

技術論文

# 燃料電池セパレータ用低Ni省Mo型オーステナイト系ステンレス鋼の開発

## Development of Austenitic Stainless Steel with Reduced Nickel and Molybdenum for Bipolar Plates of PEFCs

関向 晃太郎\*  
Kotaro SEKIMUKAI

今川 一成  
Kazunari IMAKAWA

松橋 透  
Toru MATSUHASHI

奥 学  
Manabu OKU

### 抄 録

固体高分子形燃料電池の主要部品であるセパレータ材料として、従来のカーボンより安価で高性能なオーステナイト系ステンレス鋼が注目されている。これまで SUS316L が検討されている例が多いが、本稿ではよりコストパフォーマンスに優れた適正成分を検討した。窒素添加により Ni や Mo を低減した開発鋼 218N は SUS316L より省資源かつ価格安定性に優れる。また SUS316L より耐金属溶出性に優れ、セパレータ材料として適用が見込める。

### Abstract

As a bipolar plate material that is a major component of polymer electrolyte fuel cells (PEFCs), austenitic stainless steel, which is cheaper and has a higher performance than conventional carbon, is attracting attention. Although SUS316L has been studied in many cases, this article examined suitable ingredients with better cost performance. The developed steel 218N, which reduces Ni and Mo by adding nitrogen, saves resources and is superior in price stability compared to SUS316L. 218N has better metal elution resistance than SUS316L and can be applied as a bipolar plate material.

## 1. 緒 言

水素を燃料として発電する燃料電池 (FC) はクリーンなエネルギーとして注目されている。中でも固体高分子形燃料電池 (PEFC) は 70~90℃ 程度の低温で動作させることが可能で、高い出力密度が得られることから、自動車用や家庭用電池としての適用が進んでいる<sup>1-3)</sup>。

PEFC の模式図を図 1 に示す<sup>4)</sup>。PEFC はガス拡散層 (Gas Diffusion Layer ; GDL), 膜電極接合体 (Membrane Electrode Assembly ; MEA) をセパレータ (英語では Bipolar plate と呼ぶ) で挟み込んだ構造になっている。セパレータはガスの流路を形成するため加工性が必要とされる。セパレータ-MEA 間は加湿水または発電による生成水中に MEA 中の電解質膜から硫酸イオン (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) やフッ化物イオン (F<sup>-</sup>) が溶出し<sup>4)</sup>、塩化物イオン (Cl<sup>-</sup>) も混入する環境となる<sup>5)</sup>。またカソード側の電位は理論値で 1.23 V (電位は標準水素電極 (SHE) 基準, 以下同様) (実際には 0.6~1.0V 程度) と

なるためカソードセパレータの電位もその付近まで上昇する可能性がある<sup>6)</sup>。さらにセパレータと GDL の接触部は微

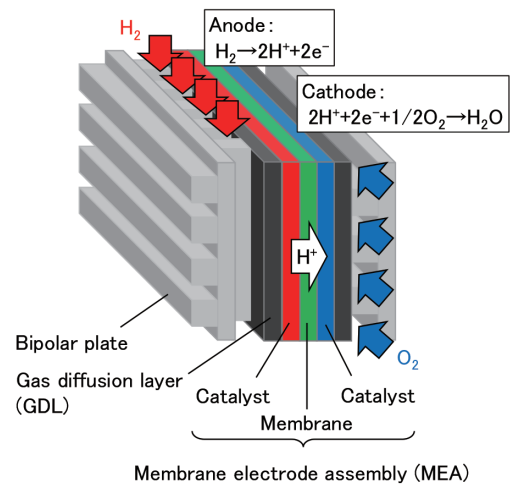


図 1 固体高分子形燃料電池の模式図  
Schematic image of PEFC

\* 日鉄ステンレス(株) 研究センター 新エネルギー材料研究部 研究員 山口県光市大字島田 3434 〒 743-8550

細なすきま構造になると考えられ、上記環境中での耐すきま腐食性が求められる<sup>6)</sup>。

代表的なオーステナイト ( $\gamma$ ) 系ステンレス鋼である SUS 316L は耐食性および加工性に優れるが、レアメタルである Mo や Ni を多く含むため価格安定性の点で課題がある。そこで本研究では PEFC セパレータ用材料として低 Ni 省 Mo 型  $\gamma$  系ステンレス鋼 (218N) を開発した。本稿では、218N 開発の経緯とその特性について述べ、最後に他用途への適用も考慮した特性評価として、実機試作した 218N 鋼板の諸特性について紹介する。

