

立命館大学審査博士論文

燃料電池自動車市場の創出
～インフラ依拠型新商品における期待の創出と作用～
(Market Creation for Fuel Cell Electric Vehicles:
Infrastructure Dependent New Products and Expectations)

2016年3月

March, 2016

テクノロジー・マネジメント研究科
テクノロジー・マネジメント専攻博士課程後期課程
Doctoral Program in Technology Management
Graduate School of Technology Management
Ritsumeikan University

長谷川 卓也

HASEGAWA Takuya

研究指導教員：石田修一教授

Supervisor: Professor ISHIDA Shuichi

【要旨】

前世紀の繁栄を支えた化石エネルギーは、今世紀に入って地球温暖化や大気汚染等をはじめとした様々な地球規模の問題に直面している。これらに対処するためあらゆる1次エネルギーから生産できる普遍性の高い2次エネルギー「水素」を活用し、新しいエネルギー社会を作ろうとする議論が高まっている。世にいう水素社会の構築である。近年、その象徴的存在である燃料電池自動車(FCEV)に大きな注目が集まっているが、現在も自律経済化に向けた見通しは明らかになっていない。本研究は、燃料電池自動車の市場創出における様々な盲点に注目し、適切な規範と指針を提供することを目的とする。この目的を遂行するため、次の2つの側面から研究を行った。

第1の側面は、社会科学的問題に関する。まず、FCEV経済の諸問題をプロダクト要因・プロセス要因・インフラ要因に分割し、期待の社会学が指摘する「過剰期待」に注目することでTechnological Innovation System (TIS)をベースとしたフレームワークを構築した。これを元にインフラ依拠型新商品であるFCEVの市場創出に必要なイノベーションが過剰期待によって失われるという仮説と、過剰期待下における各アクターのヒューリスティクスが提示した。次に、各種文献で引用される前提が様々な認識ギャップを生み出し過剰期待を招くという仮説のもと、普及予測文献の前提に関するメタアナリシスを実施した。その結果、普及年代を特定しない前提が一定割合で増加したのに対し、普及年代を特定した前提が急増すること、この急増は公的文献が学術文献に先行すること、が明らかになった。

第2の側面は、水素供給ステーション(HRS)経済およびFCEV乗用車経済の成立性検証に関する。まず、ICEV関連統計情報から特定価格帯のFCEV潜在顧客数、HRS水素供給能力、HRS最大投資額を計算し、HRS価格に対する量産効果とスケーリング効果を踏まえて成立性検証を行ったところ、水素供給面では実現可能性が示された。次に、各種統計情報からFCEVの損益分岐点を推測し、事業所年度における達成可否から成立性検証を行ったところ、水素需要面では実現困難であることが示された。そこで、検討対象をFCEV商用車に変更して成立性検証を行ったところ、HRSおよびFCEV双方の損益分岐点が市場規模の低下と引き替えに減少し、実現可能性が示唆された。

以上を踏まえ、本研究のインプリケーションとして非自動車用途→商用車用途→乗用車用途からなるマルチステップビジネスモデルが提案された。

【Abstract】

In recent years, fuel cell electric vehicles (FCEVs) have been attracting increasing attention for global warming issues; however, the economic growth is slow, it is difficult to say that the FCEV economics is experiencing a remarkable success. This research focuses on blind spots which may exist in the process of the FCEV market creation to obtain and deliver appropriate disciplines and directions to achieve the objectives. This study conducted the research from 2 aspects

The 1st aspect is related to the issues in social science. FCEV issues were divided into product, process and infrastructure issues. By drawing on Technological Innovation Systems (TIS), this study proposed a new framework which highlights strong involvements of hyper-expectations, a core concept in the sociology of expectations. A meta-analysis was then conducted focusing on the assumptions of the extant literature based on a hypothesis that optimistic assumptions make a variety of recognition gap. The analysis verified the steep increase occurred in 2006–7 in academic studies that employed year-specific assumptions, and suggested a shift of increase to earlier years in public reports. A mechanism that displaces the innovations and a set of heuristics under hyper-expectations of each actor were proposed.

The 2nd aspect is related to self-sustainability of hydrogen refueling station (HRS) and FCEV economics. The evaluation includes FCEV potential demand calculation, HRS refueling capacity calculation, HRS budget sealing. Consequently, self-sustainability was found in the H2 supply side; however, it was not seen in the H2 demand side because of high break-even point of FCEVs for passenger customers. On the other hand, self-sustainability was found both in the H2 supply and demand sides in the case of FCEVs for commercial customers. Based on the findings and a new framework, this study proposed a multi-step business model starting from non-automotive application → commercial vehicle application → passenger vehicle application.

内容

1. はじめに	7
1. 1 研究の目的	7
1. 2 地球環境問題	10
1. 3 研究の構成	13
2. 背景	15
2. 1 BEV および FCEV 概況	15
2. 2 経済的成功とプロダクトライフサイクル	17
2. 3 経済的成功の視点	24
2. 4 経済的側面	26
2. 4. 1 ICEV	26
2. 4. 2 BEV	31
2. 4. 3 FCEV	34
2. 5 技術的側面	42
2. 6 まとめ	45
3. 理論	47
3. 1 フレームワーク	47
3. 2 予測について	54
3. 3 ヒューリスティクス	55
3. 4 ハイプの原因と認識ギャップ	58
4. Assumptions Study	62
4. 1 方法	62
4. 2 結果	64
4. 3 考察	72
5. FCEV 経済の自律可能性	77
5. 1 背景と検証の対象	77
5. 2 方法	78
5. 2. 1 経済単位と検証の手順	78
5. 2. 2 HRS 価格と水素コスト	82

5. 2. 3	小型 HRS 価格の計算	89
5. 4	結果	90
5. 4. 1	HRS の自律経済性 (商圏内需要面)	90
5. 4. 2	HRS の自律経済性 (商圏内供給面)	95
5. 4. 3	FCEV の自律経済性	99
5. 6	考察	102
6.	おわりに	105
	謝 辞	110
Appendix 1	FCEV の歴史的背景	111
Appendix 2	日本におけるポータブル GRS	113
Appendix 3	MIRAI についての考察	117
Appendix 4	創造的破壊についての考察	119
Appendix 5	電動駆動機関のプロセス・イノベーションと量産価格	121
Appendix 6	水素イニシアチブ	123
Appendix 7	2007 年公開の公的文献	127
	引用文献	131
	図表目次	134

1. はじめに

1. 1 研究の目的

前世紀の繁栄を支えた化石エネルギーは今世紀に入って様々な地球規模の問題に直面している。地理的な局在性からくるエネルギーセキュリティ問題、燃焼反応排出ガスからくる大気汚染問題、および地球温暖化問題、などがそれである。これらに対処するため、全ての1次エネルギーから生産できる普遍性の高い2次エネルギー「水素」を活用し、新しいエネルギー社会を作ろうとする議論が高まっている。世にいう水素社会の構築である。

水素の活用は燃焼反応でも可能であるが、エネルギー効率の高い電気化学反応である「燃料電池」がその中心となっている。燃料電池は、近年普及の目覚ましいエネファームをはじめ、テレコムタワー用電源・ビル用電源・建機用電源・フェリーボート・ロードレベリング等、様々な用途開発が進められている。このうち、経済的インパクトの大きさから関心を集めているのが、ゼロエミッションビークル(Zero Emission Vehicle = ZEV)の一種である燃料電池自動車(Fuel Cell Electric Vehicle = FCEV)である。

FCEV はバッテリー電気自動車(Battery Electric Vehicle = BEV)と同じゼロエミッションでありながら、内燃機関自動車(Internal Combustion Engine Vehicle = ICEV)に匹敵する航続距離とガソリン充填時間に匹敵する水素充填性能を備えている。特に前者のインパクトは大きく、内燃機関自動車(ICEV)のほぼ全ての運用形態をトレースできることから、BEVには困難な長距離物流など大型車への関心も高い。

FCEV の課題はいうまでもなくコストである。自動車各社は1990年代初頭より数千億円超の資金を投入し様々なコスト削減技術(高活性白金触媒、高耐久性電解質膜、メタルセパレータ等)を実現してきた。これらによってプロダクトとしてのFCEVは2000年後半にはICEVに追いついたと言ってよいだろう。その結果、2012年に現代自動車のix35 Fuel Cell、2014年にトヨタ自動車のMIRAIが相次いでリリースされたが、不十分なプロセス・イノベーションによる高コスト体質は現在も大きく変わらない。例えばICEVのニューモデルは数百億円の投資が必要で損益分岐点は年間数千台以上とされる。各社発表によるとFCEVの投資は10倍以上であり、損益分岐点の高さを窺い知ることが出来る。

現在のFCEVビジネスが政府補助金を介して国民の多大かつ暫定的支援のもと成立していることは言うまでもない。今後FCEVが広く社会に受容されるにはこの事実を真摯

に受け止め、更に合理的な挑戦を続ける必要がある。具体的には補助金を活用しながら「補助金に依存しないビジネスエコシステムの構築」に向けた具体的道筋を明らかにし、かつ、市場と政府のエンドースメント（裏書）を得ることがゴールになる。

ただし、種類によらず誕生したばかりのシステムには無数の盲点が内包されていると見るべきであろう。著者は、化学産業と自動車産業に籍を置きながら様々な商品開発を行ってきた。しかし、技術が成熟するにつれてプロジェクト自体に「ボタンの掛け違い」が存在するのではという懸念が生じるようになった（図 1）。技術者の毎日は着実かつ丁寧にワイシャツのボタンを留めるようなものである。目先の数個のボタンに集中し、よそ見することなく所定の作業を繰り返す。途中で1段目のボタンを振り返る者はおらず、万一いたとしてもよそ見をするなど注意されるだけだろう。しかし、遠くはなれた1段目のボタンは本当に1段目のボタンホールにあるのだろうか。

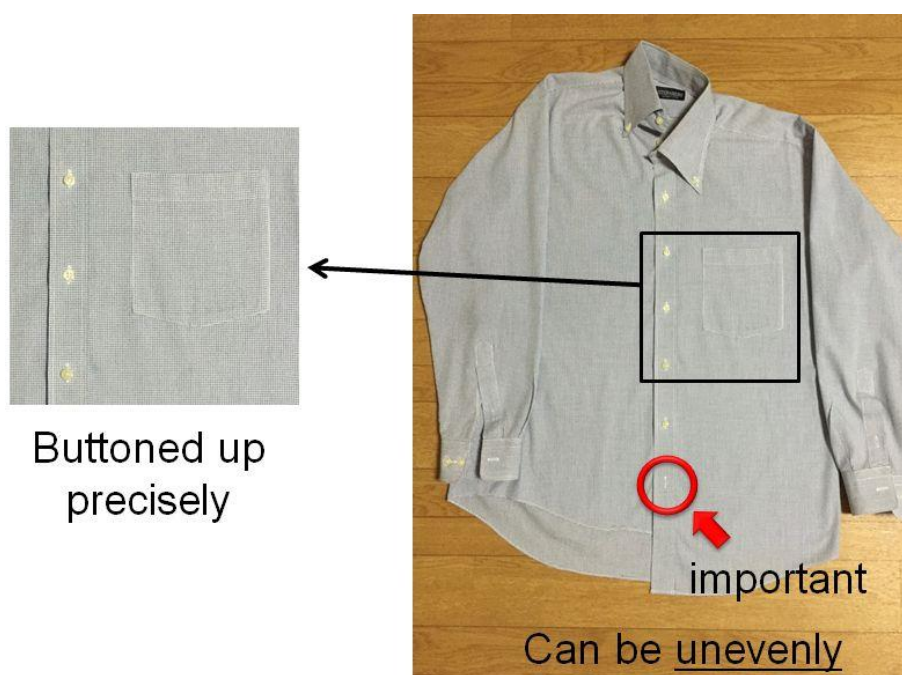


図 1 ボタンの掛け違い¹

本研究のゴールは、燃料電池自動車の自律的市場創出に必要なマネジメントを解明す

¹ Japan-Norway Science Week 2015, (28th May 2015)
<http://in-japan.no/energy2015-day2/files/2015/04/ESW-2015-Hydrogen-session-May-28-v2105.pdf>

ることにある。本研究は著者の本来の専門分野である技術開発マネジメントはその対象としない。具体的には、1段目のボタン留め作業、すなわち技術と経営をつなぐマネジメントに注目し、ここに潜む盲点を明らかにし、適切な規範と指針を提供することにある。

技術者は、与えられた経営意思を実現するべく愚直なまでに選択と集中を重ね、技術という一つの作品を作り上げる。このとき、1段目のボタンの掛け違いで積み重ねた努力が無に帰することがあってはならない以上に、1段目のボタンを確認することなく技術開発がコミットされることもあってはならない。換言すると、「経営者」は経営資源である「技術者」を最大活用できるようこの責任を果たす義務を負う。技術経営(Management of Technology = MOT)の本質はこの点にあると著者は考える。

1990年代のバブル崩壊後に日本は失われた20年を経験するが、この間、多くの作品がボタンの掛け違いによって姿を消す風景を著者は眺めてきた。これが製造業のROE(Return on Equity)を低下させ、失われた20年の一端を担ったのは言うまでもない。しかし、それ以上に若い技術者から成功経験を奪い、研究はうまくいかなくて当たり前、うまくいった研究が商品化されなくても当たり前、というネガティブな価値観を植え付けた損失は計り知れない。

本研究では、FCEVをインフラ依拠型新商品(Infrastructure Dependent New Product)のひとつとしてFCEVを捉えることとする。ここで、インフラ依拠型新商品とは、自動車に対する道路、電灯に対する電線のように、その商品価値を発現するためにインフラを必要とする新商品を意味する。経営者が担う責任のひとつにインフラ供給責任が含まれることは言うまでもない。

かつて、ICEVもインフラ依拠型新商品であったが、ICEVとそのインフラであるガソリン供給ステーション(Gasoline Refueling Station = GRS)からなる広い意味でのICEV経済は、1908年のT型フォードの登場以来110年の年月をかけた「自然進化」によって人類に多大な貢献をもたらした成功例といえるだろう。一方、新しいインフラ依拠型新商品であるFCEVとそのインフラである水素供給ステーション(Hydrogen Refueling Station = HRS)からなる広い意味でのFCEV経済は、1990年のカリフォルニア州ZEV規制の登場以来25年の年月をかけた「人工進化」が試みられてきた。本研究では、まずこの事業に向けられた人々の「努力」と「驕り」のコントラストを追いながら、FCEVの1段目のボ

タンについて考えることとする。

1. 2 地球環境問題

化石エネルギーが直面する地球規模の問題のうち、エネルギーセキュリティは政治・軍事に深く関わる問題であり本研究では言及しない。大気汚染問題は新興国都市部における大気汚染²が70年代の日本を思わせるような深刻な問題を提示するようになり、先進国都市部でもディーゼルエンジンによる大気汚染が指摘されている(図2)。これらもZEVが担う重要な役割であるが、本研究では地球温暖化問題を中心に考える。

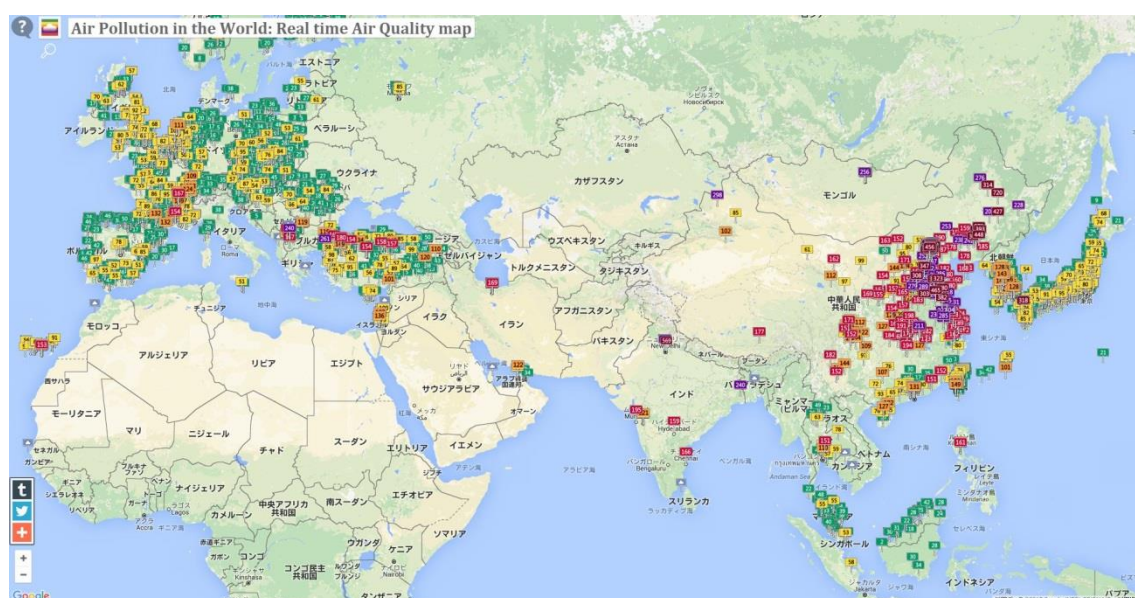


図2 世界の大気汚染状況(2015年12月14日13:00)

