

連携記事

水素ステーションへの低合金鋼適用拡大の取り組み

～水素ステーション用蓄圧器開発例と高圧水素ガス中の材料評価試験模擬検討例～
Expansion of Application of Low Alloy Steels to Hydrogen Filling Stations
～Examples of Development of Pressure Vessel for Hydrogen Filling Station and Investigation of Emulating Evaluation Technique for Mechanical Properties of Low Alloy Steel in High Pressure Hydrogen Gas～

JFEスチール(株)
スチール研究所
部長

高木周作
Shusaku Takagi

JFEスチール(株)
スチール研究所
主任研究員

松原和輝
Kazuki Matsubara

JFEスチール(株)
スチール研究所
主任研究員

岡野拓史
Hiroshi Okano

JFEスチール(株)
スチール研究所
研究員

西原佳宏
Yoshihiro Nishihara

JFEコンテナ(株)
シニアフェロー

高野俊夫
Toshio Takano

JFEスチール(株)
スチール研究所
研究員

野崎彩花
Ayaka Nozaki

1 はじめに

地球温暖化抑制のため、種々の取り組みが行われている。その一つとして、水素エネルギー社会の構築がある。日本は水素エネルギー社会構築に必要な水素製造・貯蔵・輸送・使用のそれぞれの分野で世界最先端の技術開発および実用化に向けた活動を行うとともに、毎年、水素閣僚会議¹⁾を主催し、世界の水素社会構築連携を主導している。

国内では、水素・燃料電池戦略ロードマップが策定され、2019年改訂版²⁾では2020年目標として水素ステーション160か所、燃料電池自動車(Fuel Cell Vehicle: FCV)4万台が目標とされた。2020年時点実績は、水素ステーションは135箇所開所³⁾し、目標に近い箇所数となっている。一方、FCVは4000台程度にとどまった。しかし、社会的に低炭素化を進める動きを鑑みると、今後はバス・トラック等の公共用や産業用を中心に普及が進むと考えられる。その動きを加速するためには、水素ステーション数を増加させ、水素充填の利便性を向上させる必要がある。水素ステーションの普及には、国内では4～5億円といわれているステーション建設コストの低減が必要であり、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)のプロジェクトでは、2013～2020年度に水素ステーション建設コストを2億円以下⁴⁾とする目標で種々の技術開発が行われており、現在も一部継続中である。

鉄鋼材料の観点では、水素ステーション機器への高強度低

合金鋼の適用の検討が進められている。低合金鋼は水素原子が鋼中へ侵入することで材質が劣化する水素脆化現象が発現するリスクがある⁵⁾。一般的に面心立方構造を有するオーステナイト系ステンレス鋼は水素脆化が発現しづらく、体心立方構造を有する低合金鋼は水素脆化が発現しやすい。水素脆化発現を回避するためにはオーステナイト系ステンレス鋼の使用が好ましいが、高コストであるため、低合金鋼の利用検討が行われている。鋼材中への侵入水素量が多いほど水素による材質劣化が大きくなるが、鋼中への水素の固溶量はSievertsの法則に従って決まる⁶⁾ため、水素圧力が高いほど材質劣化度合いが大きくなる。そのため、低合金鋼の水素ステーションへの適用は慎重に検討されてきた。従来の40MPa仕様水素ステーション(FCV充填圧35MPa)実用化時には、高圧ガス保安法一般高圧ガス保安規則(一般則)例示基準が改訂され、高圧水素ガスの蓄圧器に使用可能な低合金鋼として、安全検査を前提としてSCM435の使用が承認された。さらに商用化が本格化し82MPa(FCV充填圧70MPa)仕様水素ステーションの実用化時には、改めて一般則例示基準が改訂されたが、主としてオーステナイト系ステンレス鋼の適用範囲が規定された。同時期に、蓄圧器用途を主に低合金鋼の安全使用についても研究されたが、蓄圧器の設計や製造工程によって低合金鋼に対する水素脆化影響が変化するため、蓄圧器の実用化には一品毎に有識者により安全性が検証される事前評価申請の対象とされた。そのため、水素ステーション

用蓄圧器は受注から製造までの納期の長期間化と高コスト化が避けられなかった。NEDOの前記プロジェクトで、82MPa水素ステーション用蓄圧器用途を想定し、低合金鋼の安全利用を可能とするための技術基準（安全要件）を明確化することがテーマとされて、必要なデータ採取⁷⁾が行われた。その結果、現在では、水素蓄圧器等を対象として低合金鋼への安全要求が明確になり、水素ステーションの低コスト化につながっている。

