

# 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

令和2年10月2日

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

9月18日の事業者説明資料\*1の表-6に記載されている12カ月後のSCCによる亀裂進展量について、事業者の計算条件を用いて計算する。

### 計算条件(事業者説明資料\*2に基づく設定)

- 材料: SUS316
- 経年劣化事象: 応力腐食割れ(SCC)による亀裂進展
- 運転温度: 291.7°C
- 配管の寸法: 外径D: 114.3[mm]、肉厚t: 14[mm]
- 亀裂の寸法: 亀裂深さa: 4.6[mm]、亀裂長さλ: 67[mm]
- 応力拡大係数: 維持規格添付E-5における円筒中の周方向半だ円表面亀裂のK値\*3
- SCC亀裂進展速度評価式:

$$\begin{aligned} \text{ベストフィット曲線(BFC)式: } \frac{da}{dt} &= 1.13 \times 10^{-26} \times K^{1.96} \times HV^{6.45} \\ \text{包絡曲線式: } \frac{da}{dt} &= 3.38 \times 10^{-26} \times K^{1.96} \times HV^{6.45} \end{aligned}$$

配管内面から3 mm未満: 209 HV、3 mm以上4 mm未満: 207 HV、4 mm以上5 mm未満: 192 HV、5 mm以上: 191 HV  
(溶接によって生じる板厚内の硬さ分布)

- 負荷条件: 運転圧力: 15.41[MPa]、発生応力: 100[MPa]
- 溶接残留応力: 9月8日の事業者説明資料\*4の図3.4.2のデータをもとに3次多項式に近似

\*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(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。

\*2 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 公開会合資料1-2抜粋)」、2020年9月18日。

\*3 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。

\*4 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8日。

前頁の条件を用いて計算したSCCによる亀裂進展量の結果を以下の表に示す。  
事業者の計算結果が本計算の結果と一致することを確認した。

|                                |          | SCC亀裂進展速度：BFC式<br>(評価期間：12カ月) |            | SCC亀裂進展速度：包絡曲線式<br>(評価期間：12カ月) |            |
|--------------------------------|----------|-------------------------------|------------|--------------------------------|------------|
|                                |          | 亀裂深さ<br>方向                    | 亀裂長さ<br>方向 | 亀裂深さ<br>方向                     | 亀裂長さ<br>方向 |
| 初期寸法 [mm]                      |          | 4.6                           | 67         | 4.6                            | 67         |
| SCCによる進展量 <sup>注</sup><br>[mm] | 事業者説明資料* | 0.4                           | 1          | 1.1                            | 2          |
|                                | JAEA計算   | 0.4                           | 1          | 1.1                            | 2          |

注：深さ進展量、長さ進展量は事業者と同様に、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。

\* 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。

9月18日の事業者説明資料\*1の表-8に記載されている破壊評価の結果について、事業者の計算条件を用いて評価する。

#### 評価条件(事業者説明資料\*1,\*2に基づく設定)

- 配管寸法: 外径D: 114.3 mm、肉厚t: 13.5 mm
- 12カ月後の亀裂寸法:

|                 | 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 |
| 12カ月後の亀裂寸法 [mm] | 5.1    | 69     | 5.8    | 70     |

- 評価手法: 弾塑性破壊力学評価法(維持規格 添付E-9\*3)
- 許容曲げ応力評価式: 維持規格\*3に示される評価式

$$S_c = \frac{1}{SF} \left( \frac{P_b'}{Z} - P_e \right) - P_m \left( 1 - \frac{1}{Z(SF)} \right)$$

SF: 安全率 供用状態A及びBの場合SF=2.77、供用状態C及びDの場合SF=1.39 Z: Z係数( $Z=0.306\log(OD/25)+1.032$ )\*4

$P_b'$ : 塑性崩壊時の曲げ応力  $P_b' = \frac{2\sigma_f}{\pi} \left( 2\sin\beta - \frac{a}{t}\sin\theta \right)$   $\beta$ : 管の中立軸に対応する角度  $\beta = \frac{1}{2} \left( \pi - \frac{a}{t}\theta - \pi \frac{P_m}{\sigma_f} \right)$

