

次世代ロングレンジ電気自動車(EV)の 本命は燃料電池車(FECV)

～全固体電池と燃料電池のハイブリッド車
及びグリーン水素供給に関する
技術／材料の進化～

～抜粋編～

2024 年 12 月 26 日

(有)カワサキテクノロジーリサーチ

本編の内容 (※抜粋編の目次ではありません)

はじめに.....	4
水素・燃料電池が普及する社会へのシナリオ.....	4
<カーボンニュートラルを目指す動きと水素技術>.....	4
<水素と電気を主体とする水素社会>.....	4
<燃料電池（FCEV）とグリーン水素> エラー! ブックマークが定義されていませ ん。	
第1章 燃料電池自動車（FCEV）の動向と未来.....	5
1-1 燃料電池とハイブリッドシステムについて.....	5
1-2 自動車メーカーの電気自動車の開発動向.....	7
1-2-1 電気自動車、燃料電池車、ハイブリッド自動車の比較.....	7
1-2-2 燃料電池自動車（FCEV）.....	8
1-2-3 電気自動車（BEV）.....	8
1-2-4 ハイブリッド自動車（HEV、PHEV）.....	8
1-2-5 水素エンジン車と燃料電池車との違い.....	8
1-3 燃料電池とバッテリーのハイブリッド技術とは.....	8
1-4 全固体電池と燃料電池の共通点.....	8
1-4-1 バイポーラ構造と直列積層構造.....	8
1-4-2 最強となる燃料電池と全固体電池のハイブリッド自動車.....	8
1-5 トラック、電車、船、ドローン、航空機への応用.....	9
1-6 グリーン水素とFCEVで描く近未来のモビリティ.....	9
第2章 カーボンニュートラルな水素の動向と未来.....	10
2-1 グリーン水素とは.....	10
2-2 グリーン水素生成技術／関連技術.....	10
2-2-1 水素生成技術概要.....	10
2-2-2 太陽電池によるグリーン水素生成.....	11
2-2-3 光触媒によるグリーン水素生成.....	11
2-2-4 熱変換ISプロセスによるグリーン水素生成.....	11
2-2-5 水蒸気電気分解によるグリーン水素生成.....	12
2-2-6 海水の電気分解.....	12
2-2-7 量子水素エネルギー技術（常温核融合）.....	12
2-2-8 金属と水の反応による水素生成.....	12

2-3 水素貯蔵技術	12
2-3-1 水素吸蔵合金	12
2-3-2 アンモニア、メチルシクロヘキサン (MCH)	12
2-3-3 金属有機構造体 (MOF)	12
2-4 水素運搬技術	12
2-4-1 液化水素	12
2-4-2 高圧水素ガス	13
2-5 期待されるグリーン水素生成インフラ	13
2-5-1 海洋風によるグリーン水素製造 (ウインドハンター P J)	13
2-5-2 太陽電池発電⇒常温電気分解⇒電解水素⇒液化水素輸送	14
2-5-3 可視光・光触媒による水電解⇒光触媒水素⇒水素吸蔵合金保存	14
2-5-4 量子水素 (熱) ⇒熱変換 I S プロセスによる水素⇒水素吸蔵合金保存	14
2-5-5 量子水素 (熱) エネルギー⇒水蒸気電気分解⇒水素吸蔵合金保存	14
第3章 グリーン水素と燃料電池に期待される関連材料・部材	14
3-1 太陽電池	14
3-2 光触媒、水素関連触媒	14
3-3 イオン交換膜	15
3-4 セパレーター	15
3-5 水素吸蔵材料	15
3-6 水素分離膜	15
第4章 グリーン水素と燃料電池に関連するカンファレンス、ヒアリング情報	15
4-1 燃料電池関連技術	15
4-1-1 燃料電池	15
4-2 グリーン水素関連技術	16
4-2-1 水電気分解装置	16
4-2-2 その他の水素製造	16
4-3 その他関連トピック	16
4-3-1 液体水素タンク	16
4-3-2 水素供給ステーション	16
4-3-3 水素エンジン・水素燃焼技術	16
4-3-4 液体水素関連の樹脂製パーツ	16
4-4 カンファレンス情報	16
4-4-1 NEDO 水素・燃料電池成果報告会 2024	16
4-4-1-1 グリーン水素関連技術 エラー! ブックマークが定義されていません。	
4-4-2 Innovation Japan 2024	17
第5章 まとめと提言	17

