

水素スタンドで使用される低合金鋼製圧縮水素用設備  
(蓄圧器および圧縮機)に関する技術文書

JPEC-TD 0003 (2020)

令和3年(2021年)3月12日 改訂

一般財団法人 石油エネルギー技術センター

### 低合金鋼技術文書検討分科会委員(2020年度)

主査 東京電機大学 工学部 教授 辻 裕一

委員 東京大学 生産技術研究所 教授 吉川 暢宏

委員 青山学院大学 理工学部 客員教授 小川 武史

委員 慶應義塾大学 理工学部 教授 小茂鳥 潤

委員 横浜国立大学 IAS リスク共生社会創造センター 教授 澁谷 忠弘

事務局 一般財団法人 石油エネルギー技術センター

### 低合金鋼技術文書検討 TF メンバー(2020年度)

一般財団法人 石油エネルギー技術センター 佐藤 慎也・小林 拓・福本 紀

株式会社日本製鋼所 荒島 裕信

国立大学法人 九州大学 松永 久生

一般財団法人 金属系材料研究開発センター 前田 尚志

高压ガス保安協会 加藤 明

# 目次

1 適用範囲	1
2 引用規格	1
3 用語の意味	2
4 材料	3
4.1 水素適合性の判定	3
4.2 硬さ試験	4
4.3 衝撃試験	5
4.4 製品と同等の材料の定義	5
4.4.1 鍛鋼品における「製品と同等の材料」の定義	5
4.4.2 継目無鋼管における「製品と同等の材料」の定義	6
5 設計	6
5.1 許容引張応力の設定	6
5.2 最小厚さ	7
5.3 疲労解析	7
附属書 A 蓄圧器に適用する場合の追加事項	
A.1 適用範囲	8
A.2 破裂前漏洩条件の検証	8
A.3 疲労解析	8
A.3.1 疲労解析における応力振幅の設定方法	8
A.3.2 蓄圧器の使切り使用回数設定	8
附属書 B 圧縮機に適用する場合の追加事項	
B.1 適用範囲	10
B.2 圧縮機シリンダ円筒胴の疲労解析	10
附属書 C 低合金鋼の水素適合性評価の事例	11
解説	

## 1 適用範囲

水素スタンドで使用される低合金鋼製圧縮水素用設備(蓄圧器、圧縮機シリンダ及び圧縮機シリンダヘッド、以下「設備」という。)の詳細基準事前評価申請を想定し、高圧水素環境下での長期使用中の水素適合性に鑑み、現行の特定設備検査規則及び特定設備の技術基準の解釈の規定以外に考慮すべき注意事項及び判定根拠を例示する。

なお、この技術文書に規定のない項目については、**特定設備検査規則**および**特定設備の技術基準の解釈**に準拠する。

- 常用の圧力 : 40 MPa を超える圧力とする。
- 設計圧力 : 高圧水素環境下で当該材料特性を評価した際の試験圧力を超えない圧力とする。
- 設計温度 : 下限温度を-30 °C、上限温度を 200 °Cとする。
- 構造 : 溶接構造を有する設備は除くものとする。

## 2 引用規格

- 一般継目無し容器の技術基準の解釈(別添1):平成27年6月29日第2次改訂版  
特定設備検査規則(昭和51年通商産業省令第四号)  
特定設備の技術基準の解釈(別添1):令和元年12月18日第5次改訂版  
特定設備の技術基準の解釈(別添7):令和元年12月18日第5次改訂版  
JIS B 8266:2006 圧力容器の構造-特定規格  
JIS G 0306:2009 鍛鋼品の製造、試験及び検査の通則  
JIS G 0582:2015 鋼管の自動超音波探傷検査方法  
JIS G 0583:2012 鋼管の自動渦電流探傷検査方法  
JIS G 0587:2007 炭素鋼鍛鋼品及び低合金鋼鍛鋼品の超音波探傷試験法  
JIS Z 2244:2009 ビッカース硬さ試験法  
JIS Z 2245:2016 ロックウェル硬さ試験法  
JIS Z 2320-1:2017 非破壊検査-磁粉探傷試験-第1部:一般通則  
JIS Z 2320-2:2017 非破壊検査-磁粉探傷試験-第2部:検出媒体  
JIS Z 2320-3:2017 非破壊検査-磁粉探傷試験-第3部:装置  
JIS Z 2343-1:2017 非破壊検査-浸透探傷試験-第1部:一般通則:浸透探傷試験方法及び浸透指示模様分類  
JIS Z 2343-2:2017 非破壊試験-浸透探傷試験-第2部:浸透探傷剤の試験  
JIS Z 2343-3:2017 非破壊試験-浸透探傷試験-第3部:対比試験片  
JIS Z 2343-4:2001 非破壊試験-浸透探傷試験-第4部:装置  
JPVRC 日本圧力容器研究会 材料部会 水素脆化専門委員会, 2-1/4Cr-1Mo 鋼の水素脆化

割れ下限界応力拡大係数  $K_{IH}$  の測定とその評価:1989

KHKS 0220:2020 超高压ガス設備に関する基準

NDIS 2431:2017 日本非破壊検査協会規格「圧縮水素スタンド用鋼製蓄圧器の超音波探傷試験方法」

ASME Sec.VIII Div.3 KD-10:2019 Special Requirements for Vessels in Hydrogen Service

ASTM G142-98:2016 Standard Test Method for Determination of Susceptibility of Metals to Embrittlement in Hydrogen Containing Environments at High Pressure, High Temperature, or Both

### 3 用語の意味

#### a) 常用の圧力

通常の使用状態において当該設備に作用する圧力(圧力が変動する場合は、その変動範囲のうちの最高の圧力)をいう。

#### b) 最高運転圧力

設備が正常に稼働している場合の最高の圧力をいう。

#### c) 最低運転圧力

設備が正常に稼働している場合の最低の圧力をいう。

#### d) 運転温度

設備が正常に稼働している場合の温度をいう。

#### e) 設計圧力

最高運転圧力以上の圧力で、対応する温度とともに設計荷重の条件に使用し、かつ安全装置の設定圧力の基礎となる圧力をいう。

#### f) 設計温度

対象とする部分において、対応する圧力との関連から最も厳しい条件に対して定める運転温度又はそれ以上の温度で、設計に使用する温度をいう。

備考 1.最も厳しい条件に定める運転温度とは、材料強度に関して最も厳しくなる金属温度をいう。

2.設計温度は通常高温側の最高設計温度であるが、低温側の使用限界の意味で最低設計金属温度の用語を用いる。

#### g) 最低設計金属温度

設備を使用する場合の低温側の使用限界の最低の金属温度をいう。

#### h) 水素適合性

材料が高压水素環境下で使用可能であることをいう。

#### i) Slow Strain Rate Tensile Test (SSRT)

低ひずみ速度引張試験のことをいう。

j) 水素適合性検証済引張強さ

良好な水素適合性を示すことが検証された材料について、材料製造者が提示する機械的性質における引張強さをいう。

k) 許容引張応力

設備の設計上許容される引張応力の限界のことをいう。

l) 破裂前漏洩

表面き裂が肉厚内を安定的に進展し、不安定破壊を生じる前に貫通して内部流体が漏洩する事象をいう。

m) 初期想定欠陥寸法

検査により検出可能な大きさを超えない範囲で申請者が設計時の疲労き裂進展解析で用いる初期き裂の大きさをいう。

## 4 材料

### 4.1 水素適合性の判定

低合金鋼に関する水素影響の研究によれば、材料の強度が高くなるほど水素の影響が顕著となる傾向が明らかとなっており、水素影響を小さくするためには適切な強度に調整した材料を用いる必要がある。

水素の影響が小さい適切な材料強度を選定するため、**ASTM G142-98** に準拠して設計圧力及び最低設計金属温度における水素中 **SSRT** を実施するとともに、大気圧及び最低設計金属温度における大気中(もしくは不活性ガス中) **SSRT** を実施する。**SSRT** の試験片は設備の内面近傍から、あるいは **4.4** に定める製品と同等の材料における内面近傍から、円筒胴部の周方向と試験片の軸方向が一致するように採取する。水素中 **SSRT** の応力-変位線図において極大値を示すことを確認したうえで、当該材料の測定された引張強さを水素適合性検証済引張強さとする。この時、大気中と水素中の応力-変位線図を比較し、**図 4.1(a)**に示すように水素中 **SSRT** の応力-変位線図において極大値を示さない場合は不適合とする。**図 4.1(b)**のように、水素中 **SSRT** の応力-変位線図において極大値を示すことを確認した場合は適合とする。以下の **a)**または **b)**のいずれかを満たす場合には、常温における水素中 **SSRT** により代替可能であるものとする。

**a)** 高圧水素中既存データを用いる場合

化学的成分及び機械的性質が同等の材料において、**ASTM G142-98** に準拠して大気中及び設計圧力における水素中 **SSRT** を実施し同等性を確認した場合は、最低設計金属温度における応力-変位線図において極大値を示すことが確認された既存データを引用してもよい。

**b)** 高圧水素環境を模擬した環境で **SSRT** を実施する場合

高圧水素環境を模擬することが妥当と考えられる試験環境において **SSRT** を実施し、設計温度における応力-変位線図において極大値を示すことを確認する。

備考:高圧水素環境を模擬することが可能な試験法として、中空試験片に高圧水素ガスを封入した試験や連続陰極チャージ試験法等が検討されている。

注記:低合金鋼の高圧水素中 SSRT の特性については、**附属書 C の C.1** を参照のこと。

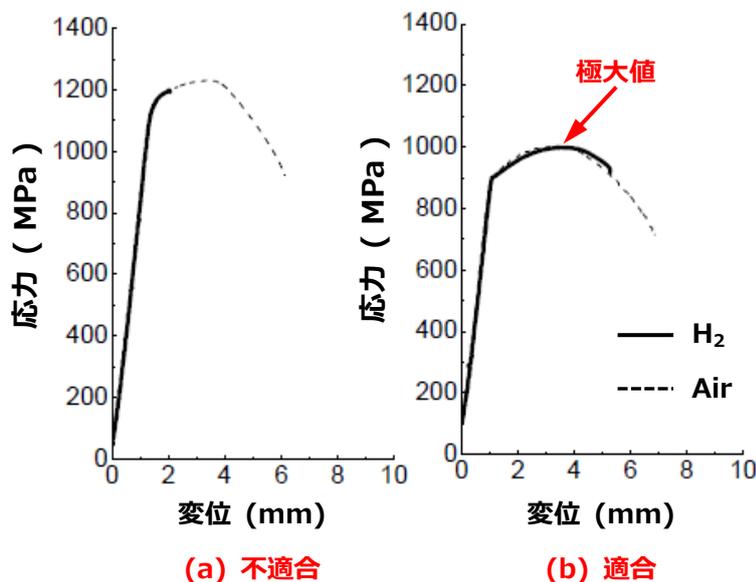


図 4.1 SSRT における応力-変位線図の模式図

#### 4.2 硬さ試験

高圧設備は大きな肉厚となり不均質な特性を生ずることが懸念されるため、**図 4.2** に示すように硬さ試験を行い、以下の **a)~e)**により硬さ試験から設備の引張強さを推定し、適正な範囲にあることを確認する。

- 設備の円筒胴部または 4.4 に定める製品と同等の材料の断面について、肉厚方向に少なくとも最内面近傍、1/4、1/2、3/4、最外面近傍の 5 箇所以上の硬さを測定する。
- 硬さ試験法は、**JIS Z 2244** に基づくピッカース硬さ試験法または **JIS Z 2245** に基づくロックウェル硬さ試験法に限る。
- 硬さ測定部位と同等の位置から採取した試験片による引張強さと硬さの比率から、内面(接ガス面)近傍の引張強さを推定し、水素適合性検証済引張強さを超過していないことを確認する。
- 硬さ測定部位と同等の位置から採取した試験片による引張強さと硬さの比率から、最低硬さ部の引張強さを推定し、設備製造者が定めた最小引張応力に相当する材料強さを下回らないことを確認する。
- 硬さ試験の成績が規定に適合しない場合には、再熱処理して再試験してもよい。ただし、再熱処理の回数は 2 回を上限とする。

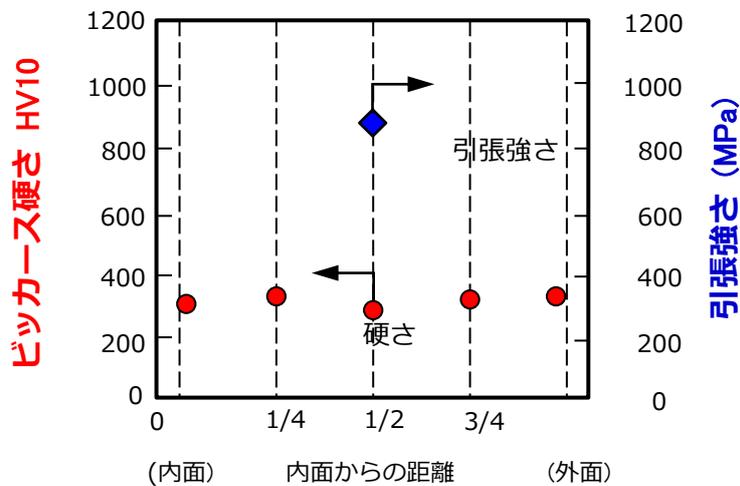


図 4.2 硬さ試験結果の模式図

### 4.3 衝撃試験

KHKS 0220 の 4.4.3 を参照して、次の手順に従いシャルピー衝撃試験を実施する。

- a) 設備の内面近傍の C-R 方位 (切欠き(き裂)への負荷方向:周方向、切欠きから発生するき裂の進展方向:半径方向)、あるいは製品と同等の材料の内面近傍の C-R 方位から試験片を採取する。この時、切欠きの位置は設備の内面となるようにする。
- b) 前記試験片を用いて最低設計金属温度におけるシャルピー衝撃試験を実施する。衝撃試験の吸収エネルギー値は、3 個の平均値が 40 J 以上、最小値が 32 J 以上でなければならない。

### 4.4 製品と同等の材料の定義

設備に使用する低合金鋼の材料特性を適切に評価するためには、設備本体から試験片を採取することが望ましいが、経済的合理性の観点から設備本体を解体することは好ましくない。

このような観点から、設備の素材となる鍛鋼品及び継目無鋼管について、小型供試体から試験片採取が可能となるよう以下のように製品と同等の材料を定義する。

#### 4.4.1 鍛鋼品における「製品と同等の材料」の定義

JIS G 0306 を参照し、素材が鍛鋼品の場合における「製品と同等の材料」の定義は以下による。本体余長部から採取したもの。または、受渡当事者間の協定によって、a)~d)の条件をすべて満たすもの。

- a) 受渡し当事者間で合意された製品と同一仕様に基づき製造された鋼塊を用い、鍛鋼品と同一種類の熱間加工を行うもの。

- b) 最大鍛錬成形比が、鍛鋼品の最小鍛錬成形比以下のもの。
- c) 鍛鋼品と同一熱処理炉で、同一の熱処理を行うもの。
- d) 厚さ又は直径は、鍛鋼品の最大厚さ又は最大直径以上のもの。

#### 4.4.2 継目無鋼管における「製品と同等の材料」の定義

継目無鋼管においては、「製品と同等の材料」が定義された材料規格が存在しないことから、**容器保安規則関係例示基準(別添 1) 一般継目無し容器の技術基準の解釈**を参照し、素材が継目無鋼管の場合における「製品と同等の材料」の定義は以下による。

次の **a)** 又は **b)** のいずれかを満たすことにより、継目無鋼管から製造する製品の同等性を確認する。

- a) 同一の設備製造所において同一の材料仕様かつ同一の製造条件で製造された設備であって肉厚、胴部の外径及び形状が同一であるもの。
- b) 受渡し当事者間で合意された製品と同一仕様にに基づき製造されたブルーム又はビレットを用い、製品と同一種類の熱間加工により製造された円筒材料であって肉厚が同一であるもの(長さが胴部の外径の3倍以上のものに限る)の両端を板で閉じたうえで、製品と同一の熱処理を行ったもの。ただし、絞り加工等管端開口部を減面する加工を施さない場合にあつては、両端を板で閉じる必要はない。

## 5 設計

### 5.1 許容引張応力の設定

設備に用いる低合金鋼の許容引張応力は、次の **a)** 及び **b)** による。

- a) **特定設備検査規則第14条**(特定設備の技術基準の解釈に定められた許容引張応力)による。
- b) 水素の影響を小さくするために材料の強度を適正な範囲に調整する必要があり、特定設備の技術基準の解釈に定められた許容引張応力を適用することが困難な場合は、以下の **1)** ~ **3)** により詳細基準事前評価申請における許容引張応力を設定してもよい。
  - 1) 材料製造者は、水素適合性検証済引張強さ及び設計温度における引張強さと降伏点を提示する。この時、材料試験を行う場合は、設備の円筒胴部の周方向と引張試験片の軸方向が一致するよう試験片を採取する。ただし、設備に使用する材料の円筒胴部の周方向と軸方向の機械的性質が同等と判断し得る場合は、軸方向から採取した引張試験片を用いてよい。
  - 2) 設備製造者は、製品または **4.4** で定めた製品と同等の材料から採取した試験片により、実際の引張強さが、許容引張応力の根拠となる材料製造者が提示した最小引張強さ以上であり、かつ、材料製造者から提示された水素適合性検証済引張強さを超過していないことを検証する。この時、材料試験を行う場合は、設備の円筒胴部の周方向と引張試

験片の軸方向が一致するよう試験片を採取する。ただし、設備に使用する材料の円筒胴部の周方向と軸方向の機械的性質が同等と判断し得る場合は、軸方向から採取した引張試験片を用いてよい。

- 3) 1)で材料製造者から提示された引張強さと降伏点に基づき、**特定設備検査規則第 14 条**に従い許容引張応力を設定する。

## 5.2 最小厚さ

設備は、**特定設備の技術基準の解釈**に定める最小厚さ以上の厚さを有していなければならない。

## 5.3 疲労解析

設備は、**附属書 A**もしくは**附属書 B**により疲労解析を行う。

**附属書 A**  
**(規定)**  
**蓄圧器に適用する場合の追加事項**

**A.1 適用範囲**

この附属書は、水素スタンドで使用される蓄圧器について、この技術文書を適用する場合の追加事項を規定する。

**A.2 破裂前漏洩条件の検証**

蓄圧器の損傷モードとして破裂前漏洩が成立することを確認するため、次の a) 及び b) により破裂前漏洩条件の検証を行う。

- a) 蓄圧器内面近傍の C-R 方位、あるいは製品と同等の材料の内面近傍の C-R 方位から採取した試験片を用い、最低設計金属温度における平面ひずみ破壊靱性値  $K_{IC}$  を測定する。
- b) KHKS 0220 の 7 を参照し、前項で求めた  $K_{IC}$  値に基づき破裂前漏洩が成立することを確認する。

**A.3 疲労解析**

この技術文書で規定する蓄圧器の使切り使用回数を設定するため、A.3.1 及び A.3.2 により、蓄圧器の疲労解析を行う。

**A.3.1 疲労解析における応力振幅の設定方法**

JIS B 8266 附属書 8 の 3 に準じ、蓄圧器の疲労解析を行う。この時、材料の強度が高くなるほど水素の影響が顕著となる傾向を鑑み、JIS B 8266 附属書 8 の 3.3 を考慮する。

蓄圧器の運転圧力に基づく圧力変動を想定した応力解析の結果から、KHKS 0220 の 6.3 に従って等価両振り応力振幅  $S_{eq}$  を算出し、A.3.2 にて疲労試験の応力振幅を定める。ここで運転圧力に基づく圧力変動とは最高運転圧力と最低運転圧力の変動範囲であり、最低運転圧力は 0 MPa に限定しない。

**A.3.2 蓄圧器の使切り使用回数の設定**

蓄圧器の使切り使用回数の設定は、次の a)～c) のによる。図 A.1 は使切り使用回数の設定方法を示す模式図である。

- a) 大気中の疲労試験による S-N 曲線から、図 A.1 の ① に示す疲労限度を求める。ただし、材料の鋼種、機械的性質が整合する場合においては、KHKS 0220 の 6.4 に記載されている最適疲労曲線の  $10^7$  回時間強度を参照してもよい。
- b) A.3.1 により求めた等価両振り応力振幅  $S_{eq}$  の 2 倍以上の値 ( $S_{eq2}$ ) を高圧水素中疲労試験

の応力振幅(図 A.1 の②)とする。この時、 $S_{eq2}$  は a) で定めた大気中の疲労限度を上回ってはならない。

- c) b) で設定した応力振幅を用いて高圧水素中で疲労試験を実施し、蓄圧器の使切り使用回数で破断しないことを検証する。

注記: 低合金鋼の高圧水素中疲労寿命特性については、附属書 C の C.2 を参照のこと。

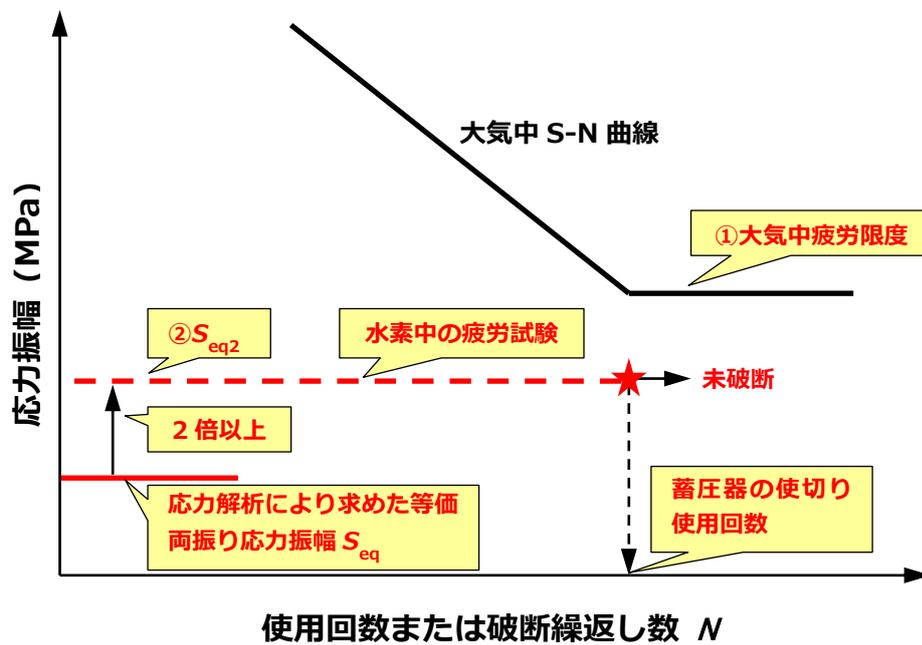


図 A.1 疲労試験による蓄圧器の使切り使用回数設定方法の模式図

**附属書 B**  
**(規定)**  
**圧縮機に適用する場合の追加事項**

**B.1 適用範囲**

この附属書は、水素スタンドで使用される圧縮機について、この技術文書を適用する場合の追加事項を規定する。なお、疲労解析については圧縮機シリンダ内周面の応力が最大になる場合について規定する。

**B.2 圧縮機シリンダ円筒胴内面の疲労解析**

圧縮機シリンダ円筒胴内面の疲労解析は、次による。

- a) 圧縮機製造者は圧縮機の最大使用回数を設定する。
- b) **KHKS 0220** の **6** により、圧縮機シリンダ円筒胴内面に発生する等価応力振幅を求める。
- c) 圧縮機シリンダ材料の疲労限度に対して、**b)**で求めた等価応力振幅が適切な裕度を有していることを確認する。
- d) 圧縮機の使用回数は、疲労解析の結果に関わらず圧縮機製造者が設定した圧縮機の最大使用回数までとする。

**附属書 C**  
**(参考)**  
**低合金鋼の水素適合性評価の事例**

この附属書は、低合金鋼の水素適合性を評価した事例を引用してまとめたものである。試験方法、試験結果、水素適合性判定結果等の詳細については引用文献を参照されたい。

この附属書には C.1～C.4 の水素適合性評価事例を示している。

- C.1 SSRT
- C.2 疲労試験
- C.3 ライジングロード試験
- C.4 疲労き裂進展試験

各試験結果は基本的に以下の 1～4 の構成となっている。

1. 水素適合性評価試験に用いた試験材の化学的成分、製造条件等を示す。
2. 水素適合性評価試験に用いた試験材の基本的な機械的性質(引張試験結果、シャルピー衝撃試験結果、硬さ測定結果等)を示す。
3. 水素適合性評価試験条件を示す。
4. 水素適合性評価試験結果を示す。

## C.1 SSRT

### C.1.1 SSRT の事例(1)

出典： HYDROGENIUS DATABASE / No. A68(Tentative) / 2017 /  
 Database on Slow Strain Rate Tensile Test (SSRT) Properties of JIS-SNCM439 Nickel  
 Chromium Molybdenum Steel in 115 MPa Hydrogen Gas

## 1. MATERIALS

Table C.1.1.1 Details of processing and related data of SNCM439.

Heat	Production process	Product form	Dimensions (mm)
B <sup>1)</sup>	Hot-rolled	Plate	Length:870 mm Width:130 mm Thickness:31 mm
G <sup>1)</sup>	Hot-rolled	Plate	Length:834 mm Width:130 mm Thickness:30 mm
J <sup>1)</sup>	Hot-forged	Cylinder	Length:3630 mm Outer diameter:320 mm Inner diameter:200 mm Thickness:60 mm

1) Reported by the manufacture.

Table C.1.1.2 Chemical composition of SNCM439.

	Heat	Element (mass %)							
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Product analysis	B <sup>1)</sup>	0.43	0.22	0.82	0.012	0.002	1.81	0.86	0.25
	G <sup>1)</sup>	0.40	0.22	0.80	0.014	0.002	1.80	0.86	0.26
	J <sup>1)</sup>	0.40	0.27	0.89	0.009	0.015	1.84	0.92	0.28
Ladle analysis	B <sup>2)</sup>	0.42	0.22	0.82	0.016	0.002	1.80	0.86	0.26
	G <sup>2)</sup>	0.39	0.22	0.79	0.016	0.002	1.80	0.84	0.26
	J <sup>3)</sup>	0.42	0.26	0.80	0.010	<0.010	1.91	0.89	0.25
	Requirement <sup>4)</sup>	Max	0.43	0.35	0.90	0.030	0.030	2.00	1.00
Min		0.36	0.15	0.60			1.60	0.60	0.15

1) Performed by HYDROGENIUS.

2) Reported by the manufacture.

3) After the inspection certificate.

4) JIS G 4053 (2008), "Low-alloyed steels for machine structural use".

Table C.1.1.3 Heat treatment conditions of SNCM439.

Material	Heat	Shape	Quenching	Tempering
Large-sized material	B <sup>1)</sup>	Plate	850 °C/2 h, Oil-quenched	650 °C/4 h, Air-cooled
	G <sup>1)</sup>	Plate	850 °C/2 h, Oil-quenched	640 °C/4 h, Air-cooled
	J <sup>1)</sup>	Cylinder	860 °C, Water-spray	620 °C, Air-cooled
			850 °C/2 h, Oil-quenched <sup>2)</sup>	650 °C/4 h, Air-cooled <sup>2)</sup>

1) Reported by the manufactures.

2) A block of  $l$  108 mm,  $w$  320 mm and  $t$  60 mm was heat-treated.

## 2. MECHANICAL PROPERTIES

Table C.1.1.4 Mechanical properties of SNCM439.

Material	Heat	Shape	Tempering Temperature (°C)	Tensile Properties				Vickers Hardness (HV)
				0.2 % proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile Strength $\sigma_B$ (MPa)	Fracture elongation $\varepsilon_f$ (%)	Reduction of Area $\varphi$ (%)	
Large-sized material	B <sup>1)</sup>	Plate	650	738 <sup>2)</sup> (739 <sup>3)</sup> )	867	22	66	275
	G <sup>1)</sup>	Plate	640	746 <sup>2)</sup> (747 <sup>3)</sup> )	873	23	66	270
	J <sup>1)</sup>	Cylinder	620	925 <sup>2)</sup> (921 <sup>3)</sup> )	1025	20	62	318
			650	766 <sup>2)</sup> (764 <sup>3)</sup> )	881	25	67	263

1) Performed by HYDROGENIUS.

2) Determined from  $\sigma$ - $\varepsilon$  curve.

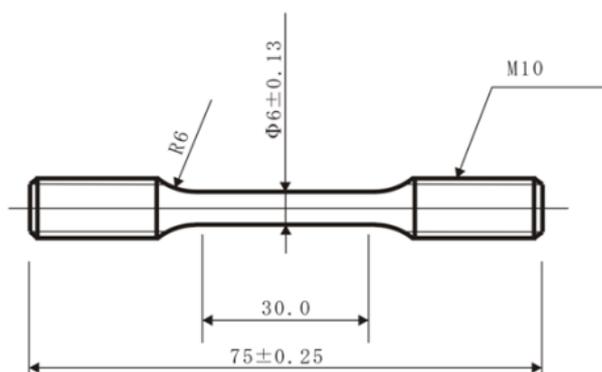
3) Determined from  $\sigma$ -stroke curve. See Fig. A1-6 in HYDROGENIUS DATABASE No.68.

## 3. SLOW STRAIN RATE TENSILE TEST CONDITIONS

Table C.1.1.5 Slow strain rate tensile test conditions.

