

企画セッション | 部会・連絡会セッション：材料部会

■ 2018年9月5日(水) 13:00 ~ 14:30 | 会場 C会場 B棟 B21

[1C_PL] 軽水炉の再稼働と健全性確保に向けた材料工学の役割

座長: 福谷 耕司(INSS)

[1C_PL01] 軽水炉材料の長期使用の観点からのSCC研究

*加治 芳行¹ (1. JAEA)

[1C_PL02] BWRプラントにおけるSCC事例と対策

*金田 潤也¹ (1. 日立GE)

[1C_PL03] PWRプラントにおけるSCC事例と対策

*杉本 憲昭¹ (1. MHI)

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

(1) 軽水炉材料の長期使用の観点からの SCC 研究

(1) Study on SCC from Viewpoint of Long-term Use in LWRs

*加治 芳行¹¹ 日本原子力研究開発機構

軽水炉の再稼働と健全性確保に向けて、軽水炉の長期使用には、照射の影響も考慮した応力腐食割れ(SCC)の理解と適切な評価が重要となる。ここでは、ステンレス鋼の SCC 研究のこれまでの成果の概要と今後の展望について述べる。

キーワード：軽水炉材料、応力腐食割れ、照射誘起応力腐食割れ、長期使用、健全性評価

1. はじめに

平成 30 年 7 月現在、国内の原子力発電所の現状として、再稼働 9 基（原子炉稼働中 6 基、停止中 3 基）、原子炉設置変更許可済 5 基、新規制基準への適合性審査中 12 基、適合性審査未申請 12 基、廃炉決定済・見込み 22 基という状況である^[1]。軽水炉材料、特に炉内構造材料として使用されるオーステナイトステンレス鋼は、中性子の照射を受けることでマイクロ組織やマイクロ組成の変化が生じて照射誘起応力腐食割れ(IASCC)や破壊靱性の低下等を引き起こす場合がある。軽水炉の長期使用には、照射の影響も考慮した応力腐食割れ(SCC)の理解と適切な評価が重要となる。ここでは、ステンレス鋼の SCC 研究の現状と展望について述べる。

2. ステンレス鋼の SCC 研究

SCC は、通常、材料・環境・応力の 3 因子がそろったときに起こるとされる割れ発生・進展現象である。材料因子としては、熱処理や溶接の入熱による粒界炭化物の形成とそれに伴う Cr 欠乏層の形成、粒界に特定の元素の偏析による粒界割れ感受性の増加、表面加工による硬化層の形成等が大きな影響を及ぼすことが知られている。応力因子としては、引張応力、特に溶接後の残留引張応力が問題とされている。腐食環境としては、溶存酸素や過酸化水素の形成等電位の上昇に関与する因子は全て大きな影響を及ぼす。

粒界型 SCC(IGSCC)の対策材として開発された低炭素ステンレス鋼においても SCC の発生が、1994 年頃から海外において報告され、2001 年には国内の BWR の低炭素ステンレス鋼製の炉心シュラウドの溶接線近傍にひび割れが発見されたことが報告された。この SCC 発生・進展のメカニズムに関して^[2]、表面機械加工及び溶接による表面微細粒組織が形成され耐食性が劣化すること、表層に引張残留応力が形成されるが、TGSCC 発生しきい応力が約 600MPa であること、冷間加工率の増加により粒界がすべりやすくなることなどの知見が得られている。このようにある程度の理解は進んだものの、まだ明らかになっていない SCC 支配因子が多く残されている。例えば、SCC 挙動における長時間熱時効や水素の影響評価、上記の成果から有力視されている粒界すべりに基づく SCC モデルの検証、SCC き裂内部の局所水質の影響評価、の検討などがある^[3]。

IASCC に関しては、材料・環境・応力の 3 因子が放射線の影響により変化する複雑現象である。特に、材料の性質が大きく変化することが重要である^[4]。IASCC の発生感受性を示す SSRT 試験の粒界破面率や定荷重試験の発生しきい応力の照射量依存性と材料の性質、特に照射による硬さの増加量、転位ループ密

* Yoshiyuki Kaji¹¹ Japan Atomic Energy Agency

度、粗大すべり間隔、粒界偏析（Cr 欠乏、Ni 富化、Si 富化）の照射量依存性を比較すると、両者とも約 20dpa まで大きく変化し、高照射量では飽和傾向で変化が小さくなるというほとんど同じ変化を示している。このことから特定の因子だけが IASCC の原因ではないことが示唆されている^[5]。また、近年、分析機器の高精度化により、SCC き裂先端の変形挙動・酸化挙動の詳細観察がなされ、照射による局所変形と酸化の加速に関する知見が蓄積されている。一方、研究炉の老朽化から中性子照射材のデータと知見が少なくなっている。その点で、既存の照射材のデータと知識の集約・整理を進めデータベース化することにより、物性の傾向式を導出することができ、既存知識の継承と規格基準への対応も可能となる。また、加速試験を中心とした実験室データと実機データの解離という課題を解決する方策として、実機廃炉材を用いた研究も今後進めていくべきである。

本発表では、これまで残されている SCC 支配因子に関する研究の現状等について説明するとともに、長期使用の観点から検討すべき今後の展望について述べる。

3. まとめ

長期利用に伴い、SCC を始めとする経年劣化事象のメカニズム解明研究を進め、60 年利用への外挿性の確認などを行うとともに、事象の複合・連鎖により発生する可能性のある潜在事象を予測するプロアクティブ材料経年劣化評価が重要となる。

参考文献

- [1] 資源エネルギー庁ウェブサイト「日本の原子力発電所の状況」
http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/001/pdf/001_02_001.pdf
- [2] 鈴木俊一：「低炭素ステンレス鋼の SCC 発生・進展挙動とメカニズム」、原子力発電設備構造材料の経年変化に関する国内シンポジウム資料集、(社)日本溶接協会(2006)
- [3] 塚田隆：「SCC 支配因子研究の新展開」、金属学会セミナー「原子炉材料の照射損傷—高経年化への対応—」資料集、(社)日本金属学会(2006)
- [4] K. Fukuya, J. Nucl. Sci. Technol., Vol.50, No.3 (2013) pp.213-254.
- [5] 福村卓也、三浦照光、藤井克彦、福谷耕司、INSSJOURNAL Vol. 24 (2017) pp.131-139.