## 2. 成分設計思想

SUS316L に対して Mo を低減することは耐食性の低下を招き、Ni を過度に低減することは  $\delta$  フェライト相析出による加工性の低下が懸念される。そこで本研究では Cr 増量による耐食性向上と窒素 (N) 添加による  $\gamma$  相安定化を図った。一般的に局部腐食の発生に対しては Cr, Mo, N の添加が有効であるとされているが、PEFC セパレータは高温、低 pH、高電位という特殊な環境であり、各元素の効果が変化すると考えられる。そこで著者らは本環境における Cr, Mo, N の効果に着目した検討を行い、耐食性に及ぼす Mo や N の効果が小さいことを知見した。また過度な N 添加は材料が硬質化し、かえって加工性を低下させる。そこで具体的な目標として、① PEFC 環境において SUS316L と同等以上の耐すきま腐食性を有すること、②セパレータ形状に加工可能な破断時全伸び (以下全伸びと略す) 45% 以上の加工性を有することを開発目標とした。

## 3. 供試材および実験方法

### 3.1 供試材

表 1 に供試材および比較材の化学成分を示す。 $\gamma$  相安定度の指標として  $Md_{30}$  (野原の式<sup>7)</sup>) :  $551-462(C+N)-9.2Si-8.1Mn-29.0(Ni+Cu)-13.7Cr-18.5Mo-68.0Nb$  を使用した。ここで  $Md_{30}$  は  $\gamma$  単相の試料に 0.30 の真ひずみを与えたとき、組織の 50% がマルテンサイト ( $\alpha'$ ) に変態する温度 (°C) である。供試材は実験室真空溶解した鋼材に圧延、焼鈍酸洗を施して厚み 1.0mm の薄板に加工し、耐すきま腐食性評価に供した。さらに冷間圧延、焼鈍酸洗を施して 0.3mm の薄板に加工し、加工性評価に供した。結晶粒度番号はいずれも約 7 にそろえた。

### 3.2 耐すきま腐食性

図 2 にすきま腐食試験片の模式図を示す。すきま腐食試験片は供試材より 30×30mm を切り出し、中央に 6.5mm $\phi$  の穴をあけ、表面を #600 湿式研磨処理した。試験片の両側を樹脂製ガスケットで挟み、さらにその外側をチタン製ワッシャーおよびボルトナットで締結した。試験液には特級試薬の NaF, NaCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, および純水を用いて 3 ppmF<sup>-</sup>

表 1 化学成分  
Chemical compositions

	(mass%)								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	N	$Md_{30}$ (°C)
Test steel	0.07	0.4	0.8–3.0	21.0–23.0	7.0–9.0	–	0.20–3.0	0.10–0.19	–57– –115
SUS316L	0.02	0.5	1.7	17.3	12.1	2.1	0.4	0.01	–120
SUS304	0.07	0.5	0.8	18.4	8.1	–	0.3	0.02	4
SUS310S	0.01	0.6	0.4	25.6	19.3	–	0.2	0.03	–394
SUS315J2	0.04	2.8	0.5	18.3	12.0	0.8	2.0	0.01	–173
SUS304N1	0.08	0.7	1.8	18.3	10.2	–	–	0.14	–117

$Md_{30}=551-462(C+N)-9.2Si-8.1Mn-29.0(Ni+Cu)-13.7Cr-18.5Mo-68.0Nb$

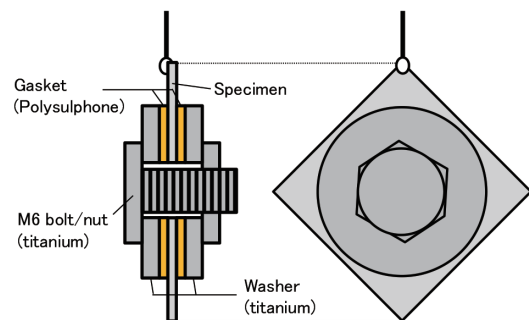


図 2 すきま腐食試験片の模式図  
Schematic image of crevice corrosion test specimen

10~50 ppmCl<sup>-</sup>, pH 3.0 の試験液を調整した。この試験液を 90°C に保持し、その中に試験片を浸漬させ、0.9V の定電位試験を 6 時間行い、局部腐食が発生する最小 Cl<sup>-</sup> 濃度を求めた。局部腐食の発生有無は光学顕微鏡を用いた外観観察により判断した。

