

特集：鋼の腐食**鋼とステンレス鋼の腐食の基礎**日本製鉄株式会社
金子道郎**1. はじめに**

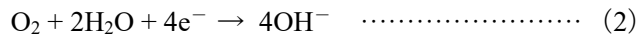
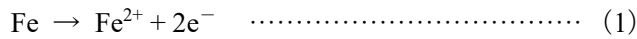
鉄鋼材料は、その優れた機械的性質、溶接性、経済合理性のある価格等から、世界で最も使用されている工業用金属材料であり、2022年度の世界の粗鋼生産量の速報値（世界鉄鋼協会）は18億7850万トンである。このように優れた特性を有する鋼であるが、腐食しやすいことから、防食塗装、表面処理、カソード防食等の防食措置を施されて使用されるか、低合金耐食鋼あるいはステンレス鋼のような耐食鋼材が用いられるのが一般的である。

公益社団法人腐食防食学会と一般社団法人日本防錆技術協会が共同で実施した“我が国の腐食コスト調査結果（2015年度）”^{1) 2) 3)}では、Hoar方式（使用分野ごとに詳細に検討し、腐食事故による直接的損失と腐食対策費を積み上げていく方法）における2015年の腐食コストの総額は6兆6000億円であり、前回の腐食コスト調査結果（1997年）の5兆2000億円の1.27倍、前々回（1974年）の1兆1000億円の6.22倍である。対GNI（Gross National Income：国民総所得）比では、1974年の0.75%から1997年の0.99%、2015年では1.27%とさらに増大しており、今後、メンテナンス費用は更に増大するものと考えられ、腐食対策費を最適化することは益々、重要となっていくものと考えられる。

一方、米国では、NACE Internationalが“International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study (IMPACT)”の報告書を発表しており⁴⁾、その中で、世界の腐食コストは2.5兆USドル（2013年）と算出している。この金額を2013年のUSドル/円の為替レートを97.5957円/USドルとして計算すると、243兆9893億円もの巨額な腐食コストとなる。例えば、適切な防食方法の適用によって、仮に腐食コストを20%低減できたとすると、我が国では約1.3兆円、世界では約48.6兆円もの腐食コストを低減できることになる。すなわち、腐食防食技術は、巨額な腐食対策費を最適化できる経済的に重要な技術分野であり、本稿では、その中で、鋼とステンレス鋼の腐食の基礎について解説する。

2. 鋼の腐食の基礎

鋼は、酸化鉄を還元すると共に、機械的性質、溶接性および耐食性等の特性向上を目的に各種の元素を添加し製造されたものである。したがって、酸素を含む大気環境中において、鋼は酸化鉄に戻る（すなわち腐食する）のが自然である。ただし、空調の効いた室内環境に置かれた鋼表面には容易に赤錆が発生しないのに対して、鋼表面に水を滴下すると、短時間の内に赤錆が発生する。これは、下記に示すように（1）の鉄の溶解反応（アノード反応）と（2）の水中の溶存酸素の還元反応（カソード反応）が鋼表面で等量生じたことによるものであり、極性溶媒として、水が Fe^{2+} を水和する性質によることが大きい。また、水に溶解できない Fe^{2+} は（3）の反応で $Fe(OH)_2$ を生成することとなる。



したがって、環境中の水分を低減することは鋼の有効な防食法となる。例えば、明石海峡大橋の主ケーブル鋼線の防食として、ケーブル内を乾燥させるために送気乾燥システムが導入され、今では本州四国連絡橋の全てのつり橋の防食法として用いられている。

また、水溶液中の室温での溶存酸素濃度は 8ppm 程度で、その移動は鋼の腐食反応と比較して遅いため、中性付近の水溶液中での鋼の腐食速度は溶存酸素の拡散律速となっており、静止した中性付近の水溶液中の腐食速度は約 0.1~0.2mm/年となる (図 1)。なお、流れの影響等で溶存酸素の拡散層厚みが薄くなると、鋼の腐食速度は増大する。

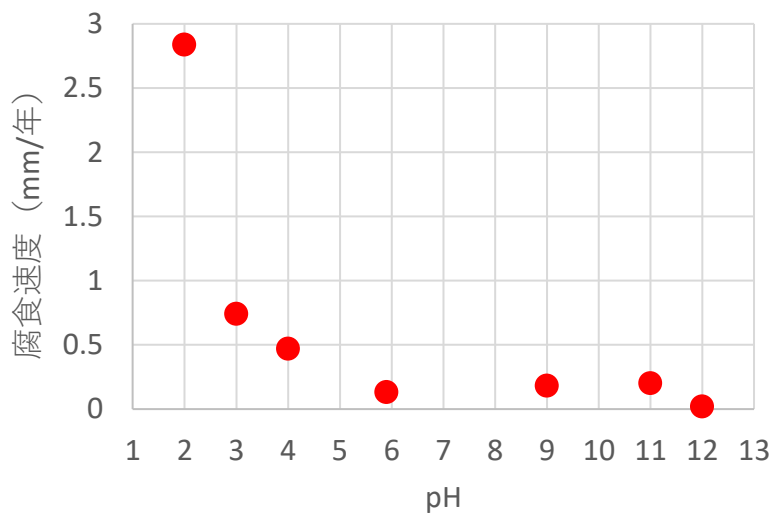
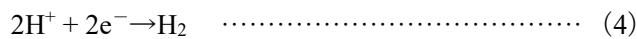


図 1 炭素鋼の腐食速度の pH 依存性

一方、酸性の水溶液中では、(4) に示す水素イオンが水素ガスとなるカソード反応が主反応となるため、図 1 に示すように酸性領域では、鋼の腐食速度は pH の低下と共に大幅に増大する。



一方、アルカリ性の水溶液中では、鋼の腐食速度は低下するが (図 1)、これは、図 2 に鉄の電位-pH 図の一例を示すように、アルカリ水溶液中では鋼表面に不働態皮膜と呼ばれる極めて薄い (通常、数 10Å オーダーの厚み)、防食性能に極めて優れた皮膜に覆われ、鋼のアノード反応速度が著しく低下することによる。例えば、コンクリート中の pH は 12.5 程度のアルカリ性であり、鋼が不働態を示すことから、鉄筋は無塗装で使用することができる。ただし、大気中の炭酸ガスによって、コンクリート中の中性化が進行すると、不働態皮膜が維持できなくなり腐食速度が増大し、さび生成による体積膨張によるコンクリートのひび割れ等が発生して、腐食環境因子の侵入が容易となって、鉄筋の腐食が進行することとなる。

