

2023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

2023年5月10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**

【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
 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. 各テーマの検討結果**
 - (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**

1. 本NEDO事業の概要 背景

水素事業者の規制緩和要望に基づく研究事業

【規制改革実施計画との関係】

<汎用ステンレス鋼>

2017年6月閣議決定

<No.39>

水素特性判断基準にかかる
例示基準の改正等の検討

・鋼種の拡大（汎用ステンレス）

<No.33>

水素スタンドにおける
微量漏えいの取扱いの
見直し

・継手の信頼性向上（溶接）

2018-2022
NEDO鋼材事業

(1)使用可能範囲拡大

例示基準改正
への貢献

(2)冷間加工

使用方法の拡大

(3)溶接

使用方法の拡大

<低合金鋼>

2013年6月閣議決定

・HRSでの低合金鋼の使用

<No.4>

水素スタンドの使用可能
鋼材に係る性能基準の
整備

2017年
技術文書制定（⇒蓄圧器）
JPEC-TD 0003(2017)

(4)高温適用

用途の拡大（圧縮機）

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	SUS316系	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
	SUS304、305系	継手、配管等	例示基準化
低合金鋼	SNM439	蓄圧器等	技術基準の高温化改正

2. 事業体制

2. 事業体制

汎用ステンレス鋼

汎用低合金鋼

(1)使用可能範囲拡大

(2)冷間加工

(3)溶接

(4)高温適用

JPEC (全体統括、基準化検討、試験計画、鋼種選定等)

KHK (ステアリング委員会の運営、基準化検討、国内外の基準調査等)

九州大学 (高圧水素環境での試験等)

JRCM (冷間強加工材の評価等)

JSW (試験、基準化検討等)

日本製鉄・日鉄ステンレス

(冷間加工・溶接に関わる水素適合性評価等)

再委託先：**NIMS**

(金属組織解析)

愛知製鋼 (SUS305)

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

絞り ⇒ 伸びを指標とした新たな水素適合性基準の確立

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」「延性」「疲労限度」の確保

<絞り指標>

水素中における

- ・強度低下なし (RTS=1)
- ・規格材料並みの絞りの確保

材料の絞り×RRA ≥ 材料規格値

- ・疲労限度の確保

<伸び指標>

水素中における

- ・強度低下なし (RTS=1)
- ・規格材料並みの**伸び**の確保

材料の伸び×REL ≥ 材料規格値

- ・**一様伸び**の確保
- ・疲労限度の確保



**絞り ≥ 75% (形状全て) と規定、
RRA ≥ 0.8を満たすNi当量を要求**

RRA=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%

詳細：2021年度JPECフォーラムで解説

(1) 汎用ステンレス鋼の使用可能範囲拡大

<伸び指標の水素適合性基準に基づく材料範囲の拡大 (-45℃) >

・本事業の検討結果 ⇒ 2020年例示基準改正に寄与

絞り規制の撤廃

…Hi-Ni材はJIS規格適合で使用可

形状に応じた伸び規定

必要Ni当量の低減化

(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) 施行済

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・板	57%以上	26.9% 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

<適材適所化：さらなる範囲拡大>

- ・その他の例示基準温度帯（-10℃、20℃）における伸び指標の適用

-10℃：Ni当量 26.0%以上

20℃：Ni当量 24.6%以上

（材料の必要伸びは-45℃の場合と同じ）

- ・鋼種の拡大

SUS305も、SUS316/316Lと同じNi当量規制を適用可能

（圧力容器のJIS規格改定が必要）

とすることで安全に使用可能との結論を得た。

(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・成形 ⇒材料を製品形状に近づけ、継手の使用や切削ロスを低減
- ・高強度化 ⇒薄肉化、軽量化