本稿では、水素ステーションへの低合金鋼適用拡大の例として、JFEスチール（株）とJFEコンテナ（株）が共同で開発した低合金鋼を用いた水素蓄圧器^{8,9)}について紹介する。また、今後、さらに高圧水素分野への鉄鋼材料の適用拡大を目指し、NEDOプロジェクトで実施された、高圧水素ガス中での鋼材特性評価を簡便に行うための手法検討状況を簡単に述べる。

2 低合金鋼を用いた水素ステーション用蓄圧器

2.1 蓄圧器の役割と種類^{*}

水素ステーションでの機器構成例を図1に示す。ステーションでは、ステーション外部から運搬された水素ガスもしくはステーション内で製造された水素を圧縮機で昇圧して蓄圧器に圧力82MPa（約800気圧）で蓄え、圧力・温度を制御するディスペンサーを介して70MPa仕様FCV車載容器に水素を充填する。充填圧力を70MPaとすることで、FCVは乗用車ではガソリン車並みの航続距離を獲得している。水素蓄圧器に用いられる圧力を検討する際には、ガソリン車で燃料をフル充填するために必要な時間と同等の約3分で水素充填が完了できることを目標とし、安全検証を経て82MPaの蓄圧器が選定された経緯がある。蓄圧器からFCVに水素充填すると蓄圧器内の圧力が低下するため、次の充填に備えて蓄圧器に水素を追加昇圧する。そのため、蓄圧器には圧力変動が生じ、その変動に対して所定の回数まで破壊しない設計が必要である。先述のNEDOプロジェクトでは蓄圧器開発

目標として、高圧水素ガスの圧力変動回数10万回以上使用可能⁴⁾であることが要求された。

圧力容器には、図2に示すように、Type1からType4の4種類の様式がある。Type1は鋼製、Type2は鋼製ライナの胴部を炭素繊維強化型樹脂（Carbon Fiber Reinforced Plastics：CFRP）で補強したもの、Type3は金属（アルミ合金もしくは鋼）製ライナの全周をCFRPで補強したもの、Type4は樹脂ライナの全周をCFRPで補強したもの、である。日本ではType1からType3が水素ステーション用蓄圧器として使用され、Type4は軽量という特徴を活かし、車載用途に用いられている。Type1およびType2蓄圧器では圧力を鋼により保持しているが、Type3蓄圧器では圧力の大部分をCFRPに分担させ、アルミ合金もしくは低合金製のライナの機能はガスの透過を抑制することが主であるため薄肉設計となっている。そのため、Type3はType1、Type2と比較して軽量であり運搬が容易であるが、同一圧力変動範囲での蓄圧器使用可能回数は、Type1およびType2がType3より多いと考えられる。Type1からType3の蓄圧器の選択はステーションの運用条件によって異なると考えられる。

2.2 高強度低合金鋼を用いた水素ステーション用蓄圧器例

本節では高強度低合金鋼を用いた水素ステーション用蓄圧器の素材および構造の特長の例を述べる。

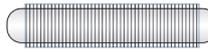
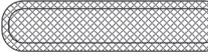
種類	Type1	Type2
素材	鋼	鋼 x CFRP(フープラップ)
模式図		
種類	Type3	Type4
素材	金属(Al or 鋼) x CFRP(フルラップ)	樹脂 x CFRP(フルラップ)
模式図		

図2 圧力容器の種類

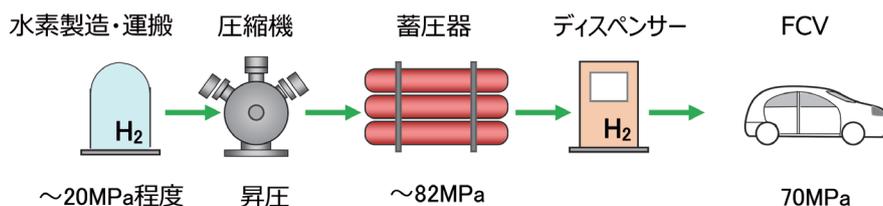


図1 水素ステーションの機器構成

^{*} 法規制上、Type1～Type4の呼称は容器保安規則（容器則）で規制される移動する容器に対して用いられる。定置式の蓄圧器は特定設備検査規則（特定則）で規制されるため、厳密には蓄圧器構造の呼称も異なると思われるが、本稿では一般に呼称されているType1～Type4という用語を用いる。

