

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18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

■ 2020年9月18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保守性を含む亀裂進展評価について、これまでの説明から変更した設定条件等を明らかにするとともに、過去の想定及び今後の予測に関する説明性を向上すべく、前回製作したモックアップの表層部及び溶接金属部の硬さ測定、並びに残留応力評価を実施した。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 (2)	内面形状確認の範囲を中心部から±10mm でプロファイルしているが範囲はもっと幅広くすべきではないか、検討し説明すること。	1
② (2)	板厚を 14mm と設定して計測しているが、内面形状確認結果では 14mm を超過した結果もあるので考え方を整理して説明すること。	2
③ (2)	9/11 公開会合における PD 手法の測定要領にある探傷条件（資料 1 - 3 17 ページ）と、現場の探傷条件が異なるので妥当性を説明すること。	4
④ (3)	モックアップの実寸法を提示すること。 また一部日本語的に分かりにくい文章があったので修正すること。	6
⑤ (4)	今回亀裂が発生した配管の位置関係（コールドレグ・加圧器からどれほど離れているか等）を提示すること。	12
⑥ (5-1)	表面硬さ（表層硬さ）の分析結果を今回の亀裂の分析に用いていないということだが、K 値等に影響が出ないか検証し説明すること。	13
⑦ (5-2)	今の評価モデルは母材を用いているが、今回発生した亀裂の大部分は溶接金属部を通っていることから、溶接金属部を評価モデルとした評価結果を提示すること。	15
⑧ (5-2)	亀裂進展線図において過去進展想定にもいろんなパターンがあり得ることから、評価をするにあたり、過去の進展がどうなのか、また今後は保守性を考慮し亀裂が進展してもどう問題ないのかを説明すること。	17
⑨ (7)	漏洩検知手順において、プラント停止後の手順ならびに亀裂により配管破断した場合の後処理についても提示すること。	31
⑩	資料 1 - 3、表 1.4.10 の供用状態 A, B の数字と表 1.4.4 の数字の関係性を説明すること。	33

※（ ）内は、資料 1 - 2 の回答事項 No を示す。

No. ① (2)

内面形状確認の範囲を中心部から±10mmでプロファイルしているが範囲はもっと幅広くすべきではないか、検討し説明すること。

内面形状確認は、亀裂の起点及び裏波からの反射源の位置特定を目的として行っている。JEAC4207-2008に反射源の種類分類を行うための詳細板厚測定範囲は、反射源の種類に必要な範囲とされていることから、今回得られた不連続部及び裏波部からの反射源を含む範囲として、溶接線中心から±10mmの範囲(図-1参照)を測定範囲としており、亀裂の起点及び裏波からの反射源の位置特定を行うにあたり十分であると考えている。

<JEAC4207-2008 2712 試験結果に基づく反射源の位置及び種類の解析>

反射源の位置の解析として、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反射源の種類解析として、検出されたエコーについて、その反射源が欠陥に基づくものか、試験部の金属組織的变化又は形状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。

<(JEAC4207-2008 解説-2712-1) 反射源の位置の解析 (3)>

内面形状変化がある場合で、反射源の種類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。このとき、オーステナイト系ステンレス鋼の詳細板厚測定を行う場合は、反射源の種類に必要な範囲にわたり、概ね2.5mm間隔での測定が望ましい。

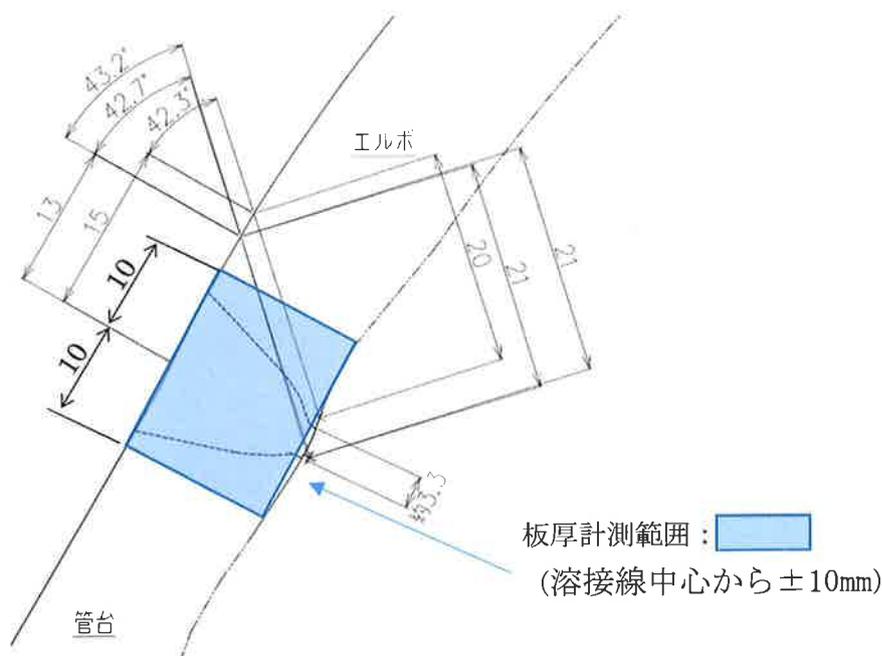


図-1 板厚測定範囲と反射源位置

No. ② (2)

板厚を 14mm と設定して計測しているが、内面形状確認結果では 14mm を超過した結果もあるので考え方を整理して説明すること。

亀裂深さ d は、別紙 JEAC4207-2008 解説 A-4730(3)b. 項に基づき、板厚を欠陥開口部近傍の板厚 T とし、その値からフェーズドアレイの結果により直接求まる亀裂先端部までの距離 Z を減じて算出している ($d=T-Z$)。

したがって、板厚は亀裂の起点部近傍の計測値である 14.0mm としている。

亀裂深さ d は、JEAC4207-2008 解説図 A-4730-1 にあるように亀裂起点部から亀裂先端までの板厚方向距離であることから、亀裂が存在する範囲において板厚が変化する場合であっても、板厚変化の影響は受けない。

なお、板厚変化があるとした場合でも、必要最小厚さ 8.2mm は、設計建設規格に基づき外径（公称値）を用いて算出した板厚であり、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準第 17 条要求に対する適合性は、本数値とフェーズドアレイ結果により直接求まる亀裂先端部までの距離 Z から 1 サイクル後の亀裂進展量 d' を減じた残厚 ($Z-d'$) との比較となり、板厚変化の影響を受けない。また、同第 18 条要求である亀裂に対する破壊評価においては、亀裂深さ d と板厚 T の比率 (d/T) が大きいほど、許容曲げ応力 S_c が小さく評価が厳しくなることから、板厚 T は保守的に実測値よりも小さい公称値 13.5mm を使用しており、板厚変化の影響を受けるものではない。

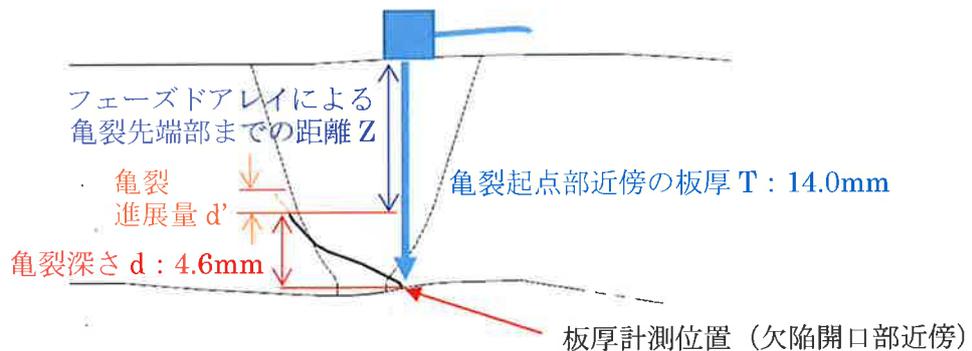
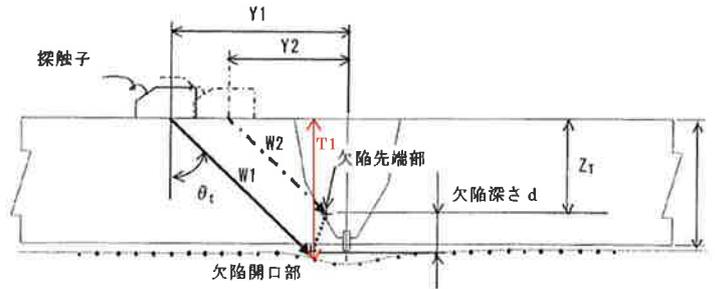


図-1 板厚計測位置

表-1 亀裂深さ測定結果

入力情報	寸法	備考
亀裂深さ	4.6mm	端部エコー法を適用
当該部板厚	14.0mm	垂直 UT 結果を使用



(測定結果の反映：ここでは表面形状の影響がない場合として示した)

θ_i ：探傷屈折角（実測屈折角） Z_r ：探触子を走査する面からの深さ

[欠陥開口部の情報]

Y1：欠陥開口部からの最大エコー高さを得た探触子位置と溶接中心（基準線）までの距離（mm）

W1：欠陥開口部までのビーム路程（mm）

[欠陥先端部の情報]

Y2：欠陥先端部からのエコーを得た探触子位置と溶接中心（基準線）までの距離（mm）

W2：欠陥先端部までのビーム路程（mm）

(c) 断面解析図への端部エコー法測定結果の反映

解説図-A-4730-1 作図に基づく解析手順（例）

(3) 欠陥深さの算出

上記(1), (2)の手順で解析を行った後、次のいずれかの方法で欠陥深さ寸法を求める。

なお、算出式の記号は、解説図-A-4730-1(c)に基づく。

- a. 欠陥開口部と欠陥先端部との伝ば時間の差から欠陥深さ d を算出

$$d = (W1 - W2) \cdot \cos \theta_i$$



- b. 板厚測定記録（T1：欠陥開口部近傍の板厚）を用いて欠陥深さ d を算出

$$d = T1 - W2 \cdot \cos \theta_i$$

- c. 探触子を走査する面から欠陥先端部までの深さ（ Z_r ）で表す場合

$$Z_r = W2 \cdot \cos \theta_i$$

- d. 解析図（作図）から直読する場合

JEAC4207-2008 解説 A-4730 抜粋

欠陥深さは、(3)b. 項に基づき板厚測定記録を用いて算出した。それぞれの欠陥深さ手法に対する評価は以下のとおり。

- (3)a. 項：外表面の形状（エルボの形状）が変化することによるビーム路程への影響が生じる懸念がある。
- (3)b. 項：欠陥開口部近傍の板厚を直接的に計測し、欠陥深さをより正確に算出することが可能である。
- (3)c. 項：探傷面と欠陥開口部が同じ面である場合を想定した手法であると考えられる。
- (3)d. 項：内外面形状の計測結果を反映した解析図を用いて、直接欠陥深さを読みとる方法であると考えられる。

No. ③ (2)

9/11 公開会合における実験手法の設定条件 (9/11 資料1-2 17 ページ) と、9/18 公開会合において説明した実験手法の設定条件が異なるので妥当性を説明すること。

1. 探傷条件について

PD 認証*を取得した要領 (PD 要領) に記載の探傷条件と今回使用した探傷条件の比較結果を別紙に示す。対象配管の口径のみ探傷条件が異なるが、対象配管の口径に対して探触子が大きい場合、探触子が十分に接触せずに亀裂からの反射波が明瞭に得られない懸念がある。そのため小型探触子を用いて試験部と探触子の接触性を向上させ、十分な倣い性を確保している。その結果、亀裂からの反射波が明瞭に得られていることから、口径の相違による影響はないと判断できる。

