

Fe-Cr-Al および Fe-Cr-Si 合金のアノード分極特性に 及ぼす Cr 量の影響

樋尾勝也*, 山田隆志**, 土田豊***, 中島浩衛***, 細井祐三****

Effect of Cr Content on Anodic Polarization Characteristics of Fe-Cr-Al and Fe-Cr-Si Alloys

by Katsuya HIO, Takashi YAMADA, Yutaka TSUCHIDA,
Koe NAKAJIMA, and Yuzo HOSOI

The effect of Cr, Al, and Si on the anodic polarization characteristics of Fe-Cr alloys was studied, with Cr content ranging from 10% to 18% in H₂SO₄ and NaCl aqueous solutions. It was shown that the effect of Al depended on Cr content while the beneficial effect of Si was found to be independent of Cr content in the Fe-Cr alloys. In Fe-Cr-3Al alloys, the critical current density for passivation and the passive current density decreased as Cr content was increased up to 16%, but these values increased in the Fe-18Cr alloy. The pitting potential moved in the noble direction when 3% Al was added to the Fe-12Cr alloy. The pitting potential, however, moved in a less noble direction in Fe-16Cr and Fe-18Cr alloys with the addition of 3% Al. The addition of 1% Si helped improve the pitting corrosion resistance of Fe-Cr-3Al alloys.

Key words : aluminum, anodic polarization, crevice corrosion, ferritic stainless steel,
iron-chromium alloys, passive film, pitting potential, repassivation, silicon.

1. はじめに

一般的にステンレス鋼に Al を添加すると、耐高温酸化性に対しては非常に有効である¹⁻³⁾が、水溶液腐食においては Al 量が多くなると耐孔食性および耐錆性を劣化させることが知られている⁴⁾。また、塩化物水溶液中におけるアノード分極特性に及ぼす Al の影響として、ステンレス鋼の孔食電位を卑な方向へ移行させる⁵⁾。Chen と Stephens⁶⁾ は、オーステナイト系ステンレス鋼の

Cr 量を低減し Al, Si 等を添加して、アノード分極特性を検討しているが、この報告において、Si を添加すると臨界不働態化電流密度は低下し、孔食電位は上昇した。一方、Al を添加すると臨界不働態化電流密度は上昇し、孔食電位は低下した。これまでに、Fe-8Cr および Fe-10Cr 合金をベースに Si を添加すると、耐食性に対して有効である^{7,8)} という同様な結果が得られた。しかし、Al を添加すると Chen と Stephens の報告^{7,8)} とは異なり、Al 添加による有効性が見出された。すなわち、ベースとなる Cr 量が異なると、アノード分極特性に及ぼす Al の影響がプラスに働く場合とマイナスに働く場合があるものと考えられる。

そこで本研究では、3%の Al を添加した Fe-Cr

* 金属研究室

** 名古屋市工業研究所

*** 大同工業大学工学部

**** 名古屋大学・大同工業大学名誉教授

合金のアノード分極特性に及ぼす Cr 量の影響を検討した。また、Cr 量の異なる Fe-Cr-3Al 合金における Si の添加効果についても調査した。塩化物水溶液中における孔食特性は、JIS G 0579 により孔食電位の測定法が規定されている。しかしながら、孔食はすきまのない自由表面に生じる孔あき腐食であり、実際の環境では構造上の、あるいは付着物下のすきま部における”すきま腐食”が問題になることがある。一般にすきま腐食臨界電位は孔食臨界電位に比べてはるかに低い⁹⁾。したがって、実際の構造物では特殊な場合を除いて構造上の、あるいは付着物下のすきま構造の存在は不可避であるから、実環境では孔食よりもすきま腐食が発生しやすい。本報告では、JIS による孔食電位の測定と併せて、塩化物水溶液中におけるすきま腐食試験を行った。さらに、不働態皮膜の構造をオージェ電子分光法 (AES) により解析し、Fe-Cr-Al 合金中における Cr 量と Al との関係における耐食性の変化のメカニズムについて考察した。

2. 実験方法

2. 1. 供試材

電解鉄、フェロクロム、純アルミニウムおよび金属シリコンを適宜配合し、真空アークボタン溶解により約 200g 溶製した。次に、1473K でホットプレスによって約 4mm の厚さにした。作製した合金の化学組成を表 1 に示す。Cr 量は 10 ~ 18% を基本とし、それぞれに Al および Si を添加した合金である。すべての合金に、1073K、1.8ks 空冷による溶体化処理を施した。

