

BWRの炉内構造物及び配管の保全技術

Repair and Preventive maintenance Technology for BWR Reactor Internals and Piping

株式会社 東芝	大坪 徹	Tooru OOTSUBO	Member
日立GEニュークリア・エナジー株式会社	伊東 敬	Takashi ITOU	Member
東京電力株式会社	坂下 彰浩	Akihiro SAKASHITA	Member

Stress corrosion cracking of welding portion has found in many domestic and foreign BWR reactor internals and Primary Loop Recirculation piping. Also, repair and preventive maintenance technologies for SCC has been developed and/or adopted to BWRs in recent years. This paper introduces the sample of these technologies, such as seal-welding for SCC on BWR reactor internals, preventive maintenance technology for PLR piping such as Corrosion Resistant Cladding, Internal Polishing and Induction Heating Stress Improvement. These technologies are introduced on "E-Journal of Advanced Maintenance", which is an international journal on a exclusive website of Japan Society of Maintenance.

Keywords: BWR, Reactor Internal, PLR piping, SCC, Repair, Preventive maintenance, EJAM

1. 緒言

近年、沸騰水型原子力発電所（以下BWR）の炉内構造物（炉心シュラウド、シュラウドサポート、CRDスタブチューブ）の溶接部や、原子炉再循環系（以下PLR）配管溶接部で、応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking、以下SCC）が確認されている。^{[1][2][3]}

炉心シュラウドやPLR配管の材質は低炭素ステンレス鋼（SUS316L、SUS316(LC)）であり、材料の低炭素化により溶接鋭敏化によるSCCは生じないと考えられていた。しかし、その後の実機材料調査や実験等により、応力が高くかつ表面加工により硬化して割れ感受性が上昇している部位については、初期に粒内型SCC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及び化学的条件により、粒界型SCCとして進展し得ることが分かった^{[1][4][5]}。また、高Ni基合金のうち、Alloy182を溶接金属として採用した炉内構造物溶接金属（シュラウドサポート、CRDスタブチューブ）においても、SCCが確認された^{[2][3]}。このようなSCCの発生に対し、種々の補修工法・予防保全技術が開発され、実機への適用も進められている。

本稿は、BWR炉内構造物及びPLR配管のSCCに対する補修工法・予防保全技術についての事例紹介を目的としている。なお、今回紹介する補修・保全技術は、日本保全学会のWEB上英文Journalとして発刊された"E-Journal of Advanced Maintenance"に、

技術記事として掲載されたものである。

2. 炉内構造物のSCC保全技術例^{[4],[6]}

炉心シュラウドにSCCが発見され、健全性評価の結果、補修が必要となった場合の補修工法として、適用済技術であるクランプ等の機械的補修、放電加工や研削加工によるき裂除去に加え、より短時間で補修可能な工法として、き裂を残存させたまま補修する封止溶接工法が開発されている。

封止溶接工法は、Fig.1に示すように、き裂を残したまま表面に肉盛溶接を行い、炉水環境から遮断することで、SCCの進展を防止する工法である。本技術の具体例として、現在開発中の水中レーザー封止溶接及び気中/水中TIG封止溶接を紹介する。

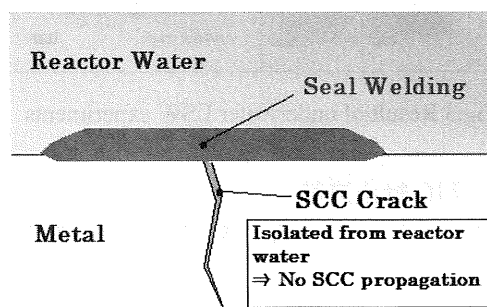


Fig.1 Concept of seal welding

2. 1 レーザー封止溶接

水中レーザー封止溶接は、水中において封止溶接が可能であることに加え、従来の溶接技術と比較して入熱を極めて低く抑えられる特徴があり、中性子照射領域で問題となるHeによる脆化対応としてもメリットのある工法である。

