

“さび”の定量と“ひび”の予測

Quantification of Rust and Prediction of Cracking

中山 元 技術開発本部基盤技術研究所材料研究部 主幹 博士(工学)
 榎原 洋平 技術開発本部基盤技術研究所材料研究部

腐食損傷形態と腐食機構の特徴に基づく腐食の分類に基づき、全面腐食型の金属(“さび”型)と不働態・局部腐食型の金属(“ひび”型)に分け、それぞれの腐食の評価の考え方を整理する。さらに、近年精力的に実施しているPWR(加圧水型原子炉)一次系水環境の応力腐食割れ(“ひび”)に対する試験・評価を通して、プラント構成機器材料の長期健全性担保のシナリオを解説する。

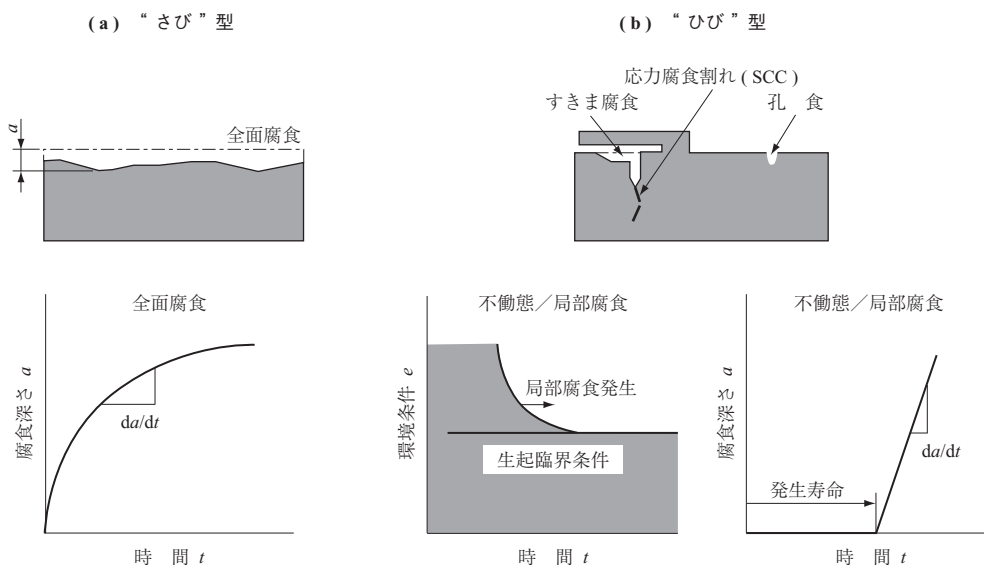
Metal corrosion was classified into two types – general (or uniform) corrosion (rust) and passive or localized corrosion (cracking) – based on the characteristics of corrosion damage morphology and of corrosion mechanisms in order to summarize the concepts regarding the evaluation of both corrosion types. In addition, this article presents scenarios for the guaranteeing through tests of the long-term soundness of materials used for plant components and the evaluation of stress corrosion cracking in the primary water environment of Pressurized Water Reactor (PWR). Such evaluations are being carried out intensively in recent years.

1. 緒 言

しばしば材料の腐食 (Corrosion) に遭遇し、腐食は専門外分野と考える技術者は、「悪魔の気まぐれな選択ではないか?」とその身の不幸を嘆く⁽¹⁾。しかしながら、腐食は材料と環境や負荷応力などに付随する特性の一つで「金属とその環境間の化学的相互作用であり、その結果として金属の性質を変化させ、金属、環境あるいはこれらを構成の一部とする実用体系機能を損傷させることが多い」と定義⁽²⁾されている。したがって、材料が使われる広き

に及ぶ腐食/耐食性があり、製品の数だけの防食技術が望まれる。そうは言っても、「腐食事例は大抵の教科書通りに起こっており、澄んだ目には関与する因子もむしろ少なく、同じ現象が場面を変えて繰り返し現れ⁽³⁾ている。」と論されている。

本稿では、腐食損傷形態と腐食機構の特徴に基づく腐食の分類に基づき、**第1図**に模式的に示すように、-(a)全面腐食型の金属(炭素鋼など、“さび”型)と、-(b)不働態・局部腐食型の金属(ステンレス鋼など、“ひび”型)に分け、それぞれの寿命予測の考え方を整理し、



第1図 腐食損傷形態と腐食機構の特徴に基づく腐食の分類と寿命予測の考え方

Fig. 1 Concepts behind classification of corrosion based on characteristics of corrosion damage morphology and corrosion mechanisms, and life prediction