電気化学的測定用試料の調整は、10mm×10mm に切り出した合金と絶縁物で被覆した銅線の先をはんだ付けをして、エポキシ樹脂に埋め込み、測定面 (100mm²) だけ露出させた。なお、エポキシ樹脂と供試材とのすき間を防止するために、あらかじめ供試材側に合成ゴム材でマスキングを施した。この試料をアルミナ懸濁液によるバフ研磨で鏡面仕上げし、純水中で超音波洗浄を行い種々の実験に供した。

表 1 化学組成 (mass%)

合金	C	Cr	Al	Si	Fe
Fe-10Cr	0.003	10.00	<0.01	<0.01	Bal.
Fe-10Cr-3Al	0.007	10.06	2.94	<0.01	Bal.
Fe-10Cr-3Si	0.005	10.03	<0.01	2.88	Bal.
Fe-10Cr-3Al-3Si	0.007	10.07	2.96	2.98	Bal.
Fe-12Cr	0.003	12.06	<0.01	<0.01	Bal.
Fe-12Cr-3Al	0.002	11.84	2.96	<0.01	Bal.
Fe-12Cr-3Si	0.002	11.86	<0.01	2.77	Bal.
Fe-14Cr	0.002	13.85	<0.01	<0.01	Bal.
Fe-14Cr-3Al	0.002	13.84	3.00	<0.01	Bal.
Fe-14Cr-3Si	0.002	13.64	<0.01	2.76	Bal.
Fe-14Cr-3Al-1Si	0.002	13.91	2.95	0.98	Bal.
Fe-14Cr-3Al-2Si	0.002	13.85	3.00	1.93	Bal.
Fe-16Cr	0.002	15.81	<0.01	<0.01	Bal.
Fe-16Cr-3Al	0.003	15.71	2.93	<0.01	Bal.
Fe-16Cr-3Si	0.002	15.64	<0.01	2.77	Bal.
Fe-16Cr-3Al-1Si	0.003	15.99	2.92	0.95	Bal.
Fe-16Cr-3Al-2Si	0.002	15.69	2.92	1.89	Bal.
Fe-18Cr	0.002	18.05	<0.01	<0.01	Bal.
Fe-18Cr-3Al	0.002	17.66	2.89	<0.01	Bal.
Fe-18Cr-3Si	0.002	17.59	<0.01	2.73	Bal.
Fe-18Cr-3Al-1Si	0.003	17.69	2.92	0.94	Bal.
Fe-18Cr-3Al-2Si	0.003	17.71	2.99	1.93	Bal.

2. 2. アノード分極曲線および孔食電位の測定

N₂ ガスで十分脱気した濃度 0.05kmol・m⁻³ の H₂SO₄ 水溶液中でアノード分極曲線の測定を行った。最初に試料を電解槽にセットし、試料の電位を -0.7V に設定し 0.6ks のカソード処理を行った。その後、電位設定を解除し、試料を不通電状態で 0.6ks 放置した。次いで、ポテンショスタットとファンクションジェネレーターを用いて、電位掃引速度を 1mV・s⁻¹ で、自然電極電位よりも少し卑な電位から動電位法にて分極させた。測定中の水溶液は N₂ 雰囲気、温度 303K に保持した。参照電極には飽和カロメル電極 (SCE) を、対極には Pt 電極を用いた。

孔食電位の測定は、N₂ ガスで十分脱気した温度 303K、3.5%NaCl 水溶液中に試料を浸し、0.6ks 放置後、アノード分極曲線の測定と同様の装置にて自然電極電位から電位掃引速度 0.33mV・s⁻¹ の動電位法で分極させた。孔食の発生により電流密度の急激な上昇が現れ、電流密度が 0.1A・m⁻² および 1A・m⁻² に達したときの孔食電位 (E_{pit}) をそれぞれ V'_{c10} 、 V'_{c100} とした¹⁰⁾。

2. 3. すきま腐食再不働態化電位の測定

電気化学的測定用の供試材にすきまが形成されるように、測定面半分にシリコンゴムを貼付けた。すきま腐食再不働態化電位の測定^{11,12)}は次のように行った。温度 300K, N₂ ガスで脱気した 3%NaCl 水溶液中に浸漬後、電位掃引速度 1.67mV·s⁻¹ で電流密度が 1A·m⁻² に達するまで分極した。この電流密度において 0.12ks 定電流電解し、電位掃引速度 3.33mV·s⁻¹ でカソード走査を行い、電流密度が 0.5A·m⁻² における電位に保持し 0.12ks 経過したとき、あるいは電流密度が +0.1A·m⁻² 以上に上昇変動したとき、ステップ状に電位を 10mV ずつ下げた。この操作を繰り返してアノード方向への増加傾向が認められなくなったときの電位をすきま腐食再不働態化電位 ($E_{R,CREV}$) とした。

