

2.1.4 エネルギーキャリア

(1) 研究開発領域の定義

再生可能エネルギーの本質的課題である時間的・空間的偏在を克服するために必要とされる。再生可能エネルギーを電力以外のエネルギー物質として長距離輸送し、中長期かつ大規模に貯蔵する媒体、エネルギーキャリアに関する研究開発領域である。有望なエネルギーキャリアとして、水素・アンモニア・有機ハイドライドなどがあげられる。再生可能エネルギーによる水素製造と水素の貯蔵・輸送・利活用技術としての液化水素、アンモニア・有機ハイドライドの高効率製造・脱水素技術（触媒・分離膜）、アンモニア・有機ハイドライドの直接活用技術などの研究開発課題がある。

(2) キーワード

エネルギーキャリア、再生可能エネルギー、液体水素、アンモニア、有機ハイドライド、水素化、脱水素、クラッキング、オートサーマル反応、燃料電池、固体酸化物形燃料電池、アルカリ形燃料電池、アニオン交換膜形燃料電池

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

地球温暖化を抑制するため、2050年までに温室効果ガスの排出量を実質ゼロにする目標が掲げられており、そのためには脱化石燃料や低炭素化技術を進め、再生可能エネルギーの大規模利用や水素社会の普及が必要とされる。太陽光や風力などの再生可能エネルギーは生産地が一般には都市部など消費地の遠隔にあり、さらに時間や季節、天候によって得られるエネルギー量が大きく変動する。クリーンで、かつ量的な可能性を有する再生可能エネルギーを大規模に利用するためには、エネルギーの生産地で水素を多く含む化学物質（エネルギーキャリア）を製造し、これを消費地まで運搬して最適な形で水素やエネルギーに戻すようなシステムの構築が必要となる。水素、メチルシクロヘキサン（MCH）、アンモニアなどがエネルギーキャリアとして注目され、普及、実用化に向けて検討が進んでいる。液化水素は純度が高く、水素ステーションなどでの利用に向いているが、沸点が低いために、液化に要するエネルギーや運搬貯蔵中のボイルオフの問題がある。MCHは石油インフラがそのまま使える優位性があるが、この3者のなかでは水素貯蔵密度が低い。アンモニアは貯蔵密度が高いが有害性があるなど、エネルギーキャリア候補はそれぞれ長所と短所を抱えており、またエネルギーキャリアとしての導入にいたる開発のステージも異なっている。MCH、液化水素については国際的な製造輸送の試みが始まろうとしている。

[研究開発の動向]

エネルギーキャリアに関するプロジェクトとして、古くはEuro Quebec Hydro Hydrogen Pilot Project (EQHHPP、1986～1998年)にて液化水素、アンモニア、トルエン/メチルシクロヘキサン系有機ケミカルハイドライドをエネルギーキャリアの候補とし、カナダの水力発電を用いて欧州に大規模水素輸送を行うプロジェクトが実施された。EQHHPPではメチルシクロヘキサンから脱水素する触媒が開発できなかったことから、液化水素が現実的な選択とされた。これをうけ、日本のWorld Energy NETwork (WE-NET、1993～1998年)では、液化水素をエネルギーキャリアとして南米およびカナダの水力発電を基盤としたプロジェクトが実施された。その後、世界的に水素関係の研究開発は燃料電池に集中投資されていたが、近年、

世界的にも二酸化炭素排出量抑制のためには再生可能エネルギーを基盤とする必要があり、水素の重要性が再認識されている。

再生可能エネルギーによる電力の導入による電力網のアンバランス解消と電力をさまざまな用途で利用する技術としてのPower to Xのキー技術として、世界的に水電解による水素製造技術の重要性が増している。EU、ロシアや北米地域では天然ガスのパイプラインが発達しており、Hydrogen Europeや米国エネルギー省では、水素の輸送に関しては1) 圧縮水素（ボンベやカードル）、2) 液化水素、3) パイプライン、4) ハイタン（水素と天然ガスの混合）のパイプライン、水素の貯蔵に関しては1) 圧縮水素（ボンベやカードル）、2) 液化水素、3) 材料への貯蔵（金属水素化物、有機ハイドライド、吸着）、4) 地下貯蔵、5) ガス配管網などのオプションがあるとして整理されている。日本の場合、船舶輸送が前提となるため、船舶輸送に適した水素の輸送・貯蔵技術に注目する必要がある。また、水素はアンモニア製造に必要な重要な原料でもある。

