



PWRプラントの高経年対策における環境疲労評価

Environmental Fatigue Evaluation in PLM Activities of PWR plant

関西電力株式会社 中村 隆夫 Takao NAKAMURA Member
 関西電力株式会社 三山 彰一 Shoichi MIYAMA

Numbers of nuclear power plants have been operating for more than 30 years and some of them exceeding 40 years in Japan. In these ageing plants, fatigue evaluation has a significant measure in assuring the plant reliability. The environmental fatigue in light water reactors, which was first recognized in the 1980's in Japan, has been drawing attention worldwide because it may cause remarkable effects on the life of important components. The Japanese nuclear industries developed the world's first practical methodology to evaluate environmental fatigue and it has been utilized in plant life management (PLM) technical evaluation. The Japan Society of Mechanical Engineers (JSME) issued the codes regarding environmental fatigue, JSME S NF1-2006, and has redrafted them incorporating the latest knowledge in 2009. This paper introduces a few examples of environmental fatigue evaluation, which was performed using the JSME codes as a part of PLM evaluation for Japanese PWR plant.

Keywords: Environmental Fatigue, Environmental Fatigue Life Correction Factor, Fen, JSME Codes, Modified Rate Approach Method, Plant Life Management

1. 緒言

我が国で30年を超える運転プラントに対して高経年化技術評価^{a)}(以下PLM評価と言う)を行う様になってから、既に10年が過ぎようとしており、これまでに20基のプラントがPLM評価を実施し、最近では運転期間が40年を超えるプラントに対する評価も行われている。

これら高経年化プラントの設備健全性確保において、疲労評価は重要な位置づけを持つ。軽水炉の原子炉冷却水を模擬した環境中で、疲労寿命が減少する場合のあることが1980年代にわが国で初めて発見され、その後、重要機器の寿命に大きな影響を与える事象として世界的に注目された。我が国は世界に先駆けて環境疲労^{b)}に関する実用的な評価手法を開発し、PLM評価において活用してきている。

a) 高経年化技術評価PLM: Plant Life Management : 原子力発電所を構成する構造物、系統及び機器に想定される経年劣化事象が安全機能に与える影響を評価することにより、長期間の供用を考慮した活動を行うために実施する疲労評価などの技術評価のことを言う。運転開始後30年を経た原子力発電施設に対し経年劣化事象の技術評価とそれに対する適切な保安活動の実施を実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則において求めている

b) 環境疲労: 腐食疲労の一種。腐食環境下で、金属材料の疲労寿命が低下することは古くから知られていたが、ここでは、原子炉冷却材のような高純度の高温水環境下で構造材料の疲労寿命が低下することを言う。「環境効果」という表現も用いられる。

日本機械学会から発行されている「環境疲労評価手法2006年版」(以下、環境疲労評価手法と言う)¹⁾は学会規格として世界で唯一のものであり、最新の知見を取り入れて2009年9月に改訂された。本論文では、機械学会規格を用いPWRプラントのPLM評価における環境疲労評価を行った事例を紹介する。

2. 環境疲労評価手法の概要

2.1 環境疲労評価の位置づけ

我が国軽水炉のPLM評価において、当初、環境疲労は新しい技術知見として、米国のNUREG報告書²⁾や国内における研究成果を元に評価が行われてきた。その後、国内試験データベースの整備が進み、これを受けて2000年に当時の通産省資源エネルギー庁から「環境中疲れ寿命評価指針」³⁾(以下MITI指針と呼ぶ)が取りまとめられ、電気事業者に通達された。以降、PLM評価においてはこのMITI指針に基づく評価が求められた。これに対して、産業界は火力原子力発電技術協会(以下火原協と呼ぶ)に委員会を設置し、MITI指針を用いた実用的な評価手法を取りまとめた。これが「発電用原子力設備に関する環境疲労評価ガイドライン」⁴⁾(以下火原協ガイドラインと呼ぶ)であり、世界で最初かつ実用的な指針として知られている。更にその後の技術知見や経験を取り入れた環境疲労評価手法が2006年3月に日本機械学会から発行された。

この規格は、日本原子力学会標準「原子力発電所の高経年化対策実施基準」¹⁵⁾に引用され、実機評価に活用されて現在に至っている。

日本機械学会「設計・建設規格」¹⁶⁾では、クラス1機器等に対して設計段階で疲労評価を要求している。この評価は、供用期間中の疲労に対して、設計上十分な余裕があることを評価しており、評価期間としては40年を仮定し、仮定した評価期間や設計荷重に対し設計余裕を十分に持たせた条件を設定して疲労評価が行なわれている。

これに対して、PLM評価における疲労評価は、高経年化の観点から、疲労に対してどの程度余裕があるかを確認し、得られた知見を長期的な保全計画に反映する目的で行われる。そのため、評価期間としては60年を仮定し、評価条件としては運転実績を元に現実的な条件を設定し、環境効果も考慮した疲労評価を行っている。

2.2 環境疲労評価手法の特徴

ここでは、PLM評価に用いられている環境疲労評価手法の特徴について述べる。^{17),18)}

環境疲労評価手法の特徴は大きく次の三点である。

- (1) 合理的な環境効果の補正方法として、環境効果補正係数(F_{en})を用いる。
- (2) 煩雑であるが精緻で合理的な方法から保守的であるが簡易な方法まで3つのオプションを設定することで評価作業量の低減を図る。
- (3) 設計建設規格に規定された各機器に特有な応力評価手法を考慮し、それに適合したひずみ評価の手順を設定することで全ての評価対象機器の環境疲労評価を可能とする。

