

展望

バイオフィルムの形成と金属材料表面-3

金属材料におよぼすバイオフィルムの影響

—微生物腐食—

Effect of Biofilm on Corrosion of Metals

—Microbially Influenced Corrosion—

天谷 尚

Hisashi Amaya

住友金属工業(株)
総合技術研究所 主任研究員

1 微生物腐食とは

微生物は、湖沼、海洋あるいは土壌など種々の自然環境中に生育しており、それらは相互に作用を及ぼしながら複雑な生態系を構成している。また、下水処理設備における活性汚泥槽など微生物の生育環境を人工的に提供して、積極的に活用する場合もある。一方、工業用水配管や熱交換器などの各種のプラント設備において、意図せずとも環境条件さえ整えば微生物が生育して繁茂してしまう場合もある。

このような微生物が生育しうる環境中において各種の材料を用いる場合、その環境中に存在している微生物による影響を考慮しなければならない。自然環境中で用いられる材料が微生物によって機能劣化をきたす、または品質低下をきたすなどの損害を被るケースを示す用語である“Biodegradation”や“Biodeterioration”は、いずれも「生物劣化」と呼ばれ、例えば浴室などでのカビによる黒シミの問題なども含まれるものであろう。また、微生物が熱交換チューブに付着することで伝熱効率が低下する問題や、船底あるいは海水取水管などにおいてカキやムラサキガイなどの大型生物が付着するために流送効率が低下する問題は、生物が付着することによる弊害であり、“Biofouling”「生物汚損」と呼ばれる。

金属材料における性能低下・機能劣化では「腐食」が大きな問題であり、微生物の影響によって誘起される金属材料の腐食現象を、特に「微生物腐食」(MIC: Microbially [あるいは Microbiologically] Influenced Corrosion) という。かつては、直訳すれば「微生物誘起腐食」となる“Induced”という表現が用いられていたが、最近では“Influenced”が用いられるようになっており、より広範に微生物の影響による作用を捉えようとの考え方によるものと思われる。なお、微生物腐食に対応する用語としては、他にも“Bio-corrosion”や“Microbial Corrosion”などとの表現もある。

梶山¹⁾によると、金属材料の腐食に対して微生物が関与す

ることを最初に意識したのはJ.H. Garrett²⁾であり、その後R.H. Gaines³⁾は水道管内外面の腐食に鉄酸化細菌と硫黄酸化細菌が関与したことを明らかにし、またD. Ellis⁴⁾とE.C. Harder⁵⁾は鉄細菌による水道管の錆こぶの生成について報告したとされている。さらにvon Wolzogen Kuhr⁶⁾が鋼の腐食反応で生成する水素を嫌気性菌である硫酸塩還元菌(SRB: Sulfate Reducing Bacteria)が利用することで、結果的にカソード復極によって腐食を促進するという考えを示して以来、金属材料の腐食に対しても微生物が影響を及ぼし得ることが広く認識され、研究されるようになった。また銅合金、アルミニウム、炭素鋼およびステンレス鋼など種々の金属材料における発生例も報告されている⁷⁻⁹⁾。

2 バイオフィルムの形成と微生物腐食

微生物腐食が生じる系には当然のことながら微生物の存在が不可欠であり、さらにその微生物が材料表面に対して何らかの相互作用を持つことが前提となる。材料表面に微生物が付着すると、やがてバイオフィルム(Biofilm)を形成することになるが、そのバイオフィルムの形成と微生物腐食とは深い関係がある。バイオフィルムとは、金属などの固体表面に水が接する場合、その表面に形成される微生物およびその代謝物を主たる構成要素とした皮膜のことであり、身近な例えでは生活排水管内面のいわゆる「ぬめり」などが挙げられる。しかしながら、バイオフィルムはその存在条件に応じて構造あるいは機能が時間的・空間的に動的に変化するものであり、バイオフィルムを単純に定義することは難しい。バイオフィルムの形成過程として、

