

水素ステーションで使用する鋼材研究の変遷と今後の展開

◇高圧水素による金属の「水素脆化」は、材料劣化を招く実用上の大きな課題である。本稿では、この課題に対し水素ステーションで安全に使用するための考え方や例示基準化について解説する。

◇水素社会の実現に向けた安全設計や材料選定には、複雑な水素脆化メカニズムに対応した定量的かつ直接的な水素適合性評価手法の確立が不可欠である。

◇水素ステーション用ステンレス鋼材 (SUS316 および SUS316L) の材料選定では、判断基準を従来の「絞り」から「伸び」へと変更することで安全性を確保しつつ、Ni 当量基準を 28.5%から 26.9%へと低減でき、汎用材の適用拡大を実現した。

◇水素ステーション用鋼材のコスト低減と調達性向上に向け、現行の Ni 当量 26.9%からさらなる低減を図るべく、より低い Ni 当量でも強度や延性、疲労特性を確保できる材料の検証が進められている。

1. はじめに

水素ステーションでの燃料電池自動車 (以下、FCV とする) への水素の充填は超高圧になる。そのため水素にさらされる金属材料に水素脆化という現象が生じ、機械的性質が低下する。この機械的性質の低下は材料劣化を招き、ひいては事故に繋がり、実用上の問題となる。

水素脆化とは、金属材料中に侵入した水素によって延性、靱性、疲労特性などが低下し、比較的低い応力状態でも割れや破断が生じやすくなる現象である。鉄鋼材料を中心に古くから知られてきたが、水素エネルギー利用、高強度鋼の適用拡大、インフラの長寿命化に伴い、現在も重要な研究課題であり続けている。

本稿では、SUS316 および SUS316L を鋼材例として、水素脆化という課題に対し、どのような考え方に基づいて水素ステーションでの安全な使用が実現され、例示基準化が進められてきたのかについて解説する。

1. はじめに
2. 水素脆化の機構
3. 例示基準化に必要な3要素
4. 水素ステーション用ステンレス鋼材の例示基準化
5. さらなる例示基準改正に向けて
6. おわりに

2. 水素脆化の機構

水素脆化の機構については、単一の理論ですべての現象を説明することは困難であり、材料の種類、応力状態、温度、ひずみ速度、水素圧力などに応じて支配的な機構が変化すると考えられている。そのため、水素脆化は複数の要因が相互に作用して発現する現象として理解されており、これまで様々な機構

が提案されてきた。代表的な水素脆化機構として、以下のものが挙げられる¹⁾。

- ① 内圧説 (Internal Pressure Theory)
- ② HEDE (Hydrogen-Enhanced Decohesion)
- ③ HELP (Hydrogen-Enhanced Localized Plasticity)
- ④ HESIV (Hydrogen-Enhanced Strain-Induced Vacancy)
- ⑤ 水素化物形成機構 (Hydride Formation)

水素社会の実現に向けたFCV、水素ステーション、蓄圧器、配管、継手、バルブ、圧縮機、水素輸送・貯蔵設備などの普及に伴い、水素環境における材料信頼性の確保がますます重要となっている。そのため、水素脆化に関する研究は、基礎的な脆化機構の解明と工学的評価手法の確立の両面から活発に進められている。これまでに提案されている各種機構は主として脆化現象の説明を目的としたものであり、材料の水素脆化感受性を直接かつ定量的に評価するものではない。このため、水素利用機器の安全設計や材料選定に資する定量的な水素適合性評価手法および評価基準の確立が重要な課題となっている。

3. 例示基準化に必要な3要素

水素ステーションで使用される蓄圧器、配管、継手、バルブなどの主要部材には、70MPa (約700気圧) 級の高圧水素環境でも安全に使用できる材料が求められる。また、水素ステーションの普及にはコスト低減が不可欠であり、汎用材の活用と一般高圧ガス保安規則例示基準への例示化が重要な課題となっていた。