$P_m$ : 一次一般膜応力(下表に示す)  $P_e$ : 熱膨張応力(下表に示す)

$\sigma_f$ : 流動応力( $\sigma_f = 2.7S_m$ 、 $S_m$ は設計応力強さ)

| 供用状態 | 一次一般膜応力 $P_m$ [MPa] | 熱膨張応力 $P_e$ [MPa] |
|------|---------------------|-------------------|
| A,B  | 38.1                | 72.0              |
| C+Ss | 40.0                | 78.9              |

\*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(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。

\*2 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 公開会合資料1-2抜粋)」、2020年9月18日。

\*3 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。

\*4 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(NA-CC-002)」、2005。

前頁の条件を用いて計算した12カ月後の許容曲げ応力 $S_c$ の値と事業者説明資料\*の表-8に示されている結果とを比較して以下の表に示す。

事業者の評価結果との間に相違があることを確認した。(参考として、 $Z$ 係数における対数関数を自然対数と仮定し、破壊評価を行った結果(表中に括弧付きで示す)は、事業者の評価結果とほぼ同じであった。)

| 亀裂進展速度評価式 | 評価期間 | 供用状態 | 一次曲げ応力*<br>$P_b$ [MPa] | 許容曲げ応力 $S_c$ [MPa] |                            |
|-----------|------|------|------------------------|--------------------|----------------------------|
|           |      |      |                        | 事業者説明資料*           | JAEA計算                     |
| BFC       | 12カ月 | A,B  | 3.8                    | 24.9               | 42.0 (24.4 <sup>注</sup> )  |
|           |      | C+Ss | 64.8                   | 82.4               | 116.8 (81.3 <sup>注</sup> ) |
| 包絡曲線式     | 12カ月 | A,B  | 3.8                    | 22.2               | 38.7 (21.6 <sup>注</sup> )  |
|           |      | C+Ss | 64.8                   | 76.9               | 110.2 (75.6 <sup>注</sup> ) |

注：亀裂角度について、事業者説明資料\*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。

事業者説明資料\*では、亀裂の発生原因分析において(P.23)、“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”としている。また、評価対象部位の製造を担当したメーカで加工を実施した配管のシンニング部の表層の硬さ計測結果が下図のように示されている。亀裂は最深点のみならず表面点でも進展する(右下図)ことから、亀裂の進展結果はシンニング加工の影響を大きく受けることが考えられる。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た亀裂進展計算を実施し、その影響を確認した。

