アンモニアによる水素貯蔵と運搬

小 島 由 継

広島大学先進機能物質研究センター ☎ 739-8530 広島県東広島市鏡山 1-3-1

(2015 年 5 月 1 日受付; 2015 年 7 月 6 日掲載決定)

Hydrogen Storage and Transportation Using Ammonia

Yoshitsugu KOJIMA

Institute for Advanced Materials Research, Hiroshima University,
1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8530

(Received May 1, 2015 ; Accepted July 6, 2015)

Hydrogen can be stored in many different forms as compressed or liquefied hydrogen in tanks, as a hydrogen-absorbing alloy, as metal hydrides with light elements, as organic hydrides or by adsorption on carbon materials. Ammonia has been expected as a hydrogen energy carrier because it has a high H_2 storage capacity with 17.8 wt% and 10.7-12.1 kg H_2 /100 L. The volumetric hydrogen density is 1.5-2.5 times of liquid hydrogen, and it is easily liquefied under about 1 MPa at room temperature. Ammonia has advantages in cost and convenience as a hydrogen carrier for fuel cell vehicles, energy carrier for solid oxide fuel cell (SOFC), gas turbine of electric power plants. Current PEM fuel cells are poisoned by trace levels (>0.1 ppm) of ammonia. After hydrogen generation by ammonia cracking, ammonia absorption materials will be useful to produce the high purity hydrogen gas.

KEYWORDS : ammonia, hydrogen energy carrier, PEM fuel cell, solid oxide fuel cell, gas turbine

1. は じ め に

化石燃料の枯渇リスク、地球温暖化に対する懸念等の問題を解決するために、二酸化炭素を発生しない再生可能エネルギー（太陽熱・光、地熱、風力等）を高効率的に利用する社会へと移行することが期待されている。現在、再生可能エネルギーは電気に変換して利用されているものの大量に貯蔵・輸送することは困難であり、エネルギー密度が高く、かつ二酸化炭素発生のない地球環境に優しい二次エネルギーが必要となる。水素はクリーンで貯蔵・輸送が可能な二次エネルギーとして考えられてきたが、常温・常圧で気体であり、液化するためには極低温（ -253°C ）を要する。液体水素でも体積エネルギー密度はガソリンの 30% 以下と低い。したがって、水素を安全かつ高密度で大量に貯蔵・輸送することは困難である。

そこで、水素を高密度で貯蔵・輸送が容易な化学物質

（水素エネルギーキャリア）に変換して利用するエネルギーシステムが期待されている。本稿では、アンモニアが水素エネルギーキャリア（水素キャリア、エネルギーキャリア）として水素社会で利用される可能性について述べる。

2. 水素キャリアとしてのアンモニアの特性

水素貯蔵材料（水素キャリア）として水素吸蔵合金、軽元素系水素貯蔵材料（ NaBH_4 , NaAlH_4 , MgH_2 , $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$, NH_3BH_3 等）、炭素系材料の研究開発が行われてきた¹⁻⁴⁾。また、これらの材料の水素吸蔵・放出速度（動力学特性）、反応温度（熱力学的安定性）を改良するために、触媒や水素化物をナノレベルで複合化したナノ複合材料が作製され評価された（マグネシウム系複合材料、 LiH-NH_3 系、 Li-N-H 系、 Li-Mg-N-H 系、 Li-C-H 系、 Li-Al-N-H 系、 $\text{NaH-NH}_3\text{BH}_3$ 系、 Li-Mg-B-H 系複合材料等）⁴⁾。

種々の水素貯蔵材料の水素密度（実験値）、固体、液体水素化物の理論計算水素密度と液体水素の水素密度を

Fig. 1. Gravimetric and volumetric H₂ densities of hydrogen storage materials.