2. 4. 不働態皮膜のAES解析

AES により、Ar スパッタを併用して、不働態皮膜の表面から深さ方向への化学組成を解析した。測定には Fe-10Cr-3Al-3Si 合金を用い、積分法により行った。各元素のオージェ電子ピークは Fe LM2, Cr LM2, Al KL1, Si KL1, Mo MN2 および O KL1 を使用し、これらのピーク強度に相対感度係数を乗じて組成に換算した。電子銃の加速電圧は 10kV, 試料電流は 30nA であり、イオン銃の加速電圧は 3kV, イオン電流は 1.5μA とした。Ar イオンスパッタは SiO₂ のスパッタ速度換算で 0.083nm·s⁻¹ であった。動作真空度はチャンバー内を 5×10⁻⁸ Pa とした後、高純度 Ar を導入し 4×10⁻⁵ Pa とした。解析する供試材は、エメリー紙で #1200 まで研磨後、303K, 30%HNO₃ 水溶液中で 3.6ks の不働態化処理を施し、アセトン中で超音波洗浄を行った。

3. 実験結果および考察

3. 1. H₂SO₄ 水溶液中におけるアノード分極特性

図 1 に Fe-Cr, Fe-Cr-3Al および Fe-Cr-3Si 合金の臨界不働態化電流密度 (i_{crit}) に及ぼす Cr 量の影響を示す。Fe-Cr 合金の場合、Cr 量の増加に伴って臨界不働態化電流密度は低下した。しか

し Fe-Cr-3Al 合金においては、Cr 量の増加に伴って 16%までは低下したが 18%では逆に上昇した。Fe-18Cr 合金に 3%Al を添加すると Fe-18Cr 合金よりやや高い電流密度を示した。Fe-Cr-3Si 合金では、Cr 量の増加に伴って低下し、どの Cr 量においても最も低い電流密度を示した。ここで、臨界不働態化電流密度の電位における各元素の溶出量を高周波誘導結合プラズマ発光分光分析 (ICP) により測定した。

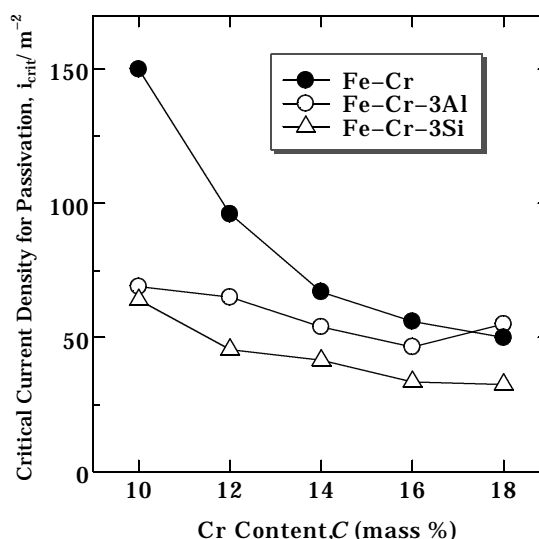


図 1 Fe-Cr, Fe-Cr-3Al および Fe-Cr-3Si 合金の臨界不働態化電流密度に及ぼす Cr 量の影響 (0.05 kmol·m⁻³ H₂SO₄ 水溶液, 303 K)

供試材には 10~18%Cr の Fe-Cr-3Al および Fe-Cr-3Si 合金を用い、303K, 200ml の 0.5kmol·m⁻³ H₂SO₄ 水溶液中で 3.6ks 保持した後の水溶液を分析した。図 2 に Fe-Cr-3Al 合金の各元素のイオン溶出量に及ぼす Cr 量の影響を示す。Fe および Al イオンの溶出量は 16%Cr まで Cr 量の増加に伴って減少し、18%Cr では 16%Cr とほとんど変化が認められなかった。しかし、Cr イオンの溶出量は Cr 量の増加に伴って 16%Cr までは減少したが 18%Cr では逆に増加した。この Cr イオンの溶出量の増加が Fe-18Cr-3Al 合金の臨界不働態化電流密度の上昇をもたらしたものと考えられる。図 3 に Fe-Cr-3Si 合金の各元素のイオン溶出量に及ぼす Cr 量の影響を示す。Fe-Cr-3Si 合

