

海外水素調達時の水素キャリア候補の比較

Comparison of the feasibility of various hydrogen carriers transported from overseas for massive quantity and long distances

竹井勝仁*

1. はじめに

2017年12月に閣議決定された「水素基本戦略」⁽¹⁾では、水素を“我が国の一次エネルギー構造を多様化させ大幅な低炭素化を実現する手段”と位置づけ、2050年を視野に入れた大きな方向性やビジョンとともに、2030年までの行動計画が示された。水素の供給、輸送・貯蔵、利用を結ぶ水素チェーンのグローバルな枠組みとして、海外の一次エネルギーを利用し、大型船舶により長距離・大量輸送し、国内での火力発電用燃料に利用する構想がある。この水素調達量として、2030年には年間30万t（1GW発電相当）が目標値として掲げられている。

水素は長距離輸送・大量貯蔵する上で、重量密度は高いが体積密度に劣る欠点があり、そのため多くの水素キャリアが提案されている。大量に安定して安価に調達することが不可欠な火力発電用燃料に利用する場合の課題を、水素キャリア毎に抽出し、混焼発電利用など早期実用化の可能性を明らかにする必要がある。

本報告では、現在実証または事業検討の段階にある水素キャリアについて、火力発電用燃料として海外調達水素を利用するケースを総合的に比較し、早期実用化の可能性を評価した概要を紹介する⁽²⁾。

火力発電用燃料として使用する場合、発電規模に見合う大量供給が可能であること、その調達が安定に行われること、現在使用されている燃料（石炭、天然ガス、石油）と価格競争できる経済性があることが求められる。また発電時には、水素混焼／専焼のための燃焼器開発や逆火現象対策、NO_x低減対策、発電効率向上対策など多くの研究開発が課題としてある。本報告の検討対象は、海外での原料水素調達から水素キャリアへの変換、大量・長距離輸送により、国内発電利用前の貯蔵、水素への再変換ま

での範囲とした（但し後述する直接燃焼可能なアンモニア、メタンについてはその優位性を考慮している）。

経済性については、検討対象とする水素キャリアに現状の燃料に対する価格競争力はなく、2030年を想定する将来において、各水素キャリア間の予想価格比較により、その優位性を検討した。水素キャリアの俯瞰的な調査分析は、これまでにいくつか報告例がある⁽³⁻⁵⁾が、本報告は、現状技術と社会的インフラの整備状況を考慮し、早期実用化の可能性を検討した点に特徴がある。

2. 水素キャリア候補

大量のエネルギー媒体を長距離輸送・貯蔵するための重要な因子として、軽量・コンパクトさの指標となる重量・体積エネルギー密度が挙げられる。水素は常温・常圧で最も軽い気体（ $0.090 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ @273K）であるため、重量的には優れるが体積的に劣る致命的な欠点を持つ。これを克服するため様々な水素キャリアが提案されている。図1に水素キャリア候補の重量・体積水素密度を示す⁽⁶⁾。重量水素密度は水素を100%とした場合の含有水素の重量割合で、体積水素密度は100L中の水素重量として示されている。

現在、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が、水素社会構築技術開発事業／大規模水素エネルギー利用技術開発（2015-2021）の中で、具体的に実証事業を進めている液化水素、メチルシクロヘキサン以外に、水素キャリアとしては、アンモニア、メタンや水素吸蔵合金、無機系水素化物がある。重量水素密度としては液化水素が最大100%で、メタン25%、アンモニア17%