Fig. 1 にまとめて示す。固体水素貯蔵材料について、実験的に達成されている充填率は 40~50% であり、ここでは 50% を仮定して体積水素密度を求めた⁵⁾。

アンモニアは 17.8 wt% もの水素量を有し、BCC 合金 (Ti_{0.22}Cr_{0.39}V_{0.39}, Ti-Cr-V) の 8 倍、Ti-Cr-Mn 合金 (Ti_{1.1}CrMn) の 10 倍、NaBH₄ の加水分解による水素発生量の 1.7 倍、Mg(BH₄)₂ の 1.2 倍、アルミニウム水素化合物 AlH₃ (アレン) の 1.8 倍と水素貯蔵材料の中では大きな重量水素密度を示す。この重量水素密度はアンモニアボラン (NH₃BH₃: 19.6 wt%) や LiBH₄ (18.5 wt%) について 3 番目に大きい。圧縮することによって室温、1 MPa 以下で容易に液化する。液体アンモニアの体積水素密度は 10.7~12.1 kgH₂/100 L (1 MPa, 25°C~0.1 MPa, -33°C) と液体水素の 1.5~2.5 倍 (4.9~7.1 kgH₂/100 L, 1 MPa, -242°C~0.1 MPa, -253°C) であり、最高の体積水素密度を示す。

Table 1 には液体系水素キャリアの特性をまとめて示す。アンモニアは、有機ハイドライド (メチルシクロヘキサン) よりも重量水素密度、体積水素密度の面で優れている。液体状態での水素貯蔵量は、メチルシクロヘキサンの約 3 倍となる。アンモニアは他の水素貯蔵材料と異なり CO₂ フリー燃焼も可能であり、「エネルギーキャリア」としての側面も有する。

一般的に、水素貯蔵量が増加すると水素化合物の生成熱の大きさは増加傾向にある。ところがアンモニアは水素貯蔵量が多いにもかかわらず、生成熱の大きさは小さく、アンモニアガスを分解して水素を放出させるのに要するエネルギー (30.6 kJ/molH₂) は水素の燃焼エネルギー (高位発熱量 (HHV): 286 kJ/mol H₂) の 10% 程度に留まる。

この値はニッケル水素電池に使用されている水素吸蔵

Table 1. Properties of liquid hydrogen carrier^{6~8)}. (*1, 1 MPa, 298 K, *2, 0.1 MPa, 240 K)

Item	Ammonia	Methyl cyclohexane (MCH)	Liquid H ₂
Equilibrium conversion	96% (300°C) HSC Chemistry 6.0	96% (300°C)	N/A
Activation energy (kJ/mol)	60-100	109	N/A
Gravimetric H ₂ density (wt%)	17.8	6.16	100
Volumetric H ₂ density (kg/100L)	10.7 ^{*1} -12.1 ^{*2}	4.73	7.1 (20K) 4.9 (31K)
Heat of formation, gas (kJ/molH ₂)	30.6	68.4	N/A
Enthalpy of vaporization (kJ/molH ₂)	15.5	10.4	0.9

合金 (LaNi₅) や燃料電池自動車に検討された水素吸蔵合金 (Ti-Cr-V) と同程度である。通常、アンモニアは液体状態で貯蔵されるため、液体アンモニアからアンモニアガスを生成させるための蒸発熱は 15.5 kJ/molH₂ となる。したがって、液体アンモニアから水素を生成するためには水素の燃焼熱の 16% を必要とする。メチルシクロヘキサンは石油系のインフラが利用できるため水素キャリアとして開発されている。メチルシクロヘキサンを蒸発させ、分解して水素放出するのに要するエネルギーは 78.8 kJ/molH₂ となり、水素から取り出せるエネルギー (燃焼熱) の 28% が水素放出に費やされアンモニアに比べ多くのエネルギーが必要である。アンモニアとメチルシクロヘキサンは 300°C での分解による水素生成の平衡転化率や活性化エネルギーは同程度である。

