

参 考 資 料

- 美浜・大飯・高浜発電所の安全性向上対策の実施状況
- 高浜発電所 4 号機の蒸気発生器伝熱管の損傷
- 大飯発電所 3 号機の加圧器スプレイライン配管溶接部の傷

2021年1月22日

美浜・大飯・高浜発電所の 安全性向上対策の実施状況

特定重大事故等対処施設の状況

特定重大事故等対処施設

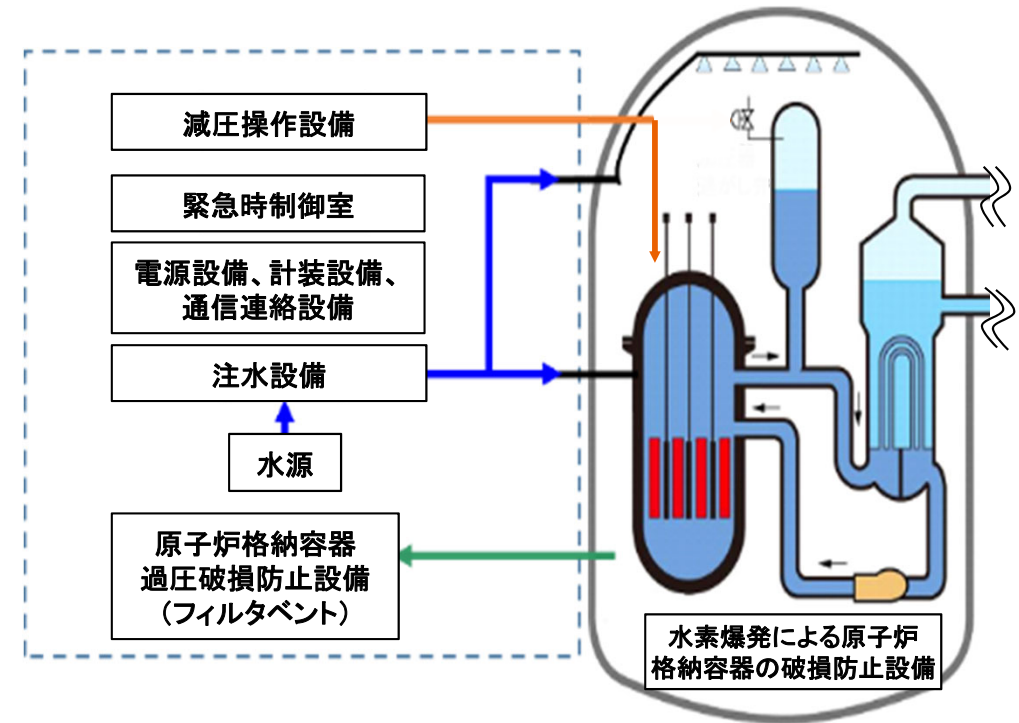
【概念図】

原子炉格納容器

○特定重大事故等対処施設設置

原子炉建屋への故意による大型航空機の衝突やその他のテロリズム等により、原子炉を冷却する機能が喪失し、炉心が著しく損傷した場合に備えて、格納容器の破損を防止するための機能を有する施設を設置。

高浜3号機については2020年12月11日運用開始
(高浜4号機については運用開始時期未定(定期検査遅延のため))



	高浜3,4号機	高浜1,2号機	美浜3号機	大飯3,4号機
本体施設の 工事計画認可	3号機：2015. 8.4 4号機：2015.10.9	2016.6.10	2016.10.26	2017.8.25
設置期限※1	3号機：2020. 8.3 4号機：2020.10.8	2021.6.9	2021.10.25	2022.8.24
実施 状況	設置変更 許可	2016.9.21許可	2018.3.7許可	2020.7.8許可
	工事計画 認可	2019.8.7認可	2019.4.25(1/4)、2019.9.13(2/4)、 2019.10.24(3/4)、2020.2.20(4/4)認可	2020.7.10申請
	工事	2020.12.22認可 ※3 2020.8.26申請	2020.7.10申請	2020.7.10申請
	工事完了	工事中	工事中	工事中

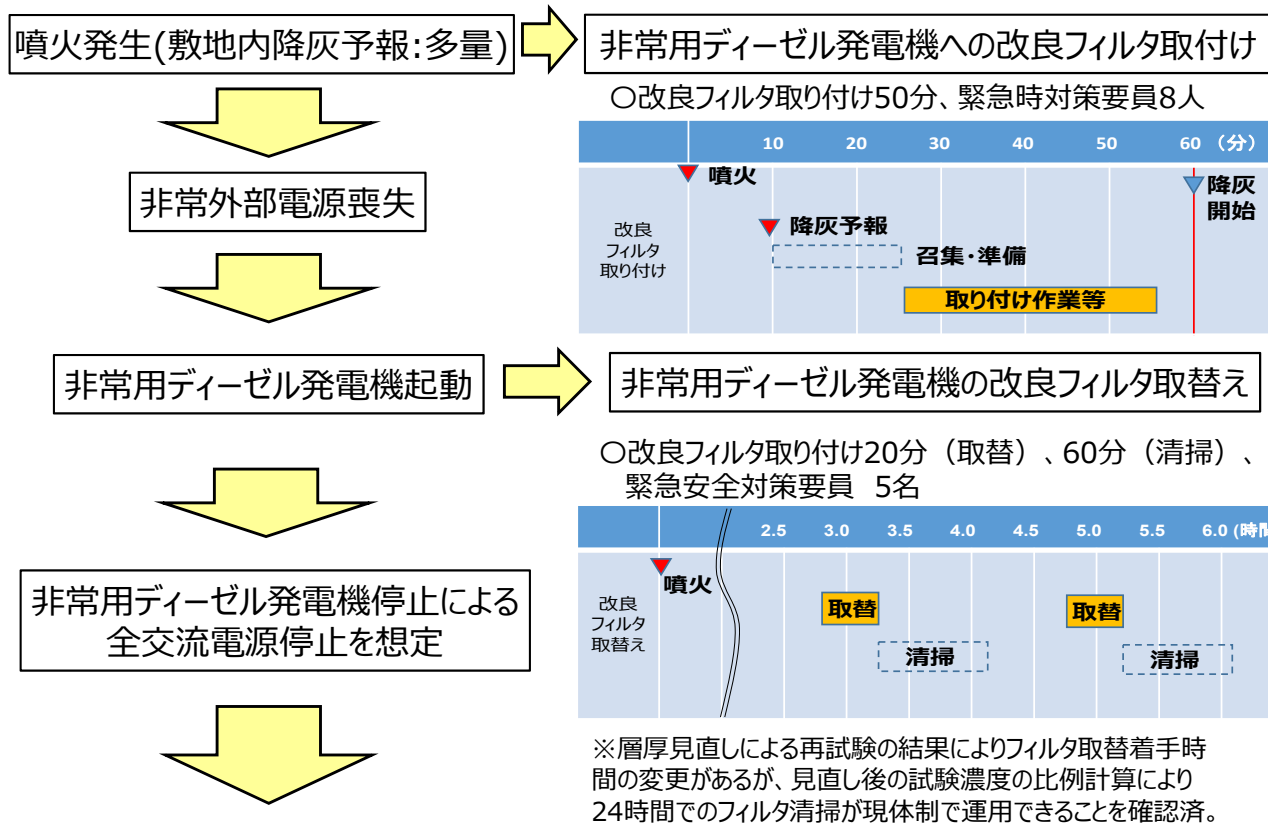
※1：実用炉規則により、本体施設の工事計画認可から5年までに設置することを要求。

※2：4分割申請

※3：2分割申請

大山火山の噴火に伴う降下火砕物の層厚評価の見直し

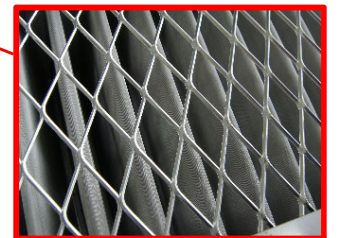
【現場における対策】(美浜3号機の例)



非常用ディーゼル発電機
改良型吸気フィルタ



旧



新

	高浜	大飯	美浜
①噴出規模11km ³ に基づく当社のシミュレーション結果	21.9cm	19.3cm	13.5cm
降灰層厚	①に基づく層厚		
	25cm	22cm	15cm
	NRAの指摘※を踏まえ見直した層厚		
	27cm	25cm	22cm

※越畑地点(25cm)と同じ距離になる大飯の降灰層厚を、越畑地点と合わせること(2020年5月 審査会合コメント)

電源車による給電準備

【手順】

- ①: 電源車移動……屋外から燃料取扱建屋内へ
- ②: 給電準備……電源車-仮設中圧ポンプを接続
- ③: 給水準備……仮設中圧ポンプの供給ライン接続、ポンプ起動

<対応時期> ①: 降灰予報(多量)後、直ちに開始、②、③: SBO発生後に開始

【原子炉設置変更許可申請】

2019年9月26日申請、現在、原子力規制委員会で審査中

大山からの距離



警報が発表されない可能性のある津波への対応に係る高浜発電所の許認可申請

【原子炉設置変更申請（2019年9月26日）／許可（2020年12月2日）】

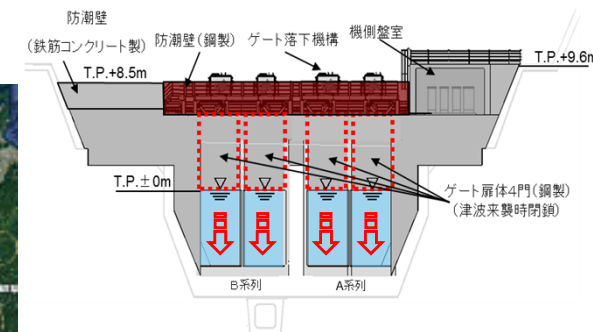
<申請の概要>

- 基準津波として今回、新たに津波警報が発表されない可能性がある津波として「隠岐トラフ海底地すべり」による津波を設定する。
- 高浜発電所1～4号機全てが運転中で取水路防潮ゲートが全て開いている時に、警報が発表されない可能性がある当該の津波が発生した場合に備え、潮位計等の追加設置および取水路防潮ゲートの運用変更等を行う。

高浜発電所への影響が大きいと考えられる隠岐トラフ海底地すべり発生想定位置（3地点）



<取水路防潮ゲート正面図>



2台の潮位計の観測潮位が10分以内に0.5m以上下降（上昇）し、その後、最低（最高）潮位から10分以内に0.5m以上上昇（下降）した場合、防潮ゲートを閉止

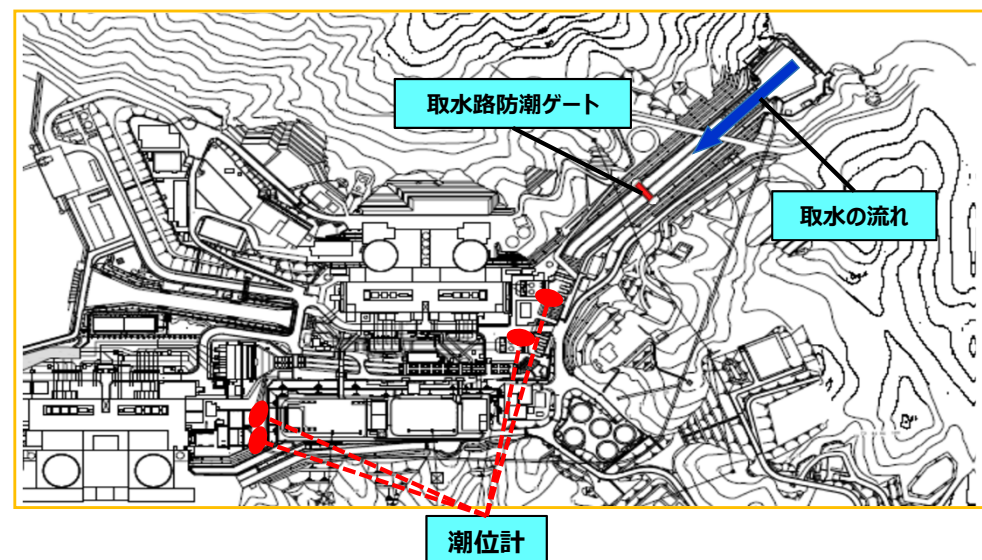
【設工認、保安規定変更認可申請（2020年10月16日）】

<設工認申請の概要>

- 潮位計と、衛星電話の具体的な仕様を記載し、耐震性を評価。
- 敷地高さに近接する入力津波を作成し、潮位計の計装誤差を考慮しても取水路防潮ゲートの閉止判断基準で検知できることを確認。
- 津波遡上範囲の車両について漂流物化しないように津波の影響を受けない場所へ退避する方針を記載。

<保安規定申請の概要>

- 津波防護施設の運転上の制限に、潮位観測システムとして潮位計及び衛星電話を設定。
- 取水路防潮ゲートの閉止判断基準等を確認した場合、循環水ポンプ停止およびプラント停止、取水路防潮ゲート閉止する等の運用を規定。



原子力人材育成方針をもとに重点実施項目を充実した。

重点実施項目

- 新規制基準の着実な浸透、規制の枠組みに留まらず安全性実現に向けた人材育成の実施
重大事故等発生時の対応やプラント挙動等について、自発的な学習の促進と、研修の改善により、理解の促進を図る。
 - ・緊急時リーダーシップ能力を高める研修（たいかん訓練など）の実施

事故対応能力の向上

- 指導者層の育成・意識の向上
要員育成状況の把握とフォローによる役職者の人材育成への意識醸成を図る。
円滑な技術伝承のため、ベテラン層など指導者の育成を図る。
 - ・育成キーマンによる推進、事業本部による支援体制の整備
 - ・OJT指導者への研修の実施

若手技術者への技術伝承

事故時対応能力の向上

福島第一発電所事故の教訓を踏まえ、事故時対応能力を高めるため訓練を積み重ねると共に実施内容の充実を図っている。

事故対応能力の向上教育訓練の充実

2012年～

テクニカルスキル向上

件名		
原	原	原
シ	シ	シ
シ	シ	シ
	重大事	重大事故の事象、緊急時
	活動判	活動レベル(EAL)判断のための教育
		シビアアクシデント対応教育Ⅲ(講義)
	シ	シビアアクシデント対応教育Ⅰ(演習)
	初動	初動対応訓練(模擬倉)
原	原	原子力防災訓練

