エネルギー関連機器材料の材質設計に基づく耐食性の向上*

—メタルダスティング及び水素環境脆化—

工 藤 赳 夫**

** 住友金属工業株式会社 総合技術研究所

Improvement in Corrosion Resistance by Alloying Design for Equipments Related to Energy Systems*

—Metal Dusting and Hydrogen Environment Embrittlement—

Takeo Kudo**

** Corporate Research and Development Laboratories, Sumitomo Metal Industries Ltd.

Two cases are presented on improvement in corrosion resistance by alloying design for equipments related to energy systems. Metal dusting, which is often encountered in CO containing gas environments, is a prominent corrosion problem for the equipment of GTL (gas to liquid) process. The resistance to the metal dusting is remarkably increased by Cu addition to a Ni-base alloy in addition to the high Cr content for the formation of the protective oxide film which acts as a barrier against the CO gas, because the added Cu, which is prone to segregate on the alloy surface, prevents dissociation of the adsorbed CO molecule and therefore the C entry at the defect sites of the oxide film.

Highly pressurized hydrogen is one of the most effective media for storage and transport of hydrogen for fuel cells. However, the pressurized hydrogen causes various materials to suffer hydrogen environment embrittlement (HEE). The susceptibility to the HEE of 300 series of austenitic stainless steels largely depends on the degree of deformation-induced martensitic transformation at the crack tip. Therefore, the high resistance to the HEE is obtained by the alloying design which minimizes its transformation in the austenitic stainless steels.

Key words : metal dusting, gas to liquid, Ni-base alloy, oxide film, segregation, hydrogen environment embrittlement, hydrogen gas, stainless steel, deformation-induced martensite, fatigue

1. はじめに

3E (Economic Growth, Energy Security and Environment Protection) の同時達成は人類の願いであり、それに向けて新エネルギー技術や省エネルギー技術の開発が鋭意進められている。エネルギー関連の機器材料は過酷な環境で使用されることが多く、その耐食性が機器の寿命を決することも少なくない。本報告では、最近注目されたエネルギー技術分野で、筆者が参画した研究開発2件について紹介する。いずれも材質設計により耐食性が著しく向上した事例である。

2. GTL プロセス材料のメタルダスティング

2.1 背景

天然ガスを原料とし、 H_2 と CO からなる合成ガスに転換した後、FT 合成法 (Fischer Tropsch) によって製造される灯油、軽油 (FT 合成油) を GTL (Gas to Liquids) とする。天然ガスから製造されるメタノール、DME (ジメチルエーテル) を含め、総称して GTL と呼ばれることもある。

GTL が注目されているのは大きくは次の2点である。

1) 天然ガスの輸送手段

パイプライン輸送、LNG 輸送に続く第三の輸送手段であり、また海上輸送、受け入れ基地が LNG に比べて容易で安価である。そのためガス田規模が LNG に比べて小さくても経済的に成り立つとされている。

2) 石油に代わるクリーンな液体燃料

天然ガスから製造される FT 合成油は硫黄分をほとんど含まず、芳香族分が非常に少ないという特徴がある。ディーゼル車の PM (Particulate Matter, 粒子状物質) の低減対策として FT 軽油の利用が期待されている。

1990 年代後半に高まった GTL プロジェクトに対する関心は、現在は低下しているものの、地道な技術開発は継続して進められている。その GTL プロセスにおいて合成ガス製造装置のメタルダスティングが解決すべき重要な腐食問題となっている。

2.2 メタルダスティング現象

メタルダスティングは CO や炭化水素を含む浸炭性ガス雰囲気中、400~800℃ の中間温度で生じる減肉現象で、孔食状に進行する場合が多い。図1に C 含量に関する反応式の平衡定数を示す¹⁾。CO ガスでは低温ほど K が大きい、すなわち浸炭性が強くなるのが中間温度域でメタルダスティングが生じやすい一因である。

ステンレス鋼あるいは Ni 基合金のメタルダスティングの発生、成長を模式的に図2に示す²⁾。合成ガスはスピネル型酸化物 M_3O_4 ($M = Fe, Mn, Cr$) や Cr_2O_3 が生成し得る酸素ポテンシャルを有しており、生成した酸化皮