PWSCC (Primary Water Stress Corrosion Cracking) 感受性の評価など当社での取組みの例を紹介する。

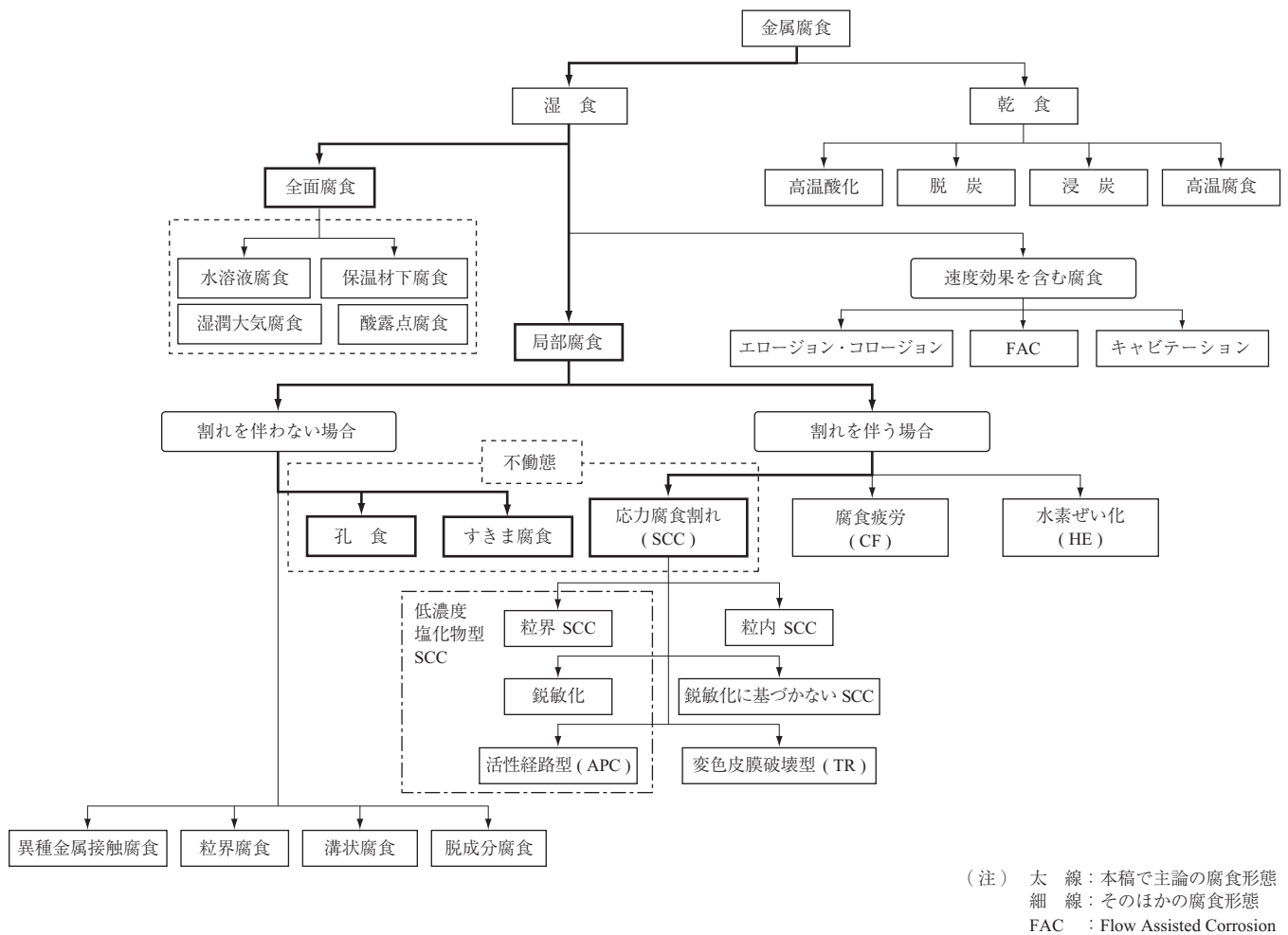
2. “さび”と“ひび”

金属はいろいろな腐食形態を取り、腐食損傷形態と腐食機構の特徴に基づく腐食の分類を第2図に示すように、湿食と乾食があり、湿食は、全面腐食、局部腐食、および、流速効果を含む腐食、などに分類される。さらに、全面腐食であれば、水溶液腐食、保温材下腐食 (CUI : Corrosion Under Insulation) など、局部腐食は、① 割れを伴わない場合は、孔食、すきま腐食、② 割れを伴う場合は、応力腐食割れ (SCC : Stress Corrosion Cracking) などと分類される。SCC のなかで、さらに、粒界割れか粒内割れか、鋭敏化に基づくか否か、活性経路型 (APC : Active Pass Corrosion) か、変色皮膜破壊型 (TR : Tarnish Rupture) か、などに進む。同様に、材料、環境についての分類体系ができる。

