

島根原子力発電所 2 号炉 審査資料	
資料番号	PLM-05 改 01
提出年月日	平成 30 年 8 月 1 日

島根原子力発電所 2 号炉 高経年化技術評価
(低サイクル疲労)

補足説明資料

平成 30 年 8 月 1 日
中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

目次

今回提出する範囲

1. 概要	1
2. 基本方針	1
3. 評価対象と評価手法	3
(1) 評価対象	3
(2) 評価手法	5
4. 代表機器の技術評価	13
(1) 健全性評価	13
(2) 現状保全	13
(3) 総合評価	14
(4) 高経年化への対応	14
5. 代表機器以外の技術評価	15
(1) 健全性評価	15
(2) 現状保全	15
(3) 総合評価	17
(4) 高経年化への対応	17
6. まとめ	17
(1) 審査ガイド適合性	17
(2) 保守管理に関する方針として策定する事項	17

別紙 1. 建設時工認における原子炉圧力容器の疲労評価結果について

別紙 2. 建設時考慮されていない応力変動の抽出プロセスについて

別紙 3. 実過渡回数と推定過渡回数の検証について

別紙 4. 環境疲労評価で考慮している溶存酸素濃度について

別紙 5. 代表機器の疲れ累積係数の算出根拠について

別紙 6. 代表機器以外の疲れ累積係数の算出根拠について

別紙 7. 評価手法を含めた疲労評価結果について

別紙 8. 未経験過渡の疲労評価結果への影響について

代表機器の疲れ累積係数の算出根拠について

(1) 原子炉圧力容器の疲労評価

①設計・建設規格に基づく評価

原子炉圧力容器の疲労評価に係る各評価対象部位の疲れ累積係数の算出根拠（a. 過渡回数, b. 解析コードおよび解析モデル, c. 材料物性値, 許容応力および外荷重条件, d. 最大評価点, e. 疲労評価結果）については, 設計・建設規格 クラス 1 容器に基づき実施しており, 以下のとおりである。

a. 過渡回数

主フランジ, スタッドボルト, 給水ノズル, 下鏡, 支持スカートの疲労評価に用いた 60 年目の推定過渡回数を表 1 から表 3 に示す。

表 1 主フランジおよびスタッドボルトの疲労評価に用いた過渡回数

運転条件	運転実績に基づく過渡回数 (2015 年 7 月末時点)	60 年時点 推定回数
ボルト締付け	20	45
耐圧試験	24	55
起動 (昇温, タービン起動)	36	74
スクラム (タービントリップ)	1	1
スクラム (その他のスクラム)	4	7
停止 (タービン停止, 高温待機, 冷却, 容器満水, 満水後冷却)	36	74
ボルト取り外し	21	46

表2 給水ノズルの疲労評価に用いた過渡回数

運転条件	運転実績に基づく過渡回数 (2015年7月末時点)	60年時点 推定回数
耐圧試験	24	55
起動（昇温，タービン起動）	36	74
夜間出力運転（出力75%）	40	81
週末出力運転（出力50%）	34	84
制御棒パターン変更	58	143
スクラム（タービントリップ）	1	1
スクラム（その他のスクラム）	4	7
停止（タービン停止，高温待機，冷却，容器満水，満水後冷却）	36	74

表3 下鏡および支持スカートの疲労評価に用いた過渡回数

運転条件	運転実績に基づく過渡回数 (2015年7月末時点)	60年時点 推定回数
耐圧試験	24	55
起動（昇温，タービン起動）	36	74
スクラム（タービントリップ）	1	1
スクラム（その他のスクラム）	4	7
停止（タービン停止，高温待機，冷却，容器満水，満水後冷却）	36	74

b. 解析コードおよび解析モデル

疲れ累積係数の算出に使用した解析コードについて表4から表6に示す。

また、解析モデルおよび評価点を図1から図3に示す。なお、温度分布解析には「TACF」、内圧による応力解析には「ASHSD2-B」、ボルトの締付力による応力および熱応力による解析には「ASHSD2-B」を用いた。

表4 主フランジ，スタッドボルトの解析コード

解析コード	TACF Ver. 0	温度分布解析用
	ASHSD2-B Ver. 0	応力解析用

【解析モデル】

【評価点】

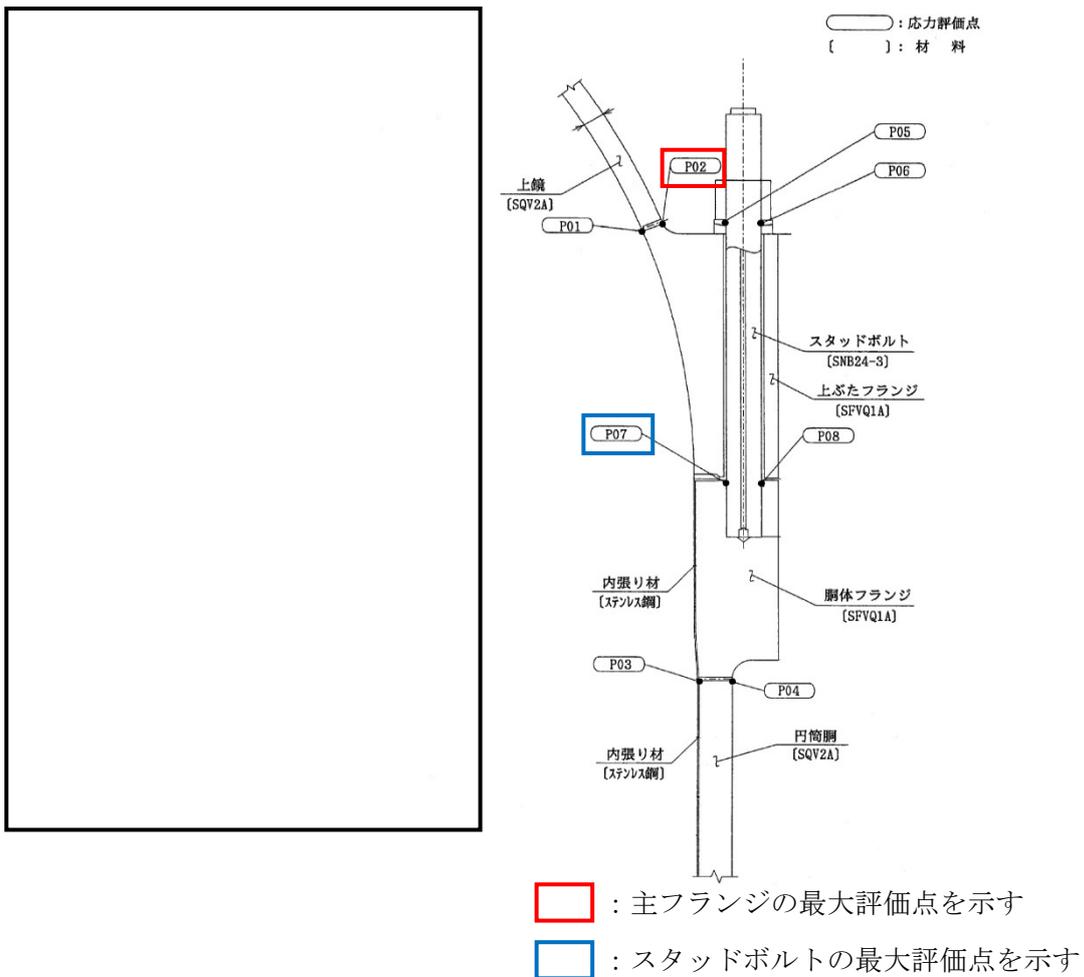


図1 主フランジ，スタッドボルトの解析モデルおよび評価点

表5 給水ノズルの解析コード

解析コード	TACF Ver. 0	温度分布解析用
	ASHSD2-B Ver. 0	応力解析用

【解析モデル】



【評価点】

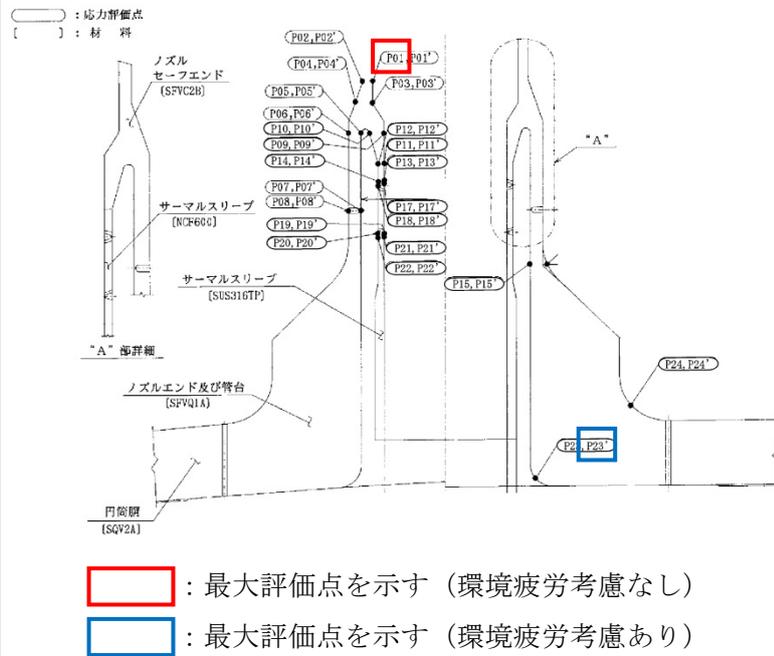


図2 給水ノズルの解析モデルおよび評価点

表6 下鏡, 支持スカートの解析コード

解析コード	TACF Ver. 0	温度分布解析用
	ASHSD2-B Ver. 0	応力解析用

【解析モデル】

【評価点】

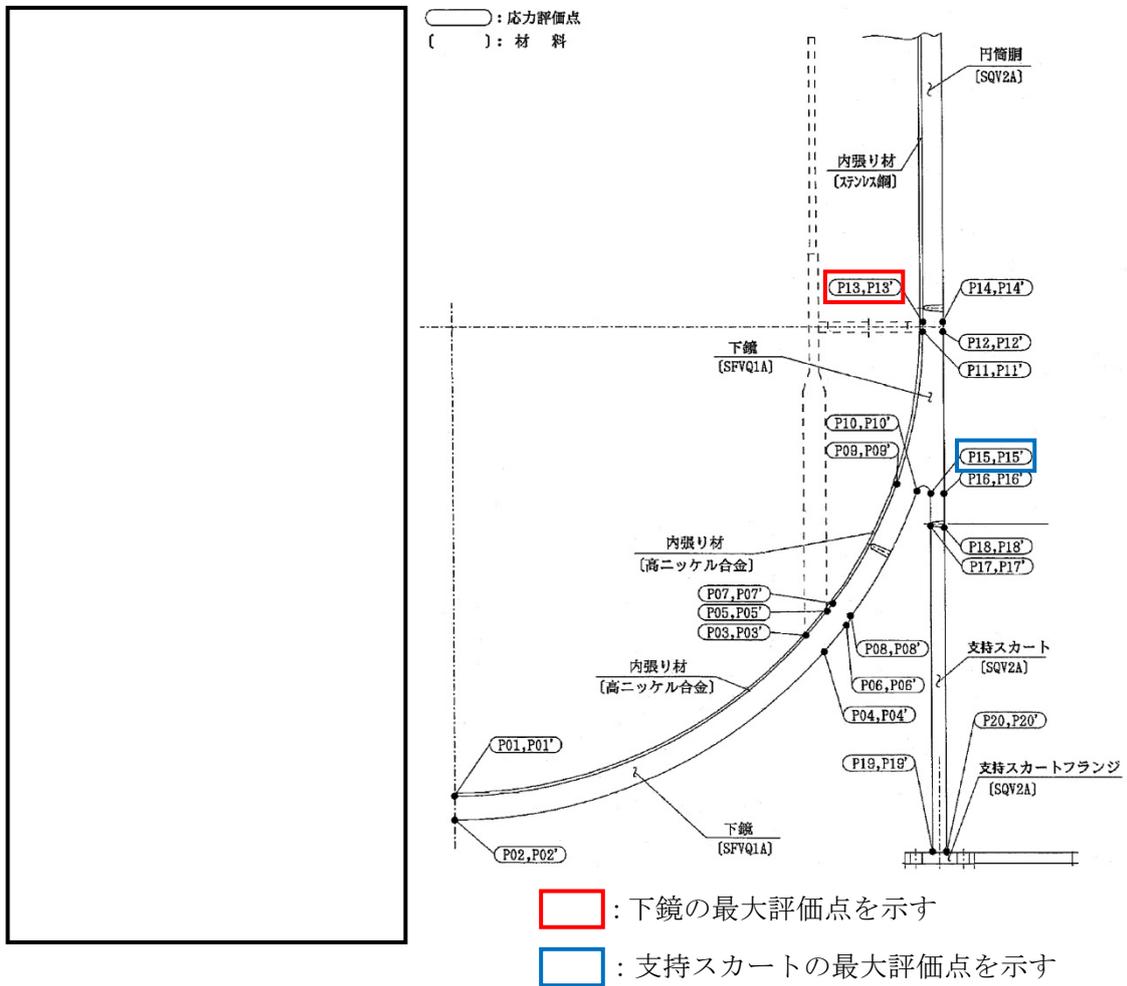


図3 下鏡, 支持スカートの解析モデルおよび評価点

c. 材料物性値，許容応力および外荷重条件

- ・各評価部位における材料物性値を表 7 から表 9 に示す。
- ・各評価部位における許容応力強さを表 10 から表 12 に示す。
- ・各評価部位における外荷重条件を表 13 から表 16 に示す。

