

軽水炉保全最適化のための統合型シミュレータ Dr. Mainte による ヒューマンエラーの影響とその低減効果の検討

Effects of Human Error and its Reduction Analyzed by Dr. Mainte,
Integrated Simulator of Maintenance Optimization of LWRs

原子燃料工業株式会社	磯部 仁博	Yoshihiro ISOBE	Member
原子燃料工業株式会社	匂坂 充行	Mitsuyuki SAGISAKA	Member
原子燃料工業株式会社	小川 良太	Ryota OGAWA	Member
原子燃料工業株式会社	松永 嵩	Takashi Matsunaga	Member
株式会社アトリー	高坂 徹	Toru Kosaka	
株式会社アトリー	松本 聡司	Satoshi Matsumoto	
東京大学	吉村 忍	Shinobu YOSHIMURA	

Dr. Mainte, an integrated simulator for maintenance optimization of LWRs (Light Water Reactors) has been developed based on PFM (Probabilistic Fracture Mechanics) analyses. The concept of the simulator is to provide a decision-making system to optimize maintenance activities for representative components and piping systems in nuclear power plants totally and quantitatively in terms of safety, availability and economic efficiency, environmental impact and social acceptance. For the further improvement of the safety and availability, the effect of human errors and their reduction on the optimization of plant maintenance activities have been studied. The types of human error analyzed in this study are undetected error of cracks independent on their depths, repair failures after crack detections through ISI (In-Service Inspection) and skipping inspections.

Keywords: Dr. Mainte, LWR, maintenance, optimization, PFM, simulation, human error

1. はじめに

著者らは軽水炉の主要機器・配管等を対象として、各種保全戦略（検査頻度、検査精度、抜取検査率、修理／取替の選択、維持規格の適用、長期サイクル運転等）が、①安全性、②信頼性、③経済合理性、④環境性、⑤社会的受容性に及ぼす影響を定量評価し、それら多角的な視点から保全戦略を総合的に最適化するための PFM(確率論的破壊力学)に基づく軽水炉保全最適化のための統合型シミュレータ Dr. Mainte を開発してきた[1-3]。

一方で、軽水炉保全作業のさらなる信頼性向上のためには、ヒューマンエラー低減の重要性が指摘されている。ここでは原子力発電所の配管を対象としたPFM解析ベースの保全最適化評価において、ヒューマンエラーの影響とその低減効果について検討した。具体的にはヒューマンエラーとして「検査時のき裂深さに依存しないき裂の見逃し」、「検査によって検出されたき裂の修理失敗」、「検査 skip」を仮定して、BWR 再循環系配管を対象に配管漏洩／破断確率、経済的／社会的コストへの影響評価を行った。

2. アプローチ

2.1 ヒューマンエラーの影響とその低減効果

ヒューマンエラーとして「検査時のき裂深さに依存しないき裂の見逃し」、「検査によって検出されたき裂の修理失敗」、「検査 skip」を仮定して、それらの影響とその低減効果について、BWR 再循環系配管の保全活動を対象に評価した。解析では BWR 再循環系配管の各種保全戦略評価用に筆者らが改良した pc-PRAISE 3.0 (Piping Reliability Analysis Including Seismic Events) [4,5]を用いた。詳細な PFM 解析条件については別文献に記すが[3]、概要を **Table 1** に示す。き裂発生確率については、実験結果と実機データの経験則から求められた pc-PRAISE で用いられている確率分布を採用した (**Table 1**)。き裂進展則についても実験結果と実機データの経験則から **Table 1** に示す式を用いた。き裂深さに対する検査精度については、pc-PRAISE で用いられている 1980 年代当時の文献データに基づく **Fig. 1** の超音波探傷による非破壊検査のき裂非検出確率を参考にした。PFM 解析結果に基づく経済性評価等に用いる条件を **Table 2** に示す。

連絡先: 磯部 仁博 〒590-0451 大阪府泉南郡熊取町
朝代西 1-950 原子燃料工業株式会社
E-mail: isobe@nfi.co.jp

Table 1 Conditions of PFM analysis for PLR pipes [3].

