

# 水素貯蔵の安全性に関する総論 安全確保のための研究開発の現状と課題

西宮伸幸

日本大学理工学部

〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8-14

## Overview of Research and Development on Safe Hydrogen Storage

Nobuyuki Nishimiya

Nihon University, College of Science and Technology

1-8-14 Kanda-Surugadai, Chiyoda-Ku, Tokyo 101-8308

A wide variety of hydrogen storage technologies are overviewed and typical safety aspects are briefly discussed. Compressed gas will be first utilized beyond the scheduled dawn of fuel cell vehicle economy in 2015. Liquefied hydrogen will also acquire people's recognition to some extent, but solidification of hydrogen will suffer from trade off problems between volumetric hydrogen capacity and safety.

**Keywords:** Compressed hydrogen, Liquefied hydrogen, Hydrogen stand, Metal hydrides, Inorganic complex hydrides, Organic chemical hydrides, Hybrid hydrogen storage

### 1. はじめに

2015年に控えた燃料電池自動車 (FCV) の本格普及期入りを前にして、水素エネルギーシステムの安全性の再確認に関する動きが目につくようになってきた。People on the street という言い方をされる一般国民の理解なしには水素社会の扉は開かない。水素・燃料電池実証プロジェクト JHFC は一般国民を対象にイベントやセミナーを連続的に開催しており [1]、九州大学水素エネルギー国際研究センターは、社会人向け、学生向けおよび市民・子ども向けの人材育成プログラムを公開している [2]。高校の理科の教員が主要な読者である「化学と教育」(日本化学会)においても、水素の安全に関する講座記事が特集された [3, 4]。上述の研究センターがこのほど行った4名の准教授公募の際、その1名を水素安全学研究部に割り振ったこともこの流れと無縁ではあるまい。上述の九州大学は、福岡水素エネルギー人材育成センターと協働する一方、12月1日、世界トップレベル研究拠点プログラム WPI でカーボンニュートラル・エネルギー研究拠点を整備することになったが、fundamental science の観点

から水素安全に対してもウイングを拡げている点の特筆される。

本稿では水素貯蔵の技術全体を概観した上で、個々の貯蔵技術の安全性に関する研究開発の現状と課題のあらましを述べる。2015年に一般国民の前に姿を見せる主なものは高圧ガスを充填された自動車用容器とこれに水素を供給する水素スタンドであると考えられるが、開発途上にある水素固形化材料も安全性の考慮なくしては市場投入がままならない時代であることに鑑み、実用間近なものから開発途上のものまで広汎な貯蔵技術をここでは議論の対象とする。

### 2. 水素貯蔵法の種類と特徴

標準的な FCV が 100 km 走行するには 1 kg の水素が必要である [5] ため、航続距離 500 km を保証するには 5 kg の水素を搭載する必要がある。同じ燃焼熱が得られる量のガソリンと水素を用意してガソリンエンジン車および FCV の走行距離を比べると後者が2倍になる [5] が、限られた空間に水素貯蔵システムを搭載しつつ燃料電池

表1. FCVの航続距離と水素車載量の目標 [6]

	2007年度末 技術実証	2010年頃 社会実証へ	2015年頃 普及初期	2020~30年頃 本格商品化
航続距離(km)	300~500	500	500~700	700
水素車載量(kg)	3~5	5	5~7	7

の高い効率を維持するためには、水素貯蔵システムは軽量・コンパクトであることが必須である。国内では、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) のプロジェクトとして、2020~30年頃の本格商用化までに7kg程度の水素車載量を達成すべく [6]、さまざまな取り組みが行われている。表1にその数値目標の概略を示す。

米国エネルギー省 (DOE) でも表1と同等の目標値を設定している [7]。ほかに、迅速な水素充填や、本特集の主題である安全性の確保も、車載水素貯蔵システムの重要な目標とされている。

