

軽水炉の再稼働と健全性確保に向けた材料工学の役割

Roles of Materials Science and Engineering for Restart and Ensuring the Integrity of LWRs

(2) BWR プラントにおける SCC 事例と対策

(2) SCC Experience and Countermeasures in BWR Power Plants

*金田 潤也¹¹ 日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社

1. 緒言

応力腐食割れ (SCC) は、SCC 感受性のある材料、引張応力、腐食環境の重畳により発生する材料劣化事象である。BWR プラントでは、1970 年台に鋭敏化した 304 ステンレス鋼製配管で SCC が確認された。その対策として、低炭素ステンレス鋼を適用して鋭敏化による SCC は抑制されたが、塑性加工を要因とする SCC が顕在化した。また、Ni 基合金においても同様に鋭敏化による SCC が確認されたが、その後、Nb により C を安定化した対策材が適用されている。これらの材料対策の他に、残留応力改善および環境改善による SCC 対策が講じられている。以下に BWR プラントにおける SCC 事例とその要因、および対策方法について述べる。

2. BWR プラントにおける SCC 事例とその要因

2-1. 鋭敏化ステンレス鋼 SCC

1974 年にドレスデン 2 号機の 304 ステンレス鋼製再循環系配管に SCC が確認された。原因調査の結果、溶接熱による粒界 Cr 炭化物析出に伴う鋭敏化、溶接引張残留応力、炉水環境が要因であることが確認された。そこで、鋭敏化抑制のための材料開発が行われ、C 濃度が 0.020% 以下で鋭敏化を抑制できることが明らかになった。また、C 濃度を低減した場合、強度が低下するため、強度を担保する目的で N を 0.12% 以下添加した材料が開発された。これらの材料は Nuclear Grade (NG) ステンレス鋼と呼ばれ、炉内および圧力境界部などに適用されている。

2-2. 低炭素ステンレス鋼 SCC

鋭敏化を抑制した低炭素ステンレス鋼の適用による SCC 対策が取られたが、1990 年代に入って海外プラントで SCC が発生した。また、国内でも 2001 年以降に低炭素ステンレス鋼の SCC が炉心シュラウドおよび再循環系配管で顕在化した。原因究明の結果、グラインダー、機械加工あるいは溶接による表面近傍のひずみおよび硬さ上昇、溶接あるいは機械加工による引張残留応力、炉水環境が要因であることが明らかとなった。この対策として、製造段階での冷間加工を極力低減する施工管理および残留応力改善技術が適用されている。

2-3. Ni 基合金 SCC

Ni 基合金では、母材の溶接熱影響部および溶接金属において SCC が確認された。この原因は、鋭敏化ステンレス鋼と同様に、溶接熱による粒界 Cr 炭化物析出に伴う鋭敏化、溶接引張残留応力、炉水環境であることが確認された。Ni 基合金では、Nb 添加による C の安定化により鋭敏化を抑制した改良 600 合金および改良 182 合金が開発され、実機適用されている。また、182 合金より Cr 濃度が高く耐 SCC 性に優れる 82 合金でも Nb および C 量を管理した材料が適用されている。

2-4. 照射誘起 SCC (IASCC)

炉心近傍で使用されているステンレス鋼製制御棒では、ハンドルのローラピン部において熱鋭敏化や冷間加工が主因でない SCC が確認された。この事象は、照射損傷に伴う照射誘起偏析と照射硬化、すき間部

* Junya Kaneda¹¹ Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd.