<冷間加工の懸念>

冷間加工による金属組織変化 ⇒水素適合性への影響

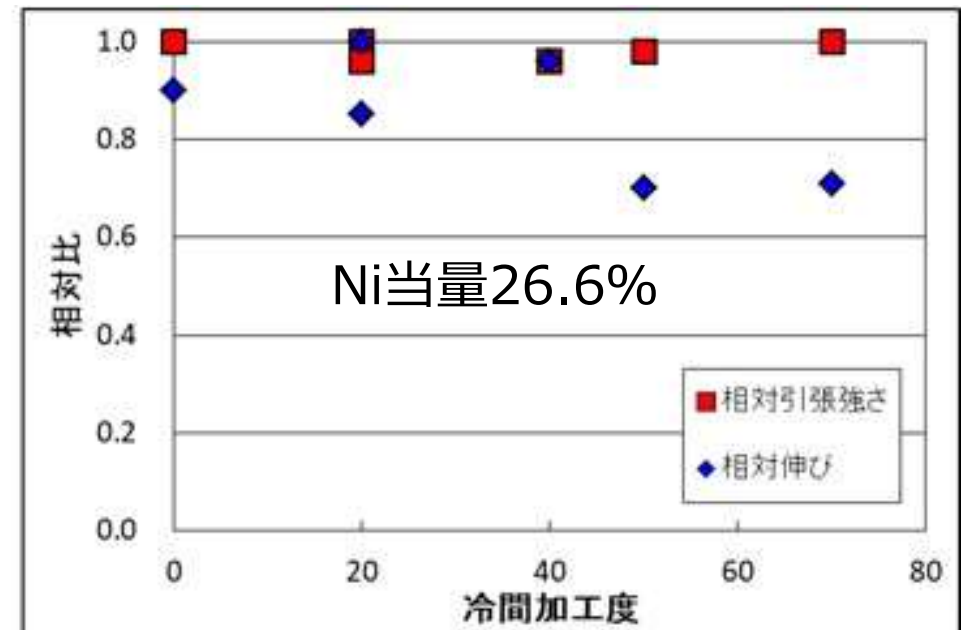
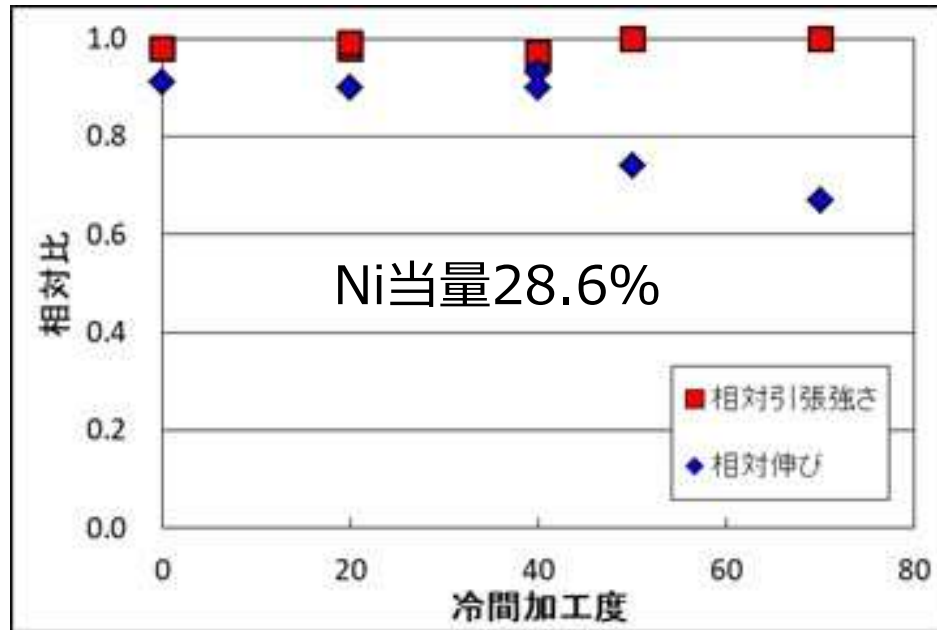
<検討内容>

- ・各種冷間加工材の水素適合性
- ・許容引張応力の設定

(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

<管の曲げに関する水素適合性の検討>

・4D曲げ

KHKS0220 : 減肉率10%を超えないこと

実際の4D曲げで減肉率5%程度

(減肉率 : $100(t_0 - t_f) / t_0$)

