

軽量アルミニウム合金の高耐食化と腐食解析*

京 良彦**, 大谷 良行***, 兒島 洋一****

Improvement in the Corrosion Resistance of the Light Aluminum Alloy and the Corrosion Analysis*

Yoshihiko Kyo**, Yoshiyuki Oya*** and Yoichi Kojima****

1. はじめに

アルミニウムは銅や鉄に比べて、歴史的には“若い金属”であるとよく言われる。紀元前から使われている銅や鉄に対して、ハンフリー・デービーによる金属アルミニウムの発見が1807年、アルミニウムの工業的製法である電解製錬法（ホール・エルー法）の発明は、今からわずか130年ほど前の1886年の出来事である。今年（2018年）が明治元年から数えて150年目にあたることを考えると、その“若さ”が実感できるだろうか。しかしながら、アルミニウムはその軽さ（密度）、強さ（比強度）、美しさ（耐食性、表面処理）といった優れた特長ゆえに急速に普及し、現在では生活用品をはじめ、飲料缶、IT機器、航空・宇宙機、車両、船舶、建材および熱交換器など、現代社会を支える基盤材料としてきわめて広範に用いられている。

アルミニウムの標準電極電位は $E^{\circ}_{\text{Al}} = -1.67 \text{ V vs. SHE}$ と、 Zn ($E^{\circ}_{\text{Zn}} = -0.76 \text{ V vs. SHE}$) と比べても非常に低く、元来非常に活性な金属であるが、大気中や水中では表面に保護性の高い緻密な酸化皮膜がすみやかに形成されるため、高い耐食性を示す。しかしながら、強酸・強塩基環境や、塩化物イオン (Cl^-) 環境においては、不動態皮膜が破壊され腐食が生じる可能性がある。また腐食環境中において、より貴な金属とアルミニウムが接触している場合、アルミニウム側の腐食が促進される異種金属接触腐食が生じる懸念がある。アルミニウムを適切に使用するためには、その腐食挙動を十分に理解することが重要である。本報では、アルミニウムの腐食・防食の基礎について概説する。

2. アルミニウムの耐食性

大気環境中におけるアルミニウムの優れた耐食性を示す例として、日本アルミニウム協会が実施した53年間大気暴露試験の結果が挙げられよう^{1,2)}。Fig. 1は名古屋（現在の(株)UACJ R&Dセンター屋上）にて暴露試験された各種アルミニウム合金（1200：純Al, 3203：Al-Mn系, 5052：Al-Mg系, 6061：Al-Mg-Si系）の最大腐食深さを示したものである。離岸距離が約7 kmと比較的海に近く、周囲は工場や交通量が多い環境であるが、いずれのアルミニウム合金も試験片の一部に深さ100～150 μm程度の腐食孔が生じたのみであり、機械的性質もほとんど変化していなかった。一方、同時に設置されていた炭素鋼や亜鉛めっき鋼板は、暴露10～20年程度でほぼ原型を留めないほどに腐食していた。

元来非常に活性な金属であるアルミニウムが高耐食性を示す理由は、前述のように表面に保護性の酸化皮膜が自然に形成されるためであり、仮に機械的な損傷を受けてもすぐに再生する。酸化皮膜は、厚さ1～数nm程度で緻密な非晶質アルミナからなるバリアー層と、その上部に形成される多孔質な水和酸化物からなるポーラス層の二層構造をとる。バリアー層は保護性が高く、室温ではほぼ一定の厚さである。ポーラス層は保護性に劣り、高湿度環境や水中では最大で厚さ数μm程度に成長することがある。また環境によっては、ポーラス層の成長によって表面が黒色～褐色に変色するウォーターステインが生じる場合がある。これは腐食とは異なり貫通孔を生じるものではないが、審美性の観点から問題になることがある。

* 電気化学, 86-Autumn (2018), 226-230より転載

This review was reprinted from *Denki-Kagaku*, 86-Autumn (2018), 226-230 published by the Electrochemical Society of Japan.

** (株)UACJ R&Dセンター 第二研究部, 博士(工学)

Research Department II, Research & Development Division, UACJ Corporation, Dr. Eng.

*** (株)UACJ R&Dセンター 第二研究部, 博士(工学)

Research Department II, Research & Development Division, UACJ Corporation, Ph. D. (Eng.)

**** (株)UACJ R&Dセンター 第一研究部 兼 第二研究部, 博士(工学)

Research Department I & II, Research & Development Division, UACJ Corporation, Ph. D.