ノンテクニカルスキル向上

JANSI	JANSI	JANSI発電所長研修(指揮者リーダーシップ)
(指)	(指)	
JANSI	JANSI	JANSI危機管理研修(課長クラス)

INSS緊急時対応リーダーシップ研修の試行実施 2016年～

たいかん訓練(対象：指揮者クラス)

目的：福島第一事故の教訓として、重大事故時に発電所対策本部の指揮者クラス*が的確に統率・指揮できるよう、緊急時のリーダーシップ能力を高める。

* 指揮者クラス：全体指揮者（発電所長）、原子炉毎の指揮を行うユニット指揮者とその補佐役を担う安全統括、副所長(技術)、運営統括長、安全・防災室長をはじめ課長クラス以上の役職者

実施内容：

- ・コントローラーから、シナリオに基づき情報を電話のみで伝達
- ・指揮者等の役割を付与されたプレイヤーは、電話による情報を基に、状況把握、対応策検討、意思決定、指令等の対応
- ・次々に阻害事象（例：所外からの問い合わせ、現場でのけが人発生）を伝達し、ストレス下での対応を訓練
- ・訓練後、全員が振り返りの討議に参加し、自身とチーム全体での気づき事項を出し合い、自身の反省と改善に繋げる

【実績】2016～2019年度に計21回（約2時間／回）実施
合計193名が参加

【改善事例】訓練の振り返りによる訓練者自らの気づきが、より効果的に得られるよう評価ツール「たいかん訓練 目標設定シート」を開発・活用

→訓練を受け要員が、自身の弱みと強みを認識したうえで、訓練に臨むことにより、能力向上の効果が高まった。

プレイヤー＜発電所対策本部＞



コントローラー＜別室＞



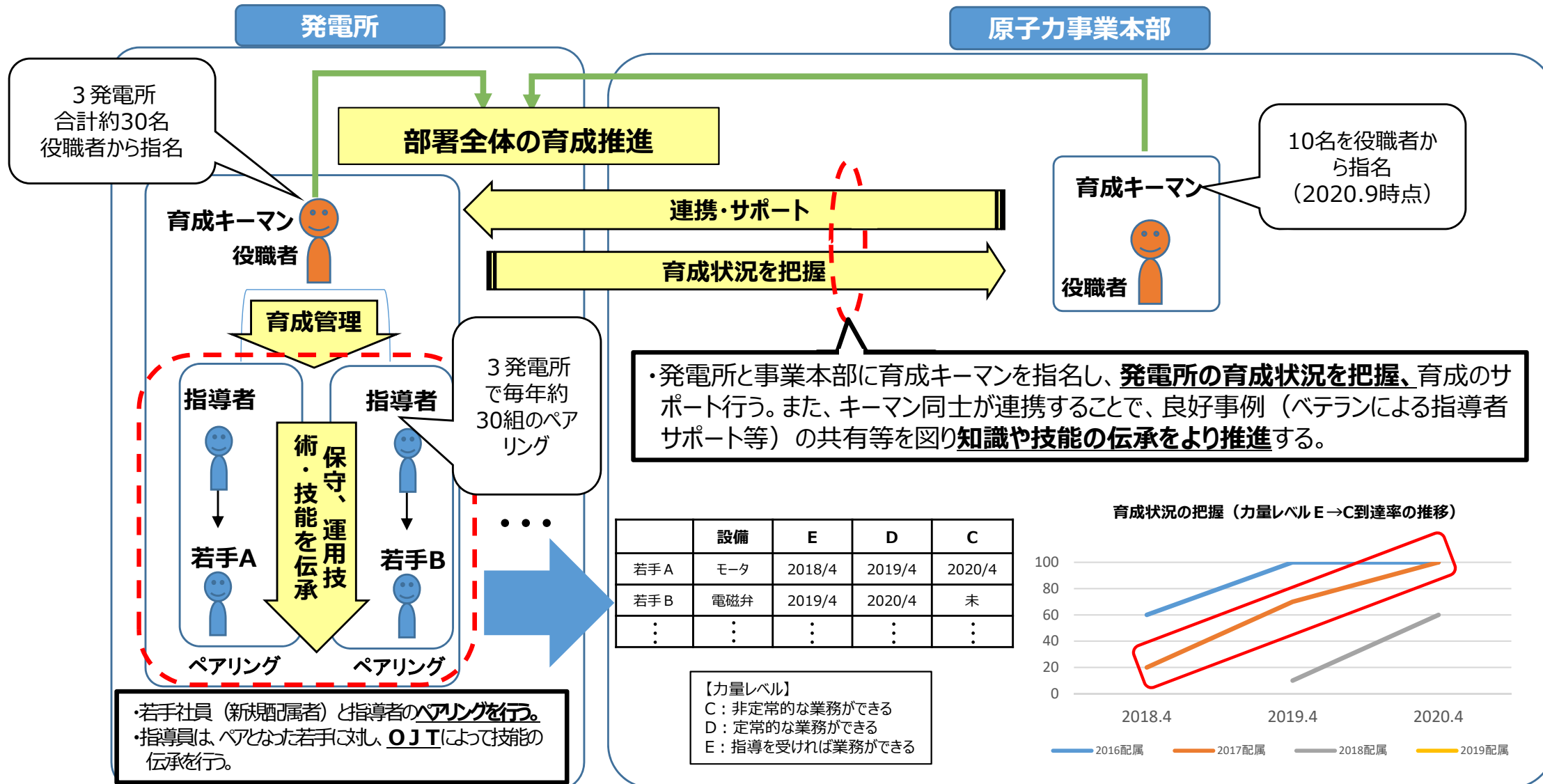
情報伝達は電話のみ

プレイヤーの動きをモニタリング

若手技術者への技術伝承

若手技術者への技術伝承に関する教育の例

技術伝承の取り組みとして、若手社員と指導者のペアリングを行うことで、OJTによる早期育成を図る。育成キーマンを任命し、取り組みのサポートを行う。



協力会社の技能認定者の育成と維持について

【目的】

協力会社（原子力発電所の請負工事に従事する者）の技能認者制度により、段階的な育成を図る。
また、5年先までの育成計画を把握し、必要な技能認定者数を確保する。

●技能認定者

原子力発電所における請負工事のうち「指定機器」（25機種）※の請負工事にする者
（※ 原子力発電所の安全・安定運転を行うために特に工事品質を維持する必要がある機器
例：原子炉容器、タービン、ポンプ、配管、非常用ディーゼル発電機等）

●認定の種類

監督責任者 A 級、技能作業者 1 級、技能認定準級

●認定試験

- ・受験資格を有する者に対して、原則、毎年 1 回実施（筆記試験や実技試験等にて確認）
- ・資格有効期限は認定を受けた年度を含めた 7 年間。

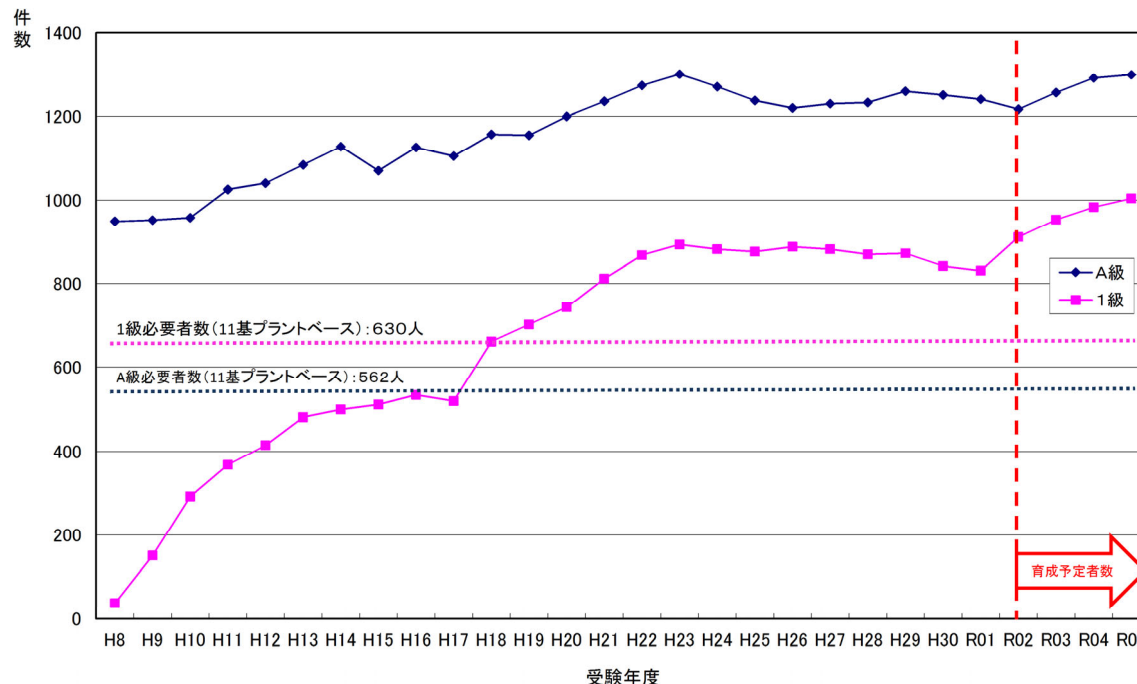
	筆記試験		現場 観察	実技 試験	技 能 レ ベ ル	受 験 資 格 の 条 件
	一般	専門				
監督 A 級	○	○	○	○	作業員を現場で指導監督して、各種法令を遵守しながら所定の作業を仕様書どおり実施する技能を有する者	準級認定後、指定する機器の工事の実務経験を2回以上有し、2年以上経過した者
技能 1 級	○	○	○	○	設備の分解・点検・組立等の作業を自ら行う者で、各種法令を遵守しながら作業を所定どおり行う技能を有する者	準級認定後、指定する機器の工事の実務経験を2回以上有し、2年以上経過した者
準級	—	○	—	—	監督 A 級、技能 1 級認定を目指すものとして、技能、知識及び資質を実務経験、講習等により習得した者	指定機器に係る工事の内、次のいずれかの実務経験を 4 回以上有する者 a. 監督責任者の修習業務（副責任者） b. 定検管理委託業務 c. 主作業での技能作業者の修習業務（技能を要する実務）

協力会社の技能認定者の育成と維持について

技能認定者数の確保に向けた取組み

- 技能認定に伴う受験機会の拡大(年1回から2回へ拡大)
- 実務経験を「定期検査」に限定せず、「プラント長期停止に伴う追加点検」や「新規制基準対策工事」についても対象として、技能者選定の実務経験枠を拡大。
- 各協力会社とコミュニケーションを図り、毎年、5年先までの各種技能認定者数および今後の受験計画を把握。
- 各協力会社とコミュニケーションを図り、退職予定者数も踏まえながら、必要な（今後の稼働プラントに応じた）技能認定者を確保。

● 技能認定者の推移



(認定者数 2019年度実績)

監督責任者A級 : 1244名

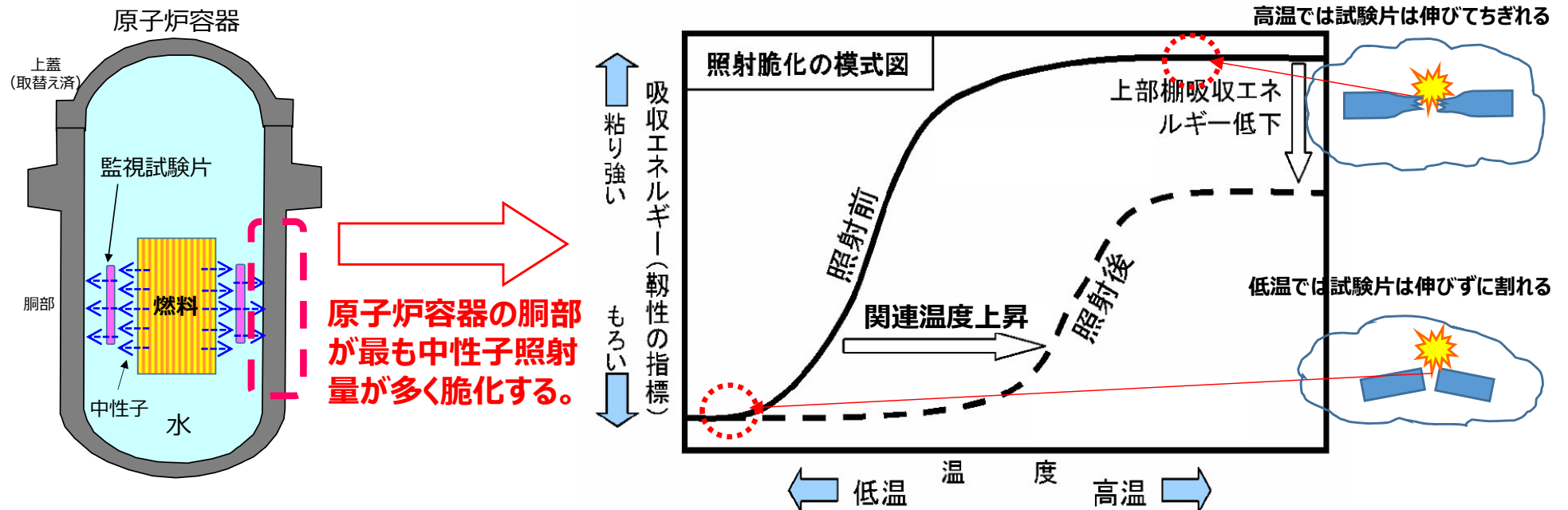
技能作業員1級 : 833名

技能認定準級 : 1863名

中性子照射脆化とは

中性子脆化とは：

- 金属は、高温状態では粘りが強いが、温度低下とともに粘りがなくなり脆くなる性質がある。
 - 中性子線（放射線）を浴びると、粘り強さが徐々に低下する。（これを中性子照射脆化という。）
- ※金属の粘り強さが失われ、衝撃に弱くなる温度が高くなることを遷移温度（関連温度）の上昇という]



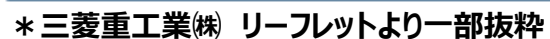
中性子照射脆化に対する粘り強さ健全性確認

- 中性子線により脆化した原子炉容器（金属壁）について、事故時に炉心冷却のため緊急注入される冷却水によって、金属壁の温度が急激に低下したとしても、十分に耐えられるか確認が必要。

