び原子炉冷却材浄化系配管ともに日本機械学会 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（2006 年版）JSME S NH1-2006 に規定される配管減肉管理対象ランクである FAC-2 及び FAC-S に該当しないことから、劣化状況評価における配管減肉を考慮した耐震安全性評価の対象外となる。

このため、通常の減肉耐震評価を行う際に考慮する必要最小肉厚での耐震評価は行わずこれまでの肉厚測定記録を基にした運転開始後 60 年時点での想定肉厚での耐震評価を実施した。

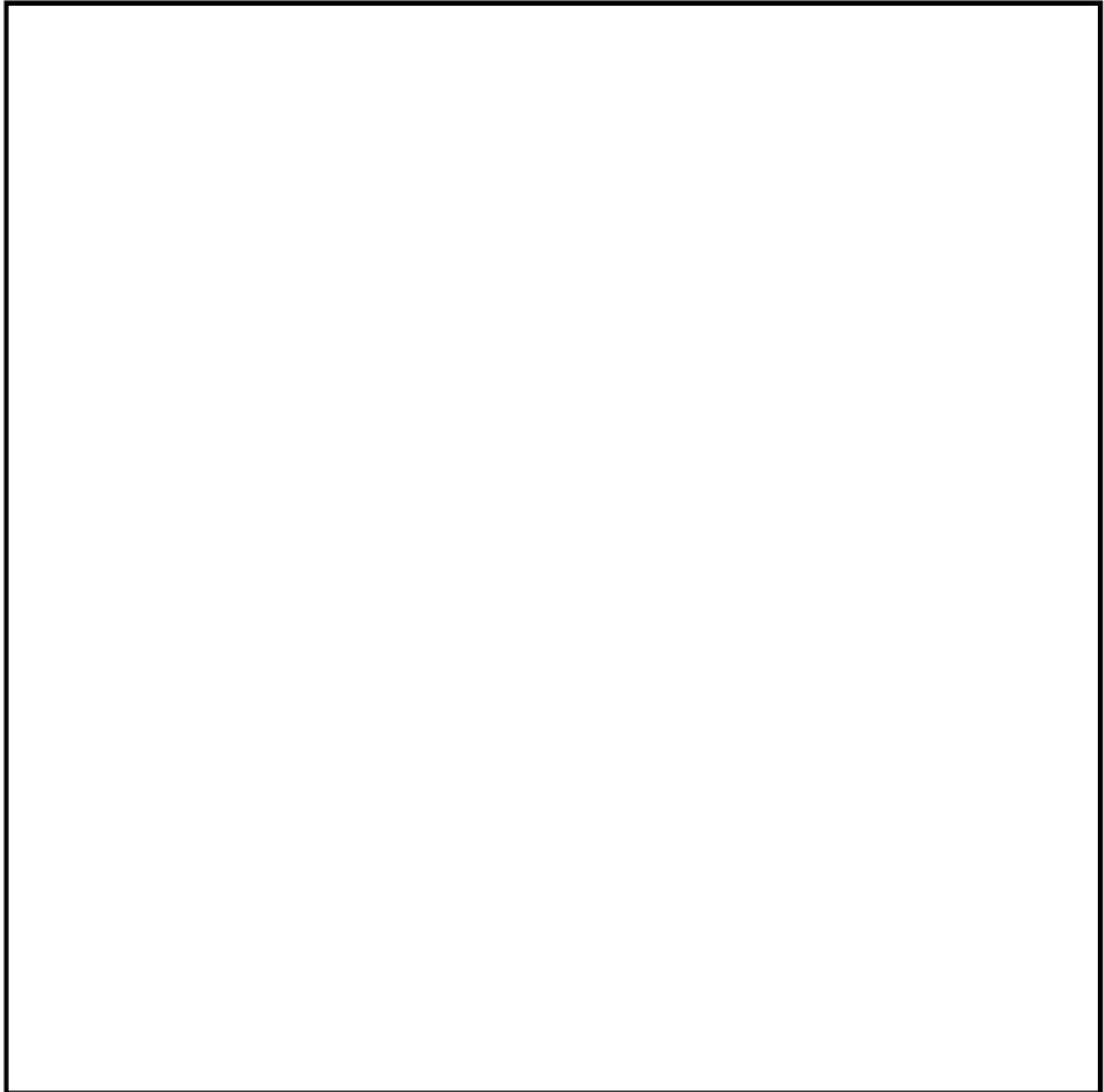
#### ② 解析モデル及び床応答曲線、解析手法

解析モデル及び床応答曲線、解析手法は工事計画認可申請（平成30年2月補正）と同様のものを用いて耐震評価を実施した。

原子炉系（蒸気部）主蒸気配管及び原子炉冷却材浄化系配管の入力地震動条件として、ペDESTAL（EL. 19.856m）の床応答曲線（東海第二発電所設置変更許可申請書（平成29年11月8日補正）及び工事計画認可申請書（平成29年11月24日補正）で記載される基準地震動SS（SS-D1, SS-11～14, SS-21～22, SS-31）の8波（1.5倍の裕度考慮）、弾性設計用地震動Sd等）による震度を用いる。

評価に用いた床応答曲線を図1～図4に示す。

プラント名 : 東海第二発電所  
構造物名 : ペDESTAL  
方向 : 鉛直方向  
波形名 : S<sub>s</sub>-D1、S<sub>s</sub>-11、S<sub>s</sub>-12、S<sub>s</sub>-13、S<sub>s</sub>-14、S<sub>s</sub>-21、S<sub>s</sub>-22 及び S<sub>s</sub>-31  
標高 : EL19.856m  
減衰 : 2.0 (%)



原子炉系（蒸気部）主蒸気配管の固有周期（1次モード）：0.118 [s] の震度：8.85 [G]

原子炉冷却材浄化系配管の固有周期（1次モード）：0.124 [s] の震度：8.85 [G]

図1 原子炉系（蒸気部）主蒸気配管及び原子炉冷却材浄化系配管設置場所の  
基準地震動 S<sub>s</sub> 床応答曲線（水平方向）



プラント名 : 東海第二発電所

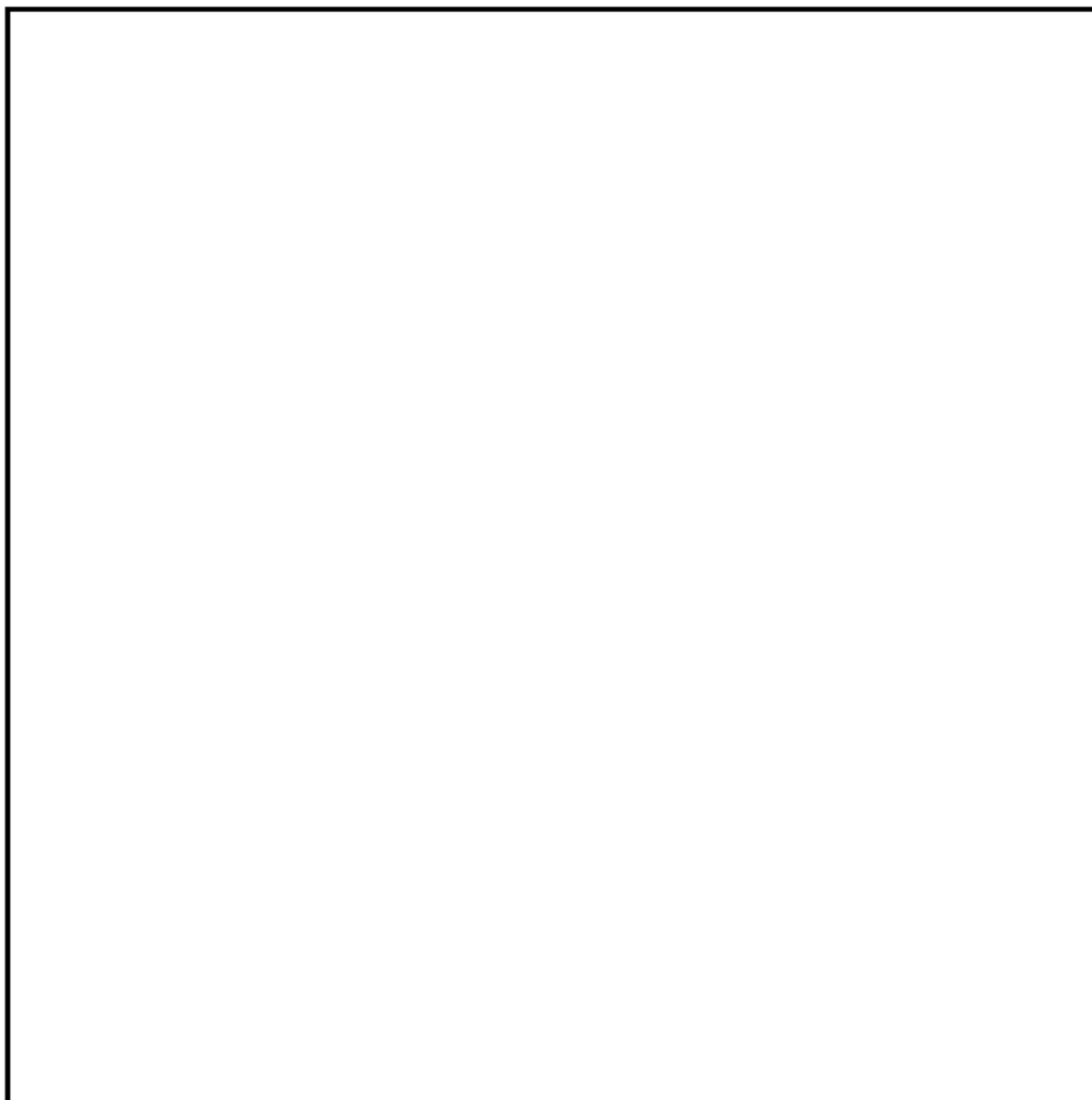
構造物名 : ペDESTAL

方向 : 水平方向

波形名 : S<sub>s</sub>-D1、S<sub>s</sub>-11、S<sub>s</sub>-12、S<sub>s</sub>-13、S<sub>s</sub>-14、S<sub>s</sub>-21、S<sub>s</sub>-22 及び S<sub>s</sub>-31

標高 : EL19.856m

減衰 : 2.0 (%)

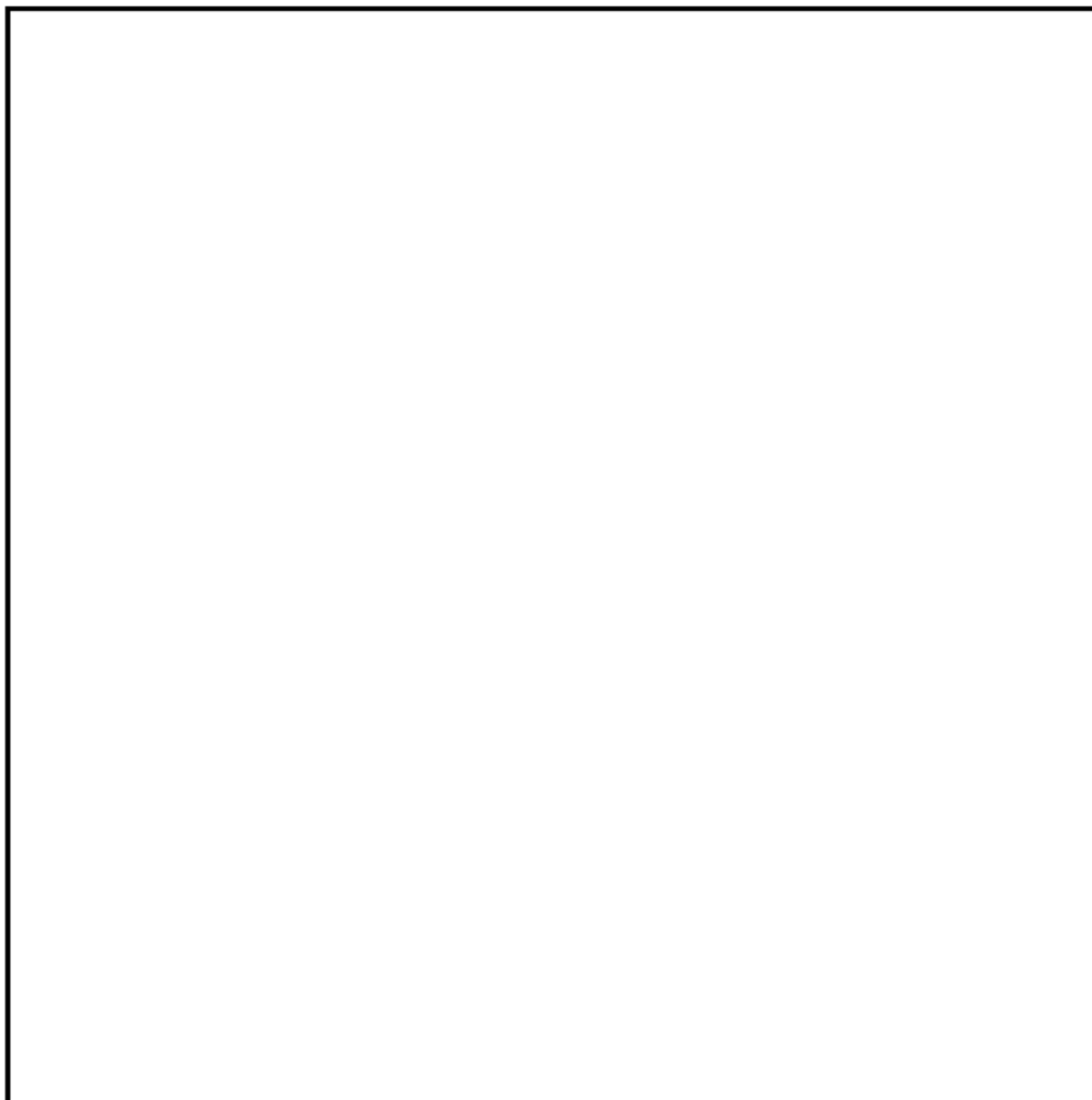


原子炉系（蒸気部）主蒸気配管の固有周期（1次モード）：0.118 [s] の震度：5.99 [G]

原子炉冷却材浄化系配管の固有周期（1次モード）：0.124 [s] の震度：6.02 [G]

図2 原子炉系（蒸気部）主蒸気配管及び原子炉冷却材浄化系配管設置場所の  
基準地震動 S<sub>s</sub> 床応答曲線（鉛直方向）

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



原子炉系（蒸気部）主蒸気配管の固有周期（1次モード）：0.118 [s] の震度：6.04 [G]  
原子炉冷却材浄化系配管の固有周期（1次モード）：0.124 [s] の震度：6.04 [G]