腐食とは金属が元の酸化物の形に戻ることであり、それ

までの期間をうまく使うことに知恵を使っていることになる。鉄の“さび(腐食)”は、 $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e$ (アノード反応) のように、イオンと電子に分かれて進展する。そこで、時々刻々の電子の動きを電流としてとらえることによって“さび”の発生や進展を定量的に評価することができる。さらに、悪いところが集中的に攻撃されながら進むと、“ひび(応力腐食割れ, Stress Corrosion Cracking : SCC)”になる。

腐食反応は、アノード反応とカソード反応とのバランスによって進行する。アノード反応は、金属がイオンと電子に分かれて溶出する反応である。カソード反応は、たとえば、溶存酸素が還元(消費)される反応 ($O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH^-$) で、それぞれ、個々のアノード反応を上向きのベクトル、カソード反応を下向きのベクトルで記し、その反応の大きさをベクトルの長さで示す。ここで、アノード反応とカソード反応の総量は等しく釣り合っている。アノード反応のベクトルが大きければ、大きな腐食となり、小さければ小さな腐食となる。相互に影響



第2図 腐食損傷形態と腐食機構の特徴に基づく腐食の分類

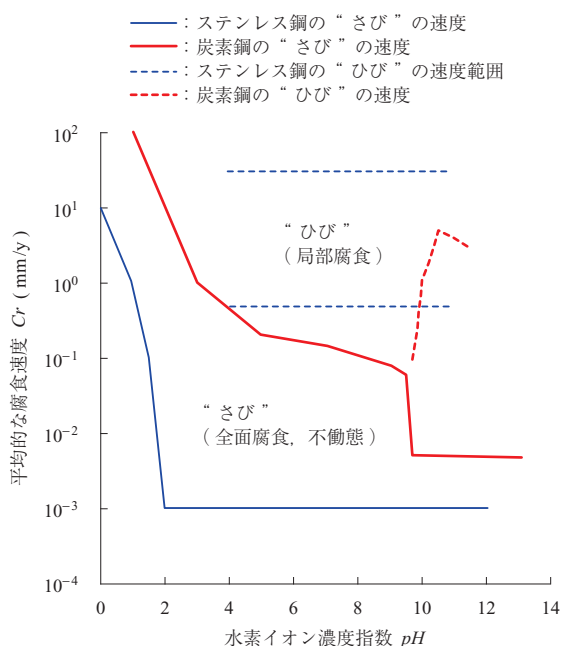
Fig. 2 Classification of corrosion based on characteristics of corrosion mechanisms and morphology of corrosion damage

を受ける範囲は、環境側の抵抗（水溶液の場合は、電気伝導度など）に依存し、海水では数 m 以上であるが、水道水では数 cm 程度に限定される。アノード反応とカソード反応が同じ位置で起きれば、全面・均一腐食になる。さらに、実用上、十分小さければ（たとえば、 $1 \mu\text{m}/\text{y}$ ）、事実上、腐食は無視できる。これを、不動態（Passivity）⁽⁴⁾と呼ぶ。ステンレス鋼は広い範囲で不動態化（ Cr_2O_3 のち密で薄い皮膜で覆われる状態）している。炭素鋼も、酸性～中性環境では均一・全面腐食するが、アルカリ性環境や中性の高温水環境では不動態化する。健全なコンクリート中の鉄筋は腐食の心配なく使用している好例である。

不動態状態でアノードとカソードが分離し、局部的にアノード反応が大きくなるところができれば、局部腐食になる。アノードとカソードが分離するきっかけとしては、鋼中の介在物、結晶粒界、付着物下や重ね板などのすきま（Crevice）部があり、応力の作用があれば、応力腐食割れ（“ひび”）になる。このときに、塩化物（ Cl^- イオン）などの不動態皮膜を局部的に破る物質が悪さを及ぼす。また、腐食反応などで生じた水素を吸収して、内部から割れる水素ぜい化（Hydrogen Embrittlement）を起こすこともある。

3. “さび”の定量

鉄（鉄鋼構造物）を、海水、河川水などの自然水や、大気に触れた状態で使用し続けると、“さび”る。第3



第3図 炭素鋼、および、ステンレス鋼の“さび”、“ひび”速度の pH 依存性

Fig. 3 pH dependence of corrosion (rust and cracking) rate of carbon steel and stainless steel