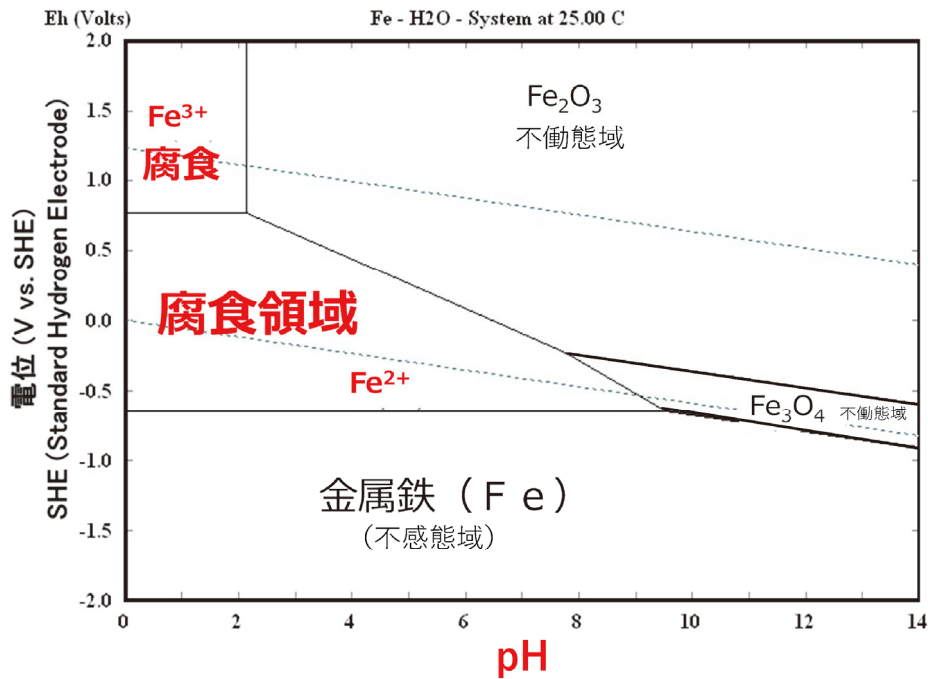


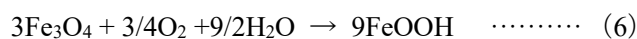
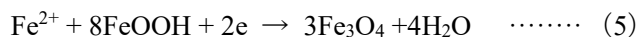
図2 鉄の電位-pH図の一例

(青色の点線内は水の安定領域、計算に用いる化合物の種類およびイオン種の種類と濃度
(上記は $1 \times 10^{-6} \text{mol/l}$) によって計算結果は変わる)

以上、鋼の腐食の基礎について述べたが、鋼表面に生成する鉄さびは、鋼の腐食を促進する場合と抑制する場合があります。次節では鋼の大気腐食を例として、腐食反応への鉄さびの影響と鉄さびを防食に利用した耐候性鋼について述べる。

3. 鋼の大気腐食と耐候性鋼

前節では、鋼のアノード溶解反応を(1)式、鉄さび生成を(3)式で説明したが、 Fe^{2+} あるいは $\text{Fe}(\text{OH})_2$ は溶存酸素の酸化力によって、 Fe^{3+} を含む各種の鉄さびを生成する。各種の鉄さびの生成過程は複雑で、本稿で簡潔に説明することはできないため、詳細は、解説⁵⁾を参照いただきたいが、重要な点は、エバンスモデル^{6), 7)}として提唱されているようにオキシ水酸化鉄(FeOOH)が(5)、(6)式に示すようにカソード反応物質として作用して、鋼の腐食速度を増大させ、(5)の反応の生成物は、(6)の反応でオキシ水酸化鉄に再酸化して、(5)と(6)の反応がサイクルで進み、生成する FeOOH が増大することが特徴である。大気環境中での鋼の腐食速度は他の金属材料と比較して大きい。鋼表面に生成した鉄さびが鋼の腐食反応を促進すると良く理解できる。なお、エバンスモデルについては、その後も研究が進められ、各種のモデルが提唱されているが、それらを説明することは、本稿の範囲を超えるため、優れた解説⁹⁾を参照いただきたい。



大気環境中における鋼の腐食は、鋼表面に生成したオキシ水酸化鉄によって促進されるが、Cu、

Cr、Ni、P等の合金元素を少量添加した耐候性鋼は、大気環境中で保護性の高いさび層を形成し、鋼の腐食速度を大幅に低減することから、橋梁等の社会インフラに使用されている。高寿命、低ライフサイクルコスト、省資源、リサイクル性等の観点から限られた地球の資源を極めて有効に利用できる耐食金属材料であり、持続可能社会構築に向けて、重要な耐食材料のひとつである。図3に普通鋼と耐候性鋼の工業地域での曝露試験結果¹⁰⁾を示すが、耐候性鋼は、曝露期間と共に腐食速度(図3の傾き)が低下しているのが分かる。これは、Cu、Ni、CrあるいはP等の合金元素の添加によって耐候性鋼の表面に保護性のさび層が生成することによる。例えば、知多第二橋(1967年竣工)、第一両国橋(1969年竣工)、くろがね橋(1973年竣工)はいずれも耐候性橋梁であるが、40~50年近くを経過した後も無塗装で使用されている。ただし、腐食環境によっては、保護性の高いさび層を生成することができず、所望の防食性能を発現できない場合もある。したがって、耐候性鋼の使用可能環境の把握あるいは腐食予測等の利用技術が開発・実用化されている。また、通常の耐候性鋼使用環境よりも飛来海塩粒子量の多い環境で使用可能なニッケル系高耐候性鋼も開発・実用化¹¹⁾されている。