* 材料と環境 2010 (東京, 2010 年) で協会賞受賞講演

** 〒660-0891 尼崎市扶桑町 1 番 8 号 (1-8, Fuso-cho, Amagasaki, 660-0891 Japan)

図1 C 活量に関する反応式の平衡定数の温度依存性

図2 ステンレス鋼および Ni 基合金のメタルダスティング発生・成長の模式図

膜が健全であれば浸炭は防止される。しかし皮膜に割れ、剥離が生じると、その欠陥部に解離吸着した C が侵入し、炭化物を生成、さらにはグラファイトを析出、内部に成長していくことで、Fe-Ni 相を脱落させながらメタルダスティングは進行する。腐食部では触媒性コークが気相に向かって成長している（コーキング）のが特徴である。またメタルダスティングが生じた部位を拡大して見ると図3に示すように、グラファイトはピット/母材界面に垂直にラメラ状に析出しているのが観察される。筆者らは、C 侵入により表層近傍のマトリックス相の固溶 C が過飽和となり、その C 過飽和相から、過飽和度が駆動力となって、共析反応によってグラファイトが直接析出するというモデルを提案している²⁾。

図3 20Cr-60Ni 鋼のピット状腐食/母材界面の SEM 観察 (650°C×80 サイクル (4000 h 加熱相当))

次節の内容を容易に理解して頂くために、メタルダスティング現象について簡単に触れた。詳細はすでに本誌に解説¹⁾があるので、参考にして頂きたい。

2.3 Cu 活用による耐メタルダスティング性の向上

図2からも分かるように、メタルダスティングの防止には1) 保護性酸化皮膜の形成によるガス遮断、2) 金属表面での CO ガスの解離吸着の抑制、が考えられる。従来の防止対策は主に1) に拠っている。図4に示すように、Cr, Ni 量の増加と共に、メタルダスティングの抵抗性は高まる³⁾。酸化皮膜の保護性を高める元素として Cr 以外に、Al, Si が有効であることも明らかにされており、合金元素の効果を Cr 当量で表す試みもなされている^{4), 5)}。しかし、酸化皮膜は長時間の使用で膜厚が増大すると、さらには熱サイクルの元では、割れや剥離を生じやすく、その欠陥部を起点としてメタルダスティングは生じる。ある潜伏期間を経て発生するのはそのためである。

酸化皮膜の欠陥部で、上記2) CO の解離吸着の抑制が実現できれば、耐メタルダスティング性はさらに向上することが期待できる。解離吸着を抑制する元素として、図5の結果から、Cu に注目した⁶⁾。図では純 Ni, 純 Cu を合成ガス模擬環境に曝した後の C の断面プロファイルを示している。Ni では表面および内部に向かって C の析出、成長があるのに対して、Cu では C の侵入は認められない。Cu は C の侵入および表面堆積を抑制する効果を有していることが分かる。そこで、実用合金系で Cu の影響を検討した。30Cr-Ni 系合金中の Cu, Si 量で整理した結果を図6に示すように、Cu, Si を適量添加すると、優れた耐メタルダスティング性が得られる⁷⁾。Si 添加量にもよるが、2~3%Cu の添加で予想以上の効果が

図4 60 vol%CO-26% H_2 -11.5% CO_2 -2.5% H_2O ガス中、650°Cにおけるピット発生に対する Cr 及び Ni の影響

図5 Ni 及び Cu の $\text{CO-H}_2\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 混合ガス中、 650°C に曝露後の C の断面プロファイル

図6 $\text{CO-H}_2\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 混合ガス、 650°C でのピット発生抑制に対する 30Cr-Ni 系合金中 Cu 及び Si の効果

認められた。しかし、この添加量で合金表面における CO の解離吸着を完全に抑制することは考え難い。

実は Ni-Cu 系合金で、Cu が表面偏析することが明らかにされている⁸⁾。本合金系においても Cu が表面偏析していることが想定されたため、その検証を試みた。前述したように、合成ガスはステンレス鋼に酸化皮膜を生成する環境であり、また C の堆積も生じる。そのため、C の堆積層/ Cr_2O_3 /母材、の 3 層構造を想定したモデルを立て、SPRing-8 の硬 X 線を用いた角度分解光電子分光法を用いて、酸化皮膜/母材界面における Cu の偏析を調べ