計算コード	拡張 pc-PRAISE 3.0 原子燃料工業(株)でソース改変
配管材料	SUS316 NG
配管直径	400A : 8 inch (406.4 mm)
配管肉厚	400A : 0.84 inch (21.3 mm)
運転期間	40年 (12ヶ月運転)
運転温度	288°C (550 ℔)
運転圧力	87.5 atm
流動応力	31.6kg/mm ² (平均値) 1.3 kg/mm ² (標準偏差)
残留応力	中口径配管の溶接残留応力値
初期き裂発生確率	$mean\ value\ of\ t_{1\sigma} = -7.72 - 5.39 \log(D_{\sigma})$ $std.\ dev.\ of\ t_{1\sigma} = 0.3081$ $D_{\sigma} = f_1(material) f_2(environment) f_3(loadings)$ $f_1 = 1.879$ $f_2 = O_2^{0.24} \exp\left[\frac{-1123}{T+273}\right] \log(4.0\gamma^{0.35})$ $f_{3\sigma} = (2.21 \times 10^{-15} \sigma^{6.0})^{0.49}$ O_2 : 酸素濃度, γ : 氷導電率, σ : 応力, T : 温度
き裂発生箇所	400A : 23箇所 (1溶接線当たり)
き裂進展速度	Harrisの式に基づく $\log \dot{a} = C_1 + C_2(C_3 \log[f_2(env.)] + C_4 K)$ $C_1: 0.8192, C_2: 0.03621,$ C_3 (平均値): 4.006, C_3 (標準偏差): 0.5792 $C_4: 1.19$
ISIの頻度	100%/5年
補修	取替

Table 2 Economy, environmental impact and social acceptance assessments.

1ユニット売上 (百万円)	80,000
営業費用 (百万円)	70,000
検査コスト [1溶接線当り] (百万円)	5
修理コスト [1溶接線当り] (百万円)	40
取替コスト [1溶接線当り] (百万円)	70
漏洩コスト (百万円)	10,000
3年以内再漏洩コスト (百万円) 【社会的受容性】	100,000
破断コスト (百万円)	100,000
3年以内再破断コスト (百万円) 【社会的受容性】	1,000,000
リスクフリーレート	0.01
12ヶ月運転	5年100%検査 運転後1ヶ月の定期検査 (火力代替発電)
原子力発電の出力	100万 kW
火力代替発電の出力	100万 kW
火力代替発電	定期検査、配管漏洩による 運転停止期間
配管漏洩	6ヶ月運転停止
原子力によるCO2排出量 (g/kWh)	20
火力によるCO2排出量 (g/kWh)	760
CO2排出コスト (yen/ton)	12,000

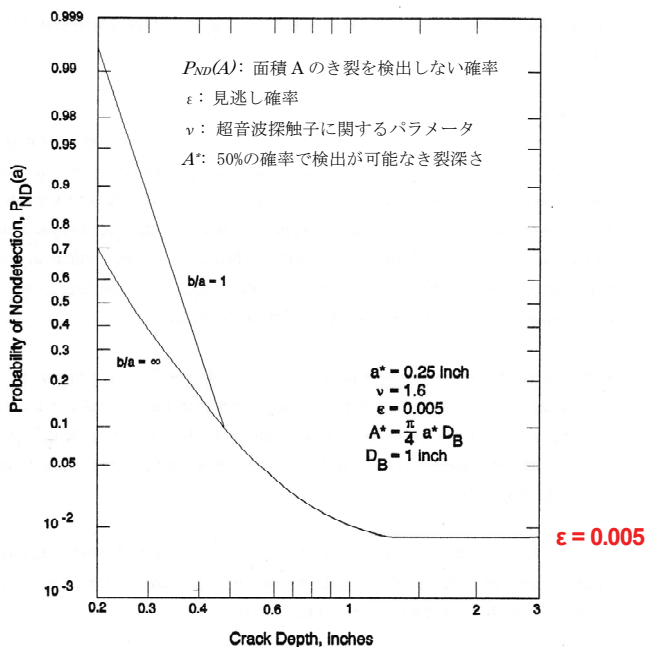


Fig. 1 Probability of non-detection of cracks by UT [3].

