

法令適用事前確認手続

照会書

関原発 第276号
平成21年10月20日

原子力発電検査課長 殿

関西電力株式会社
取締役社長 森 詳介



下記について、照会をします。

なお、照会及び回答内容が公表されることに同意します。また、照会対象法令(条項)の性質上照会者名を公にすることが回答に当たって必要とされる場合には、照会者名が公表されることに同意します。

記

1. 法令名及び条項

電気事業法第55条第1項に基づく電気事業法施行規則第94条の3第1項第1号

2. 実現しようとする自己の事業活動に係る具体的な行為

「原子力発電工作物の保安のための点検、検査等に関する電気事業法施行規則の規定の解釈(内規)(平成20・12・22原院第4号、最終改正平成21・03・16原院第7号)」及び「発電用原子力設備における破壊を引き起こすき裂その他の欠陥の解釈について(内規)(平成21・02・18原院第2号)」に基づき「一次冷却材に接触する箇所が600系Ni基合金部」の非破壊試験を計画するにあたり、別紙1の適用範囲に限定して原子炉容器及び蒸気発生器の600系Ni基合金部に対して実施される超音波ショットピーニング(以下、「USP」という)及びウォータージェットピーニング(以下、「WJP」という)の施工範囲に係る非破壊試験の範囲、程度及び試験方法を、同文書に記載された「検出限界のき裂を想定したうえで応力腐食割れ防止の有効性が実証された対策を施した部位」として適用し計画する。

3. 当該行為と照会対象法令(条項)の規定との関係についての自己の見解

電気事業法第55条第1項に基づき実施する定期事業者検査における発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令第9条の2への適合性確認については、「原子力発電工作物の保安のための点検、検査等に関する電気事業法施行規則の規定の解釈(内規)(平成20・12・22原院第4号、最終改正平成21・03・16原院第7号)」において「発電用原子力設備における破壊を引き起こすき裂その他の欠陥の解釈について(内規)(平成21・02・18原院第2号)」に規定する方法であることと解釈され、省令に定める技術的要件を満足する技術的内容が記載されており、非破壊試験は、同文書に基づき計画・実施している。

一方、原子炉容器及び蒸気発生器の600系Ni基合金部に対するUSP及びWJPの施工範囲については、添付資料1に示す結果から、USP及びWJP施工により渦流探傷試験(以下、「ECT」という)による検出限界深さ未満のき裂(以下、「潜在欠陥」という)の先端から延性き裂が発生・進展せず、潜在欠陥に悪影響を及ぼさないこと、潜在欠陥周辺であっても、USP及びWJP施工後は表面に圧縮応力が得られること、潜在欠陥が存在している場合、USP及びWJP施工後は応力腐食割れによる潜在欠陥の進展がないことが確

認されている。これらのことから、当該手法は、検出限界のき裂(ECTの検出限界)を想定したうえで応力腐食割れ防止の有効性が実証された対策であると考えられる。

従って、同部位については、「発電用原子力設備における破壊を引き起こすき裂その他の欠陥の解釈について(内規)(平成21・02・18 原院第2号)」の別紙1の5.で規定されている「検出限界のき裂を想定したうえで応力腐食割れ防止の有効性が実証された対策を施した部位」に該当し、当該規定に基づき非破壊試験を計画・実施することで、技術基準適合性を確認する試験方法として妥当であるとする。

4. 公表の遅延の希望

なし

5. 連絡先 <非公開>

以上

非破壊試験における「検出限界のき裂を想定したうえで応力腐食割れ防止の有効性が実証された対策を施した部位」の適用範囲について

標記の範囲は、確性試験により有効性が確認された以下の範囲に限定する。

1. 適用箇所

原子炉容器及び蒸気発生器の600系Ni基合金部における、以下の適用条件を満足する応力腐食割れ防止対策の実施範囲への適用に限定する。

具体的な適用箇所は以下の通り。

(1) ウォータジェットピーニング(WJP)

・原子炉容器

出入口管台セーフエンド溶接部、炉内計装筒母材内外面及びJ溶接部、安全注入管台セーフエンド溶接部

(2) 超音波ショットピーニング(USP)

・原子炉容器

出入口管台セーフエンド溶接部

・蒸気発生器

出入口管台セーフエンド溶接部

2. 適用条件

(1) 施工前確認

応力腐食割れ防止対策の施工前確認として(財)発電設備技術検査協会確性試験委員会「潜在欠陥に対する超音波ショットピーニング/ウォータジェットピーニングの影響に関する確性試験」(確性試験証明書番号:20確S2号)(別紙2参照)で規定されたECT手法(圧縮応力付与深さと同じ深さ以上の欠陥が検出できるECT)を用い、割れ等の有害な欠陥が検出されなかった部位とする。ECT手法は別紙3の通り。

なお、(財)発電設備技術検査協会確性試験委員会「潜在欠陥に対する超音波ショットピーニング/ウォータジェットピーニングの影響に関する確性試験」(確性試験証明書番号:20確S2号)終了前に施工されたECTについても、同一手法で施工されたものは含む。

(2) 施工条件

応力腐食割れ防止対策の施工条件は、以下の通りとする。

なお、(財)発電設備技術検査協会確性試験委員会「潜在欠陥に対する超音波ショットピーニング/ウォータジェットピーニングの影響に関する確性試験」(確性試験証明書番号:20確S2号)終了前に施工された応力腐食割れ防止対策についても、下記条件で施工されたものは含む。

・ウォータジェットピーニング(WJP)

(財)発電設備技術検査協会確性試験委員会「小口径管内面へのウォータジェットピーニング法適用に関する確性試験」(確性試験証明書番号:12確S1号)、「ウォータジェットピーニング法の適用範囲拡大に関する確性試験」(確性試験証明書番号:17確S1号)及び「ウォータジェットピーニング法の適用範囲拡大に関する確性試験(その2)」(確性試験証明書番号:18確S1号)で確認された項目に則り、予め確認された施工条件の範囲で施工された部位とする。施工条件は別紙4のとおり。

・超音波ショットピーニング(USP)

(財)発電設備技術検査協会確性試験委員会「超音波ショットピーニング法に関する確性試験」(確性試験証明書番号:18確S2号)で確認された項目に則り、予め確認された施工条件の範囲で施工された部位とする。施工条件は別紙4のとおり。

以上

(財)発電設備技術検査協会確性試験委員会
「潜在欠陥に対する超音波ショットピーニング/
ウォータージェットピーニングの影響に関する確性試験」

確性試験証明書



20 確 S 2 号
平成 21 年 10 月 9 日

三菱重工業株式会社
執行役員 正森 滋郎 殿
神戸造船所長

財団法人発電設備技術検査協会
理事長 佐々木 宜彦



確 性 試 験 証 明 書

下記の確性試験を確性試験規則に基づき実施し、その確性が認められたことを証明します。

記

<p>確性試験依頼者名</p>	<p>三菱重工業株式会社 執行役員神戸造船所長 正森 滋郎 平成20年11月18日</p>
<p>依 頼 件 名</p>	<p>潜在欠陥に対する超音波ショットピーニング/ウォータージェットピーニングの影響に関する確性試験</p>
<p>依 頼 内 容</p>	<p>加圧水型原子力プラントに対して、ピーニング施工前の表面検査において検出限界以下の潜在欠陥の存在が否定できない。潜在欠陥が存在すると仮定し、超音波ショットピーニング又はウォータージェットピーニングを適用した場合のピーニング施工部の健全性及び残留応力改善効果について確認することを目的とした下記項目の検討を実施し、潜在欠陥が存在しても健全性及び残留応力改善効果に影響の無いことを確認した。</p> <p>なお、施工条件は、既確性試験で検証済みの条件の範囲内で実施した。</p> <p>① ピーニング施工時での潜在欠陥の延性き裂進展に関する検討 ② 潜在欠陥近傍での残留応力改善効果に関する検討</p>
<p>備 考</p>	<p>本ピーニングの施工にあたっては別紙による。なお、その詳細については、確性試験報告書による。</p>

(潜在欠陥に対する超音波ショットピーニング/ウォータージェットピーニングの影響に関する確性試験証明書に係る別紙)

超音波ショットピーニング又はウォータージェットピーニングの適用範囲及び施工条件は、下表の既確性試験証明書による。

証明書番号	証明書発行年月日	依頼件名	備考
12 確 S1 号	平成 13 年 1 月 31 日	小口径管内面へのウォータージェットピーニング法適用に関する確性試験	
17 確 S1 号	平成 18 年 1 月 24 日	ウォータージェットピーニング法の適用範囲拡大に関する確性試験	
18 確 S1 号	平成 18 年 9 月 21 日	ウォータージェットピーニング法の適用範囲拡大に関する確性試験 (その 2)	
18 確 S2 号	平成 18 年 11 月 10 日	超音波ショットピーニング法に関する確性試験	

表 施工前確認として用いるECT手法

適用部位	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉容器 出入口管台セーフエンド溶接部、安全注入管台セーフエンド溶接部 ・蒸気発生器 出入口管台セーフエンド溶接部 	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉容器 炉内計装筒母材内面 	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉容器 炉内計装筒母材外面及びJ溶接部
プローブ	単ークロスコイル(外径約3mm)を用いたプローブ	同左	同左
探傷面	欠陥の開口面から探傷	同左	同左
探傷周波数	50kHz, 100kHz, 200kHz, 400kHz	400kHz, 600kHz, 800kHz, 990kHz	50kHz, 100kHz, 200kHz, 400kHz
校正	1mm 深さスリットを全振幅 3V, 位相角 165 度または-15 度に設定	0.5mm 深さスリットを全振幅 5V, 位相角 165 度または-15 度に設定	1mm 深さスリットを全振幅 3V, 位相角 165 度または-15 度に設定

確性試験の施工条件における□部については、メーカー施工ノウハウに関わるため、マスキングしている。

別紙4

表 USP法に関する確性試験の施工条件
(別添 確性試験証明書番号:18確S2号参照)

適用部位	蒸気発生器出入口管台の溶接部及び原子炉容器出入口管台の溶接部
ピーニングヘッドの周波数	□kHz ± □kHz
ピーニングヘッドの振幅	□μm ± □μm
ショット材質	□
ショット形状	球形 □mm ± □mm(製作時)
ショット投入量	□~□%
投射距離	□~□mm
投射角度	□±□度
施工時間	□~□秒
長時間施工制限	□秒以内
止め打ち制限	□秒以内

表 小口径管内面へのWJP法適用に関する確性試験(A-WJP)の施工条件
(別添 確性試験証明書番号:12確S1号 参照)

適用部位	炉内計装筒の内面
ノズル	形式:□ 噴射穴径: □~□mm(断面積の変化±□%) ノズル角度: □度±□度 ノズル穴位置: □
噴射距離	□~□mm(□)
噴射流量	□~□リットル/分
噴射角度	□(□度±□度)。
噴射時間	□~□分/m ²
長時間施工制限	□分/m ² 以下
止め打ち制限	□分以下
水深	□~□m

確性試験の施工条件における□部については、メーカー施工ノウハウに関わるため、マスキングしている。

表 WJP法の適用範囲拡大に関する確性試験(B-WJP)の施工条件
(別添 確性試験証明書番号:17確S1号 参照)

適用部位	炉内計装筒の外表面	炉内計装筒管台の取付けのJ溶接部	原子炉容器出入口管台の溶接部
ノズル	形式:□ 噴射穴径: □± □mm	同左	同左
噴射距離	□~□mm	同左	同左
噴射流量	□~□リットル/分	同左	同左
噴射角度	□±□度	□~□度	同左
噴射時間	□~□分/m	同左	同左
長時間施工制限	□分/m以下	同左	同左
止め打ち制限	□分以下	同左	同左
水深	□~□m	同左	同左

表 WJP法の適用範囲拡大に関する確性試験(その2)(C-WJP)の施工条件
(別添 確性試験証明書番号:18確S1号 参照)

適用部位	原子炉容器安全注入管台セーフエンド溶接部
ノズル	形式:□ 噴射穴径: □~□mm ノズル角度: □°±□°
噴射距離	□~□mm
噴射流量	□~□リットル/分
噴射角度	□度±□度
噴射時間	□~□分/m ²
長時間施工制限	□分/m ² 以下
止め打ち制限	□分以下
水深	□~□m

確性試験証明書は、メーカーの施工ノウハウに係る内容であるため、公開されないように留意頂きたい

別添

(財)発電設備技術検査協会確性試験委員会

確性試験証明書

1. 「超音波ショットピーニング法に関する確性試験」(18 確 S2 号)
2. 「小口径管内面へのウォータジェットピーニング法適用に関する確性試験」(12 確 S1 号)
3. 「ウォータジェットピーニング法の適用範囲拡大に関する確性試験」(17 確 S1 号)
4. 「ウォータジェットピーニング法の適用範囲拡大に関する確性試験(その2)」(18 確 S1 号)

加圧水型軽水炉 原子炉容器及び蒸気発生器

**600系Ni基合金部に適用するピーニング方法の
応力腐食割れ防止に関する有効性評価書**

平成21年7月

三菱重工業株式会社

加圧水型軽水炉 原子炉容器及び蒸気発生器 600系 Ni 基合金部
に適用するピーニング方法の応力腐食割れ防止に関する有効性評価書

1. はじめに

加圧水型軽水炉（以下、PWR という。）の原子炉冷却材圧力バウンダリに対する試験の範囲、程度及び試験方法は、電気事業法第 55 条第 1 項に基づき実施する定期事業者検査における発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令（昭和 40 年通商産業省第 62 号）第 9 条の 2 への適合性確認として、「原子力発電工作物の保安のための点検、検査等に関する電気事業法施行規則の規定の解釈（内規）の一部改正について（平成 21 年 3 月 23 日 平成 21・03・16 原院第 7 号）」において「発電用原子力設備における破壊を引き起こすき裂その他の欠陥の解釈について（内規）（平成 21 年 2 月 27 日 平成 21・02・18 原院第 2 号）」（以下、NISA 文書という。）に規定する方法であることが求められており、NISA 文書の別紙 1 に示される試験の範囲、程度及び試験方法の規定を満足する必要がある。

従って、PWR プラント原子炉容器及び蒸気発生器 600 系 Ni 基合金（以下、600 合金という。）部の試験計画は、NISA 文書に定める規定に基づき「検出限界のき裂を想定したうえで応力腐食割れ防止の有効性が実証された対策」の適用の有無を確認し、試験の範囲、程度及び試験方法に反映する必要がある。

このことから、原子炉容器及び蒸気発生器 600 合金部の 1 次系水環境条件下での応力腐食割れ（以下、PWSCC という。）防止対策として適用した超音波ショットピーニング（以下、USP という。）及びウォータジェットピーニング（以下、WJP という。）が、NISA 文書に定める「検出限界のき裂を想定したうえで応力腐食割れ防止の有効性が実証された対策」に該当することを確認する必要がある。

本評価書は USP 及び WJP について、（財）発電設備技術検査協会確性試験委員会「潜在欠陥に対する超音波ショットピーニング／ウォータジェットピーニングの影響に関する確性試験」（以下、UWL 確性試験という。）で技術確認された結果を踏まえ、USP 及び WJP の PWSCC 防止に関する有効性を評価し、取り纏めたものである。

2. 工法概要

原子炉容器及び蒸気発生器 600 合金部（図 1 及び図 2）に対する PWSCC 対策として用いられるピーニング方法として、超音波振動を駆動源としてショット材を衝突させることで部材表面に圧縮残留応力の付与を行う USP とウォータージェットで発生させたキャビテーション気泡が崩壊する際の衝撃圧を利用して部材表面に圧縮残留応力の付与を行う WJP がある。

本評価書で対象とする USP 及び WJP は、耐 PWSCC 性の改善を目的とした残留応力の緩和方法*¹として、第 3 者機関による確性試験にて欠陥のない健全部に対する施工条件及び施工要領に関する技術確認を行い、国内 PWR プラント原子炉容器及び蒸気発生器 600 合金部で多数適用実績のある方法である。

* 1 : 日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格に記載あり。

3. 適用条件

下記の部位に対し、以下の条件により適用するものとする。

(1) USP

(部 位)

原子炉容器 出入口管台とセーフエンドの溶接部

蒸気発生器 出入口管台とセーフエンドの溶接部

(条 件)

- ① ピーニング施工条件は、(財) 発電設備技術検査協会確性試験委員会「USP 法に関する確性試験」(確性試験証明書番号: 18 確 S2 号) (以下、USP 確性試験という。) で確認された項目に則り、予め確認された施工条件の範囲で施工されたものに限る。
- ② ピーニング施工前の確認として、USP 確性試験で確認された圧縮応力付与深さと同じ深さ又は深さ以上の欠陥が検出できる能力を有する検査手法を適用し、割れ等の有害な欠陥が検出されなかったものに限る。(本条件を満足する検査手法は、UWL 確性試験で用いた渦流探傷試験 (以下、ECT という。) を想定。USP 適用部位における ECT の欠陥検出限界深さを添付 1 に示す。)

(2) WJP

(部 位)

- 原子炉容器 炉内計装筒母材内面
- 原子炉容器 炉内計装筒母材外面及び J 溶接部
- 原子炉容器 出入口管台とセーフエンドの溶接部
- 原子炉容器 安全注入管台とセーフエンドの溶接部

(条 件)

- ① ピーニング施工条件は、(財) 発電設備技術検査協会確性試験委員会「小口径管内面への WJP 法適用に関する確性試験」(確性試験証明書番号：12 確 S1 号)、「WJP 法の適用範囲拡大に関する確性試験」(確性試験証明書番号：17 確 S1 号)、及び「WJP 法の適用範囲拡大に関する確性試験 (その 2)」(確性試験証明書番号：18 確 S1 号) (以下、WJP 確性試験という。) で確認された項目に則り、予め確認された施工条件の範囲で施工されたものに限る。
- ② ピーニング施工前の確認として、WJP 確性試験で確認された圧縮応力付与深さと同じ深さ又は深さ以上の欠陥が検出できる能力を有する検査手法を適用し、割れ等の有害な欠陥が検出されなかったものに限る。(本条件を満足する検査手法は、UWL 確性試験で用いた ECT を想定。WJP 適用部位における ECT の欠陥検出限界深さを添付 1 に示す。)

4. 検討の観点

USP 及び WJP に関し、3 項に示す適用条件を満足する場合に NISA 文書に定める「検出限界のき裂を想定したうえで PWSCC 防止の有効性が実証された対策」に該当することを以下の観点で検討する。

(1) 潜在欠陥へのピーニングの影響の確認

USP 又は WJP が、施工前健全性確認の ECT 検出限界未達の微小なき裂 (以下、潜在欠陥という。) に対して悪影響がないことを確認する。

本評価書では、潜在欠陥を有する施工面に USP 又は WJP を施工した場合の悪影響として、以下に示す要因で潜在欠陥先端に生じる延性き裂の発生・進展について検討する。

① ピーニングによる板厚内での残留応力の再配分による影響

ピーニングにより金属表面に圧縮残留応力が生じる原理を図3に示す。ピーニングは、ショット材等を打ち付けることで施工面の表層に生じる引張変形を材料の剛性（ピーニングのエネルギーが伝わらない施工面下層の剛性）で拘束することにより、施工面表層に圧縮応力を生じさせる工法である。従って、原理上、ピーニング施工により圧縮応力が付与される深さより更に深い領域ではピーニング施工前より引張残留応力が増加する領域が生じる（図4）。

従って、ピーニング施工による残留応力の板厚内での再配分により引張応力が増加する領域に達する欠陥を想定する場合、欠陥先端から延性き裂が発生・進展する可能性が考えられる。

② ピーニング施工時、施工面に生じる引張応力の影響

ピーニング施工時にはショット材等の衝突力により、材料表面に引張応力が生じ、表面欠陥にも引張応力が影響することが想定される。

従って、ピーニング施工面に欠陥を想定する場合、欠陥深さによらず、ピーニング施工時に生じた引張の影響で延性き裂が発生・進展する可能性が考えられる。

USP 又は WJP 施工に関して3項に示す適用条件を満足させた場合、ピーニング施工面に存在する潜在欠陥は、USP 確性試験又は WJP 確性試験で確認された圧縮応力付与深さよりも浅い欠陥が想定される。

つまり、本評価書で想定する潜在欠陥は、ピーニング施工により圧縮応力が付与された範囲内に存在すると判断されるので、①項に示す要因による延性き裂の発生・進展は原理上生じない。

従って、本評価書では②項を対象に、USP 又は WJP 施工時に潜在欠陥から延性き裂が発生・進展しないことを試験で確認する。

(2) 潜在欠陥へのピーニングの効果の確認

USP 又は WJP が、NISA 文書に定める PWSCC 防止対策に該当することの確認として、潜在欠陥が、運転中に PWSCC によって進展しないことを確認する。

本評価書で想定する潜在欠陥は、WJP 又は USP 施工により圧縮応力が付与

できる深さよりも浅い欠陥であるが、当該欠陥に運転中応力が作用した場合、潜在欠陥の開口部から先端部の全領域に渡って圧縮応力が作用する場合のみではなく、潜在欠陥の先端近傍は引張、開口部付近は圧縮が作用する場合も有り得る（図5）。

ピーニング施工によるPWSCC進展防止を確認するには、想定範囲内で最も深い潜在欠陥に運転中応力が付与された場合（即ち、潜在欠陥の先端近傍は引張、開口部付近は圧縮が作用する応力状態の場合）であっても、運転中に潜在欠陥先端からPWSCCが進展しないことを確認する必要がある。

以上の観点を踏まえ、潜在欠陥に運転中応力が作用した場合のPWSCC進展防止の実現性について、応力拡大係数（以下、K 値という。）を用いて検討した。

K 値は、欠陥先端の応力状態に一義的に定まるものではなく、欠陥の開口部から先端部の全領域に作用する応力分布の影響を受ける。よって、欠陥の開口部付近で圧縮、先端部に引張が作用する場合であっても、ピーニング施工で付与された圧縮残留応力と運転により生じる作用応力（引張応力）の大小関係から、K 値がゼロとなる場合（PWSCC が進展しない場合）も有り得ると推定される（図6）。

そこで、USP 又は WJP 施工部位で潜在欠陥に作用する実機で想定される応力分布を模擬し、運転中に潜在欠陥の K 値を数値解析で検討した。評価条件及び解析結果を図7に示す。（詳細については添付2）

数値解析は、表面に潜在欠陥が存在してもピーニング施工により表面から深さ 1 mm まで圧縮応力が付与されるとの前提に基づき、運転により生じる作用応力を考慮した条件における深さ 1~2 mm の表面欠陥の K 値を評価した。

解析結果から、表面から深さ約 1 mm の範囲で K 値はゼロ、即ち、ピーニングにより圧縮応力が付与されると仮定した深さより浅い欠陥は、運転中にPWSCC 進展が防止できるとの結論が得られた。よって、3項に示す適用条件を満足する USP 又は WJP を原子炉容器及び蒸気発生器に適用する場合にはPWSCC 進展防止が実現できることが推定される。

そこで、本評価書では上記の数値解析の前提及び得られた結論が妥当であることを試験で確認する。

① 残留応力確認試験（数値解析の前提の検証）

潜在欠陥周辺であっても、ピーニング施工後は表面に圧縮応力が付与できることを試験で確認する。

② SCC試験（数値解析から得られた結論の検証）

潜在欠陥が存在していても、ピーニング施工後はSCCによる潜在欠陥の進展がしないことを試験で確認する。

5. PWSCC 防止対策としての適合性確認結果

対象となる USP 及び WJP の潜在欠陥に対する影響及び効果は、UWL 確性試験において技術的妥当性が確認されている。

本評価書では UWL 確性試験の結果を確認し、下記のとおり、NISA 文書に定める「検出限界のき裂を想定したうえで PWSCC 防止の有効性が実証された対策」に該当するか確認した。

(1) 潜在欠陥へのピーニングの影響

UWL 確性試験の延性き裂進展確認試験により、USP 又は WJP 施工によって潜在欠陥の先端から延性き裂が発生・進展しないことを確認しており、USP 又は WJP 適用により、潜在欠陥に悪影響を及ぼさないと判断する。
（確性試験の詳細については添付 3）

(2) 潜在欠陥へのピーニングの効果

① UWL 確性試験の残留応力確認試験より、潜在欠陥周辺であっても、USP 又は WJP 施工後は表面に圧縮応力が得られることを確認している。（確性試験の詳細については添付 4）

② UWL 確性試験の SCC 試験より、潜在欠陥が存在していても、USP 又は WJP 施工後は SCC による潜在欠陥の進展がないことを確認している。
（確性試験の詳細については添付 5）

以上のことから、潜在欠陥を有する箇所への USP/WJP 適用により、潜在欠陥近傍でも残留応力改善効果が有効であると判断する。

6. まとめ

以上のとおり、原子炉容器及び蒸気発生器 600 合金部に対する USP 及び WJP は、上記の適用条件の範囲において、NISA 文書に定める「検出限界のき裂を想定したうえで PWSCC 防止の有効性が実証された対策」に該当することを確認した。

以上

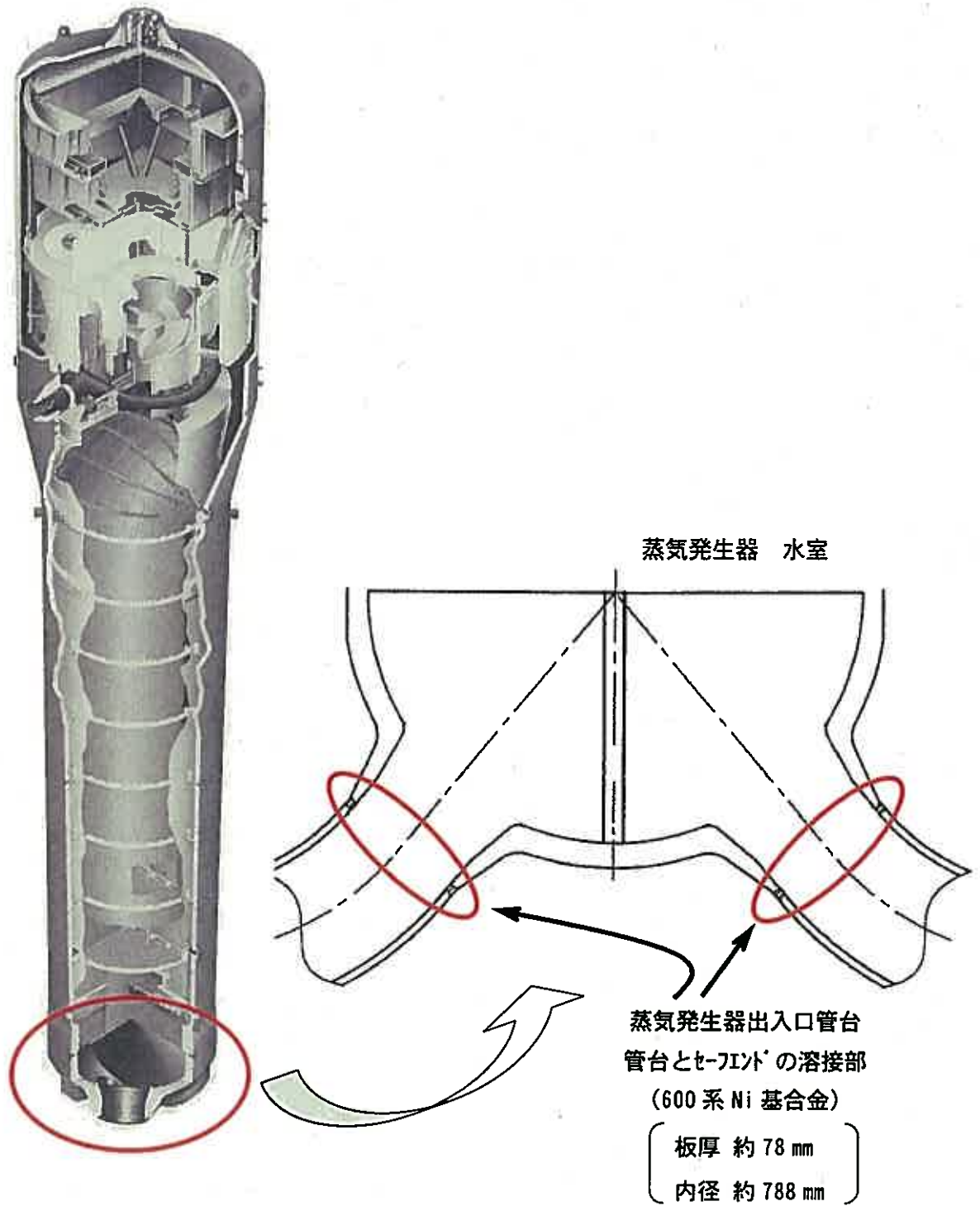


図1 USP 施工対象 (例: 蒸気発生器)

