FeAl の塩酸水溶液に対する耐食性に及ぼす ニッケルおよび銅の添加の影響

登 丸 雅 英^{a,*}, 八 高 隆 雄^b

^a 横浜国立大学 大学院工学府 (〒 240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

^b 横浜国立大学 大学院工学研究院 (〒 240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

Influence of Additional Element Ni and Cu on Corrosion Resistance of FeAl in HCl Solution

Masahide TOMARU^{a,*} and Takao YAKOU^b

^a Graduate School of Engineering, Yokohama National University(79-5, Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 240-8501)

^b Faculty of Engineering, Yokohama National University(79-5, Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 240-8501)

The addition of Cr to intermetallic compound FeAl improves its corrosion resistance in HCl aqueous solution. Furthermore, corrosion resistance effects of FeAl containing additional Ni and Cu, which improve the steel corrosion resistance, were assessed during immersion in 0.1 mol/L HCl aqueous solution. Results show that the addition of Ni or Cu reduced the FeAl corrosion rate similarly to the addition of Cr. The FeAl corrosion rate was reduced to 1/9 by the addition of Ni, and to 1/16 by the addition of Cu, and to approximately zero by the addition of Cr. The FeAl contained 12 at% Ni and the FeAl contained 12 at% Cu, which showed superior corrosion resistance to that of SUS430. The FeAl containing 12 at% Cr showed superior corrosion resistance to that of SUS304.

Keywords : Intermetallic Compound, Additional Element, Addition of Ni, Addition of Cu, Addition of Cr, HCl, Corrosion Resistance

1. 緒 言

ステンレス鋼の代替材として安価な Fe と Al からなる Fe-Al 系合金の利用の可能性が指摘されている。これら Fe-Al 系合金に対する耐食性の研究は、材料の腐食特性を短時間に判定できることから、電気化学的に活性領域や不動態皮膜の形成されやすさを計測するものが中心であった。特に腐食が問題となる酸に対するこの合金系の耐酸性については、Al 濃度が 4 at% と 12 at% を硫酸水溶液中でアノード分極曲線を調べ、 α Fe では Al 濃度が高いほど不動態保持電流密度が低くなり、耐食性が改善されること¹⁾、Fe₃Al に Cr を添加すると硫酸水溶液中で不動態皮膜が形成されやすくなること²⁾、Fe₃Al に Mo を添加すると塩酸水溶液中のピット形成が抑制されること³⁾が報告されている。すなわち Fe-Al 系合金の組成および添加元素によって耐食性が改善されることを示している。

一方、筆者らは、塩酸水溶液に対する一連の研究^{4)~6)}から、FeAl や FeAl-10Cr では塩酸水溶液中において、表面に耐食性のオキシ水酸化物の皮膜が形成されることを⁴⁾、また FeAl は Cr の添加により不動態皮膜が形成されやすくなること⁵⁾、および FeAl に添加する Cr 濃度が 10 at% 以上になると耐食性が向上し、FeAl-12Cr では SUS304 以上の耐食性が得られることを明らかにした⁶⁾。

また、鋼に 13% 以上の Cr を含有させると耐食性が著しく

向上し、さらに Ni や Cu など添加した耐食性を高めた鉄鋼製品が開発されている⁷⁾。これは Ni および Cu が添加されることによる α -FeOOH、および γ -FeOOH 粒子の微細化にともなうさび層の緻密化による耐食性向上を目指したものである。他方、塩化物環境下で主に生成する β -FeOOH に対して合金元素の Ni、Cu はあまり影響を及ぼさないとされているが、これまで FeAl 合金の塩化物環境下の耐食性に及ぼす Ni、Cu の影響を調べた例は皆無である。そこで、FeAl に Cr を添加した場合の結果との比較において、FeAl に Ni および Cu を添加し、塩酸水溶液中での質量変化と、電気化学的な特性の変化から、これら添加元素の FeAl の耐食性に及ぼす影響を検討した。