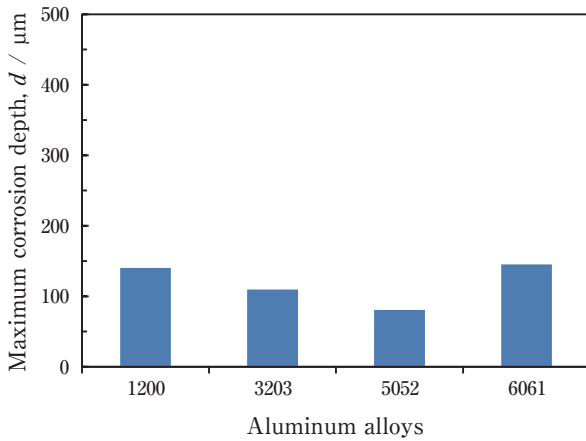


Fig. 1 Maximum corrosion depth of the various aluminum alloys after the 53-year atmospheric exposure test at Nagoya²⁾.

3. アルミニウムの腐食形態

アルミニウムの腐食形態は、均一腐食(全面腐食)と、孔食に代表される局部腐食の2つに大別される。均一腐食は酸化皮膜が全体的に溶解する場合であり、局部腐食は酸化皮膜が部分的に破壊される場合である。Fig. 2にアルミニウムの電位-pH図³⁾を示す。強酸性・強アルカリ性環境では酸化皮膜は不安定となり、 Al^{3+} もしくは AlO_2^- として溶出していく。鉄とは異なり、アルミニウムはアルカリ側にも腐食域が存在する両性金属であることが特徴である。このとき、アルミニウムは比較的大きな速度で全面が溶解している均一腐食の状態にあり、pHがより低いもしくは高いほど均一腐食速度は大きくなる傾向にある。一般的に強酸性・強アルカリ性環境中ではアルミニウムの使用は適さないが、実際の溶解速度は酸・塩基の種類や濃度および温度などの影響で大きく変化し⁴⁾、pHのみで決まるわけではない。中性付近には $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ の安定領域が存在しており、保護性の高い酸化皮膜を形成することで、アルミニウムの耐食性が発現している。酸化皮膜が安定な状態ではその溶解度は非常に小さいため³⁾、アルミニウムはきわめて耐食的である。しかしながら、 Cl^- に代表されるハロゲン化物イオンが存在すると、酸化皮膜が部分的に破壊され、孔食などの局部腐食が生じる可能性がある。孔食以外に、すき間腐食、粒界腐食、糸状腐食および異種金属接触腐食なども局部腐食の一種である。なお、電位-pH図は溶液中の金属イオン濃度がある値とした場合(腐食系では $10^{-6} \text{ mol dm}^{-3}$ とするのが通例)の熱力学的な平衡計算に基づくものであり、速度論や Cl^- などの影響は考慮されていない点に

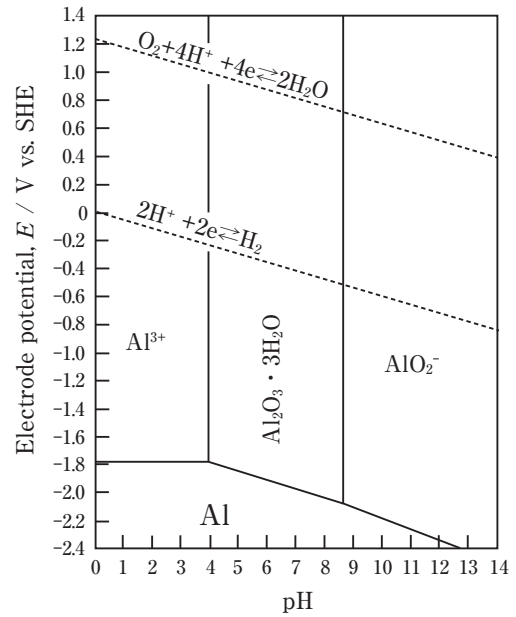


Fig. 2 Potential-pH diagram for the Al-H₂O system³⁾ (25°C, $[\text{Al}^{3+}] = [\text{AlO}_2^-] = 10^{-6} \text{ mol dm}^{-3}$).

