

関原発第384号
2020年11月4日

原子力規制委員会 殿

大阪市北区中之島3丁目6番16号
関西電力株式会社
執行役社長 森本 孝

大飯発電所第3号機における
加圧器スプレイライン配管の欠陥に関する評価の結果の報告について

記

核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第43条の3の16第4項の規定により、大飯発電所第3号機第18保全サイクル定期事業者検査において確認された、加圧器スプレイライン配管の欠陥に関する評価について、別紙のとおり報告します。

以上

別紙

大飯発電所第3号機 加圧器スプレイライン配管の欠陥評価書

本資料のうち、枠囲みの内容は、
商業機密あるいは防護上の観点
から公開できません。

別紙

大飯発電所第3号機

加圧器スプレイライン配管の欠陥評価書

2020年11月

関西電力株式会社

1. 目的

大飯発電所第3号機は2020年7月20日から定期検査中であり、定期事業者検査としてクラス1機器供用期間中検査（以下、「ISI」という）を実施していたところ、8月31日に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）との配管溶接部の超音波探傷試験（以下、「UT」という）において、有意な指示が認められた。

本書は、当該溶接部において検出された欠陥に対して、一般社団法人 日本機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格（JSME S NA1-2012/2013/2014）」（以下、「維持規格」という）に基づき欠陥の評価を実施したものであり、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第43条の3の16第4項の規定により、報告するものである。

2. 評価年月日

2020年10月21日

3. 評価を実施した者の氏名

4. 評価の対象

欠陥が確認された箇所は、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）とのシンニング部であり、評価対象欠陥を表4.1及び図4.1に示す。なお、UT指示の採取は、一般社団法人 日本電気協会「軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程（JEAC4207-2008/2012）」（以下、「JEAC 4207」という）に基づき実施した。

また、欠陥の深さ測定については、改正 令和元年6月5日 原規技発第1906051号 原子力規制委員会決定「実用発電用原子炉及びその附属施設における破壊を引き起こすき裂その他の欠陥の解釈」（以下、「亀裂の解釈」という）で要求される一般社団法人 日本非破壊検査協会「超音波探傷試験システムの性能実証における技術者の資格及び認証（NDIS 0603 :2015）」の規定要件に合格し、認証を受けた UT 技術者が、同規格に認証された探傷装置及び手順書を用いて行う方法（以下、「PD 認証方法」という）により実施した。

表 4.1 評価対象

継手 番号	管継手			欠陥寸法及び位置		
	外径※1 (mm)	厚さ※2 (mm)	材料	深さ※3 (mm)	長さ※4 (mm)	最大深さ位置
FW-4	114.3	14.0	SUS316	4.6	51	0° +3mm

※1: 公称値

※2: 指示部の実測値

※3: PD 認証方法（端部エコー法）による測定結果

※4: 屈折角 45° における斜角法で検出した配管外表面上における指示長さ 67mm から、(式 4.1)により配管内周及び外周の比を乗じて配管内面における欠陥長さを算出

$$67\text{mm} \times \frac{(114.3\text{mm} - 2 \times 14.0\text{mm}) \times \pi}{114.3\text{mm} \times \pi} = 50.5\text{mm} \rightarrow 51\text{mm} \quad (\text{式 4.1})$$

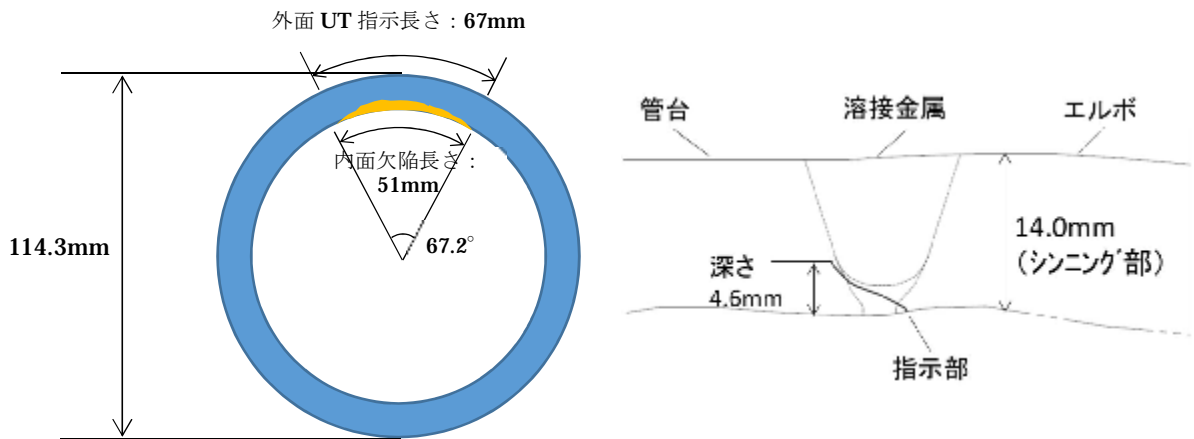


図 4.1 評価対象欠陥

5. 発生原因の推定

加圧器スプレライン配管の設計・運用を整理し、欠陥発生の原因として考えられる「機械的疲労」、「熱疲労」、「応力腐食割れ（以下、「SCC」という）」、及び「製造欠陥」それぞれに対する検討を実施した結果、「強加工 SCC」又はごく微小な「製造欠陥」により生じた欠陥が、強加工 SCC により進展したものと推定した^{[1][2]}。

「機械的疲労」、「熱疲労」、「SCC」、「製造欠陥」の可能性についての検討結果を以下に示す。

5.1 機械的疲労

加圧器スプレライン配管は、通常運転中に連続通水されているが、その流量は少なく、高速流によるランダム振動に起因する疲労は発生し難い。また、当該溶接部近傍にはオリフィスは無く、オリフィスによる振動に起因する疲労も考え難い。

振動の励振源として考えられる一次冷却材ポンプの n 成分は 20Hz であるのに対し、当該配管の一次固有振動数は 13.5Hz と十分乖離しており、共振による振動は考え難い。

5.2 熱疲労

a)高サイクル熱疲労

当該部は、通常運転中に連続通水されており、キャビティフロー型熱成層、弁シートリーク型熱成層、運転操作型熱成層の対象部位のいずれにも該当しない。また、高低温水合流部でもなく温度ゆらぎの対象部位でもないことから、原因として考え難い。

b)熱過渡による疲労

疲労評価結果は、疲労累積係数^{*}（40年運転）で0.00013と十分余裕のある値となっている。また、最も保守的に係数倍法を適用して環境疲労評価を実施した場合、環境効果補正係数は約20であり、環境疲労累積係数は約0.0026となり、これも十分余裕のある値になっていることから、原因として考え難い。

^{*} 材料の疲労がどれほどたまっているのかを表す係数で、1を超えると疲労割れが起こる可能性がある。

5.3 SCC

a)酸素型 SCC

当該部は、閉塞部ではなく、一次系水質として、溶存酸素濃度は5ppb以下に管理されていることから、原因としては考え難い。

b)塩素型 SCC

当該部は、閉塞部ではなく、一次系水質として、塩化物イオン濃度は50ppb以下に管理されていることから、原因としては考え難い。

c)強加工 SCC

当該部は、シンニング加工により表層で300HVを超える硬さと想定されること、配管内面では配管軸方向に引張残留応力があると想定されること、BWR環境下では類似のオーステナイトステンレス鋼において、PWR運転温度と同等の温度でSCCの発生が認められていることを踏まえると、PWR環境下でもSCCが発生する可能性を否定しきれない。

また、当該部は溶接の影響で板厚内部でも200HVを超える硬さとなっていることが想定され、PWR環境下の亀裂進展データによれば亀裂の進展が想定される。従って、原因の可能性があると考える。

