

2019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

2019年5月8日

一般財団法人石油エネルギー技術センター
自動車・新燃料部 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**

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（JRRCM）
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）

水素ステーション用鋼材の規制の背景

高圧・高速の水素充填を可能とするためには水素を-40℃程度に冷却しておく必要があり、高い水素圧・低温下での使用に耐える鋼材の選定が必要であった。

⇒2012年度に、絞りを指標としたSUS316系ステンレスの判断基準（Ni当量規制）を制定。例示基準化が図られ、70MPa水素ステーション建設に寄与した。

参考：Ni当量

出典：高圧ガス Vol.49 No.10 (2012)山田敏弘・小林英男「水素ステーション設備に使用する材料の選定基準」

表 オーステナイト安定化と元素の関係

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	N	Cu	Nb	出典
12.6	0.35	1.05	1	0.65	0.98	—	—	—	平山
48.6	1.14	0.85	1	1.44	2.03	48.6	—	—	Angel
9.56	-0.11Si ²	0.61	1	0.18	—	9.56	—	—	武本
15.9	0.32	0.28	1	0.47	0.64	15.9	1	2.3	野原
15.9	0.32	0.66	1	0.47	0.64	15.9	1	—	大嶋

ミルシート記載成分



Ni当量式として、材料規格の化学成分のみで判別可能な平山の式を採用した。

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

単位：wt%

絞りを指標とした鋼材の選定基準

出典：高圧ガス Vol.49 No.10 (2012)山田敏弘・小林英男「水素ステーション設備に使用する材料の選定基準」

- ・ データ解析の結果、**水素適合性の指標**として「**絞り**」に着目
- ・ 安全担保の基準として、「**水素中の絞り値 \geq JIS規格値**」を想定
- ・ 申請者の利便性を鑑み、(SSRT試験を実施することなく)ミルシート記載事項から判断出来る要求事項を例示

例示基準要求

JIS規格におけるSUS316・SUS316Lの絞り規定値は60%以上
ミルシート記載の実績値調査の結果、大気中の絞りの実績値は75%を超える

実使用条件における絞り値の低下を加味してもJIS規格を上回ることを条件

水素中の絞り \geq JIS規格値(大気中) を担保

即ち、

水素中の絞り (75% × RRA^{*} (相対絞り比)) \geq 60%
を満たす、RRA \geq 0.8となる材料の条件 (Ni当量) を見出す。

* RRA (相対絞り比) = 水素中の絞り ÷ 大気中の絞り

低温・高圧水素中の絞りに関するNi当量の影響

出典：高圧ガス Vol.49 No.10 (2012)山田敏弘・小林英男「水素ステーション設備に使用する材料の選定基準」

JIS規格におけるSUS316・SUS316Lの絞り規定値は60%以上である。
 ミルシート記載の実績値調査の結果、絞りの実績値は75%を超える。



RRA \geq 0.8であれば、下記判別式を満足する。(SSRT試験免除のためNi当量を規制)

$$\left[\begin{array}{l} \text{引張試験または} \\ \text{ミルシートの絞り} \end{array} \right] \times \text{RRA} \geq \text{規格の絞り}$$

