

溶接部超音波欠陥検査装置の開発

「その4 Aスコープメモリー装置の開発と据付、性能試験」

1997年3月

動力炉・核燃料開発事業団

東 海 事 業 所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 技術開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

溶接部超音波欠陥検査装置の開発

「その4 Aスコープメモリー装置の開発と据付、性能試験」

実施責任者：上村勝一郎*

報告者：関 正之* 平子一仁** 西山元邦*

豊島光男* 石橋藤雄* 井坂和彦**

塚田竜也**

要 旨

溶接部超音波検査法は、PMW（パルス磁気溶接）法やPRW（抵抗溶接）法といった固相接合法により発生する溶接欠陥の探傷法開発を目的に、装置開発、標準試験片開発等として行ってきた。そしてそれらの中で固相接合法だけでなく、従来の融接法（TIG溶接法）による端栓と被覆管の突き合わせ溶接部についても探傷試験を行い、X線検査法との比較も試みた。（PNC PN8410 94-010、PN8410 93-074、PN8410 96-050にて報告。）

これらの試験からPRW法やTIG溶接法の溶接部に発生する欠陥において、端栓と被覆管の境界面及びその溶接部の近傍に発生する欠陥は、内部状態（PRW法＝内バリ、TIG法＝アンダーカット等）による超音波反射エコーが複雑になり、本来目的とする欠陥エコーの分離、判定が難しい。という問題が生じた。また、PRW法の場合、溶接欠陥の有無だけでなく、接合面に生ずるミクロ的な材料変化が、溶接部の強度に大きな影響を及ぼすことが、SEM及びTEM等による観察からわかってきた。

本報告書は、これら混在する超音波エコーの分離と材料変化を非破壊検査により定性・定量化するための基礎データの収集を行うために、今年度製作したAスコープメモリー装置の開発、据付及び性能試験についてまとめたものであり、今後の開発課題について検討を加えたものである。

* 東海事業所 核燃料技術開発部 プルトニウム燃料開発室

** 原子力技術(株)

目 次

1. はじめに	1
2. Aスコープメモリー装置の製作	2
2.1 目 的	2
2.2 Aスコープメモリー装置の概念	2
2.3 Aスコープメモリー装置の構成	3
2.4 Aスコープメモリー装置によるデータ処理	4
3. Aスコープメモリー装置の性能確認試験	7
3.1 PMW用STBによる性能確認試験	7
3.2 PMW試料の性能確認試験	7
3.3 PRW試料による性能確認試験	11
4. 考 察	15
4.1 多重ゲートによる探傷について	15
4.2 Aスコープメモリー装置について	15
5. まとめ	17
6. 今後の課題	18
7. 参考文献	19

図リスト

図-1	従来のシステムによる探傷	2
図-2	Aスコープメモリー装置による探傷と探傷断面図	3
図-3	Aスコープメモリー装置出力画像 (A+B+Cスコープ)	5
図-4	Aスコープメモリー装置出力画像 (4Cスコープ)	6
図-5	溶接部超音波欠陥検査装置によるPMW用STB出力画像	8
図-6	Aスコープメモリー装置によるPMW用STB出力画像	9
図-7	Aスコープメモリー装置によるPMW試料探傷結果	10
図-8	PMW試料欠陥部のAスコープ出力画像	12
図-9	溶接部超音波欠陥検査装置によるPRW用試料探傷結果	13
図-10	Aスコープメモリー装置によるPRW試料探傷結果	14

写真リスト

写真-1	PMW欠陥部のアナログ波形	11
------	---------------------	----

表リスト

表-1	PMW試料の探傷試験条件	7
表-2	PMW用STB人工欠陥寸法比較表	7
表-3	PRW試料の探傷試験条件	11

1. はじめに

溶接部超音波検査法の開発は、平成元年度にパルス磁気溶接装置（Pulsed Magnetic Welding 以下「PMW」と称する。）による溶接部の健全性を保証する上で最も重要な溶接部の接合長さの測定を目標に開始され、平成2年度に溶接部の探傷データの画像出力を目的とした画像処理システムの設計、製作を行い、PMW法溶接部の検査として超音波法は有効かつ実用的であることを報告した。（社内資料「溶接部超音波検査装置の開発 ～その1 据付・試運転報告書～」PNC PN8410 91-010及び「溶接部超音波検査装置の開発 ～その2 画像処理システムとSTBの製作およびPMW試料の超音波探傷～」PNC PN8410 93-074にて報告。）

さらにPMW溶接法に加え、新たに進められている抵抗溶接法（Pressurized Resistance Welding 以下「PRW」と称する。）の開発にともなう溶接部検査法の開発としてPMW試料とは異なるPRW試料やTIG法溶接試料の検査を可能にするための装置駆動系の改造を実施し、探傷試験を行った。（社内資料「溶接部超音波欠陥検査装置の開発 ～その3 PMW, PRW及びTIG溶接部の探傷～」PNC PN8410 96-050にて報告。）

本報告書は、PRW試料やTIG試料の探傷において問題となる積層、混在する欠陥エコーの分離とPRW試料溶接部において欠陥探傷とともにその溶接部強度に影響を及ぼすと考えられる溶接部金属組織の変化による超音波エコーの変化を収集、解析することを目的としたAスコープメモリーシステムの製作とそれによる探傷性能試験結果についてまとめを行い、今後の課題等の検討を加えたものである。

2. Aスコープメモリー装置の製作

2.1 目的

PRW法やTIG法等により溶接された試料溶接部に発生する欠陥は、各々の溶接法により異なった特徴を持つ。PRW法の場合、溶接欠陥は、端栓と被覆管の接合境界面に発生し、接合部に沿った形状となる。この接合境界付近の内面には接合によるバリが発生し、その内バリの内面接触により発生する超音波の反射エコーにより欠陥エコーの識別が行えなくなる等の問題点が発生する。同様にTIG法溶接部の場合は、内部アンダーカットや溶接部の溶け込み状態により端栓と被覆管の境界面が複雑であり、欠陥エコーが境界面のエコーと重なりあってしまうため、欠陥エコーのみの分離が困難になるといった問題が生ずる。従って、これら雑多のエコーからの欠陥エコーを分離するためには、従来の探傷システムより欠陥の検出能を多様化する必要が出てきた。又、溶接部に限らず今までの超音波における検査対象の大半は、その検査部位の欠陥の有無や肉厚の厚さ測定であった。これは、欠陥の大きさや肉厚の減少がその検査部位の強度に大きな影響を持つためであり、「欠陥寸法や肉厚寸法の正確な測定結果=検査部位の健全保証」となっているからである。しかし、最近、材料技術の進歩により合金成分が多様化してきたため、その材料の加工時にかかる応力や熱影響が、材料強度に及ぼす影響も無視できなくなってきた。現状、これらの強度保証は、製品の抜き取りによる破壊試験以外に確認方法がなく、製品検査のために非破壊検査による材料組織検査方法の確立が囑望され、一部ではあるが超音波による材質測定方法の開発