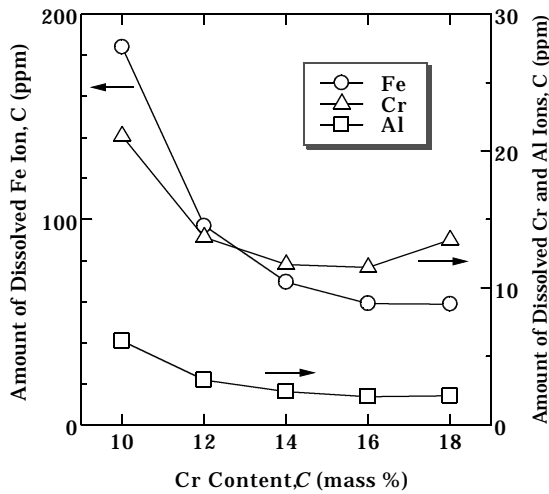


図2 Fe-Cr-3Al合金のFe, CrおよびAlイオンの溶出量に及ぼすCr量の影響

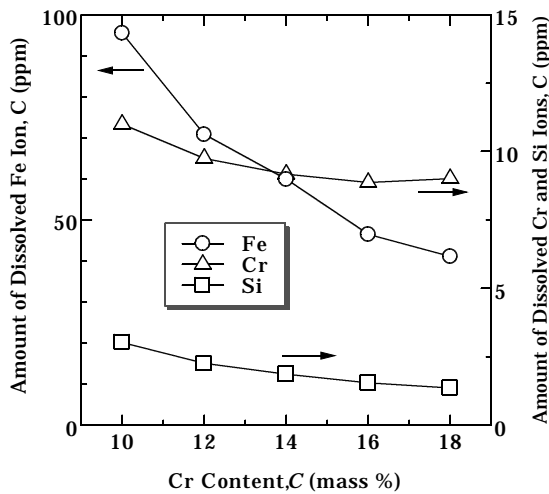


図3 Fe-Cr-3Si合金のFe, CrおよびAlイオンの溶出量に及ぼすCr量の影響

金の場合、18%CrにおけるCrイオンの溶出量は14%Crからほとんど変化が見られず、Fe-Cr-3Al合金の場合に比べて18%CrにおいてもFeイオンの溶出量が低下した。図4にFe-Cr, Fe-Cr-3AlおよびFe-Cr-3Si合金の不働態維持電流密度(i_{pass})に及ぼすCr量の影響を示す。なお、不働態領域で最も低くなった電流密度を不働態維持電流密度とした。臨界不働態化電流密度の場合と同様に、Fe-Cr-3Al合金ではCr量の増加に伴って16%までは低下したが18%では逆に上昇し、

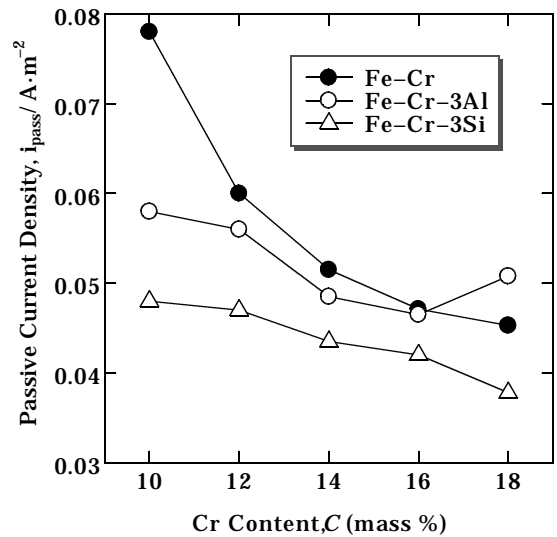


図4 Fe-Cr, Fe-Cr-3AlおよびFe-Cr-3Si合金の不働態維持電流密度に及ぼすCr量の影響 (0.05 kmol·m⁻³ H₂SO₄水溶液, 303 K)

Fe-18Cr合金よりもFe-18Cr-3Si合金の方が電流密度が上昇した。Fe-Cr-3Si合金ではCr量の増加に伴って電流密度は低下した。H₂SO₄水溶液中におけるアノード分極特性の観点から、Fe-10Cr合金からFe-16Cr合金までは3%Alを添加することによって耐食性は向上するが、Fe-18Cr合金に3%Alを添加すると逆に耐食性の劣化を招くことが明らかになった。次に、Fe-Cr-3Al合金にSiを添加し、その効果をアノード分極特性より検討した。図5にFe-14Cr-3Al, Fe-16Cr-3AlおよびFe-18Cr-3Al合金の臨界不働態化電流密度に及ぼすSi量の影響を示す。Fe-14Cr-3AlおよびFe-16Cr-3Al合金は1%のSiを添加してもほとんど効果は得られず、2%のSiを添加すると電流密度は低下した。しかし、Fe-18Cr-3Al合金に1%のSiを添加すると電流密度は若干低下し、2%のSiを添加すると著しく低下した。Fe-Cr-3Al-2Si合金においては、Cr量が増加するとそれに伴い臨界不働態化電流密度は低下した。図6にFe-14Cr-3Al, Fe-16Cr-3AlおよびFe-18Cr-3Al合金の不働態維持電流密度に及ぼすSi量の影響を示す。臨界不働態化電流密度と同様な傾向を示し、Fe-18Cr-3Al合金ではSiの添加効果が大き