2. 超音波が溶接金属を透過する場合の亀裂深さ測定について

PD 認証試験は NDIS0603-2015 に基づき試験要領が定められている。同試験における SCC 試験体の要求として、附属書 A.2.5.1 に「先端が溶接金属内にある SCC を 1 個以上含まなければならない。」とある。本要求に基づく PD 認証試験に合格したサイジング要領を用いていることから、今回適用した手法は超音波が溶接金属を透過しても、亀裂からの反射波を得ることができ、亀裂深さ測定手法として問題ない。

なお、JEAC 4207-2008 解説 2320-1 項では、“溶接線を透過した探傷を行う範囲は超音波モードとして縦波が望ましい”とされている。今回使用した探触子は、超音波モードを縦波とし、フェーズドアレイ法による超音波の点集束を図り、溶接金属部の透過性を向上させて、亀裂からの反射波を捉えることを可能としている。

※：NDIS0603-2015 「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」

探傷条件比較表

探触子※1			
項目	PD 要領に記載の探傷条件	今回使用した探傷条件	有効性評価
周波数[MHz]		同左	—
チャンネル数[個]		同左	—
素子幅[mm]		同左	—
素子のピッチ[mm]		同左	—
励振方式		同左	—
くさび材質		同左	—
くさび角度[°]		同左	—
振動子曲率[mm]		同左	—
設計収束点[mm]		同左	—
JIS 表示法		同左	—
接触面の寸法[mm]		同左	—
伝搬モード		縦波	同左
探傷器※1			
探傷器		同左	—
試験対象			
対象配管		100A(4B)	小型探触子を用いて試験部と探触子の接触性を向上させ、十分な倣い性を確保した。その結果亀裂からの反射波が明瞭に得られているため問題ない。

※1 NDIS0603-2015 附属書 A にて記載されている基本的パラメータ

: 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。

No. ④ (3)

モックアップの実寸法を掲示すること。
また一部日本語的にわかりにくい文章があったので修正すること。

頂いたコメントを反映した資料を④ No. 4 添付-1に示す。

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。

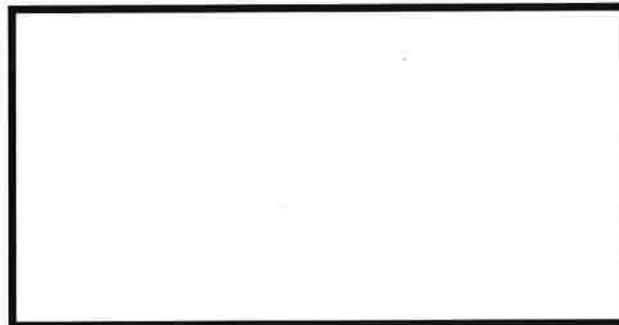
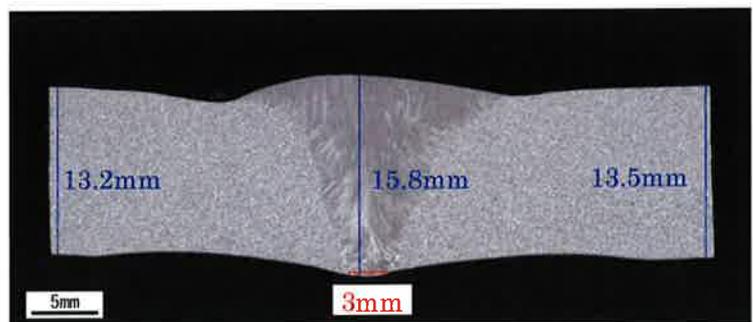


図-1 溶接積層図

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。



直管 (4B-Sch160)
 外径: 114.3mm (公称値)
 板厚 13.5mm (公称値)



※本モックアップは実機と同様の溶接工法による溶接部の性状（硬さ、フェライト量）を確認するためのものであり、配管寸法は実機と一部異なっている。

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母材の割合が大きくなる傾向にあり（図-1 参照）、フェライト量が低下する可能性が考えられる。