(Source: WAQI)³

経済産業省の調査⁴によると、世界におけるICEVの市場規模は年間184兆円で、カテゴリ別市場規模で世界最大とされている。ICEVを主流とする輸送部門が排出した温室効果ガスは2013年度に日本全体の16.4%を占め、エネルギー転換部門の41.1%、産業部門の27.0%に次ぐ3位に挙げられている。

² インドの首都ニューデリーでは市民の生活の足である Three Wheeler をすべて天然ガス車に転換したが、大気汚染を改善するには至っていない。

³ <http://www.bloomberg.com/news/articles/2014-02-27/india-s-diesel-subsidy-spurs-pollution-worse-than-beijing>

⁴ <http://waqi.info/> 数字が大きいほど汚染が厳しい。

⁴ 平成24年度産業技術調査事業報告書(産業カテゴリ別市場規模)

また、国連の気候変動枠組条約（UNFCCC）事務局が 2012 年にまとめた附属書 I 国の温室効果ガス排出量統計では、GHG total including LULUCF⁵（Land-Use, Land-Use Change and Forestry）に占める Transport 部門由来の温室効果ガス排出量は平均 22.8%であり発展途上国の成長に伴って今後急増すると予想されている。Energy Industries 部門の温室効果ガス排出量は平均 35.2%と高いが、二酸化炭素回収貯留（Carbon dioxide Capture and Storage = CCS）や核融合を用いたクリーンな原子力発電など、いくつかの根源的対策が提案されている。しかし、これらを Transport 部門に適用することは現在の科学技術では不可能であり、電動駆動化が唯一の現実的選択肢となっている。

近年、温室効果ガス排出量の削減が活発に議論されるようになったのは、2007 年の IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change: 気候に関する政府間パネル）第 4 次報告（AR4）（IPCC, 2007）⁵からと言って良いだろう。AR4 の 110 のシナリオのひとつ「2℃目標シナリオ」⁶が各国の政治目標 [秋元, 2014]として取り上げられて以降、温室効果ガス排出量削減に向けた取り組みは政府や民間企業の社会的責任(Corporate Social Responsibility = CSR)として位置付けられるようになった。例えば、日産自動車は 2010 年の NISSAN GREEN PROGRAM 2016⁷で 2050 年の新車 CO₂ 発生量を 2000 年比 90%削減すると発表している。

一方、こうした目標設定については様々な異論が提議されていることに留意する必要がある。例えば、秋元によると 2℃目標シナリオは自然科学的根拠を担当する WG1 がケーススタディーとして提示した 110 のシナリオの一つに過ぎず、影響・適応・脆弱性を担当する WG2 や、緩和策(mitigation)を担当する WG3 が、ケーススタディーの中から 110 のシナリオの一つを取り上げて総合的判断を行って推奨したものではないとされている [秋元, 2014]。なお、AR4 の後に発表された IPCC 第 5 次報告(AR5) (IPCC, 2014) ⁸では、CO₂ 濃度の一時的なオーバーシュートが許容されることになり、AR4 より現実的な考え

⁵ 例えば、気候変動に関する政府間パネル（International Panel of Climate Change）では、Working Group 1（気候変動予測）、Working Group 2（温暖化影響）、Working Group 3（対策等）という 3 つの作業部会で検討する体制がとられている。すなわち、WG3 のコスト計算は WG1 と WG2 における検討結果がその前提となる。

⁶ 「地球温暖化が産業革命以前比 2℃を超えないためには CO₂ 濃度を 450ppm 以下で安定化することが必要であり、CO₂ 排出量を 2050 年までに少なくとも半減する（-50～-85%）」というもの。

⁷ http://www.nissan-global.com/JP/NEWS/2011/_STORY/111024-01-j.html

⁸ 温室効果ガスの代表的濃度を放射強制力 (W/m²) の強さで表現した RCP (Representative Concentration Pathway) が用いられるようになった。RCP の後に続く数値が大きくなるほど 2100 年時点での温室効果ガス濃度が大きくなるとされており、上限 RCP8.5 と下限 RCP2.6 の間に RCP6.0 と RCP4.5 というシナリオが想定されている。

方が採用されている⁹。

温室効果ガス排出量の削減が「いつまでに、どの程度」必要かという科学的見解が IPCC によって確定するにはなお時間を要すると思われるが¹⁰、CO₂ 濃度上昇が様々な場所で観測されていることは事実である (AR5¹¹)。図 3 に、ハワイ・マウナロア (赤) および南極 (黒) で観測された大気中 CO₂ 濃度の推移を示す。赤の振幅はハワイ周辺における植物の光合成に由来する (植物が活発な春夏に高く秋冬に低い) と考えられるが、CO₂ 濃度の上昇速度が光合成由来の振幅より早いことは明らかであり、自然界が 1 年間に吸収可能な範囲を超えた CO₂ が大気圏に排出されていることは間違いないと言えるだろう。

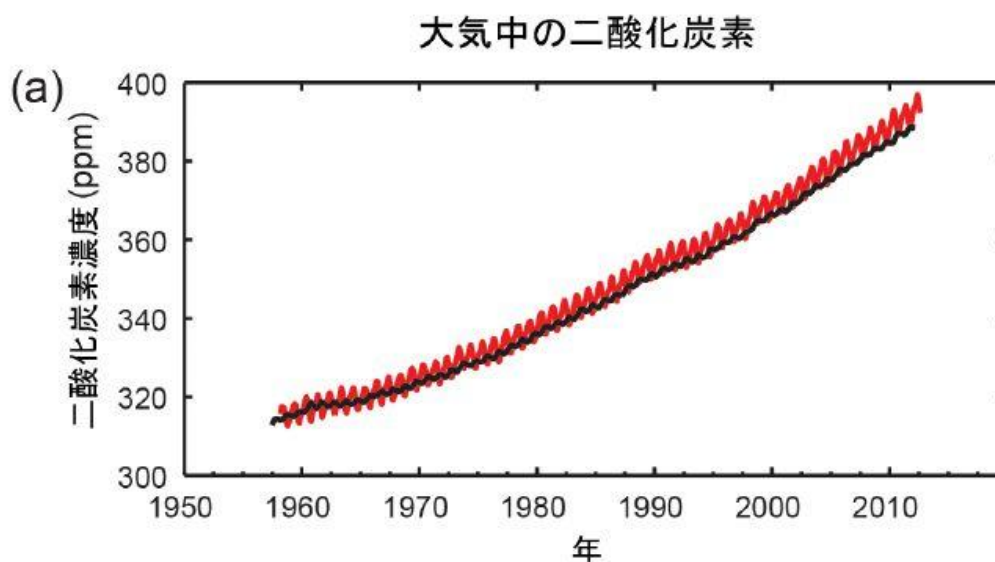


図 3 大気中の二酸化炭素濃度推移

(出典：IPCC AR5)

温室効果ガス排出量削減という要求が長期的な地球経済にとって妥当かどうかの判断は本研究の範囲をはるかに超える。本研究ではこれが妥当であると仮定し、ゼロエミッション技術を用いて化石エネルギーに由来する地球規模の問題解決を図ることを目的とする。

温室効果ガス排出量削減に応えるため、日本を中心とした自動車各社は内燃機関と電

⁹ NISSAN GREEN PROGRAM 2016 では AR5 発行にともなう内容変更は行われていない

¹⁰ もしくは永久に不可能

¹¹ 「20 世紀半ば以降に観測された気候変動は、人間活動の影響が主な要因である可能性が極めて高い (95%以上)」

動機関を組み合わせたハイブリッド自動車（Hybrid Electric Vehicle = HEV）を開発し¹²、加減速時のエネルギーロスを減らすことによって大幅な排出量削減を可能とした。ハイブリッド技術が最初に実用化されたのは1997年に発表されたトヨタ自動車のPriusであり、通常のICEVに比べて走行燃費（km/L）をほぼ倍増した。トヨタ自動車はその後HEVのラインアップを拡充し、2014年9月末までに累計705万台のグローバル販売台数を記録している¹³。

しかし、内燃機関を用いる限り排出量削減には限界がある。前記NISSAN GREEN PROGRAM 2016によると、ICEVとHEVでそれぞれ2015年（2000年新車比25%減）および2025年（同50%減）頃に限界を迎えると考えられている¹⁴。すなわち、内燃機関の改良でNISSAN GREEN PROGRAM 2016を実現することは不可能であり、少なくともHEVが限界を迎える2025年頃までにFCEVを含むZEVの本格導入に向けた見通しをつける必要があるとされている。

1. 3 研究の構成

本研究の具体的なゴールは、化石エネルギーに起因する地球規模の問題解決を図るため、インフラ依拠型新商品であるFCEV、そのインフラであるHRS、双方の経済的成功に必要なマネジメントを解明することにある。このためには都合のいい自己循環的議論¹⁵が混入しないよう注意を払う必要がある。本研究では自動車の温室効果ガス排出量削減について以下のように定義し、これをもとに研究を構成することとした。

- 自動車の温室効果ガス排出量削減は、地球規模で実現されねばならない
- 自動車の温室効果ガス排出量削減が、いつまでに、どの程度必要かは定めない

本研究は前半（2章～4章）と後半（5章～6章）に分けられる。

前半では、インフラ依拠型新商品の商業化に伴う社会科学的な諸問題を取り扱う。2章ではZEVの歴史を参照しながら本研究における経済的成功と自律経済性を定義する。

3章では4章以降の理論的背景となる、「過剰期待」(Hyper-expectation, Hype)を含む新し

¹² 欧州ではガソリン自動車よりも高い熱効率を誇るディーゼルエンジンがその主役となったが、2015年9月のドイツ自動車大手のVolkswagenによる排出ガス不正問題以来、急速な見直しが進められている。
<http://yosemite.epa.gov/opa/admpress.nsf/bd4379a92ceceec8525735900400c27/dfc8e33b5ab162b985257ec40057813b!OpenDocument>

¹³ <http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/4067878>

¹⁴ <http://www.nissan-global.com/JP/TECHNOLOGY/OVERVIEW/environmental.html>

¹⁵ 例えば、インフラの経済的成功が新商品の経済的成功を前提とする、もしくは、新商品の経済的成功がインフラの経済的成功を前提とする、などの因果性のジレンマがこれに相当する。

い Technological Innovation System (TIS) フレームワークを用いて FCEV の現状を分析する。4 章では企業戦略への影響が懸念される FCEV 普及予測文献を対象としたメタアナリシスを行い、本研究が hype の種と考える認識ギャップの分析から hype の発生原因について考察する。

後半では、インフラ依拠型新商品とそのインフラ双方の経済的成功に必要なマネジメントを自律経済性分析の結果を踏まえて提案する。5 章では ICEV・GRS 等の統計情報および国土交通情報から水素供給部門・水素需要部門それぞれの自律経済性を検証する。6 章ではこの結論をもとに 1 段目のボタンの問題を明らかにし、FCEV が辿るべき合理的な「人工進化」について、ICEV の「自然進化」を振り返りながらそのあるべき姿とマネジメントを提案する。

2. 背景

2. 1 BEV および FCEV 概況

マークラインズ統計¹⁶によると、2014 年の自動車世界販売台数は年間で 85,252,920 台であり、このうち、BEV と FCEV の販売台数はそれぞれ 158,912 台 (0.19%)、19 台 (0.00%) であった。一方、誕生したばかりの ZEV 統計はまだ網羅性が低く、近年普及が著しい中国の低電圧 BEV を含めると既に 30 万台に達するという意見もある。しかし、仮に 30 万台であったとしても 2014 年の ZEV 販売台数は全体の 0.35% にすぎない。

【BEV】

BEV の歴史は比較的早く、1890 年代にはそれまでの馬や馬車や手押し車に代わって相当数の普及が見られた。しかし、航続距離¹⁷やペイロード、燃料補給のしやすさ等で優る ICEV の普及で間もなく衰退し、20 世紀初頭にはほぼ見られなくなった。その後、20 世紀中盤の日本で戦争後の不十分な石油供給を補うため商用車等¹⁸が販売された少数の例を除くと、BEV の市場は長らくニッチ市場（老人用カート、ゴルフカート、フォークリフト等）に限られてきた。

その後、カリフォルニア州 ZEV 規制(90 年)、イラクのクウェート侵攻(90 年)、湾岸戦争(91 年)等を経て BEV への期待が急速に高まり、1997 年に General Motors から鉛電池やニッケル水素電池を搭載した 2 ドアクーペ BEV 乗用車 (EV1) のリース販売が開始された。EV1 は、一部の顧客から強い支持¹⁹を集めたが航続距離や価格の問題からビジネスとしては不成功に終わった。EV1 はエネルギー密度の低い鉛蓄電池とニッケル水素電池を搭載していたが、91 年にソニーから発売されたリチウムイオン電池がパソコンや携帯電話等で普及を経て信頼性・実用性を増したことを受けて、2010 年にはラミネート型リチウムイオン電池を搭載した 5 ドアハッチバックの BEV 乗用車 (日産リーフ) が日産自動車から販売された。更に、2012 年には安価なパソコン用リチウムイオン電池を搭載したラグジュアリーセダンタイプの BEV 乗用車 (Model S) がアメリカのベンチャー企業 Tesla Motors から販売された。

【FCEV】

¹⁶ http://www.marklines.com/ja/vehicle_sales/search_country

¹⁷ 現在の BEV でも航続距離の問題は完全に払しょくされていない。一般に Range anxiety と呼ばれている

¹⁸ 石油供給が不十分であったが、水力発電による電気供給は受けることができた

¹⁹ “Who Killed the Electric Car?” (1996), sony pictures classics, <http://www.sonyclassics.com/whokilledtheelectriccar/>

一方、FCEV 歴史は始まったばかりである。具体的には一度目の山と谷を越え、今は二度目の山を登りつつある。一度目の山は 1998-2007 年頃に現れた。1997 年 10 月に英 Economist 誌が東京モーターショーの FCEV プロトタイプ展示（Daimler-Benz、トヨタ自動車）を取り上げて”At last, the fuel cell”と報じ、同月の Automotive News 誌の取材で Daimler-Benz 副社長が「2003 年に商用化、2004 年に年産 4 万台」とコメントした頃から FCEV ブームが到来した。更に米同時多発テロ後の水素政策強化も手伝ってプロトタイプの試作と路上デモンストレーションが相次いだ。日本では 2002 年 2 月に首相官邸に納車された FCEV の前で金色の大きなカギを抱えた小泉純一郎首相の笑顔が記憶に新しい。

その一方で、FCEV 商業化に対する市場のエンドースメント（裏書）は早々に失われた。燃料電池ブームの先駆けとなったバラード社の株価を例にとると、2000 年 2 月 1 日に史上最高値 114 ドルを記録したあと 2002 年 2 月に 11 ドルに下がり、2007 年 1 月以降 5 ドルを回復することなく現在に至っている（図 4）。この状況を追いかけるように 2008 年にリーマンショックやカリフォルニア州 ZEV 規制クレジットの延期が起こり、FCEV 商業化は一度目の谷を迎えた。

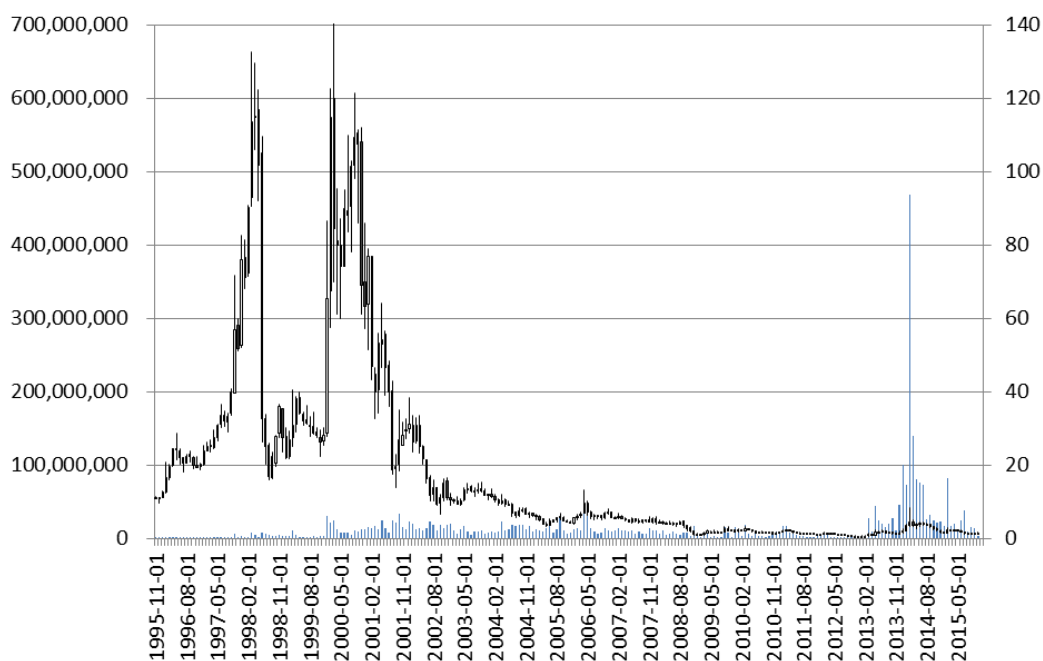


図 4 バラードパワーシステムズ株価推移²⁰

²⁰ <http://www.nasdaq.com/symbol/bldp/interactive-chart>

ただ、幸運なことに二度目の山がその直後に始まった。2009年にドイツのDaimlerが7社共同で水素ステーション整備プロジェクト H2 Mobility を立ち上げると、動きはすぐイギリスとフランスに波及し、2012年にUK H2 Mobility、2013年に H2 Mobility France²¹が相次いで設立された。