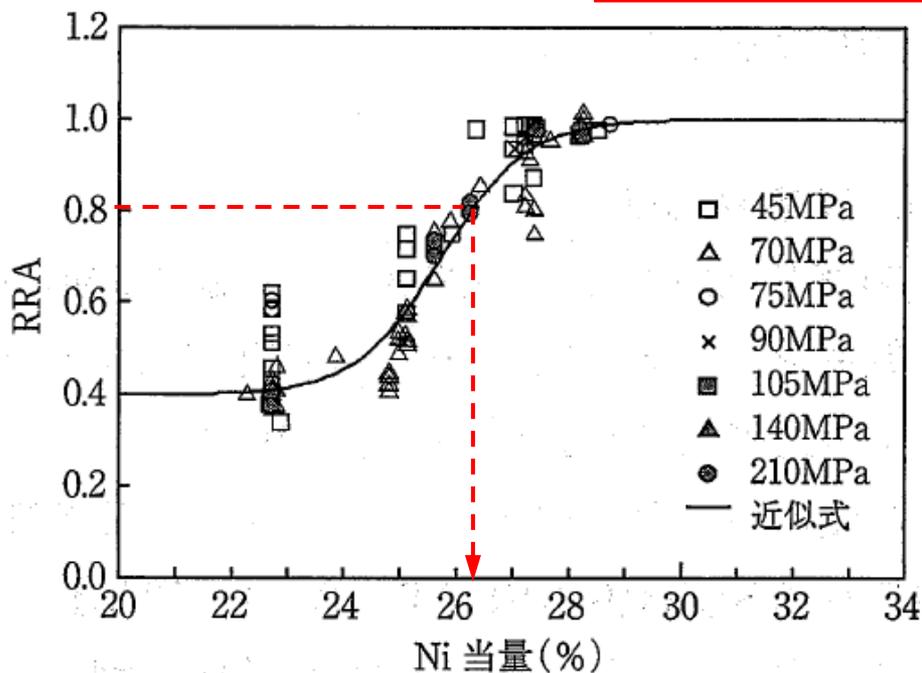


図 20°CにおけるNi当量とRRAの関係

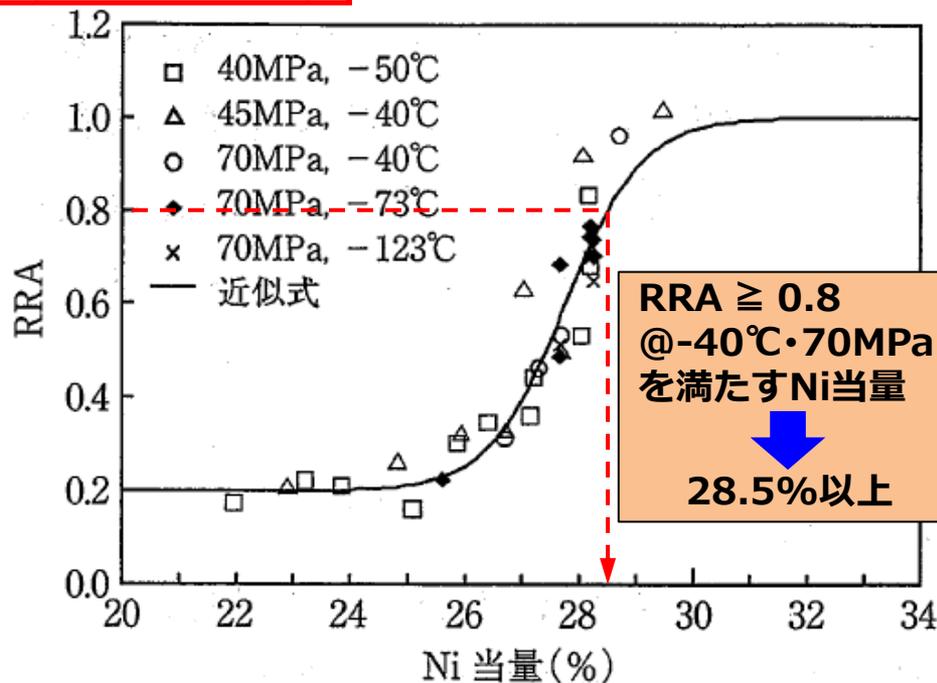
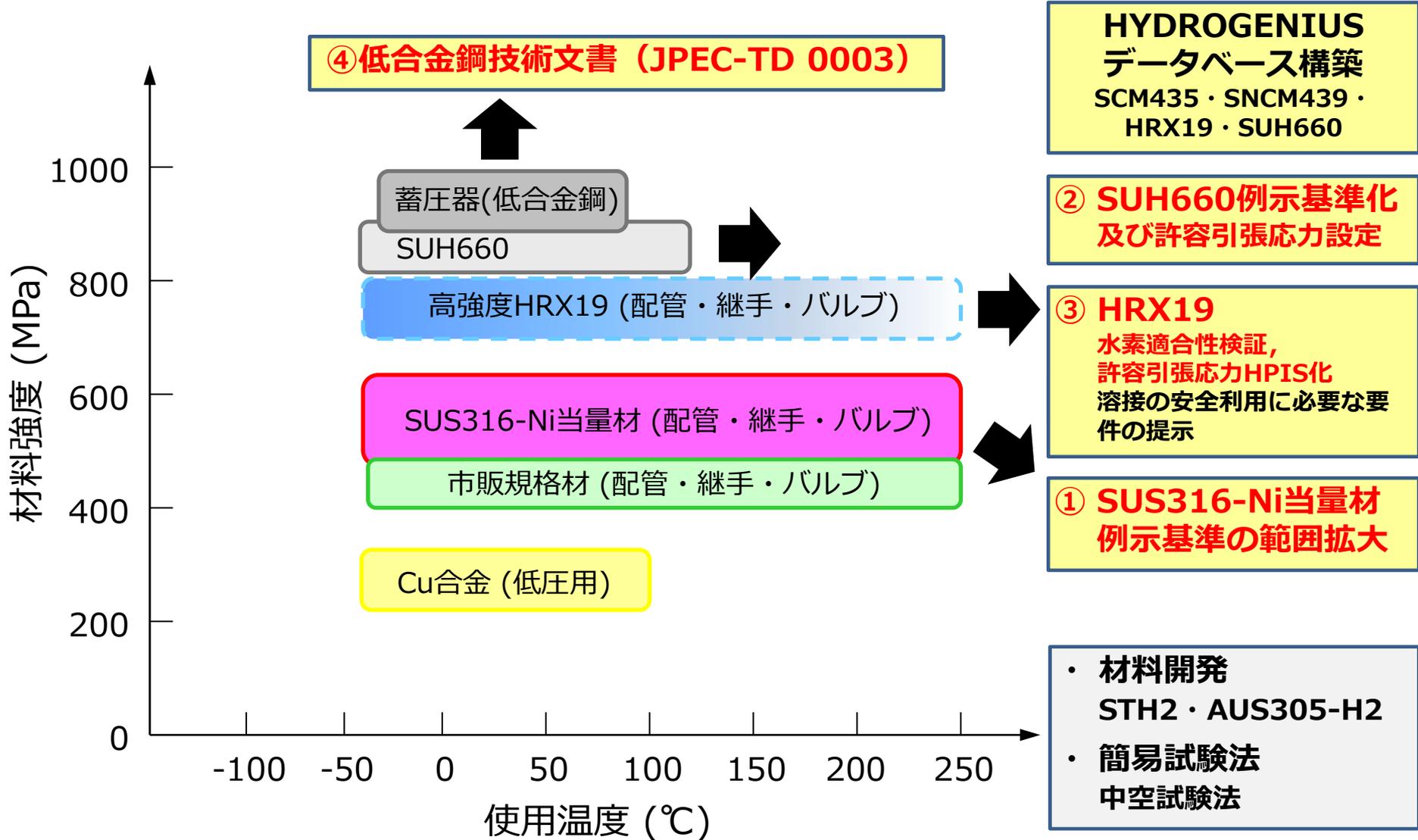


