

『大型商用車向け液体水素タンク開発及び、 自動車向け水素貯蔵材料研究』

2020年10月27日
第2回FC-Cubicオープンシンポジウム

トヨタ自動車株式会社

目次

大型商用車向け液体水素タンク開発について

- 1、商用車を取り巻く環境
- 2、大型車の課題
- 3、液体水素技術開発の課題
- 4、まとめと提言

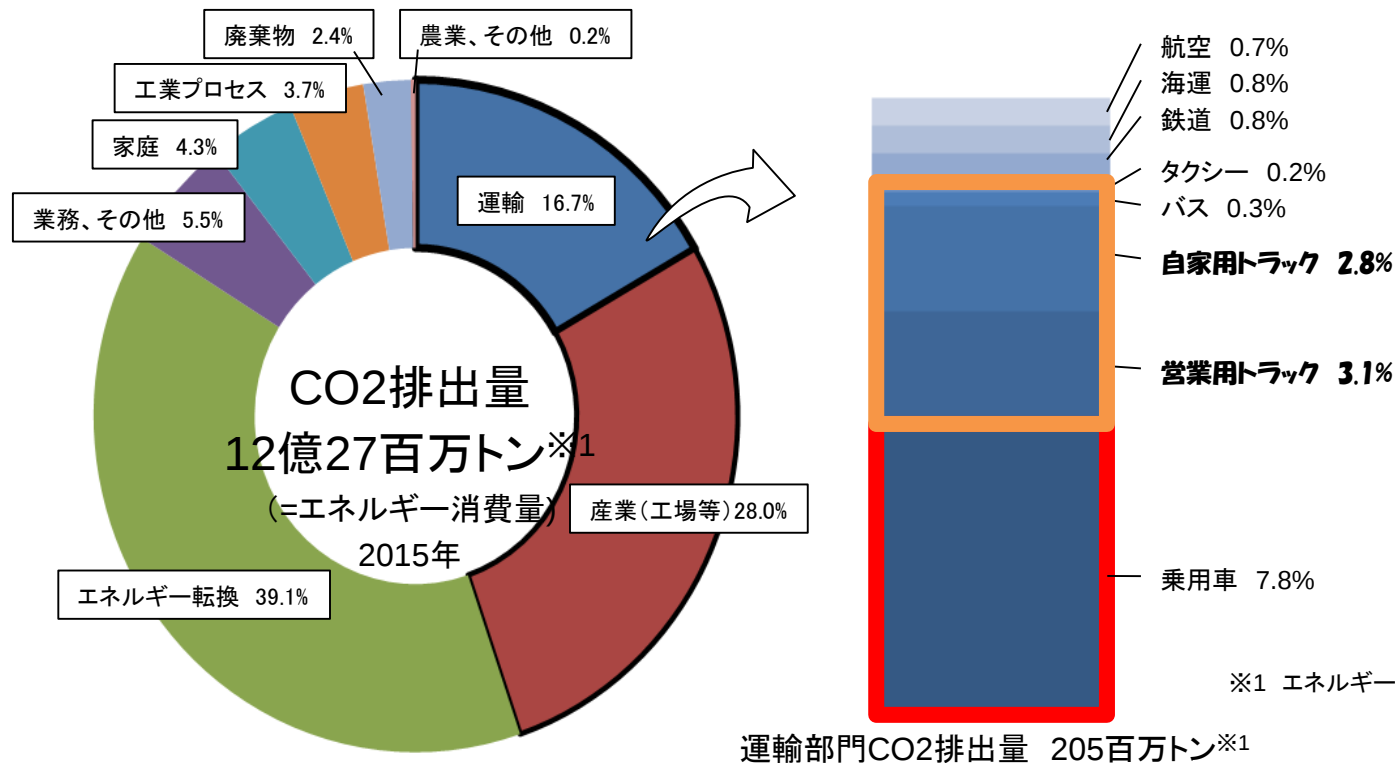
自動車向け水素貯蔵材料研究の世界動向と産学への提言

- 1、改めて「水素貯蔵材料」とは
- 2、自動車向け水素貯蔵材料に望まれる材料特性
- 3、主要各国における水素貯蔵材料の研究開発状況
 - (1) 米国
 - (2) 欧州(ドイツ、UK)
- 4、まとめと提言

大型商用車向け液体水素タンク開発について

日本におけるCO2排出量内訳

- ・運輸によるCO2排出量の多くは、乗用車とトラックが占める。
- ・CO2低減にはトラック分野の取り組みが必要



■欧州CAFÉ規制

大型商用車から排出されるCO₂を2030年までに2019年の水準から30%削減するとしていたが、欧州議会の環境委員会は
削減幅を35%まで引き上げ、
2025年までの削減の**中間目標を15%から20%に修正した。**

■加州商用ZEV規制

- ・Class 2b-8の平均年間販売台数
500台以上のOEMに適用
- ・Classを3カテゴリーに分けて、
それぞれで要求値を規定
- ・販売台数に占める要求ZEV比率を規定