図3 原子炉系（蒸気部）主蒸気配管及び原子炉冷却材浄化系配管設置場所の  
基準地震動 S<sub>d</sub> 床応答曲線（水平方向）

プラント名 : 東海第二発電所

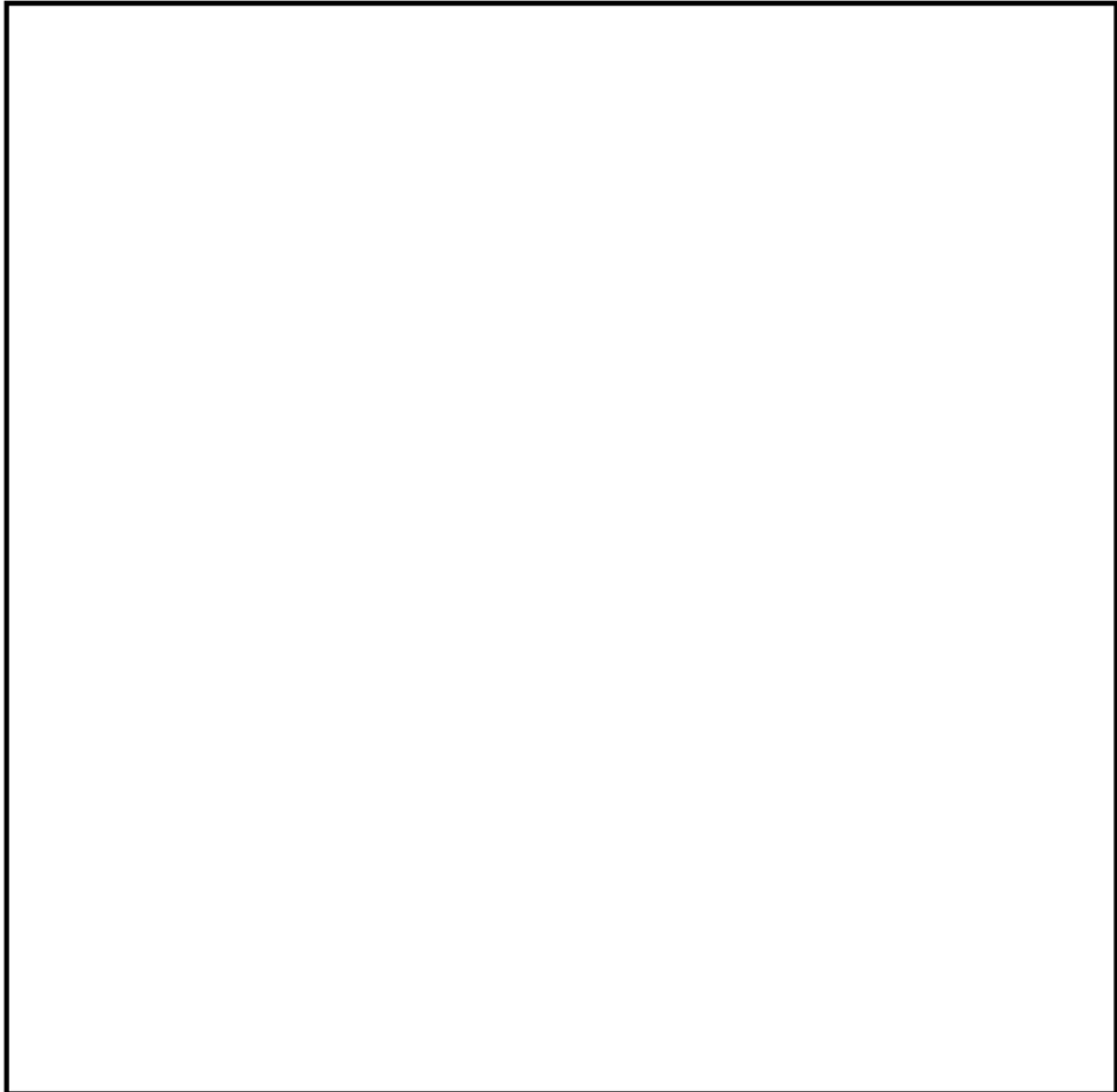
構造物名 : ペDESTAL

方向 : 鉛直方向

波形名 : S<sub>d</sub>-D1、S<sub>d</sub>-11、S<sub>d</sub>-12、S<sub>d</sub>-13、S<sub>d</sub>-14、S<sub>d</sub>-21、S<sub>d</sub>-22 及び S<sub>d</sub>-31

標高 : EL19.856m

減衰 : 2.0 (%)



原子炉系（蒸気部）主蒸気配管の固有周期（1次モード）：0.118 [s] の震度：3.20 [G]

原子炉冷却材浄化系配管の固有周期（1次モード）：0.124 [s] の震度：3.19 [G]

図4 原子炉系（蒸気部）主蒸気配管及び原子炉冷却材浄化系配管設置場所の  
基準地震動 S<sub>d</sub> 床応答曲線（鉛直方向）

### 3. 評価結果

#### (1) 原子炉系（蒸気部）主蒸気配管応力評価

原子炉系（蒸気部）主蒸気配管の腐食（流れ加速型腐食）による減肉を考慮した耐震安全性評価結果を表 1 に示す。

表 1 原子炉系（蒸気部）主蒸気配管の腐食による減肉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 (MPa)
						60 年時点肉厚		
原子炉系 (蒸気部) 主蒸気 配管	クラス 1	S	S <sub>s</sub>	IV <sub>A</sub> S	一次応力	評価結果は追而		
					一次+二次 応力			
			S <sub>d</sub>	III <sub>A</sub> S	一次応力			
					一次+二次 応力			

#### (2) 原子炉冷却材浄化系配管

原子炉冷却材浄化系配管の腐食（流れ加速型腐食）による減肉を考慮した耐震安全性評価結果を表 2 に示す。

運転開始後 60 年時点肉厚の減肉を想定し、地震時の発生応力、又は疲労累積係数を評価した結果許容値を下回ることから、耐震安全性評価上問題ない。

表 2 原子炉冷却材浄化系配管の腐食による減肉を考慮した耐震安全性評価結果

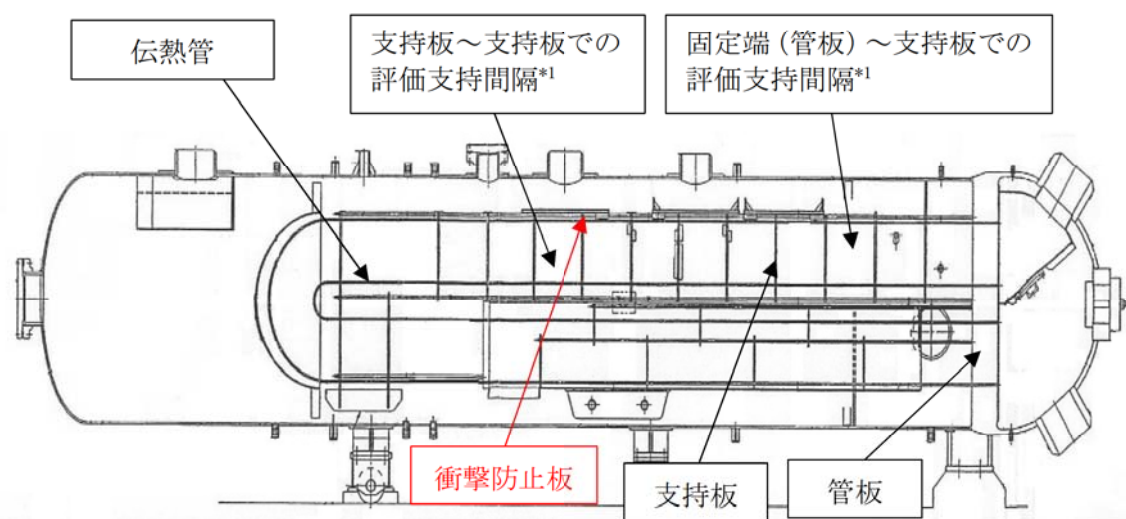
評価対象	区分	耐震重要度	評価地震力	許容応力状態	応力種別	発生応力 (MPa)		許容応力*2 (MPa)
						60 年時点肉厚*1		
原子炉冷却 材浄化系 配管	クラス 1	S	S <sub>s</sub>	IV <sub>A</sub> S	一次応力	333*3	414	
					一次+二次 応力	1015*1 (疲労累積係数： 0.5093*4,*6)	354 (疲労累積係数許 容値：1 以下)	
						828*6 (疲労累積係数： 0.4923*4,*6)	414 (疲労累積係数許 容値：1 以下)	
					S <sub>d</sub>	III <sub>A</sub> S	一次応力	228
			一次+二次 応力	563*3 (疲労累積係数： 0.0287*4,*6)			354 (疲労累積係数許 容値：1 以下)	
						503*6 (疲労累積係 数：0.0776*4,*6)	414 (疲労累積係数許 容値：1 以下)	

- \*1 : これまでの測定データに基づき想定した肉厚
- \*2 : 設計・建設規格付録図表 Part5 表 1 又は表 8, 表 9 より求まる値
- \*3 : 系統内の評価対象ライン中で最大の発生応力を示す
- \*4 : 工事計画認可申請（平成 30 年 2 月補正申請）にて、一律に定める等価繰返し回数として設定した等価繰返し回数（160 回）を用いて算出される疲労累積係数
- \*5 : JEAG4601 に基づく配管減肉を考慮した 60 年時点肉厚を保守的に 60 年時点に至る評価期間中全てに適用し、その肉厚における通常運転時の疲労累積係数は 0.4580 であり、地震動の疲労累積係数を足し合わせても許容値 1 を下回る。
- \*6 : クラス 1 配管のうち炭素鋼配管部における最大の発生応力を示す

### 3. 管支持板の腐食（流れ加速型腐食）（第3給水加熱器）に対する耐震安全性評価について

給水加熱器については、経年劣化事象として管支持板の腐食が想定され、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、設計上の施栓基準である「固定端（管板）から支持板」、「支持板から支持板」までのそれぞれの伝熱管の支持間隔\*1 喪失（支持長さ 2.5 スパン）を考慮し、伝熱管の耐震評価を実施した。第3給水加熱器の構造図を図1に示す。給水加熱器には、伝熱管、伝熱管を適切なスパンで支持するための支持板、管側と胴側を分離する管板及び伝熱管への加熱蒸気衝突に伴う損傷を防止するための衝撃防止板が設置されている。



\*1：スパンは、支持板2枚を1スパンとする。

図1 第3給水加熱器構造図

第3給水加熱器伝熱管の主な諸元を表1に示す。

表1 第3給水加熱器伝熱管の主な諸元

項目	記号	諸元
材質	—	SUS27TB*1
外径	Do	mm
内径	Di	
肉厚	t	
運転圧力（管側）（運転データより）	P1	MPa
運転圧力（胴側）（熱精算図より）	P2	MPa
最高使用温度	—	205 °C
支持間隔（固定（管板）～支持（管支持板））	L	m
支持間隔（支持（管支持板）～支持（管支持板））	L	m
許容引張応力 (S)	—	110.8 MPa*2

\*1：現行 JIS 規格呼称：SUS304TB

\*2：設計・建設規格（2005/2007）付録材料図表 Part5 表5の値を最高使用温度の値に線形補間したもの



評価に用いる床応答スペクトルを図2に示す。

プラント名 : 東海第二発電所  
構造物名 : タービン建屋  
方向 : 水平方向  
波形名 : Sd-D1、Sd-11、Sd-12、Sd-13、Sd-14、Sd-21、Sd-22 及び Sd-31  
(柔構造のため 1/2 Sd を評価に用いる)  
標高 : EL8.200m  
減衰 : 1.0 (%)

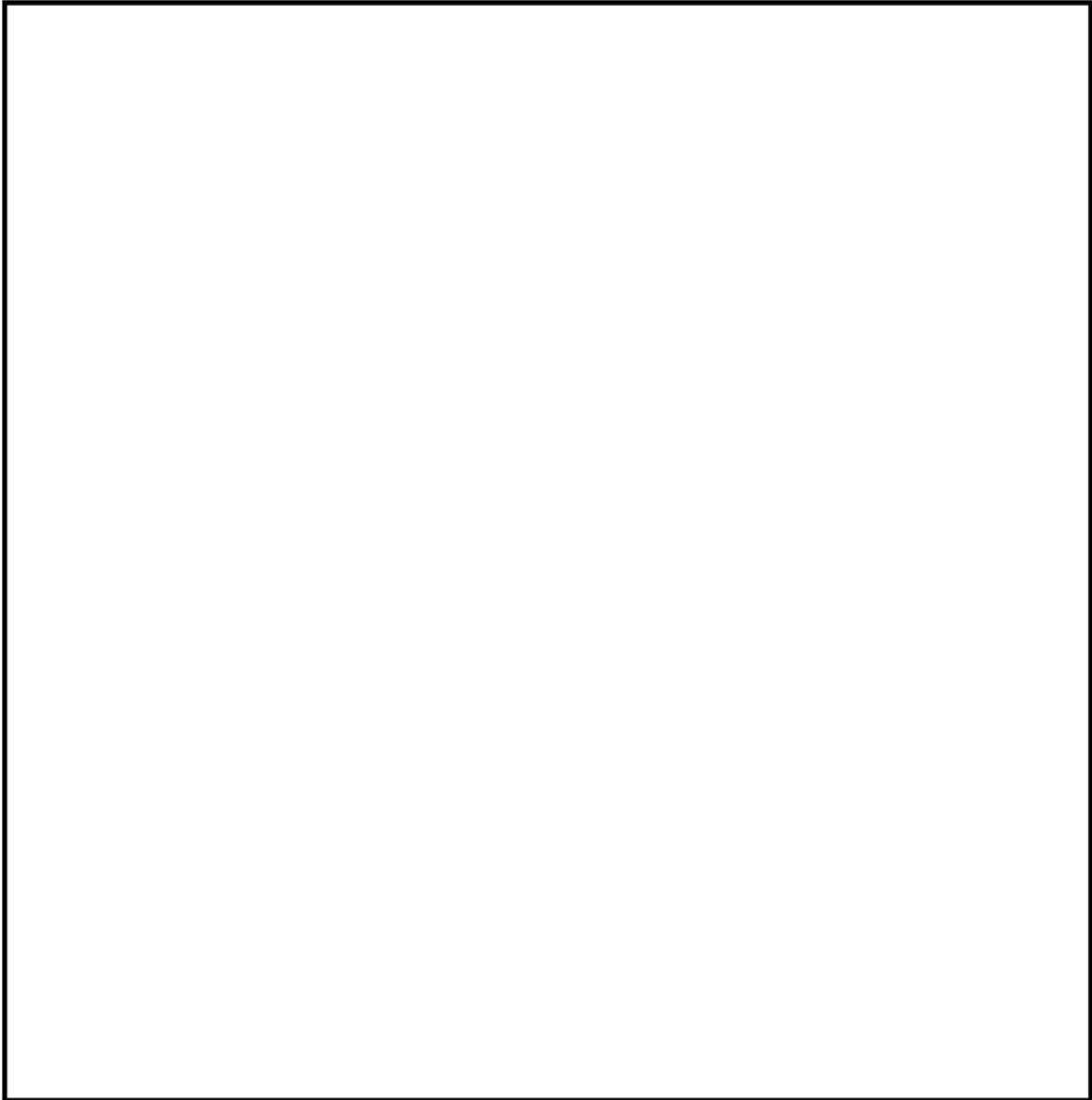


図2 第3給水加熱器設置場所(タービン建屋1階)の床応答スペクトル

片方の端部形状が固定端、支持端であっても計算手法については同様であるため、評価結果において発生応力の高い「支持板から支持板」の計算過程を以下に示す。

(1) 固有振動数の算出

① 伝熱管の断面二次モーメント：I[m<sup>4</sup>]を以下により求める。

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{\pi}{64} (D_o^4 - D_i^4) \\
 &= \frac{\pi}{64} ((\text{ })^4 - (\text{ })^4) \\
 &= \text{ } [m^4]
 \end{aligned}$$

D<sub>o</sub> : 伝熱管外形[m]

D<sub>i</sub> : 伝熱管内径[m]

② 伝熱管の単位長さ当たりの重量：m[kg/m]を以下により求める。

$$\begin{aligned}
 m &= \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) \times \gamma \\
 &= \frac{\pi}{4} ((\text{ })^2 - (\text{ })^2) \times 8030 \\
 &= 0.375882 [kg/m]
 \end{aligned}$$

γ : 伝熱管比重[kg/m<sup>3</sup>]

(機械工学便覧 第1章 工業材料一般(材料学)より)

③ チューブの相当重量[kg/m] : m<sub>e</sub>を以下より求める。

$$m_e = m_{e1} + m_{e2} + m_{e3}$$

m<sub>e1</sub> : チューブ内付加重量[kg/m]

m<sub>e2</sub> : チューブ外付加重量[kg/m]

m<sub>e3</sub> : チューブの単位当たりの重量[kg/m]

$$m_{e1} [lb/ft] = 0.00545 \times \rho_i [lb/ft^3] \times D_i^2 [in]$$

(「STANDARDS OF THE TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION (TEMA) NINTH EDITION V-7.1」より)

$$\begin{aligned}
 m_{e1} [kg/m] &= 0.00545 \times \rho_i [lb/ft^3] \times D_i^2 [in] \times \frac{0.453592}{0.3048} \\
 &= 0.00545 \times \text{ } [lb/ft^3] \times (\text{ })^2 [in] \times \frac{0.453592}{0.3048} \\
 &= \text{ } [kg/m]
 \end{aligned}$$