2.3 環境効果補正係数

環境効果補正係数 F_{en} は、式(1)に示すように、あるひずみ振幅での大気中の疲労寿命 N_A を、同じひずみ振幅での原子炉冷却水環境中の疲労寿命 N_W で除した値と定義される。(Fig.1 参照)

$$F_{en} = \frac{N_A}{N_W} \quad (1)$$

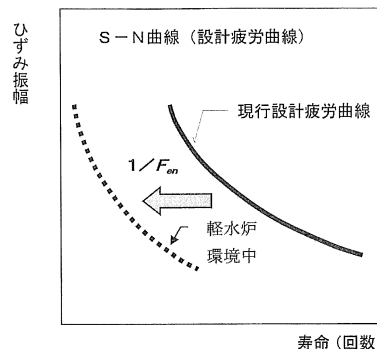


Fig.1 Environmental fatigue life correction factor(F_{en})

環境効果を考慮した疲労累積係数 U_{en} は、 F_{en} を用いて式(2)のように表すことができる。

$$U_{en} = U \times F_{en} = \sum_{i=1}^n U_i \times F_{en,i} \quad (2)$$

U_i : 合計で n 個ある応力サイクルのうち i 番目の応力サイクルにおける環境効果を考慮しない疲労係数

$F_{en,i}$: 合計で n 個ある応力サイクルのうち i 番目の応力サイクルにおける環境効果補正係数

F_{en} は材料、ひずみ速度、温度、溶存酸素濃度等に依存する関数であり、これらのパラメータが決定できれば求めることができる。ただし、 F_{en} の値はひずみ振幅の影響を受けない。また、微小なひずみ振幅では環境効果は発生しないため、 F_{en} にはひずみ振幅に対して下限のしきい値を設けている。

疲労累積係数の求め方については、第3章で述べる。

2.4 環境疲労評価方法の3つのオプション

環境疲労評価を合理的に行うために、評価区分の設定方法及び評価方法として、以下の3種類を規定した。

- 1) 係数倍法：過渡毎に評価区分を設定せず、設計条件(温度、溶存酸素濃度など)により保守側に評価する方法。
- 2) 簡易評価手法：過渡中でひずみが連続して増加する範囲をひとつの評価区分として評価する方法。
- 3) 詳細評価手法：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方法。(Fig.2 修正レートアプローチ法 参照)

2.5 修正レートアプローチ法

修正レートアプローチ法は Fig.2 に示すように、ひずみや温度の時刻暦変化を細かく区切ることで、式(3)に基づき微小区間毎に環境効果補正係数 F_{en} を計算し、それをひずみ積分して全体としての環境効果を求める方法であり、環境効果を最も合理的に評価できる精緻な手法である。ただし、評価作業に手間がかかるため、効率的な適用方法について検討が必要である。

$$F_{en, det, A} = \sum_{k=1}^m F_{en, k} \frac{\Delta \epsilon_k}{\epsilon_{max, A} - \epsilon_{min, A}} \quad (3)$$

- $F_{en, det, A}$: 過渡 A について修正レートアプローチ法で求めた環境効果補正係数
- $F_{en, k}$: 合計で m 個ある評価区分のうち k 番目の評価区分における環境効果補正係数
- $\Delta \epsilon_k$: 合計で m 個ある評価区分のうち k 番目の評価区分におけるひずみの増加分

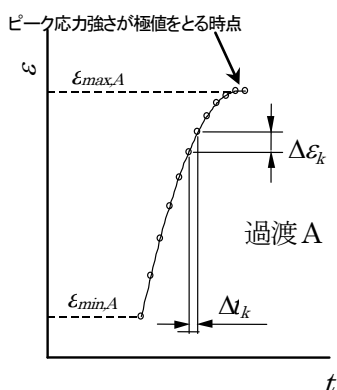


Fig.2 Modified rate approach method

3. PLM 評価における環境疲労評価

3.1 疲労評価の流れ

PLM 評価における疲労評価作業の流れを Fig.3 に示す。以下、この評価の流れに沿って PLM 評価における疲労評価の手順について述べる。

① 対象機器・対象部位の選定

PLM 評価における疲労評価では、まず疲労評価の対象機器を選定する。対象となる機器は、設計・建設規格で疲労評価が要求されている機器に加えて、規格上は要求が無いが、運転中に有意な過渡をうける可能性のある機器を選定する。

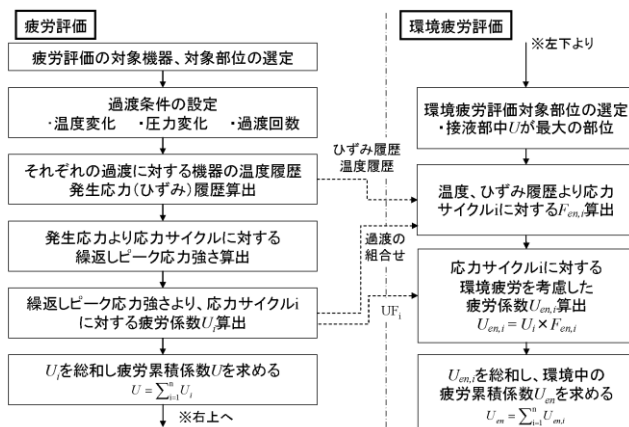


Fig.3 Flow of environmental fatigue evaluation in PLM

環境疲労評価の対象機器は、この PLM 疲労評価対象のうち、一次冷却材環境にさらされる機器が選定される。疲労評価対象機器の具体例を Table 1 に示す。

Table 1 Selection of components in fatigue evaluation

機器	設計・建設規格 疲労評価要求	PLM 疲労評価	PLM 環境疲労評価
容器	原子炉容器	○	○
	加圧器	○	○
	格納容器貫通部	○	—
配管	1次冷却材管	○	○
	配管 (RCS)	○	○
	配管 (RHRS)	○※	○
	配管 (SIS)	○※	○
	配管 (CVCS)	○※	○
	配管 (FWS)	—	○
弁	○	○	○
ポンプ	1次冷却材ポンプ	—	○
	余熱除去ポンプ	—	○
熱交換器	蒸気発生器	○	○
	再生クーラ	—	○
	余熱除去クーラ	—	○
炉内構造物	○	○	○
その他	高圧タービン	—	○
	低圧タービン	—	○
	配管サポート	—	○

