

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

関西電力株式会社

1. 事象発生状況

(1) 第一段階検査

大飯発電所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）の配管溶接部の超音波探傷試験^{※1}（以下、UTという。）においてDAC20%を超える有意な指示を検出した。前回のISI／建設時PSI記録との対比、エコーの挙動等から欠陥エコーと判断した（添付資料1）。

検出した指示

指示位置	最大エコー高さ	指示長さ
管台溶接部エルボ側	DAC176%	67mm

(2) 第二段階検査

検査要領書に基づき詳細探傷による傷の形状を確認すべく「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（フェーズドアレイによる端部エコー法）により、第二段階検査を9月1日に実施した（添付資料2）。傷は管継手（エルボ部）のシンニング^{※2}部から発生しており、当該配管厚さ14.0mm（実測）に対して深さは4.6mm、き裂長さは67mmと評価された（添付資料3）。なお、当該箇所の設計上の必要最小厚さ8.2mmは満足していた。

※1：超音波探傷試験（UT）

超音波を使って金属等の内部にある傷を検出する試験。

※2：シンニング

開先部の内面寸法を合わせるため実施する機械加工（溶接合わせ部）。

(3) 追加調査

詳細な欠陥性状を把握するため追加UTを実施した結果、欠陥は最大深さ4.6mmを中心にして、周方向になだらかな分布を呈していることを確認した（添付資料4）。

2. 原因の調査

(1) 当該部の建設記録および過去検査記録の調査

当該部の建設記録および過去の検査記録の調査を行った結果、建設時、前回の検査時（10回定検時）には有意な指示は確認されていないことを確認した。ただし、検出限界以下のごく微小な欠陥が存在していた可能性は否定できない。

当該箇所の検査実績

	試験方法	試験結果
建設時(溶接検査) (1990年)	放射線透過試験	有意な指示無し
建設時(PSI) (1990年)	U T	有意な指示無し
10回定検時(前回ISI)(2004年)	U T	有意な指示無し

(2) 発生原因の要因検討

要因分析 F T 図に基づき、加圧器スプレイライン配管溶接部の傷に対する原因調査を行った(添付資料 5)。

a. 機械的疲労

(a) 振動による疲労

加圧器スプレイライン配管は、通常運転中に連続通水されているが、その流量は少なく、高速流のランダム振動による疲労は考え難い。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。加圧器スプレイライン配管の一次固有振動数は R C P の n 成分とは十分離れており、R C P の振動成分 (n 成分) との共振による疲労も考え難い。

b. 熱疲労

(a) 高サイクル熱疲労

当該部は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になっている。また、当該部に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でも環境疲労累積係数は約 0.0026 となり、十分余裕のある値になることから、原因として考え難い。

c. 応力腐食割れ (S C C)

(a) 酸素型応力腐食割れ (O_2 S C C)

1 次冷却水は溶存酸素濃度が十分低くなるよう水質管理されている。また、加圧器スプレイライン配管は通常運転中に連続通水されており、当該部は閉塞滞留部ではないため、当該き裂が O_2 S C C によるものとは考え難い。

(b) 塩素型応力腐食割れ (C l - S C C)

1 次冷却水は塩化物イオン濃度および不純物濃度が十分低くなるよう水質管理されている。また、加圧器スプレイライン配管は通常運転中に連続通水されており、当該部は閉塞滞留部ではないため、当該き裂が C l - S C C によるものとは考え難い。

(c) 強加工応力腐食割れ (強加工 S C C)

当該部はオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS316) であり、製造時にシンニング加工を実施していることから、内表面の極表層に 300HV を超える硬化層が形成されていると判断され、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ることから、当該部位の環境条件下でのき裂の発生・進展の可能性が否定できない。

d. 製造欠陥

当該部は現地溶接で施工されており、施工当時、電気工作物の溶接に関する技術基準を定める省令に基づき、十分な品質管理を行って施工している。また、建設時の非破壊検査によれば、有意な指示は確認されていないため、製造時の不具合が要因とは考え難いが、検出限界以下のごく微小な欠陥が存在していた可能性は否定できない。

上記原因調査の結果より、今回確認された傷は、オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS316) 製の当該エルボ部表面機械加工時に形成された硬化層に起因する強加工 S C C によると推定される。

(3) 文献、国内外の運転経験

各種文献、国内外の運転経験を調査したところ、当該部位と同様の材料、環境、応力条件における強加工 S C C の発生事例については確認されなかった。ただし、各種研究知見や実機 PWR/BWR プラントにおける強加工 S C C の発生事例を確認した (添付資料 6)。

(4) 実機における強加工 S C C 発生/進展の検討

各種研究知見を調査した結果、当該配管内面の表層硬さはシンニング加工により 300HV を超えている可能性があり、BWR 環境下において 300HV を超える場合には強加工 S C C が発生する可能性があることが知られている。また、当該配管板厚の硬さは溶接の影響により 200HV を超えている可能性があり、200HV を超える場合には強加工 S C C が進展する可能性があることが知られている。

よって、当該部において強加工 S C C が発生/進展する可能性は否定できない (添付資料 7、8)。

3. 亀裂進展および破壊の評価

供用期間中検査の第一段階検査により有意な指示が認められたことから、クラス 1 配管の欠陥評価として、維持規格 EB-1300 に従った欠陥評価を実施した。当該部はオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS316) の S C C によると考えられる欠陥であることから、第二段階の欠陥評価を実施した。S C C のき裂進展評価^{*3}については、電共研成果に他の研究知見のデータを加えて保守的に

見積もったベストフィット式（BFC 式）による条件および、更なる保守性を考慮した包絡曲線式による条件の下で評価し、疲労のき裂進展評価については維持規格に基づき評価した。評価期間末期でのき裂進展量を基に破壊評価※⁴を実施し、評価期間内での健全性を確認した（添付資料 9）。

許容欠陥寸法の限界の評価

評価式	評価期間	評価期間末期の予測欠陥寸法			許容欠陥寸法の限界 a_c (mm)	判定 $a_f < a_c$
		深さ a_f (mm)	長さ ℓ_f (mm)	欠陥角度 2θ (°)		
BFC 式	10 年	8.6	74	74.2	9.6	○
包絡曲線式	3.4 年	8.6	75	75.2	同上	○

許容曲げ応力による評価

評価式	評価期間	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 $P_b < S_c$
BFC 式	10 年	通常運転	3.8	16.8	○
		地震	64.8	66.0	○
包絡曲線式	3.4 年	通常運転	3.8	16.5	○
		地震	64.8	65.4	○

※ 3：き裂進展評価

計測された欠陥形状と各種運転条件をもとに、SCCのき裂進展速度と内圧及び曲げ応力（熱及び 1/3Sd 地震）による疲労のき裂進展速度を計算し、評価期間中のき裂進展量を算出する評価。

※ 4：破壊評価

き裂進展評価の結果を、評価期間経過後の欠陥形状に基づき、各種設計荷重（通常運転、事故、地震）を考慮しても、当該部が破壊しないことを確認する評価。

なお、1 サイクル後の欠陥の大きさは BFC 式の評価では、深さ方向 5.1 mm となり、包絡曲線式の評価では、深さ方向 5.8 mm となる。

4. 類似箇所の点検

今回の有意な指示が強加工 SCC によるものと考えられることから、強加工 SCC の発生及び進展の基準に基づいた類似箇所の点検を行った。プラント運転に影響のある系統の機器・配管耐圧部のうち体積検査を要求される溶接部を対象として、SCC の 3 要因（材料・環境・応力）や亀裂進展に対する余裕等の観点から類似箇所の点検対象として 19 箇所を抽出した。点検の結果、これら類似箇所に有意な指示がないことを確認した（添付資料 10）。

追加点検対象抽出結果

設備名	箇所数
加圧器スプレイライン配管	16
加圧器逃がしライン配管	3

5. 推定原因（まとめ）

加圧器スプレイライン配管及び加圧器の設計・運用を整理し、指示発生の要因として考えられる「機械的疲労」、「熱疲労」、「SCC」および「製造欠陥」それぞれに対して検討を実施した。その結果、当該部にはシンニングによる表層の硬化や、溶接による板厚内部の硬化が想定されること、および過去の事例や研究知見を踏まえ、強加工SCCと推測される。

また、維持規格に基づき評価期間を10年間とした詳細な欠陥評価（亀裂進展評価、破壊評価）を実施した結果、評価期間内の当該部位の健全性を確認した。なお、保守的に評価した場合でも、3.4年間の健全性を確認した。

6. 今後の対応

- (1) 次回定期検査で当該配管を取り替えるとともに、切り出した当該部のき裂を開放した上で、破面のSEM観察、ミクロ組織観察、硬さ計測等によりき裂の発生・進展要因の分析を行い、知見を拡充していく。
- (2) 当該配管を取り替えるまでの間、原子炉格納容器内での漏えいを検知する特定パラメータの集中監視を行うとともに、当該部位を直接監視するカメラを新たに設置し、漏えいの監視強化を行う。

7. その他

今回の定期検査で確認された加圧器スプレイライン配管溶接部の欠陥を評価した結果、技術基準規則に定める基準に適合していると評価されることから、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条第3号に定める事故故障等の報告には該当しない。

以上

添付資料

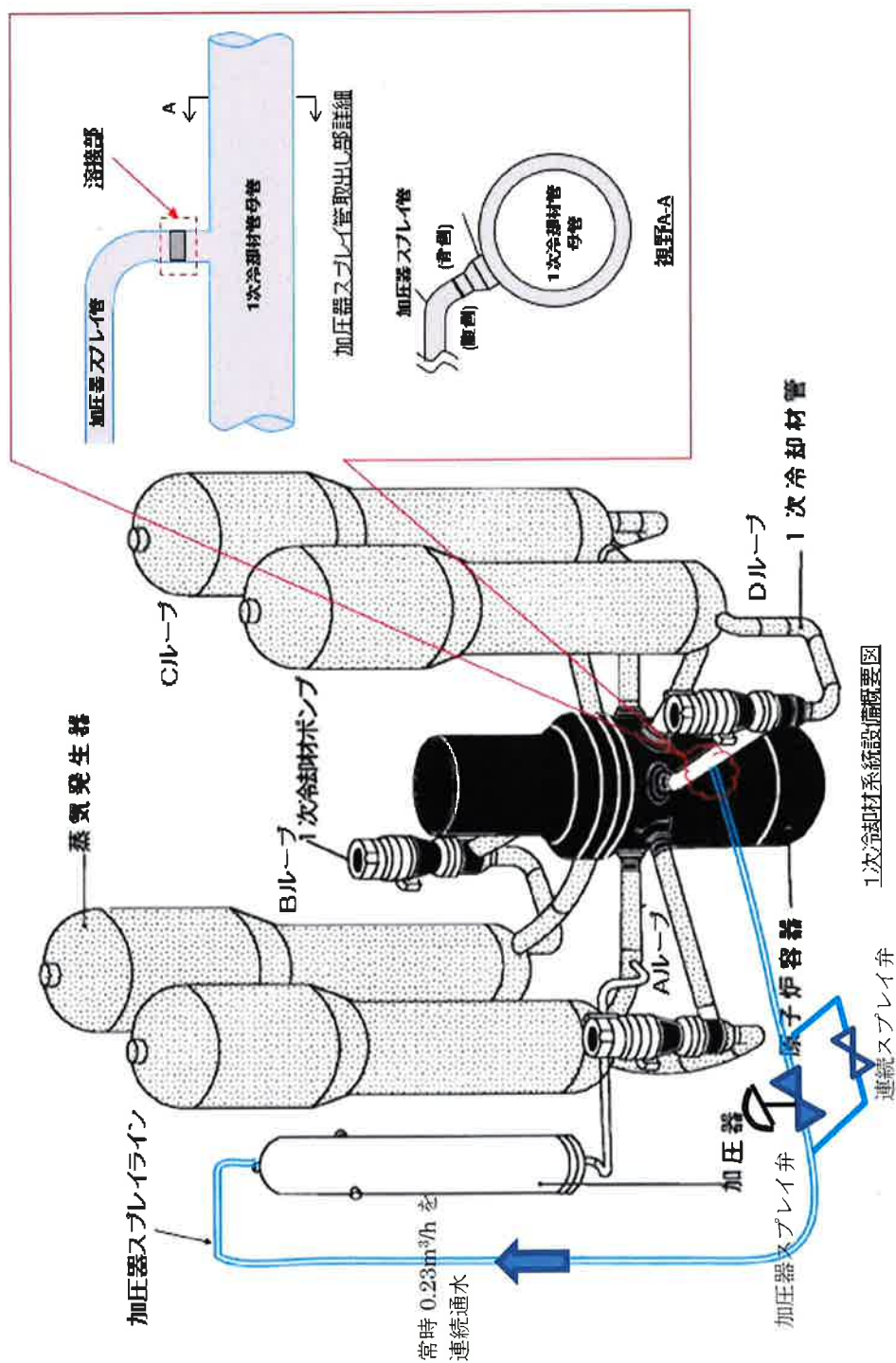
1. 第一段階検査におけるU T 結果
2. 第二段階検査における手順書およびP D 資格証
3. 欠陥深さ寸法測定結果
4. 第二段階検査を受けた追加調査結果
5. U T 指示要因検討の概要
6. 強加工S C Cに係る文献、国内外の運転経験
7. 実機における強加工S C C発生・進展の検討
8. 溶接金属のS C C進展性に関する検討
9. 欠陥の評価
10. 水平展開（類似箇所の点検）

別紙

検査、原因の検討および欠陥評価等に関する説明資料

第一段階検査におけるUT結果

指示箇所



18回定検時（今回ISI）の記録

超音波探傷データシートa（配管—インディケーションの記録）

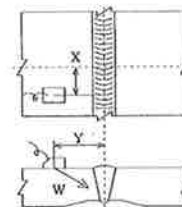
配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン（Dループ）

溶接線番号 FW-4

上流側 管 台

下流側 エルボ

探傷角度 45°（直角）



	探傷サイド		ピーク指示部					DAC20%		DAC100%		備 考
	上流側	下流側	X (mm)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	
1	○		0° +12	14	23.0	92	94	全 周	360			裏波部*
2	○		120° +8	14	22.0	44	44	全 周	360			裏波部*
3	○		180° -5	14	20.0	48	44	全 周	360			裏波部*
4	○		210° -3	15	21.0	72	69	全 周	360			裏波部*
5	○		210° +7	13	20.0	72	66	全 周	360			裏波部*
6	○		240° +19	13	20.0	82	75	全 周	360			裏波部*
7	○		300° +11	13	22.0	41	41	全 周	360			裏波部*
8	○		0° -4	14	23.0	66	68	全 周	360			裏波部*
9	○		210° +15	26	36.0	58	64	全 周	360			外表面部
10		○	90° -14	15	21.0	46	44	30° ~ 120° +13 ~ +0	77			裏波部*
11		○	90° +15	14	20.0	38	35	30° ~ 120° +13 ~ +0	77			裏波部*

備考 * : 30° 毎の記録点間の最大エコー（ピーク）が前後の記録点のエコー高さを超える反射波を示す。

検査日付 2020年 8月17日 検査実施者

超音波探傷データシートa（配管—インディケーションの記録）

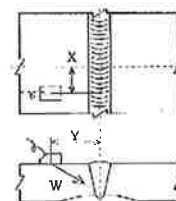
配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン（Dループ）

溶接線番号 FW-4

上流側 管 台

下流側 エルボ

探傷角度 45°（直角）



	探傷サイド		ピーク指示部					DAC20%		DAC100%		備 考
	上流側	下流側	X (mm)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	
12		○	240° +16	13	21.0	38	36	240° ~ 0° +0 ~ -24	96			裏波部*
13		○	270° +17	14	21.0	56	53	240° ~ 0° +0 ~ -24	96			裏波部*
14		○	300° +18	31	38.0	61	66	240° ~ 120° +0 ~ +0	240			外表面部
15		○	60° +2	3	16.0	70	57	60° ~ 60° -1 ~ +13	14			柱状品伝搬エコー
16		○	300° +5	3	16.0	53	43	300° ~ 300° -5 ~ +7	12			柱状品伝搬エコー
17		○	0° +3	15	20.0	192	176	0° ~ 30° -24 ~ +13	67	0° ~ 30° -12 ~ -16	26	不連続部エコー
						以下	余白					

備考 * : 30° 毎の記録点間の最大エコー（ピーク）が前後の記録点のエコー高さを超える反射波を示す。

検査日付 2020年 8月17日 検査実施者

今定検での不連続エコーのピーク指示位置とエコー高さ

超音波探傷データシートb (配管--インディケーションの記録)

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 FW-4

探傷角度 45° (直角)

X位置	上 流 (管 台)								下 流 (エルボ)							
	裏波部				柱状晶伝搬エコー				裏波部				柱状晶伝搬エコー			
	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)
0°	15	23.0	51	52												
30°	13	24.0	31	33												
60°	15	22.0	25	25					14	20.0	42	39				
90°	14	22.0	48	48					14	20.0	24	22				
120°	14	21.0	23	22					14	20.0	24	22				
150°	13	20.0	36	33					—	—	—	—	—	—	—	—
180°	13	20.0	28	26					—	—	—	—	—	—	—	—
210°	14	21.0	28	27					—	—	—	—	—	—	—	—
240°	14	21.0	25	24					14	21.0	22	21				
270°	13	21.0	32	31					16	22.0	26	26				
300°	13	21.0	35	34					16	21.0	47	45				
330°	14	23.0	29	30					16	22.0	30	30				
					空白欄は隣接する30°芯2点以上にまたがる反射波を認めず。				120°～240°はエルボ腹のため探傷不可。 空白欄は隣接する30°芯2点以上にまたがる反射波を認めず。				120°～240°はエルボ腹のため探傷不可。 空白欄は隣接する30°芯2点以上にまたがる反射波を認めず。			

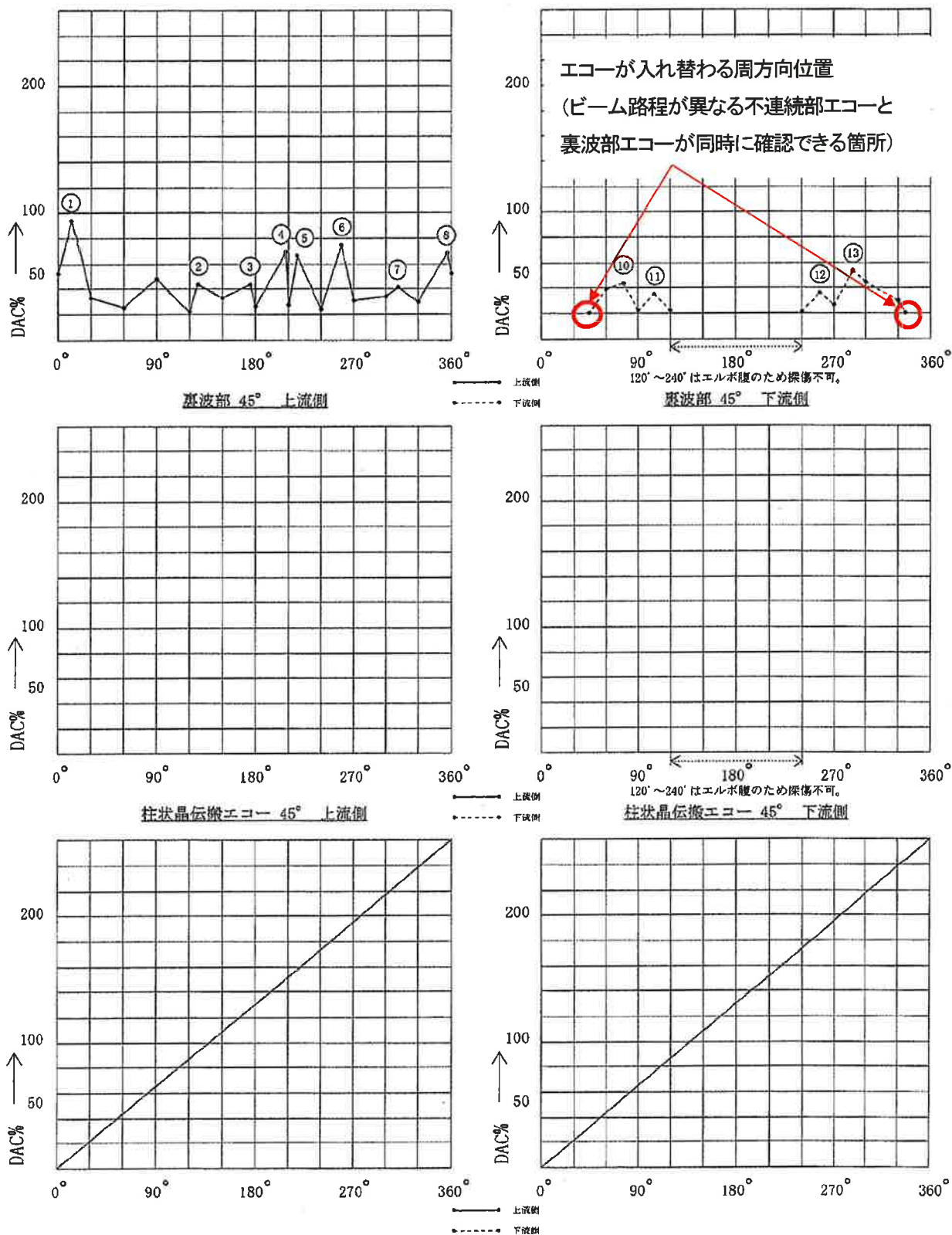
検査日付 2020年 8月17日 検査実施者

今定検での不連続部エコー検出に伴う裏波部エコーの消失

超音波探傷データシートc (配管-インディケーションのマップ)

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 FW-4



今定検において不連続部エコーと裏波部エコーが入れ替わる周方向位置

10回定検の記録

超音波探傷データシートb (配管-インディケーションの記録)

45-12-396-

配管系統及びライン名 加圧融スプレイライン				溶接線番号 FW-4				探傷角度 45° (直角)								
X位置	上 流 (管 台)								下 流 (エ ル ボ)							
	裏 波 部				外 表 面 部				裏 波 部				外 表 面 部			
	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)
0°	14	21.0	36	35	30	38.0	34	38	13	21.0	26	25	29	38.0	52	57
30°	15	22.0	22	22	30	38.0	22	24	13	21.0	49	47	29	38.0	48	53
60°	14	21.0	24	23	26	37.0	28	31	14	21.0	42	40	30	39.0	42	46
90°	14	21.0	43	41	27	38.0	25	28	14	21.0	36	35	29	38.0	22	24
120°	14	21.0	21	20	27	38.0	40	44	13	20.0	24	22	29	38.0	18	20
150°	14	20.0	33	31	28	39.0	34	37	—	—	—	—	—	—	—	—
180°	14	21.0	40	38	27	38.0	28	31	—	—	—	—	—	—	—	—
210°	14	21.0	64	61	29	38.0	26	29	—	—	—	—	—	—	—	—
240°	14	21.0	26	25	28	38.0	28	31	14	21.0	21	20	29	38.0	18	20
270°	14	21.0	34	33	29	39.0	26	28	13	21.0	22	21	31	39.0	27	30
300°	15	21.0	26	25	28	39.0	43	47	14	20.0	38	35	31	39.0	26	28
330°	14	21.0	21	20	27	38.0	24	27	14	21.0	25	24	30	38.0	28	31
								120°～240° はエルボ部の為探傷不可。				120°～240° はエルボ部の為探傷不可。				
検査日付 平成 26 年 5 月 8 日 検査実施者																

10 回定検での当該部裏波部エコーの X=0° での Y 距離と W(路程), エコー高さ

建設時の記録

No. _____ 超音波探傷データシート b (配管-インジケーションの記録)
RCS H2-3911015
配管系統及びライン名 加圧器スプレイン DLP(4B) 溶接番号 FW-4 探傷角度 45°

X位置	上流 (ノズル)								下流 (エルボ)							
	内面				外面				内面				外面			
	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y	W	CRT (%)	DAC (%)	Y	W	CRT (%)	DAC (%)	Y	W	CRT (%)	DAC (%)
0°	14	21	22	21	30	39	20	22	13	21	28	27	29	39	30	33
30°	15	22	29	24	30	39	20	22	13	21	24	23	29	39	35	38
60°	14	21	22	21	26	38	20	22	14	21	22	21	30	40	30	32
90°	14	21	32	31	27	39	21	23	14	21	22	21				
120°	14	21	21	20	27	39	21	23	13	20	21	20	—	—	—	—
150°	13	20	25	23	28	40	20	22	—	—	—	—	—	—	—	—
180°	14	21	26	25	27	39	20	22	—	—	—	—	—	—	—	—
210°	14	21	44	43	29	39	24	26	—	—	—	—	—	—	—	—
240°	14	21	22	21	28	39	26	28	14	21	21	20	—	—	—	—
270°	14	21	29	26	29	40	19	20	13	21	22	21	31	40	21	23
300°	15	21	26	25	28	40	22	24	14	20	21	20	31	40	30	32
330°	14	21	21	20	27	39	18	20	14	21	21	20	30	39	35	38
備考	データシートCマフNo. 1				データシートCマフNo. 2				データシートCマフNo. 3				データシートCマフNo. 4 空欄は記録レベル以下			

船舶生 5129 号 (原サ換)

試験日付 H2.9.29

試験員

PSI での当該部裏波部エコーの X=0° での Y 距離と W(路程), エコー高さ

第二段階検査における手順書およびPD資格証

原規技発第1906051号 原子力規制委員会決定 令和元年6月5日 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亀裂その他の欠陥の解釈 改正の抜粋

改 正 後	改 正 前
ただし、2次クリーピング波法による有意なエコー（超音波探傷試験規程において記録することとされているもの）をい（う。）を亀裂からのものではないと判断する場合にあっては、判定結果について第三者を交えて評価する体制で行うなど客観性を確保して行うこと。 また、亀裂等のサイジングは、超音波探傷試験規程に規定する方法又は欠陥評価の保守性を考慮して十分な精度を有すると認められ、かつSUS304管の応力腐食割れによる亀裂のサイジングをレール鋼管及びSUS304管の応力腐食割れによる亀裂のサイジングを行う場合においては、日本非破壊検査協会規格「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 0603:2005）（以下「超音波探傷試験システム認証2005」という。）の附属書（規定）「軽水型原子力機器に対するPD資格試験」又は日本非破壊検査協会規格「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）（以下「超音波探傷試験システム認証2015」という。）の附属書A（規定）「軽水型原子力発電所用機器のオーステナイト系ステンレス鋼配管溶接部に対する亀裂高さ測定」のPD資格試験」の規定に別紙6の要件を付したものに合格し、認証を受けた超音波探傷試験技術者（以下「UT技術者」という。）が同規格により認証された探傷装置を用い同規格により認証された手順書に従って行う方法により行	ただし、2次クリーピング波法による有意なエコー（JEAC4207-2008において記録することとされているもの）をい（う。）を亀裂からのものではないと判断する場合にあっては、判定結果について第三者を交えて評価する体制で行うなど客観性を確保して行うこと。 また、亀裂等のサイジングは、JEAC4207-2008に規定する方法又は欠陥評価の保守性を考慮して十分な精度を有すると認められ、かつSUS304管の応力腐食割れによる亀裂のサイジングを行う場合においては、日本非破壊検査協会規格「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 0603:2005）の附属書（規定）「軽水型原子力機器に対するPD資格試験」に合格し、認証を受けた超音波探傷試験（以下「UT」という。）技術者が同規格により認証された探傷装置を用い同規格により認証された手順書に従って行う方法（以下「PD認証方法」という。）により行うこと。

JEAC4207-2008 附属書 A-1100 及び附属書解説 A-1100-1 の抜粋

A-1000 総 則

A-1000 総 則

A-1100 目 的

本附属書は、超音波探傷試験による欠陥深さ寸法測定に適用可能な要領を示す。ただし、これ以外の方法であって、欠陥評価の保守性を考慮して十分な精度を有すると認められた方法により、欠陥深さ寸法測定を行ってもよい。(解説 A-1100-1)

また、欠陥深さ寸法測定は、複数の手法又は複数の測定条件で行い、総合的に評価する。(解説 A-1100-2)

A-1200 適用範囲

容器(管台内面の丸みの部分を含む。)及び配管の突合せ溶接継手(容器管台とセーフエンドとの異種金属突合せ溶接継手を含む。)に適用する。

なお、上記以外の部位で本附属書が適用できると判断される場合は、これを準用してもよい。(解説 A-1200)

A-1210 適用手法

モード変換波法、タンデム法、端部エコー法、TOFD 法及びフェーズドアレイ法による欠陥深さ寸法測定要領について示す。(解説 A-1210)

A-1220 適用部位

A-1210 項に示す手法は、それぞれ次に掲げる部位に適用できる。(解説 A-1220)

A-1221 モード変換波法

- (1) 試験部の厚さが 10mm 以上 51mm 以下のフェライト鋼系配管及び容器(クラッドなし)の突合せ溶接継手
- (2) 試験部の厚さが 10mm 以上 51mm 以下のオーステナイト系ステンレス鋼配管の突合せ溶接継手

A-1222 タンデム法

試験部の厚さが 10mm 以上 51mm 以下のオーステナイト系ステンレス鋼配管及び容器(クラッドなし)の突合せ溶接継手

A-1223 端部エコー法

- (1) 試験部の厚さが 10mm 以上のフェライト鋼系配管及び容器(クラッドなし)の突合せ溶接継手

A-1000 総 則

解説 A-1100-1 PD 認証を取得した試験技術者、探傷装置及び手順書を用いて欠陥深さ測定を行う場合

NDIS 0603（以下 PD 認証と略す）の附属書によって認証された範囲において超音波探傷試験技術者、探傷装置及び手順書を用いた欠陥深さ寸法測定を行う場合には、JEAC 4207-2008 で定められている超音波探傷試験に係る適切な試験方法、必要な技量の取得及び維持を満たすものとして、A-1100 項による「欠陥評価の保守性を考慮して十分な精度を有すると認められた方法」と見なしてよい。

解説 A-1100-2 欠陥深さ寸法測定原則

き裂の深さは、浅いものから深いものまで想定して、き裂先端を厚さ方向全体にわたり確認する。このために複数の手法の組合せ又は複数の測定条件で、総合評価することを要求した。

適用する手法の組合せ等については、適用部位、想定される欠陥等に応じて個別に定めることとなるが、「UTS」及び「PLR 配管サイジング精度確性試験」においては、次のような手法の組合せが用いられており、これらを参考にしてもよい。

モード変換波法が適用可能な部位については、欠陥深さ測定に際し、モード変換波法により欠陥深さを推定するものとする。ただし、技術的妥当性を確認できれば PD 又は海外で欠陥深さ測定の認証を取得した手法、探傷装置及び有資格者により欠陥深さ測定を行う場合に限り、モード変換波法による欠陥深さの推定を省略することができる。

〔適用する手法の組合せの例〕

- ① モード変換波法、タンデム法及び端部エコー法又は TOFD 法との組合せ
- ② 端部エコー法（縦波/横波、複数の屈折角の組合せ）
- ③ フェーズドアレイ法と端部エコー法の組合せ
- ④ TOFD 法（複数の交軸の組合せ）
- ⑤ フェーズドアレイ法（焦点、屈折角等に関する任意の複数条件）

解説 A-1200 適用範囲

(1) 適用範囲

本附属書は、容器と配管の突合せ溶接継手を適用範囲とし、具体的には、下記 a, b の範囲及びこれと同等な欠陥深さ寸法測定要領が適用可能と判断される範囲とした。

また、その他の部位（例えば、シュラウド等の炉内構造物）への適用についても本附属書の適用が可能と判断されれば用いてもよいこととした。

- a. 原子力発電施設検査技術に関する試験研究事業（平成 4 年度～15 年度上半期に、(株)発電設備技術検査協会が経済産業省原子力安全・保安院からの委託により実施した事業、及びこれを引き継いで平成 15 年度下半期～平成 16 年度に、(株)原子力安全

PD 認証に用いた手順書

軽水型原子力発電所機器の供用期間中検査における
オーステナイト系ステンレス鋼配管突合せ溶接継手の
超音波探傷試験によるき裂高さ(深さ)測定要領

三菱重工原子力技術資料：クラス B

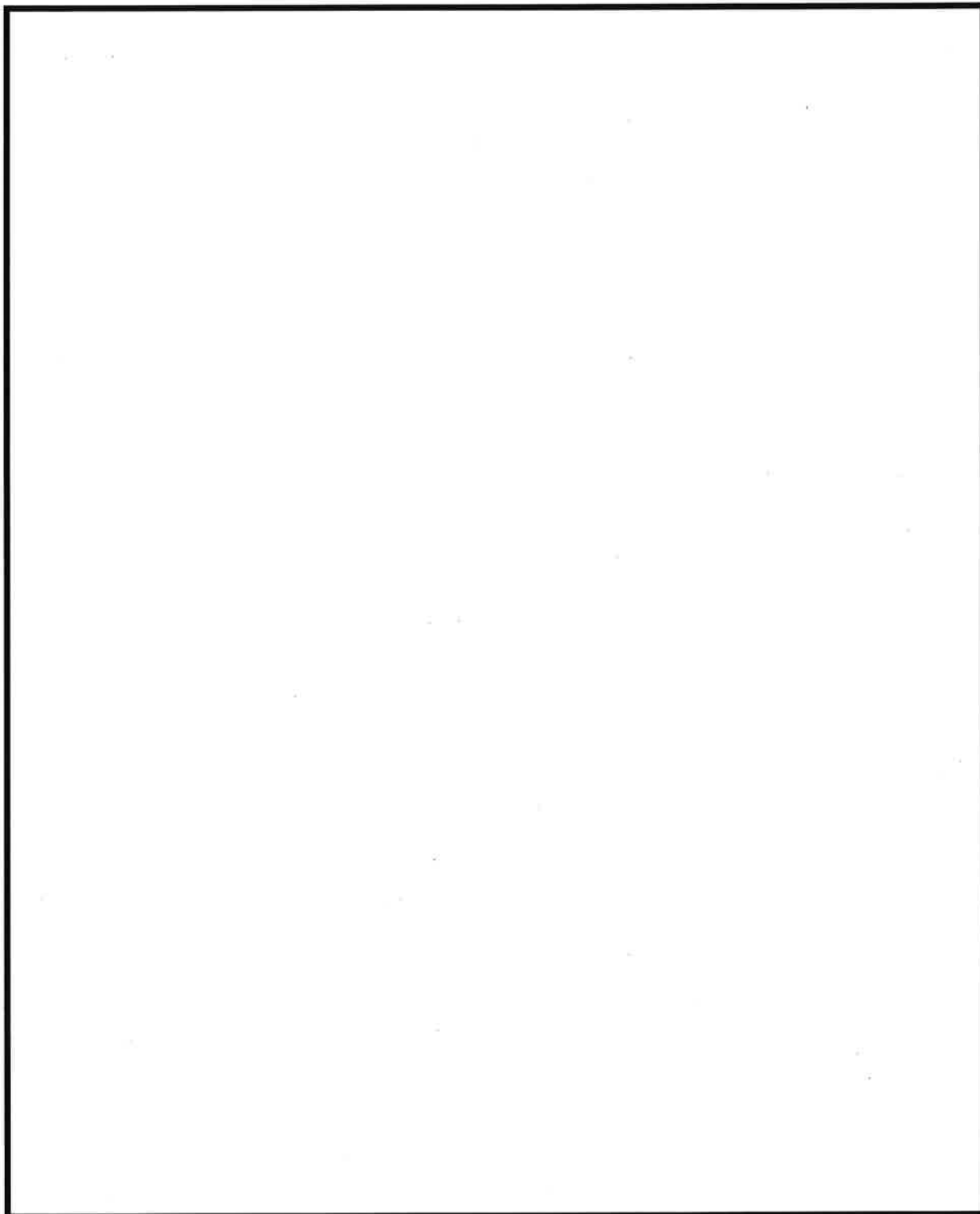
本資料は当社及び（又は）協力会社の商業機密を含んでおりますので、本提出（貸与）目的以外に使用されることは御遠慮ください。
また、当社の同意なく本資料の全部又は一部を第三者に公開、開示されることのないように願います。

三菱重工株式会社 原子力事業部

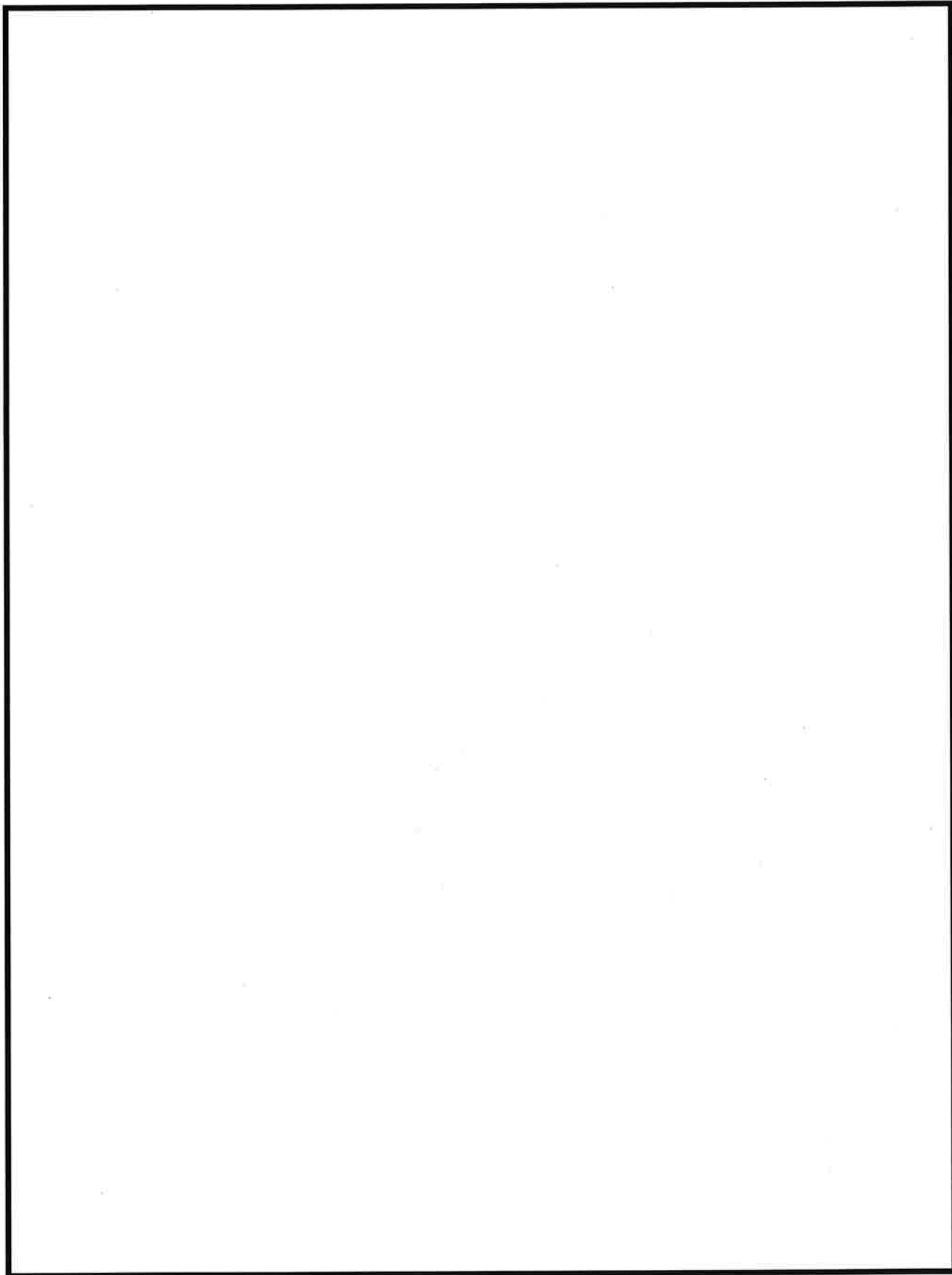


内 容		備 考	注 文 主	工事番号	年 月 日	三菱重工株式会社 エネルギー・環境部門の原子力事業部 品質保証部 原子力サービス品質管理課			
本 文	一 頁	本書は、 UFS-20112221 R0 に対し、一部 見直しを行い再 発行するもので ある。	—	アイテム	照 合 者	課 長	主 任	担 当	作 成
図 表	一 枚			—	2015.11.30	15.11.30	15.11.30		
表紙共	15 枚			—					
						作 成	2015 年 // 月 30 日		
						出 番			
配布先	電 中 研 1		控		図書 番号	UFS-20150150			改 正 0

図書表紙

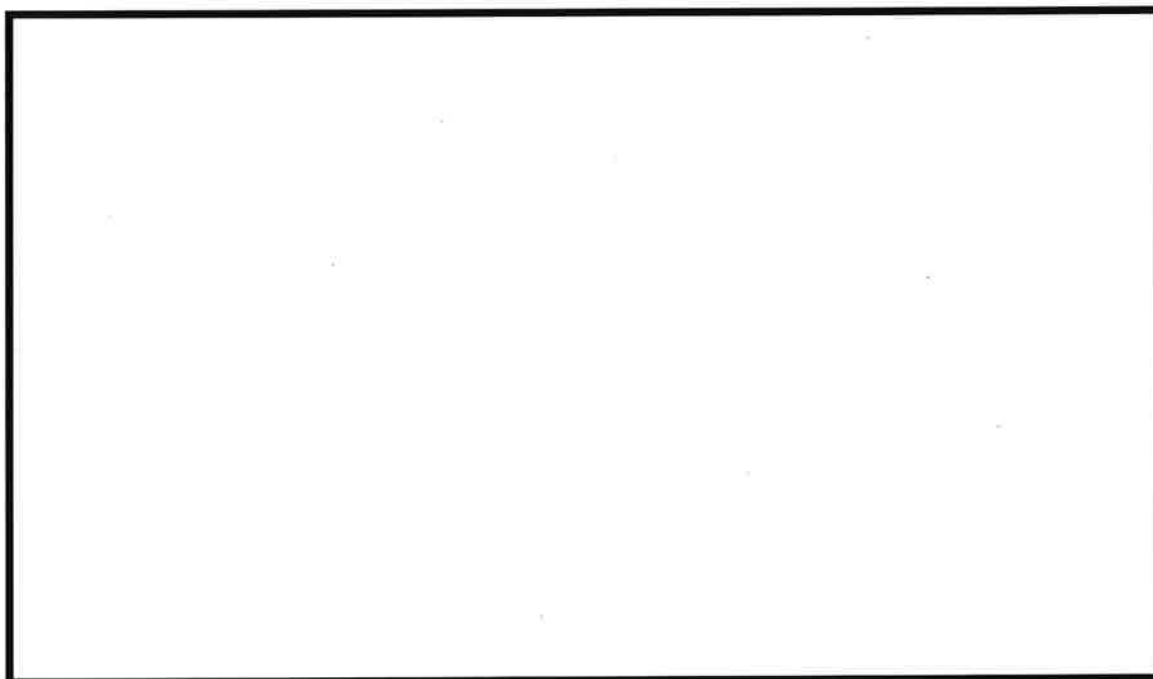


：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



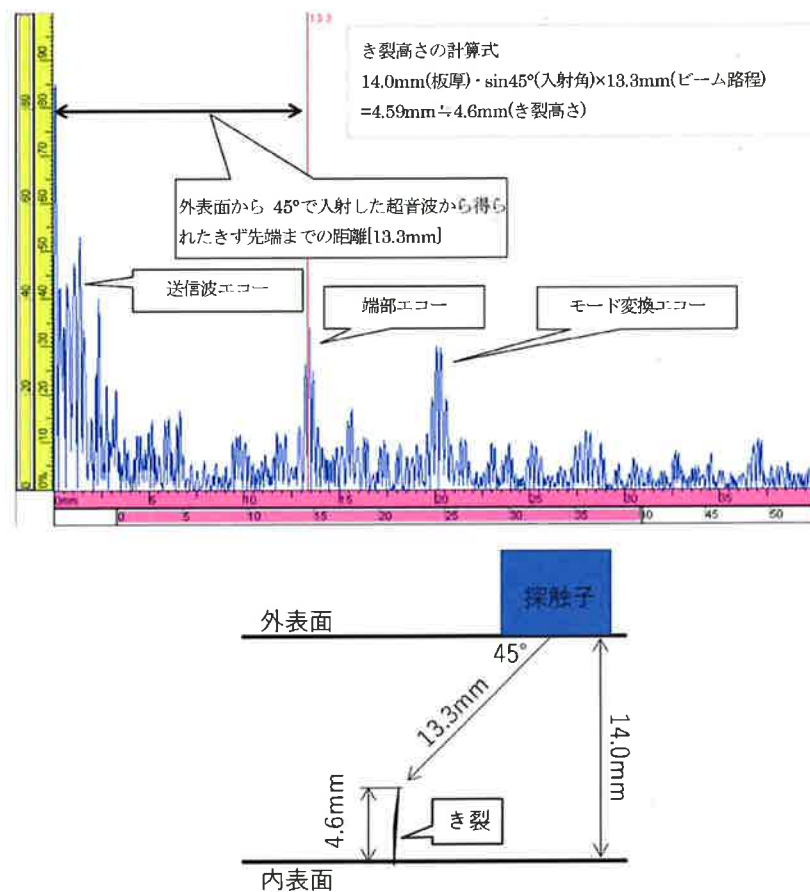
 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

NDIS0603 に基づく PD 資格証



☐ : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

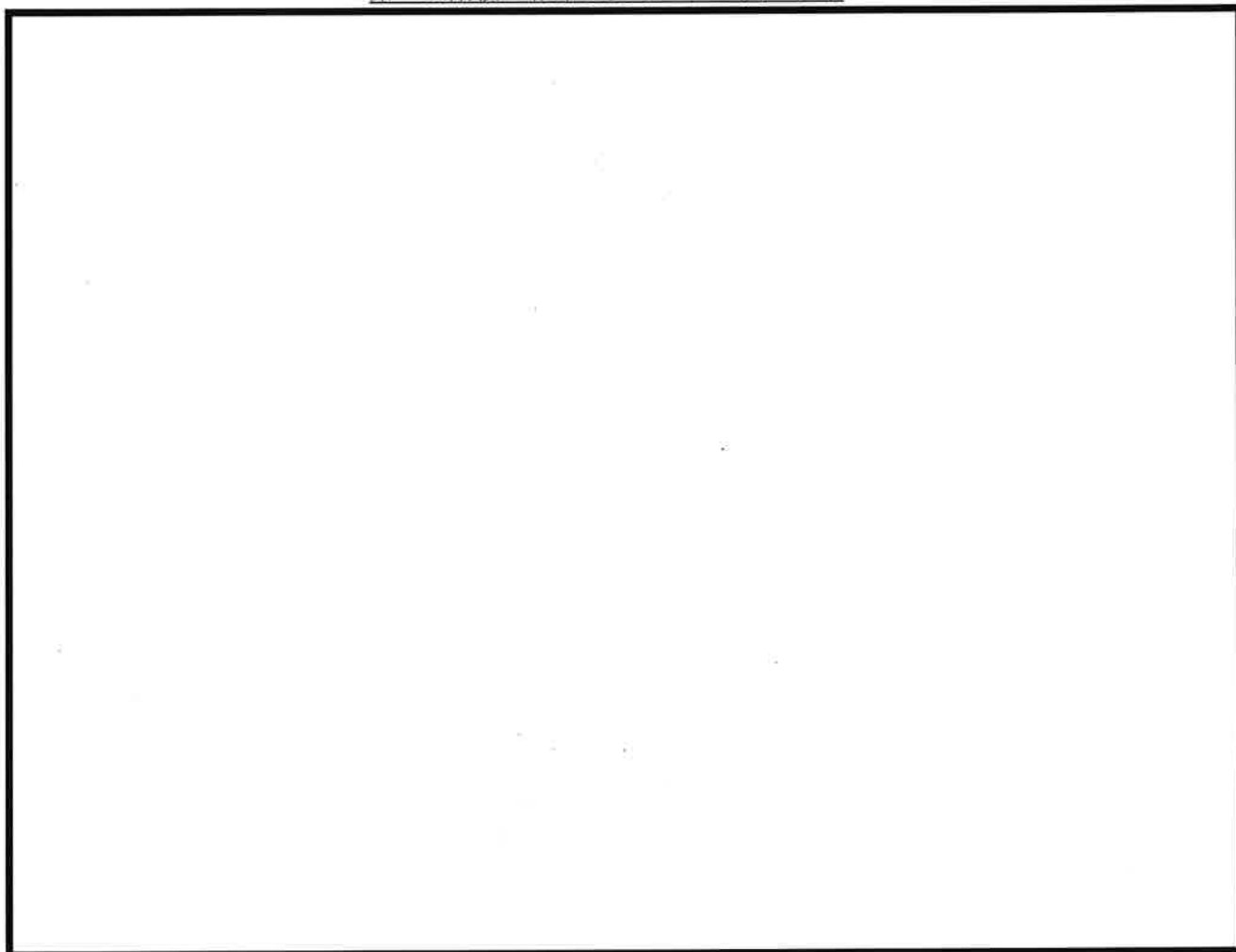
欠陥深さ寸法測定結果



A スコープ及び探傷模式図

第二段階検査を受けた追加調査結果

第二段階検査結果を受けた追加調査結果



 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

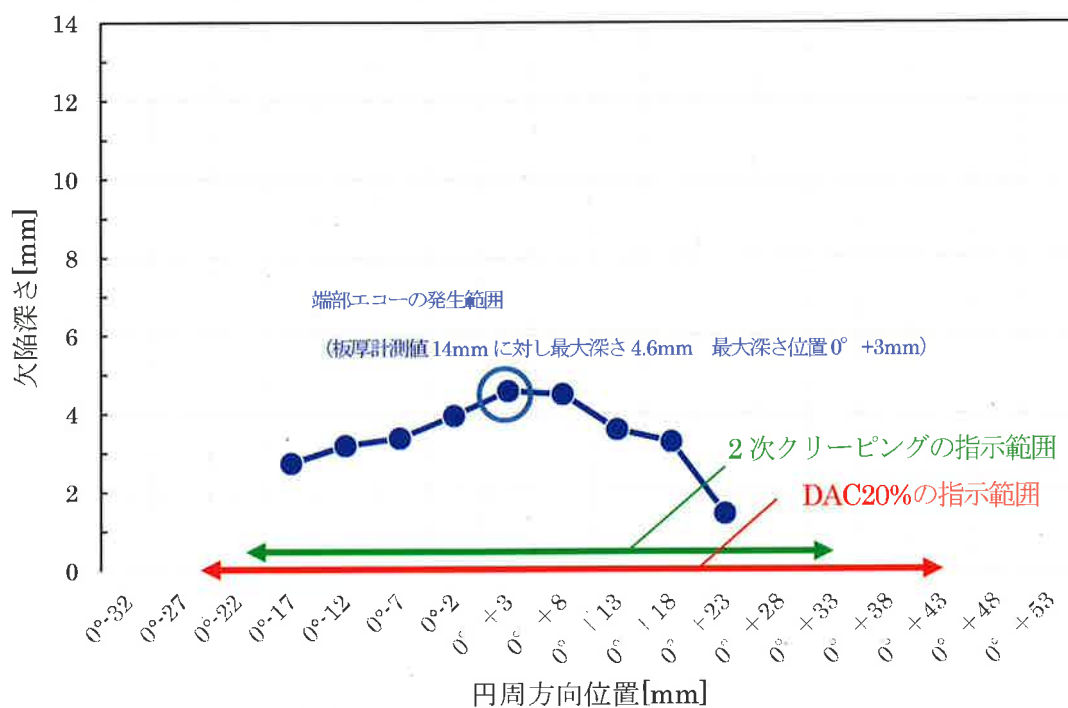
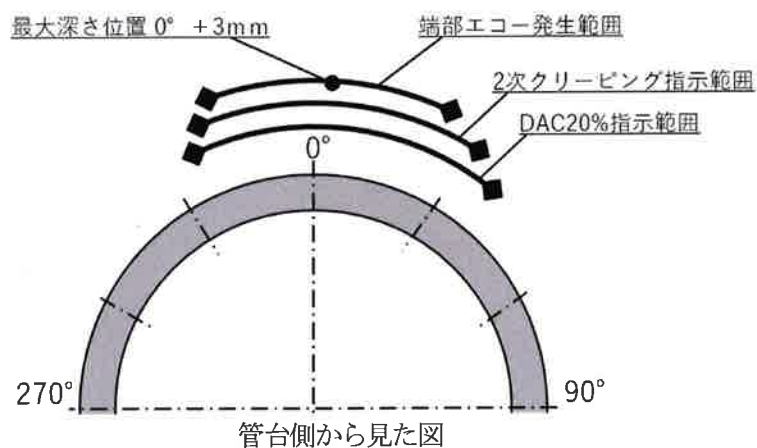


図-7 想定される欠陥性状

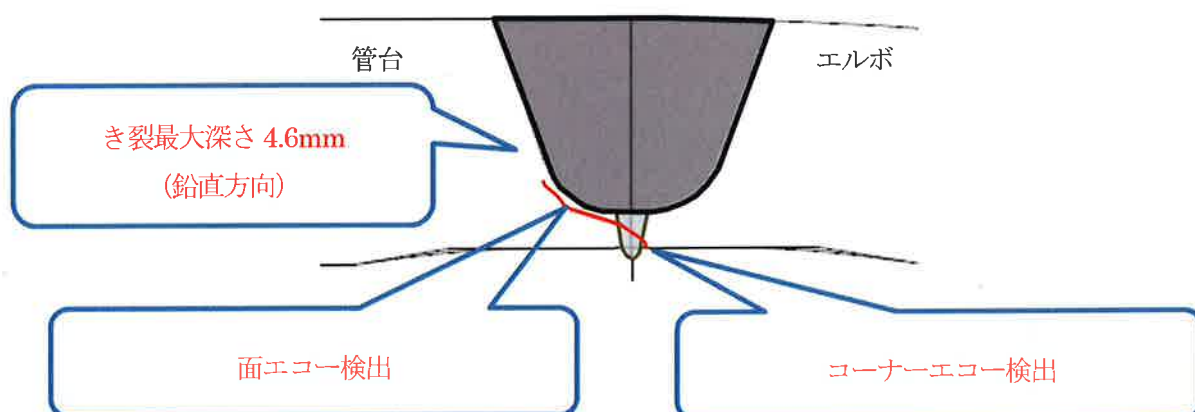
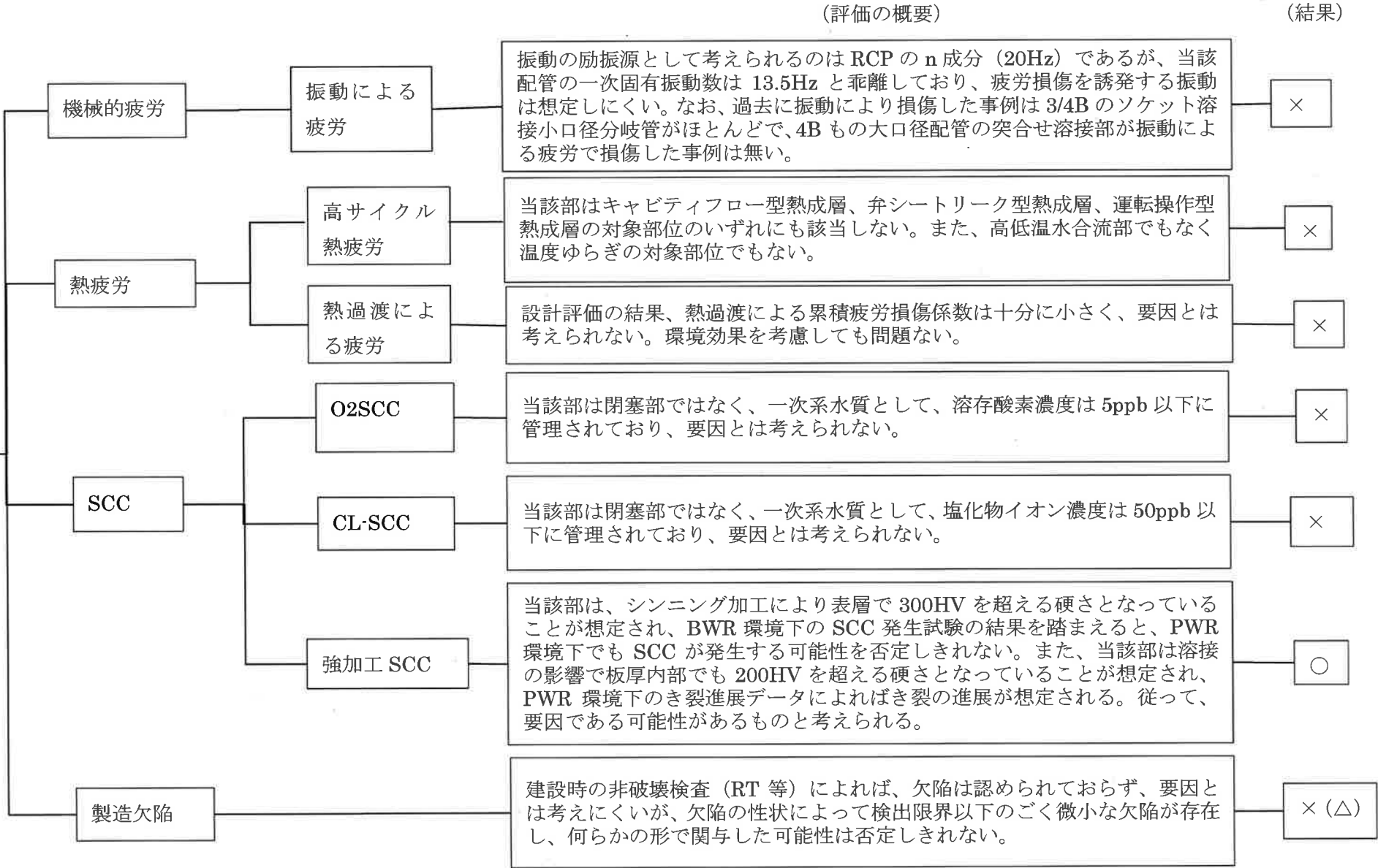


図-8 UT 結果の整理

UT 指示要因検討の概要

加
圧
器
ス
プ
レ
イ
管
台
溶
接
部
U
T
指
示

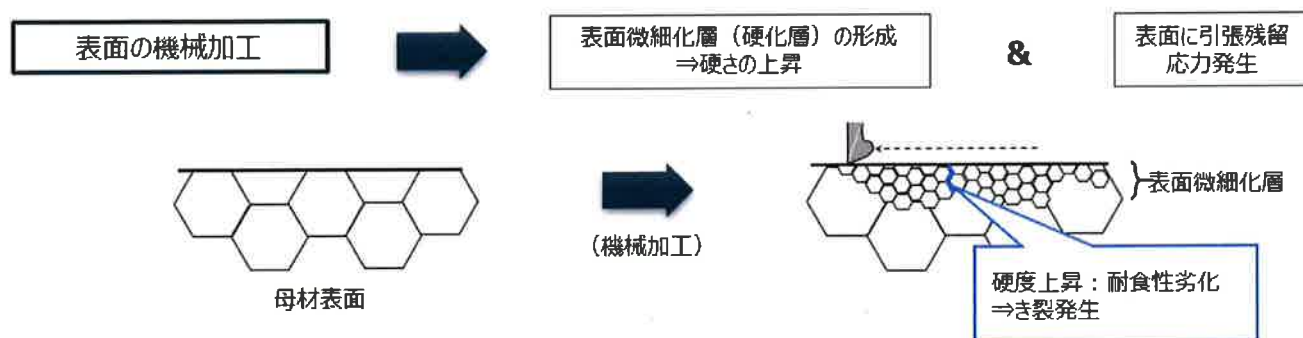


UT 指示要因検討の概要

- 凡例
- ; 可能性が考えられる
 - △ ; 関与した可能性は完全には否定しきれない
 - × ; 可能性は考えられない

強加工 SCC に係る文献、国内外の運転経験

機械加工に伴う硬さ上昇及び残留応力を起因とした割れは、2000 年代前半に BWR の再循環配管で使用されている低炭素ステンレス鋼で顕在化している。当時 BWR を中心に様々な研究が実施され、明確な発生原因までは示されなかったが、実機調査結果や研究知見より、概ね以下に示すように考えられている。



<PWR 強加工 SCC に対する取り組みの経緯>

PWR に於いては、BWR を中心とした国内外の強加工 SCC に関する事例や研究知見、更には、美浜 2 号蒸気発生器入口管台セーフエンド部（オーステナイト系ステンレス鋼）に於いて認められた強加工 SCC の可能性が否定できない事例を受け、PWR 環境での強加工 SCC に対し、以下の様な様々な対応をとってきている。（表 1 参照。表中の符号と下記符号は対応する。）

下記の様に、PWR 配管シンニング部に対しても、強加工 SCC のリスクを認識し、念のための各種対応を行っており、原因として完全に排除は出来ないものと考ええる。

一方、O₂SCC、CLSCC や疲労に対する評価を行ったが、その可能性は無いものと判断しており、上述のように PWR 環境下でも可能性を完全に否定しきれない強加工 SCC が本事象の原因であると推定した。

- A) 1999 年、美浜 2 号機の余剰抽出配管の冷間曲げ加工部で、キャビティフロー型熱成層による粒内高サイクル熱疲労割れ事象を経験した。本事象は疲労損傷事例ではあったが、その原因究明調査の過程で、芯金（加工治具）跡部近傍には、ビッカース硬さ 350HV 程度の硬化層が認められ、冷間曲げ管の芯金跡部は高硬度となることが広く認識されることとなった。
- B) 1999 年の美浜 2 号機余剰抽出配管の損傷事例を契機に、国内外の文献調査を行った。この過程で、「第 6 回原子力発電所に於ける材料の環境劣化に関する国際シンポジウム」に於いて、「STRESS CORROSION CRACKING OF COLD WORKED AUSTENITIC STAINLESS STEEL PIPES IN BWR REACTOR WATER」なる論文が発表されており、海外 BWR リンガル 1 号機の SUS304 製冷間曲げ管芯金接触跡部で、強加工 SCC により板厚の約 90% 程度の深さの粒界割れが発生していたことが確認された。本事象は、BWR における事象ではあったが、芯金を使用することで強加工を施された接触跡を有する冷間曲げ加工オーステナイト系ステンレス鋼材であり、国内 PWR プラントでも広く使用されて来ている材料、および加工法であったことから、PWR プラントの冷間曲げ加工管に対しても、強加工 SCC の潜在的リスクを認識

することとなった。

- C) 以上の様な認識の中で、スペインの研究機関 CIEMAT より「CRACK GROWTH RATE OF HARDENED AUSTENITIC STAINLESS STEELS ON BWR AND PWR ENVIRONMENTS」なる論文が発表され、BWR 環境よりも低速度ながら PWR 環境に於いても、強加工を施されたオーステナイト系ステンレス鋼では粒界 SCC 割れが進展することが明確となった。B) 項で認識された PWR プラントでの冷間曲げ加工管の強加工 SCC に対する潜在的リスクはより明確なものとなり、何らかの予防保全対策の必要性を認めることとなった。また、2000 年に維持規格に盛り込まれた評価章を受け、その実機適用に向け、必要な知見（き裂進展速度、曲げ管の破壊評価手法）の取得に着手した。

- D) 国内 PWR プラントでは、多数の芯金を使用した冷間曲げ加工管を使用してきたが、強加工 SCC に対する潜在的リスクを排除する目的で、新しい曲げ加工法の開発を行った。もともと曲げ加工部の偏平防止の為に芯金を使用した加工を行ってきたが、その芯金の接触部が強加工部を生じさせる結果となっていた為、曲げ加工条件の最適化と加工治具の形状改良により、芯金を使用しない冷間曲げ加工法を開発した。また、冷間曲げ加工後に溶体化熱処理も実施し、硬さと残留応力の改善を図ることとした。

以上の対策が確立したのを受け、2006 年ころより、RCPB 範囲も含め、工認資料上の扱いも強加工 SCC に対する予防保全対策として、冷間曲げ管取替工事を推進している。

なお、工認資料上の「変更を必要とする理由を記載した書類」には、以下の様な説明を記載している。“国内 BWR プラントの原子炉冷却系統設備配管において、配管加工時に生じる硬化層を起因とした、応力腐食割れが発生している。PWR プラントにおいては 1 次冷却材の酸素濃度を低く管理していることから、現在までのところ BWR プラントと同様の応力腐食割れによる損傷は発生していないが、原子炉冷却系統設備配管においても、製造過程で強い力による曲げ加工を行うことで生じる硬化層を有する曲げ管を使用している部位があるため、これらについて予防保全の観点から、硬化層が形成されない曲げ管等へ取替えることにより、1 次系配管の信頼性確保に万全を期す。”

- E) 2001 年以降、国内 BWR プラントのコアシュラウド及び再循環配管において、多数のひび割れ事象が報告されている。調査の結果、従来は SCC が発生し難いと考えられていた低炭素ステンレス鋼（SUS316L、原子力用 316 及び SUS304L）における応力腐食割れ（SCC）によるひび割れであることが明らかとなった。従来、これらのステンレス鋼よりも炭素含有量が高い SUS304 鋼で認められた鋭敏化型の SCC は、材料、応力、環境要因の 3 要因が重畳して発生すると考えられてきたことから、これら一連の低炭素系原子力用ステンレス鋼のひび割れは、従来のメカニズムでは説明出来ない事象と考えられた。このため、発生原因に関する調査・研究が進められた結果、機械加工等により硬化した部位では、低炭素系ステンレス鋼でも SCC 感受性を有する場合のことが明らかとなっている。

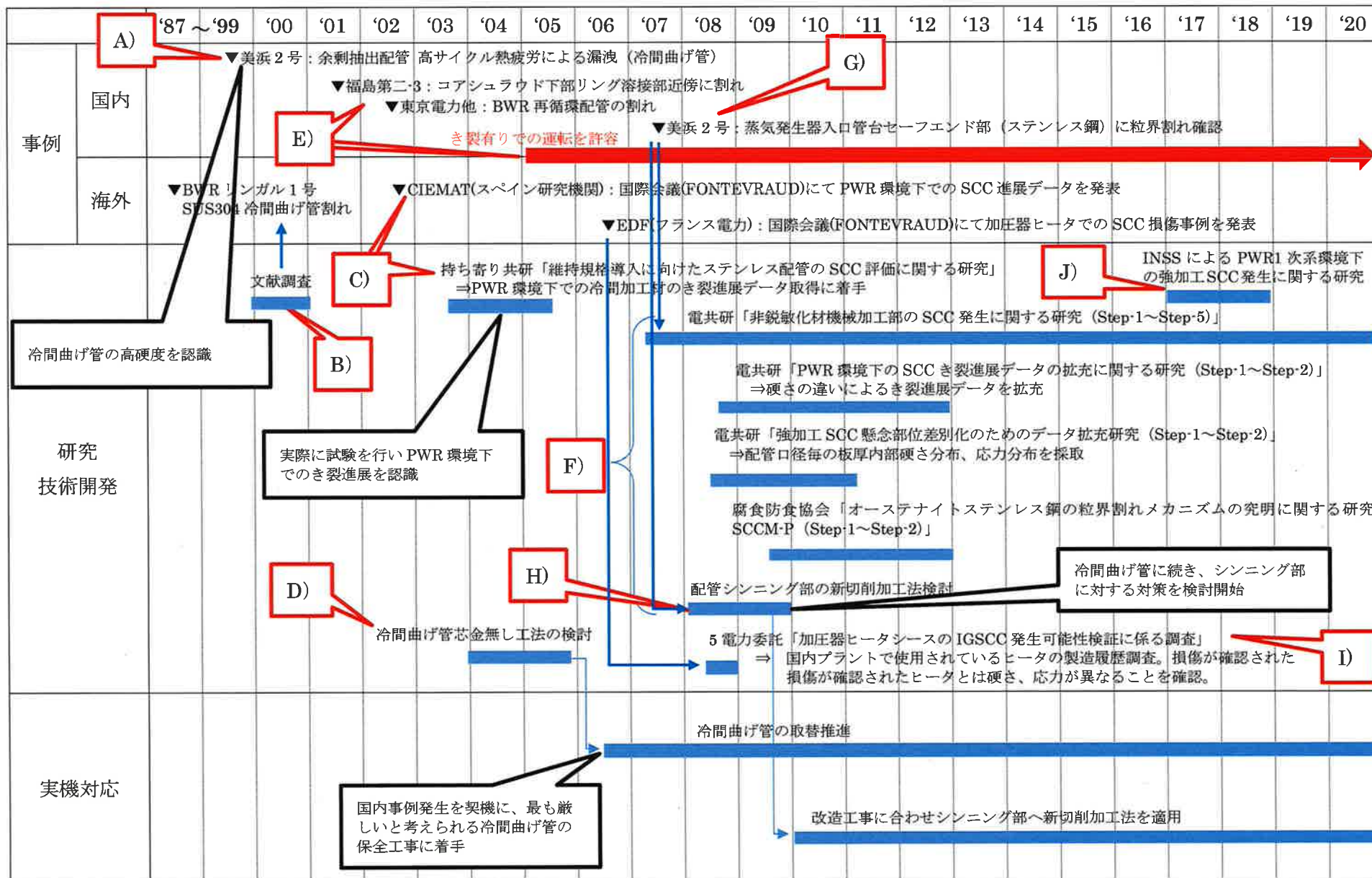
プラントの健全性評価では、原子力発電設備を建設時と同じ状態に保持することを要求した「建設基準」から、設備の安全性が確認された場合にのみ、ひび等を残したまま一定期間の運転を認める「維持基準」の議論が展開され、構造健全性評価に基づきひび割れが存在しても、一定期間

構造物の健全性が損なわれなとする判断が示されている。

- F) 各種電共研では、PWR 環境下におけるき裂進展速度データ取得を行い、加工度（硬さ）及び溶存酸素（DO）環境条件を変化させたき裂進展試験により、応力拡大係数（K 値）、温度、硬さ、溶存酸素（DO）濃度に対する依存性が確認されている。このため、機械加工及び溶接による硬化の硬さ、溶接残留応力測定を行い、PWR プラントの種々形状に対する強加工 SCC によるき裂進展に係るデータ拡充を行っている。また、K 値、硬さ、温度に対する依存性を考慮したき裂進展速度式も考案している。なお、これらの研究成果については、原子力学会、国際学会（Fontevraud 7）にて報告を行っている。
- G) 美浜 2 号機蒸気発生器入口管台セーフエンド部（オーステナイト系ステンレス鋼）において、オーステナイト結晶粒界に沿って枝分かれした、最大深さ約 0.9mm の割れが確認されている。また、セーフエンド部表面には、機械加工の影響と考えられる高い引張応力が残留していることも確認されている。セーフエンド部の割れの様相から、内面の表層部に機械加工に起因する引張残留応力が発生し、溶接部近傍において運転中の応力等により、オーステナイト結晶粒界に沿った割れが進展したものと推定されており、強加工 SCC が原因であることの可能性を示唆している。実機経験や研究動向を踏まえ、2009 年以降、PLM 技術評価書（蒸気発生器冷却材出入口管台セーフエンド部（オーステナイト系ステンレス鋼）に対する評価）への反映に加え、AESJ-SC-P005: 2012 (Amd.3)「日本原子力学会標準；原子力発電所の高経年対策実施基準：2012（追補 3）別冊・PWR においても、「経年劣化メカニズムまとめ表－PWR」で蒸気発生器に対しては PWR 一次系水質下の SCC は評価すべき対象となっており、本損傷モード自体は、世に認知されたものとなっている。
- H) 国内 PWR の配管シンニングに対しても、美浜 2 号機 SG 管台セーフエンド部の粒界割れ事象を踏まえ、2008 年より強加工 SCC の可能性は完全には排除できないものと考え、以下の様な新切削加工法を開発し、2010 年頃より予防保全対策として、配管改造工事に際し、シンニング部機械加工に適用を開始している（なお、今回の UT 指示発生部位のシンニング加工は、大飯 3 号機建設当時の 1990 年に実施されており、新切削加工法は適用されていない）。
- I) Fontevraud 6 (2006 年 9 月)で公表された EDF 文献(PWSCC of austenitic stainless of heaters of pressurizers) によって、SUS316L 製ヒータで IGSCC による漏えいが発見されていることが明らかになった。漏えい箇所は、ヒータシースの高ひずみ硬化領域である。いくつかのケースは、ヒータサポートプレート付近となっている。なお、SCC 発生要因として考えられる応力（SCC 発生は 240MPa 以上、SCC 進展は 600MPa 以上）、冷間加工による材料の硬化（Hv0.1>310）の条件が、実機で発生したことが報告されている。国内のヒータに対して、製造履歴調査、残材のサンプリング調査を実施した結果、同様の残留応力、冷間加工による材料の硬化が発生している可能性は低く、海外との差別化を行っている。（国内メーカでは、機械加工後に焼きなましによる熱処理を実施しており、硬さが緩和されているものと推定される。一方、EDF プラントの製法では、熱処理についての記述は無く、400HV 以上の硬化域も確認されていることから熱処理が実施されていない可能性もある）

- J) 原子力安全システム研究所 (INSS) では、PWR 環境下におけるき裂進展試験に取り組み、冷間加工、応力、温度がき裂進展の加速因子として寄与することを報告している。また、溶接熱影響部 (HAZ 部) でも強冷間加工材と類似の SCC 進展を示すことが確認されている。更に、き裂発生を促すために表面にグラインダ加工を施したき裂発生試験では、定荷重条件であっても一部の試験片が粒界割れを生じさせることが分かっている。

表 1 PWR 強加工 SCC に関する取り組みの概要



実機における強加工 SCC 発生・進展の検討

① 発生の評価

強加工 SCC 発生の感受性は表層の硬さと相関があることが知られていることから、UT 指示が確認された部位の表層硬さについて評価する。

当該部のエルボの材質はオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS316) であり、開先合わせのために内表面をシンニング (切削) 加工している。シンニング部の表層硬さは、図 1 に示す当該部の製造を担当したメーカーによる配管シンニング部の表層硬さ測定結果より、内表面のごく表層に 300HV を超える硬化層が形成されたと推定される。

当該部の配管口径は 4B であり、図 1 に示す測定結果に含まれていないが、シンニングを含む開先加工法は口径によらず同じであることから、4B 配管についても内挿して、開先加工時に 300HV を超える硬化層が内表面の極表層に形成されているものと判断する。

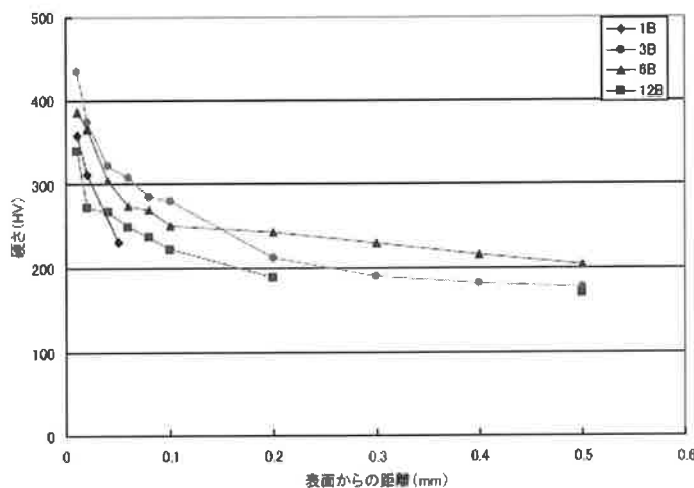
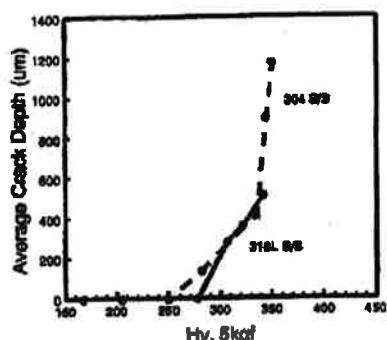


図 1 1B、3B、6B、12B 管シンニング部の表層部硬さ分布

出典；製造メーカー社内モックアップデータ

この硬さレベルで、PWR 環境中で強加工 SCC が発生することを明確に示すデータはまだないが、参考として BWR 環境下での強加工 SCC 発生試験の結果を図 2 に示す。



(1%ひずみ、試験温度：288℃、溶存酸素濃度：8ppm)

出典 M. Tsubota et al
The Effect of Cold Work on the SCC
Susceptibility of Austenitic Stainless Steels.
"Proceeding of 7th International Symposium on
Environmental Degradation of Materials in
Nuclear Power Systems. Vol.1 (1995)519-527"

図 2 BWR 環境下での SCC 発生試験結果

図2では、BWR環境下では概ね硬さが300HV以上でSCCの発生が認められる結果となっている。尚、材質はSUS316Lで当該部SUS316とは異なるが、類似のオーステナイト系ステンレス鋼であり、試験温度も288℃と当該部の運転温度約290℃とほぼ等しく、参考データとしては有益と考えている。

また、海外PWRでの加圧器ヒーターシースの実機調査結果及び試験結果より、PWR環境に於ける強加工SCCの発生には310HV以上あることが必須との記載例もある。(2006, Couvant, Degra, PWSCC of austenitic stainless steels of heaters of pressurizers)

従って、当該部はBWR環境下ではSCC発生のあるものと考えられるが、PWR環境下での発生に関する知見はまだ不十分であり発生の可能性を断言することは出来ないものの、次項に示す様に、PWR環境下でも強加工SCCは進展する事が分かっており、発生についてもその可能性を否定することは出来ないものとする。

また、調査の結果、製造時の不具合が要因とは考えにくい、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。

なお、開先シンニング部の硬化層は、溶接部近傍は溶接入熱により軟化する可能性が考えられるが、溶接部境界から一定量の距離があれば、軟化の程度は顕著ではないと推定される。今回のUT指示位置は、溶接中心から約4～5mm程度離れているものと分析されており、一方の溶接境界は溶接中心から概ね2～2.5mm程度と考えられ、UT指示位置の溶接境界からの距離は、1.5～3mm程度と想定される。図3に参考として、BWRのPLR配管溶接部において溶接境界からの距離に応じた表層での硬度分布を計測した例を示す。溶接境界からの距離が3mm程度以上離れた位置では、表層からの距離0.02mmの深さでの硬さは300HV以上となっていることが分かる。本データは、表層から0.02mmおよび0.05mmの深さでの硬度分布を示しているが、より極表層にあつてはその硬度は高くなることが想定される。今回のUT指示位置は、図3の測定と配管口径や材質は異なるが、溶接部境界から1.5～3mm程度離れていることから、概ね300HV以上の硬さとなっているものと考えられる。

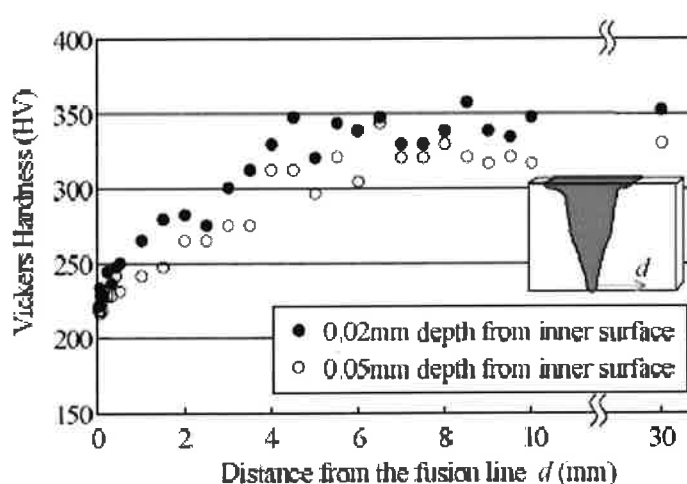


Fig. 17 Vickers Hardness profiles near the surface (along the axis d in this figure) in Kashiwazaki-Kariwa Unit 1

図3 柏崎刈羽1号機における表層の硬さ分布

② 強加工 SCC 進展の評価

強加工 SCC の進展の感受性は、板厚内の硬さと相関があることが知られている。図 4 に PWR 環境下での強加工 SCC き裂進展試験結果の一例を示す。

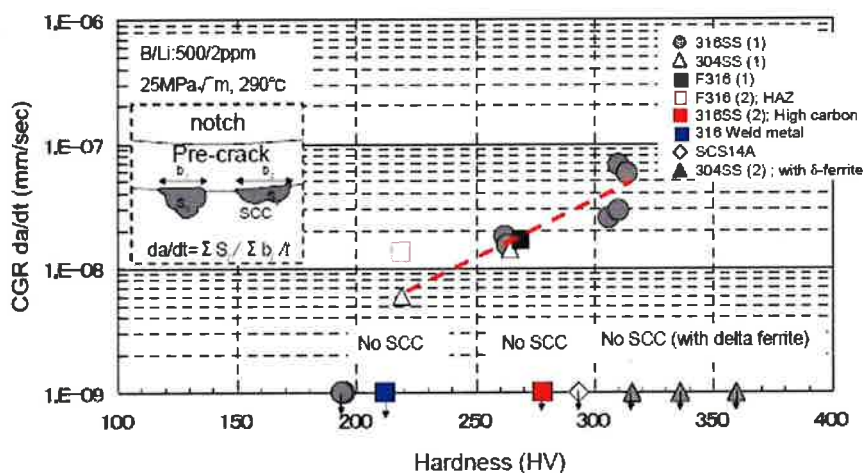


Fig. 6 Hardness / Material and Crack Growth Rate

図 4 PWR 環境下の硬さとき裂進展速度の関係

出典 ; Matsubara.et.al 2010 Fontevraud7 O02-A099-T03 ·Research

Programs on SCC of Cold-worked Stainless Steel in Japanese PWR N.P.P.

これによれば、硬さが 200HV 以上のレベルであれば、PWR 環境中で SCC き裂は進展する事が分かる。

一方、図 5 には、当該部と同じ、SUS316、4B、Sch.160 の配管溶接部近傍の板厚内硬さ分布を計測した結果を示す。

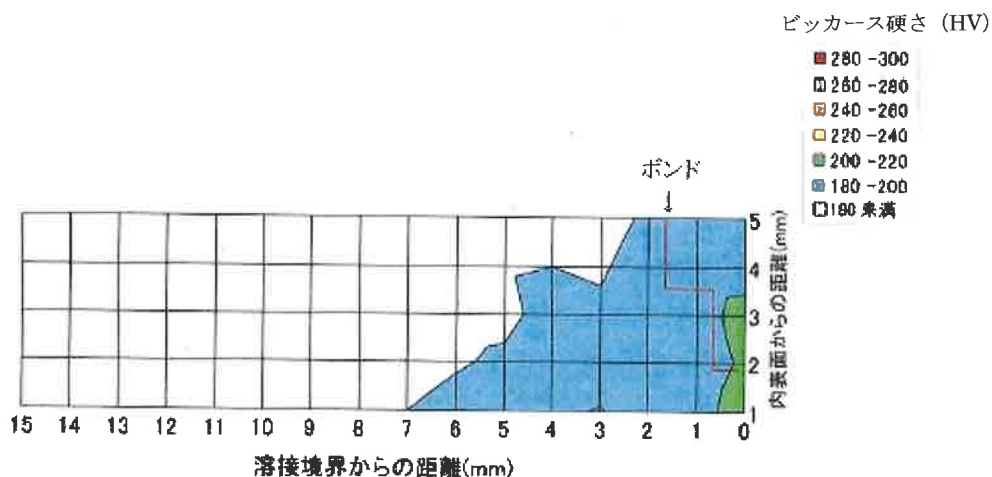


図 5 4B、Sch.160 SUS316 配管の溶接部近傍板厚内硬さ分布

出典 ; 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」

一般溶体化材料の硬さは、概ね 150~180HV 程度と言われ、図 5 によれば、溶接部近傍では、200HV を超える硬さが、表層のみでなく板厚内部にわたって認められる。

従って、図 4 および図 5 より、当該部に於いて強加工 SCC は進展し得るものと判断した。

尚、図 4 は応力拡大係数 $K=25\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、温度 290°C の条件下でのデータを示しているが、当該部の評価として使用できると考える理由を以下に示す。

まず、図 6 には、当該部と同じ、SUS316、4B、Sch.160 の配管溶接部近傍の配管軸方向溶接残留応力分布の解析結果を示す。これによれば、配管内面側では軸方向に 200MPa レベルの引張溶接残留応力の存在が認められ、周方向き裂を進展させるに足る状況となっていることが分かる。

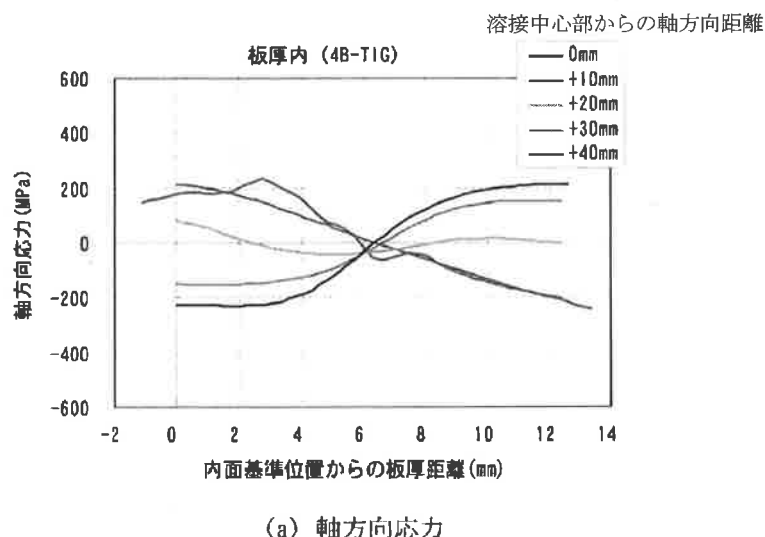


図 6 4B、Sch.160 SUS316 配管の溶接部近傍板厚内軸方向溶接残留分布

出典；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」

また、実機当該部の運転中軸方向応力は 100MPa と評価されており、図 6 の溶接残留応力を加味すれば、当該部には約 300MPa レベルの軸方向引張応力が発生していたものと想定される。

仮に深さ 2mm 程度のき裂を想定した場合、応力拡大係数 K は、概ね $\sigma\sqrt{\pi a} \approx 25\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 程度と想定され、図 4 の試験条件と同一となる。更に、実機運転温度は 290°C であり、図 4 の条件と同一である。

従って、図 4 により当該部のき裂進展の可能性を評価したことは妥当と考える。

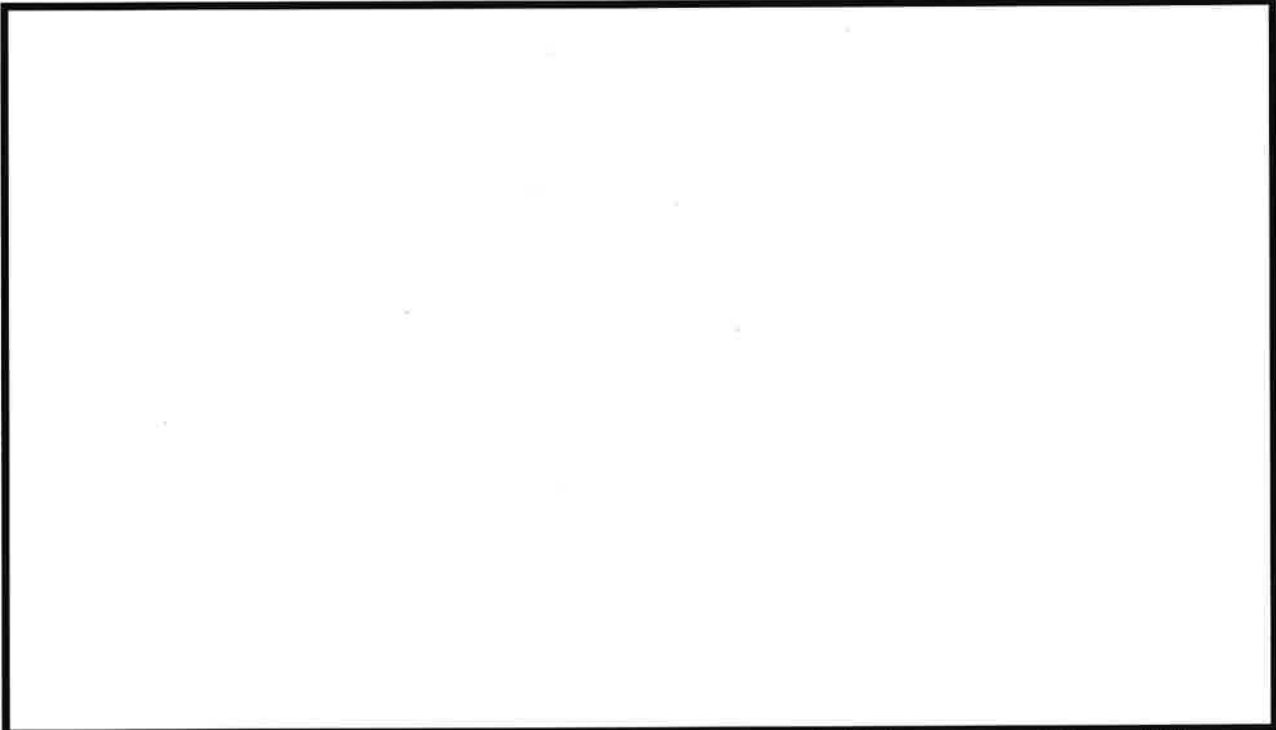
尚、図 4 はオーステナイト系ステンレス鋼母材に対する試験結果であるが、UT 検査結果からは溶込み溶接部を SCC が進展している可能性が示唆される。溶接金属内の SCC 進展の可能性に関する検討結果を、添付資料－8 に示す。

溶接金属のSCC進展性に関する検討

一般に、溶接金属は、高温割れ対策として数%～十数%程度のデルタフェライトを含んでいるため、一般的にはSCC感受性は低くなる。一方、母材ではデルタフェライトが生じにくいいため、裏波溶け込み部において母材と溶接金属の希釈によりデルタフェライト濃度が低下し、き裂が進展しやすくなる可能性が考えられるが、今後詳細な検討が必要と考えている。

デルタフェライト量は、化学成分によって大きく変動する。成分とデルタフェライト量の関係を示すシェフラーの状態図中に、SUS316 母材 (○) と溶材 (△) のミルシート値でプロットを行ったものを示す。

- ・ 316 母材はデルタフェライトを生じにくい化学成分ですが、溶接金属は高温割れ防止のためにデルタフェライト量が多くなるよう、低C・高Crの化学成分となっている。
- ・ 溶接時に母材が溶け込む部位の状態は、溶け込みの程度、即ち母材と溶接金属の希釈の程度に応じて点線上付近に位置し、母材と溶材の間のフェライト量となる。
- ・ 従って、母材と溶接金属の希釈の状況によっては、溶接金属であってもデルタフェライトが低下し、SCCの進展が認められることの可能性も否定しきれないものと考えられる。



シェフラー図は JISZ3119 (2006) より転載

しかし、デルタフェライト量が低下した場合の SCC 進展に関する知見は少なく、実機の調査とその結果を踏まえた検討が必要と考えている。

但し、以上はあくまで既存知見からの推定であり、オーステナイトステンレス鋼の裏波溶け込み部を対象とした SCC 発生・進展の研究結果はなく、SCC が進展した可能性を否定することはできない。また、裏波溶け込み部に検出限界未満の微小な欠陥があった可能性もあるため、今後、実機調査結果も踏まえた詳細な検討が必要と考えている。

尚、溶接金属内を SCC が進展した例としては、BWR プラントの低炭素ステンレス鋼製機器で発生した SCC[1]が挙げられる。一方、PWR プラントではき裂が溶接金属内で進展していた例は確認できなかった。

[1]鈴木、他“BWR における低炭素ステンレス鋼の SCC 形態の評価”圧力技術 第 42 巻第 4 号

以上

欠陥の評価

1. 欠陥の評価

1.1 評価の流れ

供用期間中検査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 1.1.1 に示す。

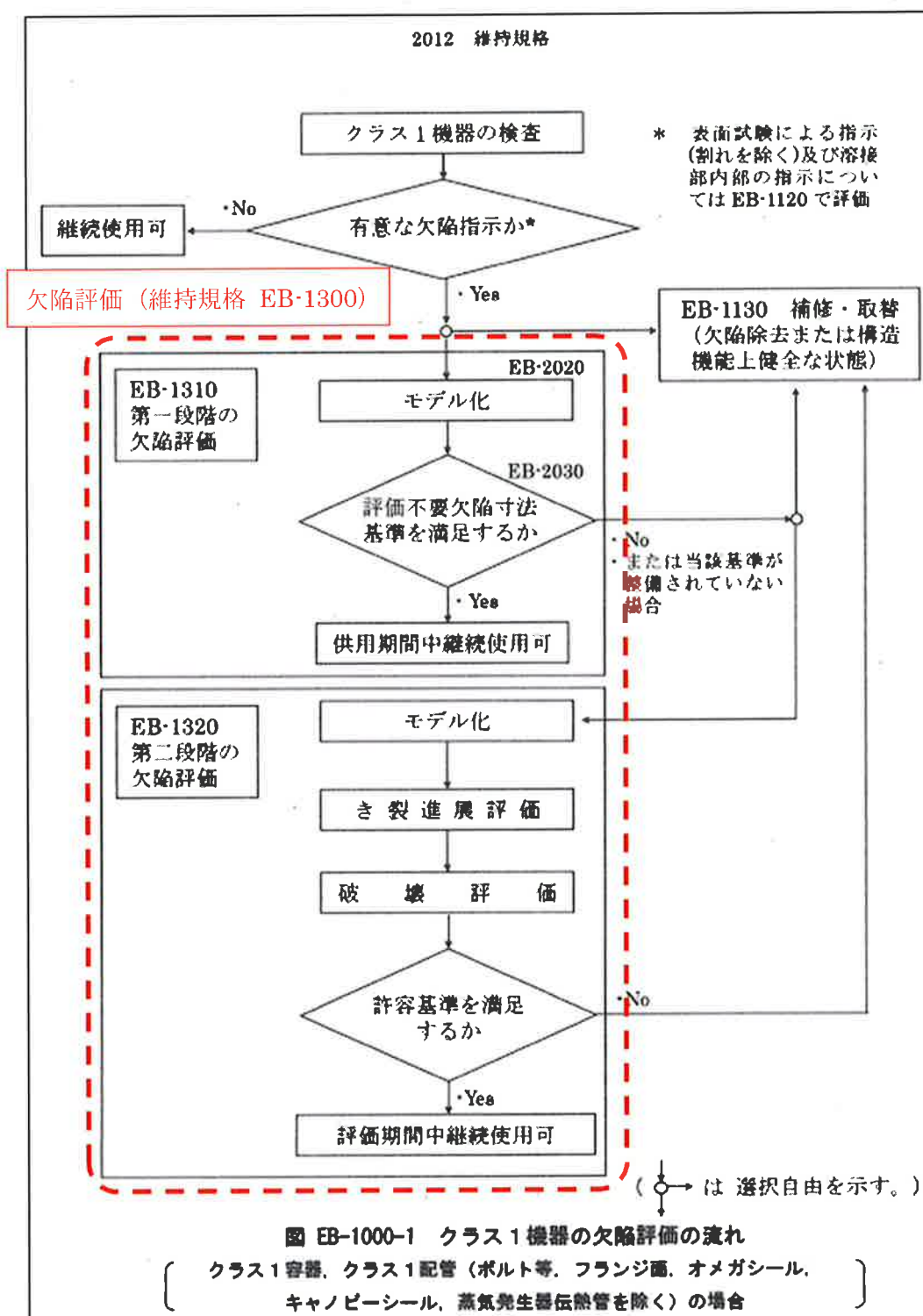


図 1.1.1 クラス1配管の欠陥評価フロー

1.2 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。モデル化に用いる欠陥形状は1項の計測結果を用いる。

当該欠陥のモデル化結果を表 1.2.1 にまとめる。

表 1.2.1 欠陥のモデル化結果

継手番号	外径 ^{※1} D (mm)	肉厚 ^{※2} t (mm)
FW-4	114.3	14

欠陥評価断面	欠陥深さ a (mm)	欠陥長さ ℓ (mm)	モデル形状 ^{※3}
周方向断面	4.6	67	周方向半だ円表面 欠陥 (内表面)

※1 公称値

※2 実測値

※3 詳細は図 1.2.1 を参照のこと。

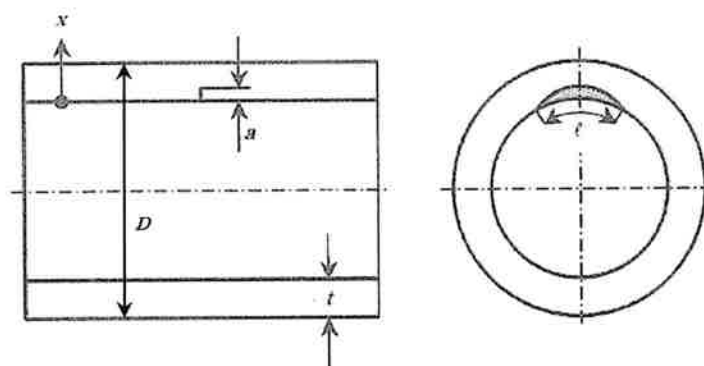


図 1.2.1 欠陥のモデル形状 (周方向半だ円表面欠陥 (内表面))

1.3 第一段階の欠陥評価 (評価不要欠陥の判定)

維持規格 EB-1310 に従い欠陥評価を実施する。

当該欠陥の進展要因は SCC と疲労であり、当該部の材料はオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS316) であるため、維持規格 EB-2000 に規定される評価不要欠陥寸法基準の適用要件に該当しない。よって、第二段階の欠陥評価に移行する。

1.4 第二段階の欠陥評価 (評価欠陥を有した状態での評価期間中の設備健全性の確認)

1.4.1 き裂進展評価

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

① き裂進展式

評価に使用する、き裂進展式を以下に示す。

a. SCC によるき裂進展評価の評価式

PWR 環境下におけるき裂進展が硬度依存性を有することについて、一般的に用いられているき裂進展速度試験手法を採用した研究として、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」や、電共研「PWR 環境下の SCC 進展データの拡充に関する研究」等が実施されてきた。

これら電共研では、強加工 SCC のき裂進展速度の進展式（き裂進展速度線図）が作成されており、国際学会「Fontevraud7, 2010」にて発表しているが（公開進展式（式 1.4.1））、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、き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されたものであるため、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い、比較結果を図 1.4.1 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。

よって今回の評価においては、より保守的な進展評価とするため、これら全てのデータを用いて速度線図を新たに設定し、き裂進展評価を実施する。き裂進展評価式としては、ベストフィット曲線（BFC）（式 1.4.2）と包絡曲線（式 1.4.3）を用いる。

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

(式 1.4.1)

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

(式 1.4.2)

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

(式 1.4.3)

ここで、

da/dt : き裂進展速度 (mm/s)

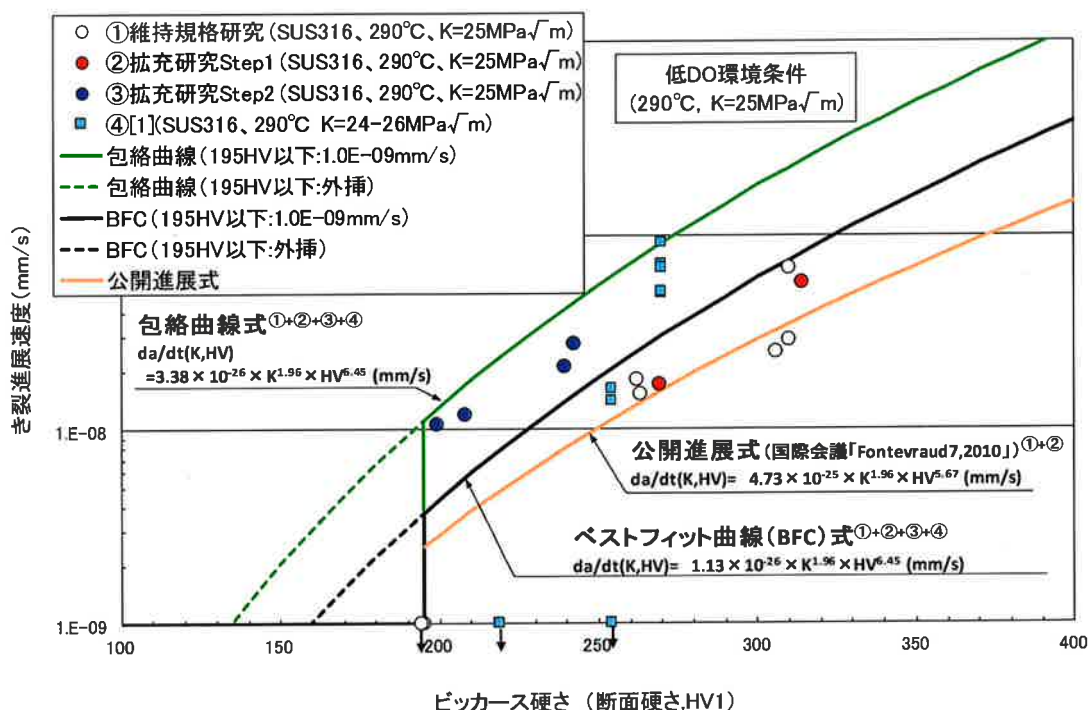
a : 欠陥深さ (mm)

t : 時間 (s)

K : 応力拡大係数 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)

HV : ビッカース硬さ (HV)

なお、過去の研究試験の結果では 195HV 以下の硬さではき裂進展が認められていないが、保守的にき裂進展評価を行うために 195HV 以下の硬さについても式 1.4.2、式 1.4.3 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 1.4.1 き裂進展速度線図

b. 疲労によるき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き裂進展速度式(式 1.4.4)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 1.4.4)

ここで

ΔK : 応力拡大係数変動範囲 (MPa√m)

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (R \geq 0 \text{ の場合})$$

$$\Delta K = K_{max} \quad (R < 0 \text{ の場合})$$

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 ($R = K_{min}/K_{max}$)

② 応力拡大係数

き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、円筒内表面だ円欠陥に対する K 値式を用いて計算する。

③ 荷重と荷重の組み合わせ

当該欠陥のき裂進展評価に考慮する荷重との荷重の組み合わせは、維持規格 添付 E-7 の規定に従い、表 1.4.1 及び表 1.4.2 の通り設定する。

表 1.4.1 き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 き裂進展評価	疲労による き裂進展評価
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 ^{注1}	1/3Sd*	—	○
溶接残留応力		○	○

凡例：○ ⇒ 考慮、— ⇒ 考慮せず

注 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 1.4.2 き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 き裂進展評価	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 き裂進展評価	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

④ 入力条件

当該欠陥のき裂進展評価に用いる各種入力条件設定の考え方を以下に示す。
また、各入力条件の一覧を表 1.4.3 に示す。

なお、SCC によるき裂進展評価においては、評価式の適用に当たり、評価式算出の根拠となった各種データと入力条件となる各推測値（溶接残留応力、硬さ）の実機への適用性確認を実施している。