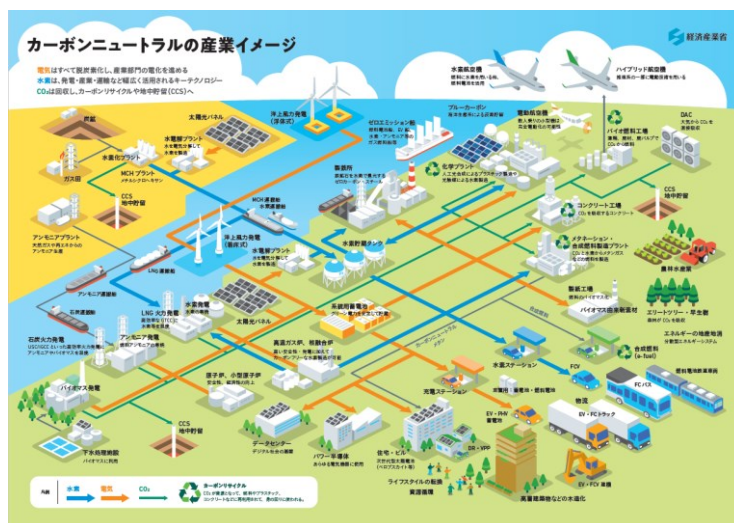
はじめに

水素・燃料電池が普及する社会へのシナリオ

<カーボンニュートラルを目指す動きと水素技術>

カーボンニュートラルに向け、エネルギー源を石化由来以外に求める動きが世界中で加速している。我が国も 2050 年までにカーボンニュートラルを目指すことを、2020 年に当時の菅総理大臣が宣言している。

(中略)



カーボンニュートラルの産業イメージ

(https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/green_growth_strategy.html)

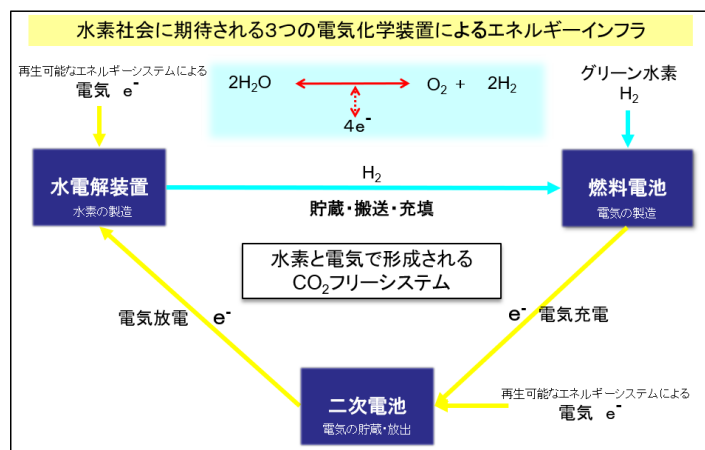
この図中に示されているように、「電気」は再生可能エネルギーなどの利用ですべて「脱炭素化」し、産業部門は電化を進めることが想定されている。「CO₂」は回収し、カーボンリサイクルや地中貯留（CCS）を行うことが想定されており、大気中への放出が抑えられている。

「水素」については、“発電・産業・運輸など幅広く活用されるキーテクノロジー”との位置づけである。

<水素と電気を主体とする水素社会>

地球温暖化防止のために様々な対策が求められており、水素と電気を主体とするいわゆる水素社会へのシフトもその一つである（図参照）。水素社会のエネルギーインフラを支える主な電気化学装置は、燃料電池、水電解装置、二次電池（バッテリー）の3つである。この3つの電気化学装置は、水のみを原料として水素と電気のエネルギーシステムを構築でき、これらの装置の進化は水素社会到来の時期を格段に早めると考えられる。

(中略)



(中略)

第1章 燃料電池自動車 (FCEV) の動向と未来

1-1 燃料電池とハイブリッドシステムについて

燃料電池は、水素などの燃料を還元剤、酸素を酸化剤として、それぞれの電極での電気化学反応により発電する発電機である。

本資料集で取り上げるモビリティ用の燃料電池は、数種類の燃料電池の方式（表1—1参照）のうち、比較的小型で、作動温度も低い、固体高分子型の燃料電池（PEFC）である。他の3つの燃料電池は、作動温度も高くコンパクト化が難しいとされている。

(中略)

理論的には、1.23Vの電圧が得られる。このエネルギーを用いて、例えば電気自動車の駆動モーターを回転させることができる。

見方を変えると、酸化剤である酸素と還元剤である水素を2つの電極を介して、酸化還元反応を起こさせそのときの酸化還元電位差に起因する電気エネルギーを取り出していることになる。

(中略)