・4D未満の曲げ

『高圧ガス特定設備等の試験検査に関する質疑応答集』(KHK)

制限項目 管の種類及び曲げ半径		外径変化率		肉厚減少率
		短径側	長径側	
鋼管の場合	$R \geq 2D_0$	10%以下	10%以下	15%以下
	$2D_0 > R \geq 1.5D_0$	JIS G 3461 (1988) ボイラ・熱交換器用炭素鋼鋼管 附属書2表1 "曲げ部の寸法許容差"に従うこと。		
鋼管以外の 管の場合	$R \geq 3D_0$	10%以下	10%以下	15%以下
	$3D_0 > R \geq 2D_0$	10%以下	10%以下	18%以下
	$2D_0 > R \geq 1.5D_0$	15%以下	15%以下	20%以下

備考 表中のRは管の中心線における曲げ半径、 D_0 は管の公称外径を表す。

⇒曲げ単体で冷間加工度40% (減肉率40%) を超えない

影響なし = 水素適合性に配慮した**曲げ後の熱処理は不要**

(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 ⇒ 材料内部の不均一性

⇒ 材料内部の水素適合性・強度分布を検証

試料（冷間引抜材）

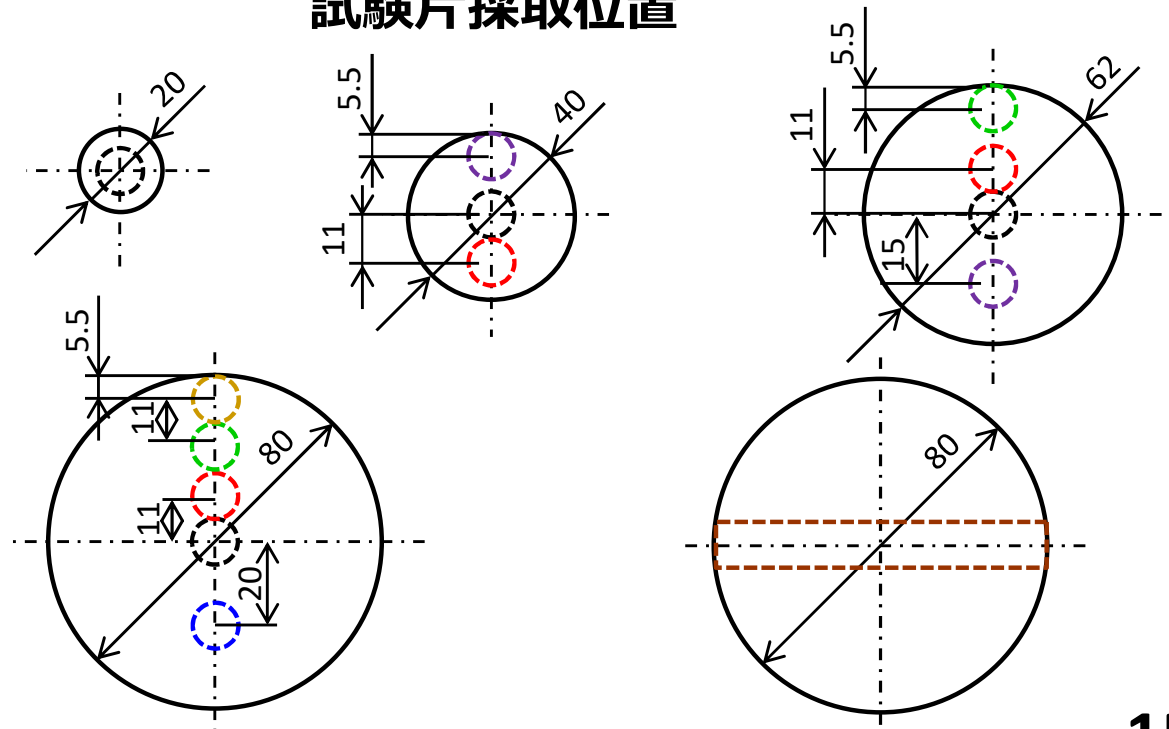
SUS316L (Ni当量27.2%)