原子炉容器の健全性の確認のために以下の2つを実施。

- ① 現状確認
- ② 将来予測（運転期間延長20年間）による確認

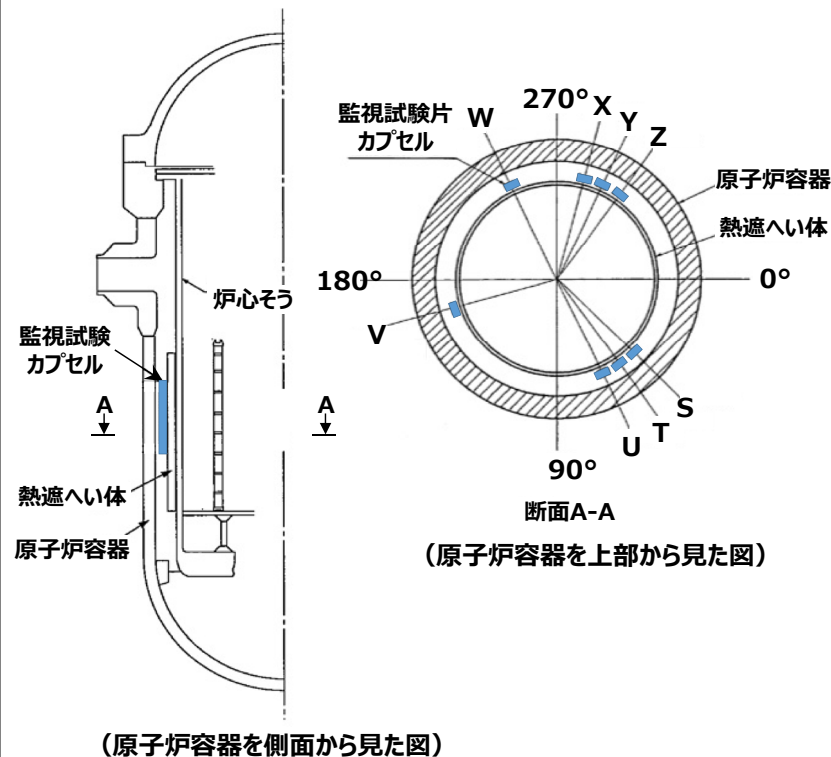
原子炉容器超音波探傷試験装置（A-U Tマシン II）



監視試験の概要

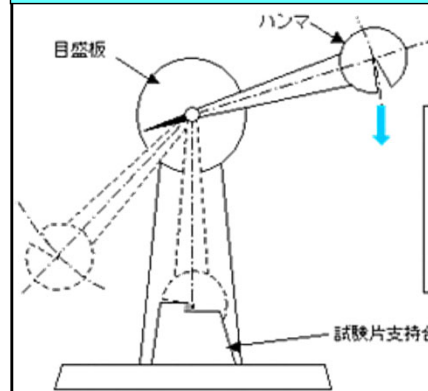
監視試験カプセル内の試験片を用いた試験を実施することにより、原子炉容器の脆化度合い（関連温度）と抵抗（破壊靱性値）を把握している。

監視試験片カプセルの装荷図

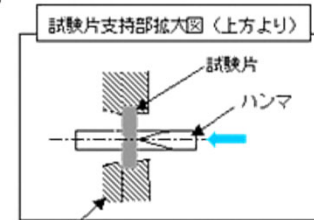


第5回目の監視試験を運転開始後50年目までに実施する。

シャルピー衝撃試験



※試験片をハンマーで叩いて脆化度合いを計測する試験。



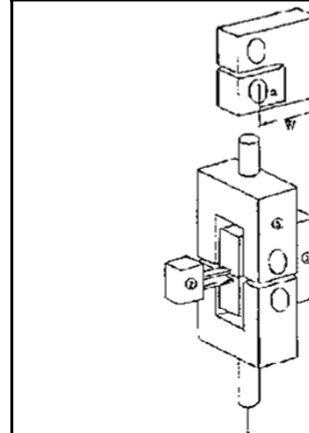
脆化度合い
(関連温度)
を取得

＜高浜1号機の母材の例＞

(単位：℃)

初期値	第1回	第2回	第3回	第4回
-4	22	54	68	95

破壊靱性試験

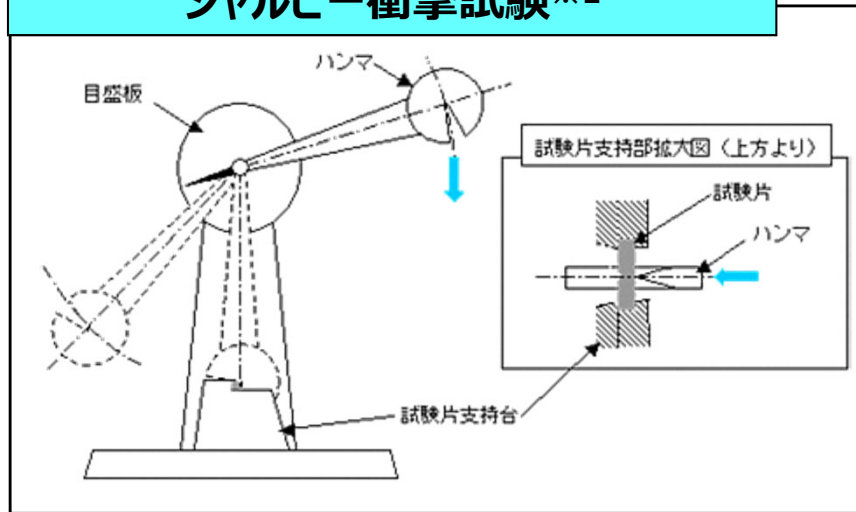


※試験片を引っ張ること抵抗を計測する試験。

原子炉容器の抵抗
(破壊靱性値)を取得

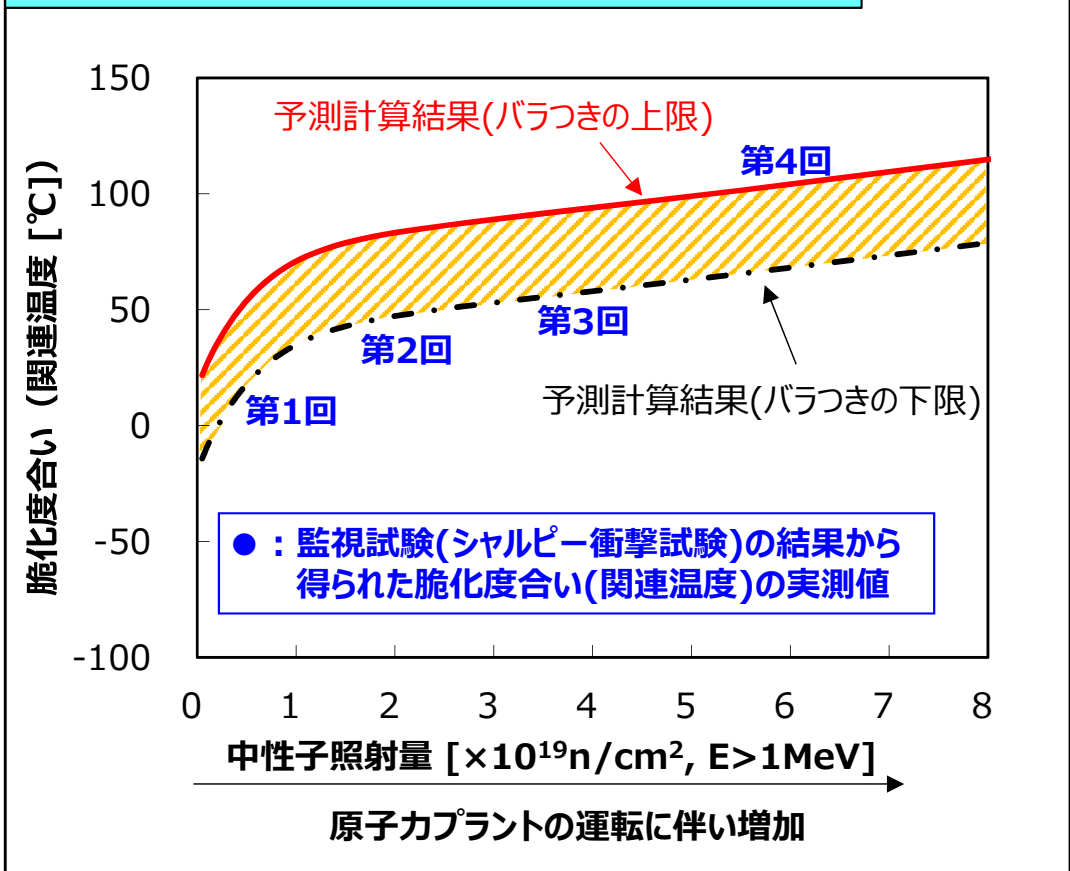
- 監視試験によって取得した原子炉容器の脆化度合い（関連温度）の実測値と、日本電気協会規格に基づく脆化予測線を比較。
- 結果： 原子炉容器の脆化度合い（実測値：グラフの青点）は、脆化予測（オレンジ斜線）の範囲内。

シャルピー衝撃試験※1



※1：試験片をハンマーで叩いて脆化度合いを計測する試験。

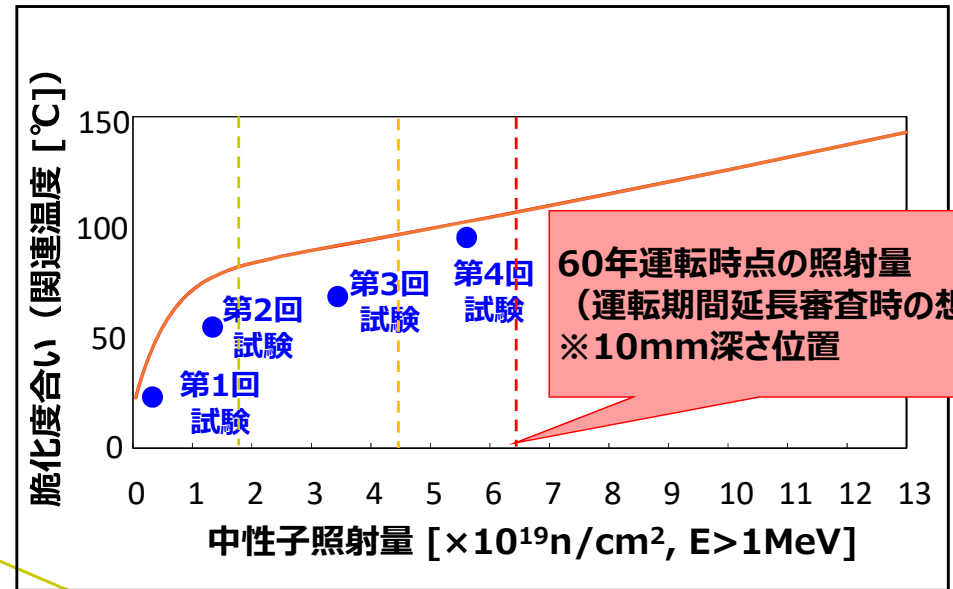
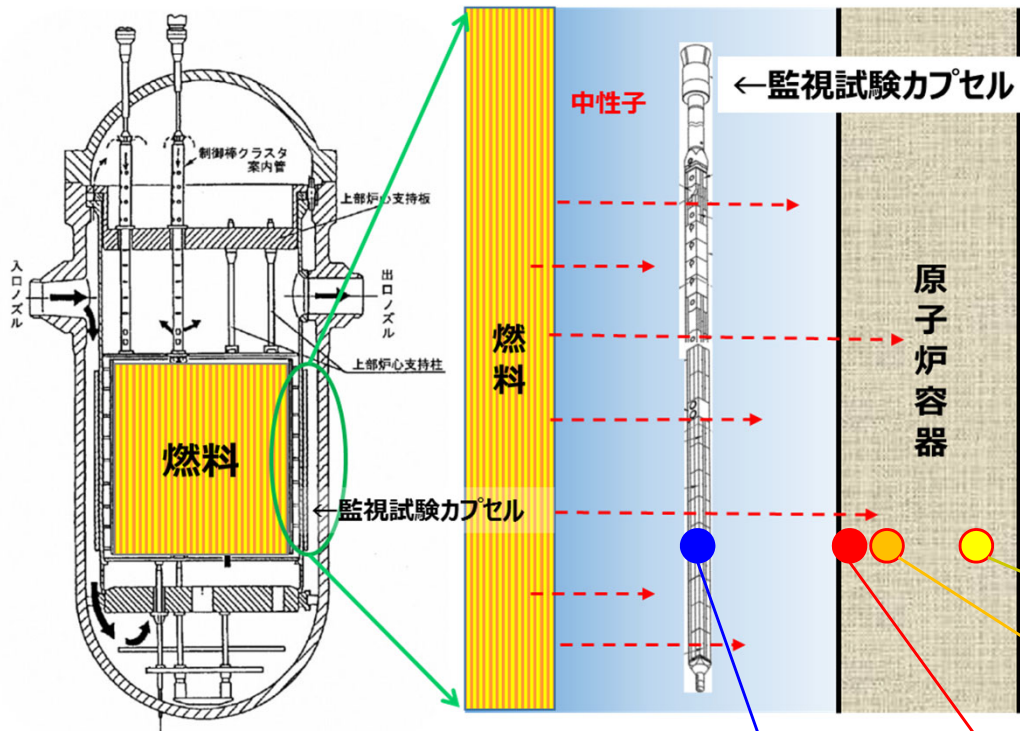
脆化度合いの予測と監視試験結果の比較 (高浜1号機の例)



(注) 本図の曲線は、比較結果をイメージしやすいよう、代表位置の中性子束に基づき計算したもの。実際に試験結果と計算値の比較を行う際は、各監視試験カプセル位置の中性子束で計算した値と比較する。

原子炉容器の位置による照射量の違い

原子炉容器の外側に向かうほど、中性子照射量は低下する。



<高浜1号機の例>

[単位: $\times 10^{19} \text{ n/cm}^2$]

稼働時間 (定格負荷相当運転年数 EFPY)	第4回監視試験 カプセル位置	原子炉容器 (板厚: 約200mm)		
		10mm深さ位置	約50mm深さ位置 (板厚の4分の1)	約150mm深さ位置 (板厚の4分の3)
第4回監視試験カプセル取り出し時点 ※実稼働時間: 約25年	約5.6	約3.9	約2.7	約1.1
60年運転時点 (運転期間延長審査時の想定) ※実稼働時間: 約40年	—	約6.4	約4.4	約1.8

