

東海第二発電所 原子炉圧力容器に係わる疲労評価結果の誤り説明資料へのご質問回答

2021年8月4日に行った面談の後、頂いたご質問事項について以下のとおり回答致します。

【ご質問事項】

(P17) 累積疲労係数の話で、一次・二次の応力そのものがなぜ大きくなっているのか。単純な疲労評価の話とどのようにリンクするのか。

【回答】

- ① 評価点毎の疲労累積係数は、複数の評価断面（当該付け根部では5つ）を対象に評価し、最大値が確認された評価断面を選定して、当該評価点の数値として記載している。
- ② 40年目 PLM では、今回の誤りの見直しにより、誤りの影響を受ける過渡事象の組み合わせが適用される評価断面においては、繰返し数に変更となることで算出結果が変わった。
- ③ 算出結果が変わったことで、最大値自体には変更がなかったが、当該評価点を選定する評価断面の中で最大となる評価断面の位置は変わった。
- ④ 変更工認の各評価点で選定する評価断面は、40年目 PLM で選定した評価断面と整合を図っている。
- ⑤ 変更工認について、今回の誤りを見直した40年目 PLM で選定した評価断面で一次+二次応力差最大範囲の数値を求めた結果、当該評価点のみ、評価断面が変更になったことにより数値が変更となった。  
（疲労評価では一次+二次+ピーク応力を用いて評価するので、工認の一次+二次応力強さの評価で求めている一次+二次応力差最大範囲とは異ったもの）
- ⑥ 評価断面が管台側へ移動する結果となり、板厚が大きくなるとともに構造不連続部の影響により評価結果としては、内側（P11, P11'）が大きく、外側（P12, P12'）が小さくなる結果となった。

以上

【ご質問】

(P17) 累積疲労係数の話で、一次・二次の応力そのものがなぜ大きくなっているのか。単純な疲労評価の話とどのようにリンクするのか。(図1参照)。

(単位: MPa)			
分類	一次+二次応力差最大範囲 ( $P_L + P_b + Q$ )		
評価点	*1 $S_n^{\#1}$	*2 $S_n^{\#2}$	許容値 $3 \cdot S_m$
P11	191	191	552
P11'	191	191	552
P12	293	293	552
P12'	293	293	552

[ 修正前 ]

(単位: MPa)			
分類	一次+二次応力差最大範囲 ( $P_L + P_b + Q$ )		
評価点	*1 $S_n^{\#1}$	*2 $S_n^{\#2}$	許容値 $3 \cdot S_m$
P11	215	215	552
P11'	215	215	552
P12	254	254	552
P12'	254	254	552

[ 修正後 ]

図1 変更工認 原子炉压力容器 給水ノズルの一次+二次応力強さの評価のまとめ  
(数値影響箇所修正前後)

【回答】

補正工認 原子炉压力容器 給水ノズルの評価における各部位の応力評価点は、40年目 PLM 評価にて選定した位置を用いており、解析モデル上に設定した複数の評価断面の中で40年目 PLM の疲労評価が最も厳しくなる位置を選定しています。ノズルエンド付け根部（応力評価点 P11, P11', P12 及び P12' : 以下、当該部位）は、今回の40年目 PLM 評価を含む疲労評価の修正により解析モデル上の評価断面の位置が変更となったことから、地震荷重による一次+二次応力差最大範囲 ( $S_n^{\#1}$ ,  $S_n^{\#2}$ ) の算出結果を見直しております。

評価断面の位置の変更によって当該部位の板厚は大きくなりますが、以降の3項に示すように、構造不連続の影響により板厚増加による応力の低下が抑制され、応力差最大範囲（応力変動）の板厚内平均応力（膜応力）の低下と比較して、応力変動の曲げ応力の減少による板厚内の低応力側の応力増加の方が大きくなったため、当該部位の低応力側の応力評価点 P11 及び P11' は、地震荷重による一次+二次応力差最大範囲が増加しました。

なお、本見直しは、有限要素法 (FEM) により求めた応力を用いて疲労評価を行う計算ソフト EVAST (添付1参照) のプログラム誤りに伴うものであり、FEM 解析自体には問題ありません。