表 7 主フランジ，スタッドボルトの繰返し荷重の評価に使用する材料の物性値

材料	$E \times 10^5$ (MPa)	$\alpha \times 10^{-6}$ (mm/mm°C)	Sm (MPa)	S (MPa)	$E_0 \times 10^5$ (MPa)	q	A_0	B_0
SFVQ1A						3.1	1.0	1.25
SNB24-3						—	—	—

表 8 給水ノズルの繰返し荷重の評価に使用する材料の物性値

材料	$E \times 10^5$ (MPa)	$\alpha \times 10^{-6}$ (mm/mm°C)	Sm (MPa)	S (MPa)	$E_0 \times 10^5$ (MPa)	q	A_0	B_0
SFVQ1A						3.1	1.0	1.25

表 9 下鏡，支持スカートの繰返し荷重の評価に使用する材料の物性値

材料	$E \times 10^5$ (MPa)	$\alpha \times 10^{-6}$ (mm/mm°C)	Sm (MPa)	S (MPa)	$E_0 \times 10^5$ (MPa)	q	A_0	B_0
SFVQ1A						3.1	1.0	1.25

〈記号の説明〉

- E : 運転温度 (°C) に対する縦弾性係数
 α : 運転温度 (°C) に対する瞬時熱膨張係数
Sm : 運転温度 (°C) に対する設計応力強さ
S : 設計・建設規格 図 添付 4-2-1 の設計疲労線図より読み取った $S_u \leq 550\text{MPa}$ の 10^6 回に対する繰返しピーク応力強さまたは設計・建設規格 図 添付 4-2-4 の曲線 2 の 10^6 回に対する繰返しピーク応力強さ
 E_0 : 設計・建設規格 添付 4-2 に記載された縦弾性係数
q, A_0 , B_0 : 設計・建設規格 表 PVB-3315-1 に示された簡易弾塑性解析に使用する係数

表 10 主フランジ，スタッドボルトの許容応力強さ

応力分類	主フランジ：一次＋二次応力 スタッドボルト：平均引張応力+曲げ応力
供用状態	A, B
温度 (°C)	
許容応力	$3 \cdot S_m$
SFVQ1A (MPa)	552
SNB24-3 (MPa)	759

表 11 給水ノズルの許容応力強さ

応力分類	一次＋二次応力
供用状態	A, B
温度 (°C)	
許容応力	$3 \cdot S_m$
SFVQ1A (MPa)	552

表 12 下鏡，支持スカートの許容応力強さ

応力分類	一次＋二次応力
供用状態	A, B
温度 (°C)	
許容応力	$3 \cdot S_m$
SFVQ1A (MPa)	552

表 13 主フランジ，スタッドボルトの外荷重条件

荷重名称	値 (kN)
ボルト締付力	

表 14 給水ノズルの外荷重条件 (ノズル)

条件	力 (kN)		モーメント (kN・m)	
	H	F _z	M	M _z
設計機械的荷重				
死荷重				
熱変形力				

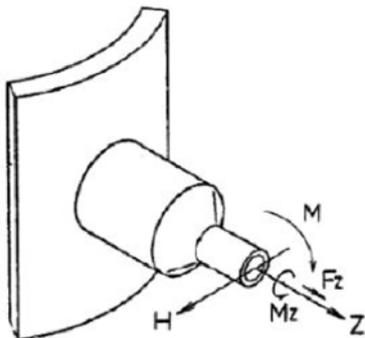


表 15 給水ノズルの外荷重条件 (サーマルスリーブ)

条件	力 (kN)		モーメント (kN・m)	
	H	F _z	M	M _z
設計機械的荷重				
死荷重 (流体反力含む)				
熱変形力				

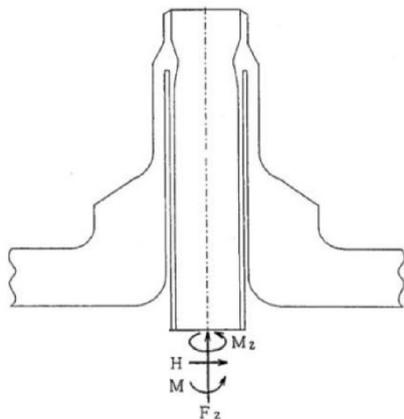
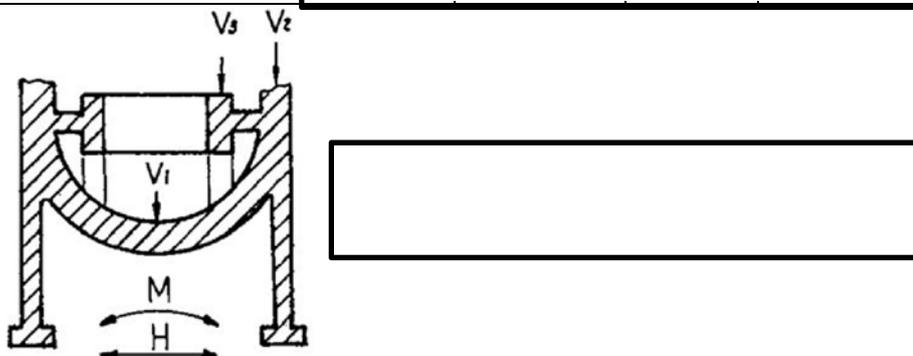


表 16 下鏡, 支持スカートの外荷重条件

運転状態		鉛直力 (kN)			水平力 (kN)	モーメント (kN・m)
		V_1	V_2	V_3	H	M
設計機械的荷重						
死荷重	燃料交換時					
	通常時					
制御棒貫通孔 スクラム反力						
冷却材喪失事故時 のジェット反力						



d. 最大評価点

各部位の評価結果および最大評価点を表 17 から表 19 に示す。

表 17 主フランジ, スタッドボルトの評価結果

分類	疲れ累積係数		
	評価点	U	
P01	0.0001	1	主フランジ
P02	0.0076	1	
P03	0.0001	1	
P04	0.0065	1	
P05	0.1866	1	スタッドボルト
P06	0.1098	1	
P07	0.3808	1	
P08	0.0143	1	

 : 最大評価点を示す。

表 18 給水ノズルの評価結果

分類		疲れ累積係数		
部位	評価点	U	環境条件	許容値
ノズル セーフエント [®]	P01	0.0952	給水	1
	P01'	0.0302	給水	
	P02	0.0112	—	
	P02'	0.0203	—	
	P03	0.0226	給水	
	P03'	0.0137	給水	
	P04	0.0003	—	
	P04'	0.0002	—	
	P05	0.0098	炉水	
	P05'	0.0016	炉水	
	P06	0.0008	—	
	P06'	0.0002	—	
	P07	0.0003	炉水	
	P07'	0.0004	炉水	
	P08	0.0002	—	
	P08'	0.0003	—	
	P09	0.0270	給水	
	P09'	0.0280	給水	
	P10	0.0030	炉水	
	P10'	0.0015	炉水	
	P11	0.0129	給水	
	P11'	0.0123	給水	
	P12	0.0156	炉水	
	P12'	0.0159	炉水	
P13	0.0088	給水		
P13'	0.0088	給水		
P14	0.0068	炉水		
P14'	0.0068	炉水		
ノズルエント [®]	P15	0.0005	炉水	1
	P15'	0.0005	炉水	
	P16	0.0024	—	
	P16'	0.0007	—	
サーマルスリープ [®]	P17	0.0002	給水	1
	P17'	0.0002	給水	
	P18	0.0003	炉水	
	P18'	0.0003	炉水	
	P19	0.0049	給水	
	P19'	0.0049	給水	
	P20	0.0032	炉水	
	P20'	0.0032	炉水	
サーマルスリープ [®]	P21	0.0239	給水	1
	P21'	0.0238	給水	
	P22	0.0109	炉水	
	P22'	0.0109	炉水	
管台	P23	0.0453	炉水	1
	P23'	0.0524	炉水	
	P24	0.0352	—	
	P24'	0.0253	—	

□ : 最大評価点 (環境疲労考慮なし)

□ : 最大評価点 (環境疲労考慮あり)

表 19 下鏡, 支持スカートの評価結果

分類 評価点	疲れ累積係数	
	U	許容値
P01	0.0005	1
P01'	0.0005	1
P02	0.0006	1
P02'	0.0006	1
P03	0.0000	1
P03'	0.0000	1
P04	0.0001	1
P04'	0.0001	1
P05	0.0011	1
P05'	0.0011	1
P06	0.0001	1
P06'	0.0001	1
P07	0.0001	1
P07'	0.0001	1
P08	0.0017	1
P08'	0.0017	1
P09	0.0034	1
P09'	0.0034	1
P10	0.0044	1
P10'	0.0044	1
P11	0.0032	1
P11'	0.0032	1
P12	0.0005	1
P12'	0.0005	1
P13	0.0069	1
P13'	0.0069	1
P14	0.0004	1
P14'	0.0004	1
P15	0.2252	1
P15'	0.2252	1
P16	0.0131	1
P16'	0.0131	1
P17	0.0000	1
P17'	0.0000	1
P18	0.0031	1
P18'	0.0031	1
P19	0.0048	1
P19'	0.0048	1
P20	0.0026	1
P20'	0.0026	1

下鏡

支持スカート

 : 最大評価点を示す

e. 疲労評価結果

最大評価点における疲労評価結果を表 20 から表 24 に示す。

〈記号の説明〉

- Sn : 供用状態 A, B における一次+二次応力の応力最大範囲
- Ke : 簡易弾塑性解析に用いる繰返しピーク応力強さの補正係数
- Sp : 一次+二次+ピーク応力の応力差範囲
- S σ : 繰返しピーク応力強さ
- S σ' : 補正繰返しピーク応力強さ
- Na : S σ' に対応する許容繰返し回数
- Nc : 実際の繰返し回数
- U : 疲れ累積係数

表 20 主フランジの疲労評価結果

応力評価点 - P02

材料 - SFVQ1A

No.	Sn (MPa)	Ke	Sp (MPa)	S σ (MPa)	S σ' (MPa)	Na	Nc	Nc/Na
疲れ累積係数 U= 0.0076								

表 21 スタッドボルトの疲労評価結果

応力評価点 - P07

材料 - SNB24-3

No.	Sp (MPa)	S σ (MPa)	S σ' (MPa)	Na	Nc	Nc/Na
疲れ累積係数 U = 0.3808						

表 22 給水ノズルの疲労評価結果^{※1}

応力評価点 - P23'