2. 実験方法

実験には金属間化合物 FeAl に 12 at% の Ni および Cu それぞれを添加した金属間化合物 FeAl-12 at%Ni および FeAl-12 at%Cu を用いた。また比較のため FeAl-12 at%Cr およびそれらを含まない FeAl を用いた。金属間化合物 FeAl は、この化合物が安定に存在する Fe と Al の原子比率の 55 : 45 に調整し、Ni、Cu および Cr を添加した金属間化合物は FeAl の Fe サイトに Ni、Cu および Cr が位置するとして、Ni、Cu および Cr を 12 at% 添加して、アルゴンガス雰囲気中でアーク溶解して合金化した。得られた 4 種類の金属間化合物の化学組成を表 1 に示す。表中の数値は at% の値である。ここで 12 at%Ni を含む FeAl を FeAl-12Ni、12 at%Cu を含む FeAl を FeAl-12Cu、および 12 at%Cr を含む FeAl を FeAl-12Cr と記す

* E-mail : m-tomaru@hamai-net.com

Table 1 Chemical composition of specimens (at%)

	Ni	Cu	Cr	Al	Fe
FeAl	—	—	—	44.8	55.2
FeAl-12Ni	11.7	—	—	44.1	44.2
FeAl-12Cu	—	11.3	—	45.5	43.2
FeAl-12Cr	—	—	11.7	48.0	40.2

こととする。得られたいずれのインゴットも 1373 K で 43.2 ks 均質化処理を施した後、10 mm × 10 mm × 2 mm のサイズに切断し試料とした。図 1 にそれぞれの試料の金属顕微鏡写真を示す。4 種類の試料写真はビレラ液(硝酸：塩酸：グリセリン = 1：2：3)でエッチングした後のものである。いずれの試料も単相材であることが認められ、平均結晶粒径が約 500 ~ 1000 μm の内にある。これら 4 種類の試料を XRD 解析したチャートを図 2 に示す。図中に示している矢印は Powder Diffraction File の Fe-50 at%Al の結果である。FeAl に添加した Ni, Cu および Cr はいずれも FeAl の Fe サイトに位置し、B2 規則相の単相であることを示している。次にこれら 4 種類の試料を SiC 耐水研磨紙で # 220 ~ # 1000 まで湿式研磨を行った後、表面を純水洗浄・エタノール脱脂を行い乾燥して実験に供した。

腐食試験には塩酸試薬を用い、これをイオン交換水にて希釈して 0.1 mol/L (以後 0.1 M と記す) 塩酸水溶液とした。腐食試験は試料片によるデータのばらつきを少なくするために、調整した 0.1 M 塩酸水溶液 400 mL を入れたプラスチック容器に各試料を浸漬して一定時間後に試料を取り出し計量し、また塩酸水溶液に戻す断続法⁸⁾を採用し、浸漬の前後における単位表面積当たりの質量変化量を求め、最後に取り出した試料表面の観察を行い試料表面組織の変化を調べた。各試料の計量は精密天秤(OHAUS 製 AS64 最小目盛 0.1 mg)を用いた。なお、腐食試験は 298 K $\pm$ 1 K に保たれた恒温槽内で行った。

電気化学的特性として分極抵抗値と分極曲線の測定を行った。試料にリード線を取り付けポリエステル系樹脂で埋め込んで電極として用いた。この時の電極表面は SiC 耐水研磨紙を用いて、# 220 ~ # 4000 まで湿式研磨を行った後、アルミナ懸濁液を用いたバフ研磨で鏡面仕上げをした。次に電極

Fig. 1 Optical micrographs of specimens. (a), (b), (c) and (d) are FeAl, FeAl-12Ni, FeAl-12Cu and FeAl-12Cr, respectively.

の表面を純水洗浄・エタノール脱脂を行い乾燥して測定に供した。試験液は 0.1 M 塩酸水溶液 400 mL とし、ガラスボールフィルターを通して水溶液に 99.999 % の高純度窒素ガスを通気して試験液の脱気を行った。測定にはポテンシostat (東方技研製 PS-14) を使用し、分極抵抗値の測定は腐食電位の ± 10 mV の間を 2 mV/30 s で、またアノード/カソード分極曲線の測定は 20 mV/30 s のステップ法を用いた。参照電極には Ag/AgCl 電極(飽和 KCl)を用い、対極には白金電極を用いた。なお、これ以降の電位は異なる試料電極の分極抵抗値や分極曲線の結果比較を容易にするために、標準水素電極電位基準(vs. SHE)に換算したもので表すものとする。また測定は窒素ガスを通気した状態で行った。

3. 実験結果および考察

3. 1 FeAl の腐食挙動に及ぼす添加元素の影響

図 3 に 0.1 M 塩酸水溶液中へ 4 種の試料を浸漬した時の、単位表面積当たりの各金属間化合物の質量変化量 Δm と浸漬

Fig. 2 XRD charts of specimens. (a), (b), (c) and (d) are FeAl, FeAl-12Ni, FeAl-12Cu and FeAl-12Cr, respectively.

