

超音波探傷試験による再循環系配管
サイジング精度向上に関する確性試験
報告書（概要版）

平成 1 5 年 6 月 4 日

財団法人 発電設備技術検査協会

序

東北電力（株）女川1号機及び東京電力（株）柏崎刈羽1号機の原子炉再循環系配管の非破壊検査を平成14年11月から12月にかけて実施したところ、複数の配管にひび割れが発見され、金属調査の結果応力腐食割れ（以下、SCCと略）であると判定された。健全性評価を可能とする維持基準の適用を想定して、超音波探傷試験（以下、UTと略）に基づいてサイジング（この場合、ひび割れの深さ）を評価したところ、材料の切断試験や切削による実測結果と超音波探傷試験の結果に大きな差異があることが判明し、超音波探傷試験に対する信頼性に疑念が持たれた。検査結果の概要は、ひび割れの検出性そのものには何ら問題はないこと、ひび割れの長さについてもモクリーピング波法の適用によって概ね妥当な相関性が得られてはいるものの、ひび割れの深さについては一部のデータが健全性評価に支障を及ぼす程度の大きな誤差を生じていたことが判明した。

原子力安全・保安院は、「原子力発電設備の健全性評価等に関する小委員会」において本件を討議した結果、次の2点を指摘した。

UTデータの信頼性を確認するため、「第三者機関による検証」が必要であること、
UTデータの信頼性のレベルは、一つの目安として、（財）発電設備技術検査協会において実施されたUT実証試験の結果と同等のレベルにあること。

このため、今後わが国の原子力発電設備のUTを行う可能性のあるメーカー等6社〔（株）東芝、（株）日立製作所、General Electric International Inc.、Framatome ANP GmbH, Westinghouse, Southwest Research Institute〕は、改良されたUT（以下、改良UTと略）のサイジング性能を客観的に評価し実機適用性を検証するため、「超音波探傷試験による再循環系配管サイジング精度向上に関する確性試験」を発電技検に委託した。

発電技検はこれを受け、改良UTの性能を公平、公正、中立に評価するため学識経験者からなる委員会を設置し、申請者の実施した試験結果を審議し評価した。また、透明性を確保するため委員会は公開とした。試験体に供した柏崎刈羽1号機の再循環系配管の現地調査についても、東京電力（株）の協力を得て、地方自治体や報道関係者に対して現場視察の機会を提供した。また（財）発電設備技術検査協会が第三者機関的な役割を果たしたのはいうまでもない。

本報告書は、現地調査を含む4回にわたる審議結果をとりまとめたものである。確性試験結果は改良UTが高精度であることを示しているが、これがUT技術の信頼回復につながるものであることを期待するものである。

本確性試験の結果を取りまとめるにあたり、ご協力を頂いた委員及び関係各位に対し、深甚な謝意を表したい。

確性試験委員会委員長 宮 健三

確性試験委員会メンバー

委員長	宮 健三	慶応義塾大学	教授
委員	小林 英男	東京工業大学	教授
	裏垣 博	高知大学	教授
	三原 毅	東北大学	助教授
	上杉 信夫	(財)発電設備技術検査協会	鶴見試験研究センター長

オブザーバ： 原子力安全・保安院 原子力発電検査課
原子力発電安全審査課

東北電力株式会社
東京電力株式会社
北陸電力株式会社
中部電力株式会社
中国電力株式会社
日本原子力発電株式会社
(財)発電設備技術検査協会 原子力事業室
高経年化技術センター

一般オブザーバ：傍聴の申し込みがあり、人数の制限で事務局了解された方

(事務局)(財)発電設備技術検査協会 企画・調査部 基準グループ
鶴見試験研究センター

用語及び略号

EDM スリット

きず（ひび）を検出するための探傷器の感度調整を行うために、試験片に放電加工（Electro-Discharged Machining：EDM）によってつけたスリットをいう。また、使用する超音波手法の検出性能やサイジング性能を確認・検討するために、既知の寸法のきずとして EDM ノッチを使用することが多い。

裏波（裏波ビード）

裏側からの溶接ができない配管溶接などにおいて、熔融金属が裏側にまで溶け込んで生じた、整った波形のビードのこと。

エコー

異なった媒質の境界面からの反射波。超音波探傷においては、試験体中のひびや底面等で反射して受信された超音波パルス信号、及びそれが探傷器の表示器（CRT）に現れた指示(波形)をいう。

応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking, SCC）

引張負荷応力(残留応力)と腐食の相乗効果によって金属材料が割れる時間依存型破壊で、金属材料と環境（水）の特定の組み合わせの下で起こる。その割れ形態には、結晶粒界に沿って割れる粒界型応力腐食割れ（Inter-granular Stress Corrosion Cracking, IGSCC）と結晶粒を貫通して割れる貫粒型応力腐食割れ（Trans-granular Stress Corrosion Cracking, TGSCC）とがある。

確性試験

新技術の評価等を目的として、依頼者からの依頼をもとに、発電技検が学識経験者からなる委員会を設置し、審議、検討を行うもの。

クリーピング波（1次、2次）

縦波を試験体に斜めに入れたとき、縦波と横波が同時に発生する場合がある。このとき、縦波を臨界角近くで試験体に入射すると、試験体のほぼ表面近くを伝搬する波が発生する。これを1次クリーピング波という。また、同時に発生した横波が試験体の底面で反射すると、その一部が縦波に変わり(モード変換という)、裏面近傍を伝搬する波が発生する。この波を2次クリーピング波という。

広帯域型探触子

波数が 3 波以下のごく短い超音波パルスが発生する探触子を言う。この探触子のパルスの周波数成分を通常用いる探触子（波数が多い）と比べると、周波数帯域幅が広いので、広帯域探触子と呼ばれる。一般に、通常の探触子より分解能が高く、SN 比もよいといわれる。

再循環系（PLR）配管

原子炉压力容器内の冷却水を循環させるための再循環ポンプにつながる配管で、容器内にある噴出し口（ジェットポンプ）とつながっており、燃料から発生した熱を効率よく取り出すため、炉心へ冷却水を送り込む役割を持っている。

サイジング

きず（ひび等）の寸法を測定すること。きずの長さの測定値を「きずの指示長さ」、板厚方向のきずの深さ（高さ）測定値を「きずの指示高さ」という。

CRT（Cathode Ray Tube）

超音波探傷器の探傷図形を表示するために使用するもの。テレビのブラウン管も CRT である。最近では液晶も使用されるため、一般には表示器という。

指示長さ

きずの長手方向に探触子を移動させて測定したきずの長さをいう。（実際のきずの長さではなく、超音波を用いて測定した長さであるため、指示長さと呼ぶ。）

時間軸

超音波探傷器の表示器（CRT）の横軸をいい、超音波が探触子から試験体中を伝搬して探触子まで戻るまでに要した時間を示す。時間軸のゼロ点からエコーの立ち上がりまでをビーム路程という。

焦点型探触子

通常の探触子は、試験体中で超音波ビームが広がってしまうが、超音波ビームをある範囲で狭くする（焦点を持たせる）ことで、その範囲できずの先端からの反射を強めるために使用する探触子を言う。集束探触子という。

DAC

DAC には 2 種類の使われ方がある。

(1) 距離振幅特性曲線（Distance amplitude curve : DAC）

同じ大きさのきずでも、そのきずの位置によって、反射して戻ってくる超音波の強さが違

ってくる。同じ大きさのきずがどこにあっても同じように評価できるようにするために、超音波が試験体中を進む距離(ビーム路程)によって、エコー高さが変化する程度を示す曲線をいう。

(2) 距離振幅補正 (Distance amplitude correction : DAC)

エコー高さを距離振幅特性曲線によりを用いて補正すること。

DAC%

ビーム路程によるエコー高さを示す曲線 (DAC 曲線) を 100%としたときのエコー高さのパーセント値をいう。

縦波

超音波の種類の一つであり、試験体中で粒子の振動方向と振動の伝搬方向が同じ波をいい、疎密波とも呼ばれる。固体中では音速が最も速い。

端部エコー法

超音波ビームがきず(ひび)の先端部分に入射するとエコーが現れ、ビーム中心がひびの先端部に当たったとき、エコー高さがピークになり、これを端部エコーという。この端部エコーが得られたときのビーム路程を利用して、ひびの深さを測定する方法を端部エコー法という。

超音波探傷試験 (Ultrasonic Testing : UT)

試験体を壊さずに外側から超音波を試験体中に伝搬させ、きず(ひび)や不連続部、あるいは底面などから超音波が反射する性質を利用して、きず(ひび)の有無を調べたり、きずの寸法を測定したりする方法である。

探触子

超音波を送受するもので、振動子を吸音材または楔に取り付け、さらにケースに収めて取り扱いに便利なようにしたもの。超音波が垂直にでる垂直探触子と斜めにでる斜角探触子がある。

ノイズレベル

超音波探傷において、きず(ひび)以外の反射源から得られるエコーをノイズ(雑音)という。特にオーステナイト系ステンレス鋼の溶接金属に特有の組織である柱状晶の境界で散乱されるノイズを林状エコーとよんでいる。本報告書では、ひびの指示長さを測定する際に、エコー高さのしきい値としてこのノイズ高さをを用いており、この評価レベルを「ノイズレベル」と記述している。

パルス反射式

きわめて短い時間の間だけ継続する超音波信号(パルス)が、ひびなどの不連続部からの反射を利用する方式。ほとんどの超音波探傷試験および超音波探傷装置はパルス反射式が用いられている。

フェーズドアレイ法

幅の狭い振動子を複数個並べた探触子を用い、個々の振動子に電圧をかけるタイミングを変えることにより、超音波ビームの方向を変えたり(垂直&斜角)やビームの太さ(焦点)を変えたりして探傷する方法。個々の振動子を端から順次切り替えていくリニア方式と、扇形にビームを振らせるセクタ方式がある。

モード変換

超音波の振動の様式をモードと呼び、固体内での超音波の代表的なモードには、縦波、横波、表面波などがある。超音波が隣接した二つの媒質の境界面や欠陥等で反射や屈折する際に、条件によっては振動の様式が変わることがある。この現象をモード変換という。例えば、固体内の縦波が境界面等で反射する際に、反射した縦波に加えてモード変換した横波も発生する。

横波

超音波の種類のひとつであり、試験体の中で音波の振動方向が進行方向に対して垂直に進む音波をいい、せん断波とも呼ばれる。液体中や気体中には存在しない。音速は縦波より遅いため、同じ周波数であれば縦波より横波のほうが波長は短くなる。

ISI (In- service Inspection)

供用期間中検査

PT (Penetration Testing)

浸透探傷試験を言う。非破壊試験方法の 1 つであり、表面に開口したひびを検出するのに用いられる。

PD (performance Demonstration)

UT 技術の妥当性確認のための試験体を使った認証試験。PD により ISI に適用する UT に関する手順書・探傷装置・検査員技量をひとまとめにして認証するシステムを PD システムという。

RMSE (Root Mean Square Error)

測定誤差を自乗平均平方根で表す方法。本報告書内では、ひびの実際の深さと UT による推定深さとの誤差を示す手法として用いている。

1. 目的

本確性試験は、再循環系配管の溶接部（熱影響部を含む。）に検出されるひび割れに対して、深さ測定用改良 UT 手法の性能を評価するためのものであり、特にひび割れ深さに対する測定精度を実機配管を用いて確認するものである。

このため、実際に応力腐食割れが発生した柏崎刈羽 1 号機の再循環系配管（材料；SUS316LC）を切り出し溶接部近傍のひび割れに対し、依頼各社が改良 UT を適用し、得られた試験結果を委員会が総合的に評価する。

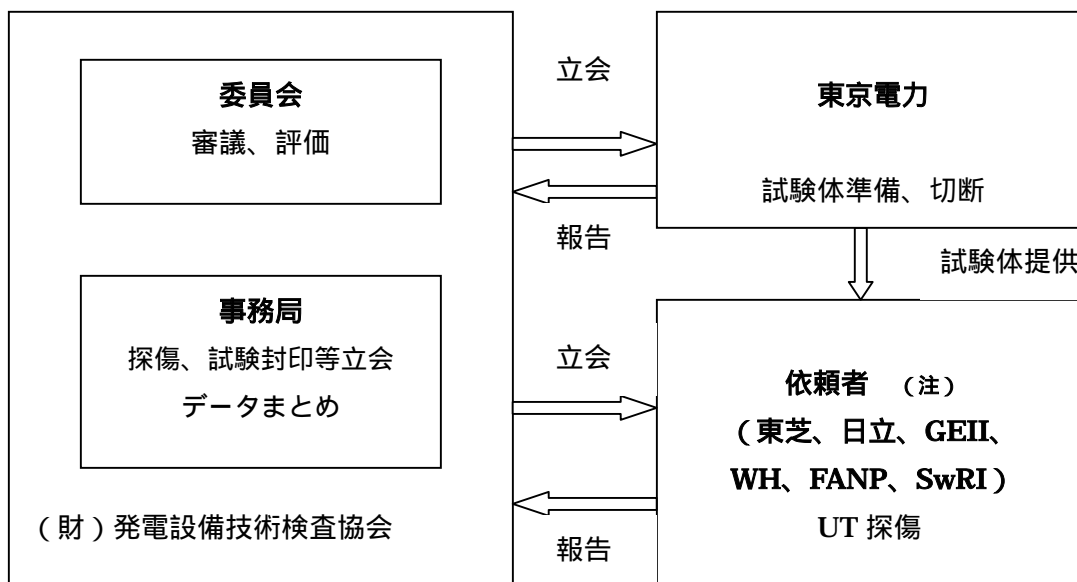
2. 確性試験の範囲

改良 UT 手法は、5 章に示すとおり依頼各社ごとに方法が異なり、また同じ手法であっても、探触子が異なる等の違いがある。このため、確性試験では、会社と各手法の組合せを一つの単位とみなして評価を行った。もとより、本確性試験の依頼者以外が同じ手法を使用したとしても、その精度を保証するものではない。

なお、UT 試験員の技量に関する要素は、今回の確性試験の UT が一定以上の技量を有する試験員が行うことを前提に、その社内訓練記録、資格記録を確認することとした。

3. 実施体制

委員会及び事務局は、依頼者が行う UT のデータ採取及び東京電力株式会社（以下、東京電力という。）より提供された柏崎刈羽 1 号機再循環系配管の試験体の準備、切断に対し、以下の体制で立会確認を行った。



(注) SwRI の参加については SwRI が研究機関であることから、今後実際に日本の発電所で UT を行うということではなく、SwRI の技術を適用して、その技術レベルの確認をするものである。

4. 試験体の準備

実機試験は、応力腐食割れが発生したと考えられる実機配管のひびを対象として実施された。これにより、確性試験受験各社より提案された改良 UT のひび深さ測定精度を評価するものである。事務局は試験に用いる試験体の準備について、公正の確保を旨として、要領書通り行われていることを立会いにより確認した。

4.1 対象ひびの選定

確性試験に供する継手として選定された 6 継手に対して、対象としたひび選定の考え方を以下に示す。

4.1.1 精度確認試験対象ひびの選定

選定された 6 継手に対し、測定値の評価に際して有効性を判断できるひびの数を 20 欠陥とし、以下の手順に従いひびの選定を行った。

1) 試験体切出し形状からの選定

試験体の切出し形状から超音波探傷が可能な、配管余長を有する側にあるひびを選定する(今回選定した 6 継手においてはいずれも溶接線の下流側のみに余長を有しており、上流側のひびは対象外とする)。

2) クリーピング反射波からの選定

クリーピング法による反射波が明瞭でなく、ひびではない可能性のあるものを除外する。

3) 45 度斜角横波による基本探傷における波高値(%DAC)からの選定

DAC90%程度以上の指示が得られているものを選定する。

4) ひび位置及び長さからの選定

ひびの長さ、溶接中心からの距離(ひびの先端部が溶接金属内/母材)について、選定するひびの数のバランスを考慮して選定する。

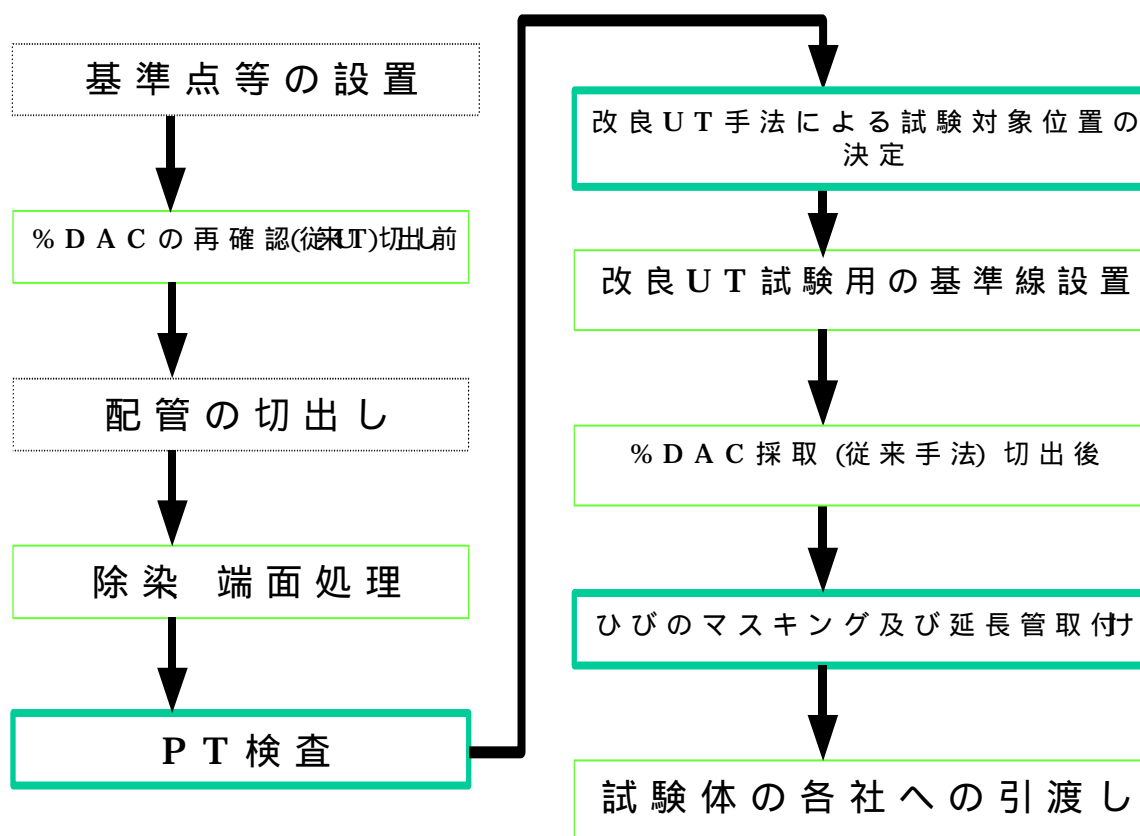
なお、精度確認試験の対象となる 20 個のひびのうち 10%程度(ひび 2~3 個)については、UTS で得られている知見との総合的な比較を行うため、以下に述べる総合試験を実施するものとした。

4.1.2 総合試験対象ひびの選定

長さの短いひびは最探点の測定に差がないことが考えられる。また、長すぎるひびでは最探点にばらつきが大きくなり評価が困難となること、また、切断試験に長時間を要することから、これらを勘案し、長さ 40~60mm 程度のひびを選定した。深さは不明であるものの、ひびの位置、エコー高さ等を考慮してひび先端が溶接金属内に進展している可能性が高いものを選定した。

(推奨)

600A 661-101-F12 の指示番号、 を含む範囲
400A 661-A02-S02 の指示番号 を含む範囲



発電技検立会による確認

改良手法試験を実施しない機関に実施

図 4.1-1 試験体準備要領

表 4.1-1 UT 対象のきずの位置

継手番号	指示番号	波高値 (%DAC)	指示長さ (mm)	探傷方向 (上/下流)	備考
			45°20%		
661-101-F12 600A		169	57	下流	推奨 (溶接金属内にき裂先端が進展している可能性あり)
		249	41		推奨 (溶接金属内にき裂先端が進展している可能性あり)
		172	80		予備 (き裂先端が溶接金属近傍と考えられる)
		189	24		予備 (溶接金属内にき裂先端が進展している可能性あり)
		205	30		予備 (溶接金属内にき裂先端が進展している可能性あり)
		164	25		推奨 (き裂先端が溶接金属近傍と考えられる)
		155	61		推奨 (溶接金属内にき裂先端が進展している可能性あり)
		172	28		予備 (形状エコーの可能性あり)
		188	22		× 除外 (クリーピング指示不明瞭である)
		134	35		推奨 (き裂先端が母材部にある可能性が高い)
		161	35		推奨 (き裂先端が母材部にある可能性が高い)
		184	40		予備 (き裂先端が母材部にある可能性が高い)
		35	5		× 除外 (クリーピング指示不明瞭である)
	661-401-F02 600A		211		15
		164	17	× 除外 (探傷側配管余長が短く探傷不適)	
		139	23	× 除外 (探傷側配管余長が短く探傷不適)	
		164	36	下流	予備 (溶接金属内にき裂先端が進展している可能性あり)
		245	18		推奨 (溶接金属内にき裂先端が進展している可能性あり)
		190	15		推奨 (溶接金属内にき裂先端が進展している可能性あり)
		162	33		推奨 (溶接金属内にき裂先端が進展している可能性あり)
		172	25		予備 (き裂先端が母材部にある可能性が高い)
		232	32		推奨 (き裂先端が母材部にある可能性が高い)
		213	31		推奨 (溶接金属内にき裂先端が進展している可能性あり)
	191	24	予備 (き裂先端が母材部にある可能性が高い)		
	216	24	推奨 (き裂先端が溶接金属近傍と考えられる)		
661-401-F23 300A		163	34	上流	× 除外 (探傷側配管余長が短く探傷不適)
		98	25		× 除外 (探傷側配管余長が短く探傷不適)
		68	28		× 除外 (探傷側配管余長が短く探傷不適)
		68	16		× 除外 (探傷側配管余長が短く探傷不適)
	24	57	36		× 除外 (探傷側配管余長が短く探傷不適)
	30	86	10		× 除外 (探傷側配管余長が短く探傷不適)
	33	109	43	× 除外 (探傷側配管余長が短く探傷不適)	
	37	270	20	推奨 (溶接金属内にき裂先端が進展している可能性あり)	
	38	60	34	下流	× 除外 (クリーピング指示不明瞭である)
	39	163	181		× 除外 (クリーピング指示不明瞭である)
	40	150	170		× 除外 (クリーピング指示不明瞭である)
	42	82	54		× 除外 (クリーピング指示不明瞭である)
44	229	152	推奨 (溶接金属内にき裂先端が進展している可能性あり)		
661-A02-S01 400A		61	13	下流	× 除外 (クリーピング指示不明瞭である)
		184	20		推奨 (溶接金属内にき裂先端が進展している可能性あり)
		49	8		× 除外 (クリーピング指示不明瞭である)
		71	2		× 除外 (クリーピング指示不明瞭である)
		116	41		予備 (形状エコーの可能性あり)
661-401-F17 300A		96	45	上流	× 除外 (探傷側配管余長が短く探傷不適)
		61	11		× 除外 (クリーピング指示不明瞭である)
		57	14		× 除外 (クリーピング指示不明瞭である)
		95	20	下流	× 除外 (クリーピング指示不明瞭である)
		96	23		× 除外 (クリーピング指示不明瞭である)
		87	42		予備 (溶接金属内にき裂先端が進展している可能性あり)
		149	21		× 除外 (クリーピング指示不明瞭である)
		93	11		× 除外 (クリーピング指示不明瞭である)
		96	55		推奨 (溶接金属内にき裂先端が進展している可能性あり)
		96	30		推奨 (溶接金属内にき裂先端が進展している可能性あり)
		109	35		× 除外 (クリーピング指示不明瞭である)
		136	12		× 除外 (クリーピング指示不明瞭である)
		115	60		× 除外 (クリーピング指示不明瞭である)
		93	22		× 除外 (クリーピング指示不明瞭である)
		109	35		× 除外 (クリーピング指示不明瞭である)
	122	66	× 除外 (クリーピング指示不明瞭である)		
21	92	27	推奨 (溶接金属内にき裂先端が進展している可能性あり)		
661-A02-S02 400A		151	99	下流	推奨 (溶接金属内にき裂先端が進展している可能性あり)
		46	21		× 除外 (波高値低く対象から除外)
		66	15		× 除外 (波高値低く対象から除外)
		59	10		× 除外 (波高値低く対象から除外)
		116	41		推奨 (溶接金属内にき裂先端が進展している可能性あり)

4.2 試験体準備要領

本項では 6 試験体に共通する試験体準備の進め方を述べる。各試験体での実績および特記事項は 4.3 に述べる。

(1) 基準点等の設置

配管基準方位 (0° を基準に 30° 間隔) を示すケガキ、軸方向の基準を示すケガキ、継手番号および流れ方向を示す刻印を設けた。これらは改良 UT 手法を実施する試験機関が設ける。軸方向の基準を示すケガキは、UT により信号を検出した位置の Y 座標 (管軸方向) の原点として使用するものである。除染、マジック消しなどの際にケガキが消えぬよう、ケガキ針を用いて基準線を設けた。図 4.2-1 に試験体に設けた基準線と刻印の例を示す。

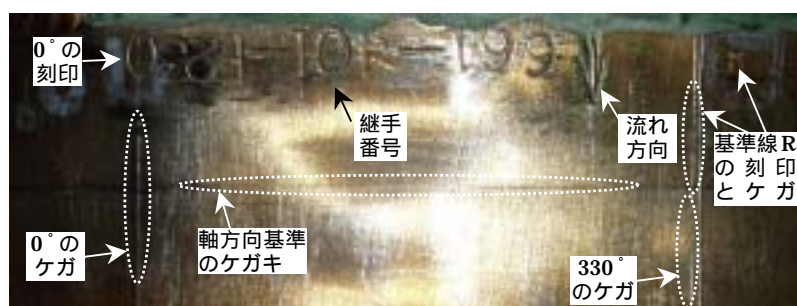


図 4.2-1 基準線のケガキと刻印の例 (試験体 3: 継手 661-101-F23)

(2) %DAC の再確認 (切断前、従来 UT 手法)

試験体に発生しているひびの状態が、切断による応力変化によって変化するか否かの評価に資することを目的として、従来 UT 手法を用いて、切断前の %DAC の再確認をおこなった。対象としたひびは以下の 6 個である。これらは各試験体の事前検査で最大 %DAC を示したものである。

- 661-101-F12 (600A) … 指示番号
- 661-401-F02 (600A) … 指示番号
- 661-401-F23 (300A) … 指示番号 37
- 661-A02-S01 (400A) … 指示番号
- 661-401-F17 (300A) … 指示番号
- 661-A02-S02 (400A) … 指示番号

UT は JEAG4207-2000 ならびに関連 JIS 規格に準拠して、JSNDI UT-2 資格を有する検査員が実施した。対象とするひびについて、最大 %DAC 及び指示長さ (20%DAC) を計測・記録した。また、最大 %DAC の A スコープ写真を採取した。

(3) 配管の切出し

試験の対象とするひびを含む配管を切出し、配管内面が視認できないよう、また放射性物質による汚染拡大を生じないように梱包した。〔改良 UT 手法による試験実施機関が実施〕原子炉格納容器 (PCV) から搬出し、試験体準備をおこなう作業エリアまで移送した。

(4) 除染、端面処理

関係者以外の立ち入りを規制した作業エリアにて開梱し、除染をおこなった。試験体全体の外観写真を撮影した (図 4.3-1、後出)。また基準線の設置や延長管の溶接に支障となる切断面のバリを除去した。

(5) %DAC 採取 (切断後、従来 UT 手法)

配管切出し前に %DAC を採取したひびについて、切断後の %DAC を採取した。当該作業は、配管切出し前に測定した同一人物が、同一の UT 計測装置を用いて実施した。なお、本項は、「(4) 除染、端面処理」以降から「(10) ひびのマスキング及び延長管取付け」前の間で適宜実施した。

計測実施の手順および作成記録は「(2) %DAC の再確認 (従来 UT 手法)」に準じる。

(6) PT 検査

改良 UT 手法による試験対象として選定されたひび (予備として選定したものを含む) に対して、位置・方向及び長さを確認するため PT 検査をおこなった。検査員は、JSNDI PT-2 種資格保持者である。対象ひびは以下の 30 個である。

661-101-F12 (600A) … 指示番号 , , , , , , , , , , (11 箇所)

661-401-F02 (600A) … 指示番号 , , , , , , , , (9 箇所)

661-401-F23 (300A) … 指示番号 37, 44 (2 箇所)

661-A02-S01 (400A) … 指示番号 , (2 箇所)

661-401-F17 (300A) … 指示番号 , , , 21 (4 箇所)

661-A02-S02 (400A) … 指示番号 , (2 箇所)

