

「水素利用技術研究開発事業 /
燃料電池自動車及び水素供給インフラの国内規制適正化、国際基準調和・
国際標準化に関する研究開発 /
水素ステーション用金属材料の鋼種拡大に関する研究開発」
（事後評価）

プロジェクトの概要（公開）

一般財団法人石油エネルギー技術センター

高压ガス保安協会

国立大学法人九州大学

（再委託先）国立研究開発法人産業技術総合研究所

（再委託先）国立研究開発法人物質・材料研究機構

平成29年11月24日

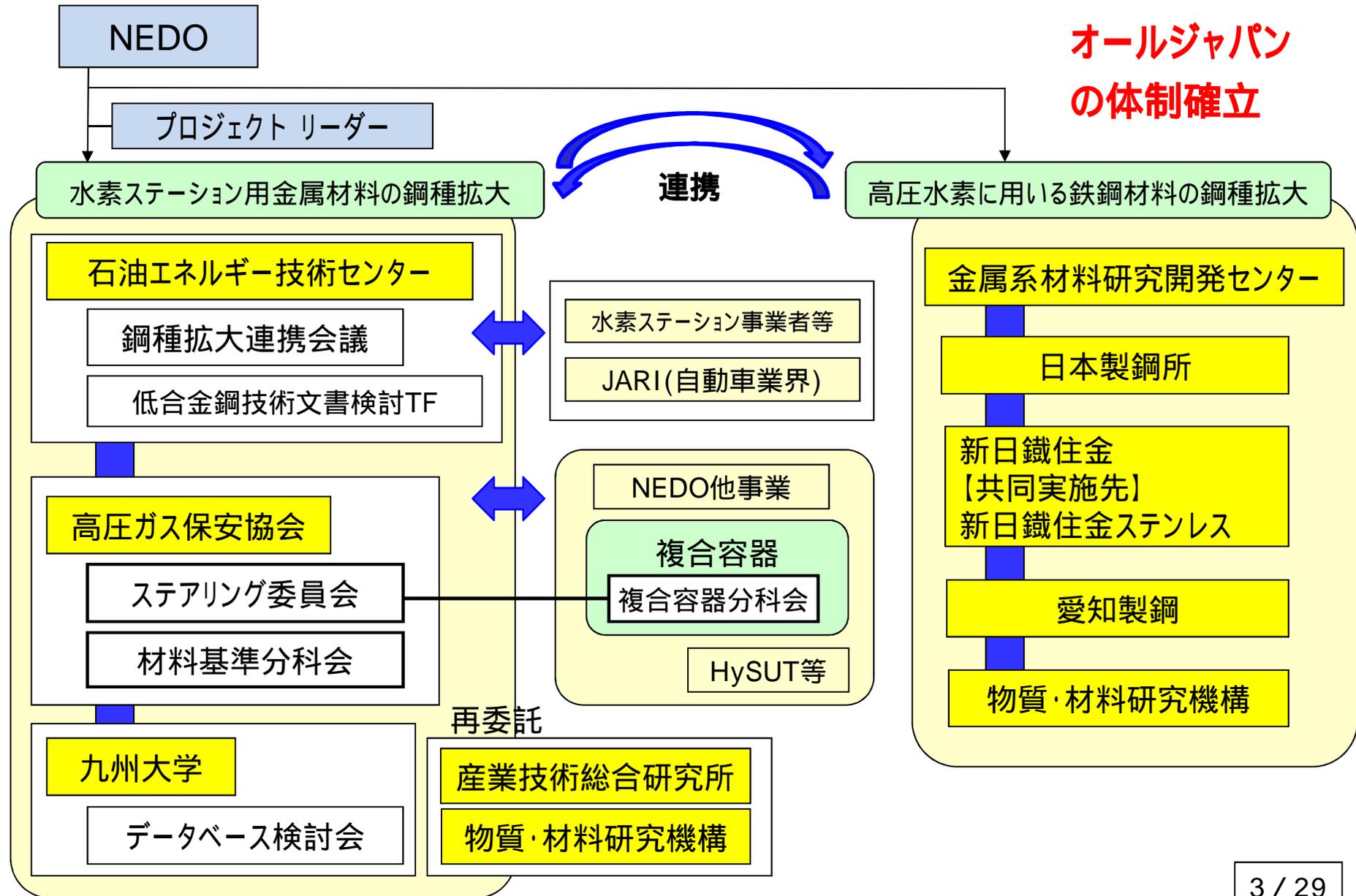
3 . 研究開発成果について (1) 研究開発目標の達成度

個別研究開発項目の目標と達成状況

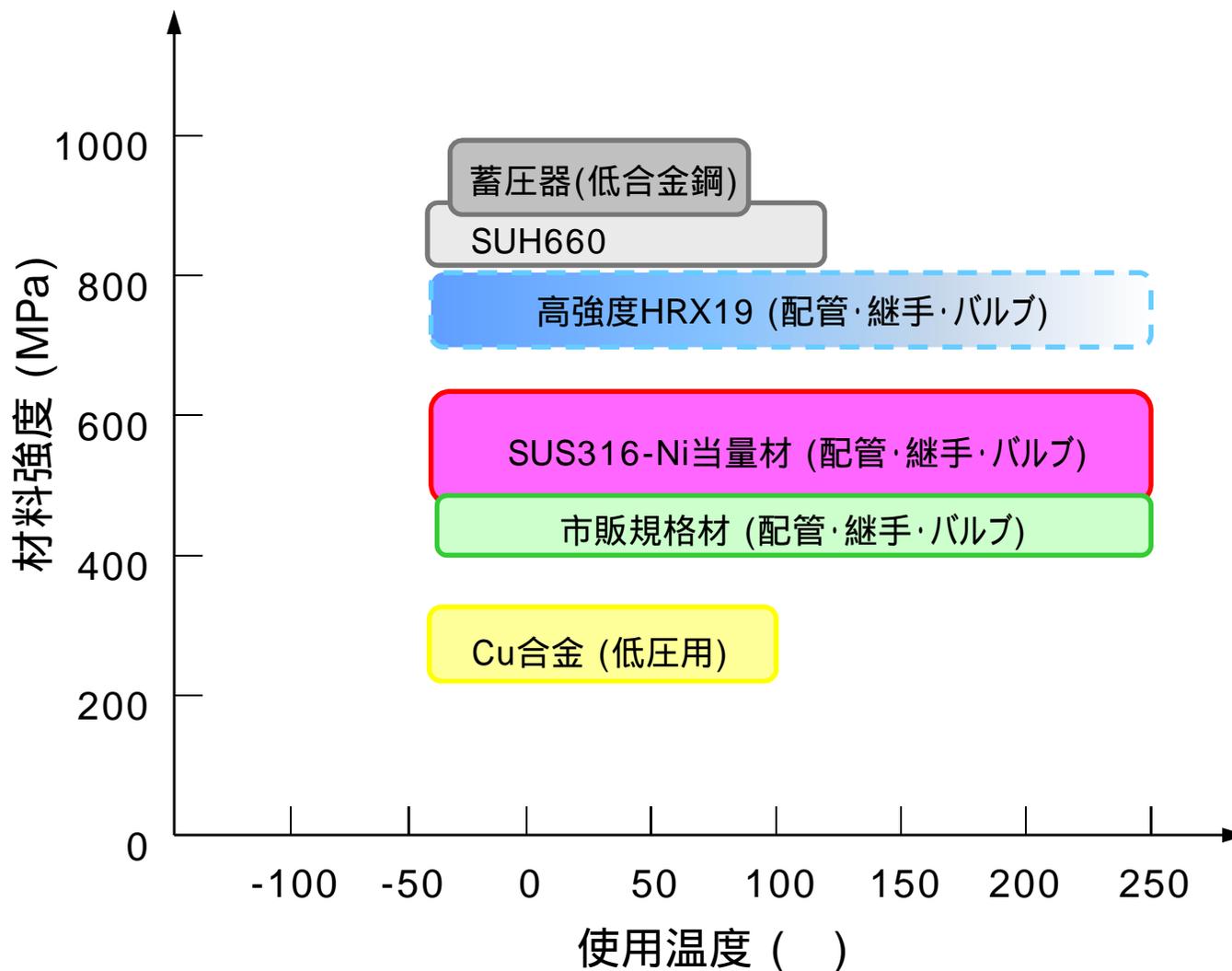
開発項目	最終目標	成果	達成度	備考
-1 汎用材の利用拡大	汎用材の累計5～8種の研究、評価、使用条件の明確化	・SUH660 (1種) , 銅合金 (2種) の例示基準化 ・20MPa以下のNi当量規制除外 (加圧鋼を含む 多鋼種 の使用が可)		
-2 新たなニーズに基づいた汎用鋼種の拡大		・汎用SUS材の使用可能域拡大研究 現行規制の妥当性を検証済 ・低合金鋼の超高圧利用方策提言 ・低合金鋼がイドライン作成研究 技術文書発行		
-1 超高圧、広温度範囲での利用拡大	ステンレス材の累計3～5種、もしくはその他材料の研究、評価、使用条件の明確化	・SUS316(高Ni)材の使用可能域拡大 (3種) ・HRX19の耐水素特性立証 (1種) ・データベース構築、産業界への提供		
-2 新たなニーズに基づいた超高圧、広温度範囲の鋼種拡大		・HRX19の溶接研究 ・海外規格材の例示基準への取込み (SUH660温度拡張基準化 (1種) , HRX19の基準化に向けた道筋の明確化)		