加工度：20および40

加工後サイズ：20～80mm

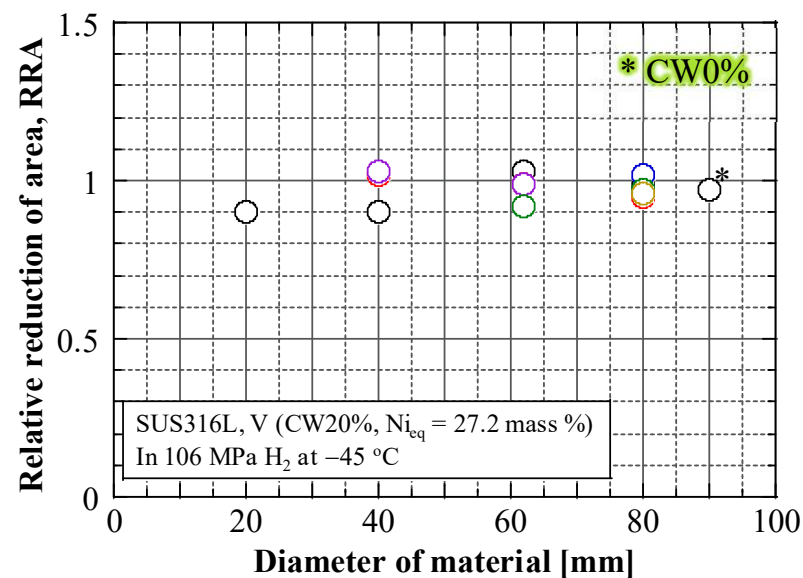
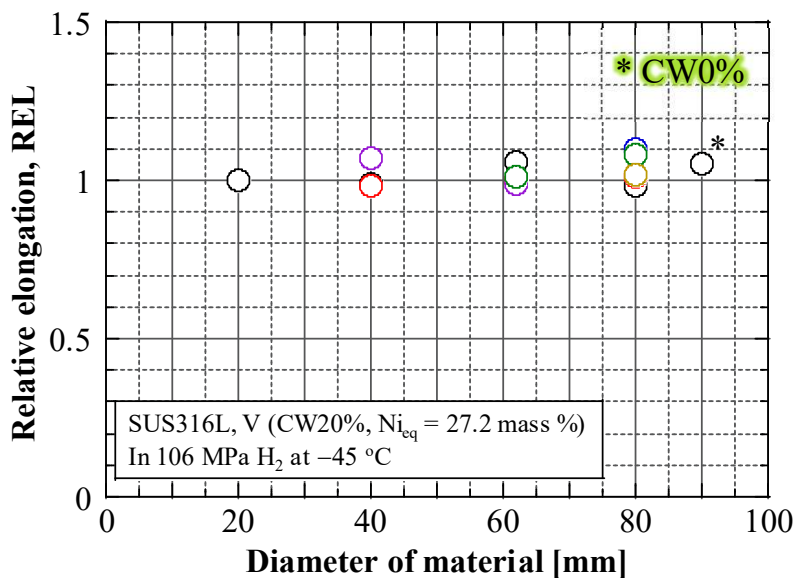
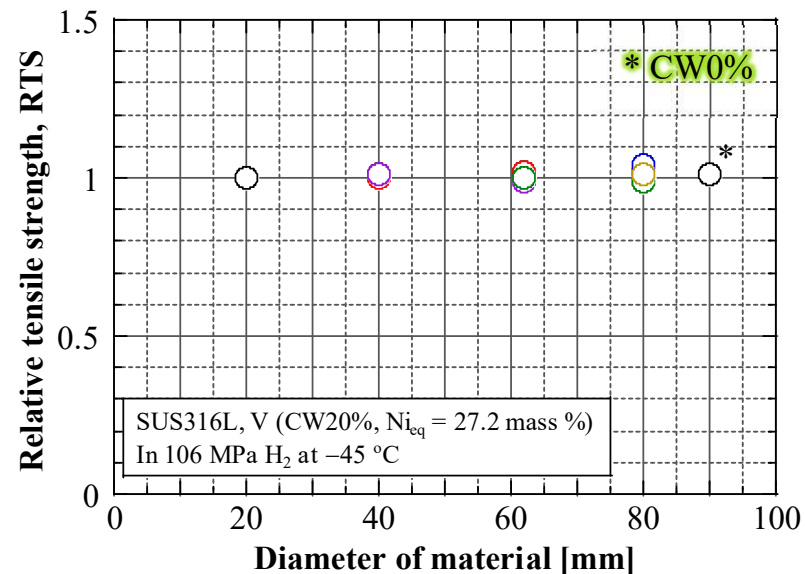
- ：材料中心から0mm
- ： // 10mm
- ： // 15mm
- ： // 20mm
- ： // 25mm
- ： // 35mm

