

# カーボンフリーのためのエネルギー供給

樋口 善彦\*

## Energy Supply Chain for Carbon-Free Technology

Yoshihiko HIGUCHI\*

**Synopsis:** It is necessary to reduce the emission of greenhouse gas because global warming resulting from carbon dioxide in the atmosphere leads to serious social loss through global climatic shifts. Efforts for storing CO<sub>2</sub> deep in the ground and obtaining energy from sustainable method other than fossil resource are proceeding, but there are some problems associated with storage and transfer of CO<sub>2</sub> and conversion of sustainable energy to stable energy carrier, for example, hydrogen and its compounds. In the present report, the technologies of solving the problems are introduced.

(Received Sep. 16, 2021)

**Key words:** carbon capture and storage, sustainable energy, hydrogen, biomass

### 1. 緒 言

国連で採択された持続可能な開発目標 (SDGs : Sustainable Development Goals) は 17 のグローバル目標を掲げており, その一つに気候変動の抑制がある<sup>1)</sup>. 気候変動に及ぼす影響の中で近年注目されているのは温暖化ガス(GHG: Green House Gas)である CO<sub>2</sub> の大気中濃度である. 現状, 地下にある化石資源である石炭や石油, 天然ガスを利用する際に大量の CO<sub>2</sub> を大気へ排出しているため, 大気中 CO<sub>2</sub> 濃度が上昇を続けており, 地球の温暖化を含む気候変動に大きな影響を与えている. したがって, 今後 CO<sub>2</sub> の大気への排出量を大幅に低減することが求められている.

化石資源は化学製品の原料である一方, エネルギー源でもあり, 人類が生産活動する際に CO<sub>2</sub> の発生は避けられない. そこで, 発生した CO<sub>2</sub> の排出量を低減する方法がいくつか考案されている. 例えば, 排ガスから CO<sub>2</sub> を分離して深い地層に貯留す

有効利用する, などである. さらに, CO<sub>2</sub> の発生量を大幅に抑制するためには, 化石資源に依存しない再生可能エネルギーの活用が不可欠である. 再生可能エネルギーは従来からある水力発電の他に, 太陽光発電, 風力発電, によって供給することが可能である.

しかし, 日本地理的な制約があり, 現状で実現可能性が高い再生可能エネルギーの整備だけでは, 国内のエネルギー需要を確実に満足させることができないかどうかについては, 不確実な要素がある. また, 欧州は中心に議論されている炭素税の影響が増大する可能性もある. したがって, カーボンフリー時代に対応した将来技術を構築する必要がある. 本稿では, 現在準備が進められている将来技術の内容を紹介する.

### 2. 二酸化炭素分離・貯留・輸送

産業界で CO<sub>2</sub> との発生を抑制することは当然だが, ゼロにすることは困難であるため, 発生した CO<sub>2</sub> を貯留あるいは利用する CCSU(Carbon Capture Storage and Utilization)が必要となる. また, 排出ガスは CO<sub>2</sub> 以外に複数のガス種を含ん

\* 産業技術短期大学教授 博士 (工学) 機械工学科  
る, 何らかのエネルギーを用いて CO<sub>2</sub> を改質して

でいるため、CO<sub>2</sub>を分離する操作も必要である。まず、CO<sub>2</sub>分離技術については、物理的作用を利用する物理吸収、物理吸着、膜分離があり、その他に化学的作用を利用する化学吸収、固体吸収がある。CO<sub>2</sub>含有ガスが高圧で供給されていれば、物理的作用を利用する物理吸収や物理吸着が有利である。さらに膜分離では透過膜を利用するだけでありエネルギーおよびコストを低減することができる。CO<sub>2</sub>含有ガスが低圧で供給される場合は化学的作用を利用する化学吸収が有利である。化学吸収では、CO<sub>2</sub>を液体のアミン化合物に吸収させた後、加熱して液体を蒸発させてCO<sub>2</sub>を放出させて再生する。蒸発に必要なエネルギーを低減することが低コスト化に要求されている。それを実現することが期待されているのがアミンを含む固体吸収材<sup>2)</sup>を用いる方法である。固体吸収材は比熱が小さい多孔質体の表面にアミンを塗布して使用するため、少ないエネルギーで再生することができる。日本で開発中の技術は移動層タイプであり、吸収ゾーンでCO<sub>2</sub>を吸収した固体吸収材を回収ゾーンに移動させてCO<sub>2</sub>を放出させるため装置の小型化、および、保守の容易化が可能である。2022年にパイロット設備での試験を開始し、2024年には大規模製造技術を確立して、2030年に3000t/day規模でCCSに適用する計画である。さらに、工場等の排ガスではなく大気中CO<sub>2</sub>を回収するDAC(Direct Air Capture)を狙った技術開発も進められている。

