

# 鉄道と船舶における燃料電池の 利用に関する調査研究報告書

一般財団法人 運輸総合研究所

2018年2月21日

# 目次

はじめに .....	1
1 鉄道および船舶における水素利用について .....	2
2 水素社会に向けた取り組み .....	11
2.1 日本における取り組み .....	11
2.2 欧州における取り組み .....	16
2.3 米国における取り組み .....	21
3 燃料電池技術の現状 .....	25
3.1 燃料電池の種類と特徴 .....	25
3.2 燃料電池の用途 .....	25
3.3 燃料電池の開発課題 .....	26
3.4 現在の主要な燃料電池サプライヤー .....	30
3.5 水素タンクについて .....	32
4 鉄道分野における燃料電池の導入事例 .....	34
4.1 国内の事例 .....	34
4.2 海外の事例 .....	36
5 船舶分野における燃料電池の導入事例 .....	40
5.1 国内の事例 .....	40
5.2 海外の事例 .....	43
6 対象車両/船舶の検討 .....	51
7 市場ポテンシャルの検討 .....	53
7.1 鉄道における燃料電池の市場ポテンシャル .....	53
7.2 船舶における燃料電池の市場ポテンシャル .....	56
8 燃料電池導入の経済性の検討 .....	58
8.1 燃料電池、リチウムイオン電池ならびに水素価格の将来低減の推定方法 .....	58
8.2 鉄道における経済性の検討 .....	60
8.3 船舶における経済性の検討 .....	66
8.4 経済性分析のまとめ .....	73
9 燃料電池導入による環境負荷の低減効果 .....	76
9.1 鉄道における環境負荷低減効果の試算 .....	76
9.2 船舶における環境負荷低減効果の試算 .....	78
9.3 再生可能エネルギー由来水素製造の現状 .....	80
9.4 環境性評価のまとめ .....	82
10 まとめ .....	83
おわりに .....	89

## はじめに

運輸分野における動力は、石油を燃料とした内燃機関が約 100 年以上もの長きにわたって占めてきた。

様々な改良が加えられ、効率化が進展するとともに、環境対策も進んできているが、近年は他分野での大量普及により見逃しがたい大きな弊害としての大気汚染および地球温暖化の観点から、内燃機関の限界も語られるようになってきている。

また、エネルギーとしても、内燃機関が利用する石油については、その依存の低減が図られてきており、近年、欧州をはじめとしてアジアでも再生可能エネルギーへのシフトが図られ始めているところである。

このような中、内燃機関を多数利用する運輸分野の果たすべき役割は極めて大きく、次世代を見据えた動力源に関する戦略の構築は大きな課題となっている。

特に、運輸分野においては、自動車において多くの取り組みがなされてきており、内燃機関での天然ガスの利用、内燃機関と蓄電池を併用したハイブリッド自動車、蓄電池だけの電気自動車（EV）など、多くの様々な取り組みが世界的になされているところである。燃料電池自動車（FCV）に関しても、わが国では、2015 年より一般への市販が開始され、実用化の道が開かれたところである。

特に、水素をエネルギー源とした燃料電池は、利用時に水しか排出しない環境に優しいシステムであること、燃料の元となる水素が水の中に大量に存在すること、水素の可搬性・貯蔵性、需要地での製造可能性等に利点があり、内燃機関の代替として一つの大きな選択肢となっている。

このような中で鉄道、船舶分野においても、内燃機関の代替動力として燃料電池に注目する動きがある。わが国でも、両分野においては、実証試験が行われてきているが、諸外国では既に実用化の動きが本格的に開始されている状況である。

今回、運輸総合研究所では、研究会を立ち上げ、鉄道、船舶分野における燃料電池の利用に関して、国内外の動向を俯瞰するとともに、わが国においては、どのような市場において燃料電池が活用出来るのか、また実際に導入する場合のコスト構造、さらには環境への負荷低減可能性がどの程度あるのかについて調査研究を行った。

## 1 鉄道および船舶における水素利用について

### 1.1 地球温暖化防止対策の必要性

2014年に公表された気候変動に関する政府間パネル（IPCC<sup>1</sup>）の第5次報告書（AR5）では、温暖化はもはや疑う余地がなく、人為起源の温室効果ガス（Green House Gas : GHG）の排出が20世紀半ば以降に観測された温暖化の支配的要因であるということが明記された。2013年には年間324億トンのCO<sub>2</sub>が大気中に放出されており、これは2010年に排出された303億トンと比較して、7%も増加していることになる。

報告書によれば1℃の平均気温上昇でも熱波や大雨、洪水などの異常気象のリスクが高くなり、2℃以上では、北極海の氷やサンゴ礁など脆弱なシステムは甚大な危険にさらされ、マラリアやデング熱など熱帯地域の流行病がより広範囲で蔓延する恐れがあるとされている。さらに上昇幅が4℃以上になると、穀物の生産量の落ち込みや魚の漁獲量の変化等により世界的に食糧の安定確保に多大な影響が予測され、影響の地域差により水を巡る紛争等、国家の安全保障問題にまで発展するリスクがあるとされている。

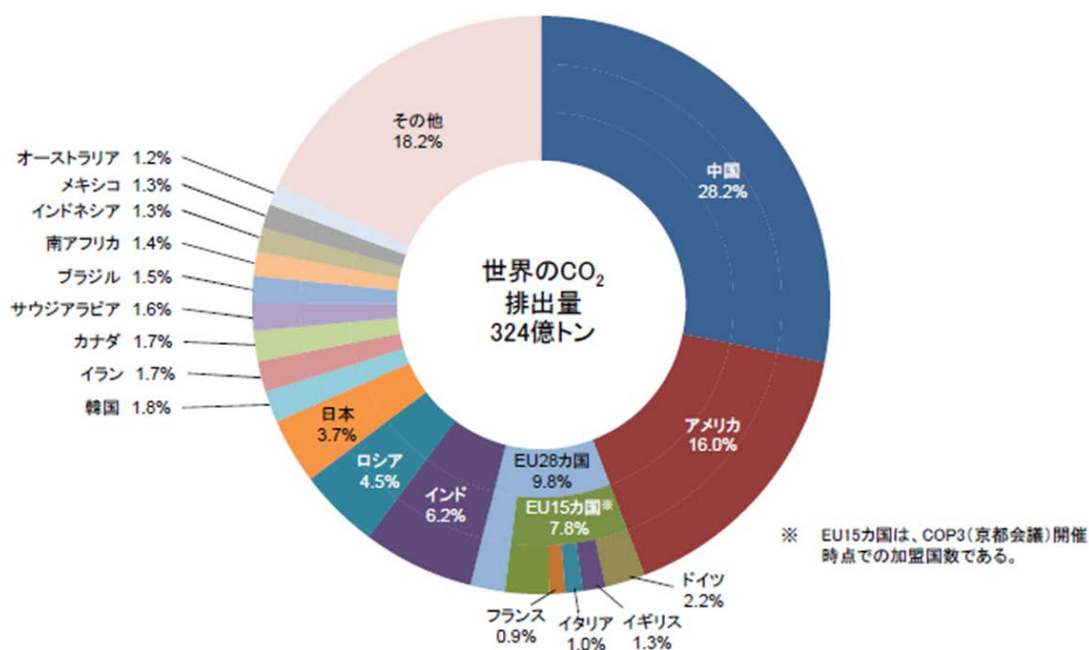


図 1-1 2013年の世界のCO<sub>2</sub>排出量の内訳

(出典) 環境省、IEA, “CO<sub>2</sub> EMISSIONS FROM FUEL CONSUMPTION”を元に作成

この報告書の内容を受けて、2015年12月にフランス・パリで開催されたCOP21において、2020年以降、すべての国が協調して気候変動問題に取り組むための新しい国際合

<sup>1</sup> 人為起源による気候変化、影響、適応および緩和方策に関し、科学的、技術的、社会経済学的な見地から包括的な評価を行うことを目的として、1988年に世界気象機関（WMO）と国連環境計画（UNEP）により設立された組織。

意である「パリ協定」が採択された。パリ協定の大きな特徴は途上国を含む世界中の国がCO<sub>2</sub>等の温室効果ガスの削減目標（約束草案）を掲げたことであり、世界共通の目標として、平均気温の上昇を産業革命以前に比べて2℃未満に抑えること（2℃目標）、更に1.5℃に抑える努力をすることが言及された。また、各国は5年ごとに削減目標を提出し、目標に向けた取り組み状況をレビューすることが定められている。

パリ協定は法的拘束力がある国際協定であり、55カ国および世界の排出量の55%を超える国の批准という発効要件を満たし、2016年11月4日に発効した。しかしながら、パリ協定は京都議定書とは異なり、各国の排出削減目標達成義務がなく、努力目標であるため、各国の約束草案をすべて合計した場合のCO<sub>2</sub>の排出量はIPCCが算出した2℃目標達成には遠くおおよぼ、さらなる追加のGHG削減対策が必要である。

今後、世界全体での長期目標達成に関する進捗管理を実施していく中で、2℃目標達成のために削減量が足りない場合にどう対処するかは課題はあるものの、世界がCO<sub>2</sub>排出を前提とする「低炭素社会」からCO<sub>2</sub>を排出しない「脱炭素社会」に向けて大きく舵を切る必要があることを示唆するものである。

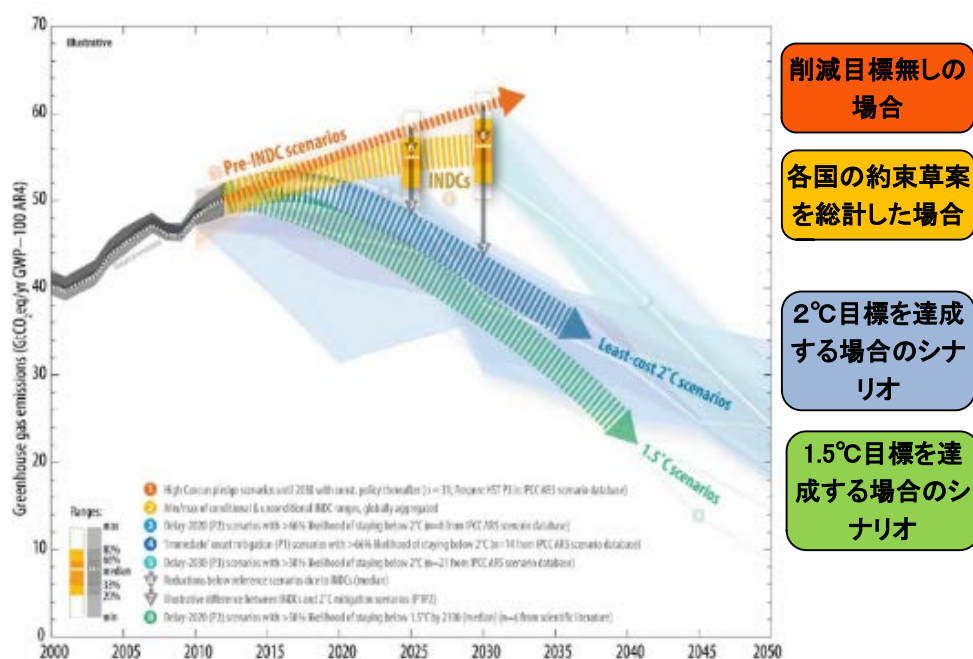


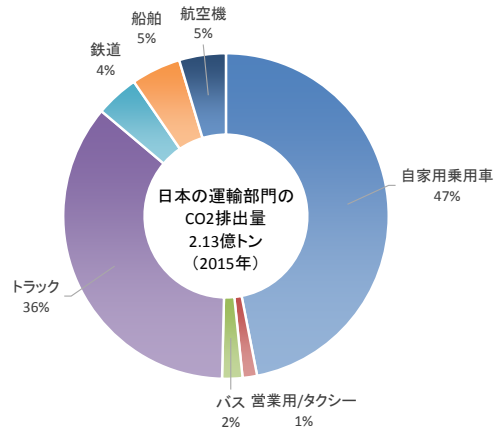
図 1-2 それぞれの IPCC シナリオにおける世界の年間温室効果ガス排出量（CO<sub>2</sub> 換算）

（出典）UNFCCC, “Aggregate effect of the intended nationally determined contributions”

日本における 2015 年度の温暖化ガス排出量は、CO<sub>2</sub> 換算で 13 億 2,500 万トンとなっており、そのうち、運輸分野は、約 2 割の 18.6%の 2 億 1,300 万トンである。運輸モード別では、自動車分野で 86.2%と圧倒的な量を占めており、船舶では 4.9%、鉄道で 4.3%となっているが、バス・タクシーの 3.4%よりも多く CO<sub>2</sub> を排出していることが分かる。

表 1-1 日本における温室効果ガス（CO<sub>2</sub>換算量）の内訳

	排出量(千トン)	割合(%)
鉄道	9,158	4.3%
船舶	10,515	4.9%
航空機	9,899	4.6%
自家用乗用車	100,124	46.9%
営業車/タクシー	3,068	1.4%
バス	4,308	2.0%
トラック	76,276	35.8%
合計	213,348	100%



(出典) 環境省、「日本の温室効果ガス排出量データ（1990～2015年度確報値）」より作成

現状では、このような地球温暖化関係の国際的な規制について、鉄道分野を対象としたものはないものの、船舶分野では国際海運を対象にした規制として国際海事機関（IMO：International Maritime Organization）において、排出量ではなく、エネルギー効率の規制を2013年より導入している。具体的には、2013年1月1日以降に建造され、国際航海に従事する400Gt以上の船舶は、以下の2つの規制を受けている。

- ・ EEDI（Energy Efficiency Design Index）：船種別による船舶のエネルギー効率を規制
- ・ SEEMP（Ship Energy Efficiency Management Plans）：船舶のエネルギー効率改善手段計画の作成を規定

## 1.2 大気汚染防止対策の必要性

大気汚染について、鉄道分野では国際的な枠組みが設置されていないものの、船舶分野ではIMOのMARPOL条約附属書VIで、国際海運に従事する船舶への規制が行われている。

具体的には、船舶の機関から発生するSO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、PMを規制対象としており、エンジンや燃料油に対する規制となっている。また、一般海域より厳しい排出規制が課せられる指定海域（ECA：Emission Control Area）も定めている。

NO<sub>x</sub> 規制については、新造船に搭載される出力130kW以上のディーゼルエンジンおよび2000年1月1日以降2010年12月31日までに建造に着手した船舶が対象である。規制内容としては、エンジンの定格回転数に応じて、定格出力当たりのNO<sub>x</sub>排出量に上限を設定している。

一般海域においては現在2次規制が実施されており、のECAにおいては3次規制が実施されている。なお、ECAは現在北米・米国カリブ海に限られるが、2021年より北海・バルト海が追加される予定である。

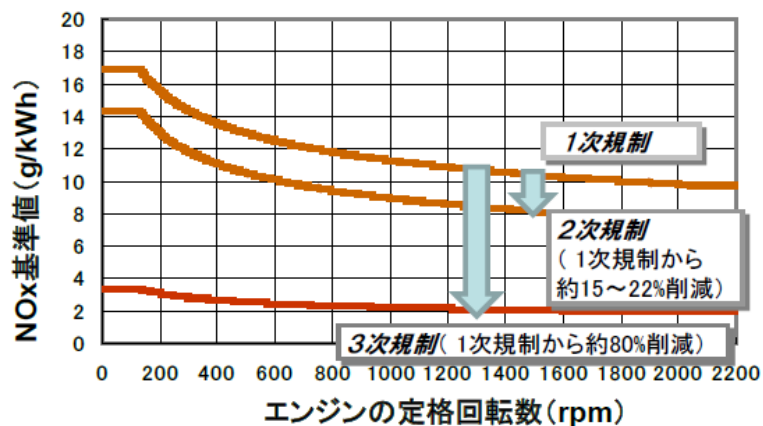


図 1-3 エンジン定格回転数毎の NO<sub>x</sub> 排出上限値

(出典) 国交省「船舶からの窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) 排出削減規制の概要



図 1-4 現在定められている ECA (左) および 2021 年から追加設定される ECA (右)

(出典) 国土交通省「船舶からの窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) 排出削減規制の概要



一方、SOxの排出量は燃料油の硫黄含有率に依存することから、硫黄分の濃度上限が設定され、一般海域およびECAに分けて段階的に規制が強化されている。ECA内を運航する船舶の燃料規制は2015年から硫黄含有率が0.1%に規制され、ECA外の一般海域では、2020年1月から硫黄含有率を0.5%に抑える規制が実施されることが決定されている。現在、SOx規制のあるECAは北米、米国カリブ海、北海およびバルト海となっている。

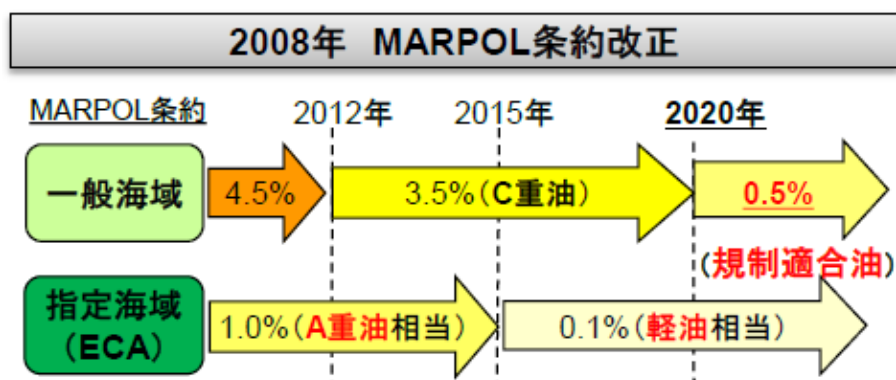


図 1-5 一般海域およびECAにおける燃料の硫黄含有率規制

(出典) 国交省、硫黄酸化物 (SOx) および粒子状物質 (PM) 削減のための国際規制

一方、地域規制であるが、欧州の鉄道と内陸水路船部門における排出量規制には、国連欧州経済委員会自動車基準調和世界フォーラムで策定された世界統一基準、Non-Road Mobile Machinery (NRMM) があり、非道路用移動式機械の内燃機関から排出される汚染物質の規則を定めている。NRMMはこれまで規制されていなかった内燃機関による排出の規制の適用により、環境性能が悪い内燃機関のフェーズアウトを目的としている。

NRMMは2017年1月1日から施行されており、鉄道と内陸水路船の内燃機関の排出規制は次に示す表の通りである。なお、Stage Vの規制の開始時期は現在検討されている最中であるが、早くて2019年に全ての内燃機関が対象になる見通しとされている<sup>2</sup>。

表 1-2 鉄道車両および機関車の Stage V の大気汚染物質排出上限値

エンジン カテゴリー	出力 (kW)	機関使用 開始年	CO	HC	NOx	PM	PM
			g/kWh				1/kWh
Locomotives	P>0	2021	3.50	4.00		0.025	—
Railcar	P>0	2021	3.50	0.19	2.00	0.015	1 x 10 <sup>12</sup>

(注) 鉄道機関については StageIVの規制は存在しない。

(出典) Transport policy.net, "EU locomotives: emissions" <http://www.transportpolicy.net/standard/eu-locomotives-emissions-2/>

<sup>2</sup> International Council on Clean Transportation, "Policy update: European Stage V Non-road emission standards" 2016 ([http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/EU-Stage-V\\_policy%20update\\_ICCT\\_nov2016.pdf](http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/EU-Stage-V_policy%20update_ICCT_nov2016.pdf))



表 1-3 鉄道車両および機関車の StageⅢA、ⅢB の大気汚染物質排出上限値

エンジン カテゴリー	出力 (kW)	機関使用 開始年	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM
			g/kWh				
StageⅢA							
RC A	P>130	2006	3.5	—	4.0	—	0.2
RLA	130≤P≤5 60	2007	3.5	—	4.0	—	0.2
RH A	P>560	2009	3.5	0.5	—	6.0	0.2
StageⅢB							
RC B	P>130	2012	3.5	0.19	—	2.0	0.025
RB	P>130	2013	3.5	—	4.0	—	0.025

(注) 機関車：R, RL, RH／鉄道車両：RC

(出典) Transport policy.net, “EU locomotives: emissions”

<http://www.transportpolicy.net/standard/eu-locomotives-emissions-2/>

表 1-4 内陸水路船の StageⅢA 大気汚染物質排出上限値

エンジン カテゴリー	行程容積 dm <sup>3</sup> per cylinder	機関使用 開始年	CO	HC+NOx	NOx	
			g/kWh			
V1:1	D ≤ 0.9, P > 37 kW	2007	5.0	7.5	0.40	
V1:2	0.9 < D ≤ 1.2			7.2	0.30	
V1:3	1.2 < D ≤ 2.5			7.2	0.20	
V1:4	2.5 < D ≤ 5			2009	7.2	0.20
V2:1	5 < D ≤ 15				7.8	0.27
V2:2	15 < D ≤ 20, P ≤ 3300 kW				8.7	0.50
V2:3	15 < D ≤ 20, P > 3300 kW				9.8	0.50
V2:4	20 < D ≤ 25				9.8	0.50
V2:5	25 < D ≤ 30			11.0	0.50	

(出典) Diesel net, “EU: Nonroad engines”

<https://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php#vessel>

表 1-5 内陸水路船の Stage V 大気汚染物質排出上限値

エンジン カテゴリー	出力 (kW)	機関使用 開始年	CO	HC	NOx	PM	PM
			g/kWh				1/kWh
IWP/IWA- v/c-1	19 ≤ P < 75	2019	5.00	4.70		0.30	
IWP/IWA- v/c-2	75 ≤ P < 130	2019	5.00	5.40		0.14	
IWP/IWA- v/c-3	130 ≤ P < 300	2019	3.50	1.00	2.10	0.10	
IWP/IWA- v/c-4	P ≥ 300	2020	3.50	0.19	1.80	0.015	1 x 10 <sup>12</sup>

(注) 内陸水路船については StageⅢB と StageⅣの規制はない。

(出典) Diesel net, “EU: Non-road engines”

<https://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php#vessel>

### 1.3 鉄道・船舶分野における燃料電池の可能性

以上のとおり、地球温暖化および大気汚染に関する交通部門への規制は世界中で高まっている。

特に、環境に優しいとされてきた鉄道、船舶についても、徐々に規制が始まっている状況であり、欧州では、パリ協定を念頭に、脱炭素社会に移行する環境が確実なものとなっていくなか、既に内燃機関では達成が非常に難しい領域に達してきている。実際に、イギリスとフランスでは 2040 年に内燃機関による自動車の新車販売を禁止する方針が打ち出されており、内燃機関に代わる代替動力源の必要性が本格的に検討され始めている。

環境対策については、従来、排ガスの太宗を占める自動車分野において多くの取り組みが先行して行われてきており、代替の燃料や動力源についても自動車では多様となってきた。現状では、天然ガス (CNG)、ハイブリッド (HV)、電気 (EV)、プラグインハイブリッド (PHV)、さらには、水素を利用した燃料電池 (FCV) が実用化されている。これらのうち、原理的に化石燃料の使用を完全にゼロにすることが可能で、走行時の CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> の排出がゼロとなるのは電気と燃料電池のみであり、前述の各種の環境規制を最も効果的にクリアできると考えられている。

電気 (バッテリー) と燃料電池の特徴と相違についてであるが、バッテリーはモーターと組み合わせて簡素な組み立てとなるが、一方でエネルギー密度が低いため、航続距離を大きくしようとすると大量のバッテリーを搭載する必要が生じる。このため、重量の大きなバッテリーを運搬する場合は、全体としてはエネルギー効率が悪化する。一方、燃料電池は、燃料として水素タンクを必要とするが、バッテリーと比較すると相対的にエネルギー密度が高く、大きなパワーや航続距離の拡大に適しているとされている。

鉄道の場合、日本の鉄道分野で現在実用化されているバッテリー (リチウムイオン電池) を用いた鉄道車両は、最大約 20km 程度の走行が可能であるにとどまり、電池の充電も頻繁に必要となる。充電時にはリチウムイオン電池が発熱するため、充電速度には限界があることから、鉄道車両では稼働率が低下する要因となってしまうことが懸念される。

船舶においても、自動車とは異なり、水の抵抗が強くエネルギーを継続的に大量に消費する運航形態であるため、体積エネルギー密度の低いバッテリーでは航続距離が得られず、充電にも非常に長い時間が必要になってしまう。

一方、インフラについては、燃料電池の場合、水素ステーションに多額の建設コストがかかるが、定期的に同じ区間を運行する路線バスや鉄道、定期遊覧船のような分野では、水素ステーションが最低 1 ヶ所で済むため、水素供給インフラのコストが抑えられる。

以上より、鉄道と船舶分野においては、地球温暖化対策や大気汚染防止の強化の流れのなかで、内燃機関に代わる動力源として燃料電池の利用が期待される。

表 1-6 移動体駆動方式各技術の比較

	CO2	大気汚染 (NOx、SOx、 PM)	価格	イン フラ	航続 距離	重量	寿命	その他	主な用途
内燃機関 (石油)	△	△	◎	◎	◎	◎	◎		ほぼすべてのモビリティで利用可能
内燃機関 (天然ガス)	○	○	○	○	◎	◎	◎	燃料漏洩時の温室効果が大	ほぼすべてのモビリティで利用可能
バッテリー	◎*	◎*	△	○	△	△	△	発電の種類で環境効果が大きく異なる 長時間の充電が必要	短距離の乗用車、 短距離の電車
燃料電池	◎*	◎*	△	△	○	○	○	価格・供給インフラで課題あり	バス、中・長距離乗用車、鉄道、船舶

\* 運転段階の排出量(Tank-to-Wheel)を想定

## 2 水素社会に向けた取り組み

第 1 章では、鉄道と船舶分野においては、内燃機関に代わる代替動力源の可能性として燃料電池が有望であることを示した。本章では、燃料電池と燃料である水素に着目し、日本、欧州ならびに米国における水素の社会的な位置づけと、水素社会の実現に向けた政策面での取り組みを紹介する。

### 2.1 日本における取り組み

2014 年 4 月に策定された第四次エネルギー基本計画では、水素について「多様なエネルギー源から製造され、様々な形態での貯蔵・輸送が可能である水素は、将来の二次エネルギーの中心的役割を担うことが期待される」と記載されており、水素社会の実現に向けて「サプライチェーン全体を俯瞰した戦略の下、多様な技術開発や低コスト化を推進するとともに、本格的な利活用に向けた体制整備を戦略的に進める」ことが明記されている。

新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が 2015 年に発行した水素エネルギー白書においては、水素エネルギーを導入することの意義として、エネルギーセキュリティの向上、省エネルギー・環境負荷低減、産業振興といった点が挙げられている。エネルギーセキュリティについては、日本の運輸部門はエネルギーのほぼ全てを原油・石油製品に依存しているため、水素を利用する FCV を利用することで、地政学リスクの低い地域からエネルギーを調達し、運輸部門に供給することが可能となると考えられている。また、水素エネルギーの利活用は FCV や家庭用燃料電池に留まらず、船舶や鉄道分野、水素発電等、日本の多くのエネルギー消費分野に対応しうるポテンシャルがあるとされている。省エネルギー・環境負荷低減については、燃料電池の効率の高さや、水素製造時における再生可能エネルギーや CO<sub>2</sub> 回収・貯留技術（CCS）の利用により、CO<sub>2</sub> 排出量を大幅に削減できる可能性がある。産業振興については、国内における水素・燃料電池関連市場規模は、2030 年に 1 兆円、2050 年に 8 兆円に拡大するとみられており、今後大きな成長が期待できると考えられる。

このような背景のもと、資源エネルギー庁は 2014 年に水素・燃料電池戦略ロードマップを策定しており、水素社会の実現に向けた取り組みをフェーズ 1～3 に分け示している。最も早く着手されるフェーズ 1 では、水素利用の飛躍的拡大を目的として、足元で実現しつつある定置用燃料電池や FCV の活用を大きく広げ、我が国が世界に先行する水素・燃料電池分野の世界市場を獲得するものとしている。フェーズ 2 は 2020 年代後半頃からの着手を想定しており、フェーズ 1 で発展させた水素需要を水素発電等の導入によりさらに拡大しつつ、水素源を未利用エネルギーにも広げ、従来の「電気・熱」に「水素」を加えた新たな二次エネルギー構造を確立するものとしている。さらに、2040 年頃を想定するフェーズ 3 では、水素製造に CCS を組み合わせることや、再生可能エネルギー由来の水素を活用することで、トータルでの CO<sub>2</sub> フリー水素供給システムを確立することを目的としている。

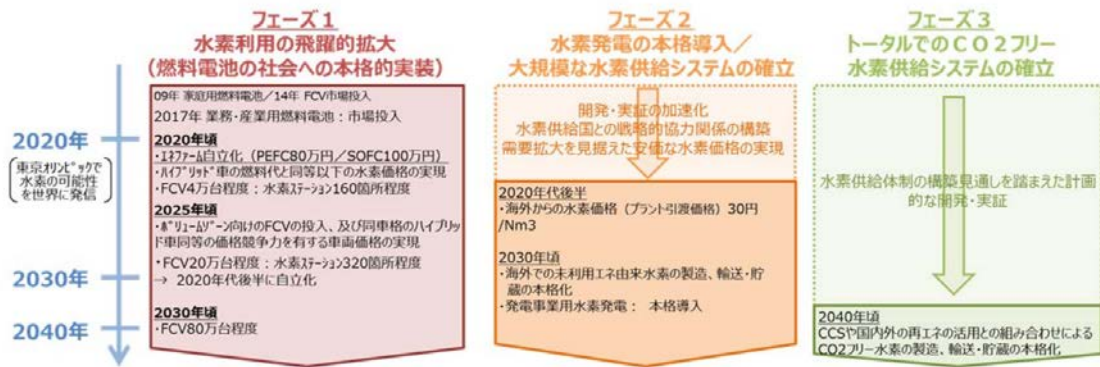


図 2-1 水素・燃料電池戦略ロードマップの概要

(出典) 経済産業省「水素・燃料電池戦略ロードマップ改訂版」

さらに、2017年4月に開催された第1回「再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議」において、世界に先駆けて水素社会を実現するため、政府一体となって取組を進めるための基本戦略を年内に策定することが示され、同年12月26日に「水素基本戦略」が公表された。水素基本戦略では、水素の意義と重要性として、①供給・調達先の多様化による調達・供給リスクの根本的減、②電力、運輸、熱・産業プロセスのあらゆる分野の低炭素化、③3E+Sの観点からの意義、④世界へ先駆けたイノベーションへの挑戦を通じた国際社会への貢献、⑤産業振興・競争力強化、⑥諸外国における水素の取組を先導、の6点を挙げている。

**2. 水素の意義と重要性**

(1) 供給・調達先の多様化による調達・供給リスクの根本的減  
 > 水素は、再生含め多様なエネルギー源からの製造・貯蔵・運搬が可能。特定のエネルギー源に依存しない多様な構造に変革。

(2) 電力、運輸、熱・産業プロセスのあらゆる分野の低炭素化  
 > 水素は利用時にCO2を排出しない。製造段階でのCCSや再生エネルギーの活用で、トータルでCO2フリーのエネルギー源に。  
 > 燃料または燃料電池との組合せであらゆる分野での究極的な低炭素化が可能。

(3) 3E+Sの観点からの意義  
 > 水素社会の実現は手段。水素社会を実現することで3E+Sの達成を目指す。

(4) 世界へ先駆けたイノベーションへの挑戦を通じた国際社会への貢献  
 > 日本の水素技術を海外展開し、世界の低炭素化を日本がリード。

(5) 産業振興・競争力強化  
 > 日本の水素・燃料電池技術は世界最高水準。国内外での積極展開により、新たな成長産業の一つに。

(6) 諸外国における水素の取組を先導  
 > グローバルな動向を常に把握し、日本が世界の水素社会実現のトップリーダーに。

図 2-2 水素基本戦略における水素の意義と重要性

(出典) 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議「水素基本戦略(概要)」

上記の意義を踏まえ、水素社会の実現に向けて取るべき戦略として、水素の低コスト化や国際的な水素サプライチェーンの構築、電力分野やモビリティ分野、産業プロセス等での水素の利用、国際標準化といったトピックが掲げられている。特にモビリティ分野に関しては、FCVやFCバスのみならず小型船舶の燃料電池化を進めることが明記されており、燃料電池船のマーケットとしてプレジャーボートや旅客船、漁船等を挙げている。また、2017年12月にNEDOで発表された「燃料電池・水素技術開発ロードマップ」においては、2025年以降に船舶・鉄道への拡大が示されている。