ρ<sub>i</sub> : 内部流体重量[lb/ft<sup>3</sup>]

(内部流体の温度及び圧力より比体積を算出)

$$\begin{aligned}
me2[\text{kg/m}] &= 0.00545 \times \rho_o[\text{lb/ft}^3] \times Do^2[\text{in}] \times \frac{0.453592}{0.3048} \\
&= 0.00545 \times \boxed{\phantom{000}} [\text{lb/ft}^3] \times (\boxed{\phantom{000}})^2[\text{in}] \times \frac{0.453592}{0.3048} \\
&= \boxed{\phantom{000}} [\text{kg/m}]
\end{aligned}$$

$\rho_o$  : 外部流体重量[ $\text{lb/ft}^3$ ]

(外部流体の圧力から飽和蒸気の比体積を算出)

$$me3 = m = \boxed{\phantom{000}} [\text{kg/m}]$$

したがって、チューブの相当重量 :  $me$  は

$$\begin{aligned}
me &= me1 + me2 + me3 \\
&= \boxed{\phantom{000}} + \boxed{\phantom{000}} + \boxed{\phantom{000}} \\
&= \boxed{\phantom{000}} [\text{kg/m}]
\end{aligned}$$

④ 伝熱管の固有振動数 (1次) :  $f_n[\text{Hz}]$  を以下により求める。

$$\begin{aligned}
f_n &= \frac{\lambda^2}{2\pi L^2} \times \sqrt{\frac{E \times 10^6 \times I}{me}} \quad (\text{機械工学便覧 A3 編 力学・機械力学より}) \\
&= \frac{\pi^2}{2 \times \pi \times (\boxed{\phantom{000}})^2} \times \sqrt{\frac{1.824 \times 10^5 \times 10^6 \times \boxed{\phantom{000}}}{\boxed{\phantom{000}}}} \\
&= \boxed{\phantom{000}} [\text{Hz}]
\end{aligned}$$

$\lambda$  : 振動係数

(機械工学便覧 A3 編 力学・機械力学 表 19 より引用)

$L$  : 管支持板スパン[m]

$E$  : 伝熱管縦弾性係数

(設計・建設規格 (2005/2007) 第 I 編 付録図表 Part6 I-付録図表-99 より)

よって固有周期 (1次) [s] :  $T$  は以下となる。

$$\begin{aligned}
T &= \frac{1}{f_n} \\
&= \frac{1}{\boxed{\phantom{000}}} = \boxed{\phantom{000}} [\text{s}]
\end{aligned}$$

(2) 発生応力の算出

① チューブの断面係数 :  $Z[\text{m}^3]$  を以下より求める。

$$\begin{aligned}
Z &= \frac{\pi (Do^4 - Di^4)}{32 Do} \\
&= \frac{\pi}{32} \times \frac{((\boxed{\phantom{000}})^4 - (\boxed{\phantom{000}})^4)}{\boxed{\phantom{000}}} = \boxed{\phantom{000}} [\text{m}^3]
\end{aligned}$$

- ② 自重による曲げモーメント：Ma[N・m]を求めるにあたって、作用する荷重は、伝熱管そのものについては自重であることから等分布荷重であり、また、伝熱管内外の流体（給水及びドレン）は、凝縮熱伝達であり均等に分布されているものと考えられることから、曲げモーメントの考え方として、梁モデルの分布荷重を適用することとした。

なお、加熱蒸気及びドレン入口部には、設計上蒸気流れがチューブ定点で集中して衝突することがないように衝突防止板が設置されている。

$$Ma = \frac{me \times 9.80665 \times L^2}{8} \quad (\text{機械設計便覧 新版 第6章 6-1節 はり 表6-2より})$$

$$= \frac{(\quad) \times 9.80665 \times (\quad)^2}{8} = \quad [N \cdot m]$$

L：管支持板スパン[m]

- ③ ②と同様に、地震時の曲げモーメント：Mb [N・m]を以下より求める。

$$Mb = \frac{me \times 9.80665 \times CH \times L^2}{8} \quad (\text{機械設計便覧 新版 第6章 6-1節 はり 表6-2より})$$

$$= \frac{(\quad) \times 9.80665 \times (1.485) \times (\quad)^2}{8}$$

$$= \quad [N \cdot m]$$

CH：加速度（1次）（設計用応答スペクトルから引用）

- ④ 自重+地震による発生応力：σa[MPa]を以下より求める。

$$\sigma_a = \frac{(Mb + Ma)}{Z}$$

$$= \frac{(\quad) + (\quad)}{1.6414 \times 10^{-7}}$$

$$= \quad [N/m^2] = \quad [MPa]$$

- ⑤ 内圧による応力：σp[MPa]を以下より求める。

$$\sigma_P = \frac{\max(P1, P2) \times Di}{4t} \quad (\text{压力容器 (野原石松 著) 第6章 6.1.1 薄膜応力 (6.1式) より})$$

$$= \frac{\max(\quad, \quad) \times 0.0139}{4 \times \quad} = \quad [MPa]$$

P1：運転圧力（管側）[MPa]

P2：運転圧力（胴側）[MPa]

T：肉厚 [m]

⑥ 伝熱管に作用する発生応力： $\sigma$  [MPa]は以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_a + \sigma_P \\ &= \boxed{\phantom{00}} + \boxed{\phantom{00}} = \boxed{\phantom{00}} \rightarrow 90 \text{ [MPa]}\end{aligned}$$

(3) 許容応力の算出

伝熱管の許容応力： $S_a$  [MPa]は、JEAG4601-1987の表6.3.3-8（Bクラス）に基づき以下のとおりとなる。

$$S_a = \min(S_y, 1.2S) = \min(143, 1.2 \times 110.8) = 132.96 \rightarrow 132 \text{ [MPa]}$$

(4) 評価結果

算出結果より、発生応力は許容応力を下回ることから、管支持板の腐食は耐震安全性評価上問題ない。

評価部位	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
第3給水加熱器伝熱管 (支持板から支持板)	90	132

## 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・経年劣化事象の抽出

地震時に動的機能維持が要求される機器（弁、ポンプ、ファン等）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も動的機能が維持されることを確認する。

動的機能の維持が要求される機器は、工事計画認可申請（平成 30 年 2 月補正申請）で対象に挙げている機器と同様である。そのうち、対象機器において想定される耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象（弁の場合は接続される配管の経年劣化を含む）を考慮した状態において動的機能維持評価を実施する必要があるかについて、以下のとおり検討した。

## a. 弁

想定される経年劣化事象として低サイクル疲労及び腐食（流れ加速型腐食）がある。低サイクル疲労については、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労累積係数（接液部は環境疲労を考慮した疲労累積係数）及び基準地震動  $S_s$  を考慮した疲労累積係数の合計が許容値の 1 を下回るため、低サイクル疲労割れが発生しないことを確認した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。

動的機能維持評価対象弁の選定フローを図 1 に示す。

## b. ポンプ、タービン設備、空調設備、機械設備等

想定される経年劣化事象として残留熱除去系海水系ポンプ、非常用ガス再循環系排風機、原子炉隔離時冷却系ポンプ駆動用タービン、非常用ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル機関等（以下、「機器等」という）の基礎ボルトの腐食（全面腐食）が想定されるが、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。

機械設備である非常用ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル機関は動的機能維持が必要な機器であるが、付属設備である空気冷却器には伝熱管の腐食（流れ加速型腐食）が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されている。

しかしながら、空気冷却器は動的機能を有する機器ではなく、また、別紙 6 に示すとおり流れ加速型腐食を考慮した耐震安全性評価上問題ないと評価されていることから、本体であるディーゼル機関の動的機能維持に影響を与えるものではない。

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。

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ないと考えられ、地震時の動的機能についても維持されると判断する。

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を確認すべき対象を以下のとおり選定した。

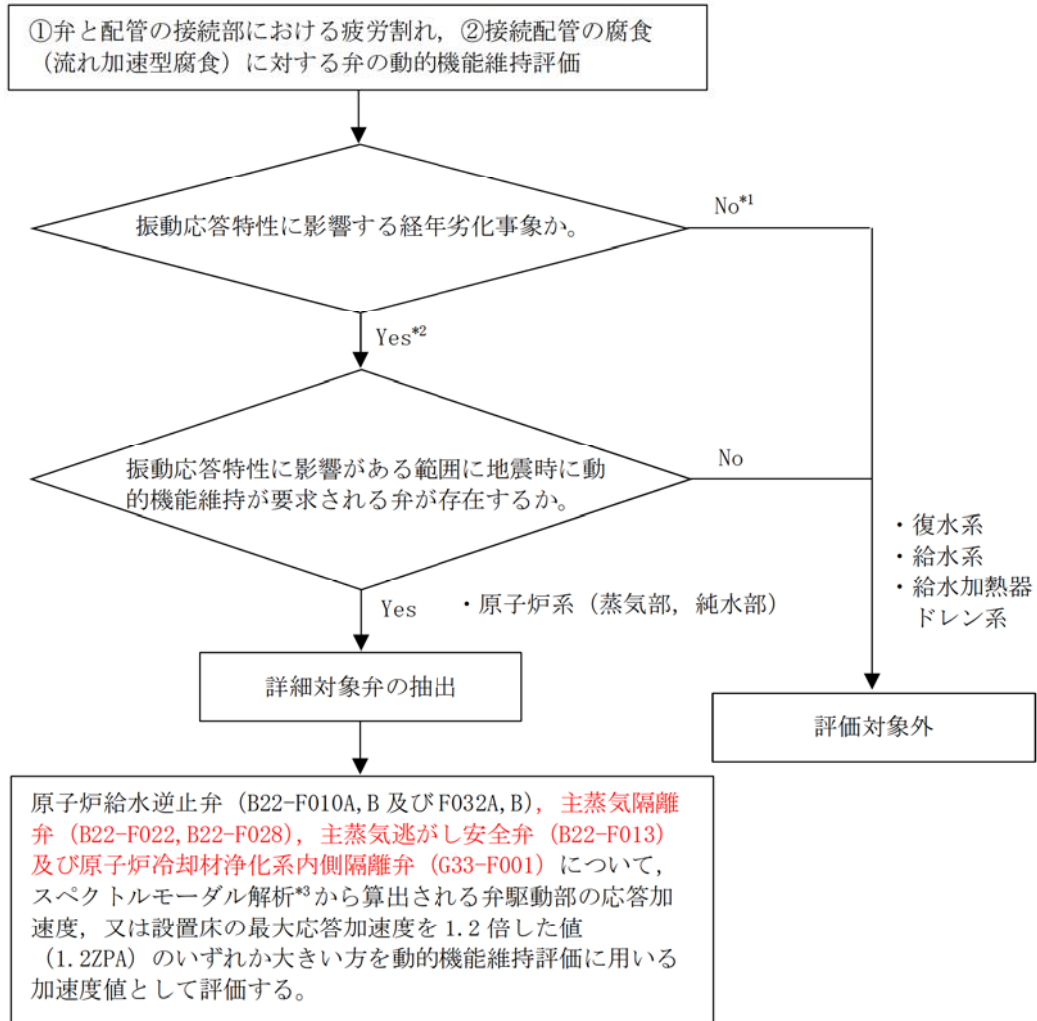


図1 動的機能維持評価対象弁の選定フロー

\*1: 疲労割れが生じた場合は影響を与える可能性があるが、疲労累積係数が1以下であることを確認しているため、割れは発生せず振動応答に影響を与える経年劣化事象ではない。

\*2: 弁そのものの経年劣化事象ではないが、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。

\*3: 振動数領域として 50Hz まで考慮した地震応答解析により算定する。

## 2. 動的機能維持評価の結果

原子炉給水逆止弁に接続する原子炉系（純水部）配管の腐食（流れ加速型腐食）に係る減肉管理部位を必要最小肉厚まで一様に減肉させた図 1～2 に示す解析モデル，並びに主蒸気隔離弁，主蒸気逃がし安全弁に接続する原子炉系（蒸気部）配管\*1 及び原子炉冷却材浄化系内側隔離弁に接続する原子炉冷却材浄化系配管\*2 に 60 年時点肉厚まで一様に減肉させた図 3～7 に示す解析モデルを用いて，計算機コード HISAP により FRS（基準地震動 S<sub>s</sub>8 波包絡）によるスペクトルモーダル解析を実施し，対象弁における応答加速度を算出した。

また，評価結果について劣化状況評価値（減肉考慮あり）が工事計画認可申請値（平成 30 年 2 月補正申請，減肉考慮なし）を下回る場合は評価結果の検討を実施した。

これにより，地震時の応答加速度が機能確認済加速度を下回ることを確認した。評価結果を表 1～3 に示す。

なお，原子炉冷却材浄化系内側隔離弁の応答加速度について，配管減肉を想定した劣化状況評価値が工認値を下回る結果を示していることから，詳細な算出根拠をそれぞれ添付番号 1 に整理した。

\*1：工事計画認可申請（H30 年 2 月補正申請）における動的機能維持評価時の応答加速度が大きい MS-B ラインを減肉後の評価対象ラインに選定して評価を実施

\*2：耐震評価モデルに炭素鋼配管部とステンレス鋼配管部が存在することから，炭素鋼配管部のみ配管減肉を考慮した

表 1 原子炉給水逆止弁の動的機能維持評価結果

地震力		振動数 (Hz)	種別	逆止弁（弁箱材料：炭素鋼，内部流体：純水）			
				原子炉系			
				原子炉給水逆止弁 (B22-F010A, B)		原子炉給水逆止弁 (B22-F032A, B)	
				応答加速度 (×9.8m/s <sup>2</sup> )	機能確認済 加速度 (×9.8m/s <sup>2</sup> )	応答加速度 (×9.8m/s <sup>2</sup> )	機能確認済 加速度 (×9.8m/s <sup>2</sup> )
S <sub>s</sub>	水平	50	工認値	4.80*1	6.0	3.88*1	6.0
			劣化状況 評価値	4.90*1	6.0	3.88*1	6.0
	鉛直		工認値	3.17*1	6.0	1.31*1	6.0
			劣化状況 評価値	3.27*1	6.0	1.31*1	6.0

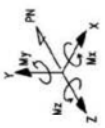
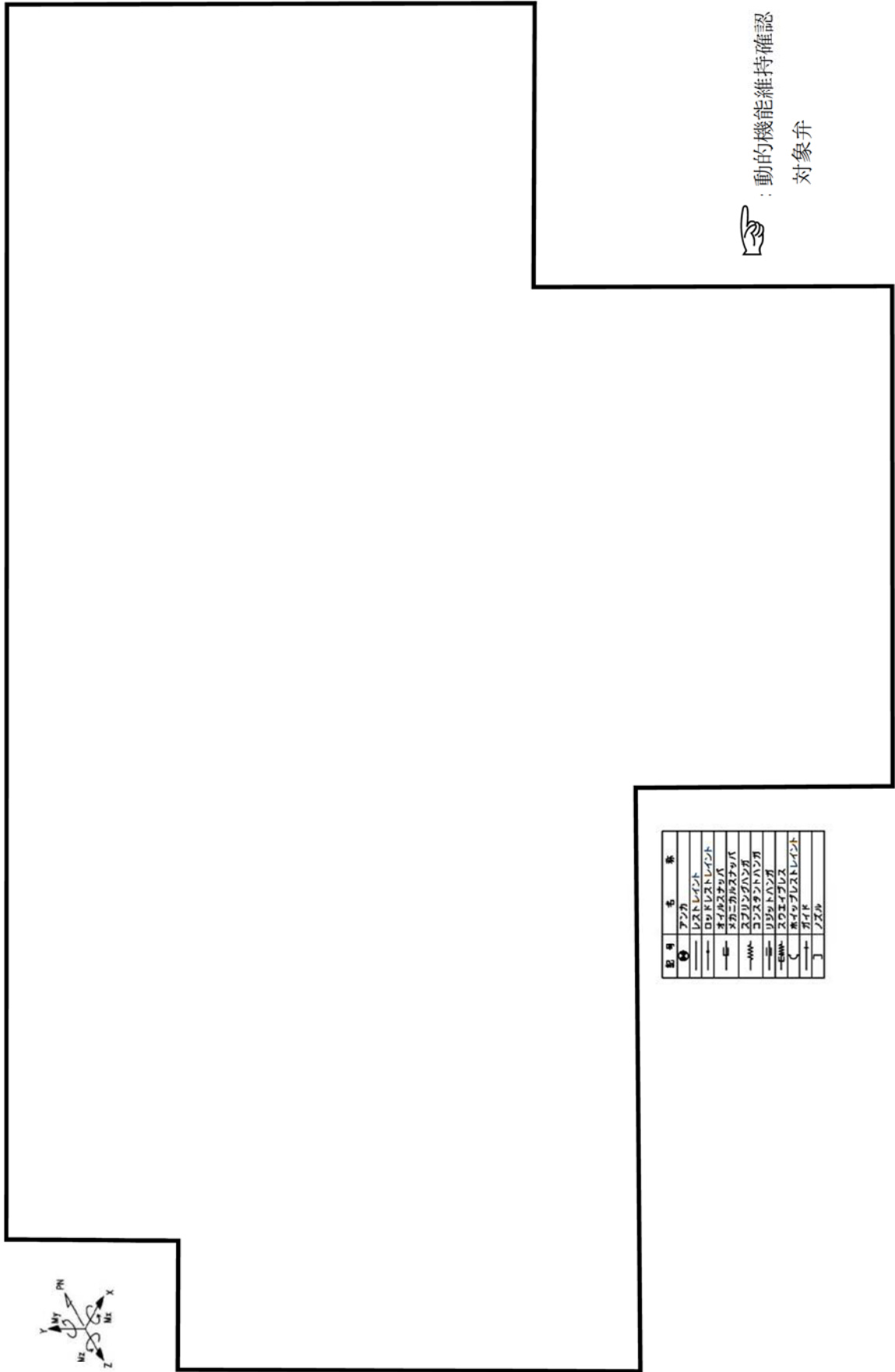
\*1：A, B 系の最大値のうち A 系を示す

