

ふげん SCC 対策技術とその有効性確認調査について

Evaluation of effectiveness of SCC prevention technologies after long term operation at the “Fugen” Power Station

原子力研究開発機構	湯浅 豊隆	Toyotaka YUASA
原子力研究開発機構	阿部 輝宜	Teruyoshi ABE
原子力研究開発機構	中村 孝久	Takahisa NAKAMURA
原子力研究開発機構	明珍 宗孝	Munetaka MYOCHIN
原子力研究開発機構	高城 久承	Hisatsugu TAKAGI

Abstract

Suffered SCC (stress corrosion cracking) at the primary cooling system in 1980, the “Fugen” power station introduced the three preventive technologies immediately. After the upgrade of the plant, no SCC occurred during the operation period. We have inspected the actual structural materials of the “Fugen” power station on its decommissioning stage to evaluate effectiveness of SCC management technologies, which are combining material replacement, induction heating stress improvement (IHSI) to reduce the welding residual tensile stress, and application of hydrogen addition to reduce oxygen in the water. No crack in the materials was found by metallurgical structure observation. Moreover, judging from the analysis of residual stress and the heat affected zone in the materials, the effectiveness of SCC management technologies was verified.

Keywords: SCC, “Fugen” Power Station, decommissioning

1. 緒言

「新型転換炉ふげん発電所（以下、「ふげん）」では、建設当初、配管はすべて SUS304 製を用いていたが、1980 年に余熱除去系配管溶接部近傍に SCC が発見されたため、ただちに対策が打たれた。ひとつは SUS316L への材料取替である。交換した配管長は 1100m、溶接箇所は約 1000 か所にも上った。ただし、溶接作業を行うことが困難な狭隘箇所については SUS304 のままとし、その代わりに溶接部付近を高周波加熱することなどによる残留応力改善技術[1]が適用された。図 1 にこれらの対策箇所を示す。また、細管については材料取替、高周波加熱工事ともに困難であったのでそのままとされ、環境因子の改善を目的として循環水中酸素ポテンシャル低減のための水素注入が実施された[2]。水素注入は運転期間を通じて継続

された。その後は SCC 等によるクラック発生のトラブルを被ることなく運転期間を全うした。

現在、廃止措置段階となっている「ふげん」を対象にして、実機環境下で長期運転環境にさらされた実機材の SCC 発生状況を詳細に検討することにより、前述の「ふげん」での SCC 対策の有効性を確認することを研究の目的とした。

連絡先:湯浅豊隆
(独)日本原子力研究開発機構
敦賀本部 原子炉廃止措置研究開発センター
技術調査課
〒914-8510 福井県敦賀市明神 3
E-mail: yuasa.toyotaka@jaea.go.jp

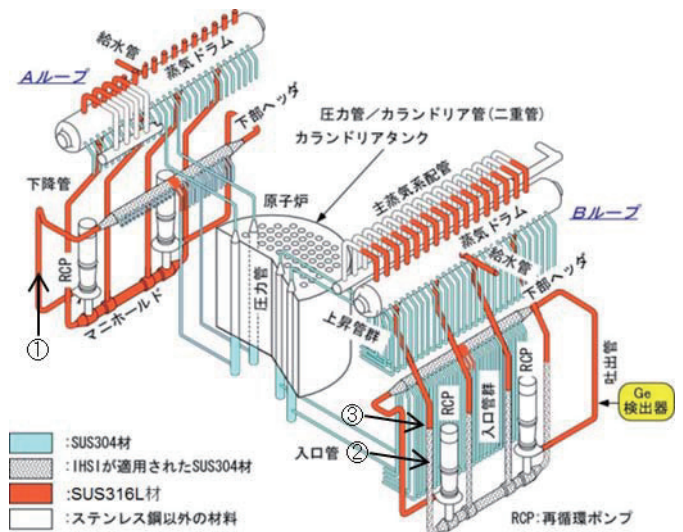


Fig.1 Material replacement at FUGEN

2. SCC 調査結果

2.1 調査方法

溶接箇所数は膨大でありすべてを調査することは不可能である。このため運転条件及び適用された SCC 対策技術からみて特徴があり、また SCC 発生の可能性の高い再循環系配管の溶接部で詳細な調査を実施した。図 1 に分析した溶接箇所のサンプル番号①から③を示し、表 1 に溶接箇所の詳細を示す。これらサンプルは 275~285℃、7気圧の高温高压水と接しており、使用時間は 6 万から 13 万時間であった。