3. アンモニアの価格と安全性

Fig. 2 にはアンモニア、ガソリン、水素の単位エネルギーあたりの価格を示す。アンモニアの燃焼に伴うエンタルピー変化は -383 kJ/molNH₃、高位発熱量 (HHV) は 22.5 MJ/kg, 13.6 MJ/L (1 MPa, 298 K の密度 0.603 g/cm³) である。アンモニアの CIF 価格は 66 円/kg (2015 年 3 月)⁹⁾ より、単位エネルギーあたりのアンモニア価格は 2.9 円/MJ (10 円/kWh) (1 MJ=0.278 kWh) となる。一方、ガソリンの高位発熱量は 34.6 MJ/L¹⁰⁾、その販売価格を 130 円/L とすると、単位エネルギーあたりのガソリン価格は 3.8 円/MJ (14 円/kWh) となる。水素の高位発熱量 (HHV) は 142 MJ/kg、供給価格は 1000~1100 円/kg である。この水素平均価格は 1050 円/kg (7.4 円/MJ, 27 円/kWh) となる。アンモニアのエネルギー価格はガソリンに比べ低く、水素に比べて 40% 以下と低価格の CO₂ フリーの合成燃料としての位置づ

Fig. 2. Energy cost of ammonia.

けを有する。

アンモニアの安全性については Risø National Laboratory (Denmark) で検討され、健康に対する有害性は 3 と、水素(0)、天然ガス(1)、ガソリン(1)に比べ高くなっている¹¹⁾。一方で、アンモニアの可燃性に対する有害性は 1 であり、水素(4)、天然ガス(4)、ガソリン(3)に比べ低く、総合的に見て現在使用されている燃料と危険度はかわらないと報告されている。2~4% のアンモニア溶液は虫刺されの薬として市販されており、蒸気圧は 30000 ppm 程度である。また、米国では家庭用アンモニア溶液（濃度 5~10%）がガラスクリーナー、バスクリーナー、キッチンクリーナーとして一般的に使われている。

毒物および劇物取締法において無水アンモニアは劇物に指定されており、液体に触れると火傷や凍傷を引き起こすほか、目に入った場合は失明の恐れがある。高濃度のガス吸入は呼吸困難を引き起す（MSDS：7664-41-7）。米国政府衛生学者会議（ACGIH）によると、アンモニアの人体に対する許容値は 1 日 8 時間の作業環境下の濃度が 25 ppm（17 mg/m³）とされている。国立医薬品食品衛生研究所によると¹²⁾、空気中でアンモニアを感知できる濃度は 5 ppm~53 ppm である。110 ppm ではきわめて強い刺激があり、570~1790 ppm では反射性声門閉鎖が報告されている。急性暴露ガイドラインレベル（不快レベル）では 30 ppm に決められている。したがってアンモニアは管理下で利用されるべきと考えられる。

4. アンモニアを用いた水素のサプライチェーン

4.1 アンモニア製造

アンモニアは主に化石燃料（天然ガス、石炭）（Fig. 3 参照）を用いたハーバー・ボッシュ法により世界で年間 1.66 億トン（2012）が製造されており、国内での生産量

Fig. 3. (color online). Ammonia production method.

は 100 万トン/年（2013）である。反応は、鉄系触媒を用いて、673~873 K、20~40 MPa で行われている。このようにアンモニアは化石燃料から製造され二酸化炭素の発生を伴っている。今後、太陽エネルギー等の再生可能エネルギーからアンモニアを製造する技術の開発が必要である。熱化学水分解を用いた水素製造技術は太陽エネルギーを水素に変換可能な技術として注目されている。これまで主に検討が進められてきた熱化学水分解による水素製造法では反応温度が 900℃ 以上と高いため、650℃ 以下の低温で制御可能な熱化学水素製造技術の研究開発が進められている¹³⁾。Na の酸化還元を用いると 500℃ での水分解による水素製造が可能である¹⁴⁾。