アンモニアは、肥料原料や汎用化学品原料として大量に使用され、その製造方法はハーバー・ボッシュ法として確立されている。1972年には鉄（Fe）触媒よりも高活性なルテニウム（Ru）触媒が東京工業大学の秋鹿、尾崎らによって発見された。数MPaの水素圧でもアンモニア合成が可能であり、近年、環境負荷の低い触媒として再注目され、その担体を変えた種々のRu系触媒合成の研究が日本を中心に行われている。一方、ハーバー・ボッシュ法では反応圧力が20MPa以上とすでに高圧のためアンモニアの液化は容易であるが、Ru触媒では反応圧力が低いため液化技術が別途必要となるという問題点はある。また、再生可能エネルギーを使用して高効率にアンモニアを製造できる小規模分散型アンモニア合成プロセスの基礎研究、応用研究・開発も進められている。外部電場印加アンモニア合成触媒、マイクロ波照射アンモニア合成触媒、高周波照射アンモニア合成触媒、プラズマアンモニア合成触媒等の研究がある。電気や光エネルギーを利用せず水と窒素とモリブデン（Mo）触媒からのアンモニア合成も報告されている。

アンモニアは、沸点が -33°C であり、水素に比べ容易に液化でき、その体積あたりの水素貯蔵量は水素吸蔵合金や高圧水素はもちろん、液化水素、メチルシクロヘキサンなど有機ハイドライドに比しても大きい。その利用法としては、直接燃料として燃焼、水素に分解して燃料電池で利用、アンモニアを直接燃料電池燃料として利用するなどの手法が考えられる。

燃料としてのアンモニアは、炭化水素よりも燃えにくく火炎伝播速度が遅いなどの特徴はあるが、炭化水素系燃料の代替燃料として、過去にはロケットやバスに利用された歴史がある。また最近では乗用車の燃料としての検討のほか、ガスタービン燃焼、工業炉への展開、石炭との混焼による環境負荷の低減など多くの試みがなされており、活発に国内外において検討されている。

アンモニアとして輸送後に、接触分解法により水素を生成させ、燃料電池燃料として利用するための技術も検討されている。アンモニア接触分解触媒としては貴金属系と非貴金属系触媒がいずれも検討されているが、貴金属触媒のうちRuを活性成分とするものが最もアンモニア分解活性が高く、低温で高い転化率を達成できることが知られている。

また、アンモニアを直接燃料とする燃料電池も検討されている。固体酸化物形燃料電池（SOFC）の燃料適応性は他の燃料電池より優れており、アンモニア直接供給も可能である。燃料電池発電は発熱反応であり、運転温度領域が $700\sim 900^{\circ}\text{C}$ と、アンモニア接触分解反応温度に近く、両者を組み合わせることにより、高効率なアンモニア利用発電技術が構成できる。また、SIPアンモニア燃料電池プロジェクトでもアンモニアを利用した燃料電池システムの1つとして、接触分解反応器と低温で動作するアニオン交換膜形燃料電池（Anion Exchange Membrane Fuel Cell:AEMFC）を組み合わせた発電システムが検討されている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

水電解による水素製造の効率を上げるために、熱エネルギーと電気エネルギーの両方を利用して水を分解する熔融塩リアクター、プロトン伝導性酸化物、酸素イオン伝導性酸化物を電解質とする水蒸気電解セル、高温水電解用ポリマー無機複合プロトン交換膜が開発されている。熱エネルギーと電気エネルギーの両方を使用して2ドル/kg以下のコストで水素ガスを生成できる可能性がある。