以下に詳細を示します。

## 1. 解析モデル上の応力評価点の選定位置

補正工認 原子炉圧力容器 給水ノズルの応力評価点は、運転状態Ⅰ及びⅡにおける疲労累積係数に40年目 PLM 評価の結果を用いることから、40年目 PLM 評価にて選定した位置を応力評価点としています。工認計算書に記載している応力評価点は P01～P18 の18点（9部位）ですが、解析モデルでは、部位毎に複数の評価断面を設定し、その中で40年目 PLM の疲労評価が最も厳しくなる位置を各部位の応力評価点として選定しています。

給水ノズルの当該部位は、ノズルエンドの付け根に該当しますが、解析モデルではノズルエンド付け根近傍に5つの評価断面を設定しており、その中で最も疲労評価が厳しくなる位置を応力評価点として選定します（図2参照）。

## 2. 疲労評価の修正に伴う応力評価点位置の変更

給水ノズルの修正前の疲労評価は、計算ソフト EVAST のプログラム誤りのうち「停止事象の事象分割誤り」及び「停止事象のうち、特定の事象の誤った回数設定」の影響を受けています。これらプログラム誤りがない修正後の疲労評価では、疲労評価に用いる過渡事象の組合せが修正前のものから見直されますが、過渡事象の組合せの見直しが疲労累積係数に与える影響の大小は、繰り返し回数や応力に依存するため、評価断面毎に異なります。

今回、40年目 PLM 評価にて、各部位の解析モデル上で設定している評価断面も含めて疲労累積係数を再評価したところ、修正前と比較して、ノズルエンド付け根部のみ、疲労累積係数が最も厳しくなる評価断面の位置が変更となることが確認されました。（添付2参照）

ノズルエンド付け根部において最も疲労累積係数が厳しくなる評価断面は、修正前の位置から管台側へ移動した位置となっており（図2中の青部参照）、「一次膜+曲げ応力強さの評価」や「一次+二次応力強さの評価」を含め、当該位置を応力評価点に見直しています。