Fig. 2 に、水中レーザー溶接の炉内構造物用試作ヘッド及び水中レーザー溶接試験の概要を示す。また、Fig-3 に SUS304L 製の試験体に実施した溶接試験結果を示す。溶接部近傍に設けられた開口幅 0.3mm、深さ 30mm、長さ 20mm の模擬き裂上に行った封止溶接は、外観写真に示すように良好なビード形状が得られた。また模擬き裂をクラッド層により封止できることを確認した。

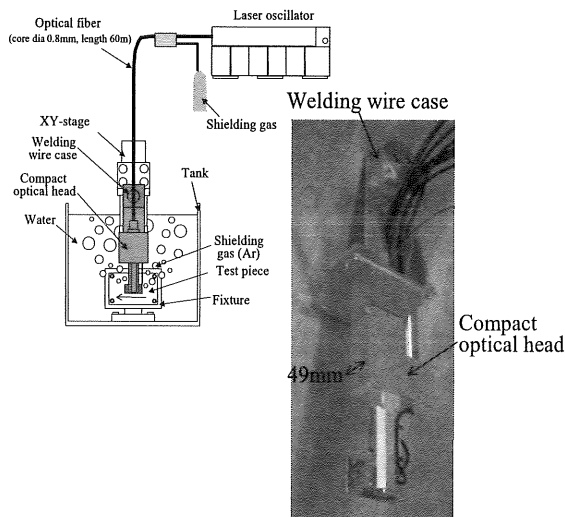


Fig.2 Schematic of experimental setup for Laser Seal Welding

	Appearances	Results of penetrant test	Results of section macro test
Shielding gas: 95 l/min			

Fig.3 Result of underwater LSW experiments

2. 2 TIG 封止溶接

TIG 封止溶接として、気中及び水中での適用例を紹介する。

Fig. 3 は、CRD スタブチューブ取付溶接部に発生した SCC の封止溶接として、炉内を気中環境にして TIG 封止溶接を適用することを想定したモックアップ試験結

果である。外観写真を Fig. 4 に、封止溶接部の断面マクロ写真を Fig. 5 に示す。模擬き裂上に行った封止溶接は、外観写真に示すように良好なビード形状が得られ、模擬き裂はクラッド層で封止できることを確認した。

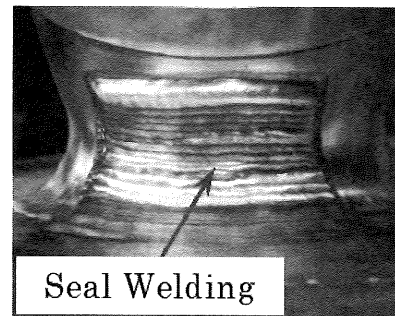


Fig.4 Appearance of TIG seal welding on the CRD stub-tube welding portion

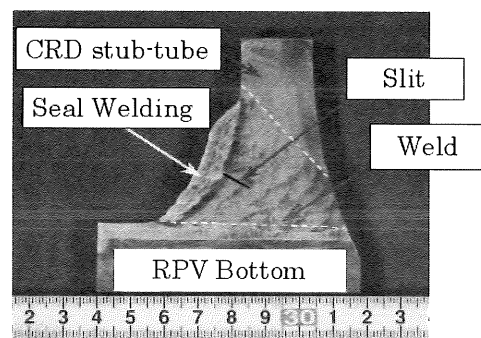


Fig.5 Section macro test of TIG seal welding on the CRD stub-tube welding portion

水中 TIG 溶接は、水中で局所的な気相空間を形成し、その気相空間内で溶接を実施する。溶接は広範囲に適用されている TIG 溶接であり、レーザー溶接に比較して高めの溶接入熱となるが、施工条件範囲を比較的広く設定出来、信頼性の高いき裂封止溶接施工が可能である。Fig. 6 に水中 TIG 溶接の施工概念を示す。本工法についても溶接モックアップ試験を行い、水中封止溶接が確実にできることを確認している。