2.2.1 水素ステーション用蓄圧器に適用される高強度低合金鋼

水素ステーションの構成は多様であるが、ステーションで製造した、もしくは外部より受け入れた水素ガスを一旦40MPa程度の圧力に昇圧して蓄える蓄圧器と、その後、さらに82MPaまで昇圧して蓄える蓄圧器がある場合が多い。いずれの蓄圧器にもCr-Mo系の低合金鋼、具体的にはJIS-SCM435もしくはJIS-SNCM439が用いられる。しかし、水素ガスが金属材料表面に触れると、図3に示すように、金属材料表面で水素分子が水素原子に乖離し材料中に侵入する。低合金鋼では、侵入した水素原子が多いほど水素脆化が顕著に発現し、材質が劣化する。図4にJIS-SNCM439鋼 (Fe-0.40% C-0.23% Si-0.71% Mn-1.76% Ni-0.74% Cr-0.22% Mo, 引張強さ928MPa) の105MPa水素ガス中の低ひずみ速度引張試験 (Slow Strain Rate Technique : SSRT) 結果および疲労試験結果¹⁰⁾を示す。SSRTのひずみ速度は 1.0×10^{-5} /s、疲労試験の応力比は-1で行った。SSRTでは大気中と水素ガス中で応力-変位曲線は重なっているが、水素ガス中での破断変位は大気中と比較して低下している。疲労限については105MPa水素ガス中では大気中と同程度であったが、低サイ

クル疲労となる応力域では、水素ガス中の破壊寿命は大気中よりも短時間化した。また、松尾ら¹¹⁾は、SCM435鋼を用いて115MPa水素ガス中で疲労き裂進展試験を行い、高圧水素ガス中の疲労き裂進展速度が大気中よりも加速するがこの加速率に上限値が存在し、その上限値は30倍程度であることを明らかにしている。これらの結果が示すように、高圧水素ガス中では低合金鋼の材質の一部は劣化する。水素脆化が発生しない低合金鋼を開発できれば好ましいが、技術的ハードルが高く、近未来に建設される水素ステーションへの適用は見通せない。そのため、このような低合金鋼の特性を理解した上で水素ステーションへの適用を可能とするための検討がNEDOプロジェクト^{7,12)}で行われている。具体的には、高圧水素ガス中で各種データを採取し、蓄圧器等への適用の考え方が議論され、その結果が、一般財団法人石油エネルギー技術センター (Japan Petroleum Energy Center : JPEC) によりまとめられ「水素スタンドで使用される低合金鋼製蓄圧器の安全利用に関する技術文書」JPEC-TD 0003 (2017)^{13,14)}として発行されている。また、この技術文書と整合する形で日本高圧ガス保安協会 (KHK) 発行の「超高压ガス設備に関する基準」KHK S0220 (2020)¹⁵⁾の中に高圧水素蓄圧器に関する基準が記載されている。

上記JPEC-TD0003 (2017) では、低合金鋼を水素インフラに適用するために、表1に示す内容を規定している。蓄圧器等のインフラに用いられる素材は、引張強さが水素影響を受けない範囲に制約され、「設計圧力以上の試験圧力で水素ガス中SSRTを実施し、不活性ガス中のSSRTの最大荷重点を超過すること」を要求している。また、10万回以上の圧力変動を受ける蓄圧器の使い切り寿命を考慮するため、水素ガス中の疲労限が大気中 (不活性雰囲気中) に比較して低下せず、さらに2倍以上の安全裕度を有した設計が要求された。さらに万一疲労き裂が進展した場合の安全も考慮し、破壊前漏洩の成立も検証するように要求している。

