新たな視点による応力腐食割れき裂進展モデリングの記述*

村上 弘 良**

** 日本原子力発電株式会社 発電管理室

New Expression Method of SCC Crack Growth Modeling*

Hiroyoshi Murakami**

** Plant Management Department, The Japan Atomic Power Company

This paper reports a new approach for the modeling of SCC crack growth in nuclear coolant environments. Many SCC tests have been carried out since 70's. Some of crack growth rate data was observed to be widely scattered. Previous studies have concentrated on the prediction of crack growth rate in a wide range of stress intensity factor. On the review of many laboratory test data, we propose a process of crack growth of SCC is the coupled phenomenon as a result of synergistic state transition between mechanical system that consisted of stress and material, and chemical system that consisted of material and environment. The coupled phenomenon is a two-stage reaction as results of state transitions of material which commonly exists in the both systems. Since in the case of new approach, several critical reactions could exist in the process of SCC crack growth, it could be explained that an observed data in laboratory test was fluctuated.

Key words : SCC, crack growth rate, coupled phenomenon, synergistic state transition

1. 緒 言

軽水型原子力発電所構造物における応力腐食割れ事象は、1970年代から現在まで発生し続けている。このため多くの民間研究および国の安全研究が実施されてきた。

高温高圧水環境下での応力腐食割れ試験結果では、き裂進展試験速度の大きなばらつきが報告されているとともに応力腐食割れき裂先端部に酸化物が観察されているなどの新たな知見も得られている。さらに、すべり溶解モデルもしくはすべり酸化モデル等高温高圧環境下での応力腐食割れき裂進展メカニズムが提案されてきた^{1), 2)}。これらのモデルは、応力拡大係数の小さな領域から大きな領域までき裂進展速度の傾向を予測することに集中していたことから、試験で観察されているき裂進展速度のばらつき、き裂の停留（不活性化）および環境条件変化によるき裂成長の時間遅れもしくは加速などの短期的変化を要領よく説明するには向いてない。また、提案されているメカニズムは、新たな知見が発見された場合に容易に知見を取り込める形態とはなっていない。

本研究では、最近のき裂進展データなどを検討し、試験で観察されているき裂進展の停留やき裂進展速度のばらつきなどを説明するモデルを検討した。

2. 課題とモデル

原子力環境下における応力腐食割れ事象は、Fig. 1に示すように集合論で利用されているベン図により説明されることが多い。この図の効用は、材料、環境および応力の3要因の重畳により応力腐食割れが発生・進展することが容易に示されることである。しかしながらメカニ

Fig. 1 Conventional Stress Corrosion Cracking Model using Venn Diagram

ズム研究の観点から3要因の重畳以外に3要因が互いに関係し連成することによりき裂の発生と進展が生じているような場合にはベン図での表現は誤解を与える。すなわち、き裂進展速度が一定となるような反応が進行している場合にはベン図による表現は明確になる。応力腐食割れき裂進展速度のばらつきや、き裂停留およびき裂進展速度の加速などを統一的に説明するには3要因が互いに関与した連成系としての表現が適切になると考えられるが、3要因の寄与率もしくは連成関係などについてメカニズム・モデルの観点からの研究はほとんどされてこなかった。

P. Ford および P. Andresen らによるすべり溶解モデルに基づく応力腐食割れき裂進展メカニズムの提案¹⁾ および T. Shoji らによるき裂進展時のき裂先端部の応力拡大係数とき裂先端部のすべり溶解・酸化の関係を明瞭にした応力腐食割れき裂進展メカニズムの提案²⁾ があるが、これらの提案では試験や実機において新たな知見が得られた際に改良が容易にできない不便さがある。また、一般にメカニズムを構築する際には、材料の化学成分・内

* 〒101-0053 東京都千代田区神田美土代町 1-1 (1-1, Kandamitoshirocho, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-0053 Japan)

Fig. 2 Synergistic State Transition Model for SCC Crack Growth

部歪み（含む残留応力）・金属組織が決定した材料に対し、応力腐食割れに特有な応力-材料の組み合わせによる力学系および材料-環境の組み合わせによる化学系の相互作用を記述することになる。しかしながら、従来の提案では単位系が異なる2つの系から「き裂発生・進展（成長）」を導出するため3要因の重畳条件を利用し2つの系を連結させる仮定を置きき裂進展式を求めている。このためき裂進展式は応力拡大係数などを定めた際には通常一つの解が求められるのみで実験結果で観察されているき裂進展速度のばらつきを表現できない。

応力腐食割れき裂先端部で生じているすべり溶解の化学反応については、素反応の解析、酸化物生成反応および反応が濃度比に比例する反応であるかなど未解決であるとともに熱力学データの蓄積もない。

本研究では、多くの応力腐食割れき裂進展試験データを検討し、進展しているき裂の停留、き裂先端部の再活性化によるき裂の再進展および環境条件変更時のき裂挙動の時間遅れおよび加速現象を容易に説明するために新たな視点から検討を行った。その結果、応力腐食割れ事象は、応力-材料の組み合わせによる力学系、材料の化学成分-材料組織など材料物性系および材料-環境の組み合わせによる化学系が協調・協調し連成する現象であると考えた（Fig. 2）。すなわち、応力腐食割れ事象は、性質の異なる系が独立に存在し、系の状態の変化を他の系に伝達するプロセスが連鎖的に生じる事象とした。新たな提案は、系の協調・共同プロセスの連鎖となるため連鎖の停止による進展き裂の停留、同一き裂長さ条件下において複数の連鎖速度の組み合わせが可能となることからき裂進展速度のばらつき等々が説明できる。