FCVに関わる水素貯蔵技術には、車載用のタンクのほか、水素スタンド用の大規模貯蔵技術も含まれる。オンサイト水素以外の水素をFCVに充填するためにはオフサイト水素を一時貯蔵して輸送する技術の確立も必要である。貯蔵規模、貯蔵期間はまちまちであるが、貯蔵形態に基づいて水素貯蔵技術を分類すると、(I) 高圧水素、(II) 液体水素および(III) 水素貯蔵材料を利用した技術の三者となる。(III) は水素の固形化技術とよばれることがあり、多くの場合、水素吸蔵合金がこれを代表していたが、無機錯体系水素貯蔵材料が近年は注目されており、また、有機ケミカルハイドライドに代表される液体貯蔵材料も重要度を増してきた。本章では、この(I)~(III)の順に水素貯蔵技術を概観し、最後に(I) 高圧水素と(III) 水素貯蔵材料を組み合わせたハイブリッド貯蔵についても概略を示す [8]。

## 2.1. 高圧水素による貯蔵

液化石油ガス (LPG) 車や圧縮天然ガス (CNG) 車用として実績のある高圧容器を基本とし、さらに35 MPa または70 MPa までの耐圧性を付与した水素用車載高圧容器の実証試験が世界各地で行われている。容器の外側は炭素繊維強化プラスチック (CFRP) で共通に補強されており、そのライナー (本体部分) の構成材料により、アルミニウム合金を利用した金属ライナー容器と高密度ポリエチレンを利用した樹脂ライナー容器に分類される。35 MPa 容器については例示基準が発行されており [9]、

すでに実用段階にある。水素スタンドは70 MPa への対応をいそいでおり、設計圧力は90 MPa とされている。水素スタンドの蓄圧容器はこれまで鋼製が通例であったが、アルミライナー容器に置き換えようという動きも出てきている。

## 2.2. 液体水素による貯蔵

液体水素は体積あたりのエネルギー密度が高圧水素よりも高いのが特長である。有明水素スタンドの場合、液体水素貯槽の容量は10,000 Lであり、FCV 130 台分の供給力がある。一方、液体水素を車載するために、気化して失われる水素 (ボイルオフガス) を低減させた極低温容器の研究・開発も継続的に行われている。積層真空断熱 (スーパーインシュレーション) 型容器を用いるのがポイントである。5 kg の液体水素の体積は70 dm<sup>3</sup> ほどになり、既存のガソリン容器に近い体積であるため、高圧容器と比較すると非常にコンパクトなシステムである。

## 2.3. 水素貯蔵材料による貯蔵

水素貯蔵材料のなかでも水素化物に分類される材料においては、水素分子が水素原子に解離して結晶格子間へ侵入したり、周辺元素と化学結合 (共有結合やイオン結合など) したりする結果、高体積密度で水素を貯蔵することができる。このことは、金属を用いる高圧水素貯蔵において水素脆性を起すことと裏腹の関係にある。原子状水素を貯蔵するのに比べると体積密度は下がるが、分子状水素の吸着によって水素を貯蔵する材料も近年注目されている。また、有機物の形で水素を貯蔵する材料も研究されている。本節では、水素化物をつくる代表的材料である金属系水素貯蔵材料 (水素吸蔵合金) および無機系水素貯蔵材料の現状と課題をおもにとりあげるが、その他の高比表面積材料・多孔質材料や有機ケミカルハイドライドなどの研究開発状況についても触れる。

### 2.3.1. 金属系水素貯蔵材料 (水素吸蔵合金)

水素吸蔵合金は、安定な水素化物を生成しやすい金属

表2. 代表的な水素吸蔵合金の水素貯蔵密度と吸蔵・放出温度

種類	水素吸蔵合金	質量密度 (mass%)	体積密度 (kgH <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	吸蔵・放出温度 (K)
AB <sub>5</sub> 型	LaNi <sub>5</sub> など	1~	93	213~373
AB <sub>2</sub> 型	TiMn <sub>1.5</sub> , TiCr <sub>1.8</sub> , ZrMn <sub>2</sub> など	~2	90~110	243~473
AB型	TiFe など	1.9	105	253~343
BCC構造	Ti-Mn-V, Ti-Cr-V, V-Ti-Cr など	2.6~3	130	233~368
	Mg <sub>2</sub> Ni など	3.6	97	523~673
Mg系	MgNi <sub>2</sub> , Mg <sub>0.7</sub> Ca <sub>0.3</sub> Ni <sub>2</sub> , Mg <sub>0.5</sub> Y <sub>0.5</sub> Ni <sub>2</sub> など	1~2	80~110	243~433
	Mg <sub>17</sub> Al <sub>12</sub> など	3.7	-	523
	Mg <sub>7</sub> Ti, Mg <sub>7</sub> Zr など	4.2~5.5	-	-

