

発表No.B2-13

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

発表者名 一財)カーボンニュートラル燃料技術センター 鈴木
一財)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
一財)金属系材料研究開発センター
大同特殊鋼株式会社
株式会社T V E
株式会社デンソー
2025.7.16

連絡先：
一財)カーボンニュートラル
燃料技術センター 鈴木
E-mail: sh-suzuki@pecj.or.jp

事業概要

1. 期間

開始 : (西暦) 2023年6月
終了 (予定) : (西暦) 2028年3月

2. 中間目標

実施項目	中間目標 (2025年度)
①Ni当量低減検討	Ni当量低減の新たな水素特性判断基準を検討、基準化に資する資料の作成
②溶接に関する検討	溶接部の水素適合性に関するロジックを構築し、水素適合性を判断するための基準を明確化
③冷間加工材に関する検討	SUS316L、SUS316、SUS305などを対象に、冷間引抜加工などにより強化した鋼材データの解析を進め、冷間加工材の機械的性質に関する標準的な規格値を整備するための必要な要件の提示
④データベースの拡大	九州大学で継続的に進め、データベースの一般公開を継続する。

3. 成果・進捗概要

実施項目	進捗状況
①Ni当量低減検討	-45℃高圧水素中における必要Ni当量の低減可能見通し
②溶接に関する検討	SSRTによらない溶接部の水素適合性判断方法の構築
③冷間加工材に関する検討	冷間加工度をベースとした冷間加工材の強度水準案を構築
④データベースの拡大	4件のデータベースの新規登録完了

1. 事業の位置付け・必要性

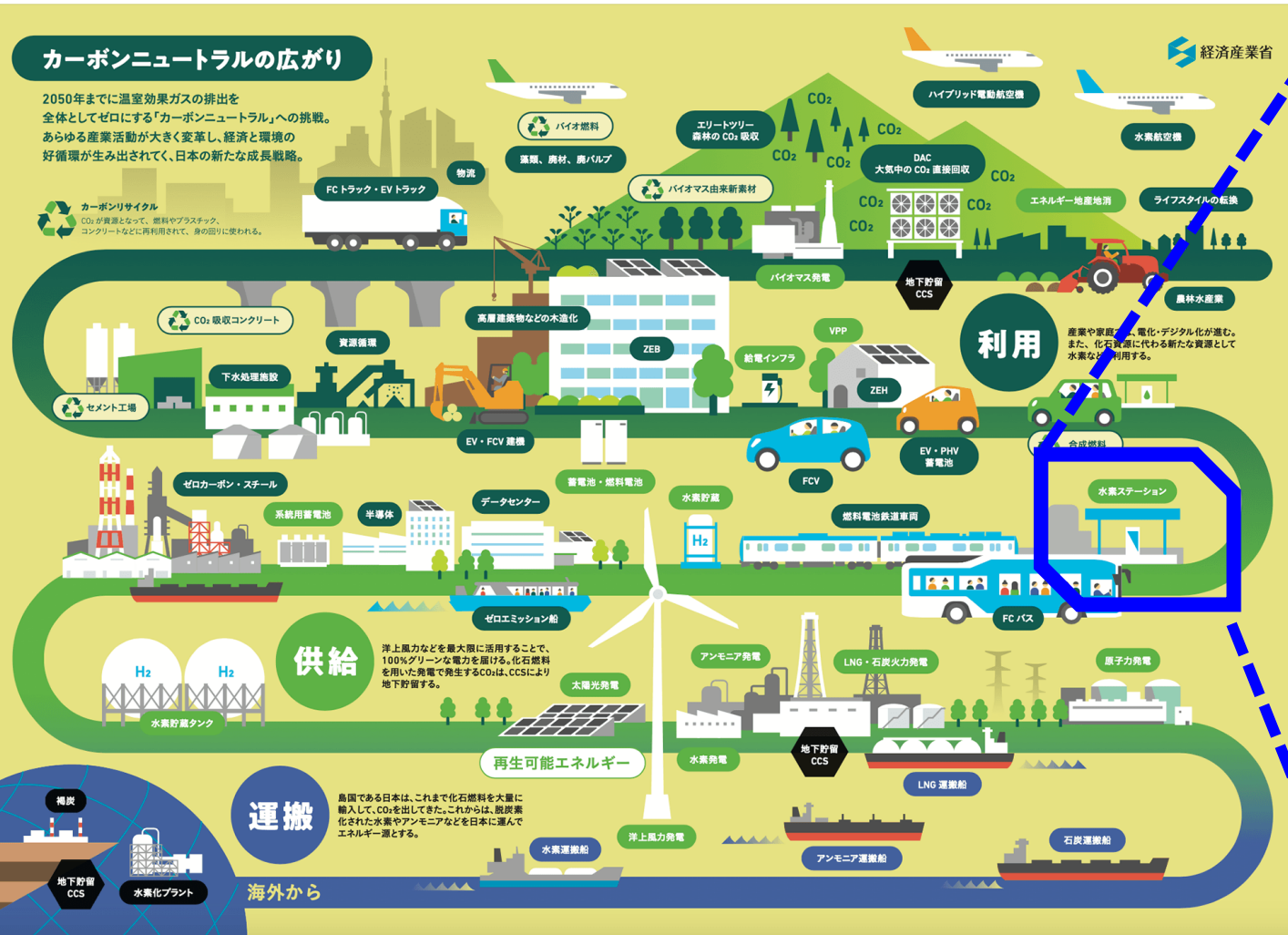
水素社会構築に向けた鋼材：

水素モビリティの利用を支える水素ステーション等の高圧水素インフラに向けた、
高圧水素で使用可能な鉄鋼材料の範囲拡大・基準化

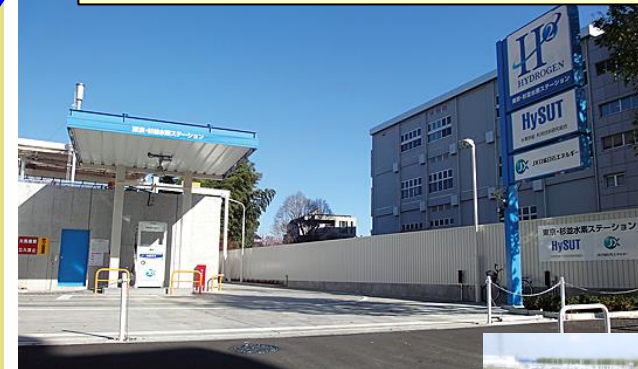
カーボンニュートラルの広がり

2050年までに温室効果ガスの排出を
全体としてゼロにする「カーボンニュートラル」への挑戦。
あらゆる産業活動が大きく変革し、経済と環境の
好循環が生み出されて、日本の新たな成長戦略。

カーボンサイクル
CO₂が資源となって、燃料やプラスチック、
コンクリートなどに再利用されて、身の回りに使われる。



商用水素ステーション（70MPa）



産業用水素ステーション（35MPa）

水素圧縮機 蓄圧器（冷凍機）

水素源

導管

ディスペンサー

1. 事業の位置付け・必要性

【背景：高圧水素に用いるオーステナイト系ステンレス鋼に関する例示基準の主な変遷】

概要

(2010) **超高压水素に対する例示基準材料の登場**
・SUS316Lを使用可とした（SUS316は適用外）

(2012) **Ni当量規制の導入** *Ni当量=12.6C+0.35Si+1.05Mn+Ni+0.65Cr+0.98Mo
・最低温度-40℃の場合はNi当量28.5以上かつ絞り75%以上
・SUS316も条件を満たせば使用可能に

(2014) 適用下限圧力の変更、温度範囲の拡大（20MPa超、-45℃～250℃）
・Ni当量の変更なし

(2016) 移動式水素スタンドへの適用拡大
・Ni当量の変更なし

(2020) **Ni当量規制の緩和**
・絞り75%の規制撤廃、必要Ni当量の引き下げ、伸び基準の導入

契機

← **水素スタンドの社会実装**
非プレクール・35MPa級HSR

← **70MPa級水素スタンドの登場**
プレクールの導入

← (前NEDO事業)
**新たな水素適合性判断基準
の研究成果**

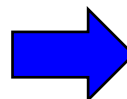
1. 事業の位置付け・必要性

【背景：絞り75%の規制撤廃、必要Ni当量の引き下げ、伸び基準の導入】

(旧)