表 1.4.3 き裂進展評価の入力条件一覧

項目	評価内容	
	SCC による き裂進展評価	疲労による き裂進展評価
評価期間	BFC 式：10 年（87,600 時間） 包絡曲線式：3.4 年（30,660 時間）	
溶接残留応力	図 1.4.2 参照	
硬さ	図 1.4.3 参照	—
出力運転条件	表 1.4.4 参照	
過渡条件	—	表 1.4.5 参照
地震力	—	1/3Sd*地震力

a. 評価期間

評価期間は後述の破壊評価が成立する 10 年（BFC 式）及び 3.4 年（包絡曲線式）とし、8,760 時間/年として計算する。

b. 溶接残留応力

評価に用いる溶接残留応力は、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」において実施した当該配管と同じ 4B Sch160 配管の突合せ溶接の残留応力解析で得られた溶接残留応力分布より設定する。溶接残留応力の板厚方向分布は溶接中心からの軸方向距離によっても異なるため、当該欠陥位置を考慮し、保守的に溶接中心から 10 mm 位置までの溶接残留応力を包絡する値として図 1.4.2 に示す通り設定する。

なお、板厚内の残留応力分布は溶接による熱収縮により上昇しているものであるが、上記電共研にて実施したモックアップ試験は、実機より入熱量が多く板厚内で発生する溶接残留応力が大きいと推定される溶接手法にて製作されたテストピースを用いていることから、同モックアップ試験結果を用いて評価上の溶接残留応力分布を設定する事で、実機の板厚内の溶接残留応力を包絡する様に設定されるものとする。

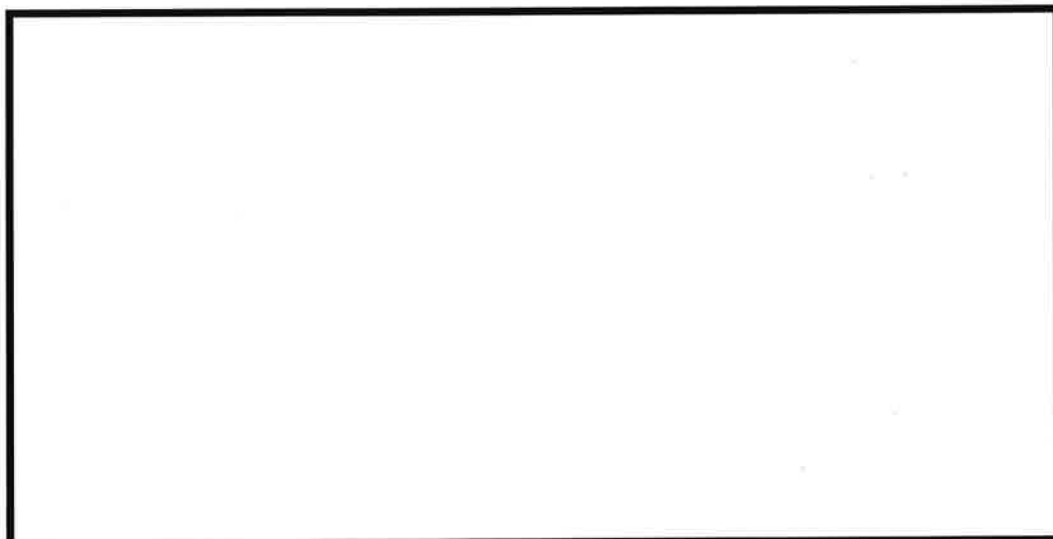


図 1.4.2 板厚内の溶接残留応力分布（管軸方向）

c. 硬さ

評価に用いる硬さ分布は、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」における、当該配管と同じ 4B Sch160 配管の溶接モックアップ試験で計測されたデータ（概略は図 1.4.3 参照のこと）を基に、配管内面から 3 mm未満は 209HV、3 mm以上 4 mm未満は 207HV、4 mm以上 5 mm未満は 192HV とする。また、板厚 5mm より外面側については計測データがないため、保守的に 5mm 位置と同じ硬さである 191HV と設定する。

なお、板厚内の硬さは溶接による熱収縮により上昇しているものであるが、上記電共研にて実施したモックアップ試験は、実機より入熱量が多く板厚内部の硬化量が多いと推定される溶接手法にて製作されたテストピースを用いていることから、同モックアップ試験結果を用いて硬さ分布を設定する事で、実機の板厚内の硬さ分布を包絡する様に設定されるものと考ええる。

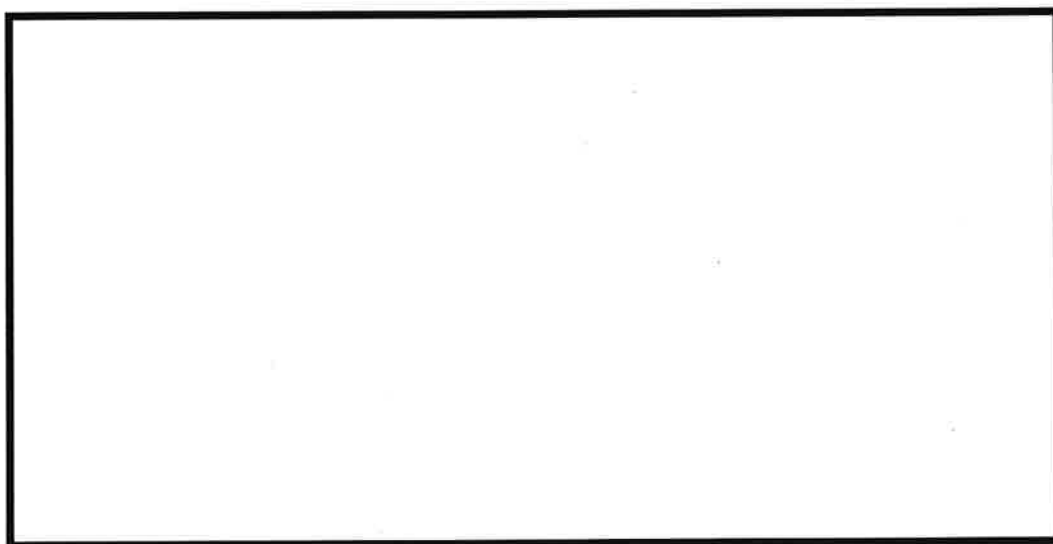


図 1.4.3 4B 配管の硬さ分布計測データ

：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

d. 出力運転条件による応力

き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 1.4.4 にまとめる。なお、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 1.4.4 き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

e. 過渡条件

き裂進展評価にて用いる過渡条件毎の負荷変動により生じる変動応力及び過渡回数を表 1.4.5 にまとめる。なお、過渡条件における発生応力は、既工認において実施した 3 次元梁解析と同等の解析により設定する。評価に用いる過渡回数は、大飯 3/4 号機の定期安全レビュー (PSR) で用いた過渡条件より評価期間を考慮して設定する。また、負荷上昇時間は過渡に応じて設定し、定義出来ない場合は 1000s とする。

表 1.4.5 き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)
			10 年※
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	

※包絡曲線式（評価期間：3.4 年）を用いたき裂進展評価は、保守的に BFC 式（評価期間：10 年）と同じ過渡回数で行う。

f. 地震力

き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、JEAG 4613-1998「原子力発電所 配管破損防護設計指針」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。

⑤ 評価結果

当該欠陥のき裂深さ及びき裂長さに対する応力拡大係数を図 1.4.4 に示す。
また、SCC 及び疲労によるき裂進展量を加味した評価期間末期のき裂寸法を表 1.4.6 に示す。

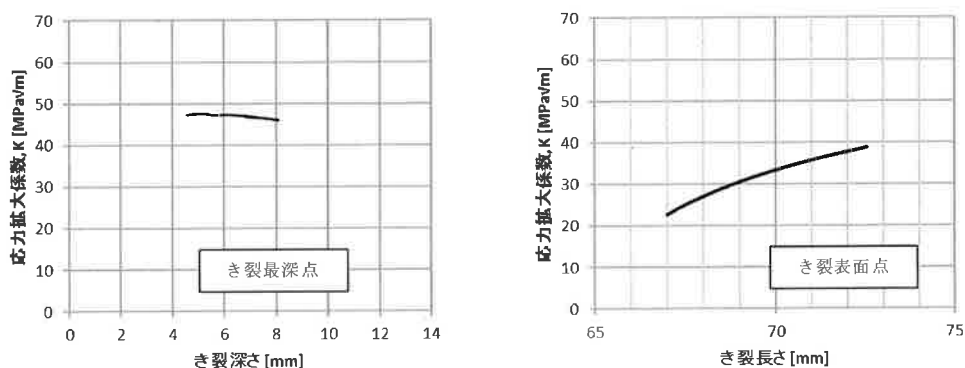


図 1.4.4 応力拡大係数分布

表 1.4.6 当該欠陥のき裂進展評価結果

	BFC 式 評価期間：10 年		包絡曲線式 評価期間：3.4 年 (過渡回数は 10 年を考慮)	
	欠陥深さ a (mm)	欠陥長さ ℓ (mm)	欠陥深さ a (mm)	欠陥長さ ℓ (mm)
初期寸法	4.6	67	4.6	67
SCC による進展量	3.5	6	3.5	7
疲労による進展量	0.5	1	0.5	1
評価期間末期のき裂寸法	8.6	74	8.6	75

前述の通り、本評価では保守的な条件で SCC によるき裂進展評価を実施している。過去の研究試験結果では 195HV 以下の硬さではき裂の進展はみられていないことに加え、電共研で計測した 4B Sch160 配管の溶接後の硬さの実測値としては、内面から 4mm を超えたあたりから 195HV を下回ることが確認されている。このため、195HV 以下における SCC によるき裂進展速度を 1.0×10^{-9} mm/s とし、内面から 4mm 以降の硬さを 195HV に設定した場合のき裂進展評価結果を図 1.4.5 に示す。

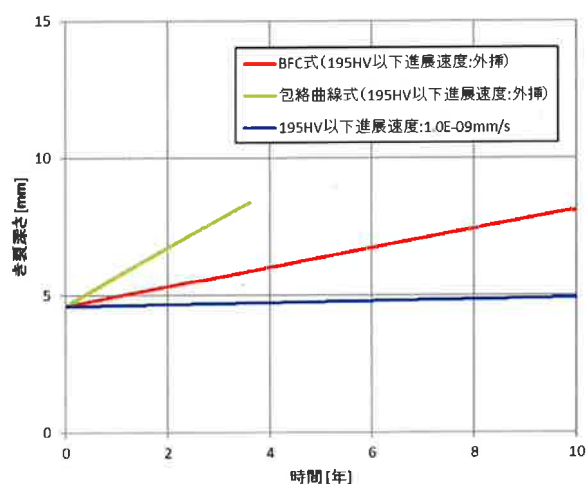


図 1.4.5 SCC によるき裂進展評価結果の比較

なお、同様の評価手法を用いて、4B 配管の UT による検出限界以下の初期欠陥を仮に想定し、き裂深さが 4.6mm に至るまでの期間を評価した結果を表 1.4.7 に示す。

表 1.4.7 検出された欠陥深さ（4.6mm）に至る期間の評価

評価式	仮に想定する 初期欠陥サイズ (深さ/長さ)	欠陥深さ 4.6mm に 至るまでの期間
BFC 式	0.5mm/2.5mm	28 年
	1.0mm/5.0mm	19 年
	2.0mm/10.0mm	10 年
包絡曲線式	0.5mm/2.5mm	10 年
	1.0mm/5.0mm	6.5 年
	2.0mm/10.0mm	3.5 年

1.4.2 破壊評価

破壊評価は、1.4.1 項のき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。

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、a. 極限荷重評価法、b. 弾塑性破壊力学評価法、c. 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 a. 許容欠陥深さの表による評価、b. 許容欠陥深さの式による評価、c. 許容曲げ応力の算出による評価が規定されているが、a. 許容欠陥深さの表による評価、及び b. 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 $2\theta \leq 60^\circ$ 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、c. 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 1.4.5 で与えられる。

$$S_c = \frac{1}{SF} \left(\frac{P_b'}{Z} - P_e \right) - P_m \left(1 - \frac{1}{Z(SF)} \right) \quad (\text{式 1.4.5})$$

P_b' は塑性崩壊時の曲げ応力で下式により求められる。

$$P_b' = \frac{2\sigma_f}{\pi} \left(2 \sin \beta - \frac{a}{t} \sin \theta \right) \quad (\text{式 1.4.6})$$

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 1.4.7 で与えられる。

$$\beta = \frac{1}{2} \left(\pi - \frac{a}{t} \theta - \pi \frac{P_m}{\sigma_f} \right) \quad (\text{式 1.4.7})$$

ここで、

σ_f : 流動応力 ($\sigma_f = 2.75m$)

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、JSME 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 および SMAW において：

$$Z = 0.306 \log \{ (OD)/25 \} + 1.032 \quad (\text{式 1.4.8})$$

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

$$Z = 0.372 \log\{(OD)/25\} + 1.293 \quad (\text{式 1.4.9})$$

- ・ 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

Z [deg]	許容欠陥深さ； a/t			フェライト 鋼管
	母材	GTAW ^{注1}	SAW ^{注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 1.4.8 を適用する。また、当該配管の板厚の実測値は 14.0mm であることから、管の厚さの要求を満足する

② 荷重と荷重の組み合わせ

破壊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 1.4.8 及び表 1.4.9 の通り設定する。

表 1.4.8 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 ^{注1}	—	○
	Ss ^{注2}	—	○

凡例：○ ⇒ 考慮、— ⇒ 考慮せず

注 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。

注 2 Ss* は、基準地震動による地震力の値を示す。

表 1.4.9 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） ^{注 1,2} ＋機械的荷重

注 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。

注 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 地震共に組み合わせは不要となる。

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、き裂進展評価に用いた表 1.4.4 の値を用いる。

b. 過渡条件およ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 Sd(弾性設計用地震動)及び Ss（基準地震動）と読み替える。Sd*として Sd 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 1.4.9 の荷重の組み合わせの中から、許容状態 A, B および許容状態 C, D において、最も厳しい条件における軸方向応力を表 1.4.10 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 1.4.10 破壊評価に用いる過渡条件およ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

④ 評価結果

き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および許容曲げ応力による評価を行った結果を表 1.4.11、表 1.4.12 に示す。評価の結果、BFC 式を用いた評価では評価期間 10 年に対して予測欠陥寸法は許容欠陥寸法限界に達しないこと、及び曲げ応力は許容曲げ応力を下回ることが確認された。

また、保守的に包絡曲線式を用いた場合でも評価期間 3.4 年に対して予測欠陥寸法は許容欠陥寸法限界に達しないこと、及び曲げ応力は許容曲げ応力を下回ることが確認された。

表 1.4.11 許容欠陥寸法の限界の評価

評価式	評価期間	評価期間末期の予測欠陥寸法			許容欠陥寸法の限界 a_c (mm)	判定 $a_f < a_c$
		深さ a_f (mm)	長さ ℓ_f (mm)	欠陥角度 2θ (°)		
BFC 式	10 年	8.6	74	74.2	9.6 (0.69 t ^{注1})	○
包絡曲線式	3.4 年	8.6	75	75.2	同上	○

注 1 JSME 維持規格 事例規格 表 1 (4) の欠陥角度 $\leq 90^\circ$, 溶接施工法 GTAW の許容欠陥深さ

表 1.4.12 許容曲げ応力による評価

評価式	評価期間	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 $P_b < S_c$
BFC 式	10 年	A, B	3.8	16.8	○
		C+Ss	64.8	66.0	○
		D+Sd	52.0	69.7	○
		SA	3.8	59.4	○
包絡曲線式	3.4 年	A, B	3.8	16.5	○
		C+Ss	64.8	65.4	○
		D+Sd	52.0	69.1	○
		SA	3.8	58.7	○

1.4.3 設備健全性の確認

1.4.2 項に示す通り BFC 式を適用した場合、当該溶接部は評価期間 10 年に対して許容基準を満たすことから、10 年の当該溶接部の健全性を確認した。また、保守的に包絡曲線式を適用した場合でも、当該溶接部は評価期間 3.4 年に対して許容基準を満たすことから、3.4 年の健全性を確認した。

なお、3.4 年の健全性は確認できているが、次回定検において当該配管の取替工事を実施することとする。

また、1 サイクル後の欠陥の大きさは BFC 式の評価では、深さ方向 5.1mm、長さ方向 69mm となり、包絡曲線式の評価では、深さ方向 5.8mm、長さ方向 70mm となる。

水平展開（類似箇所の点検）

今回の加圧器スプレイライン配管溶接部の指示は、オーステナイト系ステンレス鋼の配管溶接部の内、表面機械加工時に形成された表面微細化層（硬化層）に起因する強加工SCCと考えられる。

強加工SCCについては、材料、環境（温度）、応力に依存することから、強加工SCCの発生または進展の基準に基づき、大飯３号機における追加点検対象を選定する。

なお、追加点検対象の選定においては、プラント運転に影響のある系統の配管・機器耐圧部の内、体積検査を要求される溶接部を対象とし、配管、機器の選定フローに基づき抽出を行う。

（１）対象の選定フロー

プラント運転に影響のある系統の配管・機器耐圧部の内、体積検査を要求される溶接部を対象とし、図１に示す選定フローを用いて類似箇所の抽出及び追加点検対象の選定を行った。

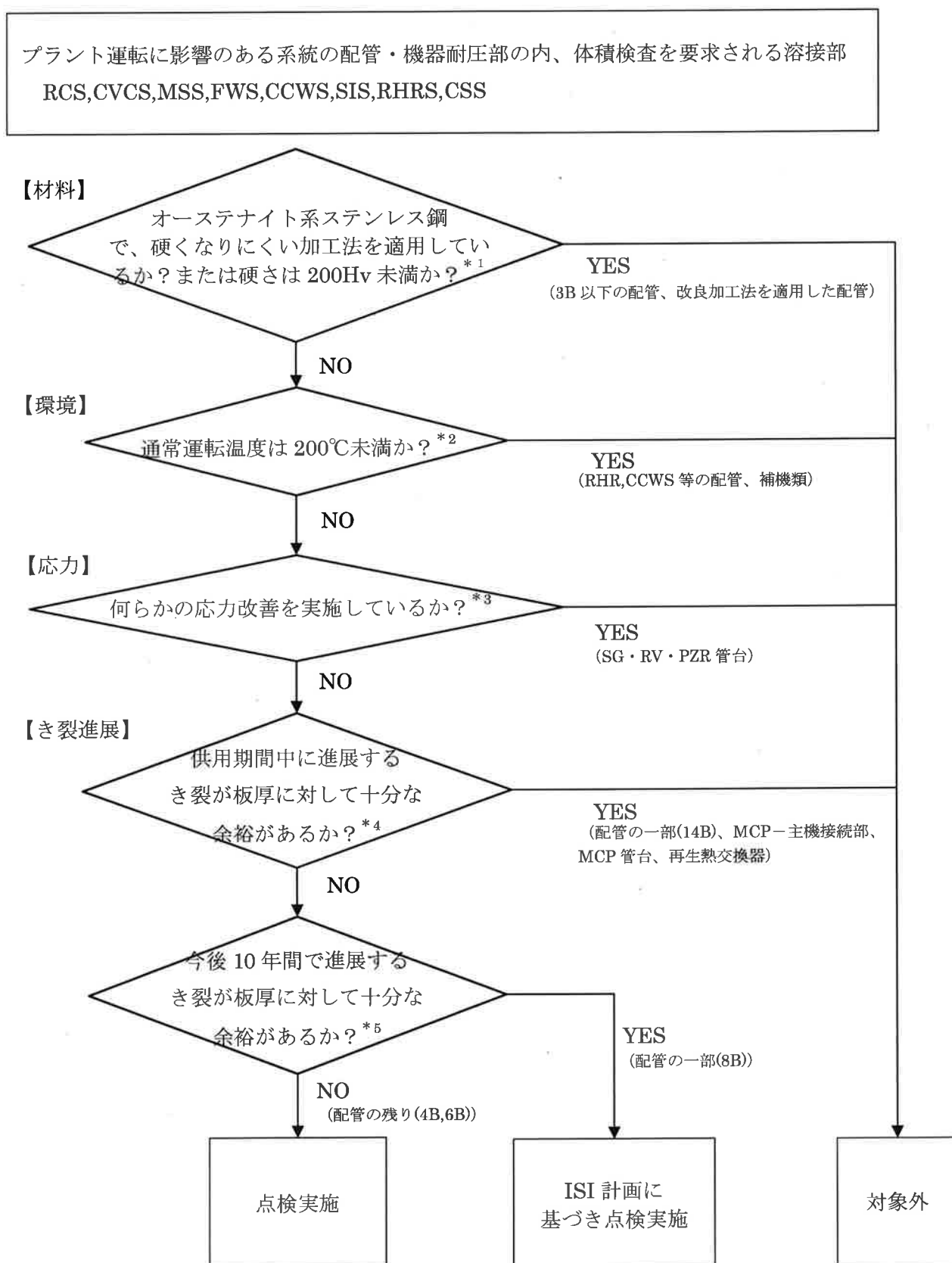
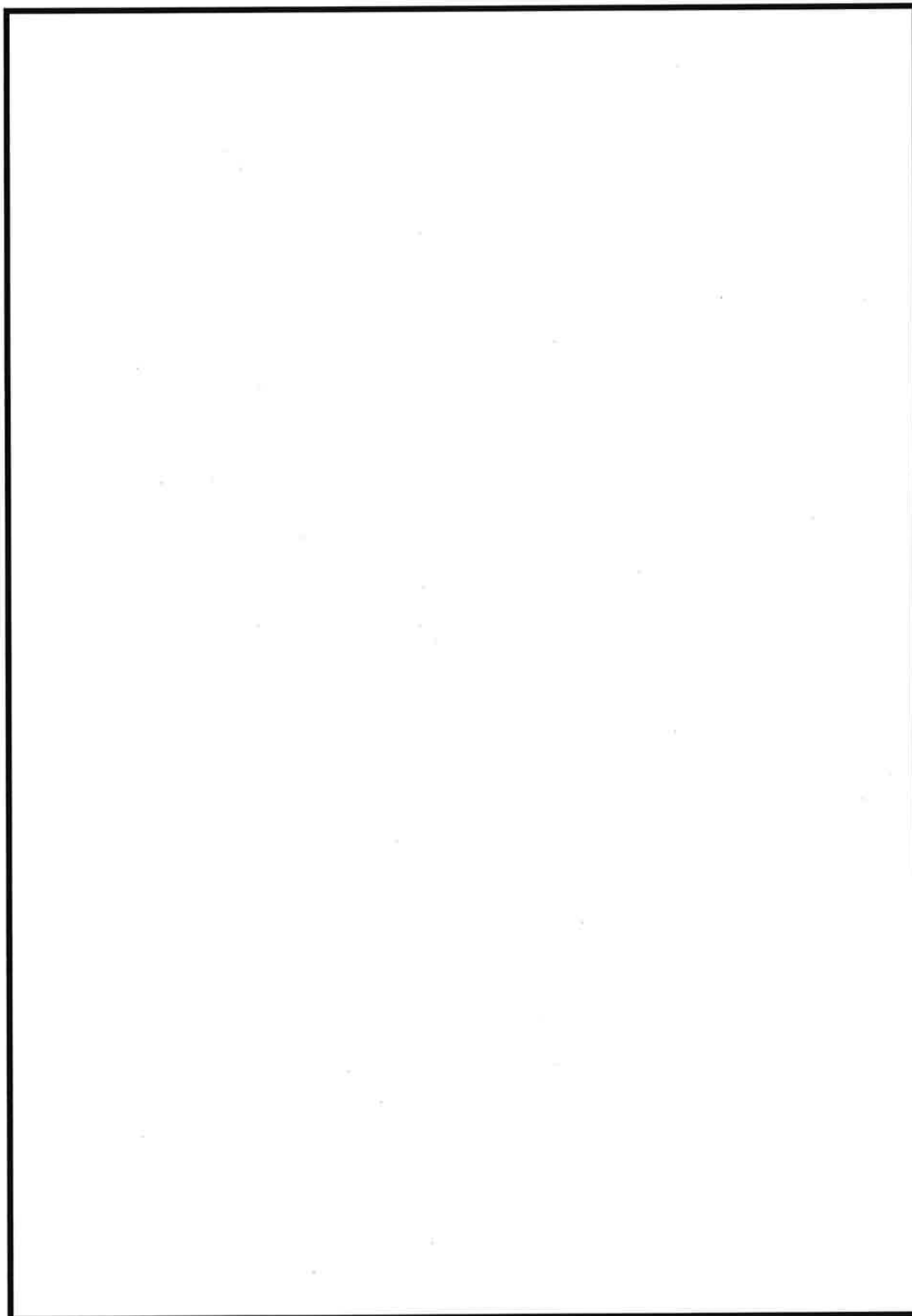


図 1 追加点検対象選定フロー



 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(2) 対象箇所

(1) に示した選定フローに基づき抽出した対象箇所を下表に示す。

表 1 追加点検対象抽出結果

設備名	箇所数
加圧器スプレイライン配管	16
加圧器逃がしライン配管	3

(3) 追加点検結果

(2) に示した追加点検対象箇所について、追加点検を実施し、有意な指示が無いことを確認した。

以上

検査、原因の検討および欠陥評価等に関する説明資料

1. 定期事業者検査	…	1 ページ
2. 指示の原因検討	…	5 8 ページ
3. 欠陥の評価	…	1 2 6 ページ
4. 水平展開（類似箇所の点検）	…	1 8 5 ページ

1. 定期事業者検査

1.1 第一段階検査の実施内容

第一段階検査は発電用原子力設備規格 維持規格 (2012 年版 (2013、2014 追補含む)) に基づく保全計画により当該部が選定され、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 (以降き裂の解釈)」及び「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 (以降 JEAC 4207)」に基づく定期事業者検査要領書に従い、クラス 1 機器の体積試験範囲に対し超音波探傷試験 (以降 UT) を実施した。

その結果、下表 (表 1.1.1) に示す部位に欠陥を検出した。

表 1.1.1 当該試験部位

試験カテゴリ	B-J 管台とセーフエンド、配管の耐圧部分の同種金属の溶接継手
項目番号・試験部位	B9.11 配管の同種金属溶接継手 (呼び径 100A 以上) 周継手
対象箇所	加圧器スプレイライン (D ループ)
溶接線番号	FW-4
溶接継手の構成	管台とエルボ
公称板厚	13.5mm

当該試験部位の検査に適用した探触子は、平成 13 年度 原子力発電施設検査技術調査等に関する事業報告書及び平成 16 年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書 (UTS 報告書) において、表 1.1.2 に示す通り、深さ 2.8mm の SCC が検出可能と確認されているものを適用した (添付・1.1)。また、検査はき裂の解釈に基づき JIS Z 2305 (非破壊試験技術者の資格及び認証) により認証された有資格者が実施した。

表 1.1.2 UT 検査精度

探触子	伝ばモード	周波数 (MHz)	屈折角	欠陥検出精度
MSEB-4E	縦	4	垂直	φ 2.4mm 横穴
MWB45-2E*	横	2	斜角 45°	< 深さ 1.6mm (疲労き裂) 深さ 2.8mm(SCC)

* 「2Z10×10A45」に相当する探触子

1.1.1 第一段階検査の判定結果

第一段階検査の判定基準は定期事業者検査要領書に規定され、“欠陥からの反射波の高さが DAC20% 以下であること及び、欠陥からの反射波の高さが DAC20% を超える場合にはその欠陥が割れその他の有害な欠陥でないこと。”とある。今回 DAC20% を超える新たな指示 (表 1.1.3) を検出し、本判定基準を満足しないと判定した。

表 1.1.3 検出した指示

指示位置	最大エコー高さ	指示長さ
エルボ側（下流側）	DAC176%	67mm

1.1.2 第一段階検査の判定に至る根拠

今回定期事業者検査要領書に基づき検出された欠陥エコーは、エコーの挙動、過去の ISI/PSI 記録との対比、測定の際のばらつき等を考慮して総合的に判断した。（添付-1.1.2）

欠陥エコーが検出された場合、確認のために他の屈折角を適用することがあるが、今回は 45° 斜角探触子以外の手法を用いずとも欠陥エコーと識別できていると判断した。

1.2 第二段階検査の実施内容

第一段階検査の結果を受け、当該指示範囲に対する欠陥深さ寸法測定を実施した。欠陥深さ寸法測定はき裂の解釈で要求される JEAC 4207 に規定する、「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（以降 PD*認証）」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（以降、PD 認証方法）により実施した。

なお、測定に使用した欠陥深さ寸法測定手法は十分な実力を有するものである。



*PD : Performance Demonstration

1.2.1 第二段階検査における欠陥深さ寸法測定結果

図 1.2.1 に示す通り、第一段階検査にて DAC20%を超える範囲(67mm)に対し、PD 認証方法に基づき欠陥深さ寸法測定をした結果、欠陥の最大深さは 4.6mm、最大深さ位置は 0° +3mm(表 1.2.1)であった（添付-1.2.1）。

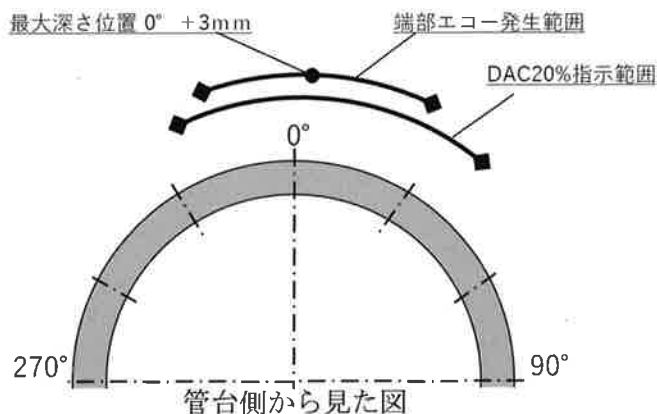


図 1.2.1 欠陥深さ寸法測定範囲と最大深さ位置

表 1.2.1 欠陥深さ寸法測定結果

最大深さ	最大深さ位置
4.6mm	0° +3mm

1.2.2 第二段階検査の欠陥深さ寸法測定根拠

き裂の解釈では、き裂等の欠陥深さ寸法測定は、JEAC4207 に規定する方法又は欠陥評価の保守性を考慮して十分な精度を有すると認められた方法により行うことが要求されている。ここでいう欠陥評価の保守性を考慮して十分な精度を有すると認められた方法として、PD 認証を取得した試験技術者、探傷装置及び手順書を用いて欠陥深さ寸法測定を行う場合が該当することが JEAC4207 に解説されている。

欠陥深さ寸法測定方法には、JEAC4207 にモード変換法、タンデム法、端部エコー法、TOFD 法 (Time of Flight Diffraction Technique) が示されている。モード変換法及びタンデム法は、概略の欠陥深さを把握することを目的とする。TOFD 法は小さな端部エコーの検出が可能な手法であるものの、今回対象とする管台とエルボのオーステナイト系ステンレス鋼溶接部の場合、探触子の配置や大きさ等の幾何学的制約及び溶接部に適用することによる超音波の減衰や異方性により、適切に欠陥深さ寸法測定ができない懸念がある。

一方、今回採用した端部エコー法は、超音波を片側から送受信可能なため、異方性の影響を受けにくいことから、JEAC4207 に規定された端部エコー法が欠陥深さ寸法測定方法のうち最も適切な手法であると考えた。さらに超音波を集束させることができるフェーズドアレイ装置を用いた端部エコー法 (フェーズドアレイ法) にて取得した PD 認証方法を用い、欠陥深さ寸法測定を行った (添付・1.2.2.1、添付・1.2.2.2)。

1.3 追加調査

1.3.1 追加調査内容

き裂進展評価に際し、より多くの情報 (詳細な欠陥性状把握) を与えることを目的として、第二段階検査にて採取したエルボ側データの別途分析、垂直探傷 (詳細調査用探触子)、管台側からのフェーズドアレイ法 (欠陥深さ寸法測定と同様の手法) 及びエルボ、管台両側からの 2 次クリーピング波法による追加調査を実施した。これら結果を受けた反射源位置の解析、複数屈折角による比較 (詳細は添付・1.3.1 参照) を行うことで欠陥性状の把握を行った。

なお、本追加調査は欠陥深さ寸法測定ではないため、第二段階検査と区別した追加調査という位置付けとした。

1.3.2 追加調査結果

追加調査の結果より、推定される欠陥深さ分布を図・1.3.1 に、追加調査結果を表 1.3.1 に示す。欠陥は、最大深さ 4.6mm を中心にして周方向になだらかな分布を呈していることが確認できた。また、エルボ側内表面近傍を起点として管台側の方向に進展した性状であると推定された。

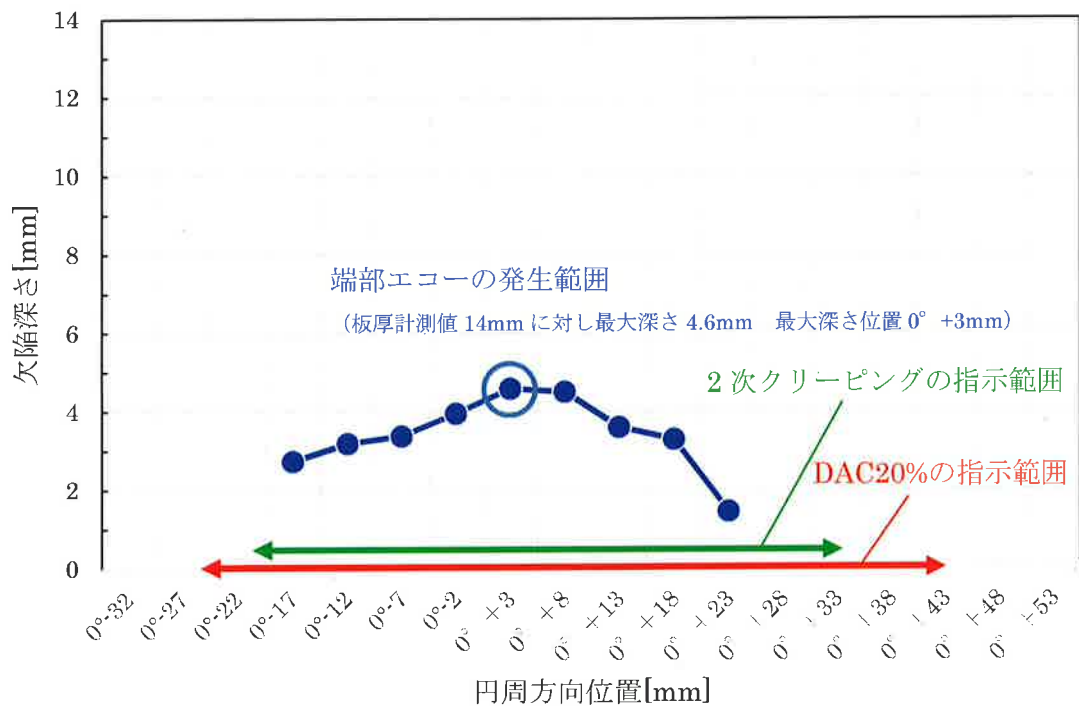


図-1.3.1 想定される欠陥深さ分布

表 1.3.1 追加調査結果

項目	内容	結果
エルボ側から採取したデータの別途分析	・ 反射源位置の解析 ・ 複数屈折角による比較	添付-1.3.1 図-2 参照
垂直探傷（詳細調査用探触子）	・ 欠陥からのエコー確認	欠陥からのエコーは 検出されず
管台側からのフェーズドアレイ法 （欠陥深さ寸法測定に適用した手法）	・ 欠陥からのエコー確認	添付-1.3.1 図-3 参照
エルボ側及び管台側からの 2次クリーピング波法	・ 欠陥からのエコー確認	添付-1.3.1 図-10,図 11 参照

平成13年度

原子力発電施設検査技術調査等 に関する事業報告書

(非破壊的統一評価指標・基準の確立に関するもの)

平成 14 年 3 月

財団法人 発電設備技術検査協会

(3)超音波探傷試験に関する欠陥検出性評価

直管ステンレス鋼疲労き裂付与試験体（厚さ 10 mm）に付与した疲労き裂欠陥（PSF11～PSF19）9 個の欠陥検出性試験結果と切断調査結果に基づき、超音波探傷試験に関する欠陥検出性評価を行った。その結果を以下に示す。

a. 欠陥検出性試験要領

超音波探傷試験による欠陥検出性試験は、JEAG 4207(1996)「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指針」を踏襲した維持基準原案 UT 指針に基づき行った。試験条件の概要を表 4.3.2.2-3 に示す。

表4.3.2.2-3単純形状部試験体[ステンレス鋼配管：150A×10t]試験条件(欠陥検出性試験)

項目		条件		備考
試験体仕様	品名	ステンレス鋼配管(φ 165.2×10t)：8体		(AS101～AS108)
	材質	SUS304TP		
	口径×板厚	φ 165.2×10t		
	継手タイプ	PIPE TO PIPE		
	試験範囲	9欠陥領域+18欠陥領域（80mm/1領域）		
	付与欠陥	疲労き裂9個		(PSF11～PSF19)
試験方法	手法	手動探傷		
	試験チーム	5 チーム		
	準拠図書	維持基準原案 U T 指針		
使用機材	超音波探傷器	U S L - 4 2 S（クラウトクレマ）		使用機材は、各チーム 共通のものを使用 *1：1チームのみ5MHz の探触子を選定
	探触子	垂直	2Z10/2ND(KGK) or 5Z10/2ND(KGK)*1	
		斜角45°	2Z10×10A45(KGK) or 5Z10×10A45(KGK)*1	
		(斜角60°)	2Z10×10A60(KGK)	
	接触媒質	グリセリンペースト		
	対比試験片	No. P150A-10T-SUS304-AC1		
その他	試験上の制限	ブラインド試験		
		1週間／1チーム(3名)		

(3) 超音波探傷試験に関する欠陥検出性評価

単純形状部試験体 [ステンレス鋼配管 (150A×10t) SCC 付与] に付与した応力腐食割れ(SCC)欠陥 9 個 (PSS11～PSS19) に関する欠陥検出性試験結果を切断結果に基づき、超音波探傷試験に関する欠陥検出性評価を行った。その結果を以下に示す。

a. 欠陥検出性試験要領

超音波探傷試験による欠陥検出性試験は、JEAG4207(1996)「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指針」を踏襲した維持基準原案 UT 指針に基づき行った。試験条件の概要を表 4.3.2.4-3 に示す。

表 4.3.2.4-3 単純形状部試験体 [ステンレス鋼配管：150A×10t] 試験条件 (欠陥検出性試験)

項 目		条 件		備 考
試験体仕様	品名	ステンレス鋼配管 (φ 165.2×10t) : 7 体		(AS501,AS503～AS507, AS509) (PSS11～PSS19)
	材質	SUS304TP		
	口径×板厚	φ 165.2×10t		
	継手タイプ	配管＋配管		
	試験範囲	9欠陥領域＋18無欠陥領域		
	付与欠陥	応力腐食割れ(SCC)		
試験方法	手法	手動探傷		
	試験チーム	5チーム		
	準拠図書	維持基準原案UT指針		
使用機材	超音波探傷器	USL-42S(クラウトクレマ)		
	探触子	垂直	5Z10/2ND(KGK)	
		斜角45°	2Z10×10A45(KGK)	
	接触媒質	ソニコート(グリセリンペースト)		
	対比試験片	P150-10T-SUS304-AC2		
その他	試験上の制限	ブラインド試験		
		1週間／1チーム(3名)		

2

平成 1 6 年度

原子力発電施設検査技術実証事業

に関する報告書

(超音波探傷試験における欠陥検出性及び

サイジング精度の確認に関するもの)

[総括版 (1/2)]

平成 1 7 年 4 月

独立行政法人 原子力安全基盤機構

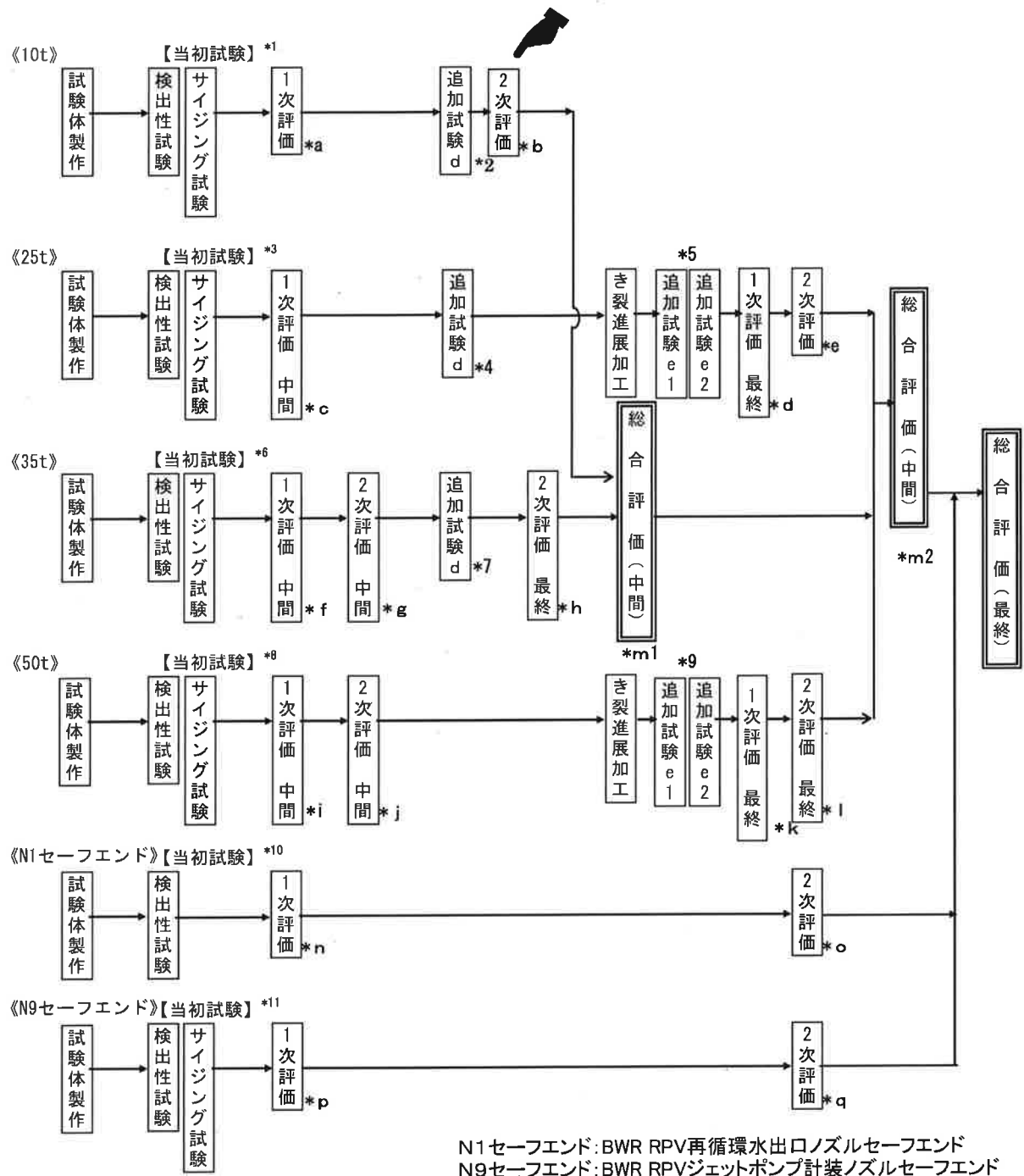


図 4.4.2.1 直管ステンレス鋼疲労き裂付与試験体における試験履歴

[図 4.4.2.1 で示す記号に関する説明]

(1) 追加試験 d

試験要領書改善（探触子の仕様検討、スリットを用いた事前訓練の導入等の反映）による端部エコー法のサイジング精度向上を目的とした欠陥サイジング試験を追加試験 d と云う。

(2) 追加試験 e 1, e 2

直管ステンレス鋼疲労き裂付与試験体（厚さ25mm, 50mm）に付与した欠陥の一部を進展させ、深いき裂に対するサイジング精度の確認を目的として行った追加試験

を追加試験e1、e2と云う。

ここで、追加試験e1とは追加試験dと同じ試験要領で行った試験を指し、追加試験e2とは、同じ試験員が追加試験dを実施する前に、欠陥深さの予備判定試験（モード変換波法を用いた大まかな欠陥深さの把握）を取り入れた試験要領で行った試験を指す。

(3) 記号*1～*11

試験体	当初試験		追加試験 d		追加試験e1, e2	
	記号	対象欠陥番号	記号	対象欠陥番号	記号	対象欠陥番号
10t	*1	PSF11～19	*2	PSF12, 16, 18	—	—
25t	*3	PSF21～29	*4	PSF21, 24, 26～28	*5	PSF22N, 28N
35t	*6	PSF301～309	*7	PSF301, 303, 304 PSF306, 307, 309	—	—
50t	*8	PSF41～49	—	—	*9	PSF41N, 47N
N1	*10	EBCF1～EBCF4	—	—	—	—
N9	*11	EBCF1～EBCF4	—	—	—	—

(4) 記号*a～*q

記号	内容	参照先
a	10t 1次評価	平成12年度 実用原子力発電施設検査技術等開発に関する事業報告書
b	10t 2次評価	平成12年度 実用原子力発電施設検査技術等開発に関する事業報告書 平成13年度 原子力発電施設検査技術調査等に関する事業報告書
c	25t 1次評価中間	平成12年度 実用原子力発電施設検査技術等開発に関する事業報告書
d	25t 1次評価最終	平成14年度 原子力発電施設検査技術調査等に関する事業報告書
e	25t 2次評価	平成14年度 原子力発電施設検査技術調査等に関する事業報告書
f	35t 1次評価	平成11年度 実用原子力発電施設検査技術等開発に関する事業報告書
g	35t 2次評価中間	平成12年度 実用原子力発電施設検査技術等開発に関する事業報告書
h	35t 2次評価最終	平成13年度 原子力発電施設検査技術調査等に関する事業報告書
i	50t 1次評価中間	平成13年度 原子力発電施設検査技術調査等に関する事業報告書
j	50t 2次評価中間	平成14年度 原子力発電施設検査技術調査等に関する事業報告書
k	50t 1次評価最終	平成14年度 原子力発電施設検査技術調査等に関する事業報告書
l	50t 2次評価最終	平成14年度 原子力発電施設検査技術調査等に関する事業報告書
m1	総合評価 中間	平成13年度 原子力発電施設検査技術調査等に関する事業報告書
m2	総合評価 中間	平成14年度 原子力発電施設検査技術調査等に関する事業報告書
n	N1 1次評価	平成15年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する事業報告書
o	N1 2次評価	平成16年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書
p	N9 1次評価	平成15年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する事業報告書
q	N9 2次評価	平成16年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書

b. 欠陥寸法と欠陥検出率の関係

検出レベルが DAC20% の場合の欠陥寸法(欠陥深さ、欠陥深さ板厚比、欠陥長さ)と欠陥検出率との関係について試験体別で整理したものを図 4.4.3.3(1)～図 4.4.3.3(4) に示し、表 4.4.3.7 に欠陥寸法と欠陥検出率の関係のまとめを示す。また、疲労き裂全体について欠陥深さ寸法と欠陥検出率の関係で整理したものを図 4.4.3.3(5) に示す。

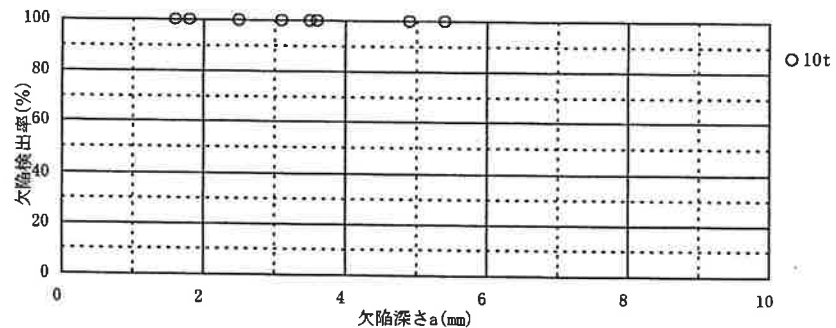
なお、対象とした 44 個の疲労き裂欠陥の全てについて、DAC100% を上回っており、検出レベルを DAC50% 及び DAC100% で整理しても検出率 100% に達している。

表 4.4.3.7 欠陥寸法と欠陥検出率の関係のまとめ (検出レベル : DAC20%)

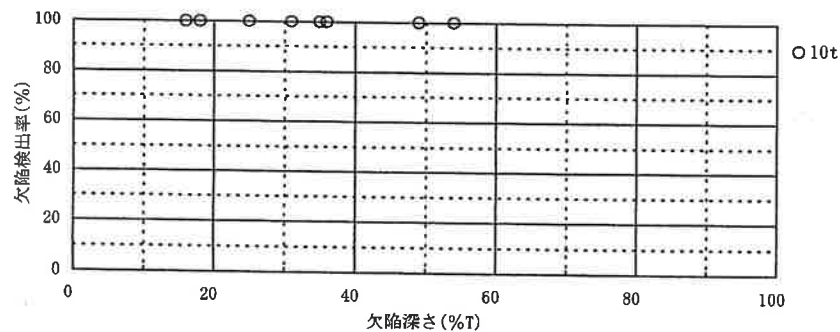
	試験体	検出率 100% の 最小欠陥深さ寸法	特徴的傾向
		(mm) *1	
	150A×10t	< 1.6 [1.5]	付与された全ての欠陥(44 個)の検出率が 100% であったことから欠陥寸法と検出率の間の明瞭な相関は確認できない。しかし、左記の最小欠陥寸法まで DAC100% を上回って検出できているため、DAC20% を検出レベルに設定した場合、検出限界は左記の値未満に存在すると考える。
	350A×25t	< 2.3 [2.1]	
	500A×35t	< 2.3 [2.7]	
	600A×50t	< 2.1 [3.9]	
	N1(41t)*2	< 1.8 [2.8]	
	N9(23t)*3	< 2.1 [1.7]	
	全体	< 1.6 [1.5]	
まとめ	何れの欠陥も DAC100% を上回って検出され、検出レベルが DAC20% の場合の検出率 100% の最小欠陥深さは、今回付与した欠陥の最小欠陥深さ 1.6mm 以下に存在するものと考える。		
備考	*1 : 検出率 100% の最小深さ欠陥と同一アスペクト比での評価不要欠陥寸法を指す。また、< は最小欠陥の検出率が 100% であり、検出限界がそれ以下であることを示す。 10t : 1.5mm (厚さに無関係)、 25t : 2.1mm(アスペクト比 0.2) 35t : 2.7mm (アスペクト比 0.15)、 50t : 3.9mm(アスペクト比 0.15) 41t : 2.8mm (アスペクト比 0.08)、 23t : 1.7mm(アスペクト比 0.15) *2 : N1(41t)は BWR RPV 再循環水出口ノズルセーフエンドを指す。 *3 : N9(23t)は BWR RPV ジェットポンプ計装ノズルセーフエンドを指す。		

c. 最大エコー高さと欠陥寸法の関係

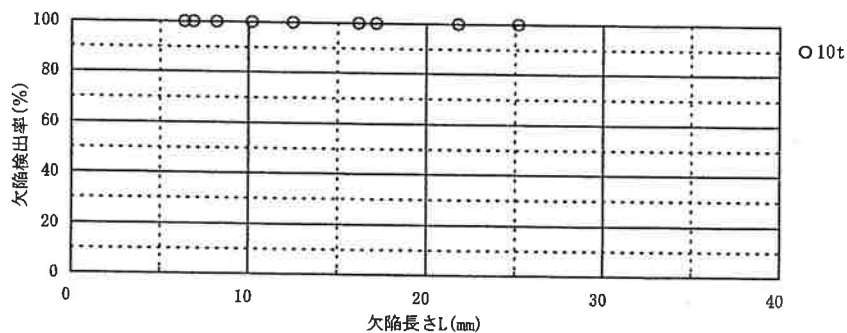
最大エコー高さと欠陥の寸法(欠陥深さ、欠陥長さ、欠陥面積[半楕円近似])との関係を図 4.4.3.4 に示す。また、最大エコー高さと欠陥寸法の関係のまとめについて表 4.4.3.8 に示す。



(a) 欠陥深さと欠陥検出率の関係

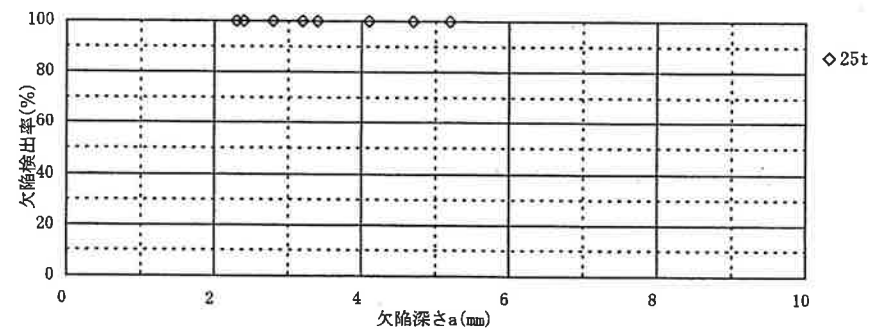


(b) 欠陥深さ (%T) と欠陥検出率の関係

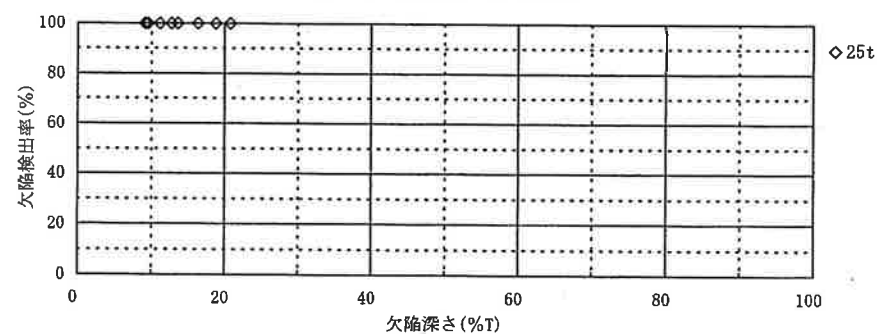


(c) 欠陥長さと欠陥検出率の関係

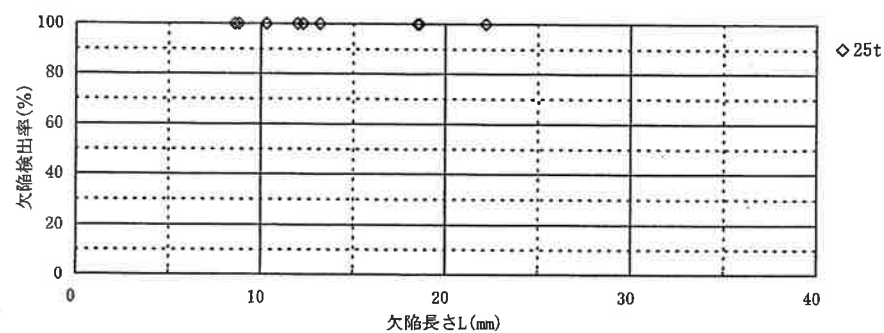
a. 直管ステンレス鋼 (150A × 10t)



(a) 欠陥深さと欠陥検出率の関係



(b) 欠陥深さ (%T) と欠陥検出率の関係



(c) 欠陥長さと欠陥検出率の関係

b. 直管ステンレス鋼 (350A × 25t)

注記：10t, 25tの付与欠陥は、全て評価不要欠陥寸法を超える。

全ての欠陥でDAC100%を超えて検出されていることから、DAC50%, DAC100%検出レベルとした場合も本図と同じである。

図4. 4. 3. 3(1) 直管ステンレス鋼疲労き裂付与試験体の欠陥寸法（深さ，長さ）と欠陥検出率の関係(DAC20%検出レベルの場合) (1/4)

表4.4.3.2(1) 直管ステンレス鋼疲労き裂付与試験体の欠陥検出性試験条件(1/3)

項目		直管ステンレス鋼 (厚さ10mm)		直管ステンレス鋼 (厚さ25mm)	
試験体仕様	品名	直管ステンレス鋼(150A×10t)：8体		直管ステンレス鋼(350A×25t)：5体	
	材質	SUS304TP		SUS304TP	
	試験体寸法	φ 165.2×10t		φ 355.6×25t	
	試験範囲	9欠陥領域＋18無欠陥領域(80mm/1領域)		9欠陥領域＋18無欠陥領域(80mm/1領域)	
	対象欠陥	疲労き裂9個(PSF11～PSF19)		疲労き裂9個(PSF21～PSF29)	
試験方法	手法	手動探傷		手動及び自動探傷	
	試験チーム	5チーム		手動：5チーム，自動：1チーム／1回	
	準拠図書	維持基準原案UT指針		維持基準原案UT指針	
使用機材	超音波探傷器	アナログ表示式		アナログ表示式及びデジタル表示式	
	探触子	垂直	2Z10/2ND ----- 5Z10/2ND*1	垂直	2Z10/2ND ----- V534 2.25/0.5(°ナメトリック)*2
		斜角45°	2Z10×10A45 ----- 5Z10×10A45*1	斜角45°	2Z10×10A45 -----
		(斜角60°)	2Z10×10A60	(斜角60°)	2Z10×10A60
	接触媒質	グリセリンペースト		グリセリンペースト	
	対比試験片	P150A-10T-SUS304-AC1		K350A-25T-SUS304-AC1	
その他	試験上の制限	ブラインド試験 1週間/1チーム *1：1チームが5MHzを採用した。		ブラインド試験 1週間/1チーム *2：自動探傷にて採用した。	

表4.4.3.4(1) 直管ステンレス鋼疲労き裂付与試験体の欠陥検出性評価パラメーター一覧(1/3)

試験体仕様 口径×厚さ	欠陥番号	欠陥寸法				Y 距離 (mm)	検出率 (%)※3	最大エコー高さ※2			最大エコー検出位置X (mm) ※2			反射源位置Y (mm) ※2	
		深さ a (mm)	長さ L (mm)	間隙※1 g (μm)	面積S (mm ²)			平均		標準偏差 dB	MAX位置 標準偏差	DAC20%指示		平均値	標準偏差
								DAC%	dB			平均値	標準偏差		
150A×10t	PSF11	1.8	8.2	2.5～4.0	11.6	-8.6～ -9.1	100	166	4.4	0.6	1.1	13.4	1.7	-8.4	1.6
	PSF12	1.8	6.9	2.5～4.0	9.8	+6.9～+7.1	100	192	5.7	0.7	1.6	14.0	1.6	6.6	2.1
	PSF13	1.6	6.4	2.5～3.0	8.0	+8.2	100	144	3.2	0.9	0.5	12.4	1.1	8.5	1.8
	PSF14	3.5	16.2	2.0～3.0	44.5	+10.2	100	402	12.1	0.5	1.3	24.6	1.5	7.9	1.0
	PSF15	3.1	12.5	5.5～9.0	30.4	-8.7	100	348	10.8	0.9	2.0	21.2	2.4	-8.9	1.1
	PSF16	2.5	10.2	3.0～4.0	20.0	-8.4	100	302	9.6	0.7	1.0	17.4	2.6	-7.7	0.8
	PSF17	5.4	25.2	5.0～7.0	106.9	+9.1	100	203	6.1	0.4	1.5	20.8	7.0	9.4	0.7
	PSF18	4.9	21.8	4.0～6.5	83.9	-9.6～ -10.1	100	325	10.2	1.0	1.3	32.0	1.2	-8.0	1.5
	PSF19	3.6	17.2	5.5～6.0	48.6	-8.1～ -8.5	100	339	10.6	1.3	1.9	24.8	1.6	-8.1	0.6
350A×25t	PSF21	4.7	12.0	15～60	44.3	+6.7～+7.0	100	693	16.8	1.9	1.1	24.6	0.6	6.3	0.8
	PSF22	3.4	8.8	未測定	23.5	-5.6～ -7.6	100	460	13.3	0.3	1.3	21.1	1.2	-5.3	1.5
	PSF22N	11.0	49.5	160	427.6		—	(663)	(16) (*4)	—	—	(68)	—	(-8.1)	—
	PSF23	3.2	8.6	5～20	21.6	+8.1～+8.3	100	491	13.8	2.2	1.0	23.5	6.6	9.2	0.5
	PSF24	4.7	18.6	5～15	68.7	+7.9～+8.4	100	602	15.6	1.9	4.5	31.3	1.2	7.2	1.5
	PSF25	2.8	12.3	5～20	27.0	-7.9～ -8.1	100	388	11.8	2.5	0.6	24.7	4.6	-5.8	2.4
	PSF26	2.3	10.3	5	18.6	+8.1～+8.2	100	371	11.4	2.2	0.9	19.9	2.1	8.6	1.3
	PSF27	5.2	22.2	5	90.7	-9.7～ -10.1	100	370	11.4	3.0	6.6	34.3	1.0	-4.7	1.5
	PSF28	4.1	18.5	未測定	59.6	+7.4～+8.7	100	513	14.2	2.8	0.6	28.6	1.1	8.0	1.7
	PSF28N	8.2	29.1	120	187.4		—	(687)	(17) (*4)	—	—	(45)	—	(9.9)	—
	PSF29	2.4	13.2	10～20	24.9	-8.7	100	342	10.7	1.9	4.1	24.8	1.7	-9.0	1.3
備考		*1:欠陥間隙は製造時記録を示す。 *2:最大エコー高さ, 最大エコー検出位置(X)及び反射源位置(Y)は、 150A×10t: 手動5チームの試験結果に基づく。 350A×25t: 手動5チーム+自動1チーム1回の試験結果に基づく *3:検出レベルがDAC20%の場合を示す。 *4: PSF22N,28Nは進展加工後の検出性試験を実施していない為、PSI記録を参考値として記載した。													

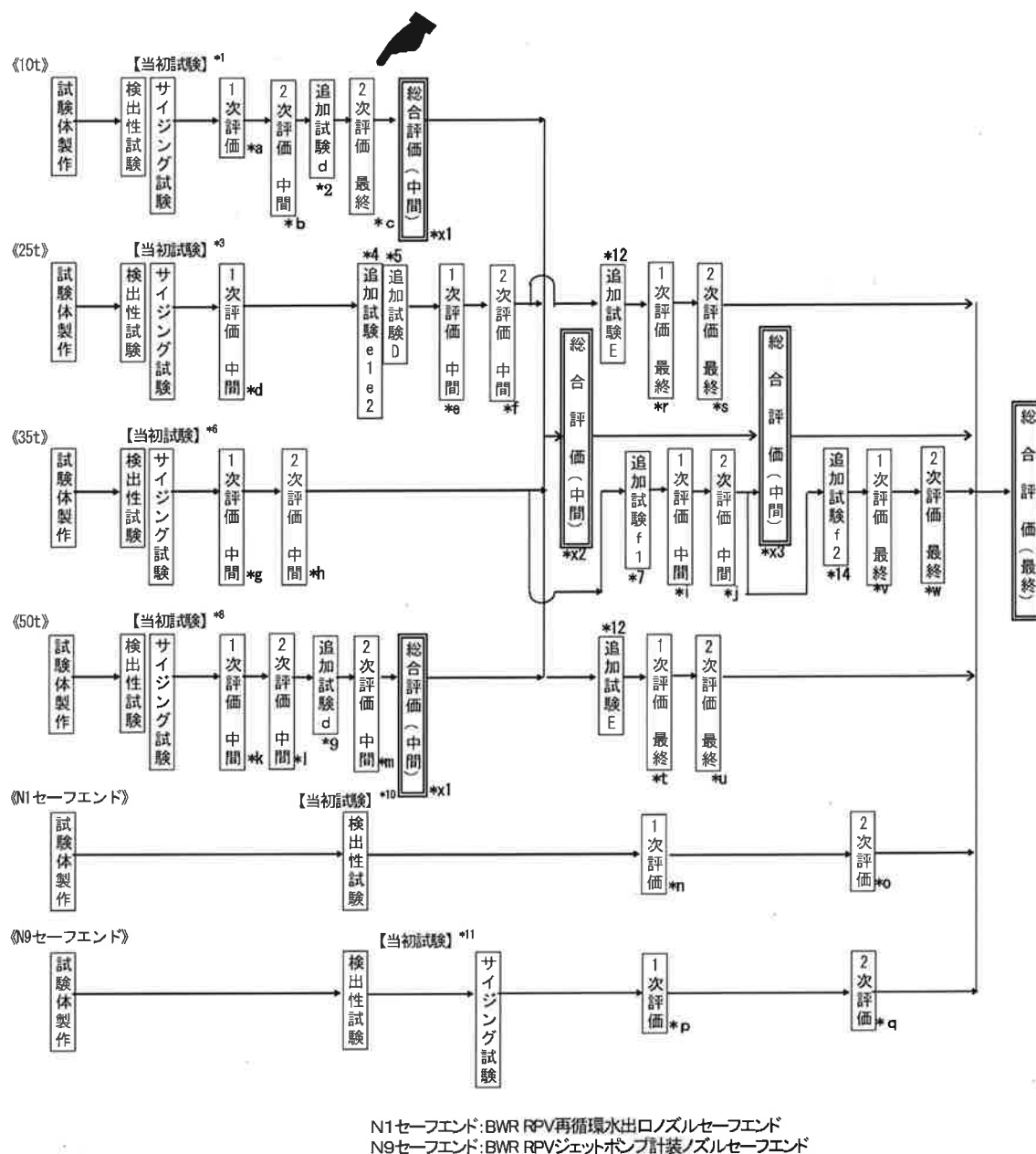


図4.5.2.1 直管ステンレス鋼SCC付与試験体の試験履歴

[図4.5.2.1で示す記号に関する説明]

(1) 追加試験d

試験要領書改善（探触子の仕様検討、スリットを用いた事前訓練の導入等の反映）による端部エコー法のサイジング精度向上を目的とした欠陥サイジング試験を追加試験dという。

(2) 追加試験e1, e2

追加試験e1とは追加試験dと同じ試験要領で行った試験を指し、追加試験e2とは、同じ試験員が追加試験dを実施する前に、欠陥深さの予備判定試験（モード変換波法を用いた大まかな欠陥深さの把握）を取り入れた試験要領で行った追加サイジング試験を指す。

(7) 記号*a~*z

各評価結果は下表を参照。

記号	内容	参照先
a	10t 1次評価	平成11年度 実用原子力発電施設検査技術等開発に関する事業報告書
b	10t 2次評価中間	平成12年度 実用原子力発電施設検査技術等開発に関する事業報告書
c	10t 2次評価最終	平成13年度 原子力発電施設検査技術調査等に関する事業報告書
d	25t 1次評価中間	平成13年度 原子力発電施設検査技術調査等に関する事業報告書
e	25t 1次評価中間	平成14年度 原子力発電施設検査技術調査等に関する事業報告書
f	25t 2次評価中間	平成14年度 原子力発電施設検査技術調査等に関する事業報告書
g	35t 1次評価中間	平成12年度 実用原子力発電施設検査技術等開発に関する事業報告書
h	35t 2次評価中間	平成14年度 原子力発電施設検査技術調査等に関する事業報告書
i	35t 1次評価中間	平成15年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書
j	35t 2次評価中間	平成15年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書
k	50t 1次評価中間	平成11年度 実用原子力発電施設検査技術等開発に関する事業報告書
l	50t 2次評価中間	平成12年度 実用原子力発電施設検査技術等開発に関する事業報告書
m	50t 2次評価中間	平成13年度 原子力発電施設検査技術調査等に関する事業報告書
n	N1 1次評価	平成15年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書
o	N1 2次評価	平成16年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書
p	N9 1次評価	平成15年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する事業報告書
q	N9 2次評価	平成16年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書
r	25t 1次評価最終	平成16年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書
s	25t 2次評価最終	平成16年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書
t	50t 1次評価最終	平成16年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書
u	50t 2次評価最終	平成16年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書
v	35t 1次評価最終	平成16年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書
w	35t 2次評価最終	平成16年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書
X ₁	総合評価中間	平成13年度 原子力発電施設検査技術調査等に関する事業報告書
X ₂	総合評価中間	平成14年度 原子力発電施設検査技術調査等に関する事業報告書
X ₃	総合評価中間	平成15年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書

b. 欠陥寸法と欠陥検出率の関係

検出レベルをDAC20%からDAC100%まで変化させた場合の欠陥寸法と欠陥検出率の関係を図4.5.3.3(1)～図4.5.3.3(4)に示す。また、表4.5.3.8に検出レベルがDAC20%の場合の欠陥寸法と欠陥検出率の関係のまとめを示す。

表 4.5.3.8 欠陥寸法と欠陥検出率の関係のまとめ（検出レベル：DAC20%）

	試験体	検出率 100%の 最小欠陥深さ寸法(mm) *1	特徴的傾向
	150A×10t	2.8 [1.5] (1.3)*2[1.5]	
	350A×25t	1.4 [2.4]	
	500A×35t	<1.7 [2.9]	
	600A×50t	3.4 [4.8]	
	N1(47t)*4	<5.4*3 [4.8]	
	N9(18.5t)*5	<4.4 [1.8]	
	全体	3.2	
まとめ	(1) 厚さ 10mm の場合、検出レベルを DAC20%に設定した場合に 100%検出できる最小欠陥寸法（欠陥深さ）は 2.8mm であり、評価不要欠陥寸法を超えていた。また、疲労き裂の場合と比較して検出率は低くなった。（参考：厚さ 10mm の疲労き裂の場合、最小検出寸法：1.6mm、評価不要欠陥寸法：1.5mm）		
	(2) 厚さ 25mm～厚さ 50mm の場合は、評価不要欠陥寸法以下の微小な欠陥の一部を除くと、最大エコー高さが DAC50%を超えており、評価不要欠陥寸法を超える欠陥に対する検出性は十分確保できるものと考えられる。		
	(3) 厚さ 10mm の評価不要欠陥寸法を超える欠陥で検出率が 100%に満たないケースの探傷データを見ると、検出できたチームの最大エコー高さ及び検出率は以下の通りである。いずれの欠陥も軸方向欠陥であり、周軸両方向の探傷結果によると、過半数のチームが検出していることから、試験員の技量、熟練度が影響していると考えられる。		
	・ PSS12：軸方向探傷結果…エコー高さ DAC62～68%（検出率：60%） 周方向探傷結果…エコー高さ DAC67、68%（検出率：40%） ・ PSS13：軸方向探傷結果…エコー高さ DAC31～42%（検出率：80%） 周方向探傷結果…エコー高さ DAC42～55%（検出率：60%）		
	(4) 図 4.5.3.3(1)a.(a), (c)で見ると、欠陥深さ 2mm×欠陥長さ 10mm 程度以上でほぼ検出率 100%（DAC20%検出レベル）に達し、図 4.5.3.3(4)で示すように欠陥深さ 3mm 程度以上で安定して検出できた。（特定のチームの結果を除く）。		

《次頁に続く》

《前頁から続く》

備考	*1：鉤括弧内の数値は、最小欠陥深さの欠陥と同じアスペクト比の評価不要欠陥寸法を示す。また、<は最小欠陥の検出率が 100%であり、検出限界がそれ以下であることを示す。 *2：検出レベルを DAC20%に設定した場合に 80%検出できる最小欠陥寸法（欠陥深さ）を示す。 *3：特定のチームの技量を除いた場合を示す。 *4：N1(47t)は BWR RPV 再循環水出口ノズルセーフエンドを指す。 *5：N9(18.5t)は BWR RPV ジェットポンプ計装ノズルセーフエンドを指す。
----	--

c. 最大エコー高さと欠陥寸法の関係

最大エコー高さと欠陥の寸法(欠陥深さ、欠陥長さ、欠陥面積[半楕円近似])との関係を図 4.5.3.4 に示す。また、最大エコー高さと欠陥寸法の関係のまとめについて表 4.5.3.9 に示す。

表 4.5.3.9 最大エコー高さと欠陥寸法の関係のまとめ

	評価対象	相関性	結果概要
	最大エコー高さ－欠陥深さ	僅かに有り	長さ 10mm～15 程度（使用した探触子の振動子幅寸法程度）、深さ 3mm～4mm 程度、面積 40mm ² 程度以下の範囲において、欠陥寸法とエコー高さの関係で相関が見られた。一方で、上記寸法を超えるようになるとエコー高さが飽和傾向を示すようになり、欠陥寸法とエコー高さの相関性は見られなくなる傾向を示した。
	最大エコー高さ－欠陥長さ	僅かに有り	
	最大エコー高さ－欠陥面積	僅かに有り	
まとめ	(1) エコー高さは、欠陥のある程度の大きさを想定する上で重要な情報となり得るが、直接寸法を知り得るほどの強い相関は認められなかった。 (2) 欠陥寸法が小さい範囲では、欠陥寸法が大きくなるにつれ、エコー高さが高くなる傾向が認められたことから、軽微な状態からの欠陥の進展性有無の監視に有益な情報になるものと期待できる。 (3) 図 4.5.3.5 に示すように、SCC の場合、疲労き裂よりエコー高さが低い傾向にあり、深さ 10mm 程度の比較的深い欠陥であっても DAC100%程度から DAC200%程度で推移する傾向を示した。		

表4.5.3.2(1) 直管ステンレス鋼SCC付与試験体の欠陥検出性試験条件（当初試験）（1/3）

項目		直管ステンレス鋼（厚さ10mm）		直管ステンレス鋼（厚さ25mm）	
試験体仕様	品名	直管ステンレス鋼(150A×10t)		直管ステンレス鋼(350A×25t)	
	材質	SUS304TP		SUS304TP	
	試験体寸法	φ 165.2×10t		φ 355.6×25t	
	試験範囲	9欠陥領域＋18無欠陥領域(80mm/1領域)		12欠陥領域＋18無欠陥領域(80mm/1領域)	
	対象欠陥	SCC9個(PSS11～PSS19)		SCC12個(PSS21～PSS29、PSS2A～2C)	
試験方法	手法	手動探傷		手動及び自動探傷	
	試験チーム	5チーム		手動：5チーム，自動：1チーム／1回	
	準拠図書	維持基準原案UT指針		維持基準原案UT指針	
使用機材	超音波探傷器	アナログ表示式		アナログ表示式及びデジタル表示式	
	探触子	垂直	2Z10/2ND	垂直	5Z10/2ND
			5Z10/2ND*1		
		横波45°	2Z10×10A45	横波45°	2Z10×10A45
			5Z10×10A45*1		
	接触媒質	グリセリンペースト		グリセリンペースト	
	対比試験片	P150A-10T-SUS304-AC2		P350A-25T-SUS304-AC2	
その他	試験上の制限	ブラインド試験		ブラインド試験	
		1週間/1チーム		1週間/1チーム	
		*1：1チームが5MHzを採用した。			

表4.5.3.5(1) 直管ステンレス鋼SCC付与試験体の欠陥検出性評価パラメーター一覧(1/3)

試験体仕様 口径×厚さ	欠陥番号	欠陥寸法*2				Y 距離 (mm)	検出率*6 (%)	最大エコー高さ *3			最大エコー高さ検出位置(X) *3			反射源位置(Y) *3		備考
		深さa (mm)	長さL (mm)	間隙 *1 g (μm)	面積 S (mm ²)			平均値		標準 偏差 dB	MAX位置 標準偏差 (mm)	DAC20%指示		平均値 (mm)	標準偏差 (mm)	
								DAC%	dB			平均値 (mm)	標準偏差 (mm)			
150A×10t	PSS11	1.2	41.8	0.2～120	39.4	+8.8～+9.6	60	48.0	-6.4	*	*	7.7	*	9.2	*	
	PSS12*4	1.6	0.4 (12.3)	0.2～10	(15.5)	+8.7～+21.0	60	66.0	-3.6	*	*	9.7	*	11.5	*	
							40	67.5	-3.4	*	*	8.5	*	0° -41.6	*	
	PSS13*4	2.0	0.0 (10.0)	0.2～10	(15.7)	+10.5～+20.5	80	38.0	-8.4	*	*	8.5	*	10.9	*	
							60	46.0	-6.7	*	*	7.3	*	0° -34.6	*	
	PSS14	1.3	9.0	0.2～15	9.2	-5.2～-6.7	80	53.8	-5.4	*	*	7.0	*	-7.4	*	
	PSS15	1.3	11.6	1 以下	11.8	+3.7～+4.9	60	44.3	-7.1	*	*	7.7	*	7.3	*	
	PSS16	5.6	34.4	1 以下	151.3	+5.2～+6.8	100	87.6	-1.1	0.3	11.3	41.0	3.1	6.9	1.2	
	PSS17	0.6	10.7	5以下	5.0	+7.2～+7.3	20	21.0	-13.6	*	*	SPOT	*	6.2	*	
PSS18	2.8	11.6	0.2～10	25.5	-6.6～-5.2	100	108.8	0.7	1.0	0.0	13.2	1.8	-7.0	1.3		
PSS19	3.9	23.1	5以下	70.8	+3.7～+4.8	100	135.2	2.6	1.0	5.2	25.6	4.2	7.4	0.8		
350A×25t	PSS21	2.0	8.1	8～12	12.7	-5.0～-5.2	100	79.2	-2.0	2.3	0.8	10.7	2.0	-3.5	1.8	
	PSS22	2.1	9.6	13～15	15.8	+6.2～+6.4	100	108.8	0.7	2.0	0.8	13.8	2.1	4.6	0.9	
	PSS23	3.9	13.9	20～22	42.9	-5.8～-6.2	100	188.5	5.5	0.9	1.8	31.5 [21.8]*5	23.8 [1.1]*5	-3.0	0.9	
	PSS24	2.4	10.1	12～14	19.0	+5.8～+6.1	100	143.0	3.1	2.3	1.2	16.2	3.4	3.8	1.6	
	PSS25	2.0	10.4	30～40	16.3	+4.4～+4.5	100	115.5	1.3	2.5	1.8	18.5	2.7	3.3	0.8	
	PSS26	2.4	13.9	10～20	26.2	-5.7～-6.0	100	114.2	1.2	2.8	4.8	22.3	2.6	-2.4	2.1	
	PSS27	0.6	3.6	5～8	1.7	-4.6～-4.7	17	20.0	-14.0	*	*	SPOT	*	-4.1	*	
	PSS28	3.6	15.0	13～15	42.4	-5.3～-5.5	100	171.2	4.7	0.9	1.0	26.2	1.8	-1.3	0.9	
	PSS29	3.3	17.9	12～20	46.4	+5.8～+6.2	100	161.2	4.1	3.2	1.6	25.3	5.8	3.5	1.9	
	PSS2A	1.4	6.7	5～8	7.4	+4.9～+5.0	100	112.8	1.0	2.2	1.3	11.3	1.2	2.6	1.2	
	PSS2B	2.7	18.8	10～15	39.9	+6.2～+6.7	100	171.2	4.7	2.1	0.4	24.7	6.7	5.1	1.2	
	PSS2C	0.7	15.5	25～30	8.5	+4.3～+4.4	0	×	×	×	×	×	×	×	×	検出不可
	PSS2D	2.9	8.0	5～10	18.2	-5.7～-6.1	100	129.2	2.2	1.0	1.3	29.4	0.5	-3.4	0.9	
	PSS2E	3.0	9.0	5～20	21.2	+5.6～+6.2	100	152.0	3.6	2.0	2.2	22.0	9.1	4.5	1.2	
PSS2F	1.4	4.5	5～20	4.9	+5.8～+7.4	100	53.0	-5.5	1.7	0.9	11.4	6.1	6.4	1.4		
PSS2G	1.5	5.0	5～10	5.9	+5.3	100	97.2	-0.2	1.8	1.5	12.0	1.2	5.2	1.2		
PSS2H	2.1	7.5	5～20	12.4	+5.0～+5.1	100	83.8	-1.5	1.6	0.4	12.2	3.1	4.6	1.0		
備考	[記号] ×：検出不可， *：検出チームが4チーム以下のため標準偏差は算出しない。															
	*1：欠陥間隙は切断調査記録を示す。															
	*2：10 t の括弧内数値は、軸方向の長さ及び面積を示す。															
	*3：最大エコー高さ検出位置(X)及び反射源位置(Y)は、150A×10t：手動5チーム、350A×25t：手動5チーム、自動1チーム1回（PSS2D～PSS2Hは除く）試験結果に基づき算出した。															
	*4：当該欠陥は軸方向欠陥であり、検出性試験結果における上段は軸方向探傷、下段は周方向探傷の結果を示す。周方向探傷における反射源位置（X，Y）は、軸方向探傷の場合とは逆（Y，X）になる。															
	*5：鉤括弧内数値は誤判定していると考えられる1チームを除いた値を示す。															
*6：検出レベルがDAC20%の場合を示す。																

第一段階検査の判定に至る根拠詳細

1. 評価対象とするエコーの判定基準

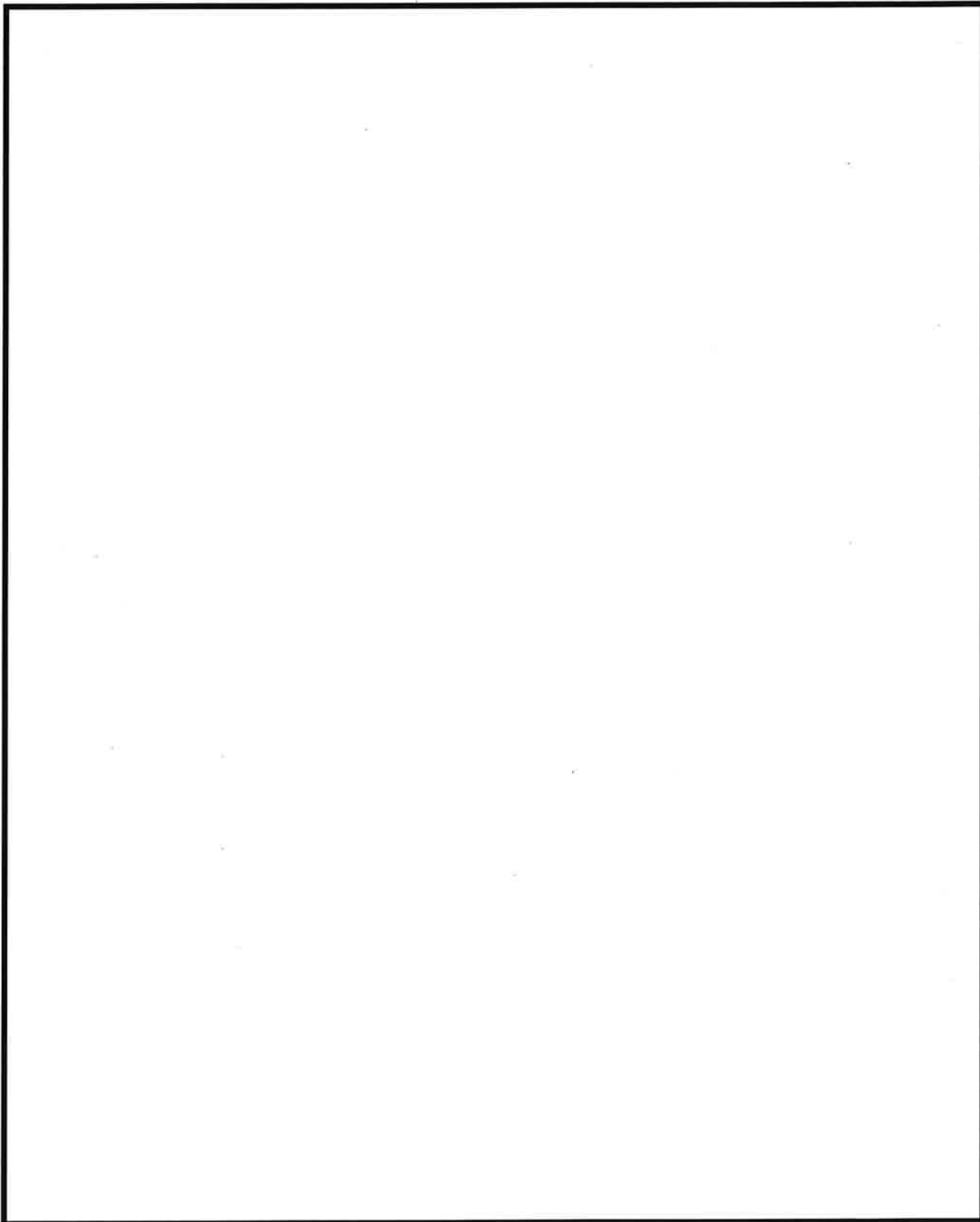
JEAC4207-2008 に基づき、DAC20%を超える高さからのエコーが評価対象となる。評価対象となったエコーは、「JEAC4207-2008 表-2712-1 UT 指示エコーの分類」に従い該当するエコーに分類する。

表-2712-1 UT 指示エコーの分類

区分 1	区分 2
A 形状エコー	a チーバ部エコー（シーニング部エコー）
	b 裏波部エコー
	c 表面エコー
	d 内表面エコー
	e 底面エコー
	f 側面エコー
	g 端面エコー
	h 遅れエコー
B 金属組織エコー	a 溶接部エコー
	b 林状エコー
	c 境界面エコー
	d 柱状晶伝搬エコー
C 雑エコー	a クサビエコー
	b ゴーストエコー
	c 電気ノイズエコー
	d 水エコー（カプラントエコー）
D 要記録エコー	a 不連続部エコー （検出された反射源が RT フィルム等で判別可能な場合、溶接欠陥の分類に従って判定しても良い）
	b 欠陥エコー

2. 斜角 45° 探触子において不連続部エコーと判断した根拠

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

18 回定検時(今回 ISI)の記録

超音波探傷データシート a (配管-インディケーションの記録)

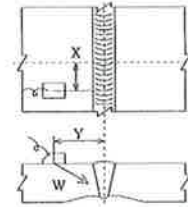
配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 FW-4

上流側 管 台

下流側 エルボ

探傷角度 45° (直角)



	探傷サイド		ピーク指示部					DAC20%		DAC100%		備 考
	上流側	下流側	X (mm)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	
1	○		0° +12	14	23.0	92	94	全 周	360			裏波部*
2	○		120° +8	14	22.0	44	44	全 周	360			裏波部*
3	○		180° -5	14	20.0	48	44	全 周	360			裏波部*
4	○		210° -3	15	21.0	72	69	全 周	360			裏波部*
5	○		210° +7	13	20.0	72	66	全 周	360			裏波部*
6	○		240° +19	13	20.0	82	75	全 周	360			裏波部*
7	○		300° +11	13	22.0	41	41	全 周	360			裏波部*
8	○		0° -4	14	23.0	66	68	全 周	360			裏波部*
9	○		210° +15	26	36.0	58	64	全 周	360			外表面部
10		○	90° -14	15	21.0	46	44	30° ~ 120° +13 ~ +0	77			裏波部*
11		○	90° +15	14	20.0	38	35	30° ~ 120° +13 ~ +0	77			裏波部*

備考 *: 30° 毎の記録点間の最大エコー (ピーク) が前後の記録点のエコー高さを超える反射波を示す。

検査日付 2020年 8月17日 検査実施者

超音波探傷データシート a (配管-インディケーションの記録)

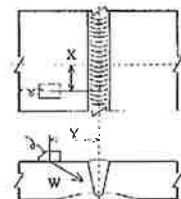
配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 FW-4

上流側 管 台

下流側 エルボ

探傷角度 45° (直角)



	探傷サイド		ピーク指示部					DAC20%		DAC100%		備 考
	上流側	下流側	X (mm)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	
12		○	240° +16	13	21.0	38	36	240° ~ 0° +0 ~ -24	96			裏波部*
13		○	270° +17	14	21.0	56	53	240° ~ 0° +0 ~ -24	96			裏波部*
14		○	300° +18	31	38.0	61	65	240° ~ 120° +0 ~ +0	240			外表面部
15		○	60° +2	3	16.0	70	57	60° ~ 60° -1 ~ +13	14			柱状屈折エコー
16		○	300° +6	3	16.0	53	43	300° ~ 300° -5 ~ +7	12			柱状屈折エコー
17		○	0° +3	15	20.0	192	176	0° ~ 30° -24 ~ +13	67	0° ~ 30° -12 ~ -15	26	不連続エコー
						以下	余白					

備考 *: 30° 毎の記録点間の最大エコー (ピーク) が前後の記録点のエコー高さを超える反射波を示す。

検査日付 2020年 8月17日 検査実施者

図-2 今定検での不連続エコーのピーク指示位置とエコー高さ

超音波探傷データシートb (配管-インディケーションの記録)

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 FW-4

探傷角度 45° (直角)

X位置	上 流 (管 台)								下 流 (エルボ)							
	裏波部				柱状品伝搬エコー				裏波部				柱状品伝搬エコー			
	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)
0°	15	23.0	51	52												
30°	13	24.0	31	33												
60°	15	22.0	25	25					14	20.0	42	39				
90°	14	22.0	48	48					14	20.0	24	22				
120°	14	21.0	23	22					14	20.0	24	22				
150°	13	20.0	36	33					—	—	—	—	—	—	—	—
180°	13	20.0	28	26					—	—	—	—	—	—	—	—
210°	14	21.0	28	27					—	—	—	—	—	—	—	—
240°	14	21.0	25	24					14	21.0	22	21				
270°	13	21.0	32	31					16	22.0	26	26				
300°	13	21.0	35	34					16	21.0	47	45				
330°	14	23.0	29	30					16	22.0	30	30				
									120°～240° はエルボ腹のため探傷不可。				120°～240° はエルボ腹のため探傷不可。			
					空白欄は隣接する30°芯2点以上にまたがる反射波を認めず。				空白欄は隣接する30°芯2点以上にまたがる反射波を認めず。				空白欄は隣接する30°芯2点以上にまたがる反射波を認めず。			

検査日付 2020年 8月17日 検査実施者

図-3 今定検での不連続部エコー検出に伴う裏波部エコーの消失

超音波探傷データシートc (配管-インディケーションのマップ)

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 FW-4

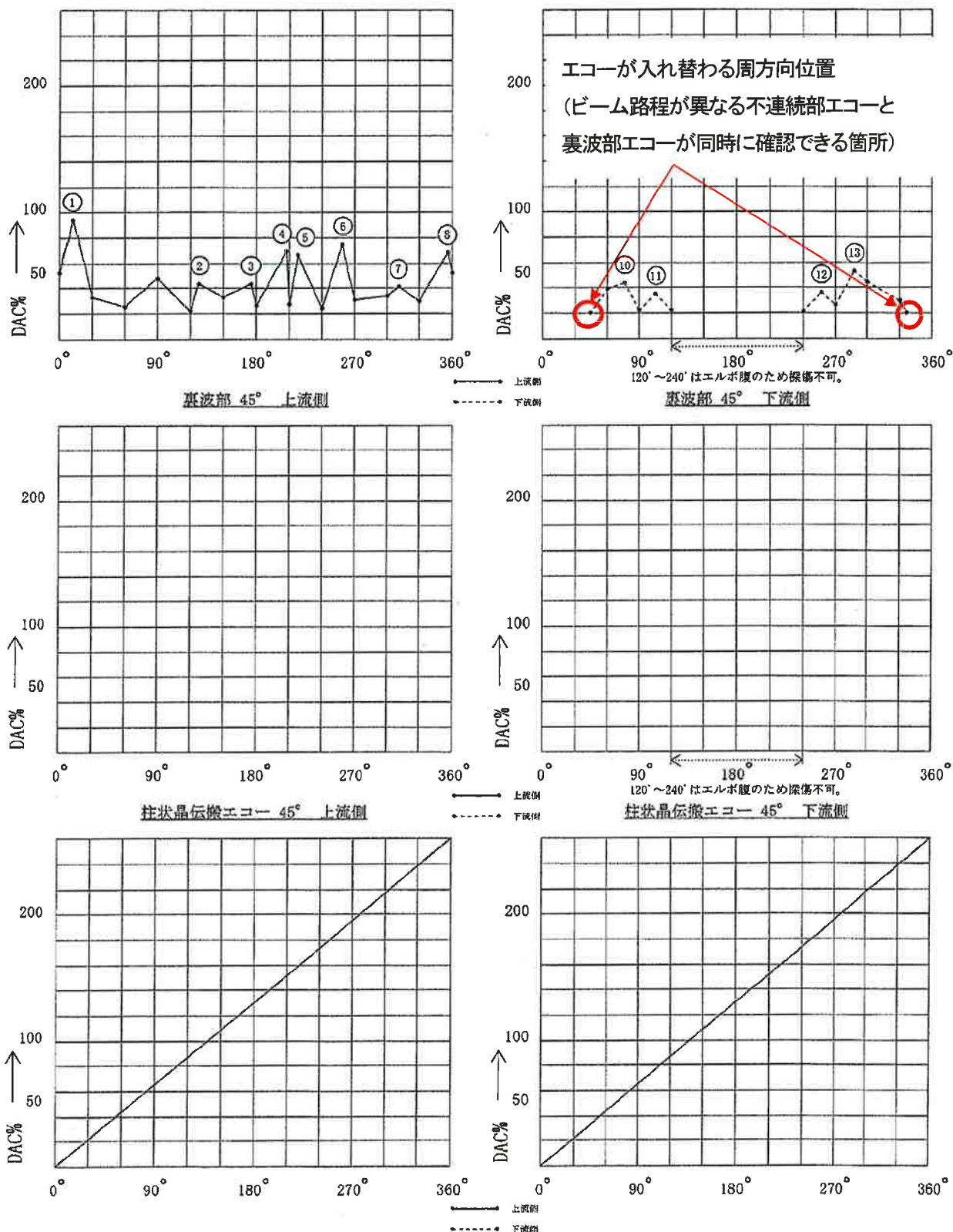


図-4 今定検において不連続部エコーと裏波部エコーが入れ替わる周方向位置

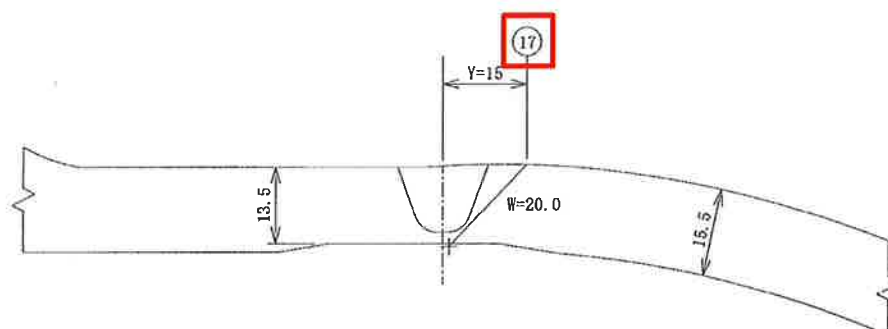
インディケーションの位置

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

縮尺: 1/1

単位: mm

溶接線番号 FW-4



上流側 (管 台)

下流側 (エルボ)

図-5 今定検での不連続エコーの反射源位置

 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

10 回定検の記録

超音波探傷データシート a (配管-インディケーションの記録)

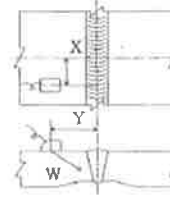
配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン

溶接継ぎ目番号 FW-4

上流側 管台

下流側 エルボ

探傷角度 45° (直角)



	探傷サイド		ピーク指示部					20% DAC		100% DAC		備考
	上流側	下流側	X (mm)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	
1	○		90° +7	14	21.0	46	44	全周	360			裏波部*
2	○		240° +19	14	21.0	64	61	全周	360			裏波部*
3	○		300° +7	14	21.0	38	36	全周	360			裏波部*
4	○		210° +17	26	36.0	54	51	全周	360			外表面部*
5	○		300° +4	26	36.0	45	51	全周	360			外表面部*
6		○	30° -14	12	21.0	50	48	240° +0 ~ 120° +0	240			裏波部*
7		○	240° +16	13	20.0	32	30	240° +0 ~ 120° +0	240			裏波部*
8		○	270° +24	15	20.0	44	41	240° +0 ~ 120° +0	240			裏波部*
9		○	330° +16	15	21.0	33	32	240° +0 ~ 120° +0	240			裏波部*
10		○	0° +2	29	38.0	52	57	240° +0 ~ 120° +0	240			外表面部*
11		○	120° -16	30	40.0	28	30	240° +0 ~ 120° +0	240			外表面部*

備考 *: 30° 毎の記録点間の最大エコー (ピーク) が前後の記録点のエコー高さを超える反射波を示す。

検査日付 平成 16 年 5 月 8 日 検査実施者

超音波探傷データシート a (配管-インディケーションの記録)

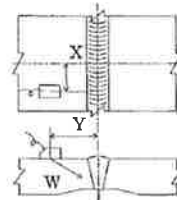
配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン

溶接継ぎ目番号 FW-4

上流側 管台

下流側 エルボ

探傷角度 45° (直角)



	探傷サイド		ピーク指示部					20% DAC		100% DAC		備考
	上流側	下流側	X (mm)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	
12		○	240° +15	29	38.0	38	42	240° +0 ~ 120° +0	240			外表面部*
13		○	270° +14	32	38.0	36	40	240° +0 ~ 120° +0	240			外表面部*
14		○	300° +17	30	39.0	60	65	240° +0 ~ 120° +0	240			外表面部*
						以下余白						

備考 *: 30° 毎の記録点間の最大エコー (ピーク) が前後の記録点のエコー高さを超える反射波を示す。

検査日付 平成 16 年 5 月 8 日 検査実施者

図-6 10 回定検での当該部裏波部エコーのピーク指示位置とエコー高さ

超音波探傷データシートb (配管-インディケーションの記録)

配管系統及びライン名 加圧懸スプレイライン

海援線番号 PB-4

探傷角度 45° (直角)

X位置	上 流 (管 台)								下 流 (エ ル ボ)							
	裏 波 部				外 表 面 部				裏 波 部				外 表 面 部			
	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)
0°	14	21.0	36	35	30	38.0	34	38	13	21.0	26	25	29	38.0	52	57
30°	15	22.0	22	22	30	38.0	22	24	13	21.0	49	47	29	38.0	48	53
60°	14	21.0	24	23	26	37.0	28	31	14	21.0	42	40	30	39.0	42	46
90°	14	21.0	43	41	27	38.0	25	28	14	21.0	36	35	29	38.0	22	24
120°	14	21.0	21	20	27	38.0	40	44	13	20.0	24	22	29	38.0	18	20
150°	14	20.0	33	31	28	39.0	34	37	—	—	—	—	—	—	—	—
180°	14	21.0	40	38	27	38.0	28	31	—	—	—	—	—	—	—	—
210°	14	21.0	64	61	29	38.0	26	29	—	—	—	—	—	—	—	—
240°	14	21.0	26	25	28	38.0	28	31	14	21.0	21	20	29	38.0	18	20
270°	14	21.0	34	33	29	39.0	26	28	13	21.0	22	21	31	39.0	27	30
300°	15	21.0	26	25	28	39.0	43	47	14	20.0	38	35	31	39.0	26	28
330°	14	21.0	21	20	27	38.0	24	27	14	21.0	25	24	30	38.0	28	31
									120°～240° はエルボ腹の為探傷不可。				120°～240° はエルボ腹の為探傷不可。			

検査日付 平成 26 年 5 月 8 日 検査実施者

図-7 10 回定検での当該部裏波部エコーのX=0°でのY距離とW(路程), エコー高さ

超音波探傷データシートc (配管-インディケーションのマップ)

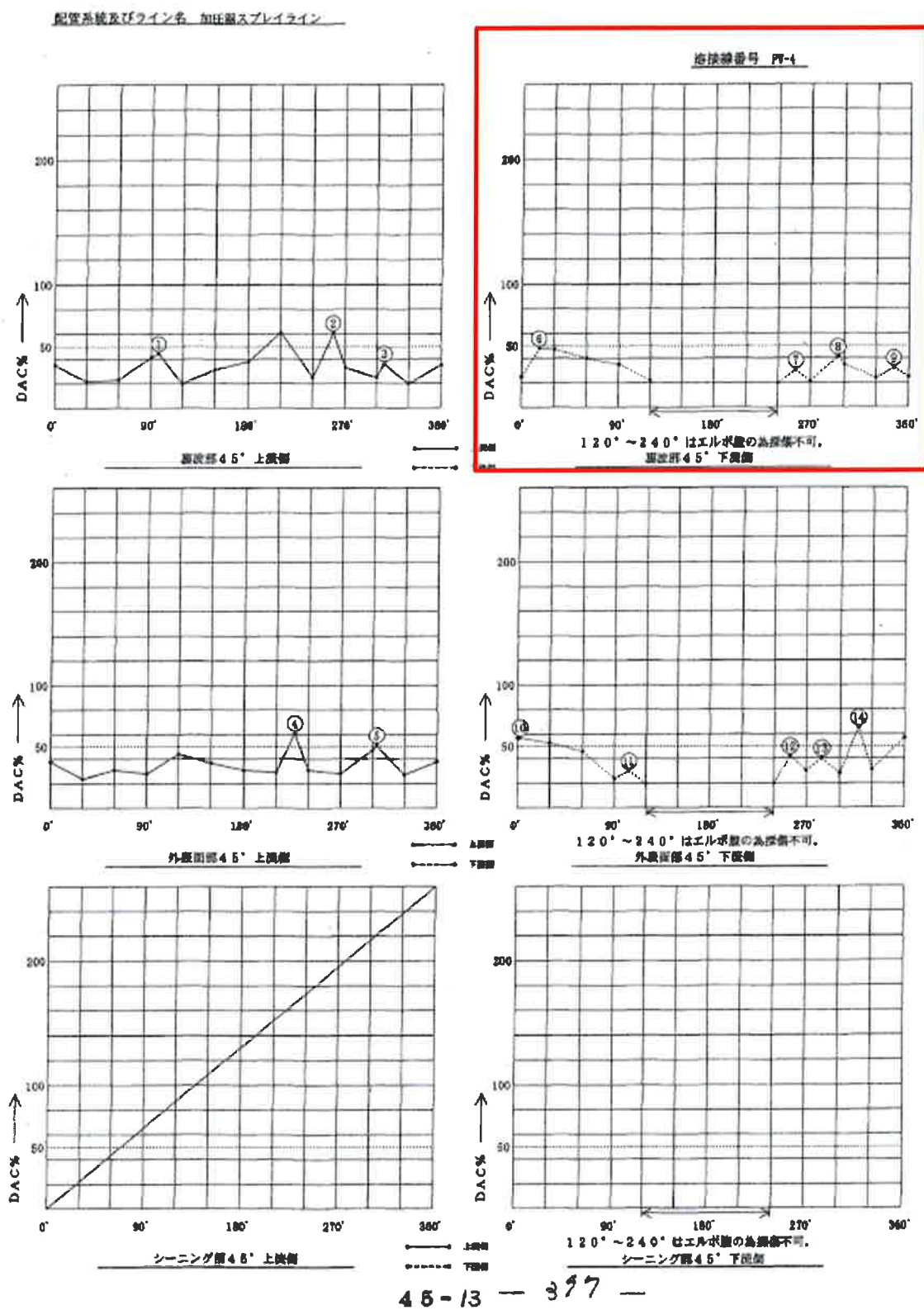


図-8 10 回定検での裏波部エコーの分布

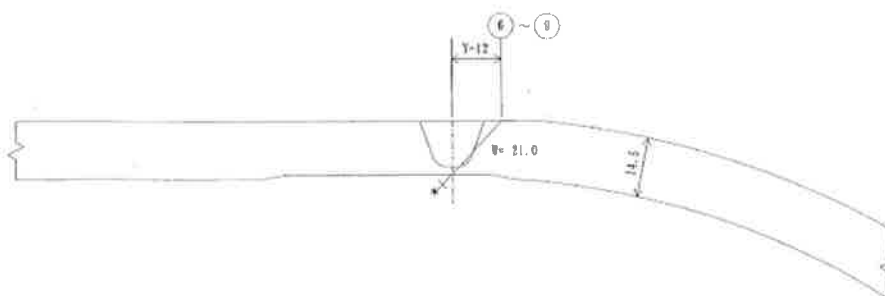
インディケーションの位置

配管系統及びライン名 加圧機スプレイトイン

縮尺: 1/1

単位: mm

図検番号 2F-4



上視側 (管台)

下視側 (エルボ)

図-9 10 回定検での当該部裏波部エコーの反射元位置

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

PSI 記録

Na _____ 超音波探傷データシート (配管-インジケーションの記録)

RCS
配管系統及びライン名 加圧器スプレイン Dループ(4B) H2-3911015
溶接継ぎ目 FW-4

上流側 ノズル 下流側 エルボ 探傷角度 45° 単位: mm

探傷サイド	ピーク指示部					20% DAC		100% DAC		備 考
	X	Y	W	CRT%	DAC%	指示範囲	指示長さ	指示範囲	指示長さ	
V	240°+21	13	20	61	57	全周 ~	359	— ~ —	—	インジケーションNo. 1 ★ 直 部 アーチメントCマノゾル 1
V	210°+17	28	38	34	37	全周 ~	359	— ~ —	—	インジケーションNo. 2 外表面部 アーチメントCマノゾル 2
V	300°+11	14	21	45	44	240° ~ 120°	240	— ~ —	—	インジケーションNo. 3 直 部 アーチメントCマノゾル 3
V	300°+19	30	39	44	48	240°+20 ~ 60°+16	176	— ~ —	—	インジケーションNo. 4 外表面部 アーチメントCマノゾル 4
						~		~		
						~		~		
						~		~		
						~		~		
						~		~		
						~		~		
						~		~		

JIS B 7711 (昭和46)

試験日付 H2.9.29試験員 XXXXXXXXXX (LEVEL Ⅱ)

三菱重工業株式会社 神戸造船所

図-10 PSIでの当該部裏波エコーピーク指示位置とエコー高さ

No. _____ 超音波探傷データシート b (配管インジェクションの記録)
 RCS H2-3911015
 配管系統及びライン名 加圧器スプレイン DL-7(4B) 溶接番号 FW-4 探傷角度 45°

X位置	上流 (ノズル)								下流 (エルボ)							
	内面				外面				内面				外面			
	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y	W	CRT (%)	DAC (%)	Y	W	CRT (%)	DAC (%)	Y	W	CRT (%)	DAC (%)
0°	14	21	22	21	30	39	20	22	13	21	28	27	29	39	30	33
30°	15	22	29	24	30	39	20	22	13	21	24	23	29	39	35	38
60°	14	21	22	21	26	38	20	22	14	21	22	21	30	40	30	32
90°	14	21	32	31	27	39	21	23	14	21	22	21				
120°	14	21	21	20	27	39	21	23	13	20	21	20	—	—	—	—
150°	13	20	25	23	28	40	20	22	—	—	—	—	—	—	—	—
180°	14	21	26	25	27	39	20	22	—	—	—	—	—	—	—	—
210°	14	21	44	43	29	39	24	26	—	—	—	—	—	—	—	—
240°	14	21	22	21	28	39	26	28	14	21	21	20	—	—	—	—
270°	14	21	27	26	29	40	19	20	13	21	22	21	31	40	21	23
300°	15	21	26	25	28	40	22	24	14	20	21	20	31	40	30	32
330°	14	21	21	20	27	39	18	20	14	21	21	20	30	39	35	38
備考	データシートCマフホ. 1				データシートCマフホ. 2				データシートCマフホ. 3				データシートCマフホ. 4 空欄は記録レベル以下			

船舶名: 5129 号 (原ヤ検)

試験日付 H2.9.29

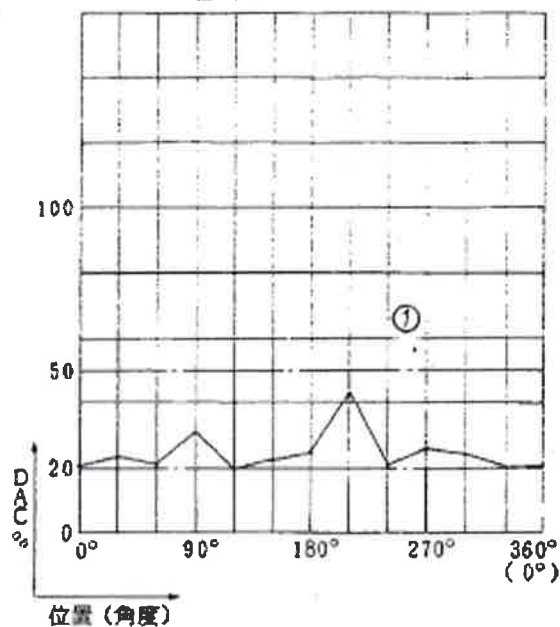
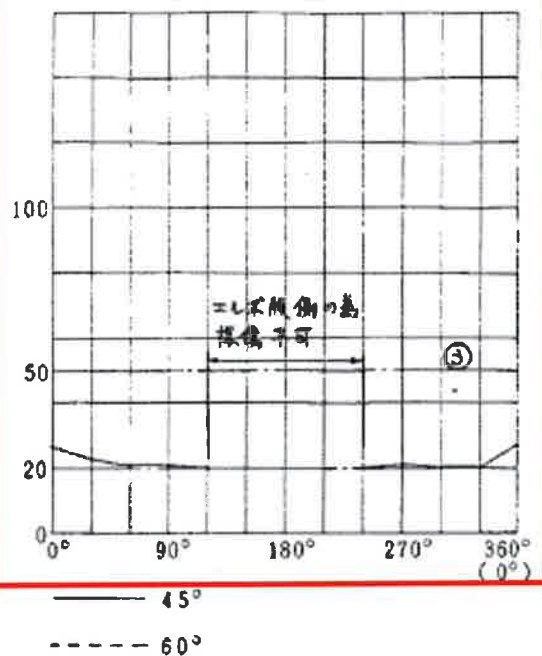
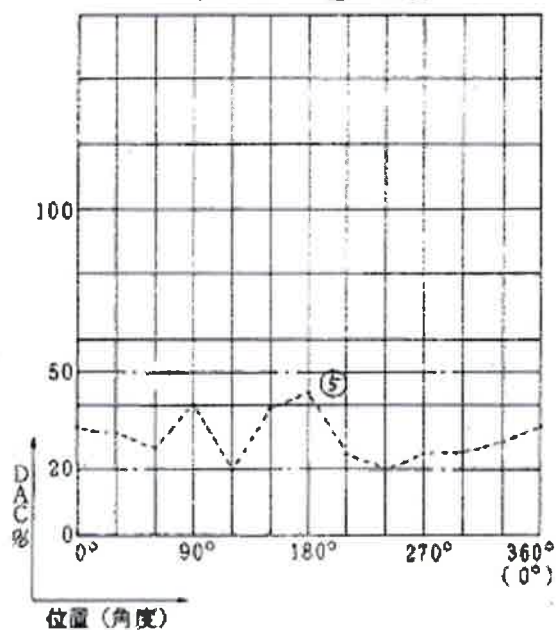
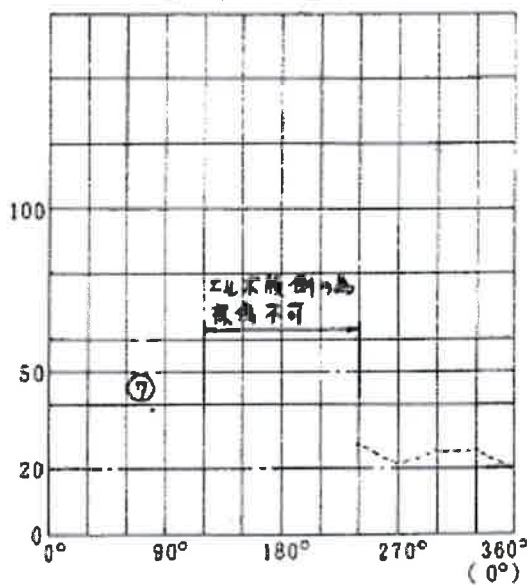
試験員

図-11 PSI での当該部裏波部エコーの X=0° での Y 距離と W(路程), エコー高さ

超音波探傷データシート c (配管-インジケーションのマップ)

H2-3912015

No. _____

配管系統及びライン名 加圧器スプレイン DILP (4B)溶接線番号: FW-4マップ No. ☒ 内面 ☒ 上流側
☐ 外面 ☐ 下流側マップ No. 3 ☒ 内面 ☐ 上流側
☐ 外面 ☒ 下流側マップ No. 5 ☒ 内面 ☒ 上流側
☐ 外面 ☐ 下流側マップ No. 7 ☒ 内面 ☐ 上流側
☐ 外面 ☒ 下流側日付 H2.9.29 試験員 _____

三菱重工業株式会社 神戸造船所

神船生 5130号 (原+換)

—1541—

図-12 PSI 回定検での裏波部エコーの分布

PSI / ~~ISI~~ 試験記録

(インジェクションの記録) H2-3911015

試験方法: ☐ PT: 液体浸透探傷試験 ☐ MT: 磁粉探傷試験
☐ VT: 肉眼試験 ☒ UT: 超音波探傷試験

No.