2.1.1 検査時のき裂深さに依存しないき裂の見逃し

Fig. 1 で ϵ の値が「き裂深さに依存しない見逃し確率」であり、米国における 1980 年代当時のデータから $\epsilon = 0.005$ の値は、冷間加工されたオーステナイト系ステンレス鋼配管、並びにフェライト鋼配管についても妥当であるとされている。ここでは、 $\epsilon = 0.005$ の値を、最小がその半分の 0.0025 から、最大がその 20 倍の 0.1 まで変化させることにより感度解析を行なった。

2.1.2 検査によって検出されたき裂の修理失敗

検査時にき裂が発見された場合に補修を実施するが、「修理失敗」に関するヒューマンエラーの確率を THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) 手法 [6] を参考に Table 3 の対数正規分布で表した。修理に失敗すると次サイクルにおいて漏洩が発生すると仮定して、60 年運転期間中の 1 溶接線当たりの累積漏洩確率を評価した。

Table 3 Probabilistic density functions for human error of welding repair.

確率密度関数	パラメータ
対数正規分布	$\mu = -4.0, \sigma = 1.0, \text{mean} = 0.03$
	$\mu = -2.5, \sigma = 0.7, \text{mean} = 0.10$
	$\mu = -1.5, \sigma = 0.7, \text{mean} = 0.30$

2.1.3 検査 skip

ヒューマンエラーとして「検査 skip」の影響について、BWR 再循環系配管を対象に検討した。解析は

- ・ 5年100%検査
- ・ 5年100%検査で5年目の検査を skip
- ・ 5年100%検査で55年目の検査を skip
- ・ 検査なし (すべての検査を skip)

の条件で、60年運転期間中の1溶接線当たりの累積漏洩/破断確率、単年度 NPV (正味現在価値) を評価した。

3. 解析結果

3.1.1 検査時のき裂深さに依存しないき裂の見逃し

Fig. 2 (a) は60年運転期間中の累積リーク確率の推移を示す。また、経済性評価として Fig. 2 (b) は60年運転期間中の単年度 NPV (現在正味価値) の推移を示す。

今回の解析条件の範囲内では、見逃し確率が $\varepsilon = 0.005$ から半分の $\varepsilon = 0.0025$ に低減されたとしても、累積漏洩確率にはほとんど影響を受けず、逆に20倍の $\varepsilon = 0.1$ となっても、運転60年目の累積漏洩確率において2%程度の差異しか無かった。また、見逃し確率の NPV への影響は限定的であった。理由としては検査精度が十分に高いため、ヒューマンエラーを考慮しても漏洩に至るまでにき裂の検出が可能となることによると考えられる。即ち、ヒューマンエラー低減の効果の高い項目の改善が重要となることが示唆される。

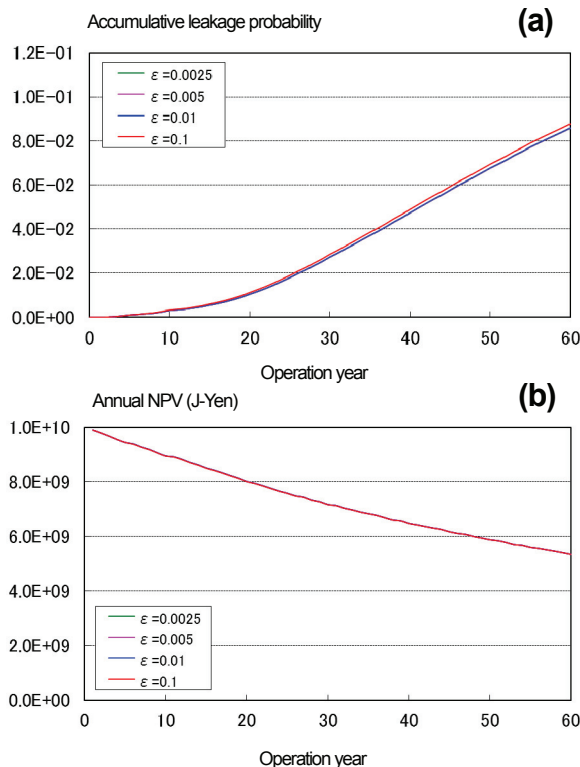


Fig. 2 Effect of undetected error of cracks independent on their depths.

