

平成 21 年度卒業論文要旨

(東京大学工学部 システム創成学科 環境・エネルギー・システムコース)

## 水素ガスパイプライン鋼管における水素脆性の評価

Evaluation of Hydrogen Embrittlement in Hydrogen Gas Pipeline

学籍番号 80852 濱出井 優  
指導教員 粟飯原周二

(平成 22 年 2 月 3 日提出)

Keywords: 水素パイプライン、高張力鋼、き裂伝播抵抗、水素脆化

### 1. 緒言

産業革命以降、化石燃料を浪費してきた結果、地球温暖化という深刻な環境問題を引き起こした。諸国が省エネや新エネルギーの開発などの温暖化抑制・防止対策を講じている反面、発展途上国の人々の人口増加と経済発展により、温暖化になりますます拍車がかかることで危ぶまれている。持続可能な社会の実現のために、必須な役割を担うとされるのが水素である。

大量供給が出来ること、天然ガスインフラの転用利用などの経済性を考慮すると、水素の輸送方法としてはパイプラインが最も現実的な選択肢となるが、そこで問題となるのが水素脆性である。

本研究では、水素ガスパイプラインに適用可能な高強度鋼管材料についての水素脆性の挙動を調査した。特に、不安定性破壊への影響調査のため、水素チャージを施した鋼管材に対して、準静的・動的破壊力学試験の実施した。また、転位によるトラップを考慮した水素拡散モデルを構築し、水素脆化の荷重速度依存性について考察した。

### 2. 供試材および実験方法

実験には、試験片として X65UO 鋼管（新日本製鐵君津製鐵所製造）を使用し、水素チャージ（新日本製鐵㈱鉄鋼研究所）をした試験片に対して、準静的 3 点曲げ試験、及び、落重動的試験を実施した。水素チャージ条件は比較のため、(1)「50°C、45MPa、48h」、(2)「95°C、45MPa、48h」とした。条件(1)では、温度はパイプラインの上限である 50°C とし、また、圧力は上限として 20MPa 程度を考えればよいが、安全側としてそれよりも高い 45MPa と設定した。条件(2)は、水素脆性の影響を明確にするために、条件(1)よりもさらに高温にし、水素侵入濃度を高くすることとした。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 破壊力学試験結果

準静的、及び、動的試験の延性き裂伝搬手高曲線(J-R 曲線)を比較したところ (Fig.1)、準静的試験において、水素チャージの有無による抵抗曲

線の差が見られた。特に、き裂長さ 5mm 程度までにおいてその差が顕著である。動的試験においては、抵抗曲線の若干の差はあるものの、水素チャージの影響は少ないと言える。

#### 3.2 SEM 破面観察

水素チャージの有無による延性破面への影響があるかを調べるために、SEM による破面観察を行った。延性き裂発生抵抗の指標となるストレッチゾーン幅は、準静的試験、動的試験とで幅の差はあるが、水素チャージによる影響はないようである。一方、ディンプル面では、無チャージ材 (Fig.3) に比べ水素チャージ材 (Fig.4) の方が平坦な面が多いことが見て取れた。

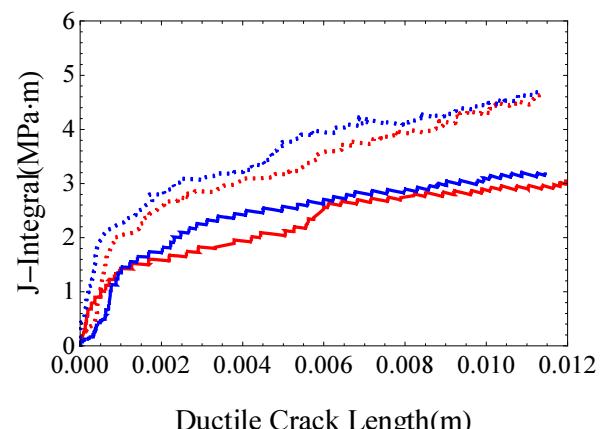


Fig.1 Crack Propagation Resistance

Table.1 Comparison of hydrogen density.(mass ppm)

	Analysis	Calculation
(1), static	<0.01	0.0212
(1), dynamic	0.01	0.0213
(2), static	0.14	0.0776
(2), dynamic	0.18	0.0776

### 3.2 水素拡散の解析と考察

転位トラップを考慮した水素拡散モデルの構築を行った。残存水素濃度分析結果とモデルによる計算結果を照らし合わせた結果(Table.1)、両者のオーダーは一致しており、整合性があると言える。また、計算によると、準静的試験の方が動的試験よりも、き裂先端近傍における水素濃度が高い。これは、準静的試験と動的試験とでは、準静的試験の方がき裂伝播抵抗が低下する傾向があるのと一致する。

