

高速炉機器の構造信頼性評価法のベンチマーク評価

Benchmark Evaluation of Structural Reliability Evaluation Codes for FBR

原子力機構	高屋 茂	Shigeru TAKAYA	Member
原子力機構	浅山 泰	Tai ASAYAMA	Member
テプコシステムズ	町田 秀夫	Hideo MACHIDA	
三菱 FBR システムズ	神島 吉郎	Yoshio KAMISHIMA	

Abstract

This paper describes a procedure of structural reliability evaluation of passive components of fast breeder reactors for a failure due to fatigue-creep interaction damage, and also reports results of benchmark evaluation conducted by using two independently developed codes. The structural integrity of a reactor vessel was evaluated deterministically and probabilistically. The results estimated by two codes agree well for both of deterministic and probabilistic evaluations, which shows that these codes are programmed properly according to the evaluation procedure.

Keywords: System based code, Fatigue-creep interaction damage, Crack propagation, Deterministic evaluation, Probabilistic evaluation, Fast breeder reactor, Reactor vessel

1. 諸言

供用期間中検査 (ISI) 要求はプラントの特徴を考慮して適切に定められなければならない。しかし、プラントの特徴には、環境、材料、設計、製作、施工、運転管理、安全評価等、多岐にわたる項目が含まれ、従来、それらを統一的に扱うことは困難であった。そこで我々は、システム化規格概念に基づく ISI 要求の検討を行っている[1]。システム化規格概念とは、関連する全ての技術要求項目を考慮して原子力プラントの信頼性を最適化することを目指した新しい規格体系に関する概念である[2]。本概念の具体化に当たっては、信頼性 (破損確率) 評価手法の整備が重要であり、現在、日本機械学会のシステム化規格検討会において、高速増殖炉の静的機器を対象とした信頼性評価ガイドライン (案) の検討が行われている[3]。さらに、信頼性評価の計算コードが適切に作成されていることも重要である。そこで、本研究では、高速増殖炉における代表的な劣化損傷機構であるクリープ疲労に関して、既存の設計評価法等を参考にき裂発生及び進展に関する評価手法を整理するとともに原子炉容器を対象として入力条件の検討を行った。さらに整理した手

順に従った評価が可能な独立に開発された二つの計算コード[4] (MSS-REAL (原子力機構)、GENPRO/PEPPER (テプコシステムズ)) を用いて、決定論評価および確率論評価を実施し、両計算コードの妥当性確認を行った。

2. 評価方法

2.1 クリープ疲労損傷によるき裂発生・進展評価

「実用高速炉の高温構造設計方針」[5] に基づきクリープ損傷量 (D_c) 及び疲労損傷量 (D_f) を評価し、(1)式を満たす場合に、深さ 1 mm の全周き裂が発生すると仮定した。

$$D_c + \frac{7}{3}D_f = 1 (D_f \leq 0.3); \frac{7}{3}D_c + D_f = 1 (D_f > 0.3) \quad (1)$$

また、き裂進展は、「高温構造健全性評価指針 (案)」[6] に基づき、(2)式を用いて評価した。

$$\frac{da}{dN} = C_f \Delta J_f^{m_f} + C_c \Delta J_c^{m_c} \quad (2)$$

a : き裂深さ

$\Delta J_f, \Delta J_c$: 疲労及びクリープに関する J 積分範囲

C_f, C_c, m_f, m_c : 材料定数

2.2 破損条件

不安定破壊とき裂の貫通を想定した。正味断面応力が流動応力を上回ったときに不安定破壊が起こるとした。また、参照応力算出式の適用限界からき裂深さが板厚 (40 mm) の 0.8 倍に達したときに貫通と見なした。

連絡先: 高屋 茂、〒311-1393 大洗町成田町 4002、日本原子力研究開発機構 高速炉研究開発部門
E-mail: takaya.shigeru@jaea.go.jp