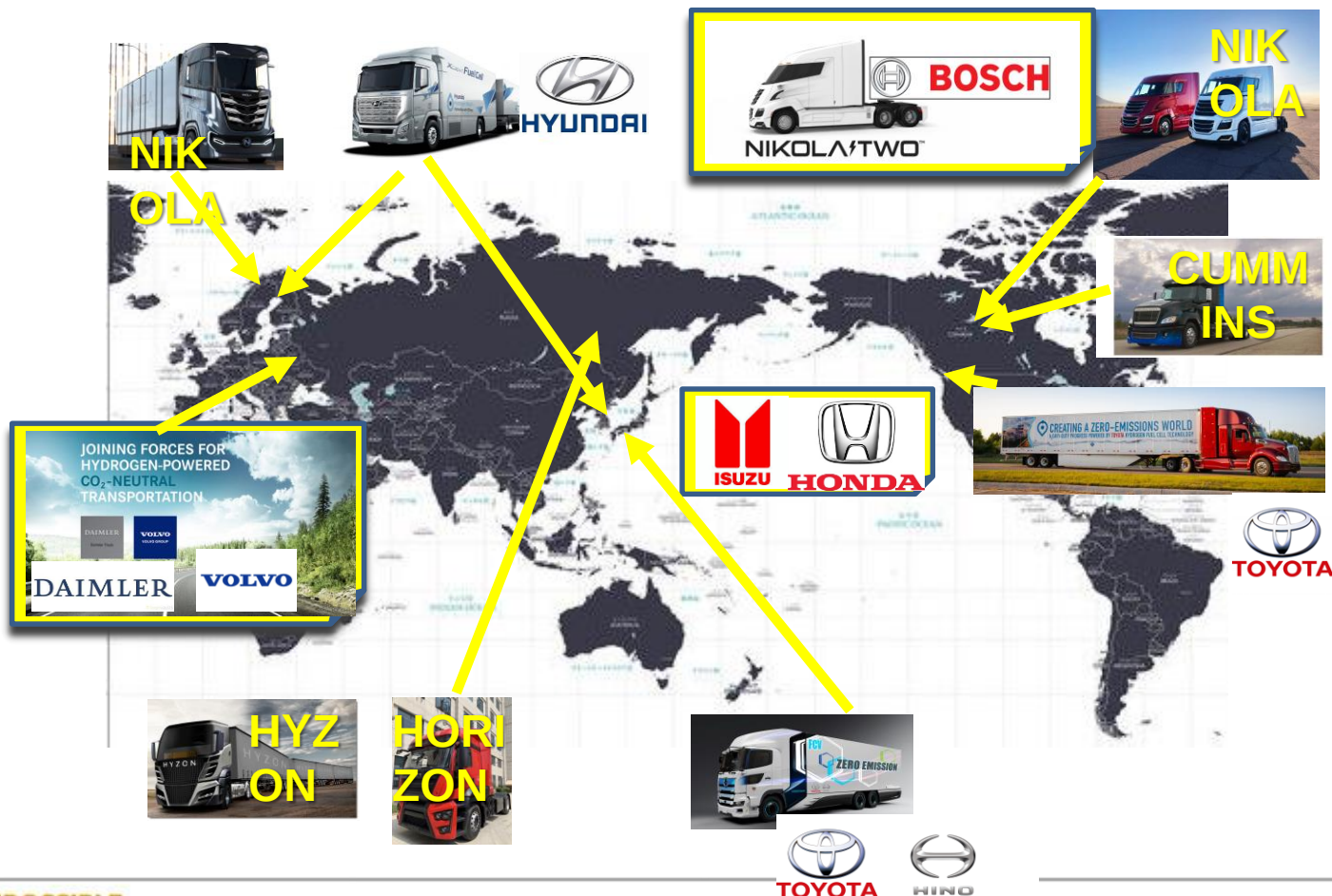
加州要求ZEV比率



Class	2b-3	4-5	6-7	8	7-8トラック
係数	× 0.8	× 1	× 1.5	× 2	× 2.5

グローバルな大型FCVの広がり

①商用車を取り巻く環境



Daimler Trucks presents technology strategy
for electrification – world premiere of
Mercedes-Benz fuel-cell
concept truck Sep.16th

ON OUR WAY TO A
HYDROGEN
FUTURE

【主要諸元】

- 燃料電池システム

FC連続出力：150kW x 2

水素貯蔵：液体水素 40kg x 2

- HVシステム

モータ出力：定格 230kW x2

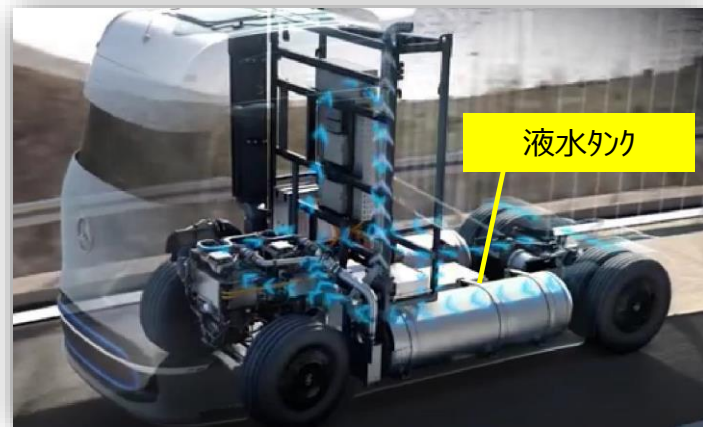
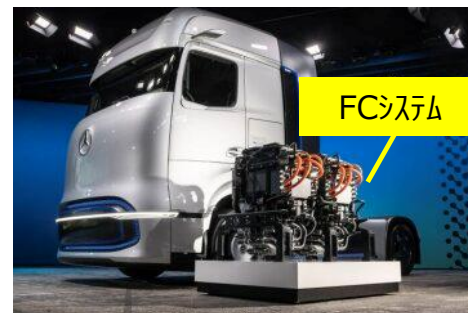
ピーク 330kW x2

バッテリー仕様:400kW 72kWh

- 航続距離 1000km以上

- Payload：25 ton
- GVW：40 ton

- 計画：'23～ デモ '20年代後半 量産



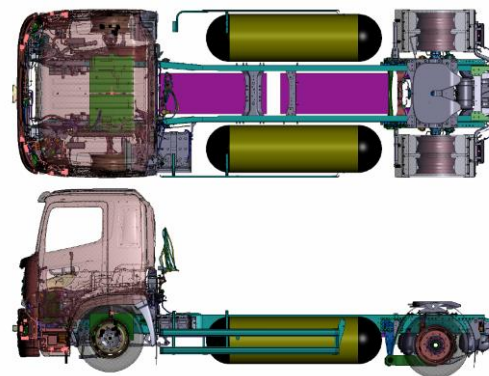
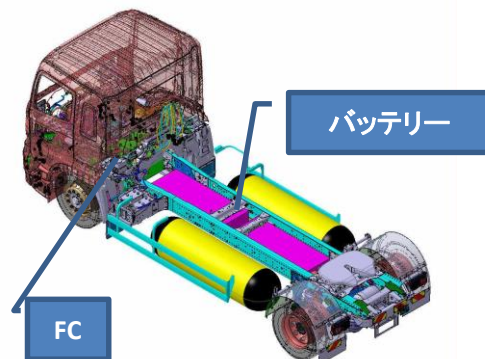
出典: <https://media.daimler.com/marsMediaSite/>

(16. September 2020)

