

分析論文

原子炉再循環系配管のSCCに対する補修・保全技術の紹介

株式会社東芝 原子力プラント設計部・佐藤 輝朗・米倉 和義

Teruaki SATO Kazuyoshi YONEKURA

石川島播磨重工業株式会社 原子力プラント設計部・本郷 智

Satoshi HONGO

株式会社日立製作所 原子力サービス部・林 章二・斉藤 英世

Shouji HAYASHI Hideyo SAITOU

1. はじめに

近年、沸騰水型原子力発電所（以下BWRという）の原子炉再循環系（以下PLRという）配管溶接部で応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking、以下SCCという）が多数確認された。

これらの配管の材質は、低炭素ステンレス鋼（SUS316（LC）材）であり、材料を低炭素化することにより、鋭敏化による応力腐食割れは生じないと考えられていたが、その後の実機材料調査結果や実験等により、表面が硬化すると粒内型応力腐食割れ感受性が上昇し、BWR炉水模擬環境中にてき裂進展試験を行うと、粒界型応力腐食割れとして進展することが判明した。

すなわち、低炭素ステンレス鋼についても、応力が高くかつ表面加工により硬度が上昇して割れ感受性が上昇している部位については、最初に粒内型応力腐食割れが発生して表面加工層程度の深さまで進展し、次に割れ先端の応力条件及び化学的条件により粒界型応力腐食割れとして進展し得ることが確認された。

SCC発生メカニズムは、材料と環境と応力の3つの因子が重なり、発生することが知られている。SCCの発生を抑制するためには、上記因子を低減することが有効である。

本稿では、PLR配管のSCCに対する補修工法・予防保全技術についての工法例を紹介する。

2. PLR配管のSCCに対する補修工法・予防保全技術例

ここでは、PLR配管のSCCに対する材料、残留応力の改善に関する補修工法・予防保全技術のうち主なものを以下で紹介する。

- 2-1) 内面肉盛工法
(CRC: Corrosion Resistant Cladding)
- 2-2) 内面研磨 (Internal Polishing)
- 2-3) 高周波誘導加熱応力改善方法
(IHSI: Induction Heating Stress Improvement)
- 2-4) 固溶化熱処理方法
(SHT: Solution Heat Treatment)
- 2-5) 水冷溶接 (HSW: Heat Sink Welding)
- 2-6) 外面肉盛溶接 (Weld Overlay) 工法

2-1) CRC^[1]

溶接部近傍の鋭敏化領域（図-1参照）の配管内面接液部を鋭敏化しない溶着金属で覆うことによりSCCの感受性を改善する工法である。配管内面接液部を溶着金属で覆う（内面肉盛）方式には種々のものがあり、その代表例を図-2に示す。

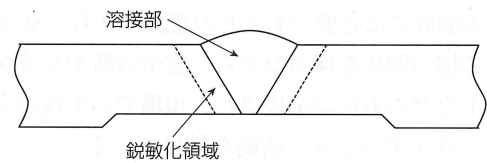


図-1 従来工法による溶接継手

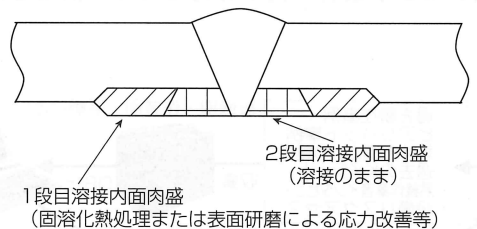
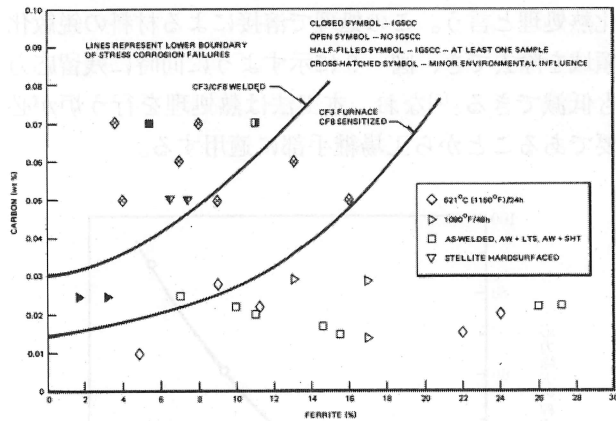


図-2 CRC工法概念図

溶接部接液部表面に高フェライトを確保することで、SCC感受性を低減することが可能となる。図-3に

示すように、一般的に炭素量の低い領域ではフェライト量が約5%以上の範囲でSCCが確認されていない。^[2]



IGSCC resistance may be predicted by the combined influence of carbon content and percent ferrite.