*一般財団法人 電力中央研究所 材料科学研究所

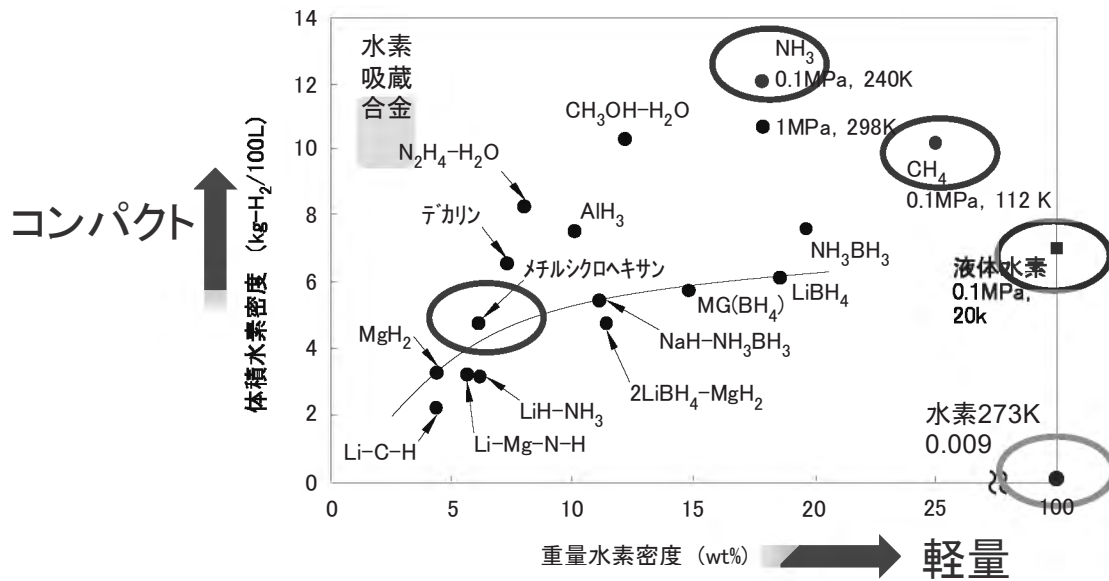


図1 水素キャリア候補の重量・体積水素密度⁽⁶⁾
(図中の線は水素化物の傾向を示している)

となり、体積水素密度はアンモニア、メタン、液化水素の順となる。また水素吸蔵合金は合金重量から重量水素密度は1.4-3.6%と低いが、体積水素密度は液化水素、メタンを上回る材料が報告されている⁽⁷⁾。この他ギ酸 (HCOOH)⁽⁸⁾ やメタノール (CH₃OH)⁽⁹⁾ も水素キャリアの候補となる。

以降は、現在実証段階にある水素キャリアまたは事業具体化検討 (FS) が進められている液化水素 (LH₂)、メチルシクロヘキサン (MCH)、アンモニア (g-NH₃ (化石原料起源アンモニアと区別))、メタン (g-CH₄ (天然ガス含有メタンと区別)) に絞る。

水素キャリアとしての評価は、重量・体積水素密度以外に、水素⇄キャリア変換時の効率、経済性、取扱い容易性 (輸送・貯蔵性)、爆発限界や燃焼速度などの物理的安全性、劇物・毒物としての化学的安全性があり、早期実用化の観点からはインフラの整備状況・既存設備の利用可能性も評価対象となる。

3. 各指標の評価結果

3.1. 輸送効率

上述の通り、重量水素密度は LH₂>g-CH₄>g-NH₃>g-MCH で、体積水素密度は g-NH₃>g-CH₄>LH₂>MCH の順位となる。これらは水素キャリアのみの評価で、この他に輸送時には、断熱材を含む貯蔵・輸送容器やボイルオフガスの再冷却・循環設備などが必要となる。ここでは、輸送船などを用いる大量輸送時に付帯設備の影響の小さい体積水素密度を重視して、g-NH₃>g-CH₄≧LH₂>MCH と評価した。

3.2. 水素エネルギー利用割合

図2に、化学熱力学計算より変換/再変換時の反応に伴う吸発熱を求めた結果を、水素熱量を100に規格化して示す。LH₂については理論的な最小液化仕事4kWh/kgを用いた。図より、化学反応により変換するg-NH₃、MCH、g-CH₄はいずれも発熱反応であり、その順に量は大きくなり、調達元で水素熱量を失うこととなる。すなわち、調達元で発熱により消失した熱量は利用先で使用できる水素熱量として用いることができない。

利用先では逆に水素再変換時に吸熱反応となるため、同量のエネルギー投入が必要である。一方、LH₂は調達元でエネルギー投入が必要であるが、利用先ではエネルギー投入が不要で、調達元で投入した冷熱の利用が可能となる。また発電利用の場合、g-NH₃、g-CH₄は直接燃焼が可能のため、利用先でのエネルギー投入が不要となるが、その場合水素燃焼に比べ利用できるエネルギーは小さくなる。