なお、日本におけるFCVの導入状況については、2014年12月にトヨタ自動車が発売したMIRAIを発売し、その後2016年3月にホンダが発売したCLARITY FUEL CELLを発売しており、国内における累計導入台数は、2017年10月末時点で約1,600台に到達（補助金交付決定ベース）している。なお、都道府県別では、トヨタ自動車の本社が所在する愛知県における導入台数が最も多く、全体の約3分の1（約600台）を占める。次いで、東京都における導入台数が多い（284台）。

前述の水素・燃料電池戦略ロードマップでは、FCVの導入目標を2020年に4万台、2025年に25万台、2030年に80万台と定めており、今後一層の導入拡大が期待される。

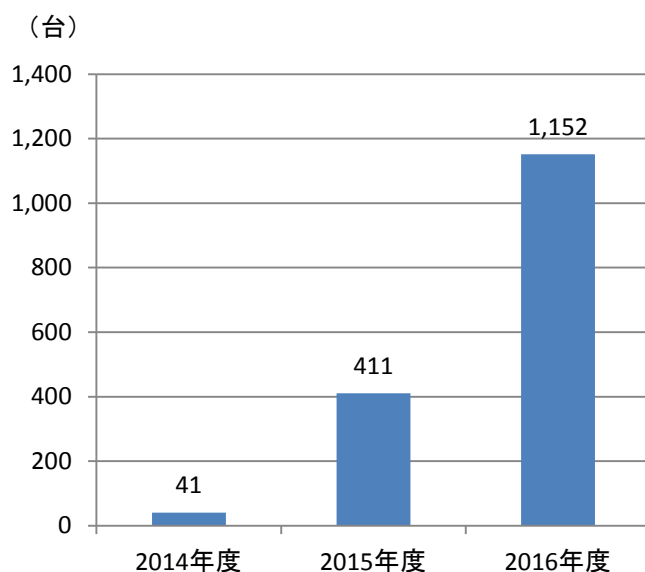


図 2-3 FCV 向け補助金交付台数の推移

(出典) 一般社団法人次世代自動車振興センターウェブサイトより作成



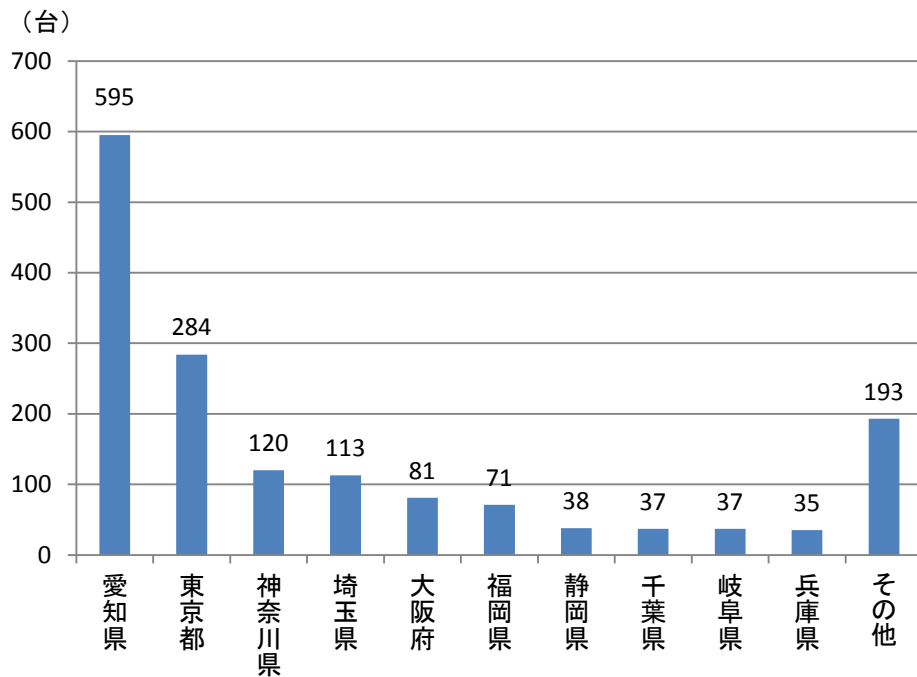


図 2-4 都道府県別累計導入台数

(出典) 一般社団法人次世代自動車振興センターウェブサイトより作成

また、日本における家庭用燃料電池（エネファーム）については、2009 年より市場導入が開始されており、2017 年 5 月に累積導入台数 20 万台を突破している。なお、水素・燃料電池戦略ロードマップにおける導入目標は、2020 年に 140 万台、2030 年に 530 万台となっている。

導入拡大に伴う量産効果により、エネファームの機器価格は当初の 5 割程度まで低減しており、直近では電解質に固体高分子膜を用いた PEFC 形で 113 万円、SOFC 形で 135 万円程度となっている。経済産業省による価格目標は、PEFC 形で 2019 年までに 80 万円、SOFC 形で 2021 年までに 100 万円であり、さらに NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ（2017 年版）では 2030 年頃の価格目標を 50 万円程度としている。このように、今後更なるコスト低減が見込まれている。

エネファーム以外の業務用燃料電池では、PAFC（りん酸形）や SOFC（固体酸化物形）の導入事例が多く、単機出力は 3kW～200kW まで幅がある。

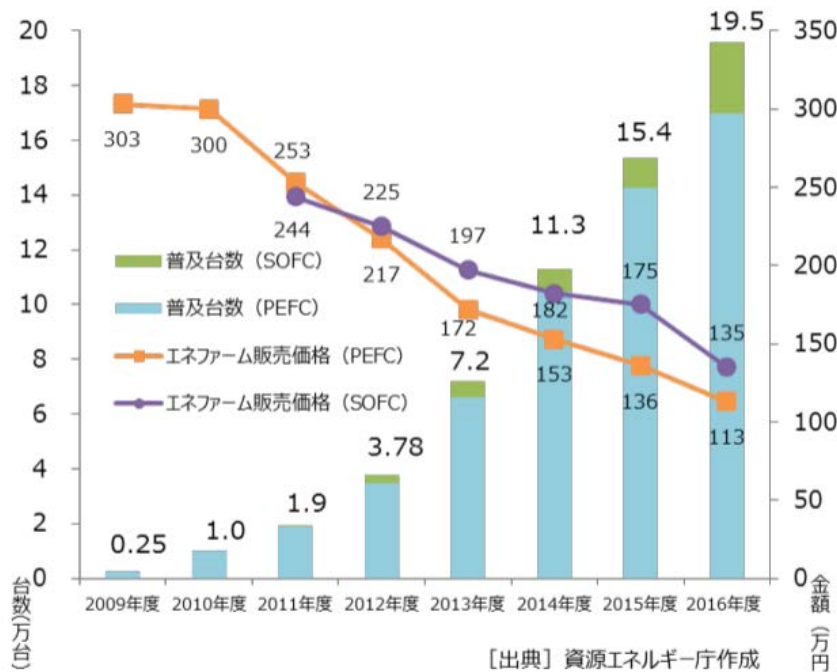


図 2-5 エネファームの累計販売台数および価格の推移

(出典) 経済産業省「水素社会の実現に向けた取組について」、平成 29 年 4 月 11 日

表 2-1 代表的な業務用燃料電池

企業	富士電機	京セラ	ブルームエナジージャパン
概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>PAFC(りん酸形)、出力105kW(発電端)で、燃料は都市ガス、バイオガス、純水素に対応可能。</li> <li>主な用途は、病院・オフィスビル等におけるコージェネレーションや下水処理場における消化ガス(メタン)を利用した発電・熱利用等。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>業務用3kW-SOFCシステムを2017年6月より受注開始。</li> <li>小規模な飲食店や福祉施設等における利用を想定。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>米ブルームエナジーとソフトバンクの合弁</li> <li>業務用SOFC(単機出力200kW)の国内販売を実施。</li> <li>慶應義塾大学や東京汐留ビルディング等への導入実績あり。</li> </ul>

(出典) 富士電機ウェブサイト、京セラウェブサイト、ブルームエナジージャパンウェブサイトより作成

日本では、FCV の購入にあたり、CEV 補助金 (クリーンエネルギー自動車導入事業費補助金) により、MIRAI の場合は 202 万円、CLARITY FUEL CELL の場合は 208 万円の購入補助金を受けることができる (いずれも 2017 年 6 月時点)。また、各地方公共団体も FCV の導入補助金を設けている場合があり、東京都の場合はさらに 101 万円の補助金を都から受けることが可能で、購入者の実質負担額は MIRAI の場合 420.6 万円となり、購入者の負担割合は本体価格の 58%に抑えられている。



図 2-6 国および地方公共団体による FCV 購入補助金のイメージ

(出典) 東京都ウェブサイト (<https://www.tokyo-CO2down.jp/individual/subsidy/fuel-cell/>)

エネファームの補助金については、2009 年の販売開始当初 1 台当たり 140 万円であったものが、機器価格の低減とともに年々引き下げられ、2017 年度は PEFC 形で最大 11 万円、SOFC 形で最大 16 万円となっている。なお、導入先が既築住宅、LP ガス利用、寒冷地仕様の場合には追加支給を受けることが可能となっている。

日本における燃料電池技術開発支援 (NEDO の技術開発プロジェクト) 等には次の事業等がある。

- NEDO 固体高分子形燃料電池利用高度化技術開発事業 (平成 29 年度予算: 27.1 億円、平成 31 年迄)
- NEDO 固体酸化物形燃料電池等実用化推進技術開発 (平成 29 年度予算: 3.9 億円、平成 29 年迄)

## 2.2 欧州における取り組み

欧州は 2050 年までの GH 削減目標を段階的に設定しており、2020 年、2030 年および 2050 年における GHG 削減目標を発表している。2020 年および 2030 年の目標は GHG 削減以外に欧州のエネルギー消費量のうちの再生エネルギーが占めるシェアおよびエネルギー効率の向上に関する目標も設定している。

2020 年の目標は “Climate & Energy Package” と称され 2009 年に施行されている。2030 年の目標は “Climate & Energy Framework” と称され 2014 年に施行されている。2030 年のエネルギー効率における目標は 2020 年に見直しを行う予定であり、現在のエネルギー効率の目標である 27% を 30% に上げる可能性がある。最終的には 2050 年に 1990 年比で 80 ~ 90% 削減することを掲げており、非化石証書などのクレジット購入に頼らず、欧州域内のみでの削減を目指している。

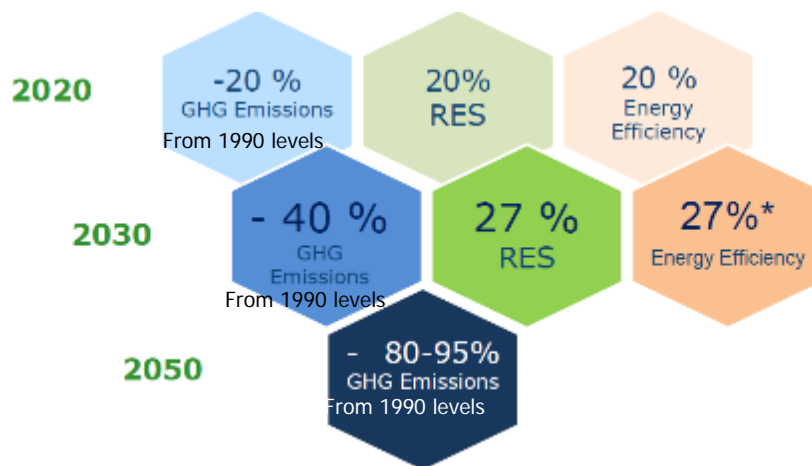


図 2-7 欧州の環境とエネルギーに関する目標

(注) RES: Renewable Energy Supply

(出典) EC, "Sustainable & Competitive waterborne transport—EU policy priorities"

EC が発表している 2050 年の CO<sub>2</sub> 排出量目標では、全てのエネルギー消費部門による大幅な削減貢献が求められている。運輸部門においては 2050 年までに 1990 年比で 60%以上の GHG 削減が可能とされており、ハイブリッド、バイオ燃料、電気自動車の利用が拡大することが見込まれている。なお、バイオ燃料は航空やその他重量物を扱う運輸部門で利用が拡大すると見込まれている。

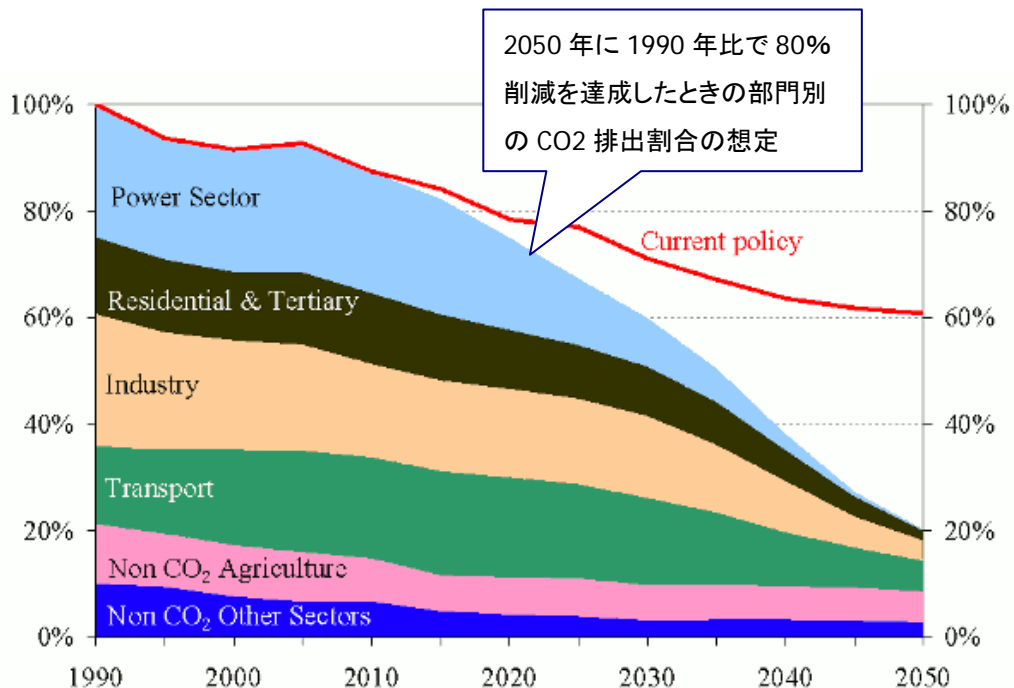


図 2-8 2050 年目標達成に向けた部門別の削減シナリオ

(出典) EC, "Climate Action: 2050 low-carbon economy"より作成

([https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en))

船舶に関連する環境目標は、EC が 2007 年に発表した “Maritime Transport Strategy 2018”、2011 年に発表した “Transport 2050” および 2013 年に発表した海運業界における CO<sub>2</sub> 削減戦略の 3 つが存在する。

“Maritime Transport Strategy 2018” は欧州の海運業界の競争力を向上する戦略を打ち出している。水素や燃料電池の利用は明確には記載はないが、“Greener Maritime Transport” および “Innovation and technological development” が重要な柱として挙げられており、長期的には水素や燃料電池の利用を見据えていると考えられる。さらに、“Greener Maritime Transport” ではゼロエミッションおよびゼロ廃棄物を長期的な目標として掲げるべきと提言している。

“Transport 2050” は運輸部門の白書であり、2050 年までに運輸部門 CO<sub>2</sub> 排出量を 2005 年比で少なくとも 40%削減する目標を掲げている。なお、目標は適宜見直される予定であり、50%の削減に強化される可能性がある。

また、EC が海運業界における CO<sub>2</sub> 排出削減の戦略、“Integrating maritime transport emissions in the EU’s greenhouse gas reduction policies” を 2013 年に発表し、以下 3 つのステップで CO<sub>2</sub> 削減を推進していく方針を設定した。

- ・ 船舶による CO<sub>2</sub> 排出のモニタリング、報告、承認を実施
- ・ 海運業界における CO<sub>2</sub> 排出量削減目標を設定
- ・ 中長期における市場メカニズムなどを含むその他の対策案を策定

### 2.2.1 欧州における燃料電池支援策の現状

欧州では、水素・燃料電池に関する基礎研究から実証プロジェクトまで様々な機関が助成プログラムを用意している。特に、FCH 2 JU は欧州委員会 (EC) および Hydrogen Europe、N.ERGHY の 3 団体から構成される官民パートナーシップであり、欧州における水素・燃料電池関連の技術開発を推進している。

Hydrogen Europe は欧州の水素に関する業界団体として中小企業から大企業、約 105 社をメンバーとする水素における最も大きい団体として知られている。N.ERGHY は FCH 2 JU に参加している欧州諸国の大学や研究機関を束ねた団体であり、FCH 2 JU の毎年の計画および中期計画の作成を担当している。

FCH 2 JU の予算額としては、EU の研究助成プログラムである Horizon 2020 が実施される 2014 年～2020 年の 7 年間で合計 13.3 億ユーロ (約 1,700 億円) が計上されている。

EC による支援策の例としては Connecting Europe Facility & Trans Europe Transport Network があり、港や船舶において CO<sub>2</sub> 排出削減の設備導入を助成している。FCH 2 JU は水素と燃料電池の技術開発や実証事業を助成している。また EIB (欧州投資銀行) による支援策のひとつである Green Shipping Guarantee は EC と共同で運用しており、船舶の大気汚染物質および CO<sub>2</sub> 排出を削減する環境技術の取り付けや改造を助成している。燃料電池の増設も助成対象に含まれる。

欧州における水素・燃料電池開発の総投資額は 2005 年から増加傾向を辿っている。特に FCH 2 JU や国の支援より民間企業による投資が最も増加しており、2005 年～2010 年の間で累計 25 億ユーロに上る。

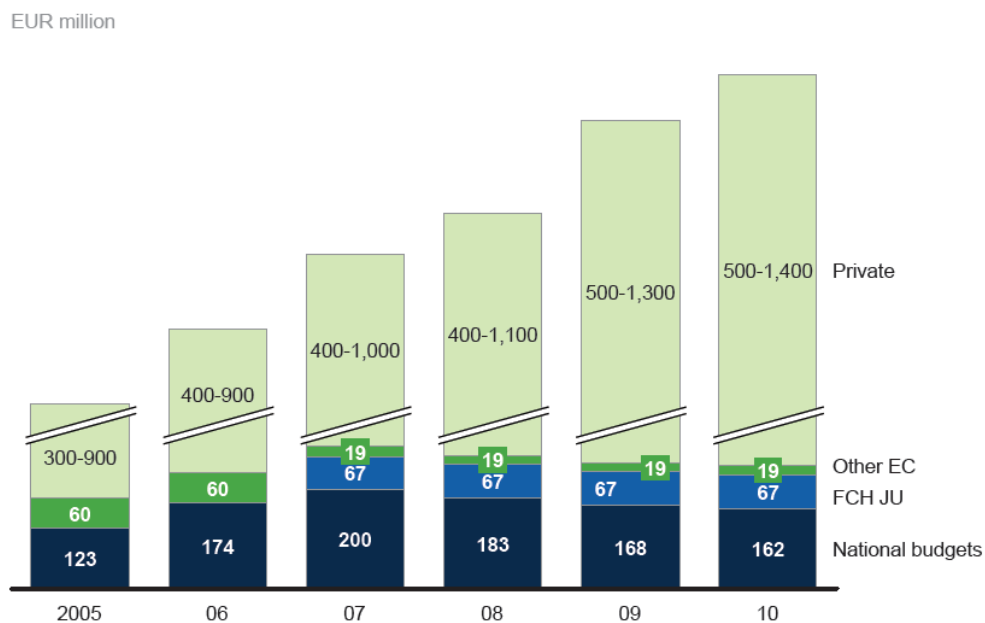


図 2-9 2005 年～2010 年における欧州の水素・燃料電池投資額

(出典) FCH 2 JU, “Trends in investments, jobs and turnover in the Fuel cells and Hydrogen sector”

FCH 2 JU が発表している最新の 2014 年～2020 年の予算計画では、期間中毎年 6.46 億ユーロの助成金が確保され、そのうち運輸部門は約 47.5%を占める計画となっている。さらに、運輸部門のうち、基礎研究が約 14.5%、実証プロジェクトが約 33%を占める計画となっている。

欧州では、水素・燃料電池技術導入に当たり FCH 2 JU の助成プログラムを活用しているケースが多い。FCH 2 JU の助成プログラムに採択されたプロジェクトは 2008 年から 2017 年 3 月にかけて累計 203 件にのぼる。(前身の FCH JU も含む)

欧州における燃料電池自動車(乗用車および小形商用車)の導入数は、2013 年から増加しており、2016 年時点で FCH 2 JU の補助を受けたものが 240 台、全体では 588 台に達している。メーカー別では、現状では韓国の Hyundai 製 FCV の導入数が最も多く、FCV 導入量全体の約 8 割を占めている。

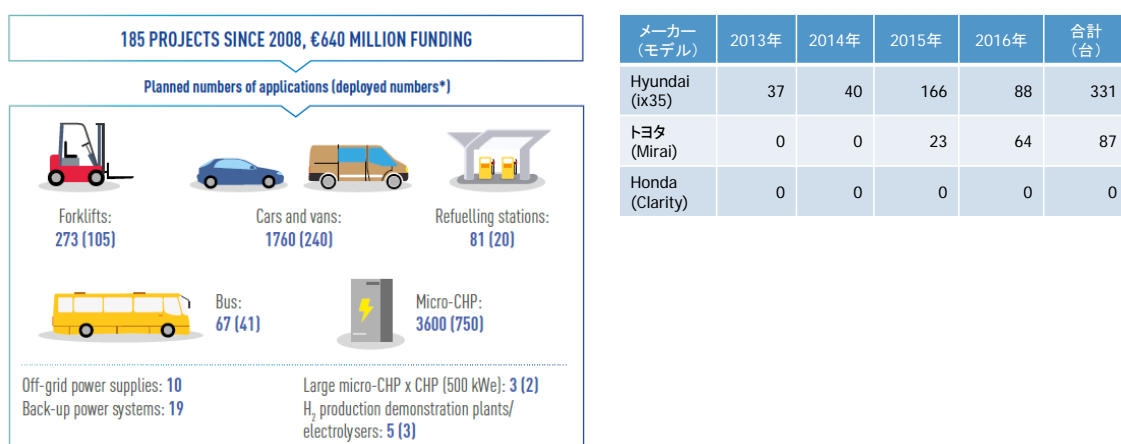


図 2-10 欧州における燃料電池導入実績と導入目標

(注) 2020 年の目標値。左図括弧のなかは 2016 年 10 月 1 日時点の FCH 2 JU 支援による導入済みの数。

(出典) FCH 2 JU, “Key to sustainable energy and transport”ならびに European Alternative Fuels Observatory(EAFO), “Passenger Cars FCV”より作成

FCH 2 JU は、最新の中期計画のなかで 2023 年までの燃料電池における技術開発目標を発表している。中期計画では、エネルギーと運輸の 2 つの “Innovation pillar” と呼ばれる研究開発の柱を軸に活動を実施している。エネルギーの柱では燃料電池の発電利用や水素の製造・運搬・供給等を研究しており、運輸の柱では乗用車、燃料充填インフラ、産業用の移動体、海運、鉄道および航空における燃料電池利用の研究を実施している。船舶における燃料電池の利用は現段階では推進システムとしての利用ではなく補助動力装置 (Auxiliary power unit) として利用が想定されている。FCH 2 JU が発表している技術開発ターゲットの詳細については表 2-2 を参照されたい。



表 2-2 FCH 2 JU 発表の船舶向け燃料電池技術開発ターゲット

導入用途	パラメーター	単位	2012年	FCH 2 JU 目標		
				2017年	2020年	2023年
船舶における補助動力装置 (APU) (100~400kW)	FCシステムコスト	€/kW	>10,000	10,000	3,000	1,500
	寿命	時間	2,000	10,000	20,000	40,000

(出典) FCH JU, “Multi-Annual Work Plan 2014-2020”より作成

## 2.3 米国における取り組み

米国における水素・燃料電池の研究開発はエネルギー省 (DOE) の Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE) の Fuel Cells Technologies Office (FCTO) が担当している。現在水素・燃料電池に関するロードマップやビジョンを示しているものは以下の2つがある。

### (1) The National Hydrogen Energy Roadmap

米国エネルギー省が 2002 年 11 月に策定し、水素・燃料電池プログラムの研究ストリームの区分などのフレームを示している。水素に取り組む意義として、石油輸入量を減らすことによる米国のエネルギーセキュリティ向上への貢献および運輸部門と発電部門による大気汚染の改善が挙げられている。

### (2) Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan

FCTO が 2003 年に初めて策定し、その後 2005 年に更新。2012 年には技術進歩を反映する形で大きく更新した。FCTO の四つの研究ストリームである燃料電池 R&D、水素製造、水素輸送および水素貯蔵の章から構成されており、研究成果を反映するため定期的に更新している。

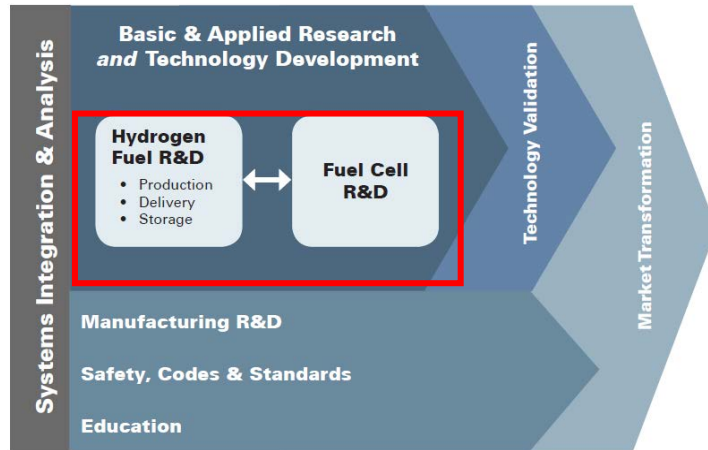


図 2-11 FCTO の水素・燃料電池プログラムにおける活動種類

(注) 赤枠内：4つの研究ストリーム

(出典) FCTO, “Multi-year research, development, and demonstration plan” 2016

FCTO の Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan は定期的に技術開発の成果などを反映するため見直されており、2016 年の更新時には 2020 年の技術目標を発表した（図 2-12 を参照）。船舶や鉄道における燃料電池の技術目標は設定されておらず、乗用車や商用車の技術目標のみについて記載している。

このなかで海運業界における燃料電池の利用可能性はあると述べられているが、補助電源としての利用のみが想定されている。船舶の燃料電池化のメリットとして、燃費向上、メンテナンスコストの低減、推進システムのバックアップ機能などが挙げられている。

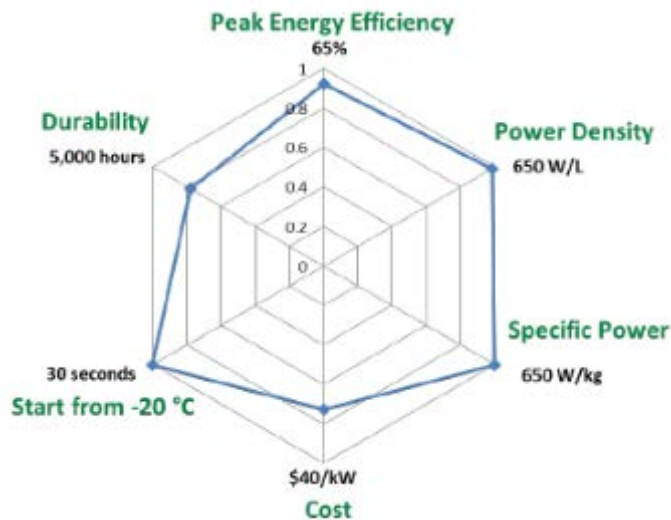


図 2-12 乗用車における 2020 年の技術目標と 2015 年の現状比較

(注) 青の線が 2015 年の現状を指す

(出典) FCTO, “Multi-year research, development, and demonstration plan” 2016

米国における燃料電池の導入状況は増加傾向にあり、その多くが FCV、燃料電池フォークリフトおよび補助電源ユニットとされている。FCV の導入は 2017 年 3 月までに 1,600 台以上に上る。また、燃料電池フォークリフトの導入数は 2017 年 5 月時点で合計 16,518 台に達しており、うち 713 台が米国エネルギー省による助成金を使用しており、残り 15,805 台が民間企業による購入である<sup>3</sup>。

なお、FCTO が運用している水素・燃料電池の技術開発の予算は、近年白金族金属フリーの触媒、電極および膜の研究開発と水素製造の中でも特に水電解への予算が大半を占めている。2018 年度はさらに白金族金属フリー触媒および水電解技術の 2 つに絞った予算要求となっている。

表 2-3 DOE の FCTO による 2016~2018 年度の燃料電池研究開発予算

Key Activity	FY 2016	FY 2017	FY 2018
	(\$ in thousands)		
	Approp.	Enacted	Request
Fuel Cell R&D	35,000	32,000	15,000
Hydrogen Fuel R&D	41,050	41,000	29,000
Manufacturing R&D	3,000	-	0
Systems Analysis	3,000	3,000	1,000
Technology Validation	7,000	18,000	0
Safety, Codes and Standards	7,000	7,000	0
Market Transformation	3,000	-	0
Technology Acceleration	0	-	0
NREL Site-wide Facilities Support	1,900	-	0
<b>Total</b>	<b>100,950</b>	<b>101,000</b>	<b>45,000</b>

(出典) US DOE Hydrogen and Fuel Cell Program,  
 “2017 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting” 2017 より作成

米国は各州レベルで FCV 購入者向けの支援策が異なっているが、カリフォルニア州は米国で最も環境政策が強化されており、ゼロエミッションである FCV の普及促進を支援する産官学のパートナーシップや FCV 購入の補助金などが整備されている。パートナーシップや FCV 補助金についての代表的な例を以下に示す。

(1) パートナーシップ: California Fuel Cell Partnership

1999 年に設立され、企業、州政府、大学、研究所など 30 以上のメンバーが FCV の導入促進と水素ステーションの整備に向けて共同でロードマップやアクションプランを作成し、活動している。

<sup>3</sup> DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record  
 ([https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/17003\\_industry\\_deployed\\_fc\\_powered\\_lift\\_trucks.pdf](https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/17003_industry_deployed_fc_powered_lift_trucks.pdf))

**(2) パートナーシップ: California Hydrogen Business Council**

100以上の企業や個人が有料で参加し、交通から定置形など広く水素のエネルギー利用を推進している団体である。2020年までにカリフォルニア州の大気汚染改善およびGHG排出削減を目指し、20,000台のFCV導入と100カ所の水素ステーション設置を目標としている。

**(3) FCV 購入支援策： High Occupancy Vehicle / High Occupancy Toll lane exemption**

FCVなどの環境性が高い乗用車には2019年1月1日まで有効なシールが配布され、高速道路料金が割引または免除となる。

**(4) FCV 購入支援策： Clean Vehicle Rebate Project**

独身または世帯の主たる生計者の所得が定められた制限額以内の場合、購入代金のうち5,000ドルが払い戻しされる制度。所得によって追加で最大2,000ドルの購入費用払い戻しを申請することができる。

### 3 燃料電池技術の現状

本章では、燃料電池の現状や、開発課題および国内外の燃料電池メーカーについてまとめる。

#### 3.1 燃料電池の種類と特徴

燃料電池は、電解質（作動原理）の違いにより数種類に分類される。それぞれの特徴を表3-1に示す。現在日本においてはFCV用途で固体高分子形燃料電池（PEFC）が、定置用途ではPEFCに加え固体酸化物形燃料電池（SOFC）が導入されている。また、固定価格買取制度を活用したバイオマス発電設備において、りん酸形燃料電池（PAFC）の導入事例もある。