5.4 製造欠陥

当該溶接部は、一次冷却材管台と管継手（エルボ部）との取り付け部であり、現地溶接で施工されており、非破壊検査として、放射線透過試験、UT（供用前検査）が実施されており、結果は良好であった。また、建設時の補修記録はなく、供用期間中の補修、改造や取替の履歴もないため、製造時の不具合が原因とは考え難いが、その性状によって表層部に検出限界以下のごく微小な傷が存在し、何らかの形で関与した可能性は否定できない。

6. 評価の方法

6.1 欠陥評価の流れ

ISIの第一段階検査により有意な欠陥指示が検出された事を受け、クラス1配管の欠陥評価として、維持規格 EB-1300 に従い欠陥評価を実施する。評価のフローを図 6.1.1 に示す。

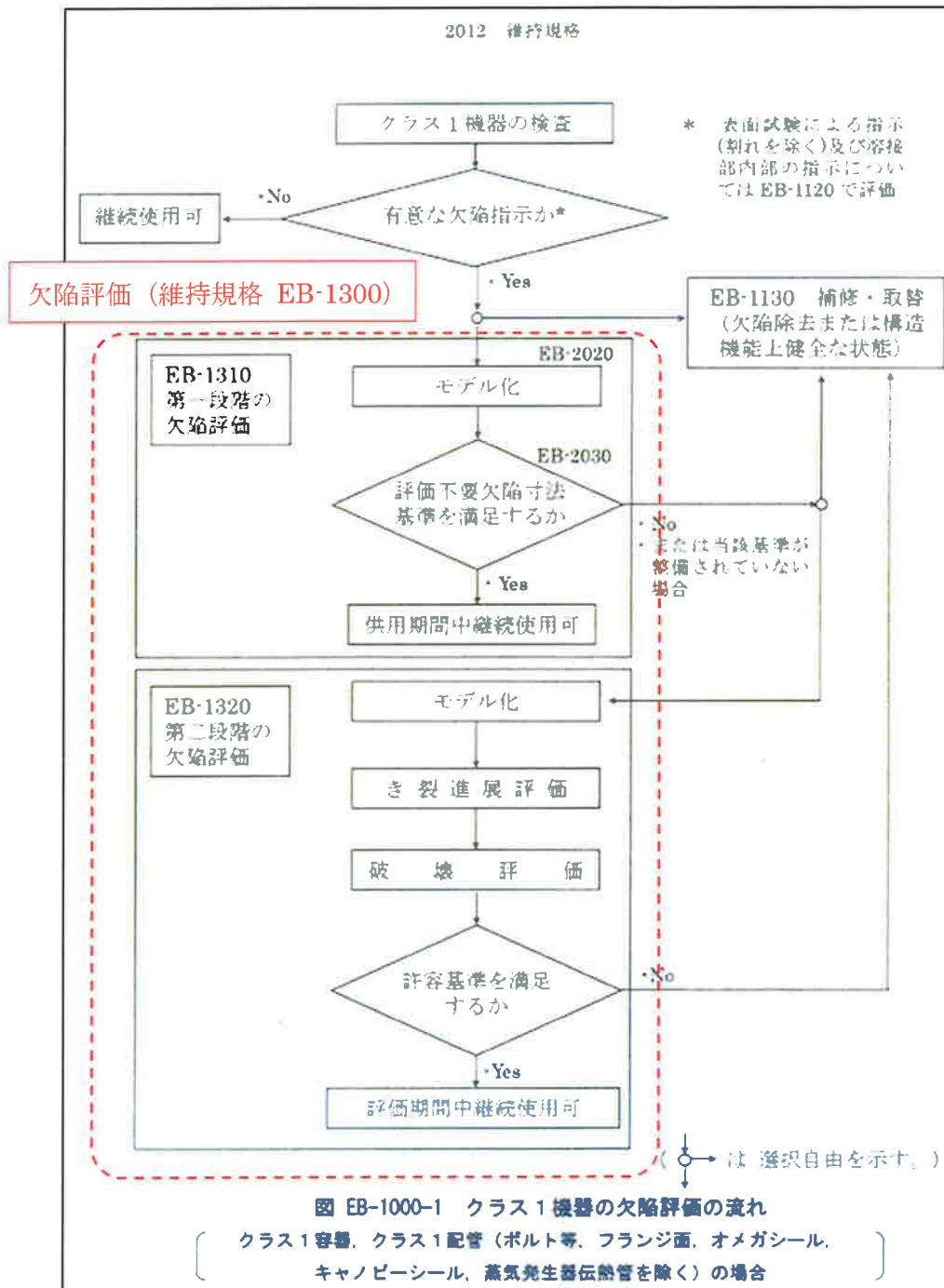


図 6.1.1 クラス1配管の欠陥評価フロー

6.2 欠陥のモデル化

欠陥評価を実施するにあたり、維持規格 添付 E-1 に従い評価断面毎に欠陥形状のモデル化を行う。

当該欠陥のモデル化結果を表 6.2.1 に示す。また図 6.2.1 に欠陥のモデル形状を示す。

表 6.2.1 欠陥のモデル化結果

継手番号	外径 D (mm)	厚さ t (mm)
FW-4	114.3	14.0*1

欠陥評価断面	欠陥深さ a (mm)	欠陥長さ ℓ (mm)	モデル形状
周方向断面	4.6	51	周方向半だ円表面欠陥 (内表面) *2

※1 指示部の実測値。ただし、破壊評価においては保守的に公称値 13.5mm を使用する。

※2 詳細は図 6.2.1 を参照。

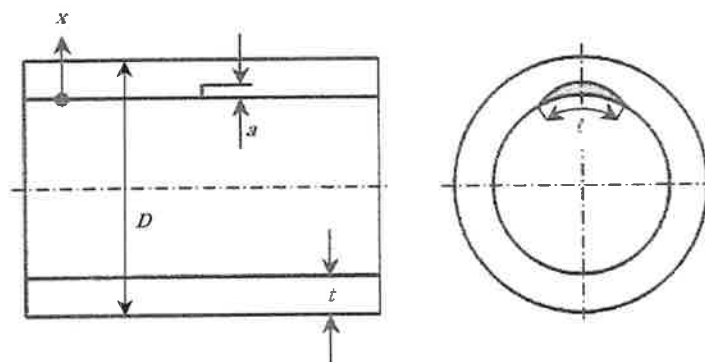


図 6.2.1 欠陥のモデル形状 (周方向半だ円表面欠陥 (内表面))

6.3 亀裂進展評価^[3]

当該欠陥の亀裂進展評価は、維持規格 EB-4300 に従い、SCC による亀裂進展と疲労による亀裂進展の観点で実施する。

6.3.1 評価期間

14 ヶ月を評価期間として設定する。

6.3.2 亀裂進展式

評価に使用する、亀裂進展式を以下に示す。

a) SCC による亀裂進展評価の評価式

PWR 環境下における亀裂進展が硬度依存性を有することについては、電共研「強加

工 SCC 懸念部位差別化のためのデータ拡充研究」、及び電共研「PWR 環境下の SCC 進展データの拡充に関する研究」で確認している。

これら電共研の成果として、強加工 SCC の亀裂進展速度の進展式（亀裂進展速度線図）を作成しており、国際学会「Fontevraud7,2010」で公表しているが（公開進展式（式 6.3.2.1））、その進展式はこれまでの電共研にて取得されたデータを基に、亀裂部の応力拡大係数と材料の硬さを進展速度への影響因子として整理し作成しているものであるため、改めてその妥当性を確認すべく他の研究知見で取得されたデータとの比較を行った。その比較結果を図 6.3.2.1 に示す。他の研究においては、電共研にて作成された速度線図より有意に進展するデータも確認されている。

