

欠陥を有する配管への I H S I の有効性確認

Confirmation test of IHSI for pipe with crack

(株) 東 芝 笹山 隆生 Takao SASAYAMA
 (株) I H I 本郷 智 Satoshi HONGO

This study is confirmed IHSI which is one of preventive maintenance techniques for stress corrosion cracking, can be applied to pipe with crack. The results were applicable under certain conditions by the test which was used pipe with 3 / 8 depth crack. Following four items were confirmed by this test. 1. Not affect for cracks and joints, 2. Residual stress would be improved with the tip of the crack and can be suppressed with crack growth, 3. Residual stress would be improved around the crack, 4. It can be effective for preventing SCC at non crack area.

Keywords: Crack, IHSI, Stress Improve, SCC, Residual Stress, Preventive maintenance

1. はじめに

沸騰水型原子炉（BWR）の原子炉再循環系配管等の応力腐食割れ（以下 SCC と称す）の予防保全技術の一つである高周波誘導加熱応力改善法（Induction Heating Stress Improvement 以下 IHSI と称す）は、過去に確性試験等において溶接残留応力を改善する効果が確認され、多くのプラントに適用されている。この予防保全工法としての IHSI は、欠陥が存在しない状態で適用することとしており、事前検査にて欠陥が確認された場合には、現状、継続使用・補修・取替の選択肢の中から状況に応じた IHSI 以外の手法が適用されている。欠陥が存在する状態で IHSI を施工することで欠陥の進展を抑制させる効果が確認される場合には、補修工法としての選択肢が増え、作業環境等に配慮した補修工法のひとつとして適用できることから、プラントの保全、補修計画を合理的に検討できる。

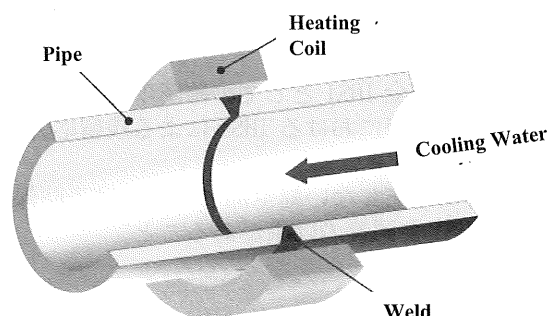
以上の背景より、欠陥を有する配管への IHSI（以下対策 IHSI と称す）の有効性を確認した。

2. IHSI の概要

IHSI は配管外面側に高周波加熱コイルを設置して加熱を行い、内面は水冷することで板厚方向に温度分布を形成し、その発生する熱応力で配管内面の残留応力を改善する工法である。

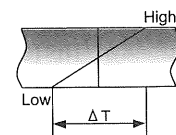
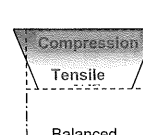
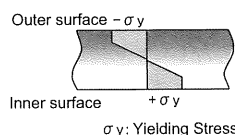
IHSI は Fig.1 に示す様に、板厚内の温度分布がほぼ直線的になるように施工条件：エッセンシャルバリアブルスを設定し加熱・冷却を行う。IHSI の加熱中の配管内面側は引張応力となり、加熱終了後の冷却過程で配管内面側では圧縮応力場が形成される。さらに

欠陥を有する場合は、IHSI 加熱中の配管内面側の引張応力により、欠陥先端部も引張荷重を受け、延性破壊には至らない程度の塑性変形を与えられて欠陥先端部は鈍化する。加熱終了後には欠陥先端部に圧縮応力場が形成される。これらの効果により、欠陥の進展が抑制されるものである。

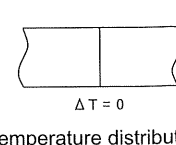
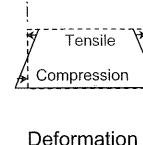
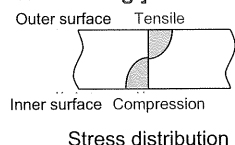


(1) Concept of IHSI

[Under Heating]



[After Cooling]