は注意を要する。例えば、Fig. 2ではpH 4付近に Al^{3+} と $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ の境界線が存在しているが、腐食促進試験(SWAAT (ASTM G85)など)に用いられるpH約3の酢酸酸性人工海水の中では、アルミニウムの腐食形態は局部腐食となる。前述のように均一腐食が問題となるのは強酸性・強アルカリ性環境中であり、通常はアルミニウムの使用が想定されない。したがって実環境で問題となるアルミニウムの腐食形態は孔食などの局部腐食である。なお、アルミニウムで「孔食」という場合、基本的に酸化皮膜が局部的に破壊されて生じる局部腐食(電気化学的には孔食電位(E_{pit})以上で生じる腐食)のことを指しており、腐食部の形状が孔状になることとは必ずしも一致しない。例えば、酸性塩化物環境中では、微細な孔食が表面全体に発生する場合がある。逆に、均一腐食が局所的な領域に発生すると、外観上は孔状となりうる。しかし、腐食部をミクロ的に観察すると両者は侵食形状が異なっており、孔食の場合は幾何学的(ファセット状)な方位性ピット、均一腐食の場合は半球状(デインプル状)となることから、腐食孔の成因を推定することが可能である。Fig. 3は、大気暴露試験後の1000系合金(純Al系)に生じた腐食孔の内部を、腐食生成物を除去した後に電子顕微鏡で観察したものである。立方体が集積したような幾何学的な侵食形状が見られ、 Cl^- による孔食が発生していたことがわかる。なお侵食形状が幾何学的になる理由は、各結晶粒表面の溶出速度が面方位によって異なり、 $\{100\}$ が溶け残り面となるためである^{5), 6)}。

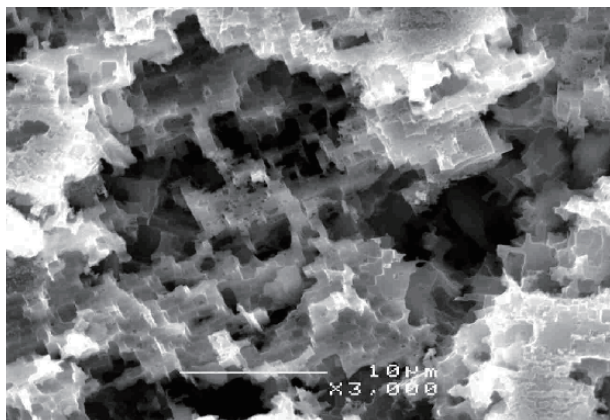


Fig. 3 SEM image inside a pitting corrosion occurred on 1100 aluminum alloy after the atmospheric exposure test.

4. アルミニウムの電気化学的性質

実環境で問題となるアルミニウムの腐食形態は孔食（局部腐食）であることから、アルミニウムの耐食性を判断するためには、孔食発生に対する感受性を評価することが重要である。孔食発生の感受性は、分極曲線から得られる孔食電位の貴卑で定量化できる。Fig. 4に6000系（Al-Mg-Si系）アルミニウム合金の、5mass% NaCl水溶液中（NaOHでpH 7に調整）における分極曲線の測定結果を示す。供試材には測定直前に前処理（60°C 5mass% NaOH × 30 s浸漬 → 純水洗 → 25°C 30mass% HNO₃ × 60 s浸漬 → 純水洗）を施しているが、これは表面酸化皮膜をいったん除去し、初期表面の差異による影響をなくすためのものである（なお前処理後の表面には酸化皮膜がすぐに再生している）。供試材を溶液中に1800 s浸漬した後、自然電位（ E_{corr} ）からアノードまたはカソード方向へ20 mV s⁻¹の走査速度で動電位分極を行った。アノードはAr脱気下、カソードは大気開放下での測定結果である。したがって、この場合はカソード分極曲線上の E_{corr} が、実環境における E_{corr} に該当する。アルミニウムの E_{corr} は、酸化皮膜の存在により金属Alの平衡電位よりもはるかに貴な値をとる。アノード分極曲線では、 E_{corr} から約-700 mV vs. SSE（飽和KCl 銀-塩化銀電極基準）において、電流密度が小さく、かつ緩やかに増加する区間が見られる。これはアルミニウムの不働態領域に相当し、表面はごく小さな速度で全面溶解している状態にある。電流密度の急増が観測される約-690 mV vs. SSEが供試材の孔食電位（ E_{pit} ）であり、表面の酸化皮膜が局部的に破壊されて成長性孔食が発生したことに対応する。逆に、アルミニウムの電極電位を E_{pit} よりも卑に制御し、不働態領域に保ち続けることで孔食発生を抑制で