このため、これら全てのデータを用いて速度線図を新たに設定し、亀裂進展評価を実施する。亀裂進展評価式としては、ベストフィット曲線（BFC）式（式 6.3.2.2）と包絡曲線式（式 6.3.2.3）を設定したが、将来の欠陥深さ及び欠陥長さがより保守的な評価となるよう包絡曲線式（式 6.3.2.3）を用いる。

$$\text{公開進展式} \quad : da/dt (K, HV) = 4.73 \times 10^{-25} \times K^{1.96} \times HV^{5.67} \quad (\text{mm/s})$$

(式 6.3.2.1)

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

(式 6.3.2.2)

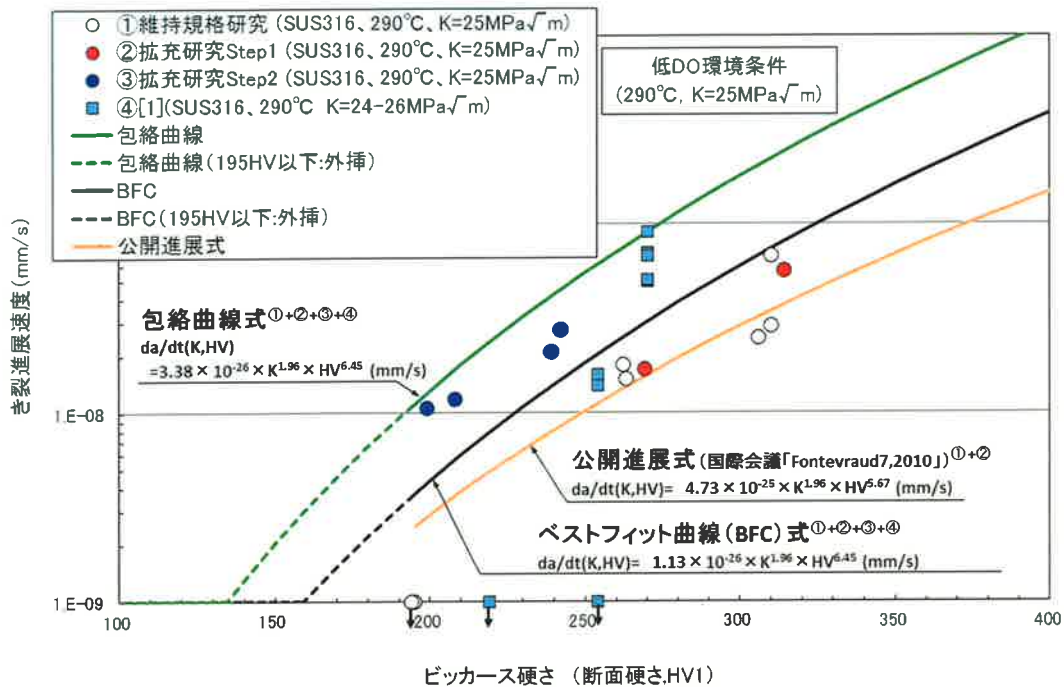
$$\text{包絡曲線式} \quad : da/dt (K, HV) = 3.38 \times 10^{-26} \times K^{1.96} \times HV^{6.45} \quad (\text{mm/s})$$

(式 6.3.2.3)

ここで、

- da/dt : 亀裂進展速度 (mm/s)
- a : 欠陥深さ (mm)
- t : 時間 (s)
- K : 応力拡大係数 (MPa $\sqrt{\text{m}}$)
- HV : ビッカース硬さ (HV)

なお、過去の研究試験の結果では 195HV 以下の硬さでは亀裂進展が認められていないものの、200HV 付近でも亀裂進展が認められているデータもあり、SCC 機構論的に 195HV に特異性があるとは考えにくいことから外挿し、式 6.3.2.3 を適用するものとする。



ビッカース硬さ（断面硬さHV1）

①維持規格研究「維持規格導入に向けた SUS 配管の SCC 評価データ整備研究」

②拡充研究 Step1「PWR 環境下の SCC 進展データの拡充に関する研究」

③拡充研究 Step2「PWR 環境下の SCC 進展データの拡充に関する研究(Step2)」

④[1] Journal of Nuclear Materials 426 (2012) 59-70

図 6.3.2.1 亀裂進展速度線図

b) 疲労による亀裂進展評価の評価式

疲労評価に用いる進展式は、維持規格 添付 E-2 に規定されるオーステナイト系ステンレス鋼の軽水炉（PWR 一次系）にある表面欠陥の疲労亀裂進展速度式(式 6.3.2.4)を用いる。

$$da/dN = 4.35 \times 10^{-10} \times T_c^{0.63} \times t_r^{0.33} \times (\Delta K)^{3.0} / (1 - R)^{1.56} \quad (\text{mm/cycle})$$

(式 6.3.2.4)

ここで

- da/dN : 疲労亀裂進展速度 (mm/cycle)
- ΔK : 応力拡大係数変動範囲 (MPa√m)
 - $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ ($R \geq 0$ の場合)
 - $\Delta K = K_{max}$ ($R < 0$ の場合)
- K_{max} : 最大応力拡大係数 (MPa√m)
- K_{min} : 最小応力拡大係数 (MPa√m)
- T_c : 温度 (°C)
- t_r : 負荷上昇時間 (s)
- R : 応力比 ($R = K_{min}/K_{max}$)

6.3.3 入力条件

亀裂進展評価の入力条件については、次のとおり設定する。なお、硬さ（表層硬さ、内部硬さ）、K 値を求めるために必要な残留応力については、モックアップ等により得られた情報を基に設定した。

a. 応力拡大係数

亀裂進展式で用いる応力拡大係数は、維持規格 EB-4360 及び維持規格 添付 E-5 に従い、円筒内表面半だ円欠陥に対する K 値式を用いて計算する。

b. 表層硬さ

(1) 表層硬さの測定結果

欠陥指示が確認された溶接部近傍は、配管内表面に開先合わせのための機械加工（シンニング加工）が施されており、機械加工に伴う内表面の極表層の硬さの硬度上昇が懸念される。PWR 環境において、硬度の上昇に伴いステンレス鋼の SCC 亀裂進展性が認められていることから、表層硬さを設定する必要がある。このため、実機と同等の加工条件により製作した 4B 及び他口径のモックアップよりデータを取得し表層硬さを確認した。硬さは日本工業規格「ビッカース硬さ試験-試験方法（JIS Z2244:2009）」に基づきデータを採取しており、4B は作成したモックアップ（4 断面）により計測したデータ、他口径については過去に取得したデータを使用した。4B のモックアップより取得したデータを表 6.3.3.1 に、その分布を図 6.3.3.1 に、過去に取得した他口径のデータを表 6.3.3.2 に、その分布を図 6.3.3.2 に示す。

表 6.3.3.1 シンニング部の板厚方向硬さデータ (荷重 2g)

