局 部 腐 食 の 予 測

—— 第5回コロージョン・セミナ課題討論^{*1}より ——

第5回コロージョンセミナ 討論リーダーグループ^{*2}

Prediction of Localized Corrosion

— Discussion at the 5th Corrosion Seminar —

Organizer Group of the 5th Corrosion Seminar

JSPS 97th Committee (Corrosion Control)^{*3}

1 結 言

日本学術振興会腐蝕防止第97委員会では、「比較的小数の人々で、共通の関心のあるテーマについて十分話し合いをして理解を深めよう」^{*4} という趣旨のもとに毎年1回コロージョン・セミナを開き今年で第5回目を数えるが、今回はそのテーマとして「局部腐食の化学と電気化学」を選んだ。このセミナの内容についてはすでに本誌の会告や情報欄を通じて紹介されているが、この中で行なわれた課題討論「局部腐食の予測」において討議された内容をまとめて紹介するのが本文の目的である。

近年局部腐食に対する研究の進歩には著しいものがあり、昭和46年度腐食防食討論会（会場：札幌市北海道工業大学）では「点食孔食機構」がその主題の一つとして取り上げられ、外国でも局部腐食に関する国際会議である“The U. R. Evans International Conference on Localized Corrosion”が開催されることになっている。このような情勢下で局部腐食をセミナの主題に選んだことは、非常に良いタイミングと言えよう。

セミナにおける講演および討論の中心は局部腐食の中でも孔食に置かれた。討論に先立って行なわれた二つの講義、すなわち「局部腐食における環境の化学」（横浜国大工・高橋正雄教授）および「孔食の電気化学」（東

大工・久松敬弘教授）が討論の重要なバックボーンとなった^{*6}。

2 孔食研究の位置づけ

図1は増子^{*7}が整理した局部腐食の予測に対する科学と工学の相互関係を示すものである。科学者は局部腐食の発生にかかわる因子を、選択された単純条件下で科学的手法を用いて扱い、局部腐食のメカニズムの解明を通じて局部腐食の予測に貢献しようとしている。これに対し、実際のプラントや構造物の局部腐食を管理し、これに対処しなければならない人々（仮りにこれを技術屋と呼ぶ）は、与えられた複雑条件下での種々の測定値や過去のデータをよりどころとしている。問題はこれらの技術屋から見ると科学者の研究が理想化された条件下で行なわれたものであるうえしばしば難解であるため技術屋の口に合わず、結局は「カン」や「いいつたえ」をたよりに局部腐食を予測する結果に終るといふところにある。

このような事情はひとえに局部腐食に限ったものではなく、腐食全般についてしばしば取沙汰される議論である。おそらくは技術百般にわたって多かれ少なかれ同様な事情が存在するであろう。しかし、腐食、なにかんづく局部腐食において問題が切実であるとするのは手前ミソであろうか。

ここで次の問を発する：

質問1 「塩化物（たとえば海水）による孔食に強いことを売物とするステンレス鋼を開発した。これを実環境で長時間使用するときすぐれた耐孔食性を示すことを予測し、ユーザーを説得しなければならない。どんな根拠やデータを提出すればよいか」。

質問2 「孔食が発生するおそれのあるプラントに用いる金属材料を選定したい。このプラントが長期にわたって孔食を発生することなく使用できることを保障する

^{*1} 日本学術振興会腐蝕防止第97委員会主催第5回コロージョンセミナ：主題「局部腐食の化学と電気化学」1971年9月27～29日富士箱根ランド、ホテル富士箱根において開催

^{*2} メンバー：増子昇（東大工）、石原只雄（金材研）、湯川憲一（新日鉄基礎研）、鈴木紹夫（味の素中研）、松島巖（日本鋼管技研）、司会および文責 松島巖

^{*3} Japan Society for the Promotion of Science, 2-1-2, Hitotsubashi, Chiyoda-ku, Tokyo, Japan.

