

2022年度 JPECフォーラム



# 新たな水素特性判断基準の導入に 関する研究開発

2022年5月11日

一般財団法人石油エネルギー技術センター  
水素エネルギー部 水素利用推進室

# 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**

## 【事業参加者一覧】

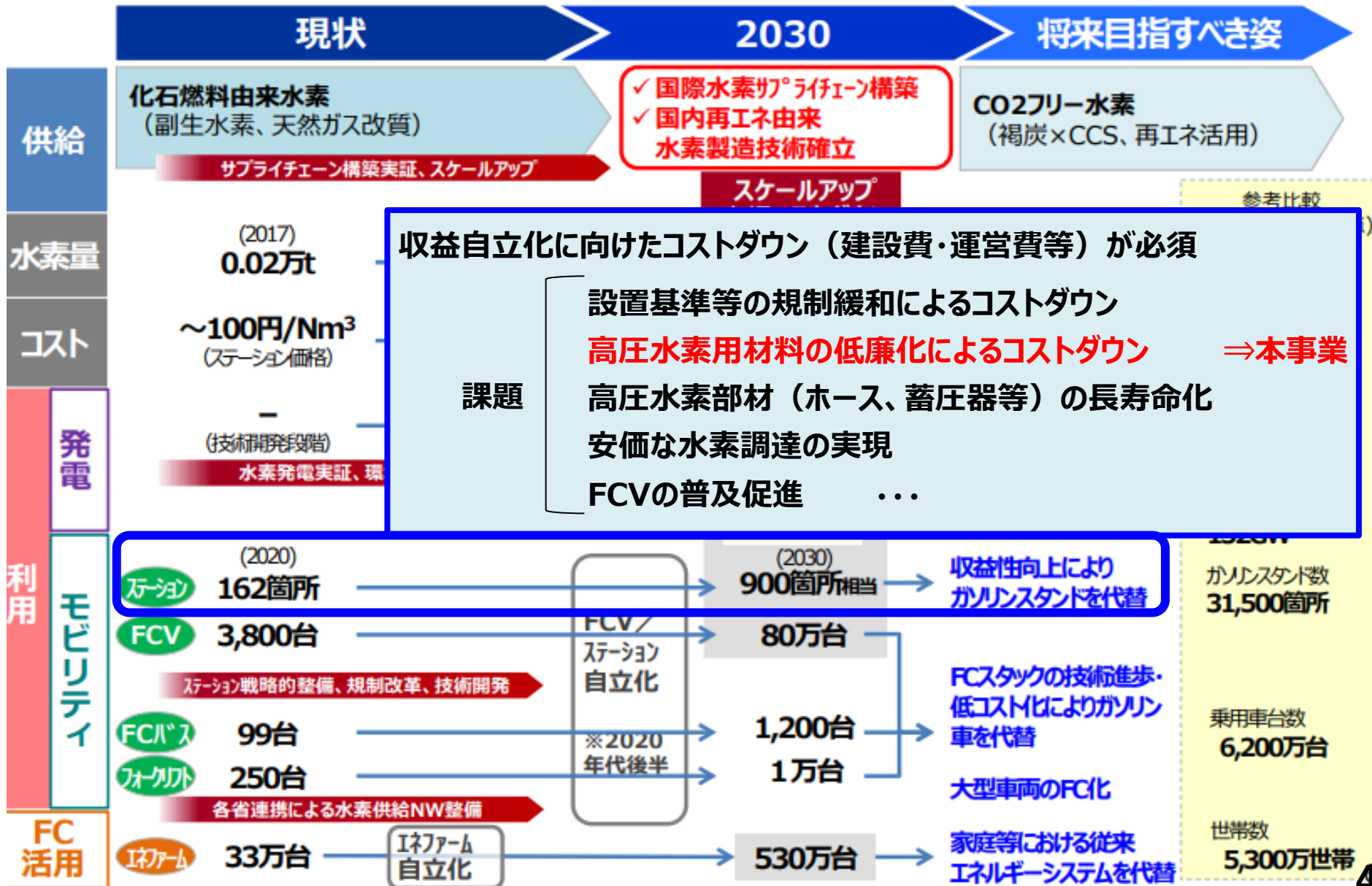
一般財団法人石油エネルギー技術センター（JPEC）  
    高圧ガス保安協会（KHK）  
    国立大学法人九州大学  
一般財団法人金属系材料研究開発センター（JRCM）  
    日本製鉄株式会社  
    日鉄ステンレス株式会社  
    愛知製鋼株式会社  
    株式会社日本製鋼所（JSW）  
国立研究開発法人物質・材料研究機構（NIMS）

# 目 次

- 1. 本NEDO事業の概要**
- 2. 事業体制**
- 3. 各テーマの検討状況**
  - (1) 汎用ステンレス鋼の使用範囲拡大**
  - (2) 汎用ステンレス鋼の冷間加工**
  - (3) 汎用ステンレス鋼の溶接**
  - (4) 低合金鋼の高温適用**
- 4. 今後の検討予定**