その後、2014年のMIRAIのリリースによって一時的に出来高（青線）は増加したものの株価は反応せず、2015年5月には出来高も沈静化した。これは株式取引が長期的リターン（経済的成功）を求める銀行家ではなく、短期的リターンを求める投資家のイベント（お祭り）になっていると見ることもできるだろう。現在、Ballardをはじめとした北米の燃料電池ベンチャー各社(Hydrogenics, Plug Power 等)はFCEV乗用車の開発と一線を画し、主にバックアップ電源用やフォークリフト等の小規模燃料電池ビジネスに活路を見出そうとして活躍していることは興味深い。

2. 2 経済的成功とプロダクトライフサイクル

ZEVの目的が化石エネルギーに由来する地球規模の問題解決である限り、ICEVに勝る大規模普及の実現が求められることは言うまでもない。ZEVが経済的成功を続けながらICEVを上回るシェアを達成することで、はじめてZEVの存在意義は成就されたと言えるだろう。これは、地球規模の問題解決を目的としない天然ガス自動車(Compressed Natural Gas Vehicle = CNGV)やLPガス自動車(Liqueid Petroleum Gas Vehicle = LPGV)等の代替燃料自動車(Alternative Fuel Vehicles = AFV)自動車よりも普及に向けた強い意思が求められることを意味している。

こうした大規模普及に至る経路は、横軸に年代、縦軸に普及率もしくは普及数をとったプロダクトライフサイクル(product life cycle=PLA)を用いて表すことができる(図 5)。

²¹ http://www.afhypac.org/images/documents/h2_mobilit_france_en_final_updated.pdf

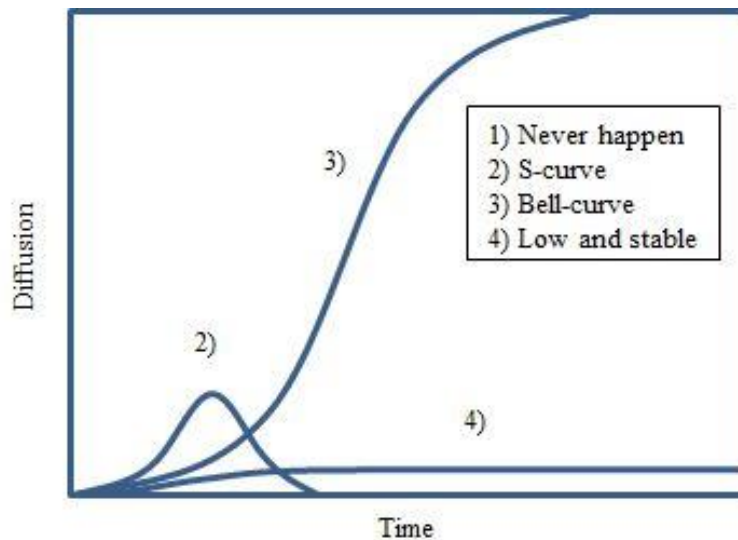


図 5 プロダクトライフサイクル

PLA は 1) Never happen、2) S-curve、3) Bell-curve、4) Low and stable の 4 つに分類できるが、3)は地球規模あるいは国家規模で普及率 100%に到達したケース、2)は急速な普及のあと何らかの理由で失速したケース、4)は緩やかに普及したあとそれ以上普及せず推移したケース、を表している。例えば、市場原理によらない手段で人工的に普及させたあと失敗した場合等は 2)、予想通りの大規模な普及に至らなかったがニッチマーケットを見出した場合等は 4)に該当するだろう。

図 6 に、19 世紀のイギリスにおける帆船と蒸気船の普及を示す。帆船は 1820-1860 年代におけるイギリスの商船ビジネスを支えたあと、徐々に数を減らしながら次代の蒸気船に海上輸送手段における進化のバトンを渡した。図 6 の帆船の曲線はベルカーブと呼ばれるが、この前半が図 5 の 3)に対応している。帆船の総トン数が最大だったのは 1860 年の 4,000,000 トンであるが、その後 20 数年で蒸気船が同等のトン数に達したときは帆船の 7 割程度はまだ就役していることから大きなオーバーラップがあったことが推測される。これは進化の勢いを示していると考えてよい。

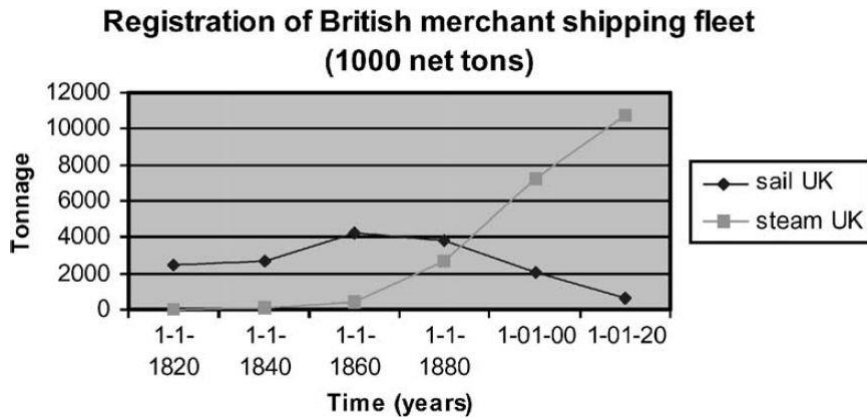


図 6 1880年代のイギリスにおける帆船と蒸気船の普及

(出典：(Geels, 2002))

図 7 に、20 世紀のアメリカにおける馬と ICEV の普及を示す²²。馬の最は 1915 年の 26,439,000 頭であるが、15 年後の 1930 年には ICEV も 26,749,853 台に達しており、馬は ICEV の 71% の 1,888,5856 であった。ここにも強い進化の勢いを見ることができる。

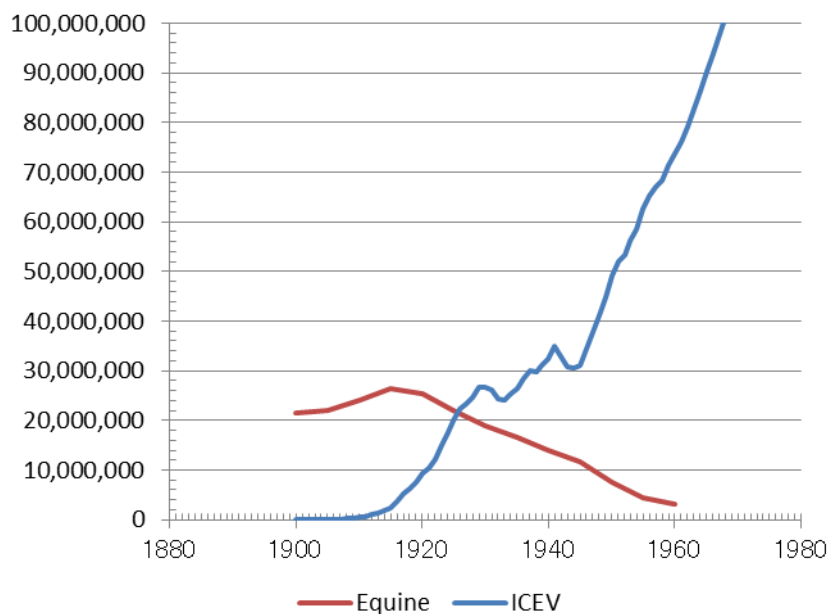


図 7 1990年代のアメリカにおける馬(Equine)と ICEV の普及²²

²² Equine: http://www.humanesociety.org/assets/pdfs/hsp/soaiv_07_ch10.pdf
 ICEV: <http://www.fhwa.dot.gov/ohim/summary95/section2.html>

図 8 に、20 世紀のニュージーランドにおける AFV(CNGV, LPGV)の普及を示す。1973 年の第一次オイルショックのあと、日本と同じく天然資源に乏しいニュージーランド政府は多額の補助金をもって ICEV を CNGC や LPGV に改造するコンバージョンキットの導入と、GRS に CNG ステーションや LPG ステーションの機能の追加工事を政策によって推進した。この結果、1984-5 年には新車登録台数の半数を CNGV および LPGV が占めるようになったが、日本による液化天然ガスの輸入本格化によって CNG および LPG の経済的意義が失われ、当該政策が 1984 年にキャンセルされるとわずか 4 年で統計に表れないほどに急減した。これ以降、ニュージーランドは新車登録台数こそ伸ばすものの（2005 年、23 万台）国内自動車産業は振るわず、1984 年以降の増分を殆ど海外からの輸入中古車（青実線と青点線の間）で賄う結果になった。同様のベルカーブは日本の CNGV にも見ることが出来る。

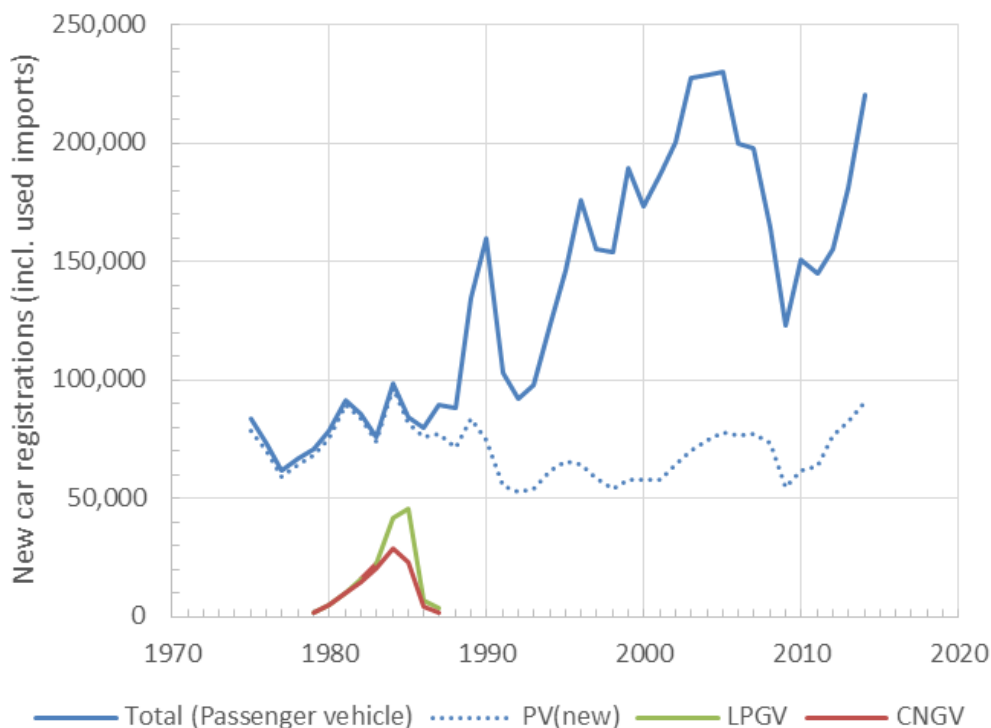


図 8 1980 年代のニュージーランドにおける AFV(CNGV, LPGV)の普及

(出典：TwE 報告 (2011) を元に著者作成)

図 9 に、日本経済新聞²⁵から引用した図を示す。日本の場合、ニュージーランドのように政策が大きく変わった訳ではない。例えば平成 10-19 年度に累計 26,353 台の CNGV に累計 196.3 億円の補助額（1 台当たり 74.5 万円）が支給されたが²³、利便性、航続距離、コストなどの諸問題が顕在化されるにつれて需要は期待を下回り年間導入台数はベルカーブを描く結果となった。

運輸低公害車普及機構が 2003 年に行ったアンケート²⁴によると、CNGトラック導入の障害となる要因として、「スタンドが少ない」が 49%、「航続距離が短い」が 22%、「補助金を勘案しても車両導入コストが高い」が 18%であった。優先順位 1 位から 3 位までにウエイト付け（1 位 3 点、2 位 2 点、3 位 1 点）した集計でもこれらが 3 つの要因が全体の 78%を占めており、上記補助額では、結果として既存の ICEV に対する CNGV のデメリットを埋め、CNGV 経済を生み出す役割を果たせなかったものと推測される。

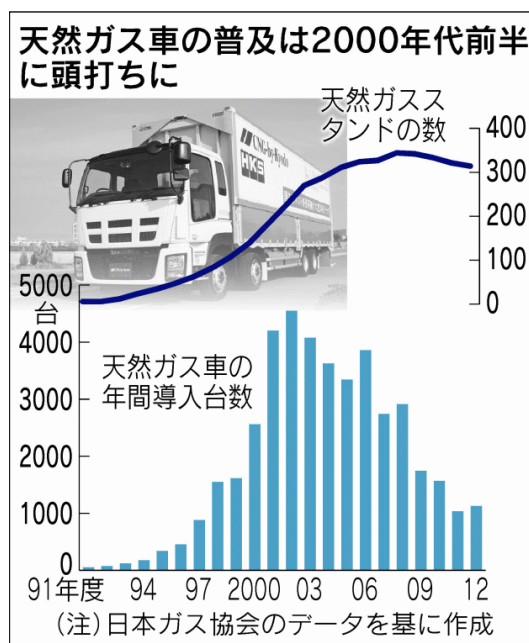


図 9 天然ガス車の年間導入台数

(出典：日本経済新聞²⁵)

²³ http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/hyouka/dokuritu_n/gijiroku/pdf/081125_1_si2_02.pdf

²⁴ <http://www.levo.or.jp/newslevo/pdf/newslevo20.pdf>

²⁵ 日本経済新聞 2014/8/20 3:30 (真相深層) 燃料電池車、乗り切れぬ訳 都市ガス、天然ガス車の挫折 パイプライン普及のカギ

経済産業省が2001年に発表した「今後のエネルギー対策のあり方について」ではクリーンエネルギー自動車の2010年度普及目標を348万台²⁶と定め、うち100万台が天然ガス自動車、5万台が燃料電池自動車とされていた²⁷。これらの目標は全て未達に終わったが、ニュージーランドと日本のCNGV曲線が似通っていることは注目に値する。

以上より、帆船と馬は成功、CNGVは失敗、と判断することは可能であるが、具体的にはどの視点を基準にすればよいだろうか。これについて考えるため、生物のアナロジーとして産業全体を一個の生態系（ビジネスエコシステム）（Moore, 1993）とみなし、産業生態系の成長を「進化」と表現する。図10に、進化について成功例と失敗例を比較したダイアグラムを示す。

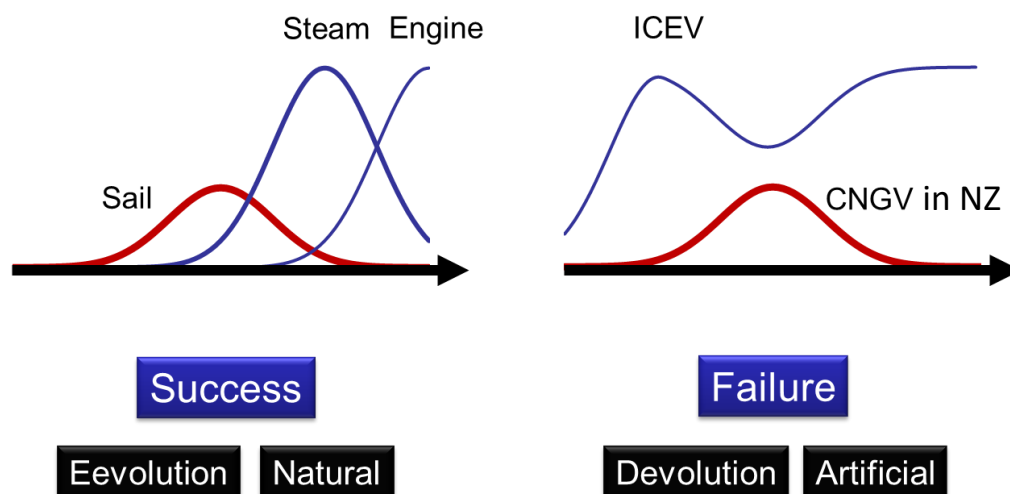


図 10 2つのベルカーブ

帆船と馬もCNGVも見かけはベルカーブであるが、帆船と馬は次代の蒸気船やICEVに進化のバトンを渡し、CNGVはBEVやFCEVに進化のバトンを渡すことなくICEVの販売曲線を一時的に急減させただけでその役割を終えた。進化のプロセスを振り返ると、帆船・ICEVは市場の監督のもとで起きた「自然進化」であったのに対し、CNGVは政府の善意からくる意思のもとで起きた「人工進化」であったと言えるだろう。

²⁶ http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/new_energy_subcommittee/pdf/010705a.pdf

²⁷ <http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g10131lj.pdf>

この定義にしたがうと、ICEV の成功は AFV や ZEV に進化のバトンを手渡した時に初めて確定することになる。確かに、ICEV が引き起こした地球規模の問題によって我々が馬車に戻ることがあるとしたら、それは大局的に失敗と言って良いだろう。しかし、これを防ぐために燃料電池自動車の自律経済的成長を実現することが本研究の目的であり、以降では ICEV を成功例として取り扱うこととする。