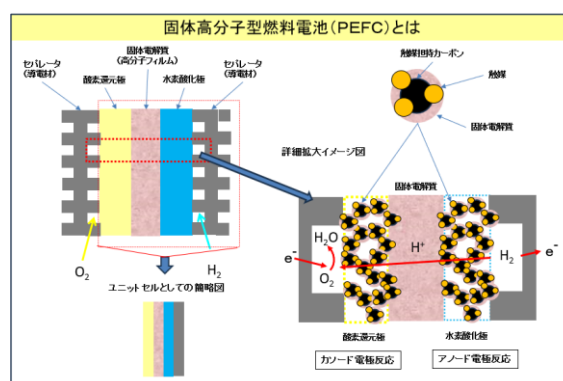


図1—2 固体高分子型燃料電池（PEFC）とは

図1-3は、実用的な燃料電池モジュールのイメージを示した。図1-1に示した電解セルの電解液（液体）を、固体電解質（プロトン伝導体）に置き換えたユニットセル複数個（図では8個）を、セパレータと呼ばれる電子伝導体で電氣的に接続する。セパレータの両側には、それぞれ異なる電極層（アノード層とカソード層）が接しておりこの構造はバイポーラ電極と呼ばれており、後述する全固体電池と同様の構造である。

ガス状の水素ガスと酸素ガスは、それぞれアノード電極（水素極）とカソード電極（酸素極）に注入される。ここで、図1-1に示したような反応が進行する。

実際の電極構造は単純ではなく、MEA（Membrane Electrode Assembly）と呼ばれる構造を有する。このMEAは、電解質膜と電極触媒から構成されている。MEA内の電解質膜は、水素イオンを通す役割を果たし、水素極から供給された水素イオンは、この膜を通過して酸素極に到達する。

この図では、右から左にプロトンが移動し、反対方向に電子が移動している。全体でみるとまるで断面積の大きな電線のなかを電気が走行しているように見える。このようなバイポーラ電極構造による直列積層は、高電圧を発生させるとともに、低抵抗化により高出力が得られる。このような構造はモジュールとしてコンパクトになり、電気自動車などのモビリティには最適のモジュールとなる。

（中略）

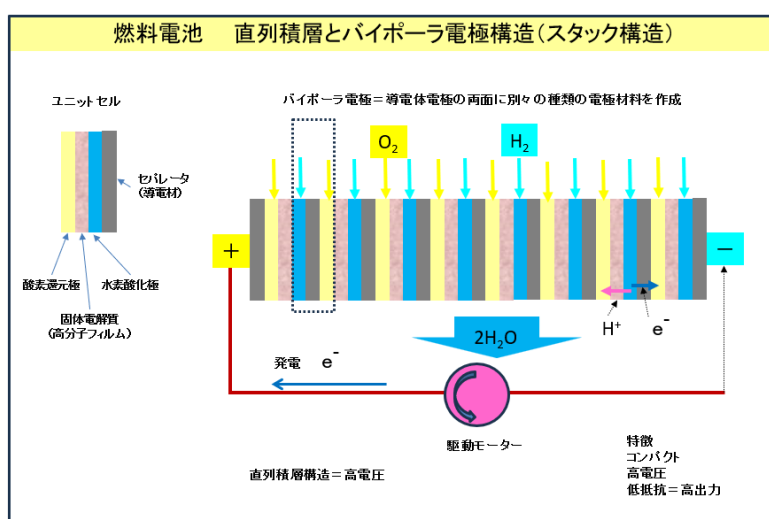


図1-3 直列構造とバイポーラ電極による燃料電池モジュール（スタック構造）

本資料集の主題は、自動車を代表とするモビリティへの2種の電気化学装置（燃料電池、全固体電池）の適用である。より理解を深めるために、図1-11には、ガソリン車、電気自動車（BEV）、燃料電池車（FCEV）の比較してみた。

（中略）

1-2 自動車メーカーの電気自動車の開発動向

1-2-1 電気自動車、燃料電池車、ハイブリッド自動車の比較

電気自動車と燃料電池車とハイブリッド自動車、さらに内燃機関（エンジン）を使用した従来型のガソリン車を、自動車に積載している電池を中心に考察した。

これらの自動車の駆動系と積載電池を中心としたイメージを図1-19、20に示した。ここでそれぞれの自動車を簡潔に説明する。

（中略）

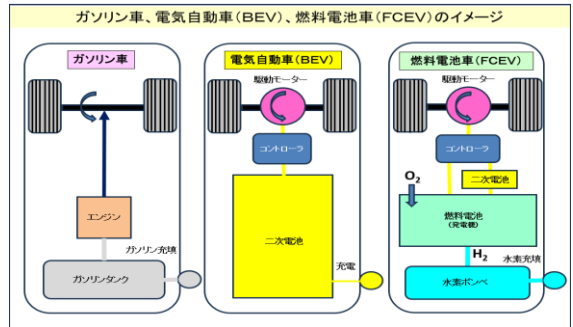


図1-19 各種自動車の駆動系と燃料のイメージ（1）

一方、長距離走行には、HEV、PHEV、FCEVが有利である。例えば長距離運送するトラックなどである。FCEVは、環境性性能、燃費、航続距離ともバランスがとれている自動車と考えられる。