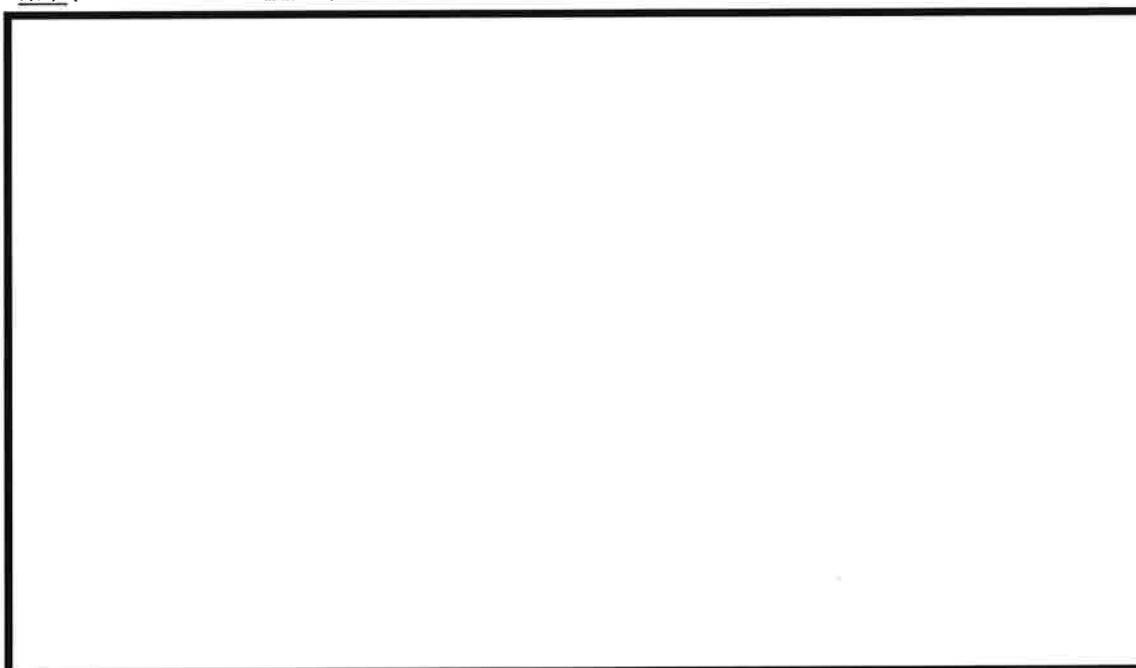


図-3 フェライト量想定

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。

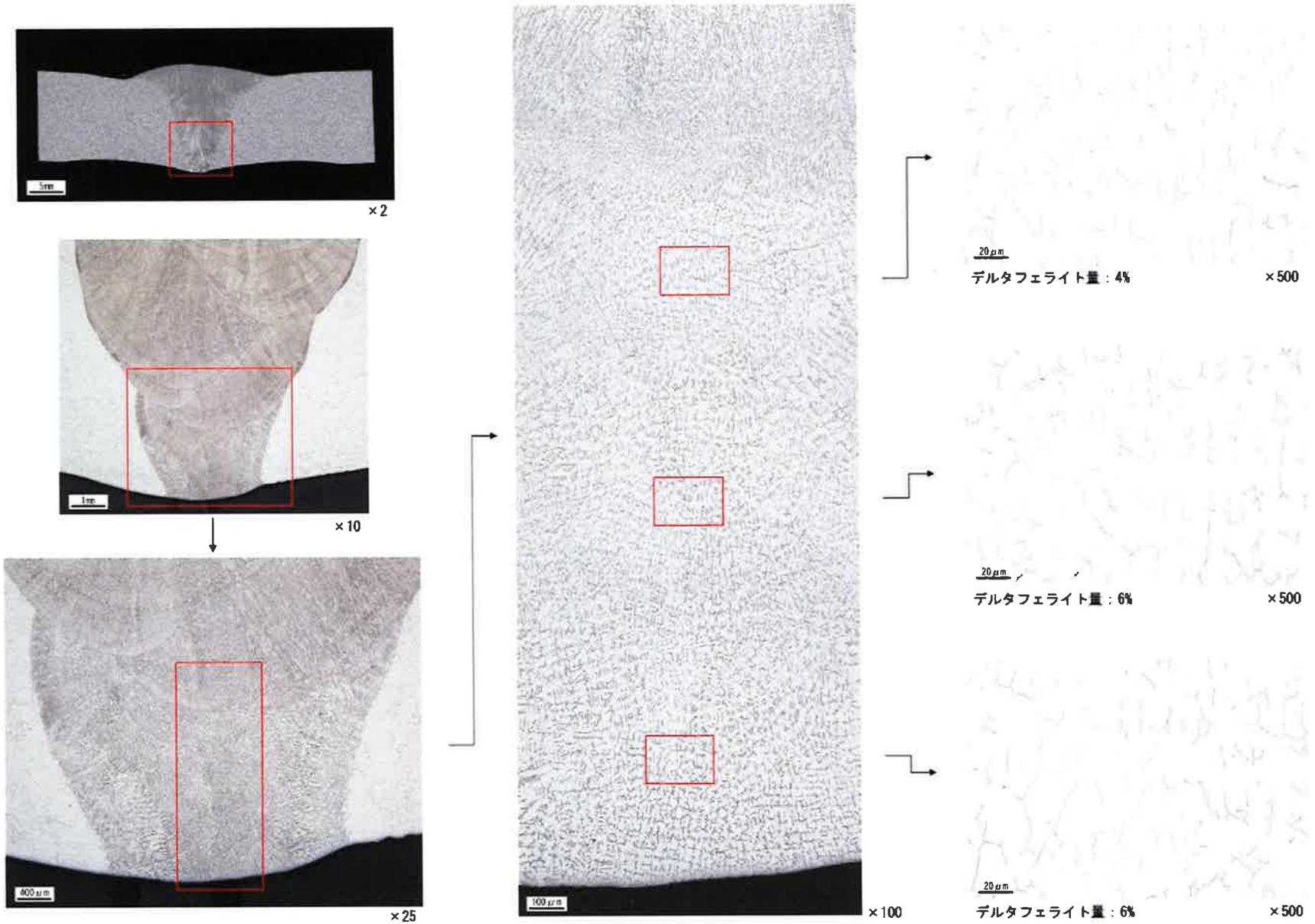


図-4 モックアップによる δ フェライト確認結果

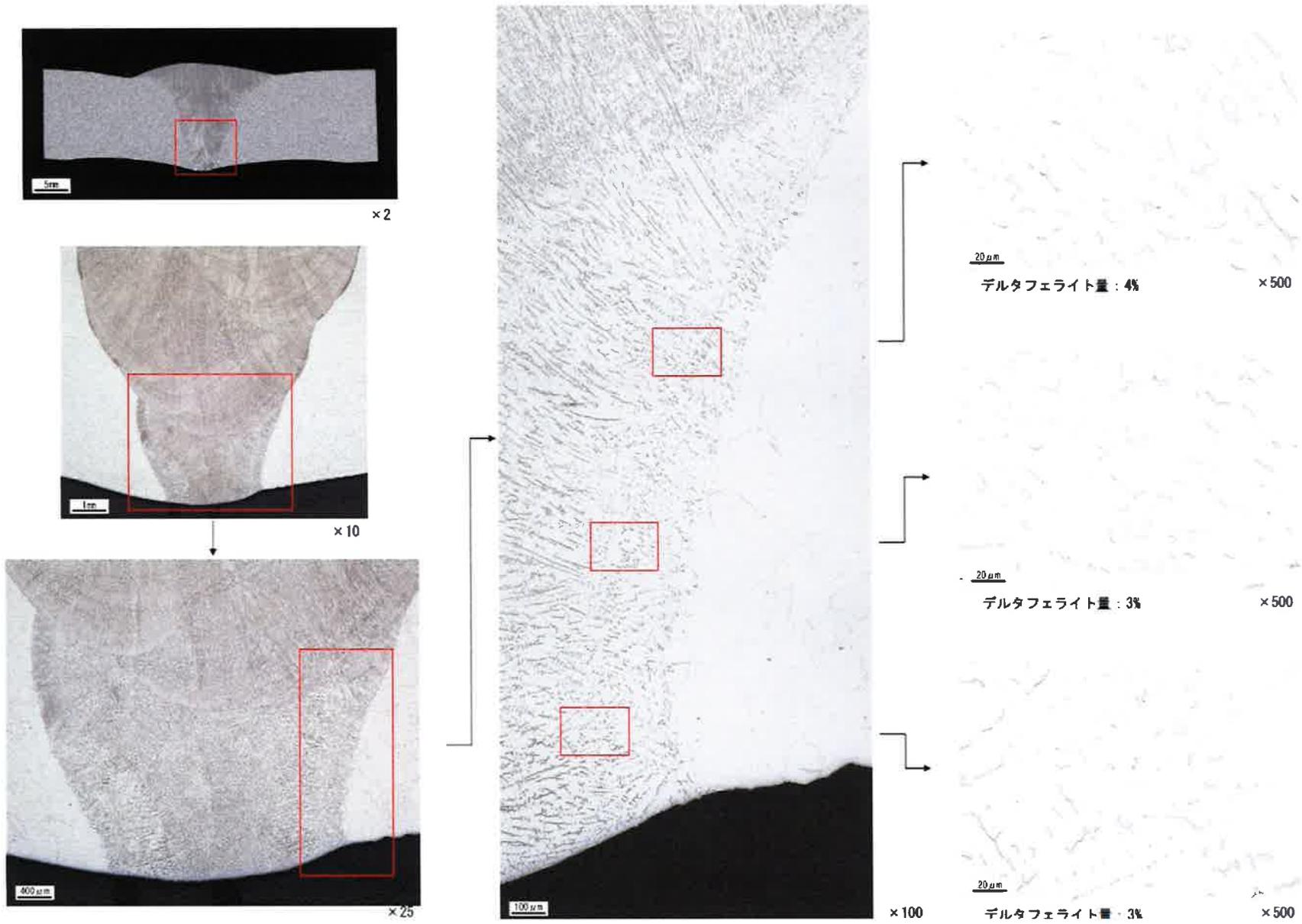


図-5 モックアップによる δ フェライト確認結果

No. ⑤ (4)

今回亀裂が発生した配管の位置関係（コールドレグ・加圧器からどれほど離れているか等）を提示すること。

配管の位置関係については、図-1のとおり。

加圧器スプレライン配管とコールドレグ、加圧器の位置関係

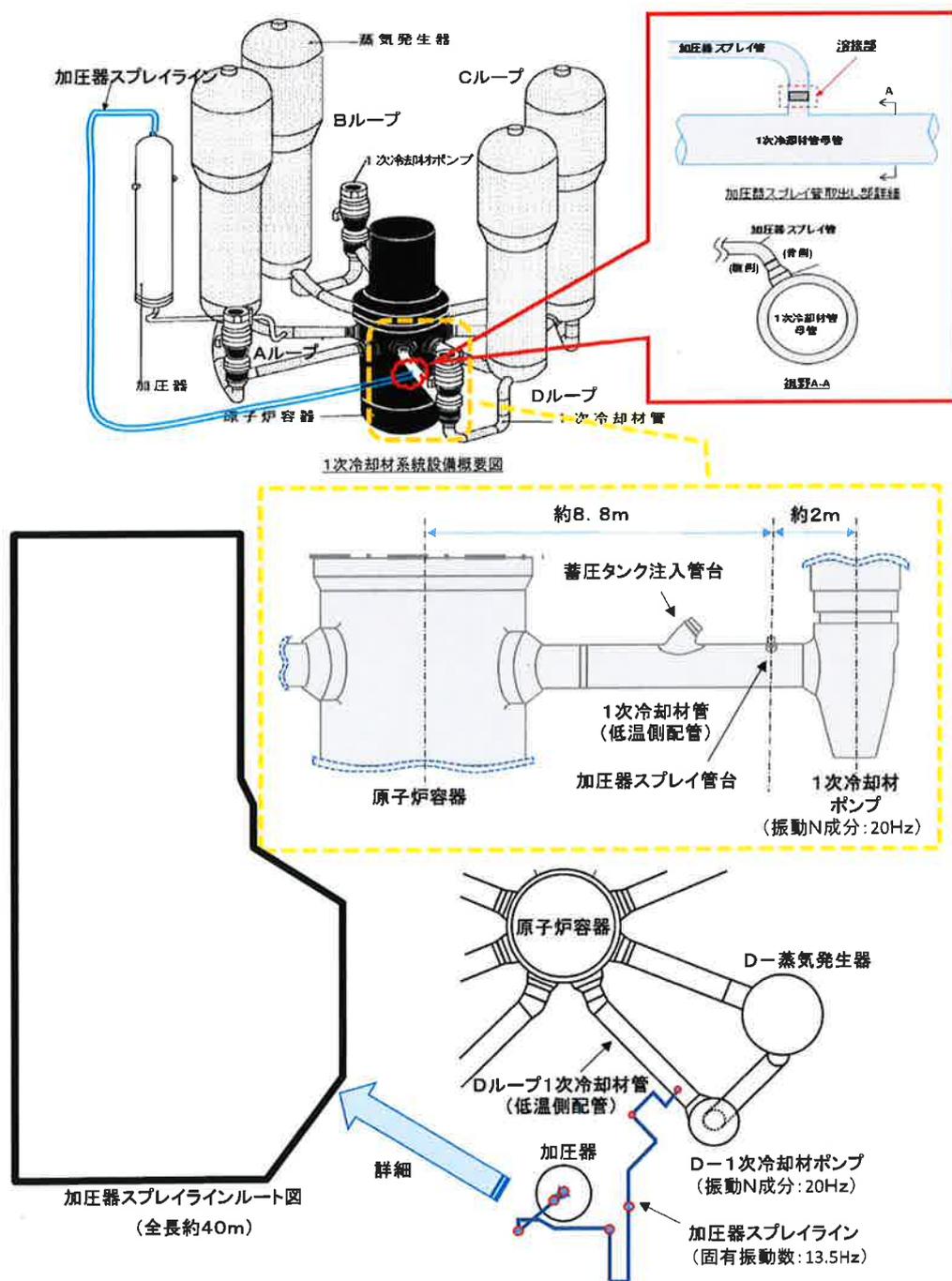


図-1 加圧器スプレライン配管とコールドレグ、加圧器の位置関係

: 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. ⑥ (5-1)

表面硬さ（表層硬さ）の分析結果を今回の亀裂の分析に用いていないということだが、K 値等に影響が出ないか検証し説明すること。

1. 表層硬さの考え方

シンニング加工による硬化部は極表層に限られることから、維持規格に基づく半楕円形状での亀裂進展評価には大きく影響しないと考え、これまでの評価には含めていなかったが、極表層の割れを長さ方向の進展ととらえることで、欠陥面積を大きくすることができ、より大きな K 値での進展評価が可能となると考えられる。

前回のご指摘を踏まえ、より保守的な評価とするため、表層部の硬さを次のとおり整理することとし、進展評価に用いることとする。

2. 表層部の硬さについて

今回当該部を模擬して製作した 4B 配管モックアップのシンニング部から新たに取得した表層における板厚方向硬さ分布を図-1 に示す。300HV を超える超硬化部は極表層の 20 μ m (0.02mm) であり、深さ 0.1 mm までに硬度は急激に低下した。表層から 10 μ m (0.01mm) 位置での硬さは 331HV (荷重 2g) であり、過去に取得した 1B, 3B, 6B, 12B のデータ (図-2) と同等の傾向であった。

また、図-1 は極表層部の硬さを荷重 2g で計測した結果であり、図-3 は板厚内部の硬さを荷重 1 kg で計測した結果であるが、進展評価においては荷重 1kg にて計測した硬さを用いているため、モックアップにて硬さ計測時の荷重の影響を確認した。結果、荷重 2g では荷重 1 kg に比べて硬さが 22~43HV 大きい値となることが確認された。

表面からの距離 0.5mm における硬さを比較すると、図-1 では 251HV、図-3 では 200~209HV となっており、約 40HV の差があることから、荷重による硬さの差異は上記モックアップによる確認結果と同等であると考えられる。

したがって、進展評価に用いる荷重 1kg に相当する硬さの値として、331HV から約 40HV 補正した 290HV を表層部硬さとして使用することとする。

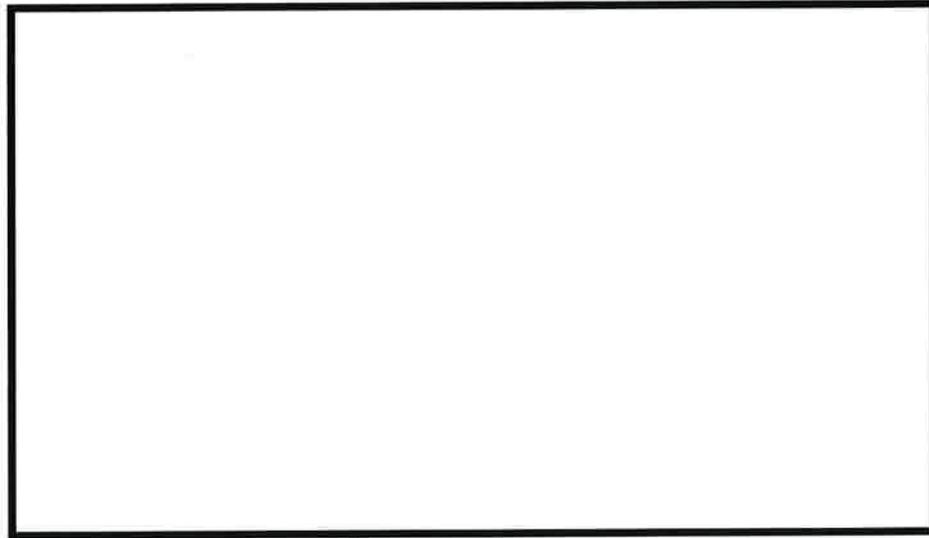


図-1 シンニング部の板厚方向硬さ分布 (荷重 2g)

出典：製造メーカー社内モックアップデータ

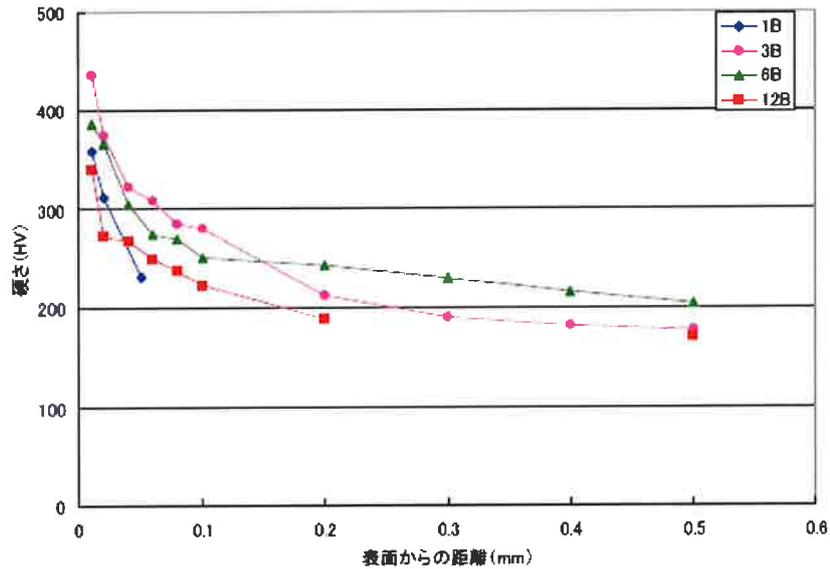


図-2 シンニング部の板厚方向硬さ分布 (荷重 10g)

出典：製造メーカー社内モックアップデータ



図-3 4B 配管 TIG+SMAW 溶接 板厚内部硬さ測定結果 (荷重 1 kg)