図-3 SCC感受性とフェライトの関係

表-1に示すとおり、耐SCC試験において内面肉盛実施箇所では、SCC抑制効果が確認されている。

表-1 CRCにおける耐SCC効果

項目 種別	継手形式	CBB試験*1 最大割れ深さ(μm)
(a) 従来工法		A 298
		D 0
(b) 固溶化熱 処理付二段 内面肉盛工法		A 0
		B 0
		C 0
		D 0
(c) 改良一段 内面肉盛工法		C 0

*1: 試験温度 289°C、溶存酸素 20ppm、試験時間 100h
 A: 継手熱影響部(母材の場合、溶金の場合)の耐SCC性の確認
 B: 熱処理を受けた溶接金属の耐SCC性の確認
 C: バタリング端部の母材の耐SCC性の確認
 D: 一般部母材の耐SCC性の確認

2-2) 内面研磨^[3]

配管内表面の残留応力の改善を目的として、配管内面表面を研磨することにより、極表面の応力を圧縮側に移行させ、SCCの発生を抑制する。図-4に各種表面加工材のCBB試験試験結果を示す。研磨による表面の残留応力改善がSCC抑制に有効であることが分かる。

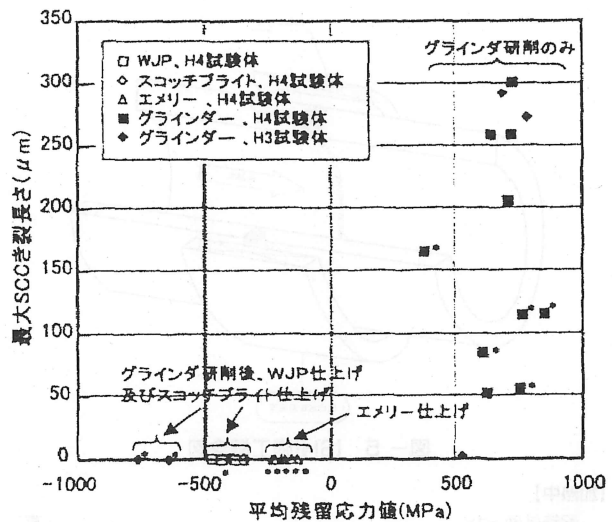


図-4 表面研磨等による表面残留応力の改善とSCC抑制効果

2-3) IHSI

対象部位の加熱有効範囲の板厚方向に温度差が発生するように、配管外面側を高周波誘導加熱法により加熱するとともに配管内面を水冷し、この時に発生する熱応力により配管内面の残留応力を改善するものである。

図-5にIHSIの施工概念図を示す。図-6にIHSI施工時の応力分布、変形、温度分布状態を示す。

IHSIでは、まず、溶接部の内面を水冷しながら、外面側を高周波誘導加熱により所定の温度まで加熱する加熱過程において、板厚方向に大きな温度差を生成させる。この時、外面側では圧縮の降伏が生じ、内面側では引張りの降伏が生じる(図-6の(a)の状態)。次に加熱を停止(内面の冷却は継続)すると板厚方向の温度差が縮小する冷却過程となり、加熱過程で生成された外面側の応力は引張り応力になり、内面の応力は圧縮応力になって、そのまま残留応力として残存する(図-6の(b)の状態)。IHSIにより、このようなメカニズムで溶接部内面の残留引張り応力を軽減又は圧縮側にすることが出来る。IHSI施工(600A)の一例として、図-7に従来開先(内外面温度差397°C)、図-8に狭開先(内外面温度差299°C)に対するIHSI施工後の配管内面軸方向の残留応力測定結果を示す。この結果から分かるようにIHSI施工を実施することにより、溶接部近傍の配管内面残留応力は圧縮残留応力となり、十分に改善されることがわかる。また、開先形状が狭開先の場合、IHSI施工後の配管内面軸方向残留応力改善の度合いは通常開先と比較し、配管内外面温度差が小さいにもかかわらず狭開先の方が効果が大きいことがわかる。