^{*4} 岡本剛「第1回コロージョン・セミナによせて」より

^{*6} 両教授の講義の内容は近く本誌に掲載の予定である。

^{*7} 本セミナ討論リーダーグループメンバー

図1 局部腐食における科学と工学の関係 (増子による)

ためにはどんな手続を取るか。

これらに対する答えは、環境の調査、実験室的促進試験、使用実績、プラントテストなどの組合せとなるのが通例である。また質問2に対しては「カン」や「いいつたえ」がある地位を占めることも否定しがたい。

他方、孔食電位の測定など、より「科学的」なパラメータも武器の一つとしてとり入れられはじめている。しかしこれらに対する実用的な意味での信頼度は高いとはいえず、「一応孔食電位も求めておこう」というのが正直なところであろう。

孔食電位で代表される科学的パラメータを「一応」といった保険的な地位から、明確な意味と適用性をもつ信頼ある地位へと引き上げる努力は最も必要とされるところであり、それが標題の討論の目的である。

3 局部腐食の予測とは何か

全面腐食においては腐食試験結果に基づいて実際使用時の腐食による厚さの減少を予測することが原理的に可能である。もちろん腐食試験環境がいかに現実を反映しているかは問題であろうし、材料の寸法効果や試験の時間因子を考慮に入れなければならないが、これらはより正しい腐食データを求める上での問題であって、予測はあくまでも可能である。

これに対し、局部腐食においては「局部腐食は生じるが予定期間は使用可能であること」を予測するのか「局部腐食が予定期間生じないこと」を予測するのかのいずれの立場をとるかによって全くちがった話となる。

現状では材料選択を行なう人々の多くは後者の立場を取るように思われる。ということは「一度局部腐食が生じてしまえばもうその材料はだめである」と考えるということである。このことは応力腐食割れについてはもっ

ともであるが、孔食についてもそうなのであろうか。

孔食が発生し成長を開始すればその材料の寿命は時間の問題であって、あぶなくてそのまま使えたものではないと考えるならば、ある材料が適正な材料であるためには、その材料がまったく孔食を生じる傾向をもたないか、発生までの誘導時間が十分長いことが必要である。これらは促進試験からはまったく予測不能である。また実地試験によって立証できるがこれを予測とはいわない。しかし促進試験やあまり長期にわたらない実地試験によってまったく孔食を生じない材料は一応の安心感を与えるので、あとはカンを働かせて使用にふみ切ることになるのであろう。

前者の立場をとって孔食の進行速度を的確に予測し、プラントの必要寿命に対し適当な腐食シロを加えて実用に供するという芸当は、現状では不可能に近い。すなわち孔食の発生時期を予測することでさえ困難であるのに加えて、その後の成長速度を正しく求めることは一層困難である。促進試験ではこの二つを分けて求めることは比較的容易であるが、データに予言力がない。他方、長期にわたるプラントテストの結果得られた最大侵食度 0.5 mm/yr という数字は誘導期間と成長速度を組み合わせたものであるから、時間的に延長することはできない。たとえこれができたとしても最も深いピットの深さの再現性ははなはだ心細い。統計的手法の一つである extreme value analysis を適用するならば、ある確率でいくらかでも深いピットが生成しうることが予言される。

古典的腐食試験がこのように孔食の予測にきわめて不満足なものであれば、なにかより「科学的な手法」の助けを借りることはできないであろうか。たとえば孔食電

位がその定義通り「その電位よりも貴な電位では孔食が発生し成長しうる臨界電位」であるならば、孔食電位から孔食成長速度は予測できないまでも、pH-電位図表における immunity 領域のように平衡論的意味で孔食が成長しえない条件にあるか否かを予測できないであろうか。

4 孔食に対する科学的アプローチのサーベイ

孔食に関する研究の集約ならびに文献のリストは Kolotyrkin¹⁾ や Smialowska²⁾ の総説に詳しいが、標題の目的に都合が良いようにまとめると次のようになる。

1960年頃から Engell や Kolotyrkin らによっていわゆる孔食電位 V_c が注目され、その後 Uhlig らや Schwenk で代表される多くの人々による種々の測定を通じて、孔食電位は確固たる地位を占めるに至った。また孔食電位が孔食のない表面から孔食が発成し成長する臨界電位を規定するものであるのに対し、一度成長を開始した孔食を停止させるためには孔食電位よりも卑な保護電位まで電位を下げなければならないという Pourbaix³⁾ の考えが提出された。孔食電位や保護電位の意味、あるいは両者の関係については種々の見解があろうが、これらは孔食傾向を決定するパラメータとして最も重要なものとなっている。