## 4. 結言

本研究において水素チャージ鋼管材に対し、破壊力学試験を行うことで水素脆性の影響の評価を行った結果、以下の事項が結論付けられる。

- (1) 水素ガスパイプラインで想定される条件では、鋼管中に侵入する水素の濃度は極めて低いことが実験と計算で確認された。
- (2) 低水素濃度下において、今回調査した高強度鋼管は準静的試験で若干の延性き裂伝播抵抗値の低下が認められた。
- (3) (2)に対応し、水素侵入により延性破面のディンプル形状が平坦になる傾向が認められた。
- (4) 動的試験においては、延性き裂伝播抵抗値に対して水素は大きな影響を及ぼさないことが確認された。
- (5) 転位による水素トラップを考慮した水素の鋼中拡散のモデルを構築し、計算を行ったところ、荷重速度が高いほど、き裂先端近傍に集中する水素の濃度は低下する傾向が認められ、水素脆性の荷重速度依存性にこのような水素濃度差も影響していることが示唆された。

水素ガスパイプラインの不安性延性破壊が動的現象であることを考えると、今回の動的試験では抵抗曲線に対して水素の影響は顕著ではなかったので、水素脆化を懸念する必要はない。しかし、準静的試験では若干といえども水素の影響が表れたので、水素ガスパイプラインで潜在欠陥が存在するような場合を想定すると、き裂発生に対する評価は慎重に行う必要がある。

## 参考文献

- [1] 大橋一彦, 平田賢, William C. Leighty. 北東アジア水素ハイウェーの提案＜天然ガス社会から水素社会へ＞. 配管技術, Jan 2006.
- [2] 水素供給インフラ・日経サイエンス. Dec 2006.
- [3] William C. Leighty, 平田賢, 大橋一彦, 朝日均, Jacque Benoit, Geoffrey Keith. 大規模新エネルギー－水素エネルギーシステム:分散型のエネルギー源を結ぶ水素パイプライン＜22回世界ガス會議・最優秀論文＞.
- [4] 石塚哲夫, 朝日均. 水素含有ガスのパイプライン輸送における実用ラインパイプ材の適用可能性.

CAMP-ISIJ, Vol.19(2006)-373.

- [5] 平田賢. 21世紀:「水素の時代」を迎える北東アジアにハイタンパイプライン網の構築を. 配管技術, 2002 増刊号
- [6] 今井康仁, 粟飯原周二. ラインパイプ用鋼管材料の延性き裂伝播抵抗値の動的測定. 日本鉄鋼協会第156回秋季講演大会, CAMP-ISIJ vol.21(2008)-1431.
- [7] P.Sofronis, R.M.McMeeking. Numerical Analysis Of Hydrogen Transport Near A Blunting Crack Tip. J.Mech.Phys.Solids, Vol. 37. No.3. pp.317-350. 1989.
- [8] 三村宏, 町田進. 基礎材料強度学. May 2000.
- [9] 深井有, 田中一英, 内田裕久. 水素と金属 次世代への材料学. Dec 1998.
- [10] 大橋一彦. 持続可能な水素社会を目指す北東アジア天然ガス・パイプライン網の構築. CAMP-ISIJ, Vol.19(2006)-369.
- [11] 資源エネルギー庁. 2030年を見通した、燃料電池/水素エネルギー社会の展望. Apr 2004.
- [12] NEDO 燃料電池・水素技術開発部. 技術開発ロードマップ. Jun 2006.
- [13] 鈴木健雄, 河端伸一郎, 富田哲爾. 欧米における既存の天然ガス供給インフラを活用した水素輸送システムの現状. IEEJ, Jul 2005.
- [14] 西丸三善. 水素エネルギーの市場予測 水素エネルギー社会への道筋の考察, 表面技術, Vol. 56, p.176 (2005).
- [15] T.L. Anderson, Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications, CRC Press, 2005.

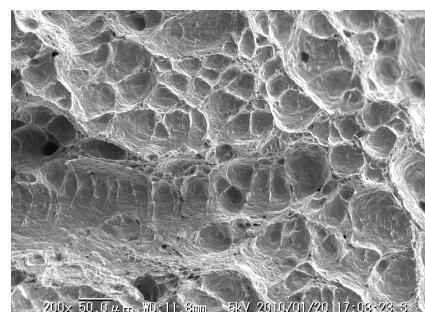


Fig.3 Fracture surface of non-charge test piece.

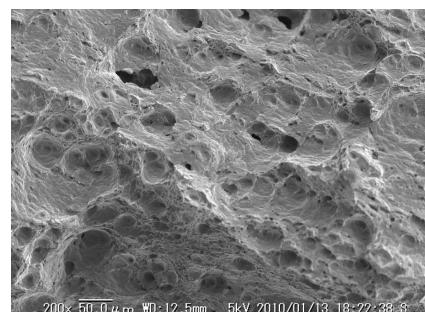


Fig.4 Fracture surface of charge(2) test piece