温度範囲	絞り	伸び	Ni当量
-45℃～250℃	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

新たな水素適合性
判断基準の導入



- ・絞り75%以上の規定は不要に
- ・-45℃でNi当量26.9%のSUS316/316Lが使用可能に

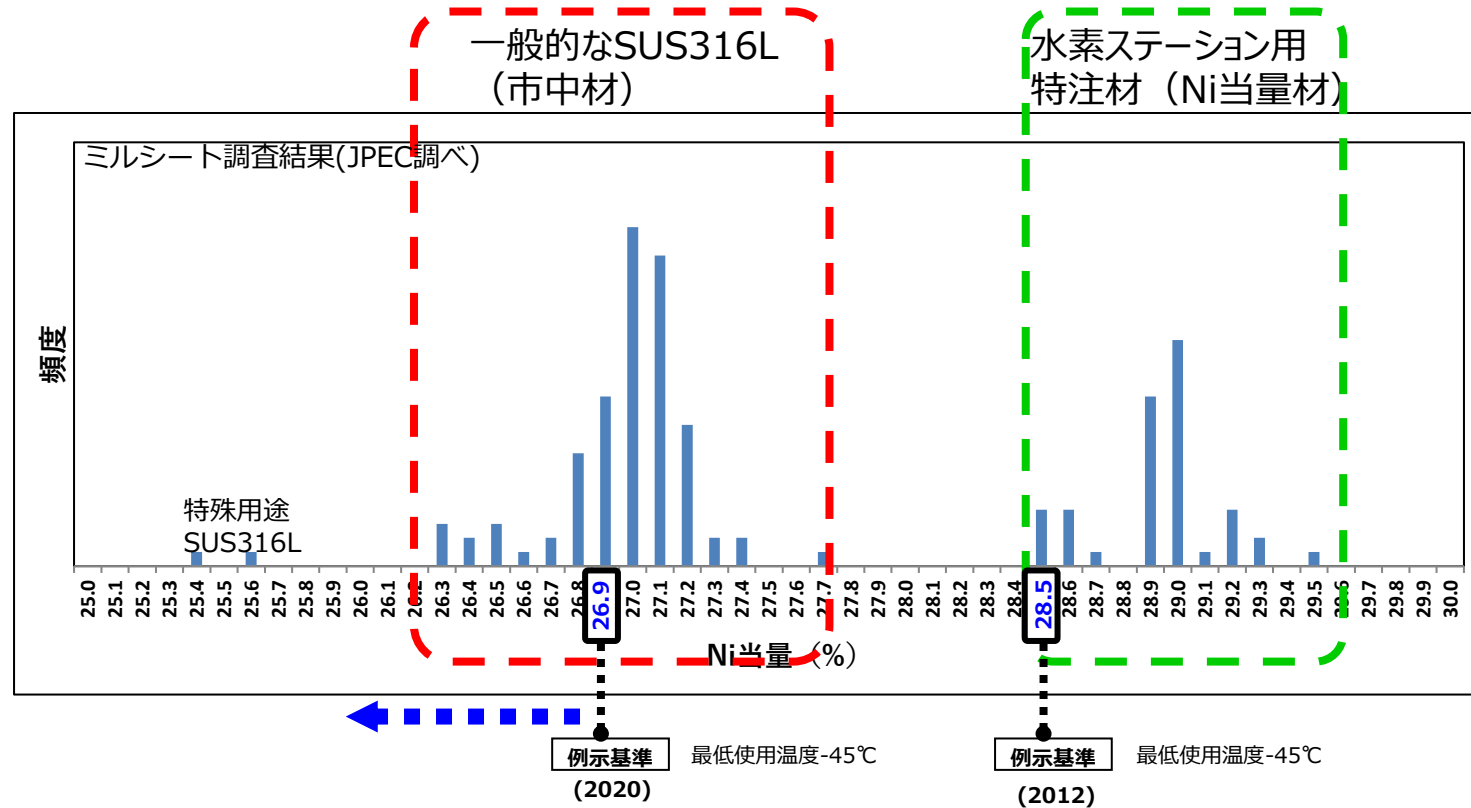
(現在)

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. 事業の位置付け・必要性

【より汎用的な材料範囲への拡大および利用に関する研究】



水素適合性判断基準の検討を深化

- ・Ni当量のさらなる低減による材料範囲の拡大
- ・Ni当量低減材料の加工による使用（冷間加工、溶接）

切削で使う

加工して使う

金属組織の変化を伴う加工方法 ⇔ 水素適合性

2. 研究開発マネジメントについて

研究開発の目標と目標設定の考え方（根拠）

実施項目	研究開発目標	根拠
①Ni当量低減検討	取得したデータ並びに既存データをもとにNi当量低減の新たな水素特性判断基準を検討し、基準化に資する資料を作成する。	新たな水素特性判断基準の構築により、高圧水素環境で使用可能なオーステナイト系ステンレス鋼の範囲拡大を図る。
②溶接に関する検討	現行例示基準範囲のSUS316Lの溶接の好適事例化検討結果に基づき溶接技術指針を改訂する。	前事業での検討範囲は旧例示基準材（Ni当量28.5%）と、高Ni当量の溶接材料YS309LMoとの組合せに留まる。 拡大された例示基準の材料とその共金溶接まで範囲を広げる。
③冷間加工材に関する検討	Ni当量低減材の冷間加工材について高圧水素環境下での水素特性データを確認し、水素ステーションで使用可能な材料であることを検証する。その上で、大気中における取得データを基にした規格値設定案を提示し、冷間加工材の有効性および水素適合性評価における規格値の在り方を検討することで、水素適合性を評価する方法を構築する。また、SUS305の高圧水素環境下での高サイクル疲労寿命試験結果に関するデータをデータベース化し公開する。	冷間加工は様々な部品の材料強度を高めるとともに精密な加工形状を実現する技術であるが現状、材料規格は無く設計規格への許容引張応力の設定事例もない。加工の度に強度が変わるため、毎回水素適合性の評価が必要となる事例の増加が予想されることから、水素で使用することを踏まえた冷間加工材の材料強度に関する議論、規格値の設定方法の提案が必要である。
④データベースの拡大	本NEDO事業で取得した実験データのデータベース化を九州大学で継続的に進め、データベースの一般公開を継続する。	各種鋼材の水素環境下における実験データ等についてステアリング委員会で妥当性を検討した上で公開する。

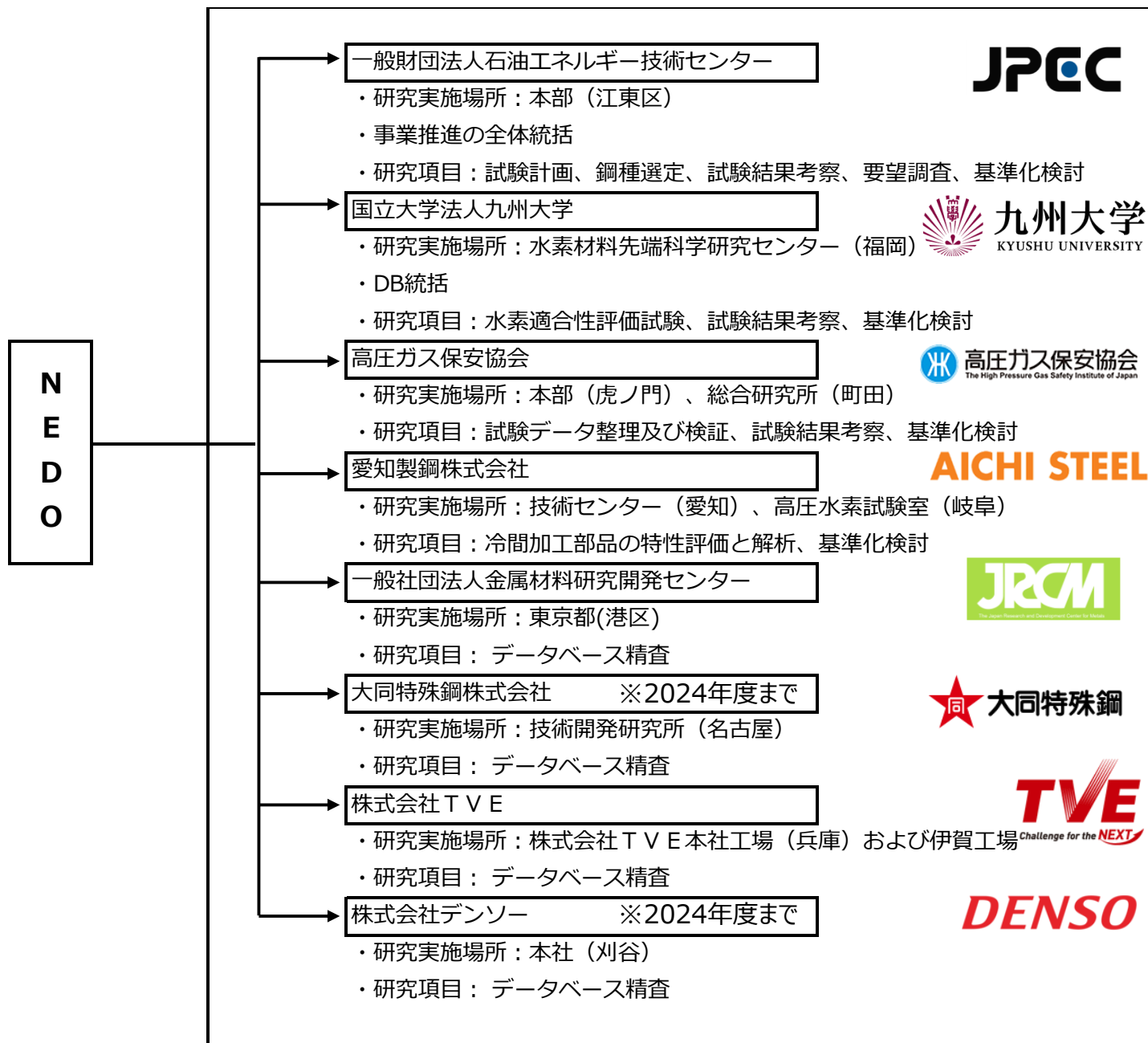
2. 研究開発マネジメントについて

研究開発のスケジュール

	FY2023	FY2024	FY2025	FY2026	FY2027
①Ni当量低減検討	SUS316系の水素適合性検討				
		基準化に資する資料作成			
②溶接に関する検討	溶接継手の水素適合性検討				
				溶接技術指針改定	
③冷間加工材に関する検討	SUS316系、SUS305冷間加工材の水素適合性検討				
			低Ni当量鋼材の冷間加工材の水素適合性検討		
			強度水準案作成		
④データベースの拡大			データベース精査		
			データベース公開		