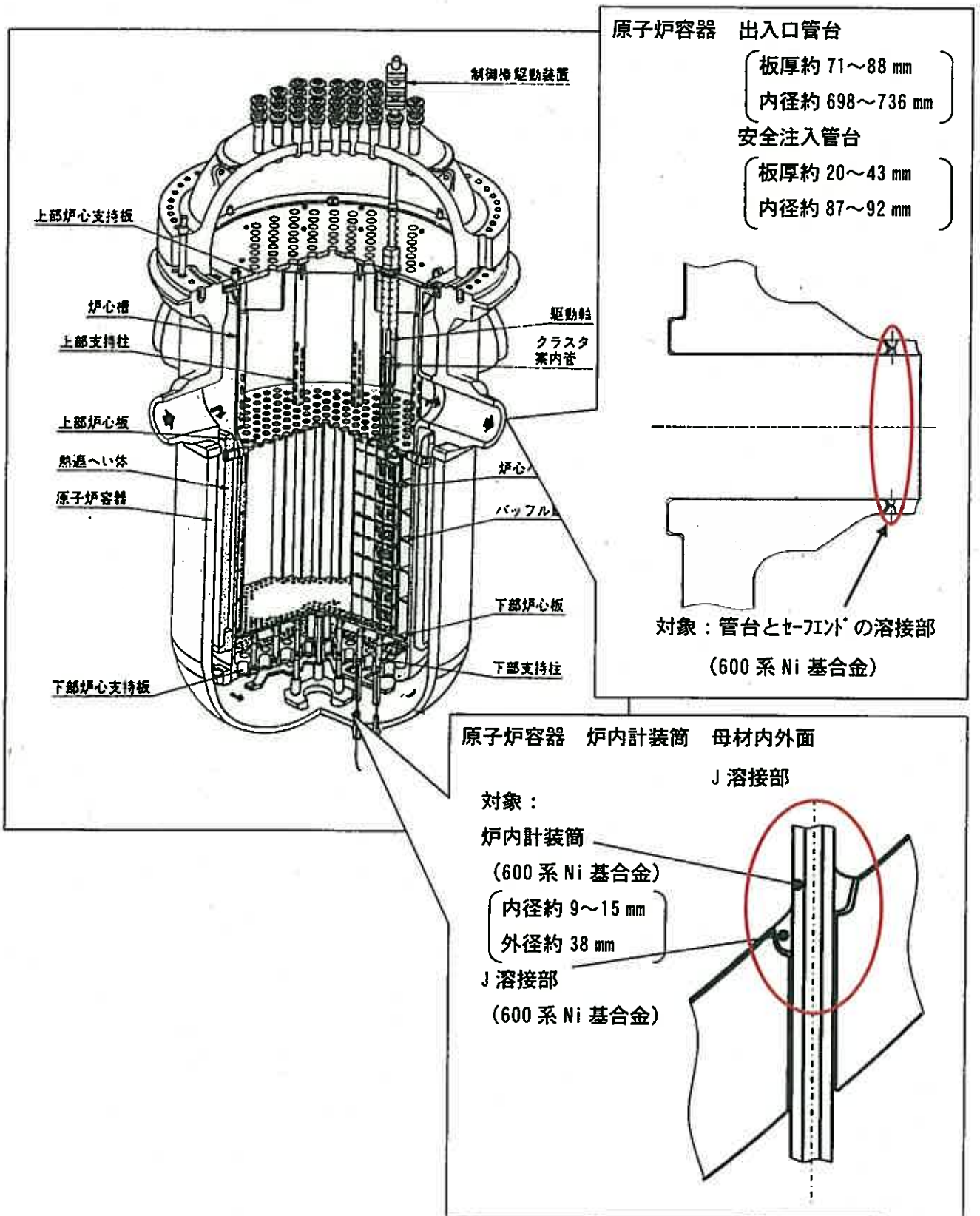
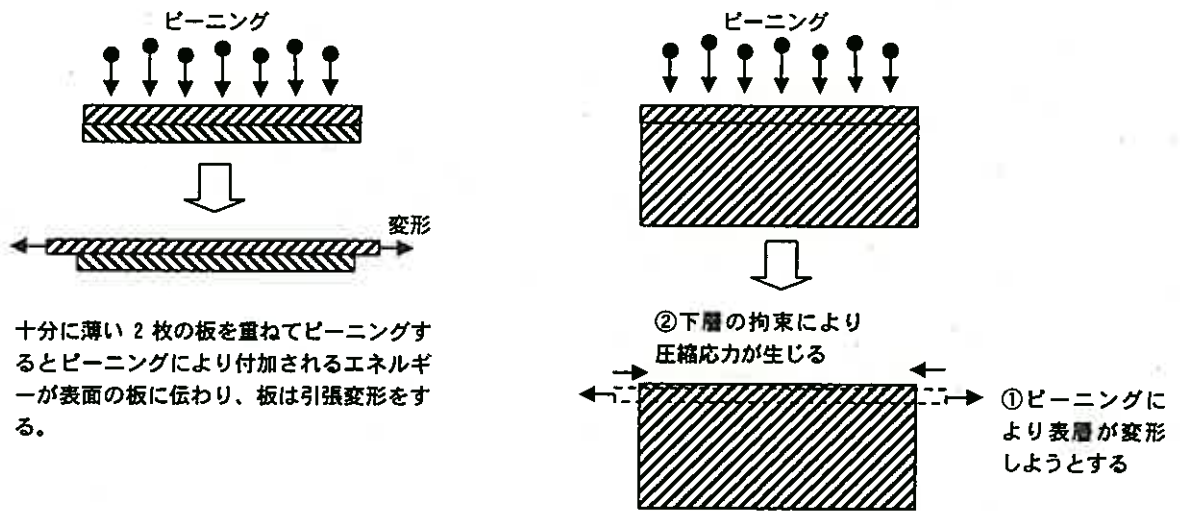


図2 WJP 施工対象 (例：原子炉容器)



厚板や構造物ではピーニングにより表層のみ引張変形しようとするが、材料の剛性（ピーニングのエネルギーが伝わらない部分が表層の変形を抑える）により変形せず、表層は圧縮される。そのために表層のみ圧縮が残る。

図 3 ピーニングにより金属表面に圧縮残留応力が生じる原理

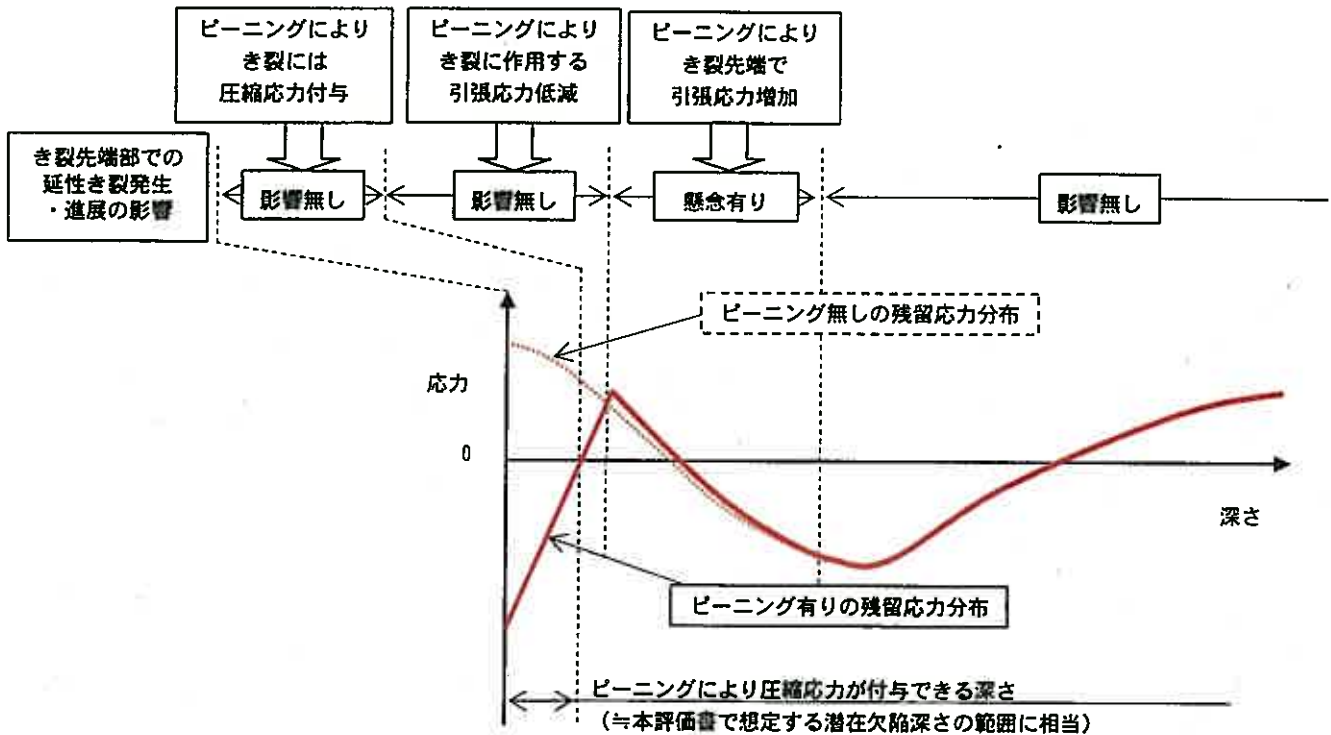


図 4 ピーニング施工有り／無しにおける板厚方向の残留応力分布と
き裂先端における延性き裂発生・進展の影響の関係

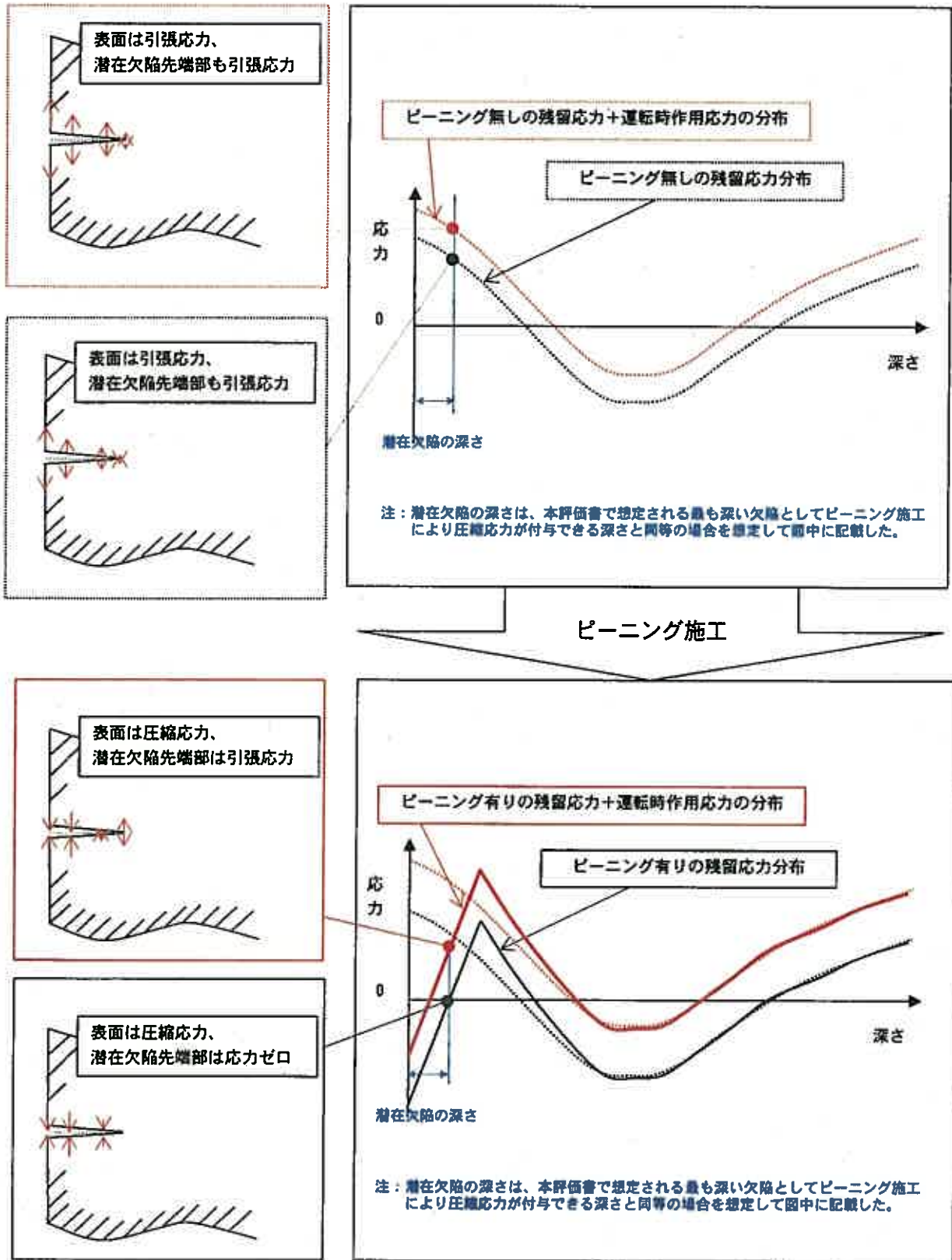


図5 ピーニング施工前後における板厚方向の応力分布

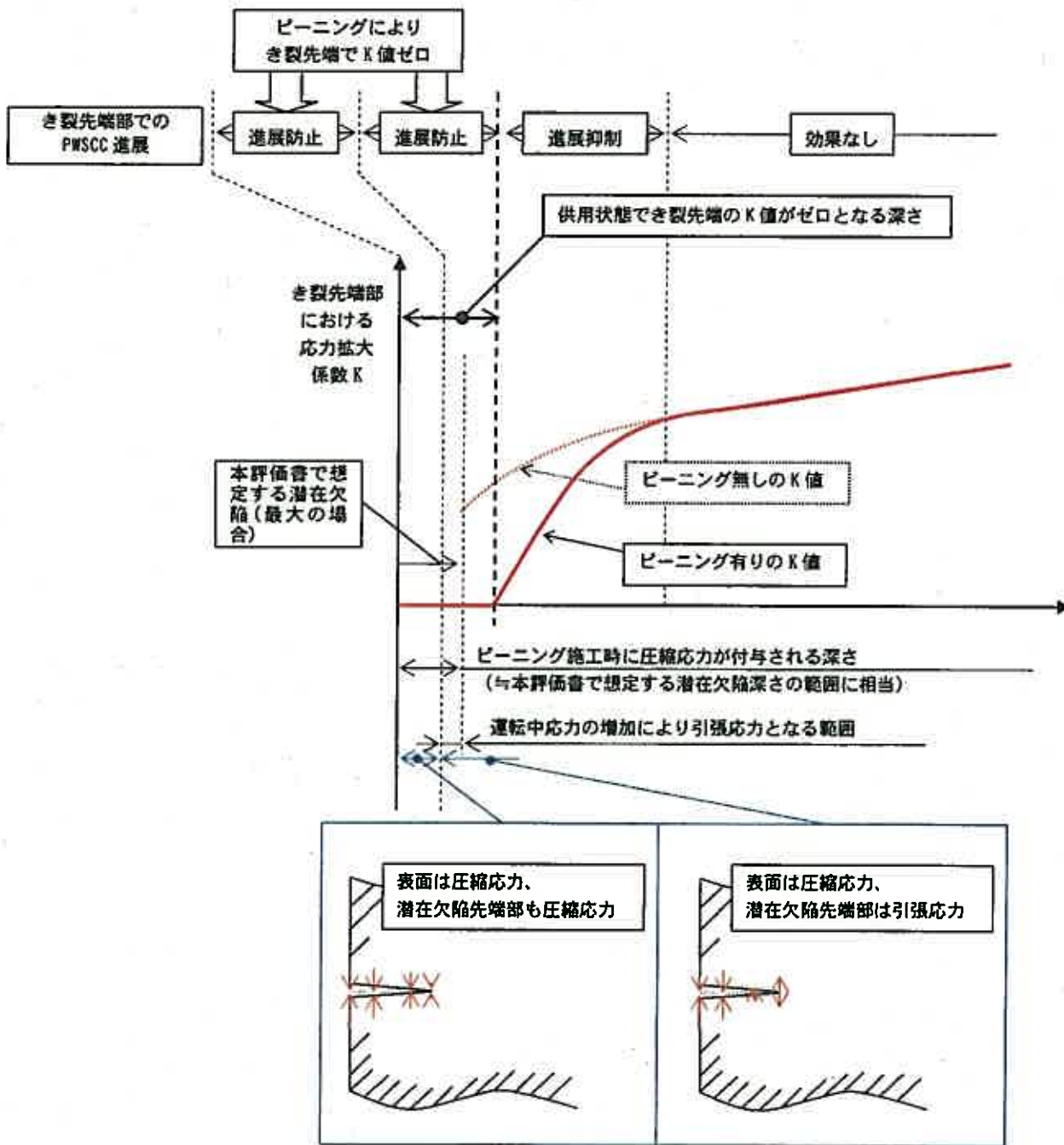


図6 ピーニング施工有り/無しにおけるき裂のK値分布とPWSCC進展への影響の関係

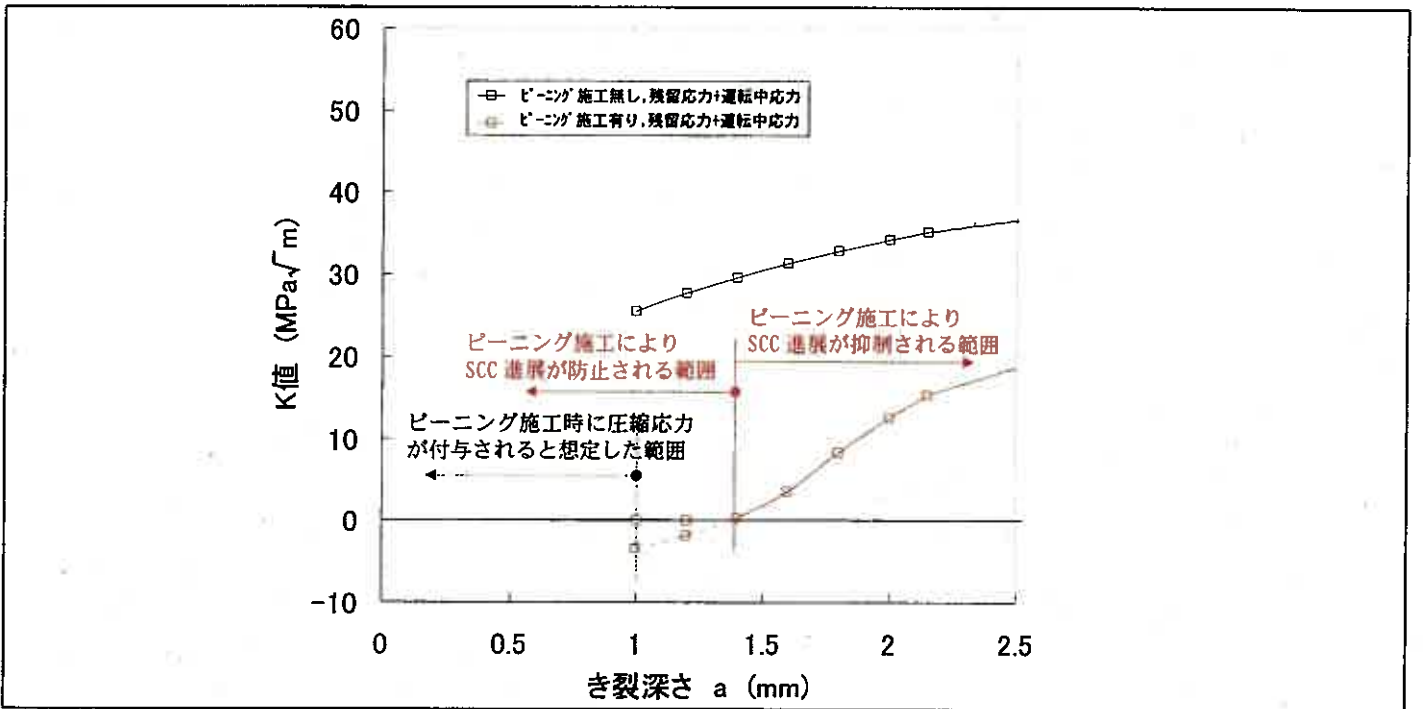
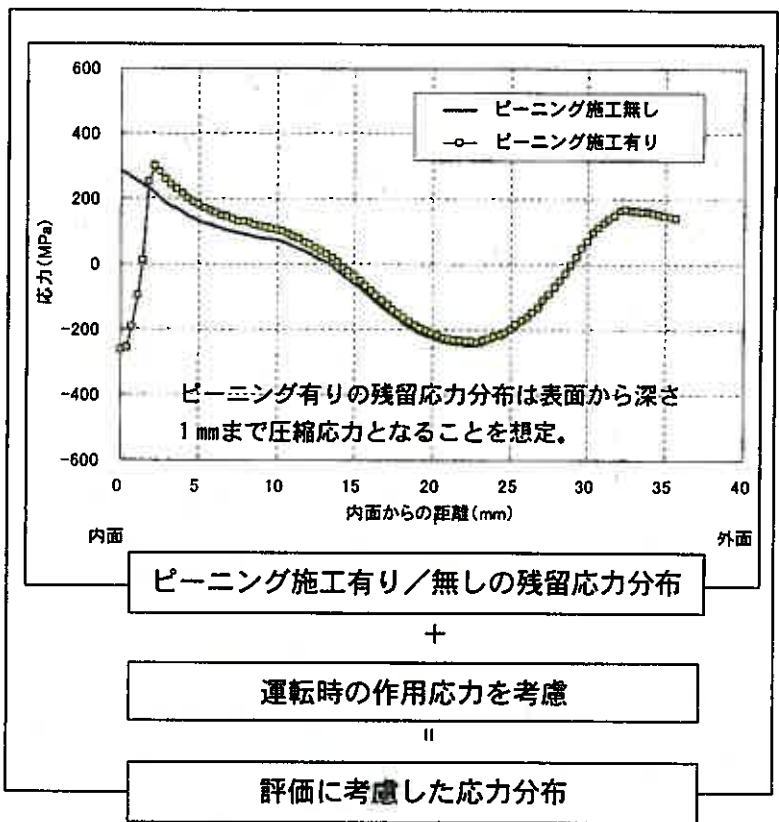
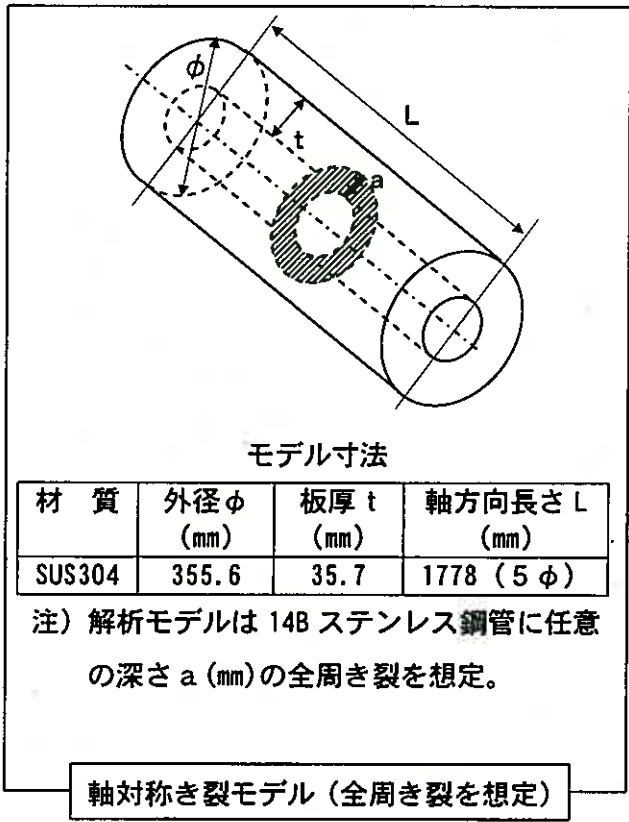


図7 ピーニング施工有り/無しにおける欠陥の K 値評価条件及び解析結果

添付1

原子炉容器及び蒸気発生器に適用するピーニング法 (USP/WJP) の既存確性試験の概要

	超音波ショット ピーニング法 (USP)	ウォータージェットピーニング法 (WJP)		
		A-WJP 法	B-WJP 法	C-WJP 法
審議時期	平成 18 年 3 月～9 月	平成 12 年 6 月～10 月	平成 17 年 9 月～11 月	平成 18 年 3 月～7 月
対象部位	<ul style="list-style-type: none"> ・蒸気発生器出入口管台とセーフィド¹⁾の溶接部 ・原子炉容器出入口管台とセーフィド¹⁾の溶接部 	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉容器炉内計装筒内面 (母材) 	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉容器炉内計装筒外面 (母材) 及び J 溶接部 ・原子炉容器出入口管台とセーフィド¹⁾の溶接部 	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉容器安全注入管台とセーフィド¹⁾の溶接部
適用条件	<p>上記の対象部位であって、施工面に割れ等の有害な欠陥がないこと。</p> <p style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px;">目視又は他の適切な試験手法により施工面に欠陥がないことを確認すること。</p>	<p>上記の対象部位であって、施工面に割れ等の有害な欠陥がないこと。</p> <p style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px;">目視又は他の適切な試験手法により施工面に欠陥がないことを確認すること。</p>	<p>上記の対象部位であって、施工面に割れ等の有害な欠陥がないこと。</p> <p style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px;">目視又は他の適切な試験手法により施工面に欠陥がないことを確認すること。</p>	<p>上記の対象部位であって、施工面に割れ等の有害な欠陥がないこと。</p> <p style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px;">目視又は他の適切な試験手法により施工面に欠陥がないことを確認すること。</p>
確認された残留応力低減効果	欠陥の無い健全部に適用した場合、表面から深さ 1.0 mm の位置で残留応力が OMPa 以下。	欠陥の無い健全部に適用した場合、表面から深さ 0.5 mm の位置で残留応力が OMPa 以下。	欠陥の無い健全部に適用した場合、表面から深さ 1.0 mm の位置で残留応力が OMPa 以下。	欠陥の無い健全部に適用した場合、表面から深さ 1.0 mm の位置で残留応力が OMPa 以下。

