

X 線画像処理によるボイラのき裂評価技術

Crack Depth Evaluation for Boiler Tubes using X-ray Image Analysis



取 違 正 明
Masaaki Torichigai

松 本 拓 俊
Hirotooshi Matsumoto

宮 澤 敬 之
Takeshi Miyazawa

茶 園 聡
Satoshi Chaen

和 田 恭 子
Kyoko Wada

ボイラ火炉壁の付着金物溶接部の裏側(管内面側)に発生する腐食疲労き裂を検査する有効な手段がなかったため、従来はサンプル抜管による調査を行っていた。そのため、評価に時間が掛かり、抜管と復旧にコストを要していた。そこで、近年急速に進歩してきた X 線検査に着目し、デジタル化した X 線像を画像処理することにより腐食疲労き裂など種々のき裂を検出し、健全部とき裂部の輝度差からき裂深さを評価する技術を確立した。これにより、現場で取替えの判断が可能になり、抜管と復旧が必要ないので評価費用も格段に安くなった。

1. はじめに

デジタル X 線は、フィルムに替わる検出器の種類により X 線 TV (イメージインテンシファイヤ付 TV カメラ)、フラットパネル半導体像検出器 (Flat Panel Detector: FPD)、輝尽性蛍光体像検出器 (イメージングプレート利用コンピュータドラジオグラフィ: CR) に分けられる。デジタル X 線の最大の利点は、結果判定がリアルタイム若しくは短時間でできることであり、画像の保存や伝達も容易である。さらに、検出器の性能が向上したこと及びコンピュータの進歩に伴って画像処理技術が発達したことにより、分解能も X 線フィルムと遜色のないレベルになってきたと言われており近年急速に普及してきた。このようなことから、著者らも火力プラントに発生する種々のき裂を対象にデジタル X 線の適用を試みたが、検出限界の点ではフィルム法が勝っていた。

そこで、X 線像をデジタル化し画像処理を行うことにより、ボイラ炉壁管の付着金物溶接部の裏側(管内面側)に発生する目に見えないき裂や同じく炉壁管の炉内側クラウン部(頂部)に発生する V 字状の溝状腐食などの深さを定量評価する技術を確立したので紹介する。

2. CR 法とフィルム法の比較

図1は、蒸発管 ($\phi 28.6 \times t6.5\text{mm}$) の外面に加工した幅 0.1mm、深さ 0.5~2.0mm のスリットを CR (Computed Radiography) 法とフィルム法で撮影し、これらの検出限界を比較したものである。図のように、フィルム法は深さ 0.5mm のスリットまで検出可能であったが、CR 法は深さ 0.5mm のスリットを検出できなかった。また、画像自体も CR 法よりフィルム法の方が鮮明であった。

3. 腐食疲労き裂への適用

ボイラを長時間運転すると炉壁管の付着金物溶接部の内面に腐食疲労き裂が発生する。このき裂は、図2に示すように溶接ビードの裏側に発生するため、超音波探触子が当てられる一部の部位について超音波探傷検査が実施されているものの有効な検査方法がない。