(2) Stress deformation and Temperature distributions Induced by IHSI

Fig.1 Concept of IHSI

連絡先: 笹山 隆生

(株) 東 芝 原子力プラント設計部
 〒235-8523 横浜市磯子区新杉田町 8
 E-mail: takao.sasayama@toshiba.co.jp

3. 予防保全 IHSI と対策 IHSI の差異

従来より施工されている予防保全工法としての IHSI と本試験にて検討した対策工法としての IHSI の差異を以下に示す。

(1) 予防保全工法としての IHSI

予防保全工法としての IHSI は、SCC 発生要因の 1 つである管内面の引張応力を改善させ、SCC 発生を防止することを目的としている。従って、欠陥が存在しないことを前提としており、施工前の UT 検査で欠陥の存在が確認された場合には施工を実施していない。尚、過去の検証で欠陥を付与した確認が行われているが、それらは UT 検出限界以下の微小な欠陥が存在した場合を想定して実施しているものである。

(2) 対策工法としての IHSI

本試験において検証を行う対策工法としての IHSI は、施工前の UT 検査において、明確にき裂の存在が確認された継手に対して施工することを想定しており、確認されたき裂の進展性を抑制させるとともに、予防保全工法としての効果も期待するものである。

4. 試験での確認項目

試験では対策工法としての IHSI 効果の確認として以下の観点に着目して検討した。

(1) 対策 IHSI 特有の確認項目

- ①き裂及び継手に対して悪影響を及ぼさないこと。
- ②き裂先端部での応力が改善され、き裂の進展性が抑制されること。

(2) 予防保全 IHSI としての確認項目

- ③き裂の近傍における IHSI による残留応力改善効果を確認する。
- ④き裂の存在しない健全部においては予防保全工法 IHSI と同等の効果があること。

5. 試験結果

5.1 対策 IHSI としての確認項目

①き裂及び継手に対して悪影響を及ぼさないことの確認

き裂を有する配管に IHSI を施行することで、き裂が IHSI 加熱中に有意に進展しないこと、材料の機械的性質に悪影響が生じてないことを試験により確認した。試験条件及び試験結果を以下に示す。

●試験条件

- ・試験体：口径 600A，厚さ 38.9mm，材質 SUS316 (LC)
- ・付与き裂の形態：EDM 初期ノッチ+疲労き裂
(深さ：3/8t，長さ：内面 90°)
- ・IHSI 条件：最高加熱温度 650°C を超える加熱を 3 回実施