現在までの ICEV の成功例うち、顕著な事例として日本を挙げることができるだろう。1945 年の第二次世界大戦終結以来、日本の ICEV 自動車産業は多くの人々によって育てられ世界トップレベルの実力を持つに至った。2014 年現在、この生態系は自動車製造業・運送業・小売業・給油業・部品製造業など 550 万人²⁸のプロフェッショナルによって構成され、さらに、全国 8,186 万人の運転免許所有者によって支えられている。関連就業人口は日本の就業人口 6,351 万の 8.7%を占めるが、その中心に位置する自動車製造業の比率は 3.3%にすぎない。図 1 1 に、以上のあらましを示す。これは、市場の監督のもとで自然淘汰され戦後 70 年をかけて最適化された姿であり「神の見えざる手」＝自然進化が作った理想の姿といっても過言ではない。

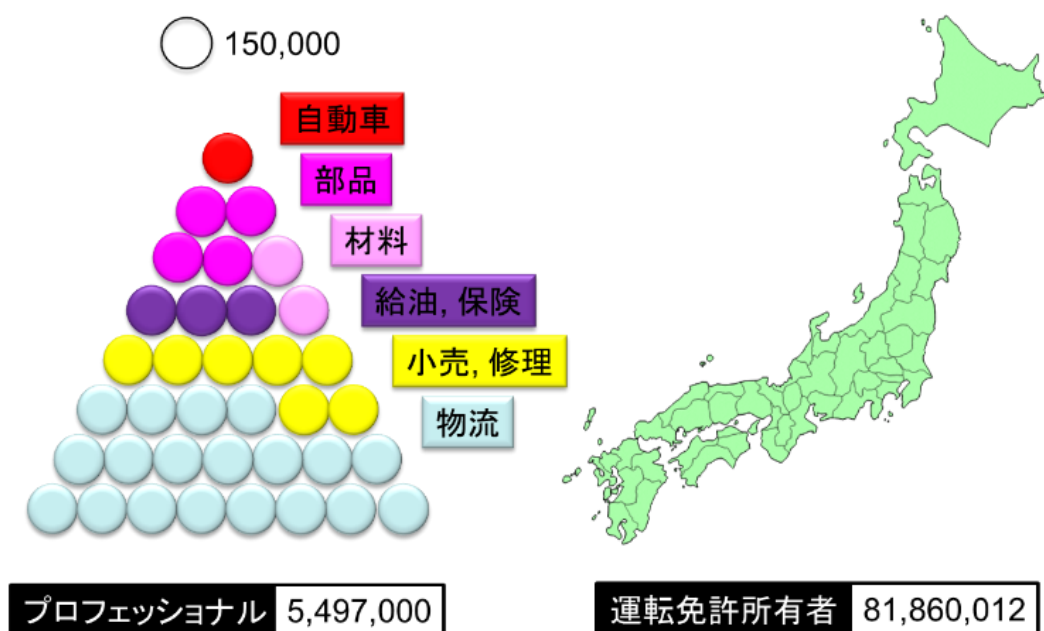


図 1 1 自動車関連産業就業者²⁹と運転免許所有者

²⁸ http://www.jama.or.jp/industry/industry/industry_1g1.html

²⁹ http://www.jama.or.jp/industry/industry/industry_1g1.html

第一次オイルショックのあとニュージーランド政府が自国の自動車産業のために最善を尽くしたことは言うまでもない。しかし、政策的な意思決定によって短期間に行動を起こさざるを得なかった政策立案者にとって、ニュージーランドにおける産業生態系（図 11）を踏まえた戦略を検討する時間はおそらく十分ではなかっただろう。

2. 3 経済的成功の視点

以上、様々な人工進化が政策的に進められた事例を見てきた。FCEV を代表とするゼロエミッション技術は全ての国家の「100年計」として地球温暖化防止に重要な役割を果たすことは前述したとおりであるが、自動車の平均使用年数³⁰が乗用車 12.38 年・貨物車 13.72 年という中で多くの顧客が FCEV に代替するための直接的価値を見出す理由を持たないことは想像に難くない。現在価値を明らかにしないまま将来の「間接的価値」実現のために「人工進化」を進めるという困難な事業を考えるにあたり、ここで改めて「経済的成功とは何か」について考えてみたい。本研究では、イノベーションの概念を初めて提唱した Schumpeter の経済学に準拠してこれを行うこととする。

旧オーストリア・ハンガリー帝国出身の経済学者である Schumpeter は初期の著書「経済発展の理論」 [シュムペーター, 1977]の中で「経済における革新は新しい欲望がまず消費者の間に自発的に表れ、その圧力によって生産機構の方向が変えられるというふうにおこわれるのではなく（中略）、むしろ新しい欲望が生産の側から消費者に教え込まれ、したがってイニシアティブは生産の側にあるというふうにおこなわれるのがつねである」と述べ、新結合（イノベーション）が非連続的に現れるときに経済発展が進行すると考えた。彼はこれを「創造的破壊」と呼び、「この過程こそが、資本主義の本質的事実である」、とした。Schumpeter は「郵便馬車をいくら連続的に加えても、それによってけっして鉄道をうることはできないであろう」という比喩を用いて「創造的破壊」を強調したが、これは 60 年後に Christensen ら（1995）によって考案された Disruptive innovation（およびその対義語としての Sustaining innovation）と同義と考えてよいだろう。

Schumpeter はまた「古いものは概して自分自身のなかから新しい大躍進を大きな力をもたないからである。先にのべた例についていえば、鉄道を建設したものは一般に駅馬

³⁰ https://www.airia.or.jp/publish/statistics/ao11kc0000000z4-att/03_32.pdf

車の持ち主ではなかったのである」と指摘し、「創造的破壊」を担う「企業家」と、単なる「事業家」との違いを明らかにした。更に「新結合は既存の結合と違って、すでに流入しつつある収益によってまかなうことはできないから、新結合を遂行しようとするものは、貨幣あるいは貨幣代替物についての信用を求め、これによって必要な生産手段を購入しなければならない。このような信用を供与することは明らかに「資本家」と呼ばれる範疇の経済主体の機能である」、「彼（著者注：銀行家）は交換経済における監督者である」として「銀行家」の役割を重視した。

Schumpeter が銀行家に期待した役割は、企業家の提案を精査し、あいまいな期待や予測ではなく、先に見える営利であるか否かを判断することであったと言えるだろう。残念ながら Schumpeter の時代には地球温暖化問題も ICEV 由来の大気汚染問題も存在しなかったため「間接的価値」を目的とした政策決定という概念について Schumpeter は何も語っていない³¹。

2014 年の国内総生産（支出側）486 兆円のうち、政府最終消費支出は 100 兆円であり、民間最終消費支出は 295 兆円であったが³²。8,162 万人の運転免許所有者を顧客とする自動車産業は後者を主要市場とする。このためには、かつてのニュージーランドのように何かを契機として動くのではなく、十分な時間をかけて 8,162 万人に直接的価値（自動車の平均使用年数内での価値）を訴える努力が必要であることは言うまでもない。たとえ、現時点において直接的価値を示すことが困難であったとしても、このための努力は継続されるべきである。また、間接的価値を示すことが重要であることを理由に直接的価値を示す努力を放棄することは、明らかに不合理ともいえる。本研究では、直接的価値を示す努力を放棄しないという立場から経済的成功の視点を直接的価値（表 1）からとらえることとした。

なお、本研究は各国の政策決定者に意識的不作為があったとは考えない。一方、無意識的不作為はありえたと考える。両者のギャップから必要なマネジメントを抽出することは、本研究の目的の別表現と言って良い。以降、本研究は無意識的不作為を「盲点」と呼ぶ。

³¹ Schumpeter が存命であればこれを放置せず、間接的価値すら直接的価値の外挿で表現しようと尽力したのではないだろうか。本研究の趣旨も同じである。次章の理論でこれについて議論する。

³² http://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/data/data_list/sokuhou/files/files_sokuhou.html

表 1 経済的成功に対する視点

視点 1： 銀行家が資本の増加を目的とした投資を行っているか

視点 2： 個別の新結合で投資回収が完了したか

第 1 の視点は「銀行家が資本の増加を目的とした投資を行っているか」である。

たとえば BEV は、LEAF や Model S などの登場で自動車市場への復帰を果たし、今も成長を続ける ICEV と並行しながら更なる成長を模索する段階にある。一方、2015 年現在の BEV 乗用車周辺に「銀行家」の姿はあまり見られない。BEV の連携先は、銀行家ではなく資本の増加を目的とした投資を行わない政府であり、その外部資金は返済義務が課されない補助金である場合が多い。膨大な初期投資を躊躇する自動車会社の背中を押すためこうした外部資金が使用されることには一定の意義があるが、資金の担い手が政府から一般の銀行家と交代するまでは視点 1 を欠いている³³。

第 2 の視点は、「個別の新結合で投資回収が完了したか」である。

一般に、新商品における初期投資は全額を当該商品の固定費には計上せず、初期の研究費は一般管理費等の名目で全社費用、後期の開発費³⁴は当該商品の固定費に計上することが多い。一般管理費に計上する比率が高いと相対的に開発費に計上する比率が下がり当該商品の製造原価は安く見える。これによって、販売価格は下がり商品力は上がるが、企業にとっては会計上の問題である。これによって初期投資額が減るわけではない。研究費と開発費の比率が個別開示されることは殆どないため実際の製造原価を精査することは困難であるが、例えばプレスリリースで開示された投資額とある償却期間前提での総販売台数からクルマあたりの償却費単価と損益分岐点を概算することは可能である。これらをクリアして視点 2 が完了する。

2. 4 経済的側面

2. 4. 1 ICEV

³³ FORD や日産自動車は米 DOE より多額の長期融資を得たことを開示しているが、資本の増加を目的としたものではないため第 1 の視点には該当しない。

³⁴ 研究の進捗によって新商品の事業性がある（会社が定める償却期間内で投資回収が見込める）と判断されたあと、生産設備等直接事業化に関わる費用を開発費とする

以下、ICEV の成功の歴史についてインフラとの関わりから更に詳細に分析する。

ICEV の経済発展は、1908 年 10 月にアメリカで発表された T 型フォードをその起点とすることができる。それまでの馬車や鉄道に代わり、ICEV は新しいインフラ依拠型新商品として誕生した。ガソリンは新しい種類のエネルギーであり、現在の BEV や FCEV と同じようなインフラ問題が生じる危険性があったが、実際にはきわめて順調にインフラ構築が進んだ。その理由は、米スタンダード・オイルにある。当時のスタンダード・オイルは創業以来 37 年を数え、照明・暖房用の灯油を販売するための高度な流通システム（パイプライン→タンク車→タンクワゴン→金属製の缶や木製の樽等）を完成させていた³⁵。しかも、灯油の製造販売会社であったスタンダード・オイルは灯油の副産物として大量のガソリンを生産していたが、揮発性の高いガソリンは照明・暖房用には不向きであり、産業廃棄物に近い存在とみなされていた。

つまり、スタンダード・オイルにとって GRS はお金のかからない産業廃棄物活用事業であり、自動車会社は後顧の憂いなく ICEV 事業に専念することができた。このため十分な ICEV が配備される前でも GRS の収益性は高く、T 型フォード発売から 10 年後（1918 年）には ICEV 登録車 143,000 台³⁶に対して既に 20,000 基の GRS が存在した（Melaina, 2007）。こうした成長をリードしたのは政府ではなく資本の増加を目指した銀行家であり、ICEV の産業生態系がきわめて自然に紡ぎ出されたと言えるだろう（視点 1）。

日本に目を転じると、1945 年に日本の自動車産業が再開してから 10 年後（1955 年）の ICEV 乗用車の生産台数は 20,000 台であったが、ICEV 商用車の生産台数は既に 660,000 台に達していた（図 1 2）。1918 年のアメリカとは多くの事情が違うとはいえ、なぜこれほど短期間に ICEV 商用車の成長が起こったのであろうか。

³⁵ 例えば、照明用灯油需要は 1910 年代に登場したタングステン電球が広く普及するまで旺盛であり、スタンダード・オイルは 1911 年に連邦最高裁から反トラストによる解体命令が出されるまでに成長していた

³⁶ <http://www.fhwa.dot.gov/ohim/summary95/section2.html>

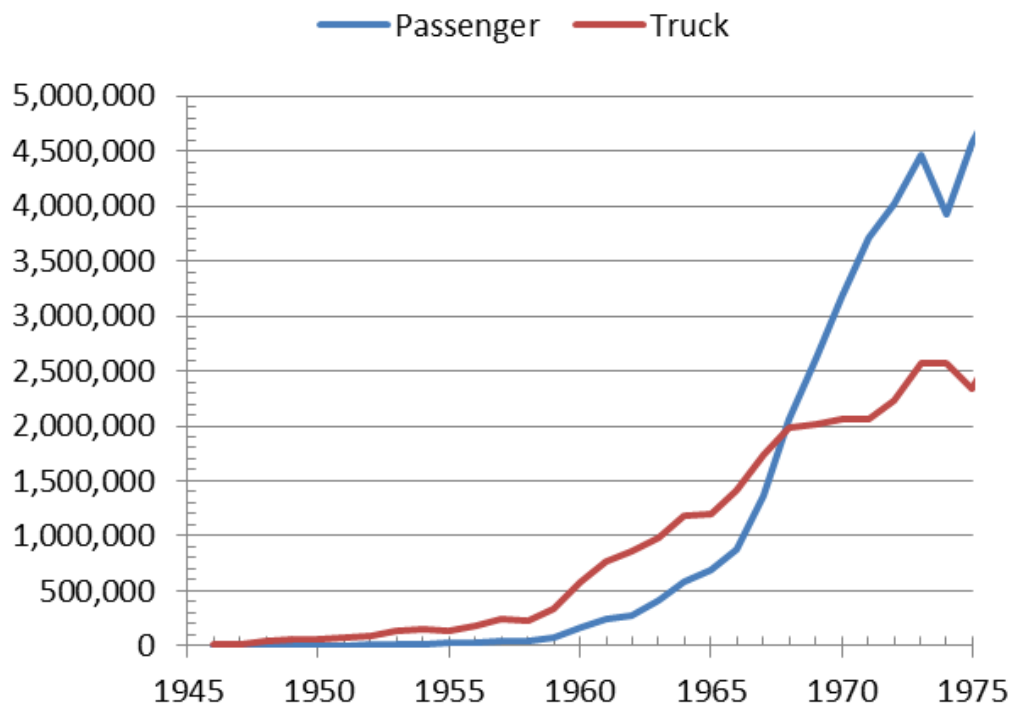


図 1 2 日本の自動車生産台数推移 (台/年)

(出典：国土交通省統計より著者作成)

戦後間もない日本で ICEV 商用車の成長を助けたのが、円筒形の金属タンクに 4 つの車輪と手回し計量器を備えた日本固有の燃料供給イノベーションであるポータブル計量器 (図 1 3) であった。



図 1 3 ポータブル式計量機

(出典：富永製作所)

1950年代の日本はまだ定置式 GRS が普及しておらず、地下タンクが不要で小回りの利くポータブル計量器は広く都市部や地方に行き渡り、高度経済成長期以前の日本の経済を支えた。(Appendix 2 日本におけるポータブル GRS)。その後、1950年10月に民間石油輸入が再開し、定置式 GRS の普及が本格化し、1952年7月に政府統制が撤廃されると石油消費は更に拡大した(表 2)。

表 2 石油消費量の推移

(1952年自動車年鑑 p369 より著者作成)

年度	揮発油	灯油	軽油	重油	合計	(kL/年)
1946	159	49	79	407	694	統制中
1947	250	46	146	744	1,186	統制中
1948	314	58	212	1,029	1,613	統制中
1949	324	64	166	934	1,488	統制中
1950	460	89	241	1,191	1,981	統制中
1951	885	129	374	3,559	3,559	統制中
1952	1,580	147	441	5,763	5,763	統制廃止
1953	2,154	415	598	8,727	8,727	統制廃止
1954	2,323	471	677	8,939	8,939	重油消費規制

1962年以降は定置式 GRS の建設ラッシュが続き(図 14)、GRS 間の過当競争(月間販売量の漸減)が懸念されるようになった。このため通商産業省は1965-1966年度のGRS年間建設数を1,500か所に規制したが、規制解除後の1968年度に約6,000か所に近い建設計画が表面化したため一時建設中止の暫定措置を出し、この結果、GRS 建設数は1968年度3,000か所、1969年度2,900か所に抑制され過当競争の危機は回避された。(視点1)(視点2)