試験片採取位置



<水素適合性>

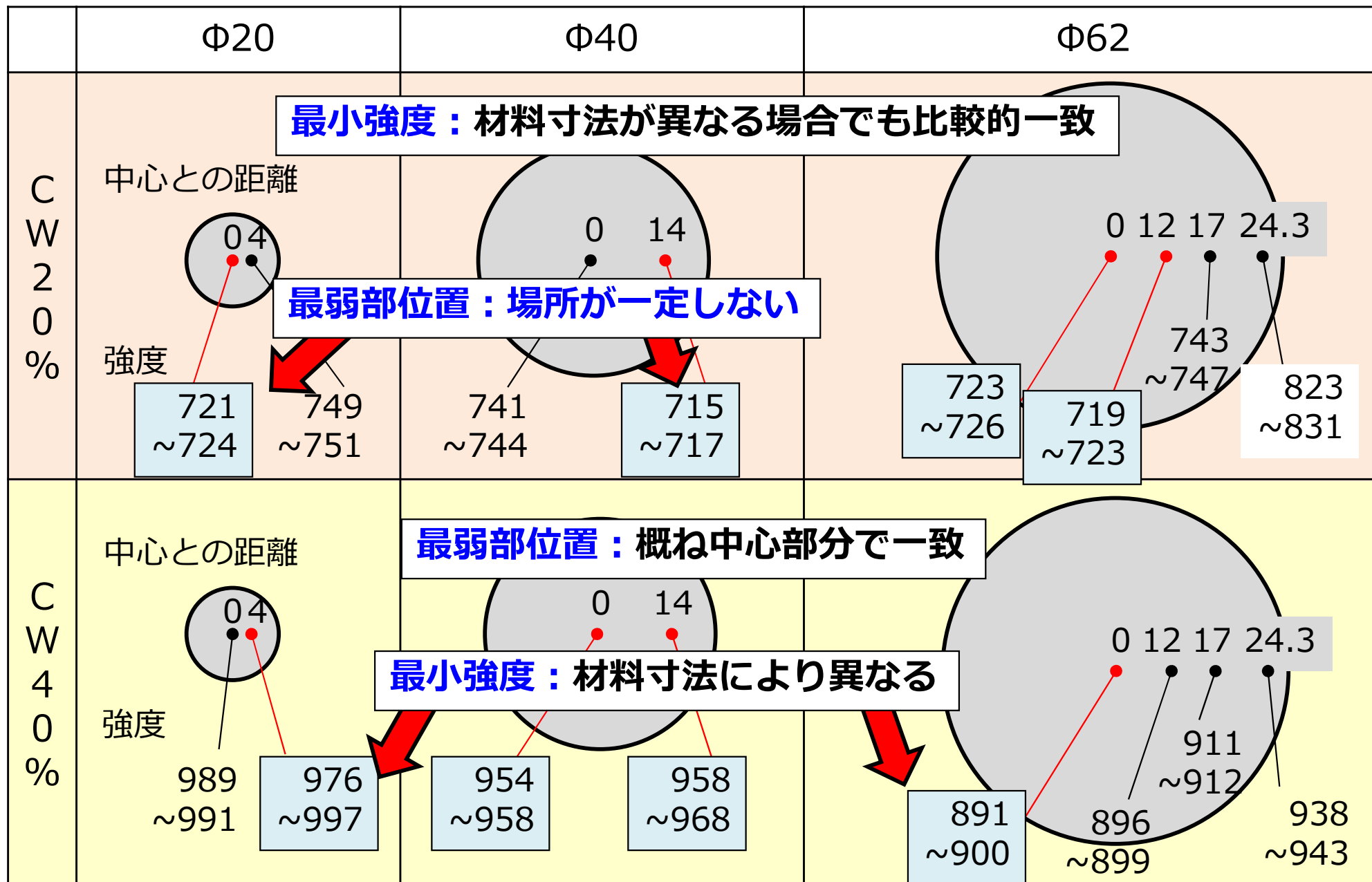
材料中心からの試験片採取位置 [mm]						
0	10	15	20	25	35	0 (R方向)
○	○	○	○	○	○	⊖