### 3.3 加工性

加工性は室温の引張試験により評価した。供試材は JIS Z 2241 に準拠して圧延方向が引張方向となるように 13B 号試験片を採取した。引張試験方法は JIS Z 2241 に準拠して全伸びを測定した。

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 耐すきま腐食性

図 3 に耐すきま腐食性を評価した結果を示す。PEFC 模擬環境におけるすきま腐食発生 Cl<sup>-</sup> 濃度は N の添加有無によらず [Cr+2Mo] で整理でき、[Cr+2Mo] が 21.4 の SUS316L は 30ppm 以上の Cl<sup>-</sup> 濃度ですきま腐食が発生し、20ppm 以下の Cl<sup>-</sup> 濃度ではすきま腐食が発生しなかった。Mo を添加していない供試材においても [Cr+2Mo] が 21.0、すなわち Cr 添加量が 21% のとき、20ppmCl<sup>-</sup> 以下ですきま腐食は発生せず、SUS316L と同等以上の耐すきま腐食性が示された。一般的にすきま腐食発生の抑制に有効とされる Cr, Mo, N について、本環境中における効果を以下に考察する。

Cr はステンレス鋼の不動態皮膜を構成する主要元素で

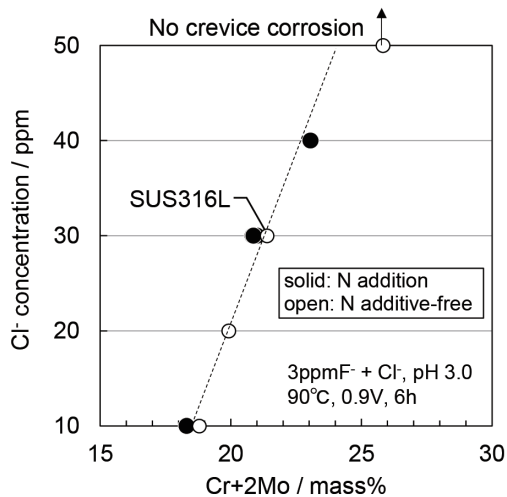


図3 合金元素とすきま腐食発生  $\text{Cl}^-$  濃度の関係  
Relationship between alloying elements and  $\text{Cl}^-$  concentration at which crevice corrosion occurred

あり、一般的にCr含有量が高い材料ほど耐すきま腐食性に優れる。本環境中においてもCr含有量の増加は有効であり、耐すきま腐食性の向上に寄与したと考えられる。Cr- $\text{H}_2\text{O}$ 系の電位-pH図<sup>9)</sup>によるとpH 3.0, 0.9Vのとき、Crは $\text{HCrO}_4^-$ の状態が安定であり、過不動態溶解が起きていると考えられるが、その速度は十分小さく、過不動態溶解を生じながらも耐食性を有する皮膜として存在していると考えられる。

Moは耐すきま腐食性を著しく向上させる元素として知られ、一般的にMo含有量が高い材料ほど耐すきま腐食性に優れる。本環境中においてもMo含有量の増加は有効であり、耐すきま腐食性の向上に寄与したと考えられる。Mo- $\text{H}_2\text{O}$ 系の電位-pH図<sup>9)</sup>によるとpH 3.0, 0.9Vのとき、Moは $\text{MoO}_4^{2-}$ の状態が安定であり、過不動態溶解が起きていると考えられる。またMoの過不動態溶解反応(例えば $\text{MoO}_2/\text{MoO}_4^{2-}$ )の平衡電位はCrのそれよりかなり卑側にあるとされており<sup>10)</sup>、0.9Vという貴な電位においては耐食性への寄与は小さくなると考えられる。