PRW溶接部の場合も同様に金相試験でのSEM、TEM観察と引張試験等破壊試験データの比較から材料組織の微細変化が溶接部強度に影響を及ぼすことが分かってきた。そこで従来の溶接部超音波検査装置の多重ゲート化と材料測定を行うためのデータ収集装置を付加し、各種溶接部の全波形データ収集を行うこととした。

2.2 Aスコープメモリー装置の概念

図-1に示す様に従来の超音波探傷装置で探傷を行うと超音波ビームの同軸上に複数個の欠陥が混在した場合、最も超音波の反射エコーが大きい欠陥のみが表示される。これは、探傷器には欠陥エコーを検出するゲート回路が1chしかなく、そのゲートに出現した最も高いエコーのみを欠陥として判定するからである。従って、

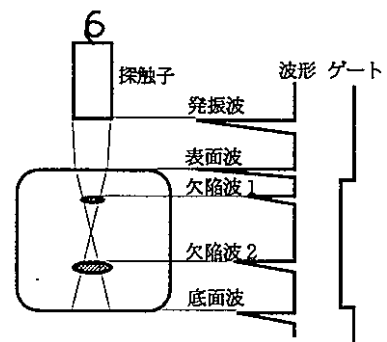


図-1 従来のシステムによる探傷

従来の探傷システムでは、ゲートが検出する欠陥エコーの材料表面からの時間（肉厚方向深さ）とエコー高さ及び探触子の材料上の位置を収録し、画像解析を行うため、ゲートで検出できない超音波データ（混在した欠陥エコーの小さい方や表面波及びそれらの波形）は収録されず、探傷後の波形確認やゲート位置変更等によるデータ再解析を行うことは再検査による複数回の確認以外には不可能であった。

今回製作したAスコープメモリー装置は、任意に設定した探傷区間の材料表面からの時間（肉厚方向深さ）とエコー高さ及び探触子の材料上の位置とともにその区間の全ての超音波波形データを記録する装置である。

図-1と同じ試料をAスコープメモリー装置で探傷すると全ての探傷波形データを収録することにより深さ方向（時間軸方向）の全てのデータを連続的に集積し、入力した材料音速を用いてゲート設定に関係なく図-2に示す様に断面画像を作成することが可能となる。また、ゲート設定に関してはそのデータ収録範囲内において任意に最

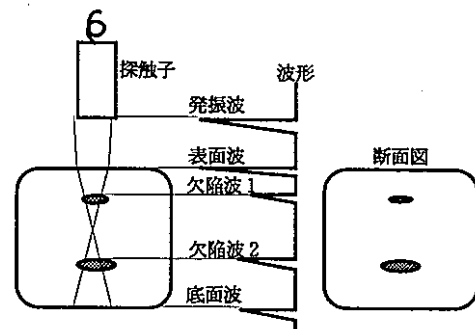


図-2 Aスコープメモリー装置による探傷と探傷断面図

大4chまで設定することが可能であり、設定ゲート毎に平面展開した画像データを表示することができるとともに全探傷データを収録してあるため、探傷後にゲート設定位置を変化させてデータ処理を行ったり、その部位の波形確認を行ったりすることができる。

2.3 Aスコープメモリー装置の構成

2.2項で説明した探傷域全般のデータ収録を行うためには、超音波波形（アナログデータ）をデジタルデータに変換する必要がある。従来の溶接部超音波検査装置の場合、データの画像処理のために超音波データのデジタル変換を行っているため、I/F基板の組み込みとデータ処理用CPU及びソフトの追加を行うことでAスコープデータ処理が可能となった。

Aスコープメモリー装置のデータ収集を行う上で重要なことはサンプリング周波数の設定にある。Aスコープメモリー装置では、データのサンプリング毎にその波形の位置、高さ、周波数帯域のデータ等の収録を行う。しかし、サンプリング周波数が低いとアナログ波形とデジタル波形そのものに相関性がなくなってしまう。通常、Aスコープメモリーのサンプリング設定は、使用探触子の5～10倍の周波数が必要となる。データ容量的には、仮に探触子周波数80MHz、回転方向1°、軸方向0.05mm分割で5mm区間の探傷を行うと約20Mバイトのデータ容量となる。従って、これらのデータ保存のた

めにAスコープメモリー装置では、外付けMOディスクによるデータ収録が可能である。

これらAスコープメモリー装置を用いたデータ収録と従来の超音波検査の切り替え及びAスコープメモリー装置のデータ収録ピッチの設定操作は、従来の溶接部超音波検査装置により行われ、データ収録のトリガー設定等は、Aスコープメモリー装置により行われる。

2.4 Aスコープメモリー装置によるデータ処理

Aスコープメモリー装置の画像処理の基本フォーマットは、従来の溶接部超音波検査装置による画像処理のAスコープ処理（個別波形処理）、Bスコープ処理（断面画像処理）、Cスコープ処理（平面画像処理）及びワイヤーフレーム処理（全体波形処理）の4種類を発展させたものである。具体的には、各々の単独データ処理とA+B、A+C、B+C、A+B+C（図-3）といった複合的な画像処理が可能になったこと、多重ゲート4ch分に対応して4chが同時にCスコープ表示できる4Cスコープ（図-4）が新たな画像処理として追加された。

また、今回の製作には組み込んでいないが、波型処理装置、周波数解析装置及びバンドパスフィルターを組み込むことにより、各種波型解析を行うことやそれらを介しての検査判定を行う機能を有している。

