

大飯発電所 3 号機

加圧器スプレイライン配管溶接部における有意な指示について

(9月11日公開会合における指摘事項の回答)

2020年9月

関西電力株式会社

■ 9月11日公開会合における指摘事項の回答

前回の公開会合で提示した、亀裂の性状、進展評価の妥当性を示すべく、当該部と同一の配管仕様及び溶接工法で新たにモックアップを製作し、溶接部の断面観察、板厚内部の硬さ測定、溶融部のフェライト量測定を行った。得られた結果も踏まえ、頂いた指摘事項について回答する。

No	指摘事項	ページ
1	当該配管の RT の検査記録（フィルム）を再度確認すること（過去のもの、今回のもの）	1
2	当該配管の溶接部の裏波の断面がわかるように図示すること	4
3	類似の配管の溶接部の溶接方法、溶接後の状態を提示すること（当該部分ではないが、標準的なもの）	16
4	亀裂の原因として強加工 SCC を推定しているが、強加工 SCC より進展性の高いと思われる原因（高サイクル疲労）については、その程度を踏まえて可能性を排除できる十分な根拠を示すこと	21
5-1	亀裂進展速度と硬さの関係を整理すること	26
5-2	今後の欠陥の評価の保守性と今ある欠陥の経緯を評価する際の保守性を整理すること	30
6	外面の欠陥角度を示しているが、内面の場合の欠陥角度を再度計算すること	32
7	仮にスプレイ配管が破断した際、漏えい検知対策および炉心損傷頻度の考え方を提示すること	39
8	前回 ISI からの正確な稼働時間（原子炉運転時間）を提示すること	46

No. 1

当該配管の RT の検査記録（フィルム）を再度確認すること（過去のもの、今回のもの）

当該配管の建設時における RT フィルムの溶接部を再確認した結果、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）で要求される透過写真の具備すべき条件（撮影配置、透過度計等）を満足していることを確認した。当該溶接部は判定基準を満足しており、RT フィルム上には欠陥による指示も無いことを確認した。また、当該溶接部の裏波が周方向にわたって連続的に形成されていることを確認した。

なお、RT フィルムの濃度差からおよその裏波幅を推定したところ、以下の結果であった。

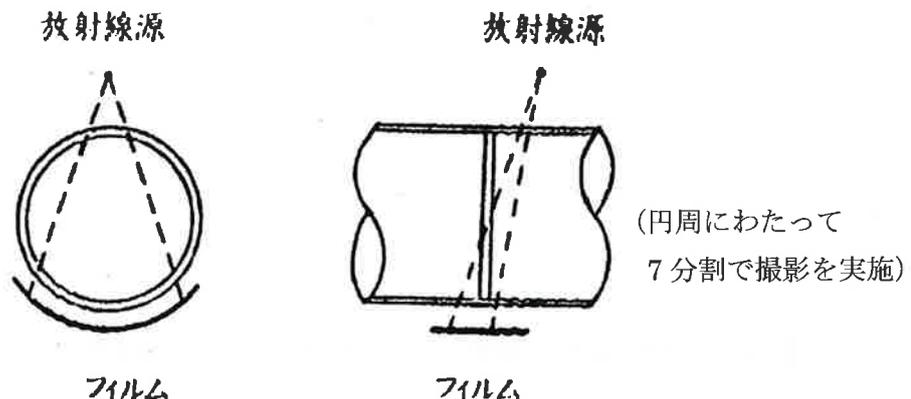
- ✓ RT フィルム No. 1（管台上部）の裏波幅と考えられる濃度差がある範囲を計測したところ約 mm であった。
- ✓ 上記の寸法を建設時 RT 記録の撮影条件（撮影距離、フィルム間距離、線源寸法、撮影角度※）を考慮し、裏波幅を算出した。
算出の結果、実機の裏波幅は、約 3.3mm であるものと推定される。

（図－2 参照）

※ 二重壁片面撮影による撮影配置であるため、溶接線に対し放射線の透過方向に傾きがある。（図－1 参照）

なお、RT 記録では撮影角度は記録されていないことから、一般的な配置となる として算出した。

また、当該溶接線に RT を適用した実績は建設時のみであり、以降の供用期間中検査としては体積試験として UT が実施されている。



図－1 建設時 RT 記録（抜粋）

：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。

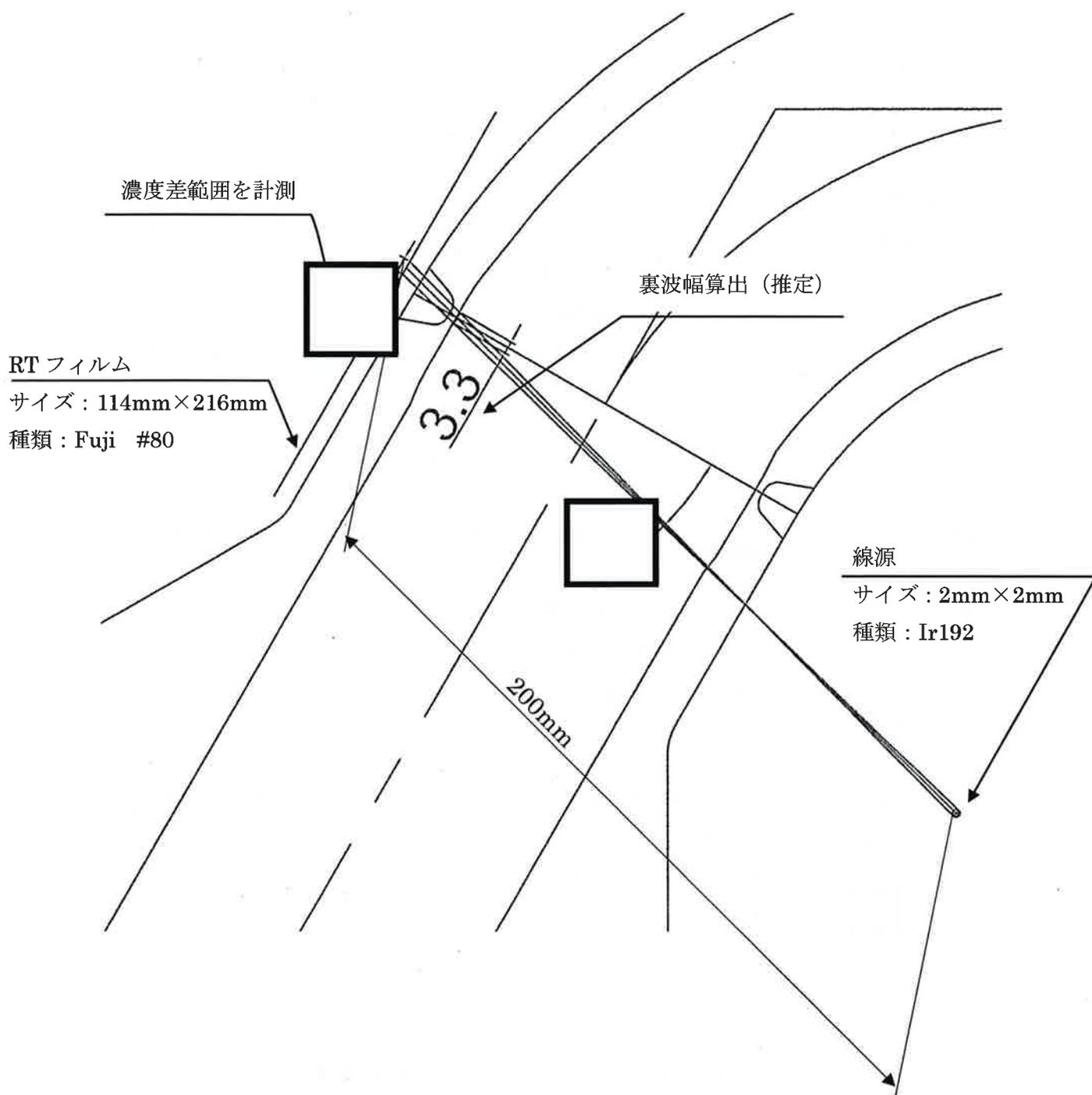
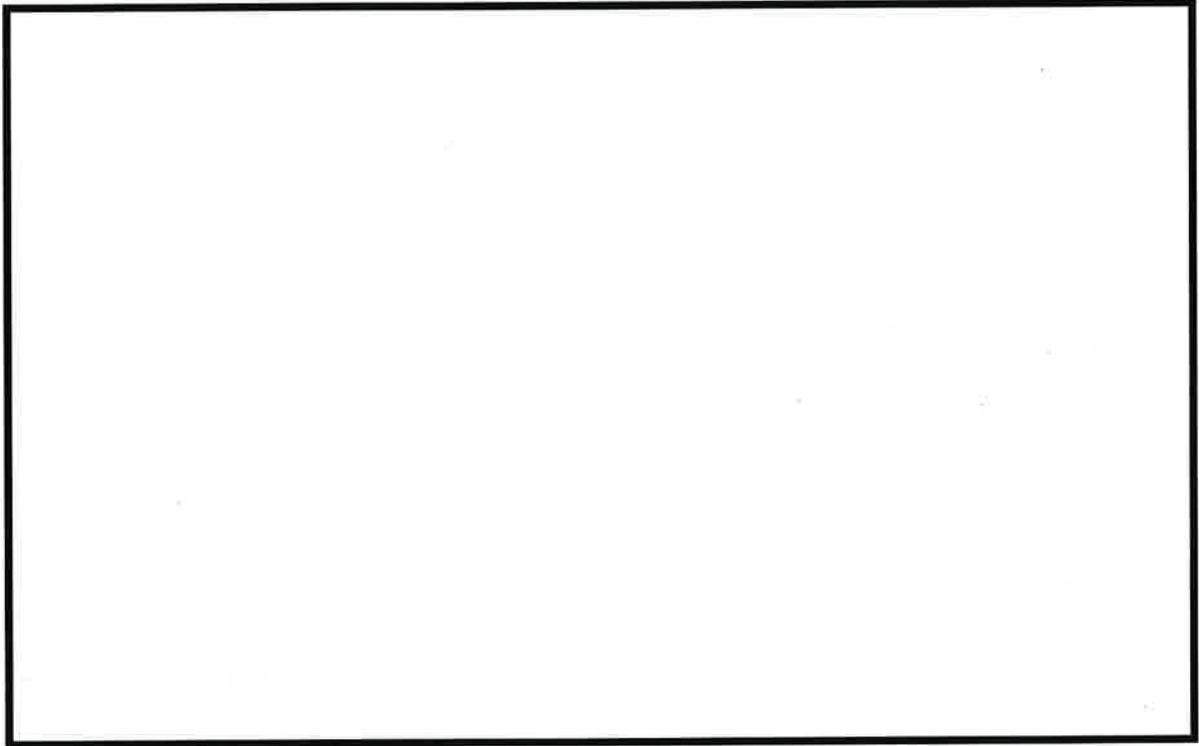


図-2 実機の裏波幅の算出結果

□ : 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。



No.1 RTフィルム

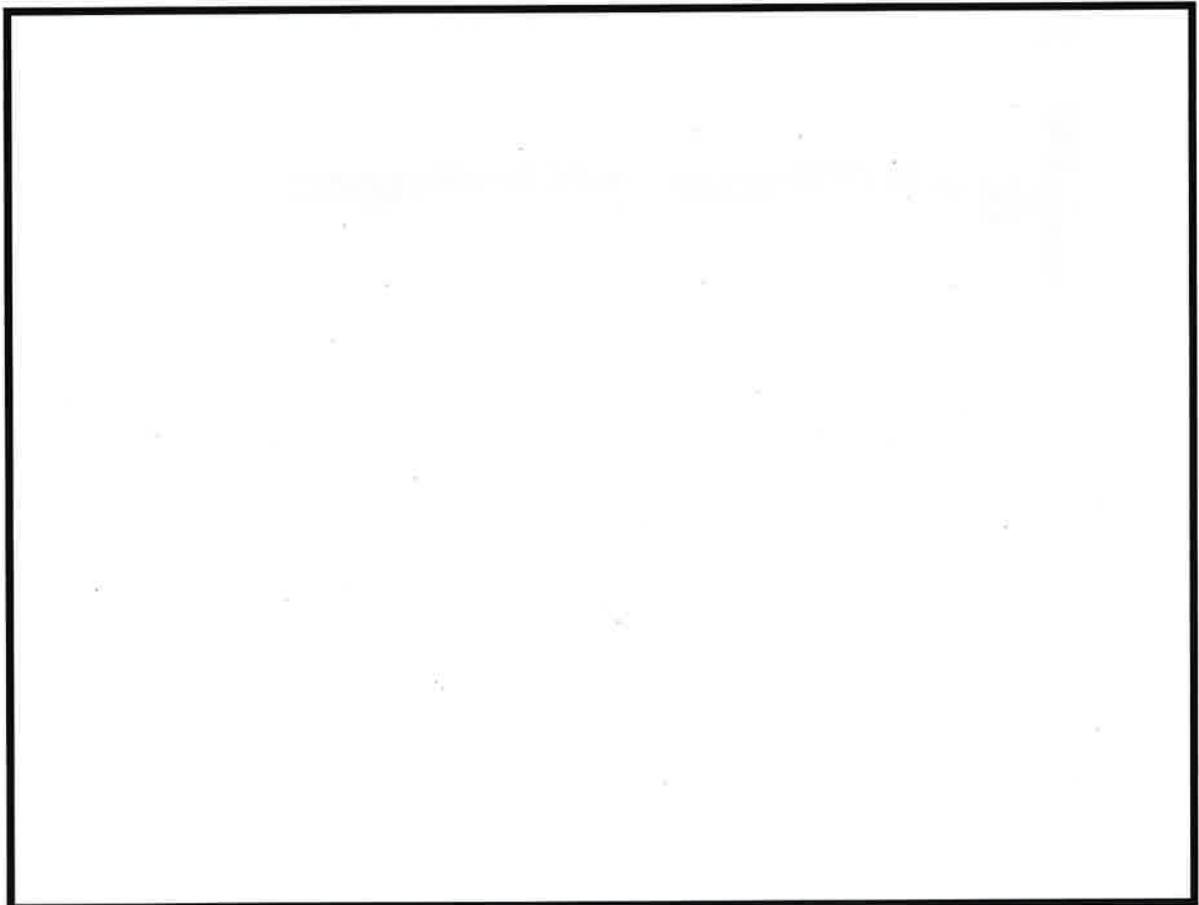


図-3 濃度差範囲の計測結果

 : 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。

No. 2

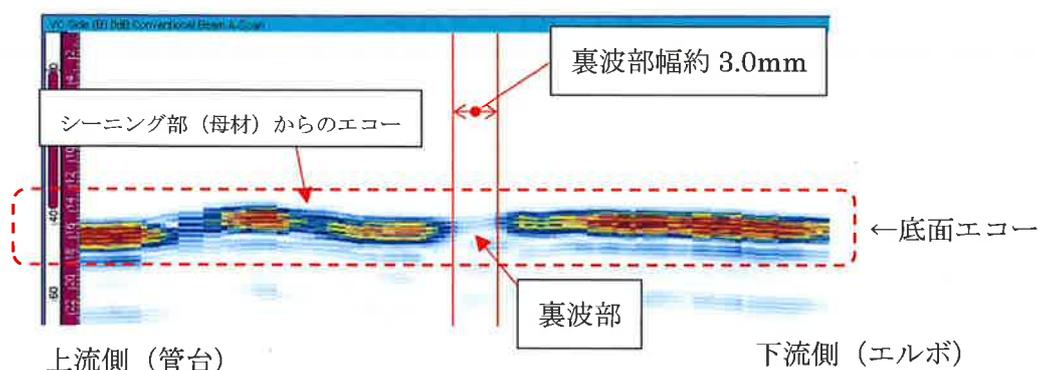
当該配管の溶接部の裏波の断面がわかるように図示すること

- 裏波溶接部幅を特定するため RT フィルムによる確認（約 3.3mm : No. 1 前述のとおり）、垂直 UT+エンコーダによる測定を実施した。その結果、裏波幅は約 3.3mm と推定した。