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。

№. ⑦ (5-2)

今の評価モデルは母材を用いているが、今回発生した亀裂の大部分は溶接金属部を通っていることから、溶接金属部を評価モデルとした評価結果を提示すること。

図-1 に示すとおり、BWR環境中にて 316NG 材の母材(熱影響部)と溶接金属部の SCC進展速度が取得^[1]されている。ここでは母材(熱影響部)よりも一般溶接金属部の SCC進展速度が 1/3 程度遅い傾向が確認されている。これは溶接金属中に含まれるフェライト量が影響し、SCC進展速度を抑制している可能性があると考えられている。

今回実施したモックアップ試験結果から、亀裂が通過したと推測される裏波溶け込み部においては、溶接金属材料と母材の混合により溶接後のフェライト量が一般溶接金属部に比べて低下する可能性(溶接金属材料7%に対して、裏波溶け込み部では3~6%のフェライト量)を考慮する。裏波溶け込み部は一般溶接金属部に比べてフェライト量が少ないため、SCC進展速度は母材の1/3までは低下しないと考え、「母材の1/2の速度と仮定したケース」及び「母材と同じ速度としたケース」でパラメトリックスタディを行った(パラメトリックスタディの結果は、№. ⑧参照)。

なお、図-2 に示すとおり、BWR環境中において亀裂進展速度に及ぼすフェライト量の影響が取得^[2]されている。フェライト量が2%増加(6.5%から8.5%に増加)することで、SCC進展速度が抑制される傾向が確認されている。

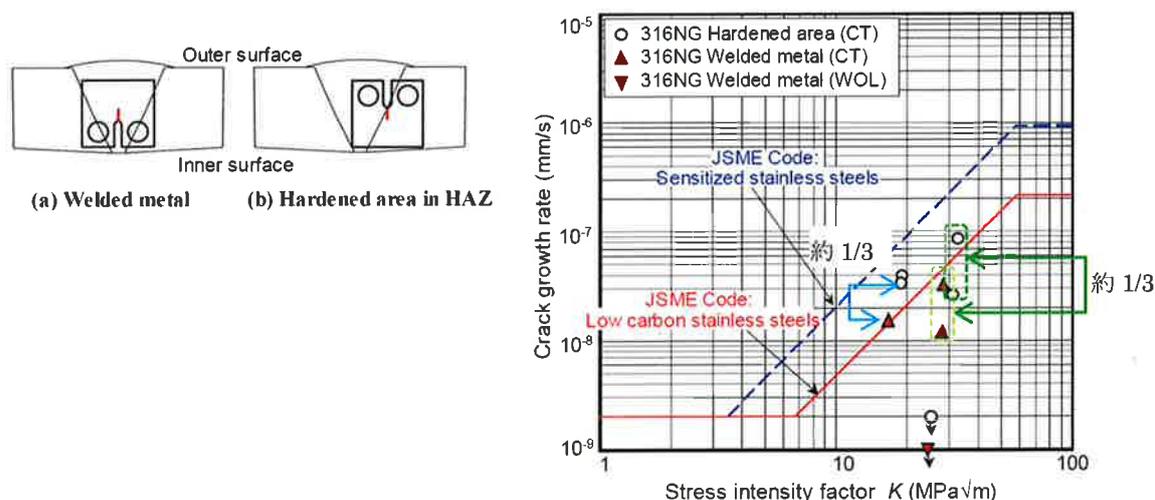


図-1 母材(熱影響部)と溶接金属のBWR環境中SCC進展速度結果[1]

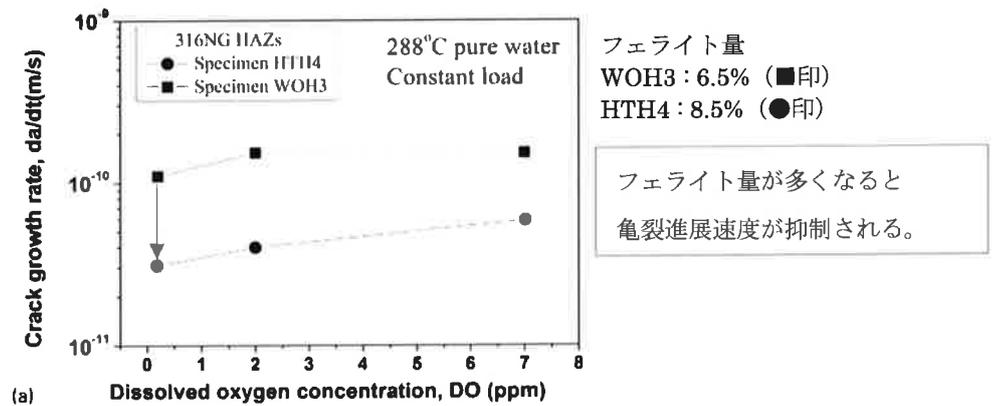


図-2 母材(熱影響部)のBWR環境中SCC進展速度結果[2]
 (フェライト量影響)

- [1] Suzuki S., Stress Corrosion Cracking in Low Carbon Stainless Steel Components in BWRs, E-Journal of Advanced Maintenance Vol.1, 2009
- [2] Zhanpeng Lu et.al., Effects of water chemistry on stress corrosion cracking of 316NG weld metals in high temperature water, Corrosion Engineering Science and Technology, 2015

No. ⑧ (5-2)

亀裂進展線図において過去進展想定にもいろんなパターンがあり得ることから、評価をするにあたり、過去の進展がどうなのか、また今後は保守性を考慮し亀裂が進展してもどう問題ないのかを説明すること。

(1) 亀裂進展の条件および結果

「過去の亀裂進展」及び「今後の亀裂進展」の検討を以下に行った。

今回、「過去の亀裂進展」において、モックアップから取得した実機状態と考えられる条件を新たに設定する。前回公開会合(9/18)からの変更点は表-1に示すとおり。

表-1 亀裂進展評価における前回公開会合(9/18)からの変更点

	過去の亀裂進展	今後の亀裂進展
亀裂進展式	新たに包絡曲線式も考慮 (欠陥長さの評価も追加)	包絡曲線式のみ考慮 (欠陥長さの評価も追加)
硬さ	新たに製作したモックアップの裏波 溶け込み部を含む亀裂進展位置にお ける硬さ測定結果を使用	変更なし
表層硬さ	新たに製作したモックアップの 表層硬さ測定結果を使用	新たに製作したモックアップの 表層硬さ測定結果を使用
応力	新たに FEM 解析を実施し、亀裂進展 位置における応力解析結果を使用	変更なし
裏波溶け込み 部の進展	裏波溶け込み部の進展速度を 1/2 と したパラメトリックスタディを実施 (No. ⑦参照)	変更なし
初期亀裂条件	欠陥深さ 4.6mm、欠陥長さ 51mm まで の伝播に至る初期亀裂条件を逆算 (前回公開会合においては、一定の 初期欠陥を設定した上での亀裂進展 評価を実施。)	変更なし (欠陥深さ 4.6mm、欠陥長さ 67mm)

上記を踏まえ、「過去の亀裂進展」及び「今後の亀裂進展」における亀裂進展評価条件を表-2、評価結果を図-1に示す。

表-2 「過去の亀裂進展」及び「今後の亀裂進展」における亀裂進展評価条件

	過去の亀裂進展評価	今後の亀裂進展評価	今後の進展の保守性
考え方	実機状態と考えられる条件を設定	十分な保守性を有した条件を設定	-
欠陥寸法	欠陥深さ：～4.6mm 欠陥長さ：～51mm (実際の欠陥長さに近いものと考えられる欠陥長さ)	欠陥深さ：4.6mm～ 欠陥長さ：67mm～ (UTで検出された指示長さ67mmを配管内表面においてモデル化した欠陥長さ)	欠陥長さを67mmとする。
評価式	BFC式 (195HV以下も外挿)： $da/dt(K, HV) = 1.13 \times 10^{-26} \times K^{1.96} \times HV^{6.45}$ (mm/s) 包絡曲線式 (195HV以下も外挿)： $da/dt(K, HV) = 3.38 \times 10^{-26} \times K^{1.96} \times HV^{6.45}$ (mm/s)	包絡曲線式 (195HV以下も外挿)： $da/dt(K, HV) = 3.38 \times 10^{-26} \times K^{1.96} \times HV^{6.45}$ (mm/s)	包絡曲線式 (195HV以下も外挿) を用いる。
硬さ	<ul style="list-style-type: none"> 初層 TIG+二層目以降 SMAW の実機溶接条件のモックアップで計測した硬さデータのうち、想定された亀裂進展経路に沿った硬さデータを適用 表層硬さは290HVを適用 (No. ⑥参照) 	<ul style="list-style-type: none"> 実機条件である初層 TIG+二層目以降 SMAW に対し、硬さが高めに出る TIG 溶接を行ったモックアップで計測された板厚内硬さ分布を適用 表層硬さは290HVを適用 (No. ⑥参照) 	<ul style="list-style-type: none"> 各板厚の最大硬さ分布を適用する。 表層硬さは290HVを適用
応力	<ul style="list-style-type: none"> 新たに FEM 解析を実施し、実際の溶接タイプ (TIG+SMAW) における亀裂進展経路に則した残留応力分布を適用 出力運転条件における応力 (100MPa) を適用 	<ul style="list-style-type: none"> 溶接タイプ (全層 TIG) における溶接中心から 10mm 迄の包絡残留応力分布を適用 出力運転条件における応力 (100MPa) を適用 	保守的な溶接タイプ (全層 TIG) において、包絡した残留応力を適用する。
裏波溶け込み部の進展	以下の2パターンの評価を実施 (No. ⑦参照) <ul style="list-style-type: none"> 母材と同等速度 母材の1/2の速度 	亀裂は溶接部を通過し、母材を進展しているため、進展経路によらず一律母材と同等速度の条件とした	-