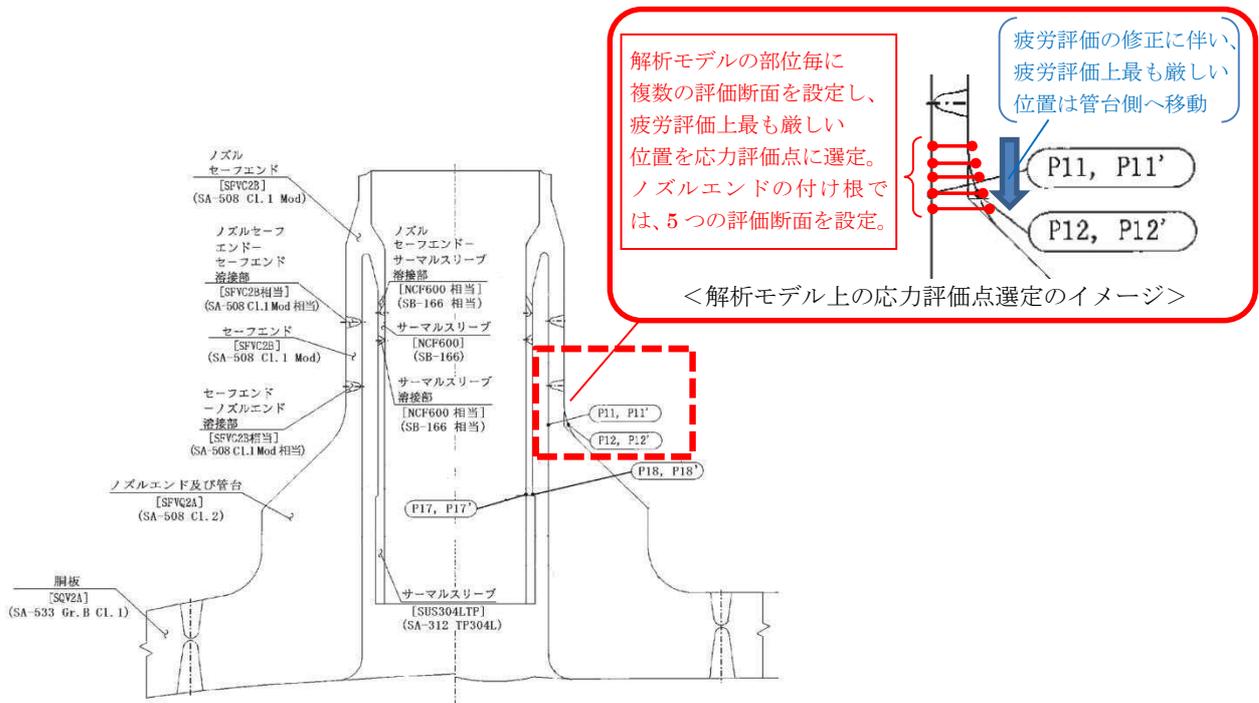


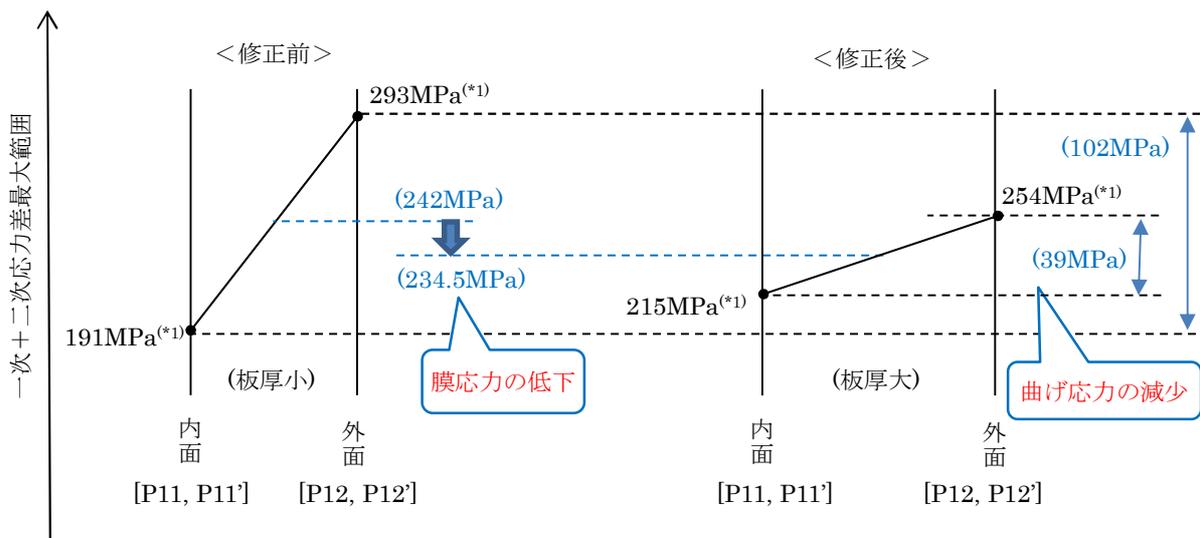
図2 給水ノズルの応力評価点

### 3. 疲労評価修正後の当該部位の地震荷重による一次+二次応力強さについて

給水ノズルの当該部位の地震荷重による一次+二次応力差最大範囲 ( $S_{n\#1}$ ,  $S_{n\#2}$ ) について、疲労評価修正前後の比較を図3に示します。なお、「地震荷重による一次+二次応力差最大範囲」は、地震の方向の正負を考慮して、地震荷重のみにより生じる応力差（応力強さ）の範囲（変動幅）を算出したものです。

給水ノズルの当該部位は、疲労評価の修正によって応力評価点が管台側に移動することにより、疲労評価修正前と比較して、板厚が大きくなります。一般的に、評価断面の板厚が大きくなる場合、断面積が大きくなることにより板厚内平均応力（膜応力）は低下し、また、断面係数が大きくなることにより、曲げ成分（モーメント、水平力）による曲げ応力は減少します。

