

TODAY

顔の見えるリサイクル



東京大学大学院工学系研究科
マテリアル工学専攻
環境マテリアル工学講座
特任准教授 醍醐市朗

オリンピック・パラリンピック史上、東京2020大会が初めてとなる取組みとして「都市鉱山からつくる！みんなのメダル」プロジェクトが実施されている。このプロジェクトは、国民が参画し、メダル製作を目的に小型家電等の回収を行い、集まったものから抽出された金属でメダルを製作する。このように、金属素材の利用側での取組みは、リサイクル材の利用を指向することが多い。しかし、リサイクル材の原料であるスクラップは発生品であり、ある事業者がリサイクル材を利用しても、他の事業者が使うスクラップを横取りしただけでは、社会全体として循環利用は促進されていない。言い換えれば、リサイクル材を利用したことにより、今まで回収されていなかった再生資源が追加的に回収されたことを主張できなければならない。そのため、金属リサイクルの促進に向けては、リサイクル材の利用率ではなく、使用済み製品からの回収効率である使用済みリサイクル率(EoL-RR, end-of-life recycle rate)で評価することが必要である。これは、都市鉱山から回収可能な資源の散逸を回避できた割合とも言え、様々な使用済み製品から各資源を回収する EoL-RR の向上が主張されるべきである。しかし、EoL-RRは、統計などから直接観測することが困難なため、主張されることはほとんどなく、著者は EoL-RR の定量手法を研究テーマの1つとしている。

さて、ここまでの記述のように、都市鉱山メダルプロジェクトは、リサイクルの促進に向け

て効果のない取組みであろうか。著者は、『顔の見えるリサイクル』こそが、都市鉱山メダルプロジェクトのレガシーたり得ると考えている。これは、欧州の Circular Economy の影響もあり、近年わが国においても増えてきた、非エネルギー鉱物資源の有限性への取組みの流れのなかの1つのエポックとなるであろう。このプロジェクトが対象としている小型家電の排出者は、これまで、使用済み製品が目の前からなくなれば良く、意図してリサイクルに供出してこなかったように感じる。それを排出者が、自ら望んでリサイクルに回すような仕組みができれば、上記の使用済みリサイクル率は上がると考えられる。その仕組みの1つが『顔の見えるリサイクル』、つまり、リサイクル材の使用先の見える回収・リサイクルシステムによる運用である。今までは、回収ありきのリサイクルであり、何に利用されるかわからなかったのに対し、リサイクル材の使用先が見えることで、排出者のリサイクルへの供出の意欲が惹起されると考えられる。都市鉱山メダルプロジェクトにおいては、「メダル」という分かりやすくかつ魅力的な使用先があり、それに対して排出者である「国民」に自主的な供出による参画を促している。『顔の見えるリサイクル』は、規制の方策でも経済の方策でもなく画期的である。近年、スーパーなどで野菜が陳列されている売り場に農家さんの顔写真が掲げられており、安心して購買することに寄与している。購買時の安心感とは異なるが、トレーサビリティが確保された回収・リサイクルシステムを構築できれば、排出者はその排出責任を実感できるとともに、貢献した達成感が得られる。今回の「私の使っていた携帯が、この選手のメダルの一部になった」と同様に、「私の乗っていた自動車から回収された白金が、孫の結婚指輪の一部になった」と言える社会は作れるだろうか。

高圧水素蓄圧器用部材の安全性評価

株式会社 日本製鋼所 室蘭研究所

荒島 裕信 柳沢 祐介

1. はじめに

当社は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) のプロジェクト「水素利用技術研究開発事業」に JRCM グループ (JRCM、日本製鋼所、新日鐵住金、新日鐵住金ステンレス、愛知製鋼、物質・材料研究機構) として参画し、水素ステーションで使用できる鋼材の拡大に向けた研究開発を進めている。

現在、燃料電池自動車 (FCV) の普及に向け、4 大都市圏を中心に商用水素ステーションの整備が進められており、FCV に水素を供給する水素ステーションでは、設計圧力が 90MPa 以上の高圧な水素蓄圧器が必要とされている。当社では、1960 年代より高温高圧の水素分圧下で使用される石油精製のリアクターを始めとした鋼製圧力容器を多数製造しており、これらの圧力容器の設計・製造技術を活かし、図 1 に示す水素ステーション用鋼製蓄圧器を開発し上市した。