日本では、北海道苫小牧市における2016年から2019年の実証実験で累計30万トンのCO<sub>2</sub>が海底の遮蔽層を有する貯留層に圧入された<sup>3)</sup>。製油所から供給される排ガスをパイプラインで輸送し、上述したCO<sub>2</sub>分離・回収技術で得たCO<sub>2</sub>を最大23MPaまで昇圧し、陸上から海底に向けて圧入井を介して導入した。その後、CO<sub>2</sub>漏洩を監視するモニタリングが継続的に行われているが、深度5弱程度の地震発生時にも異常は検知されていない<sup>4)</sup>。

また、海外でも海底あるいは地底へのCO<sub>2</sub>の貯留が推進されている。原油生産では油井にCO<sub>2</sub>を圧入する原油増進回収技術(EOR: Enhanced Oil Recovery)を適用することで原油回収効率の向上が可能であるという事情もあり、産油国では積極的にCO<sub>2</sub>貯留が行われてきた。一方、2010年以降に計画されたCCSのプロジェクトの中には収益の不確

実性や貯留地の確保の難しさのために原油価格の変動が原因で中止・中断されたものもある。このような状況の中でも比較的順調に進められている大型プロジェクトにLongshipがある。LongshipはノルウェーがCO<sub>2</sub>を北海沖の海底下2600mの貯留層に圧入する政府プロジェクトであり、将来の国外からのCO<sub>2</sub>受入れも含めて収益性を確保する予定で2024年に操業を開始すべく準備が進められている<sup>5)</sup>。

CO<sub>2</sub>の分離は発生地域の近傍で実施するのは当然であるが、CO<sub>2</sub>の貯留地域あるいは利用地域が離れている場合は輸送する手段を検討する必要がある。

CCSUで貯留されるCO<sub>2</sub>は必ずしも近場で発生するとは限らず、貯留設備までの長距離を輸送する必要が生じる。前述のノルウェーのLongshipプロジェクトでは、遠方で発生するCO<sub>2</sub>は液体状態で船舶輸送することが想定されており、そのための技術開発も進められている<sup>6)</sup>。

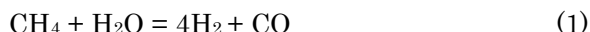
同様に、日本でも液体CO<sub>2</sub>を船舶輸送する技術開発が推進されている。日本CCS調査を始めとする産官のグループが2021年6月にNEDOの公募事業「CCUS 研究開発・実証関連事業／苫小牧におけるCCUS 大規模実証試験／CO<sub>2</sub>輸送に関する実証試験」に採択された<sup>7)</sup>。この実証実験では、液化CO<sub>2</sub>を実際に船舶で輸送するとともに事業性が検討される予定である。

### 3. 水素製造

太陽光や風力などの再生可能エネルギーは、発電量の時間変動が急激で、かつ、大きいという性質もっている。そのため、エネルギーキャリアとして水を電気分解して得た水素を貯蔵・運搬して必要な時に燃料電池や火力発電により電力を供給することが望まれている。水素製造を目的としないプロセスで副次的に水素が生成する鉄鋼業のコークス炉や化学プラントでは、安価に水素を得ることができる。例えば、岩谷産業は電解ソーダで副生する高純度の水素から液体水素を製造しており、北九州エコタウンでは日本製鉄の製鉄所から副生する水素が利用されている<sup>8)</sup>。ただし、生成量は本来の目的生産物の量に左右されてしまうため、大量の水素を安定的に供給しようとする水素製造自体を目的と