給水ノズルの当該部は、内面側 ( $P11, P11'$ ) の方が外面側 ( $P12, P12'$ ) よりも低応力となっておりますが、FEM 解析から得られる応力変動は、構造不連続の影響により板厚増加による応力の低下が抑制され、膜応力の低下 ( $7.5\text{MPa} = 242\text{MPa} - 234.5\text{MPa}$ ) よりも、曲げ応力の減少による低応力側の応力増加 ( $31.5\text{MPa} = (102\text{MPa} - 39\text{MPa}) / 2$ ) の方が大きくなったため、疲労評価修正前と比較して、疲労評価修正後の内面側 ( $P11, P11'$ ) の一次+二次応力差最大範囲（応力変動）は増加したと考えられます。



(\*1) : 図1 参照

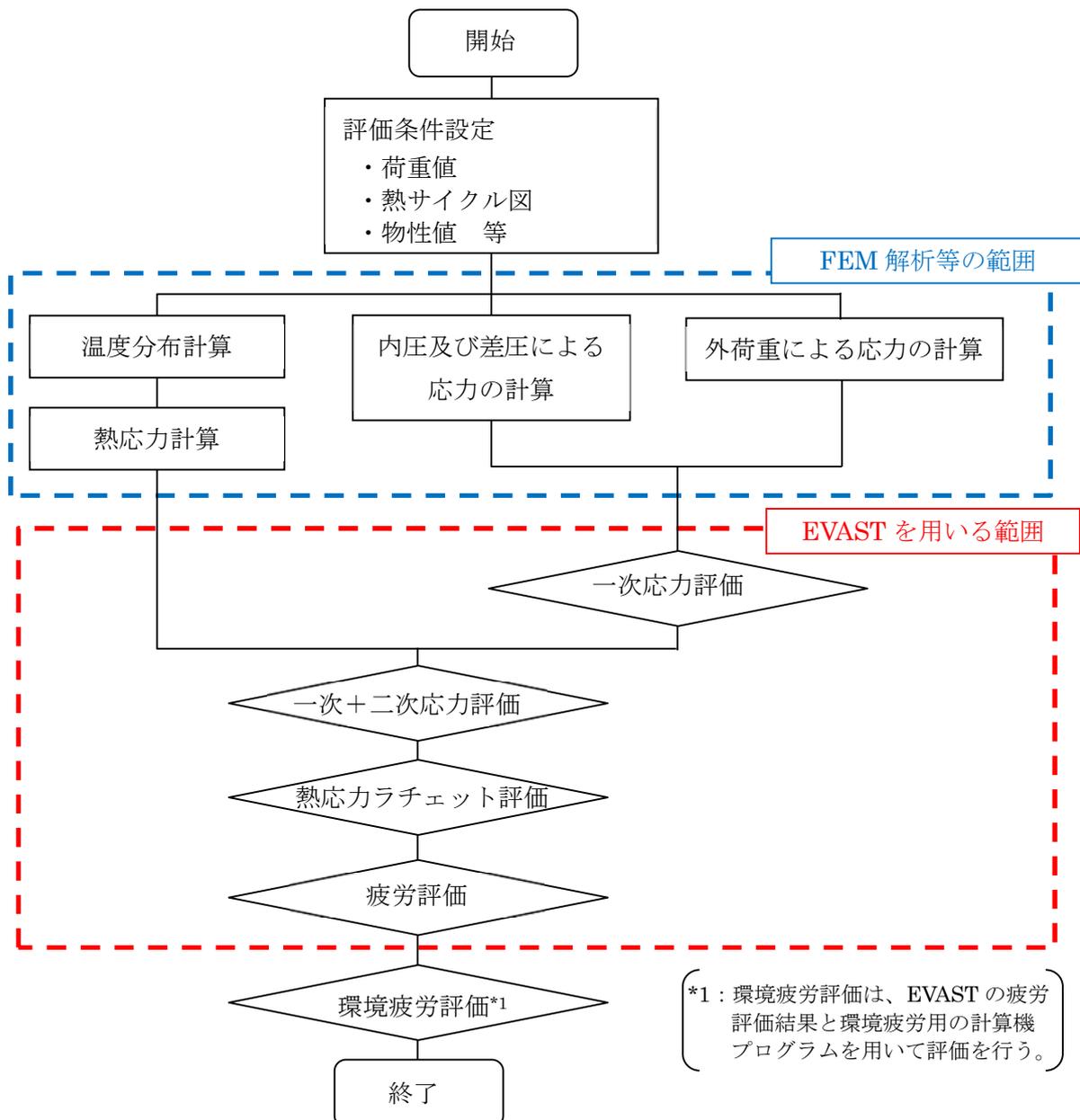
図3 疲労評価修正前後の当該部位の一次+二次応力差最大範囲の比較  
(応力評価点 : P11, P11', P12 及び P12')