2.3 評価条件

高速増殖炉原子炉容器の液面近傍（316FR 鋼溶接部）を対象に入力条件を検討した。原子炉容器には、起動 - 停止時に冷却材温度と液位の変化により生じる温度分布により液面近傍部に比較的大きな熱応力が発生する。よって、熱荷重の変動因子として温度変化幅を選択し、プラントの運用方法を参考に平均値及びばらつきを設定した。材料強度に関しては、JSME 発電用原子力設備規格設計・建設規格 第II編 高速炉規格[7]で定められている最適値を平均値として採用し、材料試験データに基づきばらつきを設定した。表1に入力条件のまとめを示す。

ベンチマークは、ばらつきを考慮しない決定論評価と、考慮した確率論評価を実施した。確率論評価には直接モ

Table 1 Input data

Parameter	PD	Value	
Number of cycles	LN	Mean	150
		SD	0.388
Axial stress due to inner pressure, MPa	Normal	Mean	8.9
		COV	0.130
Axial stress due to dead weight, MPa	Normal	Mean	15.8
		COV	0.022
Thermal stress for fatigue, MPa	Normal	Mean	239.3
		COV	0.065
Thermal stress for creep, MPa	Normal	Mean	128.5
		COV	0.051
secondary bending stress, MPa	Normal	Mean	171.1
		COV	0.065
C_f in eq. (2)	LN	Median	6.34E-5 [5]
		SD	0.421
m_f in eq. (2)	Const.	-	1.3742
C_c in eq. (2)	LN	Median	7.41E-3 [5]
		SD	0.421
m_c in eq. (2)	Const.	-	0.88
Fatigue life normalized by fatigue failure eq. in JSME code [6]	LN	Median	1
		SD	1.44
Creep rupture time normalized by rupture eq. in JSME code [6]	LN	Median	1
		SD	0.645

PD: Probability distribution, LN: Lognormal, COV: Coefficient of variation, SD: Standard deviation

ンテカルロ法を用い、サンプル数は 10^5 とした。但し、表1の条件では破損サンプルが生じないため、クリープ疲労損傷値とき裂進展速度をそれぞれ100倍して評価した。

3. 評価結果

結果を表2に示す。破損年数（決定論評価）は非常に良く一致していた。破損確率（確率論評価）も1割弱の差が認められるが、ほぼ一致していた。ISI要求の検討を行う際には、有効数字1桁程度で判断すると考えられることから十分な結果である。但し、損傷値とき裂進展速度に対する加速係数がない場合には差が若干変化する可能性があるため確認が必要である。なお、決定論評価でGENPRO/PEPPERが寿命を短めに評価していることが、確率論評価結果の差にも影響していると予想される。

Table 2 Evaluation results

	Failure time [year]	Failure probability*
MSS-REAL (A)	13634.8	5.7E-2
GENPRO/PEPPER (B)	13567.6	6.2E-2
(A)-(B)/(A) [%]	0.5	-8.8

*: 100 times larger damages and crack propagation rates were assumed.

4. 結言

本例題では、コードによる破損確率評価結果の差は1割弱であった。ISI要求の検討を行う上で十分許容されることが考えられるが、コードの妥当性確認のため加速係数無の場合や他の例題に関する検討を引き続き実施していく。

参考文献

- [1] S. Takaya et al., J. Power and Energy Systems, Vol. 5, 2011, pp.60-68.
- [2] Y. Asada et al, Proc. of ICONE 10, 2002, #22730.
- [3] S. Takaya et al., Proc. of ICONE22, 2014, #30570.
- [4] 吉村, 関東編, リスク活用のための確率論的破壊力学技術 - 基礎と応用 -, 日本溶接協会, 2012.
- [5] 日本原電, 平成16年度経済産業省委託研究「発電用新型炉技術確証試験」事業報告書 その1 設計手法高度化確証試験 別冊, 2005.
- [6] 電中研, 高温構造健全性評価指針 (案), 2001.
- [7] 日本機械学会, 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 第II編 高速炉規格 2012年版, 2012.