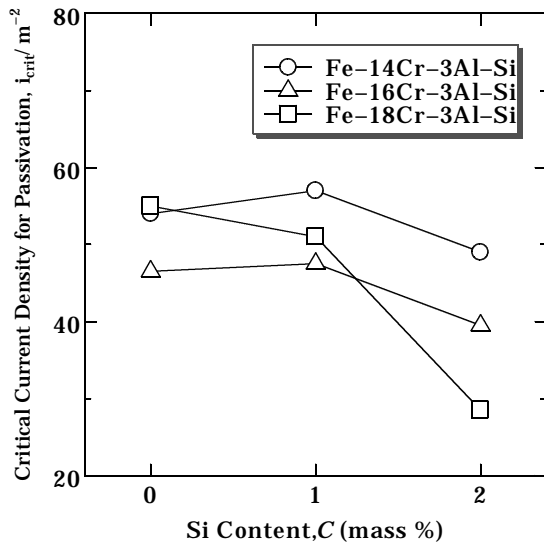


図5 Fe-14Cr-3Al-3Si, Fe-16Cr-3Al-3Si および Fe-18Cr-3Al-3Si 合金の臨界不働態化電流密度に及ぼす Si の影響 (0.05 kmol・m⁻³ H₂SO₄ 水溶液, 303 K)

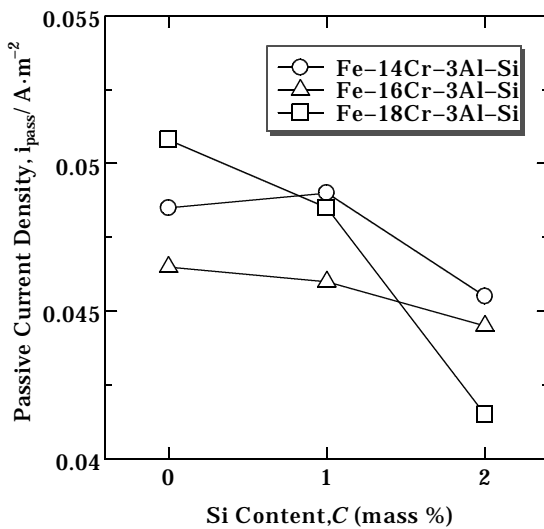


図6 Fe-14Cr-3Al-3Si, Fe-16Cr-3Al-3Si および Fe-18Cr-3Al-3Si 合金の不働態維持電流密度に及ぼす Si の影響 (0.05 kmol・m⁻³ H₂SO₄ 水溶液, 303 K)

く、2%の Si を添加することによって Fe-18Cr 合金における Al 添加による悪影響が除去された。

3. 2. 孔食電位とすきま腐食再不働態化電位

図7に各 Fe-Cr 合金の孔食電位に及ぼす Cr 量の影響を示す。V_{c'10} と V_{c'100} とでは、ほとんど同様な傾向を示した。すべての Fe-Cr 合金は Cr 量が増加するに従って、孔食電位は貴な方向へ移行した。Fe-12Cr 合金に 3%の Al を添加すると孔食電位は上昇し、Fe-14Cr-3Al 合金では Fe-14Cr 合金とほぼ同等の電位を示した。Cr が 16%以上では逆転し、Fe-16Cr および Fe-18Cr 合金に 3%の Al を添加すると孔食電位は卑な方へ移行した。H₂SO₄ 水溶液中におけるアノード分極挙動においては、Fe-16Cr 合金まで Al の添加が良好に働いていた。しかし、NaCl 水溶液中における孔食電位においては、Al の有益な効果が Fe-12Cr 合金までとなり低 Cr 側にシフトした。これは孔食という局部腐食であるために、Cr 量の影響が顕著に表れたと考えられる。また、Fe-Cr-3Al 合金では、Si を 1%添加すると孔食電位は添加しない合