※クラス1配管のみ

次に、疲労評価対象部位を選定する。設計・建設規格では、疲労評価要求のある全ての機器については、大きな変動荷重が作用しない場合を除き、疲労評価を行うが、PLM における疲労評価部位は、構造不連続部や熱衝撃、熱成層の発生が考えられる部位などを考慮して疲労評価上厳しいと考えられる部位を抽出し、疲労評価を行う。

② 過渡条件の設定

疲労評価では、応力評価 (疲労、強度) を行うために与える条件として過渡条件を設定する。過渡条件は、設計・建設規格に基づいて評価対象となる全ての運転状態で想定される圧力、温度の変化 (度合い、回数) を整理

して設定する。

Table 2 に設計時と PLM 評価時の評価条件の比較を示す。PLM 評価時の評価条件は、設計時と比較して、過渡回数としては運転実績から求めた合理的な条件を適用しているが、過渡曲線として設計と同じ保守的な条件を使用している。

Table 2 Comparison of evaluation conditions between design and PLM

評価条件	設計	PLM
過渡曲線 (温度・圧力変化等)	十分過酷なものとなるよう変化度を設定	設計用の過渡曲線を使用 (設計用の過渡曲線が無い場合は新たに設定)
過渡回数	・評価期間として40年を仮定 ・十分な余裕を考慮し、頻繁な回数に設定	・評価期間として60年を仮定 ・評価時点までの運転実績から推定
その他	---	熱成層等、設計・建設規格に要求の無い事象についても考慮

PLM 評価における過渡回数は、これまでの運転実績を基に 60 年時点の回数を推定して設定する。ただし、実績が 0 回の過渡については、1 回/60 年と算定する。過渡回数の設定例を Fig.4 に示す。

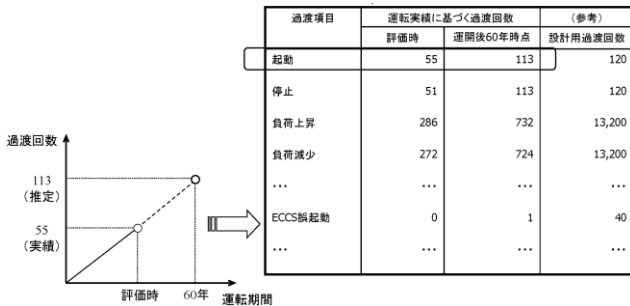


Fig.4 Method to determine numbers of transients in PLM

③ 機器の温度履歴・ひずみ履歴の算出

疲労累積係数の評価のためには、まず、各過渡に対し、機器の評価点の温度や発生応力(ひずみ)の履歴を算出する。(Fig.5 参照)

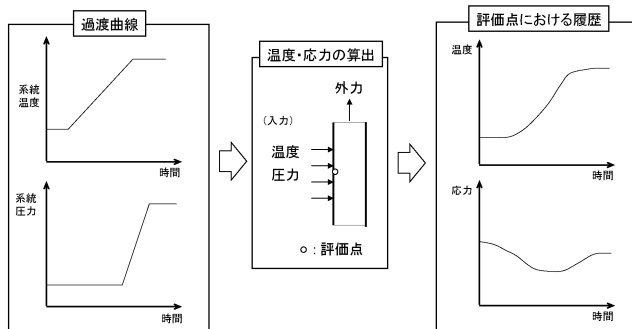


Fig.5 Calculation of histories in temperature and generated stress(strain) in each transient

④ ピーク応力強さの算出

各過渡の応力履歴より応力を整理し、式(4)により過渡条件の組み合わせに対するピーク応力強さを計算する。(Fig.6 参照)

$$S_{a1} = (A_{max} - B_{min})/2$$

$$S_{a2} = (C_{max} - B_{min})/2$$

$$\dots\dots$$
(4)

S_a: 過渡の応力履歴を組合せて応力サイクルの履歴を求め、この極大値と極小値の差の2分の1として求めたピーク応力強さ

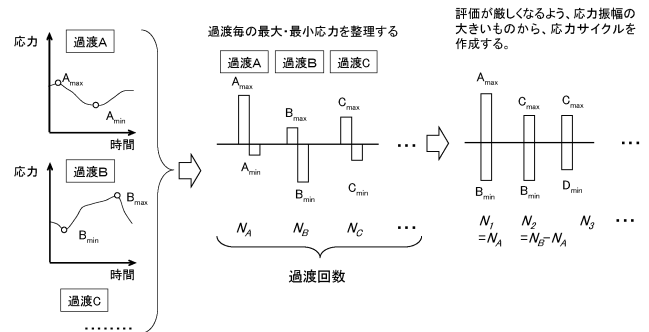


Fig.6 Calculation of peak stress intensity for the combination of transients

⑤ 疲労累積係数の算出

設計・建設規格に規定されている設計疲労線図^{c)}より、ピーク応力強さに対する許容繰返し回数 N* を求め、過渡の実際の繰返し回数 N との比を求める。式(5)により過渡の組み合わせ毎に疲労係数を求め、総和した疲労累積係数(U)が 1 を超えないことを確認する。(Fig.7 参照)

$$U = \frac{N}{N^*} = \frac{N_1}{N_1^*} + \frac{N_2}{N_2^*} + \frac{N_3}{N_3^*} + \dots + \frac{N_n}{N_n^*} < 1$$
(5)

