

超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業／
水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／
高強度低合金鋼を用いた新型高压蓄圧器に関する研究開発

山村実早保(日本製鉄) 高町恭行(JRCM)

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

2022年7月28日

連絡先：JRCM(前田)
E-mail：
tmaeda@jrcom.jp

期間

開始 : 2020年8月
終了（予定） : 2023年3月

最終目標

- (1) 1000MPa以上の高強度と高圧水素適合性の両立が可能な蓄圧器用低合金鋼の開発
- (2) 上記開発鋼の使用による新型高圧蓄圧器の試設計と低減コストの試算
- (3) 新型高圧蓄圧器の開発・適用に資する最新技術情報の収集

成果・進捗概要

- (1) JIS規格鋼およびMo-V添加鋼において、1000MPa以上の高強度と高圧水素適合性の両立が可能な低合金鋼を見出し、総合的な評価を推進中。
- (2) 上記低合金鋼の使用による新型高圧蓄圧器の試設計と低減コストの試算を推進中。
- (3) 海外を含めて新型高圧蓄圧器の開発・実用化に関する最新の技術情報を収集し課題を抽出中。

背景/目的

水素ステーション(HRS)の2025年以降の本格普及および2030年以降の自立化に向けて、蓄圧器の大幅なコスト低減を実現すべく、**現状より高強度を有する低合金鋼を適用した新型高圧蓄圧器に関する研究開発**を行う。

実施項目と研究目標

実施項目(担当機関)	最終成果目標
1. Mo-V添加鋼の高強度化と水素適合性の評価 (日本製鉄)	左記鋼種を中心に 引張強さが1000MPa以上となる化学成分および熱処理条件を明らかにし、目標強度を満たす材料についてSSRTによる水素適合性評価を行い、強度と水素適合性が両立する製造条件を明らかにする。
2. 高強度低合金鋼規格材の高強度化と水素適合性の評価(JRCM)	過去に水素適合性が未評価のJIS低合金鋼について、 引張強さが1000MPa以上となる鋼種および熱処理条件を明らかにし、目標強度を満たす材料についてSSRTによる水素適合性評価を行い、強度と水素適合性が両立する製造条件を明らかにする。
3. 蓄圧器に関する技術動向調査、新型水素蓄圧器の試設計と製造コスト比較調査(JRCM)	水素ステーション用蓄圧器の 国内外の技術動向およびコスト構造等の調査を行う。また、上記特性発現鋼材を用いた蓄圧器の試設計を行うと共に現状とのコスト比較を行ってコスト改善効果を検証する。

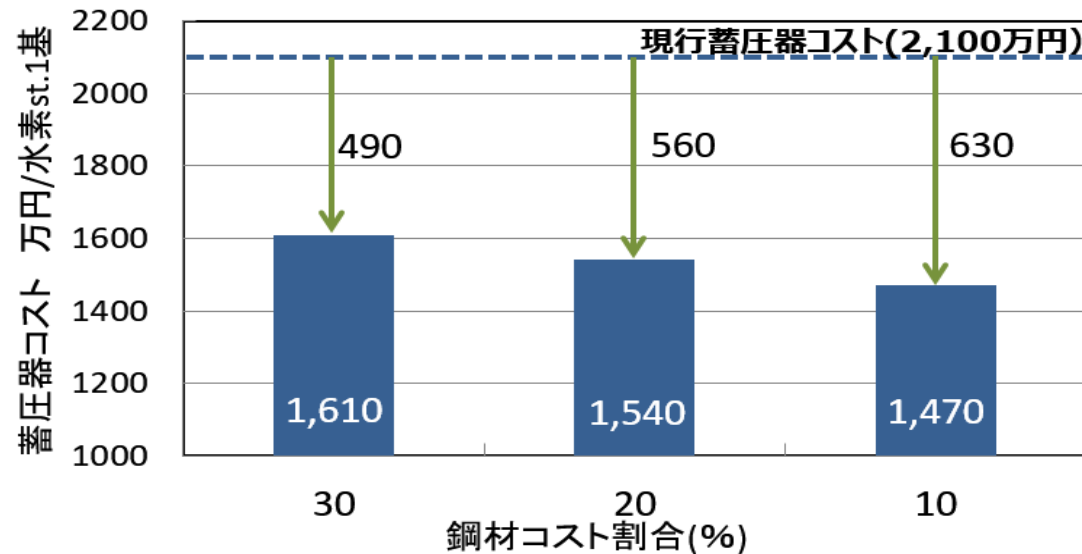
Type I 蓄圧器に関するコスト構造とコスト低減効果の検討

●蓄圧器のコスト構造

- 蓄圧器(高圧型、300ℓ)のコスト：**700万円/本程度**(富士経済レポート 2020)
- 蓄圧器コスト=鋼材コスト+製造(加工)コスト
- 製造(加工)コスト：口径が多少大きくなって(既存設備で扱える範囲内であれば)製造コストは大差なし。**
- 鋼材使用量は概ね 容量×圧力/鋼材強度に比例し、一本当たりの容量を変えても鋼材使用量は大差なし。
⇒**単なる薄肉化による鋼材使用量低減よりも、大容量化による合計本数削減の方が効果大きい。**