表1-6 各種ハイブリッド車の性能比較 まとめ					
	航続距離 (km)	燃費 (円/km)	ガソリン換算積載燃料量 (リットル)	ガソリン換算燃費 (km/l)	走行時CO2排出量 (g/km)
BEV	x	◎	x	◎	◎
FCEV	△	△	△	○	◎
HEV1	◎	△	○	△	△
HEV2	○	○	○	△	△
PHEV	◎	△	○	△	△
エンジン	○	x	○	x	x

各種ハイブリッド自動車の進化の予想を図1-28にまとめた。

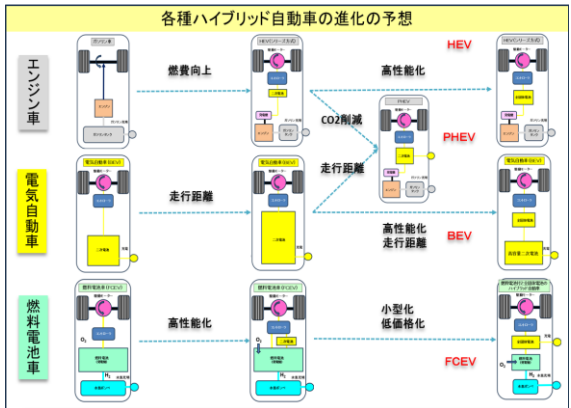


図1-28 各種タイプハイブリッド自動車の進化の予想

1-2-2 燃料電池自動車（FCEV）

《トヨタ：ミライ》

トヨタのミライは、燃料電池自動車（FCEV）のパイオニアとして、2014年に初めて発売された。

（中略）



図1-2-9 トヨタの燃料電池車（FCEV）：ミライ（2代目）概要

1-2-3 電気自動車（BEV）

1-2-4 ハイブリッド自動車（HEV、PHEV）

1-2-5 水素エンジン車と燃料電池車との違い

1-3 燃料電池とバッテリーのハイブリッド技術とは

電気自動車、燃料電池車が、走行時二酸化炭素を排出しないクリーンエネルギー自動車として、今後、発展していくが、そのクリーンエネルギー自動車の一形態として、電気自動車の二次蓄電池（バッテリー）に充電するための、小型、低出力、低価格、の燃料電池を取り付けた燃料電池付電気自動車が注目される。

（中略）

1-4 全固体電池と燃料電池の共通点

1-4-1 バイポーラ構造と直列積層構造

1-4-2 最強となる燃料電池と全固体電池のハイブリッド自動車

全固体電池は、バイポーラ構造を利用した直列積層型の高性能・コンパクト二次電池である。一方、燃料電池も同様バイポーラ電極（セパレータ）を利用したバイポーラ構造（スタックセル）による直列積層型の高性能・コンパクト電池（発電機）である。

（中略）

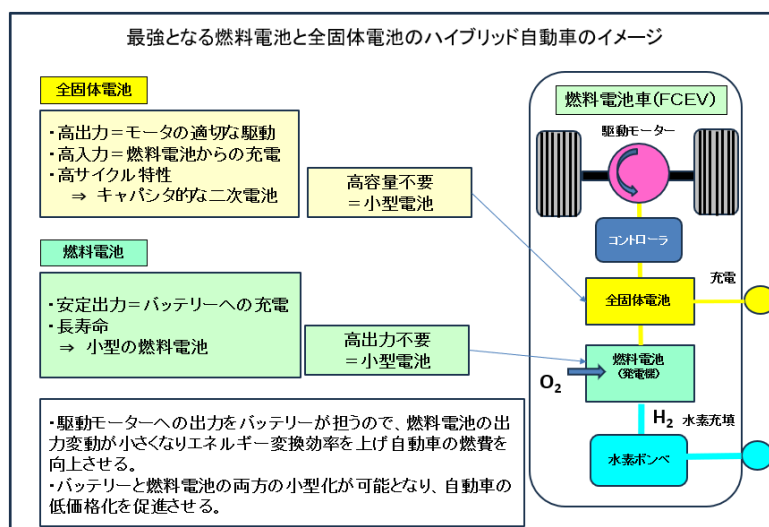


図1-50 最強となる燃料電池と全固体電池のハイブリッド車のイメージ

(中略)