表 3-1 燃料電池の作動原理とその特徴・用途

燃料電池種類	固体高分子形 (PEFC)	固体酸化物形 (SOFC)	りん酸形 (PAFC)	熔融炭酸塩形 (MCFC)	アルカリ形 (AFC)
電解質	陽イオン交換膜	セラミック	りん酸水溶液	リチウム・カリウム炭酸塩 リチウム・ナトリウム炭酸塩	水酸化カリウム水溶液
作動温度	80~120℃	600~1000℃	190~200℃	600~700℃	50~150℃
適用可能規模(現状)	数W~数百kW	0.5kW~数MW	100kW~1MW	250kW~数十MW	1kW~数百kW
使用可能燃料	純水素	純水素、天然ガス、メタノール等	純水素	純水素、天然ガス、メタノール等	純水素
主な用途	・家庭用(小規模) ・携帯/可搬用 ・車載用	・家庭用(小規模) ・産業/業務用 ・可搬用 ・事業用(大規模発電)	・事業用(大規模発電) ・非常電源用	・産業/業務用 ・事業用(大規模発電) ・非常電源	・宇宙船用 ・産業/業務用
特徴	・比較的低温で動作するため起動/停止にかかる時間が短い ・面積あたり出力が大きく、小型化が容易 ・触媒に白金を用いており一酸化炭素の除去が必要(<約10PPM)	・作動温度が高いため起動/停止に時間がかかる。 ・発電効率が高い ・長時間の連続運転に適している ・触媒に白金を用いず、一酸化炭素の除去が不要	・触媒に白金を用いており一酸化炭素の除去が必要(<1%) ・水素含有量の高い燃料が必要	・一酸化炭素の除去が不要 ・廃熱を利用した発電が可能 ・二酸化炭素の濃縮回収が可能	・エネルギー密度が比較的小さい ・低温で動作するため、起動/停止にかかる時間が短い
発電効率(HHV)	30~40%	40~65%	35~42%	40~60%	60%
主要なメーカー	国内	東芝、Panasonic、トヨタ、ホンダ、スズキ	東芝、京セラ(大阪ガス)	富士電機	—
	海外	HYDROEDGE、Ballard Power、NUVERA等	Acumentrics SOFC Corporation、Convion 等	Doosan Fuel Cell America等	POSCO Energy AFC Energy

(出典) JEMA:「燃料電池の原理と特徴」、電力中央研究所:「電中研レビュー 第51号」、各社ホームページよりみずほ情報総研作成

#### 3.2 燃料電池の用途

2015年以前は燃料電池の主な市場は定置用であったが、2015年からFCVの市販開始や燃料電池フォークリフトの普及を背景に、移動体用途の導入量が急上昇している。他方で、定置用燃料電池の市場も堅調に推移している。

燃料電池の種類別では、2011年から2014年までPEFC、SOFCならびにMCFCが主に導入された。近年はFCV等移動体向けのPEFCや発電事業等向けのPAFCの導入の伸び率が大きく、SOFCやその他の燃料電池は横ばいとなっている。

アジアと米国での燃料電池導入量は、FCVと燃料電池フォークリフトの発売後に大きく増加しており、これらの普及が燃料電池市場全体の拡大を後押ししていると考えられる。

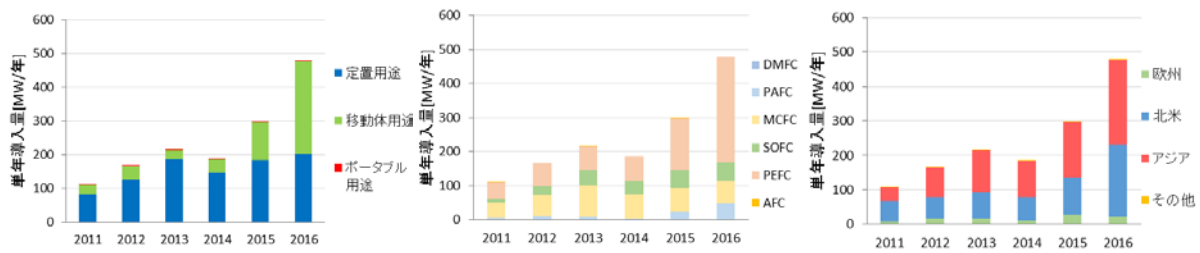


図 3-1 世界の燃料電池市場の用途別導入容量（左）発電方式別導入容量（中央）  
ならびに地域別導入容量（右）

（出典）E4tech：“The Fuel Cell Industry Review 2016”より作成

### 3.3 燃料電池の開発課題

燃料電池は近年飛躍的に普及が進んでいるが、未だ発展途上の技術であり、内燃機関を代替するにはまだ価格が高く、体積あたりの出力が小さく、耐久性が劣る等の課題がある。現在指摘されている燃料電池の主な技術的課題を表 3-2 に列挙する。

表 3-2 燃料電池の主な技術的課題

技術的課題	具体的な取り組み
効率向上	・膜の導電性向上 ・出力密度の向上（セル積層枚数削減）
長寿命化	・膜、触媒等の劣化機構解明 ・膜、触媒等の耐久性向上
不純物耐性向上	・膜、触媒等のロバスト性向上 ・利用可能な水素濃度範囲の拡大
新規素材開発	・電極、触媒、電解質膜等の新規素材探索 ・希少金属（白金等）代替法の検討
周辺機器の簡素化	・低加湿運転（加湿器レス化） ・汎用部材の採用 ・部品点数削減
その他	・排熱の有効利用法検討（定置用FC） ・量産化システムの構築 ・性能評価手法の確立

（出典）NEDO「燃料電池・水素技術開発ロードマップ 2017」等に基づき作成

#### (1) 変換効率向上

燃料電池の発電効率は、家庭用燃料電池システム（改質形の PEFC および SOFC）の場合で現在 38～52%（LHV、以下同じ）程度となっており、2025 年頃には 40～55%、2030 年頃にはそれ以上の効率の達成が目標とされている。また、業務用燃料電池（SOFC）の場合は、現在の発電効率が 50%程度、2025～2030 年頃に想定される普及期で 55%以上、2040 年頃以降は 60%以上と、高効率化が進むことが期待されている。

	現在	2020年頃	2025年頃	2030年頃	2040年頃
普及目標	【普及台数】 約20万台	140万台		530万台	
製品開発課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>■性能維持+システム全体の低コスト化、高耐久化を実現</li> <li>■技術開発課題の達成によるコスト低減</li> <li>■メンテナンス性向上等によるランニングコスト低減</li> <li>■海外対応環境(燃料ガス、需要パターン)におけるロバスト性の向上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■導入支援</li> <li>■国内展開の拡大(戸建新築住宅中心 ⇒ 集合住宅・既設住宅への拡大)</li> <li>■海外展開の拡大(欧州中心 ⇒ 他地域へも拡大)</li> <li>■電力自由化による発電電力取引円滑化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■家庭用燃料電池の自立的な普及拡大</li> <li>■市場ニーズに応じた製品の多様化</li> <li>■電力需要が大きいユーザー向け製品</li> <li>■熱需要が大きいユーザー向け製品</li> <li>■その他、高出力型等のユーザー向け製品</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■大幅小型化、設置簡素化</li> <li>■海外向け製品の低コスト化</li> </ul>	
達成性能レベル	※総合効率≧95%を前提条件 電力・熱需要に応じた高効率エネルギー供給、CO2排出量削減が可能				
発電効率 <sup>1)</sup>	38～52%	38～52%	40～55%	40～55%以上	45～60%以上
耐久性 <sup>2)</sup>	10年	10年	10年以上	15年	15年以上
システム価格 <sup>3)</sup> (標準タイプ)	PEFC:113万円 SOFC:137万円	PEFC:80万円(2019年度) SOFC:100万円(2021年度)	ユーザの投資回収年数の低減 (7～8年レベルのコスト ⇒ 5年レベルのコストへ)	50万円程度	

図 3-2 家庭用燃料電池システムに関する目標値

(出典) NEDO「燃料電池・水素技術開発ロードマップ 2017」

	現在	2020年頃	2025年頃	2030年頃	2040年頃	
普及目標		<ul style="list-style-type: none"> <li>・業務用5kW級SOFC市場初期導入(2017年)</li> <li>・実用化に向けた実証・規制見直し</li> <li>・業務用10kW級SOFC市場初期導入(2017～2018年)</li> <li>・業務用250kW級SOFC CIPVシステム市場初期導入(2017年)</li> <li>・CO2フリー水素を用いた自立分散型エネルギーシステム導入(純水素型PEFC:数kW～100kW)</li> <li>・PAFC 100kW級導入継続【システムコスト低減(低白金化、等)、メンテナンスコスト低減(耐久性向上、等)の継続】</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>市場ターゲットとなる需要家(高電熱比、BCP対応等)への活用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>業務・産業用燃料電池の自立的な普及拡大</li> <li>・分散型電源(モジュール、コージェネレーションシステム)として普及</li> <li>・再生可能エネルギー、蓄電、高温蓄熱システム等を組み合わせて電力・熱供給を最適に制御するスマートコミュニティの実現</li> <li>・CO2フリー水素を用いた自立分散型エネルギーシステムの普及</li> <li>・超高効率発電システムの実現</li> </ul>		
達成性能レベル(SOFC)	実証機より低価格帯で導入開始、導入メリットが高い潜在的ユーザを拡大しつつ継続的に価格を低減					
小容量定置用(業務用)(数kW級)	開発・実証 50%、4万時間見通し、数100万円/kW	初期導入 50%、9万時間見通し、数100万円⇒50万円/kW(80MW/年 生産ケース)	普及 >55%、43万時間見通し、<50万円/kW(数10MW/年 生産ケース)	2040年頃以降>60%		
中容量定置用(業務用)(数10～数100kW級)	開発・実証 50%、4万時間見通し、数100万円/kW	初期導入 50%、9万時間見通し、数100万円⇒50万円/kW(80MW/年 生産ケース)	普及 >55%、13万時間見通し、<50万円/kW(数10MW/年 生産ケース)	2040年頃以降>70%		

図 3-3 業務用燃料電池システムに関する目標値

(出典) NEDO「燃料電池・水素技術開発ロードマップ 2017」

## (2) 長寿命化

燃料電池の寿命(耐久性)は、業務用で現在 40,000 時間程度であり、2020 年頃には 90,000 時間、2025 年以降には 130,000 時間の達成が目標とされている。FCV 用については、現在乗用車の車両寿命である 15 年間を無交換で使用できるとされており、2025 年頃には商用車においても 15 年間無交換で使用できる水準に達することが目標となっている。なお、15 年間無交換で利用可能な耐久性の目安として、NEDO の技術開発目標では、乗用車の場合 5,000 時間作動と 6 万回の起動停止、商用車の場合 50,000 時間作動と 60 万回の起動停止が想定されている。燃料電池の耐久性を決める主な要因は電極触媒や電解質膜の劣化速度であり、劣化メカニズムの解明や劣化を抑制する技術の開発が求められている。



	現在	2020年頃	2025年頃	2030年頃	2040年頃
普及目標	【普及台数】 1,600台強 車両導入支援 乗用車：各社単一車種 ・FCフォークリフトの導入開始(2016) ・FCバスへの導入開始(2016)	4万台程度 FCバス・フォークリフト 導入規模拡大 ・二輪・商用車(トラック)への導入開始	20万台程度 乗用車：ホリウムゾーンの 燃料電池自動車の投入 ・その他移動体(船舶・鉄道、産業用車 両等)への更なる拡大 ・スタック、周辺機器の製造・供給プレーヤーの拡大	80万台程度 多数車種へ拡大 ・燃料電池スタック供給による適用 範囲の拡大、低コスト化の加速 スタック排熱量大幅削減 高出力密度化 低コスト高耐久化	300~600万台 程度 <sup>1)</sup>
達成性能レベル <sup>2)</sup>					
航続距離 <sup>3)</sup>	650km	燃料電池車の商品価値として航続距離の向上を継続的に追求		800 km	> 1000 km
スタック性能					
最大出力密度	3.0kW/L	4.0kW/L	5.0kW/L	6.0kW/L	9.0kW/L
最大負荷点電圧 (116A)	0.6V				0.85V
耐久性 <sup>4)</sup>	乗用車無交換 (15年)	乗用車無交換 (15年以上)	乗用車無交換(15年以上) /商用車無交換(15年)	乗用車・商用車無交換 (15年以上)	
システム仕様					
起動条件	起動最低温度-30℃(外気)	起動最低温度-30℃(外気)			起動最低温度-40℃(外気) 作動最高温度120℃
スタックシステム	作動最高温度90℃ 作動圧力1.2atm、水素St1.1 <sup>5)</sup>	作動最高温度~100℃、30%RH 作動圧力<1.2atm、水素St<1.1	起動温度の拡大、出力密度向上、作動最高 温度向上、冷却性能向上、燃費向上等による車 両ハワートレインとしての汎用化		エア過剰によるダウンサイジング または常圧運転による構造的 複雑化 水素St*1.0付近 7.5wt%以上かつ70L以下 <sup>6)</sup> 容器形状自由度有
水素貯蔵システム (貯蔵量1kg相当の場合)	5.7wt% かつ 125L 円筒形容器	6wt% かつ 100L <sup>6)</sup> 円筒形容器			
コスト <sup>7)</sup>					
車両価格	700万円強		同車種のHV車同等価格競争力を 有する車両価格の実現		大量普及に向けた 最終コスト目標
FCシステム (内スタック)		<0.8万円/kW	<0.5万円/kW	<0.4万円/kW	0.2万円/kW
水素貯蔵システム (貯蔵量1kg相当の場合)		<0.5万円/kW 30~50万円	<0.3万円/kW <30万円	<0.2万円/kW 10~20万円	0.1万円/kW 10万円

図 3-4 FCV・移動体用燃料電池システムに関する目標値

(出典) NEDO「燃料電池・水素技術開発ロードマップ2017」

### (3) 不純物耐性向上

一般に、白金を使用するPEFC燃料電池やPAFC燃料電池において、天然ガス等の水蒸気改質によって水素を製造する場合、改質によって得られた水素ガス中に含まれる微量の一酸化炭素(CO)が白金触媒に吸着され、触媒にCOが結合して失活(被毒)するという問題点がある。従って燃料に含まれるCOを除去し、劣化を防止する装置が必要である。CO除去機の高性能化や他の不純物に対する燃料電池触媒側の耐性向上を目指した技術開発が行われている。

### (4) 新規素材開発

PEFCスタックでは、原料コストの半分以上を白金触媒が占めているため、代替素材による白金レス化が求められている、2017年には日清紡が白金を使わない燃料電池用の触媒を開発し、カナダの燃料電池大手Ballard Power Systems社に供給を始めると発表した<sup>4)</sup>。電解質膜についても従来はフッ素系が主流であったが、近年ではコスト面で勝る炭化水素系の性能が向上しており、研究開発が進められている。

### (5) 周辺機器の簡素化

家庭用燃料電池システムのコスト構造のうち、かつては中心部分であるスタックのコストが全体の半分以上を占めていたが、近年ではスタックの低コスト化が進んでおり、ス

<sup>4)</sup> 日清紡プレスリリース、2017年9月13日 ([https://www.nisshinbo.co.jp/news/pdf/1645\\_1\\_ja.pdf](https://www.nisshinbo.co.jp/news/pdf/1645_1_ja.pdf))

タック以外の周辺機器のコスト低減が求められている。特に、コストに占める割合が大きい貯湯槽については、燃料電池本体との通信標準化による多様なメーカーの貯湯槽の採用や、貯湯ユニットと燃料電池ユニットの一体化等が考えられている。また、補機類（ブロワ、流量計、弁、熱交換器等）の低コスト化や高耐久化に向けた技術開発も求められる。さらに、燃料電池を構成する部品は特注製のものが多く、コスト増加要因となっているため、汎用部品の利用や部品点数の削減を進めることも重要である。

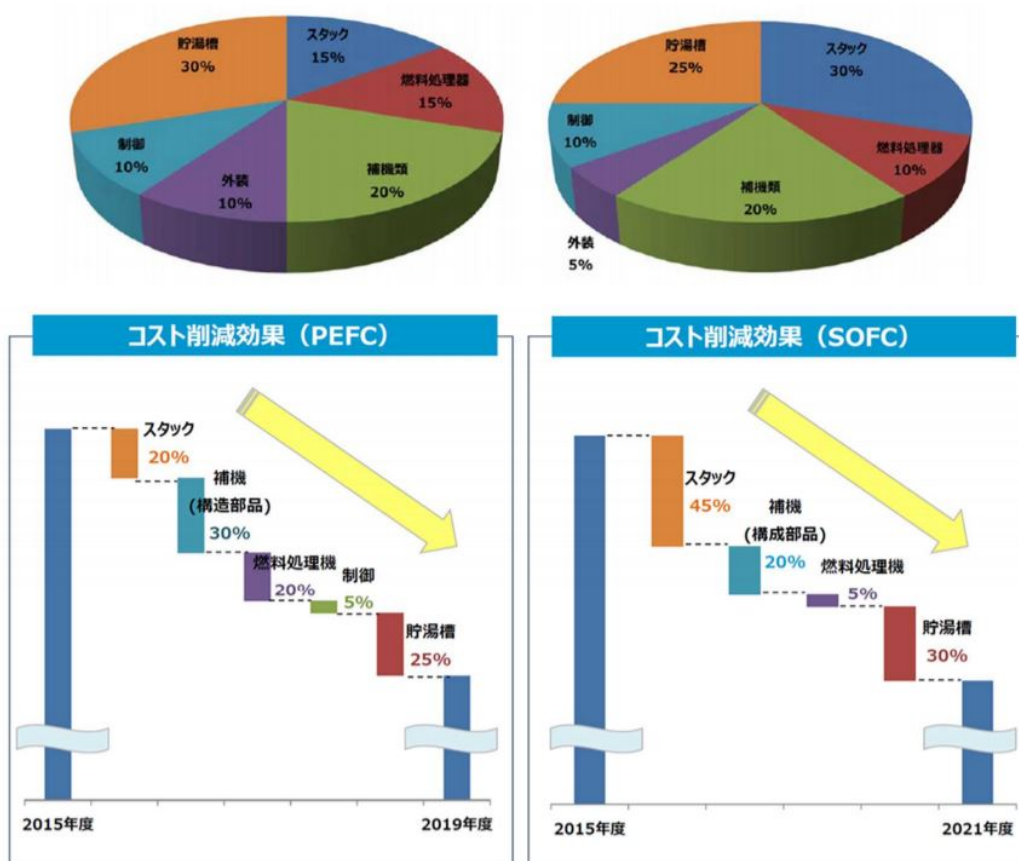


図 3-5 家庭用燃料電池システムのコスト構造  
(出典) NEDO「燃料電池・水素技術開発ロードマップ 2017」

### (6) 燃料電池技術の現状まとめ

現状では PEFC と SOFC を市販化している企業がほとんどであり、その他の種類の燃料電池を市販化している企業は少ない。燃料電池を駆動力とした自動車、バス、鉄道ならびに船舶といった移動体分野では、体積あたりの出力が大きく起動・停止が早い PEFC の活用が進んでいる。一方で SOFC の一種である DMFC (直接メタノール形) を移動体に採用する研究開発が進められているが、高い作動温度が必要で、起動から発電が可能な状態になるまでに時間がかかるため、市販化された製品としての実績は少ない。

鉄道・船舶分野で実績のある企業は、1990年代から研究開発を開始し、長期にわたって信頼性を高めてきた企業が多い。鉄道では断続的な出力が求められ、大容量バッテリーと組み合わせる必要があり、動力機器を搭載できる容積に制限がある鉄道では体積当たり出力が大きいPEFCが好まれる。船舶は、重量・容積の制約が比較的少なく、大型の燃料電池を搭載することも可能で、長時間航行の際には定常的な連続負荷が発生するためPEFC以外の燃料電池の適用も可能であると考えられる。燃料電池の主な技術的課題として、発電効率向上、長寿命化、不純物（CO）耐性向上、コスト低減があげられる。

### 3.4 現在の主要な燃料電池サプライヤー

燃料電池の主要なサプライヤーは、自動車では日本企業と北米の企業が多いが、2016年度から家庭用燃料電池の導入支援が始まっているドイツにおいても、いくつかの企業が参入している。日本ならびに海外の燃料電池メーカーについてまとめたものを表に示す。全体としてはPEFC形またはSOFC形の定置用燃料電池を製造している企業が多く、その他の方式の燃料電池を製造している企業は少ないのが現状である。

表 3-3 日本の燃料電池サプライヤー一覧

区分	企業名	主要な製品	燃料電池種類
非自動車系メーカー	東芝	純水素型燃料電池	PEFC
		H2One (自立型水素エネルギー供給)	PEFC
	Panasonic	エネファーム (住宅／集合住宅用)	PEFC
	富士電機	りん酸形燃料電池 (発電事業用／バックアップ用)	PAFC
	京セラ*	エネファーム TypeS (住宅／集合住宅用)	SOFC
自動車系メーカー	トヨタ	ミライ (燃料電池自動車)	PEFC
	ホンダ	クラリティ フューエルセル (燃料電池自動車)	PEFC
	日産	燃料電池自動車 (研究開発段階)	SOFC(直接メタノール形燃料電池)
	スズキ	燃料電池スクーター (研究開発・公道実証段階)	PEFC

(出典) 各社ホームページより作成

表 3-4 海外の燃料電池サプライヤーとその燃料電池種類・用途・製品の運用可能規模

企業名	所在地	燃料電池種類							燃料電池用途					製品の適用可能規模			
		PEFC	SOFC	PAFC	MCFC	AFC	不明	乗用車	バス・トラック	定置用	その他	不明	～10kW	10～100kW	100kW～	不明/実績無	
企業数合計		13	4	1	0	1	5	5	6	17	12	2	16	11	8	5	
Acumentrics SOFC Corporation	米国		○							○			○				
AFC Energy	英国					○					○				○		
Altery Systems	米国						○			○			○	○			
Automotive Fuel Cell Cooperation Corp.	カナダ	○						○								○	
Cellkraft AB	スウェーデン	○								○			○	○	○		
ClearEdge Power	米国			○						○					○		
Convion Ltd.	フィンランド		○							○				○	○		
Delphi Automotive Systems, LLC	米国		○							○	○		○				
Elcogen AS	エストニア		○					○	○	○			○				
elcore GmbH	ドイツ	○								○			○				
EnerFuel	米国	○								○	○		○	○			
eZelleron GmbH	ドイツ									○							
FuelCell Energy	米国						○			○					○		
FutureE Fuel Cell Solutions GmbH	ドイツ						○			○			○				
Horizon Fuel Cell Technologies	シンガポール	○						○		○				○	○		
Infinity Fuel Cell and Hydrogen, Inc.	米国	○									○					○	
Intelligent Energy	英国	○						○		○	○	○	○	○			
M-FIELD Energy LTD.	台湾						○		○	○	○	○	○	○			
Nedstack PEM Fuel Cells	オランダ	○							○	○	○	○	○	○	○		
Oorja Protonics Inc.	米国									○	○	○	○	○			
Palcan Energy Corporation	カナダ								○	○						○	
PaxiTech	フランス	○								○	○		○				
Plug Power Inc.	米国						○		○							○	
PowerCell Sweden AB	スウェーデン	○								○	○		○	○			
SerEnergy A/S	デンマーク	○											○	○			
SFC Energy AG	ドイツ											○				○	
sunfire GmbH	ドイツ		○							○			○	○	○		
Tropical S.A.	ギリシャ	○						○			○		○				
US Hybrid	米国	○							○					○			

(出典) 各社ホームページより作成

FCV 向け燃料電池の分野では日本の自動車メーカーが先行している一方で、これら自動車メーカーは自社グループ以外の製品向けに燃料電池を出荷していないため、鉄道や船舶分野では欧米の燃料電池専門メーカーの採用実績が多くなっている。

### 3.5 水素タンクについて

かつては、移動体用の水素ストレージとして、高圧水素タンクと水素吸蔵合金がそれぞれ開発されてきたが、現在は、燃料電池自動車などに搭載される水素ストレージには高圧で水素を貯蔵する圧縮水素タンクを搭載する方式が一般的になっている。タンクの充填圧力としては 35MPa や 70MPa 等異なる圧力のものがあり、高圧になればなるほど一回の水素充填あたり航続距離が長くなるが、圧縮水素へのタンクの耐圧を確保するために高強度材料である炭素繊維強化プラスチックが大量に必要なため、価格も高くなる。

日本で FCV 用に採用されている高圧水素タンクを、タンク内壁の材料（ライナー）で区分すると、現在主流となっているのはアルミ合金（またはステンレス鋼）ライナーの（Type3）と樹脂ライナー（Type4）である。燃料電池自動車用としては Type4 の水素タンクを利用するのが現在一般的である。

一方で、水素吸蔵合金の進歩もめざましく、近年ではシステムあたりの水素貯蔵密度で 35MPa の高圧タンクと同等の水準を示す水素吸蔵合金タンクも開発されている。代表的な水素吸蔵合金の組成と、それぞれの水素貯蔵量の例を表に示す。

表 3-5 水素吸蔵合金の組成と水素貯蔵能力

合金組成	質量貯蔵密度 (有効水素貯蔵量)	体積貯蔵密度	作動温度
LaNi <sub>5</sub>	1.4wt%	93 g-H 2/L	常温で吸蔵・放出
TiMn <sub>1.5</sub>	1.8wt%	95 g-H 2/L	常温で吸蔵・放出
TiCrV	2.2wt%	98 g-H 2/L	常温で吸蔵・放出
Mg <sub>2</sub> Ni	3.6wt%	97 g-H 2/L	約 300°C で放出

(出典) 日本重化学工業㈱「水素吸蔵合金を用いた水素貯蔵システム」、公益財団法人水素エネルギー製品研究試験センター 平成 23 年度 第 1 回 公開セミナー発表資料より作成

水素吸蔵合金には高圧水素タンクにはない利点があり、液体水素を用いた水素ステーションにおいてボイルオフガスの回収に利用されている。水素吸蔵合金の利点としては以下があげられる。

- ・液体水素（大気圧下約 70g/L）より体積貯蔵密度が大きい（周辺機器を除いた場合）
- ・室温付近での吸蔵・放出が可能（燃料電池の排熱利用可能）
- ・1MPa 未満での取り扱いが可能であるため、高圧ガス保安法の対象外

一方で合金を用いているため、体積あたりの重量が大きい点が欠点として挙げられ、燃費向上のために重量を減らすことが必須である自動車用途には現在採用されていない。

例えば、トヨタの FCV である MIRAI に搭載されている 70MPa 級樹脂ライナータンクと同量の水素（70MPa で充填すると 87Nm<sup>3</sup>）を吸蔵合金タンクで貯蔵するためには、シ

システム全体の重量は約 1,000kg となる。

表 3-6 高圧水素タンク・液体水素タンク・水素吸蔵合金タンクの水素当たり重量比較

	高圧水素タンク (35MPa)	高圧水素タンク (70MPa)	液体水素 タンク	水素吸蔵合金 タンク
水素貯蔵量あたり サイズ	39L/kg-H <sub>2</sub>	24L/kg-H <sub>2</sub>	15.8L/kg-H <sub>2</sub>	45.4L/kg-H <sub>2</sub>
水素貯蔵量あたり 重量	23kg/kg-H <sub>2</sub>	20kg/kg-H <sub>2</sub>	19.7kg/kg-H <sub>2</sub>	128kg/kg-H <sub>2</sub>
水素貯蔵密度 (タンク部のみ)	25.6g-H <sub>2</sub> /L	41.9g-H <sub>2</sub> /L	63.2g-H <sub>2</sub> /L	22.4g-H <sub>2</sub> /L

(出典) NEDO「燃料電池ロードマップ 水素編」(2010) および日本重化学工業㈱「水素吸蔵合金を用いた水素貯蔵システム」、公益財団法人水素エネルギー製品研究試験センター 平成 23 年度 第 1 回 公開セミナー発表資料より作成

上記のとおり、水素吸蔵合金では圧力 1MPa 未満で水素を貯蔵可能であるため、高圧ガス保安法の対象にならないという利点を活かして、再生可能エネルギーで発電した電力で製造した水素を吸蔵合金カセットに充填し、生活協同組合の物流網を利用して燃料電池を設置した家庭に配達する実証事業が今年度から開始<sup>5</sup>されるなど、実用化に向けた実証事業も進んできている。また、消防法における危険物に該当しないため、水素吸蔵合金を大量に保管しても管理が不要である点で圧縮水素よりも優位である。

特に、今回の検討対象である船舶のように、水素の貯蔵に対して、比較的重量に余裕がある用途向けには十分に適用可能な技術であると考えられる。

<sup>5</sup> 日立製作所プレスリリース、2017 年 8 月 4 日  
(<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2017/08/0804.html>)



## 4 鉄道分野における燃料電池の導入事例

### 4.1 国内の事例

#### (1) 鉄道総合技術研究所 「R291 試験電車」

鉄道総合技術研究所（鉄道総研）では、1990年代から鉄道への燃料電池の導入に関する研究開発を実施している。2006年からはNUVERA社の100kW級燃料電池スタックを利用した燃料電池システム（PEFC形）を作成し、試験車両（R291試験電車）に搭載して走行試験を行っている。

実験初期ではリチウムイオン電池を介さず燃料電池のみで駆動する1両編成で実験を行っていたが、現在は2両編成とし、燃料電池とリチウムイオン電池のハイブリッド構成となっている。構成機器の大部分は車内に配置されており、高圧水素タンクのみ床下に設置されている。高圧水素タンクの最大圧力は35MPaで、水素貯蔵量は17.2kgとなっている。

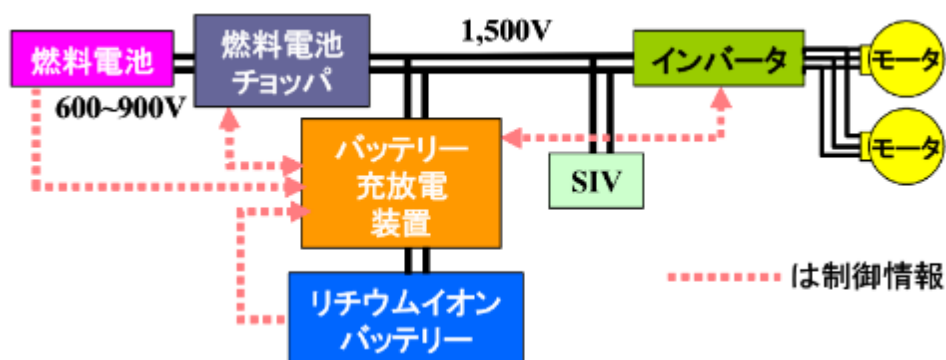


図 4-1 R291 試験電車の主回路構成

（出典）鉄道総合技術研究所

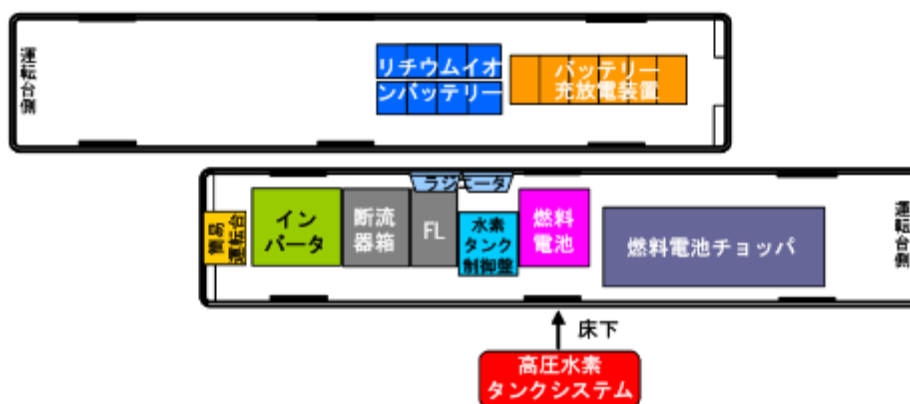


図 4-2 R291 試験電車の機器配置

（出典）鉄道総合技術研究所



## (2) JR 東日本 「NE トレイン」

JR 東日本は、ディーゼルハイブリッド方式の開発により 15%の燃費向上を達成したが、さらなる環境負荷の低減を達成するため、ディーゼルエンジンによるハイブリッドシステムの開発に用いた試験車両 NE トレイン(New Energy Train)を改造し、燃料電池ハイブリッド車両を試作した。

作成した燃料電池ハイブリッド車両は 2006 年より構内走行試験を実施、翌年から本線走行試験を行った。水素燃料の充填は、主に岩谷産業株式会社が国分寺市に整備した水素供給設備<sup>6</sup>を使用したと推察される。これは燃料電池で実際に使われている鉄道車両を本線走行させた世界で初めての例となっている。

表 4-1 NE トレイン燃料電池ハイブリッドの諸元

車両寸法	20m×2.8m×4.1m
最高速度	100km/h
主電動機方式・出力	誘導電動機 95kW×2
燃料電池方式・出力	PEFC 形 65kW×2
蓄電池種類・容量	リチウムイオン電池、19kWh
水素タンク容量・圧力	270 リットル、35MPa