●コスト試算

現状の典型的な蓄圧器**300ℓ×3本/ST**を**450ℓ×2本**に構成変更した場合のコスト試算(鋼材コスト割合は10、20、30%の場合を想定)



大容量化コスト低減効果
490~630万円(23~30%低減) /水素st.1箇所
(蓄圧器本体のみ)

●高強度鋼の必要性

- 蓄圧器一本当たりの容量増加には、長尺化あるいは大口径化が考えられるが、**長尺化はステーション敷地や機器配置の制限を受ける可能性が高いので大口径化が望ましい。**
- 現状の鋼材で大口径化すると肉厚も大きくなり、絞り加工や熱処理が困難になる。**高強度鋼の適用により厚肉化を抑えながら大口径化することが望ましい。**

●量産化の必要性

- 鋼材の特注品扱いによるコスト増回避のため、**鑄込最低ロットの在庫(200~300トン程度)が1年間で消費可能な需要が必要。**
- 製造(加工)で常設ラインによる量産体制を取るには年間数百~千本の需要が必要
- 2025~2030年の需要はロードマップから推定すると300本、即ち300トン/年程度の見込み
→鋼材の量産は可能だが、製造(加工)は特注品扱いのまま
⇒**需要拡大のためには海外市場への進出が必要。**

鋼材目標特性

- ①高強度化：引張強さ1000MPa以上
現状例：従来鋼SCM435, SNCM439→800~900MPa
- ②水素適合性
低合金技術文書(JPEC-TD 0003)に準拠
- ③焼入れ性 (設計肉厚で全体に焼きが入り高強度を確保可能)
目標例：450L, TS1000MPa, t=46.0mm

(参考)大容量化と高強度化による設計肉厚変化

	引張強度 (MPa)	容量 (L)	肉厚t (mm)	重量 (ton/1本)	本数 (本)	合計重量 (ton)	
既存鋼 (SNCM439)	880	300	45.3	1.91	3	5.73	←現状標準
	880	450	55.5	2.86	2	5.73	
高強度鋼	1000	450	46.0	2.00	2	4.01	
	1200	450	37.0	1.58	2	3.16	

研究開発：鋼材の評価方法

● 試験材作製

ラボ溶解→熱間鍛造、圧延
→ 焼入れ・焼もどし熱処理
※各鋼種の焼もどし温度を変化
させて強度変化材を作製

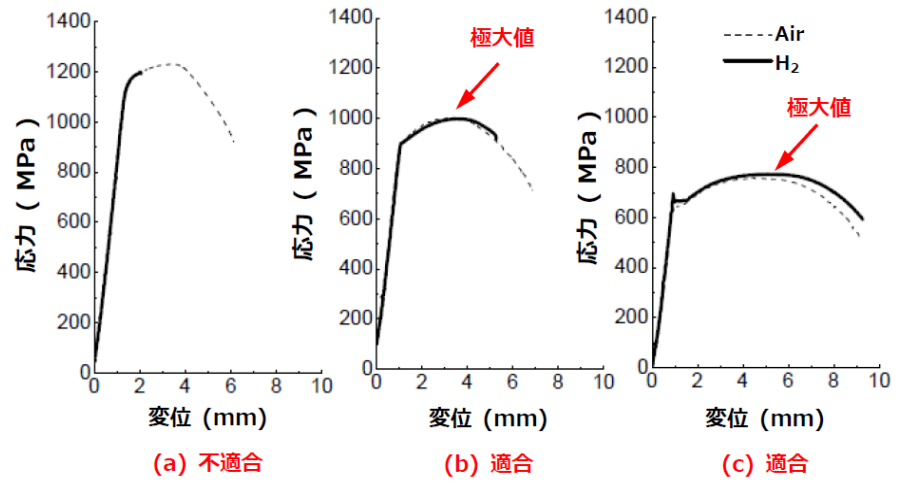
● 室温大気中引張試験

※ JIS Z 2241に準拠

● 水素適合性評価

低ひずみ速度引張試験
(Slow Strain Rate Test, SSRT)
室温大気中／高圧水素ガス中(85MPa)