Table1 Details of welding

サンプル番号	部位	SCC 対策	素材 上段:上流 下段:下流	外径 (mm) (呼び径)	環境条件	
					温度 (°C)	使用時間 (hr)
①	Aループ 吐出管	通常溶接 (材料取替)	SUS316L	406.4 (16B)	275	99820
			SUS316L			
②	Bループ 下降管	IHSI	SUS304	355.6 (14B)	285	IHSI前 27540
			SUS304			IHSI後 108720
③	Bループ 下降管	水冷溶接 (材料取替)	SUS316L	355.6 (14B)	285	66760
			SUS304			136260

サンプル①の採取箇所は図 1 の A ループ吐出管で配管材料を SUS316L に交換した通常溶接箇所、サンプル②は B ループ下降管で SUS304 の配管溶接部に高周波誘導加熱(IHSI)を行った箇所、そしてサンプル③は B ループ下降管で溶接上流部を SUS316L に交換した水冷溶接箇所とし、これらの調査を実施した。

2.2 浸透探傷検査

サンプル①から③を実機から採取したのち、浸透探傷検査を行った結果を図 2 に示す。溶接部及び溶接部近傍にはクラックの発生がないことが確認できた。

さらに、図 1 に示す再循環系 A ループの全溶接 76 か所に対しても SUS316L/SUS316L 溶接 33 か所で浸透探傷検査を行った結果、クラックの発生がないことを確認できた。

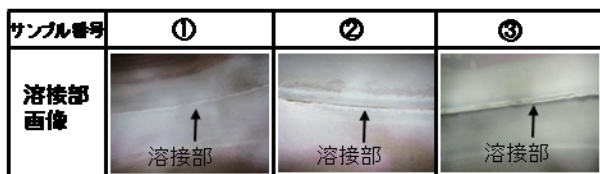
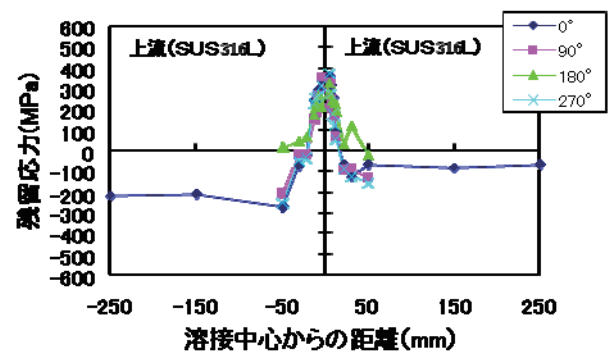


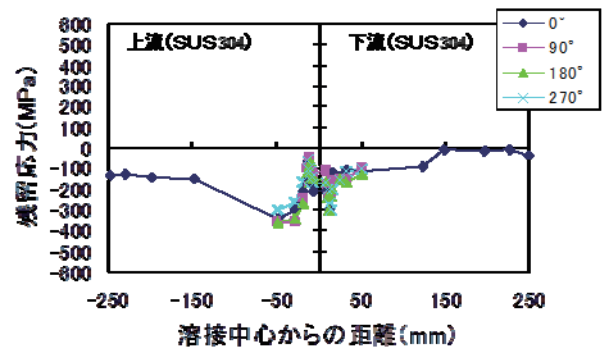
Fig.2 Results of penetrant test

2.3 残留応力測定

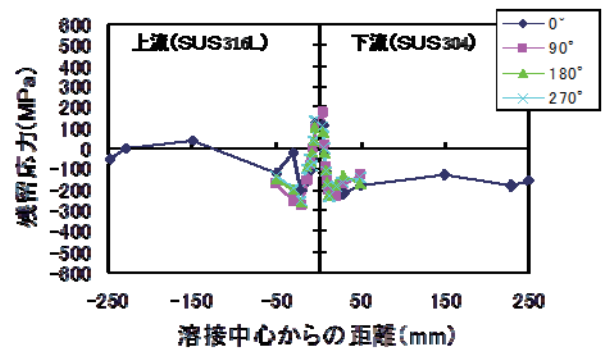
次に、歪ゲージ法により配管内外線の残留応力を測定した。サンプル①~③の内表面軸方向測定結果を図 3 に示す。配管の周方向に 4 方位 (0,90,180,270°) の測定を行った。通常溶接のサンプル①では最大 400MPa にのぼる高い引張残留応力が確認された。一方、IHSI を行ったサンプル②では、長期の運転後 (108000hr) でも内表面は圧縮残留応力となっていることが確認された。さらに、水冷溶接を行ったサンプル③では、長期の運転後 (69500hr) でも内表面軸方向における引張残留応力は 200MPa 程度に低減され、長期運転後も有効に機能していることが確認できた。



a) サンプル①(通常溶接)



b) サンプル②(IHSI)



c) サンプル③(水冷溶接)