電気化学は、対象としている系全体にかかわるマクロな測定に適しているものであり、孔食といった局所的な現象の測定にはきわめて不向きである。これを解決する方法の一つとして鈴木ら^{*8)} は人工ピット法による測定を行なった。人工ピットは人工的に作られた比較的大きな「食孔」からなるアノードと、別に作られた孔の周辺部を形成するカソードからなり、両者間の電流や電位差を外部回路によってコントロールできるものである。人工ピットはいくつかの点で実際の孔食とは異なるとはいっても、アノード、カソード各々の分極挙動、食孔内の液の組成や pH などに関する貴重な情報を提出する手段となっている。

ところでいわゆるエッチピットがマクロな食孔とどのような関係があるかについては古くから興味を持たれていたが、長い間研究はもっぱらエッチピットの生成挙動の範囲にとどまっていた。最近になって久松ら^{*9, 4)} はエッチピットがマクロな食孔へと成長しうる電気化学的条件を明らかにし、実際にマクロな食孔を作らせることによって食孔付近の電位の分布、電流の大きさ、成長挙動などを明らかにし大きな進歩をもたらした。

食孔内の溶液の組成および食孔の成長に伴う変化は、孔食機構解明上の重要な手がかりとなると考えられている。この溶液が Cl^- に富み pH が低いという一般的概

念はあるものの具体的なデータは比較的少なく、その組織的な研究と意味の解明は現在最も必要とされる事項の一つである。人工ピット法により求められた結果は食孔内の溶液がきわめて濃厚なものであることを示しており、物質の移動過程とその収支について目がむけられ、さらに濃厚溶液の電気化学がクローズアップされた。

孔食の研究には合金元素や熱処理、溶液組成、温度などの材料や環境の因子の影響を扱ったもの、食孔の形状や成長速度式に注目したものなどいろいろあるが、このセミナーで孔食予測のための「科学的」なパラメータとして取りあげられたものは、主として孔食電位および局所的な環境条件である。

5 科学的パラメータを用いた局部腐食の予測

現状では孔食の予測が「生じるか否か」に主眼点があることはさておき、「科学」の領域に属する種々の特性値をどのように「現場」に反映し、応用することができるであろうか。

このような特性値の代表的なものが孔食電位である。孔食電位の現状での評価としては次のようなものがある。

a) 孔食電位は文字通り、それ以上貴な電位では孔食が発生し成長しうる臨界電位であって、この値が貴なほど実際には達成されにくいから耐孔食性が大きな材料と考えてよい。

b) 実環境で孔食電位のような貴な電位を示すことはあまりないがそれでも孔食は起こる。したがって孔食電位の値自身に特に意味はないが、極限状態での塩化物に対する不動態皮膜の強さの順序を決める数値としての意味があり、孔食電位が貴な材料ほど相対的に耐孔食性が大きい。

c) 実環境での孔食は金属表面付着物とのすき間などで生じる。したがって清浄表面で得られる孔食電位にはほとんど実用的な意味はない。

d) 孔食電位はすき間部などについても定義できるはずである。清浄な表面での孔食電位はすき間部での孔食電位と値は異なろうがかなり良い相関を持つであろうから、後者を求め得ない現状では前者を指標とすることができる。

現在、a) と c) を支持する人は少なく、大方は b) か d) の立場をとる。b) と d) は良く似ているが、b) は孔食電位を促進試験的な感覚でとらえ、あまり本質的なものではないと考えているのに対し、d) は孔食電位の科学的意味を認め、求める対象系（表面に対する環境の与えられ方）が非現実的であることが問題であるとしているところが異なる。少なくとも今回のセミナーでの議論は d) の立場に中心があったように思われる。

それでは付着物の下やすき間における孔食電位（いわ

*8 本セミナー討論リーダーグループメンバー

*9 本セミナー講師

表1 局部腐食における局所的 pH の測定例 (湯川による)