Type and capacity of testing machine	Servo-hydraulic, 50 kN	Screw type, 50 kN
Loading condition	Uniaxial, Monotonic	
Environment	In 115 MPa hydrogen gas at -45 °C through 120 °C In 0.1 MPa nitrogen gas at -45 °C In 115 MPa nitrogen gas at RT In air at 120 °C	In air at RT
Gas purity	Hydrogen gas : 99.999% (5N) Nitrogen gas : 99.999% (5N)	---
Test speed	$1.5 \times 10^{-3}$ mm/s <sup>2)</sup> ( $5.0 \times 10^{-5}$ s <sup>-1</sup> ) <sup>3)</sup> $2.0 \times 10^{-3}$ mm/s <sup>2)</sup> ( $6.7 \times 10^{-5}$ s <sup>-1</sup> ) <sup>3)</sup>	$1.7 \times 10^{-3}$ mm/s <sup>2)</sup> ( $5.7 \times 10^{-5}$ s <sup>-1</sup> ) <sup>3)</sup>

Specimen<sup>1)</sup>  
(dimensions in mm)

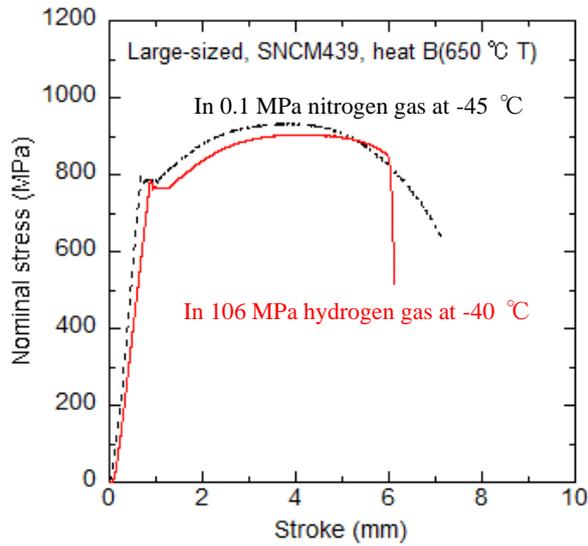


1) Surface finishing was performed by circumferential polishing with 600 grade silicon carbide paper.

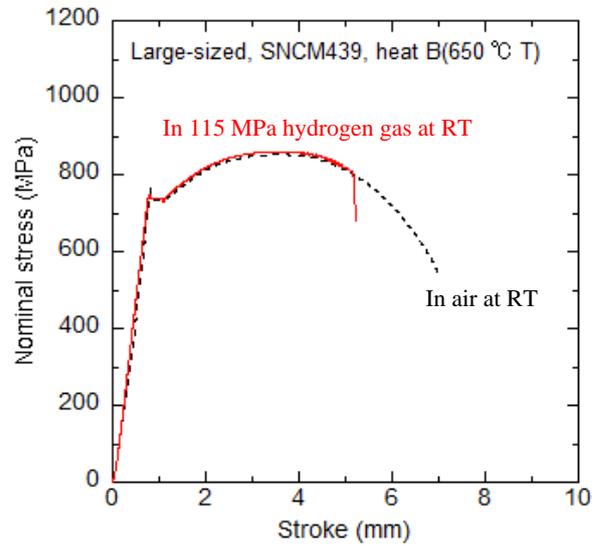
2) Stroke speed or cross head speed.

3) Determined on the basis of 30-mm parallel length of specimen.  $5.0 \times 10^{-5}$  s<sup>-1</sup> is given by  $(1.5 \times 10^{-3}$  mm/s) / 30 mm.  $5.7 \times 10^{-5}$  s<sup>-1</sup> is given by  $(1.7 \times 10^{-3}$  mm/s) / 30 mm.  $6.7 \times 10^{-5}$  s<sup>-1</sup> is given by  $(2.0 \times 10^{-3}$  mm/s) / 30 mm.

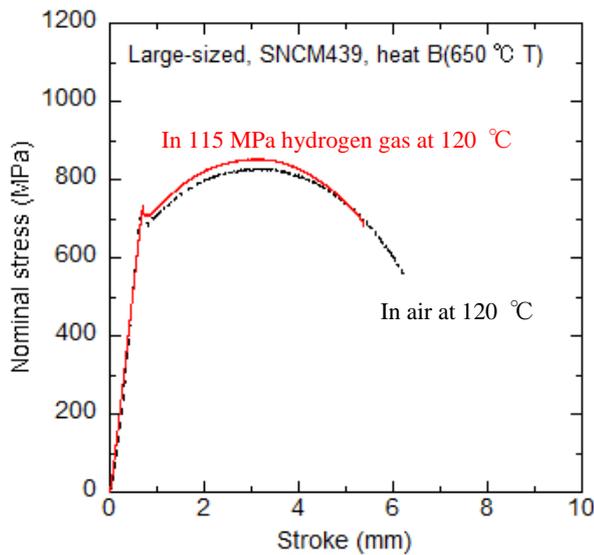
#### 4. EXPERIMENTAL RESULTS



(a-1) -40 °C, 106 MPa H<sub>2</sub>



(a-2) RT, 115 MPa H<sub>2</sub>

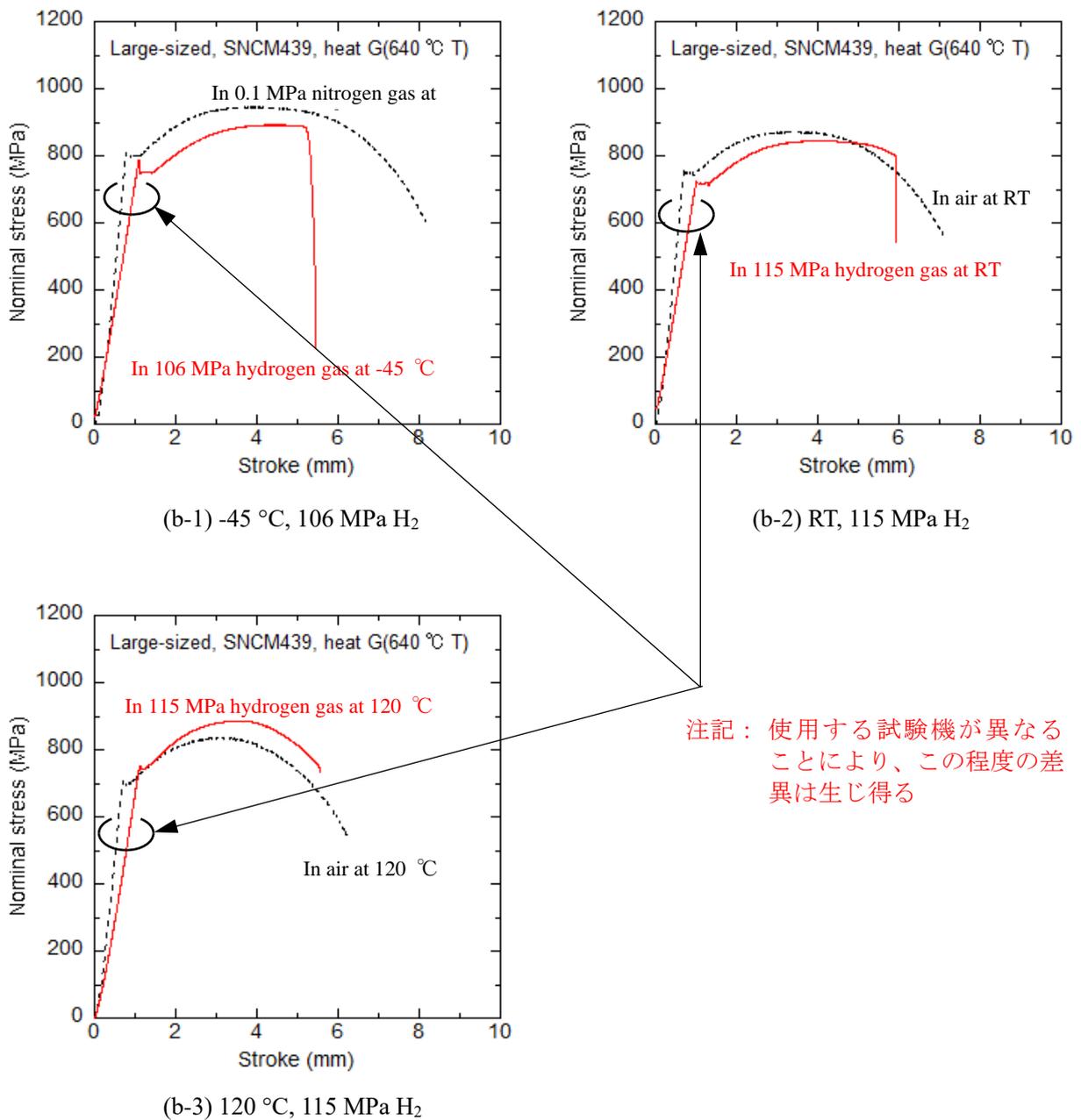


(a-3) 120 °C, 115 MPa H<sub>2</sub>

(a) Heat B tempered at 650 °C ( $\sigma_B=867\text{MPa}$ )

Fig. C.1.1.1 Stress - stroke curves of large-sized SNCM439 in 106 and 115 MPa hydrogen gas.

(Figure continued on next page.)

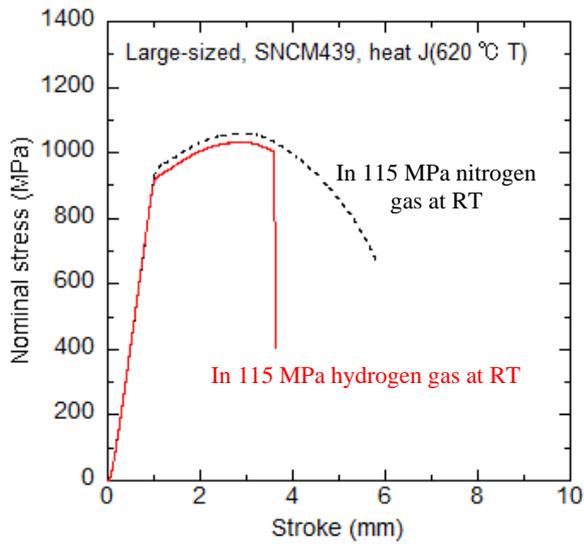


(b) Heat G tempered at 640 °C ( $\sigma_B=873\text{MPa}$ )

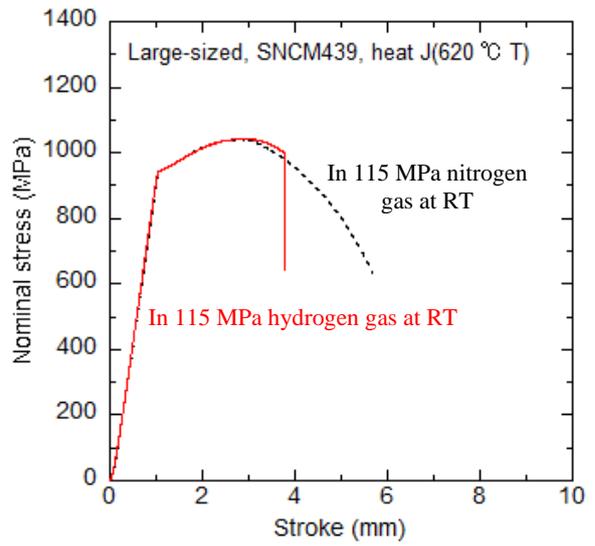
Fig. C.1.1.1 Stress - stroke curves of large-sized SNCM439 in 106 and 115 MPa hydrogen gas.

(Continued)

(Figure continued on next page.)



(c-1) RT, 115 MPa H<sub>2</sub><sup>1)</sup>



(c-2) RT, 115 MPa H<sub>2</sub><sup>1)</sup>

(c) Heat J tempered at 620 °C ( $\sigma_B=1025\text{MPa}$ )

<sup>1)</sup> Two specimens were used for SSRT in 115 MPa hydrogen gas at room temperature.

Fig. C.1.1.1 Stress - stroke curves of large-sized SNCM439 in 106 and 115 MPa hydrogen gas.

(Continued)

## C.1.2 SSRT の事例(2)

出典： 株式会社日本製鋼所  
NEDO 水素利用技術研究開発事業成果報告書

### 1. MATERIALS

Table C.1.2.1 Details of processing and related data of SNCM439.

Heat	Production process	Product form	Dimensions (mm)
A	Hot-forged	Plate	Length:950mm Width:130 mm Thickness:30 mm
B	Hot-forged	Round bar	Outer diameter:430 mm
C	Hot-rolled	Round bar	Outer diameter:300 mm
D	Hot-rolled	Round bar	Outer diameter:300 mm

Table C.1.2.2 Chemical composition of SNCM439.

	Heat	Element (mass %)								
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	O(ppm)
Product analysis	A	0.42	0.22	0.81	0.017	0.002	1.81	0.85	0.26	6
	B	0.40	0.26	0.80	0.005	0.004	1.90	0.84	0.25	35
	C	0.40	0.27	0.80	0.012	0.014	1.74	0.74	0.23	12
	D	0.41	0.26	0.82	0.022	0.010	1.60	0.79	0.15	15
Requirement <sup>1)</sup>	Max	0.43	0.35	0.90	0.030	0.030	2.00	1.00	0.30	-
	Min	0.36	0.15	0.60	-	-	1.60	0.60	0.15	-

1) JIS G 4053 (2008), “Low-alloyed steels for machine structural use”.

Table C.1.2.3 Heat treatment conditions of SNCM439.

Heat	Direction	Heat-treated shape	Quenching	Tempering
A	Axial	Length:160mm Width:130 mm Thickness:30 mm	850 °C/2 h, Oil-quenched	650 °C/4 h, Air-cooled
	Width			
B	Axial	Length:160mm Width:100 mm Thickness:30 mm	850 °C/2 h, Oil-quenched	645 °C/4 h, Air-cooled
	Circumferential			
C	Axial	Length:160mm Width:100 mm Thickness:30 mm	850 °C/2 h, Oil-quenched	645 °C/4 h, Air-cooled
	Circumferential			
D	Axial	Length:160mm Width:100 mm Thickness:30 mm	850 °C/2 h, Oil-quenched	630 °C/4 h, Air-cooled
	Circumferential			

## 2. MECHANICAL PROPERTIES

Table C.1.2.4 Mechanical properties of SNCM439.

Heat	Direction	Tensile Properties <sup>1)</sup>			
		0.2 % proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile Strength $\sigma_B$ (MPa)	Fracture elongation $\epsilon_f$ (%)	Reduction of Area $\phi$ (%)
B	Axial	739	885	22	61
	Circumferential	737	881	17	44
C	Axial	744	880	22	63
	Circumferential	765	892	16	37
D	Axial	762	894	20	59
	Circumferential	781	899	19	53

1) JIS Z 2201(2008), 14A specimen (diameter 8mm, gage length 40mm)

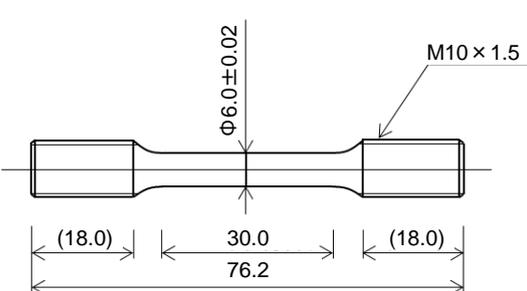
Table C.1.2.5 Mechanical properties of SNCM439.

Heat	Direction	Tensile Properties <sup>1)</sup>			
		0.2 % proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile Strength $\sigma_B$ (MPa)	Fracture elongation $\epsilon_f$ (%)	Reduction of Area $\phi$ (%)
B	Axial	739	885	22	61
	Circumferential	737	881	17	44
C	Axial	744	880	22	63
	Circumferential	765	892	16	37
D	Axial	762	894	20	59
	Circumferential	781	899	19	53

1) JIS Z 2201(2008), 14A specimen (diameter 8mm, gage length 40mm)

### 3. SLOW STRAIN RATE TENSILE TEST CONDITIONS

Table C.1.2.6 Slow strain rate tensile test conditions.

Type and capacity of testing machine	Servo-hydraulic, 100 kN	
Loading condition	Uniaxial, Monotonic	
Environment	In 90 MPa hydrogen gas at RT	In air at RT
Gas purity	Hydrogen gas : 99.99999% (7N)	---
Test speed	$3.0 \times 10^{-3} \text{ mm/s}^1$ ( $1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) <sup>2)</sup>	
Specimen <sup>3)</sup> (dimensions in mm)		

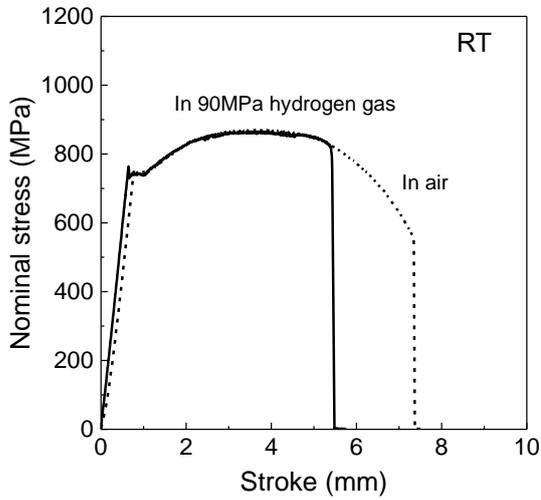
1) Stroke speed.

2) Determined on the basis of 30-mm parallel length of specimen.

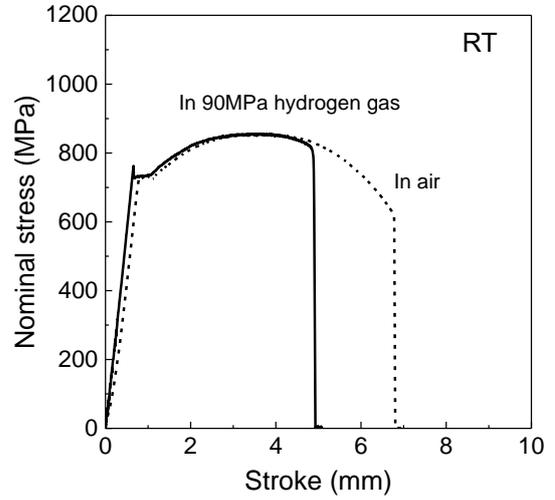
$1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  is given by  $(3.0 \times 10^{-3} \text{ mm/s}) / 30 \text{ mm}$ .

3) Surface finishing was performed by axial polishing with 800 grade silicon carbide paper.

#### 4. EXPERIMENTAL RESULTS

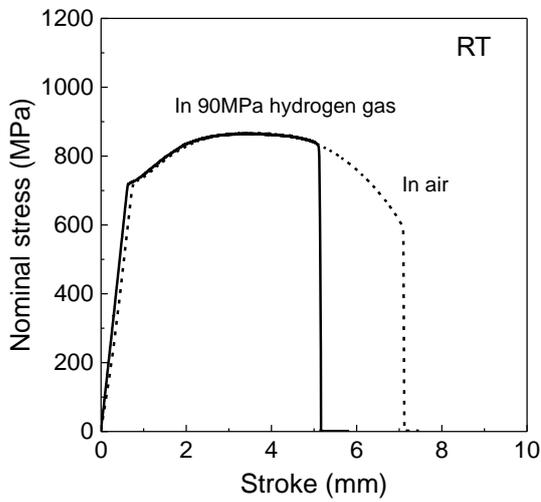


(a-1) Axial direction

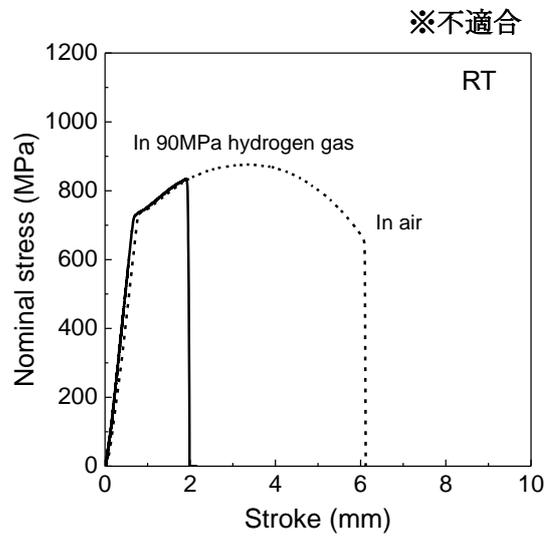


(a-2) Width direction

(a) Heat A



(b-1) Axial direction

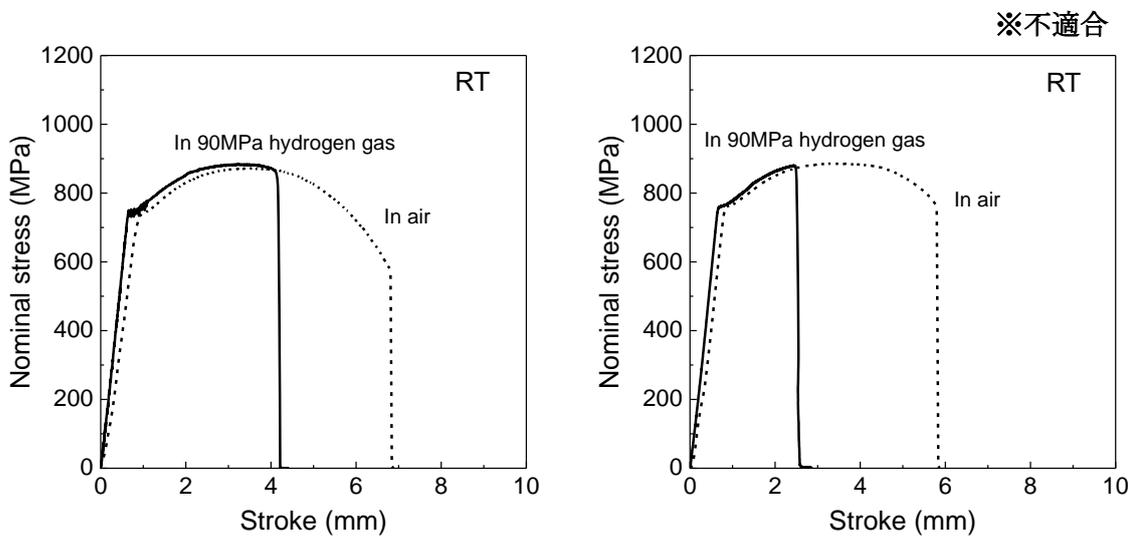


(b-2) Circumferential direction

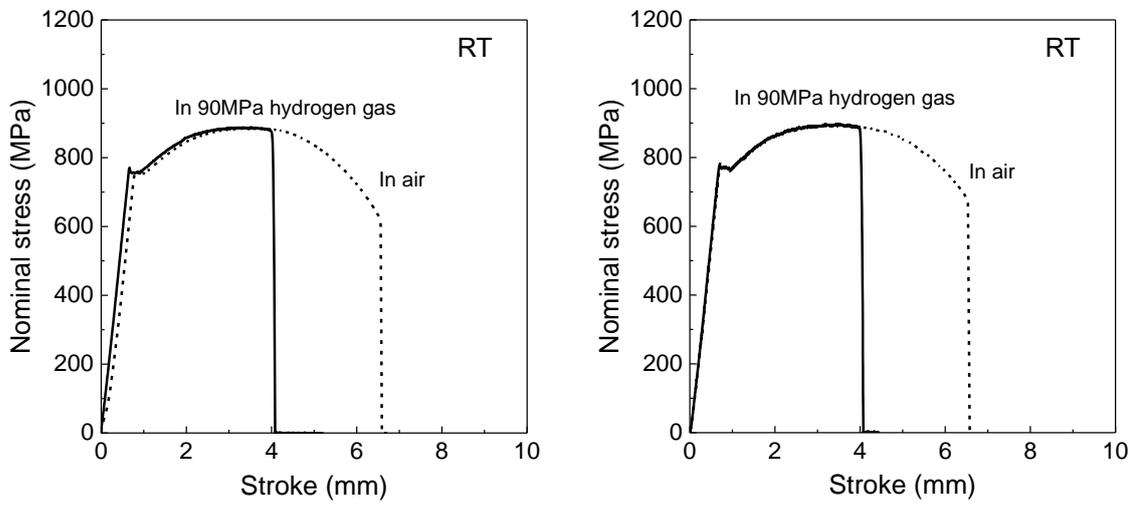
(b) Heat B

Fig. C.1.2.1 Stress - stroke curves of SNCM439.

(Figure continued on next page.)



(c-1) Axial direction (c-2) Circumferential direction  
(c) Heat C



(d-1) Axial direction (d-2) Circumferential direction  
(d) Heat D

Fig. C.1.2.1 Stress - stroke curves of SNCM439.

### C.1.3 SSRT の事例(3)

出典： JFE スチール株式会社  
NEDO 水素利用技術研究開発事業成果報告書

## 1. MATERIALS

Table C.1.3.1 Details of processing and related data of SNCM439.

Heat	Production process	Product form	Dimensions (mm)
A	Hot-rolled	Cylinder	Length:6000 Outer diameter:356 Thickness:62

Table C.1.3.2 Chemical compositions of SNCM439.

	Heat	Element (mass %)							
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Product analysis	A	0.40	0.24	0.73	0.007	<0.0010	1.77	0.74	0.22

Table C.1.3.3 Heat treatment conditions of SNCM439.

Material	Heat	Shape	Quenching	Tempering
Seamless line pipe	A	Cylinder	870 °C-80min, Oil-quench	635 °C-160min, Air-cooling

## 2. MECHANICAL PROPERTIES

Table C.1.3.4 Mechanical properties of SNCM439.

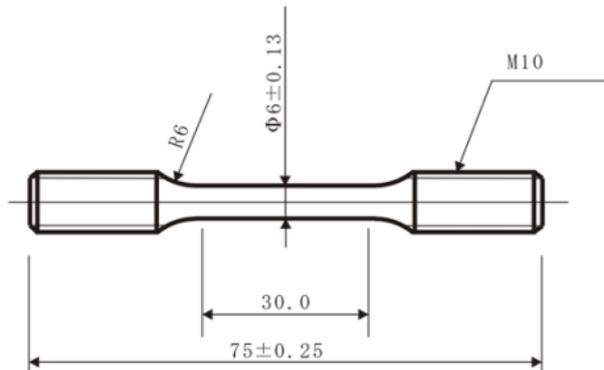
Material	Heat	Shape	Tempering Temperature (°C)	Tensile Properties				Vickers Hardness (HV10)
				0.2 % proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile Strength $\sigma_B$ (MPa)	Fracture elongation $\epsilon_f$ (%)	Reduction of Area $\varphi$ (%)	
Seamless line pipe	A	Cylinder	635	787	928	21.2	71.3	280
				787	928	21.7	69.4	

### 3. SLOW STRAIN RATE TENSILE TEST CONDITIONS

Table C.1.3.5 Slow strain rate test conditions.

Type and capacity of testing machine	Servo-hydraulic, 50 kN
Loading condition	Uniaxial, Monotonic
Environment	85°C: Air, 105 MPa hydrogen gas RT: Air, 105 MPa hydrogen gas 0°C : 0.1 MPa nitrogen gas, 105 MPa hydrogen gas -30 °C: 0.1 MPa nitrogen gas, 105 MPa hydrogen gas
Gas purity	Hydrogen gas : 99.999-99.9999% (5-6N) Nitrogen gas : 99.999% (5N)
Test speed	$2.0 \times 10^{-3} \text{ mm/s}^2$ ( $6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) <sup>3)</sup>

Specimen<sup>1)</sup>  
(dimensions in mm)



- 1) Surface finishing was performed by circumferential polishing.
- 2) Crosshead speed.
- 3) Determined on the basis of 30-mm parallel length of specimen:  $6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  is given by  $2.0 \times 10^{-3} \text{ mm/s} / 30 \text{ mm}$ .

#### 4. EXPERIMENTAL RESULTS

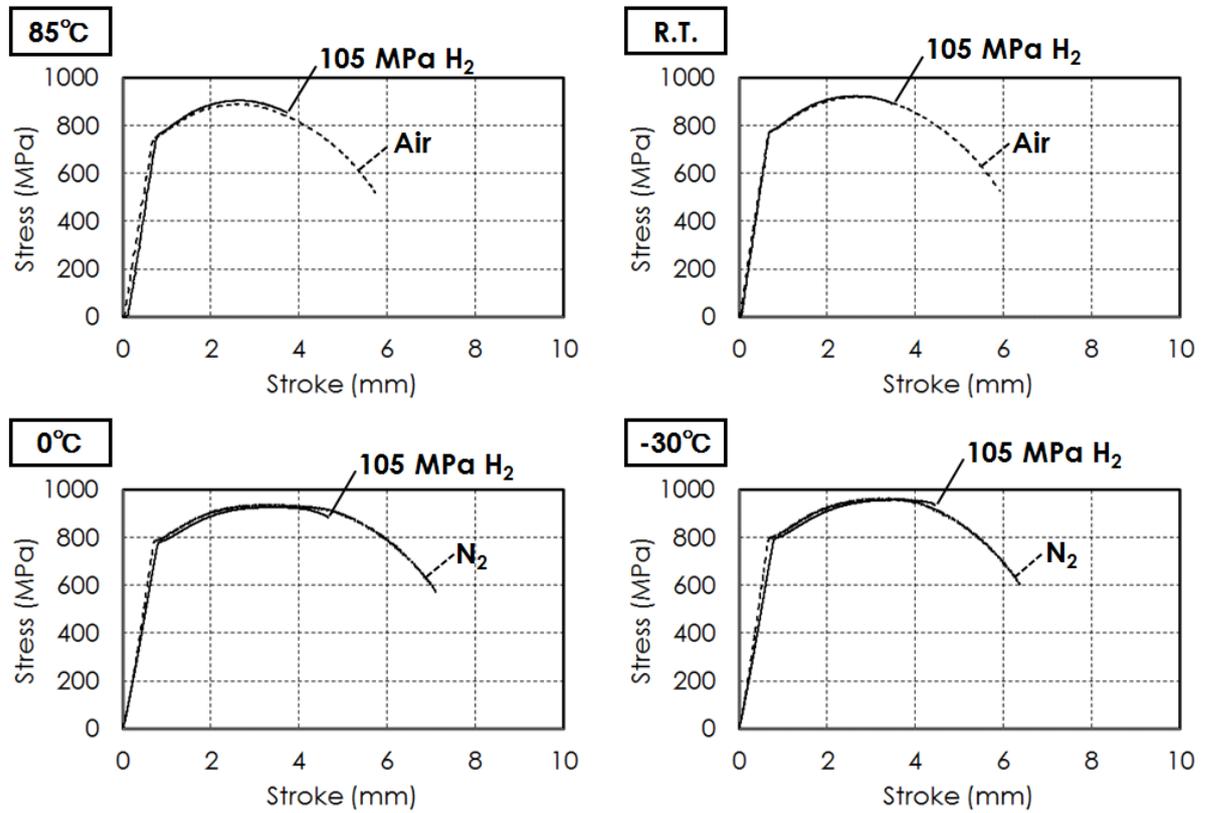


Fig. C.1.3.1 Stress - stroke curves of SNCM439.