3. 考 察

本研究では、応力腐食割れ感受性のある材料は応力-材料の組み合わせによる力学系から影響を受け材料の状態が変化する、状態が変化した材料は力学系に存在する

と同時に材料-環境の組み合わせによる化学系に存在するため状態が変化したことに対する影響を化学系から受ける、化学系から影響を受けた材料は材料の状態が変化したことから再度力学系から影響を受ける、このように系の条件に従い材料の状態が時系列的に遷移し新たな材料状態となったことで別の系の条件と整合することが必要になりさらに新たな材料状態へと遷移する現象が連鎖的に進行する事象として応力腐食割れ事象を定義した。このように定義したことにより、異なる性質を持った独立した力学系と化学系の2つの系の協調・協調の程度によりき裂進展挙動が大きく違うことが導出できるようになる。

新たな提案の具体的記述の考え方は、力学系および化学系が二本の有向ネットワークで連結されているネットワークを系からの影響を受けた材料が循環する事象として取り扱う。材料は、ネットワーク上で情報伝達媒体として他の系へと伝達される。伝達された材料は、系からの影響を受けた後、ネットワークを経由して送信元の系に伝達される。

応力腐食割れは、材料が環境へと移行する現象が最終的状态であるため化学式は次式となる。

ここに、 M : 金属, M^{Z+} : 金属イオン,

Z : 価数, e^{-} : 電子。

上式は、 M (材料) が M^{Z+} と e^{-} に変化したことを対応の概念により記述したものであると解釈できる。この対応の概念が情報伝達であると考えられる。このように考えると材料が系からの影響を受け材料の状態が変化し、状態が変化した材料が次の系に伝達され新たな状態へと変化する状態遷移は次式のように記載できる。

(2)式の対応関係を図式化すると Fig. 3 のようになる。Fig. 3 は、力学系に存在している材料 (M) に荷重が負荷 (K) した結果、材料が負荷状態の材料 (KM) へと変化する、その後状態が変化した材料 (KM) が化学系に伝達される。化学系に伝達された材料 (KM) は、その特性に応じ状態が変化 (SCC き裂が成長) し新たにき裂が成長した材料 (CPM) となる。 K と M から KM が生成する速度を反応速度定数 (状態遷移速度) k_1 および KM から K および CPM が生成する速度を反応速度定数 (状態遷移速度) k_2 とする。き裂が成長した材料は状態が変化し力学

Fig. 3 Graphical Expression of SCC Crack Growth (Reaction Network)

因子が変化することから新たな負荷荷重条件が出現するフィードバックプロセスとなる。(2)式の時系列表現は、次式となる。

(3) 式を論理式として差し引きすると、

CPM は、き裂が成長した材料を表現しているので次式が成り立つ。

したがって、(4)式は、(1)式と等価となる。従来の提案と新たな提案との相違点は、き裂進展に対する処理を前者がき裂先端の変形挙動を Faraday の法則に従う溶解過程に組み込む一段過程として処理するのに対し、後者はき裂先端の変形挙動をき裂進展するための材料の状態変化として処理を行いその後き裂が進展する2段階過程としているところである。(3)および(4)式から、KM の生成が律速過程でない場合かつ K が反応を促進する触媒と同様であると考え、新たな提案は、従来のき裂進展の提案の基本式である(1)式を特殊な場合として包含する形態となっている。

Fig. 3 の図式は情報理論および数理生物学において発達した反応ネットワークによる記述と同様であることからグラフ表現の改訂により新知見を反映することが可能となるとともに情報理論で発達した解析手法を利用できるメリットがある。

今後このモデルを発展させるためには試験データのデータベースの構築、数理モデルによるシミュレーションおよびシミュレーション結果の検証手法の開発が必要となる。

4. 結 言

本研究では、応力腐食割れき裂進展について新たな視点より検討を行い以下の結論を得た。

(1) 応力-材料の組み合わせからなる力学系および材料-環境の組み合わせからなる化学系が互いに協調・協調し連成する事象として応力腐食割れき裂進展モデルを提案した。

(2) 力学系および化学系が互いに協調・協調する連成は、両方の系に属する材料の状態が時系列的に遷移する2段階のフィードバックプロセスとして図式化した。

参 考 文 献

- 1) P. Ford, P. Andresen, H. Solomon, G. Gordon, S. Ranganath, D. Weinstein and R. Pathania, 4th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, p.4-26 (1989).
- 2) T. Shoji, S. Suzuki and G. Ballinger, 7th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, p.881 (1995).

(Manuscript received August 1, 2011;
in final form October 24, 2011)

要 旨

本論文は、原子力冷却材環境下における応力腐食割れき裂進展モデルの新たなアプローチについて報告する。多くの応力腐食割れ試験が1970年代より実施されてきた。一部のき裂進展速度は、広範囲にばらついていることが観察されている。既に報告されているき裂進展メカニズムは広範囲の応力拡大係数における予測に集中している。多くの実験結果のレビューにもとづき、応力-材料の組み合わせからなる力学系および材料-環境の組み合わせからなる化学系が協調・協調し連成するき裂成長モデルを提案した。連成は、2つの系に共通して存在する材料の状態が時系列的に2段階で遷移することにより生じる。新たな提案による方法の場合、応力腐食割れき裂進展過程において複数の律速段階の存在が可能となり実験で観察されているばらつきの説明が可能となる。

キーワード SCC, き裂進展速度, 連成事象, 協調・協同作用による状態遷移