例示基準に例示化された材料は一般申請による認可が可能であるが、未例示化の材料は個別の事前評価申請が必要となるため、多大な時間と費用を要する。このため、材料の例示基準化が強く求められていた。例示基準化には、①JIS等で標準化された材料であること、②設計に必要な許容引張応力が整備されていること、③水素適合性が確認されていること、の3要素が必要である。本稿では、①、②を満たす材料を使用することを前提とし、③の水素適合性に着目し、その判断基準の変遷と技術的背景について概説する。

4. 水素ステーション用ステンレス鋼材の例示基準化

4. 1 35MPa 水素ステーション

1990年代後半から2000年代初頭にかけて、自動車メーカーによるFCVの開発が本格化した。しかし、水素供給方法、水素ステーションの安全性、および関連法規・基準の整備は未確立の状況にあった。このような背景のもと、経済産業省は2002年度にJHFC (Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project、水素・燃料電池実証プロジェクト)を開始し、水素ステーションとFCVを組み合わせた大規模実証試験を推進した。

当時のFCVおよび水素ステーションの供給圧力は35MPaが主流であり、既存の高圧ガス技術を活用できることから、安全性の検証と社会実装が比較的容易であった。JHFCでは、水素利用技術の実証と制度整備を目的として、東京(千住、霞ヶ関、有明)、横浜、大阪などに35MPa水素ステーションが建設された。

35MPa 水素ステーション（図1）で使用される配管、継手などの材料については、水素脆化特性を評価する指標として疲労き裂進展速度試験（FCGR 試験：Fatigue Crack Growth Rate Test）が重要な役割を担った。FCGR 試験は、鋼材中に侵入した水素による疲労き裂進展速度（da/dN）を大気中と比較評価できる手法であり、機器・設備の寿命予測、許容欠陥寸法の設定、ならびに検査周期の決定に用いられる材料適合性評価試験である。

当時、配管や継手には耐食性、溶接性および機械的特性に優れたオーステナイト系ステンレス鋼が有力候補と考えられており、その中でも実績の豊富な SUS316L について水素適合性評価が実施された。その結果、図2に示すように、水素環境における疲労き裂進展速度は大気中と同等であることが確認された²⁾。これを受けて、SUS316L は35MPa 水素ステーション用ステンレス鋼材として一般高圧ガス保安規則例示基準（2011 年4月2日第4次改訂版）に例示され、水素適合性材料として適用されることとなった。

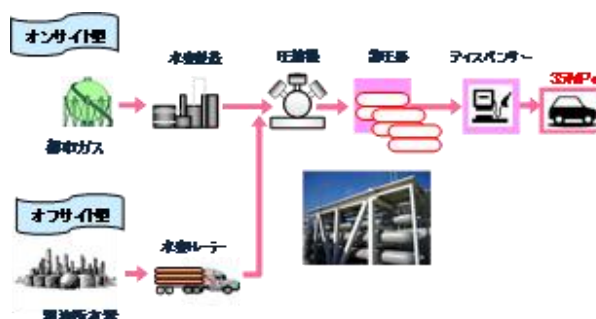


図1 35MPa 水素ステーションのイメージ図

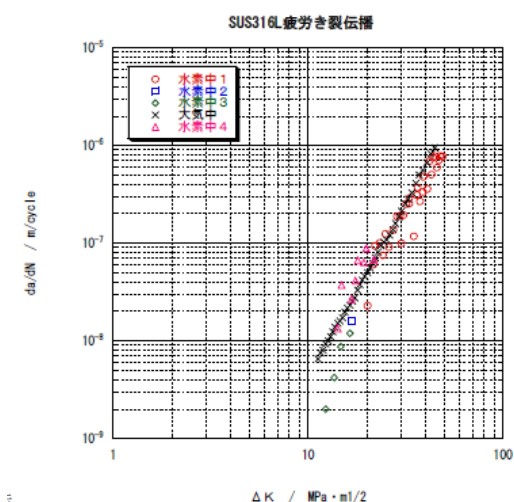


図2 SUS316L の疲労き裂進展速度特性

4. 2 70MPa 水素ステーション

地球温暖化対策の一環としてFCVの普及拡大が期待されている。FCVの本格普及には、ガソリン車と同等の600km以上の航続距離と、電気自動車より短くガソリン車と同等の時間での充填を実現することが求められ、そのため車載水素タンクの充填圧力は35MPaから70MPaへと高圧化された。

