

柏崎刈羽原子力発電所 1号機

水位計装配管取替工事に関する調査結果について

平成21年6月

東京電力株式会社

## 目次

1 . はじめに.....	1
2 . 調査検討体制 .....	1
3 . 事象の概要.....	1
4 . 調査検討結果 .....	4
( 1 ) 現時点における技術基準適合性.....	4
a . 検査による健全性確認.....	4
b . 解析による健全性確認.....	4
( 2 ) 補修等の措置に係る当時の施工状況.....	4
( 3 ) 本件の不適合管理状況及び原子力安全・保安院に報告を行わなかった理由.....	7
a . 調査により認定された事実関係.....	7
b . 本件の不適合管理状況.....	9
c . 原子力安全・保安院に報告を行わなかった理由.....	11
( 4 ) き裂（ひび）の発生要因の特性等 .....	13
a . ひびの状況.....	13
b . ひびの発生原因調査の検証.....	15
5 . まとめ.....	17
資料 - 1 . N14 ノズルセーフエンドの検査による健全性確認	
資料 - 2 . N14 ノズルセーフエンドの解析による健全性確認	
資料 - 3 . 当時の施工状況（具体的作業内容）	
資料 - 4 . 当時のひびの状況	
資料 - 5 . 当時のサンプル調査結果	
資料 - 6 . ソケット継手のモックアップによる残留応力測定	
資料 - 7 . ひびの進展形態に基づく発生メカニズムの推定	
資料 - 8 . 溶接熱影響部の割れ感受性	

## 1. はじめに

当社は、「柏崎刈羽原子力発電所1号機に関する報告徴収について」(経済産業省 平成21年2月19日)等(1)に基づき、柏崎刈羽原子力発電所1号機第10回定期検査時に行われた原子炉水位計装配管取替工事(以下、「本件工事」という)について、調査を実施した。本報告書は、一連の報告徴収、報告指示を踏まえ、調査結果を取りまとめたものである。

- 1 「柏崎刈羽原子力発電所1号機に関する報告徴収について」(平成21年2月19日,2月26日,3月11日受領)(核原料物質,核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第67条第1項及び電気事業法第106条第1項の規定に基づく報告)

「柏崎刈羽原子力発電所1号機において平成10年に確認されたき裂に関する報告について(指示)」(平成21年3月13日受領)

更に、「平成10年に東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所第1号機において確認されたひびに関する報告について(追加指示)」(平成21年6月16日受領)

## 2. 調査検討体制

図-1に調査検討体制を示す。

当初、原子力品質監査部と専門的な立場から原子力・立地本部に属する原子力品質・安全部が社内で保管している当該工事の工事報告書、検査記録等の関連文書を調べるとともに、社員への聞き取りを行った。

また、発注先メーカー及び工事実施メーカーで保管している記録等を取り寄せて調べるとともに、必要に応じ両社に対し聞き取りを依頼し、結果の報告を受けた。

その後、調査に透明性・客観性を確保するため、原子力立地・本部から独立した組織である原子力品質監査部、原子力部門以外の社内法務部門・企画部門も参画した「柏崎刈羽原子力発電所1号機 水位計装配管取替工事に関する調査検討委員会」(主査:常務(原子力品質監査部担当))を設置して、本報告書を取りまとめた。

報告書取りまとめに当たり、関係者の記憶が薄いこと及び更なる公正性の確保のため、事実関係の調査を社外の専門家である弁護士に依頼した。3名の弁護士は、社外調査団を編成し社内関係者の聞き取りを行うとともに上記発注先メーカー及び工事実施メーカーの調査結果等も精査のうえ、それらに基づき事実関係を認定した。

## 3. 事象の概要

柏崎刈羽原子力発電所1号機で第10回定期検査(平成10年10月~平成11年1月)時に、計画的な工事として、蒸気凝縮槽の高さを下げ、水位計装配管(N14計装配管)を取り替える工事が行われた。取り替えのため、計装ノズルセーフエンド(以下、「N14ノズルセーフエンド」という)に接続する配管を接続部分で切断し、切断面を浸透探傷試験(PT)したところ、指示模様(ひびの存在)が確認された。本件工事担当箇所のグループマネージャー(以下、「GM」という)は、開先加工(溶接準備のために溶接面を削る加工)をし

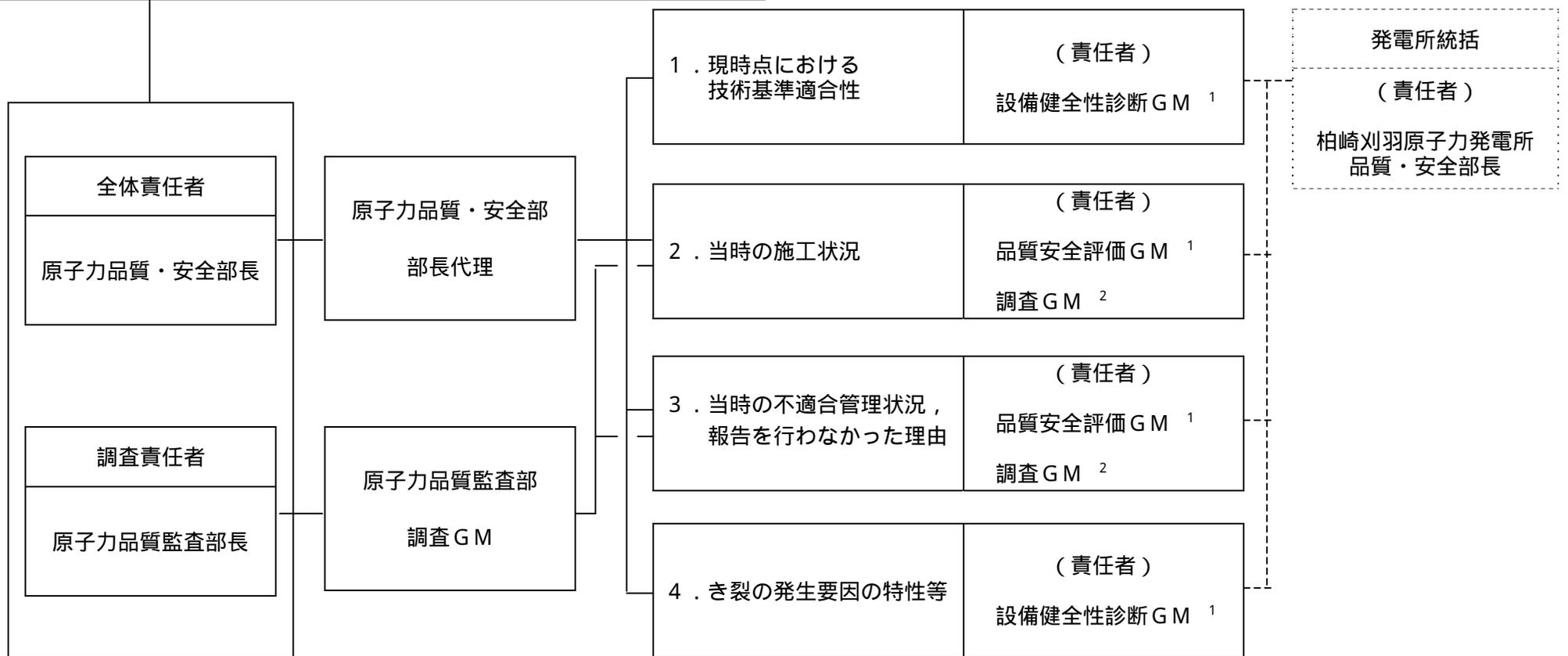
てひびがなくなれば、そのまま工事を続行すること、発注先メーカーに対し工事続行を指示した。指示模様が確認された部分をリング状に切断後に開先加工した結果、ひびは完全に除去された。

なお、GM は本件工事施工前においても水位計装ノズルからの蒸気漏れはなく、機能低下には至っていなかったこと、開先加工によりひびが解消していること及びひびの原因が溶接時の施工不良であると判断されたことから、国への報告を要する事案ではないと判断した。

柏崎刈羽原子力発電所1号機  
水位計装配管取替工事に関する調査検討委員会

主査： 常務（原子力品質監査部担当）  
 副主査： 常務（原子力・立地本部副本部長）  
 メンバー： 原子力品質監査部長 原子力品質・安全部長  
           企画部長 原子力・立地業務部長  
           広報部長 原子力設備管理部長  
           総務部 法務室長 柏崎刈羽原子力発電所長

3 / 18



1：原子力品質・安全部  
2：原子力品質監査部

図 - 1 調査検討体制

#### 4. 調査検討結果

以下の4項目について調査を実施した。

- (1) 現時点における技術基準適合性
- (2) 補修等の措置に係る当時の施工状況
- (3) 本件の不適合管理状況及び原子力安全・保安院に報告を行わなかった理由
- (4) き裂(ひび)の発生要因の特性等

##### (1) 現時点における技術基準適合性

N14 ノズルセーフエンドの現時点における技術基準への適合性を検討するため、以下の確認を行った。

###### a. 検査による健全性確認

目視試験(MVT-1)、放射線透過試験(RT)及び超音波探傷試験(UT:要求寸法を満足しているかを確認するため)により、現時点でのノズルセーフエンド/配管取り付け溶接部廻りの健全性の確認を行った。

その結果、ひび等の欠陥は確認されず、開先部の寸法は図面に示される要求寸法を満足していることが確認された。(資料-1参照)

###### b. 解析による健全性確認

第10回定期検査時の水位計装配管取替において実施したN14 ノズルセーフエンドの加工によるノズルセーフエンドの強度上への影響を解析により確認した。

その結果、JSME「設計・建設規格」(2005)で規定される許容応力を満足していることを確認した。(資料-2参照)

以上のa.およびb.の確認結果から、N14 ノズルセーフエンドには有意な欠陥はなく、強度上も許容値を満足していることから、現時点では技術基準に適合しているものと判断できる。

なお、念のため当該1号機のN14 ノズルセーフエンドと同様の形状のN12、N13 ノズルセーフエンドについてもRT及びUTを行い、健全であることを確認した。

##### (2) 補修等の措置に係る当時の施工状況

本件工事は、米国原子力規制委員会(NRC)の改善要求文書(Bulletin93-03,1993.5.28)の反映として、計画的に行われたものである。NRCは、文書の中で、蒸気凝縮槽に蓄積した非凝縮性ガスの影響によって、原子炉の減圧時に原子炉水位計が誤った指示を出す可能性に言及し、改善策の検討を要求している。

上記を踏まえ、改善策として、蒸気凝縮槽を計装配管と同じレベルに設置し、計装

配管を太く短くすること等の工事を実施した。

具体的には、計装ノズルセーフエンド（配管側）から蒸気凝縮槽間の計装配管の取り替えを実施した。配管取替えの手順は、当社及び発注先メーカ・工事実施メーカに残る記録を調査した結果から、以下の通りである。（表 - 1 参照、具体的な作業内容は、資料 - 3 参照）

まず計装配管取替のためにセーフエンド部を切断し、切断面の PT を実施した際、4 箇所（N14A,B,C,D）のノズルセーフエンドのうち 3 箇所（N14B,C,D）のノズルセーフエンド部に PT 指示模様を確認した。それを踏まえ、指示模様の有無によらず 4 箇所（N14A,B,C,D）のノズルセーフエンドについて、指示模様が確認された部分をリング状に切断、開先加工面の PT を実施し、問題ないことを確認した。リング状の切断片については、この検査とは別に詳細調査を実施した。なお、当時の運転パラメータを確認したところ、原子炉格納容器内露点温度、放射能濃度及びドライウェルサンプ水位の変動は認められず、漏えいは見られなかった。

続いて、開先面と新しい配管の開先合わせ検査を実施、当該部を溶接後に PT、耐圧試験等を行い、問題のないことを確認した。その後、発電設備技術検査協会の立会による溶接検査を受検し、合格した。

本指示模様の発生原因については、N14 ノズルセーフエンドの設置箇所が、狭隘部であったことから、比較的溶接作業がしにくかったことによる建設当時の施工不良に起因する溶接割れであると考えられた。したがって、同様に狭隘部のために溶接作業性の良くない N12、N13 ノズルセーフエンドのうち、N13 ノズルセーフエンドについて試験的に UT を実施した結果、一部に指示信号が確認された。

しかし、N14 ノズルセーフエンドで UT 指示信号が確認された箇所であっても、PT では指示模様は確認されず、実際にはひびが存在しない箇所が見受けられたことに加え、N13 ノズルセーフエンドで確認された指示信号は、N14 ノズルセーフエンドで確認されたものと比較して全般的に低いものであった。したがって、N13 ノズルセーフエンドにひび発生の可能性は低いと考えられたこと、及び約 1 年後の第 11 回定期検査の際に N12、N13 ノズルセーフエンドについては配管取替が当初より計画されていたことを勘案し、念のため次回定期検査まで N12、N13 ノズルセーフエンドの各溶接部にファーマナイト樹脂を注入することにより、万一ひびが貫通する事態に至った場合においても、蒸気の漏えいを予防する措置を実施した。

表 - 1 当時の施工状況

No	作業内容		備考
	作業項目	当立会（確認）状況	
1	マーキング		
2	配管切断，ボス抜き		
3	切断後 PT		N14B,C,D に指示模様を確認 指示模様の記録なし。( 1 )
4	ノズル先端・内面 PT		N14B,C,D に指示模様を確認 指示模様の記録あり(工事実施メーカー記録のみ。当社記録なし。)( 1 )
5	ノズル先端部 UT		N14B,C,D に UT 指示を確認 UT 指示の記録あり(工事実施メーカー記録のみ。当社記録なし。)( 1 )
6	先端部切断・整形		
7	新開先面 PT	要領書：立会 記 録：立会記録なし (記録確認の記録はあり)	No.8 と同時に実施。
8	開先面検査 開先合せ検査	要領書：立会 記 録：立会記録なし (記録確認の記録はあり)	G 立会 <sup>(注1)</sup> ( G 立会記録あり )
9	溶接		
10	溶接後 PT	要領書：立会 記 録：立会記録あり	G 立会 ( G 立会記録あり )
	溶接後 RT	要領書：記録確認 記 録：記録確認の記録あり	
11	耐圧試験 外観検査	要領書：立会 記 録：立会記録あり	G 立会 ( G 立会記録あり )
12(1)	切断片 UT		N14B,C,D に UT 指示を確認 UT 指示の記録あり(工事実施メーカー記録のみ。当社記録なし。)( 2 )
12(2)	サンプル調査 ( N14B,D について実施 )		N14B, D にひび割れを確認 調査結果記録あり(発注先メーカー記録のみ。当社記録なし。)( 2 )

(注1)：『G 立会』とは、『発電設備技術検査協会』による立会を指す。

( 1 )：本工事の工事施工要領書及び工事施工報告書において当社の立会または記録確認事項ではなかったことから当社の記録なし。

( 2 )：本工事の範囲外で調査を実施したことから当社の記録なし。

(3) 本件の不適合管理状況及び原子力安全・保安院に報告を行わなかった理由

a. 社外調査団が認定した事実関係

1) 工事進行に関する事実経過

平成10年

- 11月3日 工事下請会社(株式会社IHI)が、N14ノズルの既設配管切断作業開始。
- 11月5日 工事担当グループマネージャー(以下「GM」という)は、工事元請会社(株式会社東芝)から、N14ノズルの切断面(全4カ所中の3カ所)にひび(以下「本件ひび」という)が存在している旨の報告があったことを受け、部下を現地確認に向かわせ、浸透探傷試験(以下「PT」という)指示(ひびの存在)の状況を確認させた。その結果は、GMに報告された。
- 11月6日 GMは、工事元請会社との協議を踏まえ、上記ひびについては、N14ノズルの開先加工をすることによりなくなるかどうかを確認し、ひびがなくなれば、そのまま工事を続行することに問題はないと判断し、当該方針を工事元請会社に伝えた。また、同時に、現段階では国への報告を要する事案ではないと判断した。
- 11月9日 GMは、今回取替工事が予定されていないN12、N13ノズルについて、工事元請会社と協議の上、ファーマナイト樹脂注入の方針の是非の検討を行った。
- 11月11日 工事下請会社が、N14ノズルの先端を切断し、開先面のPTを実施した結果、ひびの存在は認められなかったため、GMは、配管取替工事を続行することを決定した。  
また、ひびが除去されたことから、国への報告を要する事案ではないと判断した。
- 11月13日 工事下請会社が、N14ノズルと新設配管の溶接作業実施。
- 11月16日 工事下請会社が溶接検査を受検、合格。
- 11月25日 工事元請会社より、本件ひびの原因調査の中間報告。  
また、このころ、ファーマナイトによる対応の当否の検討結果の説明を受け、GMは、N12、N13につきファーマナイト樹脂を注入する措置をする旨決定・実施した。
- 12月16日頃 GMは、工事元請会社から、本件ひびの原因調査結果について報告を受け、溶接割れであるとの判断が裏付けられたことから、本件は国への報告を要する事案に該当しないと確定的に判断した。
- 12月21日 工事終了。

## 2) N14ノズルの工事続行決定と国への報告の必要なしと判断するに至る経緯

### (a) 本件ひびの発生原因についての認識

GMは、本件ひびの存在が判明した直後の段階から、N14ノズルの素材であるSUS316の性質（応力腐食割れを起こしにくい）や部位（液体との接触がなく振動も少ない）から、本件ひびの原因については、疲労や応力による腐食ではなく、溶接時の施工不良（溶接割れ）である可能性が高いと考えていた。

### (b) 工事続行の可否についての判断

GMは、工事元請会社と協議した結果、配管取替工事においては、通常の処理過程として開先面を削り込んだり切断したりして処理することから、本件においても、ノズルの先端をひびがなくなるまで切断・削り込みすることとした。そして、その結果、ソケット部の深さが「電気工作物の溶接に関する技術基準の細目を定める告示」が規定する基準（9.6mm）以下になった場合には、ノズル自体を交換する必要が生じ、工事認可を取り直すことを検討することになるが、上記基準を確保できるのであれば、そのまま工事を進めて問題ないと判断した。このように判断した理由は、本件ひびの原因と思料された溶接割れは、溶接段階の施工不良に起因するものであり、入熱管理など施工をきちんとすれば起こりにくいこと、開先面を切断の上溶接した場合、その安全性については、溶接検査という過程を経ることにより担保されることにあった。

なお、当時の東京電力職務権限再配分規程では、工程の承認について、「特に重要なもの（定期検査工程、建設工事主要工程等）」は発電所長権限、「重要なもの（他部門との調整が必要なもの等）」は保修部長権限、「上記以外のもの」はGM権限と規定されているところ、上記判断事項については、GMの権限である「上記以外のもの」に該当すると解される。さらに、実際に開先加工した結果、ソケット部の深さは上記基準を満たしており、また、溶接検査も滞りなく終了しているところ、GMは、これら一連の過程において、何か問題が生じた旨の報告を受けることもなかったため、その後も、自らのなした上記判断に誤りは無いものと認識していた。

### (c) 原因調査の必要性・目的

上記のとおり、本件ひびの原因は、当初の段階から、溶接作業時の施工不良に起因するものと考えられたが、万が一、異なる原因によるものであった場合には、別途何らかの対応が必要となる可能性があることから、工事元請会社と協議の上、慎重を期して、工事元請会社において工事と並行して詳細な原因調査を実施することとした。

その結果、第10回定期検査終了前に、溶接作業時の施工不良に起因するひびであり、進展性も認められないことが再確認され、その旨が工事元請会社からGMに報告された。そこで、GMは、本件ひびの原因は溶接割れであると自らが判断したことに誤りはなかったと再認識した。

なお、その調査結果を記載した書面が、工事元請会社から東京電力に交付されたか否かについては解明に至らなかったが、少なくとも東京電力の保存文書中には存在しない。また、東京電力において、当該調査のために費用を拠出した形跡も特段認められないことからすると、当初から正式な書類として提出されなかった可能性が高く、上記書面を意図的に破棄・隠蔽したことを疑わせるに足る事情は認められなかった。

#### (d) 国への報告義務についての判断

GMは、本件に関し、国への報告義務の有無について、「原子力発電所における安全確保対策の強化について」(昭和52年3月3日通産大臣通達)により報告を求められている「軽微な事象」に該当するか否かも含め検討した結果、蒸気漏れがなく水位計装ノズルの機能低下に至っていなかったこと、開先加工によりひびが解消していること、ひびの原因が溶接時の施工不良であると判断されたことから、国への報告を要する事案ではないと判断した。

#### (e) 不具合報告書の未作成について

当時の工事共通仕様書によれば、設備器機等の点検で不具合が発見された場合は、工事元請会社は、「不具合報告書」を提出することとされていた。

しかし、本件ひびについては、工事元請会社及び同下請会社のいずれからも、「不具合報告書」は提出されていない。

#### b. 本件の不適合管理状況

平成10年当時、工事中に発見された不適合については、請負会社から不具合報告書として工事担当箇所に報告され、原因究明、対策立案、処置が行われる運用となっており、これらの不具合報告書については台帳管理されていた。

しかし、本件については不具合報告書での報告はされておらず、不具合報告書台帳にも記載がないことを確認している。この理由として、本件は計装配管の取替工事の過程で発見された指示模様であり、その後の開先加工により除去されていることから、報告されなかったものと考えられる。

当時の不具合管理は、現在の不適合管理とは異なり、不具合として報告すべき事象に対して統一された考えはなかったが、一般に工事中に発生した不具合事象により追加工事(追加契約)が発生した場合や、その事象に起因して次回定期検査時において

工事を実施する必要が生じた場合に不具合報告書を作成する運用となっており、不具合報告された内容に対する原因究明、対策立案、処置についての審議・検討は不具合報告を受けた工事担当箇所の GM が責任者となって判断を実施していた。

この運用からすると、当該計装配管の取替工事の過程で発見された本指示模様は、その後の開先加工により除去されており、追加工事の発生はなく次回定期検査時に工事をする必要もなかったことから、不具合報告書は作成されなかったものと考えられる。

また、本件は前述のとおり、計装配管の取替工事の過程で発見された指示模様で、その後の開先加工により除去されたこと、また原因調査の結果、溶接割れの可能性が高いと考えられたことから、運転停止中の 1 号機の同様の箇所のみ念のため対策を講ずるに止まり、他プラントに対する点検等の水平展開を行う必要はないと判断し、更に MIS（社内の不具合情報共有のためのツール）、NICS（当時電力中央研究所にて情報集約されていたトラブル情報データベース）といったツールを用いた情報共有についてもなされなかったものと考えられる。

しかしながら、本事例は当時使用実績の少ない SUS F 3 1 6（低炭素）に発生した事象であったということに鑑みれば、原子力発電所の安全運転の観点から、当時実施した原因究明結果も含めて当社はもとより、他事業者に対しても情報を共有し、本件の知見を役立てることが望ましかった。また、各号機の定期検査の際に類似箇所について順次点検を実施しておくことが望ましい対応であった。

なお、原因調査結果に関する書類が、当社には保管されなかった理由については、当社は調査のための費用を支払うための契約変更を行っておらず、このため契約に基づく正式な書類として提出されなかった可能性が高く、当該書類を意図的に破棄・隠蔽したことを疑わせるに足る事情は認められなかった。

しかしながら、詳細な調査が行われていることからみると、本件原因調査の目的は、N14 にとどまらず、同じ材料を使用している他の部位に同様の問題が生ずる可能性を調査する点にあったものと推察され、その知見を共有し、将来問題が生じた場合に備えるためには、非公式な調査として処理せず、当該調査結果を調査記録として提出させて保存すべきだった。

< 参考：現在の不適合管理，情報共有 >

現在の不適合管理は、運用方法を明確にマニュアルに定め、通常状態と逸脱した事象全てを幅広く抽出し、不適合管理委員会の中で事象の重要度等を審議するといった多面的な評価を実施している。また、重要度に応じて（最も重要であると判断された事象に対しては発電所所長が、最も低い重要度のものは GM が責任者）原因究明、対策立案、処置をすることとなっており、厳正適確な運用が行われている。加えて、事業者間の情報共有においても、電力から電力中央研究所へ情報を提供する運用であった NICS に代わり、事業者間で明確な運用ルールを定

めた上で、電力自らが詳細情報の入力を行う NUCIA (原子力施設情報公開ライブラリー) により原子力発電の品質に係わる情報共有が図られる運用となっている。なお、これらは保安規定においても明文化し、明確なルールとして運用されている。

#### c. 原子力安全・保安院に報告を行わなかった理由

##### 1) 平成 10 年当時報告を行わなかった理由

GM は、蒸気漏れがなく水位計装ノズルの機能低下に至っていなかったこと、開先加工によりひびが解消していること、ひびの原因が溶接時の施工不良であると判断されたことから、国への報告を実施しなかった。

