

# 超音波探傷法による 抵抗溶接部品質保証法の開発

－ 抵抗溶接部用STBの試作と探傷試験 －

(試験報告)

2003年7月

核燃料サイクル開発機構  
東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184

Japan

© 核燃料サイクル開発機構（Japan Nuclear Cycle Development Institute）

2003

## 超音波探傷法による抵抗溶接部品質保証法の開発

## － 抵抗溶接部用 STB の試作と探傷試験 －

## (試験報告)

関 正之\*、石橋藤雄\*、河野秀作\*

平子一仁\*\*、塚田達也\*\*

## 要 旨

抵抗溶接部に発生する欠陥は、微細であるため、従来からの X 線による検査では、その欠陥を識別できないため、X 線検査法に変わる手法としてより欠陥の分解能が高い、超音波法の適用について開発を行ってきた。

超音波は、X 線よりも物質内部へ伝わり易く、直進性も良いため、欠陥の検出能力に優れているが、超音波で得られる欠陥信号の強度と欠陥の大きさは必ずしも相対しない。これは、超音波の欠陥からの反射エコーの大きさが、反射源である欠陥の形状、向きに大きく影響されるためである。

そこで、パルスモーターで探触子と試料回転軸を駆動制御させ、欠陥位置データと超音波エコーを組み合わせて画像処理を行い、欠陥の寸法及び位置を正確に把握できる溶接部超音波検査装置を開発した。しかし、超音波検査法は、あくまで比較検査法であるため、検査装置の持つ欠陥検出能や探傷感度の保証には、既知の欠陥を持つ、標準試験片や対比試験片が必要となる。

標準試験片は、JIS 等でも規定されているが、抵抗溶接部のような特殊な部位に発生する特異な欠陥に対しては、その形状に特化した標準試験片が必要となる。そこで、標準試験片加工方法の検討を行い、放電加工と拡散接合により標準試験片を試作した。この試作標準試験片の人口欠陥を用いて探傷感度、データ画像処理用しきい値の校正を行い、超音波による探傷結果とその部位の金相試験による実測と比較した結果、欠陥深さ方向分解能が  $3 \mu\text{m}$ 、欠陥寸法、接合長さ測定において誤差が  $10 \mu\text{m}$  以内の探傷性能を持つことが判明し、標準試験片による探傷条件校正の有効性が確認された。また、溶接部欠陥の出来方と探傷画像に特異なパターンが存在することも探傷結果と金相試験の対比により確認された。

---

\* 東海事業所 環境保全・研究開発センター 先進リサイクル研究開発部 プルトニウム燃料開発 Gr

\*\* 原子力技術 (株)

## Development of Quality Assurance System for Resistance Welding by Ultrasonic Examination

### — Fabrication of STB for Resistance Welding and Ultrasonic Examination —

#### (Survey Document)

Masayuki Seki<sup>\*</sup>, Fujio Ishibashi<sup>\*</sup>, Shusaku Kono<sup>\*</sup>

Kazuhito Hirako<sup>\*\*</sup>, Tatsuya Tsukada<sup>\*\*</sup>

#### Summary

The defect occurred at the resistance welding zone is very minute and therefore cannot be identified by X-ray inspection. Then, the ultrasonic examination method, in which the resolution of the defect is higher than that of the X-ray inspection method, has been developed.

The ultrasonic wave sounds straight easier in the material than X rays, excels in defecting the micro defect. However, the pulse amplitude of ultrasonic wave is influenced by the shape and direction of the defect.

Then, the ultrasonic inspection equipment, in which the ultrasonic probe and the sample rotation axis are controlled to drive with the pulse motor and the defect data (position and size) are analyzed by image processing ultrasonic signal, was developed to measure the shape and the position of defect accurately.

However, an ultrasonic examination method is the comparative inspection method. Therefore, the standard test block or the reference block is indispensable to guarantee the defectability and the ultrasonic echo sensibility of the inspection device.

The standard test block is provided in JIS etc, it is needed to defect the peculiar defect occurred at the resistance welding zone. Then, the method of processing a standard test block is examined, the standard test block was made experimentally by electric discharge processing and diffusion junction method.

The ultrasonic echo sensitivity and the threshold for image processing were proofread by using the standard test block, the ultrasonic inspection and metallographic inspection were executed. Comparing the ultrasonic inspection results with the metallographic inspection results, the detectability of defect depth and the measurement accuracy were proved to be 3 $\mu$ m and with errors less than 10 $\mu$ m respectively. From these results, the effectiveness of proofreading the ultrasonic inspection condition by the standard test block was confirmed. Moreover, it was confirmed that there was a peculiar relationship between the depth and position of defect and the ultrasonic inspection results by comparing the ultrasonic inspection results with the metallographic inspection results.

---

\*JNC Tokai Waste Management and Fuel Cycle Research Center Advanced Fuel Recycle Technology Division  
Plutonium Fuel Technology Gr.

\*\*Nutech

目 次

1. 緒言	1
2. 供試材	1
3. 抵抗溶接部への超音波法の適用	2
4. 標準試験片（STB）の必要性	3
5. STBの試作	4
6. 試作STBによる探傷試験	6
7. 実試料による探傷条件の確認	8
8. 欠陥パターン抽出	10
9. 超音波から見たODSマルテンサイト材とODSフェライト材の違い	12
10. 被覆管の探傷検査	16
11. BOR60用上部端栓溶接部の超音波探傷試験	18
12. 今後の課題と検討	18
11. 結言	21
12. 参考文献	21

## 図目次

図-2.1	抵抗溶接試験片形状	1
図-3.1	溶接部超音波検査装置の駆動	3
図-3.2	溶接部超音波検査装置のデータ収録方法と平面画像展開	3
図-5.1	S T B 欠陥配置と欠陥寸法	5
図-5.2	S T B 探傷画像	7
図-8.1	抵抗溶接部に発生する欠陥パターンと金相結果の対比	11
図-9.1	マルテンサイト材とフェライト材の接合開始点の違い	12
図-9.2	メーカー側被覆管超音波探傷チャートにおける林状エコーの差	12
図-9.3	被覆管の林状エコーの違いによる接合開始点の変化と被覆管部反射エコーの比較	14
図-10.1	偏芯入射による斜角探傷	15
図-10.2	首振入射による斜角探傷	15
図-10.3	フェライト材被覆管斜角探傷結果と欠陥の金相確認 1 (偏芯入射)	16
図-10.4	フェライト材被覆管斜角探傷結果と欠陥の金相確認 2 (首振入射)	16
図-11.1	画像処理による実測寸法との誤差要因	18
図-11.2	斜角探傷の超音波伝播	20
図-11.3	タンデム法の概略図	20

## 表目次

表-2.1	ODS鋼材の化学成分	1
表-5.1	人工欠陥の放電加工寸法	5

## 写真目次

写真-3.1	抵抗溶接部と発生する欠陥	2
写真-5.1	接合状態の確認金相結果	6
写真-6.1	S T B 試作材外観写真	6
写真-6.2	加工欠陥の接合後の状態	7
写真-7.1	金相と超音波による長さ測定位置	8
写真-7.2	金相と超音波による欠陥寸法比較	10
写真-9.1	マルテンサイト材とフェライト材の被覆管金属組織	13
写真-11.1	抵抗溶接部の実際の接合長さと超音波による測定位置	19

## グラフ目次

グラフ-6.1	マルテンサイト用S T Bの探傷感度と欠陥寸法	6
グラフ-6.2	フェライト用S T Bの探傷感度と欠陥寸法	6
グラフ-6.3	画像処理しきい値と欠陥寸法	7
グラフ-7.1	S T B校正前後の寸法測定誤差比較	9

1. 緒言

酸化物分散強化型鋼（以下「ODS 鋼」と称する。）の開発にともない、ODS 鋼の最適な溶接法として抵抗溶接技術の開発を行っている。抵抗溶接法は固層接合法であるため、その溶接部に発生する欠陥の形態も従来の溶融法とは異なり、ひじょうに微細なものとなる。また、接合部の強度保証上、抵抗溶接部の接合長さの測定が必要となるため、従来の X 線検査では、溶接部の健全性を担保することは難しい。そこで、X 線よりも物質内部に伝わり易く、直進性も良く、小さな欠陥からの反射も大きい超音波を用いることとした。

しかし、超音波は、センサーとしての有効性を持つ反面、X 線検査とは異なる対比試験であるため、超音波そのものの信号の大きさと欠陥の寸法は、必ずしも一致しない。そこで超音波探傷を行うためには、試料中の欠陥信号を相対的に評価するための標準試験片が不可欠となる。

本報告書は、抵抗溶接部の品質保証を行うための超音波検査法の確立とそのために必要な標準試験の試作及び標準試験片により校正された探傷条件による抵抗溶接部の超音波探傷試験結果についてまとめたものである。

2. 供試材

(1) 探傷材料の形状

図-2.1 に今回、探傷試験に使用する抵抗溶接試験片の形状及び寸法を示す。

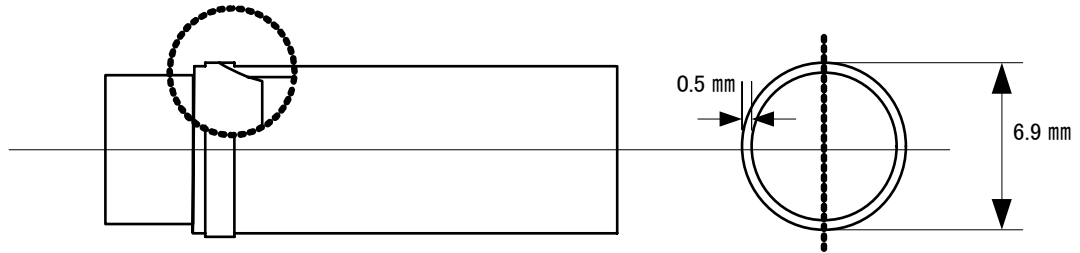


図-2.1 抵抗溶接試験片形状

(2) 化学成分

表-2.1 に抵抗溶接試験を製作したマルテンサイト ODS 被覆管及びフェライト ODS 被覆管の化学成分を示す。

表-2.1 ODS 鋼材の化学成分

(mass%)								
区分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W
マルテンサイト材	0.13	0.004	0.005	<0.002	0.003	0.02	8.90	1.99
フェライト材	0.037	0.017	0.07	<0.002	0.003	0.04	11.60	1.91

区分	Ti	Y	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	O	Ex.O	N	Ar	Fe
マルテンサイト材	0.21	0.28	0.3556	<0.184	0.1084	0.0090	0.0054	Bal.
フェライト材	0.26	0.18	0.2286	0.127	0.0784	0.0161	0.0046	Bal.



