

島根原子力発電所 2 号炉 審査資料	
資料番号	PLM-09 改 11
提出年月日	2023 年 11 月 22 日

島根原子力発電所 2 号炉高経年化技術評価  
(耐震安全性評価)

補足説明資料

2023 年 11 月 22 日

中国電力株式会社

目次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
3. 評価対象と評価手法	4
(1) 評価対象	4
①耐震安全性評価対象機器	4
②耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象の抽出	4
(2) 評価手法	8
①主な適用規格	8
②耐震安全性評価の評価手法	8
③工事計画認可補正申請で用いた耐震評価手法等の反映について	10
(3) 評価用地震力	11
(4) 評価用地震動	11
(5) 代表の選定	15
4. 代表の耐震安全性評価	17
(1) 耐震安全性評価	17
①低サイクル疲労	17
②中性子照射脆化	17
③照射誘起型応力腐食割れ	17
④熱時効	17
⑤摩耗	18
⑥腐食（流れ加速型腐食）	18
⑦腐食（全面腐食）	20
⑧動的機能維持に係る耐震安全性評価	22
⑨制御棒挿入性評価	23
⑩浸水防護施設の耐震安全性評価	27
(2) 現状保全	27
(3) 総合評価	27
5. まとめ	27
(1) 審査ガイド等記載事項に対する確認結果	27
(2) 施設管理に関する方針として策定する事項	32
添付 炉内構造物の点検記録	33

- 別紙 1. 建設後の耐震補強について
- 別紙 2. 耐震安全性評価に用いる現行の JEAG4601 以外の値を適用したケースについて
- 別紙 3. 新規制基準適合性に係る工事計画認可等における審査内容の反映について
- 別紙 4. 低サイクル疲労を考慮した耐震安全性評価について
- 別紙 5. 中性子照射脆化を考慮した耐震安全性評価について
- 別紙 6. 流れ加速型腐食を考慮した耐震安全性評価について
- 別紙 7. 機器付基礎ボルトの腐食を考慮した耐震安全性評価について
- 別紙 8. 後打ちアンカの耐震安全性評価について
- 別紙 9. 動的機能維持評価について
- 別紙 10. 機器・配管系の耐震安全性評価に用いた地震力について
- 別紙 11. これまでに発生した地震が与える影響について
- 別紙 12. 炭素鋼配管の腐食（流れ加速型腐食）に対する耐震安全性評価について
- 別紙 13. 炭素鋼配管の腐食（流れ加速型腐食）に対する耐震安全性評価に係る耐震管理厚さについて
- 別紙 14. 疲労割れに対する評価の具体的内容について
- 別紙 15. 機器付基礎ボルトの腐食に対する評価の具体的内容について
- 別紙 16. 初回申請および補正申請の発生応力および許容応力の比較について

## 流れ加速型腐食を考慮した耐震安全性評価について

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

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

## 1. 配管内面の腐食（流れ加速型腐食）に対する耐震安全性評価

## (1) 評価対象配管の抽出について

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

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

## (2) 評価対象モデル数

評価対象として抽出され評価を実施した配管は合計 62 モデルであり、系統および耐震重要度毎のモデル数を表 1 に示す。

表1 配管内面の腐食（流れ加速型腐食）（炭素鋼配管）の評価対象モデル数

評価対象配管 (系統名)	耐震重要度	モデル数 <sup>*1</sup>
給水系	S	1
	B (Ss) <sup>*2, *3</sup>	1
	B	12
原子炉ベントリ系	S	2
原子炉隔離時冷却系	S	3
復水系	B (Ss) <sup>*2</sup>	2
	B	40
タービンラント蒸気系	B	3
残留熱除去系	S	3
補助蒸気系	B	1

\*1：同一モデル内に複数の系統，耐震重要度が含まれる管があるため，モデル数は一部重複あり

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

\*3：溢水源としない B, C クラス設備に該当するため，基準地震動 Ss による評価を実施した

### (3) 評価対象ラインおよび解析モデル

解析モデルは，三次元多質点系はりモデルとし，減肉量を考慮した寸法以外のモデル化の条件は，工事計画認可と同等とする。解析は，計算機コード「HISAP」を使用する。

また，計算機コードを用いた配管の耐震評価では，応力評価に加え，一次＋二次応力の許容応力超過部位に対する疲れ累積係数による評価もあわせて実施する。

### (4) 耐震評価条件

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

なお，評価にあたっては対象モデルの重心位置の上階の設計用床応答スペクトルを適用する。

### (5) 評価内容

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

耐震安全性評価では，減肉規格（2006年度版）において流れ加速型腐食の発生の可能性が低いとされている FAC-1 管理範囲以外で，常時流れがあり減肉の想定される範囲については，減肉が想定される部位に耐震管理厚さまで減肉が生じたと想定して地震時の発生応力を評価した。

\*1：先行プラントは「耐圧上の必要最小厚さ」または「60年目の想定厚さ」を管理基準としているが、一部系統で流れ加速型腐食を考慮した耐震安全性評価が成立しないことから、「耐震管理厚さ」(=min(40年目の想定厚さ、公称板厚の80%の厚さ))を定め、耐震管理厚さを考慮した配管肉厚管理を実施している。耐震管理厚さの設定経緯および具体的な管理手法等を補紙(6)に示す。

(耐圧上の必要厚さを耐震管理厚さが下回る場合、配管肉厚は耐圧上の必要厚さ以上で管理する)

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

a. 耐震管理厚さの決定

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

b. 耐震管理厚さを用いた耐震評価

- ①エルボ部、分岐部、レギュレーサ部等の偏流発生部およびその下流部の以下に示す減肉想定範囲(減肉規格(2006年度版)に規程されている測定長さ)に耐震管理厚さまで一様な減肉が生じたと想定して三次元多質点系はりモデルに反映
  - ・管の呼び径125A以下 : 300 mm
  - ・管の呼び径125Aを超えるもの : 500 mmただし、弁およびオリフィス下流部については以下とする(Dは配管口径を示す)。
  - ・弁下流部 : 1Dの位置が上記を超える場合は1D
  - ・オリフィス下流部 : 3Dの位置が上記を超える場合は3D
- ②評価対象ラインの全ての減肉想定範囲に対し①で選定した耐震管理厚さまで、全周一様な減肉を想定し、三次元多質点系はりモデルに反映
- ③評価対象ラインの耐震クラスに応じた地震力を用いて地震時の発生応力(一次応力)の評価を実施(振動試験結果を踏まえ設計評価用として安全側に設定した減衰定数を適用する。)
- ④耐震重要度SクラスおよびBクラスのうちS<sub>s</sub>機能維持要求範囲の配管については、一次+二次応力の評価を実施し、許容応力を満足しなかった場合には疲れ累積係数による評価を実施

(6) 評価結果

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

評価対象ラインの概略図を図 1 に，全ラインの評価結果一覧および疲れ累積係数による評価結果を表 2，表 3 にそれぞれ示す。

また，評価対象ラインのうち，発生応力が許容応力を上回り疲れ累積係数が最大となった原子炉ベントドレン系配管を代表モデルとし，解析モデル図を図 2 に，疲れ累積係数の算出過程を補紙（1）に示す。

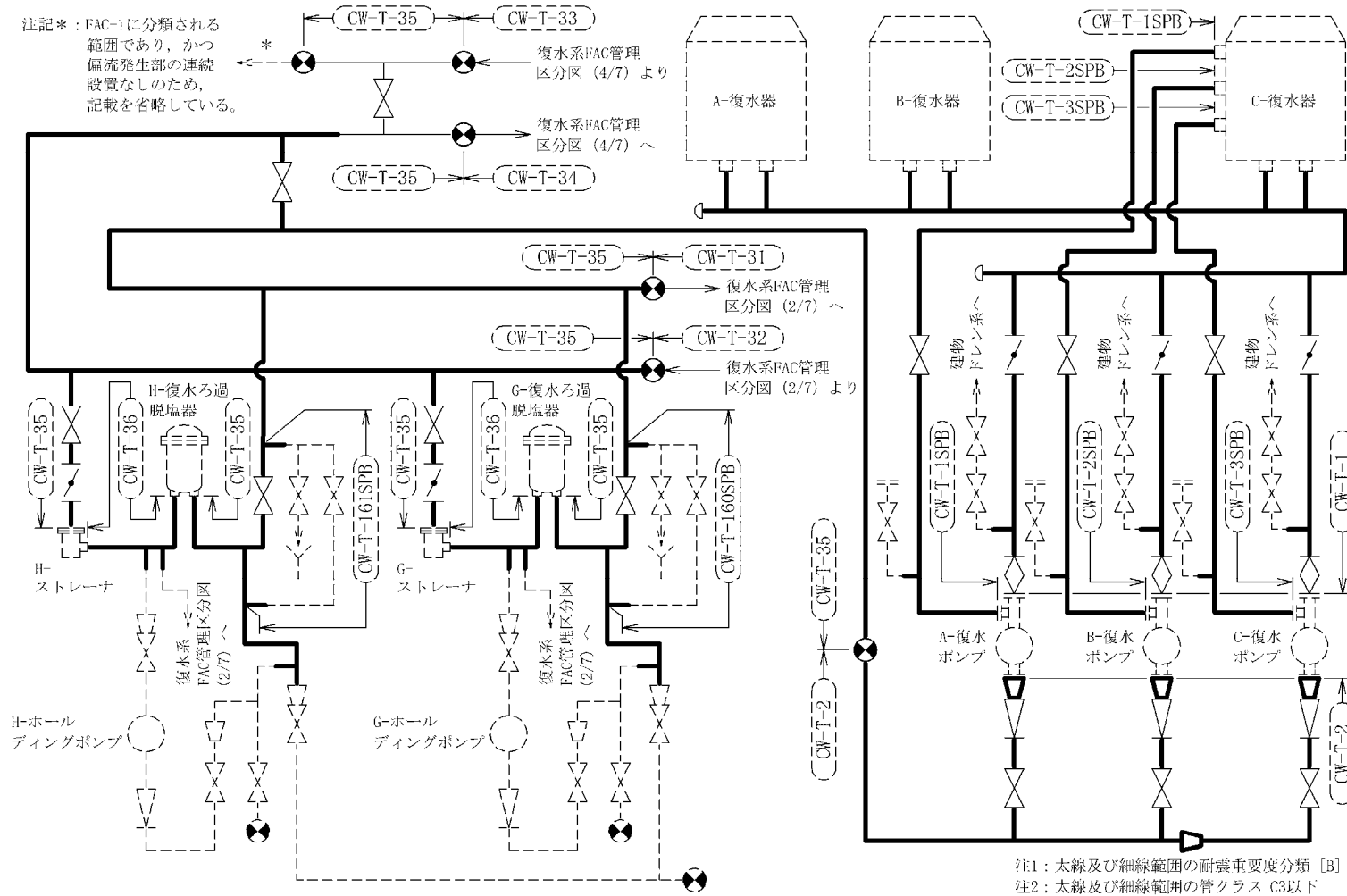
記号凡例

記号	内容
—— (太線)	FAC-2 の管
--- (太破線)	FAC-S の管
—— (細線)	FAC-1 の管
--- (破線)	減肉管理対象外の管
○ ○ - ○ - ○ ○	解析モデル名 (代表モデル)
○ ○ - ○ - ○ ○	解析モデル名 (代表モデル以外)
⊗	アンカ
C1	管クラス (管クラスがクラス 1 管である場合の例)
[S]	耐震重要度分類 (耐震重要度分類が S クラスである場合の例)

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 (1/14)

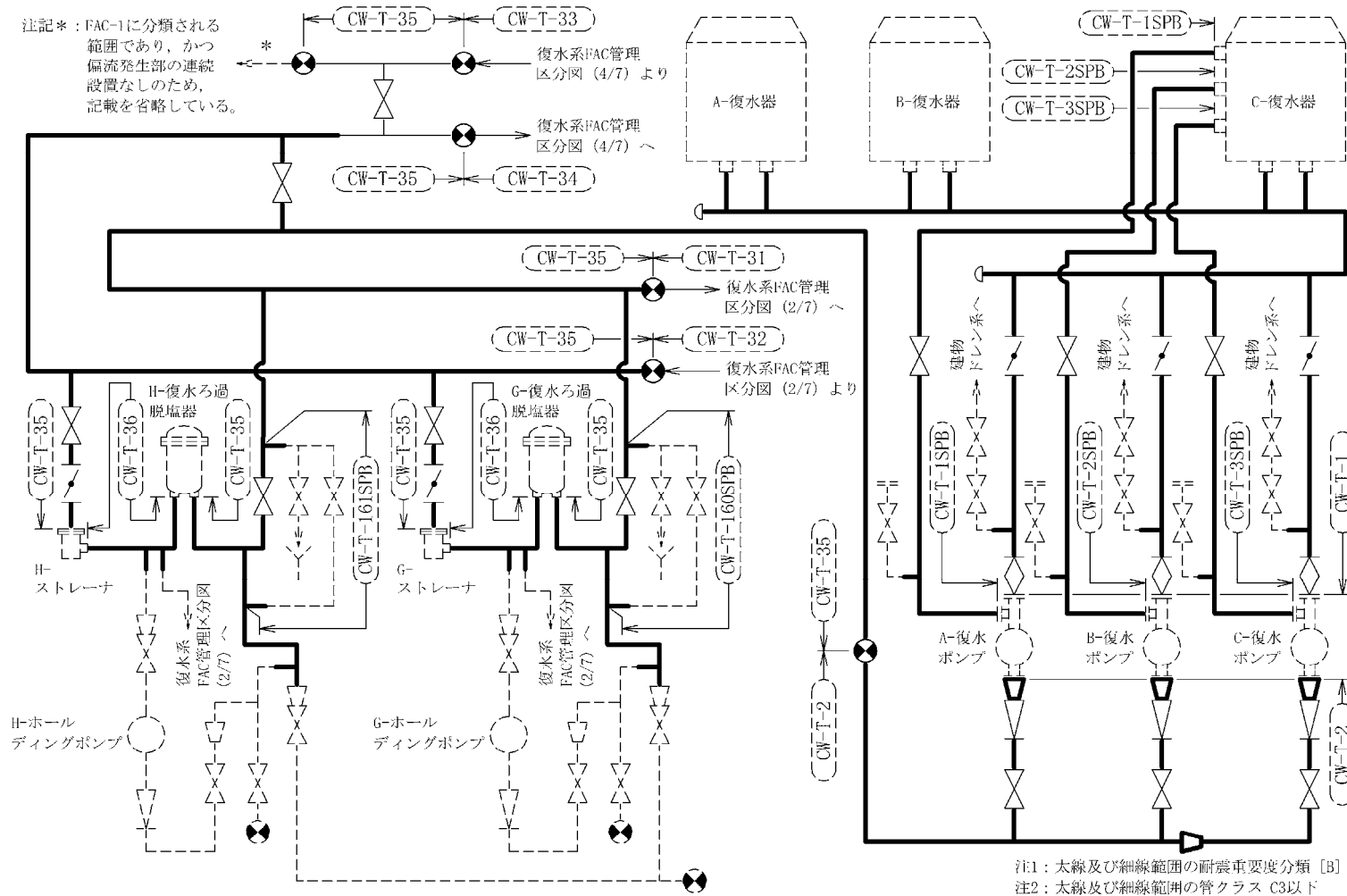






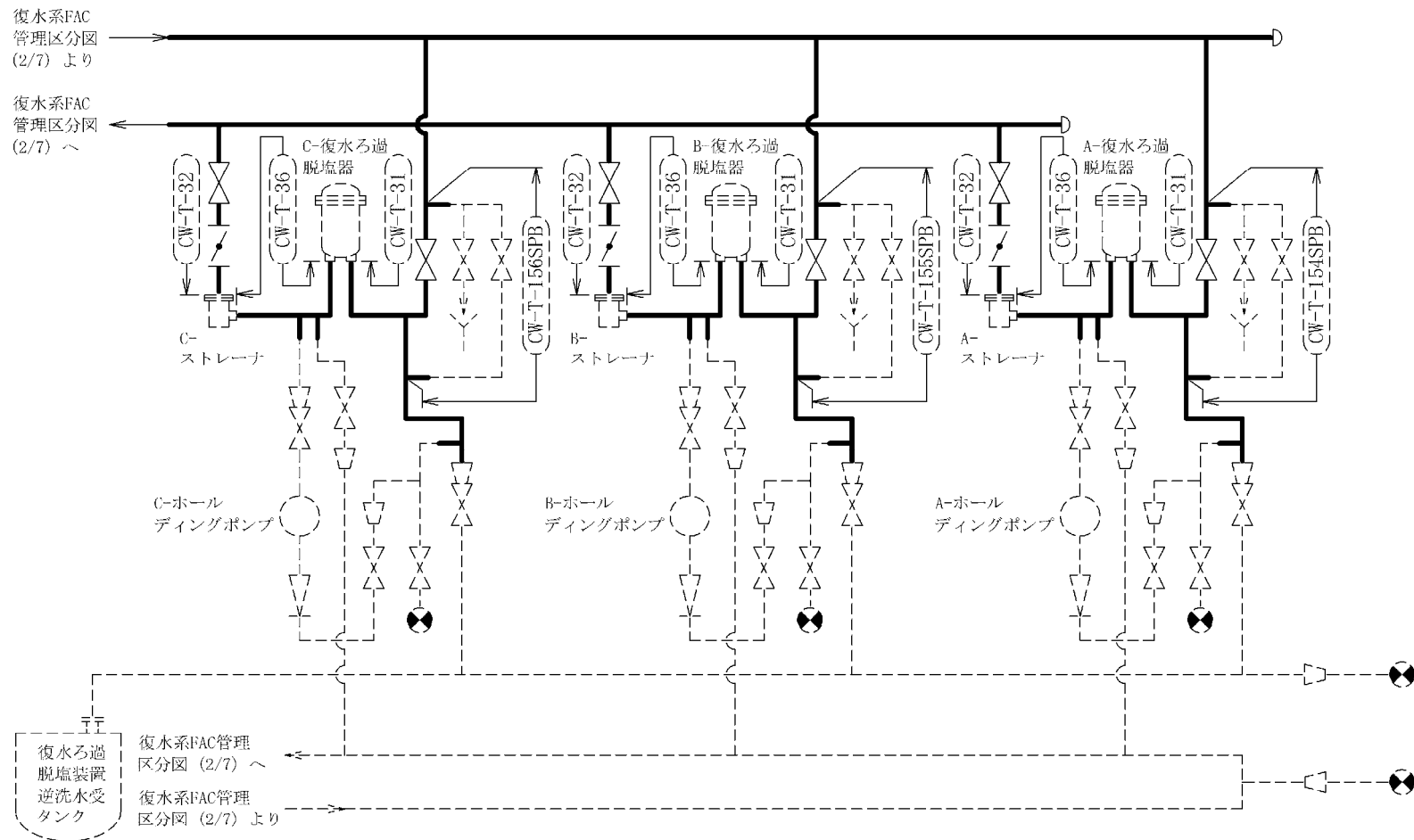
復水系 FAC 管理区分図(1/7)