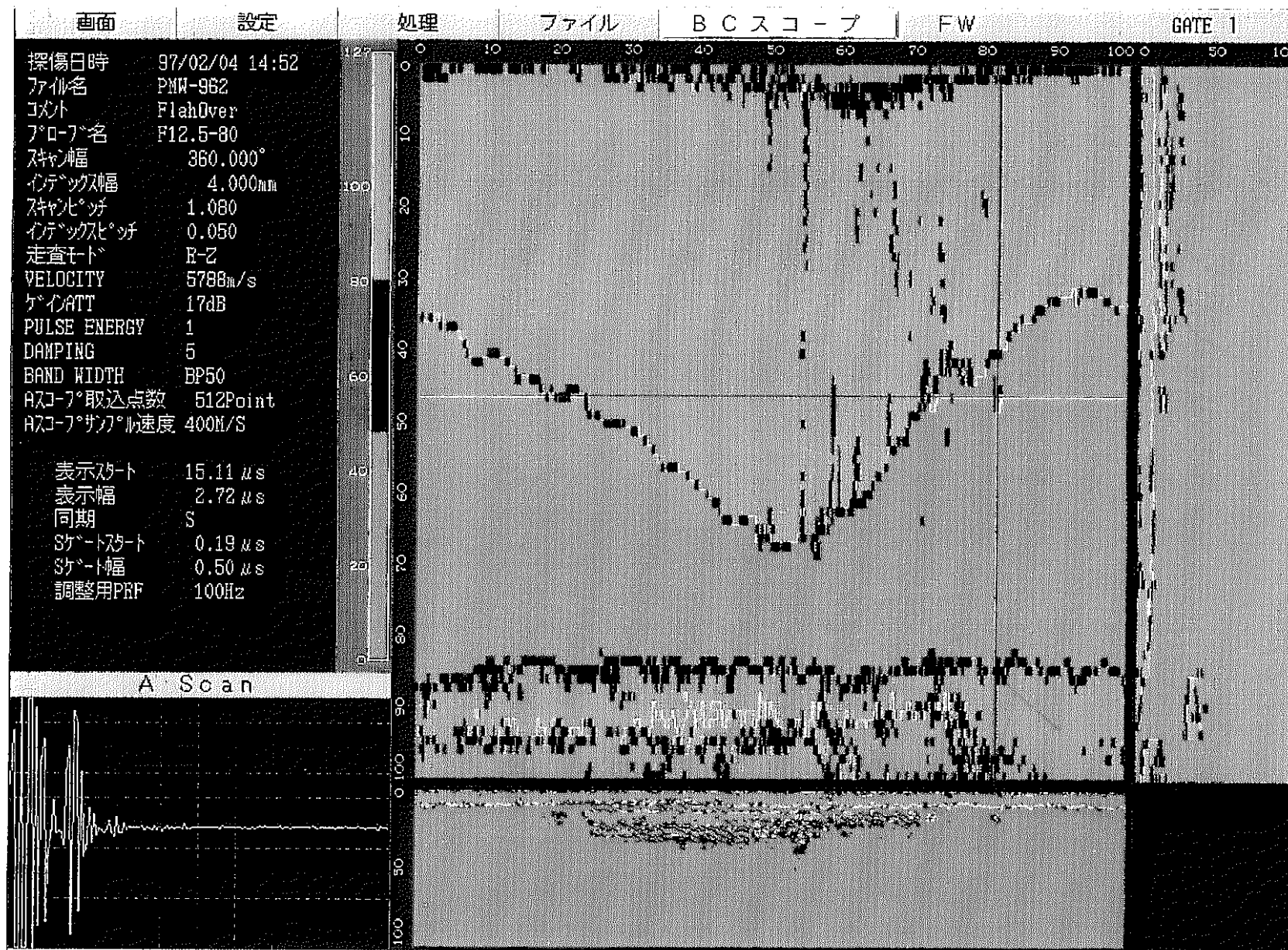


図-3 Aスコープメモリー装置出力画像(A+B+Cスコープ)

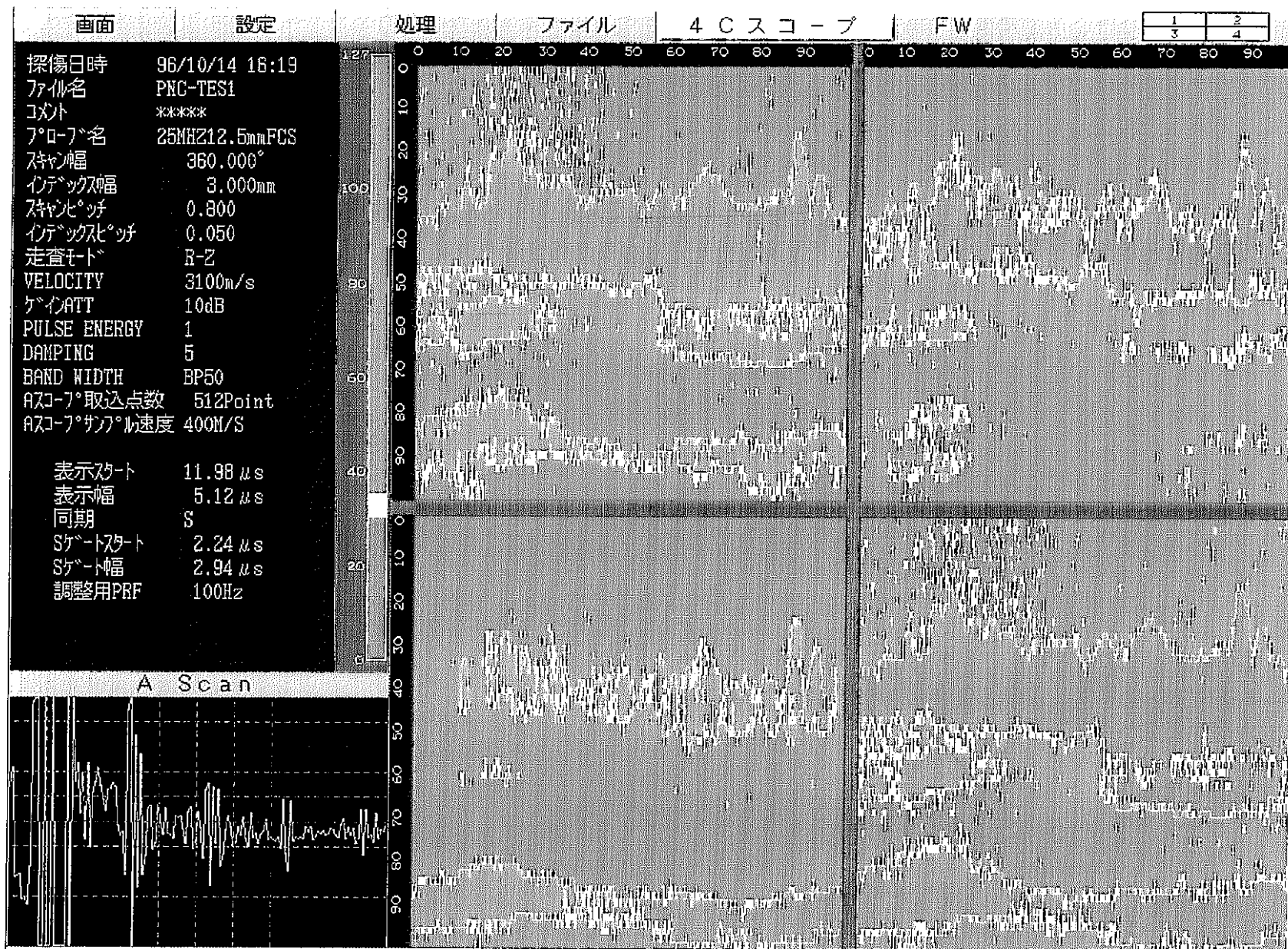


図-4 Aスコープメモリー装置出力画像(4Cスコープ)