材料 - SFVQ1A

No.	Sn (MPa)	Ke	Sp (MPa)	S σ (MPa)	S σ' (MPa)	Na	Nc	Nc/Na
疲れ累積係数 U = 0.0524								

※1：環境疲労を考慮した最大点の結果を示す。

表 23 下鏡の疲労評価結果

応力評価点 - P13

材料 - SFVQ1A

No.	Sn (MPa)	Ke	Sp (MPa)	S σ (MPa)	S σ' (MPa)	Na	Nc	Nc/Na
疲れ累積係数 U= 0.0069								

表 24 支持スカートの疲労評価結果

応力評価点 - P15

材料 - SFVQ1A

No.	Sn (MPa)	Ke	Sp (MPa)	S σ (MPa)	S σ' (MPa)	Na	Nc	Nc/Na
疲れ累積係数 U= 0.2252								

②環境疲労評価手法に基づく評価

環境を考慮した疲れ累積係数の算出根拠は以下のとおりである。なお、疲れ累積係数は小数点以下5桁目を切り上げて表記しているが、計算過程では端数処理を行わず算出した。

〈記号の説明〉

S_n : 供用状態 A, B における一次+二次応力の応力最大範囲

K_e : 簡易弾塑性解析に用いる繰返しピーク応力強さの補正係数

S_p : 一次+二次+ピーク応力の応力差範囲

S_l : 繰返しピーク応力強さ

S_l' : 補正繰返しピーク応力強さ

N_a : S_l' に対応する許容繰返し回数

N_c : 実際の繰返し回数

U : 疲れ累積係数

U_{en} : 環境を考慮した疲れ累積係数

$F_{en, sc}$: 係数倍法による環境効果補正係数

$F_{en, det}$: 詳細評価手法による環境効果補正係数

a. 給水ノズルの評価結果

給水ノズルの評価結果を表 25 に示す。

表 25 給水ノズルの環境疲労評価結果

応力評価点 — P23'

材 料 — SFVQ1A



No.	S_n (MPa)	K_e	S_p (MPa)	S_l (MPa)	S_l' (MPa)	N_a	N_c	N_c/N_a	$F_{en, det}$	U_{en}
							$U =$	0.0524		0.6505

- ・環境効果を考慮した疲労評価（環境疲労評価）は、過渡中でひずみが連続して増加する範囲で細かく評価区分を分割して評価する詳細評価手法を用いた。
- ・詳細評価手法に用いた応力変動の時刻歴データについては図 4 に、応力サイクルの組合せでの F_{en} , d_{et} を表 26 に示す。

なお、評価に用いた環境条件は以下のとおりである。

硫黄含有量（%） : $S = \square$ (ミルシート)

溶存酸素濃度 (ppm) : 0 = 運転条件により変化^{※1}

※1 : 詳細は別紙 4 に記載。

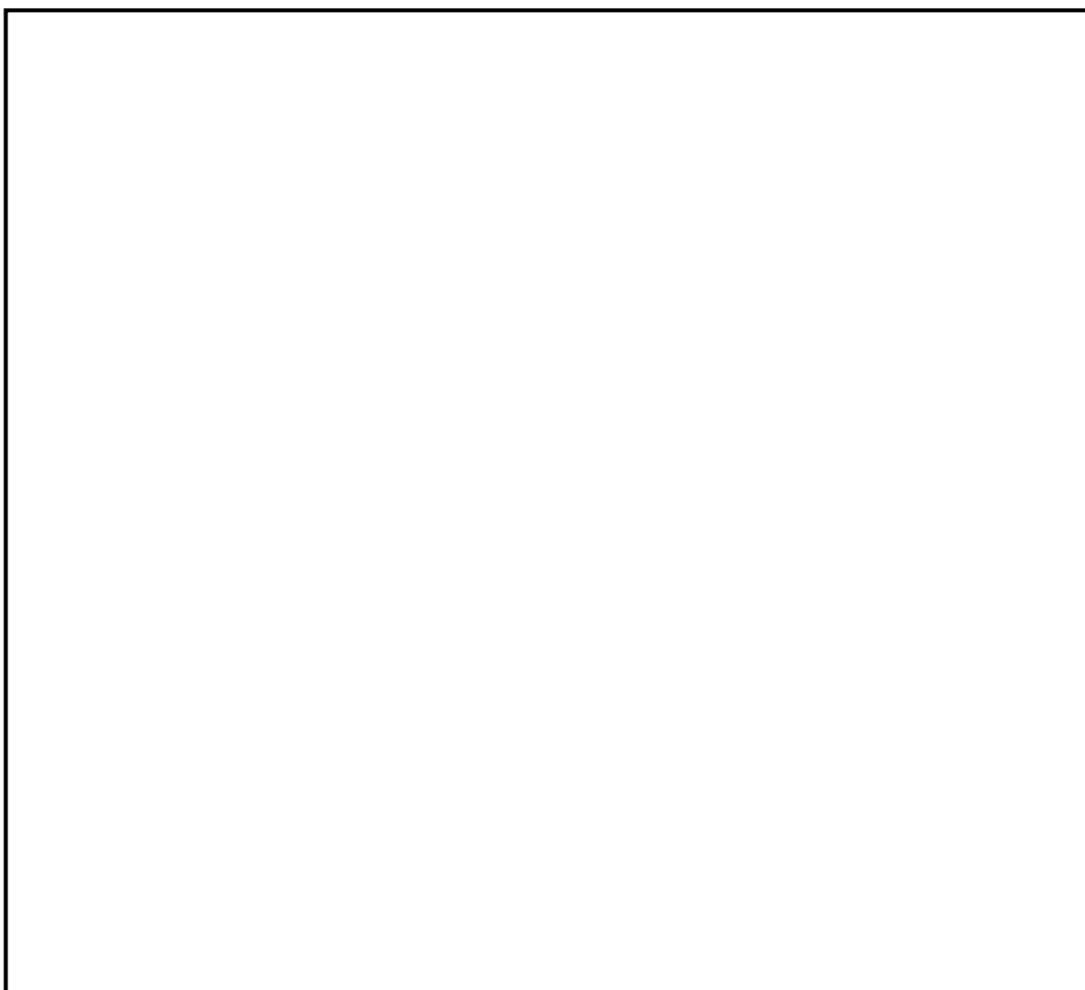


図 4 給水ノズルの応力変動の時刻歴データ

表 26 応力サイクルの組合せでの $F_{en, det}$

No.	過渡 A			過渡 B			$F_{en, det}$
	時点	$F_{en, det}$	$\Delta \epsilon$	時点	$F_{en, det}$	$\Delta \epsilon$	

--

・応力サイクルの組合せでの $F_{en, det}$ は、以下の式から求めた。

$$F_{en, det} = \frac{F_{en, det, A} \times (\epsilon_{max, A} - \epsilon_{min, A}) + F_{en, det, B} \times (\epsilon_{max, B} - \epsilon_{min, B})}{(\epsilon_{max, A} - \epsilon_{min, A}) + (\epsilon_{max, B} - \epsilon_{min, B})}$$

・環境効果を考慮した疲れ累積係数を以下の式により求めた。

$$U_{en} = \sum_{i=1}^m U_i \times F_{en, det, i}$$

$$= 0.6505$$

b. 下鏡の評価結果

下鏡の環境疲労評価は以下のプロセスにより算出した。

- 環境効果を考慮した疲労評価（環境疲労評価）は環境を考慮しない疲れ累積係数に、対象部位での環境効果補正係数の最大値を乗じて算出した。

$$U_{en} = U \times F_{en, sc}$$

- 環境条件

硫黄含有量 (%) : $S = \boxed{}$ (ミルシート)

解析温度 (°C) : $T = 302$ (最高使用温度)

溶存酸素濃度 (ppm) : $D_0 > 0.7$ (溶存酸素濃度最大値)

上記の環境条件より求めた各パラメータを以下に示す。

$$S^* = \ln(12.32) + 97.92 \times \boxed{} = \boxed{}$$

$$T^* = \ln(0.398) + 0.0170 \times 302 = 4.2127$$

$$O^* = \ln(53.5) = 3.9797$$

- 以下の係数倍法による算出式に各パラメータを代入して、環境効果補正係数を求めた。

(炭素鋼・低合金鋼およびこれらの溶接部) (BWR プラント環境)

$$\begin{aligned} F_{en, sc} &= \exp(0.08205 \times S^* \times T^* \times O^*) \quad (D_0 > 0.7 \text{ ppm}) \\ &= \exp(0.08205 \times \boxed{} \times 4.2127 \times 3.9797) \\ &= \boxed{} \end{aligned}$$

- 環境を考慮した疲れ累積係数を以下の式により算出した。

$$U_{en} = U \times F_{en, sc}$$

$$= 0.326$$

代表機器以外の疲れ累積係数の算出根拠について

(1) ポンプおよび配管の疲労評価

①設計・建設規格に基づく評価

ポンプおよび配管の疲労評価は、設計・建設規格 クラス 1 配管に基づき実施しており、評価対象部位の疲れ累積係数の算出根拠（a. 過渡回数, b. 解析モデル, c. 材料物性値, d. 最大評価点, e. 疲労評価結果）は以下のとおりである。

a. 過渡回数

原子炉再循環ポンプ, 原子炉再循環系配管, 主蒸気系配管および給水系配管の疲労評価に用いた 60 年目の推定過渡回数を表 1 から表 3 に示す。

表 1 原子炉再循環ポンプ, 原子炉再循環系配管に用いた過渡回数

運転条件	運転実績に基づく過渡回数 (2015 年 7 月末時点)	60 年目の推定 過渡回数
ボルト締付	20	45
耐圧試験	24	55
起動 (昇温, タービン起動)	36	74
夜間低出力運転 (75%出力)	40	81
週末低出力運転 (50%出力)	34	84
制御棒パターンの変更	58	143
スクラム (タービントリップ)	1	1
スクラム (その他スクラム)	4	7
停止 (タービン停止, 高温待機, 冷却, 容器満水, 満水後冷却)	36	74
ボルト取り外し	21	46

表 2 主蒸気系配管に用いた過渡回数

運転条件	運転実績に基づく過渡回数 (2015年7月末時点)	60年目の推定 過渡回数
ボルト締付	20	45
耐圧試験	24	55
起動（昇温，タービン起動）	36	74
夜間低出力運転（75%出力）	40	81
週末低出力運転（50%出力）	34	84
制御棒 ^α ターン変更	58	143
スクラム（タービントリップ）	1	1
スクラム（その他スクラム）	4	7
停止（タービン停止，高温待機，冷却，容器満水，満水後冷却）	36	74
ボルト取り外し	21	46

表 3 給水系配管に用いた過渡回数

運転条件	運転実績に基づく過渡回数 (2015年7月末時点)	60年目の推定 過渡回数
ボルト締付	20	45
耐圧試験	24	55
起動（昇温，タービン起動）	36	74
夜間低出力運転（75%出力）	40	81
週末低出力運転（50%出力）	34	84
制御棒 ^α ターン変更	58	143
スクラム（タービントリップ）	1	1
スクラム（その他スクラム）	4	7
停止（タービン停止，高温待機，冷却，容器満水，満水後冷却）	36	74
ボルト取り外し	21	46

b. 解析モデル

疲労評価に用いた解析モデルおよび評価点を図 1 から図 3 に示す。なお、解析コードは HISAP を使用した。

- ・ 原子炉再循環ポンプおよび原子炉再循環系配管の解析モデルを図 1 に示す。
- ・ 主蒸気系配管の解析モデルを図 2 に示す。
- ・ 給水系配管の解析モデルを図 3 に示す。