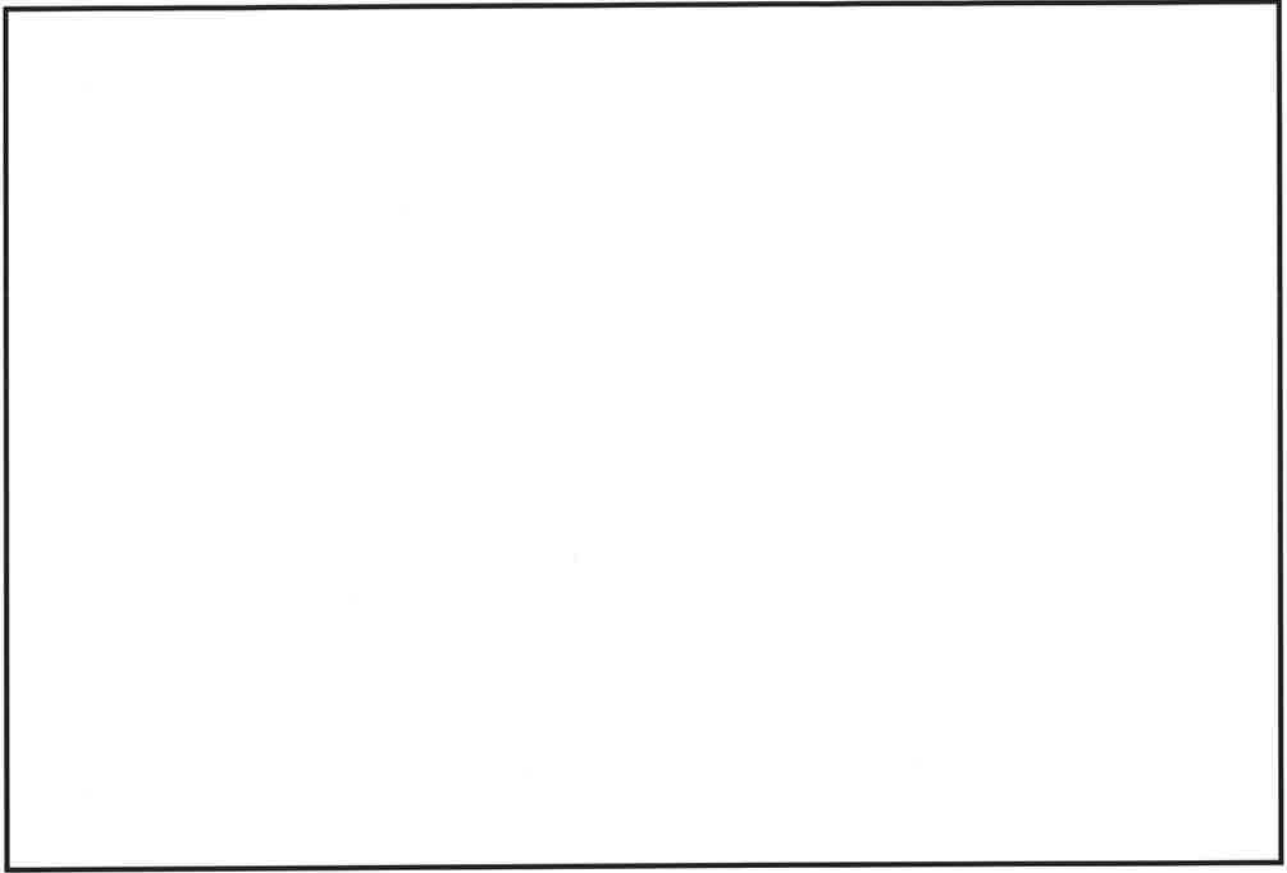
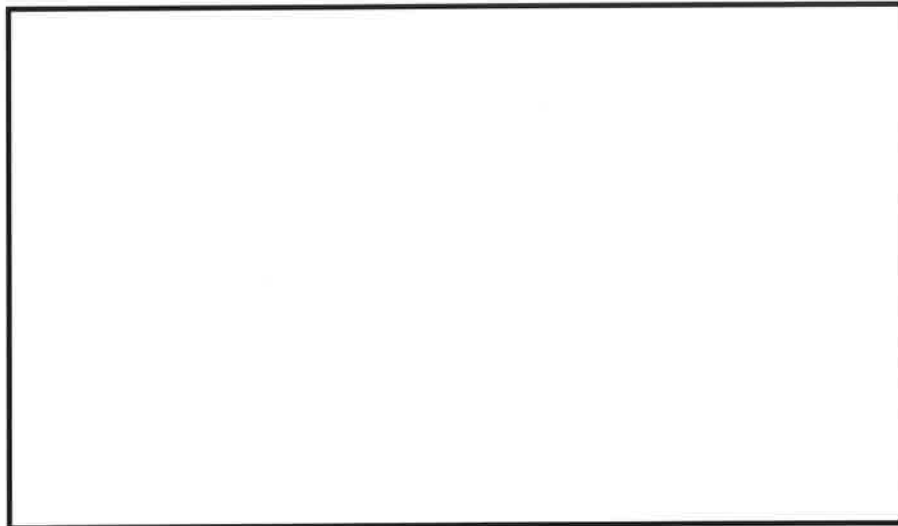
A large empty rectangular box intended for the data from Table 6.3.3.1.

図 6.3.3.1 シンニング部の板厚方向硬さ分布 (4B、2g)

表 6.3.3.2 シンニング部の板厚方向硬さデータ (荷重 10g)

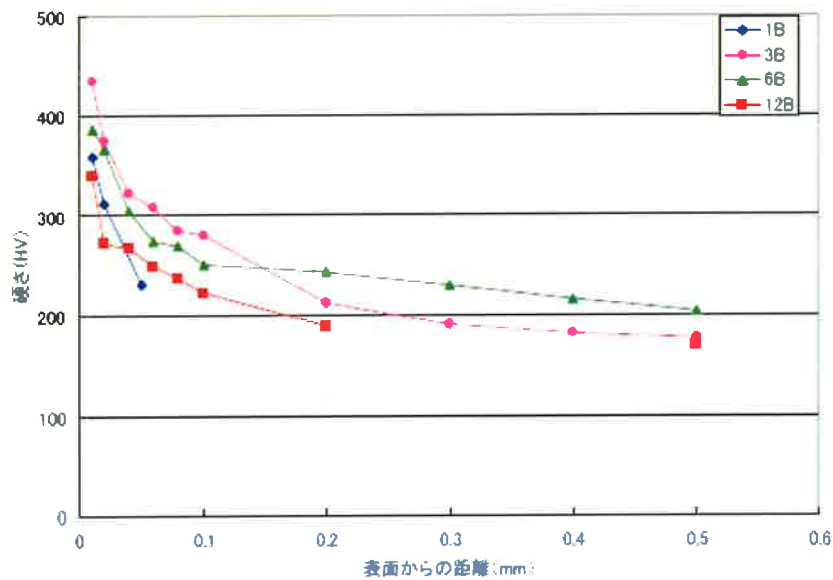
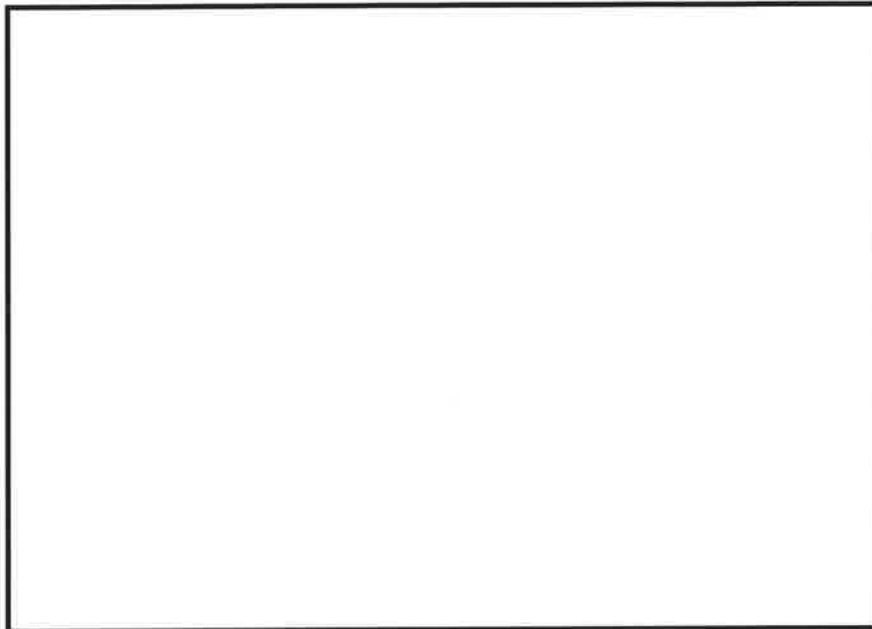