本研究は2025年1月にステージゲート審査済み。



<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。

（委員長：吉川 暢宏 東京大学生産技術研究所 教授、 高圧ガス保安協会 参与）

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。

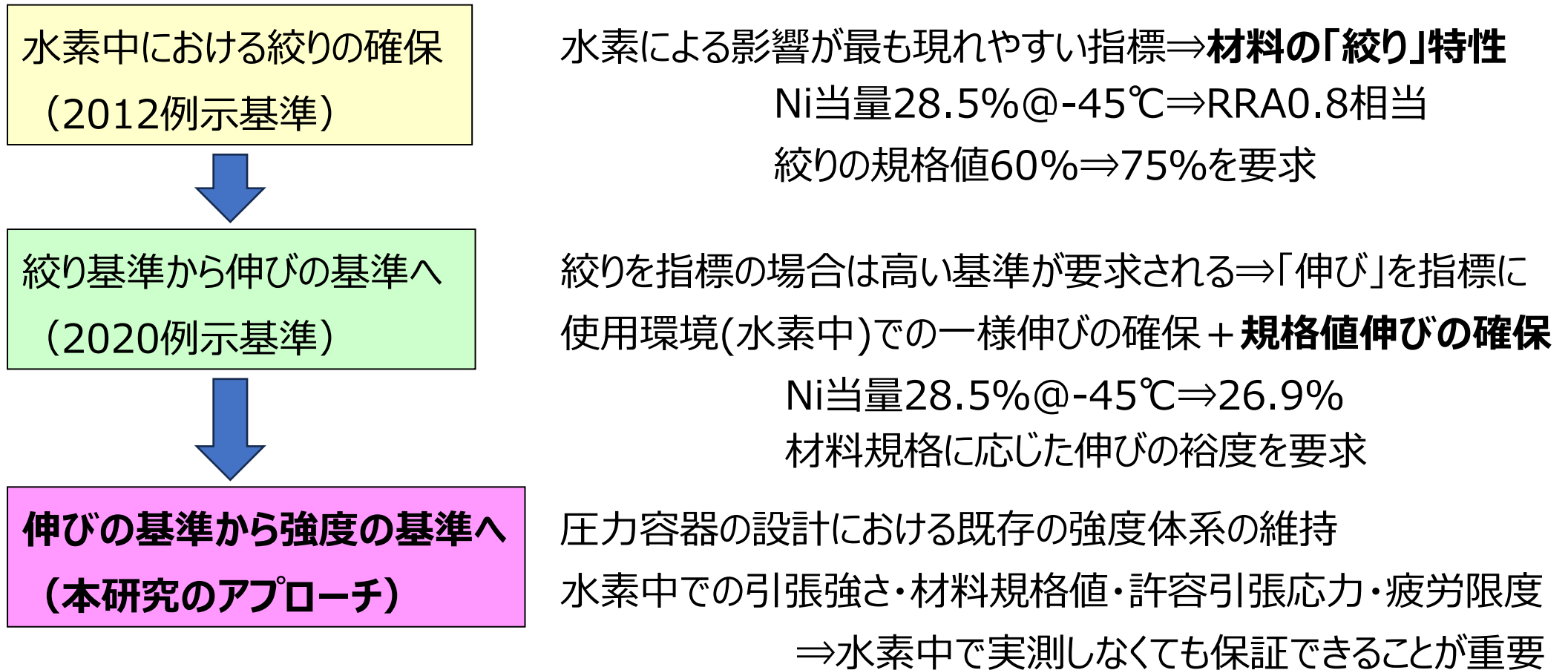
⇒NEDOへ公表申請

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。

①Ni当量低減検討

- ・水素適合性の判断基準に対するアプローチの変遷



概略

基本的な考え方：

- ①使用環境に起因する、材料の強度低下が無いこと
 - ・圧力容器設計の強度体系に準じた運用を可能とする
 - ・使用環境起因で強度低下する材料を用いる場合、使用環境での強度の実測が必要
水素による強度低下がない材料(**RTS=1**) ⇒ ミルシートによる強度保証ができる (SSRT不要)
- ②使用環境における不安定破壊のおそれの排除
 - ・使用環境において一様伸びが確保できていれば問題はない
 - ・ $EL(\text{実力}) \times REL < EL(\text{規格})$ の許容について検討中

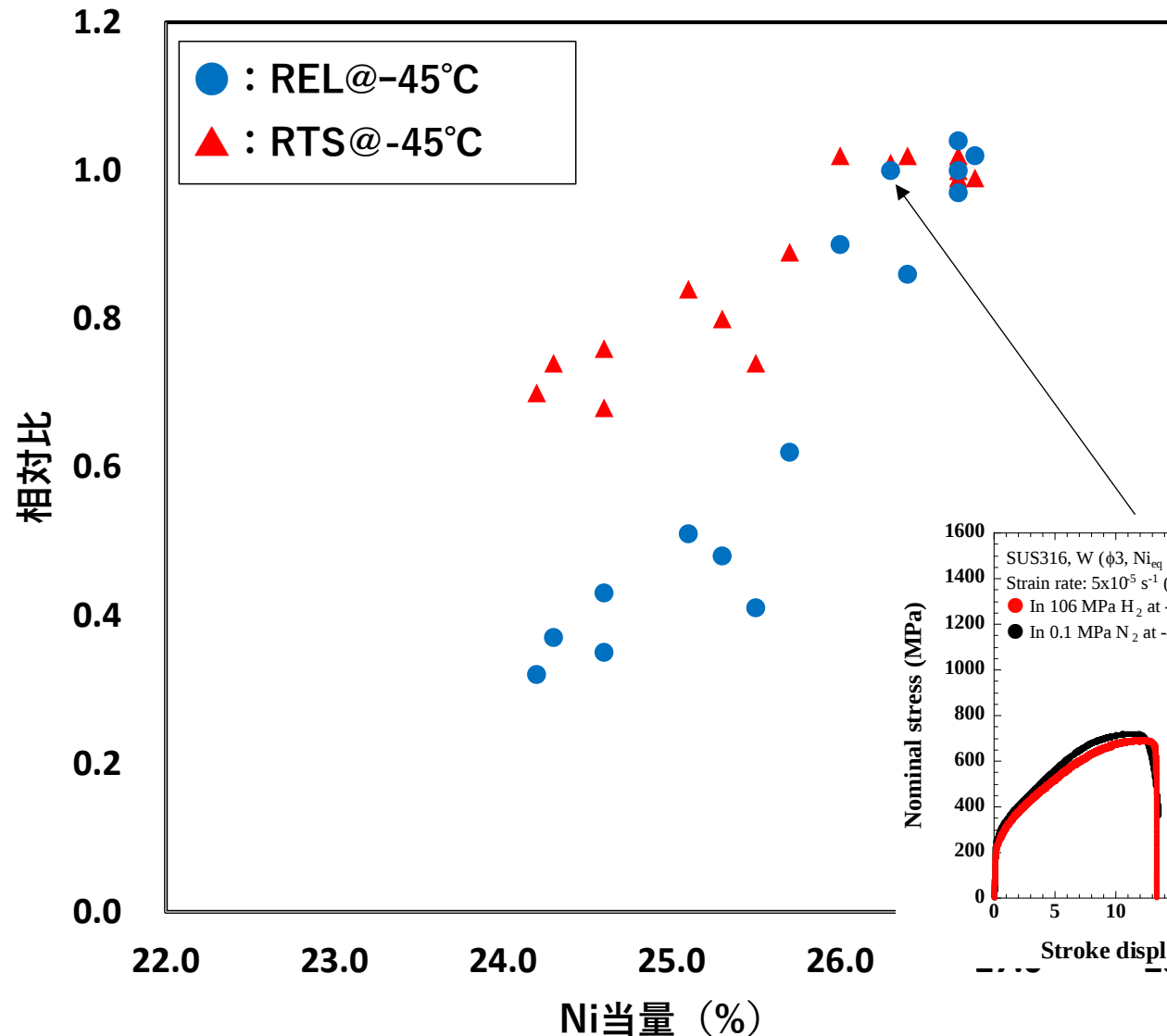
検討状況：

- ①データの不足していたNi当量26.0%付近の水素適合性に関するデータを取得、詳細な解析を行った。
- ②Ni当量26.3%材において、-45℃において $RTS = 1$ 、一様伸びも確保
特定設備検査規則および一般高圧ガス保安規則例示基準に従った設計が可能な材料規格として、
Ni当量を現行の例示基準26.9%から26.3%に低減可能と判断できる見通し。

3. 研究開発成果について

研究開発の目標及び進捗状況、目標達成に向けたアプローチ

<高圧水素中SSRT（低ひずみ速度引張試験）結果>



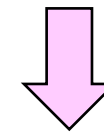
【方針】

Ni当量26.0%付近のSUS316/316Lに関する
水素適合性データを重点的に検討

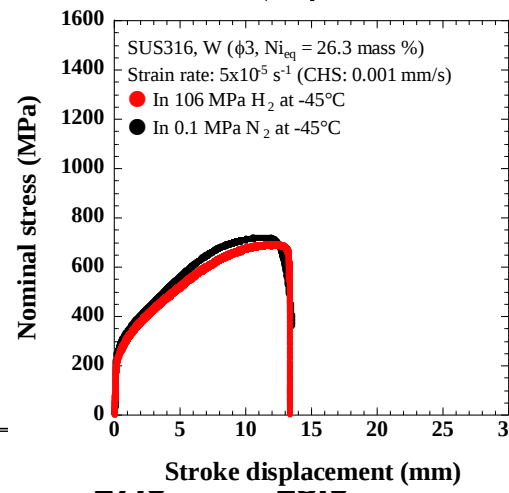
・鋼材の機械的性質に対する水素の影響度合い

EL (伸び) > TS (引張強さ)