するプラントが必要になる。

安価な水素製造プロセスには、炭化水素や CO ガスを水蒸気と反応させる水蒸気改質があるが、反応生成物として最終的に地球温暖化ガスである CO<sub>2</sub> が発生するため、実際に利用する場合は CCSU などと組み合わせる必要があり、トータルコストが高くなる恐れがある。



上記の問題を回避できる方法には、水の電気分解があり、アルカリ水電解と固体高分子の 2 つの方式に大別される。前者は、水酸化カリウムや水酸化ナトリウムの強アルカリ溶液を電気分解する方式であり、水素生産能力が 1000 Nm<sup>3</sup>/h 超と高めることができる。後者は電流密度を高くできるため小型化が可能であるが、水素生産能力が 50Nm<sup>3</sup>/h との小規模であり、材料費が高くコストの点が現時点での課題である。旭化成は NEDO の「再エネ利用水素システムの事業モデル構築と大規模実証に係る技術開発」事業で世界最大規模(2019 年当時)の電解電力 10MW、水素生産量 2000 Nm<sup>3</sup>/h の能力を有するアルカリ水電解装置を製作し、福島水素エネルギー研究フィールド(FH2R)で水素の製造を開始している<sup>9)</sup>。

最近、ドイツではノルトライン・ウェストファーレン州オーバーハウゼン市に電解電力が 30MW クラスの電解槽を設置する計画が国家水素戦略の一環として政府の補助金を受けることが決定され、2023 年に稼働開始すると報道されている<sup>10)</sup>。

#### 4. 液化水素

製造時の水素は気体の状態であるが、気体水素は単位体積当たりのエネルギー密度が低いため、エネルギーキャリアとして利用する場合には圧縮水素ガス(CHG: Compressed Hydrogen Gas)か液化水素(Liquefied Hydrogen)の形態で貯蔵や輸送することが求められる。水素の沸点は-252.7℃であり、液化には絶対温度 20.4K の超低温状態が必要であるため、トヨタが販売しているミライのような燃料電池車では 70MPa の高圧タンクが利用されている。しかし、大量の水素を貯蔵あるいは輸送する際の設

備や効率を高めるためには、気体水素の体積を 1/800 にできる液化水素の方が有利である。

水素供給コストは 2030 年時点で 30 円/Nm<sup>3</sup> の目標が設定されていることを考慮すると、現状の液化コスト 33 円/Nm<sup>3</sup> を 10 円/Nm<sup>3</sup> 程度まで大幅に低減させる必要がある。従来の液化水素の製造方法は気体圧縮を用いており、液化効率の実績は 20～30% である<sup>11,12)</sup>。一方、圧縮機を使わず磁性体のエントロピー変化による吸熱を利用する磁気冷凍は液化効率を 50% 以上に高められる可能性があり、産官学による共同開発が進められている。

一方、液化水素を船舶で長距離輸送する技術の開発も進められている。オーストラリアのビクトリア州で豊富に産出される褐炭をガス化し水蒸気との反応によって生成した水素を液化し日本へ輸送するプロジェクトが進められている。水素生成時に発生する CO<sub>2</sub> はオーストラリア国内での CCSU を利用して大気へ放散させない。川崎重工で製造される液化水素運搬船(船名: すいそふろんていあ)には公開中の水素の蒸発を考慮した設計圧力の真空断熱タンク(1250m<sup>3</sup>×2 基)が搭載され、ガス放散なしの航海が 3 週間可能である。蒸発(ボイルオフ)したガスを推進エンジンの燃料にする液体天然ガス用の LNG 運搬船とは異なり、ディーゼル発電機に基づく電気推進方式である<sup>13)</sup>。

千田らは、遠隔地から輸送された液化水素は船舶と港湾基地間を移送するローディングアームを開発している<sup>14)</sup>。係留中の船は位置が一定ではなく、アームはスィベルジョイントが使われるために断熱状態を維持できない箇所が生じ、アーム表面温度が空気中の酸素の融点(-218℃)以下になる恐れがある。その場合、いったん生成した固体酸素が通水素後の温度上昇で液化して燃焼する可能性があるため、あえて酸素の沸点(-183℃)以上になるような構造を採用している。この他にも各種の安全対策が施されている。