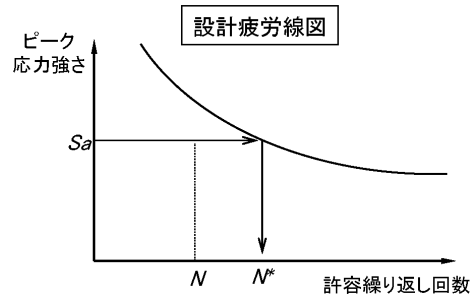


Fig.7 Calculation of usage factor (U)

環境疲労評価の方法は以下の章において機器毎の事例で紹介する。

^{c)} 設計疲労線図: Design Fatigue Curve, 疲労評価を行う際に行う線図で、ひずみ(応力)振幅に対する許容繰返し回数を示す。

3.2 環境疲労評価に適用される規格基準

わが国で PLM における環境疲労評価が開始された当初は適用可能な規格基準がなく、最新の研究成果から得られた知見や米国 NUREG 報告書を参考にして評価が行われた。

その後、国内疲労試験データベースの整備が進み、MITI 指針や火原協ガイドラインが制定されたことを受け、それらの指針類が適用されてきた。

更に、日本機械学会から環境疲労評価手法が発行され、現在 MITI 指針に代わって本規格が適用されている。

火原協ガイドラインと環境疲労評価手法は、2.2 章に述べた特徴を共有しているが、後者は最新の国内疲労試験データベースに基づき新たな環境効果補正係数 (F_{en}) 評価式を規定しているところに主な相違がある。

ここでは、PWR プラント環境条件下の疲労評価で特に重要なオーステナイト系ステンレス鋼の F_{en} 評価式について、その比較を Table 3 及び Fig.8 に示す。

環境疲労評価手法では、低速側ひずみ速度のデータが追加され、Fig.8 の様にステンレス鋳鋼のしきい値が見直されている。なお、2009 年版では PWR プラント環境条件下での F_{en} 評価式に変更はない。

Table 3 Comparison of F_{en} equation between TENPES guidelines and JSME codes in austenitic stainless steel

火原協ガイドライン (PWR)
$\ln(F_{en}) = 1.233 - P \times \ln(\dot{\epsilon}^*/0.4)$
$P = 0.04 \quad (T \leq 100^\circ\text{C})$
$P = 9.33 \times 10^{-4} X T - 0.053$
$(100 < T < 325^\circ\text{C})$
$P = 0.25 \quad (T \geq 325^\circ\text{C})$
$\dot{\epsilon}^* = 0.4 \quad (\dot{\epsilon} > 0.4\%/s)$
$\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} \quad (0.0004 \leq \dot{\epsilon} \leq 0.4\%/s)$
$\dot{\epsilon}^* = 0.0004 \quad (\dot{\epsilon} < 0.0004\%/s)$
$F_{en} = 1.0 \quad (\epsilon \leq 0.11\%)$
JSME規格 (PWR)
$\ln(F_{en}) = (C - \dot{\epsilon}^*) X T^*$
$C = 3.910$
$\dot{\epsilon}^* = \ln(49.9) \quad (> 49.9\%/s)$
$\dot{\epsilon}^* = \ln(\dot{\epsilon})$
$(\text{Wrought: } 0.0004 \leq \dot{\epsilon} \leq 49.9\%/s)$
$(\text{Cast: } 0.00004 \leq \dot{\epsilon} \leq 49.9\%/s)$
$\dot{\epsilon} = \ln(0.0004) \quad (\text{Wrought: } \dot{\epsilon} < 0.0004\%/s)$
$\dot{\epsilon} = \ln(0.00004) \quad (\text{Cast: } \dot{\epsilon} < 0.00004\%/s)$
$T^* = 0.000782 X T \quad (T \leq 325^\circ\text{C})$
$T^* = 0.254 \quad (T > 325^\circ\text{C})$
$F_{en} = 1.0 \quad (\epsilon \leq 0.11\% \text{ or seismic loading})$

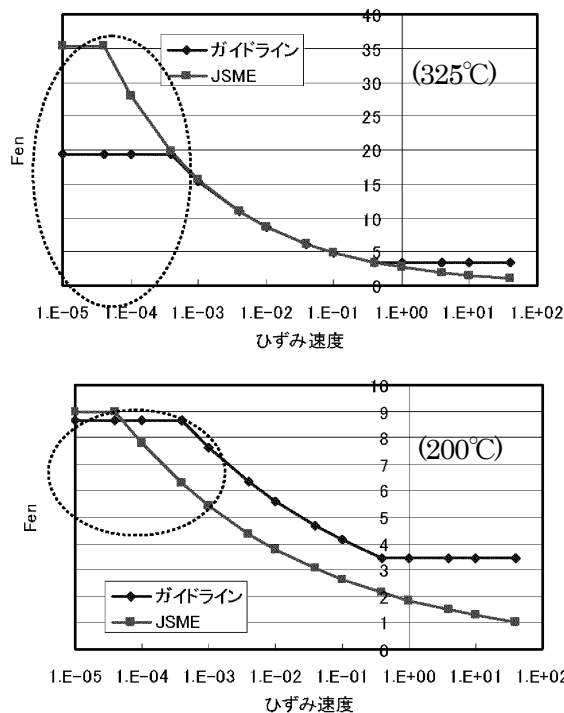


Fig.8 Comparison of F_{en} between TENPES guidelines and JSME codes in cast stainless steel