2011 年 1 月には民間 13 社による「燃料電池自動車の国内市場導入と水素供給インフラ整備に関する共同声明」が発表され、70MPa 水素ステーションの整備に向けた取組が本格化した。さらに 2012 年には、70MPa 水素ステーションの主要要件として、①1 時間当たり 6 台の FCV に対し 1 台当たり 5 kg の水素を約 3 分で充填できること、②充填時の車載タンク温度を 85℃以下に維持すること、が求められた。これらを実現するため、図 3 に示すように充填前の水素ガスを -40℃程度まで冷却するプレクール技術が導入された。35MPa 水素ステーションでは、前述のとおり SUS316L の水素適合性は FCGR 試験により確認され、例示基準化が進められていたものの、70MPa 水素ステーションでは、材料が高圧かつ低温の水素環境に曝されることとなり、従来とは異なる観点からの水素適合性評価が必要となった。

これまでに数多くの水素脆化研究が行われており、横川らは種々のステンレス鋼材について、室温では水素の影響が小さいものの、図 4 に示すように低温域では水素の影響が顕著になる（「絞り」が低下する）ことを報告している³⁾。この結果は、70MPa 水素ステーションで想定される低温水素環境において、従来の FCGR 試験のみに基づく評価では十分でない可能性を示唆するものであった。70MPa 水素ステーションで使用する材料の安全性を確保するため、水素脆化感受性を評価する新たな水素適合性判断基準の策定が求められることとなった。

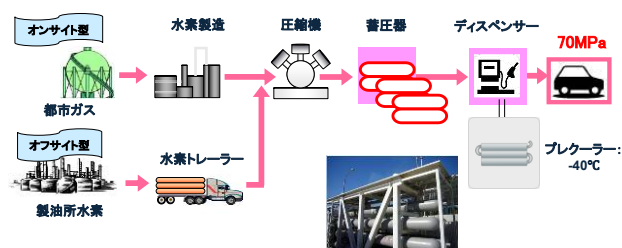


図 3 70MPa 水素ステーションのイメージ図

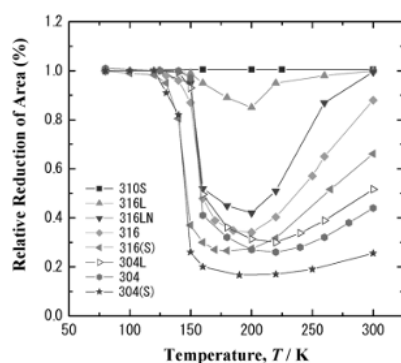


Fig. 2 Effect of temperature on relative reduction of area of type 316 series stainless steels in 1.1 MPa hydrogen and helium at low temperatures. 304 solution-annealed 304 stainless steel, 304(S) sensitized 304 stainless steel, 316 solution-annealed 316 stainless steel and 316(S) sensitized 316 stainless steel.

図 4 各鋼種における低温水素脆化特性

平成 24 年 5 月に米国の水素ステーションにおいて適切でない金属材料の使用に起因する水素漏洩事故が発生したことを契機として、日本では水素脆化に対する安全性が確認された材料から順次例示基準

化を進める方針が示された⁴⁾。このため、高圧水素環境で使用可能な材料を合理的に判定する水素適合性評価基準の整備が求められた。このような背景のもと、小林らは低ひずみ速度引張試験（SSRT 試験：Slow Strain Rate Tensile Test）の既往データを解析し、低温における機械的性質低下の主要因として加工誘起マルテンサイトに着目した。そして、オーステナイト安定度の指標である Ni 当量を用いた水素適合性評価基準を提案した⁵⁾。Ni 当量の算出には、材料規格に規定される化学成分のみから求めることが可能な平山の式（式1）が用いられた⁶⁾。

$$\text{Ni 当量 (wt\%)} = 12.6C + 0.35Si + 1.05Mn + Ni + 0.65Cr + 0.98Mo \quad \text{式1}$$