※商用車において、搭載できるスペースには限りがあり、貯蔵密度の大幅向上が必須 ≡ 液体水素の適用

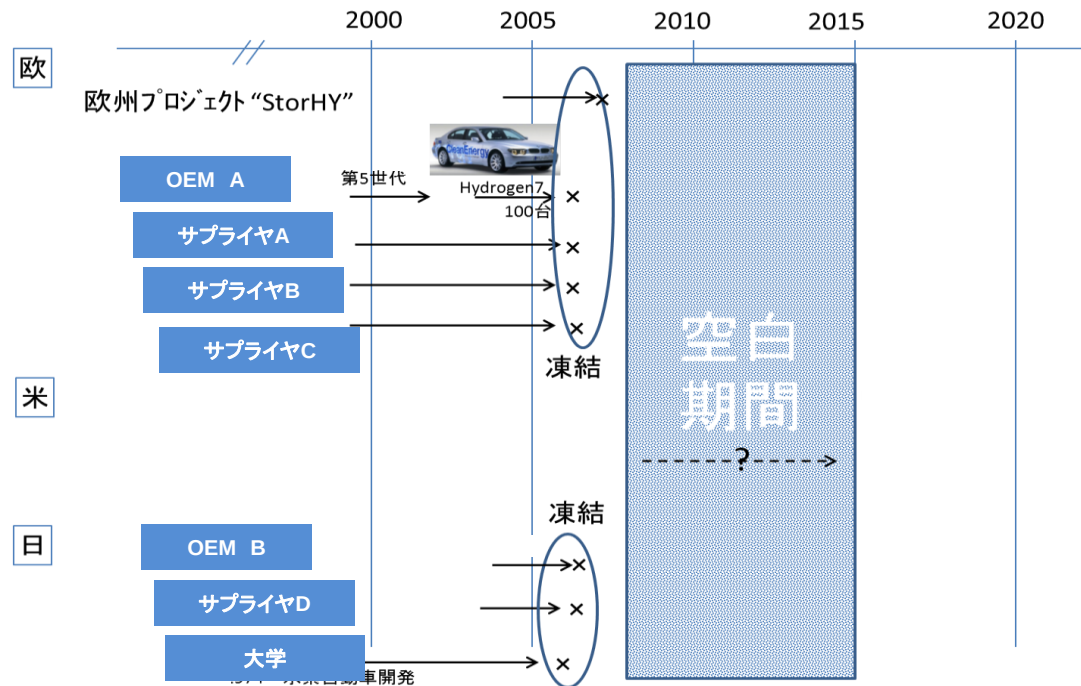
※ロングレンジが期待される大型トラックでのかい離が大きい。

	現合搭載量	搭載量Max	航続距離(要求)
小トラ	～6kg	10kg	300km (400km)
大トラ	---kg	～60kg	600km (1000km)
路線バス	～20kg	30kg	300km (200km)



車載用液体水素タンク開発の経緯

- ・乗用車向けには「ボイルオフ」等の課題から高压ガス開発に収斂。
⇒自動車向け液体水素タンクの開発は'05年頃に世界的に開発凍結。
- ・近年、商用車向けとして改めて再検討の動き。



液体水素システム例

- ・単なる燃料容器ではなく、燃料“気化”装置を含む大変複雑なシステム。
- ・また多くの技術的課題も山積しており、部品・システム・STそれぞれでの開発が必須。

機能	
①充填	充填ラインと充填時ガス抜き of 2ライン
②加熱（加圧）	ヒータ or システム冷却水で圧力確保の為の加熱
③ガス化	ガス化のための加熱
④ボイルオフ処理	触媒によるボイルオフ水素の処理, ベンチレーション、FC再利用
⑤非常時圧抜き	内部ベセル、真空断熱層からの非常時圧抜き



【その他の課題】

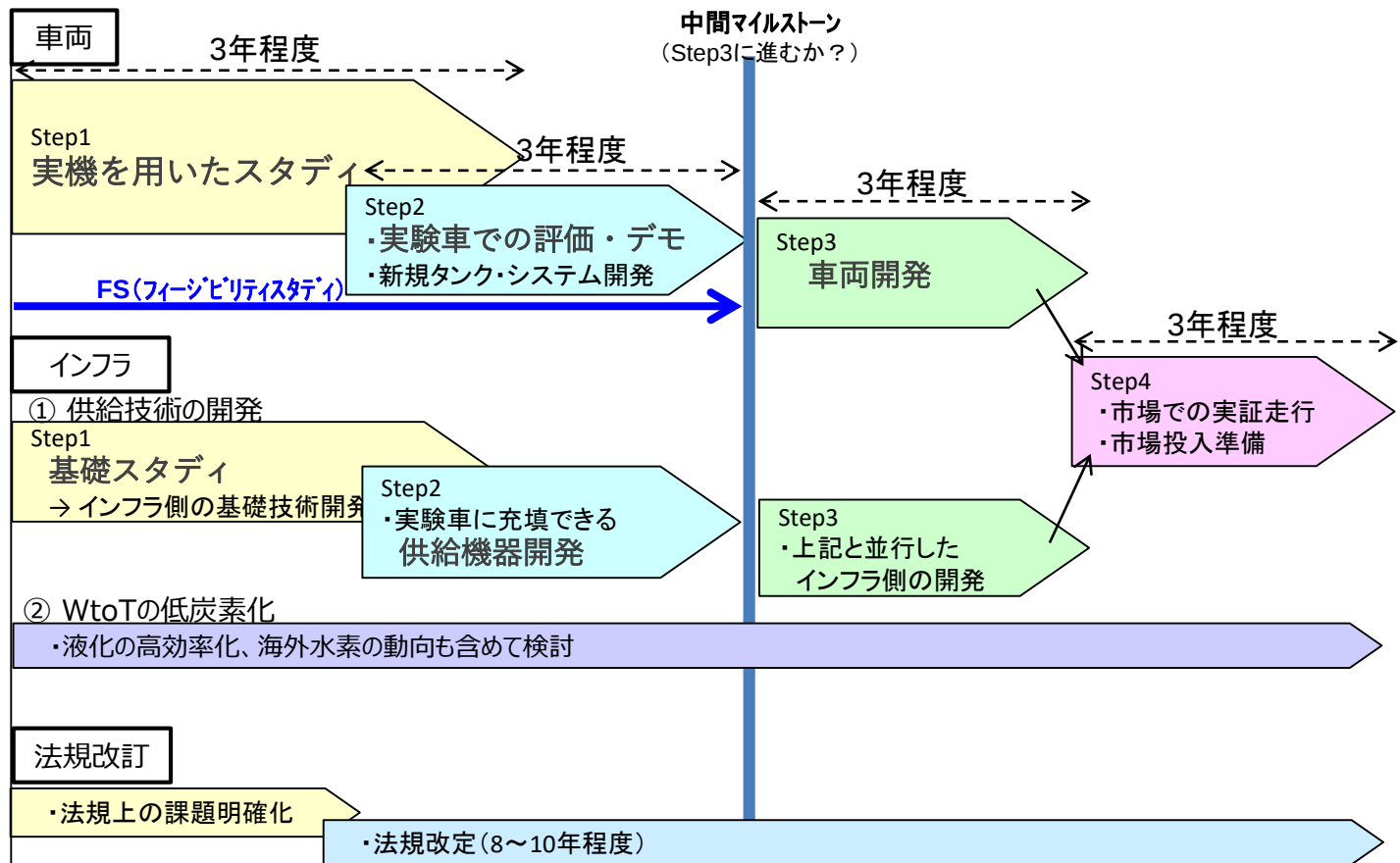
- ・ボイルオフ：水素安全、燃料ロス
- ・熱マネジメント（制御）
- ・部品信頼性不透明（試作レベル）
- ・充填時のオフガス（燃料ロス）
- ・開発の為の計測・可視化技術