図に、炭素鋼の腐食速度の pH 依存性をステンレス鋼と比較して示すように、酸性側では腐食が大きく、実用上使用不能である。中性域においては、溶出した鉄イオンが酸化物などの“さび”層になってその表面を覆い、さらなる“さび”の進展の障壁になり得る。したがって、腐食深さの増加は、初期には $0.2 \text{ mm}/\text{y}$ 程度であるが、時間の経過とともに減じて、時間の平方根に比例（べき数を $1/2$ とするべき乗則）して、数年経過時の平均腐食速度は $0.1 \text{ mm}/\text{y}$ 程度となる。なお、鉄の腐食反応そのものには塩化物（ Cl^- ）はかかわらないから、水温、溶存酸素濃度（DO）、pH などが同じ程度であれば、海水と河川水の腐食性は、ほぼ同じとみなせる。ただし、干満帯などの乾湿繰返し領域では海水面上の方が長時間にわたって湿潤環境に維持されるため、腐食量が大きくなる傾向にある。

さらに、アルカリ性になると、薄い“さび”層の被膜が安定化・ち密化（不動態化）して、“さび”は無視できるほど（ $1 \mu\text{m}/\text{y}$ ）になるが、塩化物などの有害イオンの共存によって“ひび”型の腐食を起こす恐れがある。

中性域の $0.1 \text{ mm}/\text{y}$ 程度の腐食速度であれば、 $1 \text{ mm}/10 \text{ y}$ の腐食代を設け、さらには塗装や電気防食、亜鉛めっきなどの防食手法を併用して、実用的に使用している。特に、循環冷却水など水質が制御できる系では、インヒビター（腐食抑制剤）などの添加によって弱アルカリ性の不動態域に維持するとともに、塩化物濃度の上限を設けて“ひび”型の局部腐食を起こさないように管理して使用する。また、約 10 年をめどとして、塗替えなどのメンテナンスが必要である。なお、配管内で局部的に流れが速くなる部分、過加熱による局部沸騰部など、安定的な“さび”層が生成し難い状況下では、腐食速度の時間的な低減が期待できないばかりか、機械的作用との重畳によって、 $1 \text{ mm}/\text{y}$ を超える減肉速度を取り得るため、注意が必要である。

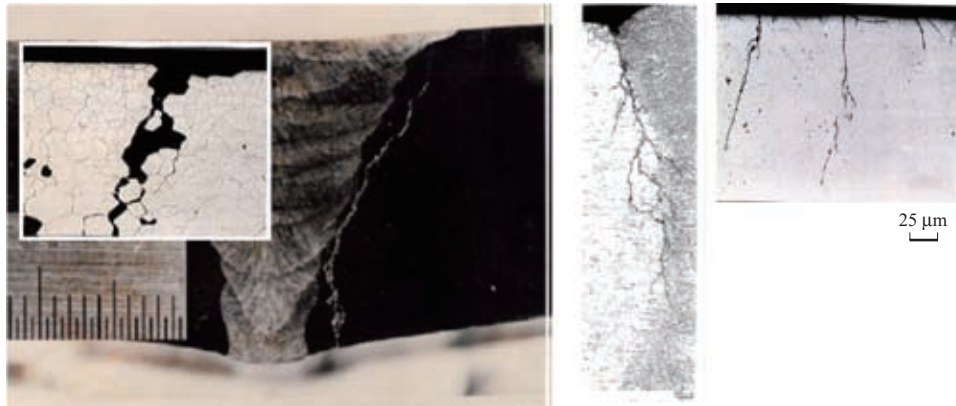
4. “ひび”の予測

ステンレス鋼の溶接構造物を、海水などの塩化物環境で使用すれば、孔食、すきま腐食が発生する可能性がある。さらに、溶接残留応力によって、第4図に示すように“ひび（SCC）”が発生することがある。すなわち、材料、環境、応力の三つの因子が重なった特定の条件が整った場合に、“ひび”という形で構造物が局部的に劣化することがある。“ひび”の箇所以外は長時間経過後も初期の材料特性を維持している。