# 1. 本NEDO事業の概要 背景

＜水素基本戦略シナリオ 出典：経済産業省ホームページ＞



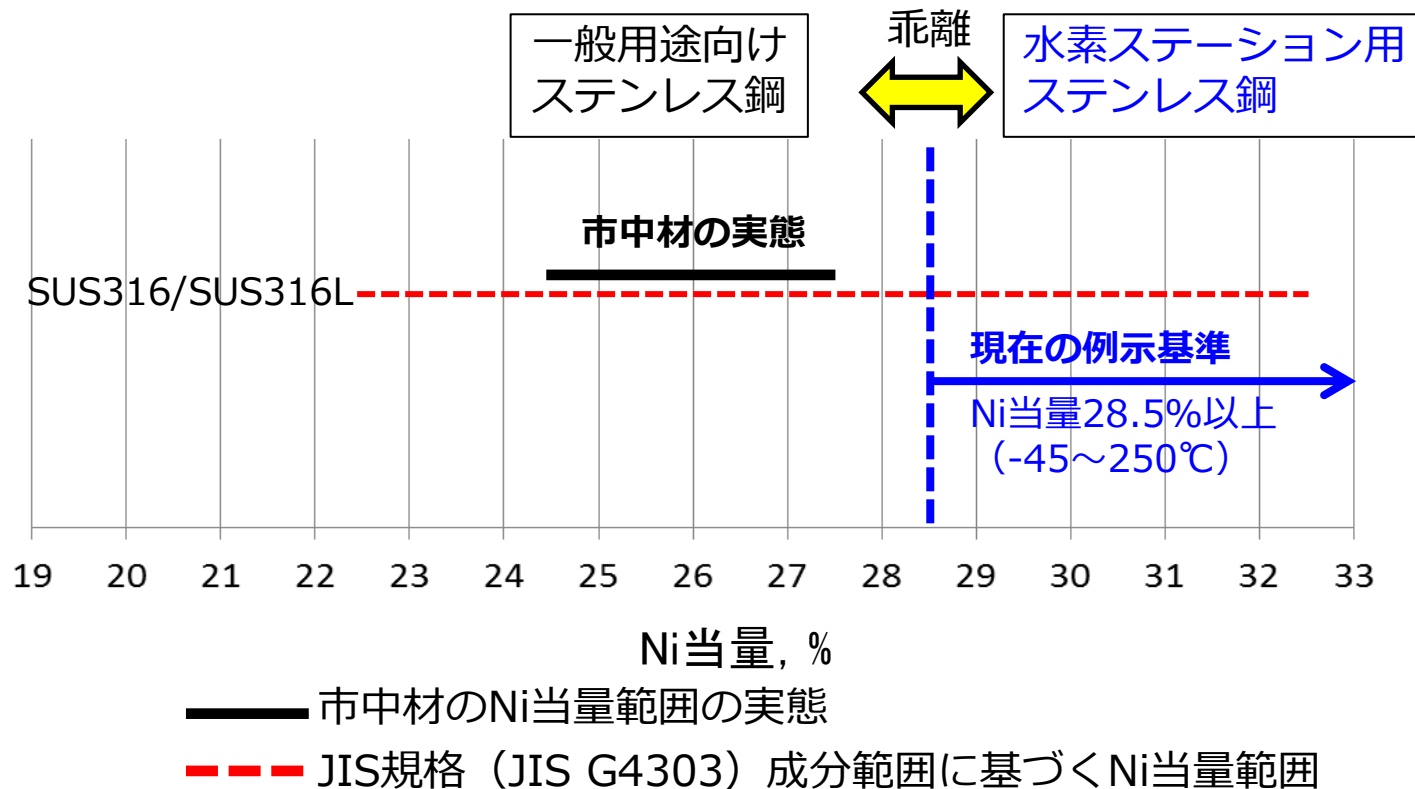
# 1. 本NEDO事業の概要 背景

<高圧水素環境で使用可能な材料の例（2018年時点）>

| 種類          | 使用可能範囲                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SUS316/316L | <ul style="list-style-type: none"><li>・一般則例示基準9.2<br/>温度下限 -45℃：Ni当量28.5%以上 絞り：75%以上<br/>温度下限 -10℃：Ni当量27.4%以上 絞り：75%以上<br/>温度下限 20℃：Ni当量26.3%以上 絞り：75%以上</li><li>注1) Ni当量式 <math>\text{Ni当量}(\%) = 12.6C + 0.35Si + 1.05Mn + Ni + 0.65Cr + 0.98Mo</math></li><li>注2) 鋼種の形状を問わず一律の絞り値を要求</li></ul> |
| 冷間加工材       | <ul style="list-style-type: none"><li>・例示基準化はされていない</li><li>・事前評価：KHKTD5201(現在はKHKS 0220に移行) の絞りの判定式に合格すること</li></ul>                                                                                                                                                                              |
| 溶接          | <ul style="list-style-type: none"><li>・例示基準化はされていない</li><li>・事前評価：水素適合性に関する判定基準が一般化されていない</li></ul>                                                                                                                                                                                                |
| 低合金鋼        | <ul style="list-style-type: none"><li>・例示基準<br/>SCM435（上限40MPa）・・・70MPa水素ステーションには圧力不足</li><li>・事前評価：低合金鋼技術文書（JPEC-TD0003）<br/>水素中SSRTで最大荷重点を確保できる場合、40MPa以上で使用可<br/>但し、<b>上限温度85℃まで</b></li></ul>                                                                                                  |

# 1. 本NEDO事業の概要 背景

＜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

# 1. 本NEDO事業の概要 概要

## 超高压水素技術等を活用した低コスト水素供給インフラ構築に向けた研究開発事業

平成30年度概算要求額

24.0億円（新規）

出典：METIホームページ  
（事業開始当時）

省エネルギー・新エネルギー部  
水素・燃料電池戦略室  
03-3581-7887

### 事業の内容

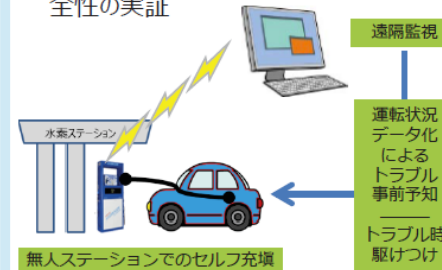
#### 事業目的・概要

- 燃料電池自動車（FCV）の世界最速普及を実現するため、超高压水素技術（大気圧の約千倍の水素を安全かつ安価に製造・貯蔵・輸送するための技術）等に関し、規制改革実施計画等に基づく規制見直しや水素ステーション整備・運営コストの低減を進めるとともに、普及期を見据えた耐久性・メンテナンス性向上等に係る研究開発等を進め水素ステーションの自立化を目指します。
- また、FCVの国際競争力確保に向け、車載用高压水素タンクの規格や充填する水素の品質管理方法等の国際基準調和・国際標準化等について研究開発を行います。

### 事業イメージ

#### （１）規制の見直し

- 遠隔監視等による水素ステーションの無人運転を可能とするために必要な技術の開発、開発した技術を用いた安全性の実証



- 現在の技術と運用に基づく水素ステーションのリスクアセスメントを実施、それに基づく設備構成の研究

- 新たな水素特性判断基準確立により汎用材を使用可能にする研究



・事業期間：2018～2020年度⇒2022年度

・事業の目的：水素ステーションに使用できる材料範囲を拡大させる。（汎用材の使用）

⇒安全性を確保しつつ材料範囲を拡大：新たな水素特性判断基準の検討が必要

⇒新たな基準を規制見直し（例示基準化）に繋げる

・検討対象となる鋼材および利用方法

1) オーステナイト系ステンレス鋼（SUS304、SUS305、SUS316系）

および冷間加工、溶接での利用（SUS316系）

2) 低合金鋼（SNCM439など）

# 1. 本NEDO事業の概要 背景

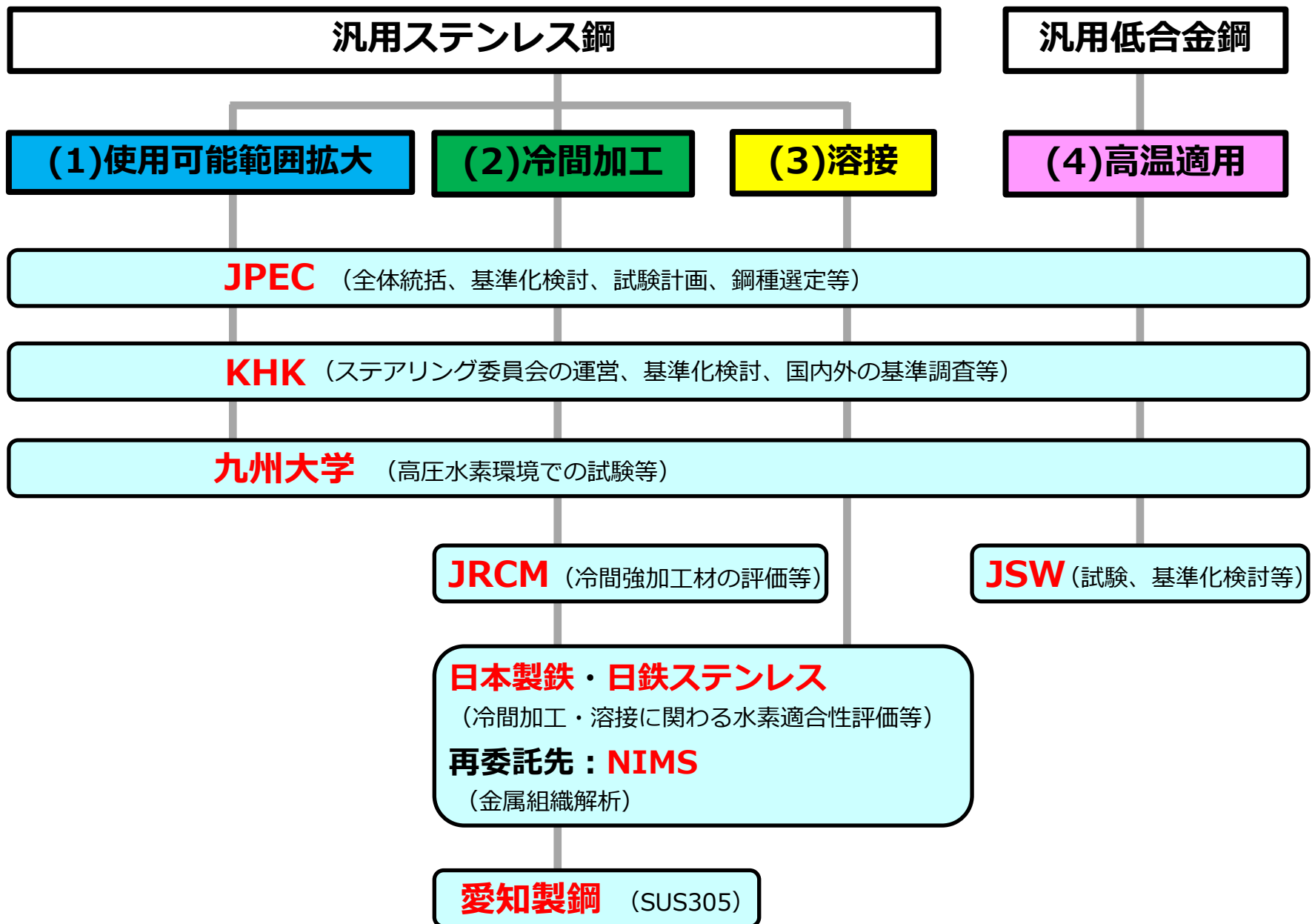
- ・本NEDO事業において研究開発を進めている鋼種 = インフラ業界からの要望に基づく
- ・例示基準の改正等、規制緩和に資する水素特性データの取得を行う

| 金属材料   | 材料の種類              | 使用機器   | 業界要望       |
|--------|--------------------|--------|------------|
| ステンレス鋼 | <b>SUS316系</b>     | 継手、配管等 | 例示基準の改正    |
|        |                    |        | 冷間加工材の基準化  |
|        |                    |        | 溶接の技術文書化   |
|        | <b>SUS304、305系</b> | 継手、配管等 | 例示基準化      |
| 低合金鋼   | <b>SNCM439</b>     | 蓄圧器等   | 技術基準の高温化改正 |