一方米国では2007年にアルゴンヌ国立研究所の研究成果が NUREG/CR-6909^[9]としてまとめられ、それを元に新規建設プラントを対象として環境効果補正係数(F_{en})を用いた評価手法が Regulatory Guide 1.207^[10]として発行されている。

また ASME 規格委員会でも、環境疲労評価手法が ASME Sec. III 規格の Code case として検討が行われ、環境効果補正係数(F_{en})を用いた評価手法に加え、環境効果を考慮した設計疲れ線図と疲労累積係数 U が 1 を超えた場合の評価基準が検討されている。

3.3 容器の評価例

容器の評価例として、加圧器の PLM 評価で環境疲労評価を行った結果を以下に示す。

① 評価対象部位の選定

設計時の評価では評価部位として管台とスカート部が選定されるが、PLM 評価ではスプレイ作動やサージ配管内の流れにより比較的大きな熱応力が発生するスプレイライン管台とサージライン管台が選定され、更に環境疲労評価については接液部で U が最大となる評価点を対象とする。(Fig.9 参照)

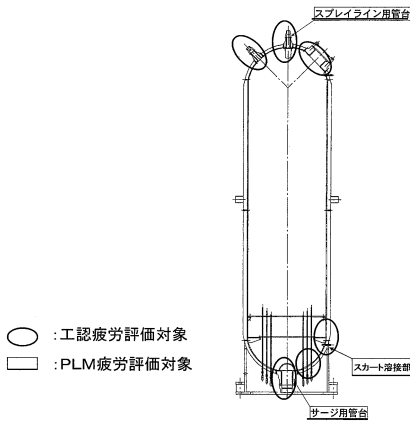


Fig.9 Selection of components and locations in fatigue evaluation

② 過渡条件の設定

評価条件として、設計用の過渡条件を用いて運転実績から推定した60年時点の過渡回数を用いる。更に、これに加えて加圧器ではスプレイの作動やサージ管内の流れに伴い熱成層が発生・消滅するため、設計時の評価には含まれていない熱成層による応力も考慮する。

次に、これらの評価条件を元に、FEMモデルにより温度履歴、応力（ひずみ）履歴を算出する。

③ 環境効果補正係数及び疲労累積係数の算出

過渡の組み合わせは、応力の大きいものから順に組み合わせ、これに対して疲労係数を計算し、更に環境効果補正係数 F_{en} を掛けて環境中の疲労係数 (U_{en}) を求める。加圧器サージ管台における疲労係数計算結果の例を Fig.10 に示す。

■ 計算例(加圧器サージ用管台部)

応力サイクル	ピーク応力強さ S_i (MPa)	過渡回数 N	許容繰返し回数 N'	疲労係数 U	環境効果補正係数 F_{en}	環境中疲労係数 U_{en}	
過渡1 D	F	345.5	1	33500	0.00003	8.203	0.00024
C	D	271.1	1	122000	0.00001	11.301	0.00009
C	A	232.1	3	302000	0.00001	12.737	0.00013
E	B	189.0	1	-	0.00000	1.000	0.00000

運転状態 I

- A: 100%からの大きいステップ状負荷減少
- B: 1ループ停止/1ループ起動

運転状態 II

- C: 外部電源喪失
- D: 1次冷却系の異常な減圧
- E: 出力運転中の非常用炉心冷却系の誤起動
- F: 1次系冷却系停止ループ誤起動

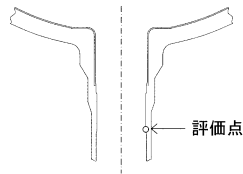


Fig.10 U_{en} calculation results in pressurizer surge line nozzle (Example of vessel evaluation)

また、ここで用いた環境効果補正係数算出の具体例を Fig.11 に示す。

過渡	微小区間	ひずみ増加 (%)	時間 (sec)	ひずみ速度 (%/sec)	温度 (°C)	$F_{en,i}$
D	36	0.021	40	0.000530	252.6	9.605
D	37	0.028	50	0.000567	254.1	9.604
D	38	0.034	100	0.000335	255.2	10.399
F	2	0.028	1	0.0277	280.5	5.176
F	3	0.015	1	0.0146	274.1	5.720
F	4	0.009	1	0.0091	271.0	6.206
F	5	0.006	1	0.0058	269.1	6.729
F	6	0.005	2	0.0027	267.7	7.840
F	7	0.003	3	0.0009	266.0	9.628
F	8	0.001	2	0.0003	264.4	11.315
F_{en}						8.203

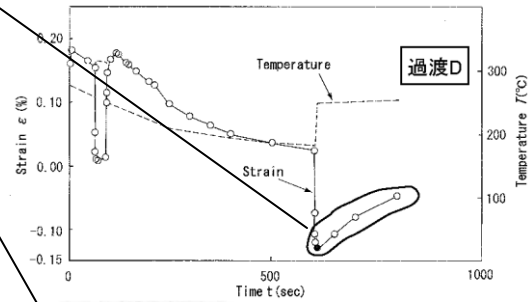


Fig.11 Example of F_{en} calculation with modified rate approach method

環境効果補正係数の算出には、詳細評価手法である修正レートアプローチ法を用いる。 F_{en} の算出例として、過渡 D と F を組み合わせた場合の計算手順を以下に示す。