SSRT 試験は、高圧水素環境と不活性ガス環境における引張特性を相対的に評価する試験法である。評価項目には、耐力（YS）、引張強さ（TS）、伸び（EL）、および絞り（RA）があるが、このうち絞りが最も水素の影響を受けやすいことが知られている。そこで小林らは、水素脆化への感受性を評価する指標である相対絞り（RRA）が1に近い材料では他の引張特性も水素の影響をほとんど受けないことに着目し、RRA を水素適合性評価の指標として採用した。SUS316 および SUS316L について、種々の水素圧力および試験温度で得られた SSRT 試験データを解析した結果、Ni 当量と RRA の関係を整理した図5を作成するとともに、絞りを指標とした水素適合性判定式（式2）を導出した。さらに、ミルシートの化学成分から算出した Ni 当量より RRA を推定できる定式（式3）も提案された。

$$(\text{引張試験またはミルシートの絞り}) \times \text{RRA} \geq \text{規格の絞り 60\%} \quad \text{式2}$$

$$\text{RRA} = 0.6 + 0.4 \times \tanh [(\text{Ni 当量} - 27.76) / 1.339] \quad \text{式3}$$

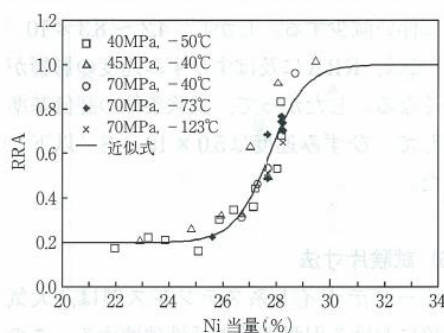


図5 -40℃における Ni 当量と RRA の関係

ミルシートの実態調査の結果、材料の RA の実力値は75%以上であることが確認された。式2に示す水素適合性の判定基準は、SUS316/SUS316L の JIS 規格に規定される RA の下限値である 60%とし、これを下回らないことを条件とした。RA 60%を満足するために必要な RRA は0.8 以上となる。また、式3より、 $\text{RRA} \geq 0.8$ となる条件は Ni 当量 28.5%以上に相当することから、-40℃における水素適合性の判定基準を Ni 当量 28.5%以上とした。

これらの成果を受け、図6に示すように一般高圧ガス保安規則例示基準（2013年3月22日第6次改訂版）で常用の温度域に対するNi当量が例示され、配管や機械継手などの材料が一般申請による認可対象となった。その結果、70MPa水素ステーションの建設が本格的に進展した。

一方、当時の例示基準は適用温度および圧力範囲が限定されていたため、適用範囲の拡大が求められた。そこでJPECは、NEDO事業「水素ステーション用金属材料の鋼種拡大に関する研究開発」（2013～2017年度）に参画し、国立大学法人九州大学および高圧ガス保安協会と共同でSSRT試験データの拡充と解析を実施した。その結果、図7に示すように適用温度範囲の拡大および常用圧力範囲の見直しが行われ、一般高圧ガス保安規則例示基準（2015年5月22日第7次改訂版）で拡大後のNi当量が例示された。