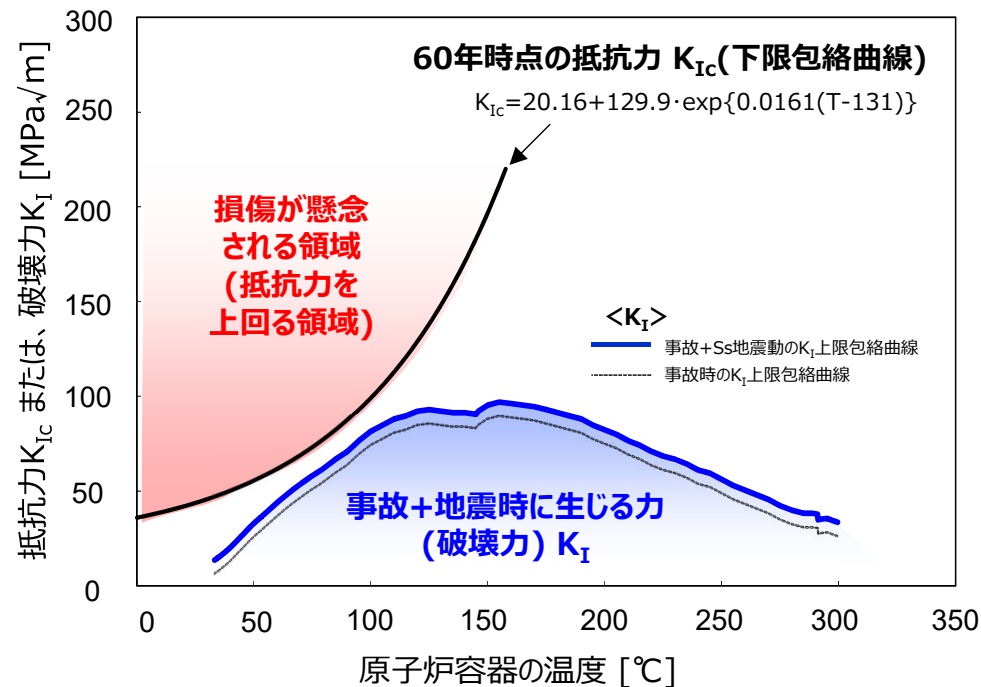
地震の影響確認

地震による影響確認として、事故時の破壊力に地震力を加えた評価を実施している。

地震の想定（基準地震動）

新規制基準適合性に係る審査で了承された最大加速度700Galを想定

<高浜1号機の評価結果の例>



事故時の破壊力に地震力を加えたとしても、**抵抗力**が**破壊力**を常に上回ることから、原子炉容器の健全性は確保される。

健全性評価(監視試験結果) 高浜 2 号機

参考15

監視試験結果

- (社) 日本電気協会 原子炉構造材の監視試験方法 (JEAC4201) 等の規定に従い、これまで計 4 回の監視試験を実施。
- 高浜 2 号機の監視試験結果を以下に示す。

高浜 2 号機 原子炉容器本体胴部 (炉心領域部) の中性子照射脆化に対する監視試験結果

監視試験	取出時期 (年月)	中性子照射量 ($\times 10^{19}\text{n/cm}^2$) [E>1MeV]	T r 3 0*1 (°C)			上部棚吸収エネルギー (J)		
			母 材	溶接金属	熱影響部	母 材	溶接金属	熱影響部
初期値	—	0	-26	-39	-80	141	172	196
第1回	1976年10月	0.3 [約3EFPY] *2	-9	-19	-71	133	162	172
第2回	1986年4月	2.2 [約19EFPY] *2	15	18	-18	110	117	144
第3回	2003年8月	3.5 [約31EFPY] *2	22	22	-36	122	133	161
第4回	2010年6月	5.6 [約49EFPY] *2	44	41	-31	124	154	179

*1：シャルピー衝撃試験における吸収エネルギーが41Jとなる温度。関連温度はTr30の移行量と関連温度初期値から算出する。

【関連温度初期値】高浜 2 号機 母材：-30℃ 溶接金属：-53℃ 熱影響部：-69℃

*2：内表面から板厚tの1/4t深さでのEFPY。EFPYとは、定格負荷相当年数であり、定格出力で連続運転したと仮定して計算した年数を示す。

健全性評価(監視試験結果) 美浜 3 号機

参考16

監視試験結果

- (社) 日本電気協会 原子炉構造材の監視試験方法 (JEAC4201) 等の規定に従い、これまで計 4 回の監視試験を実施。
- 美浜 3 号機の監視試験結果を以下に示す。

美浜 3 号機 原子炉容器本体胴部 (炉心領域部) の中性子照射脆化に対する監視試験結果

監視試験	取出時期 (年月)	中性子照射量 ($\times 10^{19}\text{n/cm}^2$) [E>1MeV]	T r 3 0*1 (°C)			上部棚吸収エネルギー (J)		
			母 材	溶接金属	熱影響部	母 材	溶接金属	熱影響部
初期値	—	0	-32	-48	-51	149	197	194
第1回	1977年10月	0.3 [約2EFPY] *2	-10	-46	-61	129	192	201
第2回	1987年1月	2.0 [約18EFPY] *2	10	-13	-42	128	141	179
第3回	2002年1月	3.5 [約30EFPY] *2	18	-12	-35	128	158	176
第4回	2011年5月	5.8 [約50EFPY] *2	45	-7	-14	139	172	190

*1：シャルピー衝撃試験における吸収エネルギーが41Jとなる温度。関連温度はTr30の移行量と関連温度初期値から算出する。

【関連温度初期値】美浜 3 号機 母材：-20℃ 溶接金属：-62℃ 熱影響部：-42℃

*2：内表面から板厚tの1/4t深さでのEFPY。EFPYとは、定格負荷相当年数であり、定格出力で連続運転したと仮定して計算した年数を示す。

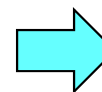
健全性評価(関連温度評価) 高浜2号機

参考17

関連温度評価

- 「(社)日本電気協会 原子炉構造材の監視試験方法 (JEAC4201-2007/2013追補版)」(以下 JEAC 4201)の国内脆化予測法による関連温度予測値を下表 (高浜2号機) に示す。
- JEAC 4201の国内脆化予測法による予測と監視試験結果の関係を下図 (高浜2号機) に示す。
- 関連温度予測値と監視試験結果から、当該部位の中性子照射脆化は、国内脆化予測法による予測の範囲内であることを確認した。

原子炉容器本体胴部の中性子照射脆化に対する
関連温度の国内脆化予測法による予測と監視試験結果の関係



原子炉容器本体胴部 (炉心領域部) の中性子照射脆化に対する関連温度の予測値

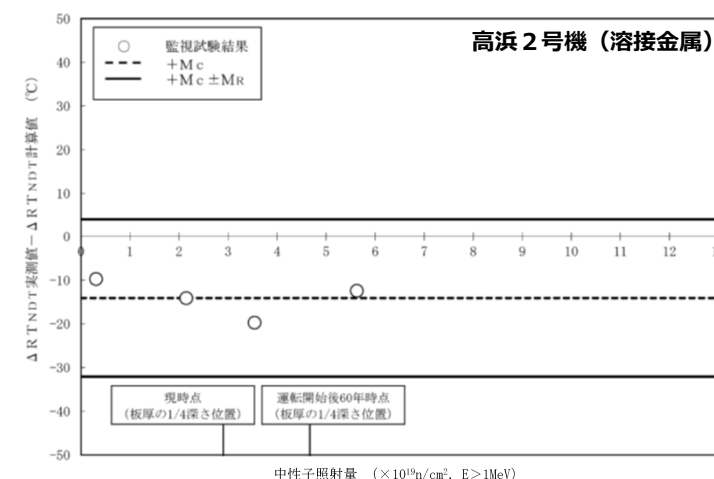
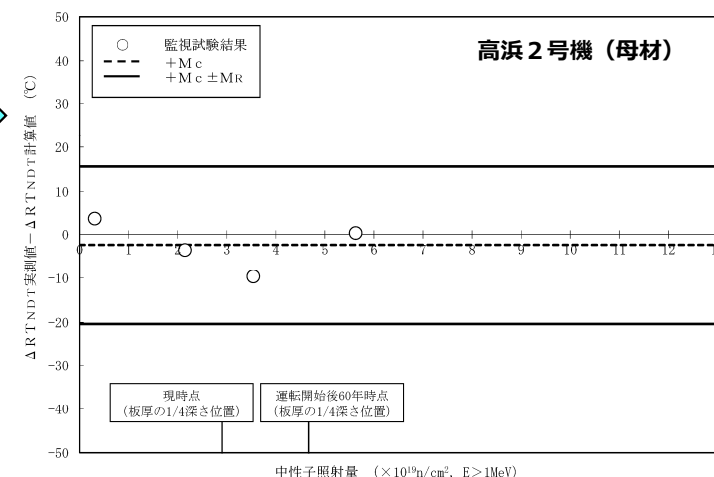


	評価時期	中性子 照射量*1 ($\times 10^{19}\text{n/cm}^2$) [E> 1 MeV]	関連温度*2 (°C)		
			母 材	溶接金属	熱影響部
高浜2号機	2015年4月時点	2.90	40	28	3
	運転開始後60年時点*3	4.67	50	37	13

*1 : 内表面から板厚 t の1/4 t 深さでの中性子照射量

*2 : 内表面から板厚 t の1/4 t 深さでの予測値

*3 : 将来の設備利用率を80%と仮定して算出



(Mc : 実測値で補正する場合に用いるマージン、Mr : マージン)

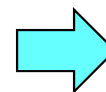
健全性評価(関連温度評価) 美浜3号機

参考18

関連温度評価

- 「(社)日本電気協会 原子炉構造材の監視試験方法 (JEAC4201-2007/2013追補版)」(以下 JEAC 4201)の国内脆化予測法による関連温度予測値を下表 (美浜3号機) に示す。
- JEAC 4201の国内脆化予測法による予測と監視試験結果の関係を下図 (美浜3号機) に示す。
- 関連温度予測値と監視試験結果から、当該部位の中性子照射脆化は、国内脆化予測法による予測の範囲内であることを確認した。

原子炉容器本体胴部の中性子照射脆化に対する
関連温度の国内脆化予測法による予測と監視試験結果の関係



原子炉容器本体胴部 (炉心領域部) の中性子照射脆化に対する関連温度の予測

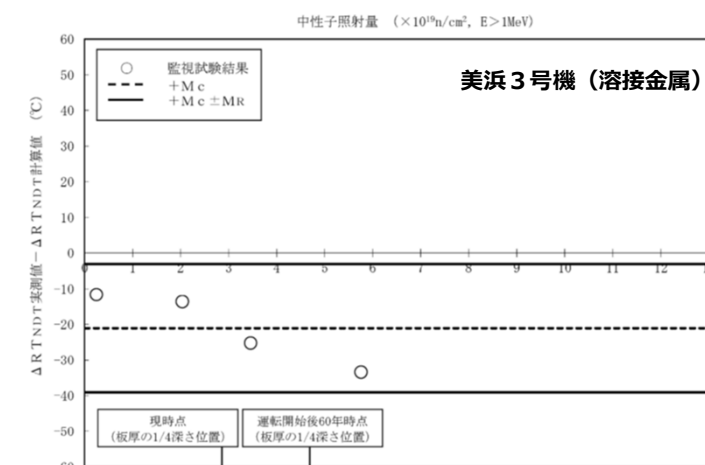
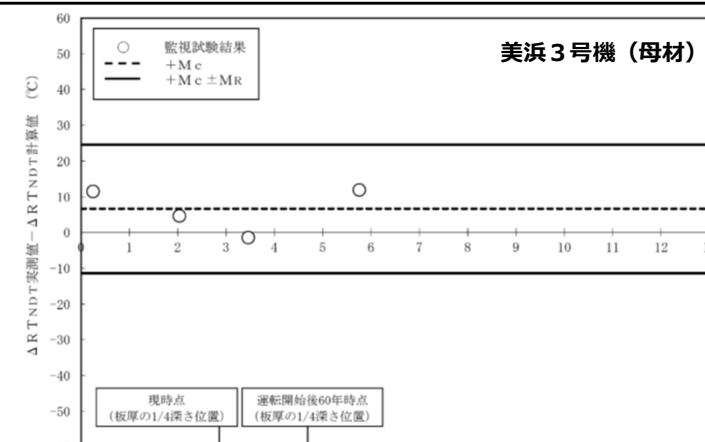


	評価時期	中性子 照射量*1 ($\times 10^{19}\text{n/cm}^2$) [E > 1 MeV]	関連温度*2 (°C)		
			母 材	溶接金属	熱影響部
美浜3号機	2015年11月時点	2.86	53	-7	-4
	運転開始後60年時点*3	4.69	64	3	7

*1：内表面から板厚 t の1/4 t 深さでの中性子照射量

*2：内表面から板厚 t の1/4 t 深さでの予測値

*3：将来の設備利用率を80%と仮定して算出



(Mc : 実測値で補正する場合に用いるマージン、Mr : マージン)

健全性評価（上部棚吸収エネルギー評価）

参考19

上部棚吸収エネルギー評価

国内プラントを対象とした上部棚吸収エネルギーの予測式（JEAC4201の国内USE予測式）を用いて、高浜1号機の運転開始後60年時点での上部棚吸収エネルギー予測値を評価した。

- ①その結果、高浜1号機は「(社)日本電気協会原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法(JEAC4206-2007)」(以下 JEAC4206) で要求している「68 J 以上」を下回っているため、JEAC4206の規定に従い破壊力学評価を実施した。
- ②評価対象時期の上部棚吸収エネルギー予測値から材料のき裂進展抵抗 (J_{mat}) を算出し、各供用状態での想定欠陥に発生するき裂進展力 (J_{app}) と比較した結果、JEAC4206に規定されている項目を満足しており、健全性に問題ないことを確認した。

① 原子炉容器本体胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化に対する上部棚吸収エネルギーの予測値

