

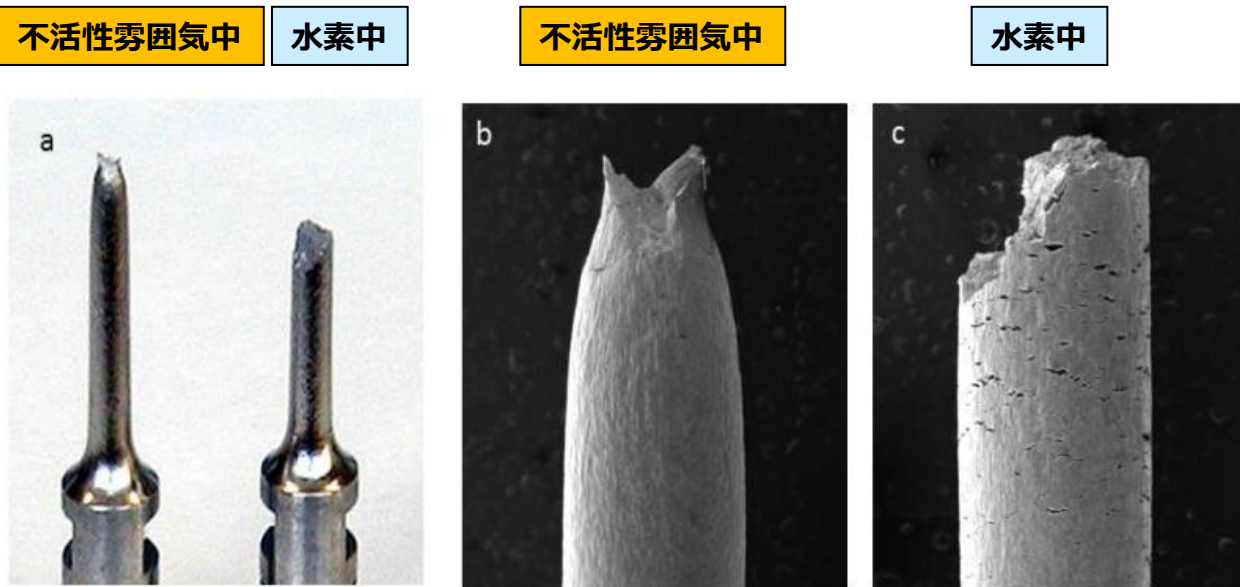
2026年度 JPECフォーラム

# 水素社会構築に向けた鋼材研究開発

2026年5月12日

一般財団法人カーボンニュートラル燃料技術センター  
水素エネルギー部

## <金属の水素脆化現象>



SUS316オーステナイト系ステンレス鋼の水素環境脆化の外観

a: 破断した試験片の写真 左: 70MPaアルゴン中破断、右: 70MPa水素中破断  
b: 70MPaアルゴン中破断  
c: 70MPa水素中破断

出典: Fukuyama et al., *J. Jpn. Inst. Met.*, Vol.68, No.2 (2004), pp.62-65.

### 水素による金属への影響

- ・延性（伸び・絞り）の低下
- ・靱性の低下
- ・強度の低下
- ・時間依存の破壊（遅れ破壊）

### 水素の影響度（水素適合性）

金属の結晶構造・成分によって異なる  
温度・水素の圧力によって異なる



**高圧水素インフラ用として適切な材料を示す必要がある**

- ・一般高圧ガス保安規則（一般則）の例示基準

高圧ガス

高いエネルギーを有する  
漏えい・破裂・爆発の影響が広範囲に及ぶ  
ガスの種類によっては可燃性・毒性



重大事故を未然に防ぎ、人命・社会・産業を守る

高圧ガス保安法



製造・貯蔵・販売・移動・消費・廃棄等の行為に対する安全基準を定める

一般高圧ガス保安規則



一般高圧ガス保安規則の要求を満たすための具体的な代表例を記載したもの

一般則例示基準

# 例示基準化のメリット

・一般則例示基準で規定される



一般高圧ガス保安規則の適合基準が明確化される

・高圧水素ガス設備に使用できる材料を規定した例示基準



一般則例示基準 9 の 2

水素に対して安全であると保証されたもの

**メリット**

一般則例示基準の記載に従う = 一般高圧ガス保安規則の要求に適合



水素適合性の証明が不要 (利便性が高い)

一般則例示基準外の内容を実施する場合：別途審査が必要

費用・時間面でのデメリット { 水素適合性の確認データを用意  
使用許諾を得るまでの審査期間

例示基準化のメリット大 ⇒ 一般則例示基準 9 の 2 における材料範囲拡大に向けた検討を実施

一般則例示基準9の2

高圧水素ガス設備に使用できる材料を例示した規定  
材料ごとに適用可能な温度・圧力範囲が定められている

・汎用ステンレス鋼 ⇒表（三）

SUS316、SUS316L、SUS305  
の一部が使用可

NEDO研究事業

競争的な水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業  
／ 共通基盤整備に係る技術開発／  
水素社会構築に向けた鋼材研究開発

① Ni当量低減

高圧水素中で使用可能な材料範囲の拡大

② 溶接

③ 冷間加工

範囲拡大された材料を加工して高圧水素中で使用するための検討

④ データベースの拡大

得られたデータを厳選・大学のデータベースにて公開

材料範囲の拡大  
に資する検討

## 鋼材ステアリング委員会

・研究計画, 進捗, 研究結果の審議・承認、  
試験データ (データベース) の審議・承認

NEDO

一般財団法人 カーボンニュートラル燃料技術センター



国立大学法人 九州大学



高圧ガス保安協会



愛知製鋼株式会社



一般財団法人 金属材料研究開発センター



大同特殊鋼株式会社 (2023~2024年度)