図 -40°CにおけるNi当量とRRAの関係

前NEDO事業(2013~2017年度)の成果まとめ

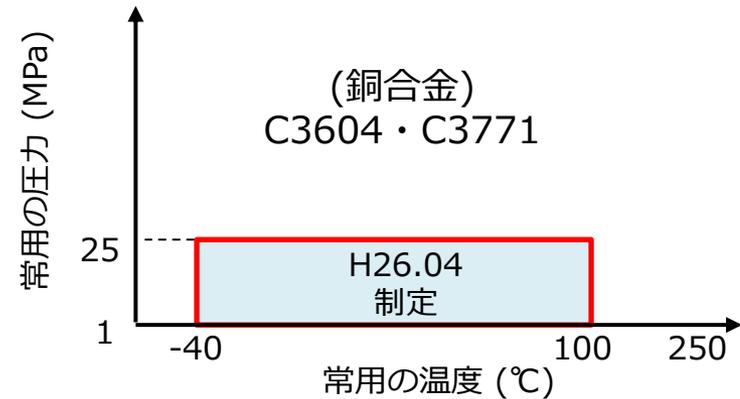
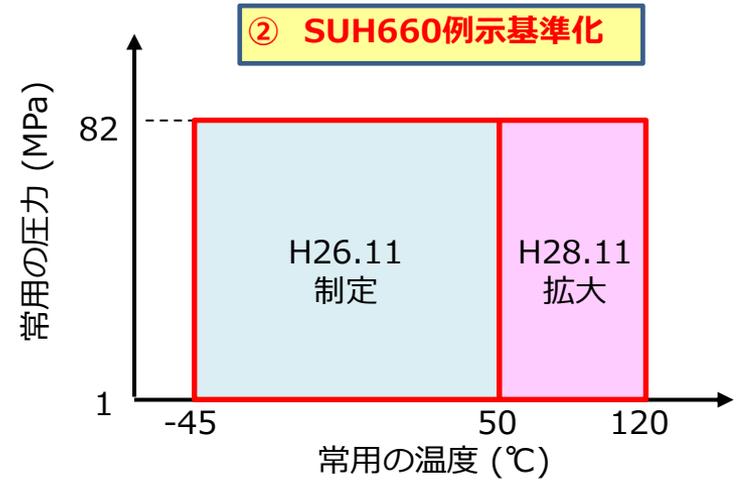
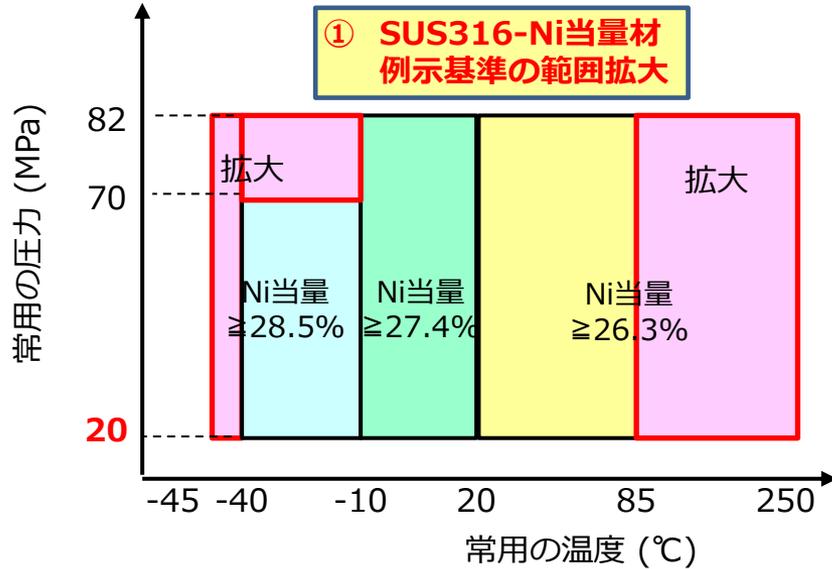
水素ステーションで使用可能な鋼種の拡大を目的としてNEDO事業を実施した。