計算より求めた効率と実用時の効率は大きく異なる。LH₂は調達元で投入するエネルギーであるが、現状約3倍の投入エネルギーが必要である。利用先で冷熱として利用可能であるが、地球規模の環境性を考慮するLCA観点からは投入エネルギー減少が必要である。

化学反応を利用する他の3キャリアは、長距離輸送を前提とすると調達元での発熱分を利用できないため、計算値 (図2のg-NH₃: 89, g-CH₄: 78, MCH: 77) が最大水素エネルギー利用割合となる。

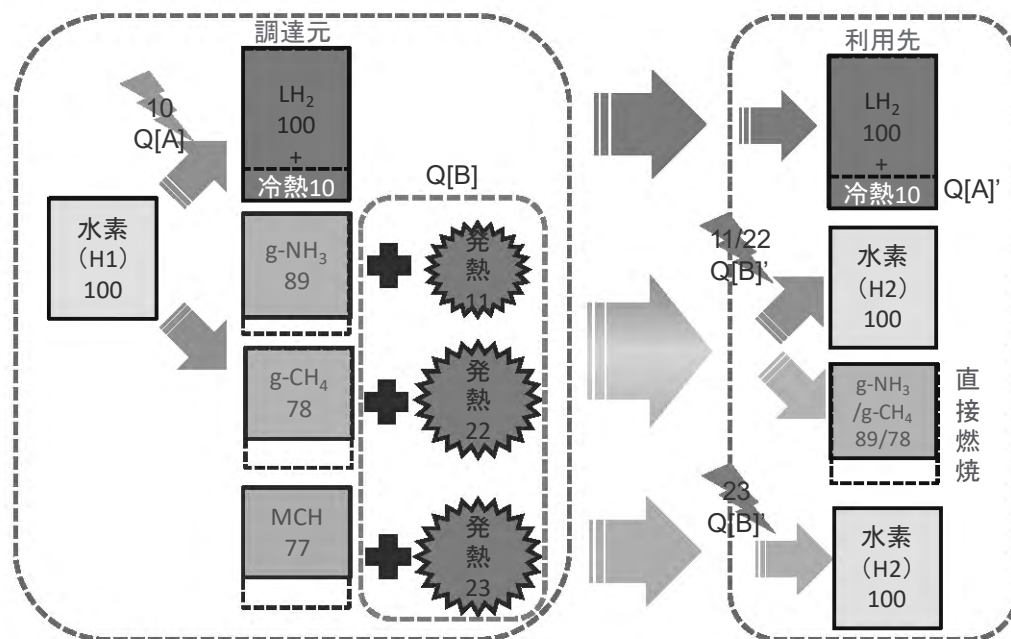


図2 各水素キャリアを用いた場合の調達元水素100とした水素エネルギー利用割合 (計算値)

表1 各水素キャリアの水素価格⁽¹⁴⁾

	国際輸送価格 (円/Nm ³ -H ₂)	国内輸送価格 (円/Nm ³ -H ₂) 50km	国際+国内輸送 50km価格 (円/Nm ³ -H ₂)	備考
LH ₂	37.54 [±7.51]	16.70	54.24	
MCH	21.56 [±4.31]	28.57	50.13	再水素化価格は国内輸送価格に含まれる
g-NH ₃	26.64 [±5.33]	21.08	47.72	再水素化価格は国内輸送価格に含まれる
g-NH ₃ 直接燃焼	25.30 [±5.06]	14.32	39.62	
g-CH ₄ 直接燃焼	21.64 [±4.32]	14.08	35.69 (40~53)	直接燃焼のみのためCCS分を加算(当所試算では+4~+17円)

[] 内は⁽¹⁴⁾の推定誤差, () 内は当所で計算した追加価格およびトータル価格

g-CH₄は、実証プラントでほぼ計算値78%に相当する反応効率が得られている⁽¹⁰⁾。g-NH₃は計算による損失量が小さいものの、実用時は54-87%と幅の大きい試算例がある^(4, 11-13)。MCHの実用レベルは不明で、さらに利用先で水素再変換23% (計算値)のエネルギー投入が不可欠のため利用先が限定される。