## **2. 事業体制**

## 2. 事業体制

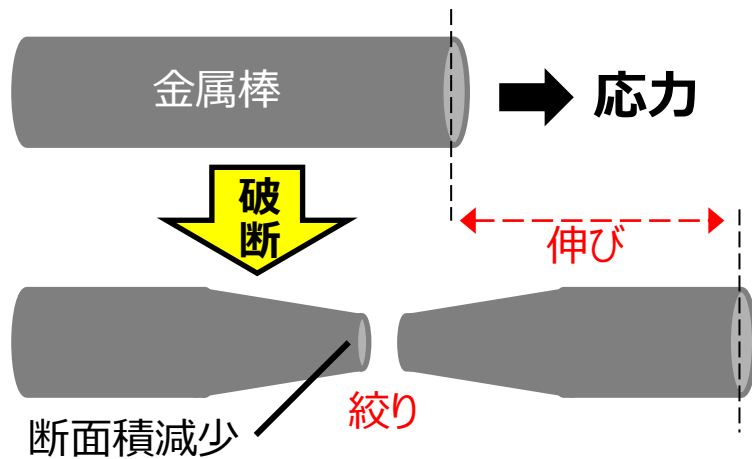


### **3. 各テーマの検討状況**

# (1) 汎用ステンレス鋼の使用可能範囲拡大

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：材料の絞り(75%)×RRA(0.8)≥ 材料規格値(60%)

RRA（相对絞り比）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%

# (1) 汎用ステンレス鋼の使用可能範囲拡大

## 本事業での検討

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<br>(60%)<br>に対し<br>75%以上 | 材料規格<br>の通り | 28.5%以上 |
| -10℃～250℃ |                               |             | 27.4%以上 |
| 20℃～250℃  |                               |             | 26.3%以上 |

## (新) 施行済

| 温度範囲      | 絞り          | 伸び          | Ni当量    |
|-----------|-------------|-------------|---------|
| -45℃～250℃ | 材料規格<br>の通り | 材料規格<br>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%<br>以上 |
|           | 管    | 50%以上 |             |
|           | 鍛鋼   | 42%以上 |             |

# (1) 汎用ステンレス鋼の使用可能範囲拡大

## <今後の検討予定>

伸び指標の水素適合性基準

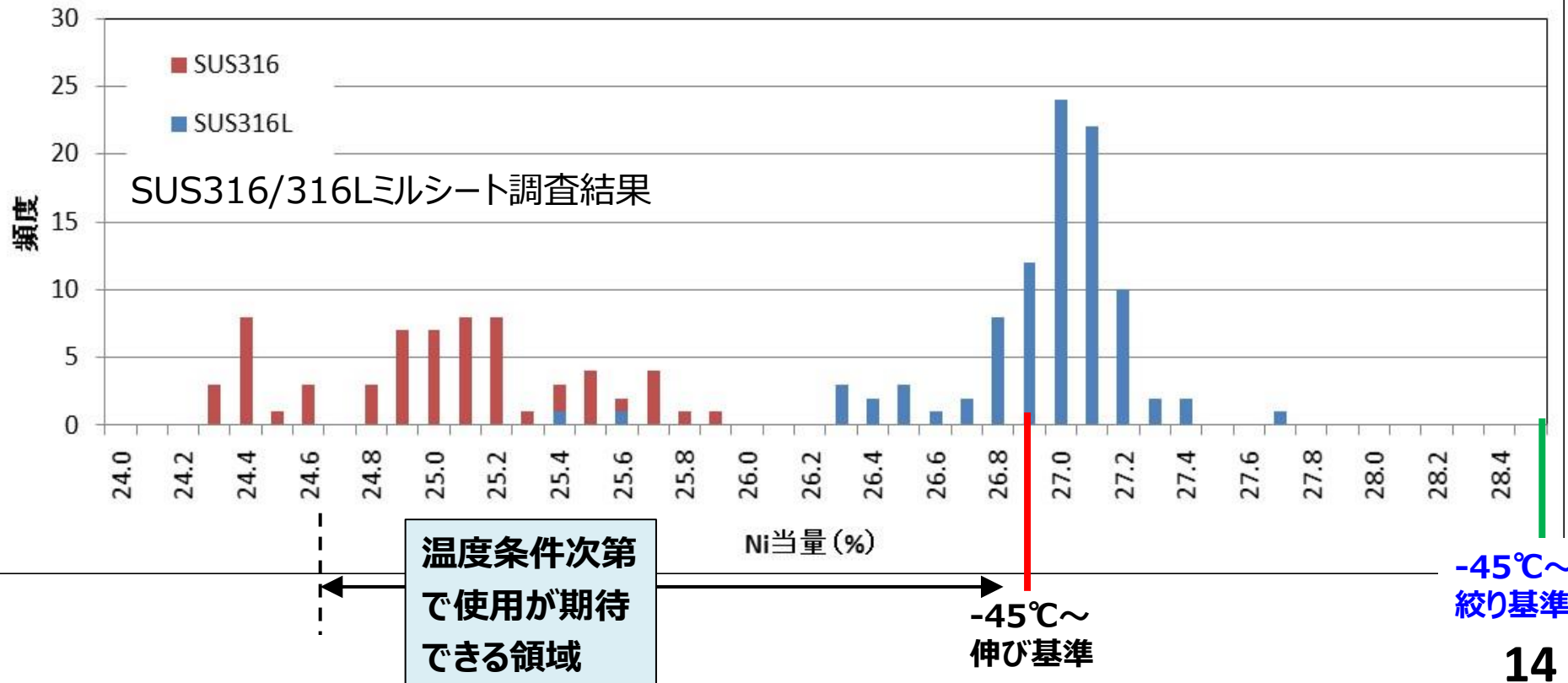


-45℃基準でNi当量を算出

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

## 【適材適所化】

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



# (1) 汎用ステンレス鋼の使用可能範囲拡大

＜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)<br>における常用の温度 | ニッケル当量 (注 1)                              |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------|
| JIS G 3214(2009)圧力容器用ステンレス鋼<br>鍛鋼品(SUSF316、SUSF316Lに限る。) | <u>-45℃以上 250℃以下</u>          | 28.5 以上 (伸びが 42%以上にあつては、 <u>26.9 以上</u> ) |
|                                                          | <u>-10℃以上 250℃以下</u>          | 27.4 以上 (伸びが 42%以上にあつては、26.9 以上)          |
|                                                          | <u>20℃以上 250℃以下</u>           | 26.3 以上                                   |
| JIS G 3459(2016)配管用ステンレス鋼管<br>(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                                   |
| JIS G 4303(2012)ステンレス鋼棒<br>(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<br>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<br>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

