

## 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<sup>1</sup><sup>1</sup> 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<sup>[1]</sup>。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<sup>[2]</sup>、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<sup>[3]</sup>。

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<sup>[4]</sup>。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 Kaji<sup>1</sup><sup>1</sup> 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<sup>[5]</sup>。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](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.