

東海第二発電所 審査資料	
資料番号	TKK 補-III-7 改15
提出年月日	平成30年7月12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12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	20
(1) 耐震安全性評価	20
① 低サイクル疲労	20
② 中性子照射脆化	20
③ 応力腐食割れ	20
④ 腐食（流れ加速型腐食）	21
⑤ 腐食（全面腐食）	24
⑥ 動的機能維持に係る耐震安全性評価	26
⑦ 制御棒挿入性に係る耐震安全性評価	27
⑧ 浸水防護施設の耐震安全性評価	30
⑨ 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	30
(2) 現状保全	30
(3) 総合評価	30
(4) 高経年化への対応	30
5. まとめ	32
(1) 審査基準適合性	32
(2) 保守管理に関する方針として策定する事項	35

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	37
別紙 2. 震災が評価に与える影響とその考え方について	49
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	57
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	69
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	81
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	88
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	132
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	204
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	230
別紙 10. 動的機能維持評価について	233
別紙 11. 浸水防護施設の耐震安全性評価について	252
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	262

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><耐震安全性評価></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 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。 ○ 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。 ○ 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。 ○ 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。
<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> <ul style="list-style-type: none"> ①特別点検の結果を踏まえた劣化状況評価。 <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> <ul style="list-style-type: none"> ①劣化状況評価を踏まえた保守管理に関する方針。
<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>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>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>㉔ 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、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>

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。

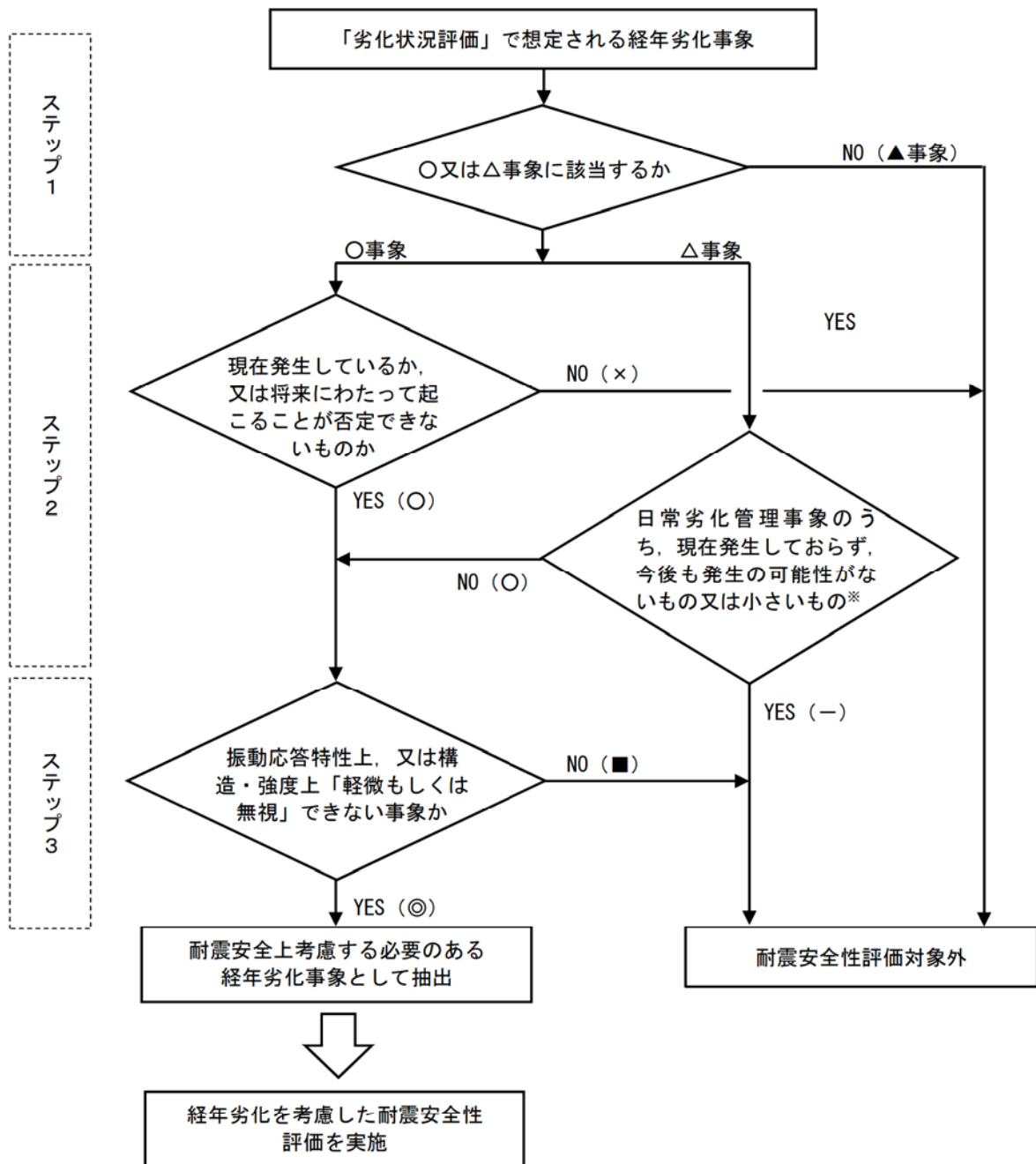
- a. 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象（○事象）
- b. 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象（日常劣化管理事象）
（△事象）
- c. 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象
（日常劣化管理事象以外）（▲事象）

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）
- 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。

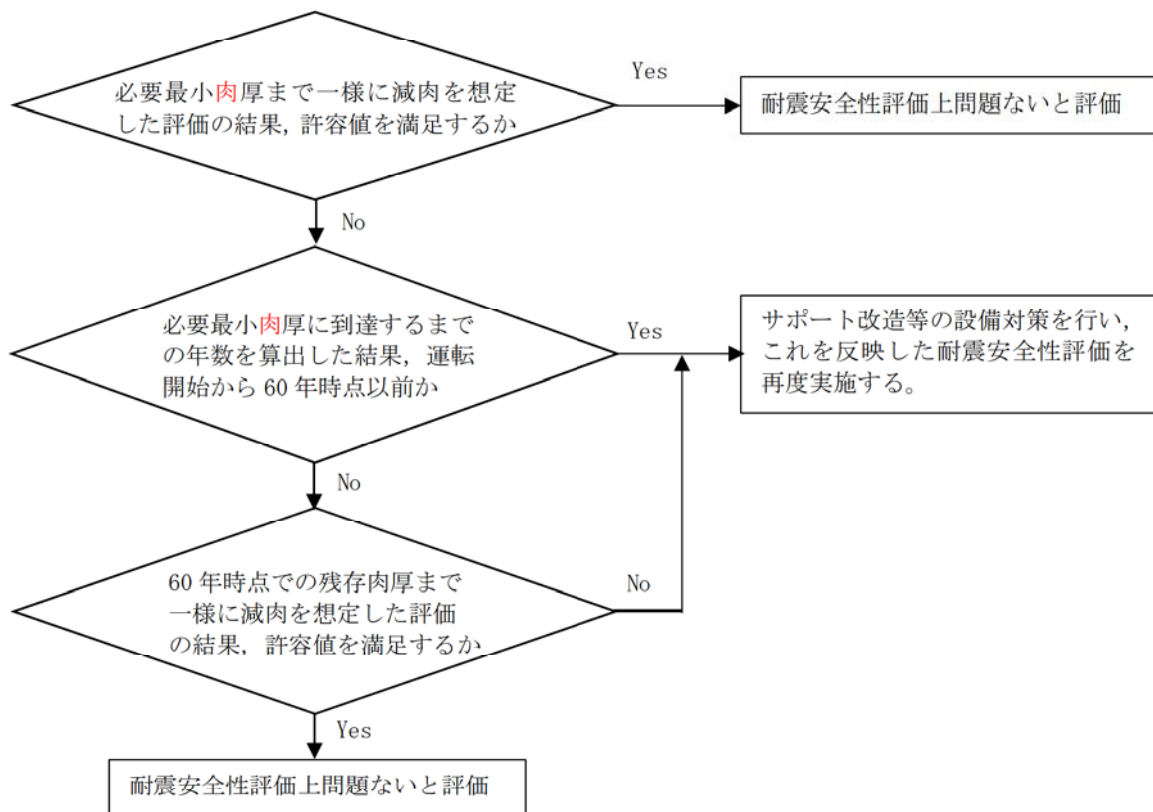


図2 腐食（流れ加速型腐食）（配管）の耐震安全性評価フロー

- (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
(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
(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の耐震評価	炉心シュラウド、原子炉本体基礎アンカ部	×	耐震評価対象外機器のため
(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ージャ、出力領域計装検出器(LPRM))	×	耐震評価対象外機器のため

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
		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

*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 ^{*3} （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 ^{*4,*5}
Cクラス	Cクラスの機器に適用される静的地震力 ^{*5}

- *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。

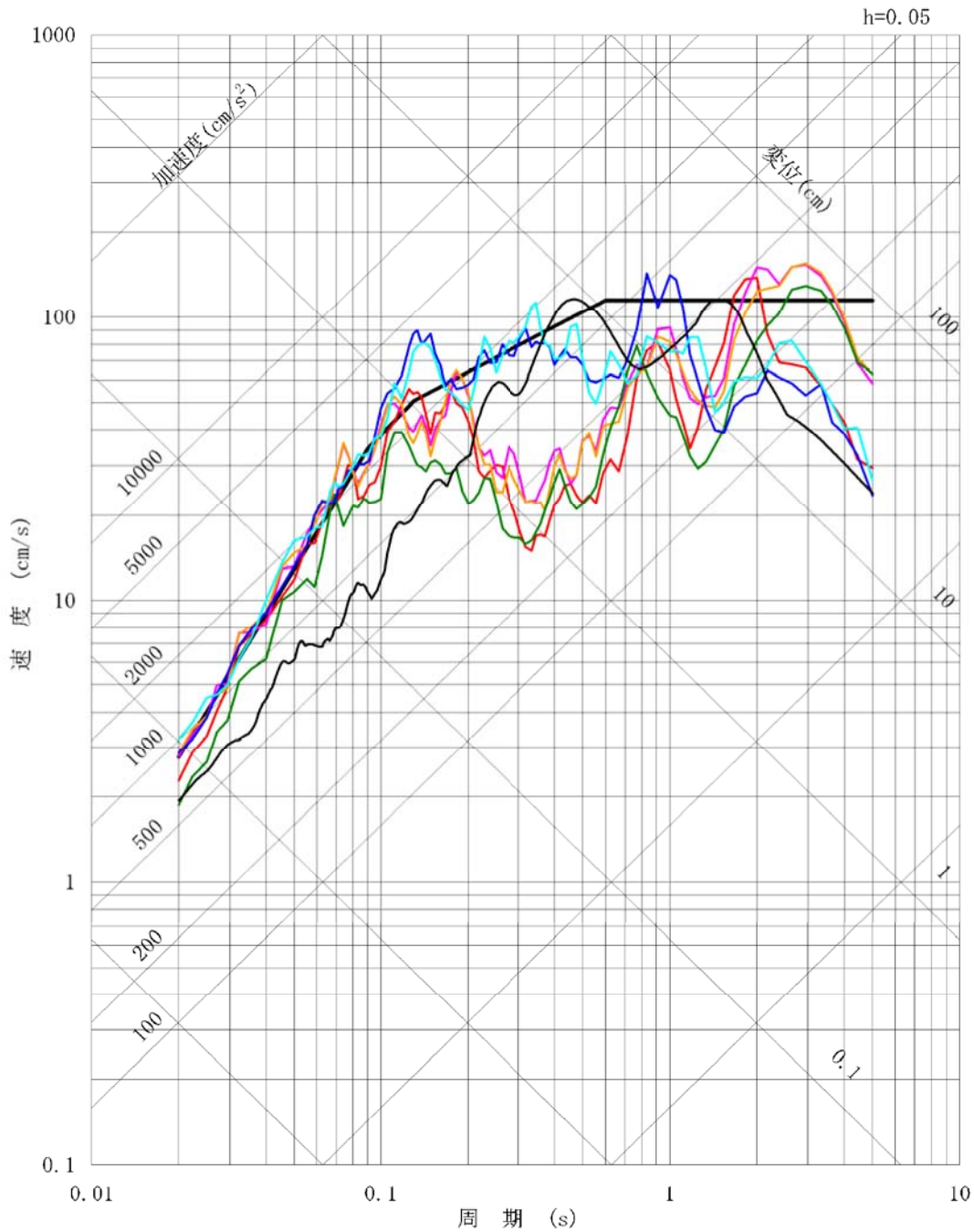
(4) 評価用地震動

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。

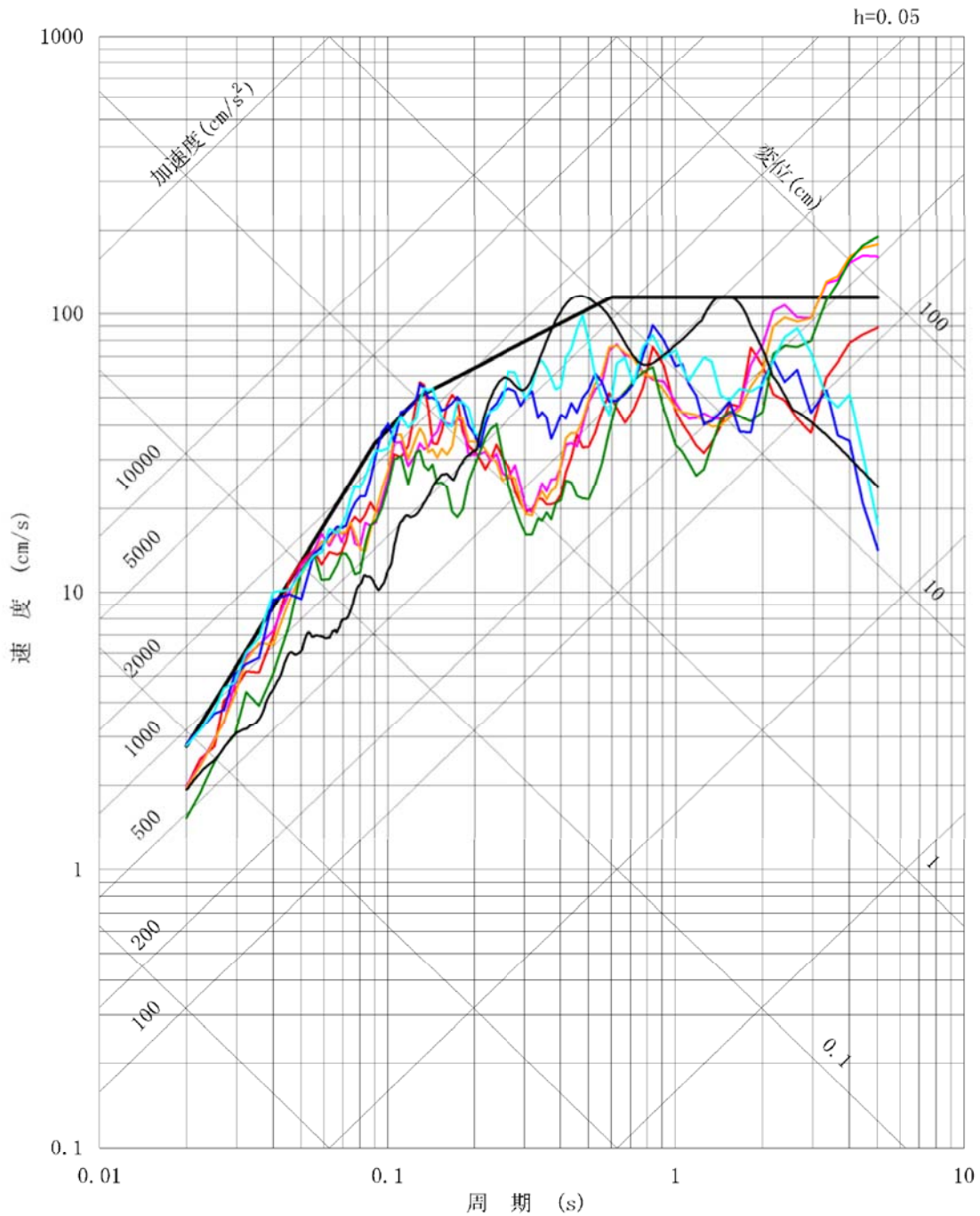
表 5 考慮した地震と地震動の最大加速度

	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 cm/s^2 鉛直 560 cm/s^2
	S_S -11	水平 (NS) 717 cm/s^2 (EW) 619 cm/s^2 鉛直 579 cm/s^2
	S_S -12	水平 (NS) 871 cm/s^2 (EW) 626 cm/s^2 鉛直 602 cm/s^2
	S_S -13	水平 (NS) 903 cm/s^2 (EW) 617 cm/s^2 鉛直 599 cm/s^2
	S_S -14	水平 (NS) 586 cm/s^2 (EW) 482 cm/s^2 鉛直 451 cm/s^2
	S_S -21	水平 (NS) 901 cm/s^2 (EW) 887 cm/s^2 鉛直 620 cm/s^2
	S_S -22	水平 (NS) 1009 cm/s^2 (EW) 874 cm/s^2 鉛直 736 cm/s^2
	S_S -31	水平 (NS・EW) 610 cm/s^2 鉛直 280 cm/s^2



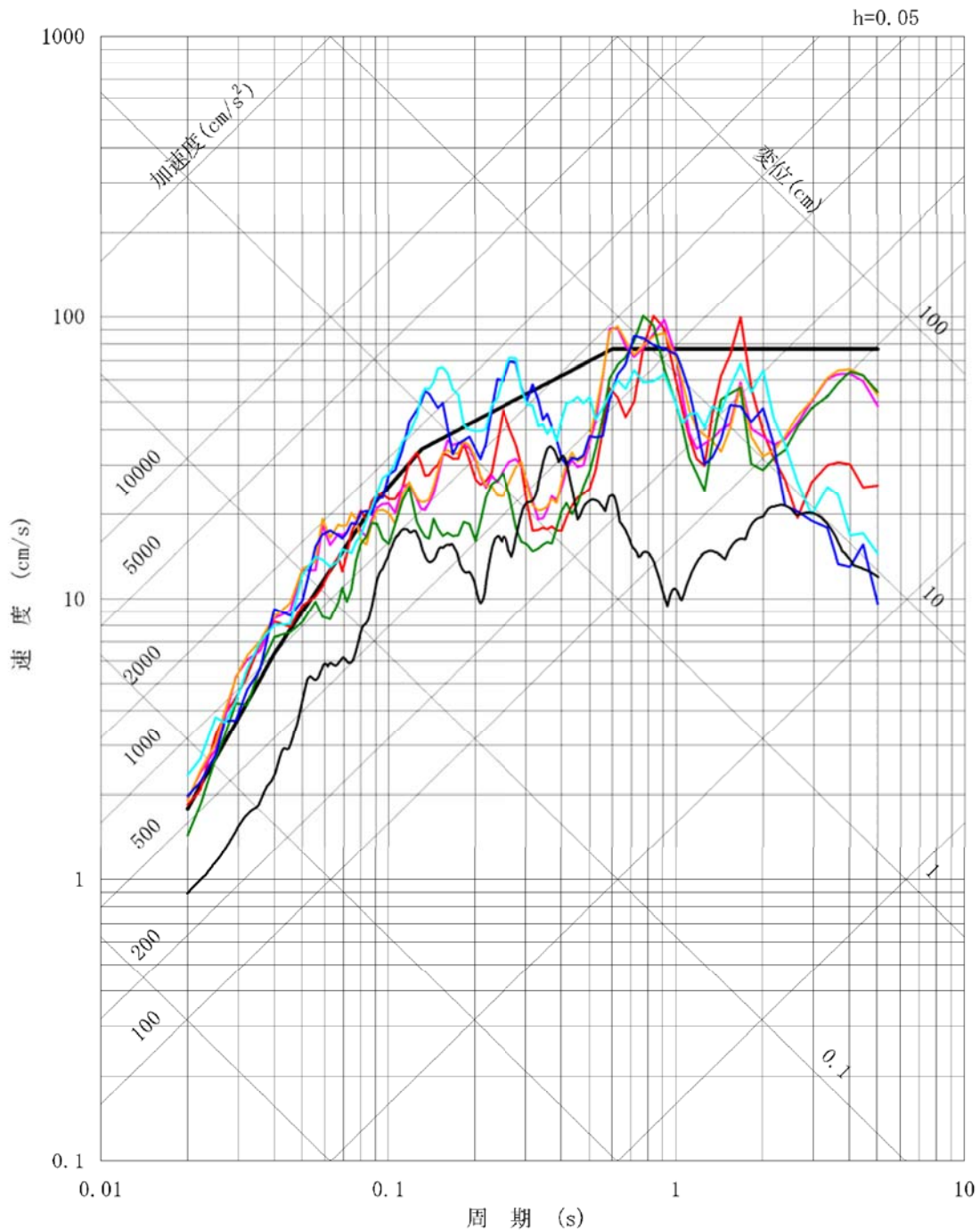
- S_s-D 1
- S_s-1 1 F 1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点 1)
- S_s-1 2 F 1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点 2)
- S_s-1 3 F 1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点 3)
- S_s-1 4 F 1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層による地震 (断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点 2)
- S_s-2 1 2011年東北地方太平洋沖型地震 (短周期レベルの不確かさ)
- S_s-2 2 2011年東北地方太平洋沖型地震 (SMG A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(1/3) 基準地震動の応答スペクトル (水平 (NS) 方向)



- S_s-D 1
- S_s-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_s-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_s-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_s-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_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 (SMG A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(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 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_s-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_s-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_s-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_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
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
腐食 (全面腐食)	1. 機器付基礎ボルト ・主排気筒 ・残留熱除去系熱交換器	・過去に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. 後打ちケミカルアンカ, メカニカルアンカボルト	発電所構内で使用されている後打ちケミカルアンカ, メカニカルアンカボルトを抽出
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）配管における基準地震動 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 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

④ 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））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 _s	IV _A S	一次応力	1031	291	364
					一次+二次応力	2770	831 (疲労累積係数: 0.5117*5)	366 (疲労累積係数許容値: 1 以下)
			S _d	III _A S	一次応力	649	225	274
					一次+二次応力	1531	556 (疲労累積係数: 0.1077*5)	366 (疲労累積係数許容値: 1 以下)
原子炉系 (蒸気部) 【主蒸気配管】	クラス 1	S	S _s	IV _A S	一次応力	評価中につき追々とさせていただきます。		
					一次+二次応力			
			S _d	III _A S	一次応力			
					一次+二次応力			

- *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：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 年時点肉厚における疲労累積係数(0.4580)を保守的に 60 年時点に至る評価期間中全てに適用し，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。

表 10 炭素鋼配管（原子炉冷却材浄化系）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)
						60 年時点肉厚*3	
原子炉冷却材浄化系配管	クラス 1	S	S _s	IV _A S	一次応力	333	414
					一次+二次応力	1015 (疲労累積係数： 0.5093*5)	354 (疲労累積係数 許容値：1 以下)
			S _d	III _A S	一次応力	228	310
					一次+二次応力	556 (疲労累積係数： 0.0287*5)	354 (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：JEAG4601 に基づき配管減肉を考慮した 60 年時点肉厚における疲労累積係数（0.0085）を保守的に 60 年時点に至る評価期間中全てに適用し，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11に、詳細な算出過程を別紙6にそれぞれ示す。

表11 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 _d	B _A S	一次応力	121	163	166

*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1.5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12に、詳細な算出過程を別紙6にそれぞれ示す。

表12 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 _S *2	IV _A 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_S地震力がS_d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_S地震力による評価応力がS_d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_d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

⑤ 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 13 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 13 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_AS の許容応力を下回る機器については，S クラス機器は III_AS の許容応力を示す

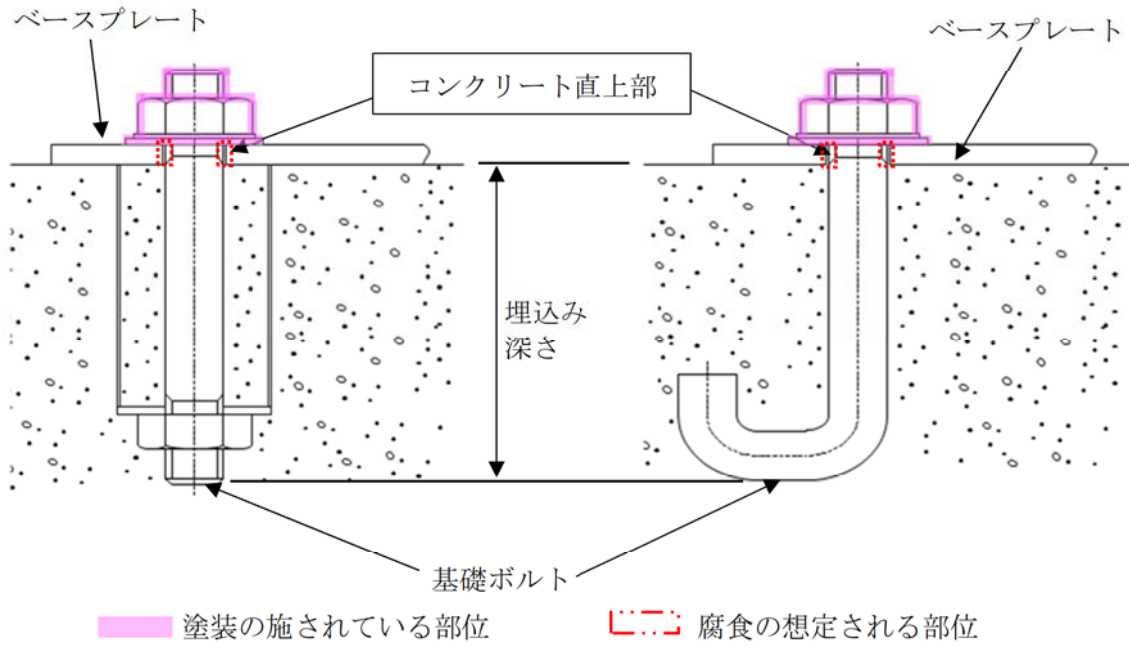


図4 基礎ボルト概要図

(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。

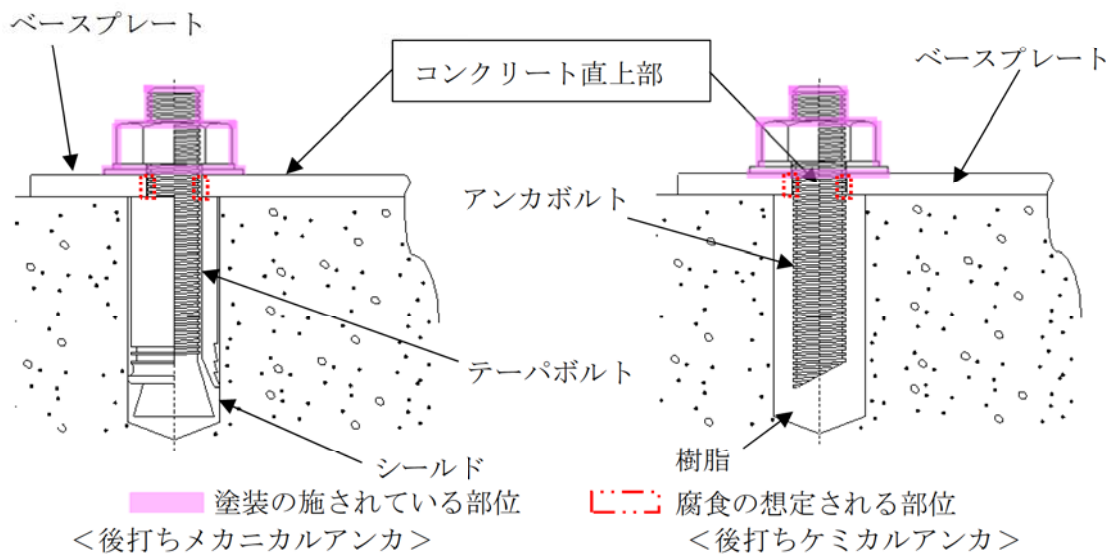


図5 後打ちアンカボルト概要図

⑥ 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。

上記弁の動的機能維持評価結果を表14～表17に、詳細な算出過程を別紙10に示す。

表14 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 _s	水平	50	工認値	4.80 ^{*1}	6.0
			劣化状況評価値	4.90 ^{*1}	6.0
	鉛直		工認値	3.17 ^{*1}	6.0
			劣化状況評価値	3.37 ^{*1}	6.0

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

表15 主蒸気隔離弁の動的機能維持評価結果

地震力		振動数 (Hz)	種別	主蒸気隔離弁	
				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 _s	水平	50	工認値	7.35 ^{*1}	10.0
			劣化状況評価値	7.86 ^{*1}	10.0
	鉛直		工認値	5.51 ^{*1}	6.2
			劣化状況評価値	5.51 ^{*1}	6.2

*1 : B22-F022B, B22-F028B の最大値 (B22-F022B の評価値) を示す

表 16 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	主蒸気逃がし安全弁	
				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 _s	水平	50	工認値	6.74 ^{*2}	9.6
			劣化状況評価値	6.84 ^{*2}	9.6
	鉛直		工認値	2.15 ^{*3}	6.1
			劣化状況評価値	2.15 ^{*4}	6.1

*1 : B22-F013B, F, K, M, P, S の最大値を示す

*2 : B22-F013K の値を示す

*3 : B22-F013B の値を示す

*4 : B22-F013F の値を示す

表 17 原子炉冷却材浄化系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	原子炉冷却材浄化系内側隔離弁	
				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 _s	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

⑦ 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_s 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 18 に、影響評価検討結果一覧を表 19 に示す。

表 18 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 19 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

⑧ 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、⑤(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

⑨ 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の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 20 に示す。

表 20 (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。	4. (1)①, ④, ⑤, ⑧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、震災時の影響を考慮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。	4. (1)②, ③に示すとおり、中性子照射脆化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。	4. (1)⑥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。	4. (1)⑦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 20 (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
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	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。	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。
	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。	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。
	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。	4. (1)①～⑧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、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。
	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. (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。
	㉔ 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。	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。
	(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。	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 20 (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・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・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、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. (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の中で、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 21 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 21 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*2
炭素鋼配管系	炭素鋼配管*1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