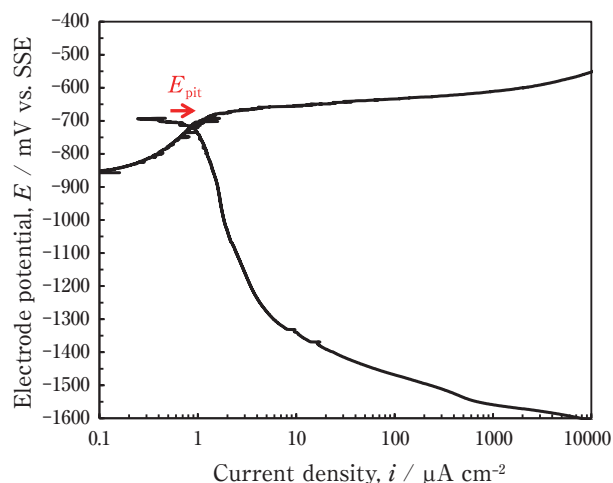


Fig. 4 Polarization curves of 6xxx aluminum alloy measured in pH 7 5mass% NaCl (anodic: de-aerated with Ar, cathodic: open-to-air).

きる。この場合、不働態領域における溶解速度は工学的には無視できる程度であるため、アルミニウムを耐食的に使用することが可能である。このように E_{pit} はアルミニウムの防食設計において非常に重要な指標となる。また E_{pit} は材料と溶液環境によって決まり、後述するようにアルミニウム中の合金元素や、溶液中のイオン種によって大きく影響を受ける。なお、溶液中のCl⁻濃度が高い場合などでは、アノード分極曲線上に不働態領域が見られない場合があるが、これは E_{pit} が卑化して $E_{\text{corr}} \approx E_{\text{pit}}$ となったためである。

一方、カソード分極曲線に着目すると、 $E_{\text{corr}} \sim$ 約-1300 mV vs. SSEにおいて見られる溶存酸素の還元電流は、鉄などで通常観測される拡散限界電流である20 $\mu\text{A cm}^{-2}$ に比べて1桁程度小さい。これは、酸化皮膜の存在により表面のカソード活性が低いためであり、アルミニウムが高耐食性を示す理由の一つとなっている。逆に、表面のカソード活性が高くなるような場合には、アルミニウムの耐食性は低下する。例えば、母相よりも貴な金属間化合物はカソードサイトとして働くため、これらを表面から選択除去した場合や⁷⁾、高純度アルミニウム⁸⁾ではカソード反応がより不活性となる。また、溶液中にCu²⁺などの重金属イオンが存在すると、アルミニウム表面に析出してカソードサイトを形成し耐食性を低下させる。

5. アルミニウムの孔食電位（ E_{pit} ）の測定法

アルミニウム耐食性の指標としての E_{pit} の重要性は、前節で述べたとおりである。 E_{pit} はアノード分極曲線の測定によって決定されるが、より簡便な手法として、

$E_{\text{corr}} \approx E_{\text{pit}}$ となる溶液中での E_{corr} の測定結果をもって E_{pit} の代用とする方法が幅広く用いられており、日本アルミニウム協会⁹⁾やASTM (G69) などによって規格が制定されている。これらの規格では、測定溶液として5mass%程度のNaCl水溶液に酸化剤を添加したものをを用いており、酸化剤でカソード反応を増大させ、 E_{corr} を $E_{\text{corr}} \approx E_{\text{pit}}$ にまで貴化させている。酸化剤は E_{pit} に与える影響が小さいものである必要から、日本アルミニウム協会では酢酸、ASTMでは過酸化水素水を用いている。なおアルミニウムで単に「電位」と呼称する場合、その電位が測定された溶液中での E_{pit} を指していることが多いため、文脈によっては E_{corr} と E_{pit} の混同に注意が必要である。