1-5 トラック、電車、船、ドローン、航空機への応用

1-6 グリーン水素とFCEVで描く近未来のモビリティ

(中略)

概略としては、長距離の航続距離が必要で比較的大型のモビリティは、FCEVやPHEV、HEVが主流となり、日常の走行距離が短い比較的小型のモビリティは、BEVが主役となると推察される。

燃料となる水素や電気のカーボンニュートラル化が望まれる。

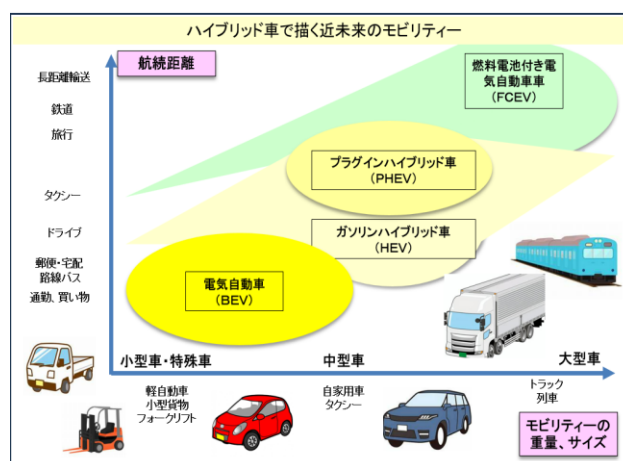


図1-56 ハイブリッド車で描く未来のモビリティ

第2章 カーボンニュートラルな水素の動向と未来

水素（ H_2 ）と酸素（ O_2 ）から電気（ e^- ）を生成することのできる燃料電池は、電気化学型発電機である。その構成は、前章で述べたように、バイポーラ電極を用いた直列の積層構造（いわゆるスタックセル）を有しておりコンパクトで高出力を発生でき、近年その材料、部材、制御方法などが大きく進歩している。

（中略）

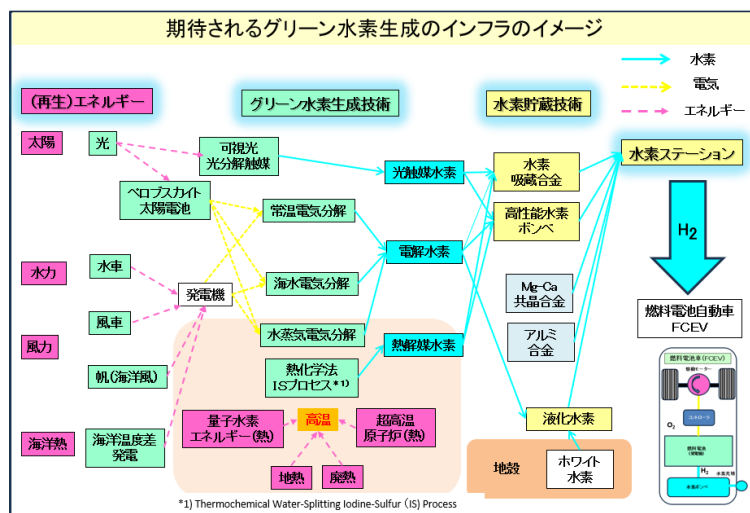


図 期待されるグリーン水素生成のインフラのイメージ

2-1 グリーン水素とは

近年、水素には、製造時の CO_2 排出や利用エネルギーによって様々な色が割り当てられ、カーボンニュートラルの観点から、生成された水素の起源を分かり易く表示される（表 1）。

グリーン水素は、「再生可能エネルギーを用い、水の電気分解により生産された水素」で、生産過程での CO_2 排出は実質ゼロである。再生可能エネルギーとしては、太陽光、風力、水力、バイオメタン燃料などが用いられる。

（中略）

2-2 グリーン水素生成技術／関連技術

2-2-1 水素生成技術概要

水素の製造には主に 3 つの方法がある。

（中略）

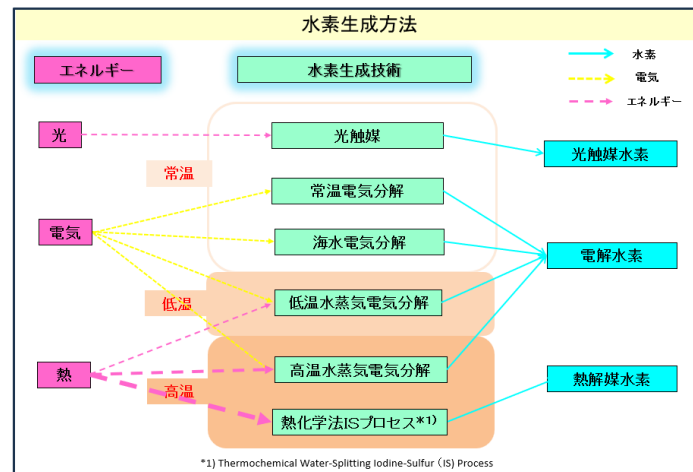


図 水素生成技術の概要

2-2-2 太陽電池によるグリーン水素生成

太陽電池による水素生成は、グリーン水素生成技術の主流である。

(中略)