液体水素技術の課題整理

③液体水素技術開発の現状

	No.	課題	詳細内容、補足
全体	1	W to W のCO2排出量の明確化	・ディーゼルとの比較において優位性あるか？ ・バイオ燃料などとの比較
	2	既存高圧水素インフラとの整合性	・既存高圧水素インフラ＝乗用車 液体水素＝長距離大型トラックの棲み分け明確化
	3	経済性、事業性成立性	・燃料代、インフラコスト含めた成立性 商用車では、対軽油での燃料価格差大（約2倍）
	4	断熱技術の向上	・断熱性能向上とコスト、生産性技術検討
	5	極低温（-253℃）での材料・部品耐久性	・極低温下での各構成部品の信頼性確保 ・他技術のBMC（LNG≒-162℃など）
車両	6	液体システムを用いたFCシステム構成	・部品点数多く、システムも複雑。 いかに簡素化し車両搭載できるか？（形状、サイズ、重量）信頼性、重量、コスト
	7	ボイルオフ抑制とボイルオフ水素の取り扱い	・タンク内圧上昇制御技術開発 ・水素安全性を考慮した圧抜き技術の開発（非常時の取り扱い）
	8	安定したFCシステムへの水素供給	・FCシステムへの水素流量確保（タンク内圧制御、レスポンス、起動時間）
	9	充填時のオフガスの取り扱い、燃料ロス	・車両側での回収・再利用の可能性検討、インフラ側での解決手法の可能性検討 ・インフラ側での解決手段の可能性検討
	10	車両入力影響	・振動（衝撃）、耐環境、衝突安全への影響確認
インフラ	11	供給側のネットワーク構築	・供給側のスループットでのネットワーク構築が必要 （既存インフラとの関係も踏まえたネットワーク）
	12	供給側のシステム構築、液体水素供給技術確立	・インフラ側も車両同様にシステム構成、供給技術の開発が必要
	13	液化技術（高効率、低コスト）向上	・液化投入エネルギー削減（CO2発生量、コスト）、高効率化

液体水素 検討の日程感



- 液体水素タンクは**商用車のFC化に重要技術**。
商用車用向け技術であるものの、水素社会の拡大に向けた
実用化をめざし、**研究を加速の方向**。
- 液体水素の適用は、単なる高圧ガス容器の置き換えではなく、
液体水素タンク“システム”の導入であり、その**システムは複雑**。
また**技術課題も数多く**、部品～STまでそれぞれの開発が必須。
- まずは 1 stステップとして、**フィジビリティスタディを実施**し、
FC車両用燃料タンクシステムとしての検証を実施したい。
- タンクシステムの開発に加え、インフラ面でも充填やその管理など、
課題の抽出、その開発・検討をお願いします。

自動車向け水素貯蔵材料研究の世界動向と産学への提言

1、改めて「水素貯蔵材料」とは

Wikipedia「水素吸蔵合金」より

『水素吸蔵合金中で、水素は結晶構造にならない規則的に配置される。このため、
気体と比較して極めて高い水素充填密度を実現』

(水素吸蔵合金に限らず水素貯蔵材料は)

限られた容積の中に、より多くの水素を貯める技術

【現状】高圧タンク

125L
5kg-H₂

水素貯蔵材料で
「**水素貯蔵密度2倍**」
と仮定

【理想】水素貯蔵材料タンク

125L
10kg-H₂

OR

62.5L
5kg-H₂

より多くの水素を、限られた体格で貯蔵するのに適。しかし…

1、改めて「水素貯蔵材料」とは 【水素貯蔵材料の現実】①

材料の一般的性質

材料が水素を吸蔵する時 発熱・膨張

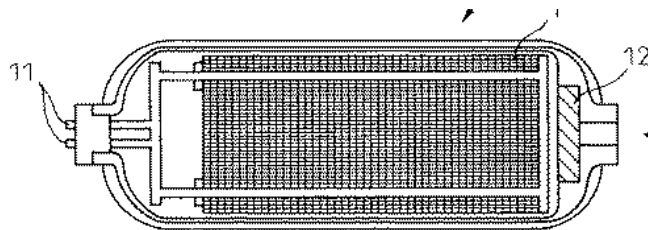
→温度が高くなると吸蔵速度低下

材料が水素を放出する時 吸熱・収縮

→温度が低くなると放出速度低下

公開番号 2008-069800

『水素吸蔵合金貯蔵用ユニット及びそれを備えた水素貯蔵タンク』



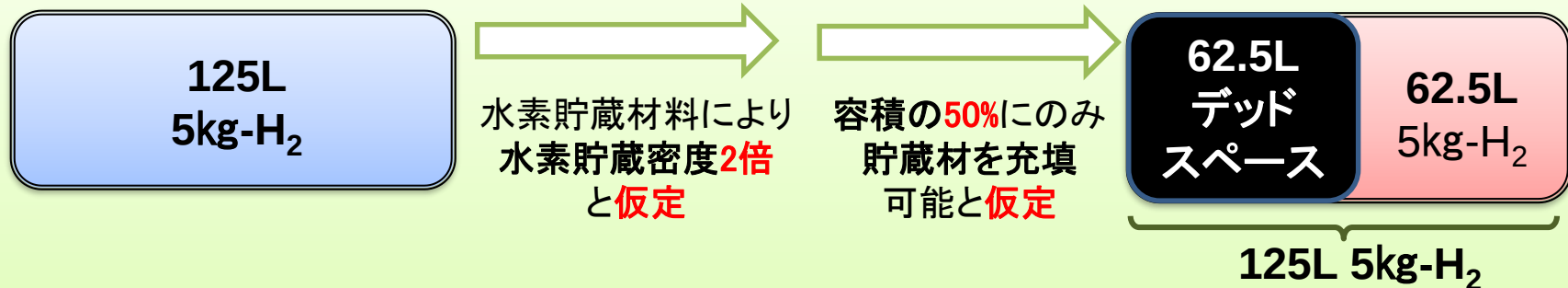
水素貯蔵タンク10は、水素を吸蔵及び放出させるための複数の水素吸蔵合金貯蔵用ユニット1を備え、これらの水素吸蔵合金貯蔵用ユニット1を冷却するための冷却用配管11と水素用フィルタ12を含む。

熱交換器による材料の温度安定化が不可欠

＝タンクの容積をすべて水素貯蔵に使えるわけではない

仮に、容積の50%にしか水素貯蔵材料が充填できないとすると...

