

氏名	嶋津秀徳		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	甲博理工第466号		
学位授与年月日	平成26年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
学位論文題目	低合金鋼の水素脆化と焼戻脆化の複合効果に関する研究		
審査会	主査	鴻巣眞二	委員 堀辺忠志
	委員	呉智深	委員 尾関和秀
	委員	西野創一郎	

## 論文内容の要旨

石油精製プラントで用いられている低合金鋼製の圧力容器には、高温高圧の水素雰囲気下で運転されているものが多く、その材料には水素吸蔵による水素脆化という問題が発生する。また、石油精製プラントで使用されている反応器の構成材料は、溶接性や耐クリープ性、耐酸化性に優れた低合金鋼製であり、水添脱硫装置ではこれが400℃前後で運転されることから焼戻脆化も同時に発生する。焼戻脆化と水素脆化の複合的な関係については、反応器が建設以来長期間使用されているため重要な問題の一つであるにも関わらず現在定量的に明らかにした研究は無い。

本論文では、低合金鋼の2.25Cr-1Mo鋼(不純物量が異なる3種類の従来鋼)と2.25Cr-1Mo-0.3V鋼(V添加鋼)を用い、じん性試験片に対して非常にゆっくりと負荷するライジングロード試験法により破壊じん性値に及ぼす水素脆化と焼戻脆化の複合効果について研究を行った。

破壊じん性値の決定法として、安定き裂が進展を開始するまでに要するエネルギーから求める方法についての検討を行った。安定き裂長さの進展量の推定にはポテンシャルドロップ法を用い、破壊じん性値 $K_{IH}$ はASTM E1820に規定された試験方法に基づき $J$ 積分値を算出し、安定き裂進展開始点での $J$ 積分値から換算して求めた。

安定き裂進展開始点を決定する方法には、これまでに、「除荷コンプライアンス法」、「デビエーション法」や「定荷重フラクトグラフィ法」等の方法が提案されているが、開始点が不明瞭であることや複数の試験片が必要になる等の欠点があった。本研究では、測定したポテンシャルドロップ量からき裂先端の塑性変形によるポテンシャルドロップ量の寄与分を差し引いたオフセットポテンシャルドロップ量を用いて安定き裂進展開始点を求める新たな方法を提案した。

従来鋼である2.25Cr-1Mo鋼においては、提案したオフセットポテンシャルドロップ法により求めた常温での破壊じん性値は、水素脆化による低下は非常に大きい。焼戻脆化の影響はほとんど認められなかった。

これに対して、V添加鋼である2.25Cr-1Mo-0.3V鋼においては、水素脆化および焼戻

脆化による破壊じん性値の低下は実質的に認められなかった。

更に、安定き裂進展開始点後のき裂進展抵抗性  $dJ/da$  について検討を行った。従来鋼である 2.25Cr-1Mo 鋼においては、水素脆化によつてき裂進展抵抗性は顕著に低下するが、V 添加鋼である 2.25Cr-1Mo-0.3V 鋼においては、水素脆化による低下は認められなかった。焼戻脆化の  $dJ/da$  に及ぼす影響は、不純物量が多い従来鋼で認められたが、不純物量が少ない従来鋼や V 添加鋼においてはき裂進展抵抗性への影響は認められなかった。

また、一定荷重保持下での常温でのき裂進展特性を明らかにした。従来鋼の焼戻脆化材は焼戻脆化していない鋼にくらべて進展速度が早いことが分かった。

水素の鋼中でのトラップサイトを推定するために、ライジングロード試験前後の試験片に対して昇温脱離分析を行った結果、従来鋼における水素のトラップサイトは主に旧オーステナイト粒界であると考えられた。一方、V 添加鋼における水素のトラップサイトは結晶粒界以外にあることが推定された。そこで V 添加鋼に対して電界放出型電子線マイクロアナライザー (FE-EPMA) による元素分析を行い、結晶粒内に微細分散した MC 型炭化物 (M=Mo, V) の析出が認められた。この析出物のトラップ効果によつて水素の拡散が抑えられて、V 添加鋼において、水素脆化による破壊じん性値  $K_{IH}$  およびき裂進展抵抗性  $dJ/da$  の低下が実質的に認められないと推定された。

最後に、本研究により得られた安定き裂開始点で与えられる下限界破壊じん性値  $K_{IH}$  結果および一定荷重下でのき裂進展挙動結果を用い、実機の反応器に存在すると仮想したき裂に対して、「供用適性評価規格 HPIS Z 101」の評価方法に基づき安全性評価を実施した。「供用適性評価規格 HPIS Z 101」は、き裂状欠陥を有する圧力容器の安全性評価を可能にする工学的方法を与える。現在供用中の圧力容器にき裂状欠陥が検出された場合に、評価点が破壊評価線図 (FAD) の許容域にある場合には、その圧力容器は継続運転が可能であると判断される。したがって、この評価により古い圧力容器の欠陥部に対して必要以上の補修や取替えあるいは補修によつて生じる可能性のある不具合を回避することができる。

実機の反応器にき裂が発生していると仮定してこの規格を適用するというフィージブルスタディを行うことによつて、水素環境で使用される圧力容器が今後継続的に運転することに問題がないかの評価手順を本研究によつて確立することができた。

## 論文審査の結果の要旨

(1) 要旨：本研究は、水素環境で使われる Cr-Mo 鋼の水素脆化と焼戻脆化の破壊じん性や延性き裂進展抵抗および一定保持荷重下での水素助長割れ進展特性に及ぼす複合効果について明らかし、圧力設備機器の安全性を FFS (Fitness For Service, 供用適性評価) で評価する手法を確立することを目的として行われたものである。水素脆化での破壊じん性を決定する方法については現状では確立されていないため、破壊じん性を簡便に決定する新たな方法としてオフセット・ポテンシャル・ドロップ法を提案している。

第 1 章では、本研究の背景と目的について述べている。

第 2 章では、材料のじん性評価法としてのシャルピー衝撃試験と破壊じん性試験についてまとめている。

第 3 章では、鋼が水素を吸蔵すると機械的特性を劣化させる水素脆化についてまとめている。

第 4 章では、Cr-Mo 鋼の経年劣化である焼戻脆化についてまとめている。

第 5 章では、シャルピー衝撃試験で評価されるじん性に対する焼戻脆化と水素脆化の複合効果についての結果を紹介している。

第 6 章では、破壊じん性を決めるために必要な安定き裂進展開始点の求め方について、オフセット・ポテンシャル・ドロップ法について述べている。

第 7 章は、焼戻脆化と水素脆化とが同時に発生した場合の安定き裂進展開始点の破壊じん性値および安定き裂進展抵抗に対してその複合効果についての実験結果について述べている。また、バナジウム添加による水素脆化抑制効果が粒内に微細に析出するバナジウムおよびモリブデンのカーバイドによることを明らかにしている。

第 8 章では、第 7 章で求めた破壊じん性値および水素助長割れの進展特性を使い、圧力容器に発生した仮想き裂状欠陥に対して FFS 評価を実施している。

第 9 章では、結論であり、本論文で得られた主要な成果と今後の課題をまとめている。

(2) 判定：本研究の成果は、1 報の学術論文（英文）としてまとめて掲載されており、国際会議では 2 件の発表を行っている。成果公表および工業的有用性としても十分満足できるものである。

以上を総合的に判断して、本論文に関する研究および成果は、博士（工学）学位論文としての水準を満足しており合格と認定する。