

# 高靱性電縫管の溶接品質 オンライン検査システム

JFEスチール株式会社

代表取締役社長 林田 英治

|            |         |         |       |
|------------|---------|---------|-------|
| JFEスチール(株) | スチール研究所 | 計測制御研究部 | 飯塚 幸理 |
| JFEスチール(株) | スチール研究所 | 計測制御研究部 | 松井 穰  |
| JFEスチール(株) | スチール研究所 | 鋼管鋳物研究部 | 岡部 能知 |
| JFEスチール(株) | 知多製造所   | 製造部     | 鈴木 雅仁 |
| JFEスチール(株) | 東日本製鉄所  | 商品技術部   | 佐藤 昭夫 |
| JFEスチール(株) | 知多製造所   | 商品技術部   | 井上 智弘 |
| JFEスチール(株) | 東日本製鉄所  | 制御部     | 岡 賢   |

## はじめに

電縫鋼管は、熱延鋼帯を連続的に管状に成形しながら高周波電気抵抗溶接を行って製造する鋼管である。各種配管から建築土木分野まで広く用いられている。継目無鋼管やUOE鋼管など他の製造方法による鋼管に比べ、生産性に優れ、表面肌が美麗、寸法精度が高いといった特徴を有する。このため、例えば石油や天然ガスの輸送用ラインパイプとして電縫鋼管を採用することで、敷設コスト削減が期待できる。しかし、溶接部に微小な酸化物が残留する場合があります。近年エネルギー開発が進む極地の低温下では靱性が低下するため、より高品質で信頼性の高い溶接部が求められていた。

本検査システムは、微小酸化物の分布状況

を、鋼管の製造中リアルタイムに全長にわたって評価可能とした世界初の技術である。これまで低温靱性の評価は抜き取りの破壊試験でしかできなかったが、本検査システムの確立により、低温靱性に影響する酸化物の有無を全長検査できるようになった。この結果、電縫鋼管溶接部の信頼性を飛躍的に向上し、極低温の極地環境や海底パイプラインなどへの電縫鋼管の本格採用を実現した。

## 開発のねらい

図1に電縫鋼管の製造プロセスを示す。電縫鋼管は熱延コイルを連続的に管状にロール成型し、コイルエッジ部に高周波電流を通電することで発生する抵抗熱を利用して、エッジを加熱・溶融の後、スクイズロールでアプセットして突合せ溶接で製造される鋼管である。電縫鋼

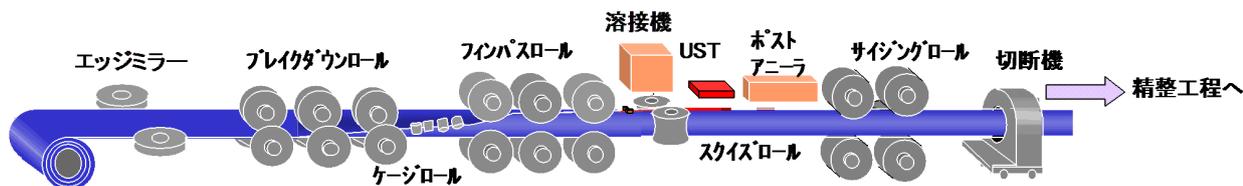


図1 電縫鋼管の製造プロセス

管は、継目無管と比較して薄肉化が可能かつ肉厚精度が良好で鋼管の肌が美麗、UOE鋼管と比べて高い生産性と高い寸法精度を有している。しかし、溶接部に微小な酸化物が残留すると、極地の低温下では靱性が低下するため、より高品質で信頼性の高い溶接部が求められていた。そこで、溶接部の低温靱性に影響を与える微小酸化物を非破壊で検出可能とする技術の確立を目指した。個々の大きさが数 $\mu\text{m}$ という非常に微小な酸化物の分布を検出するために、従来にはない高い感度を有する超音波探傷法を開発し、さらに製造中のオンライン化を図り、全長にわたる溶接品質検査を実現した。

## 装置の概要

図2に本検査システムの全体構成を示す。本検査システムは、微小酸化物を検出するためのフェーズドアレイ超音波探傷装置と、溶接直後オンライン探傷するための設備であるシーム検出・追従装置と水冷装置などからなる。これらの装置は、①検出対象についての基礎研究、②フェーズドアレイ超音波探傷による検出技術開発、③オンライン適用システム化開発を経て実現した。以下にその詳細を述べる。

### 1) 検出対象についての基礎研究

酸化物の検出により溶接品質を保証するためには、低温靱性に影響を与える時の酸化物の状態を検出しなければならない。そこで、溶接部から切り出したサンプルを準備し、点集束超音波探触子を用いた精密Cスキャンにより調査を行った。その結果、図3に示すように、電縫溶接部には微小酸化物が散在している形態があり、その密度の高い部分が低温靱性に影響していることを発見した。さらに、超音波を $1\text{mm}^2$ 程度に集束させるとエコー高さが吸収エネルギー