震災が評価に与える影響とその考え方について

(1) 評価対象機器の選定

東海第二発電所 運転期間延長認可申請（共通事項）補足説明資料にて TPO 地震における東海第二発電所への影響（震災影響）のうち耐震安全性評価について検討する。

耐震安全性評価は以下の経年劣化事象と組み合わせて実施している。

- ・疲労割れ
- ・中性子照射脆化
- ・照射誘起型応力腐食割れ
- ・腐食（流れ加速型腐食を含む）
- ・応力腐食割れ

このうち、TPO 地震を考慮した耐震安全性評価への影響が大きいと考えられる疲労割れについて、TPO 地震と組み合わせた、耐震安全性評価を実施する。

評価対象機器は疲労割れを考慮して耐震評価を実施した機器のうち、「基準地震動 S_s による疲労累積係数」が最大である原子炉系（蒸気部）配管を選定した。

(2) 評価内容

原子炉系（蒸気部）配管の疲労累積係数に TPO 地震による疲労累積係数を足し合わせた合計値が、許容値 1 を下回ることを確認する。

- ① 原子炉系（蒸気部）配管の運転実績回数に基づく疲労累積係数並びに基準地震動 S_s による疲労累積係数（表 1 参照）

表 1 原子炉系（蒸気部）配管の疲労累積係数

系統	運転実績回数に基づく 疲労累積係数	地震動による 疲労累積係数
原子炉系（蒸気部） 配管	0.0853	0.6558

原子炉系（蒸気部）配管の疲労評価モデル図を図 1 に示す。

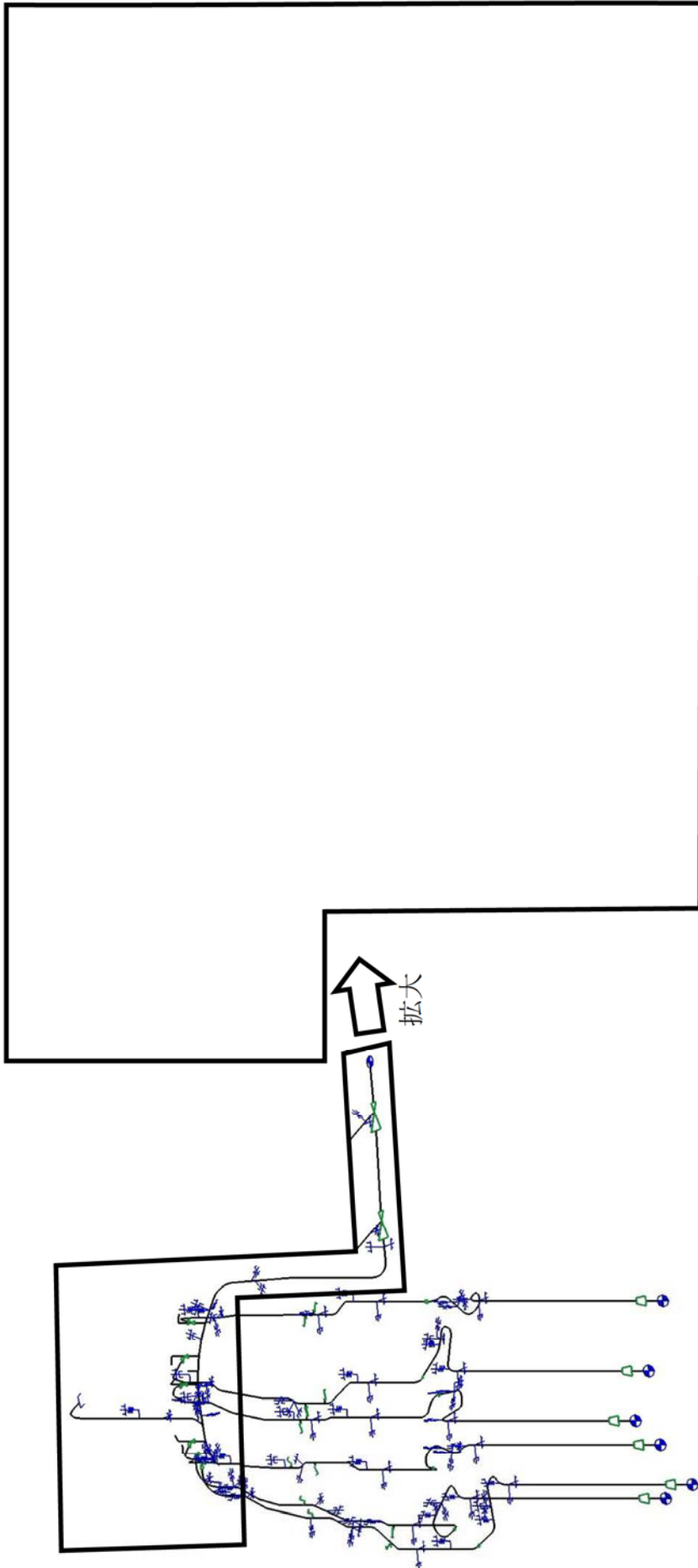


図1 原子炉系（蒸気部）配管の疲労解析モデル

評価モデル全体図

② TPO 地震による疲労累積係数

a. TPO 地震による繰返し回数の算定方法

TPO 地震による繰返し回数は「工事計画審査資料 補足-342 東海第二発電所 耐震性に関する説明書に係る補足説明資料（耐震評価対象の網羅性、既工認との手法の相違点の整理について）」に記載される繰返し回数の設定方法と同様、ピーク応力法による等価繰返し回数として算定した。

以下に TPO 地震による繰返し回数の算定方法を示す。

(a) 時刻歴変位応答波形の算定

原子炉格納容器内に設置される原子炉系（蒸気部）配管の TPO 地震による繰返し回数は、評価対象設備（MS-C）の繰返し回数を算定し設定する。

評価点の繰返し回数を求めるため、原子炉建屋—大型機器・炉内構造物連成解析の結果から算出される時刻歴加速度応答波を用いて、1 質点系の時刻歴変位応答波形を算定する。

原子炉建屋—大型機器・炉内構造物連成モデルを図 2 及び図 3 に、入力地震動の加速度時刻歴波形を図 4 に示す。

(b) 時刻歴ピーク応力値の設定

評価対象設備（MS-C）に発生するピーク応力の最大値を(a)で求めた時刻歴変位応答波形の最大値とすることで、応力の時刻歴波を作成する。最大ピーク応力に対する時刻歴波の応力算定概念図を図 5 に示す。

最大ピーク応力については、「耐震設計の標準化に関する調査報告書」（軽水炉改良標準型耐震設計小委員会、昭和 55 年）の検討において十分とされた値*1である 150 kg/mm²（1471 MPa）を使用する。

*1：「昭和 55 年度耐震設計の標準化に関する調査報告書」での整理。

現在用いられている材料において原子炉压力容器本体材料である SQV2A 及び SFV3 の一次+二次応力に対する許容値が最も高く、その値は $3S_m=56.4$ kg/mm² となる。

応力係数の極大値 5 とすれば、ピーク応力の値としては片振幅に対して、 $56.4 \times 5 \div 2 = 141$ kg/mm² となることから、最大ピーク応力としては、150 kg/mm² まで考えれば十分としている。

(c) 疲労累積係数 UF の算定

各ピーク点の応力に対する許容繰返し回数を設計疲労線図より求め、疲労累積係数 UF を求める。

設計・建設規格 容器 MANDATORY APPENDIX 添付 4-2 設計疲労線図「図 添付

4-2-1」の炭素鋼，低合金鋼及び高張力鋼の設計疲労線図を用い，応力時刻歴波に対して各時刻歴振幅に対する許容繰返し回数を算定する。設計疲労線図を図 6 に示す。

各応力時刻歴波の振幅に対する許容繰返し回数とピークのサイクル数から UF を算定する。UF 算定方法を図 7 に示す。

(d) 等価繰返し回数の算定

疲労累積係数 UF と，最大ピーク応力に対する許容繰返し回数 N_0 の積をとり，最大ピーク応力に対する等価繰返し回数 N_e を求める。

$$N_e = UF \times N_0$$

b. 算定結果

原子炉压力容器等の大型機器の各質点の水平 (NS, EW) 及び鉛直 (UD) 方向の時刻歴加速度応答波から求めた 1 質点系の応答に対する等価繰返し回数を表 2 に示す。

原子炉系 (蒸気部) 配管の等価繰返し回数は，各評価点の等価繰返し回数を包絡した (追而) 回と設定する。

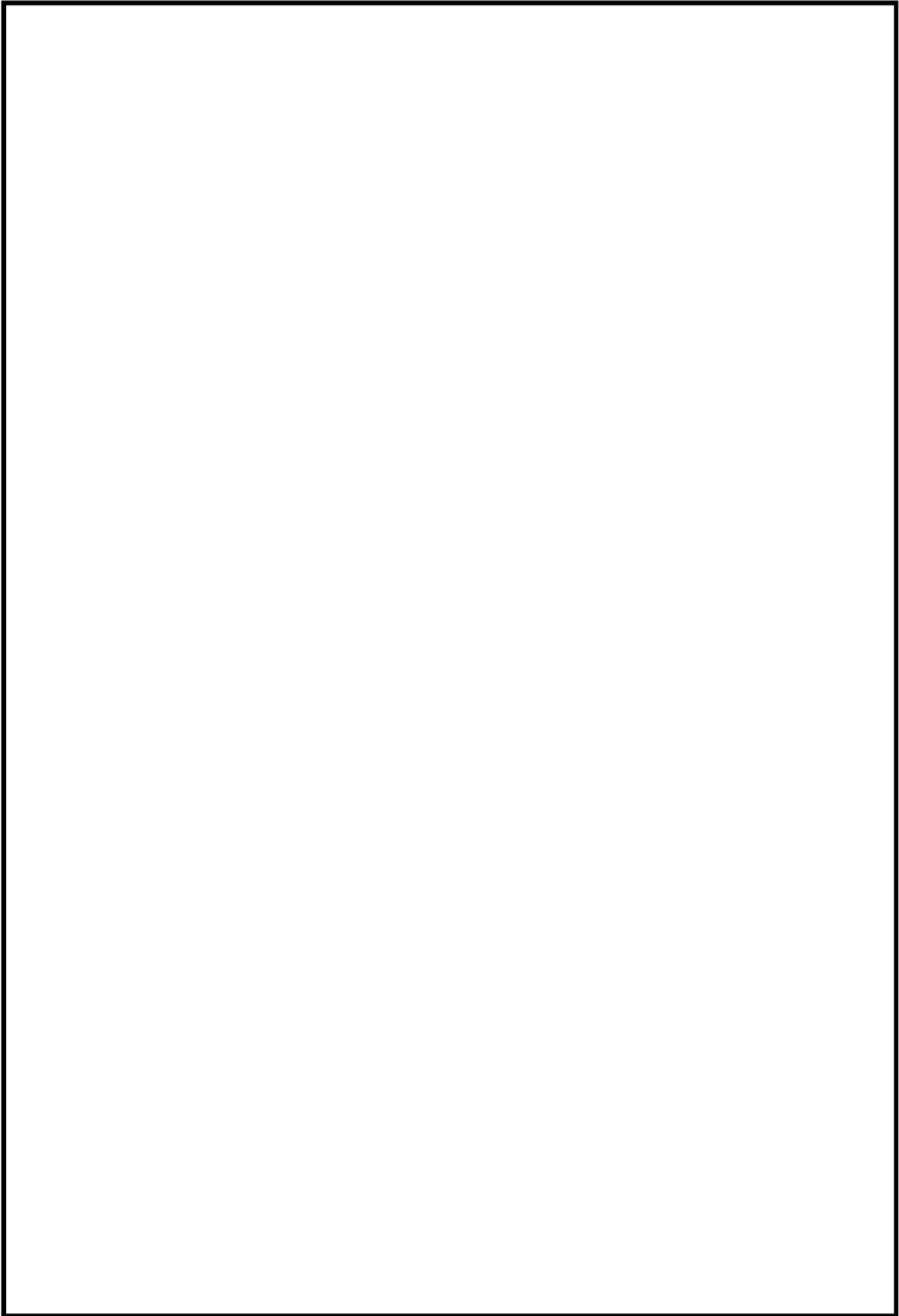


図2 原子炉建屋—大型機器・炉内構造物系連成解析モデル（水平方向）

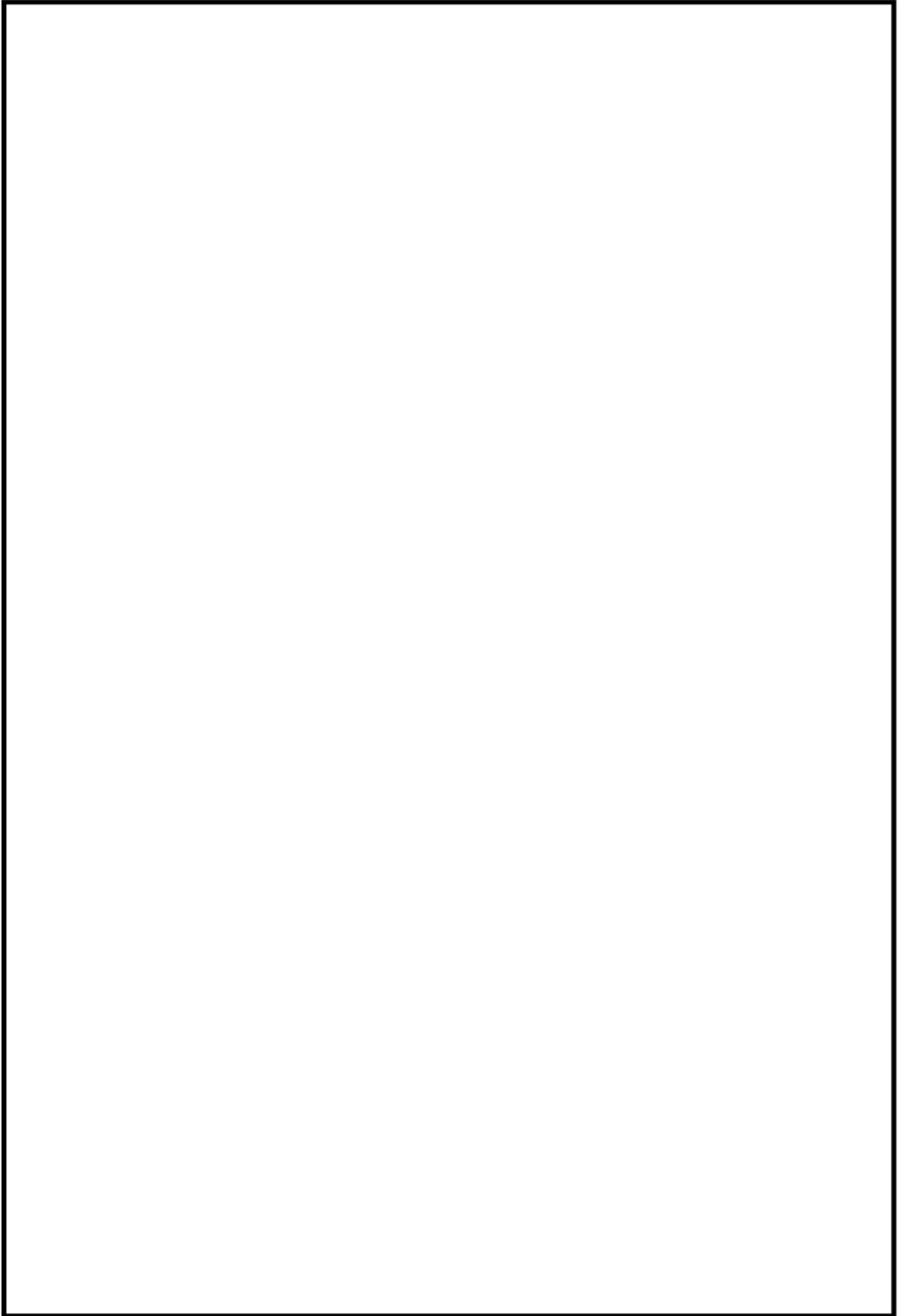


図3 原子炉建屋—大型機器・炉内構造物系連成解析モデル（鉛直方向）



図4 入力地震動（水平（NS）方向）の加速度時刻歴波形（1/3）



図4 入力地震動（水平（EW）方向）の加速度時刻歴波形（2/3）

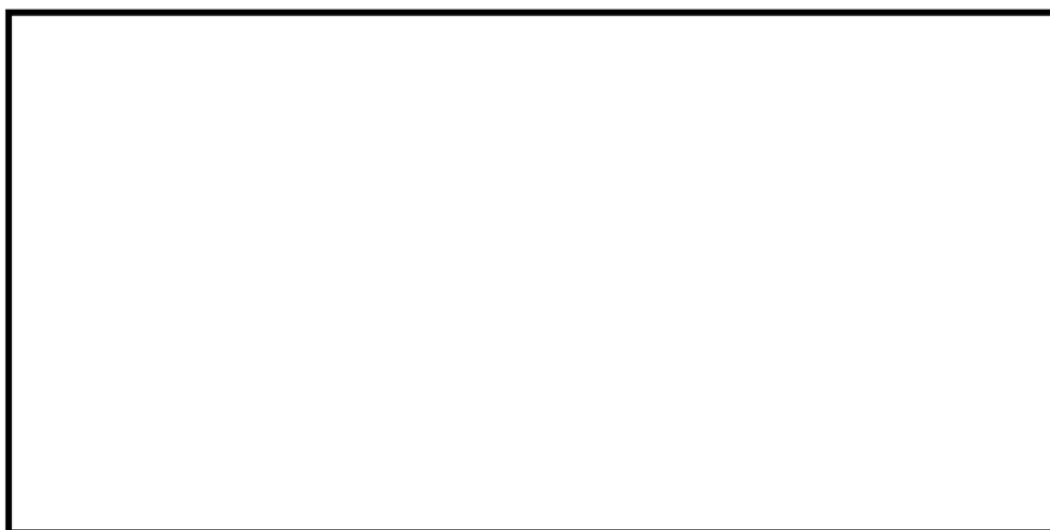


図4 入力地震動（鉛直（UD）方向）の加速度時刻歴波形（3/3）

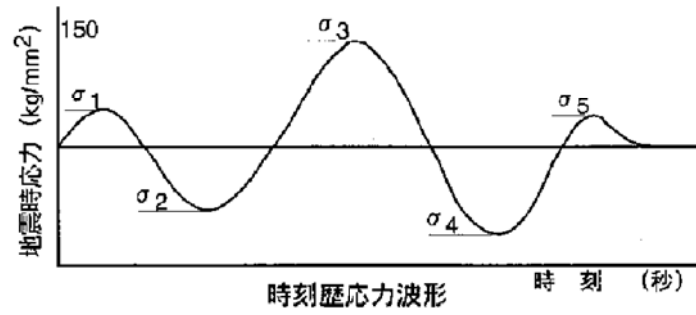


図5 最大ピーク応力に対する時刻歴波の応力算定概念図

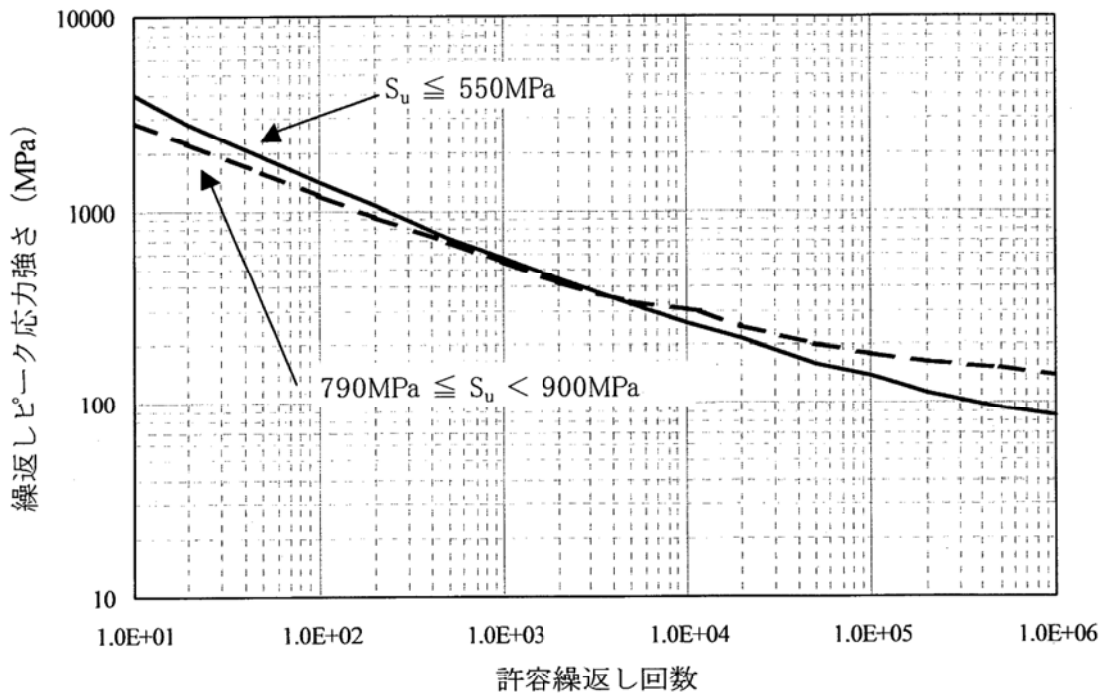


図6 炭素鋼、低合金鋼及び高張力鋼の設計疲労線図
(設計・建設規格 図添付 4-2-1 抜粋)

$$\text{地震 UF} = \frac{n_{\max}}{N_{\max}} + \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2}$$

ここで、 n_i : 各ピークのサイクル数

N_i : 各ピークに対する許容繰返し回数

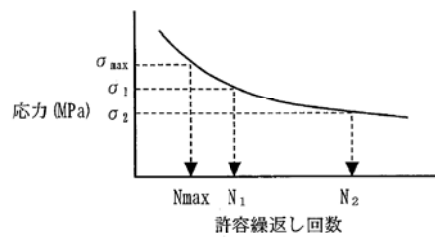


図7 UF 算定方法

表2 原子炉系（蒸気部）配管のNS, EW, 鉛直方向の等価繰返し回数

評価点	減衰定数	等価繰返し回数			評価用繰返し回数
		NS	EW	鉛直	
原子炉本体の基礎 EL. 19.856 m	h=2.0 %	37	28	26	40
		58	61	58	160

上段：TPO 地震時の入力地震動による等価繰返し回数

下段：基準地震動 S_s による等価繰返し回数

(3) TPO 地震による疲労累積係数の算出

表2に示すとおり、東海第二発電所 設置変更許可申請書（平成29年11月8日提出）で設定された基準地震動 S_s における等価繰返し回数が TPO 地震動による等価繰返し回数を上回っていることから、TPO 地震時の疲労累積係数の算出については、保守的に基準地震動 S_s の疲労累積係数に対して TPO 地震による等価繰返し回数（40）回を基に算定する。

基準地震動 S_s での等価繰返し回数は、工事計画認可申請（平成30年2月補正申請）で適用している160回とする。

したがって、TPO 地震による疲労累積係数は以下のとおり算出される。

TPO 地震による疲労累積係数

$$= \text{基準地震動 } S_s \text{ での疲労累積係数} \times \frac{\text{TPO 地震での繰返し回数}}{\text{基準地震動での繰返し回数}}$$

$$= 0.1640$$

運転開始後60年時点での運転実績回数に基づく疲労累積係数、基準地震動 S_s による疲労累積係数及び TPO 地震による疲労累積係数の算出結果(合計値)について表3に示す。

表3 TPO 地震を考慮した原子炉系（蒸気部）配管の疲労累積係数

系統	運転実績回数に基づく疲労累積係数	基準地震動 S_s による疲労累積係数	TPO 地震による疲労累積係数	合計 (許容値：1以下)
原子炉系 (蒸気部)	0.0853	0.6558	0.1640	0.9051

したがって、原子炉系（蒸気部）配管の疲労累積係数に TPO 地震による疲労累積係数を足し合わせた合計値が許容値1を下回り耐震安全上問題ない。

中性子照射脆化を考慮した耐震安全性評価について

中性子照射脆化を考慮した耐震安全性評価内容を以下に示す。

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压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ー部について、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 F-4200 「Paris and Sih の計算に基づく解」には、ノズルコーナー部について、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ついて、運転開始後 60 年時点の関連温度を算出した上で、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炉心領域胴のチャージ No. 毎の構成材料(部位 4-2) 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) 部位 4-2 の RT_{NDT} 初期値：-32 °C

(b) 運転開始後 60 年時点での ΔRT_{NDT} 予測値：56 °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：-16 °C*

*：JEAC4206 附属書 E-5000 による推定値であり、具体的には附属書図 E-5000-1 「初期プラントの破壊靱性設定フロー」に従って算出される。供用期間中の ΔRT_{NDT} を評価するにあたって、胴体フランジの RT_{NDT} 推定値（-17 °C）より高い溶接金属の RT_{NDT} 推定値（-16 °C）をコンポーネント代表値として管理しており、各部材の RT_{NDT}

初期値の推定について表 1 に整理する。

表 1 各部材の RT_{NDT} 初期値 (附属書 E-5000 による推定)

部材	チャージ No.	T _{NDT}	vT _{r50}	T _{cv}	RT _{NDT} 初期値 (°C)
胴体フランジ	47D222-1-2				-17
	47C191-1-2				-17
溶接金属	Y-204 : D53040, YF-200 : 3330-02205				-16
	Y-204 : D57310, YF-200 : 3330-02205				-16

*:母材 L 方向データを示す

なお、溶接金属の RT_{NDT} 初期値算出過程は以下のとおり。

- (a) E-5110 (2) より, T_{NDT} (上限値) = °C
- (b) E-5120 (2) より, vT_{r35M} = °C (試験温度)
- (c) E-5120 (2) (13)式より, vT_{r50} = (吸収エネルギーが 41 J 以上の温度) + 29
= °C
- (d) E-5120 (1) より, T_{CV} = MAX (vT_{r35M}, vT_{r50}) = °C
- (e) E-5130 (1) より, RT_{NDT} = MAX (T_{NDT}, T_{CV} - 33) = -16 °C

② 寸法

- a. 円筒胴内径 Di : 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 × t

④ 応力値

a. 円筒胴の応力 (計算においては, 外面腐食代 0.8 mm を考慮した寸法を用いる。)

- (a) 円筒胴の板厚 T = t - 0.8 = mm
- (b) 円筒胴の内半径 Ri = Di / 2 = mm
- (c) 円筒胴の外半径 Ro = Ri + T = mm
- (d) 円筒胴の断面積 A = π (Ro² - Ri²) = × 10⁶ mm²
- (e) 円筒胴の断面係数 Zo = π/4 × (Ro⁴ - Ri⁴) / Ro = × 10⁹ mm³
- b. 円筒胴の最高使用圧力 (Pd = 8.62 MPa) に対する応力

- (a) 円周方向応力 $\sigma_{t1m} = Pd \times Ri / T = \square$ MPa (一次膜応力)
 (b) 軸方向応力 $\sigma_{11m} = Pd \times Ri^2 / (Ro^2 - Ri^2) = \square$ MPa (一次膜応力)
 (c) 円周方向応力 $\sigma_{t2b} = Pd \times (1 + (Ro / Ri)^2) / ((Ro / Ri)^2 - 1) - \sigma_{t1m} = \square$ MPa
 (二次曲げ応力)

c. 円筒胴の供用状態 A 及び B+地震荷重による応力

- (a) 鉛直荷重 $V = \square$ kN (供用状態 A 及び B) + \square kN (地震荷重 S_s)
 $= \square$ kN
 (b) モーメント $M = \square$ 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 $\sigma_{11mS} = V / A + M / Zo = \square$ 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。

$$K_{IT} = Mt^{*1} \times \Delta Tw^{*2} = \square = \square \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

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

*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

円筒胴に対して仮想欠陥の方向及び地震荷重の有無により、以下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を、JEAC4206 附属書 A の破壊力学的手法により評価する。

具体的には、以下のとおり内圧による応力、供用状態 A 及び B の荷重、地震荷重及び熱応力による応力より K_I 、 K_{IT} 及び要求温度を算出した上で P-T 線図を作成している。

a. 内圧による応力

ケース1及びケース2については最高使用圧力に対する円周方向応力 σ_{t1m} 及び σ_{t2b} を、ケース3及びケース4については供用状態 A 及び B の軸方向応力 σ_{11m} を圧力値の比率で補正する。

ケース1及びケース2：

$$\text{応力拡大係数} : K_I = S_f \times (\sigma_{t1m} \times P / 8.62 \times M_m) + (\sigma_{t2b} \times P / 8.62 \times M_b)$$

ケース3及びケース4：

$$\text{応力拡大係数} : K_I = S_f \times (\sigma_{11m} \times P / 8.62 \times M_m)$$

b. 地震荷重による応力

ケース4について、4.③のとおり地震荷重による軸方向応力による K_I を考慮する。

$$\text{応力拡大係数} : K_I = S_f \times \sigma_{11ms} \times M_m$$

なお、ケース1及びケース3については、地震荷重への考慮なしであり、ケース2についても、地震荷重による応力は軸方向応力であることから軸方向欠陥への影響はなく、考慮なし（ケース1と同一の結果）となる。

c. 熱応力

⑤に示すとおり、図1の温度分布解析結果から、最大温度差による K_{IT} を一律に考慮する。

d. T-RT_{NDT}

T-RT_{NDT} の算出は、JEAC4206 附属書 A-3222 (7) 式による。

$$K_{IC} = 36.48 + 22.78 \exp[0.036 (T - RT_{NDT})]$$

ここで、関連温度の要求値を計算するため、T-RT_{NDT} についての式に変形する。

$$T - RT_{NDT} = 1 / 0.036 \times \ln ((K_{IC} - 36.48) / 22.78)$$

関連温度の要求値は、 K_I が K_{IC} を超えない T-RT_{NDT} として以下式より求める。

$$T - RT_{NDT} \geq 1 / 0.036 \times \ln ((K_I - 36.48) / 22.78)$$

e. 圧力・温度制限の要求温度 T

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。圧力・温度制限の要求温度 T の算出にあたっては、関連温度 RT_{NDT} 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