第一段階：固体表面へのイオン、有機物の吸着による Conditioning Filmの形成

第二段階：Conditioning Filmへの細菌細胞の付着

第三段階：付着した細胞の増殖とそれにとりまう細胞外多糖 (EPS; Extra Cellular Polysaccharides) の生産
 第四段階：他の細菌、微生物も含めた共同体としてのバイオフィルムの成長

であることが示されている¹⁰⁾。また、それぞれの段階で水の流れのような流体力学的なせん断力やその他の化学的、生物学的な要因に基づく脱離作用が働き、動的に変化しつつ成長する。

第一段階である Conditioning Film は、環境水中にある固体表面において、有機物、無機物が吸着した状態のものを指し、その生成は分子の拡散に依存しており、固体表面が水中に接した後、速やかに形成される。Conditioning Film が形成されると、その固体表面は微生物にとっての栄養源を与える場となり、さらには元の固体表面の物理化学的性質 (表面電荷、ゼータ電位、表面張力等) にもさまざまな影響を与えている¹¹⁾。微生物菌体を粒子としてみた場合、多くの微生物細胞は負に帯電していることが多く、一方の付着基盤となる固体表面も負に帯電していることから、これら荷電粒子を想定した付着理論が従来から論じられてきた。つまり、コロイド粒子の安定性を論じる DLVO 理論によって、負の荷電同士の静電的反発力 (斥力) と、菌体細胞と基盤表面間とのファンデルワールス力 (分子間引力) との関係で論じられてきた。これまで、負電荷を持つ微生物細胞と負に帯電した付着表面間との静電的反発力によるエネルギー障壁は非常に高いものと考えられてきた。しかし、コロイド粒子表面に溶液が浸透できる帯電したポリマー層を考慮した大島らによる「やわらかいコロイド粒子の理論」が提唱され、実際に細菌細胞にはその「柔らかいコロイド粒子の理論」が適用されることが示された¹²⁾。図1に示すように、従来の取扱いで微生物細胞とガラス表面間に大きな静電的反発エネルギーが存在すると考えられていたが、微生物細胞表面にポリマー層を考慮する「柔らかいコロイド粒子の理論」を適用することで、静電的反発力から考えられる高いエネルギー障壁が存在しないことがわかり、付着表面基板上への菌体細胞の付着が容易に起こりえることが理解される。

このように微生物菌体を粒子として取扱うばかりではなく、微生物菌体自身の代謝反応過程からみた研究も進んでいる。最近、Quorum Sensing と呼ばれる微生物同士のコミュニケーション機能が注目されており、バイオフィルムの形成も微生物同士のコミュニケーション作用によって発現するものとの考え方がある。「Quorum」とは「定足数」を意味し、Quorum Sensing とは、「ある一定以上の数のバクテリアが存在・集合したことをバクテリア自身が感知し、その結果として生物発光や抗生物質生産、病原性の発現といった特定の遺伝子の転写活性の制御を行なう機構」のことである。

つまり、単純な構造の単細胞生物であると思われるバクテリアでも、実のところは非常に高度な情報伝達手段を有し、自身とその周囲に存在する仲間 (あるいは敵対する種) の存在を感知して、それに応じた反応を行なっているとするものである。Quorum Sensing には、バクテリアが自ら生産し、菌体内外に分泌、拡散するオートインデューサー (AI) と呼ばれる物質がシグナル分子として介在しており、AI はグラム陽性細菌ではペプチド類、グラム陰性細菌ではアシル化ホモセリンラクトン (AHL) 類であるなど分子レベルで同定されている。バイオフィルムは、第二段階である材料表面への菌体の初期吸着に続いて、第三段階では菌体外多糖類 (EPS) を骨組みとした立体構造体に発達して形成されていく。Quorum Sensing はこの立体構造体形成に関与しているとの観点から、池田¹³⁾ はアシルシクロペンチルアミド (Cn-CPA) に Quorum Sensing 制御効果があることを見出し、図2に示すように Cn-CPA を投与した系では、緑膿菌のバイオフィルム形成抑制作用があることを証明した。実際の自然環境中のバイオフィルムは多種多様な生物種の集合体であるため、その解析は非常に難しい。しかし、Quorum Sensing