以上より、発電利用を想定した水素エネルギー利用割合の優位性を、直接燃焼可能との前提でLH₂>g-CH₄≧g-NH₃>MCHと評価した。調達元で変換時の発熱エネルギーは、水素化プラント運転に利用し損失を最小限に抑えることが望まれる。

3.3. 経済性

海外水素を調達するための各水素キャリアの経済性を同一条件で比較することは、困難である。その理由として、いずれも計画・実証段階の将来技術であり、①各キャリアに必要な設備や所要条件 (投入エネルギー源や温度領域) が異なること、②現状技術の成熟度、インフラ整備状況が異なり、将来予測が困難なこと、③物理的・化学的安全性が異なり、保安設備や緊急時対策が異なることなどが挙げられる。

本項では、既往のエネルギー総合工学研究所の評価結果を参考にした⁽¹⁴⁾。表1に結果をまとめて示す。水素原料価格は8.87円/Nm³で25億Nm³/年の水

表2 各水素キャリアの物性値
(¹⁵⁻²⁰ から引用, *値は文献により数値変動する)

	密度(g/cm ³)	沸点(°C)	爆発限界(%)*	引火点(°C)*	発火点(°C)*	最大燃焼速度(m/s)*
水素	0.090 × 10 ⁻³ @273K	-253	4-74	-157	530	2.91
液化水素	0.071@20K					
MCH (TOL)	0.769 (0.867)	101 (111)	1.1-7.1 (1.1-7.1)	4 (4)	480 (480)	—
アンモニア	0.682@240K	-33	16-25	132	651	0.09
メタン	0.423@111K	-162	5-15	-188	537	0.37

表3 各水素キャリアの既存インフラ整備状況および技術利用

水素キャリア	既存インフラ整備状況
LH ₂	インフラについては既存LNGと同様の構成とされているが、より低温であるため、例えば空気中の酸素結露による安全性の低下があり、輸送・荷役・貯蔵ともに要素技術を新たに開発する必要がある。
MCH/TCL	MCH(約5000t/年)、TOL(約160万t/年)国内生産。ローリーやケミカルタンカーによる輸送実績もある。
g-NH ₃	年間世界生産量18000万t、貿易量2000万t、国内生産量は86万t(輸入量は24万t)の実績あり。電気事業においても火力発電所排煙脱硝用途に年間数10万tが使用されている。
g-CH ₄	海外からLNGとして大量輸送されており、技術的に確立されており、インフラも整備されている。

素を海外から調達することを想定している。g-NH₃の直接燃焼とg-CH₄は、水素単価で表わすことができないが、比較のため水素熱量単位に換算されている。表には国内輸送50km時の価格を記した。既往評価結果⁽¹⁴⁾では50-200km国内配送時も計算されているが、輸送距離依存性は小さい。また、MCHの再水素化価格は国内輸送価格に含まれており、g-CH₄は直接燃焼のみで再水素化価格は示されておらず、利用後のCO₂回収・固定化価格が含まれていない。国内でのCCS追加価格については幅が大きい、4~17円/Nm³H₂(7,000~27,000円/t-CO₂)と推定した。

以上経済優位性は、当所分析結果を加味するとg-NH₃>MCH ≥ LH₂となるが、既往研究⁽¹⁴⁾での結果においても±20%の推定幅があり、さらにg-CH₄はCCS価格に不確定要素が大きいため、ここでは明確な優位性は判断しない。

3.4. 取扱い容易性(輸送・貯蔵性)・安全性

表2に各水素キャリアの物性値を示す。長距離を大量輸送するケースにおいて各キャリアともに、液体状態であることを想定しており、これより沸点が取扱い易さの目安となる。特にMCHは返送時のト

ルエン(TOL)とともに、-95~+100°Cの広い温度範囲で液体である。以上より、取扱い易さの優位性(輸送・貯蔵性)をMCH>g-NH₃>g-CH₄>LH₂と評価した。