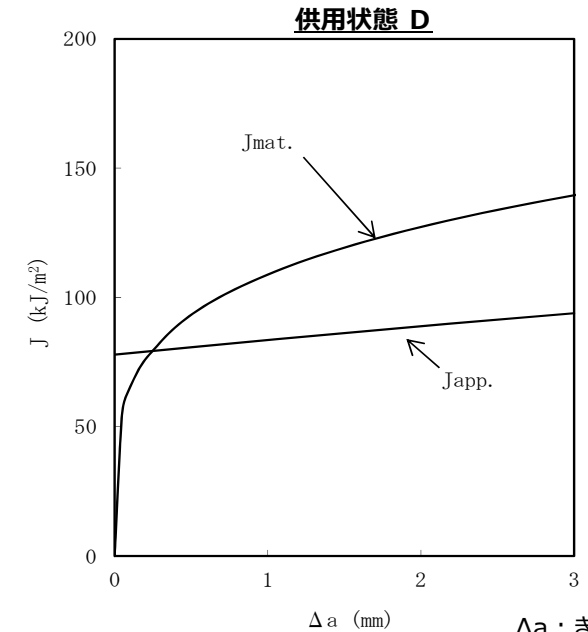
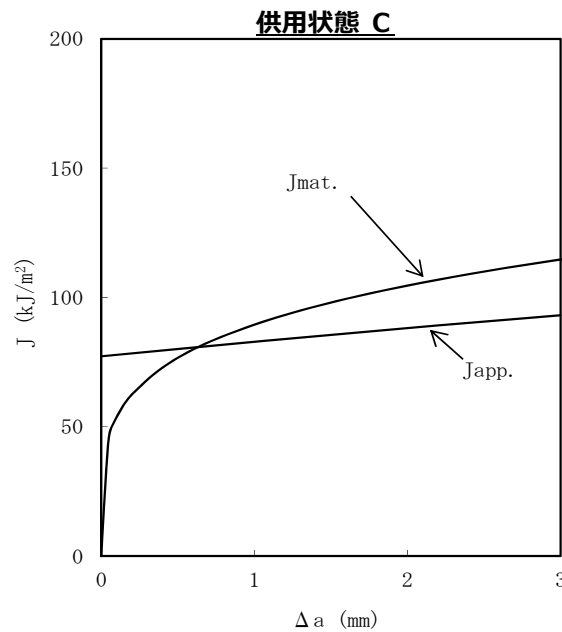
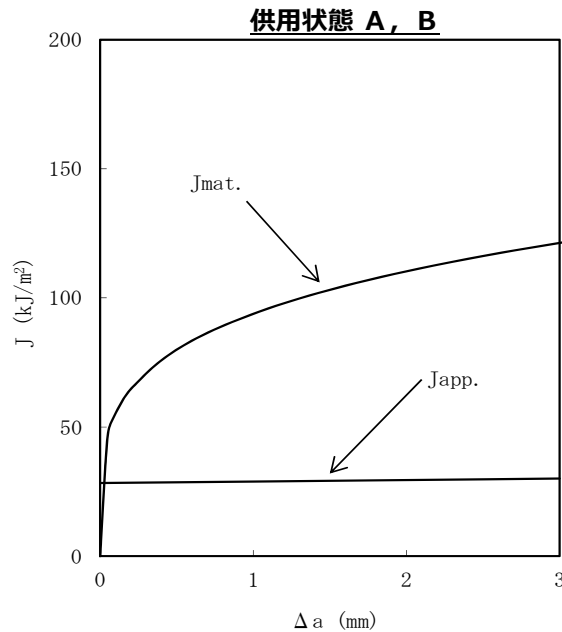
		初 期 値	2015年4月 時点*1	運転開始後 60年時点*1*2
高浜1号機	母 材	98	69	65
	溶接金属	158	115	109

(単位: J)

*1: 板厚 t の $1/4t$ 深さでの予測値

*2: 将来の設備利用率を80%と仮定して算出

② 高浜1号機 破壊力学評価結果



Δa : き裂進展量

健全性評価(上部棚吸収エネルギー評価) 高浜2号機、美浜3号機

参考20

上部棚吸収エネルギー評価

- 国内プラントを対象とした上部棚吸収エネルギーの予測式（JEAC4201の国内USE予測式）を用いて運転開始後60年時点での上部棚吸収エネルギー予測値を評価した。
- その結果、「(社)日本電気協会原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法(JEAC4206-2007)」(以下JEAC4206) で要求している「68 J 以上」を満足していることを確認した。

原子炉容器本体胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化に対する上部棚吸収エネルギーの予測値

(単位：J)

		初 期 値	2015年4月 時点 ^{*1}	運転開始後 60年時点 ^{*1*2}
高浜2号機	母 材	141	108	104
	溶接金属	172	113	106

		初 期 値	2015年11月 時点 ^{*1}	運転開始後 60年時点 ^{*1*2}
美浜3号機	母 材	149	129	125
	溶接金属	197	137	131

*1：板厚tの1/4t深さでの予測値

*2：将来の設備利用率を80%と仮定して算出

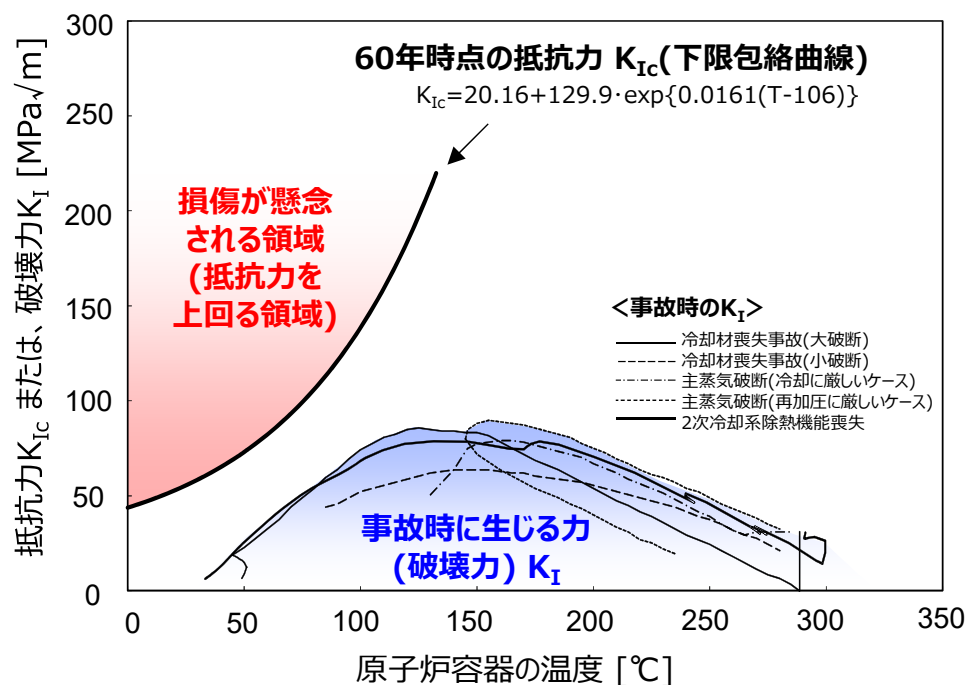
健全性評価(加圧熱衝撃評価) 高浜2号機、美浜3号機

参考21

- 脆化した原子炉容器（金属壁）について、事故時に炉心冷却のため緊急注入される冷却水によって、金属壁の温度が急激に低下したとしても、十分に耐えられるかを評価。
- 保守的に大きな亀裂を想定したとしても、60年運転時点の脆化程度では、事故時に金属壁に加わる力（破壊力）によって原子炉容器が壊れないことを確認。

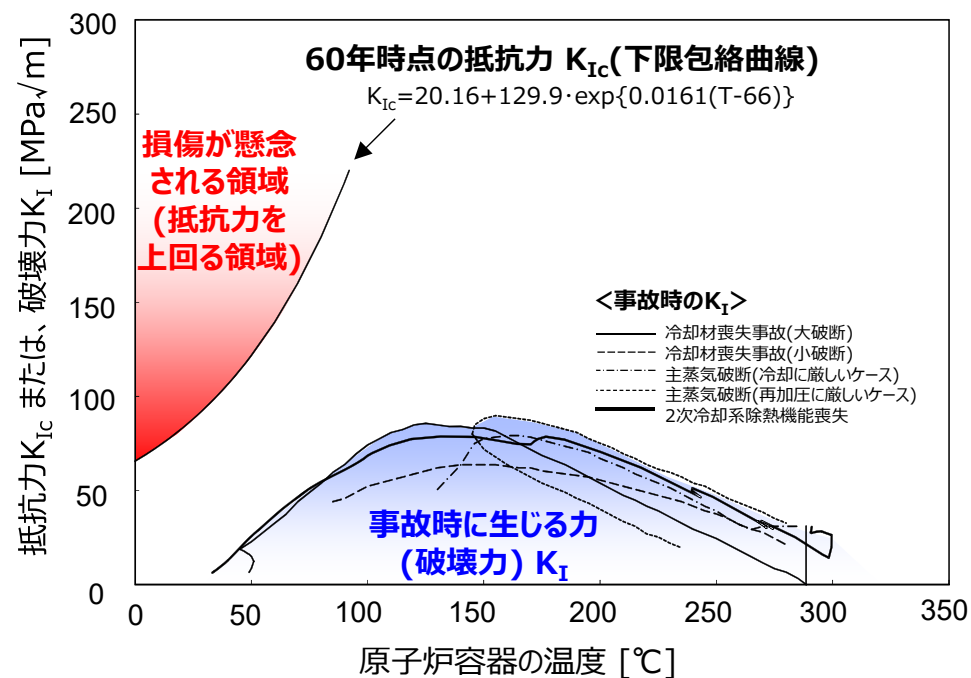
<高浜2号機の評価結果>

※深さ10mmの亀裂を想定



<美浜3号機の評価結果>

※深さ10mmの亀裂を想定



高浜発電所 4 号機の 蒸気発生器伝熱管の損傷

回収した付着物の調査結果

○ A－S GおよびC－S Gで確認された付着物を回収し、化学成分分析、外観観察等の詳細調査を実施した。

(1) 外観観察結果

- ✓ 付着物 A には、伝熱管減肉部と接触していたと想定される部位に、接触痕があり光沢が認められた。付着物 C には、接触痕や光沢は確認できなかった。
- ✓ 付着物 A および C の形状を計測した結果、それぞれ、直径22.5mm、21.9mmの円筒状に沿った形状であり、伝熱管（円筒）の外周（直径約22.2mm）に近い形状であることを確認した。

(2) 電子顕微鏡による観察結果

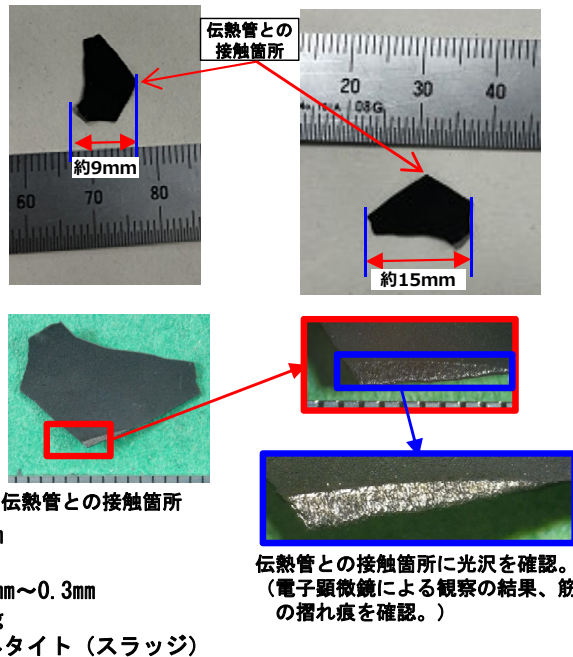
- ✓ 付着物 A について、伝熱管減肉部と接触していたと想定される部位を拡大観察した結果、筋状痕を確認し、伝熱管との摺動によりできたものと推定した。
- ✓ 付着物 C には、表面の一部に平滑な面があったが、筋状痕は確認できなかった。

(3) 成分分析結果

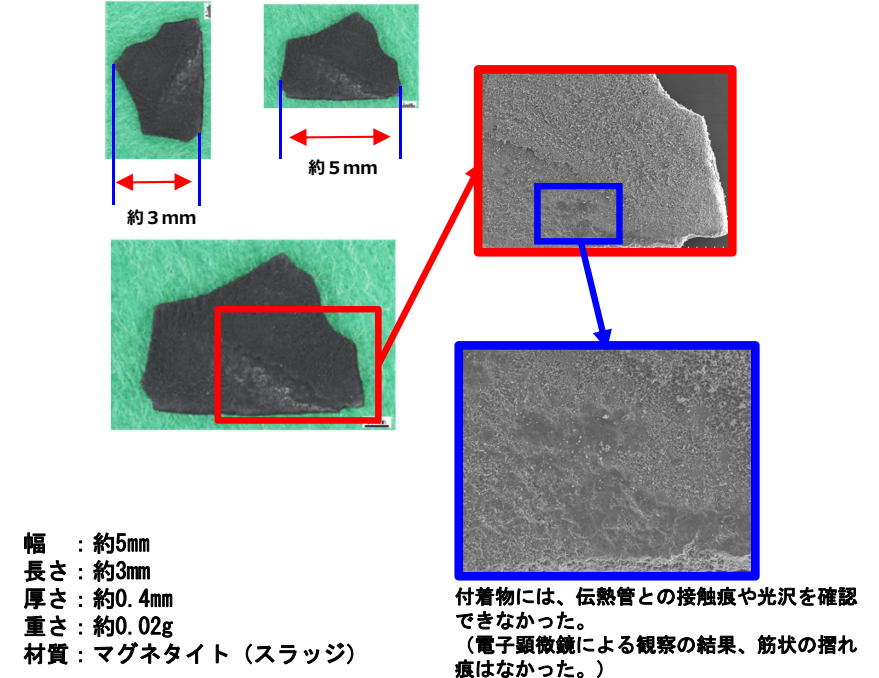
- ✓ 付着物 A および C の主成分はマグネタイトであることを確認し、S G 内で発生するスラッジと同成分であることを確認した。
- ✓ 付着物 A では、伝熱管減肉部と接触していたと想定される部位に、伝熱管の主成分であるニッケルおよびクロムの成分を検出したことから、この付着物が伝熱管をきずつけた可能性が高いと推定した。
- ✓ 付着物 C では、表面の一部にニッケルをわずかに検出したが、クロムは検出されなかった。