1、改めて「水素貯蔵材料」とは 【水素貯蔵材料の現実】②



この仮定においては

- ・水素貯蔵材料に「嬉しさ」なし
- ・むしろ材料(や熱交換器)の分が重くなる

水素貯蔵材料に求められる基本特性

- ・体積あたりの水素貯蔵密度
 - ・材料の比重
- できるだけ大きく
できるだけ小さく(=軽く)

ここまで、当たり前の話にお付き合いいただき、ありがとうございました。
では、具体的にどのような水素貯蔵材料であれば「嬉しい」のか？・・・

2、自動車向け水素貯蔵材料に望まれる材料特性 【タンクへの期待】

■NEDOロードマップ

	現在	2020年頃	2025年頃	2030年頃	2040年頃
普及目標	【普及台数】 1,600台強 車両導入支援 乗用車：各社単一車種 ・FCフォークリフトの導入開始(2016) ・FCバスの導入開始(2016) FCバス・フォークリフト 導入規模拡大 ・二輪・商用車(トラック)への導入開始	4万台程度	20万台程度 乗用車：ホリウムゾーン向けの 燃料電池自動車の投入 ・その他移動体(船舶・鉄道、産業用車 同等)への更なる拡大 ・スタック、周辺機器の製造・供給プレーヤーの拡大	80万台程度	300～600万台程度 ¹⁾ 多数車種へ拡大 ・燃料電池スタック供給による適用 範囲の拡大、低コスト化の加速 スタック排熱量大幅削減 高出力密度化 低コスト高耐久化
達成性能 ²⁾					
航続距離 ³⁾	650km	燃料電池車の商品価値として航続距離の向上を継続的に追求			> 1000 km
スタック性能					
最大出力密度	3.0kW/L	4.0kW/L	5.0kW/L	6.0kW/L	9.0kW/L
最大負荷点電圧 (16A)	0.6V				0.85V
耐久性 ⁴⁾	乗用車無交換 (15年)	乗用車無交換 (15年以上)	乗用車無交換(15年以上) ／商用車無交換(15年)	乗用車・商用車無交換 (15年以上)	
システム仕様					
起動条件	起動最低温度-30℃(外気)	起動最低温度-30℃(外気)	起動温度の拡大、出力密度向上、作動最高温度向上、冷却性能向上、燃費向上等による車両ハートレインとしての汎用化		起動最低温度-40℃(外気) 作動最高温度120℃
スタックシステム	作動最高温度90℃ 作動圧力1.2atm、水素St1.1 ⁵⁾	作動最高温度100℃、30%RH 作動圧力<1.2atm、水素St<1.1			エア系通路によるダウンサイジング または常圧運転による機構仕様緩和 水素St=1.0付近 7.5wt%以上かつ70L以下 ⁶⁾ 容器形状自由度有
水素貯蔵システム (貯蔵量5kg相当の場合)	5.7wt% かつ 125L 円筒形容器	6wt% かつ 100L ⁶⁾ 円筒形容器			
コスト ⁷⁾	車両価格 700万円強	同車種のHV車同等価格競争力を有する車両価格の実現			大量普及に向けた最終コスト目標
FCシステム (内：スタック)		< 0.8万円/kW < 0.5万円/kW 30～50万円	< 0.5万円/kW < 0.3万円/kW < 30万円	< 0.4万円/kW < 0.2万円/kW 10～20万円	0.2万円/kW 0.1万円/kW 10万円
水素貯蔵システム (貯蔵量5kg相当の場合)					

出典：NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップ
<https://www.nedo.go.jp/content/100871975.pdf>

FCV航続距離 現状650→目標1000km以上 ...単純計算で水素量1.6倍以上の搭載必要
 (例；体格125Lのままで水素搭載量8kg)

2、自動車向け水素貯蔵材料に望まれる材料特性 【タンクへの期待】

■具体例

出典:トヨタ自動車ニュースリリース(2020年10月13日)

<https://global.toyota.jp/newsroom/corporate/33952104.html>

燃料電池大型トラックの走行実証を2022年春頃より開始

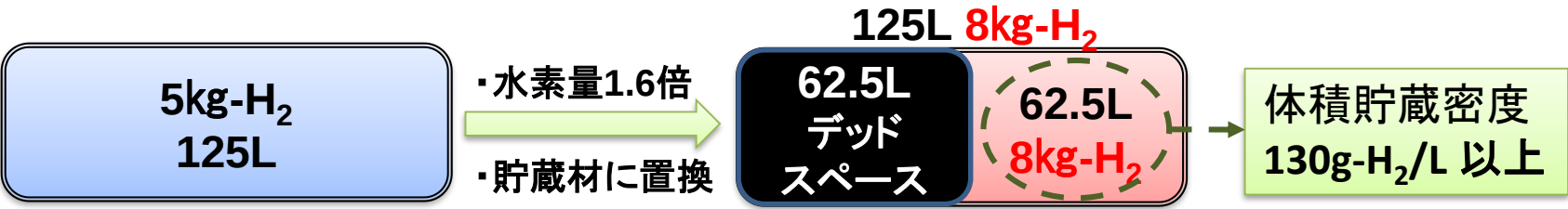


幹線輸送に使われる大型トラックは、十分な航続距離と積載量、短時間での燃料供給が求められます。その電動化においては、エネルギー密度の高い水素を燃料とする燃料電池システムが有効であると考えており、今回開発するFC大型トラックは、航続距離の目標を約600kmとし、環境性能と商用車としての実用性の高次元での両立を目指しています。