表 2 主蒸気隔離弁，主蒸気逃がし安全弁の動的機能維持評価結果

地震力	振動数 (Hz)	種別	原子炉系				
			主蒸気隔離弁 (B22-F022B)	主蒸気隔離弁 (B22-F028B)	主蒸気逃がし安全弁 (B22-F013)	主蒸気逃がし安全弁 (弁箱材質：炭素 鋼鑄鋼，内部流体：蒸気)	
S <sub>8</sub>	50	工認値	応答加速度 ( $\times 9.8\text{m/s}^2$ )	応答加速度 ( $\times 9.8\text{m/s}^2$ )	応答加速度*1 ( $\times 9.8\text{m/s}^2$ )	機能確認済 加速度 ( $\times 9.8\text{m/s}^2$ )	
			機能確認済 加速度 ( $\times 9.8\text{m/s}^2$ )	機能確認済 加速度 ( $\times 9.8\text{m/s}^2$ )	機能確認済 加速度 ( $\times 9.8\text{m/s}^2$ )	機能確認済 加速度 ( $\times 9.8\text{m/s}^2$ )	
		劣化状況評価値	追而とさせて頂きます。				

表 3 原子炉冷却材浄化系原子炉格納容器内側隔離弁の動的機能維持評価結果

地震力		振動数 (Hz)	種別	仕切弁（弁箱材質：ステンレス鋼鋳鋼，内部流体：純水）	
				原子炉冷却材浄化系	
				原子炉冷却材浄化系内側隔離弁 (G33-F001)	
				応答加速度 ( $\times 9.8\text{m/s}^2$ )	機能確認済 加速度 ( $\times 9.8\text{m/s}^2$ )
S <sub>s</sub>	水平	50	工認値	4.80	6.0
			劣化状況評価値	4.70	6.0
	鉛直		工認値	1.43	6.0
			劣化状況評価値	1.33	6.0



記号	名称
○	ファン
—	パイプ
—	バルブ
—	ポンプ
—	ヒータ
—	冷却器
—	蒸気発生器
—	凝縮器
—	圧力調整弁
—	安全弁
—	流量計
—	温度計
—	圧力計
—	水位計
—	その他


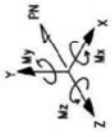
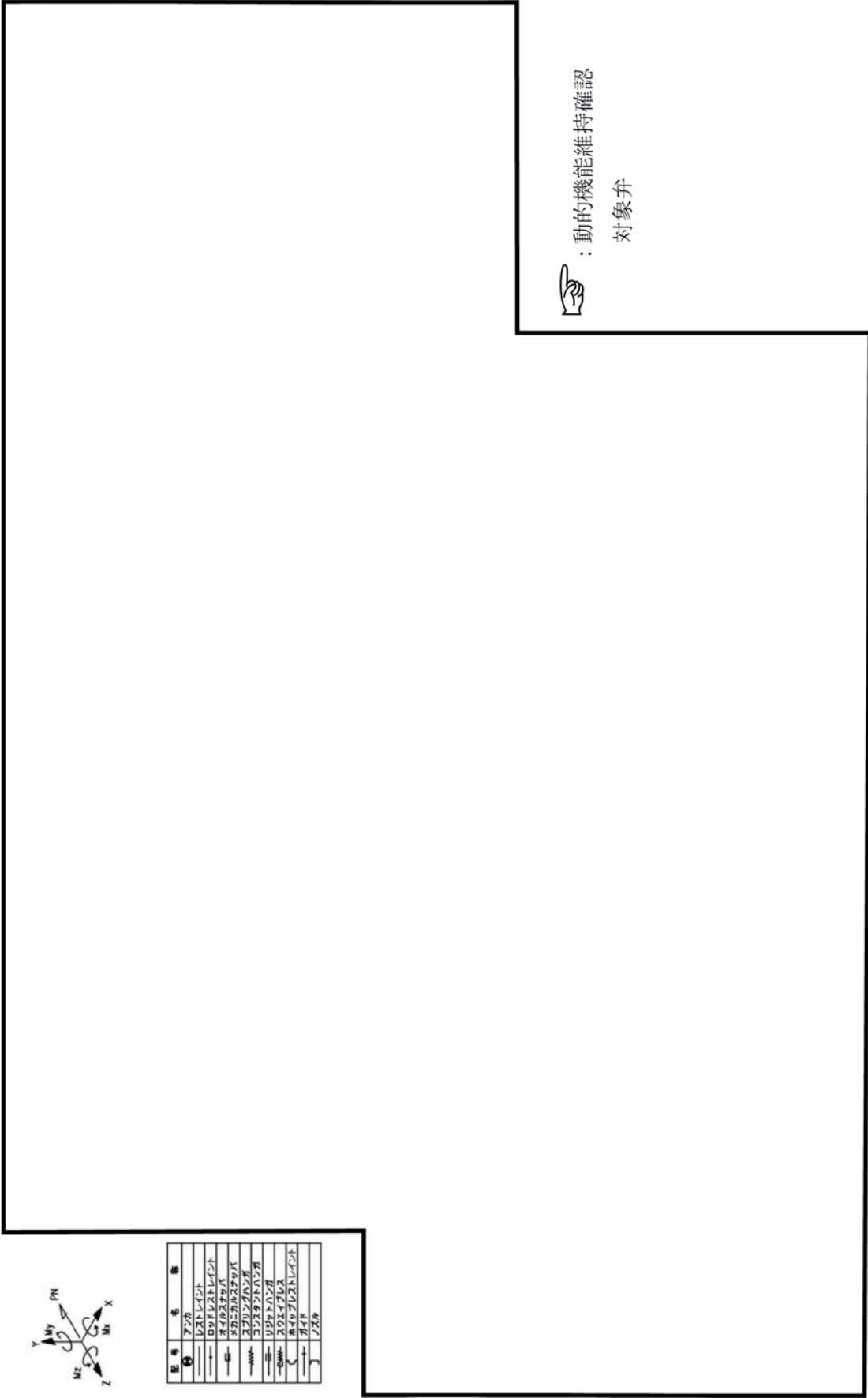

 : 動的機能維持確認  
 対象弁

図 1 原子炉系（純水部）A 系配管（解析モデル）



図号	名称
①	ファン
②	レストレイト
③	ロッドレストレイト
④	フィンスタブ
⑤	スプリング
⑥	スプリング
⑦	スプリング
⑧	スプリング
⑨	スプリング
⑩	スプリング
⑪	スプリング
⑫	スプリング
⑬	スプリング
⑭	スプリング
⑮	スプリング
⑯	スプリング
⑰	スプリング
⑱	スプリング
⑲	スプリング
⑳	スプリング
㉑	スプリング
㉒	スプリング
㉓	スプリング
㉔	スプリング
㉕	スプリング
㉖	スプリング
㉗	スプリング
㉘	スプリング
㉙	スプリング
㉚	スプリング
㉛	スプリング
㉜	スプリング
㉝	スプリング
㉞	スプリング
㉟	スプリング
㊱	スプリング
㊲	スプリング
㊳	スプリング
㊴	スプリング
㊵	スプリング
㊶	スプリング
㊷	スプリング
㊸	スプリング
㊹	スプリング
㊺	スプリング
㊻	スプリング
㊼	スプリング
㊽	スプリング
㊾	スプリング
㊿	スプリング


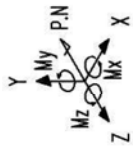

 : 動的機能維持確認  
 対象弁

図2 原子炉系（純水部）B系配管（解析モデル）





記号	記号	名称	説明
⊙	AN	アンカ	AN
—	RE	レストレイント	RE
—	RO	ロッドレスレイント	RO
—	SNO	オイルスナッチ	SNO
—	SNM	スナッチ	SNM
—	SH	スプリングハンガ	SH
—	CT	コンタクトハンガ	CT
—	RI	リフトハンガ	RI
—	SS	スライダ	SS
—	PW	パイプレストレイント	PW
—	PI	パイプ	PI
—	ISB	ISB	ISB

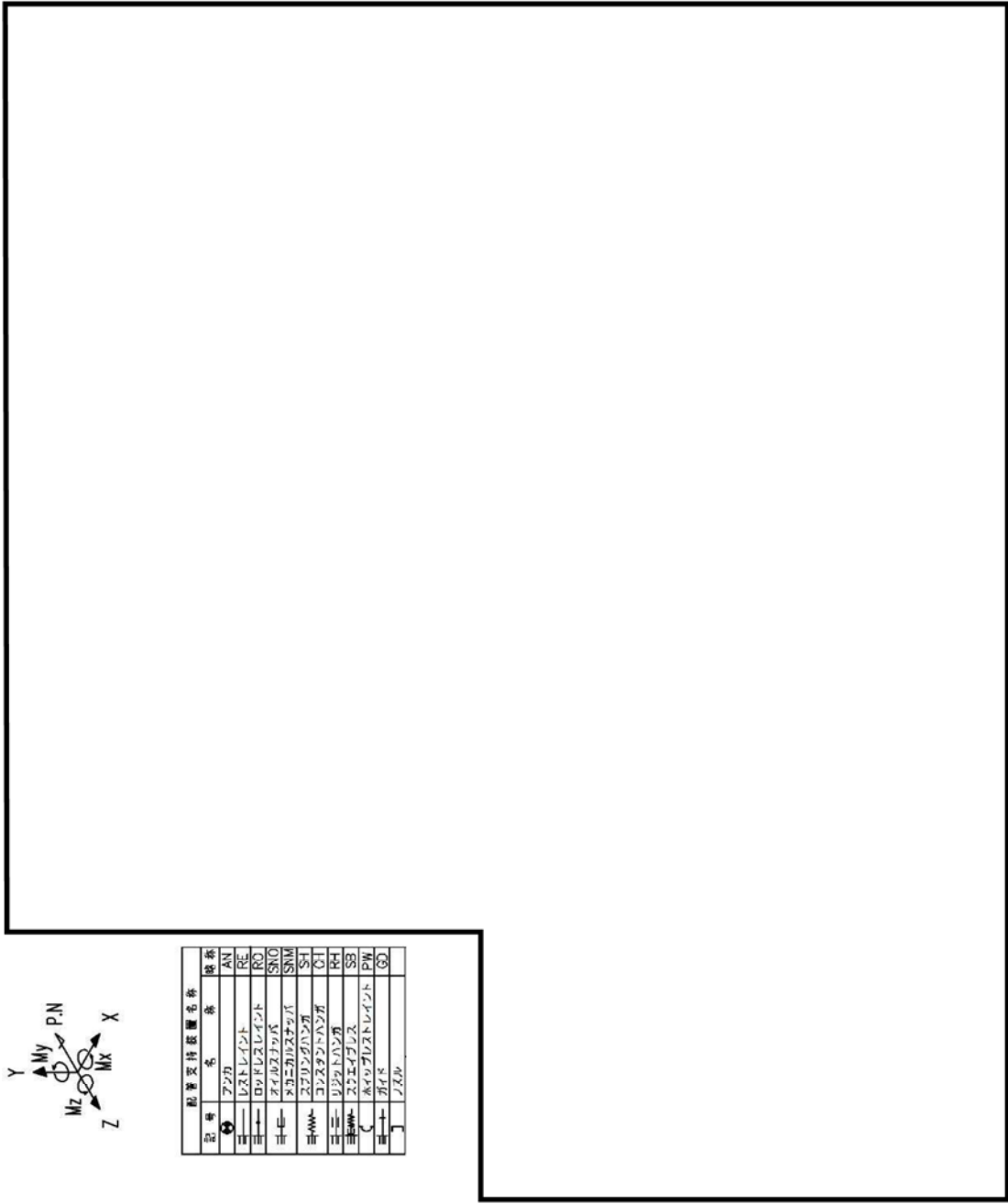
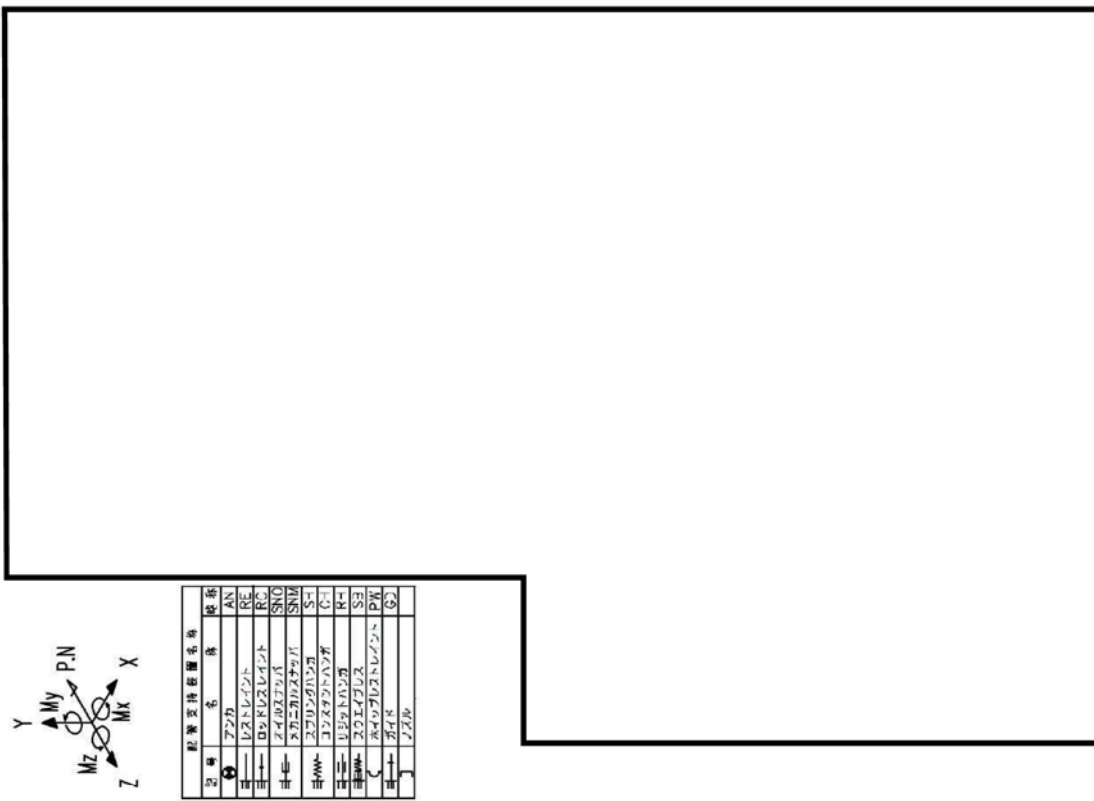
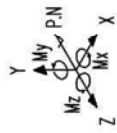