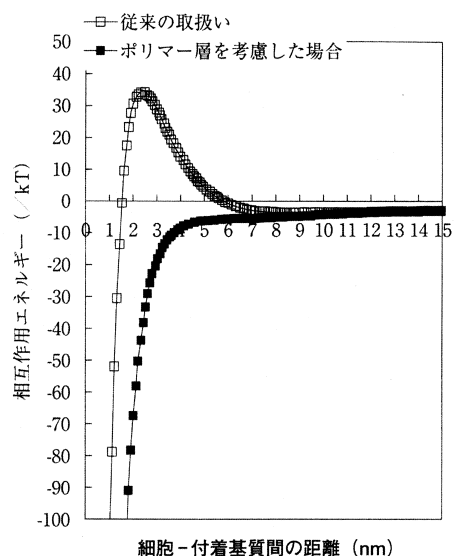


図1 微生物細胞とガラス表面間の相互作用エネルギー曲線¹²⁾
 (日本微生物生態学会バイオフィルム研究部会編著：バイオフィルム入門、日科技連 (2005)、3.より引用)

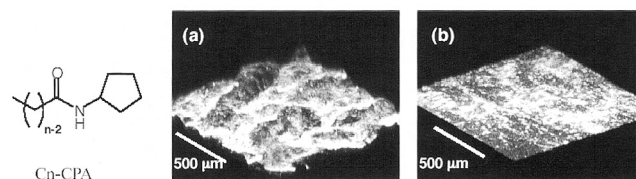


図2 Cn-CPAの構造と緑膿菌によるバイオフィルム形成¹³⁾
 (a) 通常培養系 (b) Cn-CPA添加系
 (池田幸：Proceedings of JSCE Materials and Environments 2006, (2006)、B-307.より引用)

の研究も単一種間から他種間へのコミュニケーション機能の研究へと広がりを見せており、Quorum Sensingを活用したバイオフィーム形成制御技術の開発も今後に期待できるものと思われる。

バイオフィームの構造について、「フィルム」という表現からは二次元的な広がりのある一様で均質な膜のように感じられるが、実際には3次元的な構造をもった不均質な構造をしている¹⁴⁾。バイオフィームには、Clusterと呼ばれる微生物菌体および細胞外多糖からなる集合体が散在し、その間を水が流れるWater Channelが存在する。このような比較的高い密度のCluster部と密度の低いWater Channel部(Void部)での溶存酸素濃度のフィルム厚さ方向での分布をマイクロセンサーを用いて測定した例が示されている¹⁵⁾。図3に示したように、密度の低いVoid部では基盤表面に近づくにしたがって緩やかに溶存酸素濃度が低下するのに対して、Cluster部では溶存酸素が急激に低下していることがわかる。これは、Cluster部に存在している好気性細菌によって酸素が消費されるためであろうと思われる。

このような局所的な環境の相違を提供するバイオフィームの存在は、鋼の腐食に対する影響としても大きい。たとえば、鋼表面にバイオフィームが存在した場合、局所的に溶存酸素濃度の低い部分がアノード部、溶存酸素濃度の高い部分がカソード(酸素の還元反応)部となって酸素濃度電池による腐食を生じる環境が与えられることとなる。実際、マイクロセンサーと走査型振動電極法(SVET: Scanning Vibrating Electrode Technique)によって、Cluster部の溶存酸素濃度の低い領域において、鋼のアノード溶解(腐食)電流が観測されることが示されている¹⁴⁾。また、活性汚泥を接種した培養液中に炭素鋼を浸漬させ、その表面にバイオフィームが形成された場合、無菌の条件に比較して炭素鋼の腐食速度が高かったとの観察結果¹⁶⁾もある。バイオフィームの存在