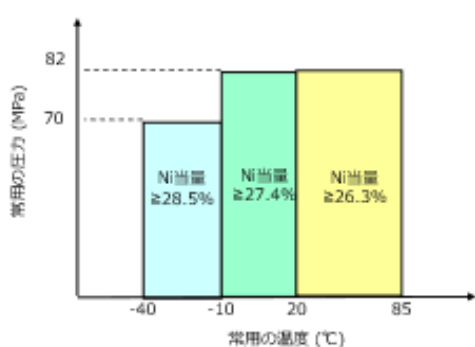


図6 一般高圧ガス保安規則例示基準
第6次改訂版

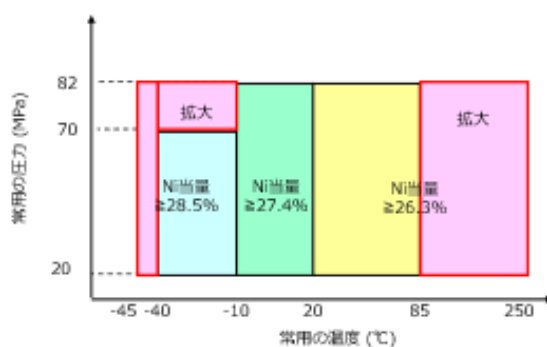


図7 一般高圧ガス保安規則例示基準
第7次改訂版

第7次改訂版により適用範囲は拡大したものの、SUS316/SUS316Lには、図8に示すように依然としてNi当量28.5%以上のハイエンド材の要求が残されていた。Ni当量28.5%材は高Ni組成であることから、コストや納期の面で課題があり、水素ステーションのさらなる普及に向けては、より汎用的な材料への適用拡大が求められていた。そこでJPECは、NEDO事業「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業」（2018～2022年度）に参画し、国立大学法人九州大学の取得したデータを解析し、水素適合性評価手法の高度化とNi当量基準の合理化に取り組んだ。その結果、新たな水素適合性判断基準の検討が進められ、Ni当量基準見直しへの道筋が示されることとなった。

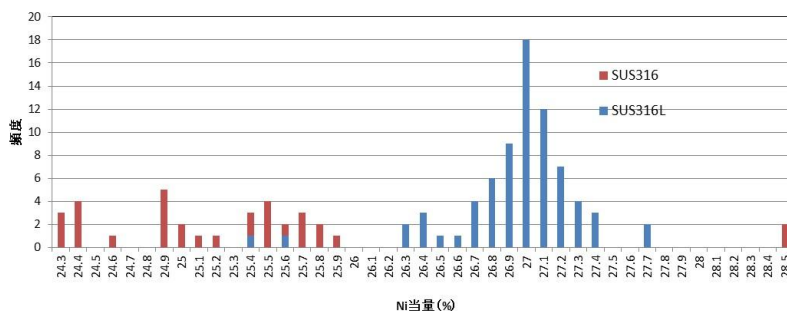


図8 SUS316/SUS316LのNi当量と頻度分布（JPEC調べ）

従来の水素適合性判断基準は、SSRT 試験における RA を指標としていた。RA は水素の影響を最も鋭敏に検出できる指標である一方、水素脆化に対して安全側の評価となるため、適用可能な材料範囲が限定される課題があった。そこで NEDO 事業では、水素環境における材料特性をより合理的に評価し、安全性の確保と適用材料範囲の拡大を両立する新たな指標として EL に着目した。以下では、EL を用いた水素適合性判断基準の考え方と、その妥当性について述べる。

(1) EL のデータの扱いに関する検証

新たな水素適合性判断基準の検討にあたっては、既報文献を含む多数の SSRT 試験データを活用することが望ましい。しかし、SSRT 試験における EL の測定方法には、試験片の標点間距離から求める方法と、ストローク変位から求める方法の 2 種類が用いられていた。そこで、多数の試験結果について両者の伸びを比較した結果 (図 9)、両測定方法で得られる伸びには良好な相関が認められ、実用上は測定方法を区別する必要がないことが確認された。これにより、既存の文献データを含めた幅広い SSRT 試験結果を活用した水素適合性判断基準の検討が可能であると NEDO 事業では結論した。