このようなことから、X線による腐食疲労き裂の検出と深さの評価法について検討した。

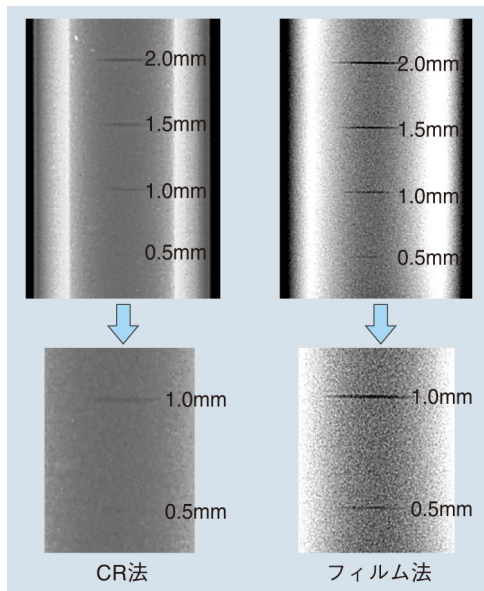


図1 CR法とフィルム法の比較

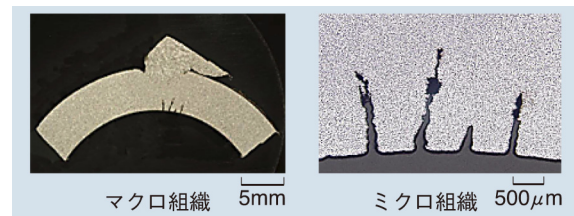


図2 腐食疲労き裂の一例

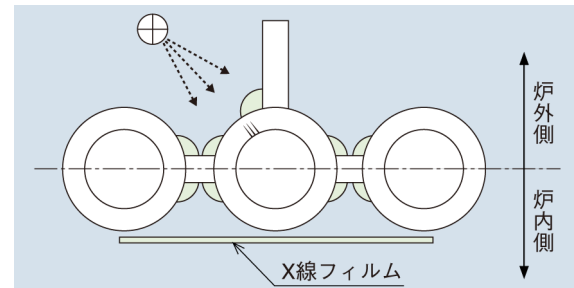


図3 X線検査の要領

3.1 検査要領と試験片

図3にX線検査の要領を示す。炉内側の管表面にX線フィルムを貼付けて炉外側(付着金物側)からX線を照射する。

図4と図5に試験片の外観を示す。φ28.6×t6.5mmの蒸発管に溶接ビードを模擬した曲率半径8mm、高さ4, 5, 6, 7mmの金物をTIG溶接し、その内面に特殊な刃物を使用して幅0.1mm、深さ0.4～2.0mmのスリットを加工した。ボイラ炉壁管に発生する腐食疲労き裂の開口幅は0.1～0.3mm程度であるので、試験片に加工した幅0.1mmのスリットがX線で検出できれば炉壁管の腐食疲労き裂は検出可能である。

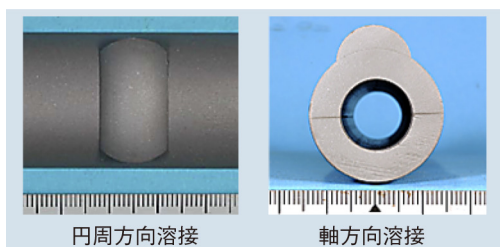


図4 試験片の外観

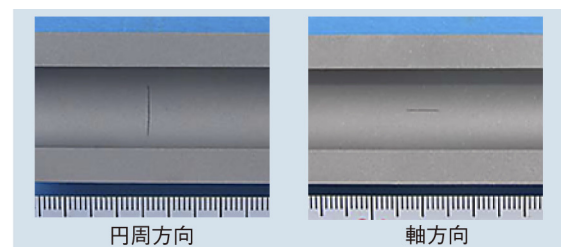


図5 人工スリットの外観(代表例)

3.2 試験結果

表1に軸方向スリットの試験結果を示す。スムーズ管及びライフル管とも同様の結果であり、ビード高さ5mm以下では深さ0.4mmのスリットが検出可能であった。また、ビード高さ7mm以下であれば、両方の管共深さ0.5mmのスリットが検出可能であった。

表2に周方向スリットの試験結果を示す。スムーズ管及びライフル管共同様の結果であり、ビード高さ6mm以下では深さ0.4mmのスリットが検出可能であった。また、ビード高さ7mm以下であれば、両方の管共深さ0.5mmのスリットが検出可能であった。

表1 軸方向スリットの試験結果

金物の高さ (ビード高さ)	スリット深さ (mm)			
	スムーズ管		ライフル管	
	0.4	0.5	0.4	0.5
4 mm	○	○	○	○
5 mm	○	○	○	○
6 mm	×	○	×	○
7 mm	×	○	×	○

表2 周方向スリットの試験結果

金物の高さ (ビード高さ)	スリット深さ (mm)			
	スムーズ管		ライフル管	
	0.4	0.5	0.4	0.5
4 mm	○	○	○	○
5 mm	○	○	○	○
6 mm	×	○	*○	○
7 mm	×	○	×	○

※画像処理後の画像を本文中に掲載

図6に画像処理により最適化されたスリット画像を示す。この画像は、ビード高さ 6mm の周方向溶接部の内面に加工した幅 0.1mm、深さ 0.4mm のスリットの X 線像である。強調したい範囲(見たい範囲)を選択し、その範囲のコントラスト階調(ガンマ値)を狭くしたり、広くしたり、トーンカーブにより明るさとコントラストを調整したりしてきずを浮き出させたものである。これにより、人間の目では確認しづらいきずも見つけることができる。