### 3. 抵抗溶接部への超音波法の適用

#### (1) 超音波探傷方法の選定

超音波探傷法は、垂直探傷法（超音波を非検材に垂直に入射させる。）と斜角探傷法（超音波を非検材に斜めに入射させる。）の2種類に大別され、非検材の形状、欠陥の方向、出来方によりその方法を選択する。

抵抗溶接部の場合、溶接欠陥は、写真-3.1に示すように接合開始点から接合境界面又は、その近傍に添って発生する。この接合開始点に発生する微細な欠陥を検出する方法として、超音波を被検材に垂直方向に入射させ、欠陥からの反射エコーを得る、垂直探傷法が最適であると判断した。

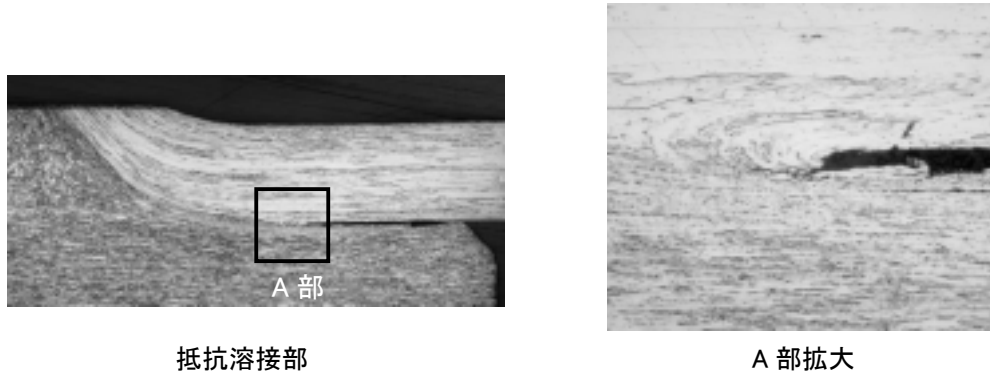


写真-3.1 抵抗溶接部と発生する欠陥

#### (2) 欠陥寸法の測定と画像処理

超音波検査は、探触子、探傷器、波形表示用のオシロスコープ等があれば、最低限、欠陥の有無を確認することが可能である。しかし、この場合、欠陥からの反射エコーの強弱を確認することは可能であるが、その信号の強弱で欠陥そのものの形状確認や寸法測定を行うことはできない。

超音波の伝播や信号の強度は、被検材の表面状態、材質、組織の状態及び欠陥の深さ位置、大きさ、方向、形等様々な影響を受ける。特に反射源である欠陥からの反射エコー強度（以下「音圧」と称する。）は、超音波ビームに対する欠陥の開口面積と密接な関係を持つ。欠陥の開口面積が超音波のビーム径面積よりも大きい場合、超音波は欠陥で100%反射されるが、欠陥の開口面積が超音波のビーム径面積よりも小さい場合、欠陥からの反射音圧： $P_F$ は、次式のようなになる。

$$P_F = P_0 A D / \lambda^2 x^2 \dots (1)$$

(1)式において  $P_0$ ：探触子からの発振音圧、 $A$ ：超音波ビームの面積、 $D$ ：欠陥開口面積、 $\lambda$ ：超音波の波長、 $x$ ：欠陥までの距離とすると、 $P_0$ 、 $A$ 、 $\lambda$ 、 $x$ は、探傷条件上一定となるため、欠陥からの反射音圧  $P_F$ は、欠陥の開口面積  $D$ に依存することとなり、欠陥の長さ寸法を反射エコーの音圧だけで定量化することは不可能である。そこで正確な欠陥寸法を測定するためには、探触子移動距離を精密に読み取るための機構が必要となる。

抵抗溶接部の検査で使用する溶接部超音波検査装置は、従来の超音波検査装置と大きく異なり、図-3.1 に示すように探触子をパルスモータで、上下、左右、前後に  $5\mu\text{m}$  ピッチで稼動制御し、回転軸を  $0.36^\circ$  ピッチで1回転を分割制御している。

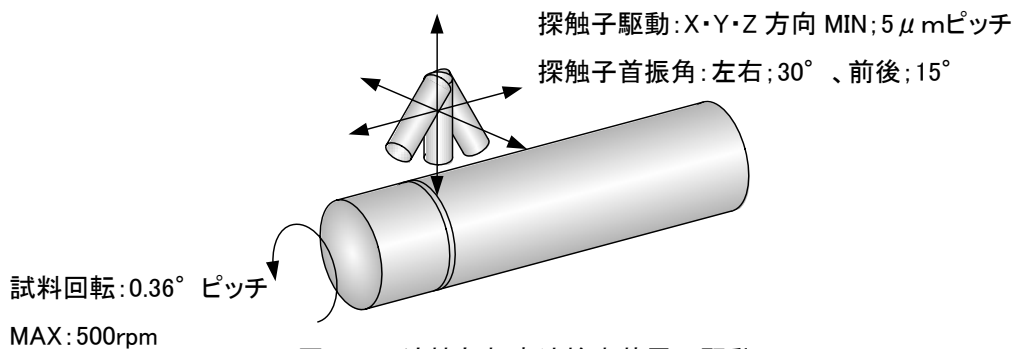


図-3.1 溶接部超音波検査装置の駆動

この探触子の移動距離、回転軸の分割と反射エコーの強度から画像処理で図-3.2 に示すようにマトリクス平面画像を作成し、このマトリクスを読み取ることで欠陥寸法を測定することが可能となる。

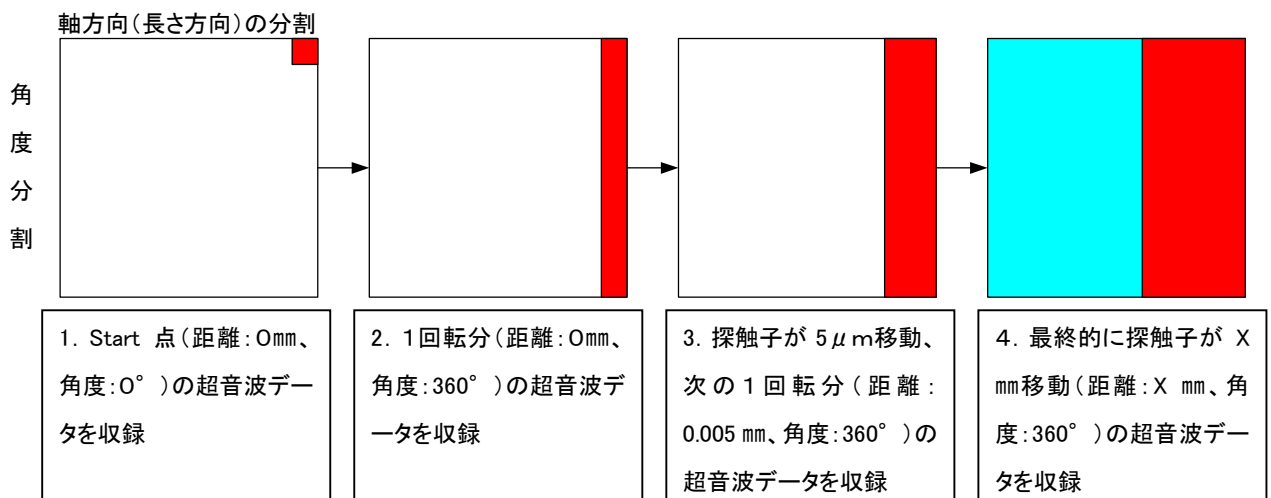


図-3.2 溶接部超音波検査装置のデータ収録方法と平面画像展開

#### 4. 標準試験片 (STB) の必要性

##### (1) 欠陥検出能の評価

欠陥の位置や寸法に関しては、(2)項で説明したようにパルスモーターの移動量と探傷データから処理されるCスコープデータを読み取ることで可能となるが、検査を行う上では探傷条件が、どれ程微細な欠陥を識別できるかが重要となる。この最小欠陥検出能の評価は、探傷により検出された欠陥を破壊確認することで可能となるが、実際の探傷試験に際しては、被検材に発生する欠陥寸法を模擬した欠陥を人工的に加工し、その人工欠陥からの反射エコー音圧を指標として探傷条件の校正や欠陥の判定を行う必要から人工的に欠陥を加工した標準試験片 (**Standard Test Block** 以下「STB」と称する。) や対比試験片 (**Reference Block** 以下「RB」