【判定方法】



SSRTにおける応力-変位線図の模式図

低合金技術文書(JPEC-TD 0003)に準拠

● 焼入れ性評価

ジョミニ焼入れ性試験
※ JIS G 0561に準拠

試験片の片側端部に冷却水を噴射
端部から一定間隔で硬さ測定
→ 硬さ変化より焼入れ距離を推定

【判定方法】

設計肉厚全体に焼きが入るか？

**引張強さ1000MPa以上で水素適合性を示し、
設計肉厚で焼きが入る材料を見出す。**

● 水素誘起き裂進展限界

K_{IH}評価

ライジングロード試験
※ KHKS 0220(2020)に準拠
室温大気中／高圧水素ガス中
(85MPa)
変位速度：2×10⁻⁴mm/s

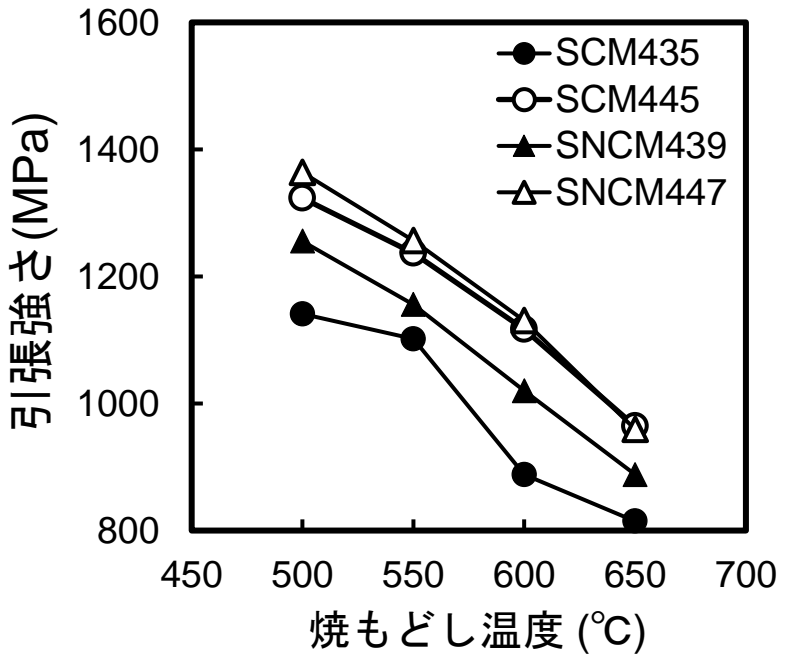
同一荷重における大気中／高圧水素ガス中の開口変位差を測定、差の増大の開始点を進展開始点とした。

研究開発：高強度低合金鋼規格材の高強度化と水素適合性の評価(JRCM)

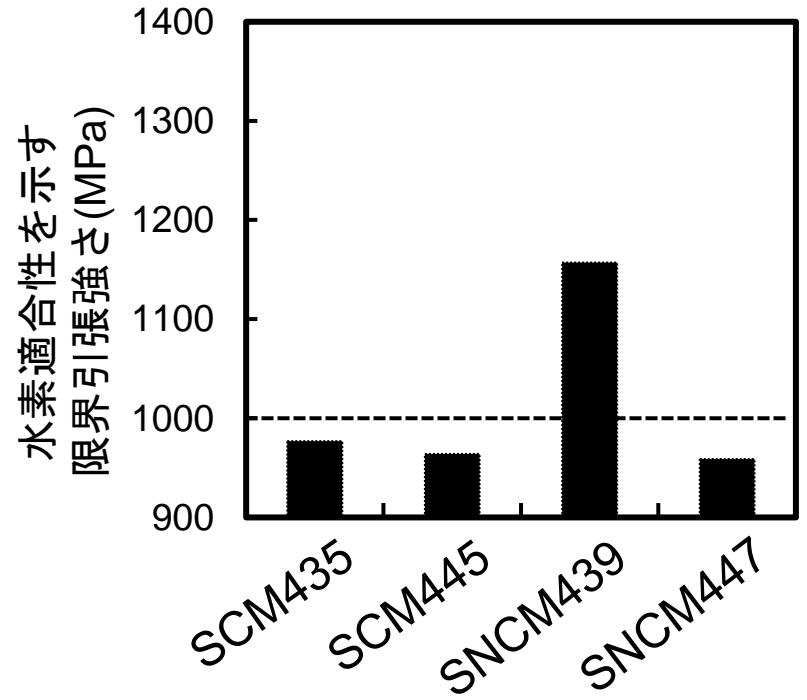
● 供試材 (mass%)

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	V	Nb	備考
SCM435	0.37	0.20	0.61	0.92	0.30	< 0.01	0.026	< 0.001	< 0.002	蓄圧器既存鋼
SCM445	0.47	0.20	0.62	0.92	0.30	< 0.01	0.025	< 0.001	< 0.002	—
SNCM439	0.37	0.20	0.62	0.92	0.30	2.01	0.028	0.011	< 0.002	蓄圧器既存鋼
SNCM447	0.48	0.20	0.60	0.92	0.30	2.02	0.030	0.004	< 0.002	—