: 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。

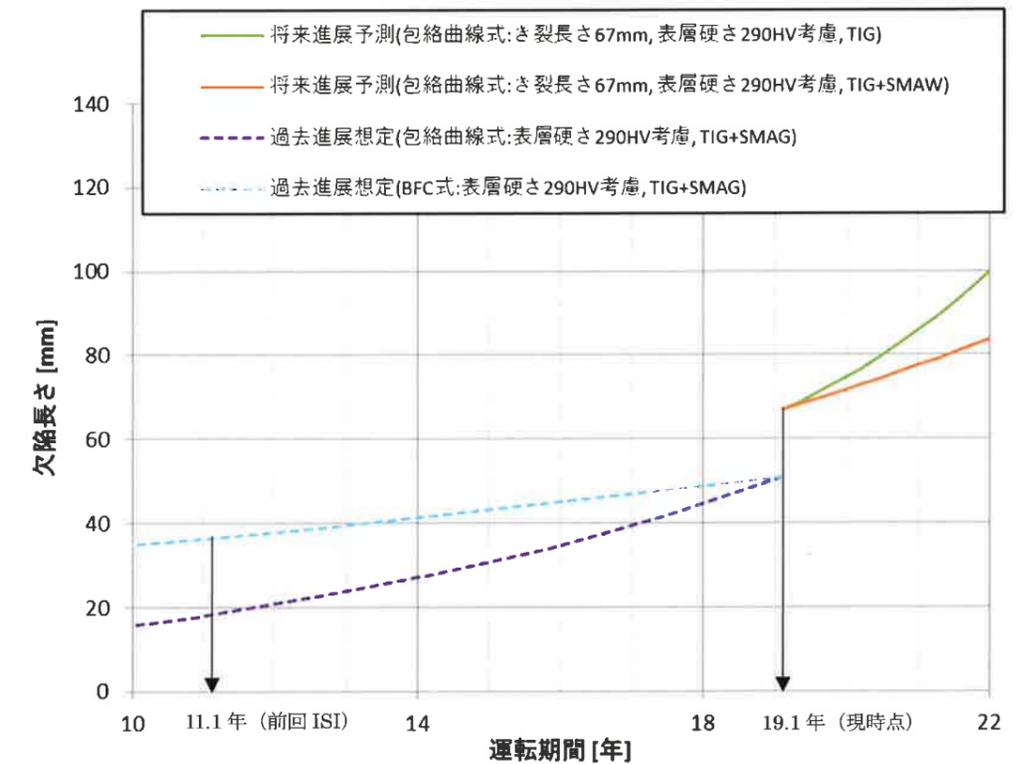
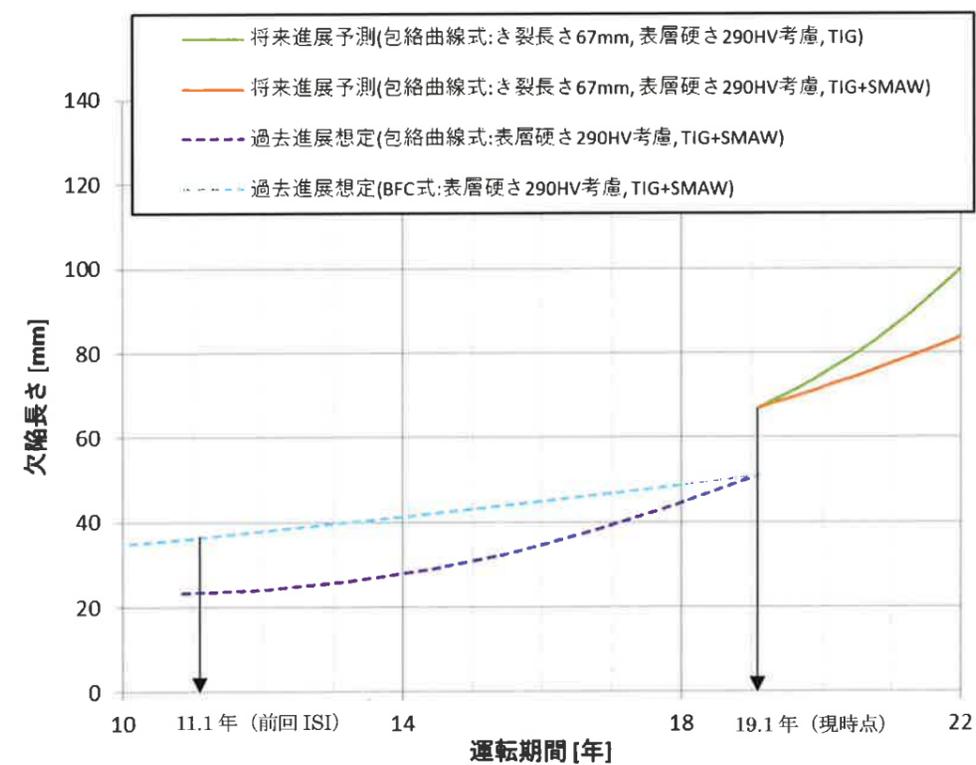
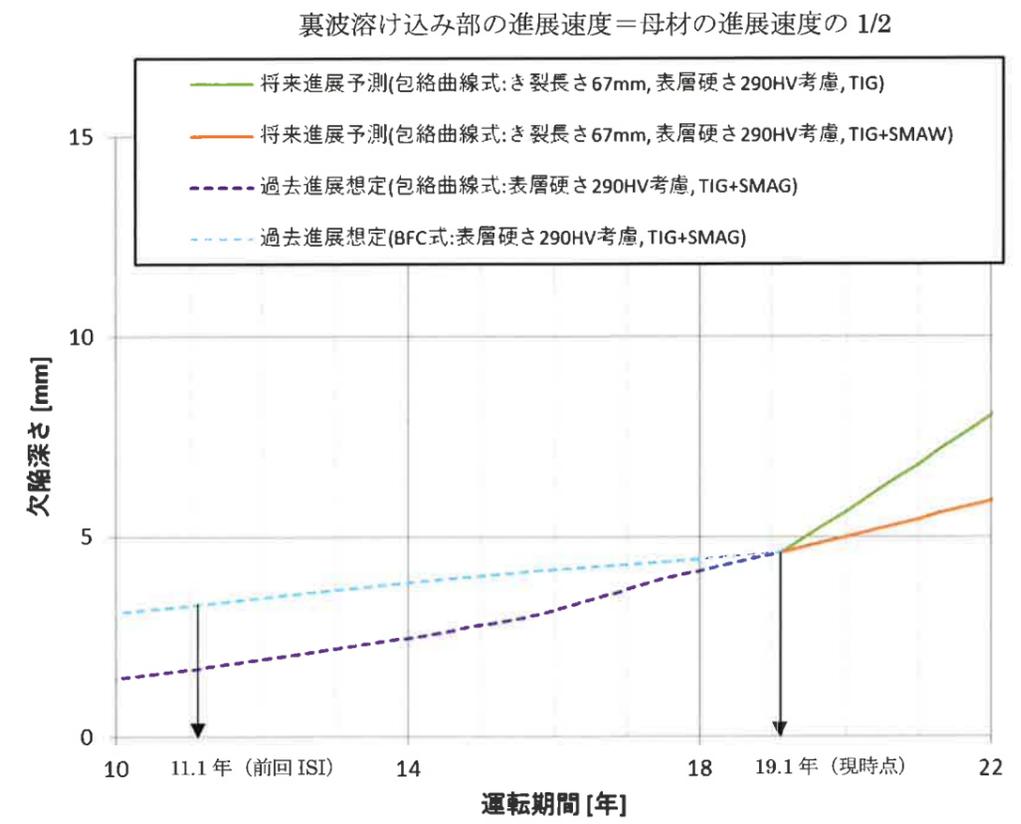
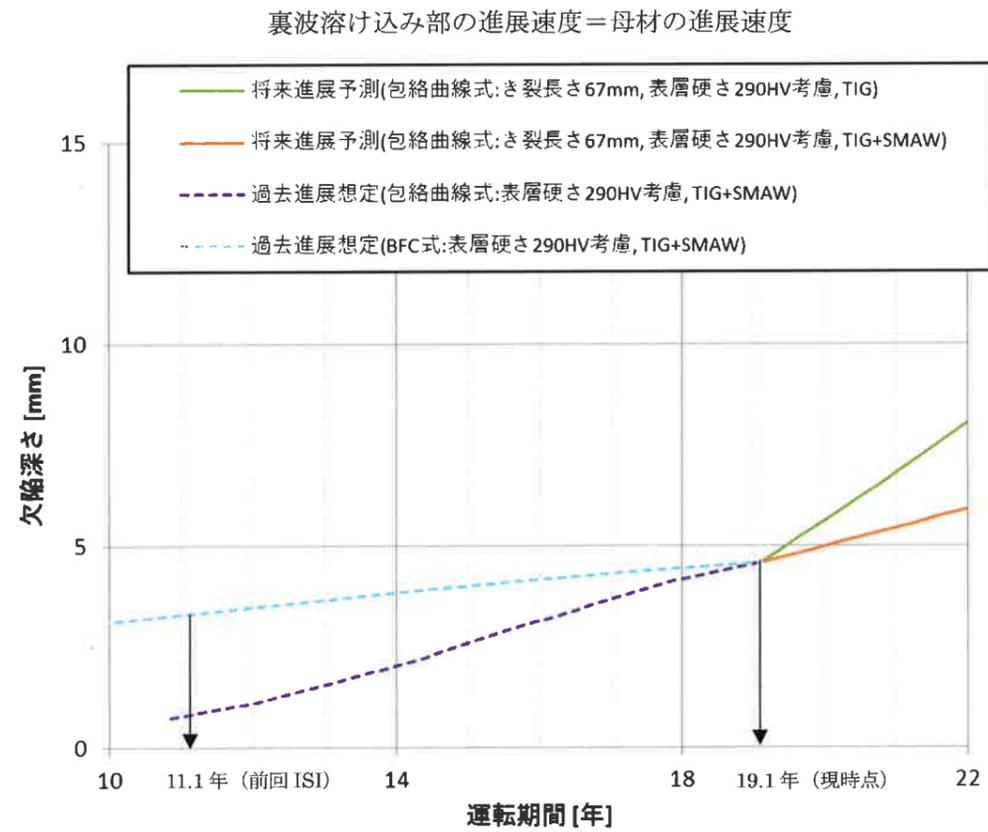


図-1 過去と今後の亀裂進展評価結果

(注1) 亀裂進展評価上、欠陥長さ／欠陥深さが32を超えた場合、維持規格に基づく計算ができなくなるため、過去の亀裂進展評価においては評価を中断している場合がある。

(注2) 現時点の欠陥長さについて、「過去の亀裂進展評価」においては実際の欠陥長さに近いものと考えられる51mmと設定し、「今後の亀裂進展評価」においては保守的にUTで検出された指示長さ67mmと設定し評価している。

(注3) 「将来進展予測」(オレンジ色)の評価条件のうち、「硬さ」及び「応力」については、「過去の亀裂進展評価」に用いた値を使用している。(紫破線の延長)

(2) 亀裂進展の考察

図-2に示すとおり、各領域について以下のとおり整理した。

領域①：前回 ISI 時における深さ 2.8mm 以上の範囲について

領域①については、前回 ISI 時（運転期間 11.1 年）に検出限界である 2.8mm 以上の亀裂が生じていたこととなるが、前回の ISI 記録を踏まえても、有意な欠陥指示は確認されていないことから、領域①の範囲についてはこれまでの亀裂進展経過とは考えにくい。

なお、今回得られたより実機に近い条件を用いて亀裂進展を逆算した結果、BFC 式での進展速度は緩やかなものとなり、領域①の範囲内となった。

領域③：包絡曲線式以上の亀裂進展速度範囲について

領域③については、包絡曲線式にモックアップで取得した以上の応力・硬さを入力した範囲となることから、実機条件から離れていく領域となる。また、包絡曲線式は強加工 SCC の亀裂進展研究において得られているデータを包絡する進展速度であり、領域③は現在の SCC 進展速度の知見を超える進展領域であることから、これまでの亀裂進展経過とは考えにくい。

以上のことから、今回の欠陥は領域②の範囲で生じたと考えられる。

今後の亀裂進展においては、包絡曲線式にモックアップで取得した応力・硬さを入力したもの（将来進展予測（包絡曲線式：亀裂長さ 67mm、表層硬さ 290HV 考慮、TIG+SMAW、オレンジ実線）が現実的な進展の上限になると考えており、今回評価に用いた将来進展予測（包絡曲線式：亀裂長さ 67mm、表層硬さ 290HV 考慮、TIG、緑実線）はより保守的であると考える。

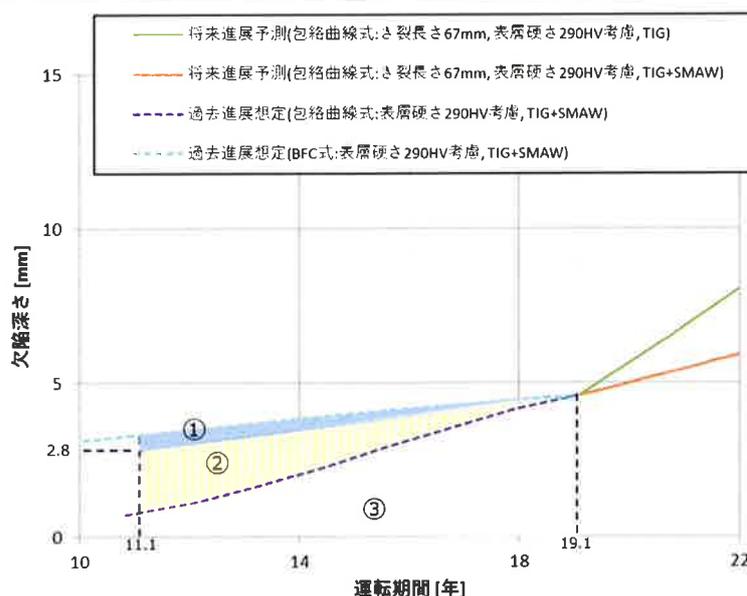


図-2 想定される深さ進展領域図

(裏波溶け込み部の進展速度＝母材の進展速度)