と称する。)を使用する。それらから得られるエコーを基準として探傷条件、装置性能等の保証を行う。

## (2) 材料が与える超音波への影響

欠陥の状態が、超音波の反射に影響を与えるように超音波の伝播路程で材料が及ぼす影響も少なくない。材料中での超音波の伝播挙動は、成分、密度、組織状態等に影響されるため、鉄鋼材料の中でもマルテンサイト、フェライト、オーステナイトでは、超音波音速や減衰の度合いは異なったものとなる。中でも結晶粒径が、超音波の散乱や減衰に与える影響は大きく、結晶粒径が粗大な程、超音波の散乱・減衰も大きくなり、林状エコー等のバックグラウンドエコーが上昇するため、同一欠陥寸法であっても反射エコー音圧には差が生じ、最小欠陥検出能の評価に影響を及ぼすこととなる。したがって、これら材料による影響下での最小欠陥寸法からの反射音圧を指標とすることがSTBには求められることとなるため、STBの材質も被検材と同一が望ましいことになる。

## 5. STBの試作

### (1) 人工欠陥加工方法の検討

金相試験、顕微鏡観察、SEM観察結果からPRW接合部に発生した微細剥離欠陥の寸法を判定し、欠陥深さ：1～2 $\mu\text{m}$ 、幅：10 $\mu\text{m}$ 、長さ：100 $\mu\text{m}$ を目標とした人工欠陥加工方法としてナノ加工技術、圧接・爆着による接合域のコントロール、放電加工法の3種について検討を行った。その結果、ナノ加工技術については、現在、検討・研究されている欠陥加工寸法が、0.1 $\mu\text{m}$ 以下と微細であり、欠陥加工後の人工欠陥の確認、定量が困難なことから除外した。次に、剥離の形態が最もPRW接合部に近いと思われる圧接・爆着による接合域のコントロールについても検討を行ったが、これらの方法は、本来、完全に接合させることが目的で、故意に剥離を形成させ、その寸法をコントロールすることが難しいことから断念した。放電加工法は、従来から人工欠陥加工法として実績があるが、目標とする寸法が、従来のSTB人工欠陥に比べ微細なことから、その加工の可能性について調査した。その結果、現行の技術では、使用電極の加工限界、ODS鋼の材質(硬さ等)と加工時の電極消耗等を考慮すると欠陥の最小加工寸法は、欠陥深さ：4～5 $\mu\text{m}$ 、幅：20 $\mu\text{m}$ が限界であることが判明した。そこでこの欠陥加工限界寸法が、PRW接合部の対比用人工欠陥として使用できるか否かについて検討を行った。

欠陥幅の加工限界：20 $\mu\text{m}$ については、PRW試料の最小外径： $\phi 6.9\text{mm}$ (円周：21.66mm)の探傷方向角度分割寸法(探傷1回転当たり1000分割)が、約21 $\mu\text{m}$ /ピッチとほぼ同等であることからこの寸法を採用することとした。欠陥深さについては、上蓋の拡散接合時における欠陥変型の状態を観察するために加工寸法を5 $\mu\text{m}$ 、10 $\mu\text{m}$ 、15 $\mu\text{m}$ 、20 $\mu\text{m}$ の4種類とした。

実際のODS溶接試料は円筒形であることからSTBの形状も円筒にすることを検討したが、今回は、試作の第1段階であることからSTB製作上の問題点を確認するため、破壊確認試験を行い易い、平板型として試作することとした。図-5.1にSTB加工図面を示す。

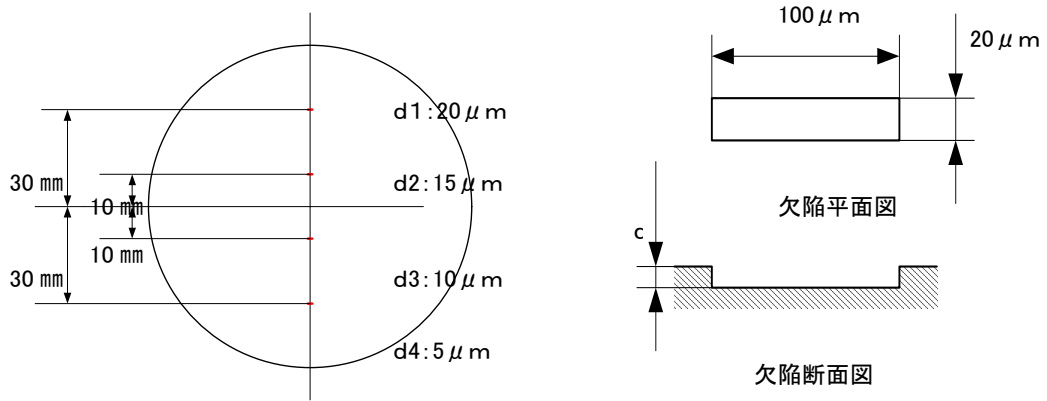


図-5.1 STB 欠陥配置と欠陥寸法

(2) 人工欠陥の加工

表-5.1 に放電加工後の人工欠陥加工寸法を示す。

表-5.1 STB 人工欠陥の放電加工寸法

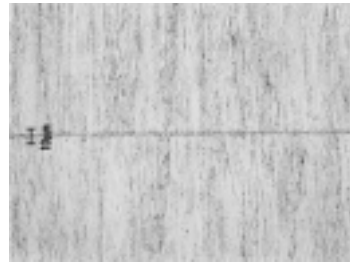
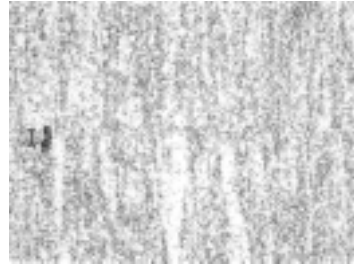
鋼種	欠陥	深さ(mm)	幅(mm)	長さ(mm)
マルテンサイト材	A	0.021	0.022	0.102
	B	0.015	0.024	0.103
	C	0.010	0.022	0.102
	D	0.005	0.022	0.102
フェライト材	A	0.020	0.022	0.103
	B	0.015	0.022	0.102
	C	0.010	0.023	0.102
	D	0.005	0.022	0.102

Table から分かるように放電加工による人工欠陥の加工寸法は、目標寸法の深さ：5、10、15、20 μm、幅：20 μm、長さ：100 μm、の値に対して十分な精度を有していた。

(3) 拡散接合条件の決定と拡散接合による組織変化

放電加工欠陥を中空にするために、欠陥以外の部位が完全に密着しており、ODS 鋼の組織の粗大化を極力抑えた上蓋の拡散接合条件について確認試験を行った。

写真-5.1 は、接合条件（温度：1050℃、加圧力：0.6kgf/mm<sup>2</sup>、保持時間：30分）におけるマルテンサイト系 ODS 鋼及びフェライト系 ODS 鋼の接合試験結果を示す。両材料とも完全に接合し、組織の粗大化等は特に認められなかった。しかし、2 鋼種では、その接合境界面の状態に若干の差が生じた。マルテンサイト系 ODS 鋼の場合、接合境界の識別が難しい程、完全に密着しているのに対し、フェライト系 ODS 鋼の場合、接合境界がはっきりと認識できる。これは、フェライト系 ODS 鋼の組織が軸方向への方向性を持つため、STB 材料を製作する際の切断でその軸方向の組織を分断したためと思われる。



マルテンサイト材

フェライト材

写真-5.1 接合状態の確認金相試験結果

6. 試作 STB による探傷試験

(1) 探傷感度の設定試験

写真-6.1 に完成した STB 試作材の外観を図-5.2 にその超音波探傷画像を示す。超音波探傷試験の結果、当初目的とした中空欠陥形状での STB 加工が行えたことを確認した。



写真-6.1 STB 試作材外観写真

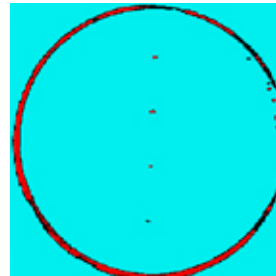
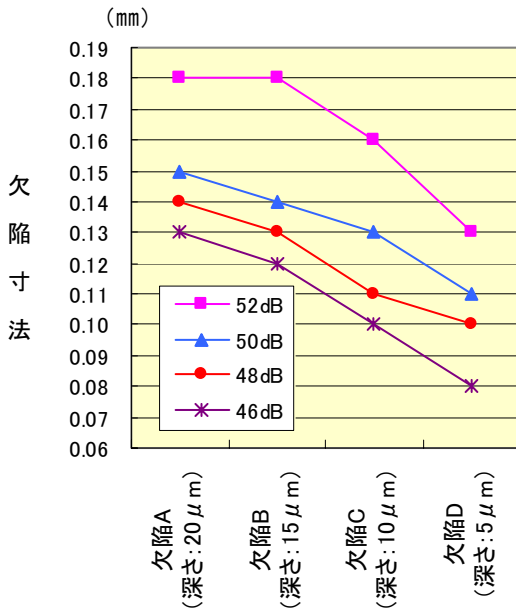
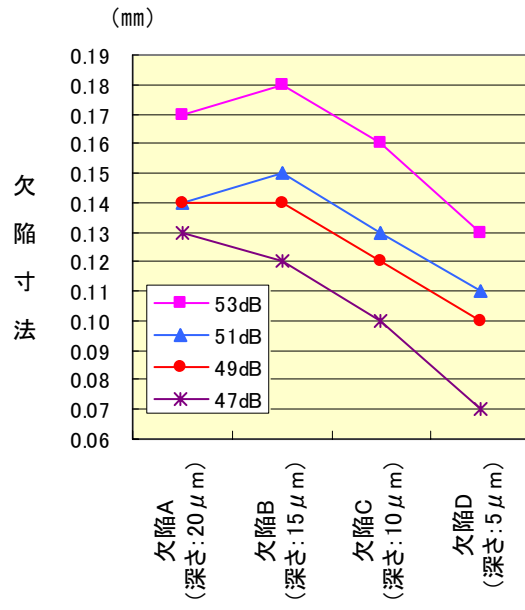