は溶存酸素のみならず、例えば嫌気性腐敗による有機酸の生成によるpHの低下など、腐食に影響する環境因子の局所的な変化をもたらすものであると考えられる。

また、バイオフィームを構成する微生物の種類によってもその代謝産物は異なり、微生物腐食に対する影響も異なる。菊地ら¹⁷⁾は、地下水から単離した数種の細菌を用いて銅に対する腐食性を実験室での培養試験により調査したところ、地下水から単離された菌のうち銅イオンに対する耐性の認められたA株(*Staphylococcus* sp.と同定された)に強い腐食作用があることを見出した。*Staphylococcus* sp.はタンパク質を発酵させてアンモニアを産生する機能があり、A株が形成するバイオフィーム内にアンモニアが蓄積されることにより、銅に孔食状の腐食が発生したものと考察されている。

3 ステンレス鋼における微生物腐食

耐食鋼であるステンレス鋼は、種々のプラント機器や配管材料などをはじめとして、非常に広範な分野で様々な用途に用いられている。そのようなステンレス鋼に対して、微生物の作用によって著しく腐食環境の苛酷性が増大する例として、自然海水環境が挙げられる。単なる3.5 wt % NaClの常温環境では十分な耐食性を有するSUS316鋼が、同じ塩分濃度であっても自然海水中では容易に孔食、すき間腐食などを発生することが知られている。これは自然海水中に存在する微生物の作用によるものであり、微生物腐食の一種であると考えられる。このような自然海水中でのステンレス鋼の腐食挙動に関して、その腐食電位(自然電位)が浸漬期間の経過とともに著しく貴となることが従来から指摘¹⁸⁾されている。ステンレス鋼において腐食電位が貴となることは、ステンレス鋼表面の不動態皮膜の局部損傷を引き起こす危険性が高まることを意味する。このような腐食電位の貴化現象は海水のみならず淡水環境¹⁹⁾などでも観察されている。

ステンレス鋼の電位貴化現象に対しては、*Leptothrix* sp.などのマンガン酸化細菌によって、自然海水中に浸漬したステンレス鋼表面に MnO_2 の沈殿が生じ、それが水酸化物に還元する際に電位が貴化する^{20, 22)}とする考えや、*Thiobacillus ferrooxidans*などの鉄酸化細菌によって生成する Fe^{3+} の酸化性によるとする説²³⁾が提案されている。また、一般的に存在する好気性細菌の代謝反応で生成する過酸化水素の酸化性によって腐食電位の貴化が生じるとするメカニズム^{24, 25)}も報告されている。過酸化水素による電位貴化メカニズムに関しては、酸化酵素添加によって腐食電位が貴化した後に、過酸化水素を分解する酵素(カタラーゼ)を添加すると腐食電位が卑化することも観察され²⁶⁾、さらに実際の自然海水環境において貴化したステンレス鋼試験片を用いて、カタ

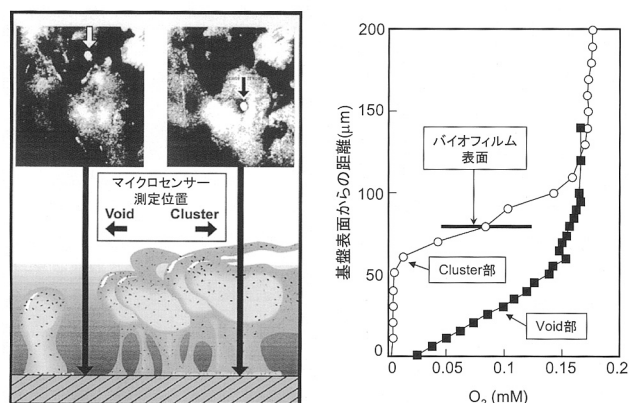


図3 マイクロセンサーによるバイオフィーム内の溶存酸素変化の測定例¹⁵⁾
(Z. Lewandowski: Corrosion 98, NACE International, Houston (1998), Paper No. 296.より引用)