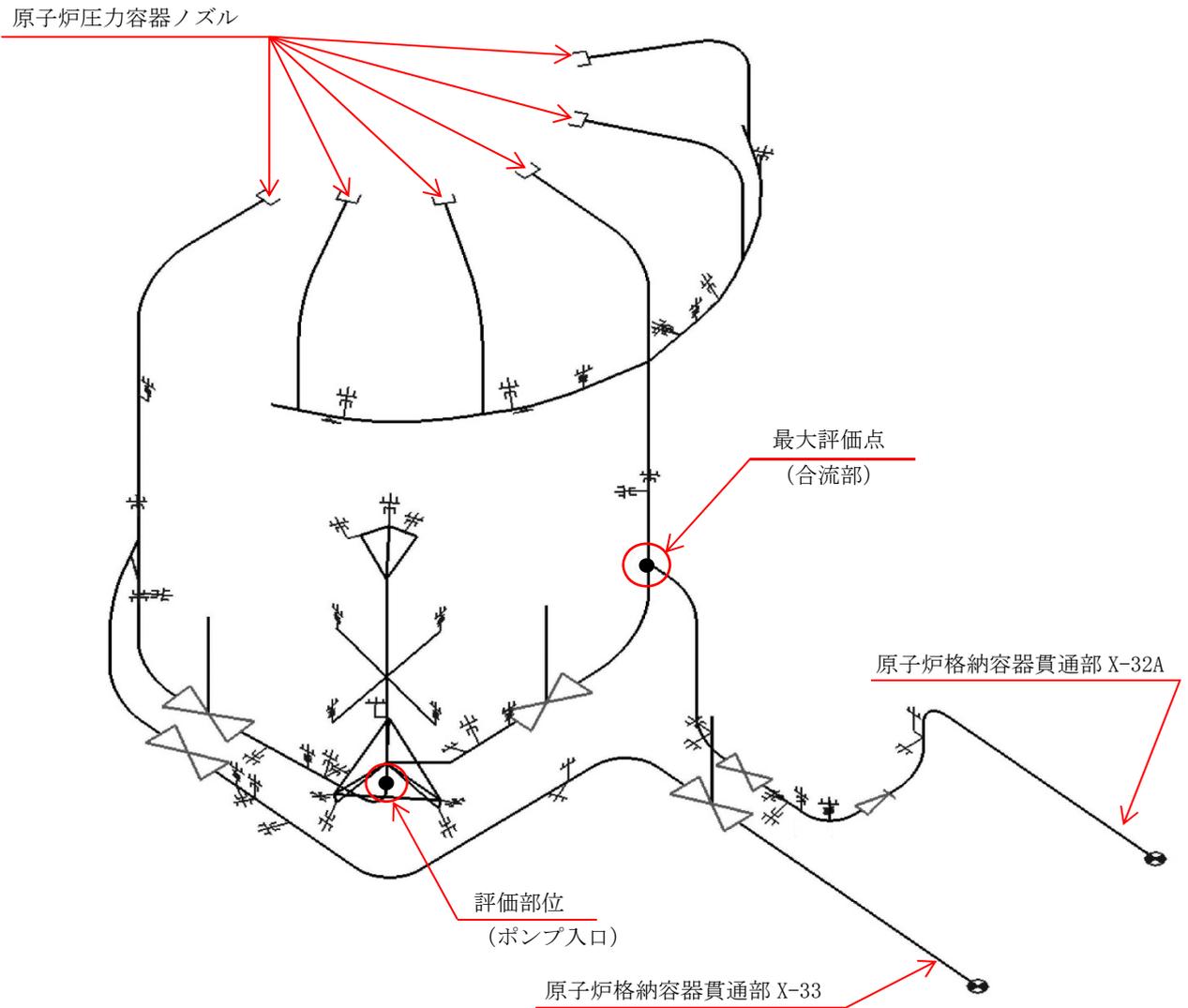


図 1 原子炉再循環ポンプおよび原子炉再循環系配管 解析モデル評価点

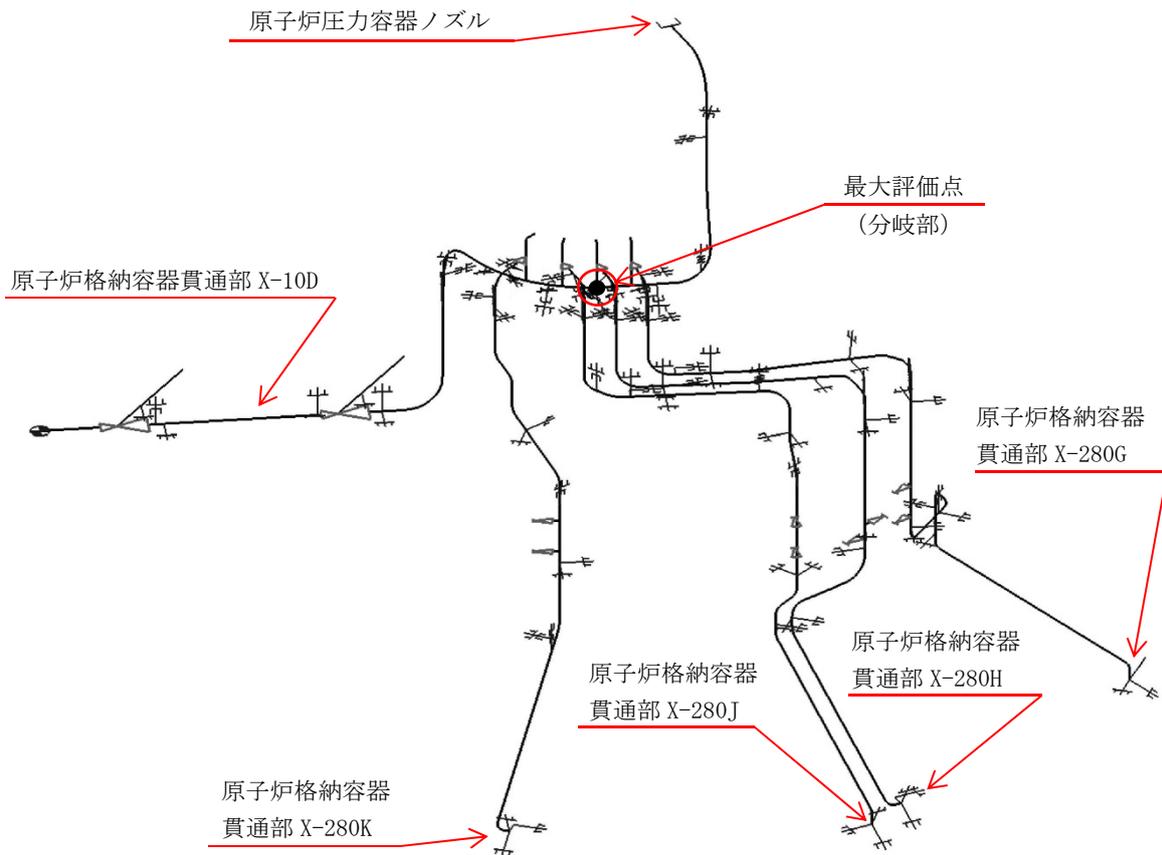


図2 主蒸気系配管 解析モデル評価点

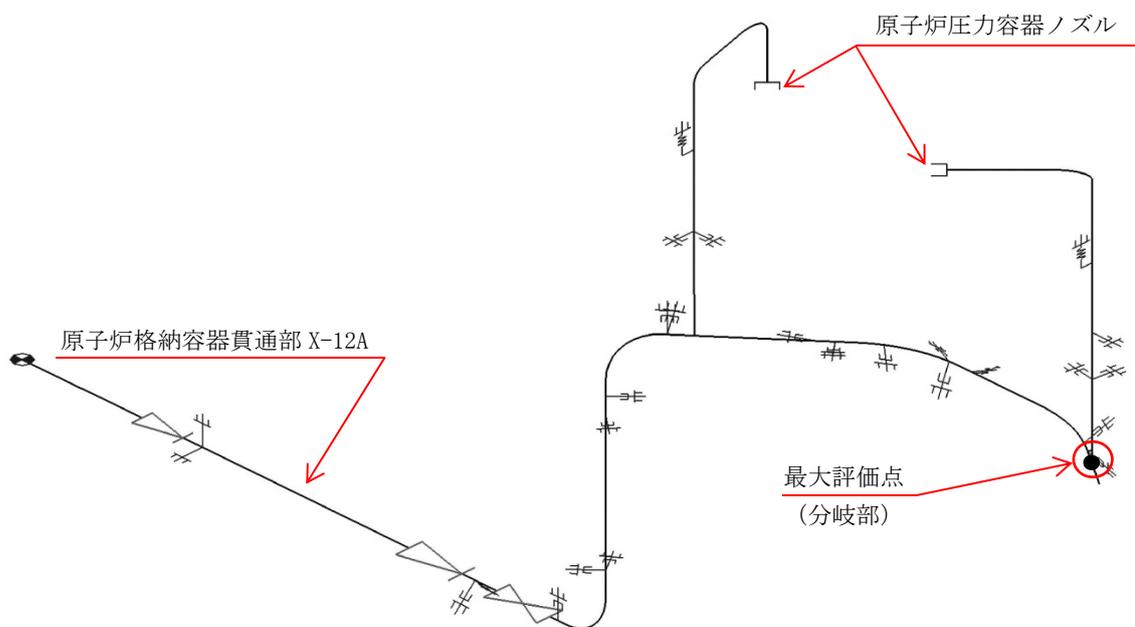


図3 給水系配管 解析モデル評価点

c. 材料物性値

評価に使用した熱膨張係数（最大評価点の数値）を以下に示す。

- ・原子炉再循環ポンプ：16.54×10⁻⁶ mm/mm°C （SUS316TP）
- ・原子炉再循環系配管：16.54×10⁻⁶ mm/mm°C （SUSF316）
- ・主蒸気系配管：12.92×10⁻⁶ mm/mm°C （STS49）
- ・給水系配管：12.24×10⁻⁶ mm/mm°C （SFVC2B）

d. 最大評価点

各配管の評価結果を表4から表6に示す。なお、原子炉再循環ポンプ（ケーシング入口ノズル配管との溶接部）は1箇所のみであるため、最大評価点の選定は不要である。

表4 原子炉再循環系配管の評価結果

評価点	疲労評価結果	評価点	疲労評価結果	評価点	疲労評価結果			
1N	U	0.0000	100	U	0.0001	163N	U	0.0001
2	U	0.0000	101	U	0.0000	170	U	0.0001
3	U	0.0000	102	U	0.0001	171	U	0.0000
4	U	0.0000	103	U	0.0000	172	U	0.0000
5	U	0.0000	1031	U	0.0000	173N	U	0.0001
5001	U	0.0000	104	U	0.0000	201	U	0.0002
6	U	0.0000	105	U	0.0000	202	U	0.0001
7	U	0.0000	106	U	0.0023	203	U	0.0002
8	U	0.0000	107	U	0.0000	204	U	0.0002
9	U	0.0018	108	U	0.0001	205	U	0.0001
10	U	0.0000	109	U	0.0000	206	U	0.0002
1001	U	0.0000	110	U	0.0000	207	U	0.0003
11	U	0.0000	111	U	0.0000	208	U	0.0002
12	U	0.0000	1111	U	0.0000	209	U	0.0016
13	U	0.0000	112	U	0.0000	210	U	0.0003
14	U	0.0000	113	U	0.0000	211	U	0.0004
18	U	0.0000	114	U	0.0021	212	U	0.0016
19	U	0.0000	115	U	0.0000	213	U	0.0014
20	U	0.0000	116	U	0.0001	214	U	0.0007
21	U	0.0000	120	U	0.0001	215	U	0.0005
22	U	0.0000	1201	U	0.0001	216	U	0.0005
23	U	0.0000	121	U	0.0000	217	U	0.0005
24	U	0.0000	122	U	0.0001	218	U	0.0006
25	U	0.0000	123	U	0.0001	219	U	0.0004
26	U	0.0003	124	U	0.0001	220	U	0.0008
47	U	0.0000	125	U	0.0000	221	U	0.0011
48	U	0.0000	126	U	0.0034	222	U	0.0005
49	U	0.0000	127	U	0.0000	301	U	0.0004
50	U	0.0000	128	U	0.0001	302	U	0.0003
51	U	0.0000	129	U	0.0000	303	U	0.0001
55	U	0.0000	130	U	0.0000	304	U	0.0001
56	U	0.0000	131	U	0.0000	305	U	0.0001
57	U	0.0000	132	U	0.0001	306	U	0.0002
58	U	0.0000	133	U	0.0000	307	U	0.0001
59	U	0.0000	134	U	0.0037	308	U	0.0015
60	U	0.0000	135	U	0.0000	309	U	0.0002
61	U	0.0037	136	U	0.0001	310	U	0.0003
62	U	0.0000	140	U	0.0000	3101	U	0.0003
63	U	0.0000	141	U	0.0000	311	U	0.0003
64	U	0.0001	142	U	0.0000	3111	U	0.0004
65	U	0.0001	143N	U	0.0001	312	U	0.0019
66	U	0.0001	150	U	0.0000	313	U	0.0012
67	U	0.0015	151	U	0.0000	314	U	0.0002
68	U	0.0000	152	U	0.0000	315	U	0.0000
69	U	0.0000	153N	U	0.0000	316	U	0.0002
70	U	0.0000	160	U	0.0001	317	U	0.0007
71N	U	0.0000	161	U	0.0000	318	U	0.0013
67	U	0.0025	162	U	0.0000	319	U	0.0018

