

令和 2 年 1 0 月 1 9 日

大飯発電所 3 号機加圧器スプレイライン配管溶接部における 有意な指示に対する亀裂進展計算及び破壊評価について

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
安全研究・防災支援部門
安全研究センター

1. はじめに

関西電力（株）（以下、「事業者」という。）大飯発電所 3 号機のクラス 1 機器を対象とした供用期間中検査において、加圧器スプレイライン（D ループ）の 1 次冷却材管台と管継手（エルボ部）の配管溶接部に対する超音波探傷試験の結果、8 月 31 日に有意な指示が認められた。その後、9 月 1 日における詳細探傷の結果、亀裂深さは約 4.6 mm、長さは約 67 mm と評価された¹⁾。今回確認された亀裂の原因は、強加工応力腐食割れ（以下、「SCC」という。）によるものであると推定されている¹⁾。当該部位の健全性確認のため、事業者により維持規格²⁾に従った亀裂進展計算及び破壊評価が実施された^{1,3)}。

本資料は、9 月 18 日までの事業者説明資料^{1,3)}を参考に、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という。）が実施した以下の検討内容を取りまとめたものである。

- ・ 事業者が実施した亀裂進展計算及び破壊評価の結果³⁾の確認
- ・ 配管内表面の表層部の硬化層の影響評価
- ・ 事例規格代替案⁴⁾に基づく許容亀裂深さの計算

2. 事業者が実施した亀裂進展計算及び破壊評価の結果の確認

2.1 SCC による亀裂進展計算の結果の確認

事業者説明資料³⁾の表-6 には、超音波探傷試験により検出された亀裂を対象とした、12 カ月の評価期間に対する SCC による亀裂進展量の計算結果が示されている。事業者による計算では、亀裂進展速度評価式として、式（1）及び（2）により表される SCC 亀裂進展速度に関する試験データのベストフィット曲線（以下、「BFC」という。）式及び包絡曲線式¹⁾が用いられた。

$$\text{BFC 式 : } \frac{da}{dt} = 1.13 \times 10^{-26} \times K^{1.96} \times HV^{6.45} \quad (1)$$

$$\text{包絡曲線式 : } \frac{da}{dt} = 3.38 \times 10^{-26} \times K^{1.96} \times HV^{6.45} \quad (2)$$

ここで、 da/dt は亀裂進展速度 [mm/s]、 a は亀裂深さ [mm]、 t は時間 [s]、 K は応力拡大係数 [MPa \cdot m^{0.5}]、 HV はビッカース硬さ [HV] である。

事業者の設定した条件¹⁾を用いて、原子力機構が算出した SCC による亀裂進展量を

表 1 に示す。表 1 から明らかなように、本計算の結果と事業者の説明資料の値とが一致することを確認した。

表 1 SCC による 12 カ月の評価期間の亀裂進展計算結果の比較

		BFC 式		包絡曲線式	
		亀裂深さ 方向	亀裂長さ 方向	亀裂深さ 方向	亀裂長さ 方向
初期亀裂寸法 [mm]		4.6	67	4.6	67
SCC による亀裂 進展量 [mm]	事業者説明資料	0.4	1	1.1	2
	本計算 ^{注1}	0.4	1	1.1	2

2.2 破壊評価の結果の確認

事業者説明資料の表-8³⁾には、12 カ月を評価期間とした場合の亀裂進展計算結果を用いた許容曲げ応力 S_c の評価結果が示されている。事業者の設定した条件¹⁾を用いて、原子力機構が維持規格に基づき算出した 12 カ月の評価期間後の許容曲げ応力 S_c の値と、事業者の評価結果とを比較して表 2 に示す。表 2 から分かるように、両者の結果の間に相違が認められた。その原因について検討したところ、事業者が Z 係数算出式における対数関数を自然対数と解釈したことによるものではないかと推定された。参考として、原子力機構が Z 係数算出式における対数関数を自然対数と仮定して評価した場合の S_c 計算結果（表 2 中に括弧付きで示す）は、事業者のそれとほぼ一致した。

表 2 12 カ月の評価期間後の許容曲げ応力 S_c の評価結果の比較

亀裂進展 速度評価式	許容状態	許容曲げ応力 S_c [MPa]	
		事業者 説明資料	本計算
BFC 式	A, B	24.9	42.0 (24.4 ^{注3)})
	C ^{注2}	82.4	116.8 (81.3 ^{注3)})
包絡曲線式	A, B	22.2	38.7 (21.6 ^{注3)})
	C ^{注2}	76.9	110.2 (75.6 ^{注3)})