これらのことから、回収した付着物はプラント運転に伴い、S G 伝熱管外表面に生成された鉄酸化物（スケール）と推定した。

A－S Gで回収した付着物（付着物A）の分析結果



C－S Gで回収した付着物（付着物C）の分析結果



- スケールが伝熱管をきずつけるメカニズムを調査するため、C－S Gにおいて損傷が確認された3本の伝熱管周辺の第1、第2管支持板上から約300個のスケールを回収し、その性状等の確認を行った。その過程で、C－S Gの伝熱管を損傷させた可能性のあるスケールを回収した。
- 回収したスケールの外観観察等の結果、2つのスケール（C2、C3）の外表面に接触痕が認められたことから、工場において化学成分分析、外観観察等の詳細調査を実施した結果、以下のことを確認した。

外観観察結果

- スケールC2（幅約18mm、長さ約10mm、厚さ約0.3mm、重さ約0.19g）、およびC3（幅約23mm、長さ約11mm、厚さ約0.3mm、重さ約0.25g）には、伝熱管減肉部と接触していたと想定される部位に接触痕を確認した。
- スケールC2、C3の形状を計測した結果、スケールC2は直径約22.3mmの円筒状、スケールC3は直径約22.6mmの円筒状に沿った形状であり、伝熱管（円筒）の外周（直径約22.2mm）に近い形状であることを確認した。

電子顕微鏡による観察結果

- スケールC2およびC3について、伝熱管減肉部と接触していたと想定される部位を拡大観察した結果、筋状痕があり、伝熱管との摺動によりできたものと推定した。
- スケールの表面の一部に平滑な面が認められたが、拡大観察の結果、筋状痕は確認でなかった。

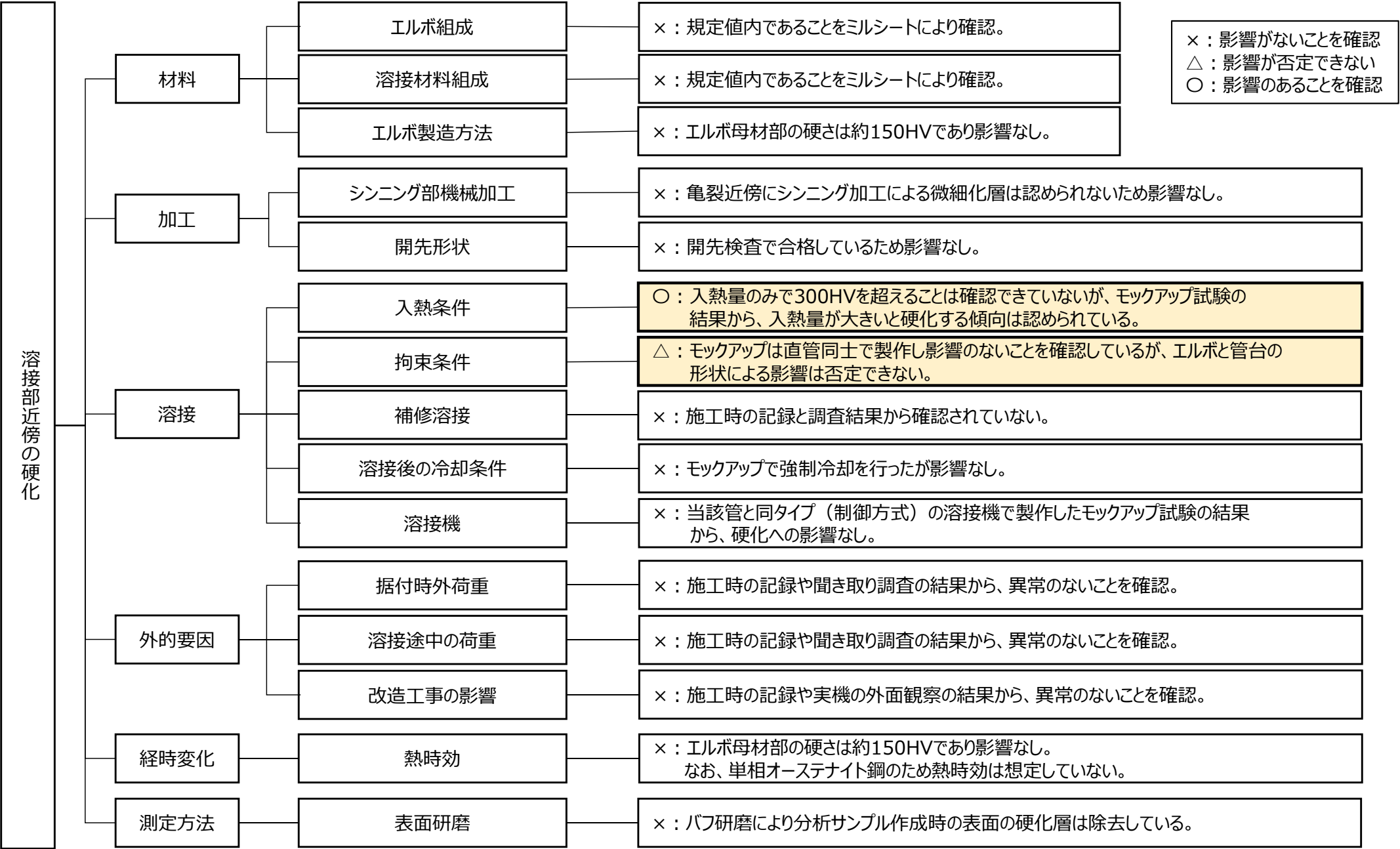
成分分析結果

- スケールC2およびC3の化学成分分析の結果、主成分はマグネタイトであり、S G内で発生するスケールと同成分であることを確認した。
- 伝熱管減肉部と接触していたと想定される部位に伝熱管の主成分であるニッケルおよびクロムの成分が検出されたことから、これらのスケールが伝熱管をきずつけた可能性が高いと推定した。
- スケールの表面に認められた平滑な面には、管支持板の材料に多く含まれるクロムの成分が検出された。

大飯発電所 3 号機の 加圧器スプレイライン配管溶接部の傷

溶接部近傍の硬化要因について

➤ FT図に基づき、溶接部近傍の硬化要因を再整理。



×：影響がないことを確認
 △：影響が否定できない
 ○：影響のあることを確認

溶接時の入熱量に加え、拘束条件による硬化への影響を確認する。

SCC発生・進展の3要素（環境、応力、材料）に関する考察

参考25

- 破面ミクロ観察の結果、破面全体にわたって応力腐食割れでよく見られる粒界割れが認められていることから、SCC発生・進展の3要素である環境、応力、材料について、以下のとおり整理した。

当該部の環境

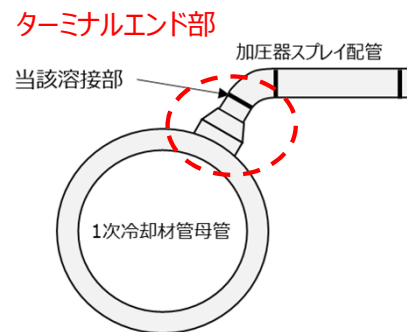
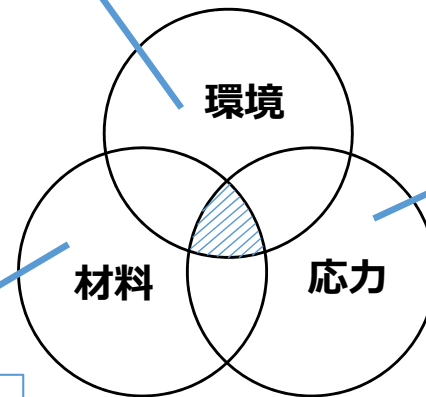
- 運転温度：
PWR環境中、200℃以上でSCCが進展する知見があり、当該部は200℃以上の環境に該当する。

当該部の応力

- 通常運転時の発生応力：100MPa
当該部はターミナルエンド部※¹であり、同ラインの他の溶接部と比べると、比較的大きな応力が発生する箇所となっている。
- 残留応力：約200MPaの引張応力
当該部は溶接残留応力が生じる部位であり、解析※²により、内面に引張の溶接残留応力が発生することを確認している。
なお、当該部はバフ研磨やピーニング等の応力改善による応力腐食割れ対策は実施していない部位である。

当該部の材料

- 材質：SUS316
BWR環境で硬さ300HV以上の場合にSCC発生の知見がある。
なお、当該部の表層部において300HV以上の硬さが認められた。
(機械加工や溶接の影響がない、通常の母材部の硬さは約150HV)



※1 ターミナルエンドとは、配管系の可撓性を拘束または制限するような箇所であり、比較的高い応力が生じる可能性があることから、ISIにおける定点として優先的に選定している。

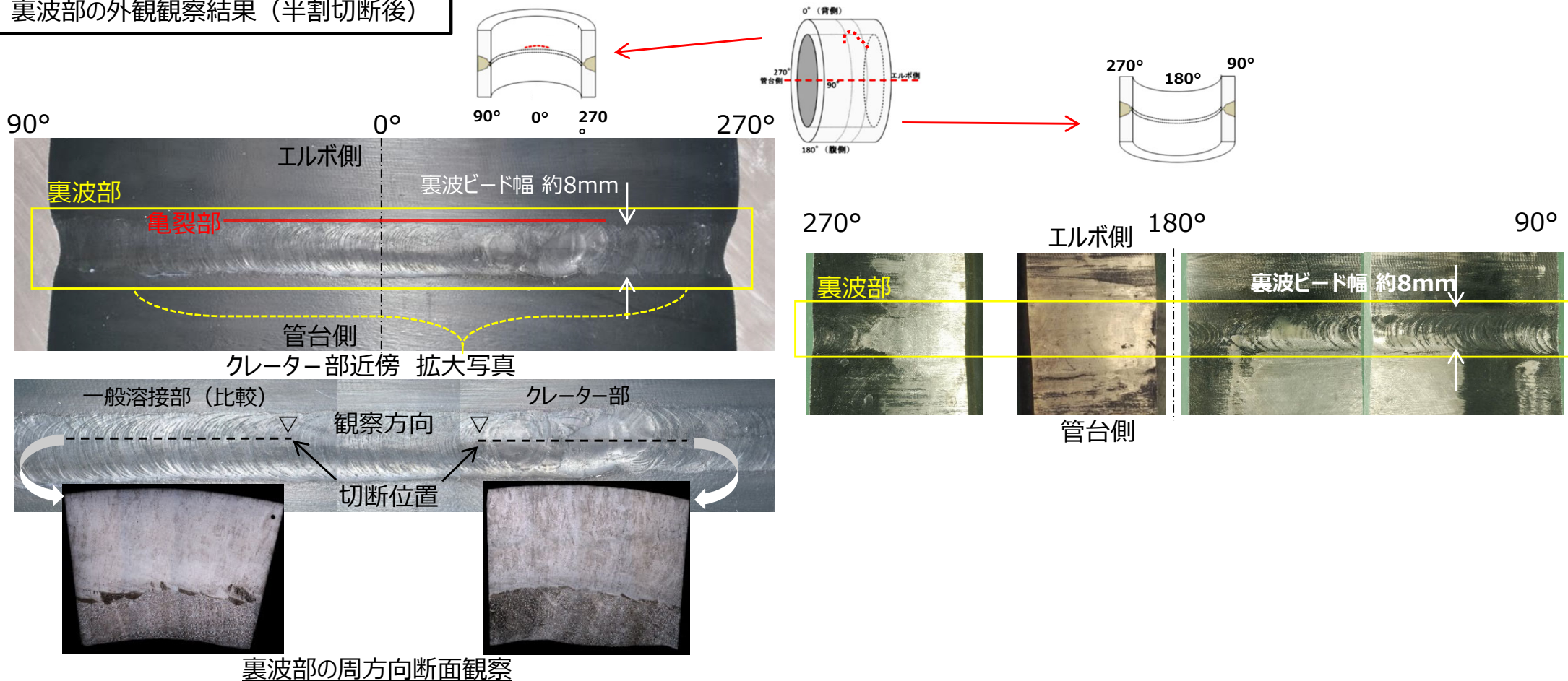
※2 旧JNESの複雑形状部機器配管健全性実証（IAF）事業による解析手法により確認した値

- SCC進展の知見のある200℃以上の温度環境である。
- 引張残留応力が生じる部位であることに加え、発生応力が比較的高いターミナルエンド部である。
- 硬さ300HV以上においてSCC発生の知見のある材料である。

溶接部に関する考察

- 亀裂が溶接境界極近傍の母材から発生・進展していることから、溶接部について「裏波部の外観、周方向断面観察」、「亀裂破面・断面観察」を行い、詳しく考察を行った。
- 「裏波部の外観、周方向断面観察」の結果、裏波部から認められる溶接異常の有無に関する考察を以下に示す。