#### C.1.4 SSRT の事例(4)

出典：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) . 超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業/国内規制適正化に関わる技術開発/新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発

### 1. MATERIALS

Table C.1.4.1 Details of processing and related data of SNCM439.

Heat	Production process	Product form	Dimensions (mm)
L	Hot-forged	Plate	Length:833 mm Width:132 mm Thickness:31 mm
E	Hot-forged	Plate	Length:750 mm Width:130 mm Thickness:31 mm
R	Hot-forged	Plate	Length:787 mm Width:130 mm Thickness:33 mm

Table C.1.4.2 Heat treatment conditions of SNCM439.

Material	Heat	Shape	Quenching	Tempering
Hot-forged material	L	Plate	850 °C/2 h, Oil-quenched	640 °C/4 h, Air-cooled
	E	Plate	850 °C/2 h, Oil-quenched	650 °C/4 h, Air-cooled
	R	Plate	850 °C/2 h, Oil-quenched	640 °C/6 h, Air-cooled

Table C.1.4.3 Chemical composition of SNCM439.

	Heat	Element (mass %)							
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Product analysis	L	0.39	0.22	0.80	0.016	0.002	1.80	0.84	0.26
	E	0.42	0.22	0.82	0.016	0.002	1.81	0.86	0.26
	R	0.39	0.22	0.82	0.015	0.0024	1.81	0.85	0.26

## 2. MECHANICAL PROPERTIES

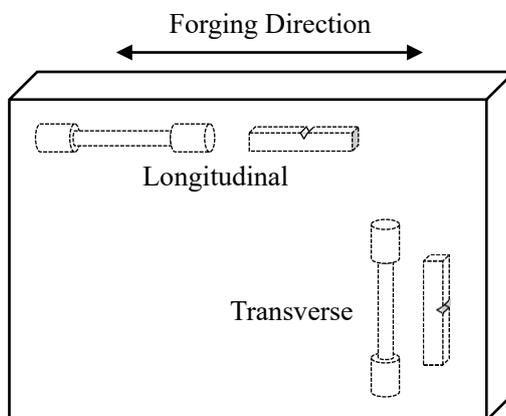


Fig. C.1.4.1 Schematic of specimen direction.

Table C.1.4.4 Tensile properties of SNCM439.

Heat	Direction	Tensile Properties <sup>1)</sup>			
		0.2 % proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile Strength $\sigma_B$ (MPa)	Fracture elongation $\epsilon_f$ (%)	Reduction of Area $\phi$ (%)
L	Transverse	755	874	21	59
E	Longitudinal	749	874	18	62
	Transverse	767	889	25	58
R	Longitudinal	748	870	22	65
	Transverse	762	875	24	64

1) JIS Z 2201(2008), 14A specimen (diameter 8mm, gage length 40mm)

Table C.1.4.5 Charpy impact properties of SNCM439.

Heat	Direction	Charpy Absorbed Energy at 20 °C (J)				Charpy Absorbed Energy at -60 °C (J)			
		Individual			Average	Individual			Average
R	Longitudinal	147	143	138	143	112	122	116	117
	Transverse	123	126	125	125	104	103	105	104

### 3. SLOW STRAIN RATE TENSILE TEST CONDITIONS

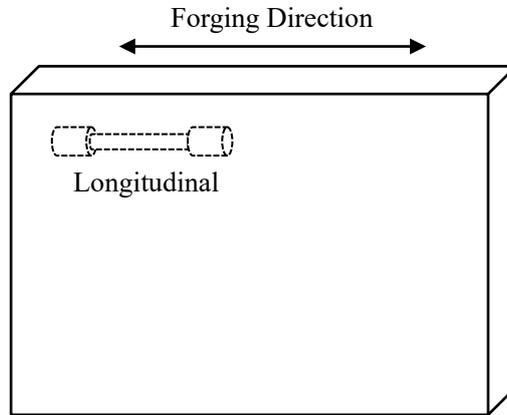


Fig. C.1.4.2 Schematic of specimen direction.

Table C.1.4.6 Slow strain rate tensile test conditions.

Applied standard	ASTM G142-98(2016) <sup>1)</sup>
Type and capacity of testing machine	Servo-hydraulic, 50 kN
Loading condition	Uniaxial, Monotonic
Environment	In 106 MPa or 115 MPa hydrogen gas at RT through 200 °C In 0.1 MPa nitrogen gas at RT In air at RT or 200 °C
Gas purity	Hydrogen gas : 99.999% (5N)
Test speed	$2.0 \times 10^{-3} \text{ mm/s}^3$ ( $6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) <sup>4)</sup>
Specimen <sup>2)</sup> (dimensions in mm)	

1) Excluding test specimen shape

2) Surface finishing was performed by circumferential polishing with 600 grade silicon carbide paper.

3) Stroke speed or cross head speed.

4) Determined on the basis of 30-mm parallel length of specimen.  $6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  is given by  $(2.0 \times 10^{-3} \text{ mm/s}) / 30 \text{ mm}$ .

#### 4. EXPERIMENTAL RESULTS

Table C.1.4.7 SSRT properties of SNCM439 Heat L.

Heat	Direction	Test condition	$\sigma_B$ (MPa)	RTS <sup>1)</sup>	$\delta$ (%)	REL <sup>2)</sup>	$\varphi$ (%)	RRA <sup>3)</sup>	
L	Longitudinal	RT	Air	880	-	24	-	69	-
			115MPa H <sub>2</sub>	879	1.00	20	0.83	48	0.70
		903	1.03	19	0.79	40	0.58		
	Longitudinal	200 °C	Air	879	-	22	-	65	-
			115MPa H <sub>2</sub>	886	1.01	18	0.82	43	0.66
		890	1.01	18	0.82	44	0.68		

- 1) 相対引張強さ(RTS) = 水素ガス環境の引張強さ/不活性ガス環境の引張強さ
- 2) 相対伸び(REL) = 水素ガス環境の伸び/不活性ガス環境の伸び
- 3) 相対絞り(RRA) = 水素ガス環境の絞り/不活性ガス環境の絞り

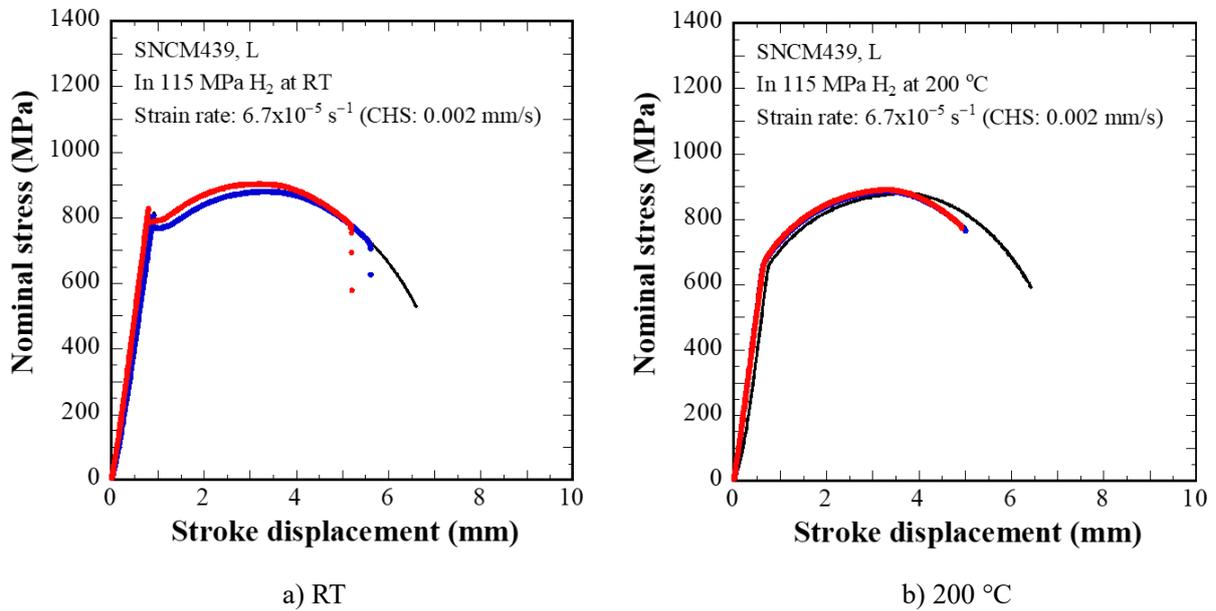


Fig. C.1.4.3 Stress - stroke curves of SNCM439 Heat L.

Table C.1.4.8 SSRT properties of SNCM439 Heat E.

Heat	Direction	Test condition	$\sigma_B$ (MPa)	RTS	$\delta$ (%)	REL	$\phi$ (%)	RRA	
E	Longitudinal	RT	Air	856	-	23	-	65	-
			115MPa H <sub>2</sub>	870	1.02	16	0.70	35	0.54
		115MPa H <sub>2</sub>	855	1.00	18	0.78	37	0.57	
	Longitudinal	200 °C	Air	861	-	21	-	60	-
			115MPa H <sub>2</sub>	861	1.00	17	0.82	40	0.67
		115MPa H <sub>2</sub>	884	1.03	17	0.80	39	0.65	

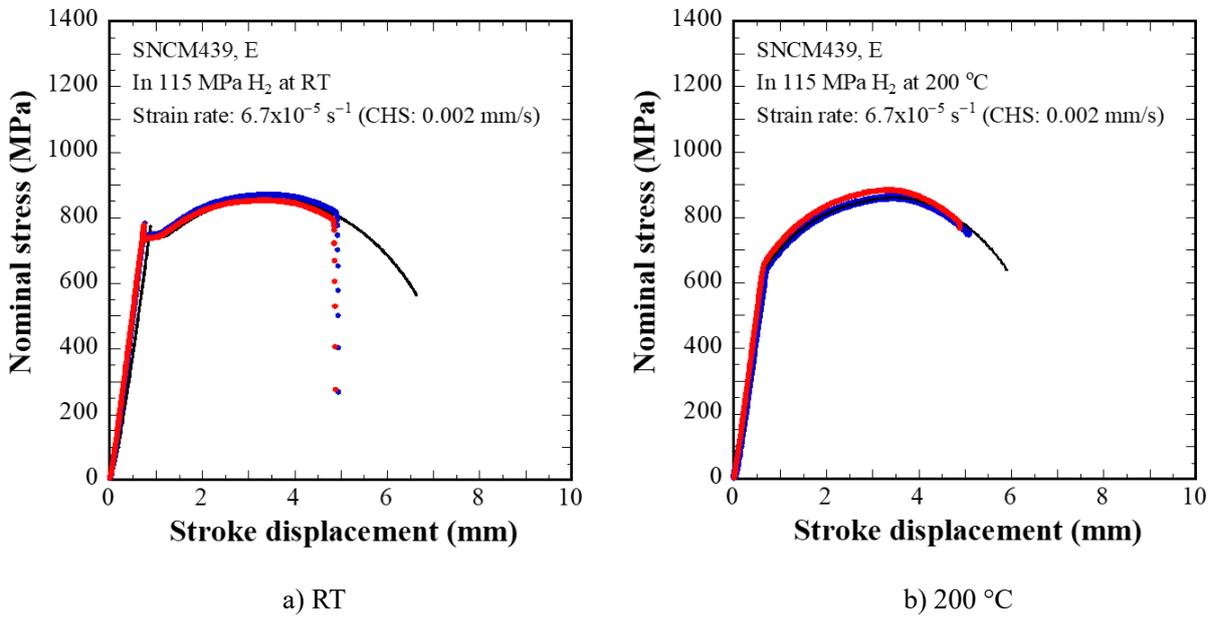


Fig. C.1.4.4 Stress - stroke curves of SNCM439 Heat E.

Table C.1.4.9 SSRT properties of SNCM439 Heat R.

Heat	Direction	Test condition	$\sigma_B$ (MPa)	RTS	$\delta$ (%)	REL	$\phi$ (%)	RRA	
R	Longitudinal	RT	Air	851	-	24	-	68	-
			115MPa H <sub>2</sub>	872	1.02	20	0.81	43	0.63
		115MPa H <sub>2</sub>	849	1.00	19	0.78	41	0.60	
	Longitudinal	200 °C	Air	859	-	21	-	60	-
			115MPa H <sub>2</sub>	855	1.00	18	0.86	42	0.70
		115MPa H <sub>2</sub>	875	1.02	17	0.82	38	0.63	

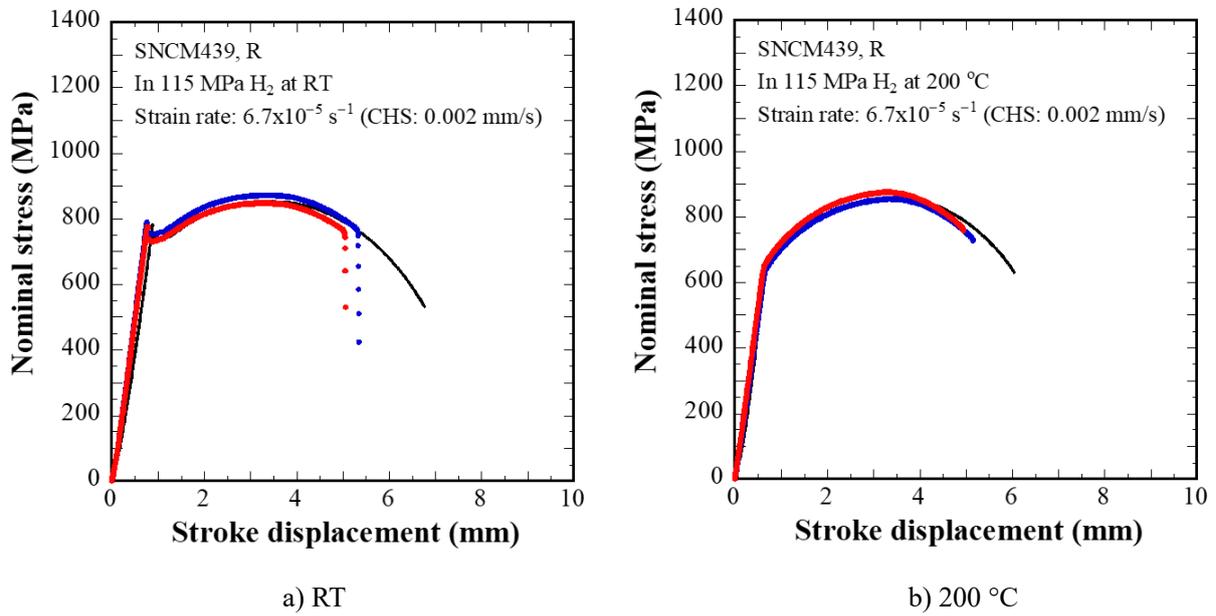


Fig. C.1.4.5 Stress - stroke curves of SNCM439 Heat R.

### C.1.5 SSRT の事例(5)

出典：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) . 超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業/国内規制適正化に関わる技術開発/新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発

## 1. MATERIALS

Table C.1.5.1 Details of processing and related data of SNCM439.

Heat	Production process	Product form	Dimensions (mm)
G	Hot-forged	Plate	Length: 834 mm Width: 130 mm Thickness: 30 mm

Table C.1.5.2 Heat treatment conditions of SNCM439.

Material	Heat	Shape	Quenching	Tempering
Hot-forged material	G	Plate	850 °C/2 h, Oil-quenched	640 °C/4 h, Air-cooled

Table C.1.5.3 Chemical composition of SNCM439.

	Heat	Element (mass %)							
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Product analysis	G	0.39	0.22	0.79	0.016	0.002	1.80	0.84	0.26

## 2. MECHANICAL PROPERTIES

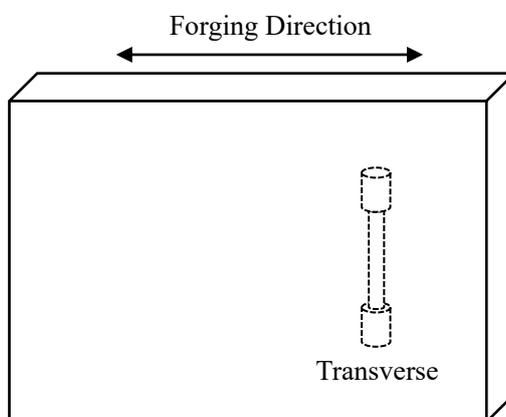


Fig. C.1.5.1 Schematic of specimen direction.

Table C.1.5.4 Tensile properties of SNCM439.

Heat	Direction	Tensile Properties <sup>1)</sup>			
		0.2 % proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile Strength $\sigma_B$ (MPa)	Fracture elongation $\epsilon_f$ (%)	Reduction of Area $\phi$ (%)
G	Transverse	755	874	21	59

1) JIS Z 2201(2008), 14A specimen (diameter 8mm, gage length 40mm)

### 3. SLOW STRAIN RATE TENSILE TEST CONDITIONS

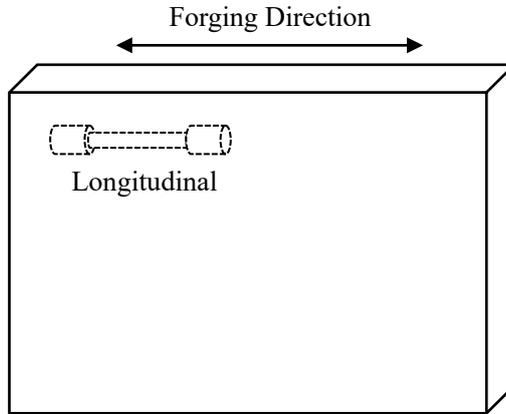


Fig. C.1.5.2 Schematic of specimen direction.

Table C.1.5.5 Slow strain rate tensile test conditions.

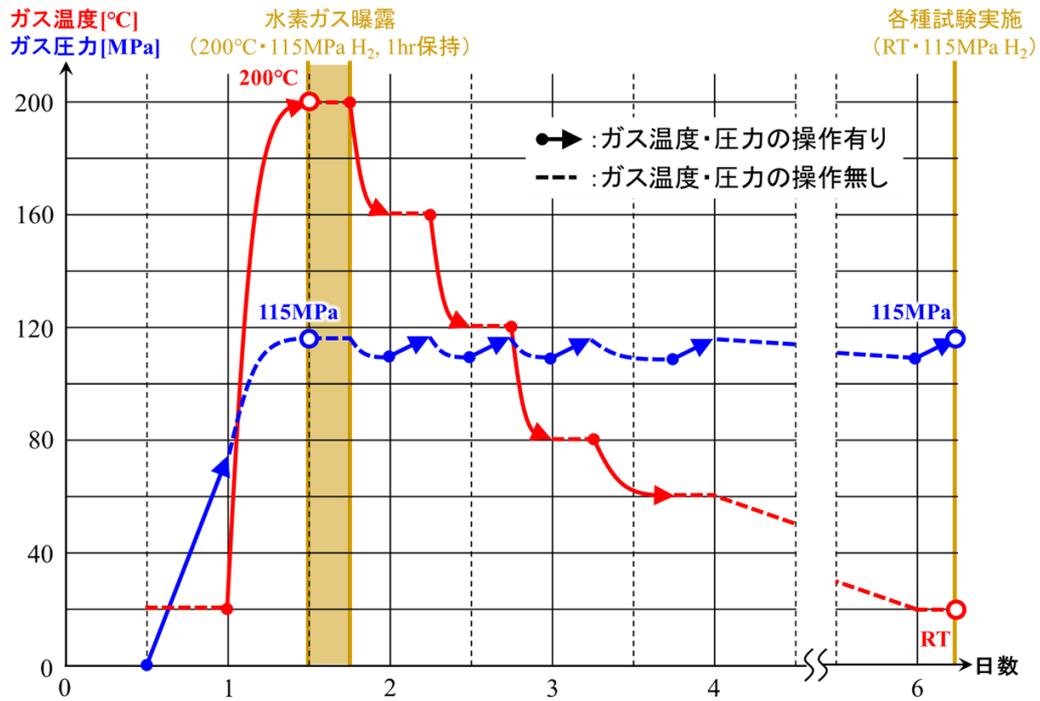
Applied standard	ASTM G142-98 (2016) <sup>1)</sup>	
Type and capacity of testing machine	Servo-hydraulic, 50 kN	Screw type, 50 kN
Loading condition	Uniaxial, Monotonic	
Environment	In 115 MPa hydrogen gas at RT	In air at RT
Gas purity	Hydrogen gas : 99.999% (5N)	---
Test speed	$2.0 \times 10^{-3} \text{ mm/s}^3$ ( $6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) <sup>4)</sup>	$1.7 \times 10^{-3} \text{ mm/s}^2$ ( $5.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) <sup>4)</sup>
Specimen <sup>2)</sup> (dimensions in mm)		

1) Excluding test specimen shape

2) Surface finishing was performed by circumferential polishing with 600 grade silicon carbide paper.

3) Stroke speed or cross head speed.

4) Determined on the basis of 30-mm parallel length of specimen.  $5.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  is given by  $(1.7 \times 10^{-3} \text{ mm/s}) / 30 \text{ mm}$ .  $6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  is given by  $(2.0 \times 10^{-3} \text{ mm/s}) / 30 \text{ mm}$ .



- ① 200°C・115MPa 水素ガス中で試験片を曝露する。(保持時間:1hr)
- ② 段階的に降温と再昇圧を繰り返す。(水素ガス圧力を 100MPa 以上で常に保持)
- ③ 室温・115MPa 水素ガス中で SSRT,  $K_{I,H}$  評価または疲労き裂進展試験を実施する。

Fig. C.1.5.3 Schematic of hydrogen charging before SSRT.

#### 4. EXPERIMENTAL RESULTS

Table C.1.5.6 SSRT properties of SNCM439 Heat G.

Heat	Direction	Test condition	$\sigma_B$ (MPa)	RTS	$\delta$ (%)	REL	$\phi$ (%)	RRA
G	Longitudinal	RT Air	873	-	26	-	67	-
	Longitudinal	RT 115MPa H <sub>2</sub>	845	0.97	21	0.81	35	0.52
	Longitudinal	RT 115MPa H <sub>2</sub> (After H charging)	841	0.96	21	0.81	34	0.51

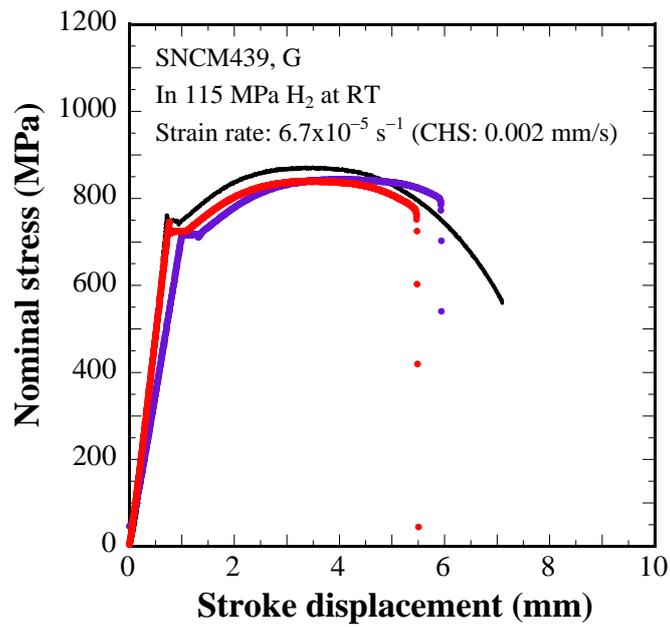


Fig. C.1.5.4 Stress - stroke curves of SNCM439.

## C.1.6 SSRT の事例(6)

出典：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) . 超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業/国内規制適正化に関わる技術開発/新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発

### 1. MATERIALS

Table C.1.6.1 Details of processing and related data of SNCM439.

Heat	Production process	Product form	Dimensions (mm)
SN23	Hot-forged	Plate	Length:573 mm Width:130 mm Thickness:33 mm

Table C.1.6.2 Heat treatment conditions of SNCM439.

Material	Heat	Shape	Quenching	Tempering
Hot-forged material	SN23	Plate	850 °C/2 h, Oil-quenched	640 °C/6 h, Air-cooled

Table C.1.6.3 Chemical composition of SNCM439.

	Heat	Element (mass %)							
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Product analysis	SN23	0.40	0.22	0.83	0.015	0.0026	1.81	0.85	0.26

## 2. MECHANICAL PROPERTIES

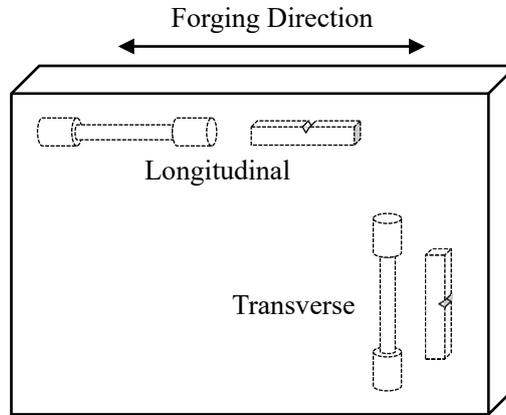


Fig. C.1.6.1 Schematic of specimen direction.

Table C.1.6.4 Tensile properties of SNCM439.

Heat	Direction	Tensile Properties <sup>1)</sup>			
		0.2 % proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile Strength $\sigma_B$ (MPa)	Fracture elongation $\epsilon_f$ (%)	Reduction of Area $\phi$ (%)
SN23	Longitudinal	751	873	24	66
	Transverse	742	869	21	60

1) JIS Z 2201(2008), 14A specimen (diameter 8mm, gage length 40mm)

Table C.1.6.5 Charpy impact properties of SNCM439.

Heat	Direction	Charpy Absorbed Energy at 20 °C (J)				Charpy Absorbed Energy at -60 °C (J)			
		Individual			Average	Individual			Average
SN23	Longitudinal	149	143	139	144	124	127	123	125
	Transverse	122	125	124	124	102	107	105	105

### 3. SLOW STRAIN RATE TENSILE TEST CONDITIONS

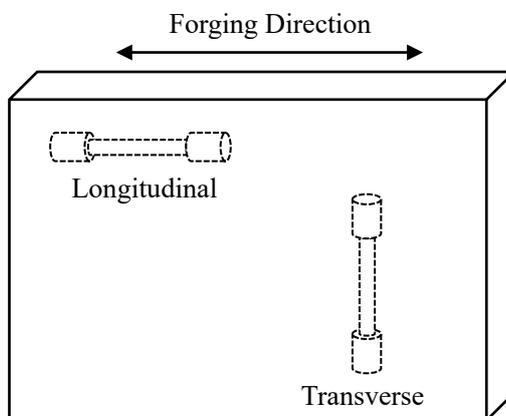


Fig. C.1.6.2 Schematic of specimen direction.

Table C.1.6.6 Slow strain rate tensile test conditions.

Applied standard	ASTM G142-98 (2016)	
Type and capacity of testing machine	Servo-hydraulic, 100 kN	Servo-hydraulic, 500 kN
Loading condition	Uniaxial, Monotonic	
Environment	In 99 MPa hydrogen gas at RT through 85 °C	In air at RT through 85 °C
Gas purity	Hydrogen gas : 99.99999% (7N)	---
Test speed	$2.8 \times 10^{-3} \text{ mm/s}^2$ ( $5.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) <sup>3)</sup>	(~Y.S.) : $1.6 \times 10^{-2} \text{ mm/s}^2$ ( $2.8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) <sup>3)</sup> (Y.S.~) : $36.7 \times 10^{-2} \text{ mm/s}^2$ ( $6.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) <sup>3)</sup>
Specimen <sup>1)</sup> (dimensions in mm)	<p style="text-align: right;">JIS Z 2201 (1998) 14A 号</p>	

1) Surface finishing was performed by circumferential polishing with 800 grade silicon carbide paper.

2) Stroke speed or cross head speed.

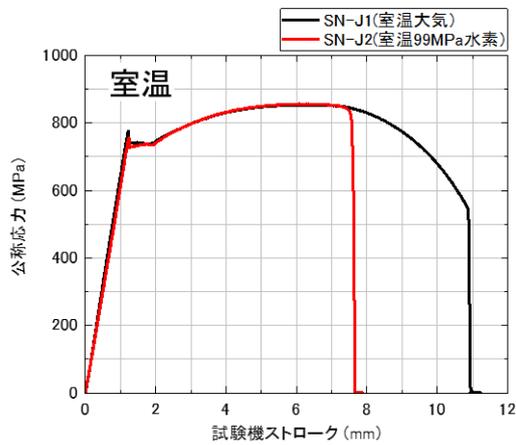
3) Determined on the basis of 56-mm parallel length of specimen. Measured value.