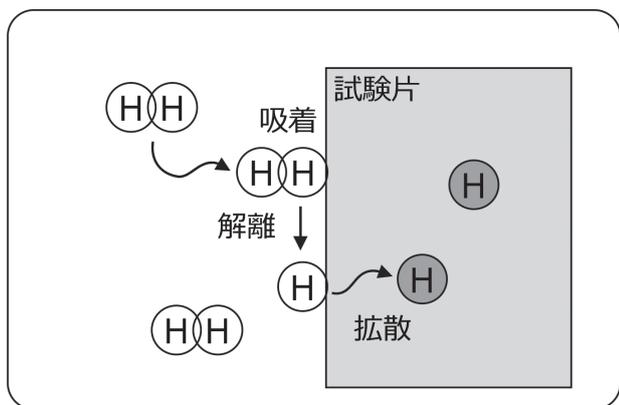


図3 高圧水素ガス中での鋼材中への水素侵入の模式図

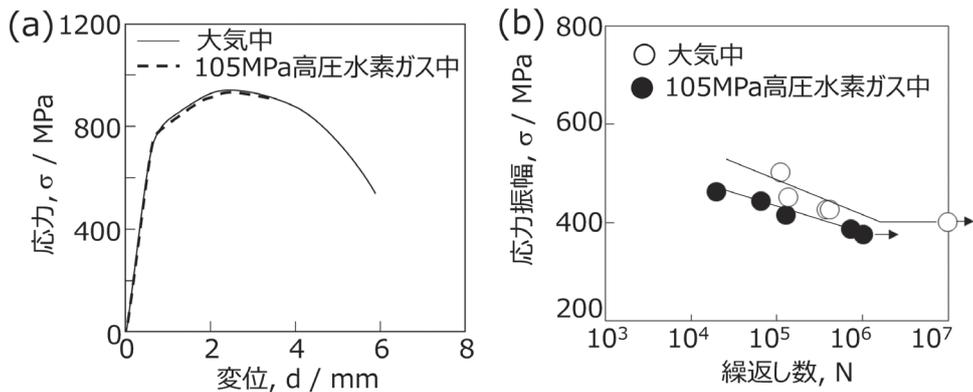


図4 105MPa高圧水素ガス中及び大気中における低合金鋼の (a) SSRT および (b) 疲労特性

「設計圧力以上の試験圧力で水素ガス中SSRTを実施し、荷重-変位曲線が不活性ガス中の最大荷重点を超過すること」という要求と「水素ガス中の疲労限が大気中（不活性雰囲気）に比較し低下しない」という要求は、降伏強さ、引張強さ、疲労限が大気中と水素ガス中で変化しないことを担保しているため、従来の設計基準と同様の考え方が高圧水素蓄圧器に関しても適用が可能となると考えられる。上記条件を満たす材料としては、KHKS0220 (2020)¹⁵⁾においてSCM435鋼もしくはSNCM439鋼での熱処理や強度範囲が例示されている。

2.2.2 高強度低合金鋼を使用した水素ステーション用蓄圧器例

本節では、高強度低合金鋼を使用した水素ステーション用蓄圧器例として、JFE スチール (株) と JFE コンテナ (株) が共同開発した蓄圧器 (以降、JFE 製蓄圧器と記載) に関して紹介する。JFE コンテナ (株) では表2に示す3種の蓄圧器製品を製造・販売している。Type1, Type2蓄圧器の構造の模式図とType2蓄圧器の外観を図5⁸⁾に示す。サイズはタイプによって異なるが、直径300～400mm程度、長さ4～6m

程度、内容量200～400L程度である。本蓄圧器は端部を縮径しないストレート型の形状としていることが特徴である。圧力容器は端部を鍛造もしくは絞り加工によって縮径し、封止部の負荷応力を低減するボンベ型が多い。一方、本蓄圧器は封止部が大口径であることで、定期実施が義務付けられている蓄圧器内面の健全性確認のための開放検査を実施しやすくなる。また、端部の縮径を行わないため、シームレス鋼管をそのまま機械加工することで容器を製造でき、低コスト化が可能となる。また、大口径のため、ボンベ型の場合と比較して熱処理時に高冷却速度での焼き入れが可能となるため、高強度で均一な材質を達成しやすい。

JFE スチール (株) では、蓄圧器開発にあたり、まず、高圧水素ガス中下での特性劣化の少ない鋼材組織を検討した。その結果の一例を示す。JIS-SCM435鋼を焼き入れ焼き戻し処理を行って、TS900MPa級で炭化物分散状態の異なる鋼を作製し、105MPa高圧水素ガス中でSSRTを行った。図6に供試材のSEM組織、得られた応力-変位曲線および大気中の変位に対する高圧水素ガス中の変位の割合⁸⁾を示す。炭化物を均

表1 蓄圧器に低合金鋼を適用するために必要な高圧水素ガス中の特性例

試験	高圧水素ガス中の必要特性
SSRT試験	設計圧力以上の試験圧力で水素ガス中SSRTを実施し、荷重-変位曲線が不活性ガス環境の最大荷重点を超過すること
疲労試験	水素ガス中の疲労限が大気中（不活性雰囲気）に比較し低下しないこと

表2 JFE 製水素ステーション用蓄圧器

容器タイプ	特長	運転圧力範囲例	設計圧力	設計係数	使用可能回数	定期自主検査
Type2	広圧力範囲	35-93 MPa	99 MPa	> 3.0	12万回	6万回
Type1	汎用長寿命	50-82 MPa	95 MPa	2.4	55万回	22.5万回
Type1	大容量	15-45 MPa	50 MPa	>3.0	21万回	10.5万回

