# 水素吸蔵放出による水素吸蔵合金の体積変化の可視化計測

松下政裕\*1, 門出政則\*1, 光武雄一\*2

# Measurement of Change in the Volume of Metal Hydride Bed by Hydrogen Absorption and Desorption

Masahiro MATSUSHITA<sup>\*3</sup>, Masanori MONDE and Yuichi MITSUTAKE

\*3 Institute of Ocean Energy, Saga University Honjo 1, Saga, 840-8502 Japan

For practical use of metal hydride (MH), it is important to clarify the influence on bulk density by cycle of expansion and contraction, and the relation between void fraction and effective thermal conductivity of MH. The effective way of such study is to measure an expansion and a contraction ratio directly. So, we have constructed visualization experimental apparatus to measure change in the volume of the MH packed bed. In this paper, the behavior of MH is shown as results of an experiment with our first apparatus. The results show that the volume of MH increased in proportion to the amount of hydrogen at the absorption. But, at the desorption, the contraction did not retrace the reverse process of the expansion. The volume of MH was increased with cycle number of absorption and desorption. The particle diameter distribution after 30th hydriding was expressible by the Rosin-Rammler distribution.

Key Words : Hydrogen, Metal hydride, Energy storage

## 1. 緒 言

環境問題や資源問題への対応のため、これからは、再生可能エネルギーの活用など、様々なエネルギー源を活 用していくことが重要となっており、そのような社会では、水素がエネルギー循環の中心となることが予測され ている.しかしながら、そのような水素エネルギー社会の確立には、まだ多くの課題が残されており、特に、水 素はその貯蔵方法が重要な課題となっている.

現在,世界中において,水素の貯蔵方法に関する様々な研究がなされているが,あらゆる要求を満たすような 保存方法は見つかっておらず,水素エネルギー社会の早期実現のためには,長期保存,一時保存,大量運搬,少 量運搬など,用途によって貯蔵方法を使い分けることが必要である.中でも,安全性を重要視するような用途で は,100℃以下の比較的低温度,10 気圧以下の比較的低圧で水素吸蔵放出ができ,爆発危険性が少ないという特 性を持つ水素吸蔵合金の使用が有望視されている.

水素吸蔵合金を実用化する上で,最も必要とされる課題が水素吸蔵・放出速度の向上である.水素吸蔵合金は, 水素吸蔵時に発熱し,放出時に吸熱するため,伝熱促進を行わないと水素吸蔵・放出速度は著しく低下する.さらに,水素吸蔵合金は,反応面積を広げるため,基本的に粉体で使用されるが,このことが伝熱性能の低下になっている.すでに水素吸蔵合金の伝熱促進の研究<sup>(1)</sup>もいくつか行われているが,設計計算などのためにも,まず は,基本的な充填特性,伝熱性能について詳細に調べることが重要である.

粉体自体の充填特性に関する研究は、粒子層の充填率を多成分粒子に対して計算する研究<sup>(2)</sup>、充填率と透過圧 力損失の関係を調べた研究<sup>(3)</sup>等が行われている.しかし、水素吸蔵合金は、水素吸蔵時に膨張し、水素放出時に

<sup>\*1</sup> 佐賀大学 海洋エネルギー研究センター(〒840-8502 佐賀市本庄1)

<sup>\*2</sup> 佐賀大学 理工学部機械システム工学科

E-mail: matusita@ioes.saga-u.ac.jp

収縮する.さらに、水素吸蔵放出を繰返すことにより微粉化していく.このため、粒子形状、粒子径分布が変化しており、その粒子変化をともなう充填特性に関する研究が必要である.

粉体の有効熱伝導率に関する研究は、計算式として、固体部分での熱伝導、固体と気体部分の熱伝達と熱伝導、 固体表面間の放射伝熱と分割して考える計算方法の提案<sup>(4)(5)(6)</sup>が行われている.どの式においても、空隙率が重要 な要素であり、充填状態を正しく評価することが重要である.また、水素吸蔵合金の有効熱伝導率の実験計測<sup>(7)</sup> も行われている.しかし、膨張収縮にともなう充填状態まで考慮した有効熱伝導率の研究はあまり行われていな い.

そこで、本研究は、水素吸蔵合金の水素吸蔵、放出に伴う膨張収縮、繰返しによる崩壊などによる粒子径変化、 形状変化に対する充填特性の変化を調べ、詳細に把握するとともに、そのような粒子形状の変化を伴う充填層の 有効熱伝導率に関する実験を行い、充填状態の変化まで組み込んだ充填層の有効熱伝導率の予測解析モデルを確 立することを目的としている.