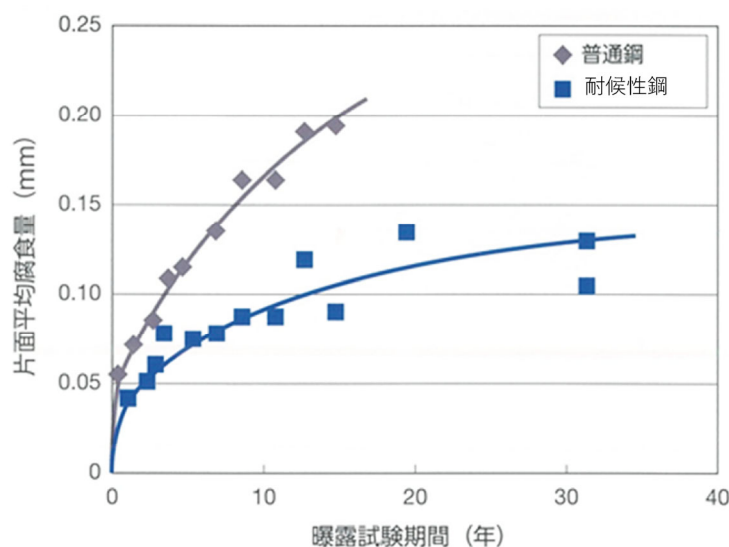


図3 普通鋼および各種耐候性鋼の大気曝露試験結果¹⁰⁾

次節では、ステンレス鋼の耐食性の特徴とステンレス鋼で問題となる局部腐食(孔食、すきま腐食、粒界腐食、応力腐食割れ)の発生機構と対策について説明する。

4. ステンレス鋼

4.1 ステンレス鋼の定義と耐全面腐食性

ステンレス鋼の定義(JIS G 0203:2009)は、クロム含有率を10.5%以上、炭素含有率を1.2%以下とし、耐食性を向上させた合金鋼である。常温における組織によってマルテンサイト(M)系、フェライト(α)系、オーステナイト(γ)系、オーステナイト・フェライト($\alpha+\gamma$)の2相系及び析出硬化系の5種類に分類される。図4は、Fe-Cr鋼の工業地域での8年間の曝露試験結果を示すが、Cr含有量が11.5%以上では、平均の腐食速度が著しく低減していることが分かる¹²⁾。図5にCrの電位-pH図の一例を示す。ステンレス鋼の電位-pH図はないので、図2の鉄の電位-pH図と図5を組み合わせて考えると、ステンレス鋼では、Feの場合と比較して、不働態領域が大幅に拡大したこ

とで高耐食化をもたらしたことが分かる。なお、**図 2** および **図 5** から、非酸化性の酸性溶液では、不働態皮膜が生成できずに、全面腐食を生じる場合が出てくるため、例えば、硫酸、塩酸等では、便覧等¹⁴⁾の腐食データを参照して、ステンレス鋼の種類と適用限界（全面腐食）を把握することが重要となる。

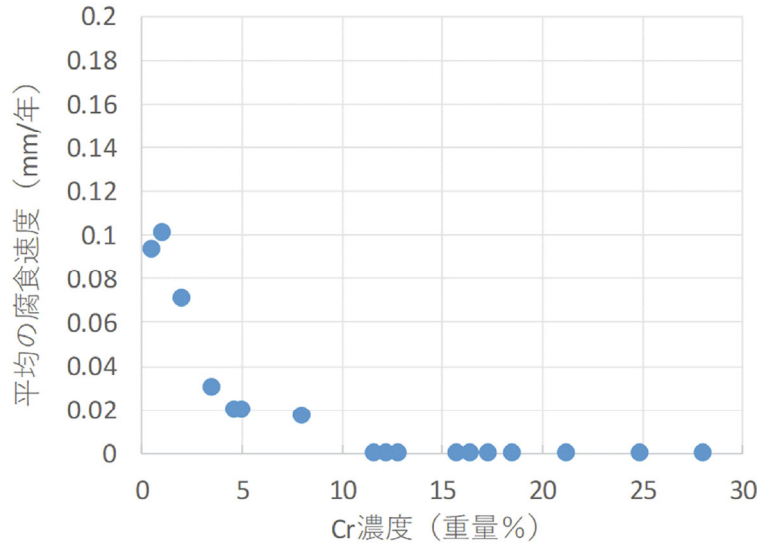


図 4 工業地帯での Fe-Cr 鋼の 8 年間の曝露試験結果

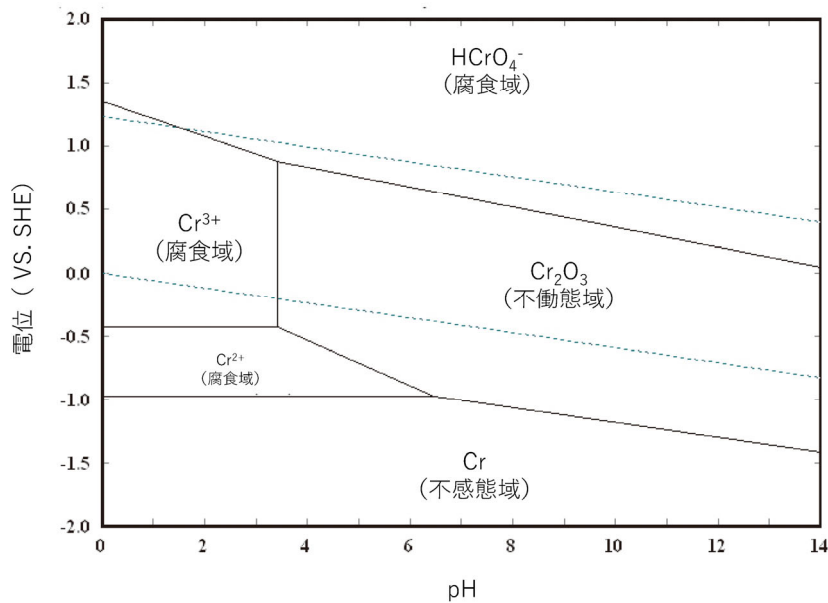


図 5 クロムの電位—pH 図の一例

(青色の点線内は水の安定領域、計算に用いる化合物の種類およびイオン種の種類と濃度
(上記は $1 \times 10^{-6} \text{mol/l}$) によって計算結果は変わる)

4.2 孔食

孔食は、**図 6** に示すように金属内部に向かって孔状に進む局部腐食である。食孔（ピット）内は、ステンレス鋼から溶出した金属イオンと電気的中性を保つために沖合の溶液から塩化物イオンが泳

動して濃縮し、(7)式に従い Cr^{3+} の加水分解反応で pH 低下し、ピット内は、酸性塩化物環境となり極めて速い速度でピットが成長することとなる (図 7)。

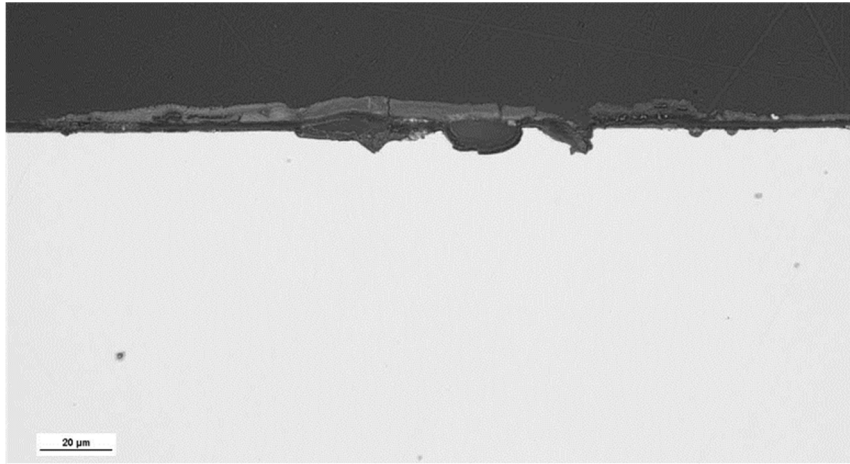
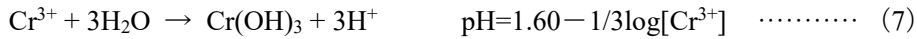