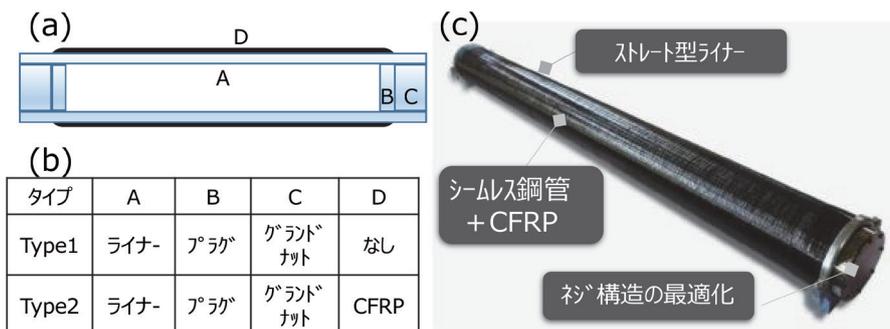


図5 JFE 製蓄圧器の (a) 断面模式図、(b) 構成と (c) Type2蓄圧器の外観

一に分散させた鋼は不均一分散させた鋼よりも高圧水素ガス中の伸びが優れていた。また、大気中の伸びに対する高圧水素ガス中の伸びの割合でも、炭化物均一分散鋼が70%、炭化物不均一分散鋼は60%で、炭化物均一分散した鋼の特性が優れていた。これらの結果から、炭化物均一分散した組織が高圧水素ガス中での特性に優れることが明確となった。この差が生じる理由は今後さらに調査が必要であるが、例えば、図7⁸⁾に示すように、炭化物が均一分散することで水素の局所的な集積が抑制されることが考えられる。炭化物分散状態のコントロール手法は種々あるが、例えば、焼き入れ焼き戻しにおいては、炭化物均一分散組織を得るためには、焼き入れ時の冷却速度を十分に確保してマルテンサイト単一組織を得ることが挙げられる。JFE製蓄圧器は大口径であるため、鋼素材を製造する際に冷却速度の確保が行いやすく、均一なマルテンサイト組織を得やすい。実際にJFEスチール(株)知多製造所において表1の特性を満足する高圧水素ガス中下で優れた材質を示す高強度低合金シームレス鋼管を製造し蓄圧器に適用している。

一方、大口径の蓄圧器は、プラグと呼ばれる蓋を保持するためのネジ部にかかる応力が高くなるため、高応力に耐えうるネジ部の設計が必要となる。ネジ部は形状の最適化を検討した結果、ネジ底曲率半径の最適化等により、ネジ底に発生する応力を低減し、目標であった10万回を超えて使用可能な容器を開発した。