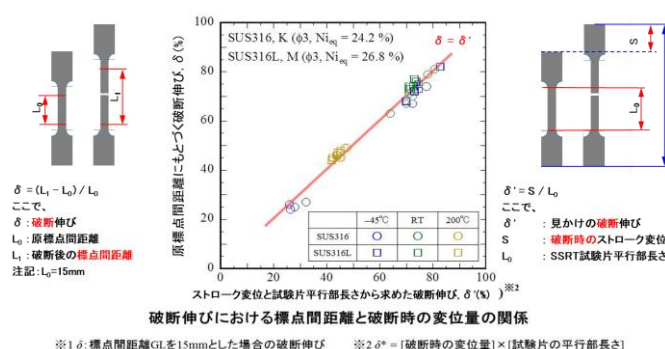


図9 SSRT 試験における標点間距離およびストローク変位から求められた EL の比較

(2) EL 指標における安全性の考え方

水素適合性の判断指標を RA から EL へ変更するにあたっては、使用材料には高圧水素環境での安全性確保が求められる。そこで、①強度の確保、②延性の確保、③疲労特性の確保を満足することを前提条件とした。

① 強度の確保：

高圧水素環境で強度が低下しないことを条件とし、実材料の引張強さとの相対比 (RTS) から評価した (式4)。

$$\text{実材料の引張強さ} \times \text{RTS} \geq \text{引張強さの材料規格値} \quad \text{式4}$$

② 延性の確保：

高圧水素環境においても材料規格値以上の伸びを有することを条件とし、相対伸び (REL) を用いて評価した (式5)。

$$\text{実材料の伸び} \times \text{REL} \geq \text{伸びの材料規格値} \quad \text{式5}$$

③ 疲労特性の確保：

高圧水素の影響による疲労限度の低下が認められないことを条件とした。

まず、強度および延性の確保について検討した。高圧水素環境において強度ならびに一様伸び（最大荷重点までの伸び）を確保できる Ni 当量について、SSRT 試験結果をベースに評価した。SSRT 試験データの解析結果から、Ni 当量 26.8% が下限と判断され、その代表例として Ni 当量 26.8% 材の応力—ひずみ線図を図 10 に示す。Ni 当量 26.8% 以上であれば、 -45°C の高圧水素環境においても安定した強度および延性を維持できることが確認された。

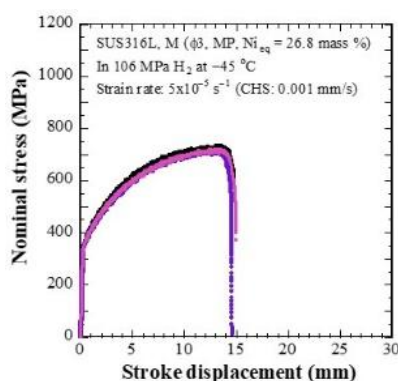


図 10 応力—ひずみ線図 (SUS316L : Ni 当量 26.8% -45°C)

一方、疲労特性については、 -45°C 、100MPa 超級の高圧水素環境で評価した事例は報告されていなかった。そこで、Ni 当量 26.8% の SUS316L を用い、室温および -45°C の高圧水素環境で疲労試験を実施した。結果を図 11 に示す。図中の矢印付きマーカーは未破断試験片を示している。 -45°C の高圧水素環境においても、Ni 当量 26.8% の SUS316L は応力振幅 270MPa で 141 万サイクルまで破断せず、大気中と同様な疲労限度を有することが確認された。また、試験後の表面観察においても疲労き裂の発生は認められず、破壊の起点となる欠陥は確認されなかった。以上の結果から、Ni 当量 26.8% 以上の SUS316L は、 -45°C の高圧水素環境においても十分な疲労特性を維持できることが示された。

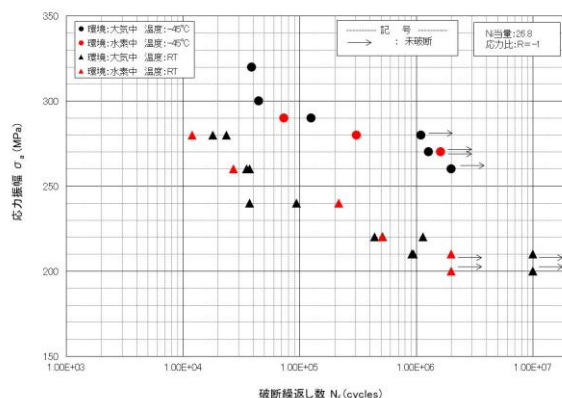


図 11 疲労試験結果 (SUS316L : Ni 当量 26.8% -45°C)