<UT+エンコーダによる B スコープデータ採取結果>

周方向位置 0° +3mm において軸方向の位置情報を取り込みながら波形データ (B スコープデータ) を採取した。

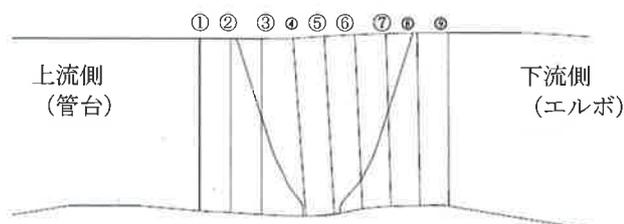
B スコープ画像を確認したところ、裏波部は局部的な凸型の形状を呈していない緩やかな形状であり、裏波部幅を画像から読み取ると、約 3.0mm であった。



- また、裏波部の形状把握のため垂直 UT を用いた 2.5mm 間隔の計測を実施した。結果を下表に示す。管台 HAZ 部～裏波～エルボ HAZ 部の間で緩やかに板厚が変化していた。

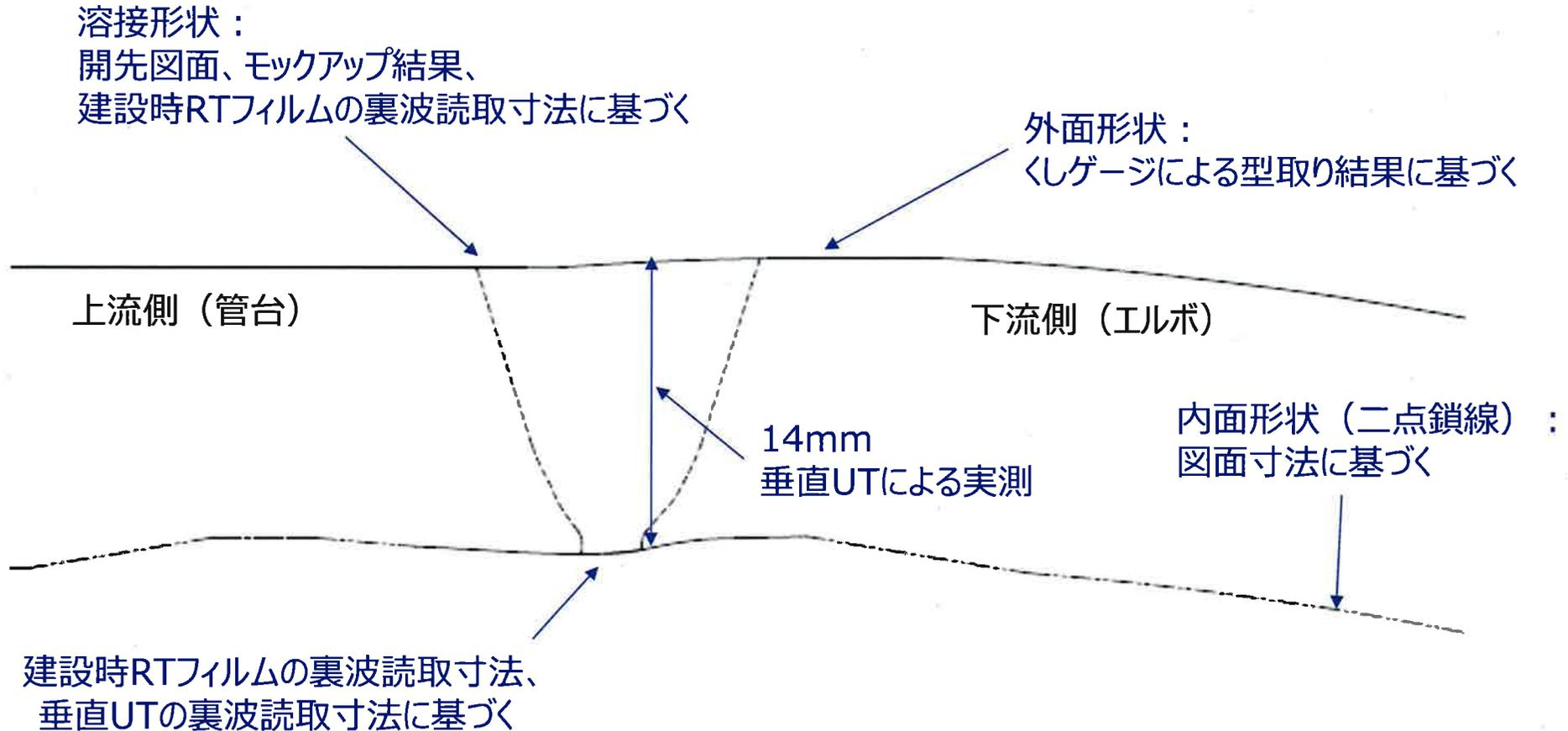
表 内面形状確認結果

溶接中心からの位置 [mm]	上流側 (管台)				中心	下流側 (エルボ)			
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
	-10	-7.5	-5	-2.5	0	2.5	5	7.5	10
厚さ [mm]	13.9	14.0	14.2	14.3	14.3	14.0	13.9	13.9	13.8



- 上記裏波部のプロファイルに加え、溶接部外面のプロファイリングを行うため、くしゲージを用いて外面形状をトレースした。
- 上記の測定結果ならびに設計図面、モックアップ結果（No.3 後述）から当該溶接部のプロファイルをNo. 2 添付-1のとおり推定した。
- 本プロファイルをもとに、今回得られた非破壊検査データを別紙のとおり解説する。

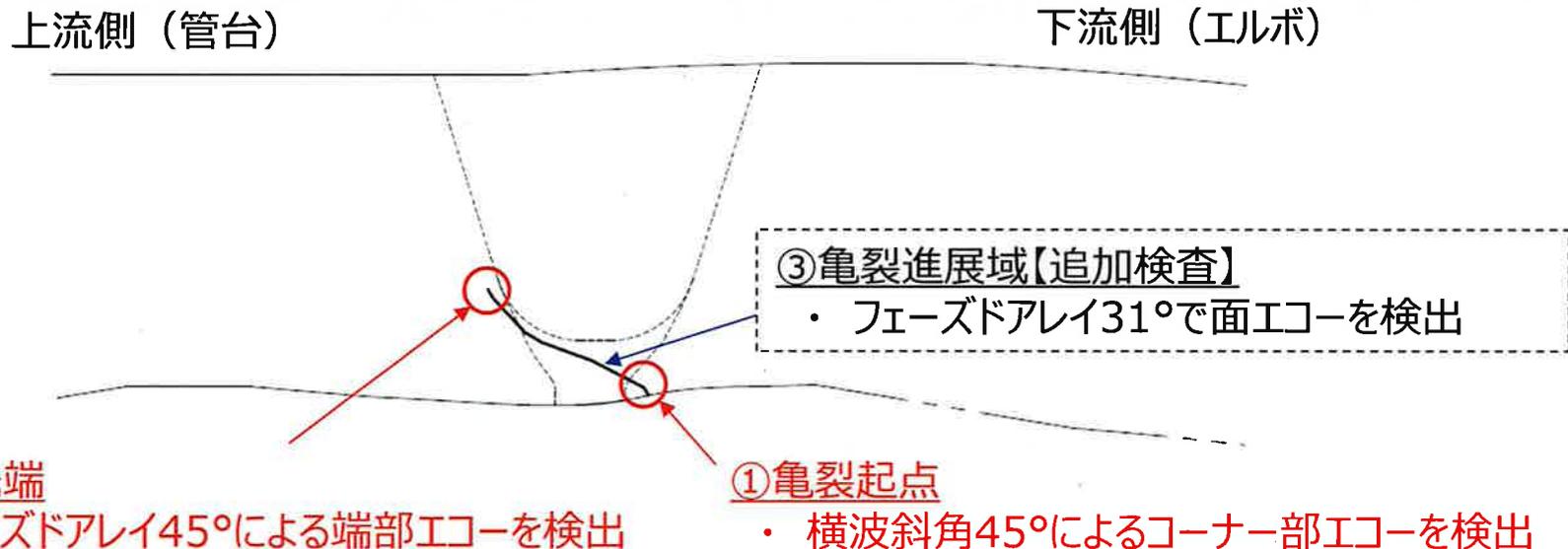
当該溶接部のプロフィール図



非破壊検査、設計データ、実測値などに基づく
亀裂の起点、進展方向、深さの特定について

大飯3号機 加圧器スプレイライン配管溶接部の供用期間中検査結果

目的・狙い	手法	確認項目	適用状況			結果
			上流側	溶金中央	下流側	
<第一段階検査> ISI標準	垂直	垂直方向の探傷により、DAC20%超えのエコーを記録し、有意な指示の有無を確認する。	○	○	○	DAC20%超えのエコーの検出なし (有意な指示は認められなかった)
	横波斜角45°	斜角方向の探傷により、DAC20%超えのエコーを記録し、有意な指示の有無を確認する。	○	○	○	エルボ側から亀裂の起点となる コーナー部エコーを検出・・・① DAC20%超えの有意な指示範囲 を亀裂長さとする。
<第二段階検査> 亀裂深さ測定 (PD)	フェーズドアレイ (縦波斜角45°)	斜角方向の探傷により、端部エコーを検出し、亀裂深さを確認する。	—	—	○	亀裂端部を検出 (亀裂深さを確認)・・・②



①亀裂起点 (1/3)

今回

- ・今回、新たに亀裂からのエコーを検出 (前回(2004年第10回定検)ISI及びPSIでは未検出)
- ・前回(2004年第10回定検)ISI及びPSI (1990年) で確認していた裏波からのエコーの消失を確認
- ・亀裂からのエコーと裏波からのエコーの入れ替わりを確認

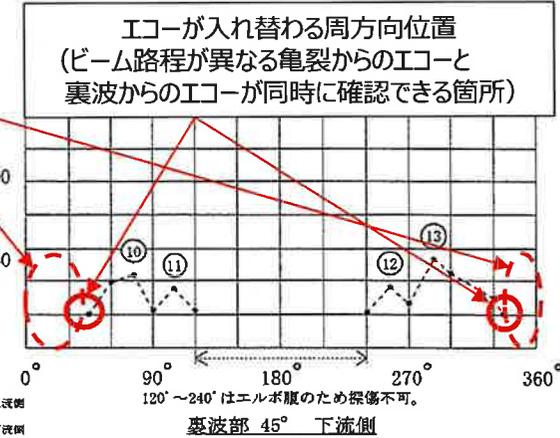
配管系統及びライン名 加圧器スプレイライン (Dループ) 海接線番号 FW-4

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							DAC 20%	
	上流側	下流側	X (mm)	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)	指示範囲 (mm)	指示長さ (mm)
12	○	240°	+16	13	21.0	38	36	240° +0 ~ -24	96
13	○	270°	+17	14	21.0	56	53	240° +0 ~ -24	96
14	○	300°	+18	31	38.0	61	65	240° +0 ~ 120°	240
15	○	60°	+2	3	16.0	70	57	60° -1 ~ 60°	14
16	○	300°	+5	3	16.0	53	43	300° -5 ~ 300°	12
17	○	0°	+3	15	20.0	192	176	0° -24 ~ +13	67

裏波からのエコーの消失 (亀裂からのエコーが検出)

X位置	裏波部			
	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)
0°				
30°				
60°	14	20.0	42	39
90°	14	20.0	24	22
120°	14	20.0	24	22



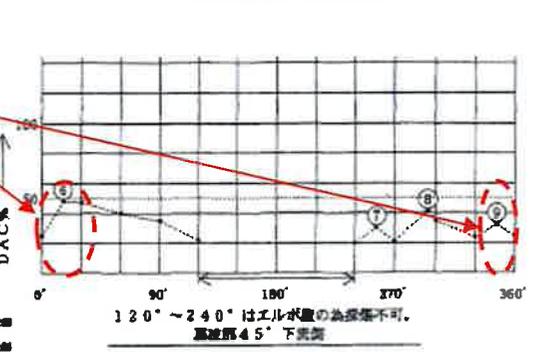
前回 (2004年第10回)