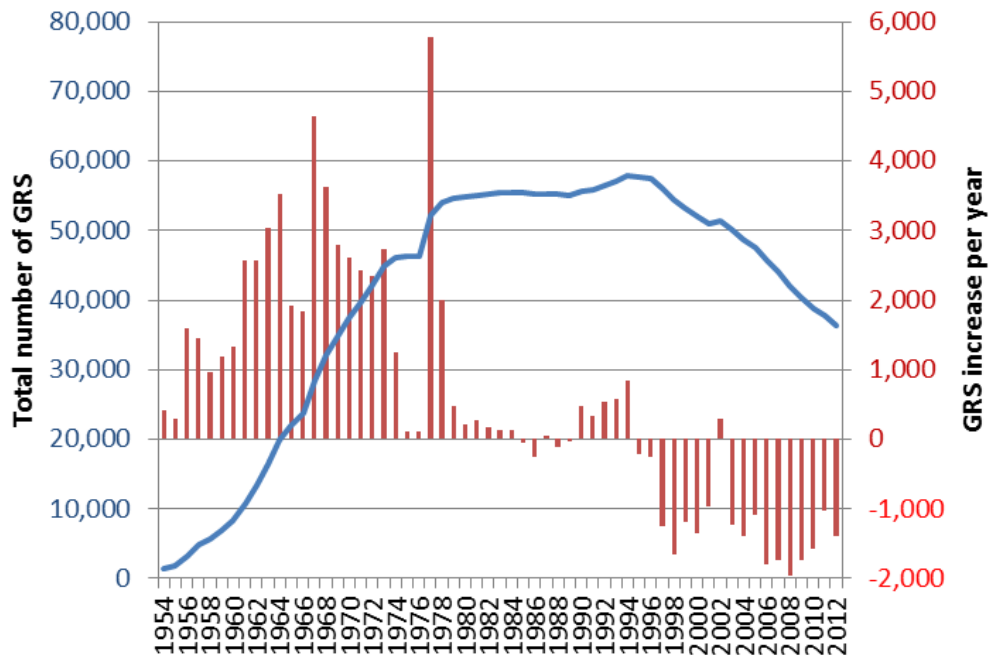


図 14 日本の GRS 数 (青) および年間増加数 (赤)

(資源エネルギー庁総合エネルギー統計より著者作成)

その後、日本は 1973 年に第一次オイルショックを迎えるが、過当競争回避で競争力を取り戻していた GRS 業界はこれを乗り越え、7 年後の 1980 年には日本はアメリカを抜いて自動車生産台数世界一を達成する。民間が過熱する中で、適切なブレーキ役を果たした通商産業省の規制は意義深いものであったと言えるだろう。これ以降、排気ガス触媒や貿易摩擦等の諸問題を乗り越えて現在の ICEV 経済が構築された。日米いずれのケースにおいても政府の役割は推進ではなく中立もしくはブレーキであり、ICEV 経済の進化の原動力は補助金ではなく常に企業家と銀行家が生み出した営業利益であった。このことは今後の ZEV 経済を考えるにあたって示唆に富む。

なお、日本の特記事項としては HEV の成功を挙げることができるだろう。しかし、HEV は既存 GRS インフラを使用できたため「インフラ依拠型新商品」には該当せず、その努力の多くはインフラ構築ではなく HEV 用部品を基本とする産業生態系の再構築にあった。よって、Prius の事例をインフラ依拠型である BEV や ZEV の普及予測に用いることが合理的でないことはいうまでもない。

2. 4. 2 BEV

次に BEV の経済的側面について述べる。自己資金（視点 1）で LEAF を開発した日産自動車は、LEAF の発売とほぼ同時に発表された NISSAN GREEN PROGRAM 2016 においてルノー日産アライアンスで 2016 年までに累計 150 万台の BEV を販売すると発表した。グローバルマーケットの拡大も手伝って発売から 4 年（2012 年 12 月現在）で LEAF を含む BEV の累計販売台数は 15.6 万台に達したが、前記目標の達成は困難とみられている。

日本市場における LEAF の月間販売台数の推移を図 15 に示す。日本市場では販売直後に記録した月間販売台数 2,593 台（2011 年 2 月）をそれ以降一度も超えておらず T 型フォードの販売時とは大きく異なり、図 5 における Low and Stable の傾向を示している。これを前期不振の理由と判断することは早計であるが、少なくとも日産自動車の本拠地である日本においてこうした傾向が現れたことは看過できないだろう。

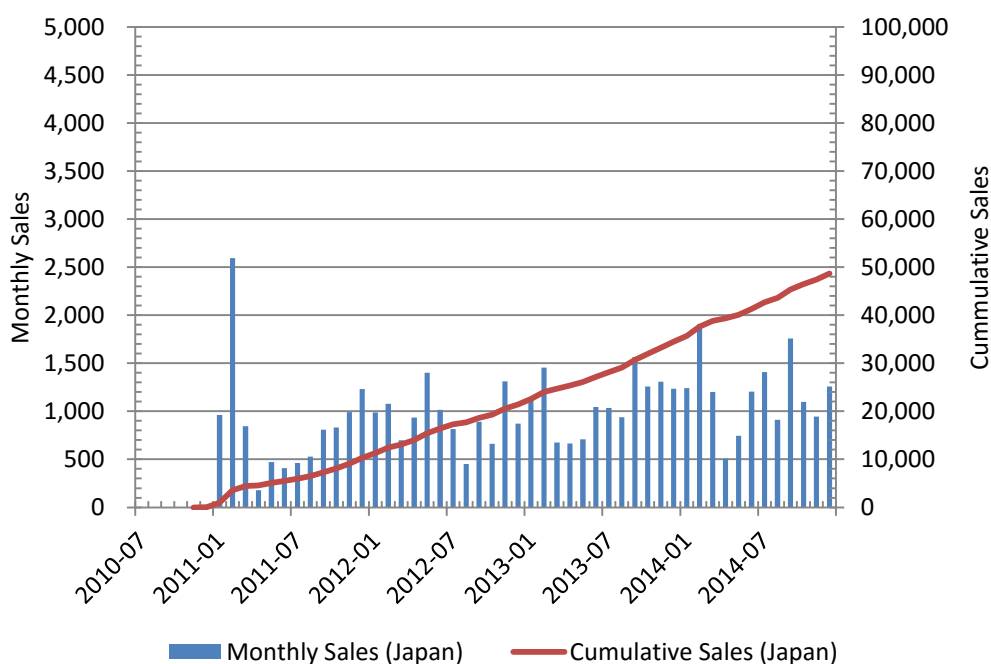


図 15 日本市場における日産 LEAF の月間販売台数および累積販売台数

また、日産自動車は LEAF 発売の前年、2009 年に行われた記者会見で「5,000 億円以上

の投資に加えて 2,000 人以上の従業員が ZEV の開発に従事している」³⁸と発表した。5,000 億円のうち、車両の製造原価に含まれる開発費にどの程度が充当されたかは明らかにされていないが、仮に 5,000 億円全額を累計販売台数 15.6 万台で割ったときの単価は 320.5 万円であり、LEAF(S)の販売価格 273 万 8,800 円を上回る（視点 2）。以上より、BEV 最大手である日産自動車の経済的成功はまだ道半ばといえるだろう。

プレミアム BEV の年間販売台数推移を図 16 に示す。2012 年発売の Tesla Motors Model S や 2013 年発売の BMW i3 とともに順調な販売台数の増加が認められる。このうち投資家から得た資金（視点 1）で Model S を開発した Tesla Motors は実績のないベンチャー企業でありながらアメリカを中心とする富裕層の支持を得て順調に株価を伸ばし、2013 年 5 月 22 日には 2010 年に政府から借り受けた長期融資（ATVM：先端技術車両製造）\$451.8M を 9 年前倒しで返済した³⁹（視点 2）。

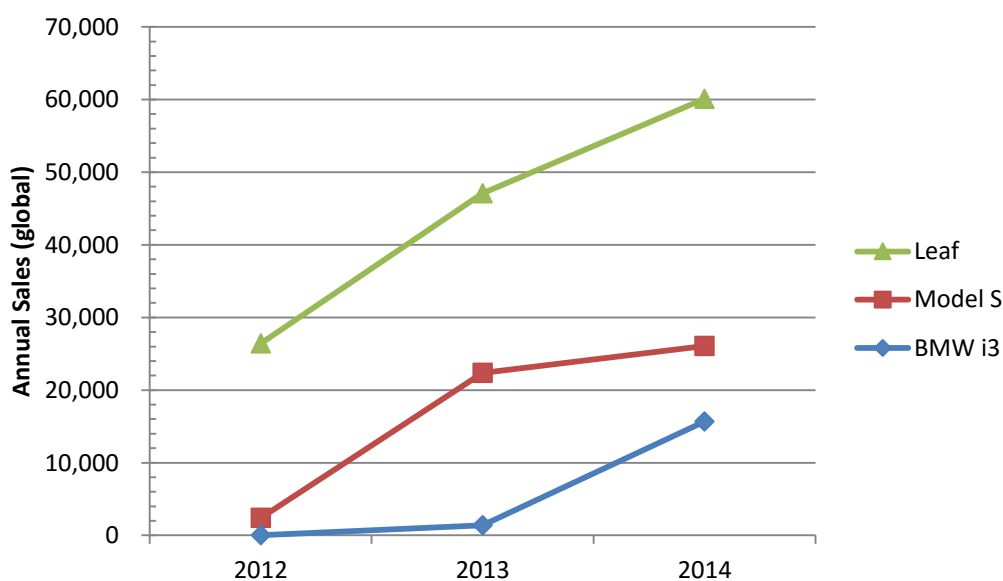


図 16 世界における主要 BEV の年間販売台数推移
 (マークライnズ統計データより著者作成)

しかし、2014 年 12 月決算によると売上高\$3,198M に対して\$2,772 の長期負債があり、

³⁸ 第 41 回東京モーターショー記者会見（2009 年 10 月 21 日）
http://www3.stream.co.jp/web06/nissan/press/JP/META/event_34jp_01-bb.aspx (8:42),
<http://nissan-tms.tumblr.com/post/232760435>

³⁹ <http://ir.teslamotors.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=766747> ATVM の総額は\$8,000M であり、Tesla Motors の他に Ford Motor が\$5,900M、日産が\$1,450M、Fisker Automotive が\$192M を借り受けている

この中には\$759.9M(2019Note)と\$1,050M(2021Note)の転換社債が含まれている⁴⁰。また、Tesla Motors は Daimler 投資部門 Blackstar Invest 等、多くの銀行家から投資を得ているが（視点1）、2010年のNASDAQ上場以来まだ一度も純利益を計上していない（表3）（視点2）。Model S が販売好調とはいえ、視点2が解消され経済的成功と見なせるようになるまでなお時間を要するだろう。その一方で、Tesla Motors は独自の急速充電器⁴¹の世界的な整備や特定顧客のためのバッテリー交換システム⁴²、車載用電池を応用した家庭用蓄電池と太陽電池の組み合わせで効率的な太陽光利用を可能とするパワーウォール⁴³など、単にBEVを販売するだけでなく産業生態系を作ろうとする強い意志を示していること、および、これらが銀行家の監視のもとに進められていることは注目に値する。

表 3 ITEM 6.SELECTED CONSOLIDATED FINANCIAL DATA

(Tesla Motors, Feb 26, 2015 Annual Report)

	Year Ended December 31,				
	2014	2013	2012	2011	2010
	(in thousands, except share and per share data)				
Consolidated Statements of Operations Data:					
Total revenues	\$ 3,198,356	\$ 2,013,496	\$ 413,256	\$ 204,242	\$ 116,744
Gross profit	881,671	456,262	30,067	61,595	30,731
Loss from operations	(186,689)	(61,283)	(394,283)	(251,488)	(146,838)
Net loss	\$ (294,040)	\$ (74,014)	\$ (396,213)	\$ (254,411)	\$ (154,328)

Tesla Motors の Elon Musk CEO は、かつて電子決済サービス PayPal の共同創業者であっただけでなく、現在は NASA に衛星打ち上げロケットを提供する Space Exploration Technologies Corporation (Space X)ほ含め、様々な革新的事業で CEO を努めている。元来の視野の広さで大手自動車会社には困難な事業を推進したと考えると理解しやすい。「郵便馬車をいくら連続的に加えても、それによってけっして鉄道をうることはできないであろう」という Schumpeter の比喩が 100 年後に繰り返されるとしたら、その可能性を最も高く備えるのは Tesla Motors のようなベンチャー企業だろう。

BMW の i3 は、499 万円という価格ながら LEAF より小さい supermini というカテゴリーで 2014 年に 15,655 台を記録している。BMW は元来富裕層顧客を多く持つが、世界初

⁴⁰ <http://ir.teslamotors.com/secfiling.cfm?filingID=1564590-15-1031&CIK=1318605>

⁴¹ <https://www.teslamotors.com/jp/Supercharger>

⁴² <https://www.teslamotors.com/jp/blog/バッテリー交換プログラム試験運用開始>

⁴³ <https://www.teslamotors.com/jp/powerwall>

の炭素複合材料で構成されたアッパーボディに加え、小型ガソリン発電機を搭載したレンジエクステンダー（ガソリン発電機搭載タイプ）も用意されるなど、電動駆動の採用に留まらない総合価値向上に大きな努力が払われているのは、プレミアムブランドならではの視野の広さの現れかも知れない。なお、i3 も LEAF と同様、銀行家ではなく社内資金で初期投資が賄われたと考えられるが、金額は明らかにされていない（視点1）。

その他の BEV としては、2013 年以降に登場した中国製 BEV (BYD e6, QQ3, Zotye E20) が挙げられるが、マークラインズによるといづれも年間販売台数 1 万台以下であった。また、2000 年代初頭に Tesla Motors とともに脚光をあび、同じく DOE からの長期融資を受けた Fisker Automotive は 2013 年に経営破たんし中国資本の傘下となっている。

2. 4. 3 FCEV

BEV の 2014 年世界販売台数は 158,912 台⁴⁴に達し（図 17）、経済的成功としては道半ばながら銀行家と連携した姿も見られるようになった。一方、2015 年の FCEV 世界販売台数は数百台（MIRAI は 2015 年に 700 台生産予定）とされ、日産リーフ初年度販売台数（2011 年、10,310 台）販売台数の 1/10 以下であった。この台数は、2000 年代の技術デモンストレーションと大差ない。この理由として指摘されるのがインフラ依拠型新商品としての FCEV に必須である HRS の配備遅れである。

⁴⁴ マークラインズ統計

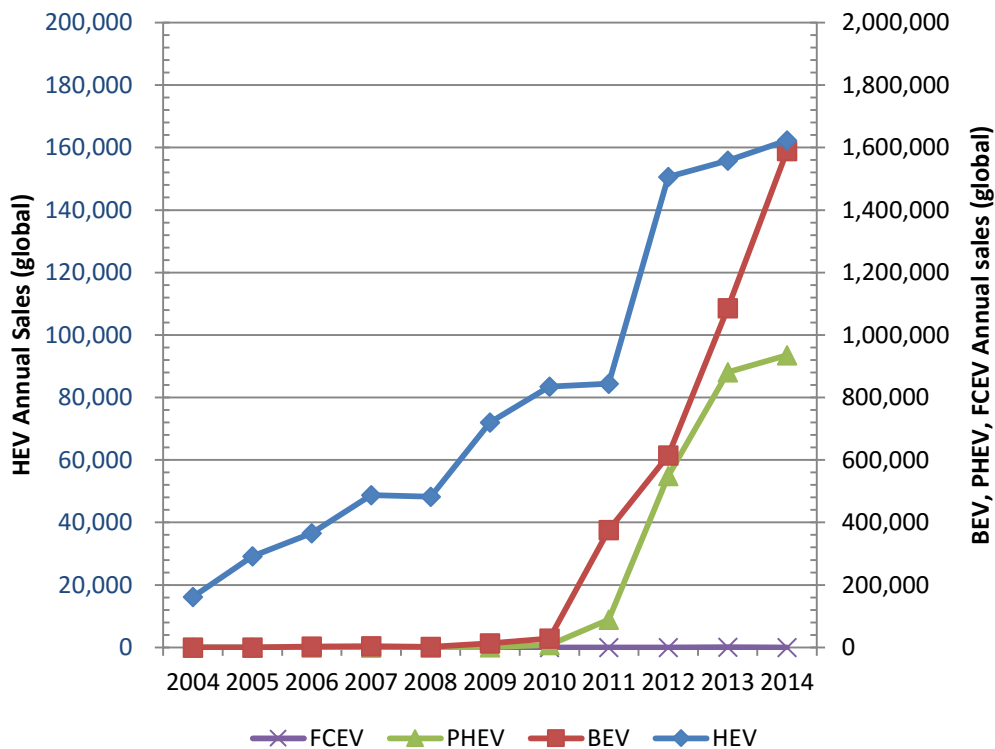


図 17 世界における HEV および ZEV の年間販売台数推移
(マークラインズ統計データより著者作成)

日本政府は2012年4月11日にエネルギー基本計画⁴⁵を閣議決定し、「2015年から商業販売が始まる燃料電池自動車の導入を推進するため、規制見直しや導入支援等の整備支援によって、四大都市圏を中心に2015年内に100ヶ所程度の水素ステーションの整備をするとともに、部素材の低コスト化に向けた技術開発を行う。一方、普及初期においては、水素ステーションの運営は容易ではなく、燃料電池自動車の普及が進まなかった場合には、水素ステーションの運営がますます困難になるという悪循環に陥る可能性もある。こうした悪循環に陥ることなく、本格的な水素社会の幕開けを確実なものとするため、燃料電池自動車の導入を円滑に進めるための支援を積極的に行う。」(p60)、として、HRSへの支援を表明した。これを受けて燃料電池自動車用水素供給設備設置補助事業⁴⁶(表4)が設けられ、「補助対象経費の2分の1と水素供給設備の水素供給能力

⁴⁵ http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf

⁴⁶ http://www.cev-pc.or.jp/hojo/suiso_outline.html

等に応じた補助上限額（著者注：2.8億円）を比べて低い金額」とする補助金を用いたHRS建設が開始された。なお、この時点において銀行家は登場していない（視点1）。

表 4 燃料電池自動車用水素供給設備設置補助事業 補助上限額表

(出典：http://www.cev-pc.or.jp/hojo/suiso_outline.html)