なお、亀裂が裏波溶け込み部を斜めに進展した理由としては、残留応力分布の複雑性・結晶組織の不均一性・デルタフェライト量のばらつき・微小な初期欠陥の存在などの要因が単独、もしくは重畳した可能性が考えられる。

また、評価は板厚方向の長さとし、傾斜による実長さとはしなかった。その理由は、強加工SCCは粒界を進展するため、分岐や蛇行を伴い実験室での評価も投影方向（板厚方向）で行われており、維持規格では板厚方向に対して評価することが規定されているためである。

(3) 今後の亀裂進展評価及び破壊評価

将来進展予測（包絡曲線式：亀裂長さ 67mm, 表層硬さ 290HV 考慮, TIG）（図-1 の緑色グラフ）について、今後 1 年間の亀裂進展評価及び破壊評価結果は以下に示す。いずれの場合においても当該部の健全性を確認することができた。なお、破壊評価において、板厚は保守的に公称値（13.5mm）を用いている。

包絡曲線式による 1 サイクル後（1 年後）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-3 当該欠陥の亀裂進展評価結果

	包絡曲線式 評価期間：1 年	
	欠陥深さ $a^{\text{注1}}$ (mm)	欠陥長さ $l^{\text{注1}}$ (mm)
初期寸法	4.6	67
SCC による進展量	1.1 (1.09)	9 (8.7)
疲労による進展量	0.1 (0.07)	1 (0.1)
評価期間末期の亀裂寸法	5.8 (5.76)	77 (75.8)

(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。() 内は切り上げ前の数字。

表-4 許容欠陥寸法の限界の評価結果

評価式	初期寸法		評価期間	評価期間末期の亀裂寸法			許容欠陥寸法の限界 a_c (mm)	判定 $a_f < a_c$
	深さ (mm)	長さ (mm)		深さ a_f (mm)	長さ l_f (mm)	欠陥角度 2θ (°)		
包絡曲線式	4.6	67	1 年	5.8	77	102.3	7.5 (0.54t ^{注1})	○

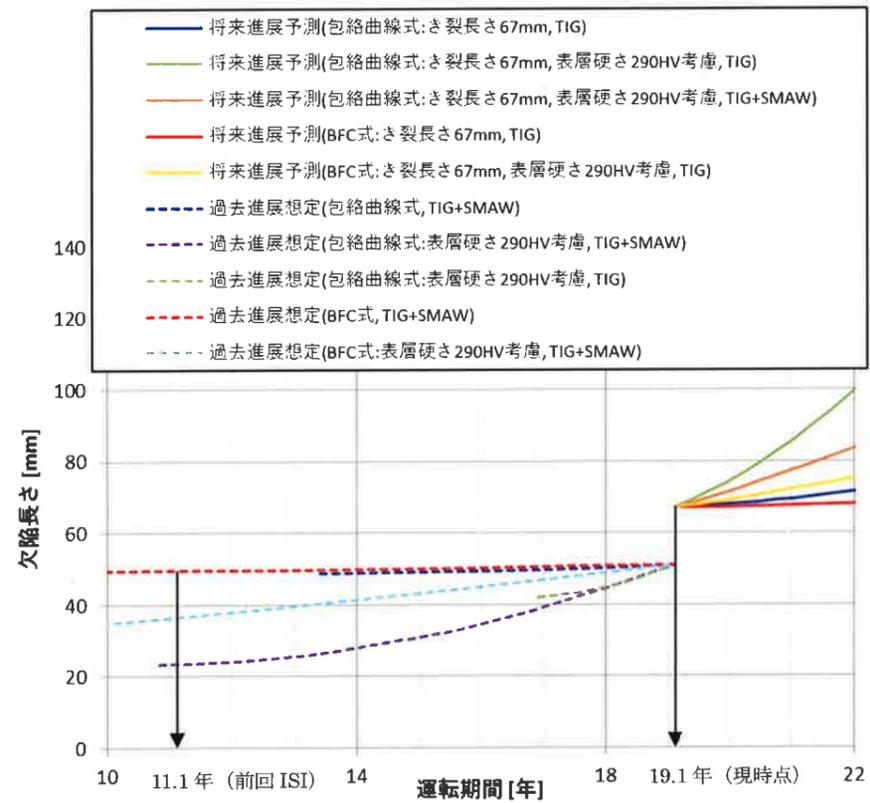
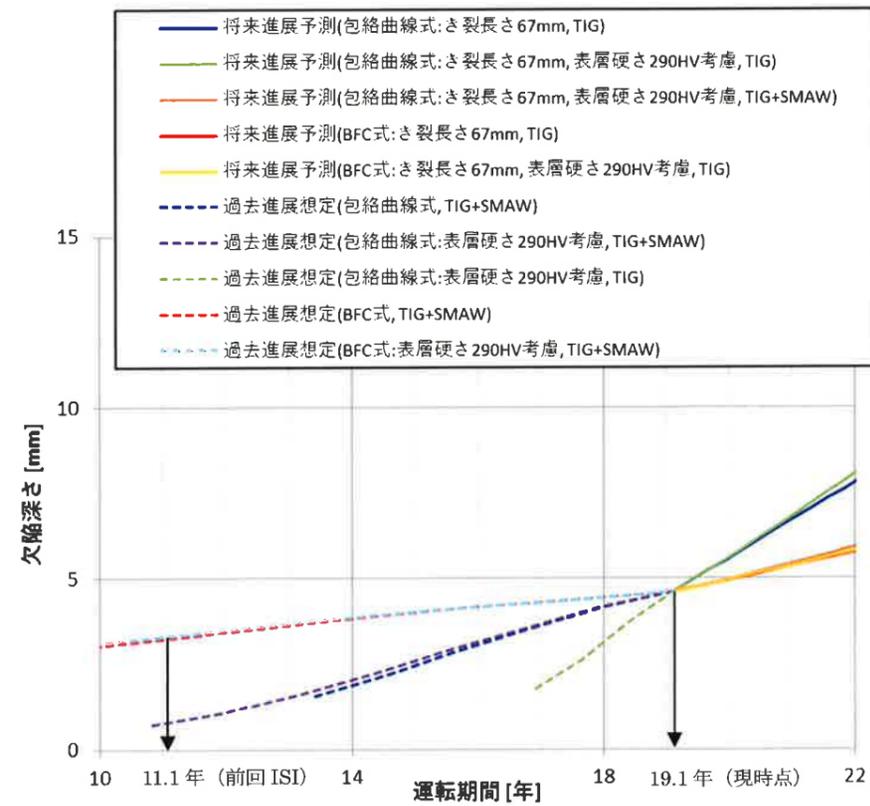
(注1) JSME 維持規格 事例規格 表 1 (4) の欠陥角度 $\leq 120^\circ$ 、溶接施工法 GTAW の許容欠陥深さ

表-5 許容曲げ応力による評価結果

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 $P_b < S_c$
包絡曲線式	1 年	A, B	3.8	19.8	○
		C+Ss	64.8	72.1	○
		D+Sd	52.0	75.6	○
		SA	3.8	65.2	○

「過去の亀裂進展」及び「今後の亀裂進展」について、各種検討した結果を以下に示す。図-1～2には亀裂進展評価結果、表-1～6には今後の亀裂進展評価結果及び破壊評価結果を示す。