 : 最大評価点を示す。

表 5 主蒸気系配管の評価結果

評価点	疲労評価結果		評価点	疲労評価結果	
1N	U	0.0007	4101	U	0.0000
2	U	0.0006	42	U	0.0000
3	U	0.0003	4200	U	0.0000
3001	U	0.0000	43	U	0.0001
4	U	0.0000	100	U	0.0000
5	U	0.0000	101	U	0.0000
6	U	0.0000	200	U	0.0000
7	U	0.0000	201	U	0.0000
8	U	0.0000	300	U	0.0000
9	U	0.0000	301	U	0.0000
10	U	0.0000	400	U	0.0000
11	U	0.0004	401	U	0.0000
12	U	0.0006			
13	U	0.0007			
1301	U	0.0000			
14	U	0.0000			
1501	U	0.0000			
15	U	0.0000			
16	U	0.0000			
17	U	0.0099			
18	U	0.0000			
19	U	0.0000			
20	U	0.0103			
21	U	0.0000			
22	U	0.0000			
23	U	0.0000			
24	U	0.0072			
25	U	0.0000			
26	U	0.0000			
27	U	0.0000			
28	U	0.0065			
29	U	0.0000			
30	U	0.0000			
31	U	0.0000			
32	U	0.0000			
33	U	0.0000			
34	U	0.0009			
35	U	0.0006			
3501	U	0.0000			
36	U	0.0000			
37	U	0.0000			
38	U	0.0000			
3801	U	0.0000			
3802	U	0.0000			
39	U	0.0000			
3901	U	0.0000			
40	U	0.0006			
41	U	0.0008			

: 最大評価点を示す。

表 6 給水系配管の評価結果

評価点	疲労評価結果		評価点	疲労評価結果	
10	U	0.0015	3802	U	0.0002
11	U	0.0002	3803	U	0.0002
12	U	0.0005	39	U	0.0002
13	U	0.0006	3901	U	0.0002
1301	U	0.0003	40	U	0.0005
14	U	0.0027	41	U	0.0005
1401	U	0.0029	4101	U	0.0002
15	U	0.0029	42	U	0.0003
16	U	0.0003	4200	U	0.0002
1601	U	0.0003	4201	U	0.0002
17	U	0.0005	43	U	0.0067
1701	U	0.0003	44	U	0.0059
1702	U	0.0002	4400	U	0.0039
1703	U	0.0002	4401	U	0.0040
18	U	0.0006	45N	U	0.0078
1801	U	0.0007	46	U	0.0006
19	U	0.0006	4601	U	0.0003
20	U	0.0003	4602	U	0.0003
2101	U	0.0003	47	U	0.0002
21	U	0.0008	4701	U	0.0002
22	U	0.0256	4702	U	0.0002
23	U	0.0008	48	U	0.0002
24	U	0.0004	4801	U	0.0002
2401	U	0.0003	49	U	0.0005
2402	U	0.0003	50	U	0.0005
2403	U	0.0003	5011	U	0.0002
25	U	0.0004	51	U	0.0003
2501	U	0.0004	5101	U	0.0002
2502	U	0.0004	5102	U	0.0002
2503	U	0.0003	52	U	0.0065
26	U	0.0003	53	U	0.0086
27	U	0.0003	5300	U	0.0050
28	U	0.0002	5301	U	0.0050
2801	U	0.0002	54N	U	0.0113
29	U	0.0003			
30	U	0.0005			
31	U	0.0005			
3101	U	0.0003			
3102	U	0.0003			
32	U	0.0009			
33	U	0.0290			
34	U	0.0007			
35	U	0.0003			
36	U	0.0004			
3601	U	0.0003			
37	U	0.0003			
38	U	0.0003			
3801	U	0.0002			

 : 最大評価点を示す。

e. 疲労評価結果

最大評価点における各配管の疲労評価結果を表 7 から表 10 に示す。

表 7 原子炉再循環ポンプ（ケーシング入口ノズル配管との溶接部）の疲労評価結果

No.	事象毎の組合せ				ピーク応力 Sp MPa	一次+二次 応力 Sn MPa	Ke係数 Ke —	繰返し ピーク応力 (ヤング率補正前) Sl MPa	最高使用温度 における ヤング率 E MPa	繰返し ピーク応力 (ヤング率補正後) Sl' MPa	繰返し回数		疲れ累積係数 U 大気中
	名称	番号		運転温度(°C)							ni	Ni	
		始点	終点	始点	終点	実回数	許容回数						
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
											疲れ累積係数総合計	0.0003	

表 8 原子炉再循環系配管の疲労評価結果

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	番号		運転温度(°C)		Sp	Sn	Ke	S ₀	E	S ₀ '	ni	Ni	U
		始点	終点	始点	終点	MPa	MPa	—	MPa	MPa	MPa	実回数	許容回数	大気中
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														
											疲れ累積係数総合計	0.0037		

表 9 主蒸気系配管の疲労評価結果

No.	事象毎の組合せ				ピーク応力	一次十二次 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	番号		運転温度(°C)		Sp	Sn	Ke	S _l	E	S _l '	ni	Ni	U
		始点	終点	始点	終点	MPa	MPa	—	MPa	MPa	MPa	実回数	許容回数	大気中
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														
13														
											疲れ累積係数総合計	0.0103		

表 10 給水系配管の疲労評価結果

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	番号		運転温度(°C)		Sp	Sn	Ke	S ₀	E	S ₀ '	ni	Ni	U
		始点	終点	始点	終点	MPa	MPa	-	MPa	MPa	MPa	実回数	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														
											疲れ累積係数総合計	0.0290		

②環境疲労評価手法に基づく評価

環境を考慮した疲れ累積係数の算出根拠は以下のとおりである。なお、疲れ累積係数は小数点以下5桁目を切り上げて表記しているが、計算過程では端数処理を行わず算出した。

<記号の説明>

U : 疲れ累積係数

U_{en} : 環境を考慮した疲れ累積係数

F_{en, sc} : 係数倍法による環境効果補正係数

a. 原子炉再循環ポンプおよび原子炉再循環系配管の評価結果

原子炉再循環ポンプ（ケーシング入口ノズル配管との溶接部）の評価結果を表11に、原子炉再循環系配管の評価結果を表12に示す。

表 11 原子炉再循環ポンプ（ケーシング入口ノズル配管との溶接部）の評価結果

NO	事 象				繰り返し回数		疲れ累積係数		環境効果を表す係数			
	名 称	番 号		運転温度(°C)		実回数	許容回数	大気中	環境中	評価条件		Fen,sc
		始点	終点	始点	終点					解析温度 (°C)	温度依存 パラメータ T*	
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
疲れ累積係数総合計					0.0003	0.0036	Fen,sc = exp(11.119 × T*)式: (EF-11)					

表 12 原子炉再循環系配管の評価結果

NO	事 象				繰り返し回数		疲れ累積係数		環境効果を表す係数			
	名 称	番 号		運 転 温 度 (°C)		突回数	許容回数	大 気 中	環 境 中	評 価 条 件		F _{envc}
		始 点	終 点	始 点	終 点					解 析 温 度 (°C)	温 度 依 存 パ ラ メ ー タ T*	
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
疲れ累積係数総合計							0.0037	0.0648				

原子炉再循環ポンプ（ケーシング入口ノズル配管との溶接部）および原子炉再循環系配管の環境疲労評価は、以下のプロセスにより算出した。

- ・環境効果を考慮した疲労評価（環境疲労評価）は、環境を考慮しない疲れ累積係数に、各運転条件での環境効果補正係数の最大値を乗じて、その合計値を算出した。

$$U_{en} = U \times F_{en, sc}$$

- ・環境条件

解析温度（℃）：T＝運転条件により変化（事象毎で最大となる温度を用いる。）

- ・以下の係数倍法による算出式に解析温度を代入して、各運転条件での環境効果補正係数を求めた。（オーステナイト系ステンレス鋼およびこれらの溶接部）（BWR プラント環境）

$$F_{en, sc} = \exp(11.119 \times T^*)$$

$$T^* = 0.000969 \times T$$

- ・環境を考慮した疲れ累積係数は、以下の式により算出した。

【原子炉再循環ポンプ（ケーシング入口ノズル配管との溶接部）】

$$\begin{aligned} U_{en} &= U \times F_{en, sc} = \sum_{i=1}^n U_i \times F_{en, sc, i} \\ &= 0.0036 \end{aligned}$$

【原子炉再循環系配管】

$$\begin{aligned} U_{en} &= U \times F_{en, sc} = \sum_{i=1}^n U_i \times F_{en, sc, i} \\ &= 0.0648 \end{aligned}$$

b. 給水系配管の評価結果

給水系配管の評価結果を表 13 に示す。

表 13 給水系配管の評価結果

NO	事 象				繰り返し回数		疲れ累積係数		環境効果を表す係数							
	名称	番 号		運転温度(°C)		回数	許容回数	大気中	環境中	解析温度		溶存酸素濃度		硫黄成分		Fe _{2O₃}
		始点	終点	始点	終点					解析温度(°C)	係数 T*	濃度 (ppm)	係数 O*	含有量 (重量%)	係数 S*	
1																
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																
13																
14																
15																
16																
17																
18																
19																
20																
21																
22																
疲れ累積係数総合計								0.0290	0.1378							

給水系配管の環境疲労評価は、以下のプロセスにより算出した。

- ・環境効果を考慮した疲労評価（環境疲労評価）は、環境を考慮しない疲れ累積係数に、各運転条件での環境効果補正係数の最大値を乗じて、その合計値を算出した。

$$U_{en} = U \times F_{en, sc}$$

- ・環境条件

硫黄含有量 (%) $S = \boxed{\quad}$ (ミルシート)

解析温度 (°C) $T =$ 運転条件により変化 (事象毎で最大となる温度)

溶存酸素濃度 (ppm) $O =$ 運転条件により変化^{※1} (事象毎で最大となる溶存酸素濃度)

※1：別紙4に基づき設定。

- ・以下の係数倍法による算出式に各パラメータを代入して、各運転条件での環境効果補正係数を求めた。(炭素鋼・低合金鋼およびこれらの溶接部) (BWR プラント環境)

$$F_{en, sc} = \exp(0.07066 \times S^* \times T^* \times O^*) \quad (DO \leq 0.7 \text{ ppm})$$

$$F_{en, sc} = \exp(0.08205 \times S^* \times T^* \times O^*) \quad (DO > 0.7 \text{ ppm})$$

$$S^* = \ln(12.32) + 97.92 \times S$$

$$T^* = 0.0358 \times T \quad (T < 50^\circ\text{C})$$

$$T^* = \ln(6) \quad (50^\circ\text{C} \leq T \leq 160^\circ\text{C})$$

$$T^* = \ln(0.398) + 0.0170 \times T \quad (T > 160^\circ\text{C})$$

$$O^* = \ln(3.28) \quad (DO < 0.02 \text{ ppm})$$

$$O^* = \ln(70.79) + 0.7853 \times \ln(DO) \quad (0.02 \leq DO \leq 0.7 \text{ ppm})$$

$$O^* = \ln(53.5) \quad (DO > 0.7 \text{ ppm})$$

- ・環境効果を考慮した疲れ累積係数を以下の式により求めた。

$$U_{en} = U \times F_{en, sc} = \sum_{i=1}^n U_i \times F_{en, sc, i} \\ = 0.1378$$

(2) 弁の疲労評価

① 設計・建設規格に基づく評価

弁の疲労評価に係る各評価対象部位の疲れ累積係数の算出根拠（a. 過渡回数，b. 評価対象部位，c. 弁箱の仕様，d. 応力分類，e. 疲労評価結果）については，設計・建設規格 クラス 1 弁に基づき実施しており，以下のとおりである。

a. 過渡回数

疲労評価に用いた過渡回数を表 14 から表 17 に示す。

表 14 原子炉再循環ポンプ出口弁に用いた過渡回数

運転条件	運転実績に基づく過渡回数 (2015 年 7 月末時点)	60 年目の推定 過渡回数
ボルト締付	20	45
耐圧試験	24	55
起動（昇温，タービン起動）	36	74
夜間低出力運転（75%出力）	40	81
週末低出力運転（50%出力）	34	84
制御棒パターン変更	58	143
スクラム（タービントリップ）	1	1
スクラム（その他スクラム）	4	7
停止（タービン停止，高温待機，冷却，容器満水，満水後冷却）	36	74
ボルト取り外し	21	46

表 15 残留熱除去ポンプ炉水戻り弁に用いた過渡回数

運転条件	運転実績に基づく過渡回数 (2015 年 7 月末時点)	60 年目の推定 過渡回数
ボルト締付	20	45
耐圧試験	24	55
起動（昇温，タービン起動）	36	74
夜間低出力運転（75%出力）	40	81
週末低出力運転（50%出力）	34	84
制御棒パターン変更	58	143
スクラム（タービントリップ）	1	1
スクラム（その他スクラム）	4	7
停止（タービン停止，高温待機，冷却，容器満水，満水後冷却）	36	74
ボルト取り外し	21	46