図3 原子炉系 (蒸気部) 主蒸気配管 (1/8) (解析モデル)



記号	記号名	単位	係数
$\sigma$	圧力		AN
$\tau$	せん断力		RE
$\sigma_x$	X方向の正応力		RX
$\sigma_y$	Y方向の正応力		RN
$\sigma_z$	Z方向の正応力		RZ
$\tau_{xy}$	X-Y面せん断力		SX
$\tau_{yz}$	Y-Z面せん断力		SZ
$\tau_{zx}$	Z-X面せん断力		SX
$M_x$	X方向のモーメント		CX
$M_y$	Y方向のモーメント		CY
$M_z$	Z方向のモーメント		CZ
$P$	点荷重		DN
$F$	面力		
$T$	せん断力		

図4 原子炉系(蒸気部)主蒸気配管(2/8)(解析モデル)



記号	記号	記号	記号	記号
●	AN	AN	AN	AN
○	RE	RE	RE	RE
□	RO	RO	RO	RO
△	SKO	SKO	SKO	SKO
◇	SKN	SKN	SKN	SKN
▽	SKT	SKT	SKT	SKT
◇	SKM	SKM	SKM	SKM
▽	SKL	SKL	SKL	SKL
◇	SKR	SKR	SKR	SKR
▽	SKB	SKB	SKB	SKB
◇	SKC	SKC	SKC	SKC
▽	SKD	SKD	SKD	SKD
◇	SKE	SKE	SKE	SKE
▽	SKF	SKF	SKF	SKF
◇	SKG	SKG	SKG	SKG
▽	SKH	SKH	SKH	SKH
◇	SKI	SKI	SKI	SKI
▽	SKJ	SKJ	SKJ	SKJ
◇	SKK	SKK	SKK	SKK
▽	SKL	SKL	SKL	SKL
◇	SKM	SKM	SKM	SKM
▽	SKN	SKN	SKN	SKN
◇	SKO	SKO	SKO	SKO
▽	SKP	SKP	SKP	SKP
◇	SKQ	SKQ	SKQ	SKQ
▽	SKR	SKR	SKR	SKR
◇	SKS	SKS	SKS	SKS
▽	SKT	SKT	SKT	SKT
◇	SKU	SKU	SKU	SKU
▽	SKV	SKV	SKV	SKV
◇	SKW	SKW	SKW	SKW
▽	SKX	SKX	SKX	SKX
◇	SKY	SKY	SKY	SKY
▽	SKZ	SKZ	SKZ	SKZ

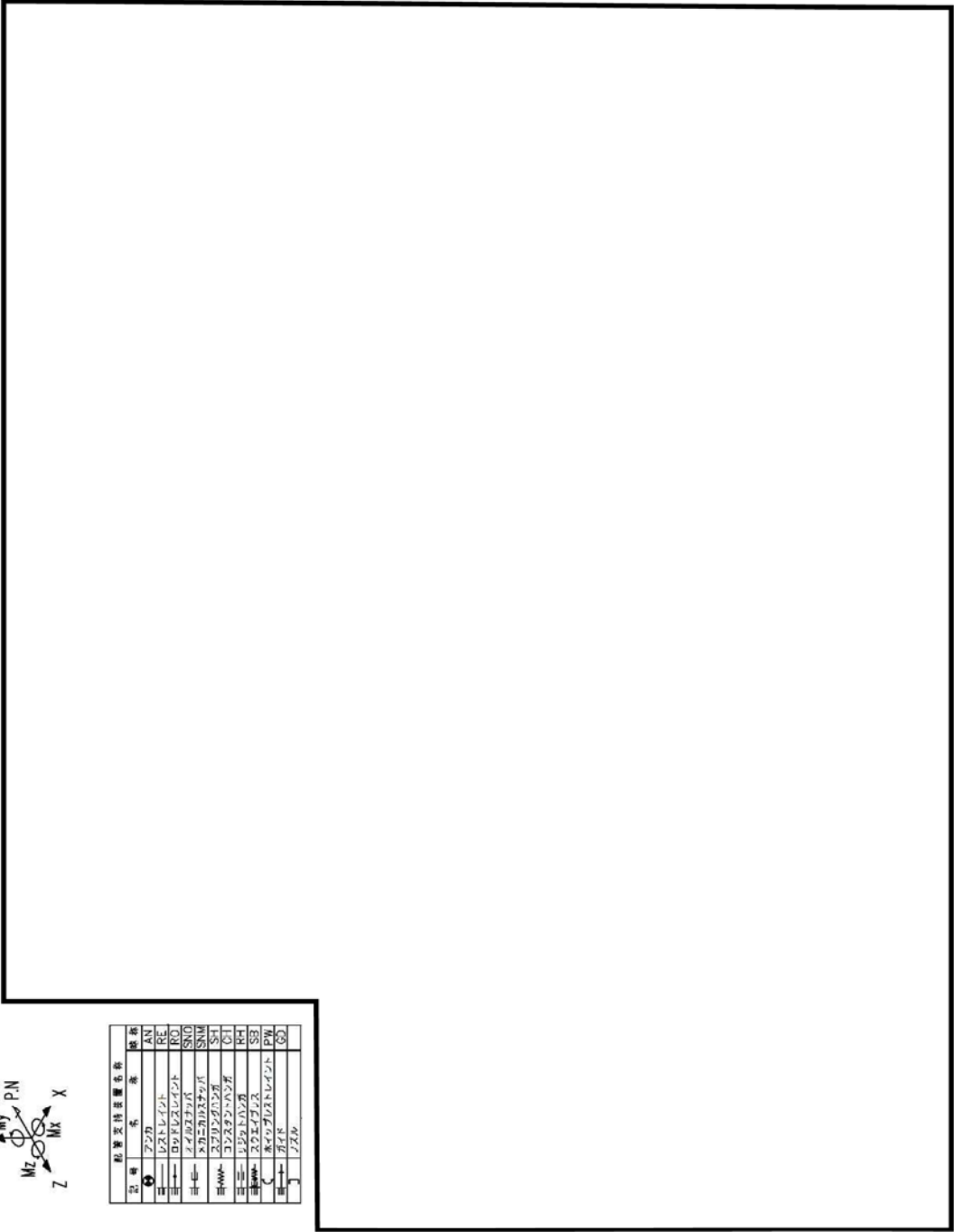
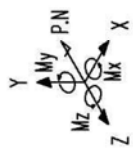


図5 原子炉系（蒸気部）主蒸気配管（3/8）（解析モデル）



記号	記号	名称	系統
●	アンカ	AN	
≡	レストレイント	RE	
≡	ロッドレストレイント	RO	
≡	ライブラリ	LIB	
≡	ライブラリサポ	LIBS	
≡	スプリング	SP	
≡	コンタクト	CT	
≡	レストリク	RT	
≡	スウェー	SW	
≡	レストレイント	PW	
≡	ジョイント	JO	
≡	ジョイント	JO	

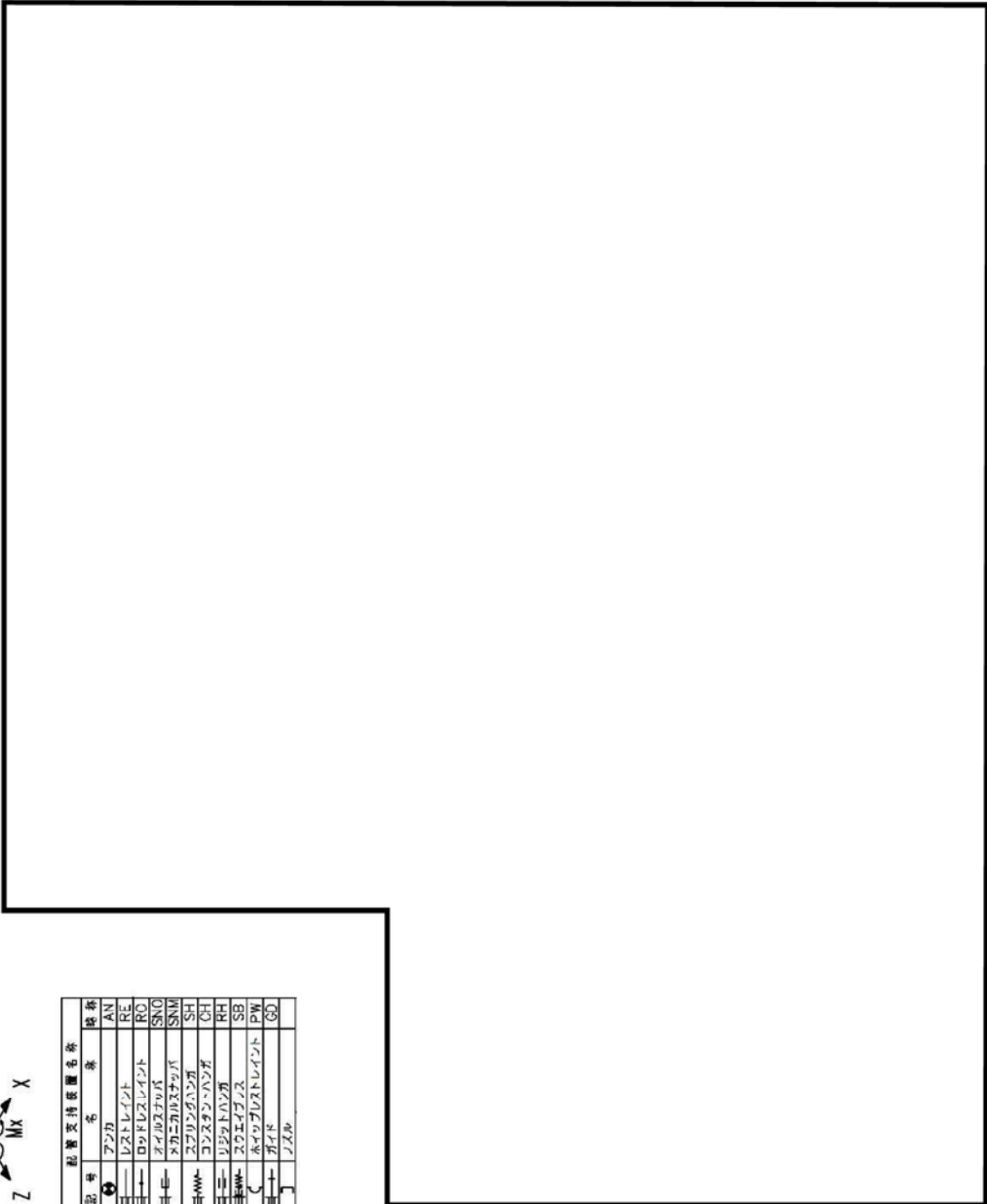
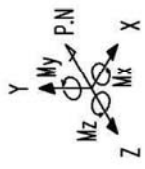
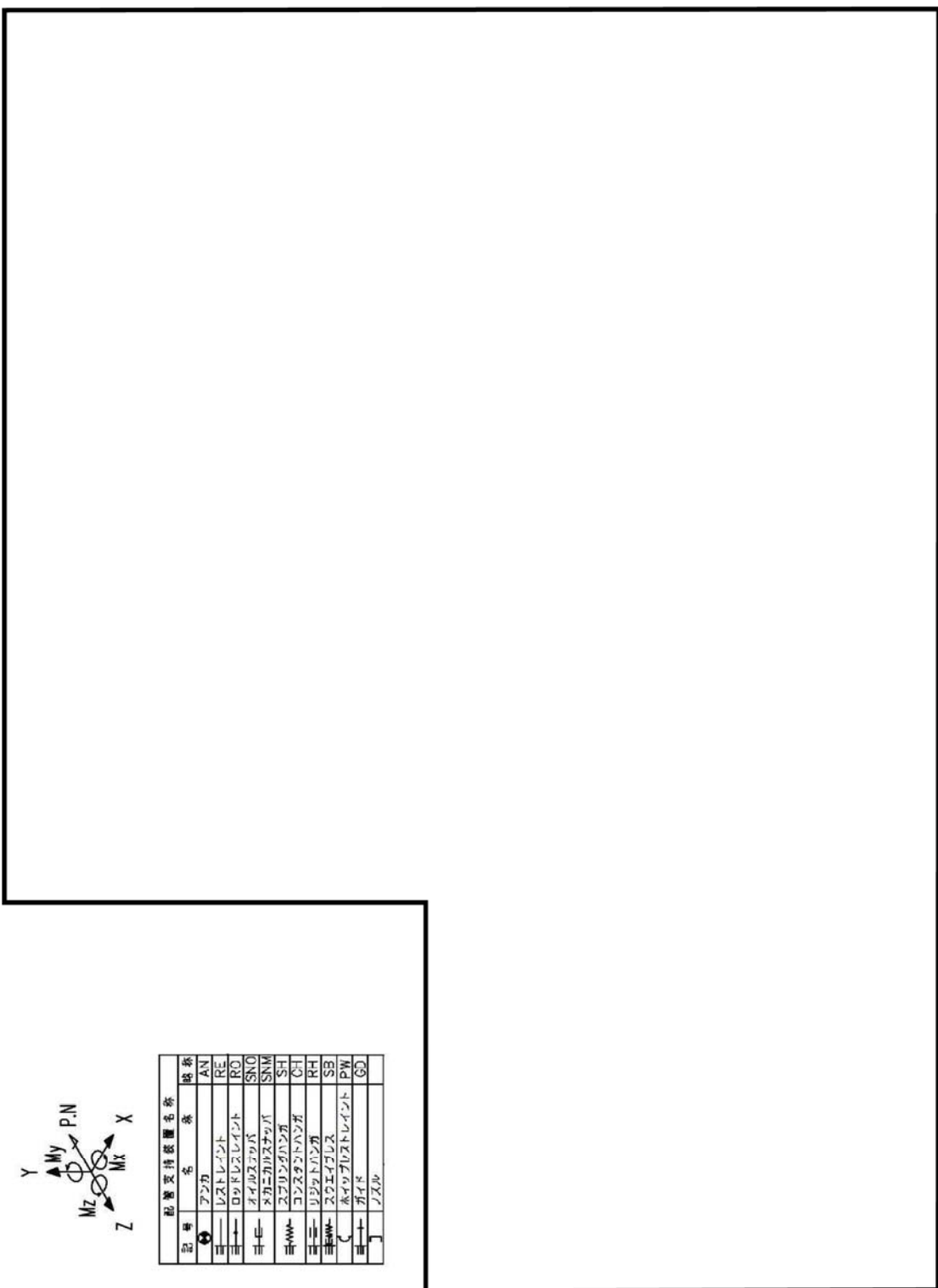
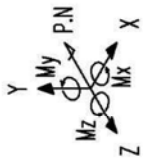


図 6 原子炉系 (蒸気部) 主蒸気配管 (4/8) (解析モデル)



記号	配管支持装置名称	取係
	アンカ	AN
	レストレイント	RE
	ロッドレスレイント	RO
	ナイロズソウバ	SNO
	スナニカリスソウバ	SNA
	ショリンダハンゴ	SH
	コリスチストハンゴ	CH
	リジッドハンゴ	RH
	スウェイブレス	SB
	ホウソウブリストレイント	PW
	ガイダ	GO
	イソル	

図 7 原子炉系 (蒸気部) 主蒸気配管 (5/8) (解析モデル)



記号	記号名	種類
⊕	アンカ	AN
⊖	レストレイント	RE
⊖	ロッドレストレイント	RO
⊖	スライダジョイント	SNO
⊖	スプリングジョイント	SNO
⊖	スプリングジョイント	SH
⊖	スプリングジョイント	CH
⊖	スプリングジョイント	RH
⊖	スプリングジョイント	SB
⊖	スプリングジョイント	PW
⊖	ジョイント	GD
⊖	ジョイント	GD