(注 1) ニッケル当量は次式によって求めること。

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

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。

## (2)汎用ステンレス鋼の冷間加工

### ＜水素インフラにおける冷間加工材のニーズ＞

- ・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いない

### ＜検討内容＞

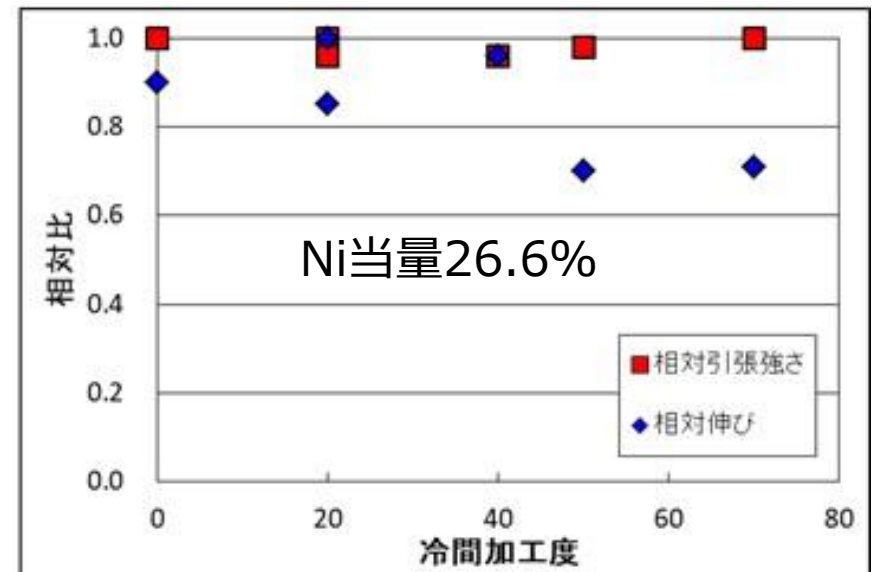
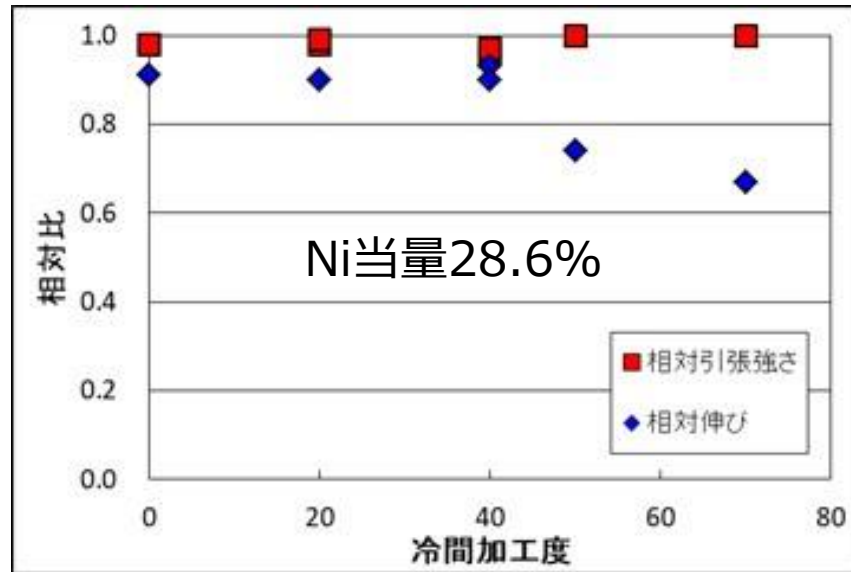
- ・各種冷間加工材の水素適合性
- ・許容引張応力の設定
- ・鋼種：SUS304、SUS305、SUS316系



## (2) 汎用ステンレス鋼の冷間加工

### ＜水素適合性に関する冷間加工の影響（SUS316L）＞

測定条件：-40～-45℃、100MPa



冷間加工度（減面率）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

## (2) 汎用ステンレス鋼の冷間加工

### <大型の冷間加工材を用いた水素適合性等の検討>

- ・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）

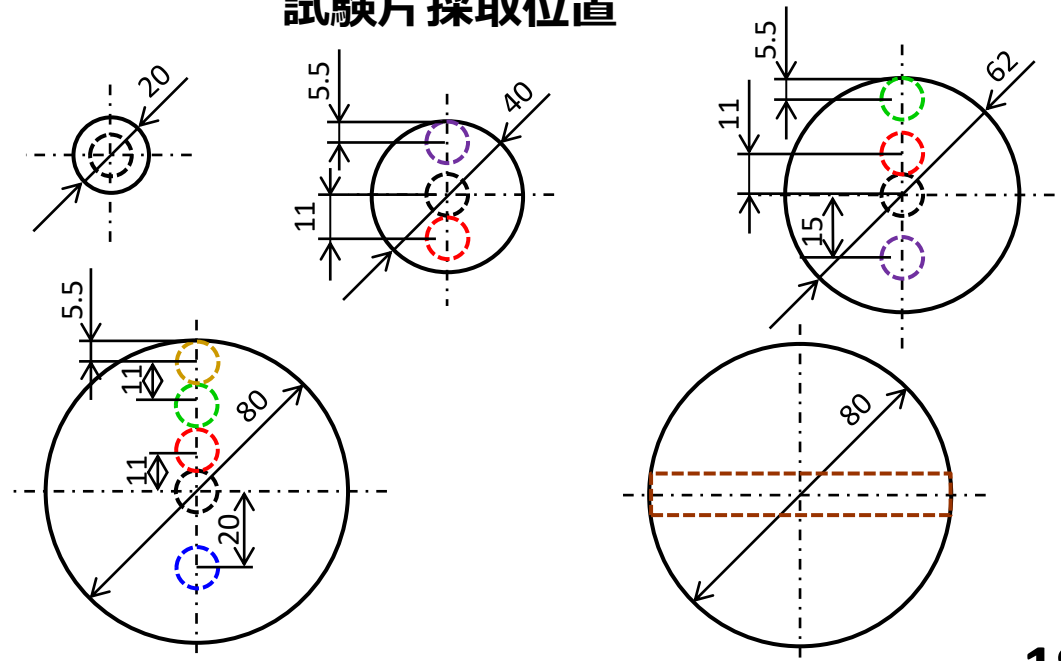
SUS316L（Ni当量27.2%）

加工度：20および40

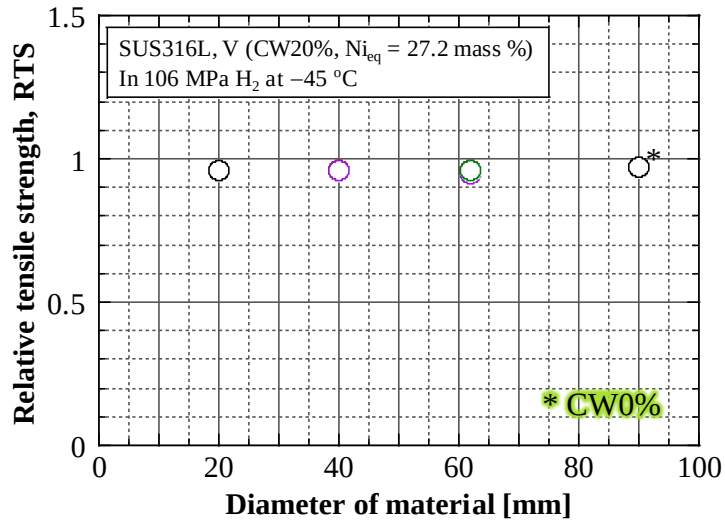
加工後サイズ：20～80mm

試験片採取位置

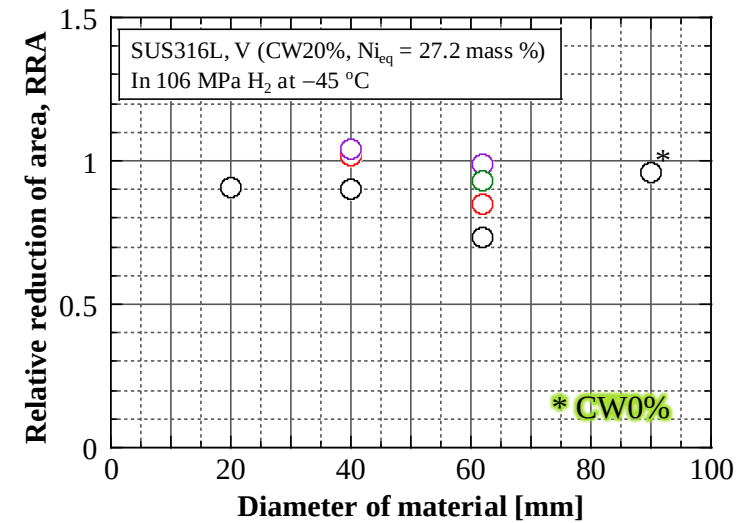
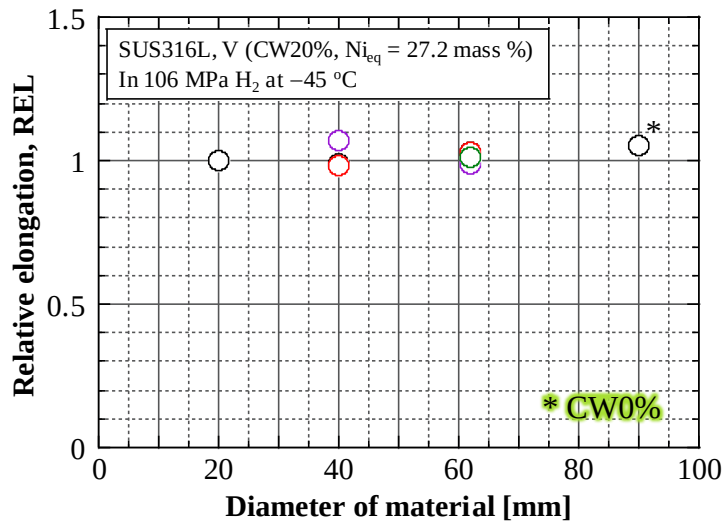
- ：材料中心から0mm  
○：10mm  
○：15mm  
○：20mm  
○：25mm  
○：35mm