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。この内、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 2 に示す。表 2 より供用状態 A 及び B の場合には、以下の制限線が設定される。

a. 17 °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. 73 °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。

なお、耐圧・漏えい試験の場合には、17 °Cの制限線とともに、供用前の水圧試験圧力の 20 %を超える圧力であり、燃料装荷後の場合に対する 34 °Cの制限線が設定される。

表 2 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	
耐圧・漏えい試験（未臨界）	燃料装荷後	≤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 °C	-16 + 33 = 17 °C
	燃料装荷後	>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} + 50 °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	34 °C (= -16+50) と 24 °Cの高い方
	燃料装荷前	すべて	圧力容器材料の最も高い RT _{NDT} + 33 °C	-12 + 33 = 21 °C
供用状態 A 及び B（耐圧・漏えい試験を除く）	炉心が未臨界	≤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} + 33 °C	-16 + 33 = 17 °C
	炉心が未臨界	>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 °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	51 °C (= -16+67) と 24 °Cの高い方
	炉心が臨界	≤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} + 33 °C	-16 + 33 = 17 °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	37 °Cと 73 °C (= -16 + 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 年時点における要求温度の計算例（ケース 4）を表 3 に、P-T 線図を図 2 に示す。

表 3 運転開始後 60 年時点の要求温度の計算例（炉心臨界時）（ケース 4）（1/2）

応力成分： σt
 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 $RT_{NDT} = 24$ °C （60年中長期の推定値）

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_{It} ($MPa\sqrt{m}$)	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}	Mm *2 (\sqrt{m})	Mb *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 3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（WRC Bulletin No. 175 Appendix 3により算出）

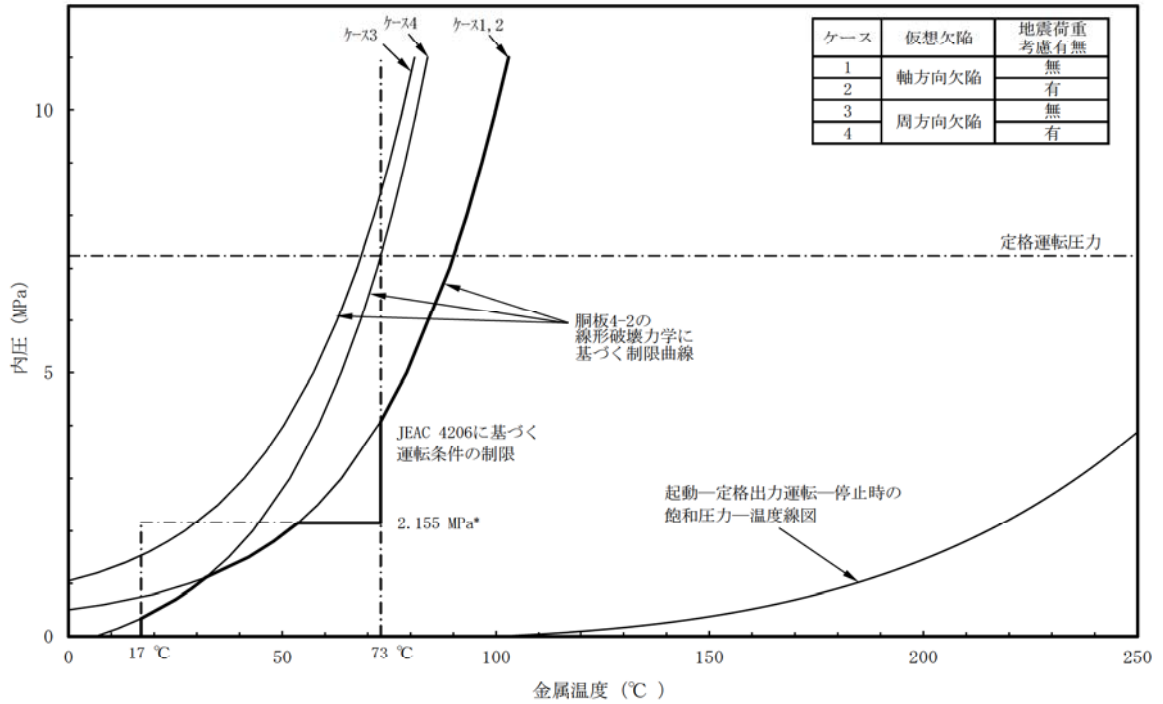
*4：内圧及び死荷重+地震荷重による応力から求められた応力拡大係数に、 K_{It} を加えたもの。

表3 運転開始後60年時点の要求温度の計算例（耐圧・漏えい試験時）（ケース4）（2/2）

応力成分： σt
 板厚 $t = \square$ mm
 欠陥深さ $a/t = 0.25$
 安全係数 $Sf = 1.5$ （一次応力の K_I に関して）
 関連温度 $RT_{NDT} = 24$ °C （60年中長期の推定値）

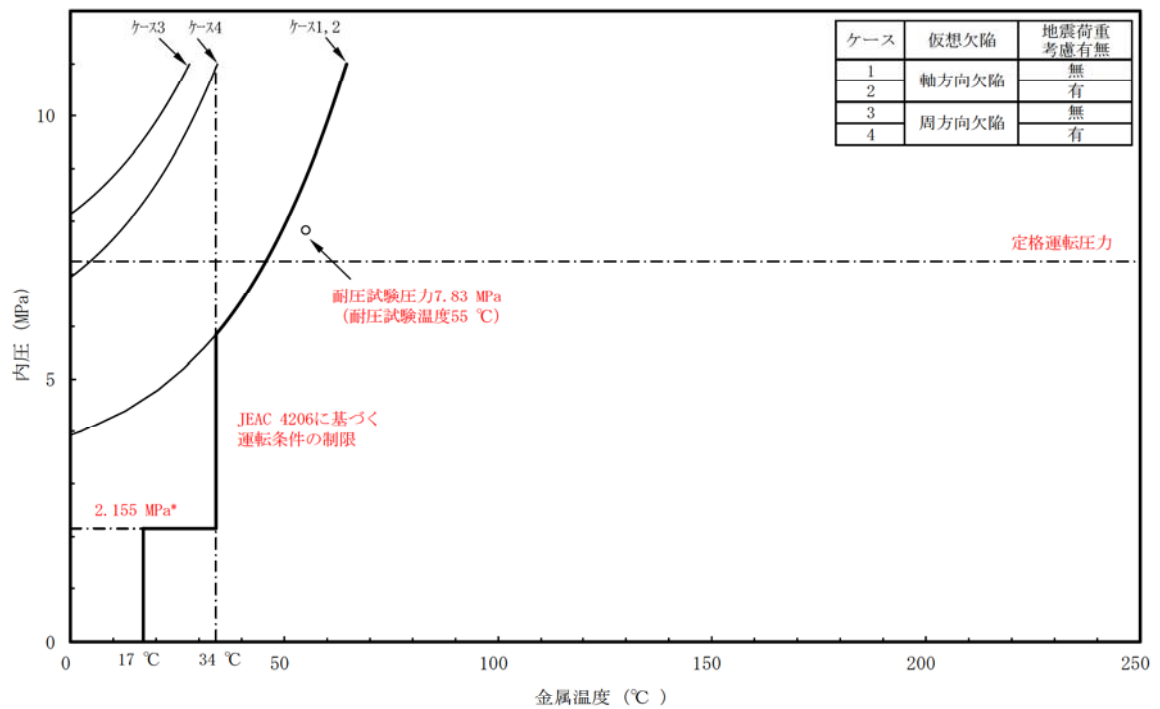
荷重組合せ	内圧 P (MPa)	応力 (MPa) *1				補正係数		温度勾配 による 応力拡大係数 K_{It} (MPa \sqrt{m})	応力拡大 係数 K_I *4 (MPa \sqrt{m})	計算された $T-RT_{NDT}$ (°C)	要求温度 T (°C)
		σ_{m1}	σ_{b1}	σ_{m2}	σ_{b2}	M_m *2 (\sqrt{m})	M_b *3 (\sqrt{m})				
最高使用圧力											
死荷重+地震荷重											
Load Combination 1											
Load Combination 2											
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 3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（WRC Bulletin No.175 Appendix 3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_{It} を加えたもの。



* : 供用前の耐圧試験圧力の 20 %を示す ((最高使用圧力 8.62 MPa) × (供用前耐圧 1.25) × (20 %) = 2.155 MPa)

図 2 運転開始後 60 年時点の原子炉圧力容器の P-T 線図 (炉心臨界時) (1/2)



* : 供用前の耐圧試験圧力の 20 %を示す ((最高使用圧力 8.62 MPa) × (供用前耐圧 1.25) × (20 %) = 2.155 MPa)

図 2 運転開始後 60 年時点の原子炉圧力容器の P-T 線図 (耐圧・漏えい試験時) (2/2)

3. K_{IC} 下限包絡曲線と K_I 曲線による評価

(1) K_{IC} 下限包絡曲線

K_{IC} 下限包絡曲線は、炉心領域胴の関連温度を考慮し、JEAC4206 附属書 A-3222 (7) 式より算出した要求温度に、JEAC4206 表 FB-4100-1 に規定されたマージン 22 °C を考慮して、 K_{IC} 下限包絡曲線をプロットする。 K_{IC} 曲線作成にあたっての要求温度の計算値を表 4 に示す。耐圧・漏えい試験時の場合は、マージン 22 °C は考慮不要となる。

(2) 応力拡大係数 K_I

① K_I 曲線 (炉心臨界時)

炉心臨界時の K_I 曲線を算出するにあたり、BWR においては起動、定格出力運転及び停止時まで飽和圧力-温度線図に従うことから、飽和圧力-温度線図で示される圧力に対して、「⑥ a. 内圧による応力」と同様に応力拡大係数を求め、「⑥ 破壊力学的手法による P-T 線図」と同様に K_I 曲線をプロットする。 K_I 曲線作成にあたっての要求温度の計算例 (ケース 4) を表 5 に示す。

熱応力は、温度分布解析の結果から最大温度差による K_{IT} を一律に考慮するが、東海第二の熱サイクル図上、原子炉压力容器内の最低温度である 38 °C を下回る範囲については、破線で示すとともに図 3 に示す円筒胴内外表面の温度解析結果より保守的に $\Delta T_w = \square$ °C を設定する。

② K_I 評価点 (耐圧・漏えい試験時)

耐圧・漏えい試験時においては、補正工認における K_I 評価点をプロットする。補正工認「V-1-2-2 原子炉压力容器の脆性破壊防止に関する説明書」では、中性子照射脆化を考慮した破壊靱性の評価は円筒胴 3 及び 4 について実施することとしており、中性子照射量を考慮する位置は内表面及び表面欠陥からの仮想欠陥深さ 1/4t、耐圧・漏えい試験圧力 (最高使用圧力以下) による円筒胴 3 及び 4 の応力拡大係数は JEAC4206 附属書 A 及び附属書 F による評価結果として \square MPa $\cdot\sqrt{m}$ 、耐圧・漏えい試験温度は 55 °C である。

運転状態として、耐圧・漏えい試験と地震との重畳は考慮する必要があるものの、内圧+地震荷重により発生する軸方向応力は小さく、内圧による周方向応力を考慮しておけば評価として十分であることから、地震荷重の影響を考慮する必要はない。

(3) 耐圧・漏えい試験時と炉心臨界時の扱い

前述のとおり、炉心臨界時の場合は応力拡大係数に安全率 2 及び K_{IT} を考慮し、要求温度にはマージン 22 °C を考慮するが、耐圧・漏えい試験時の場合は安全率 1.5 となり、最大温度差による K_{IT} 及びマージンは考慮不要となる。

(1) ~ (3) により算出した運転開始後 60 年時点の K_{IC} 下限包絡曲線と K_I の関係を図 4 に示す。いずれも $K_{IC} > K_I$ を満足することから、原子炉压力容器の中性子照射を考慮した耐震安全性評価の結果問題ない。

表4 運転開始後60年時点の K_{Ic} 曲線の計算値(炉心臨界時)

No.	応力拡大係数 K_{Ic} ($MPa\sqrt{m}$)	計算された $T-RT_{NDT}$ ($^{\circ}C$)	要求温度 T ($^{\circ}C$)	要求温度 + 22 $^{\circ}C$ マージン $T + 22$ ($^{\circ}C$)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				

表5 運転開始後60年時点の K_I 曲線の計算例(炉心臨界時)(ケース4)

応力成分: σ_t
 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)

荷重組合せ	温度 T ($^{\circ}C$)	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_{It} ($MPa\sqrt{m}$)	応力拡大係数 K_I *4 ($MPa\sqrt{m}$)
			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 3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 (WRC Bulletin No. 175 Appendix 3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_{It} を加えたもの。

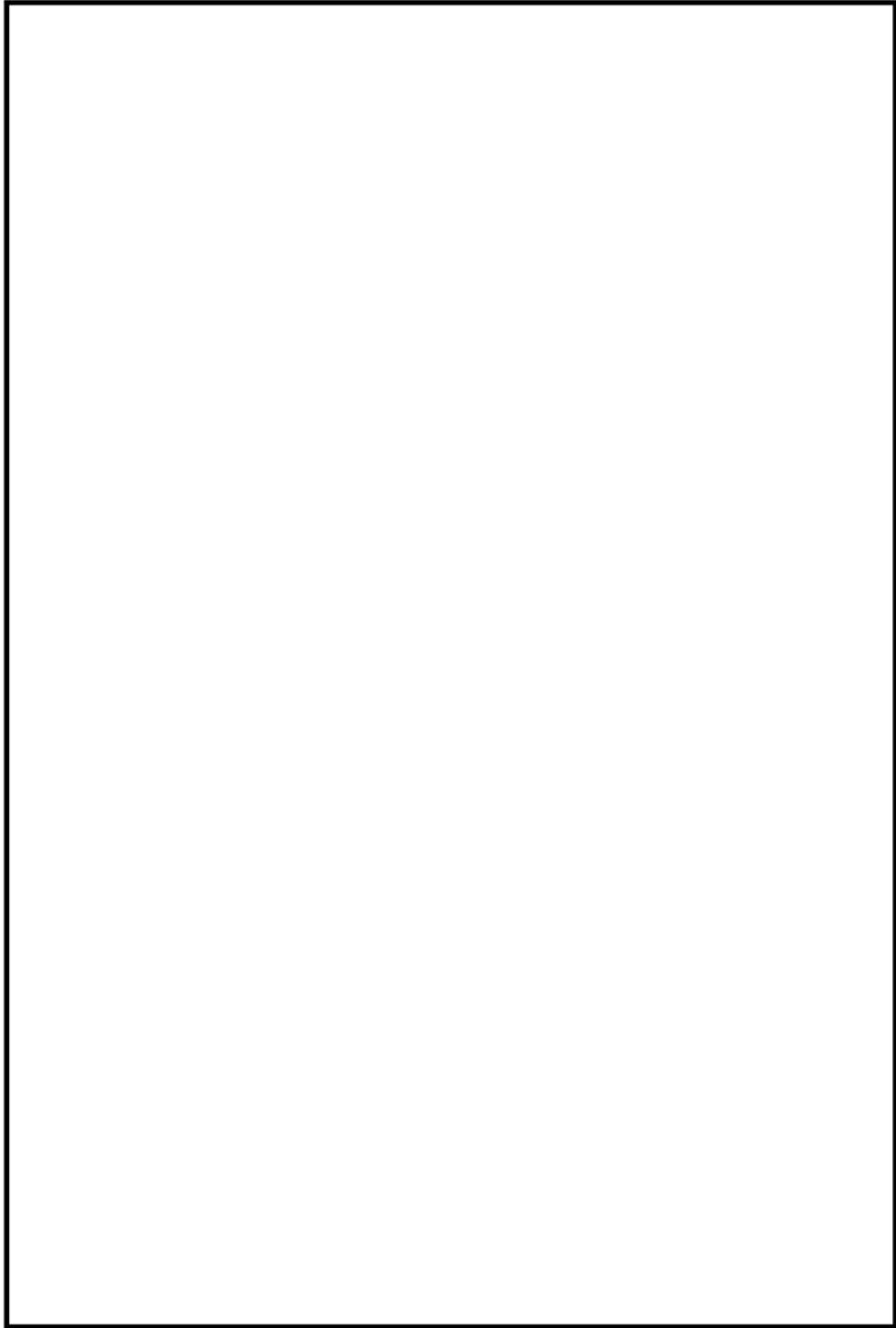


図 3 円筒胴内外表面の温度解析結果

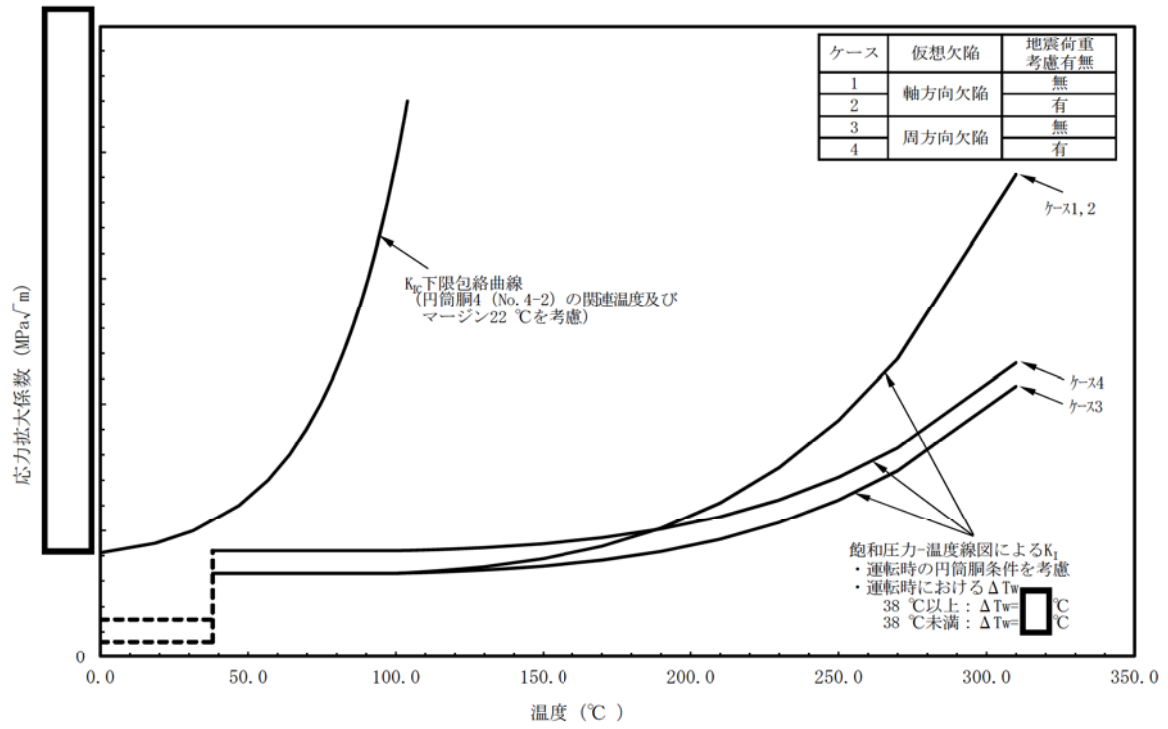


図4 運転開始後60年時点の原子炉圧力容器 K_{IC} 下限包絡曲線と K_I 曲線(炉心臨界時) (1/2)

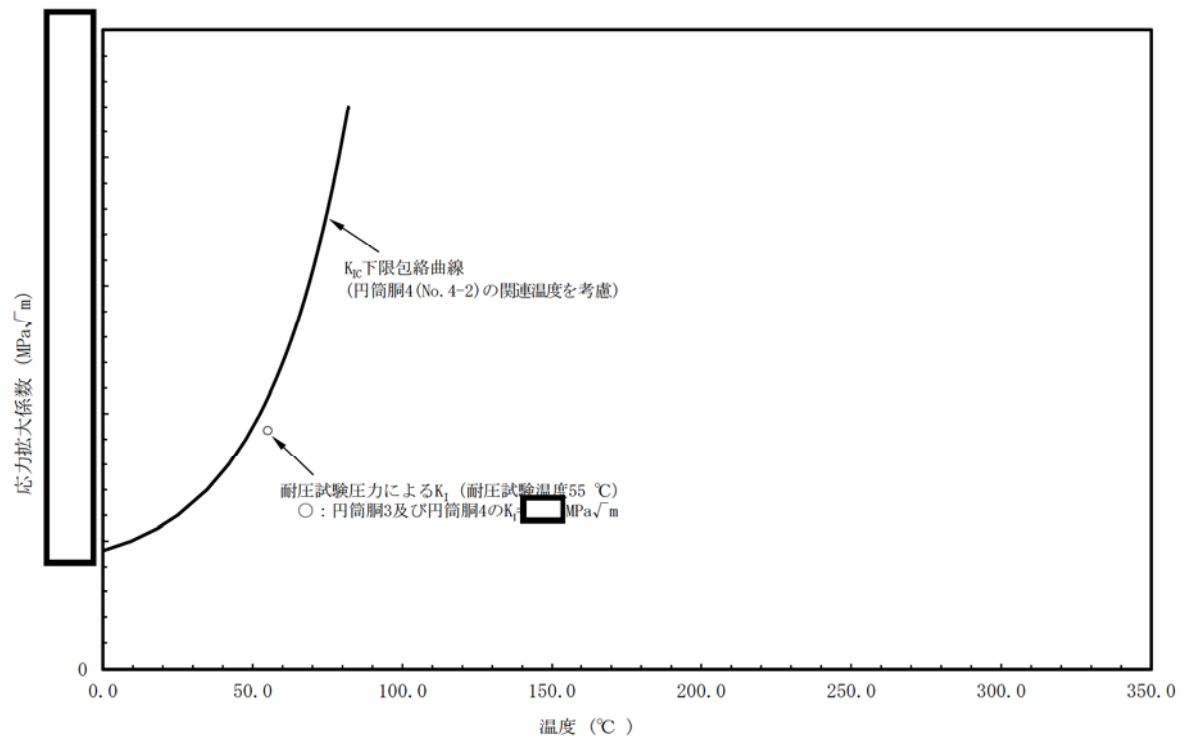


図4 運転開始後60年時点の原子炉圧力容器 K_{IC} 下限包絡曲線と補正工認の K_I 評価点 (耐圧・漏えい試験時) (2/2)

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）に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、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。

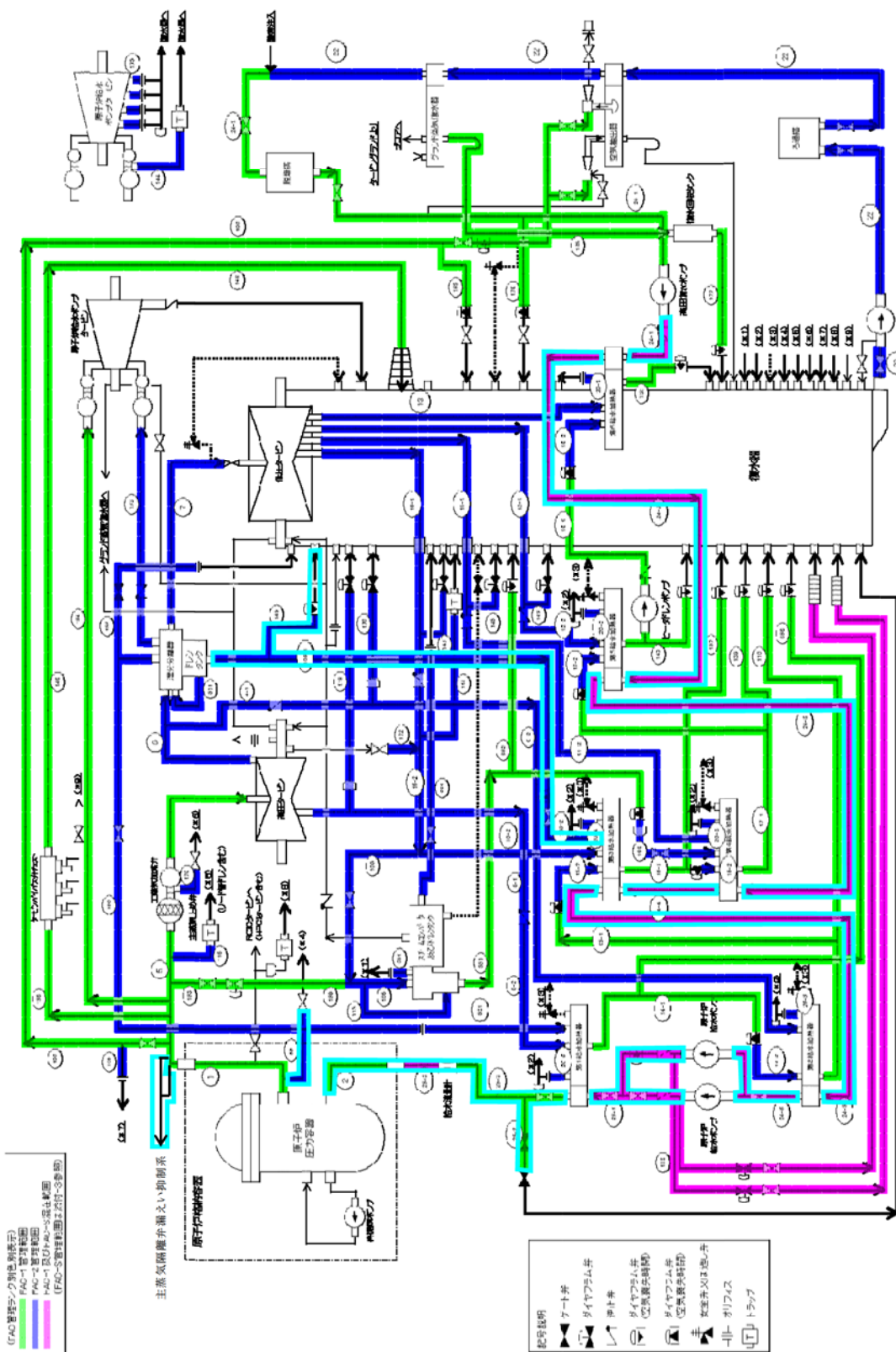
(5) 評価内容

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。



①～⑩ 減肉を考慮した耐震評価対象範囲を示す
 ⑪～⑳ 減肉を考慮しない耐震評価対象範囲を示す
 ㉑～㉒ 減肉を考慮した耐震評価対象範囲を示す
 ㉓～㉔ 減肉を考慮しない耐震評価対象範囲を示す

□ : 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

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

(JSMES NHI-2006 図 CA-1000-1 (追加))