本研究の目的において、膨張収縮よる充填状態の変化や、充填密度と有効熱伝導率の関係を明確にするために は、水素吸蔵合金の状態を直接可視化し、計測を行うことが有効である.しかし、実際に水素吸蔵合金の膨張収 縮の様子を観察した研究はほとんどなく、多くの研究者が実際の膨張収縮の様子を見たことがないという状況で ある.濱本<sup>(8)</sup>らが可視化した研究があるが、使用した合金の量が 7.8g と少ないためか、粒子自体の膨張率が 25% 程度あるにもかかわらず、充填層の膨張収縮の体積変化は 1%の増減となっている.そこで、まずは、水素吸蔵 合金の膨張収縮の挙動観察を行うための装置を構築し前報<sup>(9)</sup>で報告を行った.本報告は、その装置を使用し、水 素吸蔵合金(LaNi<sub>5</sub>)に対して行った膨張収縮の可視化計測について報告を行う.

#### 2. 実験装置及び実験条件

#### 2·1 実験装置

構築した実験装置は、水素供給配管、耐圧容器、温度制御用の循環水配管などから構成されている。図1に試験装置の概略図、図2に試験部の外観を示す.水素供給は、水素吸蔵量算出のため、水素ボンベから2次タンク(1800cm<sup>3</sup>)へ移した水素を使用する構造になっている.水素排出時においても、水素放出量を算出するため、 真空ポンプとタンクによって段階的に排出する構造になっている.容器は、水素吸蔵合金の膨張収縮による応力

と水素気体の圧力による応力の両方を可視化部分で対応するこ とは困難であったため、可視化耐圧容器と水素吸蔵合金容器を 分離した構造となっている.耐圧容器の詳細を図3に示す.可 視化部分にポリカーボネート製パイプを使用し、上下フランジ 部分はステンレスになっている.漏れ防止には、ゴムパッキン および液状ガスケット(スリーボンド1206D)を使用した.耐 圧容器の性能を評価した結果<sup>(9)</sup>では、本装置の耐圧性能は 1.0MPaと考えられる.水素吸蔵合金のための内部容器はガラス 製のビンで、内径32mmの円筒型である.耐圧容器全体は、ア クリル水槽の中に入れ、循環水によって温度制御を行った.水 温は外部の循環水供給源によって一定温度に保たれている.

計測は、2次タンクの圧力 P1 はゲージ圧計(KYOWA PG-50KU)によって、試験部の圧力 P2 は絶対圧計(ミネベア NS100A)によって計測している.2次タンク温度 T1,試験部 温度 T2,水素吸蔵合金の温度 T3,アクリル水槽水温 T4,循環 水用タンク水温は、K型熱電対によって計測している.すべて の計測値は、計測器(YOKOGAWA WE500)によって、専用 PC に記録される.サンプリング間隔は1秒とした.水素吸蔵合金 の体積は、ビデオカメラ(Victor GZ-HD620)によって可視化計 測を行った.

記号					
A	:SEM 観察による粒子面積				
C	:水素吸蔵量				
n*	: 均等数(Rosin-Rammler 分布)				
P1	:2次タンク圧力	[MPa]			
P2	: 試験部圧力	[MPa]			
Q	:累積分布				
TI	:2次タンク温度	[°C]			
T2	: 試験部温度	[°C]			
T3	: 水素吸蔵合金温度	[°C]			
T4	: 水温	[°C]			
$V_1$	: 最大吸蔵時の体積				
V <sub>0</sub>	:開始時および終了時の体積				
x	: 粒子径	[ µ m]			
xe*	: 粒度特性值(Rosin-Rammler 分布)				
Z	:水素圧縮係数				
α	: Rosin-Rammler 分布合成の係数				
$\phi_{ab}$	: 膨張率				
$\phi_{de}$	: 収縮率				

## 2·2 実験条件

使用した合金は LaNi<sub>5</sub>であり, LaNi<sub>5</sub>および LaNi<sub>5</sub>H<sub>6</sub>の特性を表1に示す.それぞれの質量から算出すると, LaNi<sub>5</sub>の最大水素吸蔵量は重量比で1.4%である.本装置では,初期活性化を可視化容器内で行うことは困難であったので,別の試験容器(銅パイプ製)で初期活性化後(30℃,1.8MPa,3時間)に,酸化防止のためアルゴン雰囲気中で可視化試験装置へ移動した.主な試験条件を表2に示す.全部で30回の水素吸蔵放出試験を実施し,各サイクル試験後に水素吸蔵量を0にするため,真空状態,水温30℃で約6時間の水素放出を行った.実験では,タップ充填や振動充填のような充填化を促進するようなことは何も行っていない.

