

発表No.C-2

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

一般財団法人石油エネルギー技術センター 鈴木

一般財団法人石油エネルギー技術センター (JPEC)  
高压ガス保安協会 (KHK)  
国立大学法人 九州大学  
一般財団法人金属系材料研究開発センター (JRCM)  
日本製鉄株式会社  
愛知製鋼株式会社  
国立研究開発法人物質・材料研究機構 (NIMS)

2022年7月28日

連絡先  
一財) 石油エネルギー技術センター 鈴木  
E-mail: sh-suzuki@pecj.or.jp  
TEL: 03-5402-8513

# 事業概要

## 1. 期間

開始 : 2018年6月

終了 (予定) : 2023年3月

## 2. 最終目標

実施項目	最終目標
① 汎用ステンレス鋼の <b>使用可能範囲拡大</b> に関する 研究開発	水素ステーションで使用可能な汎用ステンレス鋼の候補から優先度の高いSUS316系等のデータ取得を行い、取得したデータを基に新たな水素特性判断基準を検討する。新たな水素特性判断基準及びそれを満たす汎用ステンレス鋼を提示し、基準化に資する資料を作成する。
② 汎用ステンレス鋼 <b>冷間加工材</b> に関する研究開発	汎用ステンレス鋼冷間加工材について、水素ステーションにおける使用条件を明確化し、許容引張応力の検討を行い、基準化に資する資料を作成する。
③ 汎用ステンレス鋼 <b>溶接材</b> に関する研究開発	汎用ステンレス鋼の溶接について、その材料特性、水素適合性を測定し、技術指針作成に向け必要な検討課題を明らかにする。 技術指針の作成に資するデータを取得し、技術指針案を作成する。
④ <b>汎用低合金鋼</b> の高温適用に関する研究開発	汎用低合金鋼の高温水素ガス中使用を想定したデータ取得により水素圧縮機への適用可否を判断し、低合金鋼技術文書(JPEC-TD 0003)へ反映を検討する。

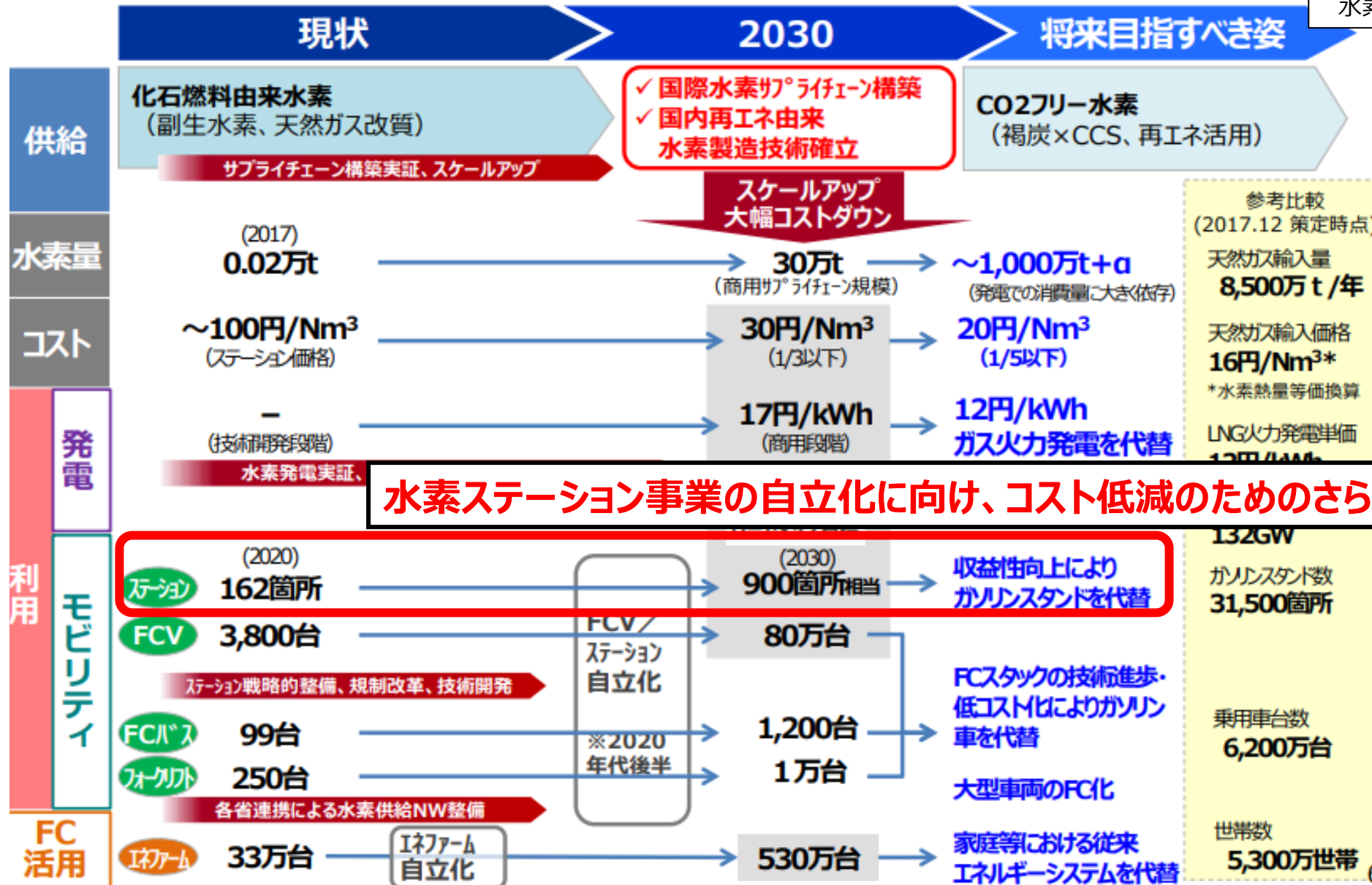
## 3.成果・進捗概要

実施項目	成果・進捗
<p>①汎用ステンレス鋼の <b>使用可能範囲拡大</b>に関する 研究開発</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・新たな水素特性判断基準における判定基準を構築するための水素適合性評価試験を実施し（SUS316、SUS304）、引張強さ・伸び・絞りのNi当量依存性、温度依存性等、水素によるステンレス鋼への影響を検討した。</li> <li>・新たな水素特性判断基準について検討し、従来の絞り基準の指標から伸びを指標とする考え方を確立した。</li> <li>・伸びを指標とする判断基準に基づき、安全性の検証、拡大すべき材料範囲の検討、従来規制・規格との整合性の検証等を行い、例示基準改正に資するデータをまとめた。</li> <li>・本検討で拡大された範囲の汎用ステンレス鋼が、低温・高圧水素中でも疲労限度が低下しないことを確認した。 （⇒以上の結果を基に、例示基準のSUS316の規制範囲が緩和された）</li> <li>・水素ステーション内の適材適所での汎用ステンレス鋼の使用可能範囲拡大を目指し、室温までの基準について検討中である。</li> </ul>
<p>②汎用ステンレス鋼<b>冷間加工材</b> に関する研究開発</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・SUS316：汎用ステンレス鋼の冷間加工材について種々の加工度での水素適合性を評価。冷間加工度40%までは水素適合性は損なわれないことを確認した。 冷間加工により疲労限度は向上することがわかった。疲労限度に対する水素の影響は見られなかった。 冷間加工材について許容引張応力を検討中（棒・管）。</li> <li>・SUS305：母材、冷間加工材の水素適合性、許容引張応力の設定に向けたデータを取得した。 （⇒以上の結果を基に、SUS305母材がJIS B 8265の圧力容器材料として追加される見込み）</li> </ul>
<p>③汎用ステンレス鋼<b>溶接材</b>に 関する研究開発</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高圧水素で使用可能な溶接材の使用条件並びに水素適合性の判断基準として必要な検討項目を明確化した。</li> <li>・必要なデータを追加し、技術指針として取りまとめを行う。</li> </ul>
<p>④<b>汎用低合金鋼</b>の高温適用に 関する研究開発</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水素圧縮機の動作状況を模擬した評価方法を確立し、水素適合性を評価した。</li> <li>・評価結果を基に、低合金鋼技術文書JPEC-TD 0003を改訂し汎用低合金鋼の適用温度を圧縮機の範囲に拡張した。</li> </ul>

# 1. 事業の位置付け・必要性

## 水素基本戦略における達成目標

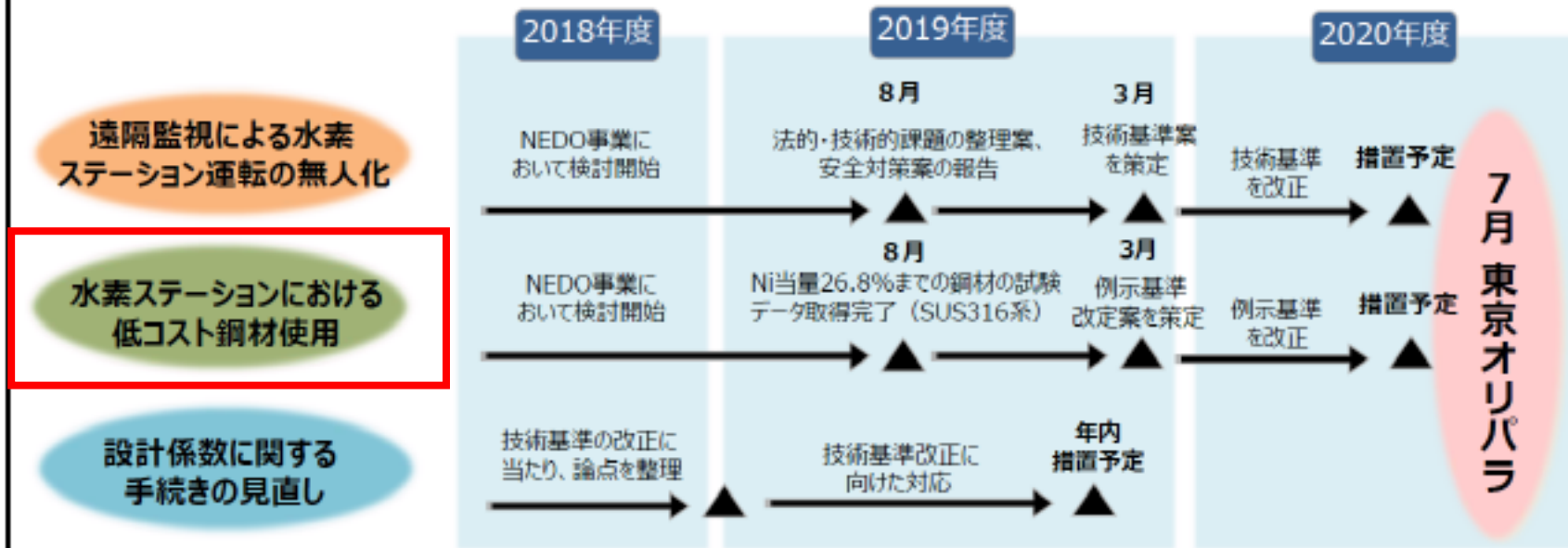
(出典) METI  
水素・燃料電池戦略ロードマップ



# 1. 事業の位置付け・必要性

(出典) 2019.3.12 METI  
水素・燃料電池戦略ロードマップ

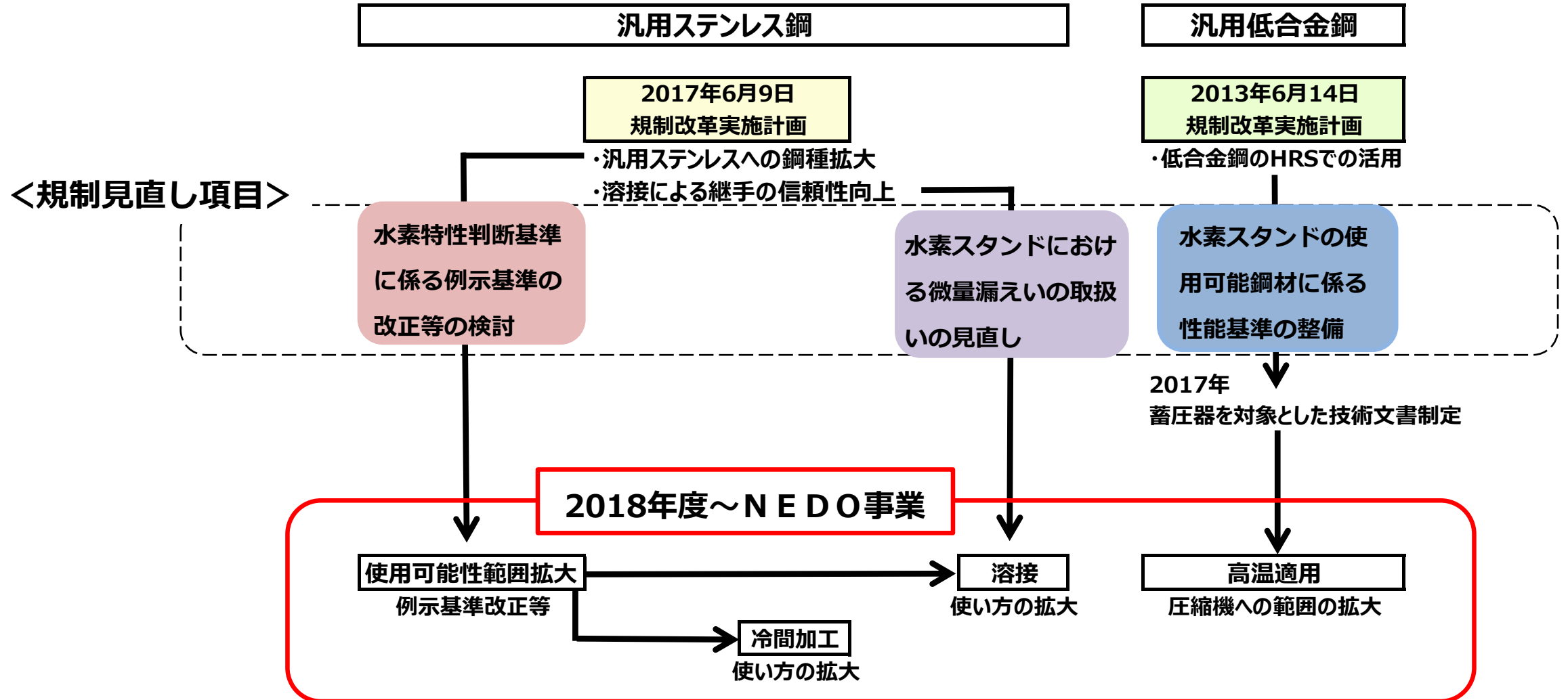
- 水素ステーションの整備費・運営費を低減させるため、安全確保を前提に、規制改革実施計画(2017年6月9日閣議決定)で掲げられている37項目の規制見直しを着実に進める。以下の主要3項目については、達成目標時期を下図のとおり定める。