しかしながら、

- ・ひびの原因が特定されていない 11 月 6 日の時点で、「開先加工することによりひびがなくなれば、そのまま工事を続行することに問題はない」と安易に判断してしまったこと
- ・ひびの原因がほぼ断定され、割れの進展がないことが確定されたのは、12 月 16 日頃であったことに鑑みると、それまでの間は「機能低下のおそれがなかった」という確定的な判断が出来なかったはずであること
- ・当時使用実績の少ない S U S F 3 1 6 に発生した事象であったこと

また、「国として通達報告対象事象に該当すると判断した可能性が高いと考える」との評価を受けたことを踏まえると、国に対して情報提供さえしていない当時の対応については、当社としても真摯に反省している。

なお、平成 14 年 9 月にまとめた「当社原子力発電所の点検、補修作業に係る G E 社指摘事項に関する調査報告書」では、本件が発生した平成 10 年頃は、当社の保修部門全体に「スケジュールどおりに定期検査を終わらせて自分たちの電源を系統に復帰させる」ことに強い意識が働いていた結果、「安全性に問題がなければ、国へのトラブル報告はできるだけ行いたくない」という雰囲気があった時代ではあったが、本件について国に報告を行わなかった理由は、前述のとおりである。

##### 2) 平成 14 年における総点検で本事案が抽出されなかった理由

平成 14 年の総点検は、原子力安全・保安院からの文書「自主点検作業の適切性確保に関する総点検について」(平成 14・08・30 原院第 2 号)により、当社が行った自主点検作業について、これまで適切に実施されていたか、客観的証拠に基づき調査を行うように指示を受けた。この指示に基づき、平成 14 年 9 月 20 日に「原子力施設にかかる自主点検作業の適切性確認に関する総点検計画書」を原子力安全・保安院に提出したが、その後の原子力安全・保安院からの指示文書「原子力発電所再循環配管に係る点検・検査結果の調査について」(平成 14・09・20 原院第 20 号)及び「原子力施設にかかる自主点検作業の適切性確保に関する総点検の今後の進め方について」(平成 14・09・

25 原院第 1 号)も踏まえ、3 発電所における自主点検作業などについて第三者機関による点検過程、点検結果の確認も行い大掛かり(約 5 ヶ月、約 796 万ページの報告書類、約 14,800 人日)で厳格な記録点検調査を実施し、その結果を取纏めて、平成 15 年 2 月 28 日に原子力安全・保安院に最終報告した。

この記録点検調査は、当時供用中の設備・機器に関する点検、修理及び改造工事に関する当社及び工事施工会社が保有する報告書類(工事報告書、委託報告書等)について、原子炉圧力容器等の重要な機器については、平成 14 年 9 月 20 日を起点として過去 14 年間に調査対象期間として、以下の観点で行った。

- ・当社保有の検査成績書、工事報告書及び工事施工会社保有の工事報告、工事記録間に矛盾または必要な技術情報の削除等はないか。
- ・電気事業法に照らして、工事計画の認可申請または届出が必要であるにもかかわらず、これを行わずに工事を実施していないか。
- ・技術基準適合維持義務違反はないか。
- ・電気事業法、原子炉等規制法および大臣通達による軽微な故障等の報告基準に基づく国への報告が適切に行われているか。
- ・国に約束した対策・工事が確実に行われているか。

本件工事は、この記録点検調査の対象だったので、当時、上記観点からの調査を行っているが、書類上、当社保有の工事報告書類と発注先メーカ保有の工事報告書類に問題となる不整合はないことに加え、本件が工事認可・届出を要する工事でもなく、また、技術基準に違反する事実もなかったことから、抽出されなかった。

### 3) 平成 18 年における総点検で本事案が抽出されなかった理由

平成 18 年の総点検は、経済産業省からの指示「発電設備の点検について」(平成 18・11・30 原院第 1 号)により当初進めてきたが、その過程で発見されたデータ改ざん等の事案を踏まえ、「検査データの改ざんに係る報告徴収について」(平成 18・12・05 原第 1 号)及び「検査データの改ざんに係る追加の報告徴収について」(平成 19・01・31 原第 21 号)に基づき調査をした。

具体的には、

- ・計器・プロセス計算機等のデータ処理に関する調査
- ・法令・安全協定に基づく記録類に関する調査
- ・法令に基づく申請手続きの不備に関する調査
- ・検査等の適切性に関する調査

の各項目について、記録類の確認を中心に調査を行った。

また、上記のうち、検査等の適切性に関する調査に関しては、検査経験者に対しアンケート調査を行い、目標値・判定値等に対して余裕が小さい等、データ改ざんの動

機につながる可能性のある項目の洗い出しを行った。その洗い出された項目を意識付けあるいは思い出しの一助として活用し、積極的な記憶の掘り起こしを行いながら、平成 18 年当時、法定検査業務に携わる社員（約 1900 名）を対象にグループ討議を実施し、そこで抽出された事案について関連する社内資料を調査し、データ改ざんの有無について確認した。また、法定検査に係るデータ処理の改ざん等の有無を確認するために、定期検査工事の主な請負先にも依頼し、「検査妨害に類似することを当社から依頼された記憶があるのか」という質問事項に対する聞き取り調査及びアンケート調査を各社において実施した。

本件は、調査の対象である上記 4 項目にはいずれも該当しない事案であった。また、法令違反やデータ改ざんなどの事実もなかったことは、社外調査団作成の調査結果報告書に記載のとおりである。

なお、本件工事の関係者は、開先加工の結果、ひびが除去されて健全となり、溶接検査にも合格しているため、問題ないものと認識していた。したがって、アンケート調査等でも課題として抽出されることもなかった。

#### (4) き裂（ひび）の発生要因の特性等

柏崎刈羽原子力発電所 1 号機の原子炉压力容器水位計配管取替工事中に発見された N14 ノズルセーフエンドのひびの調査及び廃棄された旧配管ソケット溶接部の調査が、平成 10 年から平成 11 年当時に発注先メーカ及び工事実施メーカにより実施されていることが確認された。

平成 10 年当時の発注先メーカの資料では、当該のひびは、「施工時に発生した可能性が高い」（溶接割れの可能性が高いと同義）と結論づけている。

以下では、当時の資料をもとに、その後、得られた知見等も踏まえて、当該ひびの発生要因等について再検討を行う。

##### a. ひびの状況（資料 - 4 参照）

###### 1) N14 ノズルセーフエンドの状況

工事実施メーカ保管の資料によれば、4 箇所（N14B, C, D）のうち N14B, C, D の 3 箇所に PT の指示模様が確認されている。また、UT も実施しているが、UT 指示箇所は必ずしも PT 指示模様と対応した結果は得られていない。

N14B, C, D に発見されたひびは、

a. ノズルセーフエンド（ソケット）の軸方向

b. 長さ（切断後内面軸方向長さ）で最大 5 mm（一部破面調査の結果で 6 mm の結果有り）

c. 深さ（切断面径方向深さ）で最大 7.5 mm（ソケット部厚さ：8.45 mm）

であり、N14B, N14C, N14D の 3 箇所のノズルセーフエンドに対して、それぞれ 8

箇所，4箇所，12箇所の計24箇所が記録されている。

また，当時のサンプル調査では以下が報告されている。（資料 - 5 参照）

- ・母材粒界の鋭敏化は認められなかった。
- ・破面の表面は均一な黒色を呈しており，部位による顕著な色の变化はなかった。
- ・ひびの中央部は幅が広く，内外面端部で狭くなっていた。
- ・内側及び外側のひび端部に硬さの上昇がみられた。
- ・ひび先端部の断面観察結果から，ひびは先端が鈍化して丸くなっており，停止したひびと判断された。

なお，当該サンプル調査は，N14B 及びN14D の2つのノズルに対して実施されている。当該サンプルは，ひびの状況調査において，確認された PT 指示模様が同形態であったことから，切断後の内面軸方向の指示模様の有無を考慮し，指示模様の多い当該2つのノズルから抽出されたものと推測される。

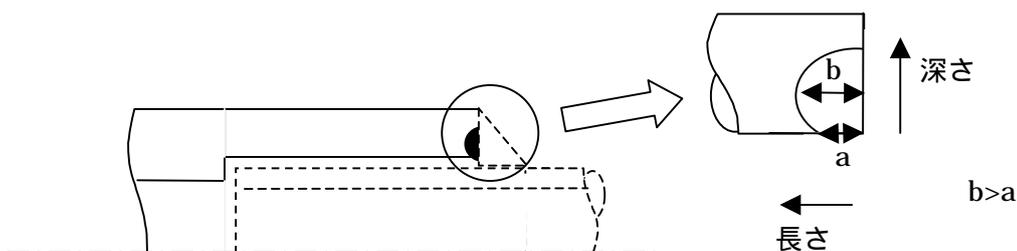


図 - 2 ひび形状イメージ図

（参考）旧配管溶接部等の状況

工事実施メーカーの資料には，資料 - 4 の図 4 - 1 に示される廃棄された旧配管ソケット溶接部等の調査結果も記載されており，N14A 接続配管，N14B 接続配管，N14D 接続配管の3箇所のソケット溶接部に対してそれぞれ，1箇所，4箇所，2箇所の計7箇所に1）と同様の PT 指示模様が確認されている。

N14A 接続配管，N14B 接続配管，N14D 接続配管に発見されたひびは，長さ（切断後内面軸方向長さ）で最大 2 mm，深さ（切断面径方向深さ）で最大 5.5mm と記録されている。

また，発注先メーカー資料には，「ノズルセーフエンド部とひびの形態は同じと考えられる」と報告されている。

## b. ひびの発生原因調査の検証

### 1) ひびの特徴

ひびの特徴をまとめると以下のようになる。

N14 ノズルセーフエンドに発見された 24 箇所すべてのひびは、ソケット側での軸方向割れであった。なお、ソケット継手モックアップでは、周方向残留応力が軸方向応力よりも高い値を示した。(資料 - 6 図 6 - 1 参照)

破面は黒色であり、粒界割れの様相を呈していた。

大部分のひびは、炉水に接するソケット内面の長さよりも、ソケット板厚方向の深さ方向に大きい。また最も長いひびの観察結果では、板厚中央部側が最も長かった。

ひびの先端は鈍化していた。

当該品は低炭素ステンレス鋼製であり、断面調査結果からも、クロム (Cr) 炭化物のような明確な鋭敏化の特徴は認められていない。

### 2) 検討すべき損傷モードと発生可能性の評価

ひびが発生する可能性のある損傷モードとしては、疲労、隙間腐食、応力腐食割れ、溶接割れが考えられる。以下、個々についての検討を行う。

#### 疲労によりひびが発生した可能性

破面が粒界破面を呈していること、また、当該部近傍にはポンプなど振動源がなく、繰返し応力の影響が小さいことから、疲労によるものではないと判断される。

#### 隙間腐食によりひびが発生した可能性

当該部の溶接部近傍では、周方向溶接残留応力が最も高く(資料 - 6 図 6 - 3 参照)、ひびは周方向応力に垂直な面上に発生していることから、応力因子の寄与が明確である。したがって、応力因子の影響しない隙間腐食ではないと判断される。

#### 応力腐食割れ(以下、SCC)によりひびが発生した可能性

- 通常運転中、当該部は蒸気環境であり、高温水環境には晒されていない。
- 切断面観察結果から、ソケット内面(接液面)に開口していないひびが複数確認されており(図 - 3 (a))、ひびは炉水に直接接していなかった可能性がある。
- 断面観察結果から、接液面ではひびの開口幅が小さく、内部で広がっており、SCC とは様相が異なる。なお、ひび先端が鈍化していることから、進展性は

ないと推定される。(資料 - 5 図5 - 2 - 1 ( 2 ) 参照)

- SCC によりひびが発生したと仮定した場合，一般的にひび長さは開口部で最大となるが(図 - 4)，確認されたひびは図 - 3 ( a )，( b ) のように板厚内部で長くなっている。(詳細な考察は資料 - 7 参照)
- 発注先メーカーに残っていた実機採取材調査結果には，SCC に影響のある硫黄 ( S ) などの有害不純物含有量は低いことが報告されている。

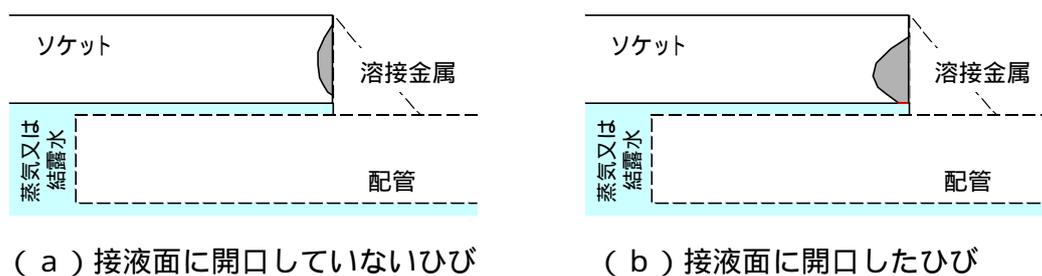


図 - 3 確認されたひびの形態

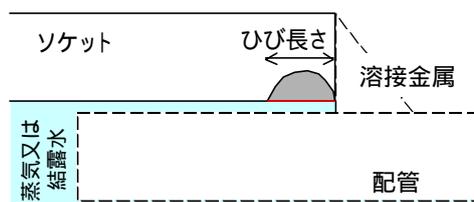


図 - 4 SCC が発生原因である場合に想定されるひびのイメージ図

溶接割れによりひびが発生した可能性

- 発注先メーカーに残っていた実機材の材料成分調査結果 ( ミルシート ) からリン ( P ) の含有量が多めであり，クロム当量 / ニッケル当量が低いことから，熱影響部における溶接割れの感受性が比較的高い。(資料 - 8 参照)
- ひびは接液面ではなく，ソケット端面の溶融境界に沿って発生していた。(図 - 3 ( a ) および資料 - 5 図5 - 1 - 2 参照)
- 当該のひびは溶接割れと SCC に共通する特徴である粒界割れであり，また，破面は酸化により黒色を呈していた。

### 3 ) ひび発生 の 推定原因

平成 10 年当時の発注先メーカーの資料には，当該のひびは，溶接施工時に発生した可能性が高いもの ( 溶接割れ ) とされている。

今回，発注先メーカー及び工事実施メーカー資料をもとに再検討したところ，当該の

ひびは、溶接割れにより発生した場合と共通する特徴が多く、他の考えられる損傷モードによるひび発生の可能性が低いことから、溶接熱影響部における溶接割れにより発生したものと推定される。

また、当該のひびは溶接割れとして発生した後、それを起点として、ソケット継手に見られる高い周方向溶接残留応力により粒界型応力腐食割れとして進展した可能性が高く、その後、ひびは鈍化して停留したものと推定される。

なお、調査の過程で意見を伺った学識経験者からは、当該部ソケットは低炭素ステンレス鋼鍛造品の中では初期に製造されたものであることから、含有量の比較的高いPが鍛造過程で粒界に偏析し、熱影響部の溶接割れ感受性を高めた可能性も考えられるのではないか、との意見があった。

## 5. まとめ

柏崎刈羽原子力発電所1号機・第10回定期検査（平成10年10月～平成11年1月）時に、計画的に行った水位計装配管取替工事で、取り替えのため、計装ノズルに接続する配管を接続部分で切断したところ、切断面にひびを確認したが、当時の対応者の判断として、国への報告は行わなかった。

しかしながら本件は、当社に調査記録が保管されていなかったという点については、不適切であり、不具合情報として記録・保管しておくべきものであった。さらに、原因調査等も行っていること、当時使用実績の少ないSUSF316（低炭素）に発生した事象であったということから考えると他事業者に対しても情報共有を行い、これらの状況等について、行政当局に対しても情報提供や相談を行うなどの積極的な対応を行うことが望ましい事象であったと真摯に反省している。

原子力施設安全情報申告調査委員会からは「不適合に関する記録について」、「原子力施設等の安全確保上重要な情報の共有について」の指摘を受けたところであり、これらについても以下の通りの確に対応していくものとする。

現状では、平成14年の点検・補修作業の不適切な取扱いの再発防止策として不適合管理プロセスが確立しており、本件事象と同様な不適合が発生した場合には、国へ報告することになる。軽微な事象であっても不適合管理委員会での取り扱いを決め、法令報告対象外の事象でも、発電所に常駐する保安検査官へ報告するところである。今後も現在確立されている不適合管理プロセスに従って不適合に関する記録の作成保存を適切に行い、設備保全等に万全を期していくこととする。

また、当社の公表基準に基づき適宜公表し、必要に応じてNUCIA等による事業者間の情報共有を図っており、品質・安全のより一層の向上の観点から、当時と比べて改善を進めて来ている。今般明らかになった本件事象についても品質・安全向上のための有益な情報を含んでいることから事業者間の情報共有を図っていくとともに保安院にて予定されている技術的な評価・検討にも積極的に情報提供していくこととしたい。

当社においても、平成 14 年以降社内通報制度を整備しており、このような制度によって得られる情報には、本件事象のような品質・安全の向上に資する情報も含まれることもあることを重視して、社員はもとより発電所に働く人たちの間で気がかりな情報については、パートナーシップ委員会\*1 等でその共有が図れるよう努めていくこととする。

これらの取り組みを継続していくことにより今後とも、情報共有・不適合管理の適切な運用に努めるとともに、透明性や対外的な説明性を確保していくこととする。

以 上

\*1 パートナーシップ委員会：

構内で働く社員及び協力企業から寄せられた発電所運営や設備に関する意見・要望を審議し、回答をすることにより、協働感醸成への寄与と発電所の一層の安全性向上と効率的運営に資することを目的とした委員会。

## N14 ノズルセーフエンドの検査による健全性確認

目視試験 (MVT-1)、放射線透過試験 (RT) 及び超音波探傷試験 (UT) による現時点でのノズルセーフエンド/配管取り合い溶接部廻りの健全性の確認を行った。その結果、ひび等の欠陥は確認されなかった。

### 1) 目視試験 (MVT-1)

対象ノズルセーフエンドの配管取り合い溶接部廻りについて、JSME「維持規格」(2008) に準じた目視試験 (MVT-1) を実施した。

(検査範囲)

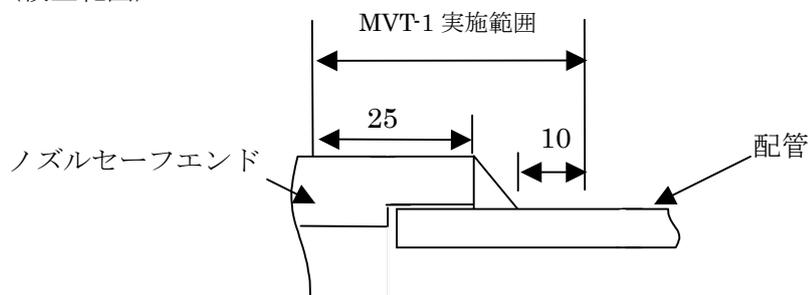


図 1-1 MVT-1 による試験範囲

その結果、有意な指示模様、ひび等は確認されなかった。(添付-1-1 参照)

### 2) 放射線透過試験 (RT)

対象ノズルセーフエンドの配管取り合い溶接部廻りについて、放射線透過試験を実施した。

試験の結果、JSME「溶接規格」(2007) 表-7 に示される判定基準を満たすものであることが確認された。(添付-1-2 参照)

### 3) 超音波探傷試験 (UT)

解析による健全性確認を実施するために、超音波探傷試験によりノズルセーフエンド側の加工に伴う荷重作用点の位置 (図 1-2 の a 寸法) が施工時の図面に示される最小寸法 (9.6mm) を満足しているかを確認した。

試験の結果、開先部の寸法は図面に示される要求寸法を満足していることが確認された。(添付-1-3 参照)

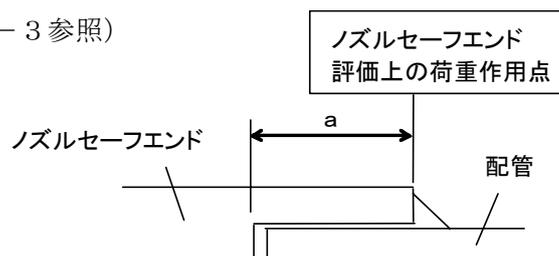
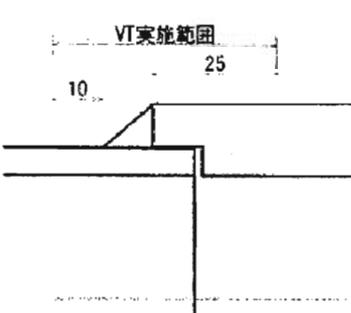


図 1-2 N14 ノズルセーフエンド開先部

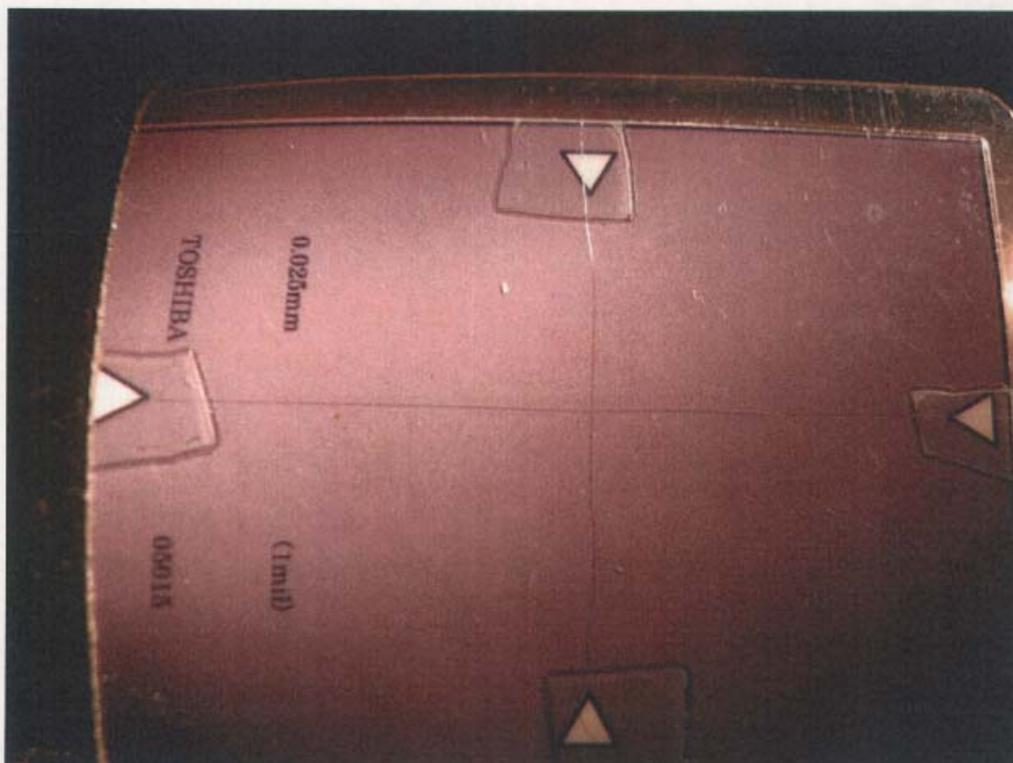
目視試験結果

<p><b>目視試験記録</b> EXAMINATION RECORD</p>	<p>検査項目 SUBJECT ソケット溶接部目視試験</p>																				
<p>注文主 CUSTOMER 東京電力株式会社殿</p>	<p>ブロック名称/系統名 BLOCK/LINE NAME N14A,B,C,D ノズルセーフエンド部</p>																				
<p>契約番号 CUSTOMER'S REF.No. _____</p>	<p>部材/継手番号 PART/JOINT No. _____</p>																				
<p>工事番号 PROJECT/WORK No. _____</p>	<p>方案/図面番号 SPEC./DWG No. K1-08-RM-P401X</p>																				
<p>工事名称 PROJECT/WORK NAME 水位計装ノズルセーフエンド健全性調査</p>	<p>検査場所 LOCATION 柏崎刈羽原子力発電所第1号機</p>																				
<p>検査詳細 EXAMINATION DETAILS</p>																					
<p>検査年月日 DATE EXAMINED 平成21年3月25日</p>																					
<p>N14ノズルセーフエンドと配管との溶接部(差込継手)についてその目視試験を実施した。</p> <p>&lt;探傷方法&gt; 直接目視試験により実施</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  </div> <table border="1" style="border-collapse: collapse;"> <tr><th colspan="2">使用計測器</th></tr> <tr><td>品名</td><td>管理番号</td></tr> <tr><td>照度計</td><td>081117995</td></tr> <tr><td>0.025mm (1mil) TP</td><td>05015</td></tr> </table> </div> <p style="text-align: right;">照度 540lx以上</p>		使用計測器		品名	管理番号	照度計	081117995	0.025mm (1mil) TP	05015												
使用計測器																					
品名	管理番号																				
照度計	081117995																				
0.025mm (1mil) TP	05015																				
<p>&lt;判定基準&gt; 有害な磨耗、き裂、腐食、侵食等の異常のないこと</p> <p>&lt;添付記録&gt; ・キャリブレーションシート ・状況写真</p>																					
<p>試験結果</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>ノズル</th> <th>0.025mm ファイヤ識別</th> <th>結果</th> <th>備考</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>N14A</td><td>可</td><td>良</td><td></td></tr> <tr><td>N14B</td><td>可</td><td>良</td><td></td></tr> <tr><td>N14C</td><td>可</td><td>良</td><td></td></tr> <tr><td>N14D</td><td>可</td><td>良</td><td></td></tr> </tbody> </table>		ノズル	0.025mm ファイヤ識別	結果	備考	N14A	可	良		N14B	可	良		N14C	可	良		N14D	可	良	
ノズル	0.025mm ファイヤ識別	結果	備考																		
N14A	可	良																			
N14B	可	良																			
N14C	可	良																			
N14D	可	良																			
<p>結果 RESULT</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> 合格 ACCEPTABLE</p> <p><input type="checkbox"/> 不合格 UNACCEPTABLE</p>	<p>東京電力</p> <p>_____ 代表者/CUSTOMER'S REPRESENTATIVE</p> <p>_____ 公認検査機関/AUTHORIZED INSPECTOR</p>	<p>日付 H21.3.25</p> <p>区分 位会</p> <p>記録確認 月/日 DATE</p> <p>担当 月/日 DATE</p> <p>Kサイト QCグループ INSPECTION SECT., QC DEPT</p>	<p>月/日 DATE H21.3.25</p> <p>月/日 DATE H21.3.25</p> <p>月/日 DATE H21.3.25</p>																		