ESTON PNC TOKAI

3. Aスコープメモリー装置の性能確認試験

3.1 PMW用STBによる性能確認試験

PMW用STBを用いてAスコープメモリー装置の探傷性能試験（データ出力確認試験）を実施した。評価項目としては、表-1に示す探傷条件により既知の値を持つ、PMW用スリット型STBを用いて探傷試験を行い、溶接部欠陥検査装置の画像処理結果とAスコープメモリー装置の画像処理結果を比較し、その画像処理パターン及び読み取り欠陥寸法を比較することにより行った。

表-1 PMW試料の探傷試験条件

使用探触子	駆動条件	探傷器条件	Aスコープメモリー条件
材質：高分子ポリマー	回転数：100rpm	パルスエネルギー：MAX	サンプリング速度： 400M/S
型式：ポイントフォーカス型	周方向ピッチ：1.08°	ゲイン：MAX	Aスコープ取込点数： 512point
ビーム径：φ0.1mm	軸方向ピッチ：0.05mm	繰返周波数：	調整用PRF：100Hz
周波数：80MHz	水温：25℃	ゲイン：62dB	
	水距離：7.5mm		

その結果、図-5に示す溶接部超音波欠陥検査装置処理画像と図-6に示すAスコープメモリー処理画像に差は見られず、欠陥の表示寸法についても表-2に示すように差が無いことが確認された。

表-2 PMW用STB人工欠陥寸法比較表

加工寸法	溶接部検査装置	Aスコープメモリー装置
S：2.06mm	2.05mm	2.05mm
L：3.04mm	3.05mm	3.05mm

3.2 PMW試料の性能確認試験

Aスコープメモリー装置によるPMW試料の探傷結果を図-7に示す。図中、右端がカーソル位置の軸方向断面、下部が周方向断面、中央が、ゲート位置により切り出した平面図で青色の部分が接合域、赤色の部分が未接合域である。左側下部に表示されている波形が、軸方向及び周方向カーソルの交点にある欠陥の欠陥波形（Aスコープ波形）である。

軸方向断面図において※1位置に赤い画像ラインが3層になっているのは、被覆管肉厚部において多重エコーとなっているためであり、※2位置に示されるのが欠陥の軸断面方向の大きさと深さ方向の位置である。（周方向断面図における表示も周断面方向の大きさと深さ方向の位置となる。）

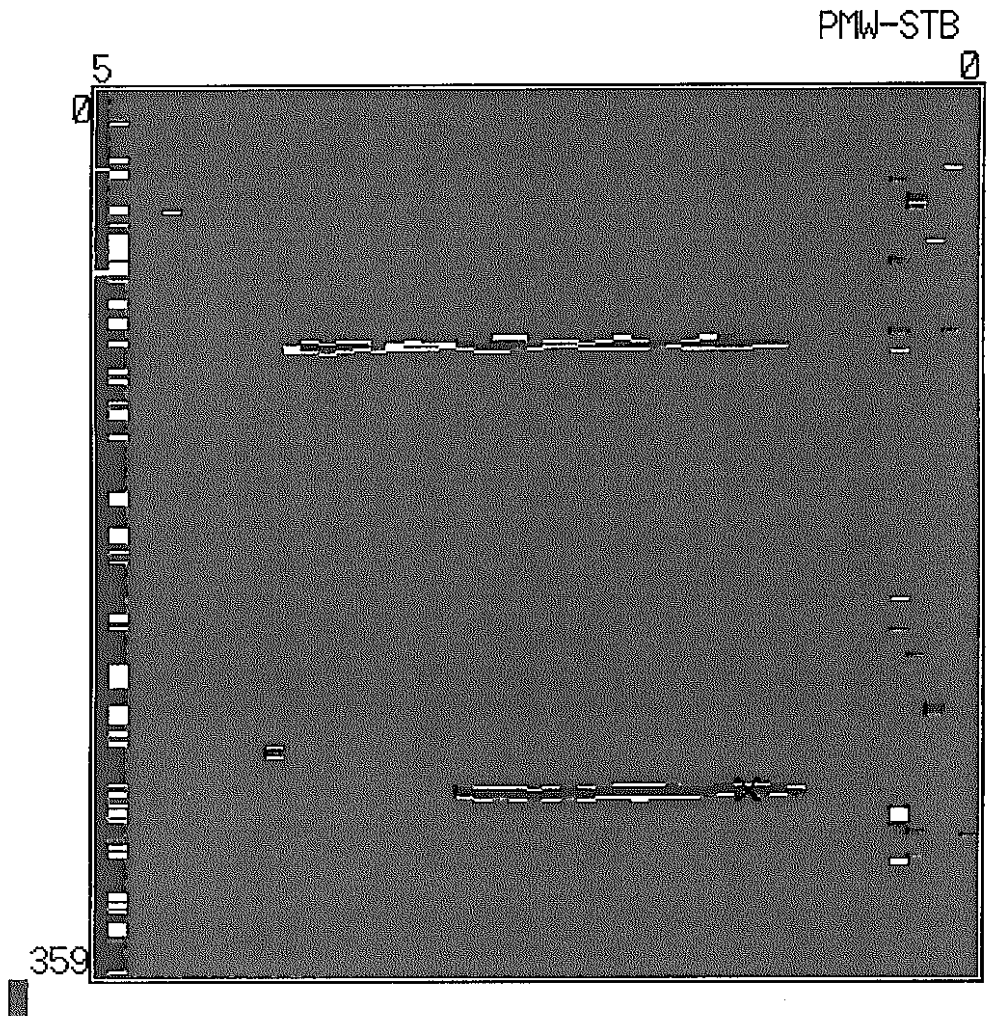
*** 平面図表示 ***
 円錐 走査 (1.080×0.100)
 全波 エコー高さ標準

0 %	~	16 %
16 %	~	32 %
32 %	~	48 %
48 %	~	64 %
64 %	~	80 %
80 %	~	96 %
96 %	~	112 %
112 %	~	

MAX

CON-SET
 カ-ラ名 F12.5-80
 年月日 97/01/20 13:31:22
 PULSE ENERGY 1 DAMPING 5

GATE IF
 START 12 10ns 0.34 mm
 WIDTH 9 10ns 0.26 mm
 VELOCITY 5788m/S
 GAIN ATT 18 dB
 BAND BP50
 X1-X2 5.00 - 0.00
 Y1-Y2 0.00 - 358.92