本事業：37項目の規制見直しの主要3項目の1つとして開始

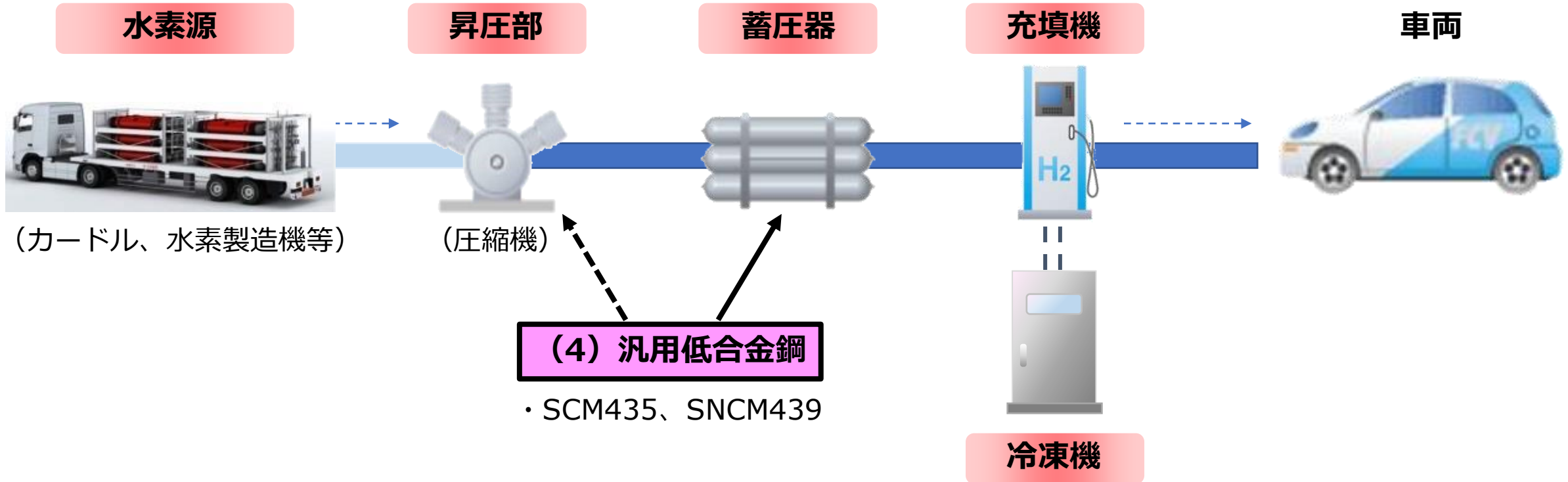
# 1. 事業の位置付け・必要性

## 【規制見直し項目と本事業の検討項目】



# 1. 事業の位置付け・必要性

## 【水素ステーションの構成例と本事業の検討項目】



## 高圧水素機器・高圧水素配管

(1) 汎用ステンレス鋼

- ・ SUS316
- ・ SUS304

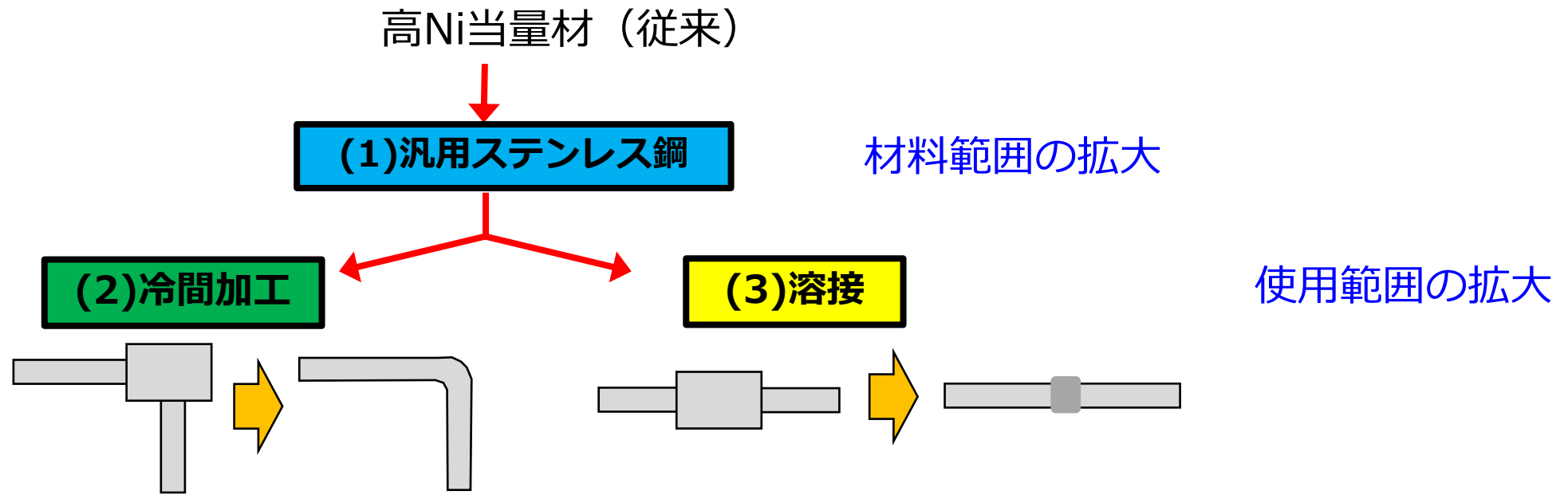
(2) 冷間加工

- ・ SUS316
- ・ SUS305
- ・ SUS304

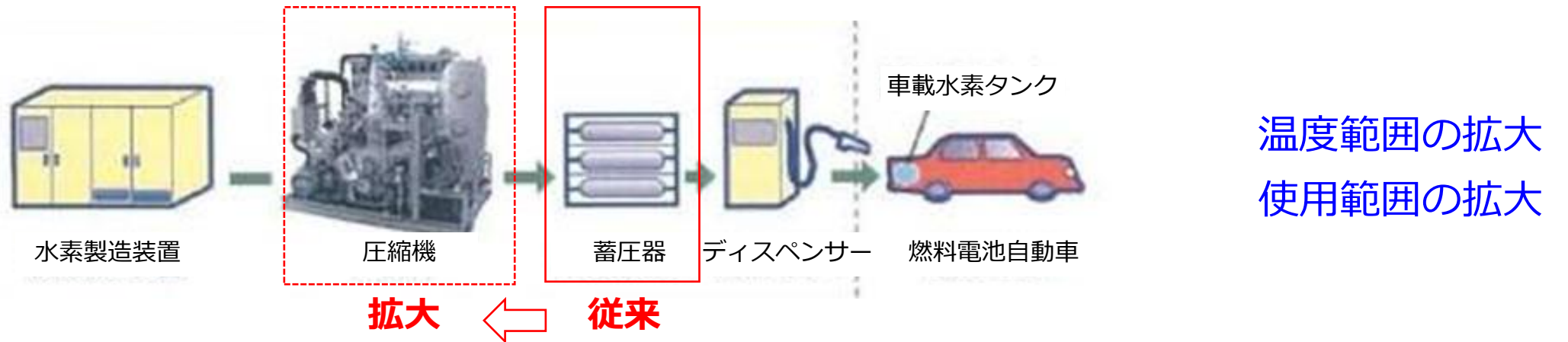
(3) 溶接

- ・ SUS316
- ・ SUS304

# 1. 事業の位置付け・必要性



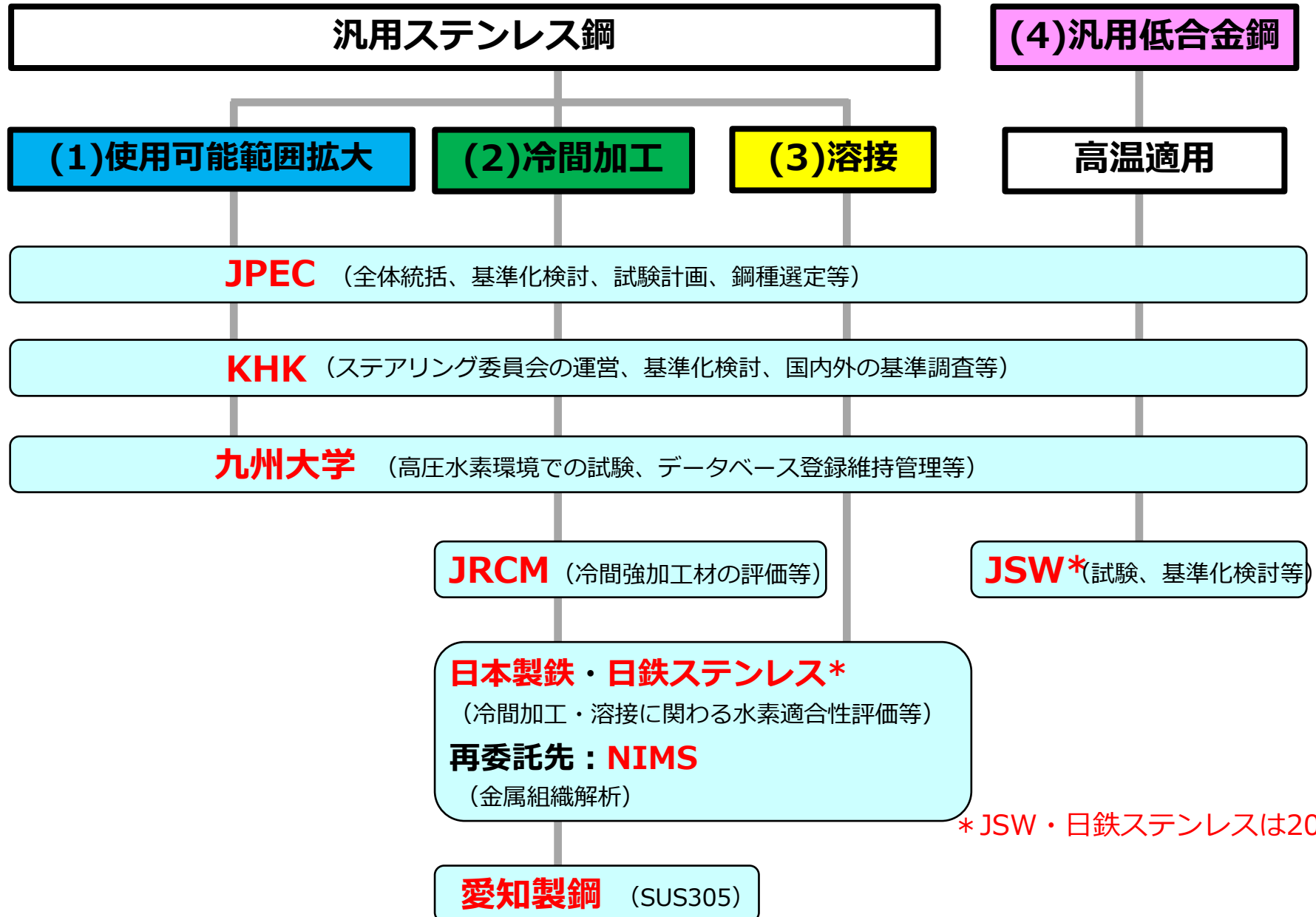
## (4) 汎用低合金鋼





実施項目	研究開発目標	根拠
①汎用ステンレス鋼の <b>使用可能範囲拡大</b> に関する研究開発	水素ステーションで使用可能な汎用ステンレス鋼の候補から優先度の高いSUS316系のデータ取得を行い、取得したデータを基に新たな水素特性判断基準を検討する。新たな水素特性判断基準及びそれを満たす汎用ステンレス鋼を提示し、基準化に資する資料を作成する。	従来の例示基準の根拠となっている絞り特性から新たな水素特性判断基準に置き換え、その結果としてNi当量を緩和させるには、低温、高圧の水素中での様々な挙動を評価し、安全性を立証することが必要である。
②汎用ステンレス鋼 <b>冷間加工材</b> に関する研究開発	汎用ステンレス鋼冷間加工材について、水素ステーションにおける使用条件を明確化し、許容引張応力の検討を行い、基準化に資する資料を作成する。	部材の薄肉化や部品の小型化を可能とし低コスト化に寄与する。将来の例示基準化を視野に入れた、当該材料の水素適合性や許容引張応力の検討が必要である。
③汎用ステンレス鋼 <b>溶接材</b> に関する研究開発	汎用ステンレス鋼の溶接について、その材料特性、水素適合性を測定し、技術指針作成に向け必要な検討課題を明らかにする。 技術指針の作成に資するデータを取得し、技術指針案を作成する。	配管接続に汎用ステンレスの溶接が使用可能になれば部品点数の削減や漏えいリスクの低減に効果的であると考えられる。 実使用に耐える溶接を実現するための検討と実施に向けた技術指針の作成が必要である。
④ <b>汎用低合金鋼</b> の高温適用に関する研究開発	汎用低合金鋼の高温水素ガス中使用を想定したデータ取得により水素圧縮機への適用可否を判断し、低合金鋼技術文書(JPEC-TD 0003)へ反映を検討する。	汎用低合金鋼は素材コストや加工性に優れるものの、水素圧縮機の温度範囲での水素適合性が未知のため現状では使用できない。

研究開発項目	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
①汎用ステンレス鋼の使用可能範囲拡大に関する研究開発	SUS316系の水素適合性検討	▽新指標の判定基準作成 SUS316系の基準化検討	▽基準化に資する資料作成 SUS304系の水素適合性検討	基準化に資する資料作成▽ 境界条件を考慮した適材適所の基準化検討	
②汎用ステンレス鋼冷間加工材に関する研究開発	SUS316系冷間加工材の水素適合性検討		SUS304系冷間加工材の水素適合性検討	▽使用条件明確化 SUS305系冷間加工材の許容引張応力、水素適合性検討	基準化に資する資料作成▽ 基準化検討
③汎用ステンレス鋼溶接材に関する研究開発	溶接部の水素適合性検討		技術指針検討	▽検討課題明確化	技術指針提案▽
④汎用低合金鋼の高温適用に関する研究開発	低合金鋼の水素適合性検討	▽圧縮機への適用可否判断	技術文書化検討・TF&分科会開催	▽技術文書改訂	



### <進捗管理>

#### ①全体に関するもの

鋼材ステアリング委員会（有識者、全事業者 + METI、NEDO）：3回/年 実施。

#### ②個別進捗確認会議

必要に応じ各テーマ事業者間の個別進捗確認会議を実施。

### <知財管理>

#### ①対外発表

外部発表（JPECフォーラム等）を行う際には知財運営委員会で内容を事前確認。

⇒NEDOへ公表申請

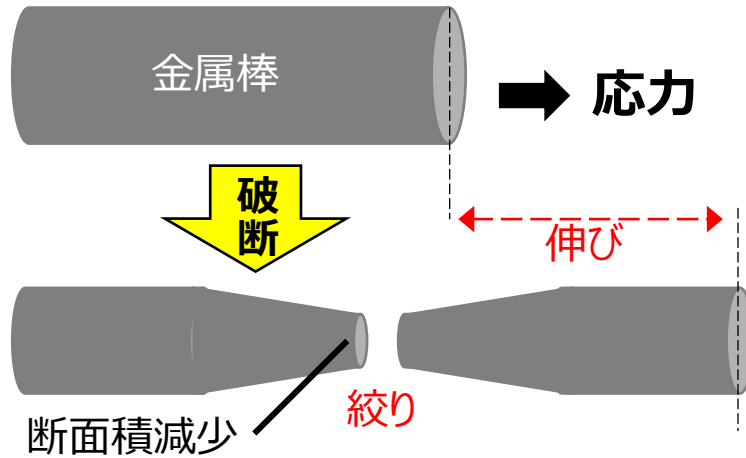
#### ②特許

本事業は汎用材を広く使用することを意図しており、権利化は行わない。

開発項目①汎用ステンレス鋼の使用可能範囲拡大に関する研究開発

目標：新たな水素特性判断基準の確立、基準化案の作成

高圧水素設備で安全に使用できる材料の要件：高圧水素ガス環境下における「強度」と「延性」の確保



延性に関する基準パラメータ：

- ・伸び
- ・絞り

従来の例示基準での考え方：延性のパラメータに「絞り」を採用

- ・伸びデータの信頼性（複数の測定方法）
- ・水素の影響がより厳しく反映される「絞り」の採用で安全性を最優先
- ・水素中での強度低下なし（RTS=1）

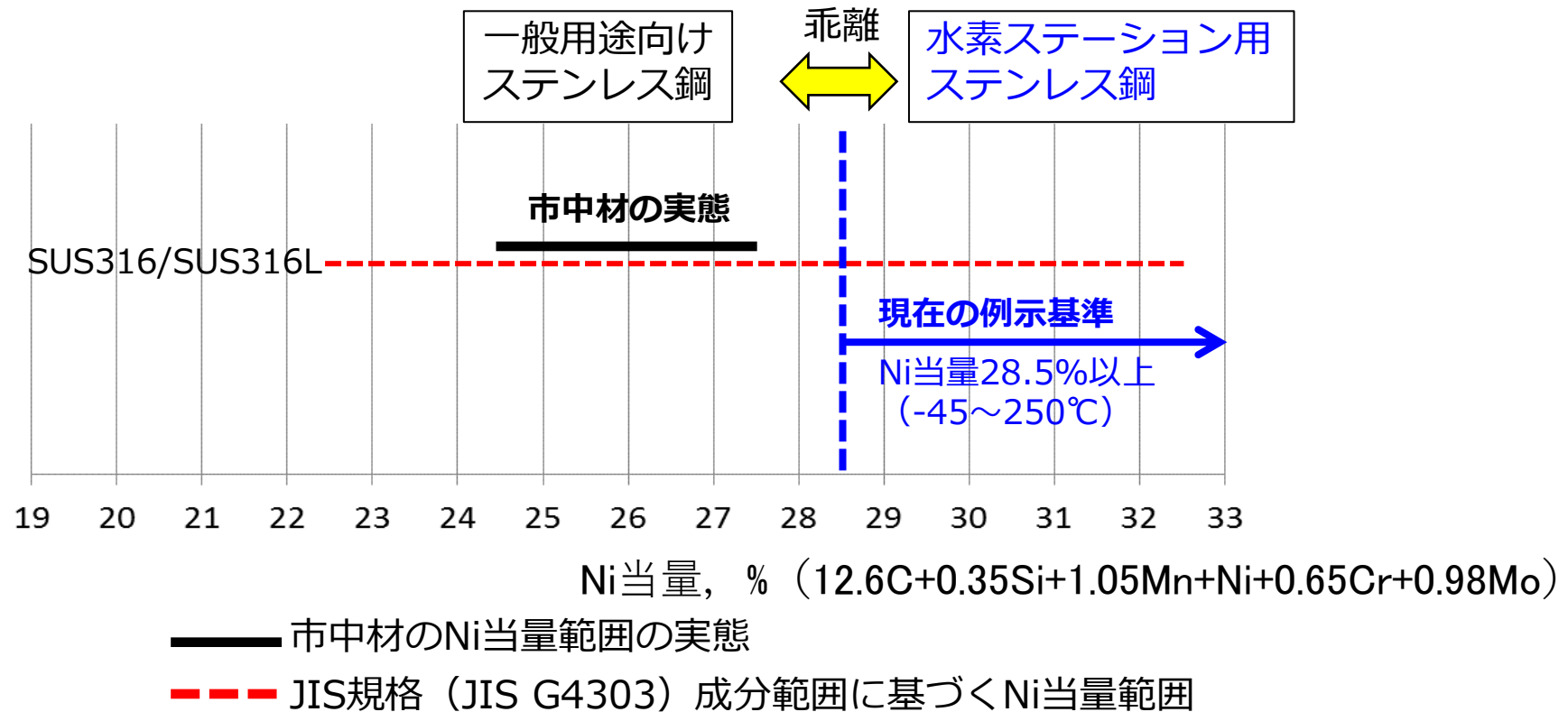
「絞り」指標の水素適合性： $\text{材料の絞り}(75\%) \times \text{RRA}(0.8) \geq \text{材料規格値}(60\%)$

RRA（相対絞り比）0.8に対応するNi当量

- 45℃：Ni当量=28.5%
- 10℃：Ni当量=27.4%
- 20℃：Ni当量=26.3%

< 高圧水素環境で使用可能なSUS316系材料 (2018年時点) >

・水素ステーションで使用する場合と一般的用途に用いる場合との違い



#### <新たな水素特性判断基準の検討>

・従来例示基準における絞りの指標に代わる指標が必要 ⇒伸びの指標を検討

課題1) 伸びデータの信頼性

課題2) 伸び指標における安全性の考え方

課題3) 新指標の実効性

課題4) 従来例示基準との整合性

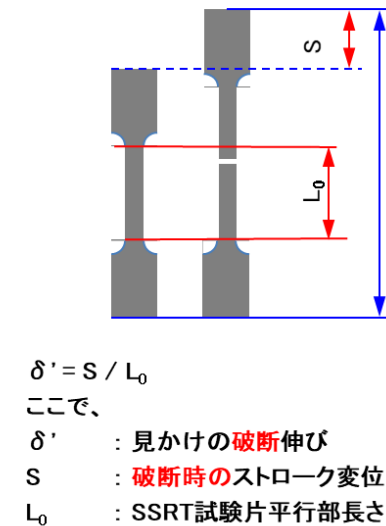
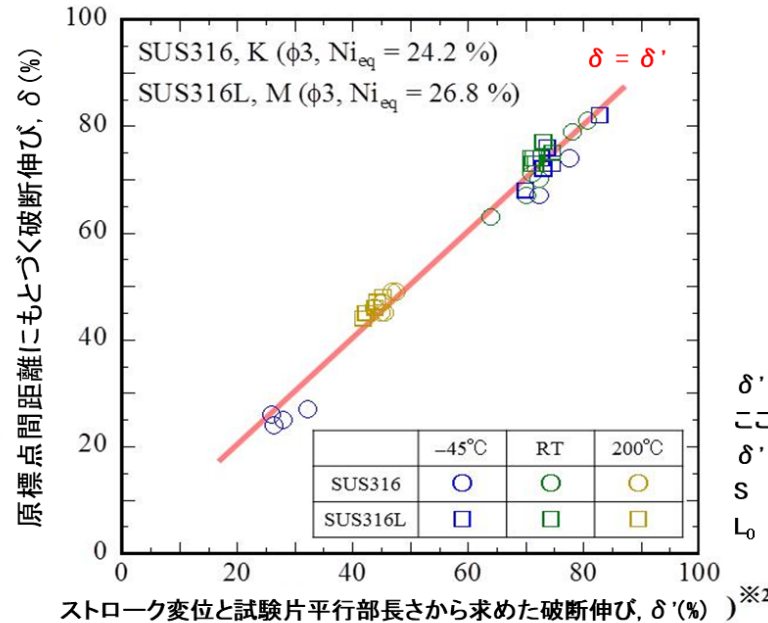
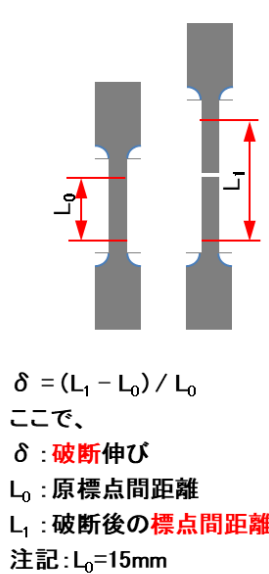
課題5) 材料形状の影響

安全性・利便性・整合性の確保

## 課題1) 伸びデータの信頼性

- ・安全性の議論には蓄積されたデータの活用が重要
- ・従来は伸びのデータの精度に疑問 (絞り基準による例示基準化の原因)

測定方法が2通り、相関性が不明



破断伸びにおける標点間距離と破断時の変位量の関係

原標点間距離またはストローク変位のいずれから得られた伸び値も同等に扱える

結果: 従来の伸びのデータを用いた安全性の議論が可能に

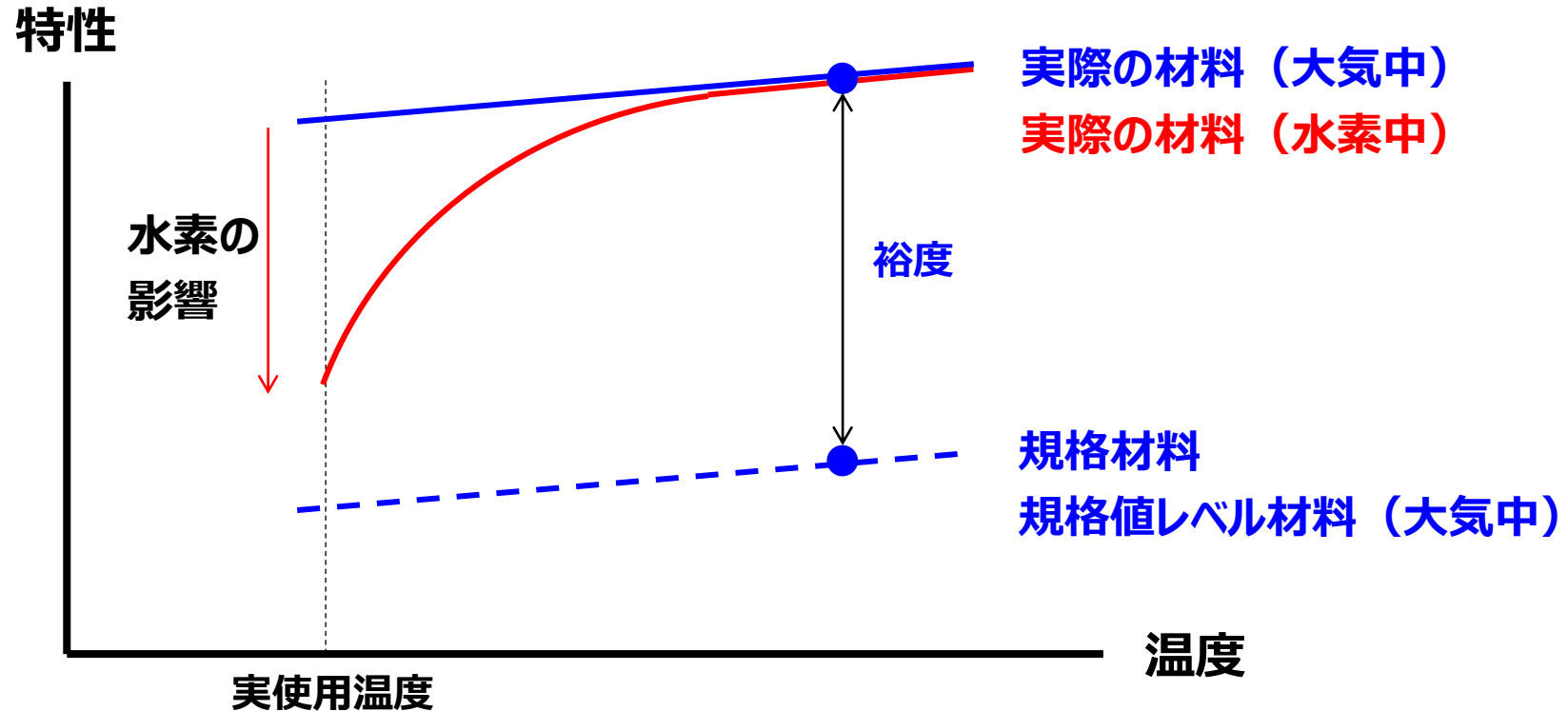


## 課題 2) 伸び指標における安全性の考え方

高圧水素設備で安全に使用できる材料の要件：高圧水素ガス環境下における「強度」と「延性」の確保

### 水素適合性

水素の影響を受けた場合でも、規格材料を大気中で用いた場合の伸びを有していること



実使用条件において水素の影響を受ける場合、相当分の裕度を要求する

## 高圧水素中の強度・延性の要件

<指標：強度⇒引張強さ（TS）、延性⇒伸び（EL）>

**TS（機械的特性値） × RTS ≥ 引張強度の材料規格値**

**EL（機械的特性値） × REL ≥ 伸びの材料規格値**

材料規格値に対する  
現物の実力・裕度

使用条件において  
要求される相対比

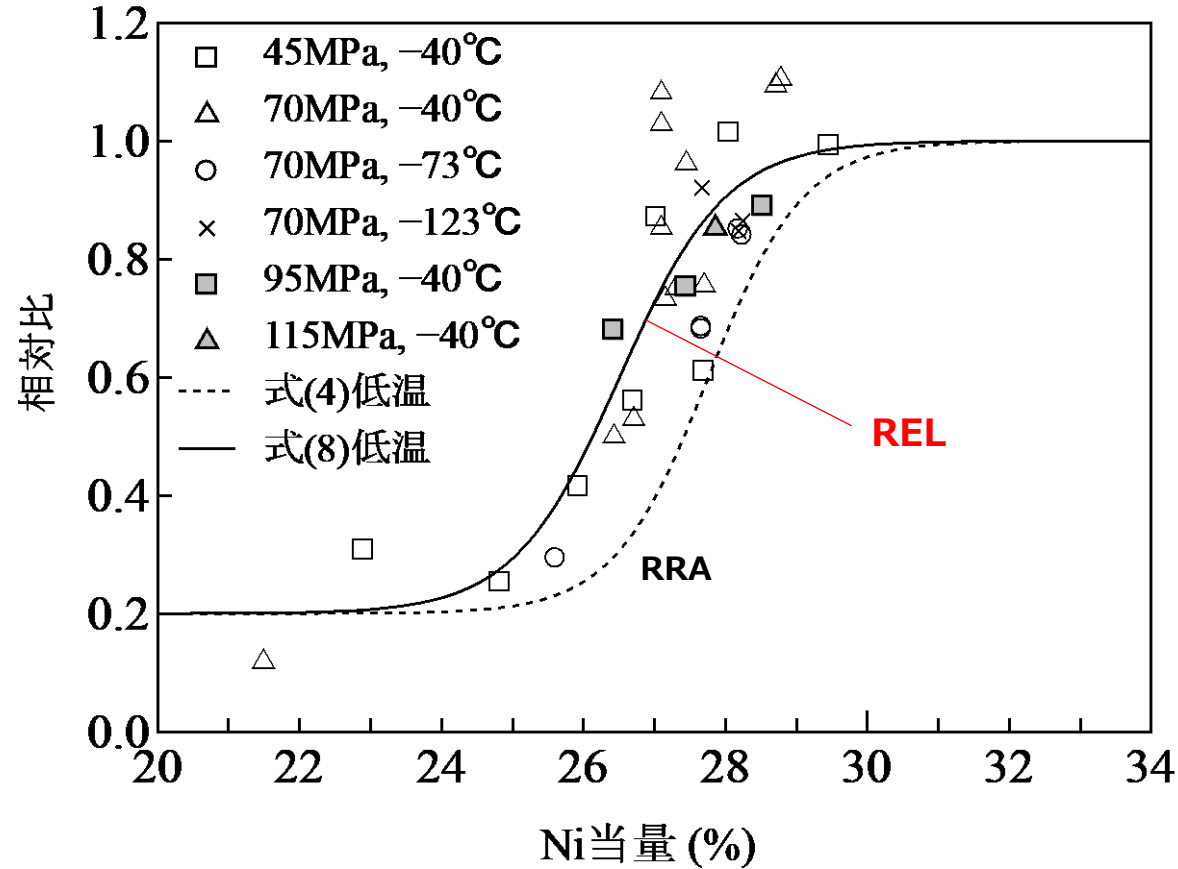
強度については引張強さ（TS）を、延性については伸び（EL）を指標とし、  
実使用環境となる低温高圧水素中における各々の相対比(RTS、REL)との関係において、  
材料の実力値（裕度）を加味した条件を満たすことで、実使用環境下における強度・延性を担保する。