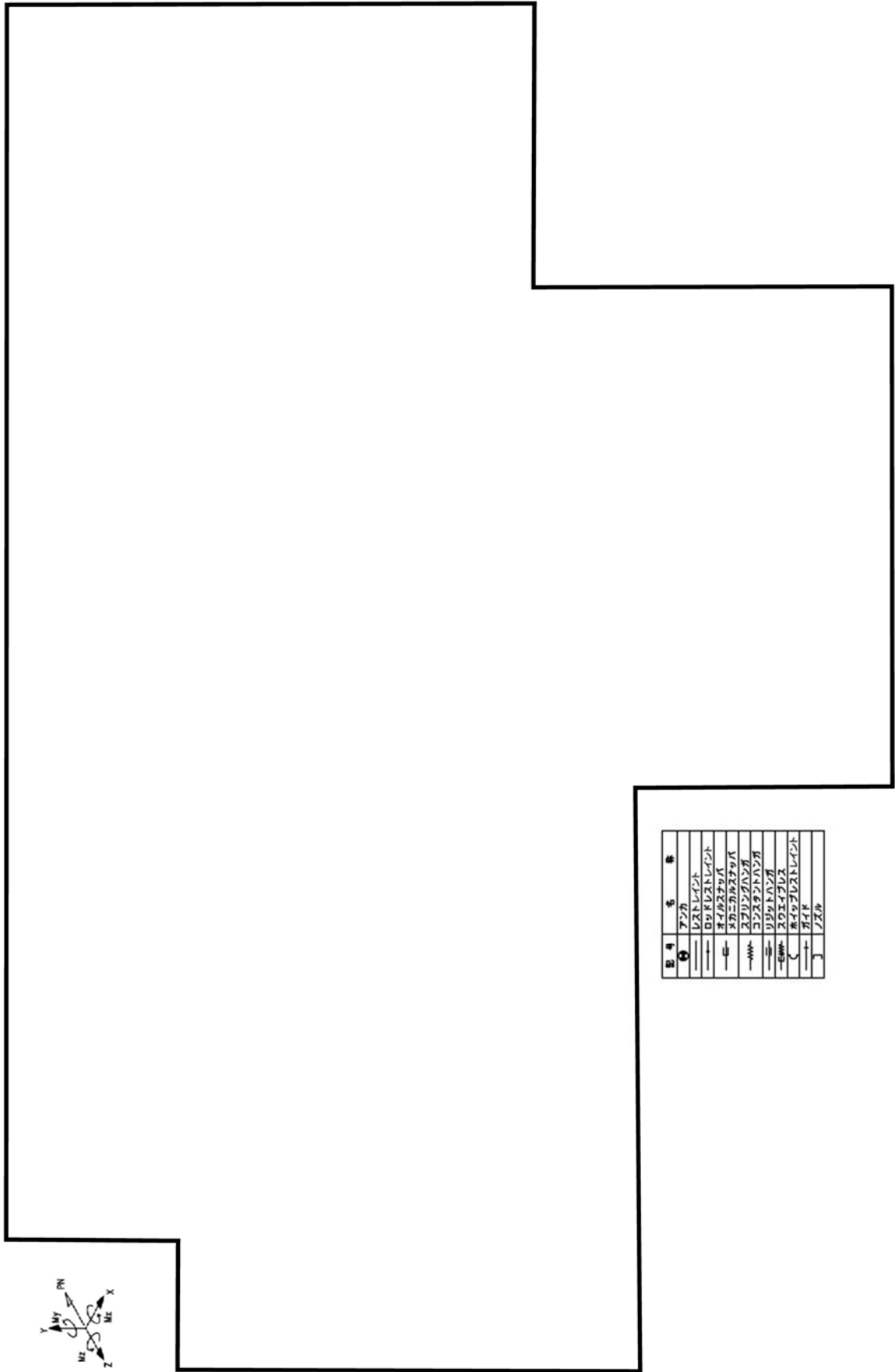


図2 原子炉系（純水部）[クラス1-耐震Sクラス] アイソメ図

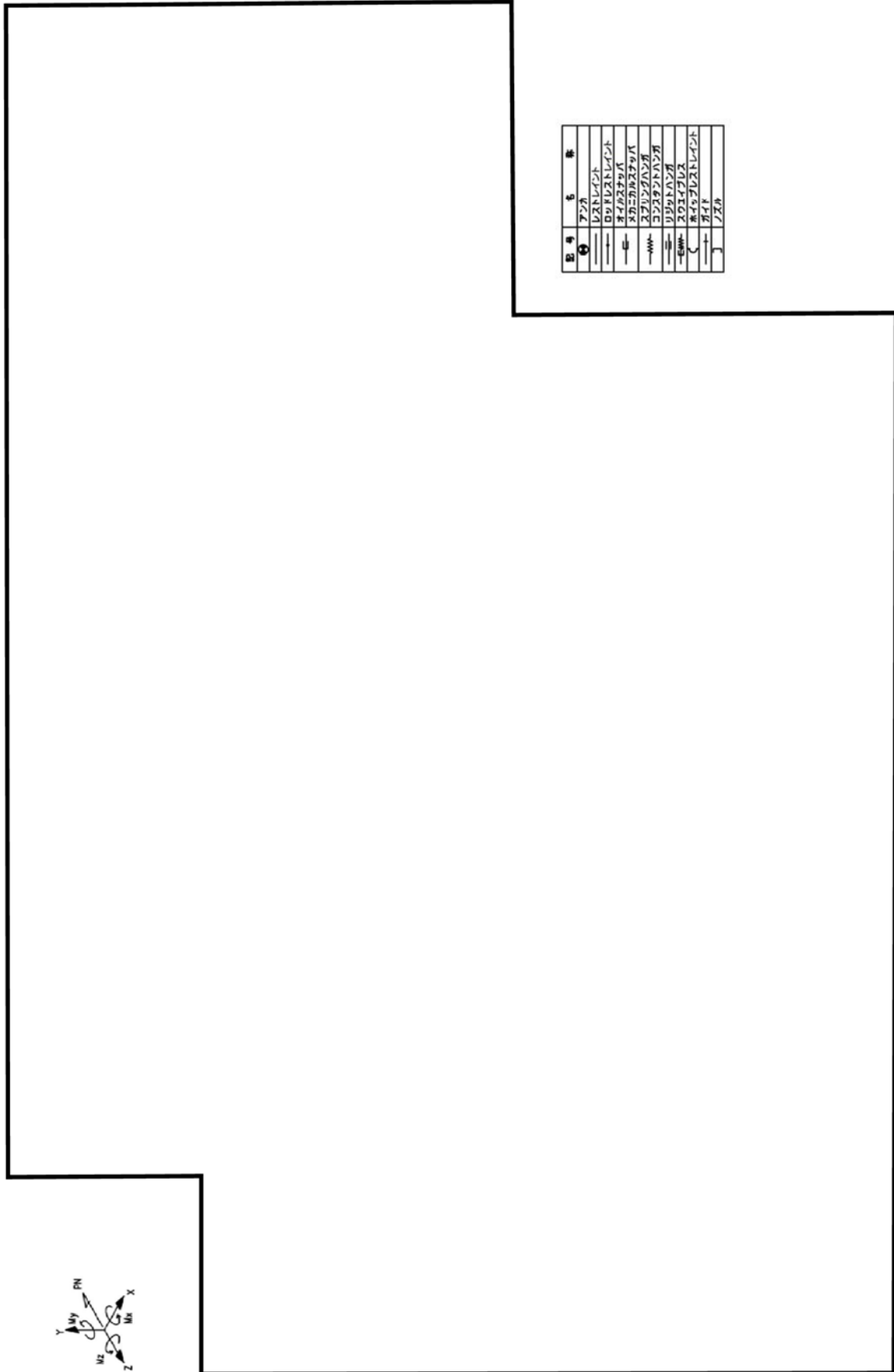
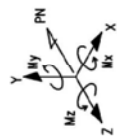


図3 原子炉系（純水部）[クラス2-耐震Sクラス] アイソメ図



記号	名称
①	炉心
②	炉心反射体
③	炉心遮蔽体
④	炉心冷却系
⑤	炉心冷却系配管
⑥	炉心冷却系配管
⑦	炉心冷却系配管
⑧	炉心冷却系配管
⑨	炉心冷却系配管
⑩	炉心冷却系配管
⑪	炉心冷却系配管
⑫	炉心冷却系配管
⑬	炉心冷却系配管
⑭	炉心冷却系配管
⑮	炉心冷却系配管
⑯	炉心冷却系配管
⑰	炉心冷却系配管
⑱	炉心冷却系配管
⑲	炉心冷却系配管
⑳	炉心冷却系配管
㉑	炉心冷却系配管
㉒	炉心冷却系配管
㉓	炉心冷却系配管
㉔	炉心冷却系配管
㉕	炉心冷却系配管
㉖	炉心冷却系配管
㉗	炉心冷却系配管
㉘	炉心冷却系配管
㉙	炉心冷却系配管
㉚	炉心冷却系配管
㉛	炉心冷却系配管
㉜	炉心冷却系配管
㉝	炉心冷却系配管
㉞	炉心冷却系配管
㉟	炉心冷却系配管
㊱	炉心冷却系配管
㊲	炉心冷却系配管
㊳	炉心冷却系配管
㊴	炉心冷却系配管
㊵	炉心冷却系配管
㊶	炉心冷却系配管
㊷	炉心冷却系配管
㊸	炉心冷却系配管
㊹	炉心冷却系配管
㊺	炉心冷却系配管
㊻	炉心冷却系配管
㊼	炉心冷却系配管
㊽	炉心冷却系配管
㊾	炉心冷却系配管
㊿	炉心冷却系配管

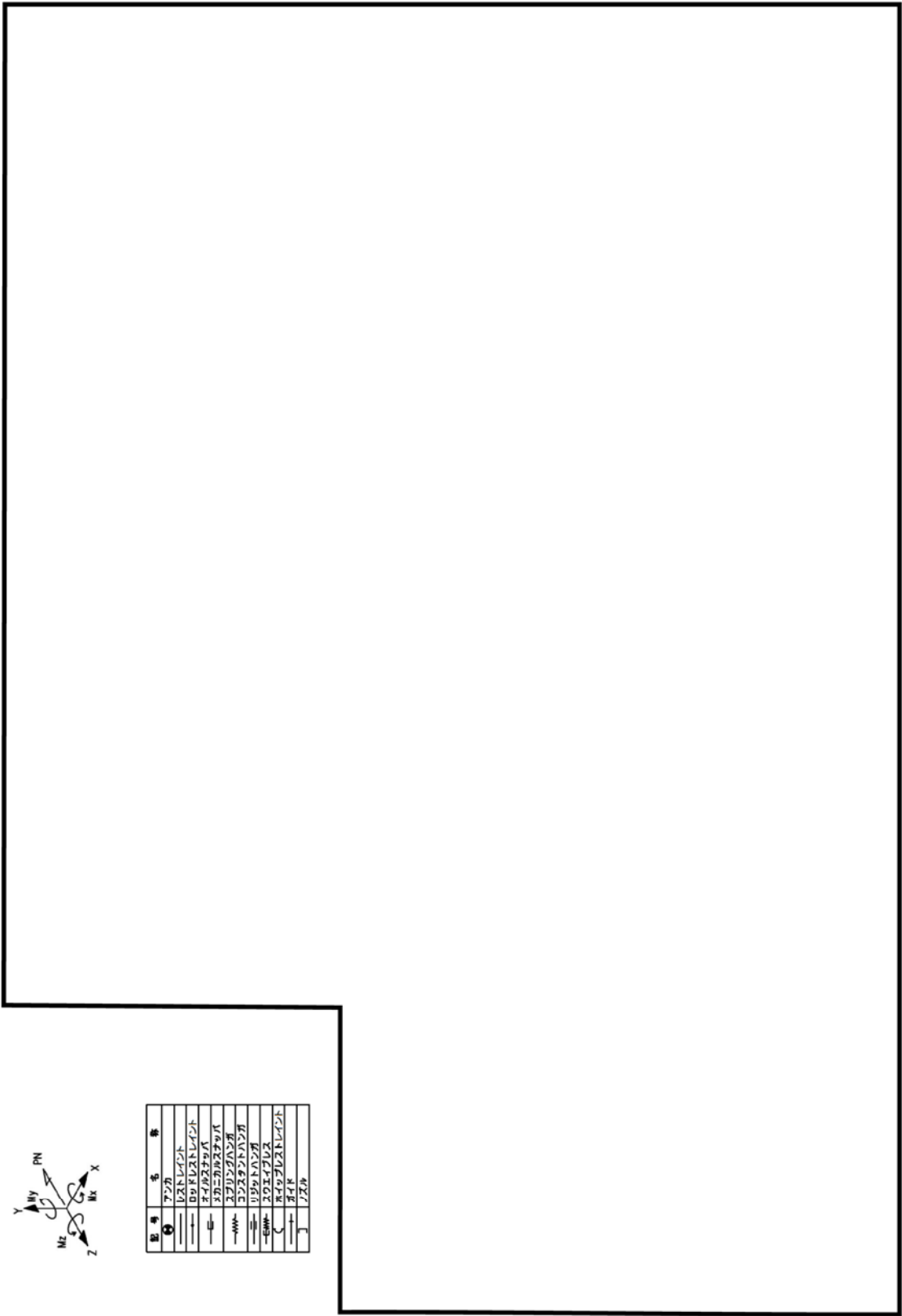
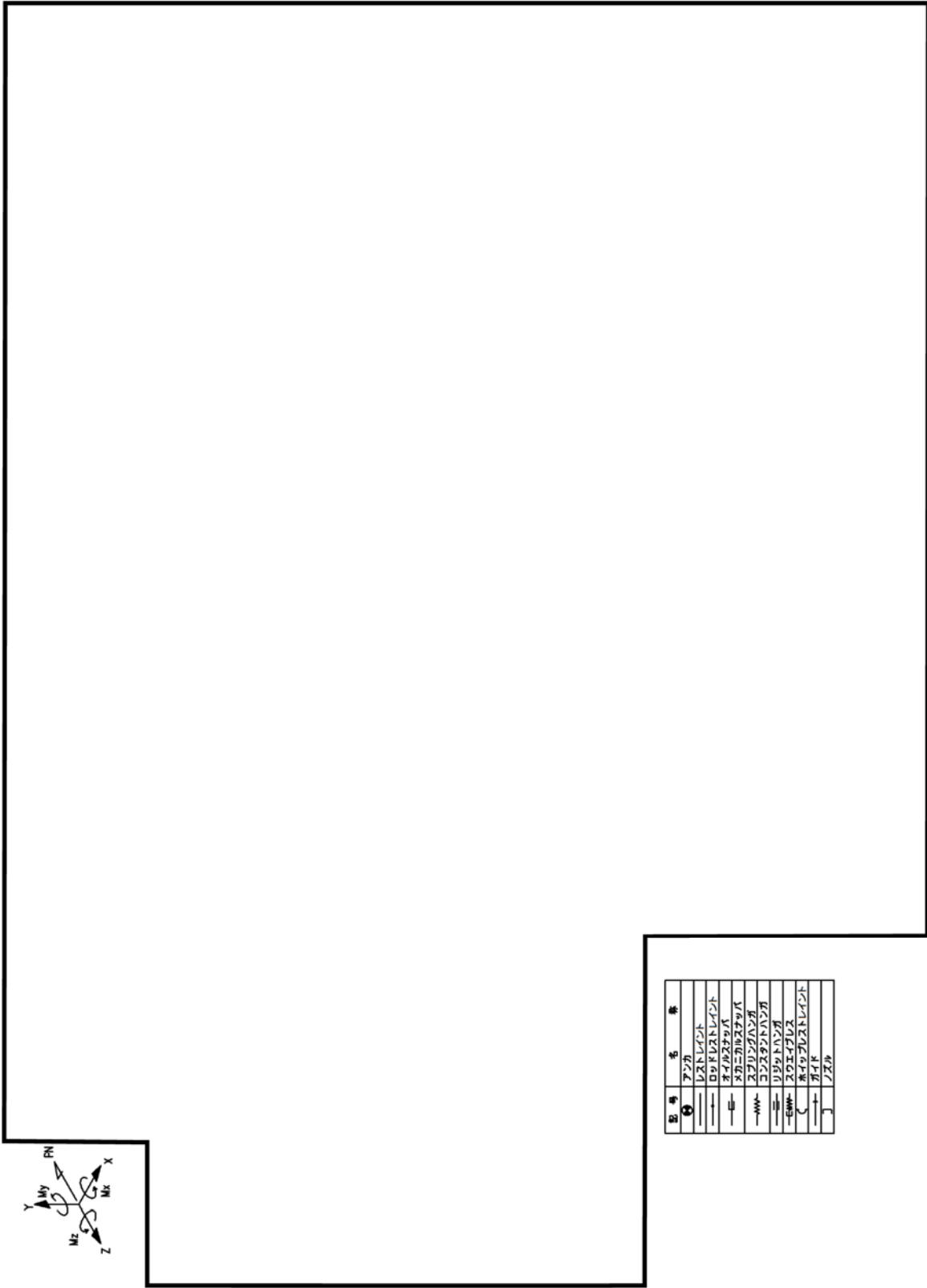
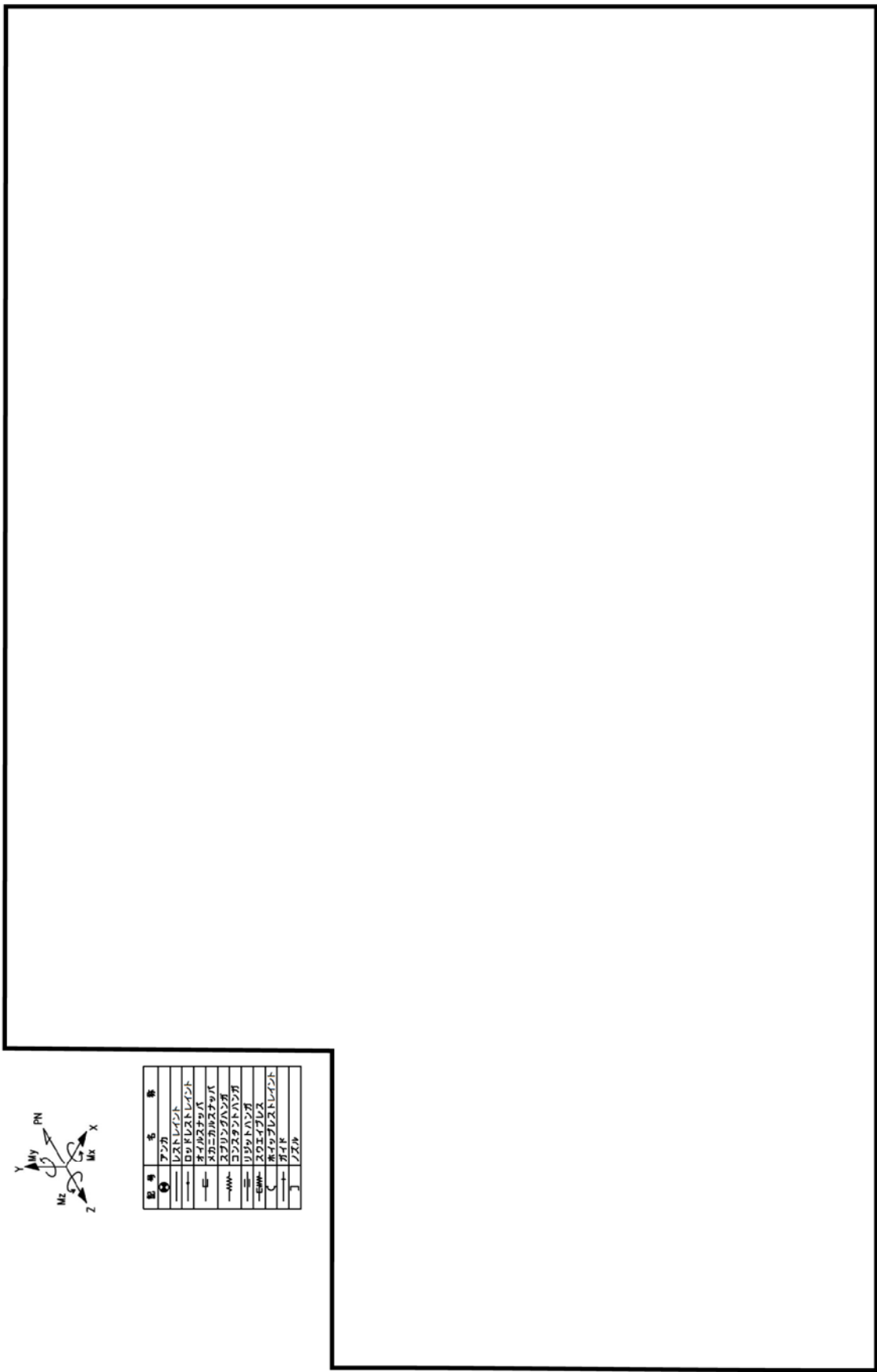


図 4 (1/2) 原子炉系 (蒸気部) [クラス 1-耐震 S クラス] アイソメ図



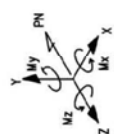
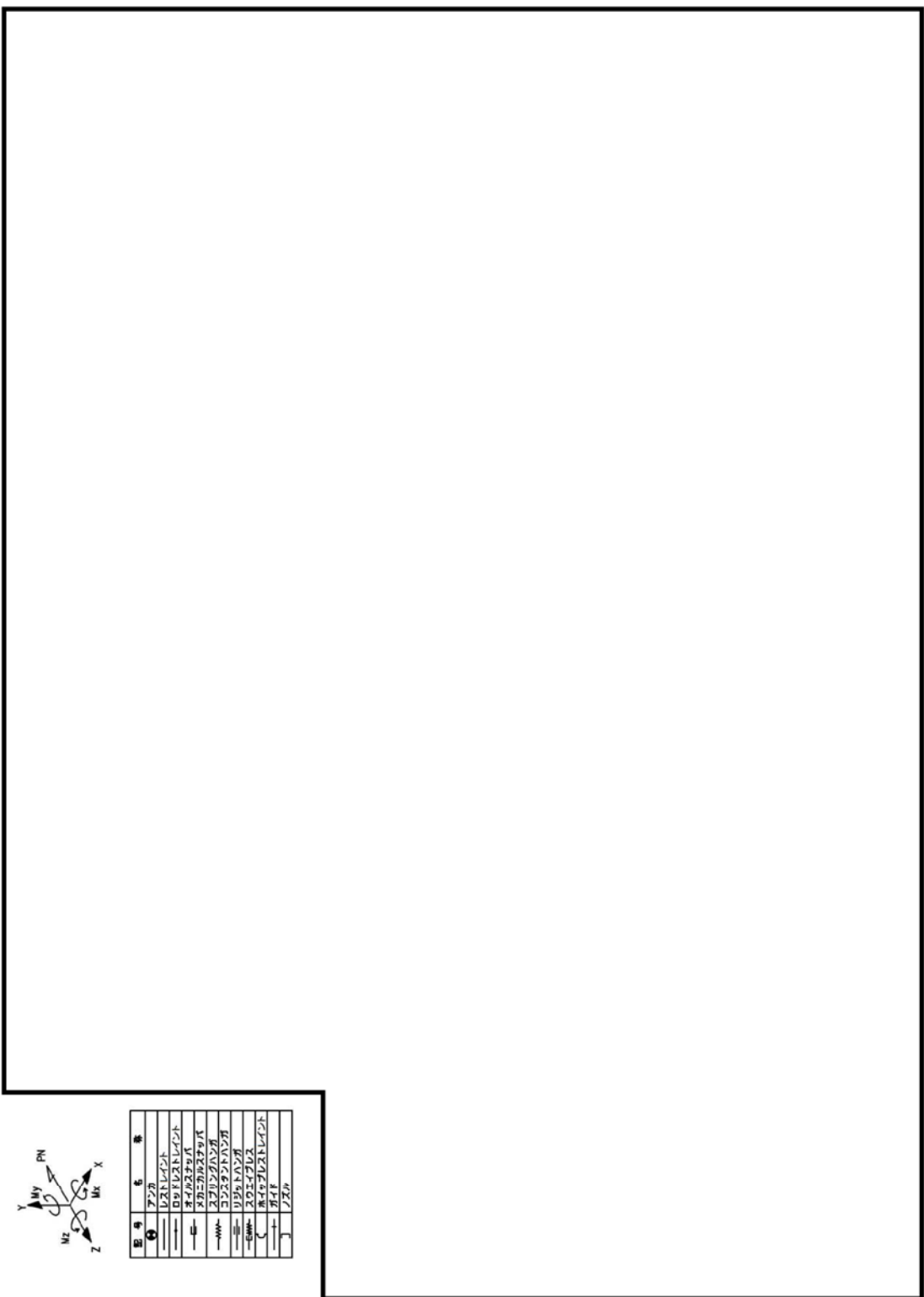
記号	名称
○	アーク
—	バラスト
—	バラストレイト
—	パイプ
—	パイプジョイント
—	パイプフック
—	パイプサポーター
—	パイプスリーブ
—	パイプステップ
—	パイプブランチ
—	パイプエルブ
—	パイプエルブレイト
—	パイプ
—	パイプ

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



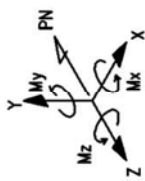
記号	名称
①	ファン
②	コンテナ
③	コンテナ
④	コンテナ
⑤	コンテナ
⑥	コンテナ
⑦	コンテナ
⑧	コンテナ
⑨	コンテナ
⑩	コンテナ
⑪	コンテナ
⑫	コンテナ
⑬	コンテナ
⑭	コンテナ
⑮	コンテナ
⑯	コンテナ
⑰	コンテナ
⑱	コンテナ
⑲	コンテナ
⑳	コンテナ
㉑	コンテナ
㉒	コンテナ
㉓	コンテナ
㉔	コンテナ
㉕	コンテナ
㉖	コンテナ
㉗	コンテナ
㉘	コンテナ
㉙	コンテナ
㉚	コンテナ
㉛	コンテナ
㉜	コンテナ
㉝	コンテナ
㉞	コンテナ
㉟	コンテナ
㊱	コンテナ
㊲	コンテナ
㊳	コンテナ
㊴	コンテナ
㊵	コンテナ
㊶	コンテナ
㊷	コンテナ
㊸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

図5 原子炉系（蒸気部）[クラス2-耐震Sクラス] アイソメ図



記号	名	番
⑥	アール	
—	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
●	アング
—	レストレイント
—	ロッドレストレイント
—	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
—	リジッドハンガ
—	スウェイブレス
—	ホイップレストレイント
—	ブレイク
—	ノズル

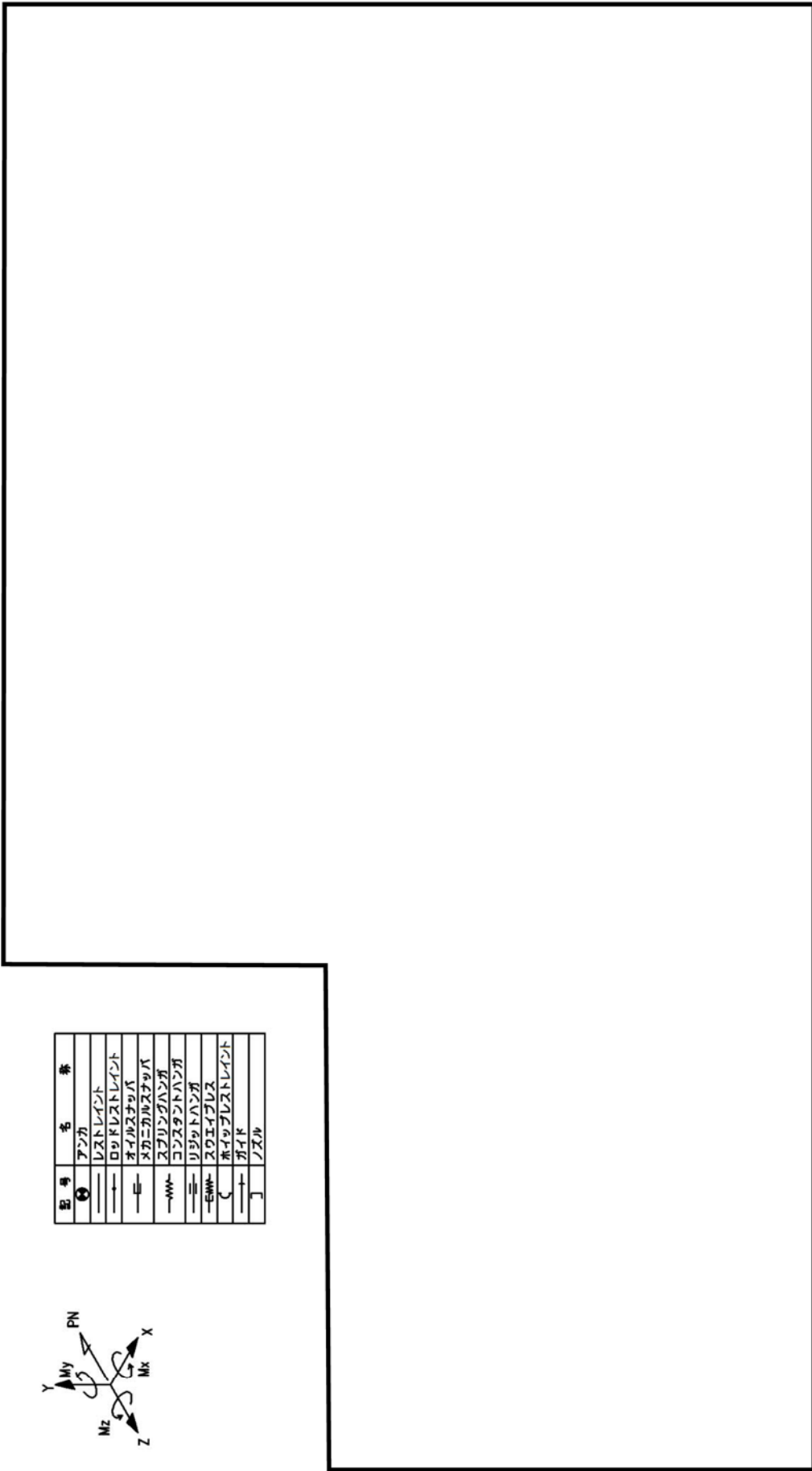


図7 給水系 [クラス2-耐震Sクラス] アイソメ図



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

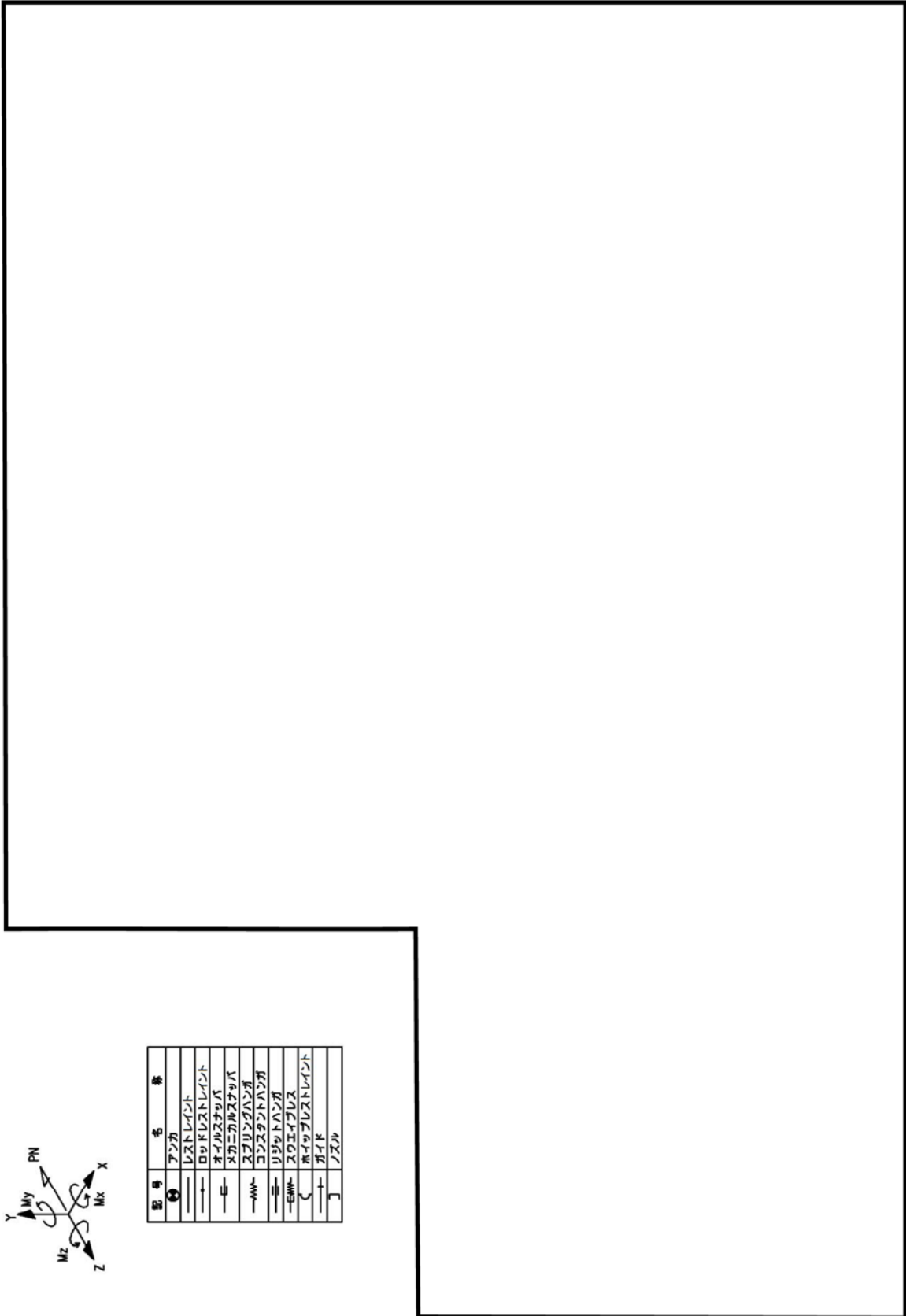


図8 給水系 [クラス2-耐震Bクラス] アイソメ図



記号	名称
\odot	アング
\ominus	レストメント
\rightarrow	ワットレストメント
\leftarrow	キアキアキア
\uparrow	アムアムアム
\downarrow	アムアムアム
\oplus	ワットアム
\ominus	ワットアム
\odot	アムアムアム
\ominus	アムアムアム