(1) 断面観察結果

IHSI 施工後の付与き裂先端分の断面ミクロ観察結

果を Fig.2 に示す。

これらに示す様に、付与き裂先端部が IHSI 施工過程において延性破壊に至ったと考えられる形跡は確認されなかった。

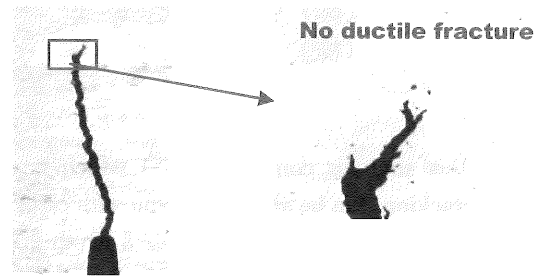


Fig.2 Cross-sectional observation of the crack tip

(2) 断面硬さ計測結果

IHSI 施工後の同付与き裂先端部の硬さ計測結果を Fig.3 に示す。

これらに示す様に、き裂先端周辺で 270~296HV 程度の硬さの領域が確認されたが、異常な硬さ上昇があることは確認されなかった。

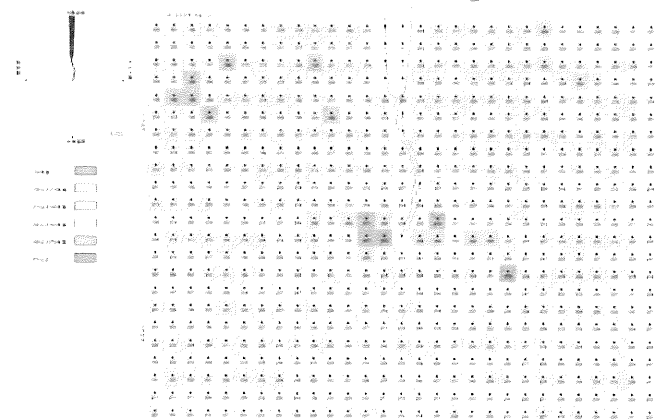


Fig.3 Hardness measurements of the crack tip

以上よりき裂深さ：3/8t，長さ：内面 90° 範囲程度のき裂を有する配管に IHSI を施工しても、き裂及び継手に悪影響を及ぼさないことが確認された。

②き裂先端部での応力が改善され、き裂の進展性が抑制されることの確認

MgCl₂ 浸漬により SCC を模擬した深いき裂を強制的に付与した試験体に IHSI を施行し、再度 MgCl₂ 浸漬を行い、き裂が有意に進展しないことを試験により確認した。

●試験条件

- ・試験体：口径 300A，厚さ 19.75mm，材質 SUS316LTP
- ・付与き裂の形態：MgCl₂ き裂
(深さ：3/8t，長さ：内面 90°)
- ・IHSI 条件：施工パラメータ ΔT_{req} の約 1.5 倍の温度差での IHSI を 1 回実施

- ・MgCl₂浸漬時間：き裂導入 120 時間，IHSI 後再浸漬 120 時間

(1) IHSI 後 MgCl₂ 浸漬前後の UT サイジング結果

IHSI 施工後の MgCl₂ 再浸漬後のき裂深さの変化有無をフェーズドレイ UT により確認し，IHSI によりき裂の進展が抑制されることを確認した。Fig. 4 に IHSI 施工後，Fig. 5 に再 MgCl₂ 浸漬後のき裂深さ分布を示す。

これらに示す様に IHSI 施工後にき裂導入時と同様の環境での MgCl₂ 浸漬を約 120 時間実施したが，再浸漬前の平均深さが 5.25mm に対し，再浸漬後の平均深さは 5.22mm であり，顕著なき裂深さの変化は認められなかった。

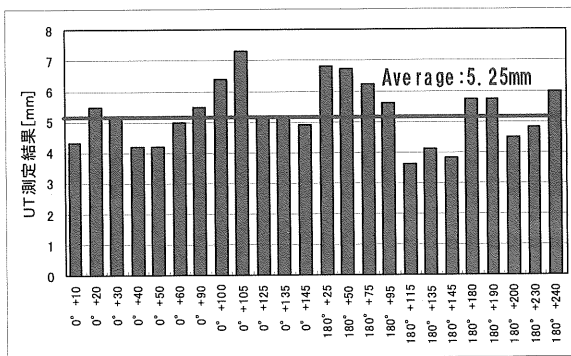


Fig.4 Ultrasonic Test result before MgCl₂

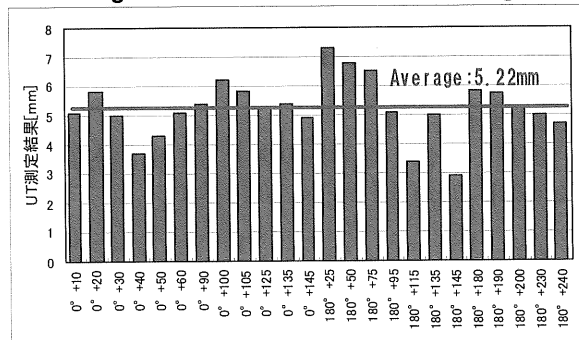


Fig.5 Ultrasonic Test result after MgCl₂

(2) 断面観察結果（再 MgCl₂ 浸漬後）

IHSI 施工後の再 MgCl₂ 浸漬後の断面観察結果を Fig. 6 に示す。

これらに示す様に，主き裂は全般的に太く，IHSI 施工により，き裂先端部が拡幅され鈍化していることが確認された。また，主き裂以外に比較的浅いき裂（副次き裂と称す）についても確認され，これらは総じて，主き裂ほどの明瞭な先端部の拡幅はなく，き裂幅は狭いことが確認された。