● 焼もどし温度による強度変化



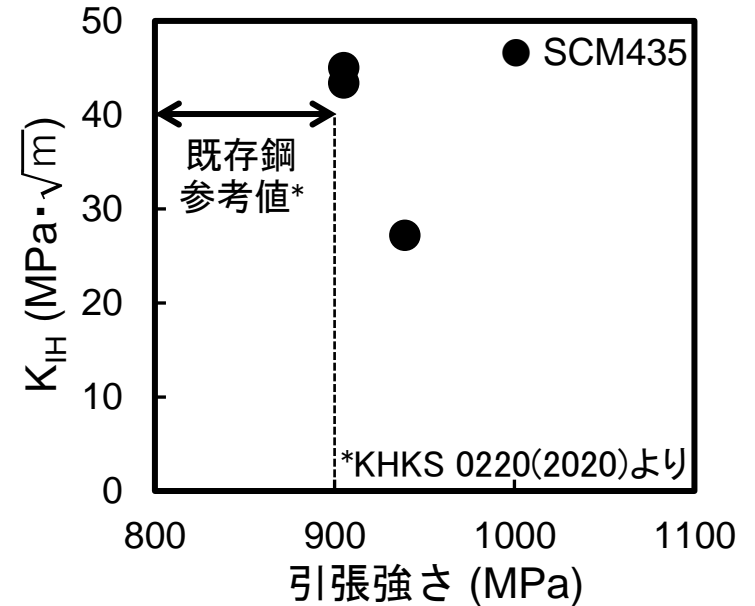
● 水素適合性評価



TS1GPa以上で水素適合性あり
→SNCM439(既存鋼)

● 蓄圧器適合性評価

- ・ 設計肉厚での焼入れ性→合格
- ・ 水素誘起き裂進展限界 K_{IH}



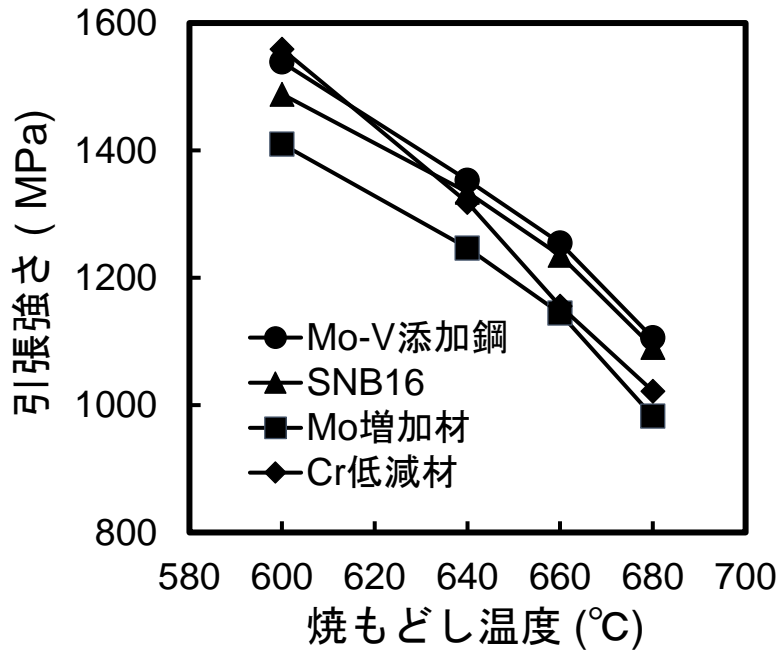
高強度化に伴い既存鋼の
 K_{IH} は低下

研究開発：Mo-V添加鋼の高強度化と水素適合性の評価(日本製鉄)

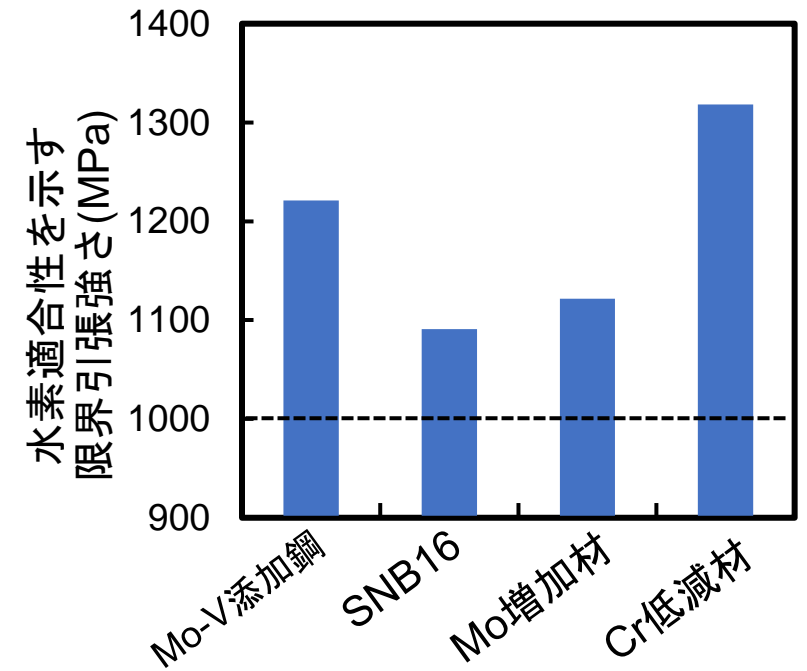
● 供試材 (mass%)

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	V	Nb
Mo-V添加鋼	0.40	0.19	0.44	1.25	0.73	<0.01	0.030	0.10	0.024
SNB16(JIS G 4107)	0.38	0.19	0.61	1.05	0.66	<0.01	0.030	0.26	0.026
Mo増加材	0.36	0.20	0.62	1.05	1.55	<0.01	0.030	0.38	0.026
Cr低減材	0.38	0.20	0.58	0.50	1.49	<0.01	0.030	0.36	0.026