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(3/14)



復水系 FAC 管理区分図 (2/7)

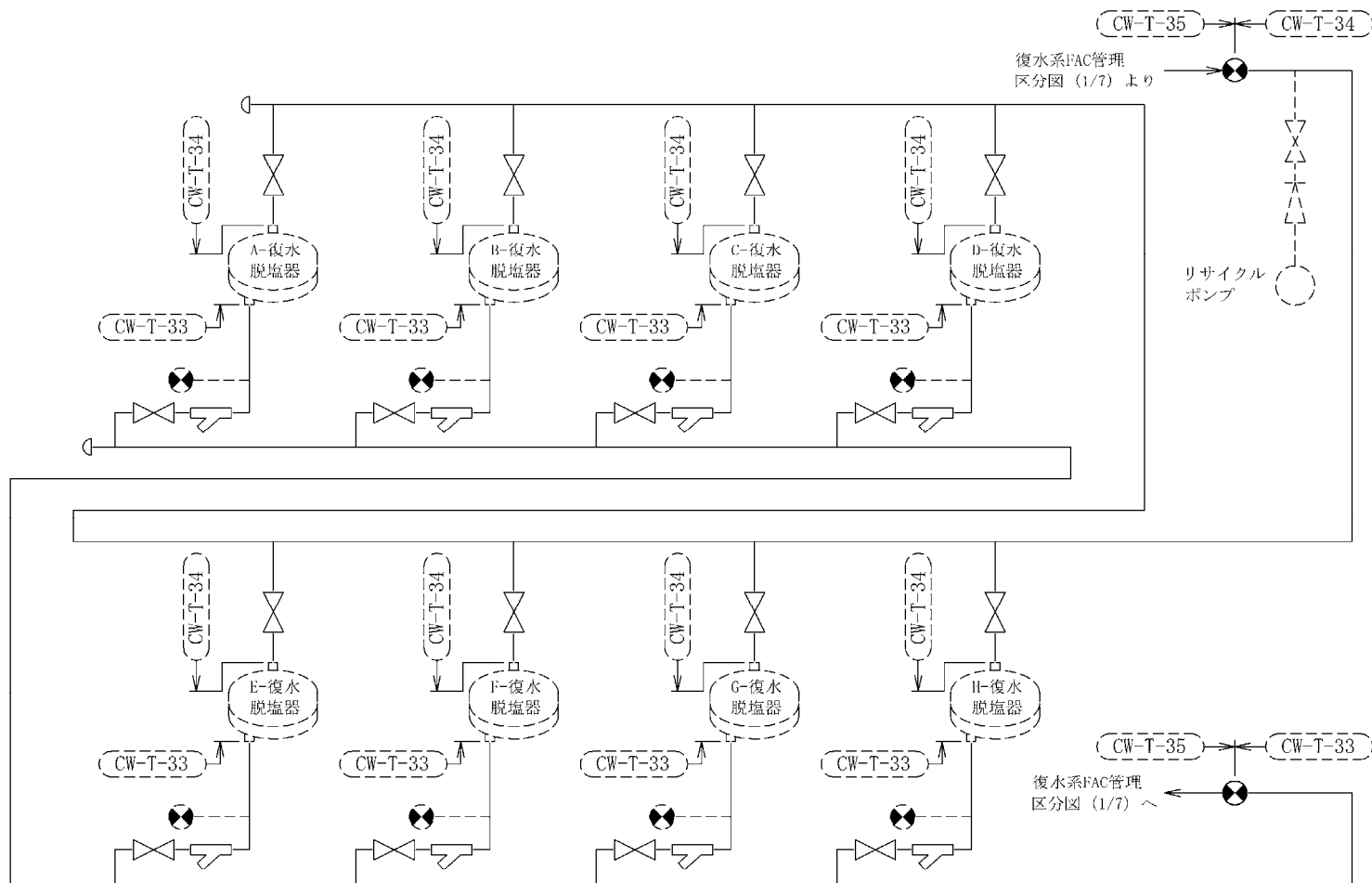
図1 配管の腐食（流れ加速型腐食）による減肉を考慮した耐震評価対象範囲(4/14)



注1：太線範囲の耐震重要度分類 [B]  
 注2：太線範囲の管クラス C3以下

復水系 FAC 管理区分図 (3/7)

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 (5/14)



注1：細線範囲の耐震重要度分類 [B]  
 注2：細線範囲の管クラス C3以下

復水系 FAC 管理区分図(4/7)

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(6/14)

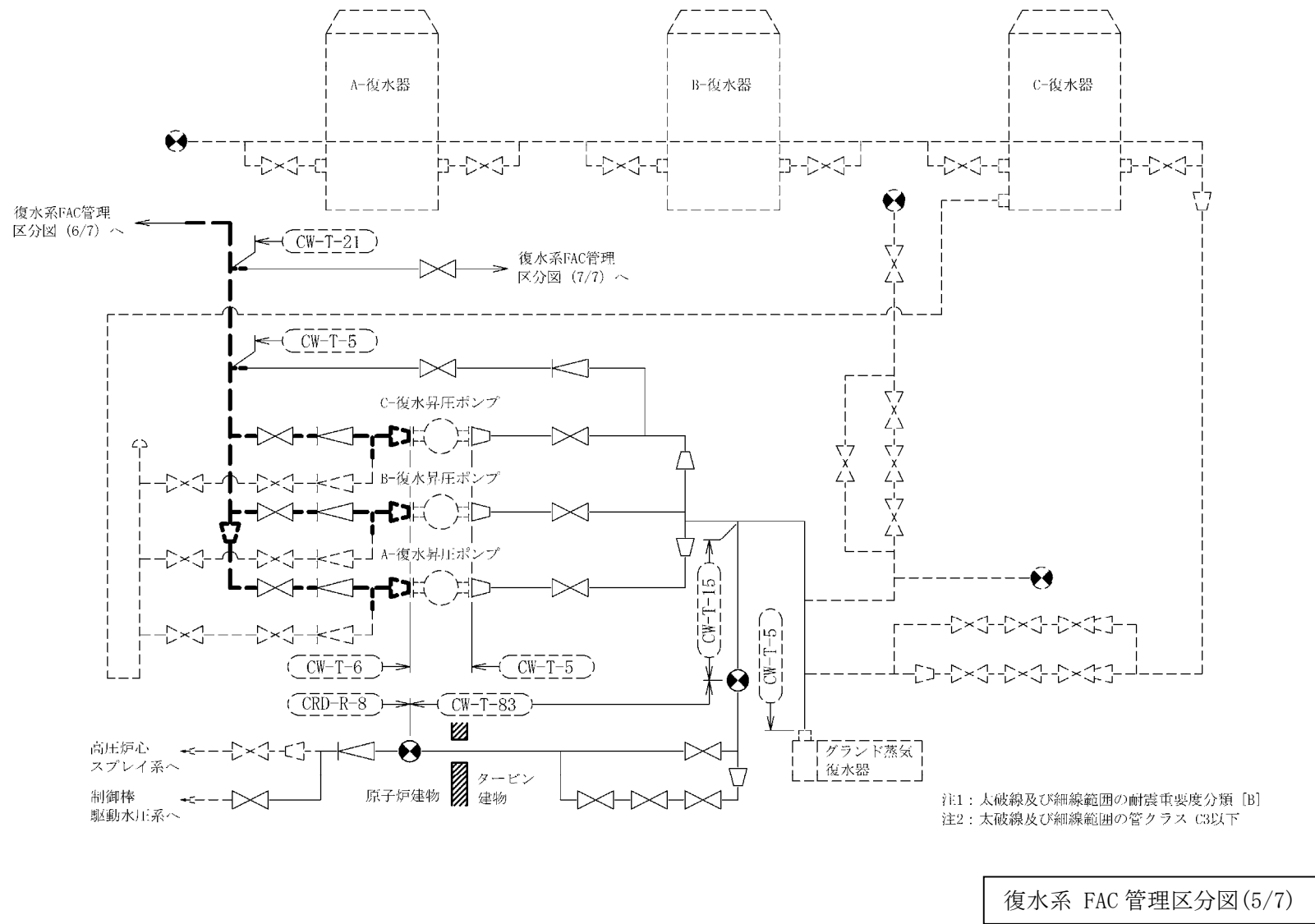
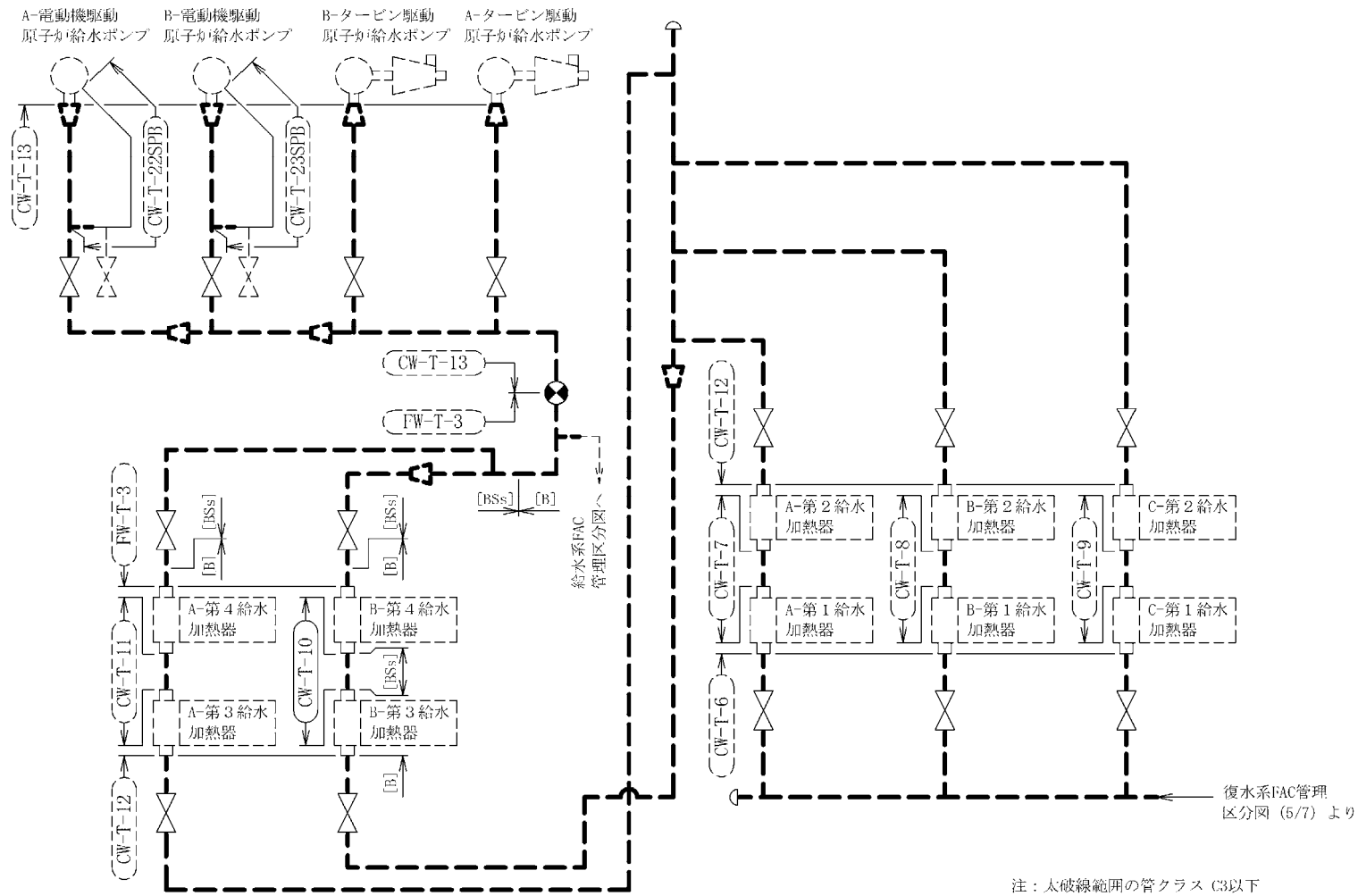
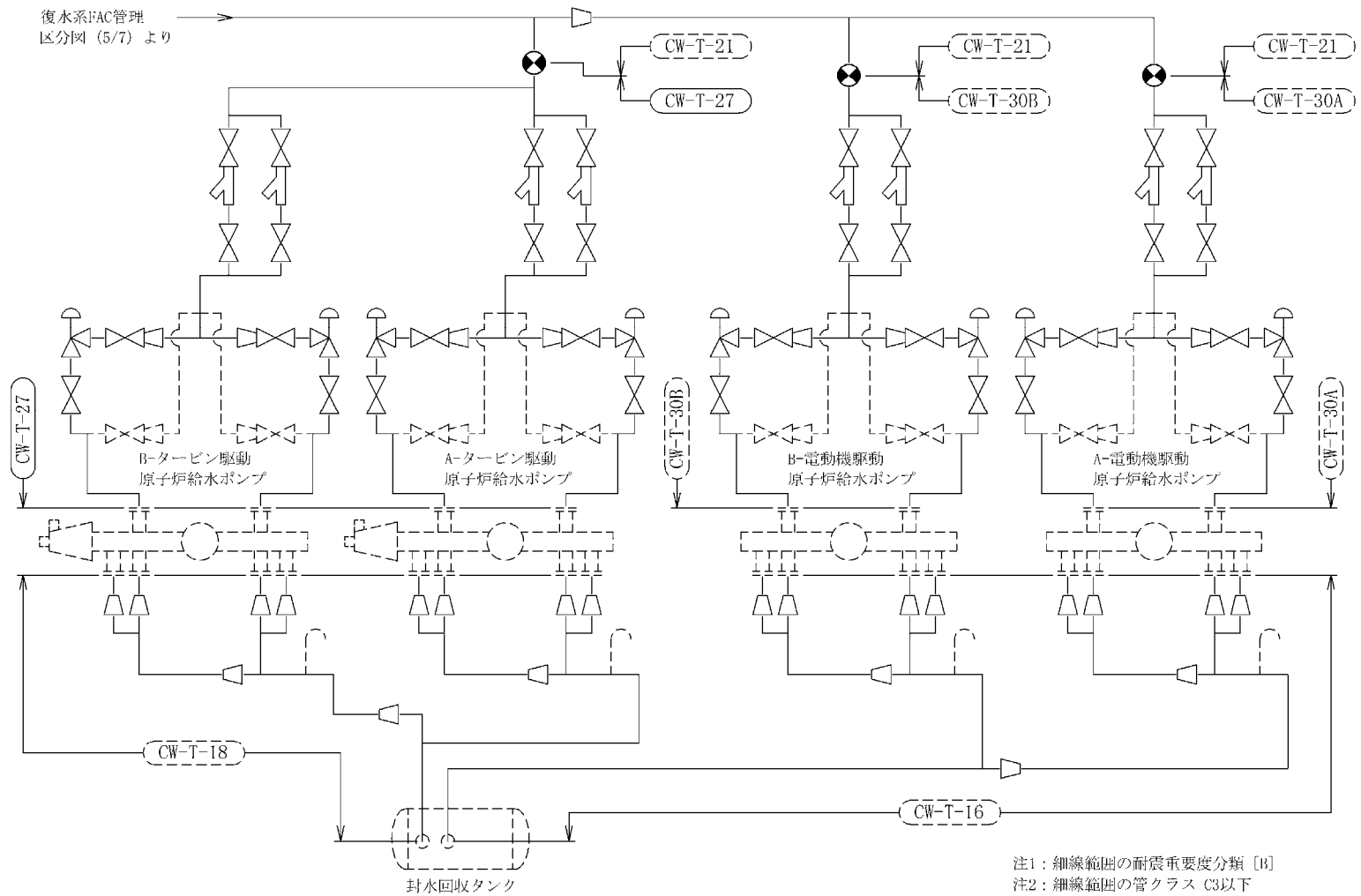


図1 配管の腐食（流れ加速型腐食）による減肉を考慮した耐震評価対象範囲(7/14)



復水系 FAC 管理区分図(6/7)

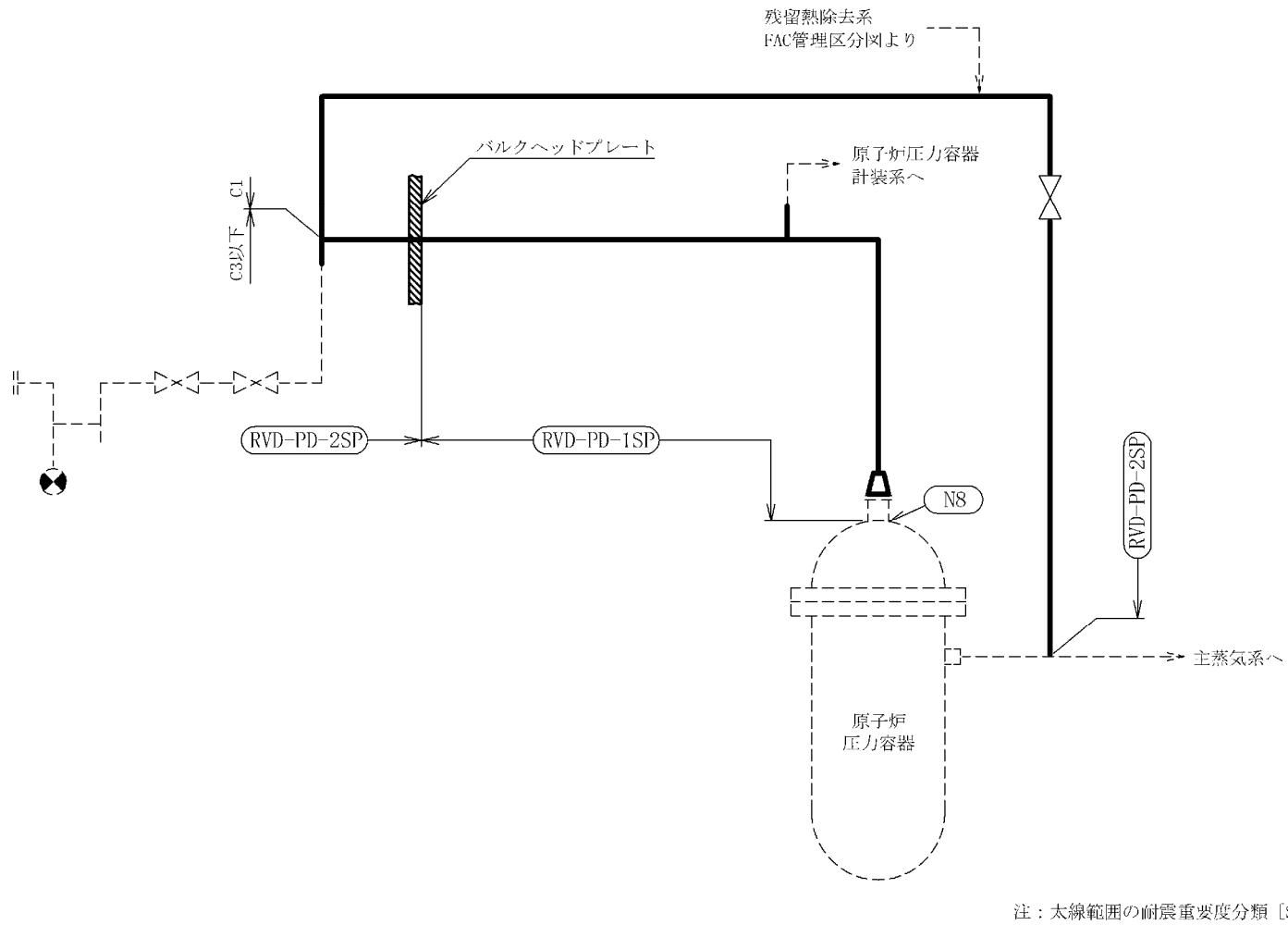
図1 配管の腐食（流れ加速型腐食）による減肉を考慮した耐震評価対象範囲(8/14)