## 計算ソフト EVAST の概要

## 1. 原子炉圧力容器の評価方法の概要

原子炉圧力容器の低サイクル疲労評価については、有限要素法（FEM）等の解析で熱応力、内圧及び差圧による応力、外荷重による応力等を計算した後に、応力強さや疲労累積係数を計算して評価を実施している。

原子炉圧力容器の疲労評価における解析評価フローを添付図 1-1 に示す。



添付図 1-1 原子炉圧力容器の解析評価フロー

## 2. 計算ソフト EVAST を用いた計算内容

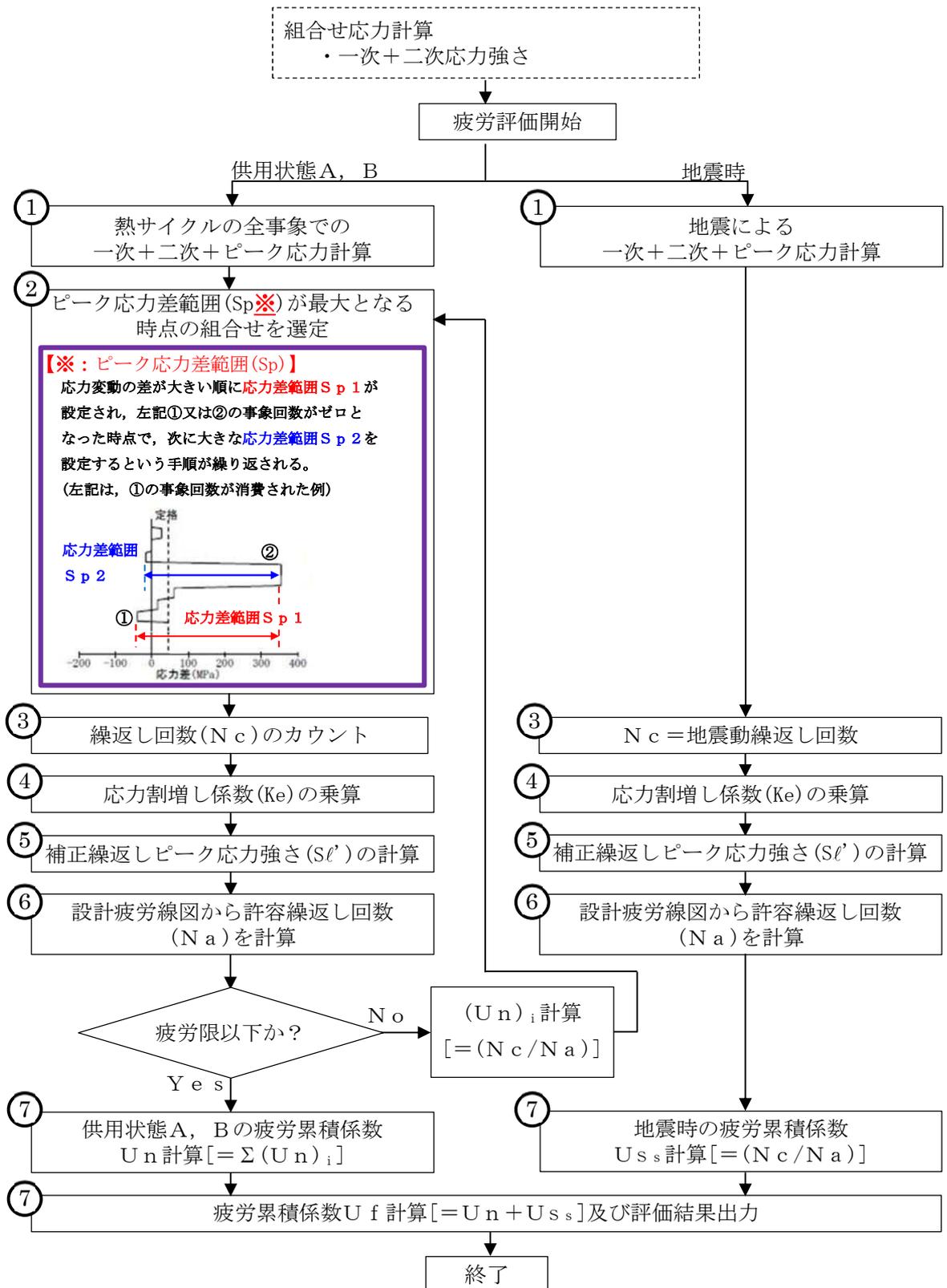
今回誤りの確認されている計算ソフト EVAST は、原子炉圧力容器の評価用に三菱パワー株式会社（旧バブコック日立株式会社）呉工場にて作成されたプログラムであり、有限要素法（FEM）等による解析を実施した後の応力強さや、疲労累積係数の計算を行うにあたり、原子炉圧力容器の評価点が大量にあることから作業効率化のために、四則演算による手計算が可能な範囲を自動化した Fortran のプログラムである。