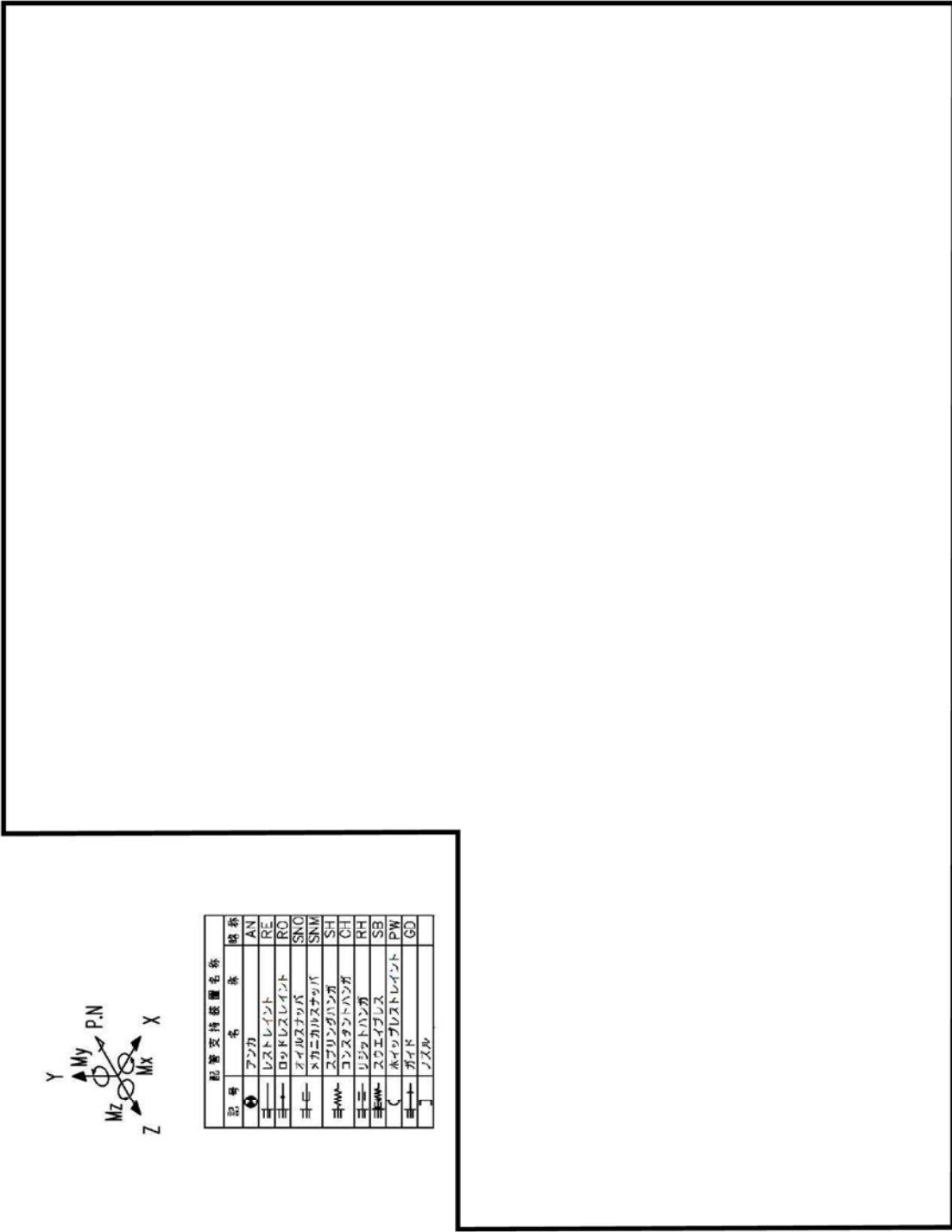
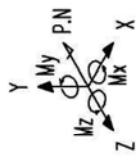


図8 原子炉系（蒸気部）主蒸気配管（6/8）（解析モデル）





記号	記号	名称	略称
☉	AN	アンカ	AN
☉	RE	レストレイント	RE
☉	RO	ロッドレストレイント	RO
☉	SNO	ノールスチップ	SNO
☉	SNM	スプリングハンガ	SNM
☉	SH	コンスタンタンハンガ	SH
☉	CH	リジッドハンガ	CH
☉	RH	コンスタンタンハンガ	RH
☉	SB	スロエイブレス	SB
☉	PW	ワイプレストレイント	PW
☉	GD	ガイド	GD
☉		リズル	

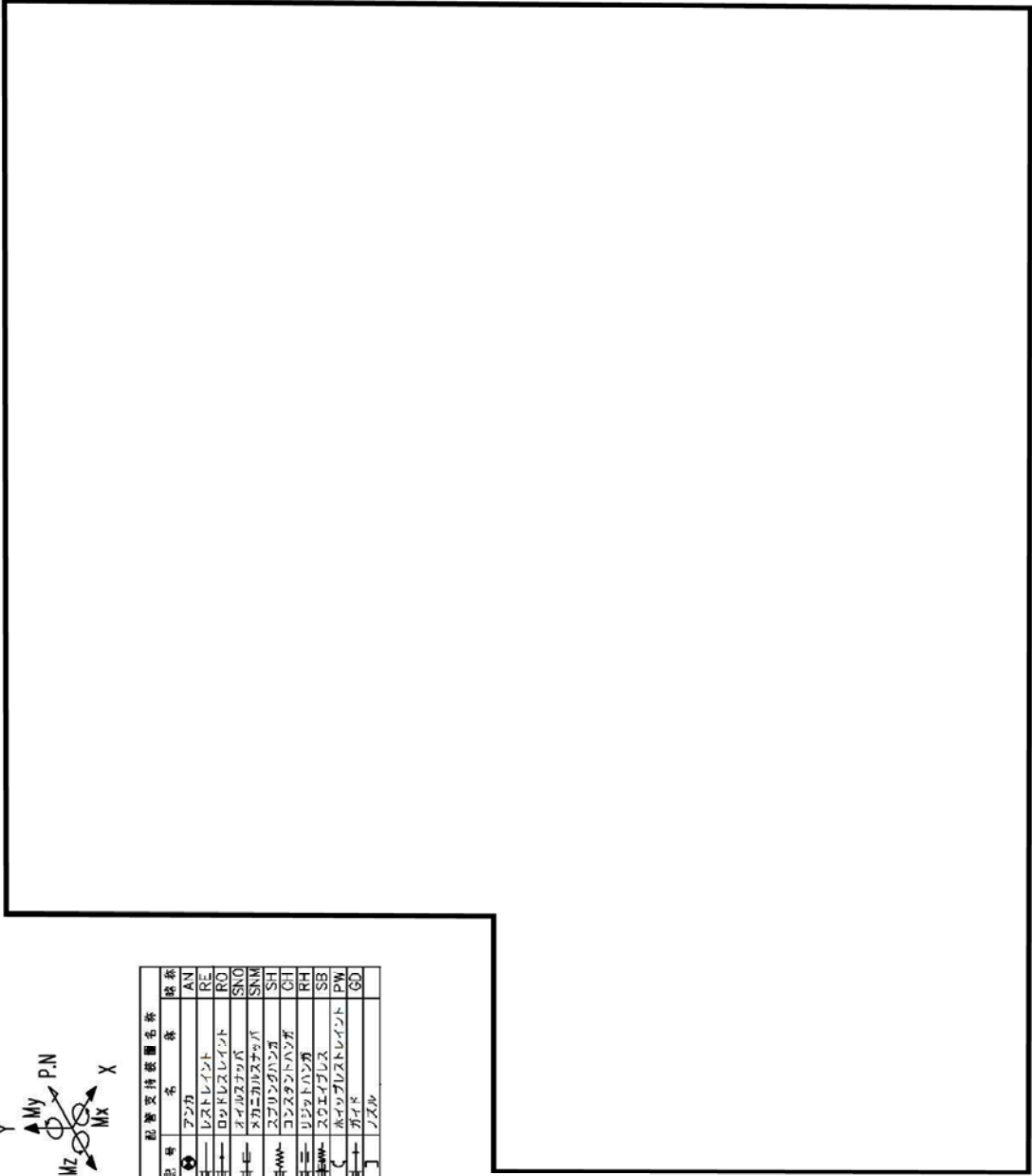
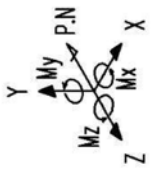
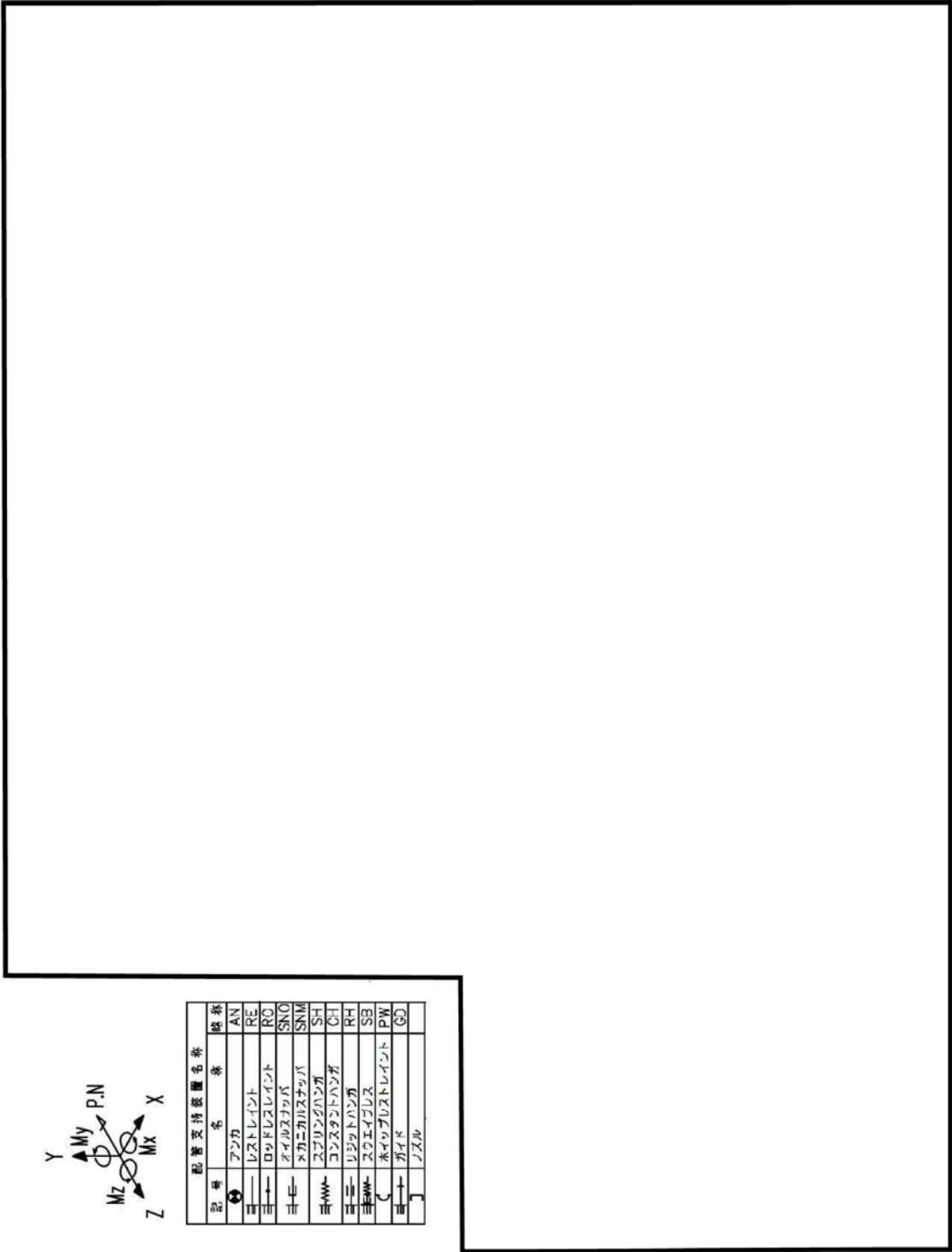


図9 原子炉系（蒸気部）主蒸気配管（7/8）（解析モデル）

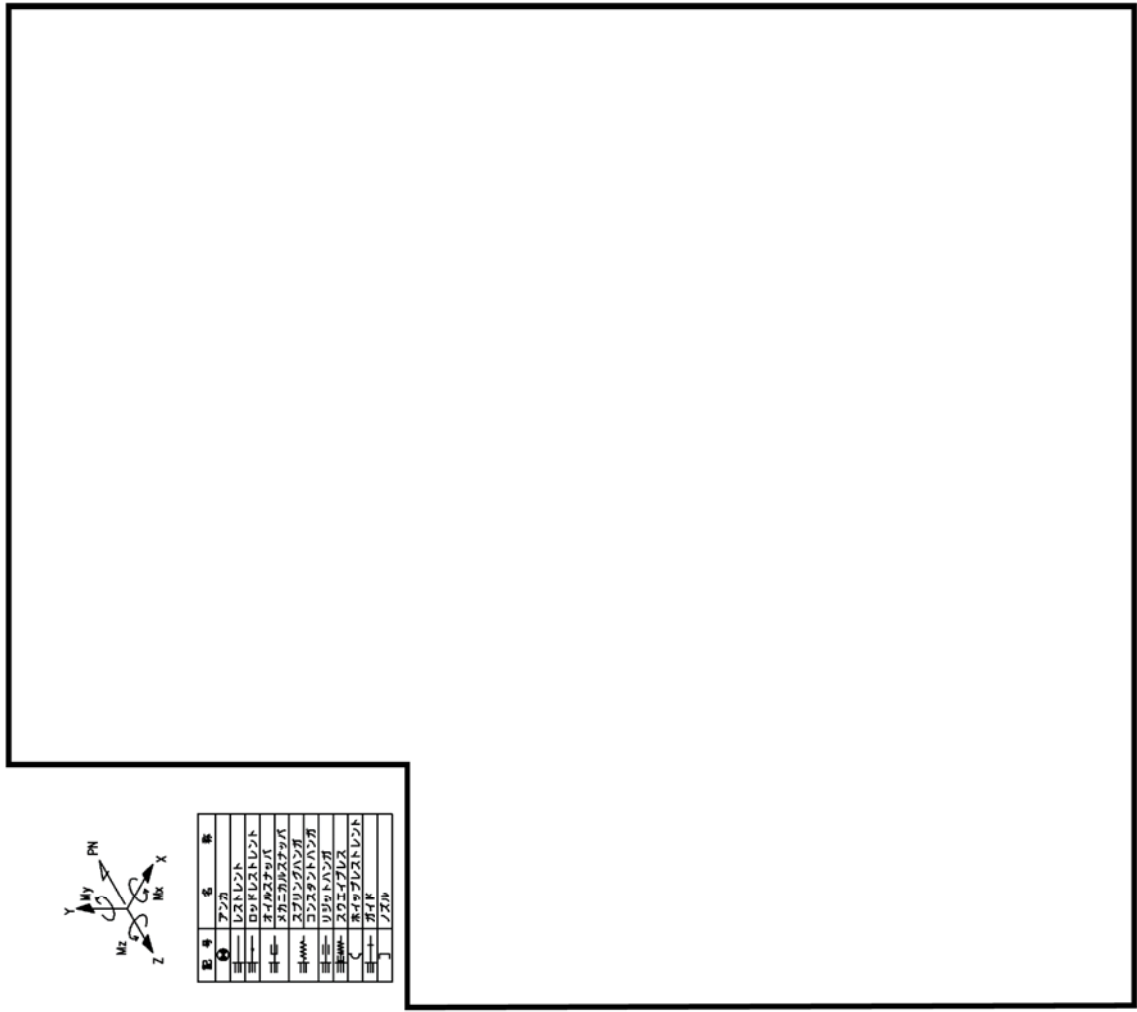


記号	記号名	略称
☉	アンカ	AN
≡	レストレイント	RE
≡	ロッドレストレイント	RO
≡	ダイヤフラム	SNO
≡	スプリングハンガ	SNM
≡	コンスタントハンガ	CH
≡	リフトハンガ	RH
≡	スウェイブレス	SB
C	パイプレストレイント	PW
≡	ガイド	GD
∩	ノズル	