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.

材料部会セッション

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

(3) PWR プラントにおける SCC 事例と対策

(3) SCC Experience and Countermeasures in PWR Power Plants

*杉本 憲昭¹¹ 三菱重工業株式会社

1. 緒言

原子力発電所を始めとしてトラブルの未然防止は重要なテーマであり、プラントの高経年化に伴う圧力容器や配管などの構成部位の余寿命診断、劣化緩和、補修も重要な課題となっている。運転時間に伴い損傷が顕在化するものとして応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking : SCC）があり、損傷の要因として、環境、材料、応力の3因子の重畳によるものと考えられている。近年、加圧水型原子炉（Pressurized Water Reactor : PWR）においても、高ニッケル合金 600（以下 600 合金）の応力腐食割れによる損傷事例が国内外において顕在化してきている。PWR プラント 1 次系水環境条件下での応力腐食割れは PWSCC（Primary Water SCC）と言われ、PWSCC 感受性を有している 600 合金が加工や溶接などによる高残留応力条件下で使用される場合に、損傷に至るものと考えられている。

長期安定運転に向け損傷・漏えいを防止するための劣化緩和として、応力改善技術、材料改善・取替技術の代表的な保全技術を述べる。

2. PWR プラントにおける SCC 対策

2-1. 応力改善技術

PWSCC 発生因子の一つである高残留応力への対策の一つとして、対象機器が施工時に気中環境の場合はショットピーニング、水中環境の場合はウォータジェットピーニングを適用し、1 次系水接液面の引張残留応力を圧縮応力に改善している。ウォータジェットピーニングではキャビテーション崩壊時の衝撃圧にて、ショットピーニングではショット材の衝突力にて、材料表面に塑性ひずみを付与することで、内表面近傍を圧縮応力に改善できることを確認している。ショットピーニングにおいては深い応力改善効果と異物管理の容易化などを目的に、粒径の大きいショット材を用い、ショット材の駆動源としてコンパクトで大きな力を出せるピエゾ素子による超音波振動を用いた手法がある。

一方、配管など内表面にアクセスが困難な場合、外面からの応力改善手法が必要であり、その手法の一つとして、高出力レーザービームを外面に移動させながら照射し、外面を急速加熱することで板厚内温度差による熱膨張ひずみを用い、内面を圧縮応力に改善する手法（レーザー外面照射応力改善法）を開発している。この手法はレーザー照射による急速加熱を実現できることから、適切な条件を選定することにより内面の水冷効果を期待することなく、適用可能とする特徴を持つ。内表面の溶接部及び溶接部近傍の高い引張残留応力を圧縮応力に改善できることを確認している。

2-2. 材料改善・取替技術

材料を変更して 1 次系水接液表面に耐 PWSCC 性の優れた材料である高ニッケル合金 690（690 合金）を用いる対策がある。690 合金は 600 合金に対しクロム（Cr）量をおよそ倍量に増加させることで耐 PWSCC 性を向上させている。

* Noriaki Sugimoto¹¹ Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

具体的には1次系水接液表面に肉盛溶接することで、600合金を接液させないようにする環境遮断クラッディングと、取替による材料改善がある。劣化緩和技術の原子炉容器出口管台セーフエンド継ぎ手（600合金）への適用例として、原子炉容器ノズル溶接部へのインレイ技術がある。流路確保や検査性確保のため、あらかじめ溝加工を行い、肉盛溶接を実施している。溶接後熱処理を不要にできる自動溶接による3層テンパービードクラッド溶接法を開発し実機に適用している。

耐 SCC 性の優れた材料を用いて製作した機器への一体取替としては、上部原子炉容器取替、蒸気発生器取替、炉内構造物取替等がある。一方で、一体取替が困難な場合や万一の損傷時の補修として、部分取替（例えば管台セーフエンド継ぎ手取替など）技術も開発している。部分取替は補修だけでなく、予防保全としての材料改善手法の一つとしても計画されている。一例として、加圧器台セーフエンド継ぎ手取替技術がある。600合金継ぎ手を含む短管を撤去し、新たな短管を取付ける際に耐 SCC 性の優れた 690 合金溶接材料にて溶接する方法である。

3. 結言

応力改善技術、材料改善・取替技術の保全技術について述べたが、これら保全技術によって原子力発電プラントの安全性と信頼性を向上させ、長期間の運転にわたって経済的に運転を継続するのに役立つものとする。今後とも、検査技術、劣化緩和・補修取替などの開発・検証を積極的に推進し、高度化・高性能化を進めていく。

参考文献

- [1] Koji Okimura et al., “RELIABILITY OF WATER JET PEENING FOR ALLOY 600 PWSCC MITIGATION”, ASME PVP2012-78468.
- [2] Takeshi Yamamoto et al., “APPLICATION OF USP TO STEAM GENERATOR NOZZLES”, ASME PVP2011-57495.