原子炉容器及び蒸気発生器の WJP/USP 施工前確認に用いる ECT 手法 (注1)

対象部位	<ul style="list-style-type: none"> ・蒸気発生器出入口管台とセーフィド¹⁾の溶接部 ・原子炉容器出入口管台とセーフィド¹⁾の溶接部 ・原子炉容器安全注入管台とセーフィド¹⁾の溶接部 	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉容器炉内計装筒内面 (母材) 	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉容器炉内計装筒外面 (母材) 及び J 溶接部
プローブ	単一クロスコイル (外径約 3 mm) を用いたプローブ	単一クロスコイル (外径約 3 mm) を用いたプローブ	単一クロスコイル (外径約 3 mm) を用いたプローブ
探傷面	欠陥の開口面から探傷	欠陥の開口面から探傷	欠陥の開口面から探傷
探傷周波数	50kHz、100kHz、200kHz、400kHz	400kHz、600kHz、800kHz、990kHz	50kHz、100kHz、200kHz、400kHz
校正	1 mm 深さスリットを全振幅 3V、位相角 165 度又は -15 度に設定	0.5 mm 深さスリットを全振幅 5V、位相角 165 度又は -15 度に設定	1 mm 深さスリットを全振幅 3V、位相角 165 度又は -15 度に設定

原子炉容器及び蒸気発生器のWJP/USP適用箇所とECTの欠陥検出能力の関係

対象部位	<ul style="list-style-type: none"> ・蒸気発生器出入口管台とセメントの溶接部 ・原子炉容器出入口管台とセメントの溶接部 ・原子炉容器安全注入管台とセメントの溶接部 	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉容器炉内計装筒内面（母材） 	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉容器炉内計装筒外面（母材）及びJ溶接部
ピーニングによる圧縮応力付与深さ(mm)	1.0 mm以上 (WJP/USP)	0.5 mm以上 (WJP)	1.0 mm以上 (WJP)
ECTによる欠陥検出限界深さ(mm)	0.5 mm ^(注1) 〔潜在欠陥深さ 0.5 mm未満〕	0.5 mm ^(注1) 〔潜在欠陥深さ 0.5 mm未満〕	1.0 mm ^(注1) 〔潜在欠陥深さ 1.0 mm未満〕

(注1) (財) 発電設備技術検査協会確性試験委員会；潜在欠陥に対する超音波ショットピーニング/ウォータージェットピーニングの影響に関する確性試験報告書（参考資料3），平成21年10月（詳細は参考1）

超音波ショットピーニング法（USP）の適用範囲、施工条件

(財) 発電設備技術検査協会確性試験委員会「超音波ショットピーニング法に関する確性試験」
(確性試験証明書番号：18 確 S2 号) で確性が認められた内容は以下の通り。

適用範囲と施工条件は、次表のとおり。

適 用 部 位	蒸気発生器出入口管台の溶接部及び原子炉容器出入口管台の溶接部
ピーニングヘッドの周波数	※kHz ± ※kHz
ピーニングヘッドの振幅	※μm ± ※μm
シ ョ ッ ト 材 質	※
シ ョ ッ ト 形 状	球形 φ ※mm ± ※mm (製作時)
シ ョ ッ ト 投 入 量	※～※%
投 射 距 離	※～※mm
投 射 角 度	※±※度
施 工 時 間	※～※秒
長 時 間 施 工 制 限	※秒以内
止 め 打 ち 制 限	※秒以内

※印については、確性試験で技術的内容は確認を受けたものである。/ウハウに係る内容を含むのでマスキングしている。

ウォータージェットピーニング法 (A-WJP法) の適用範囲、施工条件

(財) 発電設備技術検査協会確性試験委員会「小口径管内面へのウォータージェットピーニング法適用に関する確性試験」(確性試験証明書番号: 12 確 S1 号) で確性が認められた内容は以下の通り。

適用範囲と施工条件は、次表のとおり。

適用部位	炉内計装筒の内面
ノズル	形式: ※ 噴射穴径: φ※~φ※mm (断面積の変化±※%) ノズル角度: ※度±※度 ノズル穴位置: ※
噴射距離	※~※mm (※)
噴射流量	※~※リットル/分
噴射角度	※ (※度±※度)。
噴射時間	※~※分/m ²
長時間施工制限	※分/m ² 以下
止め打ち制限	※分以下
水深	※~※m

※部については、確性試験で技術的内容は確認を受けたものである。ノハウに係る内容を含むのでマスキングしている。

ウォータージェットピーニング法 (B-WJP法) の適用範囲、施工条件

(財) 発電設備技術検査協会確性試験委員会「ウォータージェットピーニング法の適用範囲拡大に関する確性試験」(確性試験証明書番号：17 確 S1 号) で確性が認められた内容は以下の通り。

適用範囲と施工条件は、次表のとおり。

適用部位	炉内計装筒の外 面	炉内計装筒管台 の取付けのJ溶接 部	原子炉容器出入 口管台の溶接部
ノズル	形式：※ 噴射穴径：φ※± ※mm	同 左	同 左
噴射距離	※～※mm	同 左	同 左
噴射流量	※～※リットル/分	同 左	同 左
噴射角度	※±※度	※～※度	同 左
噴射時間	※～※分/m	同 左	同 左
長時間施工制限	※分/m 以下	同 左	同 左
止め打ち制限	※分以下	同 左	同 左
水深	※～※m	同 左	同 左

※部については、確性試験で技術的内容は確認を受けたものである。ノウハウに係る内容を含むのでマスキングしている。

ウォータージェットピーニング法 (C-WJP法) の適用範囲、施工条件

(財) 発電設備技術検査協会確性試験委員会「ウォータージェットピーニング法の適用範囲拡大に関する確性試験(その2)」(確性試験証明書番号: 18 確 S1 号) で確性が認められた内容は以下の通り。

適用範囲と施工条件は、次表のとおり。

適用部位	原子炉容器安全注入管台セーフエンド溶接部
ノズル	形式: ※ 噴射穴径: φ ※ ~ ※ mm ノズル角度: ※ ° ± ※ °
噴射距離	※ ~ ※ mm
噴射流量	※ ~ ※ リットル/分
噴射角度	※ 度 ± ※ 度
噴射時間	※ ~ ※ 分/m
長時間施工制限	※ 分/m以下
止め打ち制限	※ 分以下
水深	※ ~ ※ m

※部については、確性試験で技術的内容は確認を受けたものである。ノウハウに係る内容を含むのでマスキングしている。

潜在欠陥へのピーニングによるき裂進展抑制効果の解析による検討

1. 目的

潜在欠陥があってもピーニングにより表面から 1 mm深さまで圧縮になるとの前提に基づき、運転中応力を考慮した条件での深さ 1~2mm の表面欠陥に生じる応力拡大係数 (K 値) を解析により求め、K 値がゼロ以下になる (即ち、ピーニングにより運転中にき裂進展が抑制される) 欠陥深さを検討した。

ここでは、配管全周き裂モデルに対して、重ね合わせの原理を用いて、き裂深さに応じたき裂面に表面残留応力分布と運転中の内圧による応力を負荷して、K 値を求めるものとした。

2. 評価条件

(1) 解析モデル

配管をモデル化し、軸対称モデルとする。き裂は、図 1 に示すような全周モデルとして評価を実施する。

形状モデルは 14B ステンレス鋼管とし、サイズを表 1 に示す。

(2) 拘束条件及び荷重条件

重ね合わせの原理を用いてき裂面に表面残留応力分布と運転中の内圧による応力分布を負荷する。モデル両端は平面保持とする。

(3) 応力分布

K 値を算出する際にき裂に付与する応力分布は、図 2 に示すピーニング施工有り/無しの残留応力に、運転時に生じる曲げ応力 (最大 150MPa) を膜応力として模擬し、加算した分布とする。

尚、ピーニングによる表面から深さ 1 mmまでの範囲の圧縮応力付与は、加熱冷却の温度履歴負荷による熱ひずみ付与により現象を模擬する。

(4) き裂深さ

き裂深さ a は 1~2mm の区間を 0.2mm ピッチで解析を行う。また、参考として 2.15mm の解析結果も併記する。

(5) 材料定数

材料定数を表 2 に示す。

3. 評価結果

解析結果を図 3 に示す。解析結果からピーニング施工有りの条件では、表面から約 1 mmの範囲は K 値がゼロ以下になる。即ち、約 1 mm程度の欠陥はピーニングにより運転中のき裂進展が防止されると推定される。

以上

表1 モデルサイズ

材質	外径 Φ (mm)	板厚 t (mm)	軸方向長さ L (mm)	き裂深さ a (mm)
SUS304	355.6	35.7	1778 (外径 Φ の5倍)	1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0、 2.15 (参考)

表2 材料定数 (室温)

ヤング率 E (MPa)	ポアソン比 ν
195000	0.3

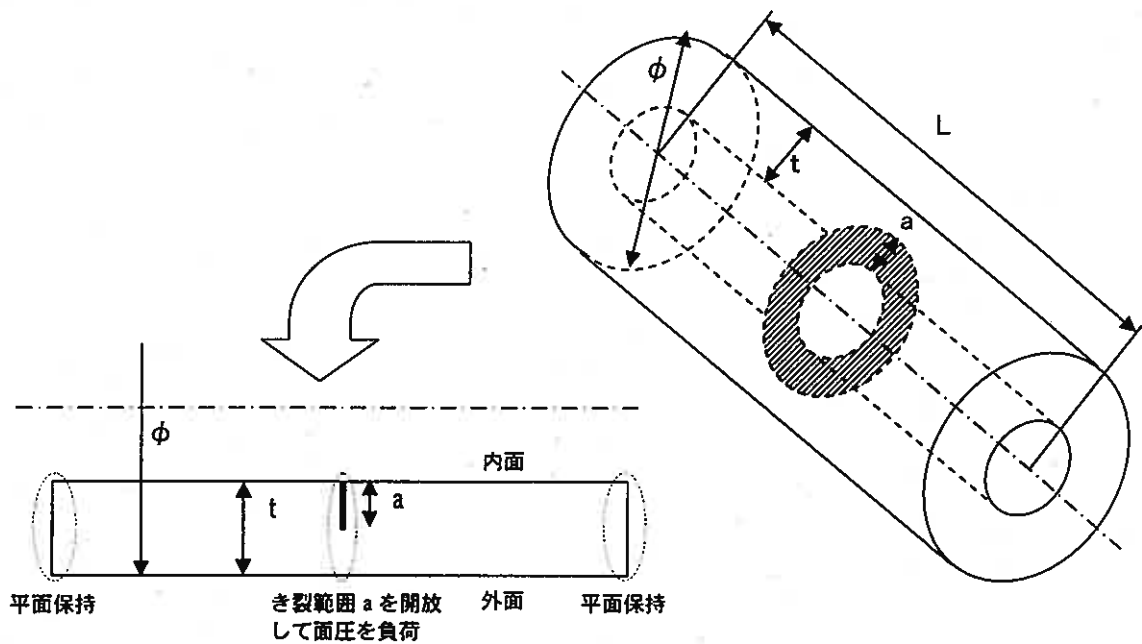


図1 き裂モデル (軸対称全周き裂)

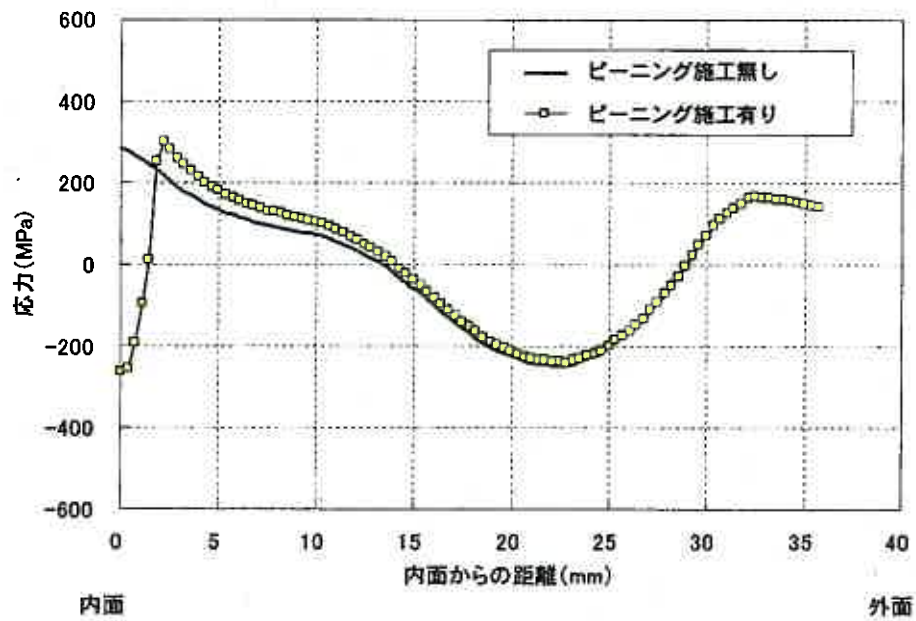


図2 ピーニング施工有り/無しの残留応力分布

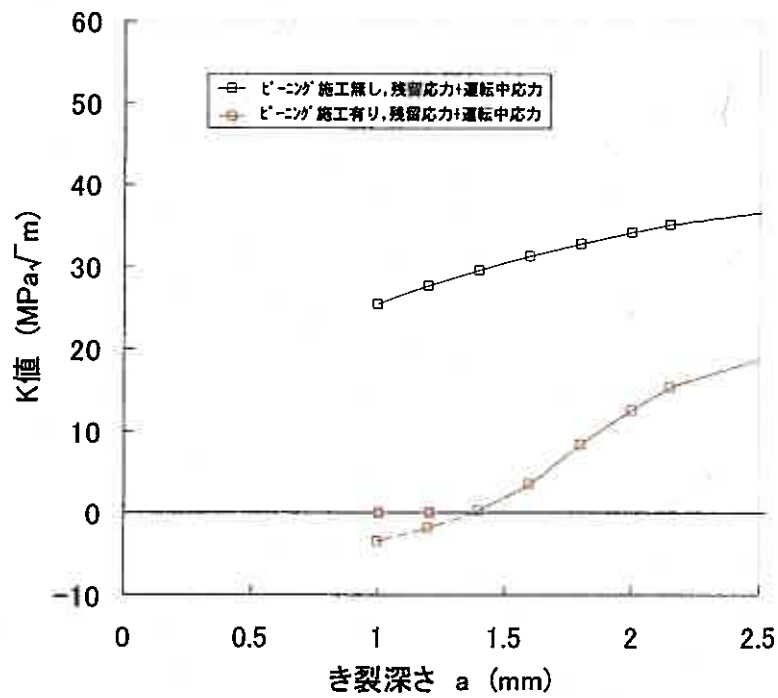


図3 ピーニング施工有り/無しの応力拡大係数

潜在き裂へのピーニングの影響の確認（延性き裂進展確認試験）

1. 目的

USP又はWJP施工により、潜在欠陥が進展しないことを試験で確認する。

2. 試験方法

(1) 試験片及び試験手順

試験片形状を図1、試験片の材質及び潜在欠陥導入条件を表1、試験手順を図2及び図3に示す。試験は、腐食溶液中で600合金溶接金属部又はSUS316母材部に潜在欠陥を導入した平板試験片を幅方向に2分割し、一方のみWJP又はUSPを施工し、以下に示す項目を調査した。

- 潜在欠陥深さ評価
- 断面拡大観察
- 破面観察
- 硬さ測定

(2) ピーニング施工条件

USP及びWJPの施工条件は、第3者機関による確性試験*¹、*²にて欠陥のない健全部に対して予め確認された条件の範囲に従うものとし、施工条件の範囲内で試験片に与えるピーニングの影響が最も大きくなる条件（残留応力改善効果が最も大きくなる条件）を選定した。USP及びWJP施工条件は、以下に示す適用部位に施工する場合の条件で代表した。

- USP：原子炉容器又は蒸気発生器 出入口管台とセメント溶接部に対する施工条件で代表（確性試験*¹にて、欠陥のない健全部に施工した場合に表面から深さ 1.0 mmの位置まで残留応力が OMPa 以下となることが確認されている施工条件）
- WJP：原子炉容器 出入口管台とセメント溶接部に対する施工条件で代表（確性試験*²にて、欠陥のない健全部に施工した場合に表面から深さ 1.0 mmの位置まで残留応力が OMPa 以下となることが確認されている施工条件）

3. 試験結果

代表的な WJP/USP 施工条件（欠陥の無い箇所に施工した場合、表面から深さ 1.0 mmの位置で残留応力が OMPa 以下となることが確認されている WJP/USP 施工条件）を用いて潜在欠陥への影響を確認した結果は以下のとおりであった。

- 潜在欠陥深さ評価

「WJP/USP 施工有り」と「WJP/USP 施工無し」両者の試験片の観察面で確認された全ての欠陥深さを測定し、ワイブルプロットに整理した結果を図 4 及び図 5 に示す。600 合金溶接金属、SUS316 母材共に WJP/USP 施工有りと施工無しの両者で欠陥深さの分布はほぼ同一で重なっていることが確認できた。

「WJP/USP 施工有り」と「WJP/USP 施工無し」両者の試験片における欠陥深さの相違に

ついて統計的検定の手法を用いて比較した結果を表 2 及び表 3 に示す。600 合金溶接金属、SUS316 母材共に WJP/USP 有り と施工無しの両者で欠陥深さに有意差なく、WJP/USP 施工による延性き裂の発生・進展は認められなかった。

- 断面拡大観察

「WJP/USP 施工有り」と「WJP/USP 施工無し」両者の試験片の欠陥形状について拡大観察による比較を行った結果を図 6 及び図 7 に示す。600 合金溶接金属、SUS316 母材共に WJP/USP 施工有り と施工無しの欠陥形状に有意な差は確認されず、WJP/USP 施工による延性き裂の発生・進展の認められなかった。

- 破面観察

「WJP/USP 施工有り」の試験片の破面に酸化皮膜による着色後に破面開放を行い、破面観察を行った結果を図 8 及び図 9 に示す。600 合金溶接金属、SUS316 母材共に観察面から、WJP/USP 施工中のき裂進展と判断される着色された延性破面は認められなかった。

「WJP/USP 施工有り」の試験片の断面をエッチング処理後に拡大観察した結果を図 10 及び図 11 に示す。600 合金溶接金属、SUS316 母材共に粒内進展した延性き裂と判断されるデンドライト境界又は粒界に沿わない終端のある欠陥は認められなかった。

- 硬さ測定

「WJP/USP 施工有り」の試験片の表層部（表面から深さ 1 mm の範囲）で潜在欠陥の近傍と、欠陥のない領域における硬さを比較した結果を図 12 及び図 13 に示す。硬さ測定結果から 600 合金溶接金属、SUS316 母材共に潜在欠陥の有無に係わらず、WJP/USP 施工後の硬さ分布が同程度（350HV 未満）で、潜在欠陥が存在することによる硬さの上昇は認められなかった。

以上のことから、潜在欠陥が存在する箇所に WJP 又は USP を施工することにより悪影響を及ぼさないと判断する。

* 1 : (財) 発電設備技術検査協会確性試験委員会「USP法に関する確性試験」(確性試験証明書番号: 18確S2号)

* 2 : (財) 発電設備技術検査協会確性試験委員会「WJP法の適用範囲拡大に関する確性試験」(確性試験証明書番号: 17確S1号)

表1 試験片及び潜在欠陥導入条件

	600合金溶接金属	ステンレス鋼母材
試験片形状	平板継手試験片 (長さ150mm×幅30mm×厚さ10mm)	平板試験片 (長さ150mm×幅30mm×厚さ10mm)
材質 (注)	母材：NCF600+SUS316 溶金：600系合金 潜在欠陥導入前に鋭敏化熱処理実施	母材：SUS316 潜在欠陥導入前に鋭敏化熱処理実施
潜在欠陥導入条件	4点曲げにより応力を負荷した状態で室温ポリチオン酸溶液に浸漬し、600合金溶接金属部に欠陥導入(目標深さ1mm)	4点曲げにより応力を負荷した状態で室温ポリチオン酸溶液に浸漬し、SUS316母材部に欠陥導入(目標深さ1mm)
試験片数	ピーニング方法毎に3体 (潜在欠陥導入後2分割)	ピーニング方法毎に3体 (潜在欠陥導入後2分割)

注) WJP/USPの対象材料は、600合金溶接金属の母材と溶接金属、ステンレス鋼の母材と溶接金属がある。材料の違いによる影響は有意ではないと考えられるが、本評価書では600合金溶接金属と316系ステンレス鋼母材を代表に試験を行い、材質による有意な違いのないことを確認する。

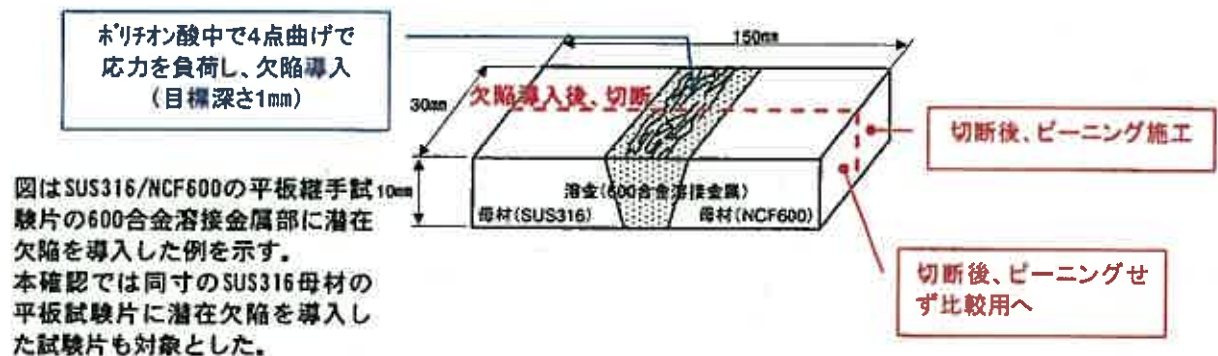
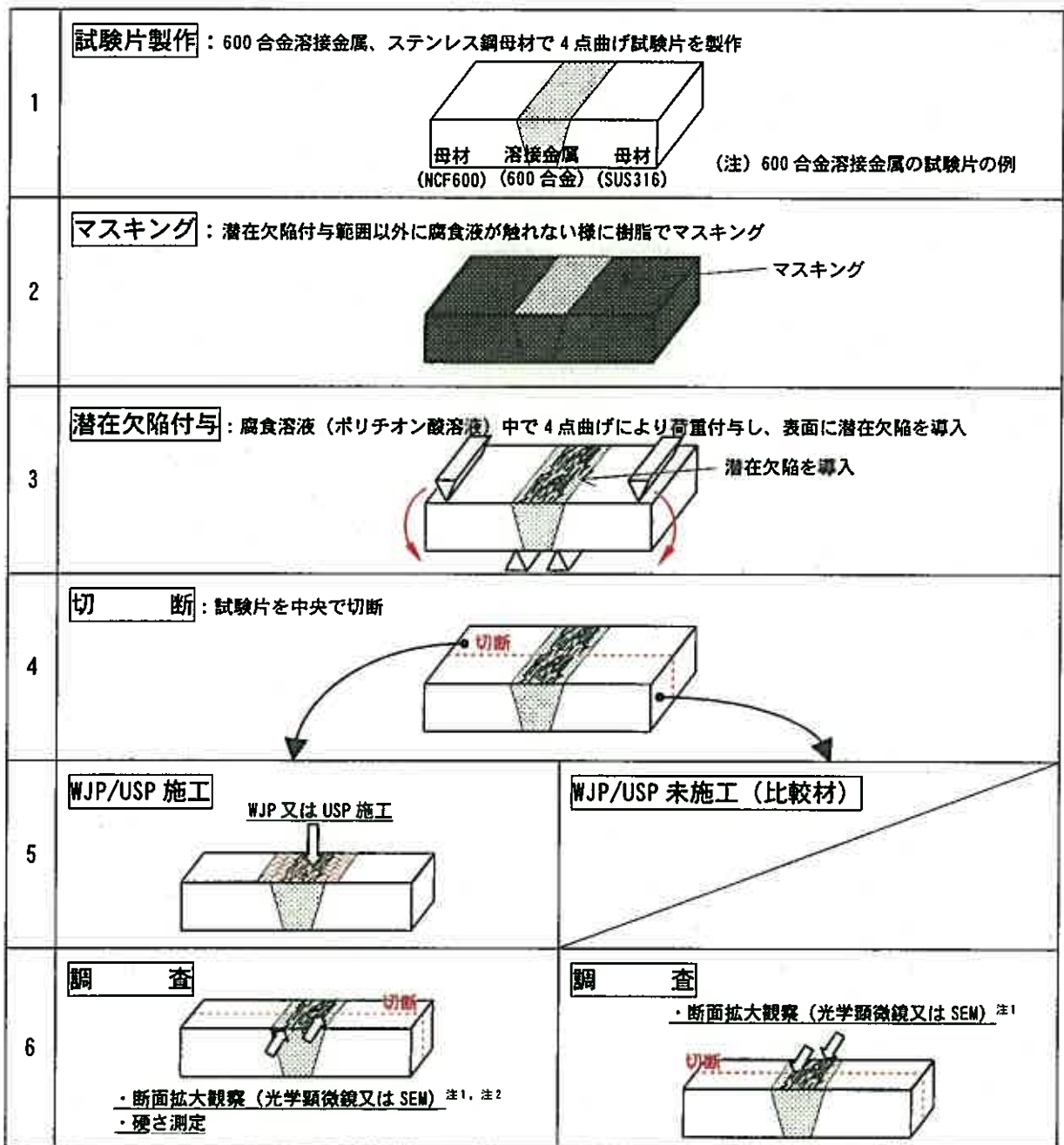


図1 試験片の形状 (600合金溶接金属の試験片の例)



注 1 : 断面拡大観察は、幅 15 mm に切断した試験片の側面付近と中央の 2 断面を確認する。

注 2 : 断面拡大観察により潜在欠陥深さを測定する際、ピーニング施工有りの場合は光学顕微鏡による観察では潜在欠陥が若干視認しにくい為、SEM 観察を併用して視認性を改善し、潜在欠陥の個数及び深さを確認する。

図2 延性き裂進展確認試験の手順
(破面観察は除く)