復水系 FAC 管理区分図(7/7)

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(9/14)





原子炉ベントドレン系 FAC 管理区分図

図1 配管の腐食（流れ加速型腐食）による減肉を考慮した耐震評価対象範囲(10/14)

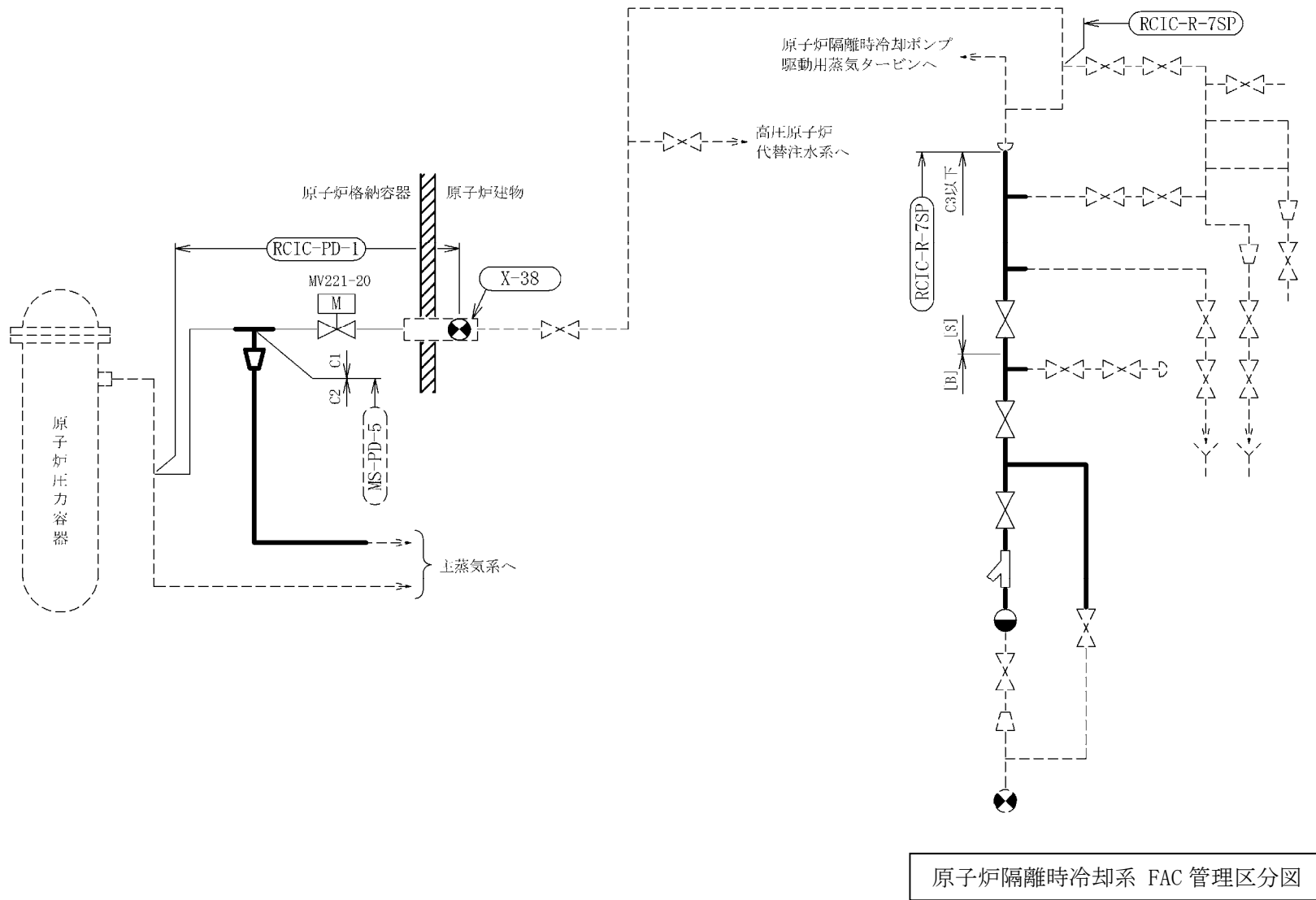
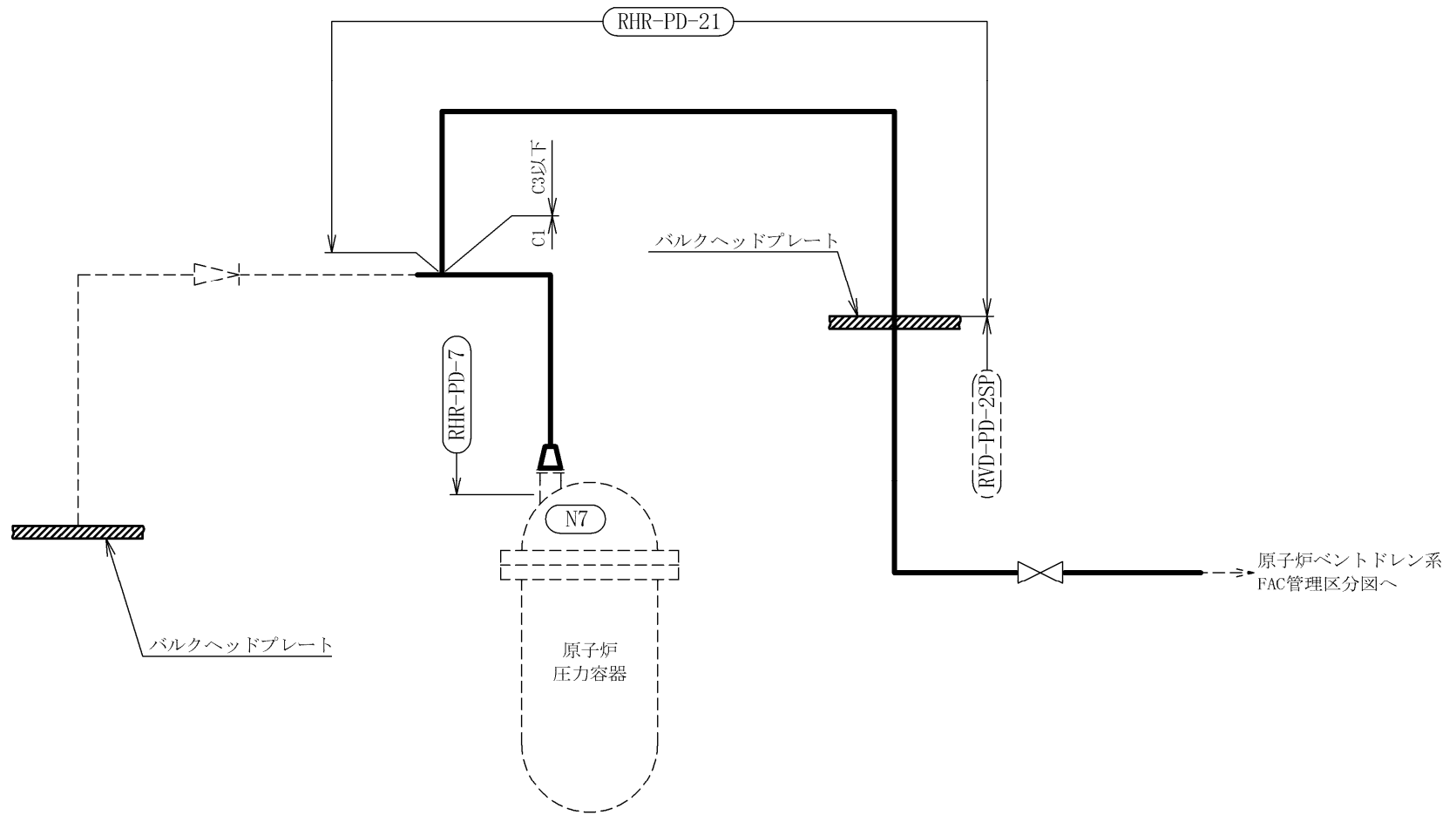


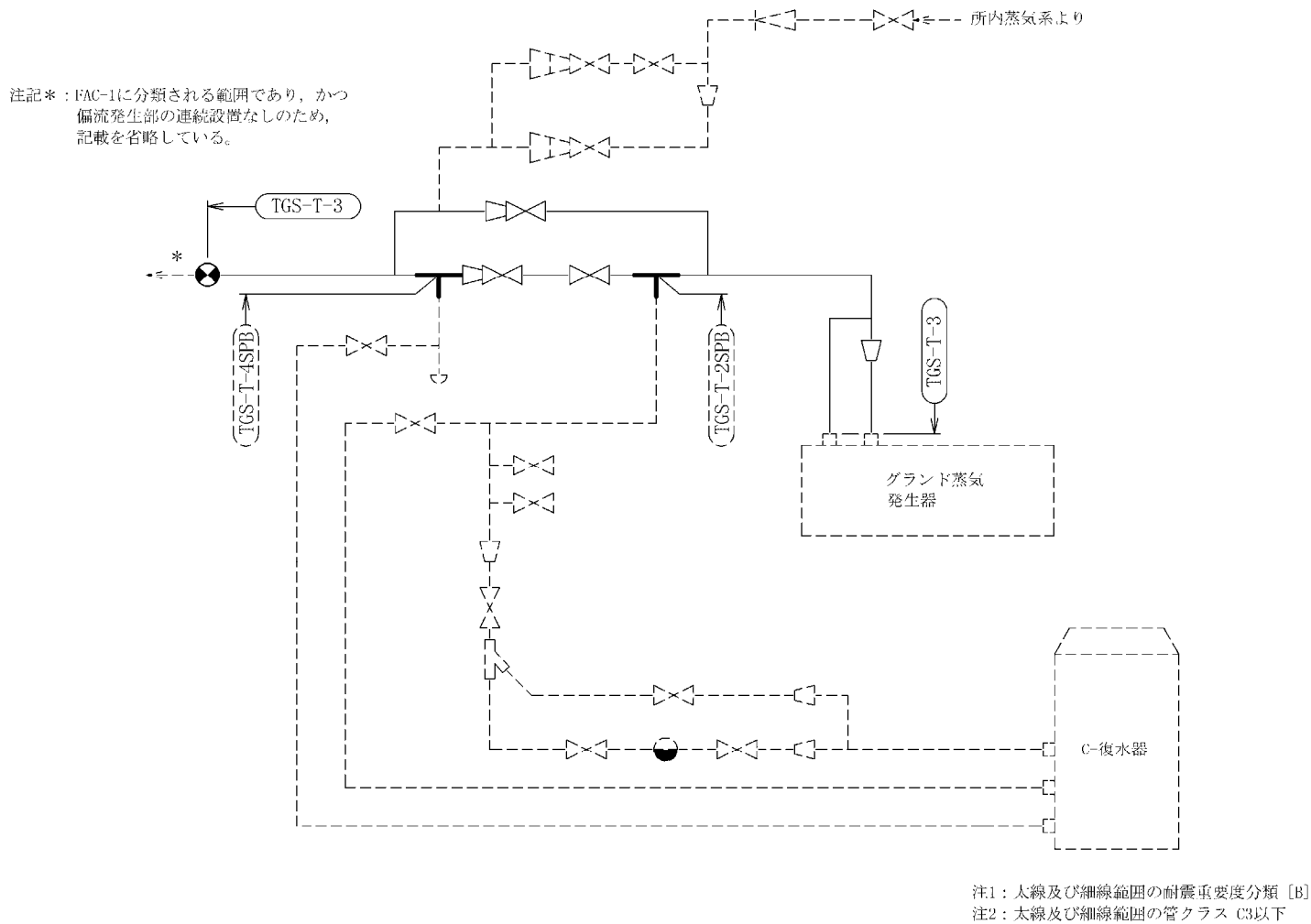
図1 配管の腐食（流れ加速型腐食）による減肉を考慮した耐震評価対象範囲(11/14)



注：太線範囲の耐震重要度分類 [S]

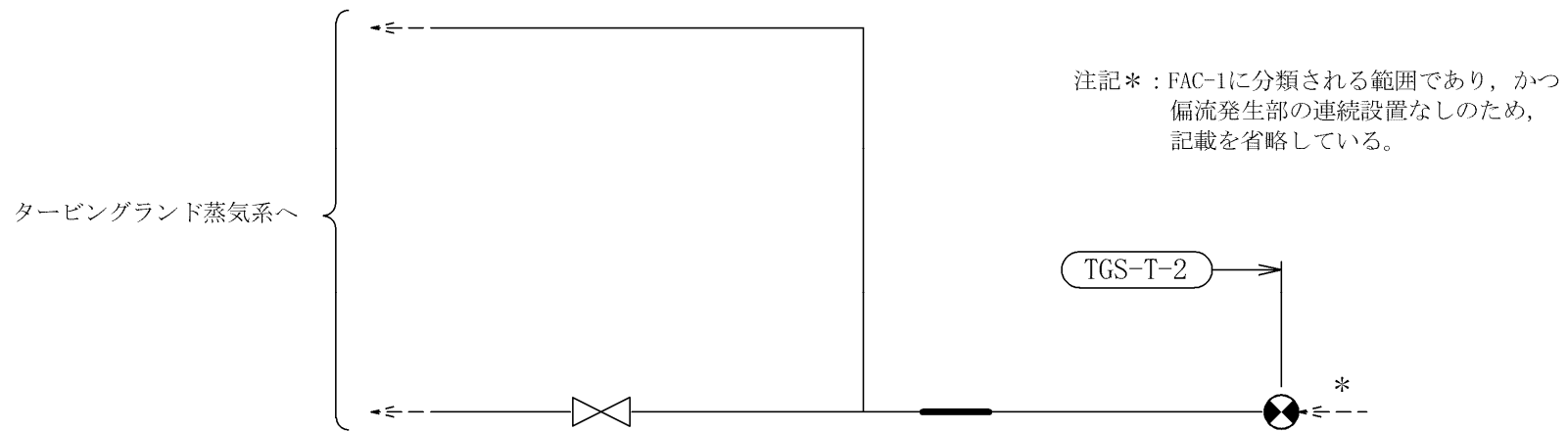
残留熱除去系 FAC 管理区分図

図1 配管の腐食（流れ加速型腐食）による減肉を考慮した耐震評価対象範囲(12/14)



タービングラント蒸気系 FAC 管理区分図

図1 配管の腐食（流れ加速型腐食）による減肉を考慮した耐震評価対象範囲(13/14)



注1 : 太線及び細線範囲の耐震重要度分類 [B]  
注2 : 太線及び細線範囲の管クラス C3以下

補助蒸気系 FAC 管理区分図

図1 配管の腐食（流れ加速型腐食）による減肉を考慮した耐震評価対象範囲(14/14)

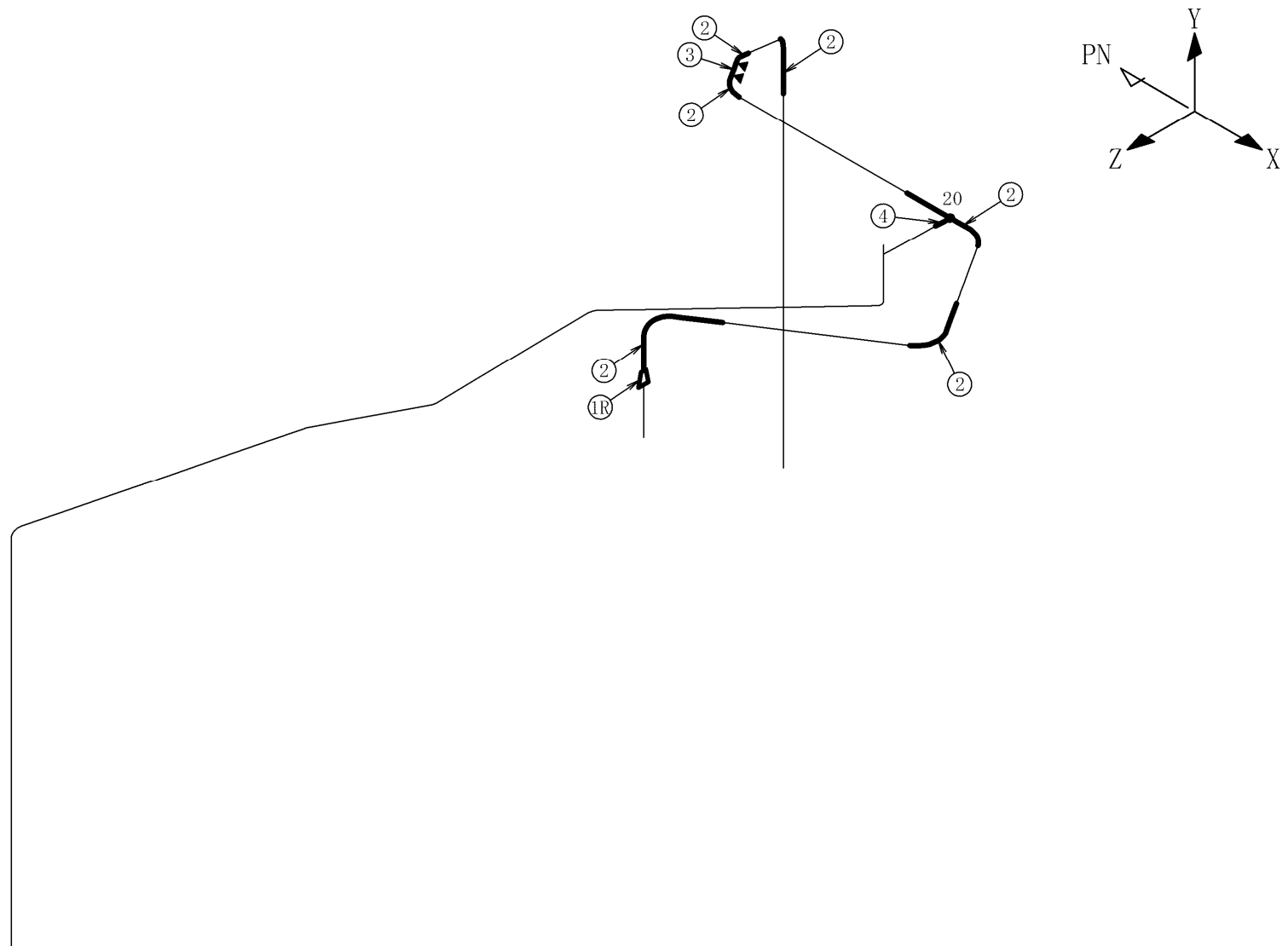


図2 代表モデル（原子炉ベントドレン系配管）の解析モデル図

表2 配管の腐食（流れ加速型腐食）に対する評価結果

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

\*1：評価モデル内の最大発生応力を示す

\*2：日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2005年版（2007年追補版を含む））＜第I篇 軽水炉規格＞ JSME S NC1-2005/2007」付録材料図表Part5 表1, 表8, 表9より求まる値