・Ni当量26.3%の材料でREL=1・RTS=1
応力ひずみ線図における一様伸びを確認



-45°C高圧水素中の圧力容器材料に必要な
Ni当量：26.3%に低減可能な見通し



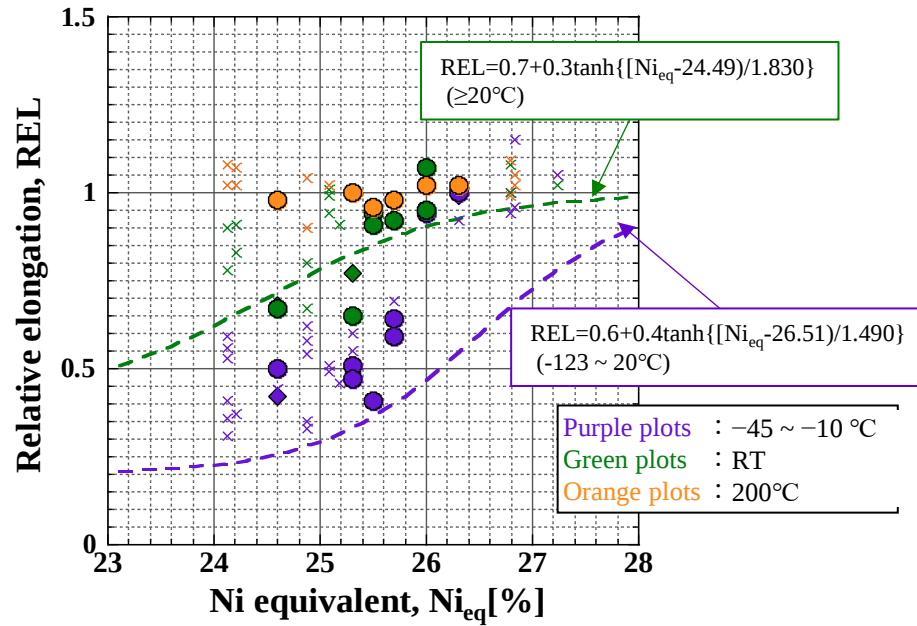
3. 研究開発成果について

研究開発の目標及び進捗状況、目標達成に向けたアプローチ

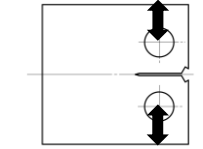
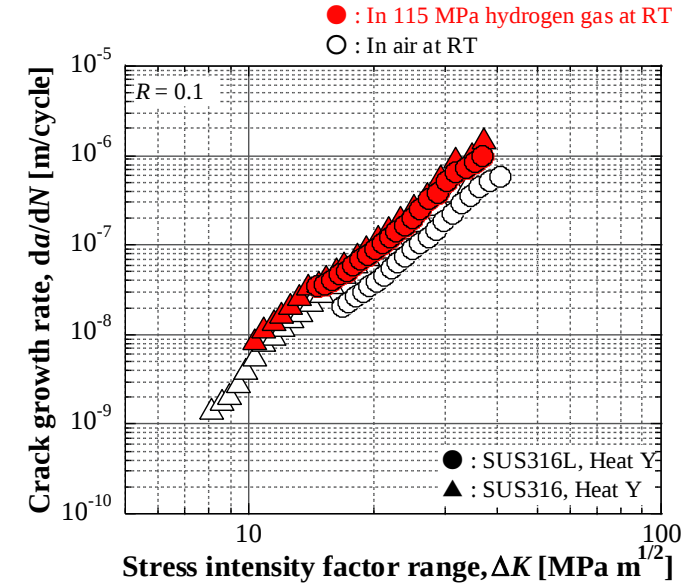
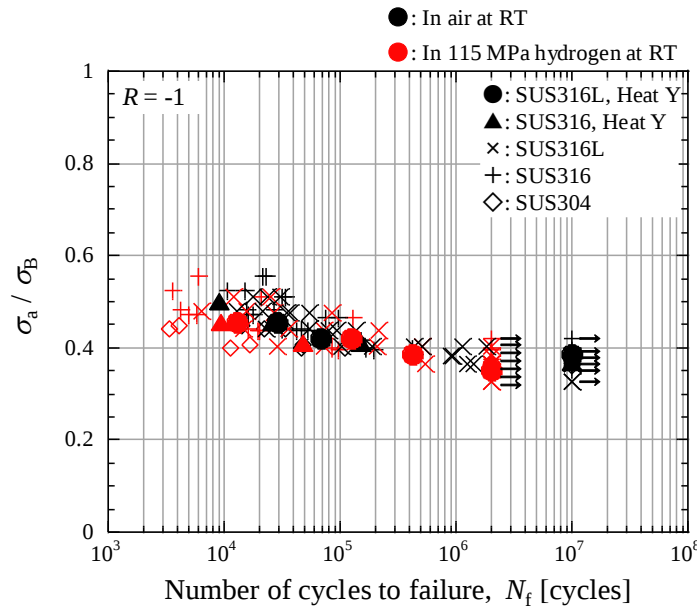
× ◆ : 前事業取得データ
● : 今期事業取得データ



SSRT試験

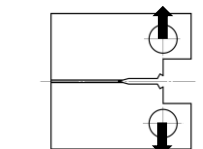
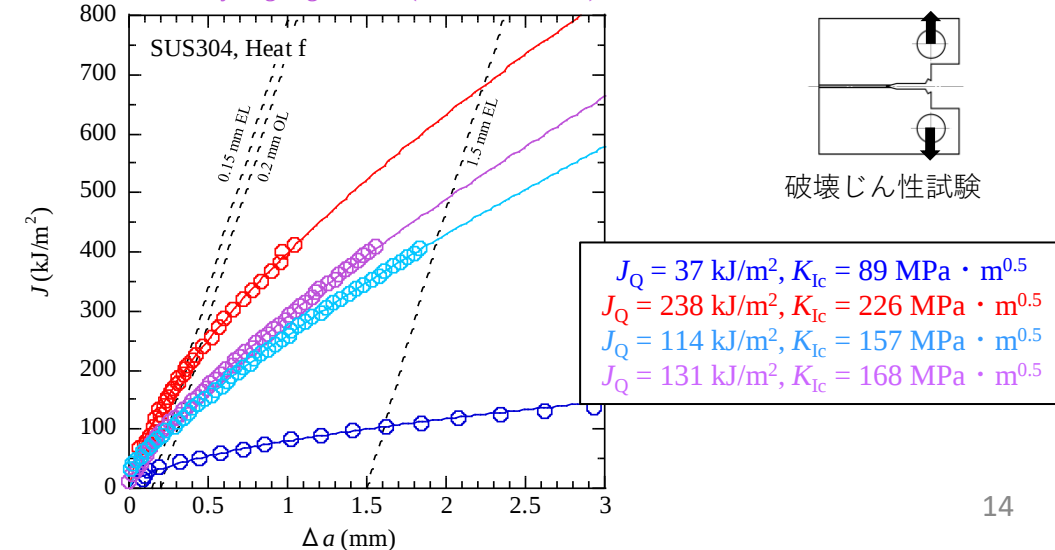