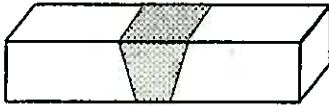

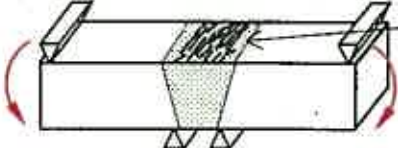
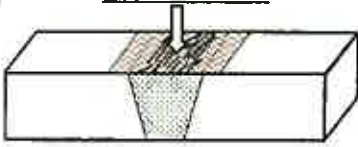
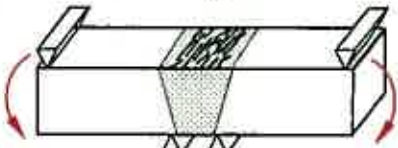
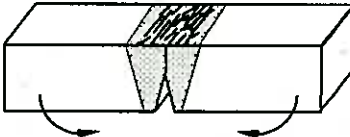
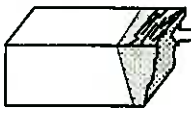
1	<p>試験片製作 : 600 合金溶接金属、ステンレス鋼母材で 4 点曲げ試験片を製作</p>  <p>(注) 600 合金溶接金属の試験片の例</p>
2	<p>マスクング : 潜在欠陥付与範囲以外に腐食液が触れない様に樹脂でマスクング</p>  <p>マスクング</p>
3	<p>潜在欠陥付与 : 腐食溶液 (ポリチオン酸溶液) 中で 4 点曲げにより荷重付与し、表面に潜在欠陥を導入</p>  <p>潜在欠陥を導入</p>
4	<p>WJP/USP 施工</p>  <p>WJP 又は USP 施工</p>
5	<p>酸化皮膜付与 : 4 点曲げにより荷重付与したままで大気中で加熱して潜在欠陥の破面を酸化皮膜により着色</p> 
6	<p>破面開放 : ノッチを入れ、潜在欠陥の破面を開放</p> 
7	<p>破面観察</p>  <p>・破面観察 (光学顕微鏡又は SEM)</p>

図3 延性き裂進展確認試験の手順
(破面観察)

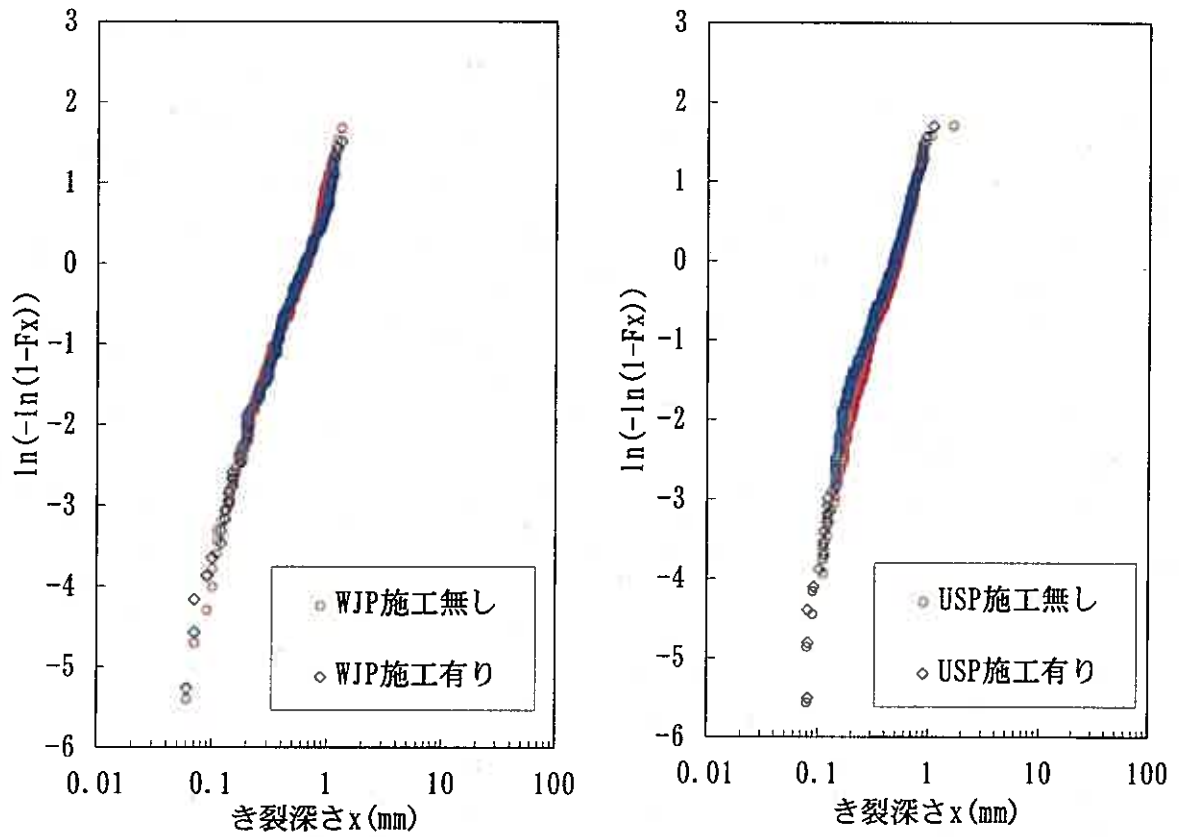


図4 潜在欠陥深さのワイブルプロット結果 (600 合金溶接金属)

x : 潜在欠陥の深さ、Fx : 深さが横軸の値以下である潜在欠陥の現れる確率

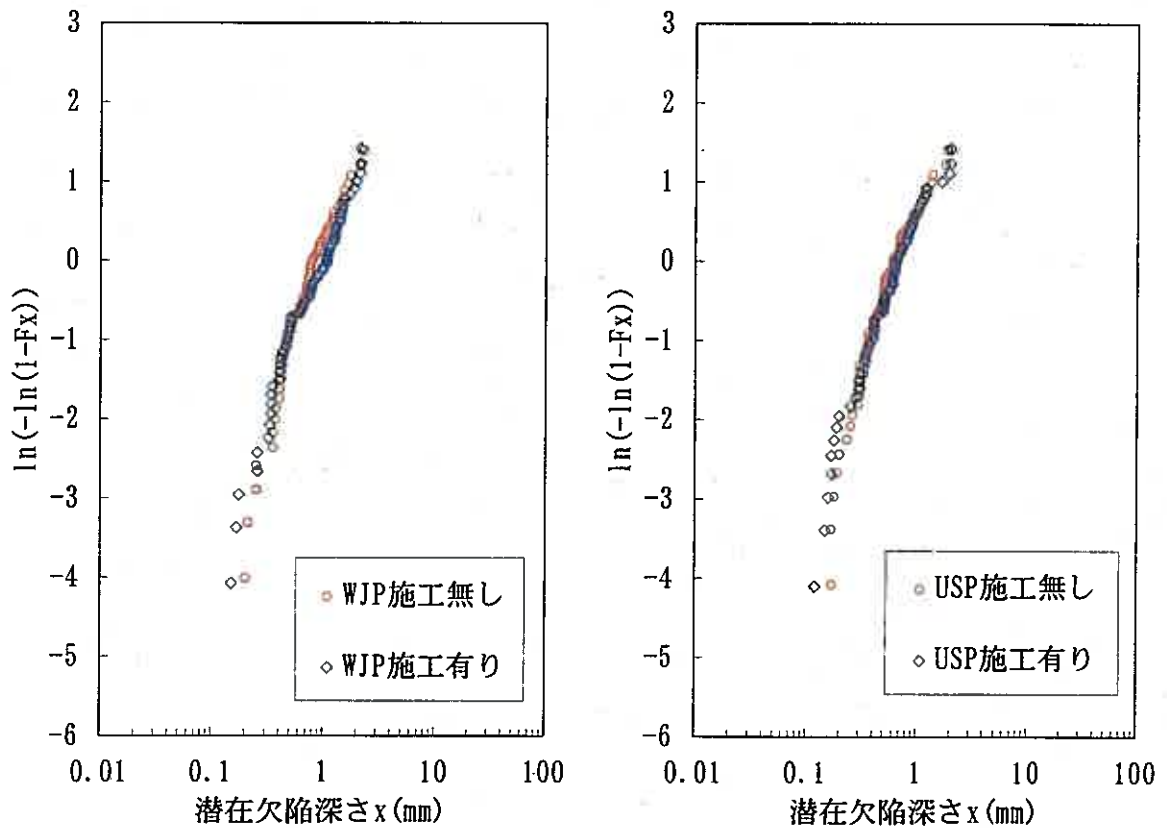


図5 潜在欠陥深さのワイブルプロット結果 (SUS316 母材)

x : 潜在欠陥の深さ、Fx : 深さが横軸の値以下である潜在欠陥の現れる確率

表2 ピーニング施工有り と 施工無し の 潜在欠陥深さの差の検定結果 (600 合金溶接金属)

項目 \ 施工有無	WJP		USP	
	施工無し	施工有り	施工無し	施工有り
データ数	220	204	257	244
検定統計量 t_0	-0.0477		0.813	
判断クライテリア $t(\phi, \alpha)$	1.97		1.97	
結果	$ t_0 < t(\phi, \alpha)$ 有意差は認められない。		$ t_0 < t(\phi, \alpha)$ 有意差は認められない。	

表3 ピーニング施工有り と 施工無し の 潜在欠陥深さの差の検定結果 (SUS316 母材)

項目 \ 施工有無	WJP		USP	
	施工無し	施工有り	施工無し	施工有り
データ数	54	60	69	58
検定統計量 t_0	-0.542		-0.264	
判断クライテリア $t(\phi, \alpha)$	1.98		1.98	
結果	$ t_0 < t(\phi, \alpha)$ 有意差は認められない。		$ t_0 < t(\phi, \alpha)$ 有意差は認められない。	

注記：

統計処置による評価として、t検定による平均値の差の検定を実施。

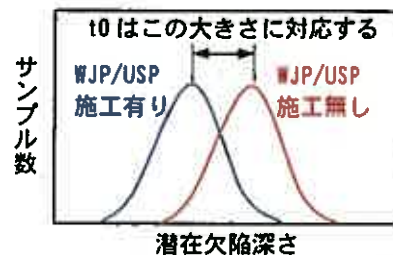
①統計検定量 t_0 (二つのデータの平均値の差の大きさに対応するパラメータ) を計算。

$$t_0 = \frac{\log \bar{x}_{\text{施工無し}} - \log \bar{x}_{\text{施工有り}}}{\sqrt{V(1/n_{\text{施工無し}} + 1/n_{\text{施工有り}})}}$$

\bar{x} : 潜在欠陥深さの平均値

V : 分散

n : 潜在欠陥の個数(データ数)



潜在欠陥深さの分布の模式図

②判断クライテリア $t(\phi, \alpha)$ と t_0 を比較。

- ・ t_0 の絶対値が判断クライテリア $t(\phi, \alpha)$ 以上の値になれば有意差があると判定。
- ・ 判断クライテリアは、データ数(ϕ)と有意確率(判断を誤る確率、 α)に依存して決まる値。通常、有意確率(判断を誤る確率)は5%として設定。

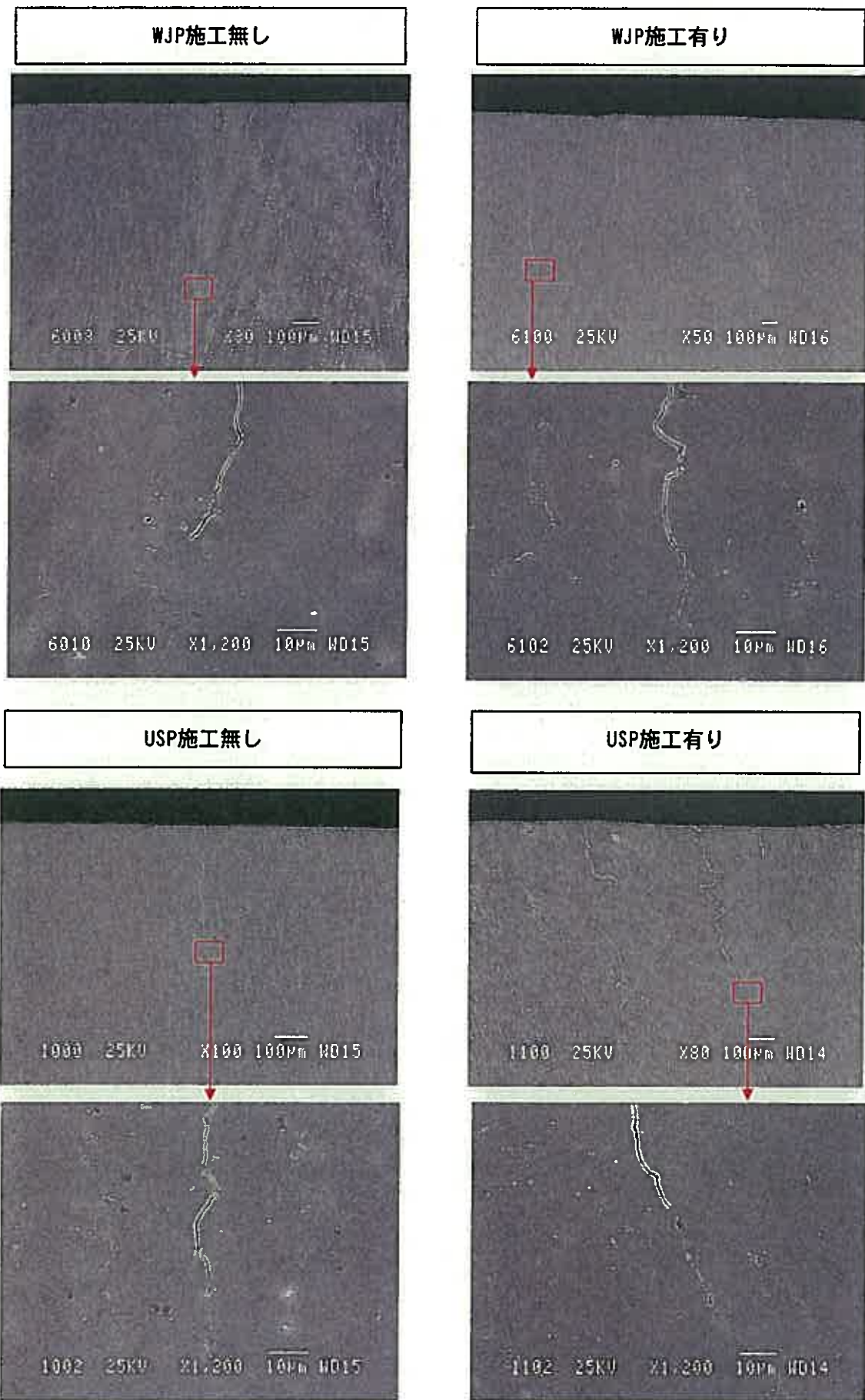


図 6 潜在欠陥先端部の形状比較 (600 合金溶接金属)

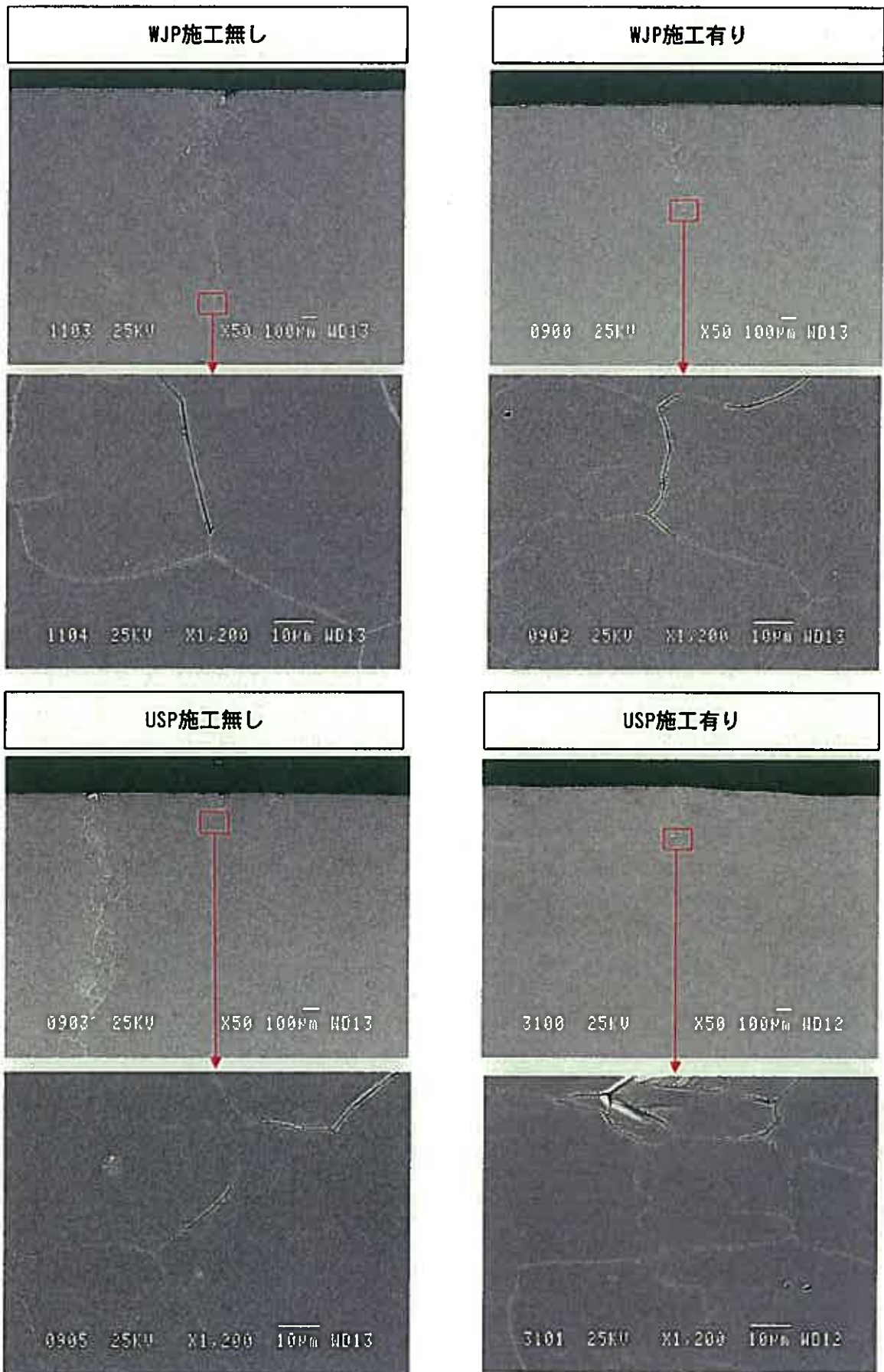


図7 潜在欠陥先端部の形状比較 (SUS316 母材)

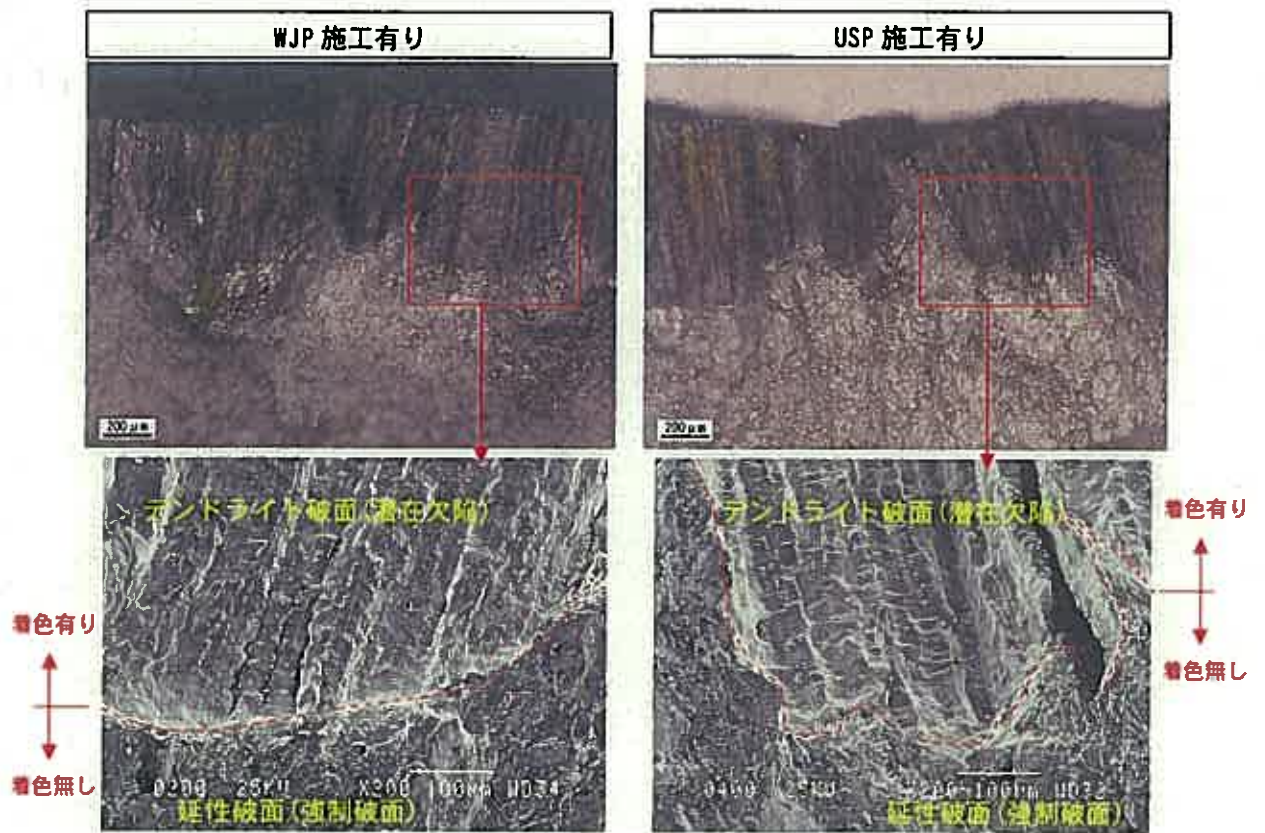


図 8 WJP/USP 施工有りの 600 合金溶接金属の潜在欠陥破面開放結果

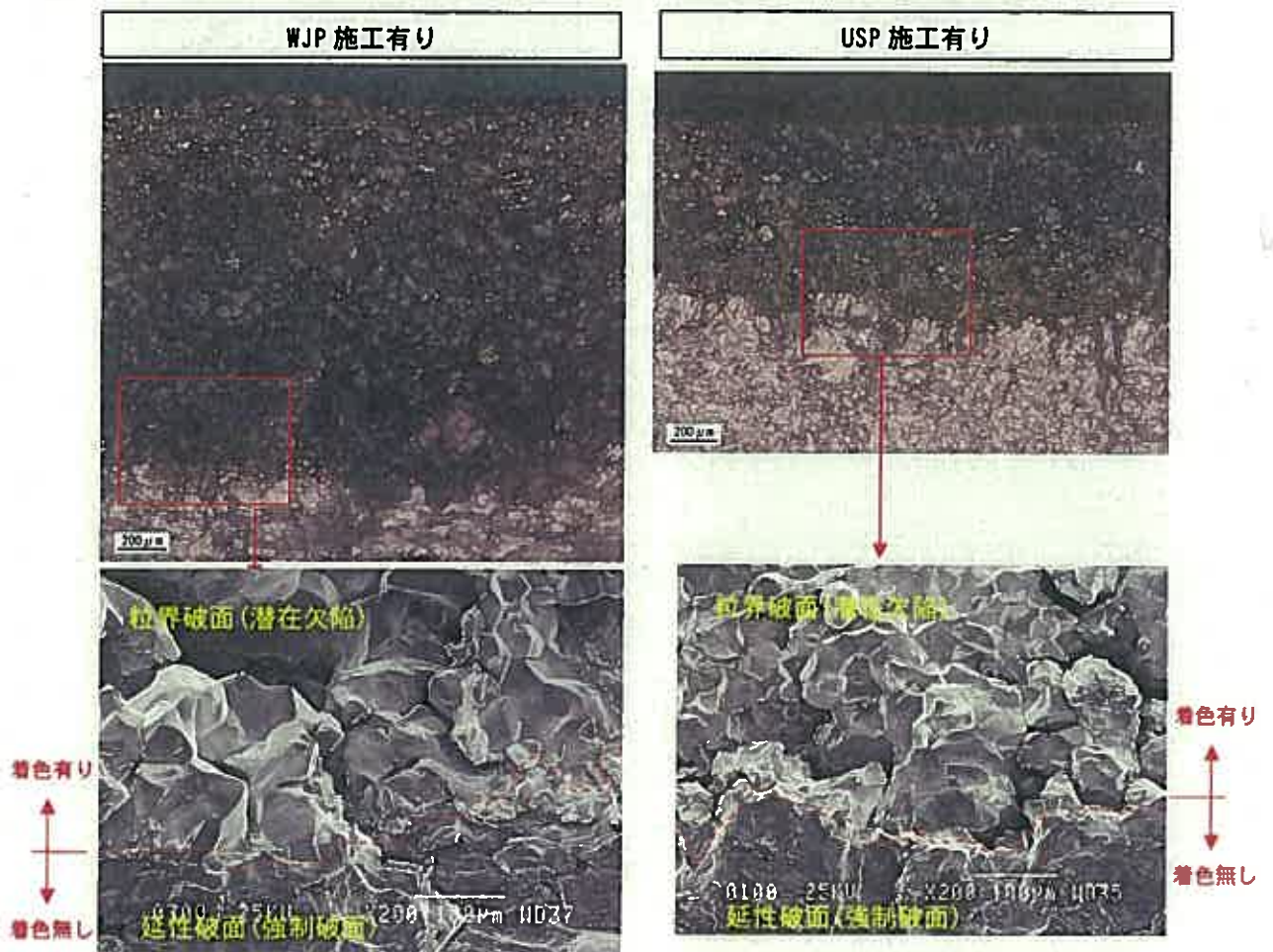


図 9 WJP/USP 施工有りの SUS316 母材の潜在欠陥破面開放結果

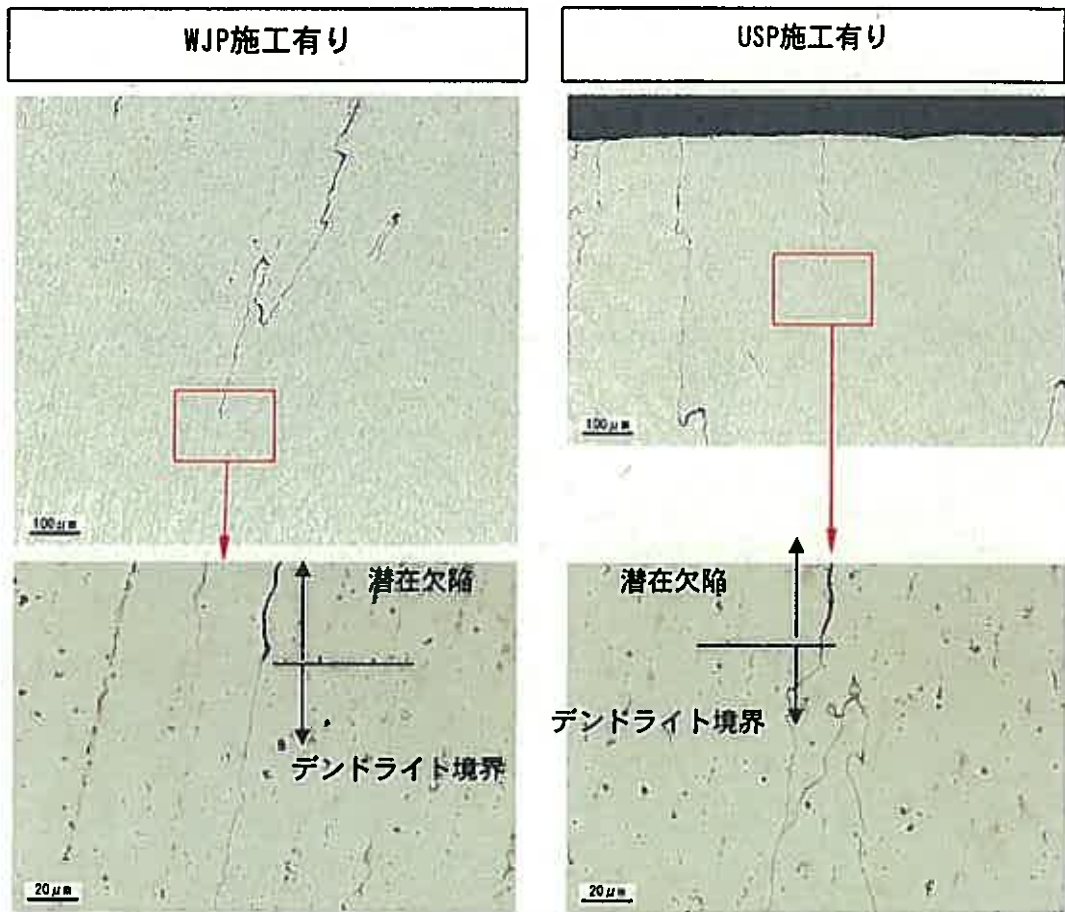


図 10 潜在欠陥先端とデンドライト境界の関係の確認結果 (600 合金溶接金属)