株式会社TVE

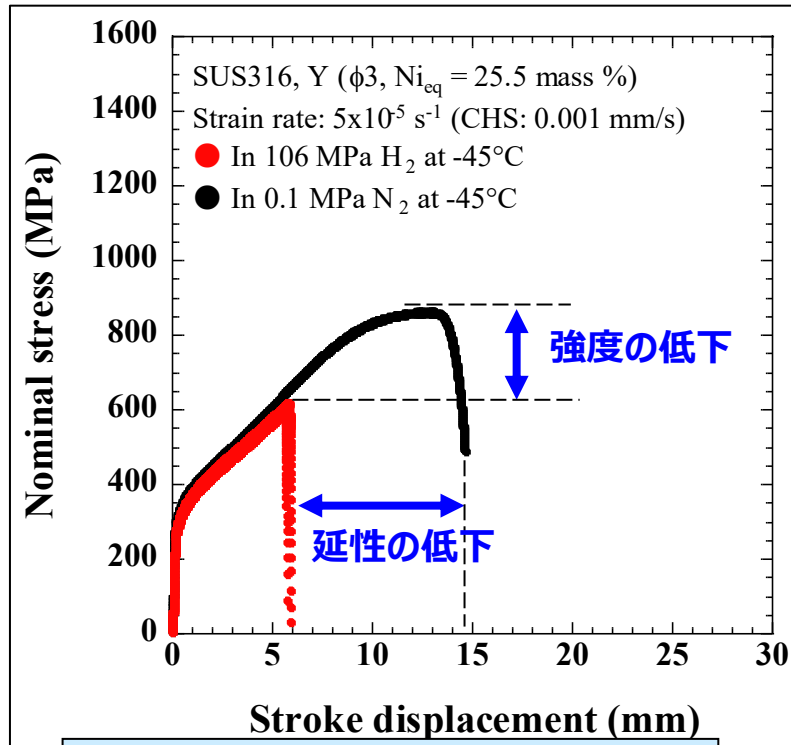


株式会社デンソー (2023~2024年度)



## 1. 水素適合性～金属材料が水素中でその特性を維持できるか

水素の影響を受けた材料の例（応力ひずみ線図）



水素の影響により延性・強度が低下

### 水素適合性を表す指標

#### SUS316等のオーステナイト系ステンレス鋼の場合

- ・材料の塑性変形時に**結晶構造（オーステナイト構造）を維持できるか**



水素適合性の表記に**オーステナイト安定度**を表す指標を採用 = **Ni当量**

- ・材料の成分で計算が可能

【平山の式】

$$\text{Ni当量}(\%) = 12.6C + 0.35Si + 1.05Mn + Ni + 0.65Cr + 0.98Mo$$

## 2. 金属材料のどの特性を指標とするかによって必要な水素適合性（Ni当量）が変わる ⇒ 基準（例示基準）に影響

(2010) 一般則例示基準9の2の創設

背景

水素スタンドの実装  
非プレクール・35MPa

- ・超高压水素に対応した例示基準材料の登場
- ・SUS316Lを使用可とした

(2012) Ni当量規制の導入

背景

FCVの70MPa化  
常用水素圧力70MPa、-40℃

\*Ni当量：オーステナイト構造の安定度指標  
=12.6C+0.35Si+1.05Mn+Ni+0.65Cr+0.98Mo

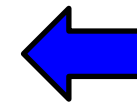
- ・最低温度-40℃、Ni当量28.5%以上かつ**絞り75%以上**（**絞りの指標**）
- ・SUS316も条件を満たせば使用可能

(2014) 適用下限圧力の変更、温度範囲の拡大（20MPa超、-45℃～250℃）  
(2016) 移動式水素スタンドへの適用

規制改革実施計画(2017)

No.39 水素特性判断基準に係る例示基準の改正等の検討

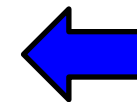
(2020) Ni当量規制の緩和



前NEDO事業

- ・**絞り**に代わり**伸び**を要件とすることでNi当量を緩和（**伸びの指標**）
  - ・規格値の伸びよりも高い伸びを要求
- ・KHKS0220のRELの遷移曲線に則る