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

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

\*5：溢水源としないB, Cクラス設備に該当するため、基準地震動Ssによる評価を実施した

表3 配管の腐食に対する評価結果（疲れ累積係数による評価結果）

系統	区分	耐震 重要度	評価 地震力	許容応力 状態	疲れ累積係数*1 (許容値：1を下回る)
原子炉ベントドレン系	クラス1	S	Ss	IV <sub>A</sub> S	0.868
			Sd	III <sub>A</sub> S	0.171
原子炉隔離時冷却系	クラス1	S	Ss	IV <sub>A</sub> S	0.087
			Sd	III <sub>A</sub> S	0.010
残留熱除去系	クラス1	S	Ss	IV <sub>A</sub> S	0.260
			Sd	III <sub>A</sub> S	0.025
	クラス3	S	Ss	IV <sub>A</sub> S	0.474
			Sd	III <sub>A</sub> S	0.073

\*1：系統内の評価対象モデル中で最大の疲れ累積係数



## 2. 伝熱管の腐食（流れ加速型腐食）に対する耐震安全性評価

### (1) 評価対象部位の抽出について

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

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

### (2) 算出過程

#### ① 原子炉補機冷却系熱交換器

原子炉補機冷却系熱交換器は S クラスであり、原子炉建物 EL. 15. 300 に設置されている。熱交換器の構造を踏まえ支持条件ごとに評価モデルを作成し、伝熱管厚さに対し管内面側から 50%減肉したものとして、JEAG4601 および機械工学便覧に定める式に基づき、固有振動数を求めた結果、いずれのモデルにおいても剛構造であることを確認した。

評価モデルと各モデルの固有振動数を表 4 に示す。

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

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

#### a. 発生応力

原子炉補機冷却系熱交換器の伝熱管について、伝熱管厚さに対し管内面側から 50%減肉したものとして、JEAG4601 および機械工学便覧に定める式に基づき、地震時に発生する応力を求めた。発生応力の算出過程を補紙（2）に示す。

#### b. 許容応力

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

② 気体廃棄物処理系排ガス予熱器

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

評価モデルと各モデルの固有振動数を表5に示す。

表5 気体廃棄物処理系排ガス予熱器の評価モデルと伝熱管腐食時の伝熱管の固有振動数

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

a. 発生応力

発生応力は原子炉補機冷却系熱交換器と同様の手法で算出した。ただし、Bクラス機器であるため地震荷重は水平方向のみ考慮することから、補紙(2)に示す各応力成分の算出過程のうち、①a. (e)および(f)は対象外とした。

b. 許容応力

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

(3) 評価結果

熱交換器伝熱管の腐食(流れ加速型腐食)を考慮した耐震安全性評価結果を表6に示す。評価の結果、発生応力は許容応力を下回り、耐震安全性に問題ないことを確認した。

表6 熱交換器の伝熱管の腐食(流れ加速型腐食)を考慮した耐震安全性評価結果

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

\*1: 設計・建設規格 JSME S NC1-2005 付録材料図表 Part5 表6, 表8および表9より求まる値

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

\*3: 耐震重要度とは別に常設重大事故等対処設備の区分に応じた耐震設計が求められていることを示す

### 3. 管支持板の腐食（流れ加速型腐食）に対する耐震安全性評価

#### (1) 評価対象部位の抽出について

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

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

#### (2) 算出過程

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

評価モデルと各モデルの固有振動数を表7に示す。

表7 気体廃棄物処理系排ガス予熱器の評価モデルと管支持機能の喪失時の伝熱管の固有振動数

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

#### a. 発生応力

気体廃棄物処理系排ガス予熱器の伝熱管について、管支持板の腐食により1箇所の管支持機能を喪失したものとして、JEAG4601および機械工学便覧に定める式に基づき、地震時に発生する応力を求めた。発生応力の算出過程を補紙（3）に示す。

#### b. 許容応力

気体廃棄物処理系排ガス予熱器の伝熱管の一次応力に対する許容応力は、2.における同機器の許容応力と同様、JEAG4601に規定されている横置円筒形容器の胴（容器）の許容応力を適用した。

#### (3) 評価結果

気体廃棄物処理系排ガス予熱器の管支持板の腐食（流れ加速型腐食）による管支持機能の喪失を考慮した伝熱管の耐震安全性評価結果を表8に示す。評価の結果、発生応力は許容応力を下回り、耐震安全性に問題ないことを確認した。

表 8 排ガス予熱器の管支持板の腐食（流れ加速型腐食）を想定した  
伝熱管の耐震安全性評価結果

評価対象	区分	耐震 重要度	評価 地震力	許容 応力 状態	応力 種別	発生応力 (MPa)		許容応力*1 (MPa)
						管板～ 管支持板	管支持板～ 管支持板	
気体廃棄物処理系 排ガス予熱器 伝熱管	—*2	B	1.8Ci	B <sub>AS</sub>	一次 応力	19	19	139

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

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

#### 4. 胴の腐食（流れ加速型腐食）に対する耐震安全性評価

##### (1) 評価対象機器の抽出について

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

##### (2) 算出過程

###### ① 原子炉浄化系再生熱交換器

原子炉浄化系再生熱交換器は B クラスであり、原子炉建物 EL. 23. 800 に設置されている。熱交換器本体を 2 次元多質点系はりモデルとし、公称板厚から 1. 47mm の腐食量を想定して有限要素法で固有振動数および胴板と脚の付け根部に作用する荷重とモーメントを算出した。固有値解析結果を表 9 に示す。なお、評価に用いた推定腐食量の算出根拠を補紙（4）に示す。

表 9 原子炉浄化系再生熱交換器の胴の腐食時の固有値解析結果

支配モード		固有振動数 [Hz]
一次	水平	

##### a. 応力評価

原子炉浄化系再生熱交換器の胴の応力評価は、工認の耐震設計の基本方針「VI-2-1-14 機器・配管系の計算書作成の方法」のうち、「添付資料-4 横置一胴円筒形容器の耐震性についての計算書作成の基本方針」と同様の手法にて許容応力および発生応力を算出した。

###### ② 気体廃棄物処理系排ガス予熱器

気体廃棄物処理系排ガス予熱器は耐震重要度分類 B クラスであり、タービン建物 EL. 12. 500 に設置されている。熱交換器の形状が JEAG4601 に示されている横置円筒形容器であるため、公称板厚から 0. 58mm の腐食量を想定して JEAG の手法に基づき評価を実施し

た。固有振動数の算出結果を表 10 に示す。なお、評価に用いた推定腐食量の算出根拠を補紙（5）に示す。

表 10 気体廃棄物処理系排ガス予熱器の胴の腐食時の固有振動数

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

a. 応力評価

気体廃棄物処理系排ガス予熱器の胴の応力評価は、工認の耐震設計の基本方針「VI-2-1-14 機器・配管系の計算書作成の方法」のうち、「添付資料-4 横置一胴円筒形容器の耐震性についての計算書作成の基本方針」と同様の手法にて許容応力および発生応力を算出した。

(3) 評価結果

原子炉浄化系再生熱交換器および気体廃棄物処理系排ガス予熱器の胴の腐食（流れ加速型腐食）を考慮した耐震安全性評価結果を表 11 に示す。評価の結果、発生応力は許容応力を下回り、耐震安全性に問題ないことを確認した。

表 11 熱交換器の胴の腐食（流れ加速型腐食）を考慮した耐震安全性評価結果

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

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

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

## 原子炉ベントドレン系配管の耐震管理厚さにおける疲れ累積係数の算出過程

## 1. 評価仕様

原子炉ベントドレン配管はクラス1管に該当することから、耐震安全性評価における疲れ累積係数については、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れ累積係数に通常運転時における疲れ累積係数を加えたものを用いる。

なお、疲れ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40年時点の厚さと、公称板厚の80%の厚さのいずれか小さい方の厚さ（以下「耐震管理厚さ」という。）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。

疲れ累積係数の算出に用いる配管仕様を表1に示す。

表1 代表モデル（原子炉ベントドレン系配管）の配管仕様

項目	単位	評価対象配管	
		原子炉ベントドレン系配管	
		評価点 20	
		主管	分岐管
配管口径 $D_0$	mm	60.5	34.0
配管肉厚 $t$	mm	6.9(8.7)* <sup>1</sup>	5.1(6.4)* <sup>1</sup>
材質	—	STS410	
最高使用圧力	MPa	8.62	
最高使用温度	℃	302	
設計応力強さ ( $S_m$ )	MPa	122* <sup>2</sup>	

\*1：（ ）内の数値は減肉前の公称板厚を示す。

\*2：設計・建設規格 JSME S NC1-2005 付録材料図表 Part5 表1 より求まる値

## 2. 算出過程

代表モデルである原子炉ベントドレン系配管の耐震管理厚さにおける疲れ累積係数の算出過程を以下に示す。

なお、ここでは疲れ累積係数の算出ケースのうち、疲れ累積係数が最も大きい基準地震動  $S_s$  による算出過程を示す。

## (1) 諸元

算出に用いた諸元を表 2 に示す。

表 2 代表モデル（原子炉ベントドレン系配管）の諸元

記号	諸元*1	単位	説明
JEAG4601-1984 許容応力編 2.2.1 項 第 1 種管の許容応力の解説より			
Z <sub>r</sub>	15569.0	mm <sup>3</sup>	主管の断面係数
Z <sub>b</sub>	3345.5	mm <sup>3</sup>	分岐管の断面係数
C <sub>2r</sub>		—	主管の応力係数
K <sub>2r</sub>		—	主管の応力係数
C <sub>2b</sub>		—	分岐管の応力係数
K <sub>2b</sub>		—	分岐管の応力係数
S <sub>n</sub>	—	MPa	一次＋二次応力変動値
S <sub>p</sub>	—	MPa	ピーク応力強さ
S <sub>l</sub>	—	MPa	繰返しピーク応力強さ
M <sub>r</sub> s		N・mm	主管の地震のみによる慣性力と相対変位により生じるモーメントの全振幅
M <sub>b</sub> s		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じるモーメントの全振幅
K	—	—	S <sub>p</sub> /S <sub>n</sub>
K <sub>e</sub>	—	—	割増し係数
設計・建設規格 第 4 章 添付 4-2 より			
S <sub>l</sub> '	—	MPa	繰返しピーク応力強さ（縦弾性係数補正後）
E	184760	MPa	材料の使用温度における縦弾性係数
S <sub>a</sub>	—	MPa	任意の点の繰返しピーク応力強さ
N <sub>a</sub>	—	—	S <sub>a</sub> に対応する許容繰返し回数
S <sub>1</sub>	—	MPa	（設計・建設規格 表 添付 4-2-1）中の S <sub>a</sub> より低く、かつ、最も近い繰返しピーク応力強さ
S <sub>2</sub>	—	MPa	（設計・建設規格 表 添付 4-2-1）中の S <sub>a</sub> より高く、かつ、最も近い繰返しピーク応力強さ
N <sub>1</sub>	—	—	S <sub>1</sub> に対応する許容繰返し回数
N <sub>2</sub>	—	—	S <sub>2</sub> に対応する許容繰返し回数
U <sub>Sd</sub>	—	—	弾性設計用地震動 S <sub>d</sub> による疲れ累積係数
U <sub>Ss</sub>	—	—	基準地震動 S <sub>s</sub> による疲れ累積係数

\*1：諸元欄の“—”は計算結果を参照





$$\frac{\left(q + \frac{A_0}{K} - 1\right) - \sqrt{\left(q + \frac{A_0}{K} - 1\right)^2 - 4A_0(q - 1)}}{2A_0}$$

$$= \frac{\left(3.1 + \frac{0.66}{1.0} - 1\right) - \sqrt{\left(3.1 + \frac{0.66}{1.0} - 1\right)^2 - 4 \times 0.66(3.1 - 1)}}{2 \times 0.66}$$

$$= 1.0 \dots \dots \dots C$$

B式 ≧ C式より、(PVB-84)式により Ke を求める。

$$Ke = Ke' = 1 + (q - 1) \left(1 - \frac{3Sm}{Sn}\right)$$

$$= 1 + (3.1 - 1) \left(1 - \frac{366}{868}\right)$$

$$= 2.214 \approx 2.3$$

よって、A式より、

$$Sl = \frac{Ke \cdot Sp}{2}$$

$$= \frac{2.3 \times 868}{2}$$

$$= 998.2 \approx 999 \text{ MPa} \quad (\text{縦弾性係数補正前})$$

④ 設計疲労線図より許容繰返し回数を算出する。

設計・建設規格 第4章 添付4-2 3.1より、使用材料(STS410)は Su<550MPa であるため、同(2)に基づき縦弾性係数により補正した繰返しピーク応力強さ S1' の値を用いて、設計・建設規格 表 添付4-2-1の設計疲労線図(デジタル値)および(設計・建設規格 添付4-2-1)式から、S1' =Sa として許容繰返し回数を求める。

E = 184760 MPa (使用温度における値)より、

$$S1' = \frac{2.07 \times 10^5}{E} \times Sl$$

$$= \frac{2.07 \times 10^5}{184760} \times 999$$

$$= 1119.252003 \approx 1119.252 \text{ MPa} \quad (\text{縦弾性係数補正後})$$

よって、設計・建設規格 表 添付4-2-1より、S1' =Sa における S1, S2, N1, N2は以下のとおり。

S <sub>1</sub> (MPa)	1069
S <sub>2</sub> (MPa)	1413
N <sub>1</sub>	200
N <sub>2</sub>	100

$$\begin{aligned}
 N_a &= N_2 \times \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^{\frac{\log(S_2/S_a)}{\log(S_2/S_1)}} \\
 &= 100 \times \left( \frac{200}{100} \right)^{\frac{\log(1413/1119.252)}{\log(1413/1069)}} \\
 &= 178.428 \approx 178
 \end{aligned}$$

⑤ 疲れ累積係数を算出する。

工事計画認可において、基準地震動  $S_s$  に対して一律に設定する等価繰返し回数として設定した 150 回に対して疲れ累積係数 ( $U_{ss}$ ) を求める。

$$\begin{aligned}
 U_{ss} &= \frac{\text{等価繰返し回数}}{\text{許容繰返し回数}} = \frac{150}{178} \\
 &= 0.84269 \approx 0.8427
 \end{aligned}$$

### (3) 通常運転時における疲れ累積係数の算出過程

評価に用いた過渡回数を表 3 に示し、疲れ累積係数の内訳を表 4 に示す。

表 3 評価に用いた過渡回数

運転条件	過渡回数※
ボルト締付	
耐圧試験	
起動(昇温, タービン起動)	
夜間低出力運転 (75%出力)	
週末低出力運転 (50%出力)	
制御棒パターン変更	
給水加熱機能喪失 (発電機トリップ)	
給水加熱機能喪失 (給水加熱器部分バイパス)	
スクラム(タービントリップ)	
スクラム(その他スクラム)	
停止(タービン停止, 高温待機, 冷却, 容器満水, 満水後冷却)	
ボルト取り外し	
スクラム (原子炉給水ポンプ停止)	
スクラム (逃がし安全弁誤作動)	

※：60 年目時点推定過渡回数に比べ十分大きな設計条件の過渡回数を適用する。

表4 通常運転時における疲れ累積係数の内訳

No.	事象毎の組合せ		ピーク応力	一次+二次 応力	Ke係数	繰返し ピーク応力 (ヤング率補正前)	最高使用温度 における ヤング率	繰返し ピーク応力 (ヤング率補正後)	繰返し回数		疲れ累積係数	
	名称	運転温度(℃)		Sp	Sn	Ke	S <sub>0</sub>	E	S <sub>0</sub> '	ni	N	U f
		始点	終点	MPa	MPa	—	MPa	MPa	MPa	回数	許容回数	大気中
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												
28												
29												
30												
31												
32												
									疲れ累積係数総計		0.0253	

(4) 評価結果

原子炉ベントドレン系配管の耐震管理厚さにおける疲れ累積係数を表 5 に示す。

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

表 5 原子炉ベントドレン系配管の耐震管理厚さにおける疲れ累積係数

種別	通常運転時の 疲れ累積係数	地震動による 疲れ累積係数	合計	許容値
U <sub>Sd</sub>	0.0253	0.1457* <sup>1</sup>	0.1710	1 を下回る
U <sub>Ss</sub>	0.0253	0.8427* <sup>2</sup>	0.8680	

\*1：弾性設計用地震動 S<sub>d</sub> による疲れ累積係数の算出に用いる等価繰返し回数は、一律に設定する等価繰返し回数として設定した 300 回を適用

