

© 1987 ISIJ

圧力容器用鋼の水素侵食におよぼす Mo および熱処理条件の影響

論文

岡田 八郎*

Effect of Mo Content and Heat Treatment Conditions on Hydrogen Attack of Steel for Pressure Vessel

Hachiro OKADA

Synopsis:

It has been shown in previous paper that good toughness of 1/2Mo steel could be obtained when the rate of cooling from the normalizing temperature was controlled to obtain a bainite content of 40% or more in the microstructure and tempering was conducted at a temperature about 650°C¹⁾. In this paper, metallurgical investigations were carried out relating to the deterioration in toughness caused by hydrogen attack and the effect of the above-stated toughness improving conditions on this resistance.

Hydrogen attack is observed in 1/2Mo steels utilized in heat exchangers, pipes and their fittings which were operated in a hydrogen environment below the safety limit shown in the API Nelson chart revised in 1983. In recent years, therefore, the reexamination of the susceptibility to hydrogen attack of 1/2Mo steels has been a matter of concern.

The effects of Mo content, microstructure and tempering temperature on hydrogen attack susceptibility of steel for pressure vessel were investigated by the specimens exposed to hydrogen at 450 and 500°C under 150 kgf/cm² G.

From the test results, it was confirmed that the resistance to hydrogen attack was improved with increasing Mo contents. In terms of the relationship between the resistance to hydrogen attack and the toughness behavior of 1/2Mo steel, it was also confirmed that the hydrogen attack deteriorated the toughness, but the toughness-improving conditions of 1/2Mo steel mentioned above reduced hydrogen attack susceptibility.

1. 緒 言

水素侵食は、高温高圧水素環境下で鋼中に拡散侵入した水素が、不安定な炭化物や固溶炭素との反応によりメタンを生成し、脱炭と結晶粒界割れを起こす水素損傷の一形態である。そのため、引張強度、延性あるいは靱性が著しく低下し、水素脆性と違って脱水素処理によつて回復しない非可逆的な現象である。

前報¹⁾における 1/2Mo 鋼の靱性挙動に関する実験結果から、1/2Mo 鋼の靱性は、そのミクロ組織中のベイナイト量が 40% 以上になるように焼ならし温度からの冷却速度を制御し、かつ 650°C 近傍の温度で焼もどし

処理を施した場合に、安定かつ最良になることが知られた。一方、前述のように水素侵食が生じた場合には、著しい靱性低下を起こす可能性がある。したがつて、上記の靱性改善条件を実用面に反映させる場合には、その条件が水素侵食抵抗性を低下せしめるものであつてはならない。

そこで、本報では、前報で求めた靱性改善条件が 1/2 Mo 鋼の水素侵食特性へ与える影響の検討を主目的として実験を行うこととした。

2. 供試材および実験方法

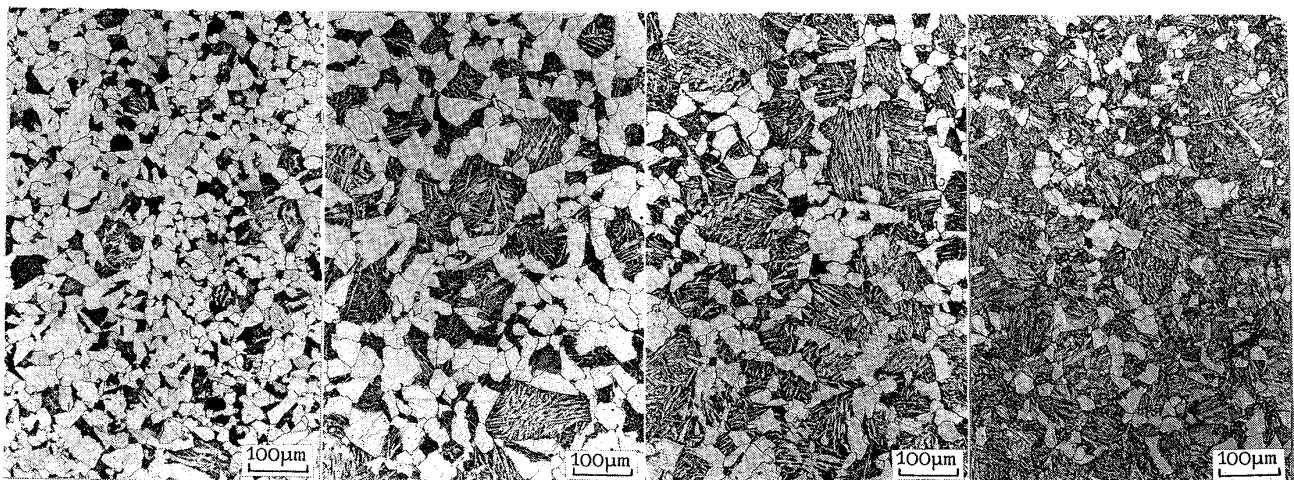
前報¹⁾で得られた 1/2Mo 鋼の靱性改善条件に相当す

Table 1. Chemical composition of material tested (wt%).