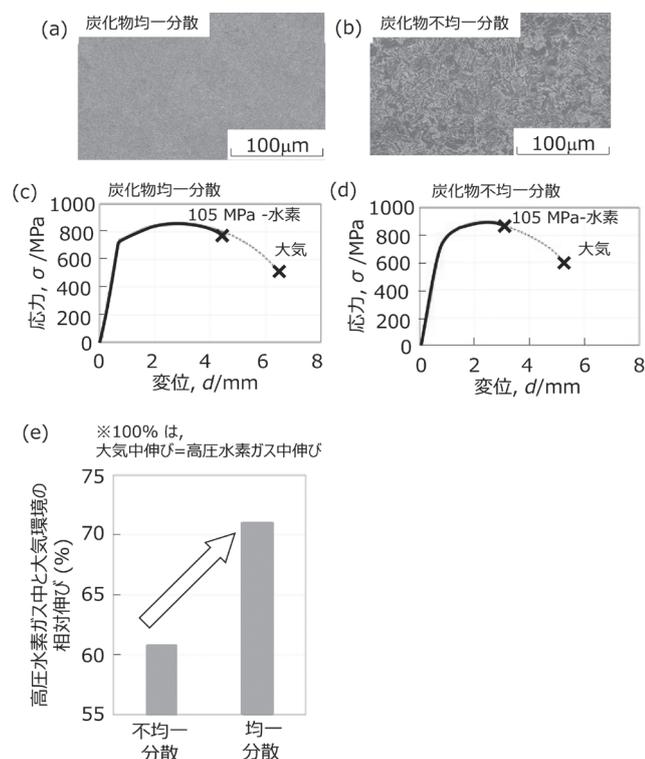


図6 高圧水素ガス中のSSRT試験結果に及ぼす炭化物分散状態の影響

また、鋼製ライナにCFRPを巻き付けたType2複合容器蓄圧器製造においては固有の課題がある。複合容器では、CFRPを巻き付けた後に100℃以上に温度を上げて樹脂を硬化させる。その後室温まで冷却すると、鋼製ライナの熱膨張係数がCFRPの熱膨張係数よりも大きいため、樹脂の効果処理温度から室温までの鋼製ライナの収縮がCFRPよりも大きく、鋼製ライナとCFRPの間に隙間が生じる。隙間が生じた状態ではCFRPに応力分担がなされないため、CFRPを巻き付けた効果が得られない。複合容器としての性能を十分に活かすためには隙間を極力低減することが必要である。図8⁸⁾に蓄圧器に内圧を付与し、CFRP外面のひずみをひずみゲージにより計測した結果を示す。隙間低減処理を行わない場合は、圧力が35MPa程度でひずみゲージからの出力が確認された。鋼製ライナが内圧によって膨張し、35MPa程度でCFRPに接触したと考えられる。一方、隙間低減処理を行った場合は、内圧が10MPaですでにひずみゲージの出力が確認されている。JFE製Type2蓄圧器は、水素ステーション用Type2蓄圧器としては国産で初めて実用化され、2020年12月25日に開所した豊田豊栄水素ステーションで使用されている¹⁶⁾。今後はType2蓄圧器が普及するにつれて、Type1蓄圧器とType2蓄圧器の得失が明確となり、適材適所の使用が

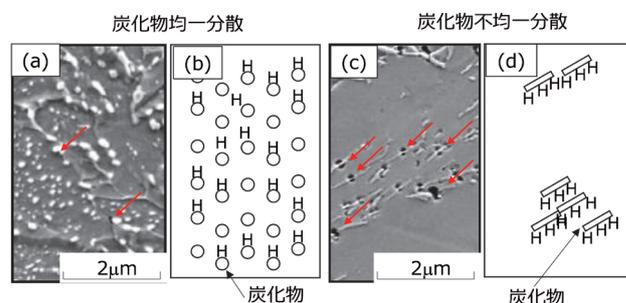


図7 炭化物分散状態が(a), (c)真ひずみ0.21で変形後のポイド生成におよぼす影響と(b), (d)鋼中の水素原子分布の推定図

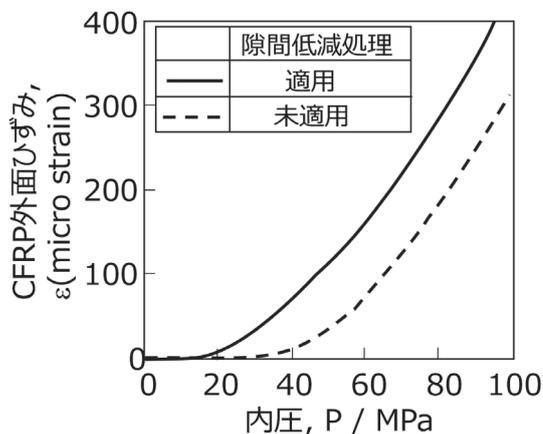


図8 Type2蓄圧器への負荷内圧と外面ひずみの関係

広がり、水素ステーションのコスト低減に一層寄与できると考えられる。

3 高圧水素環境下での鋼材特性評価の簡便な模擬手法検討

今後、水素ステーション建設コストをさらに低減するためには、種々の鋼を開発し材料データを採取していく必要がある。そのための大きな課題として、高圧水素ガス中での材料試験が困難であることが挙げられる。100MPaを超える高圧水素ガス中での材料試験には、防爆構造の試験室を備え、高圧ガス保安法に則した管理体制が必要である。そのような体制をとれる機関は少なく、通常の大学や企業では高圧水素ガス中での試験実施が困難である。そのため、もし、高圧水素ガス中の材料特性を高圧水素ガスを用いずに得られる手法が開発できれば、本分野の水素脆化現象を研究対象とする研究者が増え、鋼材開発も加速される可能性が高い。そのためNEDOでは「超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業」(2018年度～2020年度)において、高圧水素ガス中での機械的特性をより汎用的かつ低コストで採取する手法の確立を目指した取り組みが行われている¹⁷⁾。その一つが、「連続陰極水素チャージ法による水素インフラ用鋼材の水素特性判断の簡易評価手法の開発」である。

陰極チャージ法は、電気化学反応を利用して鋼材中に水素を導入する手法の一つである。溶液中に浸漬した鋼材をカソードにして通電することで、鋼材表面から水素原子を侵入させることができる。水素侵入の模式図を図9に示す。図3に示した高圧水素ガス中の水素侵入と比較すると、いずれの環境でも水素が水素原子として鋼中に侵入するため、陰極チャージ法を用いて鋼材中に侵入させる水素量を高圧水素ガス中と同じ量に制御できれば、高圧水素ガス中と同等の材料特性を陰極チャージ法を用いて採取できる可能性がある。ただし、陰極チャージ法では水素チャージ後に溶液から試験片