表 16 原子炉給水内側隔離逆止弁に用いた過渡回数

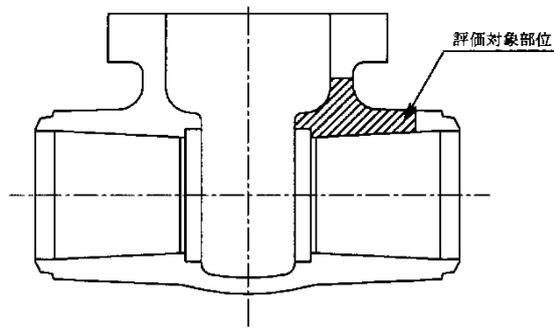
運転条件	運転実績に基づく過渡回数 (2015年7月末時点)	60年目の推定 過渡回数
ホルム締付	20	45
耐圧試験	24	55
起動（昇温，タービン起動）	36	74
夜間低出力運転（75%出力）	40	81
週末低出力運転（50%出力）	34	84
制御棒パターン変更	58	143
スクラム（タービントリップ）	1	1
スクラム（その他スクラム）	4	7
停止（タービン停止，高温待機，冷却，容器満水，満水後冷却）	36	74
ホルム取り外し	21	46

表 17 主蒸気隔離弁に用いた過渡回数

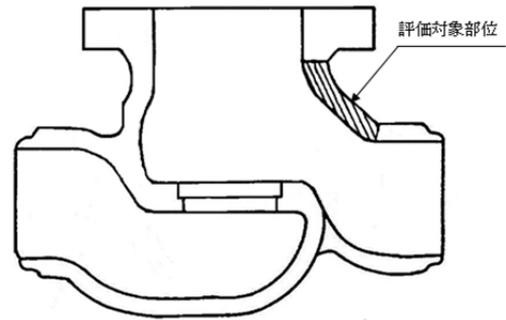
運転条件	運転実績に基づく過渡回数 (2015年7月末時点)	60年目の推定 過渡回数
ホルム締付	20	45
耐圧試験	24	55
起動（昇温，タービン起動）	36	74
夜間低出力運転（75%出力）	40	81
週末低出力運転（50%出力）	34	84
制御棒パターン変更	58	143
スクラム（タービントリップ）	1	1
スクラム（その他スクラム）	4	7
停止（タービン停止，高温待機，冷却，容器満水，満水後冷却）	36	74
ホルム取り外し	21	46

b. 評価対象部位

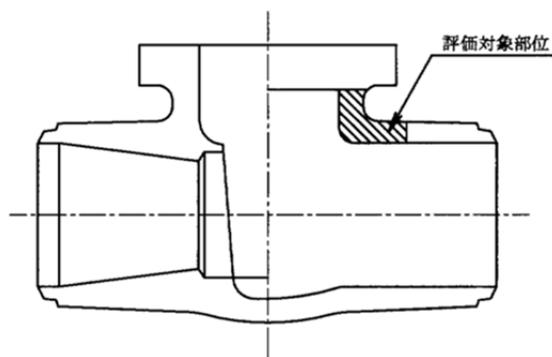
疲れ累積係数に用いた弁の評価対象部位を図4に示す。



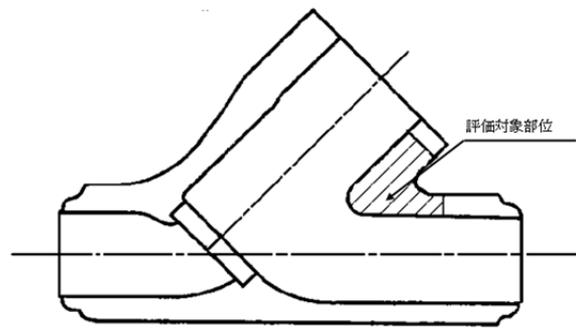
原子炉再循環ポンプ出口弁



残留熱除去ポンプ炉水戻り弁



原子炉給水内側隔離逆止弁



主蒸気隔離弁

図4 弁評価対象部位

c. 弁箱の仕様

疲労評価に使用した弁箱の仕様を表 18 に示す。

表 18 弁箱の仕様

		原子炉再循環 ポンプ出口弁	残留熱除去ポンプ 炉水戻り弁	原子炉給水内側 隔離逆止弁	主蒸気隔離弁
設計条件	単位				
最高使用圧力	MPa	10.40	10.40	8.62	8.62
最高使用温度	℃	302	302	302	302
接続管外径	mm	508.0	267.4	457.2	609.6
接続管内径	mm	447.0	216.6	409.6	547.8
内圧による一次応力[VVB-3320]					
Pr1	MPa				
Pr2	MPa				
d	mm				
Tb	mm				
Tr	mm				
Af	mm ²				
Am	mm ²				
r1	mm				
配管反力による弁箱の応力評価[VVB-3330]					
Z1	mm ³				
Z2	mm ³				
Zp	mm ³				
弁箱の一次+二次応力評価[VVB-3340]					
te	mm				
Te1	mm				
Te2	mm				
ri	mm				
θ	°				
$\alpha \times 10^{-6}$	mm/mm℃	16.95	12.69	12.69	12.69
E	MPa	178000	188000	188000	188000
△Pfm	MPa				
△Tfm	℃				

<記号の説明>

Pr1：設計・建設規格の別表 1-1 に規定する許容圧力の欄のうち、最高使用圧力より低く、かつ、最も近い呼び圧力の項の許容圧力

Pr2：設計・建設規格の別表 1-1 に規定する許容圧力の欄のうち、最高使用圧力より高く、かつ、最も近い呼び圧力の項の許容圧力

d, Tb, Tr, r1：設計・建設規格の図 VVB-3320-1 に示す寸法

Af：設計・建設規格の図 VVB-3320-1 に示す流体部面積

Am：設計・建設規格の図 VVB-3320-1 に示す金属部面積

Z1：接続管の断面係数

Z2：設計・建設規格の図 VVB-3330-1 に示す AA 断面における断面係数

Z_p : 設計・建設規格の図 VVB-3330-1 に示す AA 断面における極断面係数
 t_e : 設計・建設規格の図 VVB-3330-1 に示す AA 断面における金属部の厚さ
 T_{e1}, T_{e2} : 設計・建設規格の図 VVB-3340-1 に示す直径
 r_i : 設計・建設規格の図 VVB-3330-1 に示す AA 断面における内半径
 θ : ネック部の中心線と流路の中心線との交角
 α : 設計・建設規格の付録材料図表 Part6 表 2 に規定する材料の熱膨張係数
 E : 設計・建設規格の付録材料図表 Part6 表 1 に規定する材料の縦弾性係数
 ΔP_{fm} : 圧力の段階的な変化の最大値と最小値の差 (起動時および停止時を除く)
 ΔT_{fm} : 流体温度の段階的な温度変化の最大値と最小値との差 (起動時および停止時を除く)

d. 応力分類

弁箱の疲労評価にて考慮する応力を表 19 に示す。

表 19 疲労評価にて考慮する応力

状態	考慮する応力
供用状態 A, B	配管応力, 圧力, 熱による応力

e. 疲労評価結果

各弁箱の疲労評価結果を表 20 から表 24 に示す。

<記号の説明>

ΔT_f : 流体温度変動の振幅

S_p : 一次+二次+ピーク応力の応力差範囲

S_0 : 繰返しピーク応力強さ

N_i : 実際の繰返し回数

N_{ri} : 許容繰返し回数

U : 疲れ累積係数

表 20 原子炉再循環ポンプ出口弁の疲労評価結果

【60 年目時点：起動・停止】

ΔT_f ($^{\circ}\text{C}$)	SP (N/mm^2)	S ℓ (N/mm^2)	Ni (回)	Nri	Ni/Nri

①疲れ累積係数 U : 0.0003

【60 年目時点：起動・停止以外】

ΔT_f ($^{\circ}\text{C}$)	SP (N/mm^2)	S ℓ (N/mm^2)	Ni (回)	Nri	Ni/Nri

②疲れ累積係数 U : 0.0008

原子炉再循環ポンプ出口弁の疲れ累積係数は、①+②で合計 0.0011 となる。

表 21 残留熱除去ポンプ炉水戻り弁の疲労評価結果

【60 年目時点：起動・停止】

ΔT_f ($^{\circ}\text{C}$)	SP (N/mm^2)	S ℓ (N/mm^2)	Ni (回)	Nri	Ni/Nri

①疲れ累積係数 U : 0.0036

【60 年目時点：起動・停止以外】

ΔT_f ($^{\circ}\text{C}$)	SP (N/mm^2)	S ℓ (N/mm^2)	Ni (回)	Nri	Ni/Nri

②疲れ累積係数 U : 0.0006

残留熱除去ポンプ炉水戻り弁の疲れ累積係数は、①+②で合計 0.0042

表 22 原子炉給水内側隔離逆止弁の疲労評価結果

【60 年目時点：起動・停止】

ΔT_f ($^{\circ}\text{C}$)	SP (N/mm^2)	S ℓ (N/mm^2)	Ni (回)	Nri	Ni/Nri

①疲れ累積係数 U : 0.0159

【60 年目時点：起動・停止以外】

ΔT_f ($^{\circ}\text{C}$)	SP (N/mm^2)	S ℓ (N/mm^2)	Ni (回)	Nri	Ni/Nri

②疲れ累積係数 U : 0.0127

原子炉給水内側隔離逆止弁の疲れ累積係数は、①+②で合計 0.0286

表 23 主蒸気隔離弁の疲労評価結果

【60 年目時点：起動・停止】

ΔT_f ($^{\circ}\text{C}$)	SP (N/mm^2)	S ℓ (N/mm^2)	Ni (回)	Nri	Ni/Nri

①疲れ累積係数 U : 0.0088

【60 年目時点：起動・停止以外】

ΔT_f ($^{\circ}\text{C}$)	SP (N/mm^2)	S ℓ (N/mm^2)	Ni (回)	Nri	Ni/Nri

②疲れ累積係数 U : 0.0032

主蒸気隔離弁の疲れ累積係数は、①+②で合計 0.0120

②環境疲労評価手法に基づく評価

環境を考慮した疲れ累積係数の算出根拠は以下のとおりである。なお、疲れ累積係数は小数点以下5桁目を切り上げて表記しているが、計算過程では8桁目を四捨五入算出した。

<記号の説明>

U : 疲れ累積係数

U_{en} : 環境を考慮した疲れ累積係数

F_{en, sc} : 係数倍法による環境効果補正係数

a. 原子炉再循環ポンプ出口弁の評価結果

原子炉再循環ポンプ出口弁の環境疲労評価は以下のプロセスにより算出した。

・環境効果を考慮した疲労評価（環境疲労評価）は、環境を考慮しない疲れ累積係数に、各運転条件で算出した環境効果補正係数の最大値を乗じて算出した。

$$U_{en} = U \times F_{en, sc}$$

・環境条件

解析温度（℃）：T=289（起動（昇温）時の最高温度）

・以下の係数倍法による算出式に解析温度を代入して、環境効果補正係数を求めた。

（オーステナイト系ステンレス鋼およびこれらの溶接部）（BWRプラント環境）

$$F_{en, sc} = \exp(11.119 \times T^*)$$

$$T^* = 0.000969 \times T = 0.000969 \times 289 = 0.280041$$

$$F_{en, sc} = \exp(11.119 \times 0.280041)$$

$$= 22.50586$$

・環境を考慮した疲れ累積係数は、以下の式により算出した。

$$U_{en} = U(\text{起動・停止}) \times F_{en, sc} + U(\text{起動・停止外}) \times F_{en, sc}$$

$$= 0.0249$$

b. 残留熱除去ポンプ炉水戻り弁の評価結果

残留熱除去ポンプ炉水戻り弁の環境疲労評価は以下のプロセスにより算出した。

- ・環境効果を考慮した疲労評価（環境疲労評価）は、環境を考慮しない疲れ累積係数に、各運転条件で算出した環境効果補正係数の最大値を乗じて算出した。

$$U_{en} = U \times F_{en, sc}$$

- ・環境条件（環境補正係数が最大となる緒元の組合わせ）

硫黄含有量 (%) : $S = \boxed{}$ (ミルシート)