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	Al	N
0.15Mo	0.21	0.26	0.70	0.007	0.007	0.01	0.01	0.01	0.15	<0.005	0.0088
0.50Mo	0.23	0.26	0.72	0.007	0.007	0.01	0.01	0.01	0.50	<0.005	0.0083
1.0Mo	0.23	0.25	0.72	0.007	0.008	0.01	0.01	0.01	1.0	<0.005	0.0098

昭和 60 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 60 年 12 月 28 日受付 (Received Dec. 28, 1985)

* 千代田化工建設(株)材料技術部 (Chiyoda Chemical Engineering & Construction Co., Ltd., Moriya-cho Kanagawa-ku Yokohama 221)



0.15% Mo
(Cooling rate = 25°C/min)

0.50% Mo
(9°C/min)

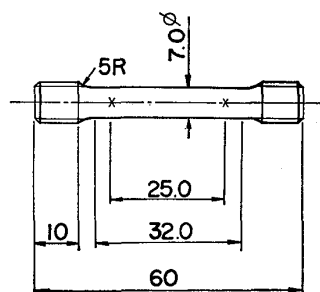
0.50% Mo
(25°C/min)

1.0% Mo
(25°C/min)

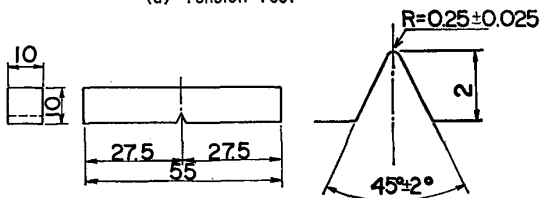
Photo. 1. Microstructures of materials normalized at 920°C and tempered at 650°C.

Table 2. Heat Treatment Conditions.

Material	Normalizing temperature (°C)	Cooling rate from normalizing temperature (°C/min)	Tempering temperature (°C)
0.15% Mo	920	25	650
0.50% Mo	920	9, 25	600, 650
1.0% Mo	920	25	600, 650



(a) Tension Test



(b) Impact Test

Fig. 1. Shapes of tension and impact test specimens.

る熱処理条件である焼ならし温度 (920°C) からの冷却速度を 25°C/min とし、焼もどし温度を 650°C (×5 h) としたものを基準条件とし、Mo 量、冷却速度および焼もどし温度を変化させたものを前報と同様の手順で作成し供試材とした。供試材の化学成分を Table 1 に、そ

れぞれの熱処理条件を Table 2 に、また、供試材のミクロ組織を Photo. 1 に示す。これらの供試材に対し、内容積 3 l のオートクレーブ中において、下記に示す条件で水素中曝露試験を実施した。

水素圧：150 kgf/cm²G

温度：450°C および 500°C

曝露時間：300 h

水素中曝露前後の供試材について、Fig. 1 に示す形状の試験片により引張試験およびシャルピー衝撃試験を、20°C の温度条件下で実施し、各供試材の水素侵食感受性を比較した。また、水素侵食発生の有無を確認するため、光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡 (SEM) により、粒界割れと気泡キャビティを観察し、さらに衝撃試験片の破面におけるバブル観察等を行った。

なお、水素中曝露後の試験片においては、拡散性水素除去のために高純度 Ar ガス (99.9995% Ar) 中で、300°C × 4 h の加熱処理を施した。

3. 実験結果

3.1 水素侵食発生に伴う機械的性質の劣化

Fig. 2 に 0.15% Mo 鋼における水素中曝露による引張性質の変化を示す。引張性質の中では、伸びおよび絞り値に対する影響が大きく、500°C での水素中曝露により、曝露前の値に比べて、伸び、絞り値とも約 69% の低下が認められた。このような水素中曝露による引張性質の変化は、0.15% Mo 鋼の 500°C 曝露材のみに認められ、0.15% Mo 鋼の 450°C 曝露材および 0.50% Mo、1.0% Mo 鋼の 450°C、500°C 曝露材には認められなかった。

一方、衝撃性質は、引張性質に比べて水素中曝露に対

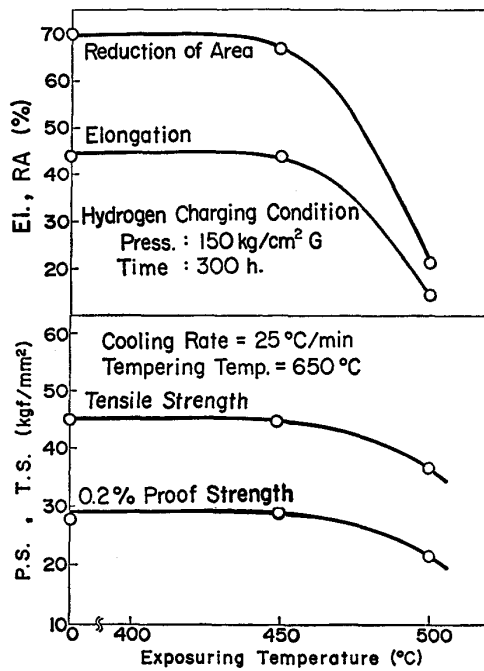


Fig. 2. Tensile properties of 0.15% Mo steel exposed to hydrogen at 450°C and 500°C for 300 h under 150 kgf/cm²G.