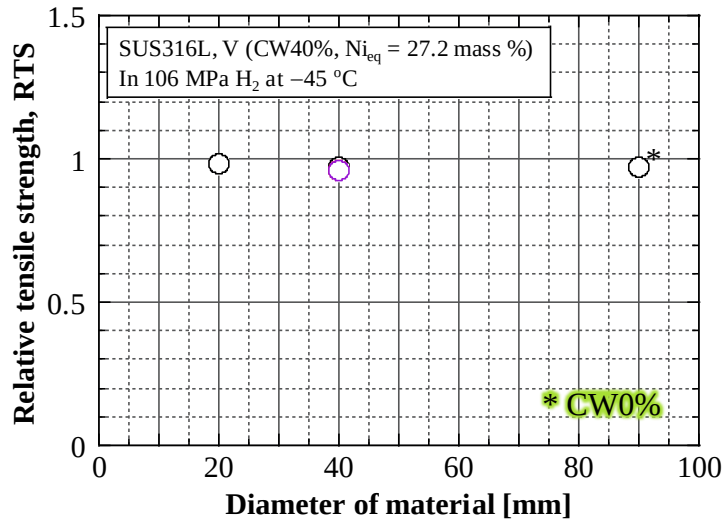
# SSRT試験結果 (SUS316L CW20% -45℃ 材料径・試験片採取位置依存性)



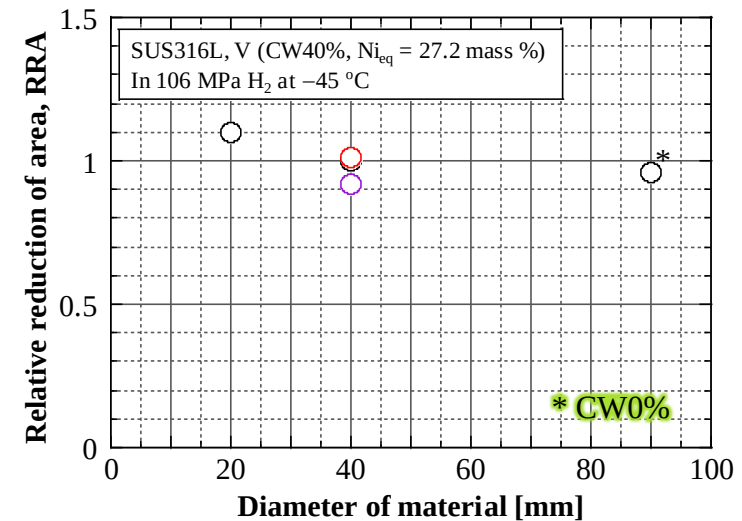
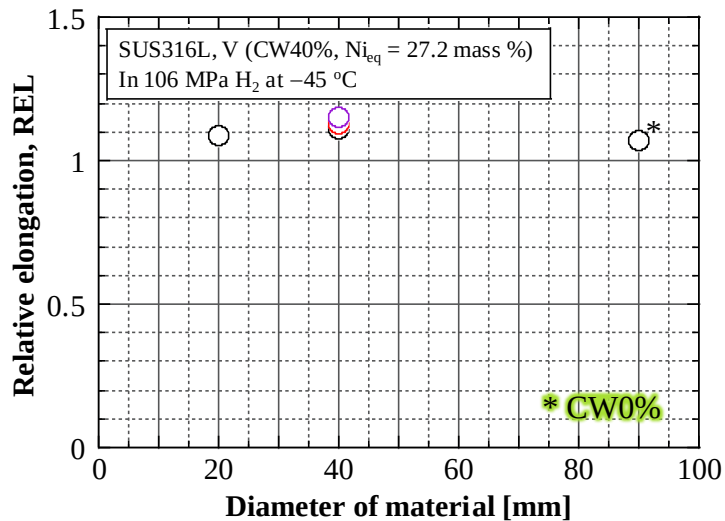
| 材料中心からの試験片採取位置 [mm] |    |    |    |    |    |            |
|---------------------|----|----|----|----|----|------------|
| 0                   | 10 | 15 | 20 | 25 | 35 | 0<br>(R方向) |
|                     |    |    |    |    |    |            |



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



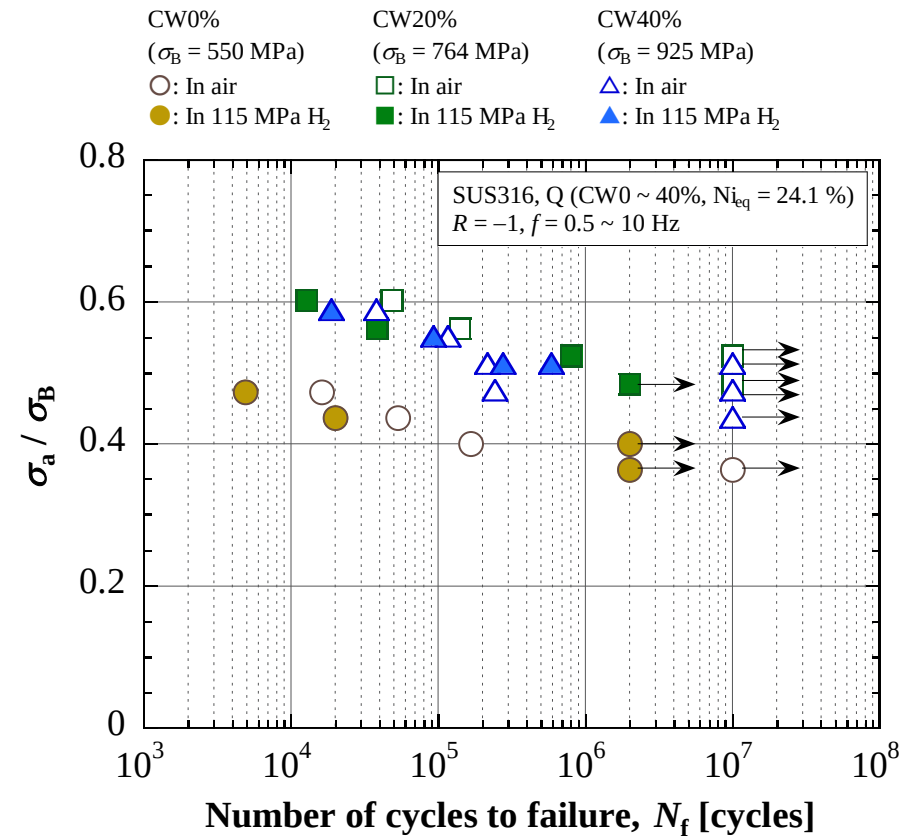
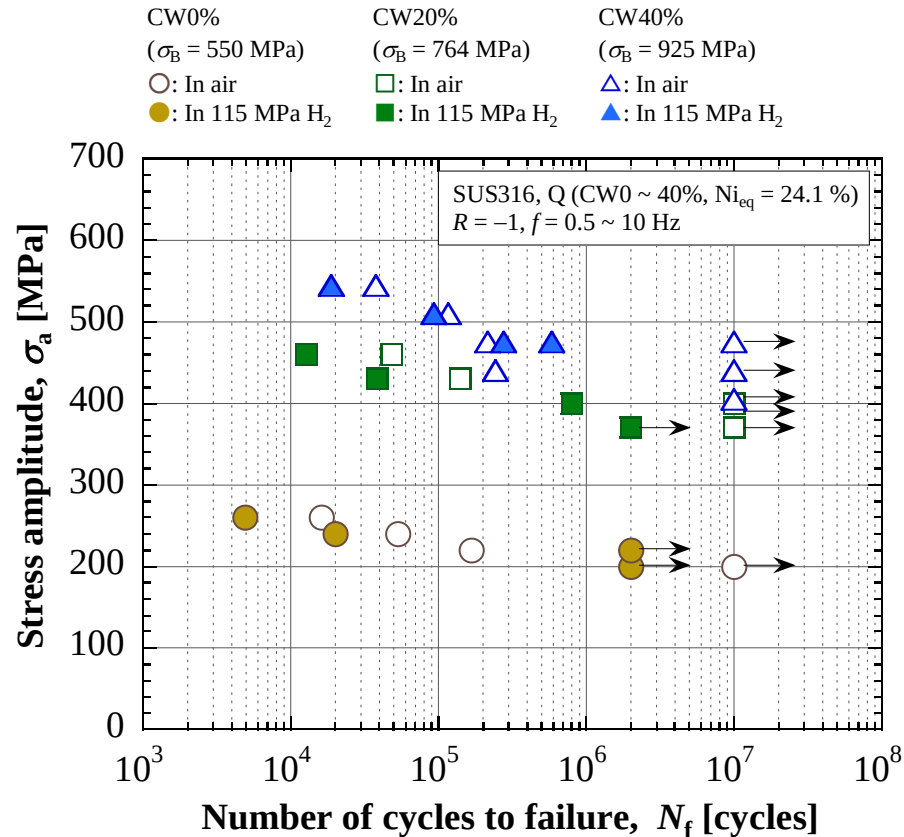
| 材料中心からの試験片採取位置 [mm] |    |    |    |    |    |            |
|---------------------|----|----|----|----|----|------------|
| 0                   | 10 | 15 | 20 | 25 | 35 | 0<br>(R方向) |
|                     |    |    |    |    |    |            |