図一5 溶接部超音波欠陥検査装置によるPMW用STB出力画像

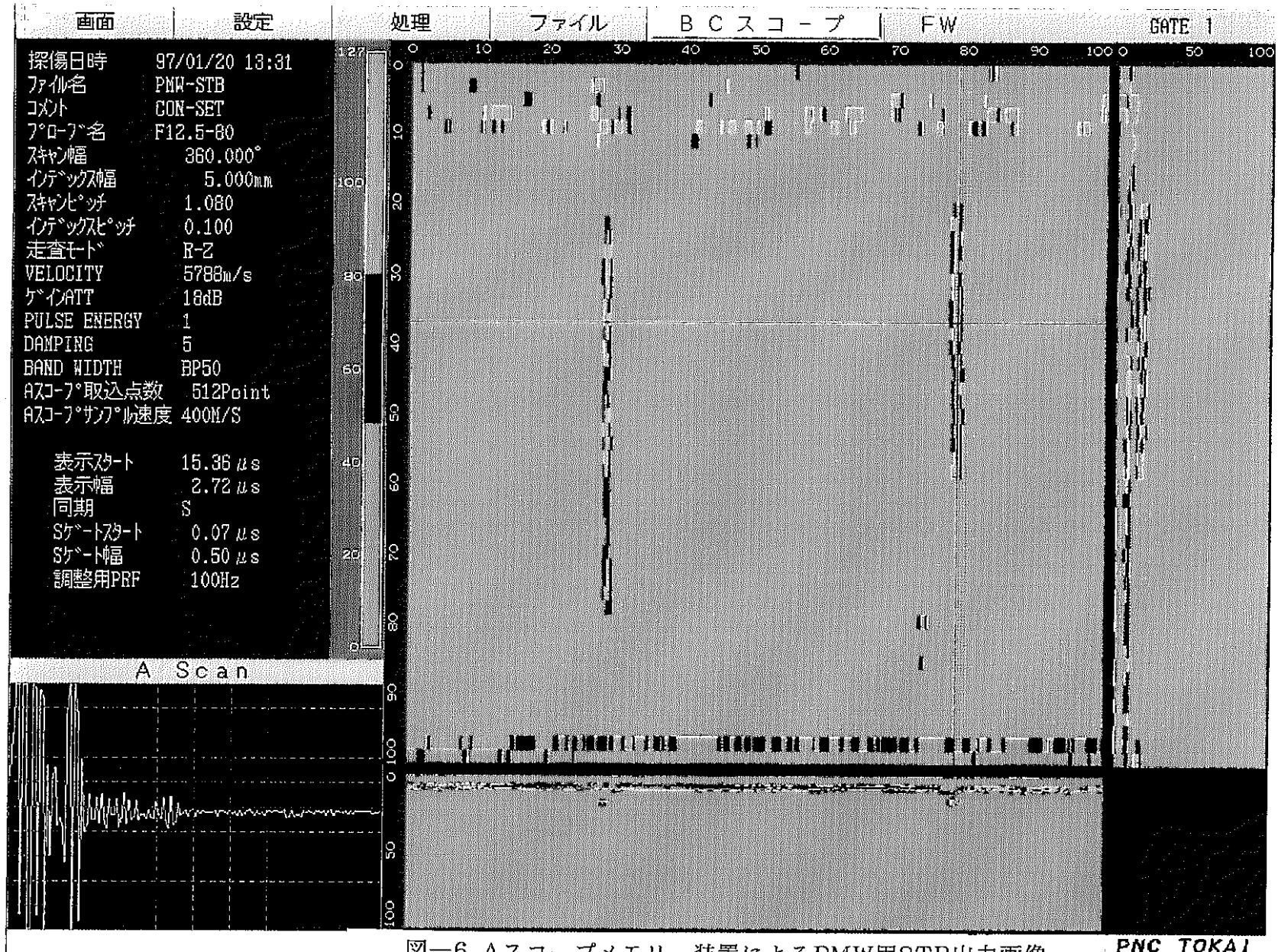


図-6 Aスコopメモリー装置によるPMW用STB出力画像

PNC TOKAI

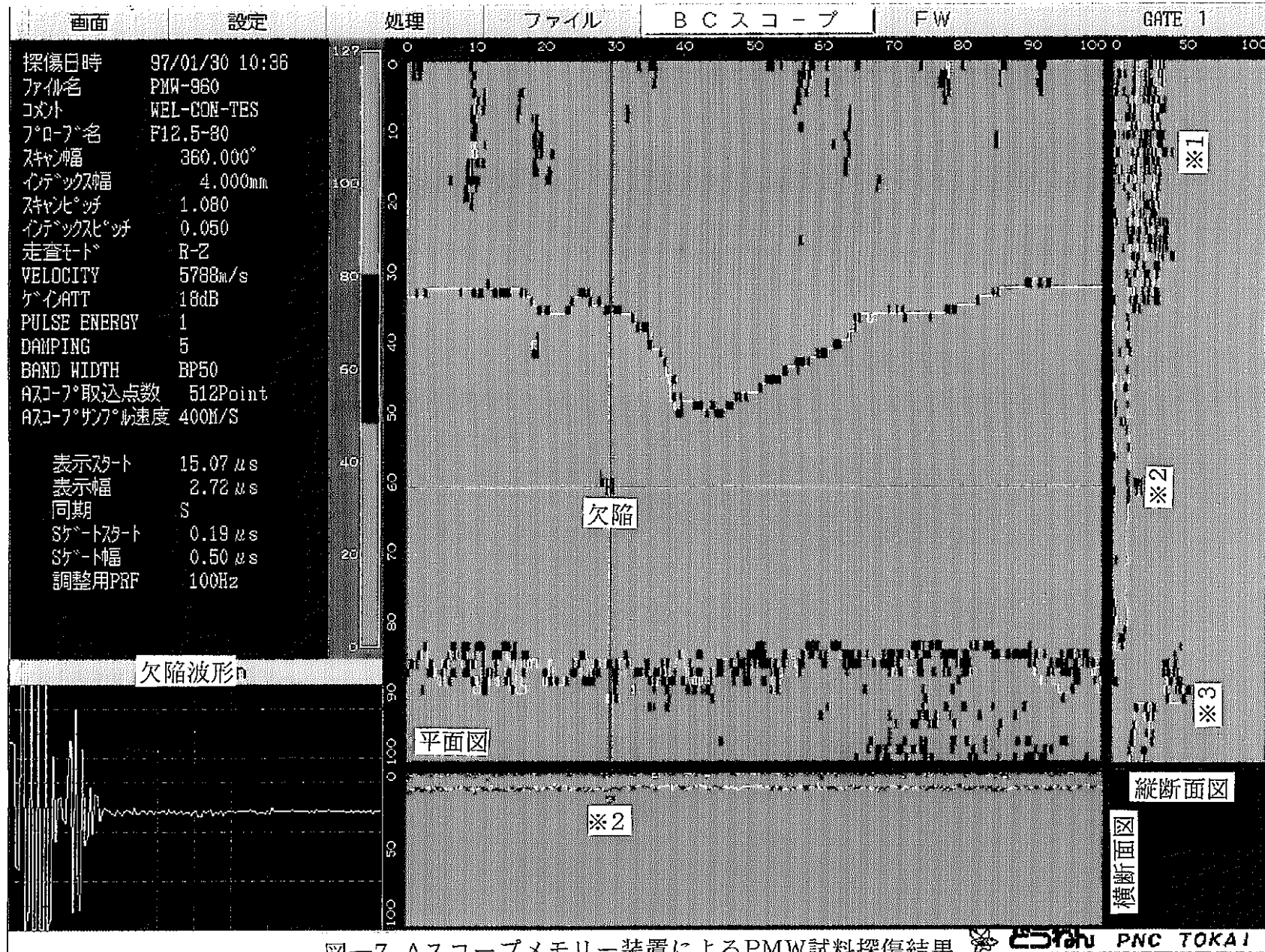


図-7 Aスコープメモリー装置によるPMW試料探傷結果

※ 3 位置において断面エコーが一段落ちてい
る部分が端栓と被覆管の境界段差部である。

図-8 に示してあるのが欠陥部波形のみの
A スコープ表示である。この A スコープ表示
と写真-1 に示すシンクロスコープ上で撮影
したアナログ波形を比較すると両者の波形に
差異は認められず、かなり忠実に波形が再現
されていることが分かる。