図 6.3.3.2 シンニング部の板厚方向硬さ分布

(2) 表層硬さの換算について

表層硬さの計測については、非常に微小な領域より硬さを採取するため、負荷する荷重を小さく設定している (図 6.3.3.1 では荷重 2g、図 6.3.3.2 は荷重 10g で計測)。一方、硬さ計測においては、1kg 程度の荷重で計測することで精緻な硬さが採取できること、小さい荷重で計測した場合、硬さが大きく採取されることが過去の研究等の中で知られている。したがって、亀裂の進展評価においては適切な硬さ

条件を入力するために、荷重 2g 及び 10g での硬さ結果を荷重 1kg での硬さに換算する必要がある。

硬さの換算を行うために、2g、10g、100g、500g、1kg の負荷荷重でモックアップの溶接熱影響のない素管部の硬さを計測した結果、表 6.3.3.3 の計測結果と図 6.3.3.3 に示す傾向が確認された。

表 6.3.3.3 負荷荷重ごとの硬さデータ

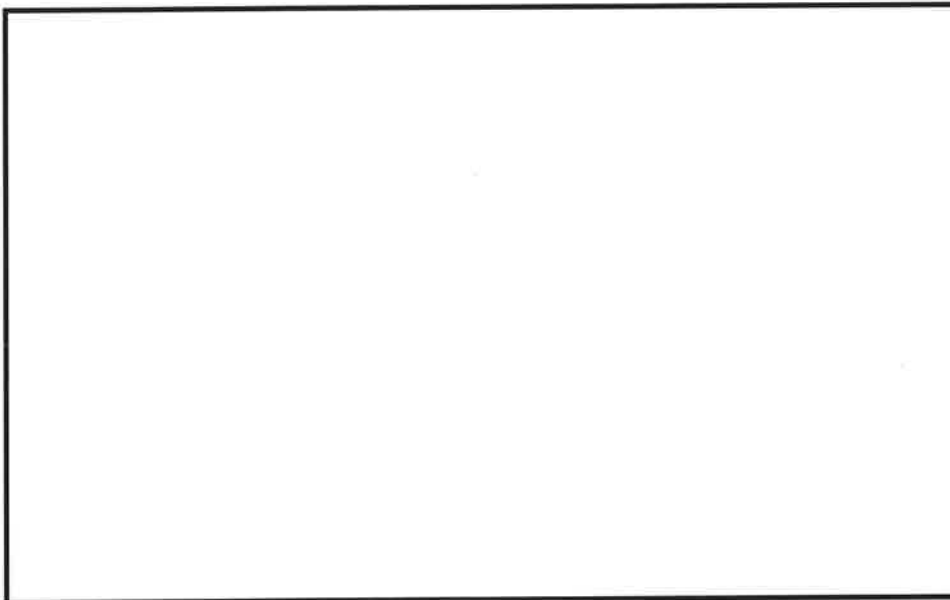


図 6.3.3.3 負荷荷重による硬さのばらつき分布

硬さの換算については、図 6.3.3.1 及び図 6.3.3.2 の結果より、図 6.3.3.3 の各荷重の差 (2g-1kg) 又は (10g-1kg) を減じることで変換することとするが、以下の条件の下で換算する。

- ・表 6.3.3.3 のとおり、各荷重で計測結果にばらつきがあることから、(2g-1kg) 又は (10g-1kg) の値に対する平均値と標準偏差の 3 倍の 3σ を考慮する。
- ・硬さが大きいほど保守的な進展評価となることから、減じる値は、表 6.3.3.3 の $m-3\sigma$ の結果を用いることとし、(2g-1kg) では 26HV、(10g-1kg) で

は 18HV を適用する。

(3) 亀裂進展に用いる表層硬さの位置について

極表層は SCC の発生領域に位置し特異な硬さを示すため、一般的に亀裂進展の解析において表層硬さは考慮されていない。しかし、極表層の硬さについて長さ方向の SCC 進展速度に影響する可能性を否定できなかったため、亀裂進展解析への適切な入力条件を検討した。

硬度が高い領域である深さ 0.04mm に長さ 1mm の表面亀裂が進展することを想定して FEM 解析を実施した結果を図 6.3.3.4 に示す。深さ 0.04mm より浅い領域の K 値は $5\sim 7\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 程度と低く、当該部の亀裂だけが有意に進展することは考え難い。

一方で、亀裂進展へのシンニング加工による硬化の影響を完全に否定できないため、表層からの距離 0.04mm の硬さを代表硬さとして進展評価に用いる。

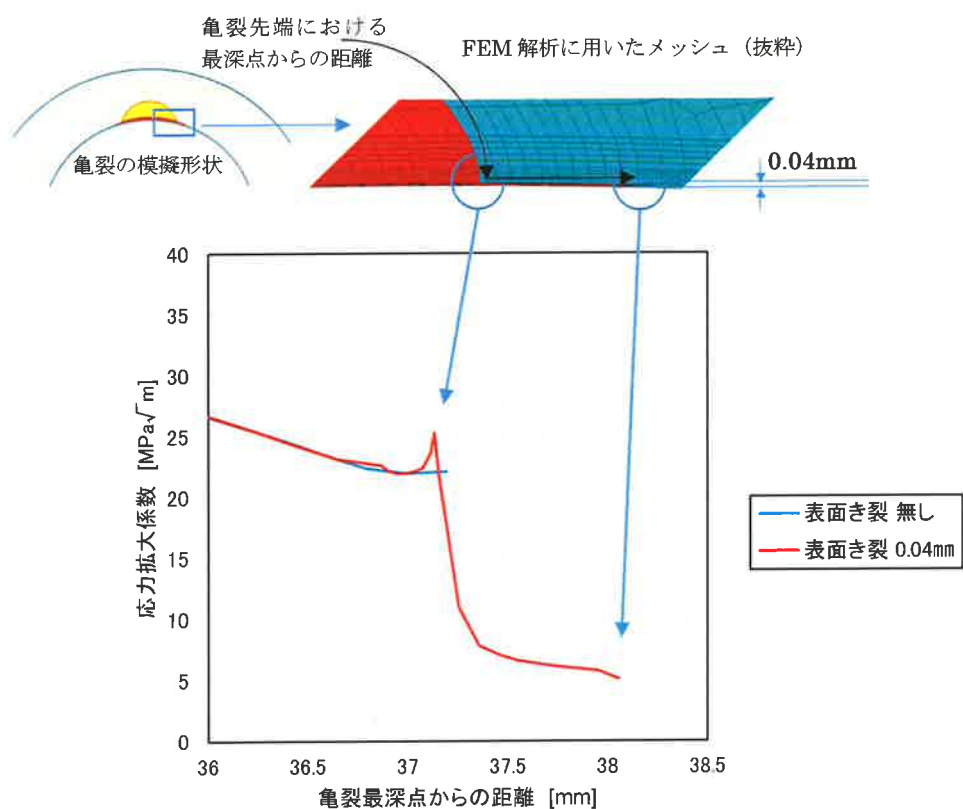


図 6.3.3.4 表面亀裂先端近傍における亀裂前縁に沿った応力拡大係数の FEM 解析結果 (亀裂深さ 0.04mm)

(4) 亀裂進展評価に用いる表層硬さの設定

(1)～(3)より、進展評価に用いる表層硬さを設定する。表 6.3.3.1 及び表 6.3.3.2 の深さ 0.04mm の硬さより、26HV 又は 18HV をそれぞれ減じ、荷重 1kg の硬さに換算したうえで、表層硬さの計測時のばらつきを保守的に評価するため、換算した硬さデータの平均値に標準偏差の 3 倍の $+3\sigma$ を考慮した 304HV を亀裂進展評価の入力条件とする。

c.内部硬さ

板厚内部の欠陥の進展経路を想定し、進展経路の硬さ分布を設定する。製作したモックアップの内部硬さについて 1 断面、また進展経路の硬さについて 4 断面を計測した。計測結果を表 6.3.3.4 に示す。また、内部硬さにおいてもバラツキを考慮し、計測した 5 断面の各アドレスについて平均値と標準偏差の 3 倍である 3σ を考慮し、より保守的な値として表 6.3.3.5 に示す平均値 $+3\sigma$ の値を設定する。