過渡 D では、一次冷却系の減圧事象が最も厳しくなる加圧器逃がし弁が誤開した場合のひずみ変化を解析している。事象発生後、原子炉がトリップして、一時的に加圧器のアウトサージが発生し、その後インサージとなる際に大きなひずみ変化が発生する。その後一次系は冷却され減温・減圧が進むが、10分後に運転操作により減圧原因は排除されるとサージが 0 となるためにひずみは一旦大きく負になった後、プラントは整定するためにひずみは増加する。

一方、過渡 F では、停止中の RCP が誤起動し停止ループ中の低温水が炉心に注入される。正の反応度添加により原子炉出力は上昇し、一次冷却材温度の上昇に伴い加圧器のインサージが発生してひずみが増加する。その後、原子炉がトリップしてアウトサージとなり、ひずみは急速に低下する。

過渡 D,F それぞれのひずみ変化を計算して微小区間に

分割し、ひずみ増加範囲のうちピーク応力強さの最大値と最小値が生じる評価区分について微小区間毎の $F_{en,k}$ をそれぞれのひずみ量により重み付け積分して F_{en} を計算する。これをピーク応力強さの最大値と最小値を組み合わせて計算した繰り返しピーク応力強さから求めた疲労係数 U に掛けて環境中疲労係数 U_{en} を求める。

④ 環境疲労評価結果

Fig.12 に加圧器における環境疲労評価結果の具体例を示す。

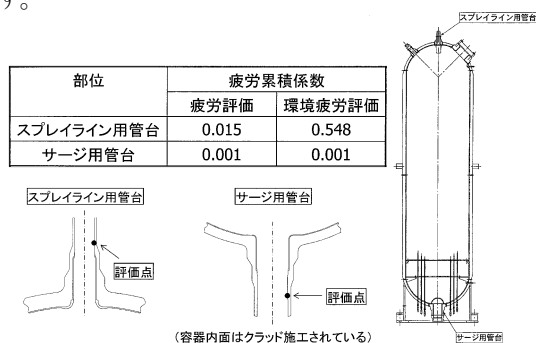


Fig.12 Example of calculation results of cumulative usage factor in pressurizer

3.4 配管の評価例

配管の評価例として、加圧器サージ管の PLM 評価で環境疲労評価を行った具体例を次に示す。

① 評価対象部位の選定

評価点の選定のため、サージ管全体の FEM 解析を行い、応力変動幅の大きい点のうち接液部を評価点として選定する。

② 過渡条件の選定

評価条件として、容器と同様に設計用の過渡条件を用いて運転実績から推定した 60 年時点の過渡回数を用いる。更に、これに加えて加圧器サージ管ではサージ管内の流れに伴い熱成層が発生・消滅するため、設計時の評価には含まれていない熱成層による応力も考慮する。(Fig.13 参照)

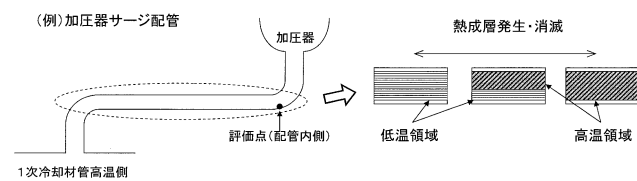


Fig.13 Determination of conditions for evaluation

次に、これらの評価条件を元に、FEM モデルにより温度履歴、応力（ひずみ）履歴を算出する。

配管の応力評価では、通常、式(6)に示す配管の応力計算式の各項の応力を絶対和して求めるため、 F_{en} を計算するための全応力に対するひずみ履歴が得られない。従って、過渡の組み合わせ毎に支配的な応力項に着目してひずみ速度や温度の履歴を求める。

$$S_p = \frac{K_1 C_1 P_0 D_0}{2l} + \frac{K_2 C_2 M_{ts}}{Z_l} + \frac{K_3 E \alpha |\Delta T_1|}{1.4} + \frac{K_3 C_3 E_{ab} |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b|}{T_a - T_b} + \frac{E \alpha |\Delta T_2|}{0.7} \quad (6)$$

式(6)における記号の定義は、日本機械学会発電用原子力設備規格「設計建設規格 第 I 編 第 5 章 PPB-3532」を参照のこと。

③ 環境効果補正係数及び疲労累積係数の算出

Table 4 に加圧器サージ管における環境効果補正係数の算出方法の例を、Table 5 には累積疲労係数の評価結果の例を示す。

Table 4 Example of determination method in strain rate and temperature for pressurizer surge line piping

支配的応力項	ひずみ速度	温度
熱膨張応力項	起動時のもの（ひずみ速度が遅く保守的）	325°C（325°C以上で F_{en} の温度パラメータは一定）
ΔT_1 項	過渡の組合せの内、支配的過渡の ΔT_1 項より求められるひずみの時刻歴より求める	過渡の組合せの内、支配的過渡の管内面温度の時刻歴
$T_a - T_b$ 項	過渡の組合せの内、支配的過渡の $T_a - T_b$ 項より求められるひずみの時刻歴より求める	過渡の組合せの内、支配的過渡の管内面温度の時刻歴
ΔT_2 項	過渡の組合せの内、支配的過渡の ΔT_2 項より求められるひずみの時刻歴より求める	過渡の組合せの内、支配的過渡の管内面温度の時刻歴
熱成層応力（FEMモデルにより算出）	熱成層応力より求められるひずみの時刻歴より求める	過渡の組合せの最大温度

Table 5 Example of calculation results in F_{en} and U_{en} for pressurizer surge line piping