図 6 大気環境（海浜地区）でのステンレス鋼の孔食の一例

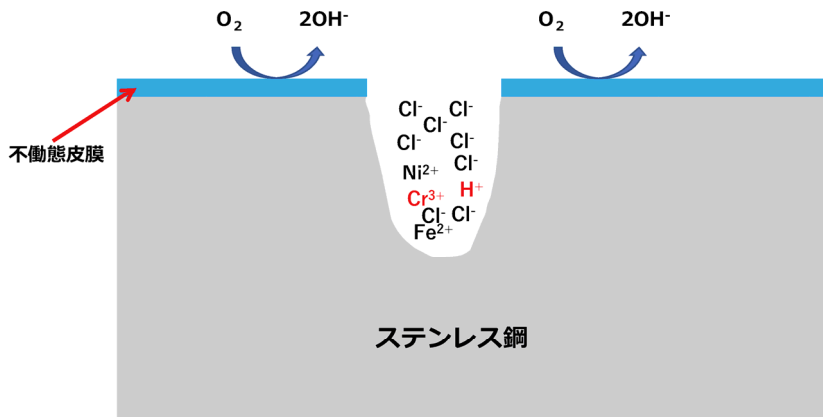


図 7 孔食の模式図

孔食の対策として、環境側では、腐食因子（例えば塩化物イオン濃度）の低減、使用温度の低減、酸化剤濃度の低減、腐食抑制剤（インヒビター）の使用、微生物腐食による孔食の場合は、環境の滅菌等が挙げられる。材料側の対策としては、鋼中の Cr 濃度、Mo 濃度、W 濃度および N 濃度の増加が有効であり、これらの元素の効果をまとめた PREN (Pitting Resistance Equivalent Number : 耐孔食指数)、例えば $\text{Cr} + 3.3(\text{Mo} + \text{W}) + 16\text{N}$ がある。図 8 に各種の JIS 規格のステンレス鋼の孔食電位 (JIS G 0591) を $\text{Cr} + 3.3\text{Mo} + 16\text{N}$ (W を含まない鋼種のため) で整理した結果を示すが、孔食電位は、 $\text{Cr} + 3.3\text{Mo} + 16\text{N}$ と比較的良い相関があることが分かる。なお、PREN では、Cr、Mo、W および N に係数をかけて、その和を取っているため、これらの合金元素の作用機構が同一で、効果の度合いが異なるだけとの印象を与えるが、それは正しくない。これらの元素の作用機構に関して、不動態皮膜の保護性、ピット内での溶解速度に及ぼす影響、ピットの再不動態化に及ぼす影響、溶出・生成したイオ

ン種によるインヒビター効果等の観点から研究がおこなわれているが、本稿で簡潔に作用機構をまとめることは困難であることから、優れた解説書¹³⁾を参照いただきたい。なお、Niの影響はPRENに入っていないが、孔食の成長速度を低減する効果がある。

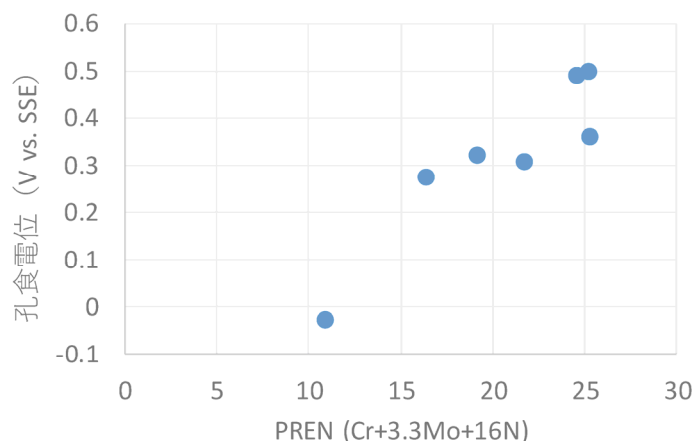


図8 30℃の3.5重量%NaCl水溶液中でのフェライト系ステンレス鋼及びオーステナイト系ステンレス鋼の孔食電位(V_{cl00})をPREN(Pitting Resistance Equivalent Number)で整理した結果

4.3 すきま腐食

すきま腐食は、金属間又は金属と他の材料との間にすき間が存在する場合、すき間の内外においてイオン、酸素などの濃淡電池が構成されて生じる腐食である。主な腐食環境因子は、塩化物イオンのようなハロゲン化物イオンである。図9はボルトで締結された2枚のステンレス鋼のすきま腐食の発生箇所を模式的に示したものである。図10は2枚のステンレス鋼板を絶縁性のワッシャーを介して、チタン製のボルトとナットで締め付けて、すきま付き試験片として、自然海水中で約8か月間の曝露試験後引き上げ、付着物を除去した後、2枚のステンレス鋼板を開いた時の外観を示す。2枚のステンレス鋼を開いた内側は、ステンレス鋼の表面光沢を失っているが、これは、すきま腐食が発生したことによる。なお、試験片の上部部分でも、ステンレス鋼の表面光沢を失って、腐食している部分があるが、ここは、絶縁性の樹脂材とステンレス鋼の間で生じたすきま腐食である。図11に塩化物イオンを含む水溶液環境中でのステンレス鋼のすきま腐食発生に至る模式図を示す。