Nも一般的に耐すきま腐食性を向上させる元素として知られるが、本環境中において明瞭な効果は認められなかった。NH<sub>3</sub>- $\text{H}_2\text{O}$ 系の電位-pH図<sup>11)</sup>によるとpH 3.0, 0.9Vのとき、Nは $\text{NO}_3^-$ の状態が安定であり、皮膜に対する $\text{Cl}^-$ の攻撃を抑制するインヒビターとしての作用が考えられる<sup>12)</sup>。一方で、すきま腐食が発生するとき、すきま内部のpHは著しく低下していると考え、 $\text{NH}_4^+$ の状態が安定である可能性も考えられる。 $\text{NH}_4^+$ による腐食抑制効果は高温の水溶液中では小さくなることが報告されている<sup>13)</sup>。本環境におけるNの効果については不明な点が多く、解明にはさらなる検討が必要である。

以上より、PEFC環境中でSUS316Lと同等以上の耐すきま腐食性を有するためには $[\text{Cr}+2\text{Mo}]$ を21以上とする必要があること、また省Mo化を目指す成分設計思想から、開

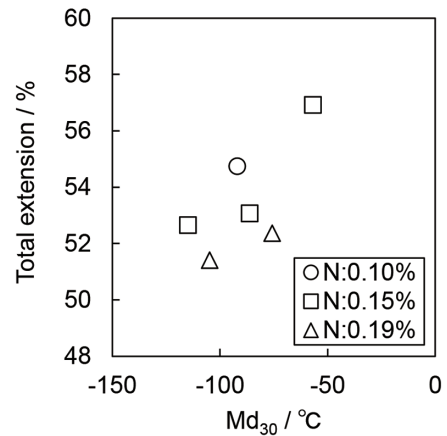


図4 全伸び値に及ぼす  $\text{Md}_{30}$  値およびN量の影響  
Effect of  $\text{Md}_{30}$  value and N contents on total extension value

発鋼の成分を21Cr-Ni-N (Mo無添加)とした。

## 4.2 加工性

図4に室温(25°C)での全伸びに及ぼす $\text{Md}_{30}$ 値およびN量の影響を示す。いずれの供試材も目標の全伸び45%以上を満足していた。N量:0.10~0.19%において、 $\text{Md}_{30}$ の値が高いほど全伸びは上昇する傾向にあった。 $\text{Md}_{30}$ が高いほど引張過程における $\alpha'$ 変態量が増加し、延性の向上に寄与した可能性が考えられる<sup>14)</sup>。また、N量の増加に伴い全伸びは減少する傾向が見られた。全伸び45%以上を安定して得るためにはNを0.19%以下とする必要があると考えられた。また、 $\delta$ フェライト相の析出を抑制するためにN量を0.10%とした場合はNi量を9.0%以上にする必要がある、Ni低減によるコストメリットが小さくなってしまったことが分かった。

以上より、加工性の観点からN量を0.15%とし、前述の耐すきま腐食性の検討も踏まえて21Cr-Ni-0.15Nを開発鋼の基本成分とした。さらに $\delta$ フェライト相析出抑制の観点からNi量を8.3%とした21Cr-8.3Ni-0.15N鋼(以下、218Nと記載)を実機試作した。

## 5. 218Nの諸特性

### 5.1 代表成分および機械的性質

表2に実機溶解した218N(21Cr-8.3Ni-0.15N)および比較材の化学成分を示す。いずれも厚さ1.0mmの冷延焼鈍板で、結晶粒度番号は約8にそろえた。表3に機械的性質を示す。218NはSUS316LやSUS304と比較して全伸びが低いものの、0.2%耐力(PS)や引張強さ(TS)が高い。PEFCセパレータをはじめ、所望の加工形状への成形が可能なのは強度が高いほど材料の薄肉化が可能であり、構造体の軽量化に貢献できる可能性がある。

### 5.2 耐すきま腐食性および耐金属溶出性

PEFC環境では耐すきま腐食性(SUS316Lと同じくらい

すきま腐食が発生しにくいこと)が必要とされることを述べたが、すきま腐食が発生しない場合でも、過不動態溶解による金属溶出が問題となる場合がある。また、フッ化物イオン(F<sup>-</sup>)は過不動態溶解を促進することが報告されている<sup>15)</sup>。そこで本節では、耐すきま腐食性と耐金属溶出性の観点から218NとSUS316LのPEFC環境下における耐食性を比較した。