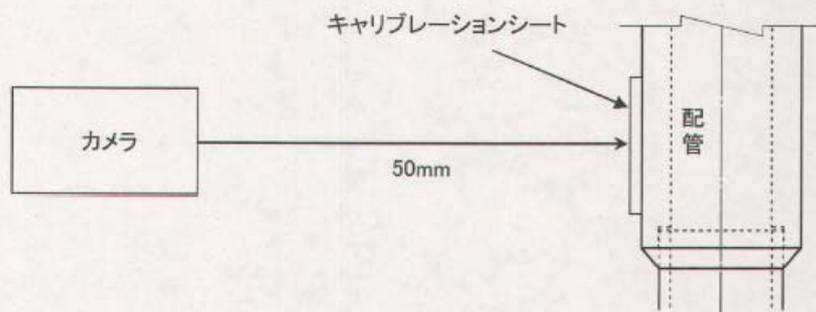
キャリブレーションシート

キャリNo:001

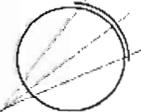
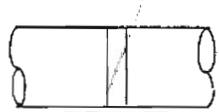
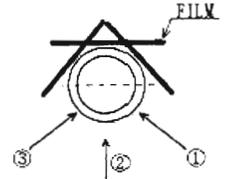
プラント名	東京電力株式会社殿 柏崎刈羽原子力発電所第1号機	工事名称	水位計装ノズルセーフエンド健全性調査
検査箇所	N14A,B,C,D	検査方法	VT
カメラ型式	Panasonic DMC-FX100 許可No 3292 IC-09(画素数:2M)	日付	H21-3-25



説明図



放射線透過試験記録

 <b>放射線検査記録</b>	検査記録番号	頁								
	検査項目	撮影日								
注文主	系統名	管クラス								
東京電力株式会社殿	主蒸気系	クラス3								
契約番号	スプール番号	図面番号								
工事番号	方案番号	材質								
	K1-08-RM-P401X	SUSF316 SUS316LTP								
工事名称	検査場所									
水位計装ノズルセーフエンド健全性調査	柏崎刈羽原子力発電所第1号機									
<b>撮影条件</b>										
X線装置	管電圧 (kVp)	距離 (mm)	時間 (分)	焦点サイズ (mm)	フィルムタイプ フィルムサイズ (インチ)	増感紙 (Pb)	管外径 (mm)	板厚 (材厚) (mm)	ペネトレーション	シム厚さ (mm)
1 ラジオフレックス 250EG-S2	160	250~420	0.5~1.4	2.0×2.0	FUJIFILM 4 1/2 × 8.5	Pb0.03	60.5/78.0	5.5/14.4	F 04	-
2 ラジオフレックス 250EG-S2	160	250~420	0.5~1.4	2.0×2.0	FUJIFILM 4 1/2 × 8.5	Pb0.03	60.5/78.0	5.5/14.4	F 04	-
3 ラジオフレックス 250EG-S2	160	250~420	0.5~1.4	2.0×2.0	FUJIFILM 4 1/2 × 8.5	Pb0.03	60.5/78.0	5.5/14.4	F 04	-
4 ラジオフレックス 250EG-S2	160	250~420	1.2~2.2	2.0×2.0	FUJIFILM 4 1/2 × 8.5	Pb0.03	60.5/78.0	5.5/14.4	F 04	-
5 ラジオフレックス 250EG-S2	160	250~420	0.5~1.4	2.0×2.0	イメージプレート 10×12	Pb 0.1	60.5/78.0	5.5/14.4	F 04	-
6										
現像条件	タンク現像	現像剤	フジハイレンドール	時間	5分	温度	20℃			
撮影方法	<input type="checkbox"/> 単撮 <input checked="" type="checkbox"/> 複撮									
タイプ A	タイプ B	タイプ C	*撮影配置							
										
2重壁片面撮影	2重壁両面撮影	2重壁両面撮影	RPV に向かって右回りで撮影							
使用計測機器	管理番号									
透過写真観察器	XS-655									
濃度計	XD-011									
写真濃度	MIN~MAX									
	1.0~3.5									
判定基準	K1-08-RM-P401X									
判定結果	合格									
東京電力	日付		QA							
	11/21 .3. 24		[Redacted]							
	立会		QC [Redacted]							
	記録確認		21.3.23							
			21.3.23							
			[Redacted] 事務所							

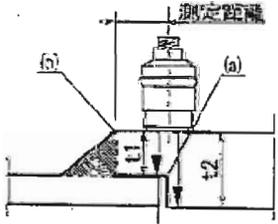


## 放射線検査記録

方法条件	スタート位置	継手番号	フィルム番号	欠陥位置 (m/m)		きず分類					備考 *差込深さ (mm)			
				← フィルム有効範囲 →	—	無欠陥	1種	2種	3種	4種		分類		
1 5 C		N-14A	1				レ					1	H21 3/2	11.5
			2				レ					1	H21 3/2	11.5
			3				レ					1	H21 3/2	12.0
1 5 C		N-14B	1				レ					1	H21 3/2	11.5
			2				レ					1	H21 3/2	11.3
			3				レ					1	H21 3/2	11.9
1 5 C		N-14C	1				レ					1	H21 3/2	12.3
			2				レ					1	H21 3/2	12.6
			3				レ					1	H21 3/2	12.3
1 5 C		N-14D	1				レ					1	H21 3/2	11.3
			2				レ					1	H21 3/2	11.1
			3				レ					1	H21 3/2	11.7
(欠陥記号) S : スラグ    P : ポロシティ    C : クラック    I : 溶込み不良    L : 融合不良 U : アンダーカット    T : タングステンズボット														

\*: 差込深さは、フィルム上から推定されるセーフエンド先端と、差込先端の距離を、配管外径から比例計算によって推定した概略値

超音波探傷試験記録

<h2 style="margin: 0;">超音波探傷検査記録</h2> <p style="margin: 0;">EXAMINATION RECORD</p>		検査項目 SUBJECT ソケット深さ測定																																																																																								
注文主 CUSTOMER 東京電力株式会社殿		ブロック名称/系統名 BLOCK/LINE NAME N14A,B,C,D ノズルセーフエンド部																																																																																								
契約番号 CUSTOMER'S REF.No. _____		部材/継手番号 PART/JOINT No. _____																																																																																								
工事番号 PROJECT/WORK No. _____		方案/図面番号 SPEC./DWG No. K1-08-RM-P401X																																																																																								
工事名称 PROJECT/WORK NAME 水位計装ノズルセーフエンド健全性調査		検査場所 LOCATION 柏崎刈羽原子力発電所第1号機																																																																																								
検査詳細 EXAMINATION DETAILS			検査年月日 DATE EXAMINED 平成21年3月25日																																																																																							
<p>N14ノズルセーフエンドと配管との溶接部(差込継手)についてそのソケット深さを測定した。</p> <p>&lt;探傷方法&gt;                  垂直探傷の底面エコーにより特定した。                  SUS-A3を使用し、時間軸を25mmに調整した。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  </div> <table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="2">使用計測器</th> </tr> <tr> <th>品名</th> <th>管理番号</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>超音波探傷器</td> <td>6101E23533</td> </tr> <tr> <td>SUS-A3</td> <td>007</td> </tr> <tr> <td>直尺</td> <td>S59</td> </tr> <tr> <td>探触子 (V535 5.0/25)</td> <td>188283</td> </tr> </tbody> </table> </div> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">ノズル</th> <th rowspan="2">方位</th> <th rowspan="2">(a)~(b)距離</th> <th colspan="2">参考</th> </tr> <tr> <th>11</th> <th>12</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">N14A</td> <td>0°</td> <td>12.5</td> <td>8.5</td> <td>14.5</td> </tr> <tr> <td>90°</td> <td>12.5</td> <td>8.5</td> <td>14.5</td> </tr> <tr> <td>180°</td> <td>12.5</td> <td>8.5</td> <td>14.5</td> </tr> <tr> <td>270°</td> <td>13.0</td> <td>8.5</td> <td>14.5</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">N14B</td> <td>0°</td> <td>12.5</td> <td>8.5</td> <td>14.5</td> </tr> <tr> <td>90°</td> <td>12.5</td> <td>8.5</td> <td>14.5</td> </tr> <tr> <td>180°</td> <td>12.5</td> <td>8.5</td> <td>14.5</td> </tr> <tr> <td>270°</td> <td>12.5</td> <td>8.5</td> <td>14.5</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">N14C</td> <td>0°</td> <td>11.5</td> <td>8.5</td> <td>14.5</td> </tr> <tr> <td>90°</td> <td>12.0</td> <td>8.5</td> <td>14.5</td> </tr> <tr> <td>180°</td> <td>12.5</td> <td>8.5</td> <td>14.5</td> </tr> <tr> <td>270°</td> <td>12.5</td> <td>8.5</td> <td>14.5</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">N14D</td> <td>0°</td> <td>12.5</td> <td>8.5</td> <td>14.5</td> </tr> <tr> <td>90°</td> <td>13.0</td> <td>8.5</td> <td>14.5</td> </tr> <tr> <td>180°</td> <td>12.0</td> <td>8.5</td> <td>14.5</td> </tr> <tr> <td>270°</td> <td>12.5</td> <td>8.5</td> <td>14.5</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">(mm)</p>				使用計測器		品名	管理番号	超音波探傷器	6101E23533	SUS-A3	007	直尺	S59	探触子 (V535 5.0/25)	188283	ノズル	方位	(a)~(b)距離	参考		11	12	N14A	0°	12.5	8.5	14.5	90°	12.5	8.5	14.5	180°	12.5	8.5	14.5	270°	13.0	8.5	14.5	N14B	0°	12.5	8.5	14.5	90°	12.5	8.5	14.5	180°	12.5	8.5	14.5	270°	12.5	8.5	14.5	N14C	0°	11.5	8.5	14.5	90°	12.0	8.5	14.5	180°	12.5	8.5	14.5	270°	12.5	8.5	14.5	N14D	0°	12.5	8.5	14.5	90°	13.0	8.5	14.5	180°	12.0	8.5	14.5	270°	12.5	8.5	14.5
使用計測器																																																																																										
品名	管理番号																																																																																									
超音波探傷器	6101E23533																																																																																									
SUS-A3	007																																																																																									
直尺	S59																																																																																									
探触子 (V535 5.0/25)	188283																																																																																									
ノズル	方位	(a)~(b)距離	参考																																																																																							
			11	12																																																																																						
N14A	0°	12.5	8.5	14.5																																																																																						
	90°	12.5	8.5	14.5																																																																																						
	180°	12.5	8.5	14.5																																																																																						
	270°	13.0	8.5	14.5																																																																																						
N14B	0°	12.5	8.5	14.5																																																																																						
	90°	12.5	8.5	14.5																																																																																						
	180°	12.5	8.5	14.5																																																																																						
	270°	12.5	8.5	14.5																																																																																						
N14C	0°	11.5	8.5	14.5																																																																																						
	90°	12.0	8.5	14.5																																																																																						
	180°	12.5	8.5	14.5																																																																																						
	270°	12.5	8.5	14.5																																																																																						
N14D	0°	12.5	8.5	14.5																																																																																						
	90°	13.0	8.5	14.5																																																																																						
	180°	12.0	8.5	14.5																																																																																						
	270°	12.5	8.5	14.5																																																																																						
結果 RESULT <input checked="" type="checkbox"/> 合格 ACCEPTABLE  <input type="checkbox"/> 不合格 UNACCEPTABLE		東京電力 _____ 代表者/CUSTOMER'S REPRESENTATIVE _____ 公認検査機関/AUTHORIZED INSPECTOR																																																																																								
日付 2009. 3. 25 区 (立会) 分 記録確認 _____ 月/日 DATE		Q A APPROVED _____ 月/日 DATE H21.3.25  Q C CHECKED _____ 月/日 DATE H21.3.25  担当 EXAMINED BY Kサイト QCグループ INSPECTION SECT., QC DEPT																																																																																								

## N14 ノズルセーフエンドの解析による健全性確認

### 1. 概要

計装配管取替後のN14 ノズルセーフエンド先端（ソケット部）における一次応力評価を実施し、JSME「設計・建設規格」（2005）により健全性評価を実施する。

#### 1.1 形状・寸法・材料

評価対象とする形状・寸法・材料・応力評価点を、図1-1に示す。

(Case1：工認形状)

- ・荷重作用点：圧力容器中心より ■ mm
- ・ソケット部深さ： ■ mm

(Case2：現形状)

- ・荷重作用点：圧力容器中心より ■ mm
- ・ソケット部深さ：9.6mm（規格上の最小寸法）

#### 1.2 荷重条件

考慮した荷重は、以下のとおりである。

- 内 圧：最高使用圧力 ■ MPa ( ■ kg/cm<sup>2</sup>)
- 外荷重：表1-1

#### 1.3 計算結果

計算結果を表1-3に示す。

#### 1.4 解析方法

二次元軸対象モデルを用いて応力解析を実施する。

応力計算については、有限要素解析プログラム( ■ )を用いた。

また、応力評価対象はノズルセーフエンド先端の形状不連続部である評価点 P01(P01'), P02(P02')とする。

### 2. 評価結果

ソケット部深さ ■ mm（工認形状）から9.6mmまで ■ mm 追込み加工した形状であっても、表示桁に表れる程の応力強さの差異は見られず、JSME「設計・建設規格」（2005）に規定される許容値を満足する。

また、二次応力についても、現状の配管ルートにおける二次応力評価に用いる配管反力（熱変形力，設計地震荷重（二次））が建設時の工認荷重条件に包絡されること（表 1-1，表 1-2 参照），ソケット部深さが変更となっても熱サイクル条件は変わらないことから，一次応力と同様に建設時工認との差異はなく，一次＋二次応力評価および疲れ解析評価は JSME「設計・建設規格」（2005）に規定される許容値を満足することを確認している。

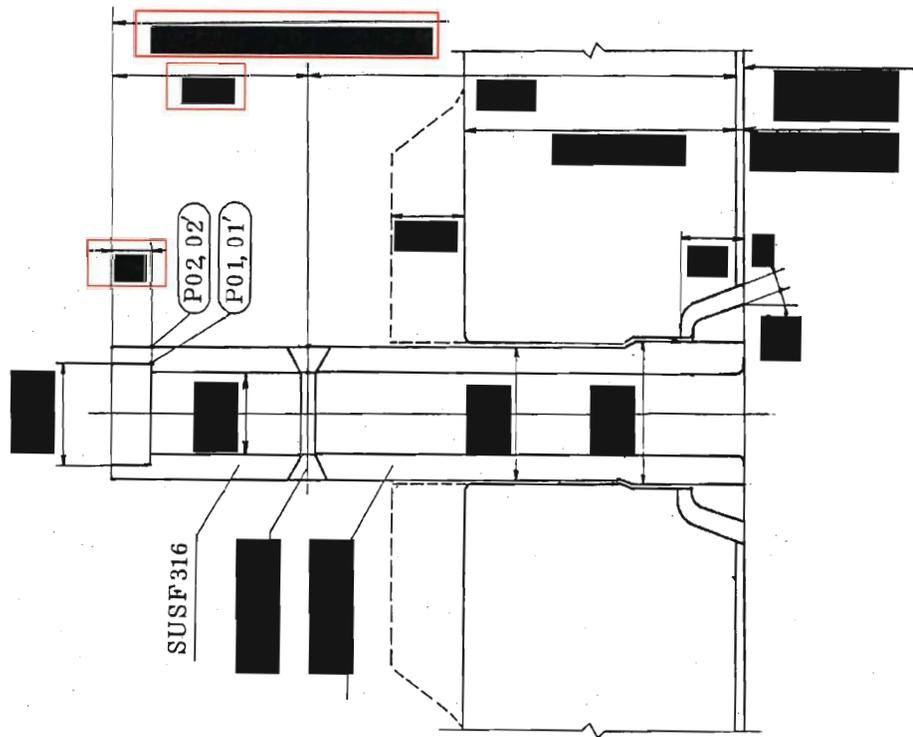
代表として，内圧，設計外荷重（死荷重および設計地震荷重（一次））を組み合わせた供用状態 C における一次応力の計算結果を表 1-3 に示す。

以上のことから，応力強さは， JSME「設計・建設規格」（2005）に規定される許容値を満足することから，健全性は確保されている。

図1-1 形状・寸法・材料

(Case1: 工認形状)

○ : 応力評価点



(Case2: 現形状)

○ : 応力評価点

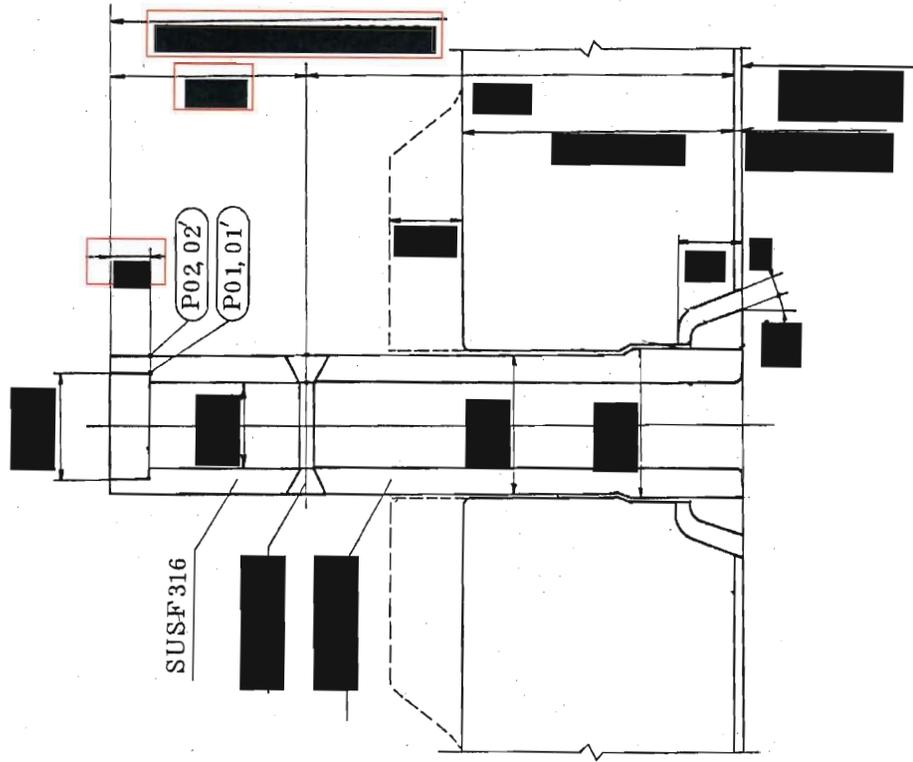


表 1 - 1 外荷重条件(N14)

ノズルにおける外荷重条件 (工認荷重条件)

記号	荷重名称	力(t)		モーメント(t・m)	
		H	Fz	M	Mz
L03	設計外荷重	■	■	■	■
L04	死荷重	■	■	■	■
L07	熱変形力	■	■	■	■
L14	設計地震荷重 (一次)	■	■	■	■
L15	設計地震荷重 (二次)	■	■	■	■

↓ SI 単位系へ換算 (\*9.80665\*10<sup>3</sup>)

記号	荷重名称	力(kN)		モーメント(kN・m)	
		H	Fz	M	Mz
L03	設計外荷重	■	■	■	■
L04	死荷重	■	■	■	■
L07	熱変形力	■	■	■	■
L14	設計地震荷重 (一次)	■	■	■	■
L15	設計地震荷重 (二次)	■	■	■	■

注記：

現状の配管ルートにおける配管反力値と工認荷重値の比較を実施した結果、ノズルセーフエンド部における一次応力評価に用いる設計外荷重(L03)は上記の工認外荷重値に包絡されていることが確認された(表1-1, 表1-2参照)。よって、今回のN14ノズルセーフエンド健全性評価にあたっては保守側に工認外荷重条件を用いるものとした。

表 1 - 2 外荷重条件(N14)

ノズルにおける外荷重条件 (現状の配管ルート)

記号	荷重名称	力 (kN)		モーメント (kN・m)	
		H	Fz	M	Mz
L03	設計外荷重	■	■	■	■
L04	死荷重	■	■	■	■
L07	熱変形力	■	■	■	■
L14	設計地震荷重 (一次)	■	■	■	■
L15	設計地震荷重 (二次)	■	■	■	■