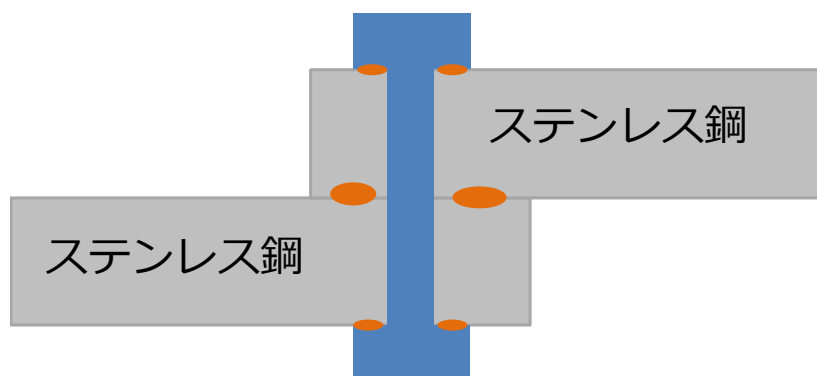


図9 ボルト締結されたステンレス鋼板のすきま腐食発生箇所（オレンジの楕円部分）の模式図

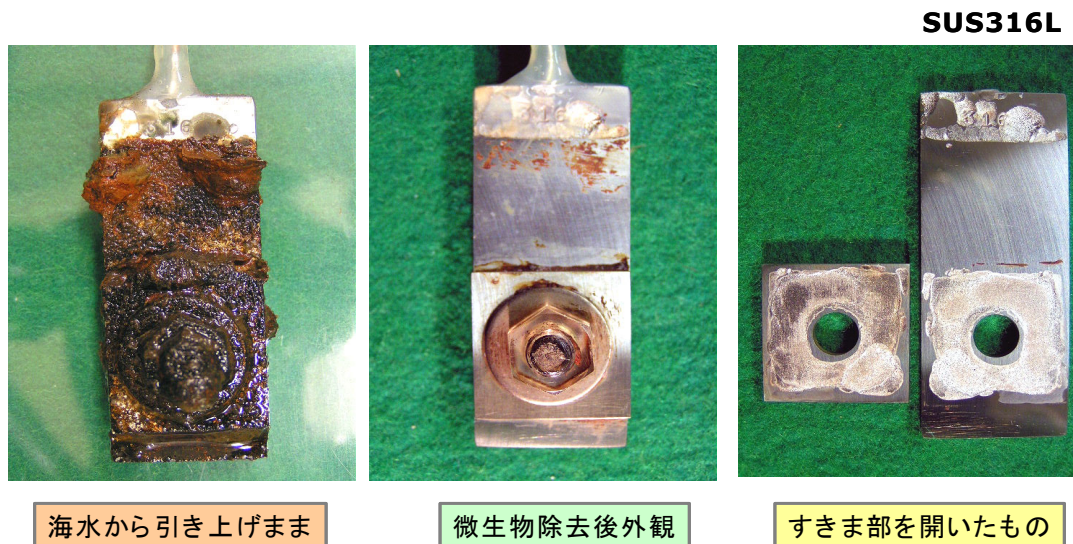


図 10 自然海水中で約 8 か月の浸漬試験を実施した
すきま付き試験片 (SUS316L) の試験後の外観写真

出典：松橋亮博士の許可を得て転載

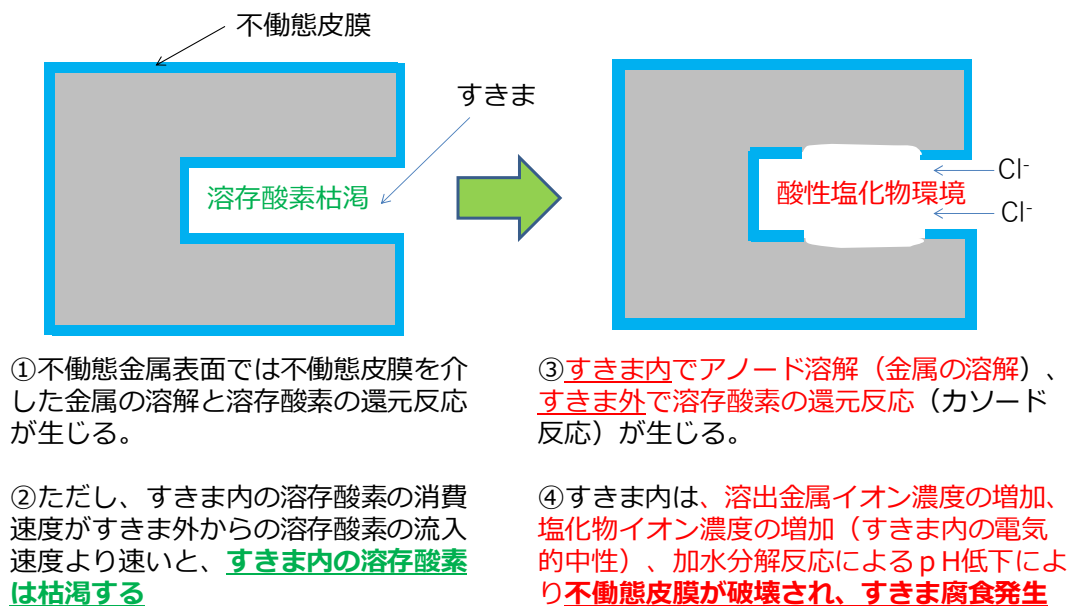


図 11 すきま腐食の模式図

すきま腐食を回避するには、まずは、すきま構造を回避する、すきま腐食を生じにくいパッキン材料を選定する、すきま内の“長さ／間隔”を小さくする、などの対策が有効となる。環境側の対策は、孔食の場合と同様に腐食因子（例えば塩化物イオン濃度）の低減、使用温度の低減等、腐食抑制剤（インヒビター）の使用、微生物腐食によるすきま腐食の場合は、環境の滅菌等の対策を講じる。塩化物イオンを含む環境での耐すきま腐食性の改善には、鋼中の Cr 濃度、Mo 濃度および N 濃度の増加が有効で、また Ni 添加は、すきま腐食の成長速度を低減させる効果を有する（表 1）。

表1 15°Cの海水中での各種ステンレス鋼のマルチクレビスすきま腐食試験結果 (30日)¹⁵⁾

鋼種	成分 (重量%)			すきま腐食発生率 (%)	最大腐食深さ (mm)
	Cr	Ni	Mo		
SUS430	17.5	0.26	0.02	52	1.17
SUS446	25.9	0.03	-	7	0.23
SUS304	18.4	9.4	-	13	0.28
SUS316	17.5	13.5	2.3	2	0.03
SUS317	19.0	13.5	3.8	0	0

(表1 題目中のマルチクレビスすきま腐食試験とは、一つの試験片の表面に複数のすきま部を形成したものである)

ただし、すきま腐食は孔食よりもはるかに発生しやすいことを前提として、環境側あるいは材料側の対策を講じる必要がある。

4.4 粒界腐食

粒界腐食は、金属材料の結晶粒界に選択的に生じる腐食である。図12は、粒界腐食を生じたステンレス鋼の表面と断面の光学顕微鏡観察結果であるが、粒界が選択的に腐食されていることが分かる。ステンレス鋼の粒界腐食は、熱影響部 (Heat Affected Zone) で発生することが多い。これは、クロム炭化物が粒界析出する温度域に一定時間加熱される部分で、ステンレス鋼の粒界にクロム炭化物が析出し、その周囲にクロム欠乏層が生成し、粒界腐食の原因となる。例えば、SUS304は、通常、約0.05~0.06重量%の炭素を含有するが、固溶化熱処理条件 (例えば1010°C~1150°C) では、炭素は、クロム炭化物固溶限界より高温のためステンレス鋼中に固溶している。熱処理後、水冷されると材料中に固溶した炭素はクロム炭化物として、析出することができないため、室温で過飽和の状態で存在することとなる。その後、例えば、溶接時に図13に示すクロム炭化物が析出する温度域に保持あるいは徐冷されると⁸⁾、図14のようにクロム炭化物が粒界に析出し、その周囲にクロム濃度の低下したクロム欠乏層が生成し、粒界腐食の原因となる。