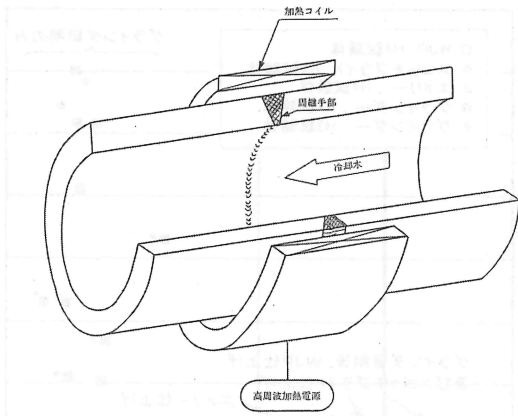


図-5 ISHI施工概念図

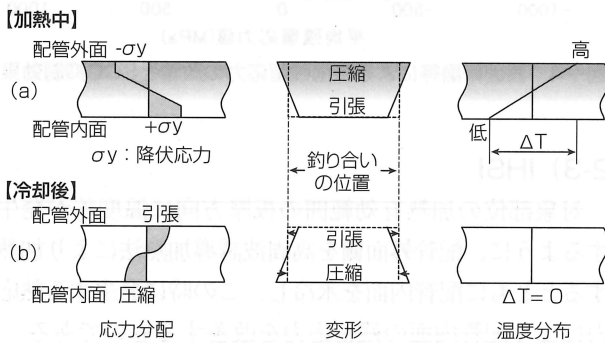


図-6 ISHI施工時の応力、変形、温度分布状態図

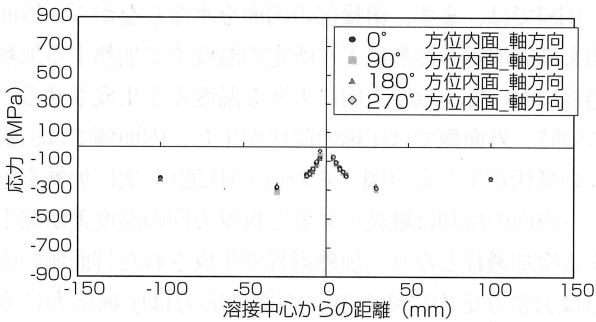


図-7 配管内面軸方向残留応力分布 (従来開先)

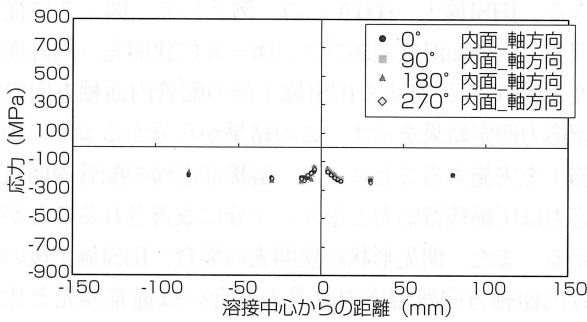


図-8 配管内面軸方向残留応力分布 (狭開先)

2-4) SHT [4]

粒界に析出したクロム炭化物は高温 (1000℃以上) に加熱されると分解し、母材中に一様に溶け込み、粒界近傍のクロム欠乏層が消失する。この熱処理を固溶化熱処理と言う。この処理で溶接による材料の鋭敏化領域を除去でき、図-9に示すように同時に残留応力も低減できる。^[5]なお、本工法は熱処理を行う炉が必要であることから工場継手部に適用する。

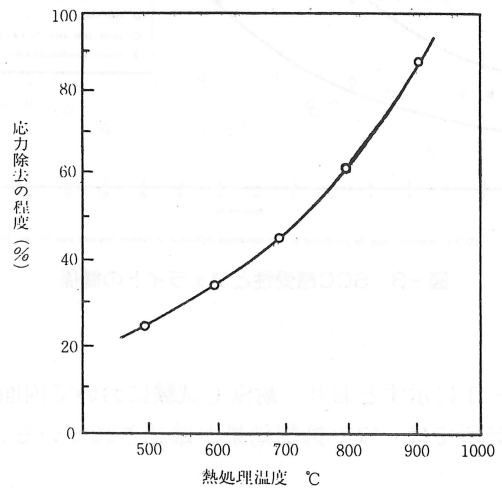


図-9 熱処理温度と応力除去率の関係

2-5) HSW [4]

水冷溶接は、図-10に示すように、配管溶接時の2~3層目までの気中溶接で隔壁を構成した後、配管内面を温水やスプレーで冷却しながら溶接施工する方法であり、管の板厚内で外面と内面で温度差を生じさせ、これによる熱応力によって応力腐食割れの応力因子である配管溶接部内表面近傍の引張残留応力を低減させる工法である。