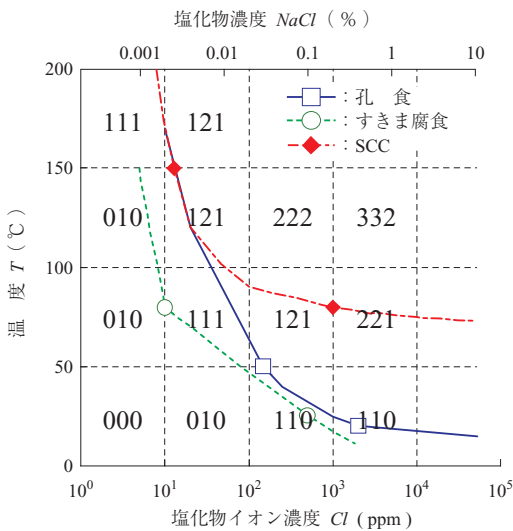
孔食、すきま腐食、SCC 発生領域を第5図に示すよ

(a) 鋭敏化による粒界応力腐食割れ

(b) 材料組織に依存しない粒内応力腐食割れ



第4図 ステンレス鋼に生じた“ひび”の例
Fig. 4 Example of cracking in stainless steel



(注) 材 料: Type304 ステンレス鋼
環 境: 塩化物
図中の三桁数字:
・各区画における劣化レベルを示す。
・一桁目(右)は SCC, 二桁目(中央)はすきま, 三桁目(左)は孔食を示す。
・劣化レベルの数字は第1表に示す。

第5図 ステンレス鋼の孔食, すきま腐食, “ひび”(SCC)発生領域図(温度-塩化物濃度)

Fig. 5 Areas of stainless steel with pitting corrosion, crevice corrosion and SCC (cracking) (temperature - chloride concentration diagram)

第1表 劣化レベル, 破損確率, 寿命, 破損感受性の目安
Table 1 Standards for degradation level, risk of damage, longevity and sensitivity to damage

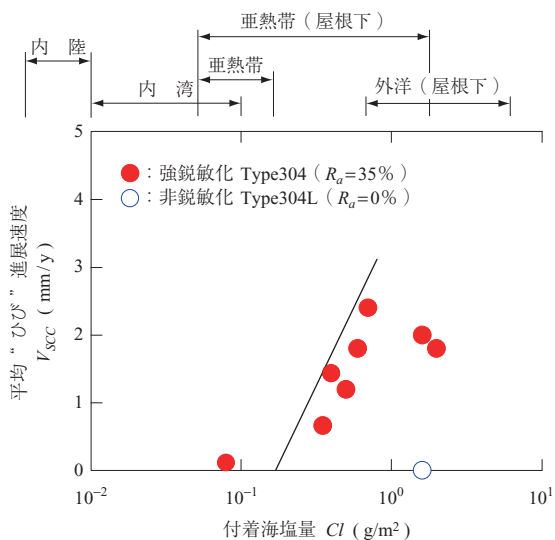
劣化レベル	破損確率	寿 命	破損感受性
3	>0.01	≤ 2d	高
2	>0.001, ≤ 0.01	>2d, ≤ 4d	中
1	>0.000 1, ≤ 0.001	>4d, ≤ 10d	低
0	≤ 0.000 1	>10d	微

(注) d: 定期検査間隔

うな温度-塩化物濃度マップ⁽⁵⁾上に記す。さらに, 温度を 50℃ ごと, 塩化物濃度を 10 倍ごとに区切った領域で, 第1表に示す劣化レベルを割り振る。たとえば, 70℃, 500 ppm [Cl⁻]では, 孔食のリスクは 1, すきま腐食のリスクは 2, SCC のリスクは 1 である。したがって, “ひび”の劣化レベルは 1 であるから, 破損確率は低であり, 確率としては 0.001 ~ 0.000 1 程度になる。これらの確率評価は, 高経年化プラントのメンテナンスの優先部位の抽出などにも活用されている。

Type304 (18Cr-8Ni 鋼)に代表されるオーステナイト系ステンレス鋼は, その溶接入熱で粒界に Cr 炭化物 (Cr₂₃C₆) が析出し, その生成過程でマトリックスからの Cr 拡散が遅れが生じるため, Cr 炭化物に近接する微小領域で Cr 欠乏域 (Cr 濃度が, Type304 の 18% に対して, 12% 以下になる) が形成され耐食性を失う, いわゆる鋭敏化を起こす。この鋭敏化したステンレス鋼に発生する“ひび”は, Cr 濃度の低い粒界を進展する。実際に鋭敏化による“ひび”が発生するか否かは, 材料 (鋼中の % C に強く依存) - 温度 (800 ~ 450℃ 域が中心) - 時間 (数分~数千時間) - Cr 炭化物析出/鋭敏化線図 (TTS (Time-Temperature-Sensitization) 線図⁽⁶⁾) で表される鋭敏化領域と, 溶接などの熱履歴との関係で決まる。鋭敏化の程度 (R_a: Reactivation Ratio) は JIS に準拠⁽⁷⁾した DOS テスター⁽⁸⁾を用いて, 非破壊的に判定することができる。鋭敏化対策材としては鋼中の % C を低下させた Type304L 鋼や, Nb や Ti で C を固定した安定化鋼などが開発され, 実用化されている。