(3) 新指標の実効性に関する検討

前節までの検討により、 -45°C の高圧水素環境で使用可能な SUS316 および SUS316L 材料の要件として、Ni 当量 26.8%以上が必要であることを示した。一方、延性確保の条件として設定した式 5 は、伸びと Ni 当量の組合せによって満足されるため、その適用範囲は一意に定まらず、複数の条件設定が考えられる。

そこで、伸びを指標とした新たな材料基準が例示基準として導入されることを想定し、市中で流通する材料の実態調査結果を基に、安全性を確保しつつ入手性および実用性に優れた伸びと Ni 当量の組合せについて検討した。

まず、Ni 当量と REL の関係については、図 12 を基に小林らが提案した定式 (式 6) を用いた⁷⁾。この定式は、超高压ガス設備に関する基準である KHK S 0220 (2019)⁸⁾ に採用されており、Ni 当量から水素環境における延性低下の程度を推定することができるものである。

$$\text{REL} = 0.6 + 0.4 \times \tanh[(\text{Ni 当量} - 26.51)/1.49] \quad \text{式 6}$$

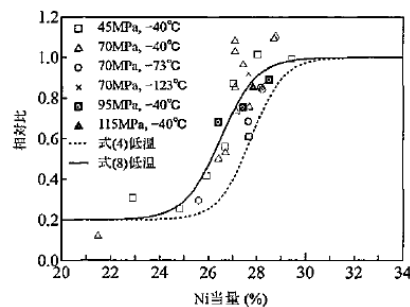


図 12 Ni 当量と REL の関係⁷⁾

次に、市中材の実態把握のため、実際に流通・使用されている SUS316 および SUS316L のミルシートを収集し、JIS G 4303、JIS G 4304 および JIS G 4305 に適合する 175 件のデータから、Ni 当量と EL の分布を解析した。

また、式 6 から求めた REL を用いて式 5 より必要な EL を算出し、Ni 当量と必要な EL の各組合せ (候補①～④) およびその組合せに適合する材料について算出した入手割合の検討結果を表 1 に示した。その結果、市中材の実態を踏まえると、Ni 当量と EL をバランスよく設定した候補③は入手割合 58%と最も高く、安全性と調達性の両立が可能な材料基準であることが示された。

表 1 -45°C における Ni 当量および伸びに適合した入手割合

	Ni 当量 (%)	EL (%)	入手割合 (%)
候補①	27.1	54	30
候補②	27.0	55	52
候補③	26.9	57	58
候補④	26.8	60	51

以上の検討結果から、候補③ (Ni 当量 26.9%、EL57%) は、-45℃の高圧水素環境において強度、延性および疲労特性を確保するとともに、市中材としての入手性も考慮した合理的な材料基準であることが示された。水素適合性を満足する Ni 当量の下限は 26.8%であることを確認したものの、実用面を考慮すると、Ni 当量 26.9%かつ伸び 57%を基準とする方が利便性に優れると判断された。

EL を水素適合性の判断指標とする妥当性については、小林らの検討⁵⁾においても確認されている。この検討結果は、SUS316/SUS316L の適用範囲拡大として、一般高圧ガス保安規則例示基準 (2024 年 7 月 1 日第 10 次改訂版) で例示された。

5. さらなる例示基準改正に向けて

これまで、水素ステーションで使用可能なオーステナイト系ステンレス鋼材を対象として水素適合性判断基準の見直しが進められ、Ni 当量の要求値は 28.5%から 26.9%へと低減された。Ni 当量 26.9%は市中で広く流通する材料レベルに相当し、水素ステーション用鋼材の適用範囲拡大に貢献した。