現時点の欠陥長さ 67mm、裏波溶け込み部の進展速度＝母材の進展速度



現時点の欠陥長さ 67mm、裏波溶け込み部の進展速度＝母材の進展速度の 1/2

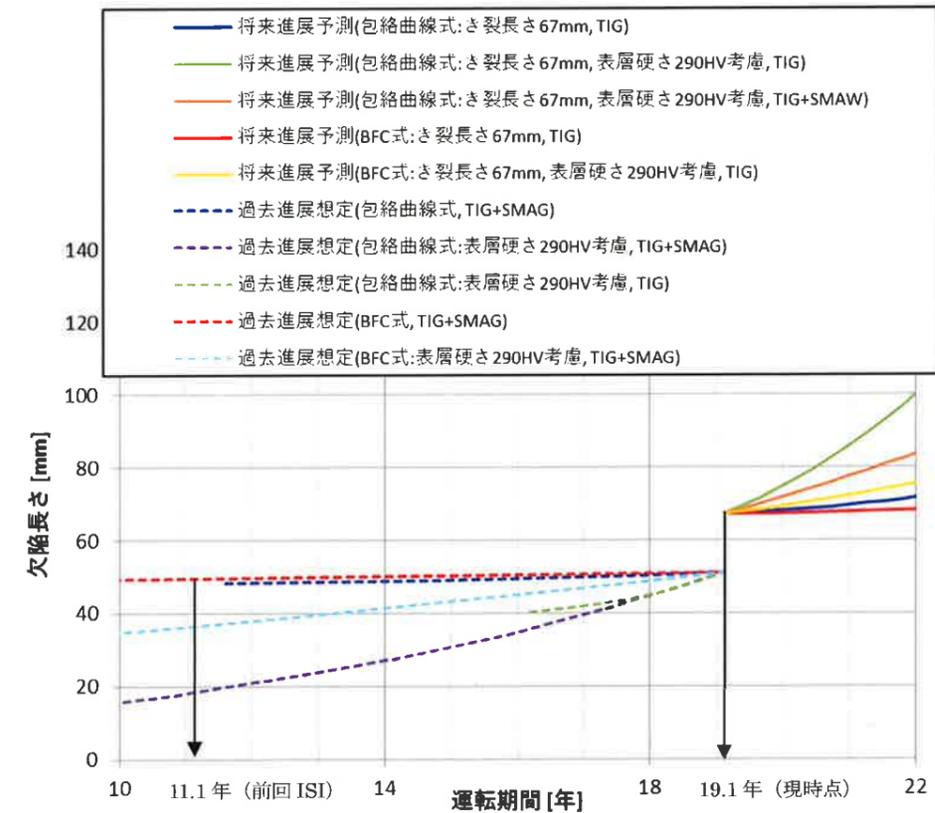
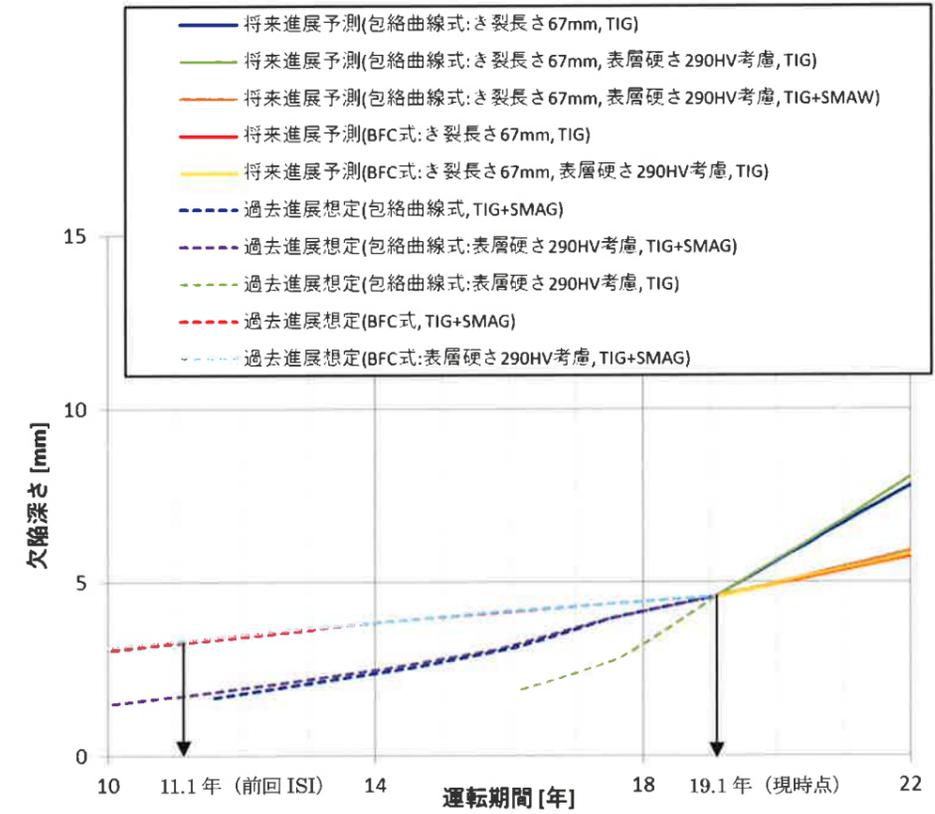
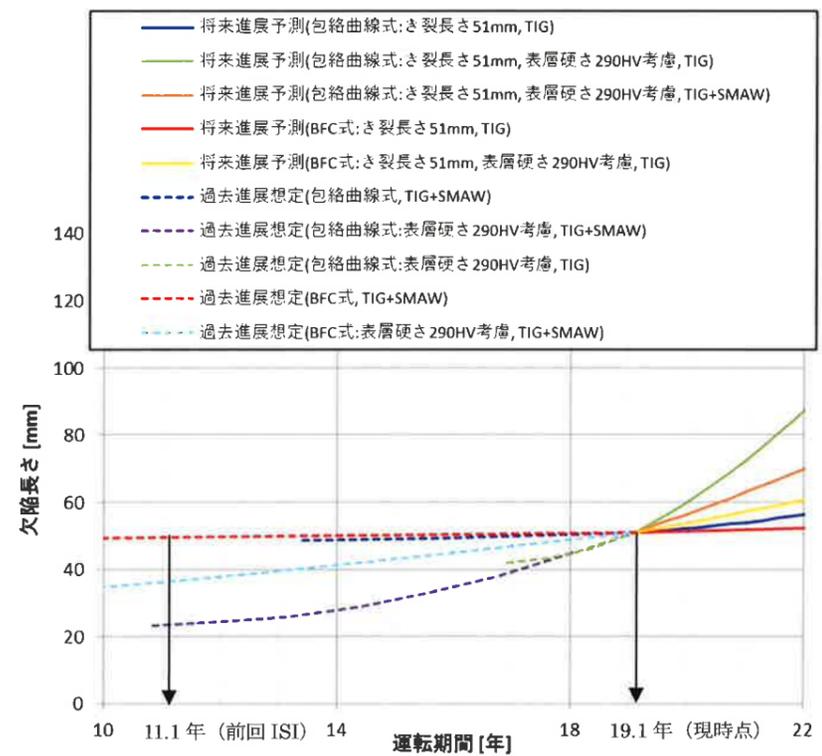
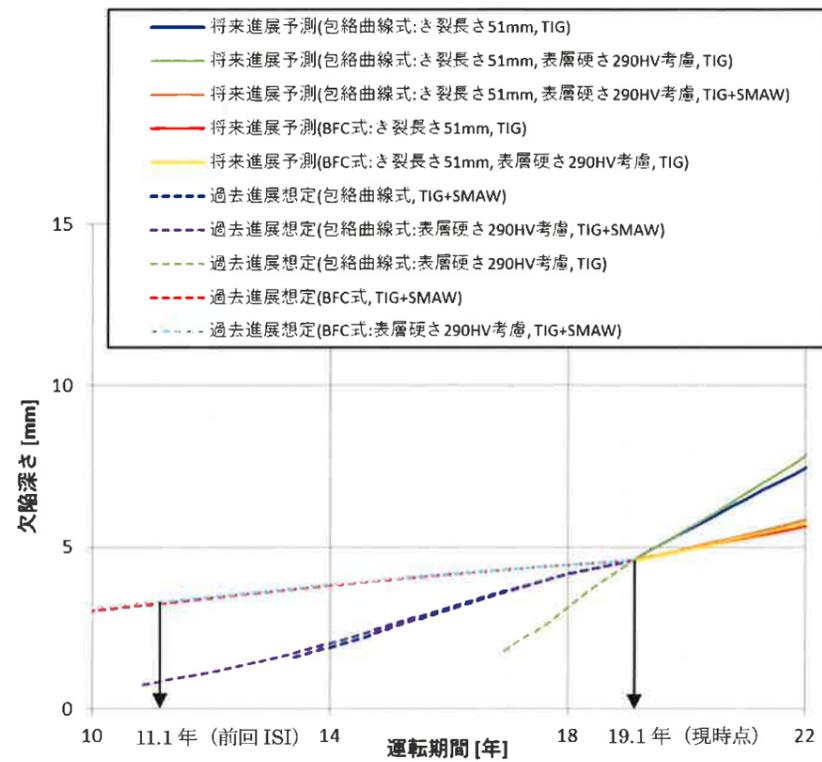


図-1 過去と今後の亀裂進展評価結果

- (注1) 亀裂進展評価上、欠陥長さ／欠陥深さが 32 を超えた場合、維持規格に基づく計算ができなくなるため、過去の亀裂進展評価においては評価を中断している場合がある。
- (注2) 現時点の欠陥長さについて、「過去の亀裂進展評価」においては実際の欠陥長さに近いものと考えられる 51mm と設定し、「今後の亀裂進展評価」においては保守的に UT で検出された指示長さ 67mm と設定し評価している。
- (注3) 「将来進展予測」(オレンジ色) の評価条件のうち、「硬さ」及び「応力」については、「過去の亀裂進展評価」に用いた値を使用している。(紫破線の延長)

現時点の欠陥長さ 51mm、裏波溶け込み部の進展速度＝母材の進展速度



現時点の欠陥長さ 51mm、裏波溶け込み部の進展速度＝母材の進展速度の 1/2

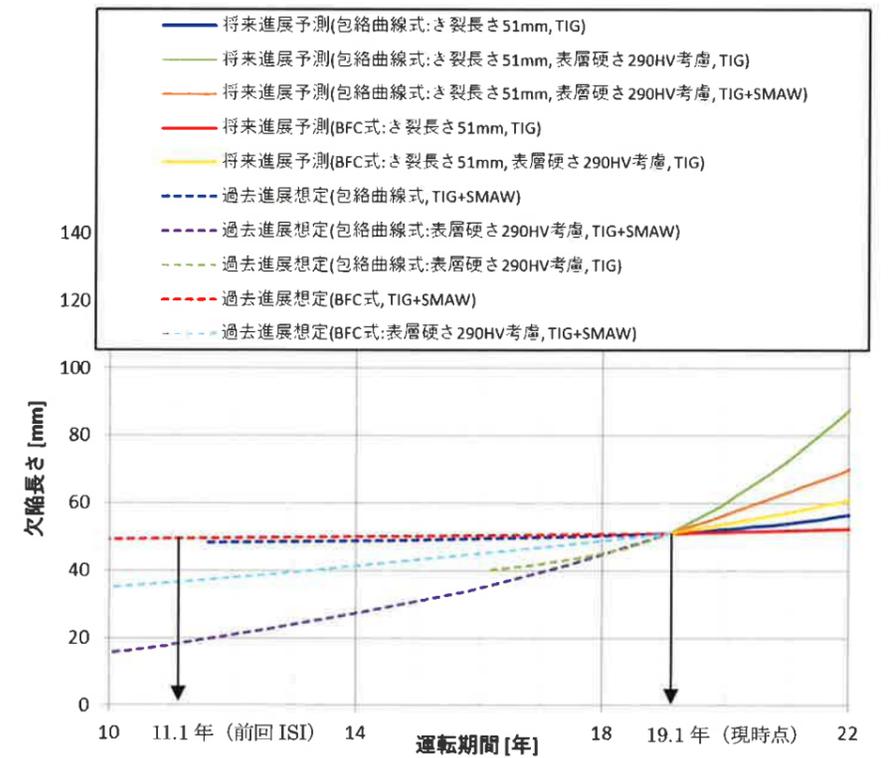
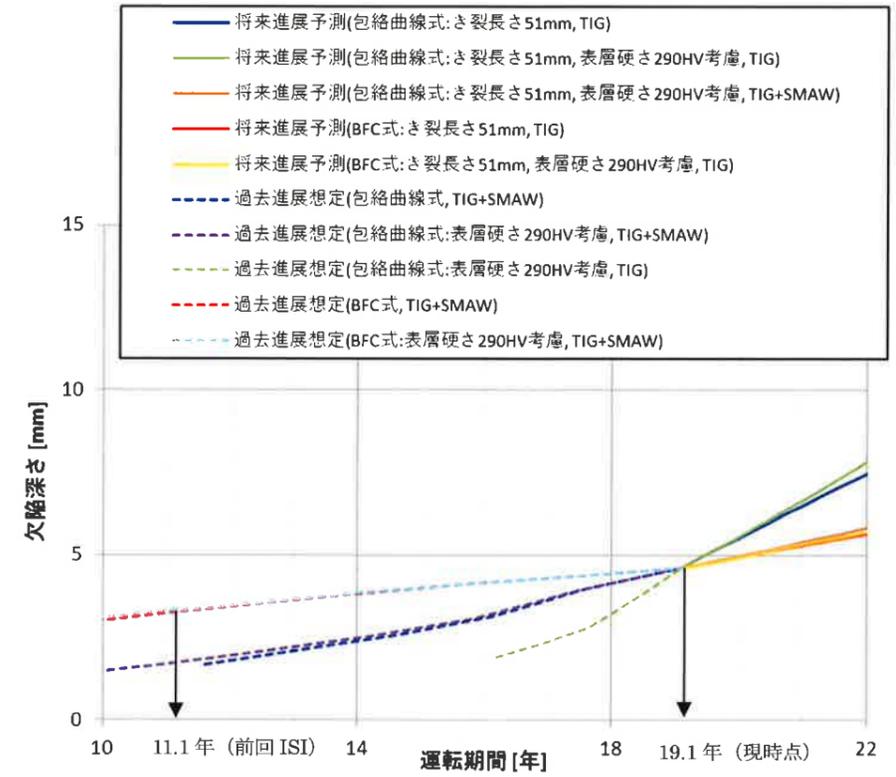


図-2 過去と今後の亀裂進展評価結果

- (注 1) 亀裂進展評価上、欠陥長さ／欠陥深さが 32 を超えた場合、維持規格に基づく計算ができなくなるため、過去の亀裂進展評価においては評価を中断している場合がある。
- (注 2) 現時点の欠陥長さについて、実際の欠陥長さに近いものと考えられる 51mm と設定している。
- (注 3) 「将来進展予測」(オレンジ色) の評価条件のうち、「硬さ」及び「応力」については、「過去の亀裂進展評価」に用いた値を使用している。(紫破線の延長)

表-1 当該欠陥のき裂進展評価結果 (現時点の欠陥長さ: 67mm)

	BFC 式 (図-1 黄) 評価期間: 1年		包絡曲線式 (図-1 緑) 評価期間: 1年		包絡曲線式 (図-1 オレンジ) 評価期間: 1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)	欠陥深さ a (mm)	欠陥長さ ℓ (mm)
初期寸法	4.6	67	4.6	67	4.6	67
SCCによる進展量	0.4	3	1.1	9	0.5	6
疲労による進展量	0.1	1	0.1	1	0.1	1
評価期間末期のき裂寸法	5.1	71	5.8	77	5.2	74

表-2 許容欠陥寸法の限界の評価結果 (現時点の欠陥長さ: 67mm)