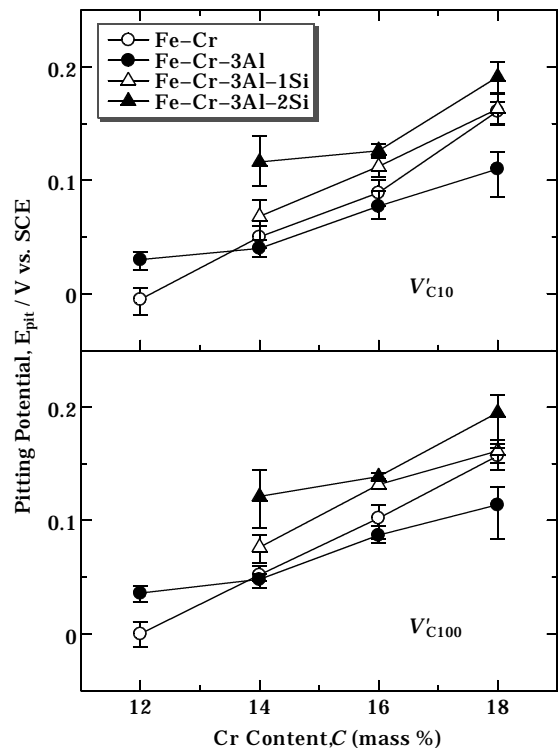


図7 Fe-Cr, Fe-Cr-3Al, Fe-Cr-3Al-Si および Fe-Cr-3Al-2Si 合金の孔食電位に及ぼす Cr 量の影響(3.5mass% NaCl 水溶液, 303 K)

金に比べ、すべて上昇し 2%の Si を添加するとさらに上昇した。孔食電位に及ぼす Si の有益な効果が確認できた。

図 8 にすきま腐食再不働態化電位に及ぼす Cr 量の影響を示す。Fe-Cr 合金は Cr 量の増加に伴ってすきま腐食再不働態化電位は貴な電位へ移行した。Fe-Cr-3Al 合金中の Cr 量が増加すると 14%Cr までは電位が上昇したが、以後は逆に低下した。また、Fe-Cr-3Al 合金と Fe-Cr 合金とを比較すると、16%Cr までは Fe-Cr-3Al 合金の方がすきま腐食再不働態化電位は貴な値であったが、18%Cr では逆転し Fe-Cr 合金よりも卑な値になった。18%Cr 以外の Fe-Cr-3Al 合金においてすきま腐食再不働態化電位が貴な値を示したのは、すきま腐食が発生すると合金中の Al は Al^{3+} として溶解し、合金表面に水酸化アルミニウムの防食皮膜を形成し再不働態化に寄与したからと考えられる。すきま内の溶液は、溶出した金属イオンの加水分解によって生ずる H^+ イオン濃度が増加し局部的に pH の低下が起こる。この Al^{3+} イオンの挙動について、pH が 4 ~ 5 の範囲において優れた腐食抑制効果を示すことが見出されている¹³⁾。そのために Fe-Cr-3Al 合金において、すきま部分の pH 値がわずかに酸性になり、再不働態化が促進されたものと考えられる。

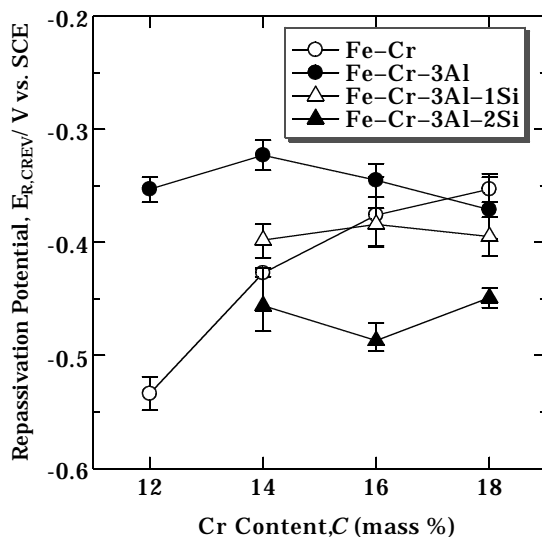


図 8 すきま腐食再不働態化電位に及ぼす Cr 量の影響 (3mass% NaCl 水溶液, 300K)

一方、Fe-Cr-3Al 合金に 1%の Si を添加すると再不働態化電位は低下し、2%の Si を添加するとさらに低下した。すなわち Si 添加の場合は、一旦すきま腐食が発生すると再不働態化しにくいことを示唆していると思われるが、孔食特性においては貴な電位をもたらした Si が、すきま腐食再不働態化電位では卑にさせる理由については今後の検討課題である。