図-5.2 STB 探傷画像

この STB を用いて欠陥の最小分解能を保証するための探傷感度の設定試験を行った。試験は、探傷感度毎に垂直探傷法で STB の平面スキャンを行い、その結果を画像処理して欠陥寸法を読み取り、グラフにプロットした。グラフ-6.1 にマルテンサイト材及びグラフ-6.2 にフェライト材の試験結果を示す。



グラフ-6.1 マルテンサイト用 STB の探傷感度と欠陥寸法



グラフ-6.2 フェライト用 STB の探傷感度と欠陥寸法

グラフに示すように探傷感度と画像上の欠陥表示寸法の関係は、探傷感度に依存し、欠陥寸法は、探傷感度が低いほど深さに対して直線性を示している。超音波の反射エコー音圧は、理論上、超音波ビーム面積に対する欠陥の間口寸法に依存する。今回の STB の放電加工時の人工欠陥間口寸法は、5 の (2) 項で示したように全欠陥ほぼ一定であることから理論上、反射エコー音圧も一定となり、欠陥寸法もほぼ近似の値を示すはずであるが、実際は、反射音圧と欠陥寸法に差が生じている。この原因として最も考えられるのが、拡散接合時の欠陥の変形による間口寸法の変化である。そこで**写真-6.2**に示すように STB を切断し、拡散接合後の人工欠陥の状態について金相試験による確認を行った。

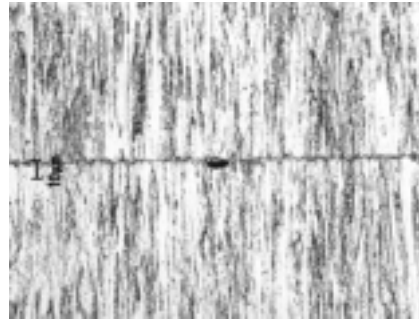


写真-6.2 加工欠陥の接合後の状態(最小欠陥:深さ5 $\mu$ m)

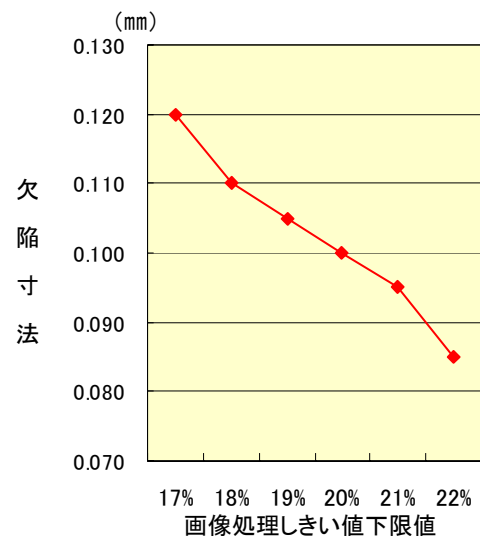
その結果、欠陥長さについては、ほぼ加工通りの寸法が維持されていたが、欠陥幅と深さについては、寸法の収縮と形状に変形(つぶれ)が確認された。この傾向は、欠陥の深さが浅いものほど大きく、最小欠陥の欠陥幅は、放電加工時の 22 $\mu$ m が、10 $\mu$ m に深さも加工時 5 $\mu$ m が、3 $\mu$ m 程度に収縮減少していることが確認され、この収縮・変形により反射エコー音圧の低下が起こったと推測される。

しかし、この変形後の寸法は、当初 STB の設計で目標としていた深さ: 1~2 $\mu$ m、幅: 10 $\mu$ m、長さ: 100 $\mu$ m に近いものであることから、この最小加工欠陥の画像寸法が、加工寸法と同じになる感度(マルテンサイト系 ODS 鋼: 48 dB、フェライト系 ODS 鋼: 49 dB)をそれぞれの STB の基準感度とした。この 2 鋼種の STB の基準感度の差は、両者の結晶組織の違いによる超音波の減衰に起因すると思われる。

(2) 画像処理しきい値の設定

(1)項で決定した探傷感度において最小加工欠陥の画像処理時の欠陥判定しきい値を変化させ、画像処理上の欠陥寸法の変化を確認し、画像処理における最小欠陥判定レベルの画像しきい値の設定を行った。

その結果、グラフ-6.3 に示すようにしきい値 20%において欠陥表示寸法が、100 $\mu$ m と加工寸法と同等になることが判明した。



グラフ-6.3 画像処理しきい値と欠陥寸法

7. 実試料による探傷条件の確認

6項で決定した溶接条件及び画像処理しきい値を用いて探傷試験を行い、金相試験による実測と比較して、接合開始点までの寸法測定及び欠陥寸法の測定を行い、STBによる条件校正の有効性を確認した。

(1) 接合開始点までの寸法測定

溶接試料を探傷し、写真-7.1に示すように端栓端から接合開始点までの寸法を処理画像から読み取り、その部位を切断、金相後、光学顕微鏡により長さ測定し、両者を比較してその誤差を確認した。その結果をグラフ-7.1に示す。

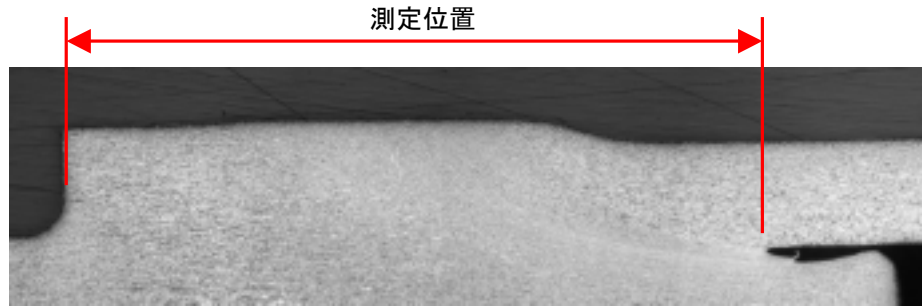
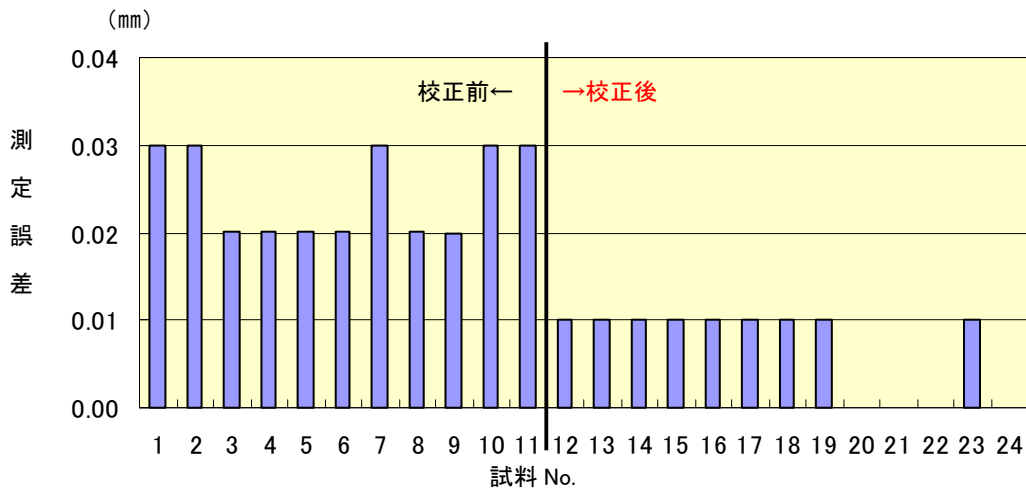


写真-7.1 金相と超音波による長さ測定位置



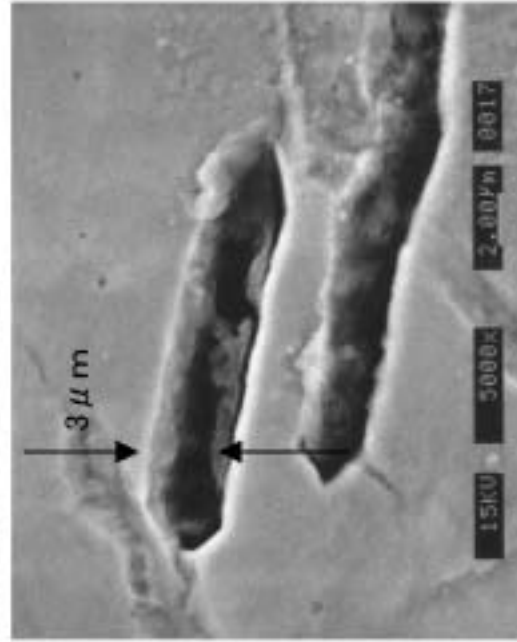
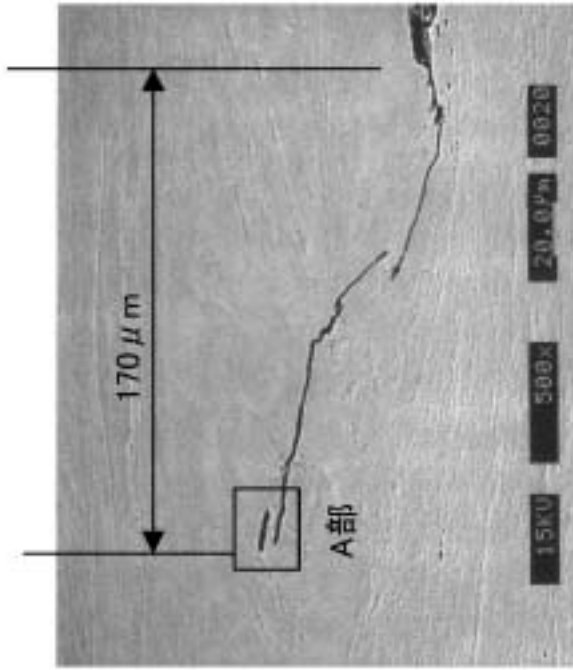
グラフ-7.1 STB 校正前後の寸法測定誤差比較