5.2.1 耐すきま腐食性

図5は、3.2節と同様の条件で耐すきま腐食性を評価した結果を示している。218NはSUS316Lと同じく20ppm以下のCl<sup>-</sup>濃度ではすきま腐食は発生せず、耐すきま腐食性に優れることが示された。

5.2.2 耐金属溶出性

耐金属溶出性は動電位分極および金属溶出試験により評価した。動電位分極試験片は供試材より15×20mmを切り

表2 化学成分  
Chemical compositions

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Md <sub>30</sub> (°C)
218N	0.07	0.4	0.8	21.1	8.4	-	0.2	0.16	-104
SUS316L	0.01	0.5	0.8	17.4	12.0	2.0	0.2	0.01	-99
SUS304	0.07	0.5	1.2	18.4	8.2	-	0.3	0.04	-17

Md<sub>30</sub>=551-462(C+N)-9.2Si-8.1Mn-29.0(Ni+Cu)-13.7Cr-18.5Mo-68.0Nb

表3 機械的性質  
Mechanical properties

	0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	Total extension (%)	Hardness (HV)	Erichsen value (mm)
218N	395	725	49	179	12.1
SUS316L	276	565	52	136	13.5
SUS304	304	646	54	166	13.4

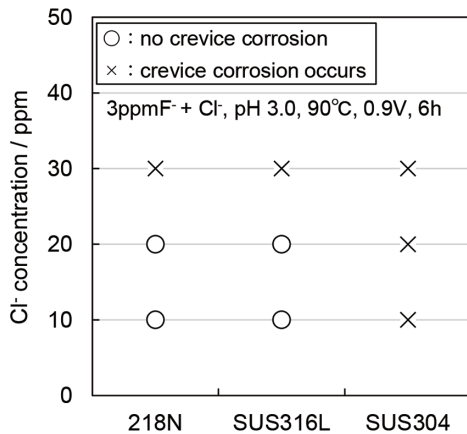


図5 218Nおよび比較材のすきま腐食発生Cl<sup>-</sup>イオン濃度  
Cl<sup>-</sup> concentration of 218N and comparative material at which crevice corrosion occurred

出し、表面を#600湿式研磨処理した後、10×10mmの電極面を残してシリコンで絶縁被覆した。試験液には特級試薬のNaF、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>および純水を用いて0~100ppmF<sup>-</sup>、pH 3.0の試験液を調整した。Arガスで十分脱気した試験液を80°Cに保持し、その中に試験片を浸漬させ、自然電位から掃引速度20mV/minで動電位アノード分極曲線を測定した。金属溶出試験片は供試材より30×30mmを切り出し、表面を#600湿式研磨処理した。試験液には動電位分極で使用したものと同様のものを使用した。0.9Vで72時間の定電位試験を行い、金属溶出量を誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)で評価した。

図6に218Nの0~100ppmF<sup>-</sup>添加、pH 3.0の硫酸溶液中のアノード分極曲線に及ぼすF<sup>-</sup>の影響を示す。約0.8VまではF<sup>-</sup>添加量によらず電流値は数μA/cm<sup>2</sup>程度であり、良好な不動態皮膜が存在していると推察される。0ppmF<sup>-</sup>の場合、約0.8~1.3Vは不動態から過不動態への遷移域であり、0.8Vより高い電位で電流値は上昇するが、Feの不動態皮膜が形成するため電流値は再び低下する。10ppmF<sup>-</sup>、100ppmF<sup>-</sup>の場合も同様に0.8Vより高い電位で電流値の上昇が見られたが、その値はF<sup>-</sup>濃度が高いほど大きくなった。F<sup>-</sup>はFeの不動態皮膜を破壊することが知られており<sup>15,16)</sup>、F<sup>-</sup>添加により母材の溶解が促進されたためと考えられる。一般的にセパレータは0.9V付近での使用が想定されるため、金属溶出の原因となるCrの過不動態溶解のほかF<sup>-</sup>に対する保護性も必要であると考えられる。