● 焼もどし温度による強度変化



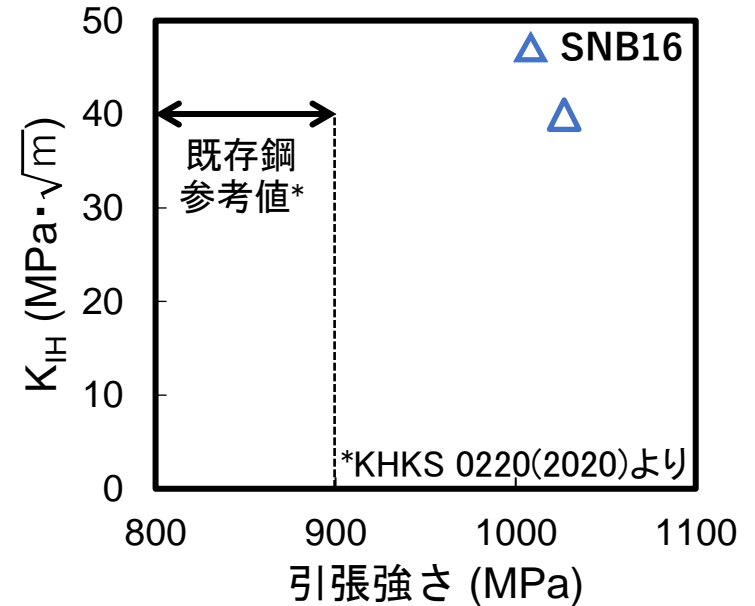
● 水素適合性評価



TS1GPa以上で水素適合性有
→ 4鋼種全て

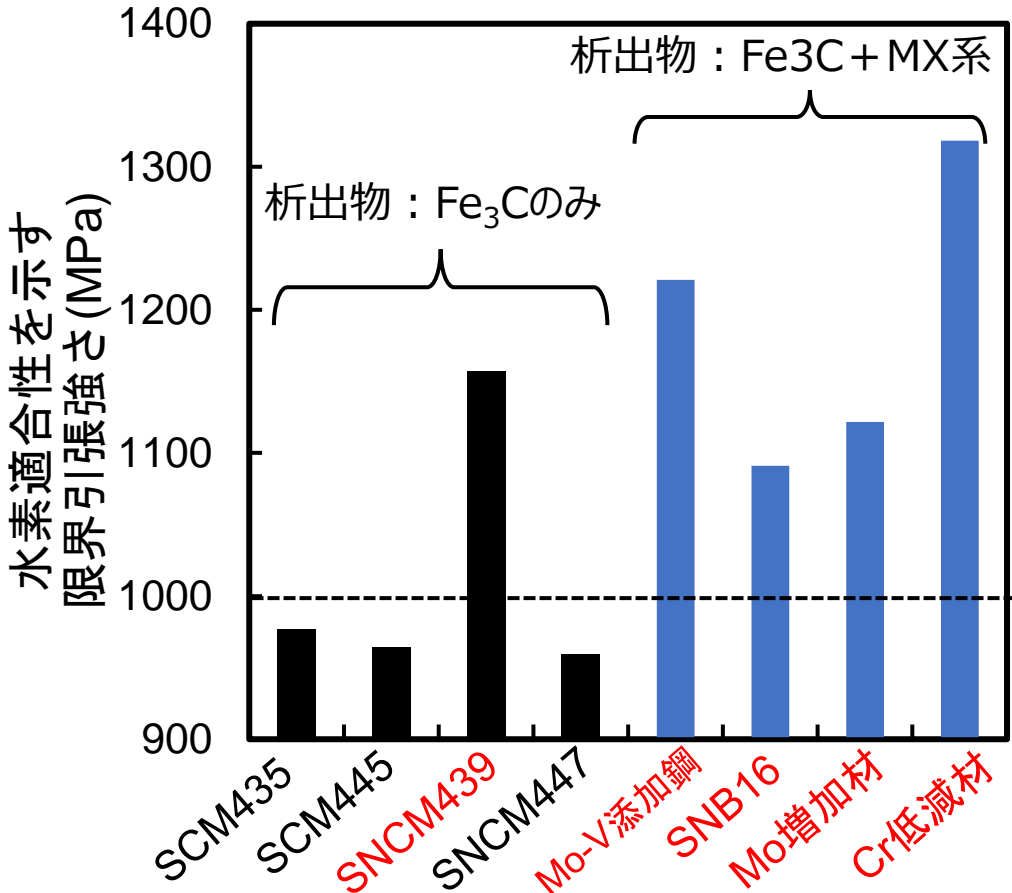
● 蓄圧器適合性評価

- ・ 設計肉厚での焼入れ性→合格
- ・ 水素誘起き裂進展限界 K_{IH}



SNB16は高強度でも
 K_{IH} が高い

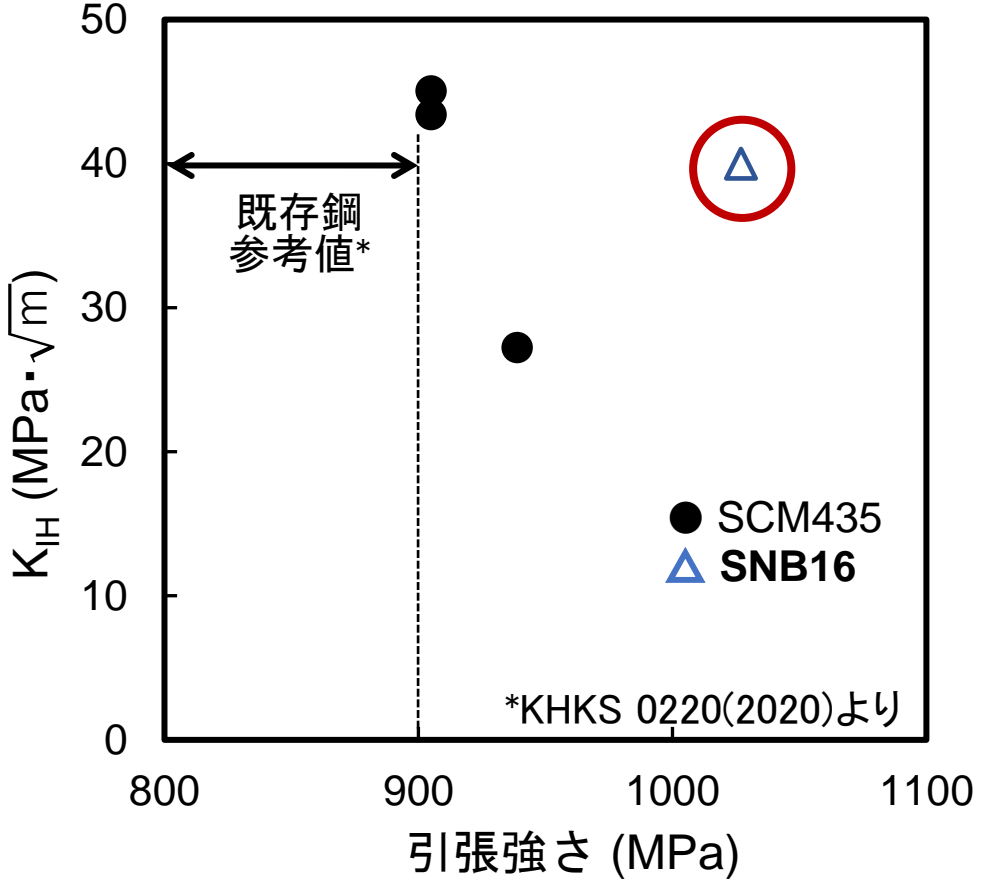
● 水素適合性評価比較



● 水素適合性と金属組織因子との関係

Mo-V添加鋼では2種類の析出物が析出
 ⇒ 析出物制御により耐水素脆化特性向上
 が望める可能性あり