ただし、

- ・ 水素中SSRTでの最大荷重点、一様伸びの確保（RTS= 1）
- ・ 水素中における疲労限度への影響のないこと

RELと材料のNi当量との関連性

高圧ガス誌令和元年6月号 (KHK) より転載



・過去の試験結果を用いたRELとNi当量との相関性

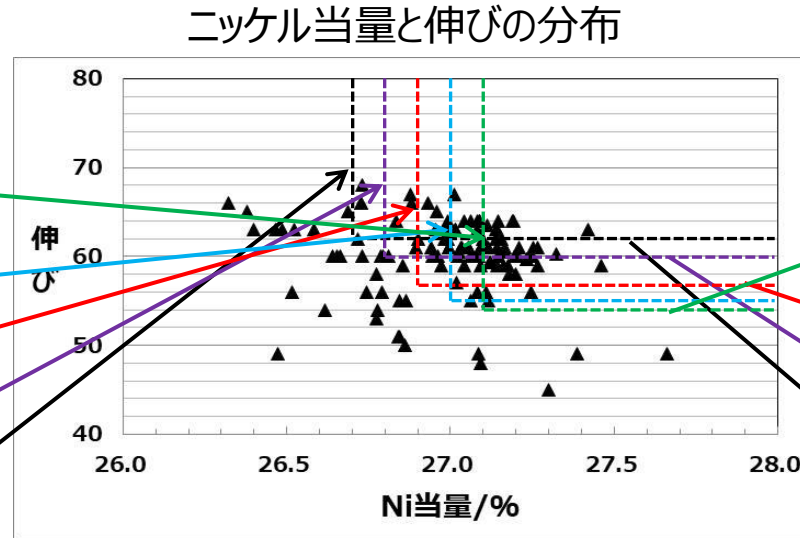


**EL × REL ≥ 伸びの材料規格値 を満足するNi当量と伸びの組合せ**

課題3) 新指標の実効性

実効性のある指標 = 実際に入手可能な材料か

必要特性の組合せ*	
Ni当量	伸び
27.1%以上	54%以上
27.0%以上	55%以上
26.9%以上	57%以上
26.8%以上	60%以上
26.7%以上	62%以上



入手確率**
30%
52%
58%
51%
29%

\*\*収集したミルシート中で必要特性の条件に合致した割合

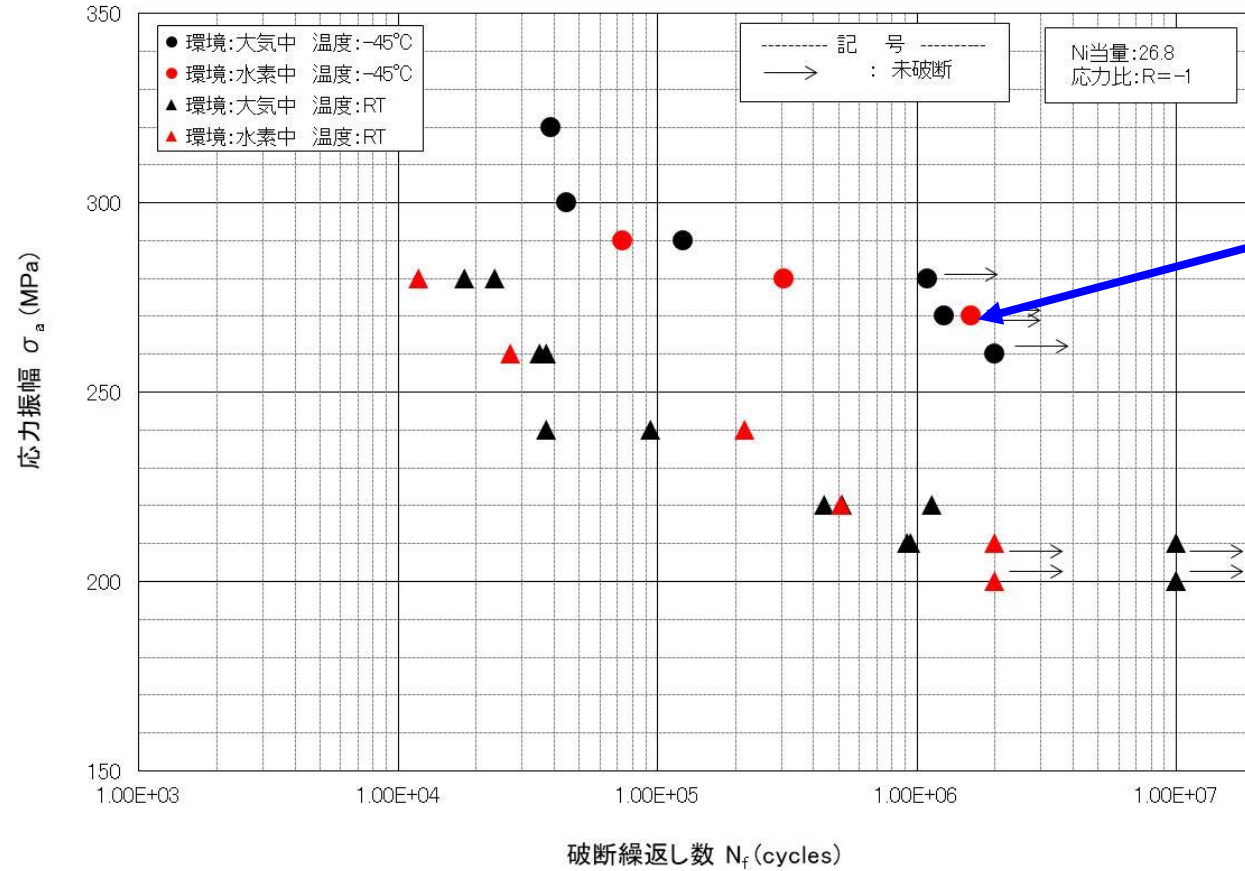
市中材の調査を行い、材料成分と伸びの実績をデータ化



最も入手性の高い組合せを検討、Ni当量26.9%を選択

## 水素中の疲労限度の確認

### <-45°C、100MPa超 水素中疲労試験>



**-45°C、100MPa以上  
水素中161.5万サイクル  
(未破断)**

黒 : 大気中  
 赤 : 水素中  
 ▲ : 室温  
 ● : -45°C

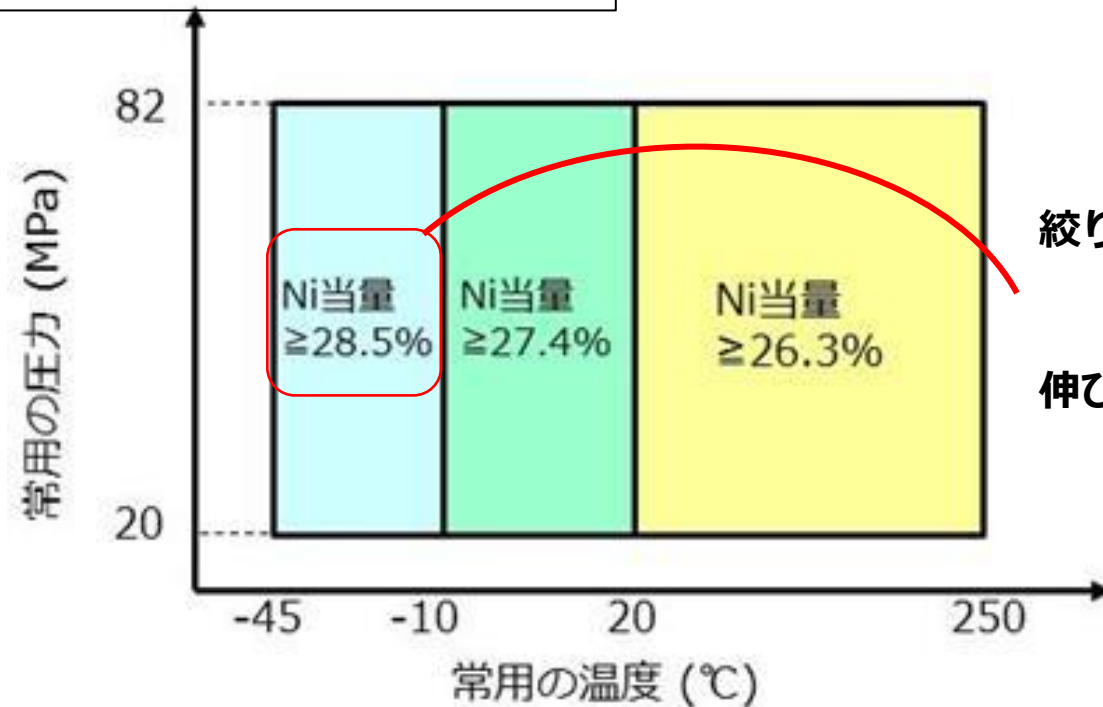
Ni当量26.8%のSUS316Lを用いて確認 ⇒低温・高圧・水素中での疲労限度の低下なし

別途、水素中SSRTで最大荷重点、一様伸びの確保を確認

課題4) 従来例示基準との整合性

従来使用できていた材料は引き続き使用できること

従来例示基準 (Ni当量規制)



絞り : 75%以上が必要  
(材料規格値より高い)

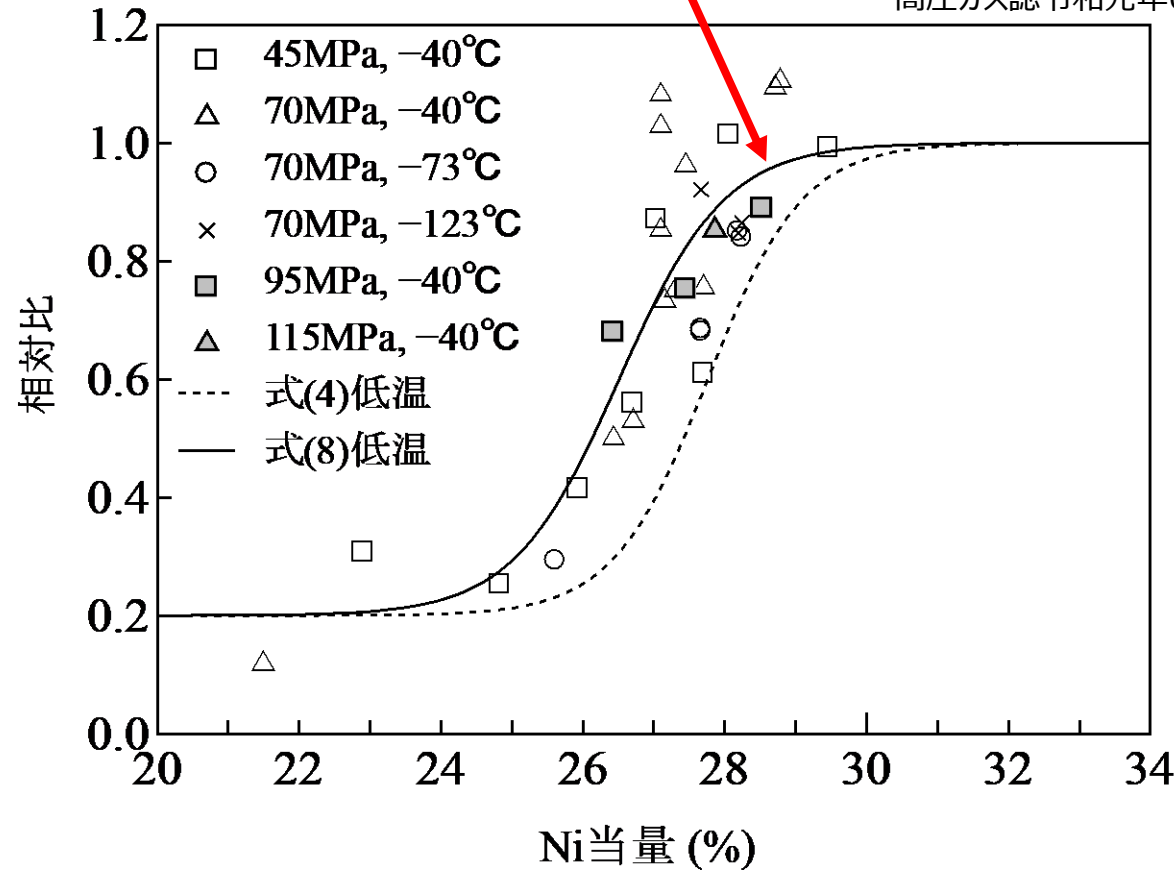
伸び : 規定なし

⇒材料規格の伸びでよい

絞り基準⇒伸び基準 とした場合、従来の材料範囲は包含可能か確認が必要

**Ni当量28.5%以上の領域⇒REL≒1とみなせる**

高圧ガス誌令和元年6月号 (KHK) より転載



**Ni当量28.5%以上⇒水素中で伸びは低下しない ⇒規格値で良い**  
**絞りに関しては裕度を要求しない ⇒規格値で良い**

**結論：Ni当量28.5%以上の場合は単にJIS規格材であればよい。**

### 課題5) 材料形状の影響 棒、管などの材料の形状によって伸び (EL) の規格値は異なる

<SUS316/316L JIS規格値>

規格材料	種類記号	化学成分								機械的特性							
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	付帯条件	YS / MPa	TS / MPa	El / %	RA / %	HB		
ステンレス鋼棒	SUS316	≦ 0.08	≦ 1.00	≦ 2.00	≦ 0.045	≦ 0.030	10.00 ~ 14.00	16.00 ~ 18.00	2.00 ~ 3.00		≧ 205	≧ 520	≧ 40	≧ 60	≦ 187		
G4303(2005)	SUS316L	≦ 0.030					12.00 ~ 15.00			≧ 175	≧ 480	≧ 60					
熱間圧延 ステンレス鋼板 及び鋼帯	SUS316	≦ 0.08					10.00 ~ 14.00			≧ 205	≧ 520	N/A					
G4304(2010)	SUS316L	≦ 0.030					12.00 ~ 15.00			≧ 175	≧ 480	N/A					
冷間圧延 ステンレス鋼板 及び鋼帯	SUS316	≦ 0.08					10.00 ~ 14.00			≧ 205	≧ 520	N/A					
G4305(2010)	SUS316L	≦ 0.030					12.00 ~ 15.00			≧ 175	≧ 480	N/A					
配管用 ステンレス鋼管	SUS316TP	≦ 0.08					10.00 ~ 14.00			11号 4号	≧ 205	≧ 520		≧ 35 ≧ 30		N/A	N/A
G3459(2004)	SUS316LTP	≦ 0.030					12.00 ~ 16.00			11号 4号	≧ 175	≧ 480		≧ 35 ≧ 30		N/A	N/A
圧力容器用 ステンレス鋼鍛鋼品	SUSF316	≦ 0.08					10.00 ~ 14.00			≧ 205	≧ 520	≧ 43		≧ 50		≦ 187	
	G3214(2009)	SUSF316L					≦ 0.030			12.00 ~ 15.00	≧ 175	≧ 480		≧ 29		≧ 45	≦ 187

**形状と伸び規格値**  
 棒・板・帯⇒40%  
 管⇒35% (11号試験片の場合)  
 鍛鋼⇒29%



## 材料の形状に応じた伸びの規格値と水素適合性を基に新基準を提案

### 本事業での検討結果

新たな水素特性判断基準：延性のパラメータに「伸び」の導入を検討

- ・ 伸びデータの信頼性の検証
- ・ 実効性、規格との整合性等の検討
- ・ 水素中での強度低下なし（RTS=1）、疲労限度の低下なし

**「伸び」指標の水素適合性：材料の伸び×REL ≥ 材料規格値**

### <研究成果を例示基準に反映>

(旧)

温度範囲	絞り	伸び	Ni当量
-45℃～250℃	材料規格 (60%) に対し 75%以上	材料規格 の通り	28.5%以上
-10℃～250℃			27.4%以上
20℃～250℃			26.3%以上

### (新) 2020年11月に例示基準改正

温度範囲	絞り	伸び	Ni当量
-45℃～250℃	材料規格 の通り	材料規格 の通り	28.5%以上
-10℃～250℃			27.4%以上
20℃～250℃			26.3%以上

温度範囲	材料形状	伸び	Ni当量
-45℃～250℃	棒	57%以上	26.9% 以上
	管	50%以上	
	鍛鋼	42%以上	

### 3. 研究開発成果について

＜現在の一般則例示基準9.2 表(三)＞

表(三)

材料の種類	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)
鍛鋼	JIS G 3214(2009)圧力容器用ステンレス鋼 鍛鋼品 (SUSF316、SUSF316L に限る。)	-45℃以上 250℃以下 28.5 以上 (伸びが 42%以上にあつては、26.9 以上)
		-10℃以上 250℃以下 27.4 以上 (伸びが 42%以上にあつては、26.9 以上)
		20℃以上 250℃以下 26.3 以上
管	JIS G 3459(2016)配管用ステンレス鋼管 (SUS316TP、SUS316LTP に限る。)	-45℃以上 250℃以下 28.5 以上 (伸びが 50%以上にあつては、26.9 以上)
		-10℃以上 250℃以下 27.4 以上 (伸びが 50%以上にあつては、26.9 以上)
		20℃以上 250℃以下 26.3 以上
棒・板	JIS G 4303(2012)ステンレス鋼棒 (SUS316、SUS316L に限る。(注 2))	-45℃以上 250℃以下 28.5 以上 (伸びが 57%以上にあつては、26.9 以上)
	JIS G 4304(2012)熱間圧延ステンレス鋼板 及び鋼帯 (SUS316、SUS316L に限る。)	-10℃以上 250℃以下 27.4 以上 (伸びが 57%以上にあつては、26.9 以上)
	JIS G 4305(2012)冷間圧延ステンレス鋼板 及び鋼帯 (SUS316、SUS316L に限る。)	20℃以上 250℃以下 26.3 以上

伸び指標の検討の結果、追記された部分

絞り75%以上の規定を撤廃

(注 1) ニッケル当量は次式によって求めること。

$$\text{ニッケル当量 (質量\%)} = 12.6 \times C + 0.35 \times Si + 1.05 \times Mn + Ni + 0.65 \times Cr + 0.98 \times Mo$$

ここで、C は炭素、Si はケイ素、Mn はマンガン、Ni はニッケル、Cr はクロム及び Mo はモリブデンの各質量分率の値 (%) を示す。

また、「伸び」とは、規格材料の引張試験又はミルシートにおける伸びを示す。

(注 2) ただし、熱間加工ままの状態を除く。

## <今年度の検討予定>

伸び指標の水素適合性基準

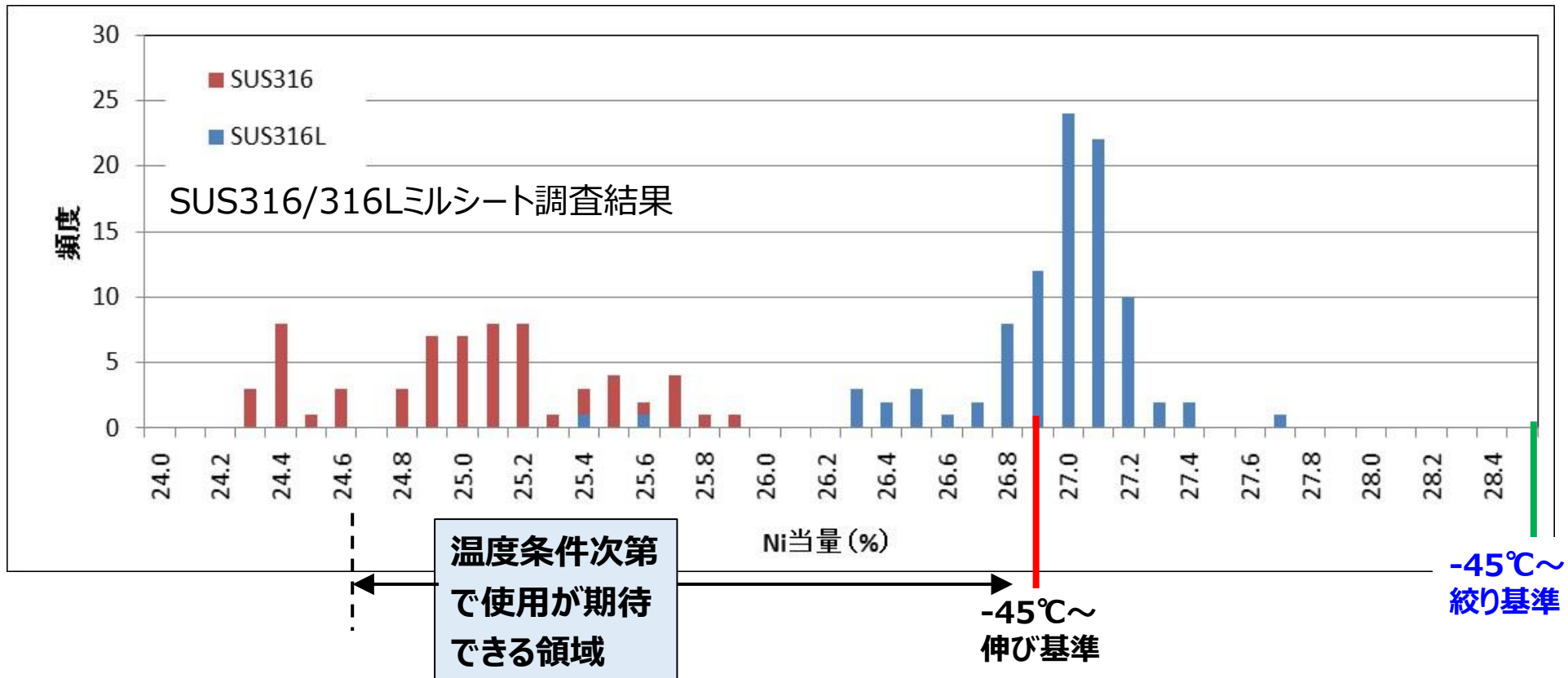


**【適材適所化】**

現状：-45℃基準でのNi当量規定

温度範囲	材料形状	伸び	Ni当量
-45℃~250℃	棒	57%以上	26.9% 以上
	管	50%以上	
	鍛鋼	42%以上	

**基準の温度下限を高く ⇒ さらにNi当量を下げた材料が使用可能**

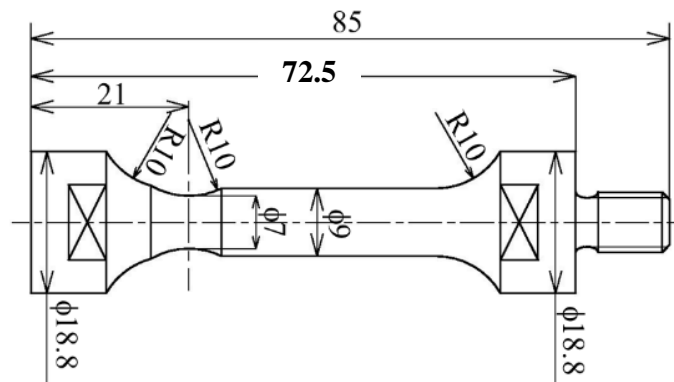


## ＜概要＞

- ▶ 水素ガス中での軸荷重疲労試験における課題
  - ・ 試験機摺動部からの水素漏れを避けるため、低速（1Hz）での試験となる
- ▶ 共振疲労試験法のメリット
  - ・ 低温・水素ガス中における疲労特性評価が可能
  - ・ 高速での試験実施が可能

