

# 論文の内容の要旨

論文題目 軽水炉における環境疲労評価手法の規格制定に関する研究

氏 名 中 村 隆 夫

## 1. 研究の目的と動機

本研究の目的は、軽水炉に適用する実用的な環境疲労評価手法を開発し学会規格として制定することにある。

環境疲労については、軽水炉が運転されてから 30 年過ぎ、国民から軽水炉の高経年化を心配する声が高まる中で、重要機器の寿命に大きな影響を与える可能性がある事象として着目されてきた。このため長年に亘り国際的に研究が行われ、多くの技術知見が得られてきた。これらの状況を受けて米国及び日本の規制側は、運転中プラントに対し運転延長に対する余裕の確保また長期保全計画策定の観点から、環境疲労評価の実施を求めてきた。

一方で、過去の原子力発電所の損傷事例を分析した結果、疲労はプラント損傷の重要要因ではあるが、その大半は機械振動や高サイクル熱疲労によるものであり、本研究の対象としている低サイクル疲労については、これまで国内軽水炉において設計段階での疲労評価手法上の問題により生じた例はなく、海外においても、ほぼ同様の状況にある。

これらを踏まえると、これまで軽水炉で長年適用されてきた ASME 規格 Sec.III に基づく疲労評価は、低サイクル疲労の発生を防止するのに十分な保守性を有していると言える。しかし、新しい知見を活用し今後の更なる軽水炉の長期運転あるいは高度利用を進める上で、環境疲労評価手法の開発並びに規格制定は大いに役立つものと考ええる。

## 2. 規格のグラントデザイン

### (1) 構造規格体系上の位置付け

1963年、ASME規格Sec.IIIに世界で初めて疲労評価の規定が導入されて以来、軽水炉のクラス1機器の設計では疲労評価が要求されてきた。ASME規格における設計段階での疲労評価は、安全余裕の枠取りであり、運転開始後には要求されない。運転開始後の機器の健全性はASME規格ではSec.XIに規定される検査によって確保される。

また、ASME規格で疲労設計に用いる設計疲労線図は、大気中の疲労試験データを基にして得られた最確曲線に対して、応力で2、サイクルで20の補正係数を掛けることで設定されている。サイクルに対する係数20の中には環境などに対する係数として4が取られたとされているが、ここでいう環境とは、実験室と産業現場の置かれている雰囲気の違いという意味であり、本研究で対象としている環境疲労のような特定の冷却材の影響を意味するものではないとされている。

### (2) 規制体系における位置付け

米国NRCが運転期間延長に際して求めた疲労評価は、規制として40年の運転許可期間を与えたことに対し、それを60年に延長することを許可するに際して余裕の再確認を求めたものと考えられ、疲労評価結果を長期保全計画に反映するというわが国の考え方と合致している。

従って、環境効果を疲労評価で考慮する目的は余裕の確認であり、第一段階として任意規定で制定すべきという考え方に基づき、環境疲労評価手法を学会規格として制定することとした。

### (3) 規格の制定プロセス

環境疲労に関する規格制定は、(A)環境疲労評価手法の規格制定、(B)簡易弾塑性評価手法の改訂、(C)設計建設規格（維持規格）への取り入れ、の3つに分けて取り組むこととし、本研究では、(A)と(B)について実施する。また、(A)においては、評価手法の開発を評価経験の蓄積や試験データの充実度に合わせて、二つの段階に分けて取り組むこととした。まず、評価手法を開発し事業者の自主基準を火原協ガイドラインとして制定した上で実績を積み、次に日本機械学会にて任意規定として学会規格を制定した。

### (4) 国際規格との整合性

学会として科学的合理性に立ってASME規格、IAEA基準やISO規格と国際的に整合性のある規格作りを今後目指していく必要がある。

### (5) 規格のグラントデザイン

環境疲労評価手法の開発に当たり、①環境効果補正係数の採用、②補正係数算出方法の3つのオプション、③各機器に特有な評価方法、の3つの研究課題を選定すると共に疲労評価に用いる簡易弾塑性評価手法の改良にも取り組むこととした。

また、これから制定する規格が満足すべき要件を明らかとした。規格が満足すべき要件は、イ) 我が国規制要求への対応、ロ) 学協会規格の役割、ハ) 産業界ニーズ、二) 最新の技術知見やプラント運転実績の反映、ホ) 国際規格との整合性、の5つである。