3. 3. 不働態皮膜の解析

Cr 含有量と Al との関係性を調べるため、AES により不働態皮膜の化学組成を解析した。Fe-Cr-3Al 合金のアノード分極曲線から求めた Cr 量の違いによって、耐食性の逆転した Fe-16Cr-3Al および Fe-18Cr-3Al 合金における Cr, Al, O の深さ方向の元素分布を図 9 に示す。また、低 Cr 鋼である Fe-10Cr-5Al 合金も同時に示す。Cr はほぼ合金の組成とおりの割合になった。Al は Fe-18Cr-3Al 合金の方が Fe-16Cr-3Al 合金に比べて、若干表面近傍に濃縮した。不働態皮膜の厚さについて、Fe-Cr 合金および Fe-Cr-10Ni 合金においては Cr 含有量が増加すると厚さは薄くなる¹⁴⁾。また、フェライト相の方が Ni を多く含有するオーステナイト相よりも皮膜厚さは厚い¹⁴⁾。しかし、図 9 より O の深さ方向分布から見積もった不働態皮膜の厚さについて推察すると、3~5%Al を含有した Fe-Cr 合金はすべてほぼ同等の厚さを示していると思われる。Fe-Cr-Ni 系と Fe-Cr-Al 系では、Cr 含有量の増加にしたがって、皮膜の厚さが異なることを示唆している。Fe-Cr-Al においては同等の厚さの不働態皮膜であることから、オージェ電子スペクトルがマトリックス中からのスペクトル情報を受けても、Cr 量の相違には関係のないことを示している。そこで、深さ方向における Al の状態について検討した。

Fe-16Cr-3Al, Fe-18Cr-3Al および Fe-10Cr-5Al 合金における Al のオージェ電子運動エネルギーの化学シフトを図 10 に示す。金属 Al および Al_2O_3 を測定すると、運動エネルギーのピークはそれぞれ 1398eV, 1390eV であった。スパッターリング時間が 60s までは Al_2O_3 に近いピークを示

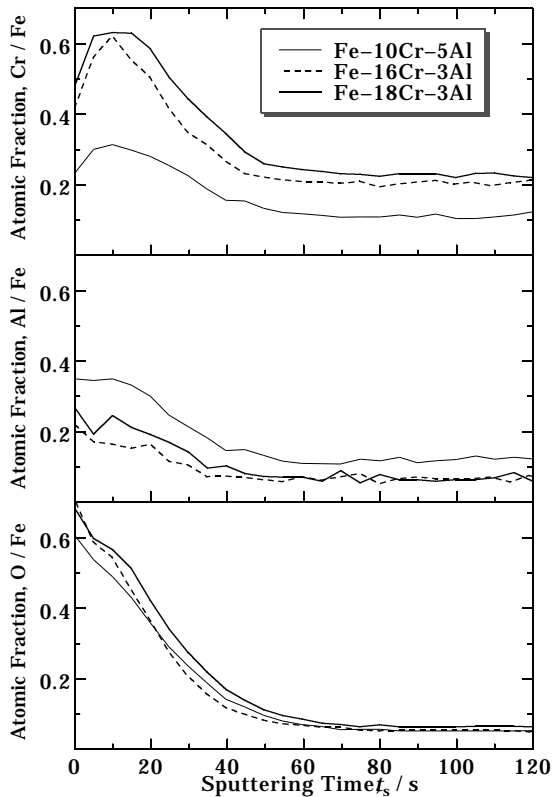


図9 Fe-Cr-Al合金の不動態皮膜のAESによる深さ分析

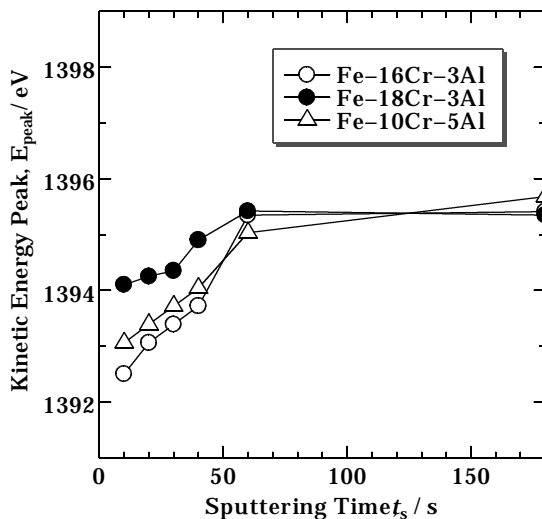


図10 Fe-16Cr-3Al、Fe-18Cr-3Al および Fe-10Cr-5Al合金のAES深さ分析におけるAlの運動エネルギーの化学シフト

し、60s以降一定となり、より金属Alに近いピークを示した。これはAlが表面では化合物を形成していることを示している。Fe-16Cr-3Al合金とFe-18Cr-3Al合金を比較した場合、Fe-16Cr-3Al合金中のAlはより化合物的でありFe-10Cr-5Al合金とほぼ同様な傾向を示し、16Crより低Cr鋼においてAlは安定な酸化物あるいは水酸化物の混合した化合物を形成していると思われる。しかし、Fe-18Cr-3Al合金中のAlはより金属Alのピークに近づいていた。すなわち、Alと化合物を形成していたOおよびOHはCr量が増加するとCrとの化合物として安定化し、そのためAl単体としての影響を及ぼすようになる。したがって、Fe-Cr-3Al合金のCr量の増加によって不動態皮膜中のAlが耐食性に悪い影響を及ぼすようになるものと考えられる。