➤ 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 CW0~40% S-N曲線)

<SUS316、Ni当量24.1%>



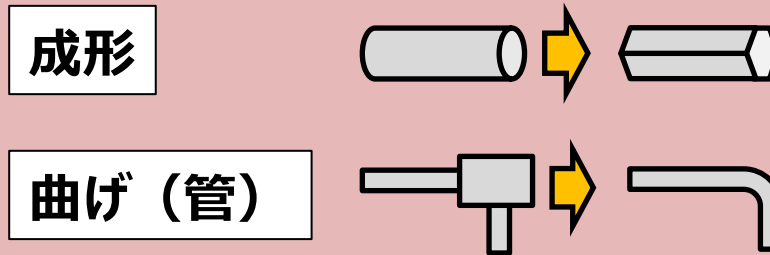
冷間加工によって疲労限度も上昇

冷間加工でも疲労限度は水素の影響を受けない

## (2)汎用ステンレス鋼の冷間加工

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）

冷間圧延、冷間引拔等による成形  
極度に減肉しない管の曲げ加工



管の曲げ～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

### <今後の検討予定>

加工後の許容引張応力設定に向けた検討

- ・ 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

## (2) 汎用ステンレス鋼の冷間加工

＜高圧水素における材料の使用イメージ＞

【原材料】

【使用方法】

【使用する許容応力】

【申請方法】

一般則  
例示基準9.2  
該当品

切削

管の曲げ（4D以上）

（4D未満：特定則範囲）

冷間加工（加工度40以内）

溶接

特定則別添1  
・別添7の  
許容引張応力  
値を使用

（固溶化熱処理材  
の許容引張応力）

独自の  
許容引張応力  
値を使用

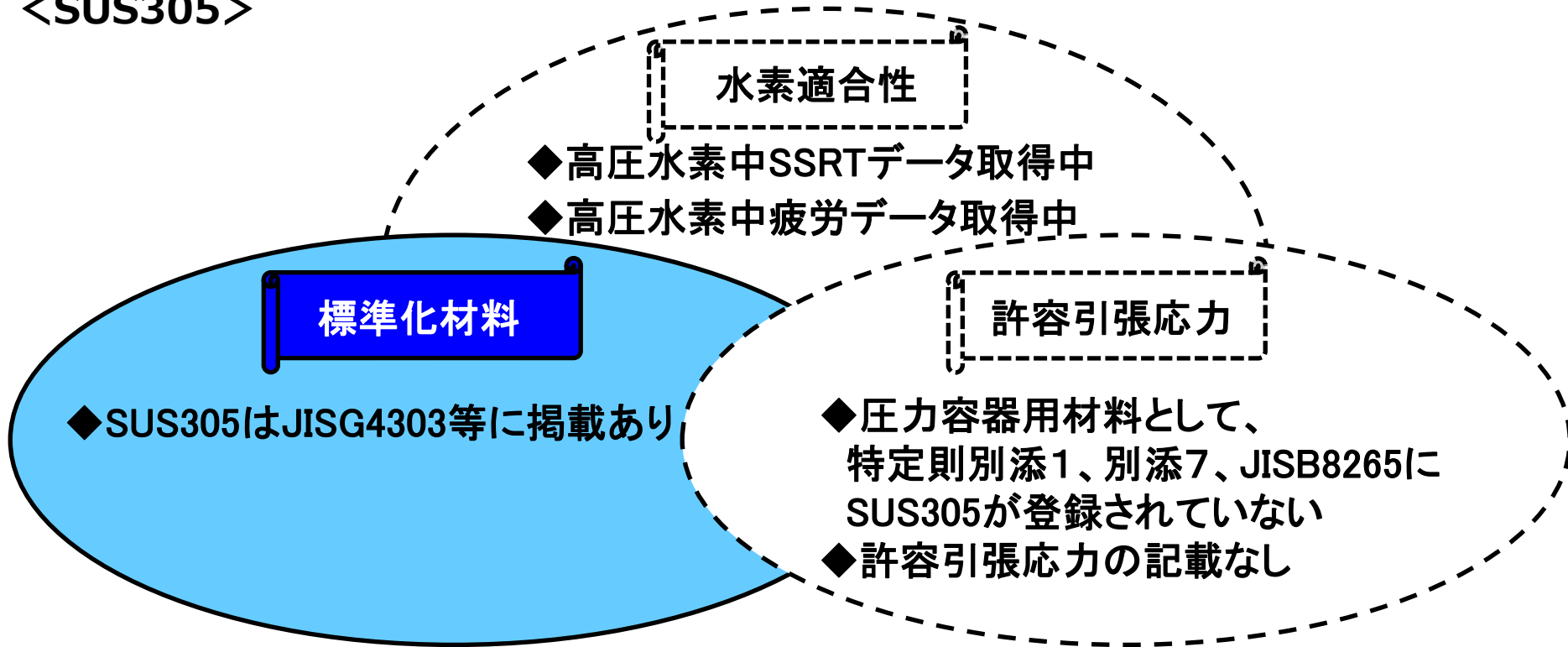
一般申請

事前評価

一般則  
例示基準9.2  
以外の材料

## (2) 汎用ステンレス鋼の冷間加工

<SUS305>



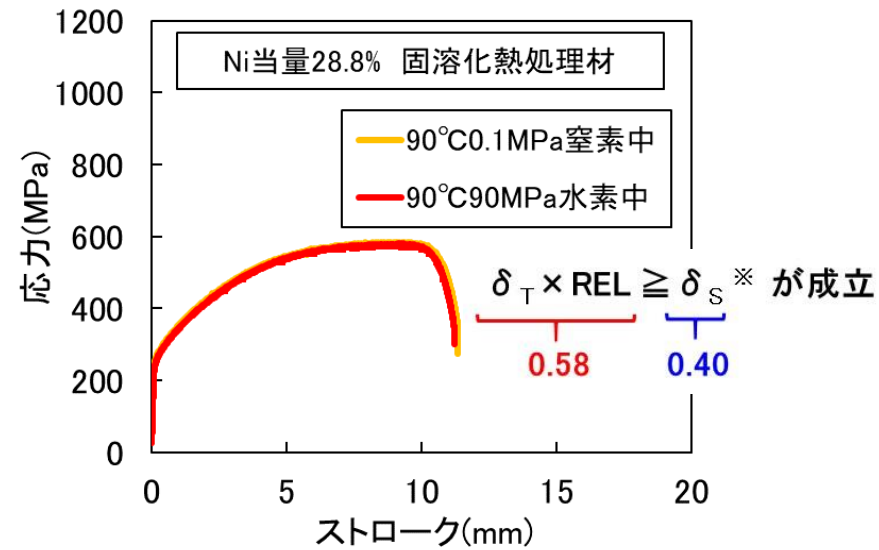
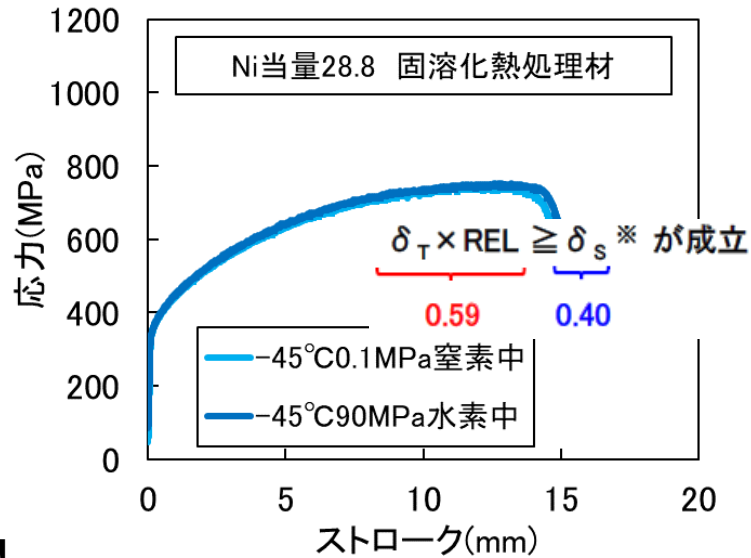
- ・ SUS305：一般則例示基準9.2で例示基準化されていない
- ・ 例示基準化には水素適合性の保証、許容引張応力の設定が必要
- ・ 冷間加工によって800MPa程度（常温）に高強度化可能