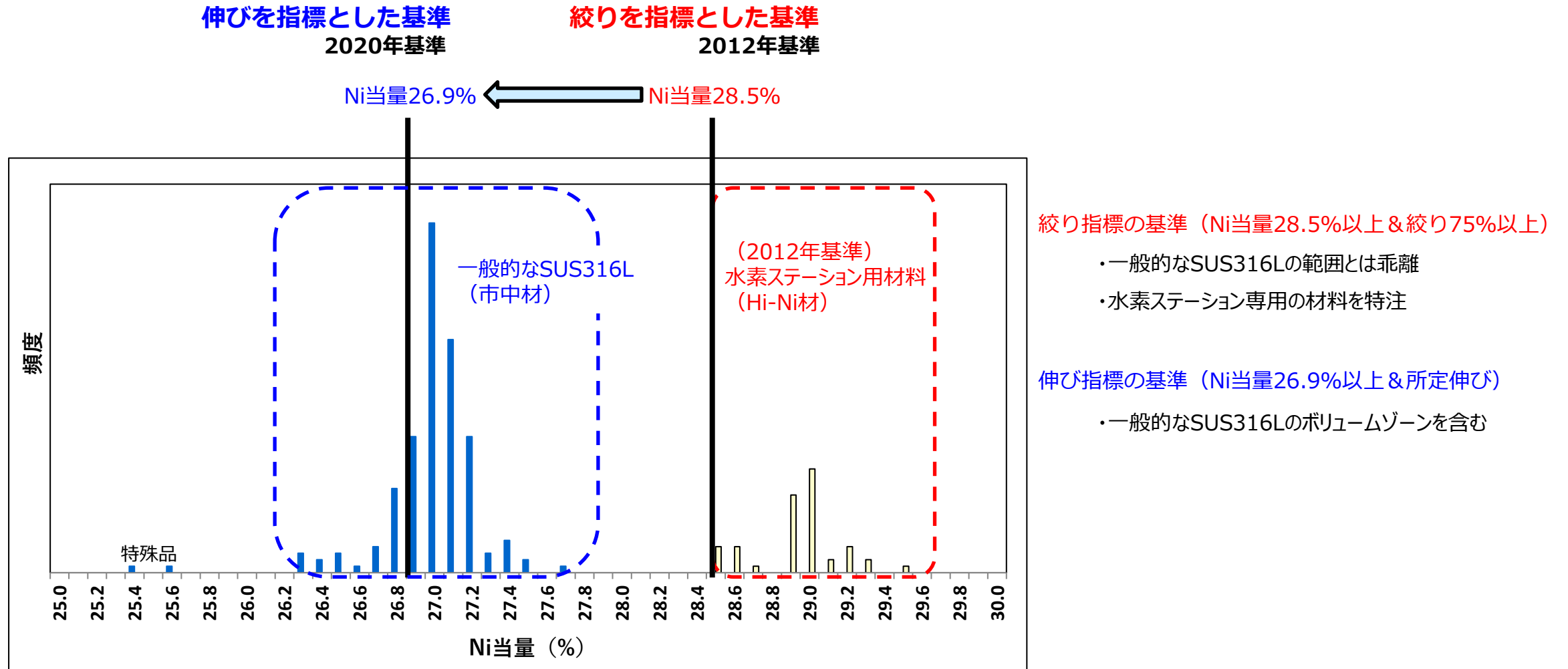
(2023～) Ni当量規制等のさらなる緩和に向けた検討



現NEDO事業

# Ni当量と実際に用いられる材料

## 市中材SUS316LのNi当量分布（JPEC調べ）と水素適合性基準の比較



指標とする金属材料の特性を変えることで水素適合性基準（Ni当量）の要求値が変わる

## 概要

### 強度を指標とした水素適合性判断基準の検討

・高圧水素機器の設計に既存の許容引張応力を使用

⇒使用温度・圧力条件において水素による強度低下が起こらない材料範囲とする

#### RTS=1 : 強度を指標とした水素特性の判断基準の検討

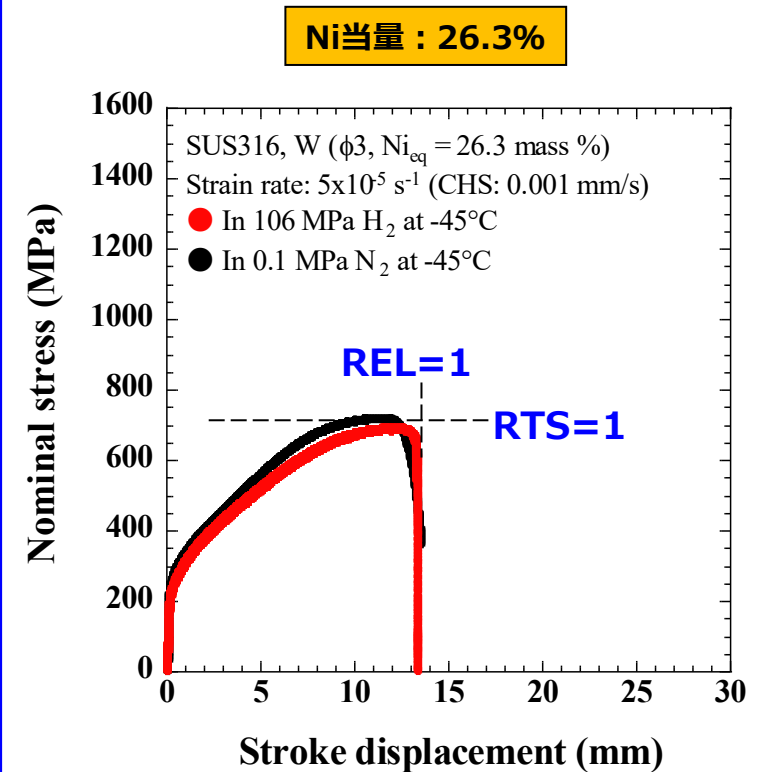
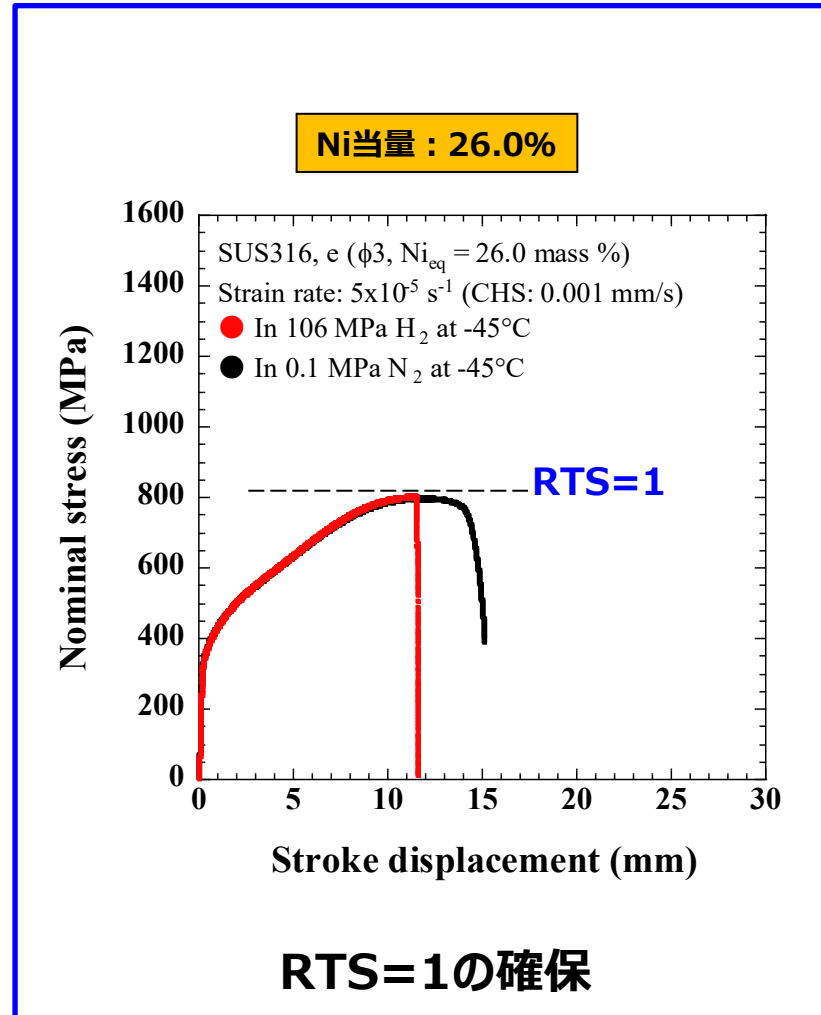
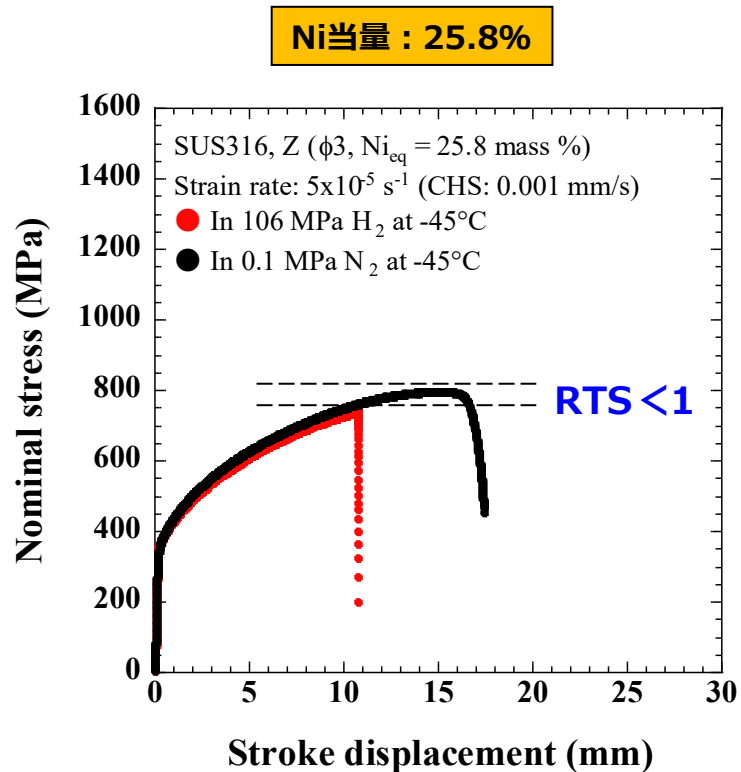
(RTS : 大気中と水素中の強度の相対比)