(出典) 科学技術・学術政策研究所「科学技術動向 2006 年 6 月号」より作成

<sup>6</sup> 岩谷産業株式会社、「水素充填設備のご案内」  
(<http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/climate/hydrogen/haneda.files/01iwatani.pdf>)

## 4.2 海外の事例

2006年に日本で燃料電池を利用した鉄道車両の試験走行が行われて以来、海外でも同様のプロジェクトが進められている。海外における鉄道の燃料電池駆動化プロジェクトの一覧を表 4-2 に示し、それぞれについて紹介する。

表 4-2 鉄道分野における主要な燃料電池利用プロジェクト一覧

鉄道車両の区分 (現在の状況)	実施場所	概要	プロジェクトメンバー (リーダー*)	実施期間	FC種類 (メーカー)	FC容量
気動車代替 (試験運行中)	ドイツ、ニーダーザクセン州、Buxtehude-Bremervörde-Bremerhaven-Cuxhaven間	ドイツの非電化鉄道において、大気汚染を削減し、再生可能エネルギーの導入を促進するため、再エネ水素を活用した燃料電池車両の導入可能性・経済性の検討を実施しALSTOMと共同で鉄道車両を開発した。	・ALSTOM* ・Hydrogenics ・Federal ministry of Transport and Infrastructure ・Lower Saxony government	2015年～2016年 FS (2018年よりドイツで旅客営業を開始する計画)	PEFC (Hydrogenics)	400kW (200kW × 2基)
LRT (試験走行中)	中国、広州高明地区	第12次五カ年計画に定める二酸化炭素排出量と大気汚染が少ない鉄道システムの開発の一環として、燃料電池路面電車の研究開発を実施している。	・CRRC QINGDAO SIFANG*	2015年試験走行 2017年下旬～2018年旅客運行開始予定	PEFC (Ballard)	200kW
LRT (商業運行中)	未定	第12次五カ年計画に定める二酸化炭素排出量と大気汚染が少ない鉄道システムの開発の一環として、燃料電池とキャパシターを組み合わせた低床LRTを開発。	・CRRC Tangshan Railway *	2015年～現在 (具体的計画未定)	PEFC (Ballard)	200kW
観光用路面電車 (商業運行中)	オランダ自治領西インド諸島アルバ、ドバイ、ドーハ	観光地の景観を損なわず、初期投資が少ないクラシックな外観の燃料電池路面電車を開発・販売している。車両本体に加え水電解装置や水素充填ステーション、ターンキーサービスを提供する。	・TIG/m* ・California Fuel Cell Partnership	アルバ:2012～ ドバイ:2015年より試験運行 ドーハ:建設中	PEFC (Plug Power)	11kW
入換機関車 (試験運行中)	米国、ロサンゼルス	BNSF Reailwayが市街地の大気汚染と騒音問題解決のため、国防省からの助成をうけて燃料電池ハイブリッド駆動の入れ替え機関車 (Switcher) の試験車両を製造した。	・BNSF Railway* ・Vehicle Projects ・Brownback, ・R-Kan	2008年～現在	PEFC (Ballard)	300kW
気動車代替 (計画中)	未定	Siemensが開発した新型鉄道車両Mireoに対して、Ballard Power Systemsが200kWの燃料電池ユニットを新たに開発。プロジェクト総予算は約900万ドル(約10.2億円)。	・Siemens* ・Ballard Power Systems	2017年～ (車両導入は2021年を想定)	不明 (Ballard)	200kW
入換機関車 (試作車製作中)	ラトビア国内	ラトビア鉄道 (Latvian Railways : LDZ)、チェコの鉄道車両製造会社CZ Loko ならびにBallard Power Systemsが燃料電池式ハイブリッド入換機関車と牽引機関車の製造に関するMoUを締結。2018年に試運転予定。	・Latvian Railways* ・Ballard Power Systems ・CZ Loko	2016年～	PEFC (Ballard)	未定

(出典) 各社ホームページ等より作成

## (1) ALSTOM “Coradia iLint”（ドイツ）

Alstom は、同社が地方鉄道向けに製造・販売しているディーゼル気動車の Coradia Lint 54 をベースに、ドイツ交通省の助成のもと、燃料電池で駆動する Coradia iLint を開発し 2017 年には実際の線路で試験走行を実施した。ドイツ・ニーダーザクセン州の地元の交通局から既に少なくとも 14 両の発注内示があるとされる。車両は 2 両編成で約 300 人が乗車でき、燃料電池と蓄電池からの電力で最高時速 140km/h に達する。屋根上に設置した水素タンクには 1 編成あたり 94kg の水素が充填可能で、1 回の燃料補給で約 600km～800km 走行可能であるという。燃料電池は Hydrogenics 社製の容量 400kW の PEFC 燃料電池システムを採用している。

型式認証が得られ次第、まず既に完成している試作車両が Buxtehude-Bremervörde-Bremerhaven-Cuxhaven 間を商業運転開始する予定となっている<sup>7</sup>。

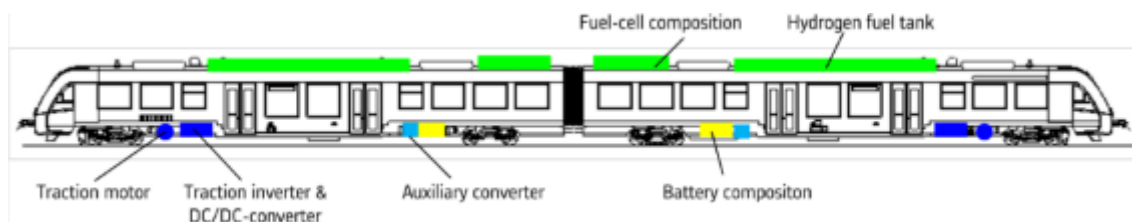


図 4-3 Coradia iLint におけるコンポーネントの配置イメージ

(出典) ALSTOM, "REGIONAL TRAINS Coradia iLint A full emission-free train"

## (2) CRRC QINGDAO SIFANG “Hydrogen Tram”（中国）

中国の中国中車（CRRC）が、中国南部の広州高明地区にて燃料電池で駆動する路面電車の実証試験を実施している。高明（Gaoming）バスターミナルから S&T park 間の計画営業距離 17.4 km を走行する計画であり、工場用地、公園、商業施設等を経由する計画となっている。

3 両編成の車両は新規に設計されたもので、最高速度は 70km/h であり、380 人が乗車可能となっている。また、1 回の水素充填につき 100km を走行可能である。燃料電池は Ballard Power Systems 製の 200kW の PEFC が 1 基搭載されている。スケジュールとしては、第一段階として Cangjiang road と Zhihu 間の 6.6km を試験運転した後、2017 年から 2018 年を目処に商業運転を開始する予定としている<sup>8</sup>。

<sup>7</sup> ALSTOM, "REGIONAL TRAINS Coradia iLint A full emission-free train" (<http://www.alstom.com/products-services/product-catalogue/rail-systems/trains/products/coradia-ilint-regional-train/>)

<sup>8</sup> CRRC QINGDAO SIFANG Co., Ltd. "Clean Rail Transit Vehicle--HyperTram", 2016 年 7 月 ([https://hydrail.appstate.edu/sites/hydrail.appstate.edu/files/11\\_jjajie.pdf](https://hydrail.appstate.edu/sites/hydrail.appstate.edu/files/11_jjajie.pdf))

### (3) CRRC Tangshan Railway “Hydrogen Supercapacitor Tram” (中国)

中国 CRRC グループの Tangshan Railway (唐山機車車両有限公司) がキャパシター、蓄電池と燃料電池を組み合わせた低床路面電車のプロトタイプを開発し、2016 年に試験走行を行った。燃料電池は Ballard Power Systems 製の 200kW の PEFC を搭載しており、最高速度は 70km/h、一回の水素充填につき 40km を走行可能と発表されている。発車時に必要な出力のうち、燃料電池単独では不足するエネルギーをキャパシターに充電した電力によって供給する設計となっている。

本車両は、2017 年 10 月に商用運転を開始したことが報道されており<sup>9</sup>、運転初日には数回の往復を行い、合計 300 人が乗車したと報じられた。

### (4) TIG/m “Fuel Cell Tram” (米国)

TIG/m は、カリフォルニアのベンチャー企業で観光地向けの燃料電池トロリーを製造・販売している。観光地の景観を守るため、架線(カテナリー)なしで走行できる燃料電池トラム(路面電車)と、再生可能エネルギーから水素を製造する技術を提供している。オランダ自治領西インド諸島アルバ(2.7km の区間で運用中)に導入済みで、2017 年第 3 四半期にはドバイにて 12 両を運転開始した。

燃料電池は Plug Power 社製 11kW の PEFC を 1 両あたり 1 基搭載し、バッテリーと組み合わせて走行する。一回の水素充填で 8 時間駆動可能で、営業運転時の速度は 10km/h とされている<sup>10</sup>。

### (5) BNSF Railways “Hydrogen Switcher” (米国)

米国の鉄道運行会社 BNSF が、2008 年から Vehicles Project 社と共同で米国国防省の助成のもと燃料電池とリチウムイオン電池のハイブリッド入換機関車を開発した。待機時間が長い入換機関車はディーゼル機関のアイドル時間が長いため、断続的に運転できる燃料電池で代替することにより経済性・環境性向上が期待されるとともに、石油に頼らない輸送システムや、軍用電源、災害時の非常用電源としての可能性も検討されている。車両の概要としては、Ballard Power Systems 社製の 150kW (連続運転時 120kW) の燃料電池を 2 基搭載し、リチウムイオン電池と合計して最大出力 500kW を発揮する<sup>11</sup>。

<sup>9</sup> XINHUANET “World's first hydrogen-powered tram put into operation” ([http://news.xinhuanet.com/english/2017-10/27/c\\_136710000.htm](http://news.xinhuanet.com/english/2017-10/27/c_136710000.htm))、(2017 年 10 月 27 日時点)

<sup>10</sup> TIG/m ホームページ、(<https://www.tig-m.com/>)、(2017 年 8 月時点)

<sup>11</sup> Ballard Power Systems “Fuel Cell for Rail Applications”, 2017 年 5 月 ([http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/default\\_images/5.%20Oben%20Ulc\\_H2%20Rail%20Works%20hop%2015.05.2017%20%28ID%202902212%29.pdf](http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/default_images/5.%20Oben%20Ulc_H2%20Rail%20Works%20hop%2015.05.2017%20%28ID%202902212%29.pdf))

## (6) Siemens “Mireo commuter train”（ドイツ）

Siemens は 2016 年に行われた国際会議“**InnoTrans 2016**”において、新型鉄道車両である **Mireo** を発表した。**Mireo** は最高時速 160km であり、軽量化や機器の高効率化によって同型の従来車両に比べてエネルギー消費量を最大 25%削減可能とされている。2017 年 2 月には、ドイツの鉄道会社 **DB Regio** が 3 両編成を 24 編成発注している。

2017 年 11 月、**Ballard Power Systems** は **Mireo** の燃料電池化に関する技術開発プロジェクトを **Siemens** と共同で実施すると発表した。**Ballard** 社は **Mireo** 向けに新たに 200kW の燃料電池ユニットを開発する。燃料電池を導入した **Mireo** の導入開始時期は、2021 年と想定されている<sup>12</sup>。

## (7) Latvian Railways “Hydrogen Locomotives”（ラトビア）

ラトビア鉄道（**Latvian Railways** : **LDZ**）、チェコの鉄道車両製造会社 **CZ Loko** ならびに **Ballard Power Systems** 社は、2016 年に燃料電池式ハイブリッド入換機関車と牽引機関車の製造に関する **MoU** を締結し、**CZ Loko** 製の **Czech-made CME3** 入換機関車と **2M62UM** ディーゼル機関車を改装し、燃料電池駆動化する検討を開始したと報じられた。

このうち入換機関車については、2018 年中に試運転を行う計画であるという<sup>13</sup>。

---

<sup>12</sup> Ballard Power Systems プレスリリース（2017 年 11 月 14 日）、([http://ballard.com/about-ballard/newsroom/news-releases/2017/11/14/ballard-and-siemens-sign-\\$9m-multi-year-development-agreement-for-fuel-cell-engine-to-power-cutting-edge-mireo-commuter-train](http://ballard.com/about-ballard/newsroom/news-releases/2017/11/14/ballard-and-siemens-sign-$9m-multi-year-development-agreement-for-fuel-cell-engine-to-power-cutting-edge-mireo-commuter-train))

<sup>13</sup> Ballard Power Systems, “Fuel Cells for Rail Applications”, (2017 年 5 月 15 日)、([http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/default\\_images/5.%20Oben%20Ulc\\_H2%20Rail%20Works%20hop%2015.05.2017%20%28ID%202902212%29.pdf](http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/default_images/5.%20Oben%20Ulc_H2%20Rail%20Works%20hop%2015.05.2017%20%28ID%202902212%29.pdf))

## 5 船舶分野における燃料電池の導入事例

### 5.1 国内の事例

#### (1) 東京海洋大学 「らいちょう N」

らいちょう N は東京海洋大学の出教授らにより次世代水上交通システムの研究実験船として開発された燃料電池を搭載する電池推進船である。ツインドライブバッテリーシステム、シリーズハイブリッドシステム、遠隔操縦システム等の特徴とする実用レベルの電池推進船となっている。

高速充電器に対応しており、主電源として東芝製 SCiB リチウムイオン 2 次電池を 145kWh 搭載し、リチウムイオン電池のレンジエクステンダー用発電装置として出力 8kW の燃料電池を搭載している。燃料電池は定置形の業務用 PEFC を採用している。これに加えて、非常時用に出力 35kW のディーゼル発電機を搭載している。水素燃料は 7Nm<sup>3</sup> のボンベを 2 本搭載し、約 20kWh の電力が発電可能である。

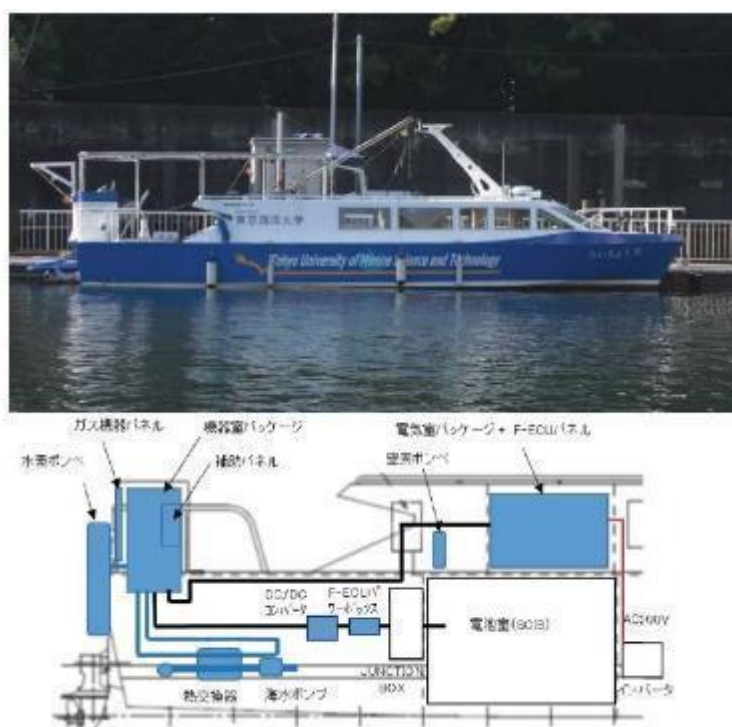


図 5-1 らいちょう N 外観と動力システムの構成図

(出典) 東京海洋大学

## (2) 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所 「神峰」

国土交通省海事局では、水素社会実現に向け、水素を燃料とする燃料電池船の安全ガイドライン策定に取り組んでおり、陸上での安全性試験を行ってきたが、実験データに裏付けされた合理的な安全ガイドラインの策定のため、海上・港湾・航空技術研究所やヤンマーらが請負っている事業のなかで、燃料電池・リチウムイオン電池推進船「神峰」(通称：バスマフート船/シームレス実験船)による試験運転を、広島県尾道市で2017年3月21日から開始している。

このプロジェクトではヤンマーが開発した燃料電池システムと渦潮電機が開発したりチウムイオン電池システムを船舶の甲板上に搭載し、燃料電池船の安全面に係る技術的課題(塩害、動揺・衝撃影響等)を整理する計画である。

船は繊維強化プラスチック(FRP)製で、総トン数は17トン、船舶の長さは16.5メートルである。2014年に建造されたディーゼル推進の実験船であり、運航試験のために、容量60kWhのリチウムイオン電池、出力5kWのPEFC、出力55kWの推進用電動機2基を搭載している。



図 5-2 神峰の外観(左)および甲板に搭載された燃料電池システム(右)

(出典) 国土交通省プレスリリース

このプロジェクトでは、現在は安全規制がない小形船舶における燃料電池利用の安全ガイドラインを策定し、安全面での制度と環境を整えることで、東京オリンピック・パラリンピックに向けた民間による燃料電池船実用化の促進を図ることを目的として様々な実験が行われた。

### (3) 環境省実証事業 「長吉丸」

環境省は浮体式洋上風力発電の実証を行っている長崎県五島沖において、2015年8月より小型燃料電池船の実証事業を開始している。この実証では、「長吉丸」と命名された小型船舶にPEFCを搭載し、実海域での運用を通して課題抽出等を行うこととなっている。なお船舶が利用する水素は、洋上風力発電の余剰電力を利用した水電解により製造される。

船体は長さ12.5mの小型船であり、約450Lの水素タンクを搭載している。1回の充填で2時間の航行が可能とされている。推進システムは、60kWのPEFC（30kW×2基）、132kWの蓄電池、440kWのモーター（220kW×2基）を搭載し、最大船速は約20ノットである。



## 5.2 海外の事例

船舶分野における燃料電池の導入可能性については、ディーゼル機関による大気汚染物質の排出が問題となる都市部等の内水域を航行する船舶、かつディーゼル機関による音や振動の軽減が快適性を大幅に向上させることができる旅客船にニーズがあるとされる。

ディーゼル機関による課題への対応策として海外では中型のクルーズ船に燃料電池を搭載するプロジェクトが複数進められている。以下に計画中および運航を開始した主な燃料電池クルーズ船のプロジェクトを紹介する。

表 5-1 船舶分野における主要な燃料電池利用プロジェクト一覧

船舶の区分 (現在の状況)	実施場所	概要	プロジェクトメンバー (リーダー*)	実施期間	FC種類 (メーカー)	FC容量
Royal Caribbean クルーズ船 (計画中)	未定	・世界最大規模のクルーズ船を保有する米国のRoyal Caribbeanは2016年に、燃料電池をクルーズ船に導入する方針を発表。 ・燃料電池システムはクルーズ船が港に係留している間のホテル電源として利用することを初期段階の目的としている。	・Royal Caribbean* ・Meyer Turku (造船所) ・Ballard Power Systems ・ABB Marine & Ports	2016年10月～開発中	未定 (Ballard Power Systems)	未定
Viking Cruises クルーズ船 (計画中)	北極圏を通るルートを運航するクルーズで使用予定	・2017年9月に旅客数900人級の燃料電池クルーズ船を建造する計画を発表し、液体水素を使用する燃料電池を推進システムとして搭載する計画。 ・燃料電池クルーズ船の計画の中には液体水素のバンカリング船の開発も含まれている。	・Viking Cruises* ・Norwegian Maritime Authority	2017年9月～開発中	詳細不明	24MW (未確定)
MS Innogy 小型旅客船 (運航中)	ドイツ、Essen市のバルデナイ湖 (Lake Baldeneysee)	・ドイツの大手エネルギー事業者RWEの子会社であるInnogyが2016年にデンマークのメタノール燃料電池メーカーであるSerEnergyと立ち上げ、現在運航中。 ・ドイツ初のメタノール燃料電池客船。 ・推進システムは5kWモジュール×7の合計35kW燃料電池と100 kWhのバッテリーのハイブリッド。燃料電池はレンジエクステンダーとしての役割を担っている。	・Innogy* ・SerEnergy ・Lux Wert (造船所) ・Weisse Flotte Baldeney	2016年～現在	DMFC (SerEnergy)	35 kW
New York Hornblower Hybrid 小形旅客船 (運行中)	米国、ニューヨーク州	ニューヨーク州のクルーズで使用されるフェリーにディーゼルエンジン、電池、風力及び燃料電池のハイブリッド推進システムを搭載し、運航している。ディーゼルエンジン推進の補助として使用。	・Hornblower Cruises & Events* ・Derecktor Shipyards	2012年～現在	PEFC (メーカー不明)	32kW
HYBRIDShips (計画中)	ノルウェー (詳細な場所は検討中)	水素を主要推進システムとするフェリーの運航を目的としている。将来、長距離運航が可能な船の開発のベースとなるデータ等の収集も目的としている。	・Fiskerstrand Holding* ・Fiskerstrand Verft ・Multi Maritime ・NEL等	2017年～2020年 (2020年にはフェリーの運航を目標としている)	PEFC (検討中)	検討中
SF-BREEZE 小形旅客船 (計画中)	米国、カリフォルニア州、サンフランシスコ・ベイエリア	サンフランシスコ・ベイエリアに燃料電池を搭載した高速フェリーのFS調査を目的としている。FS調査では、技術、規制および経済性について分析する。	・Sandia National Lab* ・Red and White Fleet* ・American Bureau of Shipping ・U.S. Coast Guard ・Elliot Bay Design Group	2015年～現在	PEFC (Hydrogenics)	合計 4.92MW
Viking Lady オフショア支援船 (実証終了)	北海	Viking LadyはノルウェーのFellowSHIPプロジェクトのもとで建造されたオフショア支援船。北海における油ガス田開発に利用。	・Eidesvik Offshore* ・Wartsila Ship Design ・West Contractors	2003年～現在	MCFC (メーカー不明)	320kW
Zemship 小形旅客船 (実証終了)	ドイツ・ハンブルク (アルスター湖)	アルスター湖および運河において旅客目的で燃料電池船Zemshipの運航を行った。約5年間の運転で、延べ43,000人の乗客が利用。	・The Hamburg Ministry of Urban Development and Environment* ・Proton Motor Fuel Cell ・Linde 他	2008年～2013年	PEFC (Proton Motor Fuel Cell)	48kW
Maranda Consortium 探査船 (計画中)	北極地域	燃料電池を様々な海洋条件の下で実証実験を行うことを目的としている。特に北極地域における起動や耐久性をテストする。将来探査船に搭載することを想定している。	・PowerCell Sweden* ・SKYE Marine Research Centre ・Suomen ympäristökeskus ・Swiss Hydrogen 等	2017年3月～ 2021年2月	PEFC (PowerCell Sweden)	20～ 100kW
Noé 小形旅客船 (計画中)	フランス本土とOuessant島	フランス本土とOuessant島の間を結ぶフェリーに燃料電池を搭載することを目的としている。水素は再生可能エネルギーを利用した水電解により製造することを想定している。	・Barillec Marine* ・Coprexma ・Pirou, Symbio FCELL ・l'Ecole Nationale Supérieure Maritime ・Pen Ar Bed	2016年～2020年	PEFC (Symbio FCell)	合計 2MW

(出典) 各社ホームページ等より作成

### (1) Zemships “FCS Alsterwasser” (ドイツ)

Zemships は、ドイツのハンブルグ市内にあるアルスター湖にて行われた、燃料電池船の実証プロジェクトである。船舶は“FCS Alsterwasser”と名付けられ、2008年8月から2013年まで運航した。乗客数は延べ43,000人に達し、燃料電池の総運転時間は2,500時間であった。運航終了の理由は、水素供給事業者側の経済的な事情によるものとされている。FCS Alsterwasserには48kWのPEFC(Proton Motor製)、35MPaの水素タンク(合計貯蔵量12kg)、202kWhの鉛蓄電池が搭載され、乗客定員は100名であった<sup>14</sup>。

### (2) Hornblower Cruises & Events “New York Horn Blower” (米国)

2011年に竣工し、ニューヨーク州のStatue Cruises社の子会社であるHornblower Cruises & Eventsが運航を開始した、世界初のディーゼルエンジン、太陽光、風力および燃料電池推進システムを搭載したフェリーであり、現在ニューヨーク州のクルーズで使用されている。

ニューヨークの造船会社であるDerecktor Shipyardsが建造し、全長168フィート(約51m)、幅40フィート(約12m)の船体に600人収容可能である。推進システムは1,400馬力あり、32kWのPEFC、700VDC AGM蓄電池を2基、Helix Winds社の5kW垂直軸風力タービンを2基および20kWの太陽電池モジュールを搭載している。なお、ディーゼルエンジンは推進補助として使用している<sup>15</sup>。

### (3) MS Innogy (ドイツ)

MS Innogyはドイツの北部に位置するEssen市のバルデナイ湖(Lake Baldeneysee)を運航中のメタノールを燃料とするドイツ初のクルーズ船である。プロジェクトはドイツの大手エネルギー事業者RWEの子会社であるInnogyが2016年にデンマークのメタノール燃料電池メーカーであるSerEnergyと立ち上げ、2017年8月28日に運航を開始したと発表した。MS InnogyはLux Wert造船所で建造され、オペレーションはWeisse Flotte Baldeney Essen市のボートクラブが担う。

SerEnergyの燃料電池ユニットは、船舶の必要出力に柔軟に対応できるようにモジュール構造をとっている。MS Innogyは5kWのモジュールを7基搭載しており、合計35kWの燃料電池ユニットとなっている。推進システムは燃料電池と100kWhのバッテリーのハイブリッドであり、燃料電池はレンジエクステンダーとしての役割を担っている。ハイブリッドシステムをとることで、1日1回の水素充填で運航が可能としている。また、燃料電池の排熱をメタノールの改質に再利用することで高いエネルギー効率を得られている。なお、メタノールの燃料タンク容量は330Lである<sup>16</sup>。

<sup>14</sup> Proton Motor Fuel Cell GmbH “Fuel Cell Systems for Zero Emission Ships: Experience from Regular Line Operation” (2010年4月22日)

<sup>15</sup> Hornblower Cruises and Events, “Hornblower Hybrid” ([www.hornblower.com/port/yacht/ny+33](http://www.hornblower.com/port/yacht/ny+33))

<sup>16</sup> SerEnergy, “The first methanol fuel cell powered vessel in Germany is now sailing the waters of lake

#### (4) Viking Lady (ノルウェー)

ノルウェーで実施された FellowSHIP プロジェクトのもとで建造されたオフショア支援船であり、2009 年より運用され、北海における油ガス田開発で利用されている。Eidesvik Offshore が船舶のオーナーであり、Wärtsilä Ship Design が船体の設計、West Contractors が船体の設計を担当し、ノルウェーの船級協会の Det Norske Veritas が船級検査・登録を行っている。Viking Lady はドイツ経済技術省やノルウェー研究評議会などが 1.2 億 NOK (約 17 億円) を助成した。

船の諸元は全長 92.2m、幅 21m、GT (総数トン) 6,100 トンであり、100%電気で推進している。約 2MW の LNG/ディーゼルバイフューエルエンジンを 4 基および 320kW の MCFC を搭載している。2009 年に運航開始し、2012 年には合計運転時間が 18,500 時間に到達した<sup>17</sup>。

#### (5) Royal Caribbean (米国)

世界最大規模のクルーズ船を保有する米国の Royal Caribbean は 2016 年 10 月にクルーズ船に燃料電池を導入する方針を発表した。まずは 2017 年から中型のクルーズ船で燃料電池システムを実証する計画である<sup>18</sup>。また、実証に向けて、Royal Caribbean はフィンランドの造船会社の Meyer Turku と業務提携の覚書を締結した。

2017 年 11 月には Ballard の 100 kW PEFC システムである、FCvelocity®を ABB Marine & Ports が船舶仕様に加工して Royal Caribbean に納入した。燃料電池システムの周辺機器のコントロールやコンバーターについても ABB が提供している<sup>19</sup>。なお、燃料電池システムはクルーズ船が港に係留している間のホテル電源 (客室の冷暖房・照明・家電等に供給する電力用の電源) として利用することを初期段階の目的としており、実証を重ねながら長期的には燃料電池を船舶の推進システムとして利用するとしている。

#### (6) Viking cruises (米国)

Royal Caribbean の競合会社である Viking Cruises は 2017 年 9 月に旅客数 900 人級の燃料電池クルーズ船を建造する計画を発表した。燃料は液体水素を使用し、燃料電池は推進システムとして搭載するとしている。なお、燃料電池クルーズ船の計画の中には液体水素のバンカリング船の開発も含まれている<sup>20</sup>。

---

Baldeneysee" (<http://serenergy.com/the-first-methanol-fuel-cell-powered-vessel-in-germany-is-now-sailing-the-waters-of-lake-baldeneysee/>) (2018 年 2 月時点)

<sup>17</sup> Wärtsilä "Viking Lady" (<https://www.wartsila.com/resources/customer-references/view/viking-lady>)

<sup>18</sup> Royal Caribbean, "RCL announces two new ships powered by lng and fuel cells" (<http://www.rclcorporate.com/rcl-announces-two-new-ships-powered-by-lng-and-fuel-cells/>)

<sup>19</sup> ABB, "ABB to deliver first fuel cell system to Royal Caribbean" (<http://www.abb.com/cawp/seitp202/f604a6bdc96ffe17c12581d2004b36fc.aspx>)

<sup>20</sup> Viking Cruises, "The future of maritime propulsion – VOC Fuel Cell R&D" (<https://zerokonferansen.no/wp-content/uploads/2017/11/2C-5-Serge-Fossati-Viking-Cruises.compressed.pdf>)

燃料電池クルーズ船は現在 Viking Cruises が運航している Viking Sun などをベースモデルに建造する計画である。完成した際には全長 235m および幅 32m になり、最大 1,000 人の旅客および約 500 人のクルーを乗せることができる世界初の大型燃料電池クルーズ船となる。燃料電池システムは約 24MW になると見積もられている。

現在 Viking Cruises は Norwegian Maritime Authority と協議を進めており、登録は Norwegian International Ship Register になるとされている。また、液体水素の調達先は Statoil と協議中であり、ノルウェーにある Statoil の産業ガスコンプレックス（メタノールプラント、天然ガス受入基地、空気分離プラント）の Tjeldbergodden から調達することを検討している。

Viking Cruises はクルーズ船を燃料電池化する意義として以下の理由を挙げている。

- ゼロエミッション（海の環境保全、大気汚染ゼロ、エンジン音の軽減）
- 環境や健康意識が高い客層への対応
- 野生の海洋生物との接触（海洋生物により近づくために音や汚染物質を排出しない）
- 従来の内燃機関等の設備のスペースの活用（燃料電池化するとキャビンスペースとして有効活用可能な空間が広がる）

## (7) Maranda（ノルウェー）

Maranda (Marine application of a new fuel cell powertrain validated in demanding Arctic conditions)は、PowerCell Sweden が開発した PowerCell S3 システム (PEFC) の 20~100kW の出力のプロトタイプを船舶向けに改良し、様々な海洋条件の下で実証実験を行うプロジェクトである。燃料電池は、北極地域の探査船である Aranda に設置され、船舶の研究用電気機器および自動船位保持装置などの電源として 18 ヶ月間使用される予定となっている。研究活動の際、音、震動および各種汚染がない環境は重要であることから、燃料電池を探査船などに搭載する方針を掲げている。

Maranda プロジェクトの総コストは約 370 万ユーロであり、そのうち約 294 万ユーロを欧州の FCH 2 JU からの助成によって賄っている。プロジェクトは 2017 年の 3 月にキックオフを行い、2021 年の 2 月に終了する予定となっている。

本プロジェクトでは、燃料電池の効率および耐久性に関する技術開発を行うこととなっており、さらに氷点下起動の試験も実施される計画である。搭載される燃料電池は 82.5kW が 2 基で合計 165kW となり、蓄電池と組み合わせたハイブリッドシステムが採用されている。燃料電池への水素供給については、350 気圧 (35MPa) の水素貯蔵タンクを利用する予定である<sup>21</sup>。

<sup>21</sup> PowerCell, "PowerCell has been granted EU funding for development of a marine fuel cell system together with amongst others ABB" (<http://investor.powercell.se/en/news/powercell-has-been-granted-eu-funding-for-development-of-52389?page=5>)