上述のように移送された液化水素はタンクに収容される。大江らは、従来の液化水素タンクは宇宙ロケット用途が多く、国内では約 500m<sup>3</sup>、海外でも 3000m<sup>3</sup> 程度と規模が小さかったのに対し、水素発電用途では大容量のタンクが想定されるため、LNG タンクの断熱性能を 10 倍に高めた 10000m<sup>3</sup> 規模の平底円筒タンクを開発している<sup>15)</sup>。

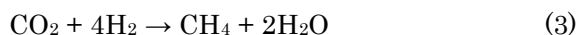
## 5. 有機ハライド

前節で述べた液化水素は有効なエネルギーキャリアであるが、極低温での液化設備と液化を維持した状態で輸送する手段が必要であることから、取り扱いが容易な媒体を利用することが検討されており、その媒体の候補の一つに有機ハライドがある。水素とトルエン(TOL: Toluene)との反応によって生成するメチルシクロヘキサン(MCH: Methylcyclohexane)は常温常圧で液体状態が維持され、危険物区分はガソリンと同じであり、既設の設備や輸送手段を用いてハンドリングが可能である。輸送されたメチルシクロヘキサンは触媒を用いて高効率に脱水素されて高純度の水素とトルエンになり、トルエンは再利用される<sup>16)</sup>。千代田加工建設は2013年に子安オフィス・リサーチパークで実証試験に成功したと報告している<sup>17)</sup>。また、同社は2015年にNEDOの水素社会構築技術開発事業の助成を受けて、ブルネイから液体のメチルシクロヘキサンを常温・常圧で輸送し、川崎市で脱水素処理により得た水素ガスを発電設備に供給する水素サプライチェーンの実証試験で目標を達成したと報告している<sup>18)</sup>。

なお、メチルシクロヘキサンとそれを脱水素してできるトルエンの漏洩による健康被害の懸念が存在する。吉田らは、これらの有機化合物が輸送タンクローリーからタンクへ移送時に大気に排出される量と周辺住民に及ぼす影響を評価した結果、健康リスクは十分に小さいと報告している<sup>19)</sup>。

## 6. メタネーション

液化水素よりも取り扱いが容易な水素キャリアーの候補にはメタンがあり、再生可能エネルギーで得た水素をCO<sub>2</sub>と反応させメタンを合成するメタネーションが注目を集めている。



メタネーションで製造したメタンは既存の都市ガスのインフラやユーティリティを活用することができ、導入のハードルが低くできるという利点がある。生成したメタンをガス火力発電で使用し、その排ガスから分離したCO<sub>2</sub>をメタネーションに使

用すれば、CO<sub>2</sub>は循環利用され外部に排出されないカーボンリサイクルが成立する<sup>20)</sup>。

このメタネーション技術はNEDOのCO<sub>2</sub>有効利用技術開発事業として、国際石油開発帝石と日立造船のグループが受託してプロセス運転マネジメントやプロセス適用性・経済性評価が行われている<sup>21)</sup>。

村田らは再生可能エネルギーを基にした水素と産業界から排出されるCO<sub>2</sub>からメタネーション技術で製造したメタンを船舶燃料として利用した場合の試算を行い、他のゼロエミッション燃料と同等の効果をもたらすと報告している<sup>22)</sup>。

海外では、すでにメタネーションが商業利用されている例もある<sup>20)</sup>。ドイツの自動車メーカーであるAudiは2013年から合成したメタンを圧縮天然ガス(CNG: Compressed Natural Gas)で走る自動車向けに供給している。フランスのGRTgaz社は2018年から25Nm<sup>3</sup>/hの設備でメタン製造を開始している。

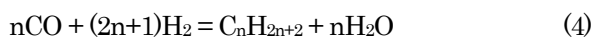
東京ガスは2021年7月に、再生可能エネルギー電力を使った水電気分解で得た水素を各種排ガスから分離したCO<sub>2</sub>と反応させてメタンを生成させる実証実験を開始すると発表している<sup>23)</sup>。