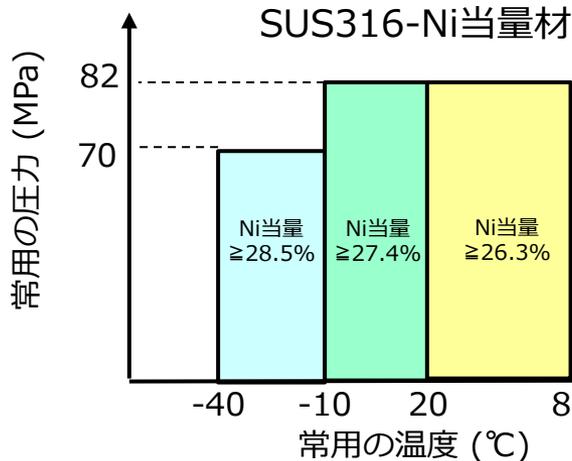
使用温度と材料強度の関係

前NEDO事業の例示基準化実績

鋼種・対象範囲を拡大し例示基準化した。



↑ ・範囲の拡大 (高圧、高低温)
・20MPa以下：Ni当量の枠外



・種類の拡大

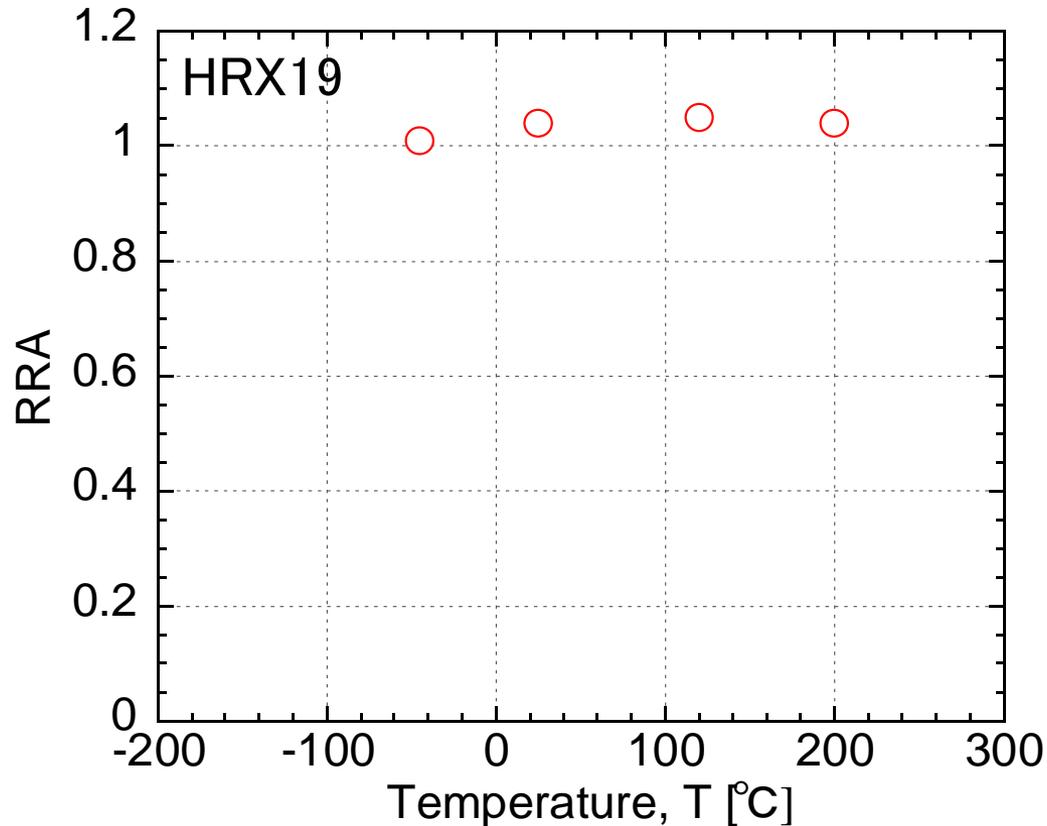
②SUH660：許容引張応力追記

許容引張応力について申請を行い、例示基準に追記された。
(2016年11月1日施行)

①特定則例示基準別添1別表1 (一部抜粋) ⇒ SUH660の許容引張応力値追記

規格名称	種類の記号	製造方法等	規定最小引張強さ	各温度における許容引張応力(N/mm ²)																			
				温度 -269	-196~-60	-45	-30	-10	0	40	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375~800
耐熱鋼棒 JIS G 4311 (1991)	SUH 21~ SUH 409	(略)																					
	SUH 446	(53)	510	—	—	—	—	—	128	128	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	(略)
耐熱鋼板 JIS G 4312 (1991)	SUH 660	(66)(67) (68)(69)	900	—	—	224	224	224	224	224	224	224	224	224	223	222	220	218	216	214	213	—	
	SUH 661	(62) (9)(62)	690 690	—	—	—	—	—	172	172	172	171	165	159	153	148	144	142	137	135	132	130	(略)
	SUS 304~ SUS 430	(略)																					

③ HRX19 : 水素適合性検証



溶接可能な高強度ステンレス鋼であるHRX19について、 -45°C から 200°C の温度範囲において良好な耐水素性を示すことを検証した。

③ HRX19 : 許容引張応力のHPIS化

表1.2 鉄鋼材料の許容引張応力(JIS以外の材料)

種類	記号	標準成分 (%)	材料規格の引張強さ N/mm ²	母材の区分	グループ番号	外圧チャート番号	製造方法	注	各温度(°C)における許容引張応力 N/mm ²																			記号								
									~40	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500		525	550	575	600	625	650		
ASME SA-312/312M (2015)	TPXM-19	22Cr-13Ni-5Mn	690				2 S			172	172	171	167	163	160	157	155	154	153	152	151	150	149	148	146	146	144	143	141	138	136	133	121	85	57	TPXM-19
ASME SA-479/479M (2015)	XM-19	22Cr-13Ni-5Mn	690				2			172	172	171	167	163	160	157	155	154	153	152	151	150	149	148	146	146	144	143	141	138	136	133	121	85	57	XM-19
ASME 鋼製鋼種	TPXM-19-ETP						2 S	(j) k)		200	200	196	190	186	182	180	177	175																	TPXM-19-ETP	
	XM-19-ETP						2	(h) j) k) 0		200	200	196	190	186	182	180	177	175																	XM-19-ETP	

HPIS

圧力容器及びボイラ用材料の
許容引張応力表

(引張強さに対する安全係数 4 対応)

Allowable Tensile Stress Values for Boiler
and Pressure Vessels Materials
(Design Margin 4)