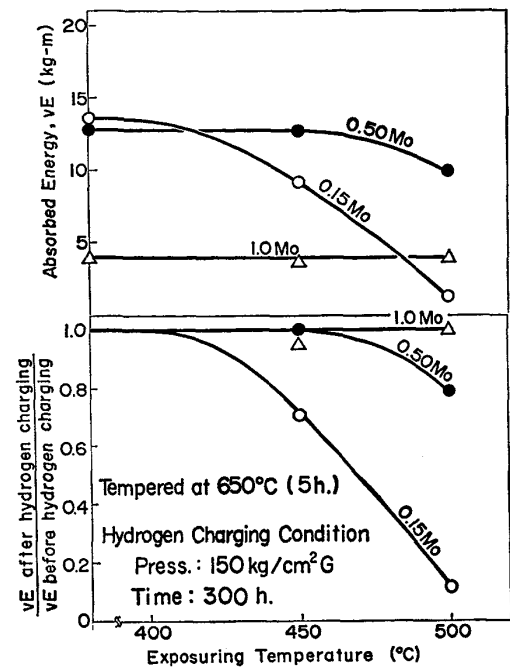


Fig. 3. Changes in absorbed energy of 0.15%, 0.50% and 1.0% Mo steels as a function of temperature of exposure to hydrogen for 300 h under 150 kgf/cm²G.

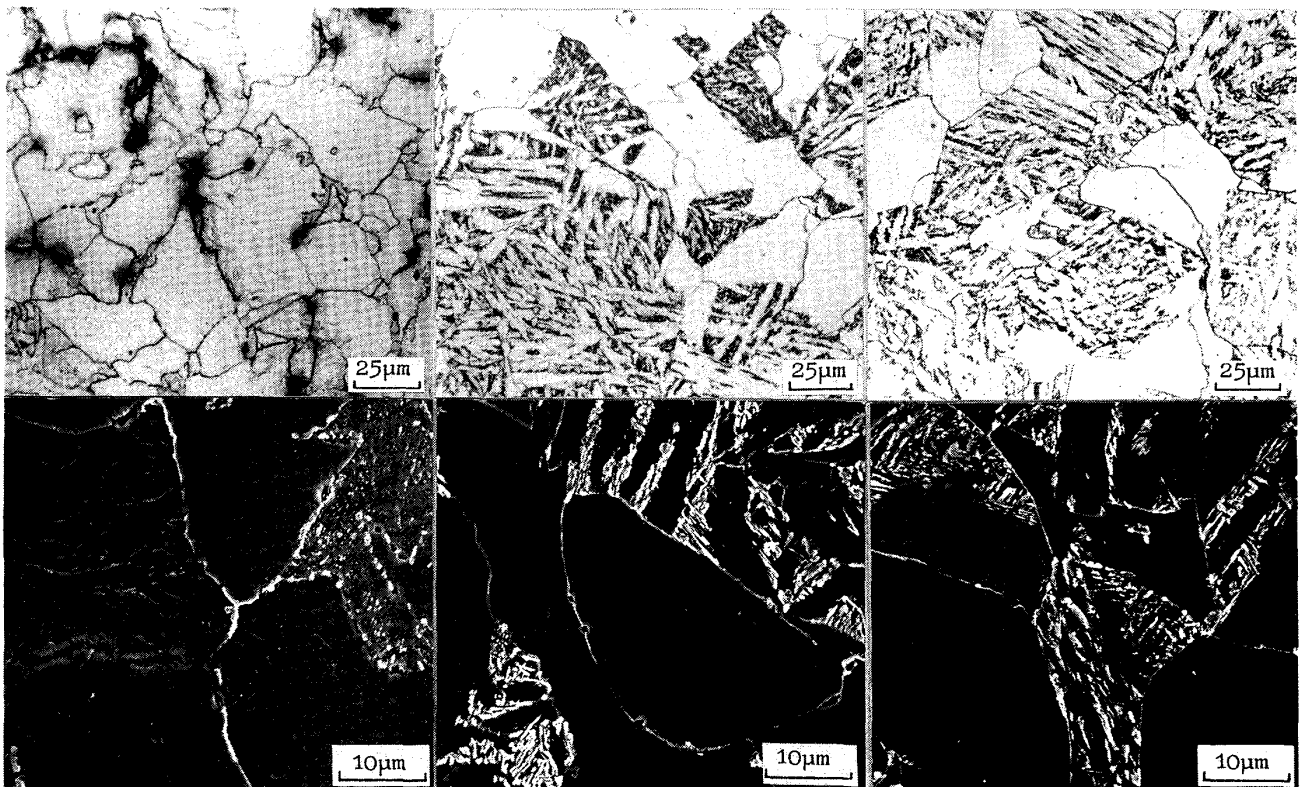


Photo. 2. Microstructures of 0.15%, 0.50% and 1.0% Mo steels exposed to hydrogen at 500°C for 300h under 150kgf/cm²G.

する変化に敏感性が認められた。Fig. 3 は、650°C で焼もどした試験片における水素中曝露温度上昇に伴うシャルピー衝撃吸収エネルギーの変化を Mo 量ごとに示したものである。Fig. 2 に示したように、引張性質の劣化が 0.15%Mo 鋼の 500°C 曝露材のみに認められたのに対し、衝撃性質においては、0.15%Mo 鋼の 450°C、500°C 曝露材および 0.50%Mo 鋼の 500°C 曝露材に劣化が認められた。1.0%Mo 鋼においては、引張試験結果と同様に、供試材の水素中曝露条件下では、衝撃値の変化は認められなかった。