A (Ti, Zr, Laなど) と水素化物を生成しにくい金属B (Mn, Fe, Co, Niなど) から構成され、可逆的に水素と反応して金属水素化物を生成する。このような組み合わせが必要であるということ、Reilly の法則とよぶことがある。表2に代表的な水素吸蔵合金の特徴を示す [10]。たとえば LaNi<sub>5</sub>H<sub>6</sub> の水素化物中における水素質量密度は1.4 mass% (LaNi<sub>5</sub>H<sub>6</sub> ⇌ LaNi<sub>5</sub> + 3H<sub>2</sub> となるので, 3H<sub>2</sub> / LaNi<sub>5</sub>H<sub>6</sub> = 6.06 / 438.52 = 0.014) 程度である。水素の体積密度はどの合金も 80 kgH<sub>2</sub> · m<sup>3</sup>以上であり、液体水素の密度 (70.8 kgH<sub>2</sub> · m<sup>3</sup>) よりも高い。しかし、車載の際には低い質量密度が問題となるため、これを改善する試みが多く行われている。高容量bcc構造合金 [11-14] がその最右翼であるが、NEDO の2015年目標値である 5.5 mass%を超えるのは容易ではない。表2を見るとMg系合金が質量密度上有望であるが、吸蔵・放出温度の低温化との両立が困難である。

ところで、固体高分子形燃料電池への水素供給に水素吸蔵合金を用いると、高分子電解質がもつ水分が水素吸蔵合金を劣化させるおそれがある。また、オンサイトで水を電気分解して水素を製造すると、水素に水蒸気が混入するため、何時間かの脱水運転を行う必要がある。合金をテトラエトキシシラン由来のセラミックス被膜でカプセル化すると、水素の吸蔵・放出にはほとんど影響を与えずに耐水性を付与することができるため、こうした水蒸気共存の問題を解決することができる [15,16]。図1は AB<sub>2</sub>型ラーベス相合金の一種をカプセル化した時の一つの効果を示しており、微粉化した試料 (a) の亀裂が被膜で修復され、繰り返し水素の吸蔵・放出を行ってもそれ以上の微粉化が進行しない (写真 (b)) ことがわかる [17]。

### 2.3.2. 無機系水素貯蔵材料

高い水素貯蔵密度が期待できる材料の候補として表3に示す無機系水素貯蔵材料があげられる [18]。

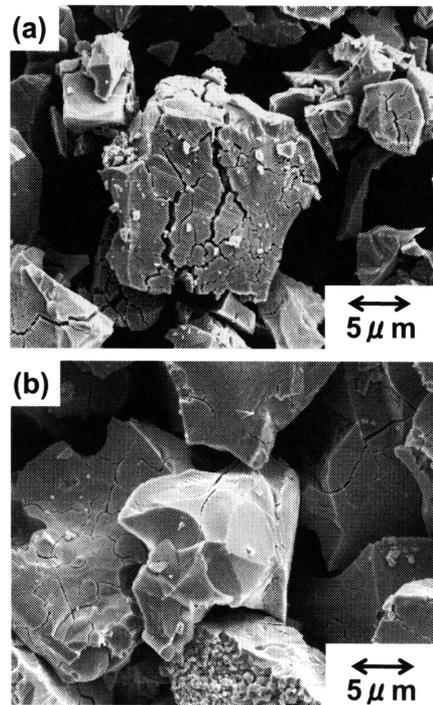


図1. Ti<sub>0.5</sub>Zr<sub>0.5</sub>(Fe<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.8</sub>)<sub>1.5</sub>合金のSEM像