また、製鉄所構内でコークスの製造過程でアンモニアが副生する¹⁵⁾。日本の鉄鋼業での石炭輸入量は 8000 万トン/年である¹⁶⁾。石炭 100 kg にアンモニア 0.2~0.4 kg 含まれており、年間の副生アンモニア量 16~32 万トン（水素：3~6 万トン）に昇る¹⁷⁾。たとえば、年間 210 万トンのコークスを製造する工程では液体アンモニアが 9800 トン製造されている¹⁸⁾。原油中にも窒素が 0.02~0.5 wt% 含まれる¹⁹⁾。2012 年度の原油輸入量は 2 億 1000 万 kL（1.8 億トン）であり²⁰⁾、原油中に窒素が 3.6~90 万トン含まれている。この窒素は石油精製プロセスの中で、水素化脱窒素（HDN）反応により副生アンモニアとして除去されている²¹⁾（4.3~108 万トン/年間）が有効利用されていない。現在の化石燃料社会からアンモニア利用水素社会に移行していく段階では、コークス製造時、石油精製時の副生アンモニアや天然ガス、石炭を貯蔵・輸送の容易な液体燃料であるアンモニアに変換する、化石燃料を利用した水素エネルギーキャリアとしてのアンモニアが考えられる。

4.2 アンモニア貯蔵・輸送

アンモニアタンカーは一般に冷却船である。液体 NH₃ の沸点は -33.3℃ と液化天然ガス（-161℃）に比べ高いため、船体構造や材料は液化天然ガス（LNG）

船ほど厳しくない。アンモニアはエネルギーセキュリティのための長期備蓄にも適している。

4.3 アンモニア利用

4.3.1 水素キャリア

貯蔵・輸送が容易なアンモニアは水素ステーションまで運ばれ水素に変換されて固体高分子形燃料電池を搭載した自動車（燃料電池自動車）用燃料として使用できる。これらは「水素キャリア」としてのアンモニア利用プロセスである。2014年12月15日、約700万円で世界初の燃料電池自動車（FCV）が市販された。水素のエネルギーあたりの価格はガソリンの1.8倍であるものの、燃料電池自動車の車両効率はガソリンハイブリッド自動車の約2倍である²²⁾。したがって、水素価格はハイブリッド車のガソリン価格と同等の水準となる。2015年末までのFCVの生産台数は約700台、2016年は2000台程度2017年には3000台程度に拡大する計画である。2010年3月に燃料電池実用化推進協議会（FCCJ）が発表したシナリオによると、FCVに関して2025年には200万台突破が目標である。

FCフォークリフトは稼働時ゼロエミッション、水素充填時間3分で従来の電動車（充電時間8時間）と同等の稼働が可能である。電動フォークリフトでは充電時間が長い間バッテリーを交換して利用しておりスペアバッテリー置場も必要となるが、FCフォークリフトではそれが不要である。このような特徴があり、米国では4000台以上が普及しており、国内では2016年度の市場導入を目指し開発中である。

FCVやFCフォークリフト等移動体が今後普及していくことが期待され、高純度水素を低コストで輸送して供給するシステムを開発することはこれらの移動体を普及する上で重要な技術課題である。Fig. 4にはアンモニアを利用した水素ステーションのイメージ図を示す。海外の再生可能エネルギーから製造された水素は、Haber-

Bosch 法によりアンモニアに変換された後に輸入基地まで輸送される。輸入基地まで運ばれたアンモニアはエネルギーセキュリティのために一部備蓄される。そこからステーションまではアンモニアタンクローリー等によって輸送される。アンモニアは水素ステーションにおいて、分解・精製されてFCVやFCフォークリフト用燃料として使用できる。アンモニアから水素を取り出し水素燃料電池で利用するためには、アンモニアを分解する必要がある。

アンモニアの分解は、(1)式のように表すことができる。

Fig. 5にHSC Chemistry 6.0を使って計算した50℃から650℃までの、アンモニアと化学平衡状態における窒素と水素の混合ガス濃度を示す。ここで、反応圧力は0.1 MPaとした。温度が高いほど水素濃度は向上し、0.1 MPa、500℃、550℃、650℃ではアンモニア残存率は1300 ppm、800 ppm、340 ppmとなる。アンモニアの分解を現実的な速度で進行させるためには効果的な触媒が必要である。種々の触媒が検討され（Table 2）、ルテニウム系触媒は鉄、コバルト、ニッケル系触媒に比べ活性

Fig. 5. N₂ and H₂ concentration at chemical equilibrium.