引張試験片ネジ部（引張変形を受けていない部分）におけるマイクロ組織の光学顕微鏡および SEM 観察の結果を Photo. 2 に示す。0.15%Mo 鋼の 500°C 曝露材においては、微細な粒界割れとその周囲における脱炭が認められ、引張性質の劣化が水素侵食によるものであることを示している。光学顕微鏡観察によると、水素侵食の特徴を表す形態は、この 0.15%Mo 鋼の 500°C 曝露材にしか認められないが、SEM 組織においては 0.50%Mo 鋼の 500°C 曝露材のすべてにおいても、粒界上に気泡キャビティが観察され、これらが水素侵食を受けていることを示すと共に、その結果が衝撃値の低下と良い対応を示している。Photo. 2 には、1.0%Mo 鋼のマイクロ組織もあわせて示したが、粒界上に気泡キャビティは観察されなかった。すなわち、水素侵食による機械的性質の劣化は、本実験結果においては、引張性質が光学顕微鏡組織の倍率の領域で対応するのに対し、衝撃性質はより敏感に反応し、SEM による観察結果と良く対応す

る。

3.2 水素侵食抵抗性におよぼす諸因子の影響

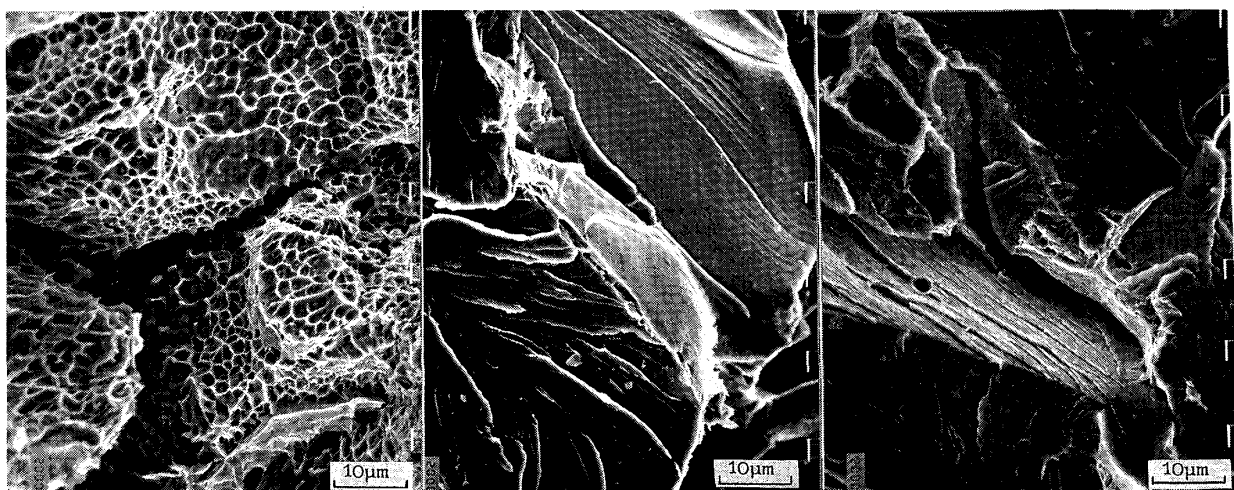
前項の結果より、衝撃性質の方が引張性質より水素侵食に対して敏感に反応することが知られ、また本実験の目的である 1/2Mo 鋼の靱性におよぼす水素侵食の影響を評価する上でも衝撃性質によつて評価することが望ましいことが確認されたので、以下の検討は衝撃試験結果を基にして行つた。

(1) Mo 量の影響

前掲の Fig. 3 に示したように、水素中曝露による靱性低下の傾向は、Mo 量が少ないほど顕著に認められる。

Photo. 3 は、500°C 曝露材における 0.15%Mo、0.50%Mo および 1.0%Mo 鋼の衝撃試験後の破面の状況を SEM により観察した結果である。0.15%Mo 鋼の破面には、水素侵食によるバブルの発生が破面上のかかなりの部分において認められるのに対し、0.50%Mo 鋼および 1.0%Mo 鋼においては、へき開破面が支配的で、0.50%Mo 鋼の破面から、その粒界部分にわずかにバブルと判断されるものが認められる。

以上の結果から、Mo 量増加による水素侵食抵抗性の向上が顕著に認められる。これは焼もどし過程における Mo を含む炭化物の析出状況が大きな影響をおよぼした結果と考えられる。前報¹⁾で示した抽出残渣の X 線回折結果および抽出残渣中の Fe と Mo 量の分析結果を示した Fig. 4 から、650°C の焼もどしにより、1.0%Mo 鋼においては Mo_2C の析出が同定され、また 0.50



0.15%Mo

0.50%Mo

1.0%Mo

Cooling rate : 25°C/min
Tempering temperature : 650°C (×5h)

Hydrogen charging condition
Temperature : 500°C
Pressure : 150kg/cm²G
Time : 300h

Photo. 3. Fracture surfaces of impact test specimens of 0.15%, 0.50% and 1.0% Mo steels exposed to hydrogen at 500°C for 300h under 150kgf/cm²G.