疲労寿命試験



疲労き裂進展試験

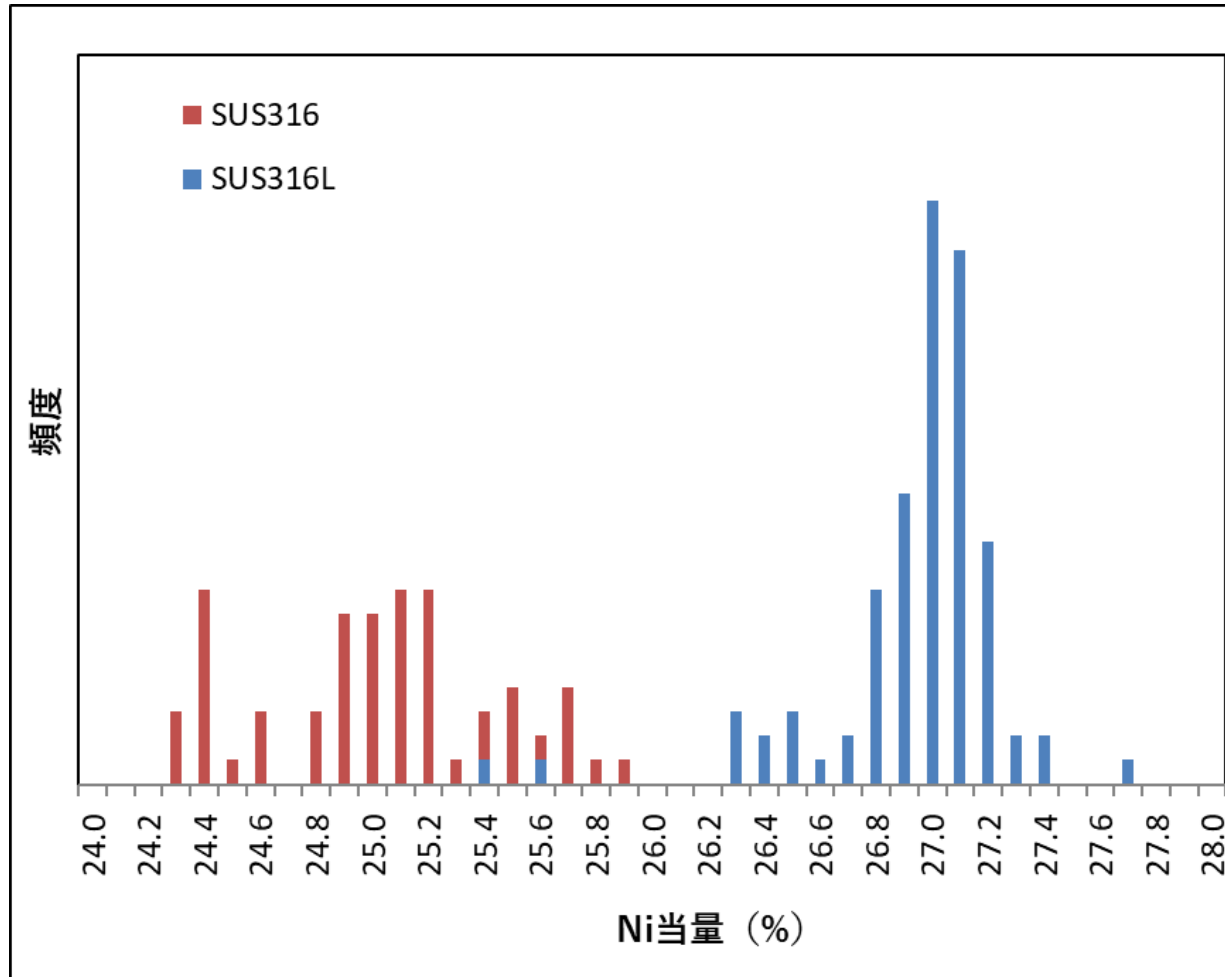
— : In 106 MPa hydrogen gas at -45°C ($v = 0.002 \text{ mm/s}$)
— : In 115 MPa hydrogen gas at RT ($v = 0.002 \text{ mm/s}$)
— : In 115 MPa hydrogen gas at RT ($v = 0.0002 \text{ mm/s}$)
— : In 115 MPa hydrogen gas at RT ($v = 0.0001 \text{ mm/s}$)



破壊じん性試験

3. 研究開発成果について

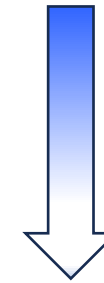
研究開発の目標及び進捗状況、目標達成に向けたアプローチ



・Ni当量26.9%以上（現例示基準）
SUS316Lのボリュームゾーンを含む



・Ni当量26.3%以上（現状の結果）
SUS316Lのほとんどの領域を含む



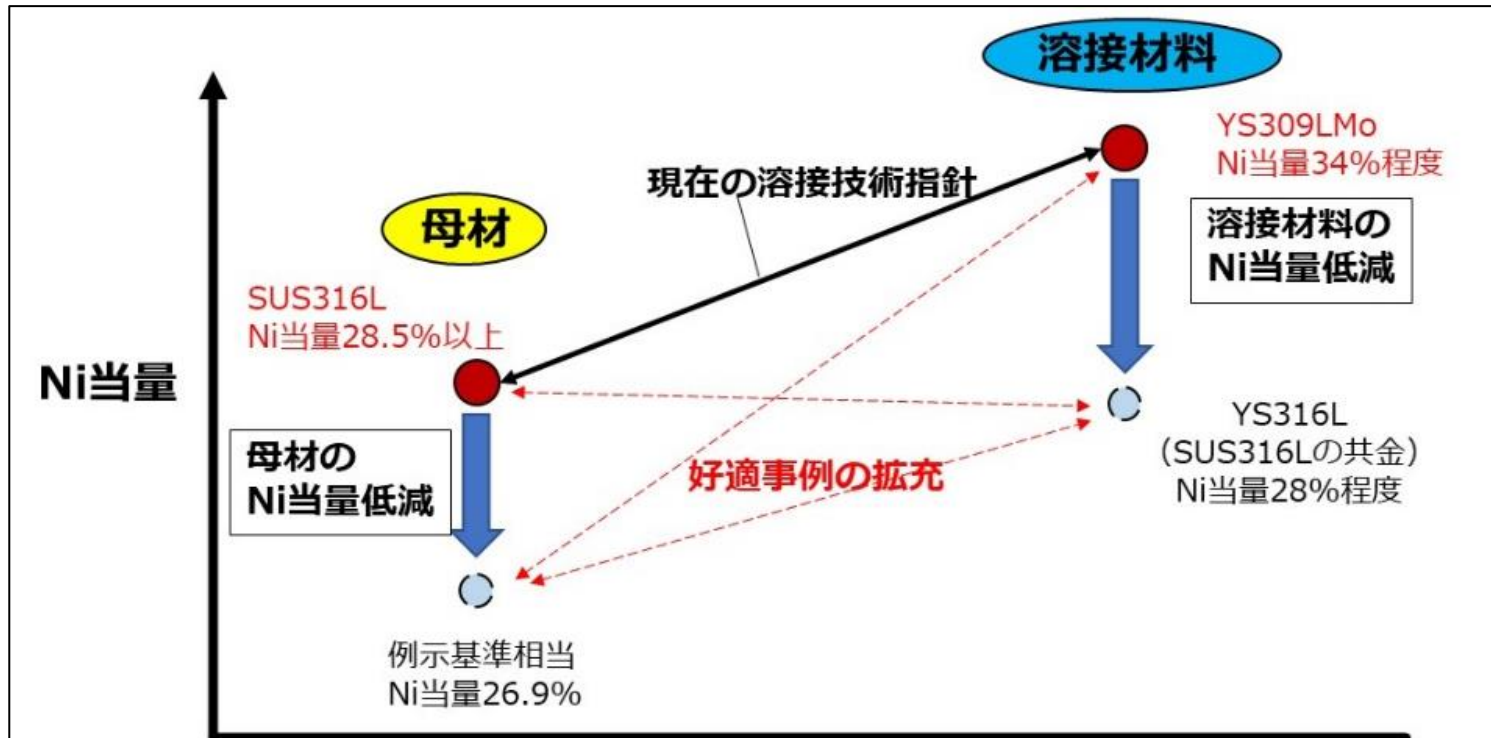
・Ni当量26.0%前後の材料の水素適合性の確認を
検討中
但し、市中材で該当するケースが少なく、材料探索中

②溶接に関する検討

溶接ままで水素適合性が保証できる、母材・溶接材料の組み合わせ（好適事例）範囲を広げていく。

- ・溶接後の溶体化処理を省略でき、
- ・SSRT等の、水素適合性の確認のための工程・試験を課さない

＜本研究の検討範囲＞ 拡大された例示基準範囲の好適事例化を目指す



・前事業の好適事例範囲

推奨母材：Hi-Ni材（Ni当量28.5%）@-45℃

推奨溶接材料：YS309LMo（Ni当量33%前後）



・本研究の検討範囲

母材：SUS316L例示基準材（Ni当量26.9%～）

溶接材料：YS316L

<技術的課題>

母材

水素適合性判断基準：絞り⇒伸び⇒強度 判断基準の見直し・範囲拡大

溶接

水素適合性判断基準

- ・前事業で用いた基準($RRA \geq 0.8$)に代わる、判断基準の構築が必要

< $RRA \geq 0.8$ >

前事業開始時点での、母材に要求されていた水素適合性
(旧例示基準(2019以前)相当)