		5	5 0
Name		LaNi <sub>5</sub>	LaNi <sub>5</sub> H <sub>6</sub>
Lattice constant	a0	5.017 A <sup>(10)</sup>	5.440 A <sup>(10)</sup>
	c0	$3.982 \mathrm{A}^{(10)}$	4.310 A <sup>(10)</sup>
Volume		86.8 A <sup>3 (10)</sup>	110.5 A <sup>3 (10)</sup>
Volume ratio		1	1.273
Mass		432.4 u	438.4 u
Mass ratio		1	1.014
Real density		8272 kg/m <sup>3</sup>	6588 kg/m <sup>3</sup>

Table.2 Experimental conditions					
	LaNi <sub>5</sub>				
	91.0g				
P2	0.6∼0.75 MPa				
T4					
	5, 10, 15 °C				
	30 °C				
	P2 T4				

## Table.1 Characteristics of LaNi5 and LaNi5H\_6

# 2・3 データ精度

水素吸蔵合金の体積は、ビデオ画像から画像処理プログラムによって算出した.画像データでの高さ方向の解像度は 0.055 mm/pixel であり、算出高さについて奥行による影響や処理による誤差を算出すると±0.6mm となっている.これを空隙率として換算すると約±0.5%の誤差範囲での結果となっている.

水素吸蔵量は、計測した圧力、温度および事前に測定した各セクション体積から、2次タンク内の水素量の変化をもとにして算出している.水素の圧縮率は、熱物性ハンドブック<sup>(11)</sup>のデータをもとに以下の式で算出し、使用した.

$$z = 1 + P * \left(1.93482 * 10^{-5} + \frac{2.04036}{T + 273.16} + \frac{81.5334}{(T + 273.16)^2} - \frac{65561}{(T + 273.16)^3} + \frac{4565160}{(T + 273.16)^4}\right)$$
(1)



Fig.1 Schematic of experimental apparatus.



Fig.3 Pressure tight case.



Fig.2 Appearance of experimental apparatus.

ここで、Pは圧力[MPa], Tは温度[℃]を示しており、低圧時には式(1)の圧縮率は使用せず z=1 とした.また、 タンクや配管などの体積の計測結果には、予備計測の結果から判断して、3%程度の誤差が含まれている.従って、 最終的な水素吸蔵量には、水素吸蔵合金 91g の最大吸蔵量に対し±1.0%未満の誤差が含まれている.

## 3. 試験結果

#### 3·1 体積変化の概要

まず、水素吸蔵放出に伴う体積変化の例を図4に示す.図4は、水素吸蔵放出サイクル4回目終了状態から5 回目の終了までの体積変化の様子を示している.まず、真空状態(図4a)から水素流入直後(図4b)には、全体 の体積が少し減少する.これは、充填化を促すことを何もしていないため、真空状態では空隙率が大きな状態に なっており、水素の流入により合金が押され、体積が減ると考えられる.その後、水素吸蔵に伴う粒子の膨張に より、全体の体積が徐々に増加し、最大吸蔵時(図4c)に、体積も最大となる.次に、水素放出時には、放出に 伴い粒子が収縮するため全体の体積も減少する.完全に水素を放出した状態(図4d)で最小の体積となる.図5 は、平均高さの変化の例を示したものである.吸蔵時には、吸蔵量に対してほぼ一定の割合で高さの増加が見ら れる.一方、放出時は、増加したときの逆をたどるのではなく、吸蔵量の半分ほどを放出するまで、わずかな高 さ変化しか見られない.半分ほど放出した後、徐々に高さは減少するが、すべて放出した状態でも、吸蔵前の高 さまでは戻らず、次のサイクルの水素流入時に急激な高さの減少がみられる.この1サイクルにおける体積の変 化は、どのサイクルにおいても、ほぼ同様の傾向がみられた.