亀裂からのエコーのデータ

6	○	30°	-14	12	21.0	50	48	240° +0 ~ 120°	240
7	○	240°	+18	13	20.0	32	30	240° +0 ~ 120°	240
8	○	270°	+24	15	20.0	44	41	240° +0 ~ 120°	240
9	○	330°	+16	15	21.0	33	32	240° +0 ~ 120°	240

裏波からのエコーを検出

X位置	裏波部			
	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)
0°	13	21.0	26	25
30°	13	21.0	49	47



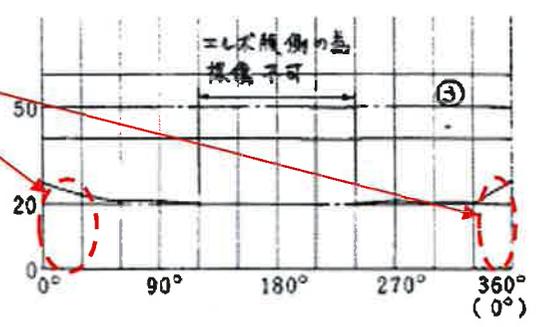
240° ~ 120° の範囲で連続的に裏波からのエコーを検出

PSI (1990年)

v	300°+11	14	21	45	44	240° ~ 120°	240
v	300°+19	30	39	44	48	240°+20 ~ 60°+16	176

裏波からのエコーを検出

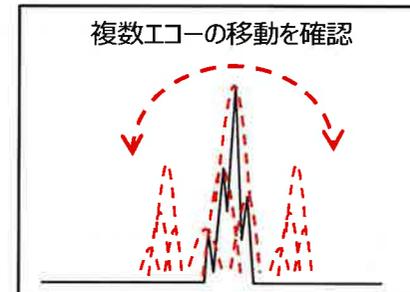
X位置	内 部			
	Y (mm)	W (mm)	CRT (%)	DAC (%)
0°	13	21	28	27
30°	13	21	24	23



①亀裂起点 (2/3)

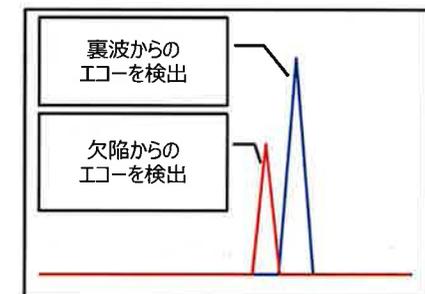
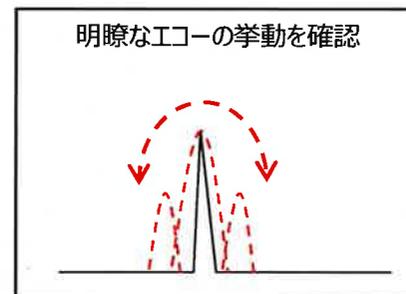
項目	PSI	第10回ISI	今回
Y:溶接中心からの距離 [mm]	13	13	15
W:超音波ビーム路程 [mm]	21	21	20
屈折角 [°]	42.7	43.2	42.3
DAC [%]	27	25	176

裏波からのエコー挙動

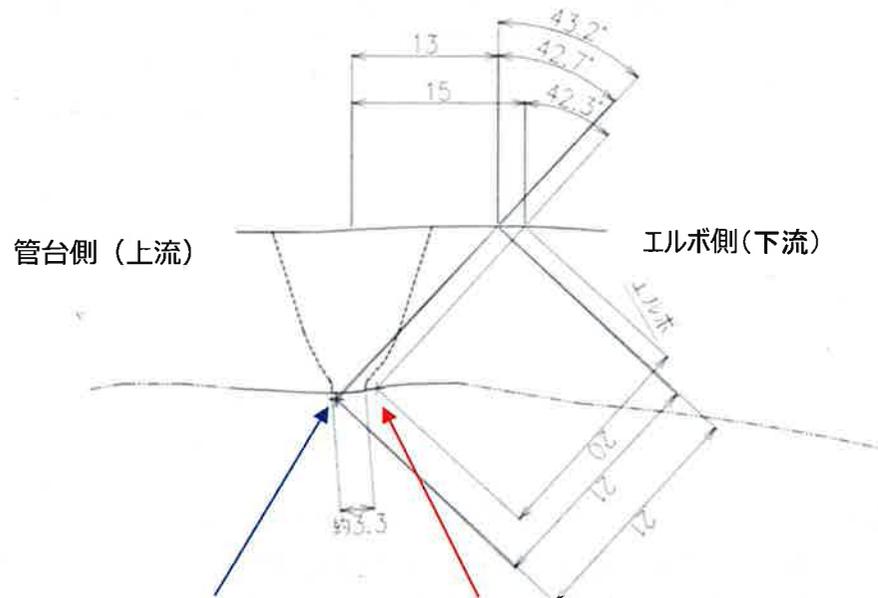


- 裏波からのエコーは裏波形状による複数のエコーとなる

亀裂からのエコー挙動



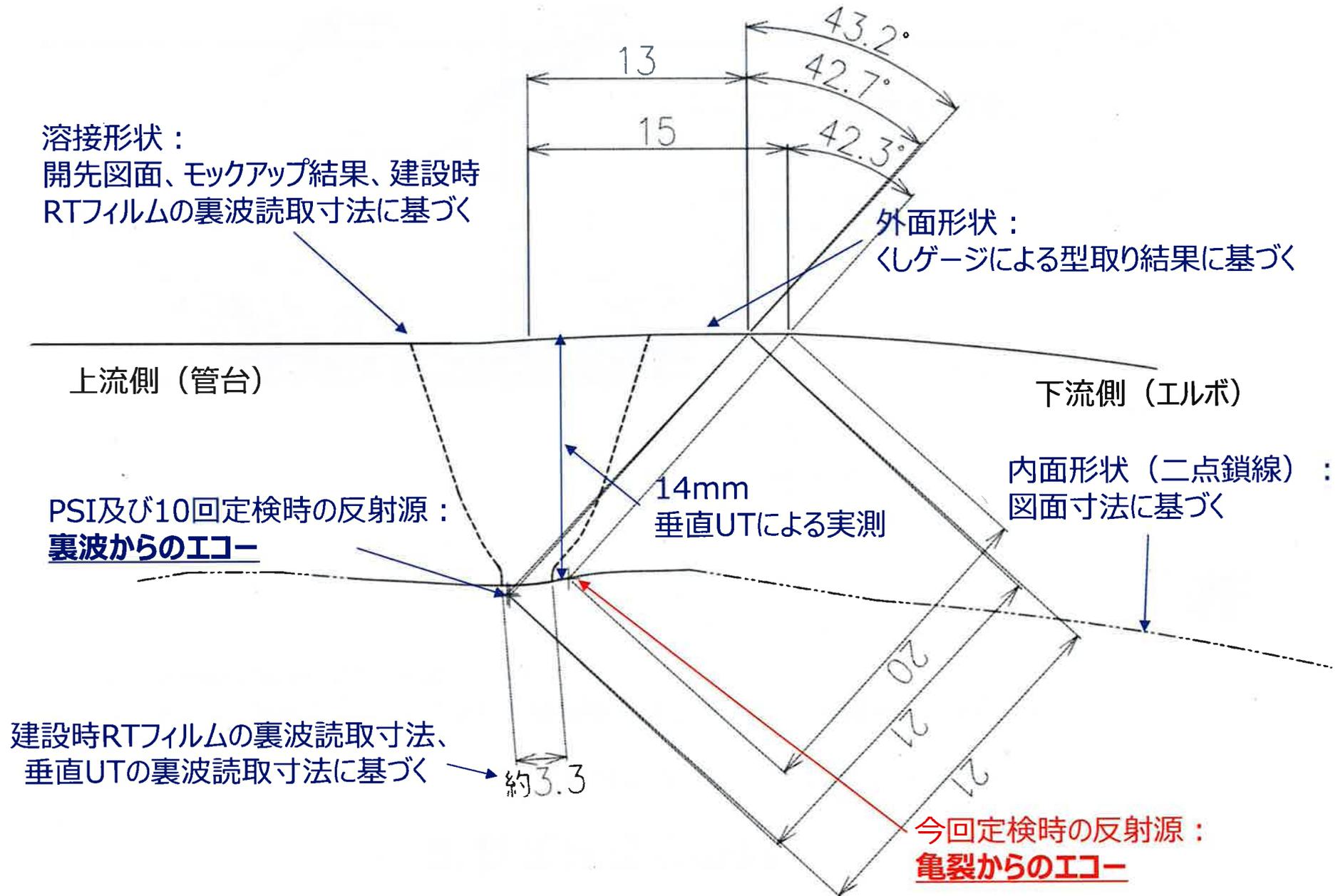
- 亀裂からのエコーは裏波と異なり他のエコーと分離した明瞭なエコーとなる
- 亀裂部と健全部の境界(今回の場合30°、330°近傍)では、裏波と亀裂両方のエコーが確認できる(エコーの入れ替わり)



PSI及び10回定検時の反射源。裏波からのエコー

18回定検時の反射源。亀裂からのエコー

①亀裂起点 (3/3)



② 亀裂先端部の性状

- 下流側（エルボ）からのフェーズドアレイ（縦波斜角45°）により亀裂先端部からのエコーを検出した。亀裂深さを4.6mmと評価した。
- コーナー部エコーから端部エコーにかけて連続的に何らかのエコーが検出（下図）されていた。このことから他の屈折角による確認を行った。

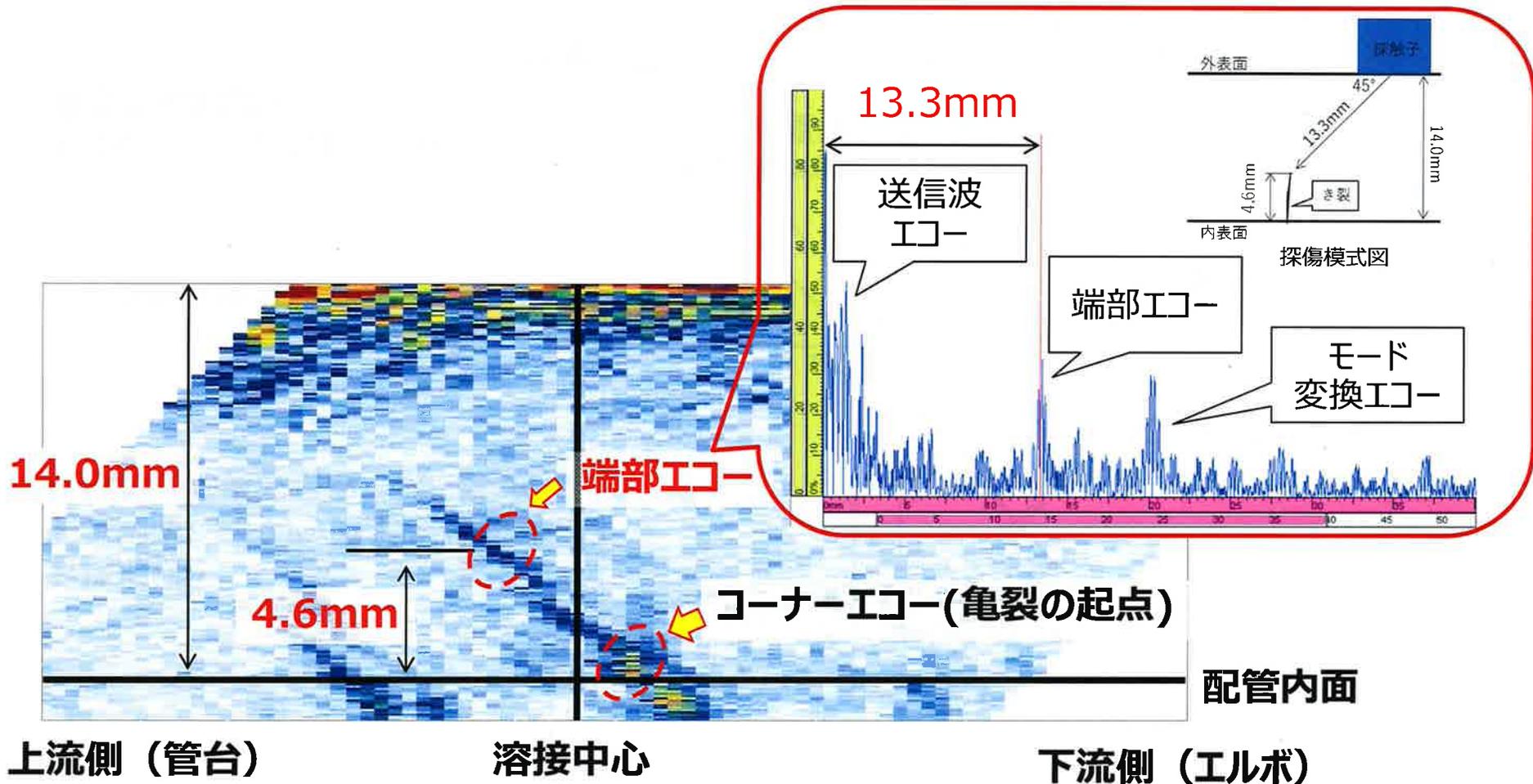


図 フェーズドアレイUT詳細調査結果（下流側屈折角45°）

③亀裂進展域の性状【追加検査】

- 下流側（エルボ）からのフェーズドアレイ（縦波斜角 31° ）により最も顕著な面エコーを検出した。結果を下図に示す。
- 当該部は下流側（エルボ）内表面近傍を起点として上流側（管台）の方向に伸びた亀裂であると推定される。