(7) 改良 UT 手法による試験対象位置の決定

PT 検査の結果を参考として、以下の方針に従って試験対象位置を決定した。決定に際しては事務局が立会った。

[精度確認試験] : PT 検査でのしみ出し量等を参考にして、ひびの最大深さ位置と考えられる位置を、改良 UT 手法による試験の対象位置とした。

[総合試験] : PT 検査での指示から求めたひびの始点、終点を十分に含む範囲を、改良 UT 手法による試験対象範囲とした。

試験対象として決定した位置は、細いマジックで点状の印を付して示した。立会い時に試験対象位置を一意に示すアルファベット記号を決定した。精度確認試験については“**A**”のように大文字一文字で、総合試験ではその対象範囲を“**B1 ~ B2**”（この場合、角度方位が $B1 < B2$ となるようにする）のように示すこととした。

(8) 改良 UT 試験用の基準線設置

前項で決定した試験体の内外面および試験体の上流側端面に以下のように基準線（ケガキ）を設置した。基準線が前項で決定された位置に設定され、基準線を示す記号が内面、外面、上流側端面の3箇所に刻印されたことについて事務局は立会い確認した。

[精度確認試験]：前項で決定し試験対象位置の内外面と上流側端面に基準線（ケガキ）を設置した。但し、内面については、基準線がひびを跨がないようにした。

[総合試験]：前項で決定した試験対象範囲の境界の内外面と上流側端面に基準線（ケガキ）を設置した。

ケガキ作業は以下の手順で実施した。

- 1) 台板上に4個のキャスターを付けた「ケガキ用載せ台」(図 4.3.1 ~ 6-1(後出)参照)を製作、その上に試験体を載せ、前項で決定した位置に付された点状のマジック指示を基に外周側に細いマジックで仮ケガキ線を引く。
- 2) 内面側に、マジックで仮ケガキ線を引く、外周側のケガキ線とのズレがなければ同じ方法でケガキ針にて罫書く。
- 3) 総合試験用はひびの真中付近に基準線を罫書く。(内面のみ)
- 4) 前項で決定した記号をケガキに近接させて刻印する。内面および外面の上流側端面に近い部位および上流側端面の3箇所に刻印を打つ。(図 4.2-5)
- 5) 外表面の角度線から基準線までの寸法計測を行う。

以上の方法で設定されたケガキ線と、それを示す刻印の例を図 4.2-6 に示す。

(9) PT 記録の採取

ケガキ、刻印を付したひびに対し、再度 PT 検査を行った。対象ひびの PT 指示模様全長をテープに写し取り、紙に貼付記録するとともに写真撮影を行った。この際、ケガキあるいは刻印が含まれるようにした。検査員は、JSNDI PT-2 種資格保持者である。その後、毛ブラシを使用して、現像粉を除去した。

(10) ひびのマスキング及び延長管取付け

改良 UT 試験の実施時に、ひびの寸法形状および位置が確認できないようにひびをマスキングすることを目的に、端面に封止板を溶接した延長管を溶接した。また本項にかかるすべての溶接線について、事務局の刻印を用いて封印した。

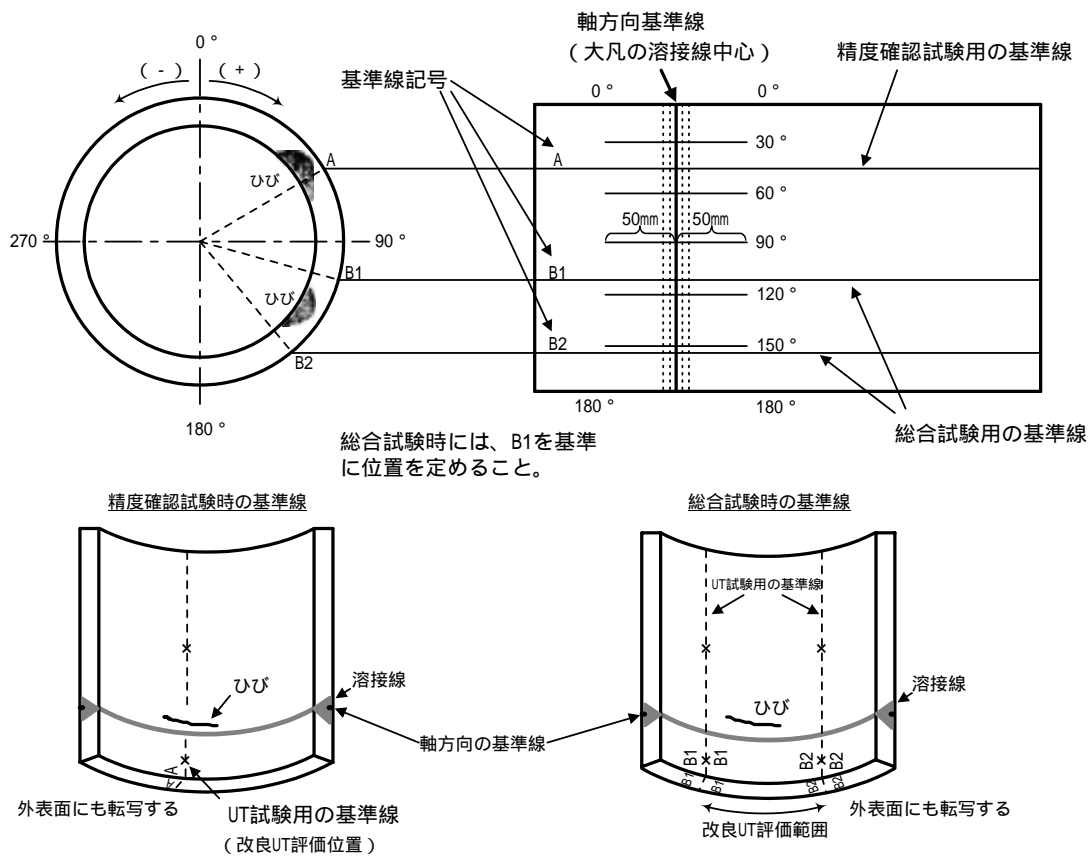


図 4.2-5 試験体の基準線（ケガキ線）と刻印



図 4.2-3 試験体の基準線（ケガキ線）と刻印の例
（精度確認試験）

4.3 試験体準備実績

4.1 で選定されたひびを含む再循環系配管の溶接継手 6 体から、4.2 に記した要領に従って、改良 UT 試験に供する試験体を製作した。なお継手内面の PT 検査結果によっては、当初選定したひびが本確性試験の目的に適しないと判断される場合があり、事務局の判断により PT 検査立会いにて、対象とするひびの変更を承認した。

以下に、試験体 1（継手番号 661-101-F12、600A）の例を示す。

(1) 試験体の概要

試験体 1（継手番号 661-401-F12）は呼び径 600A Sch.100（公称外径 625.4mm、公称肉厚 38.9mm、開先部厚さ 36.4mm）の SUSF316(LC)鋼製配管(探傷側)であり突合せ溶接部（裏波溶接）を含むものである。配管から切出された長さは 492mm（両端面間）、周長 1971mm（軸方向基準のケガキ線上）である。試験体準備工リアのケガキ用載せ台上に設置した試験体を図 4.3-1 に示す。



図 4.3-1 試験体 1 の外観

(2) PT 試験結果と基準線の設置

PT 試験を指示番号 , , , , , , , , , , のひび 11 個に対して行なった。4.1 節で選定した , , , , , の 6 つのひびは、いずれも内面に指示が認められた。またそれらはいずれも十分なしみ出しを呈していた。よって予定通りの 6 つのひびを試験対象として選定し、 , , , の 4 つは精度確認試験に、 , の 2 つは総合試験に供することとした。事務局が立会って試験対象位置を決定し、それを示すアルファベット記号を決定した。試験対象位置に基準線（ケガキ）を設け、アルファベット記号を刻印した。基準線とひびの対応を表 4.3-1 に示す。表中の位置欄は、外面に事前に設けた角度方位を示すケガキ

表 4.3-1 基準線（ケガキ）とひびの対応関係

基準線記号	ひび番号	試験種別	位置	備考
A		精度確認試験	0°より+65mm	
B		精度確認試験	30°より-19mm	
C1 ~ C2	,	総合試験	C1 : 240°より -16.5mm C2 : 270°より+9mm	C1 C2 間 =189mm
D		精度確認試験	330°より-2mm	
E		精度確認試験	330°より+32mm	

線と、個々の試験対象位置を示す基準線の相対位置である。図 4.3-2 (a) ~ (b) に個々のひび (PT 指示模様) と基準線および刻印の状況を示す。図 4.3-3 に試験体 1 に設けた基準線の概要を示す。

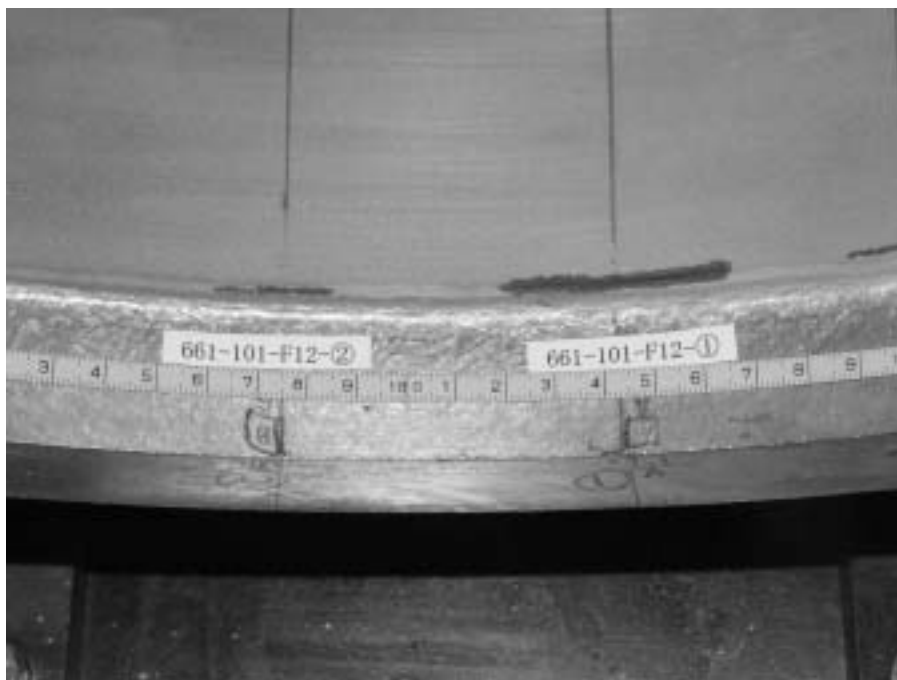


図 4.3-2(a) ひび (基準線記号 A)、 (同 B)



図 4.3-2(b) ひび、 と総合試験範囲の開始点を示す基準線 C1
(基準線 C2 は撮影範囲の左側にある。中央のケガキは切断作業用の補助線である。)

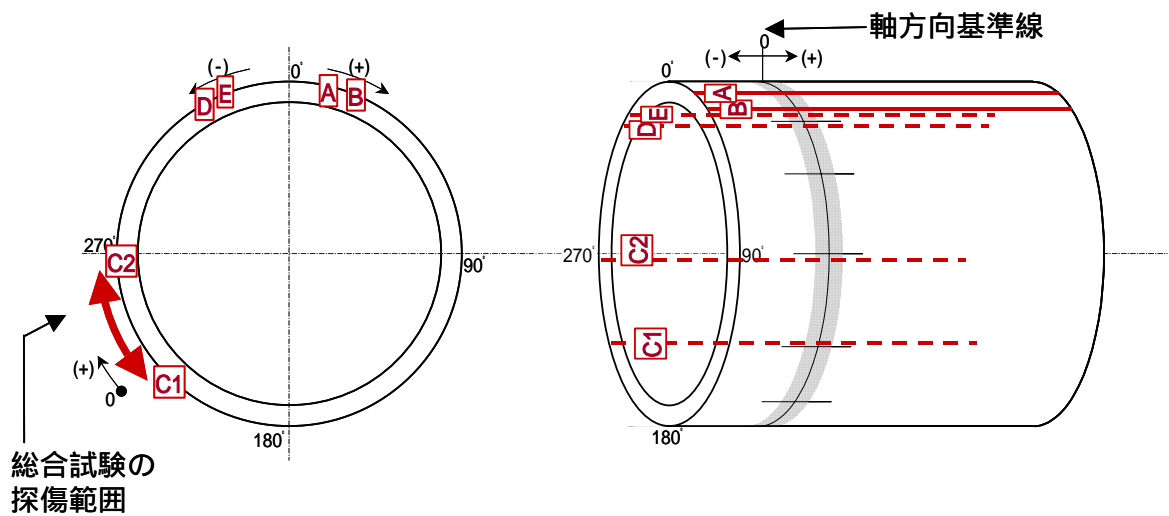


図 4.3-3 試験体に設けた基準線の概要

(3) ひびのマスキング

基準線を設けたのち、あらかじめ片端に封止板と吊り耳を溶接した延長管を溶接した。溶接は1ヶ所あたり50mm程度の長さで一周に6箇所行った。非溶接部は汚染拡大防止のため接着剤（アラルダイト）で密封した。溶接線4箇所には封印を施した。完成した試験体の外観を図4.3-4に示す。なお試験体準備過程で作成した立会記録（“基準線設置”および“ひびのマスキング”）は付録にまとめた。



図 4.3-4 基準線(ケガキ)設置を完了した試験体1 (661-101-F12, 600A)

(4) 切断前後における%DAC の評価

特定箇所の最大%DAC 及び指示長さの切断前後の測定結果概略を表 4.3-2 に示す。

- 1) 大%DAC の周方向位置;継手番号 661-101-F12 に 2mm の差が生じているが、他の継手は同一箇所である。
- 2) 最大%DAC;継手番号 661-A02-S01 に 2dB 弱の増加が生じているが、これが最大の変化で他の継手はほぼ同一の値である。
- 3) 20%DAC 長さ;継手番号 661-401-F17 に 4mm の増加が生じているが、他の継手はほぼ同一の値である。

これらの結果から、切断による応力変化に伴うひび開口の変化を示すデータは得られていない。

記録を添付資料-1；超音波探傷試験記録「配管切出し前後の%DAC の確認」に示す。

表 4.3-2 最大%DAC 及び指示長さの切断前後の測定結果概略

継手番号	口径	指示番号	計測時期	最大%DAC		20%DA C 長さ (mm)	切断位置 (注)
				周方向位置 (mm)	%DA C		
試験体 1 (661-101-F12)	600 A		前	0°+140	315	40	25
			後	0°+142	315	38	
試験体 2 (661-401-F02)	600 A		前	120°-22	289	20	44
			後	120°-22	289	20	
試験体 3 (661-401-F23)	300 A	37	前	45°+6	207	20	25
			後	45°+6	220	19	
試験体 4 (661-A02-S01)	400 A		前	180°-36	234	19	50
			後	180°-36	294	18	
試験体 5 (661-401-F17)	300 A		前	180°-13	226	30	26
			後	180°-13	221	34	
試験体 6 (661-A02-S02)	400 A		前	0°+35	152	107	50
			後	0°+35	152	105	

注：軸方向基準を示すケガキ（一周）と一次切断端面の距離

(5) ケガキ記号

6 試験体中の 21 個のひびの番号およびケガキ記号を表 4.3-3 に示す。

表 4.3-3 基準線記号の使用一覧表

試験体 (継手番号)	ひび番号	ケガキ記号	備考
試験体 1 (661-101-F12)		A	精度確認試験
		B	精度確認試験
		C1 ~ C2	総合試験
		D	精度確認試験
		E	精度確認試験
試験体 2 (661-401-F02)		F	精度確認試験
		G	精度確認試験
		H	精度確認試験
		K	精度確認試験
		L	精度確認試験
		M	精度確認試験
試験体 3 (661-401-F23)	37	P	精度確認試験
	44	R	精度確認試験
試験体 4 (661-A02-S01)		T	精度確認試験
		AA	精度確認試験 (予備)
試験体 5 (661-401-F17)		U	精度確認試験
		V	精度確認試験
	21	W	精度確認試験
試験体 6 (661-A02-S02)		X1 ~ X2	総合試験
		Y	精度確認試験

5. 超音波探傷試験による深さサイジング試験要領

5.1 確性試験方法

本節で示す確性試験方法は、原子炉再循環系（PLR）配管において検出されたひびに対して改良超音波探傷試験（改良UT）手法の有効性を評価するためのものであり、確性試験の実施手順や確認項目は、以下の確性試験方法に従うものとする。

なお、本確性試験方法に記載する改良UT手法については、国の受託事業である「原子力発電施設検査技術調査等 超音波探傷試験による欠陥検出性及びサイジング精度に関する確証試験（略称UTS）」で確認された手法や、近年の国内外でのUT手法に関する新知見等を参照した代表的な例であり、確性試験に適用するUT手法を特別に指定するものではない。

従って、確性試験で適用するUT手法の具体的な試験要領は、各社の個別試験要領書に基づくものとする。

5.1.2 改良UT手法について

従来は、ステンレス鋼溶接部の近傍に発生したひびに対して、横波端部エコー法によってひびの深さを測定していたが、平成14年の実機PLR配管の調査結果で先端が溶接金属内部へ進展しているひびがあることが確認され、その実測深さが従来UTで計測した深さと大きく異なっていた事例が報告された。

ひび深さに関する精度向上が期待される改良UT手法を本確性試験で実施するに当たって、その具体的手法は以下のとおりである。（図5.1.2-1参照）

縦波 / 横波焦点型探触子の採用

溶接金属内超音波透過性の改善

フェーズドアレイ法の活用

電子制御による超音波探傷の条件最適化、画像化による識別性向上

概略深さ判定によるひび先端識別性の向上

モード変換波の確認により、概略深さを測定

5.1.3 評価

改良UT手法の有効性の評価は次により行う。

本確性試験要領及び個別試験要領書に従ってひびの深さを測定していること。

ひび深さ測定値の誤差の評価は、UTSの結果等を参考に委員会でを行う。

5.1.4 適用規格（準拠）

適用する規格等を以下に示す。なお、この他の適用規格がある場合は各社個別試験要領書に記載する。

- (1) (社)日本電気協会「軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験指針 (JEAG4207-2000)」
- (2) 関連 JIS 規格

5.1.5 検査員資格

本確性試験に従事する検査員は、試験を行うために必要な技量（技術，知識及び経験）を有する者が行う。

検査員は下記の認定機関または規格・基準のいずれかによって認定されていることを原則とする。

- 1) 社団法人 日本非破壊検査協会
- 2) AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING SNT-TC-1A
- 3) ASME Sec.XI , Appendix VIII
- 4) European Standard EN473

5.1.6 事前準備

(1) 目的

本確性試験は各UT手法のひび深さ測定精度を確認することが目的であり、実機試験は適用手法に関して技量・能力が確認された検査員が実施するものとする。そのため、検査員に対して、事前に適用手法に関して教育・訓練を行い、能力を有していることの確認を行う。

(2) 概要

各検査員は溶接部にEDMスリットを付与した板状あるいは曲面状の試験体等を用いて、確性試験において適用する改良UT手法による探傷を試行し、その記録を作成する。

各UT手法によりEDMスリットからの反射エコー特性を適切に把握して寸法を評価していることをこれらの記録等により確認する。

なお、記録の確認の際には、併せて各社における検査員に対する教育記録等も確認する。

(3) 試験体

教育・訓練に使用する試験体は、付与したEDMスリットの先端が溶接金属内にあるものを使用する。試験体は各社所有のものを使用する。

なお、溶接金属内に先端が達していない浅いEDMスリットについても、併せて訓練を実施しておくことが望ましい。

(4) ひび寸法測定方法

事前準備として行う教育・訓練で確認するUT手法を以下に示す。基本的には、これらの方法のいずれかまたは複数の組合せとする。

なお、改良UT手法に関する具体的な測定方法については、各社個別試験要領書に記載の実機試験に適用する手法とする。

(a) ひび長さ

DAC20%指示長さ（従来 UT 手法）

ノイズレベル指示長さ（従来 UT 手法）

2次クリーピング波法（改良 UT 手法）

(b) ひび深さ

2次クリーピング波法+モード変換波法（改良 UT 手法）

焦点型横波斜角法による端部エコー法（改良 UT 手法）

焦点型縦波斜角法による端部エコー法（改良 UT 手法）

フェーズドアレイ法（改良 UT 手法）

5.1.7 実機試験

(1) 目的

実機で P L R 配管に生じたひび (S C C) に対して、リング状に配管を切断した後、改良 U T 手法による寸法測定を行い、後の切断試験にて確認されるひび寸法との比較評価から、改良 U T 手法の有効性を評価する。(5.1.3 評価 参照)

(2) 対象プラント / 継手

(a) 対象プラント：東京電力 柏崎刈羽原子力発電所第 1 号機

(b) 対象継手及びひび

対象継手及びひびは、事務局が指定する。

(3) 試験要領

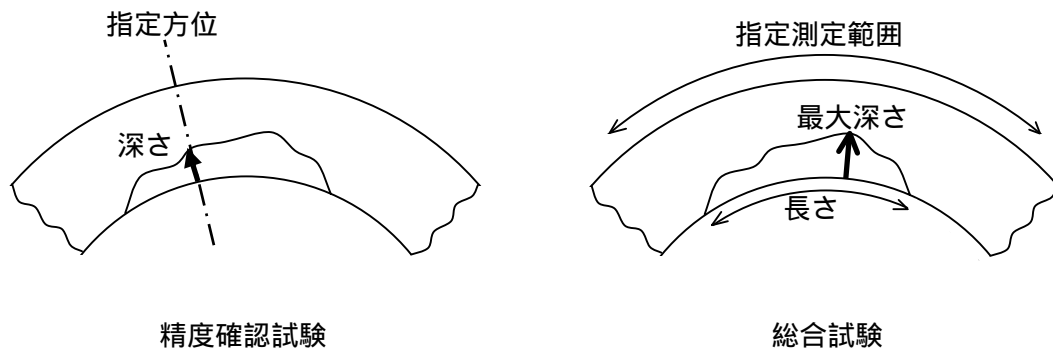
実機試験では、各社とも以下の 2 通りの試験を実施する。

「精度確認試験」：予め指定された方位位置におけるひびの深さの測定

「総合試験」：試験体の指定された範囲における各ひびの長さおよび最大深さの測定
なお、対象継手のうち 2 継手から「総合試験」に供するひびを選定し、その他のひびは「精度確認試験」に供することとする。

(4) 検査員

実機試験を実施する検査員は、5.1.5 の検査員資格を満足し、さらに 5.1.6 に記載した事前の教育・訓練を受けた者とする。



(5) ひび寸法測定方法

実機試験で適用するUT手法の概要を以下に示す。基本的には、これらの方法のいずれかまたは複数の組合せとする。

なお、具体的な測定方法については、各社個別試験要領書に記載する。

(a) ひび長さ（総合試験のみ）

DAC 20%指示長さ

通常探触子あるいはアレイ探触子を用いて、ひびコーナエコーの有無からひびの長さを測定する。エコーの検出レベルをDAC 20%に設定する。

ノイズレベル指示長さ

通常探触子あるいはアレイ探触子を用いて、ひびコーナエコーの有無からひびの長さを測定する。エコーの検出レベルをノイズレベルに設定する。

2次クリーピング波法

クリーピング波探触子を用いて、2次クリーピング波の有無からひびの長さを測定する。

(b) ひび深さ

2次クリーピング+モード変換波法

モード変換波の有無及び波形パターンによりひびの概略深さを確認し、端部エコー法等によるひび深さ測定の補助情報とする。UTSで実施されている「大まかな欠陥性状の把握手順」を参考とする。

焦点型縦波斜角法による端部エコー法

ステンレス鋼溶接金属内への音波の透過性の良い縦波を用い、端部エコーを検出する。予め想定したひびの概略深さを参考に、該当する部分を重点的に探傷する。

焦点型横波斜角法による端部エコー法

通常の横波を用い、端部エコーを検出する。予め想定したひびの概略深さを参考に、該当する部分を重点的に探傷する。

フェーズドアレイ法

アレイ探触子を用い、縦波あるいは横波によりひび先端の端部エコーを検出する。スキャンは、リニアスキャン（振動子を順番に励振させる。通常探触子の走査と同等）、セクタスキャン（屈折角を連続的に変化させる）、TOFD法（振動子群を送信側・受信側に分ける）から選択、あるいはこれらの組合せにより実施する。

5.1.8 切断試験

本確性試験で実施したUT結果を評価する上で、試験に供したひびの実態を知る必要があることから、実機から切断した試験体の切断試験を実施する。切断作業は、実機試験を行っていない第三者機関にて実施する。

切断試験結果から、ひびの長さ、深さ、傾き、開口量等を調査する。

なお、実機における切断試験対象の選定は、UTによって最もひびが深く評価された箇所あるいは、指定した探傷個所とする。

具体的な切断方法は、UTSにおいて規定されている切断ランクA手法（スライス切断）に準拠するものとする。

ただし、切断は管理区域内での作業となるため、スライス切断面を少なくする等の簡略化を図る。

5.1.9 確認項目

以下の項目について、確性試験の実施が、確性試験方法（5.1）及び個別試験要領書に従って適切に実施されていることを、立会等によって確認する。

確認項目

確認ポイント	確認項目	判定基準
配管試験体の封止	試験体を配管から切断後、試験体内面が観察できないように両端閉止板を処置されており、また、厳正に管理されていることを確認する。	封止、管理状況の立会確認
探傷実施前	要領書に定めた機材を使用し、校正が適正に行われていることを確認する。	要領書、機材、校正の記録確認
探傷の実施	探傷が予め定めた要領書に基づいて実施されていることを確認する。	各社の探傷について、随時、1回以上試験状況を確認（質問等は検査後に行う）
切断試験	配管き裂部の切断試験が要領書どおりに実施されていることを確認する。	切断記録の確認

5.1.10 概略工程

本試験の概略工程を下記に示す。

確性試験実施工程

内容	2003年3月	4月	5月
協会殿検討会			
	#1 3/19	#2 4/1	#3 5/6 #4 5/28
実施内容検討			
詳細要領検討			
事前準備			
実機試験 (切断試験)			
評価/まとめ			

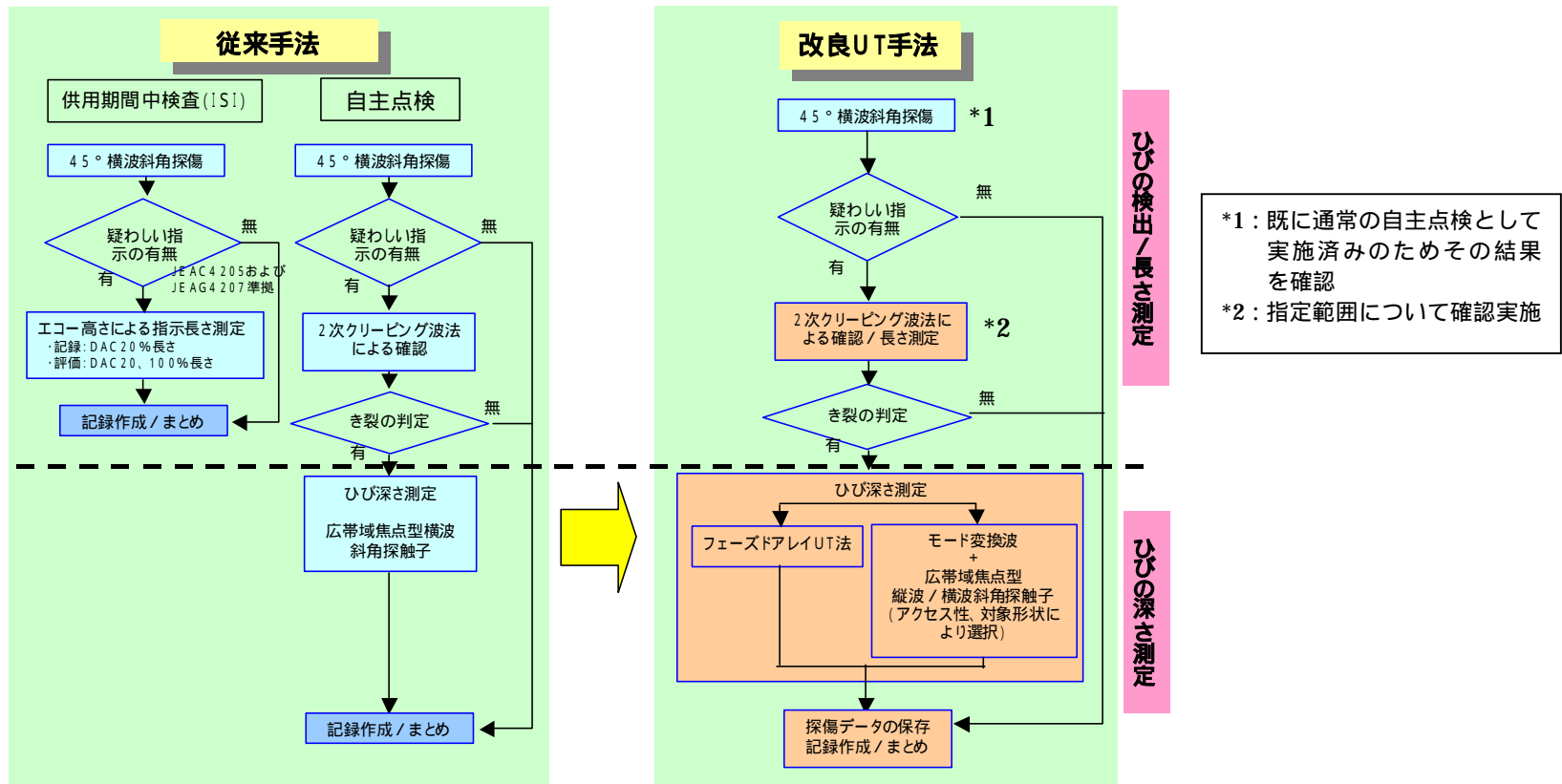


図 5.1.2-1 従来 UT手法と改良UT手法の違い

6. 超音波探傷試験結果

6.1. 試験状況及び試験結果の整理方法

6.1.1. 試験状況

確性試験は、東京電力(株) 柏崎刈羽原子力発電所 3号機タービンフロアにおいて、1号機から切り出した試験体に対し表 6.1.1-1 に示す工程に基づいて実施された。各社は、確性試験個別要領書に基づき、UT 試験員の訓練を事前に行い、その後試験体に対する UT を実施した。事務局は、各社の試験員の訓練結果を記録により確認するとともに、測定試験の実施中に校正及び測定が個別要領書どおりに行われていることを毎日の立会により確認した。また、第 3 回委員会では試験の実施状況を現場で視察した。