を取り出して材料試験を行うと、試験開始時に高圧水素ガス中と同量の水素量に制御したとしても、試験中に水素が大気中に逃散し水素量が減少するため、同等の評価ができない可能性が高い。そのため、高圧水素ガス中の材料試験を模擬するためには、サンプルを溶液に浸漬して陰極チャージを行ったまま、SSRTや疲労試験を行う必要がある。この手法を連続陰極チャージ法と呼称する。本章では連続陰極チャージ法を用いた材質評価検討結果の一例を報告する。

供試材は、焼き入れ焼き戻しで作製したTS900MPa級SNM439鋼(Fe-0.40% C-0.23% Si-0.71% Mn -1.73% Ni-0.73% Cr-0.22% Mo)を用いた。この鋼は105MPa水素ガス中では、0.38ppmの水素が侵入した。ただし、0.38ppmの値は、試験片を105MPa水素ガス中で96時間暴露した後、試験機から試験片を取り出すまで42分要した後に、水素分析に供して得た水素量である。この鋼を(1M NaOH + 0.3% NH₄SCN)水溶液に浸漬し、電位を変化させて陰極チャージを行った結果を図10に示す。図10の水素分析結果は、高圧水素ガス中と条件を合わせるため、陰極チャージ終了後、42分間室温で放置したのちに水素分析に供して得た値である。105MPa高圧ガス中と同等の水素が侵入する電位は-1.125V(vs SHE)であった。そのため、陰極チャージを-1.125V(vs SHE)の条件で行いながらSSRTを行えば、105MPa高圧水素ガス中と同等の結果が得られる可能性がある。図11¹⁸⁾に、大気中、105MPa高圧水素ガス中および-1.125V(vs SHE)の電位での連続陰極水素チャージ中でのSSRT結果を示す。水素ガス中および連続陰極チャージ中では大気中よりも破断変位が低下し、水素脆化が発現した。また、高圧水素ガス中と連続陰極チャージ中では破断変位はほぼ同じであった。また絞り値を測定した結果、高圧水素ガス中で29%、連続陰極チャージ中で27%とほぼ同等の結果であった。しかし一方、応力-変位曲線において、高圧水素ガス中では900MPa程度から一気に破断しているのに対し、連続陰極チャージ中では、荷重が