- 材料径や試験片採取位置によらず, RTS, RELおよびRRAに対して, 水素の影響は認められなかった.

(2) 汎用ステンレス鋼の冷間加工

<冷間引抜材内部の引張強さ>



(2) 汎用ステンレス鋼の冷間加工

<許容引張応力設定における課題>

加工の影響が一定でないことに起因

- ・ 最弱部位置

- ・ 最小強度

⇒ 試験片位置を決定できず、材料強度を定義できない

また、

冷間加工度、材料寸法その他、

加工方法（冷間圧延・冷間引抜）の影響も受ける

材料内部の塑性変形度の差異が

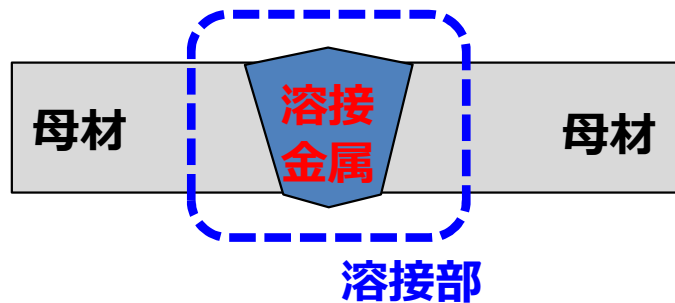
⇒ 今後の課題

<管の許容引張応力>

小径管等、材料全体で試験可能な場合 ⇒ 材料強度の定義可能

冷間加工（管）の許容引張応力表（案）を作成

(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)

⇒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	○

(3) 汎用ステンレス鋼の溶接

<As weldで使用するための課題>

高圧水素配管に使用できる材料

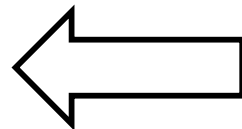
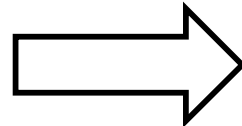
一般則例示基準で例示

<溶接前の状態>

オーステナイト

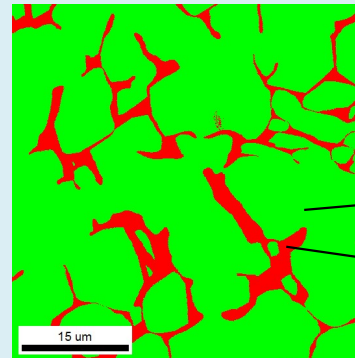
- ・ SUS316L
- ・ XM-19

溶接



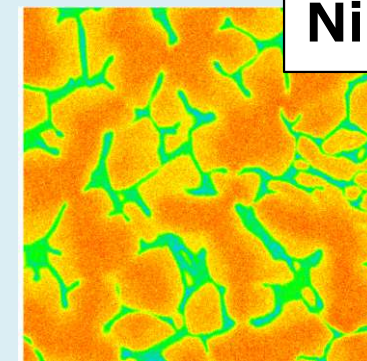
溶体化処理
(溶融・急冷)