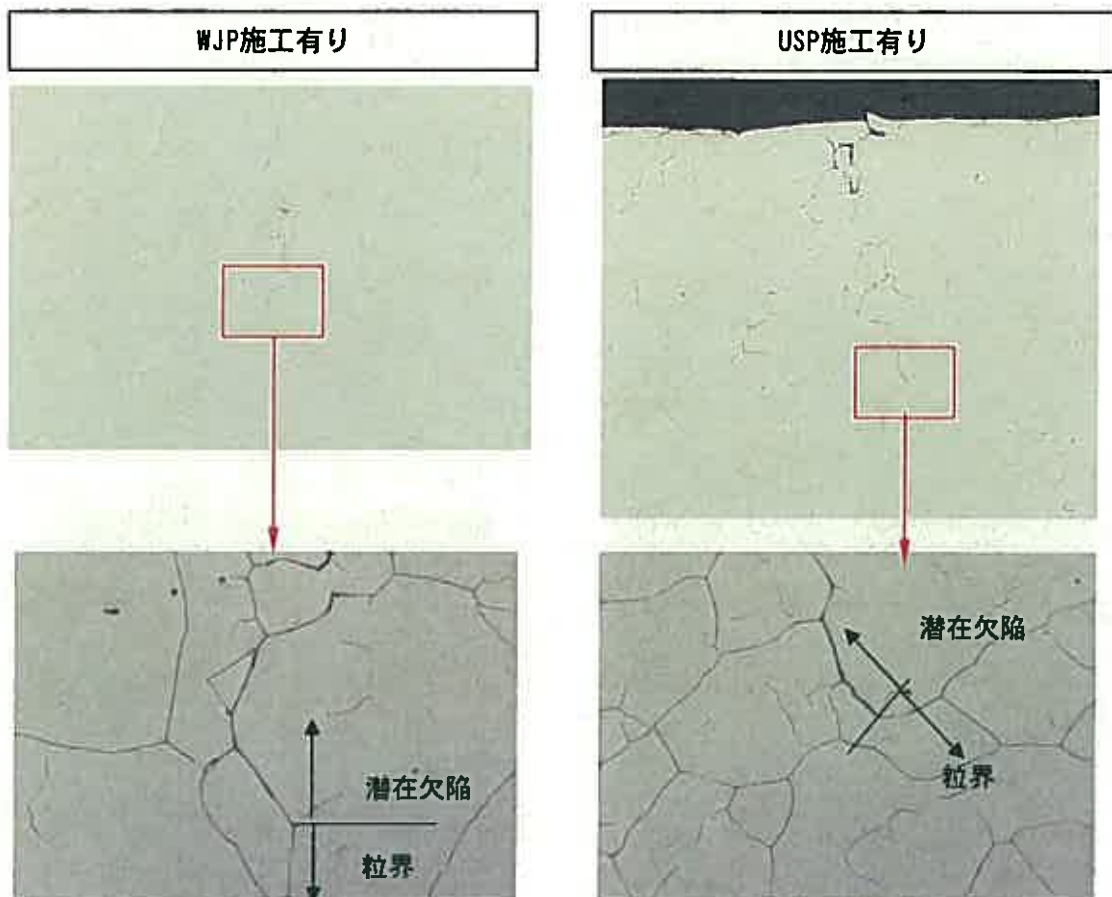


図 11 潜在欠陥先端と結晶粒界の関係の確認結果 (SUS316 母材)

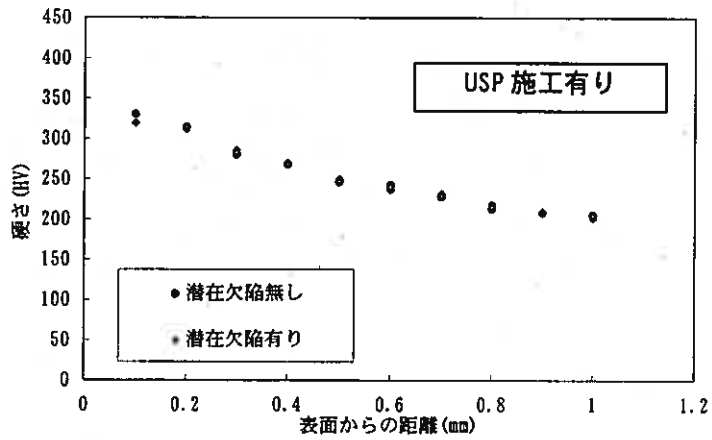
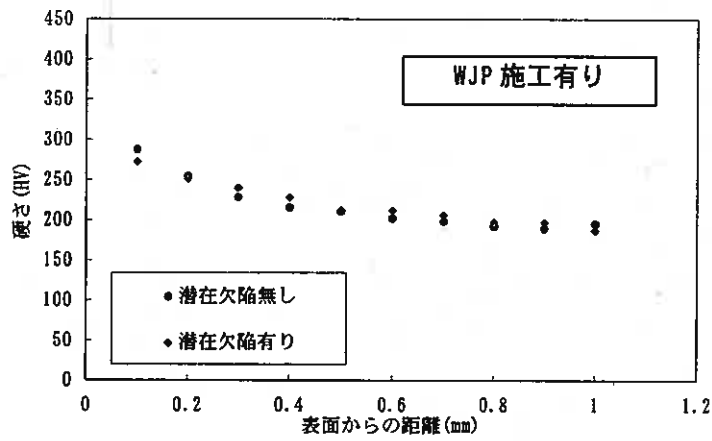


図 12 WJP/USP 施工後の試験片断面における硬さ測定結果 (600 合金溶接金属)

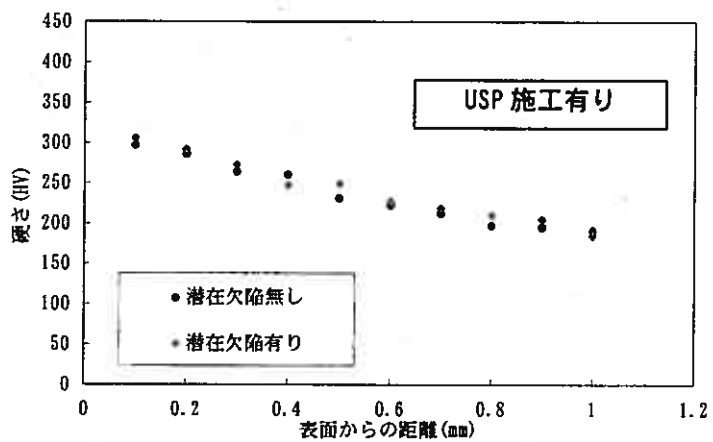
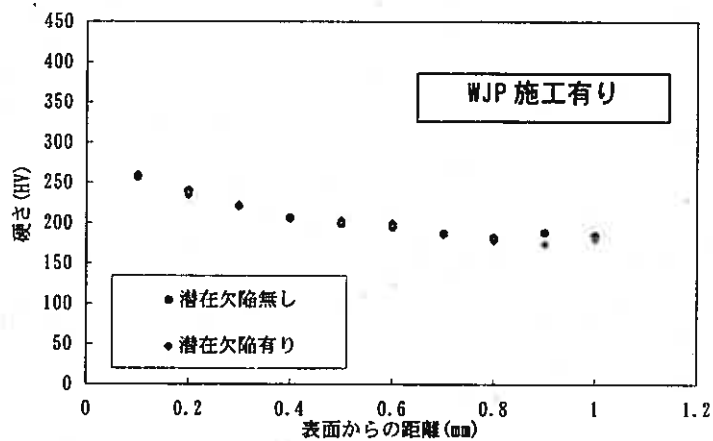


図 13 WJP/USP 施工後の試験片断面における硬さ測定結果 (SUS316 母材)

潜在欠陥へのピーニングの効果の確認（残留応力確認試験）

1. 目的

潜在欠陥が存在しても、USP又はWJPを施工すれば潜在欠陥近傍の残留応力が改善されることを試験で確認する。

2. 試験方法

(1) 試験片及び試験手順

試験片形状を図1、試験片の材質及び潜在欠陥導入条件を表1、試験手順を図2に示す。試験は、腐食溶液中で600合金溶接金属部又はSUS316母材部に潜在欠陥を導入した平板試験片にWJP又はUSPを施工し、以下に示す項目を調査した。

- X線回折法による残留応力測定（表面）（測定対象：600 合金溶接金属、SUS316 母材）
- X線回折法による残留応力測定（内部）（測定対象：SUS316 母材）

(2) ピーニング施工条件

USP及びWJPの施工条件は、第3者機関による確性試験*¹・*²にて欠陥のない健全部に対して予め確認された条件範囲に従うものとし、施工条件の範囲内で残留応力改善効果が最も小さくなる条件を選定した。USP及びWJP施工条件は、以下に示す適用部位に施工する場合の条件で代表した。

- USP：原子炉容器又は蒸気発生器 出入口管台とセメント溶接部に対する施工条件で代表（確性試験*¹にて、欠陥のない健全部に施工した場合に表面から深さ 1.0 mmの位置まで残留応力が OMPa 以下となることが確認されている施工条件）
- WJP：原子炉容器 出入口管台とセメント溶接部に対する施工条件で代表（確性試験*²にて、欠陥のない健全部に施工した場合に表面から深さ 1.0 mmの位置まで残留応力が OMPa 以下となることが確認されている施工条件）

3. 試験結果

代表的な WJP/USP 施工条件（欠陥の無い箇所に施工した場合、表面から深さ 1.0 mmの位置で残留応力が OMPa 以下となることが確認されている WJP/USP 施工条件）を用いて潜在欠陥近傍における残留応力の改善効果を確認した結果は以下のとおりであった。

- X線回折法による残留応力測定（表面）

「WJP/USP 施工有り」の試験片の表面残留応力を X線回折法で測定した結果を図 3 から図 6 に示す。600 合金溶接金属、SUS316 母材共に潜在欠陥の有無に係わらず、WJP/USP 施工により同程度の圧縮応力が付与されていることが確認できた。

これは、潜在欠陥が非常に浅いことに加え、潜在欠陥の開口量が微小であることから、WJP/USP 施工により潜在欠陥の開口面同士が押し合うことで、潜在欠陥の無いものと同程度の圧縮応力が得られたものと考えられる。

尚、測定結果には比較の為、USP/WJP 施工前の残留応力の測定結果も合わせて示す。

- X線回折法による残留応力測定（内部）

「WJP/USP 施工有り」の試験片の表面から深さ 1.0mm までの残留応力の板厚方向分布をX線回折法で測定した結果を図 7 及び図 8 に示す。SUS316 母材の結果から、潜在欠陥の有無に係わらず、WJP/USP 施工により表面から深さ 1 mm の位置でも圧縮応力が付与されていることが確認できた。

尚、600 合金溶接金属ではX線回折法による残留応力測定の手法上、深さ方向の残留応力は計測できないが、材質の違いによる表面での残留応力の測定結果に有意差がないことから、600 合金溶接金属の深さ方向の残留応力分布も SUS316 母材部と同傾向と判断される。

以上のことから、潜在欠陥が存在しても、USP又はWJPを施工すれば潜在欠陥近傍の残留応力は改善されるものと判断する。

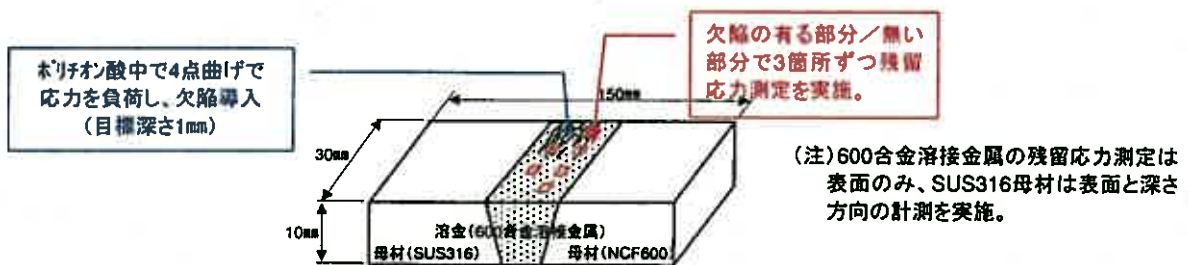
* 1 : (財) 発電設備技術検査協会確性試験委員会「USP法に関する確性試験」(確性試験証明書番号: 18確S2号)

* 2 : (財) 発電設備技術検査協会確性試験委員会「WJP法の適用範囲拡大に関する確性試験」(確性試験証明書番号: 17確S1号)

表1 試験片及び潜在欠陥導入条件




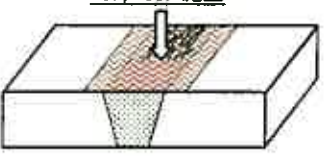
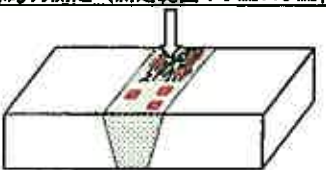
	600合金溶接金属	ステンレス鋼母材
試験片形状	平板継手試験片 (長さ150mm×幅30mm×厚さ10mm)	平板試験片 (長さ150mm×幅30mm×厚さ10mm)
材質 (注)	母材：NCF600+SUS316 溶金：600系合金 潜在欠陥導入前に鋭敏化熱処理実施	母材：SUS316 潜在欠陥導入前に鋭敏化熱処理実施
潜在欠陥導入条件	4点曲げにより応力を負荷した状態で室温ポリチオン酸溶液に浸漬し、600合金溶接金属部に欠陥導入(目標深さ1mm)	4点曲げにより応力を負荷した状態で室温ポリチオン酸溶液に浸漬し、SUS316母材部に欠陥導入(目標深さ1mm)
試験片数	ピーニング方法毎に1体	ピーニング工法毎に1体

注) WJP/USPの対象材料は、600合金溶接金属の母材と溶接金属、ステンレス鋼の母材と溶接金属がある。材料の違いによる影響は有意ではないと考えられるが、本評価書では600合金溶接金属と316系ステンレス鋼母材を代表に試験を行い、材質による有意な違いのないことを確認する。



図はSUS316/NCF600の平板継手試験片の600合金溶接金属部に潜在欠陥を導入した例を示す。本確認では同寸のSUS316母材の平板試験片に潜在欠陥を導入した試験片も対象とした。

図1 試験片の形状(600合金溶接金属の試験片の例)

1	<p>試験片製作 : 600 合金溶接金属、ステンレス鋼母材で 4 点曲げ試験片を製作</p>  <p>(注) 600 合金溶接金属の試験片の例</p>
2	<p>マスクング : 潜在欠陥付与範囲以外に腐食液が触れない様に樹脂でマスクング</p>  <p>マスクング</p>
3	<p>潜在欠陥付与 : 腐食溶液 (ポリチオン酸溶液) 中で 4 点曲げにより荷重付与し、表面に潜在欠陥を導入</p>  <p>潜在欠陥を導入</p> <p>潜在欠陥未導入 (比較)</p>
4	<p>WJP/USP 施工</p>  <p>WJP/USP 施工</p>
5	<p>調 査</p> <p>X 線応力測定 (測定範囲 : 3 mm × 3 mm 程度) 注</p> 

注 : X 線による残留応力測定は、試験片端面付近での応力開放の影響を少なくする為、試験片の中央付近で、欠陥が密に発生している箇所を確認を行う。測定箇所のサイズは概ね 3×3 mm で、測定数は潜在欠陥を含む領域で 3 箇所、き裂のない領域で 3 箇所 (測定方向は試験片の幅方向、長手方向) とする。試験結果は試験片の長手方向の結果を代表例として添付する。

600 合金溶接金属の測定箇所は表面のみとする。これは溶接金属が非等方な凝固組織であるため、集合組織形成や結晶粒粗大化により、測定領域内の結晶方位が揃い、測定に必要なランダムな結晶方位が得られないことから、深さ方向の残留応力分布が測定不可能であることによる。尚、表面は加工等による結晶方位変動が存在する為、測定可能である。

SUS316 母材は、表面と深さ方向両方を測定対象とする。深さ方向の残留応力測定は試験片表面を電解研磨法によって穿孔しながら実施する。

図 2 残留応力確認試験の手順

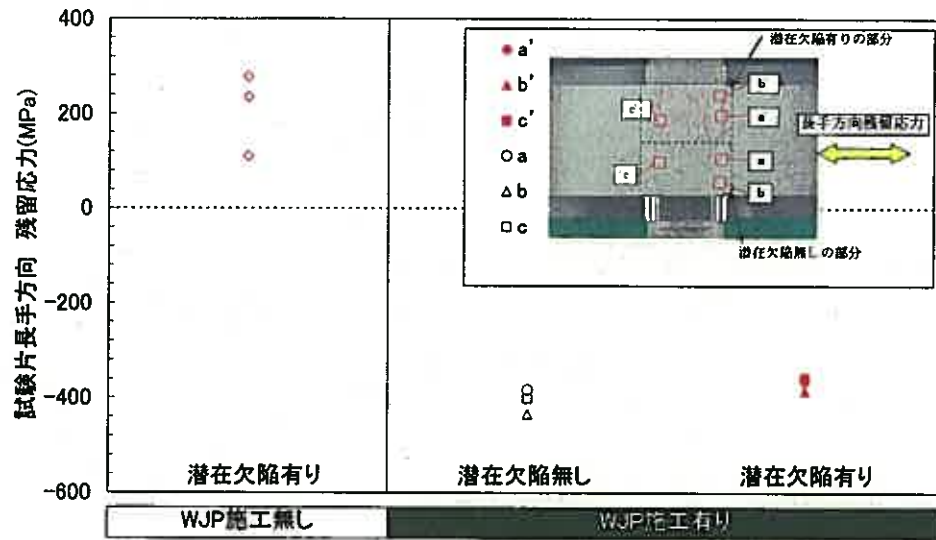


図 3 WJP 施工した潜在欠陥有り及び無しの部分の残留応力測定結果 (600 合金溶接金属)

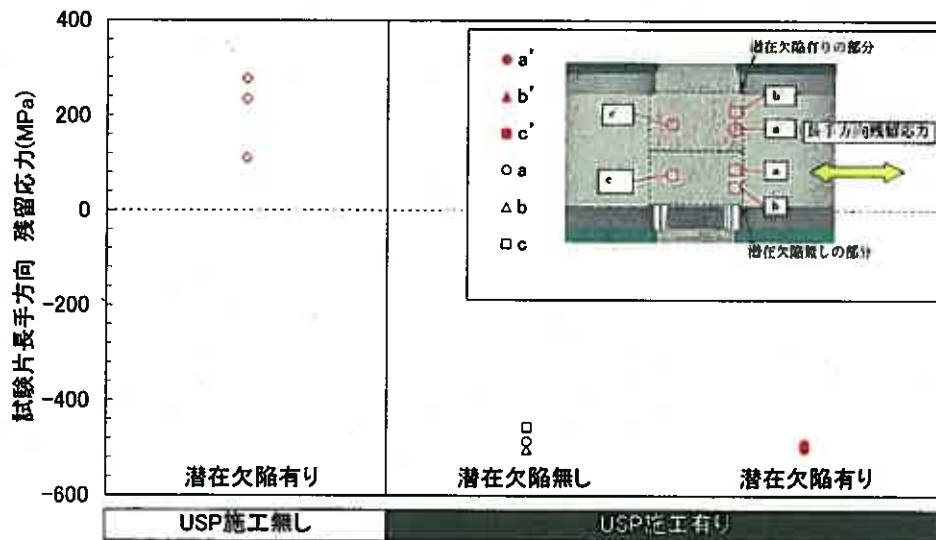


図 4 USP 施工した潜在欠陥有り及び無しの部分の残留応力測定結果 (600 合金溶接金属)

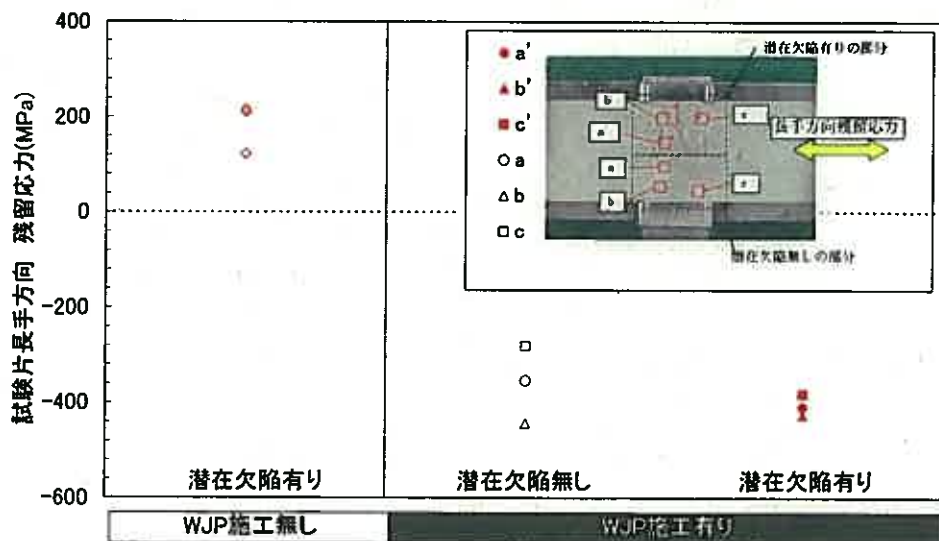


図 5 WJP 施工した潜在欠陥有り及び無しの部分の残留応力測定結果 (SUS316 母材)

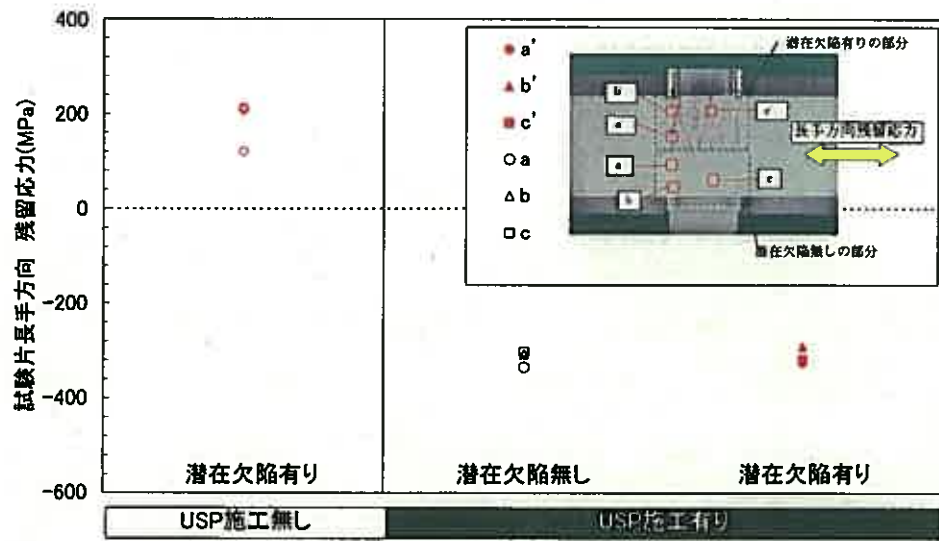


図6 USP 施工した潜在欠陥有り及び無しの部分の残留応力測定結果 (SUS316 母材)

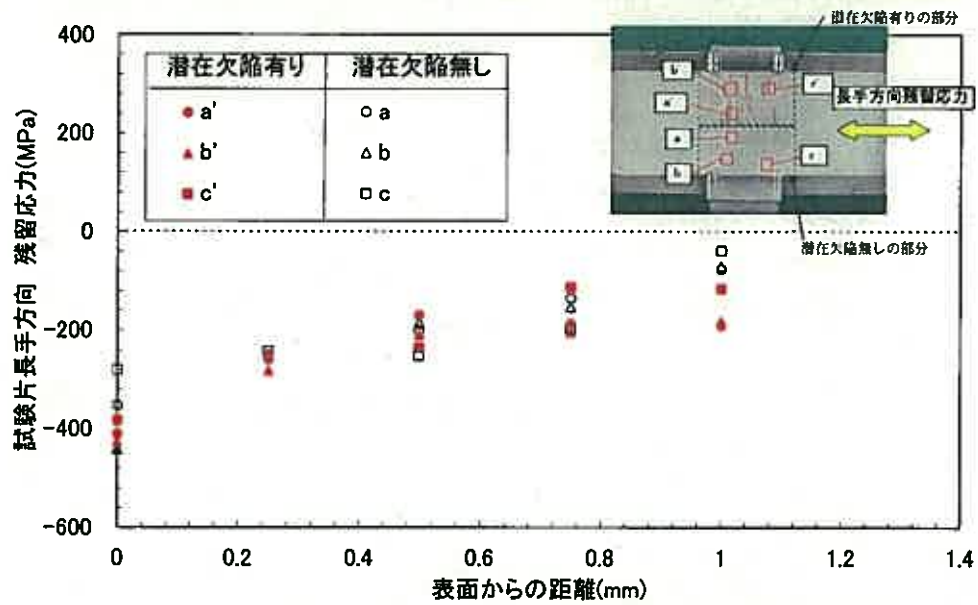


図7 WJP 施工した潜在欠陥有り及び無しの部分の残留応力測定結果 (SUS316 母材)