大幅達成、 達成、 達成見込み、 X未達

研究体制表

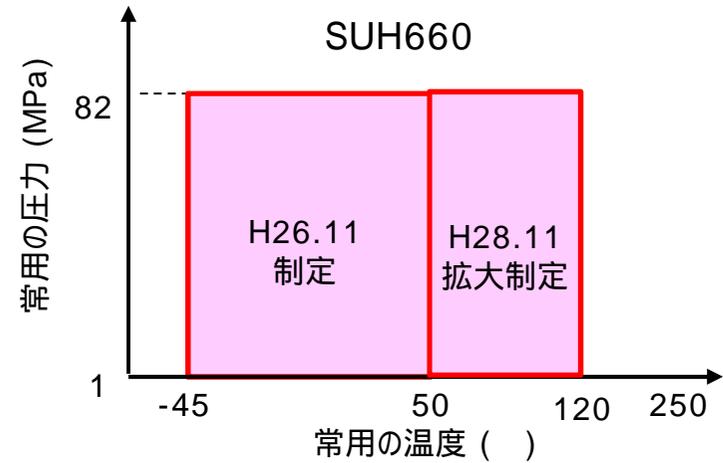
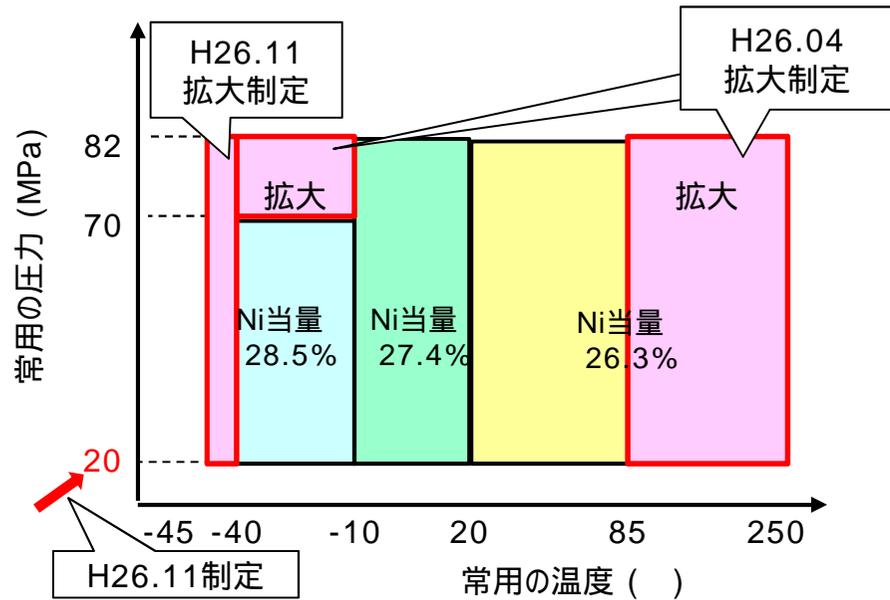


水素ステーションに関わる事業者へのニーズ調査（アンケート，ヒアリング）を通じて、鋼種拡大の方向性を下図の通り定めた。

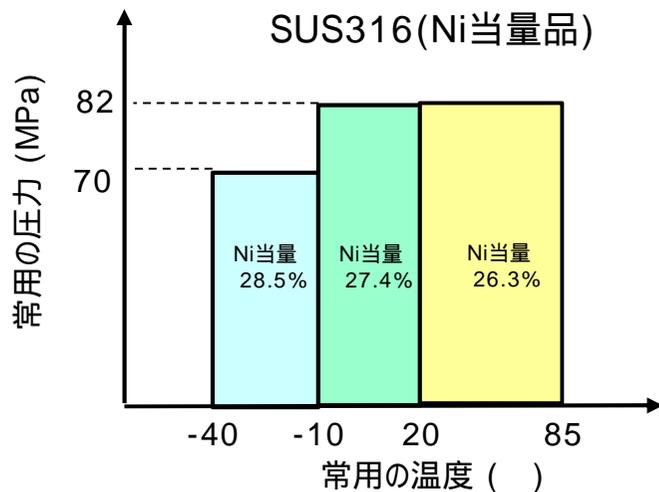


使用温度と材料強度の関係

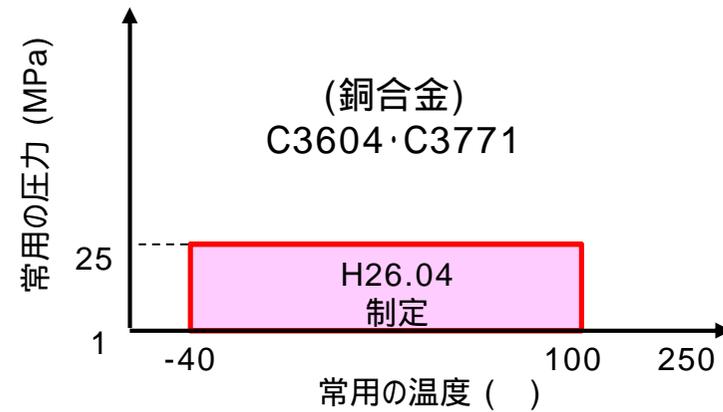
これまでの一般則例示基準化実績



↑ 範囲の拡大 (高圧、高低温)
 ・20MPa以下; Ni当量の枠外(加刃鋼も可)

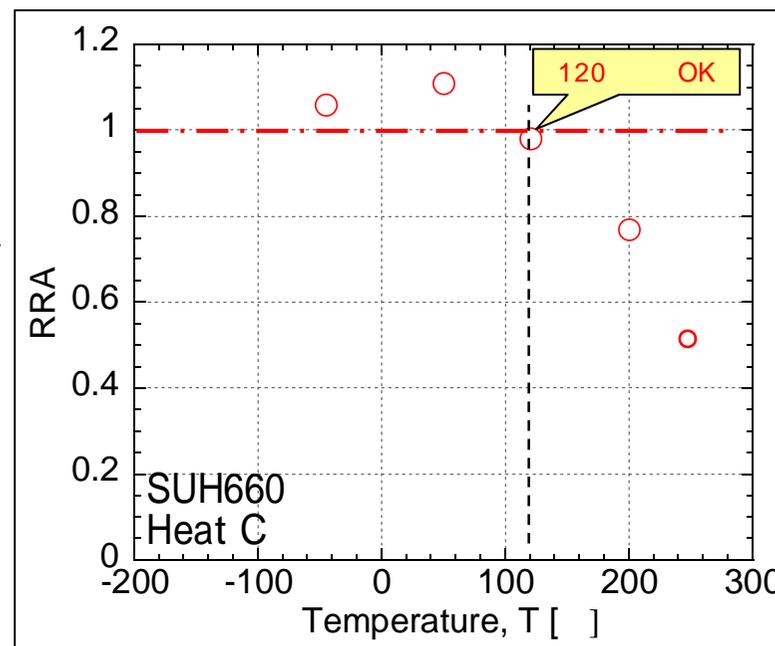
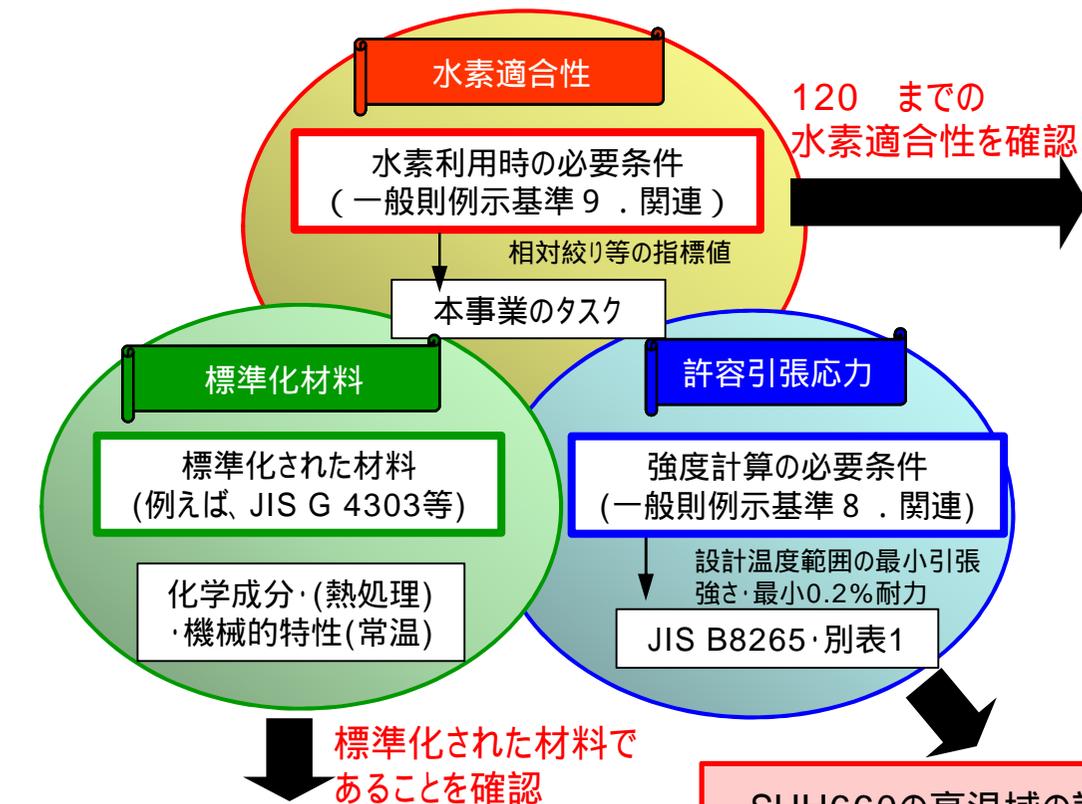