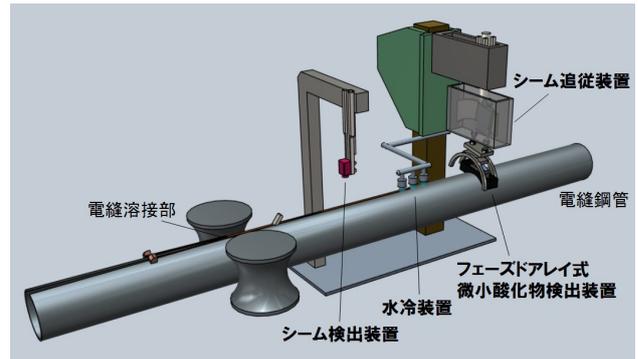


図2 溶接品質オンライン検査システムの構成

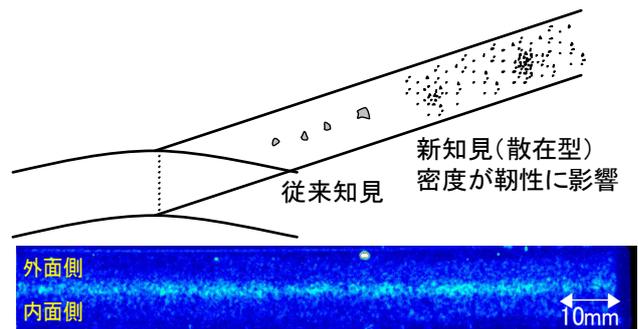


図3 電縫鋼管溶接部の微小酸化物

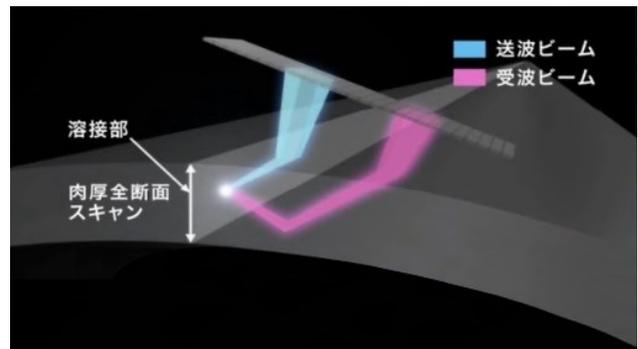


図4 フェーズドアレイによる微小酸化物検出

と相関を持つことを見出し、低温靱性を評価可能とする超音波探傷条件設定を確立した。

### 2) フェーズドアレイ超音波探傷による検出技術

溶接部を切り出すことなく鋼管のまま上記集束条件の検査を行うため、フェーズドアレイ技術を活用した。複数の振動子から位相を少しずつずらしながら送信することで、 $1\text{mm}^2$ に集束した点集束ビームを実現した。探傷面が垂直であることを考慮し、図4に示すように、正反射方向で受信を行うことで感度の向上を図り、送

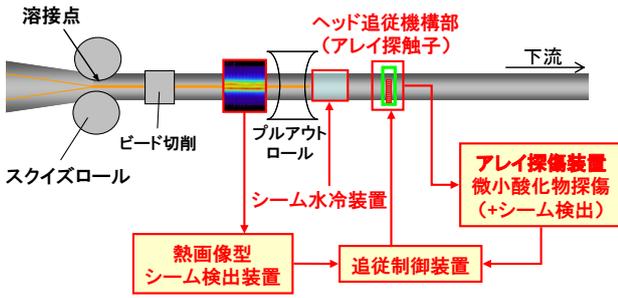


図5 シーム追従技術の構成

信位置と受信位置を適切に切り替えることによって溶接部の内面から外面までを走査するようにした。

### 3) オンライン適用システム化

製造中のオンライン全長検査を行うためには、造管方向に対して左右に数10mmの範囲で変動するシーム位置にアレイ探触子を追従させる必要がある。そこで、図5に示す構成の高精度シーム追従技術を開発した。熱画像を用いたシーム検出装置により、入熱分布を基にシーム位置を計測し、追従制御装置によりアレイ探触子の位置をシームに追従させる。途中のシーム水冷装置は、超音波の伝達に用いる水の沸騰を防ぐために設けている。シーム検出装置とアレイ探触子は一体化した構造が取れないため、両者の位置合わせに超音波信号を補助的に用いるようにし、安定したオンライン検査を達成した。

### 技術上の特徴

溶接部の超音波探傷は従来から実用されているが、検出可能な欠陥は溶込不良や割れなどの大きさがmmオーダーのものであった。本検査システムは、検出対象が数 $\mu\text{m}$ の微小酸化物であり、低温靱性に影響を与える状態を検出可能としたことにより溶接品質の検査を実現した従来に類を見ない技術である。従来の超音波探傷装置との比較を表1に示す。