各社は個別要領書に基づいて校正結果及び測定結果を記録するとともに、それらのデータを整理し直接事務局へ提出した。

6.1.2. 試験結果の整理方法

ここでは、ひび深さのサイジング精度を評価するためひび深さ測定結果についてまとめた。なお、本確性試験では、ひび深さの定義を図 6.1-1 に示す様にひび開口部の深さ位置とひび先端の深さ位置との差と定義した。これは、維持規格の欠陥のモデル化方法に沿った方法である。

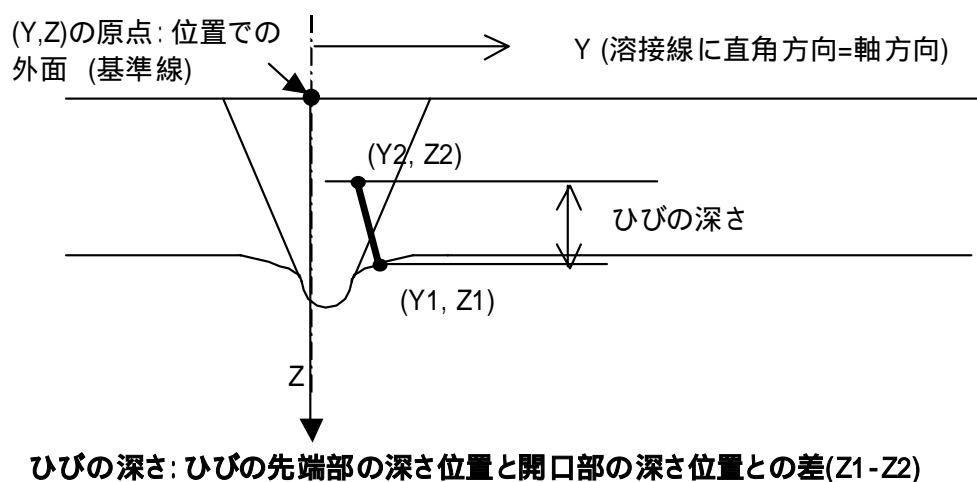


図 6.1-1 ひびの深さの定義

6.2. 事前準備(各社で実施した訓練)の結果

たびたび述べたように、各社は実機試験に先立ち、個別要領書に従い試験員に対し適用手法に関する事前の教育・訓練を実施した。訓練の概要を下記に示す。

なお、GEI と Westinghouse の 2 社は、米国の PD システムで認証されたシステム(試験要領書, 装置, 要員)に準拠して実機試験を実施した。また、Framatome ANP GmbH では、ドイツ非破壊検査協会のレベル 2, レベル 3 の認定, EN473 に基づく Framatome 社の探傷システム・SAPHIR の社内認定を受けているシステムに基づいて実機試験を実施した。

6.2.1. 訓練の概要と訓練結果(東芝)

試験片： 口径 600A × 板厚 38.1mm, あるいは口径 450A × 板厚 32.4mm

反射源：3 個の EDM スリット(深さ 3mm(先端が溶接熱影響部), 深さ 6.5mm(先端が溶接金属境界部), 深さ 9.5mm(先端が溶接金属内)), あるいは 2 個の EDM スリット(深さ 3mm(先端が溶接熱影響部), 深さ 10mm(先端が溶接金属内))

訓練結果：深さ測定誤差が ±1.5mm 以内であることを確認

6.2.2. 訓練の概要と訓練結果(日立)

試験片：口径 600A × 板厚 38.9mm, 口径 600A × 板厚 30.9, 口径 350A × 板厚 25mm, 口径 300A × 板厚 21.4mm, 平板 板厚 37mm

反射源：10 個の EDM スリット(深さ 0.5mm から 27mm), 付与位置は、溶接熱影響部, 溶接部境界部, 溶接金属内(先端部位置), 溶接金属内(開口部、先端部共)

訓練結果：深さ測定誤差が、-2.2mm から+3.0mm の範囲であることを確認。

6.2.3. 訓練の概要と訓練結果(GE I I)

米国の PD システムで認証を受けたシステム(試験要領書, 装置, 要員)で実機試験を実施。

6.2.4. 訓練の概要と訓練結果(FANP)

ドイツ非破壊検査協会のレベル 2, レベル 3 の認定, EN473 に基づく Framatome 社の探傷システム・SAPHIR の社内認定を受けているシステムで実機試験を実施。

6.2.5. 訓練の概要と訓練結果(WH)

米国の PD システムで認証を受けたシステム(試験要領書, 装置, 要員)で実機試験を実施。事前の訓練として、溶接金属を挟んで反射源の反対側から探傷し訓練を実施した。

試験片：板厚 30mm

反射源：人工的な疲労割れ (深さ 7.4mm から 21.7mm (6 個))

RMS 誤差が 1.14mm 以内であることを確認。

6.2.6. 訓練の概要と訓練結果(S W R I)

(確認中)

6.3. 実機試験結果

各社の個別要領書に沿って実施された超音波探傷手法(組合せも含む)の概要および深さサイジング結果を表 6.3.1-1 から表 6.3.1-6 に示す。

表の (a) は超音波探傷手法の概要を示す。使用した探触子等の主要な試験条件, ならびに各 UT 手法の省略名称も表中に示す。ここで,

「縦端」とは縦波による端部エコー法,

「横端」とは横波による端部エコー法,

「PA」とはフェーズドアレイ(Phased array)法

を省略したものである。

また, 各 UT 手法について, 指定した 21 箇所(内 2 箇所は最深部を測定する総合試験)における深さサイジング結果を表の (b) に示す。表の行に指定した範囲(基準線)を, 表の列に各 UT 手法の測定結果を示す。各表の (b) 中で, 端部エコーの指示無しという記述は, 端部エコーの指示が無く深さを測定していないことを示し, 検出すべき指示無とは, 指定した箇所にひびが無いという結果であったことを示している。

表 6.3.1-1 (a) 株式会社東芝が適用した UT 手法の概要

省略名称	UT 手法(組合せ)	主要な試験条件
縦端 (T)+ 横端 (T)	2次クリーピング波法+モード変換波法 焦点型縦波斜角探触子を用いたパルス反射法による端部エコー法 焦点型横斜角探触子を用いたパルス反射法による端部エコー法 (縦波及び横波による端部エコー法の測定結果を総合的に判断)	縦波:周波数 2MHz , 屈折角 45 度 , 集束深さ 20 ~ 40mm 横波:周波数 2MHz , 屈折角 45 度 , 集束深さ 30mm
PA(T)_1+ 横端 (T)	2次クリーピング波法+モード変換波法 フェーズドアレイ法(リニア走査及びセクター走査)による端部エコー法(直接接触法) 焦点型横斜角探触子を用いたパルス反射法による端部エコー法 (縦波及び横波による端部エコー法の測定結果を総合的に判断)	PA : 周波数 5MHz , 屈折角 0 度 ~ 70 度 , (縦波) 横波 : 周波数 2MHz , 屈折角 45 度 集束深さ 30mm
PA(T)_1	2次クリーピング波法+モード変換波法 フェーズドアレイ法(リニア走査及びセクター走査)による端部エコー法(直接接触法)	PA : 周波数 5MHz , 屈折角 0 度 ~ 70 度(縦波)
PA(T)_2	2次クリーピング波法+モード変換波法(水浸法)。 フェーズドアレイ法(リニア走査)による端部エコー法(水浸法)	PA : 周波数 2MHz , 屈折角 35, 40, 45, 50 度(縦波)

表 6.3.1-1(b) 株式会社東芝が適用した UT 手法による深さ測定結果

No.	継手番号	基準線	ひび番号	深さ測定値(mm)			
				縦端(T)+横端(T)	PA(T)_1+横端(T)	PA(T)_1	PA(T)_2
1	600A 661-101-F12	A	1	3	8	8	7.5
2		B	2	3	4	4	4
3		C1	6	4	5.5	5.5	4.4
4		C1	7	9	11	11	8.9
5		D	10	3	7.5	7.5	9.9
6		E	11	4.5	9	9	7.2
7	600A 661-401-F02	F	9	6.5	6	6	6.5
8		G	10	3.5	5	5	5
9		H	11	4	5	5	5.8
10		K	13	5.5	7	7	5.7
11		L	14	5	4	4	4.6
12		M	15	4.5	5	5	6
13	300A 661-401-F23	P	37	3.5	3.5	端部エコー指示無	3.4
14	R	44	3	1.8	1.8	3.2	
15	400A 661-A2-S01	T	5	3	3	3	4.2
16	AA	6	端部エコー指示無	端部エコー指示無	端部エコー指示無	端部エコー指示無	
17	300A 661-401-F17	U	13	2.4	1.1	1.1	3
18	V	14	1.7	1.3	1.3	2	
19	W	21	3	3.2	3.2	4.4	
20	400A 661-A02-S02	X1	6	3	3	3	3.4
21	Y	5	測定すべき指示無	測定すべき指示無	測定すべき指示無	測定すべき指示無	

注) 端部エコー指示無しとは、端部エコーの指示が無く深さを測定していないもの
測定すべき指示無とは、指定した箇所にひびが無いと判断したもの

表 6.3.1-2 (a) 株式会社日立製作所が適用した UT 手法の概要

省略名称	UT 手法(組合せ)	主要な試験条件
縦端(H)	2次クリーニング波法+モード変換波法 焦点型縦波斜角探触子を用いたパルス反射法による端部エコー法	縦波：周波数 2MHz， 屈折角 45 度，集束深 さ 40mm
横端(H)	2次クリーニング波法+モード変換波法 焦点型横斜角探触子を用いたパルス反射法による 端部エコー法	横波：周波数 5MHz， 屈折角 45 度，集束深 さ 12～44mm
横端(H)_2	2次クリーニング波法+モード変換波法 焦点型横斜角探触子を用いたパルス反射法による 端部エコー法	横波：周波数 2MHz， 屈折角 45 度，集束深 さ 9～69mm
PA(H)_1	2次クリーニング波法+モード変換波法 フェーズドアレイ法(フェーズドアレイ + TOFD)	周波数 2MHz，垂直 (縦波)，集束深さ可 変
PA(H)_2	2次クリーニング波法+モード変換波法 フェーズドアレイ法(セクター走査)による端部エ コー法	周波数 5MHz，屈折角 30 度～50 度 (縦波)

表 6.3.1-2(b) 株式会社日立製作所が適用した UT 手法による深さ測定結果

	継手番号	基準線	ひび番	深さ測定値(mm)				
				縦端(H)	横端(H)	横端(H)_2	PA(H)_1	PA(H)_2
1	600A 661-101-F12	A	1	7.9	4.9	6.6	6.4	6.1
2		B	2	8.4	5.9	8.3	8.7	7.6
3		C1	6	4.6	4.4	4.7	4.6	4.6
4		C1	7	10.4	6.1	10.1	8.3	8.7
5		D	10	8.0	4.5	6.6	8.1	7.3
6		E	11	7.7	5.5	7.7	7.4	7.2
7	600A 661-401-F02	F	9	10.5	8.8	12.0	9.5	9.7
8		G	10	6.1	7.7	8.9	8.9	8.4
9		H	11	8.5	5.2	7.7	8.0	7.2
10		K	13	9.6	9.9	9.0	9.7	9.7
11		L	14	8.9	5.5	6.9	6.9	7.0
12	M	15	7.3	7.3	5.7	7.3	6.3	
13	300A	P	37	4.1	3.2	4.3	5.4	4.1
14	661-401-F23	R	44	5.7	6.0	3.3	6.5	5.8
15	400A	T	5	5.5	3.9	5.6	5.8	2.1
16	661-A2-S01	AA	6	測定すべき指示無	測定すべき指示無	測定すべき指示無	2.7	2.7
17	300A 661-401-F17	U	13	4.5	4.0	3.5	4.1	2.8
18		V	14	3.1	5.2	4.4	4.7	3.9
19		W	21	3.3	3.5	3.4	4.6	2.6
20	400A	X1	6	4.8	4.2	5.3	5.8	5.5
21	661-A02-S02	Y	5	4.5	6.1	4.7	4.8	3.7

注) 測定すべき指示無とは、指定した箇所にひびが無いと判断したもの

表 6.3.1-3(a) General Electric International Inc.が適用した UT 手法の概要

省略名称	UT 手法(組合せ)	主要な試験条件
縦端(G) + 横端(G)	縦波斜角探触子を用いたパルス反射法による端部エコー法 横斜角探触子を用いたパルス反射法による端部エコー法	縦波：周波数 2MHz， 屈折角 60 度 横波：周波数 2.25MHz，屈折角 45 度

表 6.3.1-3(b) General Electric International Inc.が適用した UT 手法による深さ測定結果

	継手番号	基準線	ひび番号	深さ測定値(mm)
				縦端(G)+横端(G)
1	600A 661-101-F12	A	1	9.7
2		B	2	4.7
3		C1	6	10.4
4		C1	7	13.5
5		D	10	10.5
6		E	11	9.4
7	600A 661-401-F02	F	9	9.2
8		G	10	7.3
9		H	11	3.8
10		K	13	10.2
11		L	14	8.1
12		M	15	6.1
13	300A	P	37	測定すべき指示無
14	661-401-F23	R	44	測定すべき指示無
15	400A	T	5	4.0
16	661-A2-S01	AA	6	測定すべき指示無
17	300A 661-401-F17	U	13	測定すべき指示無
18		V	14	測定すべき指示無
19		W	21	測定すべき指示無
20	400A	X1	6	測定すべき指示無
21	661-A02-S02	Y	5	測定すべき指示無

注)測定すべき指示無とは、指定した箇所にひびが無いと判断したもの

表 6.3.1-4(a) Framatome ANP GmbH が適用した UT 手法の概要

省略名称	UT 手法	主要な試験条件
PA(F)	フェーズドアレイ法(セクター走査)による 端部エコー法	周波数 1.5MHz または 2MHz 集束有り 屈折角 約 30 ~ 約 60 (縦波及び横波)

表 6.3.1-4(b) Framatome ANP GmbH が適用した UT 手法による深さ測定結果

				深さ測定値(mm)
	継手番号	基準線	ひび番号	PA(F)
1	600A 661-101-F12	A	1	5.7
2		B	2	4.8
3		C1	6	3.9
4		C1	7	7.5
5		D	10	3.9
6		E	11	3.9
7	600A 661-401-F02	F	9	4.5
8		G	10	3.9
9		H	11	6.4
10		K	13	7.6
11		L	14	8.5
12		M	15	5.9
13	300A	P	37	測定すべき指示無
14	661-401-F23	R	44	測定すべき指示無
15	400A	T	5	3.5 *1
16	661-A2-S01	AA	6	1.3 *1
17	300A 661-401-F17	U	13	測定すべき指示無
18		V	14	測定すべき指示無
19		W	21	測定すべき指示無
20	400A	X1	6	測定すべき指示無
21	661-A02-S02	Y	5	1.5 *2

注)測定すべき指示無とは、指定した箇所にひびが無いと判断したもの

*1 欠陥ではなく溶接部のくぼみによるもの(縦波0度で評価)

*2 溶接裏波部のエコーにも判断できるが、欠陥とした場合指示は1.5mm以下と判断される。溶接部の反対側から2次的な探傷実施を推奨

表 6.3.1-5(a) Westinghouse が適用した UT 手法の概要

省略名称	UT 手法(組合せ)	主要な試験条件
縦端(W) + 横端(W)	焦点型縦波斜角探触子を用いたパルス反射法による端部エコー法 焦点型横斜角探触子を用いたパルス反射法による端部エコー法	縦波：周波数 2MHz， 屈折角 60 度 横波：周波数 2.25MHz，屈折角 45 度

表 6.3.1-5(b) Westinghouse が適用した UT 手法による深さ測定結果

	継手番号	基準線	ひび番号	深さ測定値(mm)
				縦端(W)+横端(W)
1	600A 661-101-F12	A	1	9.6
2		B	2	4.3
3		C1	6	5.1
4		C1	7	8.1
5		D	10	5.1
6		E	11	5.4
7	600A 661-401-F02	F	9	5.1
8		G	10	4.6
9		H	11	2.5
10		K	13	4.6
11		L	14	5.1
12		M	15	3.0
13	300A	P	37	測定すべき指示無
14	661-401-F23	R	44	測定すべき指示無
15	400A	T	5	4.7
16	661-A2-S01	AA	6	2.6
17	300A	U	13	測定すべき指示無
18	661-401-F17	V	14	測定すべき指示無
19		W	21	1.6
20	400A	X1	6	測定すべき指示無
21	661-A02-S02	Y	5	測定すべき指示無

注)測定すべき指示無とは、指定した箇所にひびが無いと判断したものの

表 6.3.1-6(a) 米国サウスウエスト研究所が適用した UT 手法の概要

省略名称	UT 手法	主要な試験条件
多重パルス(S)	振動子を前後に配置した探触子を用い、縦波及び横波の複数ビームを送信/受信してエコーの伝搬時間差(ビーム路程)から、ひび深さを測定する方法。	周波数 3.8MHz, 送信 70 度受信 50 度(縦波) 周波数 3.8MHz, 送信 50 度受信 40 度(縦波) 周波数 3.8MHz, 送信 30 度受信 20 度(縦波) 周波数 3.8MHz, 送信 60 度受信 20 度(縦波) 周波数 3.8MHz, 送信 60 度受信 10 度(縦波)

表 6.3.1-6(b) 米国サウスウエスト研究所が適用した UT 手法による深さ測定結果

	継手番号	基準線	ひび番号	深さ測定値(mm)	
				多重パルス(S)	
1	600A 661-101-F12	A	1	13.0	±3
2		B	2	8.0	±0.5
3		C1	6	16.0	±2
4		C1	7	19.0	±4
5		D	10	18.5	±1.5
6		E	11	19.0	±1.5
7	600A 661-401-F02	F	9	4.5	±1.5
8		G	10	4.0	±1.5
9		H	11	6.5	±2.5
10		K	13	6.0	±2
11		L	14	5.5	±2
12		M	15	7.0	±2
13	300A	P	37	5.0	±0.5
14	661-401-F23	R	44	2.0	
15	400A	T	5	12.0	±2
16	661-A2-S01	AA	6	4.0	±1
17	300A 661-401-F17	U	13	11.0	±1.5
18		V	14	8.0	±0.5
19		W	21	10.5	±2
20	400A	X1	6	4.0	±1
21	661-A02-S02	Y	5	5.5	±0.5

±は、誤差の範囲を示す

7. 切断調査

切断調査は、改良 UT による深さサイジングに供した再循環系配管に含まれたひびの実際の深さを断面金相観察により求めるものである。

7.1 切断調査要領

確性試験結果を評価する上で必要な欠陥情報は、精度確認試験および総合試験から得られる結果から得られる。精度確認試験においては基準線位置におけるひびの深さを計測項目とし、総合試験で対象としたひびについては、指定した範囲における各ひびの最大深さとひび長さを求めて比較することにした。

切断試験は、以下の手順(図 7.1-2 参照)で実施し、トレーサビリティの確保にも配慮した。また、単にひび寸法を確認するだけでなく、ひび寸法の測定精度に影響を及ぼす次の情報も取得した。

- 1) ひびの位置、長さ、傾き(溶接線方向)
- 2) ひびの開口幅
- 3) ひびの深さ、傾き(板厚方向)
- 4) ひびの進展形態、進展部の組織(母材、溶接金属)、ひび先端の形状等

(1) 封印確認および延長管の取外し

改良 UT 手法による試験が終了した試験体の延長管及びマスキング取外し前に、各溶接部に打刻した刻印が破られていないことを、事務局が立会って確認した。立会記録を添付資料に示す。

立会確認後、延長管と試験対象配管を固定していた溶接部をグラインダにより切断した。また溶接部以外の部分に充填していた接着剤を除去した。

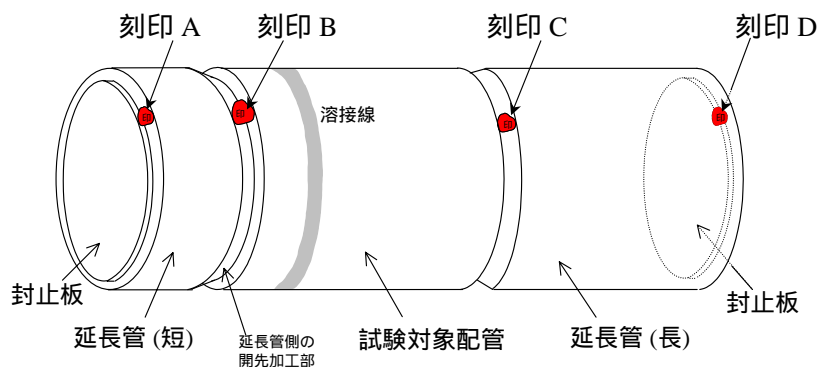


図 7.1-1 配管封止の刻印箇所

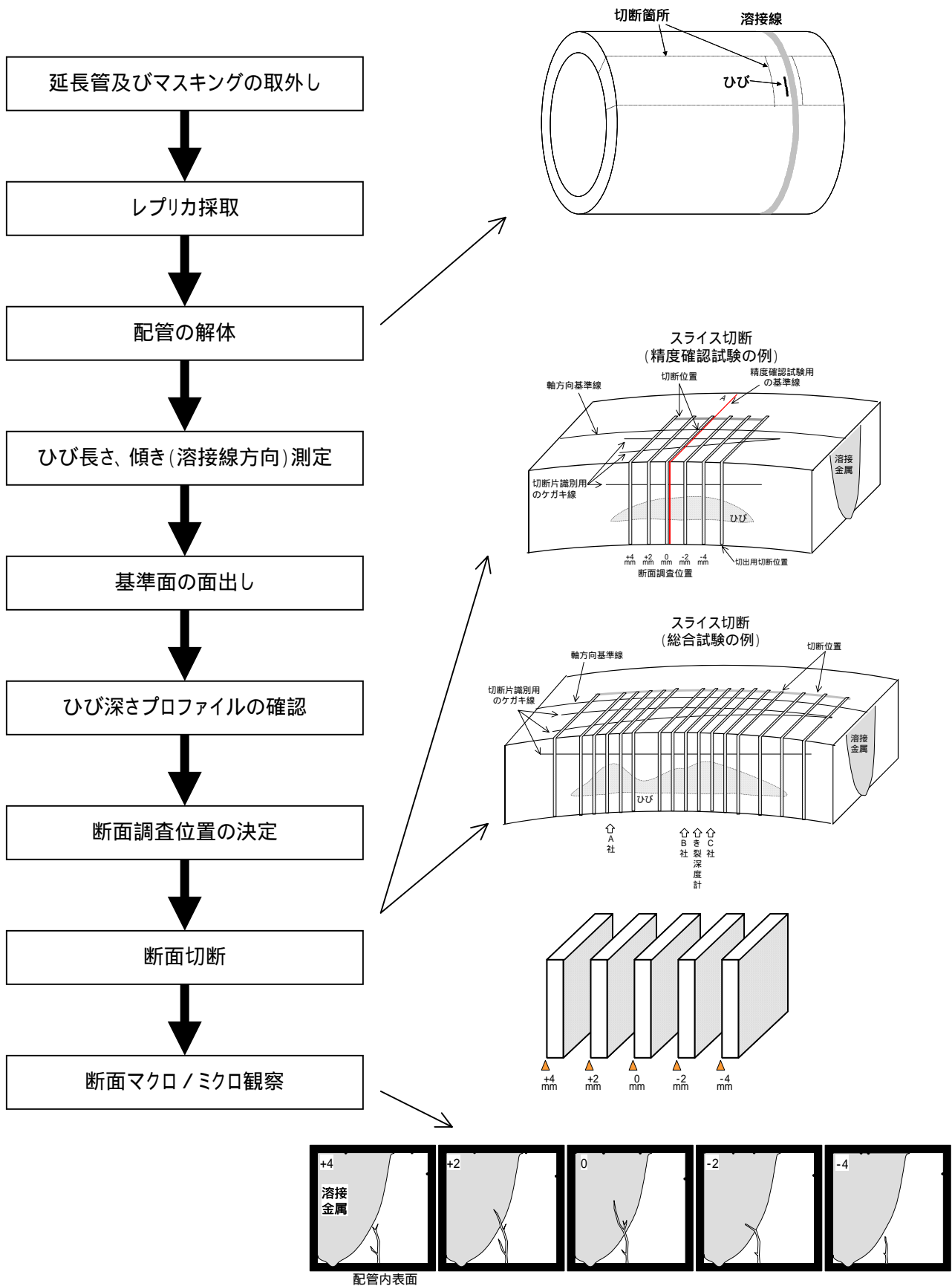


図 7.1-2 切断試験作業手順

(2) ひびのレプリカ採取

切断調査対象のひびのレプリカを採取し、ひび開口幅と長さを測定した。

レプリカの採取は、ひび部をアセトンで洗浄した後、試験体表面に酢酸メチルを滴下しレプリカフィルム(アセチルアセート系)を貼り付けて表面状況をフィルムに転写した。フィルムに、ひびの位置関係が判るように基準線と基準線刻印(ひび近傍に追加刻印したもの)も入れて転写した。フィルムはマウントに貼り付けた。これを光学顕微鏡で観察し、接眼マイクロメータを用いて基準線位置及び最大開口部位置における開口幅を測定した。また投影顕微鏡を用いてひびの長さを測定した。

(3) 配管の解体

ひび位置に留意して、プラズマ切断機及び鋸切断機を用いて試験体(配管)を大まかに切断し、ひびを含む切断調査試料を採取した。

プラズマ切断機では、鋸切断機での取り扱いが可能な大きさにするため、配管の輪切り及びその半割りを行った。プラズマ切断にあたっては、ひび部に熱影響を与えないように、切断部以外を水に漬けながら切断した。

鋸切断機では、PT 指示を基にして、ひびを十分に含む範囲で小片に切断した。

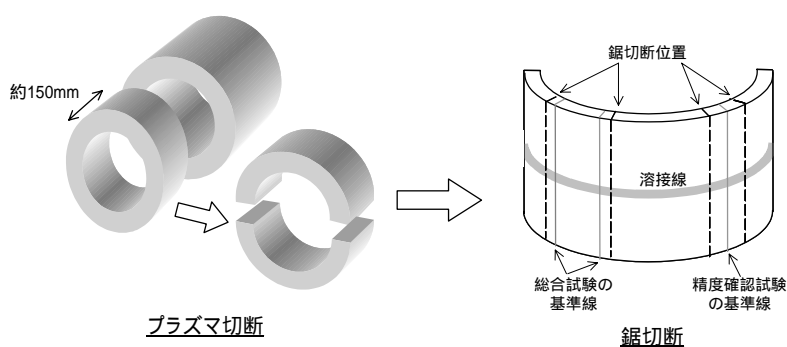


図 7.1.-3 配管の解体

(4) ひびの傾き(溶接線方向)測定

ひび部の写真を撮影し、写真からひびの傾き(溶接線方向)を分度器を用いて測定した。

なお、7.1-(2)でレプリカより求めた「ひび長さ」と、ここで求めた「ひび傾き(溶接線方向)」の定義は、以下の通りとした(図 7.1-4)。

【ひび長さ】 : 配管内表面上での長さ(ひびに沿った長さ)