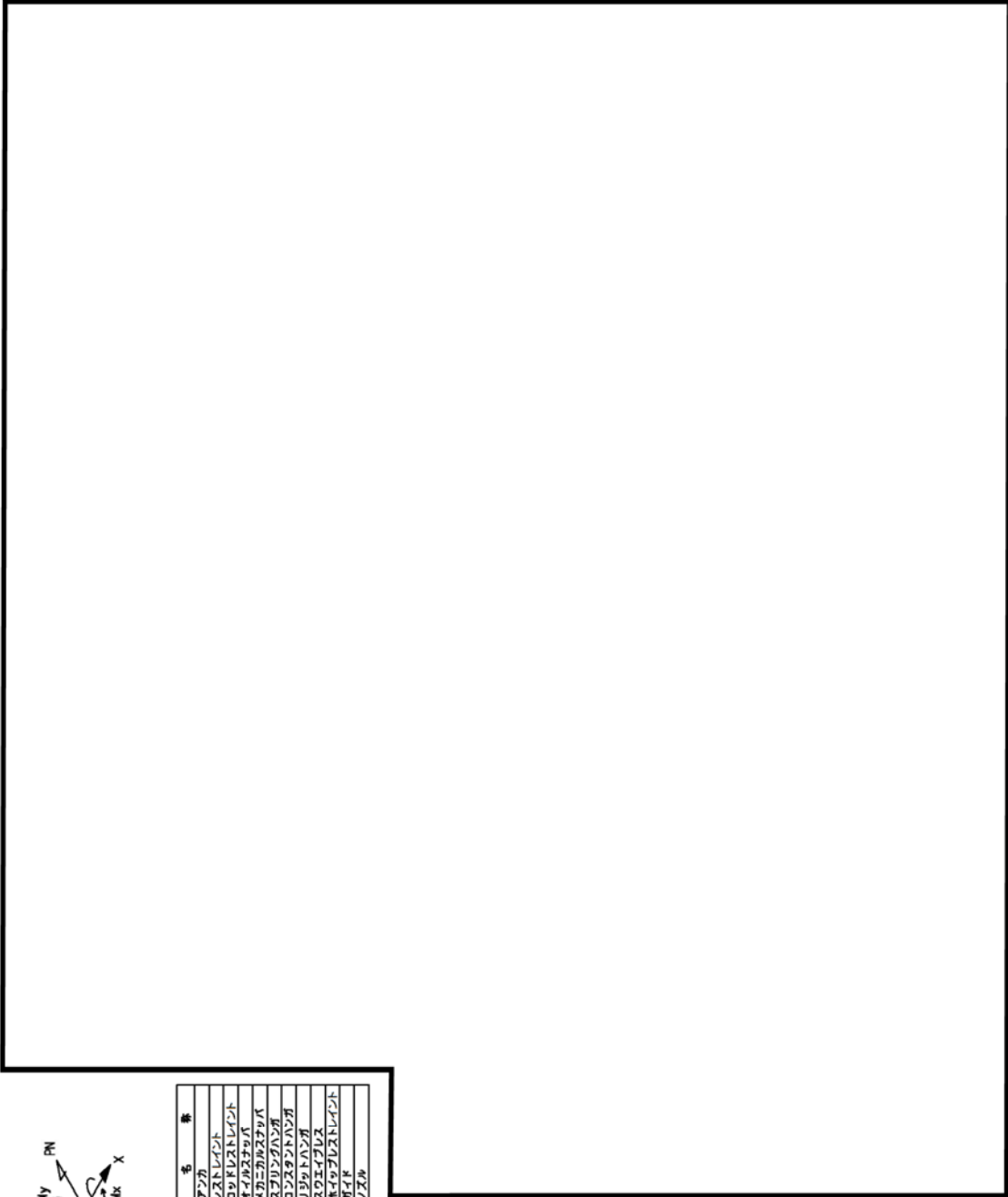
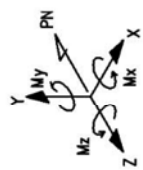


図9 給水系 [クラス3-耐震Bクラス] アイソメ図



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
—	ネカニカルスナック
—	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ト
—	ワイヤ
—	ワズル

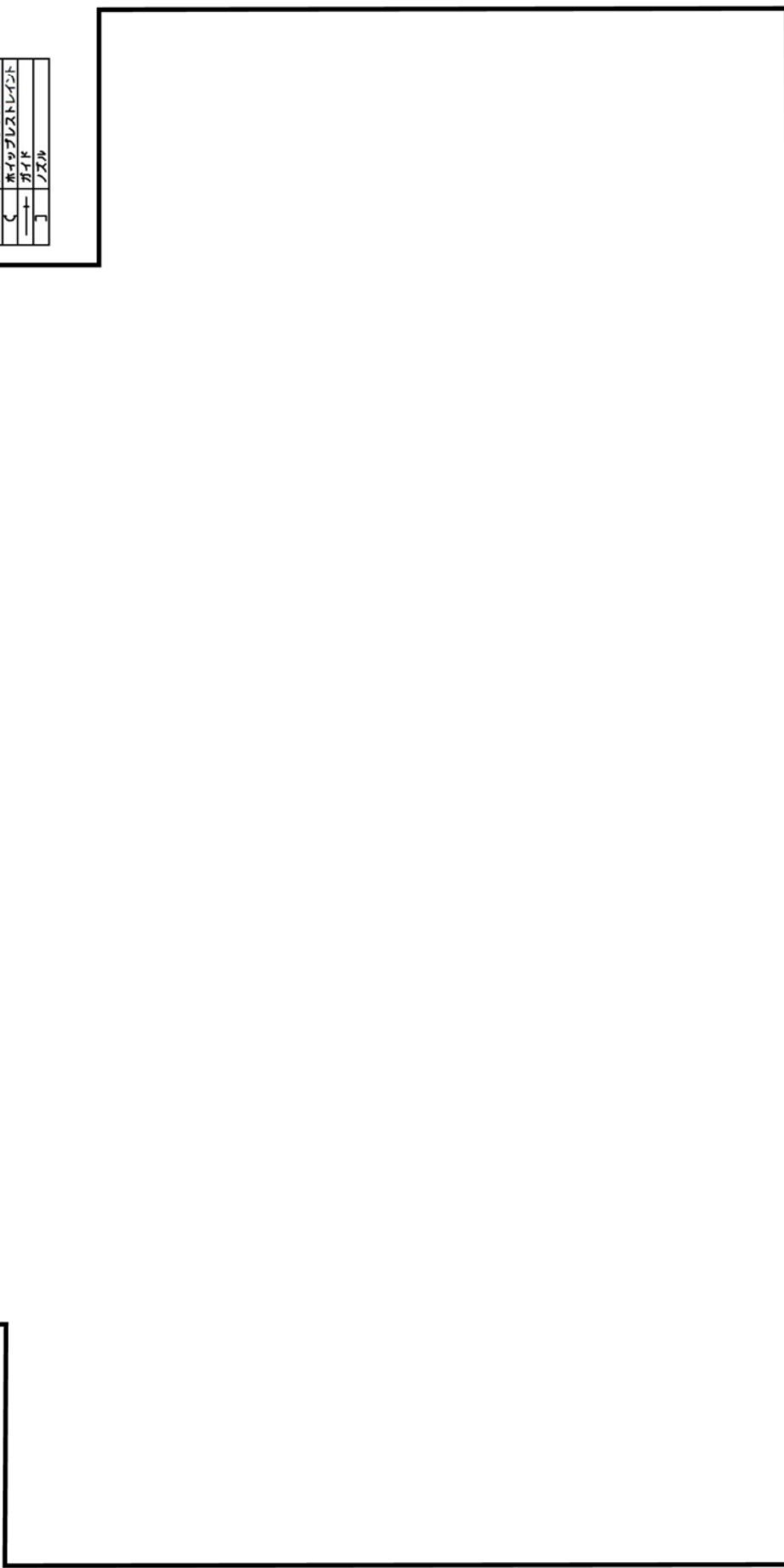


図 10 給水加熱器ドレン系 [クラス 3-耐震 B クラス] アイソメ図

評価中のため追々とさせていただきます。

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		ピーク応力 Sp MPa	K _e 係数 K _e	繰返し ピーク応力 (ヤング率修正前) SL MPa	材質 最高使用速度 における ヤング率 E MPa	繰返し ピーク応力 (ヤング率修正後) SL' MPa	繰返し回数 ni	疲労累積係数 U
	名称	番号 始点 終点							
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
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		ピーク応力 Sp MPa	K _e 係数 K _e	繰返し ピーク応力 (ヤング率修正前) SL MPa	最高使用速度 における ヤング率 E MPa	繰返し ピーク応力 (ヤング率修正後) SL' MPa	繰返し回数 実回数	疲労累積係数 U _s	
	名称	番号 始点 終点								運転温度(°C) 始点 終点
-	Sd地震	-	556	1.80	501	182840	567.201	70	1.022	0.0685
-	Se地震	-	831	2.20	915	182840	1035.906	70	2.15	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 Do	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 (Sm)	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 ³	主管の断面係数
Z_b		mm ³	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_s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

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

➤ 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

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

➤ 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_e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 < B₀ 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 _o	0.66
B _o	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°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 _d 地震時	0.0685	0.4580 ^{*1}	0.5265	1以下
S _s 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年時点肉厚における疲労累積係数（0.4580）を保守的に60年時点に至る評価期間中全てに適用し、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

他プラントで評価実績のある原子炉系（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（基準地震動 S_s 8波包絡条件, 1.5倍の裕度考慮）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

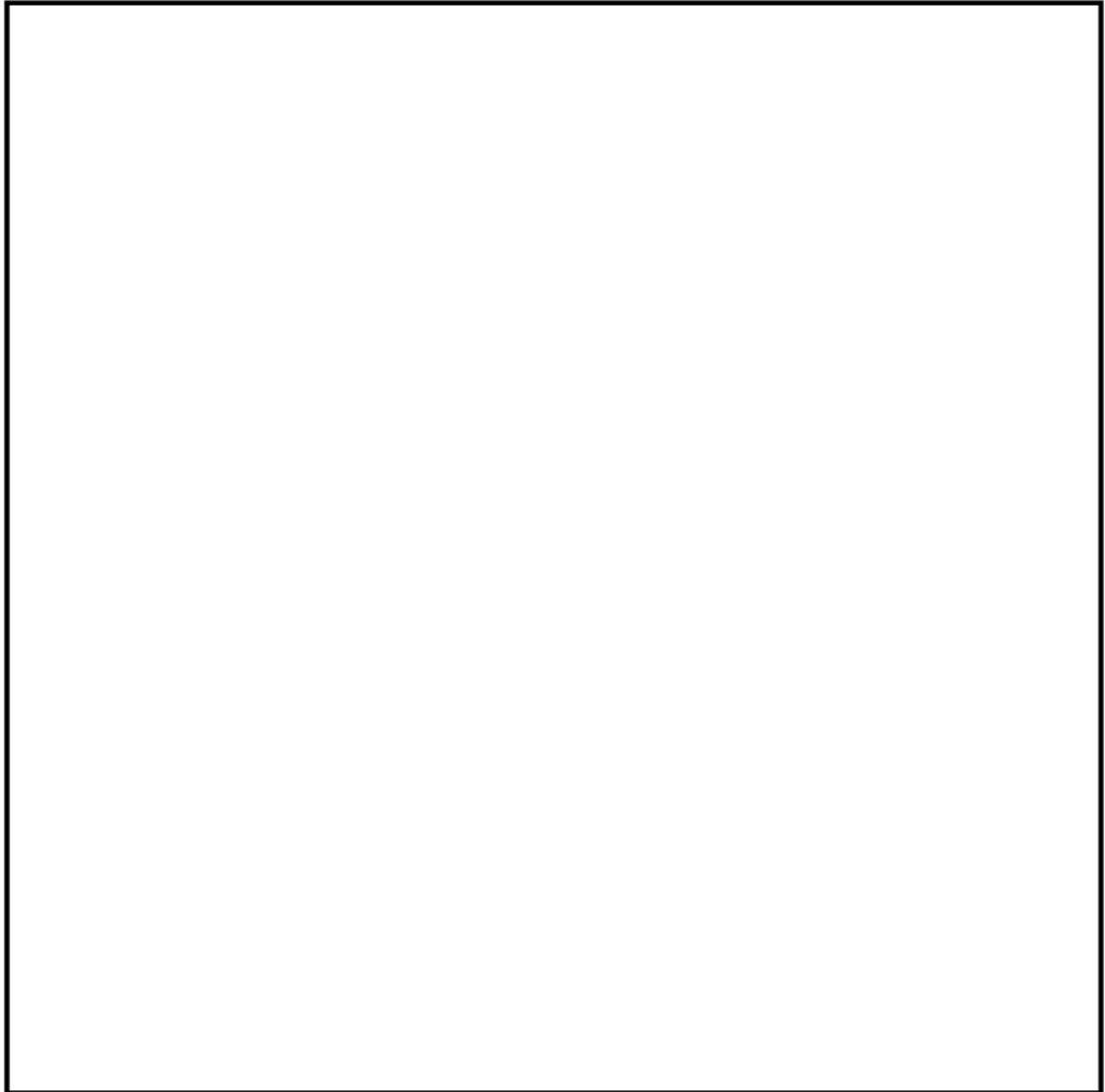
構造物名 : ペDESTAL

方向 : 鉛直方向

波形名 : Ss-D1、Ss-11、Ss-12、Ss-13、Ss-14、Ss-21、Ss-22 及び Ss-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_s 床応答曲線（水平方向）

プラント名 : 東海第二発電所

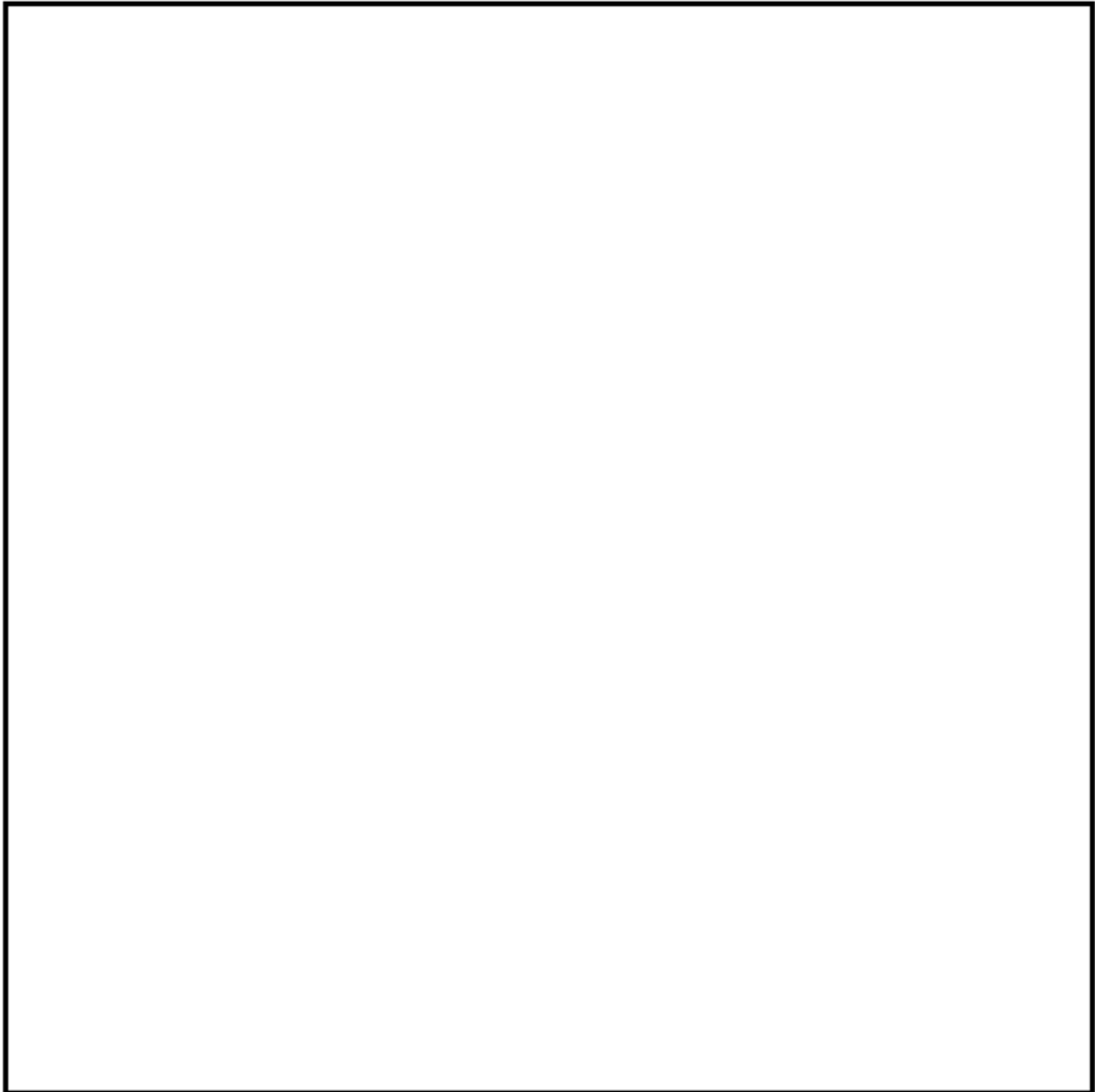
構造物名 : ペDESTAL

方向 : 水平方向

波形名 : Ss-D1、Ss-11、Ss-12、Ss-13、Ss-14、Ss-21、Ss-22 及び Ss-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_s 床応答曲線（鉛直方向）

プラント名 : 東海第二発電所

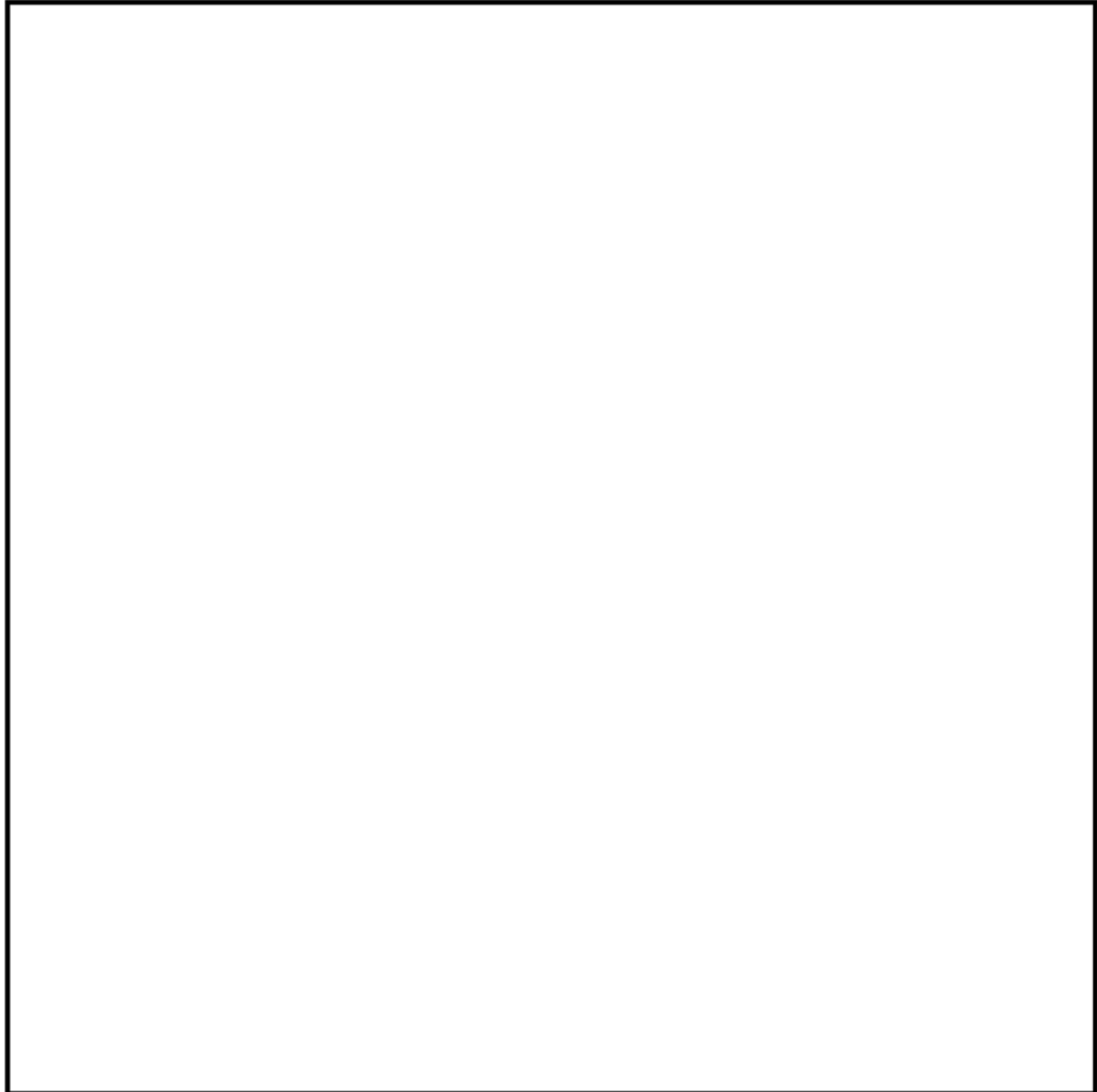
構造物名 : ペDESTAL

方向 : 水平方向

波形名 : Sd-D1、Sd-11、Sd-12、Sd-13、Sd-14、Sd-21、Sd-22 及び Sd-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_d 床応答曲線（水平方向）

プラント名 : 東海第二発電所

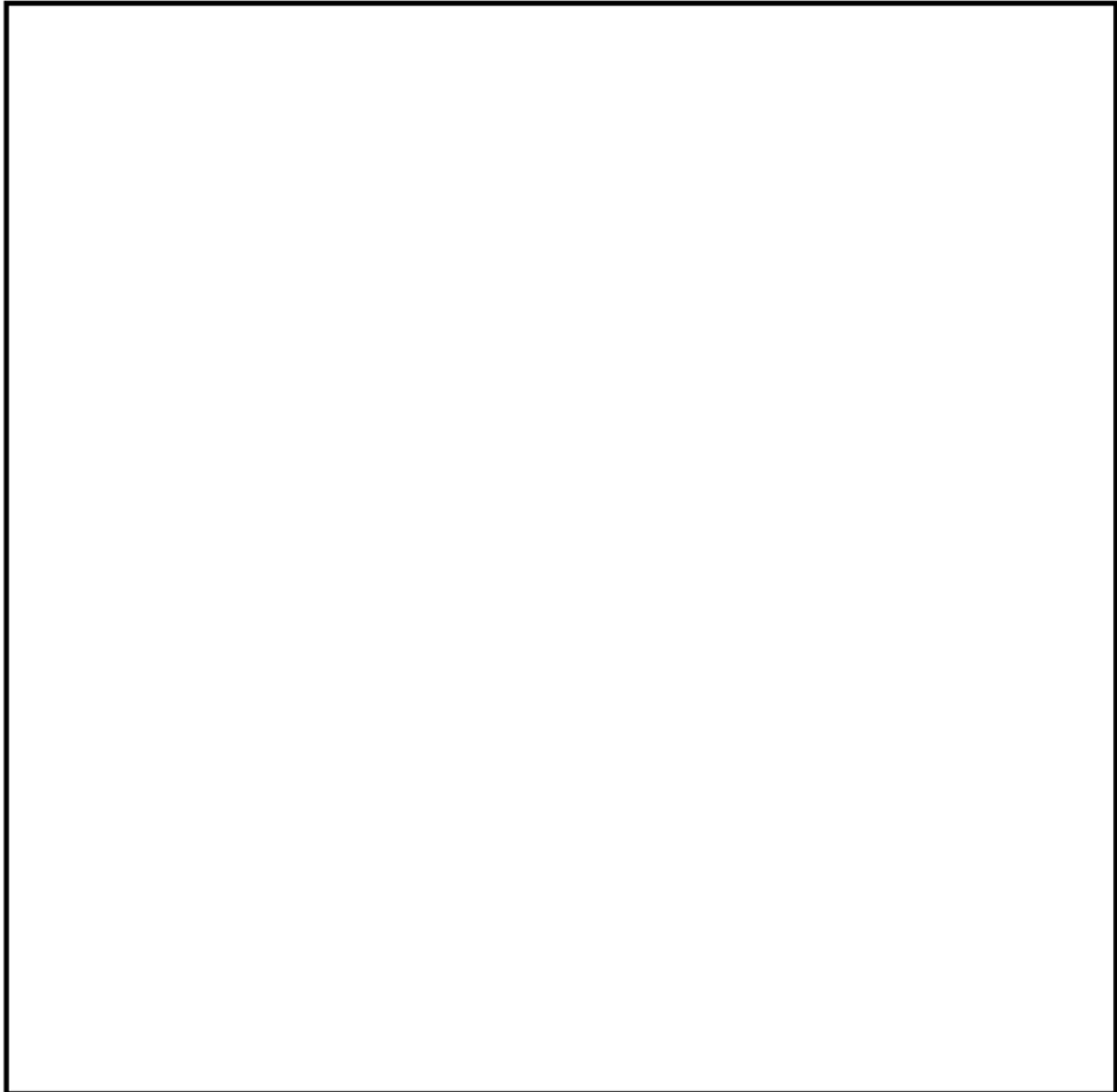
構造物名 : ペDESTAL

方向 : 鉛直方向

波形名 : Sd-D1、Sd-11、Sd-12、Sd-13、Sd-14、Sd-21、Sd-22 及び Sd-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_a 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 _s	IV _A S	一次応力	評価結果は追而	
					一次+二次 応力		
			S _d	III _A 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* ¹ (MPa)	許容応力* ⁴ (MPa)
						60 年時点肉厚* ³	
原子炉冷却 材浄化系 配管	クラス 1	S	S _s	IV _A S	一次応力	333	414
					一次+二次 応力	1015 (疲労累積係数： 0.5093* ⁵)	354 (疲労累積係数 許容値：1 以下)
			S _d	III _A S	一次応力	228	310
					一次+二次 応力	563 (疲労累積係数： 0.0287* ⁵)	354 (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：JEAG4601 に基づく配管減肉を考慮した 60 年時点肉厚における疲労累積係数 (0.0085) を保守的に 60 年時点に至る評価期間中全てに適用し、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。

4. 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）に対する耐震安全性評価について

3.1 伝熱管の耐震安全性評価について

非常用ディーゼル機関（2C、2D号機）及び付属設備、高圧炉心スプレイ系ディーゼル機
関及び付属設備の空気冷却器、潤滑油冷却器及び清水冷却器の伝熱管については、運転時間
が短く、流れ加速型腐食が発生する可能性が小さいと評価しているが、現状保全によって管
理される程度の腐食を想定した場合の部材断面の減少による剛性低下の影響を確認するた
め、伝熱管内面に施栓基準までの一様減肉を仮定した耐震安全性評価を実施する。

評価対象である各冷却器の概略図を図1に示す。

また、伝熱管の評価仕様を表1及び表2に示す。

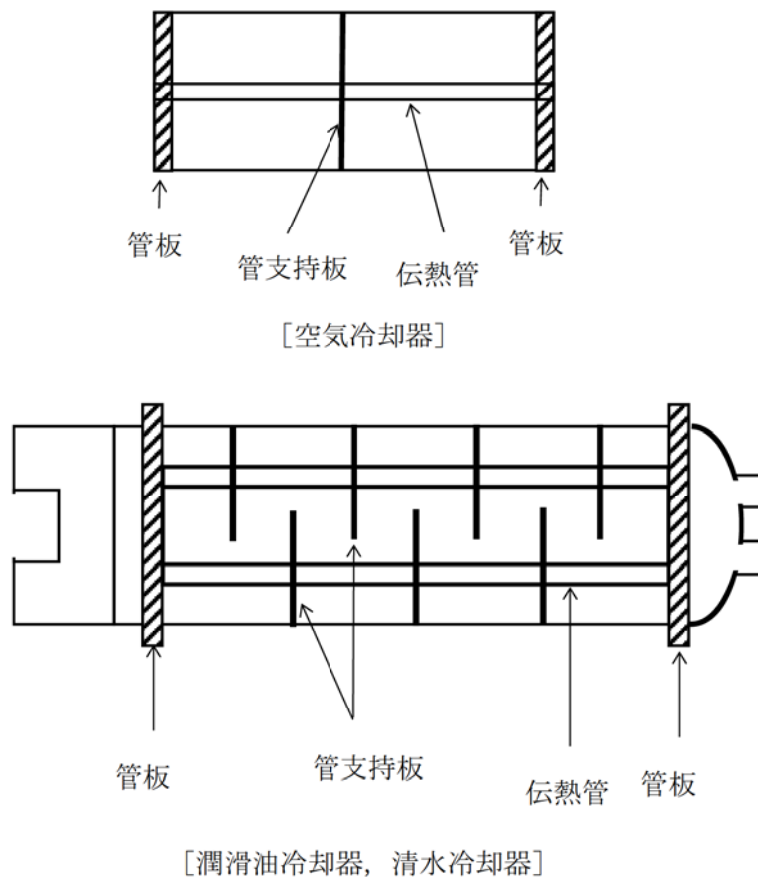


図1 非常用ディーゼル機関及び付属設備／高圧炉心スプレイ系ディーゼル機関
及び付属設備の冷却器概略図

表1 非常用ディーゼル機関（2C, 2D号機）及び付属設備の伝熱管の評価仕様

項目	記号	単位	空気冷却器	潤滑油系 潤滑油冷却器	冷却水系 清水冷却器
設計圧力（管側／胴側）	P	MPa	0.59／0.20	0.98／0.98	0.98／0.98
設計温度（管側／胴側）	—	℃	40／135	40／70	50／80
伝熱管外径	do	mm			
伝熱管厚さ	t	mm			
伝熱管減肉後内径 ^{*1}	dic	Mm			
伝熱管減肉後厚さ ^{*1}	tc	mm			
減肉を考慮した伝熱管の単位長さ当たりの相当質量	mc	kg/mm			
伝熱管材質	—	—	C7150T	C6871	C6871
支持間隔（固定（管板）～支持（管支持板）） ^{*2}	La	mm			
支持間隔（支持（管支持板）～支持（管支持板）） ^{*2}	Lh	mm			
設計引張強さ ^{*4}	Su	MPa	365	375	375
評価用震度（水平方向） S_s	CH	—			
評価用震度（鉛直方向） S_s	CV	—			