↑ 種類の拡大



SUH660：一般則例示基準の使用温度範囲拡大

例示基準化に必要な要件



RRAと試験温度の関係
(2016.3 HYDROGENIUSデータ)

標準化された材料であることを確認

SUH660材料規格
 JIS G 4311：耐熱鋼棒及び線材
 JIS G 4312：耐熱鋼板及び鋼帯

SUH660の高温域の許容引張応力を規定出来れば、
 一般則例示基準の使用温度範囲を120 まで拡張可能



SUH660：許容引張応力の設定

許容引張応力設定の根拠になり得る材料を揃えるため、以下の取り組みを行った。

ASME規格調査

・ASME 1998 Sec. Part D Table 1Aに許容引張応力表(安全係数=4)が規定されていることを確認した。

HPISでの許容引張応力設定

・HPI 圧力容器材料規格分科会に、ASME規格に準拠した許容引張応力表を申請し、承認された。(HPIS C104：安全係数4)

HPI (一般社団法人日本高圧力技術協会)：国内で許容引張応力の技術的審査を行う機関

JIS B8265での許容引張応力設定

・JIS 圧力容器技術委員会において、HPIS C104の許容引張応力表が審議され、承認された。その後、H28年6月27日付けで追補が官報公示された。

SUH660 : 例示基準改正

以下のように例示基準が改正された。(H28年11月1日施行)

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
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
	SUS 304~ SUS 430	(略)							172	172	172	172	170	169	166	164	162	160	159	158	157	156

一般則例示基準9.の2. (一部抜粋) SUH660の温度範囲拡張
(旧: -45 ~ 50 改正後: -45 ~ 120)

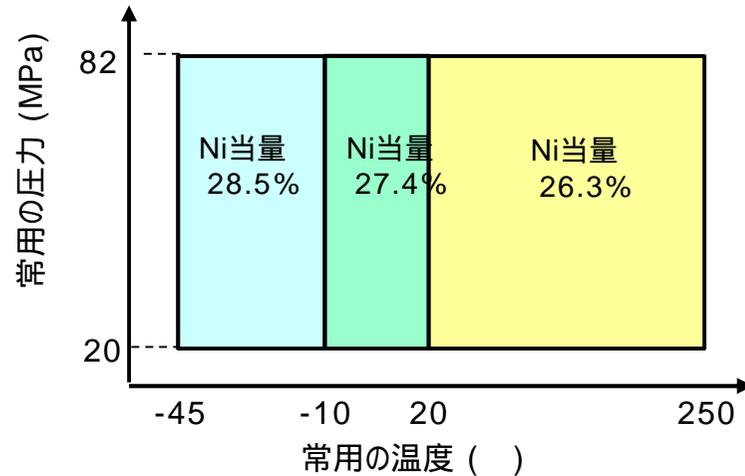
2.2 圧縮水素が通る配管 (車両に圧縮水素を充填するためのホースを除く。) 及び管継手
 … (省略) …、日本工業規格G4311(2011)耐熱鋼棒及び線材 (固溶化熱処理を965 ~ 995 で実施し、時効処理をしたSUH660 であって、その常用の圧力が82MPa 以下、かつその常用の温度が -45 以上120 以下である場合に限る。) 又は日本工業規格G4312(2011)耐熱鋼板及び鋼帯 (固溶化熱処理を実施し、時効処理したSUH660 であって、その常用の圧力が82MPa 以下、かつその常用の温度が -45 以上120 以下である場合に限る。)

出典: 経済産業省HP http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2016/11/281101.html

SUS316系：規制合理化の可能性検討

【目的】 SUS316系のNi当量規制について、規制合理化の可能性を検討する。

現行の一般則例示基準



$$\text{Ni当量} = \text{Ni} + 12.6 \text{ C} + 0.35 \text{ Si} + 1.05 \text{ Mn} + 0.65 \text{ Cr} + 0.98 \text{ Mo}$$

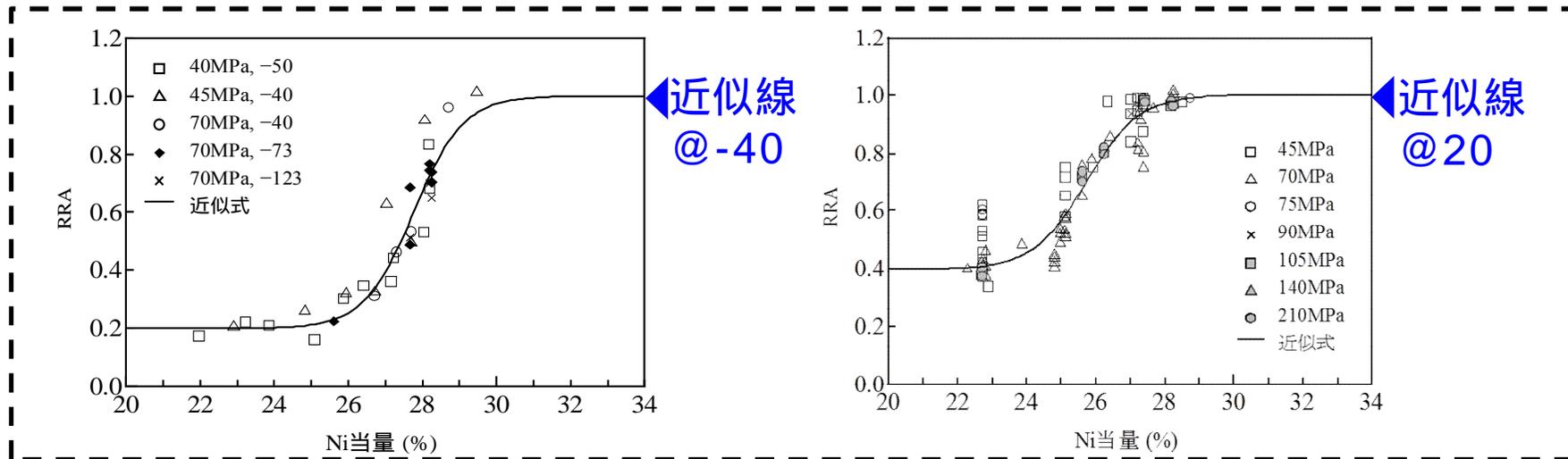
(平山の式)