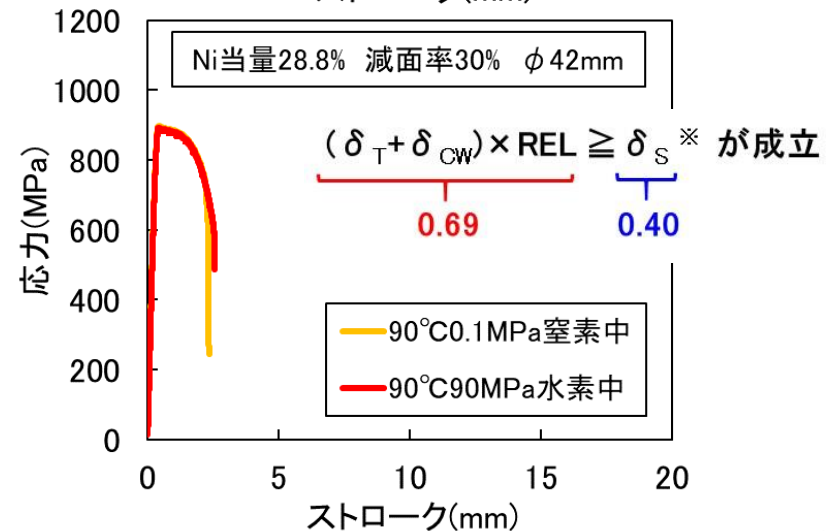
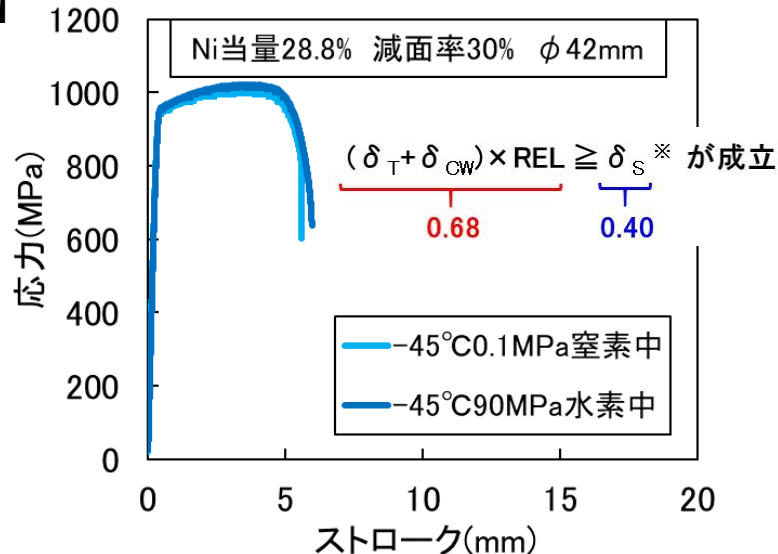
## (2) 汎用ステンレス鋼の冷間加工

- 例示基準外材料のため、KHKS0220に基づく水素適合性の判定を実施

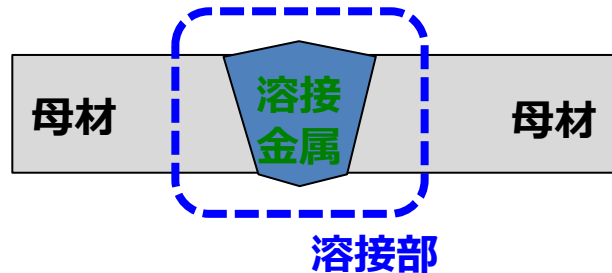
### 【母材】



### 【加工材】



### (3)汎用ステンレス鋼の溶接



母材、溶接金属、溶接部の水素適合性を評価  
溶接後熱処理なし

⇒AS WELDでの使用を目的とした検討

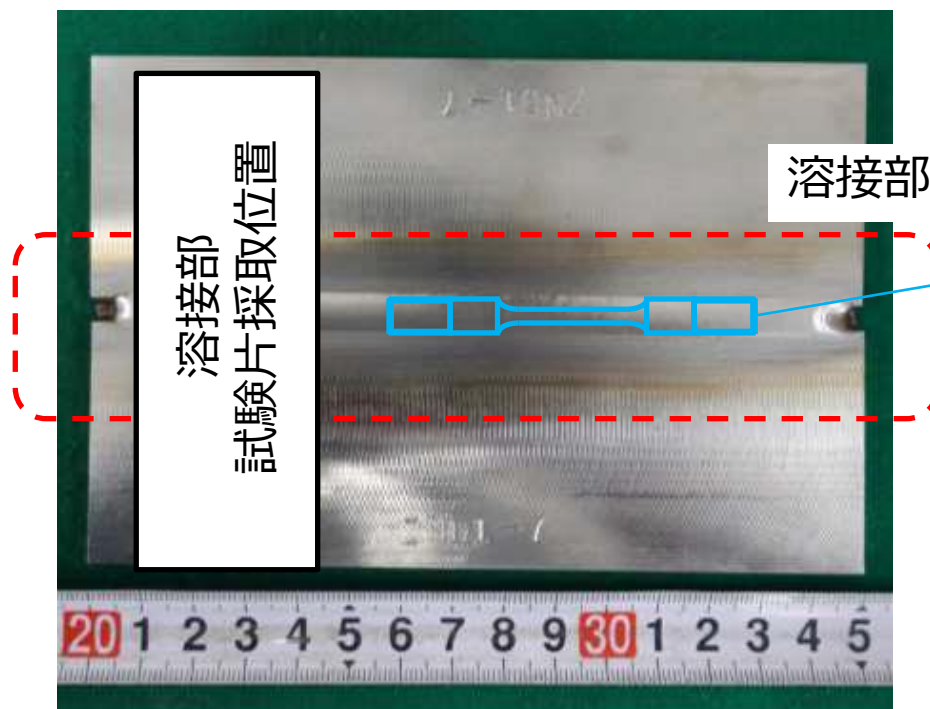
・下記の母材・溶接金属の組合せを検討

| 母材           | 成分狙い  | 水素適合性       |   |
|--------------|-------|-------------|---|
| a)SUS316L(a) | 低Ni当量 | 軽微な水素脆化の可能性 | △ |
| b)SUS316L(b) | 高Ni当量 | 水素脆化なし      | ◎ |
| c)SUS304L    | 比較材   | 水素脆化あり      | × |
| d)SUS304LN   | 比較材   | 水素脆化なし      | ○ |

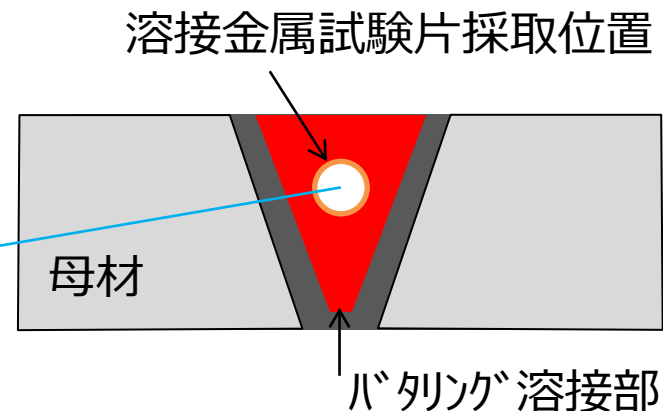
| 溶接金属       | 成分狙い  | 水素適合性       |   |
|------------|-------|-------------|---|
| A)YS316L   | 低Ni当量 | 軽微な水素脆化の可能性 | △ |
| B)YS309LMo | 高Ni当量 | 水素脆化なし      | ◎ |
| C)YS308L   | 比較材   | 水素脆化あり      | × |
| D)YS308LN  | 比較材   | 水素脆化なし      | ○ |