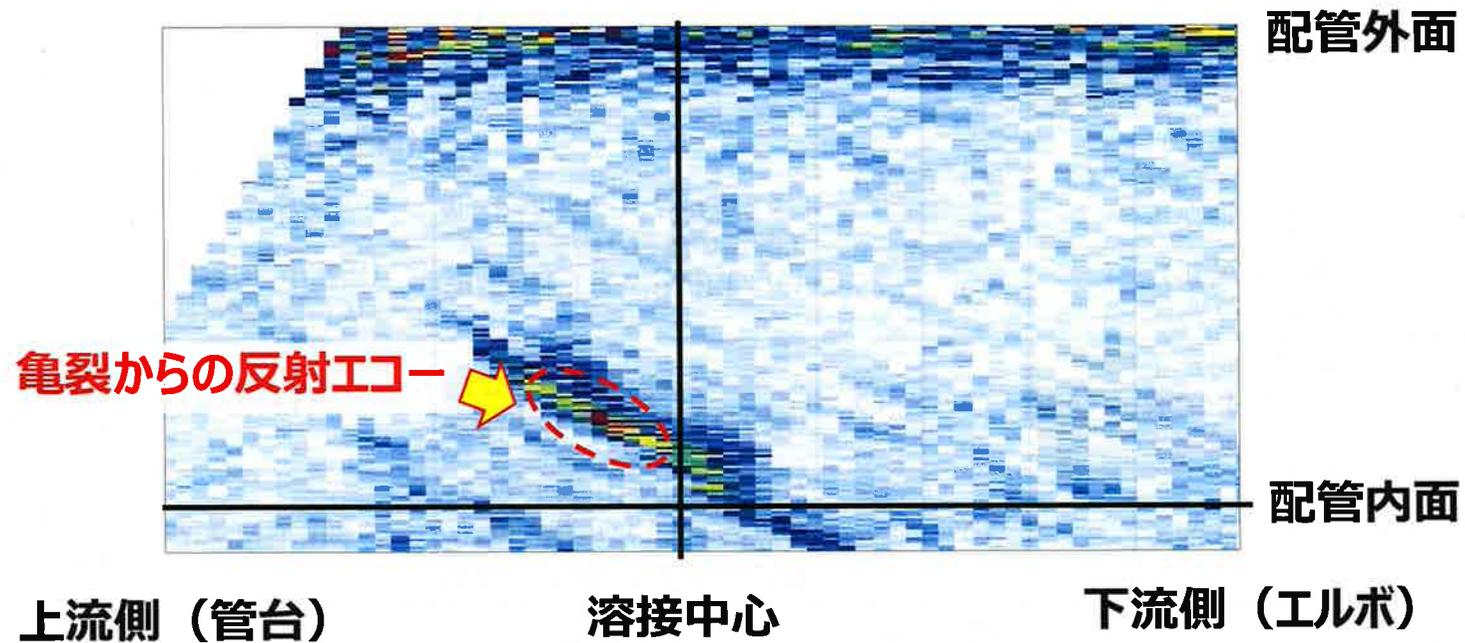


図 フェーズドアレイUT詳細調査結果（下流側屈折角 31° ）

大飯3号機 加圧器スプレライン配管溶接部 追加調査内容と結果 (1/2)

亀裂形状の再プロファイリングを行うため、更に下表のとおり種々の追加調査を実施した。

目的・狙い		手 法	確認項目	適用状況			結 果
				上流側	溶金 中央	下流側	
亀裂形状の 再プロファイリング	亀裂の傾きの確認	①2探小型垂直	探触子の倣い性を良くして 横方向に進展 していると想定されるエコーが出るか確認する。	—	○	—	欠陥エコーなし（底面エコーのみ）
	亀裂の起点の確認	②2次クリーピング	亀裂形状の再確認として 亀裂の起点 を確認する。	○	○	○	下流側（エルボ）からコーナーエコー検出（ISIと同じ結果） 上流側（管台）からは指示なし
	亀裂深さ (4.6mm) の確認	③前後2分割型プローブ (表層用、中層用)	表層用 でエコーを検出しないこと、 中層用 で亀裂の端部エコーを検出することを確認する。	○	○	—	端部エコー未検出 (外表面近傍に指示は認められず)
		④1次クリーピング (表層用) モード変換(中層用)		○	○	○	上流側（管台）・下流側（エルボ） 共に指示なし (外表面近傍に指示は認められず)
		⑤縦波マトリクス フェーズドアレイ	浅い欠陥サイジング用プローブで 表層部 に亀裂からのエコーを検出しないことを確認する。	○	○	○	下流側（エルボ）から屈折角31°で面エコー検出（PDFフェーズドアレイUTと同じ結果） 上流側（管台）から端部エコー指示なし
面形状の確認	⑥横波マトリクス フェーズドアレイ	ワンスキップ で面形状を確認する。	○	○	○	下流側（エルボ）からコーナーエコー検出（ISIと同じ結果） 、面エコーは指示なし 上流側（管台）からコーナーエコー・面エコー共に未検出 (直射、1スキップ)	
外表面の健全性確認		PT（表面検査）	外表面 まで亀裂進展が無いことを確認する。	—	○	—	有意な指示なし (外表面に至る亀裂が無い事を確認)

⇒ 亀裂の起点、進展性状について別手法でも裏付けることができた。

大飯3号機 加圧器スプレイライン配管溶接部 追加調査内容と結果 (2/2)

上流側（管台）から各種超音波探傷を行ったが、探傷エリアに反射源がないことや反射率の低下により亀裂からのエコーは確認できなかった。このことについて、以下のとおり考察した。

×：亀裂からの指示は認められなかった

- ③前後2分割型プローブ → [×] 表層付近に亀裂端部が無いと推定される。
- ④1次クリーピング、モード変換 → [×] 表層付近に亀裂端部が無いと推定される。
- ⑤縦波マトリクスPA → [×] 亀裂の進展方向と超音波の入射方向が平行だと推定される。

上流側（管台）

下流側（エルボ）

⑥横波マトリクスPA → [×]
直射でコーナーエコーが得られないことから、亀裂の起点は管台側に無いと推定される。
1回反射では面エコーを検出できなかった。

②2次クリーピング → [×]
亀裂の起点は管台側ないと推定される。

①2探小型垂直 → [×]
亀裂は板厚方向に対し直交する方向の性状ではなく10°（底面からの角度）以上傾いているものと推定される。

探傷手法	解説Ⅰ	解説Ⅱ	解説Ⅲ	解説Ⅳ
① 2探小型垂直	—	—	×	—
② 2次クリーピング	—	—	—	×
③ 前後2分割型プローブ	—	—	—	×
④ 1次クリーピング・モード変換	—	—	—	×
⑤ 縦波マトリクスPA	×	—	—	—
⑥ 横波マトリクスPA	—	×	×	—

解説Ⅰ：直射の場合、亀裂面に対して超音波が平行に近いことから、反射率が低く、検出できない。

解説Ⅱ：底面反射時の音圧反射率が著しく低下するため面エコーを検出できない。

解説Ⅲ：超音波の欠陥への入射角と亀裂面角度差により反射率が低下するため、面エコーが検出できない。

解説Ⅳ：対象となる部位に反射源（亀裂）が確認されなかった。

No. 3

類似の配管の溶接部の溶接方法、溶接後の状態を提示すること（当該部分ではないが、標準的なもの）

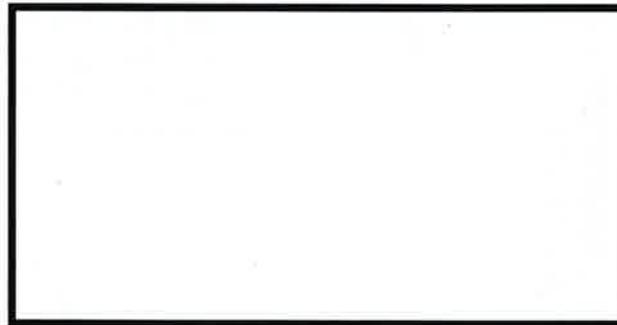
当該部の配管仕様は以下の通りである。

- ・材質；SUS316
- ・寸法； $\phi 114.3 \times t13.5\text{mm}$

また、当該部の溶接工法は以下の通りである。

- ・初層：TIG 溶接、2 層目以降：被覆アーク溶接

当該部は U 型開先を採用しており、母材のルート部分を TIG 溶接にて施工する。残部の溶接は被覆アーク溶接にて施工する。溶接積層を図－1 に示す。



図－1 溶接積層図

以上の配管仕様及び溶接工法を同一条件としてモックアップを製作した。モックアップ溶接部の断面状況を図－2 に示す。

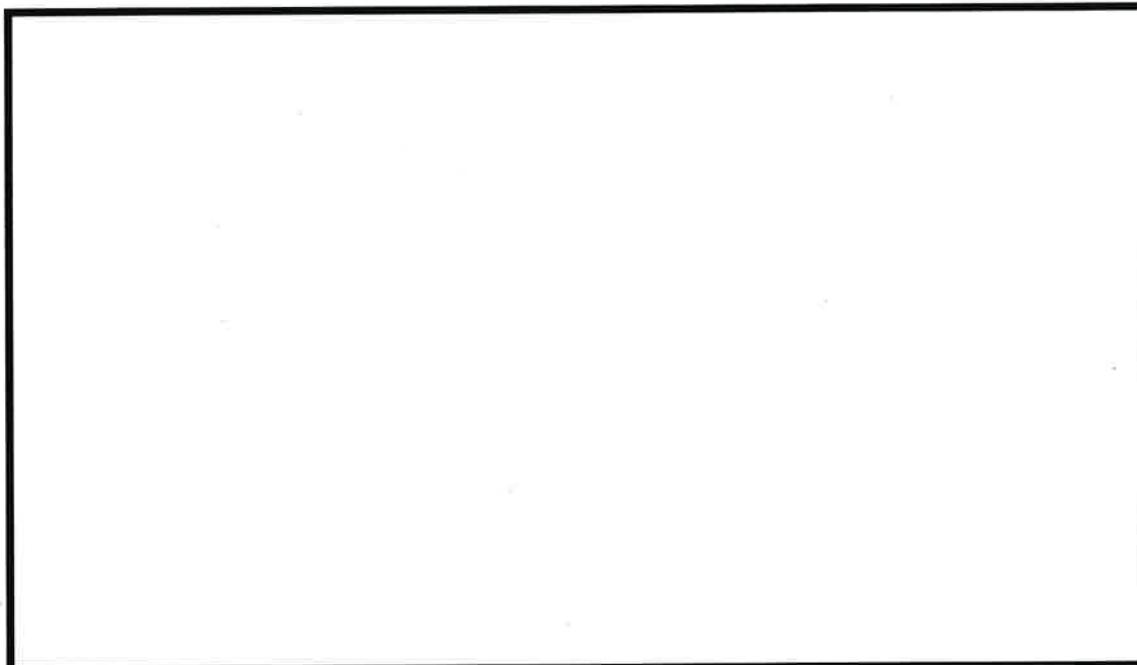


図－2 モックアップ溶接部断面図

：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。

母材である SUS316 材は、オーステナイト系ステンレス鋼であるため、組織中にフェライトは殆ど存在しないが、フェライトを含む 316 系ステンレスの溶接材料を供給して形成された溶接部は、一定量のフェライトを含む。

U 型開先の初層 TIG 溶接は、母材のルート部を溶融しつつ、溶接材料を供給して溶接部を形成するため、初層以外の溶接ビードと比較して母材の希釈率が大きくなる傾向にある（図－1 参照）。部分的に溶接材料の供給量が少なくなった場合、母材の希釈率が増すため、フェライト量が低下する可能性が考えられる。



図－3 フェライト量想定

シェフラー図は JISZ3119 (2006) より転載

今回、製作した実機サイズのモックアップ (SUS316、 $\phi 114.3 \times t13.5\text{mm}$) にて、溶融部のフェライト調査を実施した（図－4、5 参照）。その結果、約 3～6%程度のフェライトが確認された。今回のモックアップで使用した溶接材料のフェライトは 7%であり、実機で使用された溶接材料のフェライトも 7%であるため、当該溶接部のフェライト量は同等の 3～6%程度になっている可能性がある。

: 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。

PWR一次系環境下における溶接金属のSCC進展性については、これまで実機での事例がなく、研究知見は乏しいものの、SCC進展挙動を確認した研究において、フェライト 8%以上でSCC進展性が認められていない成果がある。しかしながらフェライト 7%以下の材料における知見はないこと、環境は異なるものの、BWRプラントの再循環配管では、一部溶接金属を亀裂が進展している例も確認されていることから、溶融部の δ フェライト量が 7%以下になっている場合、SCCにより亀裂が進展した可能性も考えられる。