図7にF<sup>-</sup>添加硫酸溶液中72hの0.9V定電位分極後の金属溶出量を示す。F<sup>-</sup>添加により金属溶出量は増加するものの、218NはSUS304やSUS316Lより金属溶出量が少なく、耐金属溶出性に優れることが分かった。約1.3VまではCr含有量が高いほど腐食速度が遅いことが報告されており<sup>17)</sup>、同様の理由で218Nが耐金属溶出性に優れたと考えられる。また固溶NがNO<sub>3</sub><sup>-</sup>として溶出しインヒビター(銅表面へのF<sup>-</sup>吸着を抑制する作用)として働いたことも理由

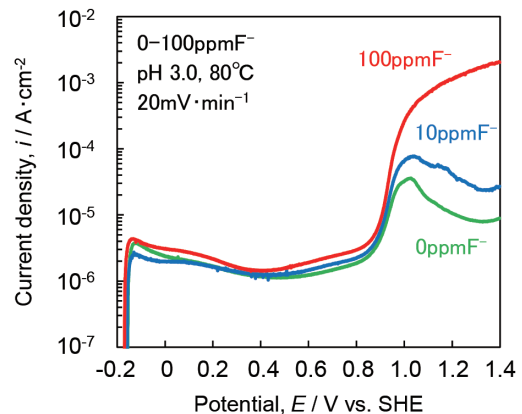


図6 218Nの0~100ppmF<sup>-</sup>添加硫酸溶液中のアノード分極曲線  
Anode polarization curve of 218N in sulfuric acid solution to which 0-100 ppmF<sup>-</sup> has been added



として考えられる。

### 5.3 耐孔食性

耐孔食性は孔食電位測定により評価した。溶液はNaCl試薬を用いて20000ppmCl<sup>-</sup>に調整し、Arガスで十分脱気した。温度は30、50、80℃の3水準とし、その他の条件はJIS G 0577に準拠して行った。供試材表面は測定直前に#600乾式研磨を行った。自然電位から掃引速度20mV/minで動電位アノード分極を行い、電流密度が100μA/cm<sup>2</sup>となった電位を孔食電位とした。

図8に各鋼種の孔食電位に及ぼす温度の影響を示す。高温(80℃)ではいずれの鋼種も比較的低い孔食電位を示し、低温になるほど孔食電位は高くなる傾向を示した。この傾向は窒素を添加した218Nで顕著に見られ、30℃の溶液中で孔食の発生は認められなかった。これは低温で孔食電位が高くなることに加え、前述の通り窒素がNO<sub>3</sub><sup>-</sup>の状態で安定となったことで耐孔食性が著しく増大し、孔食電位が急激に高くなったためと考えられる。218Nは窒素添

加の効果で特に常温付近(30~50℃)においてSUS316Lを超える耐孔食性を有することが示唆された。

### 5.4 耐候性

耐候性は沖縄県宮古島での大気暴露試験により評価した。供試材の表面は#400湿式研磨仕上げとした。大気暴露試験はJIS Z 2381に準じて日本ウエザリングテストセンター(JWTC)宮古島暴露試験場で1年間実施した。試験後の外観はJIS G 0595のレイティングナンバー(RN)により0~9の10段階で評価した。

図9に宮古島大気暴露1年後の外観写真を示す。大気暴露後のRNは218Nが8、SUS316Lが7、SUS304が4であり、218NはSUS316Lと同等以上の耐候性を示した。暴露試験中の宮古島の最高気温は34.6℃であったことから、5.3節で記述した通り、218Nの窒素添加の効果が発現しやすい温度域であったと推察される。すなわち218Nは大気腐食環境においてもSUS316Lと同等以上の耐候性を有していると考えられる。

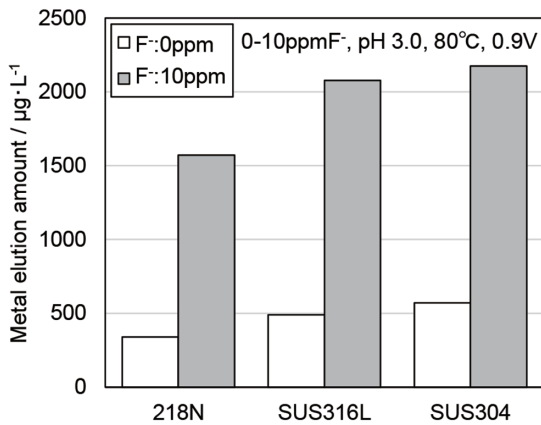


図7 F<sup>-</sup>添加硫酸溶液中72hの0.9V定電位分極後の金属溶出量

Amount of metal elution after constant potential polarization in sulfuric acid solution to which F<sup>-</sup> has been added at 0.9 V over 72 h