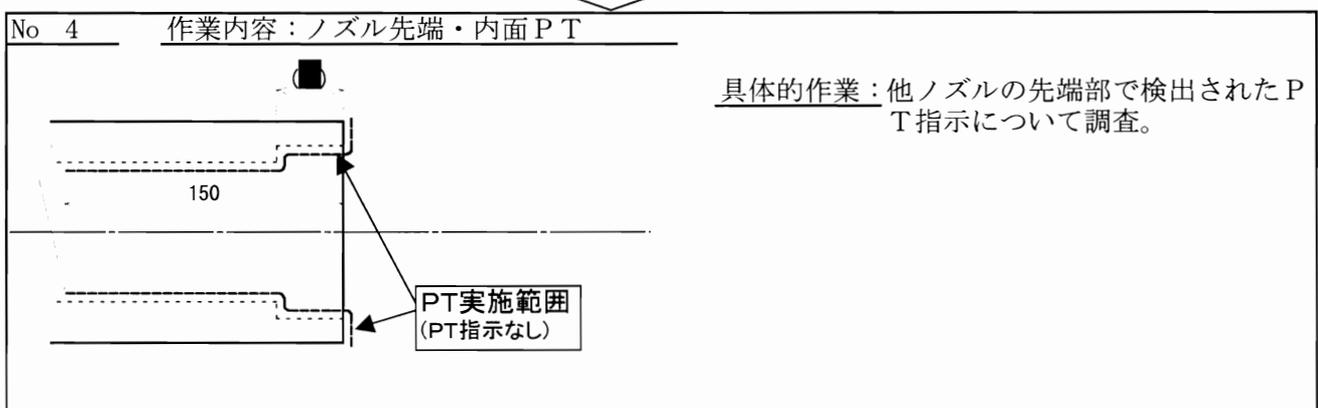
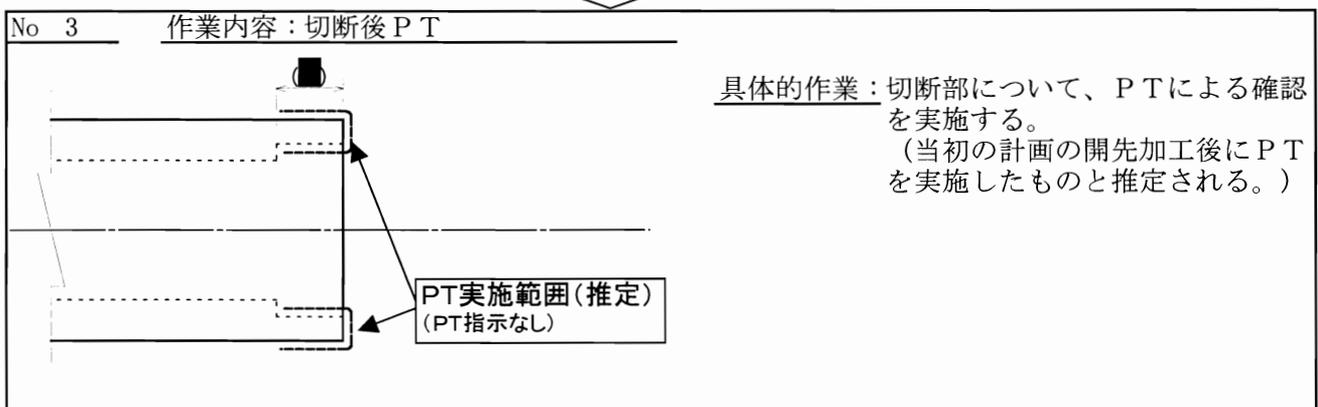
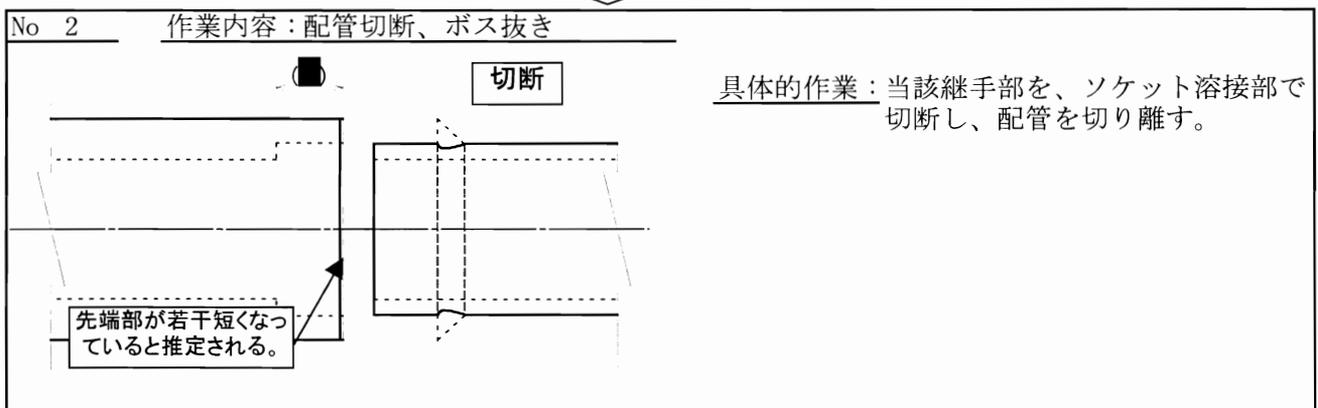
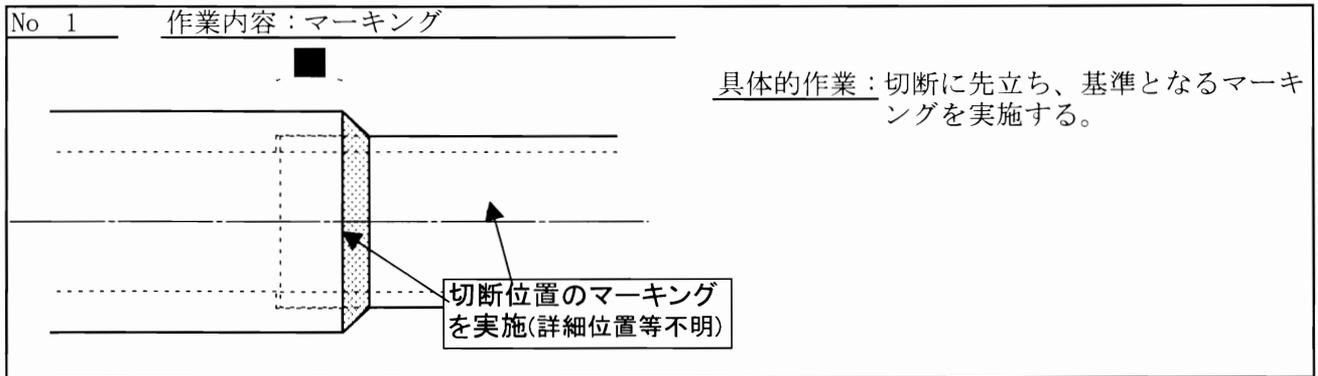
表 1 - 3 ( 1 ) 計算結果 (工認形状)

部分及び材料	一次一般膜応力 (Pm) (N/mm <sup>2</sup> )			一次膜+一次曲げ応力 (PL+Pb) (N/mm <sup>2</sup> )		
	応力強さ	許容値	応力評価面	応力強さ	許容値	応力評価面
ノズル セーフエンド (SUSF316)	46	142	P01-P02	54	201	P01-P02

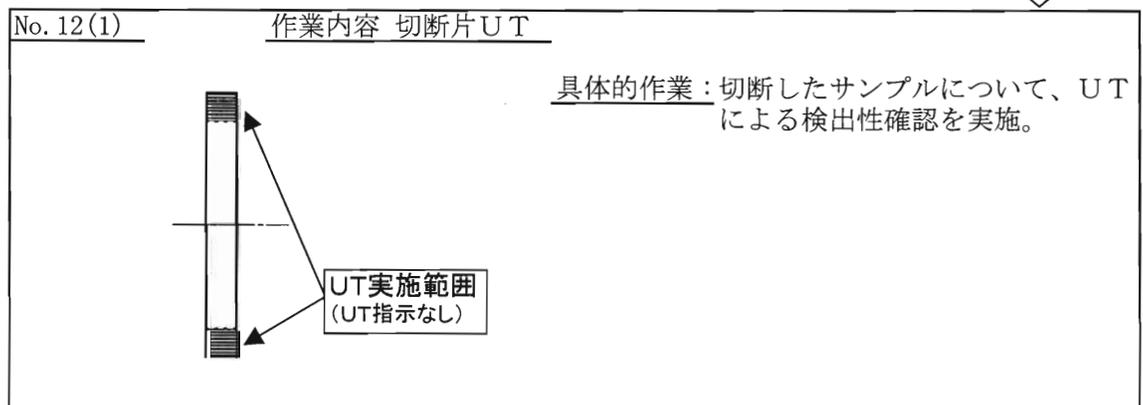
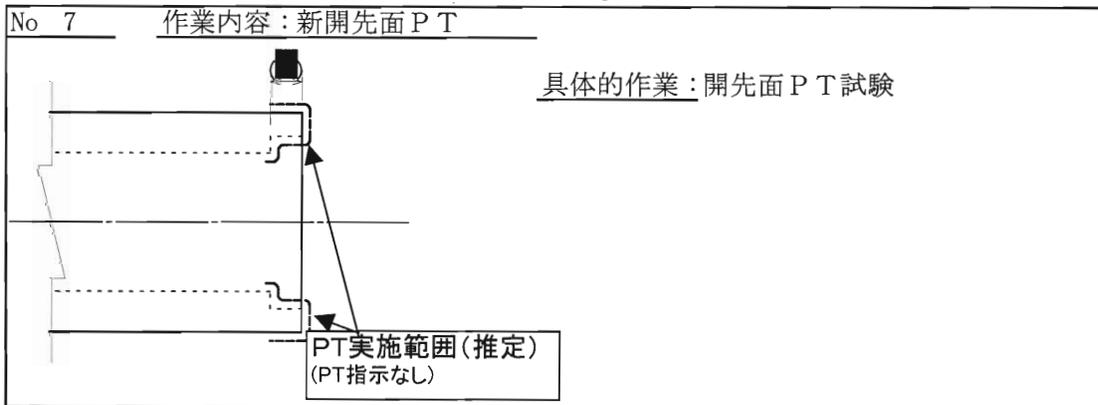
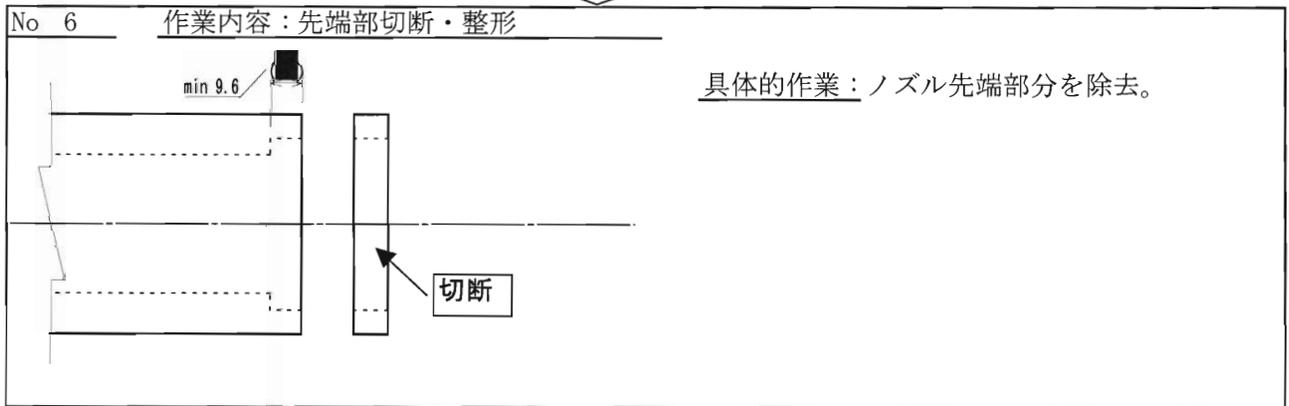
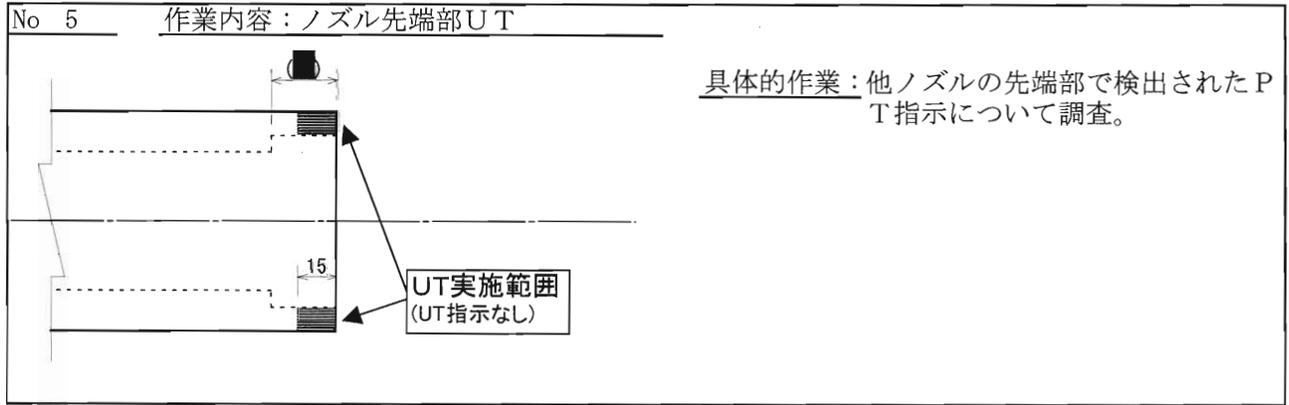
表 1 - 3 ( 2 ) 計算結果 (現形状)

部分及び材料	一次一般膜応力 (Pm) (N/mm <sup>2</sup> )			一次膜+一次曲げ応力 (PL+Pb) (N/mm <sup>2</sup> )		
	応力強さ	許容値	応力評価面	応力強さ	許容値	応力評価面
ノズル セーフエンド (SUSF316)	46	142	P01-P02	54	201	P01-P02

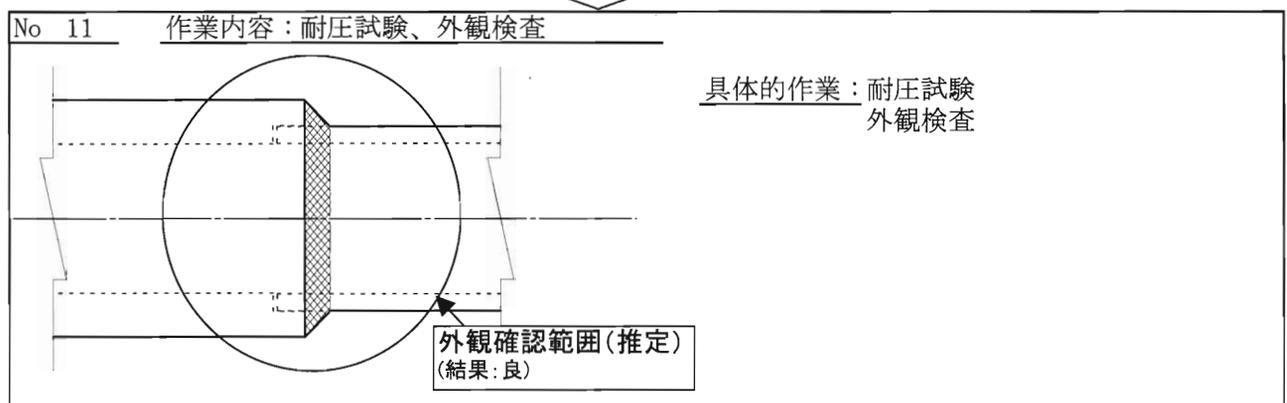
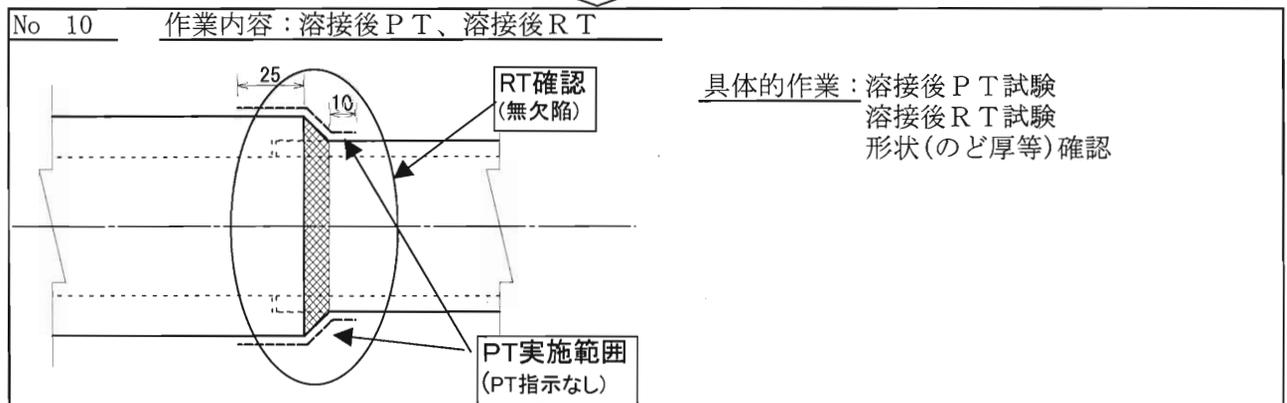
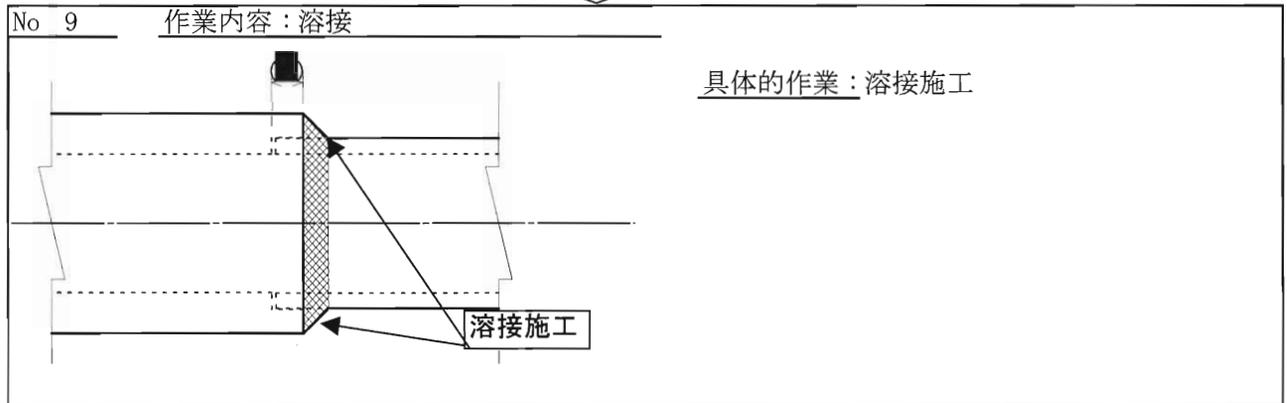
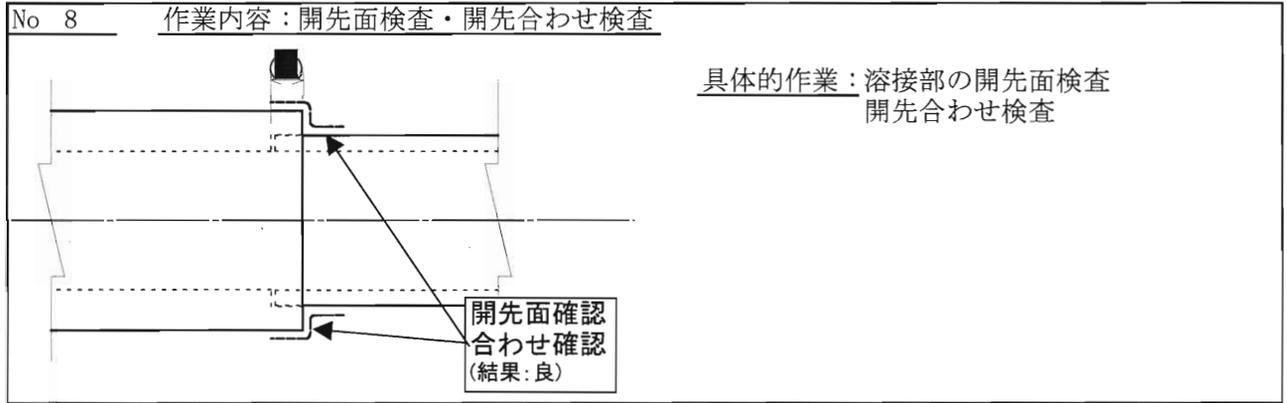
N14ノズルのセーフエンドに係る当時の施工状況フロー図 資料-3  
N14A (1/7)



N14ノズルのセーフエンドに係る当時の施工状況フロー図  
N14A (2/7)



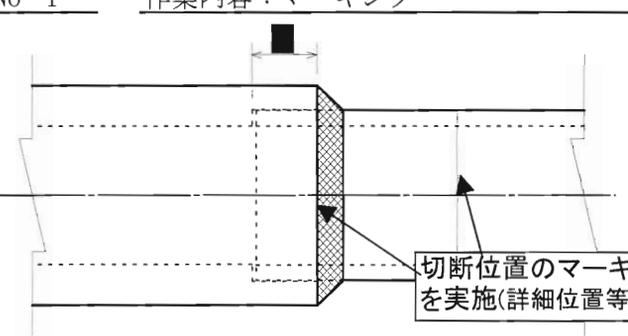
N14ノズルのセーフエンドに係る当時の施工状況フロー図  
N14A (3/7)



・ ( ) 内寸法は推定値

N14ノズルのセーフエンドに係る当時の施工状況フロー図  
N14B, C, D (4/7)

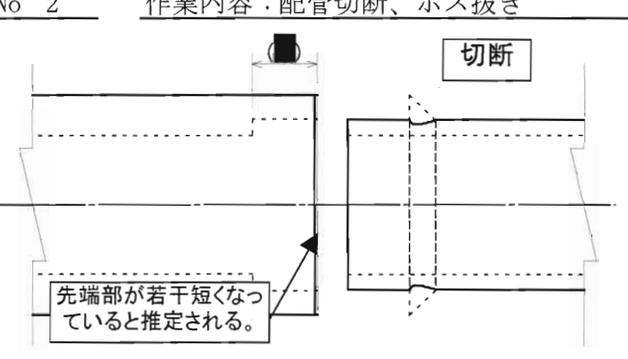
No 1 作業内容：マーキング



具体的作業：切断に先立ち、基準となるマーキングを実施する。

切断位置のマーキングを実施(詳細位置等不明)

No 2 作業内容：配管切断、ボス抜き

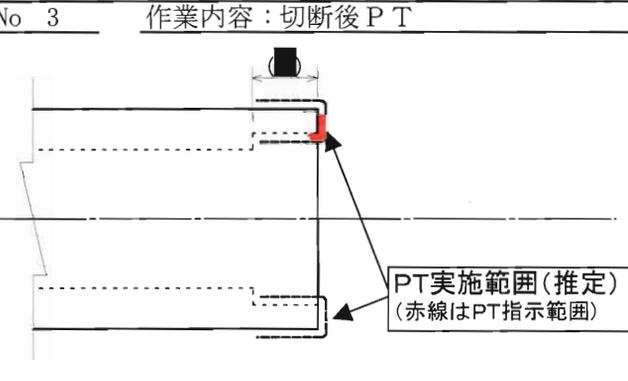


具体的作業：当該継手部を、ソケット溶接部で切断し、配管を切り離す。

先端部が若干短くなっていると推定される。

切断

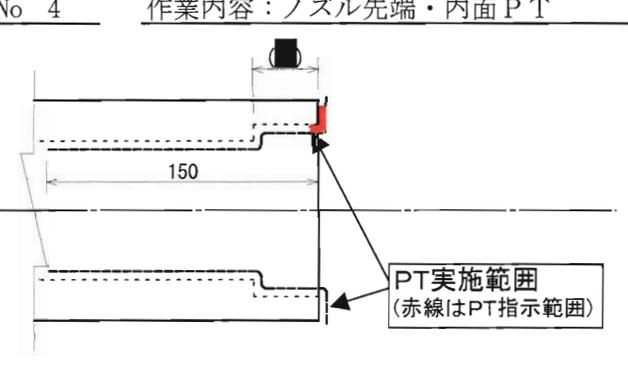
No 3 作業内容：切断後PT



具体的作業：切断部について、PTによる確認を実施する。  
(当初の計画の開先加工後にPTを実施したものと推定される。)

PT実施範囲(推定)  
(赤線はPT指示範囲)