図7に実缶に発生した腐食疲労き裂の X 線像を示す。図のように、素管部と溶接部では輝度が異なるため、同時に観察することは難しい。そのため、画像処理により素管部と溶接部をそれぞれ最適化することにより、腐食疲労き裂の発生状況を詳細に観察することができる。

3.3 き裂深さの評価

X 線フィルムの画像をデジタル化し健全部とき裂部の輝度差を測定することによりき裂深さを評価することができる。図8は蒸発管 ($\phi 28.6 \times t 6.5 \text{mm}$) の外面の円周方向に加工した幅 0.1mm、深さ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0mm の人工スリットの輝度測定結果である。この結果は、選択した分析範囲(写真中に点線で示す範囲)の管軸方向の輝度変化を示したもので、横軸が管軸方向の選択範囲、縦軸が輝度を示している。図のように、管軸中心付近を選択し、軸方向の輝度分布をとるとスリットの深さに応じて輝度変化しており、輝度の変化量とき裂深さの関係を求めると、き裂深さを評価することができる。

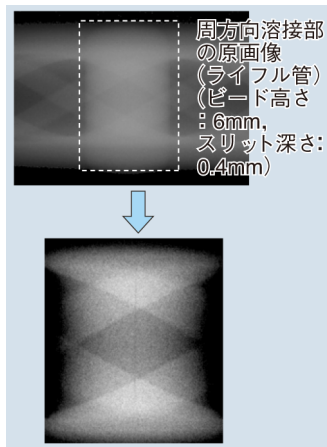


図6 最適化された画像

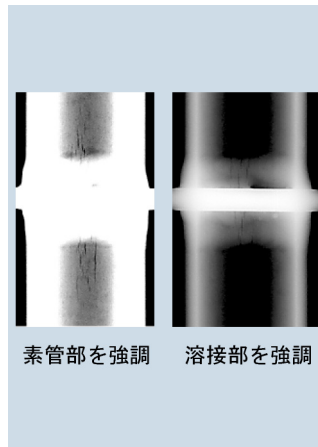


図7 腐食疲労き裂の X 線像

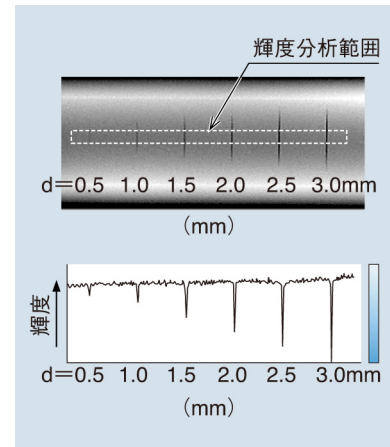


図8 管軸方向の輝度測定結果

図9は円周方向溶接部の内面に加工した幅 0.1mm、深さ 0.5, 1.0, 1.5mm (3種類) の円周方向スリットの輝度測定結果である。図8と同様の方法で管軸方向の輝度分布をとると溶接ビードの曲率に沿って輝度変化していることが分かる。また、溶接ビード中央の管内面側(裏側)に円周方向スリットを加工しているので、溶接ビード中央にスリット深さに対応した輝度変化が認められており、溶接部に発生したきずについても深さを評価することができる。