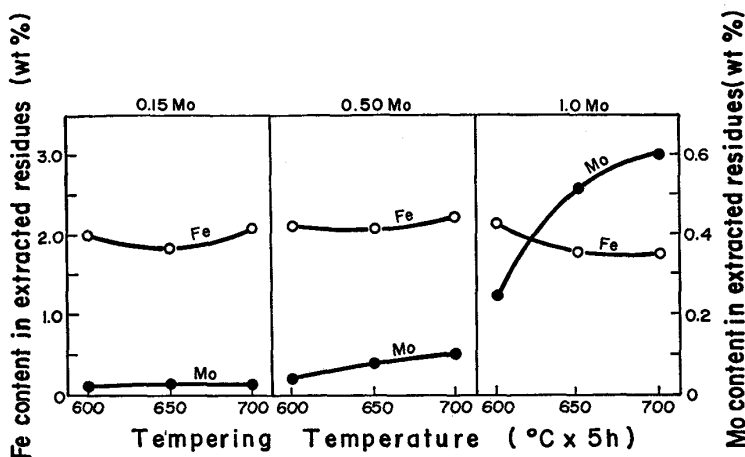


Fig. 4. Changes in Fe and Mo content in residues extracted from 0.15%, 0.50% and 1.0% Mo steels as a function of tempering temperature.

Mo 鋼においてはX線回折によつては検出されないが、Fig. 4 の抽出残渣の分析結果から炭化物中の Mo 量の増加が認められる。これに対し 0.15%Mo 鋼においては炭化物中の Mo 量の変化が認められず、これらの分析結果による Mo を含む炭化物の析出挙動は Fig. 3 における水素侵食抵抗性の挙動と良い対応を示す。

(2) ミクロ組織の影響

焼ならし温度からの冷却速度の違いは、1/2Mo 鋼に顕著なミクロ組織変化をもたらすことが前報¹⁾の結果から知られた。本実験では焼ならし温度からの冷却速度を 9°C/min と 25°C/min に変化させ、0.5%Mo 鋼の水素侵食抵抗性におよぼすミクロ組織の影響を検討した。Photo. 1 から、9°C/min の冷却速度の場合、ミクロ組織中のベイナイト量は約 20%、フェライト量は約 75%であり、25°C/min ではベイナイト量 50%、フェライト量 50% である。

水素中曝露後の衝撃試験結果を Fig. 5 に示す。500°C の水素中曝露により靱性の低下が認められる。9°C/min と 25°C/min の冷却速度の違い、すなわちミクロ組織の変化による靱性低下度の差は、両者の間ではあまり顕著ではないが、冷却速度が大きくミクロ組織中の B 量の多い方が若干高い水素侵食抵抗性が認められる。この結果は千葉ら²⁾の実験による水素侵食の初期段階ではフェライト中に固溶する炭素が粒界に拡散移動し水素と反応する方が、炭化物と水素の反応より優先し、フェライト粒界にまず気泡キャビティが形成する結果と対応しており、冷却速度が大きくなることによるミクロ組織中の B 量の増加が相対的にフェライト粒界を減少させ、水素侵食抵抗性を高めたものと考えられる。Photo. 2 に示した SEM 観察結果からも、気泡キャビティの発生がフェライト粒界により多く、また大きなものであることが認められる。

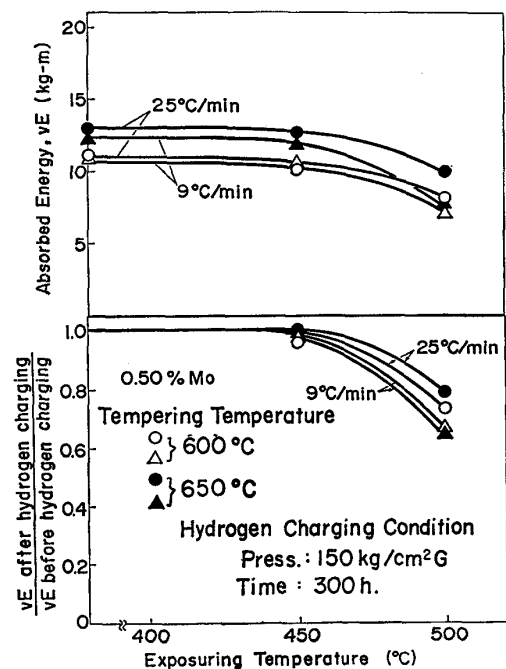


Fig. 5. Changes in absorbed energy of 0.50% Mo steel cooled from normalizing temperature of 920°C at a rate of 9°C/min and 25°C/min as a function of exposing temperature to hydrogen for 300h under 150kgf/cm²G.

(3) 焼もどし温度の影響

前報¹⁾における抽出残渣の X 線回折結果および Fig. 4 から、焼もどし温度の上昇に伴つて Mo₂C の析出および炭化物中の Mo 量の増加が認められる。すなわち、0.50%Mo 鋼においては、700°C の焼もどしにより Mo₂C の析出が認められ、650°C の焼もどしにおいては、Mo₂C は同定されなかつたものの、炭化物中の Mo 量の増加が認められる。このような焼もどし温度上昇に伴う Mo 炭化物の析出は、前記(1)項の結果と同様に、水素侵食抵抗性を改善せしめるものと考えられる。Fig.