【水素適合性判断基準】

水素中の絞り 材料規格の絞り

SUS316系の材料規格の絞りは60%以上。
大気中の絞りの実績値が75%を超えるため、
RRA 0.8

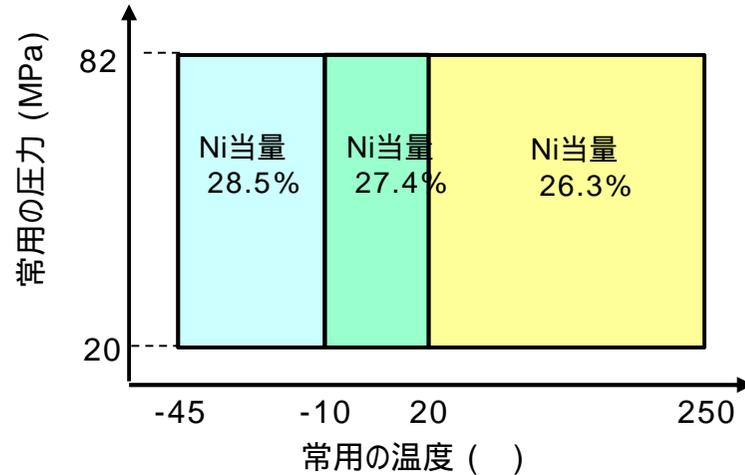
現行規制を支持するデータ



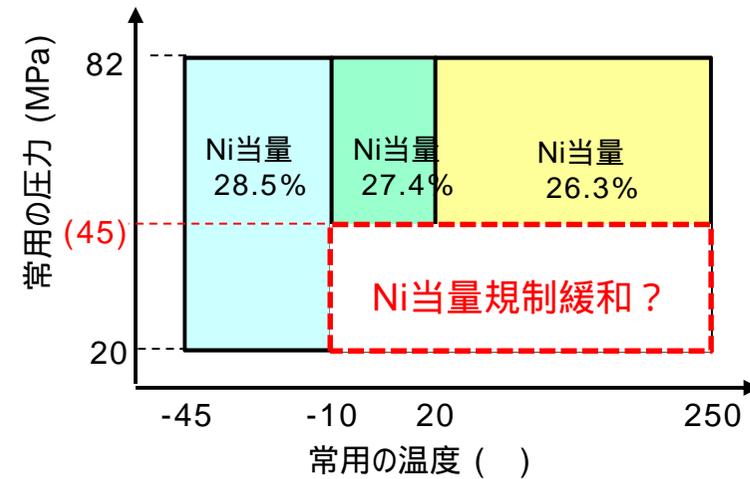
SUS316系：規制合理化の可能性検討

【目的】 SUS316系のNi当量規制について、規制合理化の可能性を検討する。

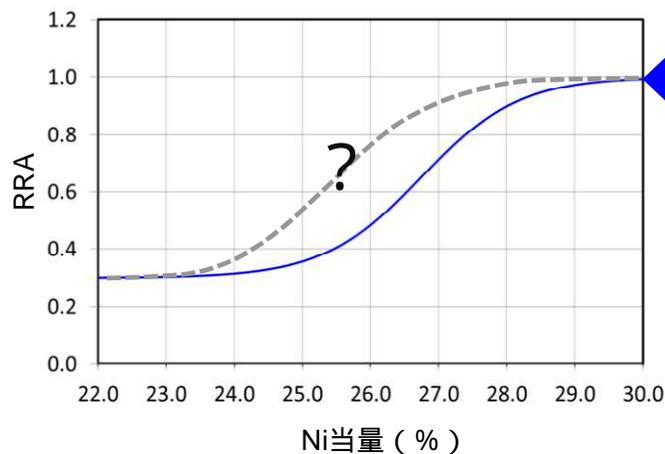
現行の一般則例示基準



規制合理化のイメージ



現行規制を支持するデータ

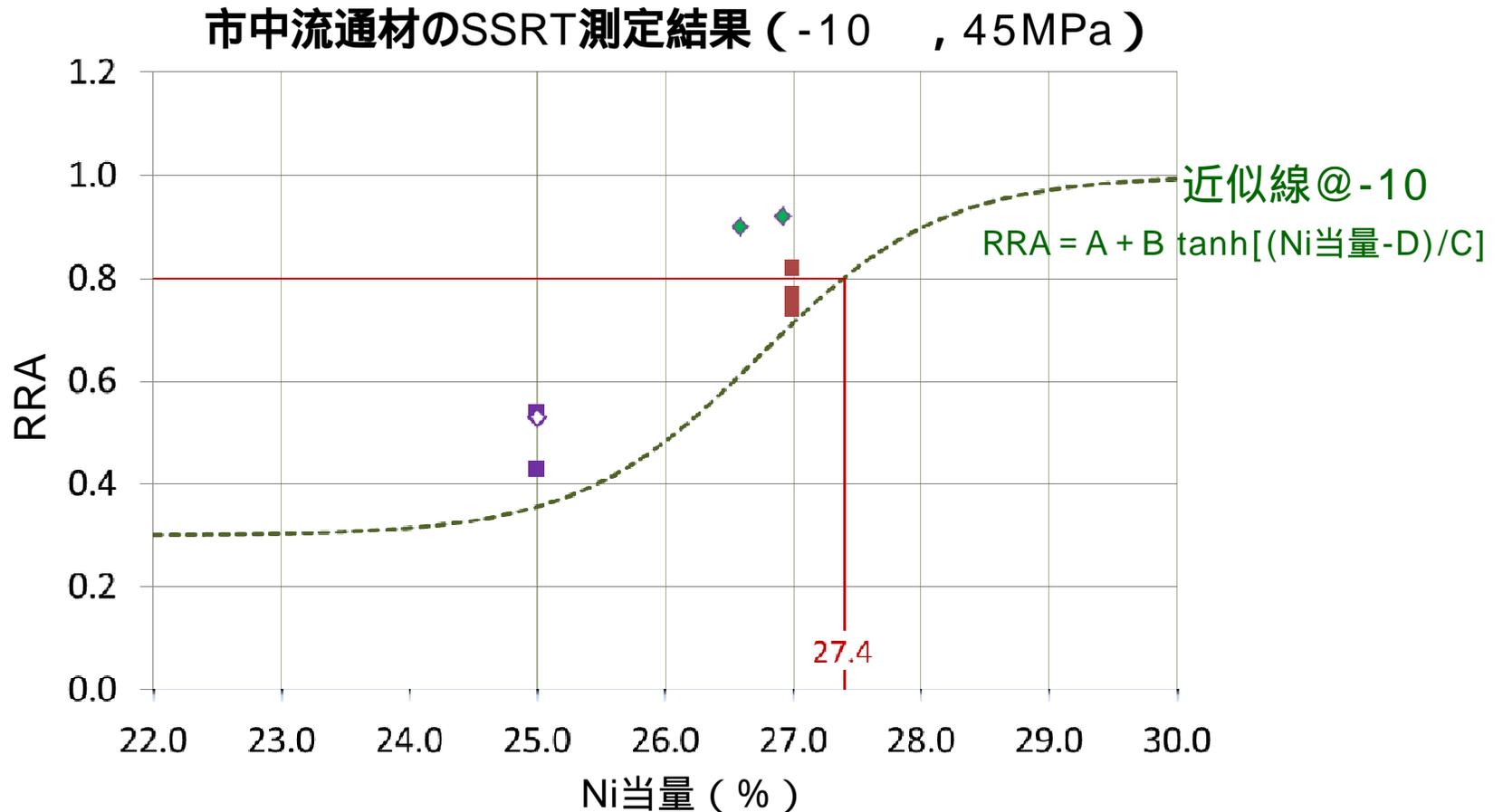


← 近似線 @ -10

$$RRA = A + B \tanh[(Ni当量 - D)/C]$$

市中流通材の実態を調査し、既存の近似線の見直し (Ni当量規制見直し) について可能性を検討した。

SUS316系：市中流通材の実態調査結果



市中流通材のRRAは既存の近似線を上回った。試験結果の下限値も考慮すると、規制合理化の提案までは出来ないが、-10℃における近似線の妥当性を実データで検証することが出来た（既存の近似線は安全側に設定されており妥当）。

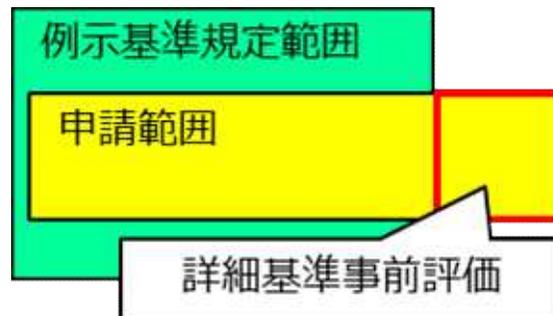
【今後の展開】 汎用材を使用したいというニーズへの対応検討
（新たな水素特性判断基準の検討等）

低合金鋼：低合金鋼技術文書の作成

【目的】低合金鋼（＝合金成分5%以下）は高強度で比較的安価だが水素影響がある材料。水素適合性について、Ni当量のような一義的な指標で規定するのが難しい。そこで、申請に必要な指針を示すことで、蓄圧器への利用を促進する。



事前評価を想定し、現行の特定則例示基準の規定以外に考慮すべき注意事項及び判定根拠を例示する。



平成29年度に低合金鋼技術文書完成

低合金鋼：低合金鋼技術文書の検討体制

(NEDO事業) 低合金鋼技術文書検討TF

メンバー：JSW，東京大学，九州大学，ベンカン機工，高圧昭和ポンペ，
JFEスチール，JFEコンテイナー，JRRCM，KHK，NEDO

事務局：JPEC

会議開催日：H28.9.20、H29.2.14、H29.7.6、H29.10.5、H29.11.29



低合金鋼技術文書案提案

(JPEC事業) 低合金鋼技術文書検討分科会

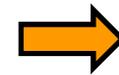
委員：東京電機大学（主査），東京大学，青山学院大学，慶應義塾大学，
横浜国立大学，FCCJ

事務局：JPEC

会議開催日：H29.2.20、H29.7.24、H29.10.23、H29.12.11

低合金鋼技術文書の構成

- 1 適用範囲
- 2 引用規格
- 3 用語の定義
- 4 材料
 - 4.1 水素適合性の判定
 - 4.2 製品と同等の材料
 - 4.2.1 鍛鋼品における「製品と同等の材料」の定義
 - 4.2.2 継目無鋼管における「製品と同等の材料」の定義
- 5 設計
 - 5.1 許容引張応力の設定
 - 5.2 硬さ試験
 - 5.3 材料の靱性検証(衝撃試験)
 - 5.4 破裂前漏洩条件の検証
 - 5.5 蓄圧器応力解析
 - 5.6 蓄圧器の累積許容繰返し数の設定(疲労寿命試験による検証)
 - 5.7 設計段階における検査周期の設定
 - 5.7.1 有害な欠陥の検査方法
 - 5.7.2 検査周期の設定
 - 5.7.2.1 疲労き裂進展の打切点
 - 5.7.2.2 疲労き裂進展解析



【基本的な考え方（一部紹介）】

水素適合性の判定

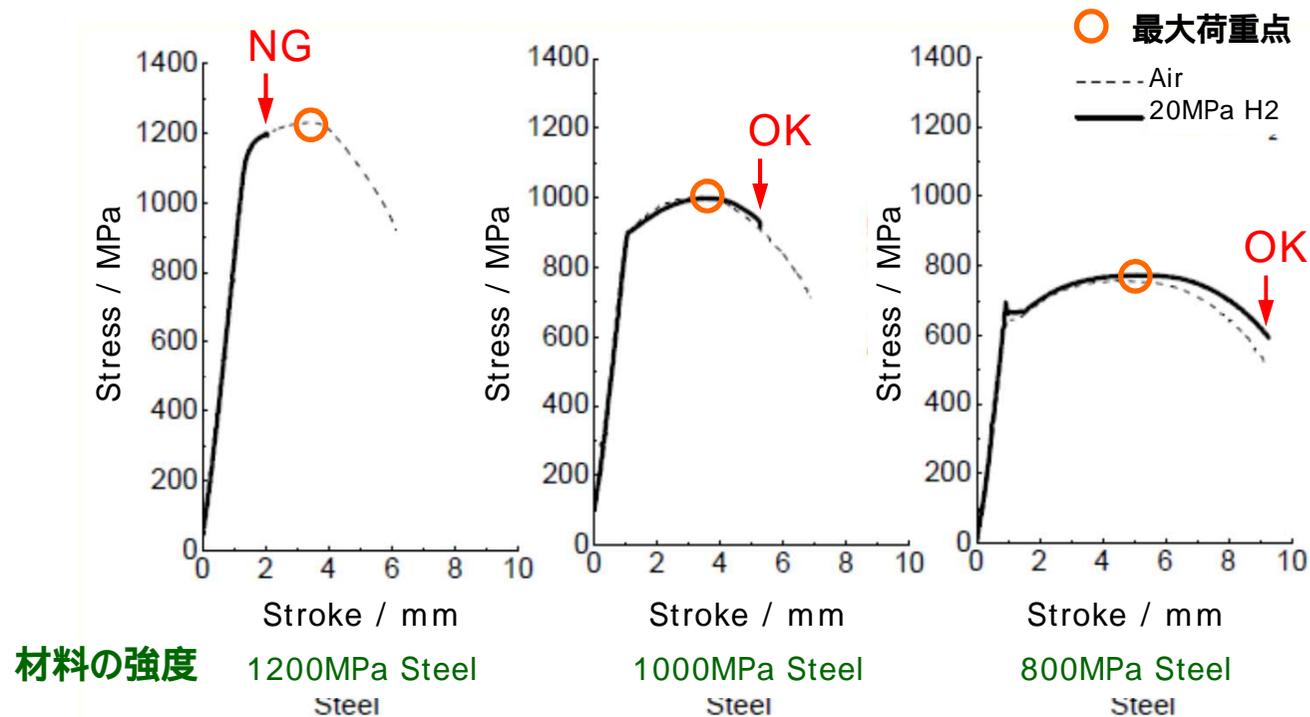
材料の強度が高くなるほど水素の影響が顕著となる傾向があり、水素影響を小さくするためには適切な強度に調整した材料を用いる必要がある。