解析温度 (°C) : $T = 55^\circ\text{C}$ (耐圧試験時の温度)

溶存酸素濃度 (ppm) : $D_0 > 0.7^{*1}$ (耐圧試験時の溶存酸素濃度)

※1 : 別紙 4 に基づき設定。

上記の環境条件により求めた環境パラメータを以下に示す。

$$S^* = \ln(12.32) + 97.92 \times \boxed{} = \boxed{}$$

$$T^* = \ln(6) = 1.791759 \quad (50 \leq T \leq 160^\circ\text{C})$$

$$O^* = \ln(53.5) = 3.979682 \quad (D_0 > 0.7\text{ppm})$$

- ・以下の係数倍法による算出式に各パラメータを代入して、各運転条件での環境効果補正係数を求めた。(炭素鋼・低合金鋼およびこれらの溶接部) (BWR プラント環境)

$$\begin{aligned} F_{en, sc} &= \exp(0.08205 \times S^* \times T^* \times O^*) \quad (D_0 > 0.7\text{ppm}) \\ &= \exp(0.08205 \times \boxed{} \times 1.791759 \times 3.979682) \\ &= \boxed{} \end{aligned}$$

- ・環境を考慮した疲れ累積係数は、以下の式により算出した。

$$\begin{aligned} U_{en} &= U(\text{起動・停止}) \times F_{en, sc} + U(\text{起動・停止外}) \times F_{en, sc} \\ &= 0.0290 \end{aligned}$$

c. 原子炉給水内側隔離逆止弁の評価結果

原子炉給水内側隔離逆止弁の環境疲労評価は以下のプロセスにより算出した。

- ・環境効果を考慮した疲労評価（環境疲労評価）は、環境を考慮しない疲れ累積係数に、各運転条件で算出した環境効果補正係数の最大値を乗じて算出した。

$$U_{en} = U \times F_{en, sc}$$

- ・環境条件（環境補正係数が最大となる緒元の組合わせ）

硫黄含有量 (%) : $S = \boxed{\quad}$ (ミルシート)

解析温度 (°C) : $T = 276^\circ\text{C}$ (スクラム (原子炉給水ポンプ停止) 時の温度)

溶存酸素濃度 (ppm) : $O = 0.08^{*1}$ (スクラム (原子炉給水ポンプ停止) 時の溶存酸素濃度)

※1 : 別紙 4 に基づき設定。

上記の環境条件により求めた環境パラメータを以下に示す。

$$S^* = \ln(12.32) + 97.92 \times \boxed{\quad} = \boxed{\quad}$$

$$T^* = \ln(0.398) + 0.0170 \times 276 = 3.770697 \quad (T > 160^\circ\text{C})$$

$$O^* = \ln(70.79) + 0.7853 \times \ln(0.08) = 2.276263 \quad (0.02 \leq DO \leq 0.7 \text{ ppm})$$

- ・以下の係数倍法による算出式に各パラメータを代入して、各運転条件での環境効果補正係数を求めた。(炭素鋼・低合金鋼およびこれらの溶接部) (BWR プラント環境)

$$\begin{aligned} F_{en, sc} &= \exp(0.07066 \times S^* \times T^* \times O^*) \quad (DO \leq 0.7 \text{ ppm}) \\ &= \exp(0.07066 \times \boxed{\quad} \times 3.770697 \times 2.276263) \\ &= \boxed{\quad} \end{aligned}$$

- ・環境を考慮した疲れ累積係数は、以下の式により算出した。

$$\begin{aligned} U_{en} &= U(\text{起動・停止}) \times F_{en, sc} + U(\text{起動・停止外}) \times F_{en, sc} \\ &= 0.2522 \end{aligned}$$

(3) 炉内構造物の疲労評価

①設計・建設規格に基づく評価

炉内構造物の疲労評価に係る各評価対象部位の疲れ累積係数の算出根拠（a. 過渡回数，b. 解析コードおよび解析モデル，c. 材料物性値，許容応力および外荷重条件，d. 最大評価点，e. 疲労評価結果）については以下のとおりである。

a. 過渡回数

疲労評価に用いた過渡回数を表 24 に示す。

表24 炉心シュラウドおよびシュラウドサポート 評価用過渡条件

運転条件	運転実績に基づく過渡回数 (2015年7月末時点)	運転開始後60年目推定
耐圧試験	24	55
起動（昇温，タービン起動）	36	74
スクラム（タービントリップ）	1	1
スクラム（その他のスクラム）	4	7
停止（タービン停止，高温待機，冷却，容器満水，満水後冷却）	36	74

b. 解析コードおよび解析モデル

疲れ累積係数の算出に使用した解析コードについて表 25 に示す。

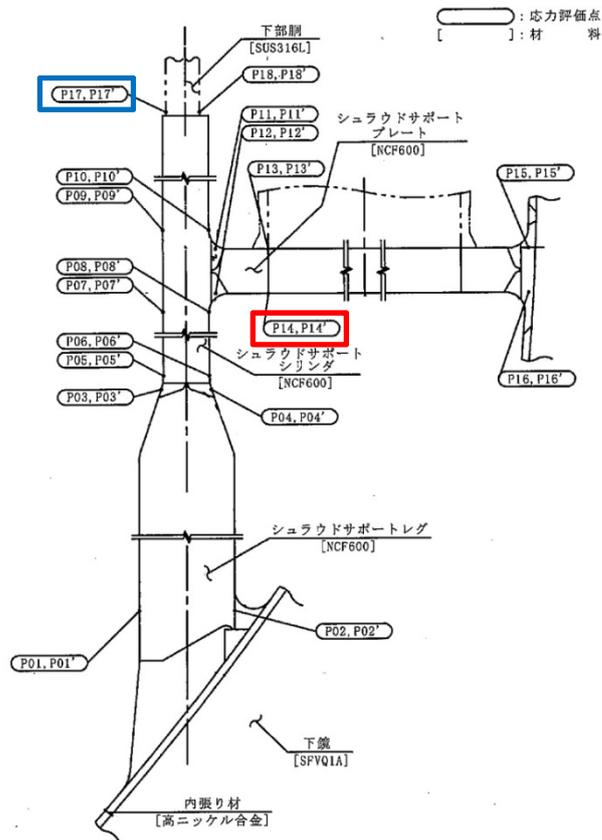
また、解析モデルおよび評価点を図 5 に示す。

表 25 炉心シュラウドおよびシュラウドサポートの解析コード

解析コード	TACF Ver. 0	温度分布解析用
		ASHSD2-B Ver. 0

【解析モデル】

【評価点】



□ : シュラウドサポートの最大評価点を示す。

□ : 炉心シュラウドの最大評価点を示す。

図 5 解析モデルおよび評価点

c. 材料物性値，許容応力および外荷重条件

- ・各炉心シュラウドおよびシュラウドサポートの材料物性値を表 26 に示す。
- ・炉心シュラウドおよびシュラウドサポートの許容応力強さを表 27 に示す。
- ・炉心シュラウドおよびシュラウドサポートの外荷重条件を表 28 に示す。

表 26 炉心シュラウドおよびシュラウドサポートの
繰返し荷重の評価に使用する材料の物性値

材料	$E \times 10^5$ (MPa)	$\alpha \times 10^{-6}$ (mm/(mm・°C))	S_m (MPa)	S (MPa)	$E_o \times 10^5$ (MPa)	q	Ao	Bo
NCF600						3.1	0.7	2.15
SUS316L						3.1	0.7	2.15

<記号の説明>

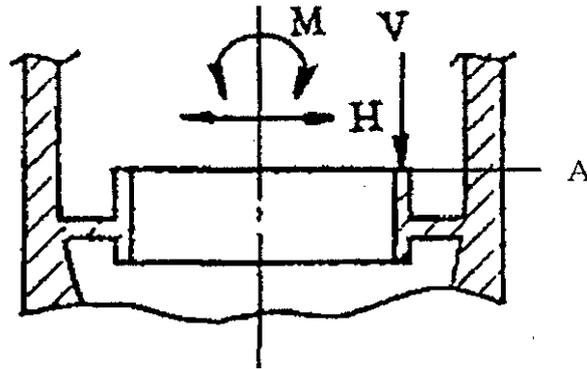
- E : 運転温度 (°C) に対する縦弾性係数
 α : 運転温度 (°C) に対する瞬時熱膨張係数
 S_m : 運転温度 (°C) に対する設計応力強さ
S : 設計・建設規格 図 添付 4-2-2 の曲線 C の 10^{11} 回に対する繰返しピーク応力強さ
 E_o : 設計・建設規格 添付 4-2 に記載された縦弾性係数
q, Ao, Bo : 設計・建設規格 表 PVB-3315-1 に示された簡易弾塑性解析に使用する係数

表 27 炉心シュラウドおよびシュラウドサポートの許容応力強さ

応力分類	一次+二次応力
供用状態	A, B
温度 (°C)	<input type="text"/>
許容応力	$3 \cdot S_m$
NCF600 (MPa)	492
SUS316L (MPa)	288

表 28 炉心シュラウドおよびシュラウドサポートの外荷重条件

荷重名称	鉛直力 (kN)	水平力 (kN)	モーメント (kN・m)
	V	H	M
設計機械的荷重			
死荷重			
ジェット反力			



d. 最大評価点

炉心シュラウドおよびシュラウドサポートの評価結果を表 29 に示す。

表 29 炉心シュラウドおよびシュラウドサポートの評価結果

分類		疲れ累積係数	
部位	評価点	U	許容値
シュラウド [*] サポート [*] NCF600	P01	0.0000	1
	P01'	0.0000	
	P02	0.0000	
	P02'	0.0000	
	P03	0.0000	
	P03'	0.0000	
	P04	0.0000	
	P04'	0.0000	
シュラウド [*] サポート [*] シリンダ [*] NCF600	P05	0.0000	1
	P05'	0.0000	
	P06	0.0000	
	P06'	0.0000	
	P07	0.0003	
	P07'	0.0003	
	P08	0.0001	
	P08'	0.0001	
	P09	0.0001	
	P09'	0.0001	
	P10	0.0000	
	P10'	0.0000	
シュラウド [*] サポート [*] プレート NCF600	P11	0.0001	1
	P11'	0.0001	
	P12	0.0001	
	P12'	0.0001	
	P13	0.0020	
	P13'	0.0020	
	P14	0.0083	
	P14'	0.0083	
	P15	0.0001	
	P15'	0.0001	
	P16	0.0001	
	P16'	0.0001	
下部胴 SUS316L	P17	0.0123	1
	P17'	0.0123	
	P18	0.0072	
	P18'	0.0072	

 : シュラウドサポートの最大評価点を示す。

 : 炉心シュラウドの最大評価点を示す。

e. 疲労評価結果

最大評価点における疲労評価結果を、表 30 から表 31 に示す。

<記号の説明>

- Sn : 供用状態 A, B における一次+二次応力の応力最大範囲
- Ke : 簡易弾塑性解析に用いる繰返しピーク応力強さの補正係数
- Sp : 一次+二次+ピーク応力の応力差範囲
- S σ : 繰返しピーク応力強さ
- S σ' : 補正繰返しピーク応力強さ
- Na : S σ' に対応する許容繰返し回数
- Nc : 実際の繰返し回数

表 30 シュラウドサポートの疲労評価結果

応力評価点 — P14

材料 — NCF600

No.	Sn (MPa)	Ke	Sp (MPa)	S σ (MPa)	S σ' (MPa)	Na	Nc	Nc/Na
疲れ累積係数 U= 0.0083								

表 31 炉心シュラウドの疲労評価結果

応力評価点 — P17

材料 — SUS316L

No.	Sn (MPa)	Ke	Sp (MPa)	S σ (MPa)	S σ' (MPa)	Na	Nc	Nc/Na
疲れ累積係数 U= 0.0123								

②環境疲労評価手法に基づく評価

環境を考慮した疲れ累積係数の算出根拠は以下のとおりである。なお、疲れ累積係数は小数点以下 5 桁目を切り上げて表記しているが、計算過程では端数処理を行わず算出した。

<記号の説明>

U : 疲れ累積係数

U_{en} : 環境を考慮した疲れ累積係数

F_{en, sc} : 係数倍法による環境効果補正係数

a. シュラウドサポートの評価結果

シュラウドサポートの環境疲労評価は以下のプロセスにより算出した。

- 環境効果を考慮した疲労評価（環境疲労評価）は環境を考慮しない疲れ累積係数に、対象部位での環境効果補正係数の最大値を乗じて算出した。

$$U_{en} = U \times F_{en, sc}$$

• 環境条件

解析温度 (°C) : T=302 (最高使用温度)