電気化学的アンモニア合成研究は中国、米国を中心にさかんに行われている。電極触媒（窒化クロム、窒化バナジウム、ニッケル/ナノポーラスカーボン、層状遷移金属の炭化物および窒化物、ヘマタイト、遷移金属窒化物ナノ粒子、ルテニウム-白金合金、窒素ドーパナノポーラスカーボン等）や固体電解質（プロトン伝導性BCY電解質膜、BaZrO₃等）を利用した膜反応器が研究されている。

アンモニアはプロトン交換膜の障害物質であるため、燃料電池用水素中のアンモニア許容濃度は0.1ppm以下（FCV用）と定められている。アンモニア接触分解ではこのような低濃度の達成は不可能であるため、Pressure Swing Absorption (PSA) などの分離技術を組み合わせる必要があるが、ゼオライトやNH₄HSO₄が新たにアンモニア吸収材として提案されており、長時間にわたって微量アンモニアを除去可能であったとされている。

アンモニア分解技術として、アンモニアと空気を触媒に併給し、サーモニュートラル近傍または発熱領域で運転するオートサーマル接触分解も検討されている。自己発熱による急速起動が容易であり、分解反応器構造がシンプルとなる。非貴金属触媒であるCo-Ce-Zr系複合酸化物触媒は入口から燃焼と分解が並行して進行するため温度プロファイルがより平坦となる。

有機ハイドライドに関しては、トルエンの電解水素化と水分解を同時に行う、固体高分子電解質（SPE）電解技術を応用した有機ハイドライド電解合成が開発されている。製造あるいは利用の過程で上流や下流のプロセスとコンバインドした高効率システムである。

また、基礎研究ながら、ギ酸（HCOOH）もエネルギーキャリアとして注目され、水素発生、直接燃料電池などの利用技術を中心に研究されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

[日本]

戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第1期として「エネルギーキャリア」（2014～19年）では、再生可能エネルギー等を起源とする電気および水素等により、クリーンかつ経済的でセキュリティレベルも高い新たなエネルギー社会を構築するため、(1) 太陽熱を利用した水素製造、(2) アンモニアの製造・利用技術、(3) 有機ハイドライドの製造・利用技術、(4) 液化水素の利用技術、(5) エネルギーキャリアの安全性評価を実施した。

JST-CRESTおよび さきがけ「再生可能エネルギーからのエネルギーキャリアの製造とその利用のための革新的基盤技術の創出」（2013～2020年）が実施された。

また、NEDO水素社会構築技術開発事業（2014～2022年）では液化水素およびトルエン-メチルシクロヘキサン系の有機ケミカルハイドライドについて実証研究を実施している。

[米国]

エネルギー庁（Department of Energy : DOE）が水素関連のプロジェクトをH2@ScaleとしてFuel Cell R&D、Hydrogen Fuel R&D、Hydrogen Infrastructure R&D、Technology Acceleration、

Safety, Codes and Standards、Systems Analysisなどの研究プログラムを進めている。金属窒化物触媒を使用したアンモニアの電気化学合成とプロトン交換膜での遷移金属窒化物ナノ粒子の電気化学的窒素還元反応電解槽などの研究も行われている。

2020年1月米国下院はアンモニアを低炭素燃料として定義する法案を発表した。また、米国にはアンモニアエネルギー協会が設立されており、持続可能なエネルギー経済におけるアンモニアの採用と使用を促進する活動をしている。アンモニア燃料会議は2017年から米国化学工学会の中で開催されている。

[EU]

Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertakeing (FCH-JU) は研究および革新的開発を促進するための欧州研究・イノベーション枠組み計画 Framework Programme (FP) の1つと位置付けられ、FCH-JUと欧州の産官学の共同体であるHydrogen EuropeでEUの資金配分をマネジメントして、主に大規模な実証プロジェクトを推進している。