## (8) HYBRID Ships project (ノルウェー)

ノルウェーで水素を主推進システムとするフェリーの運航を目指すプロジェクトが2017年1月に開始された。HYBRID Ships は H<sub>2</sub> and battery technology for innovative powertrains in ships の略であり、水素を主要推進システムとするフェリーの運航を目的としている。また、将来的には、より大規模で、長距離運航可能な船の開発を実施するため、中規模の船で水素と蓄電池のハイブリッド推進システムの実証を行う。2017年1月9日にプロジェクトはキックオフされ、2020年までに燃料電池フェリーを運航する目標である。

本プロジェクトはゼロエミッションの船舶開発を助成する目的のPilot-Eスキームに採択されている。Pilot-Eスキームの基金はResearch Council of Norway (ノルウェーの学術振興機関)、Innovation Norway (ノルウェーの貿易・産業・漁業省と自治体などの外郭団体) およびEnova (ノルウェーの石油エネルギー省の傘下) が資金投入しており、Pilot-Eの予算7,000万NOK (約9.12億円) に対してHYBRID Ships 含め5つのプロジェクトが採択されている。なお、燃料電池の容量は検討中であるがPEFCを搭載する予定である<sup>22</sup>。

表 5-2 HYBRIDShips のプロジェクトメンバーと役割

企業・組織名	役割
Fiskerstrand Holding AS	プロジェクトリーダーとして全体を統括
Fiskerstrand Verft AS	船舶の改造における技術面
Multi Maritime AS	船舶の設計および建造
SINTEF Foundation	ハイブリッド推進システムおよびその他水素・燃料電池における技術面
NEL ASA	水素の供給とバンカリング設備の技術面および安全性を含む事業性評価
Hexagon Raufoss ASA	水素の貯蔵および輸送
DNV GL	安全・リスク管理および船級登録における審査、承認のプロセス
Norwegian Maritime Authority	海運における水素および燃料電池使用の承認プロセスの調整
Norwegian Directorate for Civil Protection	関連する陸上設備の承認プロセスの調整
Møre og Romsdal County Authority	実証を行うフェリーの航路やその他フェリーへの乗り継ぎなどの連携に関する調整

(出典) Norwegian Maritime Authority, “Breaking new ground in hydrogen ferry project” 2017/1/19より作成

<sup>22</sup> Norwegian Maritime Authority, “Breaking new ground in hydrogen ferry project” (<https://www.sdir.no/en/news/news-from-the-nma/breaking-new-ground-in-hydrogen-ferry-project/>) (2017年1月時点)

## (9) SF-BREEZE (米国)

SF-BREEZE は San Francisco Bay Renewable Energy Electric Vessel with Zero Emission の略であり、サンフランシスコ湾で燃料電池を搭載したフェリーを運航するプロジェクトである。船舶運航会社である Red and White Fleet と Sandia 国立研究所が中心となり、実証プロジェクトを実施しており、他に U.S. Coast Guard (アメリカ沿岸警備隊)、American Bureau of Shipping (アメリカ船級協会)、Elliott Bay Design Group (船舶エンジニアリング会社) が参加している。なお、プロジェクトは米国海事局 (U.S. Maritime Administration: MARAD) より 50 万ドルの助成を受けている。

Sandia 国立研究所は 2016 年に FS 調査の結果を発表し、現在船体デザインの最適化に関する検討を行っている。具体的には船速を遅くすることで燃料消費を抑えコストダウンを目指し、同時に 6 種類の船体デザインについて経済性や環境性の比較を実施している<sup>23</sup>。

定員は 150 名、最高速度は 35 ノット (時速約 63 km) であり、計 4.92 MW の PEFC を搭載する計画である。燃料電池の容量のうち 4.4 MW は推進用の動力に利用され、それ以外は補助電源および予備電源として利用される。また、水素の貯蔵方式は、船体の軽量化のため液体水素貯蔵を選択している。液体水素タンクの積載量は 1,200 kg であり、往復 50 海里 (約 92km) のルートを燃料補給なしに運航することが可能とされている。

Sandia 国立研究所の FS 調査では SF-BREEZE と既存のディーゼル船を比較したコスト評価および GHG (温室効果ガス) 排出量評価を実施した。FS 調査の結果、燃料電池フェリーの初期コストはディーゼル船の 1.5 倍~3.5 倍、O&M コストは 2 倍~8 倍となった。これは、主として出力 (kW) あたりの燃料電池とディーゼルエンジンの価格差による結果であると考察されている。また、GHG 排出量は、天然ガス由来の水素を使用する場合、ディーゼル船の約 3 倍となった。これは、主に水素の液化貯蔵にかかる電力消費量の増加等によるものである。

---

<sup>23</sup> Sandia National Laboratories "Feasibility of the SF-BREEZE: a Zero-Emission, Hydrogen Fuel Cell, High-Speed Passenger Ferry" (<https://www.marad.dot.gov/wp-content/uploads/pdf/SF-BREEZE-Ferry-Feasibility-Study-Report-by-Sandia-National-Laboratory-2.pdf>)

表 5-3 SF-BREEZE のコスト評価結果

	SF-BREEZE			Conventional Diesel	
	Low	High	Future	Low	High
<b>Costs</b>					
Capital cost	\$21,990,000	\$29,220,000	\$17,166,000 <sup>d</sup>	\$8,000,000	\$15,200,000
Yearly powerplant O&M	\$1,081,200	\$1,796,200	\$375,200 <sup>e</sup>	\$226,650	\$480,480
5-year non-renewable fuel	\$9.7M	\$15.6M	Higher	\$3.90M	
5-year 100% renewable fuel	\$16.7M	\$48.7M	Lower	N/A	N/A
Fueling infrastructure	\$970,000	\$1,595,000	Lower	\$1,500	\$338,000
<b>Benefits</b>					
Economic benefit to society of emission reductions	\$2,600,000 to \$11,000,000			\$0	

(出典) Sandia National Laboratories “Feasibility of the SF-BREEZE: a Zero-Emission, Hydrogen Fuel Cell, High-Speed Passenger Ferry”

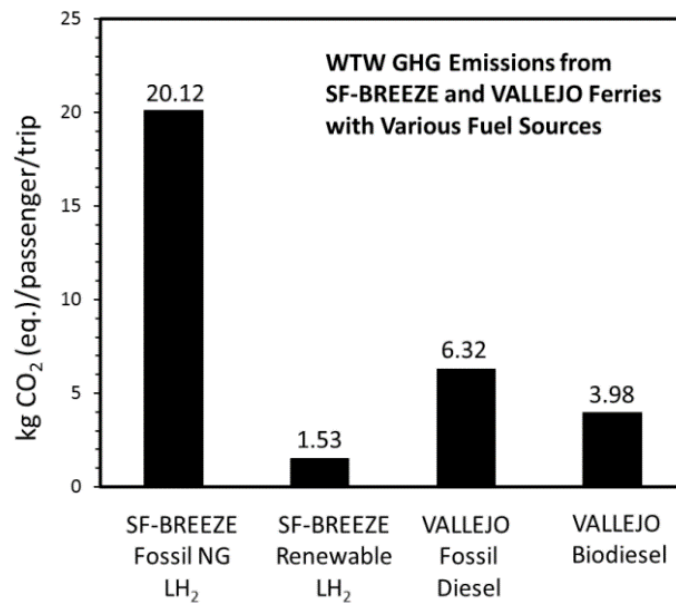


図 5-3 GHG 排出量評価結果

(出典) Sandia National Laboratories “Feasibility of the SF-BREEZE: a Zero-Emission, Hydrogen Fuel Cell, High-Speed Passenger Ferry”

#### (10) Nøé (フランス)

Nøé は、フランス本土と Ouessant 島との間を結ぶフェリーに燃料電池を搭載するプロジェクトであり、プロジェクト名称は英語で Zero emission ship に該当する。プロジェクトの実施主体は、船舶用の発電機器等を製造する Barillec Marine 社となっている。

全長 35m のフェリーに、1MW の燃料電池を 2 基搭載する計画であり、燃料の水素は再生可能エネルギー電力を利用した水電解により製造することを想定している。1 回の水素充填にかかる時間は約 4 時間と想定されている<sup>24</sup>。

燃料電池フェリーの運航開始は 2020 年が予定されているが、具体的な開発スケジュール等は明らかにされていない。

---

<sup>24</sup> VINCI Energies ホームページ (<http://www.vinci-energies.com/en/our-news/newscenter/renewable-energies-and-a-hydrogen-fuel-cell-to-power-a-ferry/>)、(2018 年 2 月アクセス)



## 6 対象車両/船舶の検討

燃料電池駆動方式の持つ長所として、走行時に CO<sub>2</sub> や NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、PM の排出がなくゼロエミッションを達成でき、環境汚染の原因にならないこと、振動・騒音が少ないこと、鉄道では電化のために架線・変電所設備など数十億円のコストを要する高価なインフラが必要なく、さらに架線が不要となるため景観が良くなる点にある。以上の特性を踏まえると、日本における鉄道と船舶への燃料電池の適用については、以下が対象となると考えられる。

### (1) 鉄道分野

ディーゼル気動車は 1 日の便数の少ない地方路線で多く採用されているが、車両基地周辺地域に排気ガスや騒音といった問題を引き起こすリスクがあるため、ディーゼルエンジンから燃料電池への変更は大きなメリットをもたらすと考えられる。

また、LRT<sup>25</sup> (Light Rail Transit) は、都市部に自動車などが集中する問題を解決するために欧州で導入が進んでおり、日本でも富山市等で採用され、今後新規に開業する宇都宮市の市電でも採用予定である。LRT においては、高い電化のコストとともに、架線（トロリー線）がもたらす景観の悪化から燃料電池の採用も有力と考えられる。



図 6-1 水田地帯を走行するディーゼル気動車（左）とヤードを移動する入換機関車（右）  
（出典）みずほ情報総研撮影

<sup>25</sup> 一般に路面電車に近い都市の新交通システムの一つであり、低床化によるバリアフリー実現など同時に路面電車の輸送性能を向上させるなどして、他の交通手段との連続性を高めたものとされる。

## (2) 船舶分野

船舶分野ではディーゼル機関が多く採用されており、東京湾では船舶の往来が多くなる時間帯に NOx 濃度が上昇する環境問題も生じており<sup>26</sup>、運航中に排ガスが出ない燃料電池の利点が活かせる。また、特に、景勝地の遊覧船や屋形船といった振動・騒音・ガソリンの臭いが敬遠されるような旅客船において燃料電池の利活用のニーズがあると考えられる。一方、船舶の運航形態として、水の抵抗力が大きいため、定常的に高出力が求められることがあり、現状の燃料電池を用いる場合は、比較的小型の船舶である、屋形船や水上バスが燃料電池利用の対象となると考えられる。



図 6-2 隅田川を航行する屋形船（左）と水上バス（右）

（出典）みずほ情報総研撮影

次章では、これらの燃料電池の導入によるメリットが高いと考えられる分野の鉄道・船舶の日本における市場規模について明らかにする。

表 6-1 燃料電池の活用が見込める鉄道・船舶分野の市場セグメント

	燃料電池の活用が見込まれる市場セグメント
鉄道分野	<p><b>①ディーゼル気動車/入換え機関車</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 多数の地方路線で利用される</li> <li>➢ 排ガスが大気汚染の原因となっている</li> </ul> <p><b>②LRT等の新規路線</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 架線の初期投資が非常に高い</li> <li>➢ 空中架線による景観の問題がある</li> </ul>
船舶分野	<p><b>観光船・遊覧船</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 小型の船舶が対象</li> <li>➢ 多数の都市港湾・湖・河川で利用され排ガスが大気汚染の原因となっている</li> <li>➢ 静粛性が好まれる</li> </ul>

<sup>26</sup> 環境省「平成 24 年度 船舶・航空機排出大気汚染物質削減に関する検討調査報告書」

## 7 市場ポテンシャルの検討

### 7.1 鉄道における燃料電池の市場ポテンシャル

燃料電池の活用が見込まれる市場セグメントであるディーゼル気動車・機関車の日本における所属車両数と、それらが走行する非電化路線の路線長をまとめる。ディーゼル気動車の所属数はJR7社の合計で約2,200両、その他（民鉄と第三セクター）が約490両の合計約2,700両となる。他方でディーゼル機関車の所属数は、JR6社の合計で106両、その他民間や第三セクターのものが94両となっている。

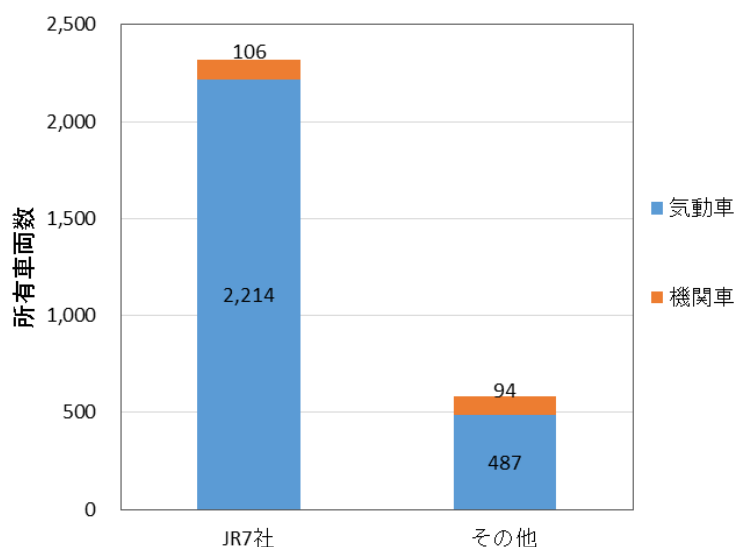


図 7-1 日本におけるディーゼル気動車ならびにディーゼル機関車の所有車両数  
 (出典) JR 気動車客車編成表 2017 (ジェー・アール・アール編)、私鉄車両編成表 2017 (ジェー・アール・アール編)、JTB 時刻表 2017 年 4 月 (JTB パブリッシング) より作成

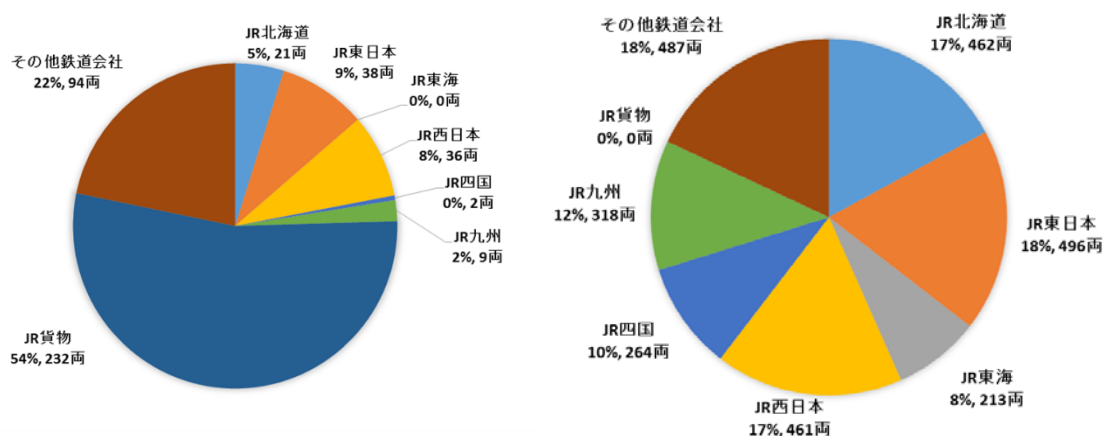


図 7-2 ディーゼル機関車 (左) とディーゼル気動車 (右) の会社別保有内訳  
 (出典) JR 気動車客車編成表 2017 (ジェー・アール・アール編)、私鉄車両編成表 2017 (ジェー・アール・アール編) より作成

非電化路線の総延長は約 8,550km で日本の鉄道網の 31%を占めている。他方、人口の都心部への集中が進む中で、このような路線は利用者が減少しつつあり、今後も電化される計画のない路線が多い。非電化率では JR 北海道と JR 四国が 70%以上と高いが、営業キロで比較すると JR 北海道と JR 東日本が大きくなっており、JR 四国の非電化営業キロは JR の中では大きくない。なお非電化路線 1 路線当たりの平均路線長を算出すると約 66km となる。

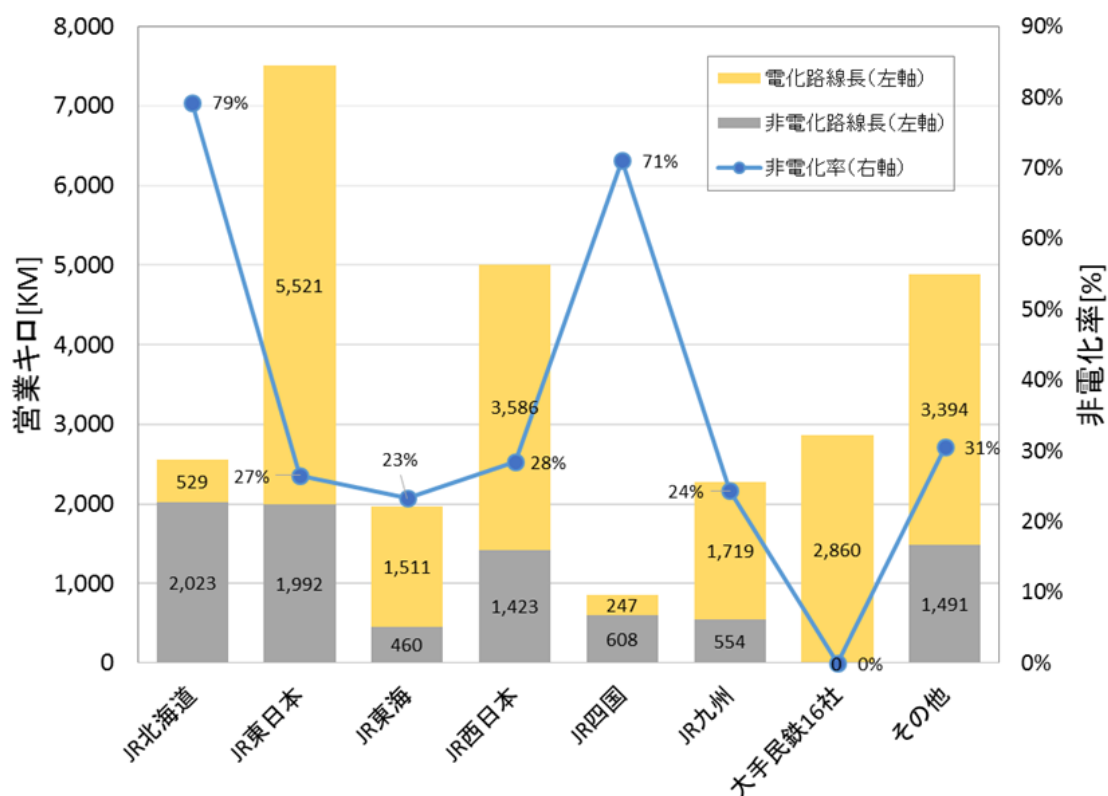


図 7-3 鉄道路線非電化率の会社別比較

(出典) 国土交通省鉄道統計年報、JTB 時刻表 2017 年 4 月 (JTB パブリッシング) より作成

既に電化が主流となっている路面電車や LRT の分野でも、中国等では燃料電池車両の実用化が始まっている。架線レス化が進む観光地での景観への配慮やコストの問題から、燃料電池が好まれると考えられる。

図 7-4 に日本における現在の LRT 路線の営業キロ (軌道長) と保有車両数を示す。LRT / 路面電車は通常の鉄道とは異なり、車両数に対して営業キロ数が短く、きわめて狭い範囲を往復する形で運行されている。総営業キロは約 235km、総車両数は 772 両となっている。

日本では徐々に路面電車が廃止されてきた歴史があるが、欧州では逆にその輸送力としての価値やバリアフリー性が見直されており、LRT の新規路線等の建設が進められてきた経緯がある。

また、日本においても宇都宮市が 2017 年より新規に宇都宮駅と工業団地を結ぶ LRT の建設に着手した。コンパクトシティ実現や通勤時の混雑緩和を目的とした LRT 導入の検討は宇都宮市以外にも行われており、日本においても今後増加する可能性のある市場である。

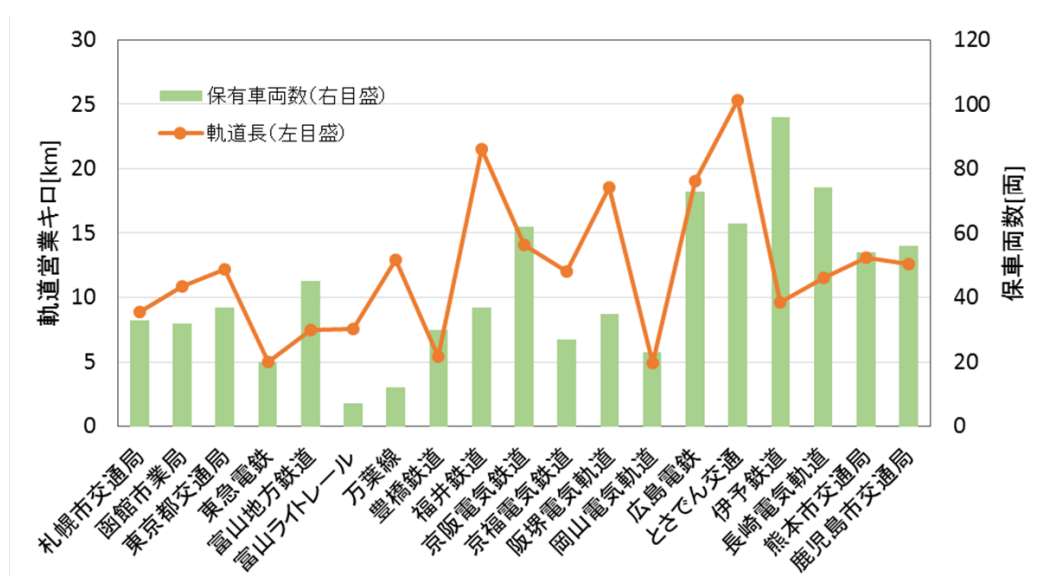


図 7-4 LRT/路面電車車両保有状況ならびに軌道営業キロ  
 (出典) 国土交通省鉄道統計年報、各社ホームページより作成

上記をまとめると鉄道分野では、150kW/両と想定して燃料電池 0.5GW 相当の市場規模がある。鉄道車両 1 両あたりの年間輸送量は 8,050 人キロ/年・両であり、平均輸送能力 (人キロ) で比較すると自動車 (FCV) 26 万台分に相当する輸送力となる。

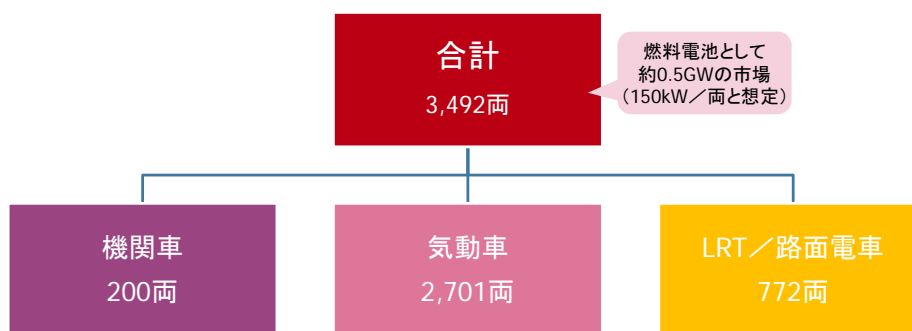


図 7-5 燃料電池車両の最大市場ポテンシャル

## 7.2 船舶における燃料電池の市場ポテンシャル

前節で検討したとおり、燃料電池が導入されうる船舶分野の市場ポテンシャルとして、主に旅客目的で登録されている内航船の船舶数をトン数別に集計した。対象となる旅客船は2017年4時点では全国で約3,000隻登録されている。旅客用の船舶の在籍数に着目すると、2.5～5トンといったクルーザーや小形遊覧船規模のものが最も多い。

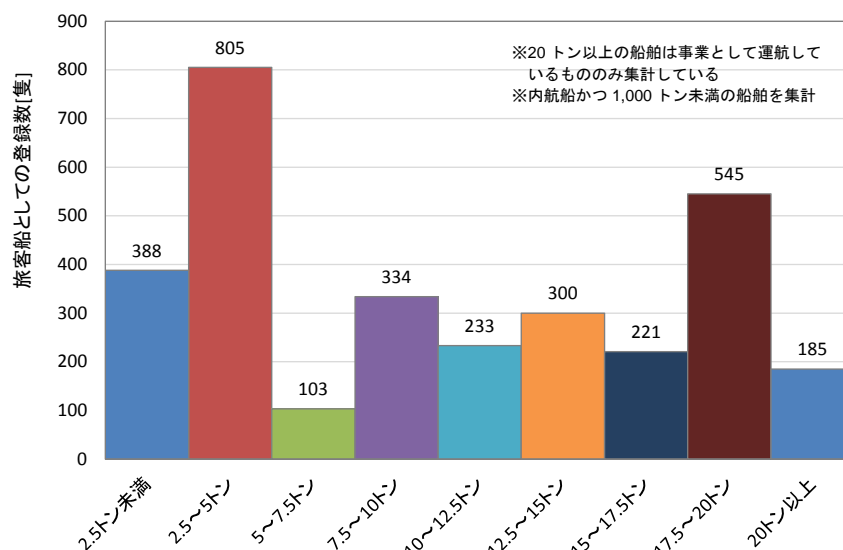


図 7-6 日本国内における重量別客船登録数

(出典) 国土交通省データ、フェリー・旅客船ガイド(2017年春季号)(日刊海事通信社)より作成

船舶分野のポテンシャルとして、旅客目的で登録されている20トン以下の船舶数の地域別在籍数を集計したもの(左下)ならびに地域別在籍トン数(右下)を図7-7に示す。小～中型の船舶は、東京・神奈川・千葉に偏在しており、総トンにして日本全体の過半数を占める。

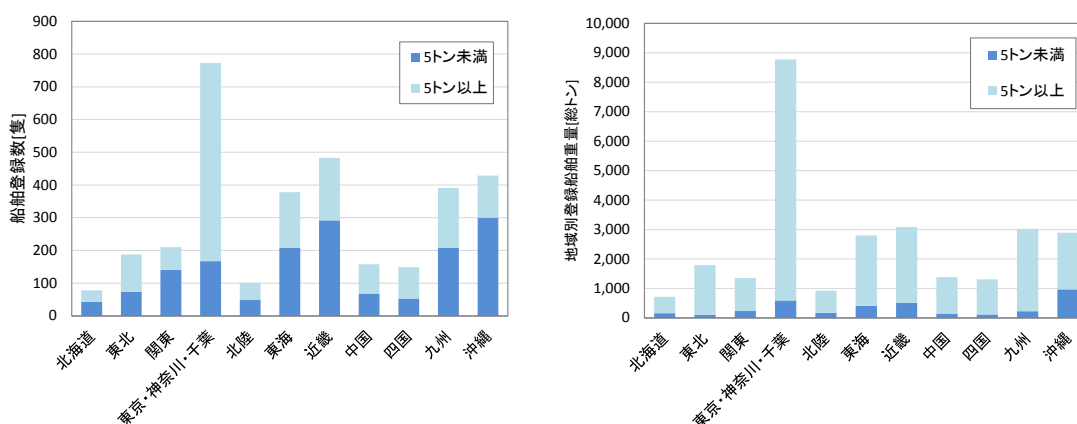


図 7-7 地域・トン数別船舶登録数(左)ならびに地域・トン数別船舶登録トン数(右)

(出典) 国土交通省データ、フェリー・旅客船ガイド(2017年春季号)(日刊海事通信社)より作成



船舶の場合は、自動車や鉄道と異なり水の抵抗が大きいため、2倍の速力を得るためには推進力を8倍（2の3乗）にする必要がある。このため、速力の高い船の動力を燃料電池で置き換える場合、大出力の蓄電池・燃料電池を積む必要があり、コスト増や搭載スペースの問題が発生する。このため、導入初期の燃料電池船としては低速・低出力の船舶が有望である。図7-8に主機関と船重量の関係を示す。主機関出力は船の総トンに必ずしも比例せず、100kW～400kWの範囲が約半分を占める。

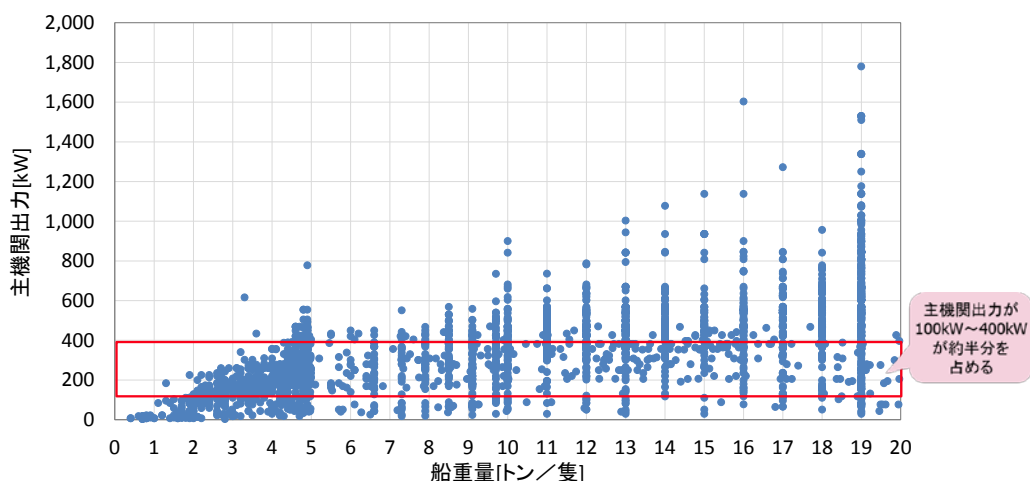


図 7-8 船体重量と主機関出力の関係  
 (出典) 国土交通省データより作成

以上をまとめると、船舶分野では旅客船に限っても約3,300隻の市場があり、これらが主機関と同じ出力の燃料電池を搭載すると想定すると、燃料電池1.3GW相当の市場規模がある。船のサイズやスペースの観点から燃料電池の搭載が有望な重量5～20トンの船舶は、旅客船に限定しても約1,700隻ある。



図 7-9 燃料電池車両の最大市場ポテンシャル



## 8 燃料電池導入の経済性の検討

本章では、燃料電池を鉄道および船舶に導入する際に、最も事業者において関心があると想定される課題である経済性の検討を行う。前章で対象となる鉄道および船舶を特定したことから、これらについて、初期コストおよび運用コストについて試算するとともに、現状の内燃機関を使用した場合との比較を行う。

なお、燃料電池は現状でも技術開発とコストダウンが進展していることから、現在（2016年断面）の燃料電池導入の経済性ととも、中長期の時点として、東京オリンピック開催年となる2020年そして2030年の時点も併せて検討する。

### 8.1 燃料電池、リチウムイオン電池ならびに水素価格の将来低減の推定方法

ここでは動力源として燃料電池システムを導入する際に、必要となる燃料電池、リチウムイオン電池および燃料となる水素の価格について検討する。

まず、燃料電池については、現状では研究や実証段階のレベルで利用される1品物の調達価格は1kWで100万円程度の価格と高止まりしているが、市場化を達成している自動車分野では、量産化により大幅にコストが低減していると考えられている。

NEDOが2017年に発表した燃料電池・水素技術開発ロードマップによれば、固体高分子形家庭用燃料電池（エネファーム）の現状の価格は113万円/台である。1台の出力を一般的なエネファームの出力である0.7Wとすると、熱を回収するための貯湯槽と燃料改質器のコスト割合（図8-1）を除いたコストはPEFC形でkWあたり約89万円/kWとなる。

他方で、2017年に発表された国際エネルギー機関（IEA）の燃料電池ロードマップの調査によれば、市販されている燃料電池自動車の燃料電池システム全体での価格は300～500USD/kWであった。現状では自動車メーカーは燃料電池を内製化しているにとどまり、他用途への展開は行われていないが、燃料電池自動車用の燃料電池を活用することができるようになれば、価格が飛躍的に低減する可能性がある。従って現状のコスト分析としては①エネファーム相当の燃料電池価格の場合と②FCV用燃料電池の価格を用いる場合の2通りの想定について計算した。