以上より，主き裂は先端の応力が低減され，き裂の進展性が抑制されることを確認したが，浅いき裂は IHSI 施工の効果が明確には確認できなかった。本試験では深い主き裂を導入するため，As Welded 状態から応力分布を強制的に変化させたため，実機 SCC 事例に比べ広範囲で複数のき裂が付与されたものと考えられる。

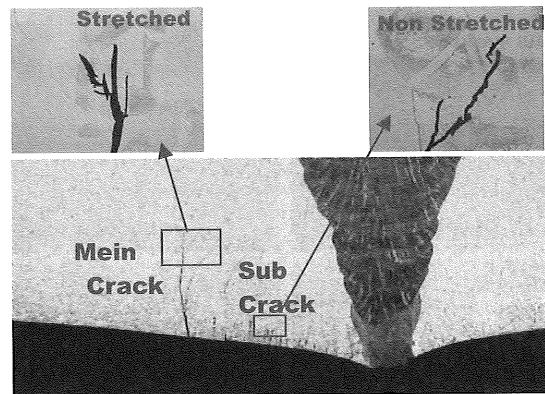


Fig.6 Cross-sectional observation

そのため，深い主き裂に隠れる浅いき裂の先端での拡幅が明確に確認出来ないものが多く，IHSI による応力低減効果が明確には確認されなかったものと考えられる。

尚，本試験結果は実機環境より厳しい条件で得られたものであるが，保守的にこれらの浅いき裂は IHSI 施工後に発生した可能性は否定できないと解釈することとした。

5.2 予防保全 IHSI としての確認項目

③き裂の近傍における IHSI による残留応力改善効果の確認

管内表面の主き裂近傍の IHSI 効果確認のため，EDM き裂を有する試験体に IHSI 施工したもの，IHSI 施工していないもの (As Weld) を MgCl₂ 浸漬し，新たなき裂の発生有無を確認した。

●試験条件

- ・試験体：口径 300A，厚さ 19.75mm，材質 SUSF316 (LC)
- ・付与き裂の形態：EDM き裂
(深さ：3/8t，長さ：内面 90°)
- ・IHSI 条件：施工パラメータ ΔT_{req} の約 1.5 倍の温度差での IHSI を 1 回実施
- ・MgCl₂ 浸漬時間：IHSI 後浸漬 120 時間

(1) 内面 PT 観察結果

IHSI 施工なしで MgCl₂ 浸漬したものと IHSI 施工後に MgCl₂ 浸漬したものの配管内表面の PT 観察結果を Fig. 7 に示す。

これらに示す様に IHSI 施工をしていない場合，EDM き裂の有無に関わらず，溶接部近傍のほぼ全周に新たなひびが確認された。

一方，IHSI 施工していたものは EDM き裂近傍のみに新たなひびが発生していることが確認された。このことから，IHSI 施工によりき裂部以外は溶接残留応力が改善され予防保全 IHSI と同様の効果が得られていると考えられる。

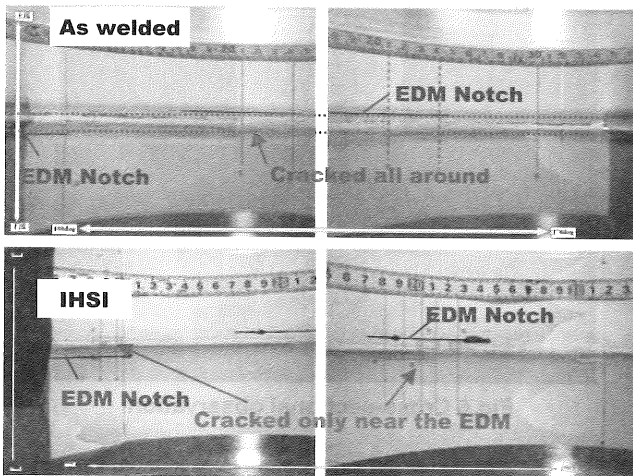


Fig.7 Penetrant test results inside surface after MgCl₂

(2) 断面観察結果

IHSI 施工なしで MgCl₂ 浸漬したもの及び IHSI 施工後に MgCl₂ 浸漬したものの EDM き裂先端部の断面観察結果を Fig. 8 に示す。

これらに示す様に IHSI 施工なしの場合、先端部から微細なき裂が発生しているのが確認できるが、IHSI 施工したものは同様のき裂は確認されなかった。このことから、き裂先端部においても IHSI 施工による応力改善効果があるものと考えられる。