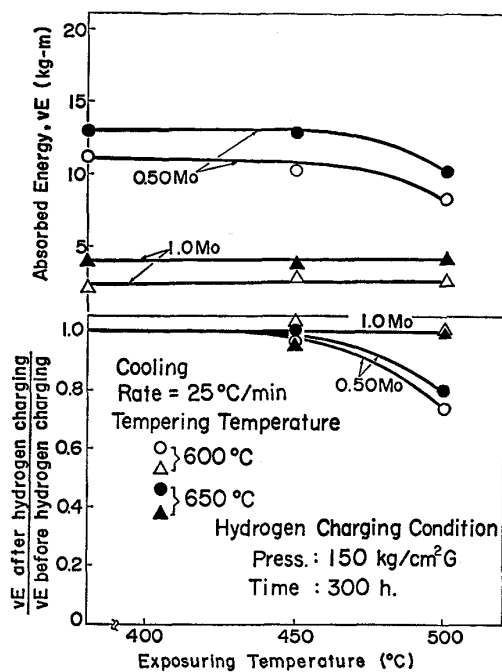


Fig. 6. Changes in absorbed energy of 0.50% and 1.0% Mo steels tempered at 600°C and 650°C as a function of exposure to hydrogen for 300h under 150kgf/cm²G.

6 は、焼もどし温度が 600°C および 650°C の場合における 0.50%Mo 鋼および 1.0%Mo 鋼の衝撃吸収エネルギーの変化を示したものである。本実験条件下では、1.0%Mo 鋼においては靱性の低下は認められないが、0.5%Mo 鋼では 500°C の水素中曝露により、靱性の低下が認められる。600°C の焼もどし温度の場合、650°C で焼もどした時に比べて若干靱性低下率が大きい。耐水素侵食性の観点においては、炭化物中の Mo 量を増加させる条件、すなわち 650°C よりも 700°C で焼もどした場合の方がその効果が大きいことが知られているが、前報¹⁾で得られた靱性改善条件の一つである 650°C による焼もどしによつても、1/2Mo 鋼の水素侵食抵抗性がそれより低い温度での焼もどしに比べて改善される傾向をもつことが確認された。

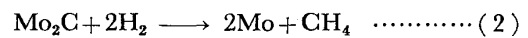
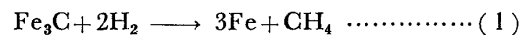
4. 考 察

高温高圧水素環境で使用される鋼の選択基準は、通称ネルソン曲線と呼ばれ、実装置における水素侵食事例を基にした指針が American Petroleum Institute (API) により示されている³⁾。最近 1/2Mo 鋼において、同曲線の安全域における水素侵食事例が多く経験され^{3)~5)}。API においてもその取扱いが討議されている現状にある。

水素侵食抵抗性におよぼす Mo 添加の効果は、本実

験結果からも顕著に認められているが、ROSETHAL ら⁶⁾が行つた実験結果の中でも確認されている。また実装置の使用経験をまとめた API の報告⁷⁾においても、Mo 当量 (Mo+1/4Cr+V) による整理により、Mo 添加 (0.05~0.50%) が水素侵食発生の温度-水素圧条件を高い側に移行させる効果が示されている。

水素侵食は、鋼中に侵入した水素が固溶炭素または炭化物と反応しメタンを生成すること起因するものと考えられており、炭化物と水素の反応においては、炭化物が Fe₃C および Mo₂C である場合には、それぞれ次に示す反応式が成り立つものと考えられる。



根本ら⁸⁾は、炭化物の安定性と水素侵食抵抗性との関連について、RICHARDSON⁹⁾による炭化物生成の標準自由エネルギーから、炭化物と水素の反応標準自由エネルギーを求め、Fe₃C に比べ Mo₂C は水素に対してより大きな安定性を持つことを示している。したがつて、本実験結果において、600°C から 700°C の焼もどし温度範囲の中で、温度が上昇するにつれて炭化物中の Mo 含有量が増加した結果は、焼もどし温度を高く設定することが、より安定な炭化物を析出させ、水素侵食抵抗性を改善する一手段となり得ることを示している。千葉ら²⁾が行つた実験結果からも、1/2Mo 鋼製使用済熱交換器に 650°C~700°C で焼鈍処理を施すと、フェライト地内に Mo₂C が析出し、水素侵食による粒界割れに対する抵抗性の向上に寄与することが確認されている。このような Mo₂C 析出に伴う粒界割れ発生の低減効果は、山崎ら¹⁰⁾により、フェライト地の炭素濃度が変化することに関連するものと考えられている。すなわち、Fe₃C のように炭化物周辺の炭素濃度が大きいものほど炭素の移動速度が大きく、粒界周辺の炭素濃度も大きくなるが、Mo₂C 等のように炭化物周辺の炭素濃度の小さいものは、水素侵食を生じにくくすると説明されている。

一方、前報¹⁾で示したように、焼もどし温度を 650°C から 700°C に上昇させると炭化物の粗大化を生じる。この傾向は水素侵食抵抗性を低下させるものと推察される。このような炭化物の大きさと水素侵食抵抗性との相関は、水素侵食抵抗性におよぼすミクロ組織の影響を検討した Fig. 5 と関連付けて推測することができよう。Fig. 5 から、若干ではあるが、ベイナイト量の増加が、抵抗性を高める傾向が認められる。この結果は、前述したように、供試材の実験条件下では、水素侵食はまだ初期段階と考えられるため、ミクロ組織中のベイナイト量増加による相対的なフェライト粒界減少の効果が出たも

のと考えられるが、他の効果として、炭化物の微細化効果も影響をおよぼしているものと推察される。すなわち、前報¹⁾の結果の中で、ミクロ組織中のベイナイト量が増加すると、個々の炭化物が微細化し、結果として焼もどしによる粒界炭化物の粗大化が抑制されることを示した。この傾向は、水素侵食発生個所を分散させ、その進展速度を遅らせる効果があると推測される。しかし、本実験結果においては、その効果は直接確認されておらず、炭化物の大きさ、分布状態と関連付けた水素侵食進展速度に関するデータの採取が今後の課題として残された。