また,粉体を扱ううえで,水素流入,放出の際に粉体が吹き上がる現象が実用上問題になることが考えられる. しかしながら,今回の可視化観察では,水素流入時にはほとんど吹き上がる現象は観察されていない.これは, 耐圧容器の水素流入口から直接内部容器に水素が吹き込まないようにしてある効果であると思われるが,よほど 急激な流入を行わない限り,流入時にはあまり注意は必要ないと思われる.一方,水素放出時にはわずかな圧力 差によっても粉体が吹き上がる現象が頻繁に観察された.これは粒子の隙間にたまった水素が,圧力変化をきっ



(a) After 4th hydriding (b) Start of 5th hydriding (c) Max absorption (d) After 5th hydriding Fig.4 Example pictures of change in volume of the metal hydride in one cycle.



かけとして噴出する現象で、その際、空隙率が大きくなっている壁付近<sup>60</sup>や熱電対周辺を通り噴出すると考えられる.従って、水素吸蔵合金を実用する上で、水素放出時に充填層から水素を抜けやすくするような構造が必要 と考えられる.

水素吸蔵放出を繰り返すことによる体積変化の様子を図6に示す.図6aは比較のために示した吸蔵前の初期充 填状態であり,図6bは水素最大吸蔵時の最大体積の変化の様子を示している.また,図7は平均高さの変化を示 しており,水素流入直後の最小高さ(Before),最大吸蔵時の最大高さ(Max),水素放出後の高さ(After)をそれぞ れ示している.図より,どの高さも,水素吸蔵放出を繰り返すことにより,ほぼ単調増加しており,その傾向は まだ持続すると考えられる.これは,水素吸蔵合金は初期の段階では,急激な粒子崩壊が生じるためとみられ, その粒子崩壊による体積の増加であると考えられる.従って,粒子崩壊の割合が少なくなってくれば,体積の増 加傾向も落ち着くと考えられる.

また、水素吸蔵合金は、水素吸蔵放出を繰り返すことで、劣化し、水素吸蔵量が減少していくことが知られている.今回の計測においても、30回の繰り返しではあるが、その劣化の傾向はみられている.図8に最大吸蔵量の変化を示す.水素吸蔵放出の繰り返しにより、ほぼ線形に水素吸蔵量が減少しており、1サイクルで約0.3%の吸蔵量の減少がみられている.この劣化の原因は、詳細には不明であるが、水素ガス中の不純物による影響などが考えられる.劣化原因については今後検討していくつもりであるが、いずれにしても、最大吸蔵量が減少しているにもかかわらず、最大吸蔵時の全体の体積は増加しており、このことからも、全体の体積変化には、粒子の崩壊に伴う形状変化、粒子径の変化などが大きく影響していることがうかがえる.

#### 3·2 空隙率

水素吸蔵放出にともなう体積の変化から、水素吸蔵合金の空隙率の変化を算出すると図9のようになる.ここで、計算のもとになる水素吸蔵合金の真密度は、水素の吸蔵量を考慮し、表1に示したように格子定数と分子量から算出した値を使用している.結果は、空隙率が5割以上というかなり大きな値となっており、水素吸蔵放出の繰り返しにより、さらに大きな空隙率へと変化している.粉体の熱伝導率を算出する式は、空隙率をパラメー







(b) Maximum absorption



タとして組み込んでいるが、モデルが球体粒子を基準にしていることもあり、多くの場合、このような大きな空隙率をあまり考慮していない.今回の結果から判断すると、水素吸蔵合金の熱伝導率の予測モデルを構築する際には、比較的大きな空隙率を対象とすることが必要と考えられる.

また,図9には30回の試験終了後に取り出してタップ充填を行った結果も示してある.結果は、タップ充填を 繰り返しても62%以下の空隙率にすることはできなかった.これは、粒子径が小さく、粒子間の付着力の影響が 大きくなり、高密度の充填ができなくなる現象であり、30回試験後の粒子では、最密充填でも62%の空隙率にな っている.一方、30回目の吸蔵試験では、最大吸蔵時にこの62%の空隙率よりも空隙が少なくなっている.これ は、30回目のサイクルで生じた粒子崩壊の影響や、水素吸蔵時の粒子膨張の影響により、30回終了後よりも、最 密充填できる空隙率が少なくなっているとも考えられるが、それらを考慮したとしても、水素最大吸蔵時には、 ほぼ最密充填状態になっていると考えられる.つまり、今回の試験では充填化を促すようなことは何も行ってい ないが、水素吸蔵放出を繰り返すことにより、水素最大吸蔵時には、そのサイクルにおける最密充填状態になっ ていると考えられる.