安全性について、いずれの水素キャリアも状態に応じて高圧ガス保安法、消防法上の危険物の適用を受ける。さらに爆発限界や燃焼速度などの物理的安全性、劇物・毒物としての化学的安全性を考慮する必要がある。表2に示した物性値の中で、狭い爆発限界で高発火点のMCHとg-NH₃は物理的安全性で優位といえる。一方化学的安全性については、MCHとg-NH₃ともに毒物及び劇物取締法に劇物として規定されており、その他MCHの脱水素化物TOLは化学物質管理促進法(PRTR)の第一種特定化学物質に指定、悪臭防止法により規定されており⁽¹⁹⁾、g-NH₃は大気汚染防止法、水質汚濁防止法、悪臭防止法により規定されている⁽²⁰⁾。

以上安全性については、物理的安全性と化学的安全性で優位性の順は逆になった。両視点ともに保安上、事故想定時に重要な項目であり、ここではその優劣を判断できない。取扱い易さの優位性が安全リスク評価に影響することを考慮して、取扱い容易性

表4 各水素キャリアの相対評価まとめ
 ◎：他のキャリアに比べ優位，△：他のキャリアよりも劣位
 各水素キャリア間を比較したもので化石燃料との比較で優位性を評価したものではない

	輸送効率 (体積・重量 水素密度)	水素エネルギー 利用率	経済性(国内 配送50kmを含 むコスト)	取扱い容易性 (輸送/貯蔵 性)・安全性	既存インフラ 技術利用可 能性	特記事項(優 位性、課題な ど)
液化水素 (LH ₂)	・常圧ガスの 1/800 ・7kg/100L (20K,0.1MPa)	・製造時に30%(理 論は10%)相当の エネルギー投入が 必要	・54円/Nm ³ (2030年CIF目標 値30円/Nm ³)	・-253°Cの極低 温のため長期間 保存難	・新規インフラ必 要海上輸送・荷 役・貯蔵に技術 開発が必要	・投入時の冷熱 は国内で利用可 ・長期展望での 有力候補
有機ハイド ライド (MCH)	・常圧ガスの 1/500 ・5kg/100L (常温)	・脱水素時に吸熱 により76%(計算 値)に減少	・50円/Nm ³	・-95~100°Cで液 体で取扱い容易	・既存インフラ利 用可(大量では 新設必要)	・脱水素化時の エネルギー投入 とトルエン回収
アンモニア (g-NH ₃)	・常圧ガスの 1/1300 ・12kg/100L (240K,0.1MPa)	・脱水素時に吸熱 により89%(計算 値)に減少するが、 直接燃焼時は不要	・48円/Nm ³ ・40円/Nm ³ (直接燃焼利用 時)	・-34°Cで液化 ・少量で健康被 害	・既存インフラ利 用可(大量では 新設必要)	・水素から製造 時の高効率化 ・直接燃焼時の NOx低減対策
メタン (g-CH ₄)	・常圧ガスの 1/1100 ・10kg/100L (112K,0.1MPa)	・脱水素時に吸熱 により78%(計算 値)に減少するが、 直接燃焼時は不要	・40-53円/Nm ³ (利用時のCO ₂ 回 収・固定化価格 に大きく依存)	・-162°Cで液化	・既存インフラ利 用可	・製造時のCO ₂ 調 達と利用時の回 収、固定化は本 質的な課題
備考 (相対順 位)	・重量では LH ₂ >g-CH ₄ >g-NH ₃ >MCH 体積では g-NH ₃ >g-CH ₄ >LH ₂ >MCH ・輸送を考慮し て体積で評価	・LH ₂ 製造は海外エ ネルギー利用 ・海外輸送の観点 で、国内実用時は LH ₂ >g-CH ₄ ≥g-NH ₃ >MCH	・エネ総工研試 算[56]に追加分 析した結果 ・g-CH ₄ 利用時の 国内CO ₂ 回収・固 定化費用により 順位は大きく変 動	・取扱い容易性 では、 MCH>g-NH ₃ >g-CH ₄ >LH ₂ ・物理的/化学的 安全性は一長一 短あり	・早期実用化の ためのインフラ 整備状況は g-CH ₄ >g-NH ₃ ≥MCH>LH ₂	・全体的には g-NH ₃ のバランス が良い ・長期的にはLH ₂ が有望 ・MCHは排熱利 用の限定