【ひび傾き(溶接線方向)] : ひび基準線(軸方向に平行)との成す角度

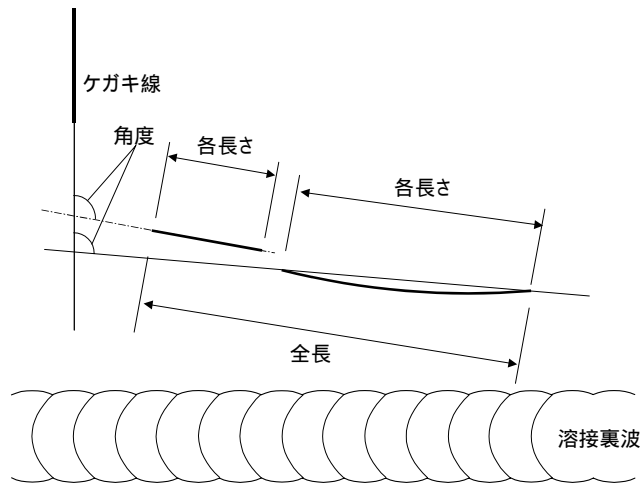


図 7.1-4 ひびの長さおよび傾きの定義(ひびが2つに分かれている場合)

(5) 基準面の面出し

放電加工機を用いて、配管内面の機械加工面を基に、切断調査試料の基準面(管軸に垂直な面)の面出しを行った。

基準面の面出し要領は、配管内面の機械加工面の底面をダイヤルゲージが同一レベルで這うように試料をセットすることによって、機械加工面の水平と軸方向を合わせ、放電加工機の持つ数値制御機能で、この軸に垂直な面(管軸に垂直な基準面)の切出しを行った。

なお、溶接線付近の変形が UT プローブの探傷方位を変化させ、これが UT 測定精度に影響を及ぼしていることも考えられるため、切断にあたっては溶接線付近の変形を確認できるよう配慮し、試料の1辺を残して L 字型に切断した。

(6) ひび深さプロファイルの確認

総合試験でのスライス切断位置は受験各社が決定したひび深さ最大の位置(配管周方向(Y))とき裂深度計で求めたひび深さプロファイルの形状を勘案して決定することとした。そのため、表 7-1 に示した総合試験の対象としたひびについて、き裂深度計を用いて 1mm 間隔でひび深さのプロファイルを測定した。

使用したき裂深度計(Karl Deusch 社製、RMG-4015 型)は、交流電位差法を用いており、精度は非磁性のステンレス鋼で 1~25%とされる。

き裂深度計での測定位置は、受験各社が決定した最深位置の中間的な位置(表 7.1-1)を「断面調査基準線」とし、この基準線に側面上で平行に 1mm 間隔でマーキングし、当該マーキングに沿って測定した。測定は放電加工ノッチを設けた校正用試験片を用いて表示値を補正したのちに行ない、三度繰り返した。ひび深さプロファイルの測定結果の例を図 7.1-11(a)~(b)に示す。

表 7.1-1 ひび深さプロファイル測定対象のひび

対象ひび		基準線記号	断面調査基準線の位置 (基準線からの外表面距離)
継手番号	ひび番号		
661-101-F12		C1,C2	26mm (C1)
661-101-F12		C1,C2	104mm (C1)
661-A02-S02		X1,X2	50mm (X1)

継手番号:661-101-F12, ひび番号:

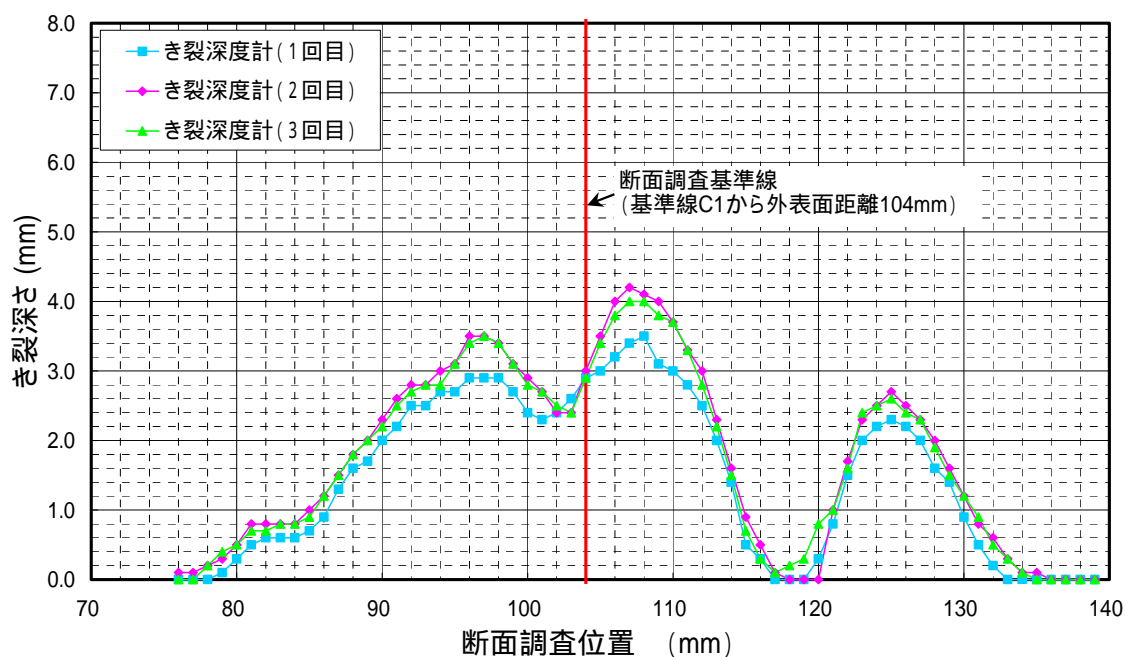


図 7.1-5 プロファイル測定結果の例

(7) 断面調査位置の決定

断面調査位置は、以下のとおりとした。

[精度確認試験]:

精度確認試験として指定した基準線位置と、この基準線を挟んで両側 4mm ずつを 2mm 間隔とした断面。断面調査位置の符号は、配管の角度方向と一致させた(0° 90° 方向が +、0° 270° 方向が -)。

[総合試験] :

(6)項のひび深さプロファイルと各改良 UT 手法で得たデータを参考にして、断面調査位置を決定した。

断面調査位置は、ひび深さプロファイルと各改良 UT 手法において最もひびが深いと評価された位置(各社コール位置)とその近傍(片側 8mm ずつ)を 2mm 間隔とし、それ以外のひびが確認された範囲は 4mm 間隔とした断面である。総合試験の断面調査位置の例は図 7.1-6 中に示した。

総合試験の評価体系を図 7.1-7 に示す。UT 試験では、外表面から配管の中心に向かった内表面側にあるひびを探傷している。一方、切断調査では、断面調査基準線に平行な位置で評価するため、UT 試験結果と切断調査とを比較評価できるよう各社コール位置を各社コール(意味を説明)相当位置(内表面)に変換した。

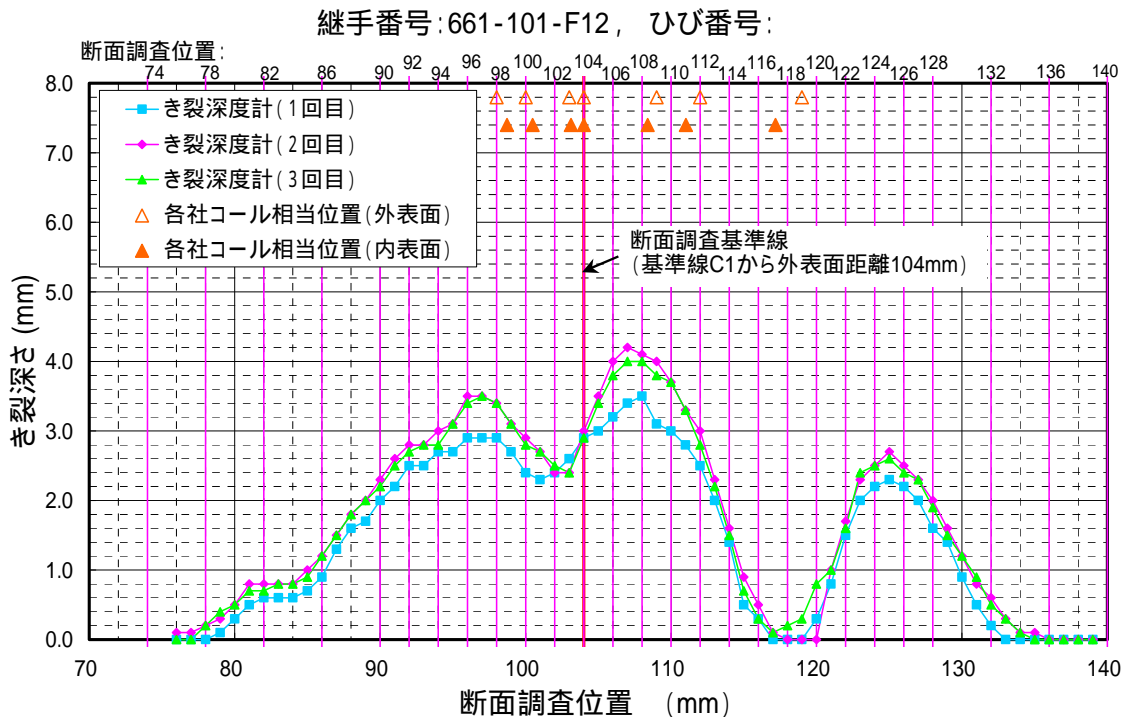


図 7.1-6 断面調査位置 の例(661-101-F12 , 基準線 C1)

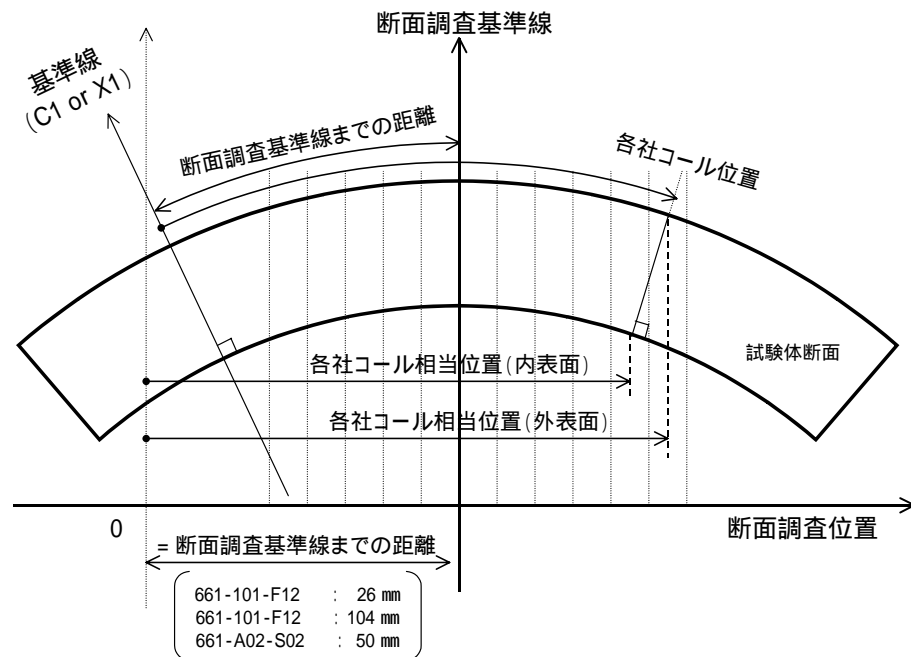


図 7.1- 7 総合試験評価体系

(8) 断面切断

放電加工機を用いて、断面調査位置を配管側面方向からスライス切断し、配管の内外表面を含んだ断面調査試料を採取した。

断面調査試料の採取手順を以下に示す。

- 1) 外表面に罫書かれた基準線位置から管軸中心に向かって、基準面(側面)に基準線を罫書く。
- 2) 放電加工機の Y 軸上で、放電加工機のワイヤーが両側面の基準線と一致するように、試料を放電加工機にセットする。
- 3) 放電加工機の数値制御機能を用いて、決定された切断位置を基準線に平行にスライス溝を入れる。スライス溝深さについては、軸方向基準線と溶接裏波がスライス片に十分に入る深さとした。
- 4) 全てのスライス溝を入れた後、スライス溝に対し直角に切断し、断面調査試料となるスライス片を採取する。

なお、切断にあたっては、放電加工機のワイヤー径 0.25mm と試料の鏡面研磨時の研磨代を考慮して、基準線から 0.4mm ずらした位置を切断した。

また、スライス切断後、試料の位置関係が確認できるよう、外表面には軸方向基準線と平行な直線とそれと交差する直線を、基準面には基準線に垂直な直線(アイマーク)を罫書いた後、スライス切断した。

(9) 断面マクロ/マイクロ観察

断面調査試料を湿式研磨及びバフ研磨により鏡面研磨し、ひび深さの測定を行なった。またマクロ写真およびマイクロ写真を撮影し、ひびの様相を調査した。

投影顕微鏡での測定体系を図 7.1-18 に示す。基準面が投影顕微鏡観察体系の Z 軸に一致するように試料をステージ上に設置したのち、試料の配管外表面側に残る軸方向基準ケガキ線を原点、即ち $(Y,Z) = (0,0)$ とし、内表面側のひび開口部(開口部中心)の座標を $(Y1,Z1)$ 、ひび先端(分岐している場合は最深点)の座標を $(Y2,Z2)$ として求めた。

ひび深さの測定値は、各ひびの代表点(精度確認試験にあっては基準面 $(X=0)$ 、総合試験にあってはひびの最深点)について、その正確さについて事務局が立ち会って確認した。

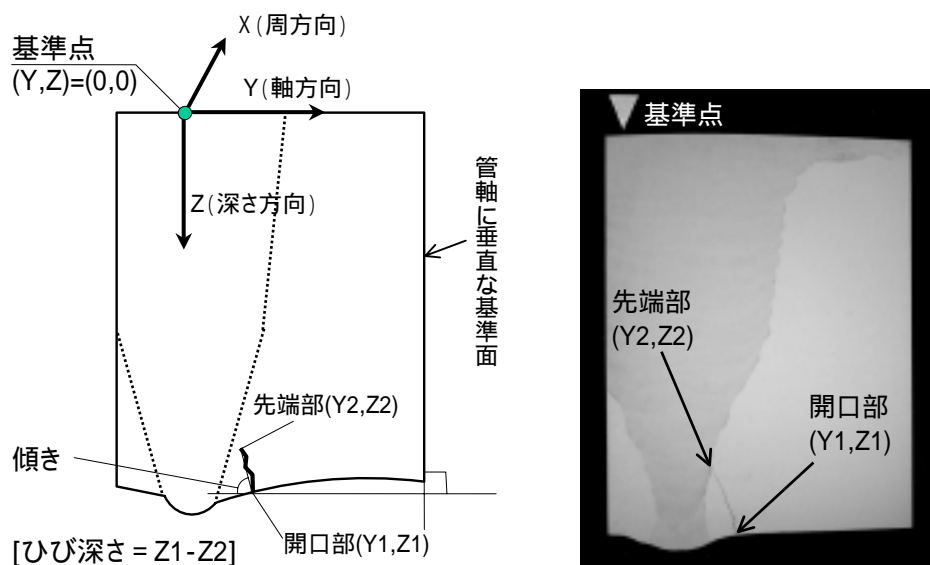


図 7.1-8 投影顕微鏡での測定体系

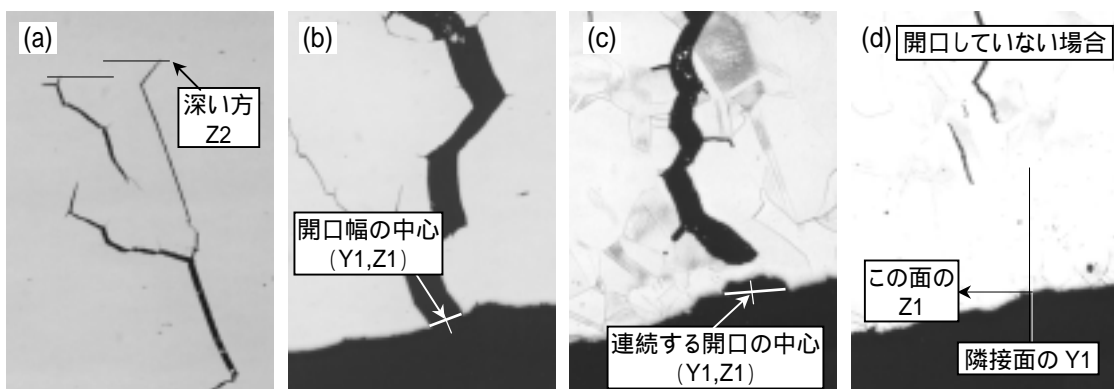


図 7.1-9 ひび深さの測定方法。(a) ひびの先端、(b) ひび開口部、(c) ひびが開口していない場合(表面との連続性が判別できる場合)、(d) ひびが開口しておらず、内表面にもひびの痕跡がない場合は隣接面のひび開口位置 $(Y1)$ 座標を参考に決定する。

7.2 切断調査結果

切断面の観察から、ひびの深さ、ひびの開口部および先端の存在位置、内表面でのひび長さおよび溶接線に対する傾き等を求めた。個々の切断面ごとにマクロ写真やエッチング前後のマクロ/ミクロ写真を撮影している。

以下にそれらの測定結果をまとめる。

7.2.1 ひび深さ

精度確認試験に供したひびの深さ測定記録及び総合試験に供したひび(3個)の深さ測定記録を表7.2-1に示す。

ひびの深さは、二例の浅いものを除いて、4.0～7.3mm(各ひびの最深位置で)の範囲に収まっており、基準線上では3.26～6.84mmとなっていた。総合試験X1/X2のひびは内表面の止端部から発生し深さ0.54mmであり、基準線Pに隣接(基準線位置から-2mm)した面では内面に開口を持たない高さ0.40mmのひびが認められた。

精度確認試験に供したひびのうち、一部ではその先端が溶接金属中に達しているものがあり、これに対応する表7.2-1中のデータを欄に太枠を付して示した。ひびが深いものが必ずしも溶接金属に達しているわけではなく、総合試験に供したひびC1/C2-ではすべての調査断面でひびは母材内にとどまっていた。配管の内表面におけるひび開口部は、精度確認試験の基準線Tと総合試験X1/X2のひびが止端部から発生していたという例を除き、すべて母材内にあった。

表中にはひびの板厚方向に対する傾き(90度で内表面に垂直。)を併せて示した。傾きは開口部と先端を結ぶ直線の管軸に対する角度として定義している。しかしながら、600Aの配管(試験体1および2)で見られたひびの多くは、ひびが深くなるにつれて次第に溶接金属側に近づき、全体としてやや弧を描いたような形状となっている。そのためひびが溶接金属に達する際の実際の角度は表示した値よりも小さいと考えるべきである。

図7.2-1には試験体1および2のひび(精度確認試験分は基準線上断面、総合試験分は最深点の断面)の、図7.2-2には試験体4の基準線Tのひびおよび試験体6の総合試験におけるX-62断面のひび(きわめて小さい)の、それぞれ実体顕微鏡写真を示す。

表7.2-1に示した総合試験の対象としたひび3個の深さ調査結果の例を図7.2-3に示す。

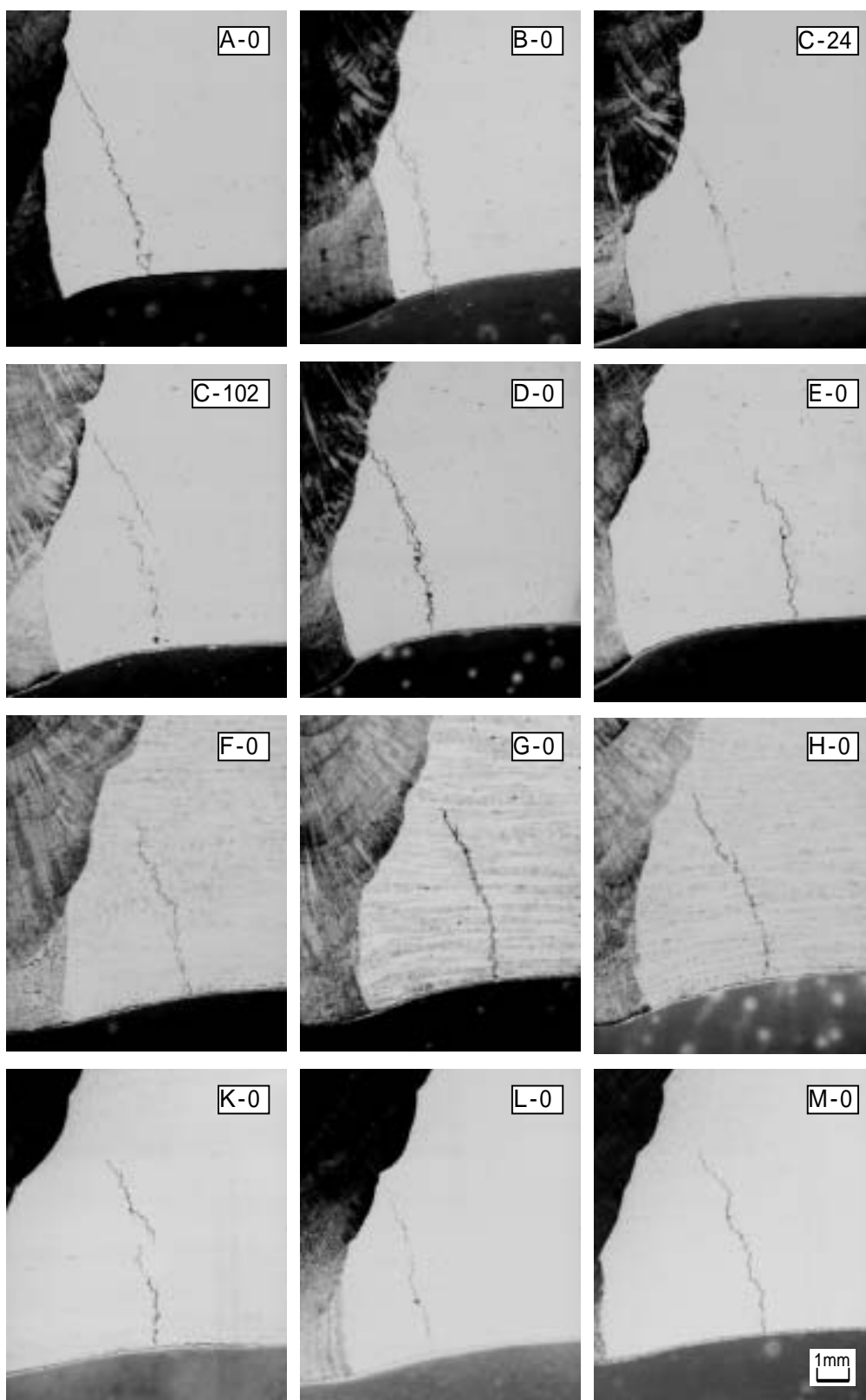


図 7.2-1 ひびの全体的様相(600A 配管(試験体 1 および 2)中のひび)

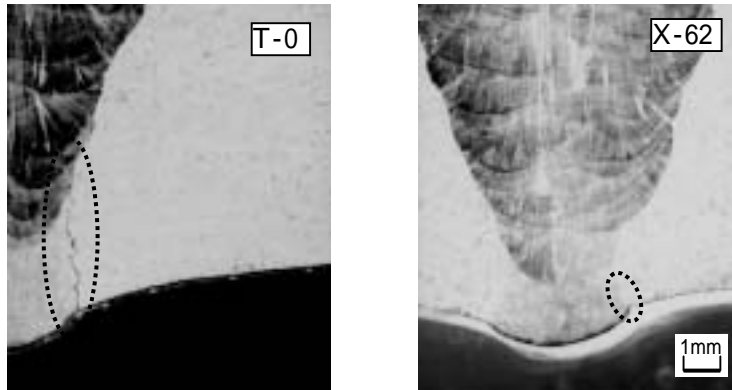


図 7.2-2 ひびの全体的様相(400A 配管(試験体 4:T-0、試験体 6:X-62)中のひび)

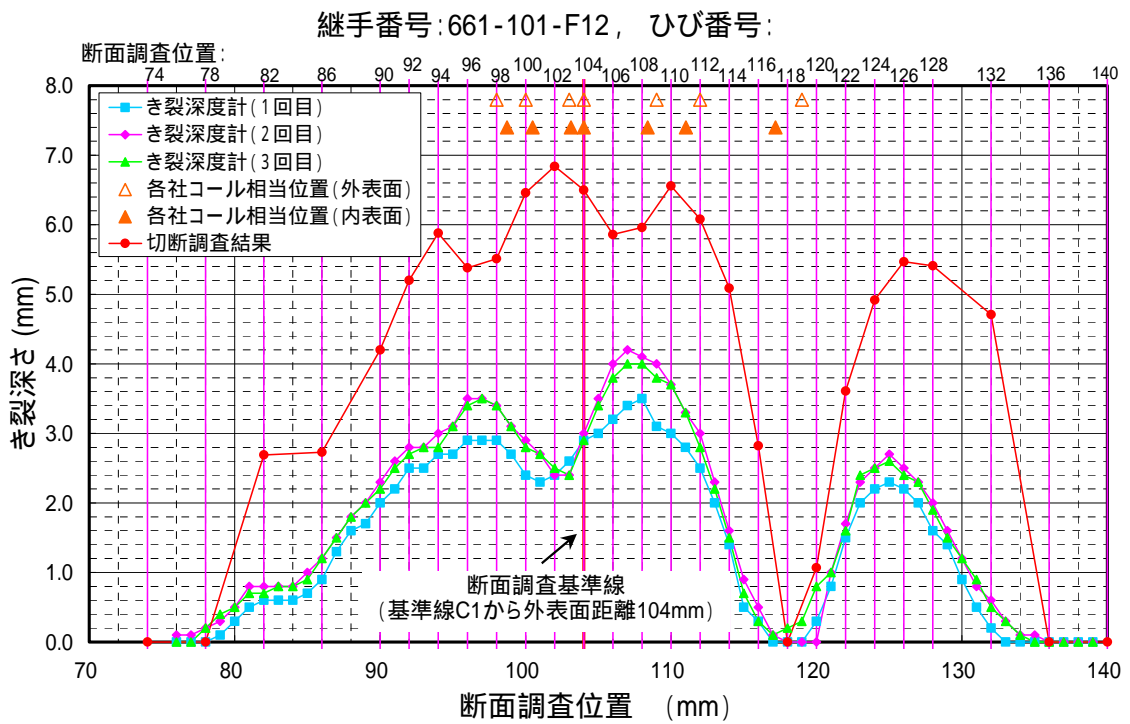


図 7.2-3 総合試験結果の例 (661-101-F12 , 基準線 C1)

精度確認試験分

基準線 記号	継手番号	ひび 番号	PT 指示	X=0 断面におけるひびの 存在部位 (Pは X=-2)		内表面ひび長さ等 (- : ひび無し、 : 基準線位置 = 最大開口部)				ひび深さ (- : ひび無し、太枠: 先端が溶金中)					注記	備考
				開口部	先端部	ひび長さ (mm)	ひび傾き (°)	ひびの開口幅(mm)		-4mm	-2mm	0mm	+2mm	+4mm		
								基準線位置	最大開口部							
A	661-101-F12 (600A)		明瞭	母材	溶金中	41.5	88.0	0.040	0.050	6.67	7.30	6.70	7.15	7.24		
B			やや薄い	母材	溶金中	22.0	88.5	0.040		5.31	5.83	5.65	5.94	5.66		
D			明瞭	母材	溶金中	19.7	94.0	0.035	0.040	4.92	5.66	5.90	6.25	6.19		
E			明瞭	母材	母材	22.0	92.0	0.035	0.040	5.51	5.18	4.81	5.07	5.23		
F	661-401-F02 (600A)		明瞭	母材	母材	7.9	91.0	0.015	0.028	5.43	5.55	5.44	4.70	1.76		
G			明瞭	母材	母材	7.7	89.5	0.013	0.020	3.33	4.57	5.28	4.78	-		
H			明瞭	母材	母材	13.5	96.0	0.040	0.045	5.87	6.35	5.79	6.00	6.27		
K			明瞭	母材	母材	8.9/33.3 ^{*1}	89.0/89.5	0.025	0.030	7.18	6.68	5.66	5.61	6.32		
L			明瞭	母材	母材	13.8/4.8 ^{*1}	95.0/94.5	0.020	0.025	6.02	5.15	4.93	3.66	4.16		
M			明瞭	母材	母材	7.8	88.0	0.025		-	4.23	5.64	5.93	5.43		
P	661-401-F23 (300A)	37	不連続な点状	-	溶金中	-	-	-	-	-	0.40	-	-	-	観察断面に表面開口なし	微小な凝固不良
R		44	不連続な点状	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ひび無し	
T	661-A02-S01 (400A)		明瞭 + 薄い指示	止端部	溶金中	4.3	92.0	0.015	0.020	4.00	3.80	3.26	3.42	1.42		
AA			薄い	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ひび無し	
U	661-401-F17 (300A)		極めて薄い	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ひび無し	
V			極めて薄い	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ひび無し	
W		21	薄く不連続に	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ひび無し	
Y	661-A02-S02 (400A)		指示無し	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ひび無し	溶金内に微小な融合不良あり