表 6.3.3.4 内部硬さデータ (荷重 1kg)

TIG+SMAW		溶金中央からの距離(mm)														
		-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
内表面からの距離 (mm)	10.5	189	170	167	174	172	178	170	182	170	178	172	174	187	170	189
	9.5	175	179	172	175	178	191	179	191	179	191	178	175	172	179	175
	8.5	192	171	183	182	190	187	184	186	184	187	190	182	183	171	182
	7.5	175	178	189	174	196	200	198	199	196	200	196	174	189	178	175
	6.5	184	181	185	197	192	204	209	183	209	204	192	197	185	181	184
	5.5	187	189	183	190	203	213	204	204	204	213	203	190	183	189	187
	4.5	179	185	185	189	192	213	209	206	209	213	192	189	185	185	179
	3.5	195	189	200	201	196	205	217	203	217	206	196	201	200	189	195
	2.5	195	191	198	202	199	205	200	216	208	205	199	202	198	191	195
	1.5	200	198	199	201	202	212	200	186	200	212	202	201	199	198	200
0.5	209	202	200	199	200	207	203	202	203	207	208	199	200	202	209	

溶金部

 : き裂の形状確認
 : 適用硬さ

溶金部

TIG+SMAW		溶金中央からの距離 (mm)														
		-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
内表面からの距離 (mm)	10.5															
	9.5															
	8.5															
	7.5															
	6.5	186	192	196												
	5.5	187	196	194												
	4.5	197	198	194	209											
	3.5	195	205	200	206											
	2.5				215	212	222	219								
	1.5							211	204	219	205					
0.5										180	194					

溶金部

TIG+SMAW		溶金中央からの距離 (mm)														
		-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
内表面からの距離 (mm)	10.5															
	9.5															
	8.5															
	7.5															
	6.5	187	191	199												
	5.5	190	189	182												
	4.5	199	194	187	208											
	3.5	211	199	197	209											
	2.5				206	203	199	199								
	1.5							196	196	201	194					
0.5										188	205					

溶金部

TIG+SMAW		溶金中央からの距離 (mm)														
		-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
内表面からの距離 (mm)	10.5															
	9.5															
	8.5															
	7.5															
	6.5	183	191	184												
	5.5	194	189	184												
	4.5	194	197	202	195											
	3.5	195	196	194	208											
	2.5				212	202	201	201								
	1.5							196	192	194	210					
0.5										193	202					

溶金部

TIG+SMAW		溶金中央からの距離 (mm)														
		-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
内表面からの距離 (mm)	10.5															
	9.5															
	8.5															
	7.5															
	6.5	190	184	182												
	5.5	191	184	193												
	4.5	189	196	202	198											
	3.5	209	198	200	198											
	2.5				195	201	208	201								
	1.5							202	192	193	204					
0.5										190	200					

表 6.3.3.5 進展評価に用いる内部硬さデータ (平均値+3σ)

内面からの距離	適用硬さ HV
～外表面	212
	↑
6mm～	212
5～6mm	205
4～5mm	226
3～4mm	226
2.98～3mm	230
2～2.98mm	234
1～2mm	233
0.68～1mm	221
0～0.68mm	212
0mm (表層)	304

d. 溶接残留応力

進展評価に用いる残留応力分布に関しては、実機当該部に発生する溶接残留応力及び運転中応力を考慮する必要がある。溶接残留応力については、当該部の溶接方法 (TIG+SMAW) を模擬した FEM 解析を実施し、進展経路に則した残留応力分布を設定した。

溶接残留応力の評価には FEM モデルによる弾塑性解析を用いており、旧独立行政法人原子力安全基盤機構 (JNES) の複雑形状部機器配管健全性実証 (IAF) 事業^{※1}により実物の溶接部を模擬した解析ができることが確認されている。

なお、解析の入力条件においては、実機と同じ開先形状、溶接パス数、入熱条件を設定し、更に溶接残留応力が入熱量の差によりばらつく事等を考慮し、入熱量を±20%の範囲で設定^{※2}した溶接残留応力分布を図 6.3.3.5、6.3.3.6 に示す。

進展評価の入力条件としては、より保守的な図 6.3.3.5 の値を用いる。

※1 複雑形状部機器配管健全性実証 (IAF) 事業 溶接残留応力解析評価データ集

小口径円筒突合せ接手 (4B Sch40 管)

※2 溶接入熱は、溶接電流 (以下、電流)、溶接電圧 (以下、電圧)、溶接速度 (以下、速度) によって決定され、 $入熱 = 電流 \times 電圧 \div 速度$ の関係を有する。溶接施工においては、溶接施工法、溶接材料を踏まえ、電流値を設定し (溶接施工記録書記載値)、電圧と速度はその電流値に応じて従属的に設定される。溶接技能資格を有する作業者による溶接施工では、施工中の電圧変動は小さく、また溶接速度は溶接の状況 (母材と溶接金属の熔融状況と入熱量に相関) を一定に維持するため微調整している。したがって、溶接施工中の溶接入熱の変動は小さいが、溶接状況に応じた微調整による入熱変動幅を保守的に±15%と見込み、更に残留応力解析では実機との差分も考慮して、溶接入熱最大として+20%、溶接入熱最小として-20%とした。

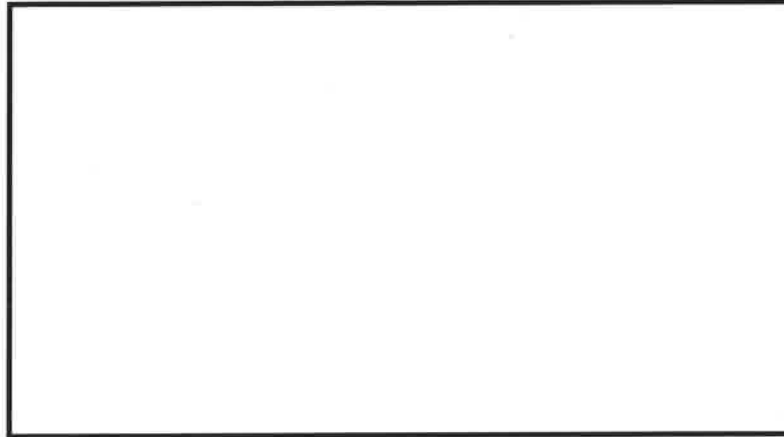


図 6.3.3.5 溶接残留応力分布 (入熱量 大)