以上の実験結果および考察から、前報¹⁾で求めた 1/2 Mo 鋼の靱性改善条件は、水素侵食抵抗性を阻害するものではないことが確認されたが、水素侵食を靱性劣化を生ずる現象の一つとして考えた場合には、焼もどしによる靱性変化と水素侵食による靱性劣化を関連付けて検討する必要がある。そこで以下に、靱性要求値の観点から、1/2Mo 鋼の靱性改善条件と水素侵食抵抗性の相関性を検討した。

圧力容器用 1/2Mo 鋼板の材料規格としては、ASTM A 204, JIS G3103 などが適用されているが、その両規格とも靱性に関する規定は示されていない。また設計規格として常用される ASME Code Section VIII などにおいても、圧力容器用 1/2Mo 鋼のような高温で使用される容器用材料における靱性要求値は規定されていない。これは、一般に狭義の構造設計では、脆性破壊が直接的な影響を与えることがないとの考え方によるもので、材料の選定は化学成分と許容応力の設定などに直接結びつく引張性質のみの規定によっているのが実情である。一方、低温用圧力容器においては、設計規格 (JIS B8243, ASME Section VIII など) 上の靱性要求値が引張強さのレベルに応じて設定されている。たとえば ASME Section VIII Division 1 においては、容器としての最低使用温度におけるシャルピー吸収エネルギー値として、圧力容器用 1/2Mo 鋼の強度レベルに対応する 52.8~66.8 kgf/mm² の引張強さの範囲での要求値を 2.8 kgf-m 以上としている¹¹⁾。

上記の設計規格の靱性要求値については、設定の理論的背景の不明確さを指摘する向きもあるが¹²⁾。本報では、2.8 kgf-m のシャルピー吸収エネルギー値を靱性要求値の一つの目安と考え、以下にこの靱性要求値を基準として、圧力容器用 1/2Mo 鋼の靱性改善条件と水素侵食抵抗性改善条件を比較検討した。

Fig. 3 から、0.15%Mo 鋼の 500°C 曝露材はすでに 2.8 kgf-m の吸収エネルギー値を下回っており、著しい靱性劣化を生じたものと判断することができる。また、

1.0%Mo 鋼においては、水素侵食を生じていないものの、初期靱性値が約 4 kgf-m であり、仮に圧力容器の最低使用温度を運転停止時の気温を考慮して 0°C と設定し、供試材の試験温度 20°C との吸収エネルギー値の差¹⁾を考慮すると、2.8 kgf-m の靱性要求値は満足されない。これらに対し 0.50%Mo 鋼においては、供試材の水素中曝露条件の範囲内では、前報¹⁾の結果より得られる 0°C と 20°C の衝撃試験温度の差による吸収エネルギー値のシフト量約 4 kgf-m を差し引いても、2.8 kgf-m の靱性要求値は満足される。たとえば、Fig. 5 において最も靱性の低下が認められた冷却速度 9°C/min, 焼もどし温度 600°C の 500°C 曝露材においても、吸収エネルギー値が 7.5 kgf-m あるので、水素侵食を受けたのちもシャルピー衝撃曲線の傾きが変わらないものと仮定すれば、0°C での吸収エネルギー値は 3.5 kgf-m となり靱性要求値は満足される。

以上の評価を靱性低下率の面からとらえてみると、Fig. 3, 5 および 6 それぞれの下図 (図の縦軸は靱性低下率ではなく、初期靱性値と水素侵食後の靱性値の比で示してある) は、水素侵食後の靱性低下率を非破壊的な手法で知ることができれば、使用中の実容器材においても、初期靱性値との比較により水素侵食後の靱性が評価しうることを示している。Fig. 7 は、本実験の供試材を用いて、水素侵食による靱性低下傾向と超音波探傷減衰法による B₃ エコー (3 回目の反射エコー) の比との相関を求めたものである。同図により、今後のデータの拡充は必要とされようが、超音波探傷により水素侵食による靱性低下率を評価しうることをわかる。

一方、前報¹⁾で求めた 0.51%Mo 鋼のシャルピー衝撃試験データから、0°C における吸収エネルギー値とベイ

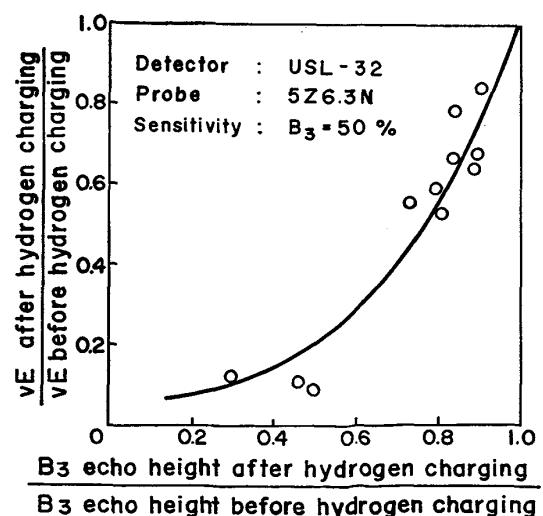


Fig. 7. Relation between changes in absorbed energy and changes in B₃ echo height.