ドイツでは2007年から省庁連合でNational Innovation Programme for Hydrogen and Fuel Cell Technologyを推進しており、NOW GmbHがNIPの予算配分を担ってモビリティを中心に大規模プロジェクトを実施している。ドイツのなかでも水素関連の環境技術は研究開発投資が活発な領域である。

[国際エネルギー機関 (IEA)]

IEAは、水素に関する世界的な政策をリードする理想的な立場にある。IEA Hydrogen Task 32“水素ベースのエネルギー貯蔵”は水素を利用したエネルギー貯蔵の研究を2013年から2018年まで行ってきた。IEA Hydrogen Task 32は17カ国から来た50人以上の専門家が参加しており、7つのワーキンググループで構成されている。2019年1月1日から2021年12月31日までTask 40が実施されている。

(5) 科学技術的課題

水電解に関しては、貴金属材料のような資源量の制約のある高価な材料を使用せず、変動性の再生電力に適合する安価で高性能な水電解システムを構築する必要がある。このため、アニオン交換膜などのアルカリ水電解の高性能な隔膜となる技術、アルカリ環境下で安価で高活性かつ起動停止を伴う運転条件で高耐久な電極触媒技術、高性能化のための電解槽内の物質移動の解析・促進技術を体系的に検討するプロジェクトを継続的に推進することが必要と思われる。

アンモニアをエネルギーキャリア、燃料として利用するためには、再生可能エネルギーを利用して高効率（低コスト）に合成する技術の開発が課題である。ハーバー・ボッシュ法の触媒改良、電気化学的合成、膜反応器を用いたアンモニア合成などが候補技術となっている。

アンモニアからの水素製造触媒やアンモニアを活性化する電極触媒についての研究も重要である。現在、材料設計指針が明らかにされつつあるが、新規材料の探索の段階が多く、コストを含めた実用性の評価という点では十分とはいえない。

上述のように、エネルギーキャリア技術に関して、液化水素、液化アンモニア、トルエン/メチルシクロヘキサ系有機ヒドライドが候補として技術開発が進められているが、これらの利点、欠点の比較が規模や応用可能な範囲を含めて客観的に比較された例は公表されていない。リスクマネジメントを含めてそれぞれのキャリアの利点、欠点を明らかにしたうえで、個別技術の効率向上や低コスト化に資する技術について研究開発を推進する必要がある。

(6) その他の課題

エネルギーキャリアの社会実装には、高圧ガス保安法、消防法、毒劇法、労働安全衛生法、道路法、船舶安全法、航空法、港則法、化審法、消防法、水質汚濁防止法、大気汚染防止法などをクリアしたうえで、社会受容性があることが必要である。特にアンモニアは劇物として規定されており取り扱いにおける規制は厳しく、特に国内での規制は燃料としての広範な利用の場合には障害となる。