4. まとめ

H₂SO₄ および NaCl 水溶液中におけるFe-Cr-3Al および Fe-Cr-3Si合金のアノード分極特性に及ぼすCr含有量の影響について検討した。また、Cr量の異なるFe-Cr-3Al合金へのSiの添加効果についても調査した。さらに、不動態皮膜の構造をオージェ電子分光法(AES)により解析した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) Fe-Cr-3Al合金の臨界不動態化電流密度と不動態維持電流密度は、Cr量が16%までは低下するが、18%では逆に増加し、またFe-18Cr合金よりも増加する。Fe-18Cr-3Al合金に2%Siを添加するとこれらの特性は向上し、測定した合金の最も良好な値が得られる。
- (2) Fe-Cr-3Al合金の孔食電位は、Cr量が12%ではFe-Cr合金に比べて貴な電位を示し14%Crでは同等であり、16%Cr以上ではFe-Cr合金よりも卑な方向へ移行する。しかし、これらの合金に1~2%のSiを添加することによって、Cr量に対応した孔食電位となる。
- (3) すきま腐食再不動態化電位はFe-Cr合金ではCr量の増加に伴って上昇する。Fe-Cr-3Al合金の再不動態化電位は16%CrまではFe-Cr合金よりも貴な電位を示すが、Fe-18Cr-3Al合金ではFe-18Cr合金より逆転する。Fe-Cr-3Al

合金の Si 添加により再不働態化電位は低下する。

- (4) Fe-Cr-3Al 合金の Cr 量が増加すると, Al と化合物を形成していた O および OH が Cr との化合物として安定化し, そのため Al 単体としての影響を及ぼすようになる。よって, Fe-Cr-3Al 合金の Cr 量の増加によって不働態皮膜中の Al が耐食性に悪い影響を及ぼすようになるものと考えられる。

参考文献

- 1) 庄司雄次ほか: "Fe-Cr-Al 合金の高温酸化性におよぼす C, Ti 量の影響". 鉄と鋼, **62** (1), 108-125(1976)
- 2) F. A. Golightly et al.: "The Influence of Yttrium Additions on the Oxide-Scale Adhesion to an Iron-Chromium-Aluminum Alloy". Oxid. Met, **10** (3), 163-187(1976)
- 3) 平松直人ほか: "20Cr-5Al 鋼の高温酸化挙動に及ぼす Ti および La の影響". 鉄と鋼, **81** (10), 1001-1006(1995)
- 4) L. R. Scharfstein.: "Effects Residual Elements on the General Corrosion Resistance of Austenitic Stainless Steels, in Effects of Residual Elements on Properties of Austenitic Stainless Steels". ASTM STP 418, **90**, (1967)
- 5) 遅沢浩一郎 (腐食防食協会編). 防食技術便覧. 東京, 日刊工業新聞社, **20**, (1986)
- 6) W. Y. C. Chen et al.: "Anodic Polarization Behavior of Austenitic Stainless Alloys with Lower Chromium Content". Corrosion, **35** (10), 443-451(1979)
- 7) K. Hio et al.: "Electrochemical Characteristics of Chromium-Saving Ferritic Stainless Steel". **55**(9), 822-824(1999)
- 8) 樋尾勝也ほか: "Fe-10Cr 合金のアノード分極特性に及ぼす Al, Si の効果". 日本金属学会誌, **63**(10), 1248-1254(1999)
- 9) 辻川茂男ほか (腐食防食協会編). 材料環境学入門. 東京, 丸善, **27**, (1993)
- 10) JIS G 0577. ステンレス鋼の孔食電位測定方法. 日本工業規格, (1981)
- 11) 辻川茂男ほか: "すきま腐食における再不働態化電位について". 防食技術, **29**(1), 37-40(1980)
- 12) 金子道郎: "「腐食すきま再不働態化電位測定法」に関する JIS 化の動きと課題". 第 129 回腐食防食シンポジウム資料 (腐食防食協会), 9-18(2000)
- 13) M. Kato et al.: "The Aluminium Ion as a Corrosion Inhibitor for Iron in Water". **19**(11), 937-947(1979)
- 14) 杉本克久: "最近の表面物性測定技術によるステンレス鋼不働態の解析". 鉄と鋼, **70**(7), 637-649(1984)