水素による影響度の強い機械的性質の序列

絞り(RA) > 伸び(EL) > 引張強さ(TS) > 降伏点(YS)

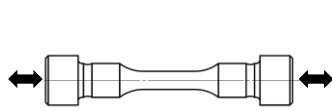
⇒**絞り**・**伸び**の基準から**強度**の基準とすることで、材料の範囲が緩和できる

## 【SSRT (低ひずみ速度引張試験)】

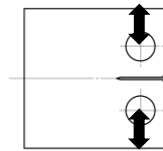


十分なNi当量を有することで、水素の影響による強度低下を回避できる

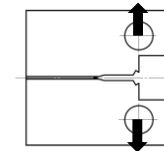
# 水素中の諸特性の検証



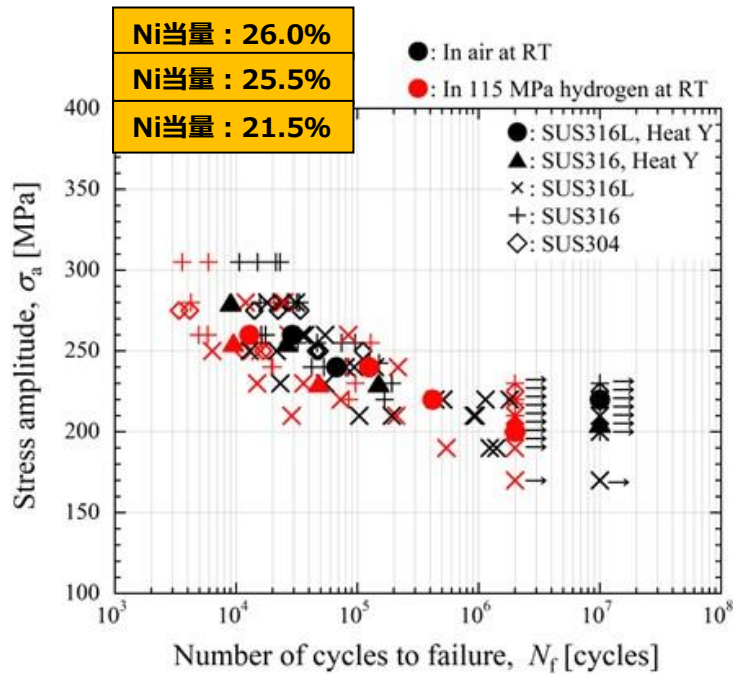
疲労寿命試験



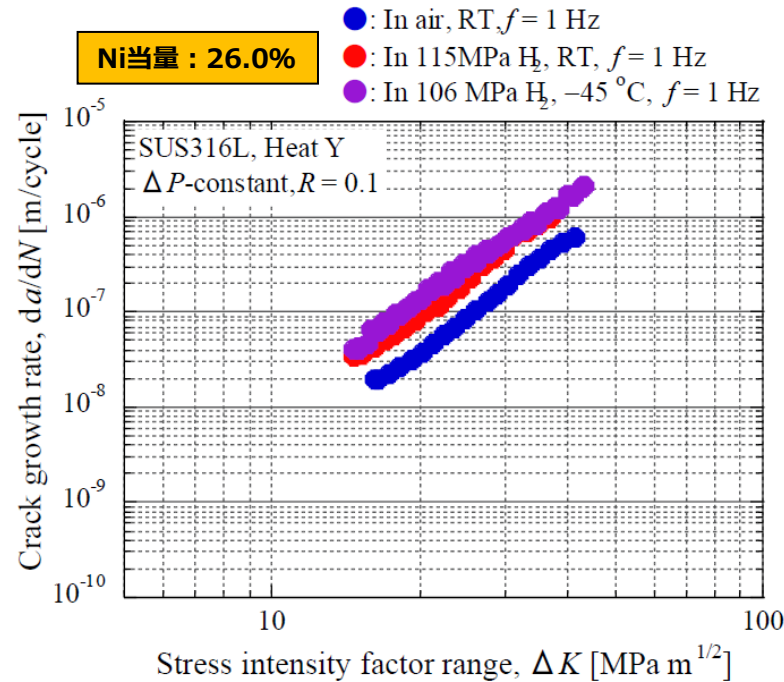