CO₂フリーアンモニアのバリューチェーンの構築をめざすグリーンアンモニアコンソーシアムが産業界を中心に2019年4月に設立されているが、高効率、低コストのアンモニア製造技術の実現のためには、従来の学協会を超えた分野連携、産学連携が必要である。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	水電解はNEDOの先導事業等で実施しているが、燃料電池・二次電池ほどの広がりが無い。エネルギーキャリアCREST/さきがけでアンモニア電解合成、アンモニア燃焼・触媒燃焼の研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	経済産業省や環境省が中心の実証プロジェクトが増加している。水電解、エネルギーキャリアともにプロジェクトが進行中。2018年から福島再生可能エネルギー研究所で実証プラントが稼働。
米国	基礎研究	◎	→	DOEが中心となって非常に秩序だった基礎研究を推進。電気化学アンモニア合成用電極触媒など。ただし、いわゆるエネルギーキャリアには積極的ではない。
	応用研究・開発	○	→	実証研究、デモンストレーション等は州レベルやエネルギー企業中心で見えにくい。APRA-E DOE プロジェクト車載用直接NH ₃ アニオン交換膜形燃料電池の開発など。
欧州	基礎研究	○	→	基礎研究は各国ごとの取り組みが主体。ドイツ、フランスを中心に基礎研究力は強力。ただし、いわゆるエネルギーキャリアには積極的ではない。電極触媒、光触媒や遷移金属錯体、固体酸化物電解槽セルの研究。
	応用研究・開発	◎	↗	多数の実証プロジェクトが進行中。 EU:FCH-JU (欧州燃料電池水素共同実施機構) で、電力・暖房・輸送・産業の各部門の低炭素化に向けEUの多年度研究プログラムの一環で実施。 英国:風力によるハーバー・ボッシュ法、アンモニア分解による水素ステーションの可能性調査。 オランダ:グリーンエネルギーによる水電解システム。 ノルウェー:グリーン水素によるアンモニア製造プラント (5万トン/年)。
中国	基礎研究	○	↗	オリジナル技術は限られているが、新技術をキャッチアップする体制は整っている。アンモニア製造の電極触媒、光触媒、高活性触媒やアンモニア燃料電池の基礎的研究が行われている。被引用件数上位の論文も増加。
	応用研究・開発	○	→	水電解槽が製品として出回り、実証・実用化研究が動いている。
韓国	基礎研究	○	→	水電解に関する中長期的なオリジナルな研究開発プロジェクトは実施されていない。KAISTで電気化学的アンモニア合成の基礎的研究が行われている。
	応用研究・開発	○	→	水素ロードマップを策定して推進しようとしているが、水素タンク爆発事故などの影響もあり順調ではない。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・電気エネルギー利用（電力貯蔵）（環境・エネ分野 2.1.9）
- ・化学エネルギー利用（環境・エネ分野 2.1.12）

参考・引用文献

- 1) K. Aika, H. Hori and A. Ozaki, “Activation of nitrogen by alkali metal promoted transition metal I. ammonia synthesis over ruthenium promoted by alkali metal”, *Journal of Catalysis* 27, no. 3 (1972) : 424-431. doi : 10.1016/0021-9517(72)90179-0
- 2) M. Kitano et al., “Ammonia synthesis using a stable electrode as an electron donor and reversible hydrogen store”, *Nature Chemistry* 4, no. 11 (2012) : 934-940. doi : 10.1038/nchem.1476
- 3) K. Sato et al., “Surface dynamics for creating highly active Ru sites for ammonia synthesis : accumulation of a low-crystalline, oxygen-deficient nanofraction”, *ACS Sustainable Chem. Eng.* 8 (2020) : 2726-2734. doi : 10.1021/acssuschemeng.9b06299
- 4) M. Hattori et al., “Solid solution for catalytic ammonia synthesis from nitrogen and hydrogen gases at 50° C”, *Nature Communications* 11, no. 1 (2020) : 2001-2008. doi : 10.1038/s41467-020-15868-8
- 5) NH3 Fuel Association, “15th Annual NH3 Fuel Conference, Pittsburgh, PA, October 31, 2018 : NH3 Energy+ Topical Conference at the AIChE Annual Meeting”, NH3 Fuel Association, <https://nh3fuelassociation.org/conference2018/> (2020年12月27日アクセス).
- 6) AMMONIA ENERGY ASSOCIATION, “16th Annual Ammonia Energy Conference 2019 November 12–14, 2019, Orlando, FL (USA)”, AMMONIA ENERGY ASSOCIATION, <https://www.ammoniaenergy.org/event/ammonia-energy-conference-2019/#event-schedule> (2020年12月27日アクセス).
- 7) Y. Ashida et al., “Molybdenum-catalysed ammonia production with samarium diiodide and alcohols or water”, *Nature* 568, no. 7753 (2019) : 536-540. doi : 10.1038/s41586-019-1134-2
- 8) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「エネルギーキャリア終了報告書」, https://www.jst.go.jp/sip/k04_result.html (2020年12月27日アクセス) .