骨子を紹介（次ページ）

低合金鋼：水素適合性の判定

【水素適合性の判定（骨子）】

水素ガス中SSRTの荷重 - 変位線図において、最大荷重点を超過することを確認する。



水素ガス中SSRTの事例

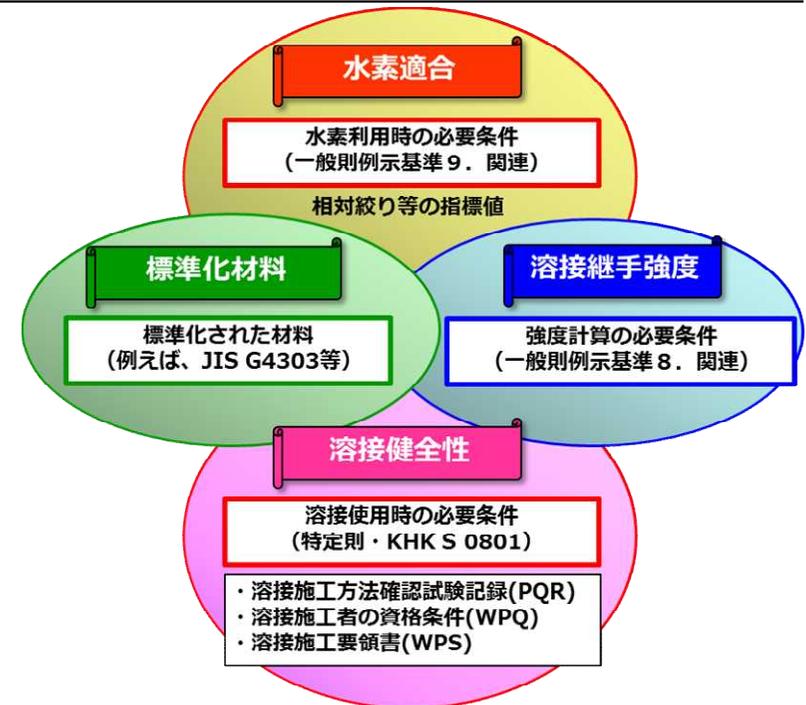
出典：Wada, Y. et al., Proc. 2007 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference (ASME2007) PVP2007-26533

溶接：溶接の安全利用に必要な要件の提示

【経緯】

商用水素ステーションにおいて、コーン&スレッド継手からの微小な水素漏洩が頻発しており、事業者にとって多大な負担となっていることを確認した。

前記課題を解決するため、コーン&スレッド継手をHRX19を事例とする溶接継手に代替することを目標とし、**高圧水素中で使用する溶接継手の安全要件**として次の項目を抽出した。



安全要件：溶接部の水素適合性・標準化材料・溶接継手強度・溶接健全性



ASME PVP 2017において国内議論の現状を報告し、高圧水素中で使用する溶接継手の安全使用に関して海外有識者の意見を聴取した。

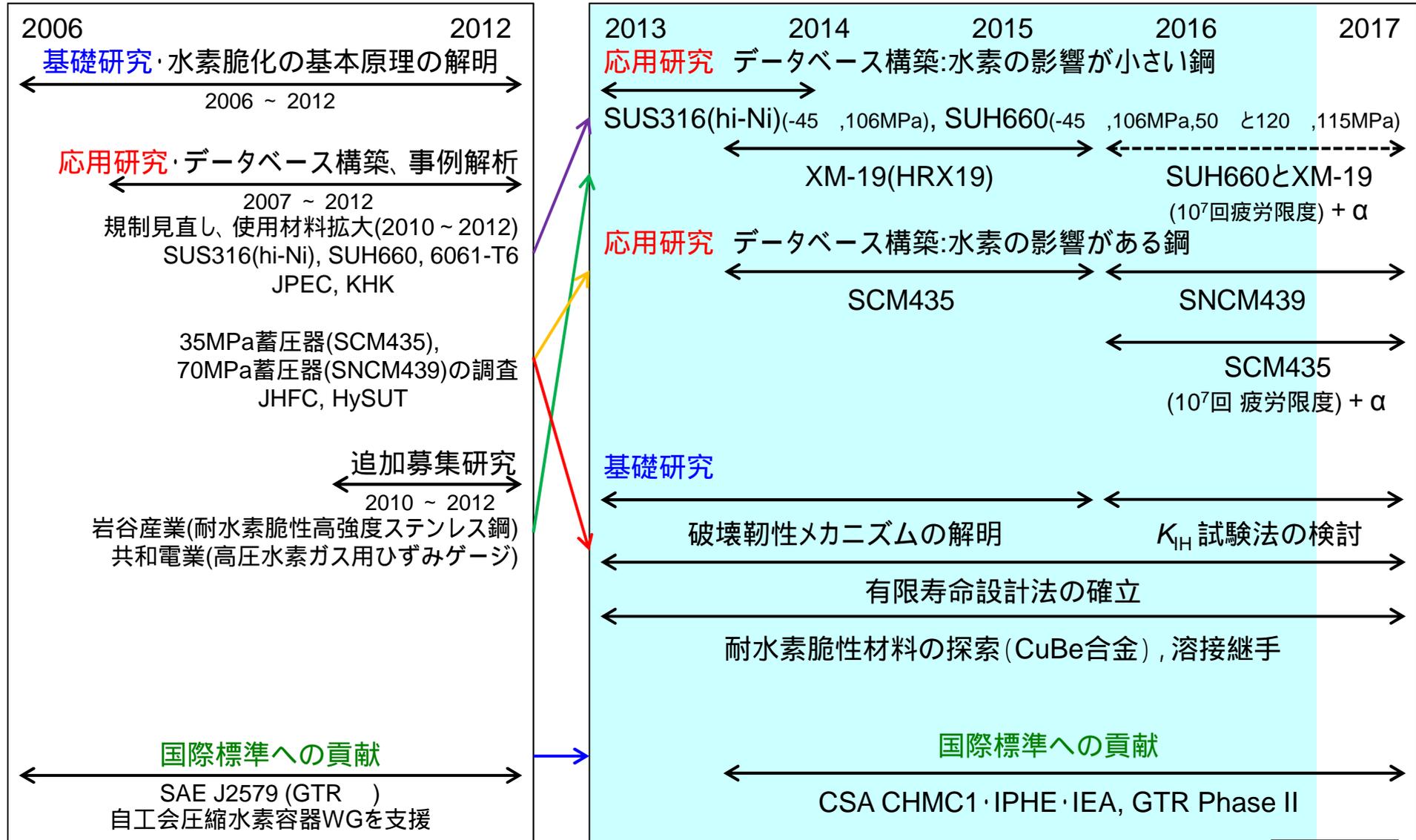
海外有識者の意見やHRX19溶接の検討結果等を踏まえ、溶接の安全利用に必要な要件を提示する。

九州大学HYDROGENIUS 取組みの概要と年次計画

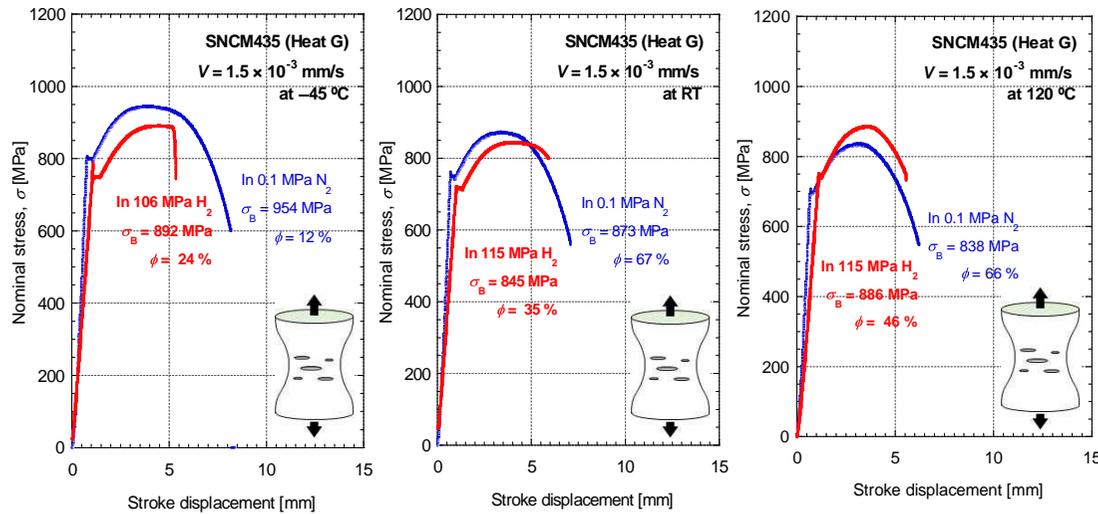
水素材料先端基礎研究事業
期(水素材料強度特性チーム)