- ・例示基準は既に緩和 絞り⇒伸び
- ・好適事例の範囲拡大には絞りに代わる新たな指標が必要



溶接部の水素適合性基準に関する

・新たなロジックの構築

・新たな判断基準

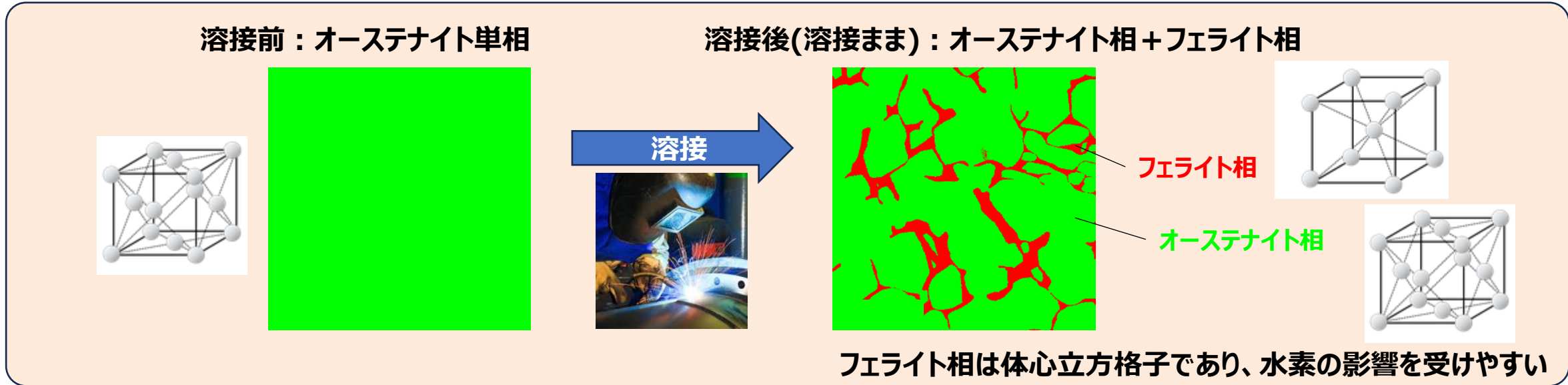
が必要

3. 研究開発成果について

研究開発の目標及び進捗状況、目標達成に向けたアプローチ

SUS316Lの溶接における、水素適合性の考え方・判断方法・基準の定量化に向けたロジック検討

<金属組織に着目>



オーステナイト相

き裂進展時にき裂の先端がマルテンサイト化した場合に水素の影響を顕著に受ける

マルテンサイト変態が起きにくい、安定度の高いオーステナイト相であることが重要

フェライト相

構造的にき裂進展しやすく、水素で助長されやすい

溶接金属内に過剰にフェライト相がネットワーク化されていると水素の影響が顕著

<溶接部の水素適合性の考え方>

水素に安定なオーステナイト相 + 過剰なネットワークを有しないフェライト相、の組合せで水素適合性が確保される

	前事業	現事業
水素適合性「有」の判断	- 溶接継手のSSRTにおいて $RRA \geq 0.8$ @使用温度 (RTS=1) 圧力容器設計の強度体系を維持 RRAの条件を満たすときに同時に達成	オーステナイト相とフェライト相の要件に適合 水素に安定なオーステナイト相 + 過剰なネットワークでないフェライト相 (RTS=1) 圧力容器設計の強度体系を維持 金属組織側の要件を満たすことで同時に達成
オーステナイト相	き裂先端がマルテンサイト変態を起こさない オーステナイト安定度であることを推奨 (凝固偏析込み) Ni当量28.5%	水素に安定なオーステナイト相 例示基準相当のNi当量@使用温度 であること Ni当量低減検討での結論を採用予定 26.3% @ -45℃ ? 凝固偏析の影響を考慮
フェライト相	- 定量性の議論は無し - 検討試料における最大フェライト量は15%	水素適合性に影響が出ないフェライト量 過剰なネットワークを形成しない = フェライト相のき裂進展で全破断しない (一発破壊・脆性破壊しない)

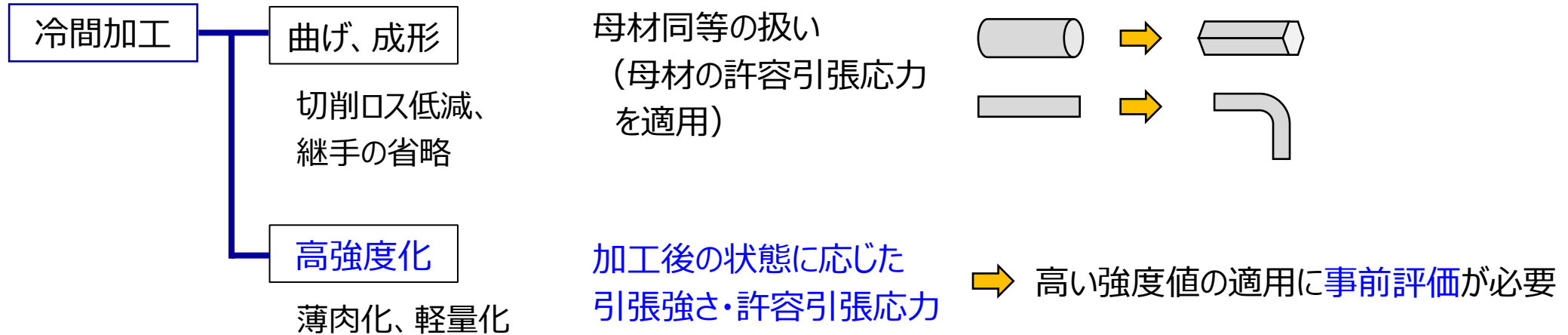
・SUS316L例示基準材 (Ni当量26.9%) とYS316Lの好適事例化、技術指針化を目指す

(例示基準の母材よりもNi当量が高い溶接材料が用いて溶接されている)

(厚肉でない溶接には一般的に溶接材料は不使用 ⇒ ノンフィラー溶接も対象)

③冷間加工材に関する検討

冷間加工は、様々な部品の材料強度を高めるとともに精密な加工形状を実現する技術



現状： 材料規格が無い・設計規格への許容引張応力の設定事例もない

今後： 加工の度に強度が変わるため、毎回水素適合性の評価が必要となる事例の増加が予想される

対応： 規格値の考え方で一律に強度や伸びの保証ができれば、過剰な試験を課すことが避けられる

- 冷間加工による水素以外の問題を回避するための加工要件は存在し、KHKS0220でも引用
- 水素の問題に関するデータがあるオーステナイト系ステンレス鋼は、不足データを埋めれば検討がしやすい
- 冷間加工材に規格値を設定する考え方の有用性を検証する

3. 研究開発成果について

研究開発の目標及び進捗状況、目標達成に向けたアプローチ

- ・SUS316L冷間引抜材において、加工度と棒材径が分かれば、加工後の引張強度を推定できる係数（加工強度係数*）が存在

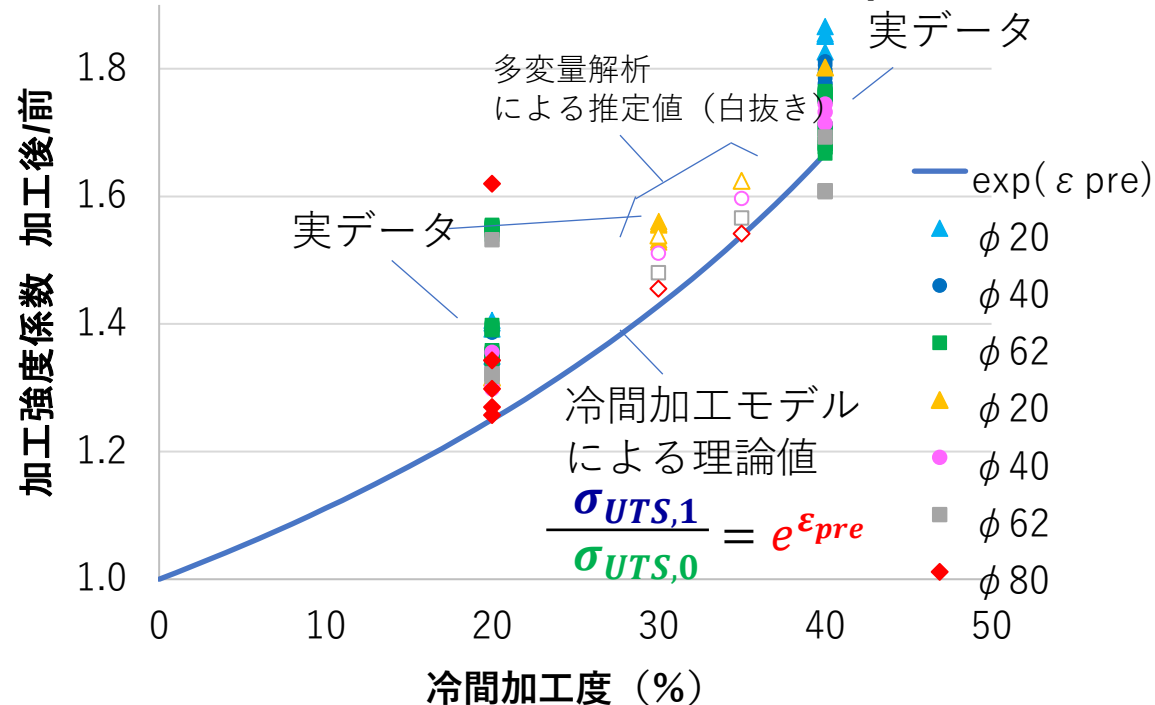
* 加工強度係数：
冷間加工後の引張強度/加工前（母材）の引張強度

- ・上記加工強度係数により、冷間加工材の許容引張応力を設定可能な式を構築

『 冷間加工材の許容引張応力 $\sigma \leq$ 母材の許容引張応力 $\times$ 加工強度係数 』

- 水素雰囲気に限らずあらゆる分野で適用可能。
- SUS305冷間引抜材、SUS316,316Lの冷間圧延材にも展開可能

SUS316L冷間加工度と加工強度係数 加工後/前



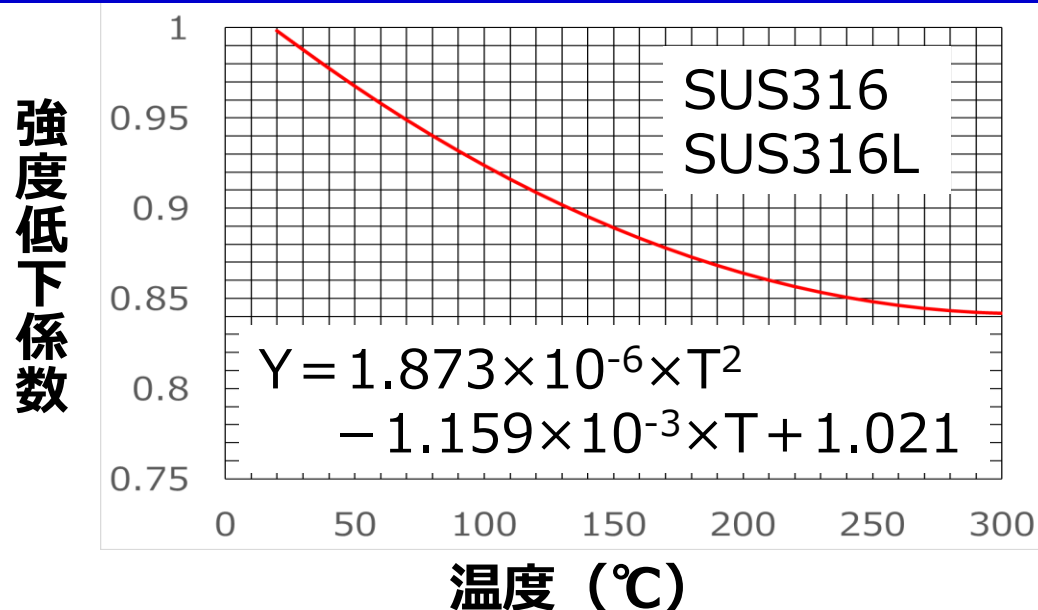
- ①加工強度係数は加工度と相関がある
- ②棒材径が大きい程、加工強度係数のMin.値は小さい
- ③冷間加工モデルによる理論値は、実データと傾向がよく一致した