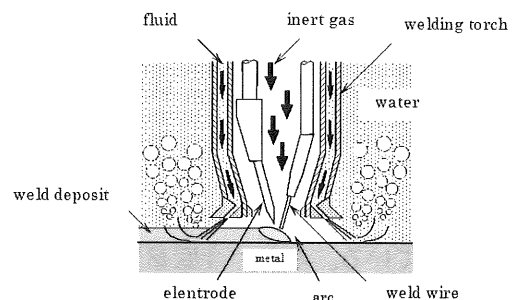


Fig.6 Work of underwater welding

3. P L R配管のS C C保全技術例^{[5],[7],[8],[9]}

ここでは、P L R配管のS C Cに対する材料、残留応力の改善に関する予防保全技術のうち、以下に示す工法を紹介する。

- (1)内面肉盛工法
(CRC : Corrosion Resistant Cladding)
- (2)内面研磨(Internal Polishing)
- (3)高周波誘導加熱応力改善方法
(IHSI: Induction Heating Stress Improvement)

3. 1 内面肉盛工法

C R Cは、溶接部近傍の鋭敏化領域の配管内面接液部を、Fig.7に示すように鋭敏化しない溶着金属で覆い、S C Cの感受性を改善する工法である。配管内面肉盛方式には種々のものがあるが、その代表構造例を Fig.8 に示す。

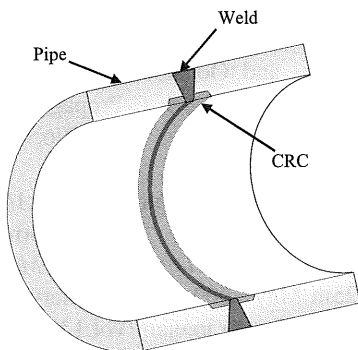
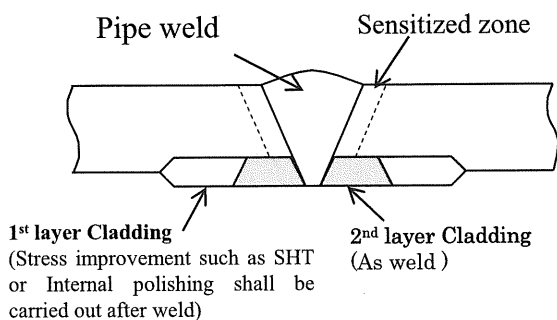


Fig.7 Concept of CRC



*Note: SHT means Solution Heat Treatment

Fig.8 Sample structure of CRC

3. 2 内面研磨

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、S C Cの発生を抑制する技術である。Fig.9に磨き工具の例を、Fig.10に配管内面の磨き施工状況例を示す。

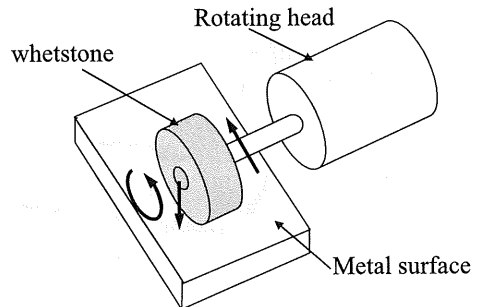


Fig.9 Sample of polishing tool



Fig.10 Polishing inside the Piping

3. 3 I H S I

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。

Fig.11にIHSIの施工概念図を示す。またFig.12にIHSI施工時の応力分布、変形、温度分布状態を示す。

IHSIでは、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。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変わり、内面の応力は圧縮応力に変わって、そのまま残留応力として残存する。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できる。