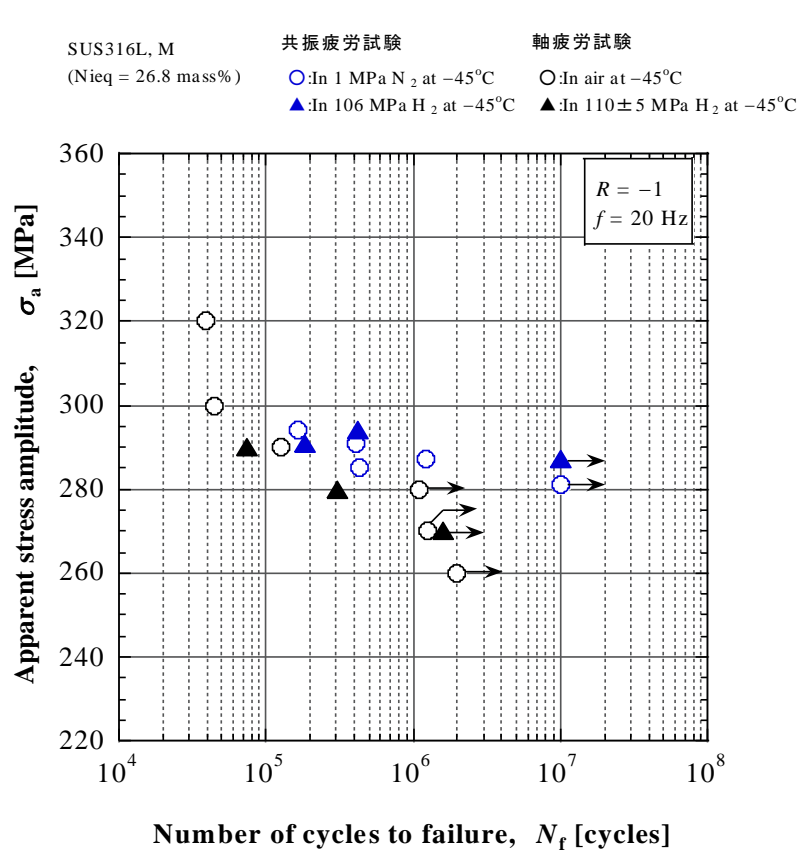
軸荷重疲労：1Hz

共振疲労：20Hz

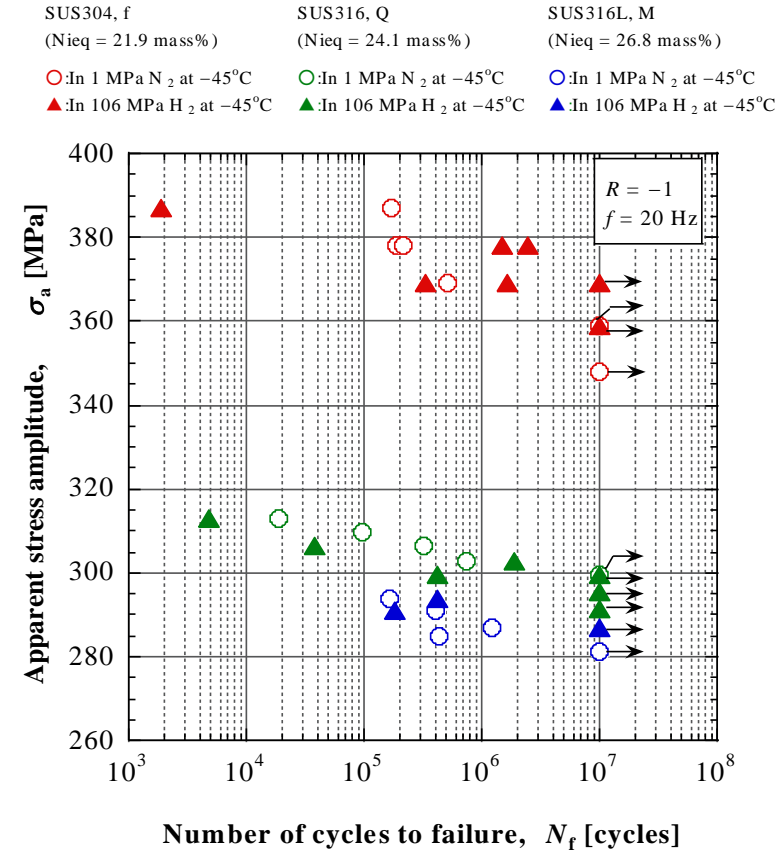


120MPa水素ガス中共振疲労試験機

#### <試験結果>





軸疲労試験と共振疲労試験の比較



$\gamma$ 系ステンレス鋼の共振疲労試験結果

- SUS316Lの共振疲労試験結果において、試験片表面の塑性変形を考慮して応力振幅値の補正を行ったところ、S-Nデータは軸荷重疲労試験のものと同等となった。
- オーステナイト系ステンレス鋼では、Ni当量の違いによらず水素ガス中での疲労限度低下は認められない。

## <応力補正の必要性>

	引張圧縮疲労試験	共振疲労試験
		
負荷形式	引張圧縮	曲げ
制御	荷重制御	加振力制御
負荷応力の計測	荷重 / 断面積	試験片表面のひずみ値 × ヤング率 (見かけの負荷応力)

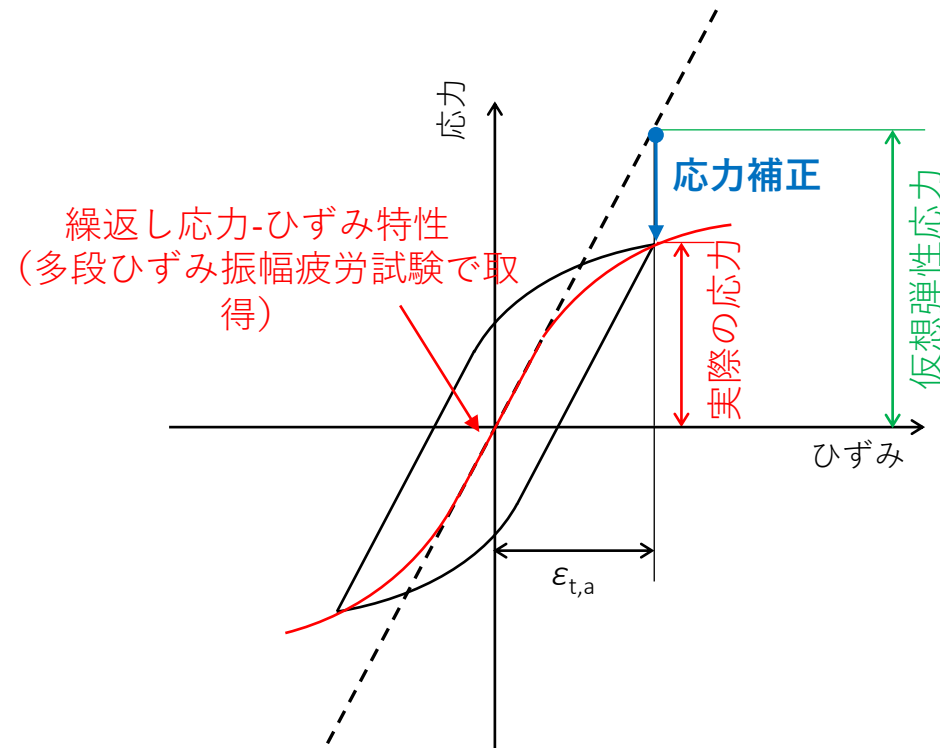


試験片表面では繰返し塑性変形が生じているため、弾性変形を仮定して求めた応力は真の値よりも高めになってしまう

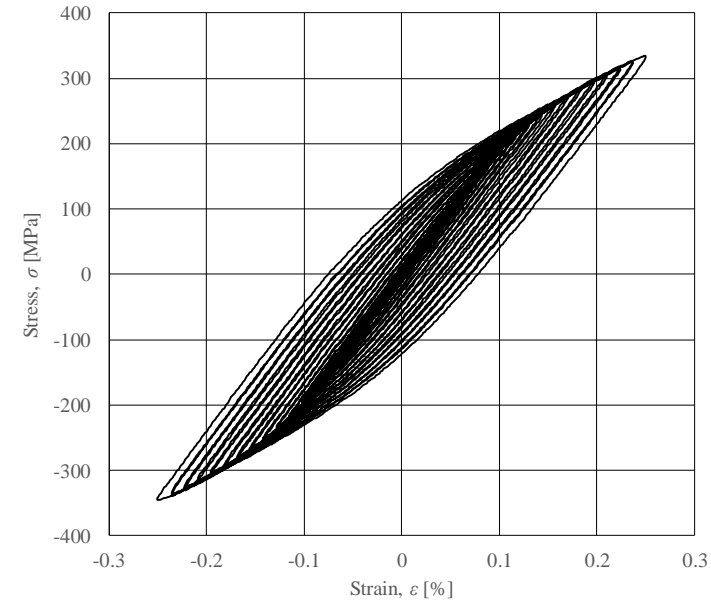
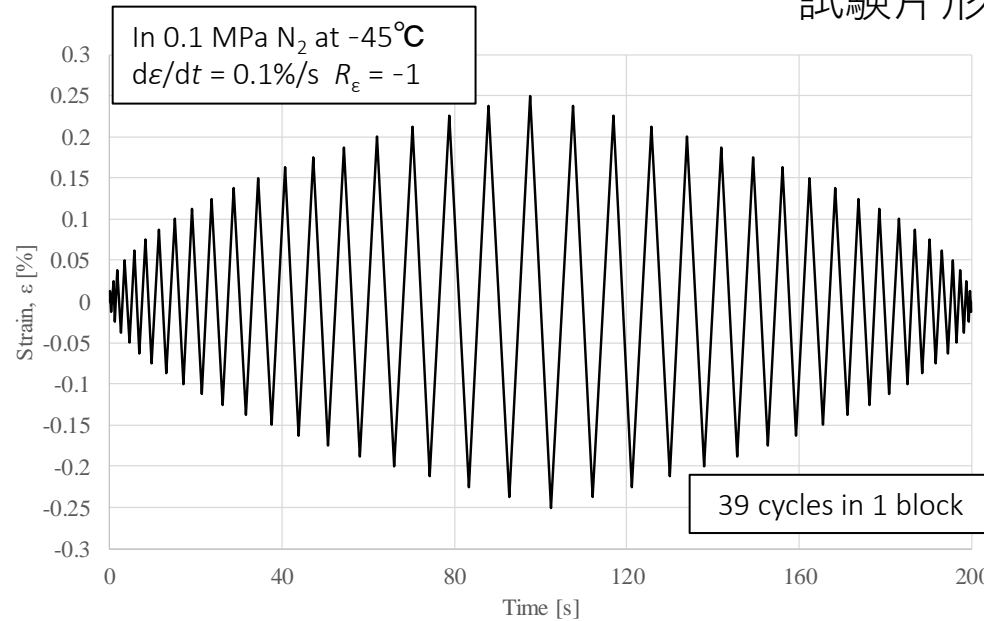
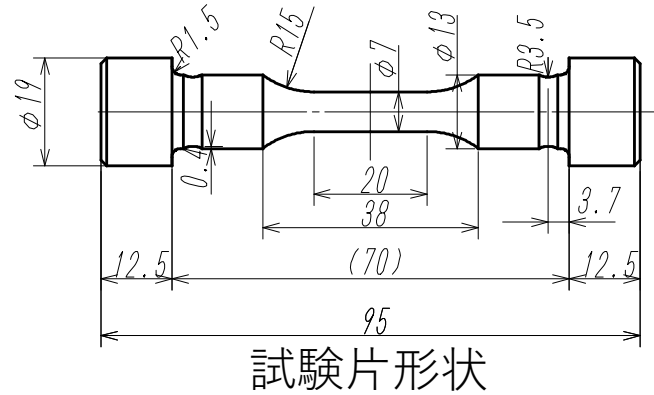


## ＜応力補正の必要性＞

- 室温での共振疲労試験において、弾性変形のみが生じると仮定し、 $\sigma_{app} = E \cdot \varepsilon_{t,a}$  を用いて応力（仮想弾性応力）を算出していた。
- 一方、 $-45^{\circ}\text{C}$ での共振疲労試験において、降伏点を超える応力の負荷が想定されるため、弾塑性変形の考慮が必要となる。
- そこで、多段ひずみ振幅疲労試験で取得した繰返し応力-ひずみ特性より、共振疲労試験で負荷された応力の補正を行った。



## <応力補正方法>

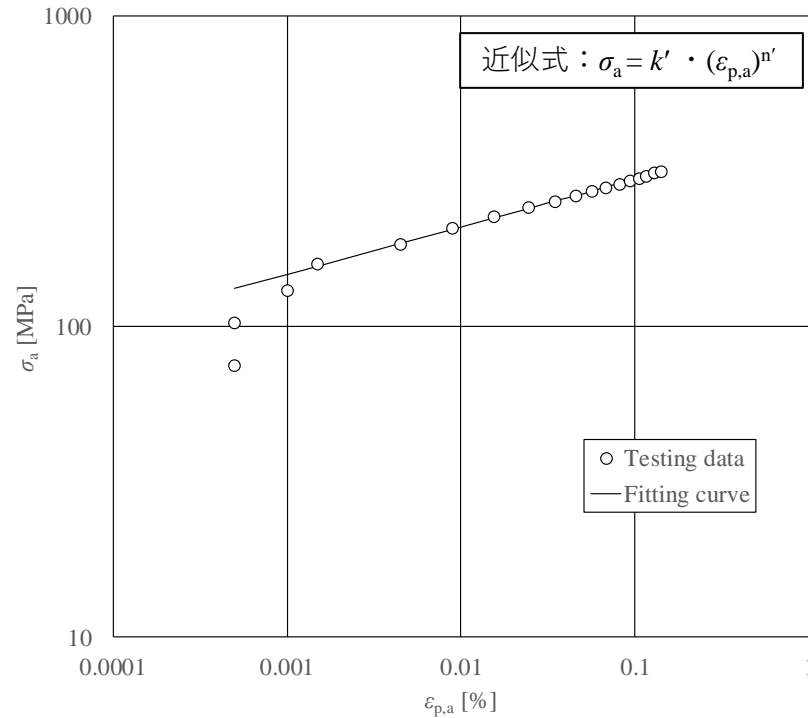


インクリメンタルステップ試験の制御波形

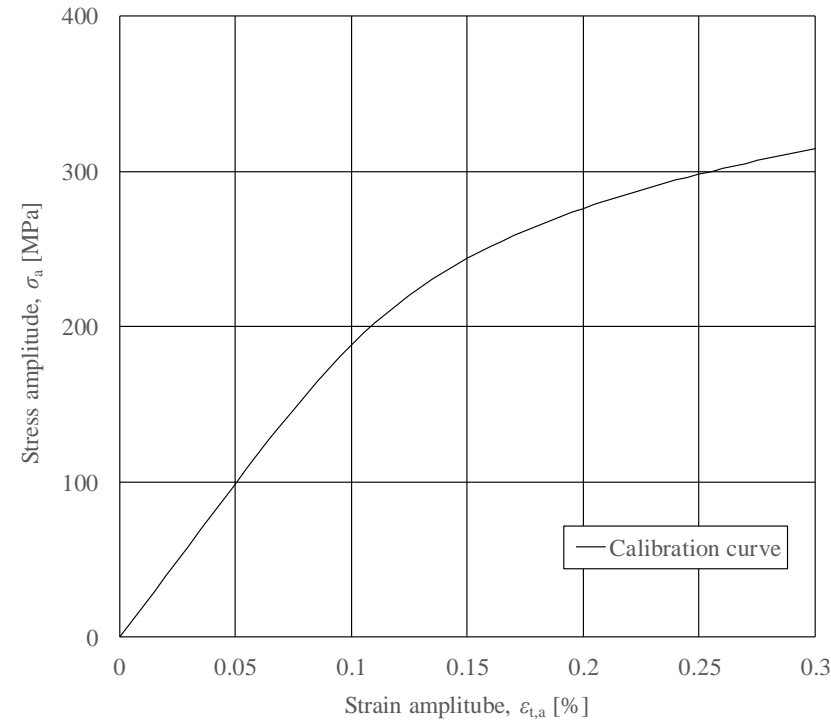
応力-ひずみ曲線

- 多段ひずみ振幅試験（インクリメンタルステップ試験）を実施。  
1 ~ 20 cycleで段階的に振幅を増加させ, 21 ~ 39 cycleで減少させる.
- ヒステリシスループを描いた応力-ひずみ曲線が得られる.





塑性ひずみと応力振幅の関係



校正曲線

- 応力振幅 $\sigma_a$ と塑性ひずみ $\varepsilon_{p,a}$ の関係は、式  $\sigma_a = k' \cdot (\varepsilon_{p,a})^{n'}$  で表すことができる<sup>1)</sup>。  
 $k'$ ：繰返し弾性係数     $n'$ ：繰返し硬化係数
- $\varepsilon_{p,a}$ を算出し、 $\sigma_a$ と $\varepsilon_{p,a}$ を両対数でプロットすると直線関係となる。
- 共振疲労試験におけるひずみ振幅から、校正曲線を用いて応力を算出する。

1) 日本材料学会編，改定材料強度学

開発項目②汎用ステンレス鋼の冷間加工材に関する研究開発

目標：水素適合性、許容引張応力等を検討し、基準化案を作成

#### <水素インフラにおける冷間加工のニーズ>

- ・曲げ ⇒各種継手を使用せずに配管の向きを変更
- ・成形 ⇒素材を製品形状に近づけ、切削ロスを低減
- ・高強度化 ⇒薄肉化、軽量化

冷間加工は例示基準化されておらず、許容引張応力が設定されていない

#### <検討対象>

鋼種	素材形状	加工方法	備考
SUS316系 SUS304系	管・棒・板	板：冷間圧延 棒：冷間引抜	従来知見における素材成形方法と整合
SUS305	棒	冷間引抜	良好な切削性 量産時を想定

## ＜供試材による水素適合性の検証＞

★化学成分表(mass%) : 狙い

180kg	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	N	Cu	Ni当量
SUS316	0.020	0.40	1.40	12.00	16.40	2.10	0.01	0.15	26.6
SUS316L	0.020	0.40	1.75	12.50	17.50	2.55	0.01	0.15	28.6
SUS304L	0.020	0.40	1.75	9.30	18.40	-	0.01	0.15	23.5
SUS304LN	0.020	0.40	1.75	11.00	18.40	-	0.20	-	25.2

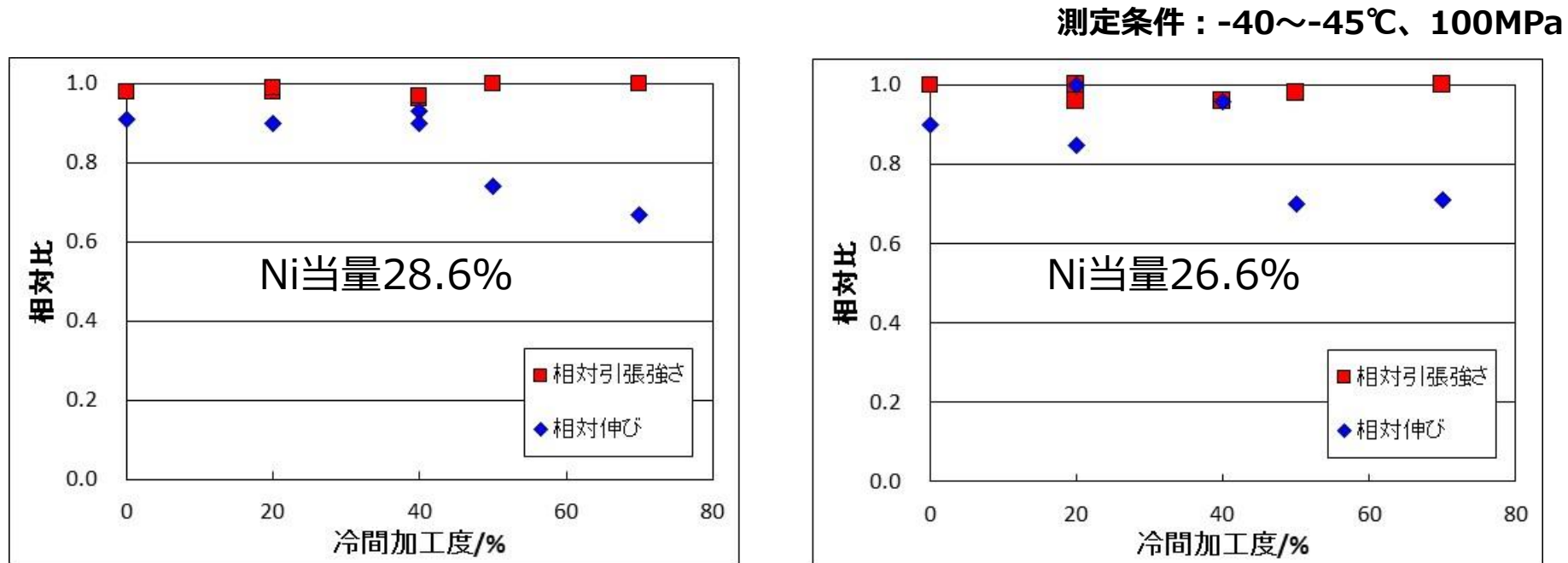
★供試素材製造方法



★冷間加工方法

冷間圧延 : 肉厚減少 0 ~ 70%

## &lt;水素適合性に関する冷間加工の影響 (SUS316L) &gt;



冷間加工度40%までRELは低下しない

RTSの方が冷間加工による影響を受けにくい

冷間加工度40%まで母材の水素適合性を維持

<大型の冷間加工材を用いた水素適合性等の検討（SUS316L棒・冷間引抜）>

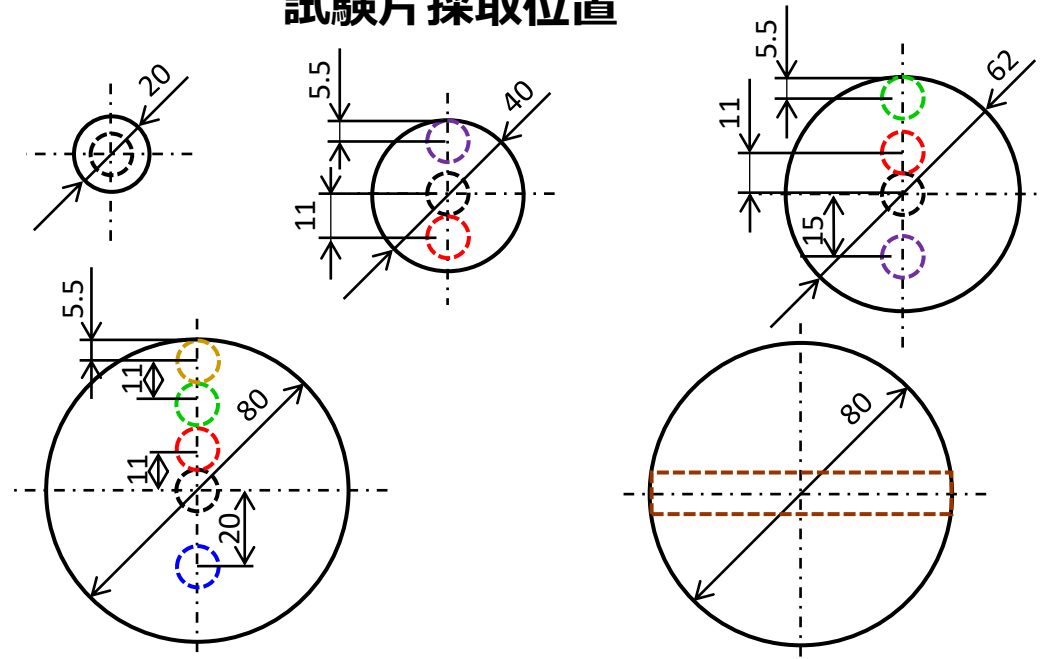
- ・大規模な水素の利用 ⇒ 高圧水素機器・部品の大型化・重量化
- ・大型の冷間加工材 ⇒ 材料内部の加工不均一