\*2：基準地震動 S<sub>s</sub> による疲れ累積係数の算出に用いる等価繰返し回数は、一律に設定する等価繰返し回数として設定した 150 回を適用

## 熱交換器伝熱管の腐食（流れ加速型腐食）に対する発生応力の算出根拠

## 1. 評価仕様

熱交換器伝熱管に対して内面から 50%の減肉を想定し，地震時の発生応力が許容応力を下回ることを確認する。

## 2. 算出過程

## (1) 諸元

熱交換器の伝熱管について，算出に用いた各記号の説明および熱交換器の仕様を表 1, 表 2 にそれぞれ示す。

なお，本文 2. (2)②に記載のとおり，気体廃棄物処理系排ガス予熱器の算出過程は原子炉補機冷却系熱交換器と同様であるため，表 2 に機器の仕様のみ記載し，算出過程は原子炉補機冷却系熱交換器のみ記載する。

表 1 計算に使用する記号の説明 (1/3)

記号	記号の説明	単位
$A_{stbc}$	減肉を考慮した場合の伝熱管のせん断断面積	mm <sup>2</sup>
$A_{tbco}$	減肉を考慮した場合の伝熱管断面積	mm <sup>2</sup>
$C_H$	水平方向設計震度	—
$C_m$	外部流体付加質量係数	—
$C_V$	鉛直方向設計震度	—
$D_i$	伝熱管内径	mm
$D_{ico}$	減肉を考慮した場合の伝熱管内径	mm
$D_o$	伝熱管外径	mm
$E_s$	伝熱管の縦弾性係数	MPa
$f_{anc}$	管板—管支持板間における伝熱管の固有振動数	Hz
$f_{hoc}$	管支持板—管支持板間における伝熱管の固有振動数	Hz
$g$	重力加速度 (=9.80665)	m/s <sup>2</sup>
$I_{tbc}$	減肉を考慮した場合の伝熱管の断面二次モーメント	mm <sup>4</sup>
$L_{an}$	管板—管支持板間の長さ	mm
$L_{ho}$	管支持板—管支持板間の長さ	mm
$m_{ec}$	減肉を考慮した場合の伝熱管相当質量	kg/m
$m_{pco}$	減肉を考慮した場合の伝熱管単位長さあたりの質量	kg/m
$m_{wico}$	減肉を考慮した場合の伝熱管内部流体の単位長さあたりの質量	kg/m

表1 計算に使用する記号の説明 (2/3)

記号	記号の説明	単位
$m_{wo}$	伝熱管外部流体の単位長さあたりの質量	kg/m
$M_{anc}$	減肉を考慮した場合の管板－管支持板間における自重による曲げモーメント	N・mm
$M_{Haanc}$	減肉を考慮した場合の管板－管支持板間における水平方向地震荷重による曲げモーメント	N・mm
$M_{Hahoc}$	減肉を考慮した場合の管支持板－管支持板間における水平方向地震荷重による曲げモーメント	N・mm
$M_{hoc}$	減肉を考慮した場合の管支持板－管支持板間における自重による曲げモーメント	N・mm
$M_{Vaanc}$	減肉を考慮した場合の管板－管支持板間における鉛直方向地震荷重による曲げモーメント	N・mm
$M_{Vahoc}$	減肉を考慮した場合の管支持板－管支持板間における鉛直方向地震荷重による曲げモーメント	N・mm
$P_{ig}$	最高使用圧力	MPa
$t_{co}$	伝熱管減肉厚さ	mm
$t_{tb}$	伝熱管厚さ	mm
$T_{os}$	伝熱管外側平均温度	℃
$T_{osi}$	運転時胴側入口温度	℃
$T_{oso}$	運転時胴側出口温度	℃
$T_{ot}$	伝熱管内側平均温度	℃
$T_{oti}$	運転時管側入口温度	℃
$T_{oto}$	運転時管側出口温度	℃
$v_i$	内部流体の比容積	m <sup>3</sup> /kg
$v_o$	外部流体の比容積	m <sup>3</sup> /kg
$Z_{tbc}$	減肉を考慮した場合の伝熱管の断面係数	mm <sup>3</sup>
$\lambda_{an1}$	管板－管支持板間における伝熱管の振動係数	—
$\lambda_{ho1}$	管支持板－管支持板間における伝熱管の振動係数	—
$\pi$	円周率	—
$\rho_i$	内部流体の密度	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_o$	外部流体の密度	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{tb}$	伝熱管材料の密度	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma_{anc}$	減肉を考慮した場合の管板－管支持板間における組合せ一次応力	MPa
$\sigma_{hoc}$	減肉を考慮した場合の管支持板－管支持板間における組合せ一次応力	MPa
$\sigma_{Hx3hanc}$	減肉を考慮した場合の管板－管支持板間における水平方向地震荷重による曲げ応力	MPa
$\sigma_{Hx3hhoc}$	減肉を考慮した場合の管支持板－管支持板間における水平方向地震荷重による曲げ応力	MPa

表1 計算に使用する記号の説明 (3/3)

記号	記号の説明	単位
$\sigma_{Vx3hanc}$	減肉を考慮した場合の管板－管支持板間における鉛直方向地震荷重による曲げ応力	MPa
$\sigma_{Vx3hhoc}$	減肉を考慮した場合の管支持板－管支持板間における鉛直方向地震荷重による曲げ応力	MPa
$\sigma_{xanc}$	減肉を考慮した場合の管板－管支持板間における軸方向組合せ一次応力	MPa
$\sigma_{xhoc}$	減肉を考慮した場合の管支持板間－管支持板間における軸方向組合せ一次応力	MPa
$\sigma_{x1c}$	減肉を考慮した場合の伝熱管における内圧により生じる軸方向応力	MPa
$\sigma_{x2ganc}$	減肉を考慮した場合の管板－管支持板間における自重による曲げ応力	MPa
$\sigma_{x2ghoc}$	減肉を考慮した場合の管支持板－管支持板間における自重による曲げ応力	MPa
$\sigma_{\phi 1c}$	減肉を考慮した場合の伝熱管における内圧により生じる周方向応力	MPa
$\sigma_{\phi anc}$	減肉を考慮した場合の管板－管支持板間における周方向組合せ一次応力	MPa
$\sigma_{\phi hoc}$	減肉を考慮した場合の管支持板間－管支持板間における周方向組合せ一次応力	MPa
$\tau_{anc}$	減肉を考慮した場合の管板－管支持板間におけるせん断応力	MPa
$\tau_{hoc}$	減肉を考慮した場合の管支持板間－管支持板間におけるせん断応力	MPa
$\tau_{H1anhc}$	減肉を考慮した場合の管板－管支持板間における水平方向荷重によるせん断応力	MPa
$\tau_{H1hohc}$	減肉を考慮した場合の管支持板－管支持板間における水平方向荷重によるせん断応力	MPa
$\tau_{V1anhc}$	減肉を考慮した場合の管板－管支持板間における鉛直方向荷重によるせん断応力	MPa
$\tau_{V1hohc}$	減肉を考慮した場合の管支持板－管支持板間における鉛直方向荷重によるせん断応力	MPa



表 2 熱交換器の機器要目 (1/2)

記号	数値*1		単位	引用元*2
—	①	C6870T	—	(熱交換器伝熱管の使用材料)
	②	SUS304	—	
$\lambda_{an1}$	①	3.927	—	機械工学便覧 A3 編 力学・機械力学 (固定-支持)
	②			
$L_{an}$	①		mm	
	②			
$T_{oti}$	①		°C	
	②			
$T_{oto}$	①		°C	
	②			
$T_{osi}$	①		°C	
	②			
$T_{oso}$	①		°C	
	②			
$D_o$	①		mm	
	②			
$D_i$	①		mm	
	②			
$t_{co}$	①		mm	
	②			
$\rho_{tb}$	①	8400	kg/m <sup>3</sup>	①JIS 非鉄 (参考「銅及び銅合金展伸材の平均的密度表」) ②JIS G 3463
	②	7930		
$v_i$	①		m <sup>3</sup> /kg	日本機械学会蒸気表
	②			
$C_m$	①		—	STANDARDS OF THE TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION (TEMA) NINTH EDITION SECTION 6 V-7. 11
	②			
$v_o$	①		m <sup>3</sup> /kg	日本機械学会蒸気表
	②			
$\lambda_{ho1}$	①	$\pi$	—	機械工学便覧 A3 編 力学・機械力学 (支持-支持)
	②			
$L_{ho}$	①		mm	
	②			
$P_{ig}$	①		MPa	
	②			
$t_{tb}$	①		mm	
	②			

\*1: ①は原子炉補機冷却系熱交換器, ②は気体廃棄物処理系排ガス予熱器の値をそれぞれ示す。

\*2: 引用元に記載がない場合, 数値は機器の設計条件 (使用環境, 寸法等) から得た値を示す。

表 2 熱交換器の機器要目 (2/2)

記号	数値*1		単位	引用元
C <sub>H</sub>	①	1.59 (Ss)	-	①設計用条件Ⅱ
		0.89 (Sd)		
	②	0.42		②1.8Ci を上回る水平震度
C <sub>V</sub>	①	1.58 (Ss)	-	設計用条件Ⅱ
		0.81 (Sd)		

\*1：①は原子炉補機冷却系熱交換器，②は気体廃棄物処理系排ガス予熱器の値をそれぞれ示す。

(2) 算出過程

a. 固有振動数

固有振動数は，機械工学便覧に定める式に基づき以下のとおり算出した。

・管板－管支持板

$$f_{anc} = \frac{\lambda_{an1}^2}{2\pi \cdot L_{an}^2} \sqrt{\frac{E_s \cdot I_{tbc}}{m_{ec}}}$$

伝熱管の縦弾性係数 $E_s$ は，ASME SECTION II PART D の値\*1から，線形補間により以下のとおり算出する。

$$E_s = 110000 \text{ MPa} + \frac{108000 \text{ MPa} - 110000 \text{ MPa}}{(100 \text{ }^\circ\text{C} - 25 \text{ }^\circ\text{C})} \cdot \left( \frac{T_{ot} + T_{os}}{2} - 25 \text{ }^\circ\text{C} \right)$$

ここで， $T_{ot} = \frac{T_{oti} + T_{oto}}{2}$ ， $T_{os} = \frac{T_{osi} + T_{oso}}{2}$ より，

$$E_s = 110000 + \frac{108000 - 110000}{(100 - 25)} \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\quad}{2} + \frac{\quad}{2} \right) - 25 \right)$$

$$= 109705.3 \approx 110000 \text{ MPa}$$

\*1：気体廃棄物処理系排ガス予熱器については，設計・建設規格 JSME S NC1-2005 付録材料図表 Part6 表 1 の値

減肉を考慮した場合の伝熱管の断面二次モーメント $I_{tbc}$ は，伝熱管外径と減肉を考慮した場合の伝熱管内径を用いて以下のとおり算出できる。

$$I_{tbc} = \frac{\pi}{64} \cdot (D_o^4 - D_{ico}^4)$$

ここで，減肉を考慮した場合の伝熱管内径は $D_{ico} = D_o - 2 \cdot t_{tb} + 2 \cdot t_{co}$ より算出できることから，

$$I_{tbc} = \frac{\pi}{64} \cdot \left( \frac{\quad}{2} \right)$$

$$= 2455.673 \text{ mm}^4$$

減肉を考慮した場合の伝熱管相当質量 $m_{ec}$ は，伝熱管自体の単位長さあたりの質量および伝熱管内外の流体の質量を用いて以下のとおり算出できる。

$$m_{ec} = m_{pco} + m_{wico} + m_{wo}$$

ここで，伝熱管自体の単位長さあたりの質量および伝熱管内外の流体の質量はそれぞれ $m_{pco} = \rho_{tb} \cdot A_{tbc}$ ， $m_{wico} = \rho_i \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{ico}^2$ および $m_{wo} = C_m \cdot \rho_o \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_o^2$ より算出できることから，



$$\begin{aligned} \text{軸方向} : \sigma_{x1c} &= \frac{P_{ig} \cdot [D_{ico} + 1.2(t_{tb} - t_{co})]}{4 \cdot (t_{tb} - t_{co})} \\ &= \frac{\boxed{\phantom{000}} \cdot [(\boxed{\phantom{000}}) + 1.2(\boxed{\phantom{000}})]}{4 \cdot (\boxed{\phantom{000}})} \\ &= 8.593244 \text{ MPa} \end{aligned}$$

(b) 自重により生じる曲げ応力成分

自重により生じる曲げ応力は、以下の式により算出した。

$$\text{管板 - 管支持板} : \sigma_{x2ganc} = \frac{M_{anc}}{Z_{tbc}} = \frac{1868.084}{221.0327} = 8.451621 \text{ MPa}$$

$$\text{管支持板 - 管支持板} : \sigma_{x2ghoc} = \frac{M_{hoc}}{Z_{tbc}} = \frac{2383.661}{221.0327} = 10.78421 \text{ MPa}$$

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

$$\begin{aligned} M_{anc} &= \frac{3 \cdot (m_{ec} \cdot L_{an} \cdot g) \cdot L_{an}}{16} \\ &= \frac{3 \cdot (\boxed{\phantom{000}} \times 9.80665) \cdot \boxed{\phantom{000}}}{16} \\ &= 1868.084 \text{ N} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{hoc} &= \frac{(m_{ec} \cdot L_{ho} \cdot g) \cdot L_{ho}}{4} \\ &= \frac{(\boxed{\phantom{000}} \times 9.80665) \cdot \boxed{\phantom{000}}}{4} \\ &= 2383.661 \text{ N} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{tbc} &= \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(D_o^4 - D_{ico}^4)}{D_o} \\ &= \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(\boxed{\phantom{000}})}{\boxed{\phantom{000}}} \\ &= 221.0327 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

(c) 水平地震荷重により生じる曲げ応力成分

水平地震荷重により生じる曲げ応力は、以下の式により算出した。

・基準地震動  $S_s$

$$\text{管板 - 管支持板} : \sigma_{Hx3hanc} = \frac{M_{Haanc}}{Z_{tbc}} = \frac{2970.254}{221.0327} = 13.43808 \text{ MPa}$$

$$\text{管支持板 - 管支持板} : \sigma_{Hx3hhoc} = \frac{M_{Hahoc}}{Z_{tbc}} = \frac{3790.022}{221.0327} = 17.14689 \text{ MPa}$$

・弾性設計用地震動  $S_d$

$$\text{管板 - 管支持板} : \sigma_{Hx3hanc} = \frac{M_{Haanc}}{Z_{tbc}} = \frac{1662.595}{221.0327} = 7.521943 \text{ MPa}$$

$$\text{管支持板} - \text{管支持板} : \sigma_{Hx3hhoc} = \frac{M_{Hahoc}}{Z_{tbc}} = \frac{2121.459}{221.0327} = 9.597942 \text{ MPa}$$

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

・ 基準地震動  $S_s$

$$\begin{aligned} M_{Haanc} &= C_H \cdot \frac{3 \cdot (m_{ec} \cdot L_{an} \cdot g) \cdot L_{an}}{16} \\ &= 1.59 \cdot \frac{3 \cdot (\text{ } \times 9.80665) \cdot \text{ } }{16} \\ &= 2970.254 \text{ N} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{Hahoc} &= C_H \cdot \frac{(m_{ec} \cdot L_{ho} \cdot g) \cdot L_{ho}}{4} \\ &= 1.59 \cdot \frac{(\text{ } \times 9.80665) \cdot \text{ } }{4} \\ &= 3790.022 \text{ N} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

・ 弾性設計用地震動  $S_d$

$$\begin{aligned} M_{Haanc} &= C_H \cdot \frac{3 \cdot (m_{ec} \cdot L_{an} \cdot g) \cdot L_{an}}{16} \\ &= 0.89 \cdot \frac{3 \cdot (\text{ } \times 9.80665) \cdot \text{ } }{16} \\ &= 1662.595 \text{ N} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{Hahoc} &= C_H \cdot \frac{(m_{ec} \cdot L_{ho} \cdot g) \cdot L_{ho}}{4} \\ &= 0.89 \cdot \frac{(\text{ } \times 9.80665) \cdot \text{ } }{4} \\ &= 2121.459 \text{ N} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

(d) 水平地震荷重により生じるせん断応力成分

水平地震荷重により生じるせん断応力は、以下の式により算出した。

・ 基準地震動  $S_s$

$$\begin{aligned} \text{管板} - \text{管支持板} : \tau_{H1anhc} &= C_H \cdot \frac{m_{ec} \cdot L_{an} \cdot g}{A_{stbc}} \\ &= 1.59 \cdot \frac{\text{ } \times 9.80665}{21.04766 \times 10^{-6}} \times 10^{-6} \\ &= 0.8611467 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{管支持板} - \text{管支持板} : \tau_{H1hohc} &= C_H \cdot \frac{m_{ec} \cdot L_{ho} \cdot g}{A_{stbc}} \\ &= 1.59 \cdot \frac{\text{ } \times 9.80665}{21.04766 \times 10^{-6}} \times 10^{-6} \end{aligned}$$

$$= 0.8424261 \text{ MPa}$$

・弾性設計用地震動 Sd

$$\begin{aligned} \text{管板 - 管支持板} \quad : \tau_{H1anhc} &= C_H \cdot \frac{m_{ec} \cdot L_{an} \cdot g}{A_{stbc}} \\ &= 0.89 \cdot \frac{\boxed{\phantom{000000}} \times 9.80665}{21.04766 \times 10^{-6}} \\ &= 0.4820255 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{管支持板 - 管支持板} : \tau_{H1hohc} &= C_H \cdot \frac{m_{ec} \cdot L_{ho} \cdot g}{A_{stbc}} \\ &= 0.89 \cdot \frac{\boxed{\phantom{000000}} \times 9.80665}{21.04766 \times 10^{-6}} \\ &= 0.4715467 \text{ MPa} \end{aligned}$$

なお、 $A_{stbc}$ は以下の式により算出した。

$$\begin{aligned} A_{stbc} &= \frac{3 \cdot \left[ \left( \frac{D_o}{2} \right)^2 + \left( \frac{D_{ico}}{2} \right)^2 \right]}{4 \left[ \left( \frac{D_o}{2} \right)^2 + \left( \frac{D_o}{2} \right) \cdot \left( \frac{D_{ico}}{2} \right) + \left( \frac{D_{ico}}{2} \right)^2 \right]} \cdot A_{tbco} \\ &= \frac{3 \cdot \left[ \left( \frac{\boxed{\phantom{000000}}}{2} \right)^2 + \left( \frac{\boxed{\phantom{000000}}}{2} \right)^2 \right]}{4 \left[ \left( \frac{\boxed{\phantom{000000}}}{2} \right)^2 + \left( \frac{\boxed{\phantom{000000}}}{2} \right) \cdot \left( \frac{\boxed{\phantom{000000}}}{2} \right) + \left( \frac{\boxed{\phantom{000000}}}{2} \right)^2 \right]} \cdot 42.07221 \\ &= 21.04766 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