機 器 名	試 験 箇 所	溶 接 線 番 号
第一種管の耐圧部	RCS 加圧器スプレイン DIL-P(4B)	FW-4

スケッチ

縮尺 実寸
単位: mm

45°裏波部 (No. 1, 3)
 〃 外表面部 (No. 2, 4)
 SUS
 (裏面屈折角: 42.7°)

上流側(ノズル) 下流側(エルボ)

60°裏波部 (No. 5, 7)
 〃 外表面部 (No. 6, 8)
 SUS
 (裏面屈折角: 55.4°)

上流側(ノズル) 下流側(エルボ)

記事: 差: 波形の劣化を注で確認

試験日付 H2.9.29

試験員

号外(57, 8, 5) 図+品

-1544-

R 0077

ニ能研工業株式会社 技術開発部

図-13 PSIでの当該部裏波部エコーの反射元位置

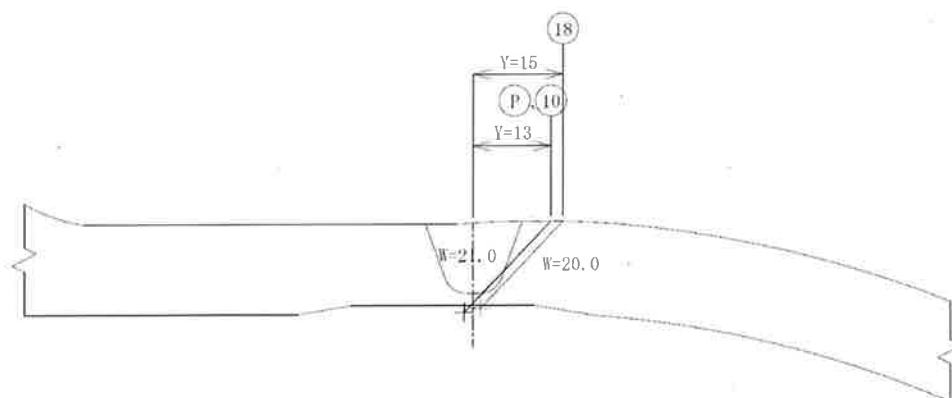
溶接線番号 FW-4

図-14 当該指示と過去記録情報の解析図比較

 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

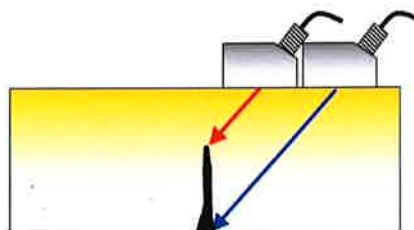
欠陥深さ寸法測定結果について

1. 欠陥深さ寸法測定手法

● フェーズドアレイによる端部エコー法

超音波を集束させたフェーズドアレイ探触子（32 チャンネル）を用い、きず等の先端から発生するエコー（端部エコー）を検出し、超音波の伝搬距離からきず等のき裂深さを求める手法。（図-1 参照）

なお、指示部の板厚は超音波厚さ計による実測値（14.0mm）を用いた。



— ①欠陥コーナ部エコー
— ②欠陥端部エコー

図-1 端部エコー法による欠陥深さ寸法測定方法

2. 欠陥深さ寸法測定結果

通常 UT にて、不連続部エコーの高さが DAC20%を超えた範囲（67mm； 0° -24mm ~ 30° +13mm）に対して欠陥深さ寸法測定を実施した。その結果、最大き裂深さ情報は以下の通りであった。（図-2 参照）

- 最大き裂深さ位置： 0° +3mm
- 最大き裂深さ： 4.6mm

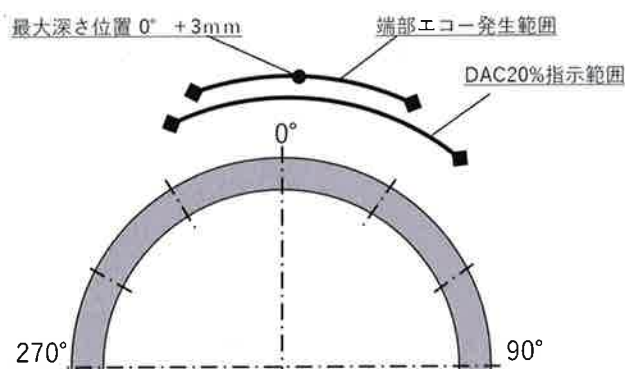


図-2 欠陥深さ寸法測定結果概要（MCP 側から見た図）

上記欠陥深さ寸法測定結果に加え、以下の計測結果も踏まえ、き裂モデル化のインプット情報を下表にまとめる。

インプット情報	寸法	備考
き裂深さ	4.6mm	端部エコー法を適用
き裂長さ	67mm	通常 UT における DAC20%指示範囲 (JEAC4207 解説 2720-2)
当該部板厚	14.0mm	超音波厚さ計を使用※

※JEAC4207-2008 2712 項では、反射源位置の解析としてビーム路程、屈折角、試験部の厚さ等から反射源位置の解析を行うこと及び、その反射源が欠陥によるものか試験部の金属組織的变化に起因するものかを判断するために解析を行う要求がある。さらに、JEAC4207-2008 解説-2712-1(3)では、“内面形状変化がある場合で、反射源の種類に分類に影響を与えると判断される場合は、詳細板厚測定を実施することが望ましい。”とある。今回は対象となる継手は形状変化が無く平坦であることから、当該指示部及び周辺の板厚計測を行っている。

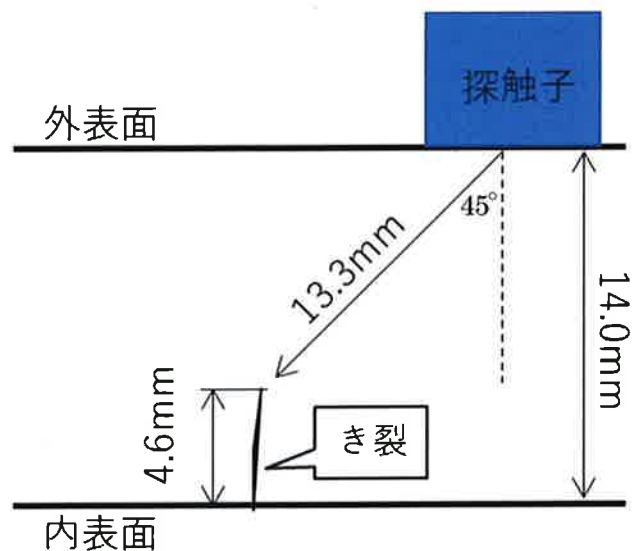
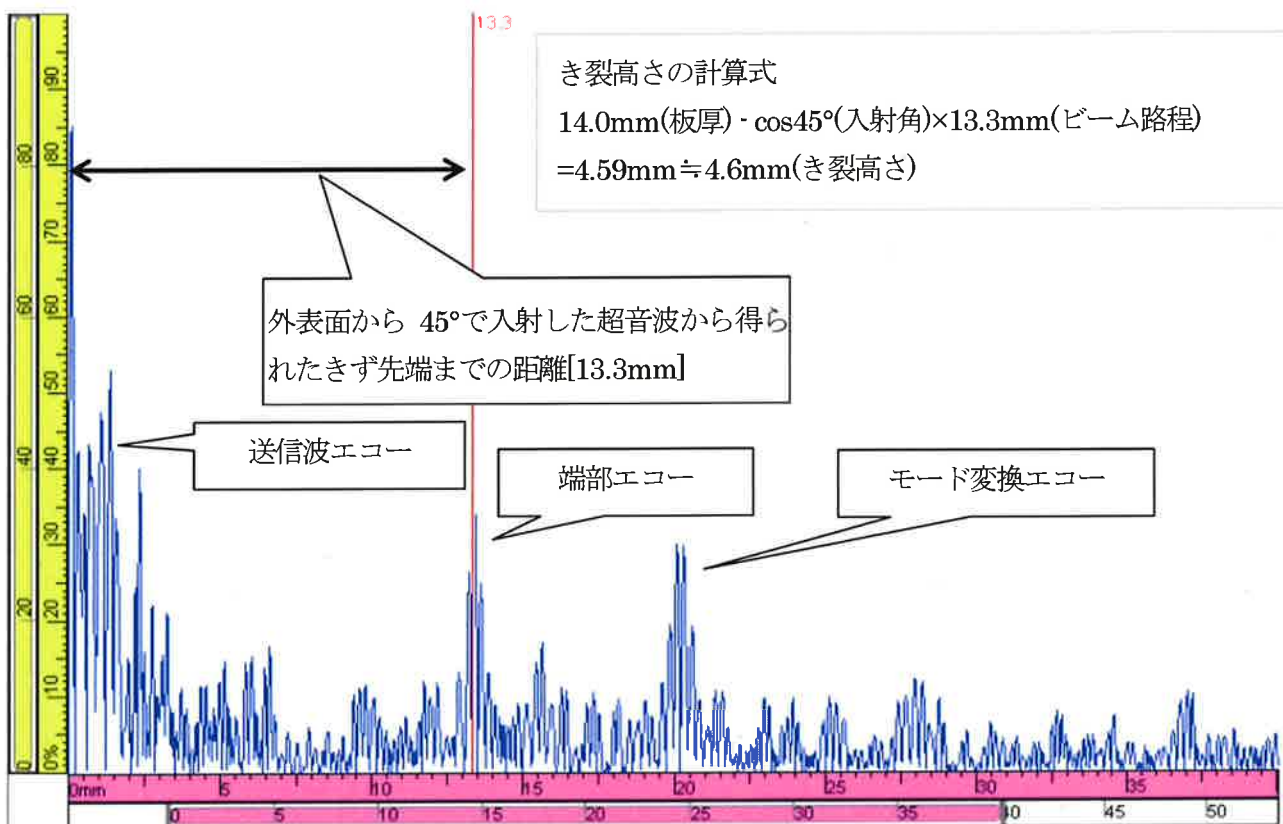


図-3 A スコープ及び探傷模式図

送信波エコーと端部エコー、モード変換エコーそれぞれの解説を下記に示す。

①送信波エコー（送信波と表面形状によるノイズの混在エコー）

今回適用した PA プローブは、超音波の送信と受信が同じ振動子（一振動子型探触子）であり、一振動子型探触子は A スコープ上の路程の短い範囲に送信波が表示される。

また、探傷面の凹凸により探触子接触面との間に接触媒質の層が生じ、その層間で超音波が多重反射したノイズエコーが発生し、前述の送信波と混在したエコーとして検出される。

②端部エコー

き裂の先端部を検出したエコー。き裂の先端部に超音波が当たると散乱波が発生(図-3.2)し、これが強いエコーとなり検出したものが表示される。

なお、この端部エコーのピーク値を示したときのビーム路程と探触子の屈折角から幾何学的にき裂高さを求める方法を“端部エコー法”という。

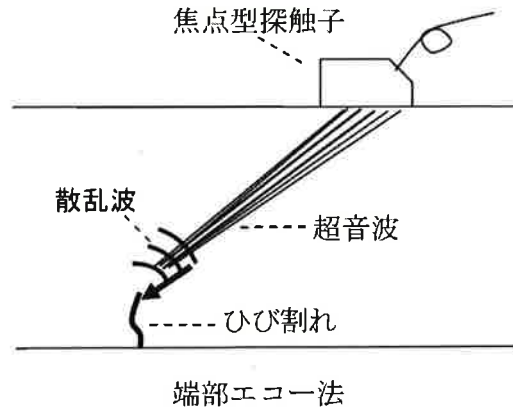


図-4 端部エコーのイメージ

③モード変換エコー

モード変換とは、底面や欠陥等の反射源で超音波が反射する際に、超音波のモード（縦波と横波）が変化することである。

今回の欠陥深さ寸法測定に用いた探触子における超音波のモードは縦波であり、当該部の欠陥深さ寸法測定にて、モード変換が生じない場合（モード①“縦波-縦波”）とモード変換が生じる場合（モード②“縦波-横波”）の両方が起きる。これらモード変換により生じる縦波と横波の音速の違いから、A スコープ上横軸におけるエコー表示位置が右側（超音波が帰ってくるまでの時間が遅い側）にエコーが生じる。図-3.3 に示すように、モード①としての縦波エコー及び、モード②としての横波エコーが得られることが分かっている。

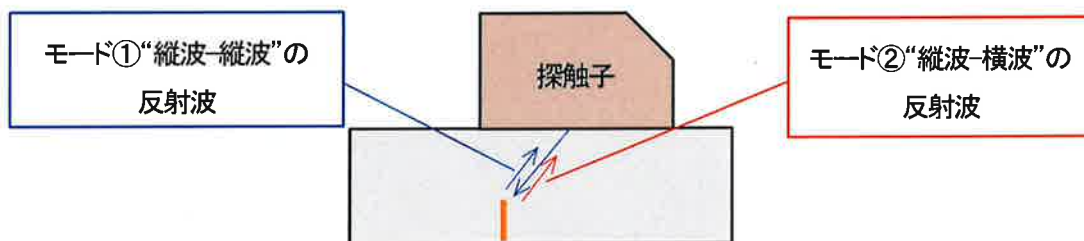


図-5 欠陥に対するモード変換例

フェーズドアレイ法による端部エコー法を用いた際の亀裂深さ読み値の考え方について

1. 亀裂深さ測定に係る NRA 要求事項について

NRA から発行されている「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亀裂その他の欠陥の解釈（以下亀裂の解釈）」において、“亀裂等のサイジングは、超音波探傷試験規程に規定する方法又は欠陥評価の保守性を考慮して十分な精度を有すると認められた方法で行うこと”と要求されている（別添-1）。ここでいう欠陥評価の保守性を考慮して十分な精度を有すると認められた方法とは、JEAC4207-2008 にて NDIS0603 によって認証された PD 資格が該当すると解説されている（別添-2）。

2. NDIS0603 における PD 資格の認証区分について

NDIS0603:2015 では、溶接部の構成に応じて認証の対象範囲を以下附属書 A～C の 3 つに区分している。これら認証区分のうち今回対象となる SUS316TP の配管溶接部は、附属書 A のオーステナイト系ステンレス鋼配管溶接部に該当する。

附属書 A：オーステナイト系ステンレス鋼配管溶接部

附属書 B：ウェルドオーバーレイ施工部

附属書 C：異種金属継手

3. 要求事項に基づく三菱による亀裂深さ測定の対応方針

NDIS0603 に基づき、オーステナイト系ステンレス鋼配管溶接部の区分にて認証された PD 有資格者（別添-3 に手順書記載の探触子及び装置、別添-4 に資格証を示す）による欠陥深さ寸法測定を行い、その測定値を亀裂進展評価に用いる。

4. PD 認証制度制定に至る背景とその運用

原子力プラントの供用期間中には、溶接金属近傍に亀裂等が発生することがある。この対策とし、2000 年に供用期間中における機器・配管などの設備の健全性評価と維持を目的として維持規格が発行（2003 年より適用）、検出された亀裂の破壊力学的評価を行って運転継続の可否と補修・取替の必要性の判定を規定しており、UT の欠陥深さ寸法測定に関しては検出精度を安全側に考慮して欠陥寸法を評価する旨規定されている。

一方で東京電力柏崎刈羽原子炉再循環系配管（PLR 配管）の亀裂調査では通常 UT による欠陥寸法の測定が行われたものの十分な精度が得られず、測定値が過小評価となる欠陥がいくつか認められた。これを受けて実施した「UT による再循環系配管欠陥深さ寸法測定精度向上に関する確性試験」などからその成果は国に認められたものの、UT の欠陥深さ寸法測定結果に対し安全側に考慮して 4.4mm 加算することとなった。

その後、UT の欠陥深さ寸法測定技術はフェーズドアレイ法等を用いた技術の高度化が行われ、同時に JISZ2305 に基づく UT 技術者のみを対象にした認証だけでなく、UT 技術者、探傷装置及び手順書を一体とした UT システム（亀裂深さ寸法測定能力）としての性能実証の必要性が浮き彫りとなり、NDIS0603 に基づく専門機関が認証する PD 認証制度が整備され、国にオーソライズされた。以降 PD 有資格者による欠陥深さ寸法測定の読み値がそのまま採用されることが認められ、運用されてきた。（別添-5）

以上

原規技発第 1906051 号 原子力規制委員会決定 令和元年 6 月 5 日 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亀裂その他の欠陥の解釈 改正の抜粋

改 正 後	改 正 前
ただし、2次クリーピング波法による有意なエコー（超音波探傷試験規程において記録することとされているものをいう。）を亀裂からのものではないと判断する場合にあっては、判定結果について第三者を交えて評価する体制で行うなど客観性を確保して行うこと。 また、亀裂等のサイジングは、<u>超音波探傷試験規程に規定する方法又は欠陥評価の保守性を考慮して十分な精度を有すると認められた方法により行うこと。</u>その際、低炭素ステンレス鋼管及びSUS304管の応力腐食割れによる亀裂のサイジングを行う場合にあっては、日本非破壊検査協会規格「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 0603:2005）（以下「超音波探傷試験システム認証 2005」という。）の附属書（規定）「軽水型原子力機器に対するPD資格試験」又は日本非破壊検査協会規格「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）（以下「超音波探傷試験システム認証 2015」という。）の附属書A（規定）「軽水型原子力発電所用機器のオーステナイト系ステンレス鋼配管溶接部に対する亀裂高さ測定のPD資格試験」の規定に別紙6の要件を付したものに合格し認証を受けた超音波探傷試験技術者（以下「UT技術者」という。）が同規格により認証された探傷装置を用い同規格により認証された手順書に従って行う方法により行	ただし、2次クリーピング波法による有意なエコー（JEAC4207-2008において記録することとされているものをいう。）を亀裂からのものではないと判断する場合にあっては、判定結果について第三者を交えて評価する体制で行うなど客観性を確保して行うこと。 また、亀裂等のサイジングは、<u>JEAC4207-2008に規定する方法又は欠陥評価の保守性を考慮して十分な精度を有すると認められた方法で行うこと。</u>その際、低炭素ステンレス鋼管及びSUS304管の応力腐食割れによる亀裂のサイジングを行う場合にあっては、日本非破壊検査協会規格「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 0603:2005）の附属書（規定）「軽水型原子力機器に対するPD資格試験」に合格し認証を受けた超音波探傷試験（以下「UT」という。）技術者が同規格により認証された探傷装置を用い同規格により認証された手順書に従って行う方法（以下「PD認証方法」という。）により行うこと。

JEAC4207-2008 附属書 A-1100 及び附属書解説 A-1100-1 の抜粋

A-1000 総 則

A-1000 総 則

A-1100 目 的

本附属書は、超音波探傷試験による欠陥深さ寸法測定に適用可能な要領を示す。ただし、これ以外の方法であって、欠陥評価の保守性を考慮して十分な精度を有すると認められた方法により、欠陥深さ寸法測定を行ってもよい。(解説 A-1100-1)

また、欠陥深さ寸法測定は、複数の手法又は複数の測定条件で行い、総合的に評価する。(解説 A-1100-2)

A-1200 適用範囲

容器(管台内面の丸みの部分を含む。)及び配管の突合せ溶接継手(容器管台とセーフエンドとの異種金属突合せ溶接継手を含む。)に適用する。

なお、上記以外の部位で本附属書が適用できると判断される場合は、これを準用してもよい。(解説 A-1200)

A-1210 適用手法

モード変換波法、タンデム法、端部エコー法、TOFD 法及びフェーズドアレイ法による欠陥深さ寸法測定要領について示す。(解説 A-1210)

A-1220 適用部位

A-1210 項に示す手法は、それぞれ次に掲げる部位に適用できる。(解説 A-1220)

A-1221 モード変換波法

- (1) 試験部の厚さが 10mm 以上 51mm 以下のフェライト鋼系配管及び容器(クラッドなし)の突合せ溶接継手
- (2) 試験部の厚さが 10mm 以上 51mm 以下のオーステナイト系ステンレス鋼配管の突合せ溶接継手

A-1222 タンデム法

試験部の厚さが 10mm 以上 51mm 以下のオーステナイト系ステンレス鋼配管及び容器(クラッドなし)の突合せ溶接継手

A-1223 端部エコー法

- (1) 試験部の厚さが 10mm 以上のフェライト鋼系配管及び容器(クラッドなし)の突合せ溶接継手

A-1000 総 則

解説 A-1100-1 PD 認証を取得した試験技術者、探傷装置及び手順書を用いて欠陥深さ測定を行う場合

NDIS 0603（以下 PD 認証と略す）の附属書によって認証された範囲において超音波探傷試験技術者、探傷装置及び手順書を用いた欠陥深さ寸法測定を行う場合には、JEAC 4207-2008 で定められている超音波探傷試験に係る適切な試験方法、必要な技量の取得及び維持を満たすものとして、A-1100 項による「欠陥評価の保守性を考慮して十分な精度を有すると認められた方法」と見なしてよい。

解説 A-1100-2 欠陥深さ寸法測定の実則

き裂の深さは、浅いものから深いものまで想定して、き裂先端を厚さ方向全体にわたって確認する。このために複数の手法の組合せ又は複数の測定条件で、総合評価することを要求した。

適用する手法の組合せ等については、適用部位、想定される欠陥等に応じて個別に定めることとなるが、「UTS」及び「PLR 配管サイジング精度確性試験」においては、次のような手法の組合せが用いられており、これらを参考にしてもよい。

モード変換波法が適用可能な部位については、欠陥深さ測定に際し、モード変換波法により欠陥深さを推定するものとする。ただし、技術的妥当性を確認できれば PD 又は海外で欠陥深さ測定の認証を取得した手法、探傷装置及び有資格者により欠陥深さ測定を行う場合に限り、モード変換波法による欠陥深さの推定を省略することができる。

〔適用する手法の組合せの例〕

- ① モード変換波法、タンデム法及び端部エコー法又は TOFD 法との組合せ
- ② 端部エコー法（縦波/横波、複数の屈折角の組合せ）
- ③ フェーズドアレイ法と端部エコー法の組合せ
- ④ TOFD 法（複数の交軸の組合せ）
- ⑤ フェーズドアレイ法（焦点、屈折角等に関する任意の複数条件）

解説 A-1200 適用範囲

(1) 適用範囲

本附属書は、容器と配管の突合せ溶接継手を適用範囲とし、具体的には、下記 a, b の範囲及びこれと同等な欠陥深さ寸法測定要領が適用可能と判断される範囲とした。

また、その他の部位（例えば、シュラウド等の炉内構造物）への適用についても本附属書の適用が可能と判断されれば用いてもよいこととした。

- a. 原子力発電施設検査技術に関する試験研究事業（平成 4 年度～15 年度上半期に、勸発電設備技術検査協会が経済産業省原子力安全・保安院からの委託により実施した事業、及びこれを引き継いで平成 15 年度下半期～平成 16 年度に、㈱原子力安全

PD 認証に用いた手順書

軽水型原子力発電所機器の供用期間中検査における
オーステナイト系ステンレス鋼配管突合せ溶接継手の
超音波探傷試験によるき裂高さ(深さ)測定要領

三菱重工原子力技術資料：クラス B

本資料は当社及び（又は）協力会社の商業機密を含んでおりますので、本提出（貸与）目的以外に使用されることは御遠慮ください。

また、当社の同意なく本資料の全部又は一部を第三者に公開、開示されることのないように願います。

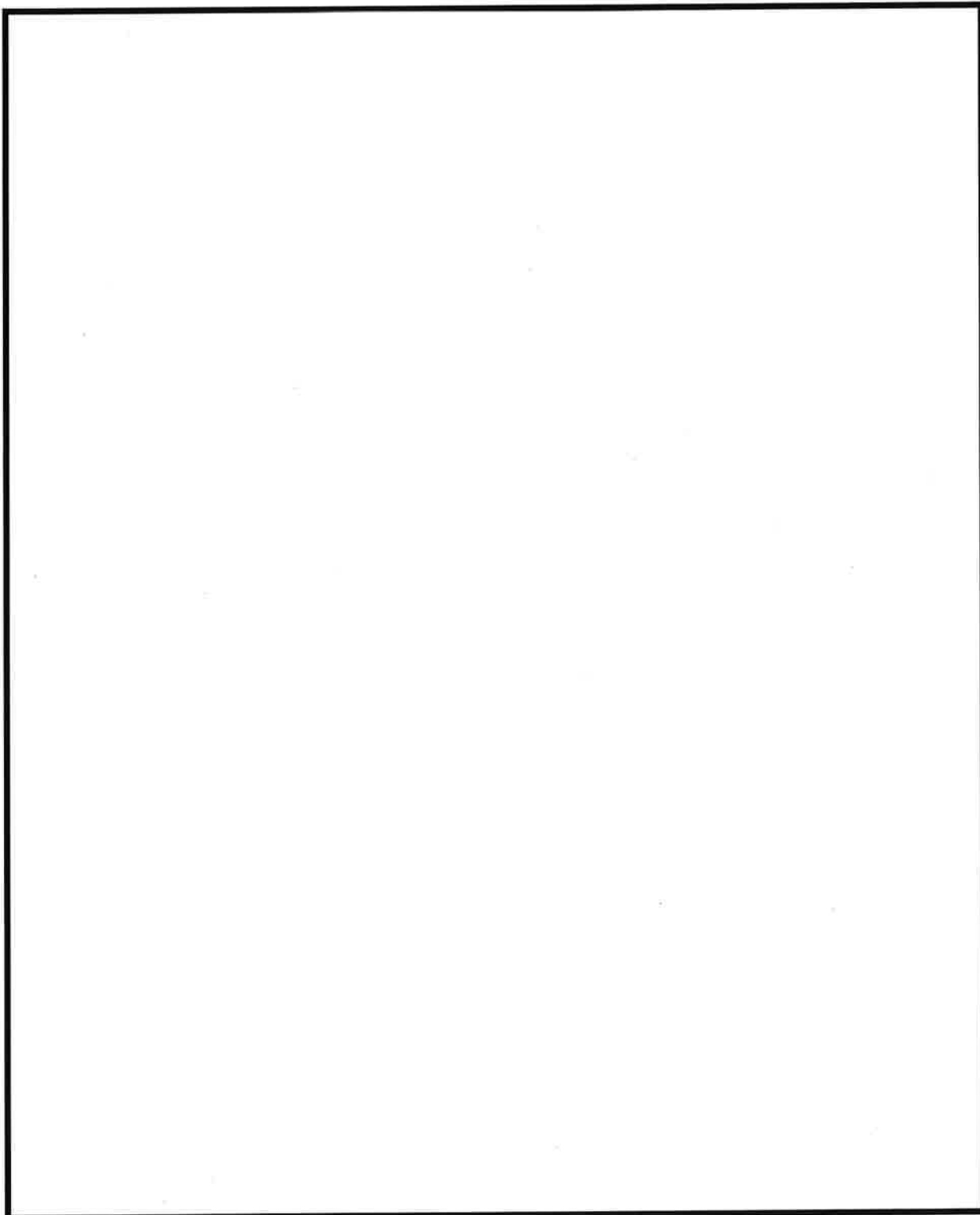
三菱重工株式会社 原子力事業部

レベル 3
承認印

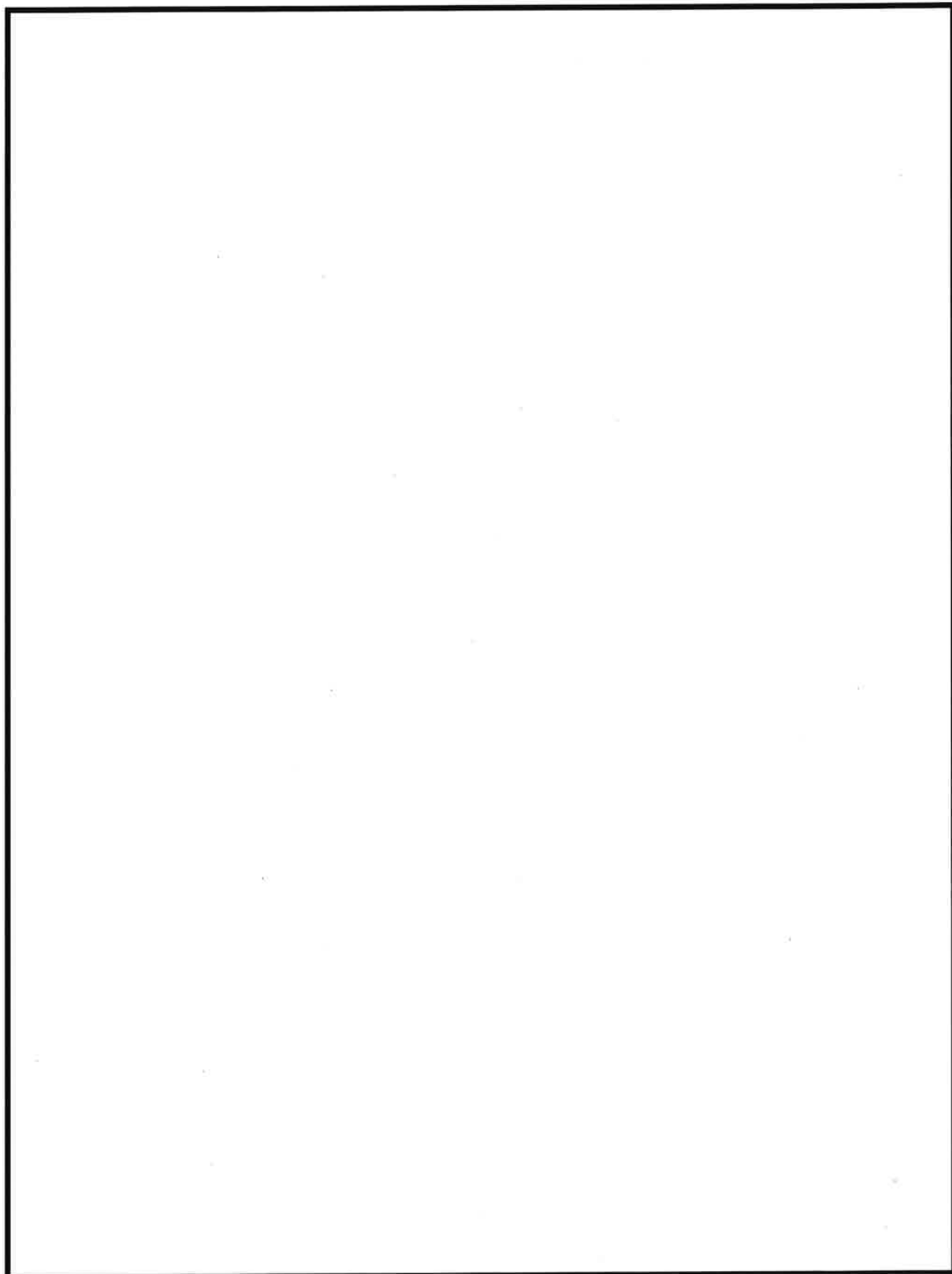


内 容		備 考	注 文 主	工事番号	年 月 日	三菱重工株式会社 エネルギー・環境・安全/原子力事業部 品質保証部 原子力サービス品質管理課	
本 文	一 頁	本書は、 UFS-20112221 R0 に対し、一部 見直しを行い再 発行するもので ある。	—	アイテム	照 合 者		
図 表	一 枚			—			
表紙共	15 枚			—			
配布先	電中研		控	図書 番号	UFS-20150150		改 正 0

（図書表紙）

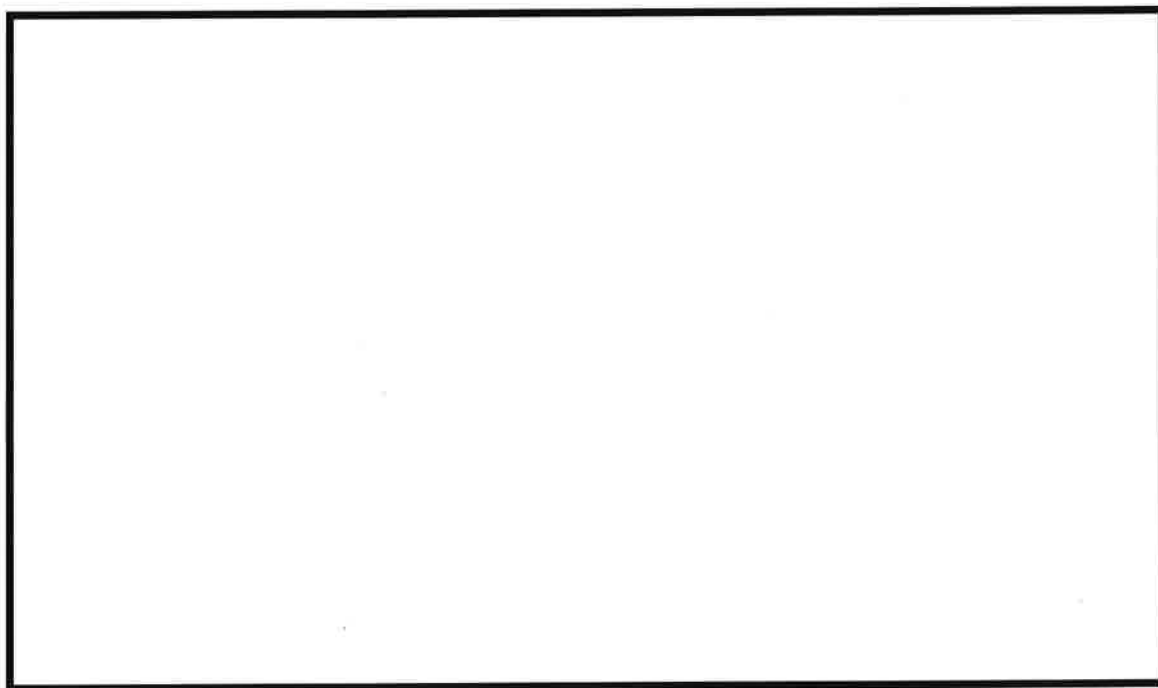


 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

NDIS0603 に基づく PD 資格証



 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

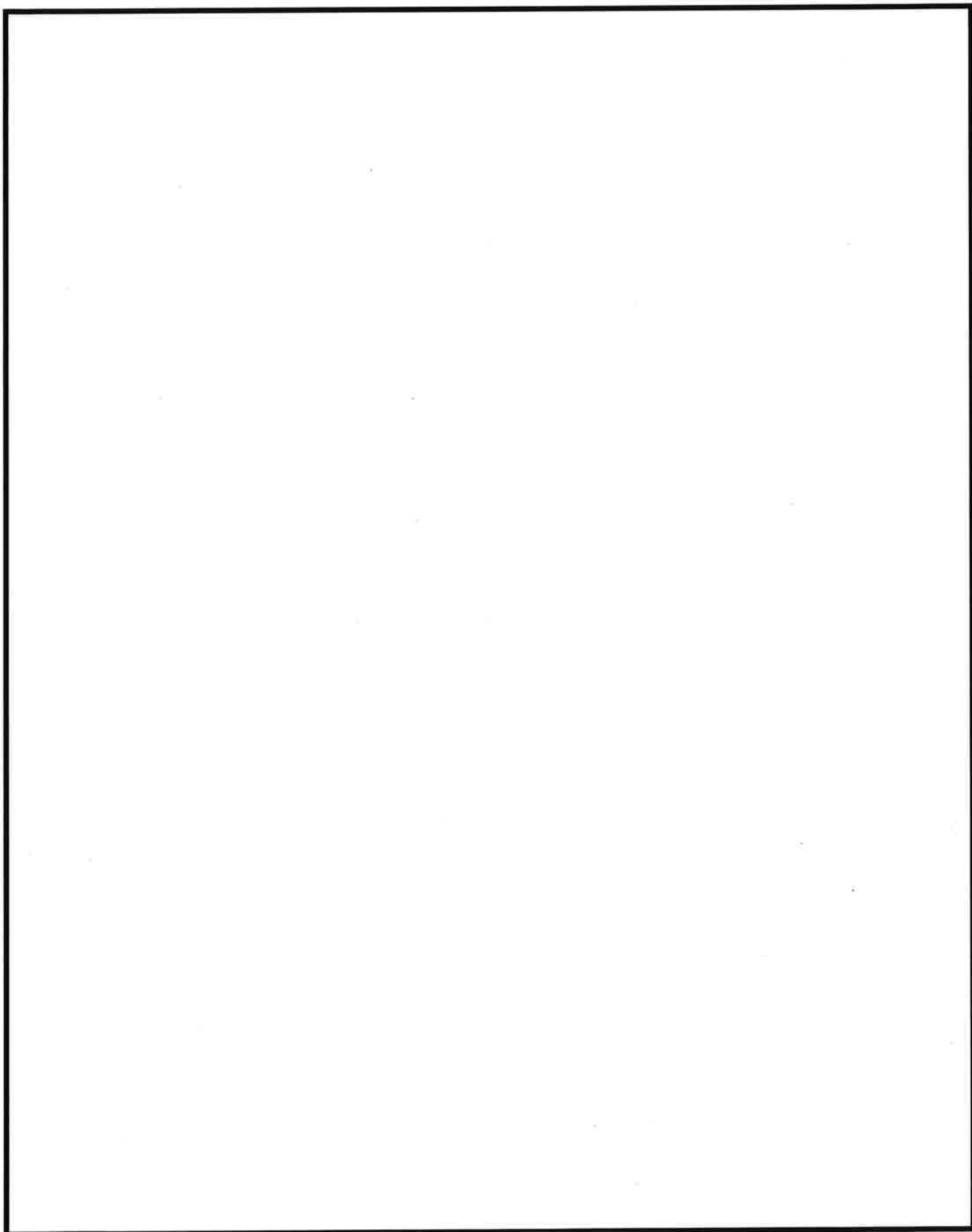
PD 資格認証制度制定による亀裂深さ測定の変遷

PD 認証制度が適用された一例として、東京電力柏崎刈羽原子炉再循環系配管の亀裂調査がある。本事例では、PD 認証制度制定前後で亀裂深さ測定が行われており、PD 資格認証制度制定前は測定値に 4.4mm を加算して健全性評価を実施しているのに対し、PD 認証制定後の 2006 年 3 月に実施した PD 資格者による測定では上記条件を解除している。時系列を以下に示す。

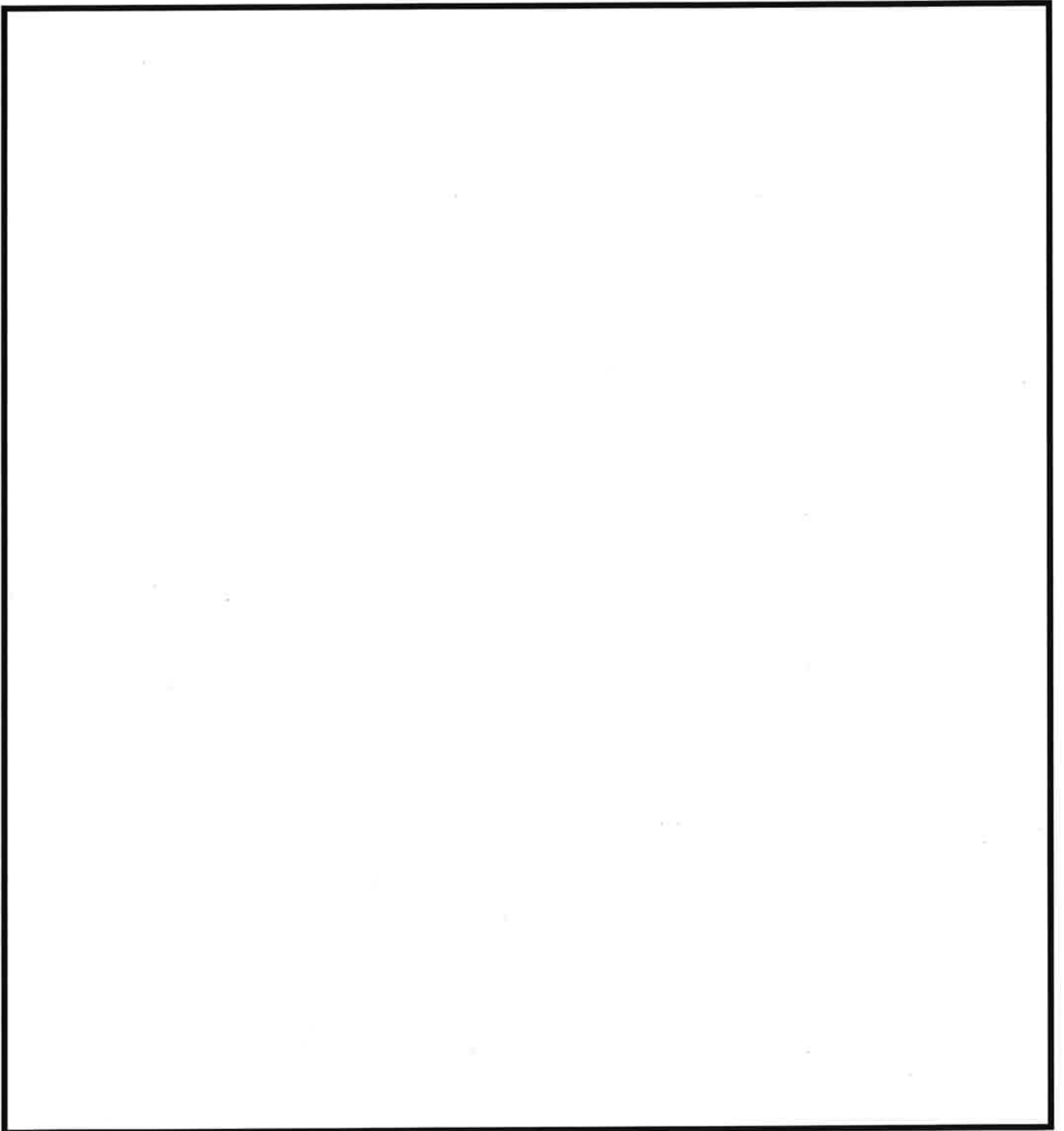
2004 年（平成 16 年）9 月	PLR 配管での条件付（ひびの深さ測定値に対し 4.4mm 加算）で健全性評価対象に追加。
2004 年 12 月	（社）日本非破壊検査協会に PD 認証精度準備委員会設置〔NDIS 原案作成委員会〕
2005 年（平成 17 年）5 月	NDIS0603「超音波探傷試験システムの性能実証における技術者の資格及び認証」制定
2006 年（平成 18 年）3 月	PD 認証制度の調整を受け、上記条件を解除

一部以下URLより抜粋。

<https://www.pref.niigata.lg.jp/uploaded/attachment/36143.pdf>

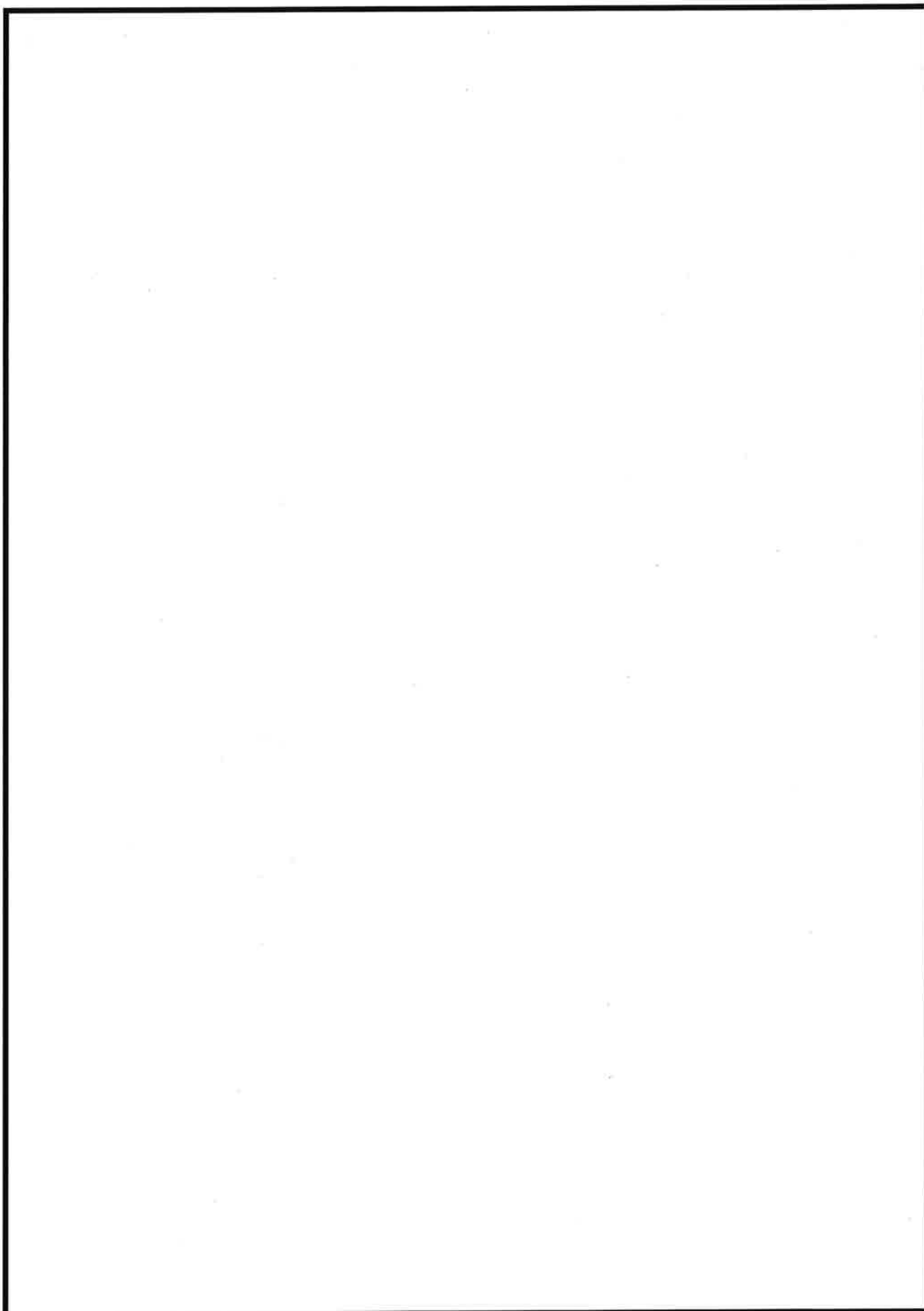


 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

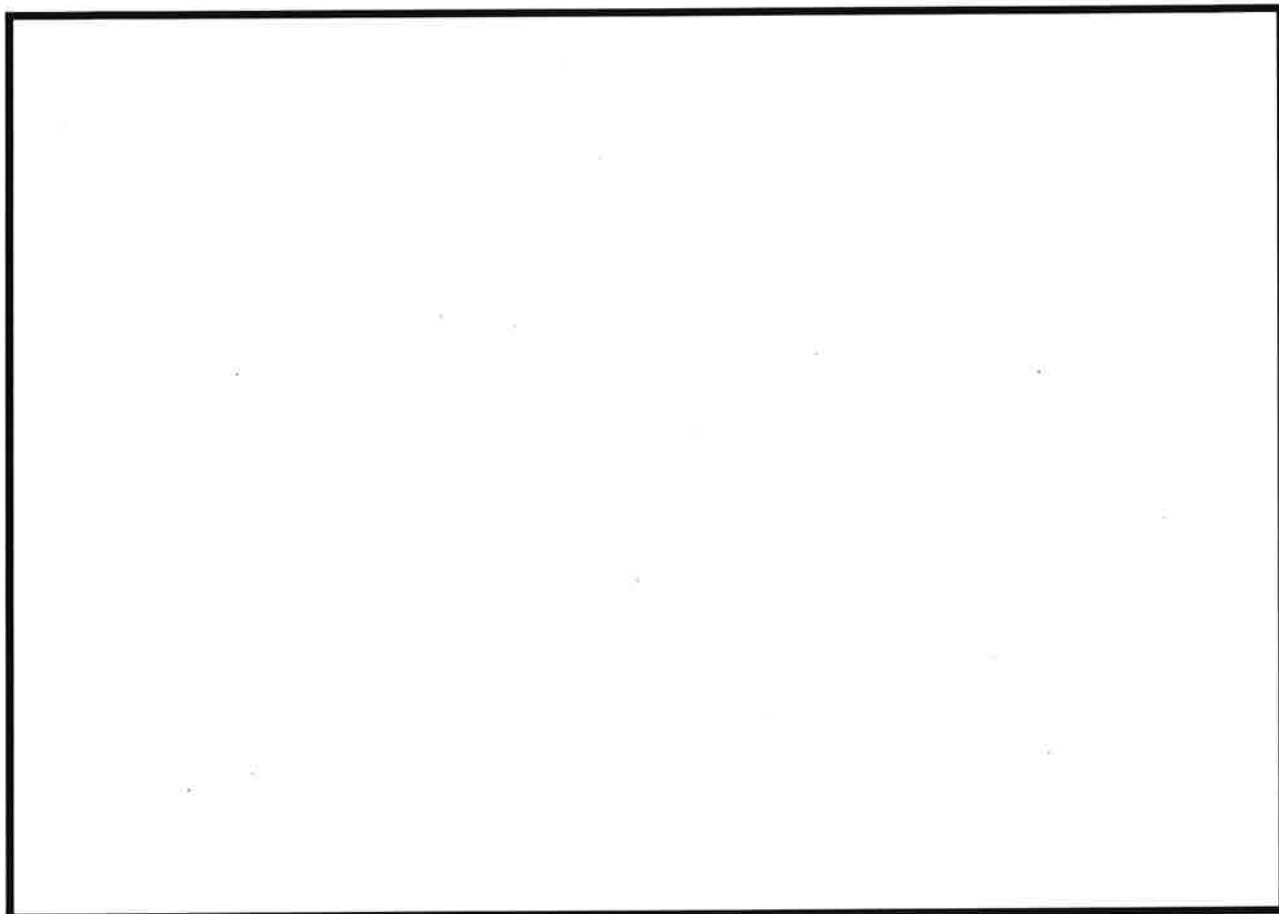


 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第二段階検査結果を受けた追加調査結果について



 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

4. 2次クリーピング波法

2次クリーピング波法とは、図-4のように、屈折角約 30° の横波が裏面で反射する際にモード変換した縦波（2次クリーピング波）に着目し、欠陥部のコーナーエコーを検出することで内表面を起点とした欠陥の有無を確認する方法である。

2次クリーピング波は内表面近傍を伝搬するため、図-5に示すように内表面を起点としたコーナーエコーが存在する場合、コーナーからの反射波検出に適している。一方、欠陥等による内表面起点のコーナー部がない場合、図-6に示すように、2次クリーピング波は裏波部に入射しにくく、裏波部による誤認が起きにくいことからコーナーエコーと裏波部からのエコー識別に有効な手法である。

今回コーナーエコーの得られた位置にて裏波部とき裂を誤認していない事を確認するため、上流側（管台側）及び下流側（エルボ側）から2次クリーピング波法にてコーナーエコーが検出可能であるか確認を行った。確認の結果（図-10）、上流側（管台側）からの探傷では記録すべき指示は無かった。一方下流側（エルボ側）からは $0^\circ - 20\text{mm} \sim 30^\circ + 3\text{mm}$ の範囲（図-11）にて、コーナーエコーが検出された。

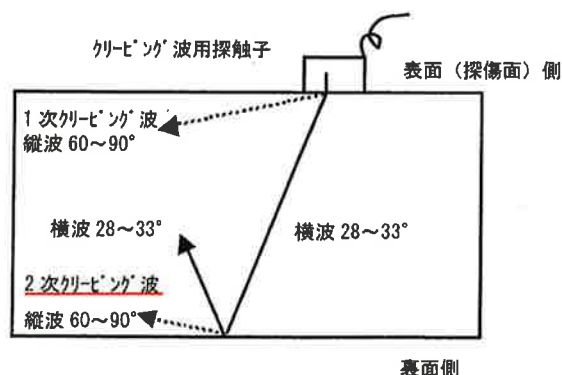


図-4 2次クリーピング波の概要（JEAC4207-2008 A-1400 抜粋）

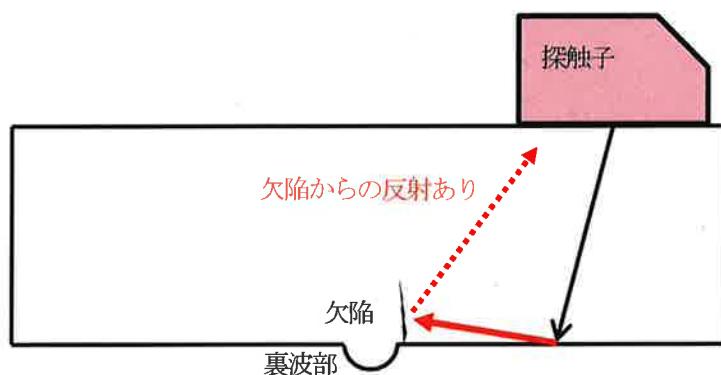


図-5 内表面を起点とした欠陥に対する2次クリーピング波の伝搬イメージ

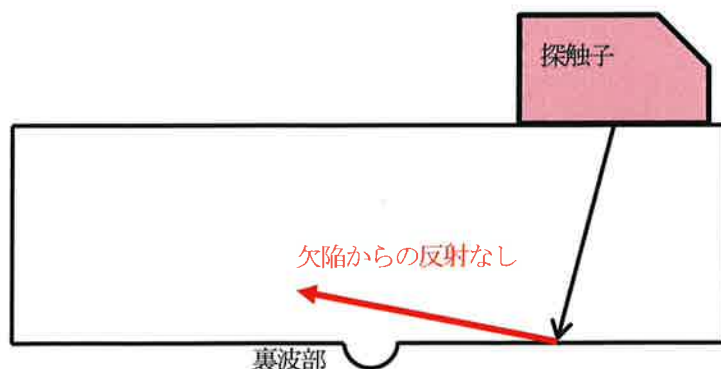
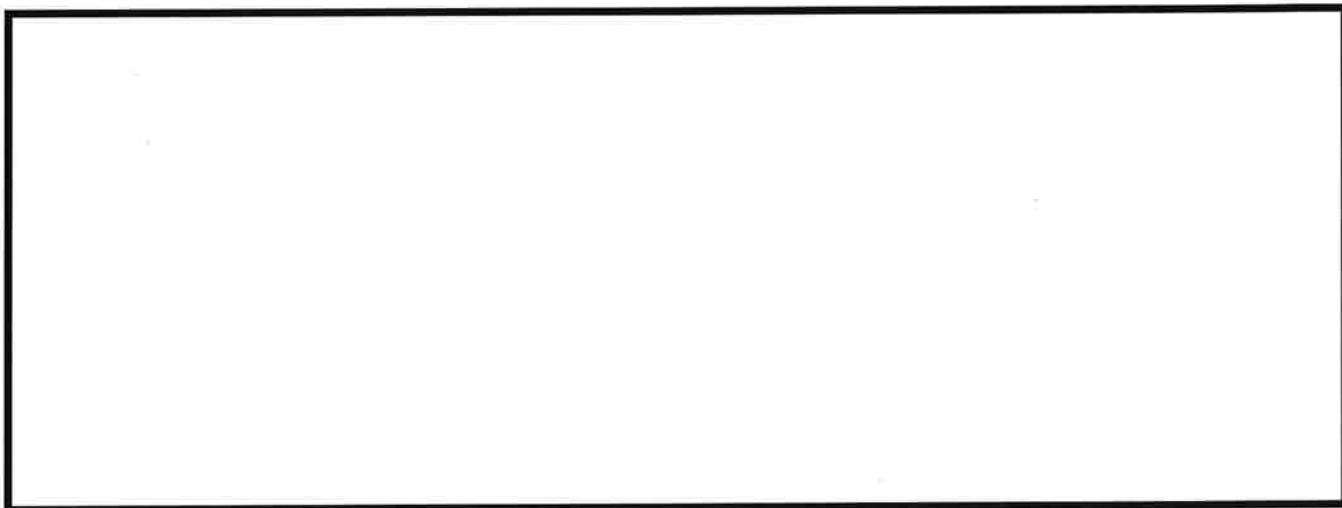


図-6 裏波部に対する2次クリーピング波の伝搬イメージ



 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

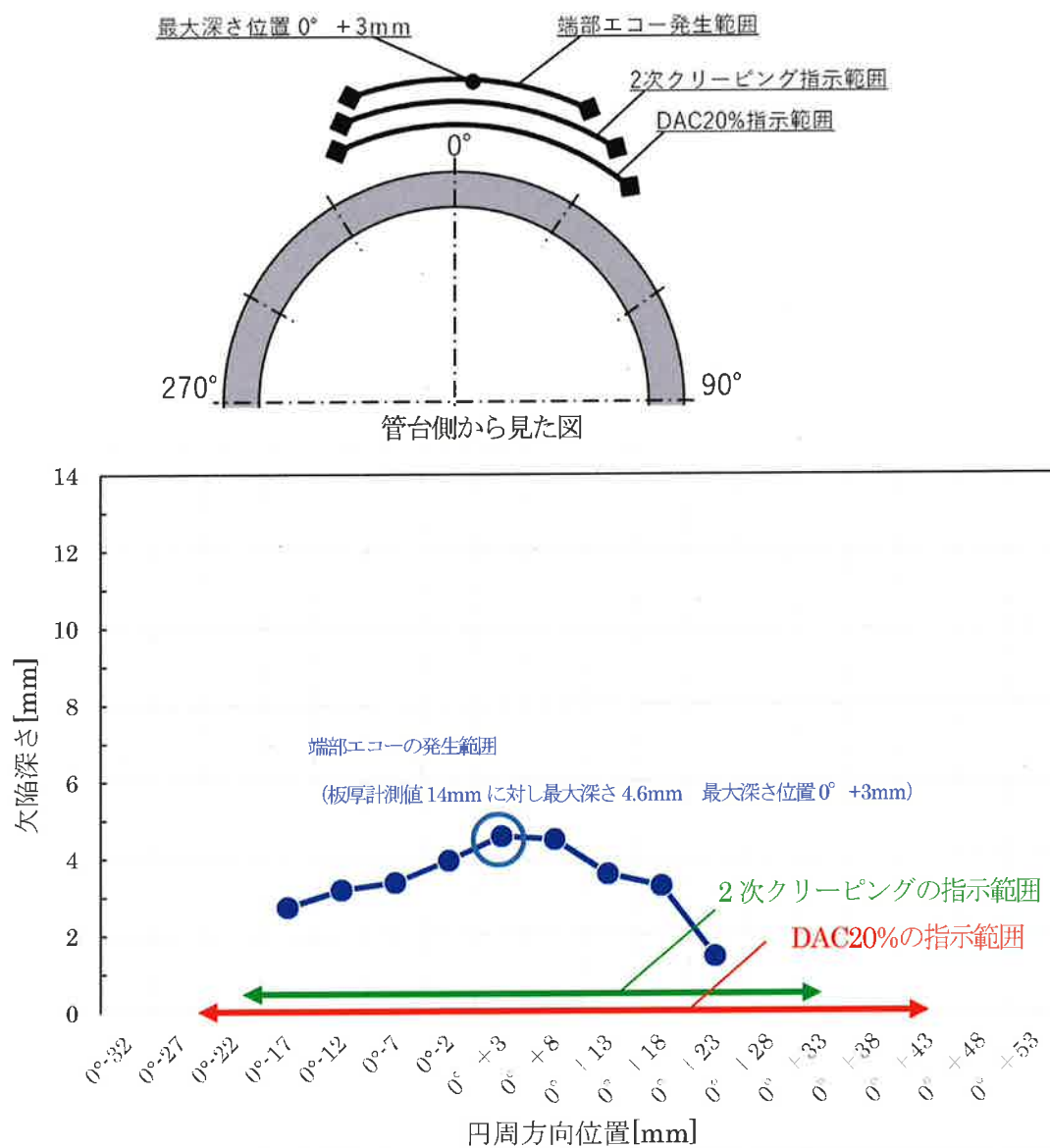


図-7 想定される欠陥性状

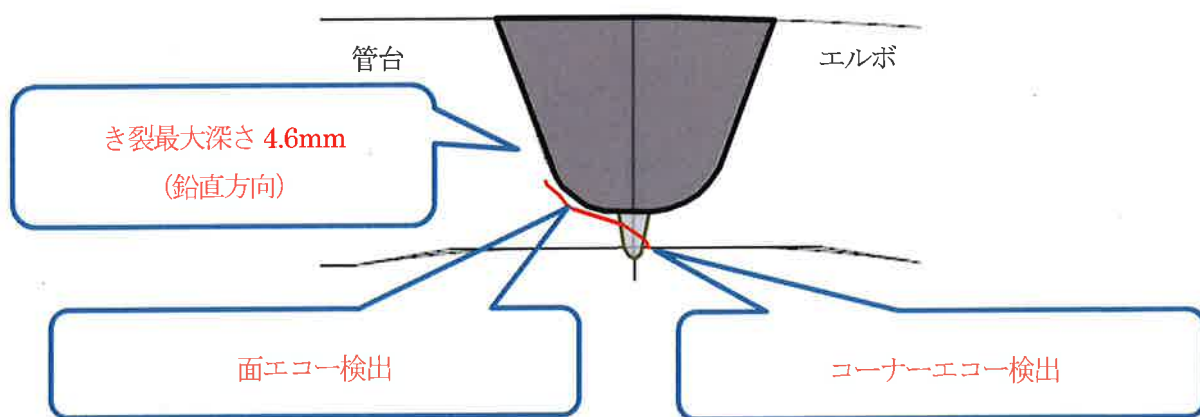


図-8 UT 結果の整理

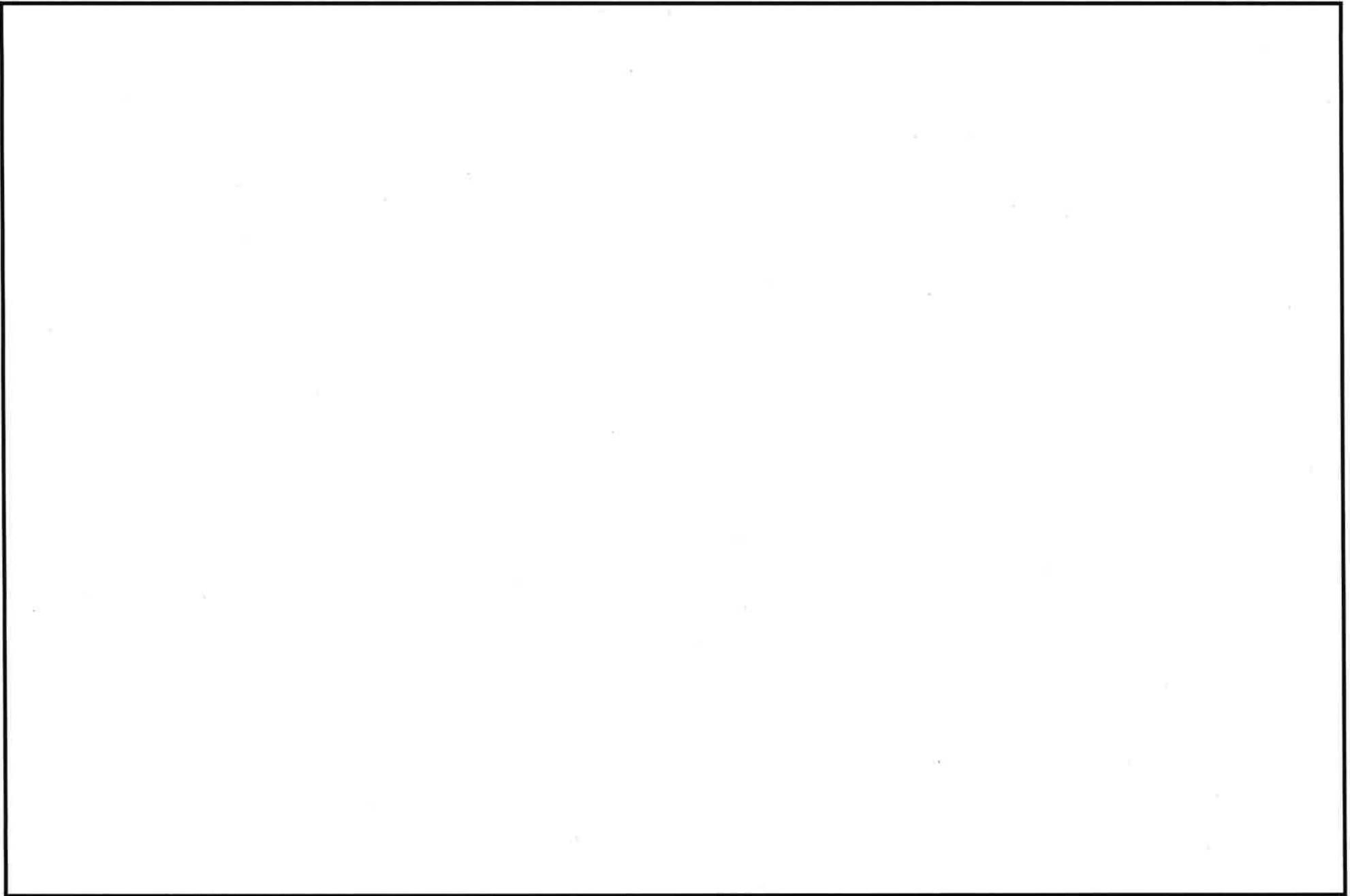


図-9 想定される欠陥性状（端部エコーのA スコープ波形）

：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

非破壊検査記録(/)

(2)検査記録

項目番号	カテゴリ	機器名	検査の対象箇所	検査箇所
B9.11	B-J	配管	配管の同種金属溶接継手 (呼び径100A以上：両継手) 加圧器スプレイライン (Dループ)	FW-4

検査実施内容	超音波探傷検査	探傷器	探触子	試験片	感度
		三菱電機株式会社 UI-25 (U109F261099)	WSY70-4 (54576-2412)	KON3. 4-4B	43. 5dB
		リジェクション	接触媒質	パルス幅	
		OFF	ソニコート	---	

検査実施結果	検査方法	確認※	助勢員A	備考
	超音波探傷検査			

確認項目	添付-1(4/4)に記載
------	--------------

評価
2次クリーピング波法を実施した結果、不連続部からの反射が認められた。

※確認項目に対し異常がない場合は、「確認」欄に「レ」と記載する。

図-10 2次クリーピング波法による探傷記録

□: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

超音波探傷データシート a (配管-インディケーションの記録)

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 PW-4

上流側 管台

下流側 エルボ

探傷角度 70°

	探傷サイド		ビーク指示部					記録レベルを超える長さ		備 考
	上流側	下流側	X (mm)	Y (mm)	W (mm)	CRT%	DAC%	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	
1		○						0° -20~30° +3	53	不連続部エコー
						以下	余白	~		
								~		
								~		
								~		
								~		
								~		
								~		
								~		
								~		
								~		

検査日付 2020年9月10日

検査実施者

図-11 2次クリーピング波法により得られた指示長さ

2. 指示の原因検討

「1. 経緯」にて示した通り、検査結果により加圧器スプレイラインエルボと1次冷却材管台との取合い溶接部に UT 指示が認められた。ここでは、その原因について検討を行う。

検査結果に基づくき裂の起点位置に関する分析結果を添付 2-1 に示す。

2.1 原因検討 (FT 図)

原因を検討するにあたり、加圧器、および加圧器スプレイ配管の設計・運用の概要につき以下の通り整理した。

- ・加圧器は、1次冷却材系統の圧力を制御するために設置されており、加圧器ヒータ、加圧器スプレイにより圧力（約 15MPa）を維持している。
- ・加圧器スプレイは、1次冷却材を加圧器気相部にスプレイし、1次冷却材圧力の減圧のために使用される。
- ・加圧器スプレイの配管は、2系統あり、1次冷却材系統（A、Dループの低温側）から分岐し、加圧器頂部につながっている。

<加圧器スプレイライン諸元>

- ・配管径：外径 114.3mm（4 B）
- ・厚み：14.0mm
- ・材質：SUS316
- ・運転圧力：約 15MPa
- ・運転温度：約 290℃
- ・流量：約 0.23m³/h（通常運転中、1系統あたり）

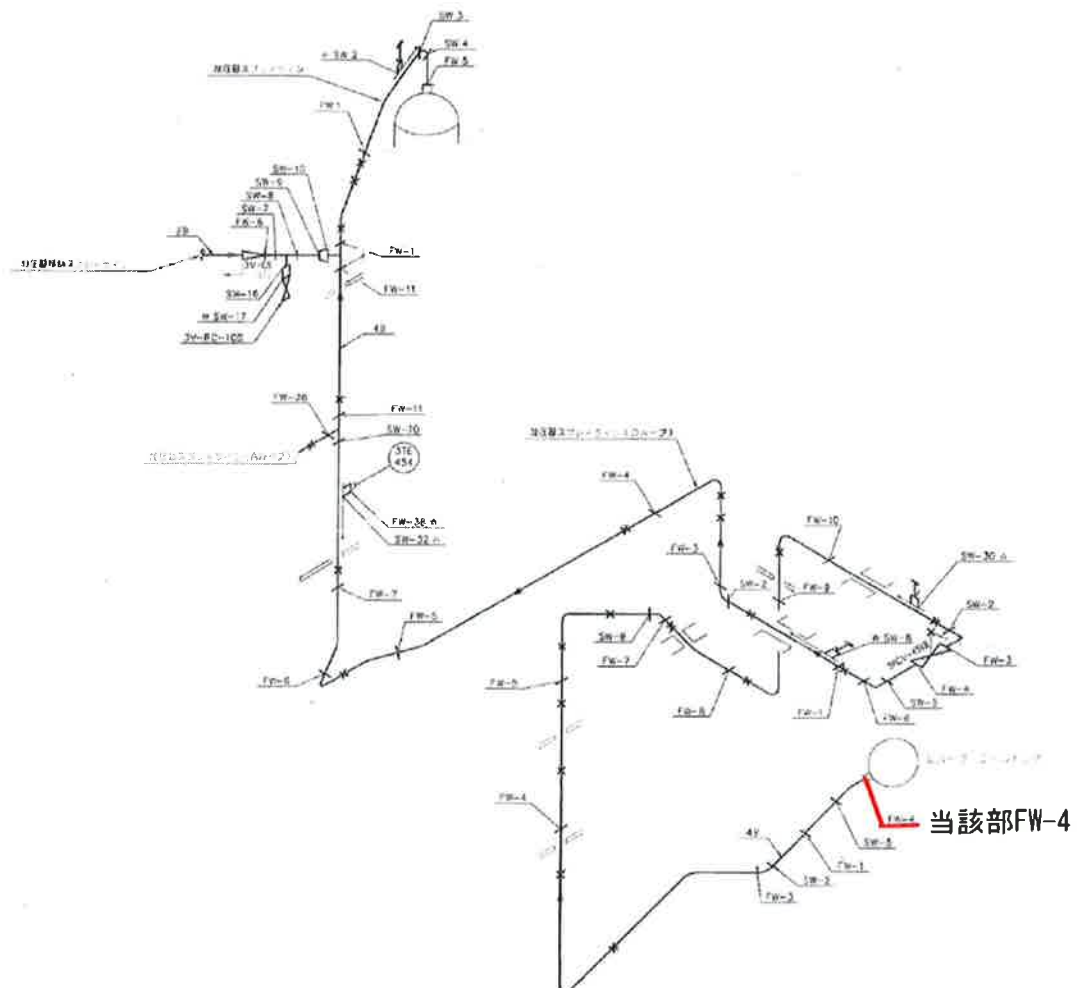
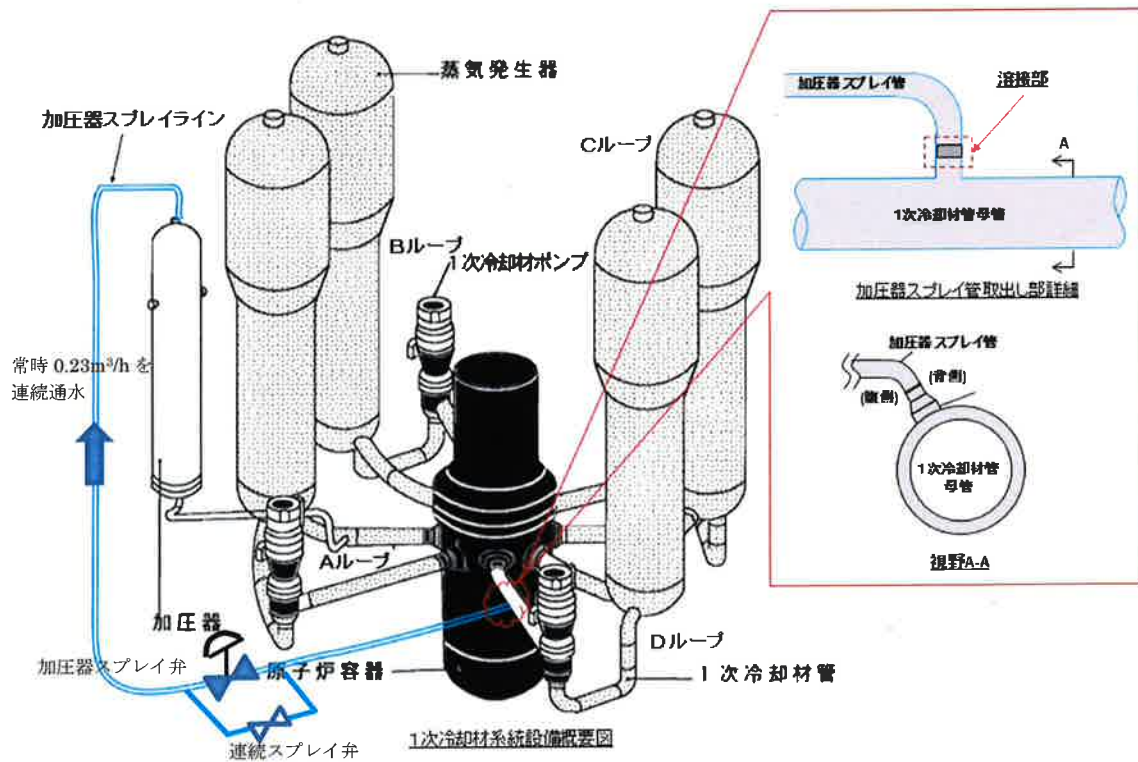
<加圧器スプレイラインの運用>

- ・起動、停止時：加圧器圧力を一定に維持するため、連続スプレイ弁、自動スプレイ弁により通水
- ・運転中：連続スプレイ弁により、少量（約 0.23m³/h）を通水

<加圧器スプレイ弁の使用期間>

- ・起動時は1次冷却材のヒートアップ開始から定格熱出力一定運転到達までの期間
- ・停止時は負荷降下開始から1次冷却材ポンプ全台停止までの期間

指示箇所



即ち、UT 指示発生部位は、起動、停止、運転中を通じ、PWR 一次系水質環境下であり、また、温度は通常運転中約 290℃の一定状態に維持されている。

以上の整理結果も踏まえ、指示の原因について、これまでの損傷事例、研究結果を基に図 1 の通り原因検討を行った。その結果、強加工 SCC である可能性が高いものと判断される。尚、建設時の非破壊検査（RT 等）によれば、製造上の不具合は認められておらず、要因とは考えにくい、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しきれない。

各検討の詳細は、2.2 から 2.4 項に示す。

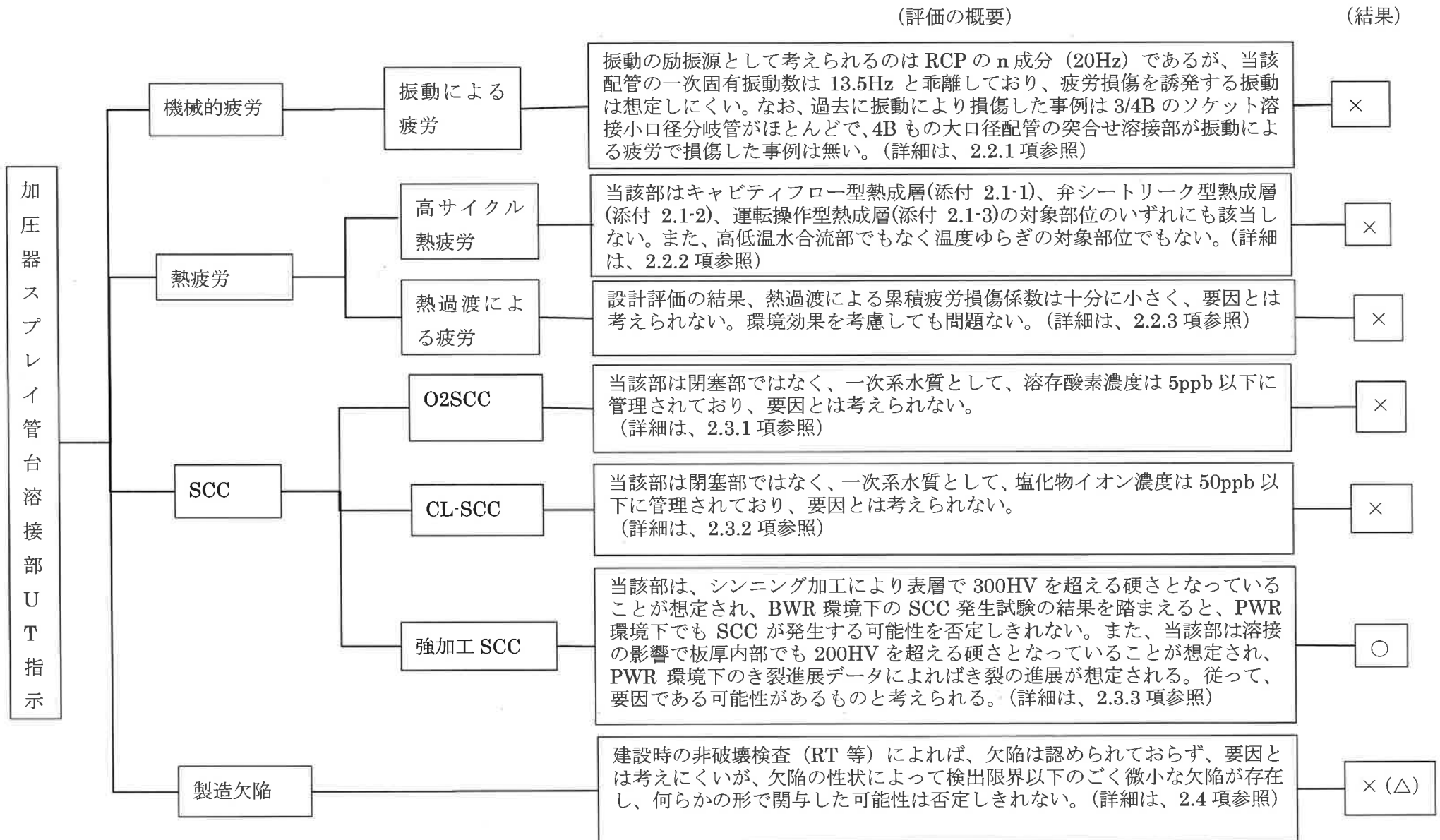


図 1 UT 指示要因検討の概要

凡例

- ; 可能性が考えられる
- △ ; 関与した可能性は完全には否定しきれない
- × ; 可能性は考えられない

2.2 疲労の評価

2.2.1 振動による疲労の評価

一般に、配管系で振動上考慮すべき励振力としては以下がある。

- ・ポンプ振動 (n、nZ 成分)
- ・ランダム振動
- ・高減圧装置による振動

加圧器スプレイ配管は、通常運転中に連続通水されているが、その流量は約 $0.23\text{m}^3/\text{h}$ (1 系統当たり) と少なく、高速流のランダム振動による疲労は考え難い。また、当該溶接部近傍には高減圧装置は無く、高減圧装置による振動に起因する疲労も考え難い。

ポンプ振動 (n、nZ 成分) としては、加圧器スプレイ配管は一次冷却材ポンプ (RCP) の励振力影響範囲にあるが、当該加圧器スプレイ配管の一次固有振動数は 13.5Hz *1 であり、RCP の n 成分: 20Hz とは十分離れており、RCP の振動成分 (n 成分) との共振*2による疲労は考え難い。

また、過去、国内 PWR にて、当該配管の様な小口径ではない突合せ溶接配管が振動による疲労により損傷した事例は無く*3、この点からも、当該き裂が振動による疲労に起因したものとは考え難い。

*1：大飯 3 号機 平成 22 年 12 月 10 日付け関原発第 461 号にて認可された工事計画の資料 4-3-2「クラス 1 管の耐震計算結果」に記載の値。

*2：斜流ポンプである RCP は、ポンプ振動成分として nZ 成分が卓越しないため、n 成分のみを考慮すればよい。

*3：過去、国内 PWR では片持ち構造の小口径分岐管 (ソケット溶接) にて、振動に起因する損傷を経験しているが、同口径 (ソケット溶接) の小口径システム配管が片持ち分岐管と同じ励振力を受けたと仮定した場合、システム配管の発生応力は片持ち分岐管の $1/4$ 程度となる。尚、過去に同加圧器スプレイ配管の小口径分岐管 (ベント弁) の運転中の振動を計測しているが、加速度は 0.7m/s^2 と低いものであった (添付 2.2.1-1 参照)。

2.2.2 高サイクル熱疲労の評価

加圧器スプレイ配管は、通常運転中に連続通水されており、キャビティフローによる熱疲労が生じる閉塞分岐管には該当しない。

また、加圧器スプレイ配管の入口接続部（MCP 側）にはスクープが設けられ、1 次冷却材の流速を駆動力として、1 次冷却材が連続通水されており、高サイクル熱疲労が生じる高低温水合流部には該当しない。

従って、当該き裂が高サイクル熱疲労に起因したものとは考え難い。

2.2.3 熱過渡による疲労の評価

加圧器スプレイ配管は、大飯 3 号機 平成 22 年 12 月 10 日付け関原発第 461 号にて認可された工事計画の資料 5-3-2「クラス 1 管の強度計算結果」にて、応力解析を実施している。解析は、日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2005 年版）〈第 I 編 軽水炉規格〉JSME S NC1-2005/2007」（日本機械学会）（以下「JSME」という。）のクラス 1 管（PPB）の規定に従い、供用状態 A 及び B における一次＋二次応力評価と疲労評価、供用状態 C 及び D における一次応力評価を実施している。

加圧器スプレイ配管は、起動・停止等の運転状態及びその状態の移行に伴って、1 次冷却材管より多様な圧力と温度の過渡状態を受ける。加圧器スプレイ配管の供用状態 A 及び B における評価では、実際に発生する過渡状態を十分満足するよう包絡し、十分苛酷かつ頻繁な設計過渡条件を設定し、同過渡条件に示す過渡の状態と回数を考慮した評価を実施している。

当該部の供用状態 A 及び B における疲労評価結果は、疲労累積係数（40 年運転）で 0.00013 と十分余裕のある値になっている*1。

また、当該部に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、これも十分余裕のある値になる。

上記疲労評価結果より、当該部は供用状態 A 及び B における疲労を十分に低く抑えて設計されており、当該き裂が熱過渡による疲労に起因したものとは考え難い。

*1：当該部は、大飯 3 号機 平成 22 年 12 月 10 日付け関原発第 461 号にて認可された工事計画の申請範囲ではないため、同工事計画の資料 5-3-2「クラス 1 管の強度計算結果」中に数値の記載はないが、同工事計画の申請範囲を含む解析ブロック中の節点に該当するため、同工事計画届出時に評価を実施している（添付 2.2.3-1 参照）。

2.3 SCC の評価

2.3.1 O₂SCC の評価

SCC は、材料・応力・環境の 3 要因が特定の条件で重畳する場合に発生する。当該部については、以下を考慮して SCC の発生を抑制している。

- ・材料：当該部の材料は、SCC の感受性が低い SUS316 を使用している。
- ・応力：溶接による引張残留応力は生じるが、溶接施工に関しては、施工当時、電気工作物の溶接に関する技術基準を定める省令に基づき、十分な品質管理を行っている。
- ・環境：定格出力運転時の 1 次冷却材は、溶存酸素、その他不純物濃度が十分低くなるように水質管理を行っている（添付 2.3.1-1 参照）。

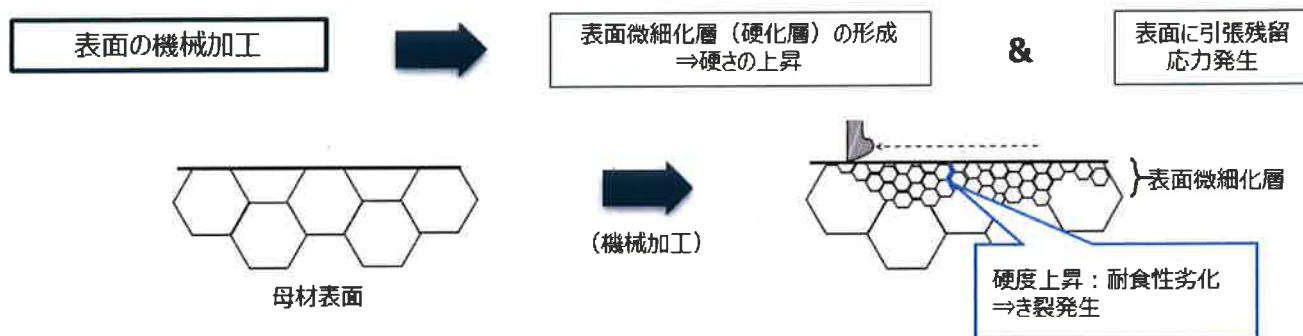
また、加圧器スプレイ配管は、通常運転中に連続通水されており、当該部は閉塞滞留部ではなく、O₂ リッチの環境下にはならないため、当該き裂が O₂SCC によるものとは考え難い。

2.3.2 Cl-SCC の評価

定格出力運転時の 1 次冷却材は、溶存酸素、その他不純物濃度が十分低くなるように水質管理を行っており、1 次系水質環境下において Cl は発生しない（添付 2.3.1-1 参照）。また、加圧器スプレイ配管は、通常運転中に連続通水されており、当該部は閉塞滞留部ではないため、水質が悪化する事もない。従って、当該き裂が Cl-SCC によるものとは考え難い。

2.3.3 強加工 SCC の評価

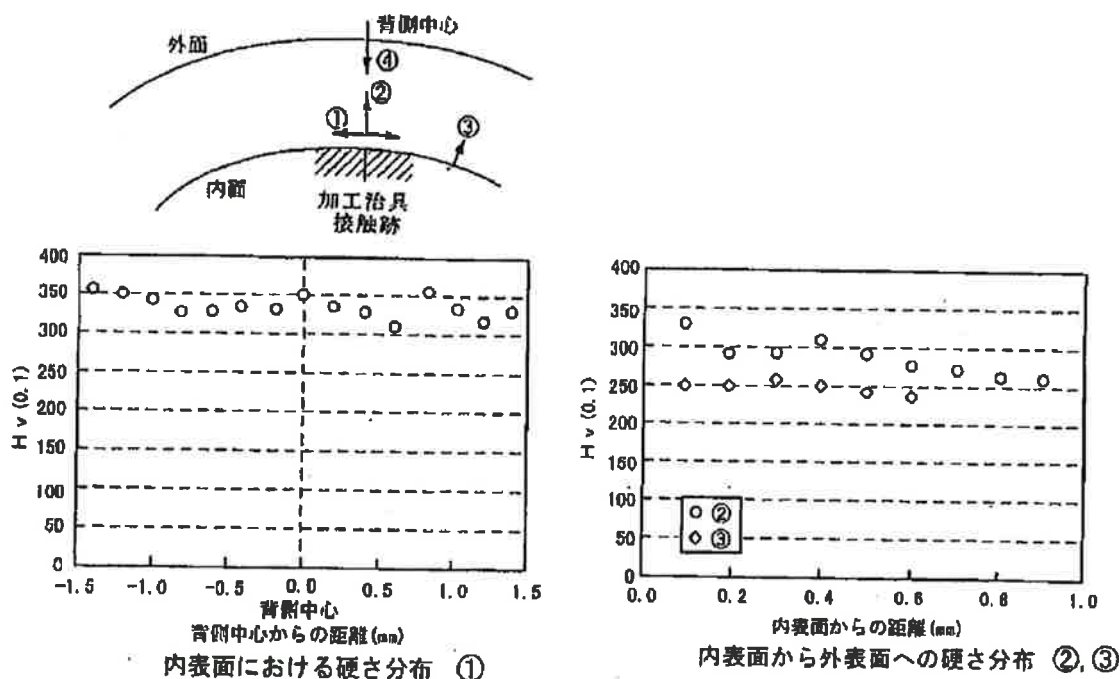
機械加工に伴う硬さ上昇及び残留応力を起因とした割れは、2000 年代前半に BWR の再循環配管で使用されている低炭素ステンレス鋼で顕在化している。当時 BWR を中心に様々な研究が実施され、明確な発生原因までは示されなかったが、実機調査結果や研究知見より、概ね以下に示すように考えられている。



① PWR 強加工 SCC に対する取り組みの経緯

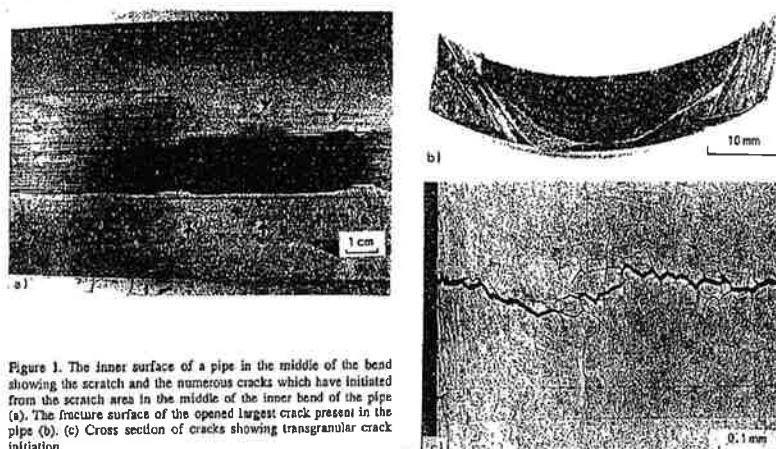
PWR に於いては、2000 年頃より、BWR を中心とした国内外の強加工 SCC に関する事例や研究知見、更には、2007 年の美浜 2 号蒸気発生器入口管台セーフエンド部（オーステナイト系ステンレス鋼）に於いて認められた強加工 SCC の可能性が否定できない事例を受け、PWR 環境での強加工 SCC に対し、以下の様な様々な対応をとってきている。（表 1 参照。表中の符号と下記符号は対応する。）

A) 1999 年、美浜 2 号機の余剰抽出配管の冷間曲げ加工部で、キャビティフロー型熱成層による粒内高サイクル熱疲労割れ事象を経験した。本事象は疲労損傷事例ではあったが、その原因究明調査の過程で、芯金（加工治具）跡部近傍には、ビッカース硬さ 350HV 程度の硬化層が認められ、冷間曲げ管の芯金跡部は高硬度となることが広く認識されることとなった。



出典：てん末書「美浜 2 号機格納容器サンプ水位上昇に伴う原子炉手動停止について」

- B) 1999 年の美浜 2 号機余剰抽出配管の損傷事例を契機に、国内外の文献調査を行った。この過程で、「第 6 回原子力発電所に於ける材料の環境劣化に関する国際シンポジウム」に於いて、「STRESS CORROSION CRACKING OF COLD WORKED AUSTENITIC STAINLESS STEEL PIPES IN BWR REACTOR WATER」なる論文が発表されており、海外 BWR リンガル 1 号機の SUS304 製冷間曲げ管芯金接触跡部で、強加工 SCC により板厚の約 90% 程度の深さの粒界割れが発生していたことが確認された。本事象は、BWR における事象ではあったが、芯金を使用することで強加工を施された接触跡を有する冷間曲げ加工オーステナイト系ステンレス鋼材であり、国内 PWR プラントでも広く使用されてて来ている材料、および加工法であったことから、PWR プラントの冷間曲げ加工管に対しても、強加工 SCC の潜在的リスクを認識することとなった。



出典 ; 「STRESS CORROSION CRACKING OF COLD WORKED AUSTENITIC STAINLESS STEEL PIPES IN BWR REACTOR WATER」

- C) 以上の様な認識の中で、スペインの研究機関 CIEMAT より「CRACK GROWTH RATE OF HARDENED AUSTENITIC STAINLESS STEELS ON BWR AND PWR ENVIRONMENTS」なる論文が発表され、BWR 環境よりも低速度ながら PWR 環境に於いても、強加工を施されたオーステナイト系ステンレス鋼では粒界 SCC 割れが進展することが明確となった。B) 項で認識された PWR プラントでの冷間曲げ加工管の強加工 SCC に対する潜在的リスクはより明確なものとなり、何らかの予防保全対策の必要性を認めることとなった。また、2000 年に維持規格に盛り込まれた評価章を受け、その実機適用に向け、必要な知見（き裂進展速度、曲げ管の破壊評価手法）の取得に着手した。

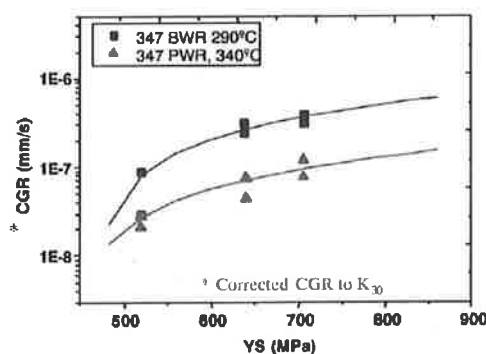


Figure 16. Crack growth rate of cold worked 347 SS, tested in PWR and BWR conditions.