時間 t との関係を示す。いずれの場合にも、浸漬時間 50 ks 以降ではほぼ一定の割合で減少している。

そこで 50 ks から 200 ks の間の $\Delta m - t$ 曲線の傾きから各試料の単位面積当りの質量減量速度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) を求めると、 $t = 50$ ks 以降 FeAl は 7.4, FeAl-12Ni は 0.81, FeAl-12Cu は 0.46, FeAl-12Cr はほぼ 0 となっている。すなわち、FeAl の塩酸水溶液中での腐食は、Ni、Cu や Cr の合金元素を添加することにより抑えられ、Ni を添加すると添加しないものに比べて腐食による質量減量速度は 1/9 に、Cu を添加すると 1/16 に、Cr を添加することによってほぼゼロになっている。

図 4 は 0.1 M の塩酸水溶液に 250 ks 浸漬した後の各金属間化合物試料の表面組織の SEM 写真である。図 4 (a) の FeAl では著しい凸凹が認められる。粒内も粒界同様激しく浸食されている。図 4 (b) の FeAl-12Ni では全体がほぼ全面腐食の状態であるが、特定の結晶粒界の腐食が進んでいる。

Fig. 3 Relationship between the amount of mass change, Δm , and immersion time, t , in 0.1 M HCl solution.

Fig. 4 SEM photographs of specimens' surface after immersed in 0.1 M HCl solution for 250 ks. (a), (b), (c) and (d) are FeAl, FeAl-12Ni, FeAl-12Cu and FeAl-12Cr, respectively.

一方、図 4 (c) の FeAl-12Cu ではすべての粒界が深く腐食されている。ところが図 4 (d) の FeAl-12Cr では、ほとんど腐食された形跡がないので研磨傷も残っている。なお、図 4 (a) の FeAl の SEM 写真には粒界腐食の痕跡が明確に認められない。そこで、腐食時間が短い 50 ks 腐食させた時点での試料表面を調べた。その結果が図 5 である。深い粒界腐食と腐食幅が広がっている様子が認められる。このことから、図 4 (a) の粒界に沿った帯状の広がり粒界腐食から発展したものと思われる。

FeAl は塩酸水溶液中で表面が均質な腐食から始まり、やがて粒界部分が粒内よりも優先して溶解すると思われる。これは溶液中で表面に形成される皮膜には十分な耐食性がないためと思われる。Cr を添加した FeAl-12Cr はわずかに白く浸食された形跡を示しているが、腐食による溶解は少なく浸漬時間に比例して質量減少量は増加していない。これは初期腐食で形成される表面皮膜が不動態化する影響であろう^{9),10)}。一方、Ni や Cu を添加した FeAl-12Ni, FeAl-12Cu の場合は腐食後の試料表面が黒く変色していたことから、FeAl-12Cr のように表面皮膜を不動態化して腐食の進行を抑制するものではないと考えられる。このことは、これらの合金には活性溶解でイオン化した金属のオキシ水酸化物や酸化物が表面に形成されるが、腐食そのものをゼロに抑える耐食性のある皮膜を形成する働きはないと言える。

FeAl は酸性水溶液中に浸漬されると溶解して Fe^{2+} と Al^{3+} の金属イオンとなり、まず Al^{3+} がアルミニウムのオキシ水酸化物として表面に形成される。次いで鉄のオキシ水酸化物が形成されてポーラスなアルミニウムのオキシ水酸化物の空隙部分を埋めて不動態化するとされている¹¹⁾。添加された Ni、Cu や Cr も溶解しオキシ水酸化物や酸化物として表面に形成される。それらのオキシ水酸化物や酸化物の耐食性が、腐食速度に影響するものと思われる。