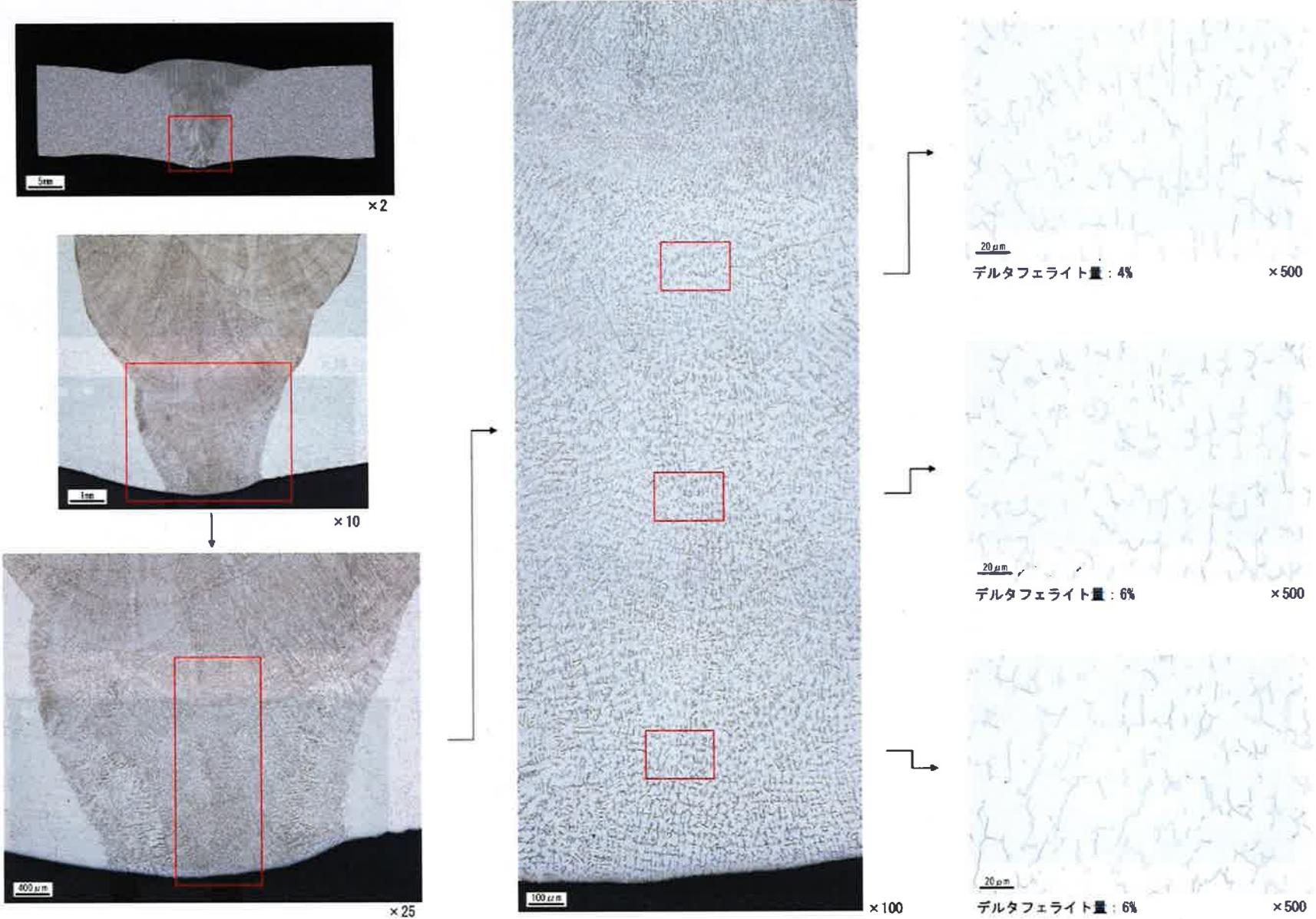


図-4 モックアップによるδフェライト確認結果

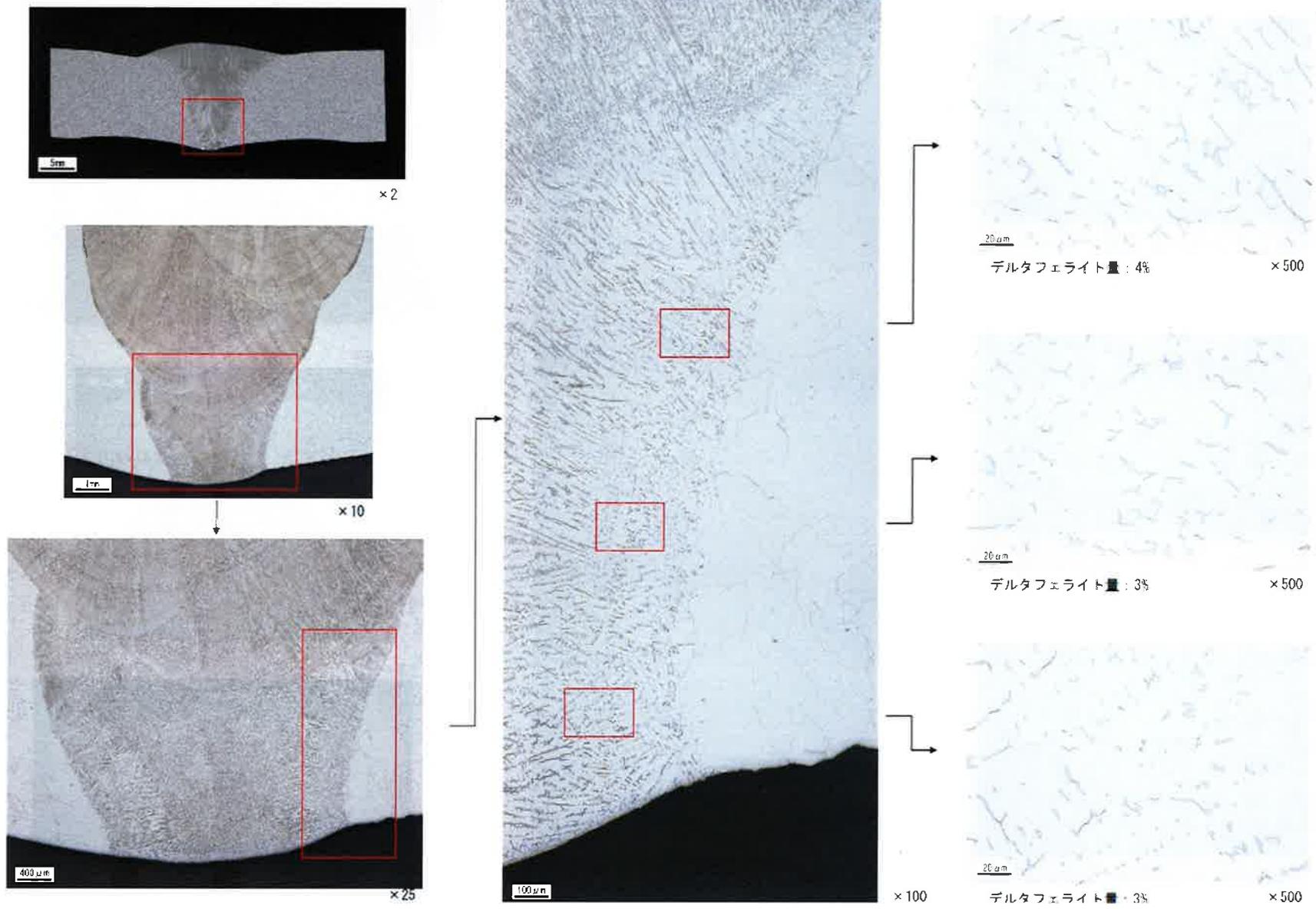


図-5 モックアップによるδフェライト確認結果

No. 4

亀裂の原因として強加工SCCを推定しているが、強加工SCCより進展性の高いと思われる原因（高サイクル疲労）については、その程度を踏まえて可能性を排除できる十分な根拠を示すこと

本事象の発生原因について、FT図に基づき要因検討を行った。FT図をNo. 4 添付-1（2020年9月11日 公開会合資料1-2抜粋）に示す。FT図に示すとおり、発生原因としては、「強加工SCC」と「製造欠陥」によるものと推定している。

ここでは、「強加工SCC」以外の原因について整理した結果をNo. 4 添付-2に示す。

(評価の概要)

(結果)

機械的疲労

振動による
疲労

振動の励振源として考えられるのは RCP の n 成分 (20Hz) であるが、当該配管の一次固有振動数は 13.5Hz と乖離しており、疲労損傷を誘発する振動は想定しにくい。なお、過去に振動により損傷した事例は 3/4B のソケット溶接小口径分岐管がほとんどで、4B もの大口徑配管の突合せ溶接部が振動による疲労で損傷した事例は無い。

×

熱疲労

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。

×

熱過渡による
疲労

設計評価の結果、熱過渡による累積疲労損傷係数は十分に小さく、要因とは考えられない。環境効果を考慮しても問題ない。

×

SCC

O₂SCC

当該部は閉塞部ではなく、一次系水質として、溶存酸素濃度は 5ppb 以下に管理されており、要因とは考えられない。

×

CL-SCC

当該部は閉塞部ではなく、一次系水質として、塩化物イオン濃度は 50ppb 以下に管理されており、要因とは考えられない。

×

強加工 SCC

当該部は、シンニング加工により表層で 300HV を超える硬さとなっていることが想定され、BWR 環境下の SCC 発生試験の結果を踏まえると、PWR 環境下でも SCC が発生する可能性を否定しきれない。また、当該部は溶接の影響で板厚内部でも 200HV を超える硬さとなっていることが想定され、PWR 環境下の亀裂進展データによれば亀裂の進展が想定される。従って、要因である可能性があるものと考えられる。

○

製造欠陥

建設時の非破壊検査 (RT 等) によれば、欠陥は認められておらず、要因とは考えにくい。欠陥の性状によって検出限界以下のごく微小な欠陥が存在し、何らかの形で関与した可能性は否定しきれない。

× (△)

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以外の原因の整理

<振動による疲労>

励振源として想定し得るものには一次冷却材ポンプ(RCP)のn成分があるが、当該配管の固有振動数(13.5Hz)はn成分(20Hz)から十分に離れており、共振の可能性は考えにくい。

ここでは、仮に当該部がn成分と同一周波数である20Hzで振動したものと仮定し、亀裂進展性について検討した。

検討条件を以下に示す。

- ・振動応力変動幅 : 48MPa
維持規格(2019年追補)に記載がある、疲労亀裂の進展が認められる応力拡大係数変動幅 ΔK の下限值 ΔK_{th} ($2.7\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)に相当する値
- ・平均応力 : 300MPa
当該部の運転応力100MPa、溶接残留応力200MPa
- ・初期疲労亀裂深さ : 1mm

上記の検討条件において、維持規格に基づき、オーステナイト系ステンレス鋼のPWR一次系水質環境中の疲労亀裂進展速度を算出すると、約 $6 \times 10^{-6}\text{mm/cycle}$ となる。RCPのn成分20Hzに相当する周波数を想定すれば、この時の亀裂進展速度は、約3,700mm/年となり、14mmの配管厚さに1mmの初期亀裂を想定した場合の残厚13mmを貫通するのに要する時間は約30時間と評価される。また、振動応力変動幅48MPaというのは、一次冷却材配管管台部に約7mmの強制変位を与えて発生する振動応力変動幅であり、点検にて異常を検知可能なレベルであると考えられる。

以上の結果からも、振動による疲労が原因とは考えにくい。

<高サイクル熱疲労>

当該配管は常時RCS低温側の水が通水(流量:約3.8L/min、温度:約290℃)されており、キャビティフロー型熱成層、弁シートリーク型熱成層、運転操作型熱成層の対象部位のいずれにも該当せず、高低温水合流部における温度ゆらぎの対象部位でもない。

過去に高サイクル熱疲労で発生した損傷事例としては、1999年の美浜2号機余剰抽出配管におけるキャビティフロー型熱成層によるものが知られている。美浜2号機の事例では、100℃の流体温度変動が100秒の変動周期で発生し、その後 10^6 回オーダの繰返し数で貫通に至ったものと想定されているが、当該配管は常時通水されていることから同様の流体温度変動が生じることは考えられない。

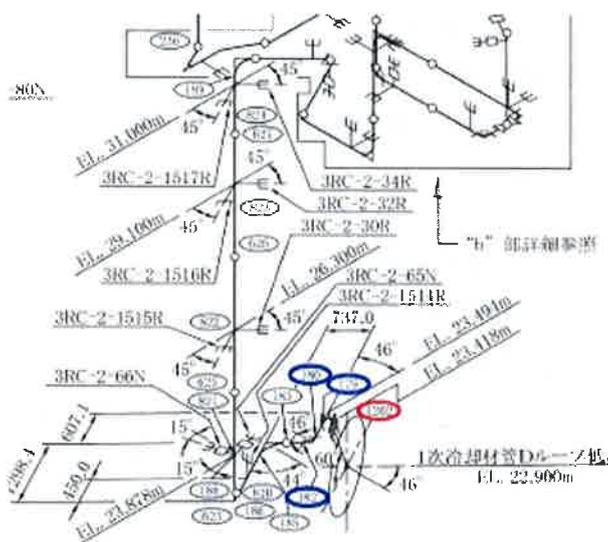
以上の結果から、高サイクル熱疲労が原因とは考えにくい。

<熱過渡による疲労>

加圧器スプレイ配管は、認可された工事計画にて、設計・建設規格のクラス1管の規定に従い、応力解析を実施している。解析においては、実際に発生する過渡状態を十分満足するよう包絡した評価を実施しており、図-1に示すとおり、疲労累積係数（40年運転）は0.00013と十分余裕のある値になっている。

また、最も保守的に係数倍法を適用して環境疲労評価を実施した場合、環境効果補正係数は約20であり、環境疲労累積係数は約0.0026となり、これも十分余裕のある値になっている。

以上の結果から、熱過渡による疲労が原因とは考えにくい。



節点番号	圧力による応力 (MPa)	各荷重による応力 (MPa)	両厚方向線形温度差による応力 (MPa)	構造上の不連続性による熱応力 (MPa)	両厚方向非線形温度差による応力 (MPa)	ヒートアップによる応力 (MPa)	過渡状態による応力 (MPa)	環境効果補正係数	疲労累積係数	許容値
400	53.6	11.5	296.1	0.0	117.5	479	240	211	0.00012	1.0
622	48.8	28.8	298.1	0.0	117.1	163	232	232	0.00008	1.0
238	53.2	56.0	298.1	0.0	117.1	195	248	248	0.00012	1.0
260	79.7	31.1	319.9	0.0	221.3	652	340	350	0.20928	1.0
364	79.9	38.5	351.9	0.0	221.3	692	346	371	0.33096	1.0
266	79.9	14.8	351.9	0.0	221.3	698	349	371	0.33741	1.0
1203	79.9	16.4	351.9	0.0	221.3	700	350	375	0.35069	1.0
1202	91.3	294.9	6.8	0.0	2.6	366	152	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	152	151	0.00007	1.0
182	91.3	146.5	6.8	0.0	2.6	248	144	139	0.00005	1.0
183	89.9	84.7	6.8	0.0	2.6	175	88	98	0.00000	1.0

図-1 疲労評価結果

(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時のメーカ確認資料)

<O₂ SCC、CL-SCC>

当該配管は、常時通水されており、閉塞滞留部ではない。また、図-2に示すとおり、実機PWRプラントの一次冷却材水質は、溶存酸素濃度は0.005ppm以下、塩化物イオン濃度は0.05ppm以下に管理されており、SCCが発生しない領域となっている。

以上の結果から、O₂ SCC及びCL-SCCが原因とは考えにくい。

表1 PWR一次系水質基準例

分析項目	単位	基準値	制限値	推奨分析項目 基準値	突検値
1 pH	25℃	*1			
2 導電率	25℃ μ S/cm	*1			
3 水素濃度	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 可溶鉄	mgFe/l			≦0.05	<0.01
11 シリカ	mgSiO ₂ /l			≦0.5	~0.3

*1 B-L系の各濃度の割合によって決まる(μ S/cm 1~40・pH4.2~10.5)
*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)