出典 ; CIEMAT, 「CRACK GROWTH RATE OF HARDENED AUSTENITIC STAINLESS STEELS ON BWR AND PWR ENVIRONMENTS」

- D) 国内 PWR プラントでは、多数の芯金を使用した冷間曲げ加工管を使用してきたが、強加工 SCC に対する潜在的リスクを排除する目的で、新しい曲げ加工法の開発を行った。もともと曲げ加工部の偏平防止の為に芯金を使用した加工を行ってきたが、その芯金の接触部が強加工部を生じさせる結果となっていた為、曲げ加工条件の最適化と加工治具の形状改良により、芯金を使用しない冷間曲げ加工法を開発した。また、冷間曲げ加工後に溶体化熱処理も実施し、硬さと残留応力の改善を図ることとした。

以上の対策が確立したのを受け、2006 年ころより、RCPB 範囲も含め、工認資料上の扱いも強加工 SCC に対する予防保全対策として、冷間曲げ管取替工事を推進している。

なお、工認資料上の「変更を必要とする理由を記載した書類」には、以下の様な説明を記載している。“国内 BWR プラントの原子炉冷却系統設備配管において、配管加工時に生じる硬化層を起因とした、応力腐食割れが発生している。PWR プラントにおいては 1 次冷却材の酸素濃度を低く管理していることから、現在までのところ BWR プラントと同様の応力腐食割れによる損傷は発生していないが、原子炉冷却系統設備配管においても、製造過程で強い力による曲げ加工を行うことで生じる硬化層を有する曲げ管を使用している部位があるため、これらについて予防保全の観点から、硬化層が形成されない曲げ管等へ取替えることにより、1 次系配管の信頼性確保に万全を期す。”

- E) 2001 年以降、国内 BWR プラントのコアシュラウド及び再循環配管において、多数のひび割れ事象が報告されている（図 E-1 参照）。調査の結果、従来は SCC が発生し難いと考えられていた低炭素ステンレス鋼（SUS316L、原子力用 316 及び SUS304L）における応力腐食割れ（SCC）によるひび割れであることが明らかとなった。従来、これらのステンレス鋼よりも炭素含有量が高い SUS304 鋼で認められた鋭敏化型の SCC は、材料、応力、環境要因の 3 要因が重畳して発生すると考えられてきたことから、これら一連の低炭素系原子力用ステンレス鋼のひび割れは、従来のメカニズムでは説明出来ない事象と考えられた（図 E-2）。このため、発生原因に関する調査・研究が進められた結果、機械加工等により硬化した部位では、低炭素系ステンレス鋼でも SCC 感受性を有する場合のあることが明らかとなっている。

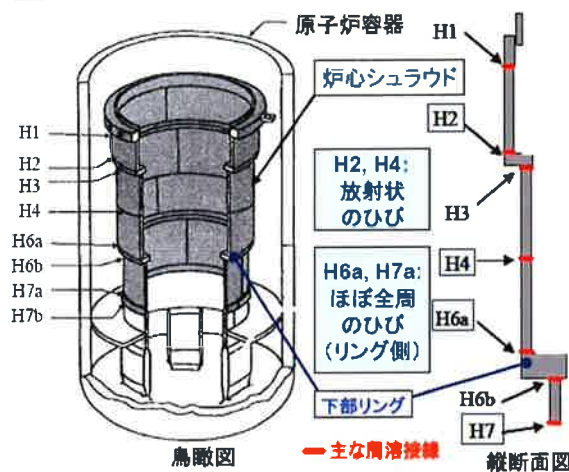
プラントの健全性評価では、原子力発電設備を建設時と同じ状態に保持することを要求した「建設基準」から、設備の安全性が確認された場合にのみ、ひび等を残したまま一定期間の運転を認める「維持基準」の議論が展開され、構造健全性評価に基づきひび割れが存在しても、一定期間構造物の健全性が損なわれないとする判断が示されている。

構造・材料

- ・材料：低炭素系ステンレス鋼
熱間圧延材：SUS304L、SUS316L、
鍛造材：SUSF316L

損傷事例

- ・SUS304L製：2/6プラント
 - H4：放射状のひび割れ
 - H2, H6a：溶接線近傍に周方向ひび割れ
- ・SUS316L製：11/17プラント
 - H3 / H4：
 - + 溶接線近傍に放射状のひび割れ(点在)
 - + 溶接熱影響部から離れた箇所(1)、a社製炉心シュラウドで発生(多)
 - H6a / H7a：
 - + 周方向のひび割れ(断続的(6)、ほぼ全周(1))
 - + b社製炉心シュラウドで発生(多)



炉心シュラウド

- ・原子炉圧力容器内に取り付けられている燃料集合体（炉心）を囲むように配置されている円筒状の機器で、炉心の支持及び原子炉内の冷却水の流れを分離する仕切り板の役割を持つ

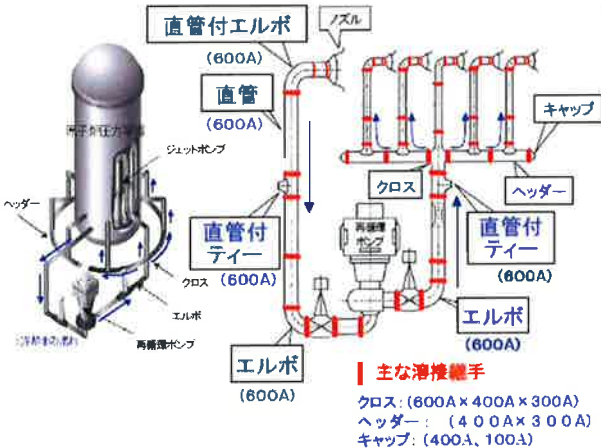
(平成16年2月20日現在)

構造・材料

- ・種々の形状・口径の配管部品を接合した構成、製造方法も異なる。
- ・材料：低炭素系ステンレス鋼
直管（管材）：SUS316TP
直管、直管付ティー、エルボ、ヘッダー、クロス、キャップ等（鍛造材）：SUSF316

損傷発生箇所

- ・PLR配管全体
- ・大径管(400A以上)同士の継手
- ・大径管とポンプ／弁等の異径部や中径管の継手



原子炉再循環系配管

- ・燃料で発生した熱を効率よく取り出すため、原子炉圧力容器の中の冷却水を循環させる系統であり、この系統に用いられている配管

図 E-1 コアシュラウド及び再循環配管の構造と損傷事例

出典：原子力安全基盤機構「平成17年度 原子力用ステンレス鋼の耐応力腐食割れ実証に関する報告書」

- ・ 炉心シュラウドの接液表面に硬化層があり、主として粒内型応力腐食割れ
- ・ シュラウドリング部のように製作時に機械加工を受けた表面では、硬さがHv300を超える100 μm 程度の厚い硬化層



図7 2F-3 シュラウド H6a
ボートサンプル断面観察写真

出典：「原子力発電設備の健全性評価について」
—中間とりまとめ—（平成15年3月10日）

- ・ 原子炉再循環系配管の開先内表面において、ごく表層に硬化域が形成
- ・ 溶接時に導入される塑性ひずみにより、溶接部極近傍は硬くなる傾向あり。

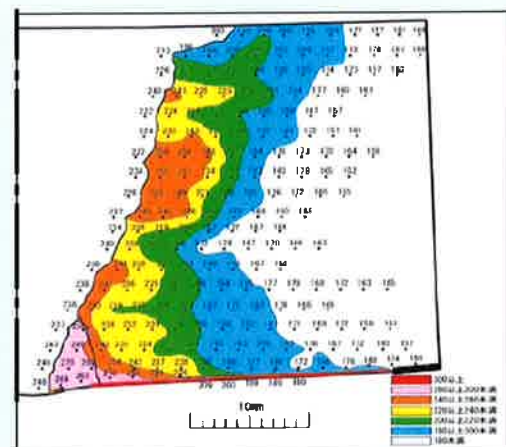


図9 K-1PLR 配管サンプル硬さ測定結果

出典：「原子力発電設備の健全性評価について」
—中間とりまとめ—（平成15年3月10日）

図 E-2 コアシュラウド及と再循環配管で共通的な SCC の特徴

出典：原子力安全基盤機構「平成 17 年度 原子力用ステンレス鋼の耐応力腐食割れ実証に関する報告書」

F) 各種電共研では、PWR 環境下におけるき裂進展速度データ取得を行い、加工度（硬さ）及び溶存酸素（DO）環境条件を変化させたき裂進展試験により、応力拡大係数（K 値）、温度、硬さ、溶存酸素（DO）濃度に対する依存性が確認されている。このため、機械加工及び溶接による硬化の硬さ、溶接残留応力測定を行い、PWR プラントの種々形状に対する強加工 SCC によるき裂進展に係るデータ拡充を行っている。また、K 値、硬さ、温度に対する依存性を考慮したき裂進展速度式も考案している。なお、これらの研究成果については、原子力学会、国際学会（Fontevraud 7）にて報告を行っている。

G) 美浜 2 号機蒸気発生器入口管台セーフエンド部（オーステナイト系ステンレス鋼）において、オーステナイト結晶粒界に沿って枝分かれた、最大深さ約 0.9mm の割れが確認されている。また、セーフエンド部表面には、機械加工の影響と考えられる高い引張応力が残留していることも確認されている（添付 G-1）。セーフエンド部の割れの様相から、内面の表層部に機械加工に起因する引張残留応力が発生し、溶接部近傍において運転中の応力等により、オーステナイト結晶粒界に沿った割れが進展したものと推定されており、強加工 SCC が原因であることの可能性を示唆している。

実機経験や研究動向を踏まえ、2009 年以降、PLM 技術評価書（蒸気発生器冷却材出入口管台セーフエンド部（オーステナイト系ステンレス鋼）に対する評価）への反映に加え、AESJ-SC-P005: 2012 (Amd.3)「日本原子力学会標準；原子力発電所の高経年対策実施基準：2012（追補 3）別冊・PWR においても、「経年劣化メカニズムまとめ表－PWR」で蒸気発生器に対しては PWR 一次系水質下の SCC は評価すべき対象となっており、本損傷モード自体は、世に認知されたものとなっている（添付 G-2）。

2020/9/8

美浜発電所 2 号機の定期検査状況について（A－蒸気発生器入口管台溶接部での傷の原因と対策） | 2008 | プレスリリース | ABOU...

関西電力 power with heart

個人のお客さま

法人のお客さま

よくあるご質問

English



関西電力送配電

HOME — ABOUT US — プレスリリース — 2008 — 美浜発電所 2 号機の定期検査状況について（A－蒸気発生器入口管台溶接部での傷の原因と対策）



プレスリリース

電気料金関係

ガス料金関係

停電

電力開始

原子力発電

火力・水力発電

新エネルギー・研究開発

経営・財務関係

環境

託送

その他

過去の送配電
プレスリリース

プレスリリース

検索したいワードをご入力ください

2008

2008年2月4日
関西電力株式会社

美浜発電所 2 号機の定期検査状況について（A－蒸気発生器入口管台溶接部での傷の原因と対策）

美浜発電所 2 号機（加圧水型軽水炉、定格電気出力 50 万キロワット、定格熱出力 145 万 6 千キロワット）は、第 24 回定期検査中に、予防保全対策として、蒸気発生器（SG）出入口管台（計 4 箇所）溶接部表面の残留応力を低減させるためにショットピーニング工事※1を実施することとし、平成 19 年 9 月 15 日から 9 月 18 日にかけて、その施工前確認のための目視点検および渦流探傷試験（ECT）※2を行ったところ、A－SG 入口管台溶接部において ECT で 13 箇所の有意な傷号指示が認められ、目視点検で 1 箇所の傷（ECT で有意な傷号指示が確認された箇所）を確認しました。浸透探傷試験（PT）※3を実施したところ、それら全ての箇所において有意な浸透指示模様（最大長さ：約 17 mm）を確認しました。

このため、超音波探傷試験（UT）※4で傷の深さを測定した結果、浸透指示模様で最大長さを確認した部位で長さ約 13 mm の傷を確認しました。この傷の深さを考慮すると、当該管台溶接部の板厚（約 6.8 mm）は、電気事業法に基づく工事計画認可申請書に記載している板厚（7.5 mm）を下回るものと評価されました。

その後、傷が確認された A－SG 入口管台溶接部の内表面について、エッチング※5およびスンプ※6による金属組織観察を行った結果は以下のとおりです。

- エッチングによる金属組織観察の結果、傷は主に 600 系ニッケル基合金溶接部に認められましたが、ステンレス製短管（セーフエンド）部にも一部認められました。
- 最も傷が深かった箇所（長さ約 17 mm、深さ約 13 mm）についてスンプ調査を実施した結果、長さ約 3～5 mm の複数の割れが軸方向に断続的に存在し、600 系ニッケル基合金溶接部内のデンドライト境界※7に沿った割れでした。この割れの特徴は、これまで国内外の 600 系ニッケル基合金溶接部で確認されている 1 次冷却材中の環境下における応力腐食割れ※8と同様の様相でした。
- セーフエンド部で認められた傷についてスンプ調査を実施した結果、金属結晶の粒界に沿って枝分かれした割れが複数認められました。

本事象による環境への放射能の影響はありませんでした。

[平成 19 年 9 月 25 日、10 月 18 日 お知らせ済み]

※1：ショットピーニング工事

金属表面に金属の玉を高速度でたたきつけることにより、金属表面の引張機械応力を圧縮応力に変化させる工事。

※2：渦流探傷試験（ECT）

材料表面に渦電流を流して、材料に発生する電磁誘導の変化から検査対象の傷を検出する方法。

※3：浸透探傷試験（PT）

試験体表面に開口している傷を目で発見するため、可視染料の入った薬液を傷に浸透させた後、余分な薬液を除去し、現像剤により浸透指示模様として顕微鏡する方法。

※4：超音波探傷試験（UT）

構造物に入射した超音波が欠陥に当たって跳ね返ってくる反射を観察することにより、欠陥の形態、形状、寸

換熱部の表面を磨いた後、しゅろ酸水溶液等により表面を腐食させ、溶接部や母材部などの金属組織の違いを
 出現させて光学顕微鏡で観察する方法。

※6： スンプ

換熱部の表面を磨いた後、表面にフィルム等を貼り付け写し取り、これを顕微鏡で観察。換熱部の金属サンプルを切り出すと同様な調査が可能。

※7： デンドライト境界

溶接部では、溶融した金属が固まる際にできる柱状の結晶（デンドライト結晶）ができ、その結晶組織の境界のことをデンドライト境界という。

※8： 1次冷却材中の環境下における応力腐食割れ

1次冷却水中の環境下で600系ニッケル基合金に発生するPWRプラント特有の応力腐食割れ。（材料、環境および発生応力の3要素が重なって発生する割れ）

割れが発生した原因について詳細に調査するため、A-SGの入口管台溶接部および配管の一部を切断し、試験研究機関に搬出して、破面観察や化学成分分析等の調査を行った結果は、以下のとおりです。

1. 原因調査結果

(1) 実機切断調査

(溶接部)

- ・ 割れは、軸方向の複数の割れから構成されており、最大深さ約11.5mmであり、デンドライト境界に沿って進展していました。
- ・ 割れ周辺は、スンプ観察の前に表面を磨く必要がありバフ施工※9を行ったため、表面は研磨が施されていた状態でしたが、それ以外の溶接部（一般部）に、機械加工※10跡である周方向の筋状の跡が等間隔に認められました。
- ・ 表面の残留応力を測定した結果、周方向に約280～480MPa、軸方向に約70～350MPaの引張残留応力を確認しました。
- ・ 溶接金属の化学分析を行い、製造時のミルシート（材料成績書）と相違がないことを確認しました。

※9： バフ施工

溶接部表面等に対して、電動工具に取り付けた円形状のワイヤブラシ等（バフ）により、表面の研磨を行うこと。

※10： 機械加工

溶接により発生する表面の凸凹を切除するとともに、管台とセーフエンド部の段差を無くするため、金剛製の刃を周方向に回転させ切削加工すること。

(セーフエンド部)

- ・ 割れは、主に2つの表層部の微小な割れからなり、オーステナイト結晶粒界※11に沿った破面が認められました。また、割れの最大深さは約0.9mmであり、当該部の板厚は電気事業法に基づく工事計画認可申請書に記載している板厚（7.5mm）を上回っていることを確認しました。
- ・ 割れ周辺は、スンプ観察の前に表面を磨く必要がありバフ施工を行ったため、表面は研磨が施されていた状態でしたが、それ以外のセーフエンド一般部の表面を型取観察した結果、機械加工跡である周方向の筋状の跡がほぼ等間隔に認められました。
- ・ 表面の残留応力を測定した結果、周方向に約570MPa、軸方向に約350MPaの引張残留応力を確認しました。
- ・ 短管金属の化学分析を行い、製造時のミルシート（材料成績書）と相違がないことを確認しました。

※11： オーステナイト結晶粒界

ステンレス鋼に代表されるオーステナイト系ステンレス鋼が持つハズの星のような形をし

(2) 製造履歴調査

当該SGは、平成3年10月～平成6年2月の間に工場で製作した際、SG管台部（セーフエンド部）の溶接作業が行われていました。その際、機械加工を実施していました。

また、当該管台と今回の検査で傷が認められなかったB-SG管台との製作手順を確認しましたが相違は認められず、溶接の手直しについてもなかったと考えられました。

(3) 機械加工再現試験

機械加工による影響を確認するため、聞き取り結果を踏まえた加工条件で実物大の試体に機械加工を実施し、表面状態の観察をしたところ、実機で観察されたものと同様な周方向の筋状の跡がほぼ等間隔で確認されました。

また、残留応力を測定したところ、当該部と同様に、周方向に大きな引張残留応力を確認しました。

(4) 文献調査

(溶接部)

文献調査を行った結果、600系ニッケル基合金溶接部については、加圧水型軽水炉（PWR）の1次冷却材環境下で300MPa以上の応力が残留していた場合、1次冷却材中の環境下における応力腐食割れが発生する可能性があることを確認しました。

また、応力腐食割れは、溶接部のデンドライト境界に沿った割れが進展することを確認しました。

(セーフエンド部)

セーフエンド部で使用しているステンレス鋼については、PWRの1次冷却材環境下で応力腐食割れが発生した事例を確認することはできませんでした。

(5) 調査結果のまとめ

(溶接部)

- ・ 過去の応力腐食割れ事象と同じデンドライト境界に沿った割れを確認しました。
- ・ 溶接部の表面において、1次冷却材環境下で応力腐食割れが発生する可能性のある応力を超える引張残留応力を確認しました。

(セーフエンド部)

- ・ 溶接部近傍において、オーステナイト結晶粒界に沿った微細な割れを確認しました。
- ・ セーフエンド部の表面に、機械加工の影響と考えられる高い引張応力が残留していることを確認しました。

2. 推定原因

600系ニッケル基合金部の割れについては、取替用SGの製作時の溶接および機械加工を行ったところ、金属表面部に高い引張残留応力が発生したことにより、1次冷却材中の環境下における応力腐食割れが発生し、運転中の応力等によりデンドライト境界に沿った割れが進展したものと推定しました。

またセーフエンド部は、割れの様相から、内面のごく表面部に高い引張残留応力が発生し、溶接部近傍において運転中の応力等により、オーステナイト結晶粒界に沿った割れが進展したものと推定しました。

3. 対策

- ・ 切出した当該部については、セーフエンド部は新品に取替え、より耐食性に優れた690系ニッケル基合金で溶接を行います。

なお、セーフエンド部の割れの発生に関する研究を行い、知見の拡充を図ってまいります。

対策工事には、数ヶ月を要する見込みであり、原子炉起動は今年の夏頃となる見込みです。

以 上

(経済産業省によるINESの暫定評価)

基準1	基準2	基準3	評価レベル
-	-	0-	0-

INES：国際原子力事象評価尺度

[添付図](#)



[サイトマップ](#)

[個人情報保護方針](#)

[サイトのご利用について](#)

© KEPCO THE KANSAI ELECTRIC POWER CO., INC.

経年劣化メカニズムまとめ表-PWR

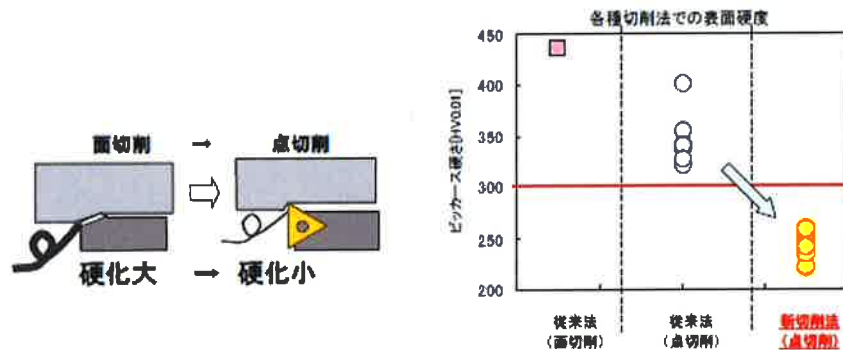
P02-15 熱交換器(蒸気発生器(多管円筒形U字管形)／1次冷却材－給水／低合金鋼－低合金鋼－ニッケル基合金) (1/1)

No.	機能達成に必要な項目	部位	材料	経年劣化事象
1	伝熱性能の確保	伝熱管	インコネル690合金	摩耗
2				粒界腐食割れ (IGA : Inter Granular Attack)
3				ピッチング (孔食)
4				疲労割れ (フレットニング疲労割れ)
5				応力腐食割れ
6				管板クレビス部応力腐食割れ
7				デントニング
8				スケール付着
9		管支持板	ステンレス鋼	スケール付着
10		振止め金具	ステンレス鋼	摩耗
11	バウンダリの維持	冷却材出入口管台 セーフエンド (ステンレス鋼及びインコネル溶接金属)	ステンレス鋼 (インコネル肉盛)	応力腐食割れ
12		1次側管板	低合金鋼 (ステンレス鋼肉盛)	肉盛下層部のき裂
13		1次側マンホール	低合金鋼 (インサートプレートはステンレス鋼)	(想定されず)
14		管板	低合金鋼 (インコネル肉盛)	疲労割れ
15				肉盛部応力腐食割れ
16		ガスケット	—	肉盛下層部のき裂
17				(消耗品・定期取替品)
18		仕切板	インコネル600合金	応力腐食割れ
19			インコネル690合金	応力腐食割れ
20		蒸気出口管台	低合金鋼	腐食 (流れ加速型腐食を含む)
21		給水入口管台	低合金鋼	腐食 (流れ加速型腐食を含む)
22				疲労割れ
23		2次側胴 (板)	低合金鋼	腐食 (流れ加速型腐食を含む)
24		フローリストリクタ ベンチュリー	インコネル690合金	(想定されず)
25			インコネル600合金	(想定されず)
26		検査用穴	低合金鋼	腐食 (流れ加速型腐食)
27				腐食
28		2次側マンホール	低合金鋼	腐食
29		気水分離器	炭素鋼, 低合金鋼, インコネル690合金, クロモモリブデン鋼	腐食 (流れ加速型腐食を含む)
30		凝水分離器	炭素鋼	腐食 (流れ加速型腐食を含む)
31		給水リング	低合金鋼, インコネル690合金	腐食 (流れ加速型腐食を含む)
32		サーマルスリーブ	低合金鋼	腐食 (流れ加速型腐食)
33			インコネル690合金	(想定されず)

H) 国内 PWR の配管シンニングに対しても、美浜 2 号機 SG 管台セーフエンド部の粒界割れ事象を踏まえ、2008 年より強加工 SCC の可能性は完全には排除できないものと考え、以下の様な新切削加工法を開発し、2010 年頃より予防保全対策として、配管改造工事に際し、シンニング部機械加工に適用を開始している（なお、今回の UT 指示発生部位のシンニング加工は、大飯 3 号機建設当時の 1990 年に実施されており、新切削加工法は適用されていない）。

新切削加工法の概要

切削工具の改良と加工条件の最適化により加工面表層部の硬度が 300HV 以下となる様配慮されている。切削工具形状改良の概念を付図 1 に、加工条件最適化の概念を付表 1 に示す。



付図 1□切削工具改良の概念

付表 1□加工条件最適化の概念

	切削工程	切込み量	説明
従来切削加工法	粗加工 (従来チップ)	大	・ミリ単位の重切削により、深い硬化層が導入される。
	仕上げ加工 (従来チップ)	中	・粗加工の影響もあり、仕上げ加工自体による硬化により 300HV を超過。
新切削加工法	粗加工 (従来チップ)	大	・ミリ単位の重切削により、深い硬化層が導入される。但し、一定の制限値を設定
	中間粗加工 (従来チップ)	中	・仕上げ加工に先立ち、粗加工の影響を除去する。
	チップ交換		
	仕上げ加工 (新チップ)	小	・新チップで最適な切削速度、送り量で切削することにより、300HV 未満の仕上がりが得られる。

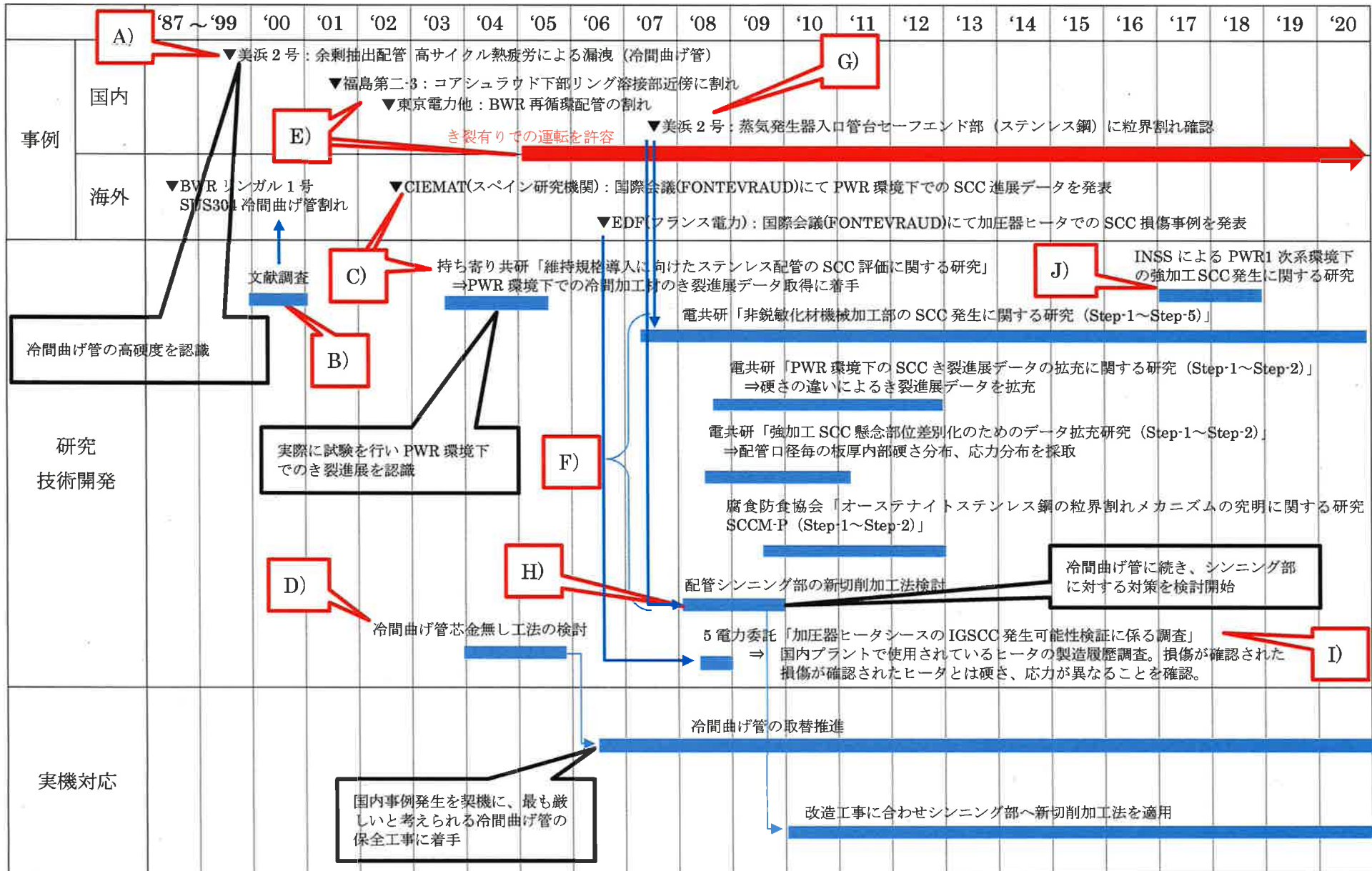
以上の様に、PWR 配管シンニング部に対しても、強加工 SCC のリスクを認識し、念のための各種対応を行っており、原因として完全に排除は出来ないものとする。

電共研で取得したデータ等に基づき、当該部の UT 指示が強加工 SCC によるものと考えられる評価を②、③に示す。

一方、O₂SCC、CLSCC や疲労に対する評価を行ったが、その可能性は無いものと判断しており、上述のように PWR 環境下でも可能性を完全に否定しきれない強加工 SCC が本事象の原因であると推定した。

- I) Fontevraud 6 (2006 年 9 月) で公表された EDF 文献 (PWSCC of austenitic stainless of heaters of pressurizers) によって、SUS316L 製ヒータで IGSCC による漏えいが発見されていることが明らかになった。漏えい箇所は、ヒータシースの高ひずみ・硬化領域である。いくつかのケースは、ヒータサポートプレート付近となっている。なお、SCC 発生要因として考えられる応力 (SCC 発生は 240MPa 以上、SCC 進展は 600MPa 以上)、冷間加工による材料の硬化 (Hv0.1>310) の条件が、実機で発生したことが報告されている。国内のヒータに対して、製造履歴調査、残材のサンプリング調査を実施した結果、同様の残留応力、冷間加工による材料の硬化が発生している可能性は低く、海外との差別化を行っている。(国内メーカーでは、機械加工後に焼きなましによる熱処理を実施しており、硬さが緩和されているものと推定される。一方、EDF プラントの製法では、熱処理についての記述は無く、400HV 以上の硬化域も確認されていることから熱処理が実施されていない可能性もある)
- J) 原子力安全システム研究所 (INSS) では、PWR 環境下におけるき裂進展試験に取り組み、冷間加工、応力、温度がき裂進展の加速因子として寄与することを報告している。また、溶接熱影響部 (HAZ 部) でも強冷間加工材と類似の SCC 進展を示すことが確認されている。更に、き裂発生を促すために表面にグライнда加工を施したき裂発生試験では、定荷重条件であっても一部の試験片が粒界割れを生じさせることが分かっている (添付 J-1)。

表 1 PWR 強加工 SCC に関する取り組みの概要



② 強加工 SCC 発生の評価

強加工 SCC 発生の感受性は表層の硬さと相関があることが知られていることから、UT 指示が確認された部位の表層硬さについて評価する。

当該部のエルボの材質はオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS316) であり、開先合わせのために内表面をシンニング (切削) 加工している。シンニング部の表層硬さは、図 1 に示す当該部の製造を担当したメーカーによる配管シンニング部の表層硬さ測定結果より、内表面のごく表層に 300HV を超える硬化層が形成されたと推定される。

当該部の配管口径は 4B であり、図 1 に示す測定結果に含まれていないが、シンニングを含む開先加工法は口径によらず同じであることから、4B 配管についても内挿して、開先加工時に 300HV を超える硬化層が内表面の極表層に形成されているものと判断する。

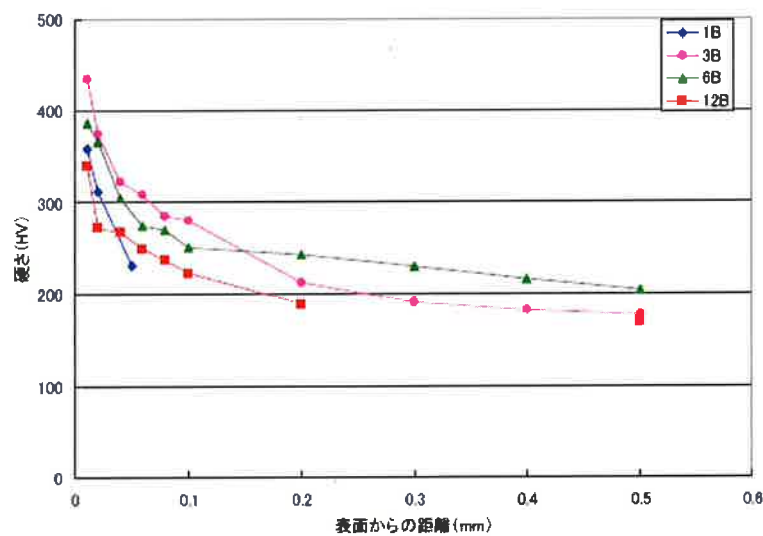
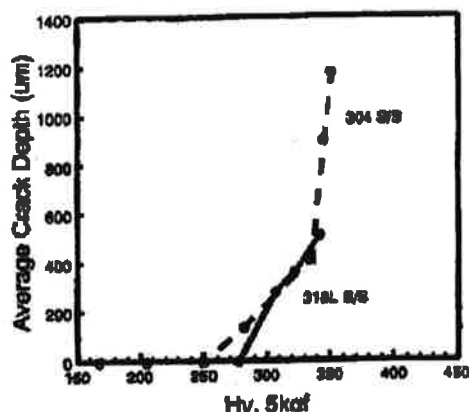


図 1 1B、3B、6B、12B 管シンニング部の表層部硬さ分布

出典；製造メーカー社内モックアップデータ

この硬さレベルで、PWR 環境中で強加工 SCC が発生することを明確に示すデータはまだないが、参考として BWR 環境下での強加工 SCC 発生試験の結果を図 2 に示す。



出典:M.Tsubota et al

The Effect of Cold Work on the SCC Susceptibility of Austenitic Stainless Steels.
"Proceeding of 7th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems. Vol.1 (1995)519-527"

(1%ひずみ、試験温度：288℃、溶存酸素濃度：8ppm)

図 2 BWR 環境下での SCC 発生試験結果

図 2 では、BWR 環境下では概ね硬さが 300HV 以上で SCC の発生が認められる結果となっている。尚、材質は SUS316L で当該部 SUS316 とは異なるが、類似のオーステナイト系ステンレス鋼であり、試験温度も 288℃と当該部の運転温度約 290℃とほぼ等しく、参考データとしては有益と考えている。また、海外 PWR での加圧器ヒーターシースの実機調査結果及び試験結果より、PWR 環境に於ける強加工 SCC の発生には 310HV 以上あることが必須との記載例もある。(2006, Couvant, Degra, PWSCC of austenitic stainless steels of heaters of pressurizers)

従って、当該部は BWR 環境下では SCC 発生の可能性のあるものと考えられるが、PWR 環境下での発生に関する知見はまだ不十分であり発生の可能性を断言することは出来ないものの、次項に示す様に、PWR 環境下でも強加工 SCC は進展する事が分かっており、発生についてもその可能性を否定することは出来ないものとする。

尚、溶接境界近傍は溶接入熱によりシンニング加工による硬化層が軟化していることも考えられるが、UT 指示位置においては概ね 300HV 以上の硬さとなっているものと考えられる。(添付 2.3.3-1)

③ 強加工 SCC 進展の評価

強加工 SCC の進展の感受性は、板厚内の硬さと相関があることが知られている。図 3 に PWR 環境下での強加工 SCC き裂進展試験結果の一例を示す

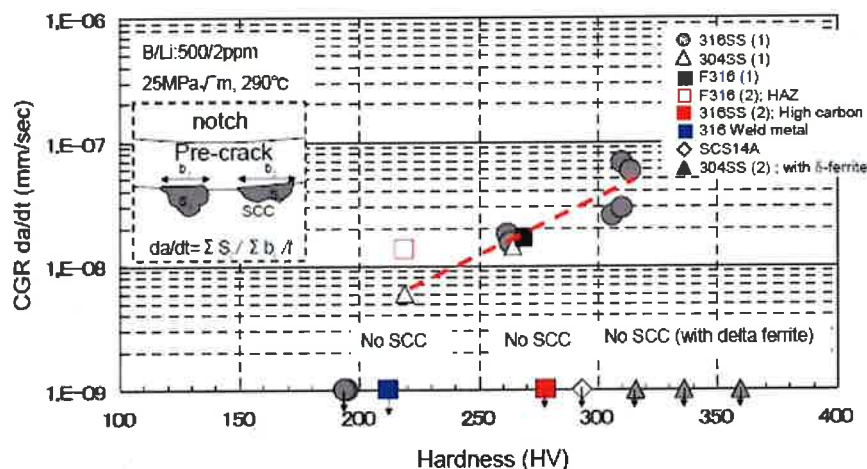


Fig. 6 Hardness / Material and Crack Growth Rate

図 3 PWR 環境下の硬さとき裂進展速度の関係

出典 ; Matsubara.et.al 2010 Fontevraud7 O02-A099-T03 -Research

Programs on SCC of Cold-worked Stainless Steel in Japanese PWR N.P.P.

これによれば、硬さが 200HV 以上のレベルであれば、PWR 環境中で SCC き裂は進展する事が分かる。

一方、図 4 には、当該部と同じ、SUS316、4B、Sch.160 の配管溶接部近傍の板厚内硬さ分布を計測した結果を示す。

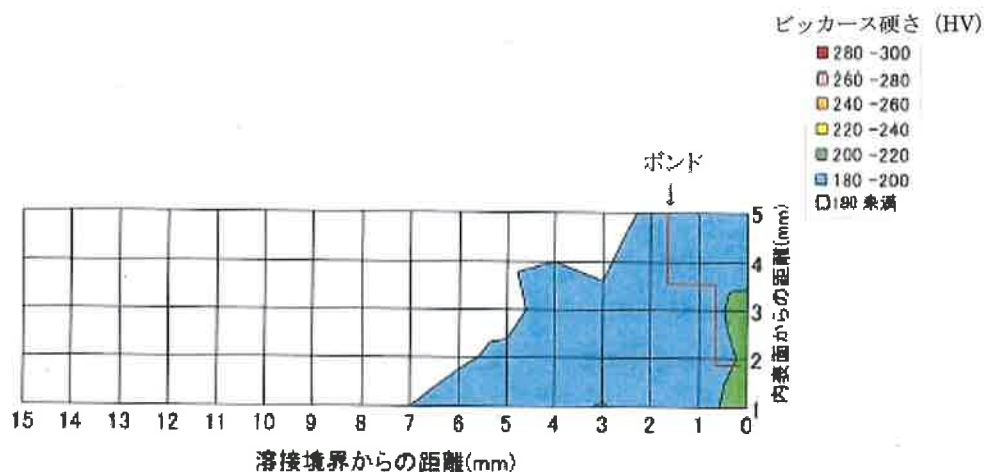


図4 4B、Sch.160 SUS316 配管の溶接部近傍板厚内硬さ分布

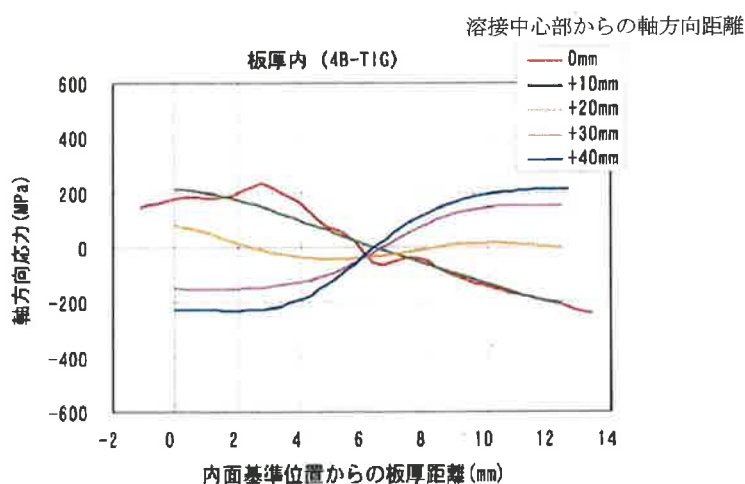
出典；電共研「強加工 SCC 懸念部位差別化のためのデータ拡充研究」

一般溶体化材料の硬さは、概ね 150~180HV 程度と言われ、図4によれば、溶接部近傍では、200HV を超える硬さが、表層のみでなく板厚内部にわたって認められる。

従って、図3および図4より、当該部に於いて強加工 SCC は進展し得るものと判断した。

尚、図3は応力拡大係数 $K=25\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、温度 290°C の条件下でのデータを示しているが、当該部の評価として使用できると考える理由を以下に示す。

まず、図5には、当該部と同じ、SUS316、4B、Sch.160 の配管溶接部近傍の配管軸方向溶接残留応力分布の解析結果を示す。これによれば、配管内面側では軸方向に 200MPa レベルの引張溶接残留応力の存在が認められ、周方向き裂を進展させるに足る状況となっていることが分かる。



(a) 軸方向応力

図5 4B、Sch.160 SUS316 配管の溶接部近傍板厚内軸方向溶接残留分布

出典；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」

また、実機当該部の運転中軸方向応力は 100MPa と評価されており、図 5 の溶接残留応力を加味すれば、当該部には約 300MPa レベルの軸方向引張応力が発生していたものと想定される。

従って、仮に深さ 2mm 程度のき裂を想定した場合、応力拡大係数 K は、概ね $\sigma \sqrt{\pi a} \div 25 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 程度と想定され、図 3 の試験条件と同一となる。更に、実機運転温度は 290℃であり、図 3 の条件と同一である。

従って、図 3 により当該部のき裂進展の可能性を評価したことは妥当と考える。

尚、図 3 はオーステナイト系ステンレス鋼母材に対する試験結果であるが、UT 検査結果からは溶込み溶接部を SCC が進展している可能性が示唆される。溶接金属内の SCC 進展の可能性に関する検討結果を、添付 2.3.3-2 に示す。

(き裂進展評価の詳細については、別途、3.4.1 に示す。)

2.4 製造不良の評価

当該溶接部は、MCP 管台とエルボの取り付け部であり、現地溶接で施工されている。施工当時、電気工作物の溶接に関する技術基準を定める省令に基づき、十分な品質管理を行って施工している(添付 2.4-3 参照)。具体的な施工手順については添付 2.4-1 に示す通り、MCP 管台及びエルボはともに工場で機械加工による開先加工及び先端部内面シーニング加工が実施され、先に現地に据え付けられた MCP 管台にエルボを合わせて現地溶接されている。非破壊検査としては、RT (添付 2.4-2 参照)、供用前検査 (PSI-UT) が実施されており、問題ない結果となっている。さらに、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、製造時の不具合が要因とは考え難いが、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しきれない。

以上

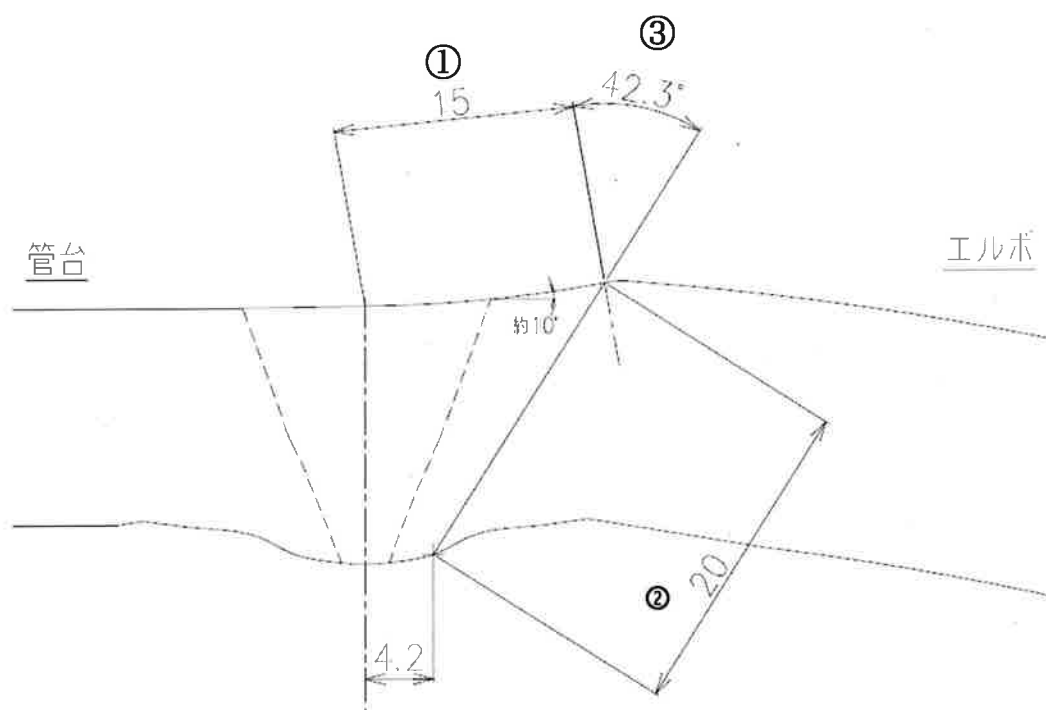
検査結果に基づくき裂起点位置の分析結果

当該溶接部は、MCP 管台とエルボの取り合いであるため、エルボ側は製法上厚肉構造となることから、開先端部からテーパ加工した形の開先形状となる。

実際のエルボ側のテーパ角は、製品の出来合いによるが継手メーカーにて、約 10° にて加工されている。

上記条件を基に UT 検査結果（添付-1.1.2）からき裂の起点を図示すると以下のようになり、溶接中心からき裂の起点は約 4.2mm となるが、製作公差や計測位置精度他を考慮すると、き裂の起点は溶接中心から概ね 4～5mm 程度と推定される。

一方、4B、Sch. 160 配管の内面での溶接ビード幅は 4～5mm 程度と考えられ、き裂の起点は母材に位置しているものと考えられる。



【参考 ISI における UT 記録（インディケーションの位置） 抜粋】

① 溶接中心からの距離 (Y) : 15mm

② 超音波ビーム路程 (W) : 20mm

③ 屈折角 : 42.3°

※内表面形状は直接計測できないため、図面情報を参考に作図

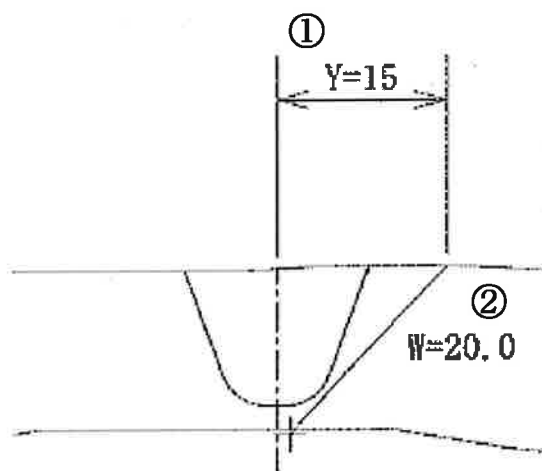
インディケーションの位置

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 FW-4

探触子 MWB45-2E

③
(SUS : 42.3°)



以上

実験室における SCC 発生試験結果

1. 概要

ステンレス鋼は PWR1 次系環境下で SCC 発生の感受性が低い材料として知られているが^{1,2}、表面に強い冷間加工を施した条件で割れが発生した例がある³。試験は亀裂発生を促進する目的でグラインダによる表面加工を施し、高い応力条件で行われたものであった。

2. SCC 発生試験の例（グラインダ加工後の試験片の亀裂³）

1) 試験条件

材料：グラインダ加工付き、平板引張試験片（5mm 幅×10mm 厚さ）

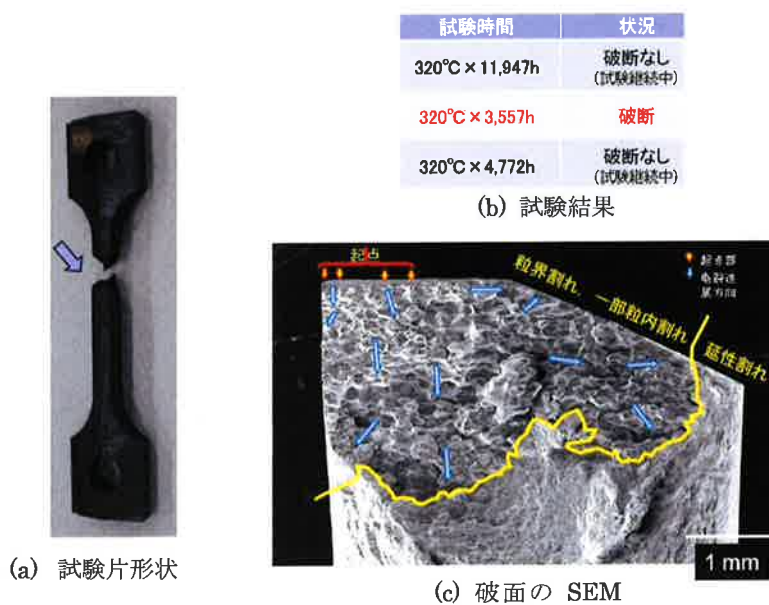
20%冷間加工 SUS316 + 表面グラインダ加工 + 傾斜研磨

水質：320℃、PWR 環境水(500 ppm B + 2 ppm Li + 30ccDH/kg・H₂O)

応力：555 MPa 定荷重

2) 結果

3 本中 1 本の試験片がグラインダ加工部を起点とした亀裂を生じさせた。破面は粒界を呈しており、**強冷間加工材と類似の SCC 進展を示した。**



¹ 竹本、武田、工藤、材料と環境 2018、A-307.

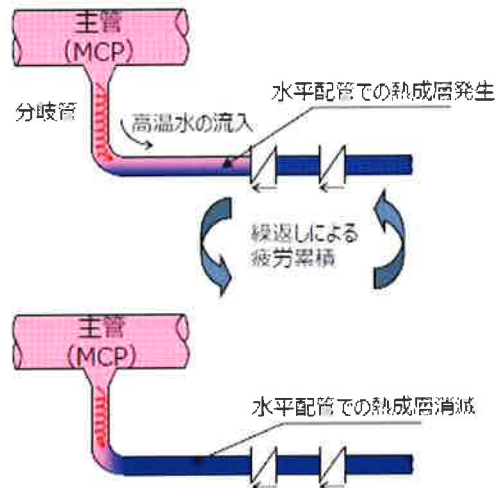
² 久保、片山、伊藤、第 64 回材料と環境討論会 2017、E-304.

³ 山田、INSS 第 24 回研究成果報告会 (2018).

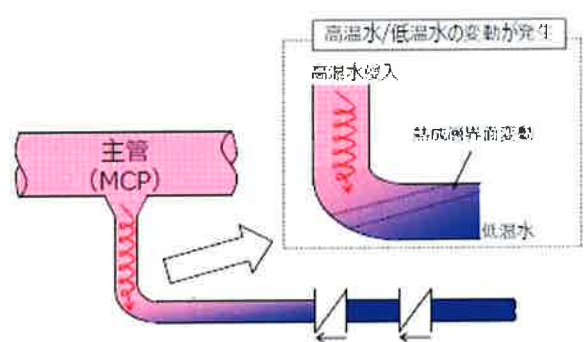
～メカニズム～

- 主管に閉塞した分岐管（鉛直下向き→水平の曲がりを持つ分岐管）が接続されている場合、主管側から枝管に熱水（キャビティフロー）が侵入し、キャビティフロー先端が曲がり部に存在する場合、熱成層界面の変動により疲労割れが発生。

＜曲がり部上部にCF先端が存在する場合＞



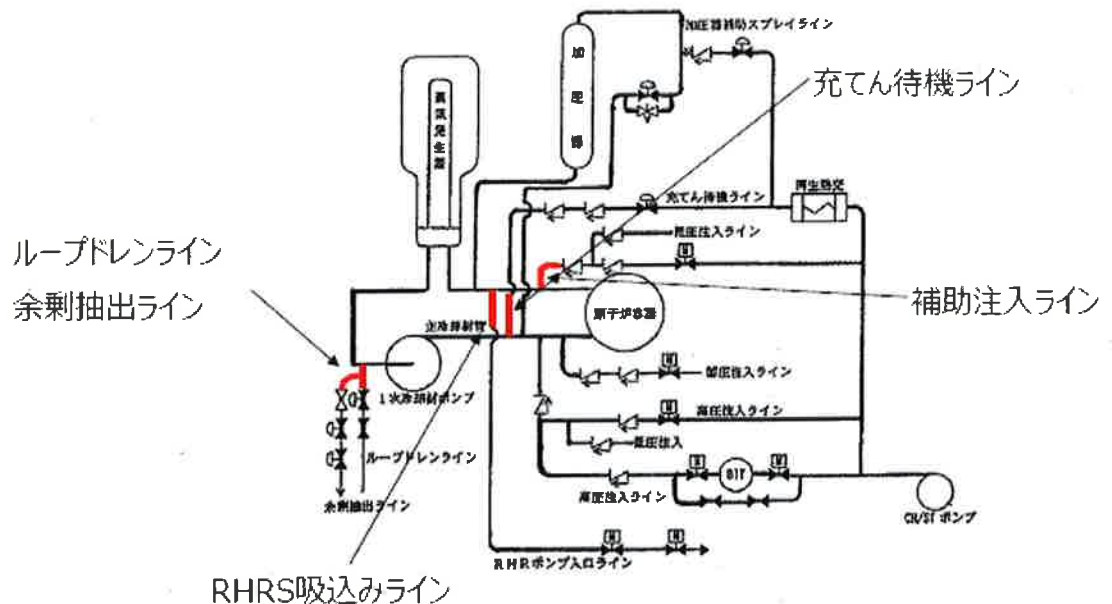
＜曲がり部中央部にCF先端が存在する場合＞



※国内外の損傷実績では、MCPからの分岐管で発生しているため、MCP分岐管を優先する

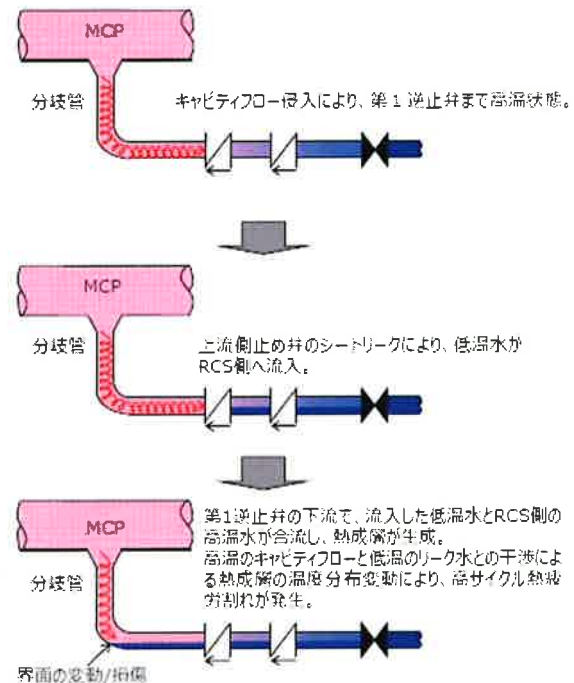
～対象ライン～

- ### ■ MCPに接続する閉塞分岐管
- 通常運転中に、流れが無く滞留しているライン



～メカニズム～

- MCPに流入する分岐管の止め弁上流側が通常時RCSより高圧になっているライン（充てんポンプ、充てん/高圧注入ポンプの吐出圧力を常時受けるライン）において、止め弁のシートリークによって冷水がRCS側に流入することにより熱成層が生じ、キャビティフローとの干渉により熱成層界面が変動し、疲労割れが発生。

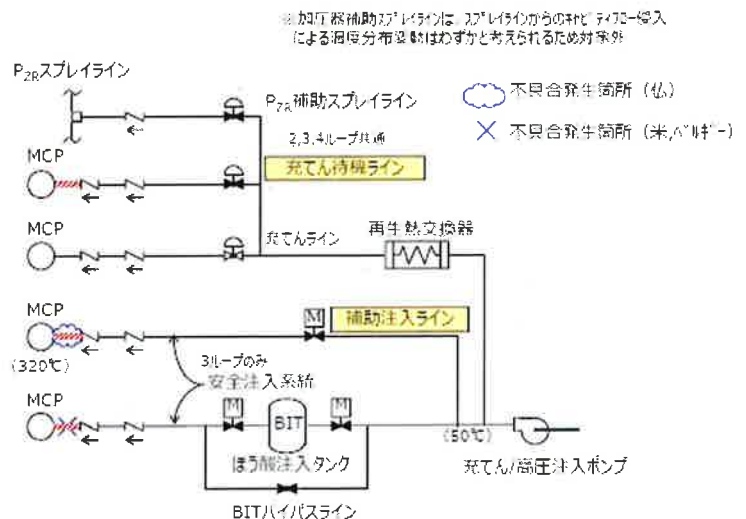
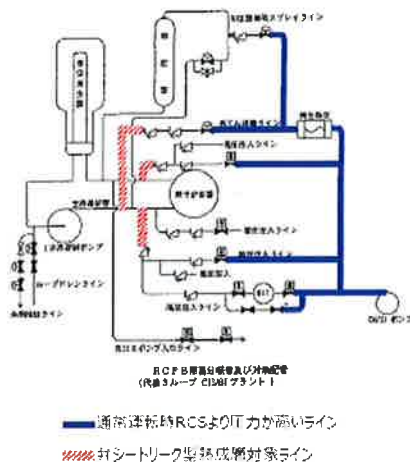


～対象ライン～

- MCPに流入する分岐管の止め弁上流側が、通常時RCSより高圧になっているライン。

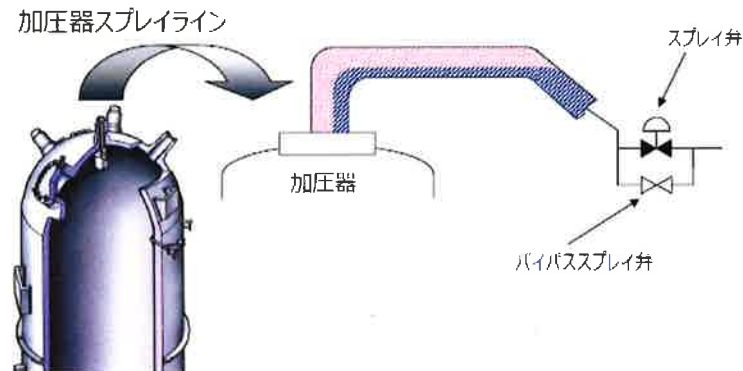


- 充てん待機ライン
- 補助注入ライン



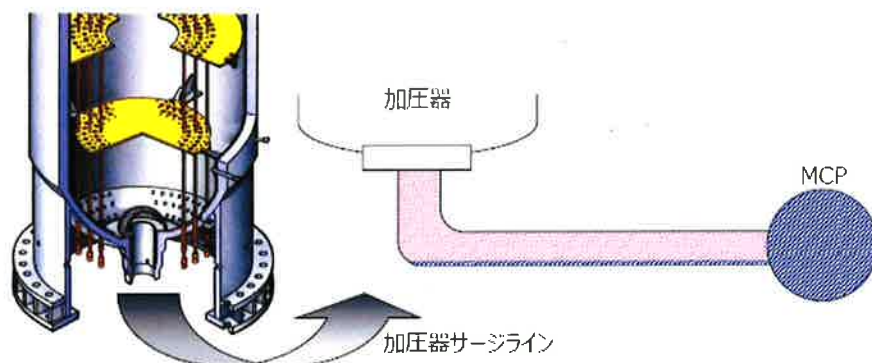
～メカニズム/対象ライン：①加圧器スプレライン～

- スプレイ弁の開閉操作により、熱成層が発生/消滅。スプレイ弁を閉じた時のバイパススプレイのような微小流量時に、加圧器側からの蒸気の逆流により気液二相となる。熱成層界面の変動により疲労割れ発生。



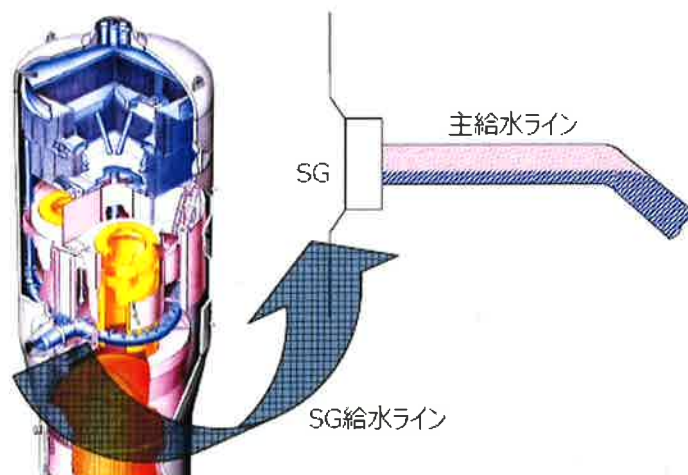
～メカニズム/対象ライン：②加圧器サージライン～

- 微小サージ流量時に発生した熱成層界面が、起動・停止時等のアウトサージ、インサージにより変動を繰り返し、疲労割れ発生。



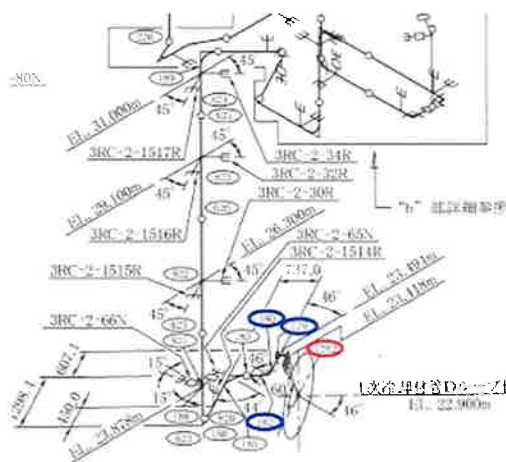
～メカニズム/対象ライン：③蒸気発生器給水ライン～

- 起動・停止時等の微小給水時に発生する熱成層界面が、間欠的な給水により変動を繰り返し、疲労割れ発生。



大飯 3 号機 加圧器スプレイ配管ベント弁 振動計測結果

系統	整理番号	弁番号	要否	加速度 (m/s ²)			評価点 1 (σ)			
				X	Y	Z	発生応力 (MPa)	評価点	許容値 (*1) (MPa)	評価
RCS	2	3V-RC-106	要	0.7	0.7	0.7	0.80	3/4B SUS 突合せ溶接	28.0	○



- 今回 UT 指示が確認された加圧器スプレラインの疲労累積係数を下表に示す。
- 当該部の供用状態 A 及び B における疲労評価結果は、疲労累積係数（40 年運転）で 0.00013（下表の赤枠）と十分余裕のある値であり、疲労割れ発生の可能性は考え難い。
- また、PWR 水中環境下での環境疲労効果を考慮した係数倍法による環境効果補正係数（約 20）を考慮しても、当該部の疲労累積係数は 0.0026 と十分に小さな値である。

表2 当該加圧器スプレライン疲労評価結果（出典：三菱社内確認資料）

（ ） 供用状態 A、B における疲労累積係数（クラス 1 配管）

節点番号	圧力による応力 (MPa)	外荷重による応力 (MPa)	板厚方向線形温度差による応力 (MPa)	構造上の不連続による熱応力 (MPa)	板厚方向非線形温度差による応力 (MPa)	ヒート入力強さ (Mpa)	繰返しヒート入力強さ (MPa)	繰返しヒート入力強さ (MPa) / (1)	疲労累積係数	許容値
400	53.6	11.5	296.1	0.0	117.5	479	240	244	0.00012	1.0
622	48.8	28.8	268.1	0.0	117.1	463	232	232	0.00008	1.0
258	53.2	56.0	268.1	0.0	117.1	495	248	248	0.00012	1.0
260	79.3	31.1	319.9	0.0	221.3	652	326	350	0.20928	1.0
264	79.9	38.5	351.9	0.0	221.3	692	346	371	0.33096	1.0
266	79.9	44.8	351.9	0.0	221.3	698	349	374	0.34744	1.0
1203	79.9	16.4	351.9	0.0	221.3	700	350	375	0.35069	1.0
1202	91.3	204.9	6.8	0.0	2.6	306	153	172	0.00013	1.0
179	91.3	192.8	6.8	0.0	2.6	294	147	165	0.00011	1.0
180	91.3	167.9	6.8	0.0	2.6	269	135	151	0.00007	1.0
182	91.3	146.5	6.8	0.0	2.6	248	124	139	0.00005	1.0
183	80.0	84.7	6.8	0.0	2.6	175	88	98	0.00000	1.0

以上

当該溶接部は通常運転中、水質管理された一次冷却材が流れているラインであり溶存酸素濃度は 0.005ppm 以下に管理されているため、溶存酸素環境下で発生する鋭敏化 SCC とは考え難い。

また、塩素濃度も 0.05ppm 以下に管理されており、Cl-SCC の発生も考え難い。

表1 PWR 1 次系水質基準値例

分析項目	単位	基準値	制限値	推奨分析項目 基準値	実績値
1 pH	25℃	*1			
2 導電率	25℃Cp/Scm	*1			
3 水ウ素	mgB/l	*2			
4 塩化物イオン	mgCl/l	≦0.05	≦0.15		<0.05
5 ふっ化物イオン	mgF ⁻ /l	≦0.05	≦0.15		<0.05
6 溶存酸素	mgO ₂ /l	≦0.005	≦0.1		<0.005
7 溶存水素	CC-STP/kg H ₂ O	25~35	≧15 ≦50		~30
8 リチウム	mgLi ⁺ /l	0.2~2.2			
9 濃度	mg/l	≦1			<0.1
10 酸可溶鉄	mgFe/l			≦0.05	<0.01
11 シリカ	mgSiO ₂ /l			≦0.5	~0.3

*1 B-Li 系の各濃度の割合によって決まる (μS/cm 1~40・pH 4.2~10.5)

*2 プラント運転状況によって変化する (0~4000mg/l)

表1 PWR一次系水質管理基準

(出典：「発電プラントの腐食とその防止 P177」火力原子力発電技術協会)

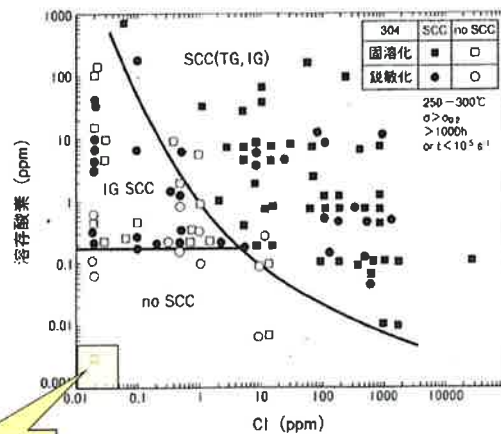


図1 304ステンレス鋼の高圧高温水による応力腐食割れにおよぼす溶存酸素とClイオンの関係

出典：「新版 金属の腐食損傷と防食技術 P389」小若正倫 著

以上

溶接境界付近の硬さに関する検討

添付 2-1 に示した様に、今回の UT 指示位置は、溶接中心から約 4～5mm 程度離れているものと分析されている。一方、溶接境界は溶接中心から概ね 2～2.5mm 程度と考えられ、UT 指示位置の溶接境界からの距離は、1.5～3mm 程度と想定される。

溶接境界の近傍はある程度軟化している可能性は考えられるが、溶接境界から 3mm 以上程度の距離があれば、軟化の程度は顕著ではないものと推定される。参考として、配管口径や材質は異なるが、BWR の PLR 配管溶接部において溶接境界からの距離に応じた表層での硬度分布を計測した例を以下に示す。

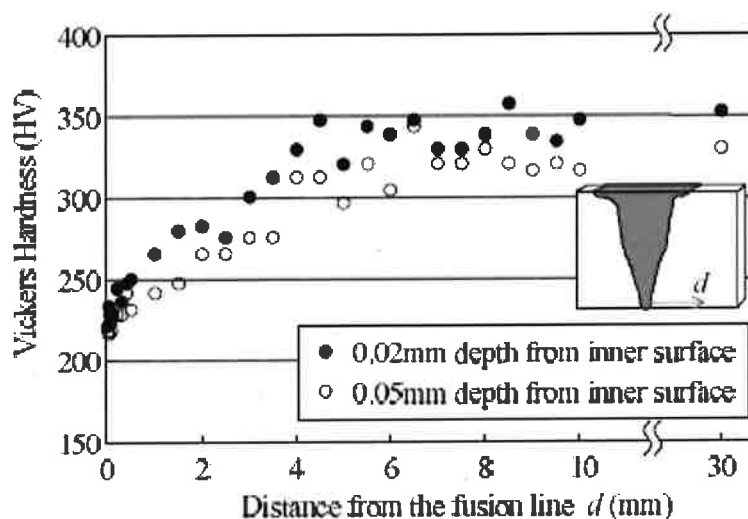


Fig. 17 Vickers Hardness profiles near the surface (along the axis d in this figure) in Kashiwazaki-Kariwa Unit 1

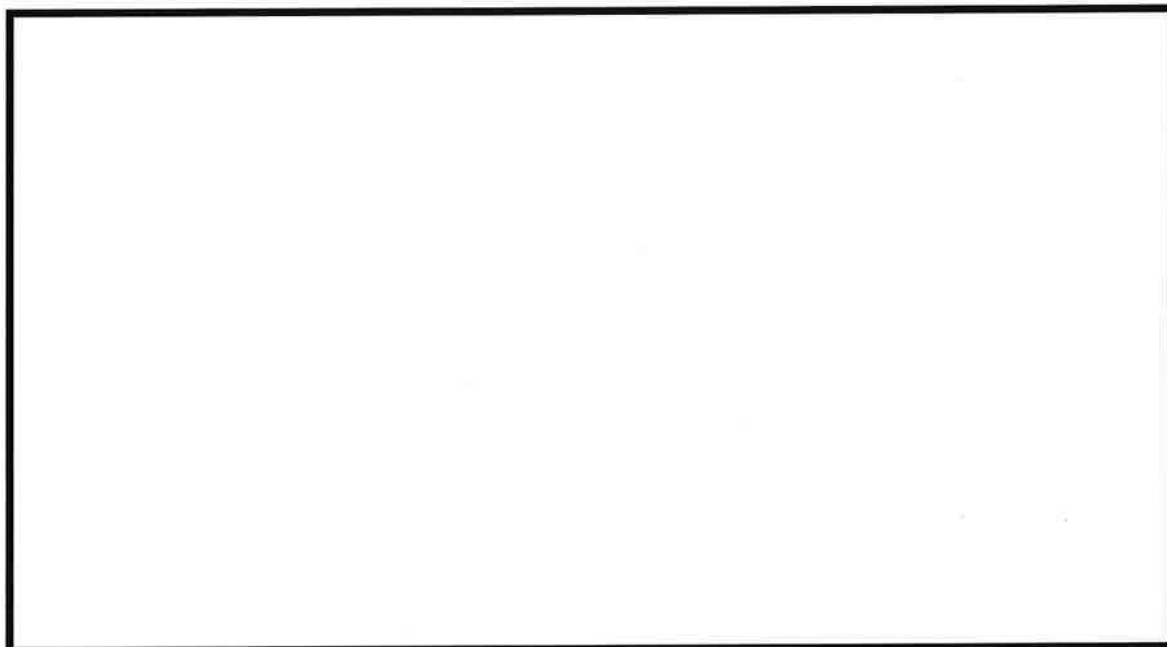
出典；BWR における低炭素ステンレス鋼の SCC 形態の評価、圧力技術、第 42 巻第 4 号

これによれば、溶接境界からの距離が 3mm 程度以上離れた位置では、表層からの距離 0.02mm の深さでの硬さは 300HV 以上となっていることが分かる。

本データは、表層から 0.02mm および 0.05mm の深さでの硬さ分布を示しているが、より極表層にあってはその硬度は高くなることが想定される。過去に配管シンニング部の機械加工条件を模擬して行った硬さ試験の結果を示す。これによれば、表層から 0.01mm 位置での硬さは、表層から 0.02mm 位置で

の硬さと比較して明らかに高い傾向が認められるため、表層 0.01mm 深さでの硬さは溶接境界から 3mm 弱以降の領域では 300HV を超えている可能性が考えられる。

従って、当該配管 UT 指示部の表層硬さは、300HV を超えている可能性があるものと考えられる。



出典；製造メーカー社内モックアップデータ

以上

：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

溶接金属の SCC 進展性に関する検討

一般に、溶接金属は、高温割れ対策として数%～十数%程度のデルタフェライトを含んでいるため、一般的には SCC 感受性は低くなる。一方、母材ではデルタフェライトが生じにくいいため、裏波溶け込み部において母材と溶接金属の希釈によりデルタフェライト濃度が低下し、き裂が進展しやすくなる可能性が考えられるが、今後詳細な検討が必要と考えている。

デルタフェライト量は、化学成分によって大きく変動する。成分とデルタフェライト量の関係を示すシェフラーの状態図中に、SUS316 母材 (○) と溶材 (△) のミルシート値でプロットを行ったものを示す。

- ・ 316 母材はデルタフェライトを生じにくい化学成分ですが、溶接金属は高温割れ防止のためにデルタフェライト量が多くなるよう、低 C・高 Cr の化学成分となっている。
- ・ 溶接時に母材が溶け込む部位の状態は、溶け込みの程度、即ち母材と溶接金属の希釈の程度に応じて点線上付近に位置し、母材と溶材の間のフェライト量となる。
- ・ 従って、母材と溶接金属の希釈の状況によっては、溶接金属であってもデルタフェライトが低下し、SCC の進展が認められることの可能性も否定しきれないものと考えられる。

シェフラー図は JISZ3119 (2006) より転載

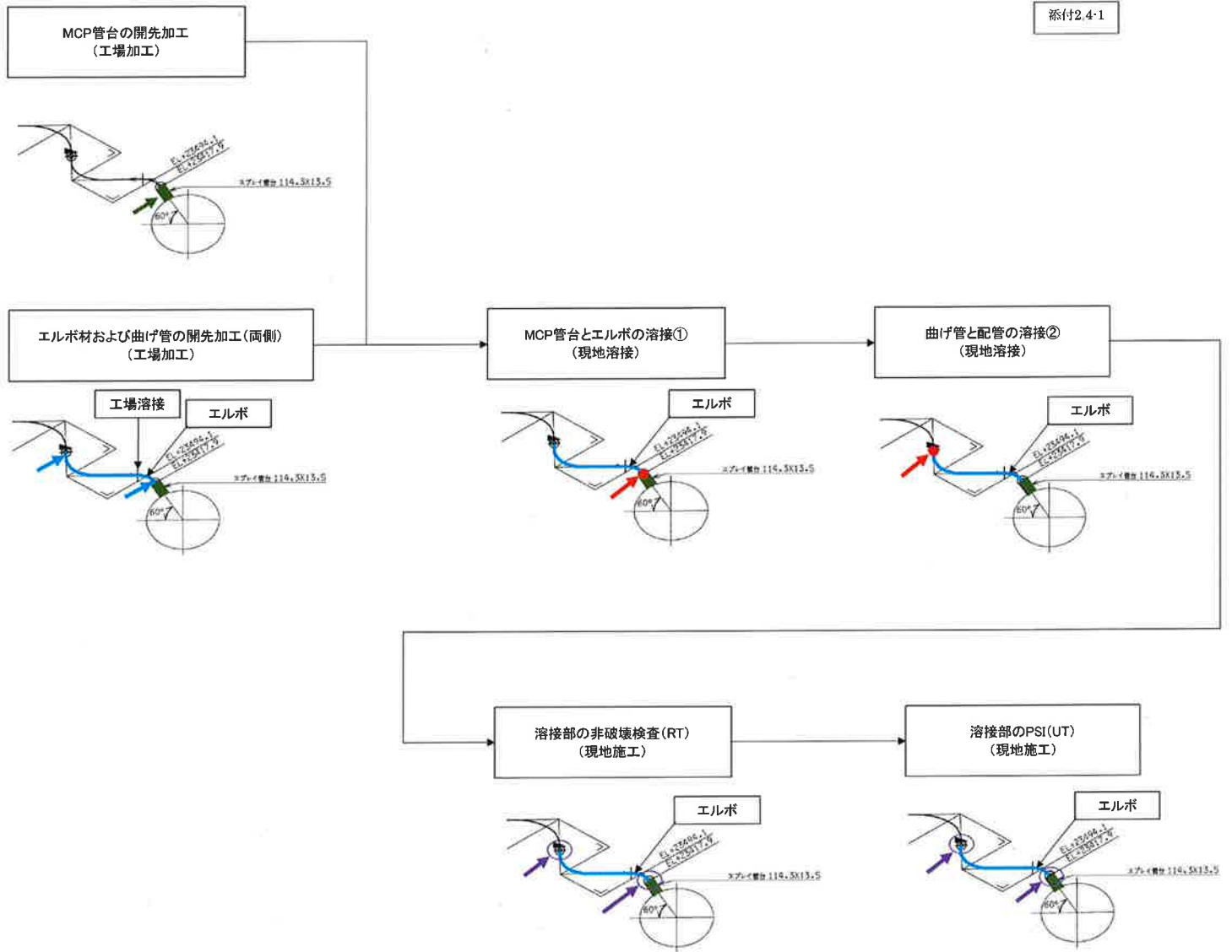
しかし、デルタフェライト量が低下した場合の SCC 進展に関する知見は少なく、実機の調査とその結果を踏まえた検討が必要と考えている。

但し、以上はあくまで既存知見からの推定であり、オーステナイトステンレス鋼の裏波溶け込み部を対象とした SCC 発生・進展の研究結果はなく、SCC が進展した可能性を否定することはできない。また、裏波溶け込み部に検出限界未満の微小な欠陥があった可能性もあるため、今後、実機調査結果も踏まえた詳細な検討が必要と考えている。

尚、溶接金属内を SCC が進展した例としては、BWR プラントの低炭素ステンレス鋼製機器で発生した SCC[1]が挙げられる。一方、PWR プラントではき裂が溶接金属内で進展していた例は確認できなかった。

[1]鈴木、他 “BWR における低炭素ステンレス鋼の SCC 形態の評価” 圧力技術 第 42 巻第 4 号

以上



加圧器スプレイ管台と配管(エルボ)の製造フロー

フィルム判定結果 TEST RESULT				
溶接線番号 WELD JOINT NO.	KON3-RCS016 FW 4 FW 6 (各1~7)		撮影日時 SHOT DATE	4.26.90
検査官 INSPECTOR	財団法人 全国溶接技術検査協会		検査日時	5.31.90
	客 先		DATE OF REVIEW	
フィルム番号 RADIOGRAPH NO.	欠陥の位置と種類 LOCATION & TYPE OF DEFECT → 寸法長 55 mm ←		初 定 EVALUATION	備 考 REMARK
KON3-RCS016 FW 4 - 1	✓		☒ 合格 PASS	
2	✓		☒ 合格 PASS	
3	✓		☒ 合格 PASS	
4	✓		☒ 合格 PASS	
5	✓		☒ 合格 PASS	
6	✓		☒ 合格 PASS	
7	✓		☒ 合格 PASS	
FW 6 - 1	✓		☒ 合格 PASS	
2	✓		☒ 合格 PASS	
3	✓		☒ 合格 PASS	
4	✓		☒ 合格 PASS	
5	✓		☒ 合格 PASS	
6	✓		☒ 合格 PASS	
7	✓		☒ 合格 PASS	
以下 余 白			☐ 合格 PASS	
			☐ 合格 PASS	

欠陥の種類 TYPE OF DEFECT		C : クラック CRACK	検査官 EXAMINER  LEVEL 1
P : ポロシティ POROSITY	IP : 溶透の不良 INCOMPLETE PENETRATION		
S : スラッグ包含 SLAG INCLUSION	LF : 融合不良 LACK OF FUSION		
T : タングステン包含 TUNGSTEN INCLUSION	A : フィルム欠陥 FILM ARTIFACT		

JIS 5036号 (規格費)

三菱重工業株式会社 神戸造船所
MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. KOBE SHIPYARD & MACHINERY WORKS

建設時における製作ステップ毎の検査及び施工管理について

当該溶接部に対する製作ステップ及び各ステップにおける実施内容と実績及び検査記録は以下の通りである。

製作時は建設当時の溶接技術基準（電気工作物の溶接に関する技術基準を定める省令：通商産業省令第81号）に従い、国の指定検査機関である財団法人発電設備技術検査協会による溶接検査を適切に受検し合格している。したがって、製作検査及び施工管理は問題ない。

ごく微小な傷の存在は否定しきれないが、下表に示す施工管理の実施および製作中検査に合格していることから、溶接施工時の有意な傷は無いと考えられる。

表 製作ステップと実施内容

作業手順 (実施場所)	実施内容と実績	検査記録
材料確認検査 (工場)	図面指示通りの材料（ミルシートが規格を満足していることの確認を含む）が使用されていることを確認している。 また、素材の表面に有害な欠陥が無いことを目視にて確認している。 溶接検査として財団法人発電設備技術検査協会の検査を受検し、合格している。 【参考】当該 60° エルボは、熱間成形により製作されている。	溶接検査実施状況表 ：添付-1 製作・据付工程チェックシート ：添付-2 素材チェックシート ：添付-3 ミルシート：添付-4
開先加工 (工場)	図面に従い開先部の加工を実施している。 スプレイ管台及び 60° エルボの加工方法（実施場所）を以下に示す。 ・スプレイ管台： 姿バイト加工（三菱工場） ・エルボ： チップ加工（材料メーカー工場）	溶接検査実施状況表 ：添付-1 製作・据付工程チェックシート ：添付-5
材料加工面検査 (現地)	目視により、機械加工部が平滑に仕上げられていること、及び、有害な傷が無いことを確認している。 溶接検査として財団法人発電設備技術検査協会の検査を受検し、合格している。	

開先合せ (現地)	取合い部材（スプレイ管台とエポ [®] ）の開先合せを実施。	溶接検査実施状況表 ：添付-1
開先検査 (現地)	取合い部材（使用材料含む）が正しいこと、開先部の形状が図面通りであること、有害な欠陥が無いことなどを確認している。 溶接検査として財団法人発電設備技術検査協会の検査を受検し、合格している。	開先検査記録 ：添付-6
溶接 (現地)	溶接施工法番号：579（T_F+A） 溶接士：A氏（K270）、B氏（K09） 溶接施工指示書兼記録書は事前に確認された適切な溶接施工法により、適切な条件で資格を有した溶接士が実施していることを確認している。溶接は初層をTIG溶接、残層を被覆アーク溶接で施工している。 施工手順（溶接方向及び積層順序）としては、通常行う配管溶接では下側から上側にかけて上進（図1参照）で施工し、積層順序は図2の通りと推定する。 なお、溶接検査として財団法人発電設備技術検査協会の検査を受検し、合格している。 図1 溶接施工模式図（推定） 図2 積層図（推定）	溶接検査実施状況表 ：添付-1 溶接施行指示書兼記録書 ：添付-7 溶接施工法確認試験記録 ：添付-11 手溶接士の氏名、資格 作業経歴 ：添付-12

：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

非破壊検査 (現地)	溶接に関する技術基準に基づき、浸透探傷試験及び放射線透過試験を実施し、有害な欠陥が無いことを確認している。(記録すべき指示はなし。) 溶接検査として財団法人発電設備技術検査協会の検査を受検し、合格している。	溶接検査実施状況表 ：添付-1 放射線透過試験記録 ：添付-8 浸透探傷試験記録 ：添付-9 製作・据付工程チェックシート ：添付-5
耐圧漏えい試験 外観検査 (現地)	規定圧力にて規定時間の保持を行い、異常な変形が無いこと及び著しい漏えいのないことを確認している。 また、溶接部の外観に有害な欠陥が無いことを確認する。 溶接検査として財団法人発電設備技術検査協会の検査を受検し、合格している。	溶接検査実施状況表 ：添付-1 耐圧・漏えい試験記録 ：添付-10 製作・据付工程チェックシート ：添付-5

溶接検査実施状況表(2)

[illegible]

溶接検査実施状況表 (1)

シート
母 号 1/2

受付番号	1 大 溶原第 306 号		機器の名称	一次冷却設備配管 (その 9)					発電所及び 施設番号	関西電力 (株) 大飯発電所第 3 号機		
申請書番号	溶中 89 神第 5134 号原		溶接施行工場	三菱重工業 (株) 神戸造船所					機器の区分	第 1 種管	検査の場所	発電所
検査年月日	2*3月22日	2*3月30日	2*4月10日	2*5月15日	2*5月29日	2*5月31日	2*6月5日	2*7月5日	2*7月16日	2*9月18日	年月日	年月日
検査員印												
検査項目	(AS)	M.A	M.A.F.(AF)	M.A	(AS)	W.P.L.Rt	A	W.P.L.Rt	W.P.L.Rt	P.F		
検査年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日
検査員印												
検査項目												
検査年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日
検査員印												
検査項目												
検査年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日
検査員印												
検査項目												
検査年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日
検査員印												
検査項目												

記 事 ※P.Fは工場溶接も含む
(注)SW分はP.耐圧時外観Fのみ発電所で実施

検査員氏名 印

検査員印

刻印番号 千01306㊦

材料・・・M、両端面・・・A.F、材料加工面・・・㊦、両端・・・A、裏ハブリ・・・B、溶接・・・W、被膜・・・S.r、磨き面・・・U.t、防錆処理・・・T.t、磁粉・・・M.t、浸透・・・P.t、機械・・・T、測定・・・P、内部・・・㊦、外観・・・F

01.06.03

製作・掘付工程シート

【参考】「B90」とは、90° 管台 (BOSS) を示す。



Hitachi Metals, Ltd.

Yasugi Works
2107-2, Yasugi-cho
Yasugi-shi, Shimane-Ken
Japan
Tel. Yasugi (08542) 2-3501



TEST CERTIFICATE

Report No. F400-03-1/4

Date Dec. 27, 1988

Messrs. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.
Kobe Shipyard & Engine Works.

Part Name: 4B加圧スプレイング

DWG. No. ZKZ-7626Rev. 0-02(YA3-218215Rev. 2)

Material JIS G3214 (1977) SUS F316

Order No. 2003207

Req. No. ZK302448-03 SE

Spec. No. MSBZK2-1002Rev. 1

Condition Solution Heat Treated & Rough Machined

Item		Specification Charge No.	Chemical Composition (%)											No. of Piece	Weight (kgs)	
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	Co				
			max 0.08	max 1.00	max 2.00	max 0.040	max 0.030	10.00~ 14.00	16.00~ 18.00	2.00~ 3.00	-	-				
1	Ladle	B9856	0.05	0.56	1.87	0.025	0.006	12.57	16.46	2.20	0.03	0.04			2	
2	Check	"	0.05	0.62	1.88	0.025	0.006	12.63	16.47	2.19	0.03	0.05				
3																
4																
Item	Test Specimen (mm) Dia. X Gauge Length	Specification	Mechanical Properties													
			Tension Test				Impact Test		Bend Test (Cold)	Hardness	Heat Treatment (°C)					
			0.2% offset Yield Strength	Tensile Strength	Elongation	Reduction of Area	Charpy (Izod)									
			kgf/mm ²	kgf/mm ²	%	%	kgf-m /cm ² ft-lbs		HBS	Solution Treatment						
			min 21	min 53	min 45	min 50	-	-	max 187							
1	12.5x50.0		28	55	60	73				146	1050x90° W.C					
2																
3																
4																

Marking: F40003 1~2

Liquid Penetrant Inspection: Good

Ultrasonic Inspection: Good

Manager of Quality Control Section,
Yasugi Works, Hitachi Metals, Ltd.

添付-4(1/6)

：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

三菱重工業株式会社神戸造船所 御中

超音波探傷検査成績表

日立金属株式会社安来工場

No. F400-03-214

承認		照査	
----	--	----	--

注文番号	2003207	数 量	2
受注番号	291-F400-03	発 電 所 名	KON-3
Req. No.	ZK 302448-03 SE	適 用 規 格	通産省告示第501号 (MSBVH6-1304 Rev0)
品 名	4B 加圧器 スプライン 溶台	検 査 年 月 日	昭和 63 年 11 月 10 日
図 面 番 号	ZK2-7626 Rev0-02 (YA3-218215 Rev2)	溶 解 番 号	B9856
鋼 種	JISG3214 (1977) SUSF316	刻 印	F40003.1~2
探傷条件			
探 傷 器	IIM 731	探傷表面状態	25S
探 傷 方 法	垂 直 法	探 傷 感 度	B ₁ =80%
標準試験片	本 体	接 触 媒 質	グリセリン
周 波 数	2.25MHz	検 査 時 期	最終 中間
探 触 子	φ20セラミック		
探傷位置 (↑印方向全面探傷)			
判 定		検 査 員	Level II
合 格		御 立 会 者	

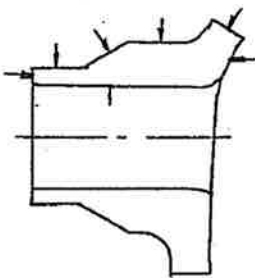
三菱重工業株式会社神戸造船所 御中

液体浸透探傷検査成績表

日立金属株式会社安来工場

No. F400-03-3/4

承認		照査	
----	--	----	--

注文番号	2003207		数量	2
受注番号	291-F400-03		発電所名	KON-3
Req. No.	2K302448-03 SE		適用規格	通産省告示第501号 (MSB4H6-1401 Rev.0)
品名	4B加圧器スプリング台		検査年月日	昭和 63 年 12 月 27 日
図面番号	2K2-7626 Rev.0-02 (YA3-218215 Rev.2)		溶解番号	B9856
鋼種	JIS G 3214 (1977) SUSF316		刻印	F40003.1~2
探傷条件				
探傷液	商品名	ロット番号	探傷表面状態	25S
浸透液	Super Check UP-T	PF1434	浸透時間	20分
現像液	" UP-T	BJ11	探傷部温度	* 14°C
洗浄液	" UP-T	BJ0000	検査時期	最終 中盤
探傷位置 (↑印方向全面探傷) ※標準試験片確認				
				
判定		検査員		
合格		Level II		
		御立会者		

染色浸透探傷検査成績表
LIQUID PENETRANT EXAMINATION REPORT



No. NKX4983

住友金属工業株式会社
鋼管製造所
技術部 品質保証室
SUMITOMO METAL IND., LTD.
STEEL TUBE WORKS
QUALITY ASSURANCE SECT.

注文先 Customer	MITSUBISHI HEAVY IND., LTD. KORE SHIPYARD & MACHINERY WORKS		
向先 Project	KON-3 RCS -M-	作業番号 Mill Work No.	NKX4983
工事番号 Job No.			
注文番号 Order No.	2003239ZJH22727-02-SE	規格 Stand.	JIS B2312 SUS316 (JIS G3459 SUS316TP)
適用標準 Applied Specification	通産省告示第501号 MITI Code No. 501 *ASME Sec. I	仕様 Spec.	ZJE-2101-0

検査日
Date of Exam. 563.12.27

員数
Quantity 2

探傷条件 Examination Condition
*該当欄をマーク Mark the applicable column

探傷時期 Exam. Stage	製品			*表面状態 Surface Condition	☒ 機械仕上 Machined ☐ グライNDER仕上 Ground ☐ 冷間仕上 Cold Drawn	
*探傷剤 Medium Material	☒	マークテックススーパーチェック MARKTEC SUPER-CHECK	浸透液 Penetrant P-T 現像液 Developer D-T 洗淨液 Remover R-T	*浸透液塗布方法 Penetrant Application	☒ ハケ塗り Brushing ☐ スプレー Spray ☐ 浸漬法 Dipping	
		I K S チェック IKS CHECK	浸透液 Penetrant P		浸透時間 Penetrant Time 20 分	
			現像液 Developer D			現像時間 Developing Time 20 分
			洗淨液 Remover R			
過剰浸透液除去方法 Method of removing excess penetrant	洗淨液を浸ませた布で拭う Wiped with cloth soaked with remover		*試験温度 Temperature 6 °C	☒ 比較試験片により確認 試験を行った Qualified with the comparator		
試験前後の洗淨方法 Method of cleansing before and after examination	アセトンに浸ませた布で拭う Wiped with cloth soaked with acetone					
*探傷範囲 Examined Area	☒ 外面全面 Whole outside surface ☐ 端面 End surfaces ☐ 端面より外径相当分長さ範囲の内面 Inside surface of bot. ends (Same length of outside diameter) ☐ 内面全面 Whole inside surface ☒ 開先面 Bevelled ends ☐ 全表面 Whole surface					

結果
Result

コウカク
ACCEPTABLE

検査
Examined by (Level - II)

判定
Judged by (Level - II)

記録確認
H2
8/10
関西電力

20

添付-4(5/6)

超音波探傷検査成績表
ULTRASONIC EXAMINATION REPORT

No. NKX4983

注文先 Customer MITSUBISHI HEAVY IND., LTD. KOBE SHIPYARD & MACHINERY WORKS
向先 Project KON-3 RCS -M- 作業番号 Mill Work No. **NKX4983**
工事番号 Job No.
注文番号 Order No. 2003239ZJH22727-02-SE 規格 JIS 5332 SUS316
適用標準 Applied Specification 通産省告示第501号 MITI Code No. 501 仕様 Spec. ZJE-2101-0
ASME Sec. III

住友金属工業株式会社
鋼管製作所
技術部 品質保証室
SUMITOMO METAL IND., LTD.
STEEL TUBE WORKS
QUALITY ASSURANCE SECT.