鋼種拡大プロジェクト
期(金属材料部門)

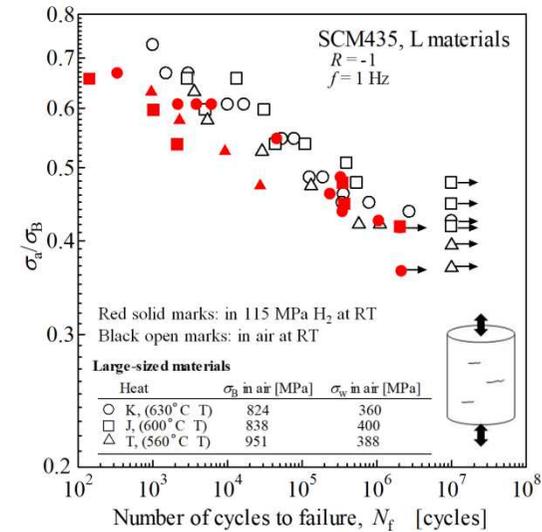
HYDROGENIUS



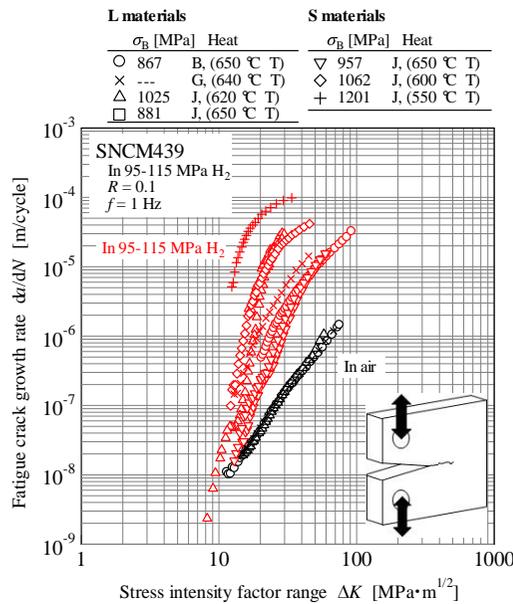
データベース構築，産業界への提供：低合金鋼SCM435とSNCM439



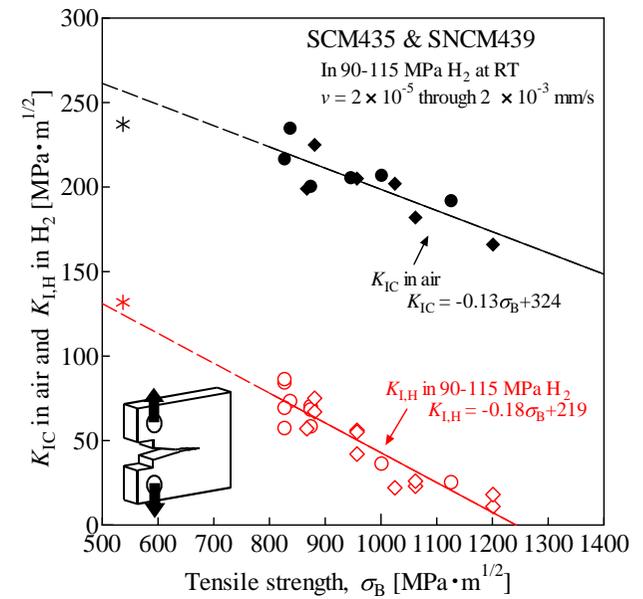
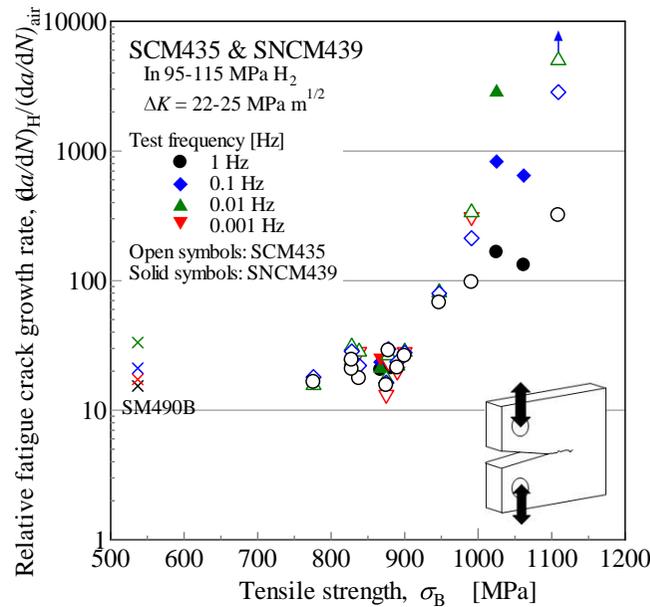
115MPa水素ガス中でも引張強さは確保



疲労限度も低下せず



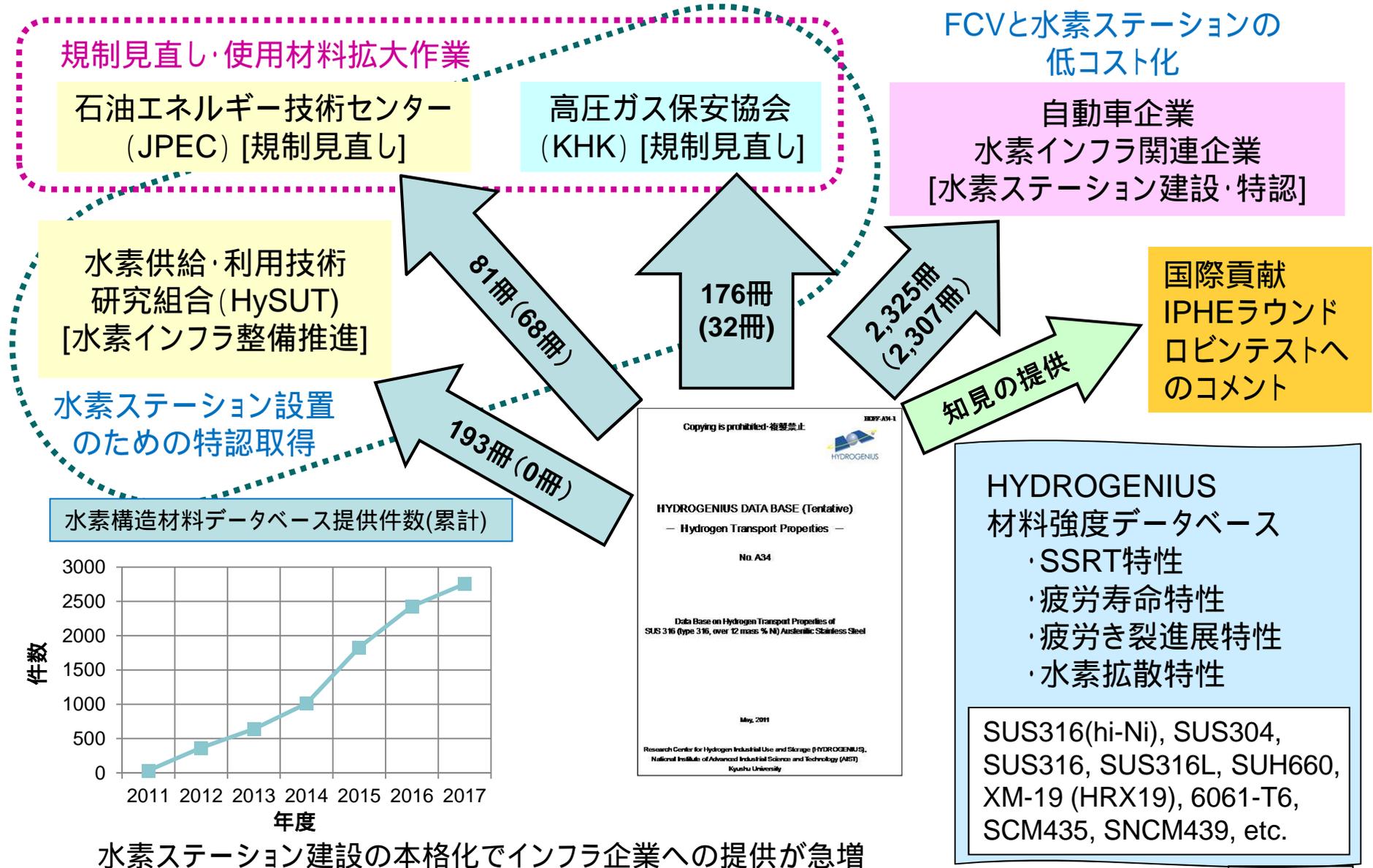
$\sigma_B \leq 900$ MPaで疲労き裂進展加速に上限値(大気中の約30倍)が存在