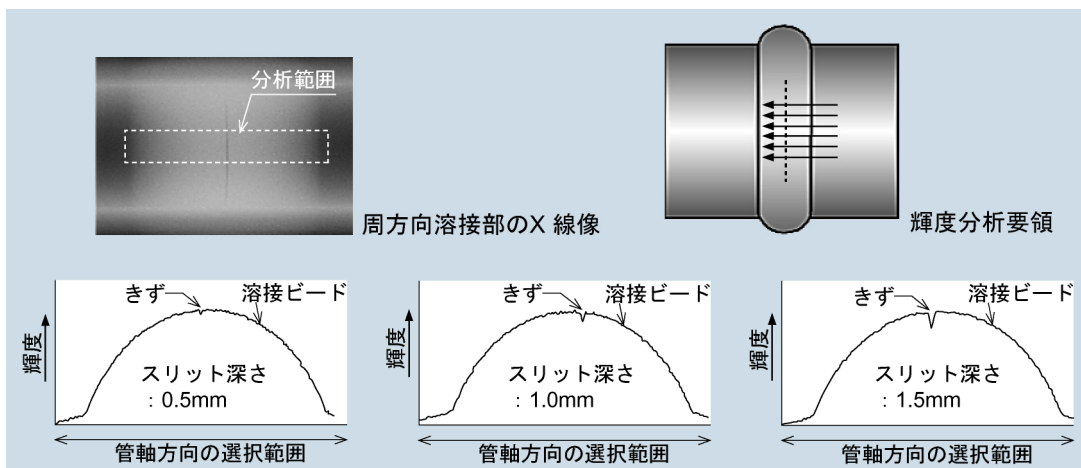


図9 きず深さの評価

蒸発管 ($\phi 28.6 \times t6.5\text{mm}$) の素管部とビード高さ 4, 5, 6, 7mm の軸方向及び周方向溶接部について、スリット深さと輝度差の関係を求め図10と図11に示した。これらの図から、軸方向及び周方向溶接部共溶接ビードが高くなると輝度差が小さくなるが、スリット深さと輝度差には一定の関係が認められる。そこで、軸方向及び周方向溶接部について、スリット深さによる輝度変化と X 線の透過厚さ(厚さ $\times 2$ +ビード高さ)の関係を求め、腐食疲労き裂の深さを評価できるようにした。図12は溶接部の内面に加工したスリットの評価精度で、軸方向及び円周方向溶接部共、きずの深さを $\pm 0.3\text{mm}$ の精度で評価することができる。

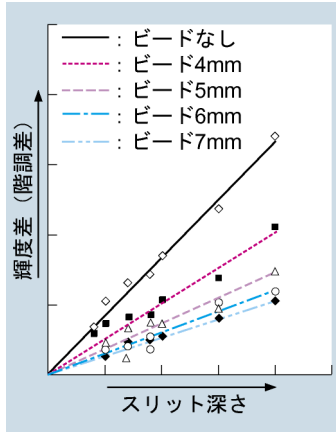


図10 スリット深さと輝度差の関係(軸方向溶接部)

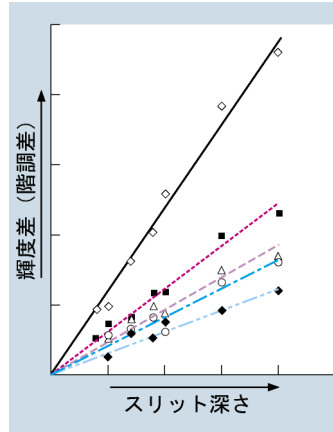


図11 スリット深さと輝度差の関係(周方向溶接部)

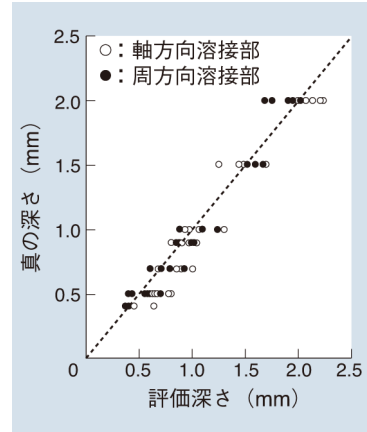


図12 管内面きずの評価精度

4. 溝状腐食への適用

石炭焚きボイラの火炉蒸発管の表面に発生する溝状腐食の外観と断面状況を図13に示す。溝状腐食深さの評価については、種々の検査方法が適用されてきたが、き裂が密集しているため十分な評価ができなかった。このようなことから、X 線による溝状腐食深さの評価について検討した。

4.1 検出限界

図14は、実機溝状腐食による検出限界確認結果である。図に示す溝状腐食は軽微なもので、破面調査の結果、き裂 A と き裂 B の深さは、0.53mm と 0.57mm であった。外観と X 線画像を比較して分かるように、X 線フィルムをデジタル化し画像処理することにより、き裂 A と き裂 B が検出できており、深さ 0.5mm 以上の溝状腐食であれば十分に検出可能である。

4.2 溝状腐食深さの評価

腐食疲労き裂と同様、分析範囲を選択し管軸方向(き裂と直交する方向)の輝度変化を測定すると、溝状腐食の深さに応じて輝度が変化するので、溝状腐食の深さを求めることができる。

図15に溝状腐食の評価精度を示した。図のように、健全部とき裂部の輝度差を測定することにより、 $\pm 0.3\text{mm}$ の精度で溝状腐食深さを評価可能である。