事業者説明資料(P.29\*)に示されている  
表層部の硬さ分布

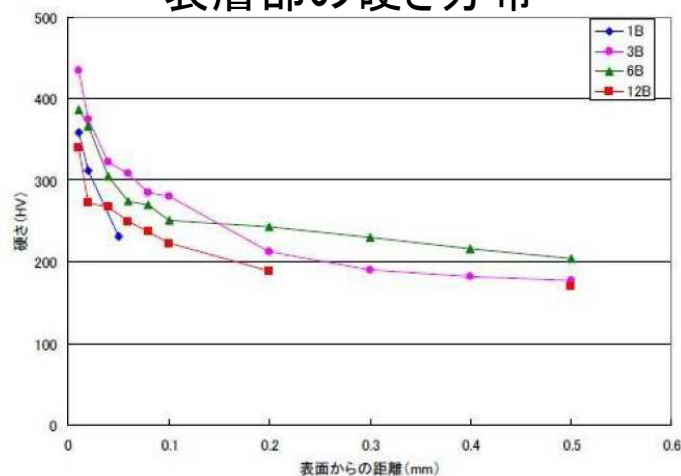
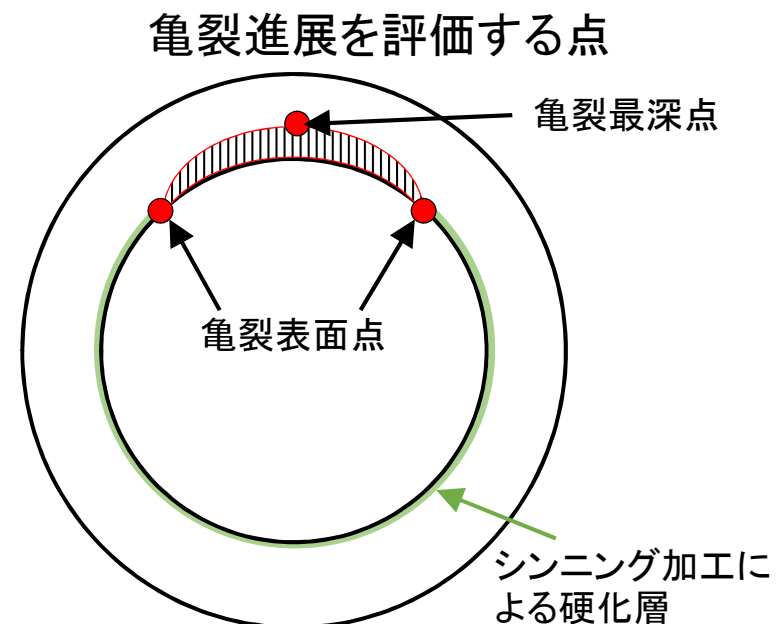


図1 1B、3B、6B、12B 管シンニング部の表層部硬さ分布

出典；製造メーカ社内モックアップデータ

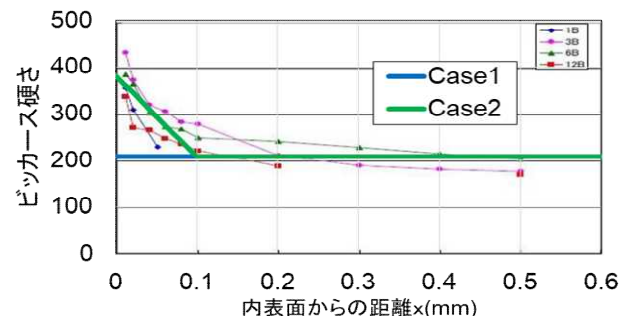


\*関西電力株式会社、「大飯発電所3号機加圧器スプレイライン配管溶接部における有意な指示について(2020年9月11日 公開会合資料1-2抜粋)」、2020年9月18日。

配管内表面の表層部の硬化層による影響を確認するため、以下の2ケースの亀裂進展計算を実施。

- Case1: 事業者説明資料\*の硬さ分布（溶接による硬さ分布のみ考慮）
- Case2: 配管内表面の表層部の硬化層を考慮（溶接による硬さ分布に加えて、シンニング加工による表層部の硬化層を考慮）

| Case1                 | Case2                                                                    |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 配管内表面から3 mm未満: 209 HV | ・配管内表面から0.1 mm未満※:<br>$HV = -1727.5x + 381.75$<br>・0.1mm以上3 mm未満: 209 HV |
| 3 mm以上4 mm未満: 207 HV  | 左欄と同じ                                                                    |
| 4 mm以上5 mm未満: 192 HV  | 左欄と同じ                                                                    |
| 5 mm以上: 191 HV        | 左欄と同じ                                                                    |



※: 事業者説明資料\* (P.29)に記載されている当該部位の製造担当メーカで加工した配管の表層部の硬さ測定結果について、内表面における硬さを測定結果の平均値、内表面からの距離が0.1mmにおける硬さを事業者が設定した溶接による硬さとし、その間の硬さを線形内挿した式。(左図Case2)