- 9) NH3 Fuel Association, “15th Annual NH3 Fuel Conference, Pittsburgh, PA, October 31, 2018 : NH3 Energy+ Topical Conference at the AIChE Annual Meeting”, NH3 Fuel Association, <https://nh3fuelassociation.org/conference2018/> (2020年12月27日アクセス).
- 10) 新エネルギー・産業技術開発機構 (NEDO)「成果報告書 2018年7月-NEDO 20180000000406, 平成26年度-平成29年度成果報告書 水素利用等先導研究開発事業 高効率水素製造技術の研究 高温水蒸気電解システムの研究,2018/7/13」, https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201807/20180000000406.html (2020年12月27日アクセス).
- 11) K. Leonard et al., “Efficient intermediate-temperature steam electrolysis with Y : SrZrO₃-SrCeO₃ and Y : BaZrO₃-BaCeO₃ proton conducting perovskites”, *J. Mater. Chem. A* 6, no. 39 (2018) : 19113-19124. doi : 10.1039/C8TA04019B
- 12) H. Miyaoka et al., “Highly purified hydrogen production from ammonia for PEM fuel cell”, *Int. J. Hydrogen Energy* 43, no. 31 (2018) : 14486-14492. doi : 10.1016/j.ijhydene.2018.06.065
- 13) T. Okanishi et. al, “Comparative Study of Ammonia - fueled Solid Oxide Fuel Cell Systems”, *Fuel Cells* 17, no. 3 (2017) : 383-390. doi : 10.1002/fuce.201600165
- 14) 光島重徳, 長澤兼作「固体高分子電解質 (SPE) 電解技術を応用した有機ハイドライド電解合成」『触媒』58巻6号(2016) : 346-350. <https://catsj.jp/jnl/top?volume=58&issue=6>
- 15) H. Kawanami, M. Iguchi and Y. Himeda, “Ligand Design for Catalytic Dehydrogenation of Formic Acid to Produce High-pressure Hydrogen Gas under Base-free Conditions”, *Inorg. Chem.*, 59, no. 7 (2020) : 4191-4199. doi : 10.1021/acs.inorgchem.9b01624
- 16) K. Mori et al., “Phenylamine-functionalized mesoporous silica supported PdAg nanoparticles : A dual heterogeneous catalyst for formic acid/CO₂-mediated chemical hydrogen delivery/storage”, *Chem. Commun.* 53, no. 34 (2017) : 4677-4680. doi : 10.1039/c7cc00864c
- 17) M. Zainoodin et al., “Performance of a direct formic acid fuel cell fabricated by ultrasonic spraying”, *Int. J. Hydrogen Energy* 43, no. 12 (2018) : 6413-6420. doi : 10.1016/j.ijhydene.2018.02.024
- 18) Hydrogen Program, “2020 Annual Merit Review : Progress Updates”, Department of Energy, https://www.hydrogen.energy.gov/annual_review20_proceedings.html (2020年12月27日アクセス).
- 19) Fuel Cells and Hydrogen, Joint Undertaking, “FCG JU PROJECTS”, Fuel Cells and Hydrogen, <https://www.fch.europa.eu/page/fch-ju-projects> (2020年12月27日アクセス).
- 20) Hydrogen Europe, “Hydrogen Europe : projects”, Hydrogen Europe, <https://hydrogeneurope.eu/projects> (2020年12月27日アクセス).
- 21) Technology Collaboration Programme by IEA, “Task 40 : Energy storage and conversion based on hydrogen”, Hydrogen TCP, <https://www.ieahydrogen.org/task/task-40-energy-storage-and-conversion-based-on-hydrogen/> (2020年12月27日アクセス).

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
環境・エネルギー応用