第6図に海洋性湿潤環境における鋭敏化したステンレス鋼の平均“ひび”進展速度の付着海塩量依存性を非鋭



(注) 試験：海洋性湿潤大気環境暴露試験
材料：ステンレス鋼

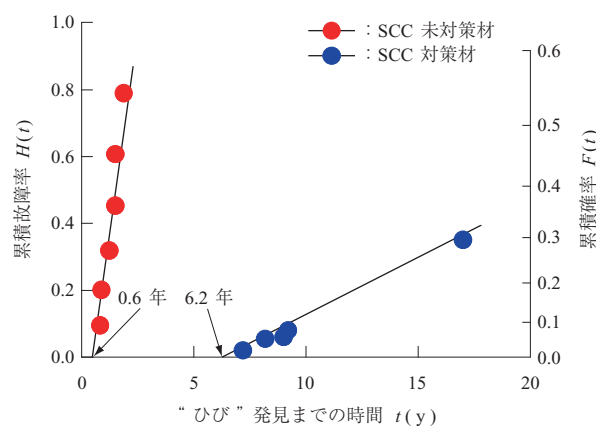
第 6 図 海洋性湿潤環境における鋭敏化したステンレス鋼の平均“ひび”進展速度の付着海塩量依存性、および非鋭敏化ステンレス鋼との比較

Fig. 6 Dependence on amount of adhering sea salt of average rate of cracking in sensitized stainless steel in wet oceanic environments, and cracking rate comparison between sensitized and non-sensitized stainless steel

敏化ステンレス鋼と比較して示す。Ra = 35%の強鋭敏化材では付着海塩量が 0.1 g/m² を超えると“ひび”を起し、付着海塩量の増加とともにその進展速度が大きくなっていく。一方、非鋭敏化材 (Type304L) では、海洋性湿潤環境 (加熱, 保温材なし) において“ひび”が発生することはない。なお、第 6 図には、代表的な環境における付着海塩量を付記した。同じ設置場所でも、潮風によって飛来海塩が供給される一方で降雨による海塩の洗い流しが起きない屋根下で、付着海塩量が多くなる。

また、条件が整えば、鋭敏化していなくても粒界を“ひび”が進展する場合があることが確認⁽⁹⁾されている。より厳しい腐食環境になれば、鋭敏化していない組織でも、結晶組織によらず、“ひび”は粒内を進展経路として進展する。

“ひび”が発生する条件が整ってから、実際に“ひび”が発生するまでには時間が掛かり、発生寿命をもつ。“ひび”が起き得る条件であっても、その発生寿命が十分に長ければ、実際には使用し得る。さらに、その発生寿命もばらつく。そのばらつきは、発生寿命が短いほど小さく、発生寿命が長くなるに伴ってばらつきも大きくなっていくため、指数分布モデル⁽¹⁰⁾などの統計的な取扱いが行われている。第 7 図に鋭敏化材 (SSC 未対策材) と、低% C 化による SSC 対策材の“ひび”発見までの時間



(注) 対象品物：プラント配管

第 7 図 鋭敏化材 (SSC 未対策材) と SSC 対策材の“ひび”発見までの時間のばらつき

Fig. 7 Difference in time to detect cracks between sensitized materials (for which SCC countermeasures have yet to be taken) and materials for which SCC countermeasures have been taken

の累積確率 (右縦軸が 1 に到達した時点で、“ひび”が 100% 発生) 依存性を示す。このケースでは、“ひび”防止対策は完璧ではなかったものの、発生寿命は 0.6 年から 6.2 年にほぼ 10 倍になり、それに伴って発生頻度も低下して、“ひび”は抑制されている。

材料 (合金種)、鋭敏化などの材料劣化因子温度、環境、負荷応力などの加速因子をパラメタとした定荷重試験の破断時間の下限界値を発生寿命として、それぞれの加速因子依存性を数式化したものを掛け合わせたモデル⁽¹¹⁾が提唱されている。中性塩化物環境中のステンレス鋼の SCC 発生寿命 a⁽¹²⁾は：

$$\begin{aligned}
 a &= a_0 \times f_{(すきま)} \times f_{(電位)} \times f_{(負荷応力)} \times f_{(塩化物濃度)} \\
 &\quad \times f_{(鋭敏化度)} \times f_{(温度)} \\
 &= a_0 \cdot [f_C \cdot (E - E_{R,SCC})]^{-1} \cdot (S_T / S_y - 0.5)^{-2} \cdot ([Cl^-])^{-0.5} \\
 &\quad R_a^{-4.1} \cdot \exp(6.8 \times 10^2 / T)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

ここで、

- f_C : すきまの有無による定数
- E : 環境の酸化還元性の指標である電位
- S_T : 負荷応力, S_y : 降伏応力
- [Cl⁻] : 塩化物濃度
- R_a : 鋭敏化度
- T : 温度