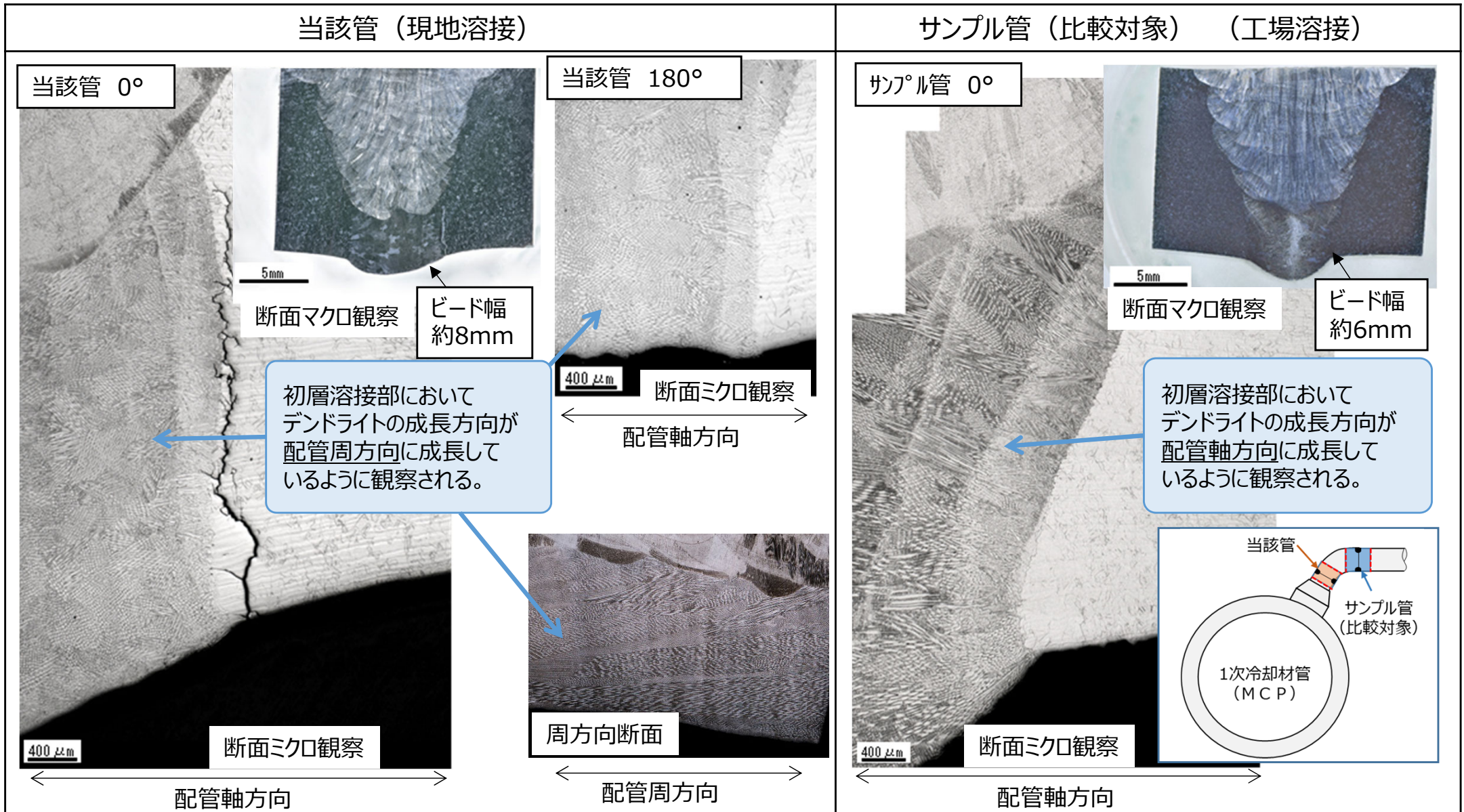
裏波部の外観観察結果（半割切断後）



- 裏波ビード幅が約8mmと幅広であった。ビード幅は360°全周にわたり同様であり、補修溶接をした場合に見られるようなビードの乱れは認められなかった。
- 溶接終端部と思われるクレーターが2つ近接して存在しているが、これは溶接操作を一旦停止し再開したことでできたものと推定され、周方向断面を確認した結果、明瞭な溶接欠陥は確認されず、補修溶接の痕跡も認められなかった。
- クレーター部は割れ中央部（0°+3mm）から離れたところ（0°+10～20mm）に位置しており、溶接欠陥も確認されておらず、亀裂発生への影響は確認できなかった。

溶接部に関する観察

- 溶接時の入熱による硬化について、当該管とサンプル管の断面を比較しビード幅および溶接金属組織について考察した。



- 当該管はサンプル管と比べ、約8mmとビード幅が広がった。
- 当該管とサンプル管との溶接金属部の組織の様相に違いが認められる。（当該管ではデンドライトが周方向に、サンプル管ではデンドライトが軸方向に成長しているように観察される。）

入熱量と硬さの関係（解析および文献調査）

- モックアップ調査で確認された入熱量と硬さの関係について、解析および文献調査により確認を行った。

解析

FEM解析による塑性ひずみへの入熱量の影響

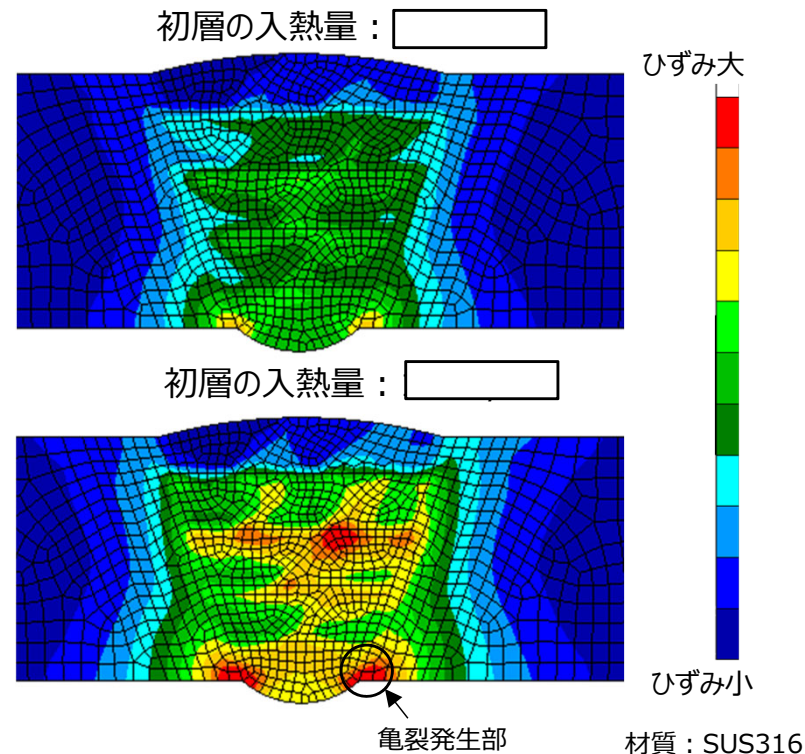


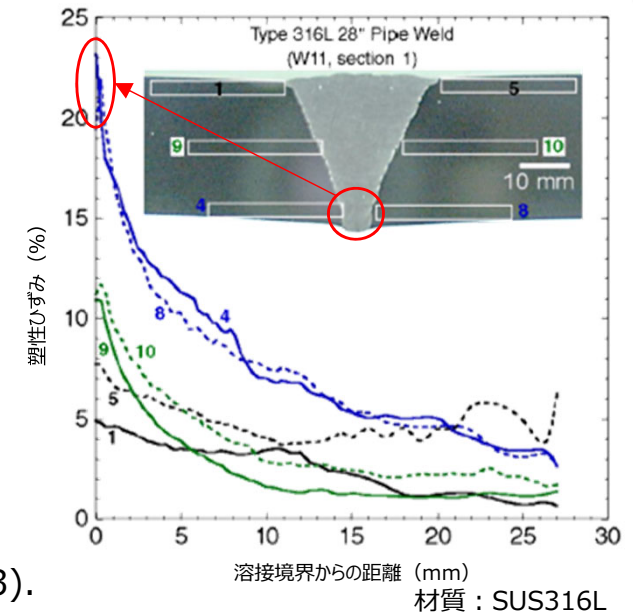
図 : 4B管(TIG+SMAW) 溶接模擬 FEM解析による塑性ひずみコンター図

- 入熱が大きくなれば、塑性ひずみが増加する。
- 亀裂発生部近傍で最大塑性ひずみが存在する。

文献調査

溶接部近傍の塑性ひずみ分布

- 内面近傍の塑性ひずみは計算値同様に増加している。



出典 : P. Andresen,
Corrosion 69.10 (2013).

硬さと塑性ひずみの関係

- 塑性ひずみが増すに従い、硬さが上昇する。

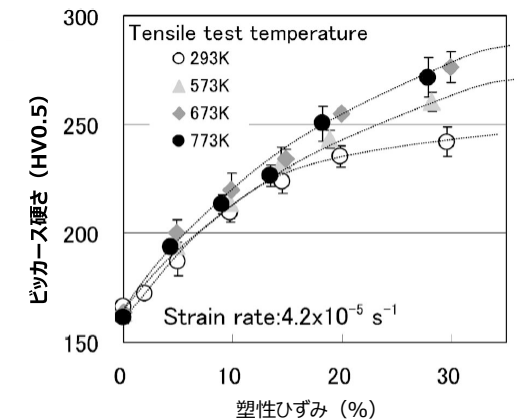


Fig. 4 Relationship between micro-Vickers hardness and tensile strain at temperatures of 293, 573, 673 and 773 K.

出典 : 加古ら, 日本金属学会誌 72[3], (2008).

- 解析および文献調査においても、モックアップ調査と同様に、**入熱量が増加するに伴い硬くなる傾向が示されていることを確認した。**

破面マクロ・ミクロ観察結果

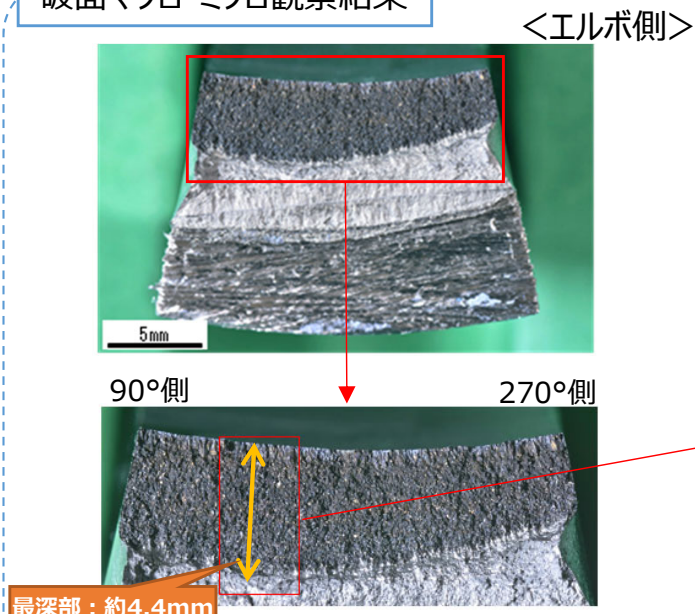


図1：破面マクロ観察

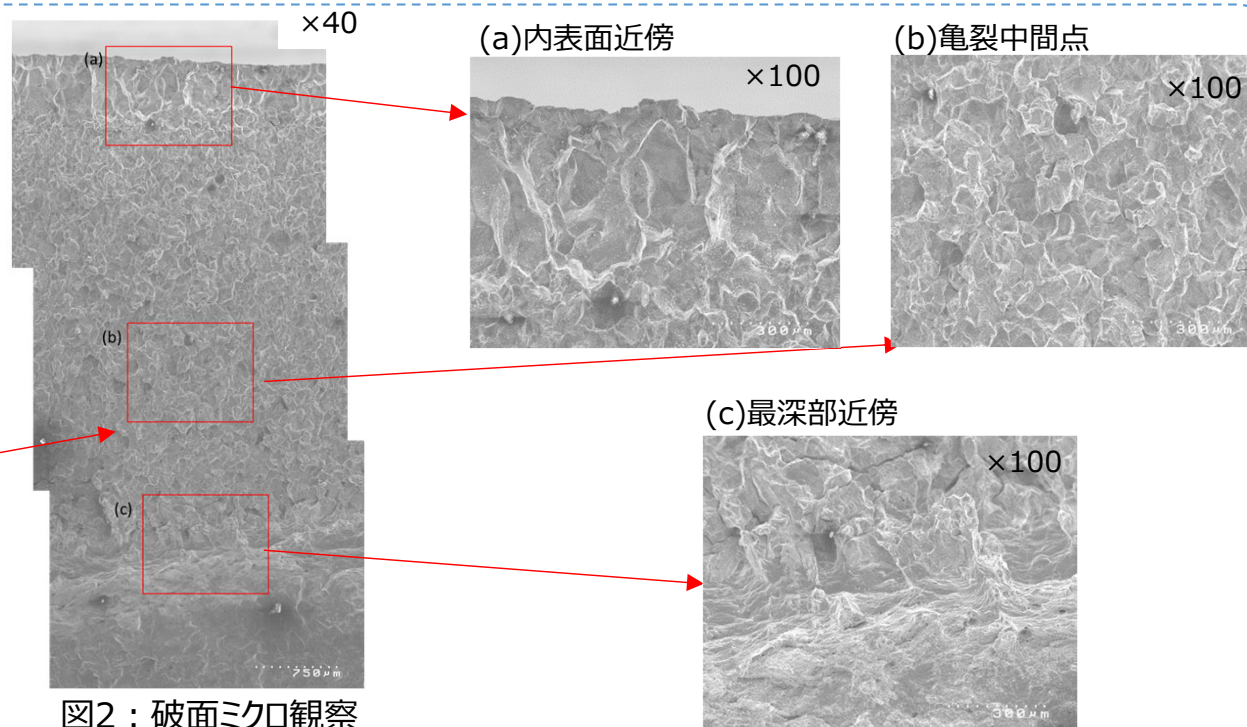


図2：破面ミクロ観察

付着物EDS分析結果

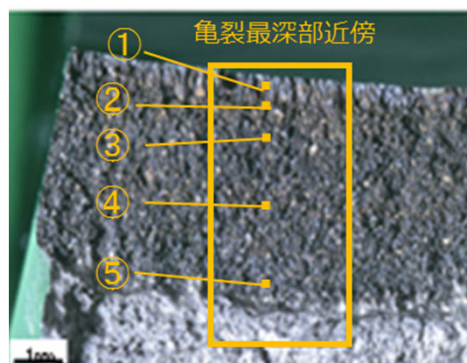


図3：付着物EDS分析位置

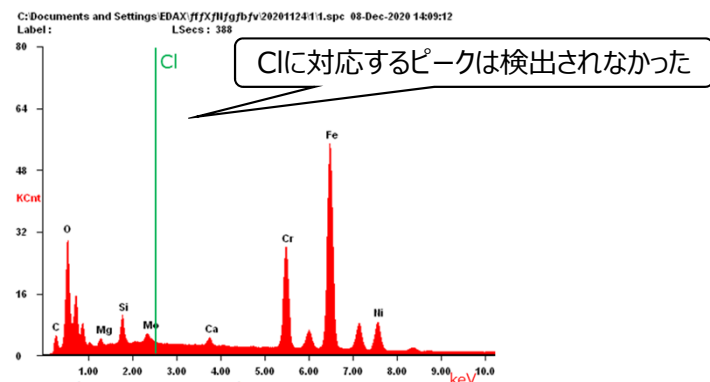


図4：付着物EDS分析結果（例：分析位置①）

- 亀裂最深部の破面ミクロ観察の結果、**破面全体にわたって応力腐食割れがよく見られる、粒界割れが認められた。**
- **疲労による割れの特徴であるビーチマークやストライエーションは認められなかった。**
- 破面観察から**Cl-SCCの特徴である粒内割れ**は殆ど認められず、付着物EDS分析から**Cl等の有害な元素**は認められなかった。