Fig.3 Residual stresses of welding measured at the primary cooling system of the "FUGEN" power station

2.4 材料評価試験

得られたサンプルをより詳細に検討するため、金属組織、鋭敏化度及び機械的特性（硬さ測定）を評価した。

初めに、サンプル①～③の配管溶接部における金属組織を図4に示す。いずれも、溶接部近傍の断面マクロ組織は溶接条件に応じた健全な組織であり、SCC等のき裂は認められなかった。

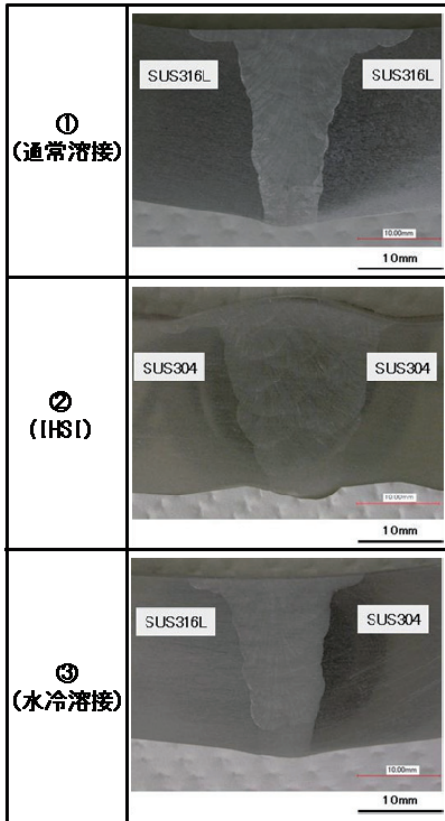


Fig.4 Microscope view of welding cross sections

次に、溶接部近傍及び母材の鋭敏化度を検討した。採取したサンプルを樹脂包埋後、鏡面研磨した。溶接熱影響部（以下、HAZと略す）及び母材に対しJIS G 0571に準拠した10%しゅう酸エッチング試験を行った。サンプル①～③の配管溶接部下流におけるHAZ部及び母材の鋭敏化試験結果を図5に示す。SUS316LはSUS304に比べ鋭敏化は少ない傾向を示した。図中でSUS316Lは段状組織であったが、一部のSUS304のHAZ部で溝状組織が認められた。特に、水冷溶接を行ったサンプル③のHAZ部で溝状組織が認められた。

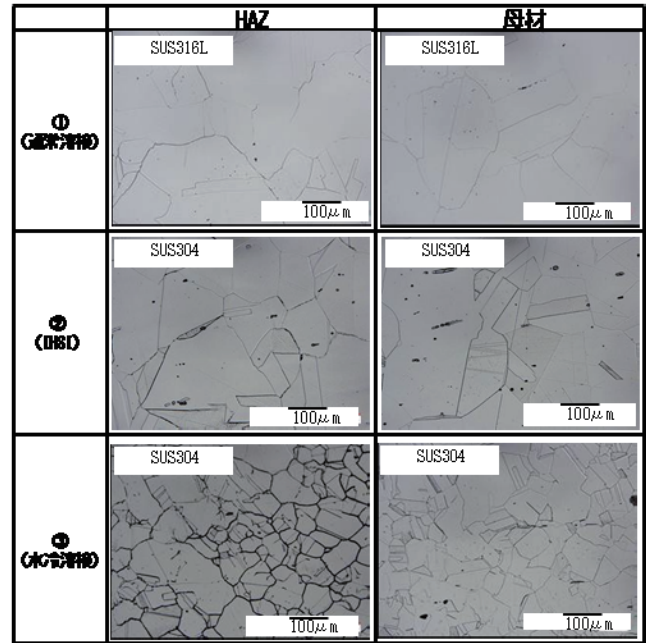


Fig.5 Photos of etched welds

SCC クラック発生の起点となることが疑われる配管内面のHAZ部で結晶方位を解析するためEBSD（後方散乱電子回折）分析を行った。鋭敏化が認められたサンプル③の下流側（SUS304）を図6に示す。断面方向にクラック等の欠陥がないことが確認できた。一方、溶接金属部から約1mm離れたHAZ部の接液面では微細な加工層が認められた。加工層の詳細な分析を行った結果を図7に示す。加工層には双晶及び $2\mu\text{m}$ 未満の粒界腐食は認められたが、SCCに進展する兆候は認められなかった。