No 4 作業内容：ノズル先端・内面PT

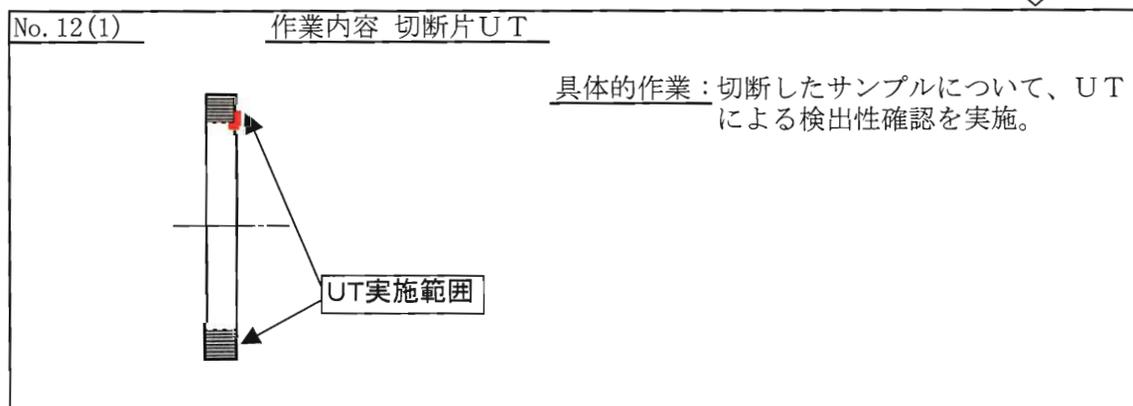
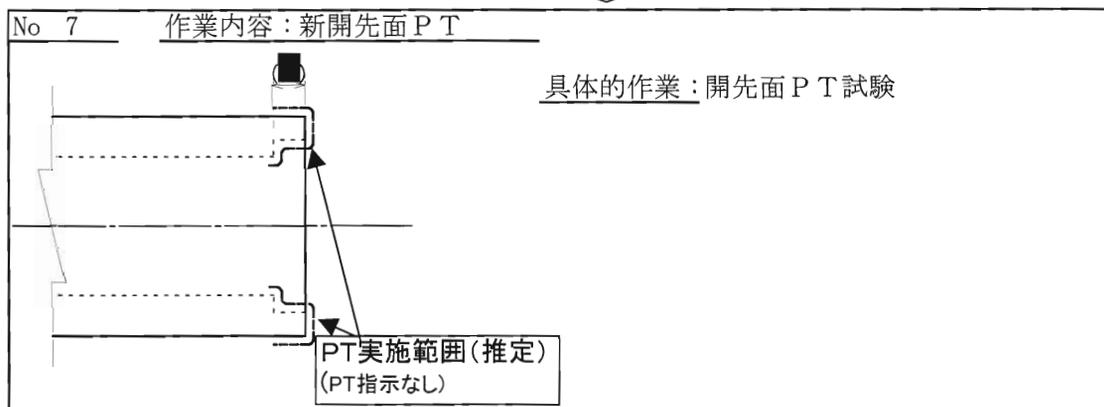
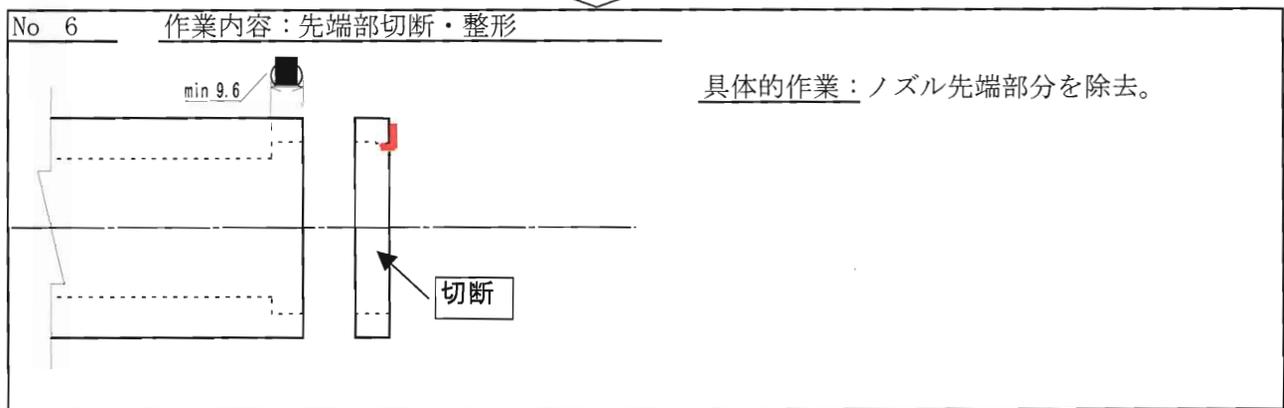
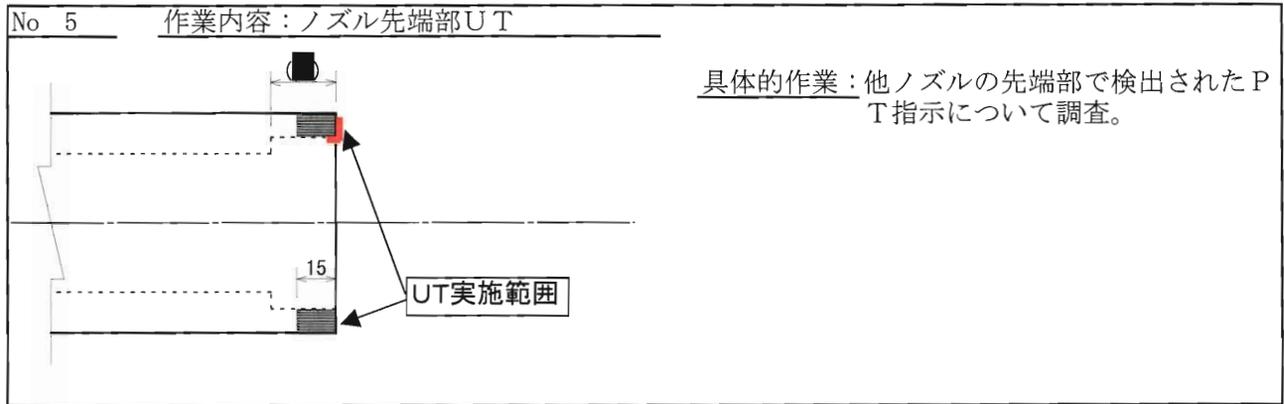


具体的作業：他ノズルの先端部で検出されたPT指示について調査。

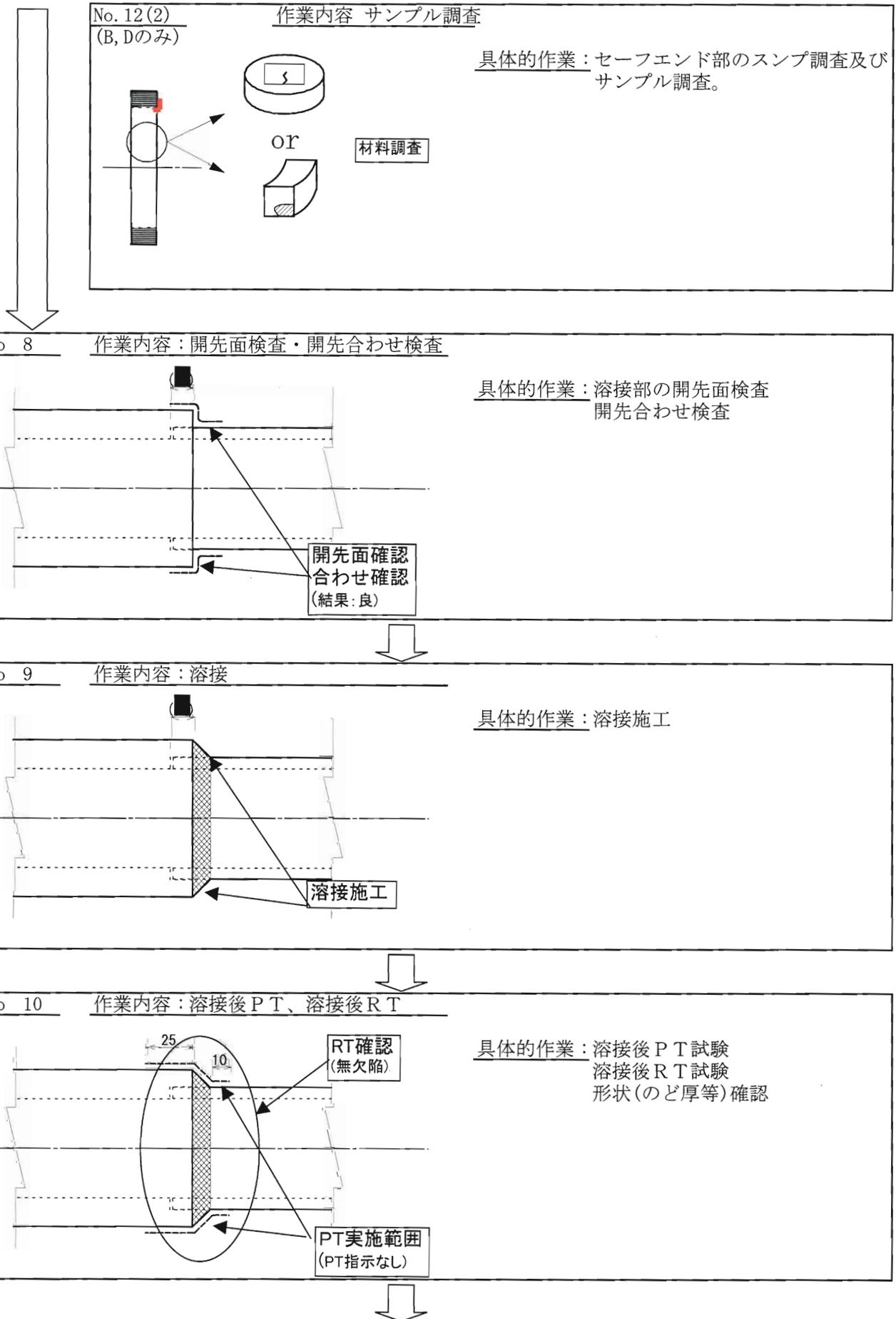
PT実施範囲  
(赤線はPT指示範囲)

150

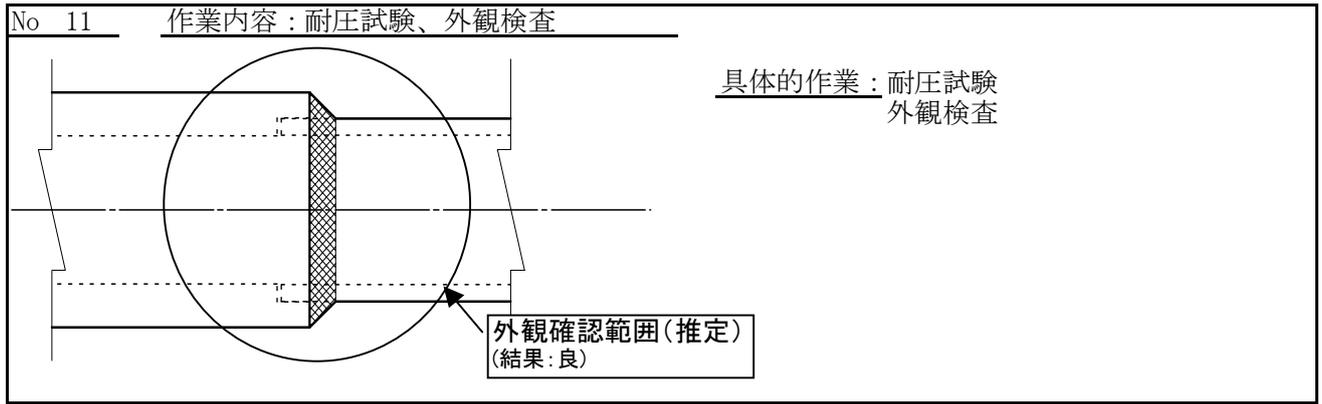
N14ノズルのセーフエンドに係る当時の施工状況フロー図  
N14B, C, D (5/7)



N14ノズルのセーフエンドに係る当時の施工状況フロー図  
N14B, C, D (6/7)

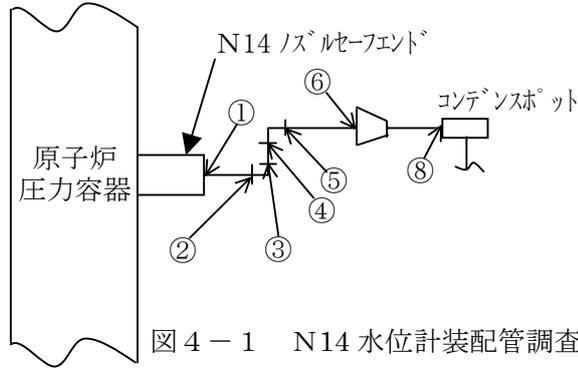


N14ノズルのセーフエンドに係る当時の施工状況フロー図  
N14B, C, D (7/7)



当時のひびの状況についての調査箇所、調査方法及び調査結果は次のとおりである。

1. N14 ノズルセーフエンド及び接続配管の調査箇所



※上記の他にN13 ノズルセーフエンド及びほう酸水注入系配管の UT 調査が実施されている。

2. 調査方法

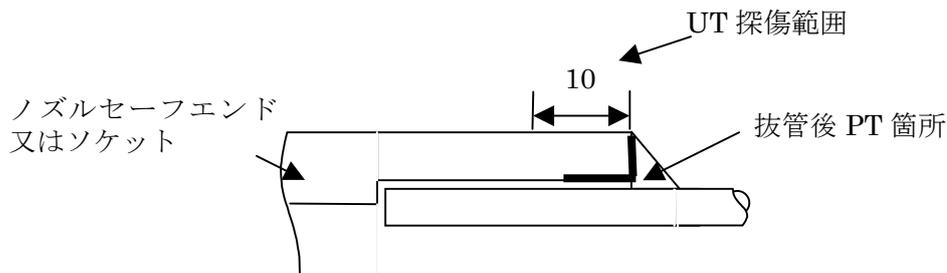
(1) 浸透探傷試験 (PT)

配管を抜管した後、PT 検査を実施 (PT 実施箇所は図4-2 参照)

(2) 超音波探傷試験 (UT)

ソケット先端部に対して、周方向斜角探傷による UT 検査を次のとおり実施 (UT 概念図は図4-3 参照)

- ①方法；周方向斜角(45°)探傷
- ②使用探触子；周波数 5 MHz，振動子径 1/4 インチ
- ③基準感度；セーフエンドと同等の材質，口径，板厚の対比試験片の深さ 4 mm EDM ノッチが CRT100%となる感度
- ④探傷範囲；図4-2 に示す UT 探傷範囲
- ⑤記録；CRT20%以上の指示について，指示位置，軸方向長さ及び最大エコー高さを記録



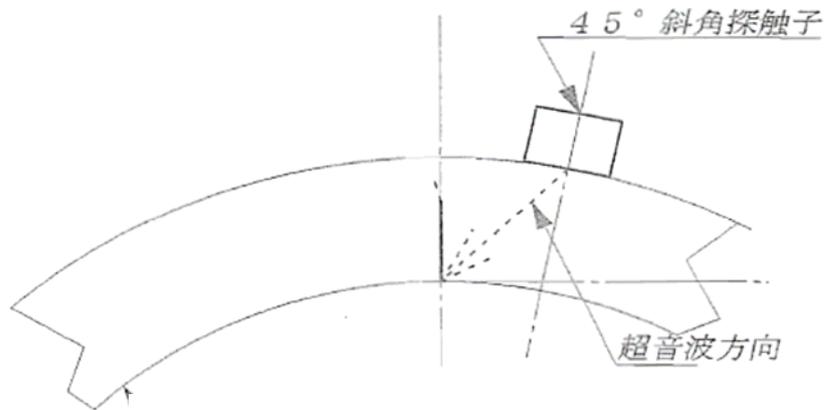


図 4-3 UT 概念図

### 3. 調査結果

PT 指示/UT 検出位置を図 4-4 (1)～図 4-4 (6) に、記録の取り纏め結果を表 4-1 に示す。

表 4-1 においては、図 4-1 に示す溶接継手部に対して、PT または UT で指示があった位置 (方位)、切断端面での PT 指示寸法、及び UT エコー高さを纏めている。

以下に、検出されているひびの状況を示す。

#### (1) N14 ノズルセーフエンド (図 4-4 (1)～図 4-4 (3) 参照)

N14B, C, D ノズルセーフエンド部に PT 指示模様及び UT 指示が確認されている。なお、UT 指示箇所は、必ずしも PT 指示と対応した結果は得られていない。

#### (2) N14 接続配管 (図 4-4 (4)～図 4-4 (6) 参照)

PT については、調査した 24 継手のうち 3 継手に PT 指示が確認され、UT については、調査した 24 継手のうち 15 継手に UT 指示が確認されている。