- (a) 水素の吸蔵・放出を7回繰り返して微粉化したもの
- (b) 続いて50 nm程度の被膜でカプセル化し、水素の吸蔵・放出を7回繰り返したもの

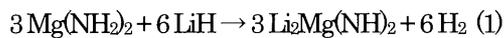
その中で、錯体水素化物は一般に M<sub>1</sub>(MH<sub>n</sub>) の組成式で表され、M<sub>1</sub>はおもに Li, Na, K, Mg などのアルカリ・アルカリ土類元素群、M<sub>2</sub>はAl (アラネート系)、N (アミド系)、B (ボロハイドライド系) などの元素を表す。

錯体水素化物の多くは原子量が小さい典型元素を構成元素とするため、水素の質量貯蔵密度は 5-20 mass% と高い。錯体水素化物は、典型元素-水素結合が比較的安定であるため、一般的に水素放出温度が高温であるが、元素置換することにより結合性の強さを低下させ、水素放出反応を 370-820 K 程度の幅広い温度領域で制御することも可能になっている [19-23]。また、錯体水素化物を

表3. 代表的な無機系水素貯蔵材料の水素貯蔵密度と放出温度

種類	$M(M'H_n)$	水素貯蔵材料	質量密度(mass%)	体積密度( $\text{kgH}_2/\text{m}^3$ )	放出温度(K)
錯体水素化物	$M' = \text{Al}$ (アラネート系)	$\text{LiAlH}_4$	10.6	97	398
		$\text{NaAlH}_4$	7.4	95	483
	$M' = \text{N}$ (アミド系)	$\text{LiNH}_2$	8.8	103	513
		$\text{Mg}(\text{NH}_2)_2$	7.2	99	723
	$M' = \text{B}$ (ボロハイドライド系)	$\text{LiBH}_4$	18.5	122	653
		$\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$	14.9	121	533
分子性水素化物		$\text{AlH}_3$	10.1	149	353~423
		$\text{NH}_3\text{BH}_3$	19.6	149	373~673

他の水素化物と複合化させて、水素放出反応の低温化、再水素化特性の向上、アンモニアなど副生ガス発生の抑制などをめざす研究も進められており、例えば $\text{Mg}(\text{NH}_2)_2$ と $\text{LiH}$ をボールミルで複合化させる実験では、それまでに報告されていた次の3種の組み合わせの中から(2)が選択されている [24]。



$\text{LiBH}_4$ では、 $\text{MgH}_2$ を加えて下記式(4)のように生成系に安定化合物が現れる工夫をすることによって、反応系の温度を高くしなくても水素放出反応が進行すると報告されている [25]。



分子性の水素化物である水素化アルミニウム ( $\text{AlH}_3$ ) やアンモニアボラン ( $\text{NH}_3\text{BH}_3$ ) も、高い質量・体積密度を有する無機系水素貯蔵材料である。しかし、可逆的な反応に数 GPa の高压水素が必要であるなどの課題があるため、熱力学的安定性の制御や効率的な再生プロセスなどに関する研究が進められている。

### 2.3.3. 高比表面積材料および多孔質材料

単層カーボンナノチューブ (SWCNTs) の最大水素吸着量ははじめ 5-10 mass% と見積られていた [26] が、その後、比表面積  $1000 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  あたり 77 K で 1.5 mass% 程度であることが示され [5]、さらに、この値が、グラファイトをボールミリングして得られたナノカーボンでも SWCNTs でも同じであり、水素分子の物理吸着現象として説明できる、とされた。しかし、Y-Ni を混ぜ込んだグラファイトのアーク放電で得られた  $500 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  の SWCNTs の場合、水素圧 100 kPa のもとでの水素吸着量は、室温で 1 mass%、77 K で 2.5 mass% と、通常の物理吸着の限界を超えている [27,28]。炭素材料上の金属種が