た。3 層構造モデルによって測定結果を矛盾なく説明できることを確認した上で、酸化皮膜/母材界面の母材側深さ方向の Cr, Ni, Cu, 3 成分についての原子比を整理した。20Cr-70Ni-2Cu 合金についての結果を図 7 に示す⁹⁾。光電子放出角度が小さくなるにつれて Cr の原子比が低下している。この事は表面近傍で Cr が減少していることを意味する。 Cr_2O_3 の生成による Cr 欠乏層の形成に基づくものである。逆に Cu は表面で原子比が高まっている。Cr 欠乏層での Cr 濃度のプロファイルを考慮し、また、Cu の表面偏析を単一原子層と仮定して、表面の Cu 濃度を求めると、母材 1.86 at% に対して、表面に 50.8 at% の Cu が存在していると見積もられ、 Cr_2O_3 /母材界面で著しく Cu 偏析が生じていることが確認された。2~3%Cu 添加でも耐メタルダスティング性が大きく向上したことに対し、この Cu 偏析の寄与は大きいものと思われる。

Cu が CO の解離吸着を抑制する作用について、電子論からの解釈として、DV-X α 法による第一原理分子軌道計算を試みた。図 8 は Fe および Cu に CO が近づく時の電子状態密度の変化を示している⁶⁾。bcc-Fe (100) 面上に CO 分子が平衡状態の距離 (0.57 Å) まで近づくと、CO 分子の 2π 反結合軌道と金属の d 軌道間で混成が起き、その結果、C-O 結合が弱まり、金属面で解離吸着する。それに対して、fcc-Cu (100) 面上では CO 分子が近づいた場合、CO 分子の 2π 反結合軌道は相互作用で分裂するものの、C-O 結合は保たれている。このように CO 分子の解離吸着は、金属 d 軌道から CO の 2π 反結合軌道への電子逆供与による C-O 結合の弱化によるものであると言え、金属のフェルミレベルが高いほど逆供与は生じにくくなる。

以上の知見に基づき、酸化皮膜によるガス遮断と解離吸着の抑制機能を組み合わせた、Cu 含有の高温耐食合金、30Cr-60Ni-1.5Si-2Cu (ASTM UNS No.N06696) を開発した。耐メタルダスティング材と言われている各種合金を比較に、長時間テストを行った結果、比較材には、時間の長短はあるが、すべてに腐食が発生したが、開発合金は 20,000 h 経過後も腐食の発生は認められておらず、良好な耐メタルダスティング性を確認した¹⁰⁾。

現在、インプラントテスト、利用技術の整備などがおこなわれており、近い将来の実用化が期待される。

図7 20Cr-70Ni-2Cu 合金の酸化皮膜/母材界面、母材側での光電子放出角度による Cr, Ni, Cu 比の変化 ($\text{CO-H}_2\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 混合ガス、 650°C 、300 s)

図8 遷移金属 (a) bcc-Fe(100), (b) fcc-Cu(100) と CO 分子の吸着反応による電子状態密度の変化

3. 高圧水素貯蔵用ステンレス鋼の水素環境脆化

3.1 背景

21 世紀は水素の時代になるとも言われており、水素利用技術の中核となる燃料電池の開発が進められている。水素は常温では気体であるため、その貯蔵に関してはガソリンなどの液体燃料のように容易ではなく、多量の水素を安全に輸送・貯蔵する技術開発が求められている。貯蔵方法には研究段階のものも含めていくつかあるが、その中で、まず最初に実用化されるのは圧縮水素ガスと液体水素であろう。

金属材料が水素により脆化することは良く知られており、ASTM では以下のように分類されている¹¹⁾。

- 1) 可逆的固溶水素脆化 (Internal reversible hydrogen embrittlement, IHE)：格子内に固溶した水素原子による脆化
- 2) 水素環境脆化 (Hydrogen environment embrittlement, HEE)：常温水素ガス環境における脆化
- 3) 水素反応脆化 (Hydrogen reaction embrittlement, HRE)：固溶水素が高压の気泡や水素化物を生成し起こる脆化