鋭敏化に対する考察

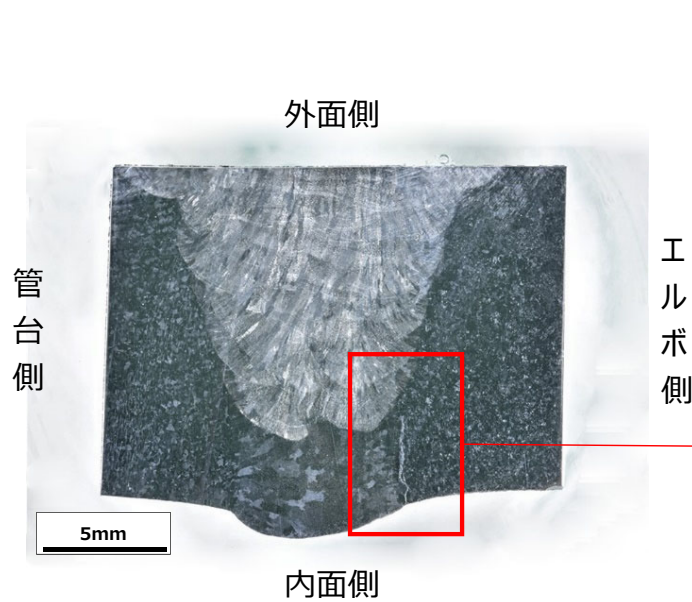


図1：断面マクロ観察

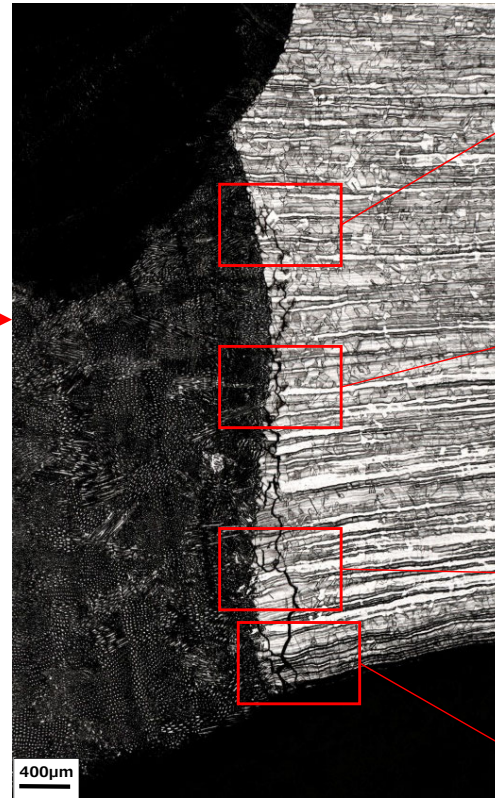
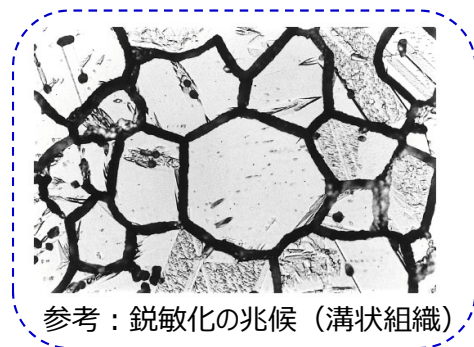
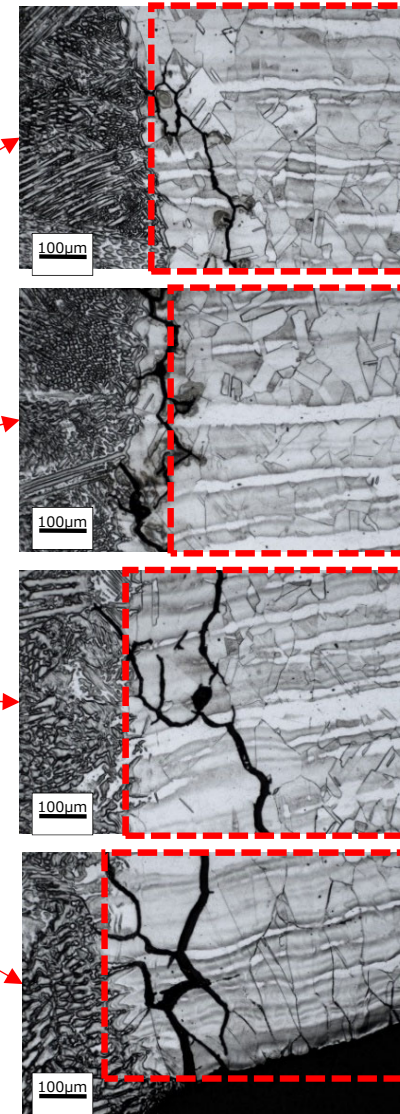


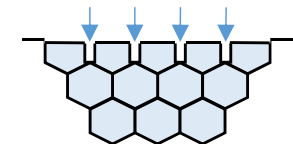
図2：断面ミクロ観察
(シュウ酸エッチング※1写真)

※1 JIS G 0571 ステンレス鋼のしゅう酸エッチング試験方法に従って実施

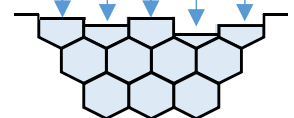


溝状組織※2は認められなかった。
〔段状組織※3を呈していた。〕

※2 溝状組織
粒界が溶けて溝が形成された組織



※3 段状組織
結晶方位ごとに腐食が異なり段差が形成された溝のない組織



断面イメージ

➤ O₂SCCの特徴である鋭敏化の兆候（溝状組織）は認められなかった。

溶接部に関する考察

参考31

- 亀裂破面・断面観察の結果、溶接欠陥の有無に関する考察を以下に示す。

溶接欠陥	定義 (JIS Z 3001-4)	発生部位			発生事象	溶接欠陥の例	調査結果
		溶金	HAZ	母材			
割れ	高温割れ	○	○	—	ビード割れ、凝固割れ、液化割れ		HAZに発生する高温割れとしては液化割れがあるが、破面観察の結果、液化割れの特徴である粒界が丸みを帯びた破面は認められなかった。また、付着物EDS分析の結果、高温割れの原因となるP（リン）は認められなかった。
	低温割れ	○	○	—	ルート割れ、ビード下割れ、止端割れ		オーステナイト系ステンレス鋼であれば、一般に低温割れは生じない。また、低温割れの要因となる水素の混入が少ないTIG溶接と低水素系棒を使用した被覆アーク溶接で行っている。
	再熱割れ	○	○	—	HAZに発生する割れ		本溶接は、溶接後熱処理は実施しておらず、運転温度は[]と低い。再熱割れではない。多層溶接の溶接熱サイクルによって炭化物が析出し、発生することはあるが、炭素量の少ないSUS316では、一般に再熱割れは生じない。
空洞	ガスを巻き込むことによって生ずる空洞	○	—	—	ブローホール、ワームホール、ピット		断面観察の結果、ブローホール等の空洞は認められなかった。
介在物	溶接金属に巻き込まれた異物	○	—	—	スラグ巻き込み、フラックス巻き込み		断面観察の結果、スラグ巻き込み等の介在物は認められなかった。
融合不良	溶接境界面が互いに十分に溶け合っていない状態	○	—	—	溶接境界面が互いに溶け合っていない		断面観察の結果、融合不良は認められなかった。
溶込不良	設計溶込みに比べ実溶込みが不足している状態	—	—	○	ルート面などが溶融されずに残っている		断面観察の結果、溶込不良は認められなかった。

□: 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。

出典 *1: (社)日本溶接協会編, 溶接技術Q&A (2004)

*2: 星研究所合同会社HP

*3: (社)溶接学会溶接冶金研究委員会編, 溶接部組織写真集 (1982)

*4: 神鋼溶接サービス株式会社HP

*5: 佐藤邦彦編, 溶接強度ハンドブック, 第1版

➤ 溶接欠陥について詳細な調査を実施した結果、**溶接欠陥の痕跡は認められなかった。**

表層の硬化について

- 一般的に、表層が固くなる原因としては以下のことが知られている。

➤ シンニング加工による硬化

シンニング加工により表面を機械加工した場合、下図の通り、表面組織が微細化した層を形成し、表面が硬化する。

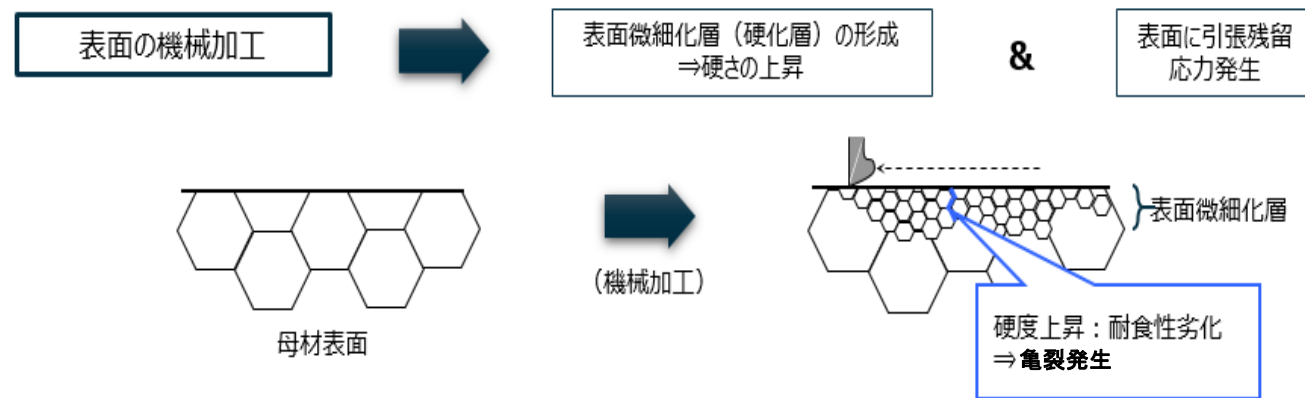


図 1：シンニング加工による硬化メカニズムのイメージ

➤ 溶接時の入熱による硬化

溶接により入熱が加えられた場合、溶接の凝固収縮に伴い、溶接境界近傍に塑性ひずみが生じ、硬化する。

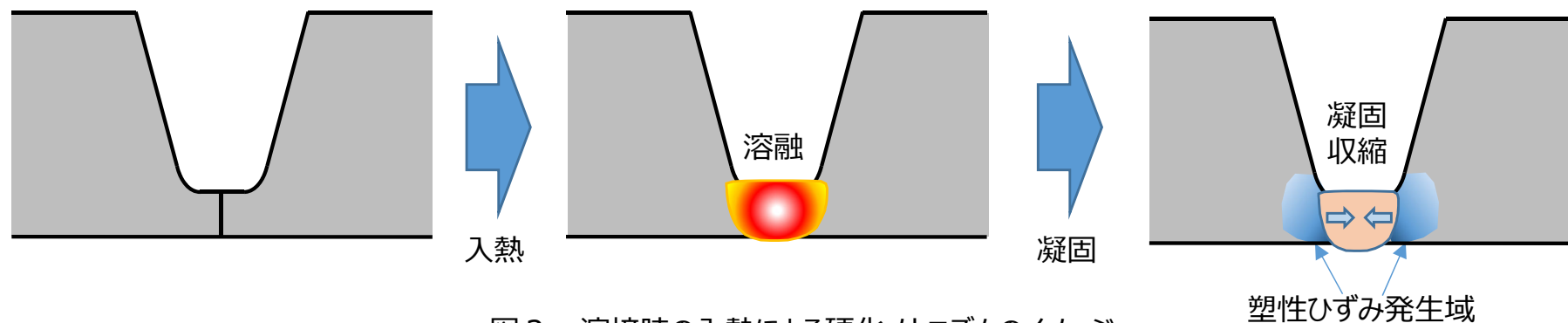


図 2：溶接時の入熱による硬化メカニズムのイメージ

デンドライト成長方向と溶接速度との関係

	当該管	サンプル管（比較対象）
文献		
イメージ図	← デンドライト成長（凝固）方向	← デンドライト成長（凝固）方向
解説	溶接速度が遅い場合、溶融池は母材を溶融しながらゆっくりと通りすぎるため、溶融池の移動に追従して溶融金属が流れる方向の冷却（凝固）が支配的となることから、<u>母材側から溶融池中心のアーク位置に向かう方向（配管周方向）にデンドライトが成長する。</u>	溶接速度が速い場合、溶融池は母材を溶融しながらすぐに通りすぎるため、溶融池通過後は<u>母材からの冷却（凝固）が支配的</u>となることから、<u>母材側から溶接金属中心に向かう方向（配管軸方向）にデンドライトが成長する。</u>

※ 出典：J.H. Devletion, W.E Wood: Metal Handbook, 9th ed.Vol.6 ASM, P.29, (1983).

➤ 当該管はデンドライト成長方向から溶接速度が遅く、ビード幅も広いことから、**大きな入熱により溶接**されたものと推察。

当該管の施工当時との比較による入熱量に係る考察

- モックアップ調査の結果、当該管の溶接施工時に大きな入熱が加わった可能性が確認されたことから、当該管の施工当時と現在の溶接条件等を比較し考察を行った。

項目	施工当時の記録 (平成2年4月時点)	現在の溶接条件 (令和2年11月時点)		当時と現在との差異に関する考察
施工場所	現地	現地	工場	工場の場合は特に溶接姿勢の制限がないが、 現地の場合 は狭隘や機器配置により溶接姿勢の制限があり比較的施工性が悪くなる。
溶接方法	初層TIG溶接＋ 被覆アーク溶接	全層TIG溶接が主流		作業安全・労働安全のため、2006年頃から、施工メーカーでは火の粉やヒュームが少ない全層TIG溶接が主流となっている。
体制	2名	1名または2名		技術伝承の観点で、 経験年数約20年の溶接士と経験年数3年の溶接士での2名でのペアリングでの体制 としていた。
電流値	TIG溶接 被覆アーク溶接	TIG溶接		当該管の電流値の記録（実績）は計画値の範囲内であり、特異性は認められない。
溶接速度	記録項目なし	記録項目なし		溶接速度は記録がないものの、2名で実施していたことから技術指導を受けた溶接で、 丁寧かつ慎重に溶接を行ったことから、溶接速度が遅くなった可能性 がある。
力量	適切な有資格者による施工	適切な有資格者による施工		当時も現在も溶接技量の認証試験に変更はない。

- 当該部は30年以上前の溶接であり、上記の記録、実機の観察結果からの推察とはなるが、現地溶接であり、溶接姿勢に制限があったことに加え、2名で実施していたことから技術指導を受けた溶接で、**丁寧かつ慎重に溶接を行ったことから、溶接速度が遅くなり入熱が大きくなった可能性**がある。