評価式	初期欠陥		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 (mm)	長さ (mm)		深さ a_f (mm)	長さ $ℓ_f$ (mm)	欠陥角度 2θ (°)		
BFC 式 (図-1 黄)	4.6	67	1年	5.1	71	94.3	7.5 (0.54 t ^{注1})	○
包絡曲線式 (図-1 緑)	4.6	67	1年	5.8	77	102.3	同上	○
包絡曲線式 (図-1 オレンジ)	4.6	67	1年	5.2	74	98.3	同上	○

(注1) 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-3 許容曲げ応力による評価結果 (現時点の欠陥長さ: 67mm)

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 (図-1 黄)	1 年	A, B	3.8	23.9	○
		C+Ss	64.8	80.3	○
		D+Sd	52.0	83.5	○
		SA	3.8	73.3	○
包絡曲線式 (図-1 緑)	1 年	A, B	3.8	19.8	○
		C+Ss	64.8	72.1	○
		D+Sd	52.0	75.6	○
		SA	3.8	65.2	○
包絡曲線式 (図-1 オレンジ)	1 年	A, B	3.8	22.8	○
		C+Ss	64.8	78.2	○
		D+Sd	52.0	81.5	○
		SA	3.8	71.2	○

表-4 当該欠陥のき裂進展評価結果（現時点の欠陥長さ：51mm）

	BFC 式 (図-2 黄) 評価期間：1年		包絡曲線式 (図-2 緑) 評価期間：1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	51	4.6	51
SCCによる進展量	0.4(0.35)	4(3.2)	1.1	11
疲労による進展量	0.1(0.06)	1(0.1)	0.1	1
評価期間末期のき裂寸法	5.1(5.01)	56(54.3)	5.8	63

表-5 許容欠陥寸法の限界の評価結果（現時点の欠陥長さ：51mm）

評価式	初期欠陥		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 (mm)	長さ (mm)		深さ a_f (mm)	長さ ℓ_f (mm)	欠陥角度 2θ ($^\circ$)		
BFC 式 (図-2 黄)	4.6	51	1年	5.1	56	74.4	9.6 ($0.69 t^{\text{注2}}$)	○
包絡曲線式 (図-2 緑)	4.6	51	1年	5.8	63	83.7	同上	○

(注2) 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-6 許容曲げ応力による評価結果（現時点の欠陥長さ：51mm）

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 (図-2 黄)	1年	A, B	3.8	27.3	○
		C+Ss	64.8	87.3	○
		D+Sd	52.0	90.1	○
		SA	3.8	80.1	○
包絡曲線式 (図-2 緑)	1年	A, B	3.8	23.3	○
		C+Ss	64.8	79.3	○
		D+Sd	52.0	82.5	○
		SA	3.8	72.3	○

亀裂が裏波溶け込み部を斜めに進展したことに対する考察

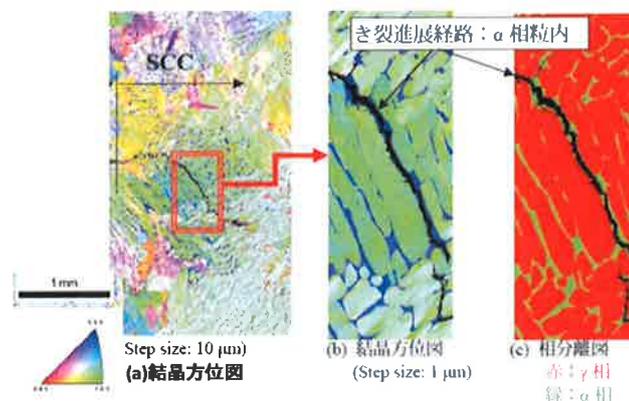
考え得る要因を以下に示すが、これらが単独、若しくは重畳したことで亀裂が斜めに進展した可能性がある。

① 残留応力分布の複雑性

- 溶接金属内の残留応力は溶接条件、ビードのパス数などによって影響を受け、その分布は3次元的（軸、周、板厚方向）に複雑である。
- 一般的には溶接中央部の溶接残留応力が大きい傾向があるため、溶接中央に向かって進む可能性は否定できない。
- 亀裂進展に伴い残留応力は再配分された場合、高い残留応力場に向かって進む可能性がある。

② 結晶組織の不均一性

- 溶接金属は母材と比べると結晶組織は不均一である。亀裂の進展経路は組織の影響を受けることが実験室でも確認されている。
- 一方、当該部は裏波溶け込み部であったことから、比較的デンドライトの成長方向が決まっていたため、溶接部中央に向かって、亀裂が伝播した可能性が否定できない。



図－1 結晶粒の境界に沿って進展した亀裂の例

熱時効ステンレス鋼の SCC 伝播経路 (320°C, DO8 ppm × 263 h → DH 2.7 ppm × 3920 h, $K \approx 30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) (出典：山田ら, INSS Journal, 2016)

③ デルタフェライト量のばらつき

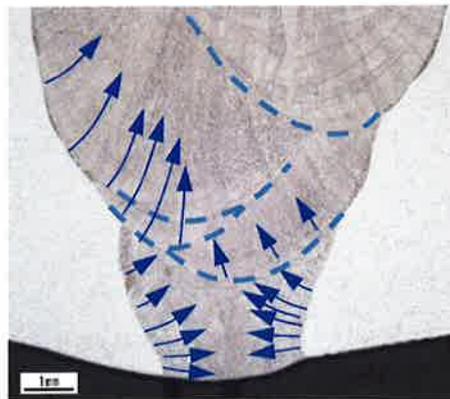
- ・溶接金属内のデルタフェライト量にはばらつきがあるため、位置によって SCC 進展感受性が変化した可能性がある。裏波溶け込み部内を横断するような進展しやすいパスが存在した可能性が考えられる。

④ 微小な初期欠陥の存在

- ・非破壊検査の検出限界以下の微小な欠陥が存在していた可能性は否定できない。例えば、裏波溶け込み部内での欠陥、裏波溶け込み部と 2 層目の境界での欠陥が、内表面に平行であった場合は、裏波溶け込み部を横断するような亀裂進展の可能性は否定できない。

<想定される進展経路の一例>

- ・モックアップによるとデンドライトは裏波溶け込み部内で図の青矢印のように成長している。
- ・エルボ側母材から溶金に入ったという前提であれば、裏波溶け込み部中央辺りまでデンドライトに沿って斜めに進展した可能性がある。
- ・裏波溶け込み部と 2 層目の境界が比較的進展しやすい状態にあり亀裂が進展した可能性が否定できない。



点線：パス境界
青矢印：デンドライト成長方向

図－2 裏波溶け込み部内における亀裂進展経路に影響する組織の状況

以上

№. ⑨ (7)

漏洩検知手順において、プラント停止後の手順ならびに亀裂により配管破断した場合の後処理についても提示すること。

1. 漏えい時のプラント操作手順について

監視カメラやパラメータの集中監視により当該部からの漏えいと判断した場合においては、早期にプラントを停止する手順とし、具体的には漏えいの程度によって以下のとおり停止操作を行うこととしている。

○微小漏えい（約 30cc/h、1 分間に 10 滴程度）時の対応操作

パラメータに有意な変化は認められないものの、監視カメラでほう酸析出や滴下程度等の漏えいが認められる微小漏えいの場合は、通常負荷降下率（20%/h）でプラント停止し、RCS 濃縮完了のタイミングで当該 D ループの RCP を停止させ、その後、通常の RCS 減温・減圧を行う。

○小漏えい（～約 0.23m³/h 程度）時の対応操作

パラメータに有意な変化が認められる小漏えいの場合は、緊急負荷降下率（5%/分）でプラント停止し、微小漏えい時と同様に RCS 濃縮完了のタイミングで当該 D ループの RCP を停止させ、通常の RCS 減温・減圧を行う。

2. 漏えい水の処理について

○微小漏えい時の処理

ほう酸析出等の微小な漏えい水（約 30cc/h、1 分間に 10 滴程度）については、床面等にとどまると思われるため、漏えい水の核種分析による放射能濃度評価後にウエス等での拭き取りで除染する。

○小漏えい時の処理

小漏えい（～約 0.23m³/h 程度）に至った場合は、貫通口から蒸気となって格納容器（CV）内に放出され CV 再循環空調設備により吸引・凝縮し、CV 下部の CV サンプに流入した後、液体廃棄物処理設備により処理する。また、滴下して階下にとどまった漏えい水については、核種分析による放射能濃度評価後に、ウエス等で拭取り後、表面汚染密度の測定を行い、汚染除去を行う。なお、必要により汚染された機器があれば除染する。

○LOCA（配管破断）時の処理

圧力バウンダリにおいて S C C や疲労により漏えいに至った事例を表-1 に示す。何れにおいてもほう酸析出等の微小な漏えい段階で発見されており、また今回の破壊評価結果からも急激な亀裂の進展により大量の漏えいや瞬時

に破断する可能性はないと考えている。

表-1 主な圧力バウンダリでの亀裂進展に伴う漏えい事象

発生時期	事象	発見状況	漏えい量	原因
1998. 9. 3	大飯 2 号機 原子炉容器サーモカップル (炉内計装用温度計) 管台キャノピーシール部の損傷について	ほう酸析出	約 780L (約 40 日間)	O ₂ S C C
1999. 4. 30	美浜 2 号機 余剰抽出水系統取出配管部からの僅かな漏えいについて	僅かな漏えい	約 300L (約 5 日間)	熱成層の変動による疲労
2003. 9. 10	敦賀 2 号機 加圧器逃がし弁用管台部等の損傷について	ほう酸析出	約 10cc	P W S C C
2004. 5. 5	大飯 3 号機 原子炉容器上部ふた制御棒駆動装置取付管台等からの漏えいについて	ほう酸析出	約 500cc	P W S C C

このように、これまでの亀裂によるトラブル実績や今回の破壊評価結果から大量の漏えいや瞬時破断のような不安定破壊を引き起こす可能性はないと考えているが、仮に当該配管が瞬時破断した場合には中破断 LOCA 事象となり、原子炉が自動停止するとともに安全注入信号が作動し、最終的に再循環運転に移行し炉心を継続的に冷却する。その際、RCS 保有水、ECCS 注入量が CV 内に漏出 (RCS 保有水 約 350m³、燃料取替用水ピット注入分約 2400m³、蓄圧タンク保有水約 108m³) することから、長期炉心冷却後、CV 内雰囲気を浄化させ、CV 内全域を除染することとなる。

No. ⑩

資料1-3、表1.4.10の供用状態A,Bの数字と表1.4.4の数字の関係性を説明すること。

表1.4.4に示している応力は、出力運転時（100%出力運転）における応力を示している。

運転圧力 (MPa)	運転温度 (°C)	発生応力 (MPa)
15.41	291.7	100

一方、表1.4.10の供用状態A,Bに示している応力は、出力運転時以外も含む供用状態A,Bにおいて発生する最も大きな応力を示している。

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 S_d (弾性設計用地震動)及び S_s (基準地震動)と読み替える。 S_d^* として S_d 地震力と静的地震力の大きいものを用いる。なお、評価に用いる地震力は既工認において用いた地震力と同等の地震力とする。
 表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_a 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

出力運転時（100%出力運転）及び供用状態 A, B において考慮している応力の内訳を表-1 に示す。

表-1 の結果より、破壊評価においては、出力運転時以外も含む供用状態 A, B において発生する最も大きな応力として、113.9MPa (=38.1MPa+72.0MPa+3.8MPa) を考慮している。

表-1 出力運転時（100%出力運転）及び供用状態 A, B において考慮している応力

条件	Pm 一次一般膜応力 (MPa)	Pe 熱膨張応力 (MPa)	Pb 自重による一次 曲げ応力 (MPa)	合計 (MPa)
出力運転時 (100%出力運転)	32.7	62.8	3.8	99.3 (100) ^{注1}
供用状態 A, B	38.1	72.0	3.8	113.9

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