#### 3·3 膨張率, 収縮率

平均高さから膨張率,収縮率を以下の式で算出した.

$$\phi = \frac{V_1 - V_0}{V_0}$$
(2)

ここで、V<sub>1</sub>は最大吸蔵時の体積、V<sub>0</sub>は各サイクルの開始時および終了時の体積である.図 10 にサイクルに伴う膨張率 φ<sub>ab</sub>、収縮率 φ<sub>de</sub>の変化を示す.太線で示したものは、水素最大吸蔵量の減少を考慮した粒子自体の体積 増加の変化を示したものである.図 10 では、1 回目の膨張率が粒子自体の膨張 27%とほぼ等しくなっている.2 回目以降は、緩やかな膨張率、収縮率の減少が見られるが、粒子自体の膨張の約半分にあたる約 13%の膨張し、約 9%の収縮を繰り返している.膨張率および収縮率の減少傾向は、最大吸蔵量の減少にともなう粒子自体の体 積変化の減少傾向に類似しており、膨張率、収縮率の変化は、水素吸蔵量の変化の影響が大きいとみられる.

また,濱本<sup>(8)</sup>らが可視化した研究では,膨張も収縮も 1%の体積変化となっており,本試験とは異なっている. この違いは,主に使用した水素吸蔵合金の量の違いによるものと考えられ,濱本<sup>(8)</sup>らの結果は水素吸蔵合金の量 が少ないため,放出時に粒子自体の重さによる体積減少が少なくなり,全体での体積変化が少なくなっていると 考えられる.

## 3・4 粒子径分布

水素吸蔵合金の体積変化は、粒子形状や粒子径分布の影響を大きく受けていると考えられる.そこで、初期粒子と30回の吸蔵試験後の粒子の詳細な観察を行った.図11は SEM(TOPON 社製, Scanning Electron Microscope: SEM, SM-200)による観察結果の例である.図11a が初期化前の粒子であり、図11b が30回の吸蔵試験後の粒子である.今回の試験において、使用した粒子には選別などの粒径統一作業を行っていない.そのため、様々な大きさの粒子が含まれており、大きな粒子では200 μ m 近い幅もみられている.一方、30回の試験後の粒子は、崩



壊が進み,ほとんどが10μm以下の幅に収まるような粒子となっている.しかし,中には,図11bの下図2枚に 見られるように,比較的寸法が大きな粒子も残っており,そのような場合は,図にみられるような多数の亀裂が 観察された.これは,30回の水素吸蔵放出試験では,まだ初期的な粒子崩壊の途中であるためと考えられる.

SEM 観察で得られた画像をもとに、画像処理プログラムを作成し、その面積から粒子径分布を算出した.図 12 にその結果を示す.図 12a が初期化前の粒子径分布で、図 12b は 30 回試験後の粒子径分布である.横軸の粒 子径は面積から得られた相当直径を示しており、以下の式で算出した.

$$x = 2 \times \sqrt{\frac{A}{\pi}} \tag{3}$$

ここでAは画像上の面積で, x が面積相当直径である.

今回使用した初期粒子は個数基準では 7~8µmの相当径にピークがみられているが, 面積基準では 109~110µm の相当径にピークがみられる分布となっていた. そのため, 粉砕粒子の分布でよく使用される Rosin-Rammler 分 布の式(4)による個数分布では, 初期粒子を表現することはできなかった.

$$Q = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x}{x_e}\right)^n\right\} \tag{4}$$

一方,30回試験後の粒子径分布は,個数基準では 1~1.5 μmの相当径にピークがあり,個数分布を Rosin-Rammler 分布として,係数 xe=3.983, n=1.197 とすると,面積基準の頻度分布においてもよい一致がみられた.今回のよう に初期粒子の分布が二つのピーク値を持つような分布であっても,30回試験後の粒子は崩壊によって



(b) After 30th hydriding





Fig.12 Frequency distribution and cumulative distribution

Rosin-Rammler 分布となったことから、水素吸蔵合金は、崩壊が進むにつれて Rosin-Rammler 分布の粒子径分布 になっていく傾向があるといえる.従って、粒子崩壊が進行した状態での解析モデルでの粒子径分布の取り扱い は、Rosin-Rammler 分布の粒子径分布として差し支えないとみられる.