疲労き裂進展試験



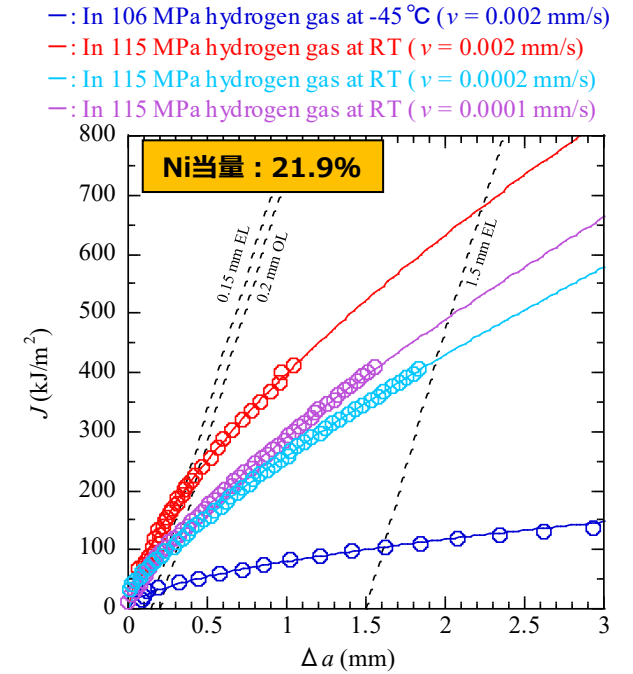
破壊じん性試験



疲労限度は水素中と大気中で同値



低温高圧水素中でもき裂進展速度があまり増加しない



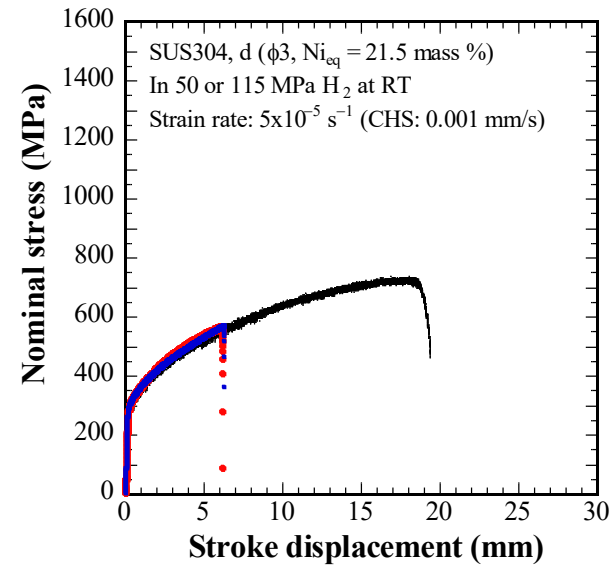
SUS304でも低温高圧水素中で十分な靱性

RTS < 1の材料(SUS304)でも、高圧水素用の構造材として問題ない結果が得られている

# 定荷重保持試験

## SSRT試験

SUS304 (RTS < 1)

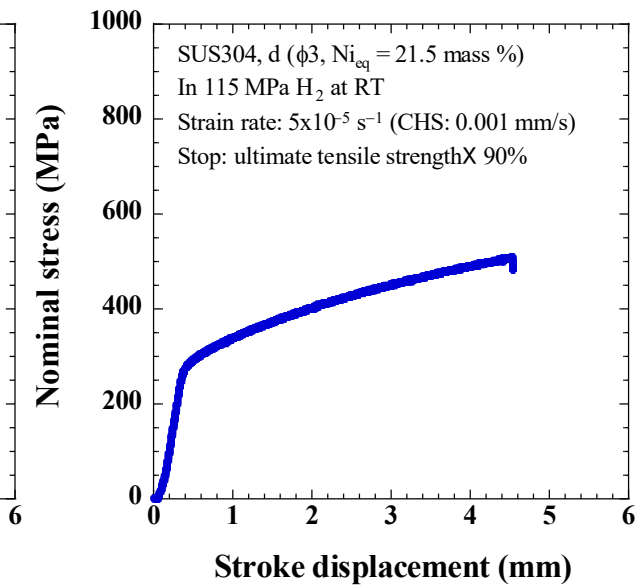
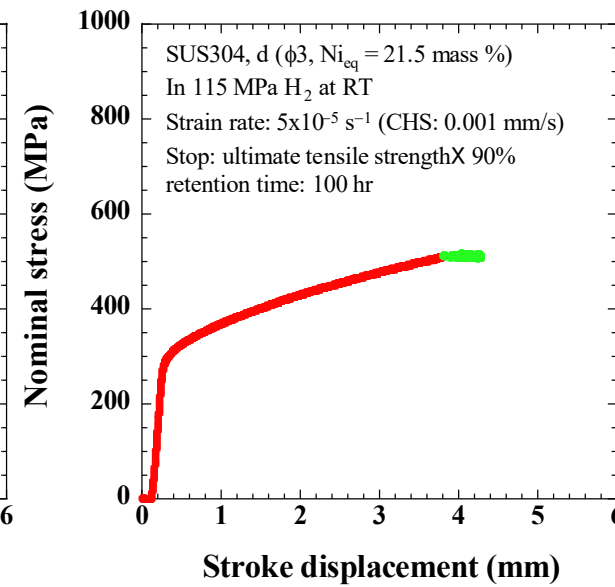
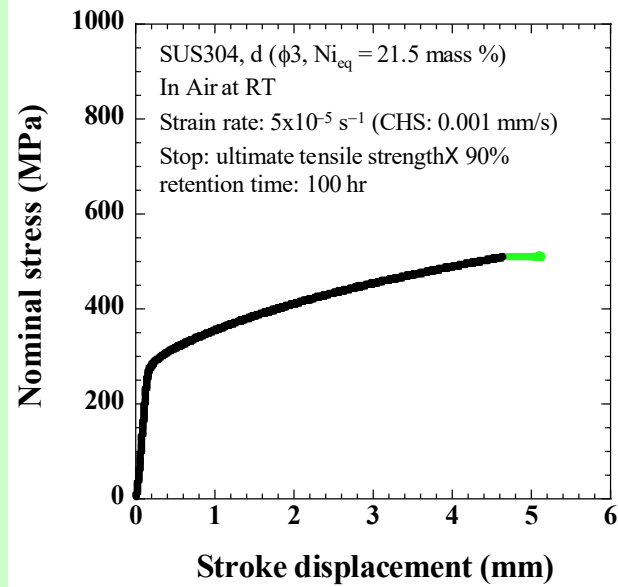