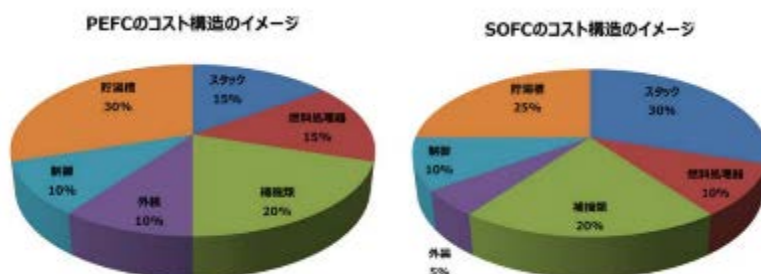


図 8-1 家庭用燃料電池のコスト構造

(出典) 資源エネルギー庁「水素・燃料電池戦略ロードマップ」(2016)

また、将来の価格低減見通しについては、FCV用燃料電池が工業的に量産化されるとともに、鉄道や船舶用途にも将来供給されるという想定のもと、2017年度にNEDOが策定した技術ロードマップにおける目標値を採用した。

水素価格については、ステーションの稼働率や規制緩和に起因するコストの低減等様々な影響因子があり、ここでは、NEDO技術ロードマップによる水素ステーションでの供給目標価格を想定した。

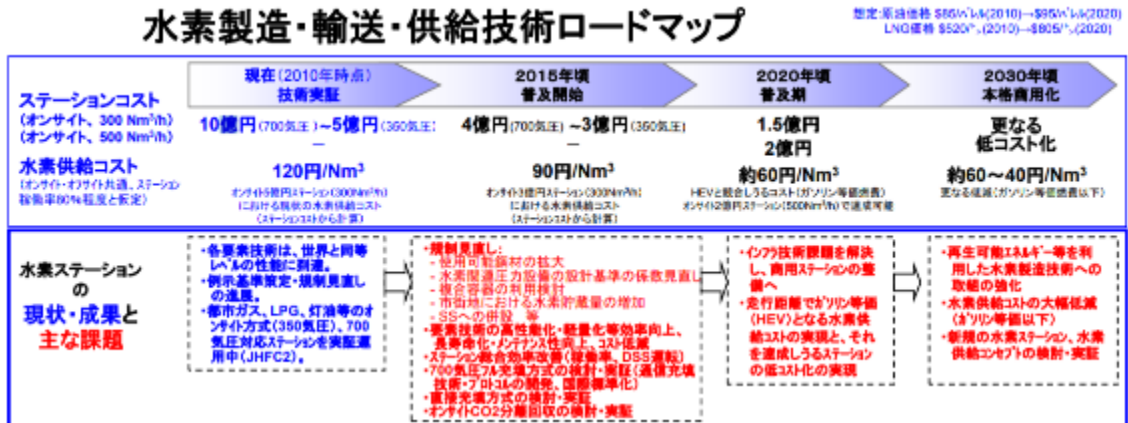


図 8-2 NEDO 水素製造・輸送・供給技術ロードマップより一部抜粋

(出典) NEDO「水素製造・輸送・供給技術ロードマップ」(2010)

## 8.2 鉄道における経済性の検討

燃料電池の鉄道車両への導入について、経済性を検討するため、本節では、気動車、入換機関車、LRT の 3 種類のうち、最も日本における市場規模が大きいことが期待される気動車を対象として分析を行った。具体的には、非電化路線において最新式のディーゼル車両を新規に導入する場合と、燃料電池車両を導入する場合のコストを比較した。

燃料電池鉄道車両については、公表されている価格情報がないため、鉄道車両等生産動態統計から推測したベース車両の価格から、燃料電池駆動化によって①不要になる構成部品の価格を除き②必要となる燃料電池システム等の価格を加算した数値を初期投資として想定するものとした。

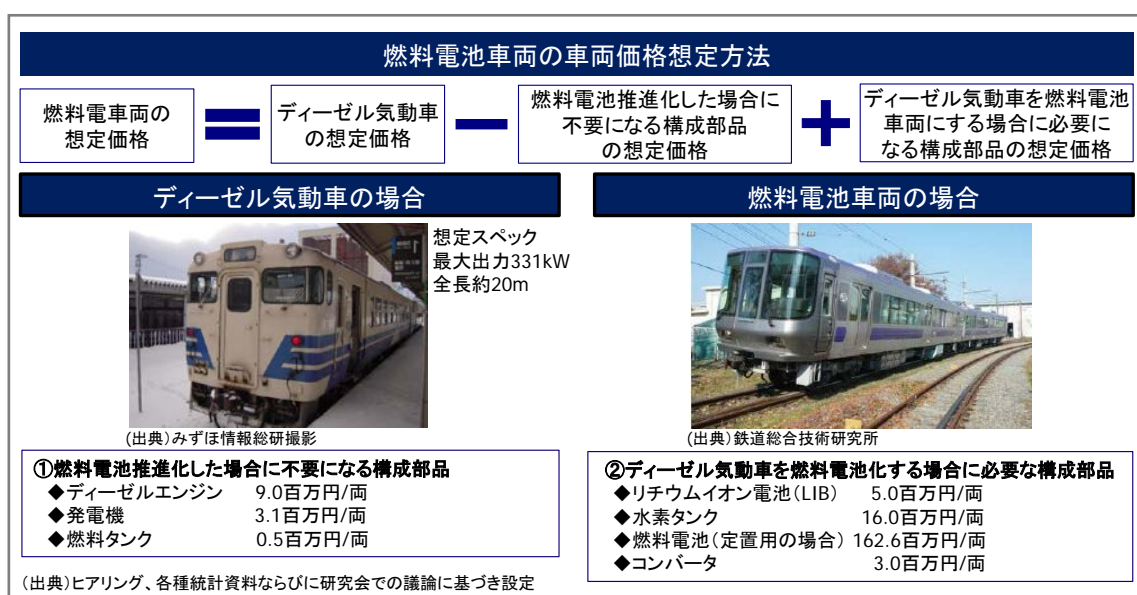


図 8-3 調査における燃料電池車両価格の想定方法

これまでに試作された燃料電池駆動車両・蓄電池駆動車両は、1両あたり 19~190kWh の蓄電池を搭載しているが、今回の試算では、燃料電池の搭載は 1両あたり 150kW 程度、蓄電池はディーゼルハイブリッドと同等の 40kWh と想定した。これは既に鉄道用リチウムイオン電池として採用実績があるリチウムイオン電池と想定すると、連続出力で 130kW、最大許容電流では 800kW の瞬間出力が取り出せることとなり、燃料電池とリチウムイオン電池の合計出力としてモデル車両で想定する 331kW を得るのに必要な出力を満たしている。実際の使用状況では最大加速を行うのは惰行に移るまでの短い時間であり、瞬間的な出力を得るためには十分であると想定される。

車両の寿命は 30 年とし、運行する路線の路線長は、前章で示した日本の非電化路線の平均路線長 66km と設定した。運行形態としては、実際の非電化路線の運用形態に基づき、この片道 66km の非電化路線を 1 日 2 往復すると仮定した。1 日の走行時間・走行距離の想定に関しては、非電化区間の運行ダイヤを参考とし表 8-1 の通り想定した。

表 8-1 燃料電池車両の運行条件と想定寿命のまとめ

項目	想定値	単位	出典
① 想定路線長	66	km	非電化路線の平均路線長を採用
② 平均走行速度	30	km/h	ヒアリングに基づき設定。燃料電池で発電し余はリチウムイオン電池に充電と想定。
③ 平均往復回数	2	回	みずほ情報総研想定値
④ 1日当たり走行距離	264	km	=①×②×③
⑤ 稼働時間	8.8	時間/日	=④÷②
⑥ 車両寿命	30	年	ヒアリングより想定
⑦ FCスタック寿命	25,000	時間	ヒアリングより想定
⑧ リチウムイオン電池寿命	8	年	ヒアリングより想定
⑨ FCスタックが寿命を迎えるまでの走行距離	750,000	km	=⑦×②
⑩ FCスタックが寿命を迎えるまでの時間	7.8	年	=⑨÷⑤÷365
⑪ リチウムイオン電池寿命	8	年	=⑧÷⑤÷365
⑫ FCスタック交換回数	3	回	=⑩÷⑥
⑬ リチウムイオン電池交換回数	3	回	=⑪÷⑥
⑭ 水素タンク交換回数	1	回	法定耐用年数が15年であることから設定

ベース車両価格は、国交省の鉄道車両生産動態統計より過去5年間で納車されているディーゼル気動車の価格から外れ値を除いた平均値として約1.5億円/両と設定した。燃料電池を導入した場合に不要となる部品としては、ディーゼルエンジン、発電機、燃料タンクとなる。エンジンは国土交通省の鉄道車両生産動態統計より、鉄道用ディーゼルエンジンの過去5年間の平均値が約900万円/基であることから、900万円/基とした。同様に、発電機は経産省の生産動態統計年報機械統計より、1kW出力当たりの価格が約1万円であり、ベースとして想定したディーゼル車両は331kWの出力であることから331万円とした。燃料タンクは、エンジン1基あたり550リットルと想定し50万円と想定した。

表 8-2 車両価格等の想定

①燃料電池駆動化によって不要となる部品価格を除く

項目	価格	単位	出典
ベース車両価格	150,000,000	円/両	国土交通省「鉄道車両生産動態統計」より設定
エンジン	-9,000,000	円/基	国土交通省「鉄道車両生産動態統計」より設定
発電機	-3,110,000	円/基	経済産業省「生産動態統計年報機械統計編」より設定
燃料タンク	-500,000	円/個	みずほ情報総研想定値
換装前価格	137,390,000	円/両	

②必要となる燃料電池システム等の価格を加算

項目	導入単位	価格	単位	出典
換装前価格	1両	137,390,000	円/両	
燃料電池システム(定置用を活用)	150kW	162,642,857	円/基	経済産業省「水素・エネルギー戦略」(2017)より算出
燃料電池システム(FCV用を活用)	150kW	8,409,750	円/基	IEA, "Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells"(2015)に基づき設定
水素燃料タンク	80kg-H <sub>2</sub> 貯蔵量	16,000,000	円/基	NEDO「燃料電池ロードマップ2017」(2017)より設定
燃料電池チョッパ	1基	3,000,000	円/基	ヒアリングよりみずほ情報総研想定
リチウムイオン電池システム	40kWh	5,000,000	円/基	NEDO「蓄電池ロードマップ2013」(2013)よりハイブリッド自動車用の高出力リチウムイオン電池の価格を想定
燃料電池車両想定価格 (定置用燃料電池を活用した場合)	1両	324,032,857	円/両	
燃料電池車両想定価格 (FCV用燃料電池を活用した場合)	1両	169,799,750	円/両	
2020年想定燃料電池車両価格 (FCV用燃料電池を活用した場合)	1両	152,990,000	円/両	
2030年想定燃料電池車両価格 (FCV用燃料電池を活用した場合)	1両	148,390,000	円/両	

一方、燃料電池システムは、定置用を導入する場合、現状の 150kW の容量では、資源エネルギー庁が発表した「水素・燃料電池戦略ロードマップ」の資料より、89 万円/kW となる。また、仮に現行の FCV 用の燃料電池を使用した場合は、前述の IEA の文献より 5.6 万円/kW となる<sup>27</sup>。足許の燃料電池タンクの価格は NEDO 燃料電池ロードマップ 2017 水素編に示された現状技術の数値より 20 万円/kg-H<sub>2</sub> (5kg の水素あたり 100 万円) とした。

2020 年と 2030 年時点でのそれぞれの価格は、燃料電池システム、燃料タンクならびにリチウムイオン電池の価格は技術の進歩と共に低減すると想定し、その他の構成部品については価格が現在と変わらないものと想定した。

2020 年の燃料電池システム、燃料タンク価格については NEDO の燃料電池ロードマップのコストで移動体用の価格として示された値または幅をもって示された値の平均値として、それぞれ 0.8 万円/kW、8.0 万円/kg-H<sub>2</sub> と想定した。同様に 2030 年の燃料電池システムと燃料タンク価格はそれぞれ 0.4 万円/kW、3.0 万円/kg-H<sub>2</sub> と想定した。2020 年と 2030 年の間については線形に補間し、2030 年以降の価格については一定と想定した。

水素燃料タンクの容量については片道、66km と想定した路線を 2 往復した場合でも十分な燃料が残るようにするため、80kg-H<sub>2</sub>/両と想定した。

リチウムイオン電池については、NEDO 二次電池技術開発ロードマップ 2013 に示されたコスト目標のうち、自動車用二次電池ロードマップのハイブリッド自動車用（出力密度重視型二次電池）として現状で 12.5 万円/kW、2020 年時点で 2.0 万円/kW と想定した。2030 年以降についても 2.0 万円/kW と想定した。

次に運行コストを検討するため、燃料である水素の燃費を検討する。燃料電池ハイブリッド車両の水素の燃費の想定は、水素と軽油の熱量を比較して行った。具体的には、まず、従来のディーゼル気動車の燃費が、0.63 l/km であり、軽油の熱量が 38.2MJ/l であることから、発電ロスを含む距離あたりエネルギー消費量を 24MJ/km とした。環境省「温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度」ホームページよりディーゼルエンジン発電機の効率を 36.8% とし、鉄道総合技術研究所の「燃料電池・バッテリーハイブリッド車両のエネルギー効率評価」より燃料電池車両の車両エネルギー効率を 74.8% とした場合の水素燃料消費量換算値は 11.9MJ/km となる。水素の熱量は、120MJ/kg-H<sub>2</sub>(HHV)であることから、1km あたり約 0.10kg の水素燃料が必要となると算出した。燃料電池車両の燃費とディーゼル気動車の燃費は、将来も現状の通りとし、ディーゼル燃料については将来も価格は一定とした。

<sup>27</sup> 為替レートは日本銀行発表の 2017 年平均為替レート 112.13 円/ドルを採用。

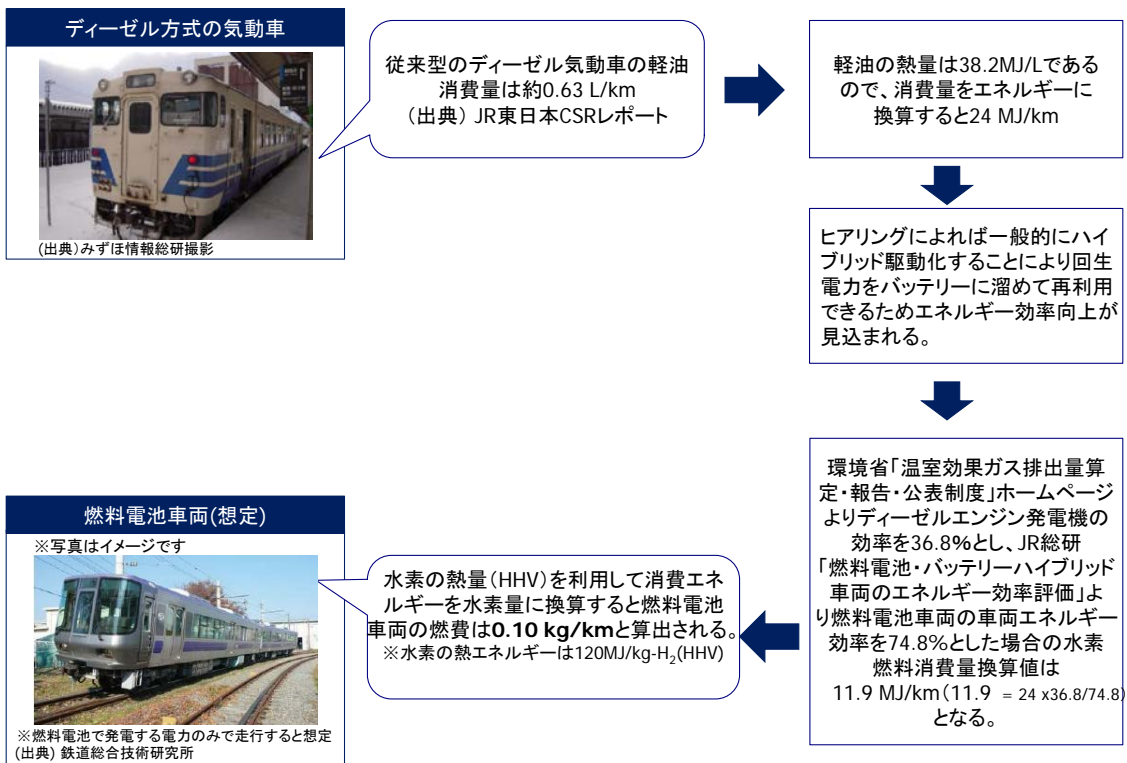


図 8-4 燃料電池車両の燃費の想定方法

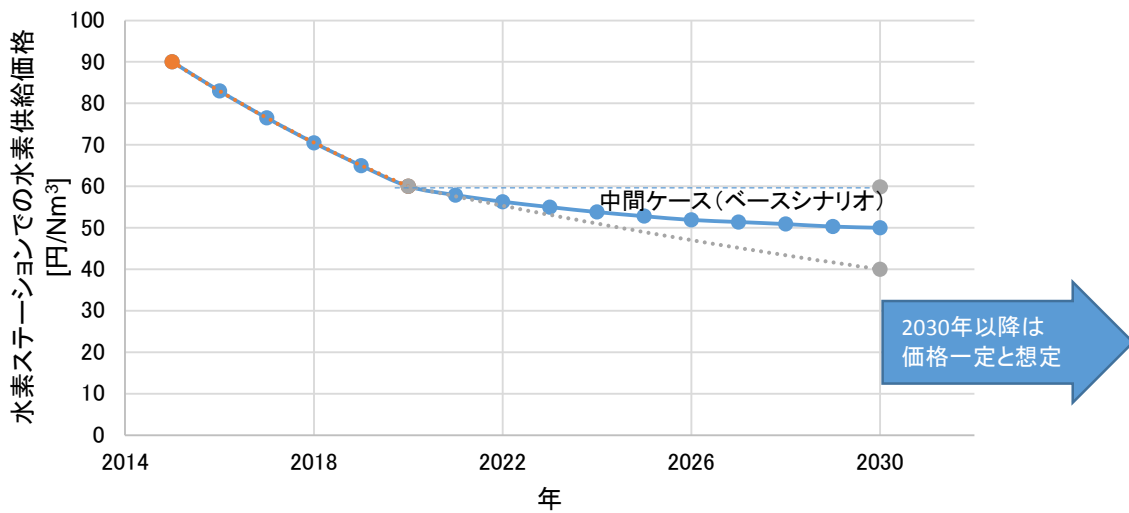


図 8-5 水素ステーションにおいて販売される価格の見通し

(出典) NEDO 水素製造・輸送・供給技術ロードマップより 2015年と2020年および2020年と2030年の間の価格を補間して作成



また、運行コストのうち、メンテナンスコストについては、基本的に燃料電池スタックはメンテナンスフリーであることから、エンジンを燃料電池化することにより、低減の可能性があると指摘されている。一方で、ヒアリング等によれば、基本的な車体のメンテナンス費は燃料電池であってもディーゼルでも大差はなく、燃料電池もフィルターやヒーターの交換等メンテナンスコストが発生する。なお、ドイツのFS調査においても燃料電池化によるメンテナンスコストの低減は10%程度とされている。従って、本研究ではやや保守的な見積もりとしてディーゼル車両と燃料電池車両でメンテナンス費は同等と想定した。

他方でディーゼル気動車の場合、ヒアリングに拠れば現状ではメンテナンスにコストをかけるのではなくエンジンそのものを交換してしまう場合が多数に上っているとのことであった。エンジンのオーバーホールのメンテナンスは行わない代わりに、廃車になるまでに1回エンジンの交換が必要になるとのことであり、ここでは気動車の製造から16年経過後（2回目の全般検査<sup>28</sup>）に1度エンジン交換費用が発生するものとした。

燃料電池システムは、いくつかの海外燃料電池メーカーへのヒアリングより25,000時間で交換するものと設定した。したがって、想定した1日当たりの走行距離を考慮すると、車両寿命を終えるまでに3回燃料電池の交換が必要である。燃料電池の耐久性については、ヒアリングに基づけば、長時間の使用にも耐えうる燃料電池を製造することも可能であるが、コストとのトレードオフになってしまうということが明らかになった。従って、コストを抑えるために耐久性については現状のまま維持するものとし、その代わりにシステム価格の大幅な低減を想定した。

また、リチウムイオン電池の寿命に関してはヒアリングにより、ディーゼルハイブリッド式車両の場合、最も寿命が短いと想定して8年に1回リチウムイオン電池システムを交換するということであり、今回のコスト試算では8年ごとに行われる全般検査の際に交換すると設定し、将来的にも8年ごとに交換するものとした。

---

<sup>28</sup> 法律によって義務付けられた全分解検査で、気動車の場合8年に1回実施することと定められている。



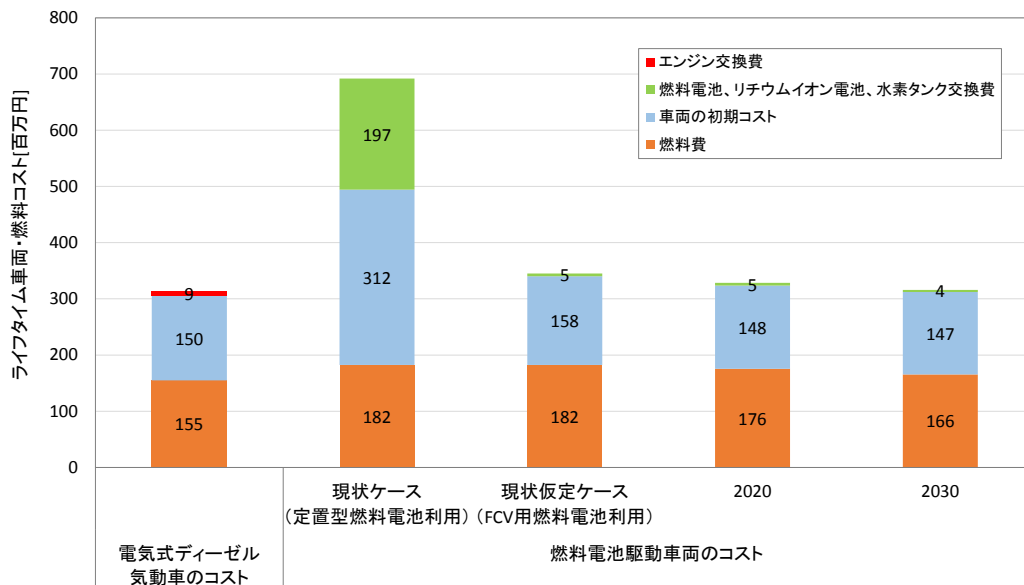


図 8-6 ディーゼル気動車と燃料電池気動車の経済性分析の結果

図 8-6 に示すように、燃料電池として価格の高い定置形燃料電池ベースのものを利用する場合は、車両の初期コストと 30 年間で 3 回発生する燃料電池、リチウムイオン電池および水素タンクの交換費用だけでディーゼル気動車の総ランニングコストを上回るコストが発生する。

一方、現状でも、比較的価格が低い自動車用燃料電池を利用でき、かつ燃料電池自動車と同じ価格で水素を供給することができる場合は、電気式ディーゼル気動車とほぼ同等のコストが見込めることが示された。さらに、燃料電池価格がおよび水素価格が想定通りに低減した場合、2030 年時点の試算コストでは、ディーゼル気動車よりも燃料電池車両のほうが総合的なコストが低くなる可能性があるという結果となった。

コスト別にみると、初期投資は 0~20% 増の水準であるが、水素価格の将来低減による燃料費の削減と回生エネルギーが利用可能になることによる総合エネルギー効率の向上を反映して運行コストが大幅に低減しているのが全体のコスト低減につながっていることが読み取れる。

さらなる経済性向上・コスト低減の可能性として、バッテリー容量を増加させ燃料電池の搭載量を低減させるという方法がある。ただし、バッテリーは発電しないため、走行で消費する電力は燃料電池から供給することが必要であり、燃料電池の容量削減には限界がある。現状では、燃料電池とバッテリーの比率は過去の実証車両の例から推測した一定値を用いているが、コスト最適なバッテリーと燃料電池の比率について研究することで、今回の経済性分析の結果と比較してさらなる経済性の向上が見込まれる可能性がある。

### 8.3 船舶における経済性の検討

燃料電池の船舶分野での経済性を検討するため、前節と同様に船舶における経済性を検討する。検討対象としては、小型の旅客船のうち、代表的な船舶として、屋形船タイプと水上バスタイプの 2 種類とした。鉄道の場合と同様に、既存の内燃機関を用いた場合と燃料電池を導入した場合のコストを比較する。

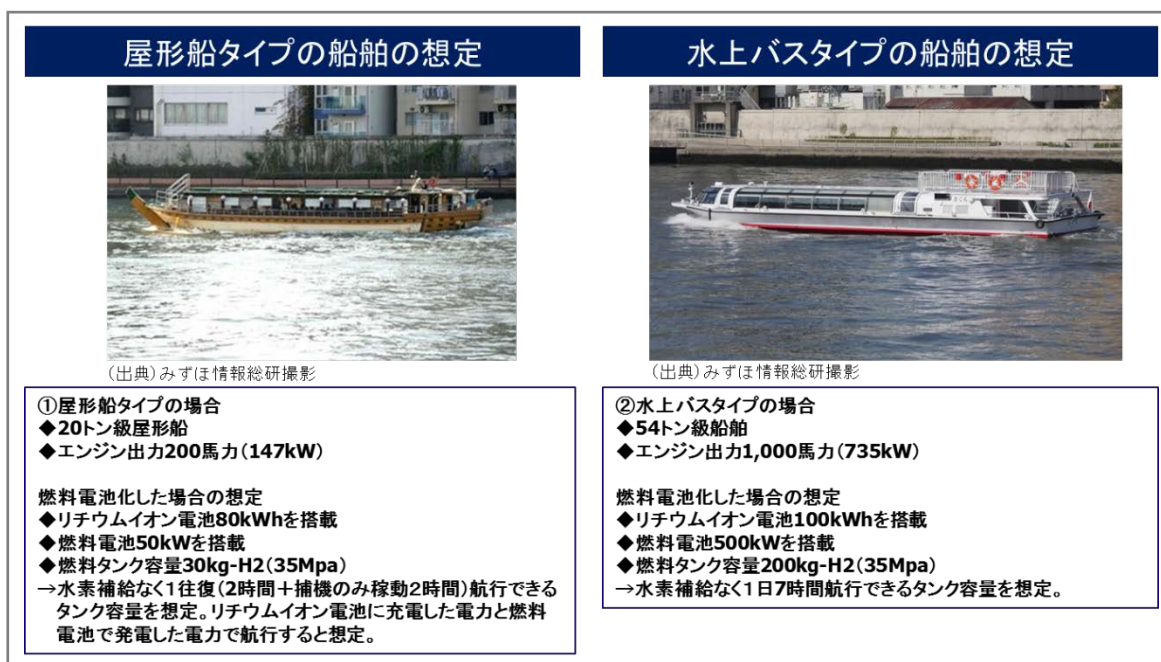


図 8-7 燃料電池船のコスト試算の前提条件

#### (1) 屋形船のケース

鉄道の場合と同様に、燃料電池の屋形船の価格を想定する際に、不要となる構成部品のコストを除き、必要となる燃料電池システム等の価格を加算した数値を初期投資として想定した。

ディーゼル式屋形船の価格は、事業者へのヒアリングにより 6,000 万～2 億円程度であることが判明している。また、国土交通省の造船統計より、20 トン未満の船舶の造船コストは、内装の設備によって異なると考えられるが、300～700 万円/トンの水準である。ここでは中間値をとり 500 万円/トンを採用した。

なお、前述のとおり、船舶は鉄道とは異なり、常に水の抵抗があることから、動力は常に運転を行う必要がある。また、ブレーキ時の回生エネルギーを活用することができない等の理由により、船舶での燃料電池システムは、燃料電池とリチウムイオン電池との役割が異なる。具体的には、燃料電池は常時稼動となり、不足する電力をリチウムイオン電池からまかなう。ここでは燃料電池を定常運転しても推進力が不足する場合、その動力をリチウムイオン電池から出力するものと想定した。

屋形船は東京湾では 250 隻程度が運航しており、そのほとんどが 20Gt 未満の船であるが 20Gt 越えも 10 数隻ある。ヒアリングによれば 70~80 人乗りから 150 人まで幅があり、主エンジンは 220~450 馬力程度で船体は FRP 製が一般的である。

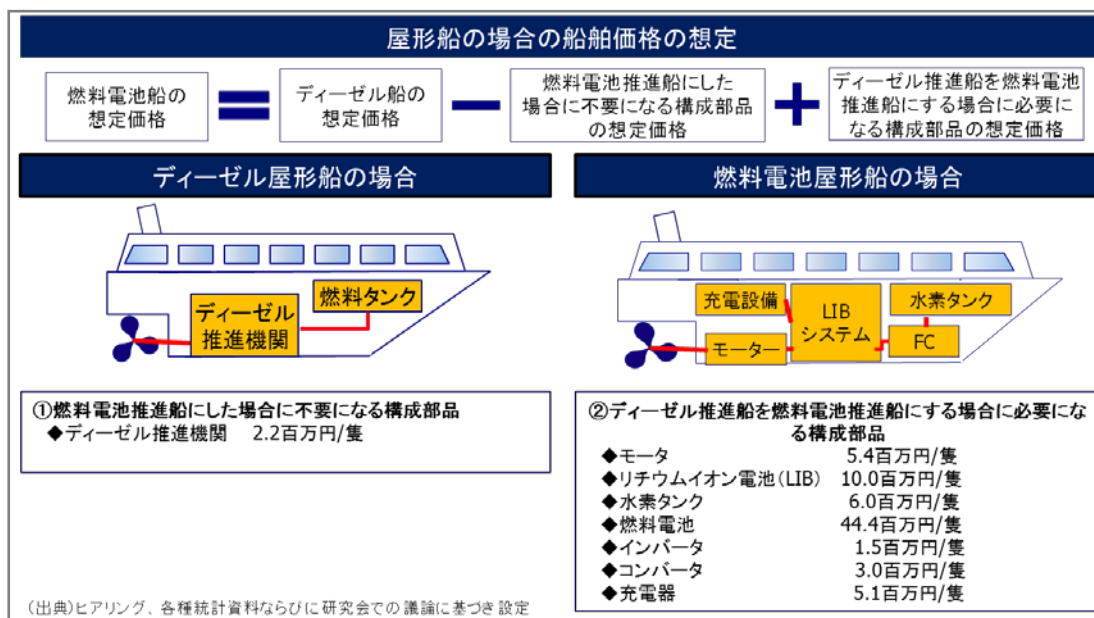


図 8-8 燃料電池船のコスト想定方法

燃料電池を導入した場合に不要となる部品としては、ディーゼルエンジンがある。エンジンは国交省の造機統計月報より、1,000 馬力未満の小形ディーゼルエンジンの過去 5 年間の平均単価が 1kW あたり約 1.5 万円であることから、1.5 万円/kW とした。燃料タンクは、事業者へのヒアリングにより、水上バスの場合 4,000 リットルであると想定したが、船舶の場合、燃料タンクは船体と一体化していることが多いため、燃料タンクが不要になることによる船体価格の変化はないものとした。屋形船についても同様の考え方にに基づき価格を想定した。燃料電池システム、水素タンクならびにリチウムイオン電池の価格については鉄道のコスト評価と同一とした。

次に運航コストを検討するため、燃料である水素の燃費を検討する。まず、ヒアリングにより、年間の燃料費から算出される 1 年間の燃料消費量を 1 年間の稼働時間で除することにより、屋形船の 1 時間当たりの軽油消費量は 20l/時間と算出した。軽油の熱量が 38.2MJ/l であることから、1 時間当たりのエネルギー消費量は、764MJ/時間となる。

屋形船自体はレジャー目的とした船舶であり高速性が求められるものではないことから、環境性能を高める目的で航行速度をディーゼル屋形船の 90% に設定し燃費を向上させるものとした。船舶の場合、航行に必要なエネルギーは速度の 3 乗に比例するため、この場合 1 時間当たりのエネルギー消費量は、558MJ/時間である。燃料電池は航行中に常に最大出力で稼働することと想定すると 3.8kg/h の水素が必要となり、558MJ/時間に

対して不足するエネルギーは 13kW と算出される。これには、リチウムイオン電池に系統から充電した電力を用いるものと想定した。ヒアリングによると、屋形船は航行せず停泊して宴会を開催する時間が 1 回の運行当たり約 2 時間あり、その間は主エンジンは稼働せず、発電用の補機エンジンを用いている。燃料電池の場合、この間は燃料電池の出力を 25% に落として運転するものとした。