なお、UT 指示箇所は、必ずしも PT 指示と対応した結果は得られていない。

CW : 超音波入射方向が時計回り方向  
 CCW : 超音波入射方向が反時計回り方向

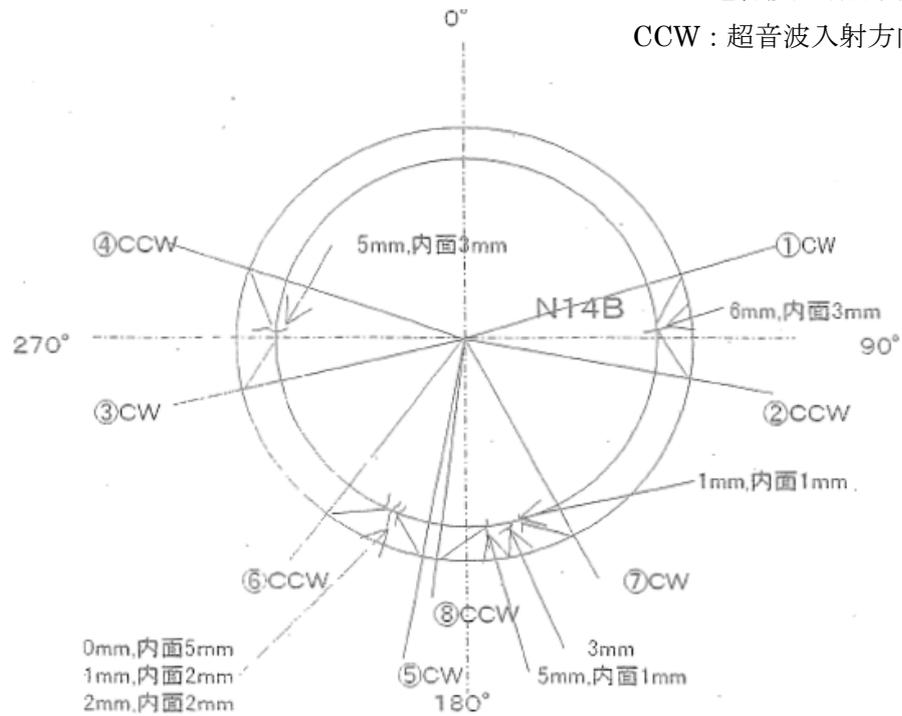


図4-4(1) N14B ノズルフェント PT 指示/UT 検出位置

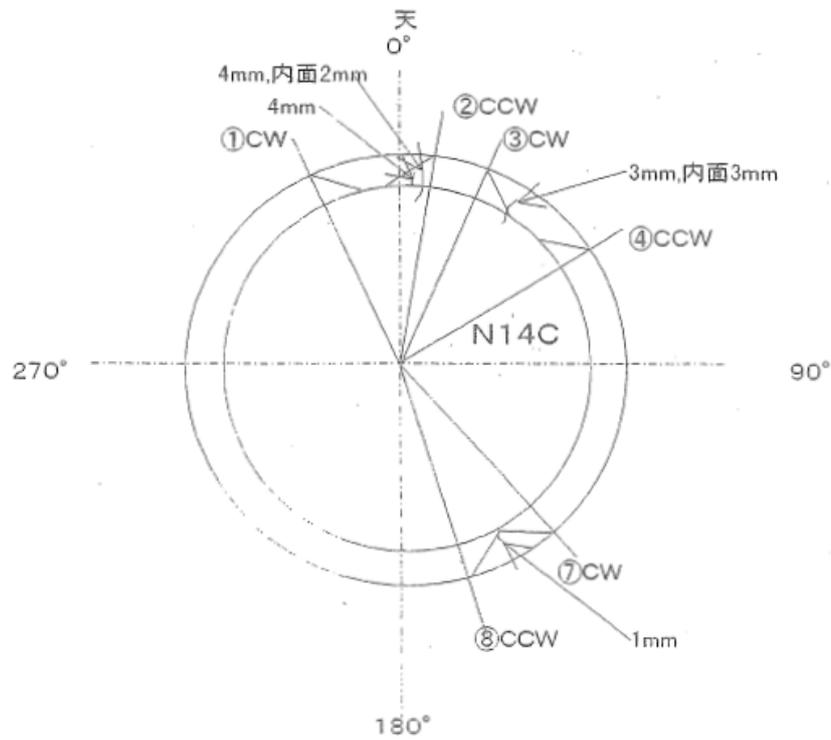


図4-4(2) N14C ノズルフェント PT 指示/UT 検出位置

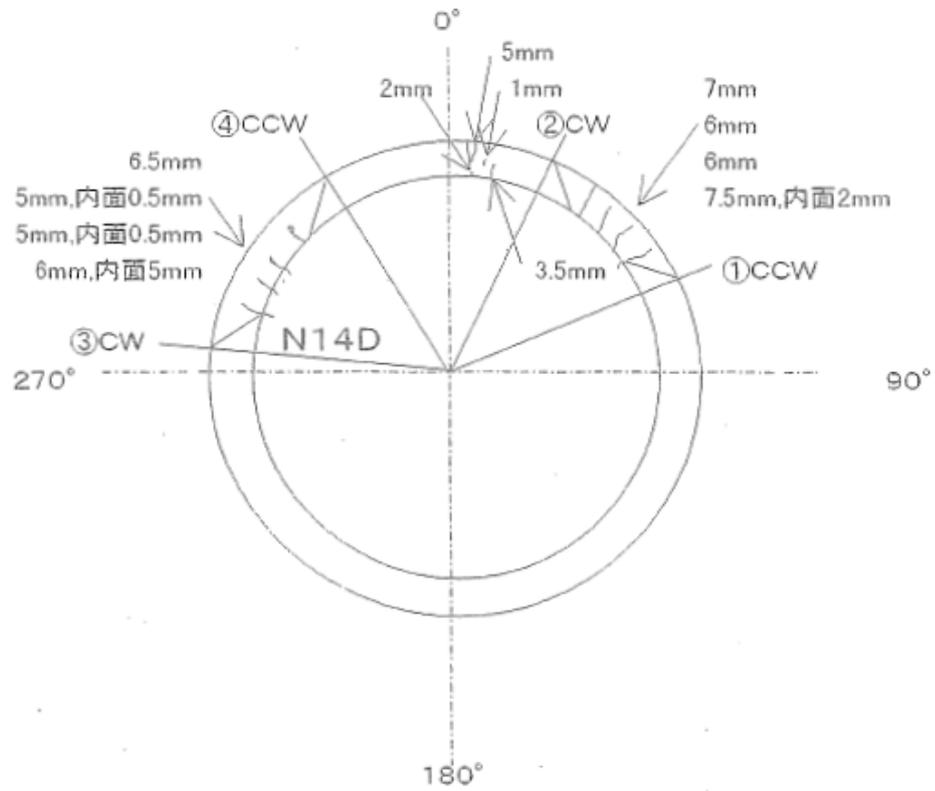


図4-4(3) N14D ノズルヘッド PT 指示/UT 検出位置

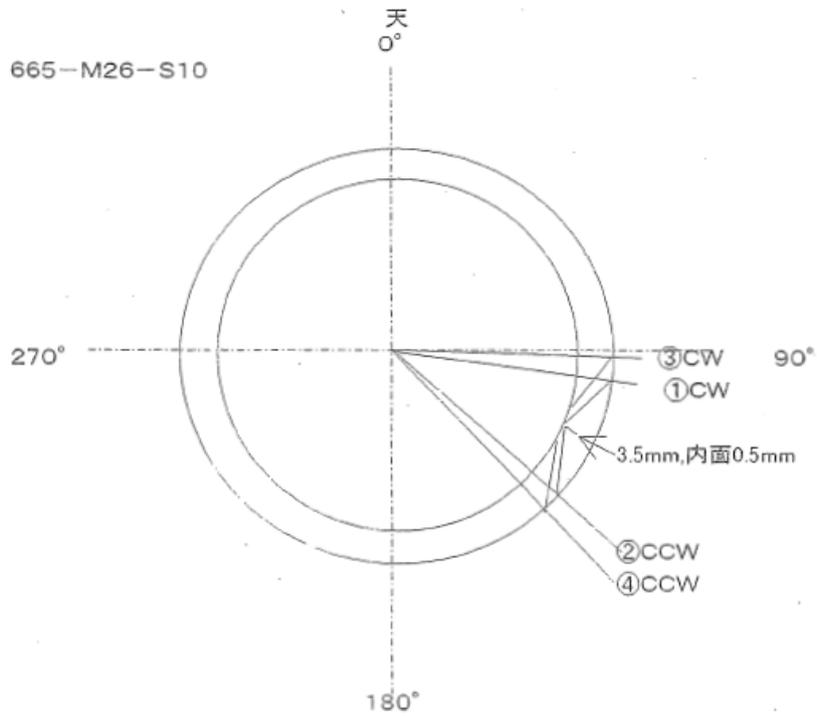


図4-4(4) N14A 接続配管 PT 指示/UT 検出位置

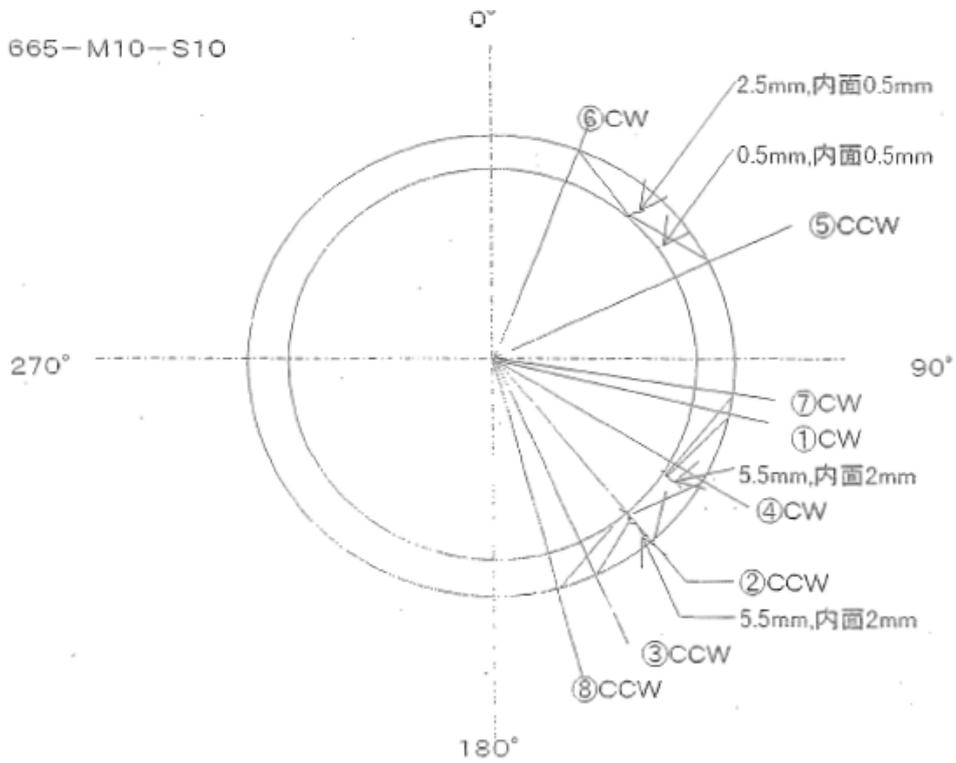


図4-4(5) N14B 接続配管 PT 指示/UT 検出位置

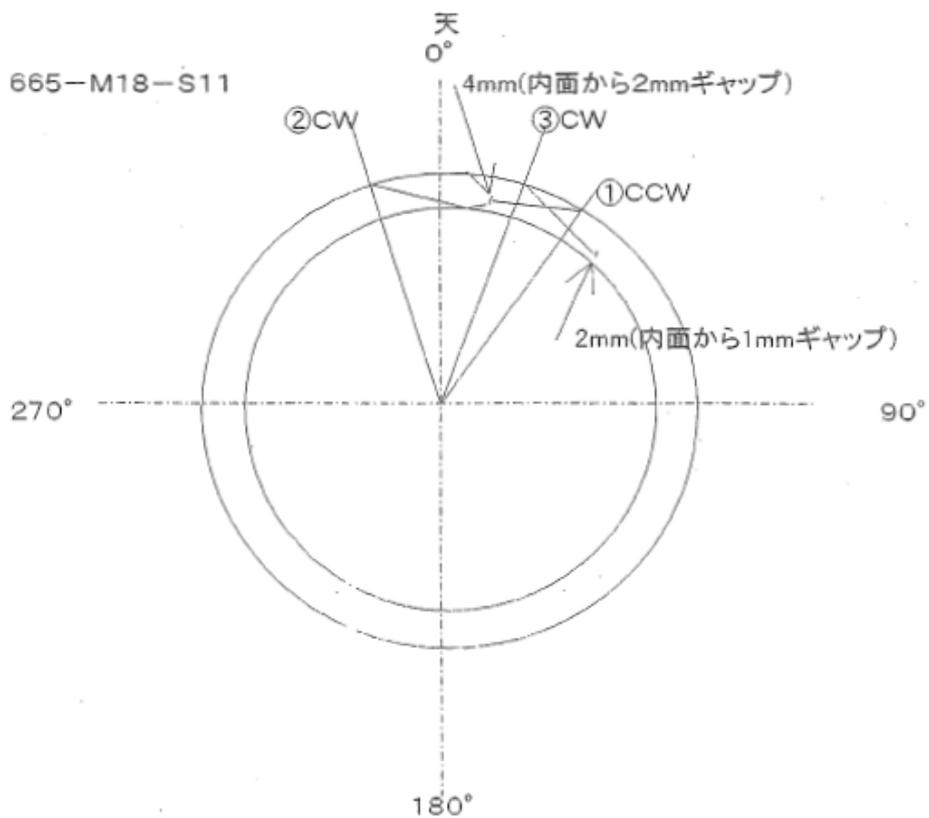


図4-4(6) N14D 接続配管 PT 指示/UT 検出位置

表4-1 記録の取り纏め表

符号	指示位置		切断端面PT指示(mm)		UT指示		備考
	ノズルor継手番号	方位(°)	軸方向長さ	深さ	エコー高さ(%)	検出方向	
N14A①	N14A	50	PT指示無し		25	CCW	
N14A①	N14A	320	PT指示無し		20	両側	
N14B①	N14B	90	3	6	85	両側	
N14B①	N14B	173	1	1~5	30	両側	
N14B①	N14B	200	5	1以下	52	両側	
N14B①	N14B	270	3	5	75	両側	破断の結果、軸方向長さ約6mm
N14C①	N14C	0	2	4	68	両側	
N14C①	N14C	30	3	3	82	両側	
N14C①	N14C	150	0	1	30	両側	
N14D①	N14D	0	0	3.5	検出せず	-	破断の結果、軸方向長さ小
N14D①	N14D	60	2	7.5	58	CCW	
N14D①	N14D	290	5	6	52	CW	破断の結果、軸方向長さ約6mm
N14D①	N14D	315	0.5	5~6.5	43	CCW	
N14A②	665-M26-S10	120	0.5	3.5	60	両側	
N14B②	665-M10-S10	40	0.5	2.5	45	両側	
N14B②	665-M10-S10	55	0.5	0.5	検出せず	-	
N14B②	665-M10-S10	120	2	5.5	60	両側	
N14B②	665-M10-S10	130	2	5.5	80	両側	
N14D②	665-M18-S11	15	内面指示無し	4	45	両側	
N14D②	665-M18-S11	35	内面指示無し	2	20	CW	
N14A③	665-M26-S11	100	PT指示無し		30	両側	
N14A④	665-M26-S01	105	PT指示無し		30	両側	
N14A④	665-M26-S01	180	PT指示無し		25	CCW	
N14A⑤	665-M26-S20		-		UT指示無し	-	
N14A⑥	665-M26-S02	110	PT指示無し		50	両側	
N14B③	665-M10-S01	60	PT指示無し		20	CW	
N14B③	665-M10-S01	105	PT指示無し		35	CCW	
N14B③	665-M10-S01	270	PT指示無し		20	CCW	
N14B④	665-M10-S20	210	PT指示無し		45	CW	
N14B④	665-M10-S20	220	PT指示無し		30	CCW	
N14B⑥	665-M10-S02	125	PT指示無し		17	CW	
N14C③	665-M01-S10	300	PT指示無し		25	CW	
N14C④	665-M01-S01	10	PT指示無し		33	CW	
N14C④	665-M01-S01	70	PT指示無し		43	CCW	
N14D③	665-M18-S10		-		UT指示無し	-	
N14D④	665-M18-S01	340			45	CCW	
N14D④	665-M18-S01	315			40	CW	
N14D⑤	665-M18-S20	345			45	CCW	
N14D⑥	665-M18-S02	300			35	CCW	
N14B⑧	665-109-F35	270			32	CCW	25A

- ・エコー高さ:ノイズレベルを5~10%CRTとしたときのCRT%を示す。
- ・検出方向:周方向深傷における検出方向を示す。(両側;CW, CCW共に検出した場合)

\* : N14A③については、切断調査における配管側にPT指示(3箇所)を検出している。

## 当時のサンプル調査結果

当時のサンプル調査での報告は以下のとおりである。(発注先メーカー資料より抜粋)

(「ひびの原因調査の中間報告」に関する資料 (平成 10 年 11 月 25 日))

### I. 割れ原因の推定

#### (1) 当該割れの特徴

- ① 10%しゅう酸エッチによる観察結果より、母材の粒界は鋭敏化していない。
- ② 破面表面が均一な黒色を呈しており、部位による顕著な色の変化がない。
- ③ 欠陥中央部の幅が広く、内外面側端部で狭くなっている。
- ④ 内外面側欠陥端部に硬さの上昇が見られている。
- ⑤ 割れは外面側は貫通しておらず、薄皮 1 枚で停止している。一方、内面側は開口しているものの、やはり、薄皮が残存した部分があり、内面開口部よりも板厚中央部の方が広がっている。
- ⑥ き裂先端部の断面観察から、割れは先端が鈍化し丸くなっている。
- ⑦ 割れは軸方向に発生しており、発生位置は、ほぼ等間隔である。
- ⑧ 異なった管から採取したサンプルに観察された破面形状が酷似している。

(「ひびの原因調査結果について報告を受けた」際の資料 (平成 10 年 12 月 16 日頃))

### 2. 実機廃材調査結果

#### 3) 金属調査結果まとめ

##### b. ノズルセーフエンド部ポートサンプル調査結果 (添付資料-4)

- ・母材粒界の鋭敏化は認められなかった。
- ・破面の表面は均一な黒色を呈しており、部位による顕著な色の変化はなかった。
- ・欠陥の中央部は幅が広く、内外面端端部で狭くなっていた。
- ・内外側の欠陥端部に硬さの上昇が見られた。
- ・き裂先端部の断面観察結果から、割れは先端が鈍化して丸くなっており、停止した割れと判断された。

なお、当該サンプル調査は、N14B 及び N14D の 2 つのノズルに対して実施されているが、当該サンプルは、ひびの状況調査において、確認された PT 指示模様が同形態であったことから、切断後の内面軸方向の指示模様が確認されているものや確認されていないものを含むように、指示模様の多い当該 2 つのノズルから抽出されたものと推測される。

サンプル調査結果

○破面観察結果

図 5-1-1

破面外観観察結果

図 5-1-2

N14D SEM-2 破面 SEM 観察結果

○端面マイクロ観察結果

図 5-2-1 (1) (2)

N14D 端面マイクロ観察結果

図 5-2-2 (1)

N14B 端面マイクロ観察結果

○断面マイクロ観察結果

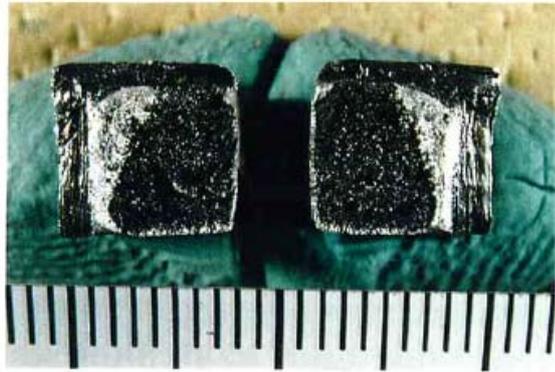
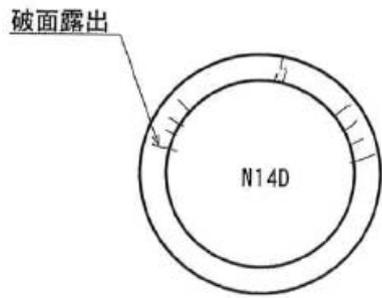
図 5-3 断面マイクロ観察結果 (N14D から採取)

○硬さ試験結果

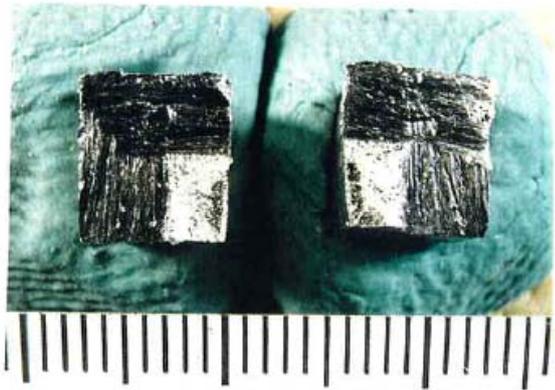
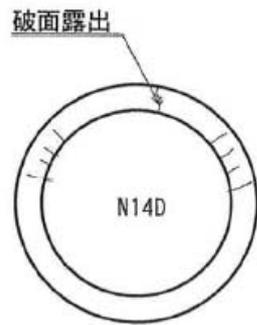
図 5-4-1 硬さの板厚方向の分布

図 5-4-2 硬さの軸方向の分布

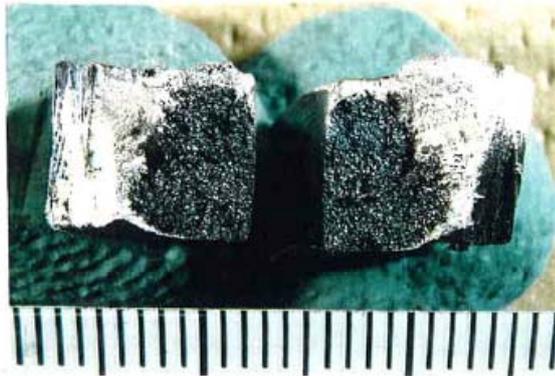
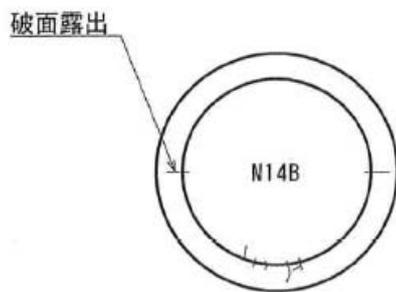
図 5-4-3 ひび近傍の硬さ分布



N14D SEM-1



N14D SEM-2



N14B SEM-1

圖 5 - 1 - 1 破面外觀觀察結果

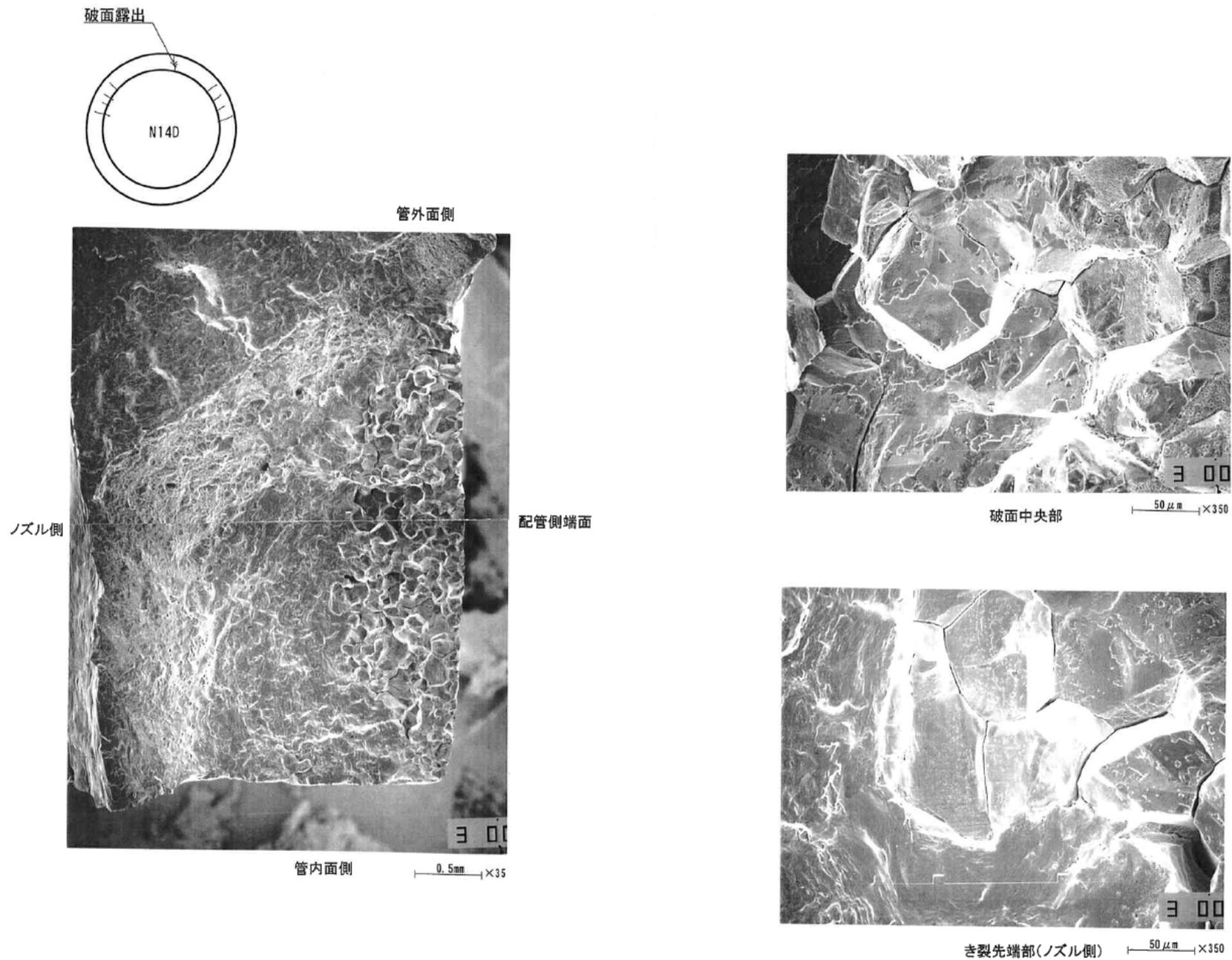


図5-1-2 N14D SEM-2 破面SEM観察結果

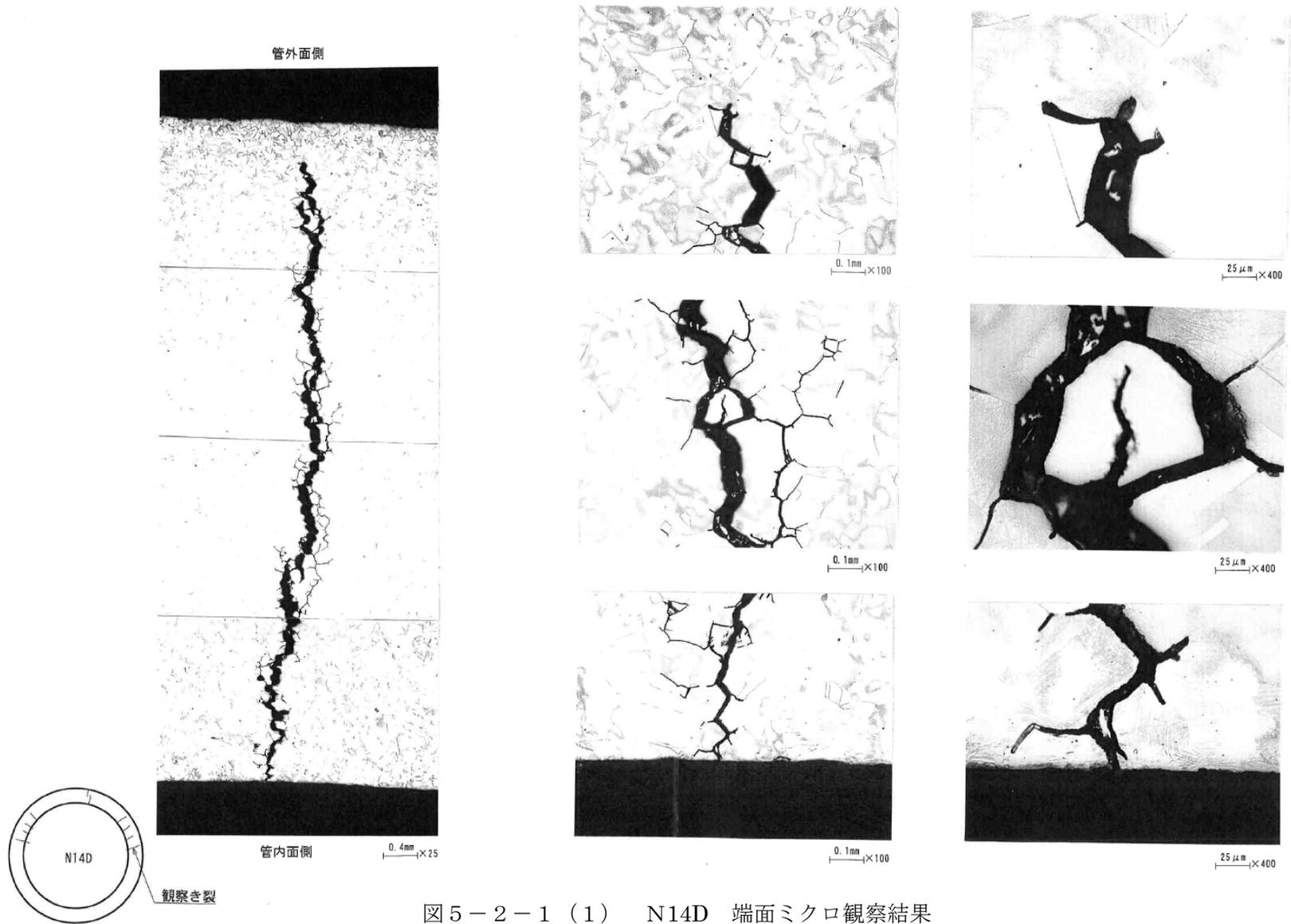


図5-2-1 (1) N14D 端面マイクロ観察結果

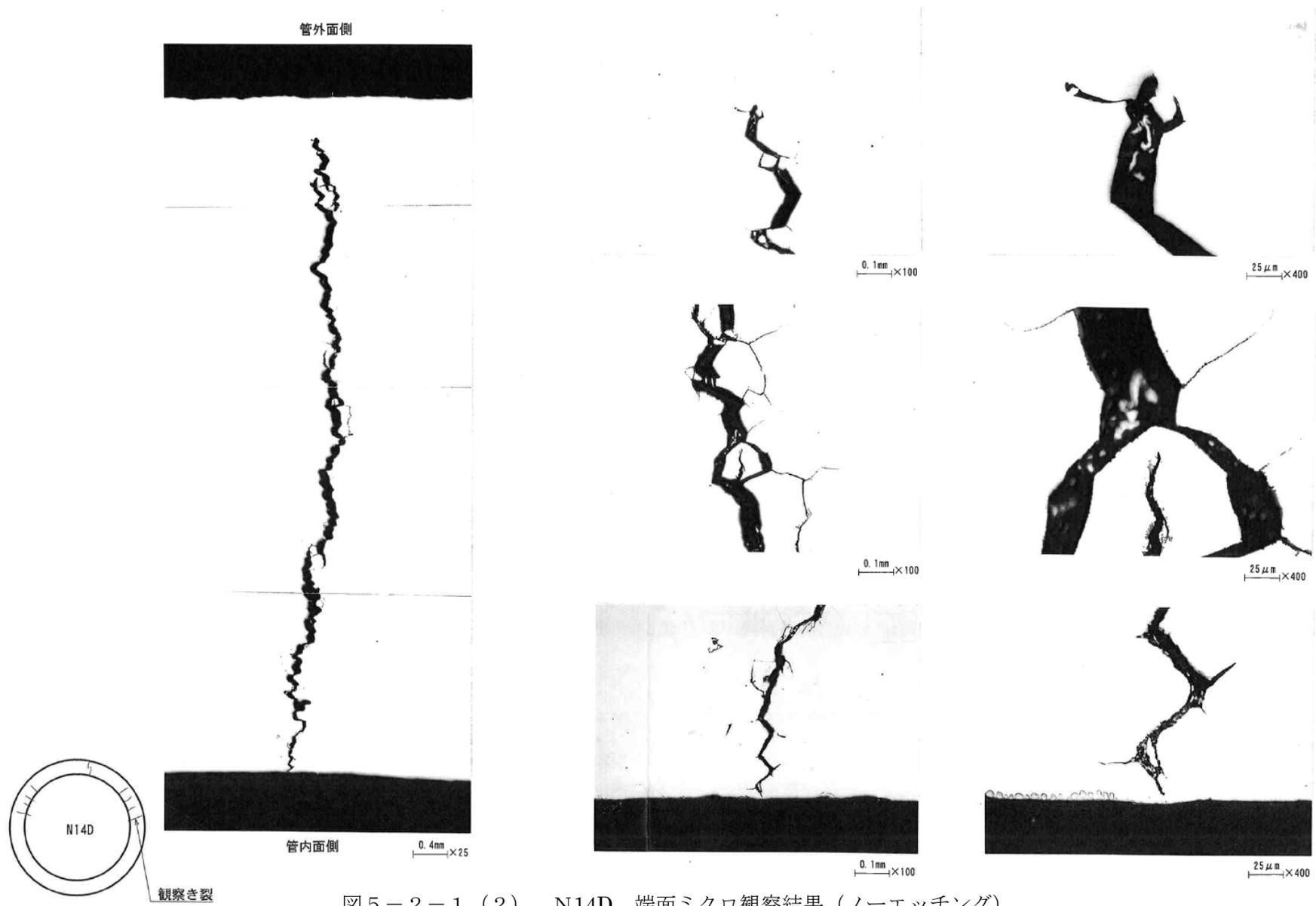


図5-2-1 (2) N14D 端面マイクロ観察結果 (ノーエッチング)