*1：伝熱管内面に、施栓基準である50%まで一様減肉が生じたと仮定する

*2：各冷却器における最大の支持間隔を用いて評価する

*3：管支持板の箇所数が1箇所のため該当部位なし

*4：設計・建設規格（2005/2007）の付録材料図表 Part5 表9に当該材料の各温度によるSu値が規定されていないため、付録材料図表 Part5 表6に記載の最小引張強さの値を用いた

*5：[]内は柔構造となる「管支持板から管支持板」の値であり、床応答曲線による震度である。その他は全て剛構造となるため、設置床の最大加速度（1.2ZPA）を用いる

表 2 高圧炉心スプレイ系ディーゼル機関の伝熱管の仕様

項目	記号	単位	空気冷却器	潤滑油系 潤滑油冷却器	冷却水系 清水冷却器
設計圧力 (管側/胴側)	P	MPa	0.59/0.20	0.98/0.98	0.98/0.98
設計温度 (管側/胴側)	—	℃	40/135	40/70	50/80
伝熱管外径	do	mm			
伝熱管厚さ	t	mm			
伝熱管減肉後内径*1	dic	Mm			
伝熱管減肉後厚さ*1	tc	mm			
減肉を考慮した伝熱管の単位長さ当たりの相当質量	mc	kg/mm			
伝熱管材質	—	—	C7150T	C6871	C6871
支持間隔 (固定 (管板) ~ 支持 (管支持板)) *2	La	mm			
支持間隔 (支持 (管支持板) ~ 支持 (管支持板)) *2	Lh	mm			
設計引張強さ (Su) *4	Su	MPa	365	375	375
評価用震度 (水平方向) S _s	CH	—			
評価用震度 (鉛直方向) S _s	CV	—			

*1：伝熱管内面に、施栓基準である 50%まで一様減肉が生じたと仮定する

*2：各冷却器における最大の支持間隔を用いて評価する

*3：管支持板の箇所数が 1 箇所のため該当部位なし

*4：設計・建設規格 (2005/2007) の付録材料図表 Part5 表 9 に当該材料の各温度による Su 値が規定されていないため、付録材料図表 Part5 表 6 に記載の最小引張強さの値を用いた

3.2 評価方法

支持間隔の片方の端部形状が固定端（管板），支持端（管支持板）であっても計算手法は同様であるため，ここでは，評価結果において発生応力と許容応力の比が最大である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「管支持板から管支持板」の計算方法について示す。

計算に使用する記号の説明を表3に示す。

表3 計算に使用する記号の説明

記号	記号の説明	単位
σ_{ϕ}, σ_x	内圧により伝熱管に生じる周方向一次応力，軸方向一次応力	MPa
M _{hc1}	自重による曲げモーメント	N・mm
M _{hc2}	水平方向地震荷重による曲げモーメント	N・mm
M _{hcv}	鉛直方向地震荷重による曲げモーメント	N・mm
σ_{xhc1}	自重により伝熱管に生じる曲げ応力	MPa
σ_{xhc2}	水平方向地震荷重により伝熱管に生じる曲げ応力	MPa
σ_{xhcv}	鉛直方向地震荷重により伝熱管に生じる曲げ応力	MPa
Z _c	減肉を考慮した伝熱管の断面係数	mm ³
τ_{h2}	水平方向地震荷重により生じるせん断応力	MPa
τ_{hv}	鉛直方向地震荷重により生じるせん断応力	MPa
A _{sc}	減肉を考慮した伝熱管のせん断断面積	mm ²
A _c	減肉を考慮した伝熱管の断面積	mm ²
$\sigma_{\phi h}$	水平方向地震力が作用した場合の伝熱管の周方向一次応力の和	MPa
σ_{xh}	水平方向地震力が作用した場合の伝熱管の軸方向一次応力の和	MPa
τ_h	鉛直方向地震力が作用した場合の伝熱管のせん断応力の和	MPa
σ_h	伝熱管の組合せ一次応力	MPa
S _u	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表6による最小引張強さ	MPa
S _a	伝熱管の組合せ一次応力に対する許容応力	MPa

3.3 入力（地震動）条件

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入力地震動条件として，原子炉建屋（EL. -4.0m）の床応答曲線（基準地震動 S_s 8波包絡条件，1.5倍の裕度考慮）による震度を用いる。

評価に用いた床応答曲線を図2及び図3に示す。

プラント名：東海第二発電所

構造物名：原子炉建屋

方向：水平方向

波形名： S_s -D1， S_s -11， S_s -12， S_s -13， S_s -14， S_s -21， S_s -22 及び S_s -31

標高：EL. -4.0m

減衰：1.0%



図2 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設置場所の床応答曲線（水平方向）

プラント名 : 東海第二発電所

構造物名 : 原子炉建屋

方向 : 鉛直方向

波形名 : S_S-D1, S_S-11, S_S-12, S_S-13, S_S-14, S_S-21, S_S-22 及び S_S-31

標高 : EL. -4.0m

減衰 : 1.0%

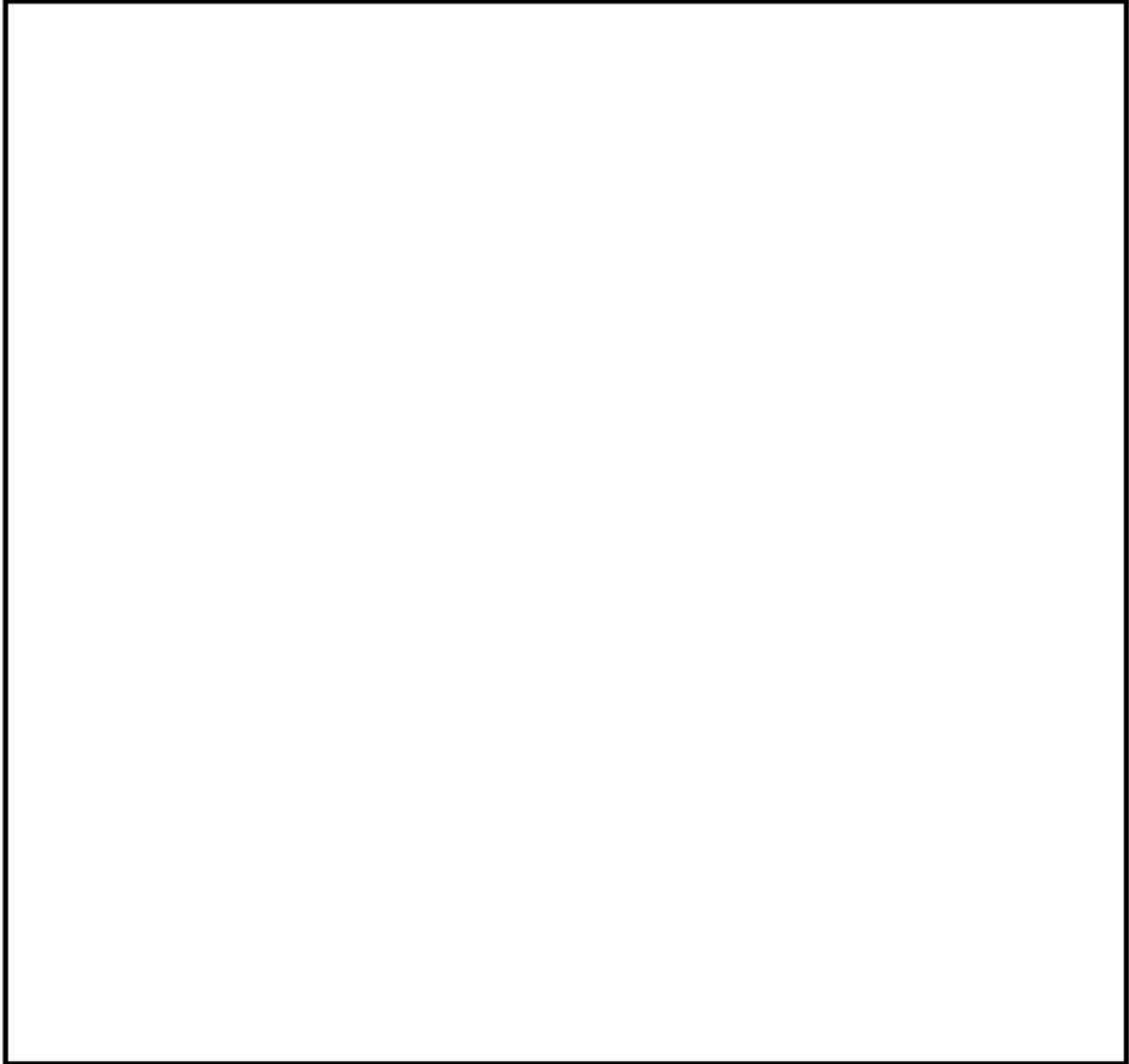


図3 非常用ディーゼル機関 (2C, 2D 号機) 附属設備冷却水系清水冷却器設置場所の
床応答曲線 (鉛直方向)

3.4 算出過程

非常用ディーゼル機関(2C, 2D号機) 附属設備冷却水系清水冷却器の「管支持板から管支持板」
 <伝熱管の応力算出>

(1) 内圧により生じる膜応力

(JEAG4601-1987 : 6. 6. 3-306・307 式より)

周方向

$$\sigma_{\phi} = \frac{P \cdot (d_{ic} + 1.2 \cdot t_c)}{2 \cdot t_c} = \boxed{} = \boxed{} \text{ (MPa)}$$

軸方向

$$\sigma_x = \frac{P \cdot (d_{ic} + 1.2 \cdot t_c)}{4 \cdot t_c} = \boxed{} = \boxed{} \text{ (MPa)}$$

(2) 自重による曲げ応力

自重による曲げモーメント M_{hc1} は以下により求める。

(機械工学便覧 1987 : A4 編 材料力学 表 7 より)

$$M_{hc1} = \frac{(m_c \cdot L_h \cdot g) \cdot L_h}{4} = \boxed{} = \boxed{} \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

したがって、伝熱管に生じる曲げ応力 σ_{xhc1} は以下により求める。

(JEAG4601-1987 : 6. 6. 3-310 式より)

$$\sigma_{xhc1} = \frac{M_{hc1}}{Z_c} = \boxed{} = \boxed{} \text{ (MPa)}$$

ここで、減肉を考慮した伝熱管の断面係数 Z_c は以下となる。

(機械工学便覧 1987 : A4 編 材料力学 表 6 より)

$$Z_c = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{d_o^4 - d_{ic}^4}{d_o} = \boxed{} = \boxed{} \text{ (mm}^3\text{)}$$

ここで、減肉を考慮した伝熱管のせん断断面積 A_{sc} は以下となる。

(機械工学便覧 1987 : A4 編 材料力学 表 9 より)

$$A_{sc} = \frac{3 \cdot \left\{ (d_o/2)^2 + (d_{ic}/2)^2 \right\}}{4 \cdot \left\{ (d_o/2)^2 + (d_o/2) \cdot (d_{ic}/2) + (d_{ic}/2)^2 \right\}} \cdot A_c$$

$$= \boxed{\hspace{15em}}$$

$$= \boxed{\hspace{2em}} \text{ (mm}^2\text{)}$$

なお、 A_c は減肉を考慮した伝熱管の断面積である。

$$A_c = \frac{\pi}{4} \cdot (d_o^2 - d_{ic}^2) = \boxed{\hspace{4em}} = \boxed{\hspace{2em}} \text{ (mm}^2\text{)}$$

(6) 鉛直地震荷重により生じるせん断応力

(JEAG4601-1987 : 6. 6. 3-355 式を参考とした)

$$\tau_{hv} = \frac{C_v \cdot (m_c \cdot L_h \cdot g)}{A_{sc}} = \boxed{\hspace{10em}} = \boxed{\hspace{2em}} \text{ (MPa)}$$

(7) 組合せ応力

(JEAG4601-1987 : 6. 6. 3-345, 346, 347 式より)

$$\sigma_{\phi h} = \sigma_{\phi} = \boxed{\hspace{4em}} \text{ (MPa)}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{xh} &= \sigma_x + \sigma_{xhc1} + \sigma_{xhc2} + \sigma_{xhcv} \\ &= \boxed{\hspace{15em}} \\ &= \boxed{\hspace{4em}} \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_h &= \tau_{h2} + \tau_{hv} \\ &= \boxed{\hspace{8em}} \\ &= \boxed{\hspace{2em}} \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

$$\sigma_h = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \sigma_{\phi h} + \sigma_{xh} + \sqrt{(\sigma_{\phi h} - \sigma_{xh})^2 + 4 \cdot \tau_h^2} \right\}$$

$$= \boxed{\hspace{15em}}$$

$$= \boxed{\hspace{2em}} \rightarrow 105 \text{ (MPa)}$$

<許容応力の算出>

当該熱交換器は、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、設計・建設規格の解説 PVC-3600 に準じて、クラス 2 容器扱いによる評価としているためクラス 2 容器の許容応力を適用する。

伝熱管は、材料が C6871 であるため、設計・建設規格の付録材料図表より、

$$C6871 : Su = 375 \text{ MPa}$$

なお、伝熱管の評価温度としては、設計温度を想定しているが、C6871 については、設計・建設規格の付録材料図表 Part5 表 9 において、各温度による Su 値が規定されていないため付録材料図表 Part5 表 6 に記載の最小引張強さの値を使用した*。

一次応力の許容応力 (Sa)

許容応力状態 IV_AS の場合は、

$$Sa = 1.5 \cdot (0.6 \cdot Su) = 1.5 \times (0.6 \times 375) = 337.5 \rightarrow 337 \text{ (MPa)}$$

許容応力状態 III_AS 供用状態 Cs の場合は、

Sa = 1.5 · min(Sy, 0.6 · Su) となるが、Sy 値が規定されていないため、Su 値のみ使用して

$$Sa = 1.5 \cdot (0.6 \cdot Su) = 1.5 \times (0.6 \times 375) = 337.5 \rightarrow 337 \text{ (MPa)}$$

とする。

* : JEAG4601-1984 参考 V 特別な材料の許容応力値 「表 V-2a 銅合金の Sy, Su の検討 (種別 C6870, C6871, 6872)」に記載される各温度における Su 値を線形補間して、当該熱交換器伝熱管の最高使用温度 (50℃) での Su 値を算出し、ほぼ同等の値であること、発生応力に余裕のあることを確認し、設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 6 に記載の最小引張強さの値を記載している。

$$Su_{50^\circ\text{C}} = \left(Su_{40^\circ\text{C}} - \left(\frac{Su_{40^\circ\text{C}} - Su_{75^\circ\text{C}}}{75 - 40} \times (50 - 40) \right) \right) \times 0.0980665 \times 100$$

$$= \left(38.0 - \left(\frac{38.0 - 37.1}{75 - 40} \times (50 - 40) \right) \right) \times 0.0980665 \times 100$$

$$= 370.13 \dots \cong 370 \text{ (MPa)}$$

$$Sa_{50^\circ\text{C}} = 1.5 \cdot (0.6 \cdot Su) = 1.5 \times (0.6 \times 370) = 333 \text{ (MPa)}$$

3.5 評価結果

算出結果より、伝熱管内面に施栓基準までの減肉を考慮した際の地震時の発生応力は 105MPa であり、許容応力である 337MPa を下回ることから、伝熱管の腐食 (流れ加速型腐食) は耐震安全性評価上問題ない。

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以外を含む全評価対象機器の評価結果を表 4 に示す。

表4 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
の伝熱管の評価結果

評価対象	評価条件	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)
							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) 空気冷却器	50%減肉を想定	—*1	S, 重*2	S _S *3	IV _A S	一次応力	16	—	328*4
非常用ディーゼル機関 (2C, 2D号機) 付属設備 潤滑油系潤滑油冷却器	50%減肉を想定	—*1	S, 重*2	S _S *3	IV _A S	一次応力	16	16	337*4
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	50%減肉を想定	—*1	S, 重*2	S _S *3	IV _A S	一次応力	45	105	337*4
高圧炉心スプレイ系ディーゼル機関 空気冷却器	50%減肉を想定	—*1	S, 重*2	S _S *3	IV _A S	一次応力	16	—	328*4
高圧炉心スプレイ系ディーゼル機関 付属設備 潤滑油系潤滑油冷却器	50%減肉を想定	—*1	S, 重*2	S _S *3	IV _A S	一次応力	19	19	337*4
高圧炉心スプレイ系ディーゼル機関 付属設備 冷却水系清水冷却器	50%減肉を想定	—*1	S, 重*2	S _S *3	IV _A S	一次応力	36	45	337*4

*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：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

*3：S_S地震力がS_d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_S地震力による評価応力がS_d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_d地震力及び静的地震力による評価を省略した

*4：0.6Su×1.5倍の値

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

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、設計許容荷重を定めており、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。後打ちアンカ減肉後の応力比の算定条件及び算定結果を表1及び表2に示す。

Sクラス機器について、基準地震動 S_s に対する耐震安全性を確認しており、ボルトの減肉を考慮した場合であっても発生応力が許容応力以下になることを確認している。Sクラス機器の後打ちアンカの基準地震動 S_s に対する評価例を表3に示す。評価例として、工認耐震計算において応力比が厳しい「安全パラメータ表示システム (SPDS) 及びデータ伝送設備」を選定した。

表1 後打ちメカニカルアンカの設計許容荷重負荷時のボルト発生・許容応力

		M6	M8	M10	M12	M16	M20
ボルトの断面積 (mm ²) *1	減肉前	18.97	34.68	55.07	80.17	150.25	234.77
	減肉後	14.62	28.70	47.46	70.93	137.50	218.77
アンカの設計許容荷重 (kN)	引張	0.98	1.56	2.15	3.13	3.72	6.66
	せん断	1.17	1.96	3.53	5.49	9.41	14.90
設計許容荷重負荷時のボルト発生応力 (MPa)	引張	52	46	40	40	25	29
	せん断	63	57	65	69	63	64
設計許容荷重負荷, 減肉時のボルト発生応力 (MPa)	引張	68	55	46	45	28	31
	せん断	81	69	75	78	69	69
ボルトの許容応力 (MPa) *2	引張	245	245	245	245	245	235
	せん断	141	141	141	141	141	135
応力比*3	引張	0.28	0.23	0.19	0.19	0.12	0.14
	せん断	0.58	0.49	0.54	0.56	0.49	0.52

*1: 谷径断面積

*2: ボルトの許容応力は以下の通り。(JSME S NC1-2005/2007 及び JEAG4601-1984 による)

- ・ボルトの材質: SS400
- ・設計降伏点: S_y (245 MPa ($d \leq 16$ mm), 235 MPa (16 mm $< d \leq 40$ mm))
- 設計引張強さ: S_u (400 MPa)

$$F = \text{MIN} (S_y, 0.7S_u) = 245 \text{ MPa} (d \leq 16 \text{ mm}), 235 \text{ MPa} (16 \text{ mm} < d \leq 40 \text{ mm})$$

- ・許容応力状態 III_AS の許容応力 (引張):

$$1.5f_t = 1.5 \times F / 1.5 = 1.5 \times 245 / 1.5 = 245 \text{ MPa} (d \leq 16 \text{ mm})$$

$$1.5f_t = 1.5 \times F / 1.5 = 1.5 \times 235 / 1.5 = 235 \text{ MPa} (16 \text{ mm} < d \leq 40 \text{ mm})$$

- ・許容応力状態 III_AS の許容応力 (せん断):

$$1.5f_s = 1.5 \times F / (1.5\sqrt{3}) = 1.5 \times 245 / (1.5\sqrt{3}) = 141 \text{ MPa} (d \leq 16 \text{ mm})$$

$$1.5f_s = 1.5 \times F / (1.5\sqrt{3}) = 1.5 \times 235 / (1.5\sqrt{3}) = 135 \text{ MPa} (16 \text{ mm} < d \leq 40 \text{ mm})$$

*3: 応力比 = 減肉時の発生応力 / 許容応力

表2 後打ちケミカルアンカの設計許容荷重負荷時のボルト発生・許容応力

		M12	M16	M20	M22	M25
ボルトの断面積 (mm ²) *1	減肉前	80.17	150.25	234.77	292.22	338.05
	減肉後	70.93	137.50	218.77	274.33	318.79
アンカの設計許容荷重 (kN)	引張	12.10	20.20	38.30	47.40	55.20
	せん断	9.60	17.90	26.80	33.20	38.70
設計許容荷重負荷時のボルト発生応力 (MPa)	引張	151	135	164	163	164
	せん断	120	120	115	114	115
設計許容荷重負荷, 減肉時のボルト発生応力 (MPa)	引張	171	147	176	173	174
	せん断	136	131	123	122	122
ボルトの許容応力 (MPa) *2	引張	245	245	235	235	235
	せん断	141	141	135	135	135
減肉時の応力比*3	引張	0.70	0.60	0.75	0.74	0.75
	せん断	0.97	0.93	0.92	0.91	0.91

*1：谷径断面積

*2：ボルトの許容応力は以下の通り。(JSME S NC1-2005/2007 及び JEAG4601-1984 による)

- ・ボルトの材質：SS400
- ・設計降伏点：Sy (245 MPa (d ≤ 16 mm), 235 MPa (16 mm < d ≤ 40 mm))
- 設計引張強さ：Su (400 MPa)

$$F = \text{MIN} (S_y, 0.7S_u) = 245 \text{ MPa} (d \leq 16 \text{ mm}), 235 \text{ MPa} (16 \text{ mm} < d \leq 40 \text{ mm})$$

- ・許容応力状態Ⅲ_AS の許容応力 (引張)：

$$1.5f_t = 1.5 \times F / 1.5 = 1.5 \times 245 / 1.5 = 245 \text{ MPa} (d \leq 16 \text{ mm})$$

$$1.5f_t = 1.5 \times F / 1.5 = 1.5 \times 235 / 1.5 = 235 \text{ MPa} (16 \text{ mm} < d \leq 40 \text{ mm})$$

- ・許容応力状態Ⅲ_AS の許容応力 (せん断)：

$$1.5f_s = 1.5 \times F / (1.5\sqrt{3}) = 1.5 \times 245 / (1.5\sqrt{3}) = 141 \text{ MPa} (d \leq 16 \text{ mm})$$

$$1.5f_s = 1.5 \times F / (1.5\sqrt{3}) = 1.5 \times 235 / (1.5\sqrt{3}) = 135 \text{ MPa} (16 \text{ mm} < d \leq 40 \text{ mm})$$

*3：応力比＝減肉時の発生応力／許容応力

表3 基準地震動 Ss に対する S クラス機器の評価例 (後打ちケミカルアンカ)

分類	設備	ボルト 呼び径 (本数)	断面積*1		荷重方向	設計許容荷重 (kN)	発生荷重*2 (kN)	減肉後 発生応力*3 (MPa)	許容応力 (MPa)	減肉後の 応力比*4
			減肉前 (mm ²)	減肉後 (mm ²)						
計測制御 設備	安全パラメータ表 示システム (SPDS) 及びデータ伝送設 備基礎ボルト	M12 (40本)	80.17	70.93	引張	12.10	6.21	88	168	0.53
					せん断	9.60	1.38 (ボルト1本 当たり)	20	129	0.16

*1：谷径断面積

*2：補正工認「V-2-6-7-3 安全パラメータ表示システム (SPDS) の耐震性についての計算書」における「ボルトに作用する力 (基準地震動 Ss)」

*3：保守的に運転開始後 60 年間の腐食量である半径方向 0.3 mm を想定

*4：減肉後発生応力/許容応力

< 減肉発生後応力の計算過程 >

引張 = 発生荷重 / 減肉後断面積 = $6.21 \times 10^3 / 70.93 = 87.56 \div 88$ (MPa)

せん断 = 発生荷重 / 減肉後断面積 = $1.38 \times 10^3 / 70.93 = 19.46 \div 20$ (MPa)

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、非常用ディーゼル発電機及び高圧炉心スプレー系ディーゼル発電機等（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。

非常用ディーゼル機関及び高圧炉心スプレー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、その付属設備である空気冷却器は動的機能を有するものではない。したがって空気冷却器の伝熱管の腐食（流れ加速型腐食）は強度評価上は耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象と扱うものの、ディーゼル機関本体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な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。

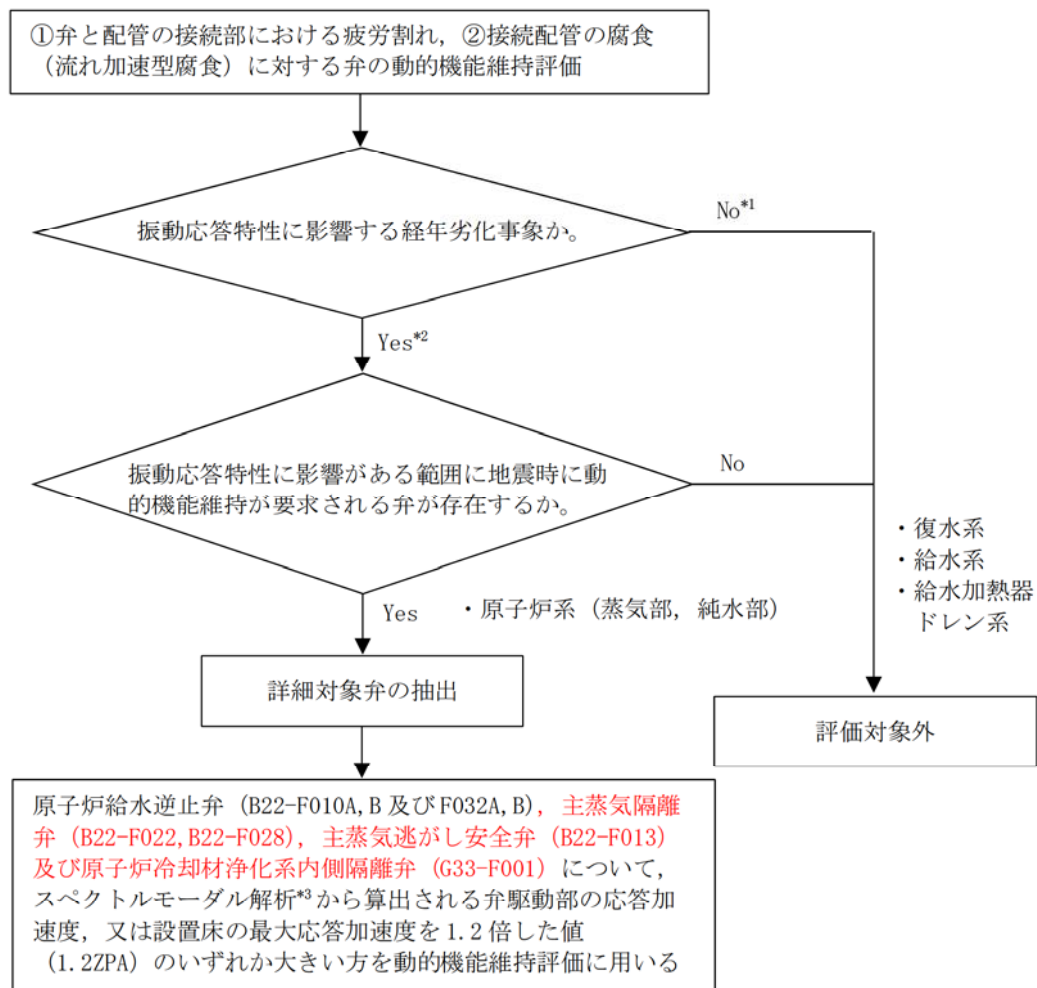


図1 動的機能維持評価対象弁の選定フロー

*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 年時点板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_s8 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。

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。

*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 ($\times 9.8\text{m/s}^2$)	機能確認済 加速度 ($\times 9.8\text{m/s}^2$)	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 _s	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 _g	水平	工認値	応答加速度 ($\times 9.8\text{m/s}^2$)	機能確認済 加速度 ($\times 9.8\text{m/s}^2$)	応答加速度 ($\times 9.8\text{m/s}^2$)	機能確認済 加速度 ($\times 9.8\text{m/s}^2$)	応答加速度*1 ($\times 9.8\text{m/s}^2$)	機能確認済 加速度 ($\times 9.8\text{m/s}^2$)	応答加速度 ($\times 9.8\text{m/s}^2$)	機能確認済 加速度 ($\times 9.8\text{m/s}^2$)
			7.35	10.0	5.10	10.0	6.74*2	9.6		
鉛直	50	劣化状況評価値	7.86	10.0	4.90	10.0	6.84*2	9.6		
			5.51	6.2	3.88	6.2	2.15*3	6.1		
S _g	鉛直	劣化状況評価値	5.51	6.2	4.29	6.2	2.15*4	6.1		
			5.51	6.2	4.29	6.2	2.15*4	6.1		