(e) 鉛直地震荷重により生じる曲げ応力成分

鉛直地震荷重により生じる曲げ応力は、以下の式により算出した。

・基準地震動 Ss

$$\text{管板 - 管支持板} \quad : \sigma_{Vx3hanc} = \frac{M_{Vaanc}}{Z_{tbc}} = \frac{2951.573}{221.0327} = 13.35356 \text{ Mpa}$$

$$\text{管支持板 - 管支持板} : \sigma_{Vx3hhoc} = \frac{M_{Vahoc}}{Z_{tbc}} = \frac{3766.185}{221.0327} = 17.03904 \text{ MPa}$$

・弾性設計用地震動 Sd

$$\text{管板 - 管支持板} \quad : \sigma_{Vx3hanc} = \frac{M_{Vaanc}}{Z_{tbc}} = \frac{1513.148}{221.0327} = 6.845813 \text{ Mpa}$$

$$\text{管支持板 - 管支持板} : \sigma_{Vx3hhoc} = \frac{M_{Vahoc}}{Z_{tbc}} = \frac{1930.766}{221.0327} = 8.735206 \text{ MPa}$$

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

・基準地震動 Ss

$$\begin{aligned} M_{Vaanc} &= C_V \cdot \frac{3 \cdot (m_{ec} \cdot L_{an} \cdot g) \cdot L_{an}}{16} \\ &= 1.58 \cdot \frac{3 \cdot \boxed{\phantom{000000}} \times 9.80665 \cdot \boxed{\phantom{000000}}}{16} \\ &= 2951.573 \text{ N} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

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

$$= 1.58 \cdot \frac{\boxed{\phantom{0000}} \times 9.80665 \cdot \boxed{\phantom{0000}}}{4}$$

$$= 3766.185 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

・弾性設計用地震動 Sd

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

$$= 0.81 \cdot \frac{3 \cdot \boxed{\phantom{0000}} \times 9.80665 \cdot \boxed{\phantom{0000}}}{16}$$

$$= 1513.148 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

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

$$= 0.81 \cdot \frac{\boxed{\phantom{0000}} \times 9.80665 \cdot \boxed{\phantom{0000}}}{4}$$

$$= 1930.766 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

(f) 鉛直地震荷重により生じるせん断応力成分

鉛直地震荷重により生じるせん断応力は、以下の式により算出した。

・基準地震動 Ss

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

$$= 1.58 \cdot \frac{\boxed{\phantom{0000}} \times 9.80665}{21.04766 \times 10^{-6}}$$

$$= 0.8557307 \text{ MPa}$$

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

$$= 1.58 \cdot \frac{\boxed{\phantom{0000}} \times 9.80665}{21.04766 \times 10^{-6}}$$

$$= 0.8371278 \text{ MPa}$$

・弾性設計用地震動 Sd

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

$$= 0.81 \cdot \frac{\boxed{\phantom{0000}} \times 9.80665}{21.04766 \times 10^{-6}}$$

$$= 0.4386974 \text{ MPa}$$

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

$$= 0.81 \cdot \frac{\boxed{\phantom{0000}} \times 9.80665}{21.04766 \times 10^{-6}}$$

$$= 0.4291605 \text{ MPa}$$

c. 組合せ応力

一次応力は、以下の式により組み合わせた。

・基準地震動 Ss

管板 - 管支持板 :

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{anc}} &= \frac{1}{2} \left[ \sigma_{\varphi\text{anc}} + \sigma_{\text{xanc}} + \sqrt{(\sigma_{\varphi\text{anc}} - \sigma_{\text{xanc}})^2 + 4 \cdot \tau_{\text{anc}}^2} \right] \\ &= \frac{1}{2} \left[ 17.18649 + 43.83651 + \sqrt{(17.18649 - 43.83651)^2 + 4 \times 1.716877^2} \right] \\ &= 43.94666 \cong 44 \text{ MPa}\end{aligned}$$

管支持板 - 管支持板 :

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{hoc}} &= \frac{1}{2} \left[ \sigma_{\varphi\text{hoc}} + \sigma_{\text{xhoc}} + \sqrt{(\sigma_{\varphi\text{hoc}} - \sigma_{\text{xhoc}})^2 + 4 \cdot \tau_{\text{hoc}}^2} \right] \\ &= \frac{1}{2} \left[ 17.18649 + 53.56338 + \sqrt{(17.18649 - 53.56338)^2 + 4 \times 1.679554^2} \right] \\ &= 53.64076 \cong 54 \text{ MPa}\end{aligned}$$

・弾性設計用地震動 Sd

管板 - 管支持板 :

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{anc}} &= \frac{1}{2} \left[ \sigma_{\varphi\text{anc}} + \sigma_{\text{xanc}} + \sqrt{(\sigma_{\varphi\text{anc}} - \sigma_{\text{xanc}})^2 + 4 \cdot \tau_{\text{anc}}^2} \right] \\ &= \frac{1}{2} \left[ 17.18649 + 31.41262 + \sqrt{(17.18649 - 31.41262)^2 + 4 \times 0.9207229^2} \right] \\ &= 31.47196 \cong 32 \text{ MPa}\end{aligned}$$

管支持板 - 管支持板 :

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{hoc}} &= \frac{1}{2} \left[ \sigma_{\varphi\text{hoc}} + \sigma_{\text{xhoc}} + \sqrt{(\sigma_{\varphi\text{hoc}} - \sigma_{\text{xhoc}})^2 + 4 \cdot \tau_{\text{hoc}}^2} \right] \\ &= \frac{1}{2} \left[ 17.18649 + 37.71060 + \sqrt{(17.18649 - 37.71060)^2 + 4 \times 0.9007072^2} \right] \\ &= 37.75005 \cong 38 \text{ MPa}\end{aligned}$$

なお、各方向の応力は上記 b. (a) ~ b. (f) で算出した各成分を用いて以下のとおり算出した。

・基準地震動 Ss

$$\text{周方向応力} : \sigma_{\varphi\text{anc}} = \sigma_{\varphi\text{1c}} = 17.18649 \text{ MPa}, \quad \sigma_{\varphi\text{hoc}} = \sigma_{\varphi\text{1c}} = 17.18649 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned}\text{軸方向応力} : \sigma_{\text{xanc}} &= \sigma_{\text{x1c}} + \sigma_{\text{x2ganc}} + \sigma_{\text{Hx3hanc}} + \sigma_{\text{Vx3hanc}} \\ &= 8.593244 + 8.451621 + 13.43808 + 13.35356 \\ &= 43.83651 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{xhoc}} &= \sigma_{\text{x1c}} + \sigma_{\text{x2ghoc}} + \sigma_{\text{Hx3hhoc}} + \sigma_{\text{Vx3hhoc}} \\ &= 8.593244 + 10.78421 + 17.14689 + 17.03904\end{aligned}$$



$$= 53.56338 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} \text{せん断応力: } \tau_{\text{anc}} &= \tau_{\text{H1anhc}} + \tau_{\text{V1anhc}} \\ &= 0.8611467 + 0.8557307 \\ &= 1.716877 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{\text{hoc}} &= \tau_{\text{H1hohc}} + \tau_{\text{V1hohc}} \\ &= 0.8424261 + 0.8371278 \\ &= 1.679554 \text{ MPa} \end{aligned}$$

・弾性設計用地震動 Sd

$$\text{周方向応力: } \sigma_{\phi\text{anc}} = \sigma_{\phi 1c} = 17.18649 \text{ MPa}, \quad \sigma_{\phi\text{hoc}} = \sigma_{\phi 1c} = 17.18649 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} \text{軸方向応力: } \sigma_{\text{xanc}} &= \sigma_{\text{x1c}} + \sigma_{\text{x2ganc}} + \sigma_{\text{Hx3hanc}} + \sigma_{\text{Vx3hanc}} \\ &= 8.593244 + 8.451621 + 7.521943 + 6.845813 \\ &= 31.41262 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{xhoc}} &= \sigma_{\text{x1c}} + \sigma_{\text{x2ghoc}} + \sigma_{\text{Hx3hhoc}} + \sigma_{\text{Vx3hhoc}} \\ &= 8.593244 + 10.78421 + 9.597942 + 8.735206 \\ &= 37.71060 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{せん断応力: } \tau_{\text{anc}} &= \tau_{\text{H1anhc}} + \tau_{\text{V1anhc}} \\ &= 0.4820255 + 0.4386974 \\ &= 0.9207229 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{\text{hoc}} &= \tau_{\text{H1hohc}} + \tau_{\text{V1hohc}} \\ &= 0.4715467 + 0.4291605 \\ &= 0.9007072 \text{ MPa} \end{aligned}$$

### 3. 評価結果

熱交換器伝熱管の腐食（流れ加速型腐食）を考慮した耐震安全性評価結果を表3に示す。評価の結果、発生応力は許容応力を下回り、耐震安全性に問題ないことを確認した。

表3 熱交換器の伝熱管の腐食（流れ加速型腐食）を考慮した耐震安全性評価結果

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

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

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

## 熱交換器管支持板の腐食（流れ加速型腐食）に対する発生応力の算出根拠

## 1. 評価仕様

熱交換器管支持板の腐食（流れ加速型腐食）による管支持板 1 箇所支持機能喪失を想定し、地震時の発生応力が許容応力を下回ることを確認する。なお、補紙（2）と同様、JEAG4601 に示されている横置円筒形容器の許容応力を適用した。

## 2. 算出過程

## (1) 諸元

熱交換器管支持板 1 箇所支持機能喪失を想定した伝熱管の耐震安全性評価について、算出に用いた各記号の説明および熱交換器の仕様を表 1、表 2 にそれぞれ示す。

表 1 計算に使用する記号の説明（1/2）

記号	記号の説明	単位
$A_{stb}$	伝熱管のせん断断面積	mm <sup>2</sup>
$A_{tb}$	伝熱管断面積	mm <sup>2</sup>
$C_H$	水平方向設計震度	—
$C_m$	外部流体付加質量係数	—
$D_i$	伝熱管内径	mm
$D_o$	伝熱管外径	mm
$E_s$	伝熱管の縦弾性係数	MPa
$f_{an}$	管板－管支持板間における伝熱管の固有振動数	Hz
$f_{ho}$	管支持板－管支持板間における伝熱管の固有振動数	Hz
$g$	重力加速度（=9.80665）	m/s <sup>2</sup>
$I_{tb}$	伝熱管の断面二次モーメント	mm <sup>4</sup>
$L_{an}$	管支持機能の 1 箇所喪失を考慮した場合の管板－管支持板間の最長長さ	mm
$L_{ho}$	管支持機能の 1 箇所喪失を考慮した場合の管支持板－管支持板間の最長長さ	mm
$m_e$	伝熱管相当質量	kg/m
$m_p$	伝熱管単位長さあたりの質量	kg/m
$m_{wi}$	伝熱管内部流体の単位長さあたりの質量	kg/m
$m_{wo}$	伝熱管外部流体の単位長さあたりの質量	kg/m
$M_{an}$	管板－管支持板間における自重による曲げモーメント	N・mm
$M_{aan}$	管板－管支持板間における水平方向地震荷重による曲げモーメント	N・mm
$M_{aho}$	管支持板－管支持板間における水平方向地震荷重による曲げモーメント	N・mm
$M_{ho}$	管支持板－管支持板間における自重による曲げモーメント	N・mm

表1 計算に使用する記号の説明 (2/2)

記号	記号の説明	単位
$P_{ig}$	最高使用圧力	MPa
$t_{tb}$	伝熱管厚さ	mm
$T_{os}$	伝熱管外側平均温度	°C
$T_{osi}$	運転時胴側入口温度	°C
$T_{oso}$	運転時胴側出口温度	°C
$T_{ot}$	伝熱管内側平均温度	°C
$T_{oti}$	運転時管側入口温度	°C
$T_{oto}$	運転時管側出口温度	°C
$v_i$	内部流体の比容積	m <sup>3</sup> /kg
$v_o$	外部流体の比容積	m <sup>3</sup> /kg
$Z_{tb}$	伝熱管の断面係数	mm <sup>3</sup>
$\lambda_{an1}$	管板－管支持板間における伝熱管の振動係数	—
$\lambda_{ho1}$	管支持板－管支持板間における伝熱管の振動係数	—
$\pi$	円周率	—
$\rho_i$	内部流体の密度	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_o$	外部流体の密度	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{tb}$	伝熱管材料の密度	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma_{an}$	管板－管支持板間における組合せ一次応力	MPa
$\sigma_{ho}$	管支持板－管支持板間における組合せ一次応力	MPa
$\sigma_{xan}$	管板－管支持板間における軸方向組合せ一次応力	MPa
$\sigma_{xho}$	管支持板－管支持板間における軸方向組合せ一次応力	MPa
$\sigma_{x1}$	伝熱管における内圧により生じる軸方向応力	MPa
$\sigma_{x2gan}$	管板－管支持板間における自重による曲げ応力	MPa
$\sigma_{x2gho}$	管支持板－管支持板間における自重による曲げ応力	MPa
$\sigma_{x3han}$	管板－管支持板間における水平方向地震荷重による曲げ応力	MPa
$\sigma_{x3hho}$	管支持板－管支持板間における水平方向地震荷重による曲げ応力	MPa
$\sigma_{\phi an}$	管板－管支持板間における周方向組合せ一次応力	MPa
$\sigma_{\phi ho}$	管支持板間－管支持板間における周方向組合せ一次応力	MPa
$\sigma_{\phi 1}$	伝熱管における内圧により生じる周方向応力	MPa
$\tau_{an}$	管板－管支持板間におけるせん断応力	MPa
$\tau_{ho}$	管支持板間－管支持板間におけるせん断応力	MPa
$\tau_{1anh}$	管板－管支持板間における水平方向荷重によるせん断応力	MPa
$\tau_{1hoh}$	管支持板－管支持板間における水平方向荷重によるせん断応力	MPa

表 2 熱交換器の機器要目

記号	数値	単位	引用元*1
—	SUS304	—	(熱交換器伝熱管の使用材料)
$\lambda_{an1}$	3.927		機械工学便覧 A3 編 力学・機械力学 (固定-支持)
$L_{an}$		mm	表 3 参照
$T_{oti}$		°C	
$T_{oto}$		°C	
$T_{osi}$		°C	
$T_{oso}$		°C	
$D_o$		mm	
$D_i$		mm	
$\rho_{tb}$	7930	kg/m <sup>3</sup>	JIS G 3463
$v_i$		m <sup>3</sup> /kg	日本機械学会蒸気表
$C_m$		—	STANDARDS OF THE TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION (TEMA) NINTH EDITION SECTION 6 V-7.11
$v_o$		m <sup>3</sup> /kg	日本機械学会蒸気表
$\lambda_{ho1}$	$\pi$	—	機械工学便覧 A3 編 力学・機械力学 (支持-支持)
$L_{ho}$		mm	表 3 参照
$P_{ig}$		MPa	
$t_{tb}$		mm	
$C_H$	0.42	—	1.8Ci を上回る水平震度

\*1：引用元に記載がない場合、数値は機器の設計条件（使用環境、寸法等）から得た値を示す。

【管支持板の管支持機能喪失による支持間長さについて】

管支持板の腐食（流れ加速型腐食）により、管支持機能を 1 箇所喪失したものとして地震時に発生する伝熱管への応力を求めることから、現状構造の支持間長さとして機能喪失を考慮した場合の支持間長さを表 3 に示す。

表 3 管支持機能喪失を考慮した支持間長さ

評価モデル	現状構造の支持間最長長さ (mm)	機能喪失を考慮した場合の 支持間最長長さ (mm)
管板-管支持板 (固定-支持)		
管支持板-管支持板 (支持-支持)		

(2) 算出過程

a. 固有振動数

固有振動数は、機械工学便覧に定める式に基づき以下のとおり算出した。

・管板－管支持板

$$f_{an} = \frac{\lambda_{an1}^2}{2\pi \cdot L_{an}^2} \sqrt{\frac{E_s \cdot I_{tb}}{m_e}}$$

伝熱管の縦弾性係数 $E_s$ は、設計・建設規格 JSME S NC1-2005 付録材料図表 Part6 表 1 の値から、線形補間により以下のとおり算出できる。

$$E_s = 188000 \text{ MPa} + \frac{186000 \text{ MPa} - 188000 \text{ MPa}}{(150 \text{ }^\circ\text{C} - 125 \text{ }^\circ\text{C})} \cdot \left( \frac{T_{ot} + T_{os}}{2} - 125 \text{ }^\circ\text{C} \right)$$

ここで、 $T_{ot} = \frac{T_{oti} + T_{oto}}{2}$ 、 $T_{os} = \frac{T_{osi} + T_{oso}}{2}$ より、

$$\begin{aligned} E_s &= 188000 + \frac{186000 - 188000}{(150 - 125)} \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\quad}{2} + \frac{\quad}{2} \right) - 125 \right) \\ &= 186320 \approx 186000 \text{ MPa} \end{aligned}$$

伝熱管の断面二次モーメント $I_{tbc}$ は、伝熱管外径と伝熱管内径を用いて以下のとおり算出できる。

$$I_{tb} = \frac{\pi}{64} \cdot (D_o^4 - D_i^4)$$

ここで、伝熱管内径は $D_i = D_o - 2 \cdot t_{tb}$ より算出できることから、

$$\begin{aligned} I_{tb} &= \frac{\pi}{64} \cdot \left( \frac{\quad}{2} \right)^4 \\ &= 20878.08 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

伝熱管相当質量 $m_e$ は、伝熱管自体の単位長さあたりの質量および伝熱管内外の流体の質量を用いて以下のとおり算出できる。

$$m_e = m_p + m_{wi} + m_{wo}$$

ここで、伝熱管自体の単位長さあたりの質量および伝熱管内外の流体の質量はそれぞれ $m_p = \rho_{tb} \cdot A_{tb}$ 、 $m_{wi} = \rho_i \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_i^2$ および $m_{wo} = C_m \cdot \rho_o \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_o^2$ より算出できることから、

$$\begin{aligned} m_e &= 1.485 + 0.001 + 0.005435 \\ &= 1.491435 \approx 1.50 \text{ kg/m} \\ m_p &= 7930 \times 187.2389 \times 10^{-6} \\ &= 1.484805 \approx 1.485 \text{ kg/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{wi} &= \frac{\quad}{4} \times \frac{\pi}{4} \times \left( \frac{\quad}{2} \right)^2 \times 10^{-6} \\ &= 0.00037 \approx 0.001 \text{ kg/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{wo} &= \frac{\quad}{4} \times \frac{\pi}{4} \times \left( \frac{\quad}{2} \right)^2 \\ &= 0.0054343 \approx 0.005435 \text{ kg/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{なお、} A_{tb} &= \left( \frac{D_o}{2} \right)^2 \pi - \left( \frac{D_i}{2} \right)^2 \pi = \left( \frac{\quad}{2} \right)^2 \pi - \left( \frac{\quad}{2} \right)^2 \pi \\ &= 187.2389 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\rho_i = \frac{1}{v_i} = \frac{1}{\boxed{\phantom{000}}} = \boxed{\phantom{000}} \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_o = \frac{1}{v_o} = \frac{1}{\boxed{\phantom{000}}} = \boxed{\phantom{000}} \text{ kg/m}^3$$