(輸送・貯蔵性)，安全性の優位性をまとめて MCH > g-CH₄ > g-NH₃ ≥ LH₂ とする。

3.5. 既存インフラ利用技術

早期実用化の可能性を判断する上で、既存インフラ整備状況およびその技術の利用可能性を検討する必要がある。表3に現状のインフラ整備状況をまとめた。g-CH₄はLNGの既存インフラを利用できる点で新たな技術開発要素はなく、量的にも8,500万tのLNG調達実績⁽²¹⁾から、競争力があれば新たなエネルギー源として既存LNGに置き換わると考えられ、問題ない。

MCHについては、その生産量(MCHの脱水素化合物TOLの世界生産量2,380万t、国内需要120万t/生産量180万t⁽²²⁾)から十分な実績があり、相応の貿易輸送力があると推定される。岡田はMCH/TOLについて、積載量44,000tクラスのケミカルタンカーで海上輸送が行われており、将来20万t以上の大型タンカーの輸送が経済的に有利になるため、IMO(国際海事機構)の認可が必要であると報告している⁽¹⁹⁾。g-NH₃についても年間24万tの輸入量⁽²³⁾からほぼ同様と考えられる。

これより両キャリアともに、輸送、積荷/揚荷設備、貯蔵タンク、国内配送手段などの技術は確立されていると推定されるが、火力発電での燃料利用により、CO₂排出削減に明確な効果が得られる量の調達としては、不十分である。例えば、大型火力発電所で脱硝用途に使用されるアンモニア量は1,000t

／年レベルであるが、熱量比10%の混焼を仮定すると、100倍以上必要と試算される⁽²⁰⁾。海外調達輸送力増強とともに、受入れ後の各設備(気化器、再液化設備、払出し設備、除外設備など)の大規模化とその技術検討が必要である⁽²⁴⁾。導入初期には規模が異なるものの、利用側の電気事業者にとって使用実績のあるg-NH₃がMCHよりも早期実用化の可能性は大きいと判断した。一方LH₂については、海外調達実績はなく、技術開発要素も多い。2017年にIMO委員会において日本提案の液化水素運搬に関する安全基準案が承認され、今後積荷国・揚荷国・船籍国間でのトリバタイト合意を得る必要がある⁽²⁵⁾。これより、早期実用化可能性(既存インフラ利用)の優位性を、g-CH₄ > g-NH₃ ≥ MCH > LH₂ と評価した。

4. 総合評価

第3章の各評価項目の評価結果をまとめて表4に示す。表中の◎、○、△は4キャリア候補の中での相対評価であり、特に優位性が認められるものを◎、他のキャリアに比べて劣位にあるものを△とした。その差分を議論する上で必ずしも客観性を満足していないが、各キャリアの現状を傾向として把握するため示した。繰り返すが、ここでは海外調達水素を国内で火力発電用燃料として使用する場合の早期実用化を大前提としている。また経済性については、各水素キャリアともに推定誤差が大きく、特に

g-CH₄の国内回収・固定化費用の推定に大きな幅があるため、表中には試算・検討結果のみ示し評価しなかった。

各水素キャリアともに、優位な評価項目があるが、全体的には直接燃焼を前提としたg-NH₃のバランスが良い。g-CH₄も同様にバランスが良いが、火力発電用燃料として燃焼後のCO₂回収設備追加・貯留適地の選定・確保などの課題は、早期実用化の視点からは根本的な課題として残る。

LH₂は、液化・輸送/貯蔵・荷役において、技術開発・新規インフラ整備が必要である。但し、大量のエネルギー輸送において国内での消費エネルギーが不要な点は優位で、長期的には最有力候補と期待される。MCHは利用先で排熱を有効活用できれば、水素エネルギー利用割合が向上する。また取扱い容易性が他キャリアに比べ格段に優れているため、エネルギーセキュリティのための国家備蓄用途なども考えられる。