の関係を示す。

5. PWR 環境における SCC 感受性評価の例

当社では以前から沸騰水型原子炉 (BWR) 向けの SCC

感受性を評価することによって BWR プラントの材料・SCC の問題に取り組んでいる。新たに加圧水型原子炉 (PWR) への参入に合わせて、PWR 環境の SCC 感受性評価を進めて、プラント構成機器材料の健全性の担保を図っている。

BWR の場合には、代表的な運転条件 (288 °C, 0.2 ppmDO, 7 MPa, DO: 溶存酸素) に対して、DO を高めることによる加速環境で SCC 感受性を評価することが行われている。

一方、PWR 一次系水の場合には、代表的な運転条件 (315 °C, 水素注入) に対して、360 °C までの温度加速が行われている。この場合の蒸気圧が 22 MPa と高圧となるため、PWSCC (一次系水 SCC) 感受性評価には特別な高温高圧の試験装置と高度な運転技術が必要になる。PWSCC 感受性を明らかにするための SSRT 試験 (Slow Strain Rate Tensile, 試験片を低ひずみ速度で引っ張り、SCC 破面率、破断ひずみ、などで比較・評価)、RUB 試験 (Reverse U-bend, 高温下で弛緩しないように工夫した逆ひずみ曲げ試験片を高温・高圧水環境に浸せし、一定時間ごとに SCC の有無を評価)、UCL 試験 (Uniaxial Constant Load, 試験片に単軸定荷重を付与し、破断寿命を求める)、き裂進展性試験 (予き裂を付与した破壊力学試験片の予き裂端からの SCC 進展の評価) に加え、400 °C の過熱蒸気環境での温度加速 RUB 試験を実施して

いる。

第 8 図に PWSCC 感受性評価として SSRT 試験の結果を示す。応力集中部から“ひび”を起こさせるためのハンプ (Λ 型の冷間加工) を付与した SSRT 試験片を、360 °C, PWR 環境 (500 ppm B, 2.0 ppm Li, DO < 5 ppb, DH (Dissolved Hydrogen) 30 cckg/H₂O) 中で、0.1 μm/min の引張速度で破断まで引っ張った。従来の Alloy600 系 (16Cr-75Ni-9Fe) Ni 基合金溶接金属の Alloy82 では、デンドライト (凝固組織) 境界に沿った割れ (IDSCC (Inter Dendritic Stress Corrosion Cracking)) を起こしたのに対して、PWSCC 対策材の Alloy690 系 (30Cr-60Ni-10Fe) の溶接金属である Alloy52 では、延性破壊を起こし、PWSCC 感受性を示さない。これらの成果を、PWSCC 感受性をもたないものづくりにフィードバックしている。

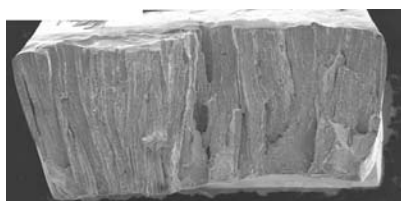
6. “さび”と“ひび”のセンシング

“さび”も、“ひび”も電子の動きが関与するため、“さびる”もの (測定対象) と、対極と、電流計があって、うまく電流として取り出せればセンシングが可能である。わざと“さび”方の違う金属、たとえば、鉄 (Fe) と銀 (Ag) の対を絶縁して並べて設置し、両者の間の電流を測る仕組みを作れば、Fe-Ag 対のぬれ具合に応じた電流が流れるため、立派な“さび”センサになる⁽¹³⁾。電子の動きを時系列で細かく追っかければ、電気化学信号

(a) 試験前のハンプ付 SSRT 試験片



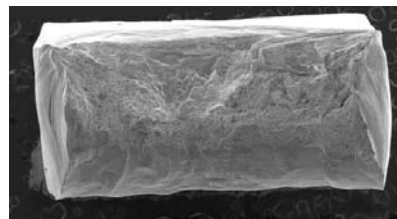
(c) Alloy82 の IDSCC 破面



(b) SSRT 試験後の外觀



(d) Alloy52 の延性破面 (SCC 感受性なし)



第 8 図 PWR 加速環境における SSRT 試験による SCC 感受性評価
Fig. 8 Evaluation using SSRT tests of SCC susceptibility in flow accelerated corrosion of PWR

(Electrochemical Signal) として, “ひび”の初期段階の予知ができる⁽¹⁴⁾. 一つ一つの“ひび”の長さは 100 μm 程度で, 近接した“ひび”同士が合体して大きくなってから破壊力学で取り扱う mm オーダの“ひび”⁽¹⁵⁾として進展していく⁽¹¹⁾. この過程の可視化⁽¹⁶⁾,⁽¹⁷⁾, モンテカルロ法を用いたシミュレーションによる解析⁽¹⁸⁾が進められている.“さび”層を抵抗としてとらえればインピーダンスが, “さび”同士の擦れ, “ひび”割れを音源としてとらえれば, AE (Acoustic Emission) が使える⁽¹⁹⁾. これらのセンシング技術によって, リアルタイムに“さび”, “ひび”の状態が監視できるようになりつつある.