ラーゼを添加すると腐食電位が卑化することも報告²⁷⁾されている。

また、淡水など塩化物イオン濃度や温度などから十分に温和と考えられる環境であれば、一般的なステンレス鋼（たとえばSUS304鋼など）で十分に耐食性は得られる。ところが、微生物が関与した場合には、単なる淡水環境といえども予期せぬ腐食を被る場合がある。淡水環境で用いられるステンレス鋼配管の多くの微生物腐食事例が、水圧試験後の残留水や滞留水の部分であることが指摘²⁸⁾されている。滞留水が存在する消火用スプリンクラー設備でも微生物腐食の危険性は高いと考えられており、バイオサイド（殺菌剤、biocide）とインヒビター処理との適正管理の必要性が述べられている²⁹⁾。ステンレス鋼の微生物腐食は、その溶接部において発生頻度が高いことが指摘^{30, 31)}されている。一般的に、ステンレス鋼はその溶接部において耐食性が劣化することは経験的にもよく知られており³²⁾、そのメカニズムとして、例えば溶接金属凝固組織の δ -フェライト/オーステナイト相でのCr、Mo等の元素の分配による不均一性^{33, 34)}や、溶接酸化スケールによる影響^{35 - 37)}など、材料側での劣化因子が考えられている。しかし、溶接部における微生物腐食発生挙動との関係において十分に明らかにされているとはいえない。

D. Walsh ら³⁸⁾はステンレス鋼表面における細菌の付着挙動に関して、培養初期における細菌の付着はランダムであるが、4～12時間後には溶接熱影響部（HAZ：Heat Affected Zone）および溶接金属部での細菌の増殖が他の部位よりも速いことを示し、溶接熱影響によるステンレス鋼表面の酸化皮膜（不働態皮膜）の不均一性に起因するものと考察している。K.R. Sreekumari ら³⁹⁾は、ステンレス鋼の溶接部を含む研磨平滑面において、*Bacillus* sp.の付着挙動について検討し、母材に比べて溶接金属部およびHAZにおいて細菌の付着傾向が高いことを示し、細菌の付着挙動にはミクロ組織の影響が考えられるとしている。天谷ら⁴⁰⁾はSUS304鋼母材に308溶接金属で作製した溶接部近傍でのマクロな凹凸形状の効果と細菌の付着挙動および腐食発生について検討を加え、

溶液の流れが滞留しやすい溶接ビード近傍凹部で細菌付着率が高くなったことから、細菌の付着に及ぼすマクロな形状の作用を示した（図4）。さらに、付着物を除去した後にSEMで観察したところ、腐食孔の発生が確認され、細菌の付着挙動と腐食の発生位置との相関が確認された（図5）。なお、酸洗によって溶接酸化スケールを除去した試験片においては、細菌の付着は同様であっても腐食は発生しなかったことから、微生物腐食の発生には細菌が付着することに加えて、従来から指摘されているような溶接酸化スケールによる材料側での耐食性の劣化の影響も重畳しているものと考察している。ステンレス鋼配管の溶接部における微生物腐食防止策としては溶接酸化スケールの除去が有効⁴¹⁾であると考えられる。

4 微生物腐食の判別と対策

これまで経験的あるいは実験的な検証により、微生物が金

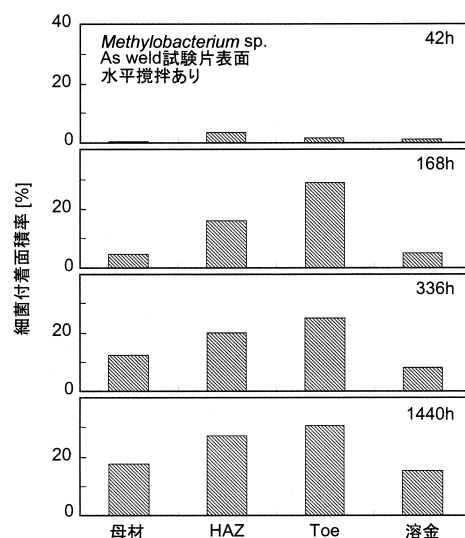


図4 溶接ビード凹凸近傍部での細菌付着位置の比較⁴⁰⁾
(天谷尚, 菊地靖志, 小澤正義, 幸英昭, 武石芳明: 溶接学会論文集, 19 [2] (2001), 345.より引用)