高压水素による脆化は 2) に属する現象である。

従来は常温水素ガス環境では材料表面に水素が接触しても解離が困難であり、水素吸収は起こらず、脆化は生じないと考えられてきた。しかし、NASA が 1960 年代後半に水素貯蔵タンクにき裂を生じる事故を経験し、それを契機に各種材料の水素環境脆化に関して体系的な研究が行われた¹²⁾。その後研究ニーズが少なかったなどの理由により研究は一旦沈静化した。最近、圧縮水素ガスが輸送・貯蔵の手段として注目されるに伴って、各種材料の水素環境脆化特性に関するデータの蓄積の必要性が考えられるようになった¹³⁾⁻¹⁵⁾。我が国においては 2003 年度から国家プロジェクト「水素安全利用等基盤技術開発」の水素用材料基礎物性の研究がスタートした。以下はその研究のうち、住友金属が実施した内容である。

3.2 加工誘起マルテンサイトの生成抑制による耐水素環境脆化特性の向上

高压水素ガス中の引張試験は、材料の機械的特性に及ぼす水素の影響を簡便に評価でき、各種材料の水素脆化感受性をスクリーニングする手法として極めて有用である。ただし、一般に水素脆化感受性はひずみ速度が小さいほど高まると言われているので、本研究では SSRT (Slow Strain Rate Test) を適用した。

SSRT により評価した、常温、45MPa 水素中での SUS304L, SUS316L, ならびに Al 合金 A6061-T6 (Al-Mg-Si 系) の脆化特性を図 9 に示す¹⁶⁾。縦軸は水素中と大気中の絞りの比であり、この値が大きいほど水素による絞りの低下が少ないことを示す。SUS316L および Al 合金が脆化を示さないのに対して、SUS304L は 10^{-4} s^{-1} 以下のひずみ速度で脆化した。ステンレス鋼種による脆化特性の違いはオーステナイト組織の安定性によるものと考え、300 番台のオーステナイト系ステンレス鋼の脆化特性に及ぼす化学組成と試験温度の影響を、 Md_{30} (30%の加工により 50%のマルテンサイトが生成する温度, $^{\circ}\text{C}$)¹⁷⁾ で整理して図 10 に示す¹⁶⁾。 Md_{30} はオーステナイト組織の安定度を示す。 Md_{30} が高くなるほど、また試験温度が低いほど相対絞りは低下した。また、図中矢印

図9 水素環境脆化感受性に及ぼすひずみ速度の影響(45MPaH₂, 常温)

図10 水素環境脆化感受性に及ぼす Md_{30} の影響 (45 MPaH₂, 常温, ひずみ速度 $3 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$)

図11 水素環境脆化感受性に及ぼす加工誘起マルテンサイト量の影響 (45 MPaH₂)

で規格成分のおおよその Md_{30} の範囲を示すが, SUS316 あるいは SUS316L は規格範囲内であっても, 成分の違いによって脆化特性が大きく変化することには注目すべきである。

図11はSSRT試験後, 試験片表面の加工誘起マルテンサイト (α') をX線回折により測定した値を横軸にして, 図10の相対絞りを整理したものである¹⁶⁾。試験温度に関わらず, α' 相の生成量と相対絞りの間には相関が認められ, 脆化の主要因が α' 相の生成であることが示唆される。

Md_{30} が常温より十分低く, 常温での加工では α' 相を生成しない SUS316L について, あらかじめ低温で加工し, α' 相を生成させた試験片 (黒丸印) を用いて, 常温の水素中で評価した結果を図12に示す¹⁸⁾。縦軸は真破断応力で整理している。30%を超える α' 相が存在していても脆化を示さないことから, あらかじめ存在する α' 相は脆化に対して大きな影響を持たないことが分かる。詳細な機構は今後の研究に待たねばならないが, き裂先端での α' 相の生成が, 連続した進展経路を与えるためにも, 必要条件と考えている。

300番台のオーステナイト系ステンレス鋼の溶接金属には, 凝固割れ防止の観点から, δ -フェライトが数%含まれることが多いが, その場合も, 20%以下の含有であれば, 脆化に対して δ -フェライトの影響はなく, 脆化は主にオーステナイト組織の安定性 (Md_{30}) によって決定されることが明らかにされている¹⁹⁾。この事実もき

図12 真破断応力に及ぼすマルテンサイト量の影響 (45 MPaH₂, 常温)