大型の冷間加工材内部の各種特性のばらつき等を検証

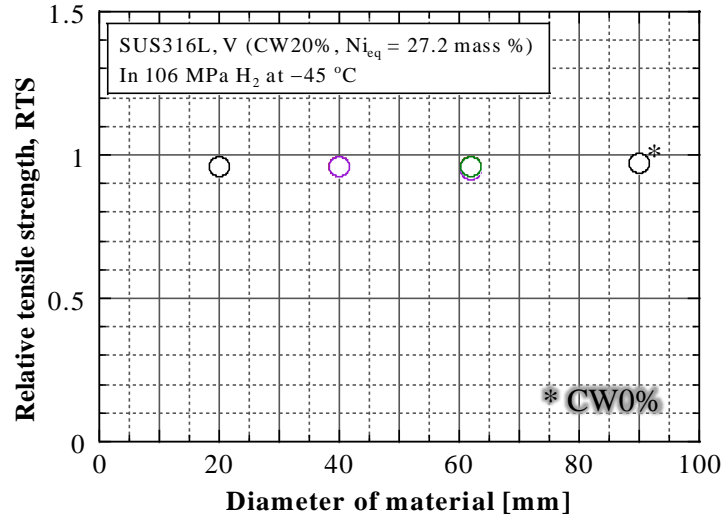
試料（冷間引抜材）  
 SUS316L（Ni当量27.2%）  
 加工度：20%および40%  
 加工後サイズ：20～80mm

- ：材料中心から0mm
- ： // 10mm
- ： // 15mm
- ： // 20mm
- ： // 25mm
- ： // 35mm

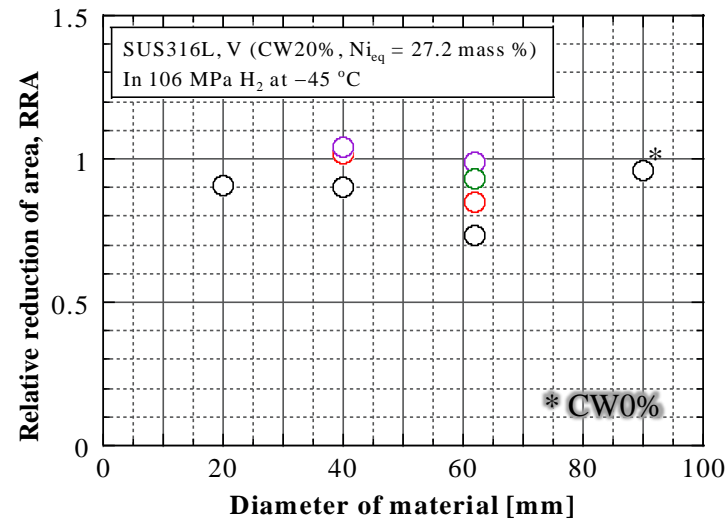
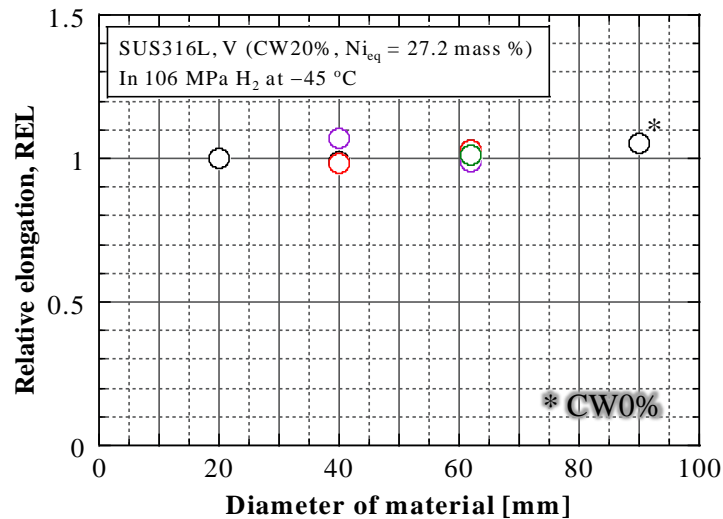
試験片採取位置



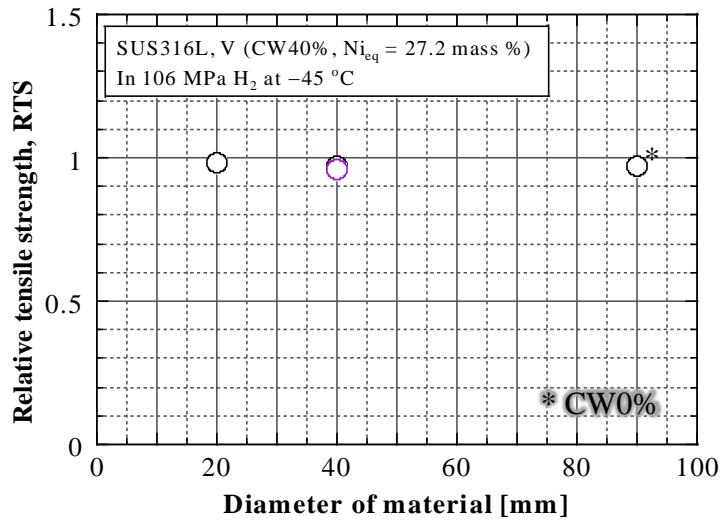
## <SSRT試験結果 (SUS316L CW20% -45°C 材料径・試験片採取位置依存性) >



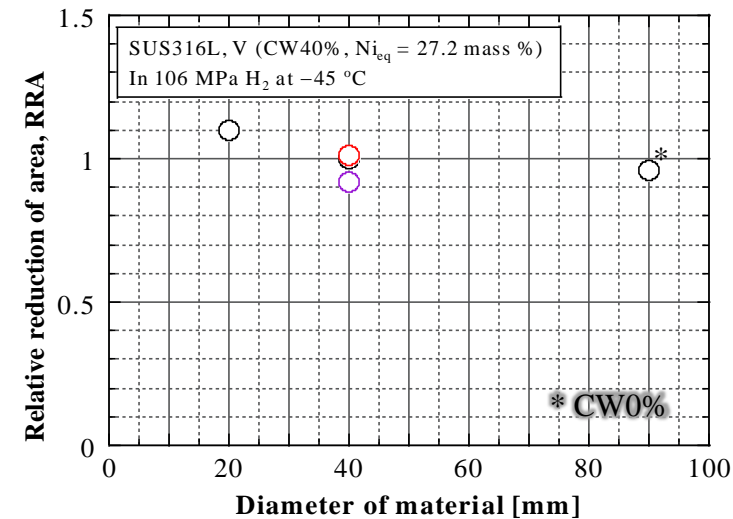
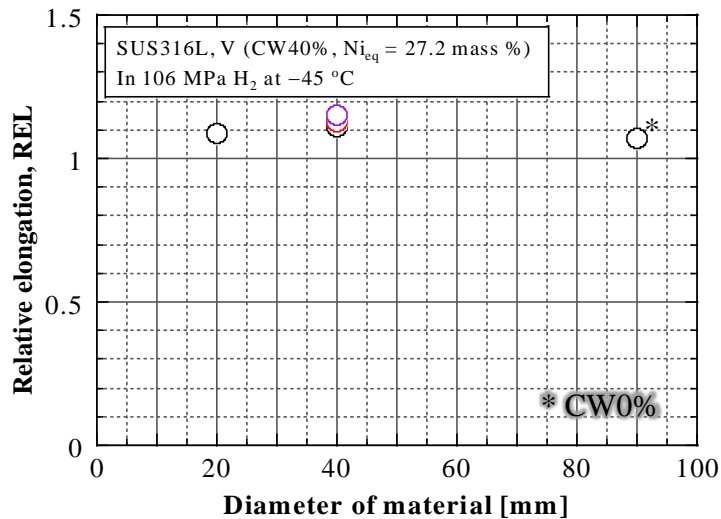
材料中心からの試験片採取位置 [mm]						
0	10	15	20	25	35	0 (R方向)
○	○	○	○	○	○	○



## <SSRT試験結果 (SUS316L CW40% -45°C 材料径・試験片採取位置依存性) >



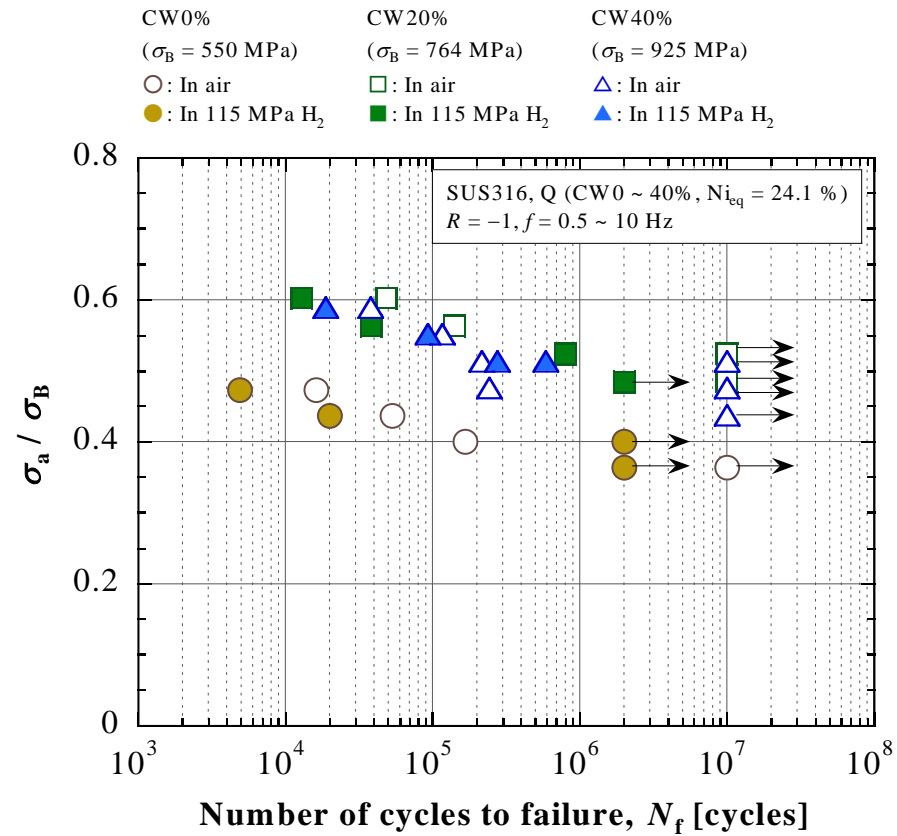
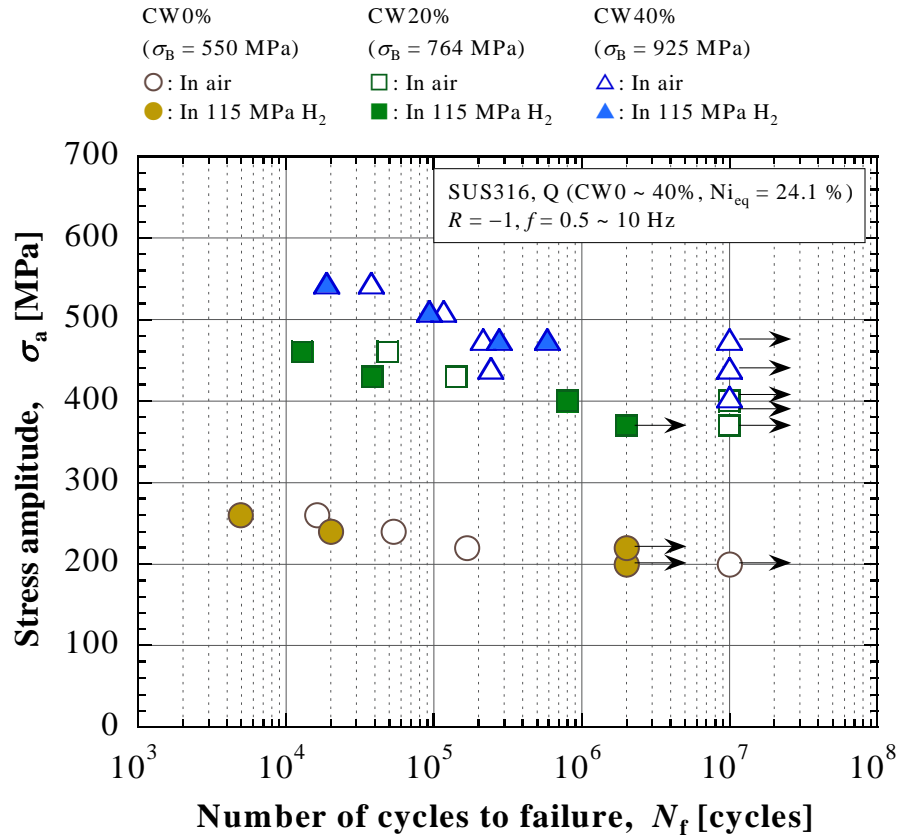
材料中心からの試験片採取位置 [mm]						
0	10	15	20	25	35	0 (R方向)
○	○	○	○	○	○	○



➤ 材料径または試験片採取位置にかかわらず，SUS316Lは同様のSSRT特性を示した。

## <疲労寿命試験結果 (SUS316 板・冷間圧延 CW0~40% S-N曲線) >

<SUS316、Ni当量24.1%>



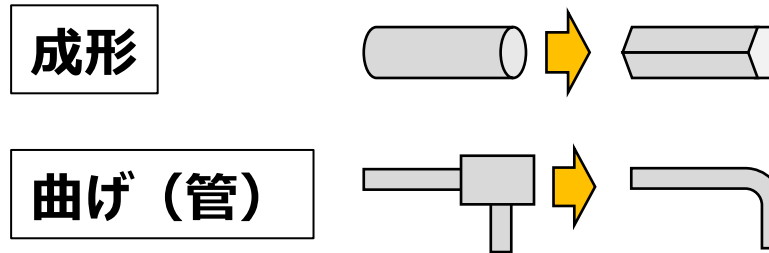
冷間加工によって疲労限度も上昇

冷間加工でも疲労限度は水素の影響を受けない



## &lt;成形・曲げ&gt;

例示基準相当SUS316/316Lの加工度40%までの冷間加工  
⇒高圧水素の影響なし（REL、RTSの低下なし）



管の曲げ：加工度は曲げ部の減肉率に相当  
4D半径曲げの加工度は5%程度

⇒特定則記載の冷間加工範囲では水素の影響は考慮不要

## &lt;高強度化&gt;

(検討中) 加工後の許容引張応力設定

課題：加工後の強度保証方法

- ・加工材内部の機械的特性均一性・異方性に関する調査
- ・高圧水素に関する冷間加工の基準案検討（棒・管）

## &lt;強加工&gt;

## 汎用ステンレス鋼冷間強加工材の水素中SSRT特性【JRCM】

## 目的

オーステナイト系および準安定オーステナイト系の汎用ステンレス鋼の冷間強加工材の常温および低温における高圧水素中のSSRT特性を評価し、水素適合性に及ぼす冷間強加工の影響を明らかにする。

試験評価対象鋼種(Ni当量：平山の式)

- SUS316L : Fe-17.5Cr-13.0Ni-2.55Mo-1.75Mn(Ni当量=28.6)
- SUS316 : Fe-16.4Cr-12.0Ni-2.1Mo-1.4Mn(Ni当量=26.6)
- SUS304L : Fe-18.4Cr-9.3Ni-1.75Mn(Ni当量=23.5)
- SUS301L : Fe-16.8Cr-6.8Ni-1.75Mn(Ni当量=19.9)

上記鋼種の冷間強加工材(断面減少率50%、70%)の低温および常温における水素適合性をSSRT試験により評価し、水素適合性に及ぼすオーステナイト相の安定化度(Ni当量)、試験温度、冷間加工プロセス、加工度の影響について検討する。

## 実験方法

## (1)実験用素材の作製(日本製鉄殿と共通素材を使用)

前記4鋼種について真空溶解により180kg鑄塊を溶製し、これ熱間鍛造および溶体化処理を施して板材および丸棒材の素材を得て供試材とした。

## (2)冷間強加工

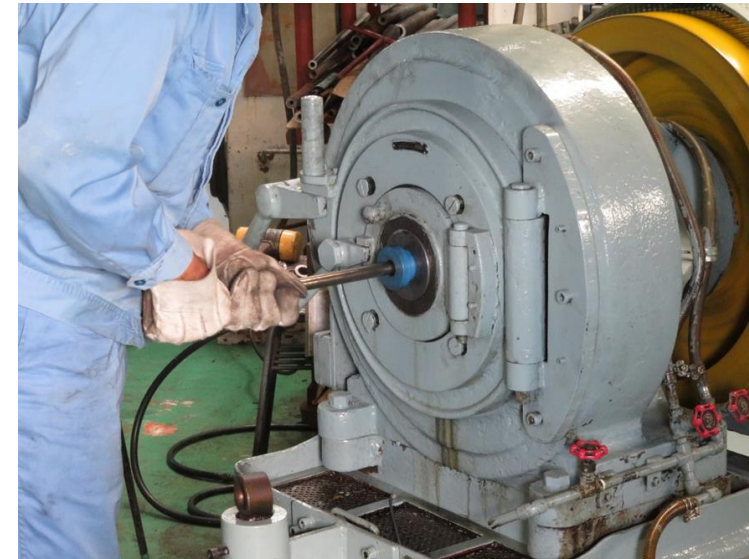
## ①冷間加工プロセス

(a) 冷間圧延

(b) 冷間鍛造(スウェージング加工: 右図)

## ②冷間加工度

冷間圧延板材、冷間鍛造丸棒材  
共に断面減少率で50%と70%



スウェージング加工の様子

## (3)SSRT試験

## ①試験片形状(直径2.5 or 3mm: 右図)

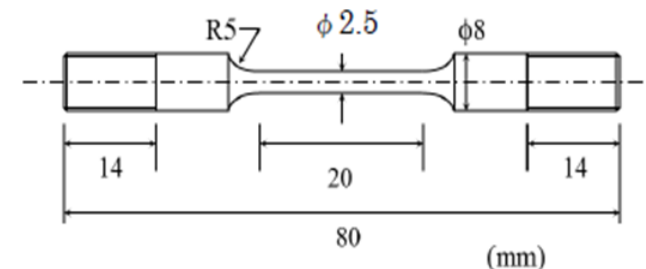
## ②試験条件

(a) 低温:  $-40^{\circ}\text{C}$ 

雰囲気: 70MPa水素中、0.1MPa窒素中

(b) 常温

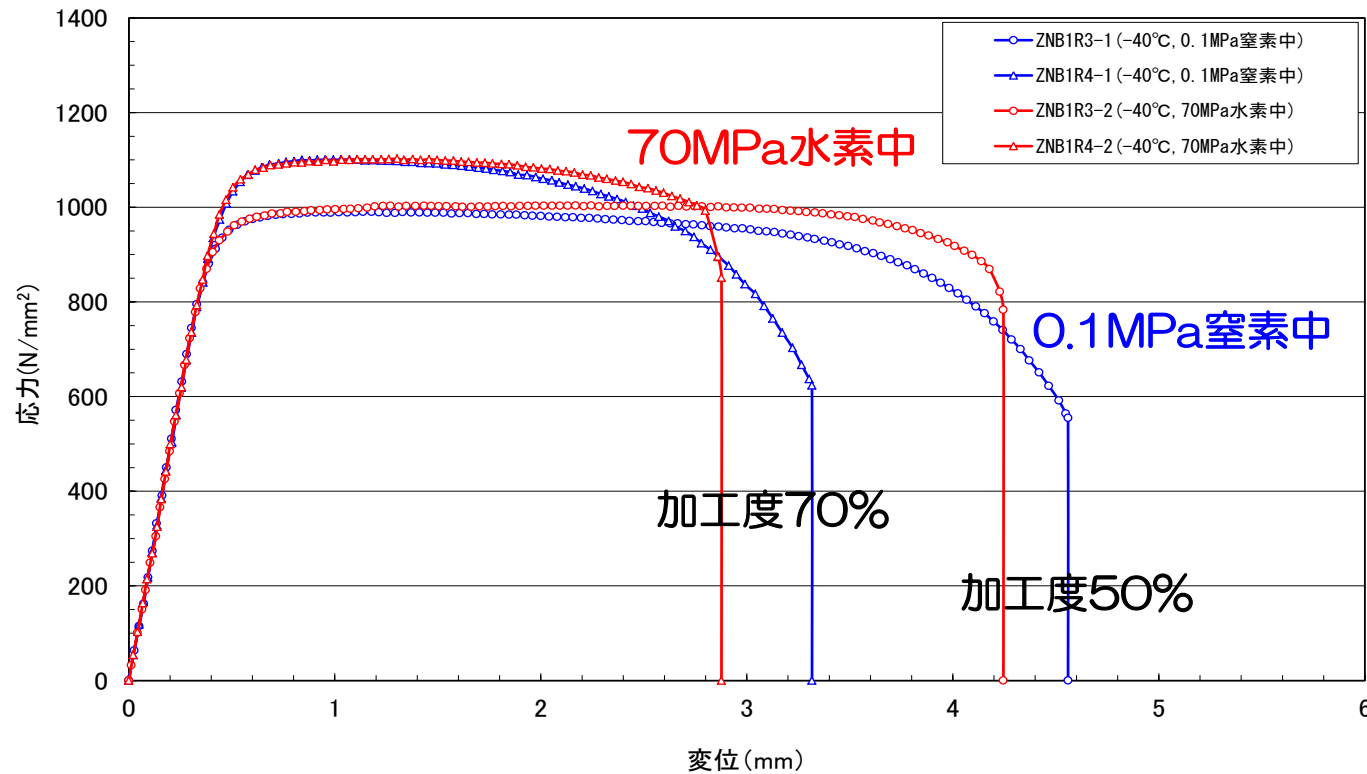
雰囲気: 85(or90)MPa水素中、大気中



SSRT試験片の形状

## 実験結果：SUS316L冷間強加工材(圧延板材)の低温水素中SSRT結果

Ni当量が最も高いSUS316L(Ni当量28.6)においても低温においては、冷間強加工材は加工度50%、70%共に水素中では明らかに延性が低下し、水素の影響が認められた。