一方で、コスト低減や調達性向上の観点から、より汎用性の高い材料の適用拡大が求められている。このため、JPEC は NEDO 事業「競争的な水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業」(2023~2027 年度) に参画し、SUS316 系ステンレス鋼材を対象に、より低い Ni 当量においても高圧水素環境で強度、延性および疲労特性を確保できるかについて検証を進めている。これらの成果は、水素ステーション用鋼材の適用範囲拡大とコスト低減に寄与するものと期待される。

6. おわりに

本稿では、水素脆化機構の概要と、水素ステーション用オーステナイト系ステンレス鋼材の水素適合性評価、およびその成果を反映した材料基準の合理化について概説した。高圧水素環境下における評価結果に基づき、水素適合性判断基準の見直しが進められたことで、SUS316 および SUS316L ステンレス鋼材の適用範囲が段階的に拡大され、水素インフラの普及に大きく貢献してきた。

今後、水素社会の本格的な実現に向けては、安全性を確保しながら設備コストの低減と材料適用範囲のさらなる拡大を図ることが重要である。そのためには、水素脆化機構のさらなる解明、実使用環境を反映した評価技術の高度化、および科学的知見に基づく規格・基準の継続的な整備が不可欠である。これらの取り組みが進展することで、より安全かつ経済的な水素インフラの構築と持続可能な水素社会の実現が期待される。

謝辞

本ジャーナルの一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の事業において得られた成果を活用したものである。関係各位に謝意を表する。

(引用文献)

- 1) 南雲道彦：『水素脆性の基礎—水素の振るまいと脆化機構—』，内田老鶴圃。
- 2) 日本自動車研究所：JARI S 001(2004) 圧縮水素自動車燃料装置用容器の技術基準。

- 3) 福山 誠司、孫 東昇、張 林、文 矛、横川 清志：SUS316 型ステンレス鋼の低温における水素環境脆化に及ぼす温度の影響、日本金属学会誌、67 (9)、456-459 (2003) .
- 4) https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/koatsu_gas/pdf/007_10_00.pdf
- 5) 山田敏弘、小林英男：水素ステーション設備に使用する材料の選定基準、高圧ガス、49 巻 10 号、885-893 (2012) .
- 6) 平山俊成、小切間正彦：Fe-Cr-Ni 系ステンレス鋼のマルテンサイト変態に対する化学組成の影響、日本金属学会誌、34 (5)、507-510 (1970) .
- 7) 山田敏弘、小林英男：水素スタンド設備に使用するオーステナイト系ステンレス鋼の選定基準（高圧水素環境の SSRT の伸びの適用）、高圧ガス、56 巻 6 号、527-533 (2019) .
- 8) 高圧ガス保安協会：KHK S 0220 (2019) 超高圧ガス設備に関する基準、(2019)、付属書 E.

(免責事項)

- ・本ジャーナルに掲載されている内容は、一般的な情報提供を目的としており、特定の事案に対する助言や勧誘を意図するものではありません。掲載情報の正確性・完全性についてはその内容を保証するものではありません。
- ・本ジャーナルの情報を利用したことにより、直接または間接的に生じた損害について、発行者および関係者は一切の責任を負いません。利用にあたっては、読者ご自身の判断と責任において行ってください。
- ・本ジャーナルに掲載されている見解や意見は執筆者個人のものであり、必ずしも発行者の公式見解を示すものではありません。
- ・本ジャーナルに掲載されている文章、図表、画像等の著作権は、特に明記がない限り発行者または正当な権利者に帰属します。無断での転載、複製、改変、配布等のご遠慮ください。

(問い合わせ先)

一般財団法人カーボンニュートラル燃料技術センター 水素エネルギー部 jrepo-2@pec.j.or.jp

本 Journal の無断転載、複製を禁止します。

Copyright © 2026 Japan Petroleum and Carbon Neutral Fuels Energy Center all rights reserved.