6. 耐食性に影響する材料因子

アルミニウムは純アルミニウムとしても幅広く使用されているが、強度やその他特性の改善を企図して様々な合金元素が添加される。アルミニウムに用いられる主要な添加元素はCu, Mg, Mn, Si, Znなどである。アルミニウムの E_{pit} は母相中の固溶元素の種類と濃度によって大きく変化し、Znは E_{pit} を卑に、CuやMnは E_{pit} を貴に変化させる。Si, Mgが E_{pit} に及ぼす影響は比較的小さい。添加元素による E_{pit} の調整は、アルミニウムの防食設計において重要である。またCu添加は E_{pit} を貴化させるものの、一般的にAl-Cu系合金の耐食性は低い傾向にある。これは、Cuを含有する貴な金属間化合物の存在や、表面から溶出したCuの再析出によって、カソード反応が活性化されるためである。他にSn, In, Gaといった元素は、微量の添加でもアルミニウムの E_{pit} を大きく卑化させるため、これを利用したアルミニウム空気電池の開発が行われている¹⁰⁾。

固溶元素以外にも、アルミニウム中の第二相粒子の存在は耐食性に大きく影響する。特にアルミニウムへの固溶量が小さい重金属などの元素は、晶析物として第二相粒子を形成しやすい。第二相粒子は母相との界面が酸化皮膜の欠陥部となるほか、自身の電気化学的性質が母相と異なることが多いため、腐食の起点となることが多い。アルミニウム中の微量不純物であるFeやSiは母相よりも貴なAl-Fe (-Si) 系化合物として存在し、カソードサイトとして作用することでその周囲が腐食の起点となる^{11), 12)}。Al-Mn系化合物は母相との電位差が小さいため、耐食性への影響はないとされる。また、 Al_3Mg_2 は母相よりも卑なため優先的に溶解する¹³⁾。 Mg_2Si は中性環境溶解初期においては母相よりも卑でありMgの選択溶解が生じるが、中性環境中では

表面にSiが濃化し徐々に貴化する^{14), 15)}。このように、第二相粒子自体や母相の電気化学的性質の理解は非常に重要であるため、微小セルを用いた分極測定などが盛んに研究されている^{12), 17)}。またAl-Mg系(高Mg)、Al-Cu系およびAl-Zn-Mg系合金などでは、第二相粒子の粒界析出によって、粒界腐食を生じる場合がある。粒界腐食が生じると短期間で貫通に至る恐れがあるが、熱処理の適正化によって防止することができる。

7. 耐食性に及ぼす環境因子

アルミニウムの耐食性に及ぼす環境因子としては、溶液中に存在するイオンの影響が大きい。重金属イオンは前述のようにアルミニウム表面に析出することでカソード反応を増大させ、耐食性を低下させる作用がある。またカチオンが及ぼす影響について、淡水中でHSAB則における硬い金属イオンが酸化皮膜中に取り込まれることが報告されている¹⁸⁾。Cl⁻に代表されるハロゲン化物イオンは孔食誘起性のアニオンであり、Cl⁻濃度の対数に比例して E_{pit} が卑化することが知られている^{19), 20)}。Cl⁻による孔食発生メカニズムは諸説あり、完全な解明には至っていない^{21)~23)}。NO₃⁻やSO₄²⁻ほか多くのアニオンは、Cl⁻に対して一定量以上存在するとインヒビターとして作用し、 E_{pit} を貴化させる^{19), 24)}。これはCl⁻とのアルミニウム表面への競争吸着によるものと理解されており^{19), 24)}、未解離状態ではこの作用は見られない²⁴⁾。一方で、Cl⁻を含む酸性水溶液中にNO₃⁻とSO₄²⁻が共存すると逆に腐食が増大することが報告されており²⁵⁾、SO₄²⁻によって酸化皮膜の性質が変化することが原因であると推定されている。さらに、SO₃²⁻(亜硫酸イオン)はアルミニウムに対して酸化剤として作用し、孔食を促進させる^{26), 27)}。

このように環境中のイオンによる影響は複雑である。また溶液中に酢酸を添加するとカソード反応を増加させる作用があるため、アルミニウムの電位測定法や腐食促進試験に用いられている。これは、酢酸は弱酸であることから酸解離定数が小さく、溶液中には存在する多量の未解離の酢酸分子がH⁺イオンの供給源として働くためである²⁸⁾。その他に、付着塩の潮解による大気腐食を模擬した実験から、特に高温の濃厚MgCl₂水溶液中においてはカソード反応が異常増大し、NaClやCaCl₂といった他の塩種に比べてアルミニウムの腐食量が増加することが報告されている^{29), 30)}。