#### 4. EXPERIMENTAL RESULTS

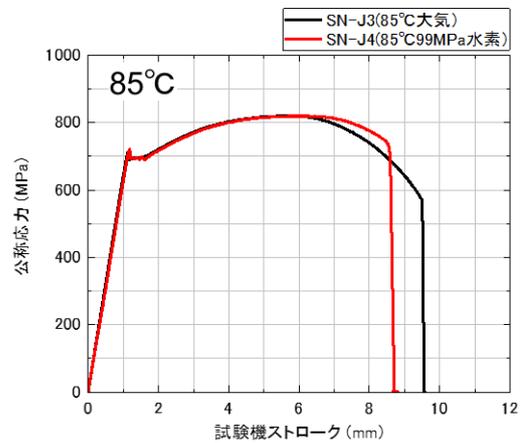
Table C.1.6.7 SSRT properties of SNCM439.

Heat	Direction	Test condition	$\sigma_B$ (MPa)	$\delta$ (%) <sup>1)</sup>	REL	$\phi$ (%)	RRA	
SN23	Longitudinal	RT	Air	853	18	-	67	-
			99 MPa H <sub>2</sub>	856	11	0.61	25	0.37
		85 °C	Air	821	15	-	64	-
			99 MPa H <sub>2</sub>	820	13	0.87	39	0.61
SN23	Transverse	RT	Air	851	18	-	60	-
			99 MPa H <sub>2</sub>	853	11	0.61	26	0.43
		85 °C	Air	817	14	-	64	-
			99 MPa H <sub>2</sub>	819	13	0.93	44	0.69

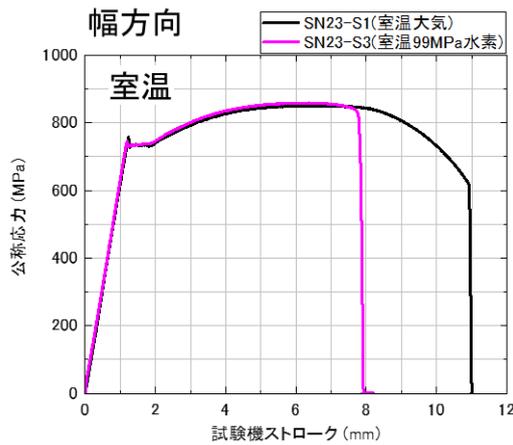
1) ストローク伸びから算出



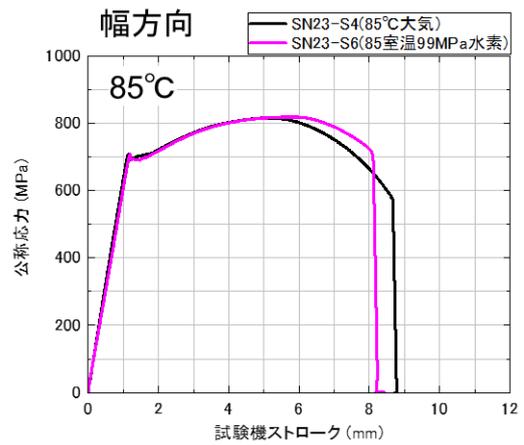
a) Longitudinal specimens at RT



b) Longitudinal specimens at 85 °C



c) Transverse specimens at RT



d) Transverse specimens at 85 °C

Fig. C.1.6.3 Stress - stroke curves of SNSM439.

### C.1.7 SSRT の事例(7)

出典：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) 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

## 1. MATERIALS

Table C.1.7.1 Details of processing and related data of SCM435.

Heat	Production process	Product form	Dimensions (mm)
J	Hot-forged	Plate	-
K	Hot-forged	Cylinder	-

Table C.1.7.2 Heat treatment conditions of SCM435.

Material	Heat	Shape	Quenching	Tempering
Hot-forged material	J	Plate	900 °C / 60 min, Oil-quenched	600 °C / 100 min, Air-cooled
	K	Cylinder	860 °C, Water-spray	630 °C, Air-cooled

Table C.1.7.3 Chemical composition of SCM435.

	Heat	Element (mass %)						
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Product analysis	J	0.36	0.18	0.78	0.013	0.005	1.04	0.20
	K	0.37	0.22	0.84	0.012	0.005	1.15	0.24

## 2. SLOW STRAIN RATE TENSILE TEST CONDITIONS

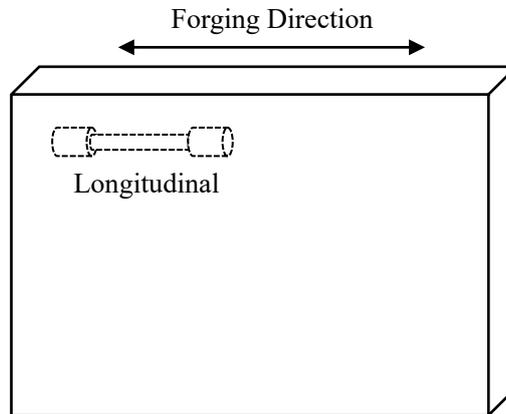


Fig. C.1.7.1 Schematic of specimen direction.

Table C.1.7.4 Slow strain rate tensile test conditions.

Applied standard	ASTM G142-98 (2016) <sup>1)</sup>	
Type and capacity of testing machine	Servo-hydraulic, 50 kN	Screw type, 50 kN
Loading condition	Uniaxial, Monotonic	
Environment	In 106 MPa or 115 MPa hydrogen gas at -45 °C through 200 °C In 0.1 MPa nitrogen gas at -45 °C	In air at RT through 200 °C
Gas purity	Hydrogen gas : 99.999% (5N)	---
Test speed	$1.5 \times 10^{-3} \text{ mm/s}^3$ ( $5.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) <sup>4)</sup>	$1.7 \times 10^{-3} \text{ mm/s}^2$ ( $5.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) <sup>4)</sup>
Specimen <sup>2)</sup> (dimensions in mm)		

1) Excluding test specimen shape

2) Surface finishing was performed by circumferential polishing with 600 grade silicon carbide paper.

3) Stroke speed or cross head speed.

4) Determined on the basis of 30-mm parallel length of specimen.  $5.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  is given by  $(1.5 \times 10^{-3} \text{ mm/s}) / 30 \text{ mm}$ .  $5.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  is given by  $(1.7 \times 10^{-3} \text{ mm/s}) / 30 \text{ mm}$ .

### 3. EXPERIMENTAL RESULTS

Table C.1.7.5 SSRT properties of SCM435 Heat J.

Heat	Direction	Test condition	$\sigma_B$ (MPa)	RTS	$\delta$ (%)	REL	$\varphi$ (%)	RRA	
J	Longitudinal	-45 °C	0.1MPa N <sub>2</sub>	954	-	27	-	72	-
			106MPa H <sub>2</sub>	936	0.98	-	-	25	0.35
	Longitudinal	RT	Air	824	-	22	-	72	-
			115MPa H <sub>2</sub>	840	1.02	16	0.73	30	0.42
	Longitudinal	120 °C	Air	864	-	23	-	70	-
			115MPa H <sub>2</sub>	829	0.96	17	0.74	42	0.60
	Longitudinal	200 °C	Air	862	-	22	-	70	-
			115MPa H <sub>2</sub>	886	1.03	15	0.69	37	0.53

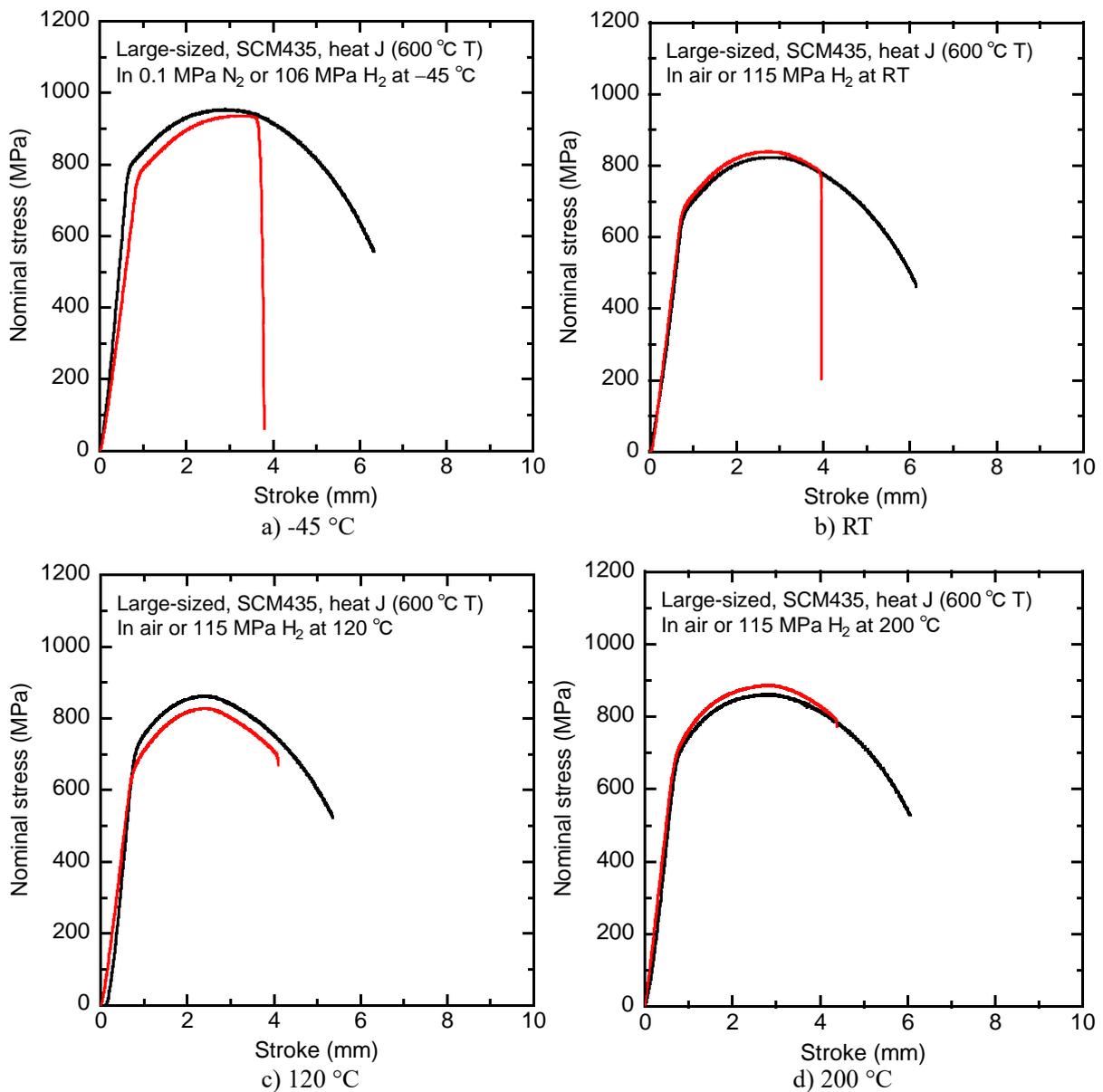


Fig. C.1.7.2 Stress - stroke curves of SCM435 Heat J.

#### 4. EXPERIMENTAL RESULTS

Table C.1.7.6 SSRT properties of SCM435 Heat K.

Heat	Direction	Test condition	$\sigma_B$ (MPa)	RTS	$\delta$ (%)	REL	$\phi$ (%)	RRA	
K	Longitudinal	-40 °C	0.1MPa N <sub>2</sub>	881	-	28	-	65	-
			106MPa H <sub>2</sub>	886	1.01	21	0.75	36	0.55
	Longitudinal	RT	Air	817	-	23	-	70	-
			115MPa H <sub>2</sub>	820	1.00	23	1.00	47	0.67
	Longitudinal	120 °C	Air	792	-	23	-	65	-
			115MPa H <sub>2</sub>	835	1.05	20	0.87	47	0.72

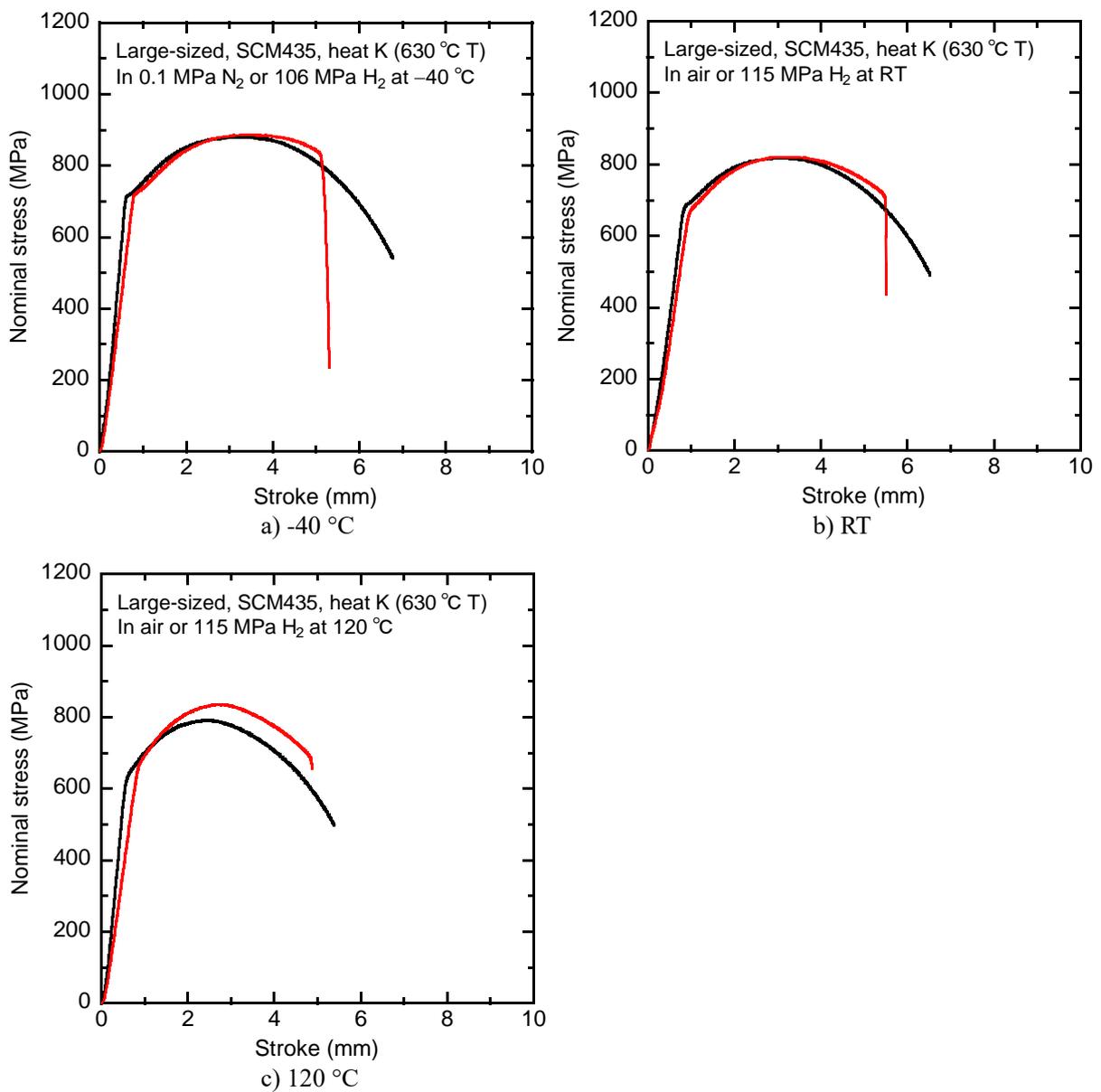


Fig. C.1.7.3 Stress - stroke curves of SCM435 Heat K.

### C.1.8 SSRT の事例(8)

出典：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) . 超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業/国内規制適正化に関わる技術開発/新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発

## 1. MATERIALS

Table C.1.8.1 Details of processing and related data of SA-723.

Heat	Production process	Product form	Dimensions (mm)
D	Hot-forged	Plate	Length:88 mm Width:100 mm Thickness:30 mm
E	Hot-forged	Plate	Length:90 mm Width:100 mm Thickness:30 mm

Table C.1.8.2 Heat treatment conditions of SA-723.

Material	Heat	Shape	Quenching	Tempering
Hot-forged material	D	Plate	850 °C / 2 h, 50 °C/min. Air-cool	640 °C/6 +6 h, Air-cooled
	E	Plate	850 °C / 2 h, 50 °C/min. Air-cool	640 °C/6+2.5 h, Air-cooled

Table C.1.8.3 Chemical composition of SA-723.

	Heat	Element (mass %)								
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
Product analysis	D	0.26	0.09	0.28	0.006	0.001	3.34	1.68	0.41	0.08
	E	0.26	0.09	0.28	0.006	0.001	3.34	1.68	0.41	0.08

## 2. MECHANICAL PROPERTIES

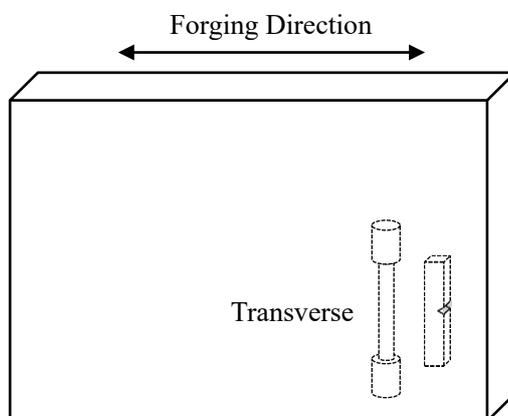


Fig. C.1.8.1 Schematic of specimen direction.

Table C.1.8.4 Tensile properties of SA-723.

Heat	Direction	Tensile Properties <sup>2)</sup>			
		0.2 % proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile Strength $\sigma_B$ (MPa)	Fracture elongation $\epsilon_f$ (%)	Reduction of Area $\phi$ (%)
- <sup>1)</sup>	Transverse	798	872	16	76

1) Heat D および Heat E と同等の材料による試験結果

2) JIS Z 2201(2008), 14A specimen (diameter 8mm, gage length 40mm)

Table C.1.8.5 Charpy impact properties of SA-723.

Heat	Direction	Charpy Absorbed Energy at 20 °C (J)			Charpy Absorbed Energy at -30 °C (J)				
		Individual		Average	Individual		Average		
- <sup>1)</sup>	Transverse	223	221	220	221	223	226	230	226

1) Heat D および Heat E と同等の材料による試験結果

### 3. SLOW STRAIN RATE TENSILE TEST CONDITIONS

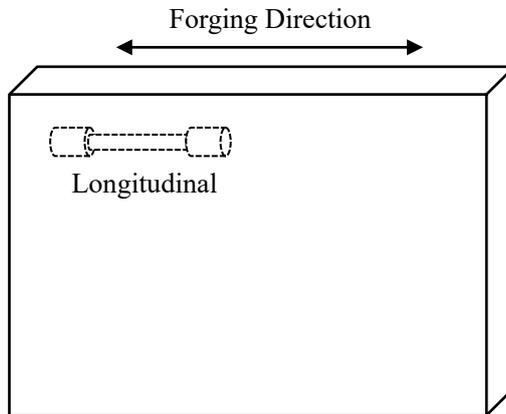


Fig. C.1.8.2 Schematic of specimen direction.

Table C.1.8.6 Slow strain rate tensile test conditions.

Applied standard	ASTM G142-98 (2016) <sup>1)</sup>
Type and capacity of testing machine	Servo-hydraulic, 50 kN
Loading condition	Uniaxial, Monotonic
Environment	In 106 MPa or 115 MPa hydrogen gas at -45 °C through 200 °C In 0.1 MPa nitrogen gas at -45 °C In air at RT or 200 °C
Gas purity	Hydrogen gas : 99.999% (5N)
Test speed	$2.0 \times 10^{-3} \text{ mm/s}^3$ ( $6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) <sup>4)</sup>
Specimen <sup>2)</sup> (dimensions in mm)	

1) Excluding test specimen shape

2) Surface finishing was performed by circumferential polishing with 600 grade silicon carbide paper.

3) Stroke speed or cross head speed.

4) Determined on the basis of 30-mm parallel length of specimen.  $6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  is given by  $(2.0 \times 10^{-3} \text{ mm/s}) / 30 \text{ mm}$ .

#### 4. EXPERIMENTAL RESULTS

Table C.1.8.7 SSRT properties of SA-723 Heat D.

Heat	Direction	Test condition	$\sigma_B$ (MPa)	RTS	$\delta$ (%)	REL	$\phi$ (%)	RRA	
D	Longitudinal	RT	Air	843	-	25	-	77	-
			115MPa H <sub>2</sub>	841	1.00	17	0.67	30	0.39
		115MPa H <sub>2</sub>	865	1.03	16	0.62	28	0.36	
	Longitudinal	200 °C	Air	793	-	23	-	77	-
			115MPa H <sub>2</sub>	802	1.01	16	0.70	44	0.57
		115MPa H <sub>2</sub>	798	1.01	16	0.69	43	0.56	

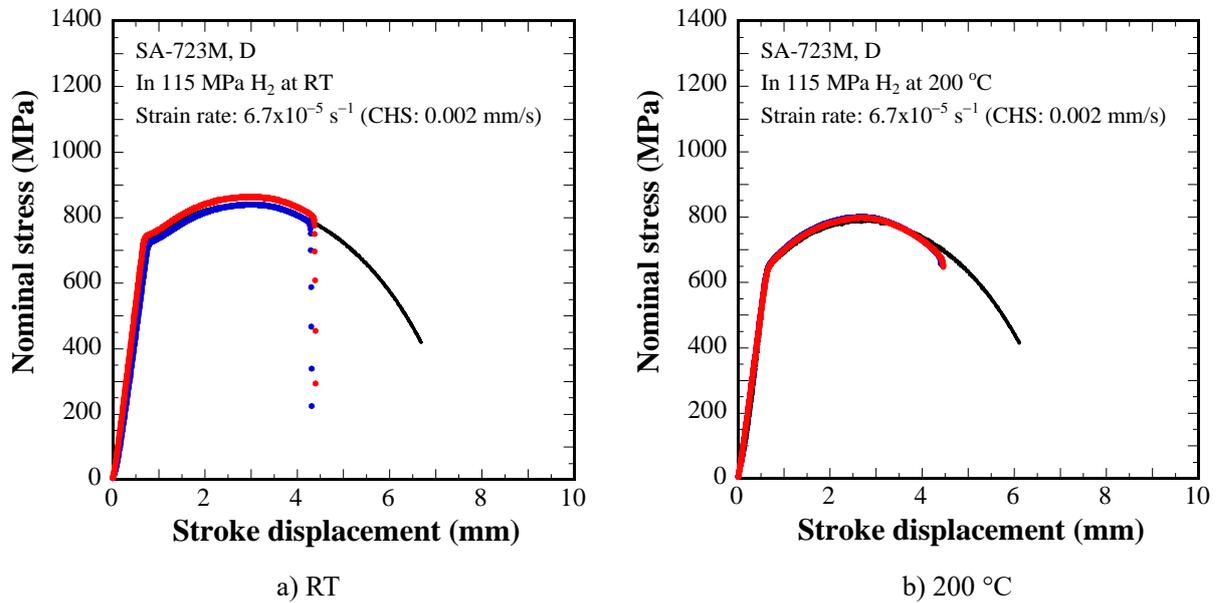


Fig. C.1.8.3 Stress - stroke curves of SA-723 Heat D.

Table C.1.8.8 SSRT properties of SA-723 Heat E.

Heat	Direction	Test condition		$\sigma_B$ (MPa)	RTS	$\delta$ (%)	REL	$\phi$ (%)	RRA
E	Longitudinal	-45 °C	Air	942	-	27	-	75	-
			115MPa H <sub>2</sub>	909	0.97	14	0.50	26	0.35
	Longitudinal	RT	Air	864	-	24	-	76	-
			115MPa H <sub>2</sub>	862	1.00	16	0.65	29	0.38
				872	1.01	14	0.58	27	0.36
	Longitudinal	200 °C	Air	812	-	22	-	76	-
115MPa H <sub>2</sub>			778	0.96	15	0.68	43	0.57	

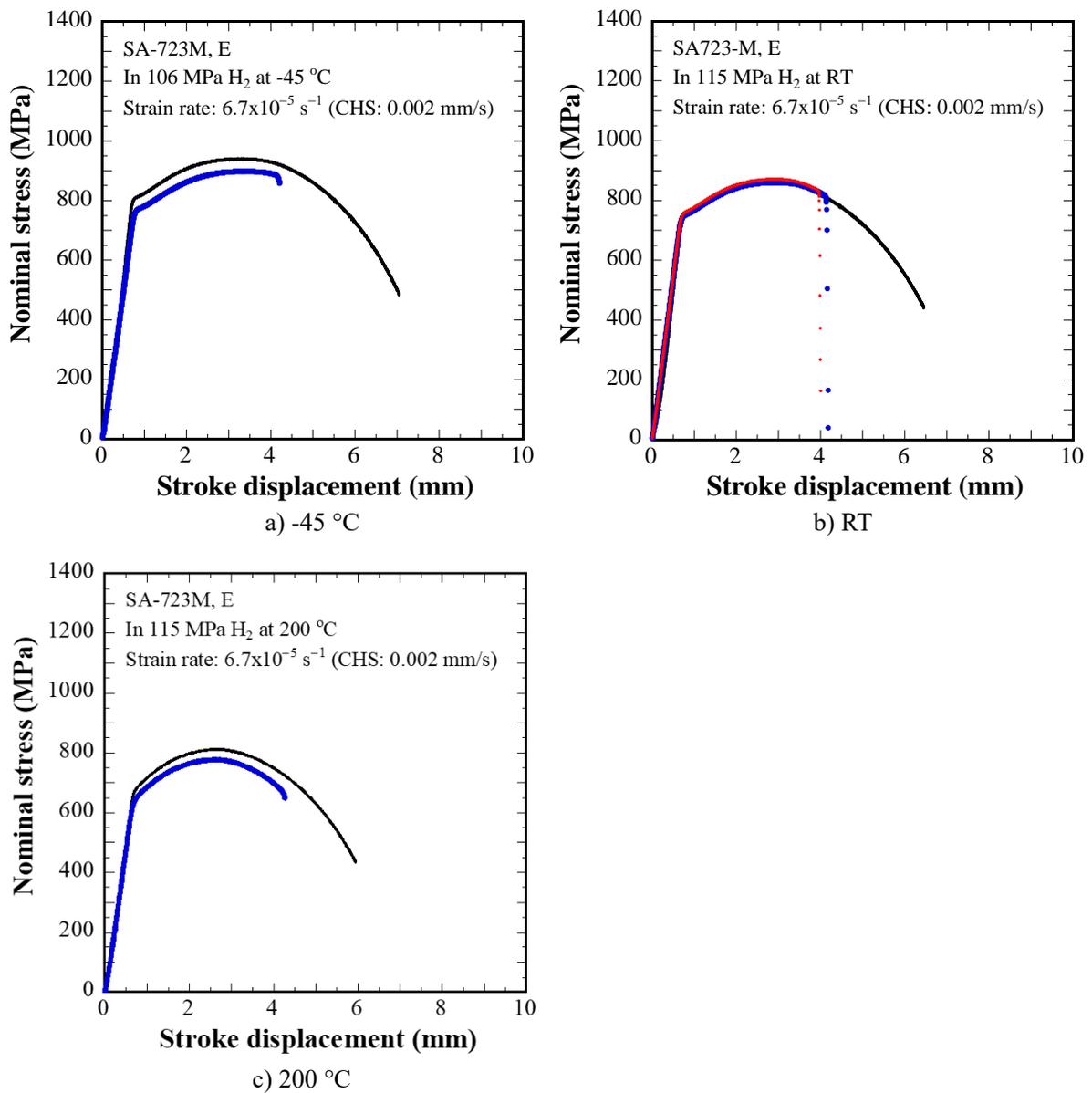


Fig. C.1.8.4 Stress - stroke curves of SA-723 Heat E.

### C.1.9 SSRT の事例(9)

出典：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) . 超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業/国内規制適正化に関わる技術開発/新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発

## 1. MATERIALS

Table C.1.9.1 Details of processing and related data of SA-723.

Heat	Production process	Product form	Dimensions (mm)
SA	Hot-forged	Round bar	Outer diameter:550 mm

Table C.1.9.2 Heat treatment conditions of SA-723.

Material	Heat	Shape	Quenching	Tempering
Hot-forged material	SA	Round bar	850 °C Water-quenched	640 °C, Air-cooled

Table C.1.9.3 Chemical composition of SA-723.

	Heat	Element (mass %)								
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
Product analysis	SA	0.26	0.09	0.28	0.006	0.001	3.34	1.68	0.41	0.08

## 2. MECHANICAL PROPERTIES

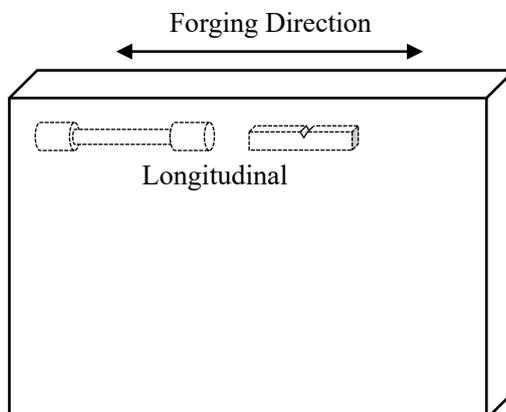


Fig. C.1.9.1 Schematic of specimen direction.