SUS316L冷間強加工材(圧延板材)の低温SSRTにおける応力-変位曲線

実験結果：オーステナイト系ステンレス鋼冷間強加工(圧延)材の低温SSRT特性

鋼種	加工度 (%)	環境	最大応力 (MPa)	RTS	伸び (%)	REL	絞り (%)	RRA
SUS316L (Ni当量:28.6)	50	窒素	990	1.01	23	0.74	77	0.78
		水素	1003		17		60	
	70	窒素	1101	1.00	21	0.67	74	0.63
		水素	1103		14		47	
SUS316 (Ni当量:26.6)	50	窒素	974	0.98	20	0.70	78	0.43
		水素	957		14		33	
	70	窒素	1092	1.00	14	0.71	76	0.43
		水素	1093		10		33	
SUS304L (Ni当量:23.5)	50	窒素	1059	1.01	36	0.17	69	0.33
		水素	1067		6		23	
	70	窒素*	1235	1.00	13	0.31	68	0.12
		水素*	1236		4		8	
SUS301L (Ni当量:19.9)	50	窒素*	1379	(0.73)	21	(0.10)	57	(0.11)
		水素*	1012(弾性限内)		2		6	
	70	窒素*	1398	(0.84)	3	(0.67)	15	(0.46)
		水素*	1173(弾性限内)		2		7	

窒素：0.1MPa @-40℃ 水素：70MPa@-40℃ \*：試験片直径2.5mm(他は3mm)

## 水素適合性に及ぼす冷間強加工の影響(まとめ)

オーステナイト系および準安定オーステナイト系の4種類の汎用ステンレス鋼の冷間強加工材(断面減少率50%,70%)について、常温および低温における高圧水素SSRT特性を評価した結果、これまでに判明した事項の要旨は下記のとおり。

## 【オーステナイト相の安定化度(Ni当量)の影響】

- Ni当量の低下に伴い水素の影響は顕著になり、Ni当量が最も低いSUS301L (Ni当量=19.9)においては、低温・水素中において弾性限内で破断する。

## 【温度の影響】

- Ni当量が最も高いSUS316L (Ni当量28.6)において、常温では水素の影響が認められないが、低温(-40℃)においては水素中で延性の低下が起こり、温度の影響が顕著であった。これは試験片の破面観察においても確認された。

## 【加エプロセスの影響】

- 冷間圧延板材、冷間鍛造丸棒材について、同じ断面減少率において後者の方が高強度低延性であったが、水素の影響は板材の方が若干大きかった。

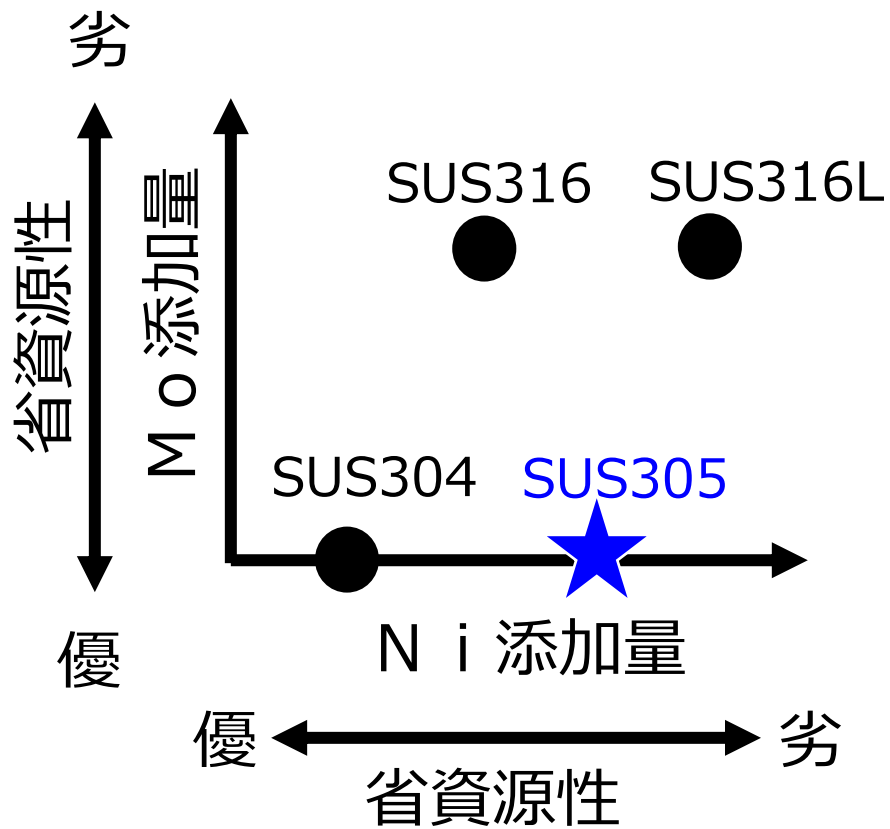
## 【加工度の影響】

- 断面減少率50%と70%の比較において、70%の方が明らかに高強度・低延性であり、低温における高圧水素の影響は70%の方が若干大きかった。

<SUS305>

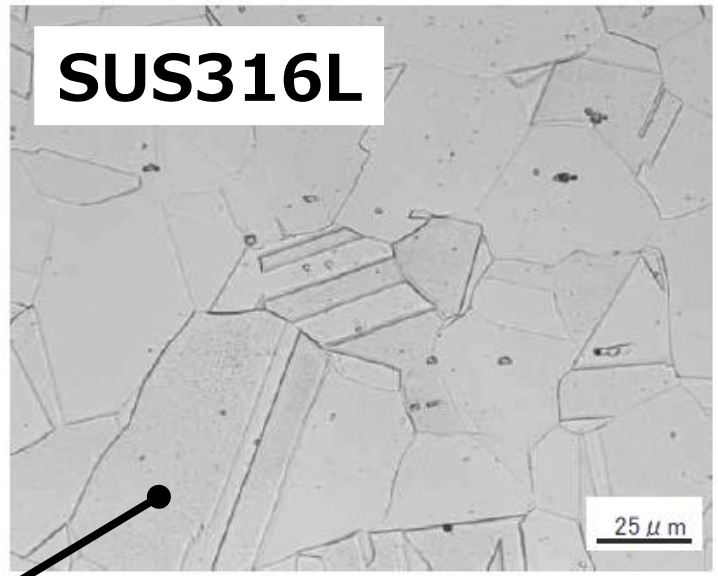
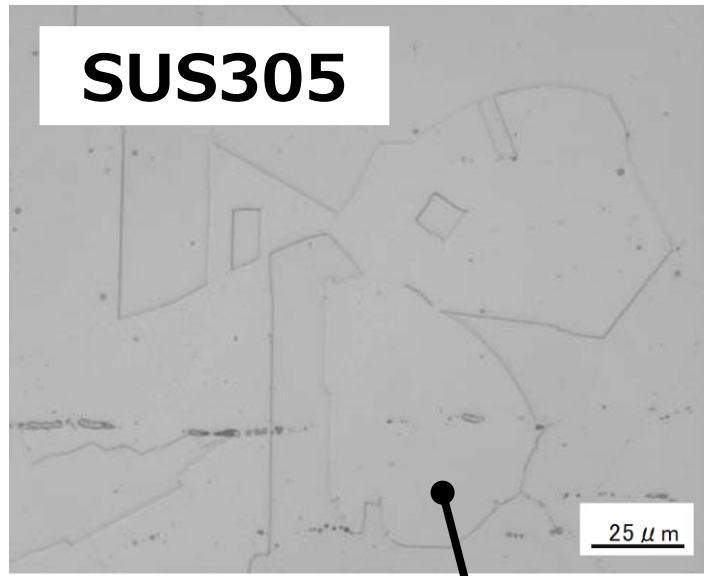
Ni添加により安定オーステナイト組織、高価なMoを含有せず省資源。

SUS305の位置付け



マイクロ組織

固溶化熱処理材

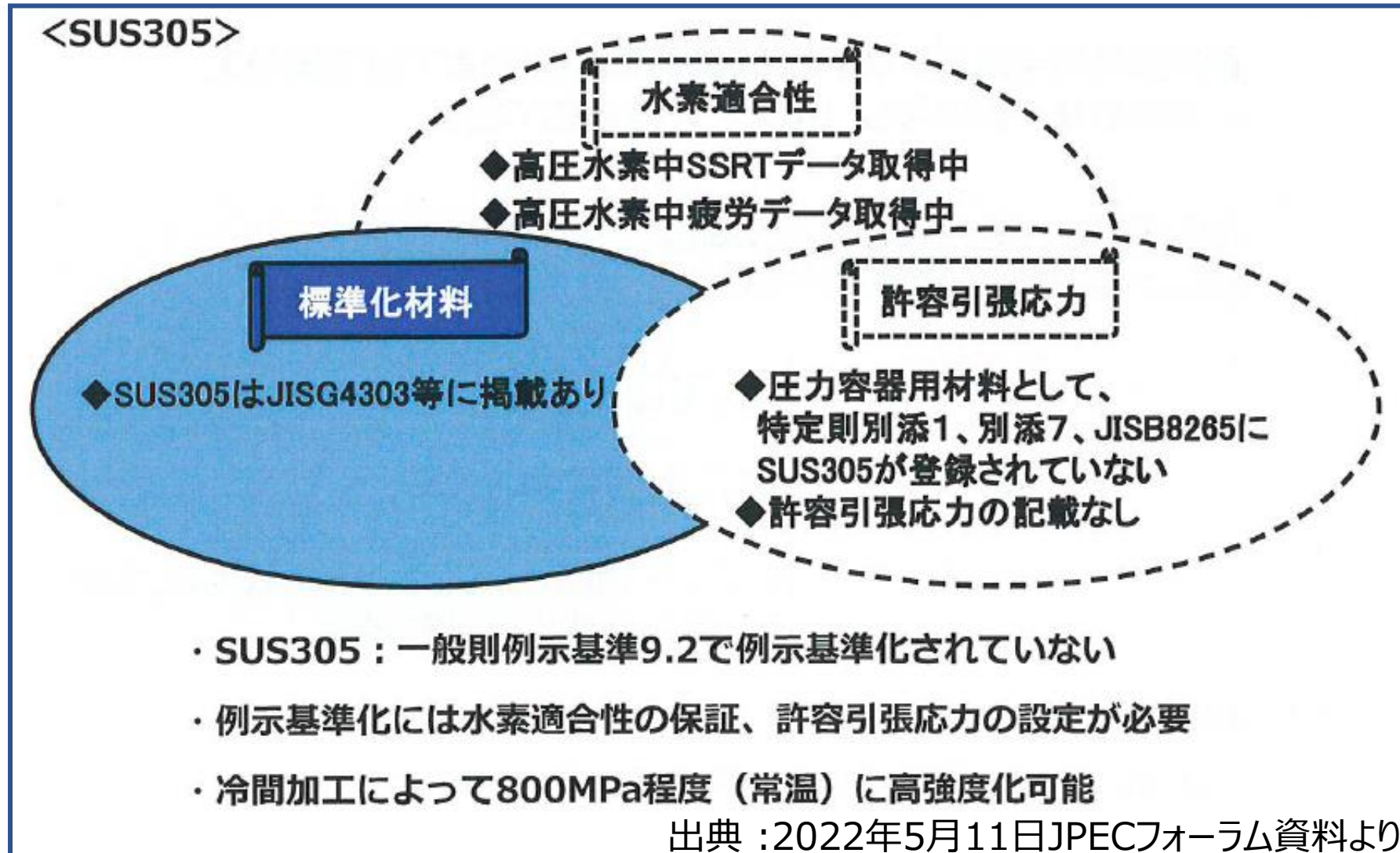


オーステナイト金属結晶



SUS305は一般則例示基準9.2で例示基準化されていない。  
水素適合性データ取得および、許容引張応力の設定に資するデータ取得が必要。

## 現在の状況



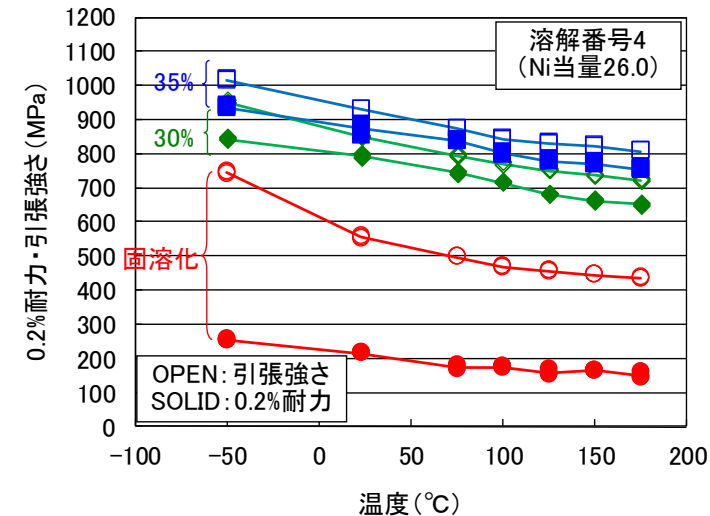
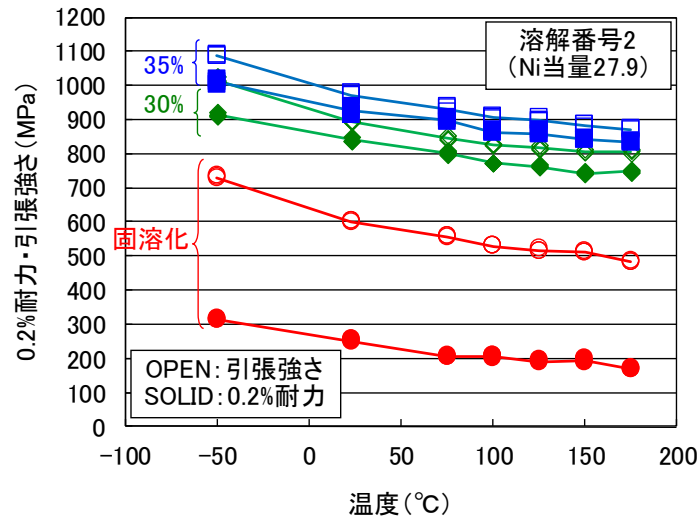
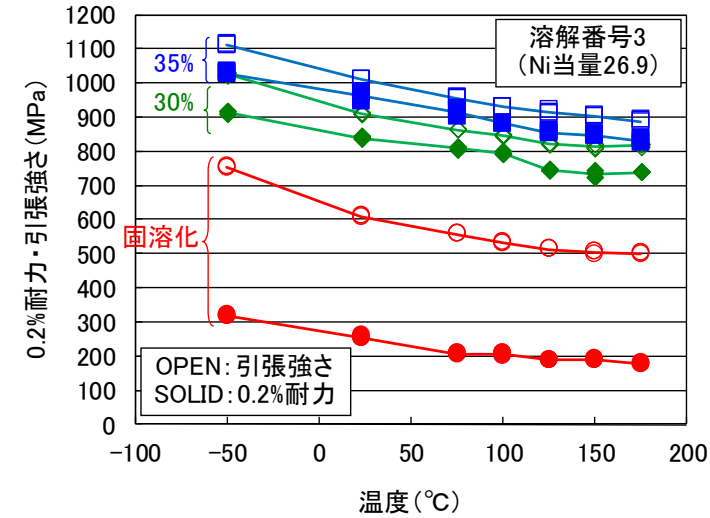
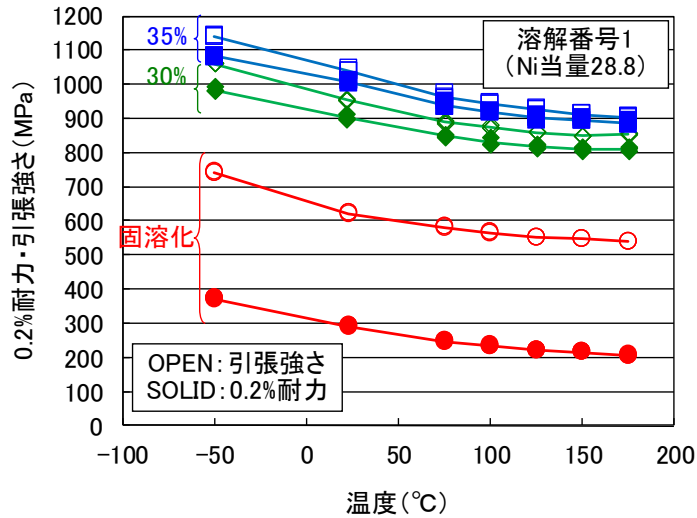


## <許容引張応力>

温度変化による急激な強度の変動は認められず、安定した強度を示している。

### 引張試験結果 (0.2%耐力・引張強さ)

Φ20mm冷間加工品 (減面率30%、35%) およびΦ29mm固溶化熱処理材



## <水素適合性>

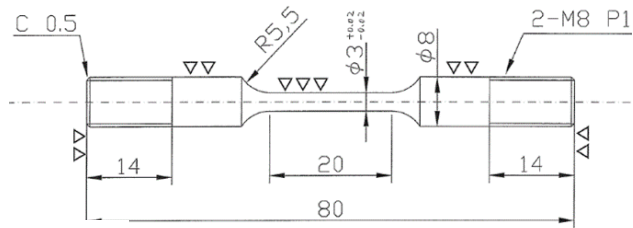
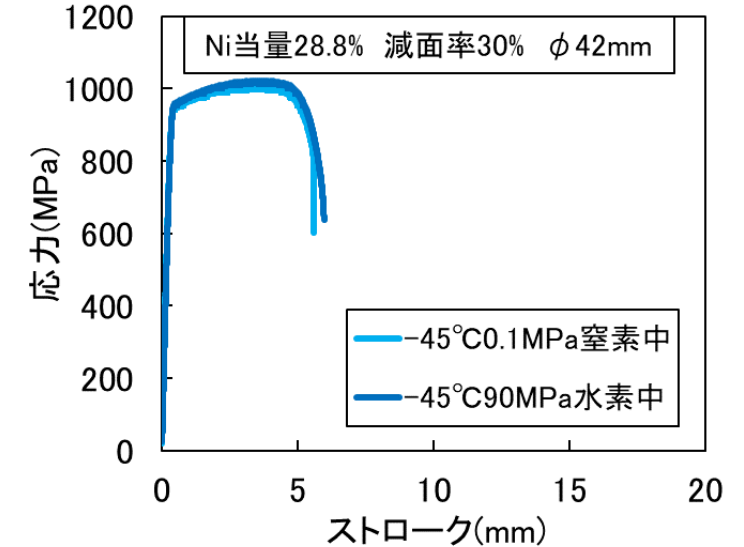
SSRTの進捗率90%（70本済）。水素適合性に優れる試験結果が得られている。

### SSRT計画と進捗

供試品			SSRT試験条件					
Ni当量 (%)	寸法 (mm)	減面率 (%)	-45℃		室温		90℃	
			0.1MPa窒素	90MPa水素	大気	90MPa水素	0.1MPa窒素	90MPa水素
28.8	φ29	0	●	●	●	●	●	●
		30	●	●	●	●	●	●
	φ20	35	●	●	●	●	●	●
		φ42	30	●	●	●	●	●
27.9	φ20	0	●	●	●	●	○	○
		30	●	●	●	●	○	○
		35	●	●	●	●	○	○
26.9	φ20	0	●	●	●	●	●	●
		30	●	●	●	●	●	●
		35	●	●	●	●	●	●
26.0	φ20	0	●	●	●	●	●	●
		30	●	●	●	●	○	○
		35	●	●	●	●	●	●

### SSRT結果の例

φ42mm冷間加工品  
(Ni当量28.8%、減面率30%) の  
-45℃90MPa水素中SSRT結果



●: 実施済み、○: 2022年度実施予定

Ni当量 (%)	減面率 (%)	試験	引張強さ (MPa)	相対引張強さ	伸び(%)*	相対伸び*	絞り(%)	相対絞り
28.8	30	-45℃0.1MPa窒素中	1006	—	27	—	62	—
		-45℃90MPa水素中	1022	1.02	29	1.07	70	1.13

\*試験片全長にて測定した値

## <水素適合性>

高圧水素中回転曲げ疲労データ取得に取り組み中。

### 高圧水素中 回転曲げ疲労試験機

(自社開発導入設備)

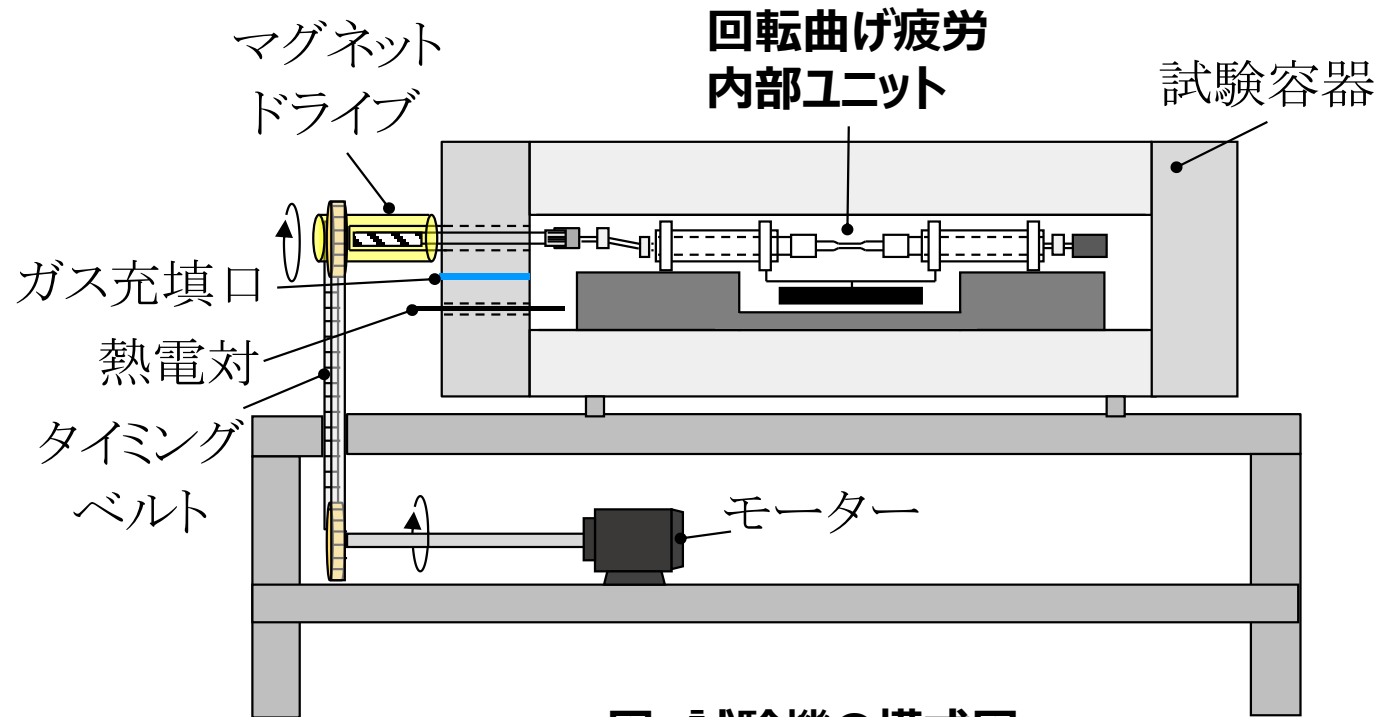


図. 試験機の模式図



図. 試験機の外観

マグネットドライブにより外部から動力を伝達し、高圧水素雰囲気内の試験容器内で、回転曲げ疲労試験を行う。

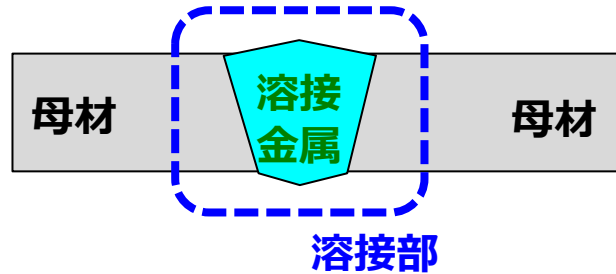
## ◆テーマの目的

溶接施工者は、溶接継手の水素適合性を評価し、社内データとして保有しているが、As Weld(溶接まま)では水素適合性要件を満足しない懸念があるため、溶接後熱処理(固溶化熱処理)を実施して出荷している。