3. 研究開発成果について

研究開発の目標及び進捗状況、目標達成に向けたアプローチ

<冷間加工部品の設計>

強度低下係数による許容引張応力の設定

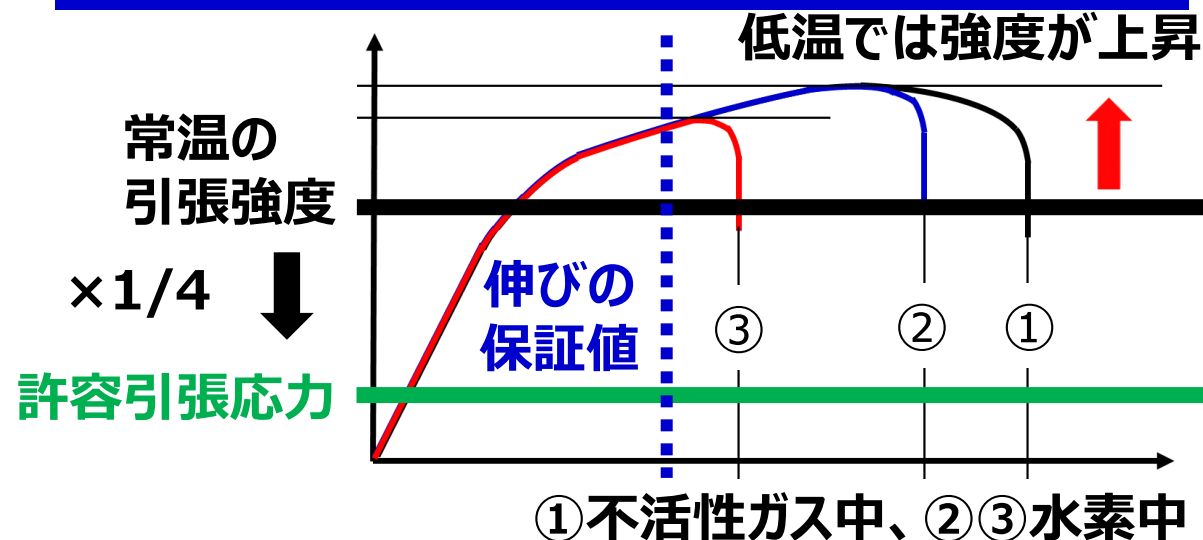


常温の強度を1としたときの強度の低下率

(冷間加工度20%～50%が適用範囲)

常温の引張試験結果に係数を乗じ、設計温度範囲に許容引張応力を設定することが可能。

-45℃ SSRT試験 冷間加工材の強度と伸び



水素中で常温の引張強度を上回る②③ともに許容引張応力は確保。ところが、引張強度の下がった③は、水素が破壊靱性値に与える影響の評価が必要。材料規格値が無い冷間加工材は、一律に伸びの保証することが困難。

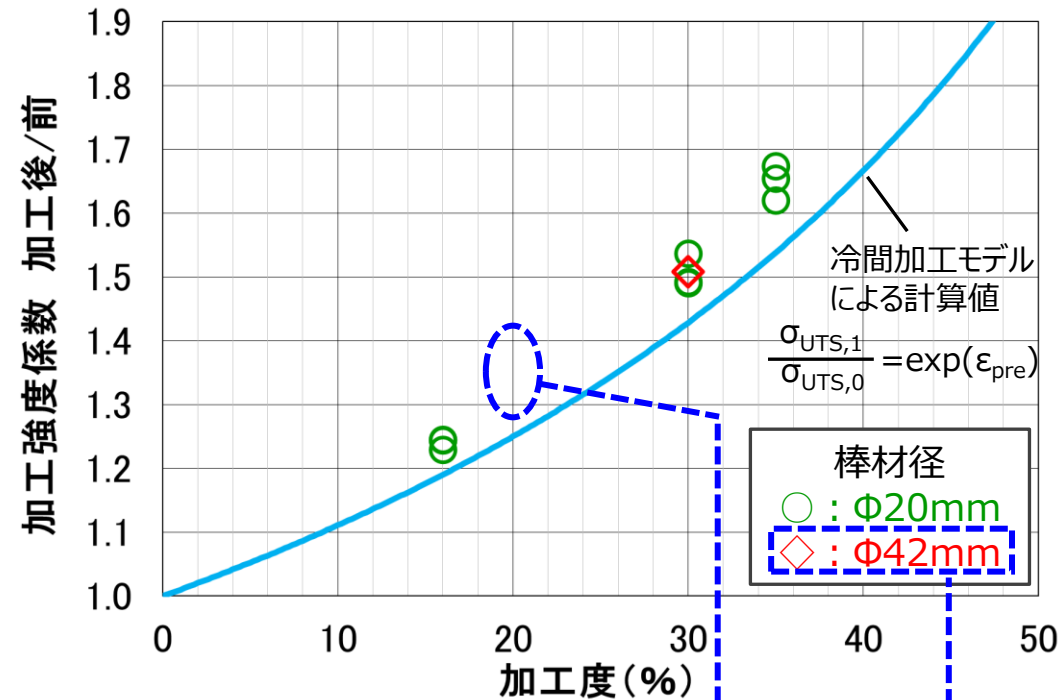
破壊靱性や疲労を含め、低温高圧水素の試験が必要。

冷間加工部品の設計に使う値に対し、水素の影響を評価する高額な試験を毎回実施すれば、コストが増加
共通して設計に使用できる値を大気中の試験から定め、水素中でも影響を受けないことを示せば部品作りに寄与
設計規格で材料規格値を作るのは不可能、機械的特性値の温度トレンドを評価することは可能、データ取得中

<SUS305>

①機械的性質データの解析

- ・許容引張応力の設定に向けて、機械的性質データを解析
加工強度係数が冷間加工モデルと整合

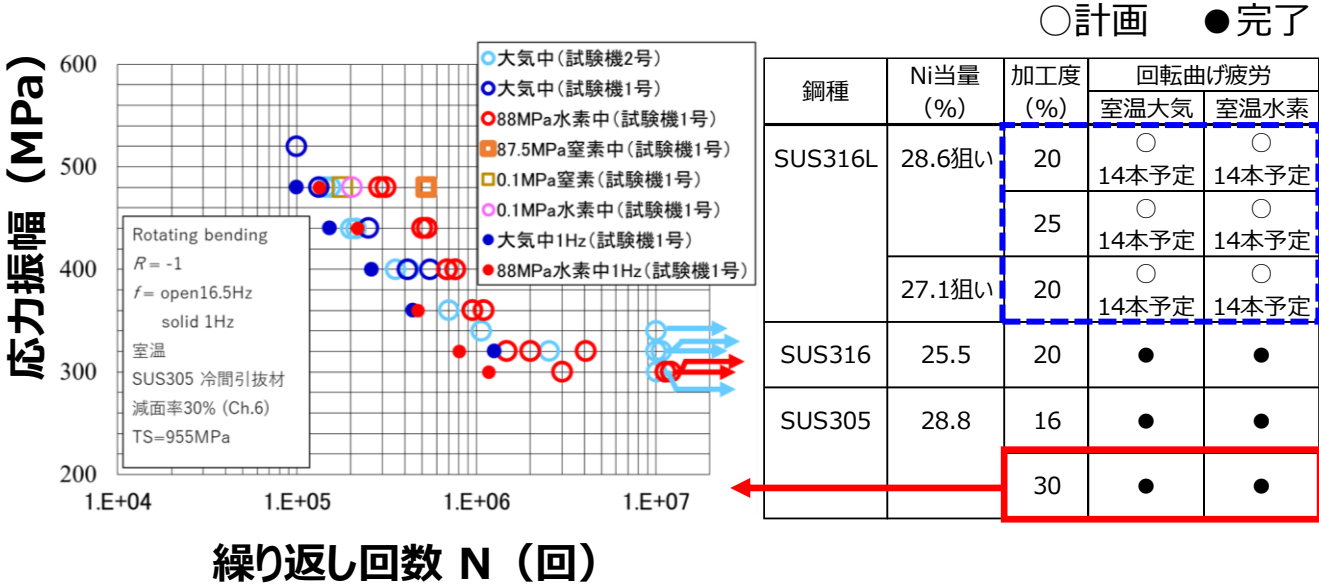


今後の計画

加工強度係数のデータ拡充
(加工度20%、棒材径Φ42mmのデータ補完)

②高圧水素中回転曲げ疲労特性

- ・許容引張応力案と疲労限度との関係を明確にすべく、高圧水素中回転曲げ疲労試験による疲労限度データを取得



- ◆大気中と同様に高圧水素中においても疲労限度が存在する
- ◆許容引張応力案と比較して十分に高い疲労限度を確認

疲労限度のデータ拡充
(SUS316L冷間引抜材)