以上より、管板－管支持板の一次固有振動数は以下のとおり算出できる。

$$f_{an} = \frac{\lambda_{an1}^2}{2\pi \cdot L_{an}^2} \sqrt{\frac{E_s \cdot I_{tb}}{m_e}} = \frac{3.927^2}{2\pi \cdot \boxed{\phantom{000}}} \sqrt{\frac{186000 \times 10^6 \times 20878.08}{\boxed{\phantom{000}}}}$$

$$= \boxed{\phantom{000}} \text{ Hz}$$

・管支持板－管支持板

機械工学便覧に定める式について、 $\lambda_{an1} \rightarrow \lambda_{ho1}$ 、 $L_{an} \rightarrow L_{ho}$ として上記の管板－管支持板と同様の計算を実施すると、一次固有振動数は以下のとおり算出できる。

$$f_{ho} = \frac{\lambda_{ho1}^2}{2\pi \cdot L_{ho}^2} \sqrt{\frac{E_s \cdot I_{tb}}{m_e}} = \frac{\pi^2}{2\pi \cdot \boxed{\phantom{000}}} \sqrt{\frac{186000 \times 10^6 \times 20878.08}{\boxed{\phantom{000}}}}$$

$$= \boxed{\phantom{000}} \text{ Hz}$$

#### b. 応力成分

気体廃棄物処理系排ガス予熱器の伝熱管について、管支持板の腐食により1箇所の管支持機能を喪失したものとして、JEAG4601 および機械工学便覧に定める式に基づき、以下(a)～(d)の各成分を算出し地震時に発生する応力を求めた。

##### (a) 内圧により生じる膜応力成分

内圧により生じる膜応力は、以下の式により算出した。

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

$$= \frac{\boxed{\phantom{000}} \cdot \boxed{\phantom{000}}}{2 \cdot \boxed{\phantom{000}}}$$

$$= 18.49750 \text{ MPa}$$

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

$$= \frac{\boxed{\phantom{000}} \cdot \boxed{\phantom{000}}}{4 \cdot \boxed{\phantom{000}}}$$

$$= 9.248750 \text{ MPa}$$

##### (b) 自重により生じる曲げ応力成分

自重により生じる曲げ応力は、以下の式により算出した。

$$\text{管板－管支持板} \quad : \sigma_{x2gan} = \frac{M_{an}}{Z_{tb}} = \frac{4935.233}{1313.087} = 3.758498 \text{ MPa}$$

$$\text{管支持板－管支持板} : \sigma_{x2gho} = \frac{M_{ho}}{Z_{tb}} = \frac{1885.011}{1313.087} = 1.435557 \text{ MPa}$$

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

$$M_{an} = \frac{3 \cdot (m_e \cdot L_{an} \cdot g) \cdot L_{an}}{16}$$

$$= \frac{3 \cdot (\text{ } \times 9.80665) \cdot \text{ }}{16}$$

$$= 4935.233 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$M_{ho} = \frac{(m_e \cdot L_{ho} \cdot g) \cdot L_{ho}}{4}$$

$$= \frac{\text{ } \times 9.80665 \cdot \text{ }}{4}$$

$$= 1885.011 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

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

$$= \frac{\pi}{32} \cdot \frac{\text{ } - \text{ }}{\text{ }}$$

$$= 1313.087 \text{ mm}^3$$

(c) 水平地震荷重により生じる曲げ応力成分

水平地震荷重により生じる曲げ応力は、以下の式により算出した。

$$\text{管板} - \text{管支持板} : \sigma_{x3han} = \frac{M_{aan}}{Z_{tb}} = \frac{2072.798}{1313.087} = 1.578569 \text{ MPa}$$

$$\text{管支持板} - \text{管支持板} : \sigma_{x3hho} = \frac{M_{aho}}{Z_{tb}} = \frac{791.7046}{1313.087} = 0.602934 \text{ MPa}$$

なお、 $M_{aan}$ および $M_{aho}$ は以下の式により算出した。

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

$$= 0.42 \cdot \frac{3 \cdot (\text{ } \times 9.80665) \cdot \text{ }}{16}$$

$$= 2072.798 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

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

$$= 0.42 \cdot \frac{\text{ } \times 9.80665 \cdot \text{ }}{4}$$

$$= 791.7046 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

(d) 水平地震荷重により生じるせん断応力成分

水平地震荷重により生じるせん断応力は、以下の式により算出した。

$$\begin{aligned}
 \text{管板 - 管支持板} \quad : \tau_{1anh} &= C_H \cdot \frac{m_e \cdot L_{an} \cdot g}{A_{stb}} \\
 &= 0.42 \cdot \frac{\boxed{\phantom{000000}} \times 9.80665}{93.90017 \times 10^{-6}} \\
 &= 0.08776 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{管支持板 - 管支持板} : \tau_{1hoh} &= C_H \cdot \frac{m_e \cdot L_{ho} \cdot g}{A_{stb}} \\
 &= 0.42 \cdot \frac{\boxed{\phantom{000000}} \times 9.80665}{93.90017 \times 10^{-6}} \\
 &= 0.046971 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

なお、 $A_{stb}$ は以下の式により算出した。

$$\begin{aligned}
 A_{stb} &= \frac{3 \cdot \left[ \left( \frac{D_o}{2} \right)^2 + \left( \frac{D_i}{2} \right)^2 \right]}{4 \left[ \left( \frac{D_o}{2} \right)^2 + \left( \frac{D_o}{2} \right) \cdot \left( \frac{D_i}{2} \right) + \left( \frac{D_i}{2} \right)^2 \right]} \cdot A_{tb} \\
 &= \frac{3 \cdot \left[ \left( \frac{\boxed{\phantom{000000}}}{2} \right)^2 + \left( \frac{\boxed{\phantom{000000}}}{2} \right)^2 \right]}{4 \left[ \left( \frac{\boxed{\phantom{000000}}}{2} \right)^2 + \left( \frac{\boxed{\phantom{000000}}}{2} \right) \cdot \left( \frac{\boxed{\phantom{000000}}}{2} \right) + \left( \frac{\boxed{\phantom{000000}}}{2} \right)^2 \right]} \cdot 187.2389 \\
 &= 93.90017 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

### c. 組合せ応力

一次応力は、以下の式により組み合わせた。

管板 - 管支持板：

$$\begin{aligned}
 \sigma_{an} &= \frac{1}{2} \left[ \sigma_{\phi an} + \sigma_{xan} + \sqrt{(\sigma_{\phi an} - \sigma_{xan})^2 + 4 \cdot \tau_{an}^2} \right] \\
 &= \frac{1}{2} \left[ 18.49750 + 14.58582 + \sqrt{(18.49750 - 14.58582)^2 + 4 \times 0.087760^2} \right] \\
 &= 18.49947 \cong 19 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

管支持板 - 管支持板：

$$\begin{aligned}
 \sigma_{ho} &= \frac{1}{2} \left[ \sigma_{\phi ho} + \sigma_{xho} + \sqrt{(\sigma_{\phi ho} - \sigma_{xho})^2 + 4 \cdot \tau_{ho}^2} \right] \\
 &= \frac{1}{2} \left[ 18.49750 + 11.28725 + \sqrt{(18.49750 - 11.28725)^2 + 4 \times 0.046971^2} \right] \\
 &= 18.49781 \cong 19 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

なお、各方向の応力は上記 b. (a)～b. (d)で算出した各成分を用いて以下のとおり算出した。

$$\text{周方向応力} : \sigma_{\phi an} = \sigma_{\phi 1} = 18.49750 \text{ MPa}, \quad \sigma_{\phi ho} = \sigma_{\phi 1} = 18.49750 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned}
 \text{軸方向応力} : \sigma_{xan} &= \sigma_{x1} + \sigma_{x2gan} + \sigma_{x3han} \\
 &= 9.248750 + 3.758498 + 1.578569 \\
 &= 14.58582 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}\sigma_{xho} &= \sigma_{x1} + \sigma_{x2gho} + \sigma_{x3hho} \\ &= 9.248750 + 1.435557 + 0.602934 \\ &= 11.287241 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{せん断応力: } \tau_{an} &= \tau_{1anh} \\ &= 0.087760 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tau_{ho} &= \tau_{1hoh} \\ &= 0.046971 \text{ MPa}\end{aligned}$$

### 3. 評価結果

熱交換器伝熱管の腐食（流れ加速型腐食）を考慮した耐震安全性評価結果を表3に示す。評価の結果、発生応力は許容応力を下回り、耐震安全性に問題ないことを確認した。

表3 熱交換器の管支持板の腐食（流れ加速型腐食）を考慮した伝熱管の耐震安全性評価結果

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

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

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

## 原子炉浄化系再生熱交換器の想定腐食量の設定根拠について

## 1. 概要

原子炉浄化系再生熱交換器の胴については2016年12月に実機の肉厚測定を実施しており、測定結果が公称板厚を上回る結果となった。しかしながら、運転開始後60年時点までの運転を想定した減肉については、水質、流速等による影響を考慮した腐食速度を用いて想定減肉量を算出した。

## 2. 原子炉浄化系再生熱交換器の想定減肉量の算出に用いる評価条件

原子炉浄化系再生熱交換器の評価条件は下記とした。

評価条件	
温度	224.4℃ ～ 50℃
溶存酸素濃度	約10ppb（水素注入時）
流速	最大1.8m/s（胴内の流速（1.07m/s）に対して保守性を考慮した設定値）

## 3. 算出方法

原子炉浄化系再生熱交換器の胴（炭素鋼）における、肉厚測定日（2016年12月12日）から運転開始後60年時点（2049年2月10日）までの期間における想定減肉量を算出した。

具体的には、上記評価条件における腐食速度を図1<sup>[1]</sup>から読み取り、流路形状による減肉量への影響係数<sup>[2]</sup>を乗じて減肉量を算出した。

評価期間	暦年
肉厚測定日（2016年12月12日）～運転開始後60年目（2049年2月10日）	32.19年

## 4. 減肉量の算出過程

3. に記載した評価条件における腐食速度は図1の読取値より以下となる。

- ・腐食速度：約60[mg/dm<sup>2</sup>/month]

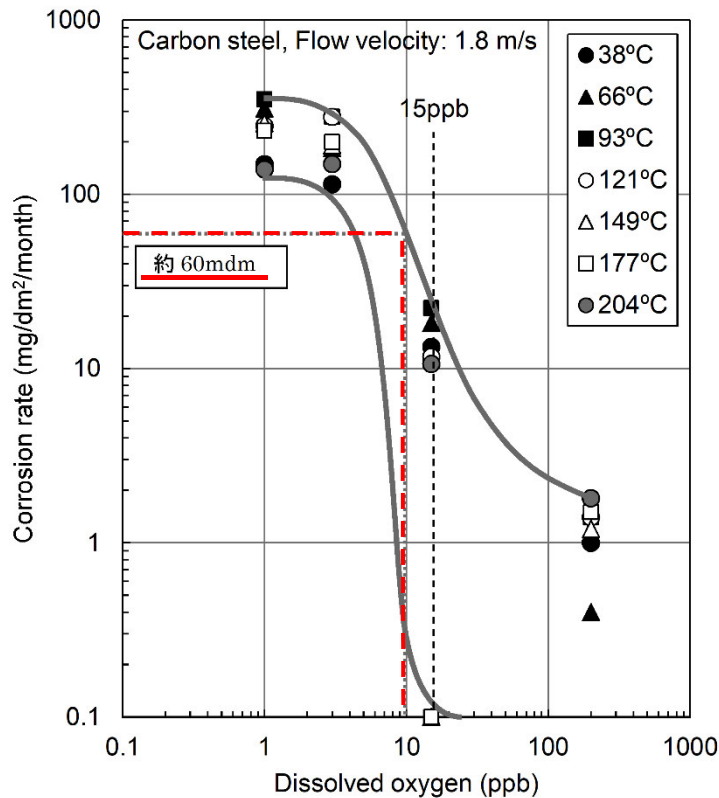


図1 腐食速度と溶存酸素の関係<sup>[1]</sup>

原子炉浄化系再生熱交換器の胴側流体の流れは、直管のように完全な水平方向の流れではなく、管支持板があるため直交方向の流れの影響を受ける。流路形状による減肉量への影響係数<sup>[2]</sup>として、当該機器の流路形状を考慮し、直管部に対する渦形成によるよどみ点での形状係数比を乗じる。

以上より、肉厚測定日から運開後60年目までの期間における推定減肉量を以下のとおり算出した。

$$\begin{aligned} \text{減肉量} &= \frac{60[\text{mg/dm}^2/\text{month}] \times 12[\text{month/year}] \times 32.19[\text{year}] \times 10[\text{mm/cm}]}{7.9[\text{g/cm}^3] \times 100[\text{cm}^2/\text{dm}^2] \times 1000[\text{mg/g}]} \times \frac{0.2^{*1}}{0.04^{*2}} \\ &= \underline{1.47[\text{mm}]} \end{aligned}$$

\*1：渦形成によるよどみ点での形状係数

\*2：直管部での形状係数

## 5. 参考文献

[1] E. G. Brush, W. L. Pearl, “Corrosion and Corrosion Product Release in Neutral Feedwater”, Corrosion, 28, 129-135 (1972)

[2] JSME S CA1-2005, 発電用設備規格 配管減肉管理に関する規格 (2005年版) (増訂版)

## 排ガス予熱器の想定腐食量の設定根拠について

## 1. 概要

排ガス予熱器の胴については2016年2月12日に肉厚測定を実施した結果、公称板厚からの減肉を確認した（公称板厚12mmに対して測定最小値が11.8mm）。

排ガス予熱器の肉厚測定回数は1回のみであることから、公称板厚から測定最小板厚の差を実際の減肉量として、減肉率を算出した。減肉傾向と運転開始後60年時点までの時間を用いて想定減肉量を算出した。

評価期間		評価時間[kh]
実績	運転開始（1989年2月10日）から初回測定までの運転時間（2012年1月27日）	162.51
想定	最後に測定した日（2016年2月12日）から運転開始後60年目（2049年2月10日）	289.2

## 2. 排ガス予熱器の減肉量の算出方法

## (1) 想定減肉率の算出

以下の算出式により減肉率を算出する。

$$\begin{aligned} \text{減肉率}[\text{mm/kh}] &= \frac{\text{公称板厚}[\text{mm}] - \text{測定最小板厚}[\text{mm}]}{\text{運転開始から初回測定までの運転時間}[\text{kh}]} \\ &= \frac{12[\text{mm}] - 11.8[\text{mm}]}{162.51[\text{kh}]} \\ &= 0.0012 \rightarrow \underline{0.002[\text{mm/kh}]} \quad (\text{小数第4位を切上}) \end{aligned}$$

## (2) 想定減肉量の算出

(1) で算出した減肉率に最後に測定した測定日から運転開始後60年時点までの時間\*を乗じて想定減肉量を算出する。

※：排ガス予熱器はプラント運転中のみ稼働する設備であるが、想定減肉量の算出にあたっては保守的にプラント停止期間を考慮せず、運転開始後60年時点までの総時間を用いて評価を行った。

$$\begin{aligned} \text{想定減肉量}[\text{mm}] &= \text{減肉率}[\text{mm/kh}] \times \text{最後に測定した日から運転開始後60年目までの時間}[\text{kh}] \\ &= 0.002[\text{mm/h}] \times 289.2[\text{kh}] \\ &= 0.5784 \rightarrow \underline{0.58[\text{mm}]} \quad (\text{小数第3位を切上}) \end{aligned}$$

## 「耐震管理厚さ」の設定および管理方法について

## 1. 「耐震管理厚さ」設定の経緯

配管の腐食（流れ加速型腐食）を考慮した耐震安全性評価について、「実用発電用原子炉施設における高経年化対策実施ガイド」の記載を踏まえ、耐圧上の必要厚さまたは60年時点での想定厚さを用いた耐震評価を実施したところ、評価が成立しないモデルがあった。

このため、評価対象配管に対して管理基準を定めることを目的とし、配管減肉管理上の保守的な管理値として、40年目の想定厚さを含めた「耐震管理厚さ」を社内QMSに定めた。

## 2. 「耐震管理厚さ」を含めた配管肉厚管理方法

炭素鋼配管の配管肉厚について、実測データに基づき耐震管理厚さ到達までの余寿命を測定し、その結果に基づき講ずるべき措置（配管取替、補修または耐震補強）を計画・実施することを社内QMSに定めている。耐震管理厚さを下回らないよう管理していることを踏まえ、運転開始後60年時点までの配管肉厚を「耐震管理厚さ」として、耐震安全性評価を実施した。実測データを踏まえた配管取替等の対策実施イメージを図1に示す。

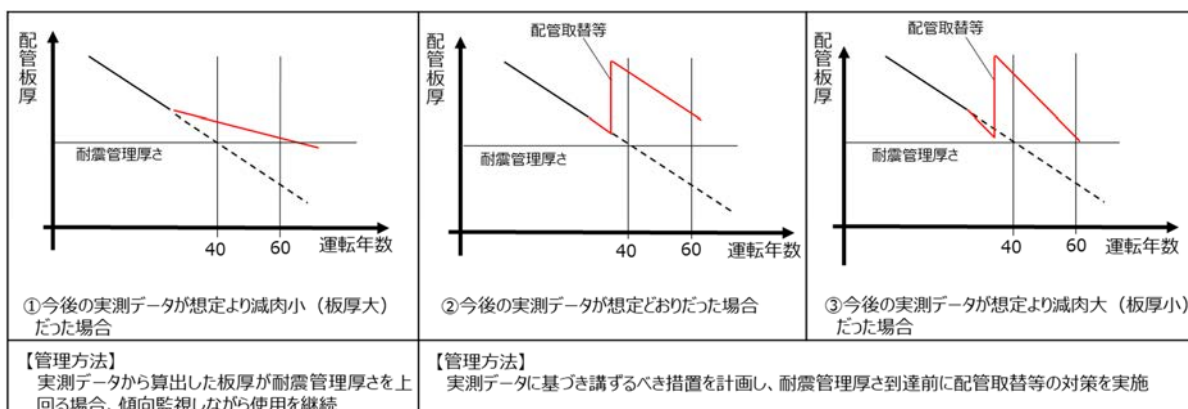


図1 配管肉厚管理における対策実施イメージ

また、配管の肉厚管理は、耐震管理厚さと必要最小厚さ（tsr）の大きい方の厚さで管理していることから、耐震上および耐圧上の両観点から、配管肉厚が基準値を下回ることはない。耐震管理厚さとtsrの比較等の詳細は別紙13に示す。