115MPa H_2 中で $K_{I,H} \approx 57$ MPa·m^{1/2}

データベース構築，産業界への提供（基準見直しと製品開発への貢献）

取得データをデータベース化，提供総数：2,407件（平成25年度以前を含めた総数：2,775件）



九州大学で取得した実験データおよび基礎研究から得られた知見をもとに、
H27年度第3回KHK基準分科会(H28.3.3)およびステアリング委員会(H28.3.22)で提案。

115MPa水素ガス中におけるSCM435とSNM439の使用指針と設計指針

使用指針

- ・ 厚さ t 30mm, 引張強さ σ_B 900 MPaを満たすSCM435並びに厚さ 60mm, 引張強さ σ_B 900 MPaを満たすSNM439は, 温度が-45 から120 , 圧力が115MPa以下の水素ガス中で使用できる。

設計指針

- ・ 115MPa水素ガス中でのSSRT試験で引張強さが確保でき, σ_B 900 MPaであることを確認
- ・ 疲労寿命解析には, 水素ガス中で疲労限度が低下しないS-N設計線図(強度で1/2, 寿命で1/20)を使用。
- ・ 疲労き裂進展解析には, 上限の $da/dN-\Delta K$ 線図(大気中の30倍)と $\sigma_B = 900$ MPa での水素誘起き裂進展下限界値 $K_{I,H} = 57$ MPa \cdot m $^{1/2}$ を使用。
- ・ LBB評価には, $\sigma_B = 900$ MPa での大気中の破壊靱性値 $K_{I,C} = 207$ MPa \cdot m $^{1/2}$ を使用。

ただし, 上記の肉厚制限(t 60mm)と強度レベルの上限(σ_B 900 MPa)は, 本事業で取得したデータから仮決定したものであり, 今後, 追加試験や材料開発を行うことで変更していく必要がある。

プロジェクトとしての達成状況と成果の意義

(1) 目標に対する達成状況

汎用材の利用拡大の目標に対する達成状況は以下のとおり。

- ・SUH660 (1種) , 銅合金 (2種) の例示基準化
- ・20MPa以下のNi当量規制除外 (加圧鋼を含む多鋼種の使用が可)
- ・汎用SUS材の使用可能域拡大研究 現行規制の妥当性を検証済
- ・低合金鋼の超高压利用方策提言
- ・低合金鋼が 1 ライン作成研究 技術文書発行

例示基準化達成数で、8種を達成した。

さらに低合金鋼技術文書発行等、目標数を上回る実用化を達成した。

超高压、広温度範囲の利用拡大の目標に対する達成状況は以下のとおり。

- ・SUS316(高Ni)材の使用可能域拡大 (3種)
- ・HRX19の耐水素特性立証 (1種)
- ・ターボ-ス構築、産業界への提供
- ・HRX19の溶接研究
- ・海外規格材の例示基準への取込み検討
(SUH660温度拡張基準化 (1種) , HRX19の基準化に向けた道筋の明確化)

例示基準化達成数で、4種を達成した。

さらにHRX19の耐水素特性立証・溶接実用化等、目標数を上回る実用化を達成した。

(2) 成果の意義

汎用材の利用拡大

- ・水素ステーションのコスト低減に寄与できる。

超高圧、広温度範囲の利用拡大

- ・70MPa級水素ステーションの超高圧域での建設に寄与できる。

データベース提供

- ・広く産業界にデータ提供を行うことで、詳細基準事前評価や特定案件事前評価（大臣特認）の申請に活用されており、水素ステーション普及に貢献している。

3 . 研究開発成果について (3) 知財と標準化 (4) 成果の普及

成果の普及

- 石油エネルギー技術センター、高圧ガス保安協会、九州大学の合計件数を示す。

	H25	H26	H27	H28	H29	H30	計
特許出願(うち外国出願)							件
論文(査読付き)	3	8	13	10	6		40件
研究発表・講演	25	62	59	53	19		218件
受賞実績	0	0	1	0	0		1件
新聞・雑誌等への掲載	1	1	1	1			4件
展示会への出展							件

平成29年9月25日現在

3 . 研究開発成果について (4) 成果の普及

成果の普及

(1) 発表会

- ・JPEC成果報告会
平成26年 6月 「水素輸送容器等に使用する金属の鋼種拡大」
平成27年 5月 「水素ステーション等で使用する金属材料の鋼種拡大」
平成28年 5月 「水素ステーション等で使用する金属材料の鋼種拡大に
関する検討状況」
平成29年 5月 「鋼種拡大に関する進捗状況について」
- ・KHK研究発表会
平成26年11月 「水素環境における金属材料劣化に関する最新情報」
平成27年12月 「高圧水素用材料及び容器の基準について」
平成28年12月 「高圧水素設備に使用される材料について」

(2) ヒアリング調査

- ・ユーザーヒアリングを随時実施し、事業の進捗状況や例示基準化状況等を説明している。
フェイス to フェイスで話すことの意義が非常に大きい。

(3) 業界関係者への周知

- ・鋼材使用側の水素業界、提供側の鉄鋼業界を含めたオールジャパン体制を構築し、
会議を通じて、得られた成果を早く業界へ周知できる仕組みとしている。

4 . 実用化の見通しについて

本プロジェクトにおける「実用化」の考え方

水素ステーションでニーズの高い鋼材について、事業者の申請負担を軽減し、新たな鋼材（＝例示基準化されていない鋼材）を使いやすくすることで、水素ステーションでの利用を促進する。

水素ステーションに関わる申請方法と事業者の申請負担

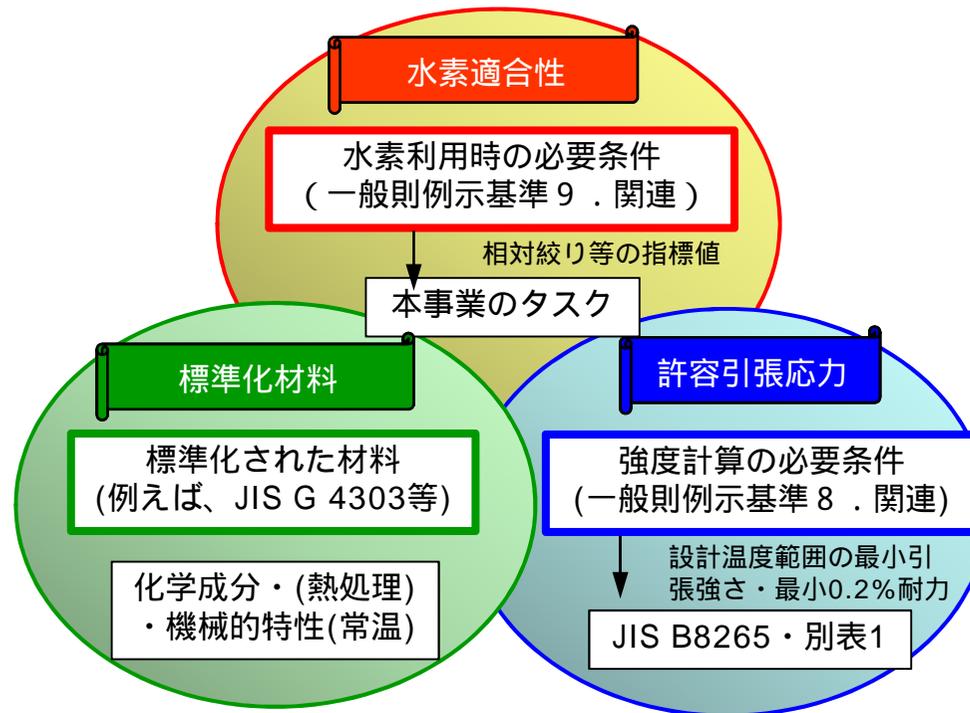
申請方法	内容	イメージ図	本事業での取り組み	事業者の申請負担 ↑ 小 ↓ 大
一般申請	例示基準の範囲内	<p>例示基準規定範囲 申請範囲</p>	<ul style="list-style-type: none"> 新たな鋼材の例示基準化 規制合理化の可能性検討 	
詳細基準 事前評価	<p>例示基準の範囲外に及ぶ場合</p> <p>申請者が作成した詳細基準が関係規則に定める機能性基準に適合するか否かが判断される。</p>	<p>例示基準規定範囲 申請範囲 詳細基準事前評価</p>	<ul style="list-style-type: none"> 技術文書化 事前評価要求事項の明確化 	

4 . 実用化の見通しについて

本プロジェクトにおける「実用化」の考え方

水素ステーションでニーズの高い鋼材について、事業者の申請負担を軽減し、新たな鋼材（＝例示基準化されていない鋼材）を使いやすくすることで、水素ステーションでの利用を促進する。

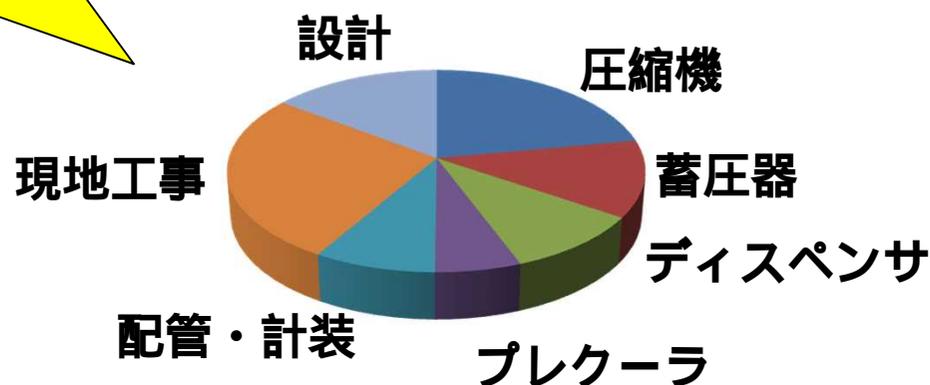
例示基準化に必要な要件



4 . 実用化の見通しについて

成果の実用化の見通し

水素ステーションのコスト構成



NEDO報告書；
「製造・輸送・貯蔵システム等技術開発」より

上図に、水素ステーションのコスト構成を示す。

- 鋼種拡大の寄与はほとんどの機器に及ぶものの、コスト的にはいずれも製作・加工費の割合が高く、材料費のみが全体コストへ及ぼす影響は少ない。
- 汎用品化、例示基準化により、材料入手、各種手続きの簡素化、及び利用方法の改善（溶接など）効果が非常に大きい。