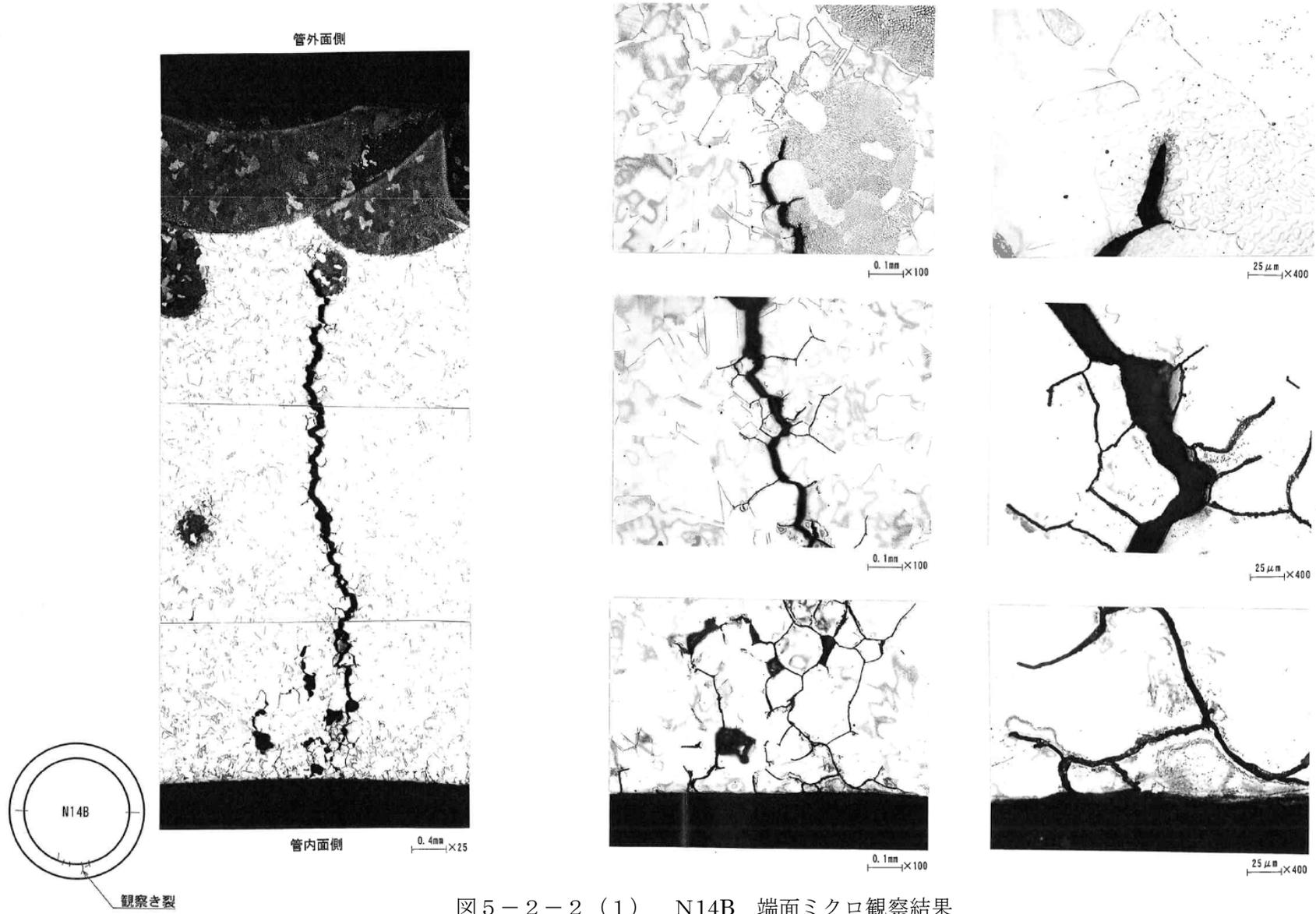


図5-2-2 (1) N14B 端面マイクロ観察結果

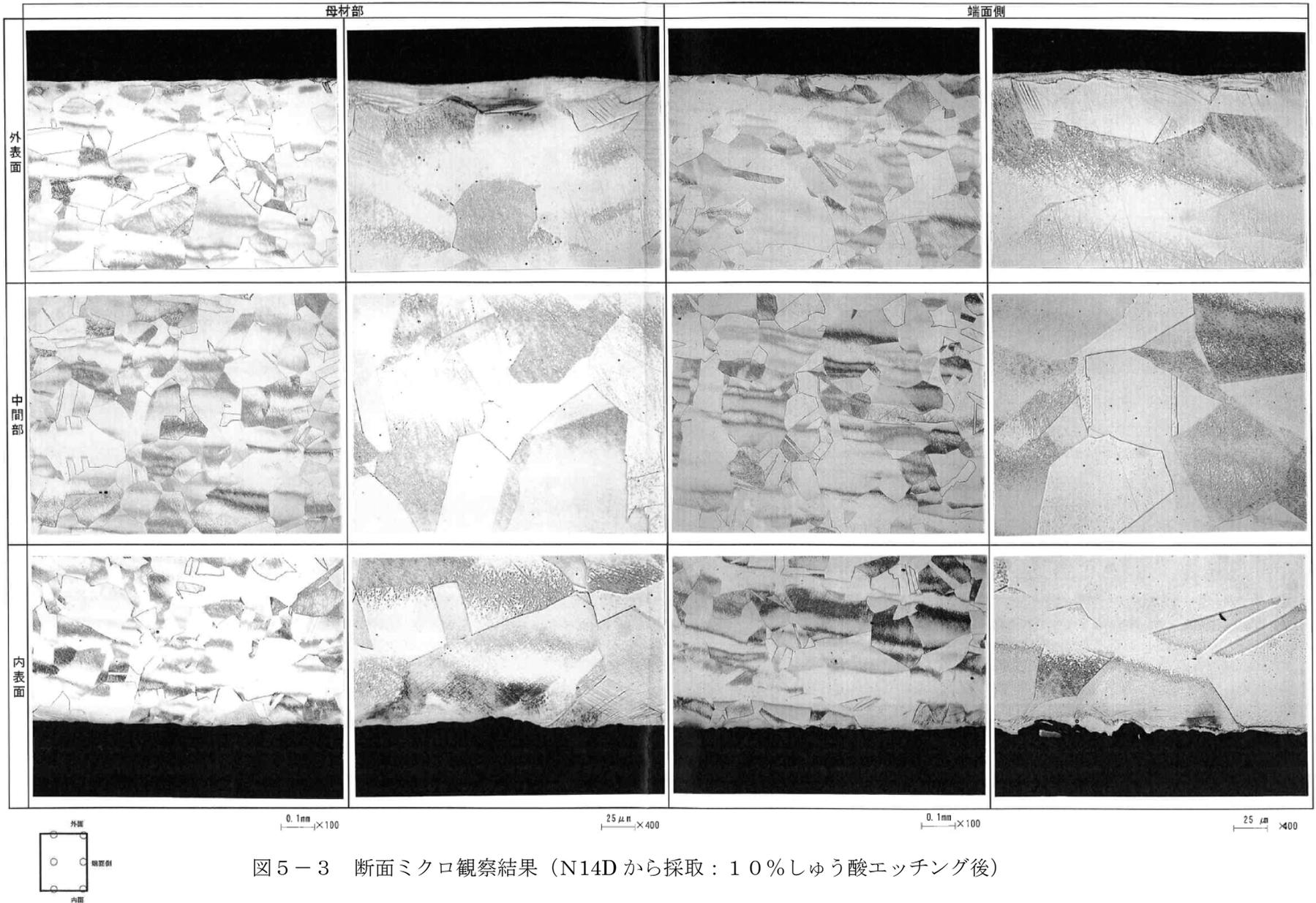


図5-3 断面マイクロ観察結果 (N14D から採取 : 10%しゅう酸エッチング後)

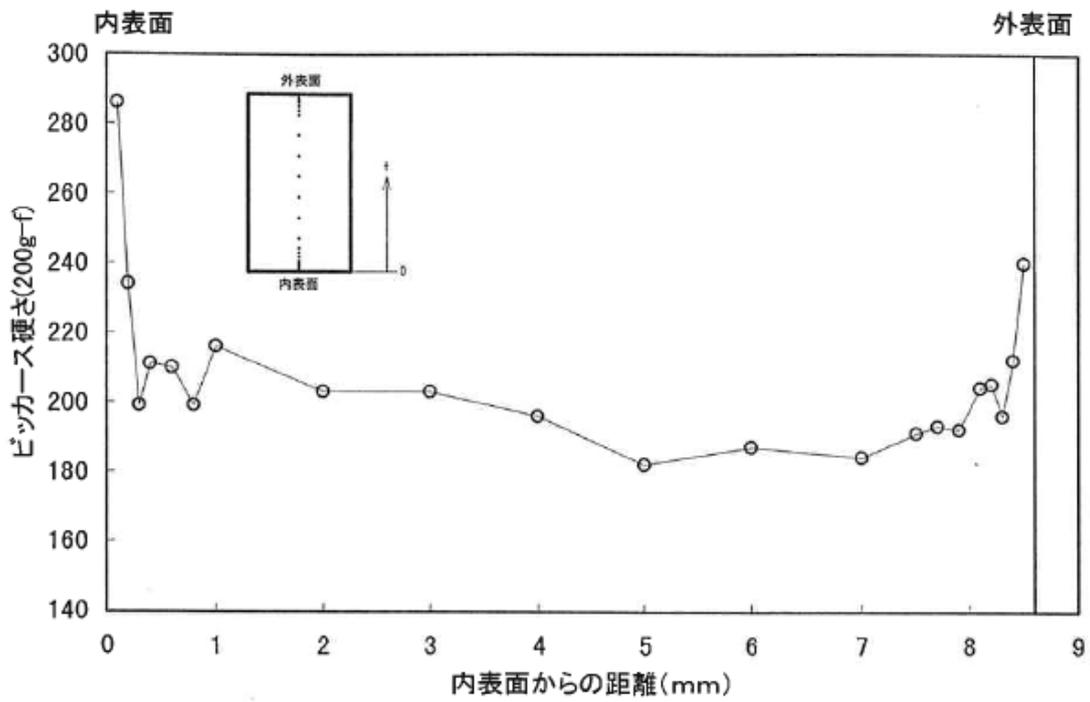


図5-4-1 硬さの板厚方向の分布 (ビッカース硬さ 荷重: 200 g-f)

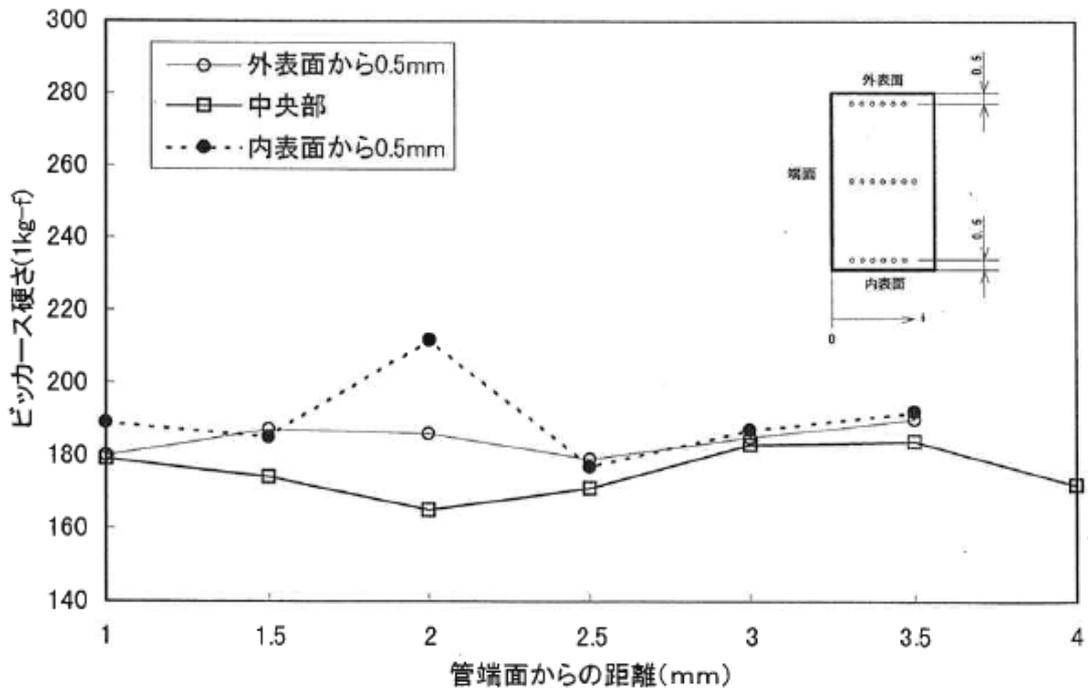


図5-4-2 硬さの軸方向の分布 (ビッカース硬さ 荷重: 1 kg-f)

硬さ比較(母材)		
	200g-f	1kg-f
計測点1	194	191
計測点2	205	181
計測点3	211	182
計測点4	197	180
計測点5	190	188
平均値	199	184

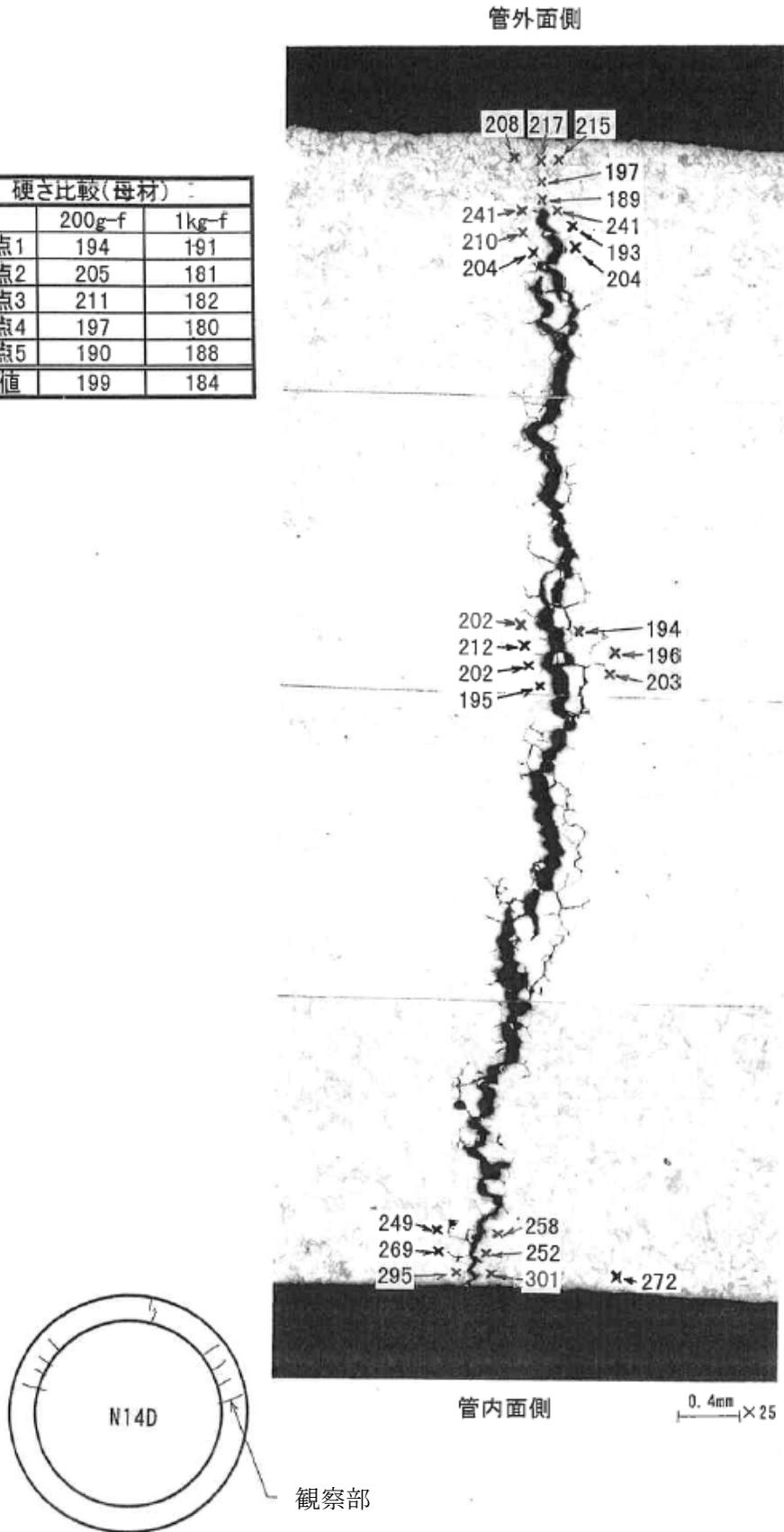
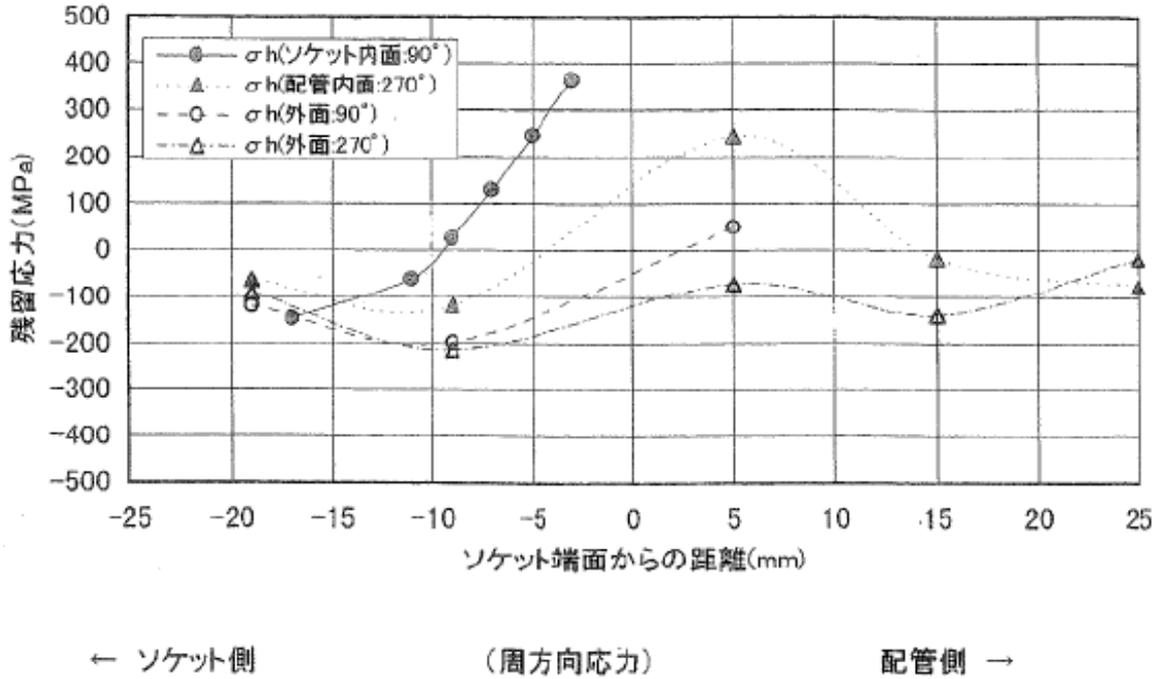


図 5 - 4 - 3 ひび近傍の硬さ分布 (N14D)

ソケット継手のモックアップによる残留応力測定

50Aソケット溶接 残留応力計測結果(RS1:4パス 周方向応力)



50Aソケット溶接 残留応力計測結果(RS1:4パス 軸方向応力)

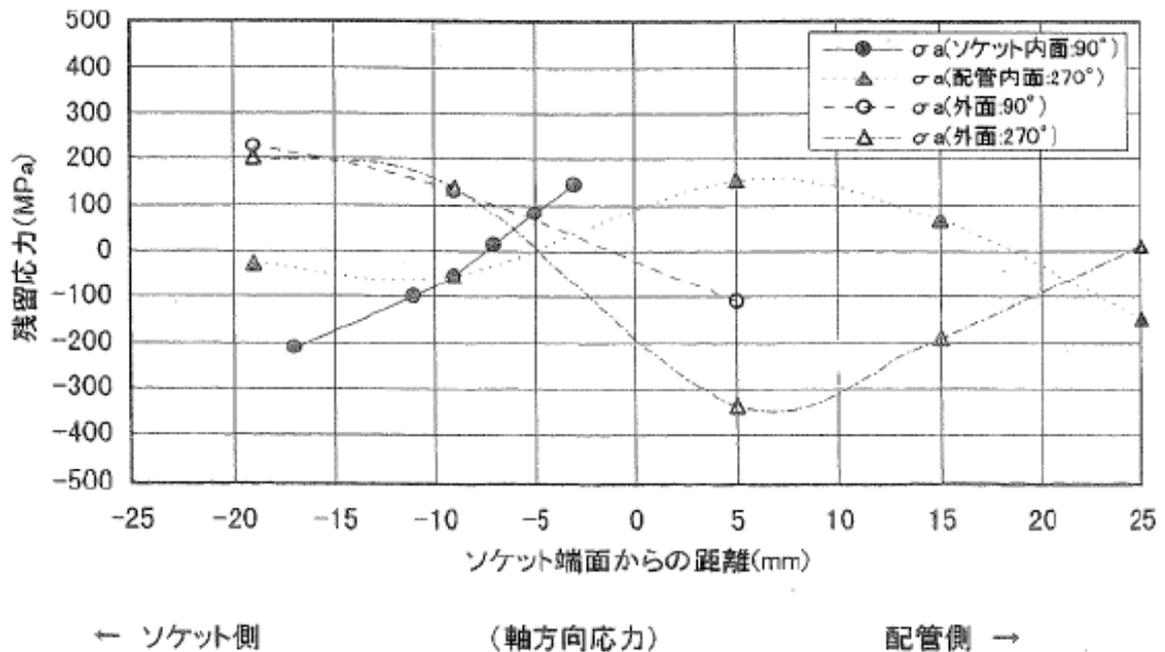
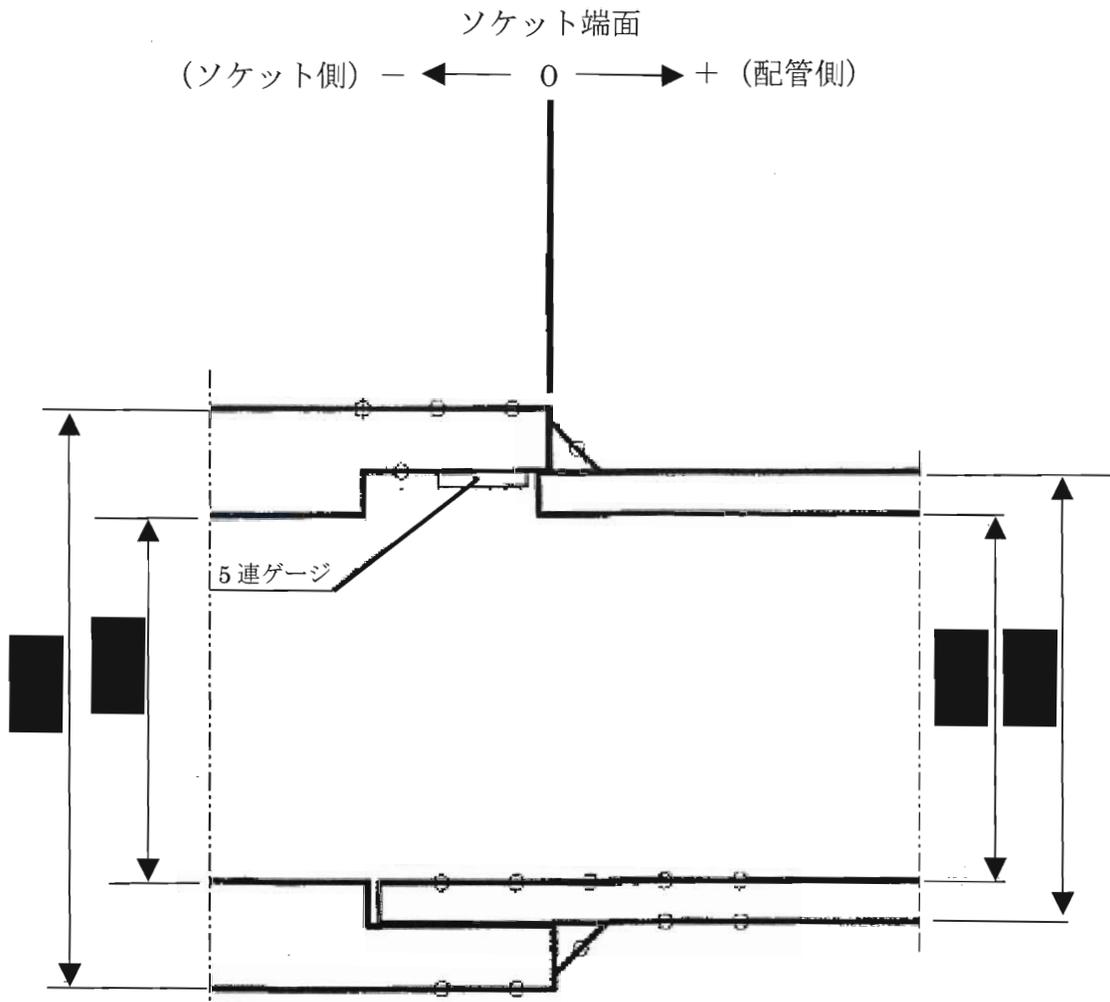