図13 応力振幅と破断寿命の関係

裂先端での α' 相の生成の重要性を支持するものであろう。

現実には水素圧の変動による疲労が重要な課題である。水素のガス圧力を変動させる試験では試験サイクルの短縮には限界があるため, ここでは管状試験片を用い, 内部の水素圧を一定にし, 外面の水圧を変動させる外圧疲労試験を実施した。管軸方向に半楕円の切欠きを設け, 切欠きから進展したき裂が外面に貫通した時点を経過寿命と定義した。図13にSUS316L, SUS304, Al合金A6061の応力振幅と疲労寿命の関係を示す¹⁶⁾。SUS316LとA6061では水素中とアルゴン中の疲労寿命の差は小さいのに対して, SUS304は水素中ではアルゴン中に比べて寿命が低下し, 特に長寿命域での低下が著しい。SUS304に関しては, 前述のSSRTと同様に, 疲労試験中に α' 相が生成し, この相が水素により脆化することが, 水素中でき裂進展が加速された主要因と考えられる。Al合金A6061の寿命がSUS316Lに比べて短い理由は弾性係数が低く, 疲労き裂の進展速度が速いことが原因である。

サイクルタイムの影響も調査し, SUS316Lではサイクルタイムの影響は認められないのに対して, SUS304ではサイクルタイムの増加に伴い, 疲労寿命が低下する結果を得ている¹⁶⁾。

3.3 安定オーステナイト系ステンレス鋼の耐食限界水素濃度

SUS316L, SUS304Lの相対絞りおよび相対破断伸びに

図 14 相対絞りおよび相対破断伸びに及ぼす水素圧の影響

図 16 推定表面水素濃度の水素圧依存性

図 15 水素脆化感受性に及ぼす推定表面水素濃度の影響

及ぼす水素ガス圧の影響を図 14 に示す²⁰⁾。SUS316L では 90MPa でも水素による絞りや破断伸びの低下は認められなかったのに対し、SUS304L では 10 MPa でも低下し、試験片の側面にはサブクラックが観察された。この相違は、すでに述べたように、 α' 相の生成有無によるものと考えられる。ここでオーステナイト組織が安定な SUS316L の耐食限界水素濃度を明らかにするため、より高い水素濃度を付与できる陰極水素チャージ法も併用して検討した。高圧水素ガス環境では解離吸着した水素原子が吸蔵されるのに対して、陰極水素チャージでは還元された水素原子が吸蔵されるという違いはあるものの、鋼中の水素は同一の挙動をすると思なすことができる。ところで、fcc 構造のオーステナイト系ステンレス鋼中の水素の拡散は極めて遅いため、通常の試験期間では試験片内部までは水素は浸透せず、試験片の厚さ方向に濃度分布を持って吸蔵されている。そのため鋼表面の水素濃度を用いて、水素脆化を定量的に整理することを試みた。その際、表面水素濃度は、水素の拡散係数、曝露時間ならびに吸蔵水素濃度の実測値から計算によって求めた²¹⁾。なお、このようにして求めた表面水素濃度は曝露時間に関わらず、一定であることを確認している。

SUS304L および SUS316L の脆化に及ぼす推定表面水素濃度の影響を図 15 に示す²⁰⁾。SUS304L の限界水素濃度が 10 ppm 以下であるのに対して、オーステナイト組織が安定な SUS316L はその 10 倍以上の約 100 ppm が限界水素濃度となり、 α' 相の生成有無が極めて大きい影響を持つことが分かる。

表面水素濃度の水素圧依存性を図 16 に示す²⁰⁾。燃料電

池自動車の航続距離をガソリン車並みの 500 km 以上にするためには 70 MPa にする必要があると言われている。常温、70 MPa での表面水素濃度は約 20 ppm であり、SUS316L の耐食限界水素濃度約 100 ppm に比べて十分小さい値であることが分かる。

本研究は NEDO「水素社会構築共通基盤整備事業」プロジェクトにおいて実施したものであり、得られた知見は水素材料に関する例示基準に反映されている。

4. おわりに

適切に材質設計することによって耐食性が向上する例として、GTL プロセス装置材料のメタルダスティングならびに高圧水素貯蔵用ステンレス鋼の水素環境脆化について紹介した。前者では保護性酸化皮膜に加えて、合金表面に偏析する Cu を活用した、CO の解離吸着抑制による耐食性の向上を、また後者では 300 番台のオーステナイト系ステンレス鋼において、き裂先端での加工誘起マルテンサイトの生成を抑制する成分設計によって、水素環境脆化への抵抗性が著しく向上することを示した。