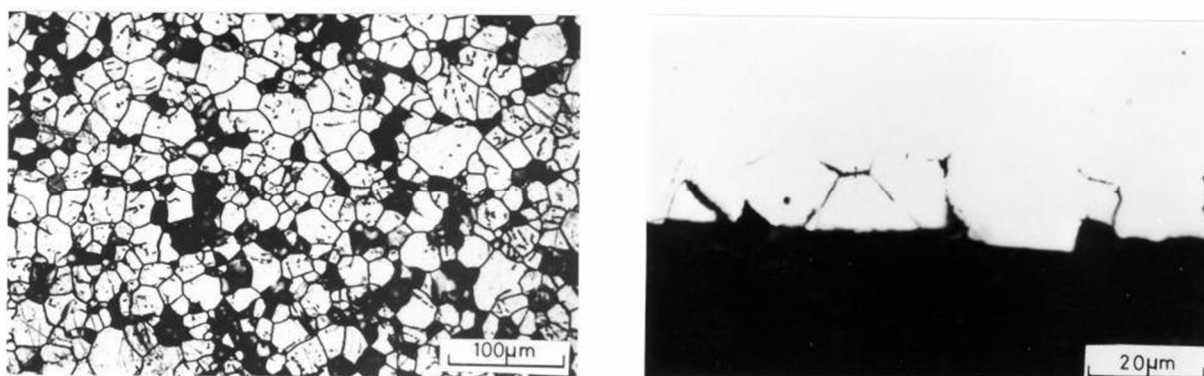


図12 ステンレス鋼の粒界腐食の光学顕微鏡観察結果の一例

(左：表面観察、右：断面観察)

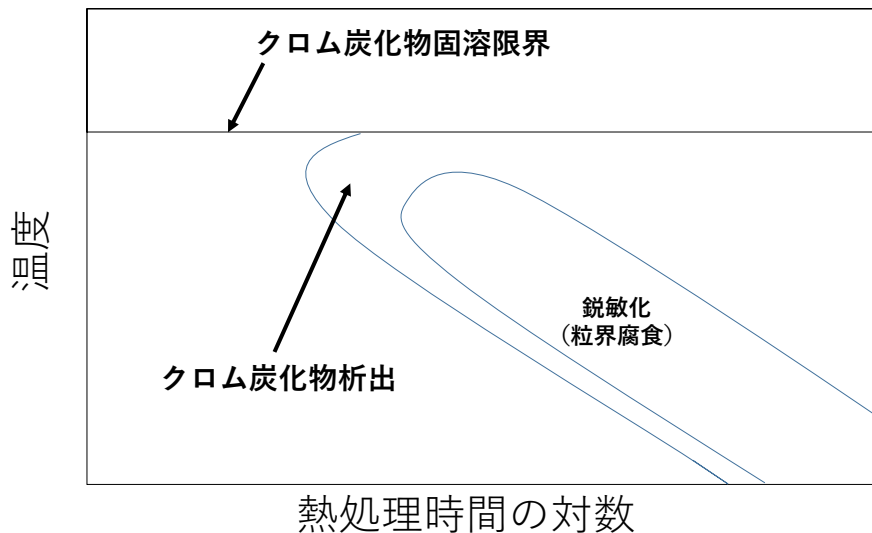


図 13 温度—時間—クロム炭化物析出／鋭敏化（粒界腐食）線図（模式図）

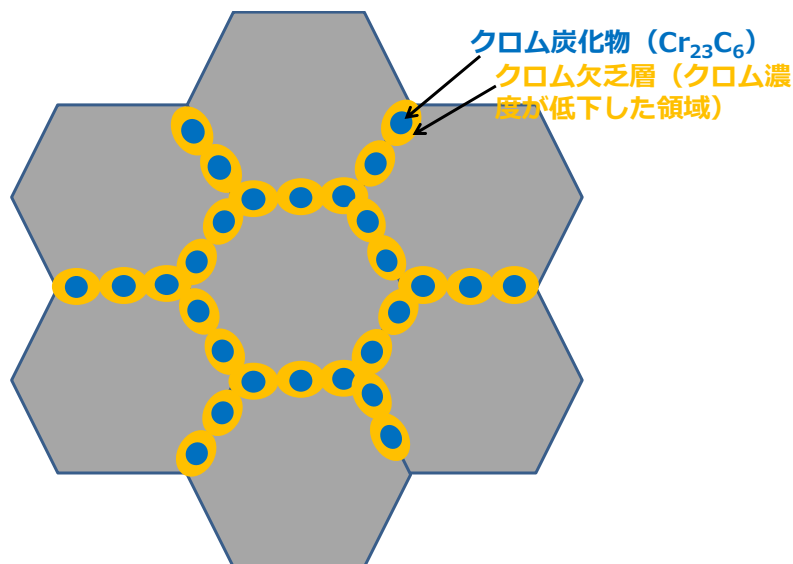


図 14 ステンレス鋼の鋭敏化の模式図

ステンレス鋼の粒界腐食を防止するには、①クロム炭化物の粒界析出によるクロム欠乏層の形成を防止するため、ステンレス鋼中の炭素濃度を低減する（オーステナイト系ステンレス鋼は、0.03重量%以下）あるいは、②クロム炭化物より高温で炭素と炭化物を生成するチタン、ニオブ等を添加する。オーステナイト系ステンレス鋼の代表鋼種は、チタンを添加した SUS321 とニオブを添加した SUS347 の安定化ステンレス鋼である。なお、③フェライト系ステンレス鋼では、クロム炭化物と共にクロム窒化物もクロム欠乏層生成の原因となるため、通常、炭素濃度と窒素濃度を低減すると共に、チタン、ニオブ等を添加するのが一般的である。したがって、フェライト系ステンレス鋼では、4.2 で述べた耐孔食性向上を目的として窒素添加が用いられることはない。

なお、高酸化性の硝酸溶液中では、非鋭敏化ステンレス鋼に粒界腐食が発生する場合があるが、かかる粒界腐食については、本稿の範疇を超えるので、優れた解説¹⁶⁾を参照いただきたい。