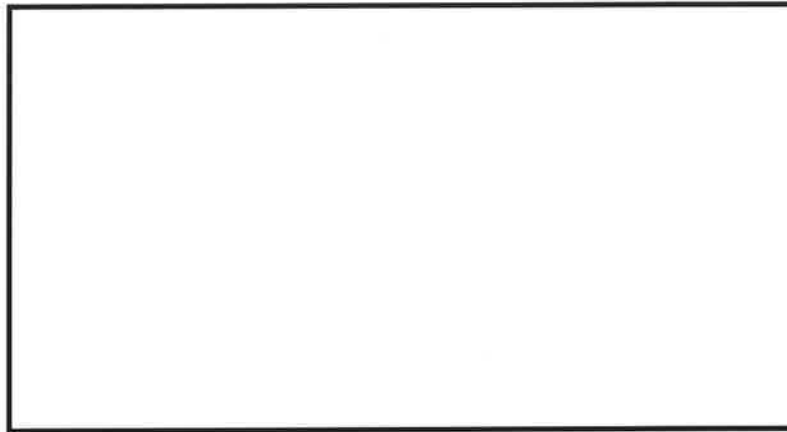


図 6.3.3.6 溶接残留応力分布 (入熱量 小)

e.溶接金属内の進展速度

現時点の欠陥先端位置は溶接金属を通過し母材に位置しているものと想定されることから、母材の進展のみを考慮すればよく、溶接金属内の影響はないものとする。

f.荷重と荷重の組合せ

当該欠陥の亀裂進展評価に考慮する荷重と荷重の組合せは、維持規格 添付 E-7 の規定に従い、表 6.3.3.6 及び表 6.3.3.7 の通り設定する。

表 6.3.3.6 亀裂進展評価で考慮する荷重の種類

項目		評価内容	
		SCCによる 亀裂進展評価	疲労による 亀裂進展評価
内圧	出力運転条件	○	○
	過渡条件	—	○
熱	出力運転条件	○	○
	過渡条件	—	○
機械的荷重		○	○
地震 ^{※1}	1/3Sd*	—	○
溶接残留応力		○	○

凡例：○ ⇒考慮、— ⇒考慮せず

※1：Sd*は、弾性設計用地震動（Sd）による地震力と静的地震力のうち大きい方の地震力の値を示す。

表 6.3.3.7 亀裂進展評価で考慮する荷重の組合せ

評価内容	組合せ
SCCによる 亀裂進展評価	出力運転条件（内圧、熱）＋機械的荷重＋溶接残留応力
疲労による 亀裂進展評価	出力運転条件（内圧、熱）＋機械的荷重＋過渡条件（内圧、熱） ＋溶接残留応力
	出力運転条件（内圧、熱）＋機械的荷重＋地震＋溶接残留応力

g.出力運転条件による応力

亀裂進展評価にて出力運転条件として用いる設計条件と、同条件における圧力＋熱＋自重による軸方向応力を表 6.3.3.8 に示す。出力条件における発生応力は、既工認において実施した 3次元梁解析結果より設定する。

表 6.3.3.8 亀裂進展評価に考慮する出力運転条件

運転圧力 (MPa)	運転温度 (°C)	発生応力 (MPa)
15.41	291.7	100 ^{※1}

※1 亀裂進展評価における出力運転時（100%出力運転）の応力は、表 6.3.3.9 の 99.3MPa を切り上げて 100MPa としている。

表 6.3.3.9 出力運転時（100%出力運転）において考慮している応力内訳

条件	Pm 一次一般膜応力 (MPa)	Pe 熱膨張応力 (MPa)	Pb 自重による一次 曲げ応力 (MPa)	合計 (MPa)
出力運転時 (100%出力運転)	32.7	62.8	3.8	99.3

h. 過渡条件

過渡条件を表 6.3.3.10 のとおり設定する。

表 6.3.3.10 亀裂進展評価で考慮する過渡条件

No	運転ケース	変動応力 (MPa)	過渡回数 (回)
			14 ヶ月
1	起動・停止	96	
2	負荷上昇 (15→100%)	35	
3	負荷減少 (100→15%)	35	
4	90%から 100%へのステップ状負荷上昇	35	
5	100 から 90%へのステップ状負荷減少	35	
6	100%からの大きなステップ状負荷減少	36	
7	燃料交換	14	
8	0%から 15%への負荷上昇・15%から 0%への負荷減少	33	
9	1 ループ停止 / 1 ループ起動 I) 1 ループ停止	35	
10	1 ループ停止 / 1 ループ起動 II) 1 ループ起動	34	
11	負荷の喪失	44	
12	外部電源喪失	47	
13	1 次冷却材流量の部分喪失	35	
14	100%からの原子炉トリップ I) 不注意な冷却を伴わないトリップ	34	
15	100%からの原子炉トリップ II) 不注意な冷却を伴うトリップ	38	
16	100%からの原子炉トリップ III) 不注意な冷却と安全注入を伴うトリップ	51	
17	1 次冷却系の異常な減圧	45	
18	制御棒クラスタの落下	37	
19	出力運転中の非常用炉心冷却系の誤起動	43	
20	1 次冷却系停止ループの誤起動	40	
21	1 次系漏えい試験	75	
22	タービン回転試験	44	

i.地震力

亀裂進展評価に用いる地震力は、維持規格 添付 E-7 で規定される評価すべき地震力の S_1 を S_d (弾性設計用地震動)と読み替え、 $1/3S_d^*$ として、 S_d 地震力と静的地震力の大きいものを $1/3$ したものを用いる。なお、評価に用いる地震力は既工認において用いた地震力と同等の地震力とする。なお、地震時の発生回数については、一般社団法人 日本電気協会「原子力発電所 配管破損防護設計指針(JEAG 4613-1998)」に基づいて設定 (10年に1回地震(地震1回あたり60回の繰り返し回数)が発生すると仮定)し60回とする。また、地震の負荷上昇時間は1sとする。

6.4 破壊評価

破壊評価は、6.3 項の亀裂進展評価から求めた評価期間末期における平面欠陥の予測寸法を基に、維持規格 EB-4400 に従い実施する。

6.4.1 破壊評価式

維持規格 EB-4420 において、当該配管のオーステナイト系ステンレス鋼管の評価に用いる評価法として、極限荷重評価法、弾塑性破壊力学評価法、2 パラメータ評価法の三通りの評価法を認めている。

維持規格解説 E-17 によると、オーステナイト系ステンレス鋼の溶接部の熱影響部については弾塑性破壊力学評価法で評価することとされていることから、当該部位の評価においては弾塑性破壊力学評価法（維持規格 添付 E-9）を適用する。

維持規格 添付 E-9 では、弾塑性破壊力学評価法として許容欠陥深さの表による評価、許容欠陥深さの式による評価、許容曲げ応力の算出による評価が規定されているが、許容欠陥深さの表による評価、及び許容欠陥深さの式による評価の適用に当たっては許容欠陥角度が $20 \leq 60^\circ$ と規定されており、検出された当該欠陥は本規定を満足しないことから、許容曲げ応力の算出による評価を適用する。

許容曲げ応力の算出による評価においては、運転中の曲げ応力が維持規格 添付 E-9 4.3 項で定義される許容曲げ応力 S_c を満足することを確認する。

許容曲げ応力 S_c は式 6.4.1.1 で与えられる。

$$S_c = \frac{1}{SF} \left(\frac{P_{b'}}{Z} - P_e \right) - P_m \left(1 - \frac{1}{Z(SF)} \right) \quad (\text{式 6.4.1.1})$$

$P_{b'}$ は塑性崩壊時の曲げ応力で下式により求められる。

$$P_{b'} = \frac{2\sigma_f}{\pi} \left(2 \sin \beta - \frac{a}{t} \sin \theta \right) \quad (\text{式 6.4.1.2})$$

ここで、

P_m : 一次一般膜応力

P_e : 熱膨張応力

SF は安全率で、

許容状態 A 及び B に対して、 $SF=2.77$

許容状態 C 及び D に対して、 $SF=1.39$

β は周方向欠陥付き管の中立軸に対応する角度であり、式 6.4.1.3 で与えられる。

$$\beta = \frac{1}{2} \left(\pi - \frac{a}{t} \theta - \pi \frac{P_m}{\sigma_f} \right) \quad (\text{式 6.4.1.3})$$

ここで、

σ_f : 流動応力 ($\sigma_f = 2.7Sm$)

A : 平面欠陥の深さ

t : 管の厚さ

θ : 周方向欠陥半長に対する角度 (欠陥角度)