3.1.2 検査によって検出されたき裂の修理失敗

Fig. 3 (a) は60年運転期間中の累積リーク確率の推移を示す。また、経済性評価として Fig. 3 (b) は60年運転期間中の単年度 NPV (現在正味価値) の推移を示す。

今回の解析条件の範囲内では、「検査によって検出されたき裂の修理失敗」の確率が対数正規分布 mean = 0.105 程度で、検査なしの累積漏洩確率となり、ヒューマンエラーとして「検査によって検出されたき裂の修理失敗」の影響は大きくなることわかる。

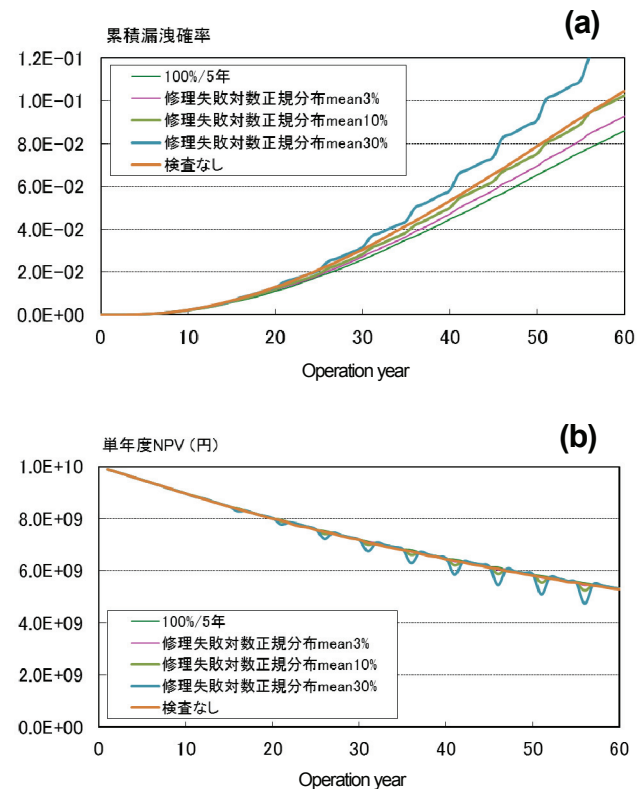


Fig. 3 Effect of repair failure after crack detection during ISI.

3.1.3 検査 skip

60年運転期間中の1溶接線当たりの累積漏洩/破断確率と単年度 NPV : 正味現在価値を評価した (Fig. 4)。

今回の解析条件の範囲内では、Fig. 4 (a) からは、「5年100%検査」と「5年100%検査で5年目の検査を skip」、「5年100%検査で55年目の検査を skip」した場合を比較した場合、60年における1溶接線当たりの累積漏洩確率の増加はそれぞれ 7.1×10^{-5} 、 1.0×10^{-3} であり、累積破断確率の増加はそれぞれ 5.2×10^{-7} 、 4.0×10^{-5} であった。また、Fig. 4 (b) からは、「5年100%検査」と「5年100%検査で5年目の検査を skip」、「5年100%検査で55年目の検査を skip」した場合を比較した場合、60年における単年度 NPV

の減少はそれぞれ、～0、12 百万であった。

以上から、60 年運転期間中の初期に比較して末期における検査 skip の影響がやや大きいものの、その影響は限定的であった。理由としては、検査頻度等に余裕があるため、「検査 skip」というヒューマンエラーを考慮しても漏洩・破断に至るまでにき裂の検出が可能となることによると考えられる。