計算ソフト EVAST は、有限要素法（FEM）等の解析で得られた応力及び許容値を用いて、内圧及び差圧による応力や外荷重による応力から一次応力評価を、内圧及び差圧による応力、外荷重による応力や熱応力から一次+二次応力評価及び熱応力ラチェット評価を、内圧及び差圧による応力、外荷重による応力、熱応力、熱サイクル条件、応力集中係数から疲労評価を実施しているものである。

計算ソフト EVAST の評価内容と入出力の関係を添付表 1-1 に示す。また、計算ソフト EVAST の疲労評価の詳細フローを添付図 1-2 に示す。

添付表 1-1 EVAST の評価内容と入出力の関係

	一次応力評価	一次+二次応力評価	熱応力ラチェット評価	疲労評価
入力	<ul style="list-style-type: none"> <li>内圧及び差圧による応力</li> <li>外荷重による応力</li> <li>許容値</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>内圧及び差圧による応力</li> <li>外荷重による応力</li> <li>熱応力</li> <li>許容値</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>内圧及び差圧による応力</li> <li>熱応力</li> <li>許容値</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>内圧及び差圧による応力</li> <li>外荷重による応力</li> <li>熱応力</li> <li>熱サイクル条件</li> <li>応力集中係数</li> <li>許容値</li> </ul>
出力	<ul style="list-style-type: none"> <li>一次一般膜応力強さの評価</li> <li>一次膜+曲げ応力強さの評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>一次+二次応力強さの評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>圧力による応力及び熱応力変動レンジの評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①一次+二次+ピーク応力</li> <li>②ピーク応力差範囲 (Sp) の組合せ</li> <li>③繰返し回数 (Nc)</li> <li>④応力割増し係数 (Ke)</li> <li>⑤補正繰返しピーク応力強さ (Sl')</li> <li>⑥許容繰返し回数 (Na)</li> <li>⑦疲労累積係数 (Un, Uss, Uf)</li> </ul> <p>* 疲労評価の詳細フローを添付図 1-2 に示す</p>



\*○内の番号は、添付表 1-1 中の赤枠部の番号との対応を示す。

添付図 1-2 EVAST における疲労評価の詳細フロー

原子炉压力容器 給水ノズル ノズルエンド付け根部 評価断面の位置の変更 (40 年目 PLM 評価)