4.5 応力腐食割れ

見た目は健全に見えるステンレス鋼が、ある日突然、割れに至る応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking:以下、SCC と略記する）は、検査による事前検出の難しさ、進展速度が速いこと等から極めて問題となる腐食損傷である。SCC は、腐食作用と静的応力とが同時に働いたときに起こる割れであり、延性に富む金属材料が、腐食環境中で、非腐食環境での破断応力より遙かに低い引張応力で破断に至る。SCC は、ステンレス鋼に限った現象ではなく、他の金属、合金でも生じ、金属および合金の種類に応じて特有な腐食環境で発生することが知られている。すなわち、SCC は、材料、環境および引張応力の3因子が組み合わさったときに発生するものであり、対策としては、どれか一つの因子を除くことによって達成される。

ステンレス鋼の SCC を割れの経路で分類すると、主として粒内を経由する粒内型応力腐食割れ（Trans granular SCC、以下、TGSCC と略記する）と粒界を経由する粒界型応力腐食割れ（Inter granular SCC、以下、IGSCC と略記する）の2種類に分けられる（図15）。ステンレス鋼のIGSCC は、多くの場合は、4.3項で説明した鋭敏化によるものであり、詳しい説明は省略する。ただし、ステンレス鋼のIGSCC は、粒界腐食を発生しないようなマイルドな環境でも引張応力と鋭敏化の相乗作用で発生するため、例えば、飛来海塩粒子量が多い、あるいは蓄積するような場合、大気環境中においてもIGSCC を発生する場合があるので注意が必要である。なお、オーステナイト系ステンレス鋼がIGSCC を発生する環境の一例としては、高温水、ポリチオン酸水溶液、チオ硫酸水溶液、チオシアン酸水溶液およびフッ化物を含む水溶液等¹⁷⁾が挙げられる。

粒内型応力腐食割れ 粒界型応力腐食割れ

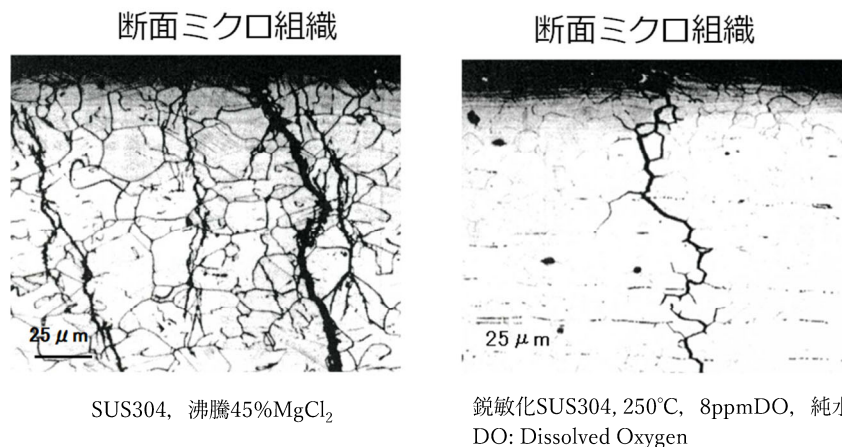


図15 粒内型応力腐食割れおよび粒界型応力腐食割れの一例¹⁷⁾

次に、ステンレス鋼のTGSCCについて述べるが、ステンレス鋼のTGSCCは、塩化物中で発生するケースが多いため、塩化物中のステンレス鋼のTGSCCを中心に述べることにする。塩化物溶液中におけるステンレス鋼のTGSCCは、活性経路腐食機構（Active Pass Corrosion、以下APCと略記する）のSCCと考えられている⁸⁾。APCは、金属のアノード溶解が重要な役割を果たす機構であり、APC機構によるSCCき裂発生下限界応力は概して低い。SUS304鋼の塩化物溶液中におけるSCCき裂発生下限界応力は、数十MPa程度であって、材料の耐力に比べ、極めて小さい⁸⁾。一般の溶接構

造物にあつては、溶接部近傍に材料の耐力を超えた溶接残留応力が作用している。したがって、塩化物水溶液中の SUS304 鋼製の溶接構造物は、応力腐食割れのき裂発生のための力学的条件を満足していると考えなければならない。SUS304 鋼に TGSCC が発生する使用温度および塩化物イオン濃度領域については、塩化物イオン濃度が高いほど、低い温度で発生しており、SCC が発生する下限の温度域は、通常、約 50~60°C 程度と考えられる。ただし、室温付近で発生するとの報告もある¹⁸⁾。

次に、金属学的組織の異なる 3 種類のステンレス鋼 (γ 系、 α 系、2相系 ($\alpha + \gamma$)) につき、塩化物溶液中の耐 SCC 性の違いについて説明する。塩化物濃度の異なる 2 種類の塩化物溶液中におけるこれらステンレス鋼の応力腐食割れ試験結果を表 2 に示す¹⁵⁾。SUS304 といった汎用的な γ 系ステンレス鋼は、塩化物濃度の低い SCC 試験においても割れを発生する。一方、Mo 含有量 (N 含有量も増加) を増した高耐食性の γ 系ステンレス鋼では (例えば 254SMO)、沸騰 42%塩化マグネシウム試験では割れを発生するものの、塩化物イオン濃度の低い沸騰 25%塩化ナトリウム溶液中では、割れを発生しない。これは、塩化物濃度が低い試験では、ピットを經由して SCC を発生するため、鋼中 Mo、N 濃度の増加による耐孔食性の向上が寄与しているものと考えられる。一方、SUS444 といった α 系ステンレス鋼は、いずれの試験でも SCC を全く発生していない点が注目される。ただし、AL29-4-2 といった高耐食性のフェライト系ステンレス鋼は、沸騰塩化マグネシウム溶液中で割れを発生する。これは、鋼中に含まれる Ni と Cu による作用と考えられている¹⁹⁾。したがって、Ni と Cu を含有しないフェライト系ステンレス鋼は、極めて優れた耐塩化物 SCC 性を示す。

表 2 各種ステンレス鋼の耐 SCC 性 (U ベンド試験法)

種類	沸騰42重量%塩化MgCl ₂ 試験	沸騰25重量%NaCl試験
SUS304鋼 (γ 系)	×	×
SUS317鋼 (γ 系, 3%Mo)	×	△
254SMO (γ 系, 3%Mo)	×	○
SUS444 (α 系19%Cr-2%Mo)	○	○
AL29-4-2 (α 系,29%Cr-4%Ni-2%Mo)	×	○
2205 (2相系, 22%Cr-5%Ni系)	×	△

×：割れ発生, ○：割れ無し, △：試験片によって割れるものと割れないものあり

次に、2相ステンレス鋼の耐 SCC 性について述べる。表 2 では、2相ステンレス鋼は、SUS444 のような優れた耐 SCC 性を示していないが、汎用の γ 系ステンレス鋼と比較して、各種の 2相ステンレス鋼の耐 SCC 性は優れており、鋼中 Mo 濃度の高い 2相ステンレス鋼では、SCC を発生する限界の温度、塩化物濃度共、上昇しており、優れた耐 SCC 性を有することが報告されている。ただし、2相ステンレス鋼の耐 SCC 性は、相中の γ 相と α 相の相比の影響を受け、 α 相の割合が約 40%近い場合、最も耐 SCC 性に優れることが報告されている²⁰⁾。溶接部では、 α 相と γ 相の相分率が、加熱温度によって変化すること、及び溶接時の残留応力が降伏応力に近いことから、2相ステンレス鋼の