	As Weld	溶接後熱処理
元素の分布	溶接金属に水素適合性に影響する有効元素が偏在する懸念あり。	偏在する有効元素が均質化され、水素適合性が改善される可能性あり。
残留応力	有り	無し
変形	溶接時の相対位置を維持	残留応力開放に伴い変形する懸念あり
施工費用	安価(熱処理費用不要)	高価(熱処理費用追加発生)

**As Weld**で使用可能な水素適合性に優れるSUS316L母材と溶接材料の組合せを見出す。

⇒技術指針の策定



- **溶接継手**は、①**母材**，②**溶接部**（溶接金属含む）からなり、これら全ての水素適合性を検証する必要がある。
- ラボで作製した候補**母材**と候補**溶接材料**の組合せで溶接継手を作製し、水素適合性を評価する。

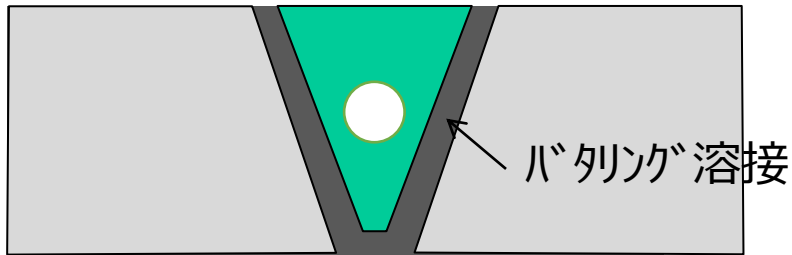
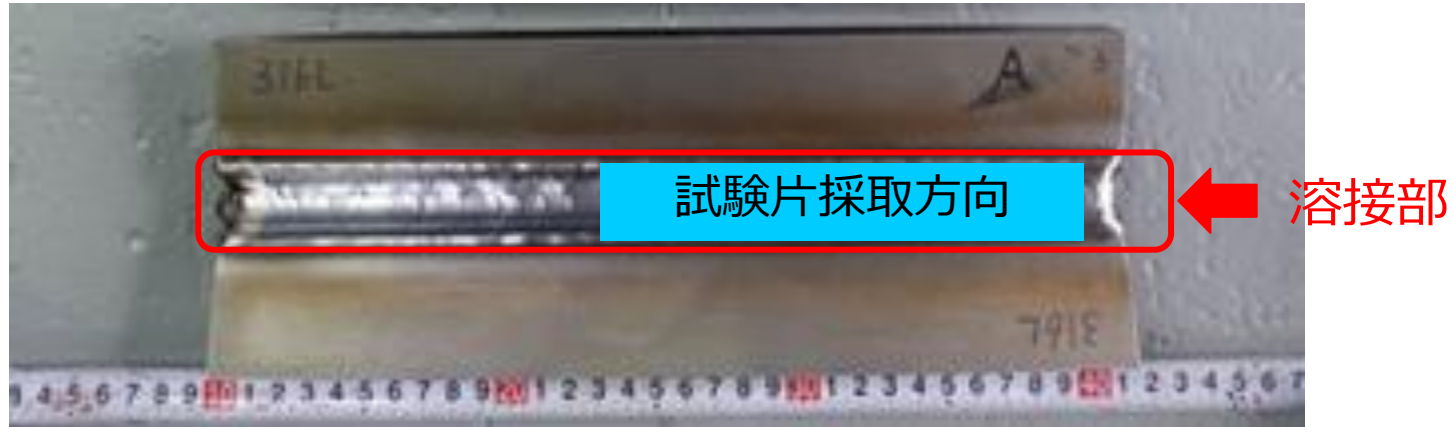
表 母材の化学組成 (mass%)

母材	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	N	Ni当量
SUS316L	0.019	0.37	1.37	11.99	16.31	2.11	—	26.5
高Ni当量SUS316L	0.020	0.37	1.71	12.49	17.44	2.57	—	28.5
SUS304L	0.019	0.38	1.72	9.35	18.36	—	—	23.5
SUS304LN	0.019	0.37	1.71	10.98	18.46	—	0.173	25.2

表 母材の常温引張試験結果

W方向	YS	TS	伸び	絞り
SUS316L	210MPa	531MPa	93%	85%
高Ni当量SUS316L	215MPa	531MPa	80%	83%
SUS304L	187MPa	603MPa	72%	83%
SUS304LN	296MPa	628MPa	72%	81%

## 溶接材料（全溶着金属）の水素適合性評価のための試験片作製方法



- 溶接条件
  - 入熱：6kJ/cm-10kJ/cm
  - シールドガス：Ar100%
  - 相関温度150℃以下

○ 試験片採取位置

表 使用した溶接材料の全溶着金属の化学組成 (mass%)

溶接材料	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	N	Ni当量
YS316L	0.016	0.48	1.73	12.36	19.55	2.20	—	29.4
YS309LMo	0.020	0.35	2.08	13.92	23.42	2.23	—	33.9
YS308L	0.022	0.50	1.66	9.60	19.63	—	—	24.6
308LN	0.024	0.41	2.21	9.79	21.65	—	0.105	26.6

## 溶接継手（母材 + 溶接部）の水素適合性評価のための試験片作製方法

- 開先形状は下図
- 溶接条件
  - 溶接方法：自動GTAW(1G)
  - 入熱：4-7kJ/cm
  - シールドガス：Ar100%
  - パス間温度150℃以下
  - **溶接後熱処理無し**

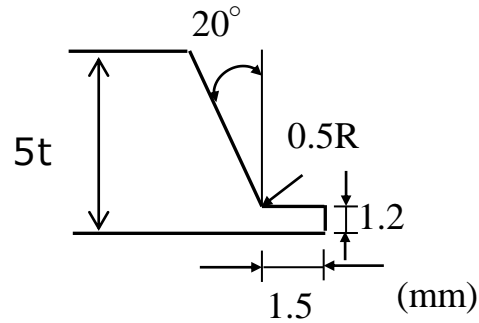


図 開先形状

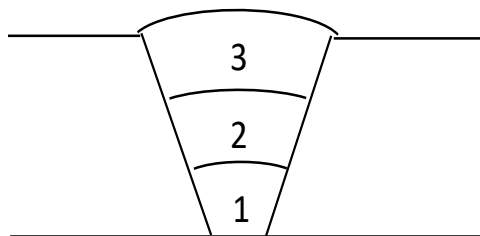
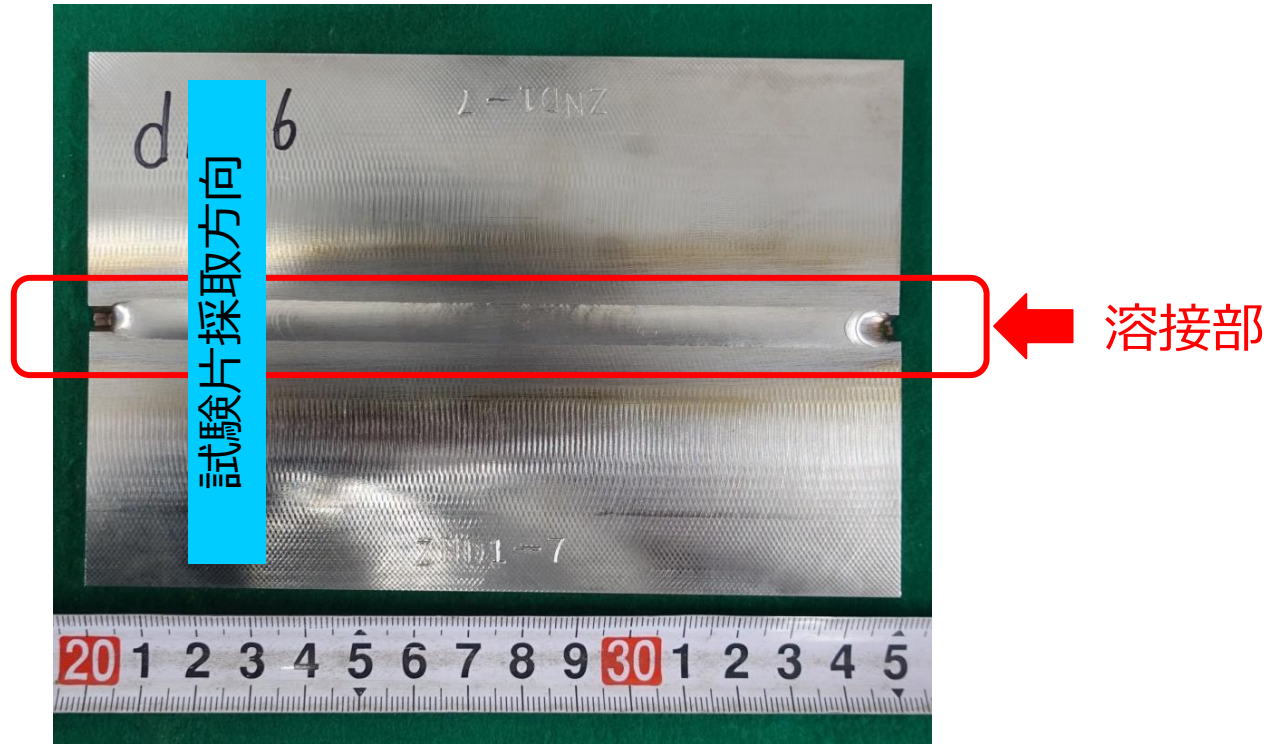
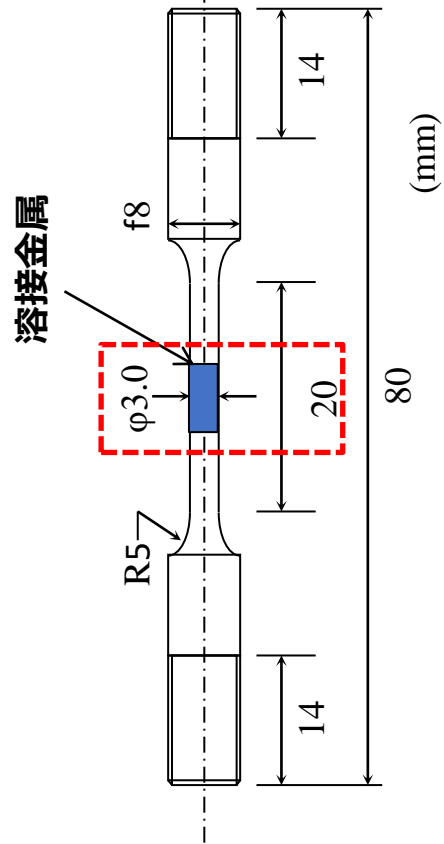


図 多層盛溶接のイメージ

表 溶接継手の常温引張試験結果（余盛無し）  
\* N数=3

母材	溶接材料	平均YS	平均TS	破断位置
SUS316L (26.5%)	YS316L	227MPa	512MPa	母材
	YS309LMo	231MPa	516MPa	母材
高Ni当量 SUS316L (28.5%)	YS316L	233MPa	516MPa	母材
	YS309LMo	240MPa	524MPa	母材
	YS308L	234MPa	517MPa	母材
	308LN	233MPa	518MPa	母材
SUS304L (25.2%)	YS316L	212MPa	540MPa	溶接金属
	YS309LMo	214MPa	577MPa	溶接金属
SUS304LN (23.5%)	YS316L	317MPa	586MPa	溶接金属
	YS309LMo	321MPa	618MPa	溶接金属





- 試験片：丸棒引張試験片
- 条件：水素圧90MPa及び大気@RT  
水素圧70MPa及び大気@-40℃  
ひずみ速度 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$   
ストローク速度0.06mm/min

溶接継手評価のためのSSRT試験片

性質の異なる組織(溶接部+母材)が混在

↓  
RELでの水素適合性評価は困難

↓  
**RRA (相対破断絞り) で評価が適当**



表 -40℃×70MPa高圧水素環境下での水素適合性評価結果(SSRT試験)

	母材 (Ni当量)	SUS304L (23.5%)	SUS304LN (25.2%)	SUS316L (26.5%)	高Ni当量 SUS316L(28.5%)
溶接材料 (Ni当量)	水素適合性	REL: 29.4% RRA: 18.1%	REL: 72.3% RRA: 51.7%	REL: 46.2% RRA: 40.8%	REL: 94.9% RRA: 79.7%
YS308L (24.7%)	REL: 43.3% RRA: 30.9%	—	—	—	RRA: 27.6% (母材/溶接金属)
308LN (26.4%)	REL: 91.6% RRA: 82.4%	—	—	—	RRA: 72.9% (母材/母材)
YS316L (29.4%)	REL: 114.9% RRA: 94.4%	RRA: 18.4% (溶接金属/母材)	RRA: 56.2% (溶接金属/溶接金属)	RRA: 32.6% (溶接金属/母材)	RRA: 66.1% (溶接金属/溶接金属)
YS309LMo (33.9%)	REL: 89.8% RRA: 93.3%	RRA: 16.3% (溶接金属/母材)	RRA: 69.1% (溶接金属/溶接金属)	RRA: 46.6% (溶接金属/母材)	RRA: 94.3% (母材/溶接金属)

\* REL (RRA) = 高圧水素中の破断伸び(絞り)/不活性ガス環境中の破断伸び(絞り)

\* RRA下の記載は (大気中の破断位置/水素中の破断位置) を示す

Ni当量 $\geq$ 28.5%を有するSUS316LとYS309LMoの組み合わせで得られる溶接継手であれば、As weldでも-40℃の過酷な高圧水素環境下で優れた水素適合性を有する可能性有り。

#### ◆今後の予定

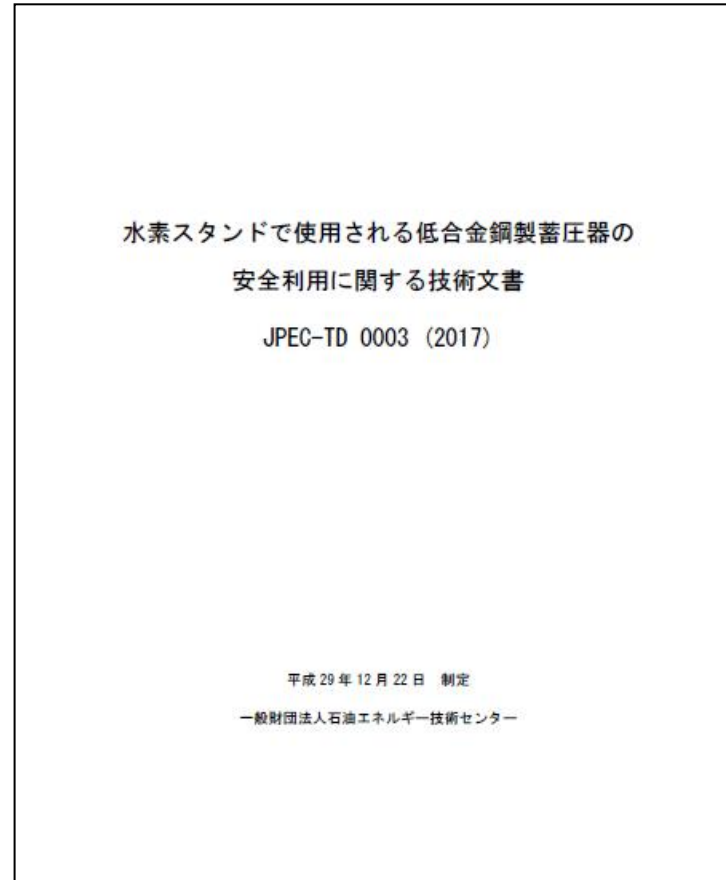
As weldでの良好な水素適合性が期待されるNi当量 $\geq 28.5\%$ のSUS316L及びYS309LMo溶接材料の組合せを対象に、母材希釈率の変化（溶接施工条件の変化）による水素適合性に及ぼす影響を調査する。

上述にて得られた結果を踏まえて、溶接金属の水素適合性を確保するために必要な組織の支配因子を調査する。

開発項目④汎用低合金鋼の高温適用に関する研究開発

目標：汎用低合金鋼の高温水素ガス中使用を想定した試験法の確立、水素圧縮機への適用可否判断、低合金鋼技術文書(JPEC-TD 0003)改訂の検討

#### <低合金鋼技術文書>



・高圧水素での使用上限温度は（当時）85℃

**SNCM439等の低合金鋼を蓄圧器に  
使用できる技術的根拠を記載**

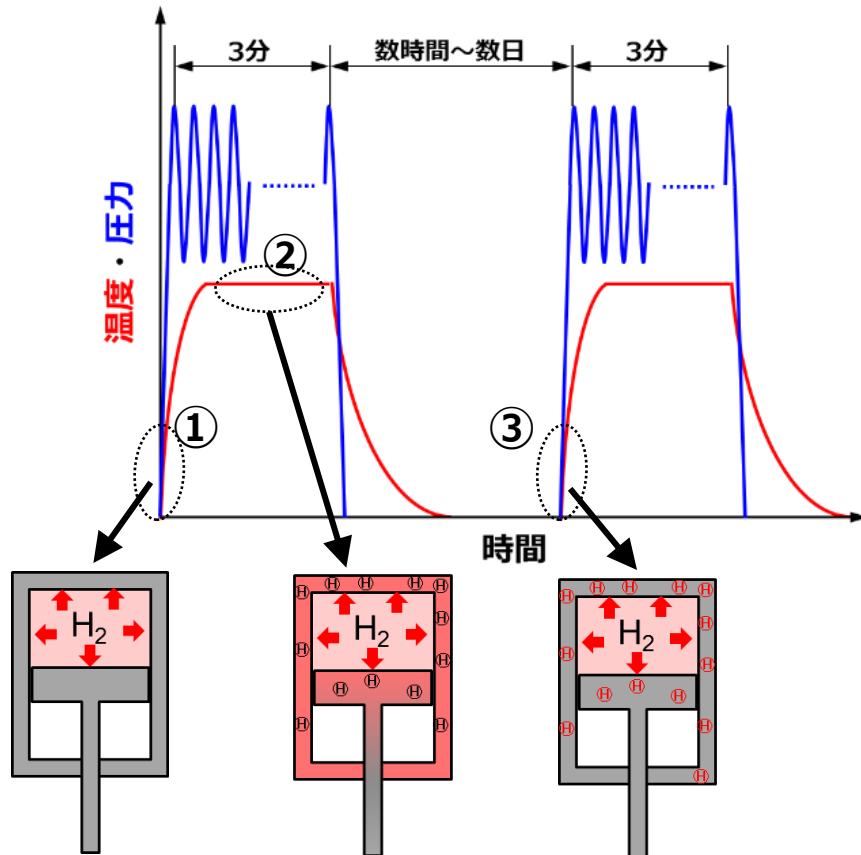
・85℃を超える温度では未検証

**高温における安全性が確認できれば、  
技術文書の範囲を圧縮機に拡大  
圧縮機の高温部で使用可能に  
（SUH660を代替可能）**

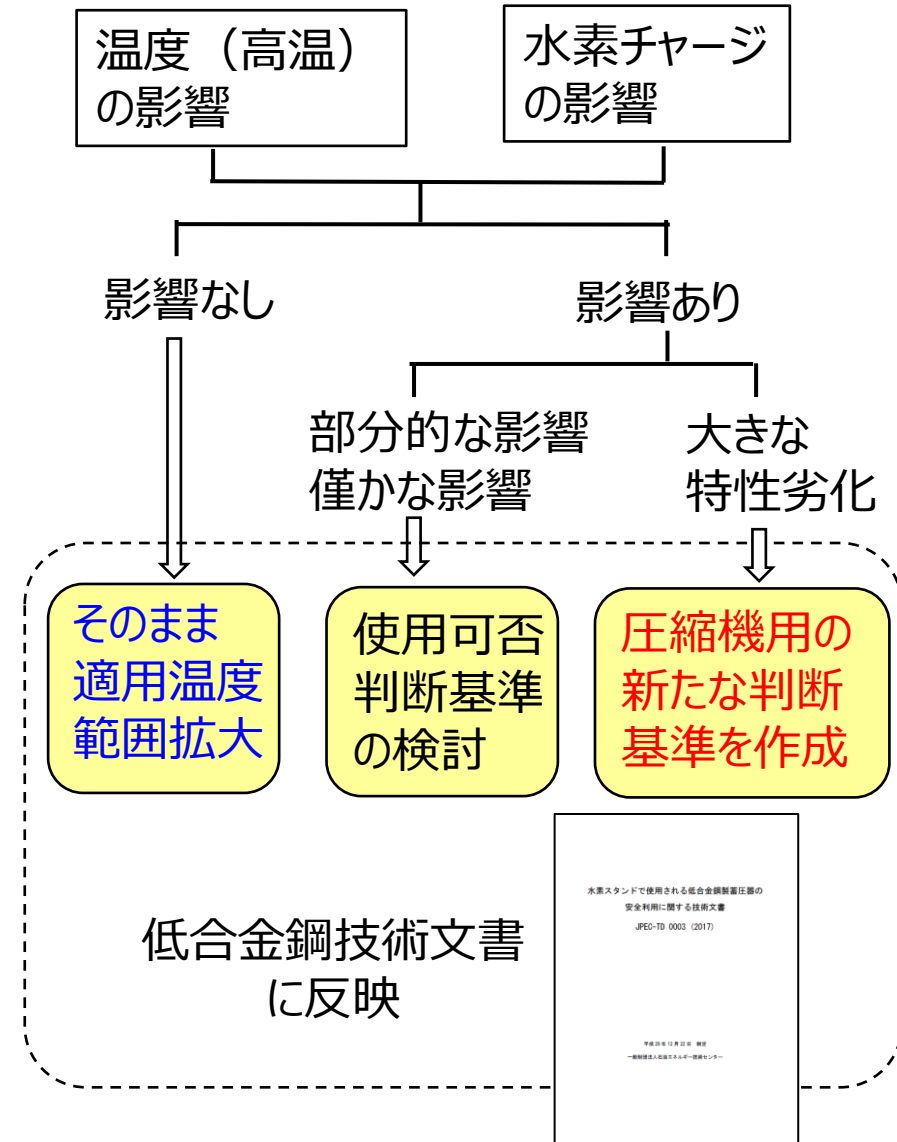
**圧縮機の動作状況を模擬した低合金鋼の水素適合性の検証が必要**

### <圧縮機の動作>

- ①初期の起動
  - ・室温・高圧水素ガス
- ②運転中
  - ・高温・高圧水素ガス + 鋼中水素
- ③短時間での再起動
  - ・室温・高圧水素ガス + 鋼中水素