オーステナイト相・フェライト相に分離



オーステナイト相
フェライト相

成分の偏析



この状態 (As weld)での水素適合性判断が必要

溶接技術指針で紹介

(3)汎用ステンレス鋼の溶接

<溶接技術指針>

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

概要 : As weldの溶接継手を対象に、
溶接部の水素適合性の判断方法と基準に関する解説
JPECホームページから入手可能

(3) 汎用ステンレス鋼の溶接

溶接健全性が確認できている

好適事例の使用

それ以外の材料の使用

① Ni当量 $\geq 28.5\%$ の
SUS316L と
YS309LMo を
使用している

② 溶接部の初層で
オーステナイト相、
フェライト相の形態
要件を満たしている

③ SSRTによる
水素適合性の評価で、
水素中で強度・延性
が低下しない
(RTS=1、RRA=1)

As weldの溶接継手で高圧水素環境で使用可能

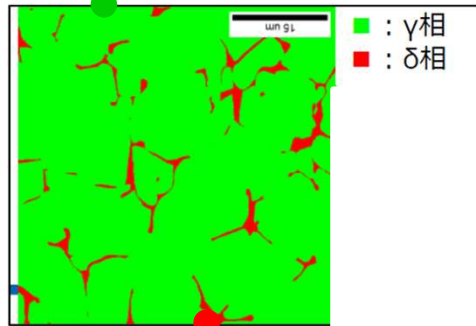
(3) 汎用ステンレス鋼の溶接

<As weldでの水素適合性判断基準>

② 溶接金属部分のオーステナイト相・フェライト相の要件

- 溶接金属のオーステナイト相：Ni当量（平山式）26.8%以上であること
低温高圧水素中で強度・延性・疲労が確保できる
(伸び基準の水素適合性を満たすオーステナイト相)

溶接金属の
EPMA・
EBSDで
判断する

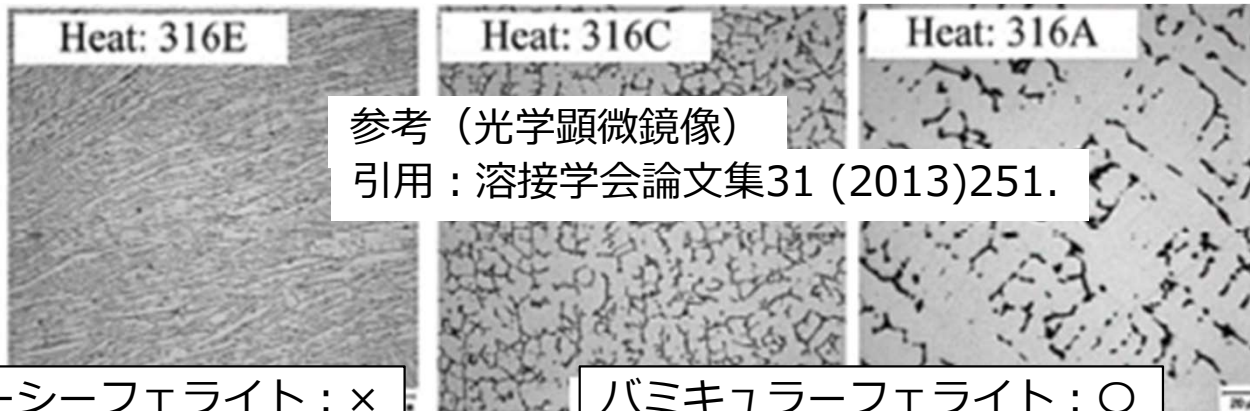


Ni当量を確認する場所は凝固モードで変わる

FAモード：δフェライトの近傍

AFモード：オーステナイト粒内の中央
オーステナイト相のNi当量が、低くなり易い所で26.8%以上

- 溶接金属のフェライト相：溶接金属内で連通せずオーステナイト中に分散



参考（光学顕微鏡像）

引用：溶接学会論文集31（2013）251.