Fig.6 Crystal orientation of Heat affected zone

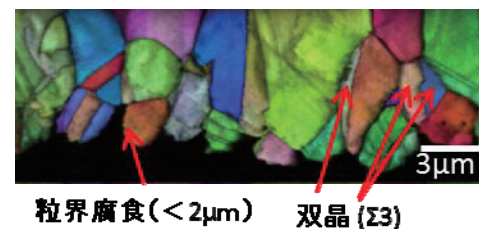


Fig.7 Crystal orientation of the work hardened layer

次に、溶接部の機械特性を調査するため、内表面近傍（内表面から0.5mm）で溶接部中央から硬さ測定を行った結果を図8に示す。断面硬さは溶接部から1~5mm離れた熱影響部で最も高く、230~260前後であり、300を超える著しい硬化部は認められず、溶接部材料が健全であることを確認した。溶接部中央から30mm程度離れたと硬さはほぼ母材と同等となった。また、サンプル③の下流側（SUS304）では、溶接中心から10mm離れた箇所でも硬さが210を超えており、鋭敏化が認められた領域だが（図5）、溶接部の断面観察（図4及び図7）より異状は認められなかった。以上のように、これまでSCCが報告されてきたSUS304[3]のHAZ部でもSCC対策を実施した「ふげん」実機材ではSCCが認められなかった。

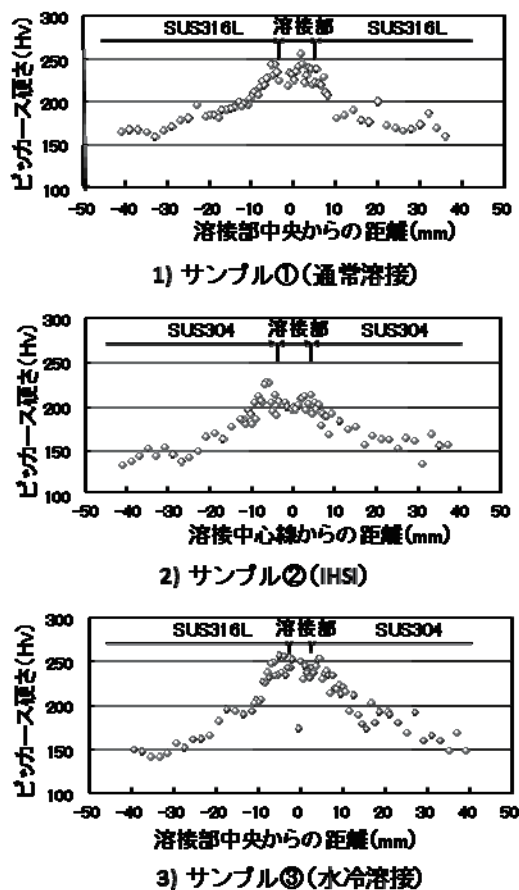


Fig.8 Hardness profiles in the cross section of welds

2.5 まとめ

以上のように「ふげん」実機材を用いて詳細な分析を行った結果、SCCは認められず、「ふげん」SCC対策の有効性を確認することが出来た。特に、約25年間（総発電時間約137,000時間）稼働した原子炉の実機材料についてこのような詳細な調査を実施したのは国内では初め

てのことであり、貴重なデータを蓄積できたものと考えられる。特に、10万時間を超えた実機材溶接部で残留応力低減対策が有効に機能していることが確認できた。しかし、調査結果の中で未解明の点もある。「ふげん」SCC対策はSCCの3因子（材質、応力、環境）に対する対策を重畳して実施したため、対策ごとの有効性を定量評価することが難しい。これらの切り分けについては、さらなる検討を要する課題であり、解明できればステンレス鋼のSCCに対し理解が格段に進むことが期待できると考えている。

謝辞

本研究は、(独)原子力安全基盤機構より平成23年度から25年度に受託した「福井県における高経年化調査研究」として実施された。

参考文献

- [1] 坂田信二、榎本邦夫、清水翼、佐川渉、“サーマルスリーブ付ノズルの高周波加熱応力改善法の開発”、溶接学会論文集サイクル機構技報、Vol.6, No.1, 1988、pp.64-70.
- [2] 高城久承、森田聡、直井洋介、北端琢也、“水化学管理技術の確立”、サイクル機構技報、Vol.6, No.20、2003、pp.95-120.
- [3] 明石正恒、見城孝雄、松倉伸治、川本輝明、“高温純水中における鋭敏化304ステンレス鋼の粒界応力腐食割れ寿命の確率分布”、防食技術、33、(1984)、pp.628-634