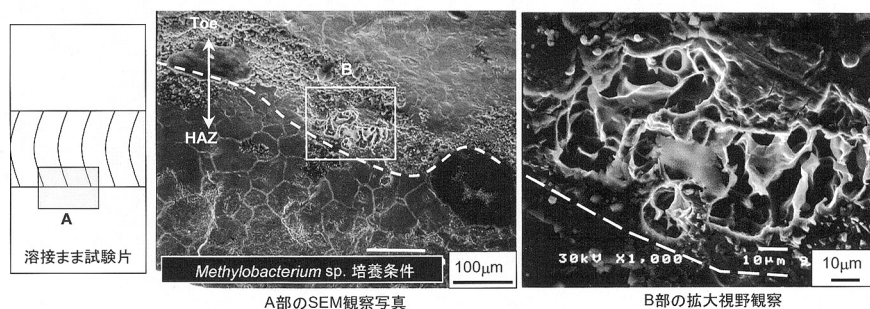


図5 溶接ビード凹凸近傍部での細菌付着部下での孔食の発生⁴⁰⁾
(天谷尚, 菊地靖志, 小澤正義, 幸英昭, 武石芳明: 溶接学会論文集, 19 [2] (2001), 345.より引用)

属材料の腐食に対して影響を及ぼすであろうことは確かめられてきた。しかし、ある腐食事例を見て、その腐食が微生物腐食であるのか否かを判別することは単純ではない。例えば、高温環境であるなど微生物が存在し得ない環境であったのなら微生物腐食ではないと判断することは簡単である（高温といえども、火山近傍などの地殻や油層において実に100℃程度でも生存しうるThermophilicなバクテリアも存在⁴²⁾するので、想像以上にバクテリアの影響範囲は大きいのかもしれないが）。しかし、腐食事例の現場から採水して、そこに微生物の存在が確認されたとしても、その事実だけをもって微生物腐食であるとは言えない。硫酸塩還元菌が作用した炭素鋼の腐食事例などでは腐食生成物中の硫化鉄系化合物の組成の調査などにより微生物腐食であるとの特定が可能な場合もあるが、ステンレス鋼の腐食などでバイオフィルムを構成する一般的な細菌による影響があったのかどうかとの見極めは困難である。つまり、腐食を生じさせる要因の一つとして、微生物による影響があったとしても、腐食形態自体は単にすき間腐食や孔食など一般的な形態となるため、その腐食形態からだけで判断はできない。Tatnall⁴³⁾らも微生物腐食の特定の難しさについて、微生物腐食と考えるためには、様々な状況証拠の積み重ねが重要であるとしている。腐食の発生した系において、微生物の調査はもちろんのこと、たとえば操業温度を高めたり殺菌剤を投入したりして、菌が生育できない環境とした場合に腐食が発生しなくなるのか、などの調査が必要であるとしている。また、ステンレス鋼の微生物腐食においては、腐食電位の貴化現象がその特徴としてあるので、その系における腐食電位をモニターして、微生物による影響の有無を確認することもできる。また、菊地ら⁴⁴⁾の手法にあるように、腐食の発生した事例水を採取して、それを用いた培養試験環境下での腐食再現調査を行なうことも有効な手段である。しかし、顕微鏡などでの直接観察では見ることができても、培養できない菌（Visible Not Culturable [VNC]）は多く存在しており、培養法のみに頼ることには限界がある。なお、最近では16SrRNA遺伝子のDNA配列に基づいた微生物の同定法の適用も行なわれるようになり、培養できないバクテリアであっても検出・同定することは可能となってきている⁴⁵⁾。