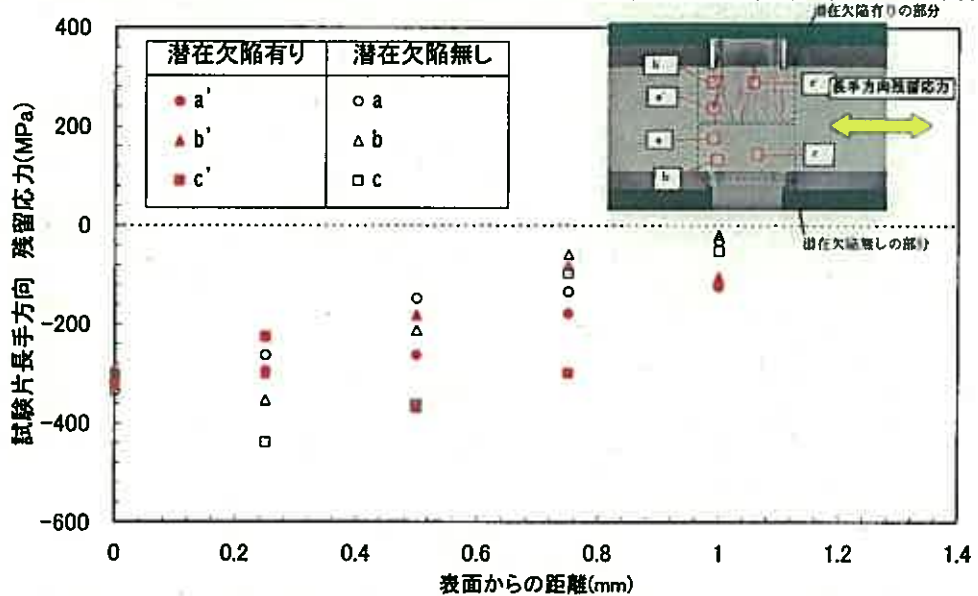


図8 USP 施工した潜在欠陥有り及び無しの部分の残留応力測定結果 (SUS316 母材)

潜在欠陥へのピーニングの効果の確認（SCC試験）

1. 目的

潜在欠陥が存在してもUSP又はWJPを施工することで、運転中のSCC進展が防止できることを試験で確認する。

2. 試験方法

(1) 試験片及び試験手順

試験片形状を図1、試験片の材質及び潜在欠陥導入条件を表1、試験手順を図2に示す。試験は、腐食溶液中で600合金溶接金属部又はSUS316母材部に潜在欠陥を導入した試験片を幅方向に2分割し、一方のみWJP又はUSPを施工した。その後、運転中作用応力を想定した応力（200MPa）を付加した状態で腐食溶液中に再度浸漬（以下、SCC試験という。）し、以下に示す項目を調査した。

- 断面拡大観察
- 潜在欠陥深さ評価

(2) ピーニング施工条件

USP及びWJPの施工条件は、第3者機関による確性試験*¹、*²にて欠陥のない健全部に対して予め確認された条件範囲に従うものとし、施工条件の範囲内で残留応力改善効果が最も小さくなる条件を選定した。USP及びWJP施工条件は、以下に示す適用部位に施工する場合の条件で代表した。

- USP：原子炉容器又は蒸気発生器 出入口管台とセメント溶接部に対する施工条件で代表（確性試験*¹にて、欠陥のない健全部に施工した場合に表面から深さ1.0mmの位置まで残留応力が0MPa以下となることが確認されている施工条件）
- WJP：原子炉容器 出入口管台とセメント溶接部に対する施工条件で代表（確性試験*²にて、欠陥のない健全部に施工した場合に表面から深さ1.0mmの位置まで残留応力が0MPa以下となることが確認されている施工条件）

3. 試験結果

代表的なWJP/USP施工条件（欠陥の無い箇所に施工した場合、表面から深さ1.0mmの位置で残留応力が0MPa以下となることが確認されているWJP/USP施工条件）を用いて、潜在欠陥に対するPWSCC進展防止の有効性を確認した結果は以下のとおりであった。

● 断面拡大観察

SCC試験後の「WJP/USP施工有り」と「WJP/USP施工無し」両者の試験片の断面拡大観察の結果を図3から図6に示す。600合金溶接金属、SUS316母材共にWJP/USP施工無しの試験片では、初期1mm程度までであったと考えられる浅い潜在欠陥が3mm以上の深さまで大きく進展した。一方、WJP/USP施工有りの試験片では、深さ1mm以下の潜在

欠陥の有意な進展がないことが確認できた。

- 潜在欠陥深さ評価

「WJP/USP 施工有り・SCC 試験無し（添付3「延性き裂進展確認試験」の試験結果）」と「WJP/USP 施工有り・SCC 試験有り」の両者の試験片の観察面で確認された全ての欠陥深さを測定し、ワイブルプロットに整理した結果を図7（上段）と図8（上段）に示す。600合金溶接金属、SUS316母材共にSCC試験有りとSCC試験無しの両者で欠陥深さの分布はほぼ同一で重なっていることが確認できた。

「WJP/USP 施工有り・SCC 試験有り」と「WJP/USP 施工有り・SCC 試験無し」の両者の試験片における欠陥深さの相違について統計的検定の手法を用いて比較した結果を表2及び表3に示す。600合金溶接金属、SUS316母材共に欠陥深さに有意差なく、WJP/USP施工により圧縮応力が付与できる深さより浅い欠陥に対するPWSCC防止の有効性が確認できた。

「WJP/USP 施工有り・SCC 試験有り」と「WJP/USP 施工無し・SCC 試験有り」の両者の試験片の観察面で確認された全ての欠陥深さを測定し、ワイブルプロットに整理した結果を図7（下段）及び図8（下段）に示す。又、「WJP/USP 施工有り・SCC 試験有り/無し」の両者の試験片における欠陥深さの相違について統計的検定の手法を用いて比較した結果を表4及び表5に示す。600合金溶接金属、SUS316母材共に欠陥深さに顕著な有意差が認められており、SCC試験の条件は潜在欠陥が進展する条件で実施されたことが確認できた。

以上のことから、潜在欠陥に対してUSP又はWJPを施工することで、運転中のSCC進展が防止できるものと判断する。

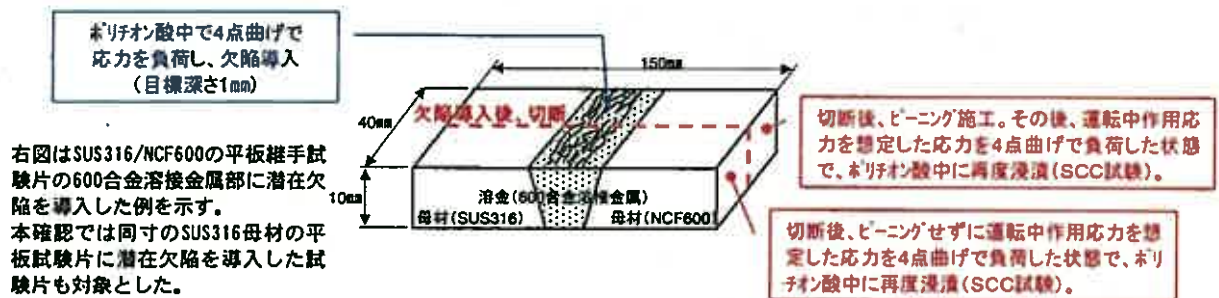
*1：(財)発電設備技術検査協会確性試験委員会「USP法に関する確性試験」（確性試験証明書番号：18確S2号）

*2：(財)発電設備技術検査協会確性試験委員会「WJP法の適用範囲拡大に関する確性試験」（確性試験証明書番号：17確S1号）

表1 試験片及び潜在欠陥導入条件

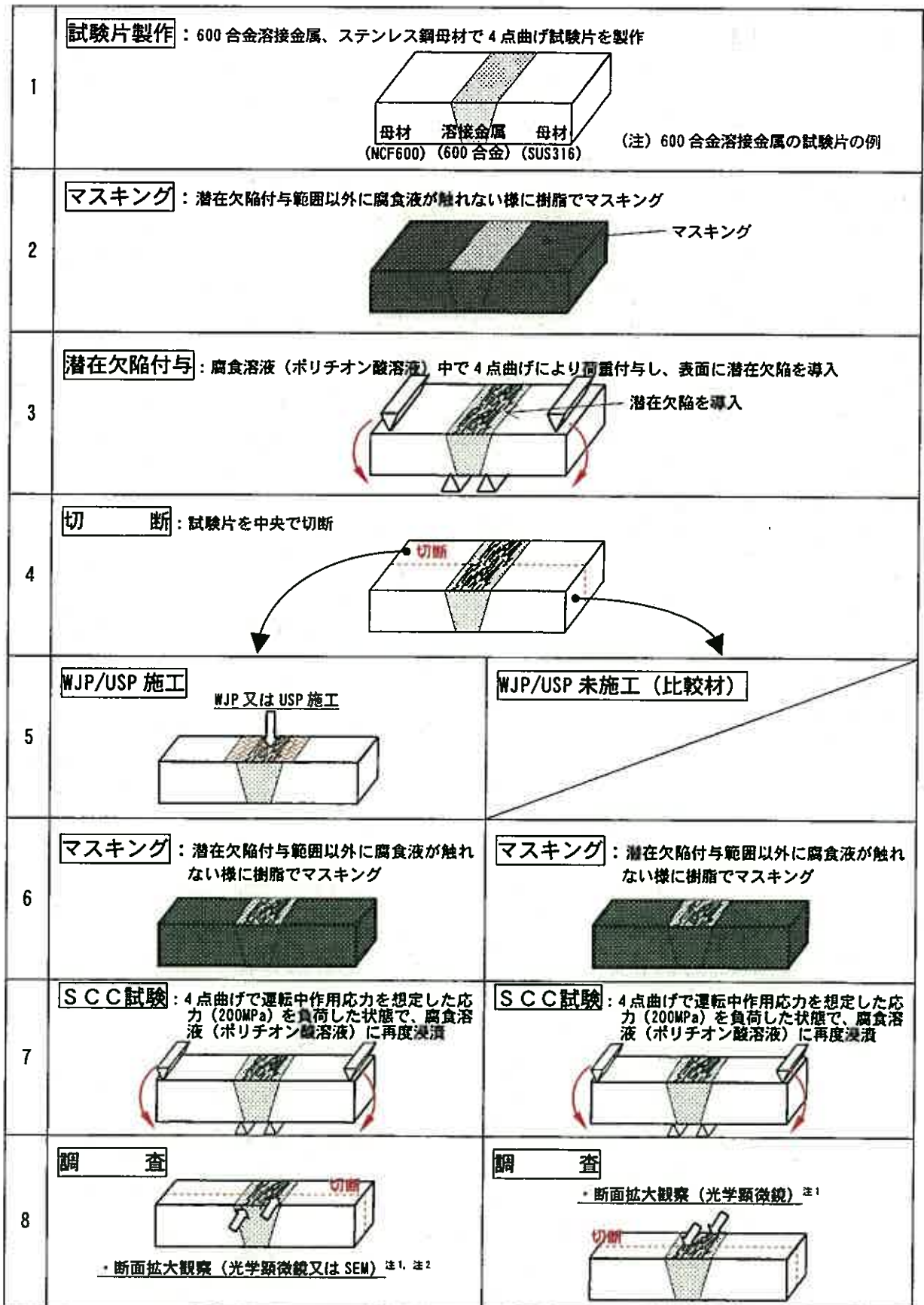
	600合金溶接金属	ステンレス鋼母材
試験片形状	平板継手試験片 (長さ150mm×幅40mm×厚さ10mm)	平板試験片 (長さ150mm×幅40mm×厚さ10mm)
材質 (注)	母材：NCF600+SUS316 溶金：600系合金 潜在欠陥導入前に鋭敏化熱処理実施	母材：SUS316 潜在欠陥導入前に鋭敏化熱処理実施
潜在欠陥導入条件	4点曲げにより応力を負荷した状態で室温ポリチオン酸溶液に浸漬し、600合金溶接金属部に欠陥導入(目標深さ1mm)	4点曲げにより応力を負荷した状態で室温ポリチオン酸溶液に浸漬し、SUS316母材部に欠陥導入(目標深さ1mm)
SCC試験条件	4点曲げにより運転中作用応力を想定した応力(200MPa)を負荷した状態で室温ポリチオン酸溶液に浸漬	4点曲げにより運転中作用応力を想定した応力(200MPa)を負荷した状態で室温ポリチオン酸溶液に浸漬
試験片数	ピーニング方法毎に2体 (潜在欠陥導入後2分割)	ピーニング方法毎に2体 (潜在欠陥導入後2分割)

注) WJP/USPの対象材料は、600合金溶接金属の母材と溶接金属、ステンレス鋼の母材と溶接金属がある。材料の違いによる影響は有意ではないと考えられるが、本評価書では600合金溶接金属と316系ステンレス鋼母材を代表に試験を行い、材質による有意な違いのないことを確認する。



右図はSUS316/NCF600の平板継手試験片の600合金溶接金属部に潜在欠陥を導入した例を示す。本確認では同寸のSUS316母材の平板試験片に潜在欠陥を導入した試験片も対象とした。

図1 試験片の形状(600合金溶接金属の試験片の例)



注 1 : 断面拡大観察は、幅 20 mm に切断した試験片の側面付近と中央の 2 断面を確認する。

注 2 : 断面拡大観察により潜在欠陥深さを測定する際、ピーニング施工有りの場合は光学顕微鏡による観察では潜在欠陥が若干視認しにくい為、SEM 観察を併用して視認性を改善し、潜在欠陥の個数及び深さを確認する。

図 2 SCC 試験の手順

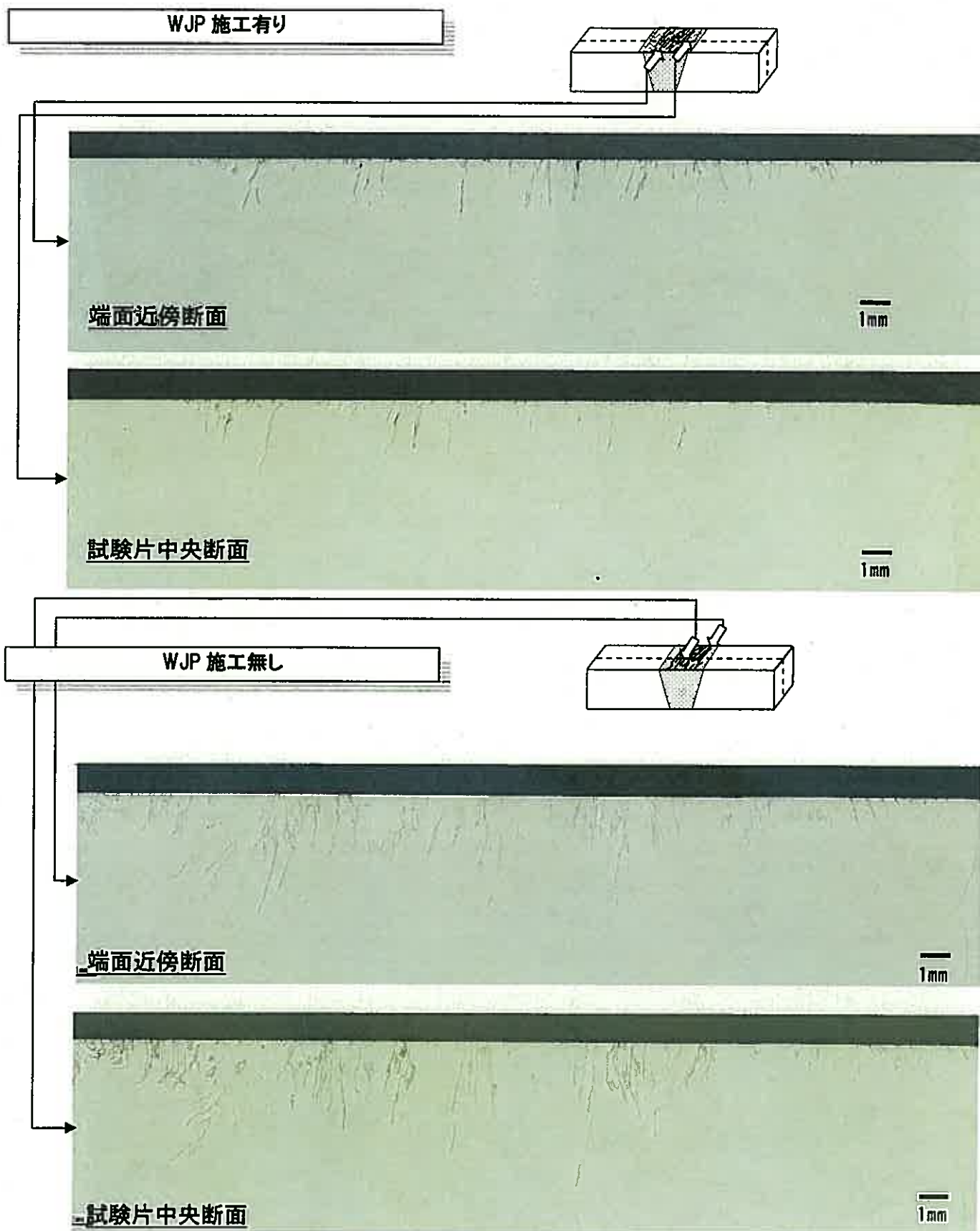


図3 WJP 施工有り及び無しの試験片を用いた SCC 試験後の潜在欠陥状況
(600 合金溶接金属による試験例)

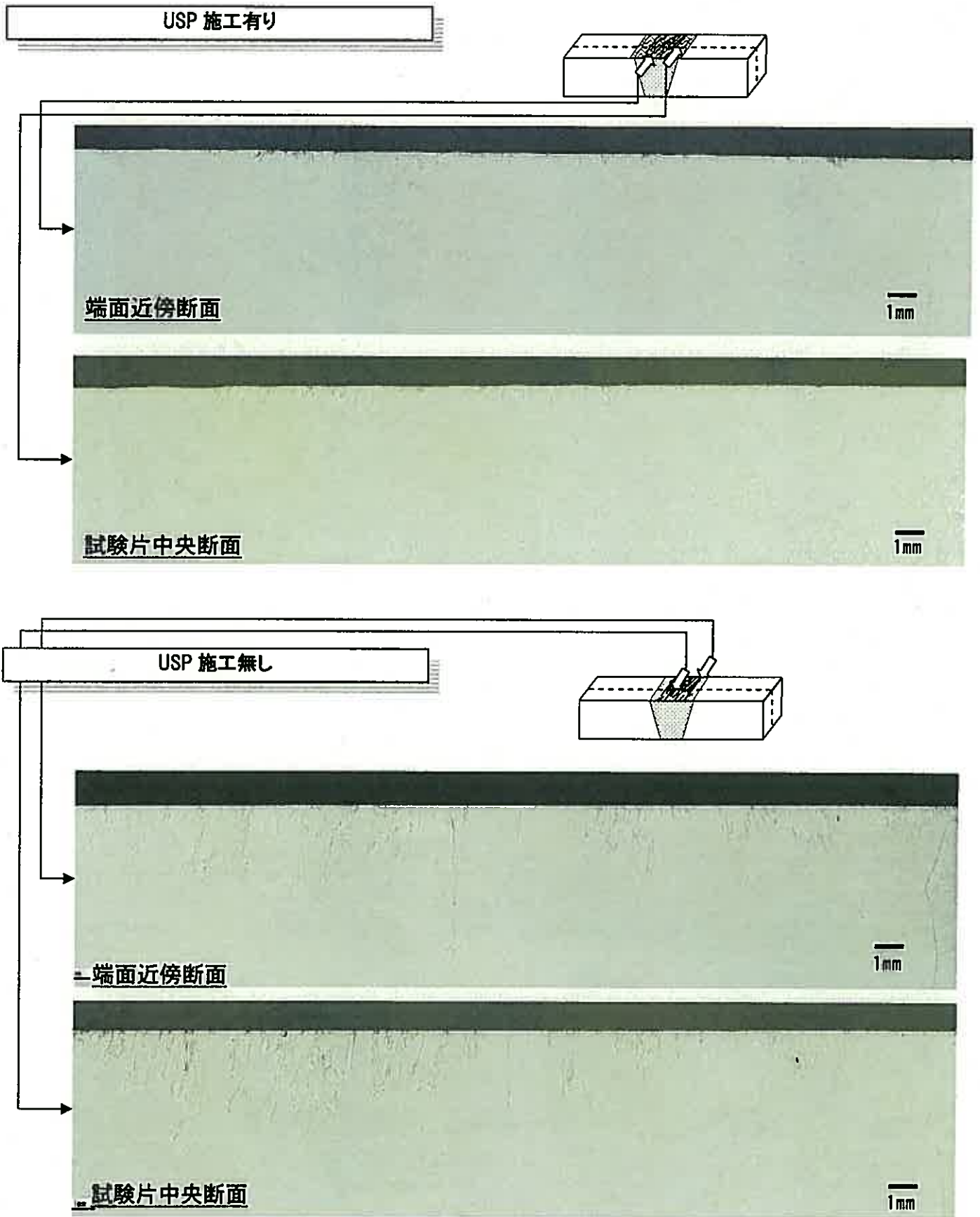


図4 USP 施工有り及び無しの試験片を用いた SCC 試験後の潜在欠陥状況
(600 合金溶接金属による試験例)

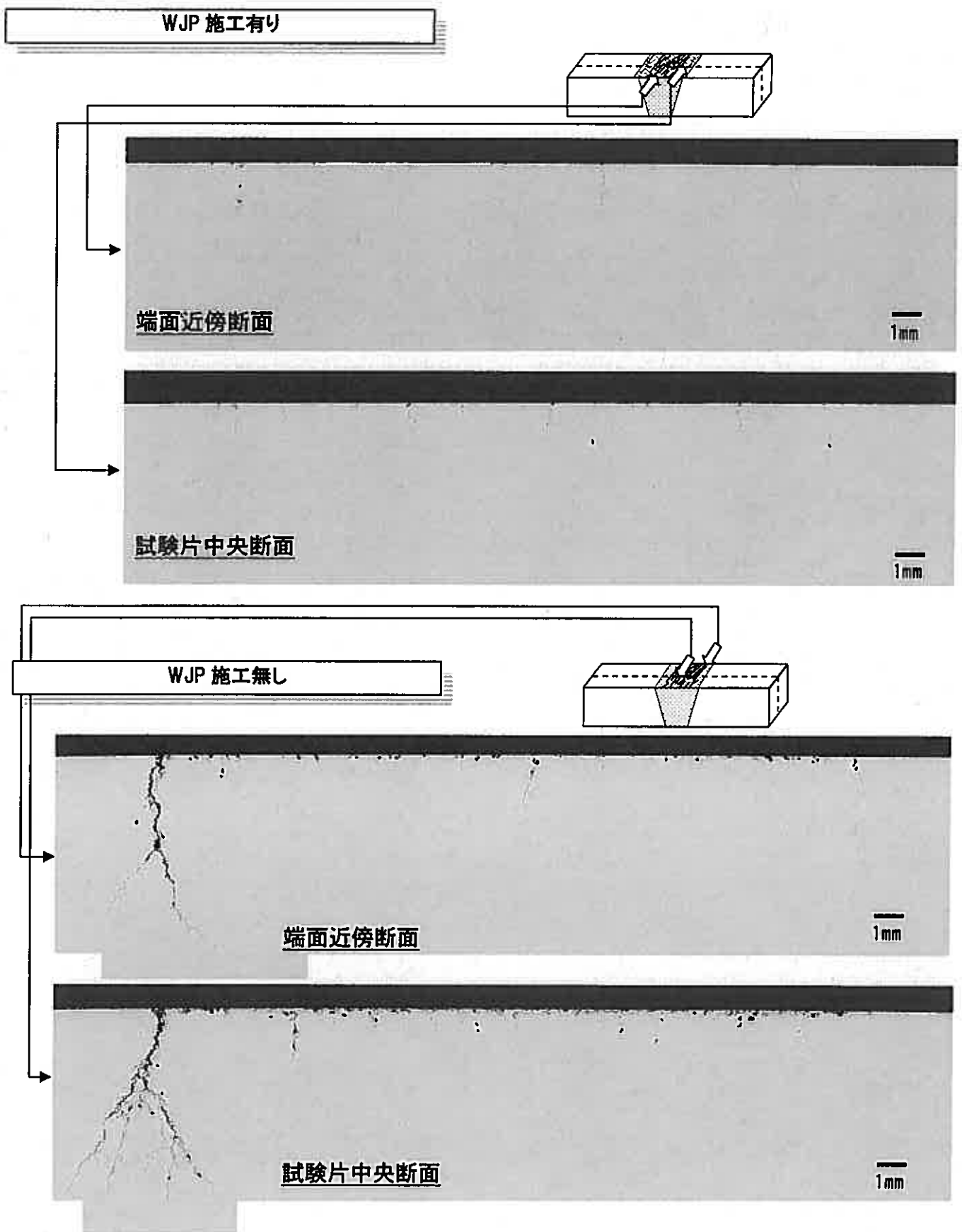


図5 WJP 施工有り及び無しの試験片を用いた SCC 試験後の潜在欠陥状況
(SUS316 母材による試験例)

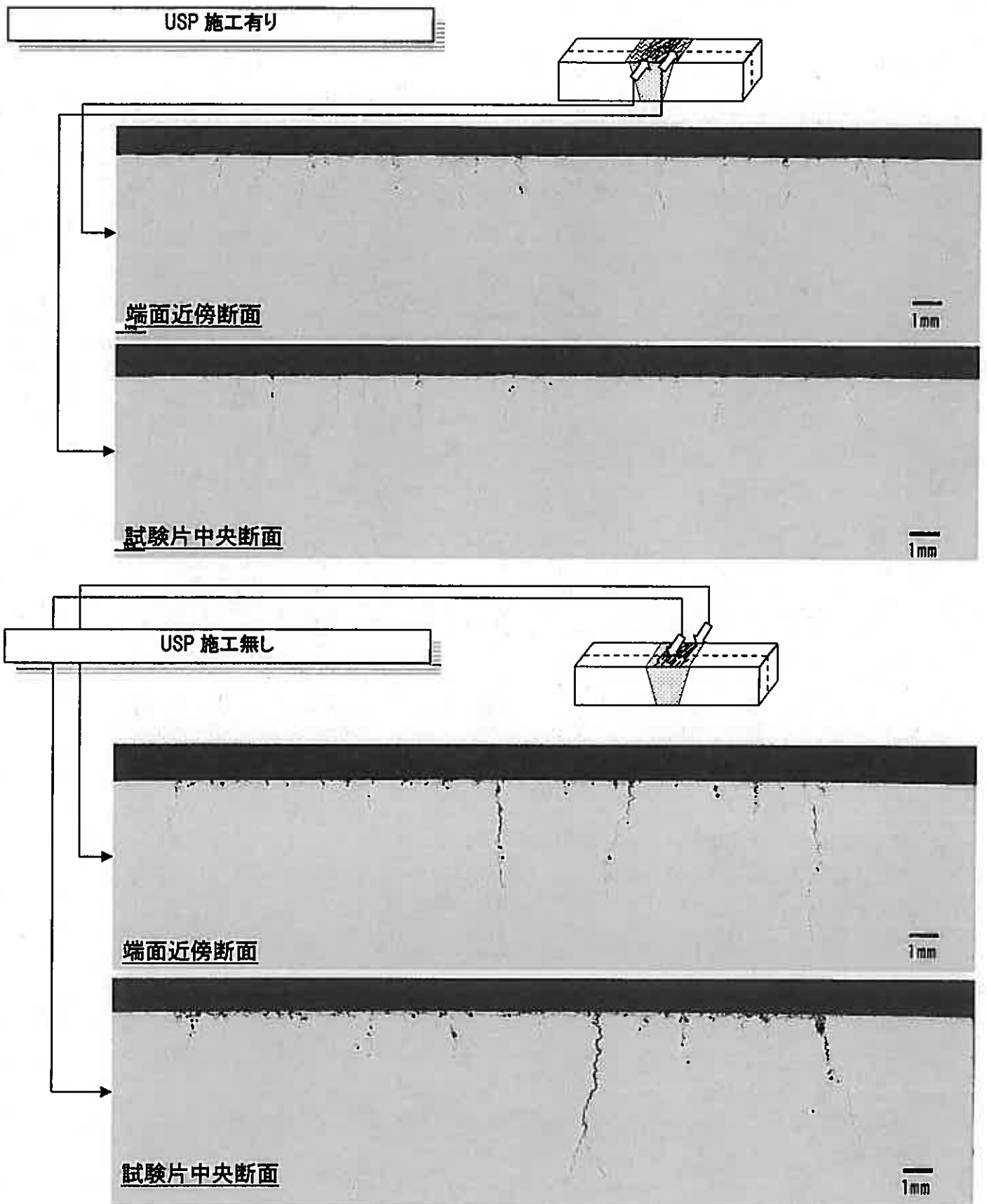


図6 USP 施工有り及び無しの試験片を用いた SCC 試験後の潜在欠陥状況 (SUS316 母材による試験例)