有する耐 SCC 性に優れた特徴が損なわれることがないように注意する必要がある。なお、表 3 は、 γ 系ステンレス鋼から α 系ステンレス鋼あるいは 2 相ステンレス鋼および 2 相ステンレス鋼から Ni 基合金への材料変更によって、塩化物 SCC 対策を講じた一例を示す²¹⁾。

表 3 塩化物応力腐食割れ事例（各種ステンレス鋼）と対策

材料	使用年数	系の最高温度 (°C)	塩化物イオン濃度	pH	酸化剤	備考	対策
SUS316L (17Cr-12Ni-2Mo)	2	100	50ppm (%オグーの可能性あり)	弱酸	—	有機塩化物多い	SUS444 (19Cr-2Mo)フェライト系ステンレス
SUS316L	3	90	0.2重量%	6	—	—	SUS329J1L (25Cr-5.5Ni-1.5Mo) : 2相系
SUS329J4L (25Cr-7Ni-3Mo-0.15N) :2相系	0.5	285	0.1ppm(析出スケール中では14%)		酸素以外	塩の濃縮激しい	Alloy825(21Cr-42Ni-3Mo-2Cu-Ti) : Ni基合金

また、材料選定以外の SCC の防止方法としては、たとえば、溶接構造体の残留応力を低減するために、熱処理による応力緩和が有効な手段となる。十分な効果を得るには、800~900°Cの温度域で熱処理を施すことが望ましい。ただし、高温での熱処理は、大型構造物に適用することは難しい場合が多く、それより低い温度で熱処理することもある。但し、600°Cから 700°C付近の温度域で熱処理すると、前述したように、溶接熱影響部で粒界腐食を発生する場合があるので（鋭敏化）、鋼中炭素濃度を低減させた低炭素ステンレス鋼、あるいは Ti、Nb といった元素を添加した安定化ステンレス鋼以外では、このような熱処理は避けるべきである。また、表面に圧縮応力を付与することによって、耐 SCC 性の向上を図ることができる。たとえば、ステンレス鋼表面にショット粒子を投射することによって、耐 SCC 性を改善することができる²²⁾。

なお、本稿では、最も応力腐食割れ発生事例の多い塩化物溶液中での TGSCC について述べたが、他の環境の TGSCC については、優れた解説書が多数、出版されているので、それらを参照していただきたい¹⁵⁾。

5. おわりに

前述したように、世界の腐食コストは 2.5 兆 US ドルと算出されており、この金額を 2013 年の US ドル/円の為替レートを 97.5957 円/US ドルとして計算すると、243 兆 9893 億円もの巨額な腐食コストとなる。したがって、適切な防食方法の適用によって、腐食コストを低減することは巨額な腐食対策費を最適化できる経済的に重要な技術分野である。本稿では、炭素鋼の腐食挙動に及ぼす環境の影響、大気腐食での鉄さびの影響（耐候性鋼）とステンレス鋼で問題となる局部腐食（孔食、すきま腐食、粒界腐食、SCC）の基礎について記述したが、本稿が腐食コストの最適化の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 腐食コスト調査委員会, 「わが国の腐食コスト」, 腐食防食協会, 日本防錆技術協会 (2020) .
- 2) 腐食コスト調査委員会, 「わが国の腐食コスト」, 腐食防食協会, 日本防錆技術協会, CD-ROM, (2020)
- 3) 腐食コスト調査委員会, 材料と環境, 69, 283 (2020) .
- 4) NACE International, International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study (IMPACT) , (2016) .
- 5) 三沢 俊平, 防錆管理/1994-11, p408~416.
- 6) U. R. Evans, Corrosion Science, 9 (1969) 227.
- 7) U. R. Evans and A. A. Taylor, Corrosion Science, 12 (1972) 277.
- 8) 材料環境学入門, 社団法人 腐食防食協会, 東京 (1993) .
- 9) 大塚 俊明, 第 211・212 回西山記念技術講座, 金属の界面腐食科学の進歩と今後の展望, “「鉄錆」の構造と耐食機構に関わる最近の進歩と今後の展望, (2012) p3~21.
- 10) 日本製鉄株式会社 耐食性鋼板カタログ A110_03_202112f, p.6.
- 11) 紀平 寛, 伊藤 叡, 坂下雅雄, 佐藤妃奈, 金子道郎, 長澤 慎, 材料と環境, Vol.71, No12 (2022) p.381-392.
- 12) R. J. Schmitt and C. X. Mullen, ASTM STP, No454 (1969) p.124.
- 13) ステンレス鋼の科学と最新技術—ステンレス鋼 100 年の歩み—, ステンレス協会, 細井祐三監修, 2011 年.
- 14) 例えば, 腐食防食ハンドブック CD-ROM 版第 2 版, 腐食防食協会, (2005) .
- 15) A. J. Sedriks, Corrosion of Stainless Steels, (1996) .
- 16) 例えば, ステンレス鋼便覧 第 3 版, ステンレス協会, (1995) p276.
- 17) 小若正倫: 新版 金属の腐食損傷と防食技術, アグネ承風社, 東京 (1995) .
- 18) 水使用ステンレス熱交換器使用実績データ処理分科会: 防食技術, 29 (1980) , p.354.
- 19) R. F. Steigwald, A. P. Bond, H. J. Dundas and E. A. Lizlovs, Corrosion, Vol.33, (1977) , p279.
- 20) 鈴木隆志, 長谷川博一, 渡辺三雄, 日本金属学会誌, 32 (1968) 1171.
- 21) 塩化物 SCC 対策鋼使用実績データ集, 平成 9 年 4 月, 化学工学会 化学装置材料委員会 腐食分科会
- 22) K. Fassler, in Korrosionum, H. Grafen, F. Kahl, and A. Rahmel, eds., Vol.1, Verlag Chemie GmbH, Weinheim/Bergstrasse, West Germany, p.136, 1974.

<略歴>

金子道郎 (かねこ みちお)

1987 年 九州大学大学院 応用原子核工学科 修了
1987 年 新日本製鐵株式会社 入社
1985 年~87 年 米国ブルックヘブン国立研究所 客員研究員
2000 年 九州大学 工学部 応用原子核工学科 博士 (工学)
2021 年 日本製鐵株式会社 材料信頼性研究部 耐食材料担当
現在に至る