STBで探傷条件を校正前の測定長さ比較では、その誤差が平均で30μm程あったのに対し、校正後の測定長さ比較では、誤差の平均が、10μm以下に減少した。このことから今回試作したSTBによる探傷条件校正の有効性と精度が確認できる。

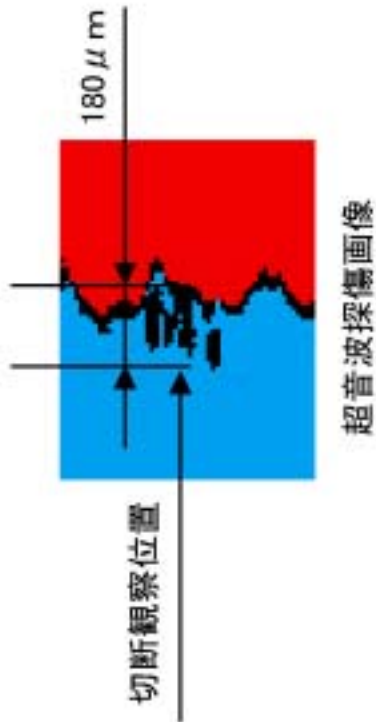
(2) 欠陥寸法の確認

写真-7.2に示すように探傷画像上で欠陥らしき部位を切断し、金相後、欠陥長さを測定し、画像処理上で読み取った欠陥測定長さと比較した。その結果、長さの差は、10μmであり、超音波での測定が実際よりも長く測定していることが判明した。

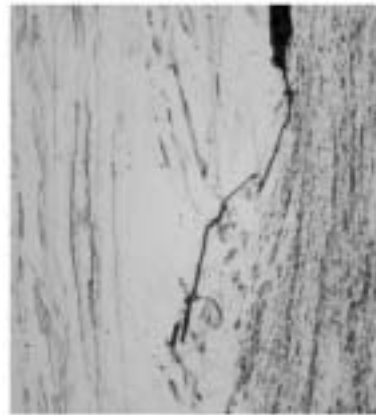
また、その欠陥をSEMにより観察し、欠陥の深さを測定したところその幅は、3μmとSTBの人工欠陥とほぼ同等の値を示しており、今回の探傷条件及び画像処理条件の校正が十分妥当であること共に溶接試料における欠陥検出能がSTBにより決定した欠陥検出能とほぼ同等であることが確認された。



A部拡大



超音波探傷画像



金相試験結果

SEM観察像

写真-7.2 金相と超音波による欠陥寸法の比較



## 8. 欠陥パターン抽出

超音波による品質保証法を確立するためには、抵抗溶接部に発生する欠陥の種類を明確にするとともにその欠陥のスペックを決定する必要がある。そこで探傷画像より特異点のある部位を切断、金相し、欠陥の有無及び欠陥の形状を確認した。図-8.1 に現在、探傷画像と金相試験による整合を取った欠陥パターンについて示す。

	未接合	微細剥離
探傷画像		
金相結果		
	端栓部欠陥	管部欠陥
探傷画像		
金相結果		

図-8.1 抵抗溶接部に発生する欠陥パターンと金相結果の対比

(1) 未接合

溶接部位に未接合が生ずるとその範囲により大きさは異なるが、接合開始点から端栓側に向かい、こぶ状、あるいは、三角州のような欠陥画像を示す。

(2) 微細剥離

接合開始点に小さい剥離欠陥が残存する場合、画像の特徴としては、欠陥が微細なため、画像処理上は黒く、接合開始点の凹凸において一部分が端栓側に伸びた状態となる。

(3) 端栓部欠陥

接合開始点に小さな切込みのような画像を示す。(2)の微細剥離と画像的には似ているが、微細剥離よりも画像上、直線的で長さも長い。

(4) 管部欠陥

接合開始点の凹凸上に接合開始点と連続性のない突出した形で画像が表示される。金相上の欠陥確認においても他の欠陥が、抵抗溶接の接合境界面やその近傍の組織の流れに沿っているのに対し、被覆管部に欠陥があり、その形、方向も法則性はない。

9. 超音波から見た ODS マルテンサイト材と ODS フェライト材の違い

図-9.1 に示すように探傷平面画像を見るとマルテンサイト材とフェライト材の接合開始点では、その画像パターンに違いが存在する。マルテンサイト材の場合、直線的でその凹凸も平均で  $50\mu\text{m}$ 、最大で  $100\mu\text{m}$  程度であるのに対し、フェライト材の接合開始点の場合、微細な凹凸が連続し、その凹凸が平均で  $120\mu\text{m}$ 、最大で  $200\mu\text{m}$  となっている。

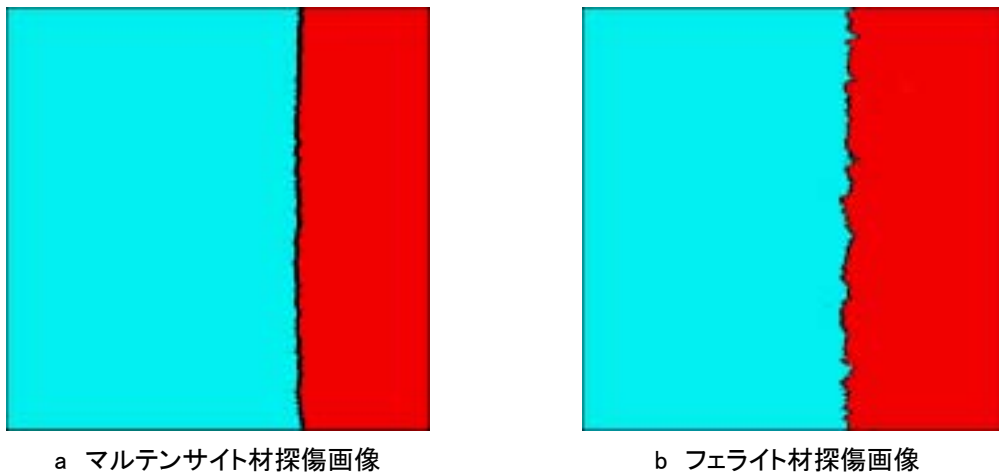


図-9.1 マルテンサイト材とフェライト材の接合開始点の違い

この2鋼種の違いを超音波的に見てみると、その違いが、図-9.2 に示すメーカー側の被覆管探傷チャート上にも現れており、マルテンサイト材と比較して明らかにフェライト材の林状エコー（シャワーエコー）が大きくなっている。

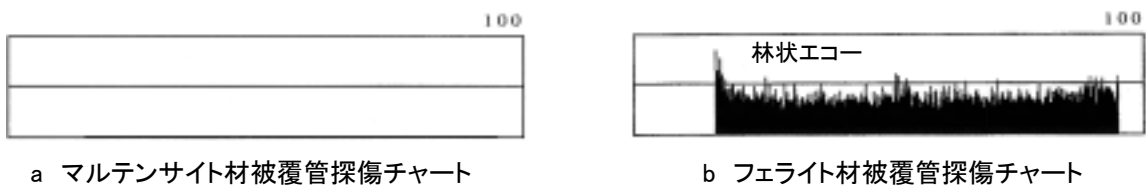
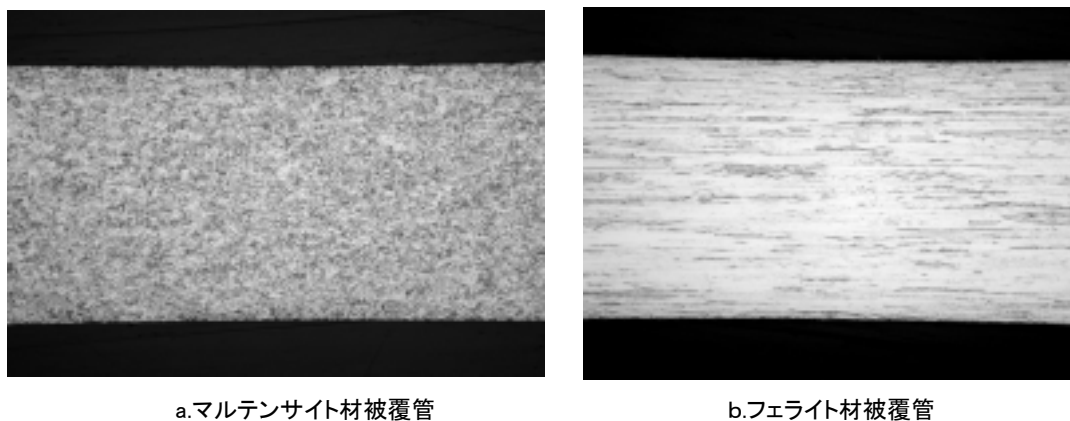