検査日 Date of Exam. 56.12.1

寸法 Size 4B SCH.160

60E(L)

員数 Quantity 2

探傷条件 Examination Condition *該当欄をマーク Mark the applicable column

探傷時期 Exam. Stage	素材		表面状態 Surface Condition	機械仕上 Machined
探傷器 Equipment	東京計器 TOKYO KEIKI: UM731		グラインダー仕上 Ground	
探傷方法 Exam. Method	0 斜角法 (Angle Beam)	0 接触法 (Contact)	工業用水 Ind. water	0 製管の寸法
探傷方向 Exam. Direction	軸方向 (2) 方向 Axial Ways	円周方向 (2) 方向 Circum. Ways	なたね油 Rape Oil	
探触子 Transducer	寸法 Size 20x20 mm	材質 Material チタン酸バリウム Barium Titanate	機械油 Machine Oil	
感度調整 Calibration	周波数 Freq. 2 MHz	0 ジルコン酸鉛 Lead Zirconate	標準ノッチ (放電加工) Standard Notch (Electric Discharged)	深さ Depth 1.5mm
探傷範囲 Examined Area	全体積 Whole Volume		長さ Length 25mm	方向 Direction 0 軸方向 0 円周方向
	備考 Remarks 素材寸法 45.0 x 5.5 x 720 = 2本		感度調整 The echoes from the standard notches were calibrated 90 % (内面) 80 % (外面) に調整	
			健全部底面からのエコー高さをオシロスコープのフルスケールの % に調整	

結果 Result

OK WAK
ACCEPTABLE

検査 Examined by (Level - I)

判定 Judged by (Level - II)

56.12.1 三菱神戸

記録確認 関西電力 112 8/10

製作・据付工程中子エックシート

溶接検査 申請番号	溶接検査 区分	89 特第 5134 号原 部 品 号	プラント名	KUH-3 加工面修式	工事名称	RCS03	図面 番号	H2-3911015 図面 番号	H2-3911016 図面 番号	オージ システム	2003239/1100	シート番号	発行日
溶接検査 区分	溶接検査 番号	部 品 号	() 開	() 閉	開先合せ 後	中 間 検 査	熱処理	溶接部非破壊検査 PT/MT UT RT	最終目視 検査	内 部 配圧試験	副圧代行 官制証	備 考	
						HPT 26PT 39PT							
G FW- 1	1	N (900) F 008	02. 04.09	02. 04.09	02. 05.14	XXX	XXX	02. PT 06.26	02. 06.27	02. 09.18	XXX	XXX	
G FW- 2	2	N (008) F 001	02. 04.10	02. 04.10	02. 05.15	XXX	XXX	02. PT 07.05	02. 07.05	02. 09.18	XXX	XXX	
G FW- 4	4	N (901) F 011	02. 03.22	02. 03.22	02. 03.29	XXX	XXX	02. PT 04.25	02. 04.27	02. 09.18	XXX	XXX	
G FW- 6	6	N (002) F 003	02. 03.22	02. 03.22	02. 03.29	XXX	XXX	02. PT 04.25	02. 04.27	02. 09.18	XXX	XXX	
G FW- 7	7	N (003) F 004	02. 03.22	02. 03.22	02. 03.29	XXX	XXX	02. PT 04.25	02. 04.27	02. 09.18	XXX	XXX	
G FW- 8	8	N (004) F 005	02. 03.22	02. 03.22	02. 03.29	XXX	XXX	02. PT 04.25	02. 04.27	02. 09.18	XXX	XXX	
G FW- 10	10	N (009) F 006	02. 03.22	02. 03.22	02. 03.29	XXX	XXX	02. PT 04.25	02. 04.27	02. 09.18	XXX	XXX	

三 菱 重 工 業 株 式 会 社 神 戸 造 船 所

開先検査記録 (1/1)										
沼津 89 特第 5134 号底										
プラント名	関西電力(株)大飯発電所第3号機				工事番号	2003239/1100				
品名	一次冷却設備配管(その他)				図番	H2-3911016				
溶接検査番号 (プロット記)	件号	部品名称	内径		開先部厚さ		面のくい違い (最大値)	開先形状、 開先面の 良否	確 認	
			上 - 下 右 - 左	MIN 設計値	最 大 最 小	年・月・日			区分	検査員
FW- 1 (/)	900	VALVE	259.2	29.1	30.0	基準面に 対して 内 外* 0.5	良	02. 05.14		
		E90L	259.2		29.8					
			259.2		29.7					
FW- 2 (/)	008	E90L	259.2	29.1	29.8	基準面に 対して 外 外* 0.8	良	02. 05.14		
		PIPE	259.2		30.3					
			259.2		30.1					
FW- 4 (/)	901	NOZZLE	89.2	11.8	12.8	基準面に 対して 外 外* 0.5	良	02. 03.29		
		E60L	89.2		12.6					
			89.2		12.8					
FW- 6 (/)	002	PIPE	89.5	11.8	12.4	基準面に 対して 外 外* 0.3	良	02. 03.29		
		PIPE	89.5		12.3					
			89.5		12.5					
FW- 7 (/)	003	PIPE	89.5	11.8	12.6	基準面に 対して 内 外* 0.3	良	02. 03.29		
		PIPE	89.5		12.4					
			89.5		12.3					
FW- 8 (/)	004	PIPE	89.5	11.8	12.6	基準面に 対して 内 外* 0.2	良	02. 03.29		
		PIPE	89.5		12.5					
			89.5		12.4					
FW- 10 (/)	009	E90L	89.5	11.8	12.8	基準面に 対して 内 外* 0.5	良	02. 03.29		
		PIPE	89.5		12.6					
			89.5		12.3					
FW- 11 (/)	006	PIPE	89.5	11.8	12.6	基準面に 対して 内 外* 0.3	良	02. 06.04		
		PIPE	89.5		12.4					
			89.5		12.3					
FW- 12 (/)	010	E45L	257.7	29.1	31.7	基準面に 対して 内 外* 0.3	良	02. 05.14		
		NOZZLE	257.7		31.2					
			257.7		31.5					

溶接施行指示書兼記録書

発電所 名称 KON-3		工作物 名称 RCS RV EL+ 26.00 1 シーリングタイト		溶接検査申請書 89 神第 5134号原		装置図番号 H2-3911015		発行日 90-01-16									
				詳細図番号 H2-3911016		ブロックNo /		シートNo 1									
溶接 番号	溶接 部名	母材の材質 (P-No区分)	継手形状 先記号	溶接 方法	溶接 位置	使用溶接材料				電流 (A)	電圧 (V)	溶接 速度 (mm/min)	溶接 時間 (min)	溶接 温度 (℃)	溶接 士 氏名	社内 確認	検査員 押印欄
						溶接材料 銘柄	シールド ガス	サイズ	ロットNo								
FW- 1	VALVE E90L	SCS14A P-8 SUS316TP P-8	JS36 -IS1 12°S160 L1-5001268	579	TF A	TGS-316LK NC-36LK	- FS	AR -	1.6 SR0232 2.6 GKK2710 3.2 GKK3004 4.0 GKK5405	MAX 177 60~120 MAX 177 70~150	TF A	1 1 6 6	2.6 19 2.6 20	TF A (K42) K-204	7/4	7/5	
FW- 2	E90L PIPE	SUS316TP P-8 SUS316TP P-8	JS36 -IS1 12°S160 L1-5001268	579	TF A	TGS-316LK NC-36LK	- FS	AR -	1.6 SR0232 2.6 GKK2710 3.2 GKK3004 4.0 GKK5405	MAX 177 60~120 MAX 177 70~150	TF H	1 1 5 16	2.6 19 2.6 21	TF A (K42) K-204	/	/	
FW- 4	NOZZLE E60L	SUSF316 P-8 SUS316TP P-8	-IS1 H2-3911016	579	TF A	TGS-316LK NC-36LK	- FS	AR -	1.6 SR0232 2.6 GKK2710 3.2 GKK3004	MAX 177 80~120 MAX 177 70~120	TF H	1 1 4 10	2.4 21 2.4 23	TF A (K270) (K09) (K270)	/	/	
FW- 6	PIPE PIPE	SUS316TP P-8 SUS316TP P-8	JS36 -IS1 4°S160 L1-5001268	579	TF A	TGS-316LK NC-36LK	- FS	AR -	1.6 SR0232 2.6 GKK2710 3.2 GKK3004	MAX 177 80~120 MAX 177 70~120	TF A	1 1 4 4	2.4 21 2.4 23	TF A (K270) (K09) (K270)	7/30	7/31	
FW- 7	PIPE PIPE	SUS316TP P-8 SUS316TP P-8	JS36 -IS1 4°S160 L1-5001268	365	TF ST	TGS-316LK SATY-316LK	- -	AR AR	1.6 SR0232 1.6 SR0281	MAX 177 60~120 MAX 177 70~190	TF H	1 1 4 12	2.4 21 2.4 24	TF A (K09) (K270) (K89)	/	/	
FW- 8	PIPE PIPE	SUS316TP P-8 SUS316TP P-8	JS36 -IS1 4°S160 L1-5001268	365	TF ST	TGS-316LK SATY-316LK	- -	AR AR	1.6 SR0232 1.6 SR0281	MAX 177 60~120 MAX 177 70~190	TF H	1 1 4 12	2.4 21 2.4 24	TF A (K09) (K270) (K89)	/	/	

(注) 姿勢 F:下向 V:立向 H:水平 O:上向 A:全姿勢 表保護 *:行方時 -:不要の時

三菱重工業(株)神戸造船所

FORM-2042

添付-7

10

放射線透過試験記録 (1/1)									
プラント名		関西電力(株)大飯発電所第3号機				工事番号		2003239/1100	
品 名		一次冷却設備配管(その 9)				図 番		H2-3911016	
フィルムマーク		KON3-RC5016							
溶接線番号	管種	外 径 肉 厚	材 質	(注)	受検 区分	判定厚	RT厚	備 考	
FW- 1	1	318.50 33.30	SCS14A SUS316TP		G	29.60	59.20		
FW- 2	1	318.50 33.30	SUS316TP SUS316TP		G	29.60	59.20		
FW- 4	1	114.30 13.60	SUSF316 SUS316TP		G	12.60	25.20		
FW- 6	1	114.30 13.50	SUS316TP SUS316TP		G	12.40	24.80		
FW- 7	1	114.30 13.50	SUS316TP SUS316TP		G	12.40	24.80		
FW- 8	1	114.30 13.50	SUS316TP SUS316TP		G	12.40	24.80		
FW- 10	1	114.30 13.50	SUS316TP SUS316TP		G	12.40	24.80		
FW- 11	1	114.30 13.50	SUS316TP SUS316TP		G	12.40	24.80		
FW- 12	1	318.50 33.30	SUS316TP SUSF316		G	30.40	60.80		

(注) 100% 実施時 → 無印
 10% 対象 → ○
 10% 抜取時 → ●

判定基準	・溶接技術基準第11条 ・UGS-A7-016	試験結果	☒ 合格 ☐
------	----------------------------	------	---

13

撮 影 条 件 EXAMINATION PROCEDURE		
溶 接 線 番 号	WELD JOINT No	KON3-RCS016 FW 4
線 源	SOURCE	☐ ライナック LINAC ML15R (H) ☐ X 線装置 _____ kVp X-RAY EQUIPMENT ☐ Co ⁶⁰ ☒ Ir ¹⁹²
線 源 寸 法	SOURCE SIZE	☐ 1 × 1 ☒ 2 × 2 ☐ × ☐
線 源・フィルム間距離	S F D	☒ 200
露 出 条 件	EXPOSURE PARAMETERS	☐ 6 - 12 Mev _____ C/Kg ☐ _____ kVp _____ mA _____ min. ☒ 370 CiBg _____ 2.0 min.
フ イ ル ム	FILM	銘 前 BRAND ☐ KODAK ☒ FUJI タイプ TYPE ☐ AA ☐ M ☒ #80 寸 法 SIZE ☐ 114×432 ☐ 178×432 ☒ 114×216
カセット中のフィルム枚数	FILM(S) IN CASSETTE	☐ シングル SINGLE ☒ ダブル DOUBLE
増 感 紙	INTENSIFYING SCREEN	前 面 ☒ 鉛 LEAD 0.1mm ☐ 鉛 LEAD 1.0mm ☐ NON SCREEN 後 面 ☒ 鉛 LEAD 0.1mm ☐ 鉛 LEAD 1.0mm ☐ NON SCREEN
現 像 条 件	PROCESSING	☐ コダック自動現像 KODAK AUTOMATIC PROCESSING ☒ フ ジ自動現像 FUJI AUTOMATIC PROCESSING ☐
材 質	MATERIAL	表 紙 参 照
材 厚	WELD THICKNESS	12.6mm + 12.6mm = 25.2mm
透過度計の型、位置	TYPE & LOCATION OF PENETRATOR	☒ ASTM TYPE 有孔型透過度計 ☐ JIS TYPE 線型透過度計 No 17 ☐ 線源側 SOURCE SIDE ☒ フィルム側 FILM SIDE
は さ り 金	SHIM	☐ 厚 み THICKNESS ☒ 使用せず NOT USED
撮 影 配 置 SHOOTING SKETCH 溶 接 開 先 EDGE PREPARATION 		

神船生4014号(機品管)

 三菱重工業株式会社 神戸造船所
 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. KOBE SHIPYARD & MACHINERY WORKS

フィルム判定結果 TEST RESULT				
溶接線番号 WELD JOINT NO.	KON3-RCS016 FW 4 FW 6 (各1~7)		撮影日付 SHOT DATE	4.26.90
検査官 INSPECTOR	財団法人 電気設備技術検査協会		検査日付	5.31.90
	客 先		DATE OF REVIEW	
フィルム番号 RADIOGRAPH NO.	欠陥の位置と種類 LOCATION & TYPE OF DEFECT 有効長 55 mm		判定 EVALUATION	備考 REMARK
KON3-RCS016 FW 4 1	▽		☒ 合格 PASS ☐	
2	▽		☒ 合格 PASS ☐	
3	▽		☒ 合格 PASS ☐	
4	▽		☒ 合格 PASS ☐	
5	▽		☒ 合格 PASS ☐	
6	▽		☒ 合格 PASS ☐	
7	▽		☒ 合格 PASS ☐	
FW 6 - 1	▽		☒ 合格 PASS ☐	
2	▽		☒ 合格 PASS ☐	
3	▽		☒ 合格 PASS ☐	
4	▽		☒ 合格 PASS ☐	
5	▽		☒ 合格 PASS ☐	
6	▽		☒ 合格 PASS ☐	
7	▽		☒ 合格 PASS ☐	
	以下余白		☐ 合格 PASS ☐	
			☐ 合格 PASS ☐	
欠陥の種類 TYPE OF DEFECT			検査員 EXAMINER	
P: ポロシティ POROSITY C: クラック CRACK			 LEVEL I	
S: スラグ捲込み SLAG INCLUSION IP: 溶け込み不良 INCOMPLETE PENETRATION				
T: タングステン捲込み TUNGSTEN INCLUSION LF: 融合不良 LACK OF FUSION				
A: フィルム欠陥 FILM ARTIFACT				

※JIS 5036号 (商品券)

三菱重工業株式会社 神戸造船所
MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. KOBE SHIPYARD & MACHINERY WORKS

浸透探傷試験記録 ()																								
溶申 89 神第 5134 号原																								
プラント名	関西電力(株)大飯発電所第3号機		工事番号	2003239/1100																				
品名	一次冷却設備配管(その 9)																							
施行要領	溶接技術基準第11条 UGS-A7-016	表面状態	製作図面による。																					
試験方法	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">浸透剤</th> <th>経過時間</th> </tr> <tr> <th>浸透液</th> <th>洗浄液</th> <th>現像剤</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SUPER CHECK UP-T</td> <td>SUPER CHECK UR-T-(M)</td> <td>SUPER CHECK UD-T</td> <td>10分以上</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td>試験温度</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td>30℃～50℃</td> </tr> </tbody> </table>			浸透剤			経過時間	浸透液	洗浄液	現像剤		SUPER CHECK UP-T	SUPER CHECK UR-T-(M)	SUPER CHECK UD-T	10分以上				試験温度				30℃～50℃	
浸透剤			経過時間																					
浸透液	洗浄液	現像剤																						
SUPER CHECK UP-T	SUPER CHECK UR-T-(M)	SUPER CHECK UD-T	10分以上																					
			試験温度																					
			30℃～50℃																					
・検査箇所、検査日、検査員は工程中チェックシートによる。 ・試験は、開先部先端よりJ 3mmの範囲を含め実施。 形状、寸法の詳細は、図面を参照のこと。 ・検査員は全てLEVEL II。																								
判定基準	溶接技術基準第11条 UGS-A7-016		試験結果	☒ 合格 ☐ NI(指示なし) ☐ RI(指示あり)																				

Pressure Test Record 耐圧・漏えい試験記録 (1/1) 溶中89神.5/34 号原			
Name of Plant プラント名	関西電力大飯発電所第3号機		Order No. 工事番号
Article 品名		設備配管 1次冷却系配管(209)	Dwg. No. 図番
Item 項目		Spec. 規定	Actual 実施
Test Item 試験の種類		☒ 水圧 Hydrostatic Test ☐ 気圧 Pneumatic Test	☒ 水圧 Hydrostatic Test ☐ 気圧 Pneumatic Test
Working Pressure 最高使用圧力		175.0 kg/cmG	圧力計番号 8945000
Test Pressure 試験圧力		☒ 218.8 kg/cmG ☐ 水張り Standing Water Test	☒ 218.8 kg/cmG ☐ 水張り Standing Water Test
Holding Time 保持時間		☒ 30分以上: 30minutes and Over ☐ 60分以上: 60minutes and Over	30 分 Minutes
Wall Temperature 壁温		☐ °C以上: and Over ☒ 規定なし Not Required	☒ 44 °C ☐ 測定せず Not Measured
Testing Medium 使用媒体		☒ A級水 Grade A Water ☐ B級水 Grade B Water ☐ C級水 Grade C Water	☒ A級水 Grade A Water ☐ B級水 Grade B Water ☐ C級水 Grade C Water
Bubble Solution 塗布材		☐ パーレックス Perlex ☒ 不要 Not Required	☐ パーレックス Perlex ☒ 使用せず Not Used
Sketch or Weld No. to be Tested. 略図又は溶接番号 耐圧試験要領書、番号 φ3-2-1-e による H2-3911015.016 工場溶接 SW.5.9.13 現地溶接 <u>FW.1.2.4 6.7.8.10</u> 11.12 (Example) 合計12ヶ所 ①: Pressure Gauge ②: Test Pump ③: Valve 圧力計 テストポンプ 弁		Pressure Chart 昇降圧曲線 昇圧開始 昇圧完了 検査開始 検査完了 降圧完了 時間 Time →	
Acceptance Std. 判定基準	☒ 溶接技術基準第14号 ☒ 通産省令 62 号 第 11 条		立会者 Witness 発電技検 社内 H2 7/12 H2 7/12
Result 判定結果	☒ Accept 合格		☒ Accept 合格



MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. KOBE SHIPYARD & MACHINERY WORKS

三菱重工業株式会社 神戸造船所

10417502号(機品管)

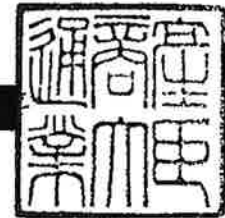
添付-11(1/3)

60資庁第 9379 号

昭和 60 年 7 月 15 日

三菱重工業株式会社
神戸造船所長 [redacted] 殿

通商産業大臣臨時代理
國務大臣 [redacted]



神戸造船所 における

溶接方法の認可について

昭和 60 年 6 月 20 日付け 神原保証 5087 号 をもって申請がありました上記の件については、電気事業法第46条 第2項第1号の規定に基づき、認可します。

60. 7. 22

579

添付-11(2/3)



溶接方法認可申請書

神原保証 5087 号
昭和60年 6月20日

通商産業大臣

■■■■ 殿

神戸市兵庫区和田崎町一丁目1番1号
三菱重工業株式会社 神戸造船所 所長 ■■■■



電気事業法第46条第2項第1号の規定により次のとおり溶接の方法の認可をうけたいので申請します。

溶接施行工場の名称および所在地		三菱重工業株式会社神戸造船所 神戸市兵庫区和田崎町一丁目1番1号
溶接設備	溶接機の種類	既認可のとおり
	応力除去設備の種類および容量	既認可のとおり
	試験設備の種類および容量	既認可のとおり
溶接施行方法	溶接部の設計	既認可のとおり
	溶接施行法	別紙のとおり
溶接士の氏名およびその者が行う溶接施行方法の範囲		既認可のとおり





添付-11(3/3)

溶接施行法確認試験合格証明書

溶接施行法確認試験 依頼者名		三菱重工業株式会社神戸造船所長 XXXXXXXXXX	
		神原保証 5027号	昭和60年2月27日
溶接施行工場名		三菱重工業株式会社神戸造船所	
整理番号		579	備考
溶接施行法確認事項の区分	溶接方法	T _r + A	
	母材	P-8 + P-8	SUS304
	溶接棒	F-5	NC-38LK
	溶着金属	A-7	
	予熱	行わない	
	応力除去	行わない	
	シールドガス	アルゴンガス	
	裏面からのガス保護	行う	
	溶加材	R-7	TGS-308LK
	ウエルドインサート	使用しない	
	電極	_____	
	フラックス	_____	
	心線	_____	
	溶接機	_____	
	層	_____	
	母材の厚さ	100 mm以下	試験材の寸法 50 mm
	ノズル	_____	
	電圧及び電流	_____	
	揺動	_____	
	あて金	_____	
リガメントの幅	_____		
衝撃試験	_____		

上記の溶接施行法は、溶接士技能確認及び溶接施行法確認試験規程に基づく
確認試験に合格したことを証明します。

60大施31号

昭和60年6月18日

財団法人 発電設備技術検査協会

理事長 XXXXXXXXXX

(フリガナ) 溶接士の氏名 コード番号	資 格	溶 接 作 業 経 歴						発電技検確認		合格の種類	備 考
		溶接検査 申請書等 交付番号	溶接作業 期日	施設者及び 発電所名	施設番号	名 称	溶接箇所	年月日	印		
■■■■■ S2804050	AW-4r F-4	63大溶原 第472号	H01.06.22	関電(株) 大飯発電所	3号機	AFWS配管	管 台			法46条	
〃	AW-4r F-5	63大溶原 第477号	H01.07.14	関電(株) 大飯発電所	3号機	AFWS配管	周継手			法46条	
〃	TW-3r R-1	63大溶原 第472号	H01.06.22	関電(株) 大飯発電所	3号機	AFWS配管	管 台			法46条	
〃	TW-3r R-5	63大溶原 第477号	H01.07.14	関電(株) 大飯発電所	3号機	AFWS配管	周継手			法46条	
■■■■■ S2511010	AW-4e F-41	63大溶原 第273号	H01.04.24	九電(株) 玄海原子力	3号機	蓄圧タンク#D	管 台	H2 3/19	■■■■■	法46条	
〃	AW-4r F-4	01大溶原 第159号	H01.09.06	九電(株) 玄海原子力	3号機	蒸気発生器#D	ラグ等			法46条	
〃	AW-4r F-5	01大溶原 第57号	H01.08.24	関電(株) 大飯発電所	3号機	冷却材フィルタ	管 台			法46条	
〃	AW-6f F-41	63大溶原 第273号	H01.04.24	九電(株) 玄海原子力	3号機	蓄圧タンク#D	管 台			法46条	
〃	TW-3r R-1	01大溶原 第159号	H01.09.06	九電(株) 玄海原子力	3号機	蒸気発生器#D	ラグ等			法46条	

(フリガナ) 溶接士の氏名 コード番号	資 格	溶 接 作 業 経 歴					発電技検確認		合格の種類	備 考	
		溶接検査 申請書等 受付番号	溶接作業 期日	施設者及び 発電所名	施設番号	名 称	溶接箇所	年月日			印
■■■■■ S1704100	AW-4 r F-4	2大溶原 第202号	H02.05.25	関西電力株式 会社大阪発電 所	第4号機	主蒸気管(その13)	周継手			法46条	
・	TW-3 r R-1	2大溶原 第202号	H02.05.25	関西電力株式 会社大阪発電 所	第4号機	主蒸気管(その13)	周継手			法46条	
■■■■■ S2804030	AW-4 r F-4	63大溶原 第729号	H02.06.26	関西電力株式 会社大阪発電 所	第3号機	主蒸気管(その9)	周継手			法46条	
・	AW-4 r F-5	1大溶原 第412号	H02.05.02	関西電力株式 会社大阪発電 所	第3号機	化学体積制御設備配 管(その94)	周継手			法46条	
・	TW-3 r R-1	63大溶原 第729号	H02.06.26	関西電力株式 会社大阪発電 所	第3号機	主蒸気管(その9)	周継手	H03.03.18 ■■■■■		法46条	
・	TW-3 r R-5	1大溶原 第412号	H02.05.02	関西電力株式 会社大阪発電 所	第3号機	化学体積制御設備配 管(その94)	周継手			法46条	
■■■■■ S2511010	AW-4 e F-4 1	62大溶原 第474号	H02.04.24	関西電力株式 会社大阪発電 所	第4号機	蒸気発生器	ラグ等			法46条	
・	AW-4 r F-4	2大溶原 第283号	H02.06.22	関西電力株式 会社伊方発電 所	第3号機	蒸気発生器(A、B ・C)	ラグ等			法46条	
・	AW-4 r F-5	2大溶原 第908号	H02.10.25	関西電力株式 会社伊方発電 所	第3号機	強酸トレンタンク	管 台			法46条	

手 溶 接 士 の 氏 名 ・ 資 格 及 び 作 業 経 歴 (平成 12年度)

工場コード 38-43

溶接施行工場名 三菱重工業株式会社神戸造船所

(フリガナ) 溶接士の氏名 コード番号	資 格	溶 接 作 業 経 歴						発電技検確認		合格の種類	備 考 (前回期限) 有効期限
		溶接検査 申請書等 受付番号	溶接検査 合格日	施設者及び 発電所名	施設番号	名 称	溶接箇所	年月日	印		
██████████ S51 04 28-01	TW-3 r R-5										管 REV:02 退職 (00/09/30)
██████████ S52 10 18-01 K324	TW-3 r R-1	11九溶火 第 36 号	99/06/18	電源開発株式 会社若松 R D F 利用発電所		集合管寄せおよび分 配管寄せ	ラグ等			法 5 2 条	(99/07/02) 01/06/17
“	TW-3 r R-5	12近溶原 第 266号	01/02/16	関西電力株式 会社高浜発電 所	第 2 号機	余熱除去設備配管	周継手	4.13 3/22	██████████	法 5 2 条	管 REV:03 (01/05/10) 03/02/15
██████████ S42 10 29-01 K270	AW-4 r F-4	10近溶原 第 322 号	99/06/03	関西電力株式 会社大飯発電 所	第 1 号機	主蒸気および主給水 貫通部配管	周継手			法 5 2 条	(00/04/14) 01/06/02
“	AW-4 r F-5	12近溶原 第 272号	01/02/21	関西電力株式 会社高浜発電 所	第 2 号機	余熱除去設備配管お よび格納容器スプレ イ設備配管	管 台	4.13 3/22	██████████	法 5 2 条	管 REV:03 (01/11/15) 03/02/20
“	TW-3 r R-1	10近溶原 第 322 号	99/06/03	関西電力株式 会社大飯発電 所	第 1 号機	主蒸気および主給水 貫通部配管	周継手			法 5 2 条	(99/07/02) 01/06/02
“	TW-4 r R-5	12近溶原 第 272号	01/02/21	関西電力株式 会社高浜発電 所	第 2 号機	余熱除去設備配管お よび格納容器スプレ イ設備配管	管 台	4.13 3/22	██████████	法 5 2 条	管 REV:03 (01/11/15) 03/02/20
“	MW-4 r E-1										管 REV:02 H12年度 作業経歴 なし 有効期間 (00/11/12)迄

FROM:0920

添付-12(3/3)

3. 欠陥の評価

3.1 評価の流れ

供用期間中検査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 3.1.1 に示す。

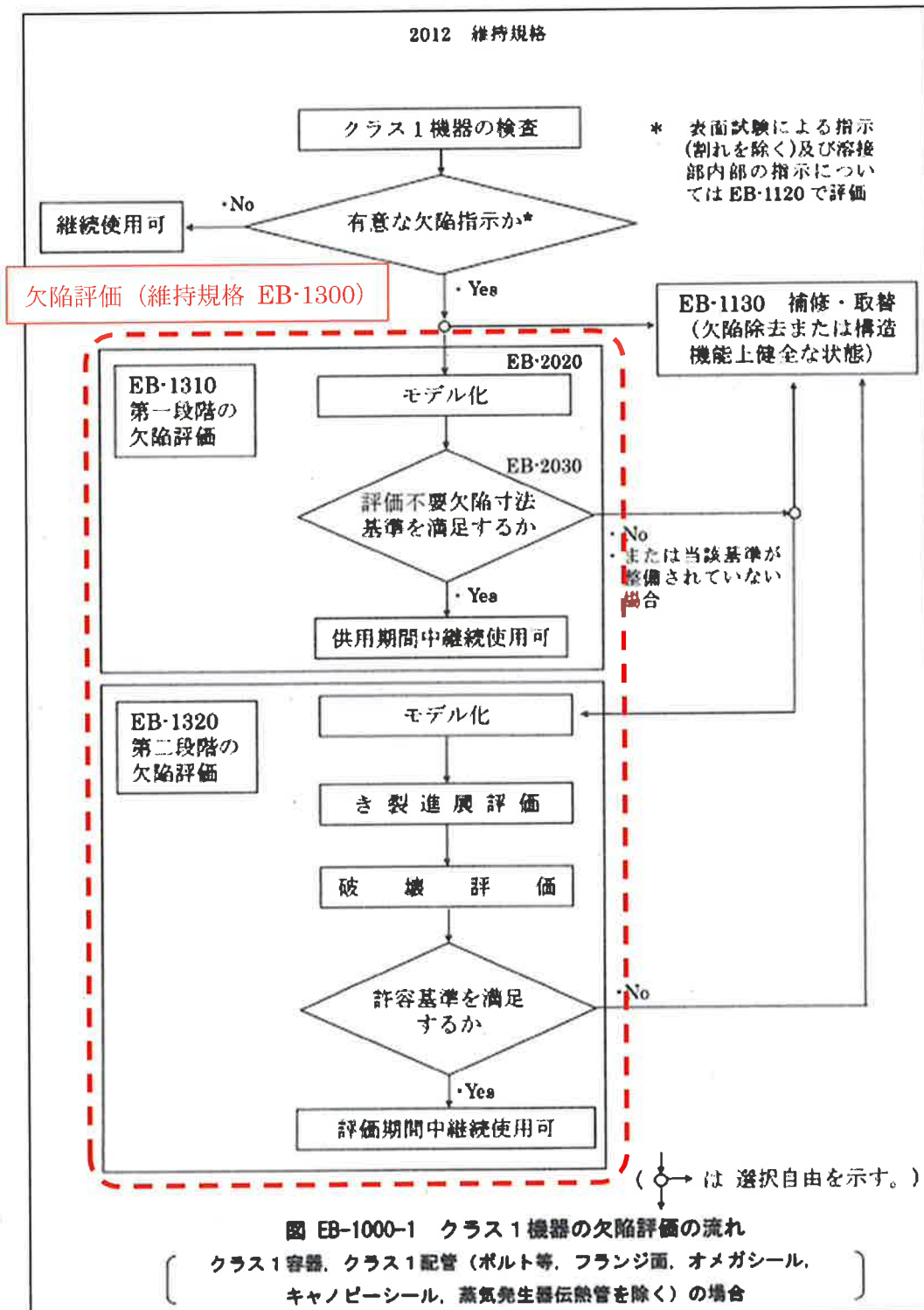


図 3.1.1 クラス1配管の欠陥評価フロー

3.2 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。モデル化に用いる欠陥形状は1項の計測結果を用いる。

当該欠陥のモデル化結果を表 3.2.1 にまとめる。

表 3.2.1 欠陥のモデル化結果

継手番号	外径 ^{※1} D (mm)	肉厚 ^{※2} t (mm)
FW-4	114.3	14

欠陥評価断面	欠陥深さ a (mm)	欠陥長さ ℓ (mm)	モデル形状 ^{※3}
周方向断面	4.6	67	周方向半だ円表面欠陥 (内表面)

※1 公称値

※2 実測値

※3 詳細は図 3.2.1 を参照のこと。

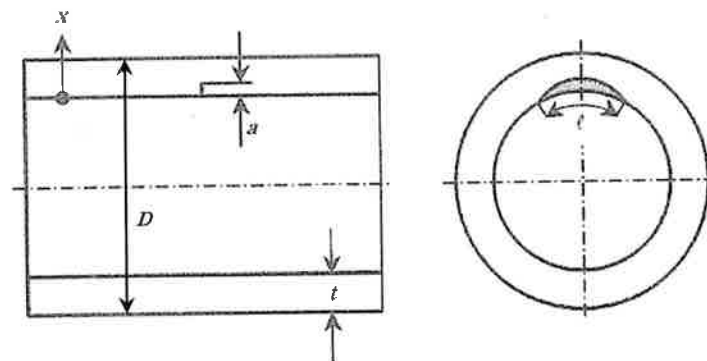


図 3.2.1 欠陥のモデル形状 (周方向半だ円表面欠陥 (内表面))

3.3 第一段階の欠陥評価 (評価不要欠陥の判定)

維持規格 EB-1310 に従い欠陥評価を実施する。

当該欠陥の進展要因は SCC と疲労であり、当該部の材料はオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS316) であるため、維持規格 EB-2000 に規定される評価不要欠陥寸法基準の適用要件に該当しない。よって、第二段階の欠陥評価に移行する。

3.4 第二段階の欠陥評価 (評価欠陥を有した状態での評価期間中の設備健全性の確認)

3.4.1 き裂進展評価

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

① き裂進展式

評価に使用する、き裂進展式を以下に示す。

a. SCC によるき裂進展評価の評価式

PWR 環境下におけるき裂進展が硬度依存性を有することについて、一般的に用いられているき裂進展速度試験手法（添付 3.4.1）を採用した研究として、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」（添付 3.4.2）や、電共研「PWR 環境下の SCC 進展データの拡充に関する研究」（添付 3.4.3）等が実施されてきた。

これら電共研では、強加工 SCC のき裂進展速度の進展式（き裂進展速度線図）が作成されており、国際学会「Fontevraud7, 2010」にて発表しているが（公開進展式（式 3.4.1））、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、き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されたものである（添付 3.4.4）ため、改めてその妥当性を確認すべく他の研究知見（添付 3.4.5）で取得されたデータとの比較を行い、比較結果を図 3.4.1 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。

よって今回の評価においては、より保守的な進展評価とするため、これら全てのデータを用いて速度線図を新たに設定し、き裂進展評価を実施する。き裂進展評価式としては、ベストフィット曲線（BFC）（式 3.4.2）と包絡曲線（式 3.4.3）を用いる。

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

(式 3.4.1)

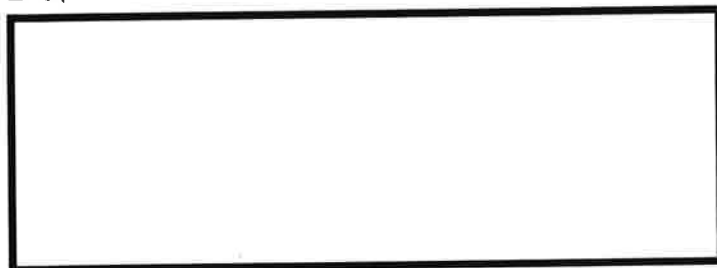
BFC 式 :

(式 3.4.2)

包絡曲線式 :

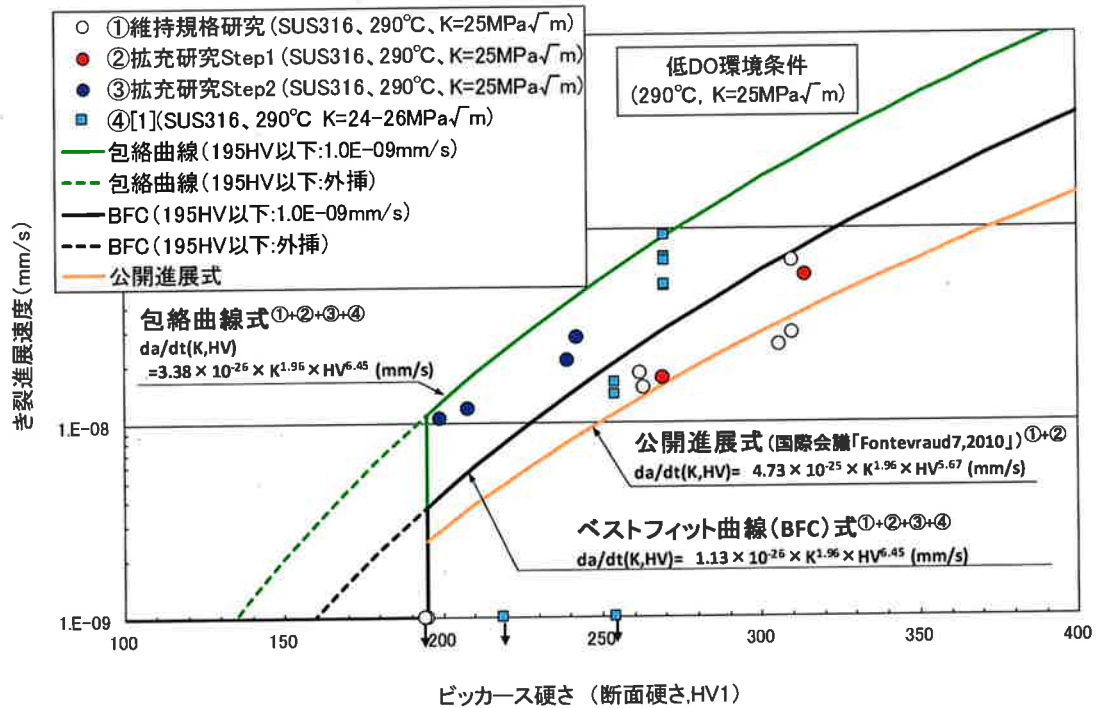
(式 3.4.3)

ここで、



なお、過去の研究試験の結果では 195HV 以下の硬さではき裂進展が認められていないが、保守的にき裂進展評価を行うために 195HV 以下の硬さについても式 3.4.2、式 3.4.3 を適用するものとする。

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



- 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 評価手法整備研究」
- 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 3.4.1 き裂進展速度線図

b. 疲労によるき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き裂進展速度式(式 3.4.4)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 3.4.4)

ここで

- 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 ($R = K_{min}/K_{max}$)

② 応力拡大係数

き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、円筒内表面だ円欠陥に対する K 値式を用いて計算する。

③ 荷重と荷重の組み合わせ

当該欠陥のき裂進展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 3.4.1 及び表 3.4.2 の通り設定する。

表 3.4.1 き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 き裂進展評価	疲労による き裂進展評価
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 ^{注1}	1/3Sd*	—	○
溶接残留応力		○	○

凡例：○ ⇒ 考慮、— ⇒ 考慮せず

注 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 3.4.2 き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 き裂進展評価	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 き裂進展評価	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

④ 入力条件

当該欠陥のき裂進展評価に用いる各種入力条件設定の考え方を以下に示す。
また、各入力条件の一覧を表 3.4.3 に示す。

なお、SCC によるき裂進展評価においては、評価式の適用に当たり、評価式算出の根拠となった各種データと入力条件となる各推測値（溶接残留応力、硬さ）の実機への適用性確認を実施している（添付 3.4.6）。

表 3.4.3 き裂進展評価の入力条件一覧

項目	評価内容	
	SCC による き裂進展評価	疲労による き裂進展評価
評価期間	BFC 式：10 年（87,600 時間） 包絡曲線式：3.4 年（30,660 時間）	
溶接残留応力	図 3.4.2 参照	
硬さ	図 3.4.3 参照	—
出力運転条件	表 3.4.4 参照	
過渡条件	—	表 3.4.5 参照
地震力	—	1/3Sd*地震力

a. 評価期間

評価期間は後述の破壊評価が成立する 10 年（BFC 式）及び 3.4 年（包絡曲線式）とし、8,760 時間/年として計算する。

b. 溶接残留応力

評価に用いる溶接残留応力は、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」において実施した当該配管と同じ 4B Sch160 配管の突合せ溶接の残留応力解析で得られた溶接残留応力分布より設定する。溶接残留応力の板厚方向分布は溶接中心からの軸方向距離によっても異なるため、当該欠陥位置を考慮し、保守的に溶接中心から 10 mm 位置までの溶接残留応力を包絡する値として図 3.4.2 に示す通り設定する。

なお、板厚内の残留応力分布は溶接による熱収縮により上昇しているものであるが、上記電共研にて実施したモックアップ試験は、実機より入熱量が多く板厚内で発生する溶接残留応力が大きいと推定される溶接手法にて製作されたテストピースを用いていることから、同モックアップ試験結果を用いて評価上の溶接残留応力分布を設定する事で、実機の板厚内の溶接残留応力を包絡する様に設定されるものと考ええる。

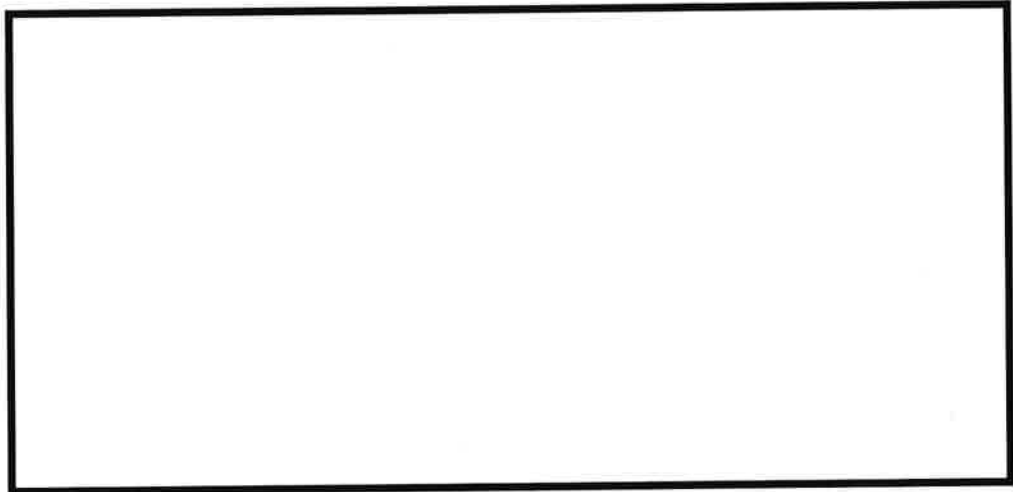


図 3.4.2 板厚内の溶接残留応力分布（管軸方向）

c. 硬さ

評価に用いる硬さ分布は、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」における、当該配管と同じ 4B Sch160 配管の溶接モックアップ試験（添付 3.4.3）で計測されたデータ（概略は図 3.4.3 参照のこと）を基に、配管内面から 3 mm未満は 209HV、3 mm以上 4 mm未満は 207HV、4 mm以上 5 mm未満は 192HV とする。また、板厚 5mm より外面側については計測データがないため、保守的に 5mm 位置と同じ硬さである 191HV と設定する。

なお、板厚内の硬さは溶接による熱収縮により上昇しているものであるが、上記電共研にて実施したモックアップ試験は、実機より入熱量が多く板厚内部の硬化量が多いと推定される溶接手法にて製作されたテストピースを用いていることから、同モックアップ試験結果を用いて硬さ分布を設定する事で、実機の板厚内の硬さ分布を包絡する様に設定されるものと考ええる。

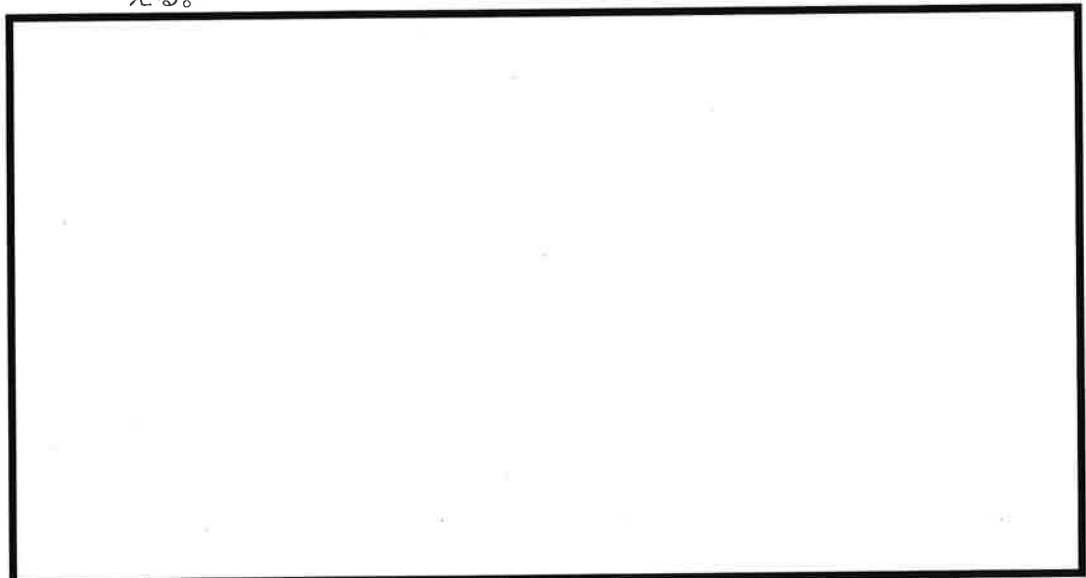


図 3.4.3 4B 配管の硬さ分布計測データ

d. 出力運転条件による応力

き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 3.4.4 にまとめる。なお、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 3.4.4 き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 (℃)	発生応力 (MPa)
15.41	291.7	100

e. 過渡条件

き裂進展評価にて用いる過渡条件毎の負荷変動により生じる変動応力及び過渡回数を表 3.4.5 にまとめる。なお、過渡条件における発生応力は、既工認において実施した 3 次元梁解析と同等の解析により設定する。評価に用いる過渡回数は、大飯 3/4 号機の定期安全レビュー (PSR) で用いた過渡条件より評価期間を考慮して設定する。また、負荷上昇時間は過渡に応じて設定し、定義出来ない場合は 1000s とする。

表 3.4.5 き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)
			10 年※
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	

※包絡曲線式（評価期間：3.4 年）を用いたき裂進展評価は、保守的に BFC 式（評価期間：10 年）と同じ過渡回数で行う。

f. 地震力

き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、JEAG 4613-1998「原子力発電所 配管破損防護設計指針」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。

⑤ 評価結果

当該欠陥のき裂深さ及びき裂長さに対する応力拡大係数を図 3.4.4 に示す。
また、SCC 及び疲労によるき裂進展量を加味した評価期間末期のき裂寸法を表 3.4.6 に示す。

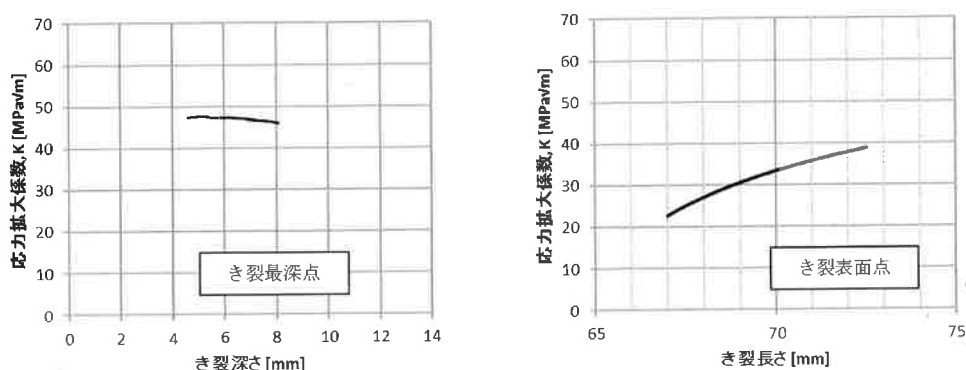


図 3.4.4 応力拡大係数分布

表 3.4.6 当該欠陥のき裂進展評価結果

	BFC 式 評価期間：10 年		包絡曲線式 評価期間：3.4 年 (過渡回数は 10 年を考慮)	
	欠陥深さ a (mm)	欠陥長さ l (mm)	欠陥深さ a (mm)	欠陥長さ l (mm)
初期寸法	4.6	67	4.6	67
SCC による進展量	3.5	6	3.5	7
疲労による進展量	0.5	1	0.5	1
評価期間末期のき裂寸法	8.6	74	8.6	75

前述の通り、本評価では保守的な条件で SCC によるき裂進展評価を実施している。過去の研究試験結果では 195HV 以下の硬さではき裂の進展はみられていないことに加え、電共研で計測した 4B Sch160 配管の溶接後の硬さの実測値としては、内面から 4mm を超えたあたりから 195HV を下回ることが確認されている。このため、195HV 以下における SCC によるき裂進展速度を $1.0 \times 10^{-9} \text{mm/s}$ とし、内面から 4mm 以降の硬さを 195HV に設定した場合のき裂進展評価結果を図 3.4.5 に示す。

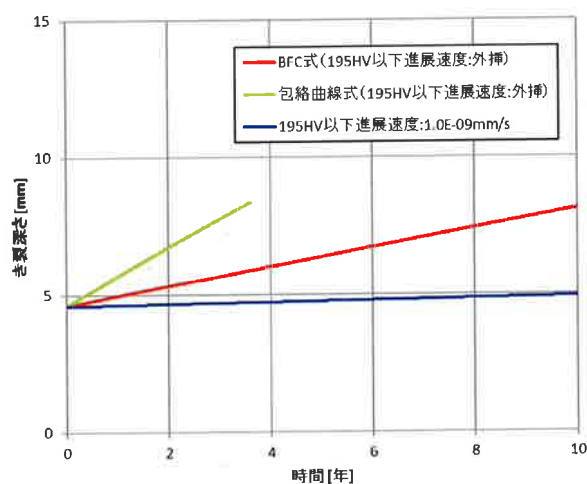


図 3.4.5 SCC によるき裂進展評価結果の比較

なお、同様の評価手法を用いて、4B 配管の UT による検出限界以下の初期欠陥を仮に想定し、き裂深さが 4.6mm に至るまでの期間を評価した結果を表 3.4.7 に示す。

表 3.4.7 検出された欠陥深さ（4.6mm）に至る期間の評価

評価式	仮に想定する 初期欠陥サイズ (深さ/長さ)	欠陥深さ 4.6mm に 至るまでの期間
BFC 式	0.5mm/2.5mm	28 年
	1.0mm/5.0mm	19 年
	2.0mm/10.0mm	10 年
包絡曲線式	0.5mm/2.5mm	10 年
	1.0mm/5.0mm	6.5 年
	2.0mm/10.0mm	3.5 年

3.4.2 破壊評価

破壊評価は、3.4.1 項のき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。

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、a. 極限荷重評価法、b. 弾塑性破壊力学評価法、c. 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 a. 許容欠陥深さの表による評価、b. 許容欠陥深さの式による評価、c. 許容曲げ応力の算出による評価が規定されているが、a. 許容欠陥深さの表による評価、及び b. 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 $2\theta \leq 60^\circ$ 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、c. 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 3.4.5 で与えられる。

$$S_c = \frac{1}{SF} \left(\frac{P_b'}{Z} - P_e \right) - P_m \left(1 - \frac{1}{Z(SF)} \right) \quad (\text{式 3.4.5})$$

P_b' は塑性崩壊時の曲げ応力で下式により求められる。

$$P_b' = \frac{2\sigma_f}{\pi} \left(2 \sin \beta - \frac{a}{t} \sin \theta \right) \quad (\text{式 3.4.6})$$

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 3.4.7 で与えられる。

$$\beta = \frac{1}{2} \left(\pi - \frac{a}{t} \theta - \pi \frac{P_m}{\sigma_f} \right) \quad (\text{式 3.4.7})$$

ここで、

σ_f : 流動応力 ($\sigma_f = 2.7S_m$)

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、JSME 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 および SMAW において：

$$Z = 0.306 \log \{ (OD)/25 \} + 1.032 \quad (\text{式 3.4.8})$$

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

$$Z = 0.372 \log\{(OD)/25\} + 1.293 \quad (\text{式 3.4.9})$$

- 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

2 [deg]	許容欠陥深さ； a/t			フェライト 鋼管
	母材	GTAW ^{注1}	SAW ^{注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 3.4.8 を適用する。また、当該配管の板厚の実測値は 14.0mm であることから、管の厚さの要求を満足する

② 荷重と荷重の組み合わせ

破壊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 3.4.8 及び表 3.4.9 の通り設定する。

表 3.4.8 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 ^{注1}	—	○
	Ss ^{注2}	—	○

凡例：○ ⇒ 考慮、— ⇒ 考慮せず

注 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。

注 2 Ss*は、基準地震動による地震力の値を示す。

表 3.4.9 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） ^{注 1, 2} ＋機械的荷重

注 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。

注 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 地震共に組み合わせは不要となる。

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、き裂進展評価に用いた表 3.4.4 の値を用いる。

b. 過渡条件およ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 Sd (弾性設計用地震動) 及び Ss (基準地震動) と読み替える。Sd*として Sd 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 3.4.9 の荷重の組み合わせの中から、許容状態 A, B および許容状態 C, D において、最も厳しい条件における軸方向応力を表 3.4.10 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 3.4.10 破壊評価に用いる過渡条件およ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

④ 評価結果

き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および許容曲げ応力による評価を行った結果を表 3.4.11、表 3.4.12 に示す。評価の結果、BFC 式を用いた評価では評価期間 10 年に対して予測欠陥寸法は許容欠陥寸法限界に達しないこと、及び曲げ応力は許容曲げ応力を下回ることが確認された。

また、保守的に包絡曲線式を用いた場合でも評価期間 3.4 年に対して予測欠陥寸法は許容欠陥寸法限界に達しないこと、及び曲げ応力は許容曲げ応力を下回ることが確認された。

表 3.4.11 許容欠陥寸法の限界の評価

評価式	評価期間	評価期間末期の予測欠陥寸法			許容欠陥寸法の限界 a_c (mm)	判定 $a_f < a_c$
		深さ a_f (mm)	長さ ℓ_f (mm)	欠陥角度 2θ (°)		
BFC 式	10 年	8.6	74	74.2	9.6 ($0.69 t$ 注1)	○
包絡曲線式	3.4 年	8.6	75	75.2	同上	○

注 1 JSME 維持規格 事例規格 表 1 (4) の欠陥角度 $\leq 90^\circ$, 溶接施工法 GTAW の許容欠陥深さ

表 3.4.12 許容曲げ応力による評価

評価式	評価期間	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 $P_b < S_c$
BFC 式	10 年	A, B	3.8	16.8	○
		C+Ss	64.8	66.0	○
		D+Sd	52.0	69.7	○
		SA	3.8	59.4	○
包絡曲線式	3.4 年	A, B	3.8	16.5	○
		C+Ss	64.8	65.4	○
		D+Sd	52.0	69.1	○
		SA	3.8	58.7	○

3.4.3 設備健全性の確認

3.4.2 項に示す通り、BFC 式を適用した場合、当該溶接部は評価期間 10 年に対して許容基準を満たすことから、10 年の当該溶接部の健全性を確認した。また、保守的に包絡曲線式を適用した場合でも、当該溶接部は評価期間 3.4 年に対して許容基準を満たすことから、3.4 年の健全性を確認した。

なお、3.4 年の健全性は確認できているが、次回定検において当該配管の取替工事を実施することとする。

また、1 サイクル後の欠陥の大きさは BFC 式の評価では、深さ方向 5.1mm、長さ方向 69mm となり、包絡曲線式の評価では、深さ方向 5.8mm、長さ方向 70mm となる。

(参考)

PWR より厳しいと考えられる BWR 環境中（水素注入環境）のき裂進展速度線図を用いた評価を行った場合でも、3.5 年の健全性が確認された。（添付 3.4.7）

SCC進展速度データ取得方法は、腐食防食協会から学会規格として「高温水中における応力腐食き裂進展試験方法」が発行されている。本規格では、オーステナイト系鋼及び合金（溶接金属，熱影響部，冷間加工材，析出硬化系鋼及び合金を含む）を対象とし，原子力発電プラントの軽水炉水環境を模擬した水質環境条件下においてコンパクトテンション（CT）試験片を用いて定荷重条件下で応力腐食き裂進展速度を求めるための応力腐食き裂進展試験方法について規定されている。

具体的には、軽水炉水質模擬環境中において破壊力学試験片と電位差法を用いてき裂進展速度を測定するために必要な試験片の準備，試験環境の調整，荷重負荷方法，き裂進展速度計算方法について制定されている。

電共研で取得されているデータは本規格の内容に準拠した進展試験方法や進展速度の求め方に準拠している。

OUTLINE OF THE JSCE STANDARD OF THE METHOD FOR MEASURING STRESS CORROSION CRACK GROWTH RATE IN HIGH TEMPERATURE WATER

Mikiro Itow¹, Taku Arai², Takashi Hirano³

¹Toshiba Corporation, 8 Shinsugita-cho, Isogo-ku, Yokohama 235-8523, Japan

²Central Research Institute of Electric Power Industry, 2-11-1 Iwado-kita, Komae-shi,
Tokyo 201-8511, Japan

³IHI Corporation, 1 Shinnakahara-cho, Isogo-ku, Yokohama 235-8501, Japan

ABSTRACT

There are several standards or guidelines pertaining to the specimens and methods for stress corrosion crack (SCC) growth tests, e.g., ISO 7539-6. However, there is no standard explicitly for SCC growth tests in a high-temperature water environment such as the primary water system of light water reactors (boiling water reactor (BWR) and pressurized water reactor (PWR)), and the precautions for testing in such an environment are not described. In response to this need, the nuclear subcommittee of the Japan Society of Corrosion Engineering (JSCE) has developed a standard of the test method for measuring the SCC growth rate in high-temperature water that simulates the primary water environment of light water reactors. This standard applies to austenitic steels and alloys except for irradiated materials. Since local deformation of the crack tip of irradiated materials differs from that of unirradiated materials and a smaller specimen is generally used for irradiated materials, irradiated materials are excluded from the application of the standard. This paper presents an outline of the developed standard with a supplementary explanation of the technical basis.

Keywords: Stress corrosion crack growth rate, high temperature water, austenitic stainless steel, nickel based alloy, boiling water reactor, pressurized water reactor, potential drop method

1. INTRODUCTION

From the viewpoint of assessing the structural integrity of nuclear power plant components, it is important to prepare crack growth rate reference curves based on reliable SCC growth rate data. There are several standards or guidelines pertaining to the specimens and methods for SCC growth tests, e.g., ISO 7539-6. However, there is no standard explicitly for SCC growth tests in a high temperature water environment such as the primary water system of light water reactors (BWR and PWR), and the precautions for testing in such an environment are not described. In response to this need, the nuclear subcommittee of the Japan Society of Corrosion Engineering (JSCE) has developed a standard of the test method for measuring the SCC growth rate in high temperature water that simulates the primary water environment of light water reactors (BWR and PWR). In the course of developing the standard, some items have been prescribed based on the test data analysis with technical discussion while related standards and guidelines have been referenced and accepted. This standard applies to austenitic steels and alloys (including weld metals, heat-affected zones, cold-worked materials and precipitation-hardening steels and alloys). Basic items, such as the specimen, test equipment, test procedure, and evaluation method, are specified in the text of the standard. Several items have been discussed based on experimental data and actual conditions experienced in the primary water systems of light water reactors. For example, the water chemistry conditions at the testing for BWR and PWR are set up precisely taking into consideration the primary water environments of actual nuclear power plants. Also, the crack growth rate is determined according to several criteria, such as crack engagement, crack extension in the tested environment and ratio of maximum crack length to average crack length. Supplementary items, such as

the guideline for crack length measurement by potential drop method (PDM), basic specifications of test equipment and environmental precrack introduction, are specified in the appendices of the standard. This paper presents an outline of the standard.

2. TERMS AND DEFINITIONS

The main terms and definitions used in this standard are indicated below as well as in JIS Z0103.

K_I = stress intensity factor (mode I)

E_{corr} = corrosion potential

T = specified temperature measured at the position close to a specimen installed inside the pressure vessel

$\dot{f}$ = circulating water flow (value of the pressure vessel capacity divided by the circulating flow per hour)

$a_{p1/4}$ = precrack length at the position of 1/4B

$a_{p2/4}$ = precrack length at the position of 2/4B

$a_{p3/4}$ = precrack length at the position of 3/4B

a_{p0} = average precrack length of $a_{p1/4}$, $a_{p2/4}$ and $a_{p3/4}$

a_{p0s} = average of surface precrack lengths

a_0 = initial crack length (distance from loading point to fatigue precrack tip)

a_f = final crack length (distance from loading point to final crack tip in test environment)

W = specimen width

b = specimen ligament ($= W - a$)

σ_{yT} = yield stress at testing temperature

$\sigma_{\text{flow}T}$ = flow stress at testing temperature ($= ([\sigma_{yT} + \sigma_{uT}] / 2)$)

A_1 = average crack length ([SCC area / specimen thickness] or equal divided method)

A_2 = average crack length in crack engagement area (SCC area / engaged crack width)

C = maximum crack length

D = fatigue precrack length

$[da/dt]_Q$ = provisional crack growth rate (interim crack growth rate calculated using the standard test method described herein)

$da/dt = [da/dt]_Q$ in a case where all validity criteria are met

B_e = effective specimen thickness ($= (B \cdot B_N)^{1/2}$)

where B is the distance between the sides of the specimen and B_N is the distance between the roots of the side groove notches. If no side groove is adopted, $B_e = B$.

3. SCOPE OF THE STANDARD

This standard applies to austenitic steels and alloys (including weld metals, heat-affected zones, cold-worked materials and precipitation-hardening steels and alloys), which are considered to be important for SCC issues in light water reactor (LWR) primary coolant systems. Since local deformation of the crack tip of irradiated materials differs from that of unirradiated materials and a smaller specimen is generally used for irradiated materials, irradiated materials are excluded from the application of the standard.

The standard provides a test method for determining SCC growth rate using compact tension (CT) specimens in simulated light water reactor environmental conditions (primary water) in a nuclear power plant.

4. PRINCIPLE OF TEST

Stress corrosion cracking is a phenomenon in which a crack initiates in an environment when stress is applied to a material susceptible to SCC. Thus, SCC is influenced by three factors: material, stress and environment. If SCC grows beyond a certain extent, subsequent crack growth behavior is considered to be influenced by the stress field at the crack tip. Therefore, the SCC growth rate is related to the stress intensity factor, K_I , which is the parameter expressing stress distribution at the crack tip. SCC growth rate, da/dt , is defined as the temporal differentiation of crack length. By applying a load to the specimen in an environment and measuring the crack length (a) continuously using PDM, the crack growth rate (da/dt) is calculated in which K_I can be determined from the crack length (a) and the applied load. The average K_I is determined by the average of the stress intensity factors calculated from the crack length at the start point for the evaluation and the final crack length (the crack length at the final point of the term for the evaluation). This standard specifies the preparation of specimens, adjustment of testing environment, method for applying load, and crack growth calculation method required to measure the crack growth rate using the fracture mechanics specimen in the simulated water environment of light water reactors.

5. SPECIMEN FOR TEST

5.1 Specimen Position and Direction

The position and direction of the specimen from the test sample is shown in Figure 1, which is basically determined from ISO 7539-6. Identification of the specimen position and direction is expressed using the letters L, T, S, R and C, defined as follows. In this notation, the first and second letters indicate the direction of the loading axis and crack growth, respectively.

(1) Plate material

L: long direction (final rolling direction, main forging direction)

T: width direction

S: thickness direction

(2) Round bar and hollow circular cylinder

L: axis direction

R: radial direction

C: circumferential direction

5.2 Specimen Geometry

The geometry of the specimen is the CT type as shown in Figure 2, which is similar to that of other standards, e.g., ISO 7539-6, ASTM E399, ASTM E647, and E1820. A narrow notch (2) can be formed at the tip of the straight notch (1). The specimen thickness, B , shall be equal to or greater than 25.4×10^{-3} m. However, it can be set to between 12.5×10^{-3} m and 25.4×10^{-3} m based on discussions. The specimen width, W , shall be equal to or greater than two times the specimen thickness (B). Side grooves can be prepared on both sides of the specimen. Taking into consideration existing related standards, e.g. ISO 7539-6, the depth of the side groove is 5% of the specimen thickness in general. This can be omitted based on discussions.

5.3 Size Requirement of Specimen

Following the existing fracture mechanics test standards using CT specimens, this standard prescribes the size requirement of the specimen in terms of the size of the plastic zone and small-scale yielding.

Specimen thickness Be and ligament b shall satisfy the following formulas (1) and (2). The factor β has been derived by analyzing existing SCC growth data and the test conditions including specimen size, stress intensity factor, etc. However, these formulas can be changed depending on the test objects based on discussions. The technical basis of the specimen size requirement will be presented in another paper at this conference [1].

$$Be > \beta (K_I / \sigma_{YT})^2 \quad (1)$$

$$b > 4/\pi (K_I / \sigma_{YT})^2 \quad (2)$$

where

Be : effective specimen thickness (m)

b : ligament (m)

K_I : stress intensity factor (MPa $\sqrt{m}$)

β : factor relating to specimen thickness. Normally, $\beta = 0.5$. In the case of cold-worked materials, and precipitation-hardening materials and alloys, $\beta = 2.5$ is appropriate.

σ_{YT} : yield stress at testing temperature (MPa)

σ_{flowT} : flow stress at testing temperature (MPa)

However, in formula (2), when (ultimate tensile strength σ_{uT})/(yield stress σ_{YT}) > 1.3 is satisfied, σ_{flowT} can be used instead of σ_{YT} .

5.4 Specimen Finish and Dimensional Measurement

The surface of the specimen is mechanically finished in order to remove the working layers and residual stress, and the surface roughness is as shown in Figure 2. Prior to testing, the dimensions of the specimen are measured and confirmed to be within the fabrication tolerance as shown in Figure 2.

5.5 Stress Intensity Factor K_I

The stress intensity factor, K_I , is defined as follows, which is the same as that in ISO 7539-6 and ASTM E399.

$$K_I = \frac{P}{B_e \sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (3)$$

where

K_I : stress intensity factor (MPa $\sqrt{m}$)

P : load (MN)

α : a/W , a is crack length (m), W is specimen width (m)

Be : effective specimen thickness (m)

Note: The accuracy of formula (3) is $\pm 0.5\%$ and the effective range is $0.2 \leq \alpha \leq 1.0$. K_I may be obtained by methods other than formula (3) based on discussions.

5.6 Precrack Introduction

A fatigue precrack is introduced at the tip of the machined notch of the specimen in the atmosphere as well as the fracture toughness test and fatigue crack growth test, e.g. ASTM E813 and ASTM E647. The conditions for introducing the precrack into the specimen have been determined as follows, taking into consideration existing related standards and experimental data. The fatigue precrack shall not be less than $0.05B$ or 1.0×10^{-3} m. The geometries of the notch and fatigue precrack should be within the required envelope shown in Figure 3. The final maximum load during precracking shall not exceed the initial load of the SCC growth test in the water environment, preferably less than 80%. The crack length (a_{0s}) after precrack introduction is measured at both sides of the front and back faces of the specimen and recorded. The loading condition during precracking is recorded for reference.

6. TEST EQUIPMENT

The test equipment consists of a high-temperature high-pressure water circulation system that can simulate the water chemistry environment in light water reactors, and a pressure vessel (autoclave) with the loading machine connected to the high-temperature high-pressure part. Figure 4 shows an example schematic diagram of the test equipment. The test equipment includes a continuous measuring device for the crack length of the specimen and a measuring device for the corrosion potential (the corrosion potential may not be measured in the test in the simulated PWR environment). The basic specifications of the test equipment simulating BWR and PWR water environments are shown in the appendix in the standard.

7. TEST METHOD

7.1 Installation of Specimen, Terminals for Crack Length Measurement, and Electrodes for Corrosion Potential Measurement

The specimen with the introduced precrack described earlier is set on the loading axis and the terminals for crack length measurement by PDM are installed. The indicated value of the crack length means the crack length obtained from the output of this method.

Two types of terminals are installed on the specimen; one is for supplying DC or AC current to the specimen and the other is for measuring the electrical potential drop across the crack. The locations of the terminals are set with reference to literatures (e.g. [2]). To prevent electric conduction between the terminals except through the specimen, the specimen is sufficiently isolated from the fixtures.

In the simulated BWR environment test, a sample electrode and a reference electrode are installed close to the CT specimen in the pressure vessel to measure the corrosion potential (E_{corr}) of the material tested. The sample electrode is the CT specimen itself or a coupon specimen made of the same material as the CT specimen. The sample electrode and the reference electrode are installed to face each other. In the PWR simulated environment test, E_{corr} is not measured in principle, but it is measured for any objects if necessary.

7.2 Adjustment of Test Water Chemistry

By adjusting test water in the water chemistry controlled tank and circulating the test water at a high-temperature and high-pressure condition through the pressure vessel containing the specimen, the water chemistries at the inlet and the outlet of the pressure vessel are set as the target test conditions. The test conditions are set to meet the test purposes. The simulated BWR environment includes normal water chemistry (NWC) and hydrogen water chemistry (HWC). Typical water chemistry of the simulated BWR environment test under NWC conditions is shown in Table 1 as an example. Typical water chemistry of the simulated PWR environment test is shown in Table 2. Temperatures A, B and C for the PWR test provide the temperature at the outlet of the pressure vessel, the outlet of the steam generator and the

typical temperature acceleration condition, respectively. Environment I for the PWR test provides the initial water chemistry condition considering the extension of the running cycle. Environment II for the PWR test provides the typical average water chemistry.

In the case of the test in the water chemistry simulated BWR environment as shown in Table 1, test water from the pressure vessel should go through the ion exchange resin to eliminate impurity ions. Then, the test water is circulated from the water chemistry controlled tank to the pressure vessel. On the other hand, in the simulated PWR environment, if the test water contains boric acid or lithium ion as shown in Table 2, the test water from the pressure vessel flows through the bypass line, not the ion exchange resin, to the water chemistry controlled tank and is circulated to the pressure vessel.

When E_{corr} is measured during the test, measurement begins after the test water chemistry is adjusted to the target condition. E_{corr} is monitored continuously by measuring the potential difference between the sample electrode and the reference electrode using a high input impedance electrometer.

The measurement items during the test are shown in Table 3. There are differences in some of the measured items for the BWR test and the PWR test due to the difference in water chemistry for the tests.

7.3 Introduction of Environmental Precrack

In the case of the SCC growth test using materials with low SCC susceptibility (e.g., low carbon stainless steels), an intergranular SCC crack generally does not occur from the tip of a transgranular fatigue precrack and/or an SCC crack front becomes uneven. Also, in the case of the SCC growth test using Ni base weld metal, it is known that the crack front of the specimen has an uncracked ligament and takes on an uneven form. This situation is considered to result in low-quality data. From this viewpoint, in the case of a test using such materials, the environmental precrack introduction before the constant load test can be adopted so that an intergranular SCC crack can easily occur from the tip of the fatigue precrack at the beginning of the test. This process will shorten the incubation time and result in the uniform SCC crack front. For this purpose, cyclic loading with the combination of a high stress ratio ($R = \text{min. stress}/\text{max. stress}$) and a low frequency, constant loading with periodical unloading, etc., are used for the environmental precrack introduction. In this standard, it is prescribed that a precrack may be introduced at the front face of the fatigue precrack in the atmosphere by applying cyclic loading to the specimen in the test environment.

Based on the results of literature survey concerning this issue, examples of recommended loading conditions for environmental precracking introduction are indicated in this standard.

As for low carbon stainless steels, the loading condition of high R (e.g., 0.9) and low frequency (e.g., 0.0001 Hz) was applied to intergranular precrack introduction for SCC crack growth test in a simulated BWR environment [3], [4]. For nickel based alloy weld metal, the method for regular environmental intergranular crack through the CT specimen thickness was investigated in a simulated BWR reactor water environment [5]. The test was conducted under various cyclic loading conditions, the shape of the crack, and the morphology of the extended crack in the environment were investigated. The test results revealed that intergranular precrack on the fracture surface through the entire thickness of the specimen could be obtained using gentle load cycling with $R = 0.9$ and $f = 0.01\text{--}0.0001$ Hz for the materials. Thus, an intergranular precrack can be introduced in a test environment by using the adequate conditions combined with the R ratio and frequency.

Andresen [6] proposed the guideline for a test method to obtain a high-quality SCC crack growth rate from the viewpoint of intergranular precracking introduction. Several loading methods were applied for environmental crack introduction at the initial stage of the test as follows: after changing $R = 0.5 \rightarrow 0.6 \rightarrow 0.7$ in steps at $f = 1$ Hz, the frequency was decreased to 0.0001 Hz at $R = 0.7$ accompanied by periodic unloading with a hold time prior to final constant loading [7]. It was pointed out that the transition from transgranular morphology to intergranular morphology can be done by such loading mode at the initial

stage and that the loading mode change and resulting crack growth behavior should be closely monitored at this stage so that the appropriate load setting and change can be made in accordance with the crack behavior [8].

Crack growth tests have also been carried out using Ni-based alloys in a simulated PWR reactor water environment, and intergranular crack growth was observed under the loading conditions of $T_{\text{Hold}} = 0.3$ h, $R = 0.5$ or 0.7 [9] and [10]. Toloczko et al. applied several loading modes in steps at the initial stage of the SCC growth test in order to introduce intergranular precrack to specimens [11], [12]. In these tests, the strain rate at the crack tip gradually decreased by decreasing the frequency at $R = 0.5 \sim 0.7$ at the initial stage. Then, the loading condition just before the start of the final constant K condition was set to $f = 0.01$ Hz, $R = 0.5$, and $T_{\text{Hold}} = 2.5$ h, for example.

Based on the above information, examples of the recommended loading conditions for the combinations of material and environment where the introduction of environmental precrack is effective are shown in Table 4.

7.4 Test Load

7.4.1 Basic Procedure

The setup of a test load for the duration of the crack growth test is based on the measured crack length and the test load is calculated from formula (3) so that K_I at the crack tip becomes the target value. The test load is basically constant during the crack growth test.

7.4.2 Optional Procedures

(1) Periodic unloading operation

Under the condition that the stress corrosion crack growth rate is significantly slow, constant loading with periodic unloading operation can be applied during the test time in order to promote stable crack growth. In this case, in order to set the unloading conditions, it is necessary to consider fatigue crack growth because of cyclic loading during the loading and unloading operations. Therefore, the loading conditions (stress ratio, time spent for loading and unloading) shall be adequately set so that the amount of fatigue crack growth by cyclic operations of loading and unloading becomes negligibly small compared with the amount of stress corrosion crack growth.

The loading condition shall be established so that the amount of crack growth by fatigue by periodic unloading becomes 5% or less of the amount of stress corrosion crack growth. An example condition that has displayed good performance is shown in Table 5. The periodic unloading operation may be adopted based on discussions.

(2) Crack-tip activation operation

In a case where it is necessary to stop the SCC growth test, the crack-tip activation loading may be performed after restarting the test, where appropriate. When the SCC growth test is performed under the condition that continuous crack growth is difficult because of small test load, etc., crack growth may become very slow or may stop. In addition, long-time discontinuation of a test or a change in conditions during testing might influence the behavior of SCC growth. Therefore, in an SCC growth test, the promotion of crack growth by crack-tip activation and the mitigation of effects of long-time discontinuation and previous test conditions are possible by cyclic unloading of the test load, which is referred to as crack-tip activation loading.

Crack growth in the term for crack-tip activation loading includes fatigue crack growth because in crack-tip activation loading, cyclic unloading of the test load is performed. Therefore, the term for providing crack-tip activation loading is not included in the term for measurement in the SCC growth test.

An example of the loading conditions of crack-tip activation loading is shown in Table 6, where R is the stress ratio (minimum load/test load in periodic unloading), T_{Hold} is the interval of periodic unloading (duration of the test load), T_{Fall} is the time required for unloading from the test load to the minimum load, and T_{Rise} is the time required for loading from the minimum load to the test load.

7.5 Crack Growth Test

After the water chemistry is stabilized, the test load is applied to the specimen. Measurement of the crack length using PDM is started simultaneously with loading, and the behavior of the acquired data is monitored. In accordance with the planned test procedures and the situation after starting the test, the test shall be conducted as follows:

- (a) If an environmental precrack is introduced, the required cyclic load is applied after the water chemistry is stabilized. Measurement of the crack length is started simultaneously with applying the load. After the indicated value of the crack length shows the target value, which is set by the concerned persons, the test load is applied to the specimen.
- (b) When the water chemistry for introduction of the environmental precrack differs from that for the SCC growth testing, the required test load is applied to the specimen after the water chemistry is adjusted.
- (c) When the indicated value of the crack length shows no significant increase for the duration of the SCC growth testing, crack-tip activation loading as described in Section 7.4 may be performed by cyclic loading, as needed.
- (d) When the water chemistry is changed during the SCC growth testing, after adjusting the water chemistry, crack-tip activation loading as described in Section 7.4 may be performed, where appropriate.
- (e) When the test load is changed during the SCC growth testing, it can be changed only in the case of an increased load. After changing the test load, crack-tip activation loading as described in Section 7.4 may be performed, where appropriate.
- (f) When the water chemistry or the test load is changed during the SCC growth testing, the SCC crack growth rate is evaluated in the period when the conditions of the water chemistry and the test load are kept constant.

The test is completed after the increase in the indicated value of the crack length measured continuously during testing is judged to satisfy the average crack length specified in Section 8.4. However, even if the indicated value cannot be judged to satisfy the increase in average crack length, the completion time of the test can be determined based on discussions.

8. EVALUATION METHOD OF TEST RESULTS

After the test, the CT specimen is forced to fracture by fatigue in the atmosphere. The fatigue precrack and the SCC growth surface developed in the high-temperature and high-pressure water environment are determined by observing the crack tip at an identifiable magnification with an optical microscope and/or scanning electron microscope (SEM). The crack geometry, the area of growth region and the maximum growth length are recorded. The typical SCC growth surface of the crack growth region in the high-temperature and high-pressure water environment is observed with SEM, and is recorded. The test results are evaluated as follows.

8.1 Crack Length Measurement and Evaluation

The average crack lengths A_1 (average crack length), A_2 (average crack length in crack engagement area), C (maximum crack length), and D (precrack length) are determined from the SCC growth surface of the specimen. The methods for determining the crack lengths are shown in Figure 5 as an example. Then, the

precrack lengths at the positions of $1/4B$, $2/4B$ and $3/4B$ from the surface are measured and expressed as $a_{p1/4}$, $a_{p2/4}$, and $a_{p3/4}$, respectively.

The following check is performed for the precrack, which is similar to that of a Japanese test standard for elastic-plastic fracture toughness [13].

- Difference of each of $a_{p1/4}$, $a_{p2/4}$ and $a_{p3/4}$ is less than $0.1 a_{p0}$.
- a_{p0s} is greater than $0.9 a_{p0}$.

where

a_{p0} : average precrack length of $a_{p1/4}$, $a_{p2/4}$ and $a_{p3/4}$

a_{p0s} : average of surface precrack lengths

In order to establish a crack length versus test time curve, the initial crack length (a_0) and final crack length (a_f) are calculated by the following equations.

$$a_0 = D + (\text{distance from loading point to machined notch})$$

$$a_f = D + A_2 + (\text{distance from loading point to machined notch})$$

8.2 Crack Growth Rate Determination

The crack lengths measured at the starting point and at the end of the test by PDM are corrected so as to meet the initial crack length (a_0) and final crack length (a_f) calculated in Section 8.1, respectively. Based on the results, a figure showing the relationship between the crack length and the test time is prepared. When the crack length measured with PDM increases linearly with time in the evaluation period and shows a change beyond the fluctuation of PDM defined in the standard, the provisional crack growth rate $[da/dt]_Q$ is calculated. Examples of the conceptual figures for the method of estimating the provisional crack growth rate from the crack length versus test time curve are prepared as reference in the standard. However, the crack lengths in obtaining the provisional crack growth rate are determined based on discussions.

8.3 K_I Determination

The stress intensity factor K_I at the time of testing is determined from the crack length and the setting load by the method described in Section 5.5. The stress intensity factor is calculated by averaging the stress intensity factors calculated from the crack length at the start point and the final crack length at the final point of the term for evaluation.

8.4 Validity Criteria of Crack Growth Rate

The criteria for valid crack growth rate have been discussed in terms of crack shape and length, and are defined as follows in the standard. In a case where all the criteria are satisfied, $[da/dt]_Q = da/dt$.

- a) Crack engagement (ratio of SCC to the specimen thickness) is 50% or more.
- b) Ratio (C/A_1) of the maximum crack length C to the average crack length A_1 is three or less.
- c) Average crack length A_1 is 0.2×10^{-3} m or more.
- d) The requirement for the precrack length given in Section 8.1 is satisfied.
- e) Ligament b satisfies the requirements given in Section 5.3.

As for item c), the average crack length ($A_1 \geq 0.2 \times 10^{-3}$ m) has been set from the idea that more than one grain is necessary for intergranular crack growth. The average crack length A_1 includes precrack growth

area. More details of the technical basis for the criteria are described in an explanatory document in the standard.

9. OTHER ITEMS

The standard also includes several other items as appendices, such as the basic specifications of the test equipment, the procedures for determining the crack growth rate from a schematic diagram of crack length vs. time curve, guideline for crack length measurement by PDM, and so on, in the text.

The standard is accompanied by an explanatory document describing the background and technical basis, etc. Also included are several other items, such as the methods for measuring the water chemistry, method for measuring E_{corr} , the use of CDCB (contoured double cantilever beam) specimens for the SCC growth test, and so on.

CONCLUSIONS

The nuclear subcommittee of the JSCE has developed a standard of the test method for measuring SCC growth rate in high-temperature water that simulates the primary water environment of light water reactors (BWR and PWR). In the course of developing the standard, some items have been prescribed based on the test data analysis with technical discussion while related standards and guidelines have been referenced and accepted. Basic items such as test equipment, test procedures and evaluation method are specified in the appendices. Also, the standard is accompanied by an explanatory document describing the background and technical basis, etc. The standard is going to be published in the near future. This standard will be revised based on technological progress and improved knowledge.

This standard has been developed by the JSCE subcommittee for the SCC growth test method. The subcommittee consisted of experts from industry and academia as follows: Chubu Electric Power Co., Hitachi Ltd., Institute of Nuclear Safety System Inc., Kansai Electric Power Co., Japan Atomic Energy Agency, Japan Atomic Power Co., Mitsubishi Heavy Industries Ltd., Nippon Nuclear Fuel Development, Nippon Steel and Sumitomo Metal Corp., Nuclear Regulation Authority, Tokyo Electric Power Co., Toshiba Corp., and Tohoku University.

REFERENCES

- [1] Arai, T., Hirano, T., Aoike, S., and Terachi, T.: "Technical Basis of the JSCE Standard of the Method for Measuring SCC Growth Rate in High Temperature Water – Specimen Size Requirement," *Proc. 17th Inter. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors*, CNS, August 10-13, 2015, Ottawa, Ontario, Canada.
- [2] Catlin, W.R., Lord, D.C., Prater, T.A. and Coffin, L.F.: "The Reversing D-C Electrical Potential Method," in "Automated Test Methods for Fracture and Fatigue Crack Growth," *ASTM STP-877*, pp. 67-85 (1985).
- [3] Itow, M., Itatani, M., Kikuchi, M., and Tanaka, N.: "Crack Growth Behaviors of Low Carbon 316 Stainless Steels in 288°C Pure Water," *Proc. 12th Inter. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Systems – Water Reactors*, Allen, T.R., King, P.J. and Nelson, L., eds., TMS, pp. 65-71 (2005).
- [4] Ando, M., Nakata, K., Itow, M., Tanaka, N., Koshiishi, M., Obata, R., Miwa, Y., Kaji, Y., and Hayakawa, M. "CGR Behavior of Low Carbon Stainless Steel of Hardened Heat Affected Zone in PLR Piping Weld Joints," *Proc. 13th Inter. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Systems – Water Reactors*, King, P.J., Allen, T.R., Busby, J., eds., Canadian Nuclear Soc., No. P0045 (2007).

- [5] Ozawa, M., Yamamoto, Y., Itow, M., Tanaka, N., Kasahara, S., and Kuniya, J.: “Interdendritic Crack Introduction before SCC Growth Tests in High-Temperature Water for Nickel-Based Weld Alloys,” *Proc. 2nd Inter. Conf. on Environmental-Induced Cracking of Metals (EICM-2)*, Vol. 2, p. 153 (2004).
- [6] Andresen, P.: “SCC Testing and Data Quality Consideration,” *Proc. 9th Inter. Symp. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors*, S. Bruemmer, P. Ford, G. Was, eds., TMS, pp. 411-421 (1999).
- [7] Andresen, P., and Morra, M.: “SCC of Stainless Steels and Ni Alloys in High Temperature Water,” *Corrosion 2007*, NACE International, Paper No. 07612 (2007).
- [8] Andresen, P.: “Irradiation Effects on Reactor Internals: IASCC,” *International Boiling Water Reactor and Pressurized Water Reactor Materials Reliability Conference and Exhibition*, EPRI, Maryland USA, July 16-19 (2012).
- [9] Yamamoto, Y., Ozawa, M., Nakata, K., Yoshimoto, K., Toyoda, M., and Okuda, J.: “Evaluation of Crack Growth Rate for Alloy 600 Vessel Penetration in a Primary Water Environment,” *Proc. 12th Inter. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Systems – Water Reactors*, Allen, T.R., King, P.J., Nelson, L., eds., TMS, pp. 1019-1028 (2005).
- [10] Yamamoto, Y., Nakata, K., Ozawa, M., Yoshimoto, K., Kanasaki, H., Tomimatsu, M., and Okuda, J.: “Development of the Crack Growth Rate Curves for Stress Corrosion Cracking of Nickel Based Alloys in a Simulated Primary Water Environment,” *Fontevraud 6th*, Paper A061-T04 (2006).
- [11] Toloczko, M.B., Olszta, M. J., and Bruemmer, S.M.: “One Dimensional Cold Rolling Effects on Stress Corrosion Crack Growth in Alloy 690 Tubing and Plate Materials,” *Proc. 15th Inter. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors*, TMS, pp. 91-106 (2011).
- [12] Toloczko, M.B., Olszta, M.J., and Bruemmer, S.M.: “Stress Corrosion Crack Growth of Alloy 52M in Simulated PWR Primary Water,” *Proc. 15th Inter. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors*, TMS, pp. 225-243 (2011).
- [13] “Standard Method of Test for Elastic-Plastic Fracture Toughness J_{Ic} ,” *JSME S 001-1981*.

Table 1 Water chemistry for simulated BWR environment test (typical example)

Analysis items	Controlled values for water chemistry
Temperature	288±3°C
Conductivity (inlet)	≤ 0.01 mS/m (at 25°C)
Conductivity (outlet)	≤ 0.02 mS/m (at 25°C)
Dissolved oxygen concentration	200 to >8000 ppb
Corrosion potential	0.15±0.05 V vs. SHE
Sulfate ion (SO_4^{2-}) concentration	≤ 5 ppb
Chloride ion (Cl^-) concentration	≤ 5 ppb

Table 2 Water chemistry for simulated PWR environment test (typical example)

Analysis items	Controlled values for water chemistry	
Temperature	Temperature A	325±3°C
	Temperature B	290±3°C
	Temperature C	360±3°C
Conductivity	Environment I	3.5±0.3 mS/m (at 25°C)
	Environment II	2.15±0.3 mS/m (at 25°C)
pH	Environment I	6.25±0.15 (at 25°C)
	Environment II	7±0.15 (at 25°C)
Boric acid concentration (As H_3BO_3 is added)	Environment I	1800±180 ppm (as B)
	Environment II	500±50 ppm (as B)
Lithium ion concentration (As LiOH is added)	Environment I	3.5±0.35 ppm
	Environment II	2±0.2 ppm
Dissolved oxygen concentration	≤ 5 ppb	
Dissolved hydrogen concentration	30±5 $\text{cm}^3\text{-STP/kg}\cdot\text{H}_2\text{O}$ *	
Sulfate ion (SO_4^{2-}) concentration	≤ 50 ppb	
Fluoride ion (F^-) concentration	≤ 50 ppb	
Chloride ion (Cl^-) concentration	≤ 50 ppb	

* $\text{cm}^3\text{-STP/kg}\cdot\text{H}_2\text{O} = 0.0893 \text{ ppm}$

Table 3 Measurement items in test

Measured items	Simulated BWR condition	Simulated PWR condition
Conductivity (inlet)	○	○
Conductivity (outlet)	○	Δ
DO concentration (inlet)	○	Δ
DO concentration (outlet)	○	Δ
DH concentration (inlet)	Note 1)	Δ
DH concentration (outlet)		Δ
Specified temperature	○	○
E_{corr}	○	Note 1)
Boric acid concentration	—	Δ
Lithium acid concentration	—	Δ
Sulfate ion (SO_4^{2-}) concentration	□	Δ
Chloride ion (Cl^-) concentration	□	Δ
Fluoride ion (F^-) concentration	Note 1)	Δ
pH	Note 1)	Δ
○: continuously measured items Δ: items measured at the beginning of the test □: items measured one or more times during the test Note 1) Measured, if needed		

Table 4 Examples of conditions of environmental precrack introduction

Loading condition	Test environment	Material
- Maximum load: test load - Stress ratio (R) = 0.9 - Frequency = 0.0001 Hz - Load waveform is triangular wave	Simulated BWR environment	Stainless steel
- Maximum load: test load - Stepwise load mode change - Step 1: Frequency = 0.1 Hz, $R = 0.3 \rightarrow 0.5 \rightarrow 0.7$ - Step 2: $R = 0.7$, Frequency = 0.01 Hz $\rightarrow$ 0.001 Hz - Step 3: Frequency = 0.01 Hz, $R = 0.7$, Maximum load hold time = 9000 s - Load waveform is triangular wave	Simulated BWR environment	Stainless steel Ni-based alloy base metal or weld metal
	Simulated PWR environment	Ni-based alloy base metal or weld metal
- Maximum load: test load - $R = 0.9$ - Frequency = 0.01 – 0.0001 Hz - Load waveform is triangular wave	Simulated BWR environment	Ni-based alloy base metal or weld metal
- Maximum load: test load - $R = 0.5$ or 0.7 - Maximum load hold time = 0.3 h - Load waveform is triangular wave	Simulated PWR environment	Ni-based alloy base metal or weld metal

Table 5 Example of periodic unloading condition

Item	Condition
R	0.7 or more
T_{Hold}	9000 (s)
T_{Fall}	About 10 (s)
T_{Rise}	150 (s)

Table 6 Example of crack-tip activation loading condition

Item	Condition
R	0.7 or more
T_{Hold}	9000 (s)
T_{Fall}	500 (s)
T_{Rise}	500 (s)
Duration	100 (h)

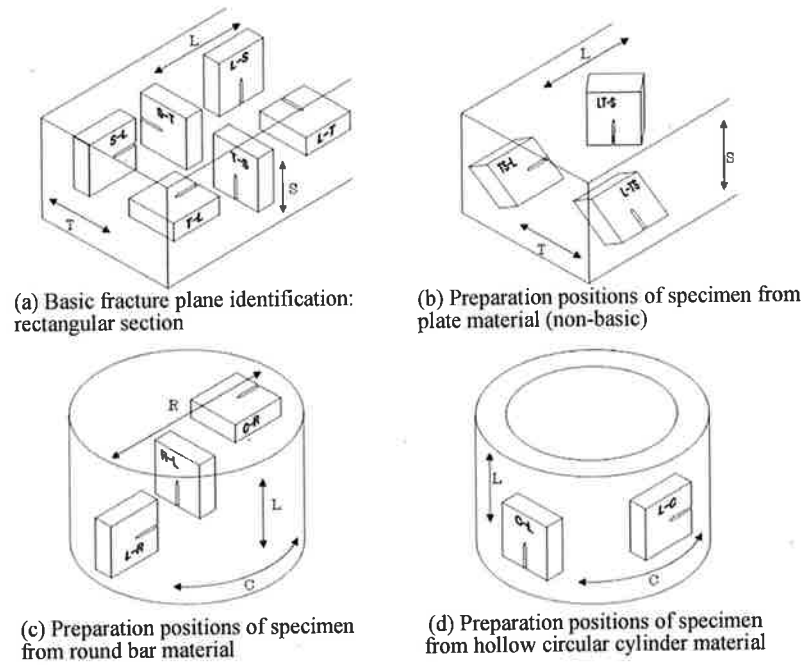
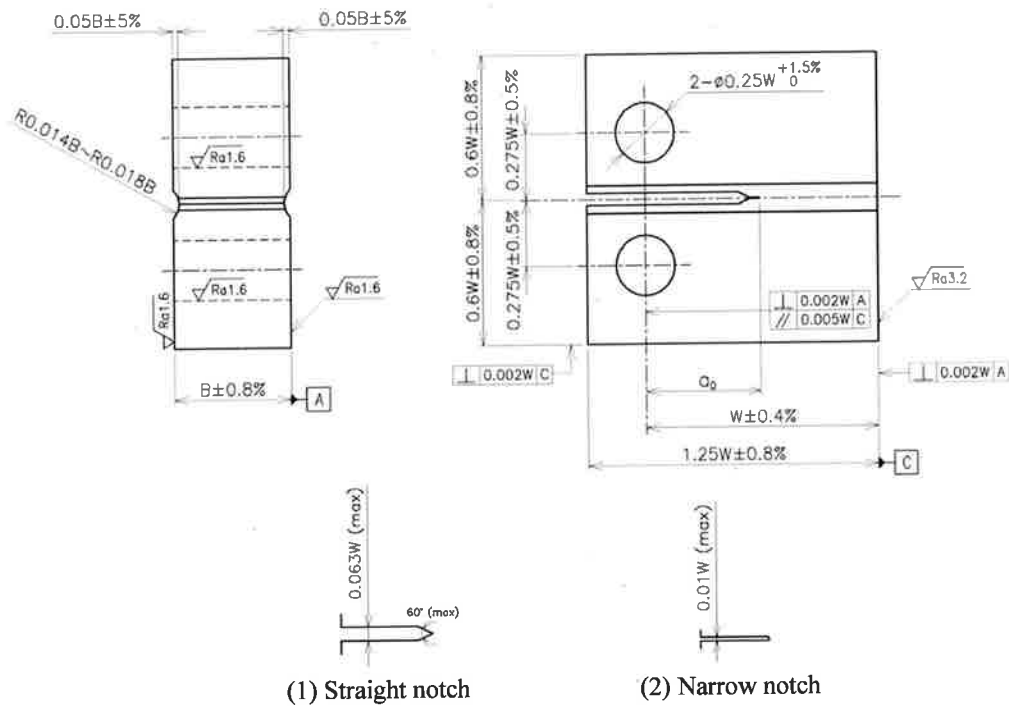


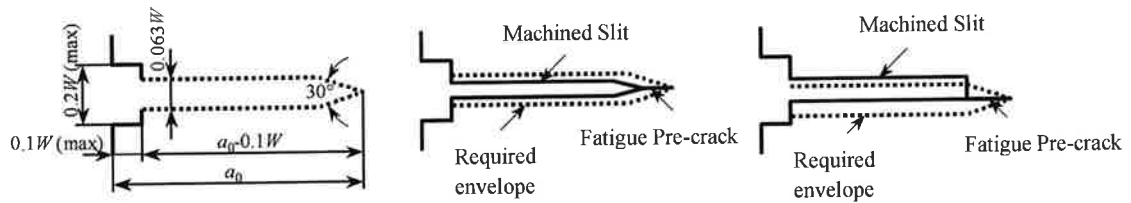
Figure 1 Specimen position and direction



Note: 1) $a_0 > 0.45W$

2) Radius of notch tip is less than 0.25 mm

Figure 2 Geometry of CT specimen



(1) Required envelope (2) Example of acceptable notch (3) Example of unacceptable notch

Figure 3 Required envelope for fatigue precrack and notch

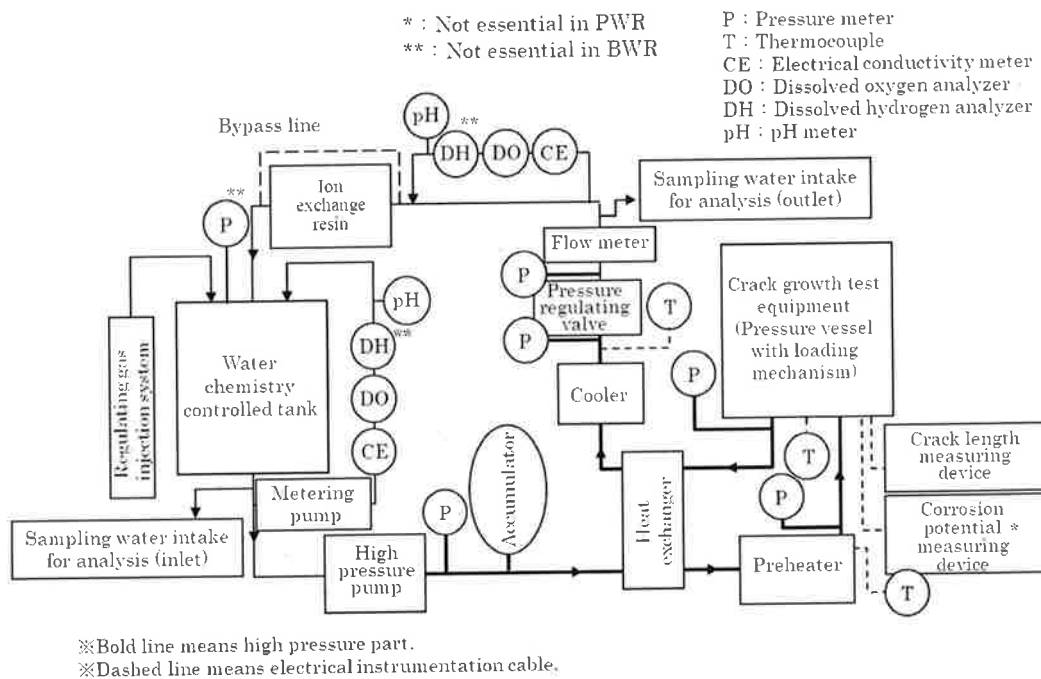


Figure 4 Schematic diagram of test equipment

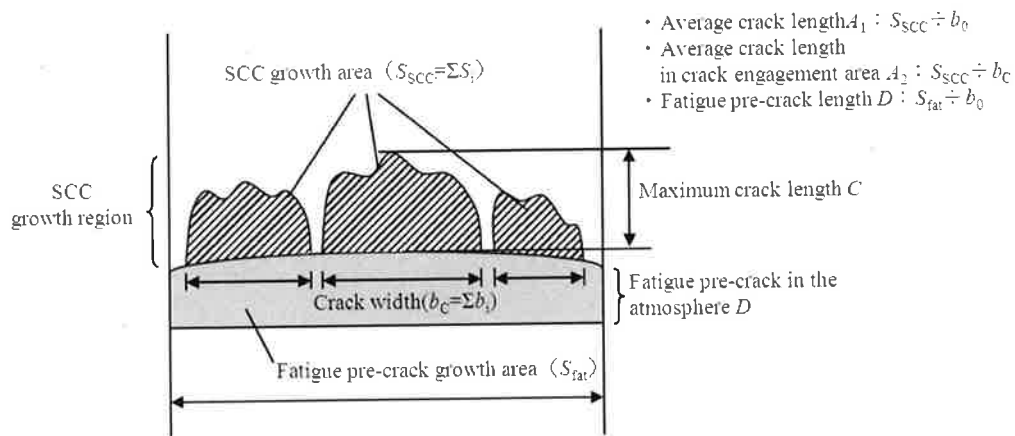


Figure 5 Method for obtaining crack lengths on the specimen fracture surface [Area method]

H21 年度 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」 最終報告書 要約版(1/3)

1. はじめに

沸騰水型軽水炉（BWR）プラントでは、冷間加工されたオーステナイト系ステンレス鋼の応力腐食割れ（SCC）が顕在化し、対策が進められている。一方、加圧水型軽水炉（PWR）においても、特異事例である可能性も否定できないながら、平成 19 年 10 月に美浜 2 号機の蒸気発生器（SG）入口管台セーフエンドにおいて粒界き裂が発見された。美浜 2 号機事例の更なる原因究明研究及び冷間加工に起因する SCC（以降、強加工 SCC と称す）の知見拡充の結果からの動向によっては、既設の機器・配管に対しても劣化緩和等の保全が必要となる可能性がある。BWR プラントのシュラウド・PLR 配管及び美浜 2 号機セーフエンドの損傷事例が、いずれも溶接部近傍であったことを考えると、水平展開においては、特に溶接部近傍を重点的に考慮する必要があると考える。これは、溶接部近傍は溶金収縮・溶接熱により板厚内部が硬化しており、溶接残留応力も重畳することで SCC き裂が進展する可能性が高いためである。特に、配管溶接部は物量が多く保全が必要な部位の差別化が必要であるが、差別化のためのデータは少なく精緻化が必要な状況である。

2. 実施内容

本研究では、配管・管台溶接部のモックアップを製作し、溶接部近傍の硬さ調査、表層の残留応力測定を実施する。また、FEM による溶接後の応力分布解析及びモックアップの板厚内部の残留応力測定の結果より、溶接残留応力値の精緻化を図る。表 1 に試験マトリックスを示す。

表 1 試験マトリックス

種類		硬さ・残留応力調査※1			応力解析		
	溶接手法	TIG	TIG +SMAW	A-TIG	TIG	TIG +SMAW	A-TIG
配管 (BW※2)	3/4B	○, △					
	1B	○					
	2B	○	○	○	○		
	3B	○, △					
	4B	○			○		
	6B	○			○		
	8B	○, □, △	○	○	○	○	○
	14B	○, □, △			○		
配管 (SW※2)	3/4B		○				
	2B		○				
配管 管台	3/4B 管台		○			○	
	1 1/4B 管台		○			○	
	MCP 管台 4B(セツワ)		○, △			○	
	MCP 管台 14B(セツワ)					○	
	MCP 管台 6B(セツワ)					○	

※1：モックアップを製作し、硬さ・残留応力調査を実施。記号の意味は以下の通り。

○：硬さ調査

△：表層の残留応力調査（ひずみゲージ）

□：板厚内部の残留応力調査計測（ひずみゲージ）

※2：BW（突合せ溶接）、SW（ソケット溶接）

2.1 硬さ測定

板厚内部（板厚の約 1/3 程度の深さ）、表層（深さ 1mm まで）のビッカース硬さを測定した。図 1 に、一般配管突合せ溶接の硬さ測定位置の例を示す。

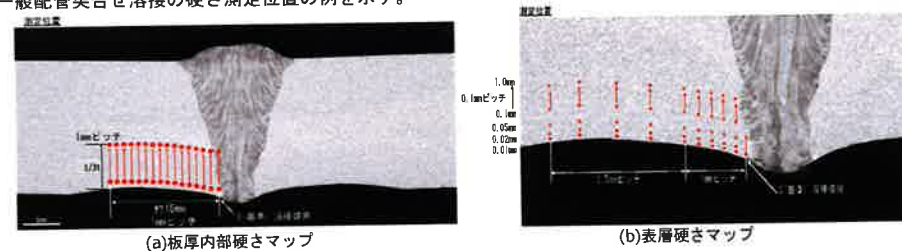


図 1 硬さ調査位置（一般配管突合せ溶接の例）

2.2 残留応力測定

2.3 項にて実施する FEM 解析の妥当性を示すために、ひずみゲージによる板厚部の残留応力測定を実施した。

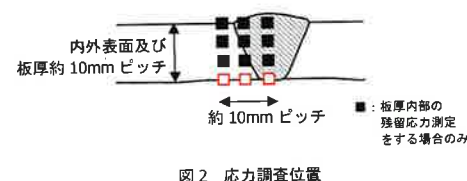


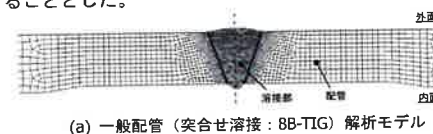
図 2 応力調査位置



図 3 残留応力測定状況例

2.3 残留応力解析

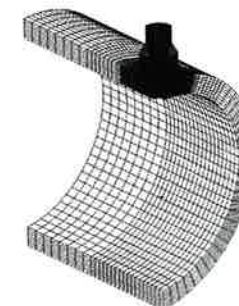
運転中応力を考慮した板厚内部の残留応力を求めるために、FEM により非定常熱伝導解析及び熱弾塑性解析機能を用い残留応力解析を実施した。一般配管は軸対称モデル、管台は 3 次元モデルとした。なお、残留応力解析結果の妥当性については、2.2 項にて実施する板厚内部の残留応力測定結果により確認することとした。



(a) 一般配管（突合せ溶接：8B-TIG）解析モデル



(b) 溶接積層図の例（一般配管：8B-TIG）



(c) MCP 管台(4B)解析モデル

図 4 解析モデルの例

3. 結果

3.1 硬さ測定結果

(1) 板厚内部の硬さ

各モックアップの硬さ結果を図5・表2に示す。また、各モックアップの板厚内部の硬さの傾向を表3に整理した。

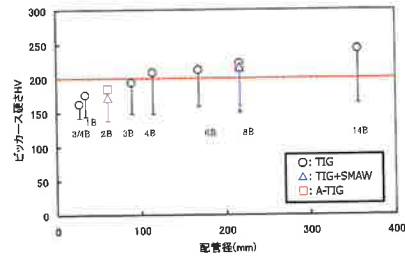


図5 一般配管 硬さまとめ

表2 ソケット溶接・配管管台・MCP管台硬さまとめ

種別	配管径	測定位置	硬さ(HV1)		溶接手法
			0°側	90°側	
一般配管(SW)	3/4B	ソケット	144~182		TIG
		配管	129~186		
	2B	ソケット	143~196		
		配管	169~198		
配管管台	3/4B	母管	154~210	147~201	TIG + SMAW
		管台	149~206	143~204	
	1-1/4B	母管	155~211	146~196	TIG
		管台	147~204	143~206	
MCP管台	4B	管台	148~204	152~225	SMAW

表3 板厚内部硬さ 結果概要

	板厚内部硬さ	板厚	硬さ
一般配管(BW)		小	板厚が小さい場合には、200HV1以下の硬さしか確認されない。
		大	板厚増加に伴い、溶接境界近傍の硬さ増加。溶接始端側から扇形に硬化領域が広がる。 4B以上で200HV1以上の硬さが確認された。ただし最大でも250HV程度(14BSch160)
一般配管(SW)		— (3/4B、2Bのみ取得)	硬化傾向は認められず。(いずれも200HV以下)
配管管台 MCP管台		— (配管管台は3/4B、1-1/4Bのみ、MCP管台は4Bのみ取得)	<配管管台> 0°側では溶接境界近傍で200~220HVの領域が確認される。測定方向により同一径管台でも溶接近傍の硬さ傾向が異なる。 <MCP管台> 90°側では溶接境界近傍で200~220HVの領域が確認される。測定方向により同一径管台でも溶接近傍の硬さ傾向が異なる。

(2) 表層の硬さ

配管管台・MCP管台等、溶接後に機械加工するものについては、300HV0.01以上の硬さとなる領域があることを確認した。一方、溶接後に機械加工等を実施しない配管溶接部(BW、SW いずれも機械加工後に溶接)については、溶接境界から離れた位置では硬化傾向が確認されたが、溶接部近傍では表層硬度の低下が確認された。

表4 表層硬さ 測定結果概要

	板厚内部硬さ	硬さ
一般配管(BW)		板厚の影響は小さく、内表面近傍の硬さは、200HV0.01程度 溶接境界から離れた位置では、シンニング機械加工の影響が認められる場合があり、内表面から0.1mm程度まで200HV以上の硬化領域が認められる。
一般配管(SW)		板厚の影響は小さく、内表面近傍の硬さは、200HV0.01程度 ソケット側では内表面から0.1mm程度まで機械加工の影響による200HV以上の硬化領域が認められる。
配管管台 MCP管台		内表面近傍は溶接後にドリルにて穴あけ加工しているため、内表面近傍で硬化傾向が認められる。 硬化領域は内表面から0.1~0.3mm程度。

3.2 残留応力測定結果

一般配管の内面及び板厚内の応力分布の測定結果と、3.3 項に示す解析結果は概ね一致しており、解析による応力評価手法の妥当性が確認できた。なお、MCP 管台 (4B) では計測と解析値では差が生じており、溶接後の機械加工の影響等も推測されるが、管台部の評価目的は板厚内の応力分布傾向の把握という位置付けであることから、本解析手法を用いた評価をそのまま適用することとする。

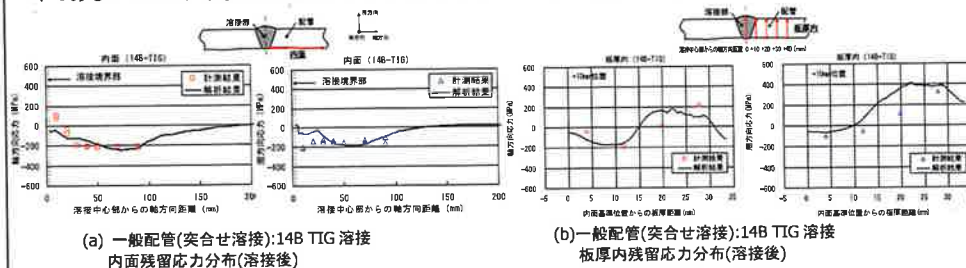


図6 残留応力計測結果と解析結果の重ね合わせ

3.3 残留応力解析結果

(1) 一般配管 (突合せ溶接)

運転条件時の板厚内の応力分布より、全て配管モデルにおいて、板厚内の応力分布は軸方向、周方向応力とも引張であることが確認でき、き裂進展評価を行うと、き裂は停滞せずに進展する可能性があると推定される。

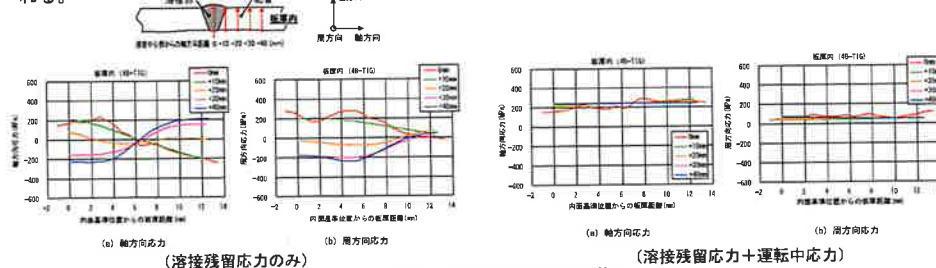


図7 応力解析結果 (4B 配管)

表5 運転条件^{※1}

解析ケース	温度 (°C)	内圧 (MPa)	曲げ応力 ^{※2} (MPa)
一般配管 (突合せ溶接)			
2B TIG	343	18	300
4B TIG	360	18	200
6B TIG	360	18	100
8B	360	18	100
14B TIG	360	18	150
配管管台			
3/4B	360	18	X=0.05mm, Y=0.5mm ^{※3}
1-1/4B	360	18	考慮しない ^{※4}
4B	330	15.51	考慮しない ^{※5}
MCP 管台			
14B	330	15.51	考慮しない ^{※5}
6B(セットイン)	330	15.51	考慮しない ^{※5}

- ※1: 工認・PLM 評価を参考に、各口径の配管/管台が主に使用されているラインの条件を基に設定した。
 ※2: 曲げ応力は、配管端部にその応力値が板厚全体に均一に負荷されると設定。
 ※3: 管台端部に負荷をかけることで、曲げ応力を模擬(X: 母管周方向、Y: 母管軸方向)
 ※4: 1-1/4B 管台は、主に片持ちのベント・ドレンライン用の管台として使用されているため、母管と枝管の相対変位 (熱移動) による曲げ応力は考慮しない。
 ※5: MCP 管台に発生する曲げ応力は、通常運転時には数 MPa 程度と微小なため、今回の解析には運転中応力として考慮しない。