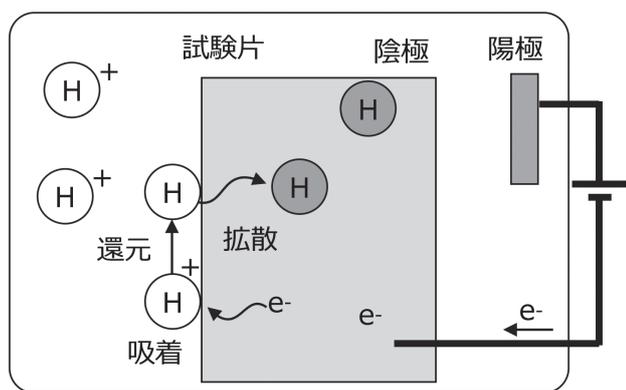


図9 陰極チャージ法による水素侵入の模式図

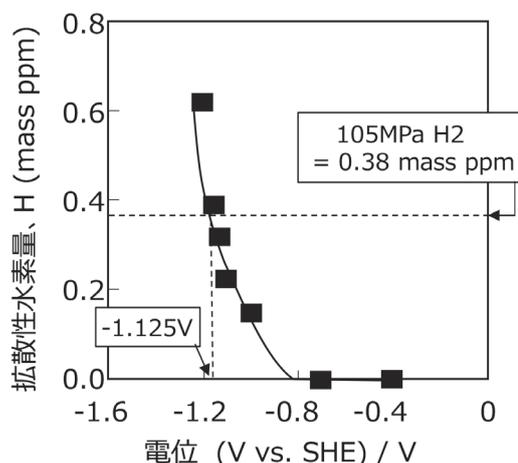


図10 SNM439鋼の水素侵入量におよぼす電位の影響

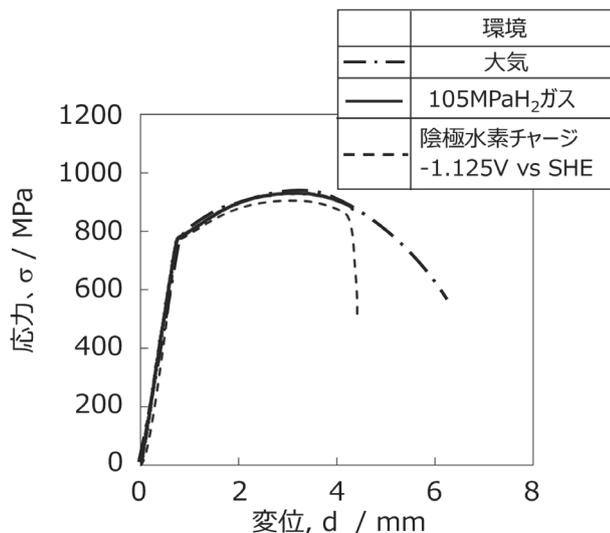


図11 連続陰極チャージ法と高圧水素ガス中のSSRT試験結果の比較

500MPa程度まで下がってから破断している。この違いの原因は現在解析中である。前述の通り、高圧水素ガス中で使用可能な低合金鋼の条件は、荷重-変位曲線が不活性ガス中のSSRTの最大荷重点に達する前に荷重点を超過すること、という点である。この観点では、連続陰極チャージ法でも高圧水素ガス中と同等の評価結果を得ることができると考えられる。一方、破断する応力が異なる点では、鋼材が局所変形を始めてからの変形挙動が高圧水素ガス中と連続陰極水素チャージ中で異なる可能性がある。今後、疲労試験結果等も確認しながら、両者の相違を明確化し、連続陰極チャージ法により高圧水素ガス中の特性を模擬できる範囲を示していく予定である。

4 まとめ

本報では、水素ステーション建設コスト低減のために鉄鋼材料が貢献している例として、JFEスチール(株)とJFEコンテナ(株)が共同で開発した低合金鋼を用いた水素ステーション用蓄圧器について紹介した。また、今後、さらに高圧水素分野への低合金鋼の適用拡大のための基盤構築の一環としてNEDOプロジェクトで行われている、高圧水素ガス中での低合金鋼の材料特性をより汎用的かつ低コストで評価できる手法の確立を目指した取り組みの一例として、「連続陰極水素チャージ法による水素インフラ用鋼材の水素特性判断の簡易評価手法の開発」の検討状況を簡単に紹介した。鉄鋼材料は今後も進化を続け、低炭素化社会での各種インフラ構築に貢献していくことを確信している。

謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技

術総合開発機構のプロジェクト「水素利用技術研究開発事業」(2015年度～2017年度)および「超高圧水素インフラ普及技術研究開発事業」(2018年度～2020年度)の一環として行われたものである。

参考文献

- 1) https://www.nedo.go.jp/events/report/ZZHY_00007.html, (accessed 2021-01-07)
- 2) <https://www.meti.go.jp/press/2018/03/20190312001/20190312001.html>, (accessed 2021-01-07)
- 3) https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo/pdf/018_01_00.pdf, (accessed 2021-01-07)
- 4) 「水素利用技術研究開発事業」事業原簿【公開】，(2017/7/28)
- 5) 例えば、南雲道彦：水素脆性の基礎，内田老鶴圃，(2008)
- 6) 例えば、松山晋作：遅れ破壊，日刊工業新聞社，(1989)
- 7) 「水素利用技術研究開発事業」事後評価報告書，平成30年3月
- 8) 岡野拓史，高木周作，松原和輝，石川信行，竹村泰昌，影山泰輔，戸田祐貴，高野俊夫：まてりあ，60 (2021)，113.
- 9) <https://www.jfecon.jp/news/210126.html>, (accessed 2021-03-07)
- 10) A.Nagano, H.Okano, K.Matsubara, N.Ishikawa and T.Takano : PVP2018-84726 Proc. ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference PVP 2018, Prague, (2018)
- 11) T.Matsuo, J.Yamabe, Y.Fukushima, S.Matsuoka and Y.Murakami : J. Soc. Mater. Sci. Jpn., 59 (2010), 924.
- 12) 平成25年度～平成29年度成果報告書 水素利用技術研究開発事業 燃料電池自動車及び水素供給インフラの国内規制適正化，国際基準調和・国際標準化に関する研究開発 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
- 13) 「水素スタンドで使用される低合金鋼製蓄圧器の安全利用に関する技術文書」JPEC-TD 0003, (2017)
- 14) https://www.pecj.or.jp/japanese/committee/pdf/jpec-td_0003.pdf, (accessed 2021-01-07)
- 15) 「超高圧ガス設備に関する基準」KHK S0220 (2020)
- 16) <https://www.jfe-steel.co.jp/release/2020/12/201225.html>, (accessed 2021-01-07)
- 17) https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100144.html, (accessed 2021-01-07)
- 18) 西原佳宏，野崎彩花，岡野拓史，高木周作：CAMP-ISIJ, 34 (2021)，188, CD-ROM.

(2021年1月14日受付)