● 水素誘起き裂進展限界 K_{IH} 比較



● 今後の予定

- 改良鋼材の作製と評価
- 試設計に必要なデータ取り
 ⇒ コスト削減効果の検証

新型水素蓄圧器(開発鋼を前提としたType1)のコスト低減のためには量産化が一つの鍵となる。そのため、国内だけでなく、海外市場への売り込むことを視野入れた水素蓄圧器あるいは鋼材開発を実施すべきと考えている。



以下の技術動向調査を実施し、必要に応じて鋼材・水素蓄圧器開発にフィードバックを実施予定

(1) 国内外における水素ステーション建設動向:

水素蓄圧器Type1の市場規模および需要動向の調査

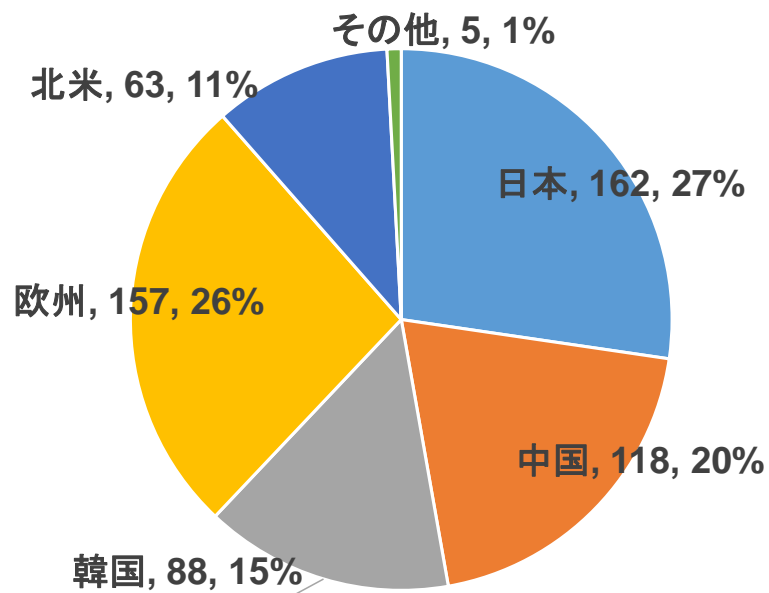
(2) 海外水素蓄圧器メーカーの最新動向:

水素蓄圧器Type1の米国、欧州、アジアにおける製造メーカーの調査

(3) 海外の水素蓄圧器適用規格:

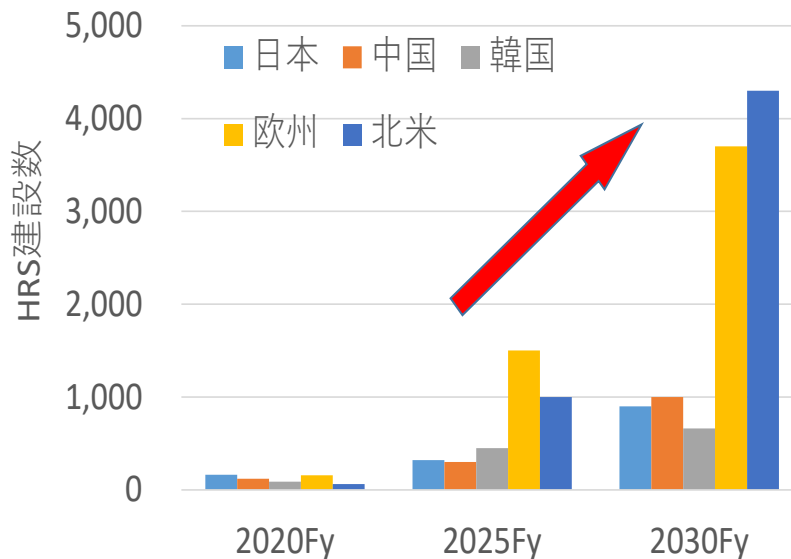
高強度鋼合金鋼(開発鋼)の海外市場への展開のための調査

(1) 国内外における水素ステーション(HRS)建設動向

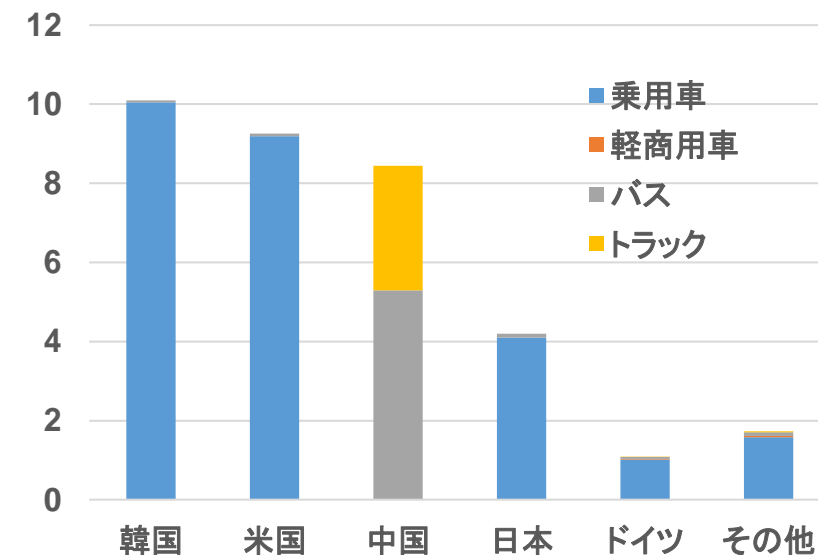


(地域,稼働数,シェア)

2020年 世界主地域のHRS建設動向



2020年以降のHRS目標数



FCV保有台数と車種構成
(単位：千台。2020年現在)

- 世界のHRSは、そのほとんどアジア(日中韓),欧州,北米に集中
- 2020年現在はアジア地域(日中韓)がHRS数でリード
- **北米,欧州地域では、HRS建設目標値が2030年に向けて大幅増**
- 中国は異質:HD FCV、35MPaが中心(市場として期待薄:高压Type1)
- 北米のHRS建設、FCV保有台数はカリフォルニア州に集中

(2) 海外水素蓄圧器メーカーの最新技術動向

地域	主要メーカー	Type				中 圧	高 圧	概要
		1	2	3	4			
北米	CP Industries	○			○	○	○	車載用も製造
	FIBA Technologies	○	○			○	○	Type2 は日本でも採用実績あり
	Worthington Industries			○		○	○*	* 最高69MPa
欧州	Faber Cylinders	○	○	○	○	○	○	カタログ上の最大容積は50ℓ
	Hexagon Purus				○	○	○	
	Luxfer Gas Cylinders			○	○*	○		* CNG用(水素用は無い)
中国	北京天海工業							水素関連情報なし
	CIMC Enric Holdings			○	○	○		Hexagonと提携
	巨化集団	○				○	○*	* 500mmD、1m ³ ×82MPa
韓国								国産は車載容器のみ
日本	日本製鋼所M&E	○	○				○	
	ベンカン機工	○				○		
	JFEコンテナー	○	○			○	○	
	サムテック			○		○	○	Type 3(アルミライナー)