## 定荷重保持試験

$\sigma_B \times 90\%$ , 100hr保持  
In Air at RT

$\sigma_B \times 90\%$ , 100hr保持  
In 115 MPa H<sub>2</sub> at RT

$\sigma_B \times 90\%$ , 除荷  
In 115 MPa H<sub>2</sub> at RT



SUS304(RTS < 1)でも、破断強度の9割の応力を水素中で長時間かけ続けても、水素の影響による破断は起こらない

水素中で時間依存の破壊が起こらないことを確認

# 使用水素圧力上限の緩和

背景

水素ステーションで扱える水素の圧力上限を93MPaに引き上げ（一般則）

対応

材料に関する水素圧力上限と対応させる必要性（例示基準）

## 材料に関する水素圧力上限について議論、2025/11 一般則例示基準9の2 改正

○一般高圧ガス保安規則の機能性基準の運用について（20190606保局第3号） 新旧対照表

（改正前欄に掲げる規定の下線を付した部分は、これに対応する改正後欄に掲げる規定の下線を付した部分のように改め、改正後欄に下線を付した規定で改正前欄にこれに対応するものを掲げていないものは、これを加える。）

改正後			改正前			
一般高圧ガス保安規則の機能性基準の運用について 制定 20190606保局第3号 令和元年 6月14日 改正 20201102保局第1号 令和2年11月 4日 9. ガス設備等に使用する材料 (略)			一般高圧ガス保安規則の機能性基準の運用について 制定 20190606保局第3号 令和元年 6月14日 改正 20201102保局第1号 令和2年11月 4日 9. ガス設備等に使用する材料 (略)			
1. (略) 2. (略)			1. (略) 2. (略)			
表(三)			表(三)			
材料の種類	常用の圧力 (93MPa 以下)	における常用の温度		常用の圧力 (82MPa 以下)	における常用の温度	ニッケル当量 (注1)
(略)				(略)		
JIS G4303 (2021) ステンレス鋼棒 (SUS316、SUS316L に限る。(注2))	(略)	(略)		JIS G4303 (2012) ステンレス鋼棒 (SUS316、SUS316L に限る。(注2))	(略)	(略)
JIS G4304 (2021) 熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯 (SUS316、SUS316L に限る。)	(略)	(略)		JIS G4304 (2012) 熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯 (SUS316、SUS316L に限る。)	(略)	(略)
JIS G4305 (2021) 冷間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯 (SUS316、SUS316L に限る。)	(略)	(略)		JIS G4305 (2012) 冷間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯 (SUS316、SUS316L に限る。)	(略)	(略)
JIS G4303 (2021) ステンレス鋼棒 (SUS305 に限る。(注2))	<u>-45℃以上 90℃以下</u>	<u>28.5 以上 (伸びが 57% 以上) であっては、26.9 以上</u>		(新設)	(新設)	(新設)

93MPa

82MPa



## ②溶接：高圧水素インフラにおける重要性

水素

高圧ガス

分子サイズが小さく、漏えいしやすい  
圧力が高いほどシールに負荷がかかる

高圧水素

漏えいリスクが高くなる

高圧水素設備で水素漏えい（カニ泡程度のものは除く）が発生

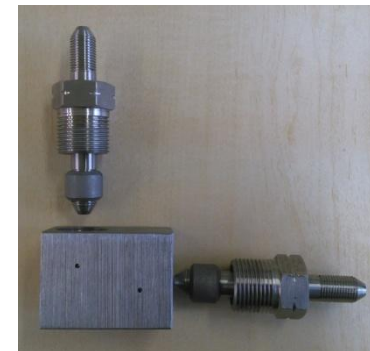
⇒ 法令上の「事故扱い」

⇒ 信頼性の高い継手が必要

機械式継手が多用された組配管



<機械式継手>



<溶接継手>



## ②溶接：水素に関する課題

**機械式継手：切削加工を用いるため、材料内部の金属組織は変化しない**

⇒ 例示基準の材料を使用していれば水素適合性は保証



(株) ミスミHPより

**溶接継手：材料の溶解・凝固を経て使用**

⇒ 水素適合性？

溶接部の水素適合性に関する情報があると有用

## ②溶接

金属組織の変化を伴う（溶接前 =  $\gamma$  相 溶接後 =  $\gamma$  相 +  $\alpha$  相）：水素適合性に関する情報が重要

水素適合性が保証できる材料組み合わせ（好適事例）を**溶接技術指針**として発信

（JPECLレポートとしてホームページで開示）

現在の好適事例の記載範囲

- ・Hi-Ni材（Ni当量28.5%以上）を用いた溶接
- ・溶接材を用いる場合はYS309LMo



対象となる材料範囲の拡大検討⇒技術指針の改定

- ・対象Ni当量の低減
- ・溶接材の追加（YS316L）

JPECレポート  
No.230304

2023年3月  
水素エネルギー部 水素利用推進室

### 高圧水素中で使用するためのステンレス鋼の溶接技術指針

◇一般則例示基準では高圧水素の配管類の接合には溶接を用いることが基本とされているが、実際の溶接の使用は少数に留まっている。

◇その理由の一つに、溶接による材料変化のため高圧水素環境での使用可能判断が非常に難しいことが挙げられる。材料変化の影響を取り除くには溶接部分に適切な熱処理を行う方法があるが簡便性は著しく低下する。

◇そこで、水素ステーションの整備における溶接施工の利用の簡便性向上を目的として、高圧水素環境で使用可能な溶接についての技術指針を構築し、溶接部の水素適合性に関する要件を解説する。