水素供給設備の規模	水素供給能力 (Nm ³ /h)	供給方式	補助率	補助上限額 (百万円)
中規模	300 以上	オンサイト方式 (パッケージを含むもの)	定額	280
		オンサイト方式 (上記に該当しないもの)	1 / 2	280
		オフサイト方式 (パッケージを含むもの)	定額	220
		オフサイト方式 (上記に該当しないもの)	1 / 2	220
		移動式	定額	250
小規模	100 以上 300 未満	オンサイト方式 (パッケージを含むもの)	定額	180
		オンサイト方式 (上記に該当しないもの)	1 / 2	180
		オフサイト方式 (パッケージを含むもの)	定額	150
		オフサイト方式 (上記に該当しないもの)	1 / 2	150
		移動式	定額	180
水素集中製造設備 (供給先水素供給設備 1 設備当たり、ただし 10 設備を上限とする)			1 / 2	60
液化水素対応設備			1 / 2	40
オンサイト方式 : 水素製造装置を敷地内に有する オフサイト方式 : 水素製造装置を敷地内に有さない 移動式 : 充填性能に直接関わる設備を 1 の架台に搭載し移動可能なもの パッケージ : 主要設備を 1 又は 2 の筐体に内包した設備形態のもの 水素集中製造設備 : 供給先水素供給設備に、水素を集中的に製造及び供給する 液化水素対応設備 : オフサイト方式設備のために液体水素を受け入れ供給する 水素供給能力 : 燃料電池自動車等への平均的な水素供給能力				

前記事業が想定する HRS の水素供給能力は 300Nm³/h (中規模) である。燃料電池シス

テム等実証研究(第2期 JHFC プロジェクト) 報告書(以下、JHFC 報告書)⁴⁷によると、300Nm³/h の HRS の設備費 3.63 億円あり、1,340 台の FCEV に水素供給する能力があるとされている。企業会計では、HRS のような高額な設備を導入する際、その全額を建設年度に費用化するのではなく、その設備が使用可能な期間(前記報告書では 10 年間)にわたって費用化したとみなす「減価償却」という主段が用いられる。減価償却費を含め、顧客数が減少しても総額は変わらない費用を固定費という(減価償却費、労務費、土地代、保険代等)。JHFC 報告書によると、HRS の償却期間は 10 年で、10 年間の固定費総額は 6.9 億円であった。また、水素販売価格から税金と利益を除いた水素製造単価はハイブリッド自動車と同程度のランニングコストを実現可能な 77.4 円/Nm³(内訳は固定費 45.3 円/Nm³、変動費 32.1 円/Nm³)であった。すなわち、1,340 台とは、HRS の水素供給能力を示すとともに、HRS から水素製造単価 77.4 円/Nm³ 以下で水素を購入するために必要な最低顧客数という意味を併せ持つ。

このため、例えば FCEV 顧客数が 1,340 台から 494 台に低下すると水素製造単価は 77.4 円/Nm³ から 155 円/Nm³(= 32.1+45.3/494*1,340)に倍増する。トヨタ MIRAI の 2015 年度国内販売計画が 400 台⁴⁸であることを考えると、HRS あたり FCEV494 台はかなり実現困難な台数であり、このため市場初期の水素製造単価が高騰しやすいか、換言するといかにハイブリッド自動車と同程度のランニングコストが実現しにくいのか、を理解しやすいであろう。これでは、銀行家が参画の理由を見つけられないことは言うまでもない(視点 2)。

⁴⁷ <http://www.jari.or.jp/portals/0/jhfc/data/report/index.html>

⁴⁸ <http://newsroom.toyota.co.jp/jp/detail/4197769/>

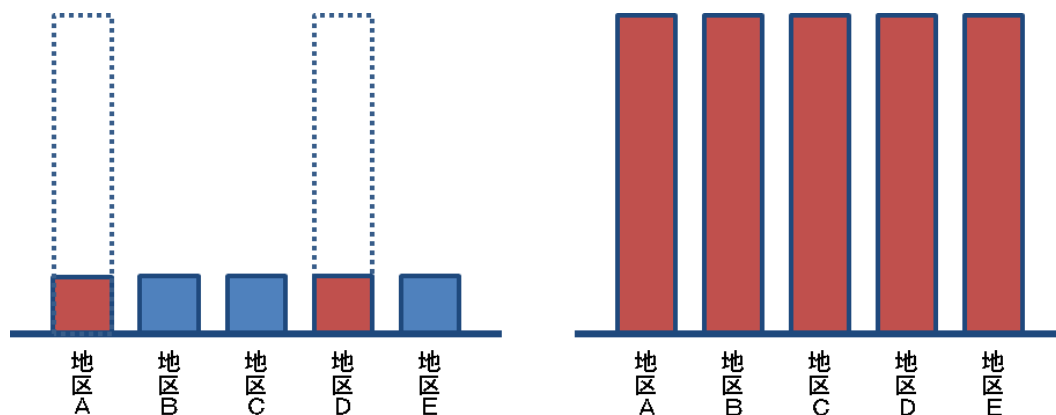


図 18 需要と供給の概念図 (現状)

(左 : HRS、右 : GRS)

ここで、グラフの高さは水素需要もしくは水素供給能力を表している。赤は需要が満たされた状態、青は供給手段がないため水素需要が顕在化していない状態⁴⁹、点線は水素需要に対して水素供給能力が大きく、HRS 利用率が計画より低下している状態を示している。すなわち、図 18 の問題は、HRS の①過大能力、②過少配備にある。

H2Mobility の理論的背景となった 2010 年の McKinsey 報告書⁵⁰でも同様の結論が示されており、ドイツにおける初年度 HRS 利用率は 21%とされた (図 19)。この報告書で 2010-2020 年の HRS の姿として想定されたのは、2つのディスペンサー、400kg/day の水素供給能力を持つ Small station であり、1日あたり 70-100 台の FCEV に水素供給可能とされている。400kg/day は、JHFC 報告書の稼働時間前提 13h/day で換算すると 345Nm³/h (=400*11.2(Nm³/kg)/13h)に相当し、JHFC の HRS とほぼ同程度の能力である。Small station という命名にはやや御幣があるだろう。

HRS 利用率 21%を日本の HRS に適用すると FCEV 顧客数は 281 台であり、水素販売量の低下によって水素製造単価は 248 円/Nm³ (=32.1+45.3/281*1,340)に高騰する。これは HEV のランニングコスト達成に必要な水素製造単価 77.4 円/Nm³ の約 3 倍である。銀行家が懸念を示すのに十分な理由と言えるだろう (視点 2)。

⁴⁹ 具体的には、FCEV の購入を希望する富裕層が存在しても、近隣に HRS が配備されていないため購入に至らないケースを意味する

⁵⁰ http://www.europeanclimate.org/documents/Power_trains_for_Europe.pdf (2010/11/05)。なお、ドイツにおける HRS 配備も遅れが続いており、2014 年現在において利用率 45%の HRS は存在していない。

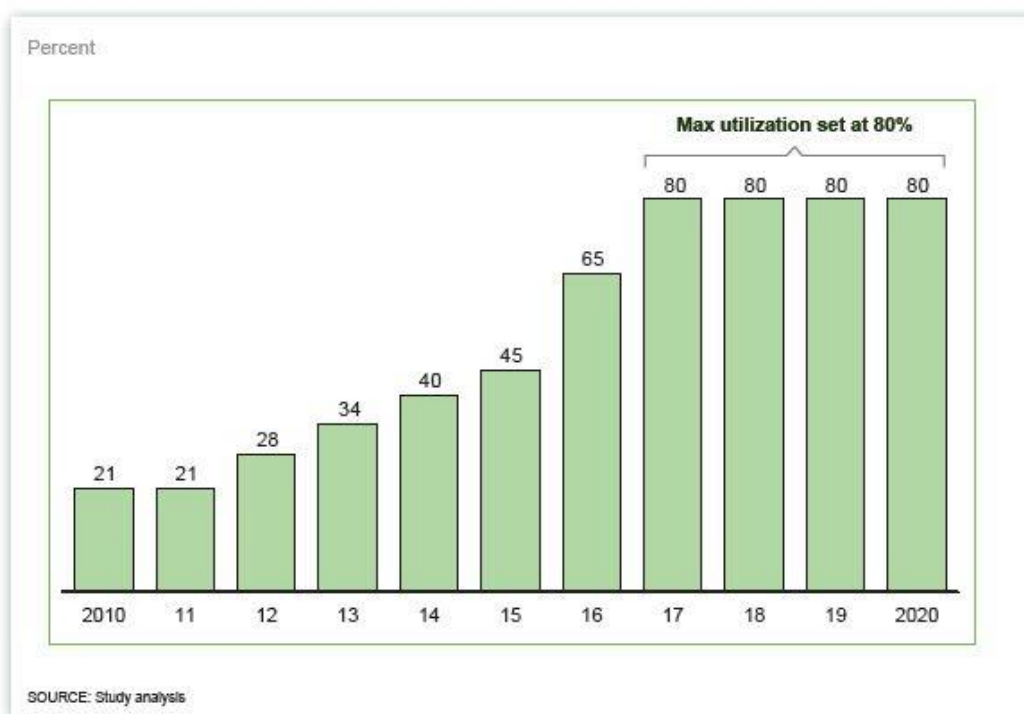


Exhibit 49: Average utilisation rate of hydrogen refuelling stations

図 19 A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis

こうした懸念を防ぐ対策として容易に考えられるのは、

①水素需要に応じて水素供給能力を最適化させ、HRS 利用率を 100%に近づける

②水素需要の取りこぼしが生じないように、①の HRS を多数配備する

である。図 20 に、対策案を示す。ここで、点線は水素需要に対する水素供給能力の過剰が殆どなく、HRS 利用率が改善している状態を示している。また、こうした HRS の配備数が増えることで全体としての FCEV 需要が増えることを示している。

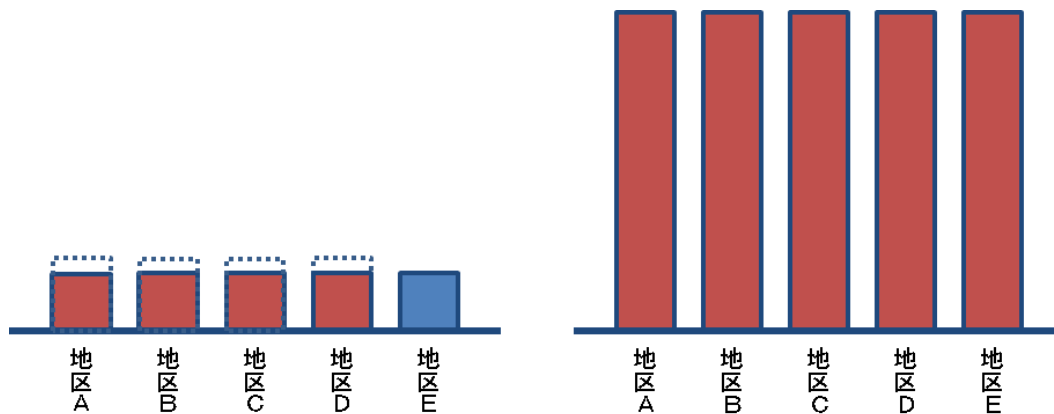


図 20 需要と供給の概念図 (対策案)

(左：HRS、右：GRS)

日本では図 20 のような対策案は採用されず、図 18 が実行に移された。これは、アメリカ・ドイツ・韓国・北欧諸国における状況も同様である。その一方で、2010 年にフランスで Symbio FCell⁵¹ という燃料電池ベンチャーが創立され、各国の大手自動車会社とは異なる FCEV/HRS ビジネスモデルが提案された。それが、FCEV と HRS を別々の事業として見るのではなく、一つのパッケージとして過不足のない合理的な需給バランスを取ることで経済的成長を目指すというビジネスモデルであり、欧州では Captive Fleet Approach もしくは Tupperware Business と呼ばれている。Tupperware とは 1946 年に考案された米 Tupperware 社製密封容器の登録商標であるが、様々な食材を入れた弁当箱というイメージは前記ビジネスモデルの特徴をよく表していると言えるだろう。

ここで用いられる FCEV は、100kW 級のいわゆるフルサイズ FCEV ではなく、市販 BEV 商用車 (Renault Kangoo Z.E.) に航続距離延長用の 10kW 級燃料電池を搭載したいわゆる Fuel Cell Range Extender Electric Vehicle (FCRE-EV) であることを特徴とする。仏 Renault 製 BEV 商用車 (Kangoo Z.E.) をベース車両として用いることで巨額の車両開発費を不要とし、かつ、白金搭載量もフルサイズ FCEV (100kW) の 1/10 であることから固定費・変動費とも大幅に安いという特徴を持つ。搭載する 10kW 級燃料電池はフランス原子力代替エネルギー庁 (CEA) が開発したものであり、ソフトウェア技術についても CEA の技術と人材を効果的に活用している。

⁵¹ <http://www.symbiofcell.com/en/>

相対的に FCEV 価格に対して経済的余裕が乏しい現在の顧客も 1950 年代の日本のようにまず商用車を活用するだろうという読みから高速走行が不必要な商用車に狙いを絞り、FC スタックのダウンサイジングと BEV では困難な冬季暖房を武器にニッチ市場を切り開いた。レンジエクステンダー用 FC スタックはガソリン発電機のように一定出力で運転されるため負荷追従応答用の補機も必要ない。この結果、FCEV の一種でありながら車両代・燃料代・電気代・保険代・HRS 償却費など 5 年間の総保有コスト (Total Cost of Ownership: TCO) でディーゼル商用車とほぼ対等⁵²という低コストを実現した。この FCRE-EV は 2016 年に 1,000 台の生産を目指すとされている。

Symbio FCell が想定する FCRE-EV の業態には、配送やタクシー等が含まれる。一般に商用車の年間走行距離は乗用車より長く、1 日あたり走行距離の乗用車より平準化しており、かつ、不特定多数の顧客が一度に HRS を訪れることもないため、水素ディスペンサー、水素蓄圧器、水素ディスペンサー等に余計を設ける必要はない。しかも、これらの商用車は必ず自らの拠点である営業所に設置された HRS を利用するため、計画的な減価償却が可能である。更に、業態によっては昼夜を通した水素充填も可能であり夜間も減価償却を進めることが出来る。こうした HRS は FCEV 乗用車のためのいわゆる「余剰能力 HRS」に対して「最適能力 HRS」と呼ぶことができる。Symbio FCell は最適能力 HRS を仏 Air Liquide、デンマーク H2Logi などと開発し、フランスから欧州各国にその拠点を増やしつつある。すなわち、対象顧客を一般乗用車顧客から営業所に設置を拠点とする一群の FCEV 商用車に転換することによって、損益分岐点を大幅に低減したビジネスモデルといえるだろう。

このビジネスモデルはフランス大統領府の支援のもと H2 Mobility France の基本方針⁵³として欧州政府燃料電池水素共同実施機構 The Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH-JU)の主要プログラムの一つである H2 Mobility Europe に採択され、2016 年に 1,000 台の配備を目指す⁵⁴とされている⁵⁴。Symbio FCell は欧州全域へのビジネス展開を計画⁵⁵するとともに、建設機械用・非常電源用・船舶用など HRS 配備律速が発生しない様々な分

⁵² 1 台あたりの TCO ギャップ (FCRE-EV とディーゼル商用車の差) は 200 台規模で 5,000€, 2,000 台規模でゼロとされる。http://www.afhypac.org/images/documents/h2_mobilit_france_en_final_updated.pdf

⁵³ http://www.afhypac.org/images/documents/h2_mobilit_france_en_final_updated.pdf

⁵⁴

<http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/H2ME%2520launch%2520-%2520Press%2520release%2520-%252024.09%2520-%2520EN-2.pdf>

⁵⁵ <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464285915301747>

野で多くの企業とコラボレーションを実施している。こうした活発なマーケティングを背景に 2014 年 5 月には Michelin が発行済み株式の 1/3 を所有するに至った⁵⁶。Michelin は銀行家ではないが、資本の増加を目的とした投資を行っていることからこれに準ずると考えて良い（視点 1）。

Symbio FCell 創業者である Fabio Ferrari CEO、Pierre-Yves Le Berre VP は、ともに自動車業界ではなく異業種（テレコム）の出身という点で Tesla Motors の Elon Musk CEO のキャリアと類似している。彼らの戦略のコアは燃料電池技術そのものではなく、燃料電池技術を含む「産業生態系」の構築にあると言って良い。このための方法論として FCEV 乗用車に固執することをやめ、FCEV 商用車と HRS のパッケージに注目することで FCEV 乗用車では不可避である需給問題を解決した。Symbio FCell のビジネスモデルが本格化するのには 2016 年以降であるが、どのような形で投資回収が進むかが注目される（視点 2）。

2. 5 技術的側面

ここで、改めて ICEV に対する BEV、FCEV の価値（魅力）について整理したい。

まず、BEV、FCEV が、現在 ICEV が市場で担っている運用形態をどれだけトレースできるかを、プロダクト要因（プロダクト・イノベーション）、プロセス要因（プロセス・イノベーション）、インフラ要因、の 3 つから比較した結果を表 5 に示す。ここで、ICEV と BEV は同じベース車両を用いた日産 NV200 と e-NV200、FCEV はトヨタ MIRAI を参照した。