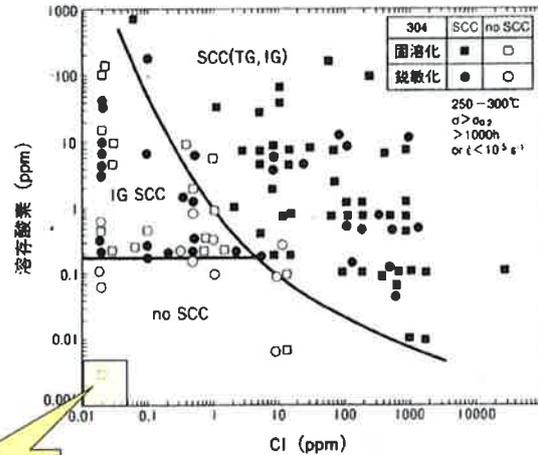


図1 304ステンレス鋼の高温高圧水による応力腐食割れに
およぼす溶存酸素とCl⁻イオンの関係
出典：「新版 金属の腐食損傷と防食技術 P389」小若正倫 著

PWR一次系水質管理値
・DO₂ ≦ 0.005ppm
・Cl⁻ ≦ 0.05ppm

図-2 PWR一次冷却材水質管理基準及び SCCに及ぼす溶存酸素濃度と塩化物イオン濃度の関係

亀裂進展速度と硬さの関係を整理すること

(亀裂の発生と硬さの関係)

開先合わせのため内表面にシンニング加工が施されている部位は、加工後の硬さが 300HV 以上となることが確認されている。過去に取得されたシンニング部の表層部硬さの分布を図-1 に示す。

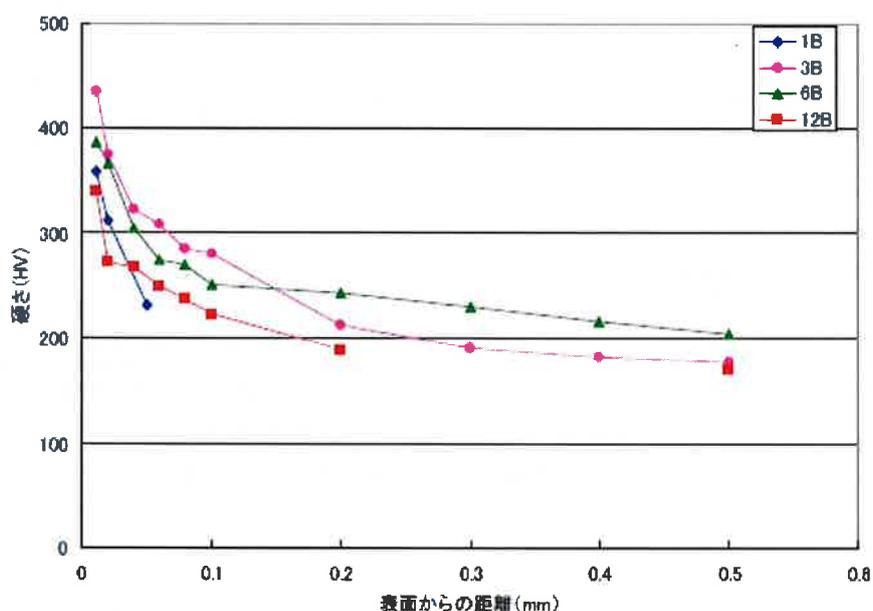


図-1 シンニング部の表層部硬さ分布
(出典：製造メーカー社内モックアップデータ)

図-1 のとおり、口径によらずシンニング加工により 300HV 以上の表層部硬さとなっていることから、今回事象箇所の 4B 配管についても 300HV 以上の硬化が表層部に生じているものと判断している。(3B、6B 配管の硬さデータから 4B 配管の硬さを算出しているものではない)

BWRでは 300HV 以上の硬さで SCC が発生するものと考えられており、PWRにおいても SCC の発生については明確な知見はないものの、200HV 以上の硬さがあれば亀裂の進展性が確認されていることから、PWR 環境下においても SCC 発生については否定できないと考えている。

一方で、今回の損傷事象については溶接部のごく近傍で生じていることから、溶接欠陥等であることも否定できないことから、1 サイクル後の実機調査において、発生要因の検証を行っていく。

(亀裂の進展と硬さの関係)

PWR 環境下における亀裂進展速度に関しては、電共研にて硬さ依存性データが採取されている (図-2 参照)。この亀裂進展速度は、図-3 に示す CT 試験片を用い、試験期間中一定の荷重を負荷し、試験終了後、破壊調査にて破面の確認を行い、SCC 亀裂の進展量を算出している。なお、CT 試験片は、所定の硬さ (200HV, 250HV 等) となるよう冷間引張にて硬さを付与している。

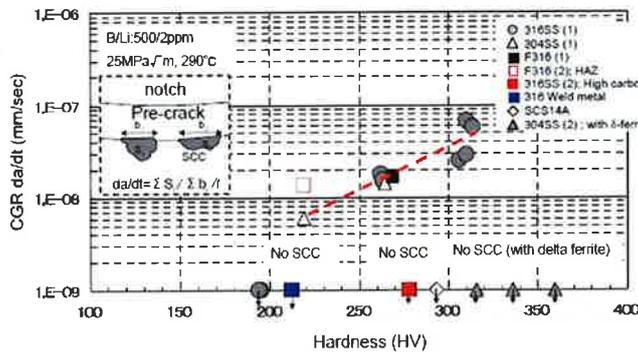


Fig. 6 Hardness / Material and Crack Growth Rate

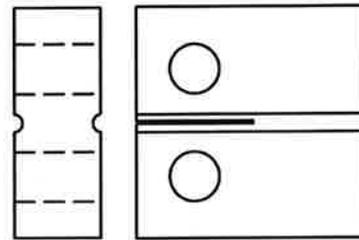


図-3 CT 試験片

図-2 PWR 環境下の硬さと亀裂進展速度の関係

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.

9/11 の会合にて示した進展評価では、図-4 の電共研における TIG 溶接施工時における板厚内部の硬さ分布を基に進展評価を行っている。



測定結果 (HV)

■ : 溶接金属内

4BTIG	軸方向 溶接境界からの距離 [mm]																
	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	
内表面からの距離 (mm)	5	148	152	150	156	155	152	157	163	166	167	176	171	170	184	191	185
	4	153	153	154	153	153	157	155	166	169	163	178	180	177	192	188	191
	3	155	156	157	160	154	160	168	167	171	174	175	187	184	187	192	207
	2	153	155	158	162	163	172	169	174	171	178	183	184	190	182	189	203
1	158	158	156	160	165	168	168	170	180	186	189	197	201	191	193	209	

図-4 4B 配管 TIG 溶接 板厚内部硬さ測定結果

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」

図-4の硬さの内、内表面からの距離ごとに、溶接境界からの距離のデータの中で高い硬度の値を以下の通り抽出し評価を行っている。

- 配管内面～3 mm未満：209HV
- 3 mm以上～4 mm未満：207HV
- 4 mm以上～5 mm未満：192HV
- 5mm 以上～外面側：191HV（計測データがないため5mm位置と同等と設定）

一方で、実機で採用している TIG+SMAW 溶接では、TIG 溶接による溶接部周辺の硬さに比べて硬さが小さくなる傾向があるため、それを確認するとともに深さ 5mm 以降の硬さ情報を得るため、No. 3で示したモックアップを使用して硬さ計測を行った。板厚内部の硬さについては、溶接に伴う収縮により、溶接部近傍において素管部より硬さが上昇することが確認された（図-5）。



図-5 4B 配管 TIG+SMAW 溶接 板厚内部硬さ測定結果

出典：製造メーカー社内モックアップデータ

なお、図-6に示すとおり、図-5の新たに取得した硬さが、図-4の電共研の成果の硬さ分布に包絡されていることも確認しており、電共研成果の硬さに基づいたSCC進展評価は実機の硬さを考慮した上でも保守的であると考えている。

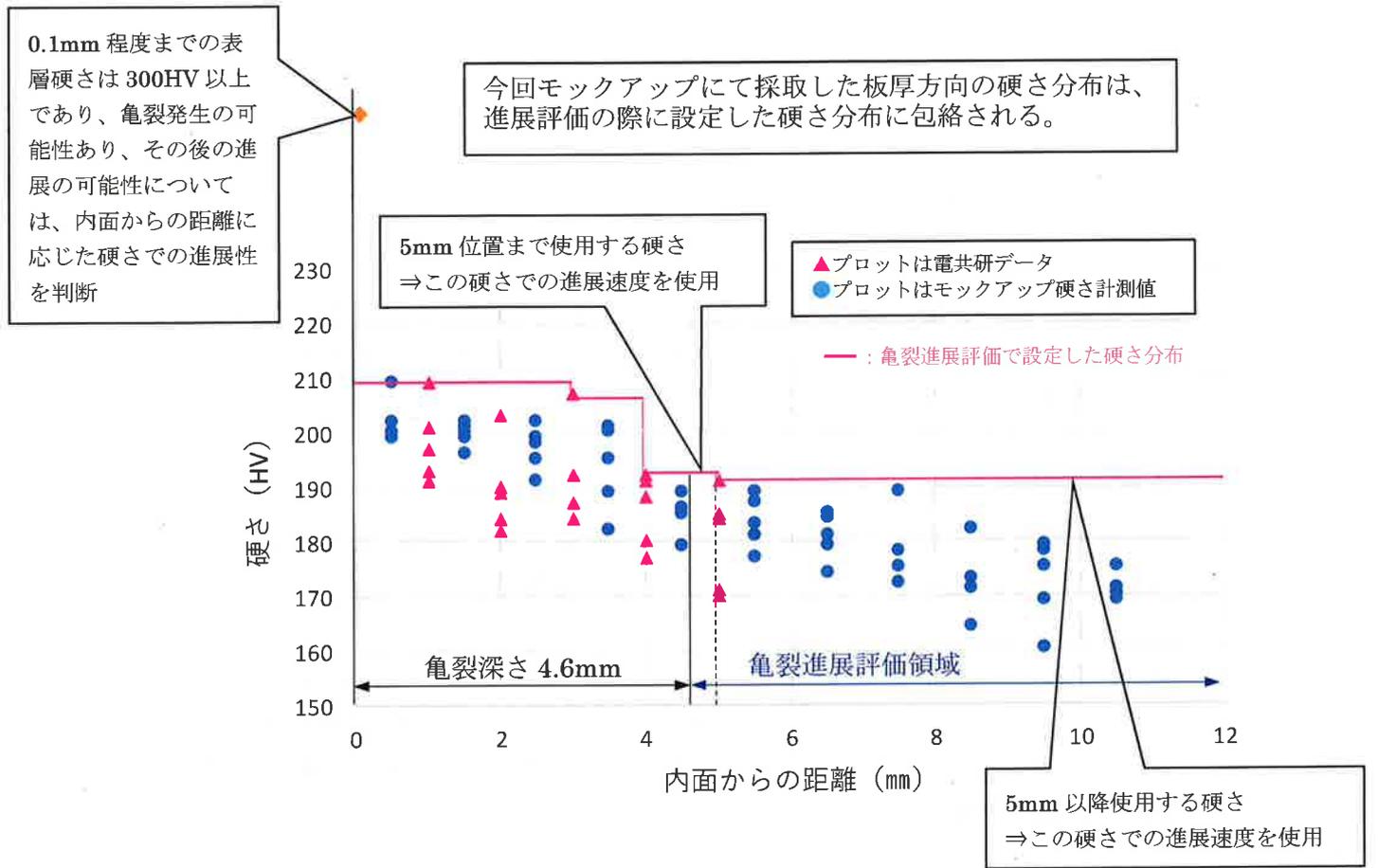


図-6 亀裂進展評価に用いる硬さ分布の考え方

今後の欠陥の評価の保守性と今ある欠陥の経緯を評価する際の保守性を整理すること

亀裂進展評価は、亀裂進展式による。また、進展式は応力と硬さに依存しているため、今後の亀裂進展評価と、今ある亀裂の経緯を評価する進展評価における各々の入力条件/保守性について、以下に示す。

① 今後の欠陥の評価

亀裂形状を考慮すると、今後の亀裂進展が考慮される領域 (≥ 4.6 mm) は、包絡曲線式による評価により以下の通り保守性が確保されている。

・亀裂進展式：

過去の電力共通研究の試験結果では、195HV 以下の硬さでは亀裂進展が認められないが、保守的に亀裂進展評価を行うために、195HV 以下の硬さについても、進展するものとした。また、進展速度の保守性を大きく確保するため包絡曲線式を適用した。

・硬さ：

硬さは内表面から外表面に向かうほど減少する傾向を示すため、一般的には亀裂進展の速度は遅くなるが、5 mm以上の範囲はモックアップ試験での 5mm の硬さの値を一定値として保守性を確保している。なお、5mm 以上の範囲でより保守的な値となることは、今回新たにモックアップを作成し、確認している。

② 今ある亀裂の経緯の評価

今ある亀裂 (< 4.6 mm) の経緯を評価するに当たっては、モックアップ試験の結果と実測データを基とした BFC 式による評価を実施している。

・亀裂進展式：

過去の研究試験の結果では、195HV 以下の硬さでは亀裂進展が認められないが、モックアップ試験の結果から今ある亀裂位置までの大半の範囲は硬さが 195HV を上回っていることから、亀裂進展式の保守性は特に考慮していない。

・硬さ：

モックアップ試験の結果から、今ある亀裂位置までの大半の範囲は硬さが195HVを上回っているため、内面からの板厚毎の計測データの最大値を基にした硬さを分布させている。