過渡1	過渡2	支配的応力項	ピーク応力強さ S_i (MPa)	過渡回数 N	許容繰返し回数 N'	疲労係数 U	環境効果補正係数 F_{en}	環境中疲労係数 U_{en}
A	A	熱成層	639.2	1	1550	0.00065	12.901	0.00832
B	B	熱成層	457.3	1	5340	0.00019	9.785	0.00183
C	C	熱膨張	264.2	1	72800	0.00001	11.932	0.00016
-	-	-	-	-	-	-	-	-

A: 100%からの原子炉トリップ（不注意な冷却とSIを伴うトリップ）
 B: 出力運転中の非常用炉心冷却系の誤起動
 C: 1次系冷却系停止ループ誤起動

部位	疲労累積係数	
	疲労評価	環境疲労評価
加圧器サージ配管	0.003	0.013

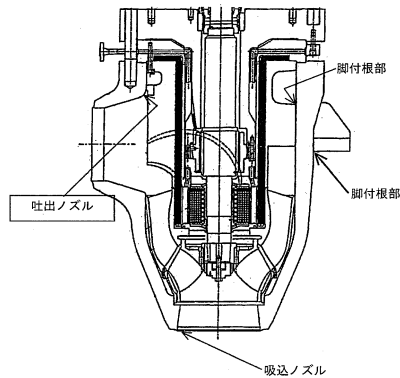
3.5 ポンプの評価例

ポンプの評価例として、一次冷却材ポンプ(以下、RCPと言う)の例を次に示す。

① 評価対象部位の選定

設計・建設規格ではポンプは疲労評価の対象外であるが、PLMでは、ポンプにおいても有意な過渡に受けるものについては疲労評価を実施している。更に、一次冷却材にさらされる部位については環境疲労評価を実施している。

Fig.14 に、ステンレス鋳鋼を使用し疲労評価上厳しいとされる RCP の評価部位の例を示す。



(注) 矢印はPLM評価における疲労評価対象部位を示す。

Fig.14 Portion selected in the fatigue evaluation of RCP

② 過渡条件の選定

評価条件として、容器と同様に設計用の過渡条件を用いて運転実績から推定した60年時点の過渡回数を用いる。

③ 環境効果補正係数及び疲労累積係数の算出

次に、これらの評価条件を元に、FEMモデルにより温度履歴、応力(ひずみ)履歴を算出する。

Fig.15 に吐出ノズルにおける環境効果補正係数 F_{en} の算出方法の例を、Table 6 には評価結果の例を示す。

過渡	微小区間	ひずみ増加 (%)	時間 (sec)	ひずみ速度 (%/sec)	温度 (°C)	F_{en}
B	1	0.03854	3600	1.07E-05	291.7	24.579
B	2	0.03397	3600	9.44E-06	236.2	13.366
B	3	0.02966	3600	8.24E-06	180.6	7.260
B	4	0.01931	3600	5.37E-06	125.1	3.948
B	5	0.00884	2340	3.78E-06	69.5	2.144
A	4	-0.00044	3600	-1.24E-07	243.2	14.433
A	5	0.00400	2340	1.71E-06	279.3	21.451
A	6	0.00112	792	1.42E-06	291.6	24.552
A	7	0.00460	168	2.73E-05	291.6	24.552
A	8	0.00867	300	2.89E-05	291.6	24.552
A	9	0.02666	1080	2.47E-05	291.6	24.552
A	10	0.14824	16920	8.76E-06	291.7	24.579
						F_{en}
						19.936

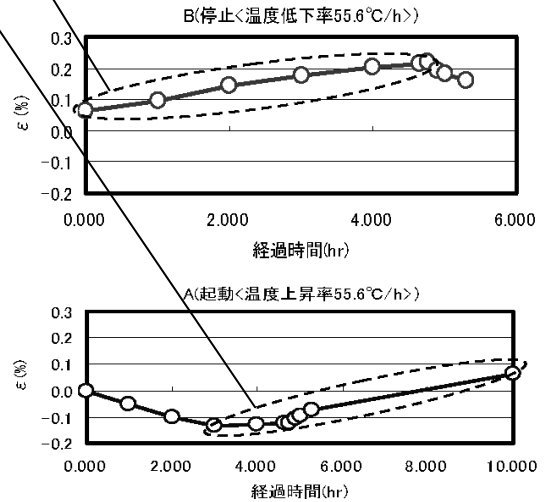


Fig.15 Example of F_{en} calculation in RCP outlet nozzle

Table 6 Example of U_{en} calculation in RCP outlet nozzle

過渡1	過渡2	応力値(Mpa)		応力対称し係数 K_σ	ピーク応力強さ $S(MPa)$	過渡回数 N	許容繰返し回数 N^*	疲労係数 U	環境効果補正係数 F_{en}	環境中疲労係数 U_m
		最大値	最小値							
B	A	376.8	-237.0	1.8	547.7	113	2910	0.03883	19.936	0.77414
C	D	346.6	-190.7	1.5	405.4	1	9390	0.00011	10.970	0.00117
D	D	300.1	-190.7	1.4	354.4	72	17900	0.00402	7.797	0.03136

A: 起動
B: 停止
C: 100%からの原子炉トリップ(不注意な冷却とSIを伴うトリップ)
D: 1次系漏れ試験

部位	疲労累積係数	
	疲労評価	環境疲労評価
1次冷却材ポンプ 吐出ノズル	0.043	0.807

3.6 PWR プラントにおける環境疲労評価例

Table 7 に代表的な PWR プラントの PLM 評価における環境疲労評価結果の例を示す。

ここに示すように、代表機器の環境疲労評価結果はいずれも許容値を満足している。また、この評価は、全て詳細評価手法を適用しているが、評価結果が厳しくない部位にはより簡易な手法を適用することにより、効率的な評価を行うことが可能である。この様に日本機械学会の環境疲労評価手法は、運転プラントの PLM 評価において全ての評価対象機器を効率的に評価できる実用的な評価手法である。