具体的な水素製造システムは、太陽電池による電力、水素製造装置による水素製造、生産された水素の貯蔵設備から構成される。本項では、進行中の大型プロジェクトの現状と、課題となるコスト低減に関する研究開発に焦点を当て紹介する。

①福島水素エネルギー研究フィールド (FH2R) のグリーン水素製造

日本における太陽電池による水素製造施設は、「福島水素エネルギー研究フィールド (Fukushima Hydrogen Energy Research Field (FH2R))」である。

(中略)



図 福島水素エネルギー研究フィールド (FH2R) *に加筆

** 出所 : https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101293.html

(中略)

2-2-3 光触媒によるグリーン水素生成

2-2-4 熱変換 I S プロセスによるグリーン水素生成

2-2-5 水蒸気電気分解によるグリーン水素生成

2-2-6 海水の電気分解

2-2-7 量子水素エネルギー技術（常温核融合）

グリーン水素生成の直接の技術ではないが、2-2-4 熱変換 I S プロセスによるグリーン水素生成のような高温の熱源を必要とする水素生成技術に寄与できると考えられる。

（中略）

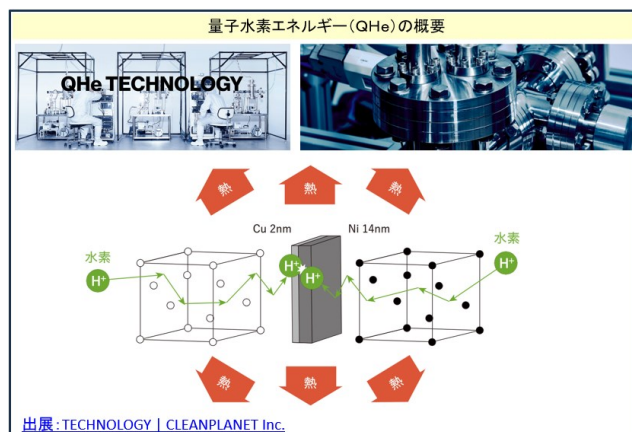


図 量子水素エネルギーの概要

2-2-8 金属と水の反応による水素生成

2-3 水素貯蔵技術

グリーン水素の製造技術に関して、前述したように新技術の開発が進められており、そのグリーン水素を貯蔵し輸送するための材料や方法に関しても関心が高まっている。また、再生可能エネルギーを電力以外の物質として、エネルギーキャリアとしても水素は注目されている。

水素は気体として、あるいは液化して貯蔵できる。また水素キャリアとして有機ハイドライドや金属ハイドライドにして貯蔵でき、安全性や輸送において利点を有する。

2-3-1 水素吸蔵合金

2-3-2 アンモニア、メチルシクロヘキサン（MCH）

2-3-3 金属有機構造体（MOF）

2-4 水素運搬技術

水素をダイレクトに貯蔵・運搬する技術として、液化水素あるいは高圧水素を取り上げる。

2-4-1 液化水素

①水素ふろんていあの液化水素タンク

世界初の液化水素運搬船「すいそ ふろんていあ」が NEDO の支援のもと、HySTRA により開発された。

(中略)



図 液化水素運搬船「すいそ ふろんていあ」の構造

<https://www.hystra.or.jp/>

2-4-2 高圧水素ガス

2-5 期待されるグリーン水素生成インフラ

2-5-1 海洋風によるグリーン水素製造（ウインドハンター P J）

(株) 商船三井が、(株) 大内海洋コンサルタント、(国研) 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所、(株) スマートデザイン、東京大学大学院新領域創成科学研究科、(株) 西日本流体技研、(一財) 日本海事協会、みらいえね企画合同会社と共同で、ウインドハンタープロジェクト（Wind Hunter PJ）を推進している。

(中略)