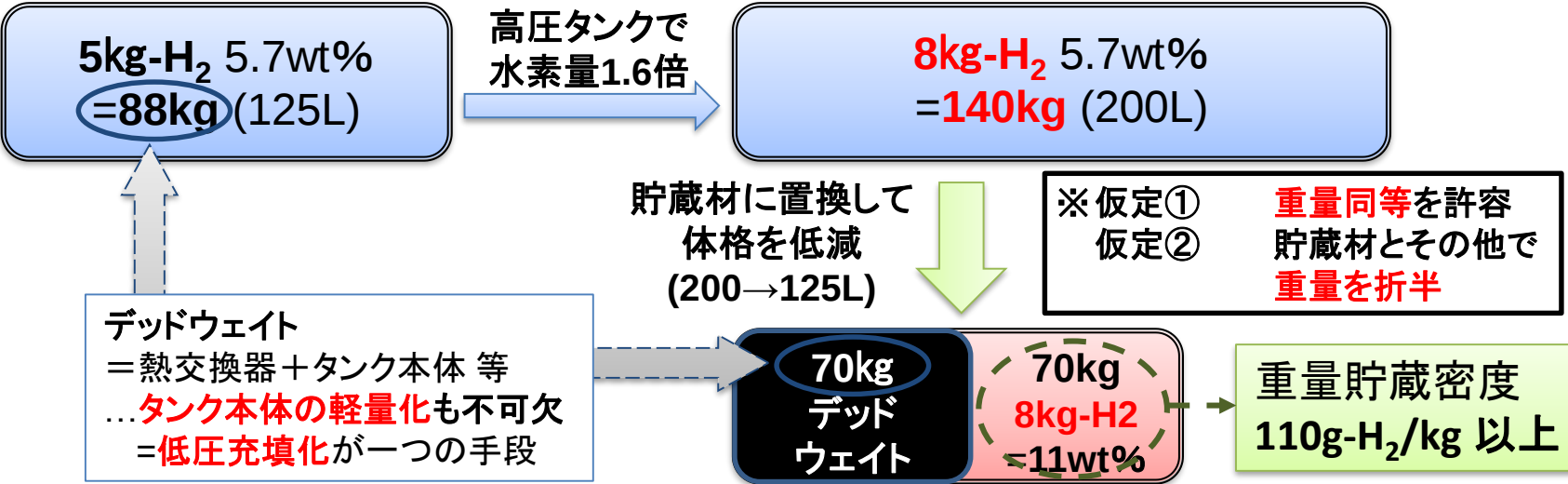
タンク体格同等で水素搭載用を1.6倍にできれば、
大型トラックの航続距離1000kmも視野に。

(1)体積貯蔵密度

※ 貯蔵材料充填率50%の仮定を維持



(2)質量貯蔵密度



2、自動車向け水素貯蔵材料に望まれる材料特性 【試算まとめ】

体積貯蔵密度 130g-H₂/L 以上
重量貯蔵密度 110g-H₂/kg (11wt%) 以上

大前提

現状の高圧タンク置き換えで航続距離1000km以上目標

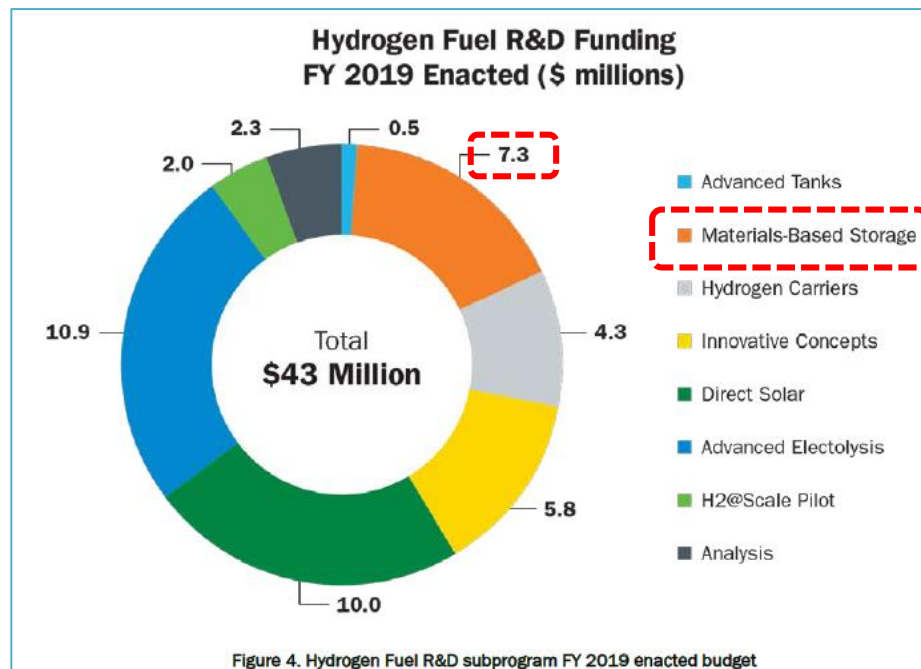
前提

現状の高圧タンクとの比較で、
・体格同等における水素搭載量1.6倍以上
・同一水素搭載量におけるタンク重量同等以下
タンクに占める貯蔵材料の割合を、
・体積比率(充填率)、重量比率とも 50%と仮置き

前提条件より想定される追加必要条件:

- ・タンク本体の軽量化のための**低圧充填化**
- ・熱交換器簡素化(小型化・軽量化)のための、**常温域での水素吸放出**

3、主要各国における水素貯蔵材料の研究開発動向 (1)米国



19年度

水素貯蔵材料の研究領域へ
エネルギー省(DOE)による
資金投入が続く

Hydrogen Storage

• In FY 2019, the subprogram selected 11 new projects to support the advanced materials storage portfolio, H2@Scale efforts, and new priorities on medium- and heavy-duty transportation technologies. Four projects will focus on hydrogen carrier development addressing large-scale hydrogen transport and bulk storage challenges. **Seven projects will focus on advanced materials for storing gaseous fuels including hydrogen and natural gas.**

出典: Hydrogen Fuel R&D Subprogram Overview, FY 2019 Annual Progress Report,
DOE Hydrogen and Fuel Cells Program
https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress19/h2f_overview_2019.pdf

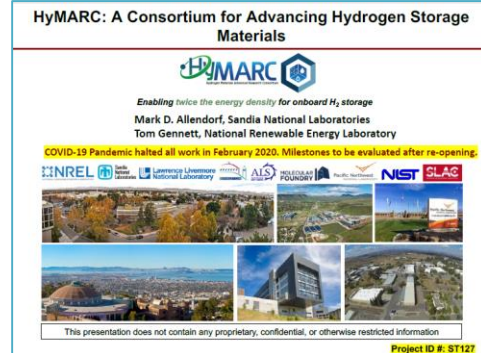
7つのプロジェクトが水素・天然ガスなどの
気体燃料の先端貯蔵材料に注力

3、主要各国における水素貯蔵材料の研究開発動向 (1) 米国

■ 19年度の状況① MOF(金属有機構造体)

MOF	ΔH from DRIFTS ^a (kJ/mol)	Q_{st} from isotherms (kJ/mol)	Total H ₂ uptake at 298 K, 100 bar (g/L)	Usable capacity at 298 K, 5–100 bar (g/L)
Comp. H ₂	—	—	7.7	7.3
Ni ₂ (<i>m</i> -dobdc)	-13.7	-12.3	11.9 ^b	11.0 ^b
Cu ^I -MFU-4l	-33.6	-32.7	11.0 ^b	9.3 ^b
V ₂ Cl _{2.8} (btdd)	-21.0	-19.5	10.7 ^b	9.6 ^b
HKUST-1 ^c	n.d.	-6.9	9.8	9.0

^aDiffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy, ^bApplied single crystal density, ^cHKUST-1 monolith prepared in Task 1.C.1

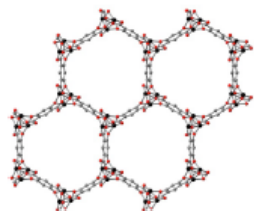


出典: HyMARC: A Consortium for Advancing Hydrogen Storage Materials

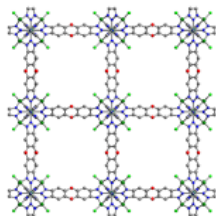
https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review20/st127_allendorf_gennett_2020_o.pdf

試算目標 130g-H₂/L 以上

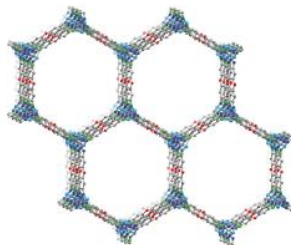
9.0~11.0g-H₂/L@10MPa, 25°C



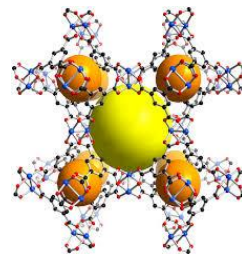
Ni₂(*m*-dobdc)



Cu-MFU-4l



V₂Cl_{2.8}(btdd)



HKUST-1 (出典:Wikipedia)

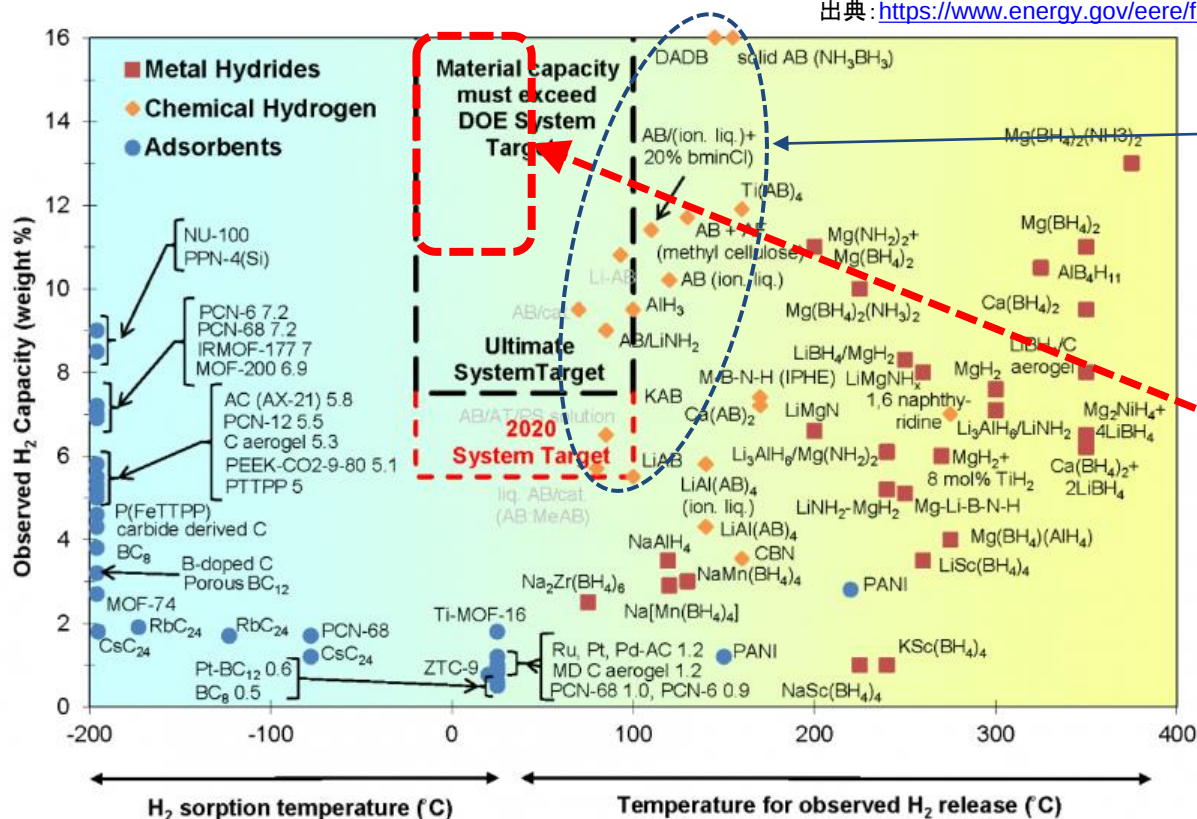
GOOD

常温・低圧での吸放出

BAD

体積貯蔵密度が1桁低い

出典: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/materials-based-hydrogen-storage>

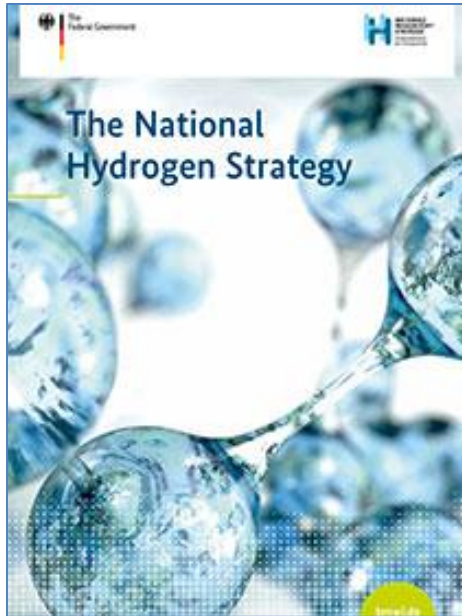


AB=アンモニアボラン ($\text{H}_3\text{N}-\text{BH}_3$)
 …100℃前後の加熱で水素放出。
 但し、水素吸着(再水素化)が困難。

高い貯蔵密度を持ち、
常温域で水素を吸放出できる材料を見出せていない

3、主要各国における水素貯蔵材料の研究開発動向 (2) 欧州

■ドイツ



Germany's federal government has adopted a €9 billion (\$10.2 billion) National Hydrogen Strategy

ドイツ政府が€9 billionの予算を採択
(2020年6月)

出典:<https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.html>

出典: http://ieahydrogen.org/pdfs/WHEC-2018_Bonhoff_20180621.aspx

NATIONAL INNOVATION PROGRAM HYDROGEN AND FUEL CELL TECHNOLOGIES (NIP)
R&D-PROJECTS ADDRESS KEY COMPONENTS OF AN AUTOMOTIVE HYDROGEN FUEL CELL DRIVE TRAIN
 (EXAMPLES)