3. 研究開発成果について

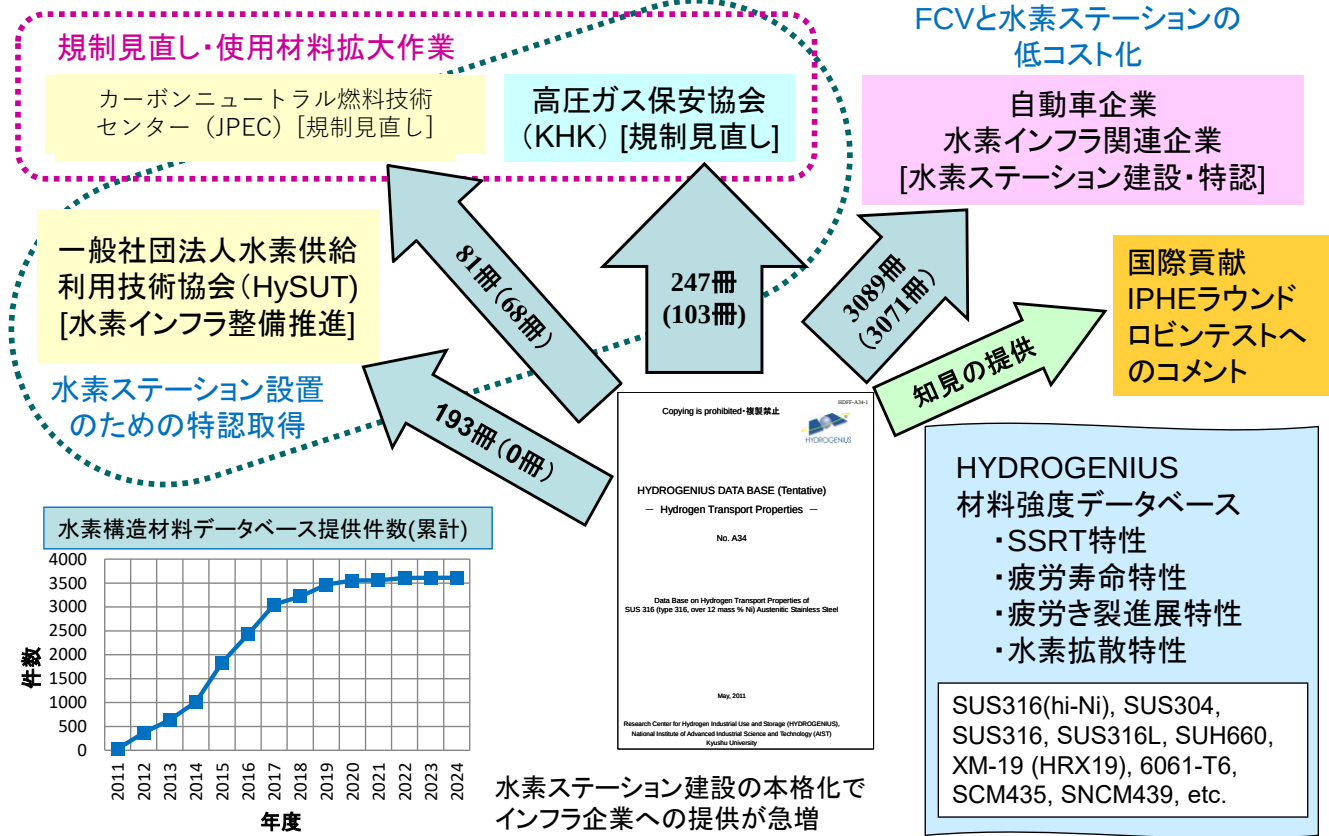
研究開発の目標及び進捗状況、目標達成に向けたアプローチ



NEDO事業名	年度	データベース No.	冊数
水素先端科学基礎研究事業	2006～2012	1 ～ 48, 51	49
水素利用技術研究開発事業	2013～2017	49 ～ 50, 52 ～ 78	29
超高圧水素インフラ本格普及技術開発事業	2018～2022	79 ～ 109	31
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	2023～	110 ～ 113	4

④データベースの拡大

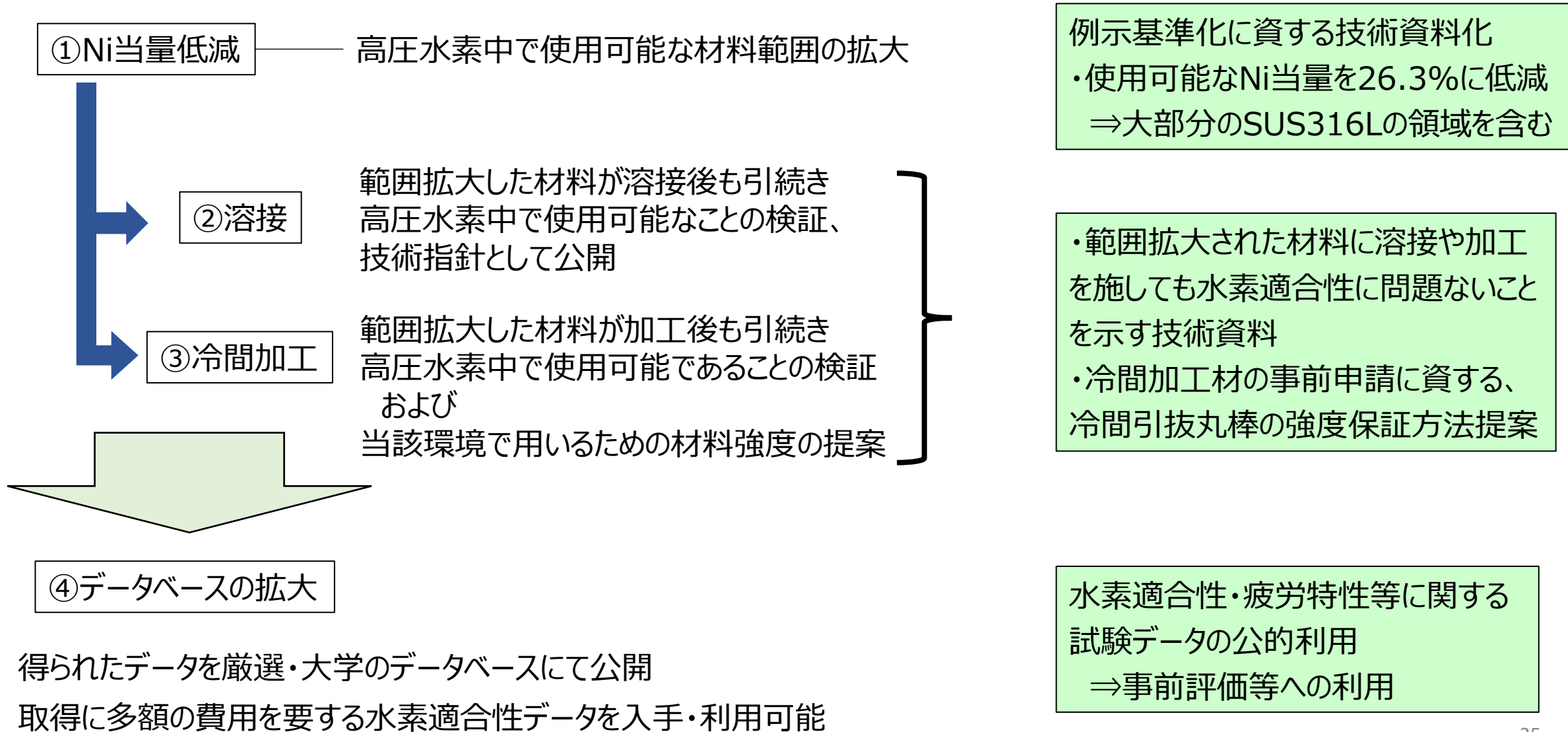
全113冊, 総ページ数: 約2800頁, 提供総数: 約3,600件



【HYDROGENIUS材料強度データベース】

SSRT特性等の水素に関する実験データを多数収録

- ・新規登録：4件
- ・審議中案件：7件



対外発表件数：計4件

2023年度：1件

2024年度：3件

- ・令和5年度 FCCJ 燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化等動向説明会
- ・令和6年度 FCCJ 燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化等動向説明会
- ・2024年度JPECフォーラム
- ・日本鉄鋼協会 会報「ふえらむ」2024年12月号

テーマ	実用化のイメージ
①Ni当量低減検討	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。一般則例示基準の改正に結び付けることで 一般申請での利用 を見込む
②溶接に関する検討	溶接の水素適合性に関する知見を 技術指針化し公開閲覧可能
③冷間加工材に関する検討	KHKS0220の強度低下係数と同様、規格最小値的な考え方により 水素中の設計に使用する共通的な値の設定方法 を示す。 高圧水素環境下での冷間加工材の疲労特性は データベース化し公開(SUS305)
④データベースの拡大	九大図書館のリポジトリを介し公開予定

テーマ	今後の課題・方針
①Ni当量低減検討	Ni当量低減に資する技術資料の作成
②溶接に関する検討	溶接施工における水素適合性の確認工程が不要であることを周知する(好適事例化)。凝固偏析等の取扱いについて検討
③冷間加工材に関する検討	冷間加工材の許容引張応力の設定に向けた引張強さ以外 の特性に支障ない範囲の確認
④データベースの拡大	データベースにおける公開可否・時期の判断

以上