すなわち、FeAl に Ni、Cu および Cr のいずれの元素を添加した場合にも塩酸水溶液に対する FeAl の腐食速度は減少する。Ni や Cu の添加は FeAl の腐食速度を抑えて、Ni の場合は 1/9 に、Cu の場合は 1/16 にする。Cr を添加した場合、前報⁵⁾ の FeAl-10Cr でもかなり不動態皮膜は形成されたが、今回の FeAl-12Cr では耐食性を十分示す不動態皮膜を形成することにより、腐食速度をほぼゼロに抑えることがわかった。

3. 2 Ni および Cu を添加した FeAl の電気化学的特性

試料電極のアノード分極曲線は、腐食溶液中における不動

Fig. 5 SEM photograph of surface of FeAl after immersed in 0.1 M HCl solution for 50 ks.

態皮膜の形成されやすさや安定度の情報を与え、広範囲の分極状態における合金の耐食性情報^{12)~14)}を与える。また腐食電位近傍(± 10 mVの範囲)で分極させ、得られた電流-電位直線の傾きから分極抵抗値を算出することができ^{15),16)}、この分極抵抗値の逆数は腐食速度に比例する。図6に4種試料の腐食電位近傍の電流-電位直線を示す。4種類の試料電極の腐食電位はFeAlが -429 mV, FeAl-12Niが -216 mV, FeAl-12Cuが -398 mVおよびFeAl-12Crが -456 mVを示している。FeAl-12Niの腐食電位はFeAlよりも 200 mV以上貴側にシフトして腐食されにくい状態になっている^{17),18)}。また直線の傾きから求めた分極抵抗値を図7に示すが、FeAlが 50Ω , FeAl-12Niが 100Ω , FeAl-12Cuが 344Ω およびFeAl-12Crは 65Ω となる。塩酸水溶液に浸漬した時点での腐食速度は分極抵抗値の大きい順に低いと考えられる。FeAlにCuを添加したFeAl-12Cuは 344Ω でFeAlの 50Ω の7倍となり腐食による溶解が抑えられる。FeAl-12Niも 100Ω とFeAlの2倍の分極抵抗値を示し溶解しにくい表面となっている。

カソード分極曲線は腐食電位から -800 mV(vs.SHE)までを、アノード分極曲線は $+1000$ mV(vs.SHE)まで分極させた時の電流密度の対数値と電位の関係を求めた。その結果を図8に示す。カソード分極をさせると、電流密度はいずれの電極も大きく増加し水素の還元反応を示し試料電極による差異は見られない。一方、アノード分極曲線には各試料電極の差異が見られる。図8(a)のFeAlと図8(d)のFeAl-12Crは活性溶解後不動態化の挙動を示し、FeAlは -100 mVで、FeAl-12Crは -340 mVで電流密度の減少が起こっている。不動態保持電

流密度はFeAlで 15 A/m^2 , FeAl-12Crでは 10 mA/m^2 となっていて、FeAlは不動態皮膜ではなく、腐食生成物によって形成される拡散抵抗性の保護皮膜、FeAl-12Crは不動態皮膜が形成されたと考えられる。一方、図8(b)のFeAl-12Niや図8(c)のFeAl-12Cuの表面は黒色に変色し腐食生成物の形成は認められるが電流密度の減少は見られなかった。

図9は 0.1 M 塩酸水溶液への浸漬 250 ks 後の腐食実験を終えた試料片を電極にしたアノード分極曲線を、浸漬前の試料のアノード分極曲線と一緒に示す。図9(a)のFeAl、図9(b)のFeAl-12Niと図9(c)のFeAl-12Cuは浸漬前も浸漬後もほとんど変わらない曲線を示している。これは、 0.1 M 塩酸水溶液に浸漬しても溶解しながら耐食性の皮膜を表面に形成しないことを示している。一方、図9(d)のFeAl-12Crの場合、腐食電位は -456 mVから -160 mVと 300 mV貴側にシフトし、不動態保持電流密度は 10 mA/m^2 から一桁低い 1 mA/m^2

Fig. 7 Polarization resistance of specimens obtained in 0.1 M HCl solution.