3. 配管内表面の表層部の硬化層の影響評価

事業者説明資料¹⁾の P. 23 では、亀裂の発生原因分析において、“当該部は、シンニング加工により表層で 300HV を超える硬さとなっていることが想定”されるとしている。評価対象部位の製造を担当したメーカーでシンニング加工を実施した配管の表層部の硬さ計測結果を図 1 に示す。内表面の硬化層は表面点での SCC 進展速度を加速させ

注1 事業者と同様に、亀裂深さ方向の進展量、長さ方向の進展量はそれぞれ計算結果の小数点以下第 2 位、小数点以下第 1 位を切り上げた。

注2 事業者説明資料¹⁾の表 1.4.10 に示す荷重組合せ C+Ss の応力条件を用いた。

注3 亀裂角度について、事業者説明資料³⁾の表-4 に示されている角度と同様に、板厚を 13.5 mm ではなく 14 mm として求めた。また、Z 係数算出式における対数関数について、常用対数ではなく自然対数と仮定した。

ることとなり、この表面点での進展は半楕円亀裂の最深点の進展にも影響することから、亀裂進展量にはシンニング加工が大きく影響すると考えられる。そのため、配管のシンニング加工による表層部の硬化層を考慮して、以下の2ケースの亀裂進展計算を実施し、硬化層の影響を確認した。

- ・ Case 1：溶接による硬さ分布¹⁾のみを考慮
- ・ Case 2：溶接による硬さ分布¹⁾に加えて、シンニング加工による配管内表面の表層部の硬化層を考慮

Case 2における配管表層部の硬化層における硬さ分布については、図1を参考に、次式により設定した。

$$HV = -1727.5x + 381.75 \quad (3)$$

(ただし、 $x \leq 0.1$, x は内表面からの距離 [mm])

式(3)は、図1に示されている4つの配管(1B、3B、6B、12B)の内表面における硬さ計測結果の平均値(381.75 HV)と、表面から0.1 mm深さにおける硬さ(209 HV)を線形内挿して設定したものである。表面から0.1 mmよりも外表面側における硬さについては、事業者が設定した溶接による硬さ分布¹⁾を用いた。Case 1及びCase 2で設定した表層部の硬さ分布を図1に破線で示す。

なお、両ケースとも、板厚内の硬さ分布以外の計算条件については、事業者説明資料¹⁾と同様の条件を用いることとし、亀裂進展速度評価式については2.1に示した包絡曲線式を用いた。

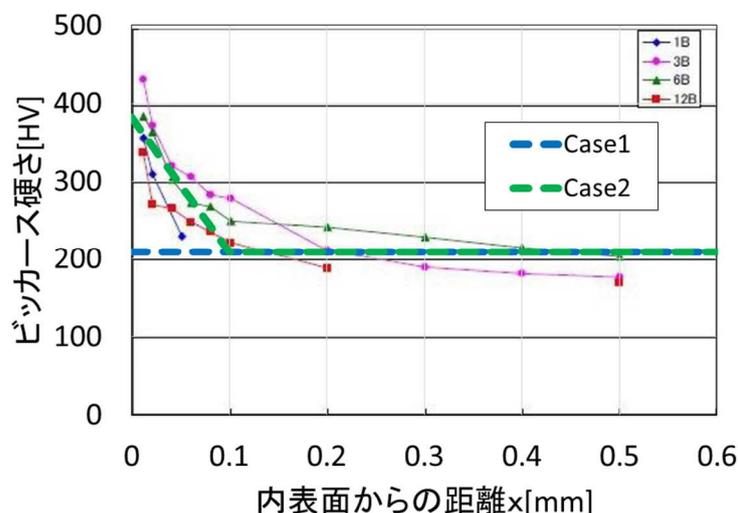


図1 1B、3B、6B、12B管のシンニング部の表層部硬さの計測結果
(事業者説明資料 P. 79 の図 1¹⁾ に影響評価計算で用いた硬さ分布を加えて示した)

12カ月の評価期間に対するSCCによる亀裂進展量を計算し、疲労による亀裂進展量を加えた12カ月後の亀裂寸法を表3に示す。Case 2の場合、配管内表面の表層部の硬化層を考慮したことにより、亀裂長さが顕著に増加することを確認した。また、この亀裂長さの増加が、亀裂の最深点における応力拡大係数に影響することで、亀裂深さも僅かに増加することが確認できた。