図-9.2 メーカー側被覆管超音波探傷チャートにおける林状エコーの差

一般に林状エコーの増加は、超音波の波長と結晶粒の大きさに関係すると言われ、結晶粒よりも超音波の波長が大きい時、林状エコーは少なく、逆に波長よりも結晶粒が大きくなると林状エコーも大きくなる。ODS 鋼に限らず通常の鉄鋼材の場合でも、マルテンサイト材よりフェライト材の方が、結晶粒が超音波に与える影響は大きいと言われている。写真-9.1 は、両者の被覆管部の金相写真であるが、明らかに両者の結晶組織には違いがあり、これにより林状エコーの増加や5項で決定した基準条件の感度差（フェライト材の方が、探傷感度を高く設定する。）となっていることが推測される。特に ODS 鋼フェライト材の場合、再結晶材であることも林状エコーの増加につながっていると考えられる。



a.マルテンサイト材被覆管

b.フェライト材被覆管

写真-9.1 マルテンサイト材とフェライト材の被覆管金属組織

図-9.3 に示すのは、フェライト材のメーカー側超音波探傷チャートにおいて林状エコーの出方に差がある2本の被覆管を抵抗溶接し、その溶接部を超音波探傷した結果である。2種を比較して分かるように同種のフェライト材においても接合開始点のパターンに差が有り、bの林状エコーの小さな被覆管の方が凹凸の少ないストレートな接合開始点となっている。写真c、dは、各々の超音波反射エコー写真だが、林状エコーの大きな管は組織の再結晶が進んでおり、超音波の減衰も大きくなっていることが分かる。

以上の点から抵抗溶接法の場合、TIG 方等の融接法とは異なる、固相接合法であるため、マルテンサイト材とフェライト材の結晶組織の差が接合にも影響を与え、接合開始点のパターンの相違となると推測される。

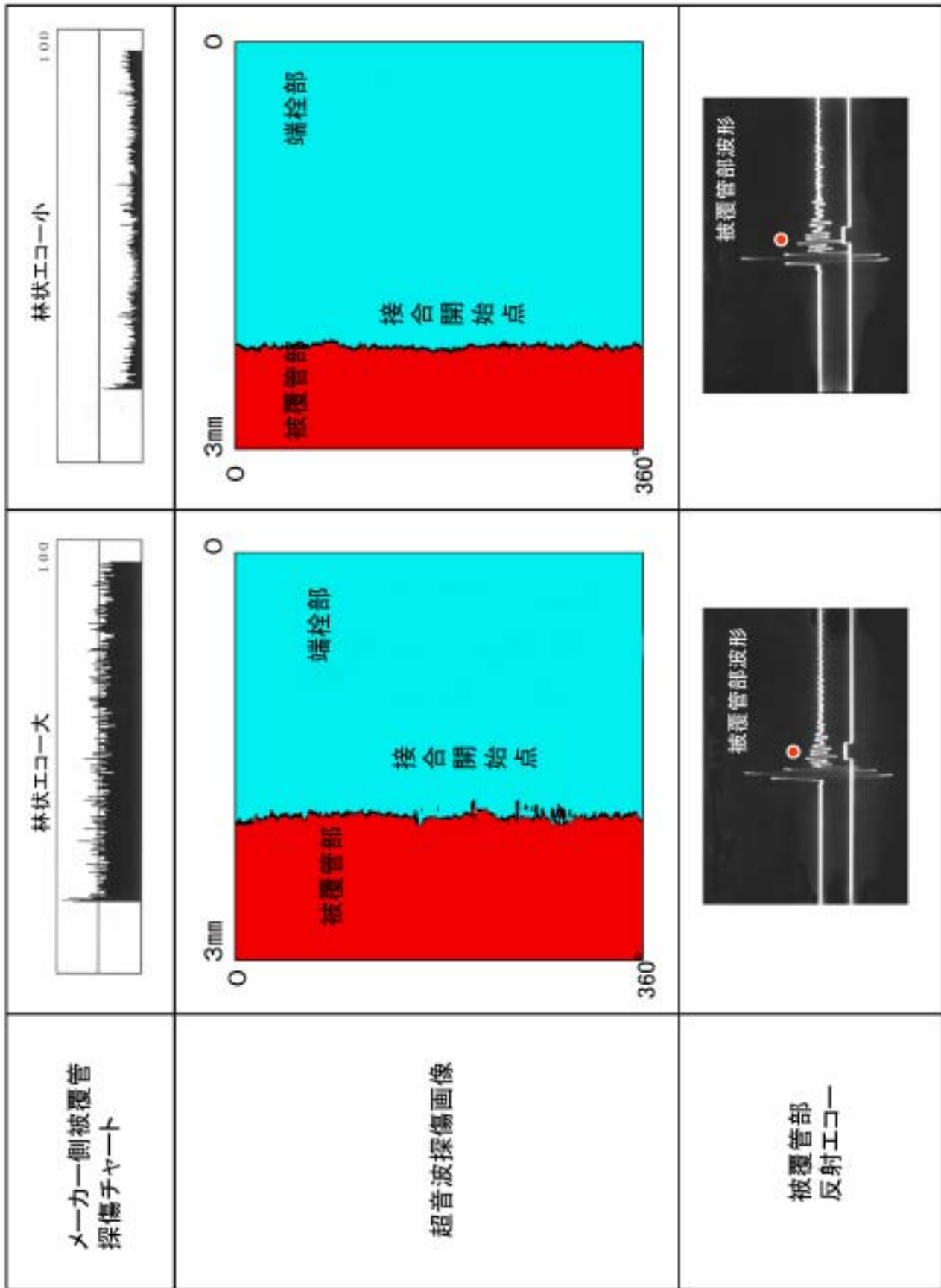


図-9.3 被覆管の林状エコーの違いによる接合開始面の変化と被覆管部反射エコーの比較

## 10. 被覆管の探傷検査

9項に示したようにフェライト材の場合、被覆管探傷チャート上での林状エコーが大きくなっているため、林状エコーと欠陥反射エコーの識別が難しく、チャートに表示されているエコー中に欠陥エコーが紛れている可能性は否定できない。特に今回、BOR-60 で使用する被覆管自体の許容欠陥が、 $50\mu\text{m}$ なのに対し、溶接部の欠陥許容は、 $40\mu\text{m}$ であるため、被覆管欠陥が、溶接後、抵抗溶接部位に残存することも十分考えられる。そこで、溶接部超音波検査装置のフレキシブル性と画像処理によるしきい値の変更を利用し、溶接に使用する被覆管端面の斜角探傷試験を実施した。

斜角探傷は、図-10.1 に示す探触子を被覆管軸より偏芯させ、超音波を管の円周方向に斜角伝播させる偏芯入射と図-10.2 に示す探触子を斜めに傾斜させ、超音波を管の軸方向に斜角伝播させる首振入射の2種の方式で試験した。なお、探触子は、溶接部検査用のポイントフォーカス型、周波数：80MHz、ビーム径、0.1mmを使用、探傷条件については、被覆管斜角探傷用のSTBが無い場合、クリープ試験片において管部F破断の特定を行った際の探傷感度（51dB）を使用し、伝播角は、理想伝播角の $45^\circ$ 、欠陥検出ゲートを直接斜角法位置に設定した。

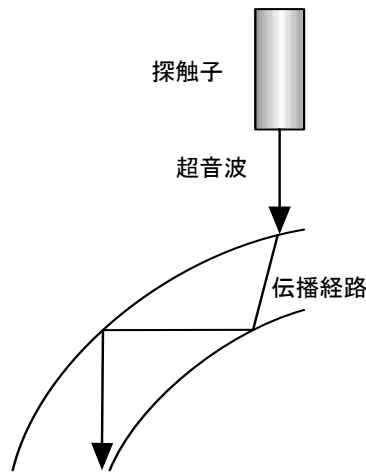


図-10.1 偏芯入射による斜角探傷

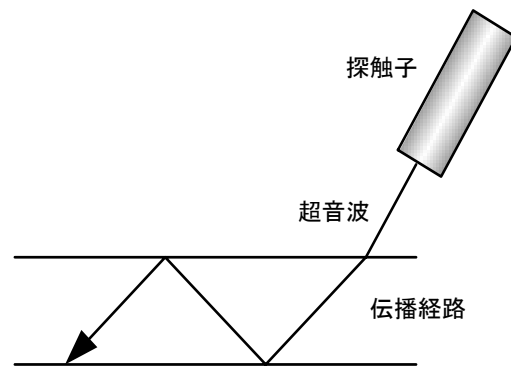
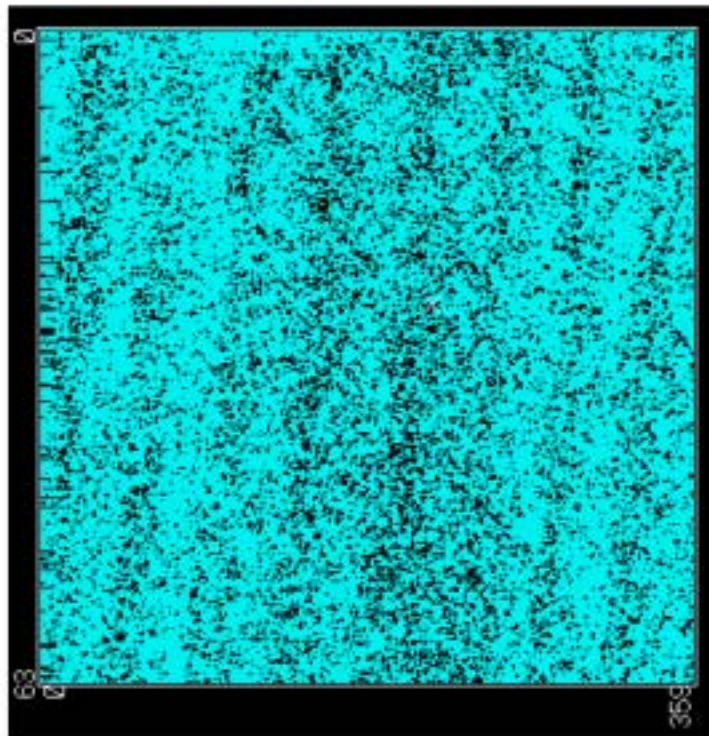