図 10 原子炉系 (蒸気部) 主蒸気配管 (8/8) (解析モデル)



図号	名称
①	ポンプ
②	バレル
③	バレル
④	バレル
⑤	バレル
⑥	バレル
⑦	バレル
⑧	バレル
⑨	バレル
⑩	バレル
⑪	バレル
⑫	バレル
⑬	バレル
⑭	バレル
⑮	バレル
⑯	バレル
⑰	バレル
⑱	バレル
⑲	バレル
⑳	バレル
㉑	バレル
㉒	バレル
㉓	バレル
㉔	バレル
㉕	バレル
㉖	バレル
㉗	バレル
㉘	バレル
㉙	バレル
㉚	バレル
㉛	バレル
㉜	バレル
㉝	バレル
㉞	バレル
㉟	バレル
㊱	バレル
㊲	バレル
㊳	バレル
㊴	バレル
㊵	バレル
㊶	バレル
㊷	バレル
㊸	バレル
㊹	バレル
㊺	バレル
㊻	バレル
㊼	バレル
㊽	バレル
㊾	バレル
㊿	バレル





 : 動的機能維持確認  
 対象弁

図 11 原子炉冷却材浄化系配管 (1/4) (解析モデル)





記号	名 称
①	アーク
②	レストレスト
③	ロフトレストレスト
④	オフレストレスト
⑤	オフレストレスト
⑥	オフレストレスト
⑦	オフレストレスト
⑧	オフレストレスト
⑨	オフレストレスト
⑩	オフレストレスト
⑪	オフレストレスト
⑫	オフレストレスト
⑬	オフレストレスト
⑭	オフレストレスト
⑮	オフレストレスト
⑯	オフレストレスト
⑰	オフレストレスト
⑱	オフレストレスト
⑲	オフレストレスト
⑳	オフレストレスト
㉑	オフレストレスト
㉒	オフレストレスト
㉓	オフレストレスト
㉔	オフレストレスト
㉕	オフレストレスト
㉖	オフレストレスト
㉗	オフレストレスト
㉘	オフレストレスト
㉙	オフレストレスト
㉚	オフレストレスト
㉛	オフレストレスト
㉜	オフレストレスト
㉝	オフレストレスト
㉞	オフレストレスト
㉟	オフレストレスト
㊱	オフレストレスト
㊲	オフレストレスト
㊳	オフレストレスト
㊴	オフレストレスト
㊵	オフレストレスト
㊶	オフレストレスト
㊷	オフレストレスト
㊸	オフレストレスト
㊹	オフレストレスト
㊺	オフレストレスト
㊻	オフレストレスト
㊼	オフレストレスト
㊽	オフレストレスト
㊾	オフレストレスト
㊿	オフレストレスト

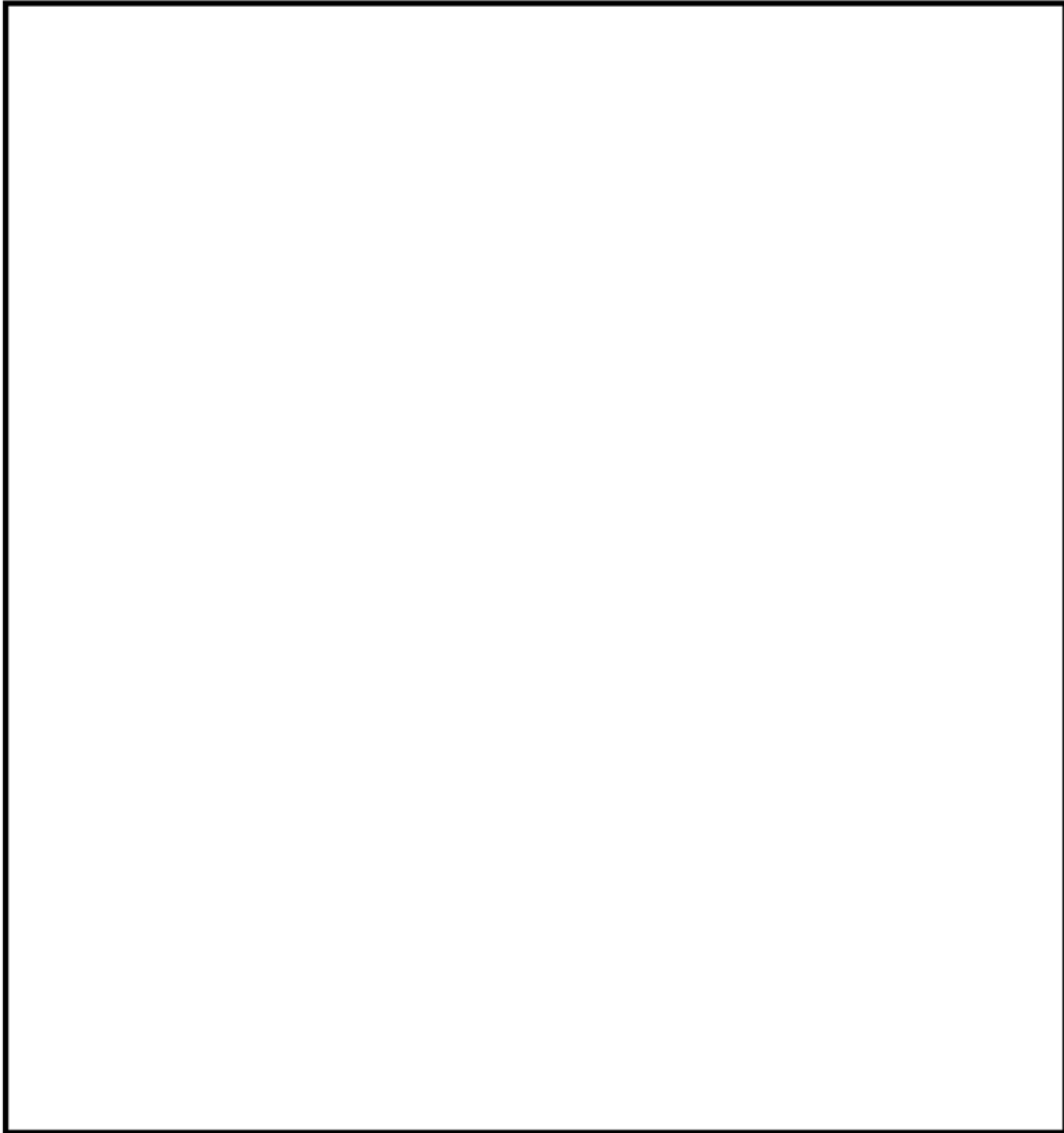


図 13 原子炉冷却材浄化系配管 (3/4) (解析モデル)



記号	名称
⊕	アンカ
≡	レストレント
≡	ロッドレストレント
≡	オイルスタップ
≡	スリニカルスタップ
≡	スプリングハンダ
≡	コンスタントハンダ
≡	リットハンダ
≡	スウェィチレス
⌋	ワイヤレストレント
≡	ブレイク
⌋	ノズル

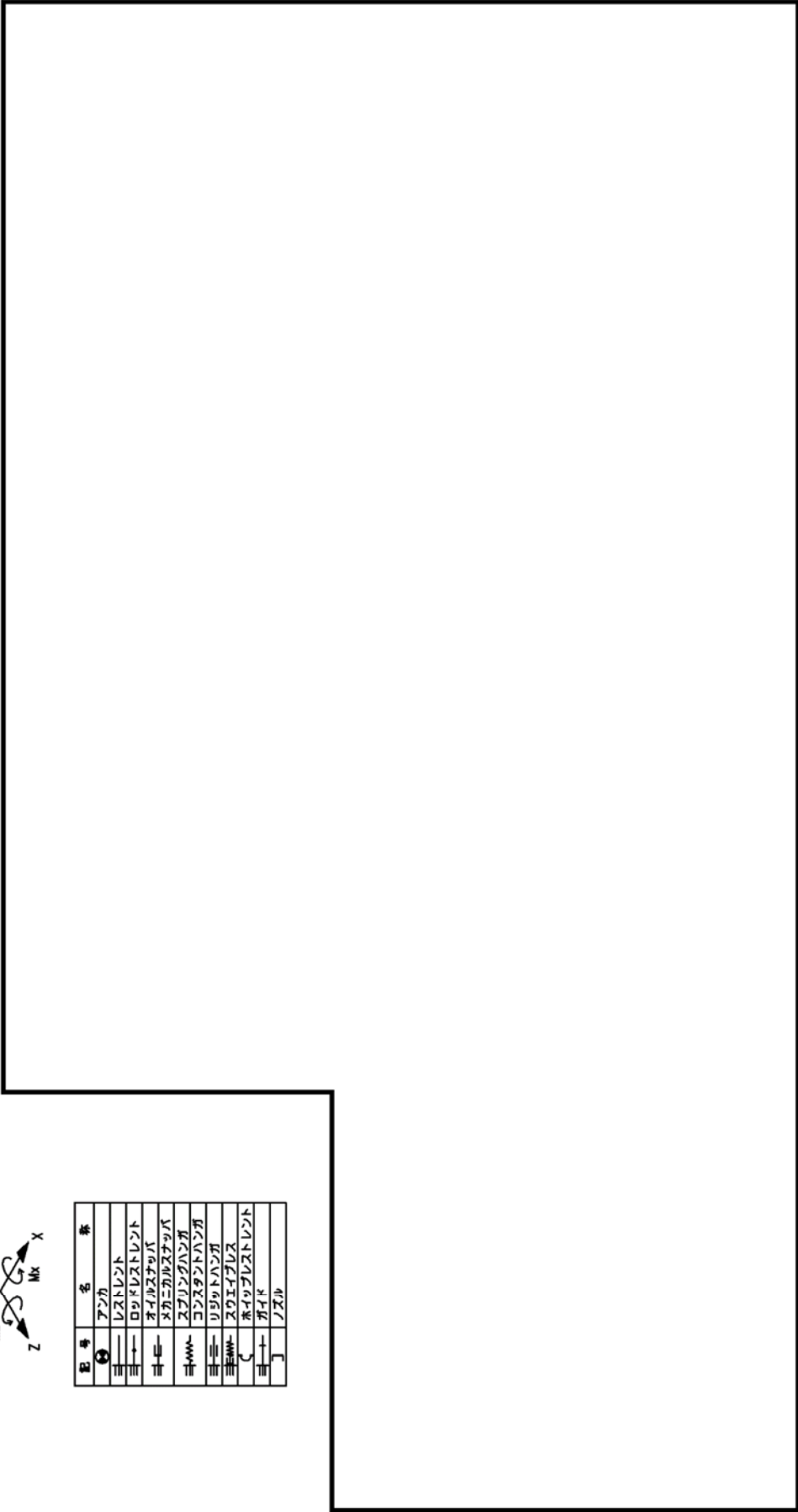


図 14 原子炉冷却材浄化系配管 (4/4) (解析モデル)



原子炉冷却材浄化系内側隔離弁（G33-F001）の配管減肉を想定した応答加速度が  
工認値を下回ることへの検討

- (1) 配管系の地震応答は多くの固有モードの組み合わせで構成されている。
- (2) 各振動モードについては、振動方向がある設備の静止位置から正負どちらも存在している。このため、設備の設置位置で変位が相殺されたり増幅されたりする。これはモード図や刺激係数の変動で示される。
- (3) 原子炉冷却材浄化系の減肉なし（工認）の弁の卓越振動モードは□次モードである。減肉あり（PLM）では、□次モードで減肉なし（工認）と概ね同じ挙動を示す振動モードが発生する。

入力加速度はほぼ同じであるが、減肉により刺激係数が変動し、応答加速度が逆転する結果となった。減肉なし（工認）及び減肉あり（PLM）の加速度算出根拠を表 4 に、主要モードにおける加速度算出根拠を表 5 に、卓越振動モードにおける解析モデル図を図 15 に示す。

表 4 加速度算出根拠

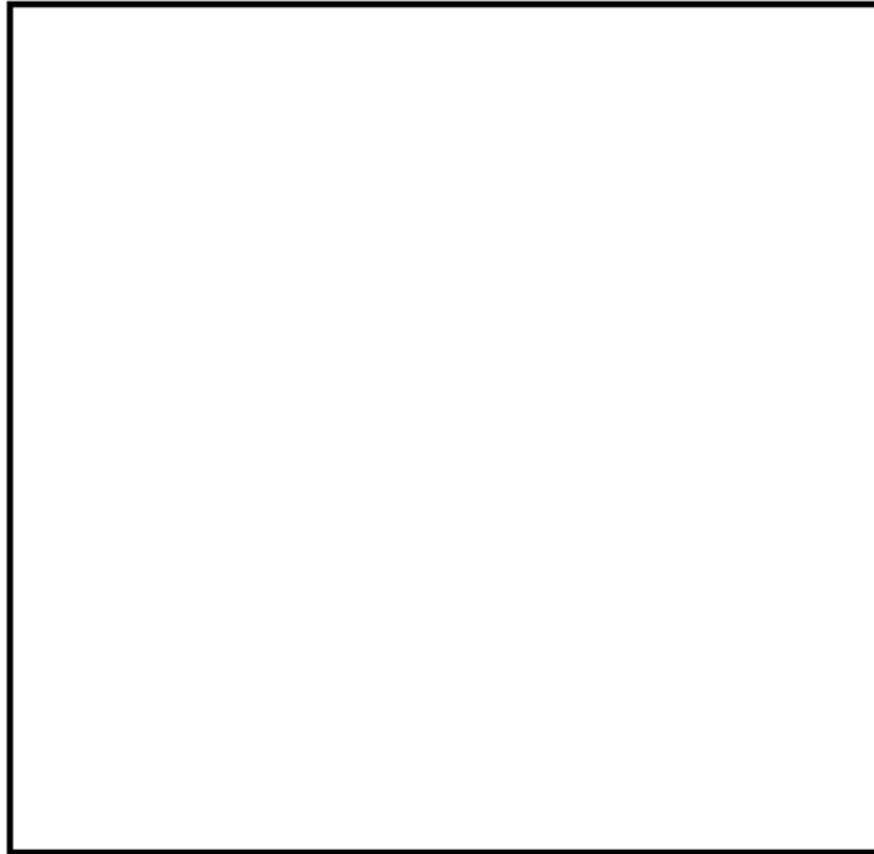
モデル	次数	固有振動数 (Hz)	基準地震動 $S_s$ による 入力加速度 (G)			刺激係数		
			X	Y	Z	X	Y	Z
減肉なし (工認)								
減肉あり (PLM)								

$1G=9.80665\text{m/s}^2$

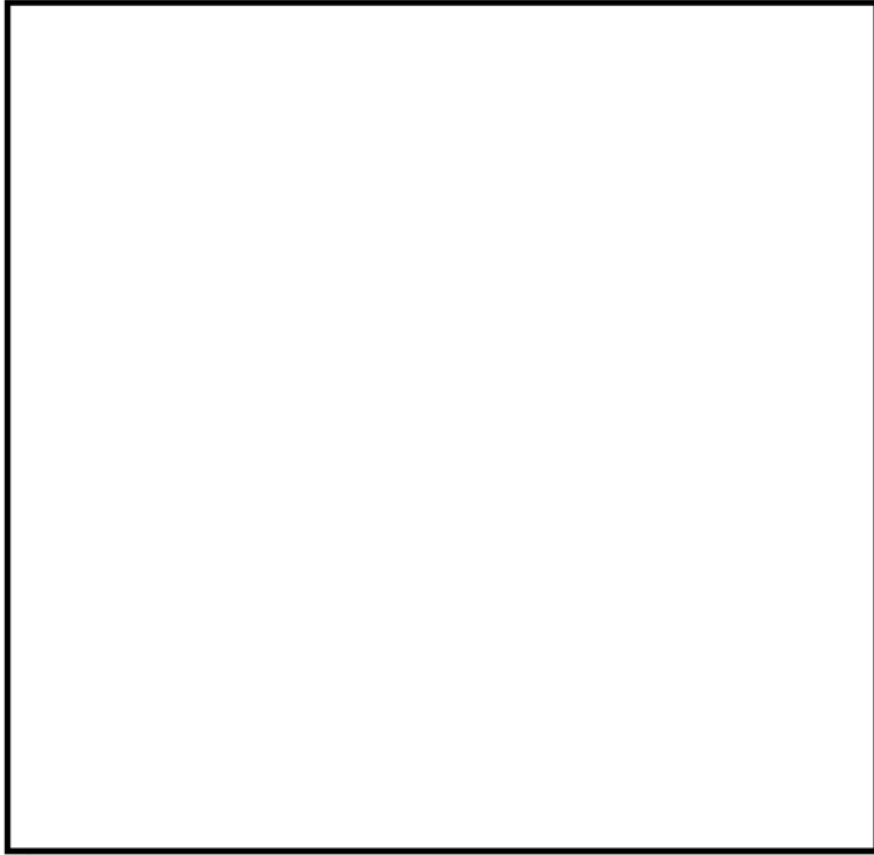
表 5 加速度算出根拠 (主要モード)