よって、今後の亀裂進展評価と今ある亀裂の経緯の再現評価では、亀裂進展式及び硬さの保守性の考慮度合は異なる。

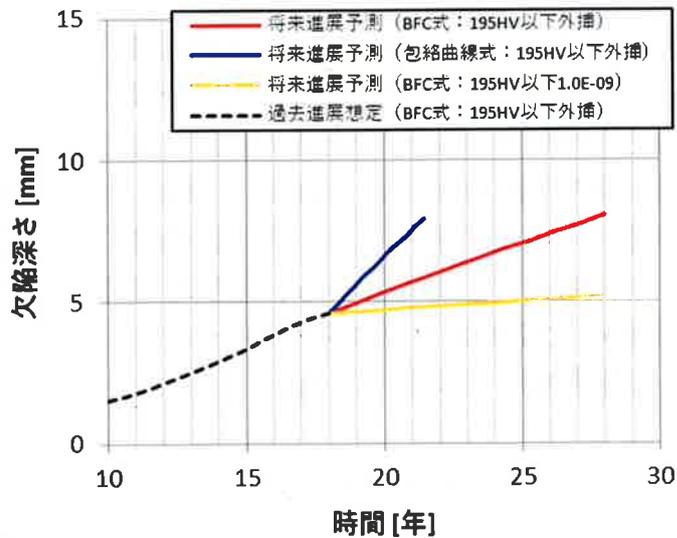


図-1 亀裂進展線図

これまでの亀裂の進展 (4.6mm まで) については、モックアップから取得した195HVを超える硬さを考慮したBFC式による評価で、現実的な進展評価となっており、前回ISI時に想定される欠陥深さについても検出限界 (2.8mm) 以下の1.5mm となったことから、BFC式による進展評価は概ね妥当であると考えている。

一方、今後の亀裂進展の評価では、195HV以下の硬さにおける進展を考慮するとともに、BFC式よりも進展速度の速い包絡曲線式を用いることで、より保守的な評価を行っている。

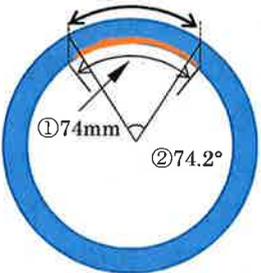
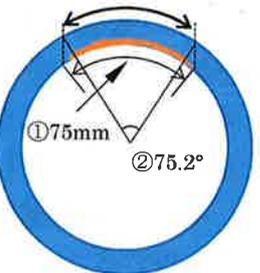
なお、1サイクルの進展評価の結果、想定される欠陥深さは5.8mmであり、包絡曲線式による評価の保守性を考慮すると、1サイクル後の配管厚さは必要最小板厚の8.2mmを満足することから、技術基準規則第17条の構造及び強度の要求を満足する。また、維持規格に基づく許容欠陥寸法の限界の評価および許容曲げ応力の評価を満足することも確認しており、技術基準規則第18条の使用中の亀裂等による破壊の防止の要求を満足する。

外面の欠陥角度を示しているが、内面の場合の欠陥角度を再度計算すること

1. 欠陥角度の考え方

UT で検出された指示長さ 67mm は配管外表面での値であり、前回報告を行った亀裂進展評価においては、評価結果が保守的になるように JEAC4207 に基づき測定された配管外表面での指示長さ 67mm を配管内表面における欠陥長さとしてモデル化し、評価期間末期の予測欠陥寸法（BFC 式：74mm、包絡曲線式：75mm）と評価した。一方、前回報告時にご指摘いただいた欠陥角度については配管外表面での指示角度をベースに考えていたことから、亀裂進展評価後の欠陥角度については、進展評価結果の欠陥長さを基に外径ベースで算出したものであった（BFC 式：74.2°，包絡曲線式：75.2°）。（表－1）

表－1 前回評価結果における欠陥長さと欠陥角度の関係

初期欠陥 (欠陥モデル化)	進展後 (BFC 式：10 年後)	進展後 (包絡曲線式：3.4 年後)
<p>①指示長さ 67mm</p>  <p>②67mm ①指示角度 67.2°</p> <p>欠陥モデル化は①外表面の指示長さ、指示角度をベースに内表面の②モデル化欠陥長さを設定</p>	 <p>①74mm ②74.2°</p> <p>①評価結果 74mm 基に 外径ベースで②欠陥角度を算出</p>	 <p>①75mm ②75.2°</p> <p>①評価結果 75mm 基に 外径ベースで②欠陥角度を算出</p>

前回のご指摘を踏まえ、欠陥角度の見直し評価の方法として、以下の 2 つのパターンが考えられる。

・パターン 1

UT で検出された指示長さは DAC20% を超える範囲の配管外表面において測定された長さであり、実際の欠陥は配管内表面で検出されたことから、実際の亀裂長

さは配管内表面における長さに置き換えることができると考えられる。

この考え方に基づくと、配管内表面におけるモデル化欠陥長さは以下の式の通り、外表面における指示長さに内周と外周の比を乗じることで求めることができる。

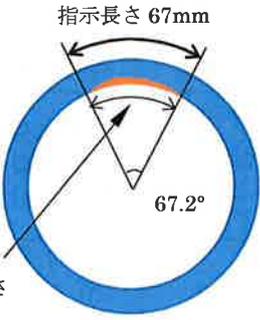
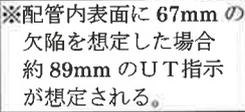
$$67\text{mm} \times \frac{(114.3\text{mm} - 2 \times 14.0\text{mm}) \times \pi}{114.3 \times \pi} = 50.5\text{mm} \rightarrow 51\text{mm}$$

上記計算により、今回検出された亀裂の配管内表面におけるモデル化欠陥長さは 51mm となる。この場合、初期の欠陥角度は UT 測定での指示角度 67.2° と一致する。

・パターン 2

UT で検出された指示長さ 67mm を配管内表面におけるモデル化欠陥長さとしてモデル化し、初期の欠陥角度を設定した欠陥モデルの角度より設定する。この場合、欠陥角度は 89.0° と算出された。

表-2 見直し後の欠陥長さ と 欠陥角度 の 関係

パターン 1	パターン 2
	

UT 測定の結果から実際の欠陥寸法はパターン 1 に近いものと考えられるが、より保守的な評価結果となる欠陥長さ・欠陥角度が大きいパターン 2 で評価を行った。

2. 評価結果

1. で見直したパターン 2 のモデル化欠陥寸法、欠陥角度を用いて許容欠陥寸法の限界の評価および許容曲げ応力による評価を実施した。結果を表-3～表

－5に示す。

欠陥角度が大きくなることで、評価結果は前回報告時の結果より厳しい結果となった。その結果、評価期間をBFC式で6.1年、包絡曲線式で2.1年とした場合の健全性が確認できた。

なお、初期欠陥寸法に保守性を持たせていることから、今回の評価では疲労過渡回数については評価期間に合わせた回数とした。

表－3 当該欠陥の亀裂進展評価結果（欠陥角度見直し：[]内は前回報告結果）

	BFC式		包絡曲線式	
	評価期間：6.1年 [10年]		評価期間：2.1年 [3.4年]	
	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 [4.6]	67 [67]	4.6 [4.6]	67 [67]
SCCによる進展量	2.2 [3.5]	3 [6]	2.3 [3.5]	3 [7]
疲労による進展量 ^{注2}	0.3 [0.5]	1 [1]	0.2 [0.5]	1 [1]
評価期間末期の亀裂寸法	7.1 [8.6]	71 [74]	7.1 [8.6]	71 [75]

注1 深さ進展量、長さ進展量はそれぞれ各評価値の小数点以下第2位、小数点以下第1位を切り上げ

注2 疲労過渡回数は評価期間に合わせる
[疲労による進展量は評価期間10年分の運転過渡を考慮]

表－4 許容欠陥寸法の限界の評価（欠陥角度見直し：[]内は前回報告結果）

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	6.1年 [10年]	7.1 [8.6]	71 [74]	94.3 [74.2]	7.5 (0.54 t ^{注3}) [9.6] [(0.69 t ^{注4})]	○
包絡 曲線式	2.1年 [3.4年]	7.1 [8.6]	71 [75]	94.3 [75.2]	同上	○

注3 JSME維持規格 事例規格 表1(4)の欠陥角度 $\leq 120^\circ$ 、溶接施工法GTAWの許容欠陥深さ

注4 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-5 許容曲げ応力による評価 (欠陥角度見直し: []内は前回報告結果)

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	6.1 年 [10 年]	A, B	3.8	16.3 [16.8]	○
		C+Ss	64.8	65.1 [66.0]	○
		D+Sd	52.0	68.9 [69.7]	○
		SA	3.8	58.5 [59.4]	○
包絡曲線式	2.1 年 [3.4 年]	A, B	3.8	16.3 [16.5]	○
		C+Ss	64.8	65.1 [65.4]	○
		D+Sd	52.0	68.9 [69.1]	○
		SA	3.8	58.5 [58.7]	○

3. 1 サイクル後の亀裂進展評価結果

2. で評価した条件に基づき、1 サイクル後の亀裂進展評価を実施した。その結果 1 年後の欠陥深さは BFC 式、包絡曲線式でそれぞれ 5.1mm、5.8mm、欠陥長さは BFC 式、包絡曲線式でそれぞれ 69mm、70mm となった。評価結果を表-6～表-8 に示す。

包絡曲線式による 1 サイクル後の亀裂進展量 5.8mm の場合、当該部の残り厚さは $14.0\text{mm} - 5.8\text{mm} = 8.2\text{mm}$ となり必要最小厚さを満足することから、技術基準規則第 17 条の構造及び強度の要求を満足する。また、維持規格に基づく許容欠陥寸法の限界の評価および許容曲げ応力の評価を満足することから、技術基準規則第 18 条の使用中の亀裂等による破壊の防止の要求を満足する。

表-6 当該欠陥の亀裂進展評価結果: 1 サイクル後

	BFC 式		包絡曲線式	
	評価期間: 1 サイクル		評価期間: 1 サイクル	
	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	0.4	1	1.1	2
疲労による進展量 ^{注6}	0.1	1	0.1	1
評価期間末期の亀裂寸法	5.1	69	5.8	70

注5 深さ進展量、長さ進展量はそれぞれ各評価値の小数点以下第2位、小数点以下第1位を切り上げ

注6 疲労過渡回数は評価期間に合わせて1サイクル分を考慮

表-7 許容欠陥寸法の限界の評価：1サイクル後

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 ($^\circ$)		
BFC式	1サイクル	5.1	69	89.7	9.6 (0.69 t ^{注7})	○
包絡 曲線式	1サイクル	5.8	70	90.6	7.5 (0.54 t ^{注8})	○

注7 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

注8 JSME 維持規格 事例規格 表1(4)の欠陥角度 $\leq 120^\circ$ 、溶接施工法GTAWの許容欠陥深さ

表-8 許容曲げ応力による評価：1サイクル後

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	1サイクル	A, B	3.8	24.9	○
		C+Ss	64.8	82.4	○
		D+Sd	52.0	85.5	○
		SA	3.8	75.3	○
包絡曲線式	1サイクル	A, B	3.8	22.2	○
		C+Ss	64.8	76.9	○
		D+Sd	52.0	80.2	○
		SA	3.8	69.9	○

○参考：パターン1による評価結果

参考として、パターン1：初期欠陥モデル長さ51mmをベースに亀裂進展、破壊評価を実施した結果を参考表-1～参考表-3に示す。

初期欠陥モデル長さを51mmとした場合、BFC式を採用した場合の10年後の亀裂深さ/長さは前回報告の8.6mm/74mmから8.2mm/59mmに小さくなる。一方、進展後の欠陥角度については内表面長さベースに見直すことで前回報告74.2°から78.4°に大きくなるが、JSME維持規格の事例規格(NA-CC-002)に基づく許容欠陥寸法の限界は変化しないことから判定基準を満足する。また、破壊評価における許容曲げ応力もほとんど変化はなく、前回報告の評価期間10年を満足し、その期間での健全性が確認できた。包絡式による評価結果についても同様に前回報告の評価期間3.4年での健全性が確認できた。

参考表-1 当該欠陥の亀裂進展評価結果(初期欠陥長さ51mm:[]内は前回報告結果)

	BFC式		包絡曲線式	
	評価期間：10年[10年]		評価期間：3.4年[3.4年]	
	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 [4.6]	51 [67]	4.6 [4.6]	51 [67]
SCCによる進展量	3.2 [3.5]	7 [6]	3.2 [3.5]	7 [7]
疲労による進展量 ^{注参考2}	0.4 [0.5]	1 [1]	0.4 [0.5]	1 [1]
評価期間末期の亀裂寸法	8.2 [8.6]	59 [74]	8.2 [8.6]	59 [75]

注参考1 深さ進展量、長さ進展量はそれぞれ各評価値の小数点以下第2位、小数点以下第1位を切り上げ

注参考2 包絡曲線式についても、疲労による進展量はBFC式に合わせて評価期間10年分の運転過渡を考慮

参考表-2 許容欠陥寸法の限界の評価(初期欠陥長さ51mm:[]内は前回報告結果)

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 [10年]	8.2 [8.6]	59 [74]	78.4 [74.2]	9.6 (0.69 t ^{注参考3})	○
包絡 曲線式	3.4年 [3.4年]	8.2 [8.6]	59 [75]	78.4 [75.2]	同上	○

注参考3 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

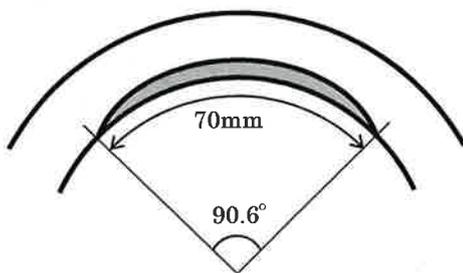
参考表-3 許容曲げ応力による評価（初期欠陥長さ 51mm：[]内は前回報告結果）

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 [10 年]	A, B	3.8	16.8 [16.8]	○
		C+Ss	64.8	66.0 [66.0]	○
		D+Sd	52.0	69.7 [69.7]	○
		SA	3.8	59.3 [59.4]	○
包絡曲線式	3.4 年 [3.4 年]	A, B	3.8	16.8 [16.5]	○
		C+Ss	64.8	66.0 [65.4]	○
		D+Sd	52.0	69.7 [69.1]	○
		SA	3.8	59.3 [58.7]	○

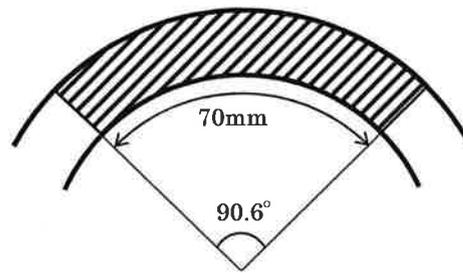
仮にスプレイ配管が破断した際、漏えい検知対策やスプレイ配管破断時の炉心損傷頻度の考え方を提示すること