HPIS C 104:2018

2018年11月22日

一般社団法人日本高圧力技術協会
High Pressure Institute of Japan

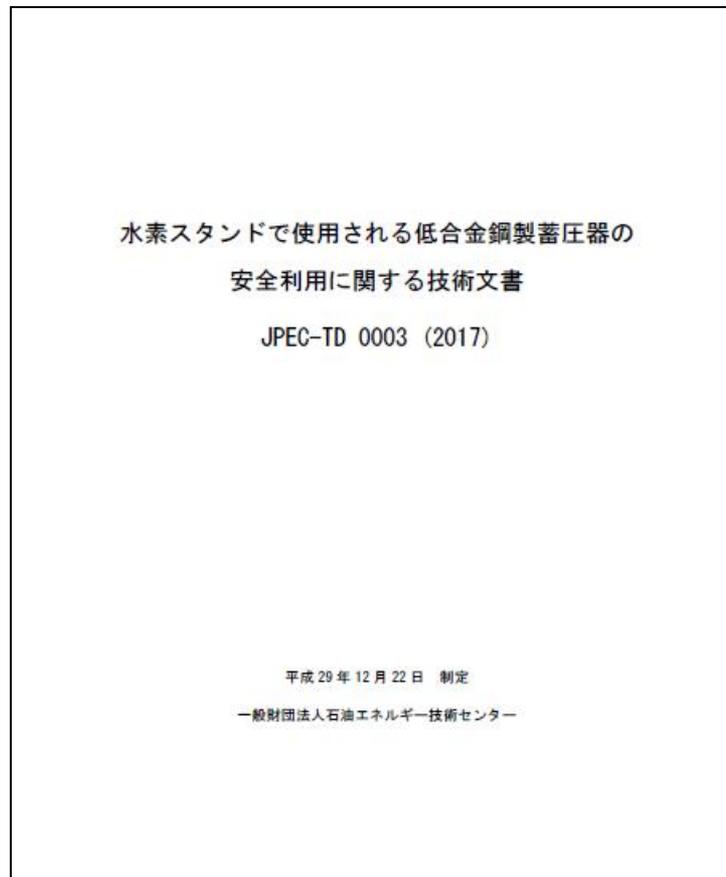
著作権法により無断での複製、転載等は禁止されております。

記号	形状	各温度(°C)における許容引張応力 N/mm ²								
		~40	75	100	125	150	175	200	225	250
TPXM-19-ETP	管	200	200	196	190	186	182	180	177	175
XM19-ETP	丸棒	200	200	196	190	186	182	180	177	175

耐水素性に優れ溶接可能な高強度ステンレス鋼であるHRX19について、ASME規格材XM-19の質別材(XM-19-ETP)として、-45°C~250°Cの温度範囲で許容引張応力を制定した。(HPIS C104 : 2018)

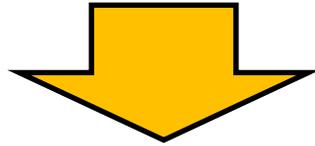
④低合金鋼技術文書

低合金鋼技術文書案を検討し、業界自主基準の審議体であるJPEC水素インフラ規格基準委員会で承認され、**JPEC-TD 0003**として発行した。⇒ JPECのHPで公開



水素ステーション用鋼材を取り巻く課題

Ni当量材は水素の影響が極めて少ないが、調達コストが高い。



水素ステーションコスト低減策の一つとして汎用性の高い鋼材（ステンレス鋼・低合金鋼）の使用が求められている。

汎用材の中には、絞りを指標とした現行の判断基準は満足しないが水素ステーションで使用可能なものがありそうなことが分かりつつある。

そこで、新たな水素特性判断基準（新指標）を検討し、安全を担保しつつ例示基準のNi当量範囲拡大を目指す。

さらに、冷間加工材（高強度化&曲げ加工対応）や継手の信頼性向上のための溶接継手の使用が求められている。

新規NEDO事業（2018年度～）の概要

(1) 汎用ステンレス鋼

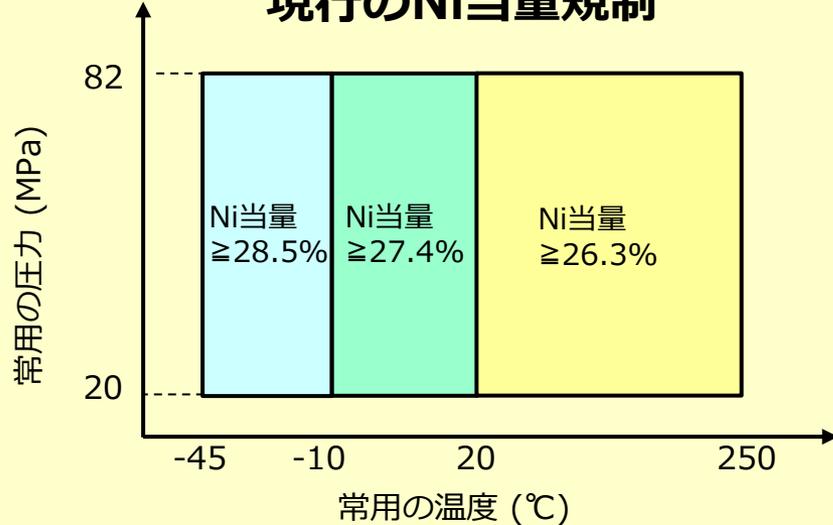
水素ステーションで使用可能な材料の範囲を拡大（下図）

使い方の拡大

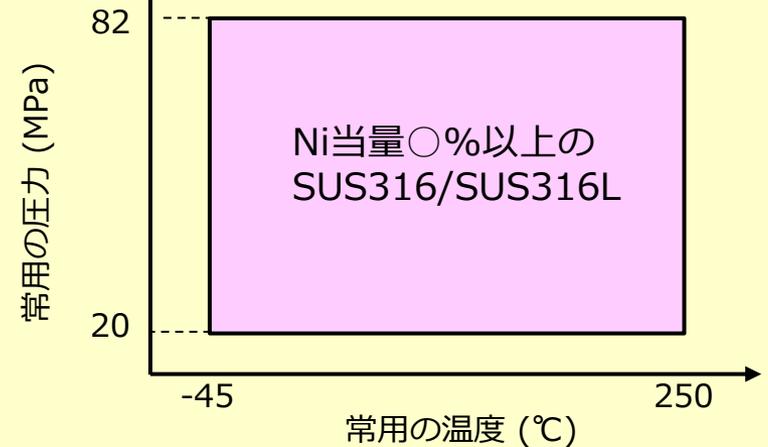
冷間加工

溶接

現行のNi当量規制



規制見直し後の絵姿（一例）



(2) 汎用低合金鋼

前事業で作成した低合金鋼技術文書の高温側への適用範囲拡大
(現状は蓄圧器のみ ⇒ 圧縮機まで拡大)