本稿が読者の参考になれば幸甚である。

終わりに、ここに紹介したメタルダスティングおよび水素環境脆化の研究は、それぞれ住友金属工業(株)総合技術研究所西山佳孝博士ならびに同大村朋彦博士の主導の元に行われたことを記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Y. Nishiyama, *Zairyo-to-Kankyo*, **56**, 84 (2007).
- 2) Y. Nishiyama, T. Kudo and N. Otsuka, *Mater. Trans*, **46**, 1890 (2005).
- 3) Y. Nishiyama, N. Otsuka and T. Kudo, *Corros. Sci.*, **48**, 2064 (2006).
- 4) R. C. Schueler, *Hydrocarbon Process*, p.73 (1972).
- 5) S. B. Parks and C. M. Schillmoller, *Ammonia Plant Safety & Related Facilities*, **37**, 220 (1997).
- 6) Y. Nishiyama, K. Moriguchi, N. Otsuka and T. Kudo, *Materials and Corrosion*, **56**, 806 (2005).
- 7) Y. Nishiyama and N. Otsuka, *Mater. Sci. Forum*, **522-523**, 581 (2006).
- 8) P. R. Webber, C. E. Rojas and P. J. Dobson, *Surface Science*, **105**, 20 (1981).
- 9) T. Doi, K. Kitamura, Y. Nishiyama, N. Otsuka, T. Kudo, M. Sato, E. Ikenaga, S. Ueda and K. Kobayashi, *Surf. Interface Anal.*, **40**, 1374 (2008).
- 10) Y. Nishiyama, N. Otsuka, S. Matsumoto and H. Matsuo, *CORROSION2009*, Paper No.09157, Houston TX, NACE (2009).

- 11) H. R. Gray, ASTM STP 543, 133 (1974).
- 12) R. P. Jewett, R. J. Walter, W. T. Chandler and R. P. Frohberg, NASA CR-2163 (1973).
- 13) S. Fukuyama, L. Zhang, M. Wen and K. Yokogawa *J. Jpn. Inst. Met.*, **67**, 157 (2003).
- 14) S. Fukuyama, D. Sun, L. Zhang, M. Wen and K. Yokogawa, *J. Jpn. Inst. Met.*, **67**, 456 (2003).
- 15) S. Fukuyama, L. Zhang and K. Yokogawa, *J. Jpn. Inst. Met.*, **68**, 62 (2004).
- 16) T. Omura, M. Miyahara, H. Senba, M. Igarashi and H. Hirata, *J. High Press. Inst. Jpn.*, **46**, 205 (2008).
- 17) T. Angel, *J. Iron Steel Inst.*, **177**, 165 (1954).
- 18) T. Omura, K. Kobayashi, M. Miyahara and T. Kudo, *Zairyo-to-Kankyo*, **55**, 139 (2006).
- 19) T. Omura, H. Hirata, M. Miyahara and T. Kudo, *Zairyo-to-Kankyo*, **57**, 30 (2008).
- 20) T. Omura, K. Kobayashi, M. Miyahara and T. Kudo, *Zairyo-to-Kankyo*, **55**, 537 (2006).
- 21) J. Crank, *The Mathematics of Diffusion*, Second Ed., Clarendon Press, Oxford, p.74 (1975).

(2010年8月19日受理)

要 旨

エネルギー関連機器材料の材質設計に基づく耐食性の向上について二例紹介した。COを含有するガス雰囲気ではしばしば生じるメタルダスティングはGTLプロセス装置材料にとって重要な腐食問題である。その防止には、COガスを遮断する、保護性の高い酸化皮膜を生成するために、Ni基合金中のCr量を高めることが必要であるが、それに加えて、Cu添加が極めて有効である。添加したCuは合金表面に偏析し、吸着CO分子の解離を抑制、その結果、酸化皮膜の欠陥部でのC侵入を抑制するためである。

高圧水素は燃料電池用水素の貯蔵・輸送にとって有効な媒体であるが、高圧水素はさまざまな材料に水素環境脆化を生じさせる。300番台のオーステナイト系ステンレス鋼の水素環境脆化感受性はクラック先端での加工誘起マルテンサイト変態の程度に大きく依存する。それ故、高い抵抗性はその変態を最小化する合金設計によって得ることができる。

キーワード メタルダスティング, GTL, Ni基合金, 酸化皮膜, 偏析, 水素環境脆化, 水素ガス, ステンレス鋼, 加工誘起マルテンサイト, 疲労