微生物腐食の対策として、冷却水系など薬剤添加によるコントロールが可能な系においては、バイオサイドの適用が現実的な制御方法の一つである。腐食電位の時間変化を連続的にモニターしつつ、薬剤投入のタイミングや適正濃度かどうかの判定を行なうなどモニタリング手法との組合せ⁴⁶⁾によって、より精度の高いコントロールが可能となるであろう。また、添加するバイオサイドの特性についても十分な注意が必要である⁴⁷⁾。酸化性バイオサイドの添加（たとえばバイオ

サイドとして一般的な次亜塩素酸）は、同時にステンレス鋼に対する腐食性を高めてしまう作用もあり、殺菌剤として有効に作用する濃度を見極め、連続添加とするのか一日に数時間のバッチ処理とするのかなど、ステンレス鋼への腐食作用を低く抑えつつ、十分な殺菌作用を発現させられる添加濃度および添加方法の見極めが重要となる。また、閉鎖系ではない自然海水中などでは、薬剤処理による対策は難しく、いわゆる耐海水性ステンレス鋼⁴⁸⁾が必要となる。淡水系の配管でも、微生物腐食の発生頻度が高いとされる溶接部において、溶接酸化スケールを十分に除去したり、耐食性のより高い合金成分を多く含んだ組成の材料を適用するなどの対策も考えられる。

5 おわりに

本稿では、バイオフィルムが存在することによる弊害の一つとして、金属材料の腐食、いわゆる微生物腐食の問題を取り上げた。淡水環境など、一般的に十分に温和な環境で腐食の問題は生じ得ないと考えられている環境条件において、微生物腐食は「予期せぬ」腐食として顕在化するケースが多い。しかし、微生物も、温度や塩化物イオン濃度、pHなどと同じく、その環境を構成する一つの環境因子であるとの捉え方が必要である。その上で、操業温度の管理や殺菌剤、インヒビターの適切な選択による対策、あるいは耐食グレードの高い鋼種の選択や溶接酸化スケールの除去などの材質面からの対策などを考慮することが重要である。

参考文献

- 1) 梶山文夫：第100回腐食防食シンポジウム資料，（社）腐食防食協会編，（1994），55.
- 2) J.H. Garrett：The Action of Water on Lead, Lewis, London, (1891)
- 3) R.H. Gaines：The Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2 (1910), 128.
- 4) D. Ellis：Iron Bacteria, Methuen, London, (1919)
- 5) E.C. Harder：Iron Depositing Bacteria and Their Geologic Relations, U.S. Govt. Printing Office, Washington D.C., (1919)
- 6) C.A.H. von Wolzogen Kuhr：Corrosion, 17 (1961) (Originally 1937), 293t.
- 7) G.J. Licina：Sourcebook for Microbiologically Influenced Corrosion in Nuclear Power Plants, EPRI, Palo Alto, (1988), 3-1.
- 8) S.W. Borenstein：Microbiologically Influenced Corrosion Handbook, Industrial Press Inc., New York,