⁵⁶ <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464285914701749>

表 5 ICEV と ZEV の比較 (1)

(ICEV:日産 NV200 VX、BEV:日産 e-NV200 VX、FCEV:トヨタ MIRAI)

大項目	小項目	ICEV	BEV	FCEV
プロダクト要因	航続距離	○ 770km	△ 190km	○ 650km
	燃料重量	○ 24→0kg ⁵⁷	△ 294kg ⁵⁸	○ 88kg ⁵⁹
	燃料補給時間	○ 3min	△ 30min	○ 3min
	ランニングコスト	○ 6yen	◎ 1.5yen	○ 6yen
	ゼロエミッション	×	○	○
プロセス要因	量産価格	○	△	△
インフラ要因	燃料補給利便性 (現在)	○	△	×
普及見込み (現在)		○	△	×

プロダクト要因は、BEV がランニングコストを除く全項目で ICEV に劣るのに対して、FCEV は全項目で ICEV と対等であった。この点は、先に示した日本の CNGV 普及事例との大きな相違点と言えるだろう。

プロダクト要因の詳細を比較するためエネルギー重量 (燃料重量) あたり航続距離を比較した結果を表 6 に示す。エネルギー重量 (燃料重量) は、ICEV ではガソリン重量、BEV と FCEV は輸送に対する負荷という観点からバッテリー ($E=mc^2$ から逆算された重量ではない) および水素タンク重量 (水素重量ではない) としている。エネルギー重量 (燃料重量) 1kg あたりの航続距離は、ICEV・BEV・FCEV でそれぞれ 27km/kg・0.64km/kg・7.4km/kg であり、BEV に対して ICEV は 40 倍以上、FCEV も 10 倍以上の航続距離がある。

表 6 ICEV と ZEV の比較 (2)

大項目	小項目	ICEV	BEV	FCEV
	車両重量	1220kg	1520kg	-
	最大積載量	600kg+2 名	550kg+2 名	-
	最大車両重量	1930kg	2180kg	-
	燃料重量あたり航続距離	27km/kg	0.64km/kg	7.4km/kg
	ICEV 比	100%	2%	27%
普及見込み (現在)		○	△	×

バッテリーの高性能化は年々進んでいるが理論的に 10 倍以上の改善は困難である。仮

⁵⁷ 24kg = 650km / 20(km/L) x 0.75(kg/L)

⁵⁸ <http://www.nissan-techinfo.com/refgh0v/og/FRG/2011-Nissan-LEAF-FRG.pdf>

⁵⁹ 5.0kg-H2 = 88kg-Tank x 5.7%:

https://www.toyota.co.jp/jpn/sustainability/environment/ecopro/2014/pdf/zero/hydrogen_tank.pdf

に、e-NV200で650km走行に必要なバッテリー重量を単純計算で求めると1005kgであり、e-NV200の最大積載量が550kgであることを考えると車両補強なしで1005kgを搭載できたとしても、積荷の2倍に相当するバッテリー重量が燃費・走行性・安全性を著しく低下させることは言うまでもない。

プロセス要因とは、同じプロダクトを製造するための設備投資をいかに減らし、同じ設備投資額でいかに生産台数を増やすか、すなわち、いかに安く作るかを意味する。ここで、車両価格は過剰期待の影響の受けやすさによって①初期価格（過剰期待の影響を受けやすい：顧客数を多く見積もりすぎて設備投資を行ったあと顧客数が充足できずに減価償却費が高騰）と②量産価格（見積もりどおりの顧客数で計画通りの減価償却費が実現したときの理想価格）に分けて考えることができる。BEVとFCEVの量産価格はMITレポート”On the Road in 2035” (Bandivadekar, et al., 2008)等で詳細に分析されているが、図21によると、2035年時点でもBEVとFCEVの量産価格はICEVより高価であるとされている。しかし、その差はわずかであるため本研究では△とした⁶⁰。

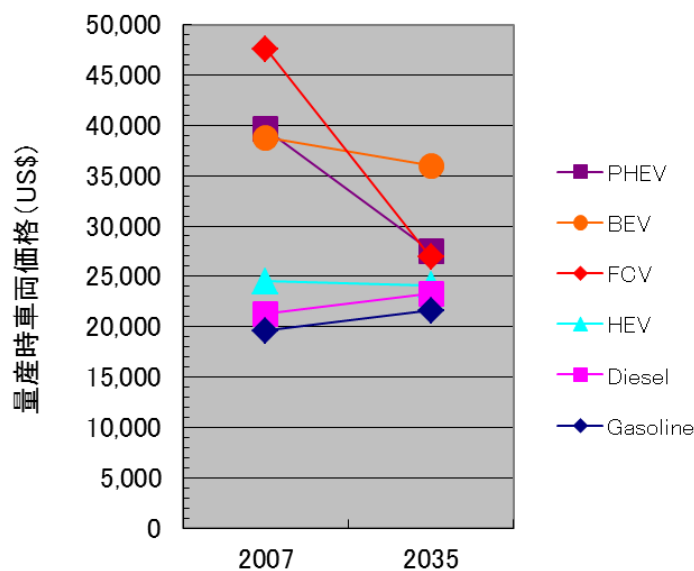


図 2 1 量産時車両価格

(MIT レポート (Bandivadekar, et al., 2008)より著者作成、
PHEV は Plug-in Hybrid Electric Vehicle を表す)

⁶⁰ 2 次元部品革命の進展に伴い大幅に縮小することが期待される [長谷川, 2016]。

一方、インフラ要因は前述のとおり BEV が△、FCEV が×である。これによって普及見込み（現在）は BEV が△、FCEV が×と判断した。以上より、ICEV に対する BEV と FCEV の技術的側面について本研究では以下のように考える。

- 地球規模の問題解決のために ICEV と置き換えを行う主体は FCEV である
- BEV はランニングコストを生かした用途で FCEV と棲み分けられる
- BEV の配備遅れはプロダクト要因とインフラ要因に起因する
- FCEV の配備遅れはインフラ問題に起因する

2. 6 まとめ

表 7 に、ICEV と BEV および FCEV の経済的成功についてまとめた結果を示す。

大手自動車会社の BEV および FCEV は視点 1、視点 2 のいずれも NO であり、独自資金での成長を目指しているが投資回収には至っていない。一方、ベンチャー企業の Tesla Motors と Symbio FCell は大手自動車会社とは異なる戦略を歩み始めた。プレミアム BEV 乗用車、FCEV 商用車(FCRE-EV)と狙いは異なるが、銀行家の支援（視点 1）を受けながら視点 2 の実現を目指している。

表 7 ICEV と ZEV の経済的成功

	視点 1	視点 2	経済的成功
ICEV	YES	YES	YES
BEV (TESLA)	NO YES	NO (NO)	NO NO
FCEV (Symbio FCell)	NO YES	NO (NO)	NO NO
視点 1 : 銀行家が資本の増加を目的とした投資を行っているか 視点 2 : 個別の新結合で投資回収が完了したか			

BEV の普及は進んだが、個別マーケットで普及率 100%に向けた動きは見えていない（図 15）。ルノー日産アライアンスは 2016 年までに累計 150 万台を目標としているが、

2015年6月の累計は25万台であり⁶¹、想定の1/6の普及速度となっている。これが損益分岐点を超えているか否かは明らかではない。BEVの潜在普及率がICEVを置き換えるほどを高いか否かについては、改めて整理する必要がある。

FCEVの普及も同様であるが、プロダクト要因（プロダクト・イノベーション）はICEVと比較して遜色ないことを確認した。プロセス要因は本研究の範囲を超えるが、少なくとも燃料電池スタックについては遜色ないと考える⁶²。

FCEVのプロダクト要因・プロセス要因については2011年迄に著者が所属する日産自動車株式会社総合研究所において解決の目途が立ったが、インフラ要因がその商業化を阻む結果となった。これを受けて2012年よりインフラ要因の分析と対策に向けた研究を開始した。以上が本研究の背景である。

⁶¹ <http://www.nissan-global.com/JP/NEWS/2015/STORY/150624-02-j.html>

⁶² 「Appendix 5 電動駆動機関のプロセス・イノベーションと量産価格」を参照されたい。プロダクト要因・プロセス要因に関する研究成果の一部は下記の雑誌・会議等で公表済み、または公表予定である。

<http://sunjet-project.eu/content/eu-japan-symposium-presentations>

<http://in-japan.no/energy2015-day2/files/2015/04/ESW-2015-Hydrogen-session-May-28-v21051.pdf>

<http://www.white2015.com/program/speakers/>

[長谷川, 2016]

3. 理論

3. 1 フレームワーク

本研究は、単に安くて高性能な FCEV を販売することではなく、FCEV の産業生態系を構成する産業界（自動車、部品、材料、修理、エネルギー、保険、物流等）、政府、アカデミアがいかに早く FCEV および HRS 市場を確立するための課題を抽出し、適切なマネジメントを見出すことを目的とする。本章ではこれを効率的に導くためのフレームワークを考える。具体的には、各アクターのモチベーションを、技術開発にフォーカスした内向的なもの（現在）から、産業生態系の構築にフォーカスした外向的なもの（将来）に転換するため、このフレームワークを用いることで必要なマネジメント指針を明らかにし、かつアクター間のコミュニケーションにおいて実務的に利用可能なフレームワークを作ることを目的とする。

単独の産業や会社を超えた相互協力を促す社会的フレームワークの構築、を目的とした取り組みとして *System-level Innovation* が注目されている (Suurs, Hekkert, Kieboom, & Smits, 2010)。System-level Innovation では、産業生態系を構成する複数のアクター（産業界、政府、アカデミア等）が相互協力を成功させるために必要な知識をどう得るかを明らかにすることで、適切に組織されたインフラのもと、目的とする経済成長が実現されることが期待される。ここで、アクターと組織の相互支援的仕組みを *Technological Innovation System (TIS)* と呼ぶ。TIS について、Carlsson と Stankiewicz は次のように定義している。“A network of agents interacting in the economic/industrial area under a particular institutional infrastructure and involved in the generation, diffusion and utilization of technology” [p.94] (Carlsson & Stankiewicz, 1991)。

これまで、オランダの研究者を中心に *System-level Innovation* の様々なフレームワークが提案されており、例えば、風力発電、太陽光発電、バイオマス、水素、コジェネレーション、天然ガス自動車、CCSなどを挙げる事が出来る⁶³。しかし、これらは基本的に本研究のような「ゼロからの市場創出」は想定しておらず、既にゼロから立ち上がった新興市場における人的コミュニケーションに主な関心が向けられている。TISのうち最も代表的なものが Suursらの表 8であるが、この構成に人的コミュニケーションへの関心の高さを伺う事が出来る。これは、「ゼロからの市場創出」を分析する機能がアカデミ

⁶³ 他の著者から様々な TIS が提案されている： (Liu & White, 2001) (Jacobsson, Sanden, & Bangens, 2004)

アにないことが理由ではなく、ゼロから立ち上がった後でなければ社会科学を適用するに足る情報が入手できないという、一種の因果性のジレンマによるものであろう。

表 8 Technological Innovation System with 7 system functions

(出典：(Suurs, Hekkert, Kieboom, & Smits, 2010))

Function 1	entrepreneurial activities
Function 2	knowledge development
Function 3	knowledge diffusion through networks
Function 4	guidance of the search
Function 5	market formation
Function 6	resources mobilization
Function 7	creation of legitimacy

たとえば、Function 1 と Function 2 は研究開発や新商品開発に従事するアクターが備えるコンピテンシーであり、特に強調する理由はないだろう。同様に、Function 3 は Function 2 の前提、Function 4 は Function 1-3 の手段であり、これらも同様である。すなわち、インフラ依拠型新商品である燃料電池自動車市場創出に向けた自動車産業にとって Function 1 から 4 はいずれも本質的に備える Function であり、本研究のフレームワークではこれらを除外することとした。Function 5 は本研究の中心概念であり、Function 6 はディーラーチェーンやサプライチェーンの構築に該当する。Function 7 は政府とのかかわりを示すものであるが、経済とは無関係な議論や合法性(legitimacy)に関する重要な議論は行われるとしても、本研究は資本の増加を目的とした投資を行わない政府を銀行家とはみなさない。よって、Function 5 と Function 6 は導入し、Function 7 は除外することとした。

以上の考察を踏まえ、Suurs らの表 8 と、Schumpeter の「新結合の遂行にかかわる五つの場合」(表 9) を参考にしながら、自動車産業のインフラ依拠型新商品に特化した本研究におけるイノベーション・フレームワークを構築した。表 10 に結果を示す。

表 9 新結合の遂行にかかわる五つの場合

(出典：(Schumpeter, 1934)第二章を元に著者作成)

1	The introduction of a new good
2	The introduction of a new method of production
3	The opening of a new market
4	The conquest of a new source of supply
5	The carrying out of the new organization

表 10 自動車産業のインフラ依拠型新商品に特化したイノベーション・フレームワーク

	Innovation Category	Main body	Objective	Related TIS functions
1	New product	Automotive firms	Automotive firms	F1, F2, F3, F4, F6
2	Process innovation	Automotive firms	Automotive firms	F1, F2, F3, F4, F6
3	Supply chain	Automotive firms	Parts suppliers	F3, F4, F6
4	Demand creation	All actors	Customers	F3, F4, F5
5	Refueling stations	Energy companies	Customers	F1, F2, F3, F4, F6

TIS が既に市場が立ち上がった新興市場における人的コミュニケーションを重視するのに対して、本研究は市場が立ち上がる以前にこれに必要なアクターが所属する基本組織(Main body)とその対象組織(Objective)との経済的コミュニケーションのあり方を重視する。特に、顕在化しにくいアクター（部品、材料、修理、保険、物流等）を顕在化しやすいアクター（自動車、エネルギー、政府等）と結びつけるために必要なマネジメントを可視化することを目的とする。複数の FIS Functions が個々の Innovation Category に関連付けられているのはこうした背景の違いを示している。

結果的に、表 10 は表 9 に近い構成となったが、Innovation Category 間の関係については大きく異なる。すなわち、表 9 は自動車産業だけでなくイノベーション全般を含むよう幅広く提案されたため Innovation category 間に特定の関係はない。個々の Innovation Category は or の関係にあるといだらう。

一方、表 10 は自動車産業のインフラ依拠型新商品に特化しており、Innovation category 間には特定の関係がある。すなわち、新商品を意味するカテゴリー1、需要を意味する category 4、インフラを意味する category 5 は、いずれもインフラ依拠型新商品にとって本質的に必要な category である。よって、これらは and の関係にある。一方、新製

法を意味する category 2、サプライチェーンを意味する category 3 はいずれも category 1 に従属すると言って良い。このため、1、4、5 の集合に対して 2、3 は or の関係にある。数式 1 に、これらの関係を示す。

数式 1

$$(\#1 \cap \#4 \cap \#5) \cup \#2 \cup \#3, \#1 \cap \#4 \cap \#5 \neq \emptyset$$

図 2 2 に、本研究のフレームワークを用いた ICEV における Innovation category の推移を示す。ここで、図の横軸は表 1 0 の Innovation category、縦軸は新商品の成熟度を意味する Business Maturity Level (BML) を表す。また、BC は Business Criteria、すなわち商品化を達成した状態、MD は Maximum Diffusion、すなわち地球規模で普及率 100% を実現した状態、を表す。ダイアグラムの左半分は 1915 年、右半分は 2015 年を表す。

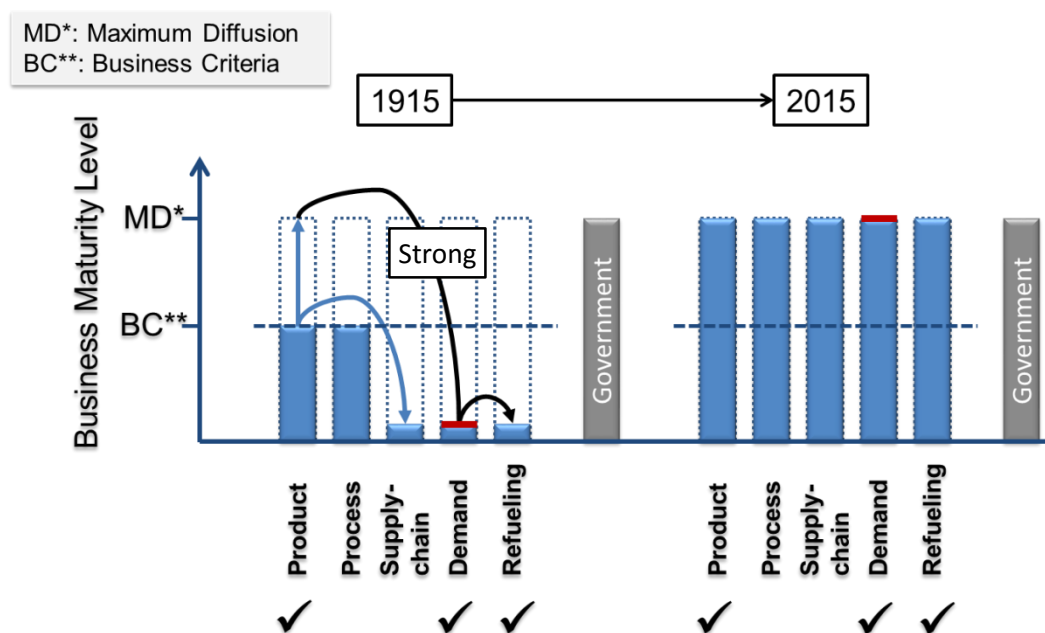


図 2 2 ICEV における Innovation Category の推移

1915 年は、前述のとおりアメリカにおいて馬の登録頭数と自動車の登録台数が拮抗した年であり、T 型フォードが発売されて 8 年目の年でもある。発売されたばかり (BC) の T