Fig. 4. (color online). Conceptive picture of hydrogen station using ammonia.

Table 2. Ammonia decomposition catalysts.

Catalyst	NH ₃ conversion /%			References
	673K	773K	873K	
Ru/Cs ₂ O/Pr ₆ O ₁₁	91	99.8	>99.8	K. Nagaoka et al., Int. J. Hydrogen Energy, 39, 20731-20735 (2014)
Ru/LSZ-DP	30000 mLg ⁻¹ h ⁻¹ 4000 mLg ⁻¹ h ⁻¹	18 54	75 100	B. Lorenz et al., Chem. Cat. Chem., 2, 1096-1106 (2010)
Nano-Ru/SiO ₂	34	90	100	L.H. Yao et al., Catalysis Today, 158, 401-408 (2010)
Nano-Ni/SiO ₂	8.5	35	82	
Ni/MWCNTs	7	58	-	Y. Zhang et al., Int. J. Hydrogen Energy, 39, 277-287 (2014)
Co/MWCNTs	7	61	-	, 39, 17573-17582 (2014)
Nano-Fe/meso SiO ₂	7	27	86	Y. Li et al., Catal. Commun., 11, 368-372 (2010)
Ni/Al ₂ O ₃	5	34	97	H. Muroyama et al., Appl. Catal. A: Gen., 443-444, 119-124 (2012)
Ni/La ₂ O ₃	6	33	90	
Fe ₂ O ₃ /CMK-5	9(723K) 6(723K)	26 17	96 80	A. Lu et al., J. Am. Chem. Soc., 132, 14152-14162 (2010)

LSZ: Lanthanum-stabilized zirconia, CMK-5: Ordered mesoporous carbon

が高いことがわかる。Ru—Cs₂O—PrO₁₁ 触媒を用いることで 400℃ のアンモニア転化率は 91% を示し、500℃ で 99.8% まで向上する。

一方、鉄、コバルト、ニッケル系触媒を利用すると、400℃ での転化率は 10% 以下である。温度上昇に伴って転化率は上昇するものの、カーボンナノチューブを担体に用いた触媒でも 500℃ での転化率は 60% 程度である。転化率を 99.8% (残存アンモニア濃度 1000 ppm) 以上とするには 650℃ 以上が必要である²³⁾。アンモニア分解により製造した水素中にはアンモニアが一部未反応のまま混入する。アンモニアは一定量を超えると、燃料電池の出力に悪影響を与える。1 ppm のアンモニアを含む水素であっても 1 週間使用すると、燃料電池が劣化することも報告されており²⁴⁾、分解しきれなかったアンモニアは燃料電池への影響のない濃度 (0.1 ppm 以下) まで取り除く必要がある。アンモニア除去のために種々の塩化物 (ZnCl₂, MnCl₂, MgCl₂) が検討された。純度 99% の水素に不純物として存在するアンモニア (10000 ppm) は 0.1 ppm まで減少することが報告されている²⁵⁾。また、硫酸を使用することで 0.1 ppm 以下までアンモニアを除去できる²⁶⁾。化石燃料には石炭、石油、天然ガス等があげられる。これらの燃料の中で今後不足すると考えられるのは、世界のエネルギーに関するキャッシュフローの 70% を占める液体燃料の石油である²⁷⁾。アンモニアは持続可能な水素キャリア用液体燃料として期待できる。