【主要メーカー主な蓄圧器仕様(Type1最大容量)】

CPI : ASME Section VIII, Division 3
100MPa x 436Ltr. (324mmD x 10.4mL)

FIBA : ASME Section VIII, Division 3
100MPa x 553Ltr. (**mmD x 9.4mL)

Faber : EN 13445
100MPa x 50Ltr. (267mmD x 1.915mL)

- 米国の CP Industries と FIBA Technologies は大型・高圧のType 1 容器を製品化。
- 米国・欧州でHRS建設目標値が大幅増(～2030年)になっており、市場規模は大きい。
目標通りにHRS建設が進むのであれば、既存のメーカーだけでは足りない可能性が高い。
⇒技術的な参入障壁の有無など、さらに調査が必要。
- 韓国でもHRS建設目標は大きいですが、HRS用蓄圧器メーカーは存在しない(主な輸入先:米国)
- 中国は商用車(トラック、バス)が主であり、中圧のため、地場のメーカーで対応可。
中国独自規格の制限もあり、参入は困難か。

(3) 海外の水素蓄圧器適用規格

目的：日本の水素蓄圧器や蓄圧器用鋼材の輸出を念頭に、海外の技術基準・規格類の要求事項を確認する。

対象国：米国、欧州、中国、韓国

結果（要旨）	ISO	① 引張強度 $\leq 1300\text{MPa}$ ② V、Nb、Ti、B、Zrの合計含有量 $\leq 0.15\%$
	米国（ASME）	① div.3の安全率は1.732（KHKS0220では2.4） ② 水素蓄圧器用鋼材はリスト化 ③ 最大引張強度 $> 950\text{MPa}$ の場合は $(K_{I_{max}} + K_{I_{res}} \leq 0)$ $K_{I_{max}}$ ：残留応力、 $K_{I_{res}}$ ：応力拡大係数
	欧州（EN）	引張強度 950MPa の場合、破裂前漏洩試験をはじめとする性能確認試験が必要。
	中国（BG）	35MPa程度の中圧が主流。輸出先としては期待薄。
	韓国（KS）	タイプ I 蓄圧器に関してはISO準拠。

ASME div.3 の安全率は、KHKS0202のそれより小さい(ASME採用地域では、同一鋼材でも蓄圧器の薄肉化・軽量化、焼入性などで優位になる可能性が推察される)。ASMEは仕様鋼材のリスト化、ISOは合金含有量の範囲限定があり、開発鋼をそのまま適用できない可能性あり。

技術動向調査まとめ(2021年度成果)

	調査項目	主な調査結果
1	国内外における水素ステーション(HRS)建設動向調査	①北米,欧州地域では、 HRS建設目標値が2030年に向けて大幅増。 ⇒高圧水素蓄圧器(Type1)の大幅な需要増が見込まれる。 ②中国市場は中圧水素蓄圧器が中心のため、高圧水素蓄圧器Type1市場としては望み薄。
2	海外水素蓄圧器メーカーの最新技術動向	①高圧・大容量水素蓄圧器(Type1)の主な製造メーカーは米国に2社(CP Industries , FIBA Technologies)。② 目標通りにHRS建設が進むのであれば、既存のメーカーだけでは足りない可能性が高い。
3	海外の水素蓄圧器適用規格	①ASME div.3 の安全率は、KHKS0202のそれより小さい(同一鋼材でも蓄圧器の薄肉化・軽量化, 焼入性などで優位になる可能性あり)。②ASMEは仕様鋼材のリスト化, ISOは合金含有量の範囲限定があり, 開発鋼をそのまま適用できない可能性あり。

【新型水素蓄圧器および製造プロセス技術課題:上記調査以外の成果】

高強度低合金鋼(開発鋼)を前提とした新型蓄圧器の基本仕様を検討。同蓄圧器開発の実現には下記課題の確認が必要と判明。

(a)大口径素管製造技術の可能性、(b)蓄圧器肉厚と焼入性との関係、(c)大径化と長尺化の比較、(d)常用圧力増の可能性、(e)端部整形・切削加工技術の開発

今後の見通しについて

実用化・事業化のイメージ

本事業の成果と今後の予定

1000MPa以上の高強度と水素適合性を兼備する低合金鋼開発の可能性を示した。

- (1)開発鋼の特性に基づいた新型高圧蓄圧器の試設計とコスト低減効果の試算(今年度実施予定)
- (2)上記開発鋼を適用した新型蓄圧器の実用化のための技術情報収集(含海外)(今年度実施予定)

将来展開

上記試設計に基づいて**新型蓄圧器(実寸)の試作**を実施する。

- (1)製造プロセス上の課題抽出と製造コストの検証
- (2)蓄圧器としての特性評価

上記(1),(2)を通じて新型蓄圧器実用化のための課題の明確化と解決を図り、将来の事業展開に資する。