新指標設定に向けての考え方

これまでの材料判定基準の考え方

絞りが水素の影響を最も受けやすい。

そのため、水素中の絞りが大気中の絞りと同等であれば、伸び・引張強さも、水素中と大気中で同等になる。

- ⇒ ①水素ステーションで安全に使用できる。
②引張強さ基準の許容引張応力が使用できる。



新指標設定に向けての考え方

設計に許容引張応力を使用するため、**水素環境でも引張強さは材料規格値以上**を確保する必要がある。絞り・伸びは緩和の方向で検討する。

水素環境の疲労限度が大気環境の疲労限度と同等であることも確認する。

- ⇒ ①水素ステーションで安全に使用できる。
②引張強さ基準の許容引張応力が使用できる。

新指標設定に向けての考え方

(参考) 現時点の案

$$\begin{array}{l} \text{・ 大気中の引張強さ} \\ \text{(室温)} \end{array} \times \begin{array}{l} \text{相対引張強さ} \\ \text{RTS} \\ \text{(-45~250℃)} \end{array} \geq \text{材料規格の引張強さ} \left(\begin{array}{l} \text{SUS316 : 520MPa} \\ \text{SUS316L : 480MPa} \end{array} \right)$$

↓
RTS≧1とみなせる閾値を設定し、延性破壊を担保する。

$$\text{・ 水素中の疲労限度} \quad \doteq \quad \text{大気中の疲労限度}$$

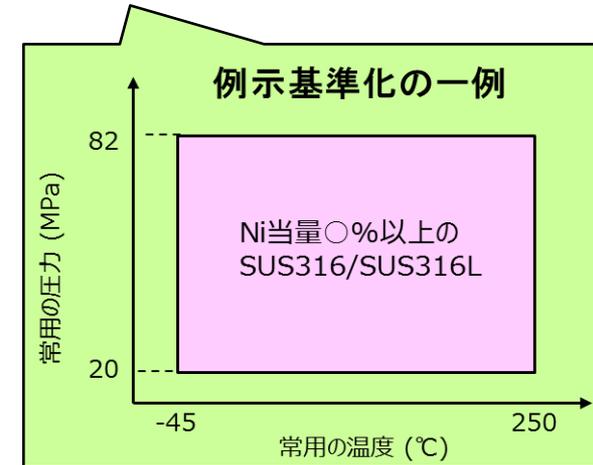
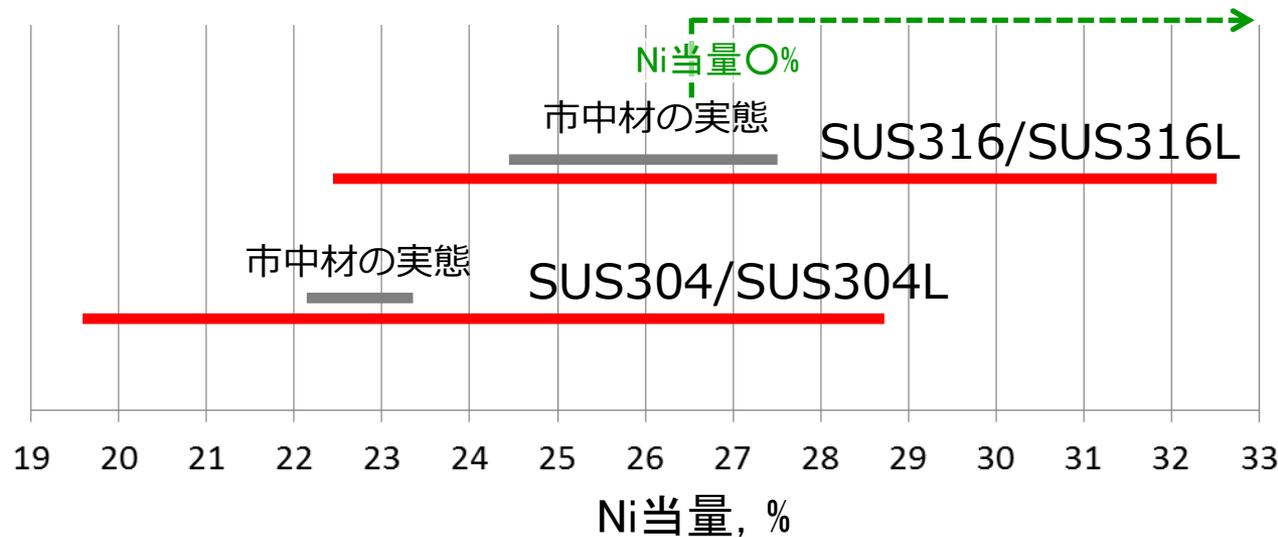
※伸びの閾値は要検討 (水素中での延性確保に必要な裕度を持った値とする)

↓
具体的な閾値の設定については、NEDO事業を推進していく中で決定する。

新指標のアウトプットイメージ

市中に流通する汎用材（SUS316系）の使用を念頭に、例示基準におけるNi当量範囲の拡大を目指す。

使用可能範囲の見極め ⇒ 例示基準化



- JIS規格値（JIS G4303）より計算したNi当量範囲
- 市中材のNi当量範囲の実態

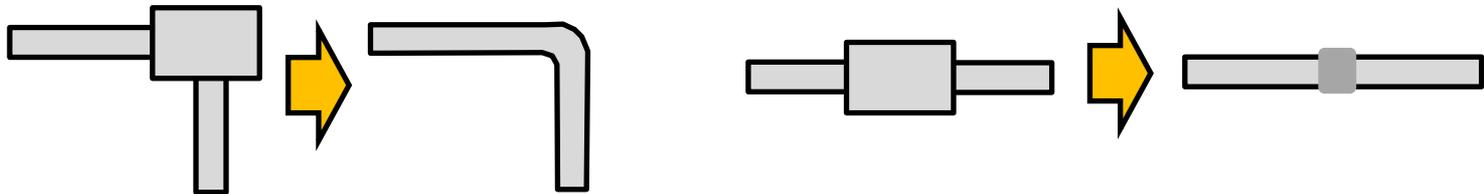
冷間加工・溶接のアウトプットイメージ

高Ni当量材

①汎用ステンレス鋼

②冷間加工

③溶接



曲げ加工、溶接による機械継手削減 ⇒ 水素漏洩リスク低減

	①汎用ステンレス鋼	②冷間加工	③溶接
建設コスト	低減	機械継手代替	機械継手代替
維持コスト	—	大幅低減	大幅低減
備考 (理由)	安価な量産流通材の使用により、調達期間の短縮・価格低減効果を期待	信頼性向上 機械継手等の接合が不要となり、漏洩等の不具合減少	信頼性向上 機械継手に代替することで漏洩等の不具合減少