なお、初期粒子においても、式(5)のような Rosin-Rammler 分布の合成として扱い、係数を $\alpha$ =0.893,  $xe_1$ =12.76,  $n_1$ =1.34,  $xe_2$ =94.2,  $n_2$ =1.82 とすることで表現は可能であった.

$$Q = \alpha \left[ 1 - \exp\left\{ -\left(\frac{x}{x_{e1}}\right)^{n1} \right\} \right] + (1 - \alpha) \left[ 1 - \exp\left\{ -\left(\frac{x}{x_{e2}}\right)^{n2} \right\} \right]$$
(5)

#### 4. まとめ

本報告は、水素吸蔵合金の膨張収縮に伴う充填状態の変化を調べるため、直接可視化できる装置の構築を行い、 その装置により水素吸蔵合金の膨張収縮の挙動観察試験を行った.得られた結果を以下にまとめる.

- (1) 水素吸蔵時には、充填層の体積は吸蔵量にほぼ比例して増加するが、その膨張率は、粒子自体の膨張率の 半分ほどであった.また、水素放出時は増加時の逆をたどるような体積減少にはならない.
- (2) 水素の吸蔵放出を繰り返すことにより、粒子崩壊が進み、高密度状態にすることができなくなるため、水素吸蔵合金充填層の体積は、徐々に増加していく、その際、特に充填化を促すことを行わなくても、最大吸蔵時には、最密充填に近い状態になっている。
- (3) 初期粒子ではピークが二つあるような粒子径分布をしていた粒子層でも、30 回の吸蔵試験後では粒子崩壊によって Rosin-Rammler 分布の粒子径分布の傾向を示した.

今後,さらに,水素吸蔵合金の膨張収縮の可視化試験を継続し,膨張収縮の繰返しによる粒子形状の変化による る充填特性を調べ,充填密度の変化に対する有効熱伝導率への影響に関する研究を行っていく.

# 文 献

- (1) 光武雄一,門出政則,重高健吾,角掛繁,布浦達也,水素吸蔵合金を用いた水素貯蔵容器内の伝熱促進(伝熱フィン最適設置条件の検討),日本機械学会論文集 B 編, 72 巻, 718 号 (2006), pp. 1396-1403.
- (2) 鈴木道隆,市場久貴,長谷川勇,大島敏男,粒度分布のある多成分粒子ランダム充填層の空間率,化学工学論文集,第11
  巻,第4号 (1985), pp. 438-443.
- (3) 鈴木道隆,阪田隆敏,中村彰二,廣田満昭,大島敏男, 粒子充填層の透過圧損失に及ぼす粒度分布の影響, 化学工学論文 集, 第17巻, 第2号 (1991), pp. 417-422.
- (4) R. BAUER, E.U.Schlunder, Effective Radial Thermal Conductivity of Packings in Gas Flow, International Chemical Engineering, Vol.18, No.2 (1978), pp.181-204.
- (5) 松原弘美, 田尻耕治,朝比奈, 小坂岑雄, 粉体の熱伝導 (III) 推定方法の検討, エネルギー・資源, Vol. 8, No.6 (1987), pp. 554-559.
- (6) W. van Antwerpen, C.G. du Toit, P.G. Rousseau, A review of correlations to model the packing structure and effective thermal conductivity in packed beds of mono-size spherical particles, *Nuclear Engineering and design*, Vol.240 (2010), pp. 1803-1818.
- (7) 門出政則, 光武雄一, 水素吸蔵合金の温度伝導度と熱伝導率の測定, 日本機械学会論文集 B 編, 70 巻, 700 号 (2004), pp. 3264-3270.
- (8) 濱本芳徳,森英夫,江藤淳朗,三谷賢史,金矢侑己,水素吸蔵放出にともなう水素吸蔵合金層の膨張・収縮率の測定,第46 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (2009)
- (9) 松下政裕,門出政則,光武雄一,水素吸蔵合金の膨張・収縮の可視化試験装置,佐賀大学海洋エネルギー研究センター報告 OTEC,第15号 (2010), pp.37-40.
- (10) 大角泰章, 新版水素吸蔵合金—その物性と応用—, 新版第3刷 (2008), pp.65-67, アグネ技術センター.
- (11) 日本熱物性学会編,熱物性ハンドブック,訂正第2版 (2000), pp.48-50,養賢堂.