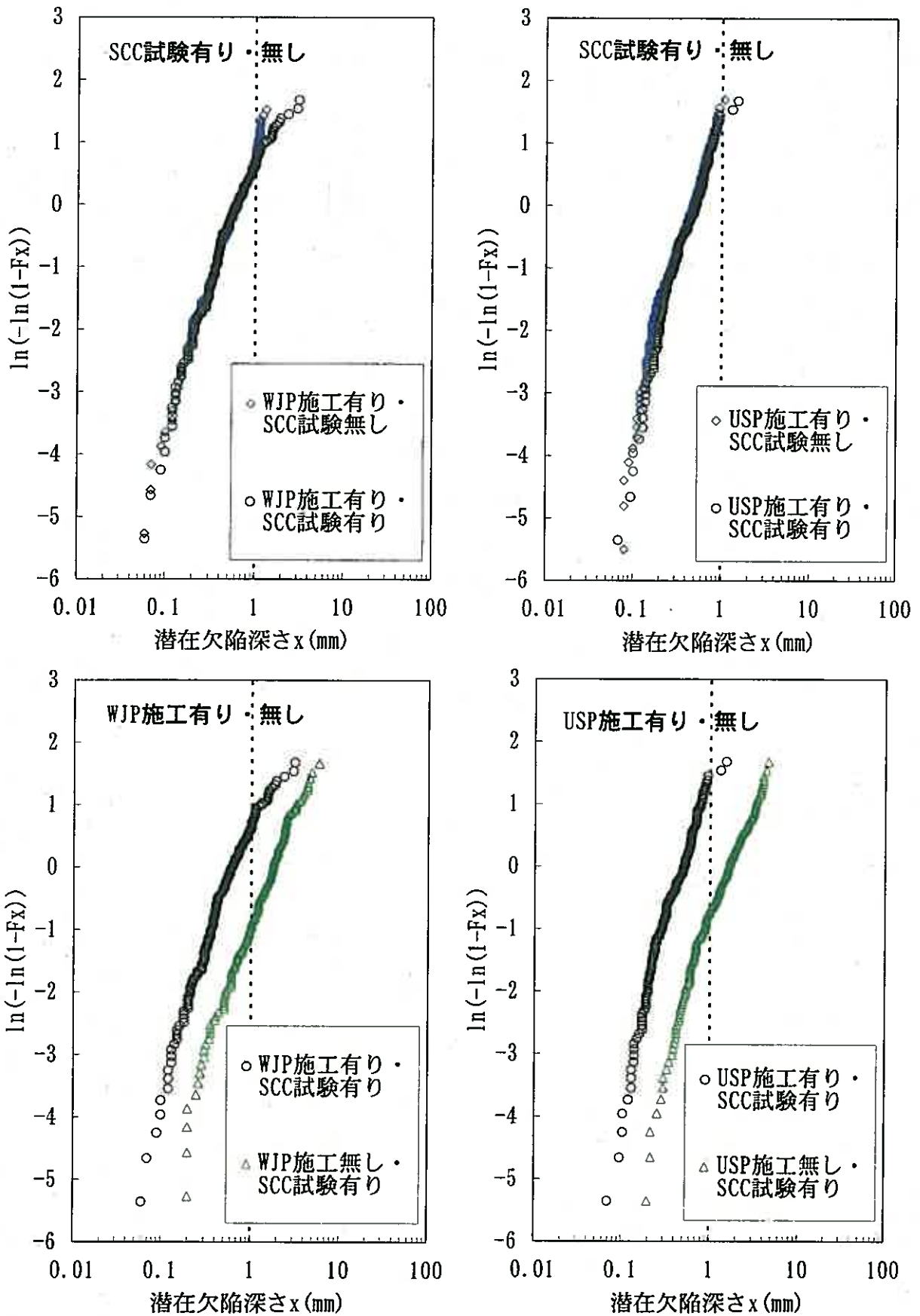


図7 SCC試験後の潜在欠陥深さのワイブルプロット結果(600合金溶接金属)

x: 潜在欠陥の深さ、Fx: 深さが横軸の値以下である潜在欠陥の現れる確率

※上段のSCC試験有り/無し2つのデータは、前者は本項の確認試験の試験片で観察されたものであり、後者は添付3「延性き裂進展確認試験」の試験片で観察されたものであり、異なる2つの試験片で観察された潜在欠陥である。

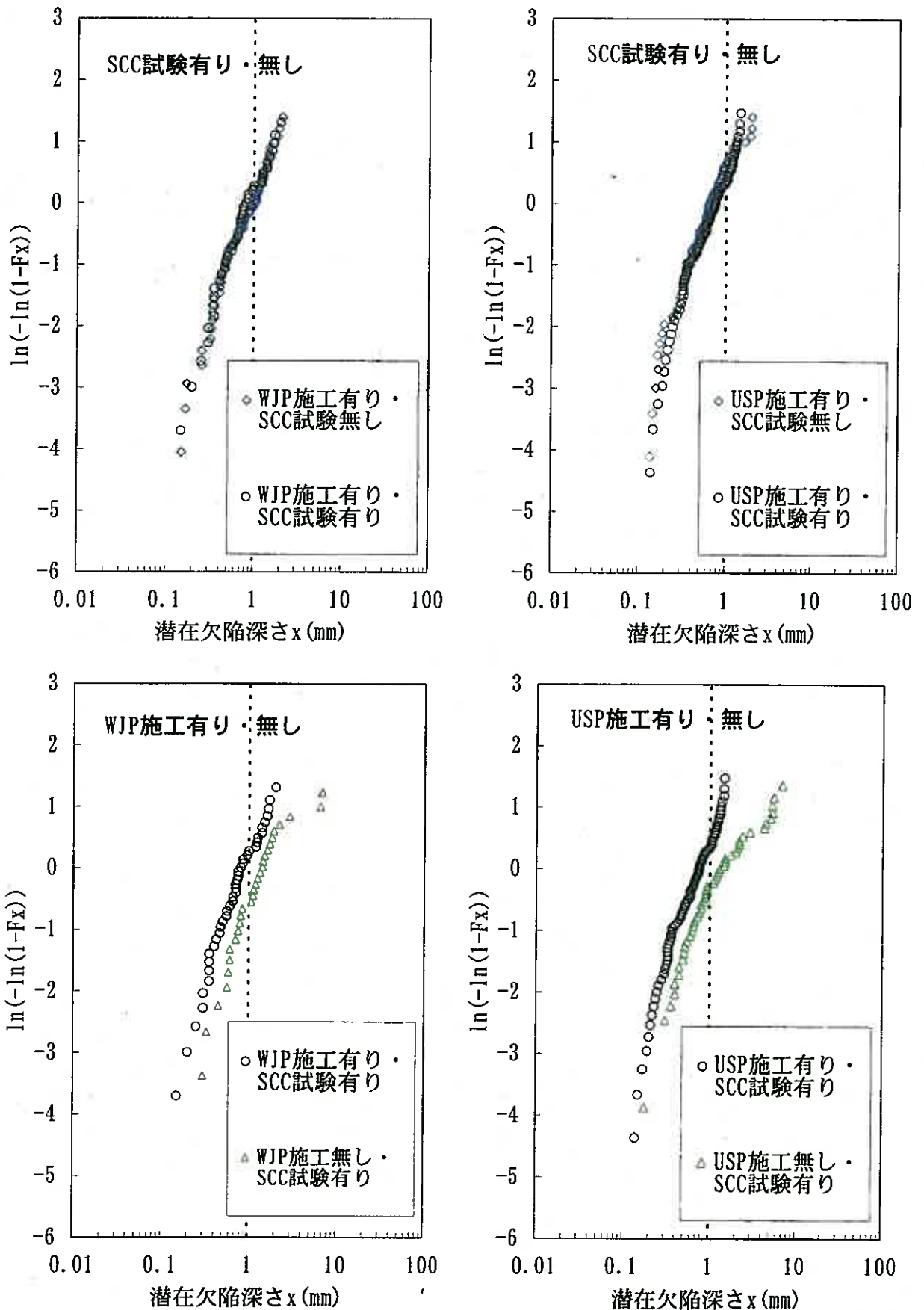


図 8 SCC 試験後の潜在欠陥深さのワイブルプロット結果 (SUS316 母材)

x : 潜在欠陥の深さ、 F_x : 深さが横軸の値以下である潜在欠陥の現れる確率

※上段の SCC 試験有り/無し 2つのデータは、前者は本項の確認試験の試験片で観察されたものであり、後者は添付 3「延性き裂進展確認試験」の試験片で観察されたものであり、異なる 2つの試験片で観察された潜在欠陥である。

表2 SCC試験有り無しとの試験片の潜在欠陥深さの差の検定結果
(600合金溶接金属、WJP/USP施工有り)

項目	施工有無	WJP施工有り		USP施工有り	
		SCC試験無し	SCC試験有り	SCC試験無し	SCC試験有り
データ数		204	211	244	211
検定統計量 t_0		-0.61		-1.14	
判断クライテリア $t(\phi, \alpha)$		1.97		1.97	
結果		t_0 < $t(\phi, \alpha)$ 有意差は認められない。		t_0 < $t(\phi, \alpha)$ 有意差は認められない。	

表3 SCC試験有り無しとの試験片の潜在欠陥深さの差の検定結果
(SUS316母材、WJP/USP施工有り)

項目	施工有無	WJP施工有り		USP施工有り	
		SCC試験無し	SCC試験有り	SCC試験無し	SCC試験有り
データ数		60	40	58	63
検定統計量 t_0		0.23		-0.47	
判断クライテリア $t(\phi, \alpha)$		1.99		1.98	
結果		t_0 < $t(\phi, \alpha)$ 有意差は認められない。		t_0 < $t(\phi, \alpha)$ 有意差は認められない。	

注記:

統計処置による評価として、t検定による平均値の差の検定を実施。

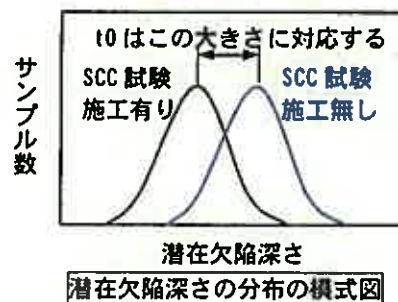
①統計検定量 t_0 (二つのデータの平均値の差の大きさに対応するパラメータ)を計算。

$$t_0 = \frac{\log \bar{x}_{\text{SCC試験無し}} - \log \bar{x}_{\text{SCC試験有り}}}{\sqrt{1/n_{\text{SCC試験無し}} + 1/n_{\text{SCC試験有り}}}}$$

\bar{x} : 潜在欠陥深さの平均値

V : 分散

n : 潜在欠陥の個数(データ数)



②判断クライテリア $t(\phi, \alpha)$ と t_0 を比較。

- ・ t_0 の絶対値が判断クライテリア $t(\phi, \alpha)$ 以上の値になれば有意差があると判定。
- ・判断クライテリアは、データ数(ϕ)と有意確率(判断を誤る確率、 α)に依存して決まる値。通常、有意確率(判断を誤る確率)は5%として設定。

表4 SCC試験有りの試験片の潜在欠陥深さの差の検定結果
(600合金溶接金属、WJP/USP施工無し/有り)

項目	施工有無	SCC試験有り			
		WJP施工無し	WJP施工有り	USP施工無し	USP施工有り
データ数		193	211	210	211
検定統計量 t_0		14.1		19.3	
判断クライテリア $t(\phi, \alpha)$		1.97		1.97	
結果		t_0 > $t(\phi, \alpha)$ 有意差有り。		t_0 > $t(\phi, \alpha)$ 有意差有り。	

表5 SCC試験有りの試験片の潜在欠陥深さの差の検定結果
(SUS316母材、WJP/USP施工無し/有り)

項目	施工有無	SCC試験有り			
		WJP施工無し	WJP施工有り	USP施工無し	USP施工有り
データ数		29	40	48	63
検定統計量 t_0		3.3		4.2	
判断クライテリア $t(\phi, \alpha)$		1.99		1.97	
結果		t_0 > $t(\phi, \alpha)$ 有意差有り。		t_0 > $t(\phi, \alpha)$ 有意差有り。	

注記：

統計処置による評価として、t検定による平均値の差の検定を実施。

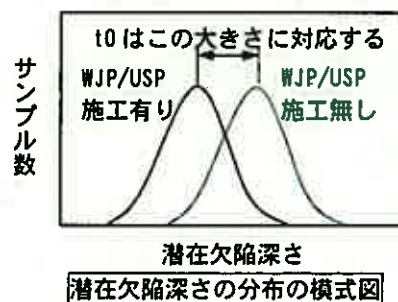
①統計検定量 t_0 (二つのデータの平均値の差の大きさに対応するパラメータ) を計算。

$$t_0 = \frac{\log \bar{x}_{\text{施工無し}} - \log \bar{x}_{\text{施工有り}}}{\sqrt{V(1/n_{\text{施工無し}} + 1/n_{\text{施工有り}})}}$$

\bar{x} : 潜在欠陥深さの平均値

V : 分散

n : 潜在欠陥の個数(データ数)



②判断クライテリア $t(\phi, \alpha)$ と t_0 を比較。

- ・ t_0 の絶対値が判断クライテリア $t(\phi, \alpha)$ 以上の値になれば有意差があると判定。
- ・ 判断クライテリアは、データ数 (ϕ) と有意確率 (判断を誤る確率、 α) に依存して決まる値。通常、有意確率 (判断を誤る確率) は5%として設定。

原子炉容器、蒸気発生器 600 系 Ni 基合金溶接金属部等の ECT による欠陥検出性について

1) 蒸気発生器及び原子炉容器のセーフエンド異種金属溶接部の ECT での欠陥検出性

蒸気発生器の出入口管台とセーフエンドの溶接部、原子炉容器の出入口管台とセーフエンドの溶接部及び安全注入管台とセーフエンドとの溶接部に対する ECT による欠陥の検出限界は、「浅田、徳久、高次、黒川、川田、平野、瀬良：PWR 容器の異種金属溶接部 ECT 検査手法の開発、日本保全学会誌、保全学 Vol.6-No.4, P38-43, 2008」により確認することが出来る（詳細は参考 1 - 1 参照）。ECT 探傷要領は以下のとおり。

項 目	仕 様
ブ ロ ー プ	単一クロスコイル（外径約 3mm）を用いたプローブ
探 傷 面	欠陥の開口面から探傷
探傷周波数	50kHz、100kHz、200kHz、400kHz
校 正	1 mm 深さスリットを全振幅 3V、位相角 165 度又は -15 度に設定

ここでは、SCC を付与した試験体に対して段階的に切削加工して、その都度 ECT で探傷するとともに、探傷終了後に破壊調査を行って実際の欠陥深さを計測している。破壊調査の結果より ECT で 0.5mm 以上の SCC は全て検出可能であったため、当該部位については検出限界を 0.5mm とした。（表 2-3 及び表 2-6, 図 3-1 参照）

2) 原子炉容器 炉内計装筒の内面の ECT での欠陥検出性

原子炉容器の炉内計装筒の内面の ECT による欠陥の検出限界は、「(財) 発電設備技術検査協会確性試験委員会；小口径管内面へのウォータージェットピーニング法適用に関する確性試験報告書(添付資料 2), 平成 13 年 1 月」により確認することが出来る（詳細は参考 1 - 2 参照）。ECT 探傷要領は以下のとおり。

項 目	仕 様
ブ ロ ー プ	単一クロスコイル（外径約 3mm）を用いたプローブ
探 傷 面	欠陥の開口面から探傷
探傷周波数	400kHz、600kHz、800kHz、990kHz
校 正	0.5 mm 深さスリットを全振幅 5V、位相角 165 度又は -15 度に設定

ここでは、さまざまな深さの SCC を付与した試験体を ECT で探傷し、探傷終了後に破壊調査を行って実際の欠陥深さを計測している。破壊調査の結果より ECT で 0.4mm 以上の SCC は全て検出可能であったため、当該部位については検出限界を 0.5mm とした。（添図 2-3 参照）

3)原子炉容器 炉内計装筒外面及びJ溶接部のECTでの欠陥検出性

原子炉容器の炉内計装筒の外面及びJ溶接部のECTによる欠陥の検出限界は、「PWR5電力及び三菱重工 共同研究；原子炉容器貫通部J溶接部等の検査技術検証に係る研究、平成19年度（最終報告書）、平成20年3月」により確認することが出来る（詳細は参考1-3参照）。ECT探傷要領は以下のとおり。

項 目	仕 様
プ ロ ー プ	単一クロスコイル（外径約3mm）を用いたプローブ
探 傷 面	欠陥の開口面から探傷
探傷周波数	50kHz、100kHz、200kHz、400kHz
校 正	1mm深さスリットを全振幅3V、位相角165度又は-15度に設定

ここでは、SCCを付与した試験体に対して段階的に切削加工して、その都度ECTで探傷するとともに、探傷終了後に破壊調査を行って実際の欠陥深さを計測している。破壊調査の結果よりECTで0.9mm以上のSCCは全て検出可能であったため、当該部位については検出限界を1.0mmとした。（表4.3.2-6及び図4.3.2-19参照）

技術論文

PWR容器の異種金属溶接部 ECT 検査手法の開発

Development of Eddy Current Testing Method for PWR Vessel's Dissimilar Metal Weld

三菱重工業株式会社	神戸造船所	浅田 義浩	Yoshihiro ASADA
三菱重工業株式会社	神戸造船所	徳久 貴一	Kiichi TOKUHISA
三菱重工業株式会社	神戸造船所	高次 正弥	Masaya TAKATSUGU
三菱重工業株式会社	高砂研究所	黒川 政秋	Masaaki KUROKAWA
三菱重工業株式会社	高砂研究所	川田 かよ子	Kayoko KAWATA
関西電力株式会社	原子力事業本部	平野 伸朗	Shinro HIRANO
関西電力株式会社	原子力事業本部	瀬良 健彦	Takehiko SERA

Eddy Current testing (ECT) for detecting stress corrosion cracks (SCCs) in the vessel's dissimilar metal weld of PWR plants was carried out. Appropriate ECT with a single cross-coil can detect shallow artificial SCCs with depth of 0.5mm or over. And magnetic saturation method is very effective for decreasing noise signals come from permeability change in the boundary region between overlay and buttering of safe-end.

Keywords: ECT testing, Nickel-Alloy steel welding, Dissimilar metal weld, SCC, PWR, RV, SG

1. 緒言

近年、加圧水型原子力発電プラント(以下、PWR)のニッケルクロム鉄合金(以下、600系合金)溶接部からの応力腐食割れ(以下、SCC)損傷事例が国内外において発生しており¹⁾、異種金属溶接部を対象とした検査技術の研究が精力的に進められている²⁾。

圧力容器や蒸気発生器の出入口管台などの大口径異種金属溶接部は、内面アクセスが可能のため欠陥開口面側からの検出性が高い渦流探傷検査(ECT)の適用が検討されている。ECT検出性について、これまで種々の研究が実施されているが³⁾⁴⁾⁵⁾、600系合金特有の透磁率変化によるノイズ影響下での試験データは少ないため、当該部を対象としたECT検出性に関するデータベース蓄積が望まれている。そこで、本研究では圧力容器や蒸気発生器の出入口管台の異種金属溶接部を模擬した平板試験体を製作し、試験体に模擬SCCを付与

した後に、ECT探傷を行って当該部位でのSCC検出性を評価した。また、容器管台の異種金属溶接部を模擬した試験体を製作し、EDMスリットを付与した後にECT探傷を行って、透磁率変化によるノイズが発生する場合の欠陥検出性も評価した。

2. ECT探傷試験

2.1 試験体の製作及び試験手順

製作したSCC付与平板試験体の主な仕様を表2-1に示す。平板試験体はSUS316の平板に600系合金相当の溶材を部分的に溶接して製作した。

始めに平板試験体の溶接部に放電加工によりスタートノッチを付与し、次いでポリチオン酸液中で4点曲げにより応力を付加してSCCを溶接金属中に挿入した。目視やPT等でSCC付与を確認後に、表面を切削してスタートノッチを除去して探傷面を平滑にした。試験体形状とSCC付与位置を図2-1に、完成したSCCの外観(PT写真)例を図2-2に示す。

表2-1 平板試験体の仕様

欠陥仕様	目視厚さ mm	付与部位	体数	個数
SCC	0.5~数 mm	600系溶接部	5	15

◆連絡先:黒川 政秋

〒676-8686 兵庫県高砂市荒井町新浜2-1-1
三菱重工業株式会社 技術本部高砂研究所
電子・光技術研究室
E-mail: masaaki_kurokawa@mhi.co.jp

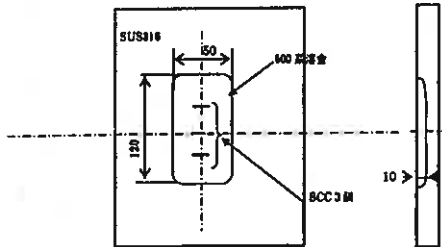


図 2-1 平板試験体

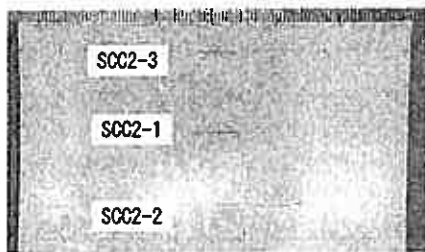


図 2-2 完成した SCC 試験体 (試験体 2) の外観

ECT 探傷試験では、試験体表面を段階的に切削加工して、その都度、同一プローブによる探傷を実施した。探傷試験終了後に破壊調査を行って深さを求めた。探傷時の SCC 深さも破壊調査時の SCC 深さから求めた。

なお、平板試験体は合計 5 体、試験体 1 体当たり 3 個の SCC を付与したため合計 15 個の SCC を製作した。

2.2 SCC 検出試験

ECT 探傷試験要領の概略を表 2-2 に示す。ECT 探傷試験では、外径約 3mm の自己誘導・自己比較方式のクロスコイルを用いたプローブを使用し、コイルと被検体表面とのリフトオフはすべての試験で一定の約 0.5mm とした。

表 2-2 ECT 探傷要領の概要

項目	仕様
プローブ	単一クロスコイル (外径約 3mm) を用いたプローブ
探傷面	欠陥の開口面から探傷
探傷周波数	50kHz, 100kHz, 200kHz, 400kHz
校正	1mm 深さスリットを全振幅 3V, 位相角 15 度に設定

コイルの感度・位相調整は、使用したコイル径に比較して十分に長い深さ 1mm の放電加工スリット (EDM スリット) の信号を全振幅 3V, 位相角 15 度に設定した。

また、各試験体の表面切削量は、検出した SCC 信号レベルを参考にして、SCC 深さで 0.5mm~5mm 程度の探傷データ蓄積を目標として決定した。各試験体に対し 1~3 回程の表面切削加工を行い、その都度 ECT 探傷を行った。

データ採取は、軸方向 1mm ピッチ、周方向 0.5mm ピッチとした。また、探傷では、50、100、200、400kHz の 4 周波数を使用したが、検出性に関しては各周波数で有意な差は見られなかったため代表として 400kHz の探傷結果を図 2-3 に示す。

周波数 400kHz の信号振幅と位相角をまとめて表 2-3 に示す。予想される様に表面切削を行うことで信号振幅は単調に減少した。欠陥はすべて開口しているため、位相角変化は小さかった。また、製作したすべての平板試験体で、SUS316 と 600 系溶金境界に欠陥検出に障害となるノイズは観察されなかった。

表 2-3 表面切削後の ECT 探傷試験結果 (周波数 400kHz)

欠陥番号		表面切削量 mm									
		0	0.5	0.7	1.0	1.5	1.8	2.0	3.0	3.2	
1-1	電圧, V	1.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	位相角, 度	156	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1-2	電圧, V	2.8	—	—	—	—	0.56	—	—	—	—
	位相角, 度	154	—	—	—	—	153	—	—	—	—
1-3	電圧, V	2.5	—	—	—	—	0.81	—	—	—	—
	位相角, 度	162	—	—	—	—	164	—	—	—	—
2-1	電圧, V	3.1	2.2	2.3	—	—	—	—	—	—	—
	位相角, 度	152	148	148	—	—	—	—	—	—	—
2-2	電圧, V	2.7	2.5	2.3	—	—	—	—	—	—	—
	位相角, 度	153	157	157	—	—	—	—	—	—	—
2-3	電圧, V	2.5	1.9	1.8	—	—	—	—	—	—	—
	位相角, 度	151	153	148	—	—	—	—	—	—	—
3-1	電圧, V	2.0	1.1	0.74	—	—	—	—	—	—	—
	位相角, 度	157	162	162	—	—	—	—	—	—	—
3-2	電圧, V	2.2	1.8	1.4	—	—	—	—	—	—	—
	位相角, 度	162	156	161	—	—	—	—	—	—	—
3-3	電圧, V	3.0	1.9	1.8	—	—	—	—	—	—	—
	位相角, 度	152	159	154	—	—	—	—	—	—	—
4-1	電圧, V	3.3	—	—	—	—	—	2.0	0.9	0.4	—
	位相角, 度	148	—	—	—	—	—	157	170	178	—
4-2	電圧, V	3.3	—	—	—	—	—	1.9	0.7	0.2	—
	位相角, 度	151	—	—	—	—	—	153	169	166	—
4-3	電圧, V	3.4	—	—	—	—	—	1.6	0.5	—	—
	位相角, 度	150	—	—	—	—	—	155	184	—	—
5-1	電圧, V	4.0	4.4	—	3.8	3.8	—	—	—	—	—
	位相角, 度	153	152	—	150	152	—	—	—	—	—
5-2	電圧, V	3.1	3.5	—	3.4	3.2	—	—	—	—	—
	位相角, 度	149	143	—	147	145	—	—	—	—	—
5-3	電圧, V	4.5	4.5	—	4.4	4.1	—	—	—	—	—
	位相角, 度	149	149	—	148	149	—	—	—	—	—