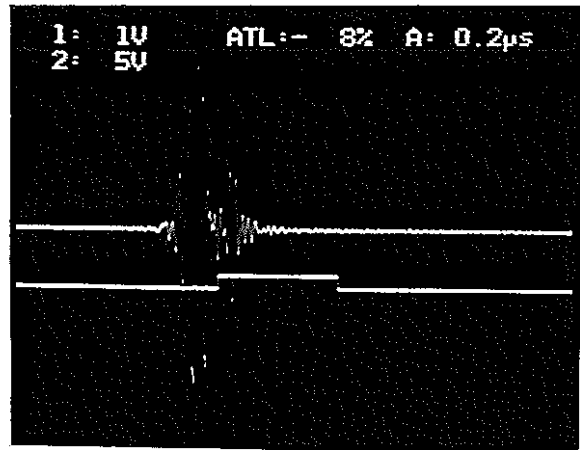


写真-1 PMW欠陥部のアナログ波形

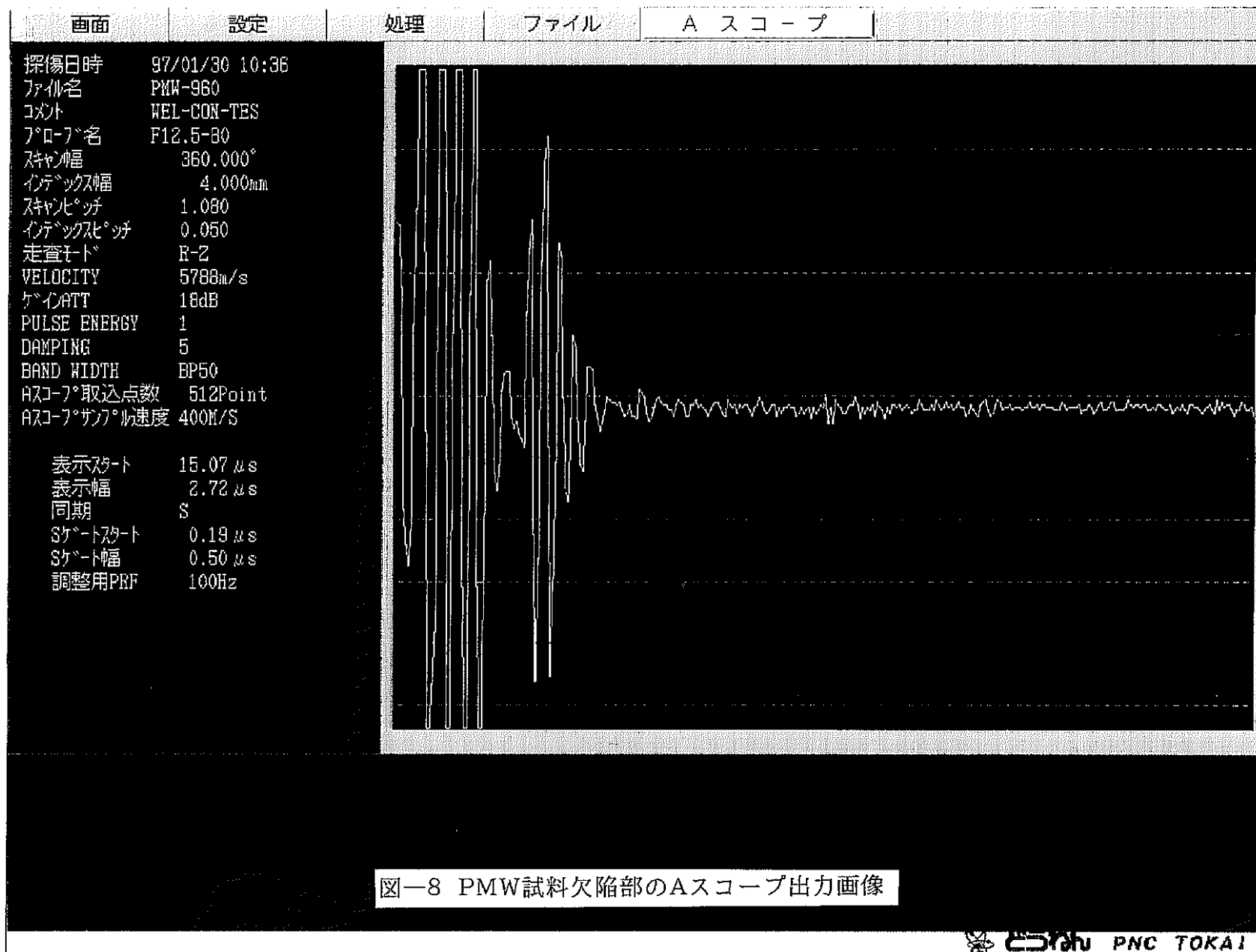
3.3 P R W 試料による性能確認試験

PMW 試料と同様に P R W 試料を用いて表-3 に示す探傷条件で入射角度 19.08° (伝播角度 44.74°)
で斜角探傷試験を行った。その結果を図-9 に示す。

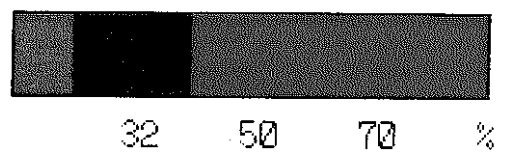
表-3 P R W 試料の探傷試験条件

使用探触子	駆動条件	探傷器条件	A スコープ メモリー条件
材質：高分子ポリマー	回転数：100rpm	パルスエネルギー：MAX	サンプリング速度： 400M/S
型式：ポイントフォーカス型	周方向ピッチ： 1.08°	ダンピング：MAX	A スコープ 取込点数： 512point
ビーム径： $\phi 0.1\text{mm}$	軸方向ピッチ：0.05mm	繰返周波数：	調整用 PRF：100Hz
周波数：80MHz	水温： 25°C	ゲイン：62dB	
	水距離：7.5mm	入射角度 19.08°	