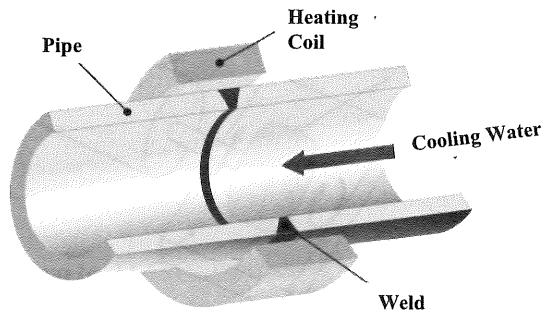


Fig-11 Concept of IHSI

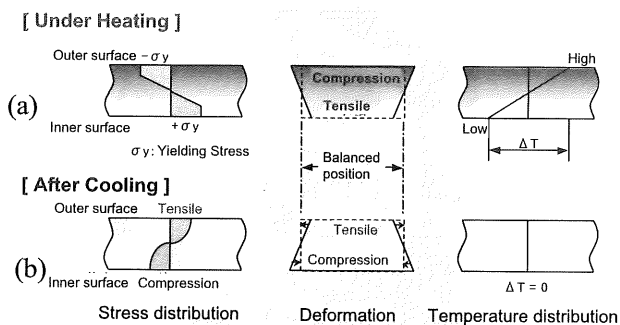


Fig-12 Stress, Deformation and Temperature Distributions Induced by IHSI

4. 結言

BWRの炉内構造物及びPLR配管の保全に関して、代表的な技術を紹介した。これらのSCC対策技術の多くは、すでに実機へ適用されている。今回紹介した技術は日本保全学会”E-Journal of Advanced Maintenance”に掲載されたものであり、今後も上記Journal上において、原子炉の補修・保全工法の紹介を拡充していく予定である。

参考文献

- [1]Shunichi SUZUKI, Kenrou TAKMORI et.al, “Stress Corrosion Cracking in Low Carbon Stainless Steel Components in BWRs”, *E-Journal of Advanced Maintenance*, Vol.1 (2009), pp.1-29, Japan Society of Maintenanceology, <<http://www.jsm.or.jp/ejam/Vol.1.No.1/AP/1.html>>
- [2] 青木孝行、服部成雄 他、“BWR 環境下で長期使用されたニッケル基合金の応力腐食割れ”、保全学、VOL.4、No.1 (2005)、pp34-41
- [3] Taizo Matsunaga, Keiji Matsunaga, ”Stress Corrosion Cracking of CRD Stub tube joint and Repair at HAMAOKA UNIT 1”, ICONE 11th, Tokyo, Japan, April 20-23, 2003, ICONE11-36056
- [4] 田中賢彰、伊藤敬、山本哲夫、森敦史、牧野吉延、“BWR 炉心シュラウドの補修及び予防保全工法”、保全学、Vol.3、No.3 (2004)、pp38-44.
- [5] 佐藤輝朗、米倉和義、本郷智、林章二、斉藤英世、“原子炉再循環配管の SCC に対する補修・保全技術の紹介”、保全学、Vol.3、No3 (2004)、pp.34-37.
- [6] Ito, Takashi and Ootsubo,Tooru, “Seal-Welding over Cracks for Preventing SCC Propagation”, *E-Journal of Advanced Maintenance*, Vol.1, No.1,25th May 2009, Japan Society of Maintenanceology, <<http://www.jsm.or.jp/ejam/Vol.1.No.1/NT/3/3.html>>
- [7] Toshiba Corporation. “CRC (Corrosion Resistant Cladding)”, *E-Journal of Advanced Maintenance*, Vol.1, No.1,,25th May 2009, Japan Society of Maintenanceology, <<http://www.jsm.or.jp/ejam/Vol.1.No.1/NT/4/4.html>>
- [8] Toshiba Corporation. “Internal Polishing”, *E-Journal of Advanced Maintenance*, Vol.1, No.1, 25th May 2009, Japan Society of Maintenanceology, <<http://www.jsm.or.jp/ejam/Vol.1.No.1/NT/5/5.html>>
- [9] Toshiba Corporation. “IHSI (Induction Heating Stress Improvement)”, *E-Journal of Advanced Maintenance*, Vol.1, No.1, 25th May 2009, Japan Society of Maintenanceology, <<http://www.jsm.or.jp/ejam/Vol.1.No.1/NT/6/6.html>>