西村らはメタネーション技術と水素製造に必要な再生可能エネルギーを風力発電とを組み合わせたアイデアを提起している<sup>24)</sup>。風況的に有利なアルゼンチンのパタゴニア地方で大規模風力発電を行い、その電力で得た水素と日本からタンカー輸送で持ち込む液化CO<sub>2</sub>とでメタネーションさせるというもので、その試算によれば日本の輸入LNG量の2.2倍の量を液化メタンとして供給可能であるとしている。風車やタンカーへの投資額が回収できるかどうかは仮定の置き方によって大きく変化するため、実現可能性については明らかではないが、海外からの再生可能エネルギー供給方法の一つの手段と考えることができる。

## 7. 合成液体燃料

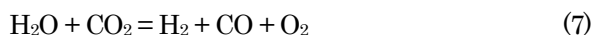
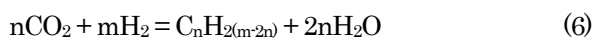
合成液体燃料は、CO<sub>2</sub>など炭素含有物と水素から作られる燃焼用途の液体炭化水素または液体アルコール(メタノールを転換したガソリン等を含む)であり、再生可能エネルギーで得た水素を使う場合は特にe-fuelと呼ばれる場合もある<sup>25)</sup>。気体燃料

であるメタンよりも単に体積当たりのエネルギー密度が高く、既存のインフラをほぼそのまま活用できるという利点を有する。従来の製造方法は反応式(4)を利用するフィッシャー・トロプシュ (FT: Fischer-Tropsch)法が一般的である。反応に必要な CO を CO<sub>2</sub> と水素の逆シフト反応 (式(5))で生成させる方法があるが、効率やコストの点で課題があった。



最近では小藤ら<sup>26)</sup>が CO<sub>2</sub> を直接還元する電解セルを開発しており、今後の大容量化や長寿命化による実用化が期待されている。

一方、反応式(6)で表されるように、CO を介さずに CO<sub>2</sub> から直接的に炭化水素を生成するの直接合成(Direct FT)法、水電解と CO<sub>2</sub> 電解を共に行い反応式(7)を利用する今日電解法が提案されており、研究の進展が期待される<sup>25)</sup>。



## 8. アンモニア燃料

前節では再生可能エネルギーで得た水素から化学反応によって化合物を生成し燃料に変換する例としてメタンを取り上げたが、アンモニアに変換する技術も注目されている。アンモニアを燃料として利用する場合には、いくつかの課題がある。その課題の一つに、発電用アンモニアを大量かつ低エネルギーで生産できる効率的な製造方法の確立がある。現状のアンモニア生産量は世界で年間 1.8 億トンであり、ハーバー・ボッシュ法によって製造されている。この方法は概ね 500°C、30 MPa という高温高压下で水素と窒素を接触させ、 $\text{N}_2 + 3\text{H}_2 = 2\text{NH}_3$  の反応によってアンモニアを発生させる。この水素は再生可能エネルギーで得た電気で水を分解して得るのはメタン製造と同じであるが、アンモニア製造法であるハーバー・ボッシュ法で必要とされる高温高压環境を得るためのエネルギーも別途必要になる。アンモニア生成反応は発熱反応であり、熱力学的には低温ほど反応

は進むはずであるが、低温では反応速度が低いことから高温状態をつくる必要があり、エネルギー消費量が多い。そのため、現在では低温で反応速度を高める触媒に関する研究が各所で取り組まれている。触媒材料としては貴金属のルテニウムが有望視されている<sup>27)</sup>。

最近では高性能な触媒として 50°C未満でアンモニアを合成できる触媒として、ルテニウムのナノ粒子と水素化フッ化カルシウム(CaFH)の複合材料が提案されている<sup>28)</sup>。さらに、ニッケル(Ni)と窒化ランタン(LaN)を組み合わせた触媒が示され、高価な貴金属であるルテニウムを使わずにアンモニア合成が可能になることが示された<sup>29)</sup>。