図-9 に示すように、従来の溶接部超音波装置での探傷平面図では、バリ除去後の表面状態の粗さと内バリからのエコーで欠陥の有無を判別することができない。また、探傷断面図においてもゲート内の最大エコーを表示してしまうため、内部の状態を確認することは不可能である。しかし、図-10 に示すように、同一条件下においてデータを収集した A スコープメモリー装置では、平面図自体は、溶接部超音波検査装置と同じだが、縦断面図及び周断面図において表面と内バリ部のエコーが分離され、その間に何点かの欠陥エコーを確認することができる。(図-10 下部は、上部四角枠を拡大し、断面をより明確にしたものである。)

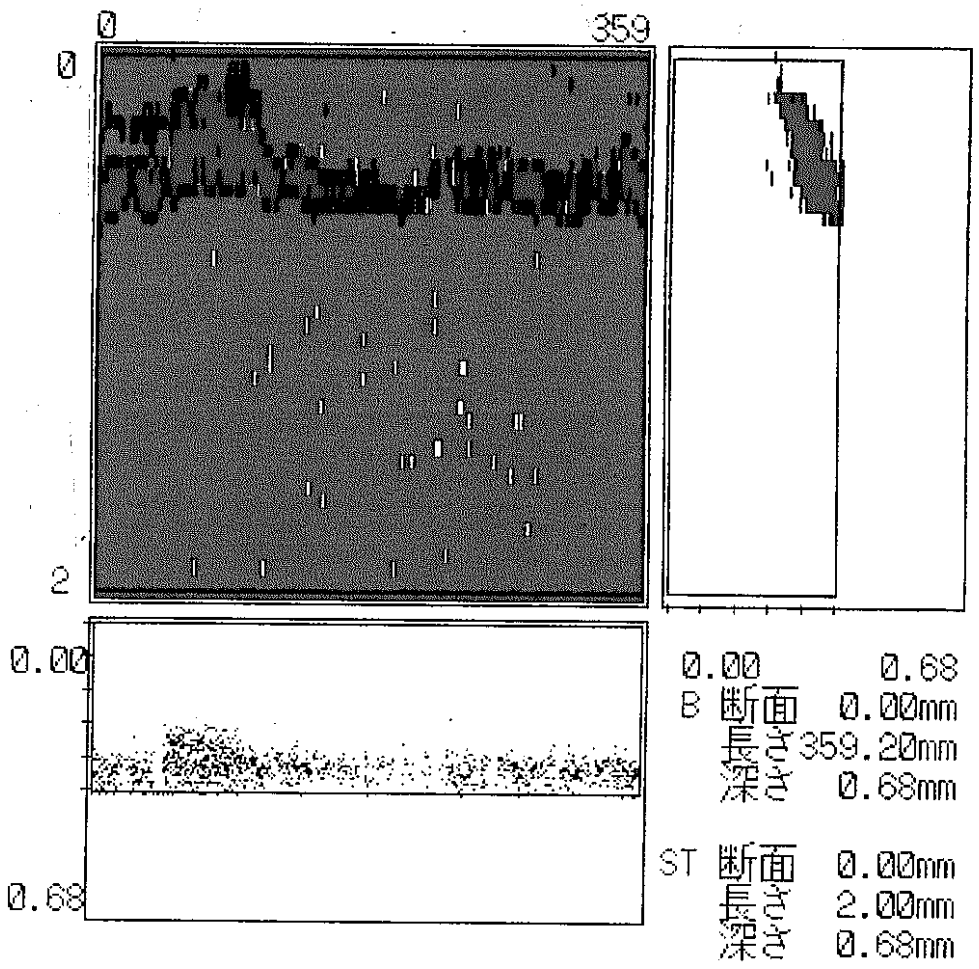


*** 断面図表示 ***
 R-Z走査(0.800×0.050)
 全波 エコー高さ標準
 MAX 30.0%
 25 40 60 100



WL=Sp 1=19
 知-名前 B80P3PF12.5
 年月日 96/06/18 11:18:20
 PULSE ENERGY 1 DAMPING 5
 GATE IF
 START 25 10ns 0.38 mm
 WIDTH 19 10ns 0.29 mm
 VELOCITY 3100 m/s
 GAIN ATT 10 dB
 BAND BP50