*1：B22-F013B, F, K, M, P, S の最大値を示す

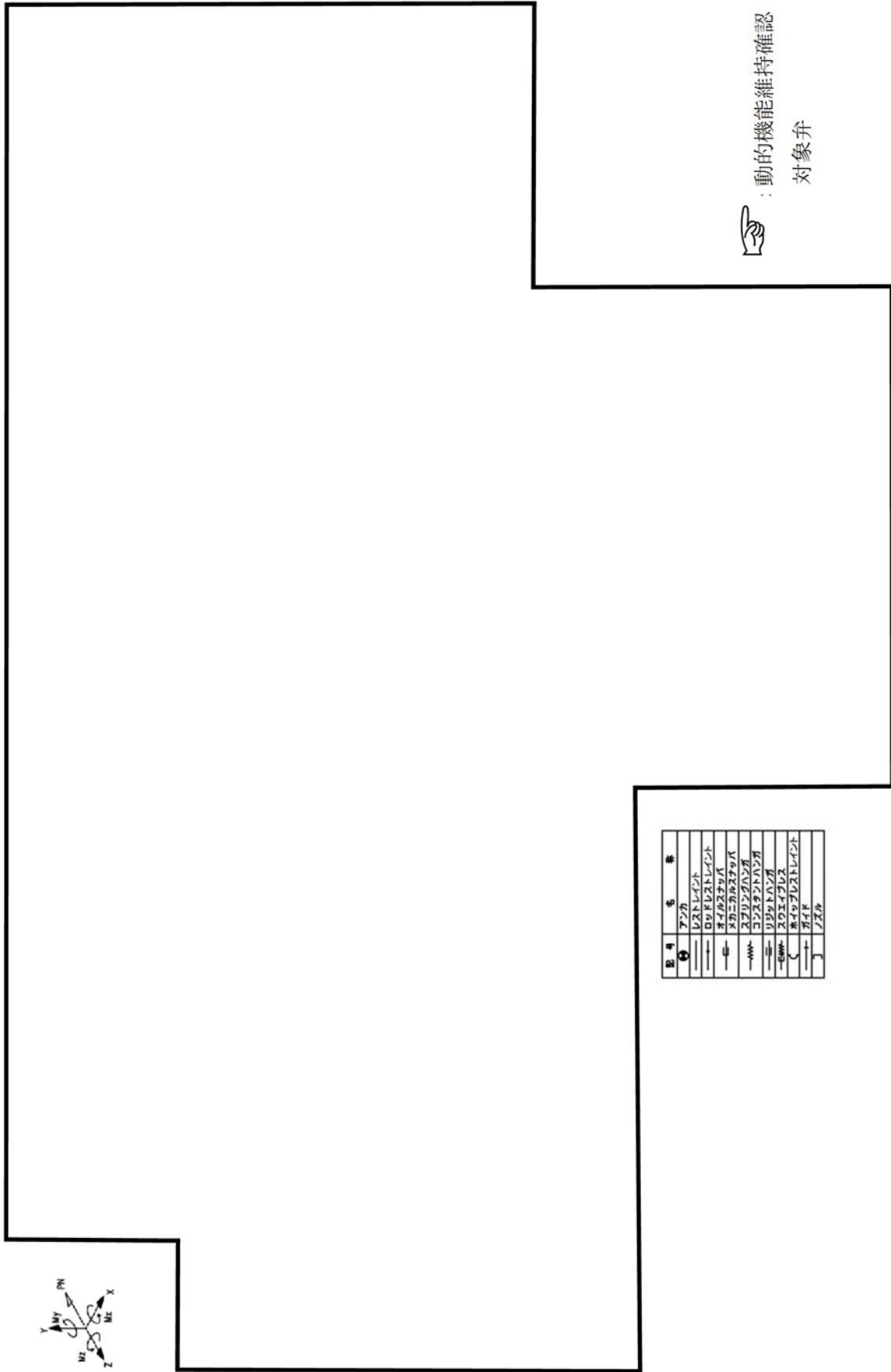
*2：B22-F013K の値を示す

*3：B22-F013B の値を示す

*4：B22-F013F の値を示す

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 _s	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
●	アソカ
○	レストレイント
—	ロッキレストレイント
—	ホイールストップ
—	スカーニカルストップ
—	スプリングハンダ
—	コンスタンタンハンダ
—	リジッドハンダ
—	スロエイブリス
⌋	クイックレストレイント
⌋	ワイヤ
⌋	ガス弁


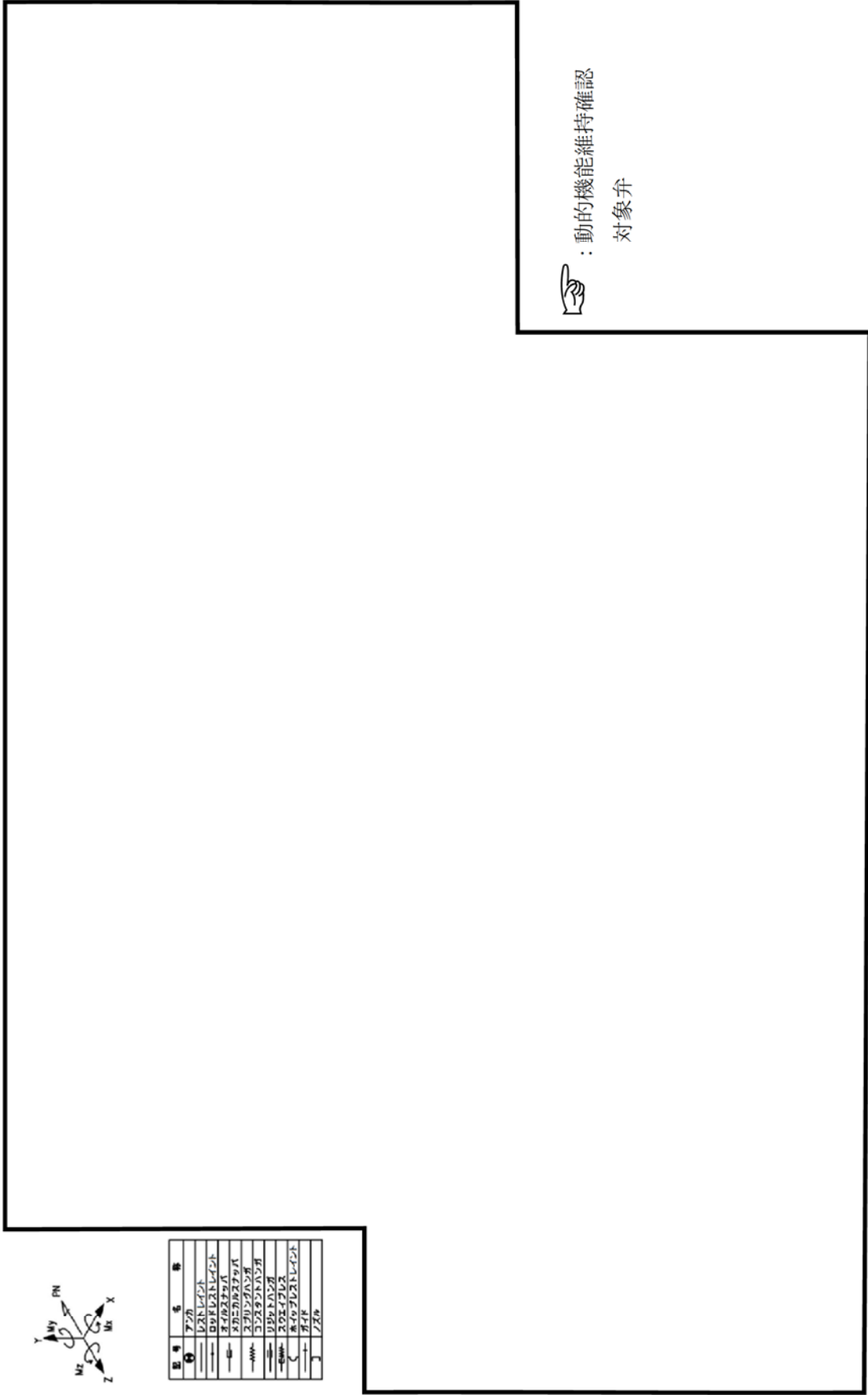
 : 動的機能維持確認
 対象弁

図 1 原子炉系（純水部）A 系配管（解析モデル）



記号	名 称
⊙	アツカ
→	レストレイト
←	ロッドレストレイト
⇄	ライズアップ
⇄	クローゼアップ
⇄	スプリングアップ
⇄	スプリングダウン
⇄	ライズダウン
⇄	クローゼレストレイト
⇄	リフト
⇄	リズク



 : 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	種別
⊙	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
⊖	SNIO	オイルスリップ	SNIO
⊖	SNM	スリニカスリップ	SNM
⊖	SH	スプリングハンガ	SH
⊖	CI	コンスタントハンガ	CI
⊖	RI	リジッドハンガ	RI
⊖	SR	スライズ	SR
⊖	PW	パイプレストレイント	PW
⊖	PIE	パイプ	PIE
⊖	PIB	パイプ	PIB

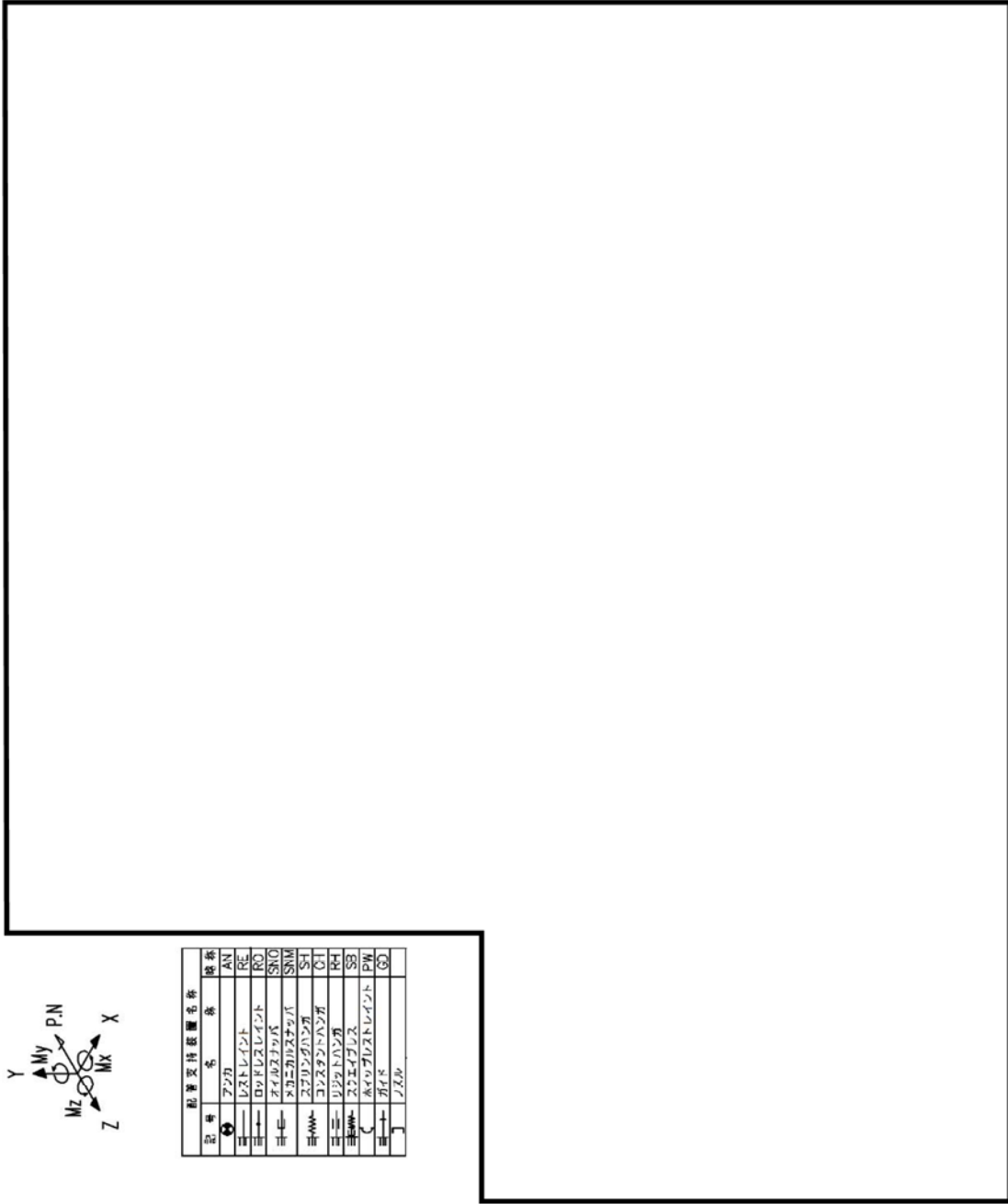
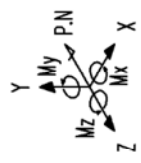
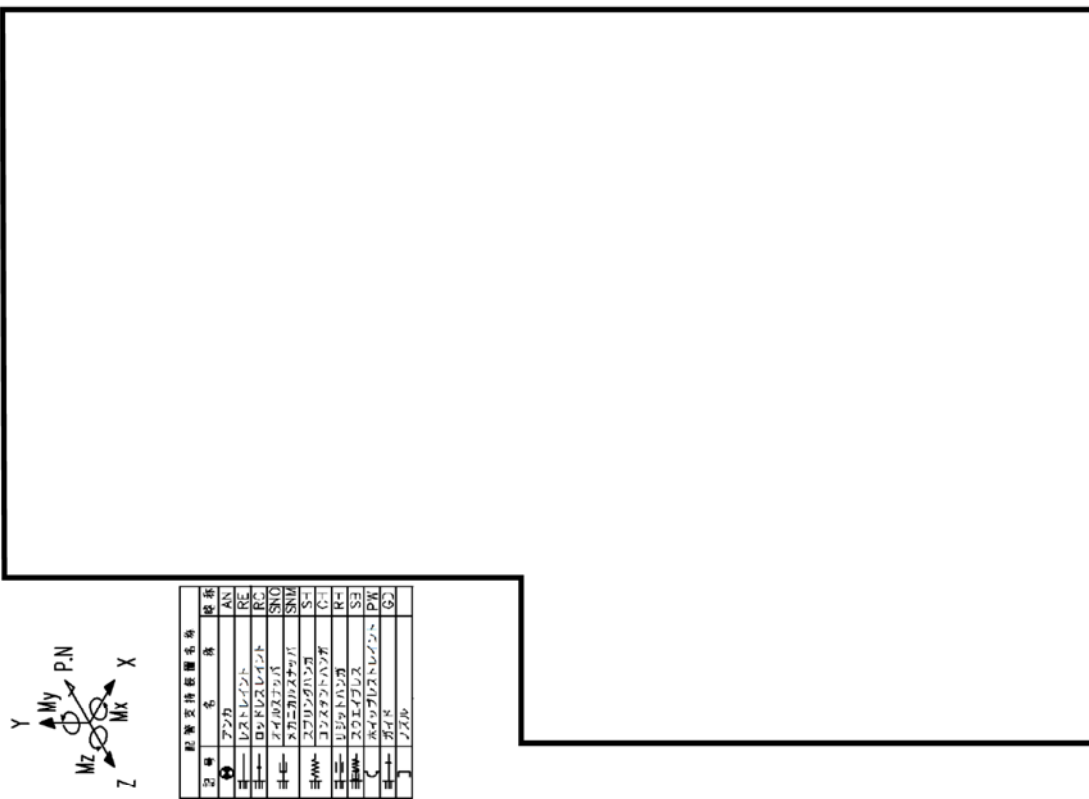


図3 原子炉系 (蒸気部) 主蒸気配管 (1/8) (解析モデル)



記号	番号	名称	図号
⊙	ア2カ	AN	
⊙	123トレンチ	RE	
⊙	100R121ポイント	RE	
⊙	100R121パイプ	SNO	
⊙	100R121パイプH	SNO	
⊙	100R121パイプS	S-	
⊙	100R121パイプG	C-	
⊙	100R121パイプR	R-	
⊙	100R121パイプS3	S3	
⊙	100R121パイプPW	PW	
⊙	100R121パイプ		
⊙	100R121パイプ		

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
●	AN	AN	AN
○	RE	RE	RE
□	RO	RO	RO
△	SKO	SKO	SKO
◇	SKN	SKN	SKN
▽	SKP	SKP	SKP
◇	SKM	SKM	SKM
◇	SKL	SKL	SKL
◇	SKR	SKR	SKR
◇	SKS	SKS	SKS
◇	SKT	SKT	SKT
◇	SKU	SKU	SKU
◇	SKV	SKV	SKV
◇	SKW	SKW	SKW
◇	SKX	SKX	SKX
◇	SKY	SKY	SKY
◇	SKZ	SKZ	SKZ
◇	SKAA	SKAA	SKAA
◇	SKAB	SKAB	SKAB
◇	SKAC	SKAC	SKAC
◇	SKAD	SKAD	SKAD
◇	SKAE	SKAE	SKAE
◇	SKAF	SKAF	SKAF
◇	SKAG	SKAG	SKAG
◇	SKAH	SKAH	SKAH
◇	SKAI	SKAI	SKAI
◇	SKAJ	SKAJ	SKAJ
◇	SKAK	SKAK	SKAK
◇	SKAL	SKAL	SKAL
◇	SKAM	SKAM	SKAM
◇	SKAN	SKAN	SKAN
◇	SKAO	SKAO	SKAO
◇	SKAP	SKAP	SKAP
◇	SKAQ	SKAQ	SKAQ
◇	SKAR	SKAR	SKAR
◇	SKAS	SKAS	SKAS
◇	SKAT	SKAT	SKAT
◇	SKAU	SKAU	SKAU
◇	SKAV	SKAV	SKAV
◇	SKAW	SKAW	SKAW
◇	SKAX	SKAX	SKAX
◇	SKAY	SKAY	SKAY
◇	SKAZ	SKAZ	SKAZ
◇	SKAA	SKAA	SKAA
◇	SKAB	SKAB	SKAB
◇	SKAC	SKAC	SKAC
◇	SKAD	SKAD	SKAD
◇	SKAE	SKAE	SKAE
◇	SKAF	SKAF	SKAF
◇	SKAG	SKAG	SKAG
◇	SKAH	SKAH	SKAH
◇	SKAI	SKAI	SKAI
◇	SKAJ	SKAJ	SKAJ
◇	SKAK	SKAK	SKAK
◇	SKAL	SKAL	SKAL
◇	SKAM	SKAM	SKAM
◇	SKAN	SKAN	SKAN
◇	SKAO	SKAO	SKAO
◇	SKAP	SKAP	SKAP
◇	SKAQ	SKAQ	SKAQ
◇	SKAR	SKAR	SKAR
◇	SKAS	SKAS	SKAS
◇	SKAT	SKAT	SKAT
◇	SKAU	SKAU	SKAU
◇	SKAV	SKAV	SKAV
◇	SKAW	SKAW	SKAW
◇	SKAX	SKAX	SKAX
◇	SKAY	SKAY	SKAY
◇	SKAZ	SKAZ	SKAZ

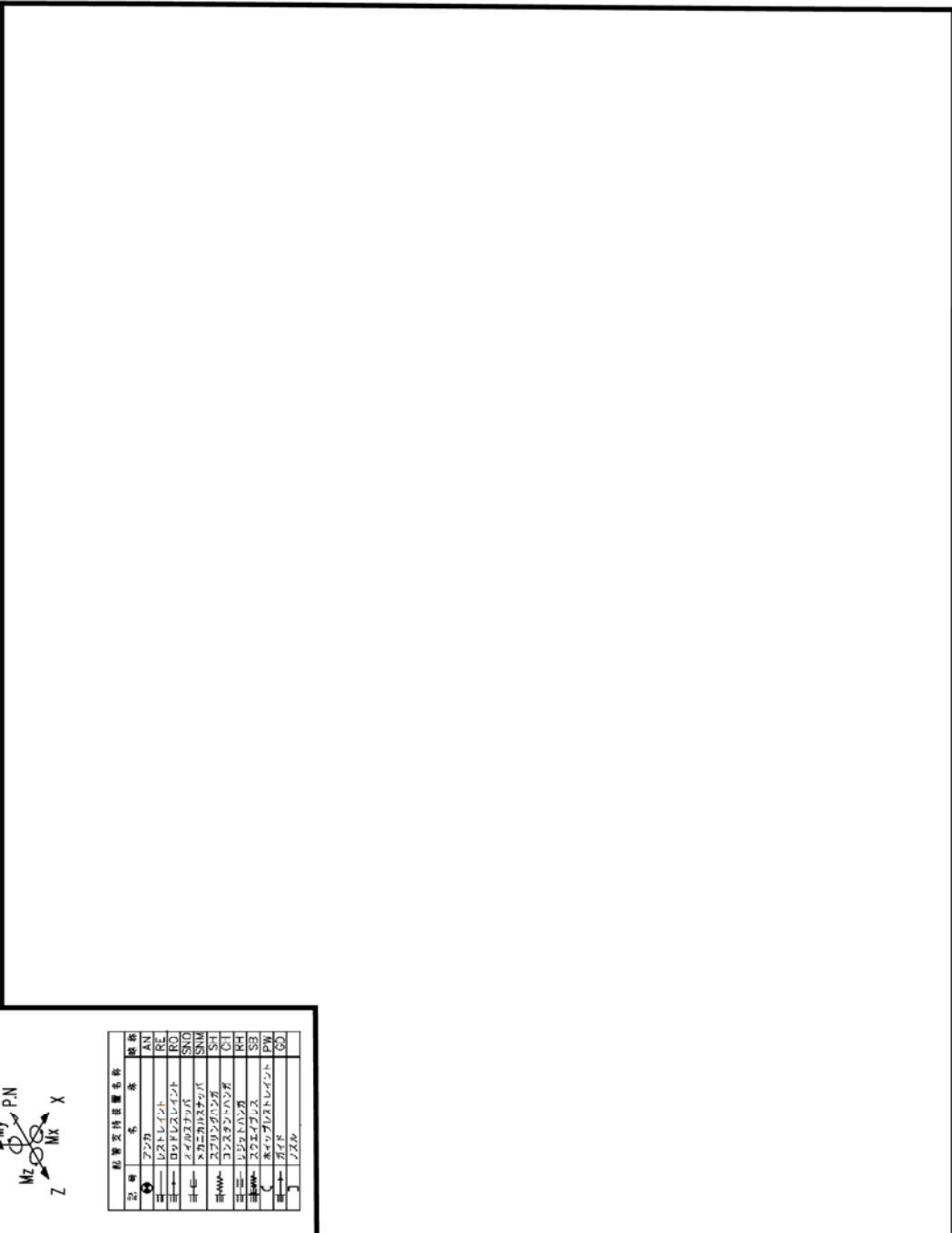
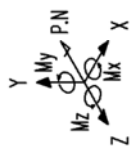


図5 原子炉系（蒸気部）主蒸気配管（3/8）（解析モデル）



記号	記号名	記号名	記号名
●	アンカ	AN	終系
—	レストレイント	RE	
—	ボールドレストレイント	RO	
—	スライダジョイント	SNJO	
—	スプリングジョイント	SNM	
—	スプリングジョイント	SN	
—	コネクティングジョイント	CT	
—	レストジョイント	RI	
—	スウェーピングジョイント	SB	
—	ボールドレストレイント	PW	
—	ジョイント	GD	
—	ジョイント	GD	

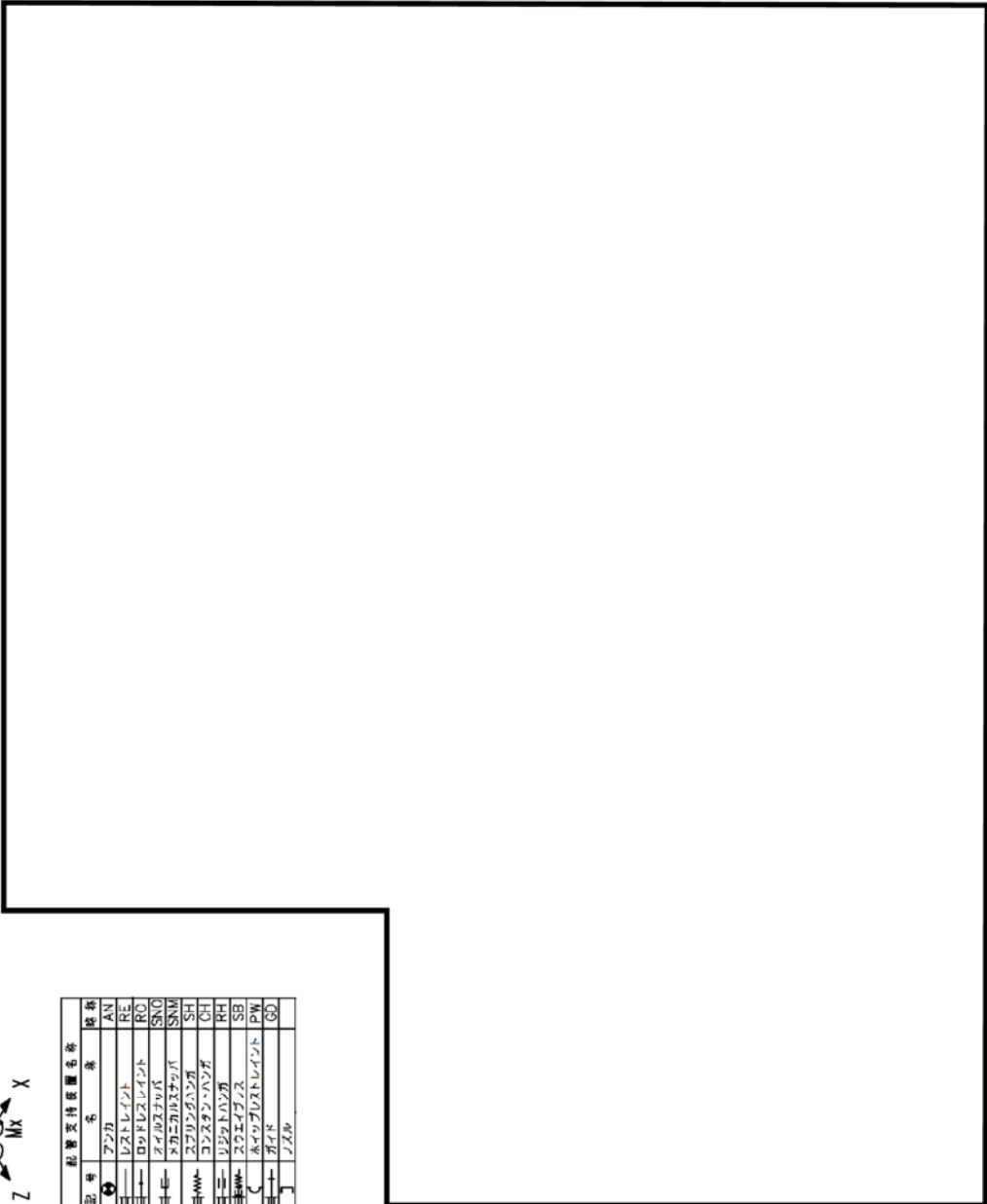
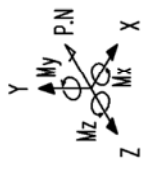
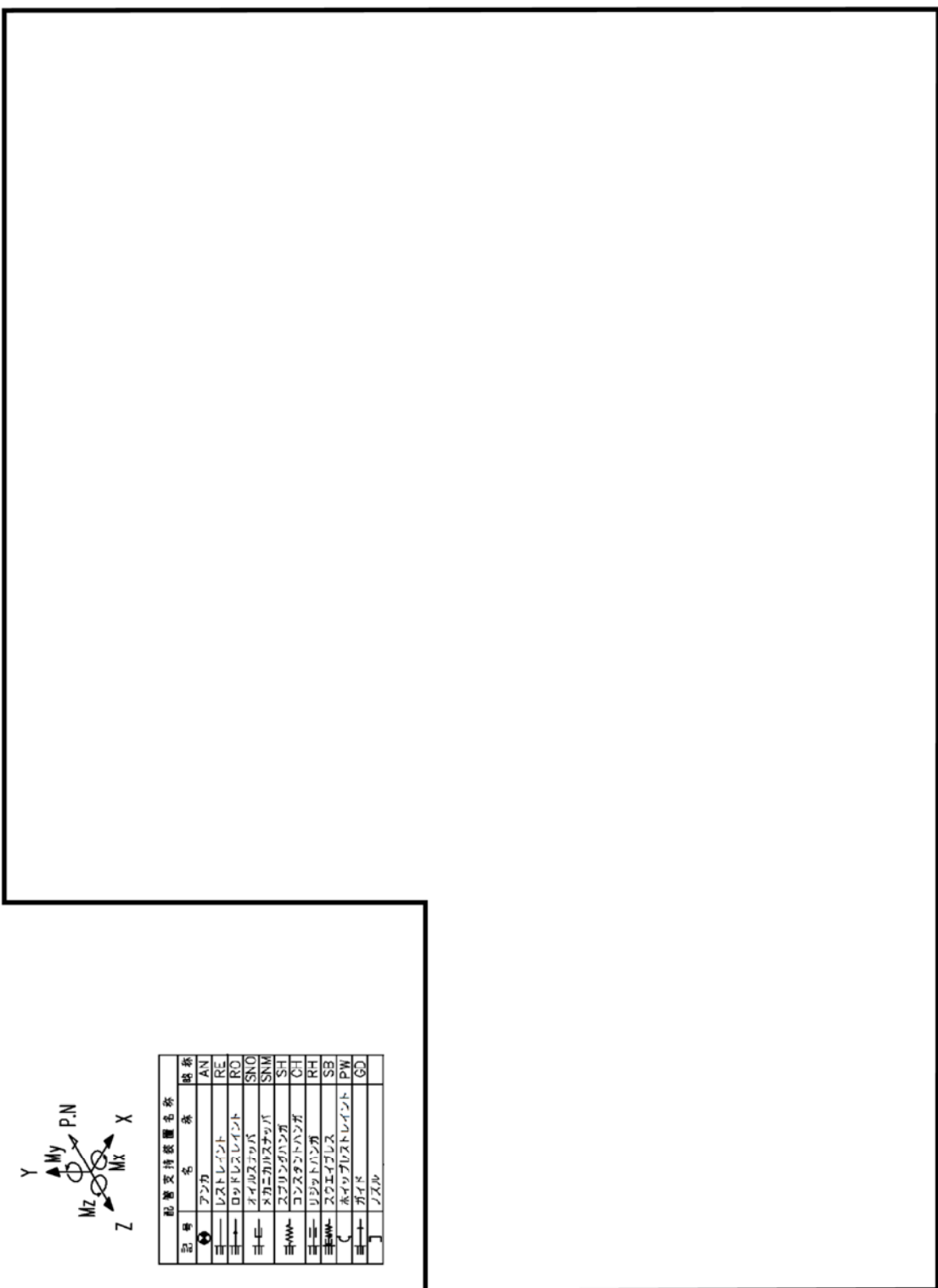


図 6 原子炉系 (蒸気部) 主蒸気配管 (4/8) (解析モデル)