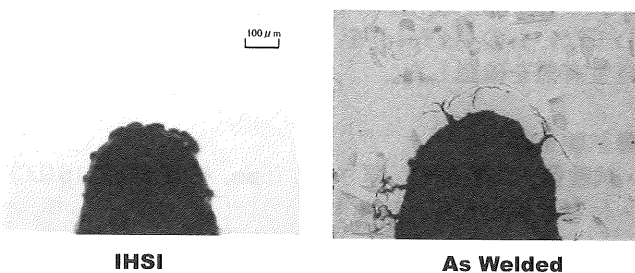


Fig.8 Cross-sectional observation of the crack tip after MgCl₂

以上より、き裂近傍での IHSI 効果は、き裂がない部分に比べ低下する傾向を示した。但し、新たなき裂の発生の可能性は IHSI 未施工状態よりは大きく改善されることが分かった。

④ き裂の存在しない健全部において予防保全 IHSI と同等の効果があることの確認

管内表面のき裂部以外の IHSI 効果確認のため、EDM き裂を有する試験体に IHSI 施工後 MgCl₂ 浸漬し、き裂部以外の新たなき裂の発生有無を確認した。

● 試験条件

- ・試験体：口径 300A, 厚さ 19.75mm, 材質 SUSF316 (LC)
- ・付与き裂の形態：EDM き裂
(深さ：3/8t, 長さ：内面 90°)

- ・IHSI 条件：施工パラメータ ΔT_{req} の約 1.5 倍の温度差での IHSI を 1 回実施
- ・MgCl₂ 浸漬時間：IHSI 後浸漬 120 時間

(1) 内面 PT 観察

IHSI 施工後に MgCl₂ 浸漬したものの配管内表面の PT 観察結果を Fig. 9 に示す。

これらに示す様に、き裂がない部分では新たなき裂の発生は確認されなかったが、き裂部については新たなき裂が発生していることが確認された。このことから、き裂がない箇所は予防保全 IHSI と同等の効果を得られるものと考えられる。