LBB 成立性

今回、ISI で検出された欠陥に対して、1 サイクル運転後の進展量について初期モデルを保守的においた包絡式 (No. 6 参照) で算出したところ、1 サイクル後の想定亀裂は、亀裂深さ：5.8mm、亀裂長さ：70mm、亀裂角度 2θ ： 90.6° という非貫通亀裂として評価されました。LBB 成立性を確認するため、この亀裂形状を下図のように扇型の貫通亀裂と想定しても、その際の貫通亀裂角度 2θ は 90.6° であり、大飯 3 号機の設計においては日本電気協会「原子力発電所配管破損防護設計技術指針 (JEAG4613)」に従い、4B 配管には 96.9° の想定亀裂角度 2θ で LBB が成立していることを確認していることから、今回、検出された欠陥は LBB が成立するものと考えています。

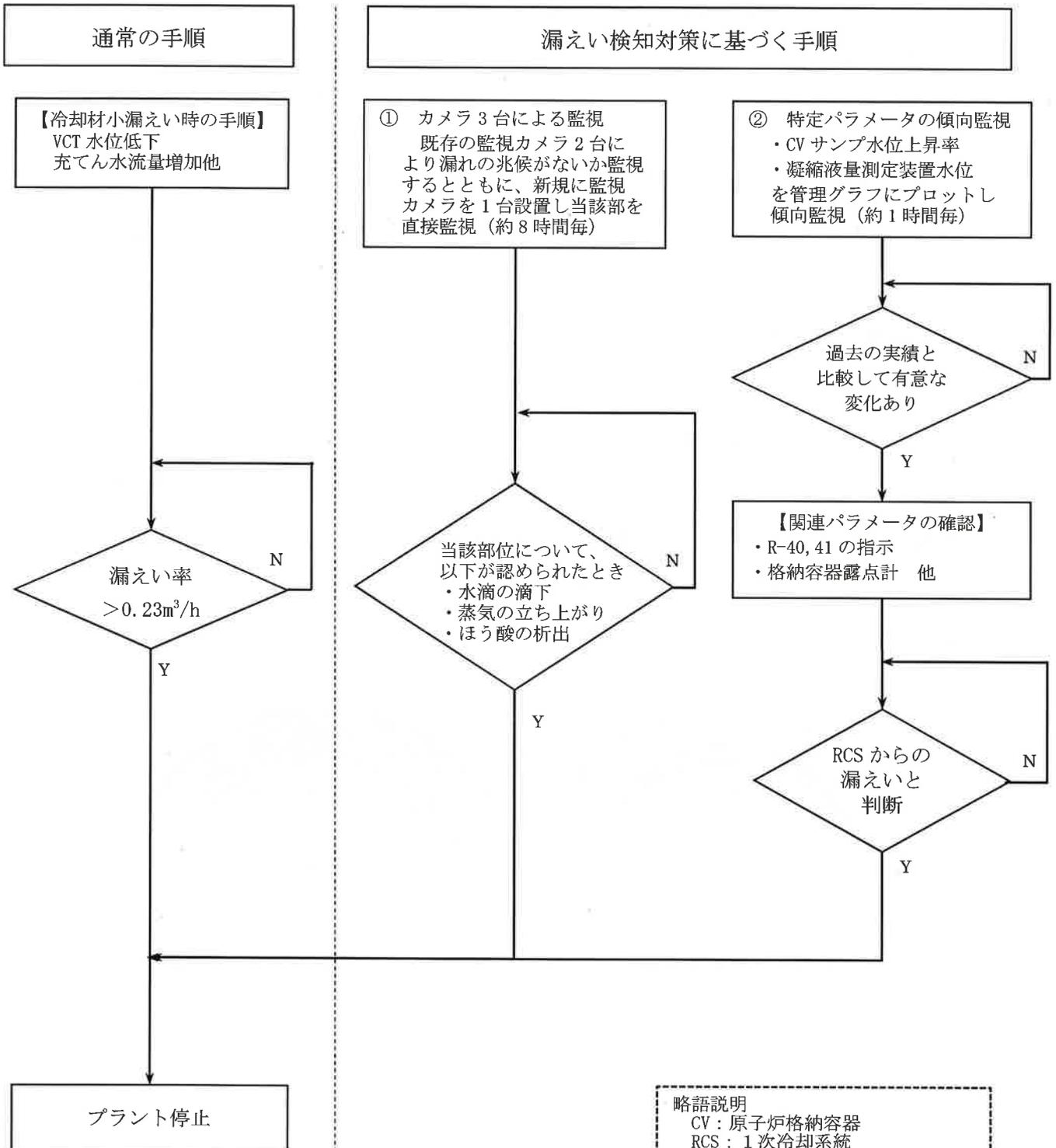


進展後の想定亀裂形状



LBB 評価として想定する貫通亀裂形状

漏えい検知対策



略語説明
 CV : 原子炉格納容器
 RCS : 1次冷却系統
 VCT : 体積制御タンク
 LOCA : 1次冷却材喪失事故
 R-40 : 格納容器じんあいモニタ
 R-41 : 格納容器ガスモニタ

3号機 加圧器スプレイライン配管 (Dループ) 付近の監視状況イメージ図

<EL 26m確認画像>



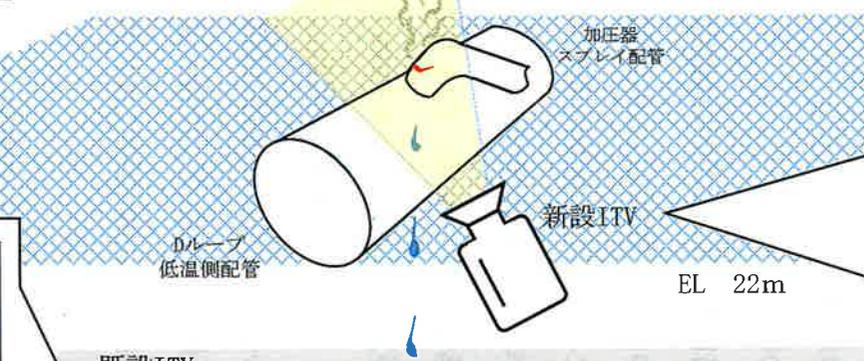
確認ポイントに赤マーキング実施



<EL 22m確認画像>



当該部位



<EL 17m確認画像>



確認ポイントに赤マーキング実施



当該配管が破損した場合の炉心損傷頻度への影響

当該配管の亀裂については保守的な評価に基づき 1 サイクル運転後においても破損が生じるものではないことを確認しており、また、万一の破損を考慮し、漏洩監視強化対策により配管破断等を未然に防止することとしている。

しかしながら、確率論的リスク評価 (PRA) においては内部事象としての配管破断や地震による配管破断も考慮しているため、本事象による評価への影響について以下に考察する。

(運転中における影響)

・内部事象 PRA の観点

仮に運転中に当該配管にギロチン破断が発生した場合は口径 (約 4 インチ) から考えるといわゆる中破断 LOCA の状態となるが、高圧注入及び蓄圧注入が自動作動することにより炉心の損傷を防止することができる。また、仮に 2 系統ある高圧注入系がいずれも作動不能であった場合においても、2 次系強制冷却 (補助給水 + 主蒸気逃がし弁開) により炉心の圧力を低下させ低圧注入を作動させる重大事故等対策により炉心の損傷を防止することができる。

しかしながら、これらの多重の対策によっても機器の故障やヒューマンエラーが重畳して炉心損傷に至る可能性は排除できないことから、PRA においてはその確率 (条件付き炉心損傷確率: CCDP) を評価しているが、大飯 3 号の過去の評価結果では $3.8E-4$ (約 2600 回中 LOCA が発生した場合に 1 回失敗する程度の確率) となっている。

亀裂を考慮した当該配管の破断頻度を定量化することはできないため、炉心損傷頻度 (CDF) としての影響は算出することはできないが、前述のとおり炉心損傷防止対策の失敗確率が小さいことと漏洩監視の強化により配管破断の発生頻度を低減できていることを併せて考えると、大幅にリスクが上昇している状態であるとは考えていない。

参考までに、現状の内部事象 PRA 評価において用いている中破断 LOCA の発生

頻度を仮に2倍とした場合でもその影響は限定的である。

発生頻度 (中破断 LOCA) (/炉年)	条件付き 炉心損傷確率 (中破断 LOCA)	CDF (中破断 LOCA) (/炉年)	CDF (合計) (/炉年)	Δ CDF
ベースケース (1.2E-04)	3.8E-04	4.5E-08	1.9E-06 (1.89E-06)	—
発生頻度2倍 (2.4E-04)	3.8E-04	9.0E-08	1.9E-06 (1.94E-06)	4.5E-08

・地震 PRA の観点

亀裂発生部位について、下表に示す通り、1 サイクル運転後の想定亀裂を保守的に評価した包絡式の条件を考慮した場合の Ss 地震裕度は 1.19 であり、健全な場合（亀裂のない場合）の Ss 地震裕度は 2.00 である。両者の比率を見ると、0.595 であり、これは健全な場合に比べて亀裂が発生することによって約 40% 耐力が低減していると考えられることができる。

	1 サイクル運転後 想定亀裂 (包絡式)	亀裂なし ^{注1}
欠陥深さ a_f	5.8mm	0mm
欠陥長さ l_f	70mm	0mm
自重応力 P_D	3.8MPa	3.8MPa
Ss 地震力 P_{Ss}	61.0MPa	61.0MPa
許容曲げ応力 S_c	76.9MPa	126.1MPa
Ss 地震裕度 ($S_c - P_D$) / P_{Ss}	1.19	2.00

注1 亀裂なしについても、欠陥深さ/長さをそれぞれ 0mm（微小な欠陥を考慮した場合と同じ）として、維持規格に基づき破壊評価を実施し、Ss 地震裕度を算出

ここで、地震 PRA において用いている当該配管の脆弱性が亀裂を想定した場合の耐力の低減によって同様に低減すると考えて評価した場合、CDF は、

亀裂発生前の $5.97\text{E}-07$ (／炉年) から $4.72\text{E}-09$ (／炉年) 増加して $6.02\text{E}-07$ (／炉年) となる。

以上より、亀裂の影響を考慮しても地震時の炉心損傷頻度への影響は極めて軽微であり、当該箇所における亀裂の存在が地震時のリスクを大幅に上昇させる要因となることはないといえる。

	Ss 耐震裕度	CDF (／炉年)	Δ CDF
亀裂なし	2.00	$5.97\text{E}-07$	—
1 サイクル運転後の 亀裂想定 (包絡式)	1.19	$6.02\text{E}-07$	$4.72\text{E}-09$

(停止時における影響)

停止時の一次冷却材の水位の状態には大きく分けて満水といわゆるミッドループ運転状態がある。満水状態では一次冷却材温度が 60°C 、圧力は約 2.7MPa であり運転中と比べ大幅に圧力が低いことから、地震を考慮しても当該配管を含めた一次冷却材バウンダリの破損は考え難い。

また、仮に当該配管が破損したとしても、冷却材の水位は配管レベル以下にはならないため炉心は露出せず、またその後の炉心冷却には多様な手段(高圧注入ポンプ、充てんポンプ、蓄圧タンク、恒設代替注水ポンプ)があることから炉心損傷のリスクは極めて小さいものと考えられる。

ミッドループ期間においては同じく温度約 60°C で圧力は大気圧となっているため破損の可能性はさらに低く、仮に当該配管が破損しても、破損箇所よりも一次冷却材の水位が低い場合冷却材の流出は発生しない。

以上のことから、停止時に配管破損による炉心損傷リスクは極めて低いと考えられる。

なお、停止時のリスク評価に係る原子力学会標準*においても、プラント停止中の配管破断による原子炉冷却材事象については「人的過誤を起因とする冷却

材流出事象で代表できる場合には、停止期間中の配管破断に起因する冷却材流出事象を起因事象から除外する。」とされている。

※ 日本原子力学会標準 「原子力発電所の停止状態を対象とした確率論的リスク評価に関する実施基準（レベル 1PRA 編）：2019」 AESJ-SC-P001:2019

（起動時における影響）

起動時においては、配管破損の観点で出力運転中に比べ厳しくなる要素は考えられず、緩和系の待機状態（ECCS 自動作動状態など）にも差異はないことから、出力運転中の評価に包含され、前述の学会標準において、停止時のリスク評価の対象外とされている。

以 上

No. 8

前回 ISI からの正確な稼働時間（原子炉運転時間）を提示すること

前回 ISI 実績：2004 年 5 月 8 日（～第 10 サイクル：97,306 時間 02 分）

前回 ISI 以降の運転実績（原子炉運転時間）

サイクル	原子炉起動	原子炉停止	運転時間
11	2005 年 1 月 13 日 7 時 20 分	2005 年 3 月 8 日 5 時 2 分	3,436 時間 45 分
	2005 年 3 月 26 日 19 時 00 分	2005 年 6 月 24 日 2 時 3 分	
12	2005 年 8 月 2 日 23 時 45 分	2006 年 9 月 27 日 11 時 45 分	10,092 時間 00 分
13	2006 年 12 月 7 日 21 時 23 分	2008 年 2 月 2 日 11 時 47 分	10,118 時間 24 分
14	2008 年 11 月 5 日 21 時 00 分	2009 年 10 月 31 日 11 時 47 分	8,630 時間 47 分
15	2010 年 1 月 22 日 0 時 36 分	2010 年 4 月 29 日 11 時 54 分	9,210 時間 16 分
	2010 年 6 月 5 日 5 時 00 分	2011 年 3 月 18 日 11 時 58 分	
16	2012 年 7 月 1 日 21 時 00 分	2013 年 9 月 3 日 1 時 6 分	10,276 時間 6 分
17	2018 年 3 月 14 日 17 時 00 分	2019 年 4 月 11 日 12 時 5 分	9,427 時間 5 分
18	2019 年 6 月 26 日 21 時 15 分	2020 年 7 月 20 日 12 時 36 分	9,351 時間 21 分
計	—	—	70,542 時間 44 分

70,542 時間 44 分=8.05 年