記号	配管支持装置名称	取係
	アンカ	AN
	レストレスト	RE
	ロッドレスト	RO
	アイズレスト	SNO
	スカーカレスト	SNM
	スクリンハンダ	SH
	コンスタントハンダ	CH
	リフトハンダ	RH
	スウェイブレス	SB
	ホップレストレスト	PW
	ガイド	GD
	スリル	

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
≡	ライムスタブ	SNC
≡	スリカニカリスタブ	SNM
≡	コンスタントハンダ	SH
≡	リジトハンダ	CH
≡	スウェイブレス	RH
≡	スウェイブレス	SB
≡	ワイヤレストレイント	PW
≡	ワイヤ	GD
≡	ワスル	

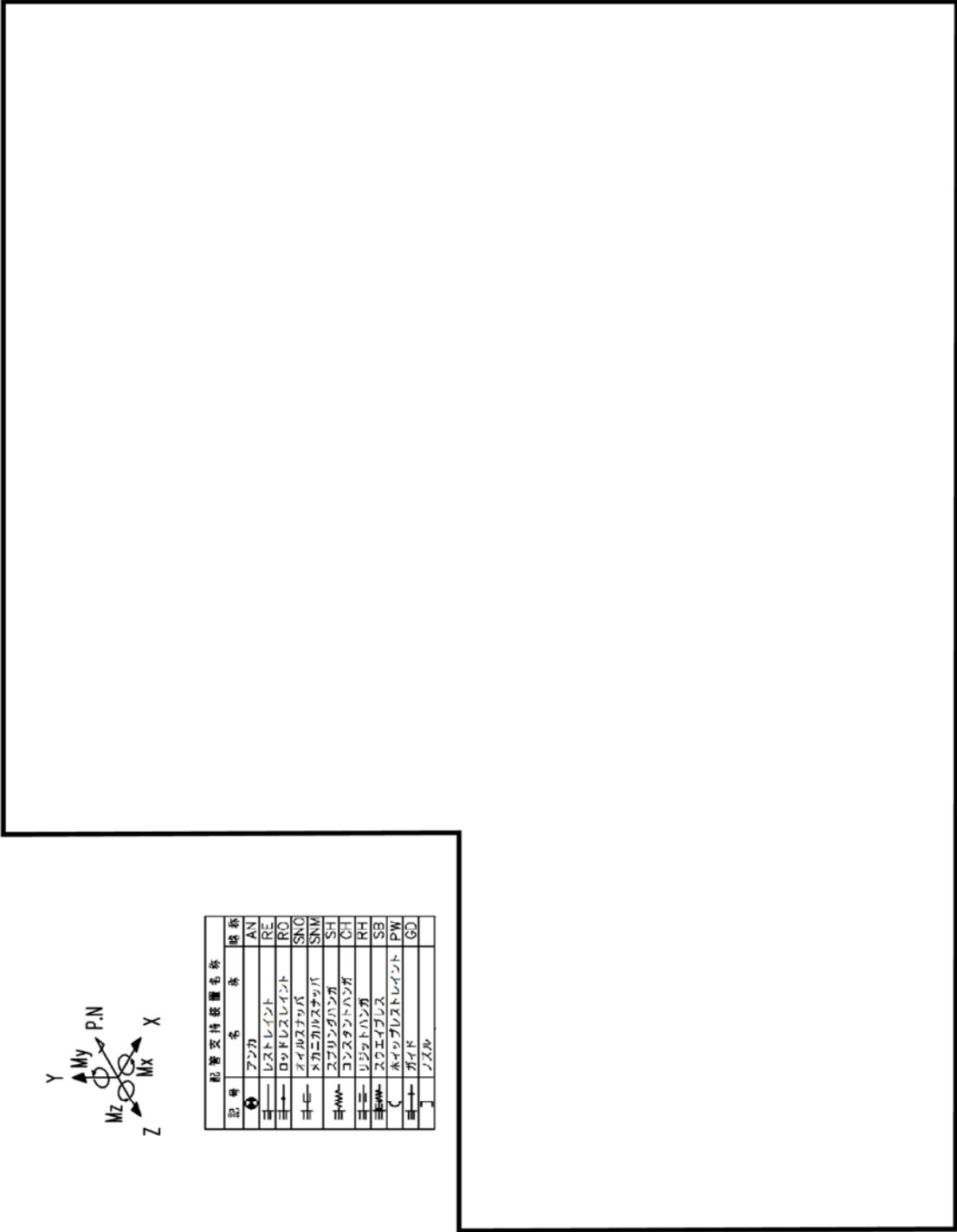
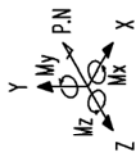


図 8 原子炉系 (蒸気部) 主蒸気配管 (6/8) (解析モデル)



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	ノードサポート	SNO
▽	SNM	ノードマスタ	SNM
◇	SH	スプリングハンガ	SH
◇	CH	コンスタントハンガ	CH
◇	RH	リジッドハンガ	RH
◇	SB	スロエイブルス	SB
◇	PW	パイプレストレイント	PW
◇	GD	ガイド	GD
◇	ISL	リズル	ISL

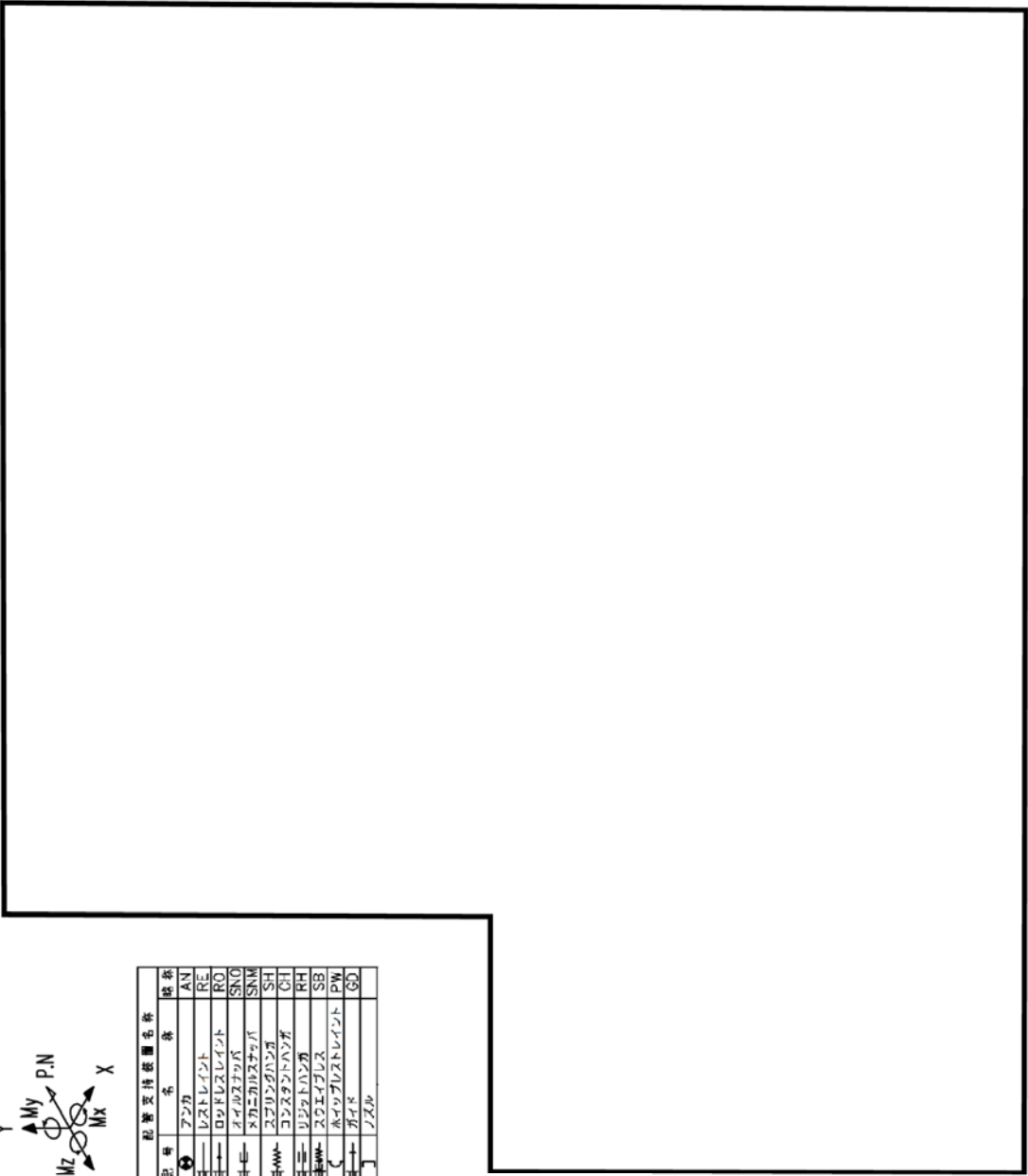
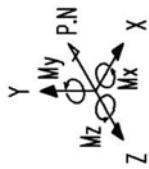
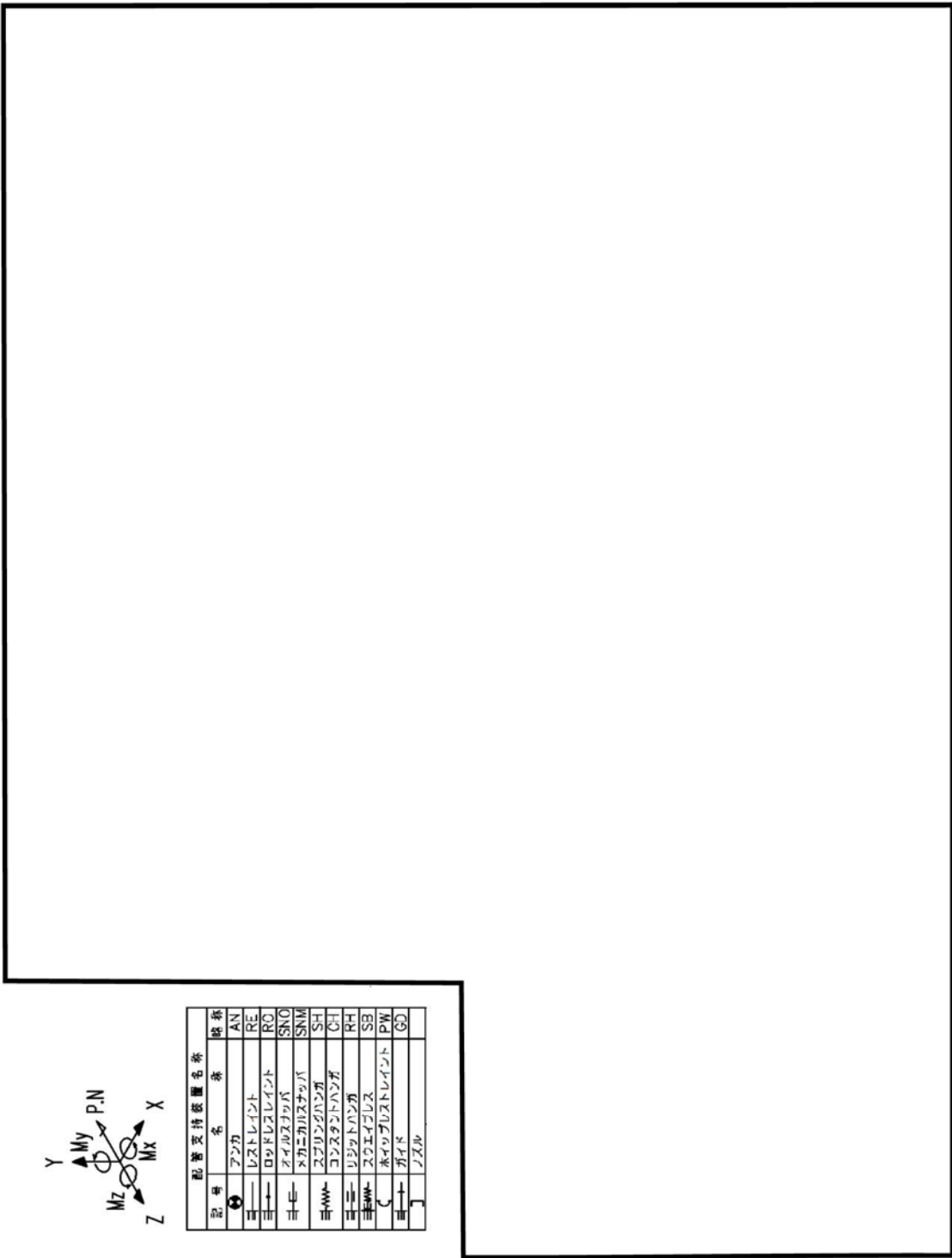
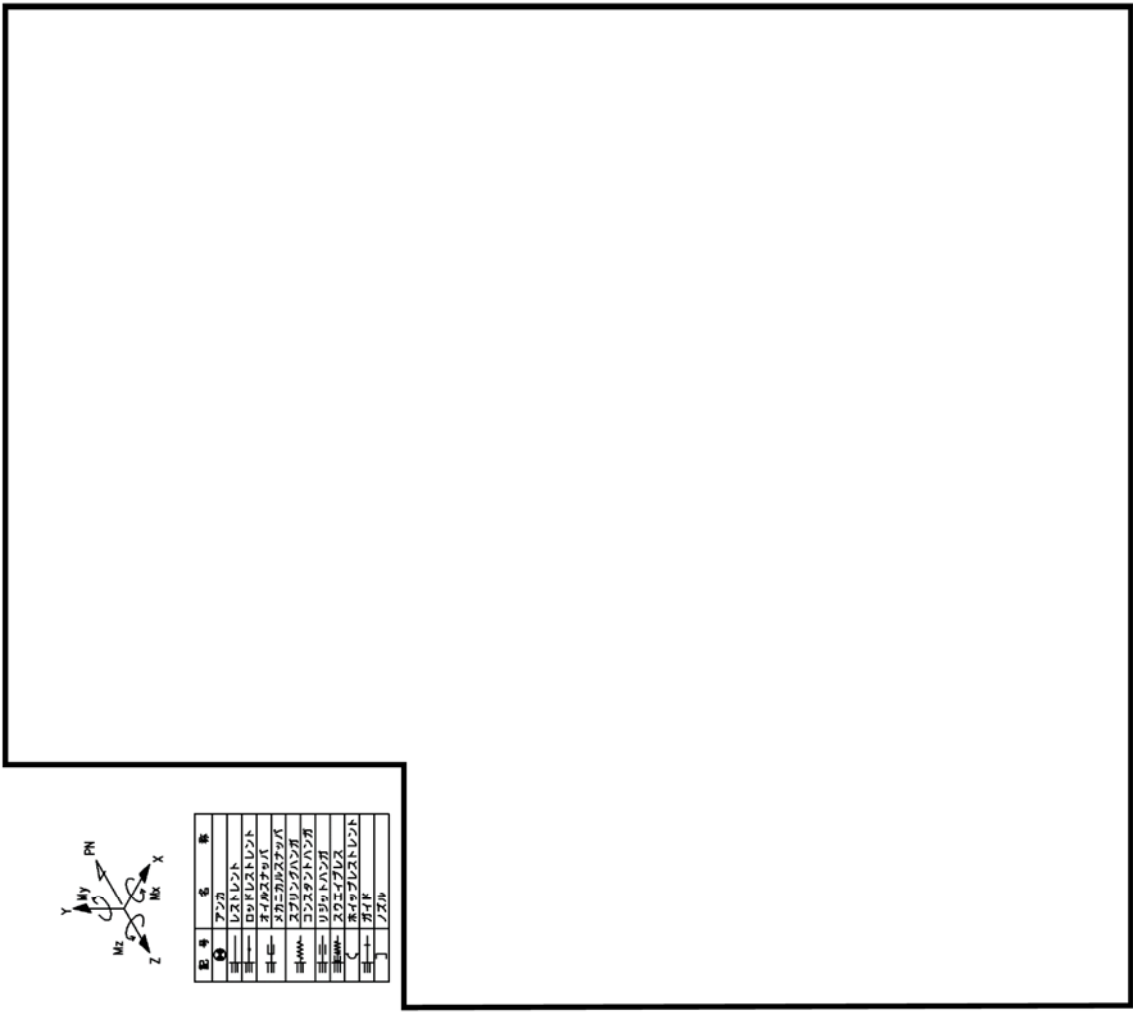


図9 原子炉系（蒸気部）主蒸気配管（7/8）（解析モデル）



記号	記号名	階級
⊙	アンカ	AN
≡	レストレイント	RE
≡	ロッドレストレイント	RO
≡	ダイヤルジョイント	SNO
≡	ネカニカバスタット	SNM
≡	スプリングハンガ	SH
≡	コンスタントハンガ	CH
≡	リジッドハンガ	RH
≡	スウェーブルス	SB
C	ボウフラレストレイント	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)



記号	名称
	アング
	レスポント
	ロッドレスポント
	燃料棒スワッ
	燃料棒スワッチ
	スプリングハン
	コンタクトハン
	リフトハン
	スライダス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス
	スライダレス



 : 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	略
①	アツカ	
②	レスト	
③	レストレスト	
④	レストレスト	
⑤	レストレスト	
⑥	レストレスト	
⑦	レストレスト	
⑧	レストレスト	
⑨	レストレスト	
⑩	レストレスト	
⑪	レストレスト	
⑫	レストレスト	
⑬	レストレスト	
⑭	レストレスト	
⑮	レストレスト	
⑯	レストレスト	
⑰	レストレスト	
⑱	レストレスト	
⑲	レストレスト	
㉑	レストレスト	
㉒	レストレスト	
㉓	レストレスト	
㉔	レストレスト	
㉕	レストレスト	
㉖	レストレスト	
㉗	レストレスト	
㉘	レストレスト	
㉙	レストレスト	
㉚	レストレスト	
㉛	レストレスト	
㉜	レストレスト	
㉝	レストレスト	
㉞	レストレスト	
㉟	レストレスト	
㊱	レストレスト	
㊲	レストレスト	
㊳	レストレスト	
㊴	レストレスト	
㊵	レストレスト	
㊶	レストレスト	
㊷	レストレスト	
㊸	レストレスト	
㊹	レストレスト	
㊺	レストレスト	
㊻	レストレスト	
㊼	レストレスト	
㊽	レストレスト	
㊾	レストレスト	
㊿	レストレスト	



図 12 原子炉冷却材浄化系配管 (2/4) (解析モデル)



記号	名 称
①	アツク
②	レストレスト
③	ロフトレストレスト
④	オールドスチール
⑤	スチールスチール
⑥	コンクリートコンクリート
⑦	リフトリフト
⑧	スチール
⑨	スチールレストレスト
⑩	リフト

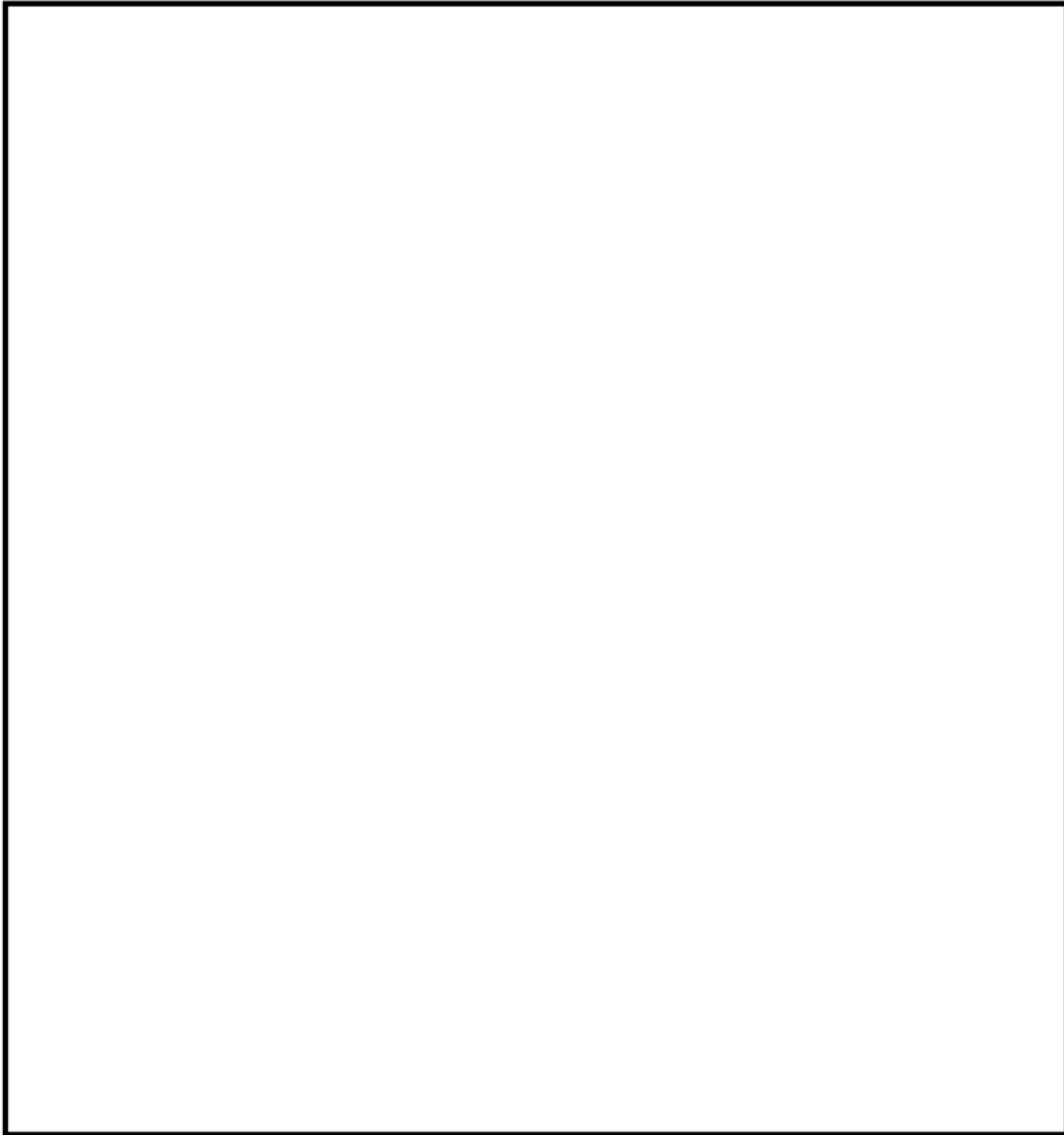


図 13 原子炉冷却材浄化系配管 (3/4) (解析モデル)



記号	名称
⊕	アンカ
≡	レストレント
≡	ロックスレストレント
≡	オイルスタンプ
≡	スプリングハンダ
≡	コンスタントハンダ
≡	リベットハンダ
≡	スウェィチング
≡	ワイヤレストレント
≡	ワイヤ
≡	ノズル

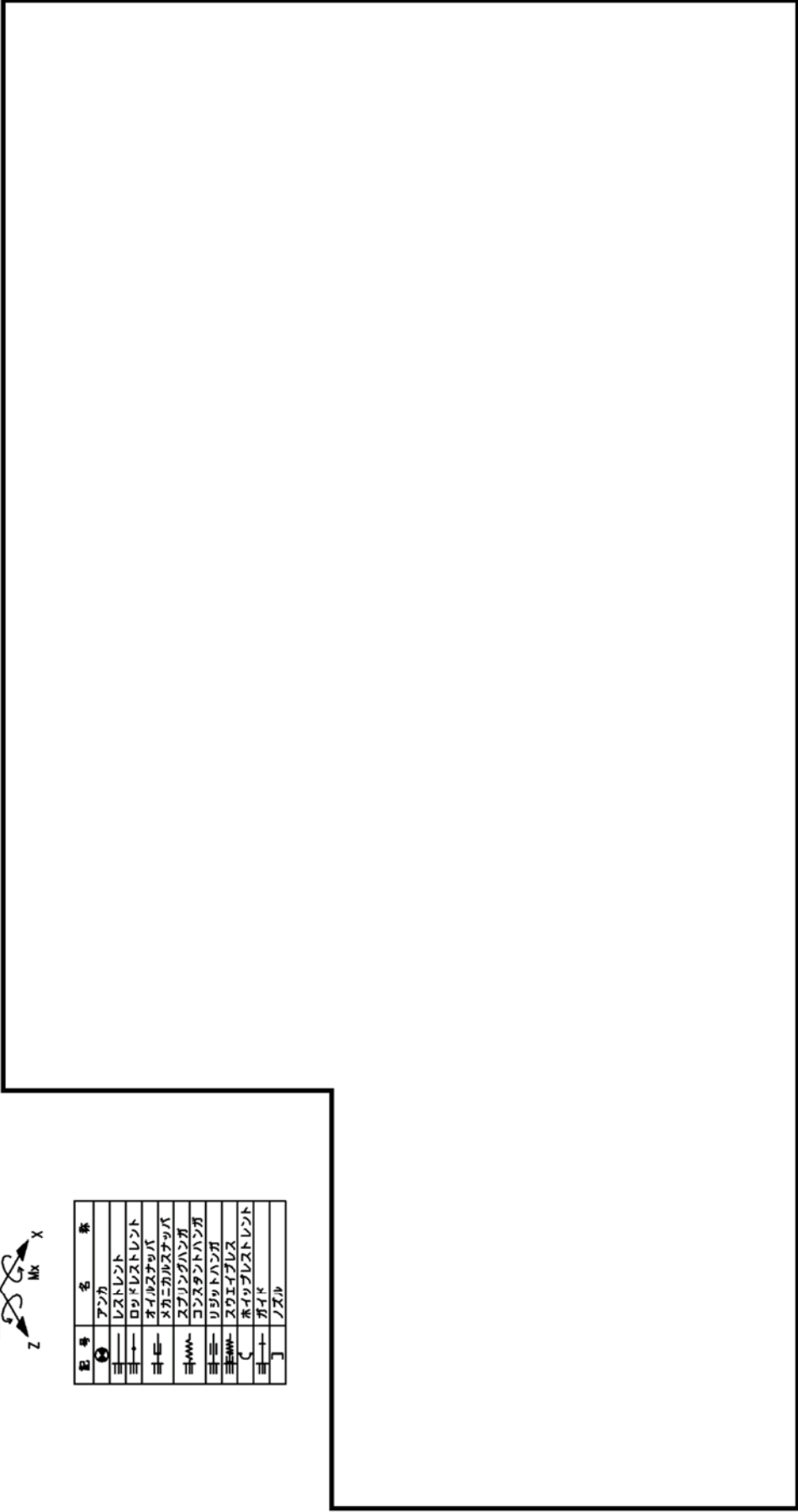


図 14 原子炉冷却材浄化系配管 (4/4) (解析モデル)

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）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 (ペローズ)		0.0000	0.0001	0.0071	0.0072
配管	ステンレス鋼配管系	給水系配管貫通部 (ペローズ)	疲労割れ	0.0000	0.0001	0.0064	0.0065
		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)	疲労割れ 腐食 (流れ加速型腐食)	0.5117	0.3256*	0.4580	0.7836
仕切弁	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-14, 15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。

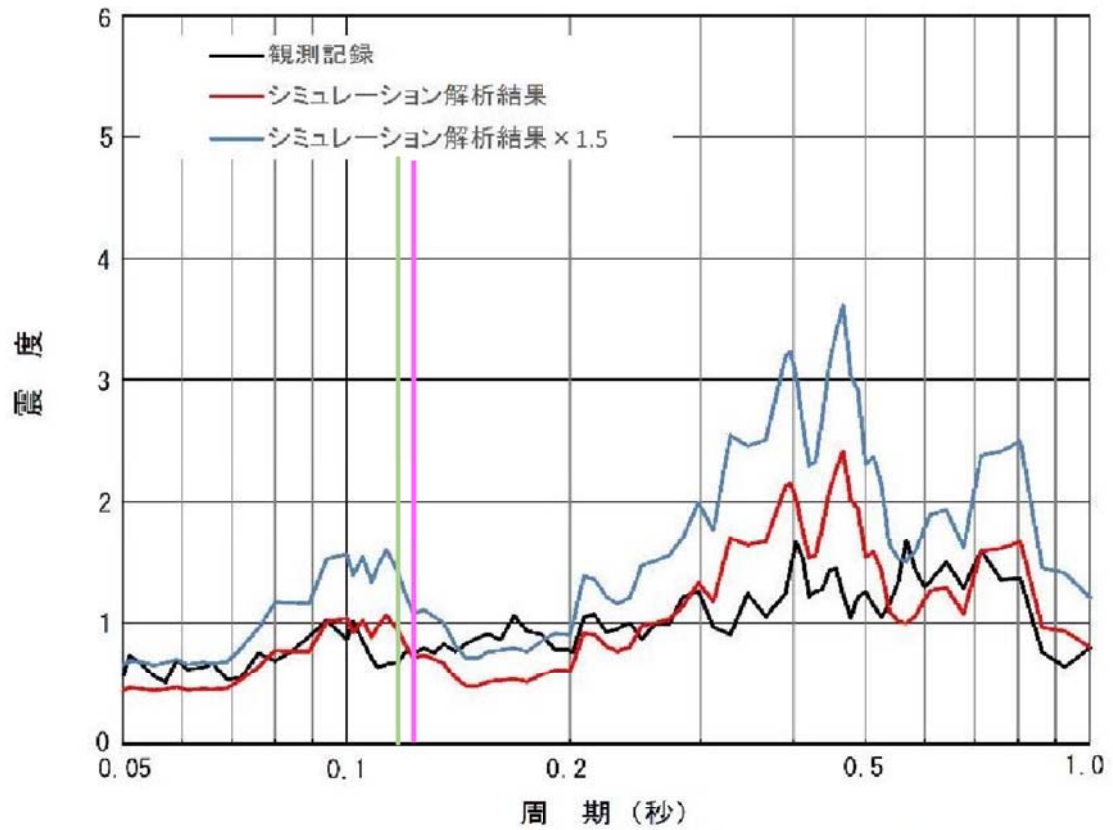
原子炉系（純水部）配管（FDW-14, 15）の影響評価結果を表3に、評価に用いた原子炉建屋 EL. 29. 0mにおける観測記録とシミュレーション解析結果の床応答曲線を示す。

表3 原子炉系（純水部）配管（FDW-14, 15）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-14, 15）	
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