材 料	環 境	バルクのpH	着目した局所	局所の pH	測 定 者
軟 鋼	3% NaCl	6.5~6.8	非腐食 (光沢) 領域	9~9.5a)	Cleary ⁶⁾
			腐食領域	6~6.5a)	
軟 鋼	3% NaCl	6	自然腐食面 (-0.7V)	9.6a)	小 林 ら ⁷⁾
			40 μ A 陰分極 (-1.08V)	11a)	
			100 μ A 陰分極 (-1.2V)	14a)	
		2	1 mA 陰分極 (-1.2V)	5a)	
			陰分極 (-1.3V)	10.5a)	
塗 装 鋼 板	0.5N NaCl	7~8	アルカリフクレ内	≥ 13	O'Driscoll ⁸⁾
	85% RH, RT	—	糸状腐食カソード部	≥ 12	Slabough ら ⁹⁾
4340 鋼	0.6N NaCl	2~10	疲れ割れ先端	3.5~3.9	Smith ら ¹⁰⁾
各 種 鋼 ^{*1}	3.5% NaCl	6.0	応力腐食割れ先端	≈ 3.7	Sandoz ら ¹¹⁾
0.45% C 鋼	3.5% NaCl	6.5	応力腐食割れ先端	3.8	Brown ら ¹²⁾
Ti-8 Al-1 Mo-1 V				1.7	
7075 Al ^{*2}				3.5	
7075 Al	3% NaCl	0	fine turning	3.5	Sebriks ら ¹³⁾
Al-5.5 Zn-2.5 Mg		1		3.9	
高 純 度 Al		2		4.4	
AZ 61 Mg 合金	3% NaCl	6.8		11.9	
Mg 合 金				11~12	Brown ¹⁴⁾
304	154℃ MgCl ₂ ^{*3)}	4.5	進行しつつある応力腐食割れ先端	≤ 1.0	Marek ら ¹⁵⁾
304	125℃ MgCl ₂ ^{*3)}	0.2~2.5	進行した割れ	1.2~2.0	Baker ら ¹⁶⁾
	150℃ MgCl ₂ ^{*3)}	6.5~6.7	浸漬 3 時間の割れ	1.4~1.6	
304	海 水 (393日浸漬)	8.2	O リングとのすき間	1.2~2.0	Peterson ら ¹⁷⁾
			同上で Fe とカップル	5.5~6.5	
			同上で Zn とカップル	> 10	
ステンレス鋼	海 水 (黒海)	8.3	す き 間	2.3	Korovin ら ¹⁸⁾
316	0.5N NaCl	5.4	人工ピット	0~0.7a)	鈴 木 ら ¹⁹⁾

*1) 4340, 17 Cr-4 Mo, 13 Cr-8 Ni-Mo, 9 Ni-4 Co, 12 Ni-5 Cr-3 Mo, 18 Ni, 11 Cr, 5.5 Mn, 0.45 C 鋼などについて
*2) 5.5 Zn-2.5 Mg-1.7 Cu-0.2 Fe-0.2 Cr
*3) 室温で測定
a) は電極を用いて測定, 他は試験紙使用

ゆる孔食電位 V_c に対し, 仮りに V_c' と表わす) を求めることは可能であろうか。 V_c' が V_c よりも卑であることには間違いない。しかし付着物の付き方やすき間ので

き方はさまざまであり, これを現実を反映した再現性のあるものとして設定することは容易ではない。鈴木之言によれば, “worst condition” での V_c' がよいことになる。この方面でのアプローチとしては塩原ら^{*10)} が人

*10 神奈川県工業試験所

工的にすぎ間を作って陽分極挙動を求めていることが注目されるがこれは再現性のあるすぎ間ではあるが worst condition をねらったものではない。

そもそも worst condition を設定することは best condition を定義するよりもはるかにむずかしい。まずはある付着物条件下での V_c' を再現性よく求め、これが V_c とどういう関係を持つかを調べることによって V_c を再評価し、さらに進んで worst condition または現実には生じる付着物を反映した条件下での V_c' を実際に求めることによって孔食電位を現実のものとするれば、孔食の予測は一層信頼性のあるものとなろう。

鈴木は人工ピットのアノードを活性化させたのち、このアノードが不活性化する限界電位 E_c を求め、環境の酸化還元電位によって決まる不動態金属の自然電位が E_c よりも卑な場合は、孔食やすぎ間腐食の心配がないと考えている。 E_c よりも卑な電位では局部アノードに生成する強腐食性溶液のバルクの溶液との入れ替え、ないしは生成する H^+ のカソード還元などにより腐食性の低減化がまさり、不活性化する。すなわち孔食の成長は考えられないわけで、 E_c を worst condition における V_c' と見なせる訳である。