図 1 300 リットル鋼製蓄圧器

一般高圧ガス保安規則の例示基準において水素ステーションで使用可能とされている材料は、引張試験における絞りとニッケル当量が規定された SUS316 など、環境中の水素の影響を受けにくい一部の材料に限られているが、これらの材料を用いて鋼製蓄圧器などの圧力容器を製造すると、極厚の製品となり、重く高コストになってしまう。そのため、蓄圧器などの大型機器に対しては高強度低合金鋼などの使用が必

要となるが、高強度低合金鋼は、環境中の水素の影響を受け脆性的な挙動を示す材料^{1,2)}であるため、水素に対する影響を正確に把握し、水素の影響を考慮した設計・製造が必要である。

このような背景から、当社は特に蓄圧器に使用される低合金鋼の安全使用を可能にするための研究開発に携わり、素材の評価や、石油エネルギー技術センター (JPEC) 主導で進められている「低合金鋼技術文書」(水素蓄圧器製造のための技術基準) の作成に対する支援を行っている。本報では、NEDO 事業で得られた成果の概要を報告する。

2. 蓄圧器の安全性評価方法

高圧ガス保安法の特定設備検査規則に準拠した圧力容器の設計では、安全係数を 4.0 と大きくすることで容器の破壊に対する安全性を確保し詳細な解析等を不要としている。しかし、水素蓄圧器においては、FCV への充てん時ごとに内圧変動を受けて疲労挙動が問題となること、水素中で疲労き裂進展速度が大きく加速することから、疲労設計の考え方を取り入れることが安全性を確保する上で必要である。

表 1 に示す各種試験を高圧水素環境で実施し、水素適合性の判定と疲労評価及び疲労き裂進展評価を行うことで、適切な疲労寿命と検査周期を設定できると考えられる。一昨年度の報告³⁾では、限界き裂寸法を求める際に必要となる水素助長割れ下限界応力拡大係数 K_{IH} について報告した。本報では低ひずみ速度引張試験 (SSRT) と疲労特性について検討した結果を報告する。

表 1 蓄圧器の安全性評価試験

評価試験項目	目的
SSRT 試験	水素適合性の判定
疲労試験	許容繰返し数の検証
疲労き裂進展試験	疲労き裂進展速度の把握
遅れ割れ試験	水素助長割れ下限界
ライジングロード試験	応力拡大係数 K_{IH} の把握

3. 蓄圧器部材の SSRT 及び疲労評価

水素ガス中の疲労寿命は大気中に比べて低下するが、疲労限度については大気中と等しくなることが報告されている⁴⁾。工業製品として作られる素材においては規格だけでコントロールしきれない影響因子として非金属介在物などが考えられるが、高压水素ガス中の疲労特性に及ぼす非金属介在物の影響については良く判っていない。

そこで、蓄圧器用部材である JIS SNCM439 鋼について、一般流通材 4 鋼種を用意し、非金属介在物量と SSRT 及び疲労特性の関係を調査した。供試材は、いずれも 30mm 厚さの試験板に加工後、850℃から油焼入れを行い、630～650℃で焼戻しを施した。表 2 に熱処理後の引張特性を示す。引張強さは 853～894MPa となっており、ほぼ同等の強度が得られている。

非金属介在物の測定には 2 通りの手法を用いた。極値統計法⁵⁾を用いて推定した試験片中の最大介在物寸法及び、JIS G 0555 点算法により測定した各介在物の面積率を表 3 に示す。その結果、介在物寸法は素材 B が 46 μm と最も大きく、素材 A,C,D は 19～24 μm でほぼ同等であった。また、素材 B はアルミナ系介在物が、素材 C,D は硫化物系・粒状酸化物系が多く、素材 A は介在物量が最も少ない傾向であった。