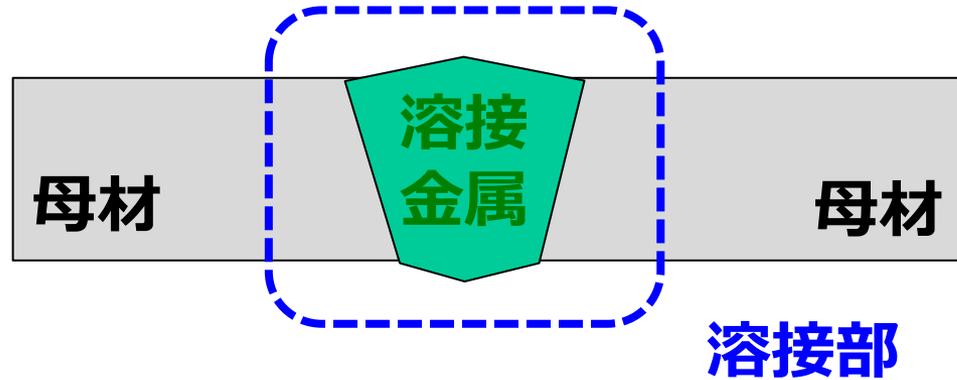
溶接継手をAs Weldで使用するための検討

	As Weld	固溶化处理
添加元素の分布	溶融部・熱影響部に有効元素が偏在する懸念あり。 ※ 水素適合性に影響しなければ問題なし	溶融部・熱影響部において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	熱応力による残留応力発生	残留応力の除去が可能
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(熱処理費用が不要)	高価(熱処理費用が追加発生)

① 母材

② 溶接金属

③ 溶接部



これらの健全性を評価する必要がある。

Step1

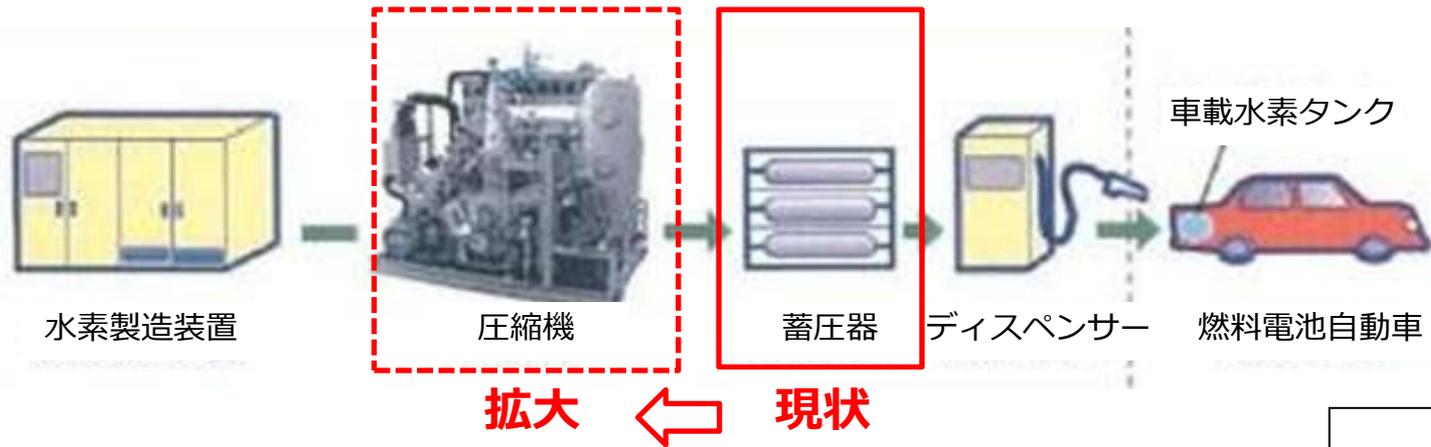
母材, 溶接金属の評価



Step2

溶接部の評価

汎用低合金鋼のアウトプットイメージ



① 低合金鋼技術文書の適用範囲拡大を目指す

現行適用範囲 蓄圧器

⇒ 改訂後適用範囲 蓄圧器 + 圧縮機



② KHKS0220改正におけるデータの提供

⇒ 超高圧設備の特認 & 事前評価の容易化

体制と役割

汎用ステンレス鋼

汎用低合金鋼

(1)使用可能性範囲拡大

(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)