ノズルエンド付け根部 応力評価点		疲労評価 修正前						疲労評価 修正後						
		選定事象(*1)	S <sub>r</sub> ' (MPa)	N <sub>a</sub>	N <sub>c</sub>	N <sub>c</sub> /N <sub>a</sub>	N <sub>c</sub> /N <sub>a</sub> (詳細値)	選定事象(*1)	S <sub>r</sub> ' (MPa)	N <sub>a</sub>	N <sub>c</sub>	N <sub>c</sub> /N <sub>a</sub>	N <sub>c</sub> /N <sub>a</sub> (詳細値)	
疲労評価修正前の評価断面 〔評価断面 A〕	赤丸部 (イメージ)	旧P11	C17 - C04	34	1000000	111	0.0001	0.00011	C17 - C04	34	1000000	111	0.0001	0.00011
			疲労累積係数 U <sub>n</sub> =		0.0002	—	疲労累積係数 U <sub>n</sub> =		0.0002	—				
			地震	30	1000000	100	0.0001	0.00010	地震	30	1000000	100	0.0001	0.00010
		疲労累積係数 U <sub>s,s</sub> =		0.0001	—	疲労累積係数 U <sub>s,s</sub> =		0.0001	—					
		疲労累積係数 U <sub>f</sub> = U <sub>n</sub> + U <sub>s,s</sub> =		0.0003	0.00021	疲労累積係数 U <sub>f</sub> = U <sub>n</sub> + U <sub>s,s</sub> =		0.0003	0.00021					
		赤丸部 (イメージ)	旧P11'	C15 - C02	24	1000000	130	0.0001	0.00013	C15 - C02	24	1000000	120	0.0001
	疲労累積係数 U <sub>n</sub> =			0.0002	—	疲労累積係数 U <sub>n</sub> =		0.0002	—					
	地震			30	1000000	100	0.0001	0.00010	地震	30	1000000	100	0.0001	0.00010
	疲労累積係数 U <sub>s,s</sub> =		0.0001	—	疲労累積係数 U <sub>s,s</sub> =		0.0001	—						
	疲労累積係数 U <sub>f</sub> = U <sub>n</sub> + U <sub>s,s</sub> =		0.0003	0.00023	疲労累積係数 U <sub>f</sub> = U <sub>n</sub> + U <sub>s,s</sub> =		0.0003	0.00022						
	赤丸部 (イメージ)		旧P12	C04 - C00	53	1000000	120	0.0001	0.00012	C04 - C00	53	1000000	120	0.0001
		疲労累積係数 U <sub>n</sub> =		0.0002	—	疲労累積係数 U <sub>n</sub> =		0.0002	—					
地震		49		1000000	100	0.0001	0.00010	地震	49	1000000	100	0.0001	0.00010	
疲労累積係数 U <sub>s,s</sub> =		0.0001	—	疲労累積係数 U <sub>s,s</sub> =		0.0001	—							
疲労累積係数 U <sub>f</sub> = U <sub>n</sub> + U <sub>s,s</sub> =		0.0003	0.00022	疲労累積係数 U <sub>f</sub> = U <sub>n</sub> + U <sub>s,s</sub> =		0.0003	0.00022							
赤丸部 (イメージ)		旧P12'	C02 - C10	30	1000000	130	0.0001	0.00013	C02 - C10	30	1000000	120	0.0001	0.00012
	疲労累積係数 U <sub>n</sub> =		0.0002	—	疲労累積係数 U <sub>n</sub> =		0.0002	—						
	地震		49	1000000	100	0.0001	0.00010	地震	49	1000000	100	0.0001	0.00010	
	疲労累積係数 U <sub>s,s</sub> =		0.0001	—	疲労累積係数 U <sub>s,s</sub> =		0.0001	—						
	疲労累積係数 U <sub>f</sub> = U <sub>n</sub> + U <sub>s,s</sub> =		0.0003	0.00023	疲労累積係数 U <sub>f</sub> = U <sub>n</sub> + U <sub>s,s</sub> =		0.0003	0.00022						