水素を原子状に解離させ、それが水素容量を増やしていると考えられるが、その原子状の水素がどのような機構で材料表面に吸着しているか、未確認である。

SWCNTs の集合体は高比表面積材料であると同時に多孔質材料でもあるが、水素吸着特性と細孔径との関係は実験的に明らかになっていない。それに対して、有機金属骨格体 (Metal Organic Framework (MOF) [29]) は有機配位子で連結された金属イオンからなる結晶性の物質であり、比表面積を支配するマイクロ細孔の直径を意図的に変えることができる。77 K における水素吸着量は、金属種や細孔構造に依存せず、単純に比表面積に支配されることがわかっている [30,31]。水素吸着熱の大小は、最大水素量に到達する水素分圧の低高を支配するのみである。

### 2.3.4. 有機ケミカルハイドライド

有機化合物の水素化-脱水素化可逆反応対により水素を出し入れして水素を貯蔵する。2-プロパノール-アセトン対、シクロヘキサン-ベンゼン対、メチルシクロヘキサン-トルエン対、デカリン-ナフタレン対などの液体の反応対が検討されてきた。デカリン-ナフタレン対は水素の質量密度が 7.3 mass% と高いが、ナフタレンの融点が 353.5 K と高く、溶媒なしでは扱いにくい。人体への害の問題からベンゼンを大量に扱うことへの抵抗が予想されるため、メチルシクロヘキサン-トルエン対が最適であろう。貯蔵水素の質量密度は 6.2 mass%、体積密度は  $48.0 \text{ kgH}_2 \cdot \text{m}^{-3}$  である。水素放出反応の触媒が開発されていないのが問題であったが、近年、アルミナ担持の白金触媒が開発され、固定床流通式パイロットプラントが成功裡に運転されている [32]。

ケミカルズの水素キャリアーとしては、ほかに、液体アンモニアも想定されるが、アンモニアを穏和な条件で分解する触媒が開発されていない上、もとのアンモニア

に戻すコストが大きい、主要な選択肢とはなり得ていなかった。近年、金属水素化物MHとアンモニアを



のように反応させると室温で水素が得られることが見出され、アンモニアが水素貯蔵媒体として見直されている [33-35]。

## 2.4 ハイブリッド貯蔵

容器に水素貯蔵材料を内蔵し、高圧水素ガスと水素貯蔵材料による水素貯蔵を同時に行う方式をハイブリッド貯蔵という [36]。このとき、高い水素貯蔵密度を有する水素貯蔵材料を利用すると、ガス圧を極端な高圧にしなくても十分な量の水素が貯蔵できる。水素吸蔵合金を利用した小型容器はすでに試験運用が行われており、Ti-Cr-V系合金などが採用されている [37]。高圧容器としての課題に加えて、水素貯蔵材料の水素吸蔵・放出に必要な高性能・軽量の熱交換器の開発に技術的な課題があると考えられてきたが、高圧ハイブリッド容器（使用圧 35 MPa 程度）への適用を想定して、常温付近の低温でも高い水素吸蔵・放出圧力を示す、低反応エンタルピー変化の水素貯蔵材料、たとえば新種の錯体水素化物  $\text{Ti}(\text{AlH})_4$  を内蔵させることにより、熱交換そのものを不要にしようとする試みもある [38]。

## 3. 各種水素貯蔵法の安全への取り組みの現状と課題

### 3.1 高圧水素貯蔵の安全

水素スタンドの安全と FCV の水素タンクの安全が中心課題であるが、前者は、図2のように運転者自身が水素充填することを前提とすると、圧縮機、蓄圧器、オンサイト水素製造装置のみならず、ディスペンサーやそこにいたる連絡配管の細部に至るまで、本質安全が求められる。安全を確保しつつコストを下げ、海外と競争できるようにするために、規制の緩和ではなく規制の見直しが求められている分野と言えよう。

鋼製蓄圧容器は開発の歴史も長く、材料選定および安全性評価について国内に高い蓄積があるが、これをアルミライナー容器に置き換えて構造設計上の自由度をもたせるためには、安全性評価を相応に組み直す必要がある。車載水素タンクの信頼性を確保するために、容器劣化・損傷に対する探知技術が向上しており、例えば、CFRP 強化アルミニウムライナーのキズを、超伝導量子