- 板厚内の硬さ分布以外の条件はP.1に記載されているものと同じ。

配管内表面の表層部の硬化層を考慮した場合、包絡曲線式を用いた12カ月後のSCC亀裂進展計算の結果を以下の表に示す。

配管内表面の表層部の硬化層を考慮することで、亀裂長さが顕著に増加することを確認した。亀裂長さの増加が、最深点における応力拡大係数に影響し、亀裂深さが僅かに増加することを確認した。

|                              | Case1 (配管内表面の表層部の硬化層の考慮なし) |        | Case2 (配管内表面の表層部の硬化層の考慮あり) |        |
|------------------------------|----------------------------|--------|----------------------------|--------|
|                              | 亀裂深さ方向                     | 亀裂長さ方向 | 亀裂深さ方向                     | 亀裂長さ方向 |
| 初期寸法 [mm]                    | 4.6                        | 67     | 4.6                        | 67     |
| SCCによる亀裂進展量 [mm]             | 1.1                        | 2      | 1.2                        | 46     |
| 疲労による亀裂進展量 <sup>注</sup> [mm] | 0.1                        | 1      | 0.1                        | 1      |
| 12カ月後の亀裂寸法 [mm]              | 5.8                        | 70     | 5.9                        | 114    |

注：事業者説明資料\*の値を用いた。

\*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。

P.7の12カ月後の亀裂寸法及びP.3に示した破壊評価条件を用いて評価した許容曲げ応力  $S_c$  を以下の表に示す。

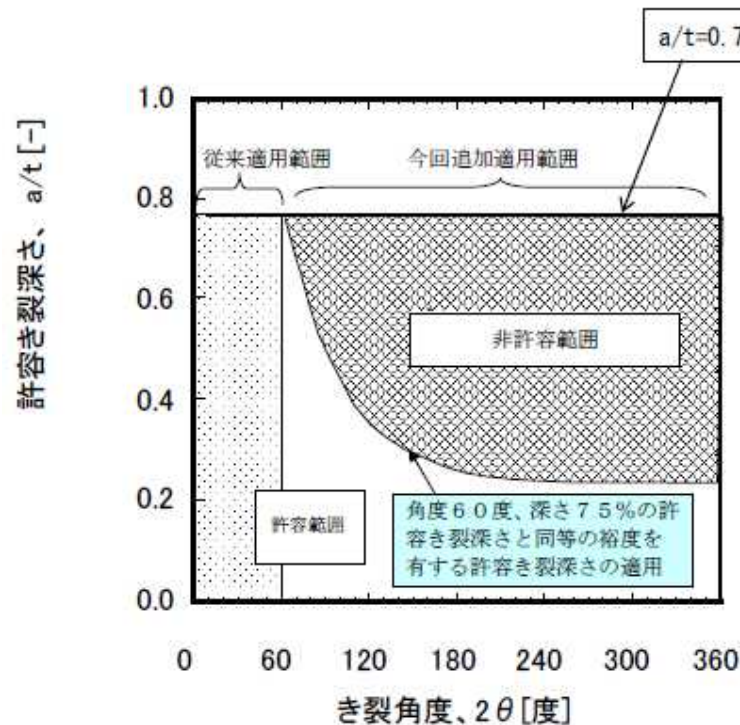
配管内表面の表層部の硬化層を考慮することで、許容曲げ応力  $S_c$  は供用状態A,Bの場合に約3割、供用状態C+Ssの場合に約2割低下することを確認した。

| 評価期間 | 供用状態 | 一次曲げ応力* $P_b$<br>[MPa] | 許容曲げ応力 $S_c$ [MPa] |       |
|------|------|------------------------|--------------------|-------|
|      |      |                        | Case1              | Case2 |
| 12カ月 | A,B  | 3.8                    | 38.7               | 26.7  |
|      | C+Ss | 64.8                   | 110.2              | 85.7  |

\* 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。

評価対象とする亀裂の角度は $60^\circ$ を超えているため、亀裂角度が $60^\circ$ を超える場合に使用することが求められている事例規格代替案\*に基づいて、許容亀裂深さを評価する。

\* : 原子力安全・保安院、独立行政法人 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、平成 19 年5 月。



事例規格代替案の模式図

(評価式は本資料のP.12に示す)