	疲労評価修正後の評価断面 〔評価断面 B〕	赤丸部 (イメージ)	新P11	C04 - C02	29	1000000	120	0.0001	0.00012	C04 - C02	29	1000000	120	0.0001
疲労累積係数 U <sub>n</sub> =				0.0002	—	疲労累積係数 U <sub>n</sub> =		0.0002	—					
地震				35	1000000	100	0.0001	0.00010	地震	35	1000000	100	0.0001	0.00010
疲労累積係数 U <sub>s,s</sub> =			0.0001	—	疲労累積係数 U <sub>s,s</sub> =		0.0001	—						
疲労累積係数 U <sub>f</sub> = U <sub>n</sub> + U <sub>s,s</sub> =			0.0003	0.00022	疲労累積係数 U <sub>f</sub> = U <sub>n</sub> + U <sub>s,s</sub> =		0.0003	0.00022						
赤丸部 (イメージ)			新P11'	C00 - C08	37	1000000	10	0.0000	0.00001	C00 - C08	37	1000000	10	0.0000
		疲労累積係数 U <sub>n</sub> =		0.0001	—	疲労累積係数 U <sub>n</sub> =		0.0001	—					
		地震		35	1000000	100	0.0001	0.00010	地震	35	1000000	100	0.0001	0.00010
		疲労累積係数 U <sub>s,s</sub> =		0.0001	—	疲労累積係数 U <sub>s,s</sub> =		0.0001	—					
		疲労累積係数 U <sub>f</sub> = U <sub>n</sub> + U <sub>s,s</sub> =		0.0002	0.00011	疲労累積係数 U <sub>f</sub> = U <sub>n</sub> + U <sub>s,s</sub> =		0.0002	0.00011					
		赤丸部 (イメージ)	新P12	C00 - C04	67	1000000	120	0.0001	0.00012	C00 - C04	67	1000000	120	0.0001
疲労累積係数 U <sub>n</sub> =				0.0002	—	疲労累積係数 U <sub>n</sub> =		0.0002	—					
地震	43			1000000	100	0.0001	0.00010	地震	43	1000000	100	0.0001	0.00010	
疲労累積係数 U <sub>s,s</sub> =			0.0001	—	疲労累積係数 U <sub>s,s</sub> =		0.0001	—						
疲労累積係数 U <sub>f</sub> = U <sub>n</sub> + U <sub>s,s</sub> =			0.0003	0.00022	疲労累積係数 U <sub>f</sub> = U <sub>n</sub> + U <sub>s,s</sub> =		0.0003	0.00022						
赤丸部 (イメージ)	新P12'		C10 - C02	42	1000000	130	0.0001	0.00013	C10 - C02	42	1000000	130	0.0001	0.00013
		疲労累積係数 U <sub>n</sub> =		0.0002	—	疲労累積係数 U <sub>n</sub> =		0.0002	—					
		地震	43	1000000	100	0.0001	0.00010	地震	43	1000000	100	0.0001	0.00010	
	疲労累積係数 U <sub>s,s</sub> =		0.0001	—	疲労累積係数 U <sub>s,s</sub> =		0.0001	—						
	疲労累積係数 U <sub>f</sub> = U <sub>n</sub> + U <sub>s,s</sub> =		0.0003	0.00023	疲労累積係数 U <sub>f</sub> = U <sub>n</sub> + U <sub>s,s</sub> =		0.0003	0.00023						

疲労評価修正前では、評価断面 A と B で疲労累積係数の最大値は同じであるが、全体的に見て、評価断面 A の方が B よりも疲労累積係数は大きいため、評価断面 A を選定

再評価により、評価断面 A の繰返し回数が見直され、疲労累積係数が減少。  
当該組合せ以外は、プログラム誤りが与える影響は、疲労限未達となる最初の組合せより後の組み合わせであり、疲労評価には影響していない。

修正後の疲労評価においては最も厳しい評価断面が評価断面 B に変更。

\*1 : C02 耐圧試験、C04 起動 (タービン起動)、C08 給水加熱機能損失 (発電機トリップ)、C10 スクラム (タービントリップ)、C15 停止 (冷却)、C17 停止 (満水後冷却)