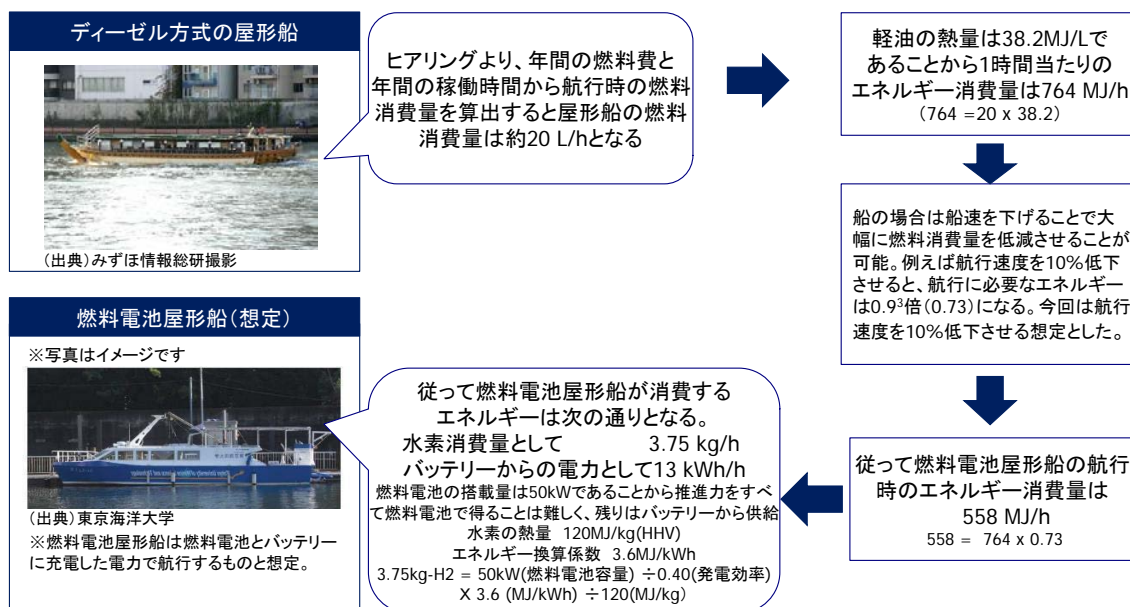


図 8-9 燃料電池船の燃費の想定方法

運航パターンについてはヒアリングに基づき年間の出航回数が 250 回、1 回あたり 4 時間運航するものと設定した。この場合年間の鉄道の場合と同様に燃料電池システムの寿命を 25,000 時間とすると、船舶寿命となる 30 年間で 1 回の燃料電池交換が必要になる。

また、水素タンクについては耐用年数が 15 年であるため 1 回交換するものとする。リチウムイオン電池については、船舶の寿命とした 30 年間の利用範囲で充放電回数がリチウムイオン電池の寿命を超えることがないため、交換を行わないものとした。

表 8-3 燃料電池屋形船の運行パターンの想定

項目	想定値	単位	出典
① 1回出航あたり航行時間	2	時間/回	ヒアリングに基づき設定
② 補機使用時間(停泊中)	2	時間/回	ヒアリングに基づき設定。燃料電池で発電し余剰はリチウムイオン電池に充電と想定。
③ 年間出航回数	250	回/年	ヒアリングに基づき設定
④ 燃料電池稼働時間	1,000	時間/年	$= (① + ②) \times ③$
⑤ 燃料電池スタック寿命	25,000	時間	ヒアリングに基づき設定
⑥ リチウムイオン電池寿命	12,000	充放電	市販のリチウムイオン電池の諸元に基づきみずほ情報総研想定
⑦ 船舶寿命	30	年	ヒアリングより想定
⑧ 燃料電池スタックが寿命を迎えるまでの年数	25	年	$= ⑤ \div ④$
⑨ リチウムイオン電池寿命	48	年	$= ⑥ \div ③$
⑩ FCスタック交換回数	1	回	$= ⑦ \div ⑧$
⑪ リチウムイオン電池交換回数	0	回	リチウムイオン電池寿命が船舶寿命より長いため交換なし
⑫ 水素タンク交換回数	1	回	法定耐用年数15年であることから設定

表 8-4 燃料電池屋形船価格等の想定

①燃料電池駆動化によって不要となる部品価格を除く

項目	価格	単位	出典
ディーゼル屋形船価格	100,000,000	円/隻	国土交通省「造船機械統計」および事業者ヒアリングより20GTのJCI船として想定
エンジン	-2,205,000	円/隻	国土交通省「造船機械統計」より想定
換装前価格	97,795,000	円/隻	

②必要となる燃料電池システム等の価格を加算

項目	導入単位	価格	単位	出典
換装前船体価格	1隻	97,795,000	円/隻	
燃料電池システム(定置用を活用)	50kW	44,392,857	円/基	経済産業省、「水素・エネルギー戦略」(2017)より算出
燃料電池システム(FCV用を活用)	50kW	2,803,250	円/基	IEA, "Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells"(2015)に基づき設定
充電機器(48kW)	1基	5,100,000	円/隻	近畿経済産業局「電池駆動船説明書(かがやき)」を参考に設定
推進機関	1基	5,407,500	円/隻	近畿経済産業局「電池駆動船説明書(かがやき)」を参考に設定
コンバータ	1基	3,000,000	円/隻	ヒアリングより設定
水素燃料タンク(35Mpa相当)	30kg-H <sub>2</sub>	6,000,000	円/隻	NEDO燃料電池ロードマップ2010に基づき設定
リチウムイオン電池システム	80kWh	10,000,000	円/隻	NEDO「蓄電池ロードマップ2013」(2013)よりハイブリッド自動車用の高出力リチウムイオン電池の価格を想定
インバータ	1基	1,500,000	円/隻	ヒアリングより設定
燃料電池屋形船想定価格 (定置用燃料電池を活用した場合)	1隻	171,695,357	円/隻	
燃料電池屋形船低価格 (FCV用燃料電池を活用した場合)	1隻	130,105,750	円/隻	
燃料電池屋形船低価格 2020年断面 (FCV用燃料電池を活用した場合)	1隻	117,202,500	円/隻	
燃料電池屋形船低価格 2030年断面 (FCV用燃料電池を活用した場合)	1隻	115,502,500	円/隻	



次にメンテナンスコストについて検討する。事業者へのヒアリングによれば、メンテナンスは年1回行っており、エンジンで70～80万円であるという結果であった。オーバーホールは1度実施すると150～200万円の費用がかかるため、エンジンは長くても10年、通常は5年程度で交換しているという。以上より、ディーゼル式屋形船の場合、メンテナンス費用も含めてエンジンを5年で交換した場合と同等の費用が、運行開始後から廃船までの間に追加で発生するものとした。

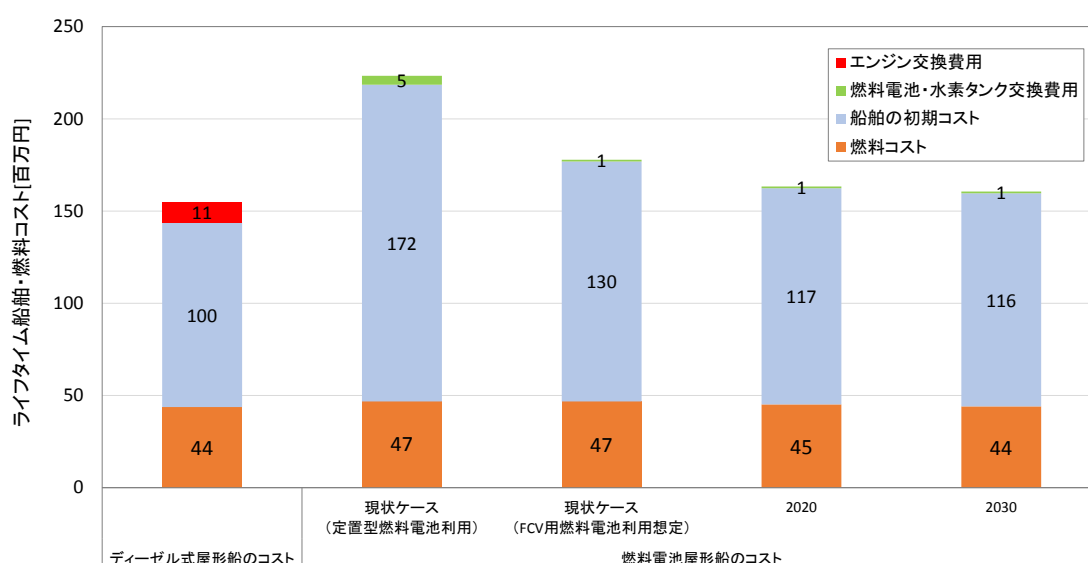


図 8-10 ディーゼル屋形船と燃料電池屋形船のコスト比較

屋形船の場合、図 8-10 に示すように、燃料電池として現状の定置形燃料電池ベースの価格の高いものを利用する場合は、船舶の初期コストだけでディーゼル屋形船の総ランニングコストに匹敵する費用が必要になる。鉄道のケースと比較すると、燃料電池の交換頻度は低くなりこの費用は抑えられるが、回生ブレーキによる燃費向上が見込めないことから、燃料費がディーゼル駆動方式と比較して大きくなる傾向があるため、コストとしては燃料電池駆動方式のほうがおおむね高いという試算結果になった。

一方、現状の燃料電池の価格水準であったとしても、FCV 用燃料電池を利用でき、かつ水素価格の将来的な低減を見込むことが可能な場合には、2030 年頃にディーゼル屋形船とほぼ同等のコストまで低減することが可能であることが示された。

屋形船の運航形態においては、定常的な出力が求められており、急激な発進や停止はほとんどないため、リチウムイオン電池と燃料電池の容量構成比率を変化させることで本検討結果よりも経済的に優れたシステム構成が達成できる可能性があり、たとえば、鉄道と異なり瞬間的な大出力が必要でないことからバッテリーの搭載容量を削減し、船体の初期費用を削減することが可能である。ただ屋形船の場合にはリチウムイオン電池

に充電した電力を水素と併用することで燃料費を削減するという運行を行っているため、バッテリーの搭載量を削減することで燃料費が上昇する。また、リチウムイオン電池を完全にゼロにした場合、燃料電池出力だけでは主機出力として不足するため、最低限のバッテリーは搭載する必要がある。屋形船については、コストと実際の運用面での制約から、最適なバッテリーと燃料電池の比を注意深く選択すれば、本検討結果と比較してより経済性の高い組み合わせが存在する可能性も残されているであろう。

## (2) 水上バスのケース

屋形船と同様の手法により、水上バスに燃料電池を活用した場合の経済性評価を実施した。運行パターンと船のスペック、価格等については、ヒアリングに基づき下記の通り設定した。

水上バスの場合、運行の定時性がもとめられることから、燃料電池式水上バスの航行速度はディーゼル式と同一とし、すべての電力を燃料電池で発電するものとした。エンジンおよびその他必要となる設備の価格は、屋形船の場合と同じとした。

燃料電池、水素タンク、リチウムイオン電池についても、鉄道の経済性評価で採用した前提を用いた。

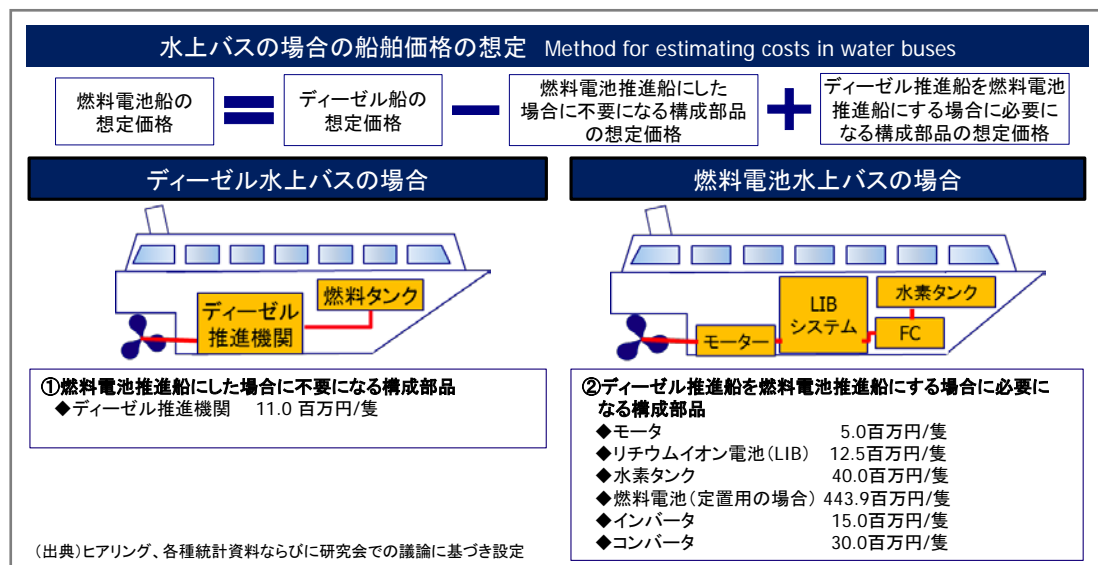


図 8-11 燃料電池水上バスのコスト想定方法

表 8-5 水上バスの運行パターンの想定

項目	想定値	単位	出典
① 1回出航あたり航続時間	7	時間/日	ヒアリングより設定
② 年間出航回数	324	回/年	ヒアリングより設定
③ 燃料電池稼働時間	2,268	時間/年	=①×②
④ 燃料電池スタック寿命	25,000	時間	ヒアリングに基づき設定
⑤ リチウムイオン電池寿命	12,000	充放電	市販のリチウムイオン電池の諸元に基づきみずほ情報総研想定
⑥ 船舶寿命	30	年	ヒアリングより想定
⑦ 燃料電池スタックが寿命を迎えるまでの年数	11	年	=④÷③
⑧ リチウムイオン電池寿命	37	年	=⑤÷②
⑨ FCスタック交換回数	2	回	=⑥÷⑦
⑩ リチウムイオン電池交換回数	0	回	リチウムイオン電池寿命が船舶寿命より長いため交換なし
⑪ 水素タンク交換回数	1	回	法定耐用年数15年であることから設定

表 8-5 に示すように、燃料電池の寿命が 25,000 時間である場合、燃料電池は約 11 年で寿命に達するため、30 年間の船舶寿命の間に 2 回の燃料電池交換が必要となる。ディーゼル式水上バスのエンジンの交換費用については、ヒアリングより 14~16 年に 1 回交換しているのが現状であるということから、15 年に 1 回交換するものと想定した。

次に運航コストを検討するため、燃料である水素の燃費を検討する。ヒアリングより 50~70 トンククラスの水上市バスの場合、1 隻の平均燃料消費量 1 日あたり約 300L となる。これを水素の量に換算すると、軽油の熱量が 38.2MJ/l であり、水素の熱量が 120MJ/kg (HHV) であることから、1 日あたりの水素消費量は約 96kg となる<sup>29</sup>。

表 8-6 燃料電池水上バスの価格等の設定

①燃料電池駆動化によって不要となる部品価格を除く

項目	価格	単位	出典
ディーゼル水上バス船体価格	162,000,000	円/隻	国土交通省「造船機械統計」およびヒアリングより想定(300万円/トン)
エンジン	-11,032,500	円/隻	国土交通省「造船機械統計」およびヒアリングより想定
換装前価格	150,967,500	円/隻	

②必要となる燃料電池システム等の価格を加算

項目	導入単位	価格	単位	出典
換装前船体価格	1隻	150,967,500	円/隻	
燃料電池システム(定置用を活用)	500kW	443,928,571	円/基	経済産業省、「水素・エネルギー戦略」(2017)より算出
燃料電池システム(FCV用を活用)	500kW	28,032,500	円/基	IEA, "Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells" (2015)に基づき設定
推進機関(電動機)	500kW	5,000,000	円/隻	経済産業省「生産動態統計年報機械統計編」より設定
水素燃料タンク(35Mpa相当)	200kg-H2	40,000,000	円/隻	NEDO燃料電池ロードマップ2010に基づき設定
コンバータ	1基	30,000,000	円/隻	ヒアリングより設定
インバータ	1基	15,000,000	円/隻	ヒアリングより設定
リチウムイオン電池システム	100kWh	12,500,000	円/隻	NEDO「蓄電池ロードマップ2013」(2013)よりハイブリッド自動車用の高出カリチウムイオン電池の価格を想定
燃料電池屋形船想定価格 (定置用燃料電池を活用した場合)	1隻	697,396,071	円/隻	
燃料電池屋形船低価格 (FCV用燃料電池を活用した場合)	1隻	281,500,000	円/隻	
燃料電池車両槽低価格2020 (FCV用燃料電池を活用した場合)	1隻	222,967,500	円/隻	
燃料電池車両槽低価格2030 (FCV用燃料電池を活用した場合)	1隻	210,967,500	円/隻	

<sup>29</sup> ディーゼルエンジンの効率を 40%、燃料電池効率を NEDO 燃料電池ロードマップより 40% (HHV) と設定した。



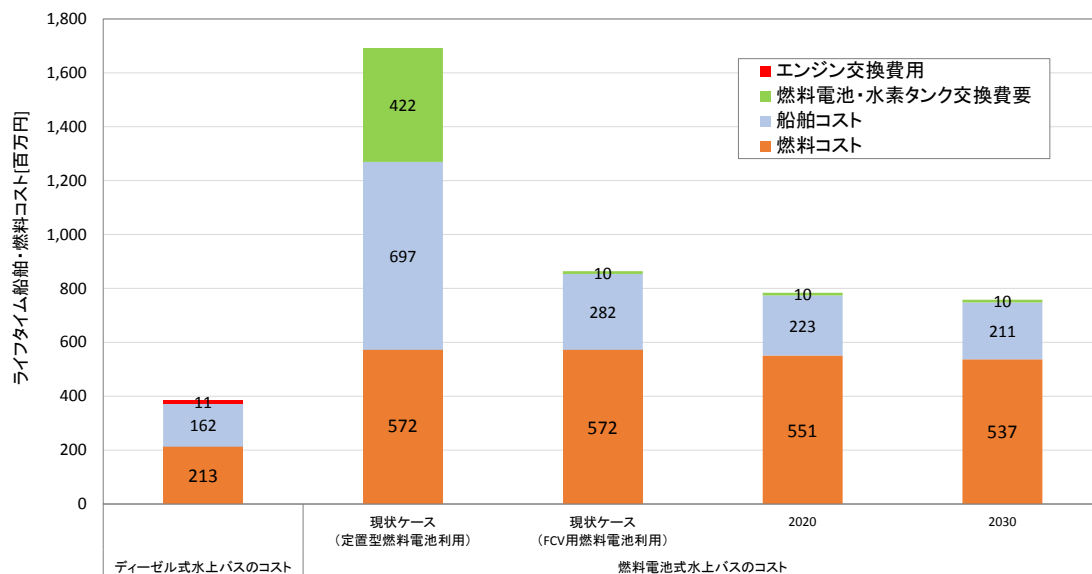


図 8-12 ディーゼル水上バスと燃料電池水上バスのコスト比較

水上バスの場合、出力の大きなエンジンを搭載しているため、同等の出力を得るためには大量の燃料電池を搭載する必要がある。図 8-12 に示すように、燃料電池として現状の定置形燃料電池ベースの価格の比較的高いものを利用する場合は、30 年間で 2 回発生する燃料電池の交換費用だけでディーゼル気動車の総ランニングコストに匹敵するコストが発生する。

燃料電池の燃料となる水素についても、軽油よりもエネルギー量当たりの価格が高いことから 2.2 倍程度の燃料費が発生してしまう。水素燃料の価格は 2020、2030 年と徐々に低減していくが、水素燃料の価格低減を加味した場合でも燃料費のみでディーゼル式水上バスの総コストを上回るという結果になった。

水上バスの場合も屋形船の場合と同様にリチウムイオン電池の搭載量を削減することによりコスト削減が可能と考えられる。例えば、水上バスのような船の場合は非常用や室内の最低限の電装品の電力を賄えるリチウムイオン電池容量に抑えることも検討すべきである。なお、今回の試算では、燃料電池屋形船の場合と異なり水上バスについては系統電力の利用がないことから、リチウムイオン電池の搭載量減により燃料費が上昇することはない。したがって、リチウムイオン電池の搭載量は最低限にとどめ、主機出力は燃料電池から供給することにより経済性が向上する可能性は大いにあるであろう。

#### 8.4 経済性分析のまとめ

鉄道分野の気動車の燃料電池駆動化のケースでは、現状の価格水準では 2030 年までに気動車と同等の水準まで到達可能であることが示唆された。これは、燃料電池を搭載する場合、ハイブリッド自動車のようにブレーキ時に運動エネルギーを電気エネルギー

に変換し、バッテリーに一時的に蓄え、再発進時に蓄えたエネルギーを再利用する回生ブレーキが利用可能となることが大きい。これは、バッテリーを備えていないディーゼル気動車では利用できない仕組みであり、エネルギー効率の面からは燃料電池駆動方式が有利となる。

また、大きな留意点として、鉄道・船舶用の軽油の場合、現状では、軽油引取税がかからないが、現在の水素価格は自動車の使用を前提にしており同税を見込んだ価格となっている。このため、現状の水素の燃料代は軽油の燃料代よりも高コストになってしまうことに注意が必要である。ただし、水素ステーションにおける水素供給価格が2030年のNEDO目標価格である40~60円/Nm<sup>3</sup>まで低減すれば、軽油の燃料代とほぼ同等の水素燃料代に抑えられ、初期投資と部品の交換費用もディーゼル気動車未満になると試算されることから、鉄道における水素駆動化は将来的には補助金無しに経済自立することが可能であるといえる。

一方、船舶分野では前述の回生ブレーキが利用できないという事情から、単純に比較すると燃料コストはディーゼル駆動方式と比較して高い傾向にある。本検討で行った屋形船のケーススタディーでは、国内外の他の小形船を対象とした燃料電池実証の事例と同様に、系統電力を大容量バッテリーに貯蔵し、同電力と燃料電池の電力を併用して航行することで水素燃料コストを圧縮する運航方法とした。これは、屋形船がスピードを目的とした船舶でないことから、航行時の速度を現状よりも10%低減させることが可能であり、さらなる水素燃料消費量抑制を図るという前提を元に検討を実施したものである。

さらに、屋形船の場合は、年間の稼働時間が短いことから水素燃料代よりも初期コストが高いということが示されており、ヒアリングでも新技術導入には初期コストが課題であるということが明らかになっている。したがって、2030年の想定を通り燃料電池システムの価格低減が十分に低減すれば、多少の優遇策は必要であるものの、経済的なハードルは低くなると考えられる。

加えて、今回の試算では燃料電池の発電効率を将来も一定とみなしたが、発電効率が向上すればさらなる燃料費削減が可能である。すなわち効率が1割向上すれば、同じ量の水素から10%多くの電気エネルギーを取り出せるため、同じ利用条件では水素消費量が10/11となり燃料コストの削減が可能となる。NEDOの水素・燃料電池ロードマップに示された開発目標を達成した場合には、屋形船の水素燃料コストがディーゼル燃料を下回る可能性もあり、2030年以降の長期的な視点に基づけば、屋形船の燃料電池駆動化も極めて有望である。

最後の水上バスについては、定時運行が求められるため高速性が需要で、大出力のエンジンを定格稼働させることから、速力・主機出力のスペックを現状のディーゼルと同等と想定した。結果として、屋形船よりも稼働時間が長い水上バスの運行形態では燃

料コストがディーゼル駆動方式の2倍近い水準となり、船体コストよりも燃料コストの方が高くなった。

水上バスについても屋形船同様に、燃料電池の発電効率向上や燃料電池の耐久性向上により、今回の検討結果よりも船舶コスト、燃料コストならびに燃料電池交換費用を削減できる可能性はあるものの、大型で出力が大きい船舶において、ディーゼル方式と同等の経済性を成立させることは今後の課題であることが示唆された。

## 9 燃料電池導入による環境負荷の低減効果

本章では燃料電池を採用することにより、鉄道および船舶分野における環境負荷をどれだけ低減可能かどうかを評価するために、地球温暖化ガスである CO<sub>2</sub> と大気汚染物質である NO<sub>x</sub> および SO<sub>x</sub> の排出削減可能性を考察する。

鉄道における CO<sub>2</sub> の排出量の試算に当たっては、第 8 章で想定した燃料電池車両の走行距離、燃費を用いた。

なお、CO<sub>2</sub> 排出量の試算に当たっては、燃料の製造過程も含めたトータルの CO<sub>2</sub> 排出量を分析する必要があり、いわゆる Well-to-Wheel を基に試算を行った。このため、特に水素については、製造方法で大きく CO<sub>2</sub> 排出量が異なるため、代表的なものとして現状の系統電力の水電解、メタンガスの改質、太陽光発電のみによる水電解の 3 通りを想定した。

表 9-1 CO<sub>2</sub> 排出量算出の諸元一覧

項目	単位	出典
① 水素製造時のWtTCO <sub>2</sub> 排出量(系統電力水電解) 電源ミックスは2010年時点を想定(原子力あり)	183 g-CO <sub>2</sub> /MJ	輸送用燃料のWell-to-Wheel評価(みずほ情報総研)
② 水素製造時のWtTCO <sub>2</sub> 排出量(オンサイトメタンガス改質)	108 g-CO <sub>2</sub> /MJ	輸送用燃料のWell-to-Wheel評価(みずほ情報総研)
③ 水素製造時のWtTCO <sub>2</sub> 排出量(太陽光発電-水電解)	22 g-CO <sub>2</sub> /MJ	輸送用燃料のWell-to-Wheel評価(みずほ情報総研)
④ 水素1kgの熱量(気体、HHV)	120 MJ/kg-H <sub>2</sub>	燃料定数の設定方法(日本自動車研究所)
⑤ 水素1kg当たりWtTCO <sub>2</sub> 排出量(系統電力水電解)	21960 g-CO <sub>2</sub> /kg-H <sub>2</sub>	=①×④
⑥ 水素1kg当たりWtTCO <sub>2</sub> 排出量(オンサイトメタンガス改質)	12960 g-CO <sub>2</sub> /kg-H <sub>2</sub>	=②×④
⑦ 水素1kg当たりWtTCO <sub>2</sub> 排出量(太陽光発電-水電解)	2640 g-CO <sub>2</sub> /kg-H <sub>2</sub>	=③×④
⑧ ディーゼル燃料のWtW CO <sub>2</sub> 排出量	2,940 CO <sub>2</sub> /L	輸送用燃料のWell-to-Wheel評価(みずほ情報総研)
⑨ 燃料電池車両の水素消費量	0.10 kg/km	8.2節 図 8-4にて算出
⑩ ディーゼル気動車の燃費	1.58 km/L	JR東日本の低炭素化・省エネの取り組み(JR東日本)
⑪ 軽油のエネルギー量	38.2 MJ/L	燃料定数の設定方法(日本自動車研究所)
⑫ 燃料電池船の水素消費量燃費	3.8 kg-H <sub>2</sub> /h	8.3節 図8-9にて算出
⑬ ディーゼル船の燃費	20.0 L/h	ヒアリングを参考に推計
燃料電池船の水素消費量燃費	3.8 kg-H <sub>2</sub> /h	8.3節 図8-9にて算出

### 9.1 鉄道における環境負荷低減効果の試算

#### (1) CO<sub>2</sub> 排出削減効果

ディーゼル車両の燃料電池車両代替による CO<sub>2</sub> 削減効果の比較結果を図 9-1 に示す。現状では、水素を系統電力を利用した水電解によって製造する場合、ディーゼル車両よりも CO<sub>2</sub> 排出量が多くなる。これは、一度発電したうえで、それを電気分解する二重の工程を行うことから、エネルギー変換効率の悪さが表れたものである。

また、オンサイトメタンガス改質による水素製造の場合は、ディーゼル車両より 25% 少ない CO<sub>2</sub> 排出量であり、さらに太陽光発電を利用した水電解の場合はディーゼル車両の 85%削減可能な水準まで低減可能であることが分かった。

ガソリン自動車を基準に比較すると再生可能エネルギーの電力を用いて水素を製造することで、ディーゼル車両の燃料電池車両代替による CO<sub>2</sub> 削減効果は年間で 154 トン分となり、ガソリン自動車を約 100 台削減した場合と同等の効果<sup>30</sup>となる。

<sup>30</sup> ガソリン乗用車の JC08 モード平均燃費 21.6km/L (出典：環境省)、年間平均走行距離は 10,575km (出典：国土交通省「自動車の使用実態」)ならびに今回の試算結果を用いて比較。

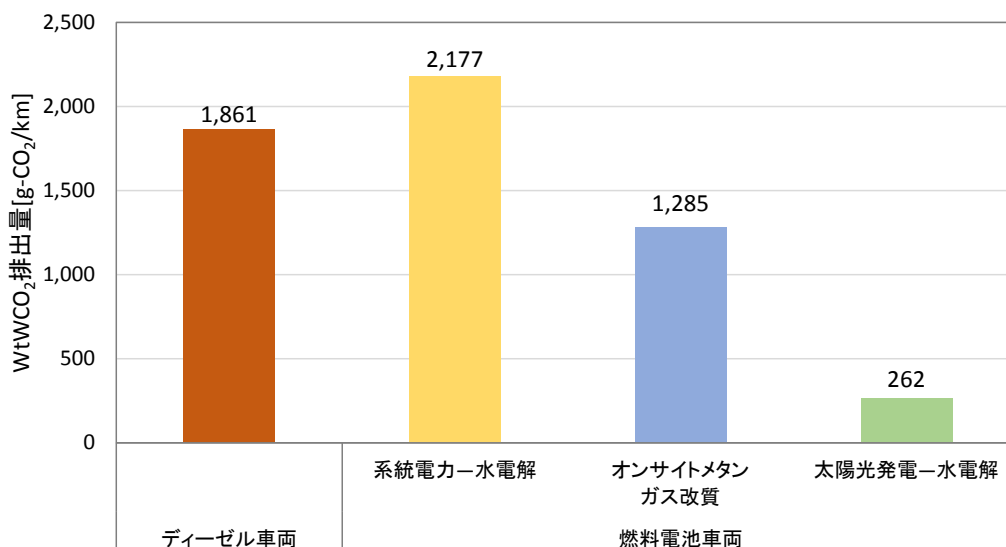


図 9-1 ディーゼル車両と燃料電池車両の水素製造方法別 Well-to-Wheel CO<sub>2</sub> 排出量比較

## (2) 窒素酸化物、硫黄酸化物の削減効果

大気汚染物質の排出削減効果については、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> が大気中で安定な CO<sub>2</sub> とは異なり発生源近傍でしか作用しないため、運行中の排出量のみを比較を行った。

それぞれの排出量は表に示すディーゼル気動車の排出係数とコスト比較の際に求めた燃料消費量 (MJ/年) の積をとることにより算出した。結果を図 9-2 に示す。

分析の結果、1 両の燃料電池車両の導入効果は、ガソリン自動車約 1.6 万台分の NO<sub>x</sub> 削減効果<sup>31</sup>に相当し、SO<sub>x</sub> では約 6.9 万台分<sup>32</sup>に相当する。

表 9-2 鉄道の場合の SO<sub>x</sub>・NO<sub>x</sub> 排出係数

	排出係数	備考	出典
窒素酸化物(NO <sub>x</sub> )	1.7g/MJ	・ディーゼル気動車の燃料消費あたり排出係数	Bureau of Transport and communication Economics(1995)
硫黄酸化物(SO <sub>x</sub> )	0.083g/MJ	・ディーゼル気動車の燃料消費あたり排出係数	

<sup>31</sup> ガソリン乗用車の NO<sub>x</sub> 排出量は The MIRAI LCA レポート (トヨタ自動車) より引用。

<sup>32</sup> SO<sub>x</sub> についてはガソリン乗用車の JC08 モード平均燃費 21.6km/L (出典：環境省)、年間平均走行距離は 10,575km (出典：国土交通省「自動車の使用実態」) ガソリンの硫黄含有量を 10ppm とし算出。