◇また、溶接後熱処理なし（As weld）でも高圧水素環境で使用可能な、水素適合性の確認を溶接後に行う必要がない溶接の組合せについて例示する。

1.はじめに

水素はカーボンニュートラル社会を築く上での要

1.はじめに

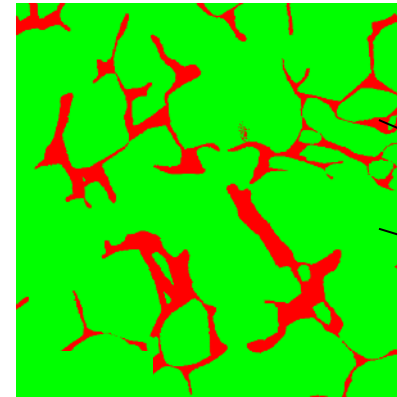
## ②溶接

### SUS316Lの場合

溶接前：均質なオーステナイト単相

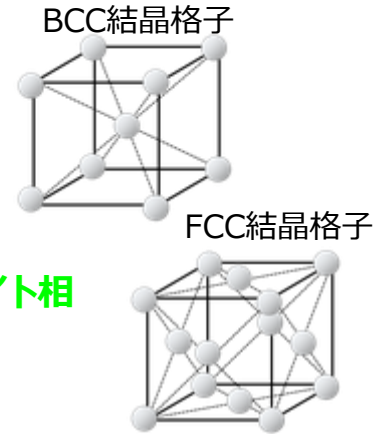


溶接後(溶接まま)：オーステナイト相 + フェライト相



フェライト相

オーステナイト相



フェライト相はBCC結晶格子で、水素の影響を受けやすい

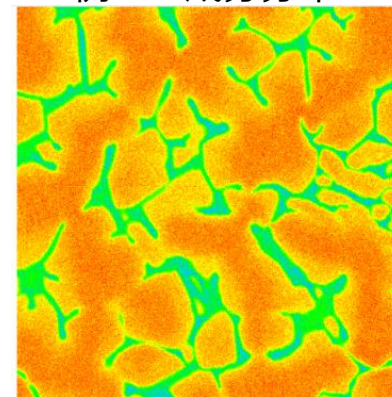
### 水素適合性に影響する因子

- ・オーステナイト相・フェライト相の生成状態
- ・オーステナイト相における凝固偏析

凝固モード (A/AF/FA/F) も溶接部の組織構造に影響

溶接後(溶接まま)：凝固偏析

例：Ni成分分布

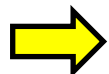


オーステナイト相/フェライト相での合金元素分配

オーステナイト相内での組成不均一化

⇒水素適合性への影響を考慮

水素適合性を保証 (確認試験不要) できる材料範囲



技術指針に記載

検討中

### ③冷間加工

**冷間加工：** 金属を再結晶温度より低い温度で塑性変形させる加工方法

**メリット**

- ・高強度化
- ・高い寸法精度
- ・製品形状に近づける
- ・滑らかな表面の形成

**冷間加工の種類（例）：**

冷間圧延	冷間引抜
冷間押出	冷間鍛造
プレス	絞り

本研究の検討対象：棒材の冷間引抜加工

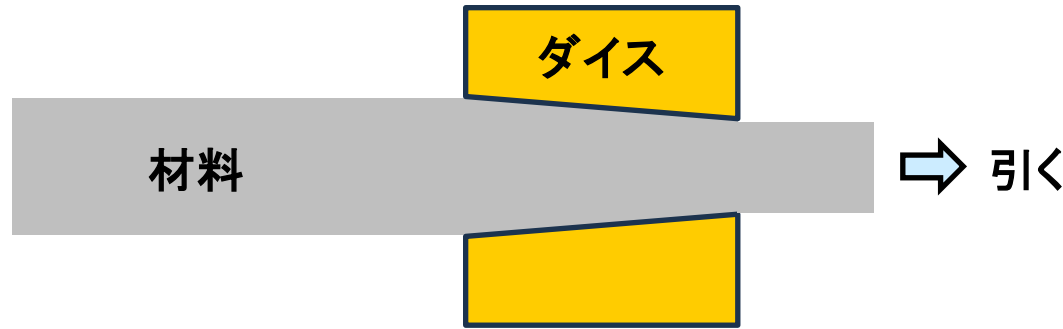
＜冷間引抜加工部品の例＞



愛知製鋼（株）HPより

### ③冷間加工

冷間引抜 :



加工による材料内部の不均一化  
 外側から強制的に引っ張られるため、  
 塑性変形の進み方が場所ごとに異なる  
 (表面・内部でひずみ量が異なる)

課題 :

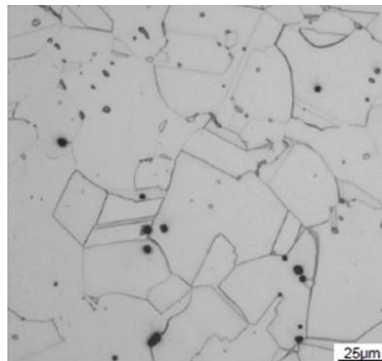
加工後の材料規格がない : 圧力設計のための公的な数値 (許容引張応力) がない



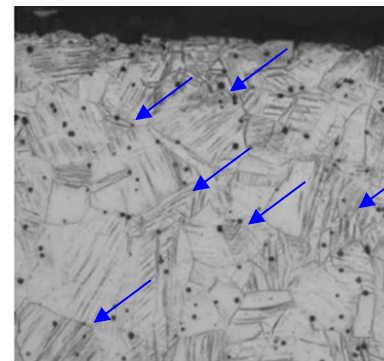
材料内部の不均一化 : 圧力設計に必要な材料強度をどう保証するか

加工に伴う金属組織の変化 : 水素適合性に問題ないか確認

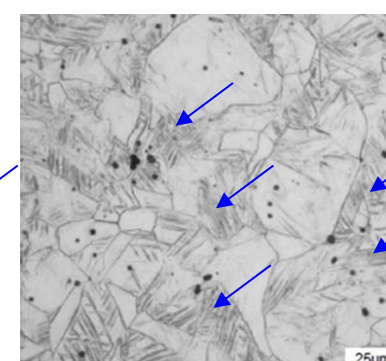
金属組織 (加工前)



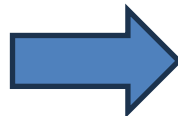
加工後 (表面付近)