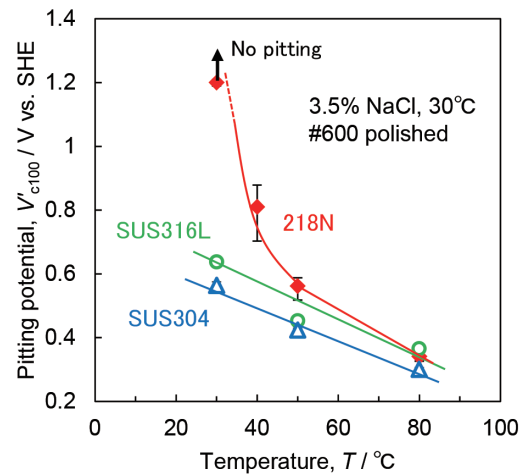


図8 各温度における孔食電位  
Pitting potential at various temperatures

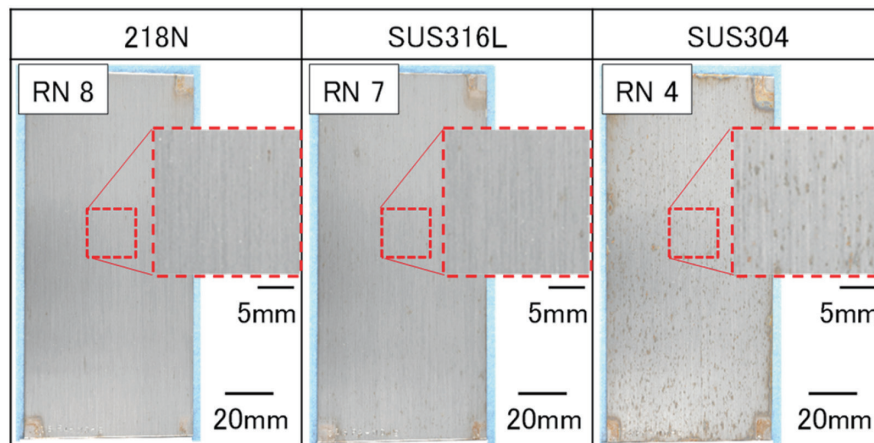


図9 大気暴露試験1年後の試験片外観  
Appearance of the specimens after 1 year of atmospheric exposure test

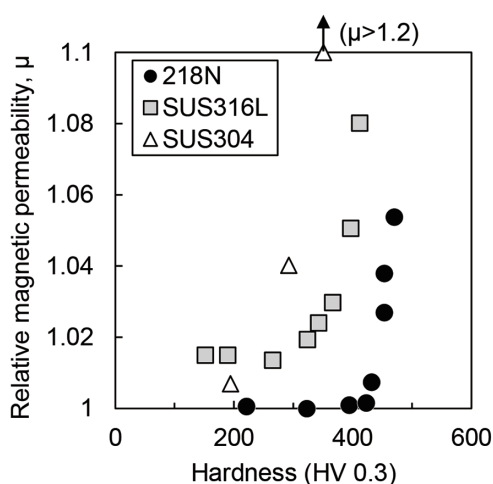


図 10 冷間圧延後の硬さと比透磁率の関係  
Relationship of hardness and relative magnetic permeability after cold rolling

### 5.5 磁気特性

真空部品や携帯用ゲーム機等の電子部品には磁場の影響やコンタミ付着防止の観点から低磁性の  $\gamma$  系ステンレス鋼 (SUS304 や SUS316L 等) がよく使用されており、高強度との両立が要求される。そこで冷延焼鈍板を種々の圧延率となるように冷間圧延し、各圧延率における比透磁率 ( $n=5$  平均) および断面硬さ (荷重 300 g,  $n=5$  平均) を測定した。比透磁率の測定には低透磁率計フェロマスタ (List-Magnetik 社製) を用いた。