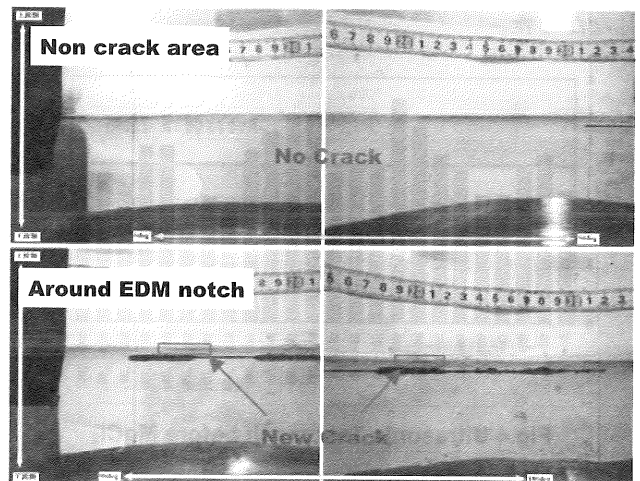


Fig.9 Penetrant test results inside surface after MgCl₂

(3) 残留応力測定結果

同一継手上的の EDM き裂あり部となし部の内面軸方向溶接残留応力分布図を Fig. 10 に示す。

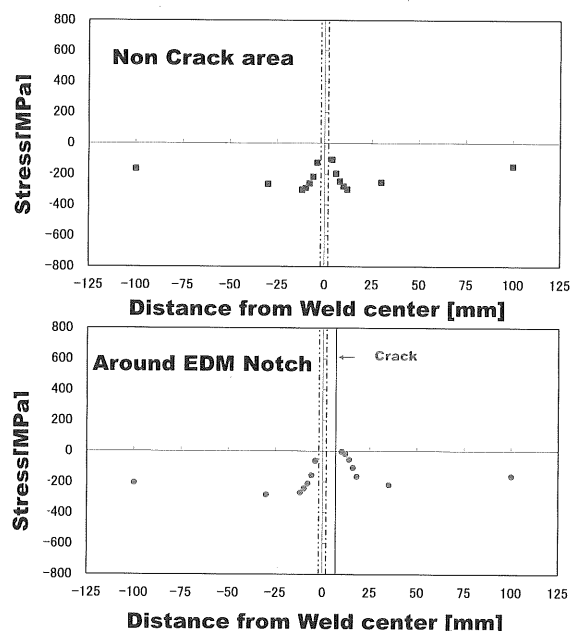


Fig.10 Residual Stress distribution for inside surface

これらに示す様にき裂あり部はき裂近傍で十分には圧縮側へ改善されてないが、き裂なし部は溶接部近傍においても約-100MPaの圧縮応力へ十分改善されており、予防保全効果があることを確認した。

以上より、同一継手上のき裂がない健全部は予防保全工法 IHSI と同等の効果があることを確認した。

6. 試験結果まとめ

試験により以下の結論を得た。

①き裂を有する継手への IHSI 施工がき裂及び継手に対し悪影響を及ぼさないことを確認した。

②き裂先端部での応力が改善され、き裂の進展性が抑制されることを確認した。副次き裂の発生は実機環境より厳しい条件で実施したため発生したと考えられるが、実機運用に当たっては、保守的に新たなき裂発生の可能性を考慮する。

③き裂の近傍における IHSI による残留応力改善効果は、き裂がない部分に比べ低い傾向を示した。但し、新たなき裂の発生の可能性は IHSI 未施工状態よりは大きく改善されることが分かった。

④き裂の存在しない健全部においては予防保全工法 IHSI と同等の効果があることを確認した。

7. 結論

確認試験結果より以下の結論を得た。

・深さ 3/8t 程度のき裂を有する配管への IHSI 施工は技術的には問題無く、その有効性（深いき裂の進展性を抑制すること）が確認された。

・試験は実機より厳しい環境条件のため、IHSI 施工後の副次き裂が確認されたと考えられるが、実機では同様の事象は発生しないと考えられる。また、仮に発生したとしても主き裂を検査することで、これらの発生有無は十分確認可能と考える。

尚、これらの検討内容については、第三者有識者の意見を求めるため、財団法人発電設備技術検査協会殿へ依頼し「き裂を有する継手への IHSI 適用に関する確性試験委員会」にて審議いただき、技術的に問題ないことを確認した。

また、実機適用についても（独）原子力安全基盤機構（JNES）内に設けられている「新保全技術適合性検討作業会」にて技術的に問題ないことを確認いただいた。

今後、実機へ適用されることを期待する。

謝辞

本技術確立のため、確性試験にてご指導いただいた東京大学 野本名誉教授をはじめ、確性委員会委員の先生、（財）発電設備技術検査協会殿、また、実機適用検討にあたり、ご助言、ご指導をいただいた関係各位へ厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1)19 確 S1 号：欠陥を有する配管系に対する高周波誘導加熱の有効性の確性試験報告書
- (2)16 確 S3 号：オーステナイト系ステンレス鋼管等の高周波加熱による応力緩和方法確性試験報告書
- (3)「発電用原子力設備規格 維持規格（JSME S NA1-2008）日本機械学会」
- (4)日本機械学会 発電用原子力設備規格維持規格（JSME S NA1-2002）【事例規格】周方向欠陥に対する許容欠陥角度制限の代替規定（NA-CC-002）
- (5)JANTI-VIP-02-第 1 版 予防保全工法ガイドライン 外面からの入熱による応力改善方法

（平成 22 年 5 月 31 日）