- (1994), 161.
- 9) B.J. Little, P.A. Wagner and F. Mansfeld : Microbiologically Influenced Corrosion, NACE International, Houston, (1997), 7.
- 10) 日本微生物生態学会バイオフィーム研究部会編著：バイオフィーム入門, 日科技連, (2005), 11.
- 11) 同上, 5.
- 12) 同上, 3.
- 13) 池田宰 : Proceedings of JSCE Materials and Environments 2006, (2006), B-307.
- 14) Z. Lewandowski : Corrosion 2000, NACE International, Houston, (2000), Paper No.400.
- 15) Z. Lewandowski : Corrosion 98, NACE International, Houston, (1998), Paper No.296.
- 16) 丹治保典, 諸野祐樹, 堀克敏, 海野肇 : 第125回腐食防食シンポジウム資料, (社) 腐食防食協会編, (1999), 27.
- 17) 菊地靖志, 塔本健次, 金丸剛, 坂根健 : 材料と環境, 47 (1998) 7, 468.
- 18) M. Akashi, Y. Imamura, T. Kawamoto and Y. Shinozaki : 防食技術, 24 (1975), 31.
- 19) エンジニアのための微生物腐食入門, (社) 腐食防食協会編, 丸善, (2004), 56.
- 20) W.H. Dickinson : Applied and Environmental Microbiology, 63 (1997) 7, 2502.
- 21) B.H. Olesen, R. Avci and Z. Lewandowski : Corrosion 98, NACE International, Houston, (1998), Paper No. 275.
- 22) Z. Lewandowski : Corrosion 98, NACE International, Houston, (1998), Paper No.296.
- 23) Y. Yao, K. Masamura and T. Kondo : Corrosion 99, NACE International, Houston, (1999), Paper No.166.
- 24) 天谷尚, 幸英昭 : 日本金属学会誌, 58 (1994), 775.
- 25) H. Amaya and H. Miyuki : Corrosion 99, NACE International, Houston, (1999), Paper No.168.
- 26) D. Feron, I. Dupont and G. Novel : European workshop on seawater corrosion of stainless steels - Mechanism and experiences (EFC publication No.19), The Institute of Materials, London, (1996), 103.
- 27) 鷲頭直樹, 升田博之 : 第47回材料と環境討論会講演集, (社) 腐食防食協会, (2000), 117.
- 28) G.J. Licina : Sourcebook for Microbiologically Influenced Corrosion in Nuclear Power Plants, EPRI, Palo Alto, (1988), 8-3.
- 29) D.H. Pope : Corrosion 2000, NACE International, Houston, (2000), Paper No.401.
- 30) J.C. Danko and C.D. Lundin : Microstructural Science, 25 (1997), 73.
- 31) 菊地靖志, 松田福久 : 配管技術, 96 (1996) 2, 51.
- 32) 松島巖 : 溶接学会誌, 61 (1992) 3, 144.
- 33) 渡辺健彦, 額娃一夫, 中村治方 : 溶接学会論文集, 3 (1985) 1, 55.
- 34) 中尾嘉邦, 西本和俊, 張文平, 田村義樹 : 溶接学会論文集, 9 (1991) 1, 117.
- 35) 東茂樹, 幸英昭, 村山順一郎, 工藤赳夫 : 防食技術, 39 (1990) 11, 603.
- 36) J.R. Kearns : Corrosion 85, NACE, Houston, (1985), Paper No. 50.
- 37) R.K. Wilson, D.B. Anderson, P.E. Morris and J. W. Wilson : Corrosion 83, NACE, Houston, (1983), Paper No.193.
- 38) D. Walsh, J. Seagoe and L. Williams : Corrosion 92, NACE, Houston, (1992), Paper No.165.
- 39) K.R. Sreekumari, M. Ozawa, K. Tohmoto and Y. Kikuchi : ISIJ Int., 40 [supplement] (2000), S54.
- 40) 天谷尚, 菊地靖志, 小澤正義, 幸英昭, 武石芳明 : 溶接学会論文集, 19 (2001) 2, 345.
- 41) 西尾純一, 東茂樹, 幸英昭 : 第53回材料と環境討論会, (社) 腐食防食協会, (2006), 493.
- 42) C. Jeanthon, S.L. Haridon, V. Cuffe, A. Banta, A-L. Reysenbach and D. Prieur : International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 52 (2002), 765.
- 43) R.E. Tatnall and D.H. Pope : A Practical Manual on Microbiologically Influenced Corrosion, ed. by G. Kobrin, NACE International, Houston, (1993), 65.
- 44) 菊地靖志, 塔本健次, 岡山智豪, 松田福久, 西村真幸, 坂根健, 金子嘉信 : 日本金属学会誌, 61 (1997) 6, 486.
- 45) エンジニアのための微生物腐食入門, (社) 腐食防食協会編, 丸善, (2004), 212.
- 46) 同上, 111.
- 47) 同上, 144.
- 48) ステンレス鋼便覧, ステンレス協会編, 日刊工業新聞社, (1995), 1355.

(2007年3月2日受付)