- フェライト相が分散
⇒ 水素適合性に影響しない
との研究報告あり
- フェライト相でき裂進展し、
溶接部が破断する現象はNG

水素に強いオーステナイト相 & 阻害しないフェライト相

(3) 汎用ステンレス鋼の溶接

<As weldでの水素適合性判断基準>

③SSRTによる溶接部の水素適合性の直接的評価

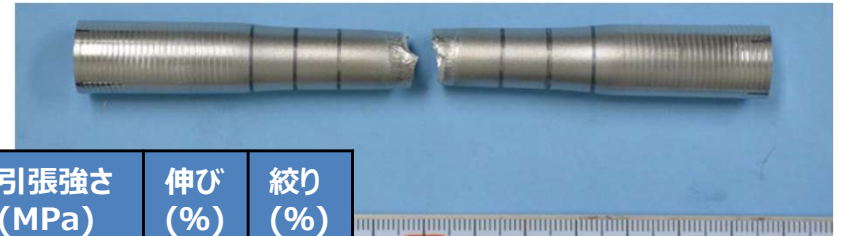
○SUS316L管 ノンフイラー溶接による実例

- ・直径14.3、t=1.5、Ni当量26.6%
- ・心金を使用し固定、管の内外の気圧・雰囲気等を等しくするため心金に通気口を設ける
- ・試験片（溶接継手）全長10cm、余盛は削除

（本事例では破断箇所の特定のため溶接部両端、心金付近等に複数の標線を設置）

【判定基準】

溶接における伸び値の規定が無い^{ため}、延性を示す指標が大気中 = 水素中であること



温度	試験片	雰囲気	破断位置	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)
室温	素管	水素 _{100MPa}	C 中央	242	575	89	65
	溶接継手	大気	C 中央	244	551	50	49
	溶接継手	水素 _{100MPa}	C 中央	235	565	56	41
低温 -45℃	素管	水素 _{100MPa}	C 中央	315	720	97	65
	溶接継手	窒素	C 中央	302	684	64	40
	溶接継手	水素 _{100MPa}	C 中央	302	696	61	44

破断位置：
全て中央（溶接部）

RTS≒1 REL≒1 RRA≒1

(4) 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

本事業の成果と課題

本事業の成果と課題

テーマ	検討予定項目
汎用ステンレス鋼 (1) 使用可能範囲拡大	<ul style="list-style-type: none">・伸びの指標の水素適合性基準の確立・-45℃における使用可能範囲拡大案の作成 ⇒ 例示基準化に寄与 -45℃で使用可能なSUS316/316LのNi当量の低減 28.5% ⇒ 26.9%・適材適所化検討の使用可能範囲拡大案の作成 20℃ Ni当量 26.3% ⇒ 24.6% -10℃ Ni当量 27.4% ⇒ 26.0% SUS305の例示基準への追加
(2) 冷間加工材	<ul style="list-style-type: none">・冷間加工度と水素適合性の関係性の明確化 SUS316/316L例示基準材：冷間加工度40%まで許容 水素適合性に配慮した曲げ後の熱処理の必要なし・大型の冷間加工材を用いた検討 冷間加工材内部における水素適合性：均一 機械的特性：材料寸法、冷間加工度、加工方法等により 不均一、傾向の不一致・許容引張応力案の検討 棒・板材：材料強度の決定方法・測定方法 ⇒ 今後の課題 管：許容引張応力表案の作成

本事業の成果と課題

テーマ	検討予定項目
(3) 溶接	<ul style="list-style-type: none">・溶接技術指針の作成 As weld溶接継手に関する 水素適合性の確認が不要な材料組合せの例示 溶接金属部分の水素適合性の判断方法
汎用低合金鋼 (4) 高温適用	<ul style="list-style-type: none">・200℃における水素適合性を検討・低合金鋼技術文書 (JPEC-TD0003) の改訂 対象に圧縮機を追加

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