図8 配管応力解析結果のまとめ (運転中応力含む) (溶接中心から10mm位置)

(2) 配管・MCP 管台

表5に示す運転中応力も考慮した応力解析結果概要の一覧を表6に示す。内面側はほとんどの解析ケースで引張傾向であったが、MCP 管台(4B)では、周・軸方向いずれの応力も内面側で圧縮応力であった。

表6 管台の運転時の板厚内応力分布傾向一覧

応力成分	評価位置	MCP 管台			配管管台	
		4B	14B	6B (セットイン)	3/4B	1-1/4B
軸方向 (接線方向)	内面	—	—	+	+	—
	板厚中心部	+	+	+	+	+
	外面	+	+	+	+	+
周方向	内面	—	+	+	+	—
	板厚中心部	+	+	+	+	+
	外面	+	+	+	+	+

+ : 引張応力 — : 圧縮応力

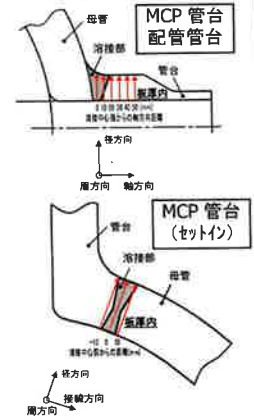


図9 管台解析の際の応力成分

3.4 計測結果をふまえた評価クライテリア例

これまでの PWR 環境での強加工 SCC のき裂進展速度の知見^{※1}より、200HV 以上ではき裂が進展すると仮定し、下記の図10のフローでは、200HV 以上の領域を抽出することとした。ただし、今後 200~250HV 間の硬さに関するき裂進展データが拡充された場合には、クライテリアが変更になる可能性がある。

図10のフローによると、3B 以下の突合せ溶接配管、ソケット溶接については、強加工 SCC で進展せず、対策不要とすることができると推定される^{※2}。

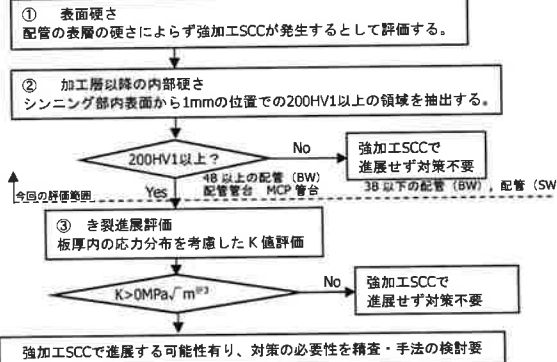


図10 評価フローと評価例

- ※2: 硬さデータは、ばらつきの評価等について今後精緻化する必要がある。
 ※3: き裂進展の下限応力拡大係数が得られていないため、ここでは $K>0\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ と設定した。

※1: 進展しきい値の考え方

H15 年~17 年持寄共研「維持規格導入に向けたステンレス鋼配管の SCC 評価に関する研究」において、冷間加工 SUS316 のき裂進展速度の硬さ依存性が取得されており、200HV では進展せず、250HV では進展するとの結果が得られている。

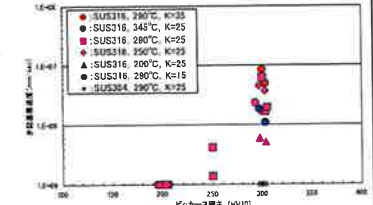


図11 冷間加工 SUS のき裂進展速度

4. まとめ

配管・管台溶接部近傍の硬さ・残留応力のデータを収集し、保全部位の差別化に資するデータベースを取得した。主な成果は以下の通りである

- 1) SUS316 の配管・管台溶接部のモックアップを製作し、溶接部近傍の硬さ調査、表層の残留応力測定を実施した。
- 2) 一般配管継手溶接の硬さ結果を基に、配管板厚と内表面 1mm 位置硬さの関係について評価クライテリアを策定し、3B 以下の配管 (BW)、配管 (SW) については、強加工 SCC で進展せず、対策不要とすることができる可能性が高くなった。
- 3) FEM による溶接後の残留応力解析及びモックアップの板厚内部の残留応力測定の結果より、応力解析評価の妥当性を確認した。
- 4) FEM による運転条件時の応力解析を行い、配管・管台溶接部近傍の板厚内の残留応力分布データを取得し、セットオンの MCP 管台については応力面で進展を否定できる可能性があることを確認した。

PWR 環境下の SCC 進展データの拡充に関する研究(Step2) H24 年度報告書 要約版 (1/5)

はじめに

沸騰水型軽水炉 (BWR) プラントでは、シュラウドや原子炉再循環系配管等のオーステナイト系ステンレス鋼の非鋭敏化材冷間加工部において応力腐食割れ (SCC) が顕在化したため、対策が進められている。また、環境条件は BWR 環境水と異なるものの、加圧水型軽水炉 (PWR) プラントにおいても機械加工・曲げ加工や溶接部の溶金収縮・溶接熱により、材料が硬化している部位が存在している。特異事例である可能性も否定できないながら、PWR プラントにおいても美浜 2 号機の蒸気発生器 (SG) の入口管台セーフエンド溶接部近傍に切削加工に起因しているとも推測される粒界割れが発見された。

そこで本研究では、既往研究にて取得したデータに加えて温度、硬さ、応力拡大係数、鋼種などの条件をパラメータとしたオーステナイト系ステンレス鋼の非鋭敏化材に対する SCC 進展データの拡充を目的として SCC 進展試験を実施した。

試験内容

強加工材のき裂進展試験環境は、PWR 一次系模擬水に溶存酸素を添加した環境 (高 D0 環境) 及び PWR 一次系模擬環境 (低 D0 環境) とする。

高 D0 環境条件下での試験マトリクスを表 1 に示す。Step1 研究にて、290℃/140HV にてき裂進展が確認されている。したがって、当該データの妥当性確認、及び高 D0 環境の低硬度範囲 (160~180HV, 3/4B~2B 配管溶接部等) の保全範囲絞込みを狙い、250℃及び 290℃での進展速度データを取得することとした。

表 1 試験マトリクス (高 D0 環境条件)

材 料		試 験 温 度					備 考
		290℃	250℃	200℃	150℃	90℃	
SUS316 ラボ 溶解材	300HV	▲ (15, 25, 35)	▲	▲●	●	●	高 D0 環境条件での 低硬度での進展 速度データの取得
	250HV	▲	●	●	●	—	
	200HV	▲	●	●	●	—	
	180HV	○	○	—	—	—	
	160HV	○	○	—	—	—	
	140HV	●	—	—	—	—	
SUS304 ラボ 溶解材	300HV	▲●	—	—	—	—	
	250HV	●	—	●	—	●	
	200HV	●	—	—	—	—	

▲: H15~H17 持寄共研で実施済, ●: Step1 研究で実施済み, ○: 本研究で実施
(特記なき場合の K 値は 25MPa $\sqrt{m}$)

<試験水質>

溶存酸素濃度: 8ppm, ほう酸濃度: 500ppm, リチウム濃度: 2ppm

試験内容

低 D0 環境条件下での試験マトリクスを表 2 に示す。別途実施した差別化共研にて、実機溶接部近傍の硬さ・応力のデータが得られ、200HV~250HV 付近の硬さの低 K 値が保全範囲絞込みに有効であることが示唆された。そこで、主として低硬度・低 K 値領域におけるき裂進展に対するしきい値の確認を目的としたデータを取得することとした。また、溶接熱影響部についても、Step1 研究にて一部データが取得されているが、追加データを取得することとした。

表 2 試験マトリクス (低 D0 環境条件)

材 料			試 験 温 度						備 考
			345℃	320℃	290℃	250℃	200℃	150℃	
SUS316	ラボ 溶解材	300HV	▲	●	▲(15, 25, 35) ●(6.5×2, 10×2, 25) ○(8)×2	▲	▲	○	・硬さ・K 値の しきい値の策定 ・硬度が異なる 場合の温度依存 性の確認 ・低温側温度し きい値の明確化
		250HV	○	○	▲(25) ○(8, 10, 15, 25)	○	▲		
		225-250HV 程度			○(10, 15, 25)				
		200-225HV 程度			○(10, 15, 25)				
		200HV	▲		▲○				
	鍛造材	250HV			●				C 量による進展 速度の影響の取得
		250HV			○×4 LN 材 C 量: 0.04%/0.06%/0.07%				
	溶接 継手	200HV 相当		●	●		●		溶接継手 (溶接 により硬化した 部位) の SCC 進展 データの取得
		高 HV 狙い (230~250HV)			○○				
	溶接金属	As weld			●				
SUS304	ラボ 溶解材	300HV	○	○	▲(6.5, 8, 10, 15, 25, 35) ●(25) ○(10, 15)	○	○	○	低 D0 環境条件 における SUS304 の進展 速度の硬さ・K 値・温度依存性 の整備
		250HV			○(10, 15, 25)				
		225-250HV 程度			○(10, 15, 25)				
		200-225HV 程度			●(25) ○(10, 15)				
		200HV			○				
		250HV			○				
	鍛造材	250HV			○×4 LN 材 C 量: 0.04%/0.06%/0.07%				素材製造方法の 違い (配管材・ 管台材) や C 量 による進展速度 の影響の取得
		250HV			○				
	溶接 継手	250HV 程度			○○				溶接継手 (溶接 により硬化した 部位) の SCC 進展 データの取得
		250HV 程度			○○				

▲: H15~H17 持寄共研で実施済, ●: Step1 研究で実施済み, ○: 本研究で実施
(特記なき場合の K 値は 25MPa $\sqrt{m}$)

<試験水質>

溶存酸素濃度: <5ppb, 溶存水素濃度: 30cc・STP/kg・H₂O, ほう酸濃度: 500ppm, リチウム濃度: 2ppm

供試材及び試験片

(1) 供試材

SCC 進展試験には以下の供試材を用いた。

- ① SUS316/SUS304(ラボ溶解材)の冷間加工材 (高 DO : 160HV~180HV, 低 DO : 200HV~300HV)
- ② SUS316/SUS304(ラボ溶解材)の C 量変化材及び LN 材
- ③ SUSF316/SUSF304 を用いて製作した溶接継手の熱影響部
- ④ SUSF304(鍛造材)

なお、高 DO 環境条件での試験には①のみを用い、低 DO 環境条件での試験には①~④を用いた。

冷間加工は、供試材から大型引張試験片を加工し、これに引張りひずみを付与する方法で行った。硬さについては、表 1 及び表 2 に示す目標硬さとなっていることを確認するため、試験前に試験片表面で測定するとともに、試験後に試験片の中央断面におけるき裂近傍でも測定を行った。大型引張試験片(予ひずみ付与)及び溶接継手熱影響部からの試験片採取要領を図 1 に示す。

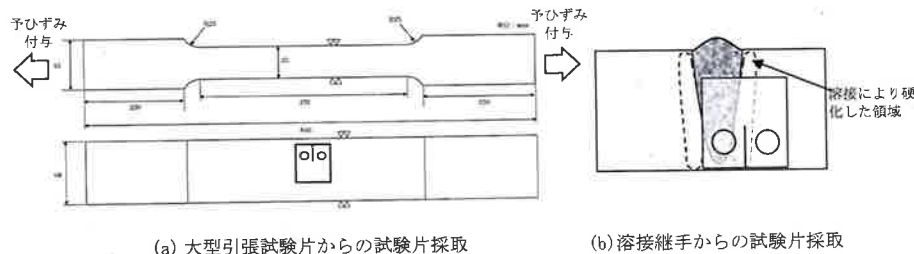


図 1 試験片の採取要領

(2) 試験片

SCC 進展試験には、試験装置の荷重負荷能力及び試験時の最大応力条件を考慮し、図 2 に示す 0.7 インチ厚さ(0.7T : 17.8mm)の CT 試験片を用いた。実機配管におけるき裂は、素管の圧延方向(配管の長さ方向)に対して垂直方向に進展するため、図 3 に示すように圧延方向とき裂進展方向が垂直になる L-S 方向にて試験片を採取した。

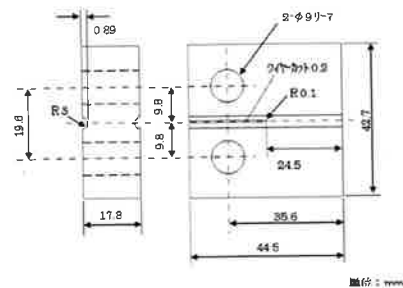


図 2 0.7TCT 試験片の形状及び寸法

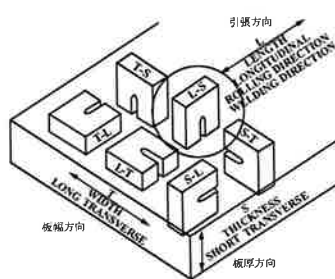


図 3 試験片の採取方向

試験方法及びき裂進展速度評価方法

(1) 試験方法

高 DO 環境条件での試験については、CT 試験片に大気中で疲労予き裂を導入後、定荷重で試験を実施した。低 DO 環境条件での試験では、SCC 進展が生じにくいことが想定されたため、大気中で疲労予き裂導入後に試験環境にて、図 4 に示す負荷上昇下降時間 30s、保持時間 0.3h、応力比 $R=0.7$ の条件で環境中予き裂導入を行った。環境中予き裂導入時の K 値は、SCC 進展試験時の K 値と同じ値に設定した。SCC 進展試験の試験水質条件を表 3 に、試験装置の概略を図 5 に示す。

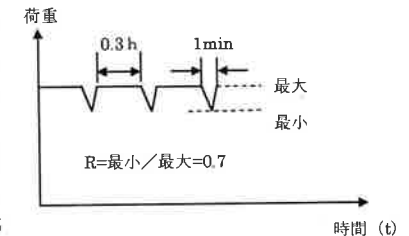


図 4 環境中予き裂導入条件の概要

表 3 SCC 進展試験の水質条件

項目	高 DO 環境条件	低 DO 環境条件
試験温度 (°C)	250, 290	150, 200, 250 290, 320, 345
溶存酸素濃度 (DO)	8 ppm	<5 ppb
溶存水素濃度 (DH)	—	30 cc/kg H ₂ O・STP
ほう酸濃度 (as B)	—	500 ppm
リチウム濃度 (as Li)	—	2 ppm

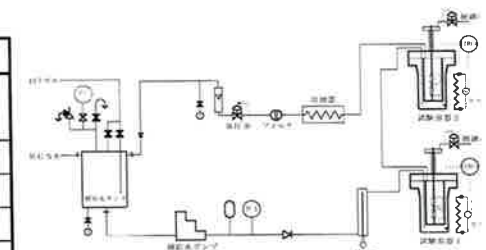


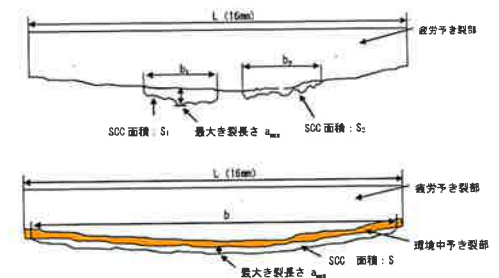
図 5 試験装置及び系統の概略図

(2) き裂進展速度の評価方法

き裂進展速度は、試験後の破面観察結果により測定したき裂進展量と定荷重の試験時間に基いて算出した。SCC によるき裂進展が生じにくい条件では、SCC き裂(粒界破面)は予き裂先端で部分的・離散的に生じるため、SCC 進展量については、図 6 に示す定義に従い、最大き裂長さ、平均き裂長さ(試験片板厚での平均値)、平均②き裂長さ(SCC 発生幅での平均)の 3 つを算出した。

SCC 進展速度についても、上記 3 つのき裂長さに対応し、最大き裂進展速度、平均き裂進展速度、平均②き裂進展速度を評価した。

なお、パラメータ (K 値, 硬さ, 温度) の影響検討には平均②き裂進展速度を用いて行った。



○最大き裂進展速度: 最大き裂長さ (a_{max}) / 進展速度評価時間 (s)

○平均き裂進展速度: 平均き裂長さ / 進展速度評価時間 (s)
平均き裂長さ: SCC 面積 (ΣS) / CT 試験片幅 (L)
SCC 面積: $\Sigma S = S_1 + S_2 + \dots$

○平均②き裂進展速度: 平均②き裂長さ / 進展速度評価時間 (s)
平均②き裂長さ: SCC 面積 (ΣS) / SCC 発生幅 (Σb)
SCC 発生幅: $\Sigma b = b_1 + b_2 + \dots$

図 6 最大、平均、平均②き裂長さの定義

試験結果及び考察

(1) 高 DO 環境条件の試験結果

高 DO 環境条件における試験結果の概要を、既往研究の結果も含めて表 4 に示す。

① SCC 進展に対するしきい値

SCC 進展に対する硬さのしきい値に関しては、温度が 200℃以下であれば 200HV 程度であるが、高温側(250℃及び 290℃)では今回の 160HV 及び 180HV の結果も含めて、低硬度条件でも SCC 進展が認められている。温度に関しては、150℃以下であれば進展が認められていない。

代表的な試験条件に対する試験後の破面観察結果を図 7 に示す。定荷重試験の SCC 進展破面は粒界破面となっていることを確認した。

表 4 高 DO 環境条件の試験結果の概要

材料	硬さ	290℃	250℃	200℃	150℃	90℃
SUS316 ラボ 溶解材	300HV	★	●	●●	○	○
	250HV	●	●	●	○	—
	200HV	●	●	○	○	—
	180HV	●	●	—	—	—
	160HV	●	●	—	—	—
SUS304 ラボ 溶解材	300HV	●	●	—	—	—
	250HV	●	—	●	—	○
	200HV	●	—	—	—	—

注) 表中の記号は以下のとおり。
白抜きは進展なし。塗りつぶしは進展ありを示す。
黒色は平成 17 年度特許共同研究データ^[1]、青色は Step1 研究データ^[2]、赤色は本研究データを示す。
☆: K=35MPa√m
○: K=25MPa√m
△: K=15MPa√m

② SCC 進展速度の K 値、硬さ、温度に対する依存性

300HV、290℃における SUS316 及び SUS304 の平均②き裂進展速度の K 値依存性を図 8 に示す。K 値の増加に伴ってき裂進展速度も増加する傾向が認められた。

K 値と平均②き裂進展速度の関係を近似した結果、次式 (1) が得られた。

$$da/dt = 1.04 \times 10^{-9} \times K^{1.78} \quad (\text{mm/s}) \quad (1)$$

$$15\text{MPa}\sqrt{\text{m}} \leq K \leq 35\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$$

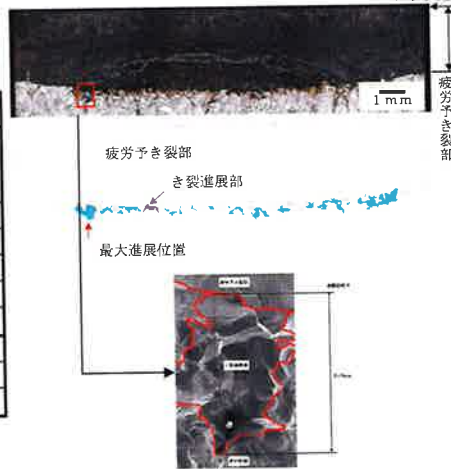


図 7 試験後の破面観察結果の例

(SUS316 ラボ溶解材, 180HV, 250℃, K=25MPa√m)

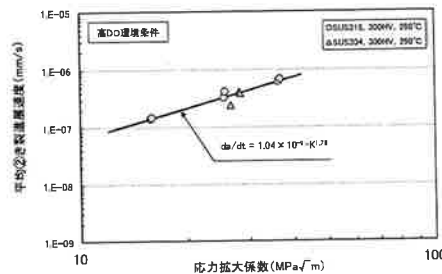


図 8 き裂進展速度の K 値依存性(高 DO 環境条件)

290℃, K=25MPa√m の条件に対する SUS316 及び SUS304 の平均②き裂進展速度の硬さ依存性を図 9 に示す。K 値依存性と同様、硬さの増加に伴ってき裂進展速度も増加する傾向が認められた。硬さと平均②き裂進展速度の関係を近似した結果、次式 (2) が得られた。

$$da/dt = 4.71 \times 10^{-13} \times \text{HV}^{2.32} \quad (\text{mm/s}) \quad 145\text{HV} \leq \text{HV} \leq 360\text{HV} \quad (2)$$

300HV, K=25MPa√m の条件に対する SUS316 及び SUS304 の平均②き裂進展速度の温度依存性を図 10 に示す。温度の上昇に伴ってき裂進展速度も増加する傾向が認められた。温度と平均②き裂進展速度の関係を近似した結果、次式が得られた。

$$da/dt = 5.30 \times 10^{-25} \times T^{7.22} \quad (\text{mm/s}) \quad 200^\circ\text{C} \leq T \leq 290^\circ\text{C} \quad (3)$$

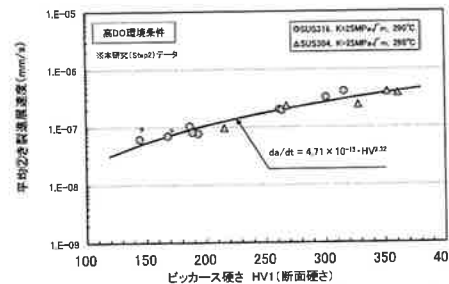


図 9 き裂進展速度の硬さ依存性(高 DO 環境条件)

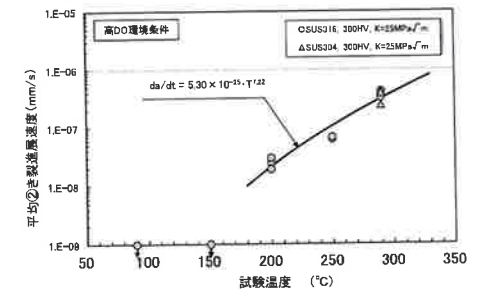


図 10 き裂進展速度の温度依存性(高 DO 環境条件)

③ SCC 進展速度式の検討

本研究を含めてこれまでに得られた SCC 進展速度データを基に、SCC 進展速度式を作成した。進展速度式の検討は、手法 1(パラメータごとに近似式を求めて算出する方法)及び手法 2(重回帰分析を用いる方法)の 2 通りについて行った。検討の結果、得られた SCC 進展速度式を次式 (4) (5) に示す。また、SCC 進展速度式による進展速度の予測結果を図 11 及び図 12 に示す。

$$\text{手法 1: } da/dt(K, \text{HV}, T) = 2.03 \times 10^{-33} \times K^{1.78} \times \text{HV}^{2.32} \times T^{7.22} \quad (\text{mm/s}) \quad (4)$$

$$\text{手法 2: } da/dt(K, \text{HV}, T) = 2.62 \times 10^{-33} \times K^{1.61} \times \text{HV}^{2.51} \times T^{7.10} \quad (\text{mm/s}) \quad (5)$$

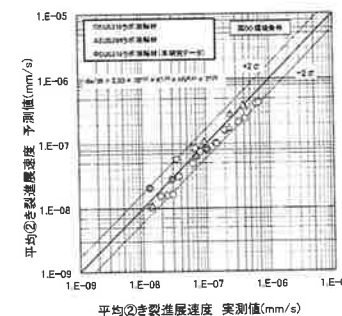


図 11 き裂進展速度の予測結果(高 DO 環境条件, 手法 1)

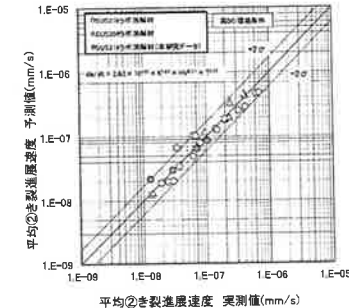


図 12 き裂進展速度の予測結果(高 DO 環境条件, 手法 2)

試験結果及び考察

(2) 低 DO 環境条件の試験結果

低 DO 環境条件における試験結果の概要を、既往研究の結果も含めて表 5 に示す。

① SCC 進展に対するしきい値

K 値のしきい値については、本研究での試験結果から、 $8\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以下となる領域では、ほとんどき裂進展が認められていないことから、しきい値としては $8\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 程度と考えられる。しかしながら、Step1 研究において 300HV , 290°C , $K=6.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ の試験で一部の試験片のき裂先端部に粒界破面が観察されており、SCC によるき裂進展が否定できないことから、K 値のしきい値については $6.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ とする。

一方、硬さについては、SUS316 及び SUS304 のいずれも、 200HV , 290°C , $K=25\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ の試験において、破面観察の結果、き裂先端部に粒界破面がわずかながら観察された。これは 200HV 以下の硬さにおいてもき裂進展が生じうることを示唆するものであるが、次のような理由から、硬さについても、これまでと同様 200HV をしきい値とすることとする。

表 5 低 DO 環境条件の試験結果の概要

材料	硬さ	345℃	320℃	300℃	290℃	250℃	200℃	150℃
SUS316 ラボ 溶解材	300HV	●●●●●	●	—	★ ●●●●● ▲ ◆ □	●●	●●	○
	250HV	●	●	—	●●●●● ▲ ◆ ◇	●	●	—
	235HV	—	—	—	●●●●● ▲ ◆ ◇	—	—	—
	215HV	—	—	—	●●●●● ▲ ◆ ◇	—	—	—
	200HV	○	—	—	○●●●● ▲ ◆ ◇	—	—	—
SUS304 ラボ 溶解材	300HV	●	●	○	★ ○●●●● ▲ ◆ ◇	●	○	○
	250HV	—	—	—	●●●●● ▲ ◆ ◇	—	—	—
	235HV	—	—	—	●●●●● ▲ ◆ ◇	—	—	—
	215HV	—	—	—	●●●●● ▲ ◆ ◇	—	—	—
	200HV	—	—	—	●●●●● ▲ ◆ ◇	—	—	—

(注) 表中の記号は以下のとおり。

記号の白抜きは進展なし、塗りつぶしは進展ありを示す。

黒色は平成 17 年度持寄共研データ^[1]、青色は Step1 研究データ^[2]、赤色は本研究データを示す。

☆: $K=35\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, ○: $K=25\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, △: $K=15\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, ◇: $K=10\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, ▽: $K=8\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, □: $K=6.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

<硬さのしきい値を 200HV とする理由>

- ・本研究の 200HV の試験片で観察された粒界破面はごくわずかな領域(図 13 参照)であり、定荷重条件で進展した破面と判断することが難しい。
- ・定荷重条件の前に環境中予き裂を導入したことによる影響の可能性はあるが、環境中予き裂を導入することは必ずしも実機の状態を適切に評価することにならない。
- ・平成 17 年度持寄共研の結果では、 200HV の条件でき裂進展が認められておらず、また、 200HV ではき裂が進展しないことが他の研究者によっても報告されている。

また、温度に関しては、SUS316 では 150°C 以下、SUS304 では 200°C 以下の温度条件で、それぞれき裂進展が認められなかったことから、低 DO 環境条件での SCC 進展に対する温度のしきい値は $150\sim 200^\circ\text{C}$ 程度と考えられる。

低 DO 環境条件の代表的な試験条件に対する試験後の破面観察結果を図 13 に示す。

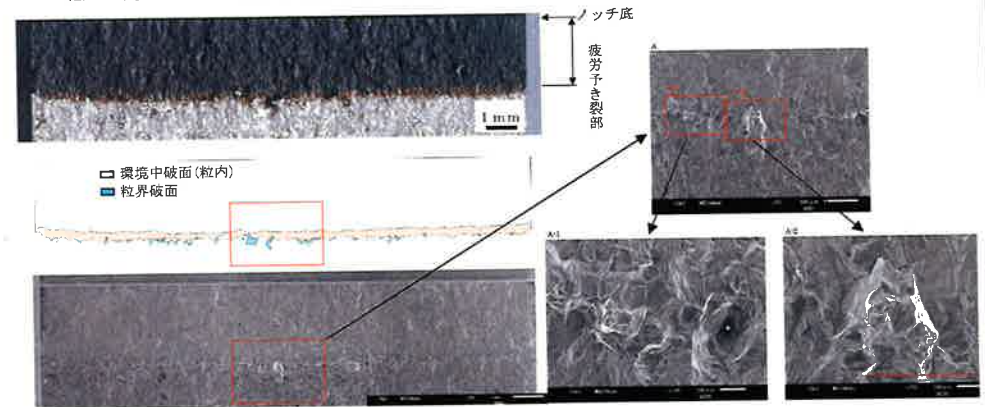


図 13 試験後の破面観察結果の例(SUS316 ラボ溶解材, 200HV , 290°C , $K=25\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)

② SCC 進展速度の K 値, 硬さ, 温度に対する依存性, 及び材質による差

300HV , 290°C における SUS316 及び SUS304 の平均②き裂進展速度の K 値依存性を図 14 に示す。K 値の増加に伴ってき裂進展速度は増加する傾向が認められた。K 値と平均②き裂進展速度の関係を近似した結果、次式が得られた。

$$da/dt = 1.01 \times 10^{-10} \times K^{1.89} \quad (\text{mm/s}) \quad (6)$$

$$10\text{MPa}\sqrt{\text{m}} \leq K \leq 35\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$$

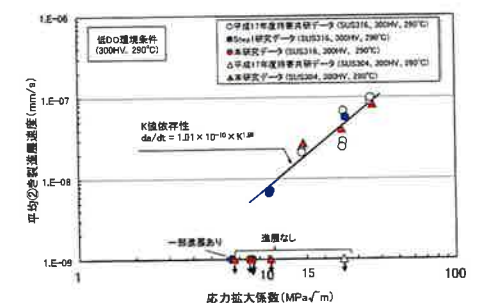


図 14 き裂進展速度の K 値依存性(低 DO 環境条件)

試験結果及び考察

290℃, K=25MPa $\sqrt{m}$ の条件に対する SUS316 及び SUS304 の平均②き裂進展速度の硬さ依存性を図 15 に示す。硬さの増加に伴ってき裂進展速度も増加する傾向が認められた。硬さと平均②き裂進展速度の関係を近似した結果, 次式が得られた。

$$da/dt = 1.93 \times 10^{-15} \times HV^{2.93} \quad (\text{mm/s}) \quad 200\text{HV} \leq HV \leq 320\text{HV} \quad (7)$$

300HV, K=25MPa $\sqrt{m}$ の条件に対する SUS316 及び SUS304 の平均②き裂進展速度の温度依存性を図 16 に示す。低 D0 環境条件においては, 250℃以上の温度領域においてき裂進展速度の温度依存性が明確に認められなかったことから, 250℃~345℃の温度範囲ではき裂進展速度を以下のとおり一定とみなした。

$$da/dt = 3.76 \times 10^{-8} \quad (\text{mm/s}) \quad 250^\circ\text{C} \leq T \leq 345^\circ\text{C} \quad (8)$$

250HV, 290℃, K=25MPa $\sqrt{m}$ の条件における平均②き裂進展速度の材質間での比較結果を図 17 に示す。Step1 研究で試験を実施した SUS316 高 C 材, 316 鋼溶接金属, SCS14A 鋳鋼の 3 材料については, 明確なき裂進展が認められなかったが, この 3 材料以外の材料のき裂進展速度はほぼ同程度であった。

290℃, K=25MPa $\sqrt{m}$ の条件において, 溶接熱影響部のき裂進展速度と SUS316 及び SUS304 ラボ溶解材の冷間加工材に対するき裂進展速度との比較を行った結果を図 18 に示す。SUS316 及び SUS304 のいずれも, 熱影響部と同等の硬さを有する冷間加工材のき裂進展速度に比べて, 熱影響部のき裂進展速度は同等以下となっていることから, 熱影響部のき裂進展速度は, 硬化部の硬さを考慮すれば, 冷間加工材のき裂進展速度で代表可能と評価される。

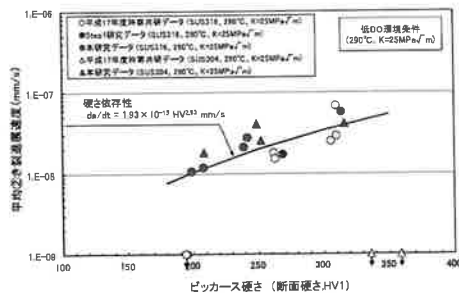


図 15 き裂進展速度の硬さ依存性(低 D0 環境条件)

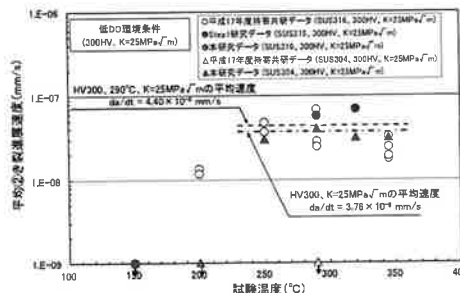


図 16 き裂進展速度の温度依存性(低 D0 環境条件)

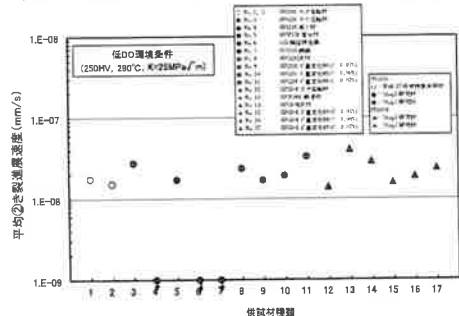


図 17 き裂進展速度の材質間比較(低 D0 環境条件)

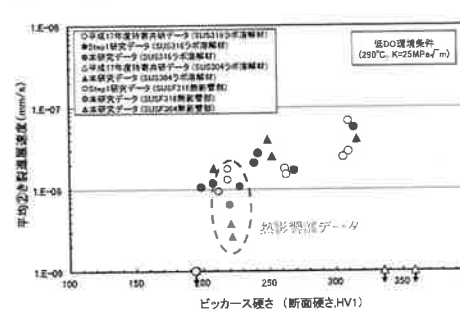


図 18 溶接熱影響部のき裂進展速度(低 D0 環境条件)

③ SCC 進展速度式の検討

本研究を含めてこれまでに得られた SCC 進展速度データを基に, SCC 進展速度式を作成した。進展速度式の検討は, 手法 1(パラメータごとに近似式を求めて算出する方法)及び手法 2(重回帰分析を用いる方法)の 2 通りについて行った。検討の結果, 得られた SCC 進展速度式を次式 (9) (10) に示す。また, SCC 進展速度式による進展速度の予測結果を図 19 及び図 20 に示す。

$$\text{手法 1: } da/dt (K, HV) = 3.79 \times 10^{-18} \times K^{1.89} \times HV^{2.93} \quad (\text{mm/s}) \quad (9)$$

$$\text{手法 2: } da/dt (K, HV) = 1.88 \times 10^{-14} \times K^{1.10} \times HV^{1.68} \quad (\text{mm/s}) \quad (10)$$

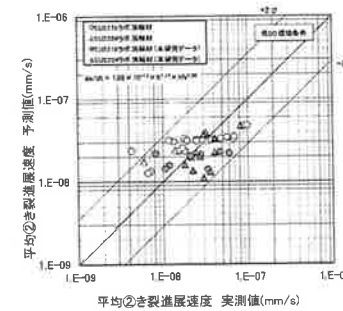
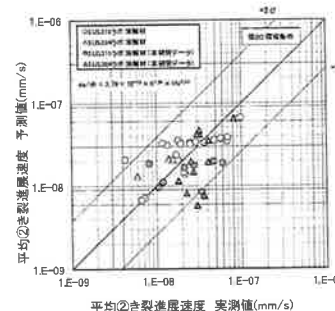


図 19 き裂進展速度の予測結果(低 D0 環境条件, 手法 1) 図 20 き裂進展速度の予測結果(低 D0 環境条件, 手法 2)

まとめ

本研究により得られた主な成果は以下のとおりである。

- 1) 高 D0 環境条件では, 主として SUS316 を用いた高温・低硬度領域 (250℃及び 290℃, 200HV 以下) を対象とした進展試験を行い, SCC 進展速度データを取得した。この結果, K 値・硬さの増加及び温度の上昇に伴ってき裂進展速度が単調に増加する傾向が認められ, 既往研究と整合する試験結果が得られた。得られた試験結果に基づき, K 値, 硬さ, 温度に対する依存性を考慮したき裂進展速度式を提案した。
- 2) 低 D0 環境条件では, 主として SUS316 及び SUS304 の低硬度・低 K 値領域を対象とした進展試験を行い, SCC 進展速度データを取得した。この結果, K 値・硬さの増加に伴ってき裂進展速度が増加する傾向が認められたが, 温度に対しては 200℃以上の温度領域では明確な依存性が認められなかった。得られた試験結果に基づき, K 値, 硬さに対する依存性を考慮したき裂進展速度式を提案した。

なお, 硬さが比較的低い条件 (250HV 以下) では, K 値が 10~15MPa $\sqrt{m}$ 程度の条件でき裂進展が認められなかった。また, SUS316 では 150℃以下, SUS304 では 200℃以下の温度条件でき裂進展が認められなかった。

- 3) 低 D0 環境条件で実施した SUS316 と SUS304 の LN 材, C 量変化材の代表条件でき裂進展試験の結果, き裂進展速度は SUS316 と SUS304 のラボ溶解材とほとんど差が認められず, 材質の影響は小さいと評価された。また, 熱影響部に対する試験の結果, 熱影響部のき裂進展速度は熱影響部と同等の硬さを有する冷間加工材のき裂進展速度と同等以下であったことから, 冷間加工材のき裂進展速度で代表できることを確認した。

なお, 2013 年 2 月の時点において, 非鋭敏化オーステナイト系ステンレス鋼の強加工 SCC に起因した損傷事例は実機 PWR プラントではほとんど報告されていないが, 今後は, 本研究で得られたデータを基に, 維持規格への反映等, 実機保全に向けて検討を行っていく必要があると思われる。

今回実施した強加工 SCC の進展評価で考慮するパラメータについて

電共研の成果として、SCC 進展速度に硬さ依存性が認められており、この傾向は他の BWR 環境中及び PWR 環境中の SCC 進展に関する試験研究においても報告されている^{[1][2]}。また、一般的に SCC と応力拡大係数 (K 値) には一依存性が認められており、種々環境における進展速度評価式が整理されている。

よって、電共研^[3]における強加工 SCC の進展式の検討においては、材料の硬さが SCC 進展速度を加速させる要因の一つと考え、K 値に加え硬さをパラメータとして SCC 進展速度式の策定を行っており、今回実施した評価における進展速度評価式算出の検討においても、K 値による影響を図 A の通り整理し、これを踏まえて硬さ依存性を図 B の通り整理・定式化した。

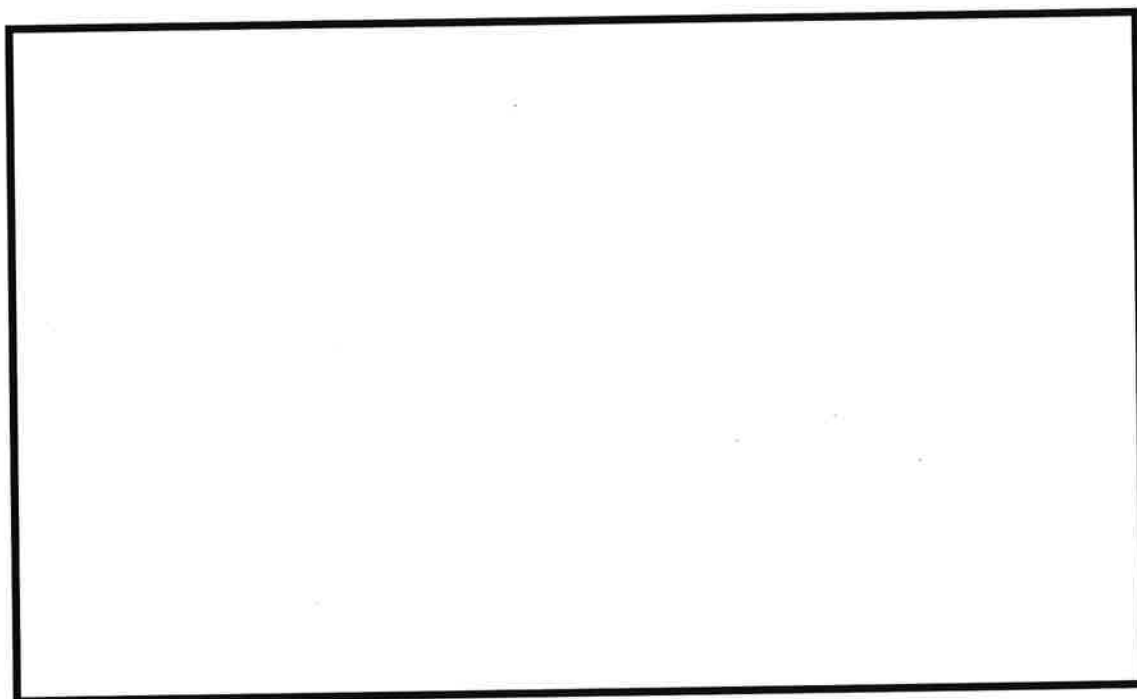


図 A K 値のき裂進展に対する影響

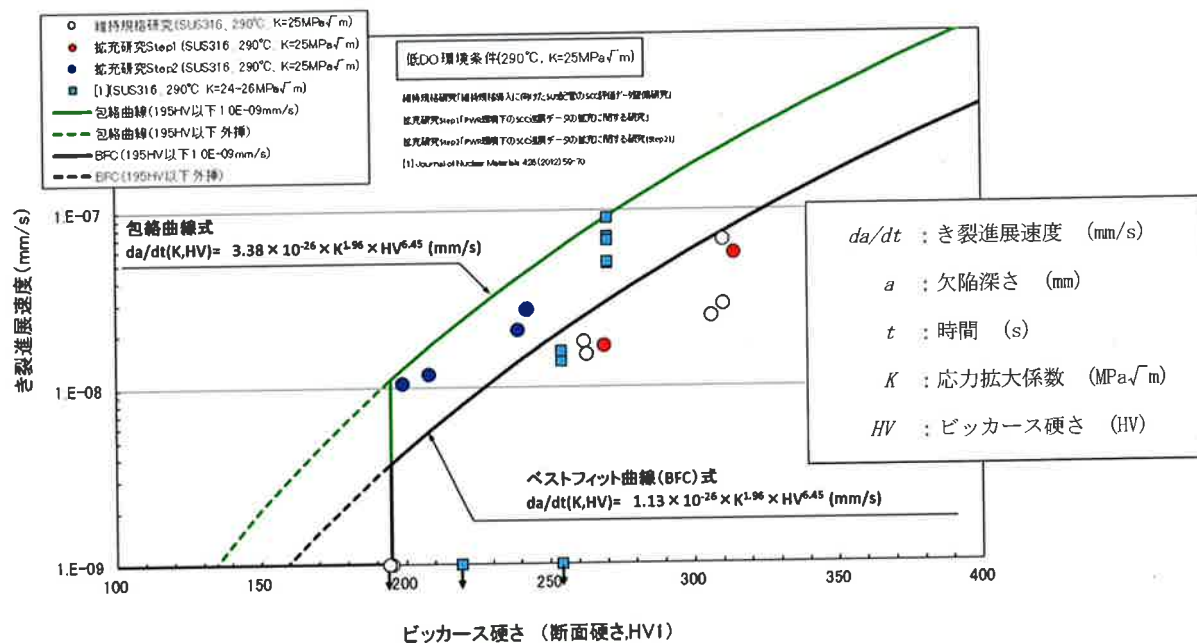


図 B 硬さのき裂進展に対する影響

- [1] 安藤 他、“低炭素ステンレス鋼製配管溶接部近傍の SCC 進展速度の硬さ依存性” 第 52 回
材料と環境討論会
- [2] Terachi, “SCC growth of SS in simulated PWR primary water” JNM
- [3] 電共研「PWR 環境下の SCC 進展データの拡充に関する研究」



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Journal of Nuclear Materials

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jnucmat

SCC growth behaviors of austenitic stainless steels in simulated PWR primary water

T. Terachi^{a,*}, T. Yamada^b, T. Miyamoto^b, K. Arioka^b

^a Radiological Management Group, The Kansai Electric Power Co. Inc., Japan

^b Institute of Nuclear Safety System, Inc., 64 Sata, Mihama-cho, Mikata-gun, Fukui 919-1205, Japan

article info

Article history:

Received 12 July 2011

Accepted 6 March 2012

Available online 16 March 2012

abstract

The rates of SCC growth were measured under simulated PWR primary water conditions (500 ppm B + 2 ppm Li + 30 cm³/kg·H₂O-STP DH₂) using cold worked 316SS and 304SS. The direct current potential drop method was applied to measure the crack growth rates for 53 specimens. Dependence of the major engineering factors, such as yield strength, temperature and stress intensity was systematically examined. The rates of crack growth were proportional to the 2.9 power of yield strength, and directly proportional to the apparent yield strength. The estimated apparent activation energy was 84 kJ/mol. No significant differences in the SCC growth rates and behaviors were identified between 316SS and 304SS. Based on the measured results, an empirical equation for crack growth rate was proposed for engineering applications. Although there were deviations, 92.8% of the measured crack growth rates did not exceed twice the value calculated by the empirical equation.

© 2012 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Stress corrosion cracking (SCC) is an important degradation issue, especially for keeping reliability of pressurized water reactors (PWRs). In nickel-based alloys such as Alloy 600 and their weld metals, SCC has been reported since the 1980s in steam generator tubing, and since the 1990s in the nozzles of pressure vessels and steam generators [1,2]. In comparison with nickel-based alloys, SCC incidence of austenitic stainless steels has been reported except in some particular cases such as for irradiated materials [3] or in oxygenated environments [4]. However, in recent years, limited examples of SCC were reported in high strain hardened areas or in heat affected zones of stainless steels in PWR primary systems [5,6].

Studies have been done on the SCC behaviors of austenitic stainless steels in simulated environments of light water reactors [7–20]. Cold work (CW) significantly enhanced SCC growth in both BWRs and PWRs. One explanation for the acceleration was reported as due to the reduced plastic zone size at a given stress intensity which produced steeper strain gradients at the crack tip [21–24]. A similar effect of CW on SCC growth was observed in various alloys and environments [24]. Furthermore, formation of vacancies and deformation structures in materials might have some role in the acceleration effect from CW [25]. Arioka et al. [25] reported that the diffusion of vacancies at the grain boundary might be an important process because some similarities were observed between intergranular (IG) creep and SCC in high temperature water. In addition,

nickel enrichment was observed ahead of the crack tips at the grain boundary which suggested that grain boundary diffusion did occur before crack advancement. Alternatively, Lozano-Perez et al. [26] pointed out that the length of the localized oxidation region at deformation bands increased with decreasing chromium content in the alloy. Since the deformation bands were formed by CW, the oxidation at crack tips seemed to have some role in the SCC growth process.

Rolling direction of CW also affected the crack growth rate (CGR). Using 316 stainless steel (316SS), Arioka et al. [27] found that much faster CGRs were observed in the T-L orientation than in the T-S orientation; a schematic drawing showing definitions of the orientations is given in Fig. 1. Moshier and Brown [20] reported that CGRs were 10 times more rapid in the S-T orientation compared to the L-T orientation of Alloy 600. The effect of the CW orientation is not well clarified, except that S-L, S-T and T-L orientations provide aggressive cracking compare to T-S and L-S orientations [20,27,28]. In considering an actual component with elbow structures, for example, while the bending method is not simple rolling, the crack direction for penetration might correspond to T-S or L-S orientations. In the present paper, T-S orientation specimens were used to estimate CGRs for 316SS and 304SS specimens.

Elucidating the temperature dependence on SCC is of great importance not only for a mechanistic viewpoint, but also for the prediction of CGRs of each system at operating power plants. The reported activation energies of SCC in CW stainless steels under PWR conditions range from 56 kJ/mol to 107 kJ/mol [25,29,30]. Several factors including chemical reaction, diffusion at a grain boundary and mechanical properties have some potential to change the apparent activation energy of cracking [31]. If the

* Corresponding author. Tel.: +81 770 32 3650.

E-mail address: terachi.takumi@a4.kepco.co.jp (T. Terachi).

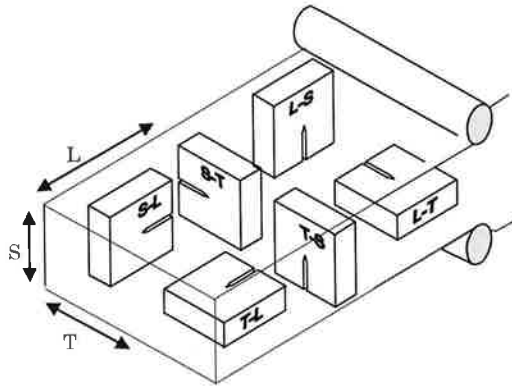


Fig. 1. Schematic of rolling orientation in relation to the longitudinal (L), thickness (T) and short transverse (S) directions.

surface reaction at a metal–water interface controls the thermal activation process, activation energy will be affected by the water chemistry conditions. From this perspective, obtaining systematic CGRs is important to get accurate activation energies and elucidate the SCC mechanism.

The objective of this study is to quantify systematically the rate of SCC growth of CW 316SS and 304SS in PWR primary water conditions. The influences of yield strength, temperature dependence and stress intensity factors were examined using 53 0.5T compact tension (CT) specimens.

2. Experimental

2.1. Materials

Specimens of 316SS and 304SS were used to determine the CGRs of SCC in hydrogenated high temperature water. The elemental components and material properties are listed in Tables 1 and 2, respectively. The materials were solution-treated at 1060–1080 °C for 10 min then water quenched. To examine the influence of CW, materials were cold-rolled in one dimension to produce 5% 10% 15% and 20% reductions in thickness at room temperature (RT).

The yield strengths of specimens at the test temperature were required to confirm the validity of the SCC test, and they were estimated from the measured data at RT and 320 °C using the trend of reported temperature dependence as shown in Fig. 2 [32]. The estimated values are listed in Table 3.

2.2. Specimen preparation

Specimen morphology was as shown in Fig. 3. The CT specimens were extracted from the CW plate. Prior to the CGR measurement, each specimen was pre-cracked in air by fatigue stress by applying a symmetrical triangle wave equal to or less than 10 Hz. The stress intensity factor of pre-cracking was controlled so that it did not exceed 80% of the stress intensity factor of the initial CGR measurement. However due to the difficulty of pre-cracking under quite a small stress condition, the minimum stress intensity factor for

Table 1
Compositions of alloys (mass%).

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
316SS	0.047	0.45	1.42	0.024	0.001	11	16.45	2.07
304SS	0.04	0.31	1.59	0.031	0.001	9.21	18.34	0.37

Heat treatment: 316SS, 1080 °C; 304SS, 1060 °C, water quenched.

Table 2
Mechanical properties of alloys.

Cold work (%)	Yield strength (N/mm ²) (320 °C)	Tensile strength (N/mm ²) (320 °C)	Elongation (% (320 °C)	HV (1 kg)
316SS				
5	243	458	36	184
10	345	495	29	219
15	495	565	15	254
20	572	607	10	270
304SS				
5	270	434	38	205
10	365	466	32	214
15	436	503	24	243
20	498	564	16	267

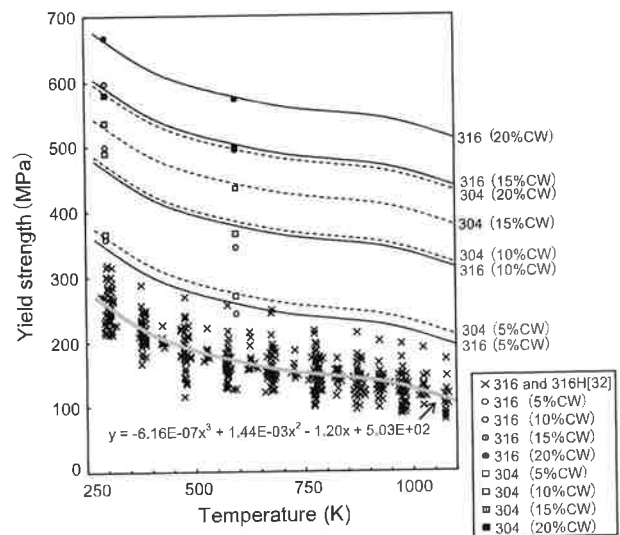


Fig. 2. Yield strength as a function of temperature [32]. Prediction curves for CW alloys are roughly parallel to the reference data.

pre-cracking was fixed to 10 MPa√m. Target length of a pre-crack was set to 2–2.5 mm and actual length was assessed after the SCC test.

2.3. Crack growth rate measurements

All CGR measurements were carried out using water circulation type autoclaves. An example of the SCC test facility set-up is shown in Fig. 4. Specimens were immersed in simulated PWR primary water that contained 500 ppm boron as boric acid, 2 ppm lithium as LiOH and 30 cm³-STP/kg-H₂O of dissolved hydrogen (DH). Dissolved oxygen in the water was continuously monitored at the inlet of the autoclave and controlled not to exceed 5 ppb. CGR trends of most specimens were monitored by the direct current potential drop method (PDM) described in ASIM standard B647-11[33]. Applied reversing direct current was 0.8–5 A and potential drop signals were detected by a high precision nano-voltmeter. Electric noise was reduced by analog and digital filtering, and noise possibly derived from temperature fluctuation of the water (less than ±1 °C) was eliminated by a smoothing technique. Calculated CGR resolution from PDM signal was roughly 10–50 l/m. RT which would also affect the entire monitoring system was maintained 25 ± 2 °C.

Example CGR measurement results are shown in Fig. 5. A trapezoidal wave loading with R=0.7, x=0.017 s⁻¹ was applied every 4 h for 10–20 days to initiate crack growth through a grain

Table 3
Estimated yield strength at high temperature (N/mm²).

Temperature (°C)	316SS				304SS			
	5%CW	10%CW	15%CW	20%CW	5%CW	10%CW	15%CW	20%CW
250	268	389	513	587	285	395	453	506
270	264	385	509	583	281	391	449	502
280	262	383	507	581	279	389	447	500
290	260	382	506	580	278	388	446	499
300	259	380	504	578	276	386	444	497
310	257	379	502	576	275	385	443	496
320	256	377	501	575	273	383	441	494
330	254	376	500	574	272	382	440	493
340	253	374	498	572	270	380	438	491
350	252	373	497	571	269	379	437	490
360	251	372	496	570	268	378	436	489

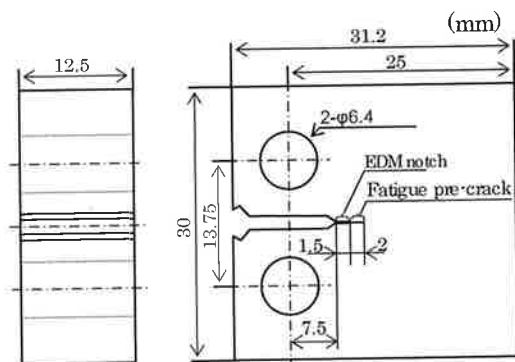


Fig. 3. Example of compact tension specimen morphology.

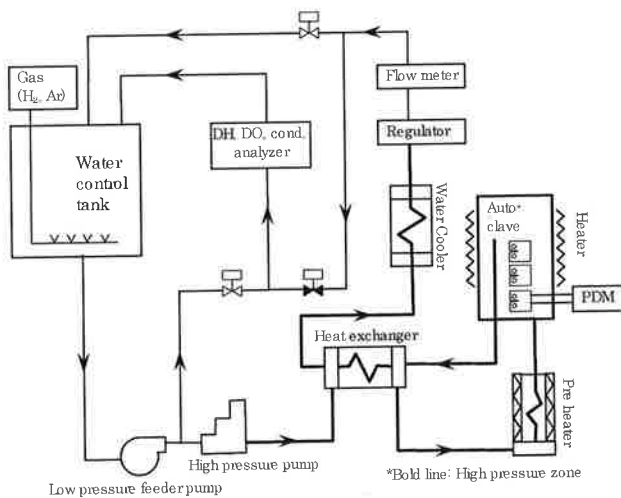


Fig. 4. Example of SCC test equipment set-up.

boundary. After the trapezoidal wave loading, the stress condition was kept constant to measure the CGR data. Several CGR data were obtained from a specimen by changing the test conditions such as applied stress, as shown in Fig. 5, or the temperature condition. After the test, the specimens were fractured by fatigue stress in air, and the crack length was measured using a scanning electron microscope (SEM). The PDM signals for the CGR were corrected by means of the average crack length that was measured by SEM fracture surface observation. However, on account of the difficulty for maintaining electrical insulation in high temperature water, the PDM technique was not applied for tests above 330 °C. This is because the present system used polytetrafluoroethylene for insula-

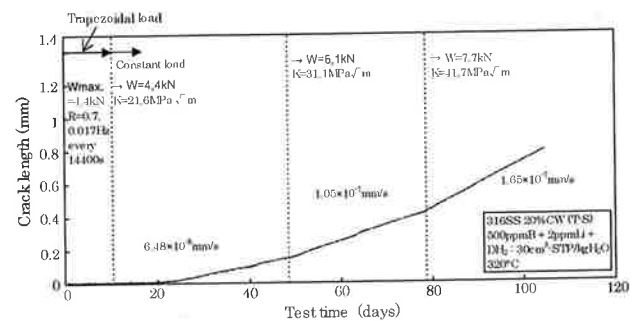


Fig. 5. Potential drop measurement of 316SS (20%CW, T-S Specimen No. S6C2F) under simulated PWR primary water conditions.

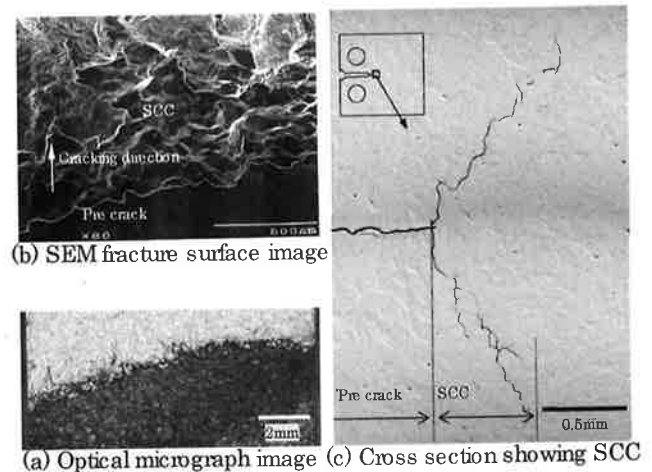


Fig. 6. Example of fracture surface and cross-sectional observation of 316SS (20%CW, T-S Specimen No. S6C2F), tested under simulated PWR primary water conditions (500 ppm B + 2 ppm Li + DH₂: 30 cm³ STP/kg H₂O, 320 °C).

tion. In the case of no PDM signal, trapezoidal wave loading was not applied as a starter due as it was not possible to eliminate the effect of fatigue loading.

3. Results

3.1. Crack growth rate measurements

Fig. 6 shows an example of a fracture surface and a cross-sectional observation of a tested 316SS (20%CW) specimen

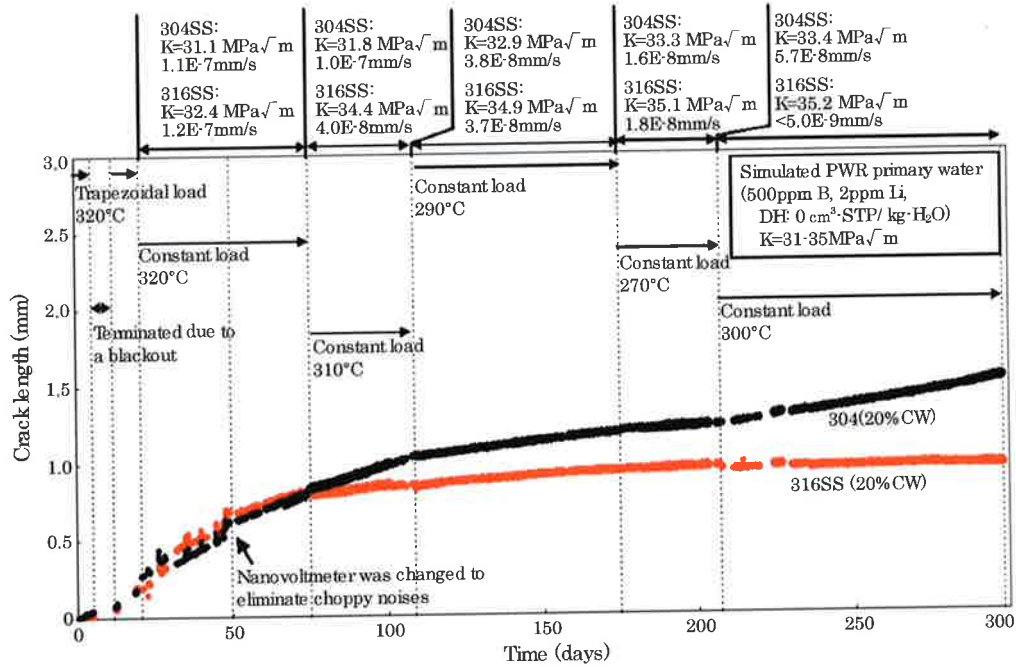
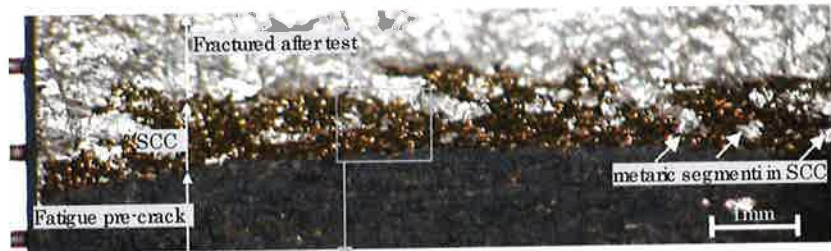
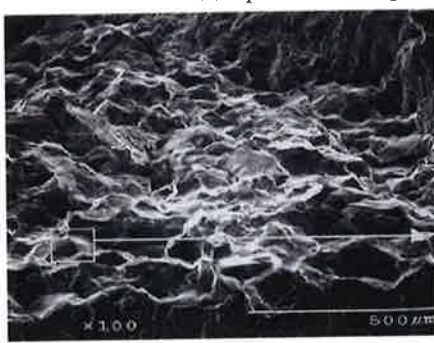


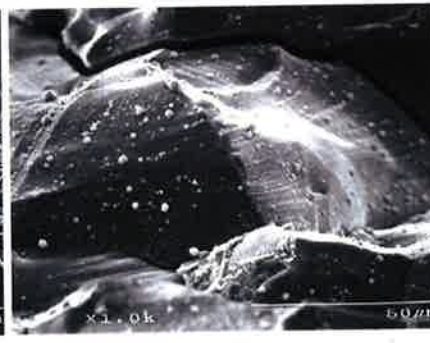
Fig. 7. Crack growth rate measurement of 316SS (20%CW, T-S Specimen No. G316A8) and 304SS (20%CW, T-S Specimen No. G304E9) under simulated PWR primary water conditions.



(a) Optical microscope image of fracture surface



(b) SEM image in low magnification



(c) SEM image in high magnification

Fig. 8. Fracture surface of 316SS (20%CW, T-S Specimen No. G316A8), tested under simulated PWR primary water conditions for 6650 h (500 ppm B + 2 ppm Li + DH₂: 30 cm³-STP/kg H₂O, 270–320 °C).

revealing that the SCC propagated through the grain boundary. The cross-sectional image showed the crack deviated in two directions, approximately 60° from normal cracking. This kind of splitting was reported on T-S orientation CW specimens [27]. Even though the mechanism is not clear, the important crack orientation for operating plants is propagation in the wall thickness direction; therefore in the paper, the crack length was defined as the measured length

observed from the loading direction using an SEM image. Theoretically branching also affects the calculation of stress intensity factor, because the stress to open the crack mouth decreases and shear stress increases [34]. However it is difficult to determine the branched angle for the entire thickness especially in specimens with short cracks, so from a practical viewpoint, apparent stress intensity factor was calculated using the ASIM E399-09 [35] code

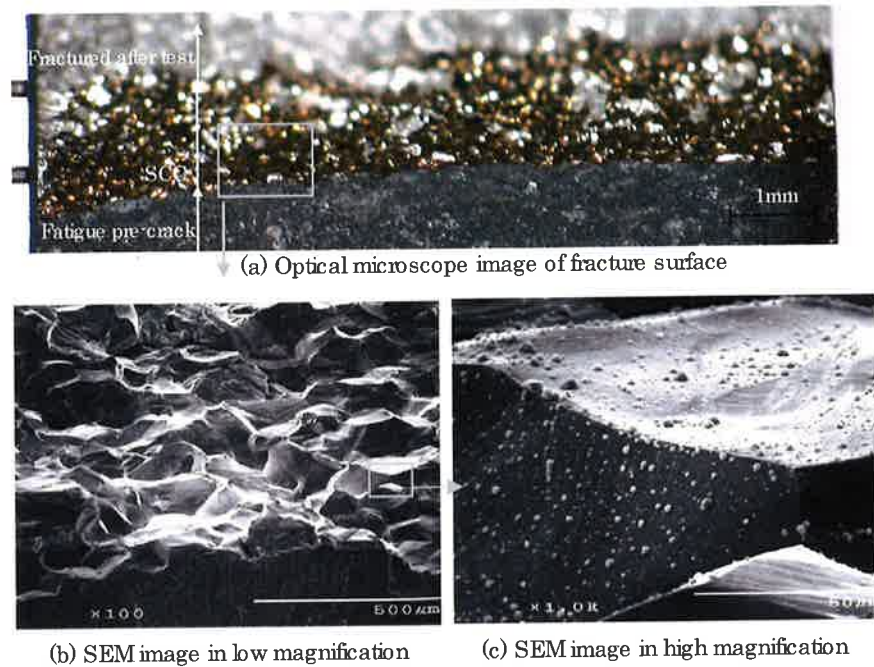


Fig. 9. Fracture surface of 304SS (20%CW, T-S, Specimen No. G304E-9), tested under simulated PWR primary water conditions for 6650 h (500 ppm B + 2 ppm Li + DH_2 ; $30 \text{ cm}^3 \cdot \text{STP/kg H}_2\text{O}$, 270–320 °C).

Table 4
SCC growth rates of 316SS (5–10%CW, T-S).

Specimen no.	Cold work (%)	Temperature (°C)	Test time (days)	Apparent stress intensity factor ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	Average crack length increment (mm)	Average crack growth rate (mm/s)
S6C5A	5	290	31	34.1	0.02	$6.3\text{E-}09$
	5	300	55	34.0	0.02	$4.2\text{E-}09$
	5	320	42	26.1	0.02	$5.5\text{E-}09$
	5	320	36	33.9	0.05	$1.5\text{E-}08$
GC S6C5 C	5	320	182	31.9	0.27	$1.7\text{E-}08$
S6C10A	10	320	26	20.3	<0.01	< $5.0\text{E-}09$
	10	320	32	27.9	0.05	$1.8\text{E-}08$
	10	320	28	34.6	0.11	$4.4\text{E-}08$
S6C10B	10	290	60	30.2	<0.01	< $5.0\text{E-}09$
	10	270	35	30.2	<0.01	< $5.0\text{E-}09$
	10	310	25	30.2	0.02	$9.6\text{E-}09$
S6C10D	10	300	71	30.9	0.04	$5.8\text{E-}09$
S6C10C	10	290	71	30.0	<0.01	< $5.0\text{E-}09$
S6C10E	10	290	27	26.1	0.01	< $5.0\text{E-}09$
	10	290	15	40.2	0.03	$2.3\text{E-}08$
	10	320	47	25.8	0.15	$3.6\text{E-}08$
S6C10-2	10	320	55	28.0	<0.01	< $5.0\text{E-}09$
	10	310	33	22.9	<0.01	< $5.0\text{E-}09$
	10	290	49	28.0	<0.01	< $5.0\text{E-}09$
	10	270	17	28.0	<0.01	< $5.0\text{E-}09$
	10	300	98	28.0	<0.01	< $5.0\text{E-}09$
GS6C10-4	10	320	41	28.2	0.166	$4.7\text{E-}08$
G316-10-TS-1	10	360	20	30.9	<0.01	< $5.0\text{E-}09$
G316-10-TS-2	10	340	34	31.7	<0.01	< $5.0\text{E-}09$
G316-10-TS-3	10	330	61	31.7	0.07	$1.3\text{E-}08$

for non-branched cracks. The apparent stress intensity factors in this paper were the averaged values during crack propagation.

Crack propagation curves of 316SS (20%CW) and 304SS (20%CW) below 320 °C are shown in Fig. 7. Initially a trapezoidal wave load was applied for IG cracking, and then it was switched to a constant load for a SCC test. The crack growth rates of 316SS

(20%CW) and 304 (20%CW) at 320 °C were estimated from the PDM trend as $1.2 \times 10^{-7} \text{ mm/s}$ and $1.1 \times 10^{-7} \text{ mm/s}$, respectively. While similar CGRs were obtained at 320 °C, slower CGRs in 316SS (20%CW) were observed at 310 °C. During the test at 290 °C and 270 °C, similar CGRs trend were observed in both steel types, and they decreased with decreasing temperature conditions. When

Table 5
SQC growth rates of 316SS (15%CW, T-S).

Specimen no.	Cold work (%)	Temperature (°C)	Test time (days)	Apparent stress intensity factor (MPa√m)	Average crack length increment (mm)	Average crack growth rate (mm/s)
S6C15A	15	320	26	20.8	0.10	4.4E-08
	15	320	32	29.1	0.19	6.9E-08
	15	320	28	36.9	0.28	1.2E-07
S6C15B	15	270	35	30.8	0.02	6.1E-09
	15	290	60	30.7	0.07	1.3E-08
	15	310	25	30.4	0.04	1.7E-08
S6C15C	15	290	71	30.0	0.01	<5.0E-09
S6C15D	15	300	71	30.1	0.21	3.4E-08
S6C15E	15	290	15	25.7	0.02	1.4E-08
	15	290	27	25.7	0.04	1.6E-08
	15	290	15	39.7	0.07	5.0E-08
	15	320	47	25.3	0.18	4.5E-08
S6C15-4	15	320	27	8.5	<0.01	<5.0E-09
	15	290	84	13.0	0.04	5.6E-09
	15	320	84	13.0	0.03	4.1E-09
S6C15-5	15	290	56	13.5	0.10	2.0E-08
	15	290	21	17.3	0.04	2.2E-08
	15	290	63	17.9	0.01	<5.0E-09
	15	290	48	21.8	0.01	<5.0E-09
	15	290	50	21.9	0.09	2.0E-08
	15	290	35	26.1	<0.01	<5.0E-09
G316-15-TS-1	15	360	30	31.7	<0.01	<5.0E-09
G316-15-TS-2	15	340	34	31.6	<0.01	<5.0E-09
G316-15-TS-5	15	330	61	30.9	0.11	2.1E-08
G316-15-TS-8	15	250	409	30.1	0.08	2.3E-09

Table 6
SQC growth rates of 316SS (20%CW, T-S).

Specimen no.	Cold work (%)	Temperature (°C)	Test time (days)	Apparent stress intensity factor (MPa√m)	Average crack length increment (mm)	Average crack growth rate (mm/s)
S6C2E	20	250	75	38.4	<0.01	<5.0E-09
	20	270	32	40.8	0.05	1.7E-08
S6C20D	20	290	27	26.6	0.12	5.0E-08
	20	290	15	26.9	0.09	7.1E-08
	20	290	15	42.2	0.24	1.8E-07
	20	300	71	30.1	0.83	1.4E-07
	20	320	47	25.8	0.39	9.5E-08
S6C2E	20	290	30	38.6	0.10	3.8E-08
	20	290	22	40.2	0.07	3.4E-08
	20	320	17	39.3	0.20	1.4E-07
S6C2D	20	320	61	29.6	0.55	1.1E-07
S6C2F	20	320	30	21.6	0.17	6.5E-08
	20	320	38	31.1	0.35	1.1E-07
	20	320	26	41.7	0.37	1.7E-07
G316A8	20	320	55	32.4	0.57	1.2E-07
	20	310	33	34.4	0.11	4.0E-08
	20	290	66	34.9	0.21	3.7E-08
	20	270	32	35.1	0.05	1.8E-08
	20	300	91	35.2	<0.01	<5.0E-09
S6C20-1	20	290	83	13.6	0.04	5.6E-09
	20	320	84	13.5	<0.01	<5.0E-09
S6C20-2	20	290	56	14.4	0.09	1.9E-08
	20	290	63	19.3	0.21	3.8E-08
	20	290	21	20.6	0.03	1.5E-08
	20	290	48	24.0	0.21	5.1E-08
	20	290	50	25.7	0.29	6.8E-08
	20	290	35	29.7	0.28	9.1E-08
GCS6C20-K	20	360	30	32.5	0.52	2.0E-07
GCS6C20-L	20	340	34	32.9	0.79	2.7E-07
GCS6C20-M	20	340	30	32.9	0.88	3.4E-07
GCS6C20-N	20	350	30	32.9	0.86	3.3E-07
GCS6C20-O	20	360	30	32.1	0.36	1.4E-07
G316-20-TS-1	20	250	409	31.7	0.28	7.9E-09

Table 7
SCC growth rates of 304SS (5–15%CW, T-S).

Specimen no.	Cold work (%)	Temperature (°C)	Test time (days)	Apparent stress intensity factor (MPa $\sqrt{m}$)	Average crack length increment (mm)	Average crack growth rate (mm/s)
G304B-1	5	290	72	20.8	<0.01	<5.0E-09
	5	290	58	25.8	<0.01	<5.0E-09
	5	290	58	31.2	0.16	3.3E-08
G304B-2	5	320	182	30.9	0.07	4.6E-09
G304C-1	10	310	68	30	0.10	1.7E-08
	10	320	33	31.1	0.08	2.9E-08
	10	290	34	31.4	0.08	2.9E-08
	10	270	29	31.6	<0.01	<5.0E-09
	10	280	51	31.6	0.04	1.0E-08
	10	300	64	31.6	<0.01	<5.0E-09
G304-10-1	10	340	76	30	<0.01	<5.0E-09
G304C-2	10	290	72	20.1	<0.01	<5.0E-09
	10	290	58	25.1	0.07	1.4E-08
	10	290	58	30.5	0.19	3.8E-08
G304D-1	15	320	33	31.5	0.22	7.7E-08
	15	290	34	32.1	0.08	2.9E-08
	15	270	29	32.2	<0.01	<5.0E-09
	15	280	51	32.5	0.01	<5.0E-09
	15	300	64	32.7	0.03	6.1E-09
	15	310	68	33	0.14	2.4E-08
G304D-2	15	290	72	15.3	<0.01	<5.0E-09
	15	290	58	19	0.09	1.8E-08
	15	290	58	23.1	0.30	6.0E-08
G304-15-2	15	340	76	34.2	0.60	9.2E-08
G304-15-TS-3	15	330	61	31.8	0.13	2.40E-08
G304-15-1	15	250	409	30.1	0.10	2.8E-09

Table 8
SCC growth rates of 304SS (20%CW, T-S).

Specimen no.	Cold work (%)	Temperature (°C)	Test time (days)	Apparent stress intensity factor (MPa $\sqrt{m}$)	Average crack length increment (mm)	Average crack growth rate (mm/s)
304E-3	20	290	35	27.8	0.13	4.3E-08
	20	290	50	13.8	0.08	1.8E-08
	20	290	63	18.5	0.13	2.4E-08
	20	290	48	22.9	0.13	3.1E-08
	20	290	50	23.6	0.17	4.1E-08
	20	290	21	18.8	0.05	2.7E-08
G304E-1	20	320	33	30.5	0.25	8.7E-08
	20	290	34	31	0.06	1.9E-08
	20	280	51	31.1	0.02	5.1E-09
	20	280	64	31.2	0.04	6.5E-09
	20	300	32	31.3	0.01	<5.0E-09
	20	310	19	31.4	0.05	2.9E-08
	20	310	17	31.6	0.05	3.3E-08
	20	310	17	31.6	0.05	3.3E-08
G304E-5	20	290	84	14	0.01	<5.0E-09
	20	320	27	9.17	<0.01	<5.0E-09
	20	320	84	14	0.03	3.7E-09
G304E-9	20	320	55	31.1	0.54	1.1E-07
	20	310	33	31.8	0.30	1.0E-07
	20	290	66	32.9	0.22	3.8E-08
	20	270	32	33.3	0.05	1.6E-08
	20	300	91	33.4	0.45	5.7E-08
	20	300	91	33.4	0.45	5.7E-08
G304-20-4	20	340	76	32.8	0.98	1.5E-07
G304-20-2	20	250	409	29.2	0.35	9.9E-09

the temperature was increased from 270 °C to 300 °C, the OGR of 304SS (20%CW) was increased, although retardation of the OGR ($<5 \times 10^{-9}$ mm/s) was observed in 316SS (20%CW). According to Ozawa et al. [36], similar retardations of crack propagation in Alloy 600 have been confirmed by OGR measurements using CT specimens.

The fracture surface of the 316SS (20%CW), as shown in Fig. 8a, indicated that unfractured metallic segments remained in the SCC area. The existence of the metallic segments meant that the SCC susceptibility was not homogeneous. If the unfractured segments resisted the crack mouth opening, the crack growth could be arrested. From this consideration, it should be noted that even if

the signal noise ratio is high enough and the test conditions are well controlled, reliability of CGRs in certain alloys is difficult to obtain. From this aspect, systematic investigations are required to elucidate the cracking phenomenon.

Figs. 8 and 9 show the fracture surfaces of 316SS (20%CW) and 304SS (20%CW) specimens; they exhibited similar surface morphologies. Typical IG facets were observed at the SOC area, and granular corrosion products, up to 2 μm in size, were scattered on the surfaces. Previously, it was reported that the corrosion products consisted of spinel type iron-rich oxide [15]. No obvious differences were observed between 316SS and 304SS.

In order to obtain systematic data, 83 crack growth tests were conducted using 38 specimens of 316SS with CW from 5% to 20% as shown in Tables 3–5. The influences of CW, test temperature and applied stress on CGR were examined. Since the CGR of 316SS under simulated PWR conditions is slower than that under the oxygenated condition, average CGR measurement times of 53 days were needed to improve the data accuracy. In many cases a longer test time (maximum: 409 days) was used, while 22 tests were evaluated as below the detection limit or had no crack initiation. When the PDM is applied to monitor crack growth, theoretically the detection limit depends on the signal to noise ratio. However, CGR data for less than 10 μm crack length were regarded as being for an invalid length to eliminate the unknown error. It should be noted that several tests did not apply the PDM due to unavailability of the facility; in those cases, periodical loading was not performed as a starter for crack initiation. The purpose of periodical loading is to induce the transition from the transgranular (TG) fatigue pre-crack to the IG crack. This could affect reproducibility of SOC growth rates especially in low susceptibility specimens by reducing the effect of crack initiation period. The required crack length for less scatter of CGR measurements and the detection limit under high temperature conditions are discussed later.

In the same way, 49 CGRs of 304SS with 5–20%CW were measured using 16 specimens, and 12 CGRs were evaluated as below the measurable limit or no cracking was observed as listed in Tables 6–8. Since relatively low temperature tests were performed on 304SS, average test time for each CGR measurement was about 69 days. The total number of suitable CGRs was 98, excluding the 35 data omitted because they were below the detection limit.

4. Discussion

4.1. Influence of cold work

Fig. 10 illustrates the influence of CW on the CGR in 316SS specimens exposed to simulated PWR primary water conditions. Since it is difficult to measure the CW ratio of an actual component, Vickers hardness was used instead to describe the effect of CW. The acceleration effect on CGRs by CW clearly appeared for both 320 °C and 300 °C conditions. According to Tsubota et al. [37], the critical hardness for initiation of SCC for 316L stainless steel under simulated BWR conditions was HV = 300. On the other hand, the cracks propagated even for HV = 184 with 316SS (5%CW). This discrepancy indicates that the critical hardness for initiation is higher than that for propagation as CGR under BWR conditions is generally faster than that under PWR conditions.

A comparable enhancement effect on yield strength for 316L, 304, 304L and 347L stainless steels is well documented [8,12,13,29,38]. Comparing the absolute value of CGRs is difficult by reason of different test conditions and materials, but the tendency for an increase in CGR by cold working was consistent with the reported data as shown in Fig. 11.

In addition, the enhancement effect by high yield strength has been reported not only for stainless steel, but also nickel-based

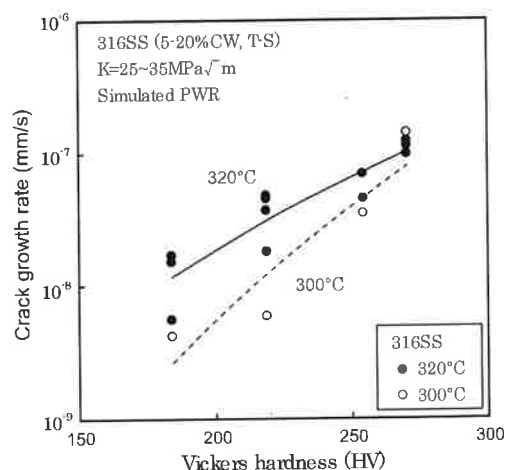


Fig. 10. Effect of hardness on crack growth rate of CW 316SS tested under simulated PWR primary water conditions. (Specimen Nos.: S6C5A, S6C10A, S6C10D, S6C10E, GS6C10-4, S6C15A, S6C15D, S6C15E, S6C20D, S6C2F, G316A8.)

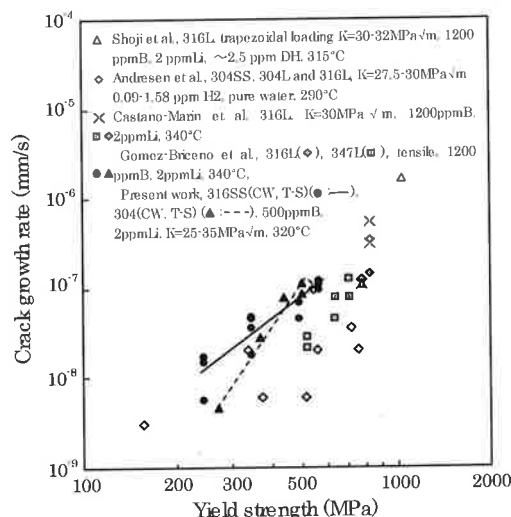


Fig. 11. Effect of yield strength on the crack growth rate of 316 and 316L under various simulated PWR primary water conditions [12,13,29,38]. (Specimen Nos.: S6C5A, S6C10A, S6C10E, GS6C10-4, S6C15A, S6C15E, S6C20D, S6C2F, G316A8, G304B-2, G304C-1, G304D-1, G304E-1, G304F-9.)

alloys which have been used as nuclear reactor component materials. Speidel and Magdowski [39] measured the CGRs of Alloy 600 by a double cantilever beam (DCB) test and found the CGRs could be expressed using the yield strength to the third power. Fig. 12 compares 316SS, 304SS and Alloy 600 as a function of yield strength. While the test methods were different, the figure indicated that similar yield strength dependency was observed between stainless steels and nickel-based alloy.

The corrosion phenomenon of these alloys does not correspond to the CGRs [40], therefore the effect of yield strength might not correlate to corrosion factors. The proposed role of high yield strength has been described by Andresen et al. [41] and Shoji et al. [12]: the plastic zone size at a crack tip becomes smaller in high yield strength alloys to provide a higher strain gradient.

The theoretical yield strength dependence is not clear, but empirically it can be described as the following equation (Fig. 12).

$$\text{CGR} \propto \sigma_y^a \quad (a = 2 - 3) \quad (1)$$

4.2. Influence of stress intensity factor

The crack growth rate is generally induced by the applied stress which the results from this study exhibit clearly as shown in Figs. 13 and 14. The apparent $K(K_a)$ dependence on CGR often is empirically described by the following relation:

$$\text{CGR} \propto K_a^b \quad (b = 0.6 - 3.2) \quad (2)$$

where b is a constant that describes the K_a dependence. Fig. 13 shows the K_a dependence on 316SS indicated that 20%CW alloy provided a lower b value in comparison with 15%CW. However, it should be noted that this varying of trends was not obvious, if the data from $K_a = 13 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ were not there, there would be much slower CGRs with a fair amount of scatter due to difficulty of measurement. The CGRs of 316SS and 304SS obtained at 290 °C were slower and had more scatter as shown in Fig. 14. The statistical K_a dependence is discussed later, the obtained b for 316SS and 304SS ranged from 0.6 to 3.2.

The effect of K_a on CGRs has been evaluated for various alloys and water chemistry conditions as shown in Fig. 15. The acceleration effect by CW and temperature was recognized for several alloys, highest CGRs were observed for Alloy 600 with 31.9%CW in the S-T orientation. While CGRs were strongly influenced by the materials and test environment, comparable K dependences were observed in Alloy 600, 316SS and 304SS. This indicated that the influence of stress intensity on SCC was similar between nickel-based alloy and stainless steels under these conditions.

Regarding the threshold for the crack propagation, Scott [42] proposed that the threshold of Alloy 600 was $9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ at 350 °C. The lowest K_a value of the present study was $13 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ for 316SS (15%CW). The existence of a threshold could not be elucidated because the data tended to be scattered for low CGR tests.

4.3. Influence of temperature on CGR

The temperature dependences of several cold-worked 316SS and 304SS specimens are shown in Figs. 16 and 17 respectively. The tests were performed under a constant load with an apparent stress intensity factor between 25 and 35 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$. Arrhenius type temperature dependences were observed from 250 °C to 320 °C, but they disappeared above 330 °C in 15%CW and 10%CW 316SS specimens.

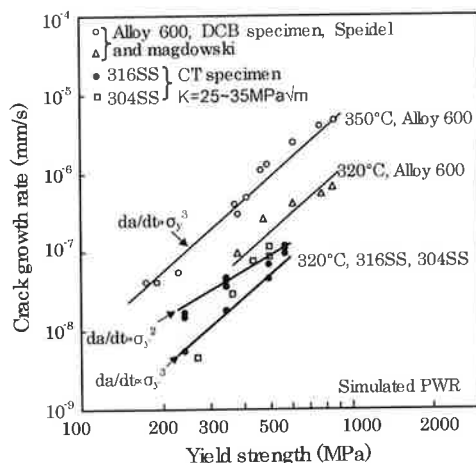


Fig. 12. Effect of yield strength on the crack growth rates of 316SS, 304SS and Alloy 600 [39]. (Specimen Nos.: S6C5A, S6C10A, S6C10E, GS6C10-4, S6C15A, S6C15E, S6C20D, S6C2F, G316A8, G304B-2, G304C-1, G304D-1, G304E-1, G304E-9.)

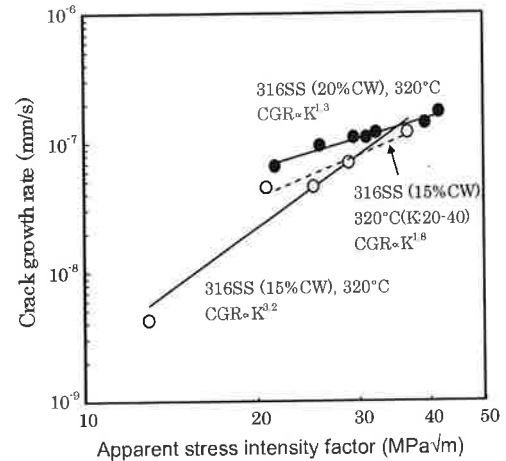


Fig. 13. Effect of stress intensity factor on the crack growth rates of 316SS with 20%CW and 15%CW at 320 °C. (Specimen Nos.: S6C20D, S6C2E, S6C2F, G316A8, S6C20-1, S6C15A, S6C15E, S6C15-4.)

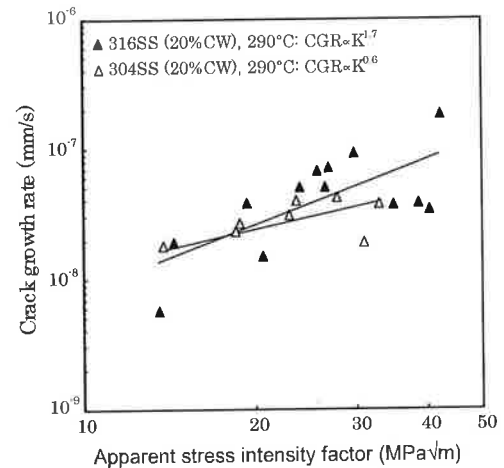


Fig. 14. Effect of stress intensity factor on the crack growth rates of 316SS (20%CW) and 304SS (20%CW) at 290 °C. (Specimen Nos.: S6C20D, S6C2E, G316A8, S6C20-1, S6C20-2, 304E-3, G304E-9.)

Because the PDM could not be applied above 330 °C, true CGRs in high temperature were not elucidated, but the results implied that the CGRs were inhibited at higher temperature particular in lower percent CW alloys. One of the explanations for the suppression effect is decreasing the corrosion rates of stainless steels in simulated PWR primary water conditions [43]. The reason for the suppression effect above 330 °C was not clear, but a surface electro-chemical reaction seemed to be the rate limiting process for the corrosion of specimens and SCC.

The estimated apparent activation energies, which were obtained using the least squares method, were 75 kJ/mol, 81 kJ/mol and 145 kJ/mol in 316SS with 20%CW, 15%CW and 10%CW, respectively, as shown in Fig. 16. On the other hand, the respective apparent activation energies of 304SS (20%CW) and 304SS (15%CW) were calculated as 91 kJ/mol and 90 kJ/mol. Estimated apparent activation energies always include CGR measurement errors, but the trend of apparent activation energy decreases with increasing percent of CW has been reported by Rebak et al. [19], Moshier and Brown [20], and Cassagne and Gelpi [44] in Alloy 600. In addition, according to Shoji et al. [12], no consistent effect of temperature on crack growth rate was obtained for higher percent CW 304L

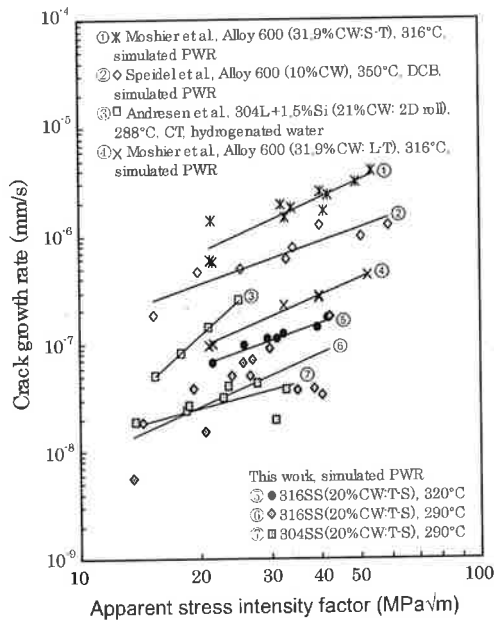


Fig. 15. Effect of stress intensity factor on CGR of various alloys in high temperature water [20,38,39]. (Specimen Nos.: S6C20D, S6C2E, S6C2F, G316A8, S6C20-1, S6C20-2, 304E3, G304E9.)

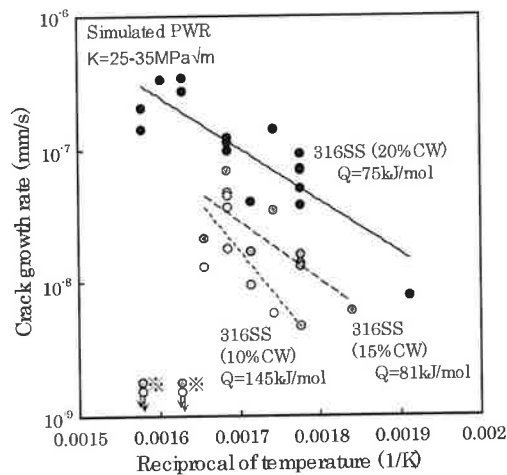


Fig. 16. Temperature dependence on crack growth rate of cold worked 316SS under simulated PWR primary water conditions. (Specimen Nos.: S6C20D, S6C2F, G316A8, S6C20-2, GCS6C20-K, GCS6C20-L, GCS6C20-M, GCS6C20-N, GCS6C20-O, G316 20 TS1, S6C15B, S6C15D, S6C15E, G316-15-TS1, G316-15-TS2, G316-15-TS5, S6C10A, S6C10B, S6C10D, S6C10E, GCS6C10-4, G316-10-TS2, G316-10-TS3.) Data from total crack length less than 0.01 mm.

and 316L, which had yield strength of 750–1000 MPa. On the contrary, Speidel and Magdowski [39] reported no significant influence of CW on the temperature dependence in experiments using double cantilever beam specimens. All these data implied that mechanical properties have some potential to change the activation energy but it is difficult to determine the accurate activation energy.

Fig. 18 shows the temperature dependence on CGRs of cold worked stainless steels and Alloy 600 as reported from several sources [17,29,30,38,45,46]. Reported apparent activation energies in CW stainless steels were around 60 kJ/mol, while slightly higher values ranging from 75 to 145 kJ/mol were obtained in this study.

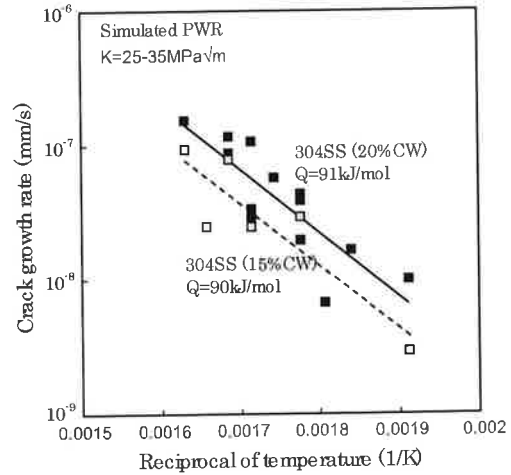


Fig. 17. Temperature dependence on crack growth rate of cold worked 304SS under simulated PWR primary water conditions. (Specimen Nos.: G304D-1, G304-15-2, G304-15-TS3, G304-15-1, 304E3, G304E1, G304E9, G304-20-4, G304-20-2.)

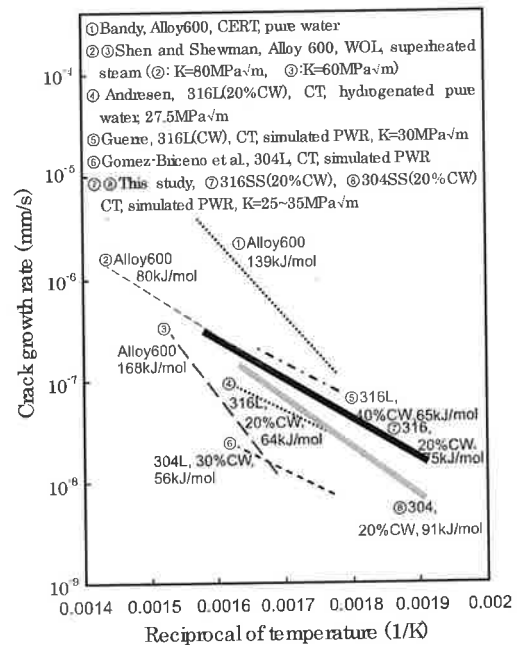


Fig. 18. Temperature dependence on crack growth rate of cold worked stainless steels and Alloy 600 under simulated PWR primary water and deaerated water conditions [17,29,30,38,45,46].

On the other hand, slightly higher apparent activation energies were reported for Alloy 600 ranging from 80 to 168 kJ/mol.

Arioka et al. [25] reported a similar temperature dependence for CGR in IG creep CGRs of 316SS. The CGRs of SCC were over 10 times higher, and a comparable thermal activation process might influence the crack growth.

4.4. Empirical formula for CGR calculation

This paper presents the influences of CW, stress intensity factor and temperature on the CGR of 316SS and 304SS. Each of the factors was precisely assumed as described above, but variability of data complicates the accurate prediction of CGRs. For instance

the coefficient for yield strength (a) varies from 2 to 3 (Eq. (1)), the coefficient for apparent K (b) ranges from 0.6 to 3.2 (Eq. (2)) and activation energy varies from 75 to 145 kJ/mol. If the mechanism is fully understood and accuracy of CGR measurement is enough, it might be possible to use each obtained parameter. However, CGRs of CW stainless steels under PWR conditions tend to be scattered and the role of each parameter has not been clarified, then statistical data treatment presents a feasible way to evaluate the CGRs.

In the study, the empirical formula was established from the obtained correlations as described in Eq. (3). Factors for yield strength, apparent stress intensity factor and temperatures were calculated by multivariable analysis using all CGRs obtained in the study except for those evaluated for a crack length less than 0.01 mm:

$$\frac{da}{dt} = 9.5 \times 10^{-10} \times r_y^{2.9} \times K_a^{1.0} \times \exp\left(\frac{-84 \times 10^3}{RT}\right) \quad (3)$$

where da/dt is crack growth rate (mm/s), r_y is yield strength at test temperature, K_a is apparent stress intensity factor, R is gas constant (8.314 kJ/mol K) and T is absolute test temperature. SCC test results indicated the existence of a peak temperature, and the applicability range of the formula was between 250 °C and 320 °C. It should be noted that the base CGRs were for T-S orientation and cracking was branched, so technically, an absolute value for precise CGRs in operating power plants is not predictable.

Fig. 19 compares the calculated CGRs, which were derived from the empirical formula, and the measured CGRs; the data seemed to scatter in some extent. There are many reasons for variability of each measurement, for example crack arrest by an uncracked segment or specific material structures, and actual CGRs have some irregularities. In addition, PDM measurements of such low CGRs have some errors from electric noise, insulation of wires, etc. The empirical formula of Fig. 19 includes these irregularities and measurement errors from 98 CGRs. Theoretically, each factor might influence it mutually, then establishing the precise equation requires further fundamental studies.

Even though the precise CGR is not predictable, similar parameter dependences were observed between 316SS and 304SS. Both steel types were used with the same empirical formula and no obvious differences were observed. The results indicated that CGRs of 316SS and 304SS could be estimated using the same empirical formula.

Regarding the maintenance of operating power plants, the accuracy and margin of the safety ratio is important. Fig. 20 shows the

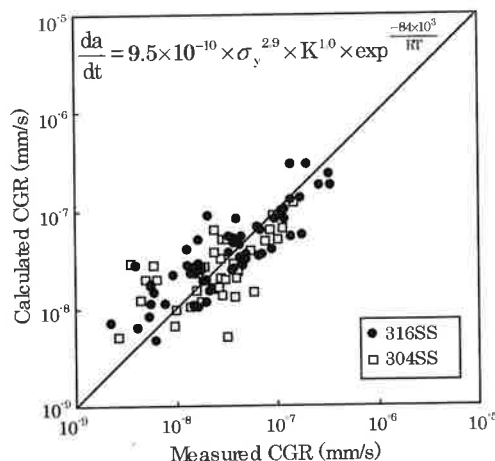


Fig. 19. Comparison of CGRs measured and calculated by the empirical formula.

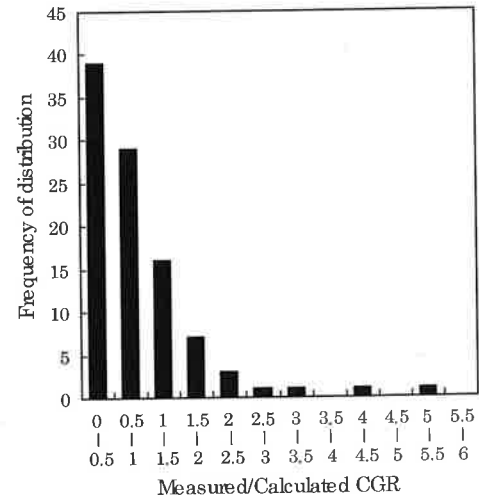


Fig. 20. Frequency of distribution as a function of measured/calculated CGR ratio.

frequency of distribution of measured/calculated CGR ratio; 92.8% of the measured CGRs did not exceed twice the calculated CGRs.

5. Conclusions

The crack growth rates of 316SS and 304SS under simulated PWR primary water conditions have been summarized to develop an empirical formula providing better engineering applications. Fifty-three cold worked compact tension specimens were employed to clarify the influences of yield strength, temperature dependence and stress intensity factors:

- The influences of each parameter for 316SS and 304SS were similar, so the same empirical formula for crack growth rates could be applied. The estimated apparent activation energy was 84 kJ/mol and it was calculated from all the obtained crack growth rates. On the other hand, crack retardation was clearly observed above 330 °C in lower cold worked stainless steel specimens, therefore the applicability range of calculated activation energy was regarded as between 250 °C and 320 °C.
- The crack growth rates increased with increasing yield strength for 5% and 20% cold worked 316SS and 304SS specimens. These rates were proportional to the 2.9 power of yield strength at test temperature.
- The crack growth rates increased with increasing apparent stress intensity in the region between 13 MPa $\sqrt{m}$ and 40 MPa $\sqrt{m}$, and these rates were proportional to the apparent yield strength.
- Cracking of T-S orientation specimens propagated through the grain boundary, and then branched off in two directions.

References

- W. Bamford, J. Hall, A review of alloy 600 cracking on operating nuclear plants including alloy 82 and 182 weld behavior, in: Proc. of ICONE2, ASME, 2004.
- D.W. Alley, A regulatory analysis and perspective regarding degradation of materials in light water reactors, in: Proc. of Corrosion 2011, Paper no. 11198, NACE, 2011.
- G.S. Was, P.L. Andresen, Corrosion 63 (1) (2007) 19.
- J.M. Boursier, S. Gallet, Y. Rouillon, et al., Stress corrosion cracking of austenitic stainless steels in PWR primary water: an update of metallurgical investigations performed on France withdrawn components, in: Proc. Int. Symp. Fontevraud 5, September 23–27, 2002.