SSRT 試験には直径 6mm の丸棒試験片を用いて、大気中と 90MPa 水素ガス中で歪速度約 1×10^{-4} /s で実施した。SSRT 試験結果を図 2 に示す。水素ガス中で実施したいずれの試験片も最大荷重点を超えてから破断しており相対引張強さ（水素中の引張強さ / 大気中の引張強さ）は 1.0 となる。同図には相対絞り（水素中の絞り / 大気中の絞り）も併記したが、本試験の範囲内では非金属介在物の影響は明瞭でない。図 3 には水素中破断試験片の破面観察例を示す。いずれの試験片も試験片表面が起点となり、水素中でのき裂進展領域（擬へき開破面、QC）と、最終破断領域（ディンプル破面、D）が観察された。また、素材 B の SSRT 特性は他の素材と同等であるが非金属介在物が起点となり破断している場合には、SSRT 特性を低下させる可能性が考えられる。

表 2 供試材の引張特性

供試材	0.2% Y.S. (MPa)	T.S. (MPa)	E.L. (%)	R.A. (%)
素材 A	730	853	20	57
素材 B	739	885	22	61
素材 C	744	880	22	63
素材 D	762	894	20	59

表 3 供試材の非金属介在物

供試材	最大介在物寸法 $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ (μm)	非金属介在物の面積率 (%)		
		硫化物・シリケート系	アルミナ系	粒状酸化物系
素材 A	24	0.017	0.000	0.004
素材 B	46	0.013	0.021	0.021
素材 C	19	0.075	0.000	0.075
素材 D	21	0.046	0.000	0.058

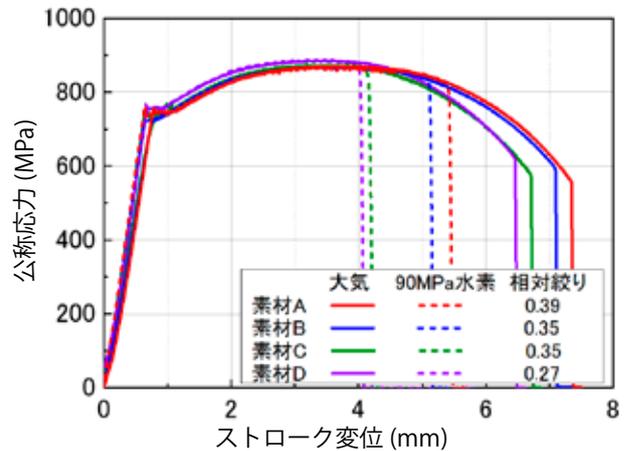


図 2 SSRT 試験結果

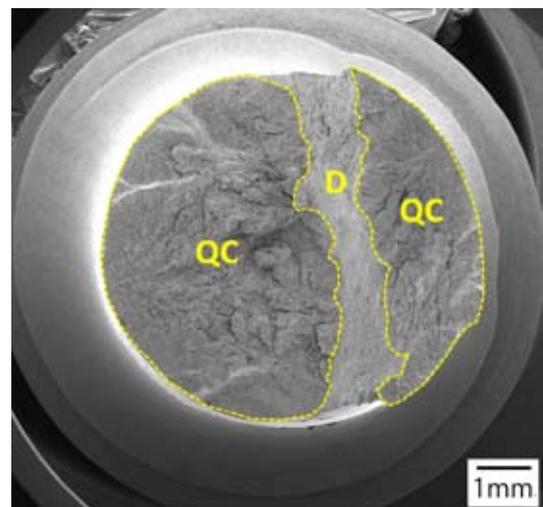


図 3 破面観察結果 (素材 B)