食孔内部の pH がバルクの溶液のそれに比べてはるかに低い値を示すことはしばしば話題となる。すなわち、食孔内での急激な金属の溶解はこの領域での正の電荷の過剰を招くため、電気的中性を保とうとして Cl^- イオンが食孔内部へ移動して高濃度の MCl (M は金属) を生成するが、これが加水分解する結果 H^+ の濃度が高くなると説明されている。このような事情は孔食に限らず電気化学的に生じる局部腐食一般に当てはまり、Brown⁹⁾ はこれらを occluded cell corrosion と呼んでいる。

表 1 は湯川^{*11} が種々の報告からまとめた局部的 pH の値である。アノード部分の pH が低いことは、アノードの活性を保つ上で必然であり、その活動を刺激するものといえる。

食孔内の pH は食孔の成長にかかわる因子であるから孔食の進行速度の予測には都合のよい指標のように見える。しかし低い pH がそのまま速い孔食の成長につながると考えるのは早計である。鈴木が SUS 28 と 33 について人工ピットを用いて 70℃ の 0.5N NaCl 中で定電流的に実験してピット内の pH を求めた結果では、SUS 28 では pH 0.6~0.8 (Cl^- 濃度例 3.87N), SUS 33 では pH 0.06~0.17 (Cl^- 濃度例 6.47N) となり、pH は耐孔食性の大きな SUS 33 でむしろ低くなっている。

今回のセミナーで高橋教授が強調されたように、濃厚溶液中、とくに Cl^- が存在する場合には、分析濃度からは

予想もできない大きな H^+ の活量となることが多い。すなわち活量を反映する pH、水素電極電位、加水分解平衡とかに対する H^+ のポテンシャル因子は濃厚な酸と同じであるが、実在する H^+ の濃度は低いので、中和、拡散、泳動といった量論的關係で結ばれたり、存在する濃度が因子となるような現象においては同じ pH の酸とはまったく異なったものとなるわけである。

したがって高橋教授や増子がセミナーにおいて展開したような食孔内外の物質収支に関するきっちりした取り扱いに基礎を置き、測定された pH の意味に対する正しい理解をすることなくしては、食孔内部の pH を孔食の予測に用いることは危険である。pH というきわめて現場的で直観的な因子にかかわる科学者と技術屋の交流において孔食予測における進歩があり、コロージョン・セミナーの意義が見いだせるというものである。

科学的手法を局部腐食の予測に用いようとする試みは、応力腐食割れや粒界腐食にも見られる。石原^{*12} がまとめた応力腐食割れの予測法の分類にしたがえば、1) 電位-時間曲線、2) 応力-破断時間曲線 (木島の理論)、3) 表面エネルギーと破断応力との関係、4) 積層欠陥エネルギー (または転位の形態)、5) 金属組織などが武器となっている。また Uhlig²¹⁾ は応力腐食割れにおける臨界電位を提唱した。他方粒界腐食においては、シュウ酸エッチ組織など一般的予測法のほかに、対象とする環境中での定電位電解によって求められる危険電位領域と自然電位とを比較するという方法がある²⁰⁾。ここで注目すべきことは、応力腐食割れや粒界腐食では金属学的因子に着目した予測法があるのに対し、孔食における金属学的因子はほとんど予測の役に立たないことである。

6 経験的データによる予測

予測のむずかしい孔食において科学的特性値に応援を求める一方、過去に得られたデータは有効に利用されなければならない。すなわち現場的予測方法の基礎をカンやいいつたえから実証的判断へとレベルアップする必要がある。これらはひとえに経験的データの集積をいかに将来の予測へと発展させうるかにかかっている。この取り扱いの中に学問の活用余地がある。

代表的取り扱いの例として先に触れた extreme value analysis がある。この手法は限られた数の試験片または測定面積についての孔食の最大深さのデータ群 (各試験片または各測定面積区分における最大孔食深さを試験片または区分の数だけ集めたもの) に基づいて、さらに多数の試験片または広い面積において発生するであろう孔食の最大深さを統計的に予測するものである。残念ながらこの方法はあまり活用されておらず、その信頼度についてのデータも少ない。

もう一つの例として長い土壌埋設パイプラインの孔食

*11 本セミナー討論リーダーグループメンバー

*12 本セミナー討論リーダーグループメンバー

による過去の貫通事故の件数から、将来そのパイプラインが何件の貫通事故を生じるかを経過年数の関数として予測するもので²²⁾、横軸に経過時間またはその対数を、縦軸に積算貫通事故件数の対数をとればほぼ直線となることから、これを延長して将来の予測が可能である。これは経験的に見いだされた方法であるが、速度論的にその根拠が説明されている²³⁾。