表1 従来の超音波探傷装置との比較

|         | 従来装置                | 本装置                |
|---------|---------------------|--------------------|
| 検出対象    | 溶込不良や割れ<br>(mmオーダー) | 溶接品質<br>(微小酸化物)    |
| 超音波探触子  | 単一型                 | アレイ型               |
| 超音波ビーム  | 非集束                 | 点集束                |
| 探傷法     | 送受同一位置              | 正反射方向受信            |
| 感度      | -                   | 従来比10倍以上           |
| シーム追従精度 | $\pm 5\text{mm}$    | $\pm 1.5\text{mm}$ |
| シーム追従方式 | 光学式                 | 熱画像式               |

微小酸化物を検出できるようにするために、アレイ型探触子を用いた点集束化と正反射方向での受信配置を行うビーム制御により、従来の超音波探傷装置に比べて10倍以上の高感度化を得ている。点集束ビームでは、より高精度なシーム追従が必要とされるため、熱画像式のシーム追従技術を開発した。

### 実用上の効果

図6はシャルピー衝撃試験との対比を行った例である。フェーズドアレイによる微小酸化物検出装置のエコー高さとシャルピー吸収エネルギーとは良く対応しており、エコー高さから低温靱性の評価が可能である。

図7は製造中のオンライン試験例であり、入熱を変化させた時の酸化物密度変化を検出した例である。酸化物の発生状況が製造中リアルタイムに検出・マッピング表示可能である。

低温靱性の評価は、従来は抜き取りのシャルピー衝撃試験が必要だったが、このように微小酸化物の検出がリアルタイムでできるようになったことで、電縫溶接技術の改善にも大きな効果を発揮した。本検査システムの開発に並行して、 $-50^{\circ}\text{C}$ 以下の極低温下における靱性確保を可能とした「低温靱性に優れた電縫鋼管」が

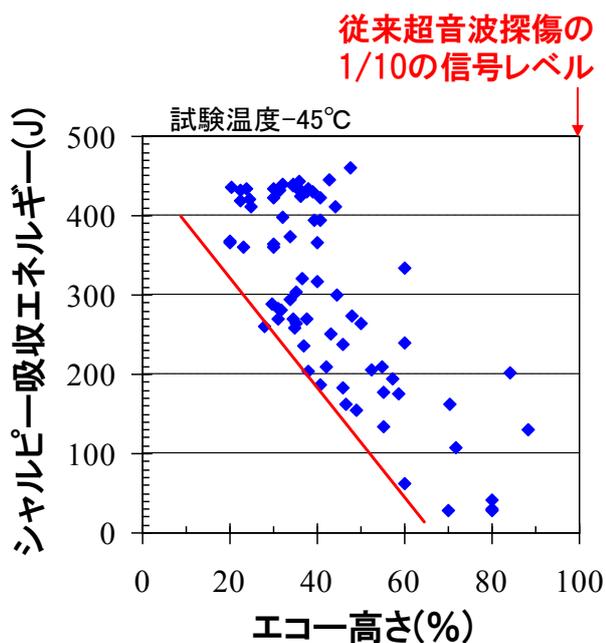


図6 シャルピー衝撃試験との対比結果

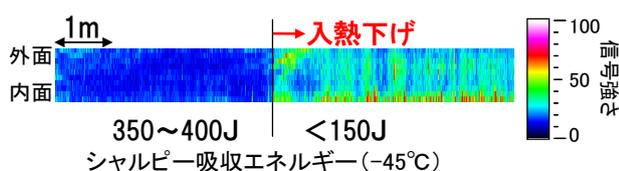


図7 微小酸化物発生状況のオンライン試験例

開発された。本検査システムによる全長検査の実現と製造技術の進歩により、電縫鋼管の信頼性を飛躍的に向上することができ、極低温の極地環境や海底パイプラインなどへの採用が進んでいる。

## 知的財産権の状況

本検査システムに関する主要な特許登録は下記の通りである。

① 日本国特許第4544240号

名称：管体の超音波探傷装置および超音波探傷方法

概要：フェーズドアレイ技術を用いた点集束ビームによる溶接部探傷法

② 日本国特許第4910770号

名称：管体の超音波探傷装置および超音波探傷方法

概要：点集束ビームによる微小酸化物検出方法

③ 日本国特許第5076984号

名称：電縫管の超音波探傷方法及び超音波探傷装置ならびに製造方法

概要：熱画像によるシーム検出・追従技術

## むすび

電縫鋼管の溶接部に対する長年にわたる研究と装置化開発の成果として本検査システムの開発に成功し、電縫鋼管の信頼性向上と適用領域拡大につながった。

今後も独自の設備・技術・商品の開発を通じて、お客様の高度化するニーズにお応えするべく努力を重ねていく所存である。