X1-X2 0.00 - 359.20
 Y1-Y2 0.00 - 2.00



図一9 溶接部超音波欠陥検査装置によるPRW用試料探傷結果

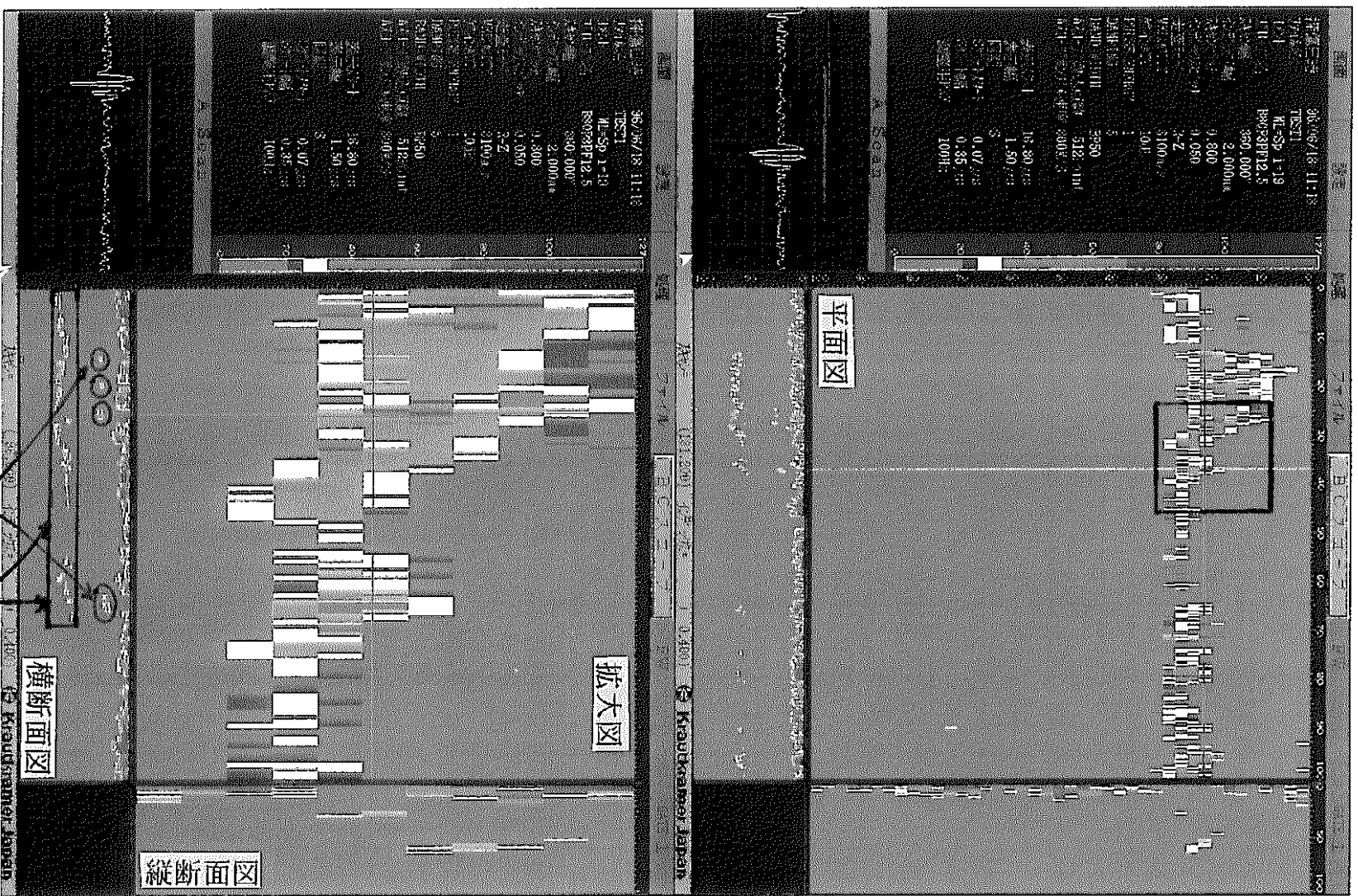


図-10 Aスコープメモリ装置によるPRW試料探傷結果

4. 考 察

4.1 多重ゲートによる探傷について

PRW溶接部の場合、溶接域の境界面に被覆管内面バリが発生するため、バリと欠陥の分離が難しく欠陥の判定が困難である。また、TIG溶接部の場合も端栓と被覆管の境界面が一様ではなく、溶け込み域が被覆管肉厚以上であることから境界面の欠陥を分離抽出することが難しい。これは、探傷法ではなく従来の超音波探傷器が持つ、探傷システムの問題であり、探傷ゲートを1chしか設定できないことやゲートに複数の欠陥エコーが出現すると大きなエコーを優先的に欠陥として出力するためである。

今回、導入したAスコープメモリー装置による多重ゲート探傷システムは、従来の探傷システムでは不可能であった、重なりあった超音波エコー中の欠陥エコーの分離が可能になり、超音波検査装置がもともと持っていた欠陥分解能の高さと合わせ、検査の対象範囲が広まったと考えられる。従って、固相接合法による溶接部探傷検査だけでなく、TIG溶接によるFBR用つば型端栓溶接部等の探傷検査法としても適用できる。また、検査そのものだけでなく、超音波探傷条件を設定する上でも有効であると考えられる。従来、斜角探傷の条件設定は、内外面の欠陥波形を交互に手操作でシンクロ上に出し、静止状態で条件を作成、その後、駆動させ、条件を確認するという作業を繰り返し行いながら設定していた。そのため、手作業による欠陥検出と、駆動系の影響により条件が安定しない等かなり熟練した技術が必要であった。本システムでは、探傷域全体を多重ゲートで4分割し、探傷させ、取り込んだデータから波形を確認、それを繰り返すことで駆動時の探傷条件を作成することが可能であり、簡単な超音波の知識があれば斜角探傷条件の作成が可能となった。

4.2 Aスコープメモリー装置について

現在、開発を実施している新しい溶接法であるPMWとPRWは、両者とも固相接合法であるが、その溶接メカニズム、溶接部形状を比較すると超音波による検査方法も大きく異なる。PMWの場合の溶接部の強度は、接合長さとの密接な関係を持つため、検査法としては、溶接部中の欠陥とともに接合長さの正確な測定が要求される。従って、超音波検査法としては最も基本的な垂直探傷法とPMWでの特殊な形状を正確にトレースし、一定探傷条件を確保する駆動システムの開発が検査法の確立に直結していた。一方、PRWの場合は、接合域の欠陥の有無とともに接合面におけるミクロ層の材料組織変化により、溶接部の強度に大きな影響を及ぼすことが、SEMやTEMによる観察から分かってきた。組織の変化による溶接部強度は、溶接条件の管理、抜き取りによる破壊検査による強度保証によりある程度は担保できると思われる。また、これを何らかの非破壊検査法により識別することができ

ればさらに好ましい。

現在、非破壊検査による材料組織の定性化及び定量化は、各種分野で盛んに研究開発が実施されている。中でも材料中の伝播が良く、欠陥分解能が高い超音波による方法は、有力視されており、実際にジルカロイ中の水素化物形成状態の測定実例も出されている。これら材料解析を行う場合、得られる全超音波データから波型解析装置、周波数解析装置等により形成あるいは析出する金属組織の持つ特有の波形や周波数を選別、抽出する方法が一般的とされている。

今回、導入したAスコープメモリー装置は、これらの材料解析を行うために必要な超音波データの完全収録システムである。しかし、現在のシステムは、波型解析装置、周波数解析装置等のシステムを含んでいない。従って、直接的に材料解析を行うことはできないが、今後、解析手法を確立するために必要な数多くのデータ収集を実施する。

5. まとめ

1. 従来の溶接部検査装置からAスコープメモリー装置への探傷データの転送をPMW用STBのスリット型欠陥寸法を用いて比較したところ差は見られず、同一ゲート処理下における画像データにも差が見られなかった。
2. 従来のシンクロスコープからのアナログ波形データとAスコープメモリー装置におけるデジタル波形の再現性を確認したところ、両者の間に差はなく、かなり忠実な波形再現が可能であることが分かった。
3. Aスコープメモリー装置の多重ゲートシステムを用いることにより、探傷域断面の欠陥分布が明確になったため、従来、困難であったPRW溶接部及びTIG溶接部の重なりあった欠陥の分離も容易に行える。

6. 今後の課題

1. 欠陥エコーと今まで識別が困難であったその他のエコー（バリ、アンダーカット等）との識別が可能となったので、バリ、アンダーカット等のエコーの出方をより明確にし、欠陥判定の方法を体系化する。
2. Aスコープメモリー装置の画像処理能力を最大限に生かしたPRW及びTIG溶接部用のSTBの形状、製作方法を検討する。
3. PRW溶接部の溶接部強度評価の非破壊検査法を確立するための前段階として、数多くの溶接部波形データの収集を行う。
4. FBR用のつば型端栓TIG溶接部についても探傷方法を検討し、探傷試験を実施する。

7. 参考文献

1. 日本非破壊検査協会編；超音波探傷試験 A (1976)
2. 溶接部超音波欠陥検査装置の開発「その1 据付、試運転報告書」PNC PN8410 91-010
3. 溶接部超音波欠陥検査装置の開発「その2 画像処理システムとSTBの製作及びPMW試料の超音波探傷」PNC PN8410 93-074
4. 溶接部超音波欠陥検査装置の開発「～その3 PMW, PRW及びTIG溶接部の探傷～」PNC PN8410 96-050