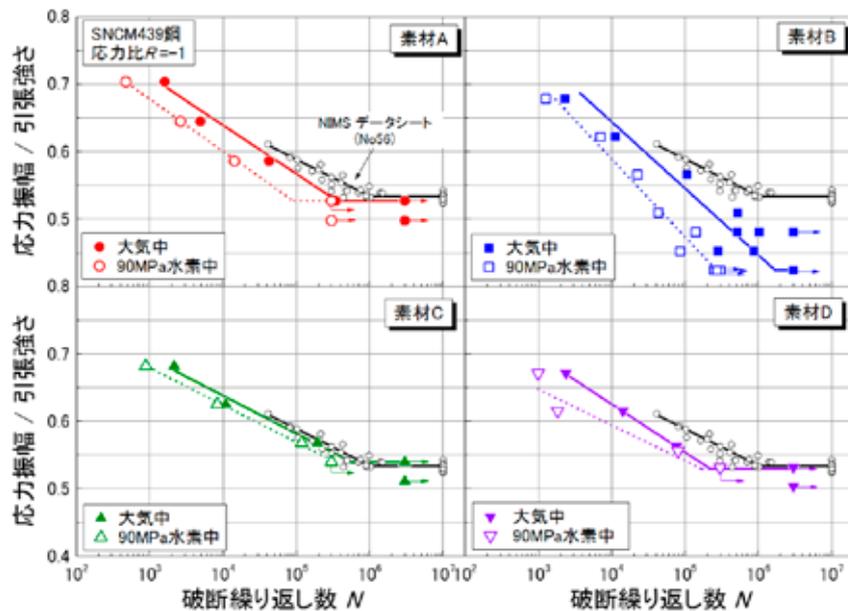


図4 疲労特性の比較

疲労試験結果を図4に示す。なお、縦軸は応力振幅を引張強さで規格化して示している。疲労試験は、大気中・水素中ともに応力比 $R=-1$ の両振り軸荷重制御により行った。疲労波形は正弦波とし、水素中の周波数は1Hzとした。試験打ち切り回数は、大気中試験で300万回、水素中では試験時間とシール材劣化の制約から30万回とした。比較として同鋼種のNIMSデータシート⁶⁾の結果も図中に示す。

大気中の結果では、素材A,C,DはNIMSデータとほぼ同等の疲労限度であるが、素材Bは疲労限度が低下する傾向を示した。従来からの報告通りに、粗大な非金属介在物は疲労破壊の起点となり、疲労限度を低下させたと判断される。水素中と大気中の結果を比較すると、いずれの素材も有限寿命領域では大気中に比べて水素中の疲労寿命が低下する傾向であるが、大気中の疲労限度の応力振幅では素材A,C,Dにおいては30万回までの水素中の疲労試験でも破断は認められなかった。一方、素材Bに関しては、応力振幅の小さな領域においても水素中で疲労寿命が低下する傾向にあり、非金属介在物起点で発生したき裂が水素により大きく影響を受け疲労寿命の低下をもたらしているものと考えられ

た。本試験では水素中の試験を30万回までとしており、さらに長寿命域における挙動の把握が今後の課題である。

4. おわりに

蓄圧器用部材であるSNCM439鋼を用いて、SSRTと疲労特性について検討した。その結果、本試験の範囲においては、水素中のSSRT特性に極端な低下は認められないが、疲労特性に関しては粗大な非金属介在物により疲労限度の低下が認められた。このような素材が高圧水素用機器として使用されることのないように歯止めをかけることが必要であり、今後も水素環境中における低合金鋼の評価を進め、蓄圧器の安全利用と基準化・標準化に資するデータを蓄積したいと考えている。

参考文献

- 1) 大西敬三ら, 金属学会会報, Vol.8, No.9 (1969).
- 2) 荒島裕信ら, 鉄と鋼, Vol.96, No.2 (2010).
- 3) 柳沢祐介, JRCM NEWS, 第343号 (2015).
- 4) Wada, Y. et al., Proceedings of ICHS 2005, Paper No. 220113 (2005).
- 5) 村上敬宜, "金属疲労 微小欠陥と介在物の影響", (1986), 養賢堂.
- 6) NIMS 疲労データシート No.56 (1987).

The Japan Research and Development Center for Metals
JRCM NEWS / 第372号

内容に関するご意見、ご質問はJRCM 総務企画部までお寄せください。
本書の内容を無断で複写・複製・転載することを禁じます。

発行 2017年10月1日
 発行人 小紫正樹
 発行所 一般財団法人 金属系材料研究開発センター
 〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目5番11号 第11東洋海事ビル6階
 TEL (03)3592-1282 (代) / FAX (03)3592-1285
 ホームページ URL <http://www.jrcm.or.jp/>
 E-mail jrcm@oak.ocn.ne.jp