- [5] T. Couvant, P. Moulart, L. Legras, et al., PWSCC of austenitic stainless steels of heaters of pressurizers, in: Proc. Int. Symp. Fontevraud, 6, 2006.
- [6] Nuclear Industry Safety Agency (NISA), Cracks on the Inner Surface of the Welds at Primary Water Inlet and Outlet Nozzle to Steam Generators, NISA, February 5, 2008.
- [7] N. Totsuka, Z. Szklarska-Smialowska, Corrosion 44 (1988) 124.
- [8] P.L. Andresen, T.M. Angeliu, W.R. Catlin, et al., Effect of deformation on SCC of unsensitized stainless steel, in: Proc. of Corrosion 2000, Paper no. 203, NACE, 2000.
- [9] P.L. Andresen, L.M. Young, W.R. Catlin, et al., Stress corrosion crack growth rate behavior of various grades of cold-worked stainless steel in high temperature water, in: Proc. of Corrosion 2002, Paper no. 2511, NACE, 2002.
- [10] K. Arioka, Effect of temperature, hydrogen and boric acid concentration on IGSCC susceptibility of annealed 316 stainless steel, in: Proc. Int. Symp. Fontevraud 5, September 23–27, 2002.
- [11] K. Arioka, T. Yamada, T. Tukumi, Influence of boric acid, hydrogen concentration and grain boundary carbide on IGSCC behaviors of SUS 316 under PWR primary water, in: Proc. 11th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, Stevenson, August 10–14, 2003.
- [12] T. Shoji, G. Li, J. Kwon, S. Matsushima, et al., Quantification of yield strength effects on IGSCC of austenitic stainless steels in high temperature water, in: Proc. 11th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, Stevenson, August 10–14, 2003.
- [13] M.L. Castano Marin, M.S. Garcia Redondo, G.D. Velasco, et al., Crack growth rate of hardened austenitic stainless steels in BWR and PWR environments, in: Proc. 11th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, Stevenson, August 10–14, 2003.
- [14] F. Vaillant, T. Couvant, J.M. Boursier, et al., Stress corrosion cracking of cold-worked austenitic stainless steels in laboratory primary PWR environment, in: Proc. PVP2004, San Diego, CA, July 25–29, 2004.
- [15] T. Terachi, K. Fujii, K. Arioka, J. Nucl. Sci. Technol. 42 (2) (2005) 225.
- [16] T. Couvant, L. Legras, F. Vaillant, Effect of strain-hardening on stress corrosion cracking of AISI 304L stainless steel in PWR primary environment at 360 °C, in: Proc. 12th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, Salt Lake City, UT, August 14–18, 2005.
- [17] C. Guerre, O. Raquet, E. Herms, et al., SCC growth behavior of austenitic stainless steels in PWR primary water conditions, in: Proc. 12th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, Salt Lake City, UT, August 14–18, 2005.
- [18] K. Arioka, T. Yamada, T. Terachi, R.W. Staehle, Corrosion 62 (1) (2006) 74.
- [19] R.B. Rebak, Z. Xia, Z.S. Smialowska, Corrosion 51 (9) (1995) 689.
- [20] W.C. Moshier, C.M. Brown, Corrosion 56 (3) (2000) 307–320.
- [21] Y.C. Gao, K.C. Hwang, Elastic-plastic fields in steady crack growth in a strain-hardening material, in: Proc. 5th Int. Conf. on Fracture, Cannes, France, vol. 2, (1981) p. 669.
- [22] L.M. Young, P.L. Andresen, T.M. Angeliu, Crack tip strain rate: estimates based on continuum theory and experimental measurement, in: Proc. of Corrosion 2001, Paper no. 1131, NACE, 2001.
- [23] T. Shoji, T. Yamamoto, K. Watanabe, et al., “3D FEM simulation of EAC crack growth based on the deformation/oxidation mechanism, in: Proc. 11th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, Stevenson, August 10–14, 2003.
- [24] P.L. Andresen, M.M. Morra, W.R. Catlin, Effect of yield strength, corrosion potential, composition and stress intensity factor in SCC of stainless steels, in: Proc. of Corrosion 2004, Paper no. 4678, NACE, 2004.
- [25] K. Arioka, T. Yamada, T. Terachi, et al., Corrosion 63 (12) (2007) 1114.
- [26] S. Lozano-Perez, T. Yamada, T. Terachi, et al., Acta Mater. 57 (18) (2009) 5361.
- [27] K. Arioka, T. Yamada, T. Terachi, et al., Corrosion 62 (7) (2006) 568.
- [28] D.J. Gooch, Mater. Sci. Eng. 91 (1987) 45.
- [29] D. Gomez-Briceño, M. Sol-García, J. Lapena, SCC behavior of austenitic stainless steels in high temperature water effect of cold work, water chemistry and type of materials, in: Proc. 14th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, Virginia Beach, VA, August 23–27, 2009.
- [30] C. Guerre, O. Raquet, E. Herms, et al., SCC crack growth rate of cold-worked austenitic stainless steels in pwr primary water conditions, in: Proc. 13th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, Whistler, Canada, August 19–23, 2007.
- [31] Z. Lu, Y. Takeda, T. Shoji, J. Nucl. Mater. 383 (2008) 92.
- [32] Japan Stainless Steel Association, Stainless Steels Handbook, Nikkan Kogyo Shimbun, Ltd., Japan, 384, 1995 (in Japanese).
- [33] ASTM E 647-11. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, American Society for Testing and Materials, 2009.
- [34] E. Ritchey, D.S. Morton, Influence of specimen size on the SCC growth rate of Ni-alloys exposed to high temperature water, in: Proc. of Corrosion 2006, Paper no. 6513, NACE, 2006.
- [35] ASTM E 399-09. Standard Test Method for Plane-strain Fracture Toughness of Metallic Materials, American Society for Testing and Materials, 2011.
- [36] M. Ozawa, Y. Yamamoto, K. Nakata, et al., Establishment of experimental conditions for the SCC growth rate test of alloy 600 and Ni base weld metal in high temperature oxygenated water, in: Proc. 12th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, Salt Lake City, UT, August 14–18, 2005.
- [37] M. Tsubota, Y. Kanazawa, H. Inoue, The effect of cold work on the SCC susceptibility of austenitic stainless steels, in: Proc. 7th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, 1995, p. 519.
- [38] P.L. Andresen, M.M. Morra, J. Nucl. Mater. 383 (2008) 97.
- [39] M.O. Speidel, R. Magdowski, Stress corrosion cracking of stabilized austenitic stainless steels in various types of nuclear power plants, in: Proc. 9th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, Newport Beach, CA, August 1–5, 1999.
- [40] T. Terachi, T. Yamada, K. Arioka, S. Lozano-Perez, Role of corrosion in LPSCC of Fe- and Ni-based alloys, in: Proc. of the Int. Symp. on Research for Light Water Reactors, 2007, p. 215.
- [41] P.L. Andresen, L.M. Young, P.W. Emigh, R.M. Horn, Stress corrosion crack growth rate behavior of Ni alloys 182 and 600 in high temperature water, in: Proc. of Corrosion 2002, Paper no. 2510, NACE, 2002.
- [42] P. Scott, An analysis of primary water stress corrosion cracking in PWR steam generators, in: Proc. of the Specialists Meeting on Operating Experience with Steam Generators, Brussels, Belgium, 1991.
- [43] T. Terachi, T. Miyamoto, T. Yamada, K. Arioka, Mechanistic study of LPSCC of stainless steels. Temperature dependence of corrosion in hydrogenated water, in: Proc. of Nuclear Plant Chemistry Conf., Quebec City, Canada, October 3–7, 2010.
- [44] T. Cassagne, A. Gelpi, Crack growth rate measurements on alloy 600 steam generator turning in primary and hydrogenated AVT water, in: Proc. 6th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, San Diego, CA, August 1–5, 1993.
- [45] Y. Shen, P.G. Shewmon, Corrosion 47 (9) (1991) 712.
- [46] R. Bandy, D.C. Rooyen, Corrosion 40 (1984) 425.

電共研試験結果^[1]等に基づく進展式の実機適用性について【SCC 進展式検討に用いた試験条件と実機条件との比較】

SCC 進展式の設定では CT 試験片を用いた SCC 試験結果を用いて評価している。

実機と SCC 試験の差異について比較検討し、適用性の検討を行った。

項目	実機	SCC 試験	相違の影響
材質	実機材(配管材)		
温度	290℃		
水質	PWR 環境		
硬さ	200HV 近傍と推定		
硬化の仕方	表面ではシンニング加工、内部では溶接による残留応力により硬化		
き裂進展方向	圧延方向との関係は不明確		

いずれの条件も大きな相違はなく、SCC 試験条件は実機条件を包絡する試験となっており、適用性に問題はないものとする。

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【き裂進展解析のインプット条件と実機との比較】

SCC 進展評価では、板厚方向の硬さ分布及び残留応力を入力値として使用しており、研究成果^[2]を基に設定している。

研究成果の設定根拠と実機条件の比較を設定パラメータ毎に行い問題ないことを確認した。

① 板厚方向の硬さ分布

- 実機と同様のシンニング加工を実施したモックアップを作成して、溶接分近傍の断面から板厚方向の硬さ分布を取得。
(口径：4B（実機同様）、材質：SUS316（実機同様）)
- 実機の溶接条件は TIG+SMAW であるが、モックアップは TIG で実施されており差がある。ただし、2B 及び 8B 配管にて溶接手法の影響を確認しており、TIG の方が TIG+SMAW よりも板厚内の硬さが全体的に硬い傾向であることを以下の通り確認しており、実機への適用性に問題はない。

② 板厚方向の残留応力

- 実機 4B 配管の溶接パスを模擬して、FEM 解析し、板厚方向の残留応力を設定。
- 別途、実機仕様の他口径(3/4B、4B、8B、14B)配管(SUS316)モックアップの溶接部近傍から、残留応力測定(ひずみゲージ法)を実施。
- 解析と残留応力測定結果の比較にて、板厚方向の残留応力分布傾向が一致することを確認している。
- 実機の溶接条件は TIG+SMAW であるが、モックアップは TIG で実施されており差がある。ただし、TIG の方が TIG+SMAW に比べて入熱量が大きく、引張残留応力が高い傾向にあるため、実機への適用性に問題はない。

*:ひずみゲージ法: 供試体切断時の解放ひずみ値を元に、元の供試体に生じていた残留応力を評価

[1] 共同研究報告書「PWR 環境下の SCC 進展データの拡充に関する研究」

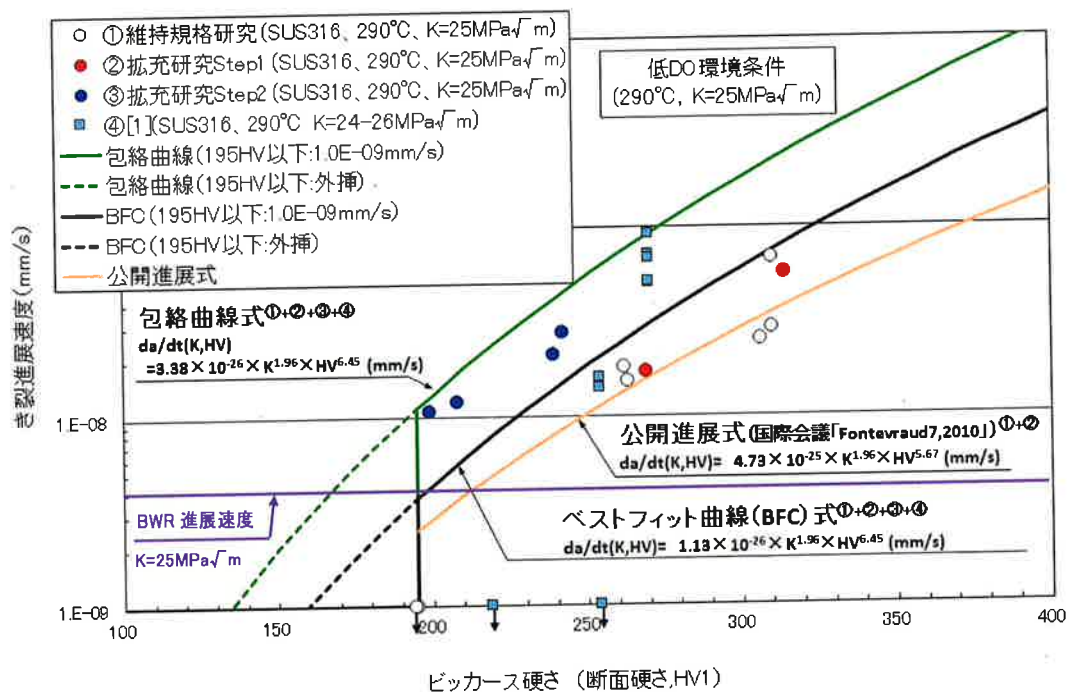
[2] 共同研究報告書「強加工 SCC 懸念部位差別化のためのデータ拡充研究」

BWR き裂進展速度線図に基づくき裂進展評価

PWR より厳しいと考えられる BWR 環境中（水素注入環境）の鋭敏化 SUS304 のき裂進展速度線図を用いた評価を実施した。評価要領としては、4.6mm の初期き裂を想定し、破壊評価で用いたき裂深さ 8.6mm となるまでに必要となる年数を評価した。評価結果を下表に示す。

SCC 及び疲労による進展を考慮すると、8.6mm となるまでには 3.5 年と評価された。

	BWR（水素注入）鋭敏化 SUS 式	
	評価期間：3.5 年	
	欠陥深さ a (mm)	欠陥長さ ℓ (mm)
初期寸法	4.6	67
SCC による進展量	3.6	4
疲労による進展量	0.4	1
評価期間末期のき裂寸法	8.6	72



4. 水平展開（類似個所の点検）

2章の「指示の原因検討」より、今回の加圧器スプレイライン配管溶接部の指示は、オーステナイト系ステンレス鋼の配管溶接部の内、表面機械加工時に形成された表面微細化層（硬化層）に起因する強加工SCCと考えられる。

強加工SCCについては、2章に記載のとおり材料、環境（温度）、応力に依存することから、強加工SCCの発生または進展の基準に基づき、大飯3号機における追加点検対象を選定する。

なお、追加点検対象の選定においては、プラント運転に影響のある系統の配管・機器耐圧部の内、体積検査を要求される溶接部を対象とし、配管、機器の選定フローに基づき抽出を行う。

（1）対象の選定フロー

プラント運転に影響のある系統の配管・機器耐圧部の内、体積検査を要求される溶接部を対象とし、図4.1に示す選定フローを用いて類似箇所の抽出及び追加点検対象の選定を行った。

プラント運転に影響のある系統の配管・機器耐圧部の内、体積検査を要求される溶接部
RCS,CVCS,MSS,FWS,CCWS,SIS,RHRS,CSS

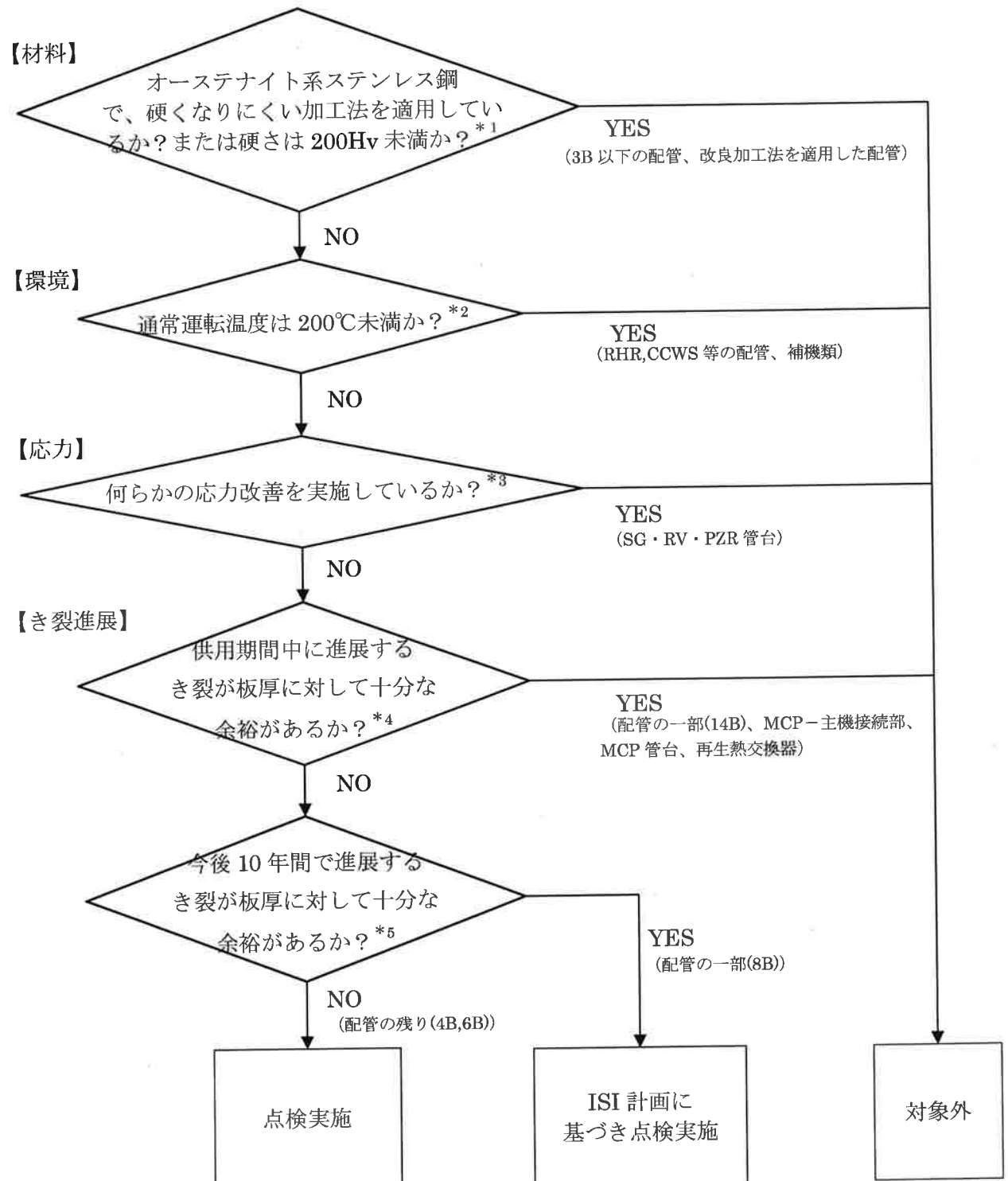
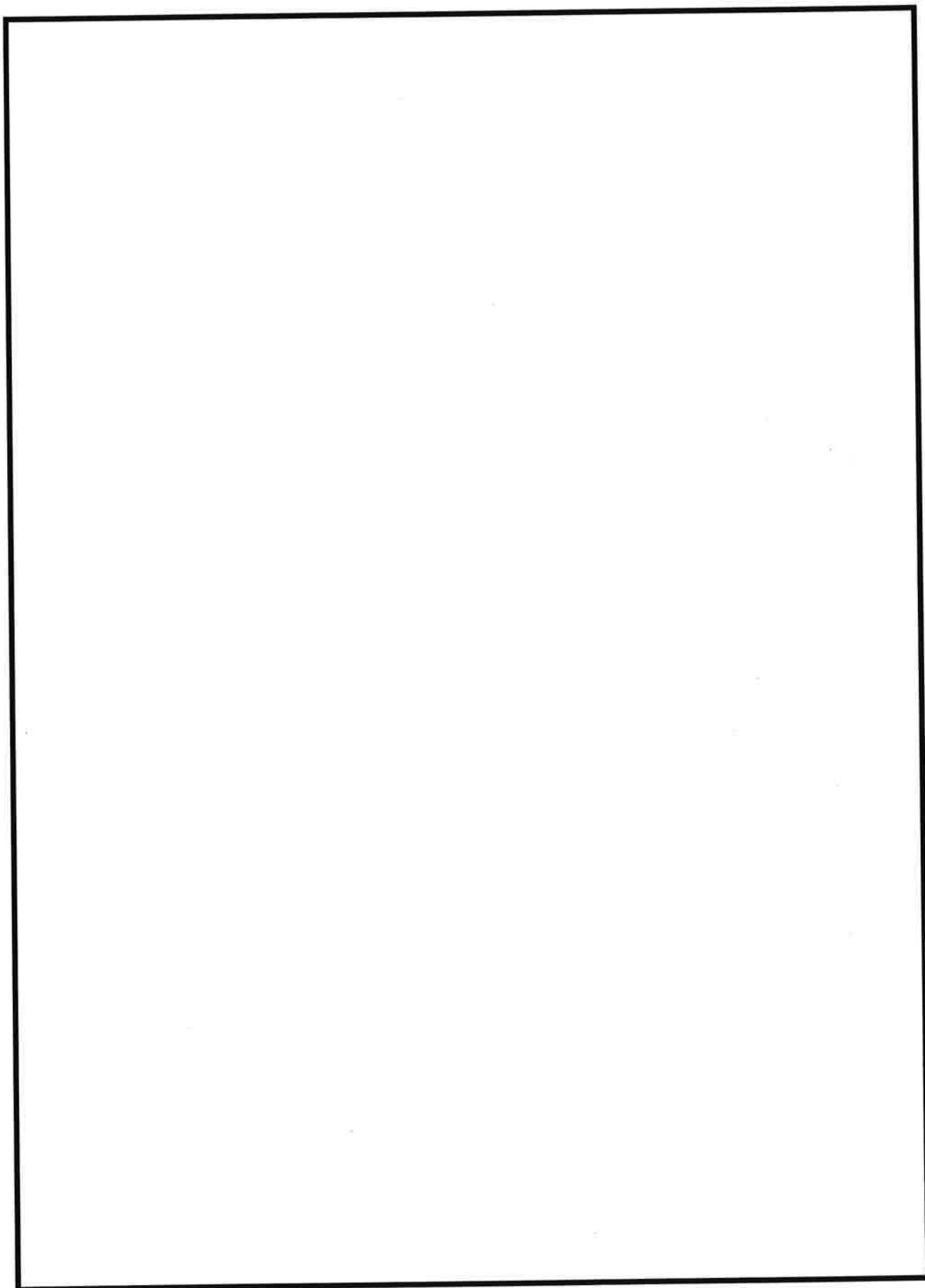


図 4.1 追加点検対象選定フロー



 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(2) 対象箇所

(1) に示した選定フローに基づき抽出した対象箇所を下表に示す。

表 4.1 追加点検対象抽出結果

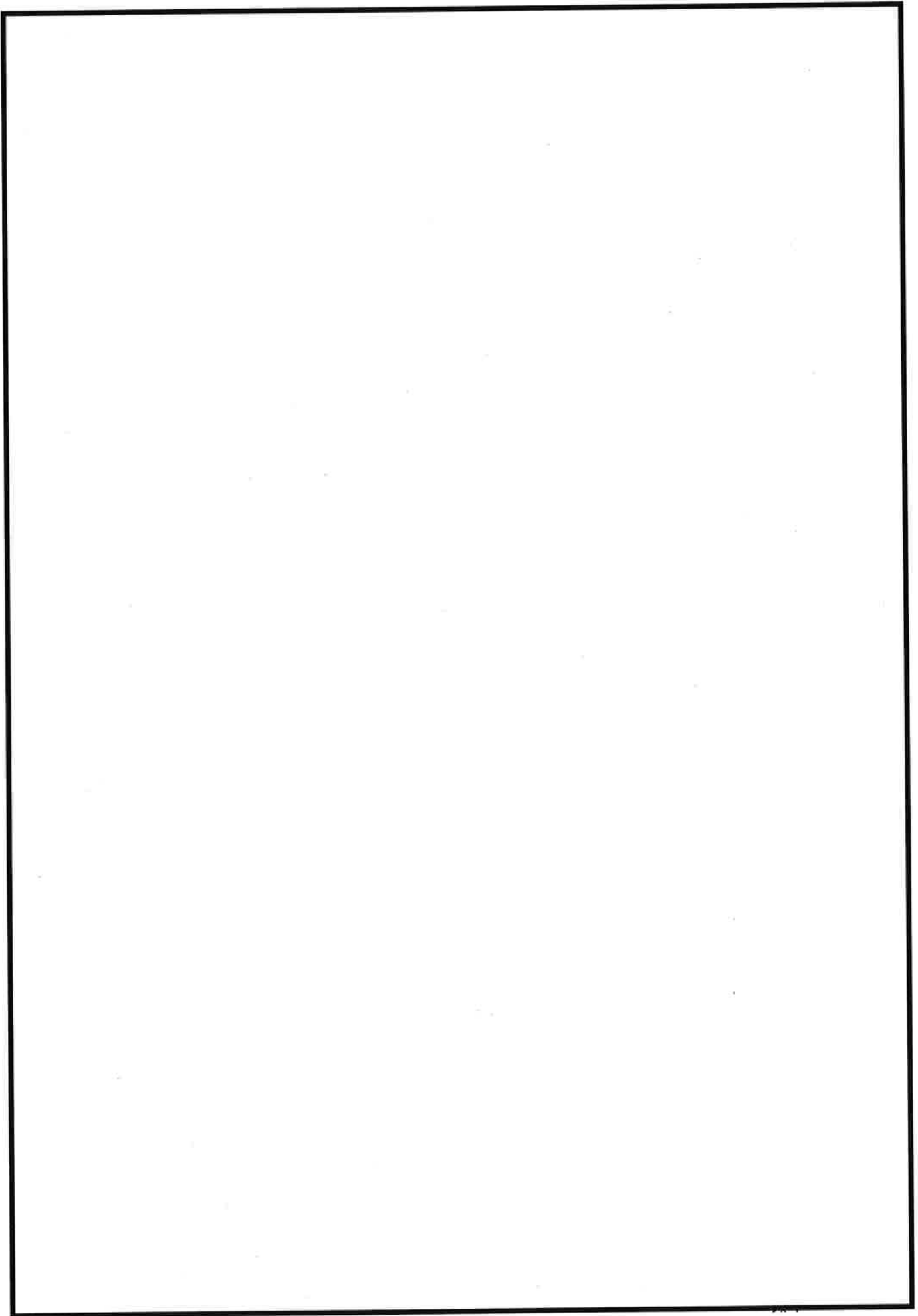
設備名	箇所数
加圧器スプレイライン配管	16
加圧器逃がしライン配管	3

(3) 追加点検結果

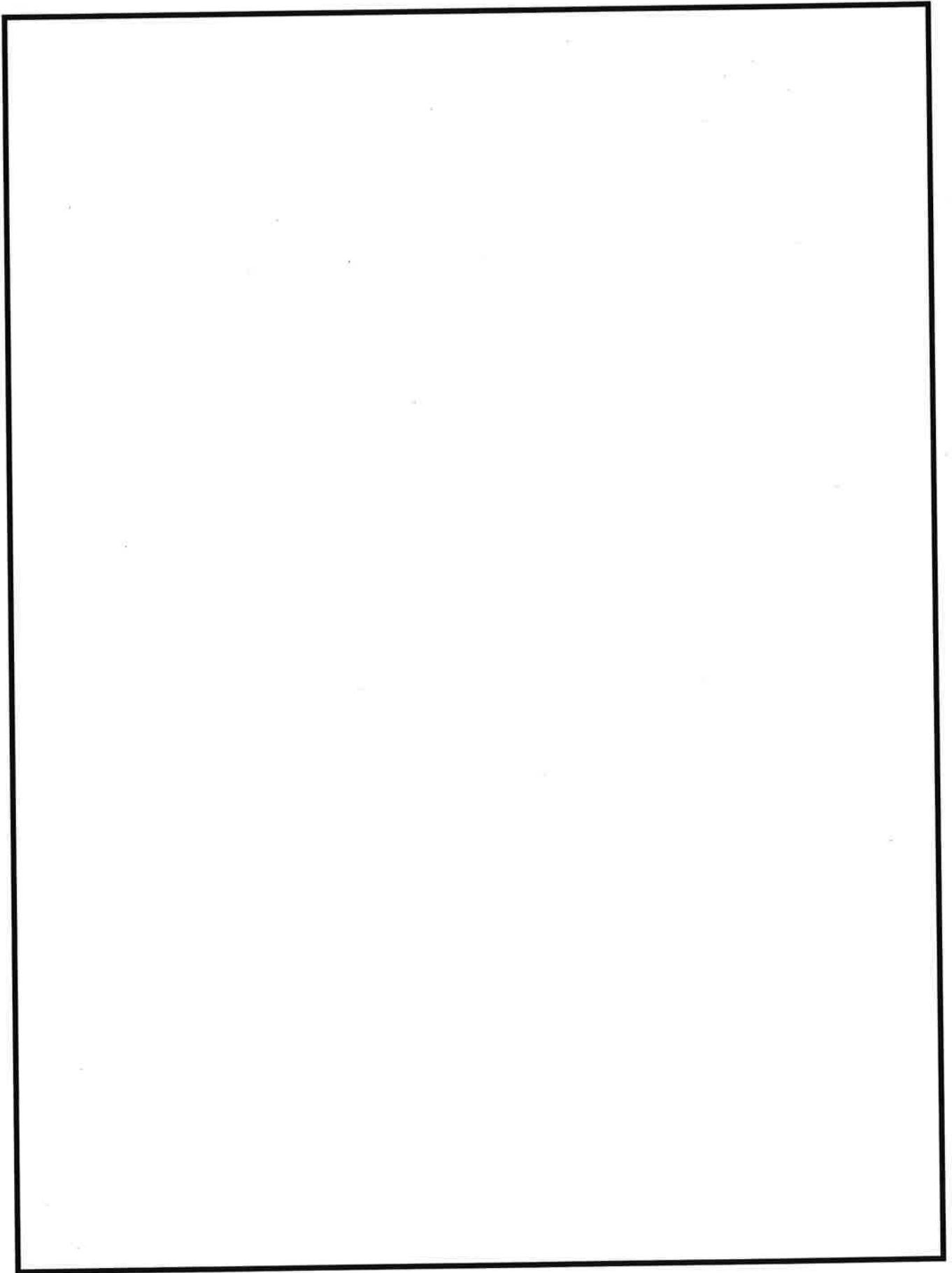
(2) に示した追加点検対象箇所について、追加点検を実施し、有意な指示が無いことを確認した。(添付-6 参照)

以上

 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

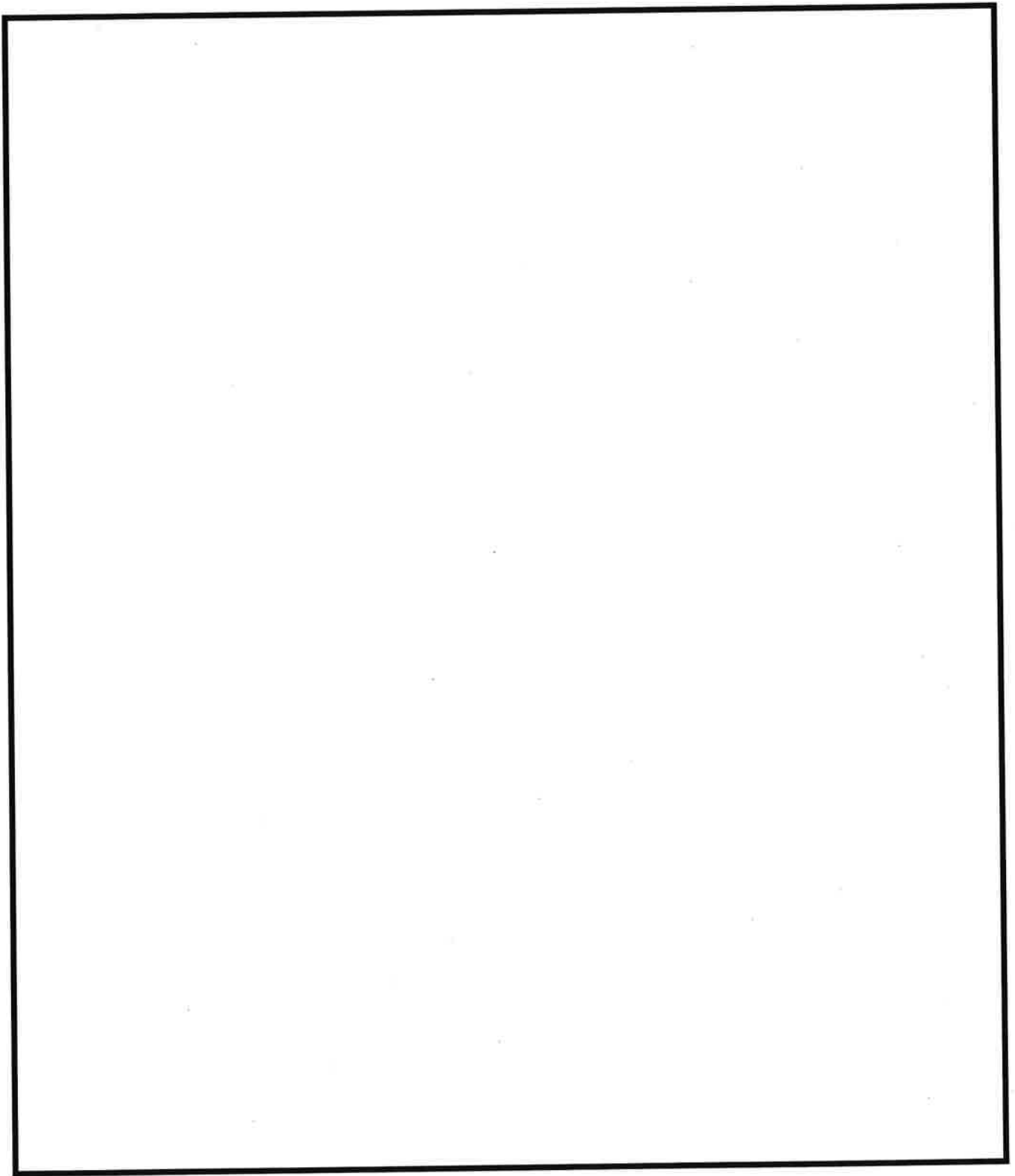


: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



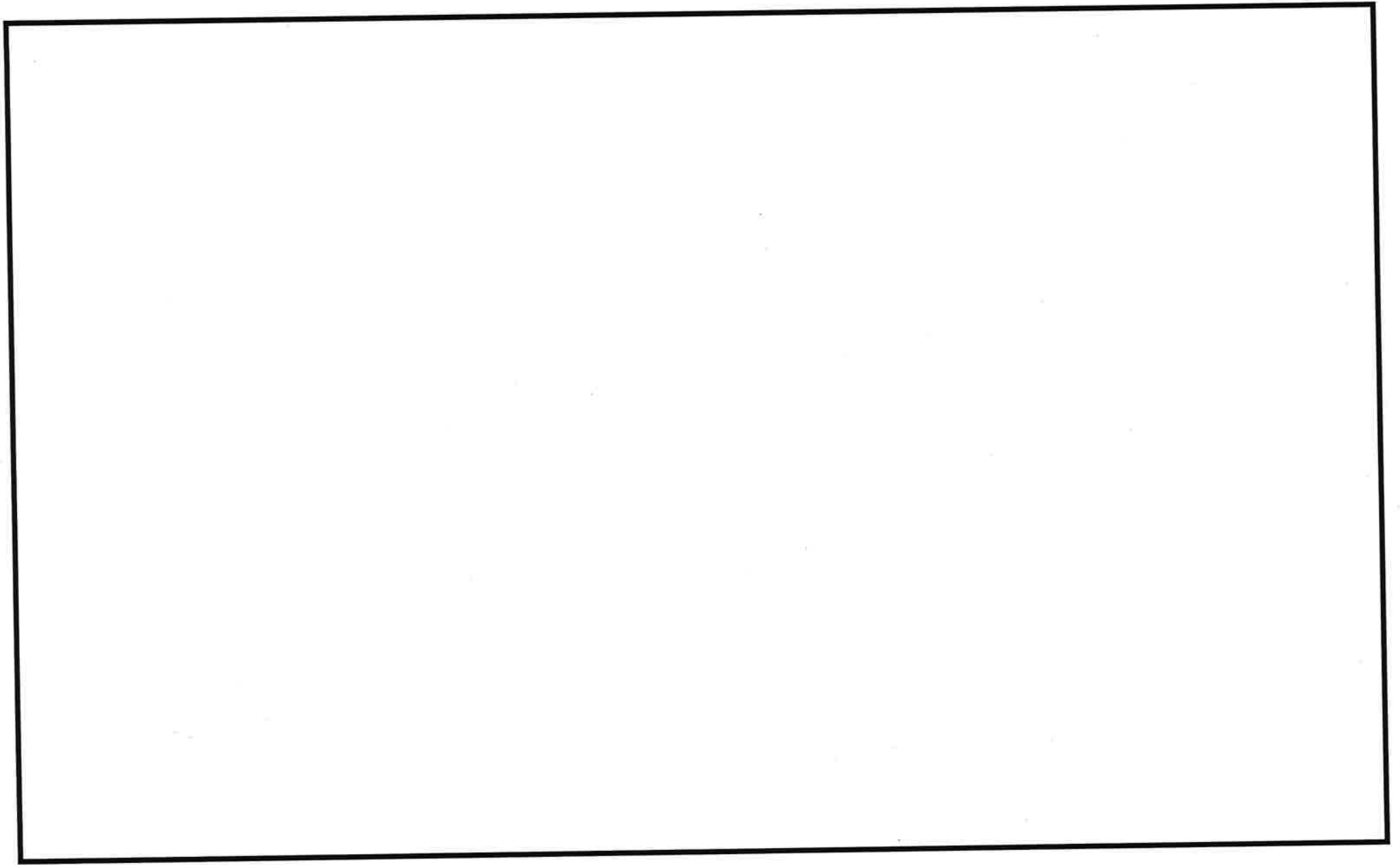
 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

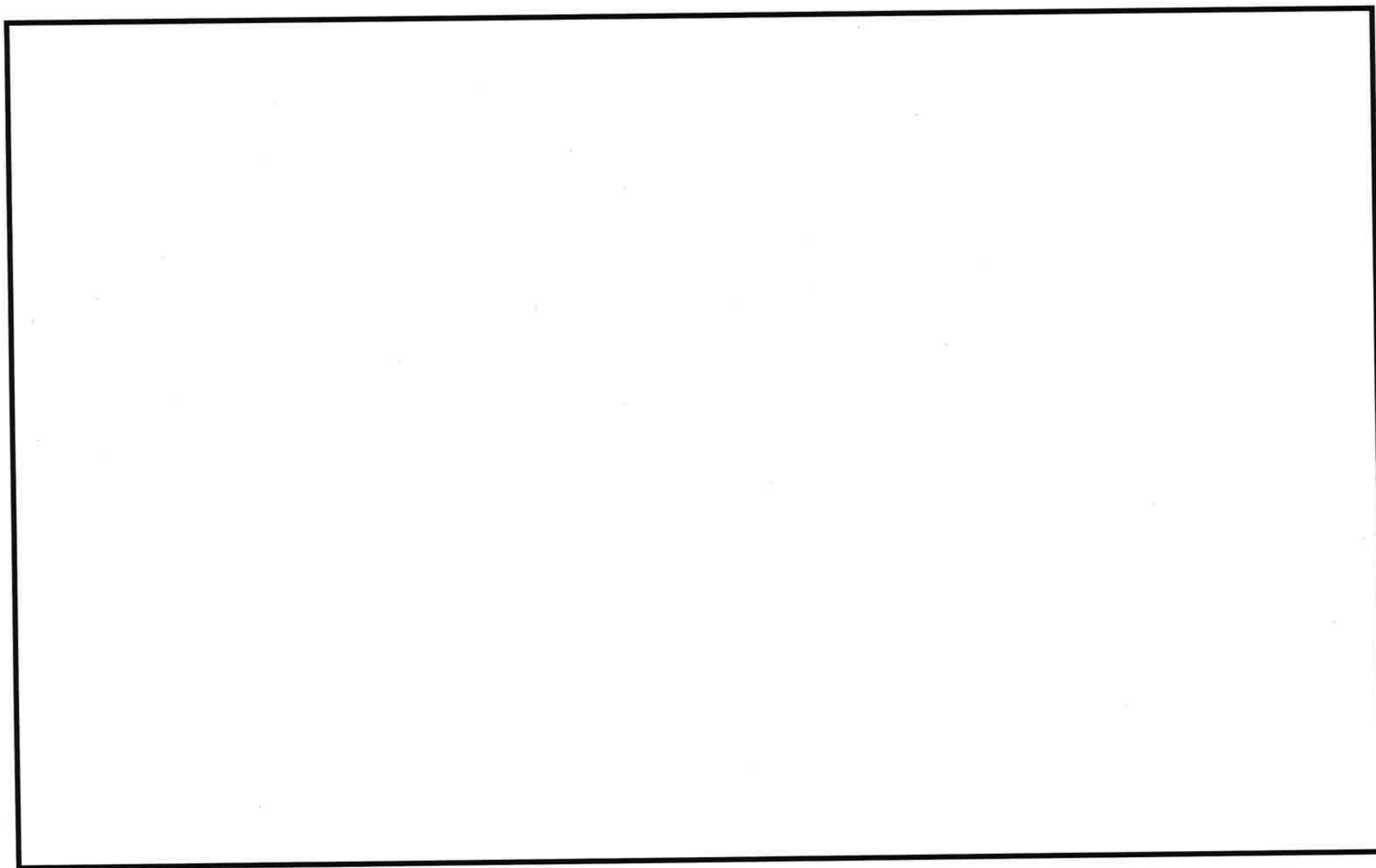


 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

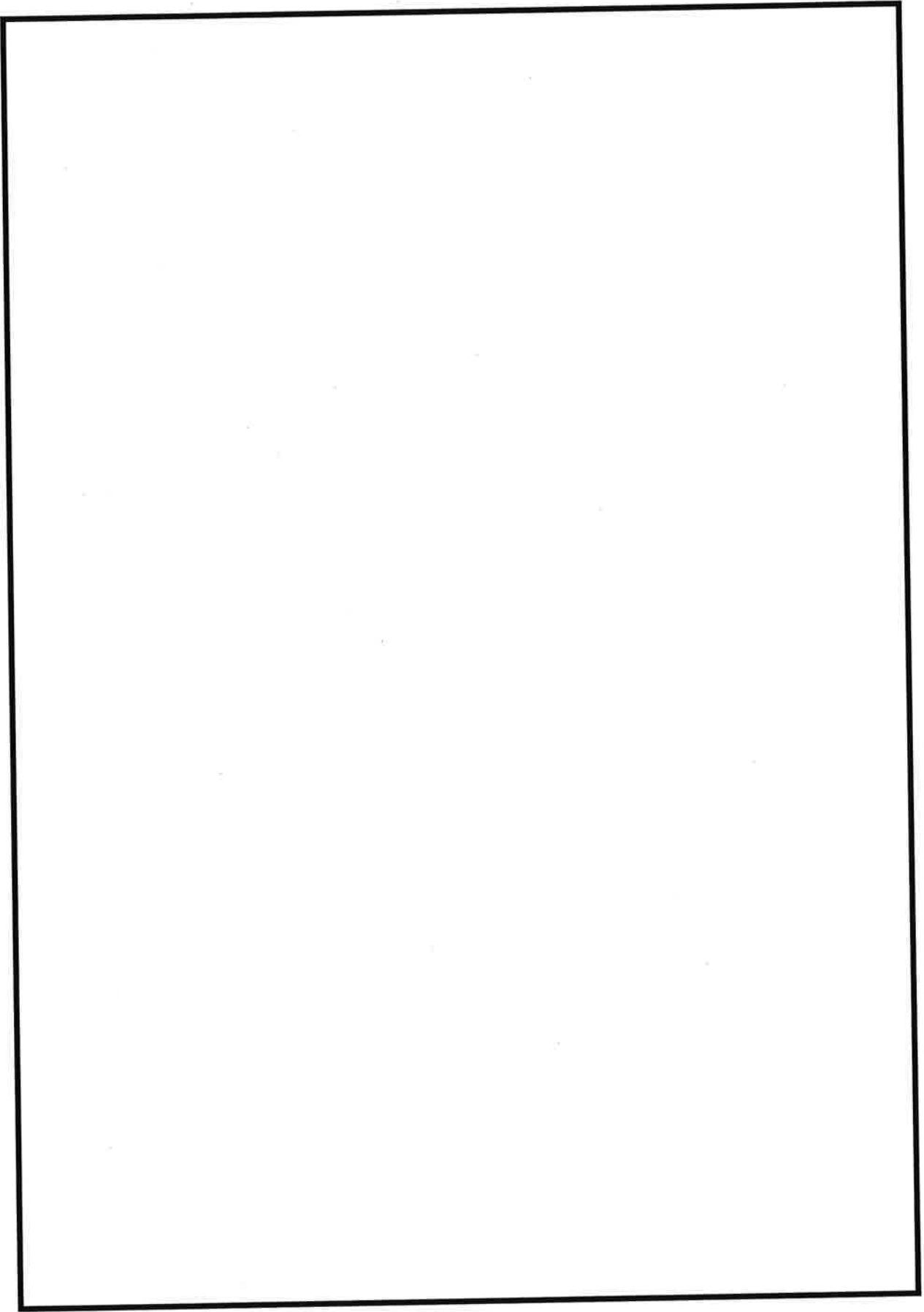
 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



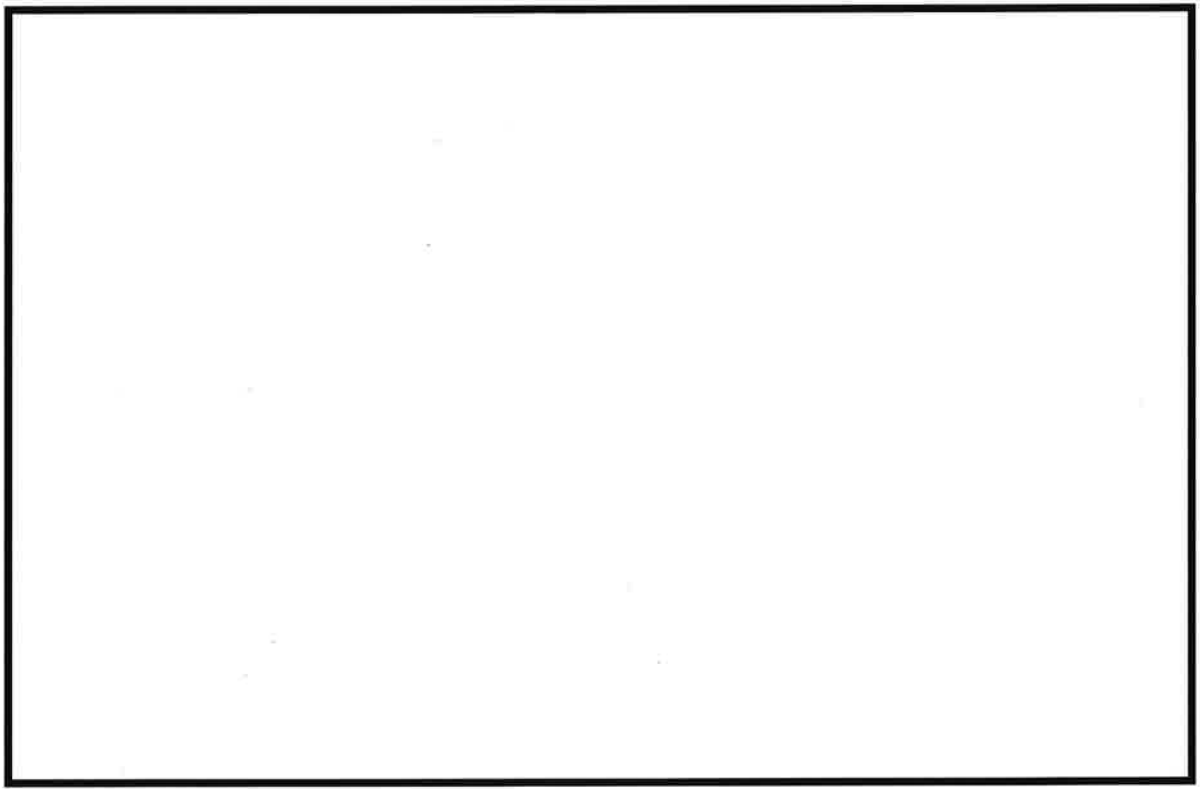
 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

追加点検結果

本文図 4.1「追加点検対象選定フロー」に基づき至近にて点検実施対象に選定された溶接線 19 箇所について、供用期間中検査の 1 段階検査と同じ超音波探傷検査を実施した結果を示す。

(1)追加点検の対象

検査対象箇所	溶接番号	
加圧器スプレイライン (A ループ) ①	FW-4	
	SW-5	
加圧器スプレイライン (A ループ) ②	SW-20	
	FW-21	
	FW-22	
	SW-23	
	FW-24	
加圧器スプレイライン (D ループ) ①	SW-5	
加圧器スプレイライン (D ループ) ②	SW-2	
	FW-3	
	FW-4	
	SW-5	
	FW-6	

検査対象箇所	溶接線番号	
加圧器スプレイライン	SW-10	
	FW-11	
	FW-28	
加圧器逃がし弁ライン	FW-3	
	SW-4	
	SW-19	

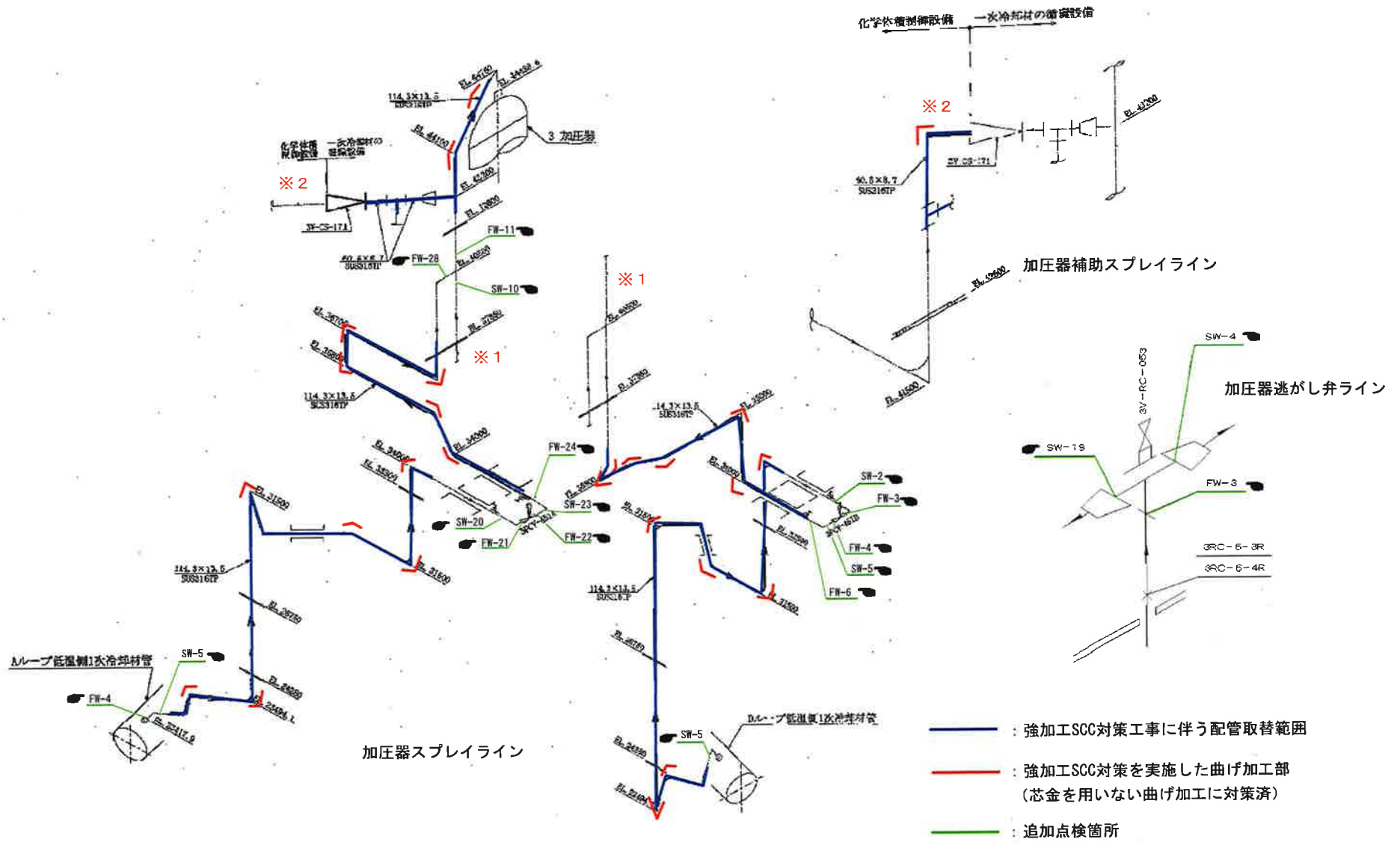
(2)追加点検の結果

追加点検では、いずれの溶接線でも有意な指示は認められなかった。点検結果記録を 3 例添付する。

検査対象箇所	溶接番号	有意な指示	結果添付
加圧器スプレイライン (A ループ) ①	FW-4	無	○
	SW-5	無	○
加圧器スプレイライン (A ループ) ②	SW-20	無	
	FW-21	無	
	FW-22	無	
	SW-23	無	
	FW-24	無	
加圧器スプレイライン (D ループ) ①	SW-5	無	○
加圧器スプレイライン (D ループ) ②	SW-2	無	
	FW-3	無	
	FW-4	無	
	SW-5	無	
	FW-6	無	
加圧器スプレイライン	SW-10	無	
	FW-11	無	
	FW-28	無	
加圧器逃がし弁ライン	FW-3	無	
	SW-4	無	
	SW-19	無	

以上

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



大飯3号機 強加工SCC（曲げ加工部）取替範囲

非破壊検査記録 (/)

(1) 検査の判定

項目番号	カテゴリ	機器名	検査の対象箇所	検査箇所
B9.11	B-J	配管	配管の同種金属溶接継手 (呼び径100A以上：周継手) 加圧器スプレイライン (Aループ)	FW-4 (H2-3911007)

検査方法		検査年月日	立会実績	結果	検査員	備考
体積検査	超音波探傷検査	年 月 日	有・無			
判定基準		添付-1(4/4)に記載				

非破壊検査記録 (/)

(2) 検査記録

検査年月日 年 月 日

助勢員 A

項目番号	カテゴリ	機器名	検査の対象箇所	検査箇所	
B9.11	B-J	配管	配管の同種金属溶接継手 (呼び径100A以上：周継手) 加圧器スプレイライン (Aループ)	FW-4 (H2-3911007)	
検査実施結果	検査方法		確認※	助勢員 A	備考
	体積検査	超音波探傷検査			
確認項目			添付-1(4/4)に記載		

※確認項目に対し異常がない場合は、「確認」欄に「レ」と記載する。

 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

超音波探傷検査 (UT) 記録

検査箇所 加圧器スプレイライン (Aループ)

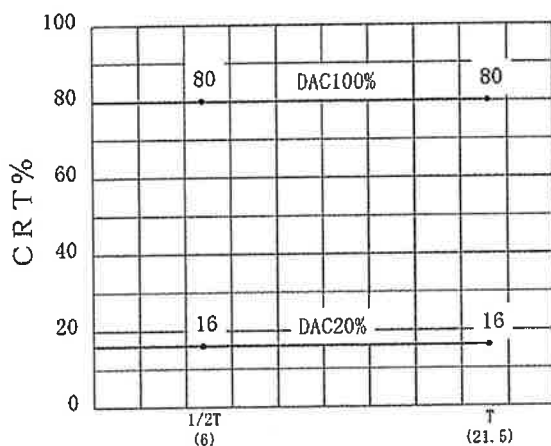
溶接線番号 FW-4 (H2-3911007)

距離-振幅補正曲線 (垂直 探触子)

Ser. 57462-05019

KON3.4-4B

横穴: $\Phi 2.4$



感 度
61.0dB

ビーム
路 程
(W)

フルスケール 25mm

横穴に対し音響隔離面を直交する方向で感度校正を行った。

1/2T



SUS316TP-S

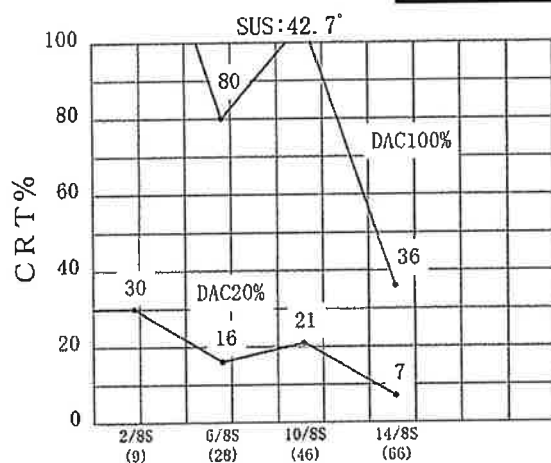
13.5

距離-振幅補正曲線 (45度 探触子)

Ser. 56921-57572

KON3.4-4B

横穴: $\Phi 2.4$



感 度
31.0dB

ビーム
路 程
(W)

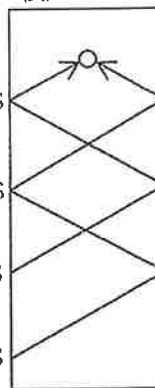
フルスケール 100mm

2/8S

6/8S

10/8S

14/8S



SUS316TP-S

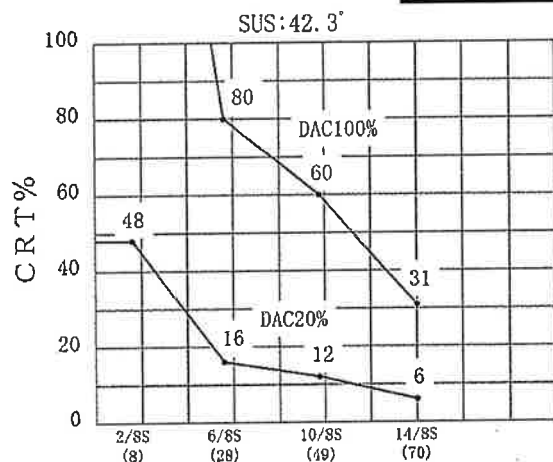
13.5

距離-振幅補正曲線 (45度 探触子)

Ser. 56921-9908

KON3.4-4B

横穴: $\Phi 2.4$



感 度
43.0dB

ビーム
路 程
(W)

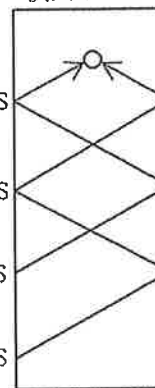
フルスケール 100mm

2/8S

6/8S

10/8S

14/8S



SUS316TP-S

13.5

枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

超音波探傷検査 (UT) 記録

検査箇所 加圧器スプレイライン (Aループ)

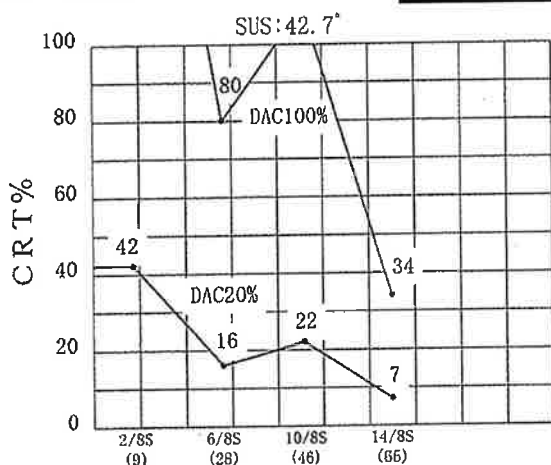
溶接線番号 FW-4 (H2-3911007)

距離-振幅補正曲線 (45度 探触子)

Ser. 676580

KON3. 4-4B

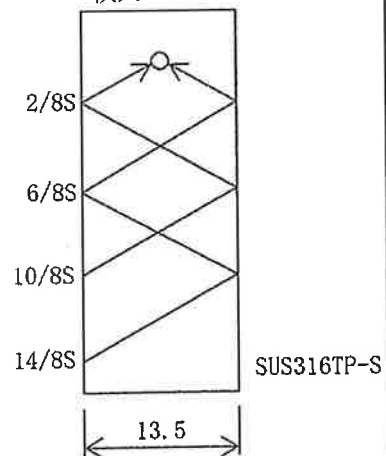
横穴: $\Phi 2.4$



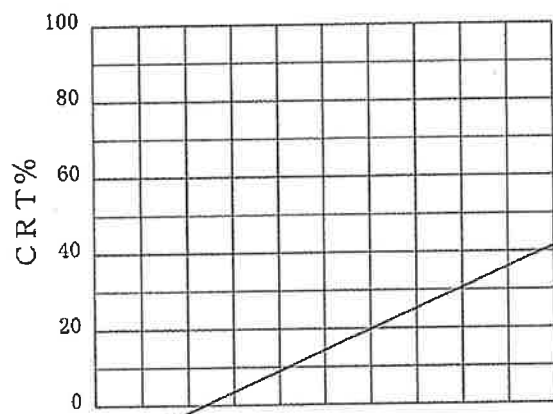
感 度
39.5dB

ビーム
路 程
(W)

フルスケール 100mm



距離-振幅補正曲線

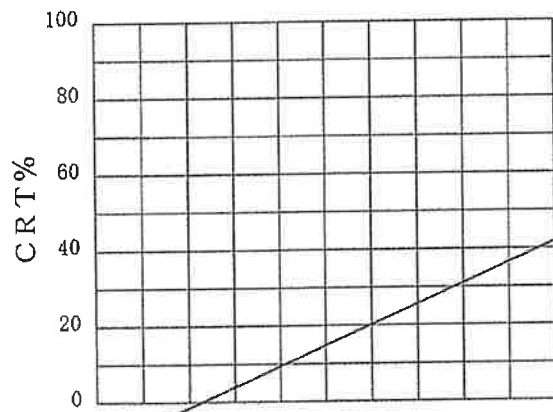


感 度

ビーム
路 程
(W)

フルスケール mm

距離-振幅補正曲線



感 度

ビーム
路 程
(W)

フルスケール mm

枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

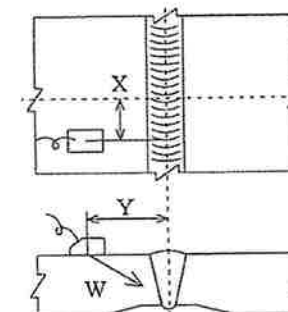
超音波探傷データシート a (配管-インディケーションの記録)

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

溶接線番号 FW-4 (H2-3911007)

上流側 管 台 下流側 エルボ

探傷角度 45° (直角)



	探傷サイド		ピーク指示部					DAC 20%		DAC 100%		備 考
	上流側	下流側	X (mm)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	
1	○		0° +12	13	21.0	36	35	全 周	360			裏波部*
2	○		30° +10	13	21.0	30	29	全 周	360			裏波部*
3	○		120° +15	13	21.0	32	31	全 周	360			裏波部*
4	○		180° +18	13	21.0	38	36	全 周	360			裏波部*
5	○		240° +20	13	20.0	56	52	全 周	360			裏波部*
6	○		330° +11	12	21.0	25	24	全 周	360			裏波部*
7	○		240° +14	26	38.0	30	32	全 周	360			外表面部
8		○	0° +15	12	22.0	38	38	240° +0 ~ 120° +0	240			裏波部*
9		○	30° +20	12	19.0	36	32	240° +0 ~ 120° +0	240			裏波部*
10		○	60° +17	13	21.0	34	33	240° +0 ~ 120° +0	240			裏波部*
11		○	330° +8	13	21.0	60	57	240° +0 ~ 120° +0	240			裏波部*

備考 * : 30° 毎の記録点間の最大エコー (ピーク) が前後の記録点のエコー高さを超える反射波を示す。

溶接線番号 FW-4 (H2-3911007)

45° (直角)

209

超音波探傷データシートb (配管-インディケーションの記録)

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

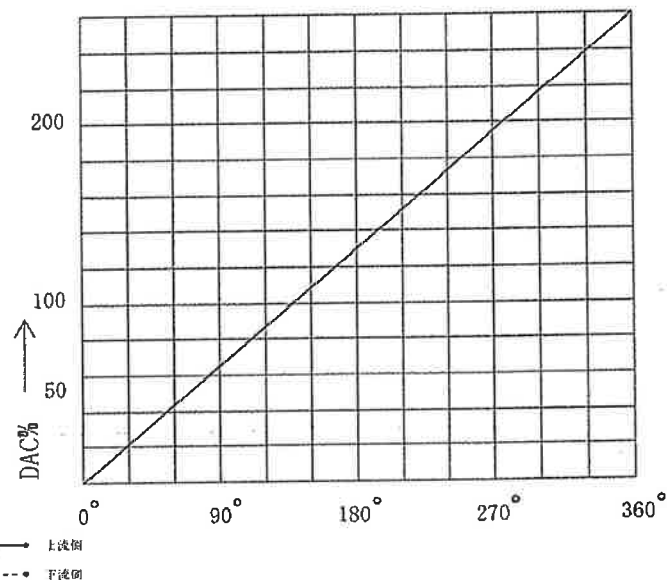
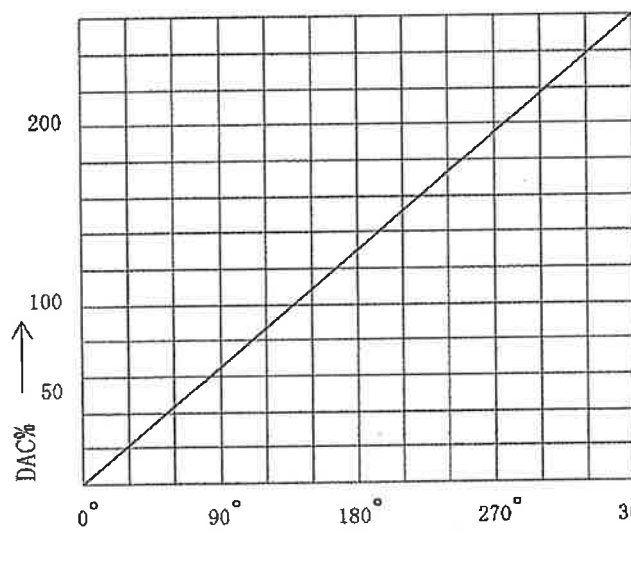
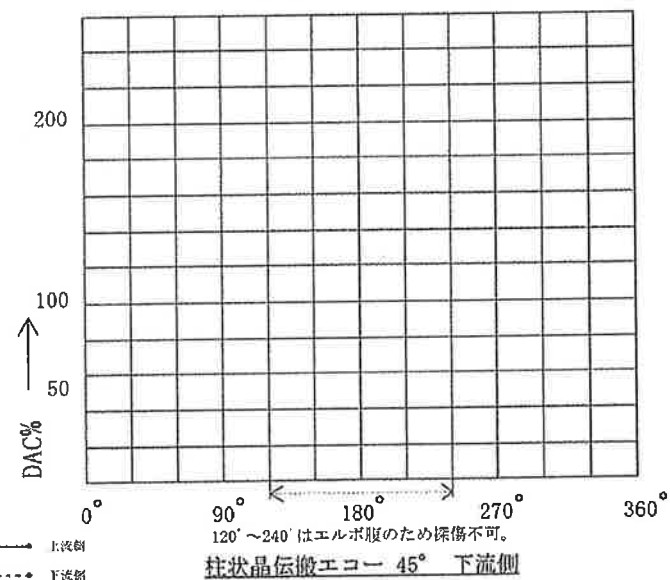
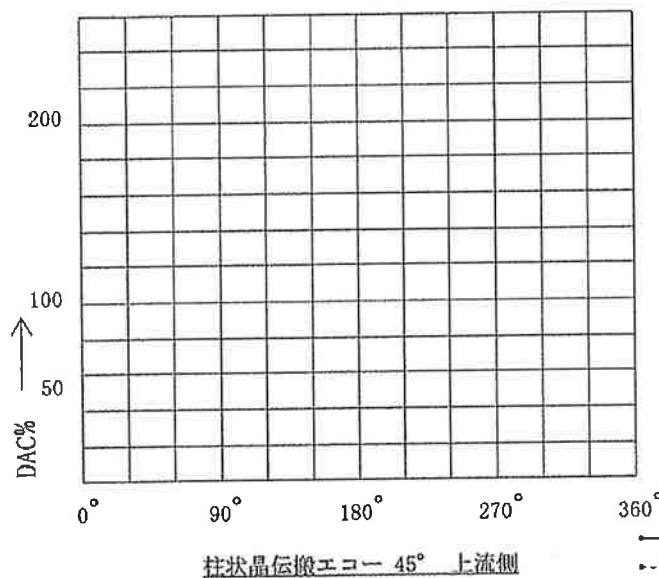
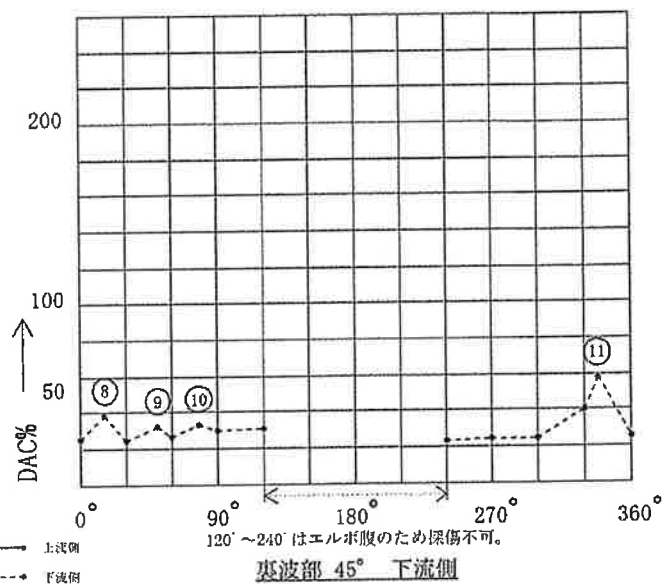
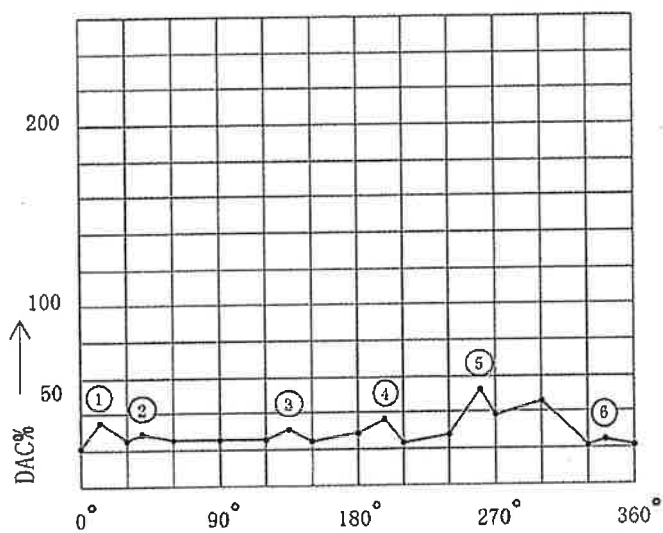
溶接線番号 FW-4 (H2-3911007)

探傷角度 45° (直角)

X位置	上 流 (管 台)								下 流 (エルボ)							
	裏波部				柱状晶伝搬エコー				裏波部				柱状晶伝搬エコー			
	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)
0°	12	20.0	22	21					11	21.0	26	25				
30°	13	21.0	26	25					13	22.0	24	24				
60°	13	21.0	26	25					13	20.0	28	26				
90°	14	21.0	26	25					13	22.0	30	30				
120°	13	21.0	26	25					11	18.0	36	31				
150°	13	21.0	25	24					—	—	—	—	—	—	—	—
180°	13	21.0	30	29					—	—	—	—	—	—	—	—
210°	13	20.0	25	23					—	—	—	—	—	—	—	—
240°	12	19.0	30	27					13	20.0	25	23				
270°	13	21.0	40	38					13	22.0	24	24				
300°	12	20.0	50	46					11	18.0	28	24				
330°	13	21.0	22	21					12	22.0	40	40				
					空白欄は隣接する30° 芯2点以上にまたがる反射波を認めず。				120° ~240° はエルボ腹のため探傷不可。				120° ~240° はエルボ腹のため探傷不可。 空白欄は隣接する30° 芯2点以上にまたがる反射波を認めず。			

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

溶接線番号 FW-4(H2-3911007)



インディケーションの位置

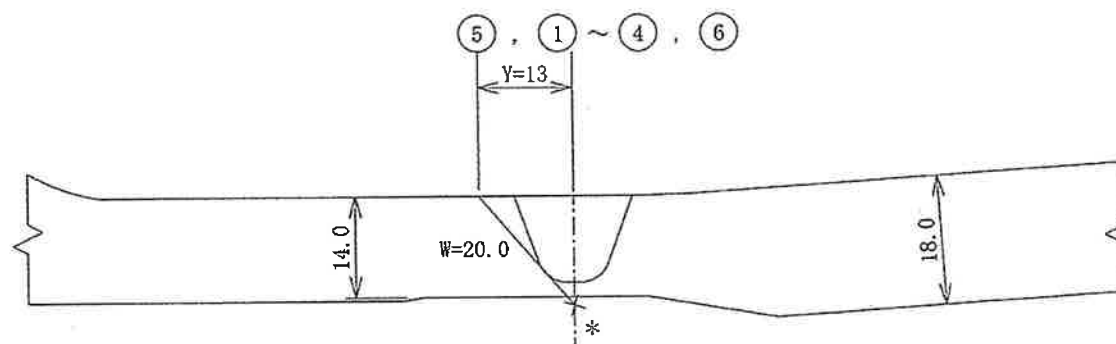
配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

溶接線番号 FW-4(H2-3911007)



縮尺 : 1/1

単位 : mm



上流側 (管 台)

下流側 (エルボ)

* : ビーム路程、Y 距離を計測し作図した結果、裏波部に位置する。

 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

インディケーションの位置

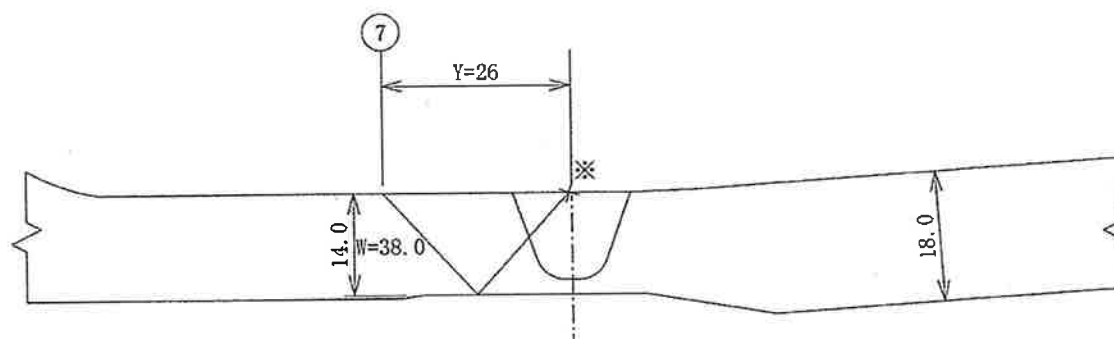
配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

溶接線番号 FW-4(H2-3911007)



縮尺 : 1/1

単位 : mm



上流側 (管 台)

下流側 (エルボ)

※ : ビームの到達点の波形の変化を指で確認。

 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

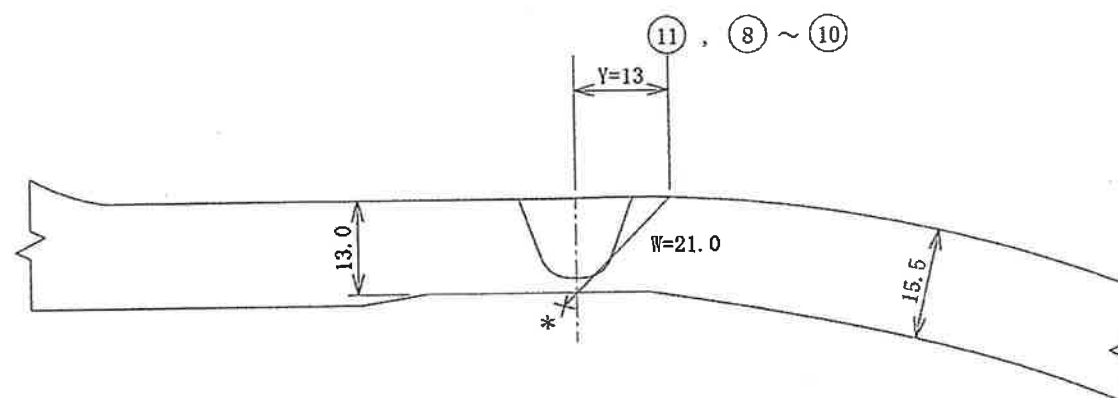
インディケーションの位置

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

溶接線番号 FW-4 (H2-3911007)

縮尺：1/1

単位：mm



上流側 (管 台)

下流側 (エルボ)

*：ビーム路程、Y距離を計測し作図した結果、裏波部に位置する。

：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

インディケーションの位置

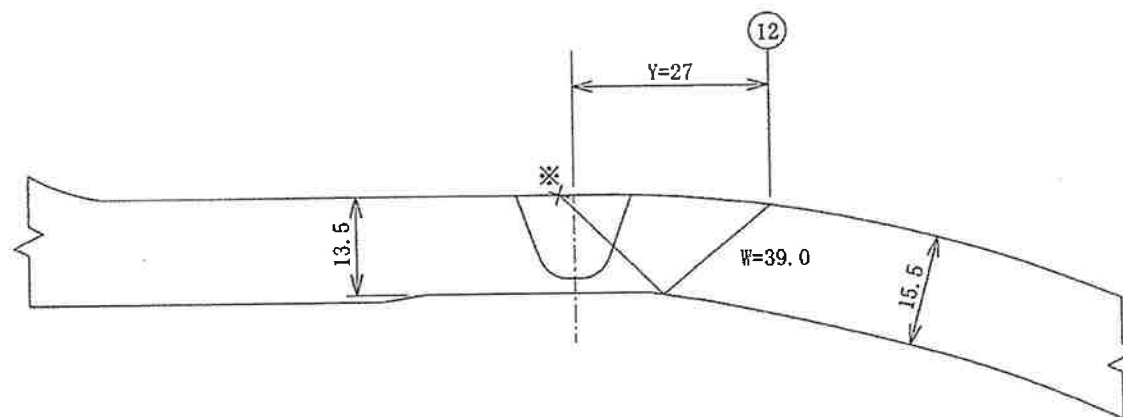
配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

溶接線番号 FW-4 (H2-3911007)



縮尺: 1/1

単位: mm



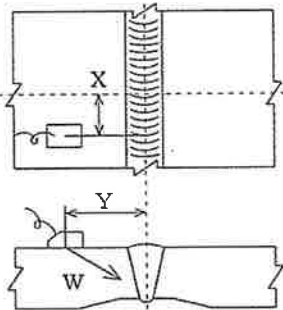
上流側 (管 台)

下流側 (エルボ)

※: ビームの到達点の液形の変化を指で確認。

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

超音波探傷データシート a (配管-インディケーションの記録)



配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ) 溶接線番号 FW-4 (H2-3911007)
上流側 管 台 下流側 エルボ 探傷角度 45° (小型探触子) (直角)

	探傷サイド		ピーク指示部					DAC 20%		DAC 100%		備 考
	上流側	下流側	X (mm)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	
1		○	180° -6	12	19.0	54	39	120° ~ 240° +0 ~ +0	120			裏波部*
2		○	210° +8	11	19.0	104	74	120° ~ 240° +0 ~ +0	120			裏波部*
3		○	210° -7	27	38.0	90	94	120° ~ 240° +0 ~ +0	120			外表面部
4		○	180° -5	0	15.0	120	72	120° ~ 240° +0 ~ +0	120			柱状晶伝搬エコー*
5		○	210° +18	0	15.0	148	88	120° ~ 240° +0 ~ +0	120			柱状晶伝搬エコー*
						以下	余白					

備考 * : 30° 毎の記録点間の最大エコー (ピーク) が前後の記録点のエコー高さを超える反射波を示す。

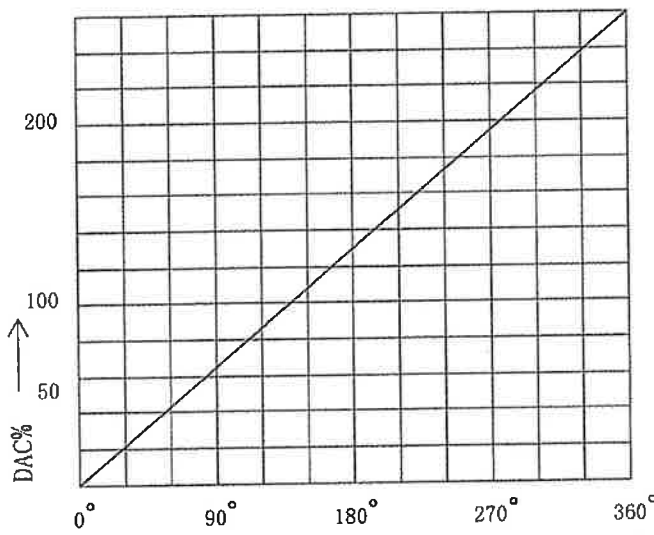
超音波探傷データシートb (配管-インディケーションの記録)

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ) 溶接線番号 FW-4 (H2-3911007) 探傷角度 45° (小型探触子) (直角)

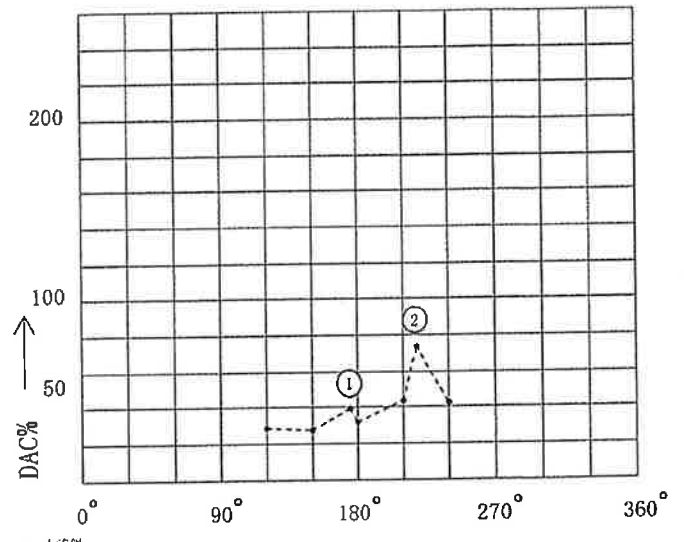
X位置	上 流 (管 台)								下 流 (エルボ)							
	裏波部				柱状晶伝搬エコー				裏波部				柱状晶伝搬エコー			
	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)
0°																
30°																
60°																
90°																
120°									11	19.0	40	29	0	15.0	70	42
150°									12	19.0	38	27	0	15.0	55	33
180°									13	19.0	45	32	0	16.0	96	60
210°									13	18.0	64	44	0	16.0	58	36
240°									12	18.0	62	42	0	15.0	62	37
270°																
300°																
330°																

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

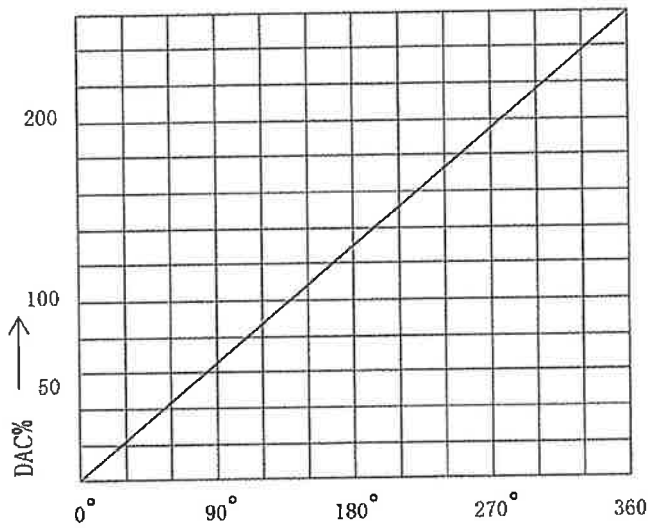
溶接線番号 FW-4 (H2-3911007) (小型探触子)



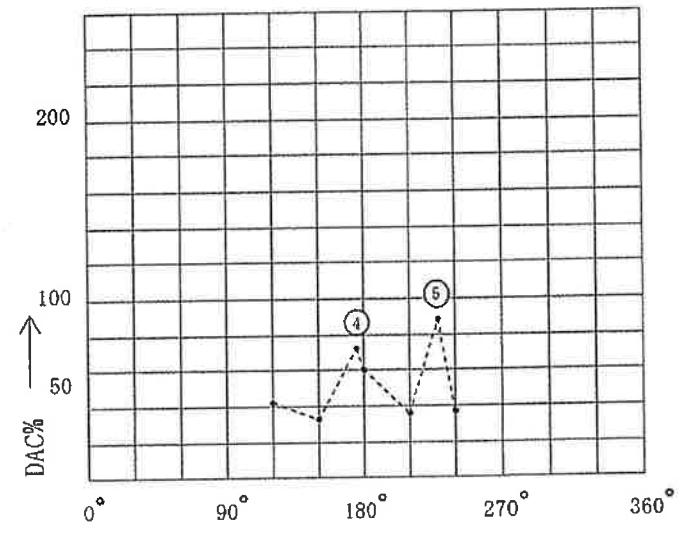
裏波部 45° 上流側



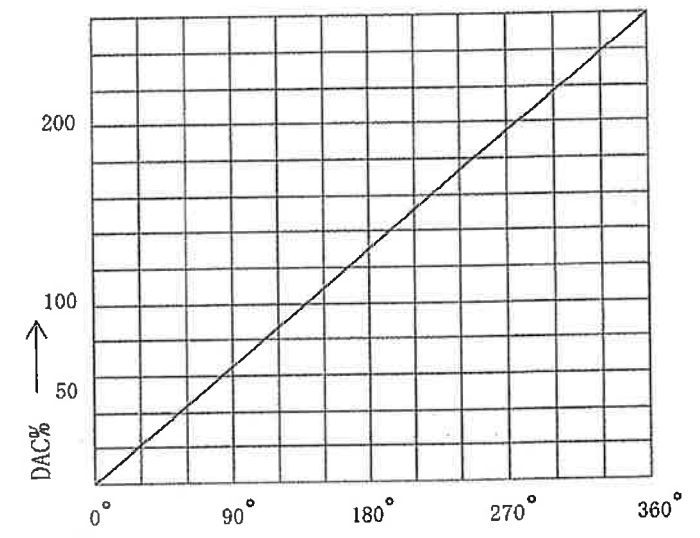
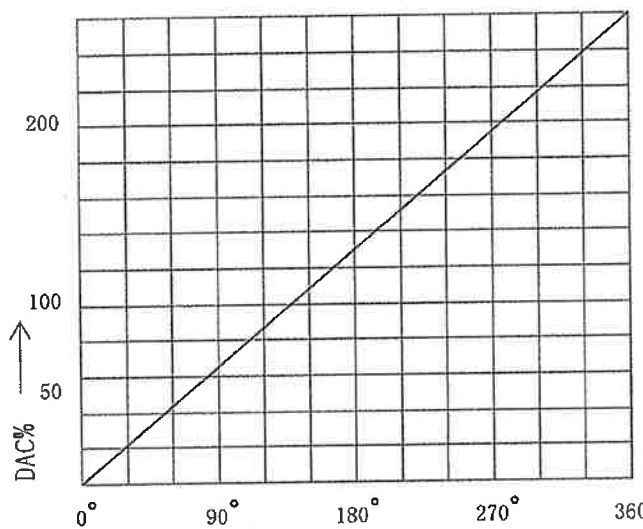
裏波部 45° 下流側



柱状晶伝搬エコー 45° 上流側



柱状晶伝搬エコー 45° 下流側



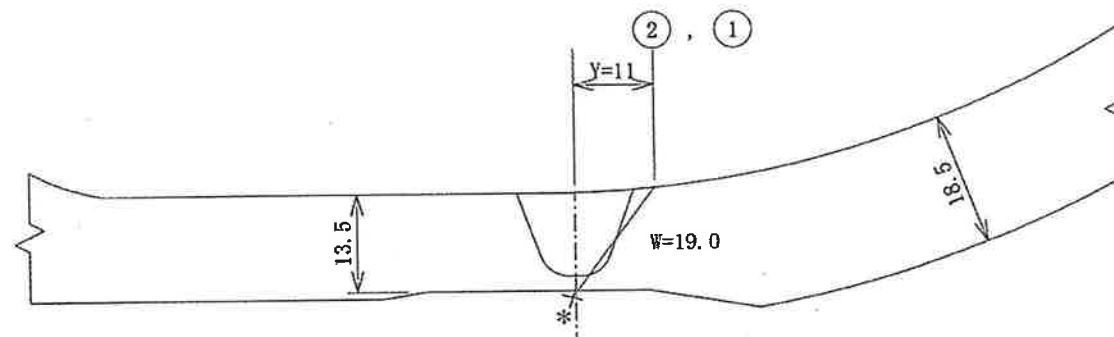
インディケーションの位置

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

溶接線番号 FW-4 (H2-3911007)

縮尺 : 1/1

単位 : mm



上流側 (管 台)

下流側 (エルボ)

* : ビーム路程、Y 距離を計測し作図した結果、裏波部に位置する。

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

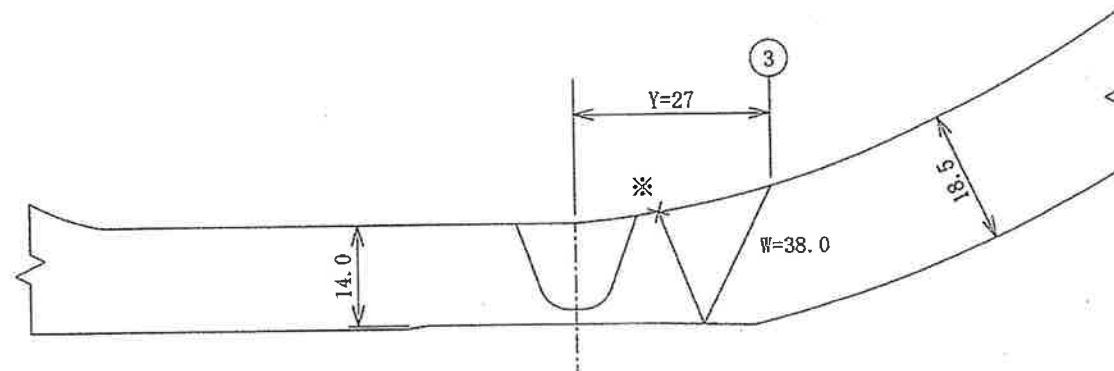
インディケーションの位置

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

溶接線番号 FW-4(H2-3911007)

縮尺: 1/1

単位: mm



上流側 (管 台)

下流側 (エルボ)

※: ビームの到達点の波形の変化を指で確認。

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

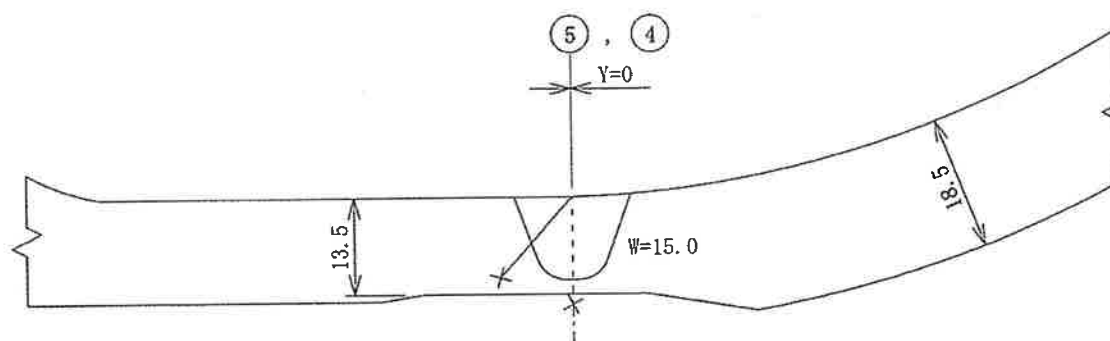
インディケーションの位置

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

溶接線番号 FW-4 (H2-3911007)

縮尺 : 1/1

単位 : mm



上流側 (管 台)

下流側 (エルボ)

--- : 破線の様に進んだと思われる。

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

非 破 壊 検 査 記 録 (/)

(1) 検査の判定

項目番号	カテゴリ	機 器 名	検 査 の 対 象 箇 所	検 査 箇 所
B9.11	B-J	配管	配管の同種金属溶接継手 (呼び径100A以上：周継手) 加圧器スプレイライン (Aループ)	SW-5 (H2-3911007)

検 査 方 法		検 査 年 月 日	立会 実績	結 果	検 査 員	備 考
体 積 検 査	超音波 探傷検査	年 月 日	有・無			
判 定 基 準		添付－1(4/4)に記載				

非破壊検査記録 (/)

(2) 検査記録

検査年月日 年 月 日

助勢員 A

項目番号	カテゴリ	機器名	検査の対象箇所	検査箇所
B9.11	B-J	配管	配管の同種金属溶接継手 (呼び径100A以上：周継手) 加圧器スプレイライン (Aループ)	SW-5 (H2-3911007)

--	--	--	--	--

検査実施結果	検査方法		確認※	助勢員 A	備考
	体積検査	超音波探傷検査			
確認項目			添付-1(4/4)に記載		

--	--	--	--	--	--

※確認項目に対し異常がない場合は、「確認」欄に「レ」と記載する。

 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

超音波探傷検査 (UT) 記録

検査箇所 加圧器スプレイライン (Aループ)

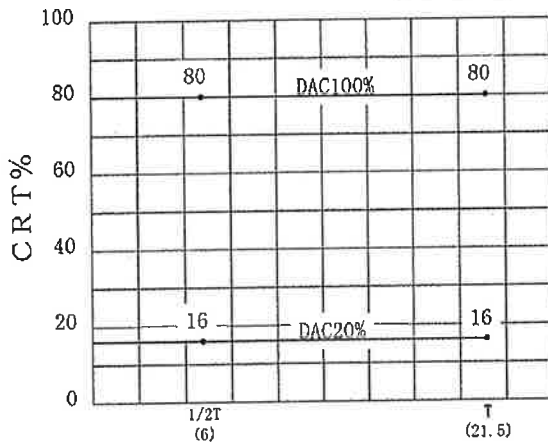
溶接線番号 SW-5 (H2-3911007)

距離-振幅補正曲線 (垂直 探触子)

Ser. 57462-05181

KON3. 4-4B

横穴: $\Phi 2.4$

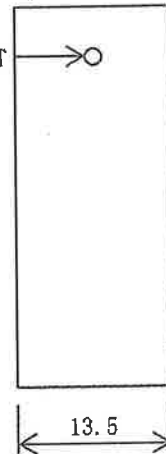


感 度
52.0dB

ビーム
路 程
(W)

フルスケール 25mm

1/2T



SUS316TP-S

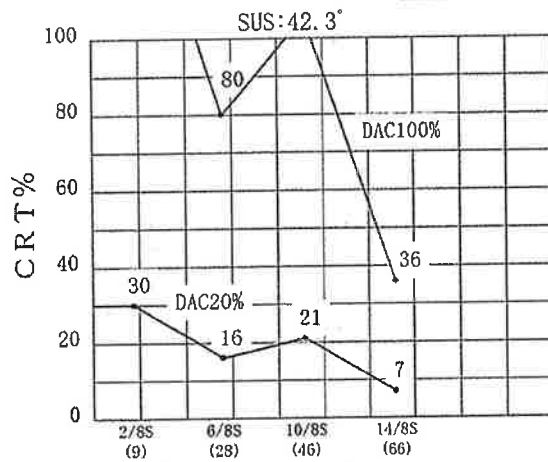
横穴に対し音響隔離面を直交する方向で感度校正を行った。

距離-振幅補正曲線 (45度 探触子)

Ser. 56921-04624

KON3. 4-4B

横穴: $\Phi 2.4$



感 度
36.5dB

ビーム
路 程
(W)

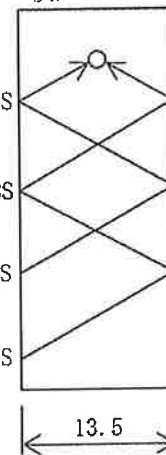
フルスケール 100mm

2/8S

6/8S

10/8S

14/8S



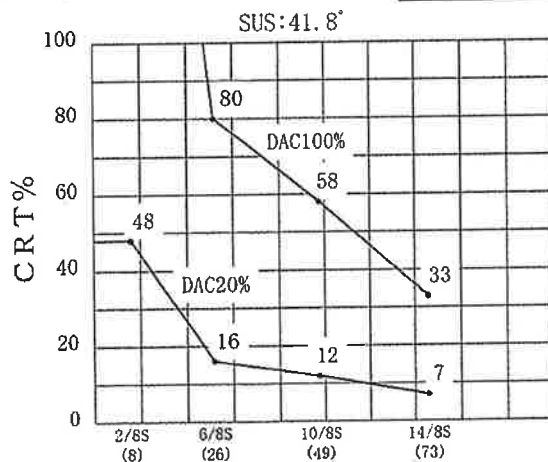
SUS316TP-S

距離-振幅補正曲線 (45度 探触子)

Ser. 56921-04627

KON3. 4-4B

横穴: $\Phi 2.4$



感 度
40.0dB

ビーム
路 程
(W)

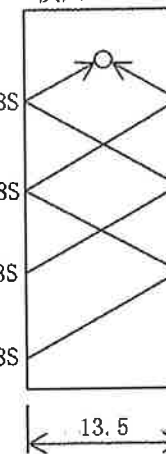
フルスケール 100mm

2/8S

6/8S

10/8S

14/8S



SUS316TP-S

枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

超音波探傷検査 (UT) 記録

検査箇所 加圧器スプレイライン (Aループ)

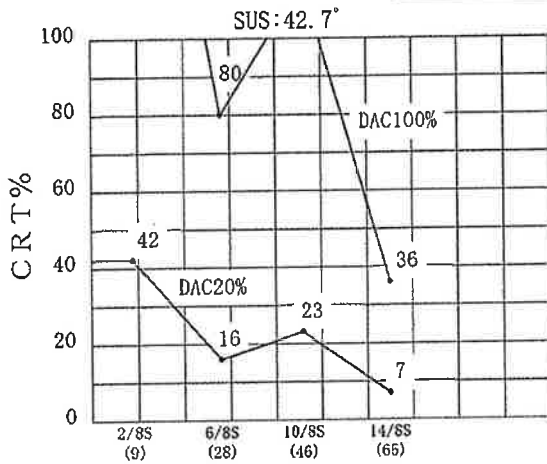
溶接線番号 SW-5 (H2-3911007)

距離-振幅補正曲線 (45度 探触子)

Ser. 697618

KON3. 4-4B

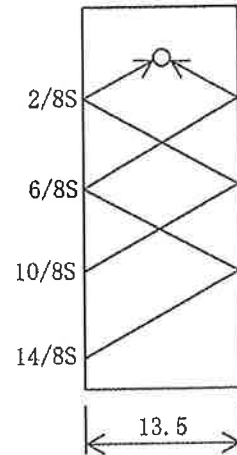
横穴: $\Phi 2.4$



感 度
40.0dB

ビーム
路 程
(W)

フルスケール 100mm



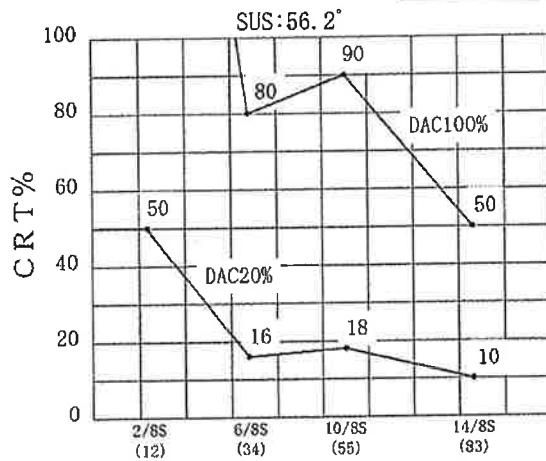
SUS316TP-S

距離-振幅補正曲線 (60度 探触子)

Ser. 56922-03404

KON3. 4-4B

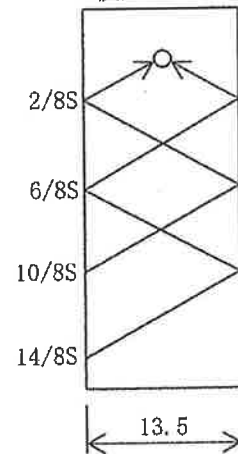
横穴: $\Phi 2.4$



感 度
47.0dB

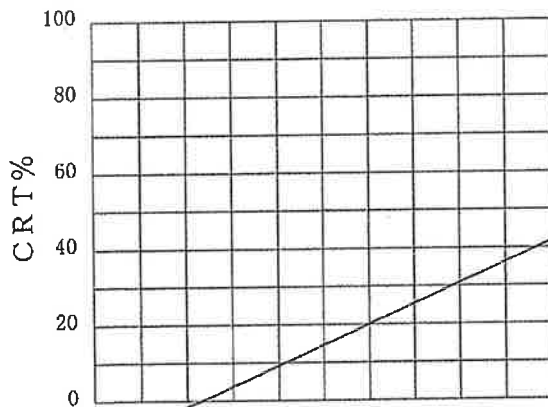
ビーム
路 程
(W)

フルスケール 100mm



SUS316TP-S

距離-振幅補正曲線



感 度

ビーム
路 程
(W)

フルスケール mm

□: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

超音波探傷データシート a (配管—インディケーションの記録)

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911007)

上流側

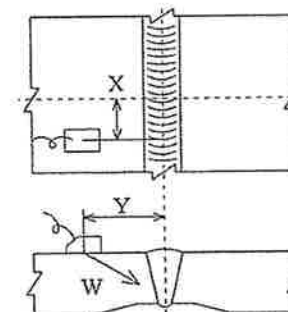
エルボ

下流側

パイプ

探傷角度

45° (直角)



	探傷サイド		ピーク指示部					DAC 20%		DAC 100%		備考
	上流側	下流側	X (mm)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	
1	○		30° -3	13	20.0	75	69	240° ~ 120° +0 ~ +0	240			裏波部*
2	○		60° +8	12	19.0	40	36	240° ~ 120° +0 ~ +0	240			裏波部*
3	○		90° +1	11	19.0	40	36	240° ~ 120° +0 ~ +0	240			裏波部*
4	○		240° +17	12	20.0	61	56	240° ~ 120° +0 ~ +0	240			裏波部*
5	○		300° -7	13	20.0	32	30	240° ~ 120° +0 ~ +0	240			裏波部*
6	○		300° +11	13	22.0	30	30	240° ~ 120° +0 ~ +0	240			裏波部*
7	○		330° +20	13	21.0	40	38	240° ~ 120° +0 ~ +0	240			裏波部*
8	○		300° +20	25	34.0	30	34	240° ~ 120° +0 ~ +0	240			外表面部
9		○	30° -5	12	21.0	120	114	全周	360	30° ~ 30° -6 ~ -4	2	裏波部*
10		○	60° +9	13	20.0	50	46	全周	360			裏波部*
11		○	150° -15	13	20.0	55	51	全周	360			裏波部*

備考 * : 30° 毎の記録点間の最大エコー (ピーク) が前後の記録点のエコー高さを超える反射波を示す。

超音波探傷データシート a (配管—インディケーションの記録)

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911007)

上流側

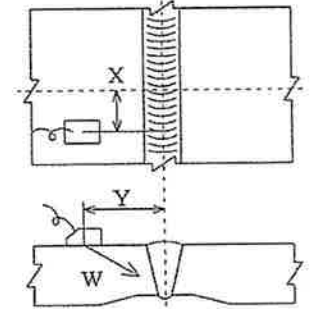
エルボ

下流側

パイプ

探傷角度

45° (直角)