モデル	次数	固有振動数 (Hz)	基準地震動 $S_s$ による 入力加速度 (G)			刺激係数		
			X	Y	Z	X	Y	Z
減肉なし (工認)								
減肉あり (PLM)								

$1G=9.80665\text{m/s}^2$



減肉なし (  次モード)



減肉あり (  次モード)

図 15 原子炉炉冷却材浄化系内側隔離弁 (G33-F001) の卓越振動モードの比較 (解析モデル)

工事計画認可申請の内容を踏まえ劣化状況評価の見直しがある場合の見直し前後の相違点について

工事計画認可申請（平成 30 年 2 月補正申請以降）の審査内容を踏まえて、劣化状況評価における耐震安全性評価の見直しを行うものは以下のとおり。

1. 原子炉格納容器内大型機器，機器・配管系の等価繰返し回数の見直しを反映した評価

東海第二発電所の新規制基準への適合に係る工事計画認可申請の審査において、原子炉格納容器内大型機器及び機器・配管系の地震時の疲労累積係数の算出の際に一律に定める等価繰返し回数が 110 回から 160 回に見直されるため、地震時の疲労累積係数を再評価し、耐震安全性評価の見直しを行う必要がある。

(1) 影響範囲の抽出

原子炉格納容器内大型機器及び機器・配管系の地震時における疲労累積係数算出の際に一律に定める等価繰返し回数を使用して耐震評価を行っている機器及びその経年劣化事象を抽出する。

(2) 評価手法

(1) で抽出された機器について、工事計画認可申請の評価手法と同様に、等価繰返し回数 160 回における疲労累積係数を算出し、運転開始後 60 年時点での通常運転時の疲労累積係数との合計値が 1 を下回ることを確認する。

合計値が 1 を上回る機器については、機器毎に個別に設定する等価繰返し回数における疲労累積係数と、運転開始後 60 年時点での通常運転時の疲労累積係数との合計値が 1 を下回ることを確認する。

(3) 評価結果

等価繰返し回数 160 回における疲労累積係数を算出し、運転開始後 60 年時点での通常運転時の疲労累積係数との合計値が 1 を下回ることを確認した。

なお、炭素鋼配管系（原子炉系（蒸気部））の腐食（流れ加速型腐食）については等価繰返し回数 160 回における疲労累積係数と通常運転時の疲労累積係数との合計値が 1 を上回ることから、機器毎に個別に設定する等価繰返し回数における疲労累積係数と、運転開始後 60 年時点での通常運転時の疲労累積係数との合計値が 1 を下回ることを確認した。

評価結果を表 1 に示す。

表 1 (1/2) 原子炉格納容器内大型機器, 機器・配管系の等価繰返し回数を見直しを反映した評価結果

機種	機器名称	部位	経年劣化事象	見直し前 (110回)での地震時の疲労累積係数	見直し後 (160回)での疲労累積係数	運転開始後 60年時点での疲労累積係数	合計値
ポンプ	原子炉再循環ポンプ	ポンプケーシングと入口配管の溶接部	疲労割れ	0.0023	0.0033	0.0000	0.0033
		主フランジ		0.0000	0.0000	0.0177	0.0177
容器	原子炉圧力容器	スタッドボルト	疲労割れ	0.0000	0.0000	0.2526	0.2526
		給水ノズル		0.0002	0.0002	0.6146	0.6148
		下鏡		0.0002	0.0002	0.4475	0.4477
		支持スカート		0.0002	0.0002	0.5691	0.5693
		主蒸気配管貫通部 (ベローズ)		0.0000	0.0001	0.0071	0.0072
		給水系配管貫通部 (ベローズ)		0.0000	0.0001	0.0064	0.0065
配管	ステンレス鋼配管系	原子炉再循環系	疲労割れ	0.1000	0.1455	0.1182	0.2637
	炭素鋼配管系	原子炉系 (純水部)	疲労割れ	0.0178	0.0259	0.5799	0.6058
		原子炉系 (蒸気部)	疲労割れ	0.4509	0.6558	0.0853	0.7411
	炭素鋼配管系	原子炉系 (蒸気部)	腐食 (流れ加速型腐食)	0.5117	0.3256*	0.4580	0.7836
	原子炉給水止め弁	弁箱	疲労割れ	0.0000	0.0000	0.5373	0.5373
原子炉再循環ポンプ出口弁	弁箱	疲労割れ	0.0001	0.0001	0.0338	0.0339	

\* : 160 回での疲労累積係数が 0.7442 となり, 60 年時点での疲労累積係数との合計値が許容値 1 を上回るため, 個別に設定される等価繰返し回数 (70 回) により疲労累積係数を算出した

表 1 (2/2) 原子炉格納容器内大型機器, 機器・配管系の等価繰返し回数を見直しを反映した評価結果

機種	機器名称	部位	経年劣化事象	見直し前 (110 回) での地震時の疲労累積係数	見直し後 (160 回) での疲労累積係数	運転開始後 60 年時点での疲労累積係数	合計値
逆止弁	原子炉給水逆止弁	弁箱	疲労割れ	0.0000	0.0000	0.8848	0.8848
原子炉再循環ポンプ流量制御弁		弁箱	疲労割れ	0.0001	0.0001	0.0738	0.0739
主蒸気隔離弁		弁箱	疲労割れ	0.0000	0.0000	0.2278	0.02278
炉内構造物	炉心シュラウド	下部胴	疲労割れ	0.0005	0.0007	0.0351	0.0358
	シュラウドサポート	シリンダ, プレート, レグ	疲労割れ	0.0000	0.0000	0.0647	0.0647



## 2. 東北地方太平洋沖地震の地震観測記録を踏まえた耐震評価

東北地方太平洋沖地震に対する原子炉建屋のシミュレーション解析結果と観測記録を比較した結果、床応答スペクトルの一部の周期帯で観測記録がシミュレーション結果を上回ることが確認されたことから、原子炉建屋内機器への耐震評価への影響について確認する。

### (1) 評価方法

原子炉建屋内機器の固有周期を確認し、観測記録とシミュレーション解析の応答比率を踏まえた割り増しを考慮しても、設備の有する耐震裕度に収まることを確認する。

### (2) 評価結果

- ① 原子炉建屋の各床面のシミュレーション解析結果の床応答スペクトルと観測記録の床応答スペクトルの比較結果を表2に示す。

表2 原子炉建屋の各床面のシミュレーション解析結果の床応答スペクトルと観測記録の床応答スペクトルの比較結果

項目		シミュレーション解析結果の床応答スペクトルと観測記録の床応答スペクトルの比較結果
減衰定数	a. 5.0 %	・シミュレーション解析結果の床応答スペクトルは観測記録の床応答スペクトルを包絡している
	b. 2.0 %	・EL. <input type="text"/> mの床応答スペクトルの比較では、0.05秒から0.1秒において観測記録の床応答スペクトルがシミュレーション解析結果の床応答スペクトルを超えている周期が確認できる。 ・EL. <input type="text"/> mの床応答スペクトル以外の階高の床応答スペクトルにおいては、シミュレーション解析結果が観測記録を概ね包絡していることが確認できる。
	c. 1.0 %	・EL. <input type="text"/> mの床応答スペクトルの比較では、0.05秒から0.1秒において観測記録の床応答スペクトルがシミュレーション解析結果の床応答スペクトルを超えている周期が確認できる。 ・EL. <input type="text"/> m及びEL. <input type="text"/> mの床応答スペクトルの比較では、一部の周期帯で観測記録の床応答スペクトルがシミュレーション解析結果の床応答スペクトルを超えている周期が確認できる。 ・EL. <input type="text"/> mの床応答スペクトルにおいては、シミュレーション解析結果が観測記録を包絡していることが確認できる。
最大応答加速度		・全標高に対して、シミュレーション解析結果の最大応答加速度は観測記録の最大応答加速度を超えていることが確認できる。

② 各設置床レベルにおいて、観測記録の床応答スペクトルがシミュレーション解析結果の床応答スペクトルを超えていることが確認される減衰定数の機器・配管系への影響検討を実施した結果、概ね耐震裕度が床応答スペクトル比率以上であり、観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

一部機器についても床応答スペクトル比率が耐震裕度を上回る結果となったため、詳細検討を行い、耐震裕度確保可能であることを確認した。

なお、工事計画認可申請にて影響評価を実施した機器のうち、耐震安全性評価対象機器については原子炉系（純水部）配管のFDW-13, 14が抽出された。

経年劣化を考慮した場合、1次固有周期における観測記録の震度がシミュレーション解析の震度を上回るものの、FRS 応答比率を耐震裕度が上回っており、耐震安全性に影響がないことを確認した。

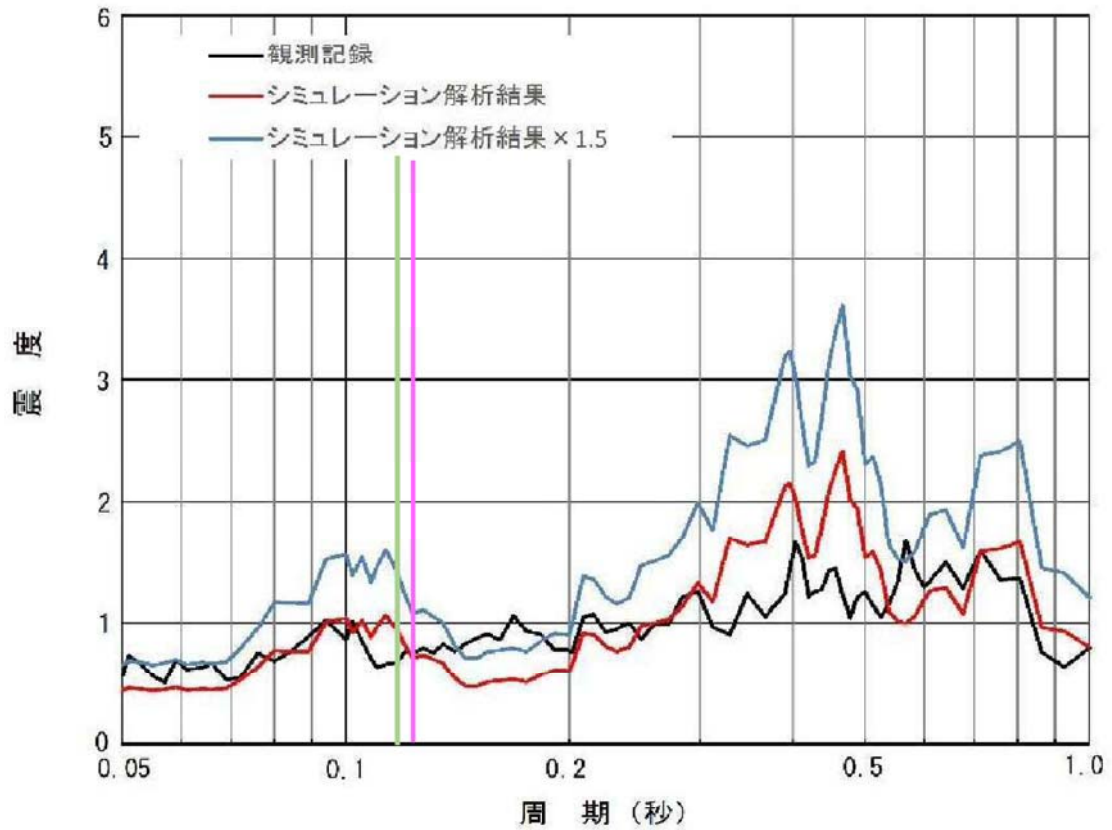
原子炉系（純水部）配管（FDW-13, 14）の影響評価結果を表3に、評価に用いた原子炉建屋 EL. 29. 0mにおける観測記録とシミュレーション解析結果の床応答曲線を示す。

表3 原子炉系（純水部）配管（FDW-13, 14）の影響評価結果

項目	工事計画認可申請での評価 (経年劣化考慮無し)	運転延長認可申請での評価 (経年劣化考慮有り)
設備名称	原子炉系（純水部）配管（FDW-13, 14）	
標高（EL. m）	20. 3	
減衰定数（%）	2. 0	
評価部位	配管本体	
応力分類	一次	
一次固有周期（秒）	0. 124	0. 130
発生応力	81	104
許容応力	229	229
裕度	2. 82	2. 20
FRS 比率*1	—	1. 09*2
影響評価	影響なし	影響なし

\*1：観測記録がシミュレーション解析結果を上回っている場合は、その応答比率を記載し、シミュレーション解析結果が観測記録を上回っている場合は「—」を記載

\*2：EL. 20. 3mについては地震計が設置されていないため上階のEL. 29. 0mの床応答曲線を適用



- 経年劣化を考慮しない場合の原子炉系（純水部）配管の1次固有周期（0.124秒）
- 経年劣化を考慮した場合の原子炉系（純水部）配管の1次固有周期（0.130秒）

図1 原子炉建屋 EL. 29.0m における観測記録とシミュレーション解析結果の床応答曲線

### 3. 海水ポンプ室の床応答曲線及び最大応答加速度の見直しを反映した評価

海水ポンプ室に設置される海水ポンプについては、保守性を考慮した床応答曲線（設備評価用床応答曲線）及び最大応答加速度（1.2ZPA）にて耐震計算を実施していたが、液状化検討対象層を考慮した地盤物性条件に基づく地震応答解析が完了したため、正規の床応答曲線及び最大応答加速度の包絡性を確認した結果、床応答曲線は水平方向及び鉛直方向ともに包絡性を確認できたが、最大応答加速度のうち水平方向について包絡性を確認できなかったことから、最大応答加速度の変更に伴う海水ポンプ基礎ボルトの腐食（全面腐食）を考慮した耐震安全性評価の再計算が必要となった。

#### (1) 影響範囲の抽出

海水ポンプ基礎ボルトの腐食（全面腐食）を考慮した耐震安全性評価の再計算が必要となる機器は以下のとおり。

- ・ 残留熱除去海水系ポンプ
- ・ 非常用ディーゼル発電機海水ポンプ
- ・ 高圧炉心スプレイ系ディーゼル冷却系海水系ポンプ

#### (2) 評価結果

残留熱除去海水系ポンプ、非常用ディーゼル発電機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル冷却系海水系ポンプの再計算後の結果を含めた最大引張、せん断応力を表4に示す。

表4 残留熱除去海水系ポンプ、非常用ディーゼル発電機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル冷却系海水系ポンプの再評価に伴う最大発生応力値

機器名	応力	最大応答加速度 (1.2ZPA) 見直し前		最大応答加速度 (1.2ZPA) 見直し前	
		発生応力	許容応力	発生応力	許容応力
残留熱除去海水系ポンプ	引張	97*1	195	71*1	195
	せん断	16*1	150	24*2	150
非常用ディーゼル発電機 海水ポンプ	引張	29*1	180	26*1	195
	せん断	7*1	139	11*2	150
高圧炉心スプレイ系ディーゼル冷却系海水系ポンプ	引張	29*1	180	26*1	195
	せん断	7*1	139	11*2	150

\*1：最大応答加速度（1.2ZPA）による得られる評価値

\*2：機器の固有周期と基準地震動  $S_s$  の床応答曲線を用いて算出される震度により得られる評価値