4.3.2 エネルギーキャリア

アンモニアをエネルギーキャリアとして直接利用することも検討されている。天然ガスを用いた固体酸化物形燃料電池 (SOFC) には小規模分散型から、大規模火力代替システムまで高い発電効率が期待される。SOFC は運転温度領域が 700~1000℃ で作動する。この動作温度であればアンモニアを水素に分解が容易であり、Ni, Co などの卑金属触媒がアンモニア SOFC に利用できる²³⁾。発電所や、燃料電池を用いた駆動が困難であると予想されるトラック、航空機、船舶のような大型移動体では、アンモニアは直接燃焼により利用される。2014 年 9 月、福島再生可能エネルギー研究所と東北大学は灯油 30% 相当をアンモニアで置き換えた状態で燃焼し、21 kW のガスタービン発電に成功している²⁸⁾。平成 8 年に提出された WE-NET の報告書では、「水素キャリア」として、液体水素とアンモニアが比較検討された²⁹⁾。ここで、それぞれの輸送距離を 5000 km、水素燃焼タービンの発電出力を 1000 MW (100 万 kW) に設定されている。この出力は原子力発電所 1 基分に相当する。システム効率は、Table 3 に示すようにアンモニアは到着時点

Table 3. Preliminary calculation of energy balance.
(WE-NET : 1996)

Item		Liquid H ₂ system	NH ₃ system
Input electric energy		100	100
Energy after production		72.9	70.3
Energy loss by transportation (5000km)		(2.5)	(1.6)
Energy after transportation		70.4	68.7
Plant cost /hundred million yen		7409	5411
Energy generated (Efficiency: 60%) Combined Cycle	hydrogen carrier	42	32 H ₂ gas turbine
	energy carrier	H ₂ gas turbine (100-300MW)	41 NH ₃ gas turbine

で 69%, 液体水素が 70% であるから同程度であることがわかる。

水素製造設備から水素燃焼タービン発電までの設備費合計は、液体水素システムが約 7,400 億円、アンモニアシステムで約 5,400 億円である。アンモニアは約 -30℃ で輸送貯蔵が可能であるのに対して、液体水素では極低温であり設備に断熱構造が必要であることから割高となっている。アンモニアガスタービンが開発されれば、アンモニアをそのまま燃焼することができ、水素ガスタービンと同程度の効率 (41%) で電気エネルギーを利用可能である。さらに設備費も低くなり、アンモニアは液体水素に比べ低コストのエネルギーキャリアとして利用できる。

エネルギー白書 2014 によれば日本における乗用車とバスのエネルギー消費量は 14% 程度であり、すべてが燃料電池自動車やバスに置き換わったとしても、CO₂ の削減量は少ない³⁰⁾。一方、発電によるエネルギー消費量 (発電用エネルギー投入量/一次エネルギー国内供給量は全体の 40% 以上を占めており、CO₂ 削減効果は発電用にアンモニアを利用する方が大きいと考えられる³¹⁾。

5. ま と め

アンモニアは炭素原子を有さない水素化物の中で、唯一大量製造されている物質である。アンモニアサプライチェーンもすでに確立されており、水素エネルギーキャリアとしての可能性について既存の設備を流用して検討可能である。水素エネルギーキャリアに関する研究開発は内閣府、総合科学技術・イノベーション会議の SIP (戦略的イノベーション創造プログラム)「エネルギーキャリア」(管理人: JST) として 2014 年度から実施されており、2020 年の東京オリンピック・パラリンピックにおけるエネルギーキャリアを活用した水素社会の実証などを目標としている¹³⁾。将来、アンモニアが太陽