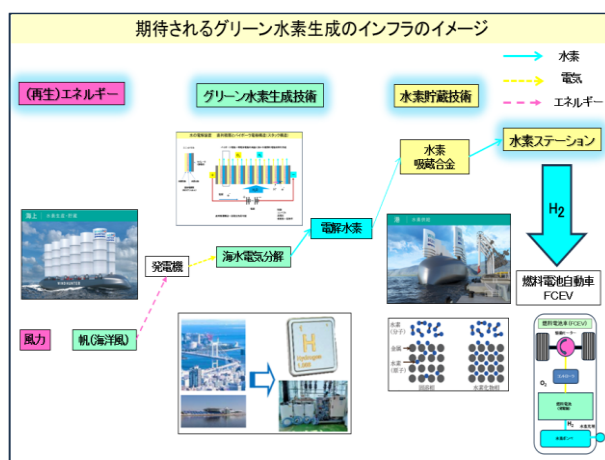


図 海洋風によるグリーン水素製造、輸送（ウインドハンター P J）

2-5-2 太陽電池発電⇒常温電気分解⇒電解水素⇒液化水素輸送

2-5-3 可視光・光触媒による水電解⇒光触媒水素⇒水素吸蔵合金保存

2-5-4 量子水素（熱）⇒熱変換 I S プロセスによる水素⇒水素吸蔵合金保存

2-5-5 量子水素（熱）エネルギー⇒水蒸気電気分解⇒水素吸蔵合金保存

第 3 章 グリーン水素と燃料電池に期待される関連材料・部材

前述してきたように、グリーン水素の生成技術とそれに関連する再生エネルギー生産技術、さらに電気自動車用の燃料電池に関連する材料や部材の進化は、このような水素と電気を中心とした近未来社会に大いに期待される。

ここでは、これらに必要な材料や部材に着目して、現状で期待されている材料、部材、将来期待される材料、部材について紹介する。（表 3－1， 3－2 参照）

（中略）

表3-1 期待される材料の問題と解決方法 (1)

分野	材料の詳細	用途	問題	課題	解決方法(材料参考例)	効果
太陽電池	電解液/材料	ペロブスカイト太陽電池	電コスト	高性能の電解液	多量ニッケル電解液にニッケル触媒ナノ粒子を添加し電解液の電導性を向上させる	電解液の電導性を向上
	電解液/材料		電解液の劣化	電解液の劣化を抑制する	カルボキシル系電解液	電解液の劣化を抑制
	電解液/材料		電解液の劣化	電解液の劣化を抑制する	カルボキシル系電解液	電解液の劣化を抑制
光触媒	電解液/材料	光触媒水素発生装置	電解液の劣化	電解液の劣化を抑制する	カルボキシル系電解液	電解液の劣化を抑制
	電解液/材料		電解液の劣化	電解液の劣化を抑制する	カルボキシル系電解液	電解液の劣化を抑制
	電解液/材料		電解液の劣化	電解液の劣化を抑制する	カルボキシル系電解液	電解液の劣化を抑制
水素吸蔵合金	電解液/材料	水素吸蔵合金	電解液の劣化	電解液の劣化を抑制する	カルボキシル系電解液	電解液の劣化を抑制
	電解液/材料		電解液の劣化	電解液の劣化を抑制する	カルボキシル系電解液	電解液の劣化を抑制
	電解液/材料		電解液の劣化	電解液の劣化を抑制する	カルボキシル系電解液	電解液の劣化を抑制

3-1 太陽電池

3-2 光触媒、水素関連触媒

《光触媒と関連導光技術》

《燃料電池・電解水素生成関連触媒》

水素を酸素と化学反応させて電気を生む燃料電池を積んだ燃料電池自動車は、発電時に温暖化ガスを排出しない。しかし、現状の市販車では燃料電池の触媒は、高価で希少な白金が1台で20～30 gほど使われており、普及の妨げとなっていた。以下（本編参照）

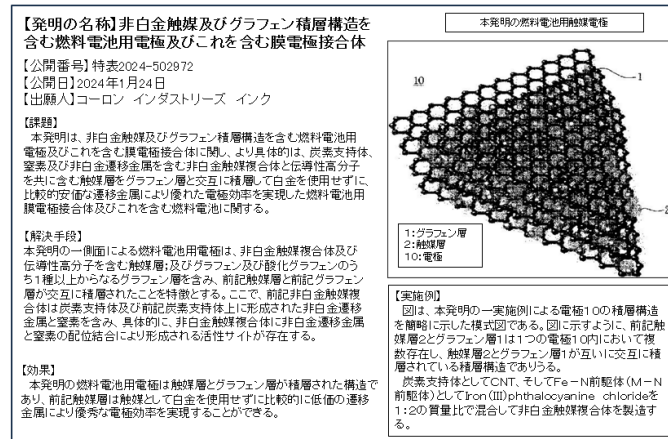


図3-7 特表 2024-502972 公報 “非白金触媒及びグラフェン積層構造を含む燃料電池用電極及びこれを含む膜電極接合体” より

3-3 イオン交換膜

3-4 セパレータ

3-5 水素吸蔵材料

3-6 水素分離膜

第4章 グリーン水素と燃料電池に関連するカンファレンス、ヒアリング情報

参加した展示会全般に関して感じたのは、燃料電池の性能や小型化といった個々の技術の発展は大切ではあるものの、サプライチェーンがどのように繋がって構築されるかによって市場や開発の広がりが大きく左右されるという印象だった。