### <高温・高圧サイクルにおける水素の影響>



### <評価方法>

- ① 200℃・115MPa水素ガス中で曝露する。（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。

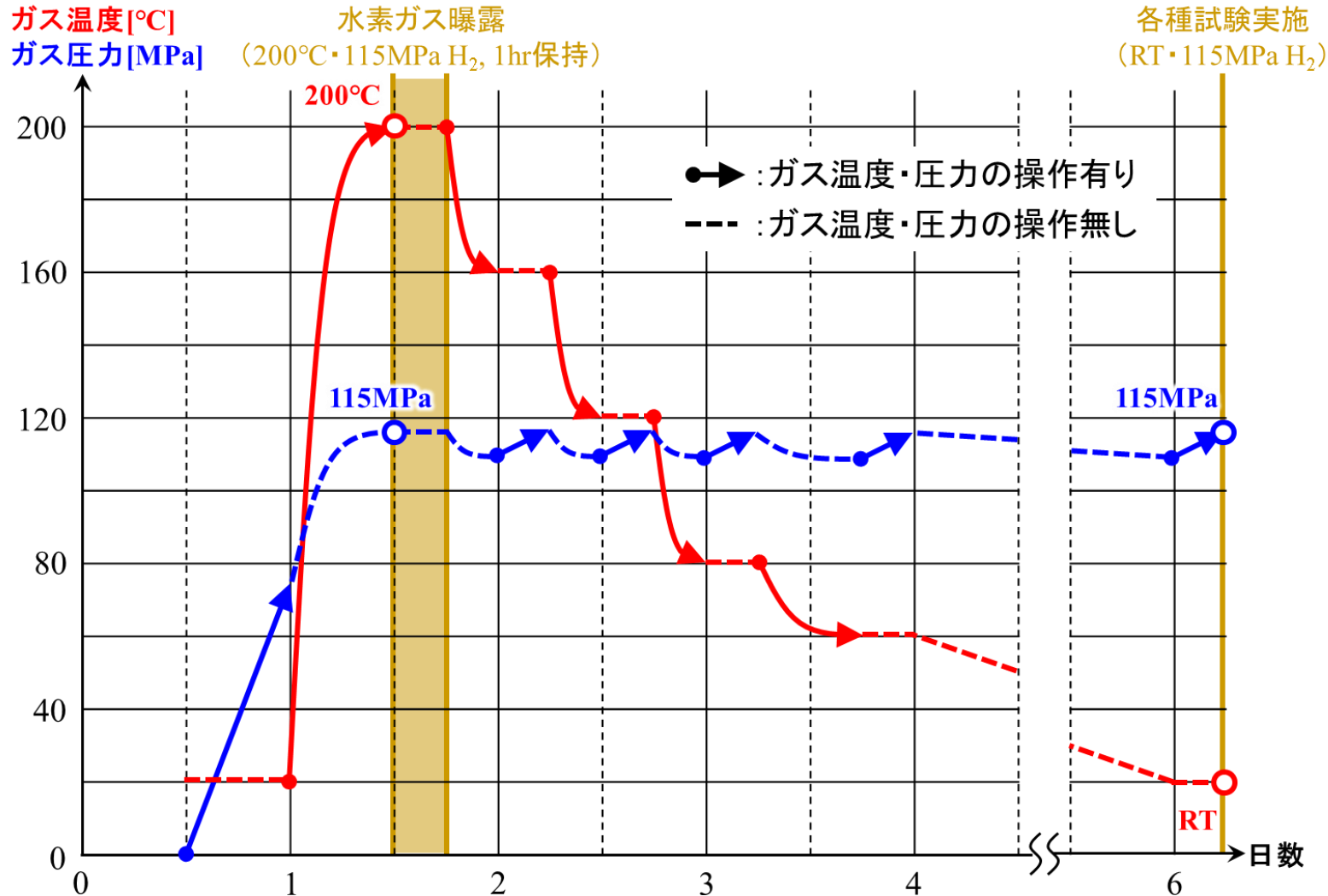
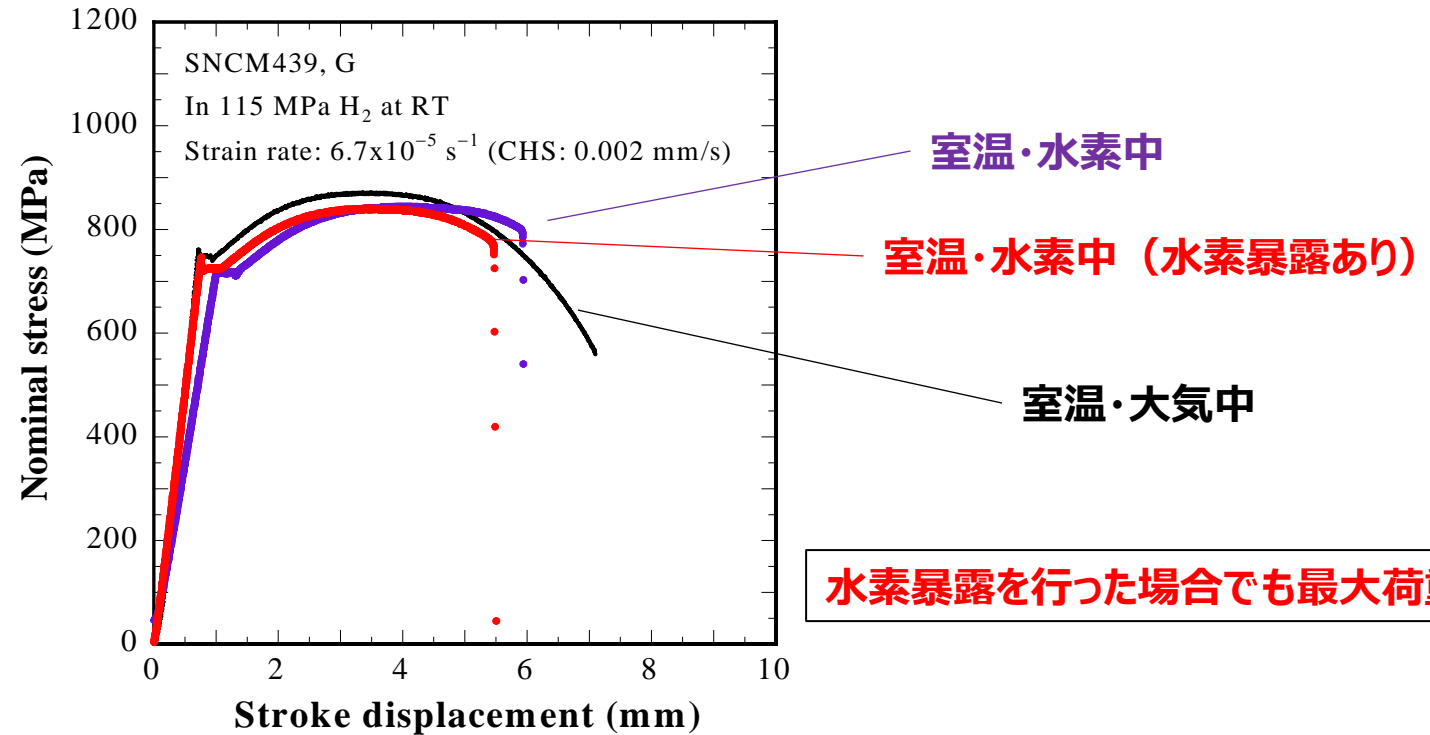


図 高温・高圧水素環境評価に関する水素ガス温度・圧力の変動イメージ

<水素適合性>

SSRT試験結果 (SNCM439)



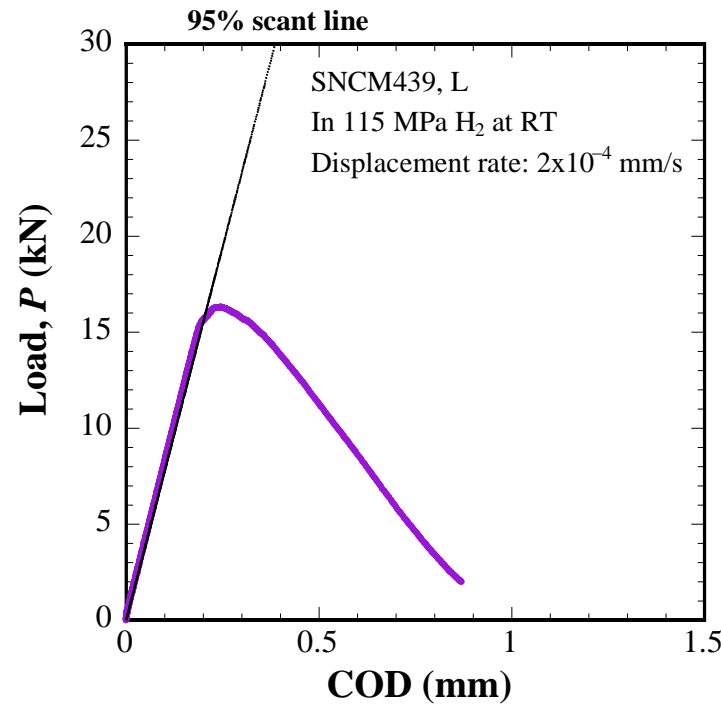
応力-変位曲線 (SNCM439)

試験雰囲気	水素ガス曝露	$\sigma_B$ [MPa]	RTS	$\delta$ [%]	REL	$\phi$ [%]	RRA
室温・大気中	無し	873	—	26	—	67	—
室温・115MPa水素ガス中	無し	845	0.97	21	0.81	35	0.52
	有り	841	0.96	21	0.81	34	0.51

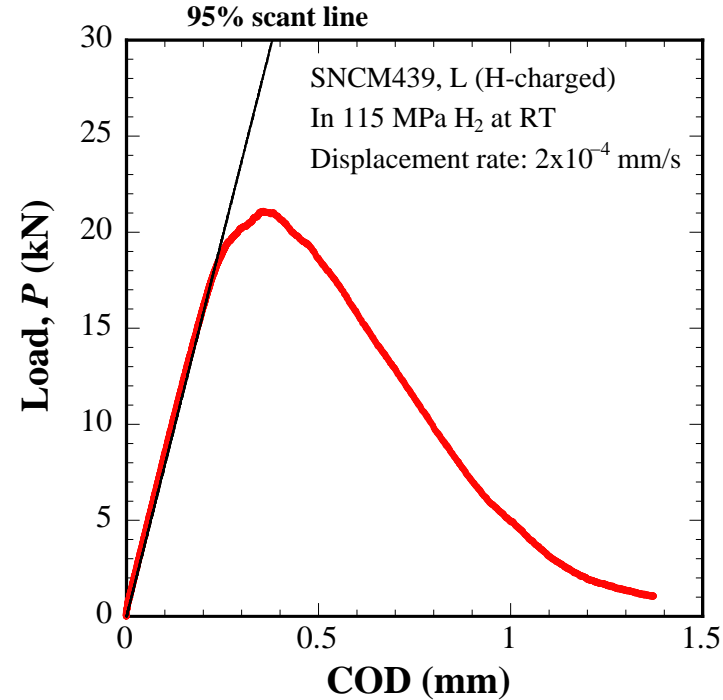
高温・高圧水素ガス環境曝露により水素を予め飽和させても、高圧水素ガス環境の影響は同等である

<破壊靱性 (SNCM439) >

P-COD曲線 (SNCM439, 室温・115MPa水素ガス中)



(a) 水素ガス曝露：無し



(b) 水素ガス曝露：有り

試験雰囲気	水素ガス曝露	$K_{I,H}$ [MPa√m]
室温・115MPa水素ガス中	無し	50.5
	有り	56.4

高温・高圧水素ガス環境曝露により水素を予め飽和させても、高圧水素ガス環境の影響は同等である。

### <低合金鋼技術文書の改訂>

#### 低合金鋼技術文書改訂TFの設立および技術文書改訂（2020）

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

##### 1 適用範囲

本技術文書においては、水素スタンドで使用される鋼製蓄圧器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を鑑み、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技術文書として例示する。

常用の圧力： 40MPa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こと。

設計温度： 下限温度を-30℃、上限温度を200℃と想定する。

構造： 溶接構造を有する蓄圧器は除く。

- **SNM439等の低合金鋼が対象**
- **上限温度を85℃⇒200℃に改訂**
- **適用範囲に圧縮機を追加**
- **最新版はJPECホームページより入手可**



## <個別研究開発項目の達成状況>

利用可能

見込

### ①汎用ステンレス鋼の使用可能範囲拡大に関する研究開発

- ・伸びを指標とする新たな水素適合性判断基準の確立
- ・低温高圧水素中で使用可能なSUS316系ステンレス鋼の基準案の作成
- ・適材適所化に向けたSUS316・SUS304系ステンレス鋼の基準案（検討中）



例示基準の改正：-45℃基準  
使用可能なNi当量を26.9%に低減



非プレクール部の材料範囲拡大提案

### ②汎用ステンレス鋼冷間加工材に関する研究開発

- ・SUS316：水素適合性に影響を及ぼさない冷間加工度の範囲明確化  
冷間加工材の許容引張応力案の検討中
- ・SUS305：水素適合性、許容引張応力に関するデータの取得



例示基準材の特定則範囲の曲げ：  
規制追加・制限の必要なし

SUS305の圧力容器材料適用

高強度・軽量な汎用材の利用拡大

### ③汎用ステンレス鋼溶接材に関する研究開発

- ・母材・溶接金属・溶接部の水素適合性評価
- ・水素適合性の判断基準明確化と技術指針化の推進



溶接の利用促進⇒漏洩リスクの低減  
一般申請における技術的補助

### ④汎用低合金鋼の高温適用に関する研究開発

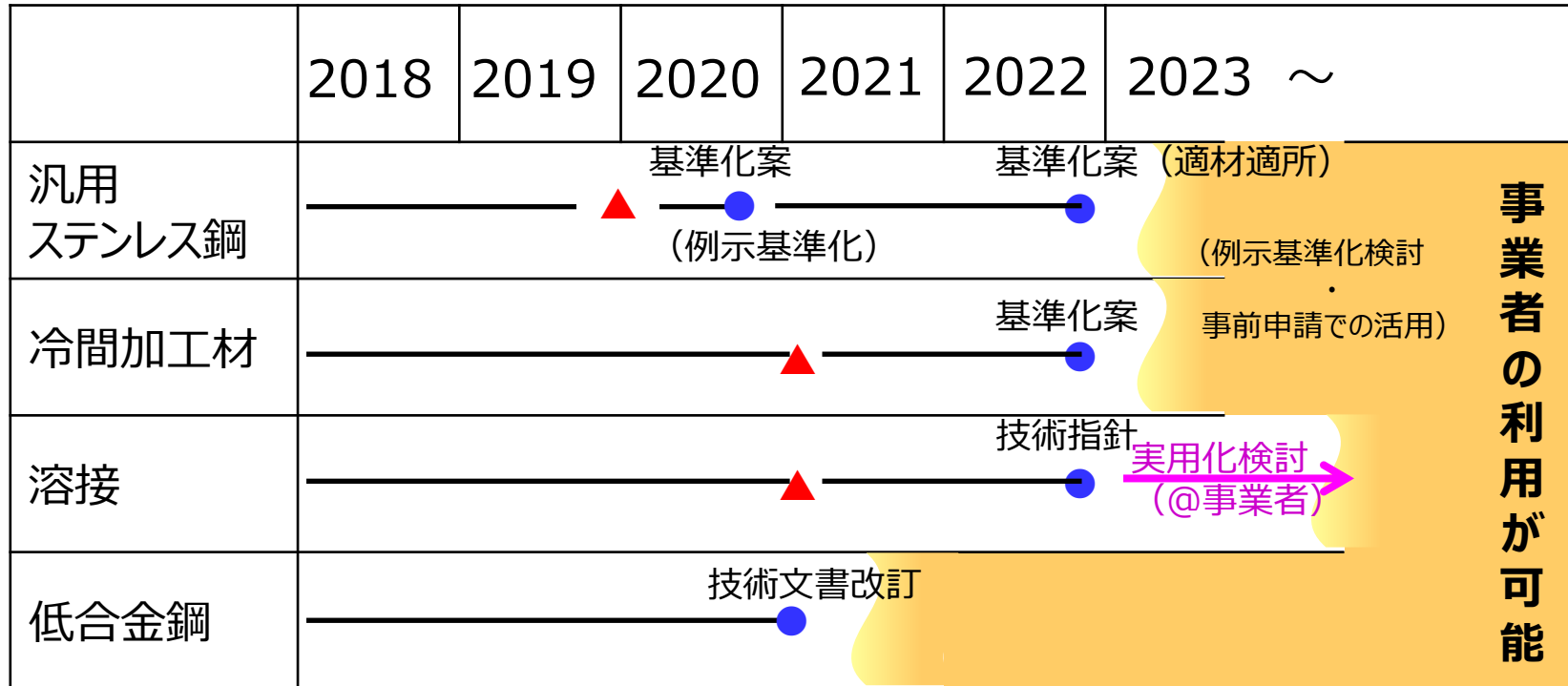
- ・高温での使用を想定した実験手法を確立、各種評価試験完了
- ・低合金鋼技術文書(JPEC-TD 0003)改訂完了、圧縮機への適用拡大



圧縮機高温部での利用：  
入手性・工作性・コスト改善

対外発表件数は以下のとおり。

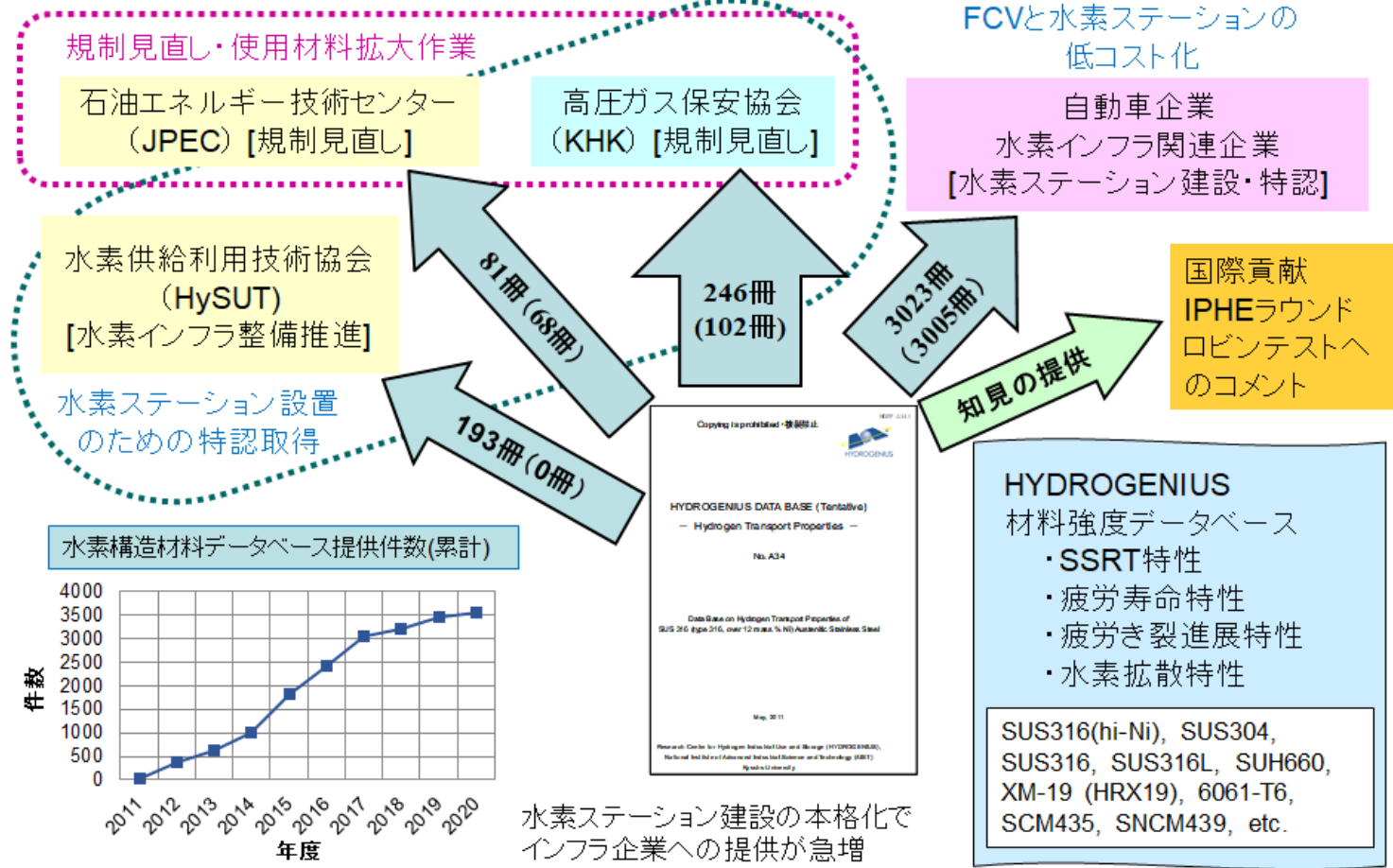
	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	計
研究発表・講演	12	7	3	4	26
新聞・雑誌等への掲載	6	0	3	1	10



▲ : 判定基準・使用可能範囲    ● : 基準化に資する資料・ガイドライン

## <NEDO鋼材データベース検討会の設置>

全78冊, 総ページ数:約1800頁, 提供総数:3,543件



- ・九州大学HYDROGENIUSの材料データベース  
前NEDO事業で構築：事前申請、規制緩和・国際規格の議論に貢献
- ・本事業で得られた有用なデータの利活用・国際貢献を図るべく検討会を新設

テーマ	今後の検討予定項目
① 汎用ステンレス鋼の使用可能範囲拡大	・-45℃基準での使用可能範囲拡大案の例示基準化を達成 ⇒利用可 ・適材適所の使用条件における使用可能範囲拡大 室温までを対象とした基準案作成
② 汎用ステンレス鋼冷間加工材	・基準案作成に向けた取り組み 水素適合性の検討 許容引張応力の検討（棒・管）
③ 汎用ステンレス鋼溶接材	・技術指針の作成に向けた取り組み 水素適合性の基準、判断方法 溶接事例の検討
④ 汎用低合金鋼の高温適用	・低合金鋼技術文書の改訂完了（2022年度予定を前倒し） ⇒利用可

得られた研究成果について、例示基準化を見据えた技術基準案を作成する。

溶接については技術指針の形でまとめる。

汎用低合金鋼については2022年度達成内容を前倒し達成し、事業を終了。

得られた実験結果は九大データベースへの登録を検討し、事業者の利便性に寄与する。

---

**ご清聴ありがとうございました**