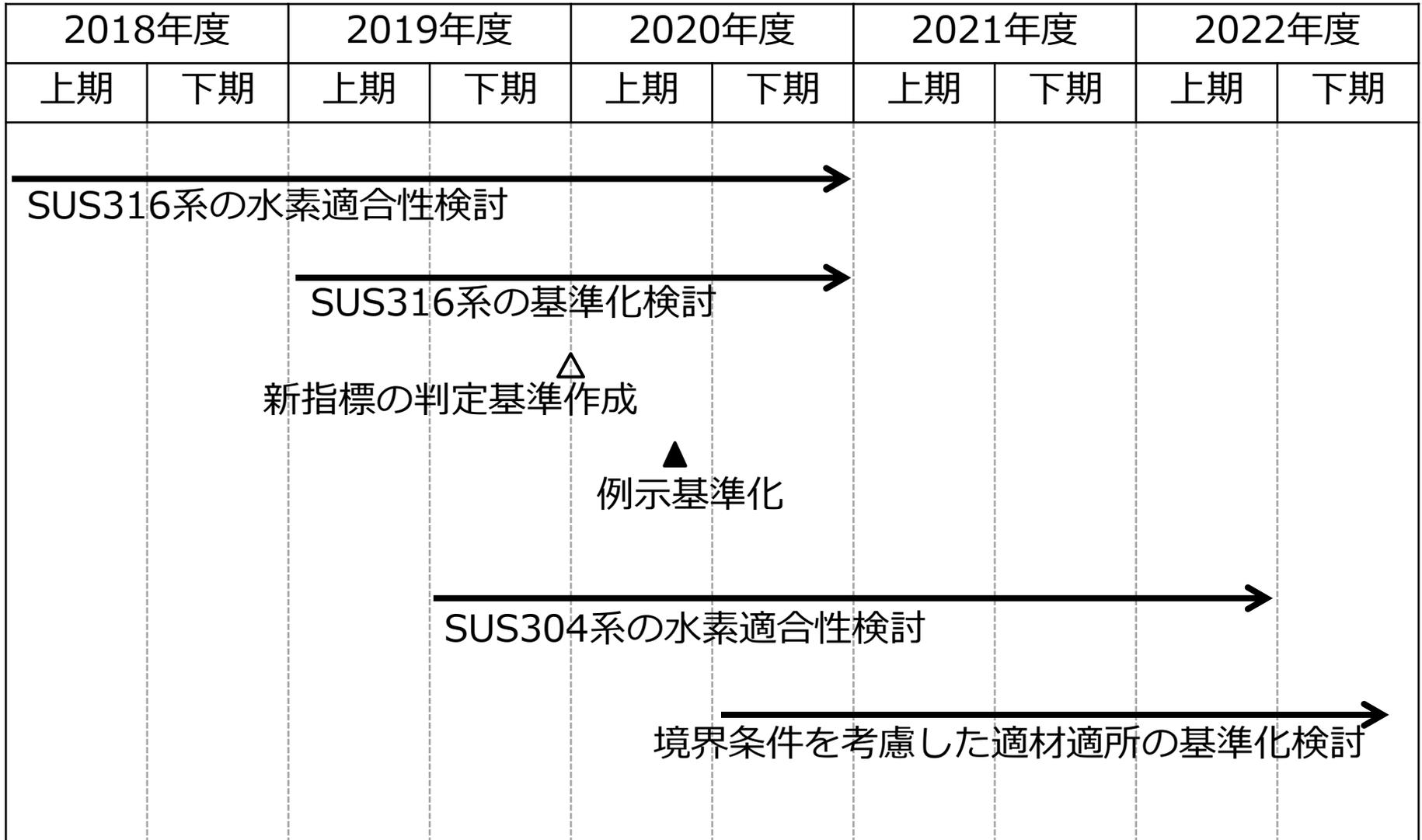
愛知製鋼 (SUS305)

事業スケジュール

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

	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
JPEC	試験計画・鋼材手配・試験			外注・試験結果考察	→
				基準化検討	→
KHK	試験計画・引張試験（大気中）・試験結果考察				→
				基準化検討	→
九州大学	SSRT試験・疲労試験・試験結果解析				→

例示基準化スケジュール



事業スケジュール

汎用ステンレス鋼冷間加工材に関する研究開発

	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
JPEC	試験計画・鋼材手配・試験外注・試験結果考察				→
					基準化検討
KHK	試験計画・引張試験（大気中）・試験結果考察				→
					基準化検討
JRCM	汎用ステンレス鋼の水素適合性に及ぼす冷間加工度の影響解明				→
日本製鉄 日鉄ステンレス	SUS316L、SUS304冷間加工材に関する水素適合性評価				→
愛知製鋼	SUS305冷間加工材に関する水素適合性評価				→
NIMS	金属組織学的な材料の解析				→
九州大学	SSRT試験・疲労試験・試験結果解析				→

事業スケジュール

汎用ステンレス鋼溶接材に関する研究開発

	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
JPEC	試験計画・鋼材手配・試験	外注・試験結果考察		技術指針検討	→
KHK		試験結果考察		技術指針検討	→
日本製鉄 日鉄ステンレス	試験計画・試験片作製・高圧水素中機械試験			試験結果考察	→
NIMS	金属組織学的な材料の解析				→
九州大学	SSRT試験・疲労試験・試験結果解析				→

事業スケジュール

汎用低合金鋼の高温適用に関する研究開発

	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
JPEC		試験結果考察			→
				技術文書化検討・TF&分科会開催	→
KHK		試験結果考察			→
				技術文書化検討	→
JSW	試験計画・各種試験・試験結果解析				→
				技術文書化検討	→
九州大学	SSRT試験・破壊靱性試験	疲労き裂進展試験	試験結果解析		→

2018年度成果

項目	成果
新指標	<p>新指標の判定基準を構築するため、水素適合性評価試験を開始した。Ni当量下限値を見極めるため、既存データを補完するデータを取得中（Ni当量24.2%、25.1%、26.5%、26.8%）。</p> <ul style="list-style-type: none">・ SSRT： 引張強さ・伸び・絞りのNi当量依存性、温度依存性、水素圧依存性・ 疲労試験： 水素中で疲労限度が低下しないことの確認
冷間加工	<p>冷間加工度を変えた素材（0～70%）を作製し、水素適合性評価試験を開始した。高Ni当量側（Ni当量28.6%）から評価を行い、Ni当量を下げた時の影響を確認する。</p>
溶接	<p>試験素材を製造し、母材と溶接金属に関わる水素適合性評価試験を開始した。高Ni当量側（Ni当量28.6%）から評価を行い、Ni当量を下げた時の影響を確認する。</p>
汎用低合金鋼	<p>圧縮機の高温稼働を模擬した水素圧・温度プロファイルで素材を水素曝露して、水素適合性評価試験を開始した。</p>

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*）
からの委託事業の結果得られたものです。

* New Energy and Industrial Technology Development
Organization