総合試験分

基準線 記号	継手番号	ひび 番号	PT 指示	最大深さ位置における ひびの存在部位		内表面ひび長さ等 (- : ひび無し、 : 基準線位置 = 最大開口部)				最大深さ位置の前後 4mm のひび深さ (- : ひび無し、太枠: 先端が溶金中)					最大深さ位置 (C1/X1から)	備考
				開口部	先端部	ひび長さ (mm)	ひび傾き (°)	ひびの開口幅(mm)		-4mm	-2mm	0mm	+2mm	+4mm		
								基準線位置	最大開口部							
C1/C2	661-101-F12 (600A)		明瞭	母材	母材	14.5	91.0		0.030	4.95	4.16	5.12	5.02	4.76	24mm	
C1/C2			明瞭	母材	母材	10.0/32.6 ^{*1}	93.5/94.0		0.050	5.51	6.46	6.84	6.50	5.86	102mm	
X1/X2	661-A02-S02 (400A)		薄い	止端部	母材	-	-		-	-		0.54		-	62mm	X1 ~ X2 間の溶金内に断続的に微小な融合不良あり

* 1: ひびが二つに分かれている。A/B とは、Amm のひびと Bmm のひびが隣接していることを示す。

表 7.2 - 1 切断調査結果の概要

8. 超音波探傷試験結果の評価及びまとめ

8.1. 試験結果と切断調査結果との比較

a) 精度確認試験及び総合試験における深さ測定結果

深さサイジング試験に適用した手法(複数手法の組み合わせを含む)ごとの結果を図 8.1-1 から図 8.1-13 に示す。図は切断調査で測ったひび深さと UT で測定したひび深さを、ひびごとに表示したものであり、図の縦軸がひびの深さを、図の横軸には適用された手法を列挙した。図中の横実線及び矢印記号は、切断調査によって基準線上で測った深さ(精度確認試験の対象)、又は最大深さ(総合試験の対象)を示す。また、横点線及び矢印記号は、基準線位置 $\pm 2\text{mm}$ 、 $\pm 4\text{mm}$ の位置での最大深さ(ただし、基準線での深さよりも 1mm 以上深い場合)が得られた時のその深さを示す。

図の横軸に示した UT 手法の名称については、図のスペースの関係で省略した記号で記述した。省略した記号の具体的な内容は 6 章の表中に示す。

b) 総合試験における最深部の測定位置

総合試験の対象とした基準線は、基準線 C1(ひび番号)と基準線 X1(ひび番号)である。それぞれ、UT で深さを測定した位置(ひびの長さ方向の位置)を切断調査結果と共に図 8.1-14 から図 8.1-16 に示す。図の縦軸は深さを示し、横軸は内表面でのひびの長さ方向の位置を示す。UT で深さを測定した位置は、内表面に投影した結果をプロットした。

基準線 C1 のひび番号 では、各社ともほぼ最深部付近を測定していた。基準線 C1 のひび番号 でも、ほぼ最深部付近を測定していた。基準線 X1 のひび番号 では、切断調査でひびを確認した位置からずれた位置で測定していた。

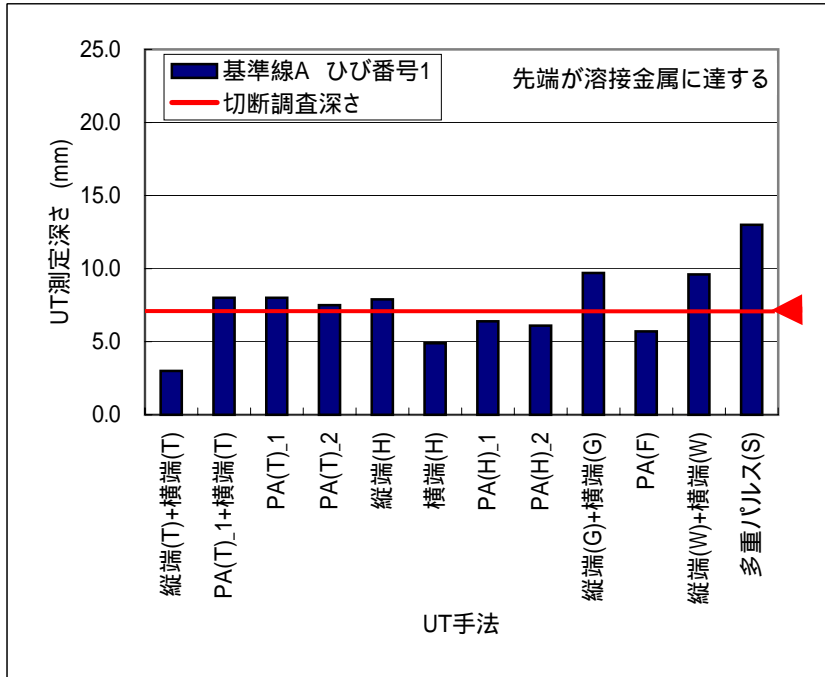


図8.1-1 基準線記号A(661-101-F12継手(600A))のUT測定深さと切断調査深さ

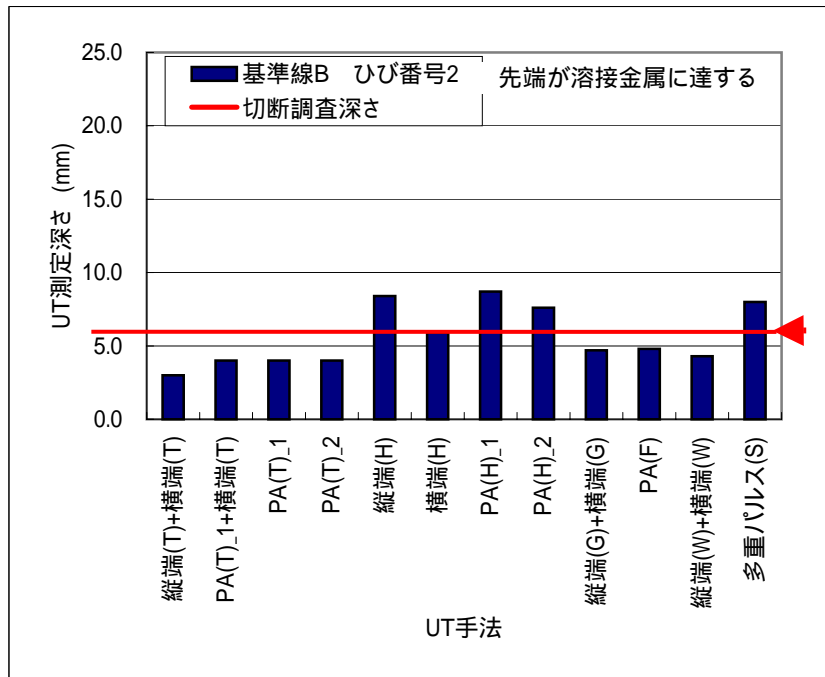


図8.1-2 基準線記号B(661-101-F12継手(600A))のUT測定深さと切断調査深さ

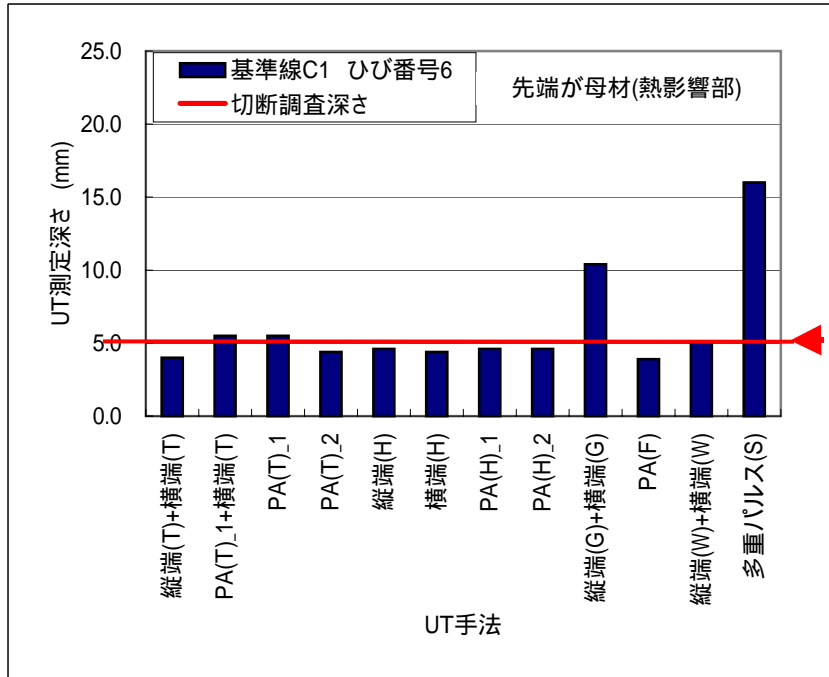


図8.1-3 基準線記号C1(661-101-F12継手(600A)) ひび番号 の UT測定深さと切断調査深さ

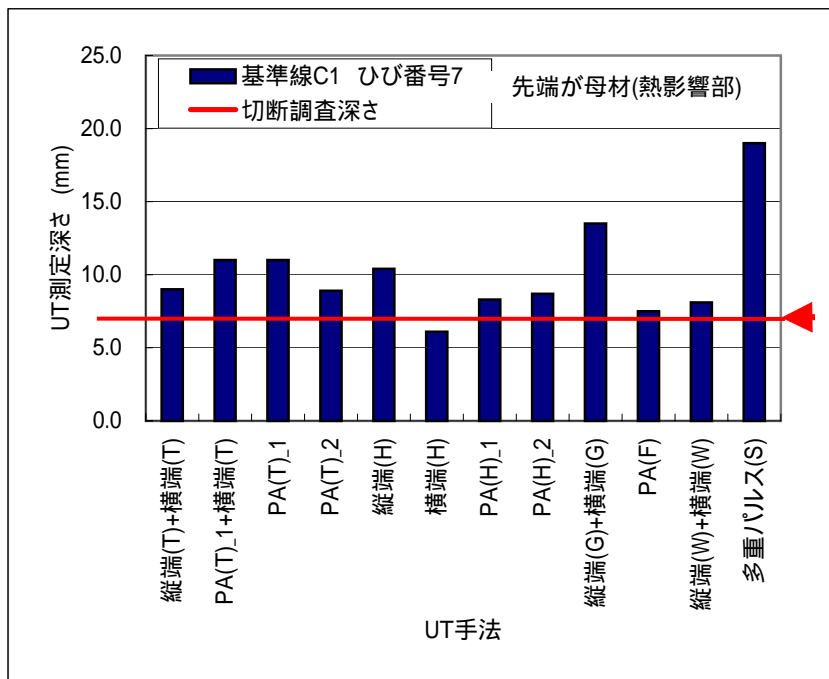


図8.1-4 基準線記号C1(661-101-F12継手(600A)) ひび番号 の UT測定深さと切断調査深さ

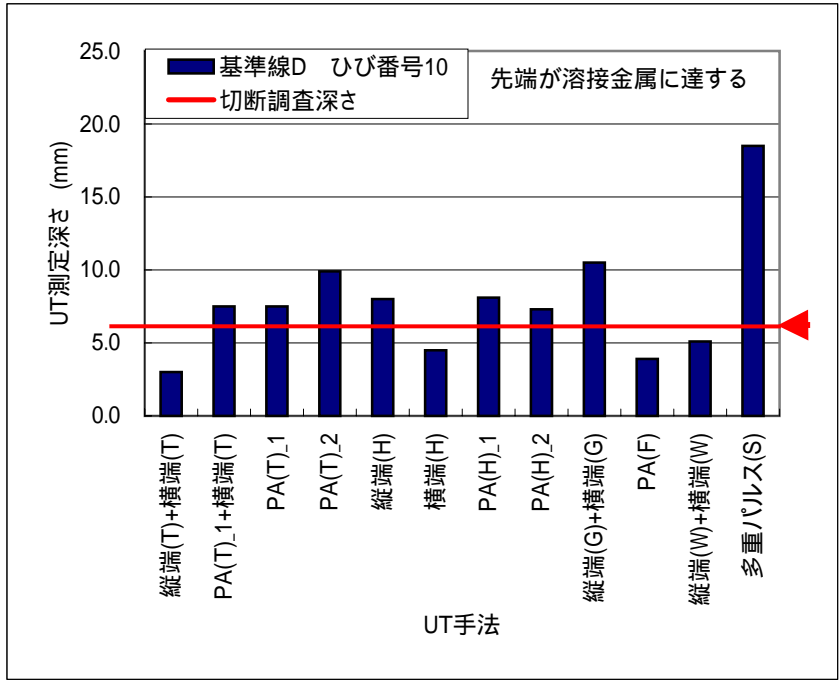


図8.1-5 基準線記号D(661-101-F12継手(600A))のUT測定深さと切断調査深さ

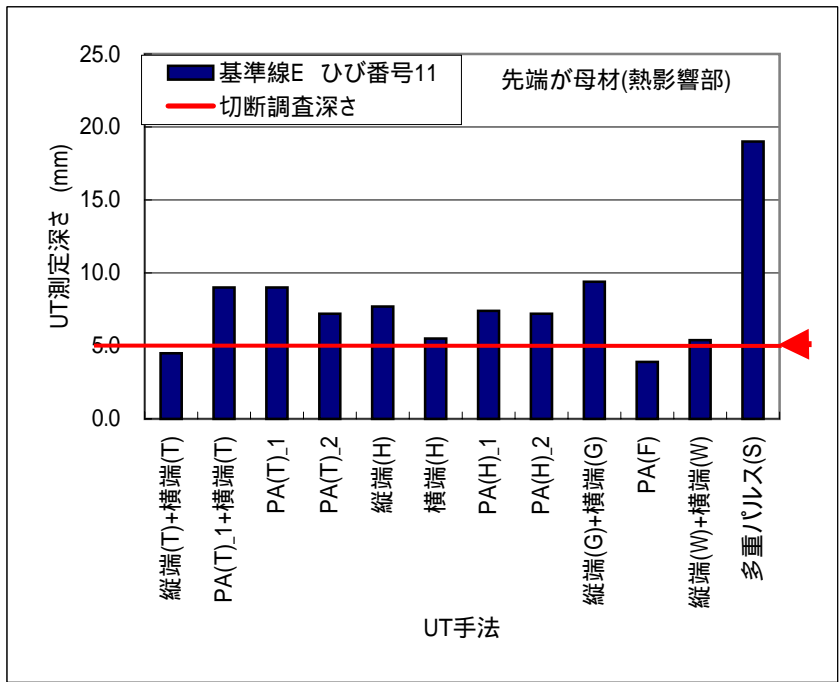


図8.1-6 基準線記号E(661-101-F12継手(600A))のUT測定深さと切断調査深さ

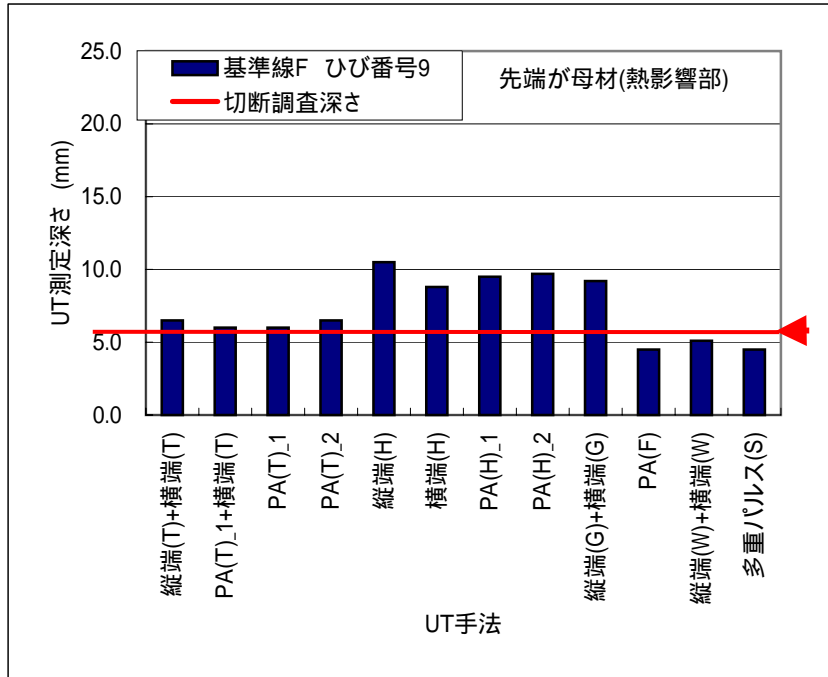


図8.1-7 基準線記号F(661-401-F02継手(600A))のUT測定深さと切断調査深さ

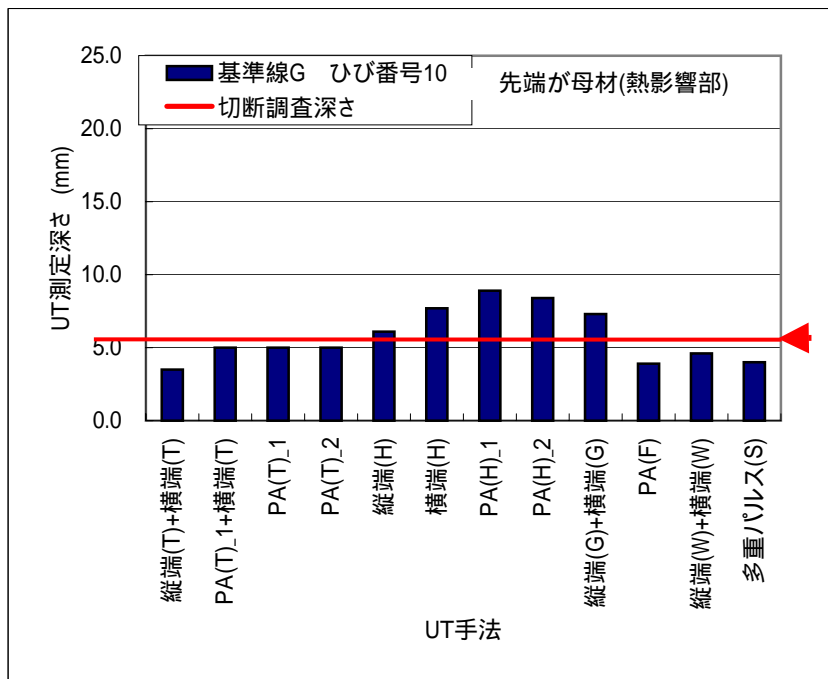


図8.1-8 基準線記G(661-401-F02継手(600A))のUT測定深さと切断調査深さ

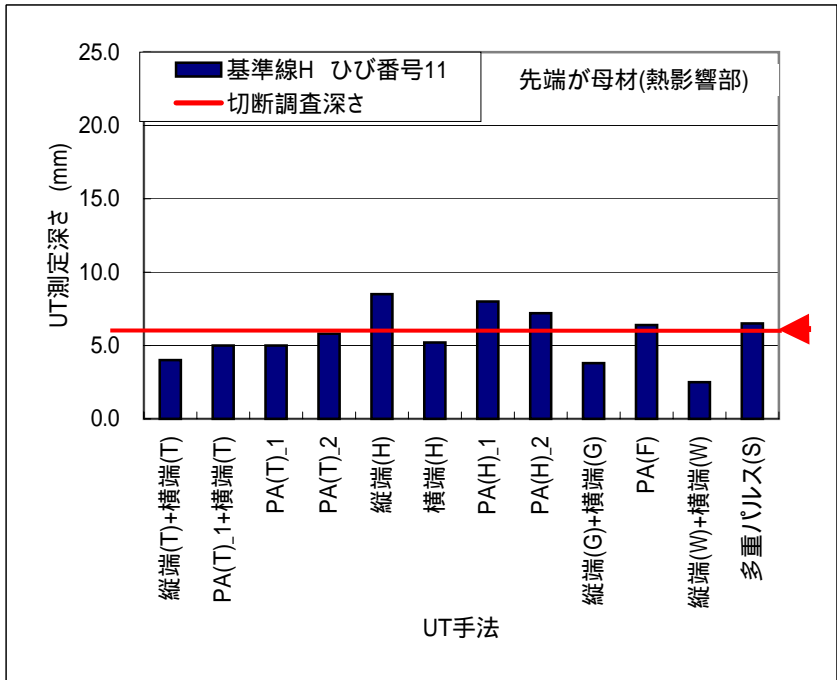


図8.1-9 基準線記号H(661-401-F02継手(600A))のUT測定深さと切断調査深さ

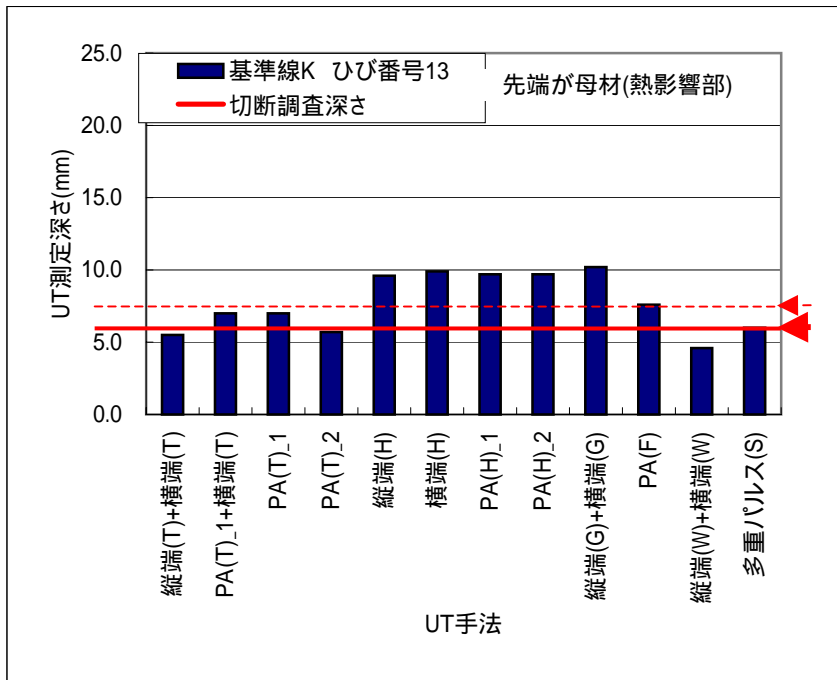


図8.1-10 基準線記号K(661-401-F02継手(600A))のUT測定深さと切断調査深さ

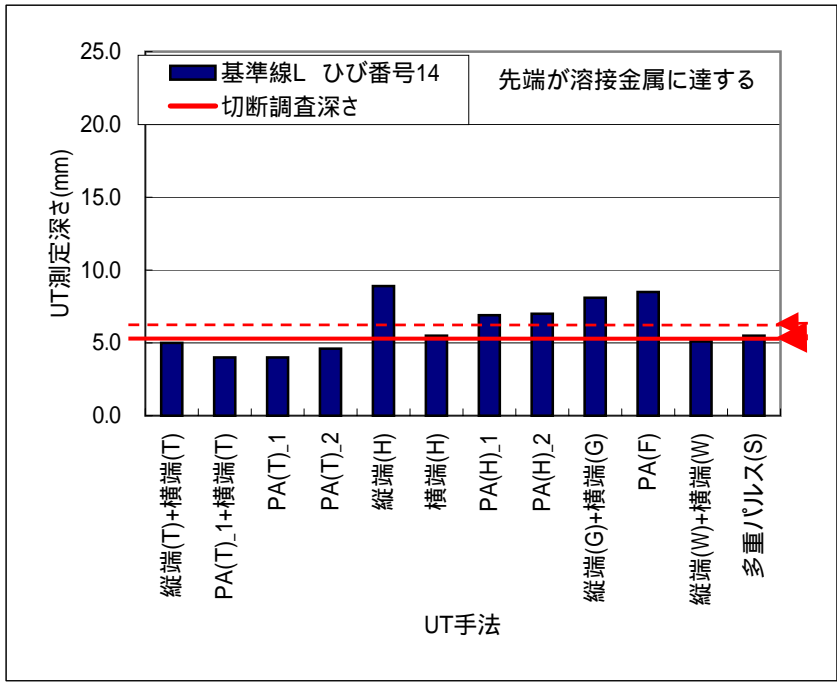


図8.1-11 基準線記号L(661-401-F02継手(600A))のUT測定深さと切断調査深さ

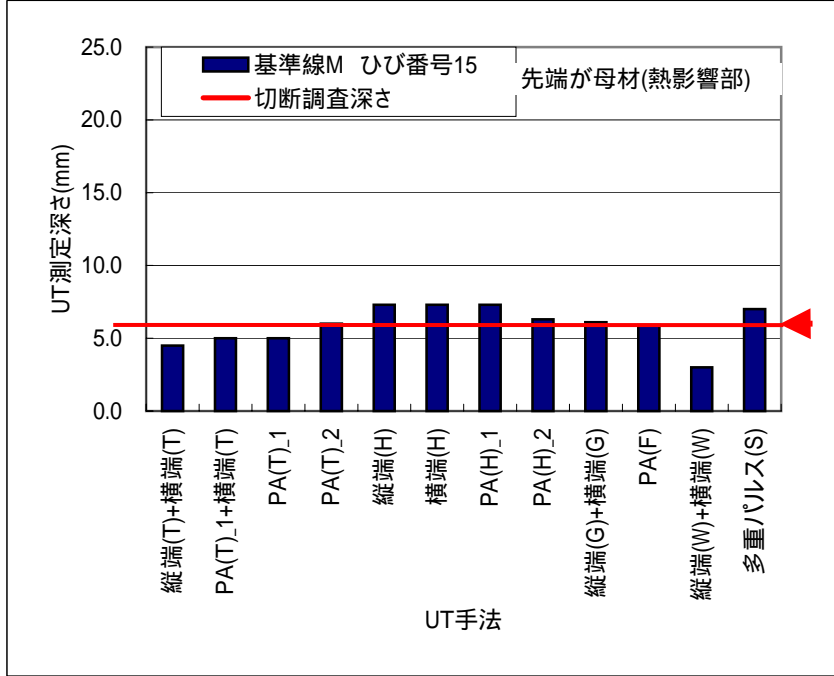


図8.1-12 基準線記号M(661-401-F02継手(600A))のUT測定深さと切断調査深さ

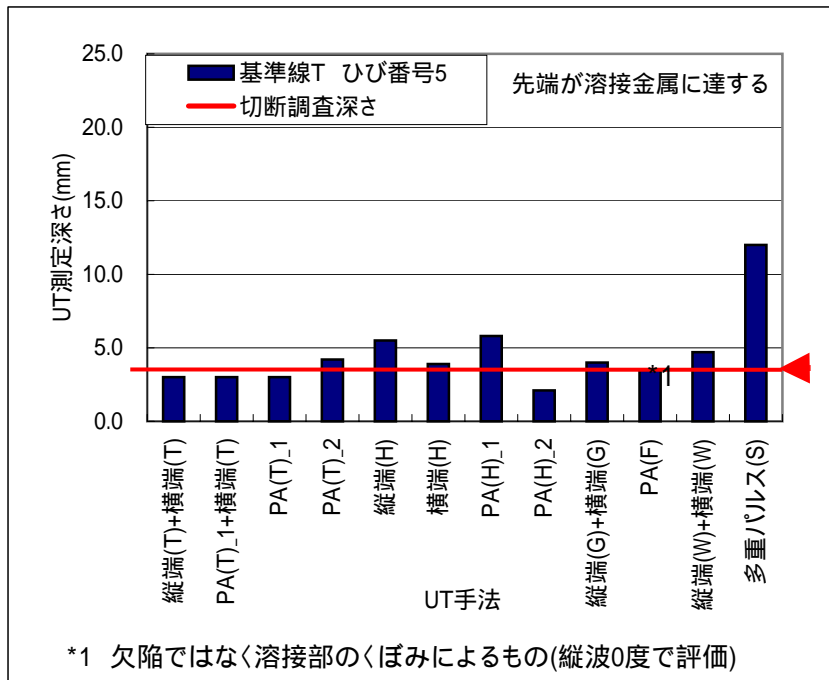


図8.1-13 基準線記号T(661-A02-S01継手(400A))のUT測定深さと切断調査深さ

継手番号: 661-101-F12, ひび番号:

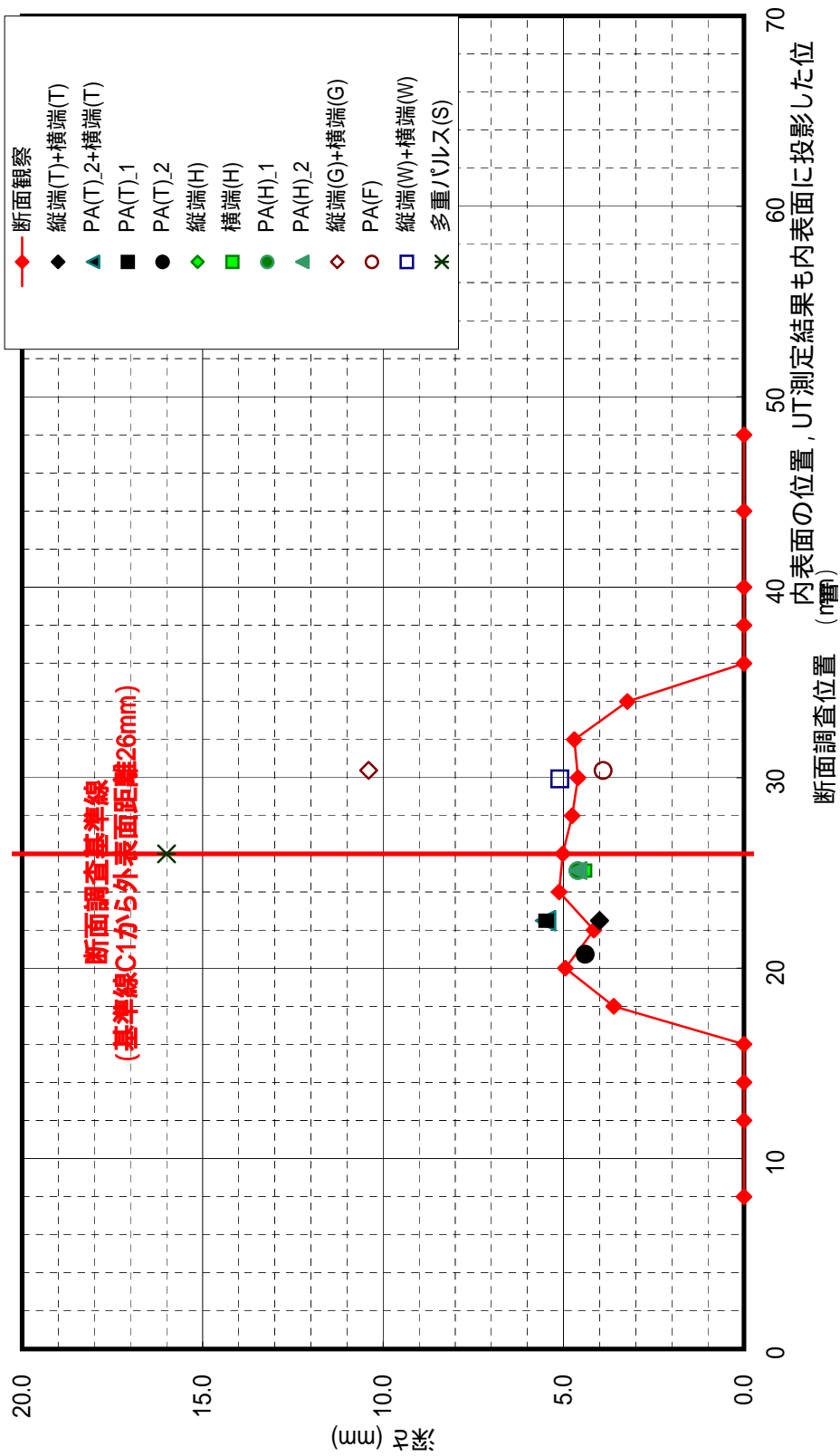


図8.1-14 基準線C1ひび番号 の各社の測定位置及び切断調査結果 (UT測定結果は, 内表面の位置に投影して表示)

継手番号:661-101-F12, ひび番号:

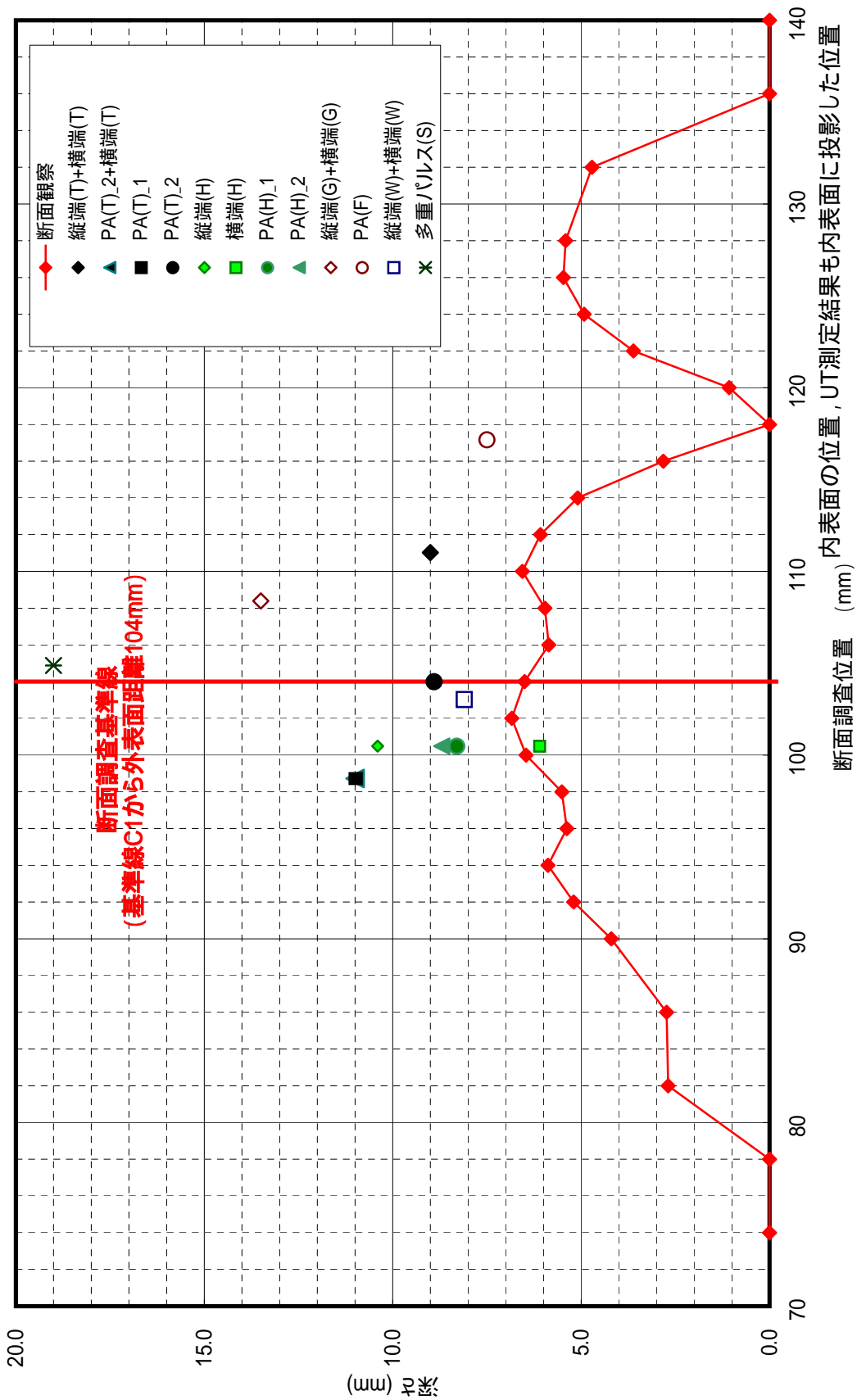


図8.1-15 基準線C1ひび番号 の各社の測定位置及び切断調査結果 (UT測定結果は, 内表面の位置に投影して表示)

継手番号:661-A02-S02, ひび番号:

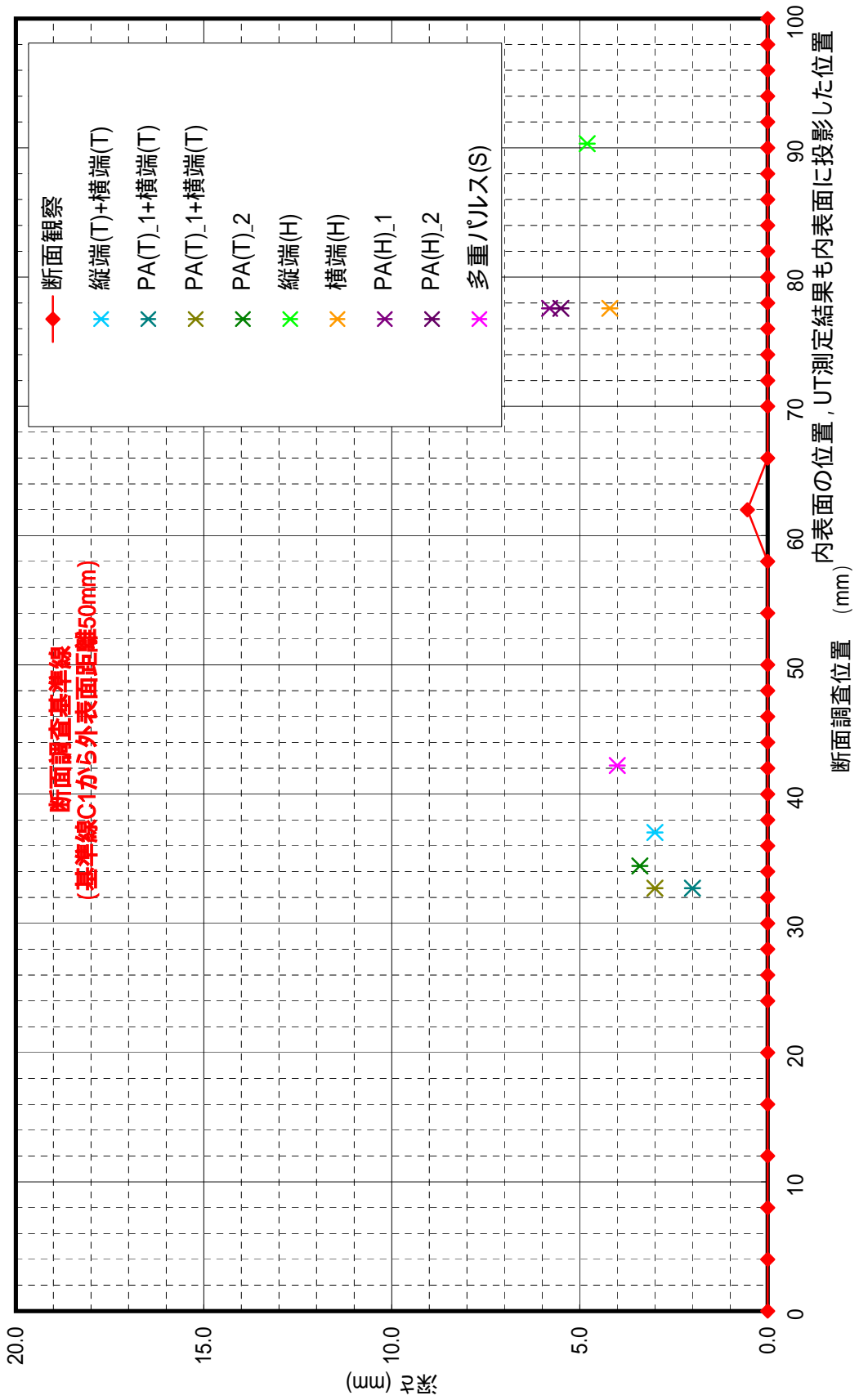


図8.1-16 基準線X1ひび番号 の各社の測定位置及び切断調査結果 (UT測定結果は, 内表面の位置に投影して表示)

8.2. 深さサイジング精度の評価

8.2.1 深さサイジング精度

深さサイジング精度を評価するため、UT で測定したひび深さと切断調査によるひび深さの相関を、適用した UT 手法ごとにグラフにまとめた。各社の個別要領書で適用した UT 手法ごと、あるいは端部エコー法やフェーズドアレイ法といった大まかな手法に分類して整理したものを図 8.2-1 から図 8.2-17 にそれぞれ示す。これらのグラフでは、ひびの先端が溶接金属内かあるいは外かという分類をせずにまとめた。適用した手法の省略記号は 8.1 と同じである。図の横軸は切断調査による基準線上でのひび深さを、縦軸は UT で測定したひび深さである。

切断調査結果より、ひびの深さは約 3mm から約 7mm に分布しているものの、大部分のひびは深さ 5mm 程度であり、測定精度を統計的に分析することは困難と考えられる。そこで、深さ測定精度を評価するパラメータとしては、誤差平均、標準偏差、誤差の二乗平均平方根 (RMSE: Root mean squared error) を用いることとした。また、UTS で得られている、端部エコー法による UT サイジング精度 (誤差平均とデータのばらつきを考慮した、下限の線) も合わせて表示した。