# 溶接部の作製

## <溶接部>



## (断面)



- 溶接条件 (バタリング溶接)
  - 入熱 : 6kJ/cm-9kJ/cm
  - シールドガス : Ar100%
  - 層間温度150℃以下

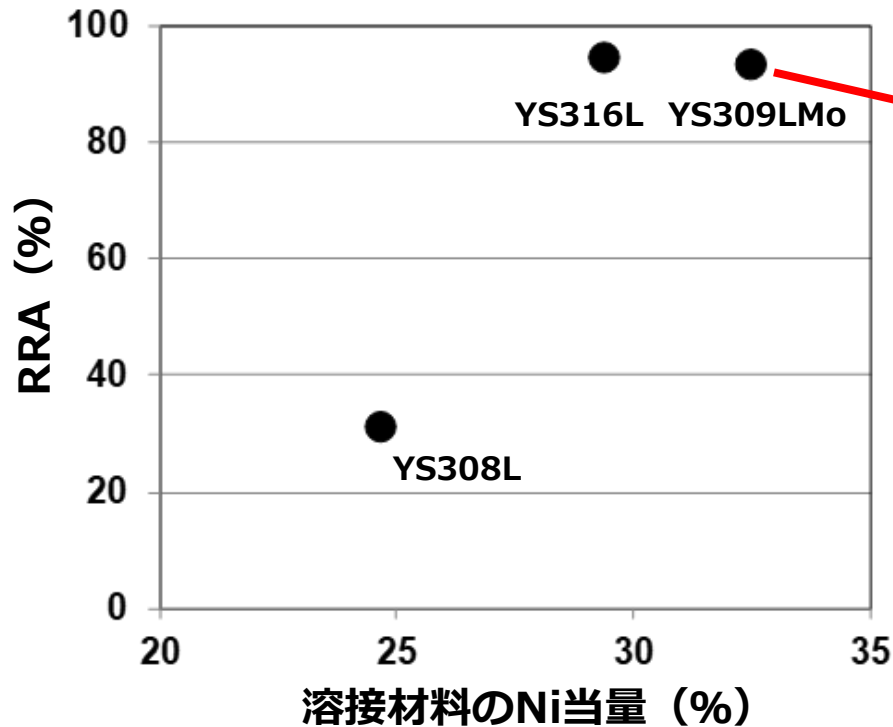
## <溶接金属組成>

| 溶接金属     | C     | Si   | Mn   | Ni    | Cr    | Mo   | N     | Cu   | Ni当量<br>(平山の式) |
|----------|-------|------|------|-------|-------|------|-------|------|----------------|
| YS316L   | 0.016 | 0.48 | 1.73 | 12.36 | 19.55 | 2.2  | 0.025 | 0.32 | 29.4           |
| YS309LMo | 0.020 | 0.35 | 2.08 | 13.92 | 23.42 | 2.23 | 0.080 | 0.01 | 33.9           |
| YS308L   | 0.022 | 0.50 | 1.66 | 9.60  | 19.63 | 0.08 | 0.020 | 0.12 | 24.6           |
| YS308LN  | 0.024 | 0.41 | 2.21 | 9.79  | 21.65 | 0.01 | 0.105 | 0.01 | 26.6           |

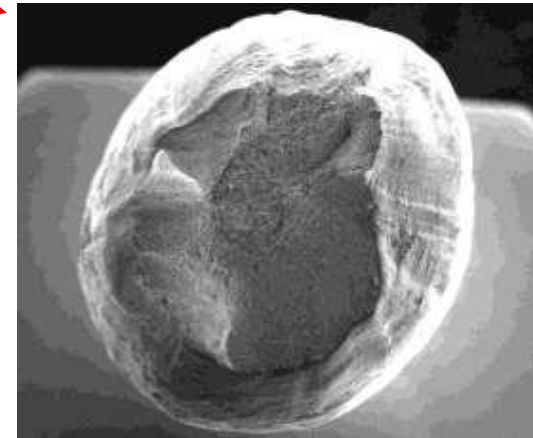
# 溶接部の水素適合性

## ＜溶接金属のSSRT結果（-40℃）＞

・溶接後の熱処理なし



## ＜破面（水素中）＞



- ・溶接部（母材＋熱影響部＋溶接金属）の延性：絞りによる評価
- ・高Ni当量の溶接金属による溶接：高RRA＝水素中での高い延性

# (3)汎用ステンレス鋼の溶接

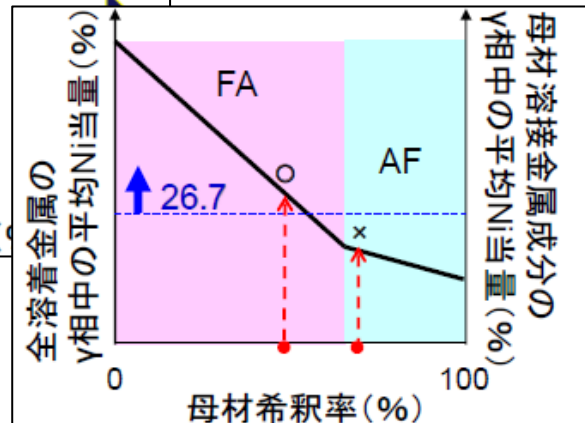
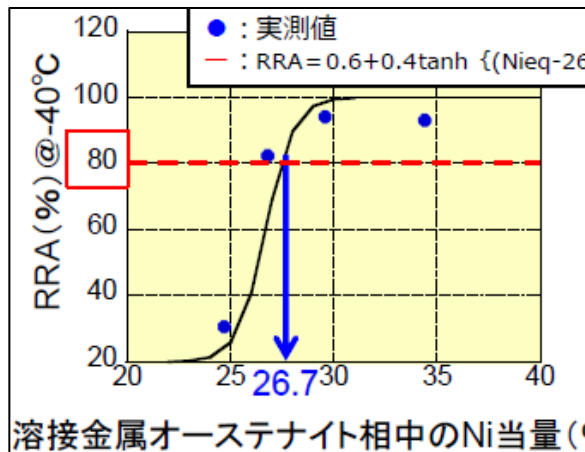
| 試験温度：-40℃ 母材            |                           | SUS304L<br>(Ni当量23.5%)   | SUS304LN<br>(Ni当量25.2%)  | SUS316L<br>(Ni当量26.5%)   | SUS316L<br>(Ni当量28.5%)   |
|-------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 溶接材料                    | 水素適合性                     | REL: 29.4%<br>RRA: 18.1% | REL: 72.3%<br>RRA: 51.7% | REL: 46.2%<br>RRA: 40.8% | REL: 94.9%<br>RRA: 79.7% |
| YS308L<br>(Ni当量24.7%)   | REL: 43.3%<br>RRA: 30.9%  | 必要に応じて<br>実施             | 必要に応じて<br>実施             | 必要に応じて<br>実施             | RRA: 27.6%<br>(BM/WM)    |
| 308LN<br>(Ni当量26.4%)    | REL: 91.6%<br>RRA: 82.4%  | 必要に応じて<br>実施             | 必要に応じて<br>実施             | 必要に応じて<br>実施             | RRA: 72.9%<br>(BM/BM)    |
| YS316L<br>(Ni当量29.4%)   | REL: 114.9%<br>RRA: 94.4% | RRA: 18.4%<br>(WM/BM)    | RRA: 56.2%<br>(WM/WM)    | RRA: 32.6%<br>(WM/BM)    | RRA: 66.1%<br>(WM/WM)    |
| YS309LMo<br>(Ni当量33.9%) | REL: 89.8%<br>RRA: 93.3%  | RRA: 16.3%<br>(WM/BM)    | RRA: 69.1%<br>(WM/WM)    | RRA: 46.6%<br>(WM/BM)    | RRA: 94.3%<br>(BM/WM)    |

試験結果

好適材料  
の組合せ

水素適合性基準

判断ロジック



溶接条件  
の範囲

OUTPUT

技術  
指  
針  
化

# 低合金鋼技術文書の改訂

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

## **4. 今後の検討予定**

## 4. 今後の検討予定

| テーマ                      | 検討予定項目                                                                          |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 汎用ステンレス鋼<br>(1) 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<br>↓<br>・適材適所の使用条件における使用可能範囲拡大を目指す<br>SUS304、SUS316 |
| (2) 冷間加工材                | ・例示基準化に向けた取り組み<br>SUS305、SUS316<br>許容引張応力の検討<br>基準化案の検討                         |
| (3) 溶接                   | ・技術基準の作成に向けた取り組み<br>水素適合性の判断スキームの整理<br>技術指針化                                    |
| 汎用低合金鋼<br>(4) 高温適用       | ・低合金鋼技術文書の改訂を完了（2022年予定前倒し）<br>2020年度を以て事業終了                                    |



# ご清聴ありがとうございました

謝辞

以上の発表に関する技術開発成果は、  
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  
「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