干渉デバイス (SQUID) で非破壊的に検査する方法が開発されている [39]。この技術を蓄圧容器に適用すれば、データに基づいたメンテナンスが可能となる。



図2. ミュンヘン空港内の水素スタンド

### 3.2 液体水素貯蔵の安全

多くの科学技術者は液体窒素の使用経験を持っており、液体窒素冷却式のコールドトラップの使用法を誤ると酸素富化された空気が凝縮して危険であることを知っている。液体水素においてもこれと似た酸素凝縮が起ると誤解されている向きがあるが、現実の使用条件下では起り得ない。高圧ガスに比べて着火爆発や人身災害が少ないことは、本号の特集記事から知ることができる。

液体水素の密度は、圧力が増加すると減少する。そのため、圧力がむしろ低いほど、液体水素を高密度に貯蔵できる。ここで言う圧力の低下は、飽和蒸気圧の低下という意味であり、温度を下げ、圧力を下げているため、密度が上がる。多くの科学技術者にとってはなじみの薄い液体水素であればこそ、相互点検による安全確保が必要であろう。

### 3.3 水素貯蔵材料の安全

#### 3.3.1 金属系水素貯蔵材料の安全

水素吸蔵合金には 1970 年代からの開発の歴史があり、その中で、安全に関する知見が多く蓄積されている。水

素化物がもとの金属または合金よりも空气中で激しく燃えるということは一般に成立せず、例えば空气中のX線回折で回折線の変化を経時で追跡した場合、もとの金属または合金のほうが急速に変化することもしばしば経験される場所である。

2.3.1で紹介したテトラエトキシシラン由来のセラミックス被膜で水素吸蔵合金をカプセル化すると、水素の吸蔵・放出にバリアー効果が現れるものの、飽和水素量にはほとんど影響を与えずに、耐水性および耐酸素性が付与され、空气中で発火しやすい水素吸蔵合金やその水素化物も安定に存在できる。複合化するとリサイクルの障害になるという考え方もあるが、万一の場合の安全を考えると、合金の複合化という分野も今後重要になる可能性がある。

### 3.3.2. 無機系水素貯蔵材料の安全

有機化学の分野で長年使用されてきた $\text{LiAlH}_4$ 、 $\text{NaAlH}_4$ 、 $\text{LiBH}_4$ などは比較的扱いやすい物質であるが、アミド、イミド、アンモニアボラン、水素化アルミニウムなどは爆発的に水素放出することがあり、アンモニアを発生したり、さらに合成時の溶媒が残留していて引火したりするおそれもあるため、扱いが難しい。開発実験への参入障壁が高いため、今のところ素人仕事による事故は報告されていないが、注目度が高まるにつれて潜在的な危険が高まることに注意しなければならない。

本号の特集で述べられているとおり、多くの無機錯体系水素貯蔵材料はメカノケミカル処理を経ているため、創成された未知の危険性を知らず知らずのうちに獲得している可能性がある。とくに、高圧下でハイブリッド貯蔵にも使用されようとしている今、安全性の評価は重要である。

### 3.3.3. 高比表面積材料および多孔質材料の安全

多くの材料が77 K程度の低温で実質的な水素吸着を起すため、2015年からの本格普及期入りの時期には、安全の問題は顕在化しないと考えられる。炭素系材料には燃焼の危険があり、またその針状の形態に由来する生体への悪影響が懸念されるが、2.3.3で紹介したMOFや、非燃焼性の窒化ホウ素BNに基材を変更する動きもあり、材料開発の進展によっては安全の問題が急拡大する可能性も残されている。

### 3.3.4. 有機ケミカルハイドライドの安全

有機ケミカルハイドライドは、水素の輸入や国家備蓄に関わる貯蔵技術であり、貯蔵量が長く貯蔵期間が長い

という点で他の技術と大きく異なっている。安全性に対する考え方も、したがって多様にならざるを得ないが、本号の特集記事により、その全貌を知ることができる。材料そのものの安全性のほか、化学反応、化学プラントとしての安全性も、化学工業界の蓄積や過去の事故事例をもとにして議論することができる。