なお、本確性試験の目的がひびの深さ測定精度の評価であることから、測定誤差等の評価においては、切断調査でひびが存在しているデータのみを用いた。

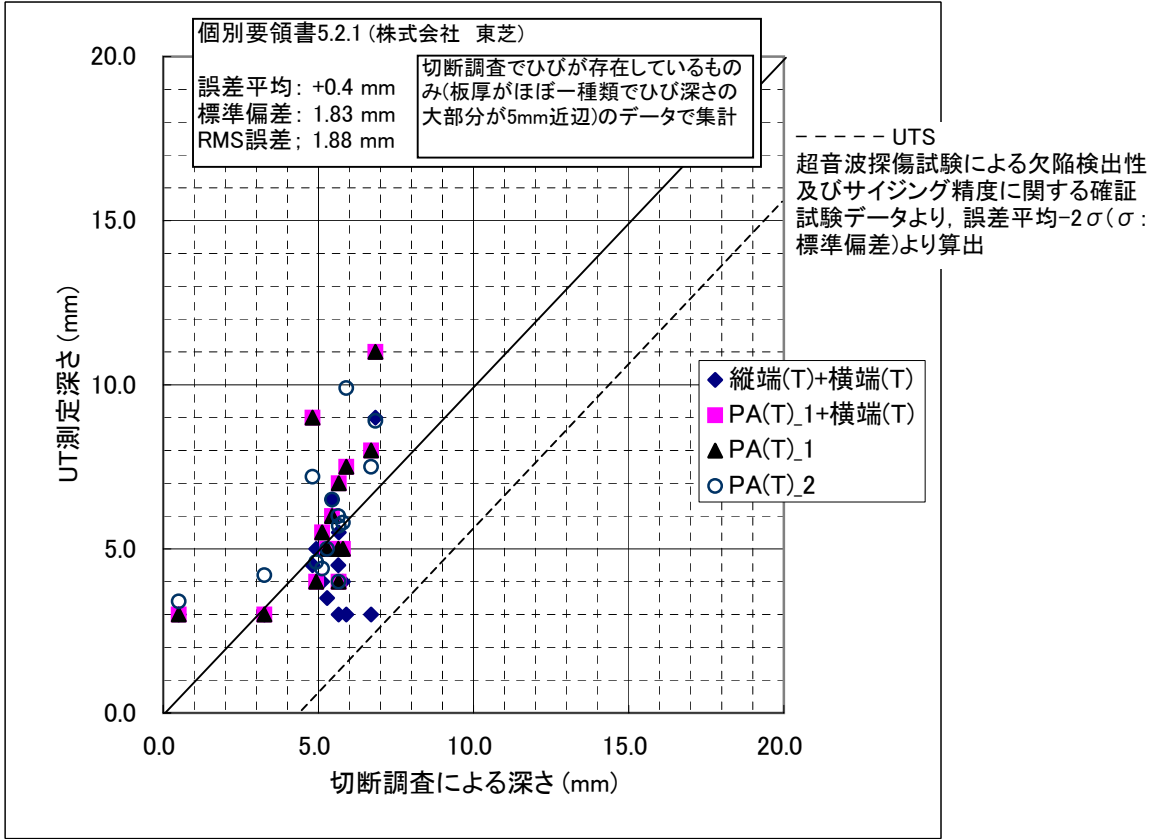


図8.2-1 個別要領書(5.2.1)に基づくUTによる深さサイジング精度

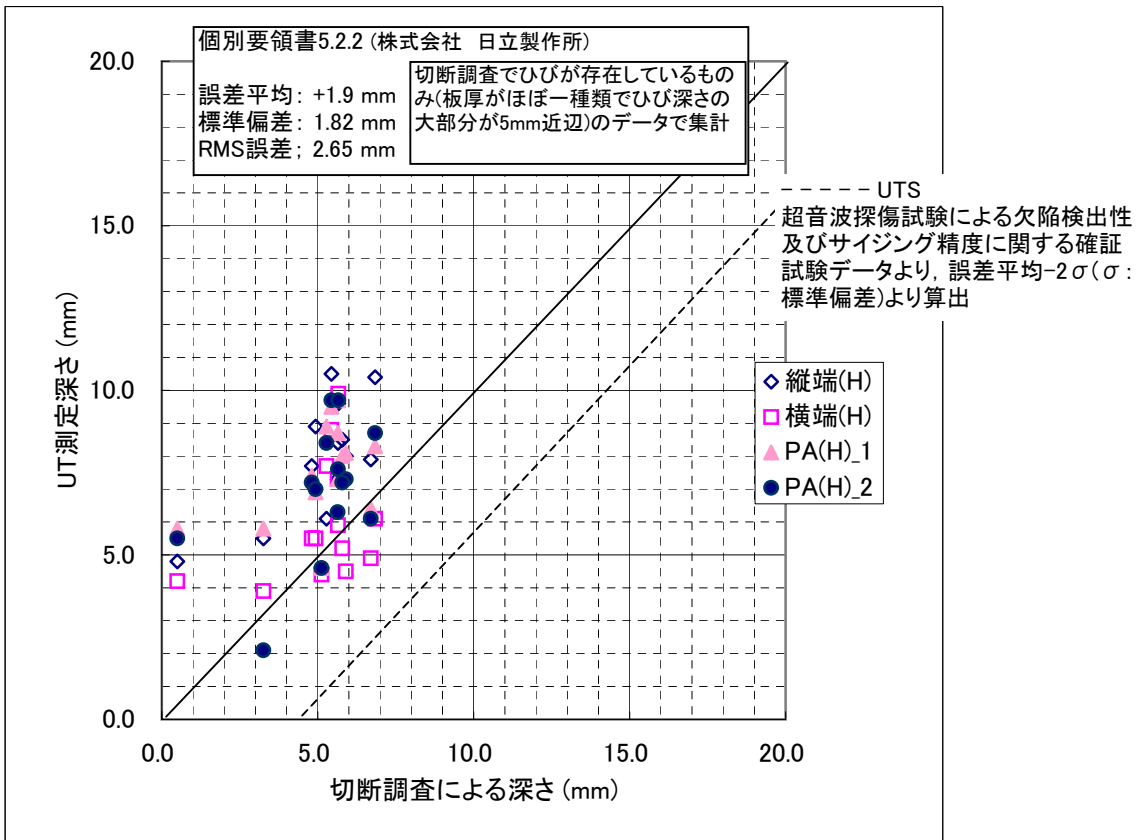


図8.2-2 個別要領書(5.2.2)に基づくUTによる深さサイジング精度

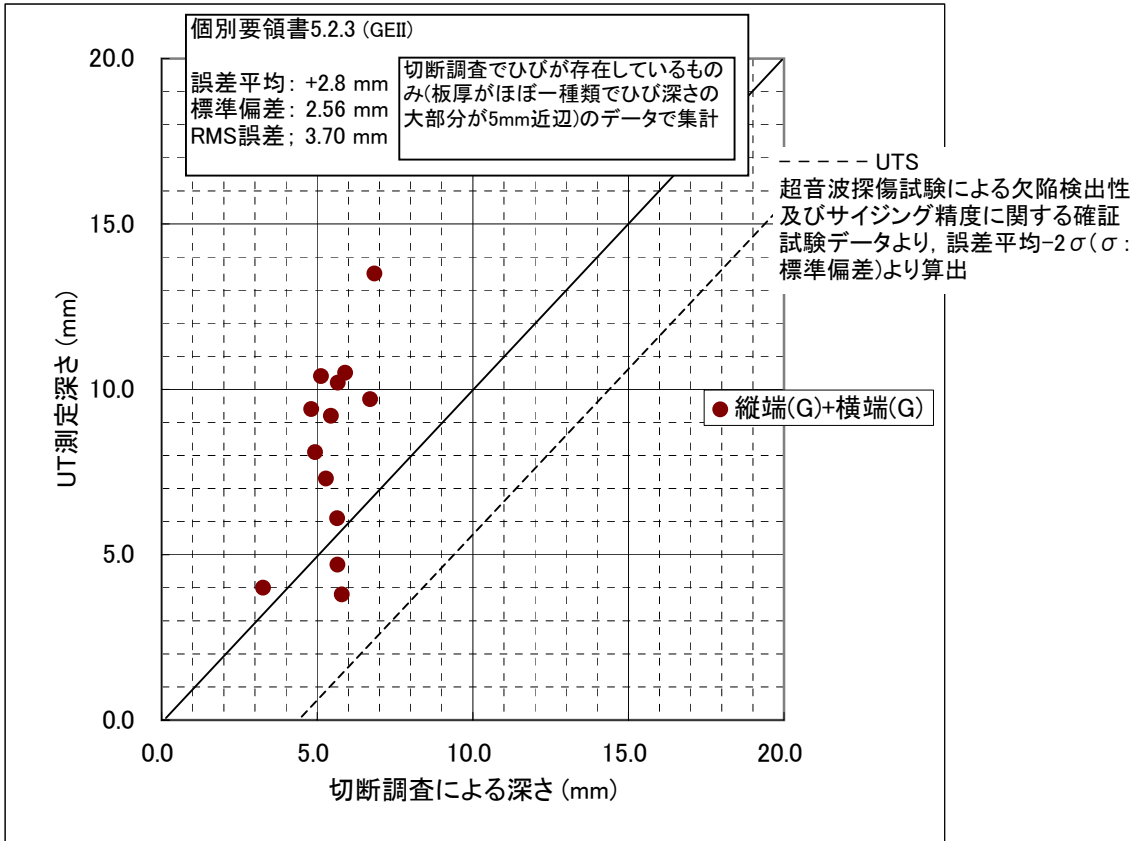


図8.2-3 個別要領書(5.2.3)に基づくUTによる深さサイジング精度

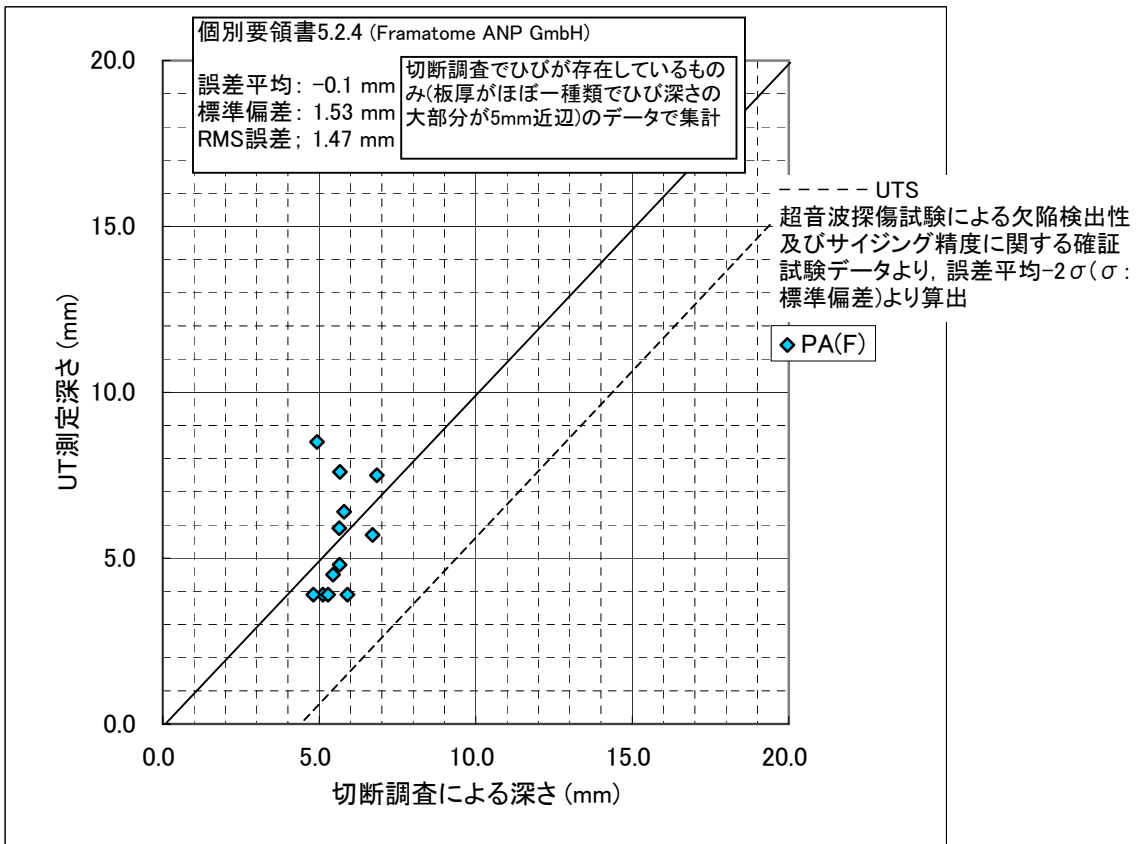


図8.2-4 個別要領書(5.2.4)に基づくUTによる深さサイジング精度

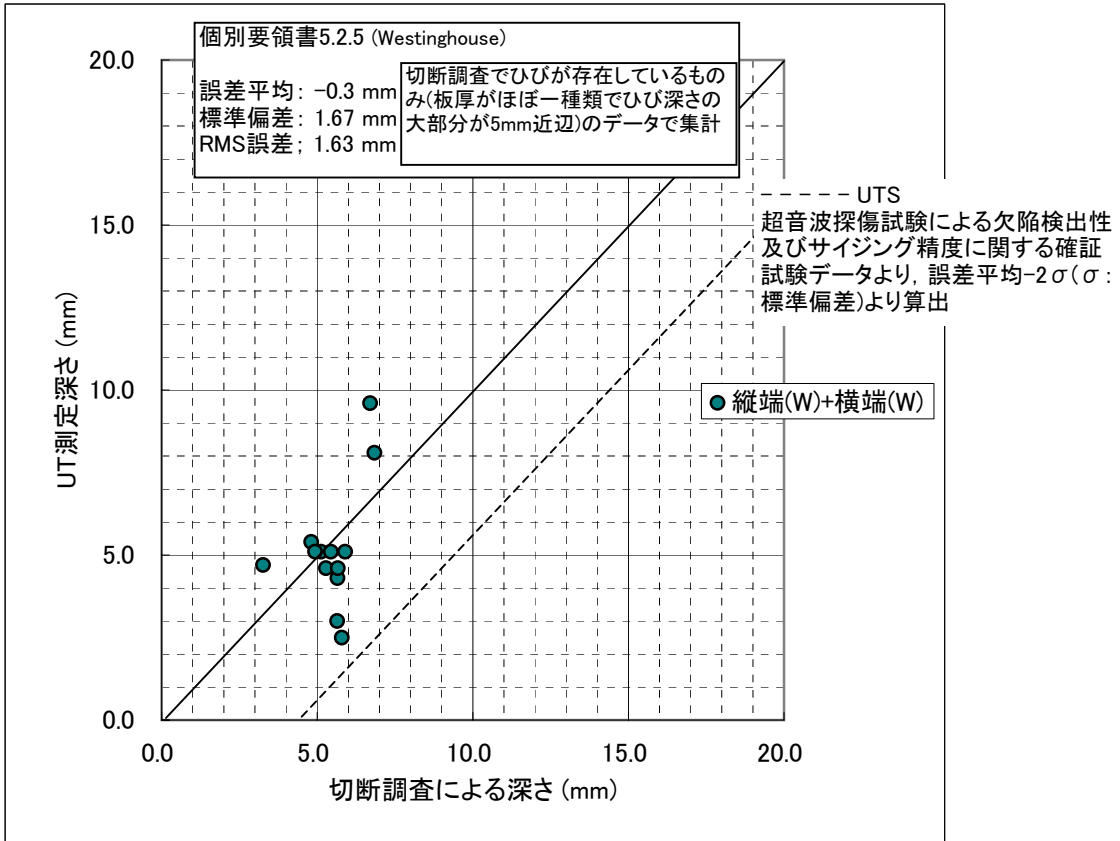


図8.2-5 個別要領書(5.2.5)に基づくUTによる深さサイジング精度

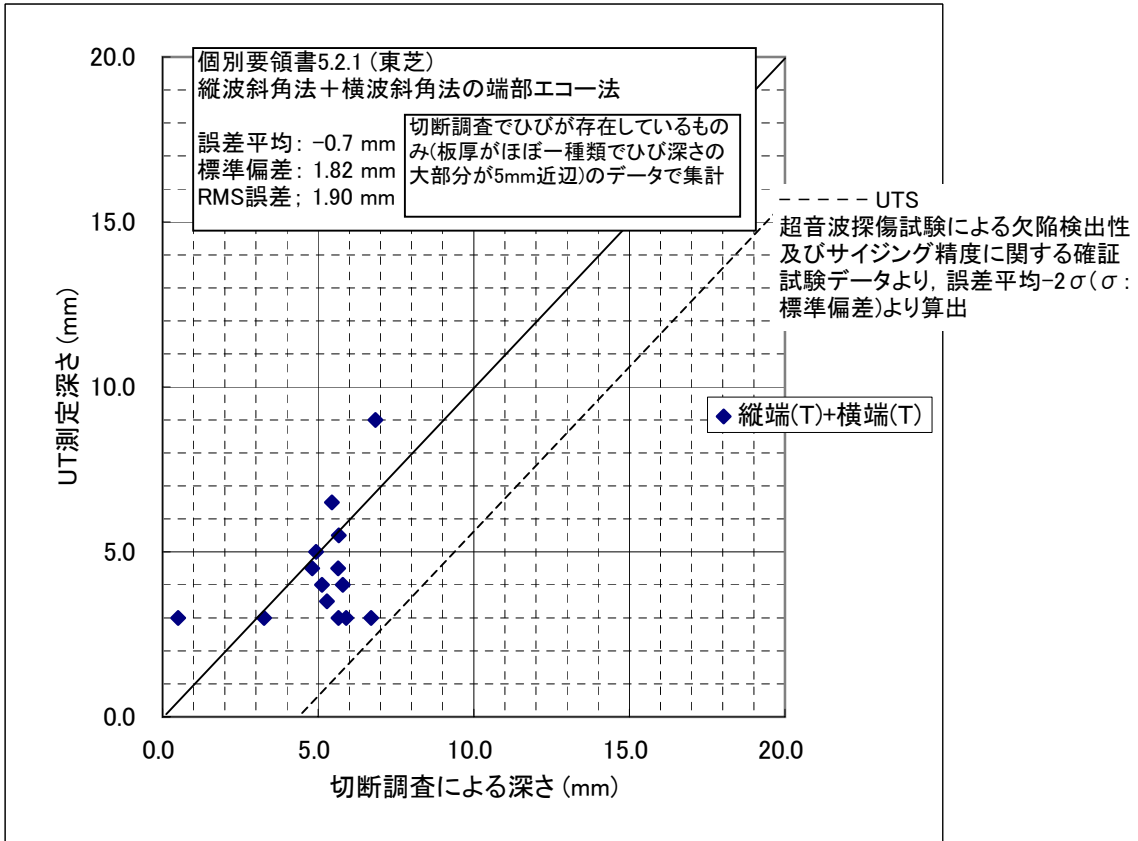


図8.2-6 個別要領書(5.2.1)に基づくUTによる深さサイジング精度 (縦端(T)+横端(T)手

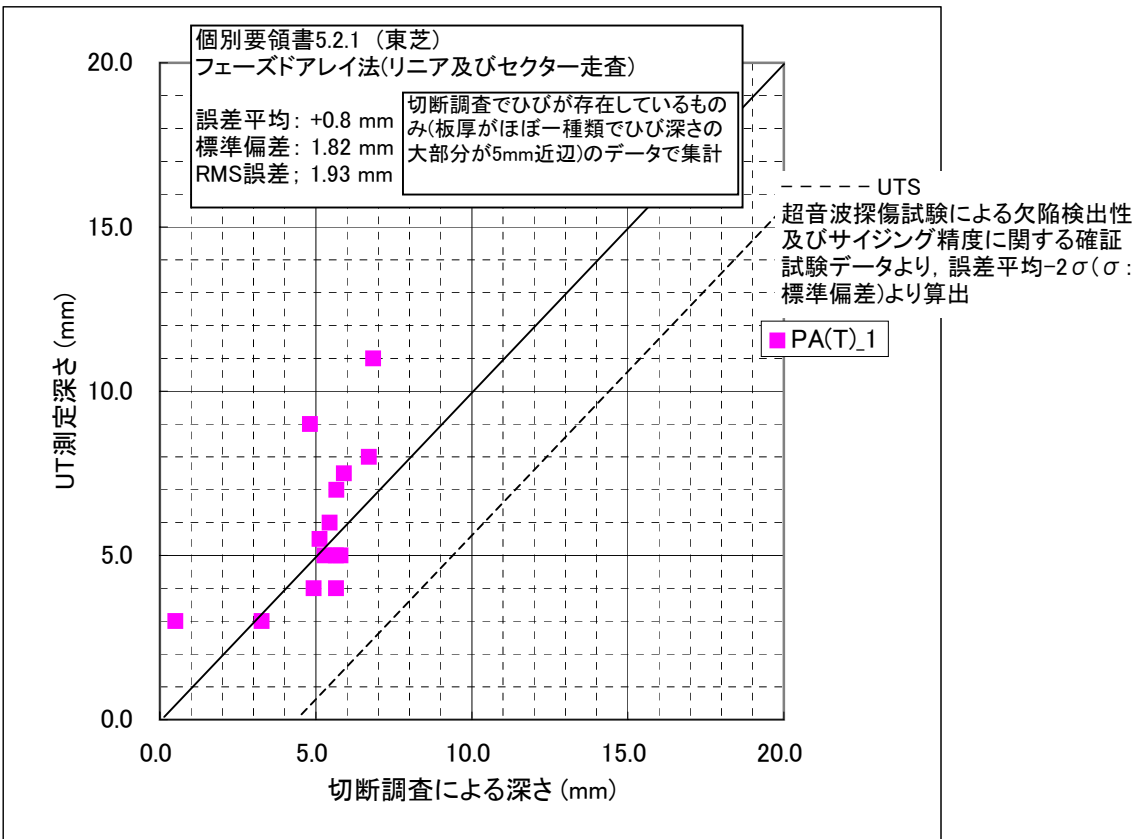


図8.2-7 個別要領書(5.2.1)に基づくUTによる深さサイジング精度 (PA(T)_1手法)

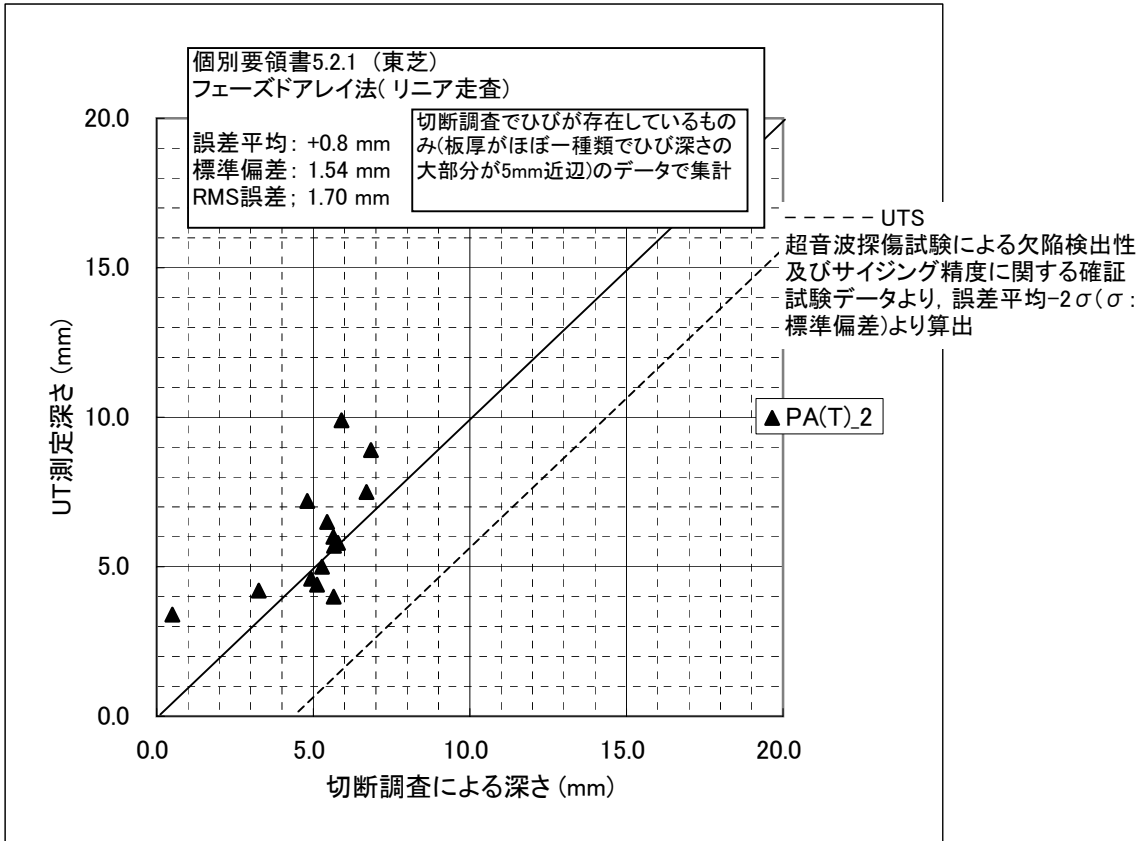


図8.2-8 個別要領書(5.2.1)に基づくUTによる深さサイジング精度 (PA(T)_2手法)

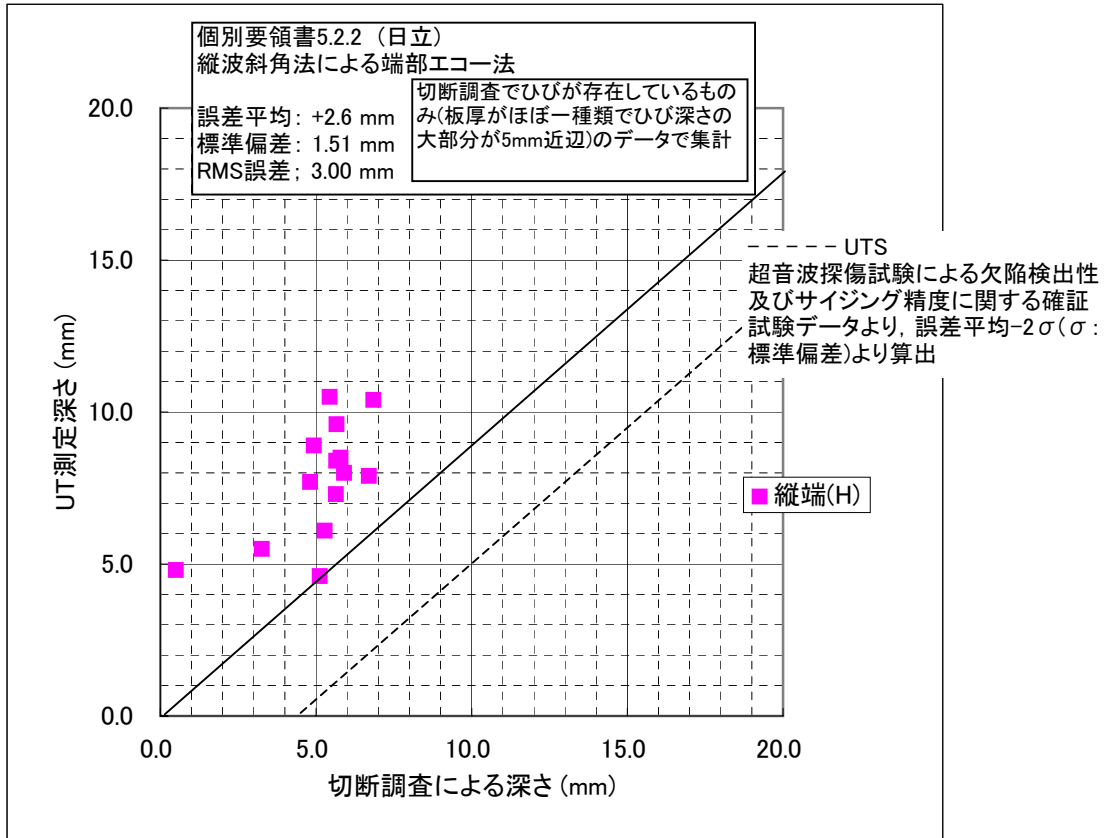


図8.2-9 個別要領書(5.2.2)に基づくUTによる深さサイジング精度 (縦端(H)手法)

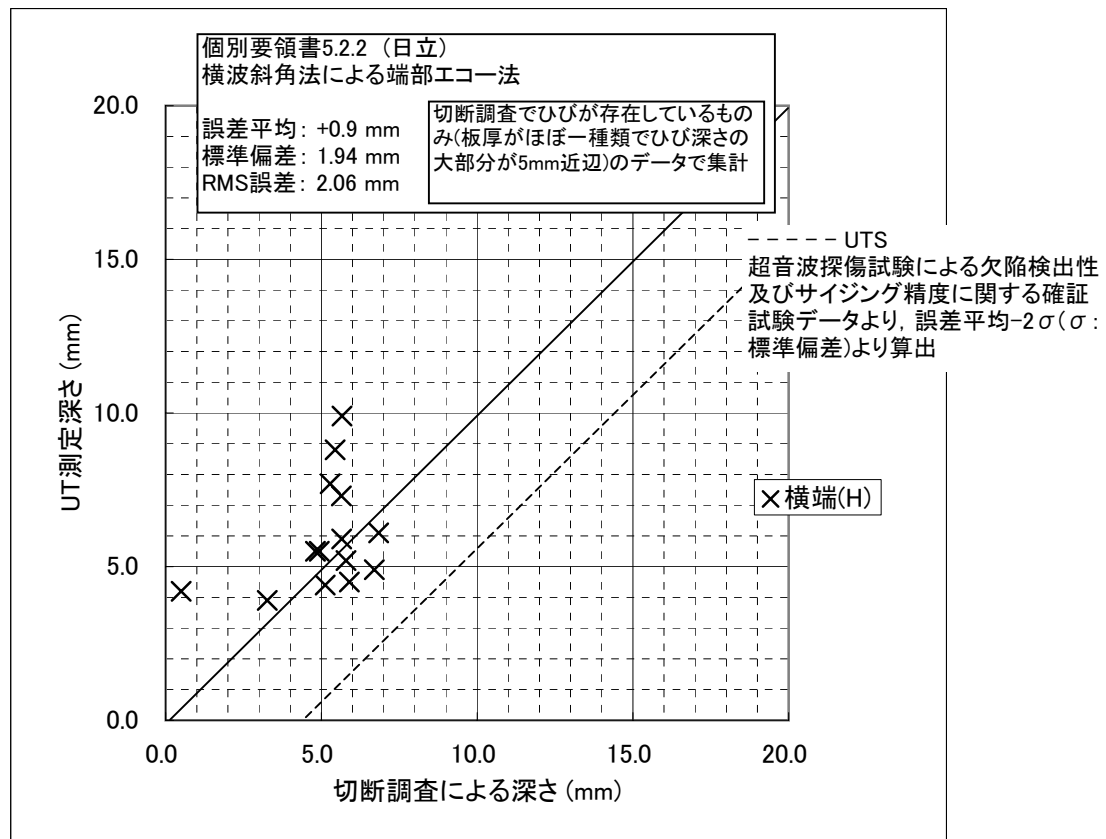


図8.2-10 個別要領書(5.2.2)に基づくUTによる深さサイジング精度 (横端(H)手法)

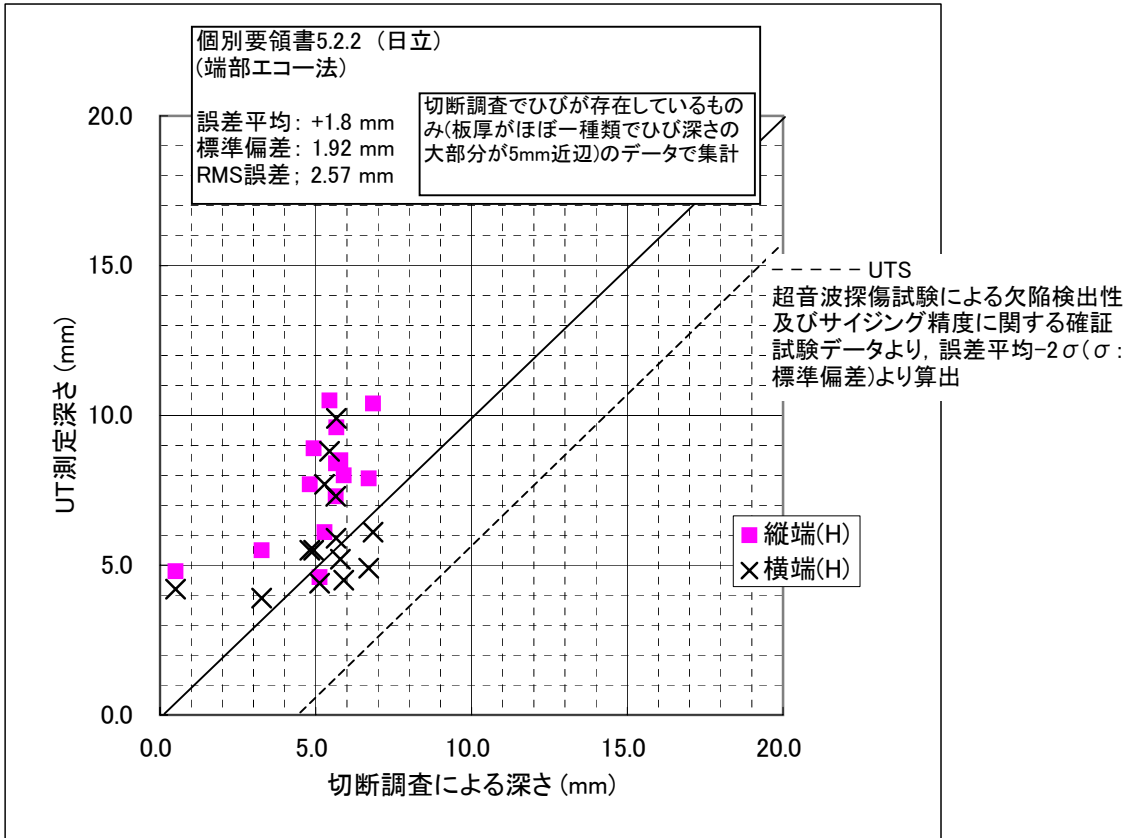


図8.2-11 個別要領書(5.2.2)に基づくUTによる深さサイジング精度 (縦端(H)及び横端(H)手法)

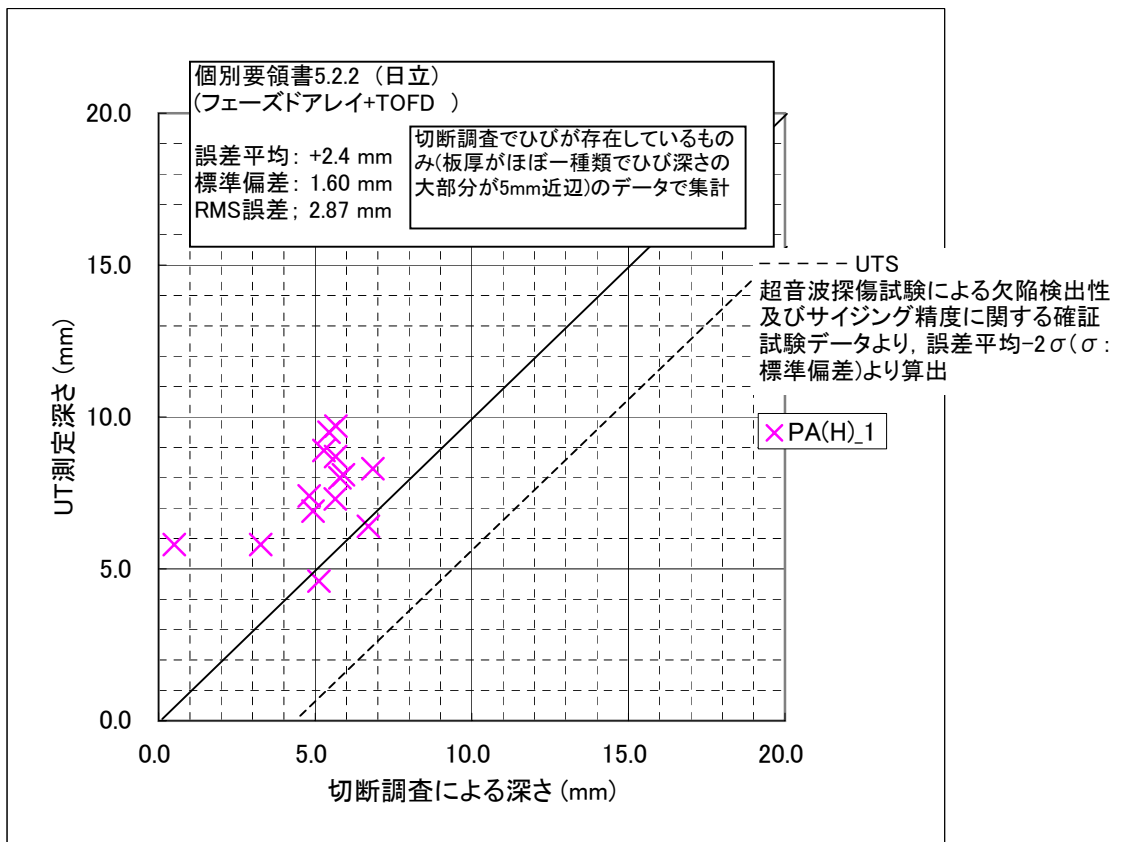


図8.2-12 個別要領書(5.2.2)に基づくUTによる深さサイジング精度 (PA(H)_1手法)

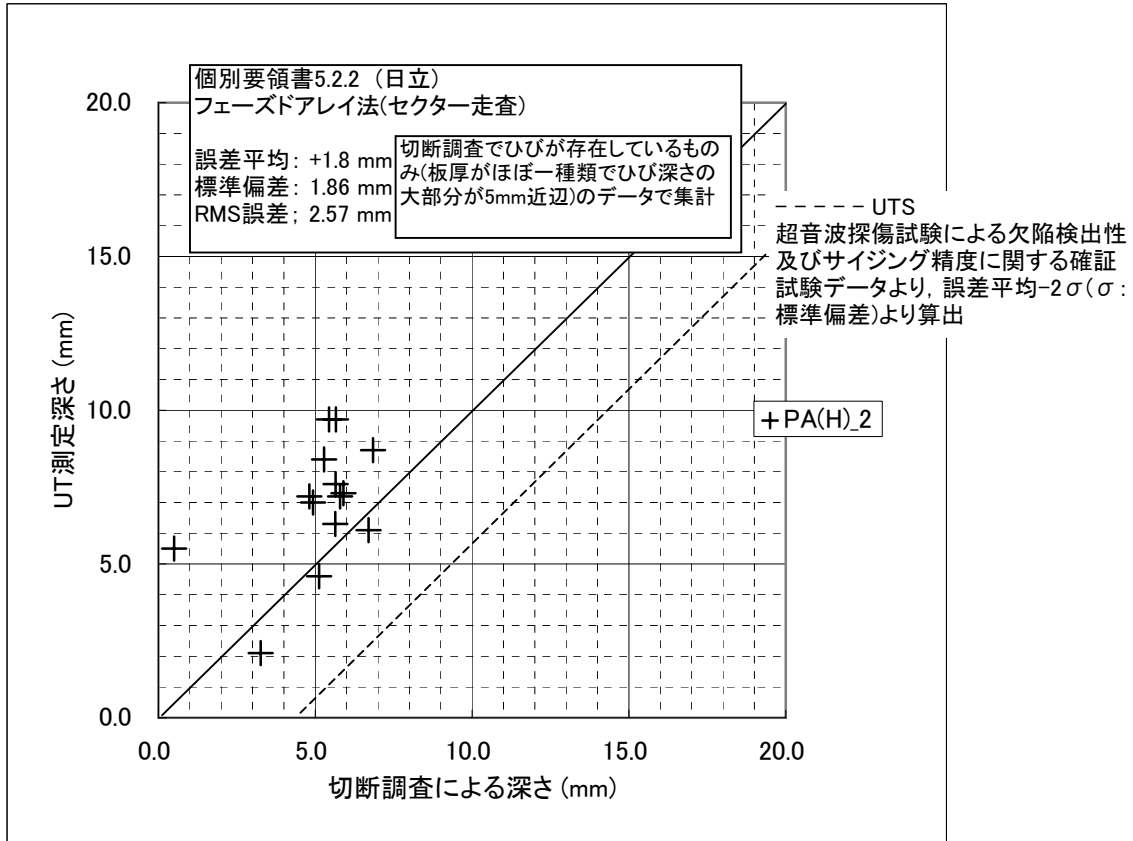


図8.2-13 個別要領書(5.2.2)に基づくUTによる深さサイジング精度 (PA(H)_2手法)

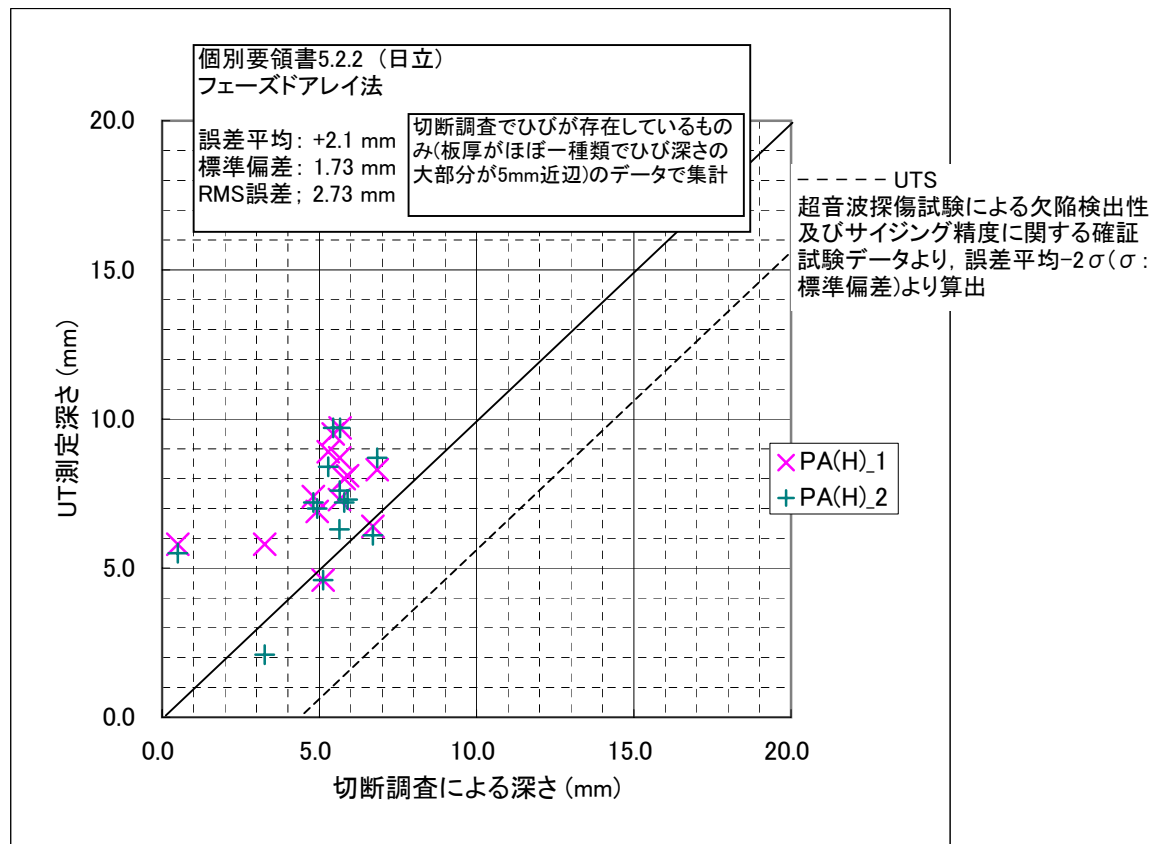


図8.2-14 個別要領書(5.2.2)に基づくUTによる深さサイジング精度 (PA(H)_1及びPA(H)_2手法)