Table C.1.9.4 Tensile properties of SA-723.

Heat	Direction	Tensile Properties <sup>1)</sup>			
		0.2 % proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile Strength $\sigma_B$ (MPa)	Fracture elongation $\epsilon_f$ (%)	Reduction of Area $\phi$ (%)
SA	Longitudinal	743	865	22	71

1) JIS Z 2201(2008), 14A specimen (diameter 8mm, gage length 40mm)

Table C.1.9.5 Charpy impact properties of SA-723.

Heat	Direction	Charpy Absorbed Energy at -15 °C (J)			
		Individual			Average
SA	Longitudinal	186	189	196	190

### 3. SLOW STRAIN RATE TENSILE TEST CONDITIONS

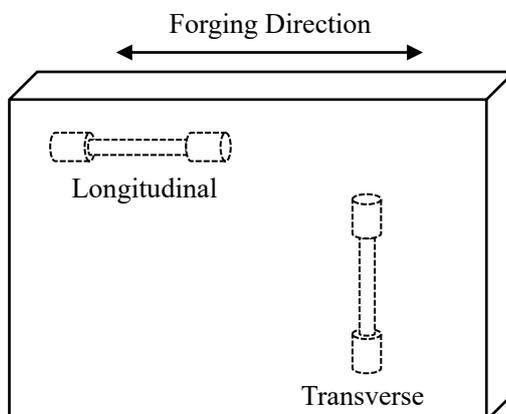


Fig. C.1.9.2 Schematic of specimen direction.

Table C.1.9.6 Slow strain rate tensile test conditions.

Applied standard	ASTM G142-98 (2016)	
Type and capacity of testing machine	Servo-hydraulic, 100 kN	Servo-hydraulic, 500 kN
Loading condition	Uniaxial, Monotonic	
Environment	In 115 MPa hydrogen gas at RT through 85 °C	In air at RT through 85 °C
Gas purity	Hydrogen gas : 99.99999% (7N)	---
Test speed	$2.8 \times 10^{-3} \text{ mm/s}^2$ ( $6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) <sup>3)</sup>	(~Y.S.) : $1.6 \times 10^{-2} \text{ mm/s}^2$ ( $2.8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) <sup>3)</sup> (Y.S.~) : $36.7 \times 10^{-2} \text{ mm/s}^2$ ( $6.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) <sup>3)</sup>
Specimen <sup>1)</sup> (dimensions in mm)	<p style="text-align: right;">JIS Z 2201 (1998) 14A 号</p>	

1) Surface finishing was performed by circumferential polishing with 800 grade silicon carbide paper.

2) Stroke speed or cross head speed.

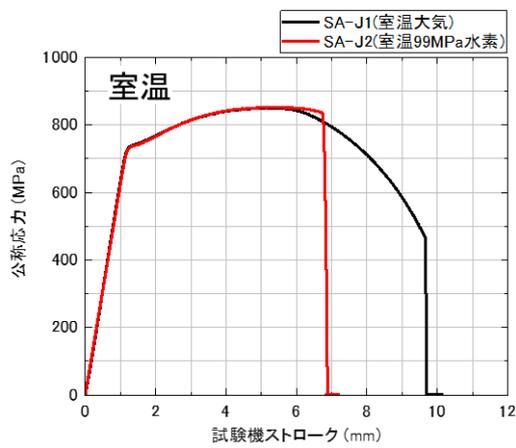
3) Determined on the basis of 56-mm parallel length of specimen. Measured value.

#### 4. EXPERIMENTAL RESULTS

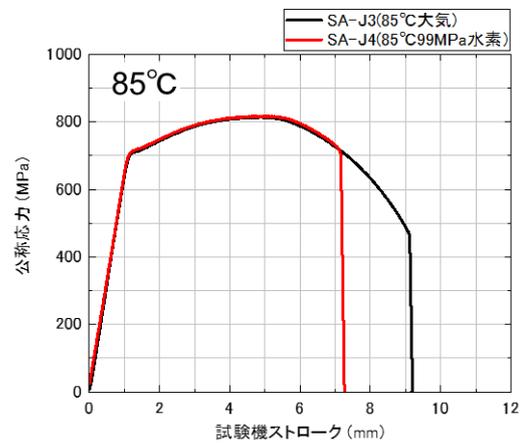
Table C.1.9.7 SSRT properties of SA-723.

Heat	Direction	Test condition	$\sigma_B$ (MPa)	$\delta$ (%) <sup>1)</sup>	REL	$\phi$ (%)	RRA	
SA	Longitudinal	RT	Air	850	16	-	73	-
			99 MPa H <sub>2</sub>	852	10	0.63	25	0.34
		85 °C	Air	814	15	-	71	-
			99 MPa H <sub>2</sub>	817	11	0.73	36	0.51
SA	Transverse	RT	Air	843	15	-	68	-
			99 MPa H <sub>2</sub>	850	10	0.67	22	0.32
		85 °C	Air	810	13	-	61	-
			99 MPa H <sub>2</sub>	815	10	0.77	31	0.51

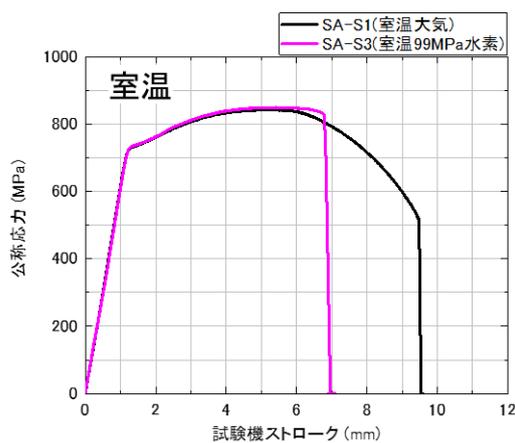
1) ストローク伸びから算出



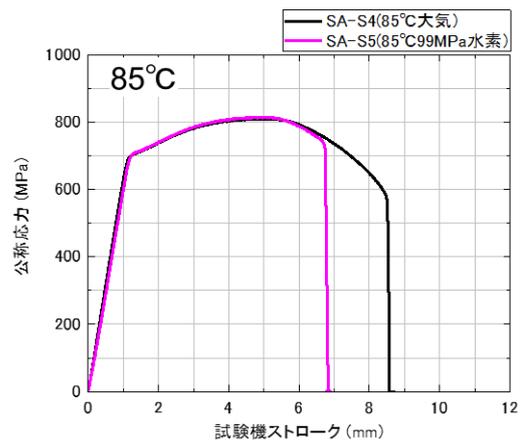
a) Longitudinal specimens at RT



b) Longitudinal specimens at 85 °C



c) Transverse specimens at RT



d) Transverse specimens at 85 °C

Fig. C.1.9.3 Stress - stroke curves of SA-723.

## C.2 疲労試験

### C.2.1 疲労試験の事例(1)

出典： HYDROGENIUS DATABASE / No. A69(Tentative) / 2017 /  
Database on Fatigue Strength Properties of JIS-SNCM439 Nickel Chromium Molybdenum Steel  
in 115 MPa Hydrogen Gas

## 1. MATERIALS

Table C.2.1.1 Details of processing and related data of SNCM439.

Heat	Production process	Product form	Dimensions (mm)
C <sup>1)</sup>	Hot-rolled	Plate	Length:870 mm Width:132 mm Thickness:31 mm
H <sup>1)</sup>	Hot-rolled	Plate	Length:830 mm Width:132 mm Thickness:31 mm
J <sup>1)</sup>	Hot-forged	Cylinder	Length:3630 mm Outer diameter:320 mm Inner diameter:200 mm Thickness:60 mm

1) Reported by the manufacture.

Table C.2.1.2 Chemical composition of SNCM439.

	Heat	Element (mass %)							
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Product analysis	C <sup>1)</sup>	0.43	0.22	0.82	0.012	0.002	1.81	0.86	0.25
	H <sup>1)</sup>	0.40	0.22	0.80	0.014	0.002	1.80	0.86	0.26
	J <sup>1)</sup>	0.40	0.27	0.89	0.009	0.015	1.84	0.92	0.28
Ladle analysis	C <sup>2)</sup>	0.42	0.22	0.82	0.015	0.002	1.80	0.85	0.25
	H <sup>2)</sup>	0.39	0.22	0.79	0.016	0.002	1.81	0.84	0.26
	J <sup>3)</sup>	0.42	0.26	0.80	0.010	<0.010	1.91	0.89	0.25
	Requirement <sup>4)</sup>	max	0.43	0.35	0.90	0.030	0.030	2.00	1.00
min		0.36	0.15	0.60			1.60	0.60	0.15

1) Performed by HYDROGENIUS.

2) Reported by the manufacture.

3) After the inspection certificate.

4) JIS G 4053 (2008), “Low-alloyed steels for machine structural use”.

Table C.2.1.3 Heat treatment conditions of SNCM439.

Material	Heat	Shape	Quenching	Tempering
Large-sized material	C <sup>1)</sup>	Plate	850 °C/2 h, Oil-quenched	650 °C/4 h, Air-cooled
	H <sup>1)</sup>	Plate	850 °C/2 h, Oil-quenched	640 °C/4 h, Air-cooled
	J <sup>1)</sup>	Cylinder	860 °C, Water-spray	620 °C, Air-cooled
			850 °C/2 h, Oil-quenched <sup>2)</sup>	650 °C/4 h, Air-cooled <sup>2)</sup>

1) Reported by the manufactures.

2) A block of  $l$  108 mm,  $w$  320 mm and  $t$  60 mm was heat-treated.

## 2. MECHANICAL PROPERTIES

Table C.2.1.4 Mechanical properties of SNCM439.

Material	Heat	Shape	Tempering Temperature (°C)	Tensile Properties				Vickers Hardness (HV)
				0.2 % proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile Strength $\sigma_B$ (MPa)	Fracture elongation $\varepsilon_f$ (%)	Reduction of Area $\varphi$ (%)	
Large-sized material	C <sup>1)</sup>	Plate	650	738 <sup>2)</sup> (739 <sup>3)</sup> )	867	22	66	275
	H <sup>1)</sup>	Plate	640	746 <sup>2)</sup> (747 <sup>3)</sup> )	873	23	66	270
	J <sup>1)</sup>	Cylinder	620	925 <sup>2)</sup> (921 <sup>3)</sup> )	1025	20	62	318
			650	766 <sup>2)</sup> (764 <sup>3)</sup> )	881	25	67	263

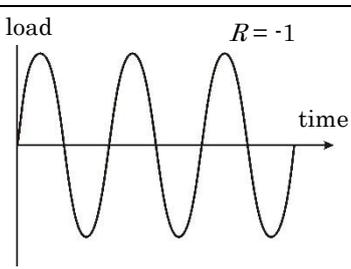
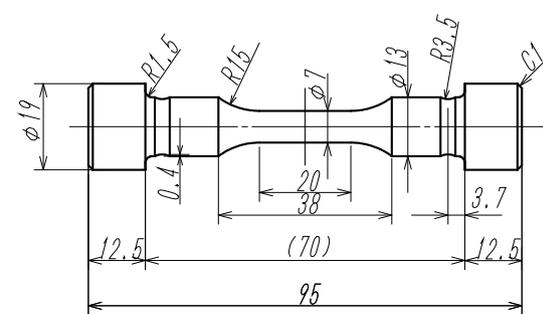
1) Performed by HYDROGENIUS.

2) Determined from  $\sigma$ - $\varepsilon$  curve.

3) Determined from  $\sigma$ -stroke curve. See Fig. A1-6 in HYDROGENIUS DATABASE No.68.

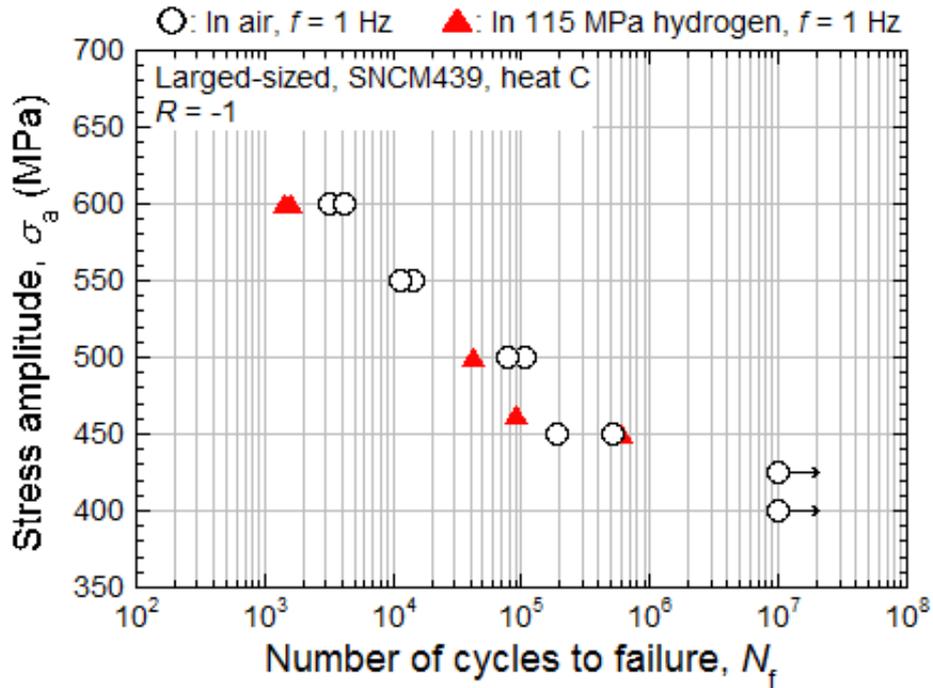
## 3. FATIGUE STRENGTH PROPERTIES

Table C.2.1.5 Fatigue test conditions.

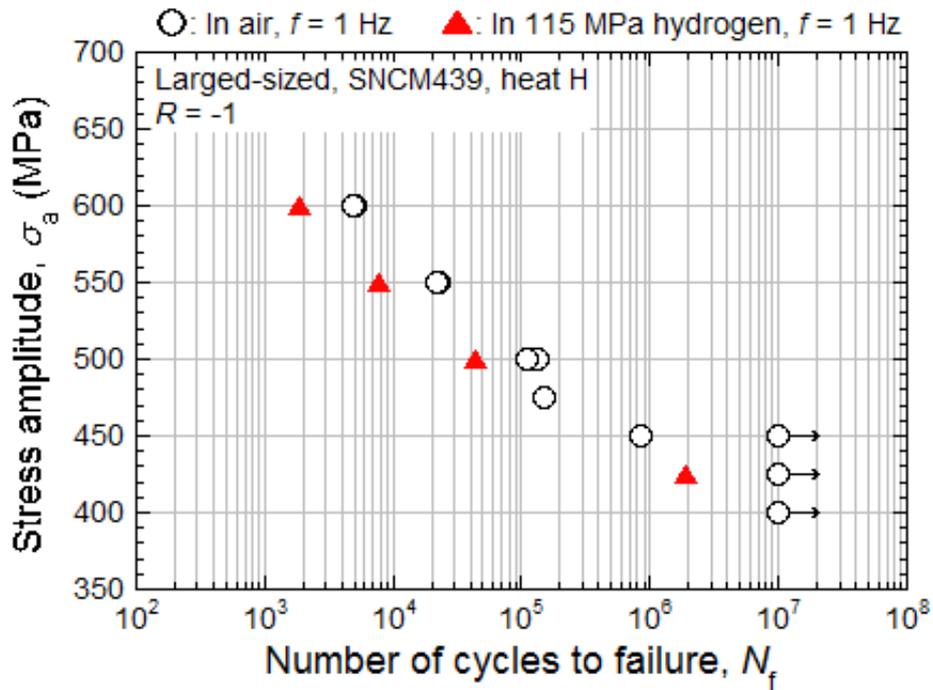
Type of test	Uniaxial
Testing machines	100 kN servohydraulic fatigue machine in gaseous hydrogen and nitrogen up to 120 MPa 50 kN servohydraulic fatigue machine in air
Loading condition	Constant stress amplitude test under zero mean stress ( $R = -1$ )
Waveform	 <p style="text-align: center;">Sinusoidal</p>
Frequency	0.01 – 1 Hz
Environment	115 MPa hydrogen gas, RT Laboratory air, RT
Gas purity	Hydrogen gas: 99.999 %
Specimen <sup>1)</sup>	

1) The specimen surface was finished by buffing with a colloidal SiO<sub>2</sub> (0.04  $\mu$ m) solution.

4. EXPERIMENTAL RESULTS



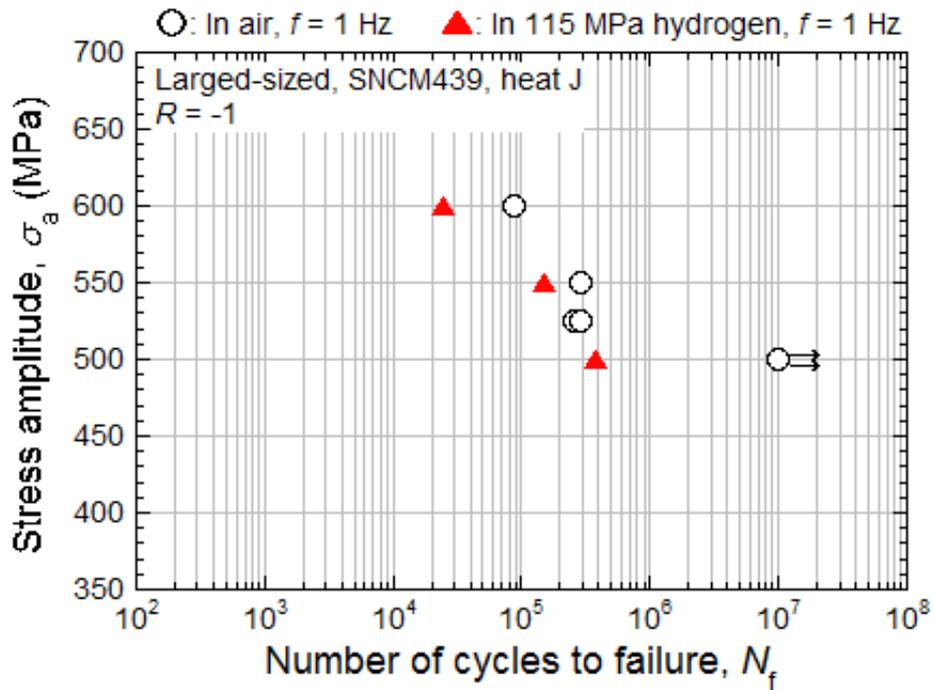
(a) Heat C, tempered at 650 °C ( $\sigma_B=867$ MPa)



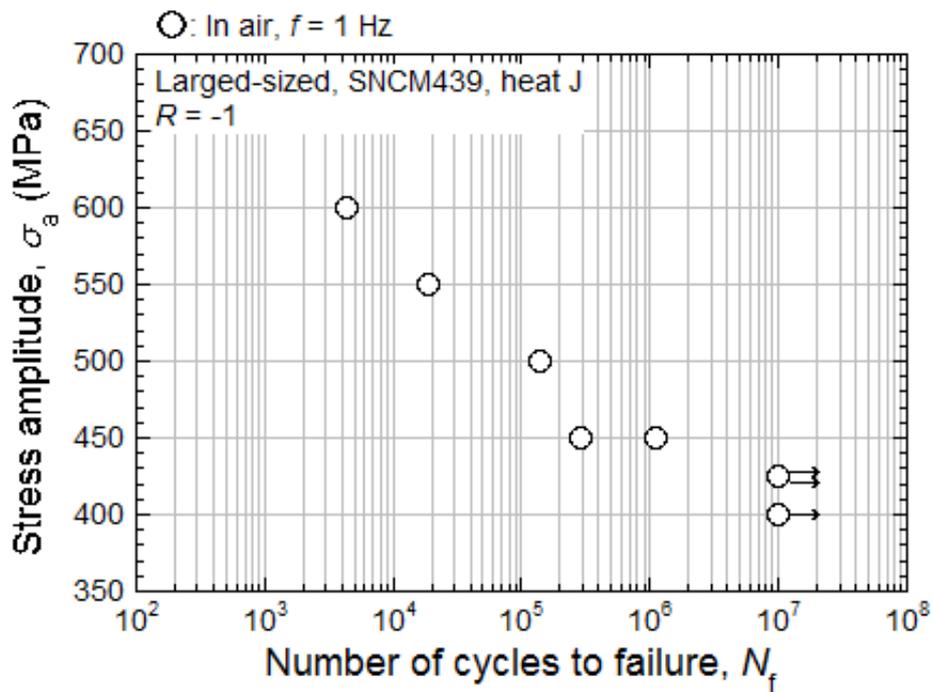
(b) Heat H, tempered at 640 °C ( $\sigma_B=873$ MPa)

Fig. C.2.1.1 S-N diagram of large-sized SNCM439.

(Figure continued on next page.)



(c) Heat J, tempered at 620 °C ( $\sigma_B=1025$ MPa)



(d) Heat J, tempered at 650 °C ( $\sigma_B=881$ MPa)

Fig. C.2.1.1 S-N diagram of large-sized SNCM439. (Continued)

## C.2.2 疲労試験の事例(2)

出典： 株式会社日本製鋼所  
NEDO 水素利用技術研究開発事業成果報告書

### 1. MATERIALS

Table C.2.2.1 Details of processing and related data of SNCM439.

Heat	Production process	Product form	Dimensions (mm)
A	Hot-forged	Plate	Length:950mm Width:130 mm Thickness:30 mm
B	Hot-forged	Round bar	Outer diameter:430 mm
C	Hot-rolled	Round bar	Outer diameter:300 mm
D	Hot-rolled	Round bar	Outer diameter:300 mm

Table C.2.2.2 Chemical composition of SNCM439.

	Heat	Element (mass %)								
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	O(ppm)
Product analysis	A	0.42	0.22	0.81	0.017	0.002	1.81	0.85	0.26	6
	B	0.40	0.26	0.80	0.005	0.004	1.90	0.84	0.25	35
	C	0.40	0.27	0.80	0.012	0.014	1.74	0.74	0.23	12
	D	0.41	0.26	0.82	0.022	0.010	1.60	0.79	0.15	15
Requirement <sup>1)</sup>	Max	0.43	0.35	0.90	0.030	0.030	2.00	1.00	0.30	-
	Min	0.36	0.15	0.60	-	-	1.60	0.60	0.15	-

1) JIS G 4053 (2008), "Low-alloyed steels for machine structural use".

Table C.2.2.3 Heat treatment conditions of SNCM439.

Heat	Direction	Heat-treated shape	Quenching	Tempering
A	Axial	Length160mm Width:130 mm Thickness:30 mm	850 °C/2 h, Oil-quenched	650 °C/4 h, Air-cooled
B	Axial	Length160mm Width:100 mm Thickness:30 mm	850 °C/2 h, Oil-quenched	645 °C/4 h, Air-cooled
	Circumferential			
C	Axial	Length160mm Width:100 mm Thickness:30 mm	850 °C/2 h, Oil-quenched	645 °C/4 h, Air-cooled
	Circumferential			625 °C/4 h, Air-cooled
D	Axial	Length160mm Width:100 mm Thickness:30 mm	850 °C/2 h, Oil-quenched	630 °C/4 h, Air-cooled

## 2. MECHANICAL PROPERTIES

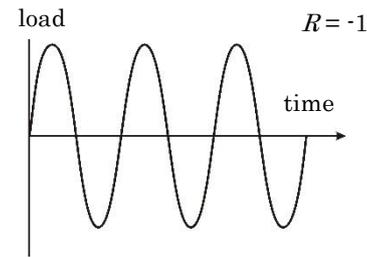
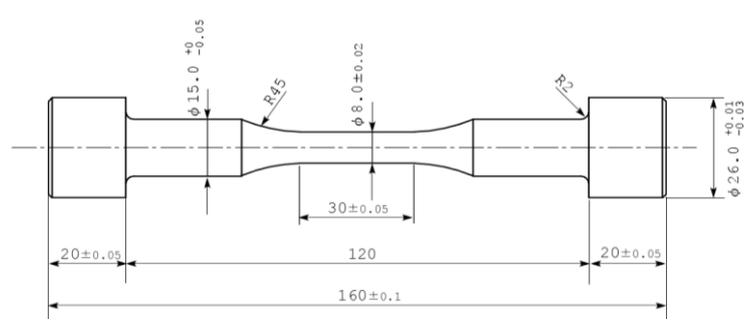
Table C.2.2.4 Mechanical properties of SNCM439.

Heat	Direction	Tensile Properties <sup>1)</sup>			
		0.2 % proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile Strength $\sigma_B$ (MPa)	Fracture elongation $\epsilon_f$ (%)	Reduction of Area $\phi$ (%)
A	Axial	730	853	20	57
B	Axial	739	885	22	61
	Circumferential	737	881	17	44
C	Axial	744	880	22	63
	Circumferential	830	954	16	42
D	Axial	762	894	20	59

1) JIS Z 2201(2008), 14A specimen (diameter 8mm, gage length 40mm)

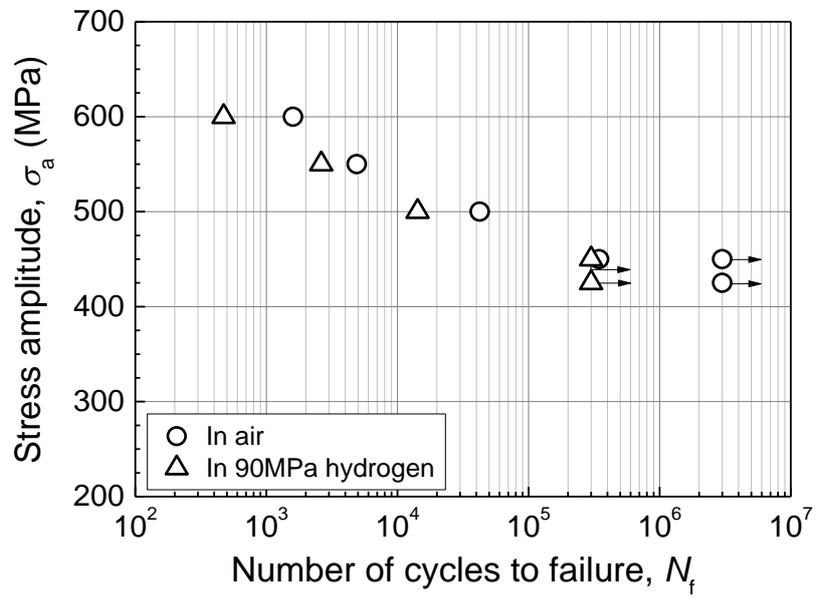
### 3. FATIGUE STRENGTH PROPERTIES

Table C.2.2.5 Fatigue test conditions.

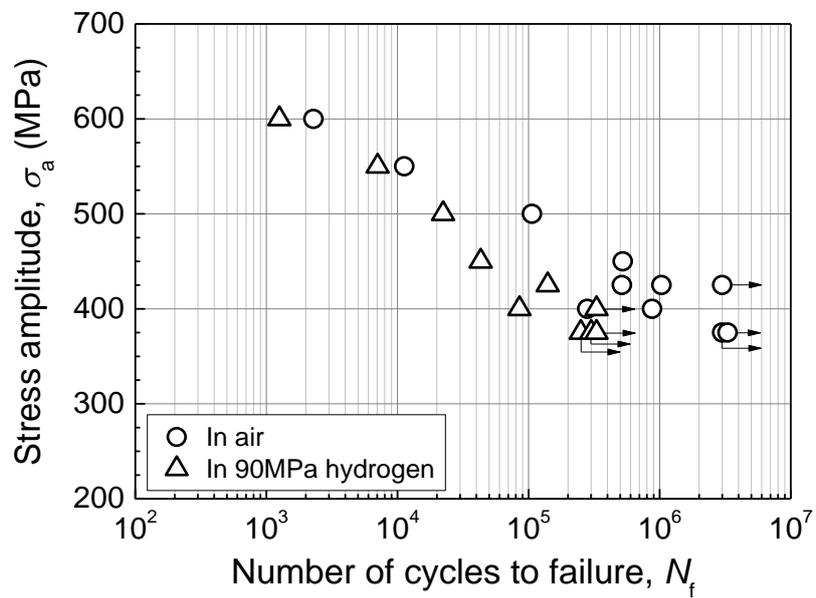
Type of test	Uniaxial	
Testing machines	Servo-hydraulic, 100 kN	Servo-hydraulic, 100 kN
Loading condition	Constant stress amplitude test under zero mean stress ( $R = -1$ )	
Waveform		
	Sinusoidal	
Frequency	1 Hz	0.5 – 5 Hz
Environment	In 90 MPa hydrogen gas at RT	In air at RT
Gas purity	Hydrogen gas : 99.99999% (7N)	---
Specimen <sup>1)</sup>		

1) Surface finishing was performed by axial polishing with 800 grade silicon carbide paper.