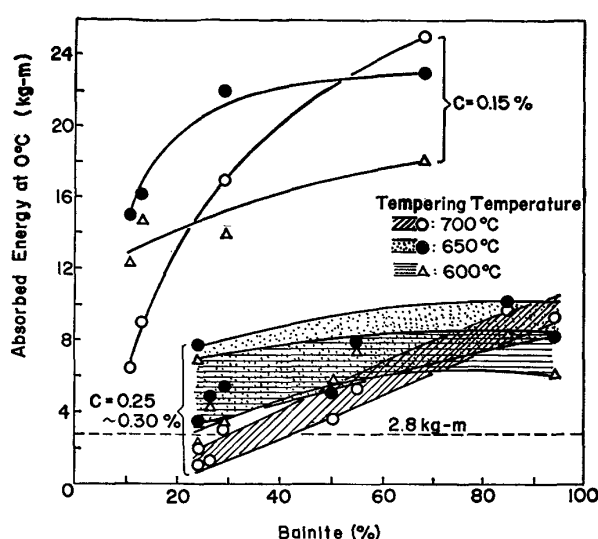


Fig. 8. Relation between absorbed energy at 0°C and volume fraction of bainite in 0.15~0.30%C and 0.50% Mo steels.

ナイト量の相関は Fig. 8 のように示される。靱性改善条件であるベイナイト量 $>40\%$ 、および焼もどし温度 650°C の条件下では、C量にかかわらず $2.8\text{ kgf}\cdot\text{m}$ の靱性要求値が満足される。他方、焼もどし温度が 700°C の場合は、含有C量が高い領域で、ベイナイト量 $<43\%$ の時、靱性要求値が満足されないことがわかる。したがって、超音波探傷等で水素侵食による靱性低下率を評価する前提のもとに、前報¹⁾で求めた压力容器用 $1/2\text{Mo}$ 鋼の靱性改善条件は、压力容器の脆性破壊を防止するための条件として、水素侵食による靱性低下を加味しても、適正な条件であるものと判断される。

5. 結 言

$1/2\text{Mo}$ 鋼の靱性改善条件であるマイクロ組織中のベイナイト量が 40% 以上となるように焼ならし温度からの冷却速度を制御し、かつ 650°C での焼もどし処理を与えた場合の水素侵食抵抗性に与える影響を検討することを目的として、Mo量および熱処理条件を変化させた供試材により、水素中曝露試験を行い、次のような結論を得た。

(1) 水素侵食抵抗性に対し、Mo量の多少は大きく影響し、Mo量の増加が抵抗性を向上せしめることが確

認された。また $1/2\text{Mo}$ 鋼においては、 $650\sim 700^{\circ}\text{C}$ の焼もどし処理を施すと、炭化物中のMo量が増加し、水素侵食抵抗性を向上せしめることが知られている Mo_2C の析出量が増加することが確認された。

(2) $1/2\text{Mo}$ 鋼において、マイクロ組織中のベイナイト量の増加は水素侵食抵抗性を若干ではあるが向上させることが確認された。

(3) 以上の結果から、前述の $1/2\text{Mo}$ 鋼の靱性改善条件は、水素侵食抵抗性を阻害するものではなく、抵抗性向上をもたらす傾向のあることが推察された。

(4) 低温用压力容器の設計規格における靱性要求値である最低使用温度で $2.8\text{ kgf}\cdot\text{m}$ の吸収エネルギーを準用し、 $1/2\text{Mo}$ 鋼製压力容器の運転停止時の気温を考慮した最低使用温度を 0°C と仮定して、水素侵食抵抗性改善条件と靱性改善条件を比較検討した。その結果、 700°C の焼もどし温度は 650°C の場合に比べて Mo_2C 析出量増加の面からは水素侵食抵抗性を改善しうるものではあるが、靱性要求値の観点から、焼もどし温度として高すぎることを確認され、前述の靱性改善条件が、水素侵食による靱性低下を加味した上でも、適正な条件であると判断された。

おわりに、本実験を通じて有益かつ貴重な御助言をいただいた(株)日本製鋼所大西敬三博士、千葉隆一博士並びに村上賀国博士に深甚なる感謝の意を表する。

文 献

- 1) 岡田八郎, 内藤勝之, 山本 寛, 村上賀国: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 1913
- 2) 千葉隆一, 大西敬三, 石井邦雄, 前田啓吉: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 1542
- 3) API Pub. 941 3rd Ed. (1983)
- 4) 千葉隆一, 大西敬三, 石井邦雄, 前田啓吉: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 1518
- 5) 岡田八郎: 第2回日中技術交流会発表論文集 (化学工学協会), (1984), p. 67
- 6) P. C. ROSENTHAL, W. SCHROEDER, F. H. VITOVEC: Proc. API, 43 (1963), p. 98
- 7) API Pub. 941, (1970)
- 8) 根本 正, 正岡 功, 田野崎和夫: 溶接学会誌, 34 (1965), p. 773
- 9) F. D. RICHARDSON: JISI, 175 (1953), p. 33
- 10) 山崎大蔵, 新川利和, 榎本博俊, 大江 力: 三菱重工技報, 13 (1976), p. 63
- 11) ASME Section VIII, Div. 1, (1983)
- 12) 豊田政男: 溶接学会誌, 54 (1985), p. 10