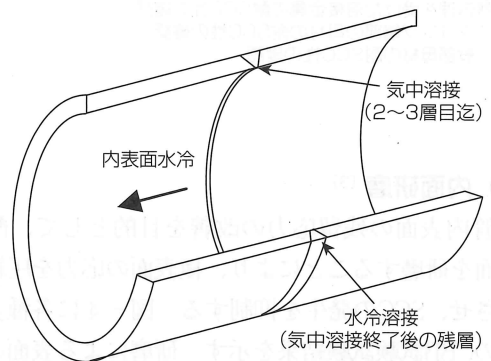


図-10 水冷溶接方法の概念図

水冷溶接の応力改善効果は、図-11に示すように通常の気中溶接より水冷溶接の方が引張残留応力が低減されていることが確認できる。

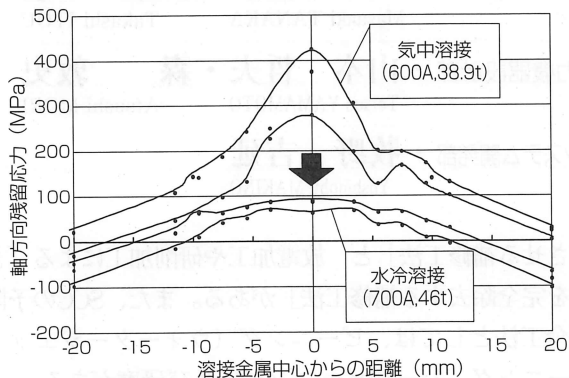


図-11 水冷溶接応力改善の効果

2-6) 外面肉盛溶接 (Weld Overlay) 工法 [6]

SCCが発生した配管溶接部の外面に、耐応力腐食割れに優れた高フェライトの溶接金属を带状に肉盛溶接し、配管を包み込む補修工法である。(図-12) 割れの発生した部位の元々の配管には強度を期待せず、带状の肉盛溶接部分で強度を担保する。(図-13)

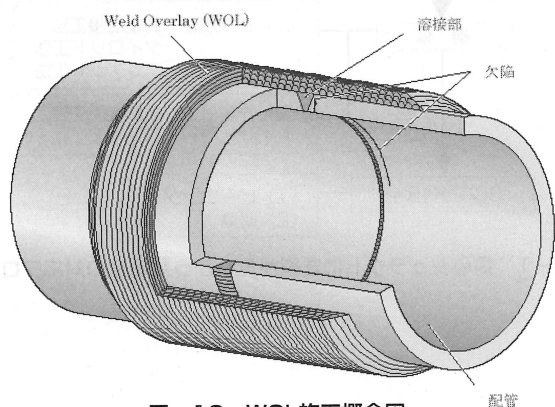


図-12 WOL施工概念図

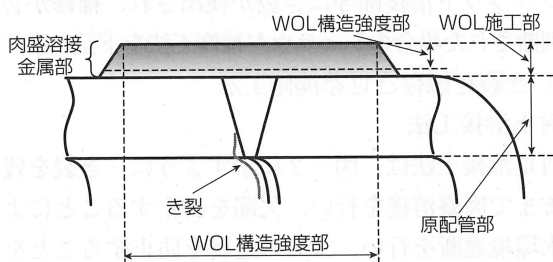


図-13 WOL配管部の断面概念図

3. まとめ

SCCは、材料、応力、環境の3因子が重畳した時に発生することから、本稿では材料、応力の因子を改善する補修工法・予防保全技術のうち主な工法・技術を紹介した。

今後も低炭素ステンレス鋼のSCCに関する研究から得られた新知見を取り入れながら新工法の開発を進めて行く方針である。

参考文献

- [1] 田中伸治、梅本忠宏、糸亮一、“内面肉盛工法を利用した応力腐食割れの改善”、石川島播磨技報、第19巻、第3号、(昭和54年5月)。
- [2] Hughes N, Clarke W L, Delwiche D E, “Intergranular Stress-Corrosion Cracking Resistance of Austenitic Stainless Steel Castings”。
- [3] 高守謙郎、ほか“高温順水中における低炭素ステンレス鋼のSCCの発生と進展”、日本保全学会誌「保全学」Vol.3, No.2, (2004)。
- [4] “総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会原子力発電設備の健全性評価等に関する小委員会(第5回)資料”。
- [5] 平浩“初歩と実用のステンレス講座”、日本工業出版。
- [6] “総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会原子力発電設備の健全性評価等に関する小委員会(第6回)資料”。

(平成16年9月10日)