700 bar hydrogen storage

- improving the manufacturing process
- 04/01/2017 - 03/31/2019
- public funding (BMVI): 1.432 Mio. Euro

fuel cell stack

- joint specifications
- preparing mass production
- 05/01/2017 - 09/30/2019
- public funding (BMVI): 18.548 Mio. Euro

system development

- next generation automotive fuel cell
- 03/01/2017 - 08/31/2019
- public funding (BMVI): 4.842 Mio. Euro

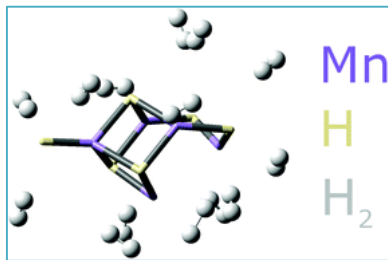
Targets:
 • 1.3 W/cm² @ 2 A/cm²
 • > 3.8 kW/l
 • <40 €/kW @ 30,000 #/a

Dr Klaus Bonhoff

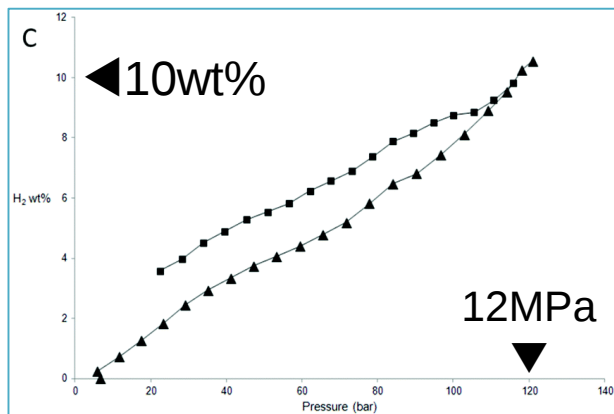
これまでのところ、
水素貯蔵材料に対する研究開発の
取組みは見られない。

3、主要各国における水素貯蔵材料の研究開発動向 (2) 欧州

■ UK (Lancaster University)



Manganese Hydride
(水素化マンガン)



水素の吸脱着等温線(298K)

出典: Energy Environ. Sci., 2019, 12, 1580—1591, The Royal Society of Chemistry 2019
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/EE/C8EE02499E#!divAbstract>

Energy &
Environmental
Science



PAPER

View Article Online
View Journal | View Issue

Check for updates

Cite this: Energy Environ. Sci.,
2019, 12, 1580

A manganese hydride molecular sieve for practical hydrogen storage under ambient conditions†

Leah Morris,^a James J. Hales,^b Michel L. Trudeau,^c Peter Georgiev,^d
Jan Peter Embs,^e Juergen Eckert,^f Nikolas Kaltsoyannis^g and
David M. Antonelli^g *

a reversible excess adsorption performance of **10.5 wt%**
and **197 kgH₂ m⁻³** at **120 bar** at **ambient temperature**

常温 **12MPa** 充填で
体積貯蔵密度 **197g-H₂/L**
質量貯蔵密度 **10.5wt%**



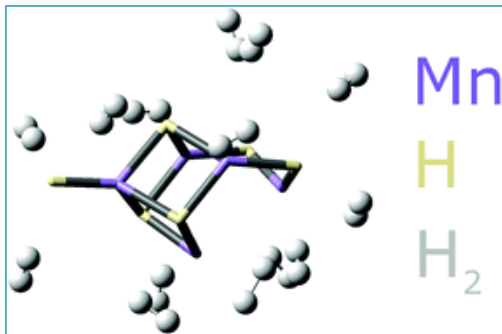
試算目標
130g-H₂/L
11wt%



材料特性の試算目標に匹敵・凌駕する材料の報告あり

3、主要各国における水素貯蔵材料の研究開発動向 (2) 欧州

出典: Energy Environ. Sci., 2019, 12, 1580—1591, The Royal Society of Chemistry 2019
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/EE/C8EE02499E#!divAbstract>

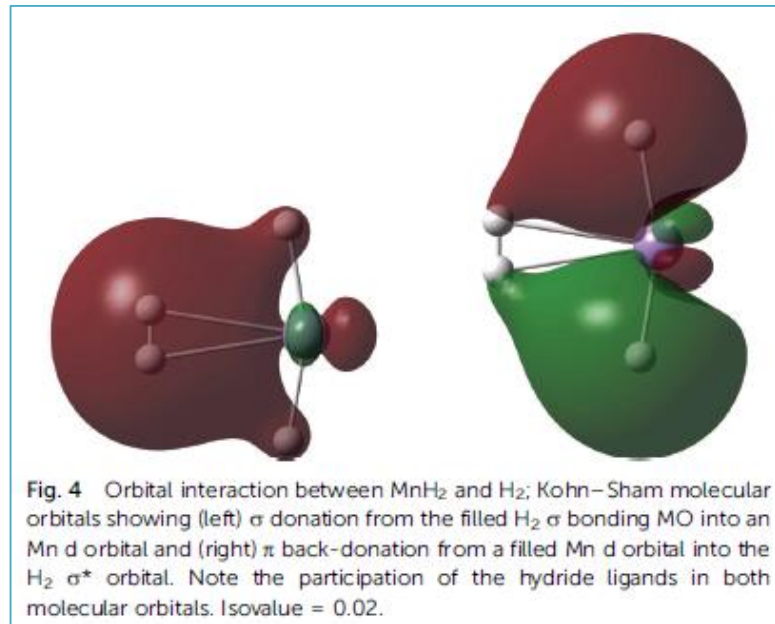


Manganese Hydride
(水素化マンガン)

水素分子から水素化マンガンへの σ 供与(左)と
 水素化マンガンから水素分子への π 逆供与(右)の
 適度なバランスにより、**水素が可逆的に結合可能**

キーワード

「Kubas結合による二水素錯体」



4、まとめと提言

- ①NEDOの長期目標をベースに、いくつかの前提・仮定を加えることで車載用水素貯蔵材料に望まれる貯蔵密度を試算した。
- ②米国やドイツでの公的資金投入による研究からは、①の試算に合致しうる新規の水素貯蔵材料は、現在のところ見出せない。
- ③UKの大学による研究から、高いポテンシャルを有する水素貯蔵材料が見出されている。



高圧タンクを凌駕できる水素貯蔵材料の難易度は極めて高いが、それに近いポテンシャルを有する材料も現れつつある。

『燃料電池車の商品価値として航続距離の向上を継続的に追求』
(NEDOロードマップ)を**日本の技術で実現**するため、新規水素貯蔵材料に対する産学による**積極的な取組みに期待**したい。