メチルシクロヘキサントルエン対がもっとも有望であるが、メチルシクロヘキサンもトルエンも危険物第4類第1石油類であり、海洋汚染防止法では有害液体物質であることから、ベンゼンやカルバゾールよりましということで実用化されることのないよう、注意する必要がある。例えばガソリンスタンドのような形態で給油することを想定した場合、蒸気吸引の問題からはじめて、細かく対応することが必要となる。

### 3.4. ハイブリッド貯蔵の安全

熱交換器の重量が水素の質量貯蔵密度を低下させることから、熱交換器を無くしたハイブリッド容器が提案されているが、これを用いると、構造も簡易化され、強度的な問題も緩和されると考えられる。一方、このタイプのハイブリッド容器は、無機錯体系の水素化物を用いることが前提となっているため、3.3.2で述べた危険性を内在している。

現行の安全性試験において、落下試験は水平置きで評価され、垂直置きは除かれている。熱交換器の内挿の問題という以前に、水素吸蔵合金収容容器を垂直に保持することができないためである。垂直に置くと合金粉末が圧密化し、その後の水素の出し入れが困難になるほか、膨張によって容器が変形することが知られている。ところで、高比表面積材料や多孔質材料の中には容器に密充填すること自身が困難なものがある。容器の垂直保持が必要な場合、次世代の高比表面積材料や多孔質材料を収容したハイブリッド容器が出現するかもしれない。

## 4. おわりに

総論として、水素貯蔵に関わる材料およびシステムの安全性について概観した。詳細は本号の特集記事のそれぞれに的確に記されている。無事故で2015年を迎え、燃料電池自動車の本格普及期入りを現実のものとして受け入れることができることを祈念している。