8. 異種金属接触腐食

異種金属接触腐食とは電位の異なる金属が電氣的に接触している際に、貴な金属が防食され卑な金属の腐食が促進される現象である。ほとんどの実用金属はアルミニウムよりも貴であるため、異種金属と接触して使用される場合には注意が必要である。金属以外でも導電性があり電位が貴なCFRPとの接触で異種金属接触腐食を生じる場合がある³¹⁾。アルミニウムの異種金属接触腐食は、貴な相手材との電氣的な接触によりアルミニウムの局部腐食が加速される現象であるから、①異種金属との電氣的な接触、②水の存在、③Cl⁻の存在が必要条件となる。異種金属接触腐食は相手材との電位差が大きいほど加速される傾向にあるが、実際の腐食速度は電位差のみでは決まらず、相手材のカソード活性や接触面積比および使用環境などの影響が非常に大きい。ステンレス鋼の電位はアルミニウムよりも貴であるがカソード活性が小さいため、接触部の水はけがよく濡れ時間が短い場合には実用上問題にならないことが多い³²⁾。ただし、異種金属接触腐食の影響が無視できない場合には、相手材との絶縁対策や水の侵入を防止する措置が必要である。アルミニウムがより卑な金属との接触はアルミニウムが防食される側になり、Znはアルミニウムの腐食を抑制する。しかし電位が非常に卑なMgとの接触は過防食となり、カソードとなるアルミニウム表面がアルカリ化するため、かえって腐食量が増大する。またアルミニウム合金どうしであっても、両者の E_{pit} の差が大きい場合には異種金属接触腐食が生じ、より貴な E_{pit} を持つアルミニウム合金側が防食される。これを利用することで、アルミニウムを防食する犠牲防食法が広く用いられている。

9. アルミニウムの犠牲防食

アルミニウムの防食法として、陽極酸化(アルマイト)、塗装、化成処理および犠牲防食などが実用的に用いられているが、最後に犠牲防食法について解説する。鉄の犠牲防食とは、より電位が卑なZn等によって金属Feが熱力学的に安定になる電位を与えることを指す。アルミニウムの犠牲防食は鉄とは異なっており、何らかの方法でアルミニウムの電極電位を E_{pit} より卑な不働態領域に保ち、孔食の発生と成長を防止することを意味する。前述のとおり、中性環境中の不働態領域ではわずかな均一腐食が生じているのみで、その速度は事実上無視できるからである。逆に、均一腐食速度が無視できない強アルカリ環境中などでは、犠牲防食は

成立しない。

アルミニウムの犠牲防食は、特に配管材や熱交換器など、貫通腐食の発生が製品にとって致命的となる分野においてきわめて重要な技術である。そこで、相対的に卑なAl-Zn系合金を材料表面に配置する方法が広く用いられている。卑な合金を表層(犠牲陽極材)に貴な合金を内部(心材)にクラッドした板では、表層が心材を犠牲防食するため、腐食の進行方向が水平方向となる。これにより、肉厚方向への腐食の進行が抑制され貫通寿命が劇的に向上する。すなわち、心材単独の材料に孔食が発生した場合、穿孔に対する余裕度(腐食代(しろ))は実質的に板厚方向への1次元的な距離しかないため、短時間で貫通に至る可能性がある。しかし犠牲陽極層の存在によって、その有効体積分だけ3次元的に余裕度を稼ぐことができる、という考え方である。アルミニウム表層にZnを付与する方法としてはクラッド板以外に押出クラッド管、Zn溶射やろう付に用いるフラックスにZnを添加しておく方法などが用いられ、犠牲陽極材と被防食材間の E_{pit} に50~200 mV程度の差を持たせる場合が多い^{33),34)}。また被防食材である心材は、機械的強度の向上と E_{pit} の貴化を兼ねてMnやCuなどが添加されることが多い。その他、熱交換器の設計においてフィン材に卑なアルミニウム合金を配置することで、冷媒が流れるチューブ材を犠牲防食する防食設計法も広く用いられている。

10. おわりに

アルミニウムは耐食性に優れた材料であるが、その腐食特性は材料因子と環境因子に大きく左右される。冒頭で述べたように、アルミニウムは“若い”金属であり、まだまだ大きな可能性を秘めている。アルミニウムの可能性を引き出し使いこなしていくためには、腐食挙動の十分な理解が必要不可欠である。

参考文献

- 1) 社団法人 軽金属協会 大気ばく露試験委員会：アルミニウム合金板の耐食性—20年間の大気ばく露試験結果一、(1977)。
- 2) 一般社団法人 日本アルミニウム協会 耐食性評価試験委員会：アルミニウム合金板の耐食性—50年間の大気暴露試験結果一、(2012)。
- 3) M. Pourbaix : Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions, NACE, TX, p.171 (1974).
- 4) S. D. Cramer and B. S. Covino, Jr. : ASM Handbook vol.13B, ASM international, OH, (2005), 120.
- 5) 久松敬弘 : Denki Kagaku (presently Electrochemistry) , **38** (1970) , 691.
- 6) 昆謙造 : 防食技術, **32** (1983) , 593.
- 7) 世利修美, 小澤健 : 軽金属, **54** (2004) , 328.