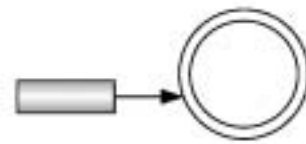
図-10.2 首振入射による斜角探傷

図-10.3 は、フェライト材被覆管に超音波を偏芯入射させ、斜角探傷試験を行った結果である。a 図は、溶接部検査用 STB で決定した画像しきい値のままの探傷平面画像であるが、メーカー側の探傷チャート同様に林状エコーの影響と思われる黒色で表示される部分が多く、欠陥等からの反射エコーのピーク（赤色）を識別することが難しい。そこで、画像しきい値を変化させ、ある一定レベル以下の信号（黒色部）をカットしたものが、b 図となる。この b 図で表示されたエコーピークの部位を切断し、金相観察した結果、写真 c に示す管部欠陥が観察された。

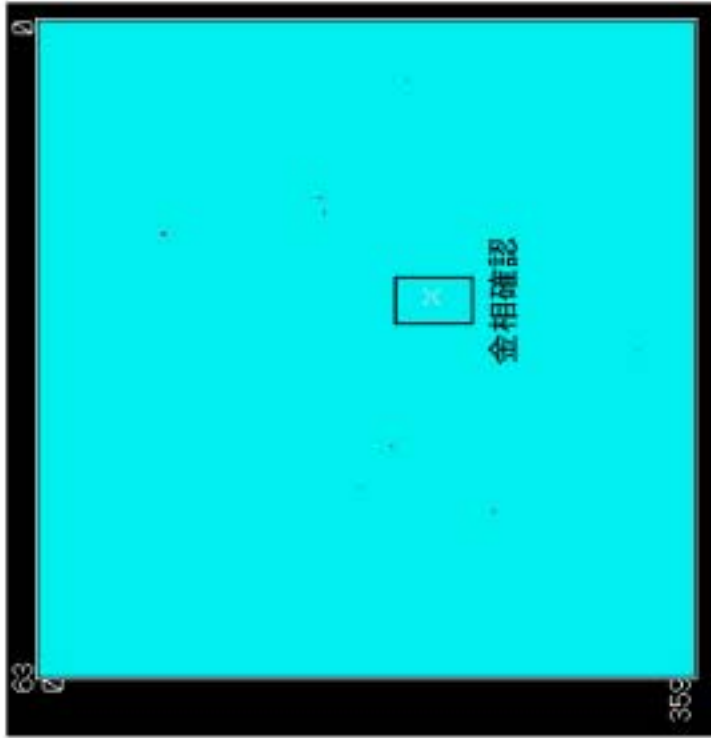
図-10.4 は、首振斜角によるフェライト材被覆管の探傷平面画像であるが、偏芯入射と同様に一定レベル以上の反射エコーピーク（赤色）が表示された。そこで金相試験により確認を行った結果、写真 c に示す管部欠陥が確認された。



a: 通常の画像しきい値による探傷画像



探傷方向: 左偏芯  
偏芯量 : 1.16mm  
入射角 : 19.6°  
伝播角 : 45°

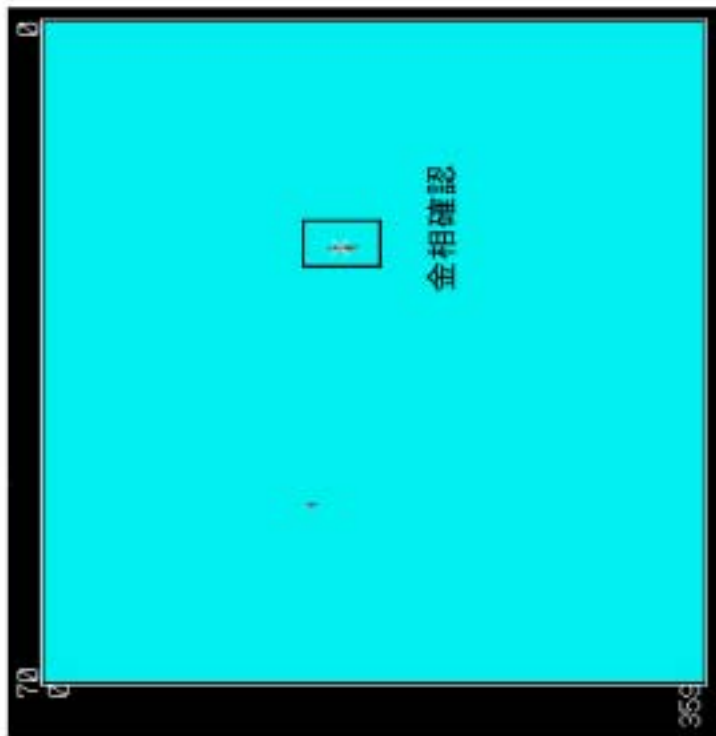


b: 黒色部(林状エコー)を画像しきい値による除去した探傷画像



c: 欠陥部金相写真 x400

図-10.3 フェライト材被覆管斜角探傷結果と欠陥の金相確認 1 (偏芯入射)



a: 黒色部(林状エコー)を画像しきい値による除去した探傷画像



図-10.4 フェライト材被覆管斜角探傷結果と欠陥の金相確認 2(首振り入射)



## 11. BOR60 用上部端栓溶接部の超音波探傷試験

上記の試験、確認を行った結果を基に参考データではあるが、BOR60 用上部端栓溶接部（マルテンサイト材：20 本、フェライト材：18 本）の超音波探傷試験を実施し、ロシアに向け出荷した。

尚、これらのデータについては、報告書「BOR-60 照射試験用上部端栓付 ODS 鋼被覆管の製造 — 溶接条件設定試験、装置改造及び端栓溶接 —」にて詳細を報告した。

## 12. 今後の課題と検討

### (1) 実試料と同一形状の STB の製作

3 項でも述べたが、STB の形状は、現在の平板状よりも実試料と同じ円筒形が望ましい。平板と円筒形では、その曲率の分だけ、中心線以外の超音波ビームは、屈折角を持って試料内部に入射することになり、超音波の音圧に微妙な差が生ずる。

また、平板と円筒では、超音波検査装置の操作モードにも違いが生ずるため、実際の検査を行う際の簡便性の点からも同一形状の STB が望ましい。

### (2) 欠陥寸法・接合長さ測定の精度の向上

#### ① 欠陥寸法・接合長さ測定の精度の向上

STB による探傷条件及び画像処理しきい値の校正の結果、欠陥寸法・接合長さの測定精度は、 $10 \mu\text{m}$  程度の誤差となった。しかし、これ以上の測定精度の向上を考える場合、超音波検査装置の性能を上げる必要がある。

通常、超音波による寸法測定（外径、肉厚等）の誤差は、 $2 \sim 3 \mu\text{m}$  程度と言われているが、これは、材料内での超音波の伝播時間を計測し、寸法換算するため、校正値が適正であれば、その測定精度を担保できる。しかし、本装置は、探触子を移動させるパルスモーターの読み取り値により寸法を測定するため、パルスモーターの最小送りピッチ： $5 \mu\text{m}$  が、寸法測定の最小分解能となってしまふ。同様に画像処理においてもマトリックスの構成が、 $5 \mu\text{m}/$ 目盛となるため、図-11.1 に示すように欠陥の位置が画像処理のマトリックス上に配置されていれば、その誤差は、小さくなるが、欠陥がマトリックスを跨る場合、欠陥の両端で画像処理され、実測との誤差を大きくすることとなる。

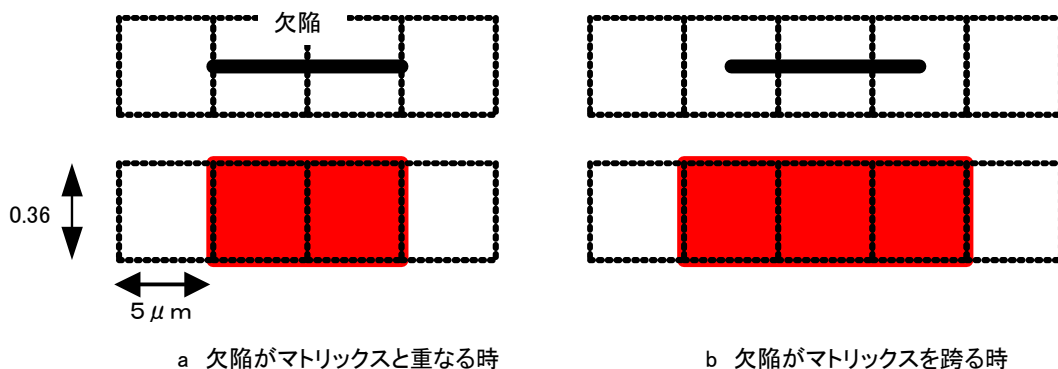


図-11.1 画像処理による実測寸法との誤差要因

また、探傷の開始位置の決定は、端栓端のエッジエコーを利用している。しかし、エッジエコーは、試料毎の端栓端の状態によりバラツキが生ずるため、開始点の判定にズレを生み、測定精度に影響を与える要因となる。したがって、この測定開始点の決定についても検討を行う必要がある。