参考文献

- 1) 経済産業省：水素基本戦略，平成29年12月26日。
- 2) 竹井 勝仁，山本 博巳，森 昌史，永田 豊，市川 和芳，西 美奈，池川 洋二郎：海外水素調達時の水素キャリア候補の比較（2018年度調査），電力中央研究所報告 Q18Q005，2019年4月。
- 3) 水野有智，石本祐樹，酒井奨，坂田興：国際水素エネルギーキャリアチェーンの経済性分析，エネルギー・資源学会誌，38(3)，pp.11-17(2017)。
- 4) 水素利用等先導研究開発事業/エネルギーキャリアシステム調査・研究/エネルギーキャリアシステムの経済性評価と特性解析(平成28年度2月)，独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 委託先一般財団法人 エネルギー総合工学研究所。
- 5) 水素利用等先導研究開発事業/トータルシステム導入シナリオ調査研究(平成28年度3月)，独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 委託先国立研究開発法人 産業技術総合研究所。
- 6) (原図) 小島由継：水素キャリアとしてのアンモニア，一般社団法人日本エネルギー学会水素部会，「エネルギー学」部会アンモニアシンポジウム，2016.1.14.に加筆。
- 7) 秋葉悦男：水素エネルギーシステム Vol. 31, No. 2 (2006)。
- 8) M. Iguchi, Y. Himeda, Y. Manaka, K. Matsuoka and H. Kawanami, ChemCatChem. Vol. 8, No. 5, pp 886-890 (2016)。
- 9) P. Moser, S. Schmidt, K. Stahl and G. Wiechers, VGB Congress, 13th Sep. 2018 Munich.
- 10) 水素利用等先導研究開発事業/エネルギーキャリアシステム調査・研究/高効率メタン化触媒を用いた水素・メタン変換(平成30年度2月)，国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 委託先一般財団法人 日立造船株式会社。
- 11) G. Soloveichik, NH₃ Fuel Conference 2016, 16th Sep. 2016.
- 12) 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術(WE-NET)，平成8年度報告書。
- 13) Power to Ammonia, ISPT (Institute for sustainable process technology), 2017.
- 14) エネルギー総合工学研究所：メタネーションによる合成メタンの経済性評価の調査報告書～国内配送～，2018年8月。
- 15) NEDO 水素エネルギー白書2014，独立行政法人 新エネルギー産業技術開発総合機構。
- 16) 小島由継：J. Jpn. Inst. Energy, Vol. 93, N. 5 2014.
- 17) TIIS ニュース，No.245 公益財団法人産業安全技術協会2011年7月5日発行。
- 18) <https://www.fintech.co.jp/etc-data/bakugen-data.htm>
- 19) 岡田佳巳：水素エネルギーシステム Vol.35, No.4 (2010)。
- 20) SIP 終了報告書：エネルギーキャリア/アンモニア直接燃焼/既設火力発電所におけるアンモニア利用に関する検討(一般財団法人電力中央研究所)，(平成27年4月1日～平成31年3月31日)。
- 21) エネルギー総合工学研究所：メタネーションによる合成メタンの経済性評価の調査報告書，2018年2月。
- 22) 世界の石油化学製品の今後の需給動向 [対象期間：2007～2020年]，平成28年7月，経済産業省製造産業局素材産業課。
- 23) 日本肥料アンモニア協会ホームページ (<http://www.jaf.gr.jp/>)
- 24) 谷川博昭：公益財団法人 原総合知的通信システム基金主催特別セミナー「水素発電，アンモニア利用の可能性と事業動向」講演資料(2018

年7月5日).

- 25) 西村元彦：一般財団法人 日本電機工業会 燃料電池発電システム専門委員会, 第96回新エネルギー講演会「水素基本戦略における燃料電池の位置づけと水素サプライチェーンの取組み」講演資料 (2018年9月6日).

著者略歴



1986年慶応義塾大学大学院工学研究科応用化学修士課程修了。同年(財)電力中央研究所入所。リチウム電池の材料開発・性能評価, 新規水素製造法の開発に従事。2004～2005年にノルウェー工科大学(NTNU)客員研究員を兼務。同所材料科学研究所エネルギー変換・貯蔵材料領域リーダー, 副所長を歴任, 研究参事。工学博士。