#### 4. EXPERIMENTAL RESULTS



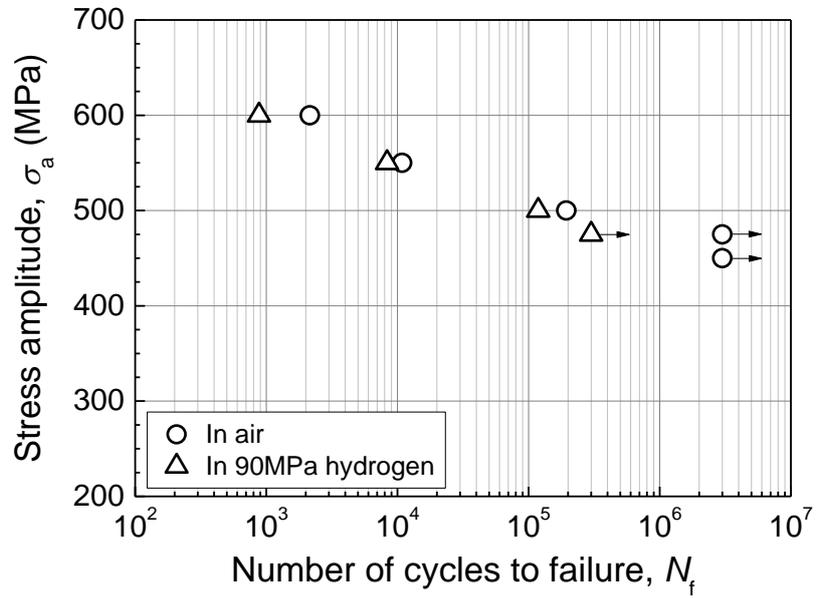
(a) Heat A, axial direction



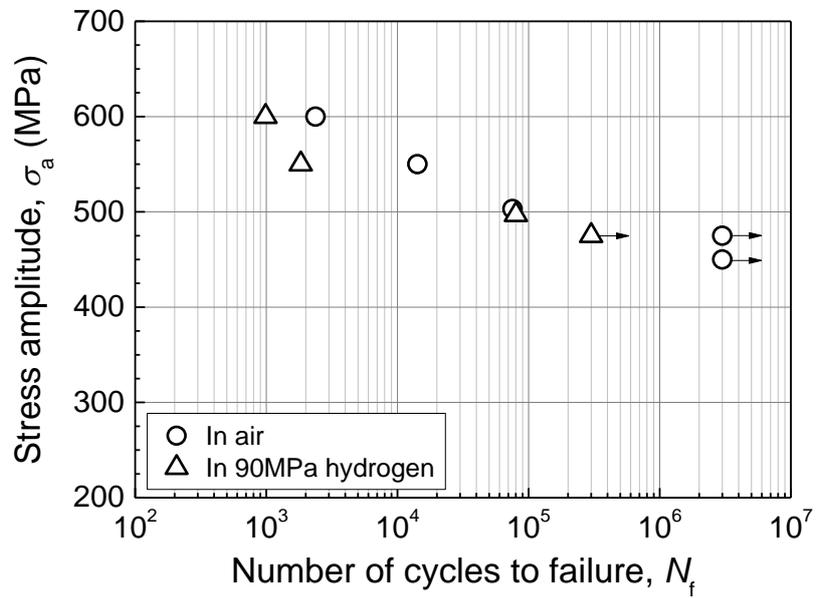
(b) Heat B, axial direction

Fig. C.2.2.1 S-N diagram of SNCM439.

(Figure continued on next page.)



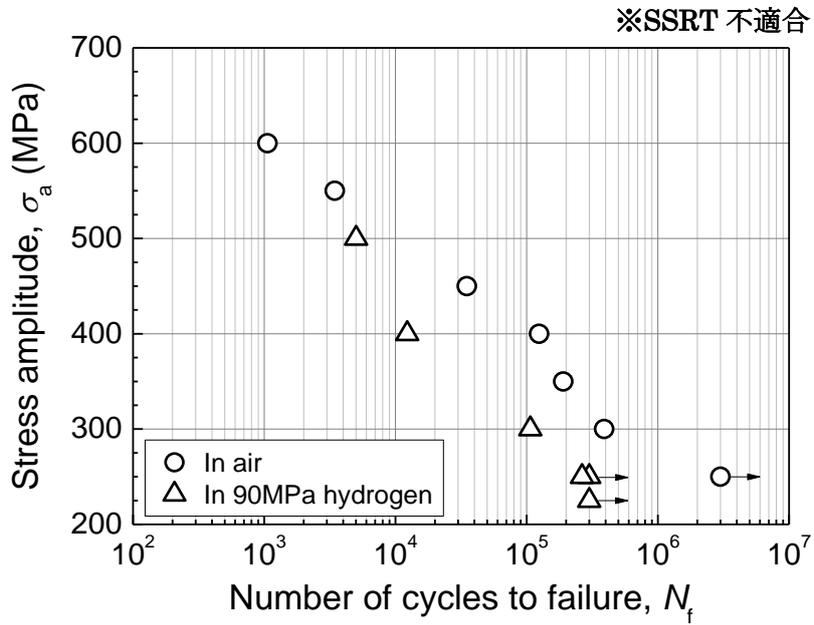
(c) Heat C, axial direction



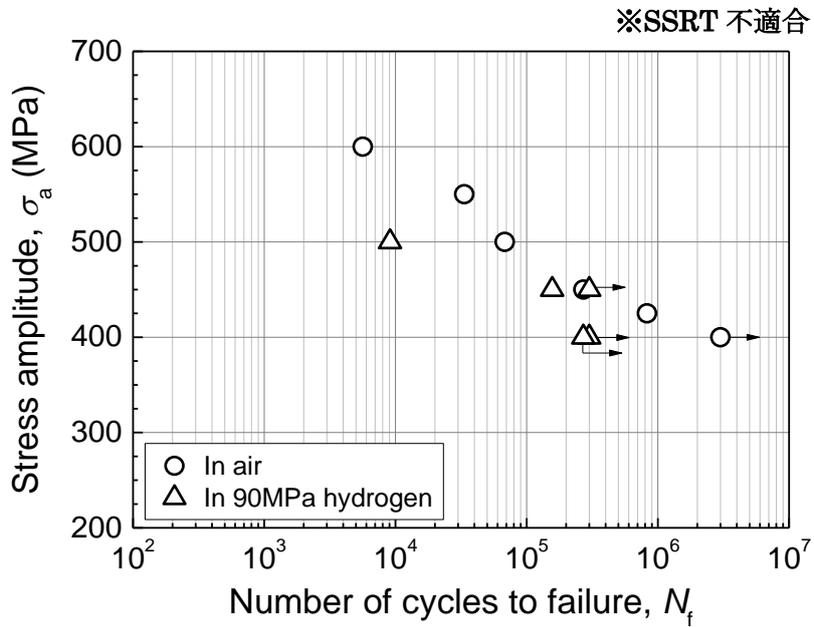
(d) Heat D, axial direction

Fig. C.2.2.1 S-N diagram of SNCM439.

(Figure continued on next page.)



(e) Heat B, circumferential direction



(f) Heat C, circumferential direction

Fig. C.2.2.1 S-N diagram of SNCM439.

### C.2.3 疲労試験の事例(3)

出典： JFE スチール株式会社  
NEDO 水素利用技術研究開発事業成果報告書

## 1. MATERIALS

Table C.2.3.1 Details of processing and related data of SNCM439.

Heat	Production process	Product form	Dimensions (mm)
A	Hot-rolled	Cylinder	Length:6000 Outer diameter:356 Thickness:62

Table C.2.3.2 Chemical compositions of SNCM439.

	Heat	Element (mass %)							
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Product analysis	A	0.40	0.24	0.73	0.007	<0.0010	1.77	0.74	0.22

Table C.2.3.3 Heat treatment conditions of SNCM439.

Material	Heat	Shape	Quenching	Tempering
Seamless line pipe	A	Cylinder	870 °C-80min, Oil-quench	635 °C-160min, Air-cooling

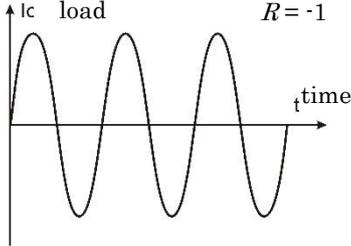
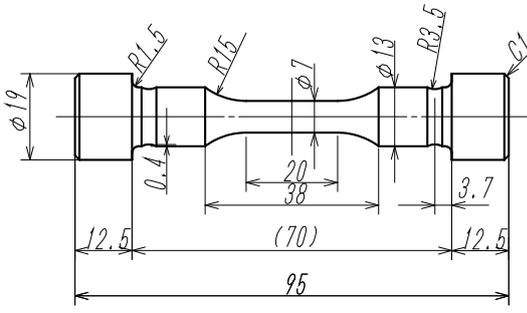
## 2. MECHANICAL PROPERTIES

Table C.2.3.4 Mechanical properties of SNCM439.

Material	Heat	Shape	Tempering Temperature (°C)	Tensile Properties				Vickers Hardness (HV10)
				0.2 % proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile Strength $\sigma_B$ (MPa)	Fracture elongation $\varepsilon_f$ (%)	Reduction of Area $\varphi$ (%)	
Seamless line pipe	A	Cylinder	635	787	928	21.2	71.3	280
				787	928	21.7	69.4	

### 3. FATIGUE STRENGTH PROPERTIES

Table C.2.3.5 Fatigue test conditions.

Type of test	Uniaxial
Testing machines	Servo-hydraulic, 50 kN
Loading condition	Constant stress amplitude test under zero mean stress ( $R = -1$ )
Waveform	 <p style="text-align: center;">Sinusoidal</p>
Frequency	1 Hz
Environment	RT: air, 105 MPa hydrogen gas
Gas purity	Hydrogen gas: 99.9999 % (6N)
Specimen <sup>1)</sup>	

1) The specimen surface was finished by polishing.

#### 4. EXPERIMENTAL RESULTS

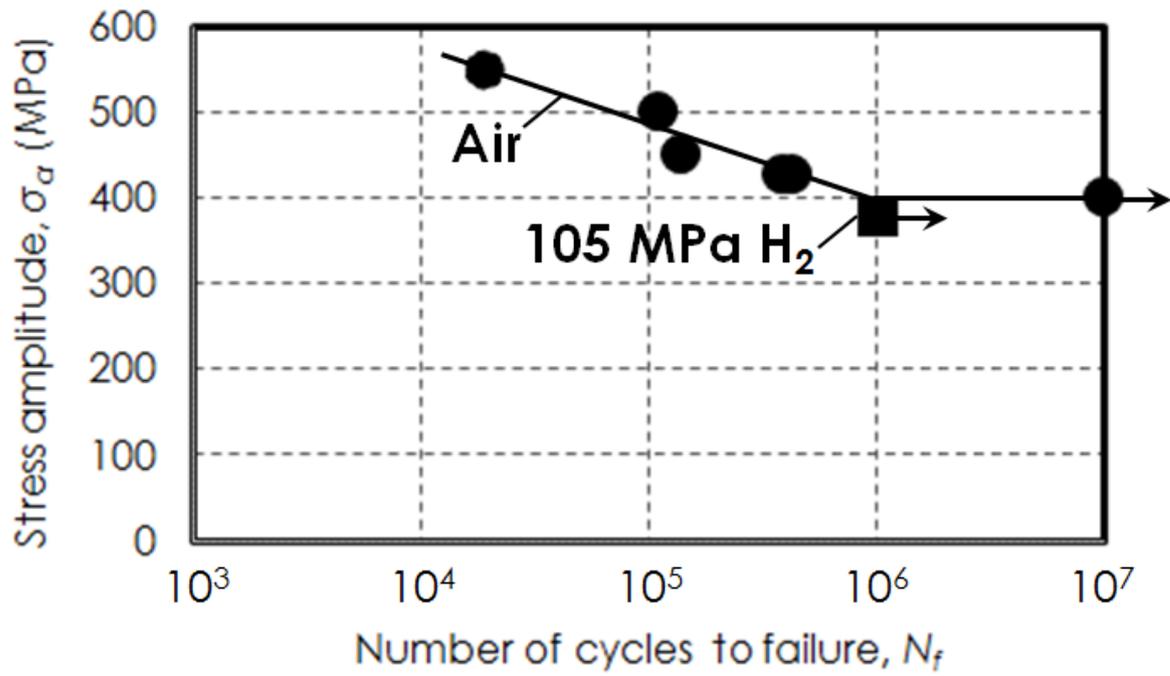


Fig. C.2.3.1 S-N diagram of SNCM439.

### C.3 ライズングロード試験

#### C.3.1 ライズングロード試験の事例

出典：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)：超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業/国内規制適正化に関わる技術開発/新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発

## 1. MATERIALS

Table C.3.1.1 Details of processing and related data of SNCM439.

Heat	Production process	Product form	Dimensions (mm)
L	Hot-forged	Plate	Length: 833 mm Width: 132 mm Thickness: 31 mm
E	Hot-forged	Plate	Length: 750 mm Width: 130 mm Thickness: 31 mm
R	Hot-forged	Plate	Length: 518 mm Width: 130 mm Thickness: 33 mm

Table C.3.1.2 Heat treatment conditions of SNCM439.

Material	Heat	Shape	Quenching	Tempering
Hot-forged material	L	Plate	850 °C/2 h, Oil-quenched	640 °C/4 h, Air-cooled
	E	Plate	850 °C/2 h, Oil-quenched	650 °C/4 h, Air-cooled
	R	Plate	850 °C/2 h, Oil-quenched	640 °C/6 h, Air-cooled

Table C.3.1.3 Chemical composition of SNCM439.

	Heat	Element (mass %)							
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Product analysis	L	0.39	0.22	0.80	0.016	0.002	1.80	0.84	0.26
	E	0.42	0.22	0.82	0.016	0.002	1.81	0.86	0.26
	R	0.39	0.22	0.82	0.015	0.0024	1.81	0.85	0.26

## 2. MECHANICAL PROPERTIES

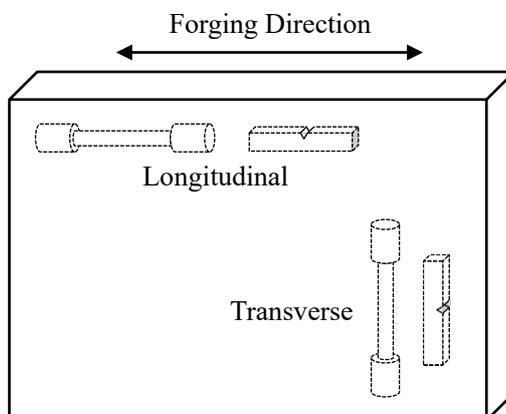


Fig. C.3.1.1 Schematic of specimen direction.

Table C.3.1.4 Tensile properties of SNCM439.

Heat	Direction	Tensile Properties <sup>1)</sup>			
		0.2 % proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile Strength $\sigma_B$ (MPa)	Fracture elongation $\epsilon_f$ (%)	Reduction of Area $\phi$ (%)
L	Transverse	755	874	21	59
E	Longitudinal	749	874	18	62
	Transverse	767	889	25	58
R	Longitudinal	748	870	22	65
	Transverse	762	875	24	64

1) JIS Z 2201(2008), 14A specimen (diameter 8mm, gage length 40mm)

Table C.3.1.5 Charpy impact properties of SNCM439.

Heat	Direction	Charpy Absorbed Energy at 20 °C (J)				Charpy Absorbed Energy at -60 °C (J)			
		Individual			Average	Individual			Average
R	Longitudinal	147	143	138	143	112	122	116	117
	Transverse	123	126	125	125	104	103	105	104

### 3. RISING LOAD TEST PROPERTIES

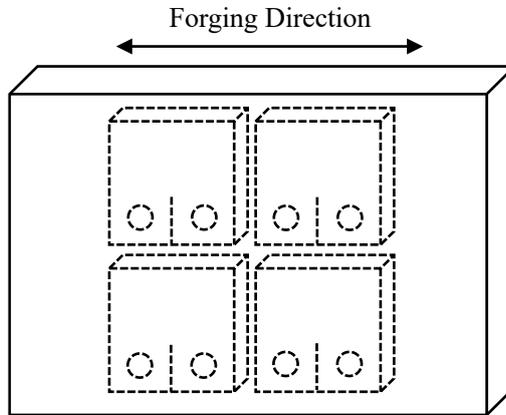
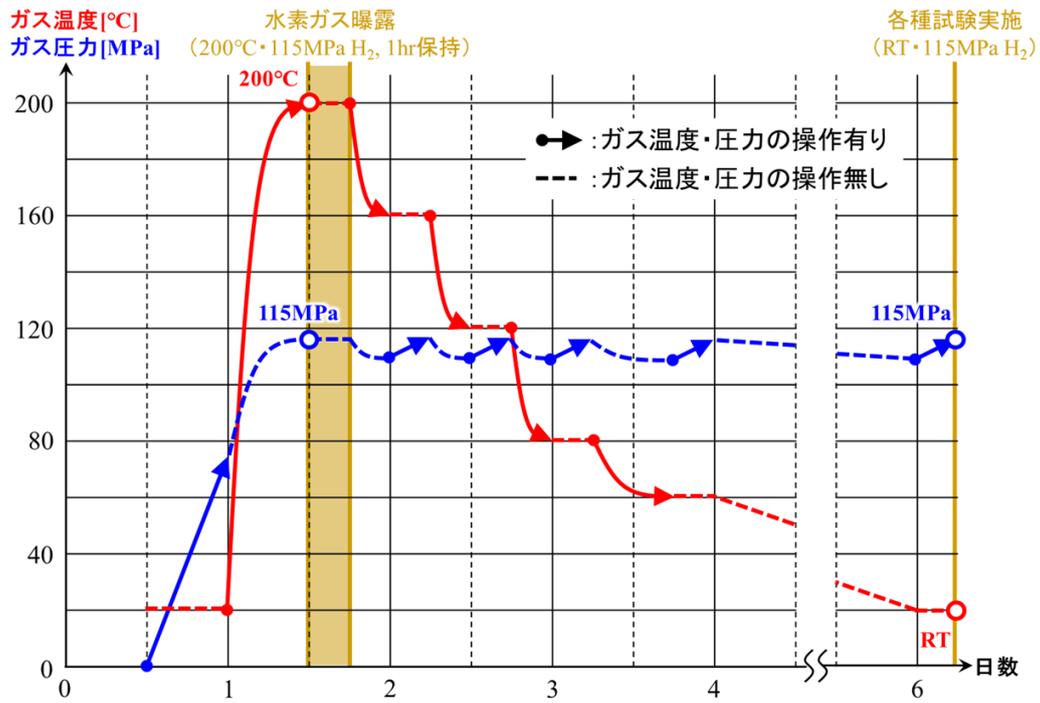


Fig. C.3.1.2 Schematic of specimen direction.

Table C.3.1.6 Rising load test conditions.

Applied standard	ASTM E399
Testing machines	Servo-hydraulic, 50 kN
Loading condition	Uniaxial, Monotonic
Environment	In 115 MPa hydrogen gas at RT
Gas purity	Hydrogen gas: 99.999 % (5 N)
Test speed	$2.0 \times 10^{-4}$ mm/s
Specimen (dimensions in mm)	



- ① 200°C・115MPa 水素ガス中で試験片を曝露する。(保持時間:1hr)
- ② 段階的に降温と再昇圧を繰り返す。(水素ガス圧力を 100MPa 以上で常に保持)
- ③ 室温・115MPa 水素ガス中で SSRT, K<sub>I,H</sub> 評価または疲労き裂進展試験を実施する。

Fig. C.3.1.3 Schematic of hydrogen charging before rising load test.

#### 4. EXPERIMENTAL RESULTS

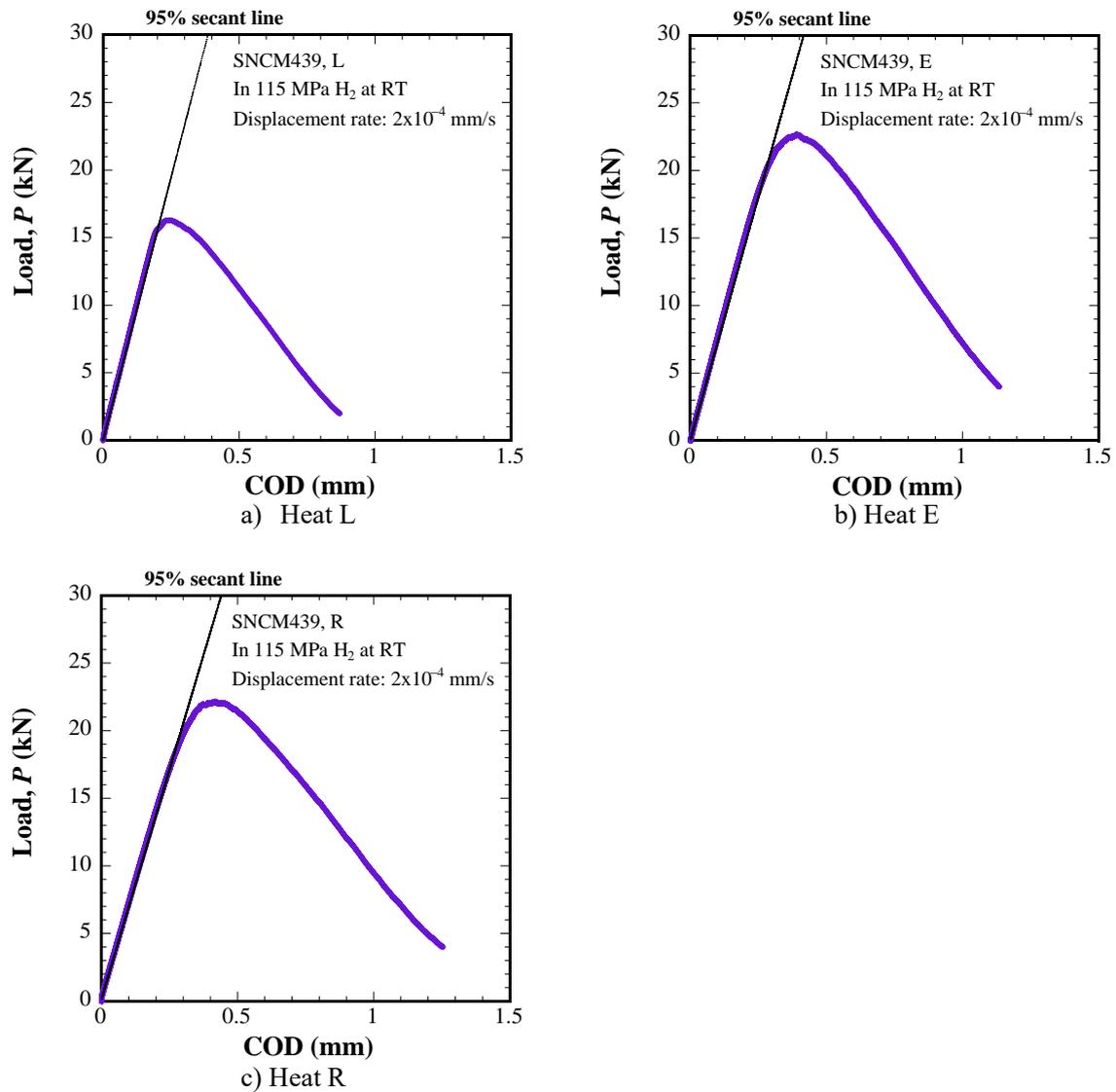


Fig. C.3.1.4 Relationships between Load and COD for SNCM439.

Table C.3.1.7 Results of rising load tests for SNCM439.

Heat	Displacement rate [mm/s]	Test condition	$K_{IH}$ [MPa $\cdot\sqrt{m}$ ] <sup>1)</sup>
L	$2 \times 10^{-4}$	RT $\cdot$ 115 MPa $H_2$	50.5
E			64.7
R			56.9

1) ASTM E399 により求めた  $K_Q$  を  $K_{IH}$  とみなす

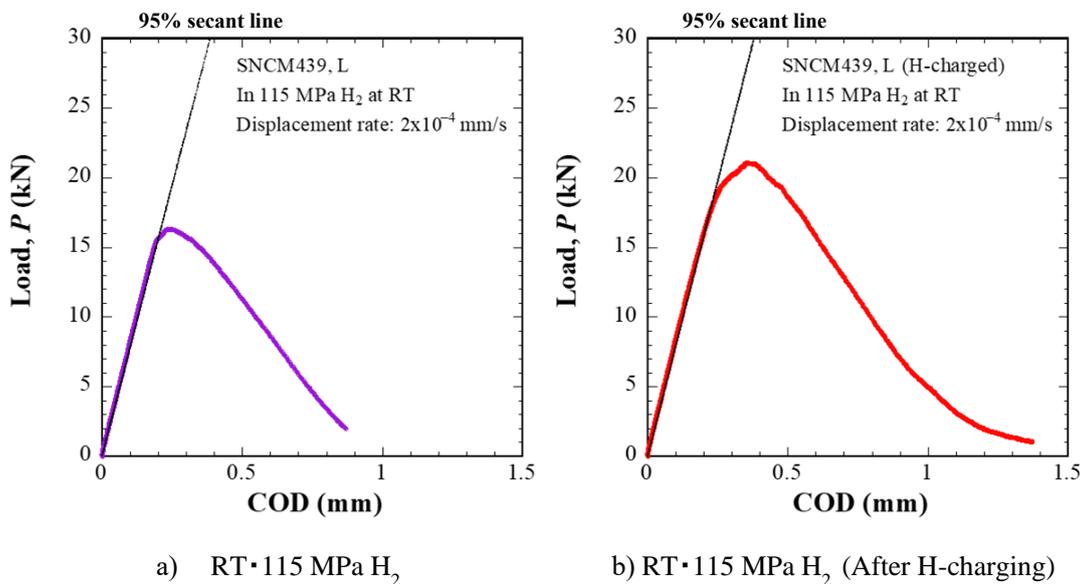


Fig. C.3.1.5 Relationships between Load and COD for SNCM439 Heat L.

Table C.3.1.8 Results of rising load tests for SNCM439.

Displacement rate [mm/s]	Test condition	$K_{IH}$ [MPa $\cdot\sqrt{m}$ ] <sup>1)</sup>
$2 \times 10^{-4}$	RT • 115 MPa H <sub>2</sub>	50.5
	RT • 115 MPa H <sub>2</sub> (After H-charging)	56.4

1) ASTM E399 により求めた  $K_Q$  を  $K_{IH}$  とみなす

## C.4 疲労き裂進展試験

### C.4.1 疲労き裂進展試験の事例(1)

出典： HYDROGENIUS DATABASE / No. A70(Tentative) / 2017 /  
Database on Long Fatigue Crack Growth Properties of JIS-SNCM439 Nickel Chromium Molybdenum Steel in 115 MPa Hydrogen Gas

## 1. MATERIALS

Table C.4.1.1 Details of processing and related data of SNCM439.

Heat	Production process	Product form	Dimensions (mm)
B <sup>1)</sup>	Hot-rolled	Plate	Length:870 mm Width:130 mm Thickness:31 mm
G <sup>1)</sup>	Hot-rolled	Plate	Length:834 mm Width:130 mm Thickness:30 mm
J <sup>1)</sup>	Hot-forged	Cylinder	Length:3630 mm Outer diameter:320 mm Inner diameter:200 mm Thickness:60 mm

1) Reported by the manufacture.

Table C.4.1.2 Chemical composition of SNCM439.

	Heat	Element (mass %)							
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Product analysis	B <sup>1)</sup>	0.43	0.22	0.82	0.012	0.002	1.81	0.86	0.25
	G <sup>1)</sup>	0.40	0.22	0.80	0.014	0.002	1.80	0.86	0.26
	J <sup>1)</sup>	0.40	0.27	0.89	0.009	0.015	1.84	0.92	0.28
Ladle analysis	B <sup>2)</sup>	0.42	0.22	0.82	0.016	0.002	1.80	0.86	0.26
	G <sup>2)</sup>	0.39	0.22	0.79	0.016	0.002	1.80	0.84	0.26
	J <sup>3)</sup>	0.42	0.26	0.80	0.010	<0.010	1.91	0.89	0.25
	Requirement <sup>4)</sup>	max	0.43	0.35	0.90	0.030	0.030	2.00	1.00
min		0.36	0.15	0.60	-	-	1.60	0.60	0.15

1) Performed by HYDROGENIUS.

2) Reported by the manufacture.

3) After the inspection certificate.

4) JIS G 4053 (2008), “Low-alloyed steels for machine structural use”.

Table C.4.1.3 Heat treatment conditions of SNCM439.

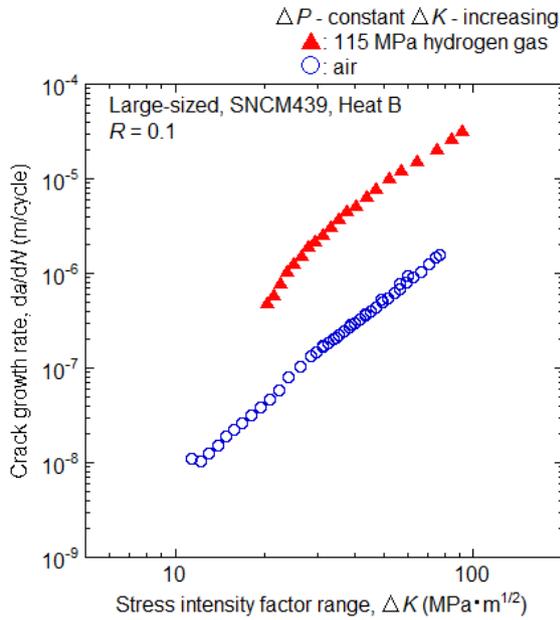
Material	Heat	Shape	Quenching	Tempering
Large-sized material	B <sup>1)</sup>	Plate	850 °C/2 h, Oil-quenched	650 °C/4 h, Air-cooled
	G <sup>1)</sup>	Plate	850 °C/2 h, Oil-quenched	640 °C/4 h, Air-cooled
	J <sup>1)</sup>	Cylinder	860 °C, Water-spray	620 °C, Air-cooled
			850 °C/2 h, Oil-quenched <sup>2)</sup>	650 °C/4 h, Air-cooled <sup>2)</sup>

1) Reported by the manufactures.