での酸化物形成とその成長に伴う応力上昇、すき間部での腐食環境劣化が要因と考えられている。この対策として、製造時のすき間部での不純物付着抑制による腐食生成物生成抑制策がとられている。また、制御棒のシースおよびタイロッドにも IASCC と考えられるひびが認められている。そこで、照射損傷を抑制した材料開発の取り組みがなされているが、現在のところその適用には至っていない。

3. BWR プラントにおける SCC 対策

SCC 抑制のために、SCC 要因に基づき以下の対策が行われている。

3-1. 材料改善

前述のように鋭敏化を抑制した低炭素ステンレス鋼および C を安定化した Ni 基合金が開発され、実機に適用されている。また、冷間加工を低減したり、表面加工層を除去するための研磨などの製造管理が行われている。ステンレス鋼溶接金属は母材より耐 SCC 性に優れることから、配管内面などでは耐食性肉盛 (Corrosion Resistant Cladding : CRC) が適用されている。耐 IASCC 材料としては、Ta 添加ステンレス鋼[1]などが開発されており、今後、実機適用が期待される。

3-2. 応力改善

溶接および機械加工による引張残留応力が SCC 要因であることから、残留応力低減を目的として以下の手法が開発、適用されている。

- ・ HSW (Heat Sink Weld) : 配管の初層溶接後、配管内を流水で冷却しながら開先を肉盛り、配管内面を圧縮応力とする方法。
- ・ 狭開先溶接 : 開先を狭くして溶接歪を小さくすることにより残留応力を低減する方法
- ・ IHSI (Induction Heating Stress Improvement) : 配管溶接部の内面を流水で冷却しながら外面を誘導加熱コイルにより加熱した後、加熱をやめ、配管内面の引張残留応力を低減する方法
- ・ ピーニング (Water Jet / Laser / Shot Peening) : 弾性拘束された材料表面をキャビテーション崩壊に伴う衝撃波やショットの衝突などで塑性変形させ、圧縮応力を残留させる方法
- ・ 研磨 : 研磨により表面近傍の残留応力を低減する方法

3-3. 環境緩和

BWR の炉内は高温純水環境にあり、腐食電位 (Electrochemical Corrosion Potential : ECP) を低減することによる SCC 対策が進められている。通常、炉水は放射線分解により酸素および過酸化水素が生成されることから、酸化環境 (Normal Water Chemistry : NWC) にある。これに対して、水素注入 (Hydrogen Water Chemistry : HWC) により ECP を低減し、SCC を抑制することができる。しかし、水素の注入量が増えると主蒸気中の放射能 (N-16) 量が上昇するため、過度の水素注入は避けることが望ましい。そこで、白金の触媒効果を利用して少量の水素注入で効果的に ECP を低減する貴金属注入が開発され、米国ではほとんどの BWR プラントで適用されている。また、国内および欧州でも一部の BWR プラントで適用されている。また、近年では TiO₂ の触媒効果を利用した環境緩和技術も開発されている。

3-4. 取替・補修

SCC が発生した機器は、ひびの除去、補修溶接、タイロッドなどによる補強が行われている。また、機器そのものを新規のものと交換する取替も行われている。アクセスに制約のある炉内機器であっても、炉心シュラウド、シュラウドサポート、ICMハウジング、CRDスタブチューブでは取替工法が開発、適用されている。

4. 結言

SCC はプラント寿命に影響を及ぼす可能性のある材料劣化事象である。その対策を講じる上で、まず事象の要因とメカニズムを明確にすることが重要である。そのために、実機サンプル調査、再現試験など材料工学的観点での詳細な調査が行われてきた。明らかにされた SCC 要因に対しては、それを取り除くための材料改善、応力改善、環境緩和の観点で材料開発、手法開発が行われてきた。SCC 抑制のためには、材料、応力、環境の要因のうち少なくとも一つの要因を取り除く必要があり、好ましくは複数の対策を組合

せて二つ以上の要因を同時に取り除くことが望まれる。SCC メカニズムは未だ解明しきれていない部分があり、継続的な研究開発が期待される。

参考文献

[1] J. Kaneda et al., 17th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, "SCC and Crevice Corrosion Resistances of Tantalum-modified Stainless Steel", Ottawa, Ontario, Canada, August 9-12, 2015.