- 以下の係数倍法による算出式に解析温度を代入して、環境効果補正係数を求めた。

(ニッケルクロム鉄合金およびこれらの溶接部) (BWR プラント環境)

$$F_{en, sc} = \exp(10.015 \times T^*)$$

$$T^* = 0.000343 \times T$$

$$F_{en, sc} = \exp(10.015 \times 0.000343 \times 302) = 2.8219$$

- 環境を考慮した疲れ累積係数を以下の式により算出した。

$$U_{en} = U \times F_{en, sc}$$

$$= 0.0234$$

b. 炉心シュラウドの評価結果

炉心シュラウドの環境疲労評価は以下のプロセスにより算出した。

- 環境効果を考慮した疲労評価（環境疲労評価）は環境を考慮しない疲れ累積係数に，対象部位での環境効果補正係数の最大値を乗じて算出した。

$$U_{en} = U \times F_{en, sc}$$

- 環境条件

解析温度（℃）：T=302（最高使用温度）

- 以下の係数倍法による算出式に解析温度を代入して，環境効果補正係数を求めた。

（オーステナイト系ステンレス鋼およびこれらの溶接部）（BWR プラント環境）

$$F_{en, sc} = \exp(11.119 \times T^*)$$

$$T^* = 0.000969 \times T$$

$$\begin{aligned} F_{en, sc} &= \exp(11.119 \times 0.000969 \times 302) \\ &= 25.8896 \end{aligned}$$

- 環境を考慮した疲れ累積係数を以下の式により算出した。

$$U_{en} = U \times F_{en, sc}$$

$$= 0.3170$$

(4) 容器（原子炉格納容器）の疲労評価

①設計・建設規格に基づく評価

容器の疲労評価に係る疲労評価に係る疲れ累積係数の算出根拠（a. 過渡回数，b. 基本寸法および仕様，c. 許容繰返し回数，d. 疲労評価結果）については，設計・建設規格クラス MC 容器に基づき実施しており，疲れ累積係数の算出根拠は以下のとおりである。

a. 過渡回数

疲労評価に用いた過渡回数を表 32 から表 35 に示す。

表 32 ベント管ベローズの疲労評価に用いた過渡回数

運転条件	運転実績に基づく過渡回数 (2015年7月末時点)	60年目の推定 過渡回数
ボルト締付	20	45
耐圧試験	24	55
起動（昇温，タービン起動）	36	74
夜間出力運転（75%出力）	40	81
週末出力運転（50%出力）	34	84
制御棒パターン変更	58	143
スクラム（タービントリップ）	1	1
スクラム（その他スクラム）	4	7
停止（タービン停止，高温待機， 冷却，容器満水，満水後冷却）	36	74
ボルト取り外し	21	46

表 33 ベント管ベローズの過渡回数

項目 運転 状態	記号	運転実績に基づ く過渡回数(2015 年7月末時点)	60年目の推定 過渡回数	備考
通常状態	N ₁	240	520	表 32 に示すボルト締付およびボルト 取り外し以外の過渡回数の合計 値（一の位切り上げ）
設計状態	N ₂	30	50	設計状態相当の変位となる回数 を PCV 全体漏えい率試験の回数 と考え，表 32 に示すボルト取り外 しの過渡回数を用いる。（一の位 切り上げ）

表 34 機械ペネトレーション（配管貫通部 ベローズ式）の疲労評価に用いた過渡回数

運転条件	運転実績に基づく過渡回数 (2015年7月末時点)	60年目の推定 過渡回数
ボルト締付	20	45
耐圧試験	24	55
起動（昇温，タービン起動）	36	74
夜間低出力運転（75%出力）	40	81
週末低出力運転（50%出力）	34	84
制御棒パターン変更	58	143
スクラム（タービントリップ）	1	1
スクラム（その他スクラム）	4	7
停止（タービン停止，高温待機，冷却，容器満水，満水後冷却）	36	74
ボルト取り外し	21	46

表 35 機械ペネトレーション（配管貫通部 ベローズ式）の過渡回数

項目 運転 状態	記号	運転実績に基づ く過渡回数(2015 年7月末時点)	60年目の推定 過渡回数	備考
通常状態	N ₁	240	520	表 34 に示すボルト締付およびボルト取り外し以外の過渡回数の合計値（一の位切り上げ）
設計状態	N ₂	30	50	設計状態相当の変位となる回数を PCV 全体漏えい率試験の回数と考え，表 34 に示すボルト取り外しの過渡回数を用いる。（一の位切り上げ）

b. 基本寸法および仕様

疲れ累積係数の算出に用いたベント管ベローズおよび機械ペネトレーション（配管貫通部ベローズ式）の形状を図6、図7に、基本寸法を表36、表38に、仕様を表37、表39に示す。

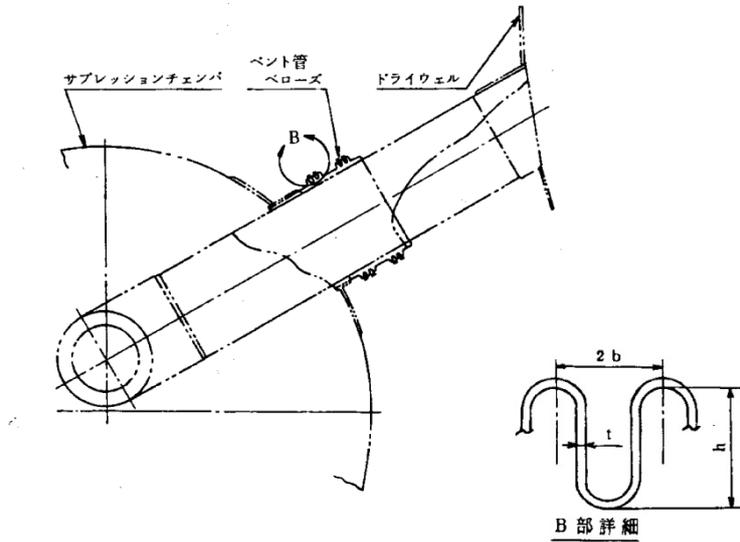


図6 ベント管ベローズの形状

表36 ベント管ベローズの基本寸法

部位	形状				
	b (mm)	h (mm)	t (mm)	n	c
ベント管ベローズ					

〈記号の説明〉

b: ベローズの波のピッチの2分の1

h: ベローズの波の高さ

t: ベローズの板厚

n: ベローズの波数の2倍の値

c: ベローズの層数

表37 ベント管ベローズの仕様

部位	材料	区分	最高使用温度 (°C)	最高使用圧力 (MPa)	縦弾性係数 (MPa)
ベント管ベローズ	SUS304	通常状態	57	0	192000
		設計状態	171	0.427	184000

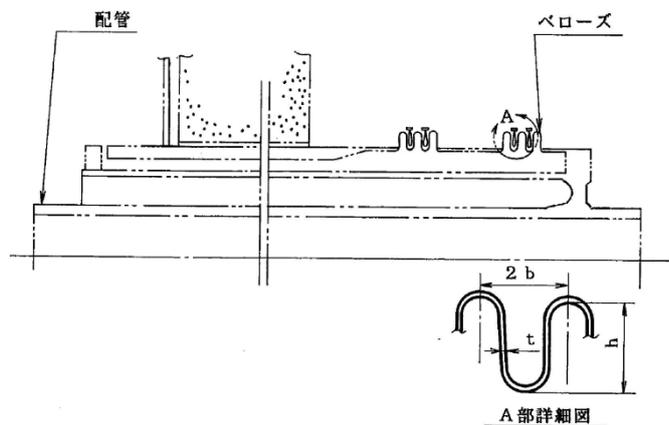


図7 機械ペネトレーション（配管貫通部 ベローズ式）の形状

表 38 機械ペネトレーション（配管貫通部 ベローズ式）の基本寸法

部位	形状				
	b (mm)	h (mm)	t (mm)	n	c
主蒸気系 配管貫通部 (X-10A~D)					
給水系 配管貫通部 (X-12A, B)					

〈記号の説明〉

b : ベローズの波のピッチの 2 分の 1

h : ベローズの波の高さ

t : ベローズの板厚

n : ベローズの波数の 2 倍の値

c : ベローズの層数

表 39 機械ペネトレーション（配管貫通部 ベローズ式）の仕様

部位	材料	区分	最高使用温度 (°C)	最高使用圧力 (MPa)	縦弾性係数 (MPa)
配管貫通部 (X-10A~D および X-12A, B)	SUS304	通常状態	57	0	192000
		設計状態	171	0.427	184000

(1) 通常状態

$$N_{SA} = \left(\frac{11031}{\sigma} \right)^{3.5} = \left(\frac{11031}{\boxed{}} \right)^{3.5} = \boxed{} \text{回} \quad (X-10A \sim D)$$

$$= \left(\frac{11031}{\sigma} \right)^{3.5} = \left(\frac{11031}{\boxed{}} \right)^{3.5} = \boxed{} \text{回} \quad (X-12A, B)$$

ここで、 σ は次の計算式により計算した値

$$\sigma = \frac{1.5 \cdot E \cdot t \cdot \delta_1 + P \cdot h}{n \cdot \sqrt{b \cdot h^3} + t \cdot c}$$

$$= \boxed{} + 0.0 \times \frac{\boxed{}}{\boxed{}} = \boxed{} \text{MPa} \quad (X-10A \sim D)$$

$$= \boxed{} + 0.0 \times \frac{\boxed{}}{\boxed{}} = \boxed{} \text{MPa} \quad (X-12A, B)$$

(2) 設計状態

$$N_{SB} = \left(\frac{11031}{\sigma} \right)^{3.5} = \left(\frac{11031}{\boxed{}} \right)^{3.5} = \boxed{} \text{回} \quad (X-10A \sim D)$$

$$= \left(\frac{11031}{\sigma} \right)^{3.5} = \left(\frac{11031}{\boxed{}} \right)^{3.5} = \boxed{} \text{回} \quad (X-12A, B)$$

ここで、 σ は次の計算式により計算した値

$$\sigma = \frac{1.5 \cdot E \cdot t \cdot \delta_2 + P \cdot h}{n \cdot \sqrt{b \cdot h^3} + t \cdot c}$$

$$= \boxed{} + 0.427 \times \frac{\boxed{}}{\boxed{}} = \boxed{} \text{MPa} \quad (X-10A \sim D)$$

$$= \boxed{} + 0.427 \times \frac{\boxed{}}{\boxed{}} = \boxed{} \text{MPa} \quad (X-12A, B)$$

表 41 機械ペネトレーション（配管貫通部 ベローズ式）の全伸縮量（mm）

貫通部番号	通常状態 δ_1	設計状態 δ_2	備考
X-10A~D			建設時工認の値
X-12A, B			

d. 疲労評価結果

ベント管ベローズおよび機械ペネトレーション（配管貫通部 ベローズ式）の疲労評価結果を表 42, 表 43 に示す。

表 42 ベント管ベローズの疲れ累積係数

評価条件	通常状態		設計状態		$\frac{N_1}{N_{SA}} + \frac{N_2}{N_{SB}}$
	N_{SA}	$\frac{N_1}{N_{SA}}$	N_{SB}	$\frac{N_2}{N_{SB}}$	
評価時点					0.02924
運開後 60 年 時点					0.04874

ベント管ベローズの疲れ累積係数 U : 0.0488 (小数点以下 5 桁目を切り上げ)

表 43 機械ペネトレーション（配管貫通部 ベローズ式）の疲れ累積係数

	貫通部番号	通常状態		設計状態		$\frac{N_1}{N_{SA}} + \frac{N_2}{N_{SB}}$
		N_{SA}	$\frac{N_1}{N_{SA}}$	N_{SB}	$\frac{N_2}{N_{SB}}$	
評価時点	X-10A, B, C, D					0.09089
	X-12A, B					0.06868
運開後 60 年 時点	X-10A, B, C, D					0.15783
	X-12A, B					0.11572

主蒸気系配管貫通部の疲れ累積係数 U : 0.1579 (小数点以下 5 桁目を切り上げ)

給水系配管貫通部の疲れ累積係数 U : 0.1158 (小数点以下 5 桁目を切り上げ)