P.7の12カ月後の亀裂寸法及びP.3に示した破壊評価条件を用いて、事例規格代替案に基づき、許容亀裂深さを求めた。その結果を以下の表に示す。

|                                      | Case1 (配管内表面の表層部の硬化層の考慮なし) |        | Case2 (配管内表面の表層部の硬化層の考慮あり) |        |
|--------------------------------------|----------------------------|--------|----------------------------|--------|
|                                      | 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    |
| 供用状態A, Bにおける許容亀裂深さ [mm] <sup>注</sup> | 5.8                        |        | 4.1                        |        |
| 供用状態C+Ssにおける許容亀裂深さ [mm] <sup>注</sup> | 5.8                        |        | 4.1                        |        |

注：配管肉厚を13.5 mmとして計算。また、許容亀裂深さは各評価値の小数点以下第2位を切り捨て。

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を行った結果、以下のことが明らかになった。

- 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がほぼ一致することを確認した。
- 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あることを確認した。その原因は、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によるものであると考えられる。
- シンニング加工による配管内表面表層部の硬化層の考慮により、亀裂進展及び破壊評価の結果は大きく影響を受けることを確認した。

事例規格の代替案\*では、許容亀裂深さを以下のように求めることとしている。

$$S_c = \frac{1}{SF} \left\{ \begin{array}{l} \left( \frac{(P_b')}{Z} \right)_0 - P_e - P_m \left( 1 - \frac{1}{Z \cdot SF} \right) \\ \frac{(P_b')}{Z} : 2\theta = 60^\circ \text{の場合注1} \\ \\ \left( \frac{(P_b')}{Z} \right) - P_e - P_m \left( 1 - \frac{1}{Z \cdot SF} \right) \\ \frac{(P_b')}{Z} : 2\theta > 60^\circ \text{の場合注2} \end{array} \right. \quad (2)$$

注1:  $(P_b')_0$ については、 $a/t=0.75$ かつ $2\theta=60^\circ$ の場合の塑性崩壊時曲げ応力 $P_b'$ を $(P_b')_0$ として求めている。  
Z係数については、亀裂角度が $60^\circ$ 以下の場合の式から算出している。

ここで、 $P_b'$ は式(1)におけるものと同じであり、このうち $(P_b')_0$ は角度 $2\theta=60^\circ$ 、 $a/t=0.75$ のき裂を有する部位に対する値、 $(P_b')$ は角度 $2\theta=60^\circ$ を超えるき裂を有する部位に対する値である。

注2:  $P_b'$ については、予測亀裂長さから算出される亀裂角度により $P_b'$ を求めている。  
Z係数については、亀裂角度が $60^\circ$ を超える場合の式から算出している。

$$\begin{array}{l} \beta \leq \pi - \theta \text{ の場合} \\ \left\{ \begin{array}{l} P_b' = \frac{2\sigma_f}{\pi} \left( 2\sin\beta - \frac{a}{t}\sin\theta \right) \\ \beta = \frac{1}{2} \left( \pi - \frac{a}{t}\theta - \frac{P_m}{\sigma_f}\pi \right) \end{array} \right. \\ \beta > \pi - \theta \text{ の場合} \\ \left\{ \begin{array}{l} P_b' = \frac{2\sigma_f}{\pi} \left( 2 - \frac{a}{t} \right) \sin\beta \\ \beta = \frac{\pi}{2 - \frac{a}{t}} \left( 1 - \frac{a}{t} - \frac{P_m}{\sigma_f} \right) \end{array} \right. \end{array} \quad (1)$$

ここで、 $SF$ は安全率、 $P_b'$ は塑性崩壊時の曲げ応力、 $P_e$ は熱膨張応力、 $P_m$ は膜応力、 $\sigma_f$ は流動応力、 $Z$ はZ係数、 $a$ はき裂深さ、 $t$ は板厚、 $\theta$ はき裂の半角度である。

\* : 原子力安全・保安院、独立行政法人 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、平成19年5月。