Fig. 6 Polarization curves near the corrosion potential of specimens obtained in 0.1 M HCl solution. (a), (b), (c) and (d) are FeAl, FeAl-12Ni, FeAl-12Cu and FeAl-12Cr, respectively.

Fig. 8 (a) Polarization curves for specimens obtained in 0.1 M HCl solution., (b), (c) and (d) are FeAl-12Ni, FeAl-12Cu and FeAl-12Cr compared with FeAl, respectively.

の値を示し不動態皮膜の形成を示唆している。

3. 3 FeAl-12Cr に形成される皮膜に及ぼす浸漬時間の影響

FeAl に比べ金属を添加した FeAl は、いずれも塩酸水溶液に対して優れた耐食性を示したが、特に FeAl-12Cr では腐食速度がほぼゼロになった。そこで FeAl-12Cr の場合の腐食中における皮膜の形成について検討する。

FeAl-12Cr は腐食電位の値や活性溶解の後に不動態化を示すなど FeAl と同じ挙動を示す。しかしながら 0.1 M 塩酸水溶液へ 250 ks 浸漬した FeAl-12Cr は FeAl とは異なり耐食性皮膜が形成されている挙動を示した。FeAl-12Cr がこのような耐食性皮膜の形成と塩酸水溶液中に浸漬している時間との関係を調べた。0.1 M 塩酸水溶液中に 50 ks, 100 ks, 150 ks, 200 ks 浸漬させた FeAl-12Cr を試料電極とし、腐食電位から +1000 mV までアノード分極させ分極曲線を得た。これを図 10 に示す。なお、分極前のカソード処理は行わなかった。

浸漬時間が 50 ks のアノード分極曲線から、浸漬時間 0 ks の腐食電位と比べて 200 mV 貴側に腐食電位がシフトし、活性溶解の様相は示さず自己不動態化の様子を呈している。浸漬時間が 150 ks 以上になると腐食電位は 0 ks の腐食電位と比べて 300 mV 以上貴になり、自己不動態化している。

FeAl-12Cr は 0.1 M 塩酸水溶液に少なくとも 50 ks 以上浸漬することで、不動態皮膜が形成されることが示された。

3. 4 Ni および Cu を添加した FeAl とステンレス鋼の酸に対する耐食性

アルミナライジング処理鋼は表面硬度が 400 HV 以上となり耐摩耗性に優れ、耐酸性のあることからステンレス鋼の代替材としての用途が検討されている。実用ステンレス鋼のオーステナイト系 SUS304 とフェライト系 SUS430 に対して、

FeAl と同様に 0.1 M 塩酸水溶液中に浸漬させて質量変化量と表面組織の変化を調べた。その結果、質量は浸漬時間に比例して一定の割合で減少した。単位時間当たりの減少量、すなわち腐食速度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) を、FeAl と合金元素 Ni, Cu および Cr を添加した FeAl の腐食速度と一緒に表 2 に示す。また 0.1 M 塩酸水溶液に浸漬する前と 250 ks 浸漬した後の表面組織の状態を図 11 に示す。浸漬前は金属顕微鏡写真で、浸漬後は SEM 写真である。SUS430 は粒界部分の浸食が進んで表面状態には凸凹が見られる。一方 SUS304 も食孔が多数見られる。腐食速度は SUS430 の 3.9 に対して FeAl-12Ni と FeAl-12Cu は 1 けた小さい 8.1×10^{-1} と 4.6×10^{-1} となっている。また SUS304 は 4.6×10^{-2} と腐食速度は FeAl-12Ni や FeAl-12Cu よりも低いが、FeAl-12Cr は 8.5×10^{-6} とほぼ

Fig. 10 Anodic polarization curves for FeAl-12Cr immersed in 0.1 M HCl solution for 0 ks, 50 ks, 100 ks, 150 ks, 200 ks and 250 ks.

Fig. 9 Anodic polarization curves for FeAl, FeAl-12Ni, FeAl-12Cu and FeAl-12Cr before and after immersion for 250 ks in 0.1 M HCl.

Fig. 11 Optical micrographs and SEM photographs of specimens' surface before and after immersion for 250 ks in 0.1 M HCl solution.