## 参考文献

- 水素・燃料電池実証プロジェクトイベント情報、  
<<http://www.jhfc.jp/news/event/index.php>>.
- 福岡水素エネルギー人材育成センターイベント・講演会情報、  
<[http://www.mech.kyushu-u.ac.jp/h2/education/2009/07/post\\_24.php](http://www.mech.kyushu-u.ac.jp/h2/education/2009/07/post_24.php)>.
- 岡野一清、化学と教育、Vol. 59、印刷中(2011).
- 田村陽介、化学と教育、Vol. 59、印刷中(2011).
- L. Schlapbach, A. Züttel, Nature, Vol. 414, 353-358 (2001).
- NEDO 技術開発機構、燃料電池・水素技術開発部、燃料電池・水素技術開発ロードマップ 2008、  
<https://app3.infoc.nedo.go.jp/informations/koubo/events/FA/nedoeventpage.2008-06-18.1414722325/>.
- S. Satyapal, "Hydrogen Storage", U.S. Department of Energy 2007 Annual Merit Review, [http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review07/pl\\_3\\_satyapal.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review07/pl_3_satyapal.pdf).
- 西宮伸幸、池田一貴、折茂慎一、無機マテリアル、Vol. 17、351-358 (2010).
- JARI (財)日本自動車研究所) -S001、圧縮水素自動車燃料装置用容器の技術基準 (2004)、  
<http://www.meti.go.jp/feedback/downloadfiles/i50224hj.pdf>.
- 田村英雄 監修、水素吸蔵合金-基礎から最先端技術まで、エヌ・ティー・エス、p.39 (1998).
- T. Kabutomori, H. Takeda, Y. Wakisaka, K. Ohnishi, J. Alloys Compd., Vol. 231, 528-532 (1995).
- E. Akiba, H. Iba, Intermetallics, Vol. 6, 461-470 (1998).
- M. Okada, T. Kuriwa, T. Tamura, H. Takamura, A. Kamegawa, J. Alloys Compd., Vol. 330-332, 511-516 (2002).
- K. Kubo, H. Itoh, T. Takahashi, T. Ebisawa, T. Kabutomori, Y. Nakamura, E. Akiba, J. Alloys Compd., Vol. 356-357, 452-455 (2003).
- 西宮伸幸、櫻村一輝、水素エネルギーシステム、31, No. 1, 38-43 (2006).
- N. Nishimiya, M. Suzuki, K. Ishigaki, K. Kashimura, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 32, 661-665 (2007).
- 西宮伸幸、エネルギー・資源、Vol. 30, 54-57 (2009).
- S. Orimo, Y. Nakamori, J. R. Eliseo, A. Züttel, C. M. Jensen, Chem. Rev., Vol. 107, 4111-4132 (2007).
- K. Miwa, N. Ohba, S. Towata, Y. Nakamori, S. Orimo, Phys. Rev. B, Vol. 69, 245120-1-8 (2004).
- Y. Nakamori, G. Kitahara, A. Ninomiya, M. Aoki, T. Noritake, S. Towata, S. Orimo, Mater. Trans., Vol. 46, 2093-2097 (2005).
- Y. Nakamori, G. Kitahara, K. Miwa, S. Towata, S. Orimo, Appl. Phys. A, Vol. 80, 1-3 (2005).
- K. Miwa, N. Ohba, S. Towata, Y. Nakamori, S. Orimo, Phys. Rev. B, Vol. 71, 195109-1-6 (2005).
- Y. Nakamori, K. Miwa, A. Ninomiya, H. Li, N. Ohba, S. Towata, A. Züttel, S. Orimo, Phys. Rev. B, Vol. 74, 045126-1-9 (2006).
- T. Ichikawa, K. Tokoyoda, H. Leng, H. Fujii, J. Alloys and Compounds, Vol. 400, 245-248 (2005).
- J. J. Vajo, S. L. Skeith, F. Mertens, J. Phys. Chem. B, Vol. 109, 3719-3722 (2005).
- A. C. Dillon, K. M. Jones, T. A. Bekkedahl, C. H. Kiang, D. S. Bethune, M. J. Heben, Nature, Vol. 386, 377-379 (1997).
- N. Nishimiya, K. Ishigaki, H. Takikawa, M. Ikeda, Y. Hibi, T. Sakakibara, A. Matsumoto, K. Tsutsumi, J. Alloys Compd., Vol. 339, 275-282 (2002).
- 西宮伸幸、石垣幸一、蛭名武雄、滝川浩史、日比美彦、榊原建樹、炭素、No.210, 199-204 (2003).
- H. Li, M. Eddaoudi, M. O'Keeffe, O.M. Yaghi, Nature, 402, 276-279 (1999).
- M. Hirscher, B. Panella, Scripta Mater., Vol. 56, 809-812 (2007).
- M. Hirscher, B. Panella, B. Schmitz, Microporous Mesoporous Mat., Vol. 129, 335-339 (2010).
- 岡田佳巳、斉藤政志、恩田信博、坂口順一、水素エネルギーシステム、Vol. 33, No. 4, 8-12 (2008).
- N. Sifer, K. Gardner, J. Power Sources, Vol. 132, 135-138 (2004).
- L. Li, J.A. Hurley, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 32, 6-10 (2007).
- H. Yamamoto, H. Miyaoka, S. Hino, H. Nakanishi, T. Ichikawa, Y. Kojima, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 34, 9760-9764(2009).
- N. Takeichi, H. Senoh, T. Yokota, H. Tsuruta, K. Hamada, H. Takeshita, H. Tanaka, T. Kiyobayashi, T. Takano, N. Kuriyama, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 28, 1121-1129 (2003).
- 森大五郎、小林信夫、篠澤民夫、松永朋也、久保秀人、藤敬司、都築誠、日本金属学会誌、Vol. 69, 308-311 (2005).
- M. Felderhoff, C. Weidenthaler, A. Pommerin, F. Schüth, Proc. 18<sup>th</sup> World Hydrogen Energy Conference, pdf (2010).
- Y. Hatsukade, K. Yotsugi, Y. Sakaguchi, S. Tanaka, Physica C, Vol. 463-465, 1043-1047 (2007).