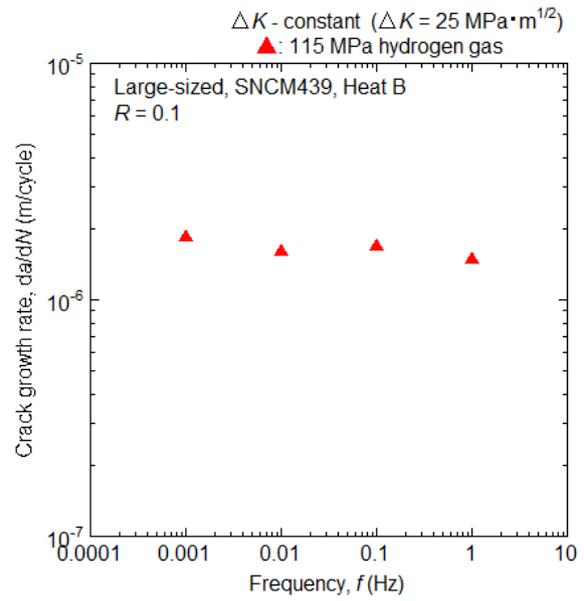
2) A block of  $l$  108 mm,  $w$  320 mm and  $t$  60 mm was heat-treated.



#### 4. EXPERIMENTAL RESULTS

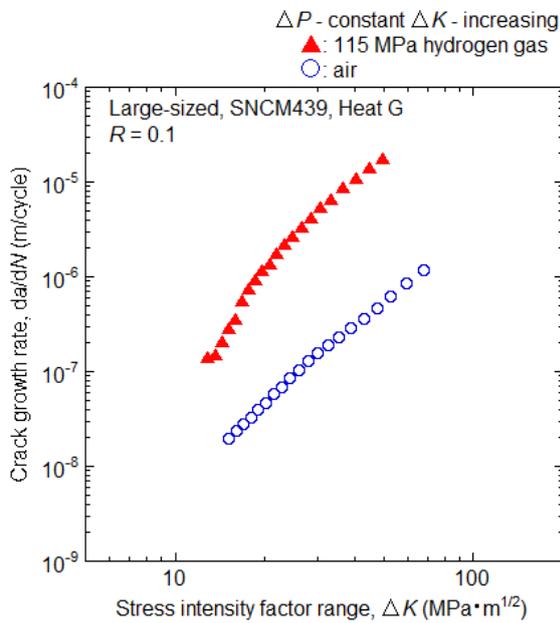


(a-1)  $da/dN$  versus  $\Delta K$

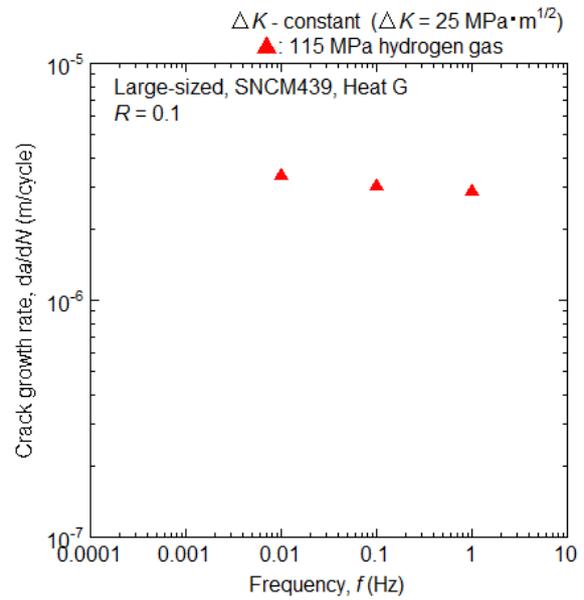


(a-2)  $da/dN$  versus  $f$

(a) Heat B,  $T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\sigma_B = 867\text{MPa}$ )



(b-1)  $da/dN$  versus  $\Delta K$

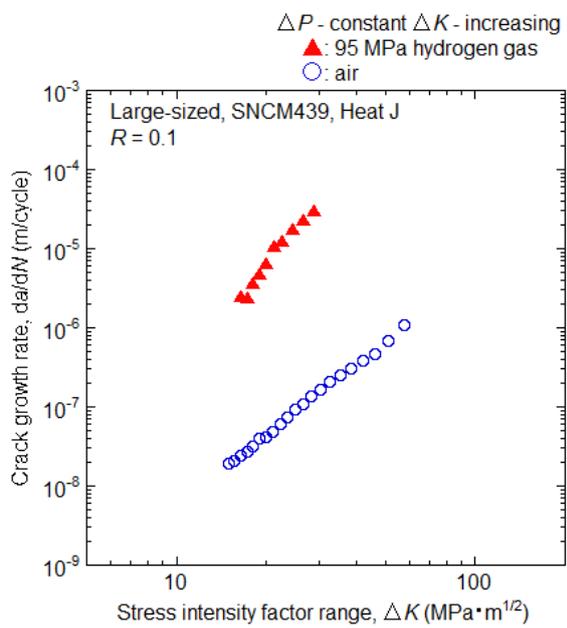


(b-2)  $da/dN$  versus  $f$

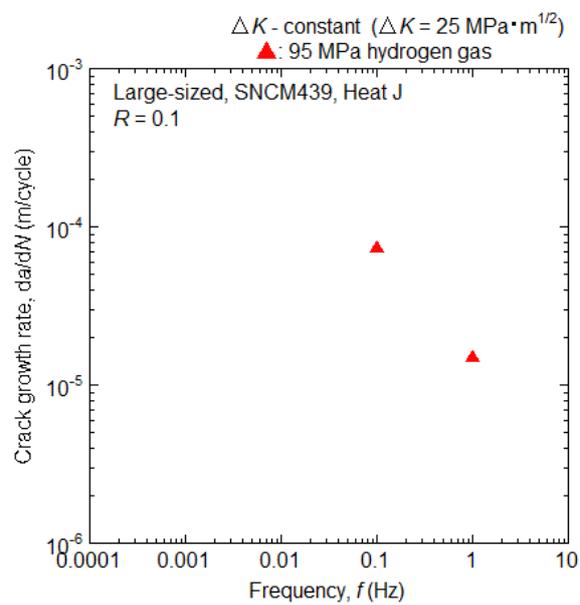
(b) Heat G,  $T = 640\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\sigma_B = 873\text{MPa}$ )

Fig. C.4.1.1 Relationships between  $da/dN$  and  $\Delta K$ , and between  $da/dN$  and  $f$  for large-sized SNCM439.

(Figure continued on next page.)



(c-1)  $da/dN$  versus  $\Delta K$



(c-2)  $da/dN$  versus  $f$

(c) Heat J,  $T = 620 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\sigma_B = 1025 \text{ MPa}$ )

Fig. C.4.1.1 Relationships between  $da/dN$  and  $\Delta K$ , and between  $da/dN$  and  $f$  for large-sized SNCM439. (Continued)

## C.4.2 疲労き裂進展試験の事例(2)

出典：Yoru Wada, Effect of cycle frequency on fatigue crack propagation behavior for steels in hydrogen storage, Proceedings of ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference, 2013, Paris, France, PVP2013-97485.

### 1. MATERIALS

Table C.4.2.1 Details of processing and related data of SNCM439.

Heat	Production process	Product form	Dimensions (mm)
D	Hot-forged	Plate	Thickness:75 mm
E	Hot-rolled	Round bar	Outer diameter:200 mm

Table C.4.2.2 Chemical composition of SNCM439.

	Heat	Element (mass %)							
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Product analysis	D	0.42	0.22	0.80	0.014	0.0023	1.82	0.86	0.25
	E	0.40	0.23	0.78	0.022	0.0100	1.72	0.83	0.20
Requirement <sup>1)</sup>	Max	0.43	0.35	0.90	0.030	0.030	2.00	1.00	0.30
	Min	0.36	0.15	0.60	-	-	1.60	0.60	0.15

1) JIS G 4053 (2008), "Low-alloyed steels for machine structural use".

Table C.4.2.3 Heat treatment conditions of SNCM439.

Heat	Heat-treated shape	Quenching	Tempering
D	Thickness:35 mm	850 °C, Simulated cooling 60 °C/min	640 °C, Air-cooled
E	Outer diameter:200 mm Inner diameter:60 mm Thickness:70 mm	870 °C, Oil-quenched	620 °C, Air-cooled

### 2. MECHANICAL PROPERTIES

Table C.4.2.4 Mechanical properties of SNCM439.

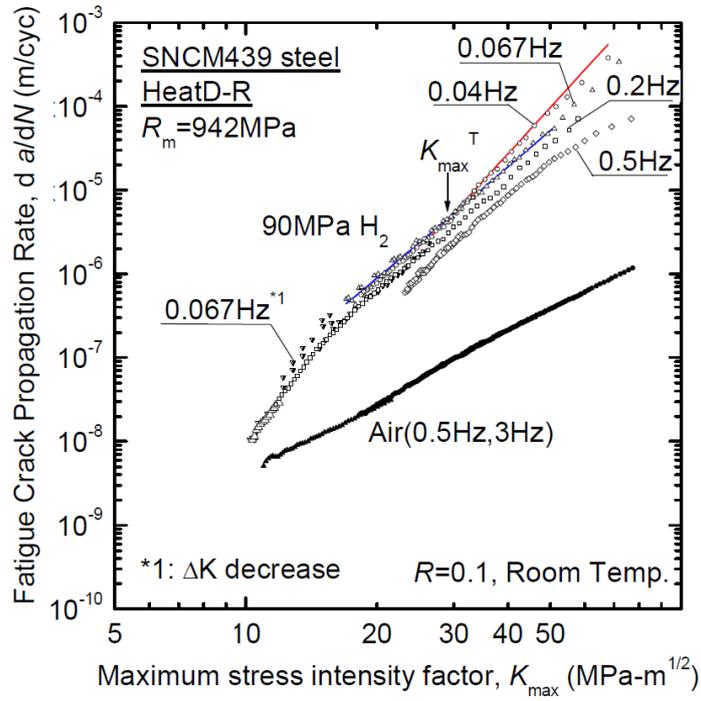
Heat	Direction	Tensile Properties			
		0.2 % proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile Strength $\sigma_B$ (MPa)	Fracture elongation $\epsilon_f$ (%)	Reduction of Area $\phi$ (%)
D	Width	804	942	-	65
E	Axial	808	957	-	67

### 3. FATIGUE CRACK GROWTH PROPERTIES

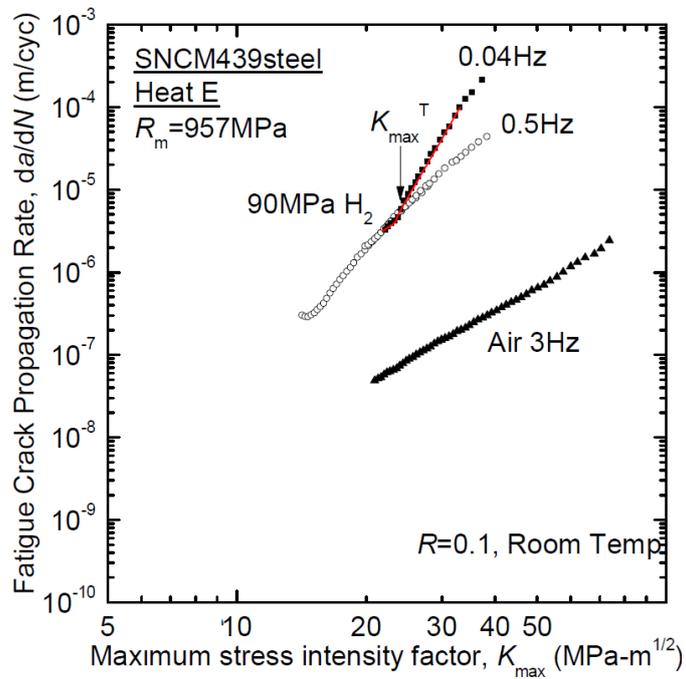
Table C.4.2.5 Fatigue crack growth test conditions.

Testing machines	Servo-hydraulic, 100 kN
Loading condition	Sinusoidal
Environment	90MPa hydrogen gas, RT
Gas purity	Hydrogen gas: 99.99999 % (7 N)
Frequency	0.067, 0.04, 0.2, 0.5 Hz
Specimen (dimensions in mm)	

#### 4. EXPERIMENTAL RESULTS



(a) Heat D



(b) Heat E

Fig. C.4.2.1 Relationships between  $da/dN$  and  $K_{max}$  for SNCM439.

### C.4.3 疲労き裂進展試験の事例(3)

出典： JFE スチール株式会社  
NEDO 水素利用技術研究開発事業成果報告書

## 1. MATERIALS

Table C.4.3.1 Details of processing and related data of SNCM439.

Heat	Production process	Product form	Dimensions (mm)
A	Hot-rolled	Cylinder	Length:6000 Outer diameter:356 Thickness:62

Table C.4.3.2 Chemical compositions of SNCM439.

	Heat	Element (mass %)							
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Product analysis	A	0.40	0.24	0.73	0.007	<0.0010	1.77	0.74	0.22

Table C.4.3.3 Heat treatment conditions of SNCM439.

Material	Heat	Shape	Quenching	Tempering
Seamless line pipe	A	Cylinder	870 °C-80min, Oil-quench	635 °C-160min, Air-cooling

## 2. MECHANICAL PROPERTIES

Table C.4.3.4 Mechanical properties of SNCM439.

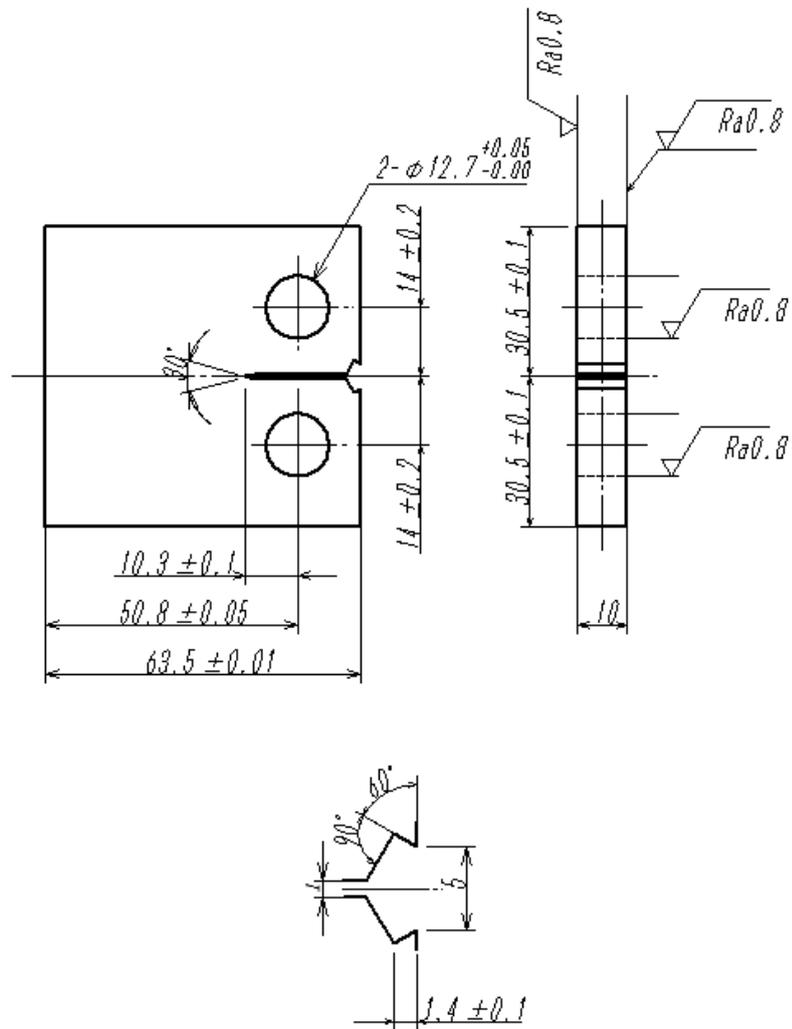
Material	Heat	Shape	Tempering Temperature (°C)	Tensile Properties				Vickers Hardness (HV10)
				0.2 % proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile Strength $\sigma_B$ (MPa)	Fracture elongation $\epsilon_f$ (%)	Reduction of Area $\phi$ (%)	
Seamless line pipe	A	Cylinder	635	787	928	21.2	71.3	280
				787	928	21.7	69.4	

### 3. FATIGUE CRACK GROWTH PROPERTIES

Table C.4.3.5 Fatigue-crack growth test conditions.

Testing machines	Servo-hydraulic, 50 kN
Loading condition	Sinusoidal
Environment	RT: Air, 93 MPa hydrogen gas
Gas purity	Hydrogen gas: 99.9999 % (6N)
Frequency	1 Hz

Specimen<sup>1)2)</sup>  
(dimensions in mm)



#### 4. EXPERIMENTAL RESULTS

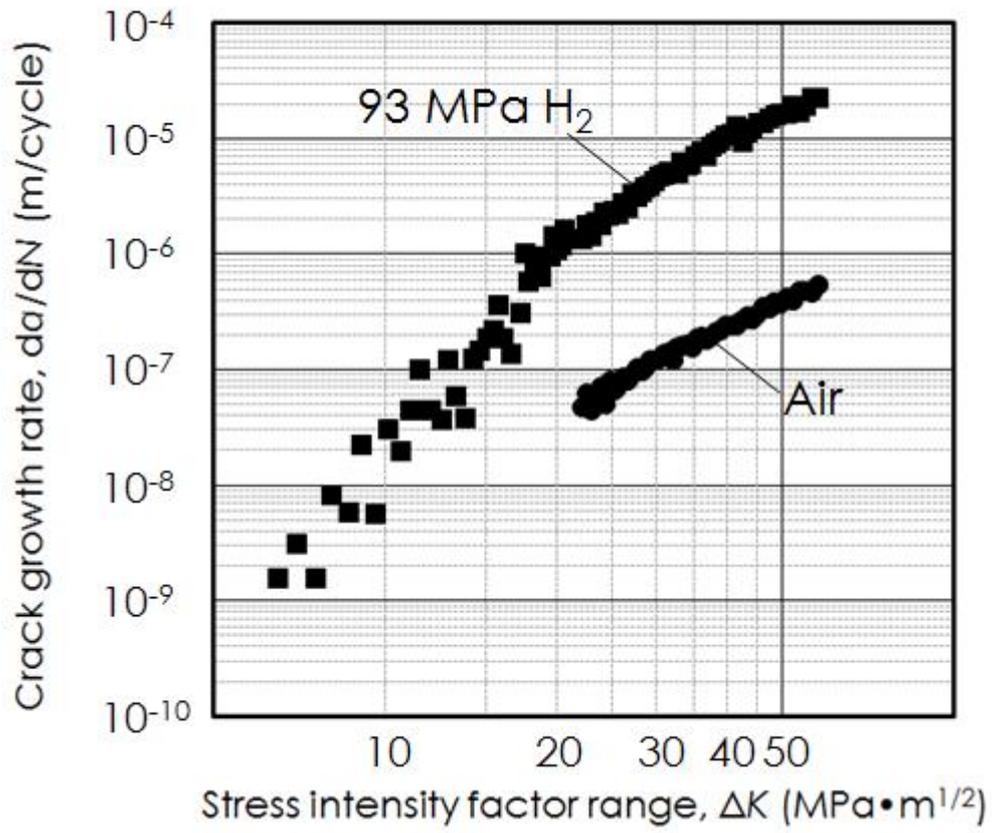


Fig. C.4.3.1 Relationships between  $da/dN$  and  $\Delta K$  of SNCM439.

#### C.4.4 疲労き裂進展試験の事例(4)

出典：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) . 超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業/国内規制適正化に関わる技術開発/新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発

### 1. MATERIALS

Table C.4.4.1 Details of processing and related data of SNCM439.

Heat	Production process	Product form	Dimensions (mm)
L	Hot-forged	Plate	Length: 833 mm Width: 132 mm Thickness: 31 mm
E	Hot-forged	Plate	Length: 750 mm Width: 130 mm Thickness: 31 mm
R	Hot-forged	Plate	Length:518 mm Width:130 mm Thickness:33 mm

Table C.4.4.2 Heat treatment conditions of SNCM439.

Material	Heat	Shape	Quenching	Tempering
Hot-forged material	L	Plate	850 °C/2 h, Oil-quenched	640 °C/4 h, Air-cooled
	E	Plate	850 °C/2 h, Oil-quenched	650 °C/4 h, Air-cooled
	R	Plate	850 °C/2 h, Oil-quenched	640 °C/6 h, Air-cooled

Table C.4.4.3 Chemical composition of SNCM439.

	Heat	Element (mass %)							
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Product analysis	L	0.39	0.22	0.80	0.016	0.002	1.80	0.84	0.26
	E	0.42	0.22	0.82	0.016	0.002	1.81	0.86	0.26
	R	0.39	0.22	0.82	0.015	0.0024	1.81	0.85	0.26

## 2. MECHANICAL PROPERTIES

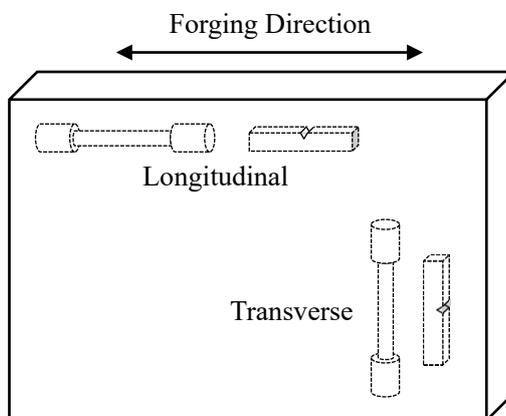


Fig. C.4.4.1 Schematic of specimen direction.

Table C.4.4.4 Tensile properties of SNCM439.

Heat	Direction	Tensile Properties <sup>1)</sup>			
		0.2 % proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile Strength $\sigma_B$ (MPa)	Fracture elongation $\epsilon_f$ (%)	Reduction of Area $\varphi$ (%)
L	Transverse	755	874	21	59
E	Longitudinal	749	874	18	62
	Transverse	767	889	25	58
R	Longitudinal	748	870	22	65
	Transverse	762	875	24	64

1) JIS Z 2201(2008), 14A specimen (diameter 8mm, gage length 40mm)

Table C.4.4.5 Charpy impact properties of SNCM439.

Heat	Direction	Charpy Absorbed Energy at 20 °C (J)				Charpy Absorbed Energy at -60 °C (J)			
		Individual			Average	Individual			Average
R	Longitudinal	147	143	138	143	112	122	116	117
	Transverse	123	126	125	125	104	103	105	104

### 3. FATIGUE CRACK GROWTH PROPERTIES

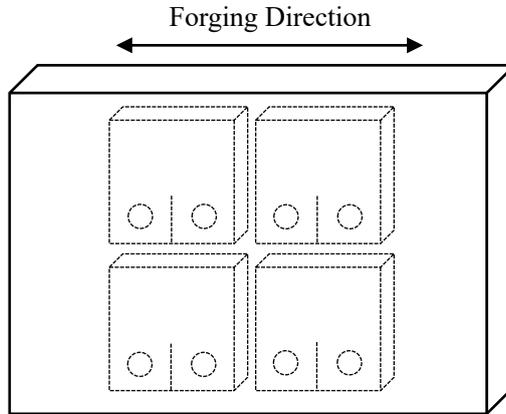
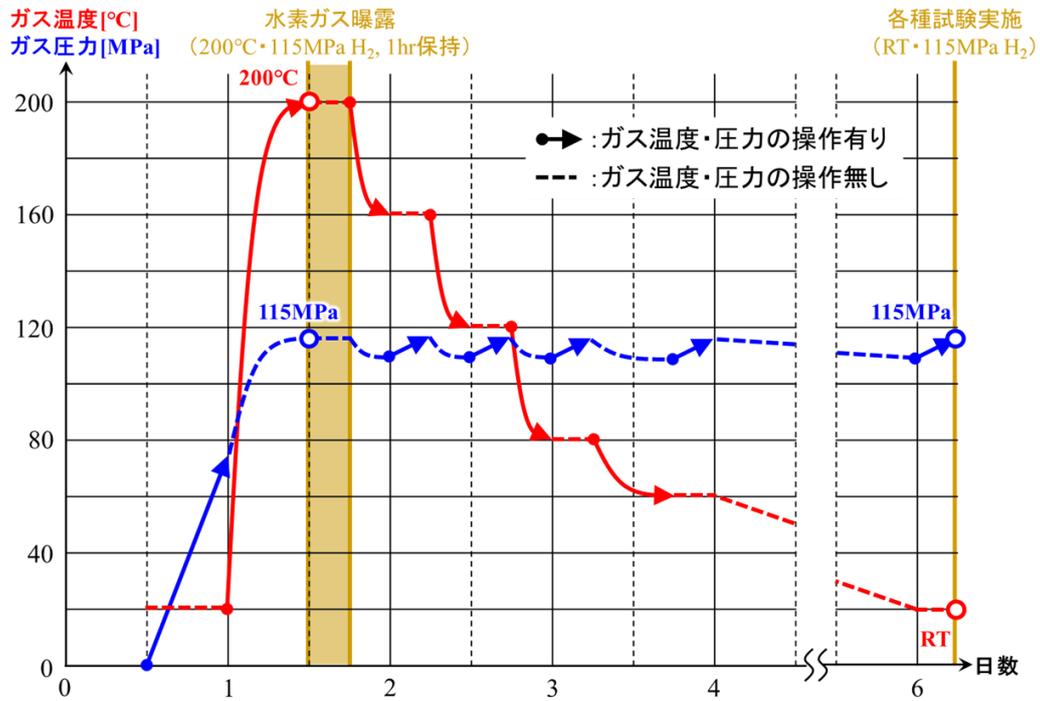


Fig. C.4.4.2 Schematic of specimen direction.

Table C.4.4.6 Fatigue crack growth test conditions.

Applied standard	ASTM E647
Testing machines	Servo-hydraulic, 50 kN
Loading condition	Uniaxial, Cyclic
Environment	In 115 MPa hydrogen gas at RT In air at RT
Gas purity	Hydrogen gas: 99.999 % (5 N)
Frequency	1 Hz
Specimen (dimensions in mm)	<p>Technical drawing of a specimen with the following dimensions and features:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Thickness: <math>t = 10</math> mm</li> <li>Total height: 61 mm</li> <li>Top hole diameter: <math>\phi 12.7</math> mm</li> <li>Bottom hole diameter: 12.7 mm</li> <li>Bottom hole offset from right edge: 1.4 mm</li> <li>Crack length from top hole center: 10.3 mm</li> <li>Crack angle: <math>30^\circ</math></li> <li>Crack length from bottom hole center: 50.8 mm</li> <li>Total width: 63.5 mm</li> </ul>



- ① 200°C・115MPa 水素ガス中で試験片を曝露する。(保持時間:1hr)
- ② 段階的に降温と再昇圧を繰り返す。(水素ガス圧力を 100MPa 以上で常に保持)
- ③ 室温・115MPa 水素ガス中で SSRT, K<sub>I,H</sub> 評価または疲労き裂進展試験を実施する。

Fig. C.4.4.3 Schematic of hydrogen charging before fatigue crack growth test.

#### 4. EXPERIMENTAL RESULTS

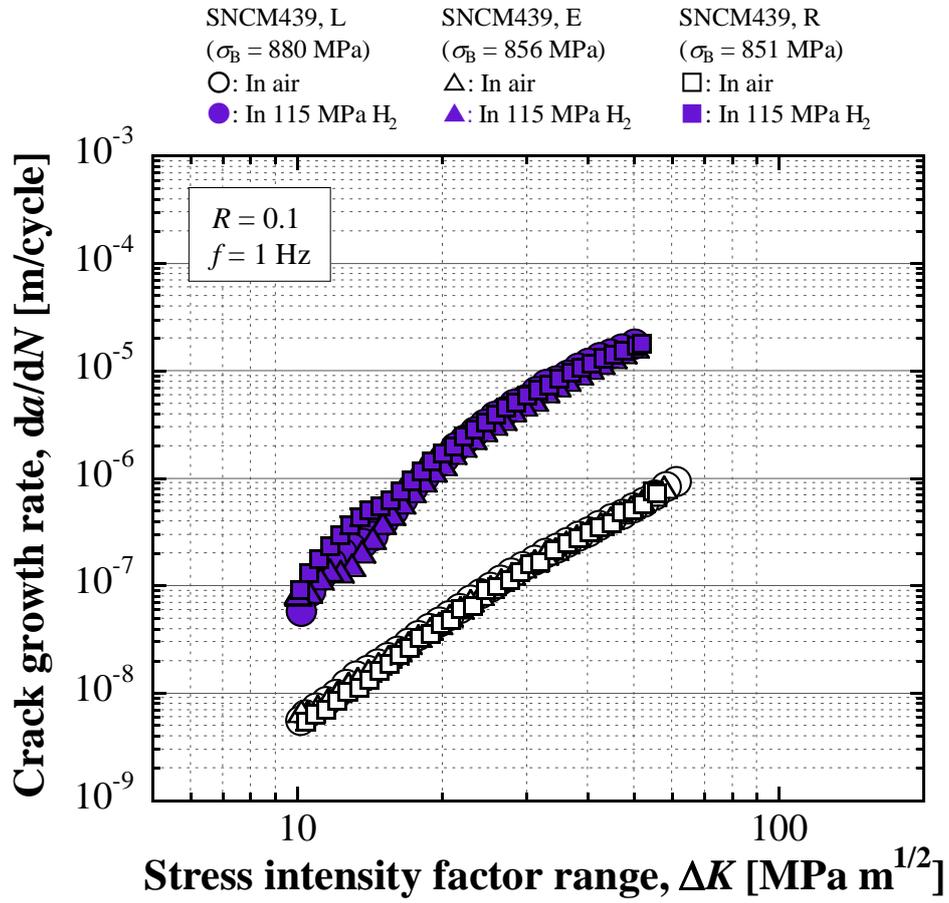


Fig. C.4.4.4 Relationships between  $da/dN$  and  $\Delta K$  for SNCM439.