## 9. バイオマス燃料

前述した DAC(Direct Air Capture)は工学的見地から大気中 CO<sub>2</sub> を回収する技術であるが、この回収機能は従来から植物の光合成が担っている。例えば、国内で発生する未利用間伐材等のほとんどは既にバイオマス発電の燃料として利用されており、年々増加しているバイオマス発電量をまかなうために、PKS(Palm Kernel Shell)と呼ばれるパームヤシ種殻、木質ペレット、木質チップがバイオマス燃料として輸入されている<sup>30)</sup>。このうち、PKS は約 8 割がインドネシアから、約 2 割がマレーシアから、木質ペレットは約 6 割がベトナムから、約 3 割がカナダから、10%弱がマレーシアから輸入されている。木質チップは製紙原料としても使われており、バイオマス燃料としての利用量が明らかではないため、ここでは言及しない。少なくとも PKS と木質ペレットの年間輸入量は増加し続けており、輸入量はいずれも 200 万トンを越えている。

林業から出た間伐材などを利用する地消地産の発電方式と認識されることが多いが、すでに国内で算出されるバイオマス燃料では不足しており、燃料自給率は今後低下していくと考えられる。

資源エネルギー庁のホームページで紹介されているバイオマスには、(1)林地残材や未利用間伐材、製材屑、(2)牧場内の牛糞を発酵させて得たメタンガス、(3)下水汚泥と生ごみから発生するメタンと残渣から得た固形燃料、(4)食品工場の生ごみと排水汚泥由来のメタン、(5)木質ペレットとパームヤシ種殻 (PKS: Palm Kernel Shell)、(6)間伐材など、

がある<sup>31)</sup>。

なお、現時点でバイオマス燃料として最もよく利用されてきたのは木材チップであるが、近年増加しているのが木材ペレットとパームヤシ種殻であり、池らは、いずれも2023年には30%近いシェアになると推定している<sup>32)</sup>。

発酵により生成したメタンを利用する場合を除いて、固体燃料であるバイオマスを使った発電では無水ベースで燃料の0.5~12質量%(DB: Dry Basis)程度の燃焼灰が発生するといわれている<sup>33)</sup>。

ただし、バイオマスの種類によって配分は大きく異なる。池らによれば、現時点で最もシェアの高い木材チップの配分1.3%に対し、パームヤシ種殻の配分は3.5%と2倍以上あるため、バイオマス燃焼灰に占めるパームヤシ種殻の燃焼灰の比率は63%に到達する<sup>32)</sup>。したがって、将来発生する燃焼灰の特性を把握して、有効な利用・処理方法を今から検討しておく必要がある。

本章の冒頭で述べたように、本来のバイオマス発電はエネルギーの地産地消を念頭においたものであった。しかし、パームヤシ種殻は産出地のアジアから輸送されるために、もはや地産地消エネルギーや循環社会の枠組みから外れたものであり、輸送時のCO<sub>2</sub>発生量なども考慮して総合的判断を加えて利用していく必要があると考えられる。

ここまで述べたバイオマスは陸生植物を基にしたものであるが、水中において太陽光エネルギーを使って大気中のCO<sub>2</sub>を吸収して油脂を生成する藻類を活用する動きも活発化している。油脂を高効率で生成し、かつ、増殖速度の速い藻類の中でもボツリオコッカスは炭化水素の含有率が高いことが知られている。IHIは2015年に品種改良に取り組み、NEDOの委託事業「戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業」で屋外大規模培養に成功し<sup>34)</sup>、2020年にはバイオジェット燃料の国際規格「ASTM D7566 Annex7」を取得した<sup>35)</sup>。また、従来の課題だった油脂抽出に必要なエネルギーの低減や抽出残渣の有効活用法についても検討されている<sup>36,37)</sup>。また、炭水化物の形でエネルギーを蓄えるユーグレナ(和名:ミドリムシ)は古くから研究開発が進められていたが、実用化には至っていなかったが、2005年に大量培養が可能となり、バイオ燃料の原材料としての研究開発が進められ<sup>38)</sup>、

2016年には品種改良によって従来よりも多くの油脂を含有させることに成功している<sup>39)</sup>。さらに、2021年にバイオジェット燃料の国際規格 ASTM D7566 Annex6 規格に適合した<sup>40)</sup>。