Table 2 Corrosion rate of specimens obtained in 0.1 M HCl solution

	Corrosion rate ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
FeAl	7.4
FeAl-12Ni	8.1×10^{-1}
FeAl-12Cu	4.6×10^{-1}
FeAl-12Cr	8.5×10^{-6}
SUS304	4.6×10^{-2}
SUS430	3.9

し表面に腐食生成物を形成させるが、不動態皮膜とならないことがわかった。

(5) 0.1M 塩酸水溶液中で FeAl-12Ni と FeAl-12Cu はフェライト系の SUS430 よりも優れた耐食性を示し、FeAl-12Cr はオーステナイト系の SUS304 よりも優れた耐食性を示すことがわかった。

(Received January 14, 2011 ; Accepted June 22, 2011)

文 献

- 1) D. Schaeppers, H. Strehblow ; *Corros.Sci.*, **39**, 2193 (1997).
- 2) J. Kim, R. Buchanan ; *Corrosion*, **50**, 658 (1994).
- 3) H. Choe, H. Choi, K. Kim ; *J.Mater.Sci.*, **32**, 1221 (1997).
- 4) M. Tomaru, T. Yakou ; *Tetsu-to-Hagané*, **95**, 649 (2009).
- 5) M. Tomaru, S. Okazaki ; *J. Surf. Finish. Soc. Jpn.*, **61**, 541 (2010).
- 6) M. Tomaru, T. Yakou ; *Tetsu-to-Hagané*, **97**, 117 (2011).
- 7) 中山武典, 石川達雄 ; 神戸製鋼技報, **59**, 13 (2009).
- 8) 伊藤伍郎 ; 改訂腐食科学と防食技術, p.114 (コロナ社, 2005).
- 9) 桐生雅夫, 奥村勇人, 鎌土重晴, 小島 陽, 二宮隆二, 中津川勲 ; 軽金属, **46**, 39 (1996).
- 10) D. Suzuki, S. Yoshihara, Y. Chikugo, N. Kudo ; *J. Surf. Finish. Soc. Jpn.*, **60**, 129 (2009).
- 11) V. Rao ; *Electrochimica Acta*, **49**, 4533 (2004).
- 12) S. Frangini ; *Corrosion*, **55**, 89 (1999).
- 13) V. Rao, R. Baligidad, V. Raja ; *Corros.Sci.*, **44**, 521 (2002).
- 14) S. Frangini, N. Cristofaro, A. Mignone, J. Lascovich, R. Giorgi ; *Corros.Sci.*, **39**, 1431 (1997).
- 15) M. Stern ; *Corrosion*, **14**, 440 (1958).
- 16) M. Stern, A. Geary ; *J.Electrochem.Soc.*, **104**, 56 (1957).
- 17) 中原賢治, 徳本 啓, 坂口茂也, 林 安徳 ; 粉体および粉末冶金, **44**, 241 (1997).
- 18) 原 義則, 中井 昇 ; 塗料の研究, No.142, 2 (2004).

ゼロとなっている。

4. 結 言

金属間化合物 FeAl にステンレス鋼の特性改善の元素である Ni, Cu および Cr を 12 at% 添加した FeAl-12Ni, FeAl-12Cu, FeAl-12Cr および FeAl の 0.1 M 塩酸水溶液中における耐食性を調べ, Ni, Cu および Cr の添加が FeAl の塩酸水溶液に対する耐食性に与える影響を検討した。その結果,

- (1) Ni, Cu および Cr の添加は, FeAl の腐食速度を抑え, FeAl-12Ni は FeAl の腐食速度の 1/9 に, FeAl-12Cu は 1/16 に, および FeAl-12Cr は腐食速度がほぼゼロになることがわかった。
- (2) FeAl の腐食は粒界部分が優先して溶解して発達しているが, Ni, Cu および Cr の添加は, これら添加元素が溶解した後に形成されるオキシ水酸化物や酸化物の影響で, 粒界部分の優先的溶解を抑える効果があり, その効果は Cr が最も顕著で次いで Ni であった。
- (3) FeAl-12Cr は 0.1 M 塩酸水溶液中で表面が均質に腐食するが不動態皮膜を表面に形成して, 粒界腐食を抑えるとともに耐食性を飛躍的に増すことがわかった。
- (4) FeAl-12Ni と FeAl-12Cu は 0.1 M 塩酸水溶液中で腐食