表 3 に示した 12 カ月後の亀裂寸法を用いて、事業者説明資料¹⁾と同様の評価条件で算出した許容曲げ応力 S_c を表 4 に示す。Case 2 の許容曲げ応力 S_c は、Case 1 に比べて、許容状態 A, B の場合には約 3 割低下し、許容状態 C の場合には約 2 割低下することを確認した。

以上より、配管内表面の表層部の硬化層は、亀裂進展計算及び破壊評価において、重要な因子であることが示された。

表 3 表層部の硬化層の影響評価に係る 12 カ月の評価期間後の亀裂寸法の計算結果

	Case 1		Case 2	
	亀裂深さ方向	亀裂長さ方向	亀裂深さ方向	亀裂長さ方向
初期亀裂寸法 [mm]	4.6	67	4.6	67
12 カ月後の亀裂寸法 [mm] ^{注 4}	5.8	70	5.9	114

表 4 表層部の硬化層の影響評価に係る 12 カ月後の許容曲げ応力の評価結果

許容状態	許容曲げ応力 S_c [MPa]	
	Case 1	Case 2
A, B	38.7	26.7
C ^{注 5}	110.2	85.7

4. 事例規格代替案に基づく許容亀裂深さの計算

評価対象の亀裂の角度は 60° を超えているため、維持規格としては、亀裂角度が 60° を超える場合に適用する事例規格を用いることになるが、その事例規格の技術評価⁴⁾において、技術基準としては代替案を使用することが求められている。この事例規格代替案に基づき、表 3 に示した Case 1 及び Case 2 の 12 カ月後の亀裂寸法、及び事業者説明資料¹⁾に示されている計算条件を用いて、許容亀裂深さを求めた。その結果を表 5 に示す。Case 2 の許容亀裂深さは、Case 1 に比べて約 3 割低下することを確認した。

^{注 4} 事業者と同様に、深さ進展量及び長さ進展量のそれぞれ小数点以下第 2 位、小数点以下第 1 位を切り上げて、初期亀裂寸法に加算することで 12 カ月の評価期間後の亀裂寸法を算出した。

^{注 5} 事業者説明資料¹⁾の表 1.4.10 に示す荷重組合せ C+Ss の応力条件を用いた。

表 5 事例規格代替案に基づく許容亀裂深さの計算結果

	Case 1 (表層部の硬化層を考慮しない)		Case 2 (表層部の硬化層を考慮)	
	深さ 方向	長さ 方向	深さ 方向	長さ 方向
初期亀裂寸法 [mm]	4.6	67	4.6	67
12 カ月後の亀裂寸法 [mm]	5.8	70	5.9	114
事例規格代替案に基づく許容亀裂深さ [mm] ^{注6}	5.8		4.1	

5. まとめ

大飯発電所 3 号機の加圧器スプレイライン配管溶接部における有意な指示に対する亀裂進展計算及び破壊評価を行い、以下のことを明らかにした。

- ・ 事業者の計算条件を用いた亀裂進展計算については、事業者の結果と本計算の結果とが一致した。
- ・ 事業者の評価条件を用いた破壊評価については、事業者の結果と本評価の結果との間に相違が認められた。その原因として、事業者が Z 係数算出式における対数関数を自然対数として取り扱ったことが推定された。
- ・ シンニング加工による配管内表面表層部の硬化層を考慮することは、亀裂進展及び破壊評価の結果に大きく影響する。

参考文献

- 1) 関西電力株式会社, “大飯発電所 3 号機加圧器スプレイライン配管溶接部における有意な指示について,” 2020 年 9 月 11 日.
- 2) 日本機械学会, “発電用原子力設備規格維持規格 (2012 年版),” JSME S NA1-2012, 2012.
- 3) 関西電力株式会社, “大飯発電所 3 号機加圧器スプレイライン配管溶接部における有意な指示について (9 月 11 日公開会合における指摘事項の回答),” 2020 年 9 月 18 日.
- 4) 原子力安全・保安院、(独) 原子力安全基盤機構, “日本機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格 (JSME S NA1-2002) 【事例規格】周方向欠陥に対する許容欠陥角度制限の代替規定 (CC-002)」に関する技術評価書,” 2007 年 5 月.

以上

^{注6} 配管肉厚を 13.5 mm として算出した。許容亀裂深さは、計算結果の小数点以下第 2 位を切り捨てた。