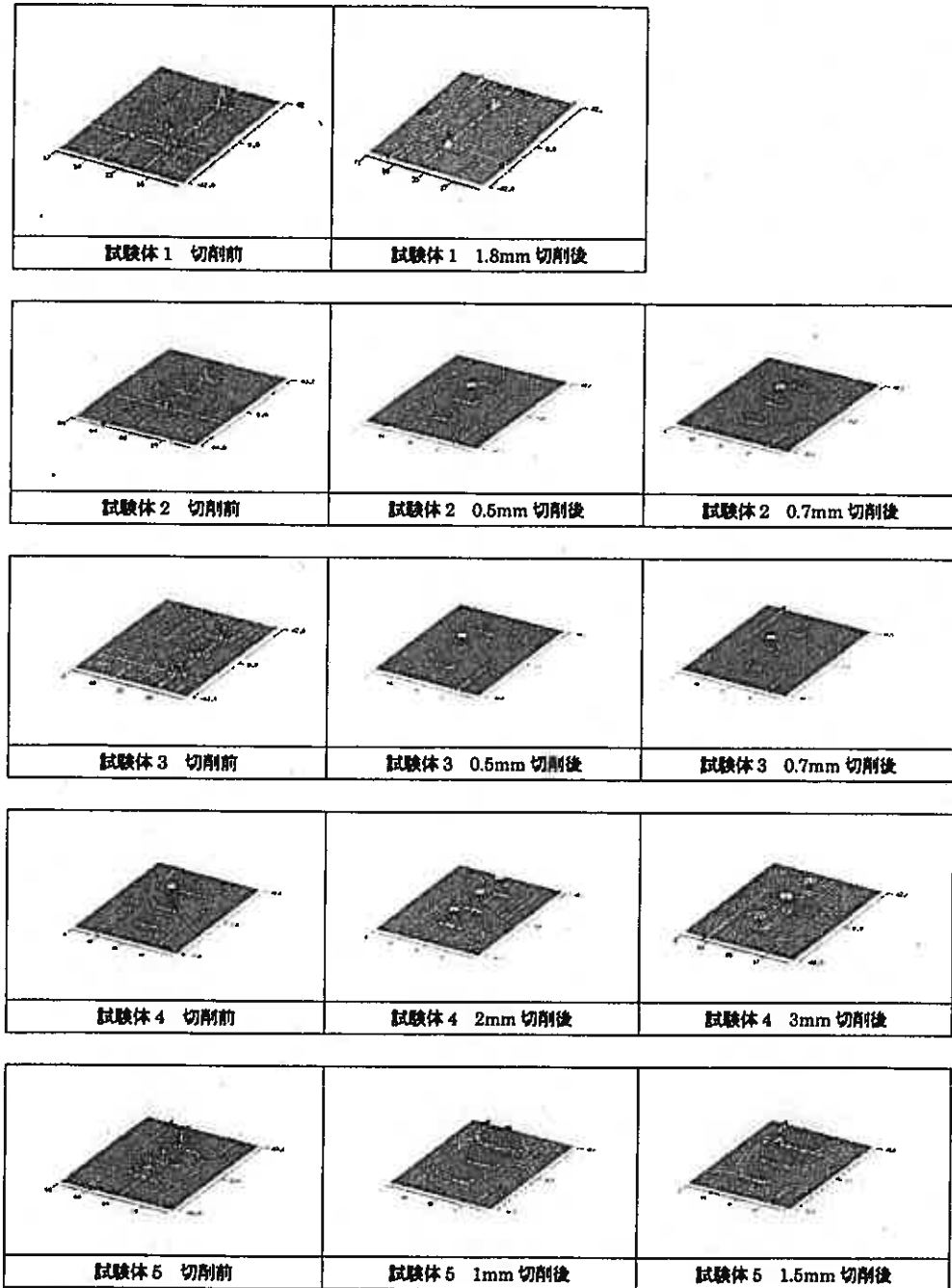


図 2-3 探傷波形 (Cスコープ, 400kHz)

表 2-4 曲率の影響確認結果

EDM スリット	試験体	平板		管台模擬	
		長さ	深さ	長さ	深さ
		3mm	3mm	3mm	3mm
		1mm	2mm	1mm	2mm
	電圧, V	3.6	4.5	3.6	4.7
	位相角, 度	158	152	158	152
	探傷データ (400kHz)				

SCC1-1 は 1.8mm 切削時に消失したため、深さを求めることができなかったが、それ以外の 14 個の SCC は最終の表面切削後もすべて検出可能であった。

なお、平板と管台形状で、欠陥信号に有意な差がないことは、表 2-4 に示すように EDM スリット試験体を用いて確認した。

2.3 磁気飽和型 ECT

本研究で製作した平板 SCC 試験体では透磁率変化に起因する境界ノイズは観察されなかったが、実機モックアップ形状の試験体では境界部ノイズが観察された。

図 2-4 に試験で使用した压力容器出口管台形状の異種金属溶接部模擬試験体の仕様を示す。試験体には、多数の周方向 EDM スリットが付与されている。通常 ECTプローブと永久磁石により磁気飽和した ECTプローブでの探傷結果を図 2-5 に示す。

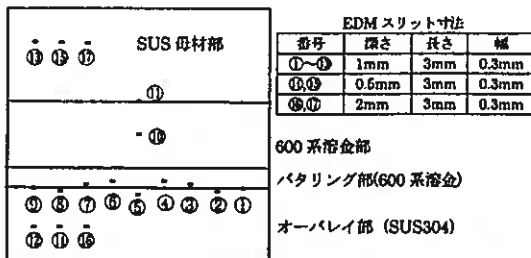


図 2-4 異種金属溶接部模擬試験体

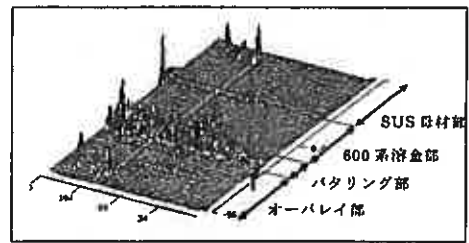
通常 ECT プローブによる探傷では、オーバレイ部とバタリング境界部で透磁率変化に伴うノイズが発生するため、この部分での欠陥検出性が低下していること

が確認できる。

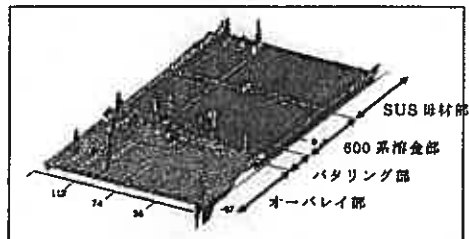
一方、磁気飽和型 ECT ではこのノイズが大幅に低減していることが確認できる。磁気飽和型の場合に印可しているコイル近傍での磁束密度は約 1500 ガウス程度であり、磁石の探傷面への吸着によるプローブ走査障害等は発生しないレベルであった。

以上の様に、磁気飽和によりオーバレイとバタリング境界部で発生するノイズレベルを大幅に低減できることが確認できた。また、磁気飽和によりこのノイズ信号が低減されることから、この部位のノイズ発生原因が透磁率変化に起因することの確認もできたと言える。

次に、磁気飽和が欠陥信号に有意な影響を与えないことを確認するために、磁気飽和を行った状態で、SCC 検出試験で使用した平板 SCC 試験体の探傷試験も実施した。磁気飽和の有無による信号電圧と位相角の比較を表 2-5 に示す。予想通り、磁気飽和の有無で信号電圧と位相角に有意差が無く、磁気飽和が欠陥検出に影響を与えないことが確認できた。



通常 ECT



磁気飽和型 ECT

図 2-5 通常 ECT と磁気飽和型 ECT の比較

表 2-5 磁気飽和の有無による信号の比較 (周波数 400kHz)

欠陥 番号	磁気飽和無し		磁気飽和有り		比較	
	電圧 V	位相角 度	電圧 V	位相角 度	電圧比 %	位相角 差度
2-1	3.1	152	3.2	155	96	-3
2-2	2.7	153	2.9	162	96	-9
2-3	2.5	151	2.5	149	98	2
3-1	2.0	153	2.0	157	99	-4
3-2	2.2	162	2.2	160	100	2
3-3	3.0	152	2.7	153	112	-1
4-1	3.3	148	3.2	147	104	1
4-2	3.3	151	3.2	155	105	-4
4-3	3.4	150	3.5	152	97	-2
5-1	4.0	153	4.0	151	99	2
5-2	3.1	149	3.3	147	94	2
5-3	4.5	149	4.5	149	99	0

2.4 破壊調査

表面切削後の比較的浅い SCC の PT 写真及び破壊調査結果を図 2-6 に示す。破壊調査では、浅い SCC の内、SCC1-2 と SCC1-3 は、欠陥直交方向に切断して断面ミクロ観察で欠陥深さを測定した。それ以外の SCC はすべて疲労による破面開放を行って欠陥深さを測定した。破壊調査のまとめを表 2-6 に示す。

表 2-6 破壊調査のまとめ

欠陥番号	磁気飽和 mm	備考
1-1	-	1.8mm 切削後消失
1-2	0.6	1.8mm 切削
1-3	0.5	同上
2-1	3.2	0.5mm、0.7mm 切削
2-2	2.6	同上
2-3	2.7	同上
3-1	1.3	同上
3-2	1.9	同上
3-3	1.8	同上
4-1	0.5	2mm、3mm、3.2mm 切削
4-2	0.5	同上
4-3	0.6	2mm、3mm 切削
5-1	5.0	0.5mm、1.0mm、1.5mm 切削
5-2	4.9	同上
5-3	5.0	同上

3. 試験結果の評価

SCC 欠陥深さと ECT 検出信号電圧の関係を図 3-1 に示す。破壊調査結果から、クロスコイル型 ECT プロブは、平板試験体で深さ 0.5mm~1mm 程度の SCC の検出が可能であった。また、検出信号レベルは深さ 5mm 程度まで欠陥深さにほぼ比例する傾向を示した。

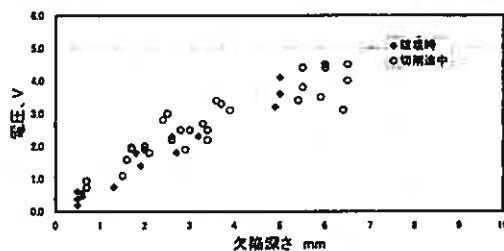


図 3-1 欠陥深さと ECT 検出信号の関係

4. まとめ

ECT 検出性能に関し、下記の知見が得られた。

- ① クロスコイル型 ECT プロブを用いて平板 SCC 試験体を探傷した結果、深さ 0.5mm~1mm 程度の SCC を検出できた。検出信号レベルは深さ 5mm 程度まで欠陥深さにほぼ比例する傾向を示した。
- ② 磁気飽和により、オーバーレイとバタリング境界部に発生する透磁率変化に起因するノイズを大幅に低減することが可能である。また、磁気飽和は、SCC 検出信号の振幅・位相に影響を与えない。

謝辞

本研究を行うに当たり、PWR 電力各社からデータ開示を含む種々のご協力をいただきました。関係者の御協力に深く感謝いたします。

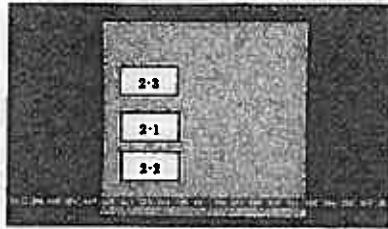
参考文献

- [1] 高原、渡辺、“米国の加圧水型原子力発電所における Alloy 600 製圧力バウンダリー構成機器の 1 次冷却水応力腐食割れ事例の傾向分析”、日本原子力学会論文誌、Vol.5-No.4、pp282-291、2006。
- [2] 原子力安全基盤機構、“平成 17 年度ニッケル基金合金溶接部の報告書”、2006。
- [3] 櫻井、黄、高木、内一、“数値シミュレーション支援によるアレイマルチコイル型渦電流探傷プロブの開発”、日本機械学会論文集(A)、Vol.68-No676、

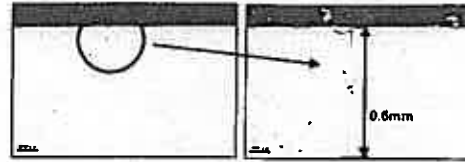
pp1801-1808, 2002.

- [4] 大島、橋本、“渦電流探傷試験における SCC の数値解析モデル化の検討”、日本 AEM 学会誌、Vol.10-No.4, pp348-388, 2002.
- [5] 長屋、高木、黄、内一、“テンプレートマッチングを用いた画像処理による渦電流探傷信号からの複数欠陥の同定”、日本機械学会論文集(A)、Vol.69-No.684, pp60-67, 2003.

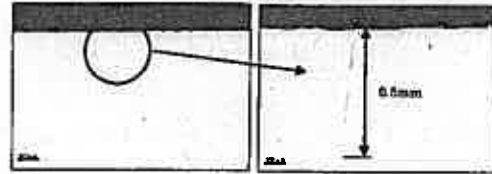
(平成 19 年 7 月 30 日)



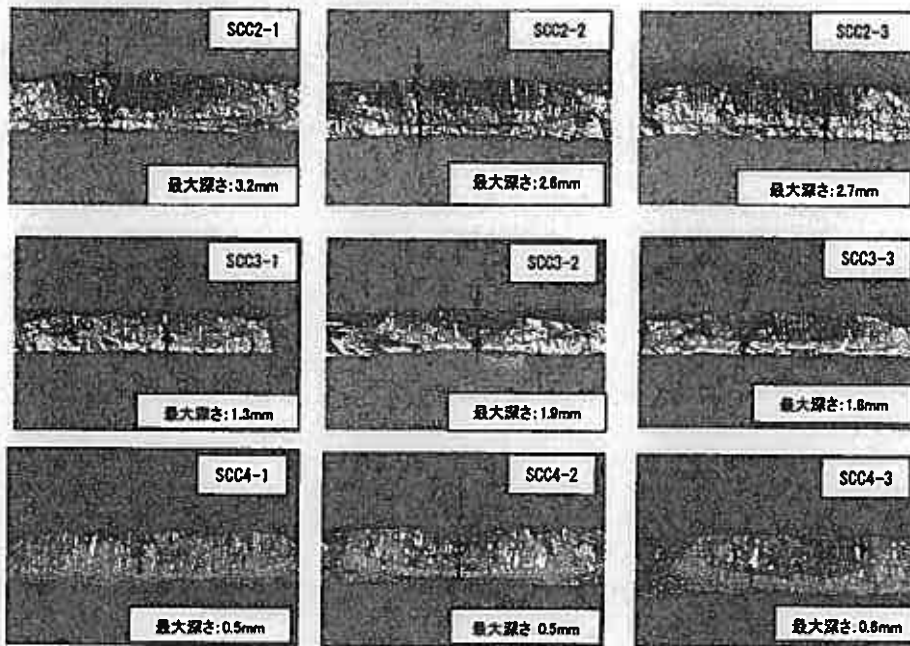
試験体 2 の外観及び PT 検査状況



SCC1-2 の断面ミクロ



SCC1-3 の断面ミクロ



試験体 2~4 の外観及び PT 検査状況

図 2-6 破壊調査結果

小口径管内面への
ウォータージェットピーニング法適用
に関する確性試験報告書

平成13年1月

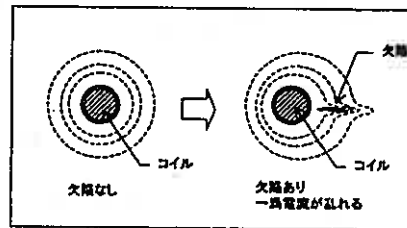
財団法人 発電設備技術検査協会

添付資料-2

施工前検査法としての渦電流探傷試験 (ECT) 概要

ECTの原理

- ECT(渦流探傷試験)
 - ・コイル電磁誘導の原理により被検体表面に渦電流を発生させ、欠陥による渦電流の乱れにより欠陥を検出する
 - ・一般的に表面及び表面近傍の欠陥検出に広く用いられる

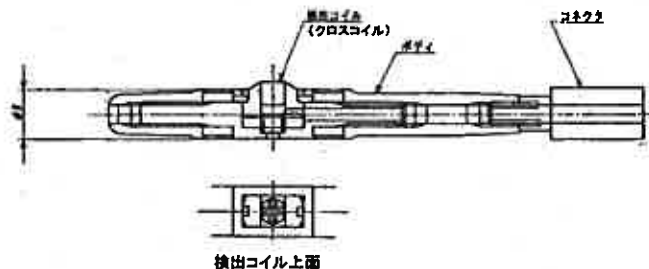


原理図

図2-1 ECTの原理

炉内計装筒ECT技術

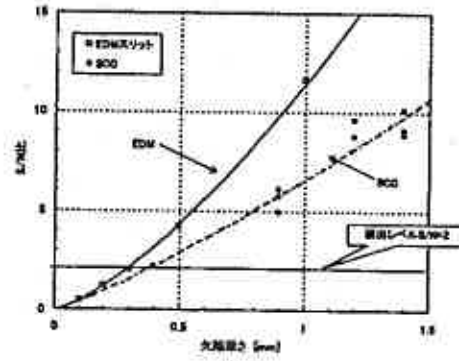
- クロスコイル形式(十字型コイル)を採用
蒸気発生器伝熱管検査の供用期間中検査などで、これまでに十分に適用されている技術であり、実績が豊富である。
⇒ 信頼性が高い



炉内計装筒用クロスコイル型ECTプローブ

図2-2 炉内計装筒 ECT 概要

ECT検出能力



↓
深さ0.5mm以上のSCCを検出可能

添図 2-3 ECT 検出能力

共同研究報告書

原子炉容器貫通部J溶接部等の検査技術検証に係る研究

平成19年度

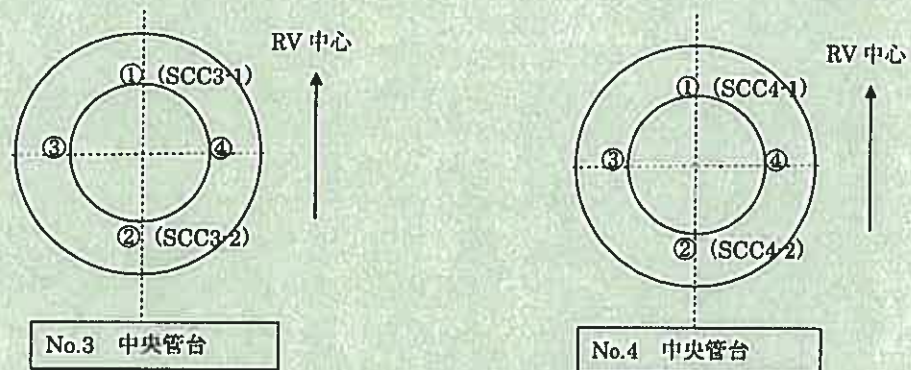
(最終報告書)

平成20年 3月

関西電力株式会社
北海道電力株式会社
四国電力株式会社
九州電力株式会社
日本原子力発電株式会社
三菱重工業株式会社

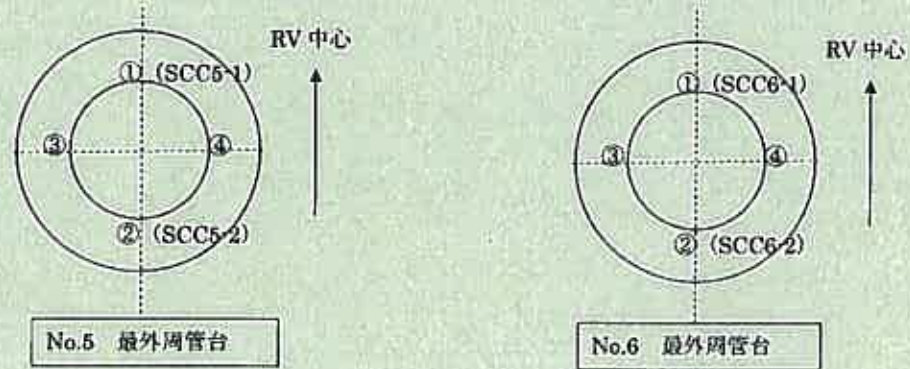
表 4.1.4.3 BMI-J モックアップ試験体の仕様

欠陥種類	試験体 No.	モックアップ形状	深さ mm	長さ mm	欠陥方向	挿入位置	個数
SCC	3	中央	数 mm	数 mm	周	180° 間隔	2
	4	中央	同上	同上	半径	同上	2
	5	最外周	同上	同上	同上	同上	2
	6	最外周	同上	同上	同上	同上	2
EDM スリット	3	中央	0.5, 1.0	3, 5	半径	同上	2
	4	最外周	同上	同上	周	同上	2
	5	中央	同上	同上	半径・周	同上	2
	6	最外周	同上	同上	同上	同上	2
	8	最外周	0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	3, 5, 10	同上	30° 間隔	12
9	同上	同上	同上	同上	同上	12	



試験体	番号	欠陥種類	欠陥方向	長さ mm	深さ mm
No.3	①(SCC3-1)	SCC	周	—	—
	②(SCC3-2)		周	—	—
	③	EDM	半径	3	0.5
	④		半径	3	1.0
No.4	①(SCC4-1)	SCC	半径	—	—
	②(SCC4-2)		半径	—	—
	③	EDM	周	5	0.5
	④		周	5	1.0

図 4.1.4.7 BMI-J 溶接部へ欠陥付与位置 No. 3 及び No.4



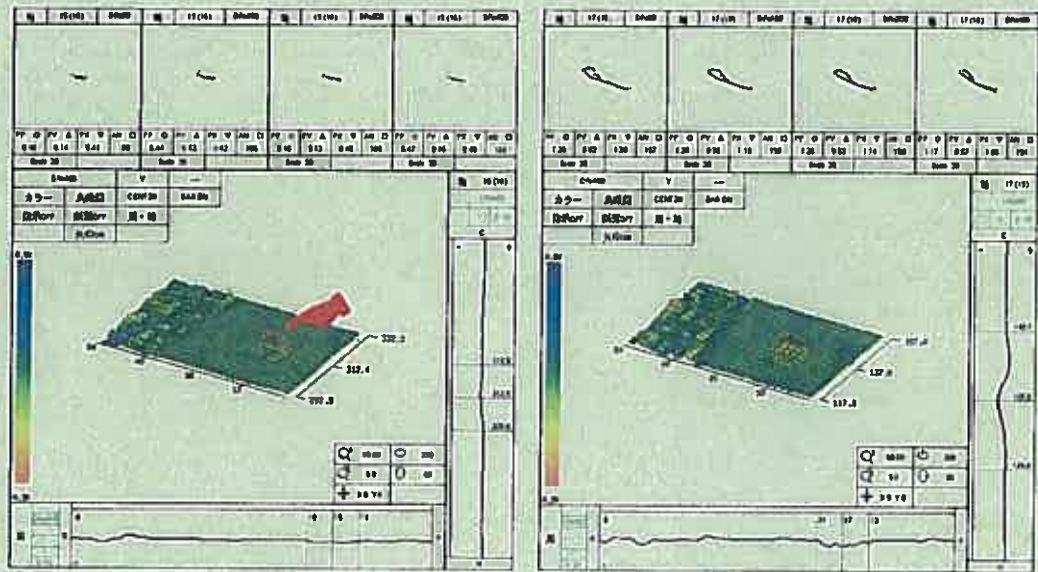
試験体	番号	欠陥種類	欠陥方向	長さ mm	深さ mm
No.5	① (SCC5-1)	SCC	半径	—	—
	② (SCC5-2)		半径	—	—
	③	EDM	半径	5	1.0
	④		周	5	0.5
No.6	① (SCC6-1)	SCC	半径	—	—
	② (SCC6-2)		半径	—	—
	③	EDM	半径	3	2.0
	④		周	5	1.0

図 4.1.4-8 BMI-J 溶接部へ欠陥付与位置 No.5 及び No.6

表 4.3.2-6 試験体 No.3,4,5 及び 6 試験結果 (SCC 及び EDM スリット)

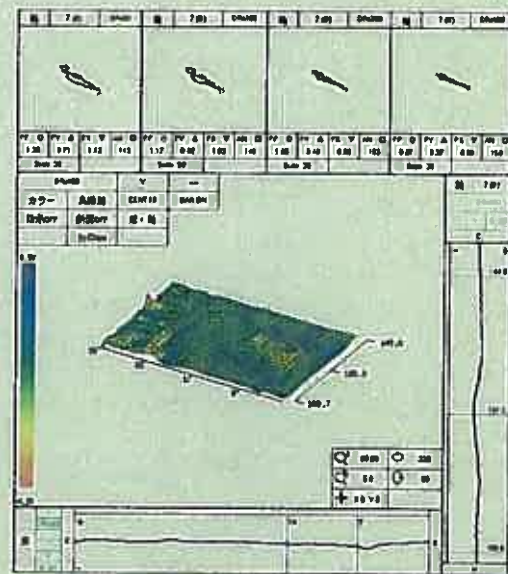
試験体	欠陥 番号 No	欠陥 種類	モックアップ	検出可否	
				表面切削前 探傷	1回目表面 切削後探傷
No.3	① (SCC3-1)	SCC	中央管台	○(0.9)	—
	② (SCC3-2)	SCC	同上	○(2.4)	○(1.6)
	③	EDM	同上	○(0.5)	—
	④	EDM	同上	○(1.0)	—
No.4	① (SCC4-1)	SCC	同上	○(3.5)	○(1.4)
	② (SCC4-2)	SCC	同上	○(1.9)	○(1.2)
	③	EDM	同上	○(0.5)	—
	④	EDM	同上	○(1.0)	—
No.5	① (SCC5-1)	SCC	最外周	○(1.3)	○(1.1)
	② (SCC5-2)	SCC	最外周 (狭隙部)	○(1.9)	○(1.8)
	③	EDM	最外周	○(1.0)	—
	④	EDM	最外周	○(0.5)	—
No.6	① (SCC6-1)	SCC	最外周	○(1.6)	○(1.4)
	② (SCC6-2)	SCC	最外周 (狭隙部)	○(1.1)	○(1.0)
	③	EDM	最外周	○(1.0)	—
	④	EDM	最外周	○(2.0)	—

○は検出可を示す。また、検出可否の括弧内数値は探傷時の欠陥深さ (mm) を示す



切削前(深さ 0.9mm)

切削前(深さ 2.4mm)



切削後(深さ 1.6mm)

① (SCC3-1)

② (SCC3-2)

図 4.3.2-19 BMI-J 溶接部試験の探傷結果 (試験体 No.3 SCC ①、②)

注) 代表例として試験体 No. 3 の探傷結果を添付。



×2



×5

図 4.4.5-1 J溶接部試験体の破壊調査結果 SCC3-1

140

注) 代表例として試験体 No.3 (欠陥番号①、欠陥深さ 0.9 mm) の破壊調査結果を添付。



図 4.4.5.2 J溶接部試験体の破壊調査結果(SEM 観察) SCC3-1

注) 代表例として試験体 No.3 (欠陥番号①、欠陥深さ 0.9 mm) の破壊調査結果を添付。