(中心～表面の中間付近)



加工に伴う  
組織の不均一化



← ひずみ

### ③冷間加工

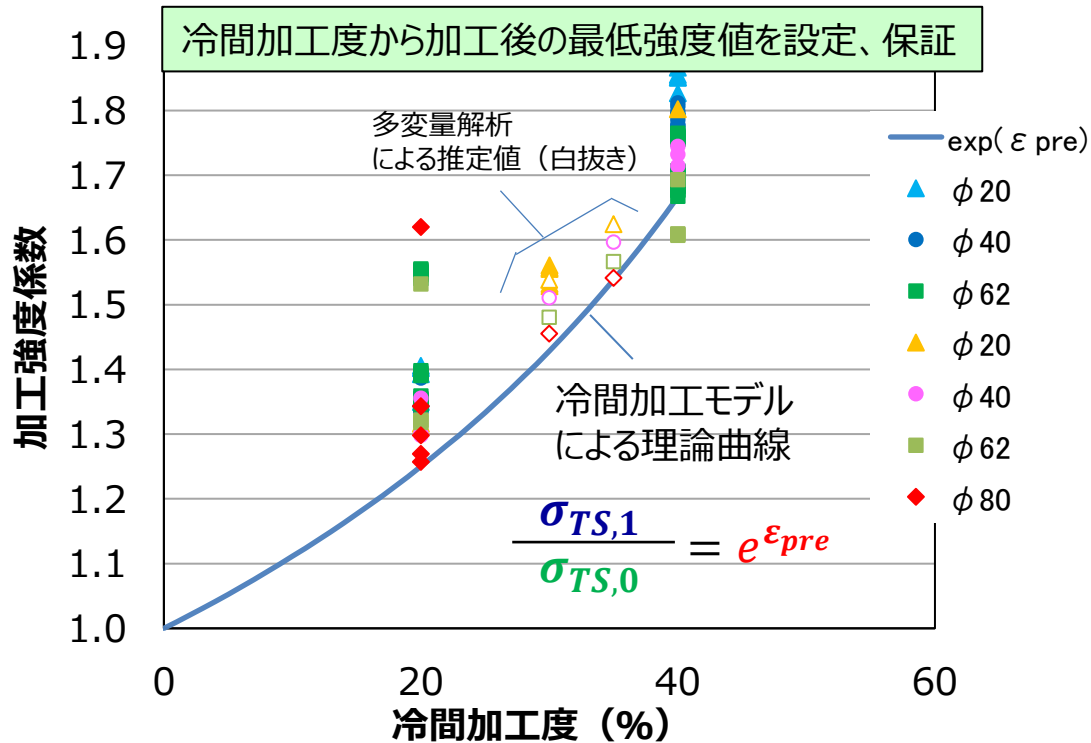
冷間引抜加工 を対象に材料強度保証の仕組みを検討中

加工度と棒材径から加工後の引張強度を推定 ➡ 許容引張応力

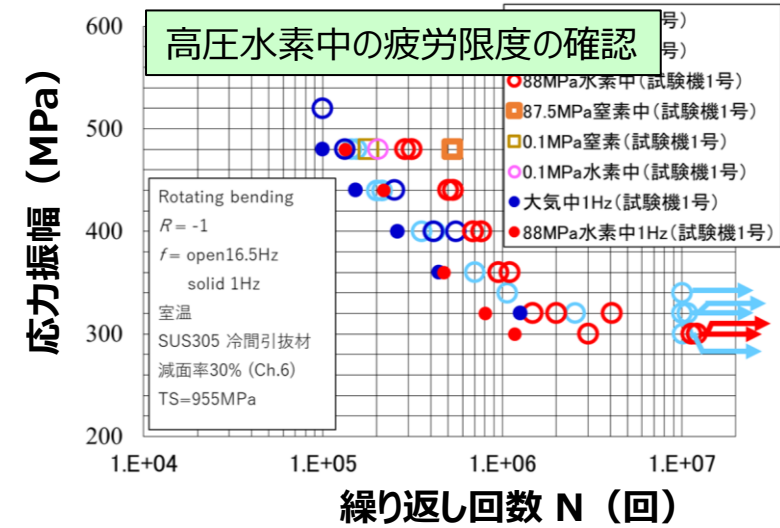
- 温度の影響、疲労限度との比較検証
- 水素中での使用

#### <加工強度係数を用いた解析>

\* 加工強度係数： 冷間加工後の引張強度/加工前（母材）の引張強度

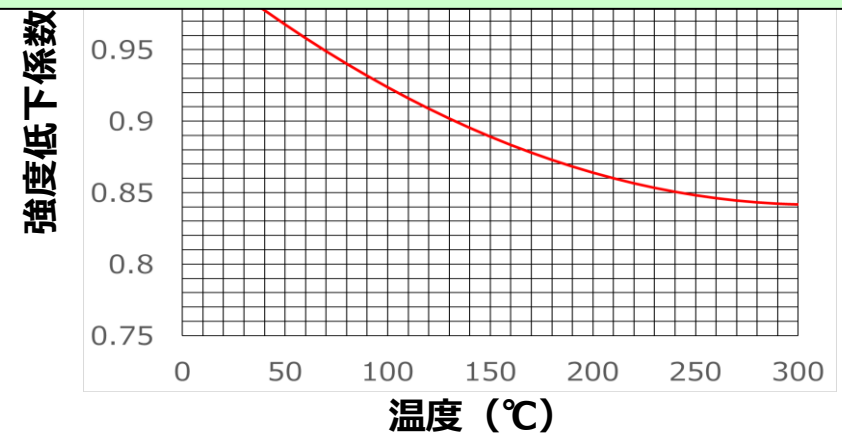


#### <加工後の疲労特性（水素中）に関する検証>



#### <強度の温度依存性に関する検証>

強度低下係数（温度の影響による強度減少）の検証



## 謝辞

以上の発表に関する技術開発は、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\*）からの委託事業「競争的な水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業」（プロジェクトコード：P23004）によるものです。

また、技術開発成果は、委託事業「超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業」（プロジェクトコード：P18011）の結果得られたものです。

\*New Energy and Industrial Technology Development Organization