光・熱，風力，地熱等の再生可能エネルギーから製造され，ガスタービン発電機，SOFC，燃料電池自動車等の水素エネルギーキャリアとして利用されることを期待したい。

文 献

- 1) 小島由継：日本エネルギー学会誌 **93**, 7 (2014).
- 2) 小島由継，市川貴之：“吸着剤・吸着プロセスの開発動向”加納博文監修（シーエムシー出版，2014）p. 190.
- 3) Y. Kojima, H. Miyaoka and T. Ichikawa: “Advanced Materials for Clean Energy”, ed. by Q. Xu and T. Kobayashi (CRC, 2015).
- 4) 小島由継：まてりあ **52**, 333 (2013).
- 5) 水内 潔，武内 孝，福角真男，杉内正美，永井 宏：日本金属学会誌 **62**, 893 (1998).
- 6) A.K. Hill and L. Torrente-Murciano: Int. J. Hydrogen Energy **39**, 7646 (2014).
- 7) 岡田佳巳，斉藤政志，真壁利治：水素エネルギーシステム **31**, 8 (2006).
- 8) 主藤祐功，大久保 天，秀島好昭：化学工学論文集 **35**, 566 (2009).
- 9) 統計情報サービス：http://toukei-is.com/h/?p=281410000&f=06
- 10) 〈参考1〉燃料定数の設定方法：http://www.jari.or.jp/portals/0/jhfc/data/report/2005/pdf/result_ref_1.pdf
- 11) Ammonia New possibilities for hydrogen storage and transportation: http://www.elucidare.co.uk/news/Ammonia%20as%20H2%20carrier.pdf
- 12) 急性曝露ガイドライン濃度 (AEGL), Ammonia: http://www.nihs.go.jp/hse/chem-info/aegl/agj/ag_Ammonia.pdf
- 13) エネルギーキャリア 研究開発計画—内閣府：http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/4_ene kyari.pdf
- 14) H. Miyaoka, T. Ichikawa, N. Nakamura and Y. Kojima: Int. J. Hydrogen Energy **37**, 17709 (2012).
- 15) JFE ケミカル：https://www.jfe-chem.com/products/chemical/ammonium
- 16) 鉄鋼を支える石炭：http://www.jcoal.or.jp/coaldb/shiryō/material/20100301ccs_washio.pdf
- 17) 西澤勇志智：“化学新叢第二輯國策化学”（東京同文館，1940）.
http://www4.plala.or.jp/hinoyama/history/kokusaku kagaku/1-5.html
- 18) コークス炉増設事業に係る環境影響評価準備書（要約書）：https://www.city.kitakyushu.lg.jp/files/000078874.pdf
- 19) 小川 勝：燃料協会誌 **57**, 425 (1978).
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jie1922/57/6/57_6_425/_pdf
- 20) 第3節 一次エネルギーの動向：http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2012html/2-1-3.html
- 21) 新妻拓弥：水素エネルギーシステム **33**, 26 (2008).
- 22) 燃料電池車の開発状況：https://www.fujitsu-ten.co.jp/gihou/jp_pdf/40/40in.pdf
- 23) 江口浩一，小林秀昭：水素エネルギーシステム **38**, 214 (2013).
- 24) R. Halseid, P. J. S. Viel and R. Tunold: J. Power Sources **154**, 343 (2006).
- 25) B. A. van Hassel, J. R. Karra, J. Santana, S. Saita, A. Murray, D. Goberman, R. Chahine and D. Cossement: Sep. Purif. Technol. **142**, 215 (2015).
- 26) W. D. Scott and F. C. R. Cattell: Atmos. Environ. **13**, 307 (1979).
- 27) K. Lovegrove: CSIRO Solar Fuels Workshop, Wednesday 10 December, Grand Pacific Le Diba, Odaiba, Tokyo 2014.
- 28) ガスタービンでアンモニアを燃焼させる発電技術：http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2014/pr20140918/pr20140918.html
- 29) 各サブタスクの平成8年度の成果概要：http://www.ena.or.jp/WE-NET/report/1996/japanese/3_1.html
- 30) エネルギー白書2014：http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2014html/
- 31) 平成23年度(2011年度)におけるエネルギー需給実績(確報)：http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/totals_energy/pdf/stte_009.pdf