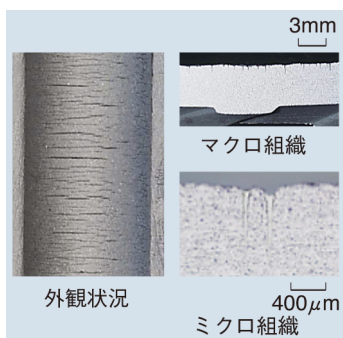


図13 溝状腐食の外観と断面状況

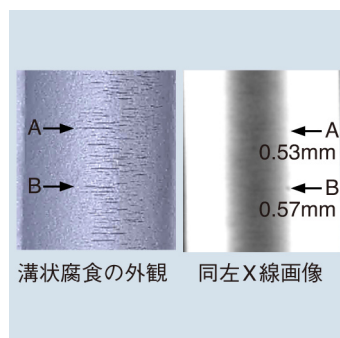


図14 溝状腐食の検出限界

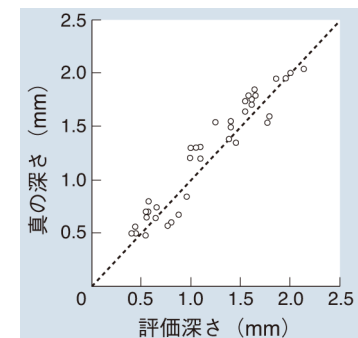


図15 溝状腐食の評価精度

5. 孔食の評価

横置型パネルの下面側に孔食が発生する場合があります。孔食深さをX線で評価した。図16は孔食評価用試験片のX線画像と孔食部(人工きず)の輝度測定結果で、孔食の深さに応じて輝度に変化していることが分かる。したがって、評価対象伝熱管と同一仕様の試験片で孔食深さと輝度差の関係を求めておけば孔食深さを評価することができる。

6. 適用実績

表3に実機への適用実績を示す。評価対象は、火炉壁管の付着金溶接部の裏側(管内面側)に発生する腐食疲労き裂やき裂が無数に発生するために他の検査法では評価が困難な溝状腐食、幅広フィンに発生した熱疲労き裂、ドレン配管に発生した熱衝撃によるき裂及び横置型パネルに発生した孔食であり、平成18年3月実機適用後、平成21年3月現在、合計11缶に適用してきた。

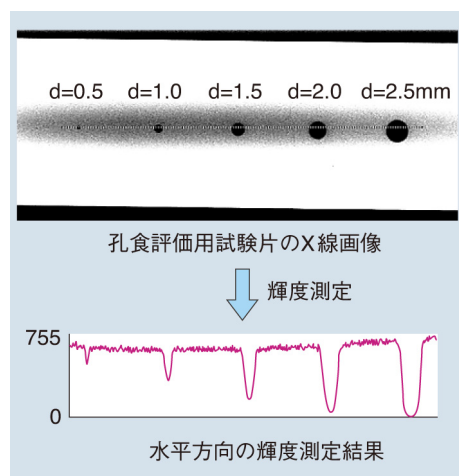


図16 孔食深さの評価

表3 実機への適用実績

	評価対象	缶数
①	火炉壁腐食疲労き裂調査	4缶
②	火炉壁溝状腐食評価	3缶
③	火炉壁腐食疲労き裂調査	1缶
④	ドレン配管熱衝撃き裂評価	1缶
⑤	再熱器孔食深さ評価	1缶
⑥	過熱器・再熱器溝状腐食評価	1缶
	(合計)	11缶

7. まとめ

本報では、ボイラ伝熱管に発生するき裂や種々のきずを対象にX線による深さの評価法について紹介した。今後は、これらの成果をもとに他製品に発生するき裂やきずについても同様の取り組みを実施し、本技術の適用拡大を図っていく所存である。

参考文献

- (1) 放射線イメージング技術の最前線“X線による非破壊検査”，RADIOISOTOPES, 52, 2003
- (2) 放射線画像処理法の概要と配管検査への適用，非破壊検査 55 巻 9 号(2006)

執筆者紹介



取達 正明
技術本部
長崎研究所
サービス技術課
主席



松本 拓俊
技術本部
長崎研究所
サービス技術課



宮澤 敬之
原動機事業本部
ボイラ統括技術部
ボイラ設計課



茶園 聡
技術本部
高砂研究所
電子・光研究室



和田 恭子
技術本部
先進技術研究
センター
プロジェクトグループ