## ② 接合長さ測定のための端栓側接合境界の確認

写真-11.1に示すように抵抗溶接による実際の接合長さは、B-C点の長さとなる。しかも、接合境界点であるB点は、抵抗溶接時に端栓、被覆管の硬さ等の影響を受け、材料により前後に移動するため、B-C点間の寸法は、A-C点間の寸法に依存しない。従って、B点の検出が、接合長さを非破壊で測るために不可欠であるが、B点は、外観上も超音波エコー上も特別な変化が認められないため、B点を現状の非破壊検査で特定することは極めて難しい。

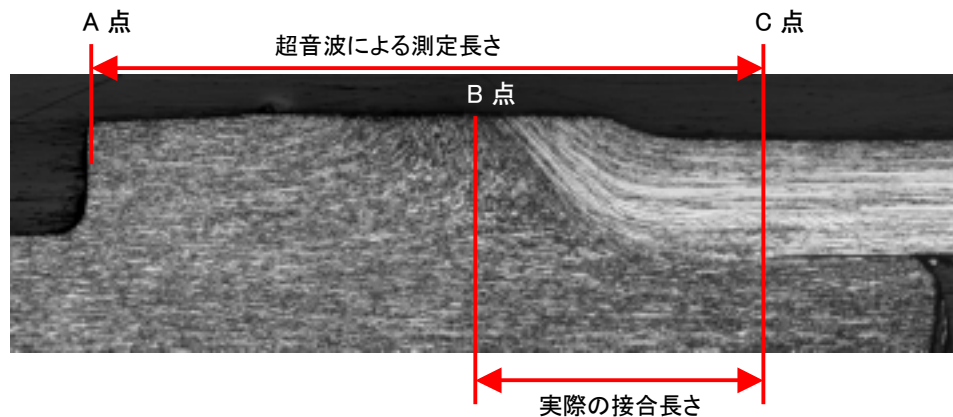


写真-11.1 抵抗溶接部の実際の接合長さと超音波による測定位置

そこでB点を決定する方法として超音波で測定したA-C点寸法と抵抗溶接装置から得られるデータ（変位量等）による接合長さを算出法についても検討を行う必要がある。

## (3) 表面層付近の欠陥の検出

2項でも述べたように抵抗溶接部の超音波探傷方法として垂直探傷法を用いている。超音波の反射や屈折は、光と同じ性質を持つため、垂直に発振された超音波は、試料表面にあたった時に表面波として探触子に帰る。超音波の反射は、隣接する2つの物質の音響インピーダンス（密度×音速）により決定するため、水中で発振された超音波の約94%が試料表面で反射されることになる。従って、表面波は、比較的大きな波形となるため、その幅分は欠陥検出用のゲートをずらす必要が生じ、そのゲートのズレ分が、探傷不感帯となってしまふ。抵抗溶接部に発生する欠陥は、溶接のメカニズム上、接合開始点近傍となるが、被覆管中の欠陥が溶接部位に残存した場合等、表面層近くに欠陥がある場合、欠陥の検出が難しくなる。

この問題に対処する方法として、斜角探傷法の併用が考えられる。斜角探傷法の場合、図-10.2に示すように発振した音波が角度を持って表面に当たるため、表面波の影響を受けることはない。その反面、探触子のビーム入射位置が特定しづらく、欠陥までのビーム路程が内部の屈折角となるため、欠陥の位置を特定することが難しくなる。従って、垂直探傷と機械的に検出位置が同じになる探触子ホルダーを用いる等、垂直探傷との併用法について検討を行う必要がある。又、図-10.3に示す超音波の送受信を分離し、表面層付近の探傷を行うために特化した探触法（タンデム法）についても検討を試みる必要がある。

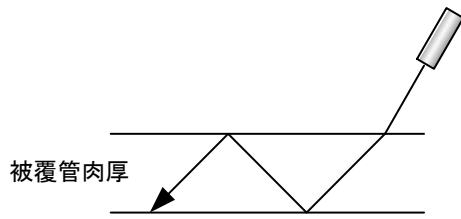


図-11.2 斜角探傷の超音波の伝播

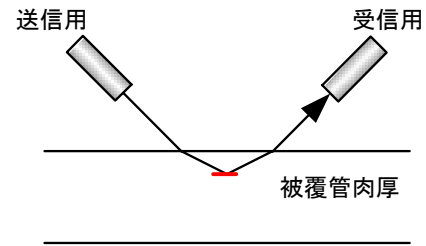


図-11.3 タンデム法の概略図

#### (4) 欠陥の分離

現状の探傷方法では、接合開始点に別種の微細な欠陥が、混在すると画像処理上、この欠陥を識別判定することは難しい。特にフェライト材の場合、8項でも述べたようにマルテンサイトに比べ接合開始点の凹凸が激しいため、欠陥の識別が難しくなる。

欠陥の分離については、(3)項と同様に斜角探傷法を用いることである程度、可能であると考ええるが、欠陥の方向、幅等が、接合開始点と完全に重なった場合の分離は、現状の探傷・判定方式では難しく、新たな方法について試験、検討を行う必要がある。

#### (5) 欠陥パターンの抽出と強度データの収集

現在、溶接試験と探傷試験の結果より特異点を金相と対比することで、抵抗溶接部に発生する欠陥パターンを抽出しているが、品質保証のためには、抵抗溶接部の検査基準を決定する必要がある。現在、欠陥の種別、寸法と溶接部の強度については、そのデータが取れておらず、特異点の有無で判定を行っているが、(4)項のような微細欠陥の混在を考える上でも欠陥の種別、寸法と強度の関係を明確にする必要がある。

これらの試験方法としては、現在、引張試験、内圧バースト試験等短時間強度については、十分な強度を得ていることや抵抗溶接部の形状、欠陥の発生箇所から考えると内圧クリープ試験による強度評価が適当であると考ええる。

#### (6) 被覆管の受入探傷検査

溶接部の品質保証法の確立とは、直接関係はないが、8項で記したようにフェライト材の ODS 被覆管は、その組織の影響から林状エコーの発生が極めて多く、現状の被覆管検査ラインでの受入検査は、メーカー側と同様の結果（再検率の増加、欠陥エコーの識別不可等）となることが予想される。今回、9項で行った被覆管端部の超音波検査において被覆管中の欠陥の抽出に成功したが、これは、溶接部検査装置の持つ性能に負うところが大きい。まず、センサーである探触子であるが、溶接部検査装置の発振周波数は、被覆管検査用の3～4倍の広域を持ち、ビーム径は、 $1/3 \sim 1/5$ と小さくなっている。しかし、検査時間は、被覆管検査ラインが、 $1000 \sim 3000$  mm/分の速度で処理できるのに対し、溶接部検査装置は、ピッチ制御であるため、 $2 \sim 3$  mm/分（探触子送りピッチを  $0.05 \sim 0.1$  mmに設定）となる。このように溶接部検査装置の場合、密度の高い超音波検査が可能であると同時に画像処理により一定レベルのエコーを抽出表示することが可能であるため、被覆管中の微細な欠陥の識別が行えと考えられる。（その反面、探傷時間は長くなっている。）今回、BOR-60用の被覆管は、常陽やもんじゅと比較して被覆管探傷スペックが大きいにも関わらず探傷に影響を及ぼしていることから ODS 鋼被覆管（特にフェライト材）の受入検査についても今後の検討が必要である。

## 11. 結言

現在までの試験結果より超音波検査法は、抵抗溶接部の検査法として十分な性能を有している。また、試作した **STB** についても探傷条件及び欠陥検出能の保証、探傷精度の向上等が確認されており、品質保証を行うための基本的な部分については、確立されてきたと思われる。しかし、**STB** の形状、接合長さの測定、探傷不感帯の解決等、何点かの技術的課題も残しており、今後、早急に試験を行う必要がある。

今回、参考データとしてではあるが、初めて超音波による溶接部検査を行い、ロシア BOR-60 炉に装荷することとなった。今回の基準は、ロシア側の要求によるものであるが、今後、国内（常陽）での照射試験を視野に入れ、超音波という新しい検査法の導入を考えた場合、局への申請、ヒアリングに対応するためには、より細部にわたるデータとその証明が要求されることは明白であり、それに対応することを念頭にデータ収集、解析が必要と思われる。特に溶接部に発生する欠陥については、新たな欠陥パターンにその都度、対応する必要があり、欠陥と機械的強度の関係を明確にすることが、品質保証法確立のための最も大きな課題である。

また、超音波の観点から見たフェライト材の ODS 鋼被覆管は、従来の被覆管材料（SUS316 相当鋼等）よりも、林状エコーの影響が大きく、被覆管単体の製品検査を行う上で、探傷条件、欠陥の識別等超音波上の課題が多い。従って、今後、被覆管の受入検査方法についても検討・試験を行い、対策を講じる必要がある。

## 12. 参考文献

- (1) 日本非破壊検査協会編：超音波探傷試験 A 1976、日本非破壊検査協会（1977）
- (2) 日本クラウトクレーマー株式会社翻訳・編：超音波材料検査の手引（ 年）
- (3) 関 正之，他：“BOR-60 照射試験用上部端栓付 ODS 鋼被覆管の製造 —溶接条件設定試験、装置改造及び端栓溶接—”、JNC TN8430 2003-004（2003）