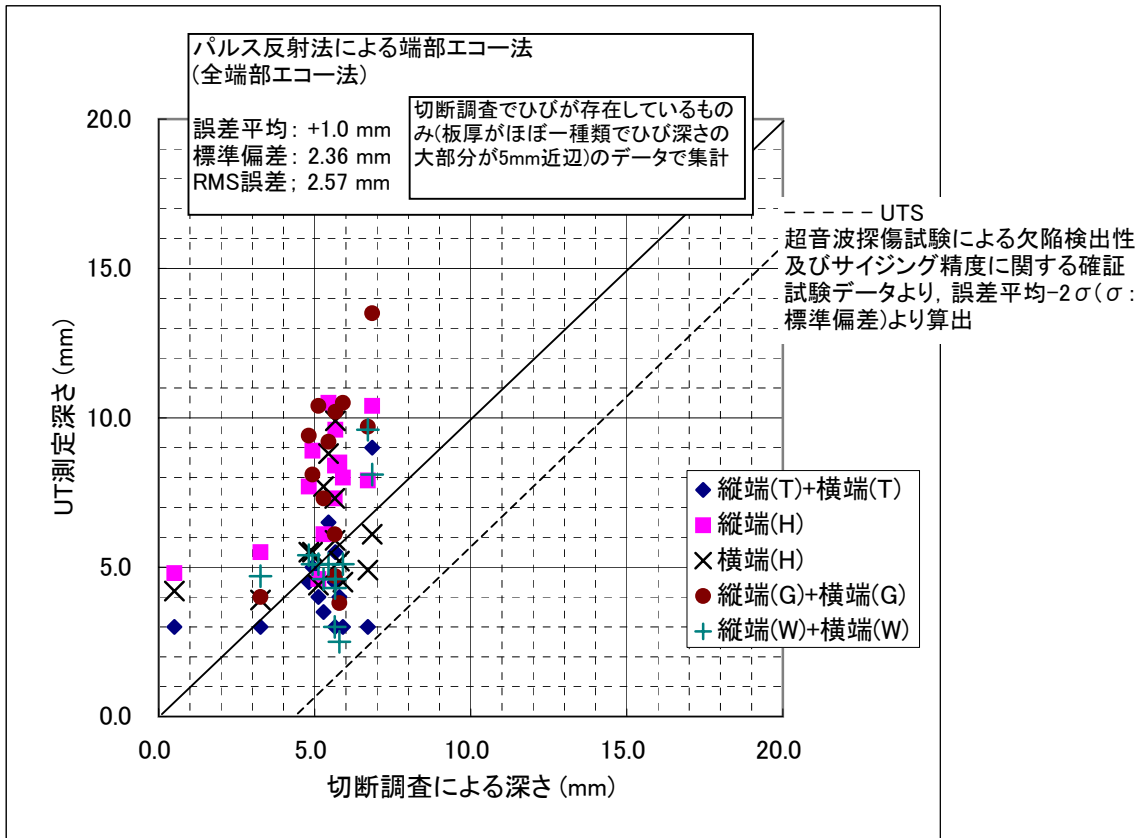


図8.2-15 端部エコー法による深さサイジング精度 (全端部エコー法)

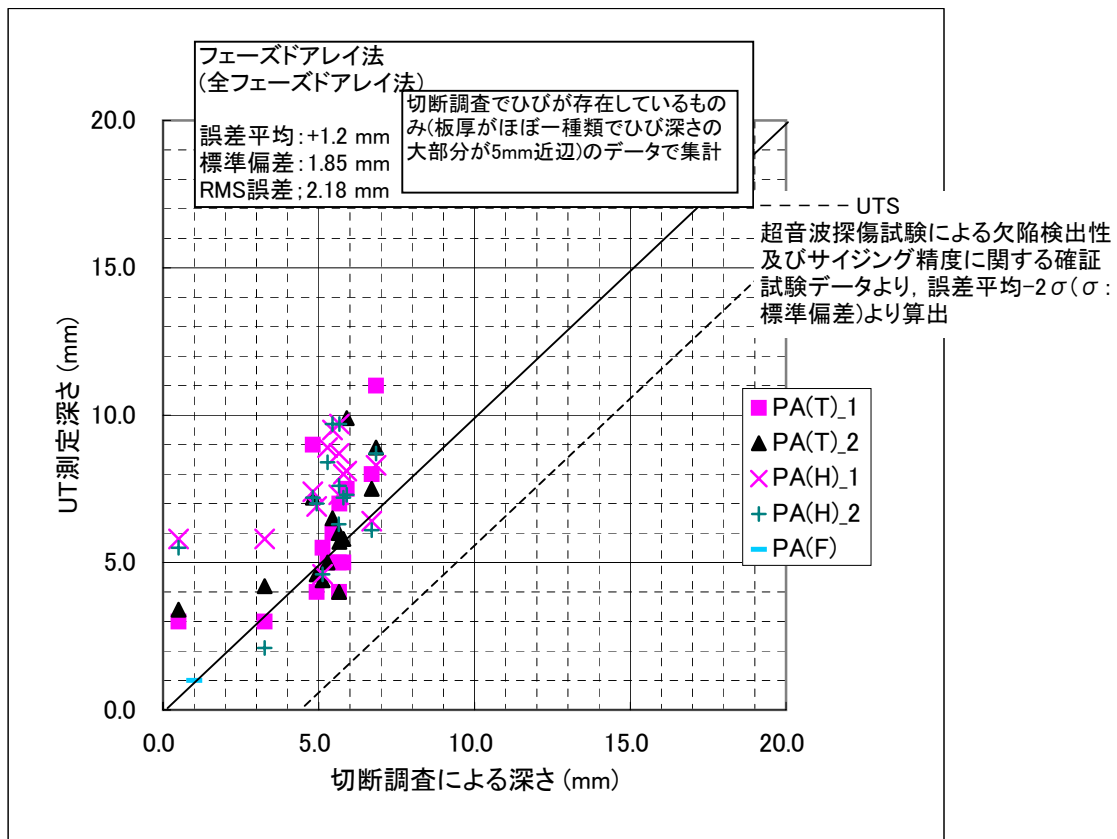
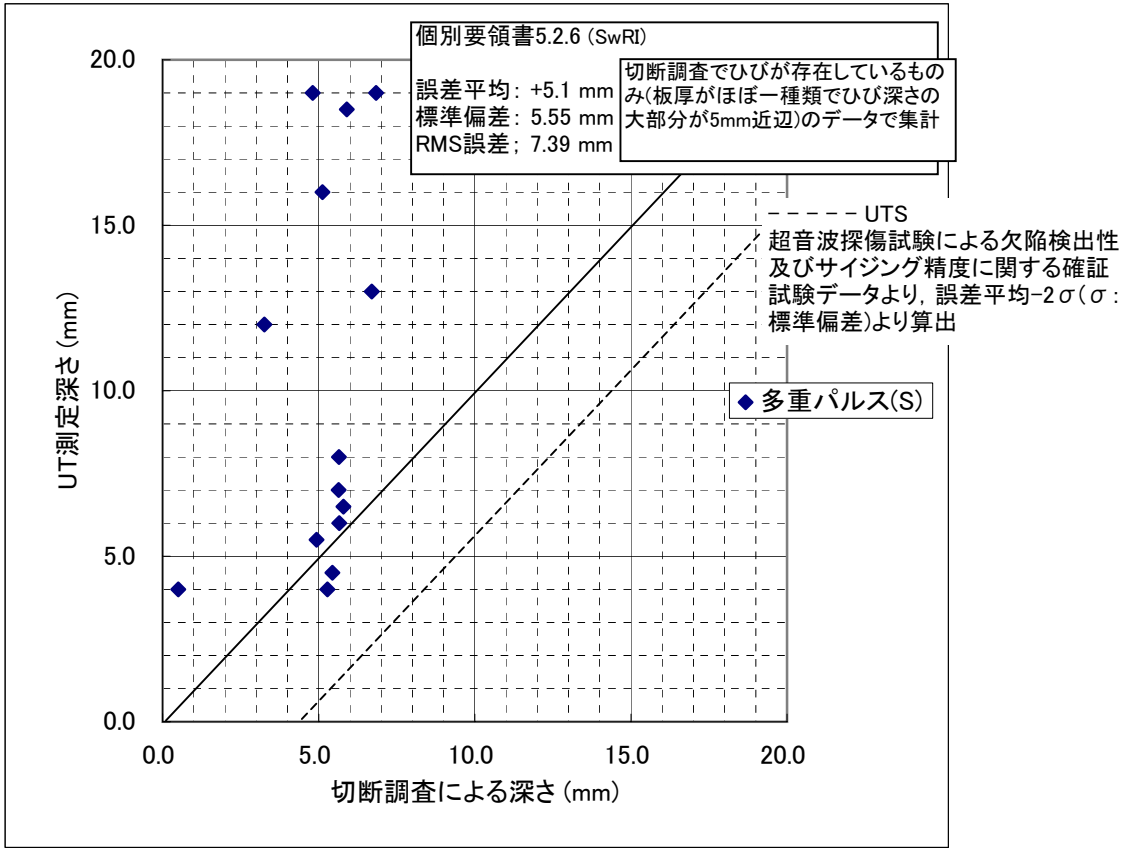


図8.2-16 フェーズドアレイ法による深さサイジング精度 (全フェーズドアレ)



参考図8.2-1 個別要領書(5.2.6)に基づくUTによる深さサイジング精度

8.2.2 深さサイジング精度のまとめ

評価の対象としたひびは、合計 13 個であり、試験体も口径 600A × 板厚約 40mm に 12 個、口径 400A × 板厚約 30mm に 1 個であった。ひびの深さも大部分が 5mm 付近に局在していた。このデータに基づくまとめを下記に示す。

a) 全体的な傾向

図 8.2-1 から 8.2-17 及び表 8.2.2-1 (誤差平均) に示されるとおり、各社のデータは切断調査深さが 4mm を超えるのものについては、欠陥として深さを捉えていた。

また、図 8.2-1 から 8.2-17 には参考として UTS の下限値 (誤差平均 - 2) を示しているが、全てのデータは、UTS の下限値を下回るものはなかった。一方、切断調査深さに比べて大きめに評価している手法もあり、特に 1 手法 (1 社) が極端に過大評価していた。この 1 手法 (1 社) 以外は、著しく過大評価しているものは無い。

全社を総合した手法ごとにみると、図 8.2-16 (端部エコー法) と図 8.2-17 (フェーズドアレイ法) では、フェーズドアレイ法の方が誤差やばらつきが小さい。しかし、各社の個別の手法では、表 8.2-1 に示す様に、フェーズドアレイ法と端部エコー法とで同等の測定精度を有するものもあり、本結果のみでは一概にどちらが良いとは言えない。

b) 各手法(会社)ごとのまとめ

各社の UT 手法ごとでは、縦端(H)、PA(H)_1 及び PA(H)_2、縦端(G)+横端(G)の手法で誤差平均がプラス 2mm より大きい結果であり、切断調査深さよりも大きめに測定する傾向があった。縦端(T)+横端(T)、PA(T)_1 及び PA(T)_2、横端(H)、PA(F)、縦端(W)+横端(W)では、誤差平均が ± 1mm 以内であり、ほぼ切断調査深さのとおりに測定していた。

しかし、特別参加の多重パルス(S)については、誤差平均が 5mm を超えており実機への適用については改善の余地がある。

測定値のばらつきを示す標準偏差では、特別参加の多重パルス(S)で 5mm を超えており、改善の余地がある。それ以外の手法については、標準偏差が 3mm 以内であり、さらに縦端(G)+横端(G)を除く全ての手法では 2mm 以下であった。測定誤差の二乗平均平方根(RMSE)でも、大部分の手法で 3mm 以下であり、2mm 以下の手法も 6 手法あった。

表 8.2-1 深さ測定精度のまとめ

(mm)

	縦端 (T)+横 端(T)	PA(T)_1 +横端 (T)	PA(T) _1	PA(T)_ 2	縦端 (H)	横端 (H)	PA(H)_ 1	PA(H)_ 2	縦端 (G)+横 端(G)	PA(F)	縦端 (W)+横 端(W)	多重 パル ス(S)
誤差平均	-1.0	+0.7	+0.7	+0.7	+2.5	+0.7	+2.2	+1.6	+2.8	-0.1	-0.3	+5.2
標準偏差	1.63	1.82	1.82	1.48	1.49	1.83	1.43	1.69	2.56	1.56	1.67	5.76
RMSE	1.84	1.88	1.88	1.57	2.87	1.88	2.59	2.28	3.70	1.47	1.63	7.61

[注記] 切断調査でひびが存在しているもののみ(板厚がほぼ一種類でひび深さの大部分が5mm 近辺)のデータで集計

切断調査の結果, 基準線 R, U, V, W, AA についてはひびが無く, また基準線 X1 については微小なひびが認められた。この様な箇所では, ひびがあるものとして深さを測定した UT 手法(会社)と形状エコー判断した UT 手法(会社)に分かれた。基準線 R, U, V, W, AA の試験体の裏波形状を確認すると, 1~2mm 程度の凹凸のある形状であることがわかる。

8.3. 考察

a) 深さ測定精度

今回適用した UT 手法では、極端に過小評価するものは無かった。また、表 8.2-1 に示すように深さ測定誤差のばらつきも小さくまとまっていた。その理由の一つは、改良 UT 手法の一つである「2 次クリーニング波法+モード変換波法」に代表される大まかに深さを把握する方法の効果、及び同一手法でも複数の周波数や角度、波の種類で探傷した効果と考えられる。

b) 改良 UT 手法の有効性について

(1) 過小評価の改善

改良 UT 手法の有効性を考察するため、従来 UT 手法の深さサイジング結果と比較した。図 8.3-1 は、確性試験で測定したひびを従来 UT 手法で測定した結果(第 5 回健全性小委員会資料 5-5-1 より)と比較したものである。従来 UT 手法では、実際のひび深さに対して小さく測定されていたものが、改良 UT 手法により改善されている。

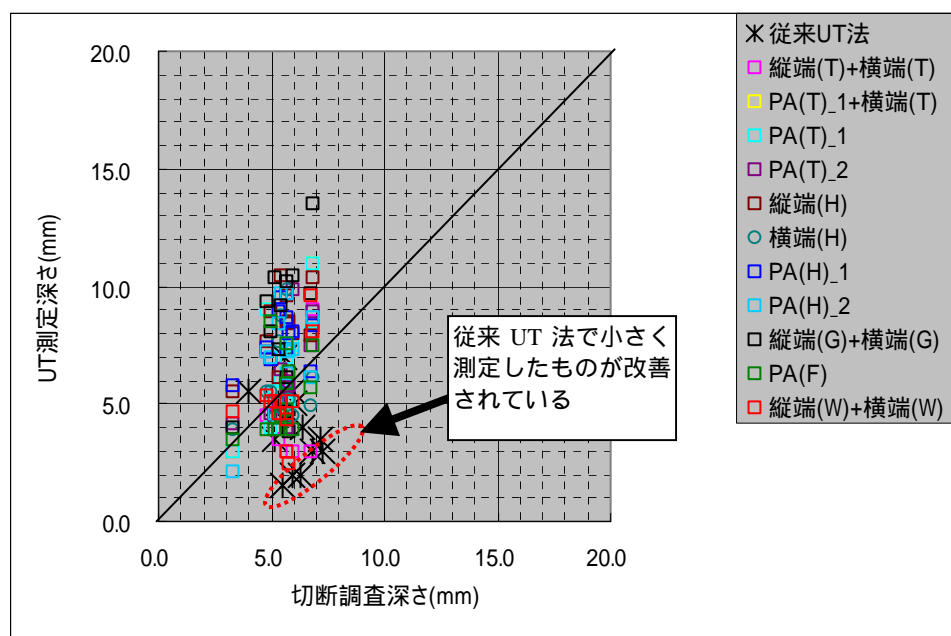
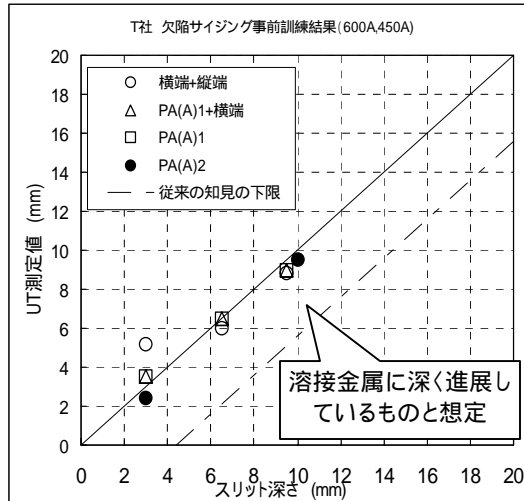


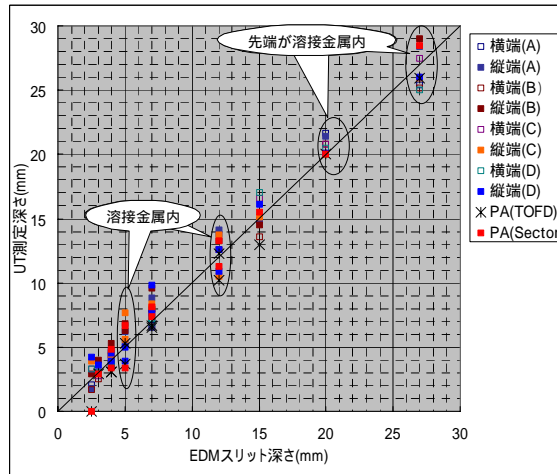
図 8.3-1 従来 UT 手法と改良 UT 手法との比較

(2) 溶接金属内に進展したひび深さ測定について

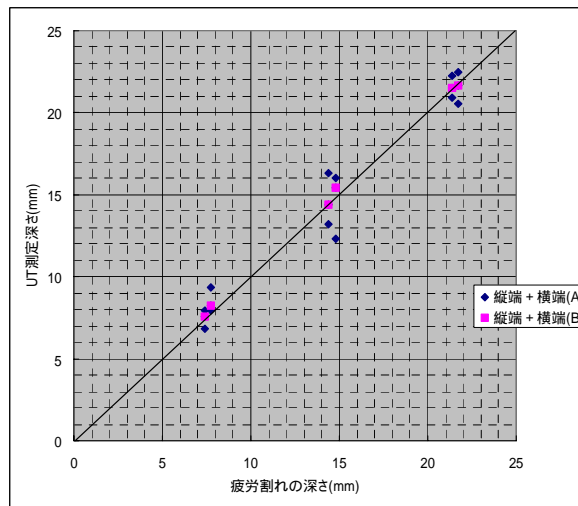
確性試験では、ひびの深さが 7mm 程度までであり、またひびの先端が溶接金属内に進展しているものもあったが、深く進展したものは無かった。ここでは、深いひびや溶接金属内に進展したひびについての測定精度について考察する。6.2 に示す様に、事前の訓練において反射源の深さが 10mm 程度の試験片(会社によっては 20mm 以上の深さまで)を用いて、各社で適用した手法を用いて深さを測定し、その測定精度を確認している。反射源の先端部を溶接金属内にいれたものや、溶接金属を介した条件で訓練を実施し測定精度を確認している。図 8.3-2 は、各社の訓練結果の例を示したものである。



(a) T社の事前訓練結果



(b) H社の事前訓練結果



人工欠陥(疲労割れ)に対して、溶接金属を介してサイジング訓練を実施

(c) W社の事前訓練結果

図 8.3-2 各社の事前訓練結果

反射源の先端部が溶接金属内にあるものや、溶接金属を介した条件での UT においても、反射源の先端からの信号をとらえて、精度良く測定されている。これら事前の訓練で使用した試験片の反射源は、実際のひびの先端と厳密には異なるものの、超音波の挙動としては大きな差は無いと考えられ、改良 UT 手法は、今回測定の対象となったものに比べて深いひび、あるいは溶接金属内に進展したひびであっても、確性試験と同等な測定ができるものと考えられる。また、米国 PD システム及びドイツ非破壊検査協会の認証を受けた手法においても、今回測定の対象となったものと比べて深いひびや溶接金属内に深く進展したひびの深さについて、確性試験と同等な測定ができるものと考えられる。

c) 切断調査深さよりも大きめに評価した結果について

いくつかの測定値(又は UT 手法)において、切断調査深さよりも大きめに評価した結果があった。この要因について考察した。

なお、深さを大きめに評価した結果であるが、従来の知見と比較して著しく大きめに評価しているデータではない。

本確性試験の発端は、ひび深さ測定において大きく過小評価したものがあり、UT による深さ測定精度に疑問がでたことである。そして、その対策法の一つである改良 UT 手法による深さ測定精度を確認するのが本試験の目的である。

各社とも、今回の測定においては、深いひびの先端を見落とさないことに十分に注意し、そして、最新の知見である「ひびの先端が溶接金属内に進展する場合がある」ということに注意して試験を実施していた。その結果、従来では雑音レベルと判断していた微弱なエコーについても慎重に分析し評価していた。

各社のサイジング手法は種々異なり、各社ごとに多少の差異はあるものの、ひびの先端部と開口部からの指示を試験員が識別し、エコーのビーム路程差(伝搬時間の差に相当)から、ひびの深さを算定している。この際、指示を識別することや指示のどの部分を測定するかについては、各社の判断すなわち各社の技術となる。

深さを大きめに評価した結果について、その UT データを各社で分析した結果、ひびの先端を捉えた上で、先端の指示の近くにある、微弱な指示を先端として評価したものであることがわかった。これらの UT データの一部については、事務局でも確認した。

このような評価フローは、今後適切にマニュアル化されることにより、常により正確な深さを測定することができるものと考えられる。

d) 形状エコーの識別について

今回の試験において、口径 300A 及び 400A の配管については、基準線 T 及び X1 以外では切断調査によりひびが無かった(基準線 P については、裏面に開口したひびは無かった)。このような箇所では各社ごとに判断が異なり、ひびとして深さを測定した UT 手法(会社)、形状エコー等と判断して深さを測定しなかった UT 手法(会社)、形状エコーとした上で反射源の深さを測定した手法(会社)と各社異なる結果を示した。基準線 P, R, U, V, W の切断調査結果によると、溶接部の裏波形状に凹凸を有しており、この形状は超音波の反射源になりうるものである。

超音波探傷シミュレーションシステムによる確認においても、図 8.3-3 に示すように形状の凹凸部分から明瞭な反射波が戻っているのが確認できる。通常の点検等においては、深さサイジングの測定の前に、欠陥の検出を目的とした試験を実施するため、このような反射源については、深さサイジングの対象になることは少ないと考えられ、また、このような形状エコーの識別技術については今後の研究により克服可能と考えられる。

裏面に開口はしていなかったが、微小な反射源が内在していた基準線 P や深さ 0.5mm のひびであった基準線 X1 においては、深さを測定した UT 手法(会社)と測定しなかった UT 手法(会社)と、この場合も各社で判断が分かれた。深さを測定した UT 手法(会社)でも、切断調査による深さに比べて大きく測定していた。

この様に、数 mm 以下の深さを示すものに対しては、継続的な反射源の様子(深さが進展するものかどうか等)を監視することにより、ひびであるかどうか評価していくことが考えられる。

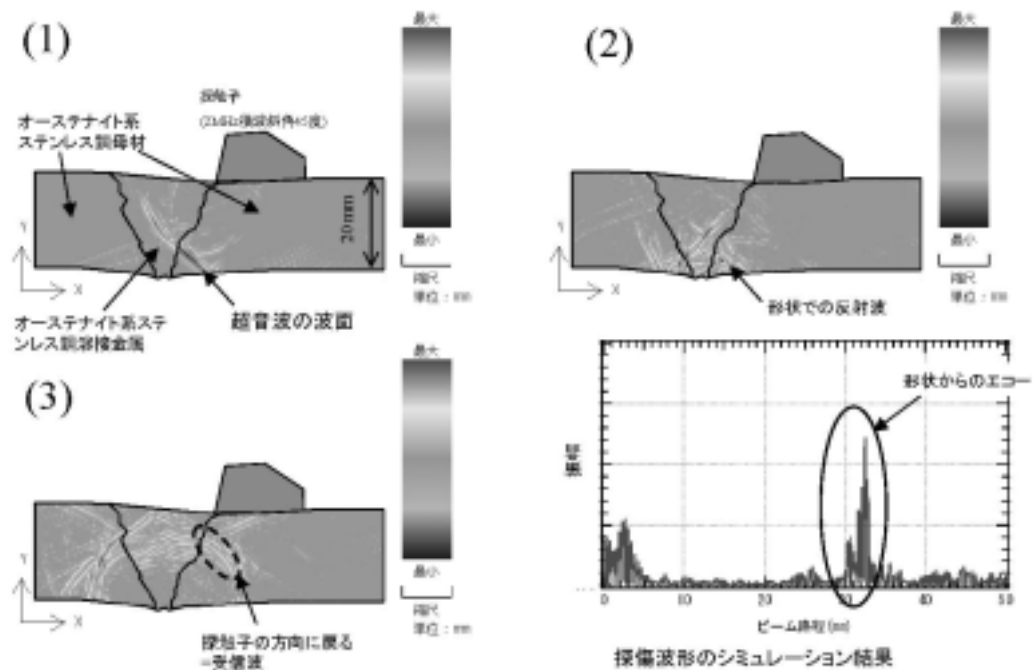


図 8.3-3 基準線 P での UT シミュレーション結果

e) 実機との違いについて

東芝, 日立, GEI, Framatome ANP, Westinghouse の各社とも、この確性試験のために特化した方法ではなく、実機を想定した方法あるいは実機に近い方法で試験を実施していた。したがって、アクセスが困難等の制約のある箇所以外においては、実機においても同等な測定ができると考えられる。

9 . 結言

我が国の規制行政において、維持基準の導入は画期的である。そしてその導入は昨年12月の法改正を経て本年10月に施行されようとしている。その維持基準の適用に当たっては、欠陥のサイジングが重要な中核的技術である。

この視点から、原子炉の安全性に関する重要機器（シュラウドや再循環系配管）のいくつかに SCC が発生している状況の下、SCC が機器の健全性に与える影響を評価することは必須である。そのためには超音波探傷試験を適用して非破壊検査を行い、SCC のサイジングを特定することが必須である。そのサイジング精度を確かめるために、切断や切削によって実機配管のひび割れの実深さを測定し、両者を比較した。その結果、UT による測定値と実深さの間に大きな違いが見られる場合が生じ、専門家はもとより関係者から UT 検査に対する信頼性に疑念が投げかけられた。この事態に対処するために、実機配管に含まれる SCC を対象に従来 UT 技術に勝るとも劣らないと思われる改良 UT がどの程度優れているのか、その精度を確認する必要性がでてきた。本確性試験はその趣旨にそって、改良 UT の精度を確認するため実施されたものである。

本確証試験では、

- 1) 客観性を確保するために、第三者機関としての機能を有する（財）発電設備技術検査協会に検査会社が確性試験を委託した、
- 2) 検査会社は国内2社、国外4社というかつてない形態で試験が行われ、結果的には国際コンペの様相を呈し、UT 技術に関する世界最高の技術の競争という側面を示した、
- 3) 試験結果の公平性、客観性、実機適用性（例えばブラインドテスト）は実機配管を提供してくれた東京電力（株）の協力を得て、（財）発電設備技術検査協会のガイドンスや立会いのもとで十分に確保された、
- 4) 特に試験が要領書どおりに実施されたかどうかは同協会の立会いの下で十分に検証された、

などの点が注目すべき観点であった。

一連の試験の結果、

- 1) UT に要求される精度は最終的には機器内の亀裂進展速度や検査期間などによって決定されるものの、全体的に見て、得られた試験結果により維持基準適用に必要な精度は改良型 UT の適用によって満足されるという見通しが得られた。
- 2) 今回の確性試験で得られた結果は従来型 UT による UTS の代表的結果に比べて改善されていること、深さ検出における概略検査を活用した検査手法が効を奏していること、特に国内会社の結果の多くが安全側の評価になっていること、無欠陥を正しく診断する点に関しては外国会社の技量には高いものがあること、小さな欠陥に関しては裏波エコーと欠陥の区別が識別困難であったことがあるがこれは今後の研究によって克服可能と思われること、などの有用な知見および見通しが得られた。

- 3) 今回の試験対象は、柏崎刈羽1号機の再循環系配管を対象としたもので、改良 UT 試験の性能調査という点からは、亀裂は溶接金属部にわずかに進入した亀裂はあったものの、深く進入した亀裂は見られなかった。溶接金属部に深く入った人工亀裂（EDM ノッチ）や疲労亀裂とほんのわずかしが入らない亀裂に対する UT 検査結果の精度を比較すれば、懸念される異方性に関してばらつきの範囲内で違いは見られないので、溶接金属部に浅く入った今回の亀裂に対する精度をもってして、溶接部に対する改良 UT の精度と見做して良いものと判断する。
- 4) とは言え、現在、異方性の大きい溶接部のサイジング精度については、他の原子炉配管でも確認されつつあるところであり、今後データの蓄積を計り、UT 技術のさらなる精度向上に努めていくことが望まれる。

今回の確性試験は限られた期間内に行われたものであるが、それでも、試験に参加された関係会社、(財)発電設備技術検査協会の協力を得て、改良 UT の精度を評価し維持基準適用に有用な技術であるとの見通しが得られたものと判断する。関係各位のご協力に感謝する次第である。

確性試験委員会