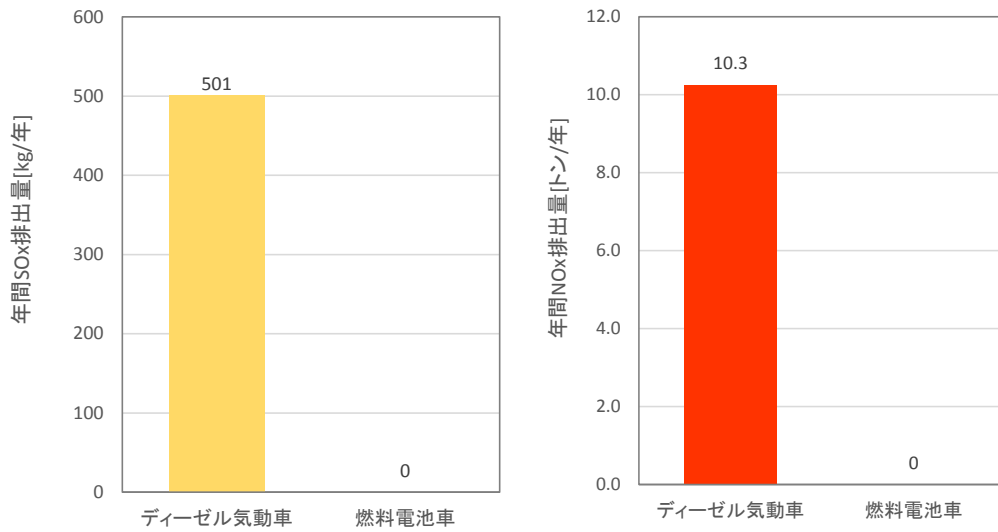


図 9-2 ディーゼル気動車と燃料電池気動車の年間 SOx（左）、NOx（右）排出量比較

## 9.2 船舶における環境負荷低減効果の試算

### (1) CO<sub>2</sub> 排出削減効果

ディーゼル屋形船の燃料電池代替化による CO<sub>2</sub> 削減効果の比較結果を図 9-3 に示す。水素を系統電力を利用した水電解によって製造する場合は、ディーゼル推進の場合よりも CO<sub>2</sub> 排出量が多くなるが、他方でオンサイトメタンガス改質の場合ならびに太陽光発電を利用した水電解で水素を製造する場合、ディーゼル屋形船の場合の 4 分の 1 程度まで低減可能となる。太陽光発電の電力を用いた水電解で水素を製造する場合、CO<sub>2</sub> の削減効果は年間で 45 トン分となり、ガソリン自動車約 40 台分に相当する。

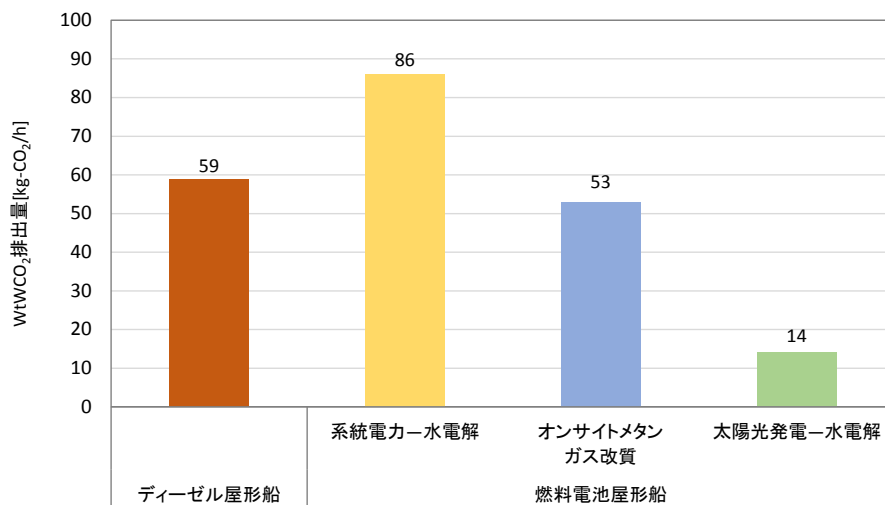


図 9-3 ディーゼル屋形船と燃料電池屋形船の Well-to-Propeller<sup>33</sup> CO<sub>2</sub> 排出量比較

<sup>33</sup> 鉄道における Well-to-Wheel に相当する

## (2) 窒素酸化物、硫黄酸化物の削減効果

次に人体に有害な NOx ならびに酸性化を引き起こし気管支炎や喘息の原因になる SOx の削減効果について試算した。試算の前提に当たっては、下記表の数値を用いた。なお、鉄道の場合と同様に、局所的な環境汚染として運航時の排出量を比較するのが適切であるため、航行時の排出量のみを比較するものとした。

表 9-3 船舶の場合の SOx・NOx 排出量係数

	排出係数	備考	出典
窒素酸化物(NOx)	1.8g/MJ	・航行中のディーゼル機関の排出係数	IPCC(1996)
硫黄酸化物(SOx)	4.9kg/ton-Fuel	・MGO(Marine Gas Oil)燃料使用時の排出係数	EC(2002)

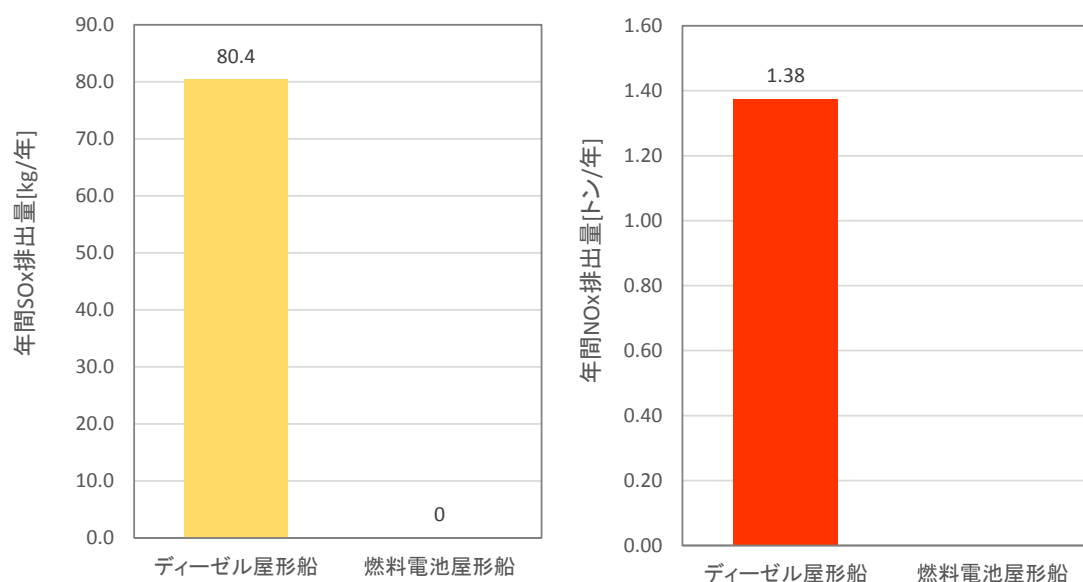


図 9-4 デーゼル屋形船と燃料電池屋形船の年間 SOx（左）、NOx（右）排出量比較

その結果を図 9-4 に示す。1 隻の燃料電池屋形船の導入効果は、NOx では年間 80kg とガソリン自動車約 2,200 台分の削減効果があり、SOx の削減効果は年間 1.38 トンと約 1.1 万台分<sup>34</sup>に相当する。

<sup>34</sup> SOx についてはガソリン乗用車の JC08 モード燃費 21.6km/L（出典：環境省）、年間平均走行距離は 10,575km（出典：国土交通省「自動車の使用実態」より 2016 年の値）ガソリンの硫黄含有量を低硫黄油相当（10ppm）として算出。

### 9.3 再生可能エネルギー由来水素製造の現状

前節では、燃料電池の活用による CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> の削減効果について分析し、Well-to-Wheel の視点から CO<sub>2</sub> 排出量削減効果に着目すると、鉄道と船舶分野において、燃料電池の活用により大きな CO<sub>2</sub> 削減効果を得るためには、CO<sub>2</sub> 排出につながらない再生可能エネルギー等により水素を製造することがきわめて重要であることが明らかになった。ここでは、CO<sub>2</sub> 排出量の少ない水素製造にむけた日本の取り組みに加え、ドイツや英国で稼働している実証事業の例について紹介する。

#### (1) 川崎重工業による褐炭と CO<sub>2</sub> 回収貯留による低 CO<sub>2</sub> 液体水素輸入の取り組み

川崎重工業は、豪州南部に日本の総発電量に換算して 240 年分もの量が存在する安価な褐炭から水素ガスを製造し、同時に発生する CO<sub>2</sub> は CO<sub>2</sub> 回収貯留 (CCS ; Carbon dioxide Capture and Storage) 技術により地中に貯留することで、低炭素水素を大量生産する計画を検討している。

国の研究会<sup>35</sup>で川崎重工業が発表した試算によると、CCS 技術を含めた水素の船上引渡しコストは約 30/Nm<sup>3</sup> となり、低コストと低炭素を両立する事業として実現が期待されている。

#### (2) ドイツの風力発電を利用した Power to Gas (PtoG) による水素製造の取り組み

欧州を中心に、水電解装置により電気エネルギーを水素に変換して貯蔵する“Power to Gas”技術の実証が進んでいる。この電力としては、主に再生可能エネルギーが用いられる。

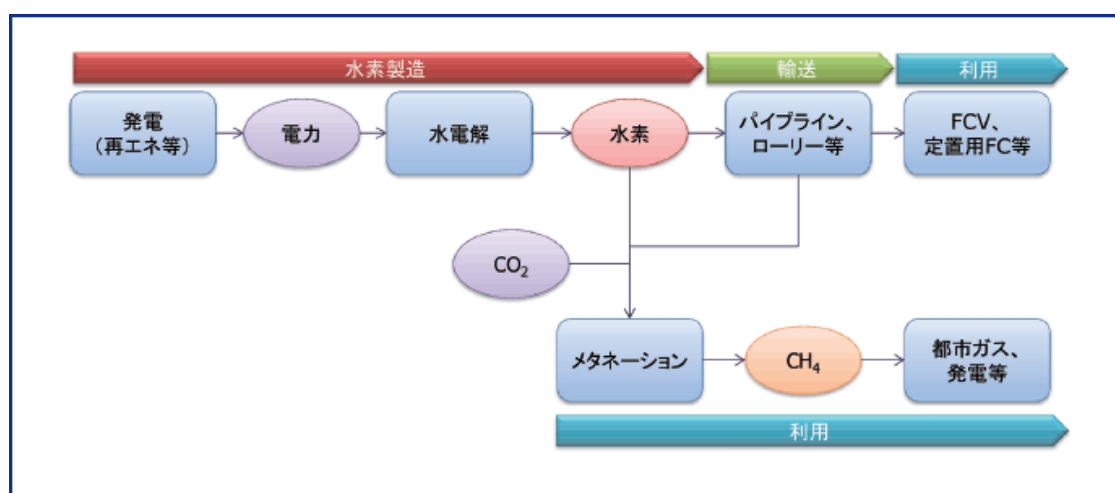


図 9-5 一般的な Power to Gas のフローイメージ

(出典) みずほ情報総研「欧州における Power to Gas のプロジェクト動向と今後の展望」

<sup>35</sup> 経済産業省、長期地球温暖化対策プラットフォーム「海外展開戦略タスクフォース」第2回会合



ドイツ北部では、大形の洋上風力発電所を筆頭に多くの風力発電設備が存在している。一方で電力の大量消費地域は首都のあるドイツ中部から工業の発展している南部であり、電力を送電する必要があるが、既存の送電容量は風力発電の大量導入以前のものが大半であり、風況の良い日は送電容量の不足により電力を需要地まで運ぶことができないという状況が発生している。地元の住民の反対もあり、送電線の増強は直近では困難であり、2014年にドイツでは風力発電による電力の2.4%<sup>36</sup>が活用できない余剰電力となった。この棄てられる電力を、安価で、あるいはマイナスの価格で調達することにより低コストで再生可能エネルギー由来の水素を製造するという実証事業が行われている。特に実証事業の数が多いのはドイツであり、European Power to Gas Platformの公表したデータによれば欧州のPtoG実証事業のうち50%以上がドイツ国内で行われている。再生可能エネルギーは稼働率が低いため、水電解装置の稼働率が低くなってしまうことが課題であるが、水力発電と組み合わせることにより、稼働率を高めようという試みもある。

同様の例は中国西部の風況に優れ日射が豊富だが電力需要のない地域でも発生しており、現在具体的に検討されているわけではないが、中国西部で製造した再エネ由来水素の活用という可能性も考えられよう。

風力発電等の余剰電力からPtoGにより水素を製造する同様の取り組みは国内においてもNEDOの実証事業として実施されている。

### (3) 英国 Orkney 島における再エネ水素製造実証の取り組み

一般的に電力網が本土から独立している島嶼部は需給調整能力が低いため、太陽光発電や風力発電といった再生可能エネルギーの発電量が多い日には、再生可能エネルギーの出力抑制を行い、本来発電できた電力を利活用できない場合がある。このような島嶼部での出力抑制は、日本においても、九州電力の種子島や隠岐諸島で実際に行われている。

英国は北部のOrkney島において、風力発電と潮汐発電により発電した電力の余剰により再生可能エネルギー由来水素を製造・貯蔵し、港で電力として活用あるいは水素トレーラーに搭載してフェリーで本島に輸送する実証が行われている。

このような、島嶼部に導入された再生可能エネルギーの余剰電力を利用し製造した水素の活用は、離島と本土を結ぶ船における燃料電池活用とも相性が良く、エネルギーセキュリティ向上やエネルギー地産地消の観点から我が国でも今後検討の余地があると考えられる。

---

<sup>36</sup> ドイツ連邦ネットワーク庁ホームページ "Zahlen, Daten und Informationen zum EEG"  
([https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen\\_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/zahlenunddaten-node.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/zahlenunddaten-node.html))

#### 9.4 環境性評価のまとめ

燃料電池で代替することにより、環境への排出ガスの影響がどの程度削減可能であるかについて分析した。燃料電池駆動方式の鉄道車両と屋形船のCO<sub>2</sub>の削減効果については燃料製造時からの Well-to-Wheel での CO<sub>2</sub> 排出量で評価し、局所的な環境汚染が問題となる SO<sub>x</sub> と NO<sub>x</sub> については、走行中の排出量で評価を行った。

まず、CO<sub>2</sub>の削減効果については水素の製造方法で大きな幅があった。例えば、電力を購入して水の電気分解により水素を製造するケースは、化石燃料である天然ガスから水素を製造するケースよりも CO<sub>2</sub> 排出量が多くなる。これは、火力発電等で発電した電力を用いて、一般的に電力ロスの大い水電解装置で水素を製造することにより 1 次エネルギーから水素にいたるまでに大量のエネルギーが失われ、サプライチェーンでのエネルギー効率が低いことが原因となっている。

一方で、太陽光発電等は発電時に CO<sub>2</sub> を排出しないため、排出量は極めて小さくなることが分かった。

なお、既に鉄道や船舶は、現状でも、自動車と比較すると 1 人キロあたりの CO<sub>2</sub> 排出量が極めて少ない輸送モードであることに留意する必要があるが、試算結果としては、燃料電池を導入した場合ガソリン自動車 40~100 台分の削減効果があった。

一方で、大気汚染物質である NO<sub>x</sub> と SO<sub>x</sub> については、鉄道と船舶は既に厳しい規制がなされている自動車と比較して多くの排出があることから、燃料電池導入による削減効果は非常に大きく、NO<sub>x</sub> ではガソリン自動車 0.2~1.6 万台分、SO<sub>x</sub> では 1.1~6.9 万台分の削減効果が見込めた。例えば、ディーゼル気動車が多数乗り入れる地方のターミナル駅や、東京都のように湾内で多くの船舶が往来し、汚染物質が滞留し易い場所で燃料電池式の鉄道車両あるいは小型船舶を導入することで、数千~数万台分の自動車が排出する量に相当する大気汚染物質を削減し、住民の生活環境の向上に大いに貢献することが可能であることが示唆される。

## 10 まとめ

鉄道と船舶分野における燃料電池の利用について、国内外の水素社会への取り組みとともに、具体的な導入事例を調査し、主に市場のポテンシャルと導入した場合のコスト分析および環境負荷の低減分析を行った。

本研究会により得られた分析結果の要点は以下のとおりである。

### 海外の導入事例 - 燃料電池の選択について

燃料電池の導入の契機について、鉄道、船舶ともに、海外での事例は環境対策である点を挙げている。特に、大気汚染については、地域規制が極めて厳しくなっており、現状の内燃機関では対応がますます困難となっている。

特に、欧州での内燃機関に対する規制である EURO5 は、NO<sub>x</sub> と PM に対する規制が厳しく、鉄道事業者は対応を迫られている。

船舶についても、欧州やカリブ海等で導入されている、ECA (Emission Control Area) 規制は、従来の C 重油の利用ではなく、他の代替燃料や動力源の使用を促すものとなっている。

さらに、地球温暖化については、パリ協定が発効しており、京都議定書のような強制目標はないものの、引き続き、低炭素・脱炭素の動きは加速しており、交通分野における取組は加速することが予想される。

このような中、既存の内燃機関ではなく、バッテリーも有力な候補となっており、自動車分野においては、EV の市場投入が加速しているものの、重量、寿命、航続距離などに課題があるとされている。

このような背景のなか、現状では内燃機関を用いる鉄道と船舶においては、燃料電池が一つの代替動力源としての可能性を有しており、実用化が進められている。

一方、鉄道車両メーカー、造船所、燃料電池メーカーは、このような環境規制の強化を技術革新(イノベーション)の契機として捉えており、新技術のいち早い開発や導入が、競争性を高めるとの観点から燃料電池に関する取り組みを進めており、海外での展開も視野に入れている。

### 市場ポテンシャル

わが国における潜在的な燃料電池の利用について、鉄道分野においては、ディーゼルを用いた気動車や入替機関車、あるいは新規の LRT が対象となりうる事が分かった。

特に、ディーゼル気動車は日本の鉄道総路線長全体の 31%を走行しており、車両数も約 3,000 両あるため、適用可能性がある市場は大きいと考えられる。一方で、このようなディーゼル気動車の路線は、いわゆる過疎路線であり、大規模な新規投資を積極的に行うことが可能となるかは、課題の一つである。

船舶分野については、都市部の河川・港湾における、小型の旅客船、遊覧船、屋形船が対象となることが分かった。航行域周辺の大気汚染防止に貢献することが出来るとともに、エンジンの振動と騒音がないことから、旅客に対して快適な空間を提供することが可能となる。一方で、このような小型の旅客船等の運航事業者や造船所は、比較的小規模であり、新技術の導入に慎重であるのが課題の一つである。

### コスト分析と環境負荷の低減

現状の燃料電池システムの価格は、工業的な大量生産を行っていないことから、実証段階での価格は非常に高価であることが分かった。一方で、今後の市場拡大による規模の効果が表れた場合や自動車分野に利用されている燃料電池システムを鉄道や船舶にも利用できる場合には、現状での手作業による燃料電池スタック製造と比較して効率的な生産が可能になり大幅なコストの削減が考えられる。

同様に、燃料となる水素についても、現状では市場が成熟していないものの、褐炭など海外の未利用エネルギーから製造した水素の輸入や、アンモニアからの製造等が行われ、水素発電など大規模な水素の消費が行われることが計画されており、大量供給による価格低下が考えられる。

以上を踏まえた結果、2020年、2030年の中長期のスパンを分析すると、将来的な燃料電池・水素タンク・リチウムイオン電池の価格低減に支えられ、30年のライフタイムでは現状の内燃機関と同程度のコストとなる可能性があることが示された。一方で水素価格については2030年断面でも軽油と比較して、高い水準であり更なる水素供給価格の低減が望まれる。

環境負荷の低減については、CO<sub>2</sub>の削減は、運転時のみの排出に着目すればゼロエミッションが達成されるために、極めて優良な成果をあげることが可能となる。また、Well-to-Wheelまで拡大してみれば、再生可能エネルギー等から製造した低炭素水素の利用が重要であることが分かった。NO<sub>x</sub>とSO<sub>x</sub>に関し、日本では小型の船舶や鉄道では排出規制がなく、浄化触媒等の導入もインセンティブが少なく進んでいないため、1隻の燃料電池屋形船の導入あるいは1両の燃料電池鉄道車両導入により、ガソリン自動車数千台から最大では約7万台分のNO<sub>x</sub>とSO<sub>x</sub>削減効果が得られることが示唆され、削減効果は非常に高いということが明らかになった。

次に、五つの主な課題と提言をまとめる。

#### ① 環境規制とイノベーション創出のインセンティブ

海外でのヒアリングによれば、燃料電池の導入理由として、環境規制の強化が挙げられている。欧米の地域規制や世界的な環境に関する規制は早晩、日本にも波及する可能性が大きい。また、仮に現状で、わが国では規制が掛かっていない内容でも、特にメーカーに

においては、世界市場をターゲットにする場合、このような厳しい規制を先んじて、早期に対応していくことが重要である。

このため、事業者の取組みの加速が重要であると考えられるため、事業者における新技術の開発・導入にインセンティブを設けることが必要となってくる。

現状では、政府の補助金、税制優遇措置を主なものとしたインセンティブがあり、これらの措置の着実な充実拡大も必要である。一方で、新技術の開発・導入には一定程度のリスク（いわゆる「魔の川」「死の谷」「ダーウィンの海」）があることから、事業者は先行して開発・導入するよりも、他社の動きをみる傾向があるとされている。このような状況が市場化を遅くさせることもあるため、リスクを引き受けて先駆者として開発・導入を行う者へのインセンティブが有用であると考えられる。

先行者利益としては、特許制度が最も知られているが、前述の補助金や税制優遇措置についても、先行者が最も恩恵を受けるような制度として、例えば、同様の事業を行う際には、一律の補助率ではなく、規模や企業リスクに応じた柔軟な補助金の傾斜配分や税制優遇措置が考えられ、例えば、最も早く導入を行う者に対しては、先行者利益として事業の2/3の補助を行い、2番目の者には1/2の補助と参入が遅くなるにつれて徐々に減額していくなど、先行者へのインセンティブを働かせることも重要であると考えられる。

## ② 燃料供給インフラ

水素の燃料供給に関するインフラについては、従来、卵と鶏の関係と言われており、自動車分野においても課題となっている。これは、燃料電池に限ったことだけではなく、電気自動車、LNG などについても、同様の問題があり、石油以外の他の新エネルギーを使用する場合に必ず生じる課題であり、最も困難な課題であることは、数多く指摘されてきている。特に、わが国全体としてのエネルギー政策にも関係する課題であり、個々の運輸モードや事業者だけが解決することは難しく、国、事業者、利用者のそれぞれの協力が必要不可欠である。

現状で運輸分野の水素供給インフラは、まずは燃料電池自動車用の設備の進展が図られており、この自動車設備の鉄道と船舶への共用化が図られることが、普及開始当初は望ましいと考えられる。

これは、インフラ設備は設置コストが高いため、鉄道・船舶専用の設備を、需要が少ない初期の段階で整備することは現実的に困難であると考えられるためである。ドイツでかつて運行されていた燃料電池船 *Zemship* の例では、当該船舶1隻だけへの供給となり、需要が少なく採算が合わないことから水素供給会社が撤退したと言われている。

他方で、燃料電池自動車に比べて水素を大量消費する鉄道・船舶への供給は、水素の供給会社にとっても、供給量の増加が図られるとともに、水素の製造から最終供給地点までの全体を含めたサプライチェーンの構築のコストの低減にも資すると考えられる。

また、第3章で紹介したとおり、船舶においては、水素吸蔵合金を使用した燃料タンク

を用いる場合も検討されている。この場合は、1MPa以上の高圧の水素を使わずにすむことから、燃料供給を比較的容易に行うことが可能となるとともに、供給設備の設置や供給に際しても高圧ガス保安法の適用対象から除外されることから、水素充填インフラの大幅なコストダウンが可能となると考えられる。

### ③ コスト削減

燃料電池システム導入のコストについては、その生産量の少なさから、燃料電池のスタック等が現状では手作業で製造されており、内燃機関と比較して高価となっている。一方、燃料電池の需要が増大すれば、規模の効果が働くとともに、製造段階においても自動化等の工場生産を行うことが可能となることから、大幅なコストダウンが見込まれると言われており、政府のロードマップや各種の予測においても、今後の需要の増加に伴う価格下落が示唆されている。わが国の例でいえば、PEFC形のエネファームが6年で半分以下の価格になったことは大きな例証であり、このようなコスト低減への取り組みが加速することが期待される。なお、エネファームの場合には、特に、ガス業界による市場の開拓意欲が旺盛であり、燃料電池メーカーと組んで積極的に市場へ参入したことは注目すべきであると考えられる。

さらに、第5章で紹介したとおり、海外では大型クルーズ船において燃料電池を搭載し、液体水素を燃料に用いる計画が発表されているところであるが、このような大口の需要が増加することが期待されており、水素サプライチェーンの拡大とそれに伴う供給コスト削減に期待したい。

### ④ 安全規制関係

運輸分野においては、一般の旅客を相手にすることから、安全が第一に優先されることは論を待たない。また、安全な運輸モードの構築は、個々の事業者のみならず、当該運輸モードに対する信頼の醸成には最も不可欠なものであることから、これを規制で担保することが従来より行われてきたところである。

このため、水素を扱う燃料電池という新技術の導入に当たっても従来と同等かそれ以上の安全対策が必要となってくる。一方、事業者においては、どの程度の対策を実施していくか具体的な規制内容が明らかでないと、事業化に際しての安全対策コストが不明であり、これが事業化にあたって問題視されることがある。

安全規制に関して、海外の動向調査における事業者のヒアリングから明らかになったことは、新技術を導入しようとする事業者が、安全リスクの評価を行い、自らがその安全性を評価し、これが、従前の安全リスクと同等以上であることを規制当局に対して証明することが基本スタンスであるということである。すなわち、国や国際機関が規制を事前に準備するというトップダウン方式ではなく、事業者が積極的に安全対策を提案して国が規制を策定していくというボトムアップ方式である。

このような方式では、特に、先行事業者の意向が大きく反映され、当該事業者が有する技術や手法が規制にいち早く反映されることから、上述の事業者へのインセンティブの一つにもなると考えられ、大きな利点を有すると考えられる。

具体的には、我が国において、鉄道については、鉄道営業法により安全規制が担保されているが、具体的な安全対策については鉄道事業者が行うこととなっている。また、船舶については、国際条約の SOLAS 条約により、国内法では船舶安全法により安全規制が担保されている。特に、船舶においては、国際基準の制定は 500Gt 以上の大型船舶を対象として検討されていることから、仮に制定されたとしても、小型船舶へそのまま適用することは困難である。また、国際条約の改正に際しては多大な時間を要することから、これを待っているのは現実的ではなく、自国での検討・制定が必須である。

以上を踏まえると、基準の作成にあたっては、最終的には国が行うことが必要であるものの、実際に燃料電池を導入する運用事業者や製造者と規制当局の密接な対話を通して、迅速に、かつ効果的で効率的な規制を作り上げていく必要があると考えられる。

#### ⑤ 技術開発課題

現時点で既に実用化されている燃料電池技術であるが、メーカーや事業者へのヒアリングの結果、まだ解決すべき課題が残されていることが明らかになった。特に、ディーゼルエンジンと同等の寿命・コストの達成は既存の内燃機関を代替しうる水準、すなわちディーゼルパリティ達成にあたっての重要な課題である。

現在の燃料電池の変換効率は 40～50%と、内燃機関と同等以上の水準にあるが、これを更に向上させれば水素の消費量を抑え、燃料電池の経済性の課題を改善することが可能となる。例として、変換効率が 10%向上すれば、10%水素価格が下がった場合とほぼ同等の経済性改善が見込まれる。また、効率が向上することで燃料電池から発生する熱を抑制し、熱交換器を小形化しシステム全体のコストを抑制することも可能となる。

また、燃料電池の鉄道と船舶分野における利用のためには小形化の課題がある。現状で利用できる燃料電池は燃料電池スタック自体の小形化が進んでいるものの、周辺機器の体積が大きく、鉄道や船舶に搭載する場合、客室体積を圧迫してしまうため、大出力の燃料電池の搭載は困難であることが指摘されており、燃料電池システム全体の小形化を推進する必要がある。

このように、実用化されている燃料電池においても、研究開発による向上の余地は大きく、運用面も含めたトータルでのコスト低下を達成するために技術開発の進展が欠かせない。

上述したように、新技術の導入に際して、燃料供給インフラと乗り物の関係は、「ニトリと卵」の関係といわれることが多い。このような事態は、新しい燃料を使用する場合、



供給インフラがないと、乗り物の普及が進まず、また乗り物が普及しないとインフラ設置が進まないというジレンマの例えである。

これは、燃料供給インフラに限ったことではなく、コスト削減についても大量生産に必要な需給が必要であること、安全規制についても国が案を作成するのか事業者が作成するのか、いずれも「ニワトリと卵」の一つと考えられる。

これらは、本質的には、インフラと使用者、市場の需給だけではなく、国と事業者の睨み合いが原因となっていることが多い。

このような課題を乗り越えるためには、国と事業者の深い対話と歩み寄りが最も必要であると考えられる。双方で、徹底的なリスク管理を行うとともに、新技術導入のチャレンジを行う者に対して、大きな先行者利益を確保できるような仕組み作りが必要である。

## おわりに

地球温暖化や大気汚染といった環境問題への意識の高まりとともに進められている、石油を中心とした化石エネルギーからの脱却は、100年以來の大変革であると認識されている。このような中で、運輸モードが果たす役割は非常に大きなものである。

今回、当研究所では、燃料電池という一つの大きな可能性のある選択肢が鉄道および船舶分野で今後、どのように適用されるかを調査研究してきた。課題はあるものの、従前の内燃機関に代わる将来性のある動力源となる可能性があることが明らかになったところである。

一方、課題の多くは、実際に利用され普及された段階でも見つかるであろうこと、また、本格的な普及の拡大には技術のブレークスルーも必要であることが分かった。

新技術は、萌芽的研究から市場に普及するまで、地道な研究・開発が必要である。燃料電池はまだ、市場化の光が見え始めたところであり、引き続き、一步一步着実に普及へ前進させていくことが必要である。他の技術分野においてもこのような傾向はみられるものであり、今後の国・事業者の地道な取り組みに期待したい。

## 鉄道と船舶における燃料電池の利用に関する調査研究 研究会について

本調査レポートは、一般財団法人運輸総合研究所内に設置した「鉄道と船舶における燃料電池の利用に関する調査研究 研究会」において検討した内容を取り纏めたものである。

### <委員（敬称略）>

#### ○委員

河村 篤男（座長） 横浜国立大学 大学院工学研究院 知的構造の創生部門 教授

#### ○鉄道 WG

近藤 圭一郎 千葉大学 大学院工学研究院 融合理学府電気電子工学コース 教授

柏木 隆行 公益財団法人鉄道総合技術研究所 車両制御技術研究部  
水素・エネルギー研究室 室長

柴田 宗典 公益財団法人鉄道総合技術研究所 企画室 戦略調査課 主査

明石 直也 国土交通省 鉄道局 技術企画課 技術開発室 課長補佐

#### ○船舶 WG

大出 剛 東京海洋大学 海洋工学系 特任教授

山口 剛史 NREG 東芝不動産 経営企画部経営企画担当 グループ長

十倉 拓也 国土交通省 海事局 海洋・環境政策課 専門官

鷺頭 誠 運輸総合研究所 ワシントン国際問題研究所 所長

#### ○オブザーバー

吉川 雅人 経済産業省 資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部  
新エネルギーシステム課 水素・燃料電池戦略室 係長

平田 宏一 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所  
環境・動力系 副系長 動力システム研究グループ

#### ○事務局

岡 建典 運輸総合研究所 総務部 国際業務室 主任研究員

大山 祥平 みずほ情報総研株式会社 環境エネルギー第2部エネルギーチーム  
コンサルタント

有泉 利菜 みずほ情報総研株式会社 環境エネルギー第2部エネルギーチーム  
コンサルタント

佐藤 貴文 みずほ情報総研株式会社 環境エネルギー第2部エネルギーチーム  
コンサルタント

※所属は平成29年12月時点

### <研究会実施時期>

第1回研究会 平成29年8月1日（火）10:00-12:00

第2回研究会（鉄道WG）平成29年10月11日（水）15:00-17:00

第2回研究会（船舶WG）平成29年10月25日（水）10:00-12:00

第3回研究会 平成29年12月20日（水）9:30-12:00