- 8) 杉本克久, 沢田可信, 森岡進: 日本金属学会誌, **34** (1970), 312.
- 9) 一般社団法人 日本アルミニウム協会 耐食性評価試験委員会: 軽金属, **67** (2017), 16.
- 10) D. R. Egan, C. Ponce de Leon, R. J. K. Wood, R. L. Jones, K. R. Stokes and F. C. Walsh, J.: Power Sources, **236** (2013), 293.
- 11) J. O. Park, C. H. Paik, Y. H. Huang and R. C. Alkire, J.: Electrochem. Soc., **146** (1999), 517.
- 12) Yuto Sakaizawa, Izumi Muto, Yu Sugawara, Yoshiyuki Oya, Yoshihiko Kyo and Nobuyoshi Hara: ECS Trans., **80** (2017), 553.
- 13) S. Jain, M. L. C. Lim, J. L. Hudson and J. R. Scully: Corros. Sci., **59** (2012), 136.
- 14) F. Eckermann, T. Suter, P. J. Uggowitzer, A. Afseth and P. Schmutz: Electrochim. Acta, **54** (2008), 844.
- 15) O. Gharbi and N. Birbilis: J. Electrochem. Soc., **165** (2018), C497.
- 16) K. A. Yasakau, M. L. Zheludkevich, S. V. Lamaka and M. G. S. Ferreira: Electrochim. Acta, **52** (2007), 7651.
- 17) N. Birbilis and R. G. Buchheit: J. Electrochem. Soc., **155** (2008), C117.
- 18) K. Otani, M. Sakairi, R. Sakaki, A. Kaneko, Y. Seki and D. Nagasawa: J. Solid State Electrochem., **18** (2014), 325.
- 19) H. Böhni and H. H. Uhlig: J. Electrochem. Soc., **116** (1969), 906.
- 20) 西山貞雄, 当摩建: 材料と環境, **42** (1993), 569.
- 21) G. S. Frankel: J. Electrochem. Soc., **145** (1998), 2186.
- 22) J. O'M. Bockris and Y. Kang: J. Solid State Electrochem., **1** (1997), 17.
- 23) P. M. Natishan and W. E. O'Grady: J. Electrochem. Soc., **161** (2014), C421.
- 24) 大谷良行, 本川幸翁, 兒島洋一: 軽金属学会第125回秋季大会講演概要 (2013), 221.
- 25) 村田拓哉, 大谷良行, 小山高弘, 兒島洋一: 軽金属学会第127回秋季大会講演概要 (2013), 93.
- 26) 大谷良行, 本川幸翁, 兒島洋一: 材料と環境, **63** (2014), 394.
- 27) 兒島洋一, 岸元努, 辻川茂男: 材料と環境, **45** (1996), 305.
- 28) 大谷良行, 兒島洋一: 軽金属, **62** (2012), 244.
- 29) 島田隆登志, 大谷良行, 本川幸翁, 兒島洋一, 武藤泉: 材料と環境, **62** (2013), 56.
- 30) 藤村涼子, 小山高弘, 内田秀俊: 軽金属, **63** (2013), 175.
- 31) 境昌宏, 坂本千波: 材料と環境, **64** (2015), 224.
- 32) 社団法人 日本アルミニウム協会: アルミニウムハンドブック第7版, (2007), 64.
- 33) 磯部保明: 材料と環境, **48** (1999), 469.
- 34) 加藤健志, 池田洋: 住友軽金属技報, **37** (1996), 112.



京 良彦 (Yoshihiko Kyo)
(株)UACJ R&Dセンター 第二研究部
博士(工学)



大谷 良行 (Yoshiyuki Oya)
(株)UACJ R&Dセンター 第二研究部
博士(工学)



兒島 洋一 (Yoichi Kojima)
(株)UACJ R&Dセンター
第一研究部 兼 第二研究部
博士(工学)