これらの研究課題と規格の満足すべき要件を受けて、規格のグラントデザインを取りまとめ、それに沿って研究を進めて規格を制定した。

### 3. 環境疲労評価手法の開発

環境疲労評価手法については、2006年3月に日本機械学会規格として「環境疲労評価手法」を発行することで、本研究の目的を達成した。

環境疲労評価手法の特徴は、次の通りである。

- (a) 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。
- (b) 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。
- (c) 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評価を可能とする。

#### (1) 環境効果補正係数

環境効果補正係数  $F_{en}$  は、下式に示すように、あるひずみ振幅での大気中の疲労寿命を、同じひずみ振幅での原子炉冷却水環境中の疲労寿命で除した値と定義する。

$$F_{en} = \frac{N_A}{N_W}$$

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

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

$F_{en}$  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されれば求めることができる。

現在の設計・建設規格でのクラス1機器の疲労損傷の評価では、二つの過渡を組合せた応力サイクルの疲労累積係数  $U_i$  を全ての応力サイクルに対して線形加算することで疲労累積係数を求めている。

各応力サイクルにおいてひずみ速度、温度、溶存酸素濃度等の条件が決定されれば、 $F_{en}$  評価式に基づき各応力サイクルにおける  $F_{en}$  を算出でき、上記式の通り、各々の応力サイクルによる疲労累積係数  $U_i$  とその応力サイクルでの  $F_{en,i}$  を乗じたものを線形加算することで環境中での疲労累積係数を求めることができる。

#### (2) 環境疲労評価方法の3つのオプション

環境疲労評価を行う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。

#### (3) 各機器に特有の評価方法

一般に配管、弁等の場合、容器と異なり、簡略化された応力解析手法が用いられることが多い。このことから、環境効果を考慮する評価方法についても、容器、配管、ポンプ、弁、炉心支持構造物に分けてまとめた。

#### 4. 簡易弾塑性評価手法の改良

告示 501 号(設計建設規格)で規定されている簡易弾塑性解析用割り増し係数について、より適切な  $K_e$  評価式を検討し、疲労評価の保守性低減を図った。

その結果、新  $K_e$  評価式として、 $K_e$  式と  $A_0$  式を組み合わせたもの、及び直接解析によって求めた  $K_e$  係数の 2 案が適切なものとして結論付けられた。この規格改訂案は、疲労解析の対象となる重要機器の形状・材料・荷重条件について保守性を持たせており、規格として汎用的に用いる上で十分に妥当性を持つものである。

#### 5. 評価手法の実機検証と規格制定活動の評価

環境疲労評価に関する火原協ガイドラインを適用して、代表的 PWR プラントの PLM 評価を実施した。また、日本機械学会規格で新たに取り入れたステンレス鋳鋼の評価式の影響を新  $K_e$  係数の効果と合わせて確認した。

その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 火原協ガイドラインで策定した環境疲労評価手法を PLM 評価に適用した。その結果、60 年の運転を仮定し環境効果を考慮した疲労評価を実施することにより、評価手法の実機適用性を確認した。
- (2) 火原協ガイドラインで適用した環境効果補正係数  $F_{en}$  は暫定的に設定したものであり、EFT プロジェクト成果等の最新の知見を適用して日本機械学会規格を制定した。
- (3) 日本機械学会規格で新たに導入したステンレス鋳鋼の環境疲労評価式の適用性が確認された。また、新  $K_e$  係数採用による  $F_{en}$  の低減効果も確認できた。

更に、次の観点から規格制定活動の成果について評価を行った。

##### ①規格制定のプロセス

規格の制定は多くの段階を経て達成されるが、その各々のプロセスにおいて規格制定活動が満足する成果を挙げたことを確認した。

##### ②規格のグランドデザイン

規格のグランドデザインに沿って、規格制定活動が満足する成果を挙げたことを確認した。

##### ③制定する規格が充足すべき要件に対する評価

制定する規格が充足すべき要件に対する評価を行い、満足する成果を挙げたことを確認した。

#### 6. 今後の課題

環境効果を設計段階での疲労評価に取り入れること等、疲労評価に関する今後の検討課題について取りまとめた。