参考文献

- (1) 腐食防食協会編: 材料環境学入門 丸善 1993年 p. i
- (2) ISO/TC156/WG1 用語分科会: ISO 8044 金属と合金の腐食-用語と定義 防食技術 第39巻第3号 1990年3月 pp. 148 - 154
- (3) 腐食防食協会編: 金属の腐食・防食 Q&A コロージョン 110 番 丸善 1988年 p. iv
- (4) 久松敬弘: 金属材料の腐食入門 (III) 日本船舶機関学会誌 第12巻第10号 1977年10月 pp. 718 - 725
- (5) 機械システム振興協会: 機械システム等のメンテナンス最適化のための高度メンテナンス技術開発に関するフィージビリティスタディ報告書 エンジニアリング振興協会 2007年3月
- (6) ステンレス鋼の鋭敏化曲線調査分科会: ステンレス鋼の鋭敏化曲線の収集と解析 防食技術 腐食防食協会 第39巻第11号 1990年11月 pp. 641 - 652
- (7) 日本工業標準調査会: ステンレス鋼の電気化学的再活性化率の測定方法 JIS G0580-2003 最新改正 2003年3月
- (8) 携帯型鋭敏化度測定装置, IHI 検査計測製 DOS テスター A-94: オンライン (入手先) < <http://www.iic-hq.co.jp/services/J/06.html> > (参照 2011-07-04)
- (9) 二見常夫: 沸騰水型原子力発電所における低炭素ステンレス鋼の応力腐食割れの経過と教訓 (1) 保全学 日本保全学会 第4巻第4号 2006年1月 pp. 29 - 34
- (10) G. Nakayama, M. Akashi and A. Ohtomo : A

- probabilistic assessment for the stress corrosion cracking lifetime of sensitized 304 stainless steel in sodium chloride solutions ISIJ International vol. 31 No. 2 (1991. 2) pp. 223 - 228
- (11) M. Akashi and G. Nakayama : Stress-corrosion crack initiation process model for BWR plant materials Proceeding of international symposium on plant aging and life predictions of corrodible structures Sapporo Japan (1995. 5) pp. 99 - 106
 - (12) 中山 元, 明石正恒: 鋭敏化ステンレス鋼/中性塩化物環境系における粒界応力腐食割れ寿命予測モデル 材料と環境 腐食防食協会 第48巻第3号 1999年3月 pp. 162 - 168
 - (13) 元田慎一, 鈴木揚之助, 篠原 正, 兒島洋一, 辻川茂男, 押川 渡, 糸村昌祐, 福島敏郎, 出雲茂人: 海洋性大気環境の腐食性評価のための ACM 型腐食センサ 材料と環境 腐食防食協会 第43巻第10号 1994年10月 pp. 550 - 556
 - (14) 井上博之, 山川宏二: 応力腐食割れ試験における腐食電位振動の新しい解析方法 材料 日本材料学会 第42巻第479号 1993年8月 pp. 930 - 933
 - (15) 中山 元, 榊原洋平, 藤井朋之, 島村佳伸, 東郷敬一郎: 応力腐食割れ発生から進展過程を評価する試験法に対する破壊力学の寄与 材料 日本材料学会 第59巻第12号 2010年12月 pp. 890 - 899
 - (16) 柴田俊夫, 春名 匠: 低ひずみ速度試験中に発生・進展する応力腐食割れの直接観察およびその破壊力学的統計的評価 材料と環境 腐食防食協会 第41巻第12号 1992年12月 pp. 809 - 815
 - (17) 渡辺 豊, 杉森健太: 応力腐食割れ発生ダイナミクスの可視化手法 材料と環境 2007 講演予稿集 腐食防食協会 A-310 2007年5月
 - (18) K. Tohgo and N. Ogi : Monte carlo simulation of stress corrosion cracking in structural metal materials Key Engineering Materials Vols. 306 - 308 (2006) pp. 447 - 452
 - (19) 長 秀雄, 新井良平, 鈴木裕晶, 竹本幹男: 安定化・高感度光ファイバ AE 計測システムの開発とガス漏洩による AE の検出 非破壊検査 日本非破壊検査協会 第53巻第11号 2004年11月 pp. 709 - 714