一方、維持規格の事例規格 (NA-CC-002) においては、周方向欠陥の角度が 60° を超える場合に対する以下の規定が定められている。

- 弾塑性破壊力学評価法において、オーステナイト系ステンレス鋼管の評価に用いる Z 係数は以下の規定に従う。

GTAW 及び SMAW において :

$$Z = 0.306 \log\{(OD)/25\} + 1.032 \quad (\text{式 } 6.4.1.4)$$

SAW 及びフェライト量 20%未満の casting オーステナイト系ステンレス鋼管において :

$$Z = 0.372 \log\{(OD)/25\} + 1.293 \quad (\text{式 } 6.4.1.5)$$

- 管の厚さが 8.6mm 以上であること。
- 下表の許容欠陥深さを満足すること。

(4) スケジュール160

許容欠陥深さ ; a/t

Z [deg]	オーステナイト系ステンレス鋼管			フェライト 鋼管
	母材	GTAW ^{註1}	SAW ^{註2}	
60.0	0.75	0.75	0.69	0.75
90.0	0.75	0.69	0.39	0.46
120.0	0.64	0.54	0.31	0.37
150.0	0.55	0.47	0.26	0.32
180.0	0.50	0.42	0.24	0.29
210.0	0.47	0.40	0.23	0.27
240.0	0.45	0.39	0.23	0.27
270.0	0.45	0.39	0.23	0.27
≥300	0.45	0.39	0.23	0.27

なお、当該部位の溶接は GTAW (ティグ溶接) + SMAW (被覆アーク溶接) を適用していることから、式 6.4.1.5 を適用する。また、当該部位の厚さの実測値は 14.0mm であることから、管の厚さの要求を満足する。

許容欠陥深さの規定に関しては、亀裂の解釈において維持規格の事例規格の技術評価書の代替案に従うよう要求があることから、上表は適用しない。

6.4.2 荷重と荷重の組合せ

破壊評価に考慮する荷重との荷重の組合せは、維持規格 添付 E-7 の規定に従い、表 6.4.2.1 及び表 6.4.2.2 の通り設定する。

表 6.4.2.1 破壊評価で考慮する荷重の種類

項目		評価内容	
		許容状態 A, B	許容状態 C, D
内圧	出力運転条件	○	○
	過渡条件	○	○
熱	出力運転条件	○	○
	過渡条件	○	○
機械的荷重		○	○
地震	Sd ^{*1}	—	○
	Ss ^{*2}	—	○

凡例：○ ⇒考慮、— ⇒考慮せず

※1 Sd^{*}は、弾性設計用地震動 (Sd) による地震力と静的地震力のうち大きい方の地震力の値を示す。

※2 Ss^{*}は、基準地震動による地震力の値を示す。

表 6.4.2.2 破壊評価で考慮する荷重の組合せ

評価内容	組合せ
許容状態 A, B	供用状態 A, B における過渡条件 (内圧、熱) + 機械的荷重
許容状態 C, D	供用状態 A, B, C, D における過渡条件 (内圧、熱) + 機械的荷重 + Sd [*] 地震力
	供用状態 A, B, C における過渡条件 (内圧、熱) + 機械的荷重 + Ss [*] 地震力
	SA における過渡条件 (内圧、熱) ^{*1,2} + 機械的荷重

※1 重大事故 (SA) 条件に関しては維持規格上の規定はないが、許容状態 C, D の規定を準用して評価を行う。

※2 SA 時に DB 条件 (負荷喪失) を上回る事象としては、ATWS (制御棒挿入失敗) + 主給水流量喪失 or 負荷喪失の事象が挙げられるが、当該事象が DB 条件 (負荷喪失) を上回る期間は 4 時間程度と非常に短期的であることから、SA 条件は Ss, Sd 地震共に組合せは不要となる。

6.4.3 入力条件

a. 出力運転条件による応力

圧力 + 熱 + 自重による軸方向応力として、亀裂進展評価に用いた表 6.3.3.8 の値を用いる。

b. 過渡条件及び地震力による応力

破壊評価に用いる地震力は、維持規格 添付 E-7 で規定される評価すべき地震力の S_1 及び S_2 を S_d (弾性設計用地震動)及び S_s (基準地震動) と読み替える。 S_d^* として S_d 地震力と静的地震力の大きいものを用いる。なお、評価に用いる地震力は既工認において用いた地震力と同等の地震力とする。

表 6.4.2.2 の荷重の組合せの中から、許容状態 A,B 及び許容状態 C, D において、最も厳しい条件における軸方向応力を表 6.4.3.1 に示す。

なお、各供用状態における発生応力は、既工認において実施した 3 次元梁解析結果より、設定する。

表 6.4.3.1 破壊評価に用いる過渡条件及び地震力による応力

供用状態	P_m 一次一般 膜応力 (MPa)	P_e 熱膨張 応力 (MPa)	P_b 一次曲げ応力			
			自重 (MPa)	自重を除 く機械的 荷重 (MPa)	地震 (MPa)	合計 (MPa)
A, B	38.1	72.0	3.8	-	-	3.8
C+Ss	40.0	78.9	3.8	-	61.0	64.8
D+Sd	32.7	78.9	3.8	6.4	41.8	52.0
SA	40.9	79.4	3.8	-	-	3.8

7. 評価の結果

維持規格に基づき技術基準への適合性を確認した結果、評価期間 14 ヶ月に対して技術基準に適合することを確認した。

以下に欠陥評価の結果を示す。

7.1 亀裂進展評価の結果

SCC 及び疲労による亀裂進展量を加味した評価期間末期の亀裂寸法を表 7.1.1 に示す。

表 7.1.1 当該欠陥の亀裂進展評価結果

	包絡曲線式 評価期間：14 ヶ月	
	欠陥深さ a (mm)	欠陥長さ ℓ (mm)
初期寸法	4.6	51
SCCによる進展量	1.1	12
疲労による進展量	0.1	1
評価期間末期の亀裂寸法	5.8	64

7.2 破壊評価の結果

亀裂進展評価から求めた評価期間末期における予測欠陥寸法を用いて、許容欠陥寸法限界による評価及び許容曲げ応力による評価を行った結果を表 7.2.1、表 7.2.2 に示す。維持規格の事例規格に関する技術評価書に基づく許容欠陥寸法の限界の評価及び維持規格の許容曲げ応力の評価を満足することから、技術基準規則 18 条の使用中の亀裂等による破壊の防止の要求を満足する。

表 7.2.1 許容欠陥寸法の限界の評価結果

評価式	初期寸法		評価 期間 (月)	評価期間末期の亀裂寸法			許容欠陥 寸法の限界 a_c ^{※1} (mm)	判定 $a_f < a_c$
	深さ (mm)	長さ (mm)		深さ a_f (mm)	長さ $ℓ_f$ (mm)	欠陥角度 2θ (°)		
包絡 曲線式	4.6	51	14	5.8	64	85.0	7.3	○

※1 維持規格事例規格の技術評価書に規定の代替案による

表 7.2.2 許容曲げ応力による評価結果

評価式	評価期間 (月)	荷重の 組合せ	一次曲げ応力 P_b (MPa)	許容曲げ応力 S_c (MPa)	判定 $P_b < S_c$
包絡曲線式	14	A, B	3.8	40.3	○
		C+Ss	64.8	113.4	○
		D+Sd	52.0	115.8	○
		SA	3.8	105.3	○

8. 補修等の措置

欠陥評価の結果、保守的に評価した場合であっても、14ヶ月を経過した後も技術基準に適合することを確認したが、より説明性を高めるために実機より詳細なデータを取得・充実させる必要があると判断し、今回の定期検査において当該配管の取替えを実施する。

9. 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（大飯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係る公開会合（第1回）資料1-2）
- [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（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（大飯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係る公開会合（第2回）資料1-1）
- [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（2020年9月25日公開会合における指摘事項の回答（亀裂進展））”、2020年10月2日（大飯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係る公開会合（第4回）資料1-1）