図6-1 50Aソケットのひずみ解放法による残留応力計測結果 (試験体RS1:4パス溶接)



○ : ひずみゲージ取付け位置

図6-2 残留応力計測位置

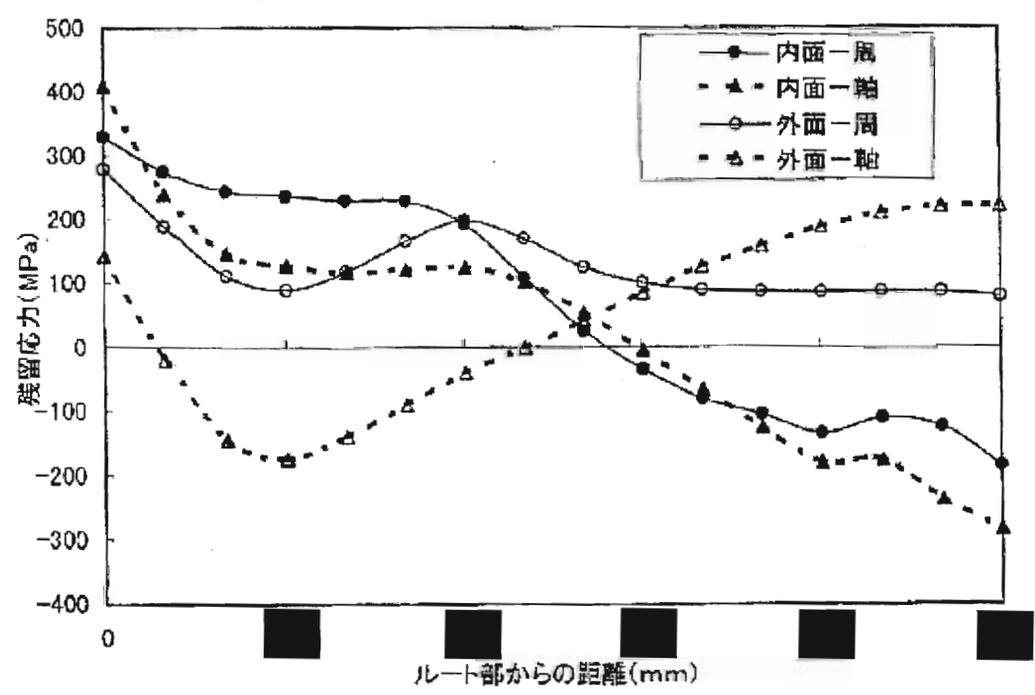
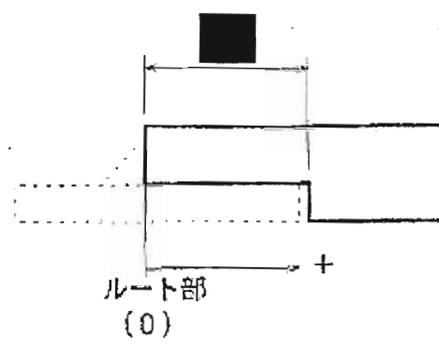


図6-3 FEMによるソケット部の応力解析結果

## ひびの進展形態に基づく発生メカニズムの推定

### 1. 調査結果に基づく代表的なひび形状の推定と分類

ソケットの端面および内面の浸透探傷試験(以下, PT)結果(資料-4 図4-4参照)によると, 確認された PT 指示 24 個の中に, ソケット内面(接液面)側に開口していないひび(図7-1)が 11 個確認された。

当該配管の切断は, 溶融境界からソケット母材側に 1~2 mm 程度の位置で行われたとされていることから, 図7-2に示すように, 切断時に開口部が除去された可能性も否定できないが, いずれの場合においても, ひびの内面側の開口部幅は, 板厚内部でのひび幅よりも小さいと判断できる。

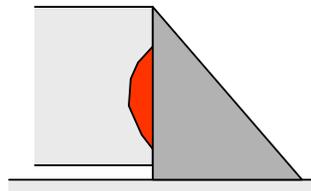


図7-1 ソケット内面の接液面側に開口していないひび

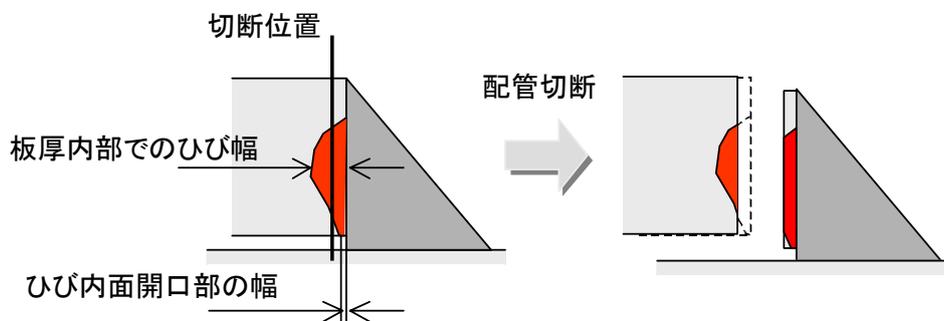


図7-2 配管切断時に開口部が除去された

開口部の幅が板厚内部のひび幅と比較して小さい傾向は, 発注先メーカーにより実施された破面調査結果(資料-5 図5-1-1参照)においても, 特にN14D-SEM-2, N14B-SEM-1において明瞭に観察される。

N14D-SEM-1については, ソケット内外面のわれ残り部が他の2例と比較して小さいが, 上述の端面 PT 結果や, 破面様相の顕微鏡観察結果では, 他と同様な傾向が認められており, いずれのひびも同一のメカニズムにより生じたと判断される。

したがって、現状で確認されている知見の範囲では、実機で確認されたひび形状は以下の3通りに分類できる(図7-3参照)。

-Type A: 内面に開口部のないひび(資料-4 図4-4のPT指示結果の中で、内面の軸方向長さが記載されていないもの)

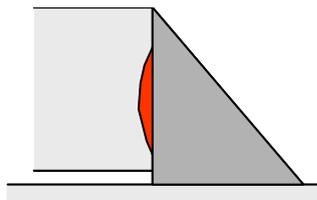
-Type B: 内面に開口部があるが、軸方向幅の小さいひび(資料-5 図5-1-1のN14D SEM-2)

-Type C: 軸方向幅が大きく、ソケット内外面近傍のわれ残りが明瞭なひび(資料-5 図5-1-1のN14D SEM-1)

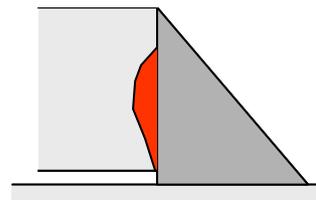
一方、後述のように、内表面を起点としてSCCが発生・進展したと仮定すると、予測されるひび形状は、図7-3(d)に示すように、内表面側において最大幅になると考えられ、これをType Dと分類する。

-Type D: 内面側開口部で最大幅となる形状のひび

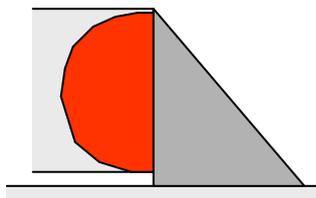
(N14D SEM-1については、内面側開口部の幅と比較すると、板厚内部のひび幅が若干ながら大きいことから、Type Cに分類されると判断した。)



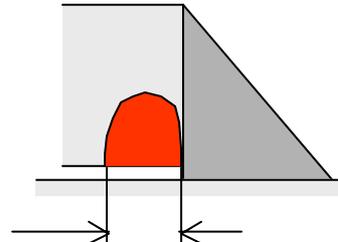
(a) Type A: 接液面開口のないひび



(b) Type B: 接液面開口のあるひび



(c) Type C: 軸方向幅のひびが大きく、  
両端にわれ残りのあるひび



ひび内面開口部の幅

(d) Type D: 開口部で最大幅となるひび

図7-3 ひび形状の分類

## 2. ひびの進展メカニズム

ひびの発生原因としては、溶接時の熱影響部(HAZ)の高温割れとSCCが考えられる。高温割れの場合、ひびは溶接時に熔融点直下まで加熱された部位に生じる。したがって、熔融境界からひび先端までの幅が5mmを超えるひび(資料-5 図5-1-1のN14D SEM-1やN14B SEM-1)については、高温割れのみでは説明できず、ひびの発生と進展の

メカニズムを独立に検討する必要がある。

ひびの進展に想定されるメカニズムとしては、(1)破面が粒界割れであること、(2)何らかの原因で内面に開口したひびが発生すれば、蒸気環境中においても毛細管現象によりひび内部に凝縮水が存在し得ること、(3)ソケット溶接継手では、周方向に高い引張り残留応力が存在すること、などから、SCCである可能性が高いと考えられる。

### 3. ひびの発生メカニズムによるその後の進展形状の推定

図7-4は、ひび発生メカニズムごとに想定される初期ひび形状と、その後考えられるひびの進展形態のフローを示す。

フロー中の太実線矢印、実線矢印、破線矢印は、凡例中に示すように、当該の形態の進展が生じる可能性が高い、中程度、低いことをそれぞれ示す。

以下に、各過程の発生可能性と、その判定の根拠を示す。

#### 3.1 初期のひび形状の推定

図7-4の左側に、ひびの発生メカニズムごとに推定される初期のひび形状を示す。ソケット継手では、周方向の力学的拘束が強いことから、高温割れ、SCCによらず、ひびは軸方向に発生しやすい。

発生原因として高温割れを想定した場合、ひびは溶融境界近傍にのみ発生することから、図7-4左上に示すように、溶融境界に沿った細長い形状になると考えられる。また、手動溶接による溶接条件のばらつき等により、発生した溶接割れは、内面側に開口しない場合(i)と開口する場合(ii)の双方が考えられる。

一方、SCCとしてひびが発生したと想定すると、確認されたType Aのひび11個については、いずれも配管切断時に開口部が除去されたことになる。配管の切断位置は溶融境界から1~2 mm程度であったことから、ひびの起点(内表面側開口部)は溶融境界の極近傍に位置し、その開口部の幅は1~2 mm程度以下であったと考えられる(iii)。

#### 3.2 起点を高温割れと想定した場合

##### (a) Type Aの可能性

図7-4フロー①に示すように、高温割れとして発生したひびが内面側に開口していない場合、その後のSCCとしての進展は生じないため、ひび形状は不変である。これによりType Aのひびの発現が矛盾なく説明できる。

##### (b) Type Bの可能性

フロー②に示す通り、溶接割れが内面に開口していた場合、配管内が蒸気環境下であっても、ひび内部には凝縮水が存在し得る。SCCとしての進展量が比較的小さい場合には、Type Bのひびの発現は矛盾なく説明できる。

また、配管の切断位置によっては、Type Aのひびともなり得る。

### (c) Type C の可能性

上述の(b)と同様であるが、軸方向の SCC 進展量が大きい場合は、Type C となり得る。配管内外表面近傍のわれ残りと同様な様相は、CT 試験片を用いた実験室レベルでの SCC 試験においてもよく観察されているものであり、ひびの進展方向が配管軸方向であったと考えると、特異的な事象ではない。

また、資料-5の図5-2-1のひび断面写真においては、ひび開口部の幅が、板厚内部のひび開口幅と比較して小さく、SCC が内面側から進展したときに想定される様相とは異なっていた。しかしながら、進展が軸方向であったと仮定すれば、進展方向に対して両端に位置するソケット内外面側において、開口量が小さいことは矛盾なく説明される。

## 3.3 起点を SCC と想定した場合

### (a) Type A の可能性

当該部でのひびが SCC として発生・進展するためには、ひびが内表面側に開口部を有し、蒸気環境に接している必要がある。したがって、Type A の発現は、Type B のひびの開口部が配管切断時に除去されることによつてのみ可能であり、その可能性は次項で評価する。

### (b) Type B の可能性

SCC として発生したひびが Type B のような最終形状に至るためには、フロー④→⑤のように、ひびが高いアスペクト比（深さ／開口幅）を保持したまま、深さ方向のみに進展したと考える必要がある。

ひびのアスペクト比が大きくなると、ひび最深部のき裂進展力（応力拡大係数）は、ひび表面部と比較して小さくなるため、ひびは表面方向（幅を広げる方向）にも進展するか、深さ方向の進展が停止すると考えられ、Type B のような深さ方向のみの進展が生じることは考えにくい。（金属組織の影響を強く受ける Ni 基合金の溶接金属では、アスペクト比の高いひび進展事例が多いが、オーステナイト系ステンレス鋼の母材では一般的でない。）

### (c) Type C の可能性

最終的な Type C のひび形状に至るには、軸方向に SCC が進展する場合（C-I）と、放射状に進展する場合（C-II）が考えられる。

フロー④に示すように、初期に SCC が深さ方向へ優先的に進展したと仮定すると、その後の進展形態（⑥）は、上述③と同様に可能である。ただし、初期段階である④の可能性は低いことから、C-I の発現可能性も低いと判断される。

フロー⑦に示すように、初期の段階からひびが放射状に進展し、Type C-II に至ると考えると、われ残りを生じたソケット内面近傍では、何らかの理由でひびの進展が遅かったことになる。しかしながら、以下に示す理由から、当該部では、むしろ内表面近傍での進展が優先しやすいと考えられることから、フロー⑦の可能性も低いと判断

される。

-周方向残留応力は外面側より内面側の方が高い（資料-6 図6-3）。

-ソケット内面側では硬さ上昇が認められることから（資料-5 図5-4-3），材料面での SCC 感受性は，相対的な硬さの低い板厚内部よりも，表面の方が高い。

#### (d) Type D の可能性

初期から SCC として発生・進展する場合，上記(c)の理由から，ひび形状は表面開口部で最大幅となる「Type D」になると考えるのが一般的である。

しかしながら，実機調査結果では，少なくとも 45%以上(24 個中 11 個)のひびが，Type D とは明確に異なる様相を呈していた。また，残りの「PT 指示の軸方向長さが 0 でないひび」についても，板厚内部でのひび幅が調査されていないものの，同様な傾向を示すものが存在する可能性は少なくない。

#### 4. まとめ

以上の検討から，ひびの起点が高温割れであると仮定すると，実機で確認された最終的なひび形態の中で，少なくとも 45%以上を占める Type A～C の発現が矛盾なく説明できる。一方，起点を SCC であると仮定した場合，予測されるひび形状は主に Type D となり，実機事象の多くが説明できない。

したがって，当該部に確認されたひびは，溶接割れが主因となって発生し，その中で接液面側に開口を有していた一部のひびが SCC により軸方向に進展したものと推定される。

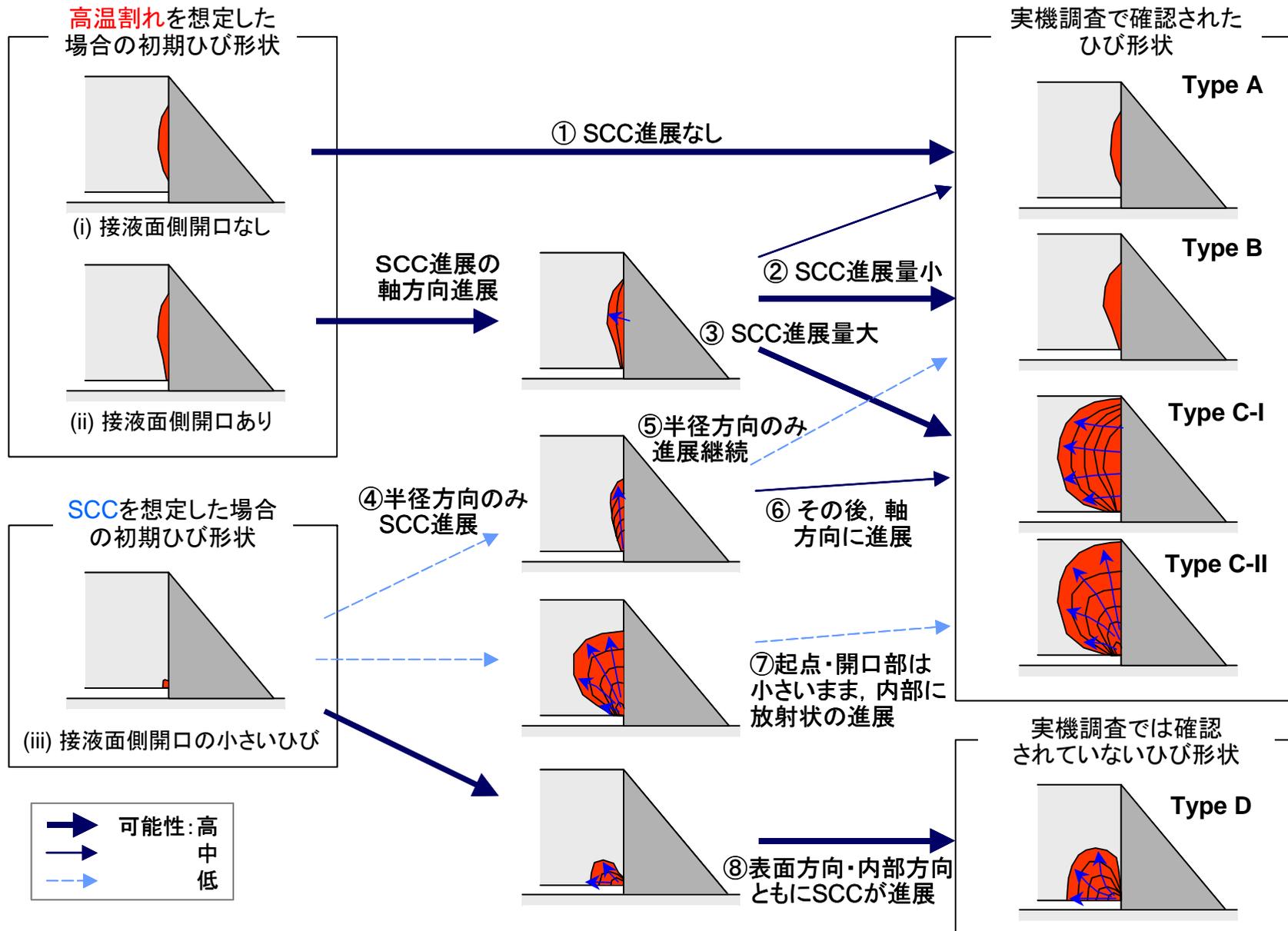


図7-4 ひびの発生メカニズムごとに想定される進展形態のフロー

溶接熱影響部の割れ感受性

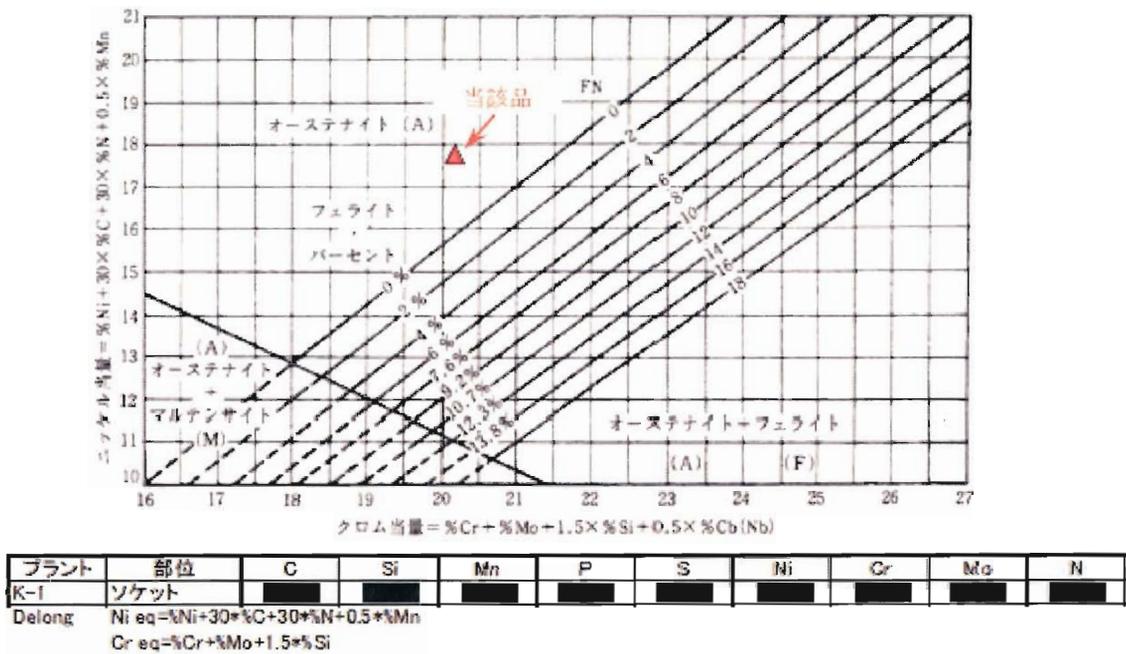


図8-1 Delong組織図

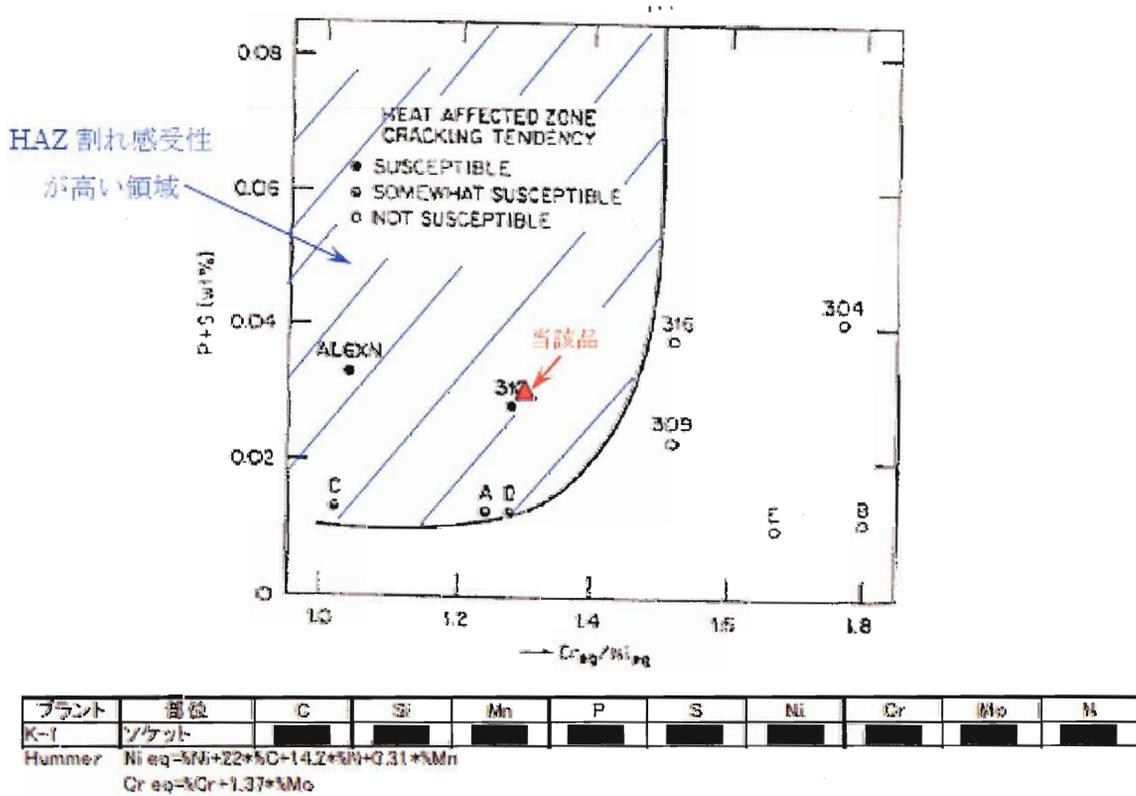


図8-2 ステンレス鋼の溶接熱影響部 (HAZ) 割れ感受性

参考文献

V.P. Kujanpaa, et al., "Characterization of Heat-Affected Zone Cracking in Austenitic Stainless Steel Welds," Supplement to the Welding Journal pp221-s-228-s, August 1987