図 10 に冷間圧延後の硬さと比透磁率の関係を示す。SUS304 は硬さが 351 HV のとき比透磁率が 1.2 を超える値まで増加しており、加工誘起マルテンサイト ( $\alpha'$ ) 生成によるものと推定される。SUS316L は硬さ 300 HV 程度まで低い比透磁率を有していたが、硬さ 300 HV を超えると比透磁率の上昇が見られた。それに対して 218N は硬さ 400 HV 程度まで低い比透磁率を有しており、高強度と低磁性のバランスに優れることが示された。圧延による比透磁率の上昇は  $Md_{30}$  が低い鋼種ほど抑制されることに加え、218N は窒素添加により  $\alpha'$  が生成しなくても他鋼種より硬質であることから、高強度と低磁性の両立が可能であると考えられる。

## 6. 結 言

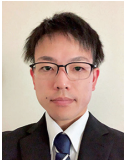
PEFC セパレータ向け低 Ni 省 Mo 型  $\gamma$  系ステンレス鋼として、SUS316L と同等の耐すきま腐食性および加工性を有

する鋼の最適成分系を検討し、218N (21Cr-8.3Ni-0.15N) を開発した。得られた結果は下記の通りである。

- (1) PEFC 模擬環境における耐すきま腐食性試験において、[Cr+2Mo] が 21 以上のとき SUS316L と同等以上の耐すきま腐食性が認められた。
- (2) N : 0.10 ~ 0.19% の範囲では、加工性 (全伸び) は  $Md_{30}$  の値が高いほど上昇した。また、N 量の増加に伴い全伸びは減少する傾向が見られ、全伸び 45% 以上を安定して得るためには N を 0.19% 以下とする必要があると考えられた。
- (3) PEFC 環境を模擬した 0.9V では Cr 含有量が高いほど腐食速度が遅く、218N は F<sup>-</sup> イオンを含む PEFC 環境を模擬した定電位試験の結果では SUS304 や SUS316L より金属溶出量が少なく耐金属溶出性に優れた。
- (4) 218N は SUS304 や SUS316L より高強度であり、常温付近においては特に優れた耐孔食性および耐候性を示す。また高強度と低磁性の両立が可能であり、これらの特性を活かした他用途への適用も期待される。

### 参照文献

- 1) 西方篤：材料と環境. 58, 288 (2009)
- 2) 今村淳子 ほか：新日鉄住金技報. (396), 110 (2013)
- 3) 宮野真一 ほか：炭素. (247), 54 (2011)
- 4) 宮澤篤史 ほか：Electrochemistry. 78 (10), 825 (2010)
- 5) NEDO：NEDO 水素・燃料電池成果報告会 2023, C1-16 (2023)
- 6) 八代仁 ほか：材料と環境. 60, 432 (2011)
- 7) 野原清彦, 小野寛, 大橋延夫：鉄と鋼. 63, 772 (1977)
- 8) Pourbaix, M.: Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions. NACE, 1966, p.263
- 9) Pourbaix, M.: Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions. NACE, 1966, p.275
- 10) 深谷祐一 ほか：材料と環境. 56, 406 (2007)
- 11) Pourbaix, M.: Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions. NACE, 1966, p.498
- 12) 遅沢浩一郎：熱処理. 36, 206 (1997)
- 13) 八代仁 ほか：材料と環境. 47, 591 (1998)
- 14) 石尾光太郎 ほか：鉄と鋼. 92, 38 (2006)
- 15) 橘孝二 ほか：材料と環境. 42, 762 (1993)
- 16) 春名匠 ほか：材料と環境. 43, 331 (1994)
- 17) 長野博夫 ほか：まてりあ. 34, 1077 (1995)



関向晃太郎 Kotaro SEKIMUKAI  
日鉄ステンレス(株)  
研究センター 新エネルギー材料研究部  
研究員  
山口県光市大字島田3434 〒743-8550



今川一成 Kazunari IMAKAWA  
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部  
主幹研究員



松橋 透 Toru MATSUHASHI  
日鉄ステンレス(株)  
研究センター 商品開発部  
部長 上席主幹



奥 学 Manabu OKU  
日鉄ステンレス(株)  
研究センター 新エネルギー材料研究部  
部長 上席主幹研究員