## 10. 結 言

本稿では、脱炭素化社会に向けて研究開発や実証実験が進められているプロジェクト等を紹介・説明した。その中には、CO<sub>2</sub>分離・貯留・輸送技術、水素製造、エネルギーキャリアに関わる液化水素、有機ハライド、メタネーション、合成液体燃料、アンモニア燃料、さらには植物を利用したバイオマス燃料、が含まれるが、現時点でどの技術がカーボンフリーの主流の技術になるかは判断できない。しかし、2050年の実質的な二酸化炭素排出量ゼロの社会を実現するためには、どの技術であっても対応できる準備をしておかなければならない。

## 参考文献

- 1) 持続可能な開発目標 SDGs とは、<<https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/about/index.html>>,(参照 2021-09-10)
- 2) 二酸化炭素固体吸収材の実用化に向けた研究開発の進展,<[https://www.rite.or.jp/news/events/yogo\\_ppt\\_separationfy2020\\_r.pdf](https://www.rite.or.jp/news/events/yogo_ppt_separationfy2020_r.pdf)>,(参照 2021-09-10)
- 3) 苫小牧 CCS 大規模実証試験,<<https://www.japanccs.com/>>,(参照 2021-09-10)
- 4) 田中 豊: 日本機械学会誌,122(2019),No2,22-25.
- 5) 令和2年度地球温暖化・資源循環対策等に資する調査委託費(我が国における CCS 事業化に向けた制度設計や事業環境整備に関する調査事業)調査報告書,<[https://www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/2020FY/000266.pdf](https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2020FY/000266.pdf)>,(参照 2021-09-10)
- 6) Ship transport of CO<sub>2</sub> for Enhanced Oil Recovery – Literature Survey, <<http://www.sccs.org.uk/images/expertise/reports/co2-eor-jip/SCCS-CO2-EOR-JIP-WP15-Shipping.pdf>>,(参照 2021-09-10)
- 7) CO<sub>2</sub> 船舶輸送に関する研究開発および実証事業