新たな鋼材の例示基準化により、申請負荷を軽減することがニーズとなっている。

本事業において、例示基準化に資する資料の作成を行ってきており、このニーズに合致している。

4 . 実用化の見通しについて

成果の実用化の見通し

	鋼材等	使用・検討条件等	成果	
範囲 拡大	SUS316 (Ni当量品)	- 45 ~ 250	例示基準改正	
		Ni当量規制合理化	規制合理化には至らなかったが、 現行規制の妥当性を検証	
	SUH660	- 45 ~ 50	例示基準改正	
		温度範囲拡張 (~ 120)	例示基準改正	
	HRX19	- 45 ~ 250	基準化に向けた道筋の明確化	
種類 拡大	銅合金系		例示基準改正	
	低合金鋼	SCM435	70MPa級蓄圧器	使用指針と設計指針の提案
		SNCM439		
汎用鋼 (SUS, 低合金鋼含む)		20MPa以下	例示基準改正	
使い 方 拡大	許容応力値の海外規格引用		SUH660の350 までの ASME規格値のJISへの引用	JIS B8265改正
	溶接		HRX19を事例として溶接材の水素適合性 を検証	溶接の安全利用に必要な 要件の提示
	低合金鋼の利用拡大		70MPa級蓄圧器	低合金鋼技術文書発行

ユーザーニーズに基づき、各種鋼材の実用化（例示基準化等）を達成した。

4 . 実用化の見通しについて

実用化に向けた具体的取り組み

年度	H 2 5	H 2 6	H 2 7	H 2 8	H 2 9
範囲の拡大					
SUS316 (Ni当量品)	→		基準化	→ 適正使用条件見直し	
SUH660	→		基準化	→ 例示基準改定に向けた検討	
HRX19		→			
種類の拡大					
銅合金系	→	基準化			
低合金鋼					
・SCM435		→			
・SNCM439			→		
汎用鋼 (SUS、低合金鋼等含む)	→	基準化			
使い方の拡大					
許容応力値等の海外規格引用		→			
溶接		→			
低合金鋼の利用拡大				ガイドライン完成	→ 技術文書化

技術基準の整備に資する資料



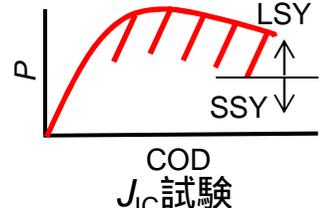
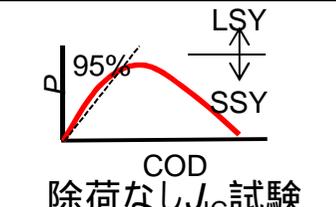
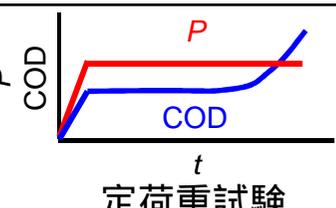
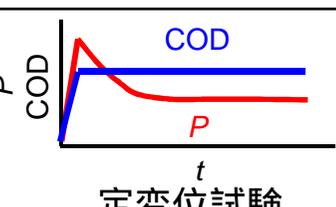
水素ステーションでの利用拡大

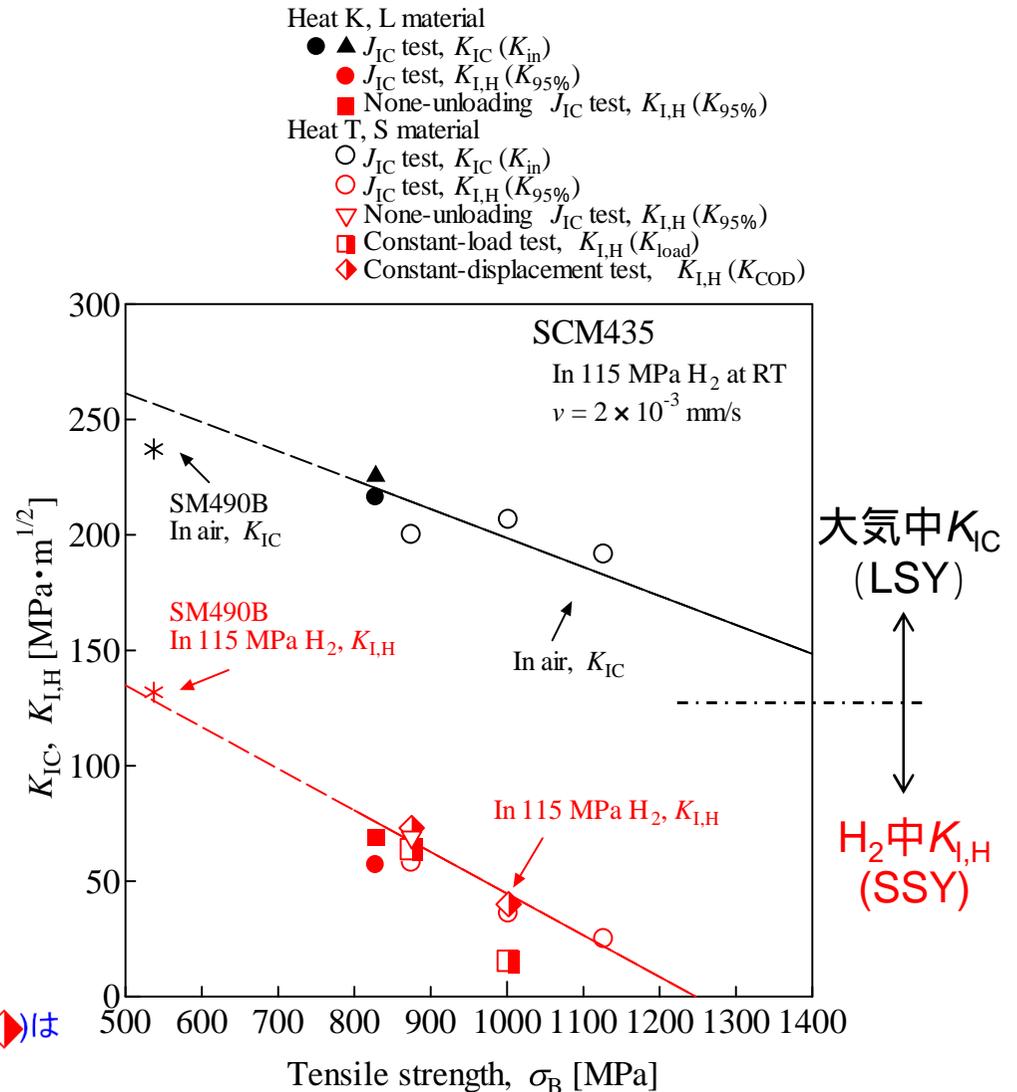
以下、補足資料（再委託先の成果）

高压水素ガス環境中の破壊靱性

低合金鋼の超高压利用方策提言 (一部をAISTに再委託)

疲労き裂進展特性に加え, 破壊前漏洩 (Leak Before Break : LBB) の評価には大気中の破壊靱性値 K_{IC} , 使用回数の決定には水素ガス中の水素誘起き裂進展下限界値 $K_{I,H}$ が必要

試験方法	規格
 <p>COD J_{IC} 試験</p>	ASTM E1820
 <p>COD 除荷なし J_{IC} 試験</p>	ASTM E399
 <p>定荷重試験</p>	ASME BPVC KD-10 ISO 11114-4
 <p>定変位試験</p>	



115MPa水素ガス中では, 定荷重試験結果(■)と定変位試験結果(◇)は J_{IC} 試験結果(●, ○), 除荷なし J_{IC} 試験結果(■, ▽)と一致。

外部・内部水素による破壊形態の分類と内部水素試験の適用可能性の提案

鋼種名	SSRT試験	疲労寿命試験	疲労き裂進展試験
Low-Ni _{eq} (SUS304)	○ 外部水素: HIS ² 内部水素: HIS ²	○ (内部水素により 疲労限上昇) 外部水素: HIS ² 内部水素: HIS ²	○ (内部水素で き裂進展加速) 外部水素: HIS ² 内部水素: HIS ²
High-Ni _{eq} (SUS316L)	○ 外部水素: D 内部水素: D(ポイドシート)	○ 外部水素: S 内部水素: S	○ 外部水素: S 内部水素: S
High-Ni _{eq} (SUH660)	○ 外部水素: D 内部水素: F	○ 外部水素: S 内部水素: S	○ 外部水素: S 内部水素: S
SCM435	× (内部水素で特性に 変化なし) 外部水素: HIS ² 内部水素: D	× (内部水素で特性に 変化なし) 外部水素: HIS ² 内部水素: S	○ (内部水素で き裂進展加速) 外部水素: HIS ² 内部水素: HIS ²

HIS²: 水素継続すべり破面
 D: デンプル破面
 S: ストライエーション(疲労破面の代表)
 F: ファセット破面

○: 適用可能→データベース化
 : ある限られた条件のみ適用可
 ×: 適用不可