ここに「腐食と確率」という未開拓の学問分野がある。U. R. Evans はその著書 “The Corrosion and Oxidation of Metals” の中の一章をさいて腐食における統計、確率を論じている。その後の学問や技術の進歩はこの名著の内容をかなり時代遅れのものとし最近では補遺が出版されているが、腐食の統計的扱いにおける目新しい進歩が見られないことは、特に統計、確率の面が重要である孔食に対処する者にとって反省に値することであろう。

7 結 言

この課題討論に与えられた時間はわずか3時間で、局部腐食の予測というあまりにも巨大な対象を相手にするには短かすぎる時間ではあったが、学校あるいはこれに類する機関より7人、材料メーカー10人、ファブリケーターおよびユーザー7人という比較的バランスのよい少人数の集りにおいて局部腐食における科学的手法を中心に討論が行なわれ、その意義についての理解が深められたのは幸いなことであった。実務サイドの技術者がより良く科学的手法を理解して取り入れるとともに、研究のニーズを明確にすることによりまたまだ山積している学問的追求を必要とする内容への積極的活動を刺激し、学問、実務両者が共通の敵に立向ってこそ、問題解決へ一歩前進することができよう。

文 献

- 1) Ja. M. Kolotyrkin: *Corrosion*, **19**, 261 (1963).
- 2) Z. S. Smialowska: *Corrosion*, **27**, 223 (1971).
- 3) M. Pourbaix, L. Klimzack-Mathieu, Ch. Mar-

tens, J. Meunier, Cl. Vanleughenaghe, L. de Munck, J. Laureys, L. Nellmans & M. Warzu: *Corr. Sci.*, **3**, 239 (1963).

- 4) 久松, 吉井: 日本金属学会誌, **34**, 1207 (1970); 吉井, 久松: 同誌, **35**, 151 (1971); 吉井, 久松, 松村: 同誌, **35**, 633 (1971); 松村, 久松, 吉井: 同誌, **35**, 820 (1971).
- 5) B. F. Brown: *Corrosion*, **26**, 249 (1970).
- 6) H. J. Cleary: *J. Metals*, **22**, No. 3, 39 (1970).
- 7) 小林, 藤井, 伊藤: 第16回腐食防食討論会要旨集, p. 326 (1969).
- 8) W. G. O'Driscoll: *J. Iron Steel Inst.*, **167**, 353 (1951).
- 9) W. H. Slabough & M. Grother: *Ind. Eng. Chem.*, **46**, No. 5, 1014 (1954).
- 10) J. A. Smith, M. H. Peterson & B. F. Brown: *Corrosion*, **26**, 539 (1970).
- 11) G. Sandoz, C. T. Fujii & B. F. Brown: *Corr. Sci.*, **10**, 845 (1970).
- 12) B. F. Brown, C. T. Fujii & E. P. Dahlberg: *J. Electrochem. Soc.*, **116**, 218 (1969).
- 13) A. J. Sedriks, J. A. S. Green & D. L. Novok: *Corrosion*, **27**, 198 (1971).
- 14) B. F. Brown: *NRL Report*, 7168 (1970) (文献13に引用).
- 15) M. Marek & R. F. Hochman: *Corrosion*, **26**, 5 (1970).
- 16) H. R. Baker, M. C. Bloom, R. N. Bolster & C. R. Singleterry: *Corrosion*, **26**, 420 (1970).
- 17) M. H. Peterson, T. S. Lennox & R. E. Groover: *Mater. Prot.*, **19**, No. 1, 23 (1970).
- 18) Yu. M. Korovin & I. R. Vlanoski: *Corrosion*, **22**, 16 (1966).
- 19) 鈴木, 山部, 北村: 防蝕技術, **18**, 100 (1969); 第18回腐食防食討論会要旨集, p. 33 (1971).
- 20) W. D. France, Jr & N. D. Greene: *Corr. Sci.*, **8**, 9 (1968); **10**, 379 (1970).
- 21) H. H. Uhlig: 4th International Congress on Metallic Corrosion (1969).
- 22) S. A. Bradford: *Mater. Prot. Perform.*, **9**, No. 7, 13 (1970).
- 23) M. H. Peterson: *Mater. Prot. Perform.*, **9**, No. 10, 14 (1970).