	探傷サイド		ピーク指示部					DAC 20%		DAC 100%		備考
	上流側	下流側	X (mm)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	
12		○	150° +17	13	21.0	30	29	全周	360			裏波部*
13		○	210° -4	13	21.0	35	34	全周	360			裏波部*
14		○	210° +5	12	21.0	50	48	全周	360			裏波部*
15		○	270° -12	13	19.0	38	34	全周	360			裏波部*
16		○	300° -9	13	21.0	32	31	全周	360			裏波部*
17		○	330° -5	12	20.0	52	48	全周	360			裏波部*
18		○	330° +22	12	20.0	48	44	全周	360			裏波部*
19		○	30° -5	24	34.0	30	34	全周	360			外表面部
						以下	余白					

備考 * : 30° 毎の記録点間の最大エコー (ピーク) が前後の記録点のエコー高さを超える反射波を示す。

超音波探傷データシートb (配管—インディケーションの記録)

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911007)

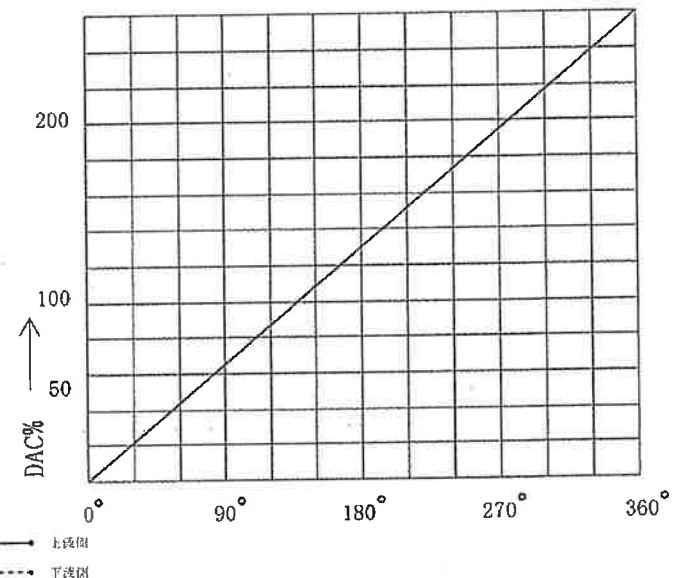
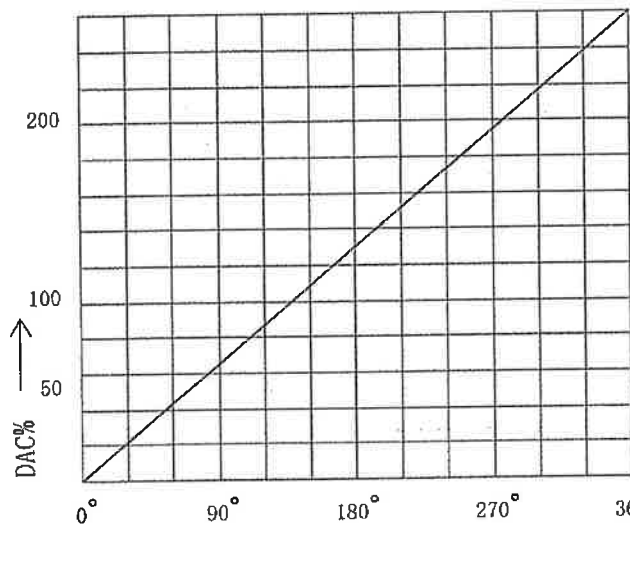
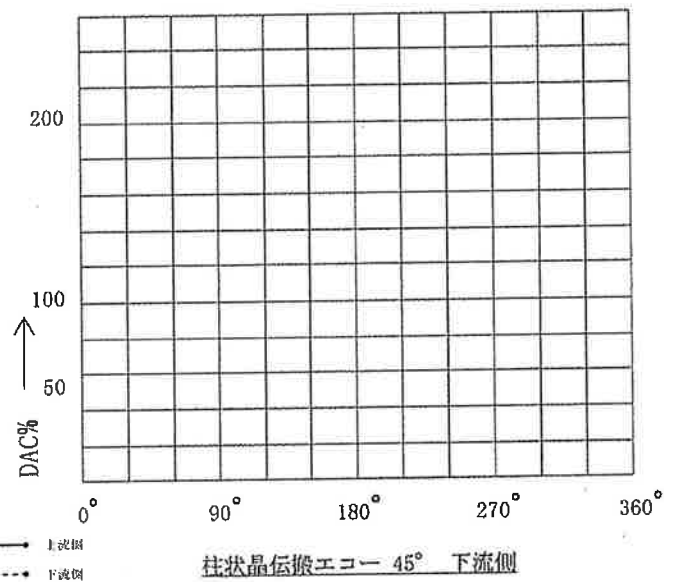
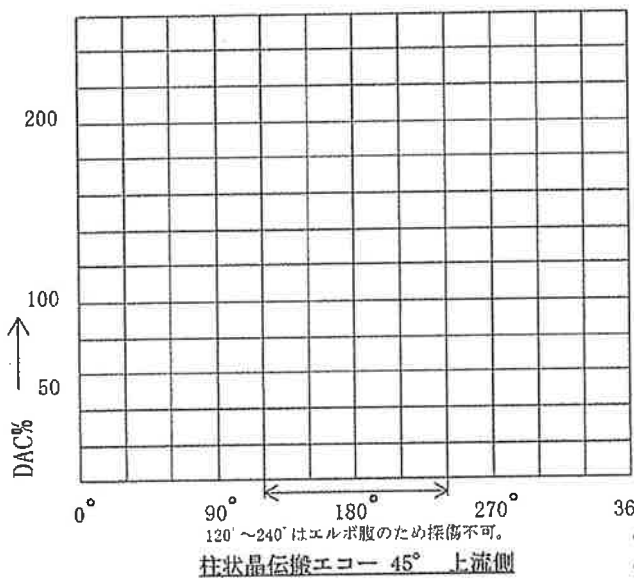
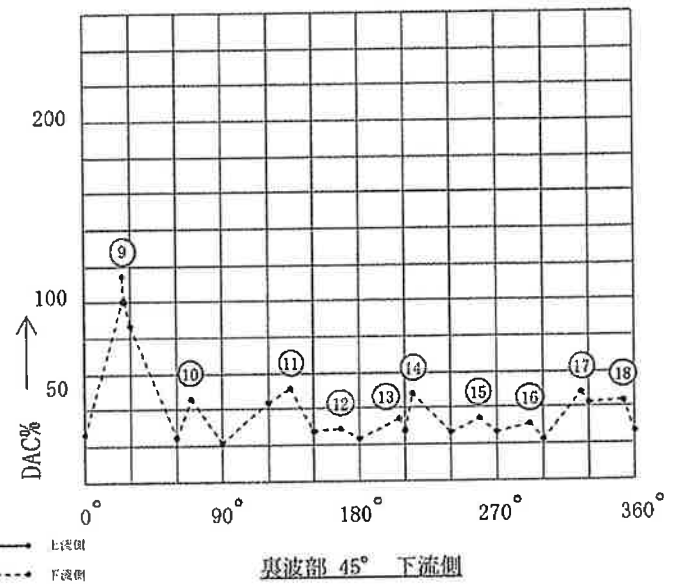
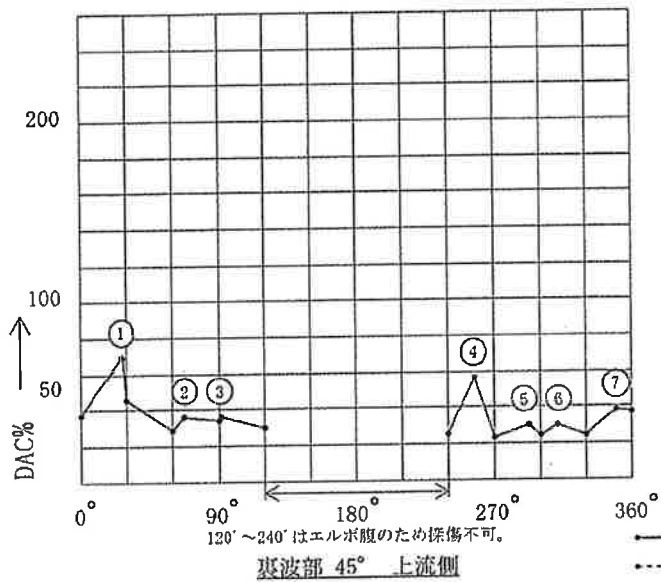
探傷角度 45° (直角)

X位置	上 流 (エルボ)								下 流 (パイプ)							
	裏波部				柱状晶伝搬エコー				裏波部				柱状晶伝搬エコー			
	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)
0°	13	22.0	37	37					12	20.0	28	26				
30°	11	20.0	50	46					12	21.0	90	86				
60°	12	21.0	30	29					12	20.0	26	24				
90°	12	19.0	38	34					12	20.0	22	21				
120°	12	20.0	32	30					12	20.0	48	44				
150°	—	—	—	—	—	—	—	—	13	21.0	28	27				
180°	—	—	—	—	—	—	—	—	13	21.0	24	23				
210°	—	—	—	—	—	—	—	—	13	20.0	30	28				
240°	12	21.0	26	25					13	20.0	28	26				
270°	11	20.0	25	23					13	19.0	29	26				
300°	14	21.0	25	24					13	20.0	23	22				
330°	13	21.0	25	24					12	21.0	45	43				
	120°～240° はエルボ腹のため探傷不可。				120°～240° はエルボ腹のため探傷不可。 空白欄は隣接する30° 芯2点以上にまたがる 反射波を認めず。								空白欄は隣接する30° 芯2点以上にまたがる 反射波を認めず。			

超音波探傷データシート c (配管—インディケーションのマップ)

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911007)



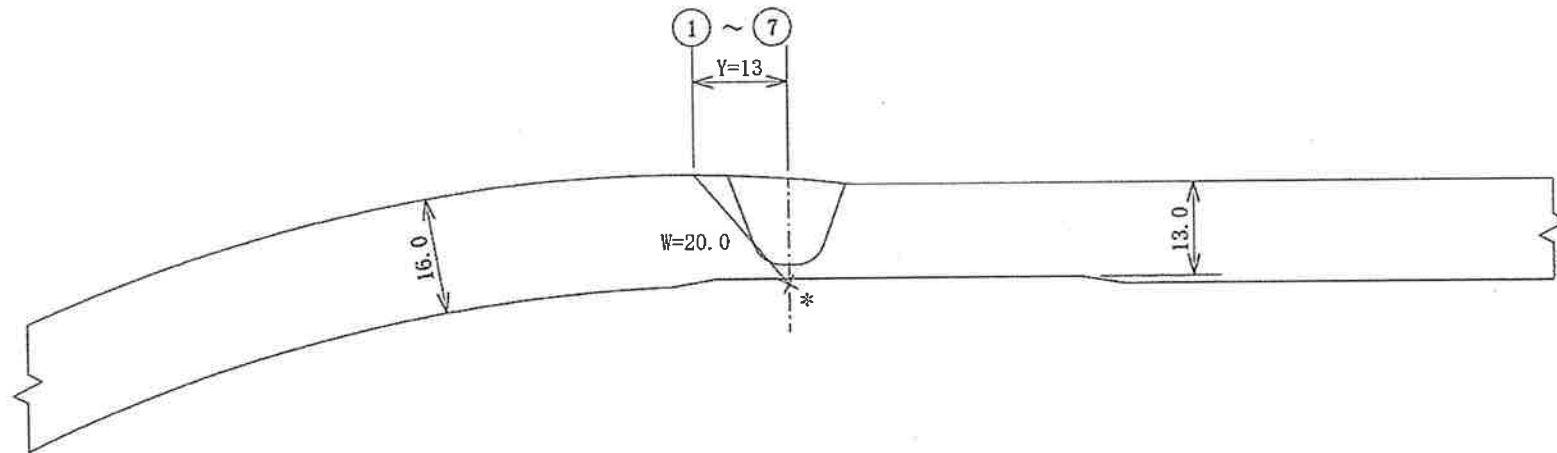
インディケーションの位置

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911007)

縮尺 : 1/1

単位 : mm



上流側 (エルボ)

下流側 (パイプ)

* : ビーム路程、Y距離を計測し作図した結果、裏波部に位置する。

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

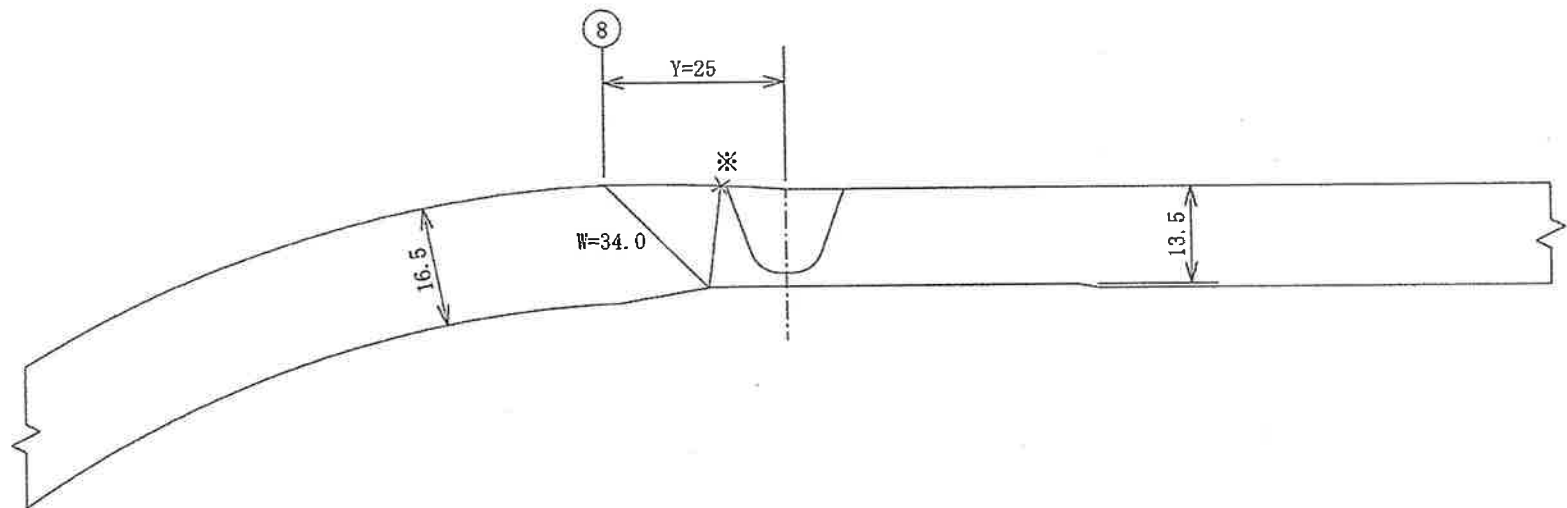
インディケーションの位置

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911007)

縮尺 : 1/1

単位 : mm



上流側 (エルボ)

下流側 (パイプ)

※ : ビームの到達点の波形の変化を指で確認。

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

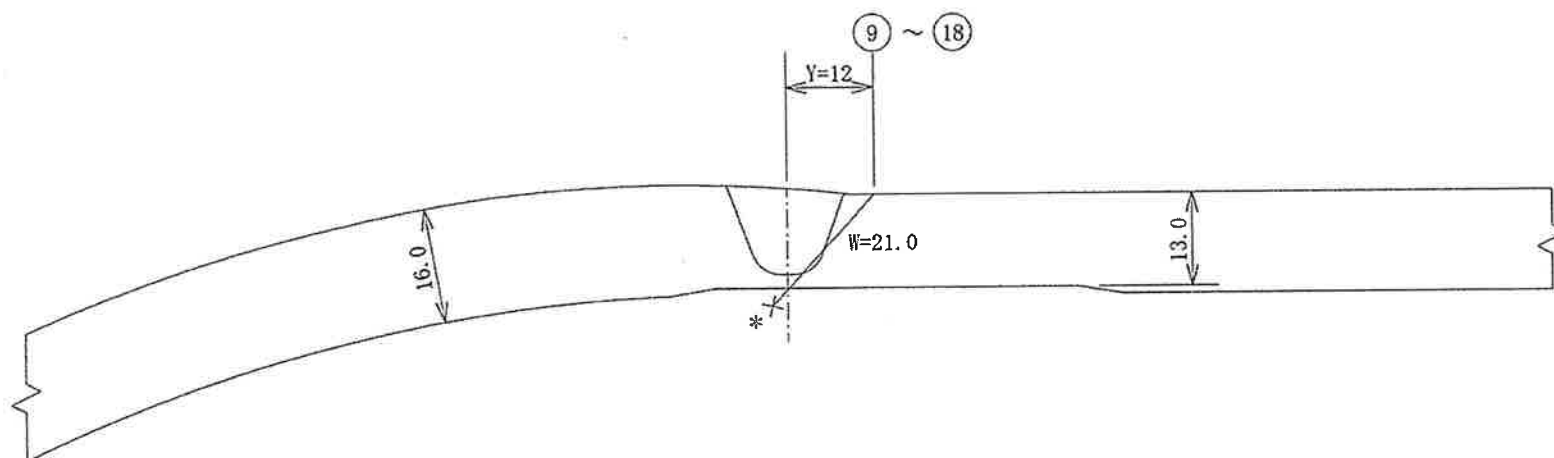
インディケーションの位置

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911007)

縮尺 : 1/1

単位 : mm



上流側 (エルボ)

下流側 (パイプ)

* : ビーム路程、Y距離を計測し作図した結果、裏波部に位置する。

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

インディケーションの位置

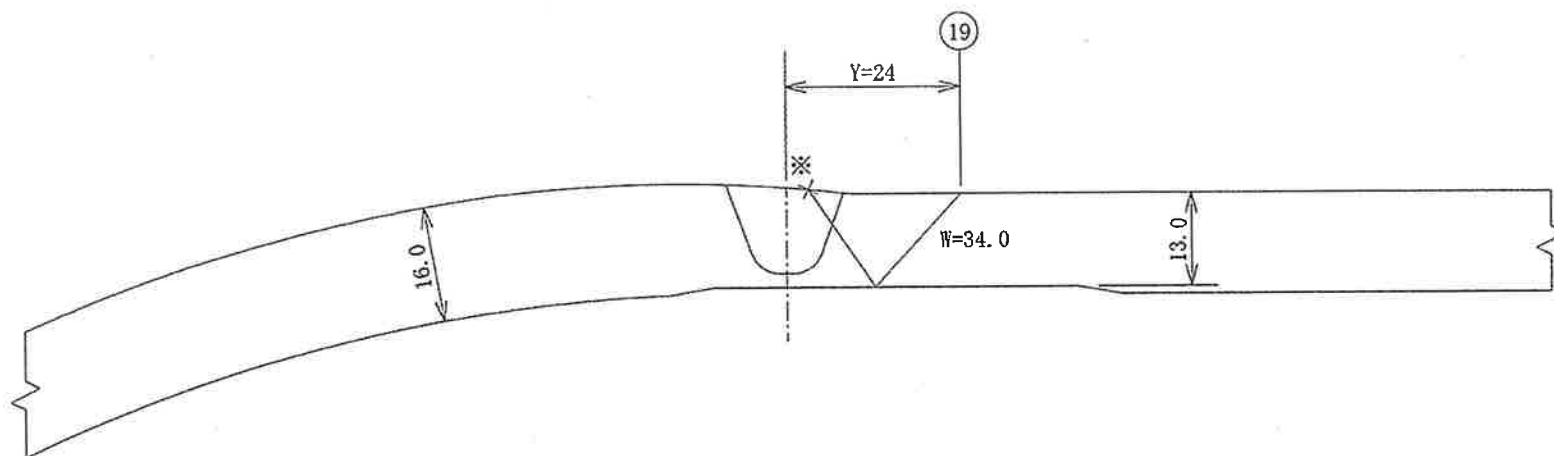
配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911007)



縮尺 : 1/1

単位 : mm



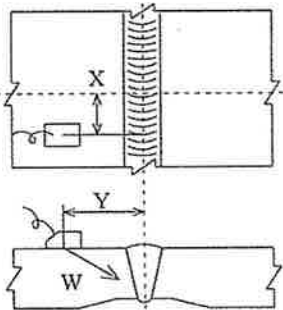
上流側 (エルボ)

下流側 (パイプ)

※ : ビームの到達点の波形の変化を指で確認。

 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

超音波探傷データシート a (配管—インディケーションの記録)



配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ) 溶接線番号 SW-5 (H2-3911007)
上流側 エルボ 下流側 パイプ 探傷角度 45° (小型探触子) (直角)

	探傷サイド		ピーク指示部					DAC 20%		DAC 100%		備考
	上流側	下流側	X (mm)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	
1	○		120° +16	12	22.0	46	38	120° ~ 240° +0 ~ +0	120			裏波部*
2	○		150° +6	12	21.0	35	28	120° ~ 240° +0 ~ +0	120			裏波部*
3	○		210° -5	11	20.0	85	64	120° ~ 240° +0 ~ +0	120			裏波部*
4	○		240° -11	11	20.0	78	58	120° ~ 240° +0 ~ +0	120			裏波部*
5	○		180° +3	18	36.0	52	55	120° ~ 240° +0 ~ +0	120			外表面部
						以下	余白					

備考 * : 30° 毎の記録点間の最大エコー (ピーク) が前後の記録点のエコー高さを超える反射波を示す。

超音波探傷データシートb (配管—インディケーションの記録)

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911007)

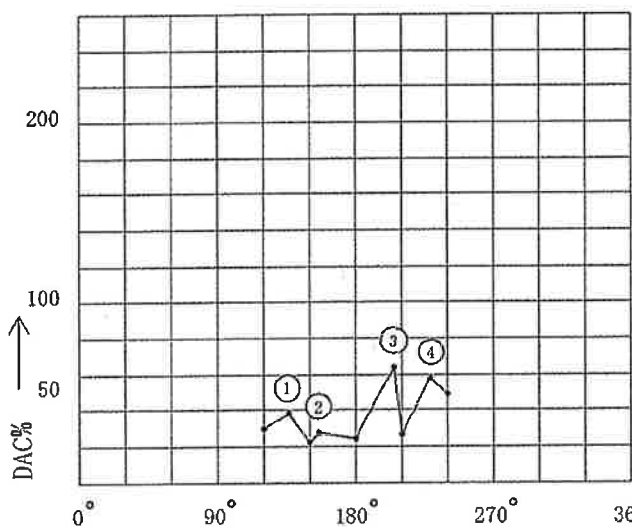
探傷角度 45° (小型探触子) (直角)

X位置	上 流 (エルボ)								下 流 (パイプ)							
	裏波部				柱状晶伝搬エコー				裏波部				柱状晶伝搬エコー			
	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)
0°																
30°																
60°																
90°																
120°	11	20.0	40	30												
150°	12	22.0	26	22												
180°	11	21.0	30	24												
210°	11	20.0	35	26												
240°	12	20.0	65	49												
270°																
300°																
330°																
					空白欄は隣接する30° 芯2点以上にまたがる 反射波を認めず。											

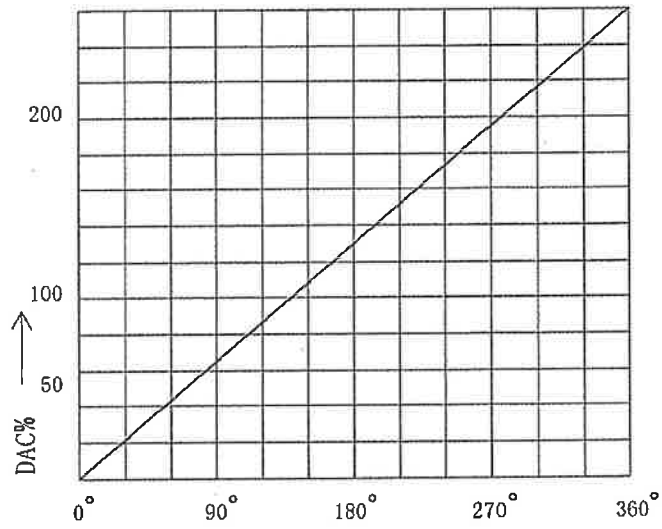
超音波探傷データシートc (配管-インディケーションのマップ)

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

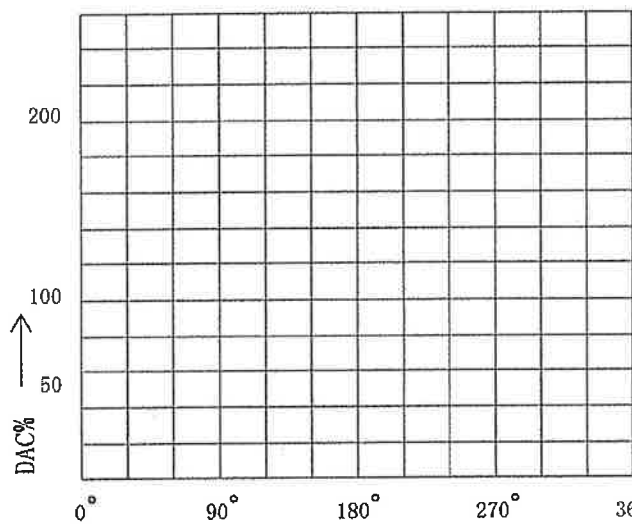
溶接線番号 SW-5 (H2-3911007) (小型探触子)



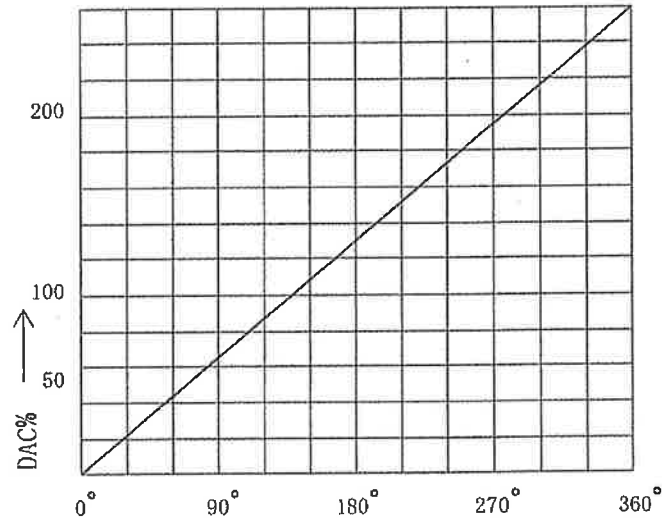
裏波部 45° 上流側



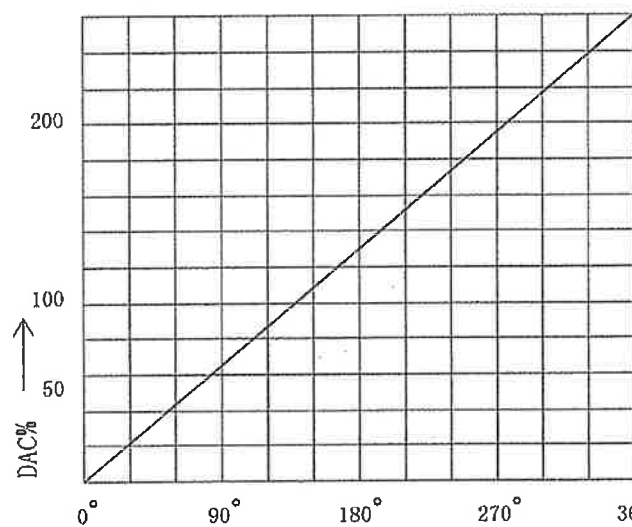
裏波部 45° 下流側



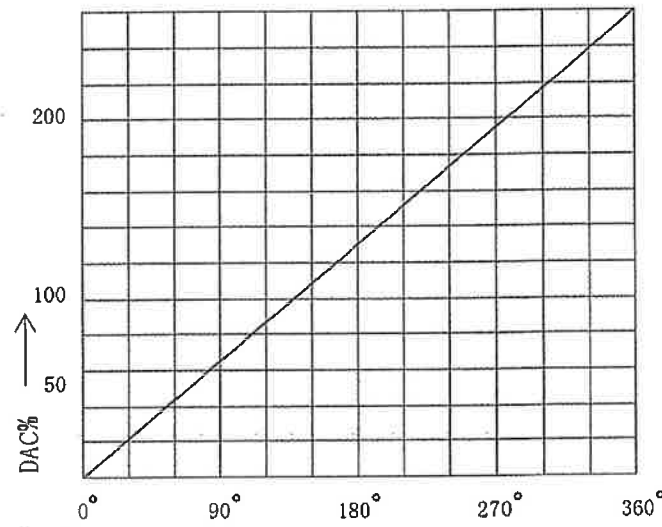
柱状晶伝搬エコー 45° 上流側



柱状晶伝搬エコー 45° 下流側



上流側
下流側

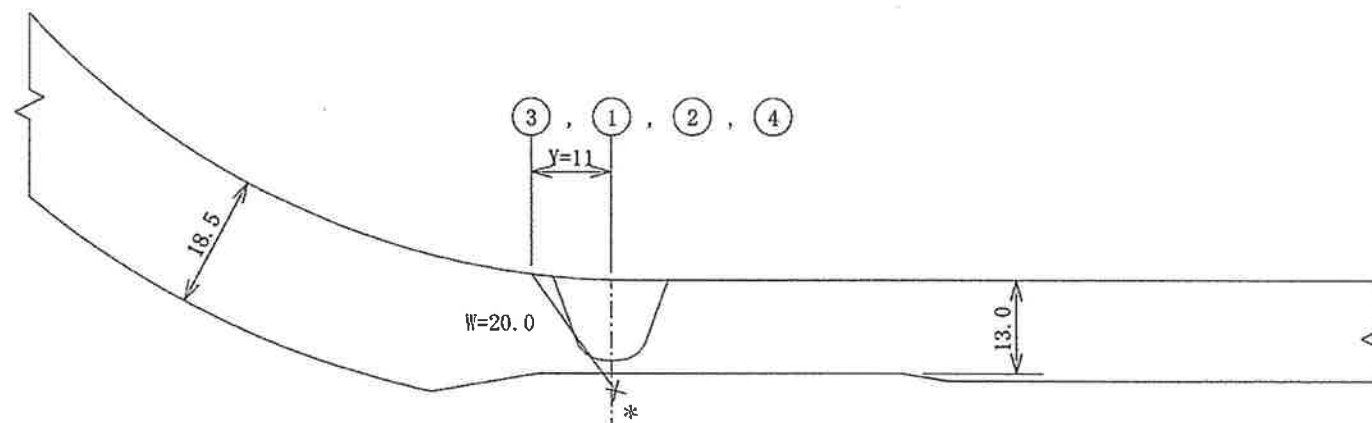


配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

溶接線番号 SW-5(H2-3911007)

縮尺：1/1

單位：mm



上流側 (エルボ)

下流側 (パイプ)

*：ビーム路程、Y距離を計測し作図した結果、裏波部に位置する。

□：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

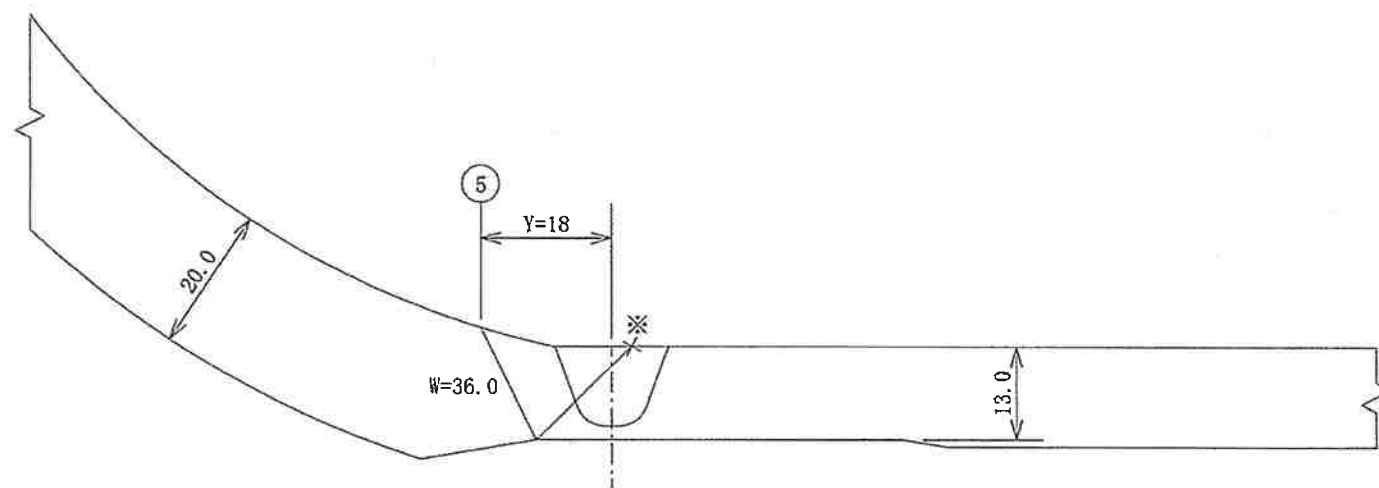
インディケーションの位置

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

縮尺 : 1/1

単位 : mm

溶接線番号 SW-5 (H2-3911007)



上流側 (エルボ)

下流側 (パイプ)

※ : ビームの到達点の波形の変化を指で確認。

 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

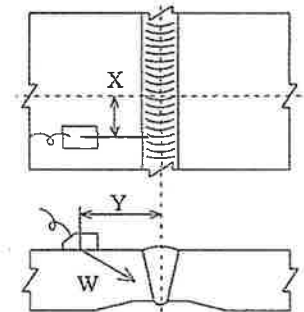
超音波探傷データシート a (配管—インディケーションの記録)

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911007)

上流側 エルボ

下流側 パイプ

探傷角度 60° (直角)

	探傷サイド		ピーク指示部					DAC20%		DAC100%		備考
	上流側	下流側	X (mm)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	
1		○	30° -7	19	24.0	160	102	0° +0 ~ 30° +0	30	30° -8 ~ 30° -6	2	裏波部*
						以下	余白					

備考　＊：30° 毎の記録点間の最大エコー（ピーク）が前後の記録点のエコー高さを超える反射波を示す。

超音波探傷データシートb (配管-インディケーションの記録)

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911007)

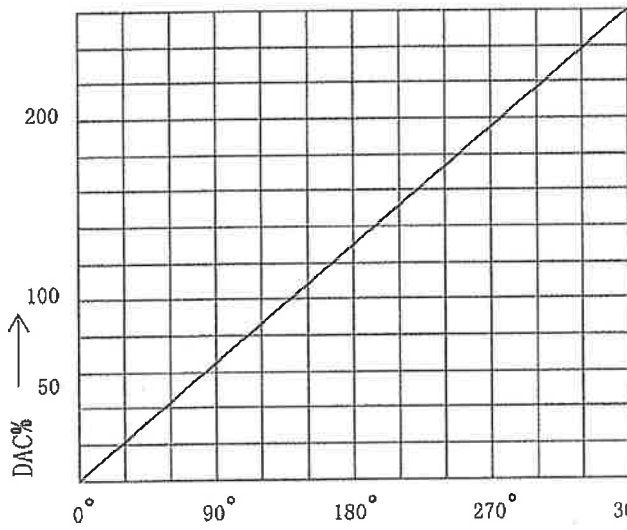
探傷角度 60° (直角)

X位置	上 流 (エルボ)								下 流 (パイプ)							
	裏波部				柱状晶伝搬エコー				裏波部				柱状晶伝搬エコー			
	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)
0°									18	24.0	70	45				
30°									18	23.0	130	79				
60°																
90°																
120°																
150°																
180°																
210°																
240°																
270°																
300°																
330°																
													空白欄は隣接する30° 芯2点以上にまたがる 反射波を認めず。			

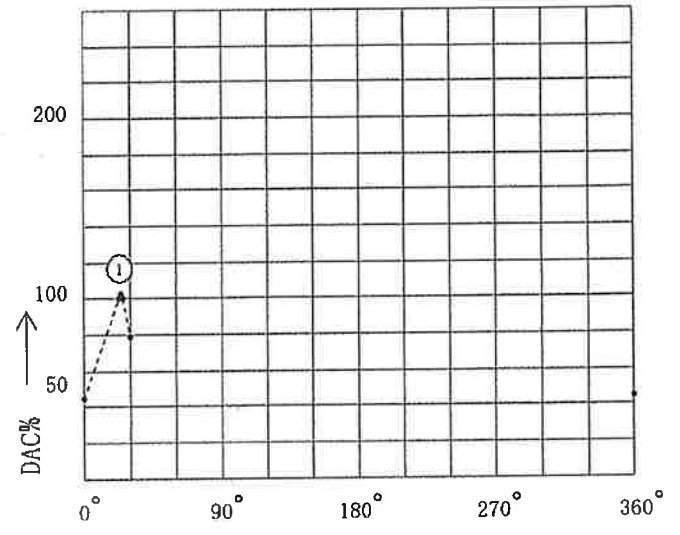
超音波探傷データシートc (配管—インディケーションのマップ)

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

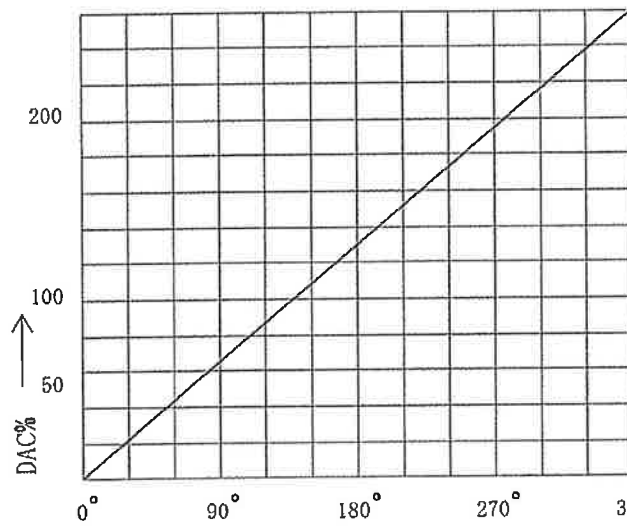
溶接線番号 SW-5(H2-3911007)



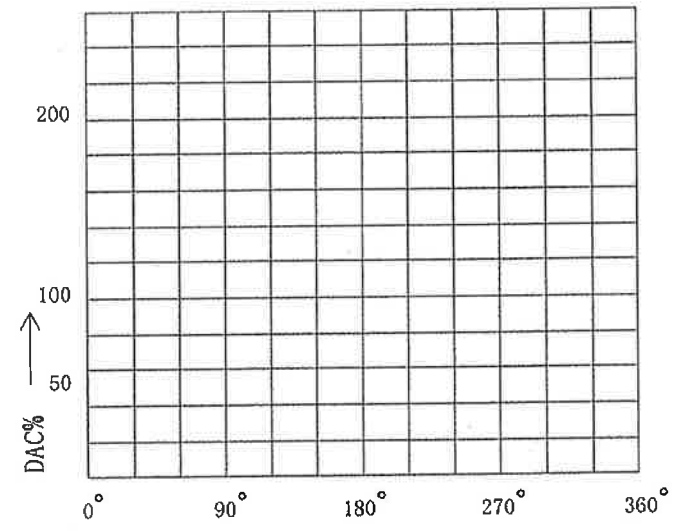
裏波部 60° 上流側



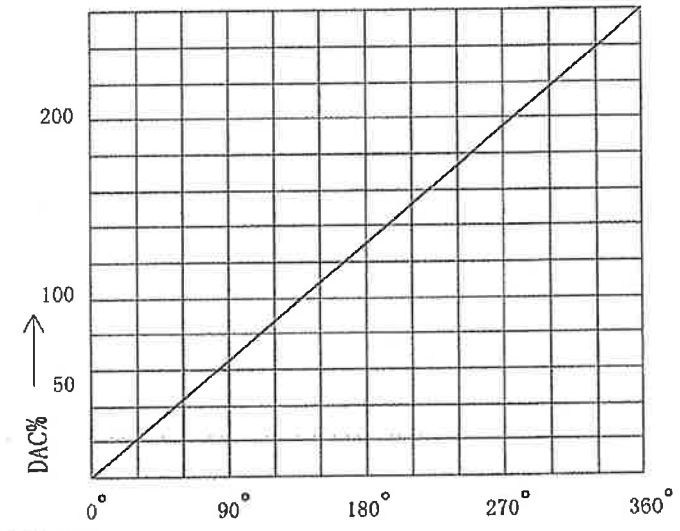
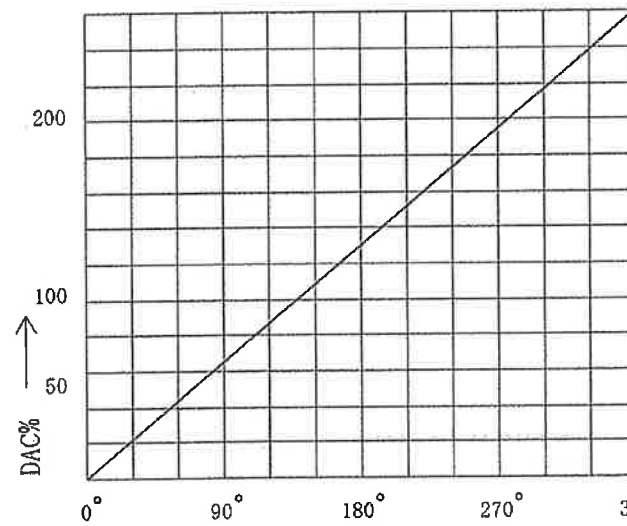
裏波部 60° 下流側



柱状晶伝搬エコー 60° 上流側



柱状晶伝搬エコー 60° 下流側



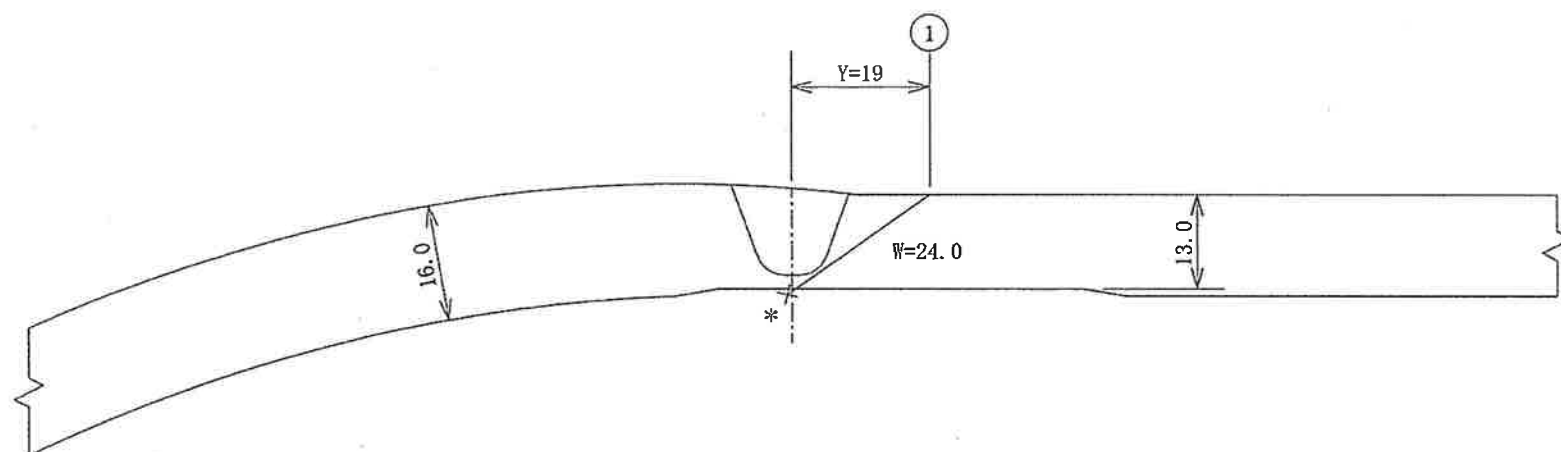
インディケーションの位置

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Aループ)

溶接線番号 SW-5(H2-3911007)

縮尺 : 1/1

単位 : mm



上流側 (エルボ)

下流側 (パイプ)

* : ビーム路程、Y距離を計測し作図した結果、裏波部に位置する。

 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

非 破 壊 検 査 記 録 (/)

(1) 検査の判定

項目番号	カテゴリ	機 器 名	検 査 の 対 象 箇 所	検 査 箇 所
B9.11	B-J	配管	配管の同種金属溶接継手 (呼び径100A以上：周継手) 加圧器スプレイライン (Dループ)	SW-5 (H2-3911015)

検 査 方 法		検 査 年 月 日	立会 実績	結 果	検 査 員	備 考
体積 検査	超音波 探傷検査	年 月 日	有・無			
判 定 基 準		添付－1(4/4)に記載				

超音波探傷検査 (UT) 記録

検査箇所 加圧器スプレイライン (Dループ)

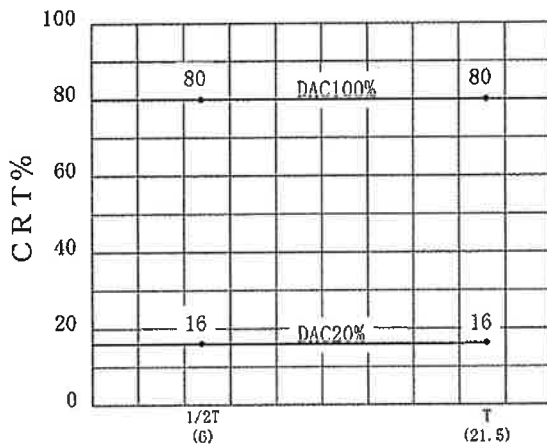
溶接線番号 SW-5 (H2-3911015)

距離-振幅補正曲線 (垂直 探触子)

Ser. 57462-72410

KON3. 4-4B

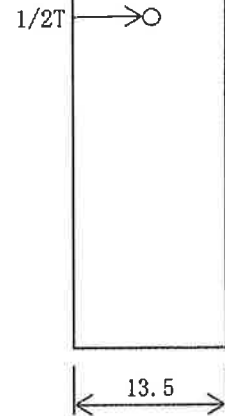
横穴: $\Phi 2.4$



感 度
51.5dB

ビーム
路 程
(W)

フルスケール 25mm

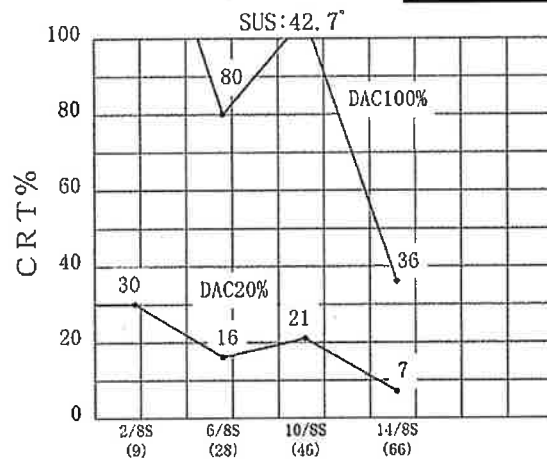


距離-振幅補正曲線 (45度 探触子)

Ser. 56921-57574

KON3. 4-4B

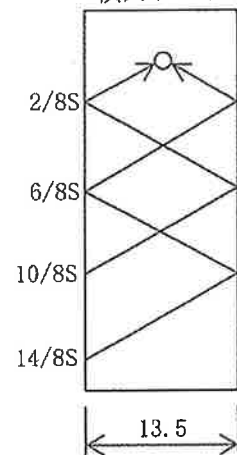
横穴: $\Phi 2.4$



感 度
29.5dB

ビーム
路 程
(W)

フルスケール 100mm

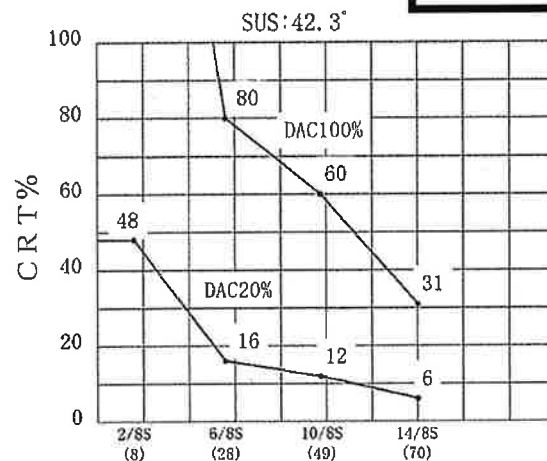


距離-振幅補正曲線 (45度 探触子)

Ser. 56921-8833

KON3. 4-4B

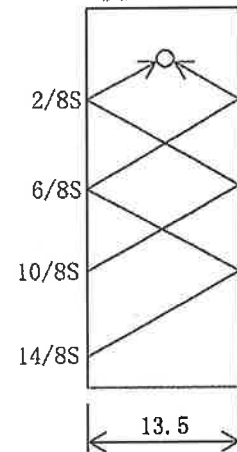
横穴: $\Phi 2.4$



感 度
43.5dB

ビーム
路 程
(W)

フルスケール 100mm



： 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

超音波探傷検査 (UT) 記録

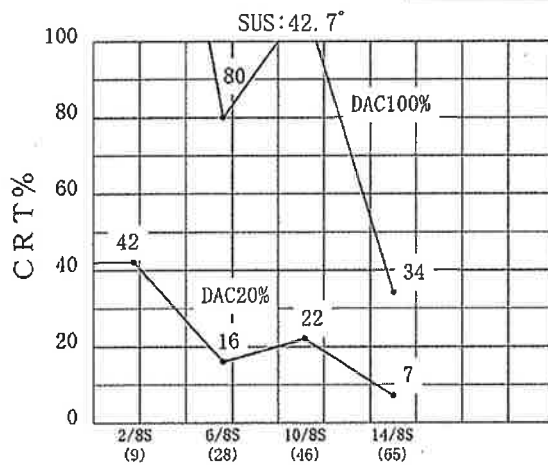
検査箇所 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911015)

距離-振幅補正曲線 (45度 探触子)

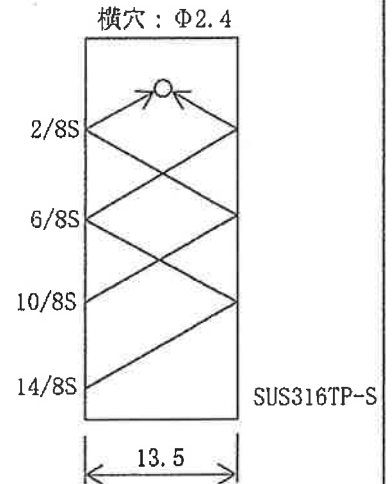
Ser. 676581

KON3. 4-4B



感 度
39.5dB

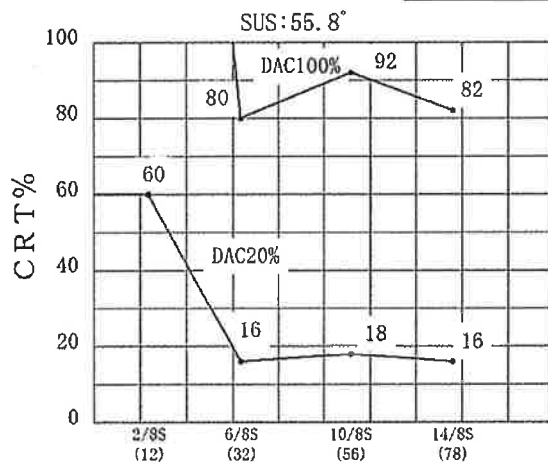
ビーム
路 程
(W)



距離-振幅補正曲線 (60度 探触子)

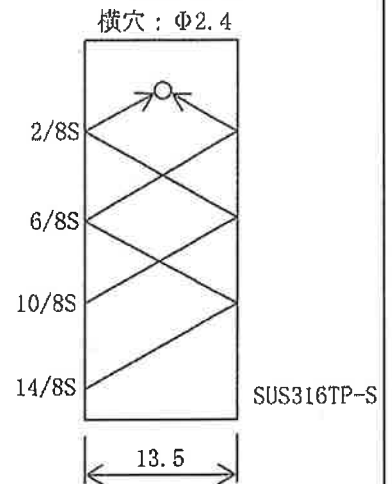
Ser. 678038

KON3. 4-4B

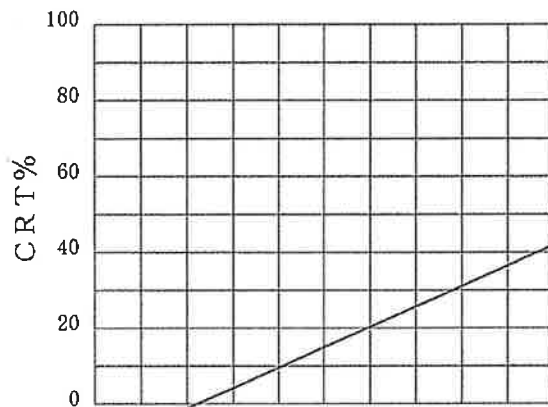


感 度
46.5dB

ビーム
路 程
(W)



距離-振幅補正曲線



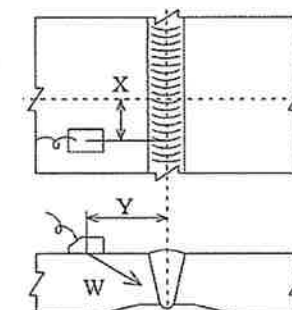
感 度

ビーム
路 程
(W)

フルスケール mm

枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

超音波探傷データシート a (配管-インディケーションの記録)



配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ) 溶接線番号 SW-5 (H2-3911015)

上流側 エルボ 下流側 パイプ 探傷角度 45° (直角)

	探傷サイド		ピーク指示部					DAC 20%		DAC 100%		備考
	上流側	下流側	X (mm)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	
1	○		90° +11	14	19.0	37	33	240° +16 ~ 120° +0	224			裏波部*
2	○		270° -7	13	18.0	62	54	240° +16 ~ 120° +0	224			裏波部
3	○		270° +6	14	20.0	38	35	240° +16 ~ 120° +0	224			裏波部*
4	○		300° +6	14	21.0	39	37	240° +16 ~ 120° +0	224			裏波部*
5	○		330° +4	14	21.0	47	45	240° +16 ~ 120° +0	224			裏波部*
6	○		30° +9	25	37.0	53	58	240° +0 ~ 120° +0	240			外表面部
7	○		0° +2	1	16.0	67	54	240° +0 ~ 120° +0	240			柱状晶伝搬エコー*
8	○		30° +5	0	15.0	58	46	240° +0 ~ 120° +0	240			柱状晶伝搬エコー*
9	○		90° -17	0	15.0	56	44	240° +0 ~ 120° +0	240			柱状晶伝搬エコー*
10	○		90° +9	1	15.0	62	49	240° +0 ~ 120° +0	240			柱状晶伝搬エコー*
11	○		240° +8	0	15.0	35	28	240° +0 ~ 120° +0	240			柱状晶伝搬エコー*

備考 * : 30° 毎の記録点間の最大エコー (ピーク) が前後の記録点のエコー高さを超える反射波を示す。

超音波探傷データシート a (配管—インディケーションの記録)

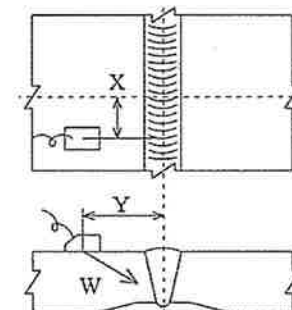
配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911015)

上流側 エルボ

下流側 パイプ

探傷角度 45° (直角)



	探傷サイド		ピーク指示部					DAC 20%		DAC 100%		備考
	上流側	下流側	X (mm)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	
12	○		300° +5	0	15.0	39	31	240° ₊₀ ~ 120° ₊₀	240			柱状晶伝搬エコー*
13		○	30° -8	14	21.0	45	43	0° ₊₁₁ ~ 30° ₋₂	17			裏波部
14		○	60° -6	14	20.0	29	27	60° ₋₁₃ ~ 60° ₋₃	10			裏波部
15		○	60° +7	14	20.0	26	24	60° ₊₂ ~ 60° ₊₁₀	8			裏波部
16		○	90° +5	14	20.0	27	25	90° ₊₄ ~ 90° ₊₆	2			裏波部
17		○	90° +10	13	20.0	25	23	90° ₊₉ ~ 90° ₊₁₁	2			裏波部
18		○	180° -13	14	20.0	40	37	150° ₊₁₁ ~ 180° ₋₇	12			裏波部
19		○	180° +17	13	20.0	68	63	180° ₊₇ ~ 210° ₋₁	22			裏波部
20		○	240° -10	13	20.0	49	45	210° ₊₁₃ ~ 240° ₋₂	15			裏波部
21		○	270° +12	14	21.0	29	28	270° ₊₈ ~ 300° ₋₇	15			裏波部
22		○	300° +7	13	20.0	42	39	300° ₊₃ ~ 300° ₊₁₆	13			裏波部

備考 * : 30° 毎の記録点間の最大エコー (ピーク) が前後の記録点のエコー高さを超える反射波を示す。

超音波探傷データシート a (配管-インディケーションの記録)

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911015)

上流側

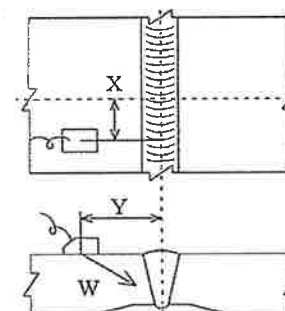
エルボ

下流側

パイプ

探傷角度

45° (直角)



	探傷サイド		ピーク指示部					DAC 20%		DAC 100%		備考
	上流側	下流側	X (mm)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	
23		○	330° +8	14	21.0	44	42	330° -12 ~ 0° -8	34			裏波部
24		○	270° +13	24	35.0	55	62	全周	360			外表面部
25		○	30° +5	0	15.0	57	45	30° -10 ~ 30° +9	19			柱状晶伝搬エコー
26		○	60° -4	0	15.0	36	29	60° -7 ~ 60° +1	8			柱状晶伝搬エコー
27		○	60° +10	0	15.0	36	29	60° +6 ~ 60° +12	6			柱状晶伝搬エコー
28		○	90° -7	1	16.0	32	26	90° -11 ~ 90° -4	7			柱状晶伝搬エコー
29		○	120° -5	1	16.0	43	35	120° -11 ~ 120° -2	9			柱状晶伝搬エコー
30		○	150° +13	0	15.0	62	49	150° +7 ~ 150° +19	12			柱状晶伝搬エコー
31		○	330° -16	0	15.0	36	29	300° +8 ~ 330° -8	14			柱状晶伝搬エコー
32		○	330° +11	0	15.0	32	26	330° +9 ~ 0° -12	9			柱状晶伝搬エコー
							余白					
備考												

超音波探傷データシートb (配管-インディケーションの記録)

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911015)

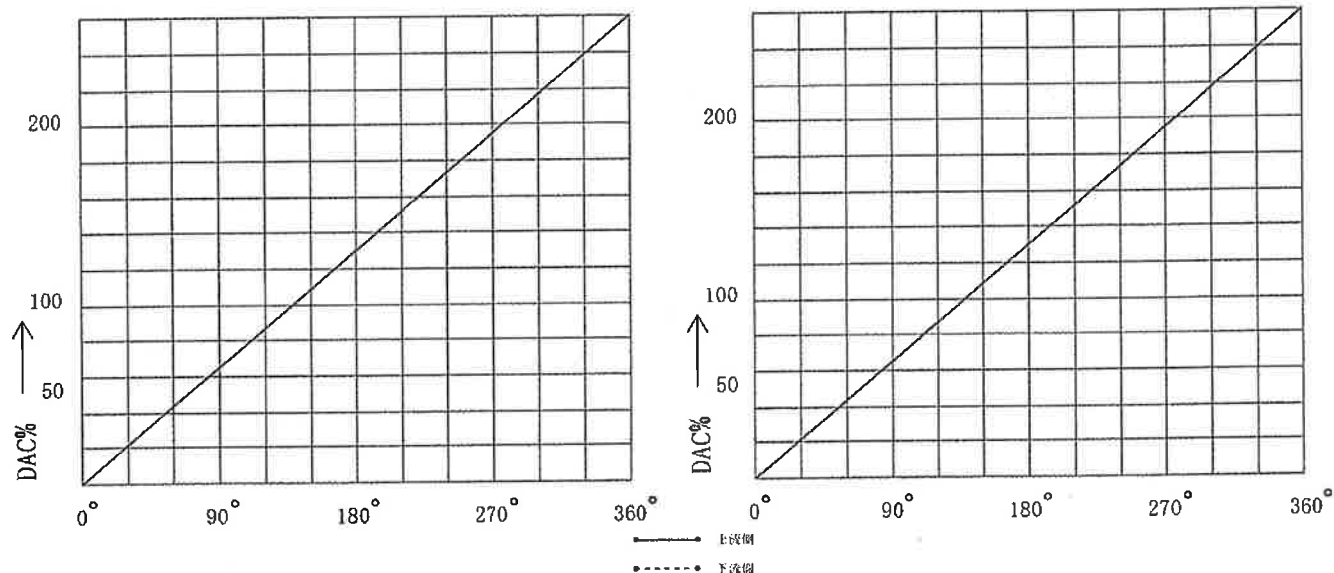
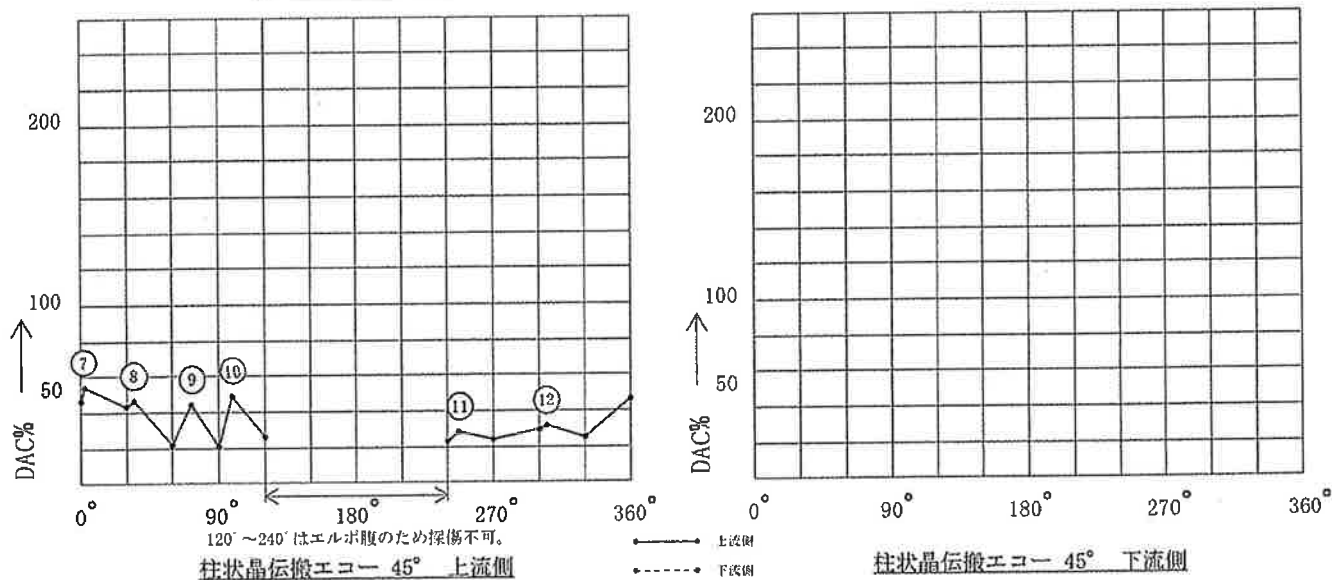
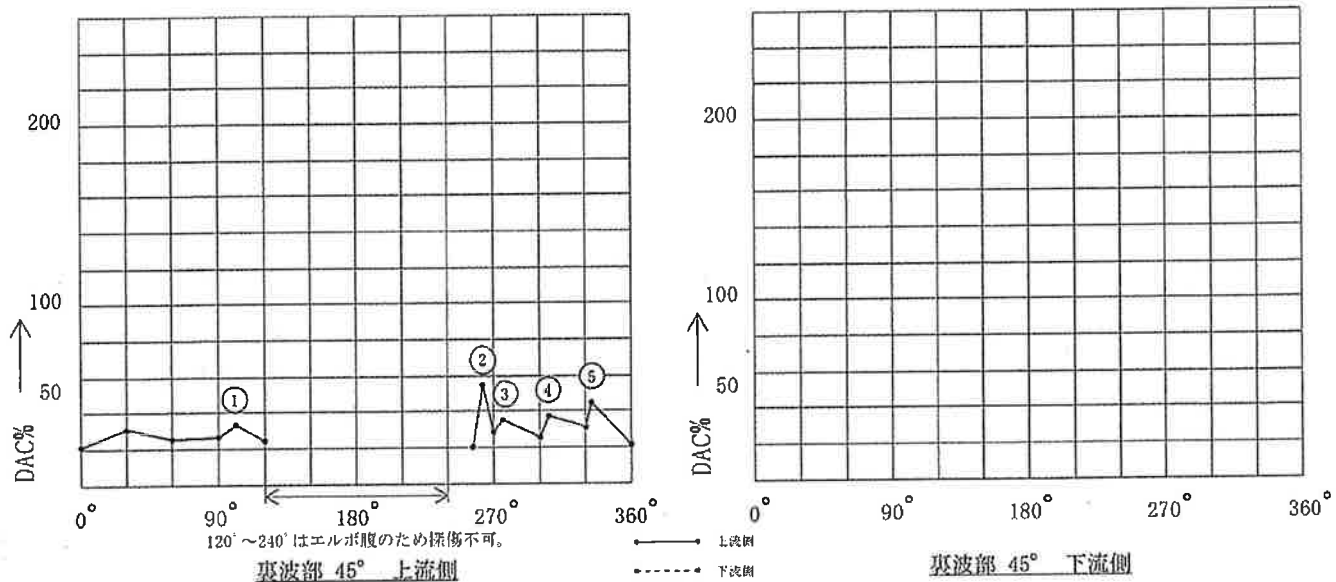
探傷角度 45° (直角)

X位置	上 流 (エルボ)								下 流 (パイプ)							
	裏波部				柱状晶伝搬エコー				裏波部				柱状晶伝搬エコー			
	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)
0°	13	21.0	22	21	1	16.0	56	46								
30°	14	21.0	32	31	1	16.0	53	43								
60°	14	20.0	27	25	1	15.0	28	22								
90°	14	20.0	28	26	1	16.0	26	21								
120°	14	22.0	24	24	0	15.0	33	26								
150°	—	—	—	—	—	—	—	—								
180°	—	—	—	—	—	—	—	—								
210°	—	—	—	—	—	—	—	—								
240°					0	15.0	29	23								
270°	13	19.0	32	29	1	16.0	29	24								
300°	13	19.0	28	25	1	16.0	36	29								
330°	13	21.0	32	31	1	16.0	31	25								
	120° ~ 240° はエルボ腹のため探傷不可。 空白欄は隣接する30° 芯2点以上にまたがる 反射波を認めず。				120° ~ 240° はエルボ腹のため探傷不可。 空白欄は隣接する30° 芯2点以上にまたがる 反射波を認めず。				空白欄は隣接する30° 芯2点以上にまたがる 反射波を認めず。				空白欄は隣接する30° 芯2点以上にまたがる 反射波を認めず。			

超音波探傷データシート c (配管-インディケーションのマップ)

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911015)



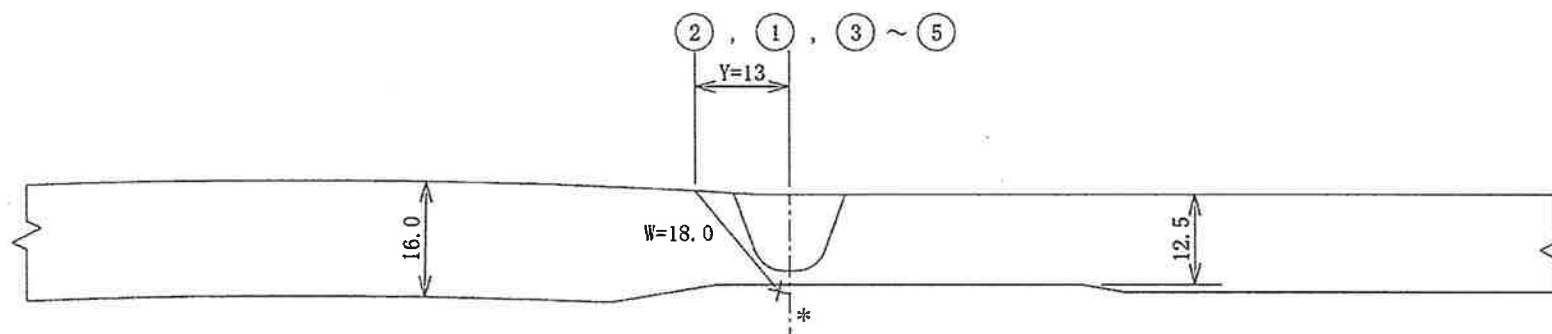
インディケーションの位置

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911015)

縮尺：1/1

単位：mm



*：ビーム路程、Y距離を計測し作図した結果、裏波部に位置する。

：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

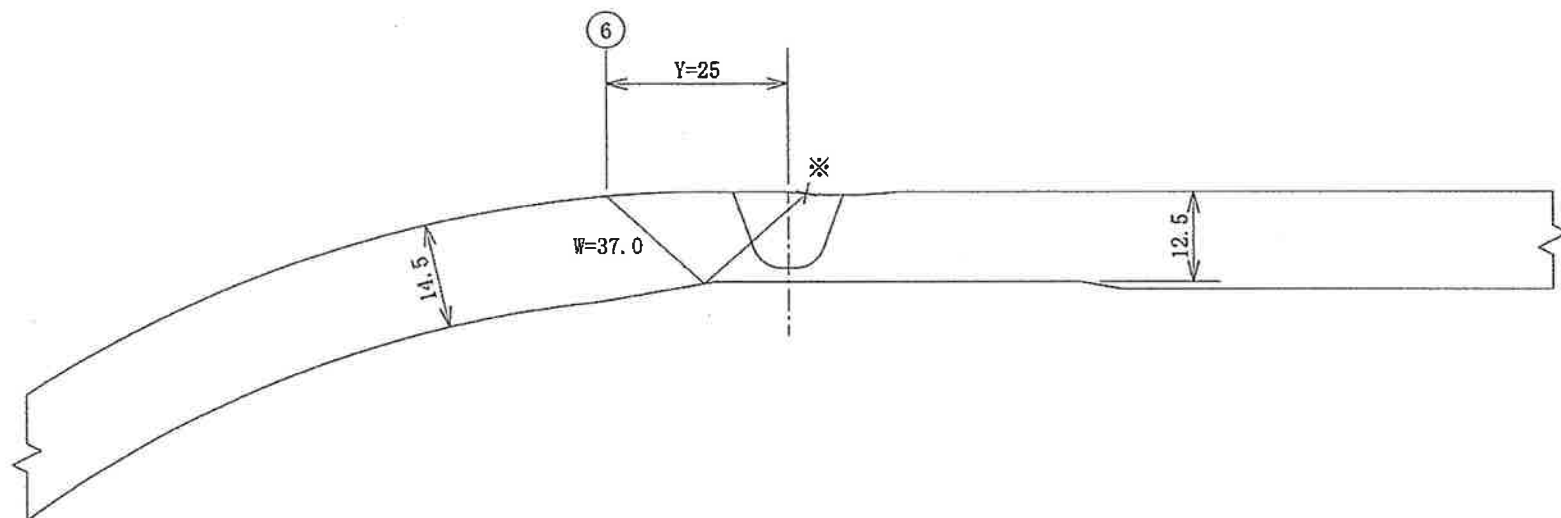
インディケーションの位置

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911015)

縮尺: 1/1

単位: mm



上流側 (エルボ)

下流側 (パイプ)

※: ビームの到達点の波形の変化を指で確認。

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

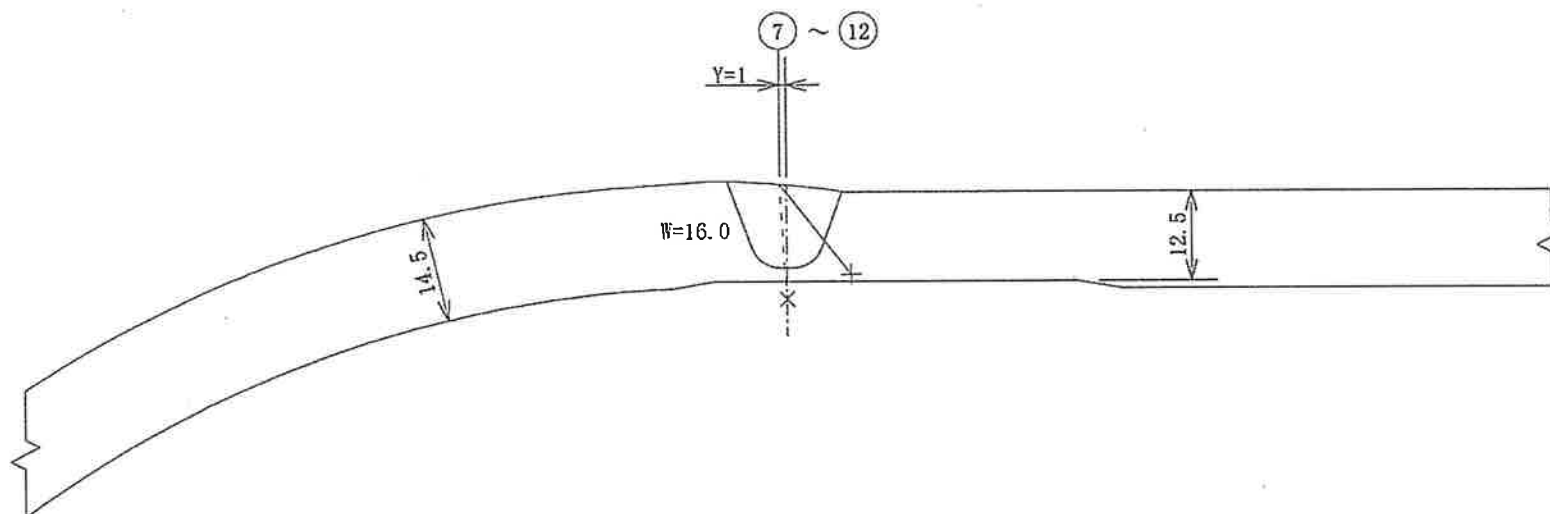
インディケーションの位置

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911015)

縮尺 : 1/1

単位 : mm



上流側 (エルボ)

下流側 (パイプ)

--- : 破線の様に進んだと思われる。

 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

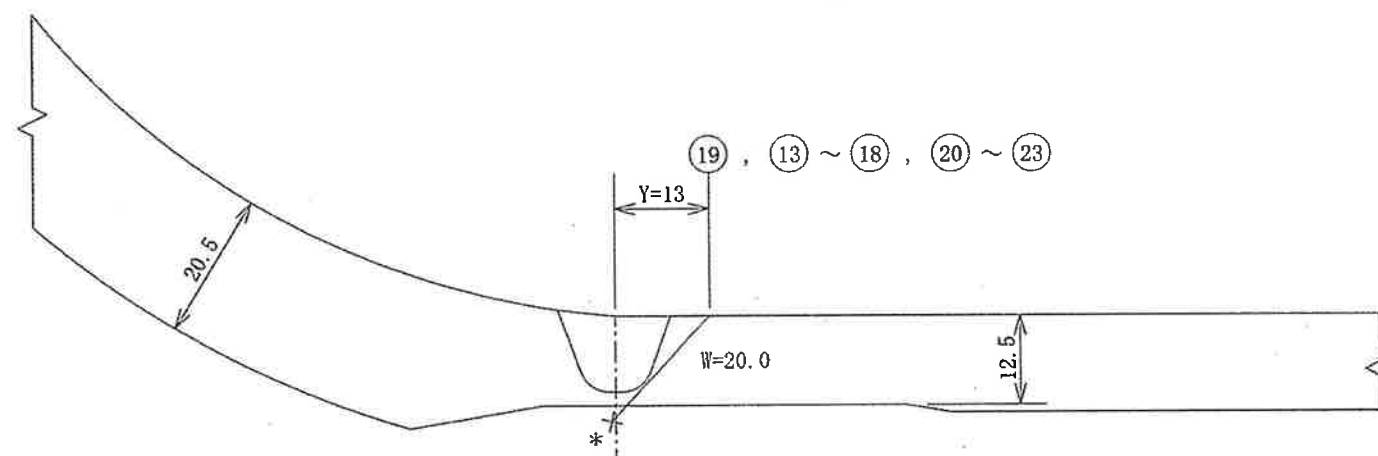
インディケーションの位置

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911015)

縮尺 : 1/1

単位 : mm



上流側 (エルボ)

下流側 (パイプ)

* : ビーム路程、Y距離を計測し作図した結果、裏波部に位置する。

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

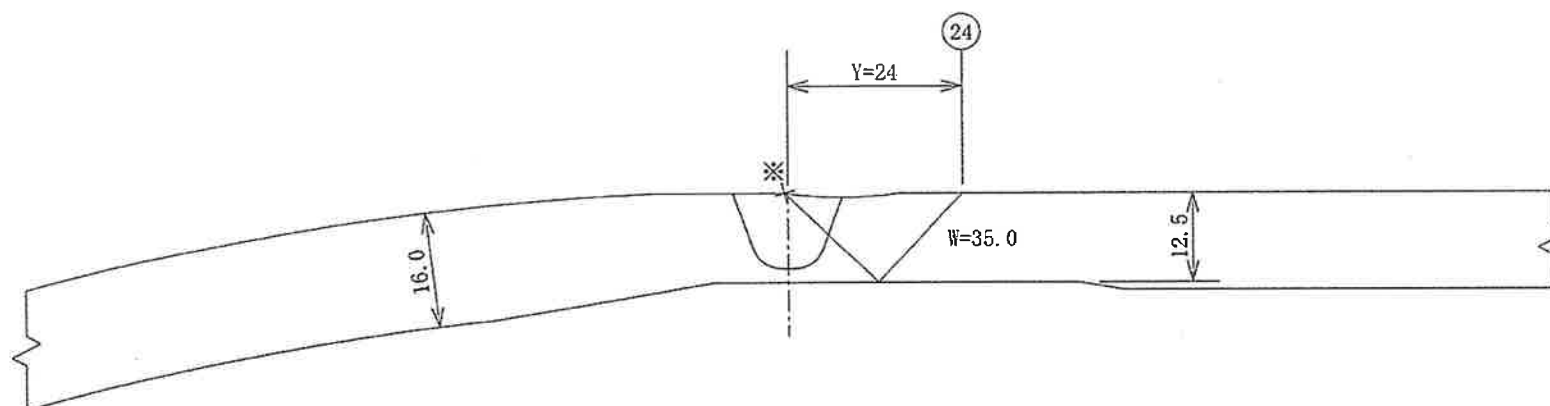
インディケーションの位置

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 SW-5(H2-3911015)

縮尺 : 1/1

単位 : mm



上流側 (エルボ)

下流側 (パイプ)

※ : ビームの到達点の波形の変化を指で確認。

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

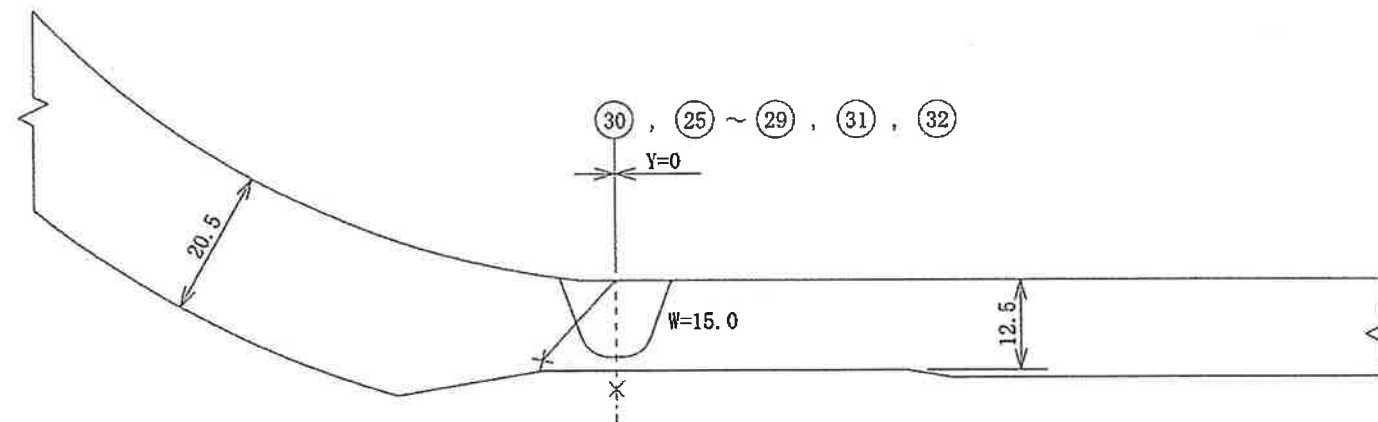
インディケーションの位置

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 SW-5(H2-3911015)

縮尺 : 1/1

単位 : mm



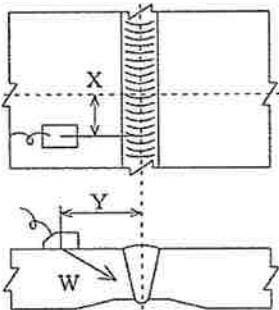
上流側 (エルボ)

下流側 (パイプ)

--- : 破線の様に進んだと思われる。

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

超音波探傷データシート a (配管-インディケーションの記録)



配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ) 溶接線番号 SW-5 (H2-3911015)

上流側 エルボ 下流側 パイプ 探傷角度 45° (小型探触子) (直角)

	探傷サイド		ピーク指示部					DAC 20%		DAC 100%		備考
	上流側	下流側	X (mm)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	
1	○		120° +15	12	19.0	41	29	120° +0 ~ 240° +0	120			裏波部*
2	○		180° -6	13	21.0	39	31	120° +0 ~ 240° +0	120			裏波部*
3	○		210° -7	12	20.0	82	61	120° +0 ~ 240° +0	120			裏波部*
4	○		240° -7	12	20.0	68	51	120° +0 ~ 240° +0	120			裏波部*
5	○		180° -14	24	36.0	110	118	120° +0 ~ 240° +0	120	180° -18 ~ 180° -10	8	外表面部
6	○		120° +12	1	15.0	110	66	120° +0 ~ 240° +0	120			柱状晶伝搬エコー*
7	○		180° -15	1	15.0	104	62	120° +0 ~ 240° +0	120			柱状晶伝搬エコー*
8	○		210° -3	1	16.0	148	92	120° +0 ~ 240° +0	120			柱状晶伝搬エコー*
9	○		240° -6	1	16.0	172	107	120° +0 ~ 240° +0	120	240° -7 ~ 240° -5	2	柱状晶伝搬エコー*
						以下	余白					

備考 *: 30° 毎の記録点間の最大エコー (ピーク) が前後の記録点のエコー高さを超える反射波を示す。

超音波探傷データシート b (配管－インディケーションの記録)

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911015)

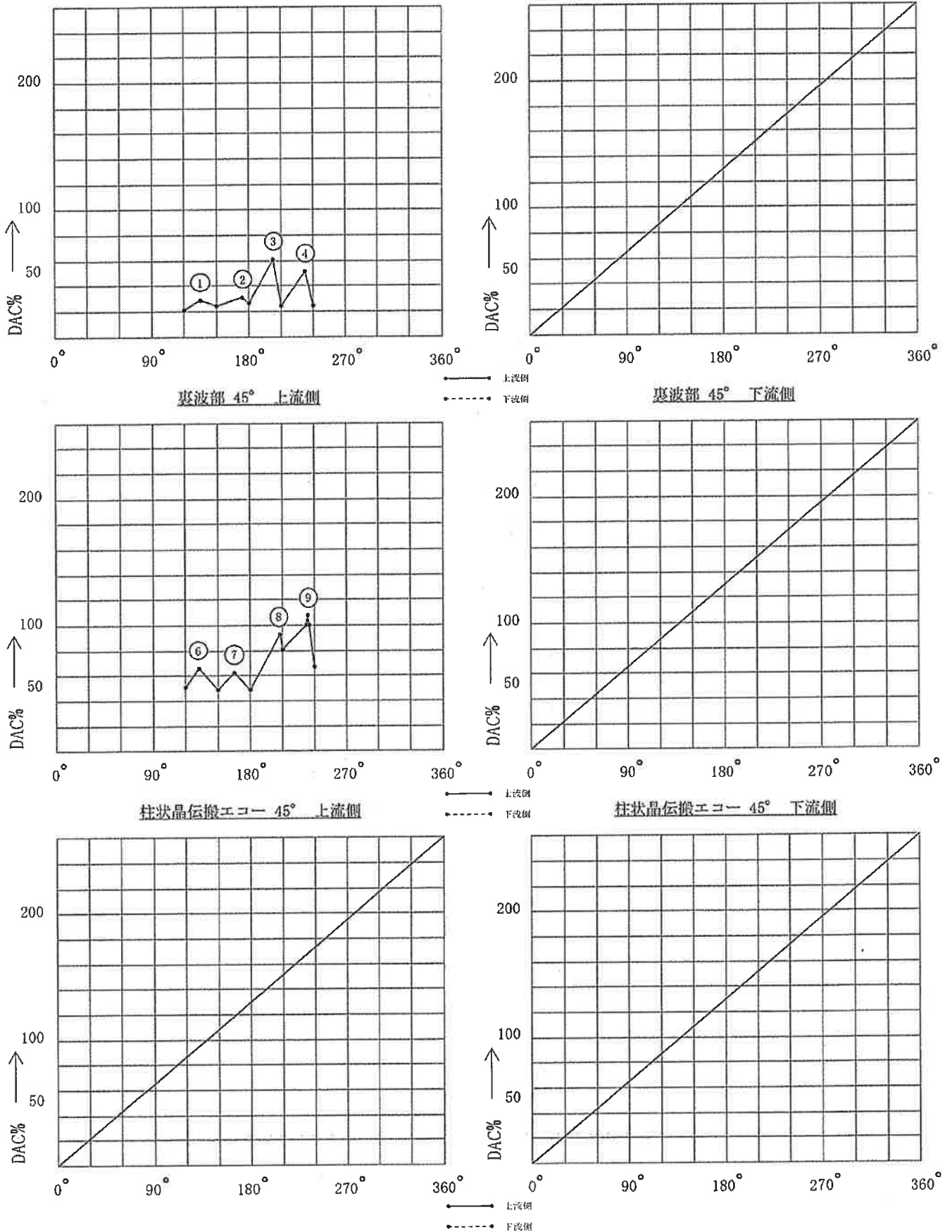
探傷角度 45° (小型探触子) (直角)

X位置	上 流 (エルボ)								下 流 (パイプ)							
	裏波部				柱状晶伝搬エコー				裏波部				柱状晶伝搬エコー			
	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)
0°																
30°																
60°																
90°																
120°	13	20.0	28	21	1	16.0	82	51								
150°	12	20.0	32	24	0	15.0	82	49								
180°	12	20.0	35	26	1	16.0	78	49								
210°	12	20.0	32	24	1	16.0	130	81								
240°	13	20.0	32	24	1	16.0	108	67								
270°																
300°																
330°																

超音波探傷データシート c (配管-インディケーションのマップ)

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911015) (小型探触子)



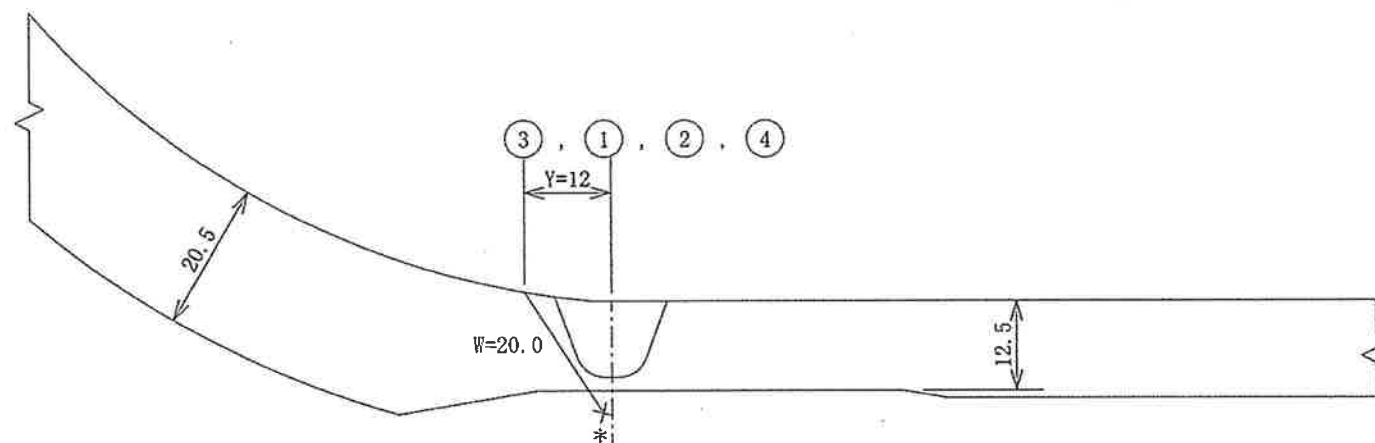
インディケーションの位置

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911015)

縮尺 : 1/1

単位 : mm



上流側 (エルボ)

下流側 (パイプ)

* : ビーム路程、Y距離を計測し作図した結果、裏波部に位置する。

 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

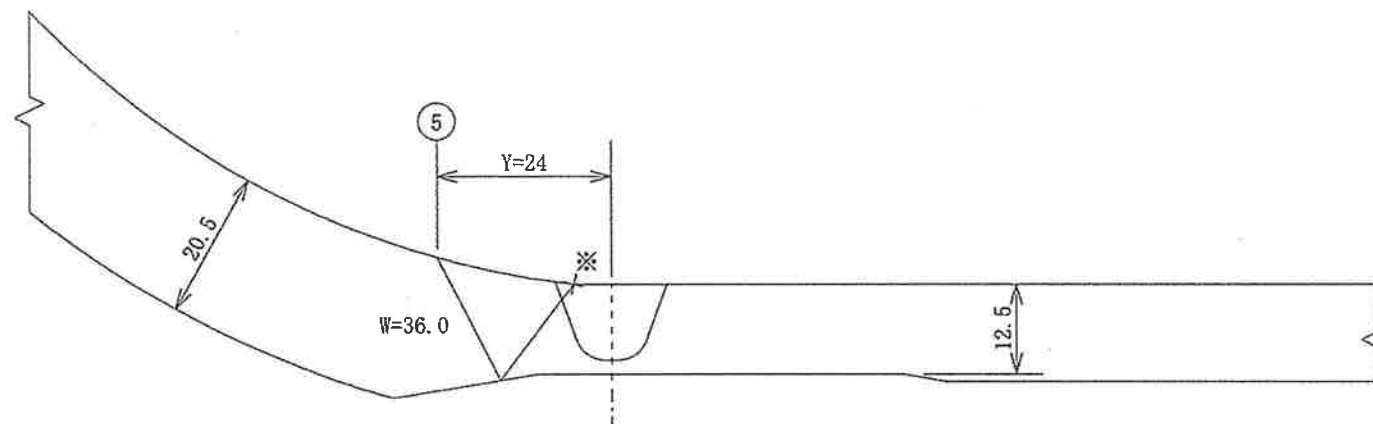
インディケーションの位置

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 SW-5(H2-3911015)

縮尺 : 1/1

単位 : mm



上流側 (エルボ)

下流側 (パイプ)

※ : ビームの到達点の波形の変化を指で確認。

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

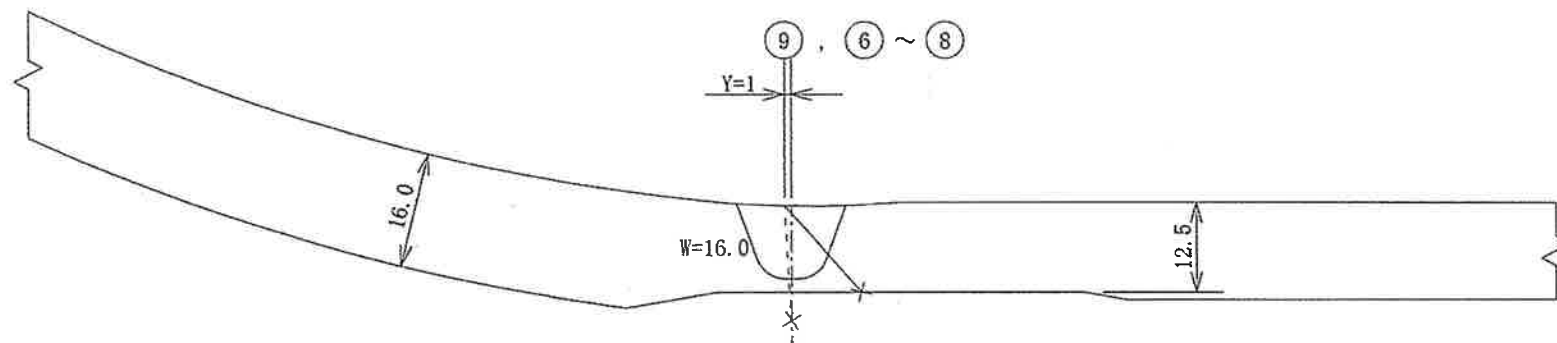
インディケーションの位置

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911015)

縮尺 : 1/1

単位 : mm



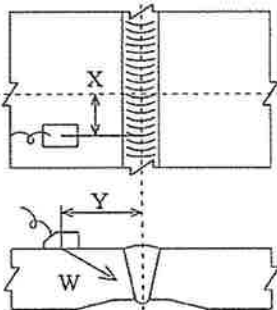
上流側 (エルボ)

下流側 (パイプ)

--- : 破線の様に進んだと思われる。

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

超音波探傷データシート a (配管-インディケーションの記録)



配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ) 溶接線番号 SW-5 (H2-3911015)
上流側 エルボ 下流側 パイプ 探傷角度 60° (小型探触子) (直角)

	探傷サイド		ピーク指示部					DAC 20%		DAC 100%		備考
	上流側	下流側	X (mm)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)	
1	○		240° -3	18	23.0	56	32	210° +0 ~ 240° +0	30			裏波部*
2	○		210° +9	0	16.0	170	67	210° +0 ~ 240° +0	30			柱状晶伝搬エコー*
						以下	余白					

備考 * : 30° 毎の記録点間の最大エコー (ピーク) が前後の記録点のエコー高さを超える反射波を示す。

超音波探傷データシートb (配管—インディケーションの記録)

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911015)

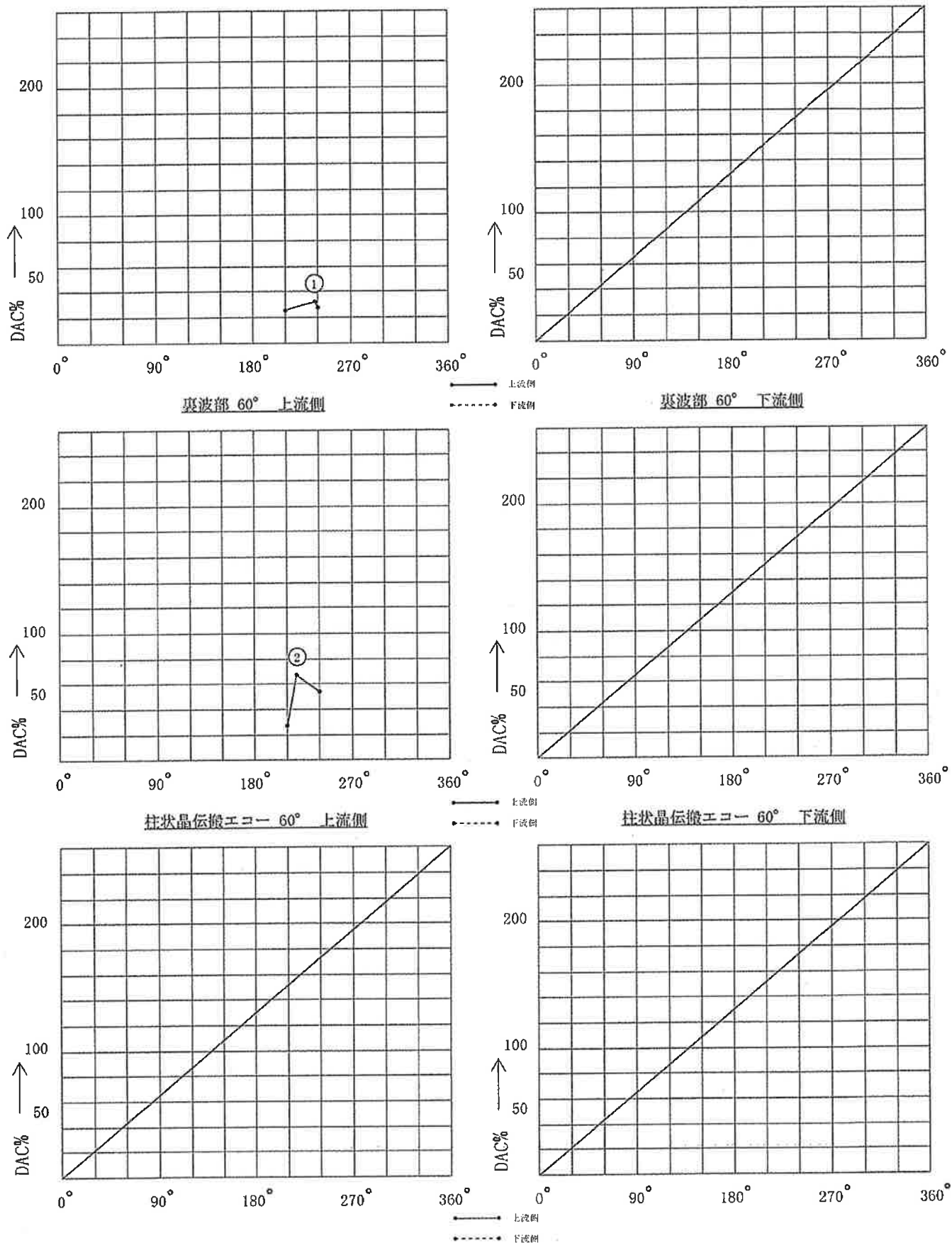
探傷角度 60° (小型探触子) (直角)

X位置	上 流 (エルボ)								下 流 (パイプ)							
	裏波部				柱状晶伝搬エコー				裏波部				柱状晶伝搬エコー			
	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)
0°																
30°																
60°																
90°																
120°																
150°																
180°																
210°	18	24.0	42	25	0	16.0	69	27								
240°	18	23.0	48	27	0	15.0	144	54								
270°																
300°																
330°																

超音波探傷データシート c (配管—インディケーションのマップ)

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911015) (小型探触子)



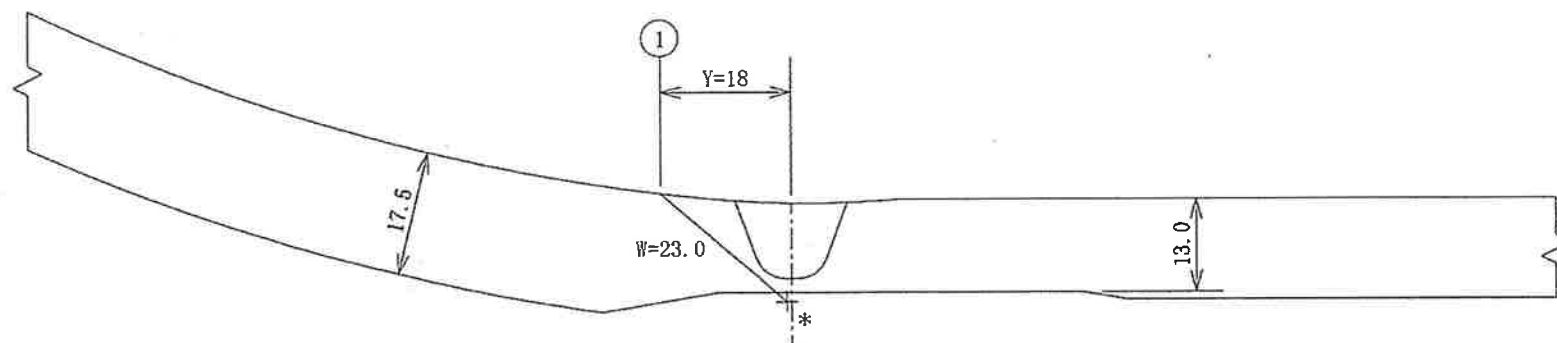
インディケーションの位置

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 SW-5 (H2-3911015)

縮尺: 1/1

単位: mm



上流側 (エルボ)

下流側 (パイプ)

* : ビーム路程、Y距離を計測し作図した結果、裏波部に位置する。

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

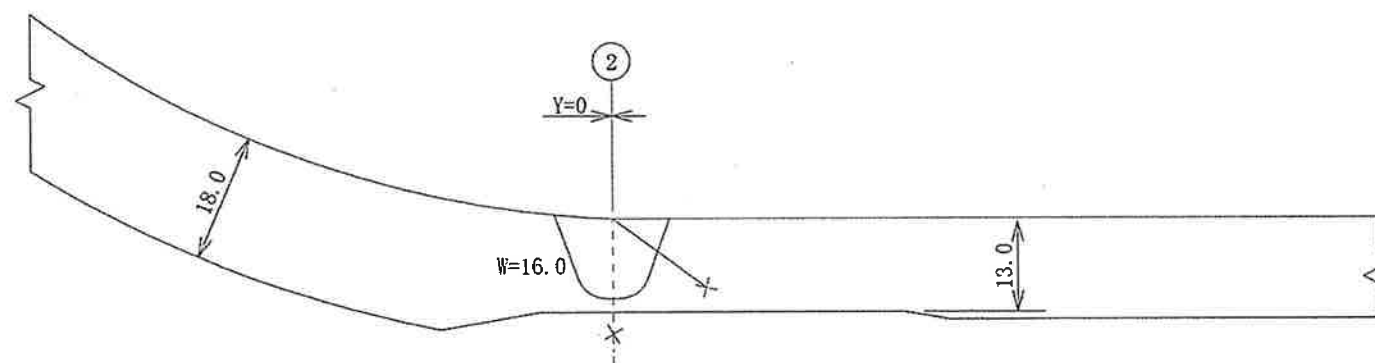
インディケーションの位置

配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ)

溶接線番号 SW-5(H2-3911015)

縮尺 : 1/1

単位 : mm



上流側 (エルボ)

下流側 (パイプ)

--- : 破線の様に進んだと思われる。

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。