Table 7 Example of environmental fatigue evaluation results in typical PWR plant

■ 代表的な機器の評価結果			
機器名	評価対象部位	大気中の疲労累積係数 (注1)	環境効果を考慮した疲労累積係数
原子炉容器	冷却材出口管台	0.000	0.000
	スプレイン用管台	0.015	0.548(注2)
1次冷却材管	サージ用管台	0.001	0.001
	クロスオーバーレグ	0.001	0.001
	加圧サージライン用管台	0.033	0.147
RCS配管	加圧サージ配管	0.002	0.013(注2)
	加圧器スプレ配管	0.080	0.410(注2)
余熱除去ポンプ 第1入口弁(仕切弁)	弁箱	0.002	0.058
抽出水第1止め弁(玉形弁)	弁箱	0.018	0.225
1次冷却材ポンプ	吐出ノズル	0.043	0.807
余熱除去ポンプ	ケーシングカバー	0.003	0.012
炉心支持構造物	上部炉心支持板	0.010	0.111
蒸気発生器	給水入口管台	0.002	0.354(注2)
	管板廻り	0.080	0.180
余熱除去クーラ	管板部	0.126	0.443

(注1) PLM報告書では、非接測部も含めて最大値を記載しているが、ここでは右欄の環境疲労評価値の値を記載している。
(注2) 熱成膜による発生応力を含めた解析結果

4. 結言

本論文では、運転プラントに対して環境疲労評価を実施した代表例とそれに用いた評価手法を紹介した。

これらの評価は PLM 評価の一部として実施され、日本機械学会規格環境疲労評価手法 2006 年版を用いている。

この結果から、60 年の運転を仮定しても疲労累積係数は 1 以下に収まり、疲労評価の結果、長期保全計画に反映する必要はないとの結果が得られている。また、この評価は保守的な設計過渡条件を用いており、実機の運転条件においては更に低い疲労累積係数が得られるものと推定される。

このことから、我が国 PWR プラントにおいては、環境効果を考慮しても運転プラントの高経年化に対する設備健全性は十分確保されていることが確認された。また、合わせて日本機械学会の環境疲労評価手法は運転プラントの PLM 評価において実用的で有効な評価手法であることが示された。

一方で、本評価手法を今後設計段階で適用するためには更に評価条件が厳しくなるため、なお一層の評価手法や評価条件の高度化が求められており^{[11],[12]}、現在、日本機械学会発電設備規格委員会原子力専門委員会疲労評価タスクにて引き続き検討が進められている。

謝辞

本論文をまとめるに当たり、これまで環境疲労評価手法の開発ならびに実機適用に尽力された、日本機械学会発電設備規格委員会原子力専門委員会環境疲労評価分科会のメンバーを始めとする我が国環境疲労関係者の長年にわたるご努力に感謝と敬意を表します。

参考文献

- [1] 日本機械学会 発電用原子力設備規格 環境疲労評価手法(2006年版) (JSME S NF1-2006), (2006年3月発行)
- [2] 米国規制委員会(NRC)の発行する公開の報告書。特に外部機関に委託した研究成果の報告書は NUREG/CR-の番号が付けられる。環境疲労評価手法に関する報告書としては、NURG/CR-6583 (1998), 5704(1999),6909(2007)などがある。
- [3] 環境中疲れ寿命評価指針(平成 12 年 9 月 : 通商産業省資源エネルギー庁 原子力発電管理課), 2000 年、資源エネルギー庁通達
- [4] 発電用原子力設備に関する環境疲労評価ガイドライン, 2002 年, (社)火力原子力発電技術協会
- [5] 日本原子力学会標準 原子力発電所の高経年化対策実施基準 : 2008, (AESJ-SC-P005:2008), 2009 年 2 月発行
- [6] 日本機械学会発電用原子力設備規格設計・建設規格 (2008 年版)(JSME S NC1-2008), (2008 年 11 月発行)
- [7] 中村隆夫、杉江保彰, 総説 学会規格作りとコードエンジニアの役割—軽水炉における環境疲労評価手法の実例—, 日本原子力学会和文論文誌 (Vol. 9, No.1, pp.1-12, 2010)
- [8] 樋口洵、中村隆夫、杉江保彰, 軽水炉冷却水中における疲労損傷評価手法の開発, 日本機械学会論文集 A 編 76 巻 762 号(2010-2)
- [9] O.K.Chopra, "Effect of LWR Coolant Environments on the Fatigue Life of Reactor Materials," NUREG/CR-6909(ANL-06/08), U.S.NRC, 2007
- [10] Regulatory Guide 1.207, "Guidelines for Evaluating Fatigue Analyses Incorporating the Life Reduction of Metal Components Due to the Effects on the Light-Water Environment in New Reactors", U.S.NRC, 2007
- [11] T. Nakamura, M. Iwasaki, S. Asada, Optimization of Environmental Fatigue Evaluation (Step-1) PVP2007-26247, 2007ASME PVP Conference, July 2007, San Antonio, Texas, USA
- [12] Y. Nomura, K. Tsutsumi, T. Inoue, S. Asada, T. Nakamura, Optimization of Environmental Fatigue Evaluation (Step-2) PVP2009-77115, 2009ASME PVP Conference, July 2009, Prague, Czech Republic

(平成 22 年 1 月 29 日)