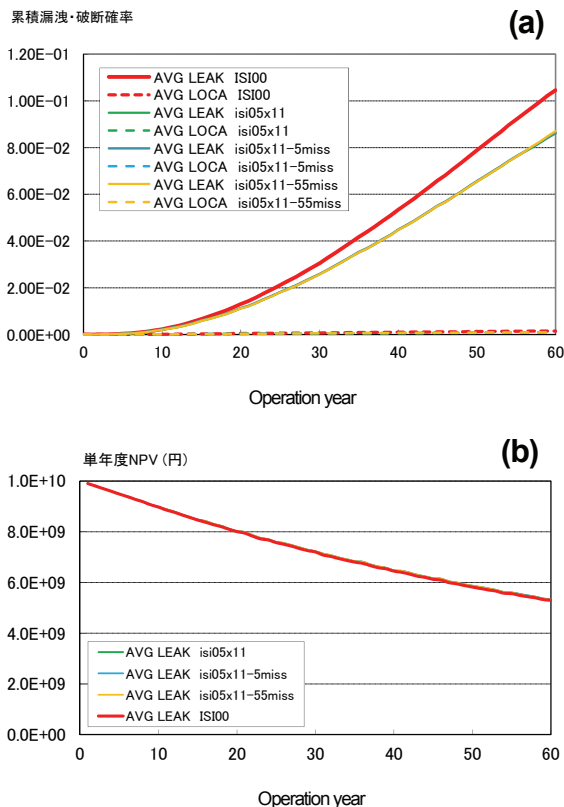


Fig. 4 Effect of inspection skip.

4. まとめ

ヒューマンエラーがBWR再循環系配管の保全に及ぼす影響として、「検査によって検出されたき裂の修理失敗」、「検査 skip」の影響について検討した。

今回の解析条件の範囲内では、「検査によって検出されたき裂の修理失敗」については、累積漏洩確率への影響は大きいことがわかった。一方で、「検査 skip」については、累積漏洩／破断確率、NPV（正味現在価値）への影響は限定的であった。

RI-ISI (Risk-Informed In-Service Inspection) において、①影響度と②破損の可能性(劣化の程度)を考慮した検査計画が必要なように、ヒューマンエラー低減の効果の高い作業の抽出が重要となることがわかる。或

いは、ヒューマンエラーが発生しても影響度が低い保全計画とすることが重要である。

また、今回ヒューマンエラーとして仮定した「検査時のき裂深さに依存しないき裂の見逃し」、「検査 skip」は Omission Error (実行すべき行為をしない) であり、「検査によって検出されたき裂の修理失敗」は Commission Error (実行したが正しく行われぬ) であるが、Commission Error が影響大となる保全活動についてはその実施のあり方に注意が必要になると考えられる。

参考文献

[1] 匂坂充行, 磯部仁博, 吉村 忍, 矢川元基, “確率論的破壊力学に基づく蒸気発生器伝熱管メンテナンス戦略の定量評価,” 日本原子力学会誌, 42[12], 1325-1333 (2000).

[2] 匂坂充行, 磯部仁博, 吉村 忍, 矢川元基, “確率論的破壊力学と財務的手法を用いた SG 伝熱管メンテナンス戦略の経済性評価,” 日本原子力学会和文論文誌, 3[2], 151-164 (2004).

[3] 吉村 忍, 古田一雄, 磯部仁博, 匂坂充行, 野田満晴, 秋葉博, “軽水炉保全最適化のための総合型シミュレータ Dr. Mainte の開発,” 日本原子力学会和文論文誌, 9[2], 125-138 (2010).

[4] D.O.Harris, E. Y. Lim, D. D. Dedhia, Probability of Pipe Fracture in the Primary Coolant Loop of a PWR Plant, Vol. 5 : Probabilistic Fracture Mechanics Analysis, NUREG/CR-2189, 5, U. S. Nuclear Regulatory Commission (1981).

[5] D. O. Harris, E. Y. Lim, D. D. Dedhia et al., Fracture Mechanics Models Developed for Piping Reliability Assessment in Light Water Reactors, NUREG/CR-301, U. S. Nuclear Regulatory Commission (1982).

[6] A.D. Swain and H.E. Guttman, “Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications Final Report,” NUREG/CR-1278, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, August 1983.