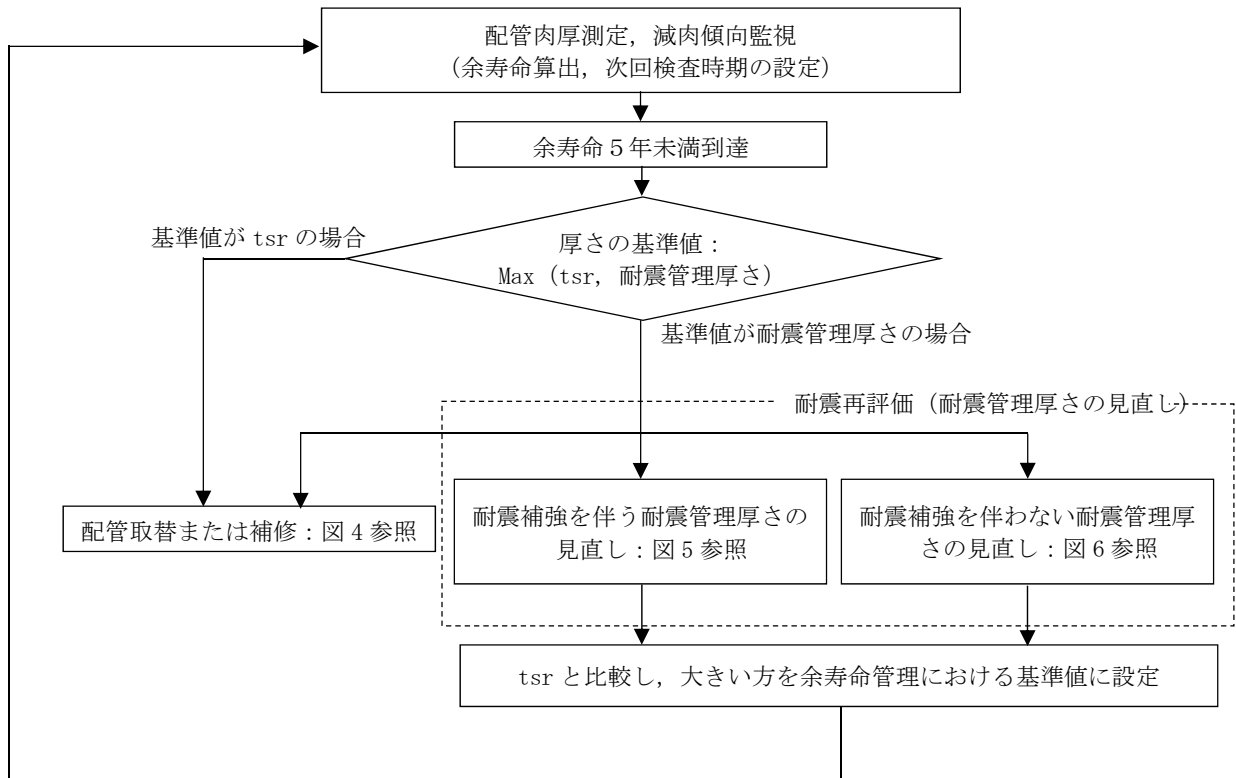
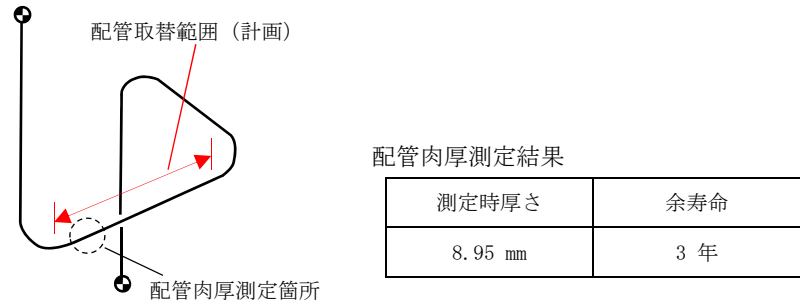
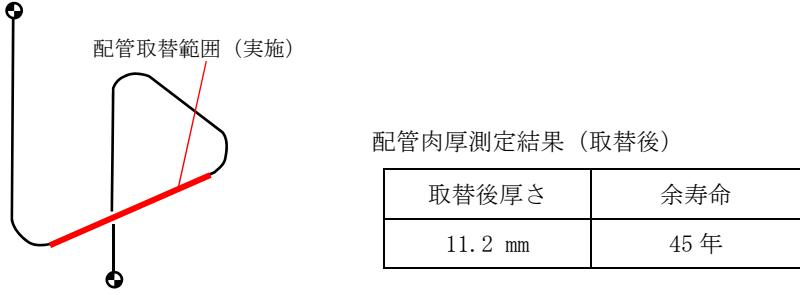


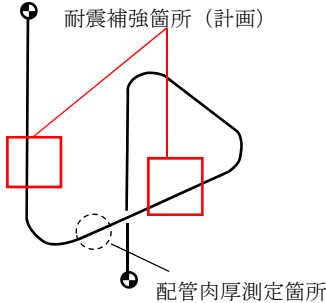
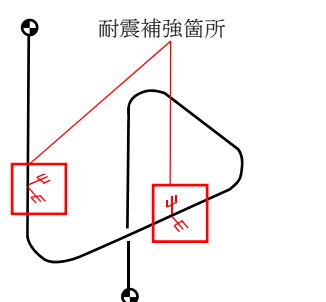
図3 余寿命管理の概要フロー

余寿命	イメージ図および測定結果（数値例※）	対応内容				
5年未満 ～ 15か月以上	 <p>配管取替範囲（計画）</p> <p>配管肉厚測定箇所</p> <p>配管肉厚測定結果</p> <table border="1" data-bbox="689 432 1106 536"> <tr> <td>測定時厚さ</td> <td>余寿命</td> </tr> <tr> <td>8.95 mm</td> <td>3年</td> </tr> </table>	測定時厚さ	余寿命	8.95 mm	3年	<ul style="list-style-type: none"> <li>措置内容（配管取替範囲）を決定し、配管取替計画を策定（計画には実施時期（定期事業者検査）を含む）</li> </ul>
測定時厚さ	余寿命					
8.95 mm	3年					
15か月未満	 <p>配管取替範囲（実施）</p> <p>配管肉厚測定結果（取替後）</p> <table border="1" data-bbox="689 743 1106 847"> <tr> <td>取替後厚さ</td> <td>余寿命</td> </tr> <tr> <td>11.2 mm</td> <td>45年</td> </tr> </table>	取替後厚さ	余寿命	11.2 mm	45年	<ul style="list-style-type: none"> <li>措置（配管取替）の実施</li> <li>取替後の配管肉厚測定結果に基づき余寿命を算出</li> <li>余寿命に応じた管理を継続</li> </ul>
取替後厚さ	余寿命					
11.2 mm	45年					

※：数値は説明のために例として記載した値であり、実際の測定結果等を使用したものではない

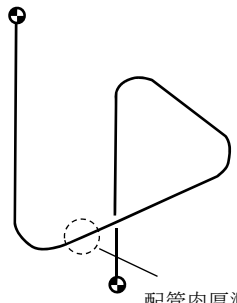
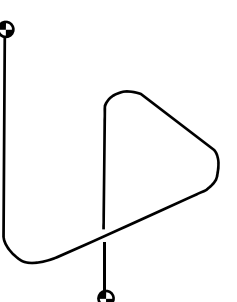
図4 余寿命管理の具体的手法（例1：配管取替の実施）



余寿命	イメージ図および測定結果（数値例※）	対応内容																						
5年未満 〜 15か月以上	<p>イメージ図および測定結果（数値例※）</p> <p>耐震補強箇所（計画）</p>  <p>配管肉厚測定箇所</p> <p>耐震評価結果（補強前、30年PLMの評価結果）</p> <table border="1" data-bbox="616 303 1108 406"> <thead> <tr> <th></th> <th>配管肉厚</th> <th>発生応力</th> <th>許容応力</th> <th>判定</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>耐震管理厚さ</td> <td>8.8 mm</td> <td>110 MPa</td> <td>200 MPa</td> <td>○</td> </tr> </tbody> </table>		配管肉厚	発生応力	許容応力	判定	耐震管理厚さ	8.8 mm	110 MPa	200 MPa	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>措置内容（耐震補強）を決定し、工事計画を策定（計画には実施時期（定期事業者検査）を含む）</li> </ul>												
	配管肉厚	発生応力	許容応力	判定																				
耐震管理厚さ	8.8 mm	110 MPa	200 MPa	○																				
15か月未満	<p>イメージ図および測定結果（数値例※）</p> <p>耐震補強箇所</p>  <p>-E: レストレント</p> <p>耐震再評価結果（補強後）</p> <table border="1" data-bbox="616 622 1108 853"> <thead> <tr> <th></th> <th>配管肉厚</th> <th>発生応力</th> <th>許容応力</th> <th>判定</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>耐震管理厚さ（補強前）</td> <td>8.8 mm</td> <td>90 MPa</td> <td>200 MPa</td> <td>○</td> </tr> <tr style="border: 2px solid red;"> <td>tsr</td> <td><u>6.9 mm</u></td> <td>160 MPa</td> <td>200 MPa</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>60年想定厚さ</td> <td>7.8 mm</td> <td>140 MPa</td> <td>200 MPa</td> <td>○</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">↓</p> <table border="1" data-bbox="616 877 1108 949"> <tr> <td>耐震管理厚さ 再設定後の余寿命</td> <td>20年</td> </tr> </table>		配管肉厚	発生応力	許容応力	判定	耐震管理厚さ（補強前）	8.8 mm	90 MPa	200 MPa	○	tsr	<u>6.9 mm</u>	160 MPa	200 MPa	○	60年想定厚さ	7.8 mm	140 MPa	200 MPa	○	耐震管理厚さ 再設定後の余寿命	20年	<ul style="list-style-type: none"> <li>措置（耐震補強）を実施</li> <li>耐震補強内容および配管の減肉を反映したモデルにて耐震再評価を実施</li> <li>耐震管理厚さを再設定（左図の例ではtsr(6.9 mm)と同じ配管肉厚を耐震管理厚さとして再設定）</li> <li>再設定した耐震管理厚さに基づき余寿命を算出</li> <li>余寿命に応じた管理を継続</li> </ul>
	配管肉厚	発生応力	許容応力	判定																				
耐震管理厚さ（補強前）	8.8 mm	90 MPa	200 MPa	○																				
tsr	<u>6.9 mm</u>	160 MPa	200 MPa	○																				
60年想定厚さ	7.8 mm	140 MPa	200 MPa	○																				
耐震管理厚さ 再設定後の余寿命	20年																							

※：数値は説明のために仮記載した値であり、実際の測定結果等を使用したものではない

図5 余寿命管理の具体的手法（例2：耐震補強を伴う耐震管理厚さの見直し）

余寿命	イメージ図および測定結果（数値例※）	対応内容																											
5年未満 15か月以上	 <p>耐震評価結果（30年PLMの評価結果）</p> <table border="1" data-bbox="616 303 1108 406"> <thead> <tr> <th></th> <th>配管肉厚</th> <th>発生応力</th> <th>許容応力</th> <th>判定</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>耐震管理厚さ</td> <td>8.8 mm</td> <td>110 MPa</td> <td>200 MPa</td> <td>○</td> </tr> </tbody> </table>		配管肉厚	発生応力	許容応力	判定	耐震管理厚さ	8.8 mm	110 MPa	200 MPa	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>措置内容（減肉量再設定）を決定し、耐震再評価を計画（tsrや60年目想定厚さを含めた評価を実施し、成立しない場合は、適切な肉厚（例：50年時点の想定厚さ）を個別に設定のうえモデルを作成し、耐震再評価）</li> </ul>																	
	配管肉厚	発生応力	許容応力	判定																									
耐震管理厚さ	8.8 mm	110 MPa	200 MPa	○																									
15か月未満	 <p>耐震再評価結果</p> <table border="1" data-bbox="616 622 1108 877"> <thead> <tr> <th></th> <th>配管肉厚</th> <th>発生応力</th> <th>許容応力</th> <th>判定</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>耐震管理厚さ</td> <td>8.8 mm</td> <td>110 MPa</td> <td>200 MPa</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>tsr</td> <td>6.9 mm</td> <td>280 MPa</td> <td>200 MPa</td> <td>×</td> </tr> <tr> <td>60年想定厚さ</td> <td>7.8 mm</td> <td>210 MPa</td> <td>200 MPa</td> <td>×</td> </tr> <tr style="border: 2px solid red;"> <td>50年想定厚さ</td> <td>8.4 mm</td> <td>150 MPa</td> <td>200 MPa</td> <td>○</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">↓</p> <table border="1" data-bbox="616 909 1108 973"> <tr> <td>耐震管理厚さ再設定後の余寿命</td> <td>11年</td> </tr> </table> <p>（配管施工（現場）に変更なし）</p>		配管肉厚	発生応力	許容応力	判定	耐震管理厚さ	8.8 mm	110 MPa	200 MPa	○	tsr	6.9 mm	280 MPa	200 MPa	×	60年想定厚さ	7.8 mm	210 MPa	200 MPa	×	50年想定厚さ	8.4 mm	150 MPa	200 MPa	○	耐震管理厚さ再設定後の余寿命	11年	<ul style="list-style-type: none"> <li>より減肉が進行した条件のモデルで耐震再評価を実施</li> <li>耐震管理厚さを再設定（左図の例では50年想定厚さ（8.4 mm）を耐震管理厚さとして再設定）</li> <li>再設定した耐震管理厚さに基づき余寿命を算出</li> <li>余寿命に応じた管理を継続</li> </ul>
	配管肉厚	発生応力	許容応力	判定																									
耐震管理厚さ	8.8 mm	110 MPa	200 MPa	○																									
tsr	6.9 mm	280 MPa	200 MPa	×																									
60年想定厚さ	7.8 mm	210 MPa	200 MPa	×																									
50年想定厚さ	8.4 mm	150 MPa	200 MPa	○																									
耐震管理厚さ再設定後の余寿命	11年																												

※：数値は説明のために仮記載した値であり、実際の測定結果等を使用したものではない

図6 余寿命管理の具体的手法（例3：耐震補強を伴わない耐震管理厚さの見直し）

表-3 余寿命5年以上の検査実施時期

次回検査実施時期 (定事検) ※1 [a = 最小値-1年]	余寿命 [a]	b, c, dのいずれか早い時期			備考
		余寿命が5年 となる時期(年) [b] = a - 5	余寿命の1/2 が経過する時期(年) [c] = a / 2	10年※3 [d]	
1 ※2	5.1とした場合	0.1(最小)	2.55(最小)	10	検査実施箇所の減肉傾向(減肉率が極端に大きくなった場合等)によっては、実施時期を次表によらず時期を早めに確認する場合もある。
	6年	1	3	10	
	7年	2	3.5	10	
2	8年	3	4	10	
3	9年	4	4.5	10	
4	10年	5	5	10	
6	15年	10	7.5	10	
8	20年	15	10	10	
	30年以上	25	15	10	

※1 定事検のため原子炉が停止している期間

※2 余寿命5年以上の検査実施時期の最短検査時期は1定事検とする。

※3 エルボ等の2回目測定のみ適用。2回目測定実績に基づき定めた値であり、測定実績の蓄積に伴い、必要により見直しを行う。

当社QMS文書「配管肉厚管理手引書」より抜粋

図7 余寿命に応じた次回検査時期の設定

表-8 算出された余寿命に応じて講ずるべき措置			
	算出された余寿命	講ずるべき措置	
必要最小厚さ基準	8年以上	余寿命に応じて、次回の検査実施時期を設定(表-3「余寿命5年以上の検査実施時期」に示す。)	…【tsr管理①】配管取替計画の策定
	2年以上5年未満	配管取替え計画の策定および実施までの間における定事検ごとの検査	…【tsr管理②】次回定事検にて取替
	15ヶ月※1以上2年未満	次回定事検期間内における配管の取替え※2または補修※3	…【tsr管理③】今回定事検にて取替
	15ヶ月※1未満	当該定事検期間内における配管の取替え※2または補修※3	
耐震管理厚さ基準	5年以上	余寿命に応じて、次回の検査実施時期を設定(表-3「余寿命5年以上の検査実施時期」に示す。)	【「耐震管理厚さ」管理①】 次回定事検までに以下を実施 「耐震再評価による管理厚さ見直し」または 「取替/補修/補強計画の策定」  【「耐震管理厚さ」管理②】 上記(【「耐震管理厚さ」管理①】)を踏まえ、取替/補修/補強の実施 (管理厚さ見直しの結果、余寿命が15か月以上となった場合は、tsr/耐震管理厚さの余寿命が短い方に応じて措置を実施)
	15ヶ月※1以上5年未満	次回定事検期間までに耐震評価による管理厚さの見直し、配管取替え計画の策定、配管補修計画の策定または耐震補強計画の策定	
	15ヶ月※1未満	当該定事検期間内に耐震評価および耐震管理厚さの見直しを行い、算出された余寿命に応じた以下の対応を実施 ・見直した耐震管理厚さの余寿命が15ヶ月以上の場合、必要最小厚さ基準または耐震管理厚さ基準のいずれか短い方の余寿命に応じた講ずるべき措置の実施 ・見直した耐震管理厚さの余寿命が15ヶ月未満の場合、当該定事検期間内における配管の取替え※2、補修※3または耐震補強	
※1	15ヶ月とは、次回運転サイクルまでの最長運転サイクルで、①並列～総合負荷検査までの30日、②総合負荷検査から解列まで13ヶ月(実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第48条)、③さらに最大延長30日とした場合の15ヶ月とした。		
※2	配管の取替えに際しては、「減肉の生じにくい配管構造とするような設計・施工上の工夫や配管材質の改良」などの対策を講ずるため設計メーカーと十分調整・検討を行い実施する。		
※3	補修方法として内面肉盛溶接があるが、その適用に際しては、日本機械学会発電用原子力設備規格 JSME S NBI-2001「溶接規格」に従って溶接を行い、溶接部の強度を母材と同等以上とする必要がある。その他の補修方法として、日本機械学会発電用原子力設備規格 JSME S NAI-2004「維持規格」の記載内容も参照することができる。		

当社QMS文書「配管肉厚管理手引書」より抜粋

図8 余寿命に応じた措置等の具体例