（中略）

4-1 燃料電池関連技術

4-1-1 燃料電池

①FC モジュール

トヨタグループ@2024年2月スマートエネルギー展 in 東京ビッグサイト

トヨタグループの展示スペースには、MIRAIなどで用いる燃料電池の出展があり、大盛況だった。



図 MIRAI への搭載用 FC モジュール：TFCM2s-F（Type II 横型）（左）と汎用型の小型モジュール（右）

（出典：2024 年 2 月スマートエネルギー展にて KTR 撮影）

（中略）

4-2 グリーン水素関連技術

4-2-1 水電気分解装置

4-2-2 その他の水素製造

4-3 その他関連トピックス

4-3-1 液体水素タンク



図 水素容器

（出典：同社ブースにて KTR 撮影）

4-3-2 水素供給ステーション

4-3-3 水素エンジン・水素燃焼技術

4-3-4 液体水素関連の樹脂製パーツ

4-4 カンファレンス情報

4-4-1 NEDO 水素・燃料電池成果報告会 2024

2024 年 7 月 18 日、19 日と 2 日にわたり「NEDO 水素・燃料電池成果報告会 2024」が開催され、関連する多くの研究開発成果が行われた。ポスター発表の内容を弊社で分析し、用途・分野別に整理した。

(参照：https://www.nedo.go.jp/events/report/Z2SE_00012.html)。

① 水電解（水素生成）関連技術

発表 No.	題目	実施者	水電解用MEA(膜電極複合体)			
			アノード (陽極)	カソード (陰極)	MEA	膜
P1-1	プロトン交換膜型水電解装置用革新的低貴金属担持アノード触媒の研究開発	山梨大学、日本化学産業株式会社、石福金属興業株式会社	プロトン交換型水電解用低貴金属触媒			
P1-2	革新的水電解用電極技術の研究開発	学校法人同志社	アニオン交換膜水電解用低コスト長寿命 AWE 陽極			
P1-3	以下、本編参照					
P1-4						

② 燃料電池（発電）関連

③ 水電解、燃料電池用部材

④ システム全体、ユースケース。装置関連

4-4-2 Innovation Japan 2024

第5章 まとめと提言

《 調査企画担当 》

(有)カワサキテクノリサーチ

調査企画プロジェクトチーム

代表 川崎 徹

担当 大谷 彰、丸山 幸治、山本 美輪、今宿 芳郎

なお、本抜粋編の図表は縮小してあります。本編の図表はもっと大きく鮮明にご覧いただけます。

<内容>
は

目標 ()
FCEV の動向
の 開発
の比較 FCEV
BEV HEV、PHEV
の 通点
電池
描く への
水素の動向
とは

海水の
水の反応 技術 ()
MOF MCHC
(

水素 (熱)⇒
(熱)

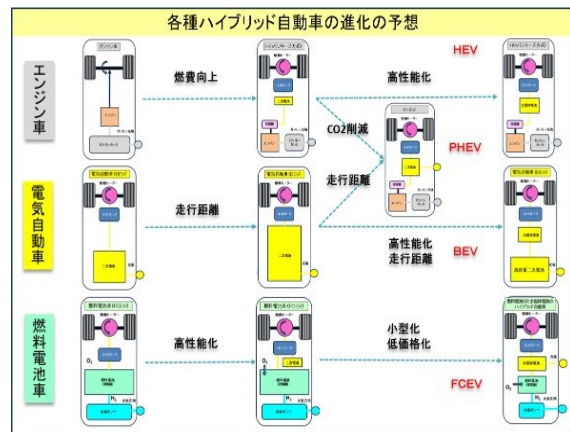
その他の
その

の

ま

表1-5 各種ハイブリッド車の性能比較

	航続距離 (km)	燃費 (円/km)	ガソリン換算積載燃料量 (リットル)	ガソリン換算燃費 (km/l)	走行時CO2排出量 (g/km)
BEV	349	4	6	60	0
FCEV	840	7	22	39	0
HEV1	1296	7	53	26	94
HEV2	966	6	35	28	76
PHEV	1256	7	50	26	91
エンジン	859	10	47	19	127
全体平均	891	7	34	35	62



ー P J