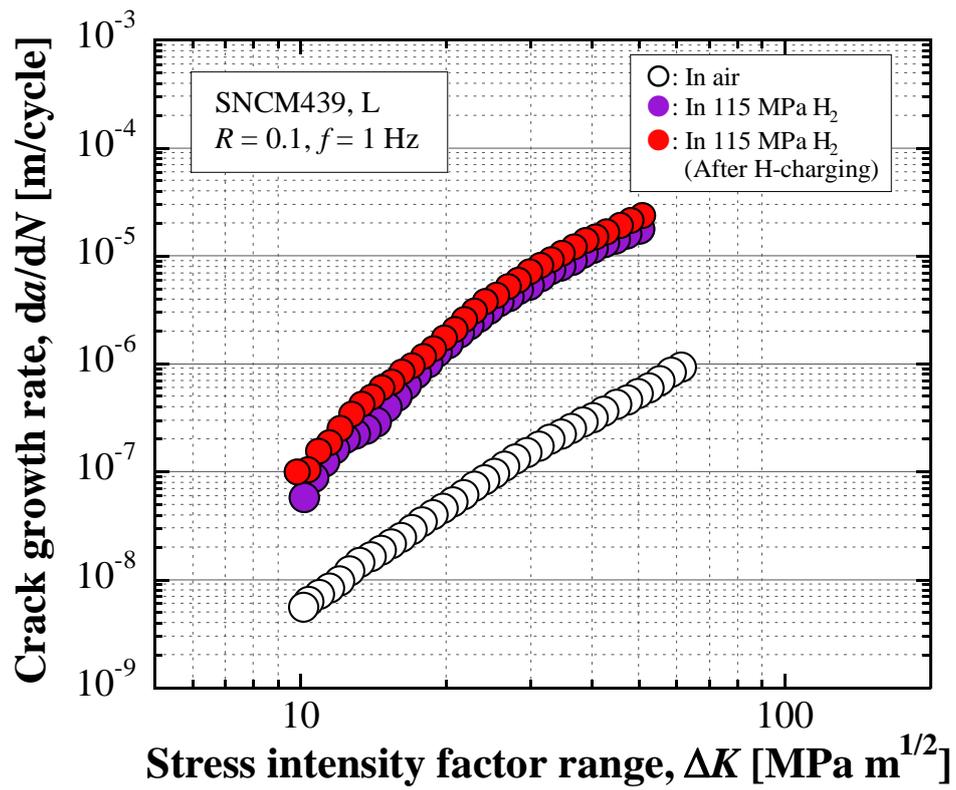


Fig. C.4.4.5 Relationships between  $da/dN$  and  $\Delta K$  for SNCM439 Heat L.

# 解 説

# 解説目次

- 1 蓄圧器の材料評価事例
- 2 疲労解析のための応力解析事例
- 3 金属加工(しわ)に関する注意喚起
- 4 設計段階における疲労き裂進展解析方法について

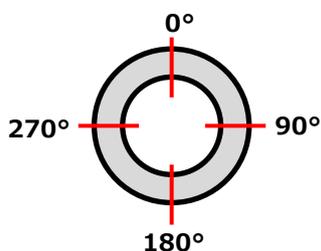
## 水素スタンドで使用される低合金鋼製蓄圧器高圧機器(蓄圧器および圧縮機)の安全利用に関する技術文書の解説

この解説は、技術文書本文に規定・記載した事柄、並びにそれらに関連した事柄を説明するものであり、技術文書の一部ではない。

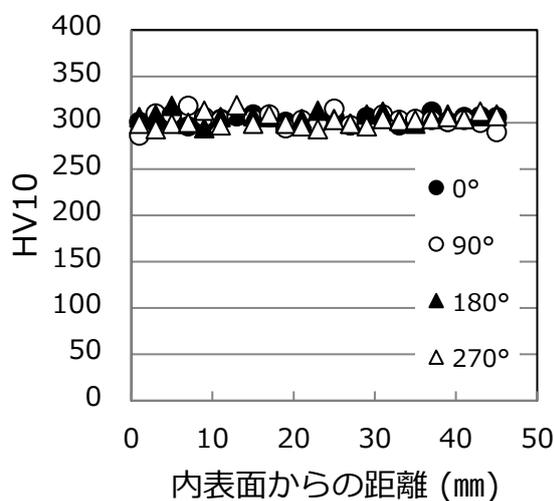
### 1 蓄圧器の材料評価事例

#### a) 硬さ試験

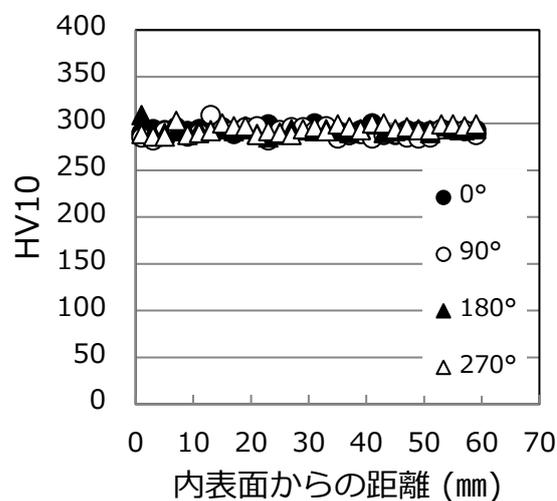
良好な水素適合性を有する SNCM439 を素材として実際に製造された蓄圧器について、解説図 1 の部位の硬さ分布を実測した事例を解説図 2 に示す。肉厚 45 mm 及び 58 mm の場合においても均質な硬さ分布が得られることを示している。



解説図 1 硬さ分布測定部位



肉厚:45 mm 引張強さ=971 MPa



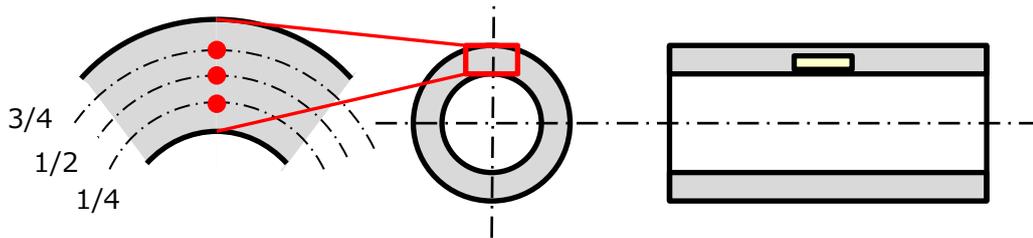
肉厚:58 mm 引張強さ=934 MPa

解説図 2 SNCM439 蓄圧器から採取した硬さ試験の事例

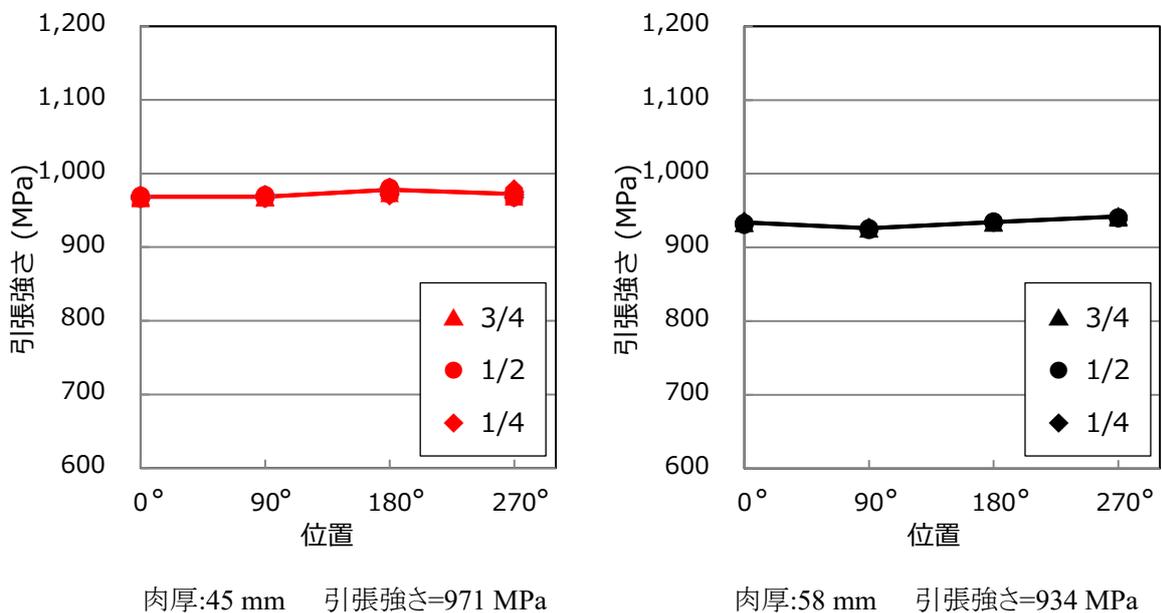
出典: (一財)石油エネルギー技術センター NEDO 水素利用技術研究開発事業/水素ステーション用金属材料の鋼種拡大に関する研究開発成果報告書

b) 引張試験

解説図2に硬さ分布を示した蓄圧器を供試材とし、解説図3に示す部位(周方向の0°、90°、180°、270°の位置において、肉厚方向における1/4、1/2、3/4の部位)から引張試験片を採取し引張強さを測定した事例を解説図4に示す。肉厚方向及び周方向各位置における引張強さは均一な値を示しており、解説図2に示す硬さ分布の均一さと良好な対応を示している。



解説図3 引張試験片採取位置

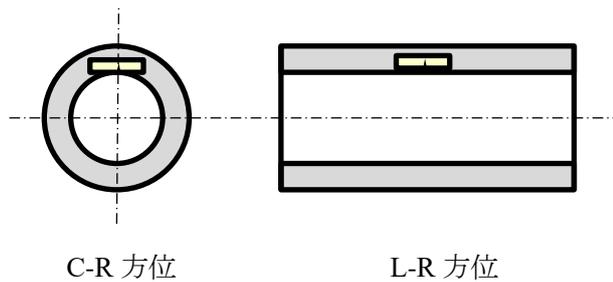


解説図4 SNCM439 蓄圧器から採取した引張試験の事例

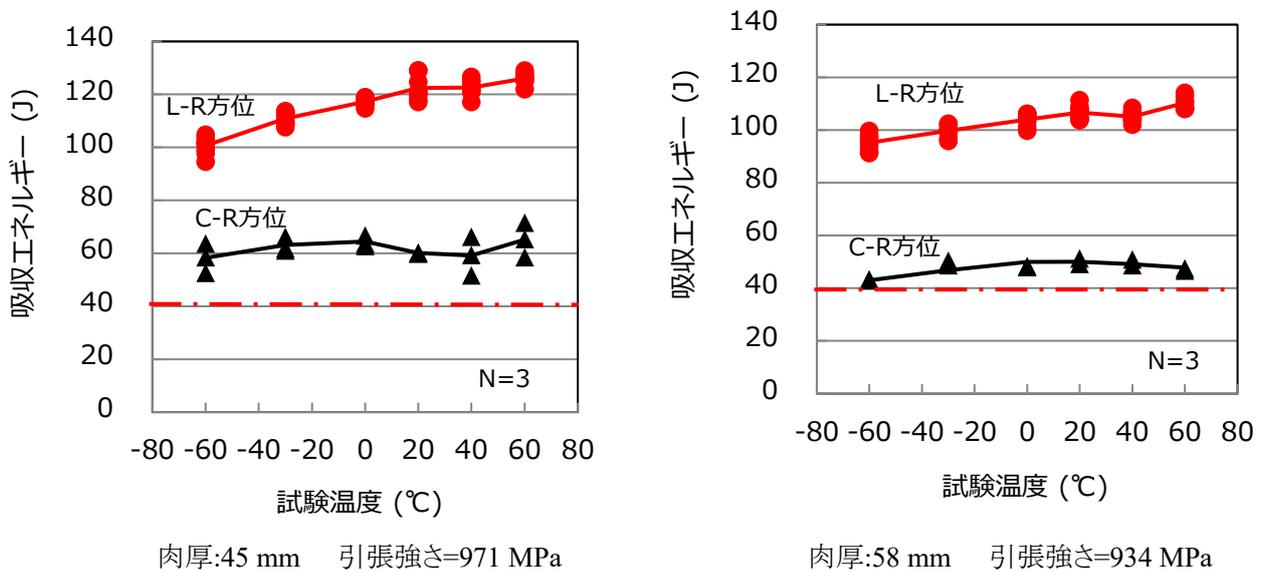
出典: (一財)石油エネルギー技術センター NEDO 水素利用技術研究開発事業/水素ステーション用金属材料の鋼種拡大に関する研究開発成果報告書

c) シャルピー衝撃試験

良好な水素適合性を有する SNCM439 を素材として製造された蓄圧器の解説図 5 に示す部位から採取した試験片を用いてシャルピー衝撃試験を実施した事例を解説図 6 に示す。L-R 方位（切欠き(き裂)への負荷方向:軸方向、切欠きから発生するき裂の進展方向:半径方向）から採取した試験片に比較し、C-R 方位から採取した試験片の吸収エネルギーが低下するものの、いずれも合格要件である 40 J 以上の値が得られている。



解説図 5 シャルピー衝撃試験片採取位置

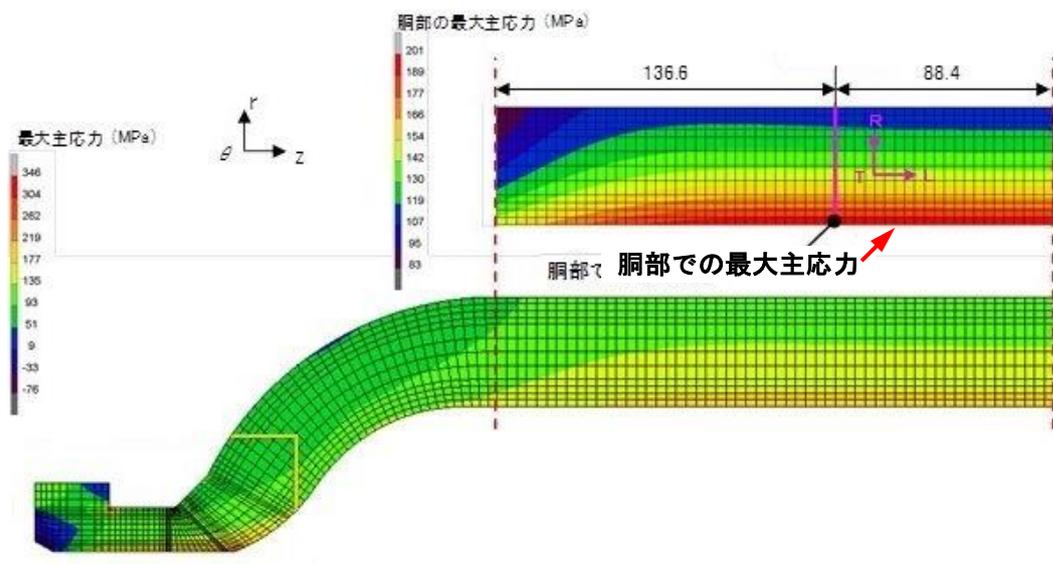


解説図 6 SNCM439 蓄圧器から採取したシャルピー衝撃試験の事例

出典: (一財)石油エネルギー技術センター NEDO 水素利用技術研究開発事業/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成果報告書

## 2 疲労解析のための応力解析事例

解説図7にJIS B 8266 附属書8 の3.3 局部的構造不連続の影響の項で指定されている方法のうち、「e) 局部的構造不連続の影響を反映させて有限要素法解析などによって定めた応力」の規定に基づき、有限要素法により蓄圧器の最大主応力を解析した事例を示す。

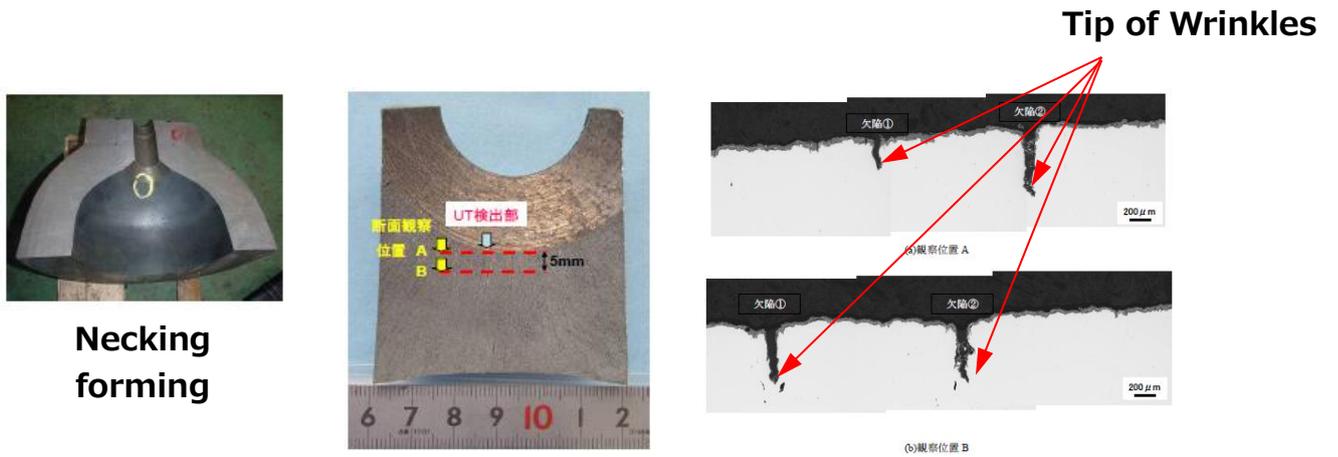


解説図7 有限要素法により蓄圧器の主応力を解析した事例

出典: (平成20年度～平成24年度)水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発成果報告書  
- 低コスト型70 MPa級水素ガス充填対応ステーション機器に係わる研究開発

### 3 金属加工(しわ)に関する注意喚起

口金部の絞り成形により、鏡部内面に生ずるしわ底部がき裂進展の起点となる初期欠陥を包含していることが懸念され、製造品の開口部または外面から欠陥を探傷し、所定の大きさ以下であることを確認することが望ましいが、現時点では具体的な解決策が見通せないことから、当面は注意喚起に留めることとした。



解説図 8 鏡部内表面に観察されたしわの事例

参考文献:(平成 20 年度～平成 24 年度)水素製造・輸送・貯蔵システム等技術発成果報告書  
- 低コスト型 70 MPa 級水素ガス充填対応ステーション機器に係わる研究開発

#### 4 設計段階における疲労き裂進展解析方法について

初期想定欠陥寸法を初期き裂長さとした疲労き裂進展解析方法を示す。

注記：低合金鋼の高圧水素中疲労き裂進展データについては、**附属書 C の C.4** を参照のこと。

##### a) 欠陥の検査方法及び初期想定欠陥寸法の設定

水素ガスに接する蓄圧器表面には有害な欠陥があってはならないことから、次の方法を用いて蓄圧器に有害な欠陥が存在しないことを検証する。

鍛鋼品の場合           ： 超音波探傷試験、磁粉探傷試験、浸透探傷試験

継目無鋼管の場合   ： 超音波探傷試験、渦流探傷試験、磁粉探傷試験、浸透探傷試験

この時、超音波探傷試験については、**JIS G 0587**、**JIS G 0582**、**NDIS 2431** 等を参照する。また、磁粉探傷試験、浸透探傷試験、渦流探傷試験については、それぞれ、**JIS Z 2320-1～3**、**JIS Z 2343-1～4** 及び **JIS G 0583** に定める手法等を参照する。

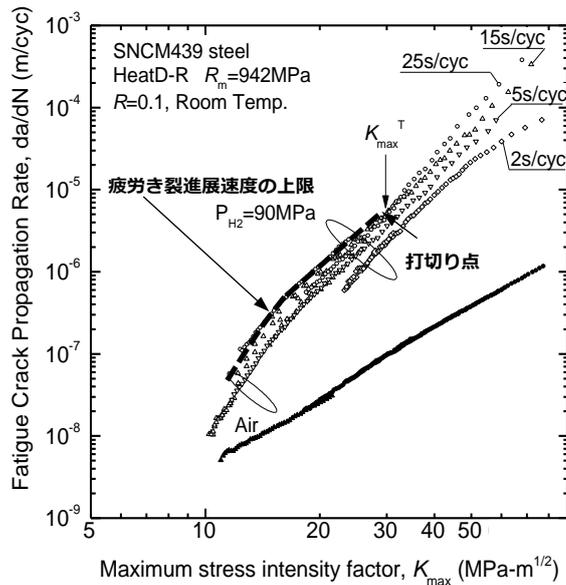
**解説表 1** に検査の方法と初期想定欠陥寸法の設定の事例を示す。ただし **KHKS 0220** の **8.2 b)** に規定されているように、申請者が検出精度を証明できる場合は**解説表 1** より小さい初期想定欠陥寸法を設定してもよい。

解説表 1 検査の方法と初期想定欠陥寸法の設定の事例

検査の方法	磁粉探傷法 浸透探傷法 渦流探傷法	超音波探傷法	
		垂直法	斜角法
初期想定欠陥の寸法の設定	長さ 1.6 mm (き裂深さ/長さ=1/3)	内面き裂 検出不可	深さ 1.1 mm (肉厚 16 mm < $t$ < 51 mm) 深さ 1.6 mm (肉厚 $\geq$ 51 mm) (き裂深さ/長さ=1/3)

##### b) 初期想定欠陥寸法に基づく疲労き裂進展解析の手順

**解説図 9** は、水素中と大気中の疲労き裂進展特性を比較して示す。図中の破線は、水素中において加速した疲労き裂進展速度の上限を与える疲労き裂進展曲線である。**a)** で設定した初期き裂に基づき、破線が示す疲労き裂進展曲線を用い、**KHKS 0220** の **8** に規定された手順に従って、疲労き裂進展解析を行う。応力拡大係数が後述の水素中限界応力拡大係数  $K_{IH}$  に到達した時点打切り点として限界き裂深さ  $a_c$  を決定する。**KHKS 0220** を参照して、き裂深さが限界き裂深さに達する場合の繰返し数  $N_c$  の 1/2 またはき裂深さが限界き裂深さ  $a_c$  の 1/4 に達する場合の繰返し回数のうち、いずれか小さい方の繰返し数を許容繰返し数とする。



解説図 9 水素中と大気中の疲労き裂進展特性の比較

c) 疲労き裂進展解析に用いる  $K_{IH}$  測定方法

水素中では限界応力拡大係数が低下する懸念を鑑み、ASME Sec.VIII Div.3 KD-10 もしくは JPVRC 材料部会 水素脆化専門委員会、2-1/4Cr-1Mo 鋼の水素脆化割れ下限界応力拡大係数  $K_{IH}$  の測定とその評価の評価法に準拠して、一定変位試験、ライジングロード試験を用い、水素中限界応力拡大係数  $K_{IH}$  を求め、疲労き裂進展解析における打切点を決定する。

一定変位試験:

ASME Sec.VIII Div.3 KD-10 に記載の試験方法

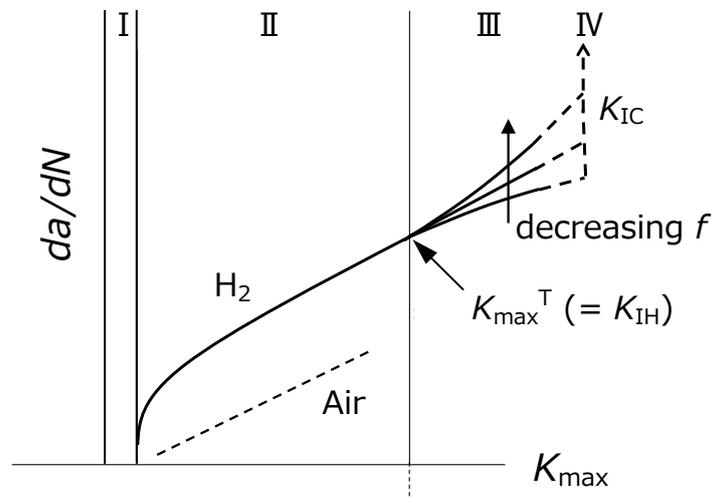
ライジングロード試験:

JPVRC 材料部会 水素脆化専門委員会、2-1/4Cr-1Mo 鋼の水素脆化割れ下限界応力拡大係数  $K_{IH}$  の測定とその評価に記載の試験方法

注記: 低合金鋼の高圧水素中疲労き裂進展データについては、附属書 C の C.4 を参照のこと。

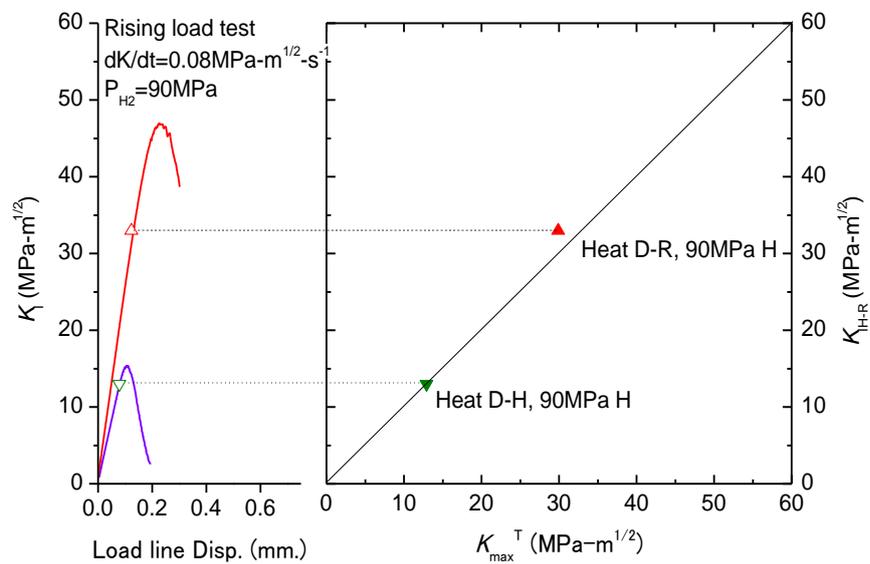
大気中に比較して水素中の疲労き裂進展速度が加速し、解説図 9 に示す  $K_{max}^T$  以上の  $K_{max}$  において水素中での繰返し速度依存性が発現する挙動と  $K_{IH}$  の関係を解説図 10 に示す。ここで、I からIVの記号は、き裂進展における次の Phase を意味する。

- Phase I :  $K_{max} < K_{maxth}$  疲労き裂の発生下限界以下
- Phase II :  $K_{max} < K_{max}^T (=K_{IH})$  水素助長疲労き裂進展
- Phase III :  $K_{max} > K_{max}^T (=K_{IH})$  水素誘起割れ/安定破壊
- Phase IV :  $K_{max} > K_{IC}$  不安定破壊



解説図 10 疲労き裂進展特性の模式図

ライジングロード法により測定された  $K_{IH}$  と水素中の疲労き裂進展特性において繰返し速度依存性が発現する  $K_{max}^T$  を対比した事例を解説図 11 に示す。

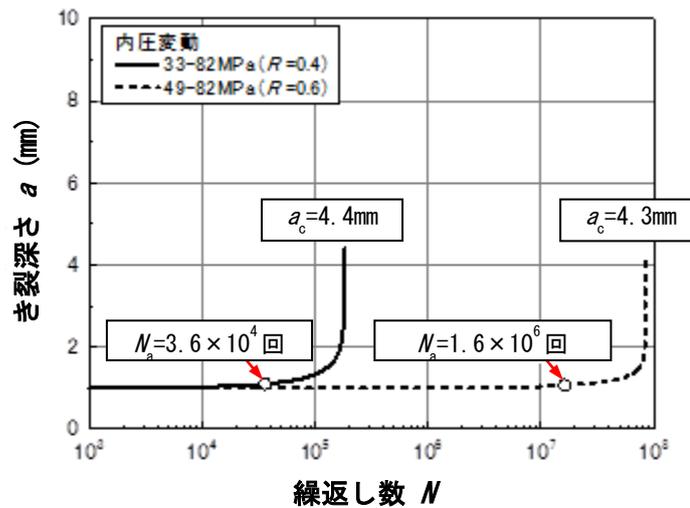


解説図 11 ライジングロード法による  $K_{IH}$  と疲労き裂進展から求めた  $K_{max}^T$  の対比

出典: (社)日本高圧力技術協会 平成 23 年度秋季講演会

d) 疲労き裂進展解析の事例

解説図 12 に疲労き裂進展解析の事例を示す。曲線は、初期き裂深さを 1 mm として、内圧変動が異なる 2 条件の解析結果である。 $K_{\max}$  が  $K_{IH}$  に到達した時点で解析を打ち切り、その時の限界き裂深さ  $a_c$  と繰返し数  $N_c$  を求める。 $N_c$  の 1/2、又はき裂深さが  $a_c$  の 1/4 に達する繰返し数のうち、いずれか小さい方の繰返し数として決定した許容繰返し数  $N_a$  は、内圧変動の差異に応じて、それぞれ  $3.6 \times 10^4$  回及び  $1.6 \times 10^6$  回となる。



解説図 12 疲労き裂進展解析の事例

出典: 株式会社日本製鋼所 NEDO 水素利用技術研究開発事業成果報