- を開始,< [https://www.ena.or.jp/?fname=Press-release\\_20210622\\_ver7.pdf](https://www.ena.or.jp/?fname=Press-release_20210622_ver7.pdf)>, (参照 2021-09-10)
- 8) 水素エネルギー技術-NEDO, < <https://www.nedo.go.jp/content/100639759.pdf>>, (参照 2021-09-10)
- 9) カーボンニュートラル社会の実現に向けた旭化成の取組,< [https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/suiso\\_nenryo/pdf/022\\_01\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo/pdf/022_01_00.pdf)>, (参照 2021-09-10)
- 10) 国家水素戦略の一環として初のグリーン水素の電解槽の建設を支援,< <https://www.jetro.go.jp/biznews/2021/08/55f50a9998437cd0.html>>, (参照 2021-09-10)
- 11) 磁気冷凍技術による革新的水素液化システムの開発< [https://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/091/shiryu/\\_icsFiles/afieldfile/2019/01/09/1412343\\_005.pdf](https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/091/shiryu/_icsFiles/afieldfile/2019/01/09/1412343_005.pdf)>, (参照 2021-09-10)
- 12) 沼澤健則: 低温工学,**55**(2020),53-58.
- 13) 稲津晶平: 日本マリンエンジニアリング学会誌,**54**(2019),No.5,38-42
- 14) 千田哲也, 猪股昭彦, 河合 務, 青山憲之: 日本マリンエンジニアリング学会誌,**54**(2019), No.3,111-117.
- 15) 大江知也, 密本巨彦, 藤極之徳, 井上剛良, 轟章, 斎藤雅規: 圧力技術,**58**(2019),138-151.
- 16) 岡田佳巳: 水素エネルギーシステム,**34**(2010),No.4,19-24.
- 17) 水素社会の実現に向けて「大規模水素貯蔵・輸送システム」の実証に成功,< <https://www.Chiyodacorp.com/jp/media/2013/post-77.html>>, (参照 2021-09-10)
- 18) 「世界初の国際間水素サプライチェーン実証の完了」,< <https://www.chiyodacorp.com/media/210202.pdf>>, (参照 2021-09-10)
- 19) 吉田喜久雄, 吉田 愛: 環境科学会誌,**31**(2018), 164-177.
- 20) メタネーション技術に関する動向,< [https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/methanation\\_suishin/pdf/001\\_08\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/001_08_00.pdf)>, (参照 2021-09-10)
- 21) INPEX の CO<sub>2</sub>-メタネーション技術について ~NEDO-CO<sub>2</sub> 有効利用技術開発事業~, < [https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/methanation\\_suishin/pdf/001\\_07\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/001_07_00.pdf)>, (参照 2021-09-10)
- 22) 村田直宏, 河野有吾, 茂木康弘, 大藪弘彦, 白石 開, 佐藤厚徳, 平田純一, 阪口克典, 中尾憲治: マリンエンジニアリング,**56**(2021),628-637.
- 23) メタネーション実証試験を 2021 年度内に開始,< <https://www.tokyo-gas.co.jp/news/press/20210707-03.html>>, (参照 2021-09-10)
- 24) 西村 顕, 森山達也, 嶋野 純: 日本エネルギー学会誌,**96**(2017),400-407.
- 25) 合成燃料研究会中間取りまとめ,< [https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/gosei\\_nenryo/pdf/20210422\\_1.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/gosei_nenryo/pdf/20210422_1.pdf)>, (参照 2021-09-10)
- 26) 小藤勇介, 御子柴 智, 北川良太: 東芝レビュー,**75**(2020),No.6,48-51.
- 27) 難波哲哉: 化学と教育,**67**(2019),530-533.
- 28) 50°Cで水素と窒素からアンモニアを合成す新触媒,< <https://www.titech.ac.jp/news/2020/046682>>, (参照 2021-09-10)
- 29) ニッケルを使った高性能アンモニア合成触媒を開発,< <https://www.titech.ac.jp/news/2020/047268>>, (参照 2021-09-10)
- 30) 輸入バイオマス燃料の状況,< <https://sdb148d487ed9e55d.jimcontent.com/download/version/1519787620/module/12333858189/name/ImportedBiomassFuelReport.pdf>>, (参照 2021-09-10)
- 31) 再生可能エネルギーとは バイオマス発電,< [https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving\\_and\\_new/saiene/renewable/biomass/index.html](https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/renewable/biomass/index.html)>, (参照 2021-09-10)
- 32) 池 美乃里, 大下和徹, 高岡昌輝: 廃棄物資源循環学会論文誌,**31**(2020),169-178.
- 33) (一社)日本木質バイオマスエネルギー協会: 木質バイオマス熱利用について,< <https://www.jwba.or.jp/explanation/heat/#03>>, (参照 2021-09-10)
- 34) バイオ燃料用微細藻類の屋外大規模培養設備を

- 公開,<[https://www.ihi.co.jp/ihi/all\\_news/2015/other/1190355\\_1671.html](https://www.ihi.co.jp/ihi/all_news/2015/other/1190355_1671.html)>,  
(参照 2021-09-10)
- 35)微細藻類から製造するバイオジェット燃料が国際規格 ASTM 認証を新規取得,< [https://www.ihi.co.jp/ihi/all\\_news/2020/other/2020-6-08/index.html](https://www.ihi.co.jp/ihi/all_news/2020/other/2020-6-08/index.html)>,(参照 2021-09-10)
- 36)芋生憲司：日本エネルギー学会機関紙えねるみくす,**96**(2017),29-33.
- 37)大坂典子, 長谷川文生, 海津 裕, 芋生憲司：日本エネルギー学会誌, **97**(2018),105-113.
- 38)鈴木健吾：日本エネルギー学会機関紙えねるみくす,**96**(2017),50-55.
- 39)ユーグレナバイオジェット燃料が完成, 年内の供給開始・フライト実現へ BIC プロセスによるバイオジェット燃料で ASTM 認証に適合,  
< [https://www.euglena.jp/news/20210315/?\\_ga=2.206440663.514495970.1630573742-2013869145.1630573742](https://www.euglena.jp/news/20210315/?_ga=2.206440663.514495970.1630573742-2013869145.1630573742)>,(参照 2021-09-10)
- 39)油を多く産生するユーグレナ変異体を選抜する品種改良法の開発に成功,<<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20160523/index.html>>,  
(参照 2021-09-10)