型フォードは成熟した商品(MD)ではなかった。しかし、過去の輸送手段(馬、馬車、鉄道馬車等)に対するプロダクト要因としての優位性は明らかであり、顧客に直接的価値(経済的利益)を示して ICEV 需要を引き起こすに十分な求心力を備えていたと考えられる。プロダクト要因の求心力は、自動車製造業に直結する部品や材料だけでなく、修理・エネルギー・保険・物流等に及び、2015 年に至る産業生態系全体の構築を促した。

インフラ要因も恵まれた環境にあった。ICEV の場合、その発売前から灯油の副産物として大量のガソリンが生産されており、スタンダード・オイルが全米に張り巡らせた灯油供給流通システム(パイプライン→タンク車→タンクワゴン→金属製の缶や木製の樽等)の末端の缶や樽の中身をガソリンに置き換えるだけで最低需要は満たされた。プロセス要因についても、ムービング・ベルトによる流れ生産という新しいプロセス・イノベーションは製造固定費と損益分岐点の大幅な低下をもたらし、ICEV の製造原価を低減することでプロダクト要因の求心力を増強した。

結果的に、プロダクト要因の求心力と、インフラ要因の利便性を目の当たりにした銀行家が自律的市場創出に参加することで ICEV 経済成長を推進させた。すなわち、ZEV に対してあらゆる点で恵まれた ICEV 市場は、顧客が BML の成長を見通すことができる予測可能な市場(predictable market)であり続けたと言えるだろう。

以上のカテゴリー推移において、Suurs らが Function 7 として強調した政府は現れていない。2 章で述べた通り、かつて日本政府は年間建設数の規制や一時建設中止の暫定措置等を出すことによって GRS 産業を過当競争から救ったが、これが行われたのは 1960 年代であり 1950 年代に何等かの役割を果たすことはなかった。これは、本研究の視点 1・視点 2 で政府を銀行家から除外した別の説明でもあり、本研究でいう人工進化と自然進化を分けるひとつのポイントでもある。

次に、FCEV におけるイノベーション・カテゴリーの推移を図 23 に示す。

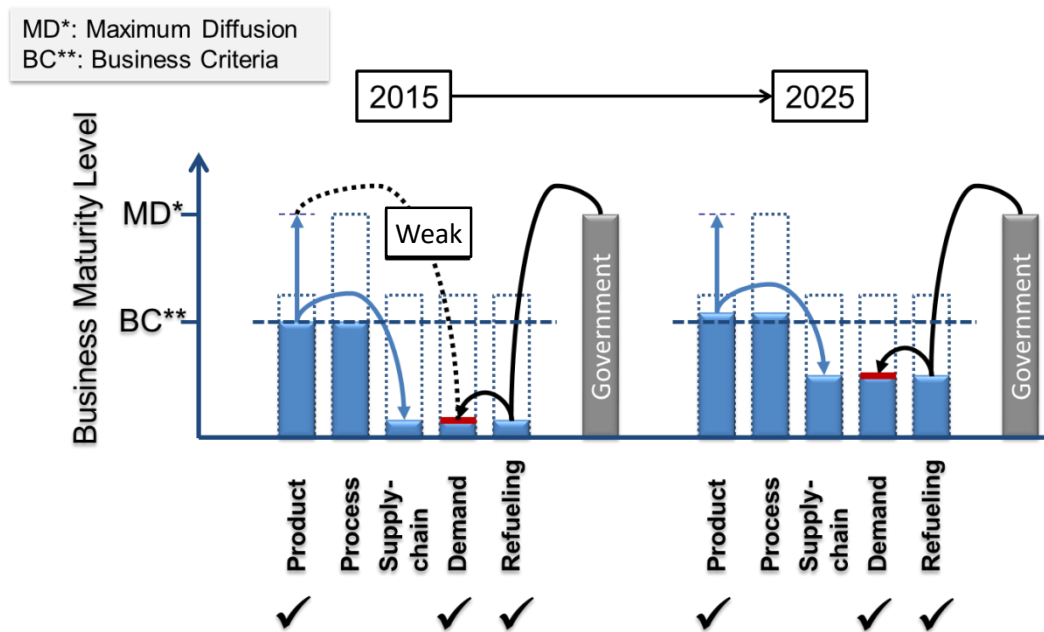


図 2.3 FCEV における Innovation Category の推移

2015 年はトヨタ MIRAI が発売された翌年であるが、1915 年の T 型フォードとはいくつかの相違点がある。プロダクト要因として、過去の輸送手段 (ICEV) に対する優位はゼロエミッション性能以外になく、直接的価値で需要を引き起こす求心力は備えていない。また、ICEV で顕著だったプロダクトの求心力は直接関係する部品や材料に留まり、他の Innovation Category を促すには至っていない。プロセス要因としては、3次元部品主体の内燃機関から2次元部品主体の電動機関へアーキテクチャの大転換を迎えたにもかかわらず、ICEV におけるムービング・ベルトのようなプロセス・イノベーションは発生せず、FCEV の製造原価を低減する機会を失っている。インフラ要因としては、水素生産としては製鉄所・製油所・化学工場等に大量の副生水素が存在するものの、水素流通としてはスタンダード・オイルの灯油供給流通システムのように水素に転用できる安価な既存インフラは存在しない。

このような状況でも、直接的価値にこだわらない特定需要は存在する。Rogers が著書”Diffusion of Innovation”で示した Innovator や Early adaptor と呼ばれる顧客層である [Rogers, 2007]。しかし、ICEV 産業生態系は成熟期に入って久しく、大手自動車会社の意思決定者の多くは既存アーキテクチャの変更を望まない保守的アクターで占められるよ

うになった。保守的アクターは自ら育った常識(status quo)に高い自負を持っており、ゼロからの市場創出で status quo が通用しない場合であっても、自らが盲点に陥ることへの不安を感じることに慣れていない。換言すれば、イノベーションマインドの欠落である。こうした保守的アクターの属性が、FCEV 経済成長を遅延させる理由のひとつと言えるだろう。

プロダクト要因の求心力の低さとインフラ要因の懸念の高さが銀行家の参加を躊躇させ、FCEV 経済は顧客に直接的価値を示す機会を失い、イノベーションの停滞が生じる。これを救済するために、十分な顧客を確保できる見通しがないまま政府は「投資を増大させる義務を負わない」補助金や税制その他の手段⁶⁴で HRS を支援することになる。しかし政府の補助金は有限であり、HRS 建設速度は政府の年間予算で律速される。また「投資を増大させる義務を負わない」補助金は民間投資家（銀行家）にとって理解しがたい投資であり銀行家の参加を更に遠ざける。これらの結果、FCEV 市場は顧客にとって BML の成長を見通しにくい予測困難な市場(unpredictable market)とはり、ますます状況を悪化させる。求心力が弱いインフラ依拠型新商品のジレンマと言って良いだろう。

こうしたジレンマを回避するため、補助金を無償とするのではなく何らかの義務を負わせるというアイデアがある。例えばアメリカのエネルギー省(DOE)は補助金を新産業創出のトリガーもしくは触媒と位置づけており、補助金の効果がレバレッジレシオ（累積投資と累積売り上げの比率）とペイバックタイム（累積投資と年間売り上げの比率）で評価される⁶⁵。

プロダクト要因の求心力が強い場合は、多額の補助金を支払ってもレバレッジレシオを高くペイバックタイムを短く維持できるが、求心力が弱い場合は、多額の補助金を支払うとレバレッジレシオは低くペイバックタイムは長くなるため、評価が下がる。これを避けるため、事業側は事業価値を上げるために尽力する。この結果、政府補助金の健全化が進み銀行家を遠ざける理由は改善される。

しかし、補助金制度の工夫以前にインフラ依拠型新商品のジレンマの発生を避ける総合戦略の転換が必要であることは言うまでもない。これまでの FCEV 経済において、な

⁶⁴ この結果、需要に対して水素供給能力が過剰な HRS が建設され、設備利用率の低迷によって水素製造単価の高騰を招くという別の問題も招いている。この問題は 5 章で議論する。

⁶⁵ In the case of the Department of Energy, revenues resulting from its funded projects were valued at more than 4.5 times its investment as of 2014; see page 25 of http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review14/03_satyapal_plenary_2014_amr.pdf

ぜ「十分な顧客を確保できる見通しが無いまま」補助金を支出しかつ受領することが是とされたのだろうか。次に、「予測」について考える。

3. 2 予測について

投資が資本の増加を予測して行われる限り、投資と予測は不可分である。

近年、内燃機関⁶⁶、充電インフラ⁶⁷、水素ステーション⁶⁸、に対して、自動車会社の垣根を超えた共同推進を行う新しい仕組みが相次いで報道された。共同推進や大同団結は特に日本人が好む美德の一つである。例えば、産業生態系が確立された ICEV においてその技術を更に進化させるための大同団結の重要性は疑うべくもない。

しかし、21 世紀になって登場したばかりの新しいシステム（インフラ依拠型新商品である FCEV と、そのインフラである HRS）には、無数の盲点が内包されていると見るべきである。我々は ICEV 経済という「巨人の肩」に乗っている訳ではなく、何度も同じ過ちを繰り返している FCEV 経済という「小人の肩」に乗っていると考える方なはずである。もしそうであれば、FCEV 経済を考える基本的思考モードは、垂直ではなく水平、集中ではなく探索、が正解ではないだろうか。仮に、自らが小人の肩ではなく巨人の肩に乗っていると誤解し、第一ボタンが確認されないまま大同団結を解決策とみなして思考モードを集中に転じるとしたら、それは自らの目を覆うことと同じであり、予測の放棄であり、投資の放棄でもある。その迂闊さは過去繰り返された第二次世界大戦前夜にも共通するだろう。〈すべて確認済み今こそ一致団結のとき〉という結論がイナーシャ（組織的慣性力）の作用によって導かれるとボタンの掛け違い議論は影をひそめる。

本研究では、投資と予測は不可分であるという前提のもと、FCEV 経済で現在唯一実施されている投資、補助金と予測の関係について考える。

投資は資本の増加の可能性が予測できる場合に実施するものであり、予測不可能な場合、損失が予測される場合は実施されない。この前提において、図 23 のような政府による投資（補助金）の一般的解釈は、『民間では困難な案件に対して、政府が市場原理を超

⁶⁶ 「日本の自動車業界における新たな共同研究組織が始動」（2014/5/19）

<http://www.aice.or.jp/docs/news/140519JP.pdf>

⁶⁷ 「自動車メーカー4社、PHV・PHEV・EVの充電インフラの共同推進に合意」（2013/7/29）

http://www.mitsubishi-motors.com/publish/pressrelease_jp/corporate/2013/news/detaild729.html

⁶⁸ 「自動車メーカー3社、水素ステーションの整備促進に向けた支援内容を決定」（2015/7/1）

<http://www.honda.co.jp/news/2015/4150701.html>

えたりリスクを織り込んで予測しこれを補完する』、と言って良いだろう。しかし、政府は基本的に行政機関であり研究機関ではないため、必ず「予測」を行う機能を政府で完結できるとは限らない。このため、現実的にはアカデミアや産業界に所属する専門家の予測のひとつが「政府の予測」として採択される場合が多い。これは、「銀行家の予測」が無数の市場参加者の総意をもとに決定される事と好対照である。こうして採択された予測はいわゆる政治的判断であり、必ずしも科学的判断もしくは市場的判断ではないことに留意する必要がある。

周知のとおり、政治的判断は個別産業単位の経済ではなく、国家全体を俯瞰しながら実施される。よって、個別産業単位ではかえって Volatility が拡大する場合も多いだろう。本研究は政治学を対象外とするためこれを否定するものではないが、本研究は技術経営学の立場から個別産業単位の経済的成功を考えるために、一致団結や政治的判断はインフラ依拠型新商品による世界規模の問題解決の手段から除外する。

本研究では、4章において一致団結や政治的判断が行われやすい傾向の原因を過剰期待という視点から統計的に分析し、5章において一致団結や政治的判断を除外した FCEV 経済の自律性を検証する。次に、4章への準備として、予測におけるアクターの行動様式（ヒューリスティクス）について整理する。

3. 3 ヒューリスティクス⁶⁹

FCEV 乗用車の経済的成長が遅いという事実は、プロダクトとしての求心力が ICEV 乗用車に比べて格段に強くないことを意味している。また、直接の義務を負わない補助金には前述のとおり銀行家を遠ざける負の側面も存在する。

にもかかわらず、自動車会社、エネルギー会社、政府はなぜ求心力が強いと考えて、あるいは、補助金の負の側面を踏まえずに補助金活用を進めるのだろうか。本研究では以下の3つの heuristics（暗黙のうちに用いる簡便な解法）を定義し、これによって前記アクターの行動様式を推測した。ここで、破壊的イノベーション(Disruptive innovation)および持続的イノベーション(Sustaining innovation)は、Christensen⁷⁰の定義による。

⁶⁹ [Kahneman, 2012]

⁷⁰ [Christensen, 2001]、序文

1. ある *Innovation category* が破壊的 (*Disruptive*) であるとき、他の *Innovation category* ではイノベーションのための努力は除外(*Exempted*)される
2. 先行商品で1つ以上の *Innovation category* が破壊的であったとき、後続商品のアクターはすべての”and”*category* で大きな努力が必要という認識を持ち得ず、いくつかの *Innovation category* が停滞(*Stagnant*)する
3. 過剰期待(*hype*)の作用で停滞に対する懸念が緩和され、いくつかの *Innovation category* の停滞が確定する

表 1 1 に、図 2 2 (ICEV)に heuristics を適用した結果を示す。破壊的イノベーションであった category 1 の影響で category 3,4,5 が除外(*exempted*)されている(*heuristic 1*)。

表 1 2 に、図 2 3 (FCEV)に heuristics を適用した結果を示す。ICEV で除外(*exempted*)された category 5 が停滞(*stagnant*)している(*heuristic 2*)。

category 1(FCEV)は、ゼロエミッションを直接的価値とする少数の顧客には破壊的イノベーションであるが、ゼロエミッションを直接的価値としない大半の顧客には持続的イノベーションにすぎない。Heuristics作用で以下のようなプロセスが生じると仮定した。ここで、category 5のアクターはエネルギー会社、category 4のアクターは自動車会社とエネルギー会社を想定している。

1. category 4,5はICEVの時のようにcategory 1によって活性化されない(*heuristic 1*)
2. category 4,5のアクターは懸念を感じるものの懸念に留まる(*heuristic 2*)
3. category 4,5のアクターの懸念が低減されることを期待して過剰期待(*hype*)へのニーズが生まれる
4. なんらかの種が提供されることで*hype*が生成する
5. *Hype*によって停滞が確定し、該当する *Innovation category* が失われる(*heuristic 3*)

次に*hype*について考える。

表 1 1 ICEVs in 1915-2015

(Historical comparison)

	Innovation category	Comparative advantages over the former product^a	Intension Intensity
1	New product	Driving range, payload, fuel economy	Disruptive
2	Process innovation	Line production	Disruptive
3	Supply chain	Subordinated to 1	(Exempted)
4	Demand creation	Subordinated to 1	(Exempted)
5	Refueling stations	Subordinated to 4	(Exempted)

^aFor example, horse-drawn carriages

表 1 2 FCEVs in 2015-2025

(Projection computed by the author)

	Innovation category	Comparative advantages over the former product^a	Intension Intensity
1	New product	Zero-emission	Sustaining
2	Process innovation	Two-dimensional parts architecture ⁷¹	Disruptive
3	Supply chain	Subordinated to 1	Stagnant
4	Demand creation	Subordinated to 5	Stagnant
5	Refueling stations ⁷²	Subordinated to policies	Stagnant

^aICEVs

⁷¹ Fuel cell stacks have roughly 1,000 parts for 100kW as well as gasoline engines. However, 1,000 parts are almost composed of only three kinds of sheets (gas diffusion layers, catalyst coated membranes, and metal separators), which can make high-speed production similar to newspaper production composed of one kind of sheet (paper).

⁷² Gasoline was an industrial waste from kerosene production before ICEV appeared in the market. This could be another reason for exemption.

3. 4 ハイプの原因と認識ギャップ

Hype とは Hyper expectation もしくは Hyperbolic expectation の略であり、日本語で「過度の期待」を意味する⁷³ (Borup, Brown, Konrad, & van Lente, 2006)。Hype をキーワードにイノベーションの普及を研究する学問分野は Sociology of Expectations (期待の社会学) と呼ばれ、System-level Innovation と同じく社会科学の一分野として欧州、特にオランダの研究者を中心に一つの学問体系を成している (van Lente, 1993)。

「期待」には、他者に行為を促すことで不確実性への危機感を克服しようとするポジティブな側面と過度の期待によってバランスの崩れた経済発展を招くネガティブな側面があるが、期待の社会学は後者に注目する。これまでバイオ、エネルギー、ナノテク、情報技術などの様々な事例が研究されており^{74,75}、水素および FCEV についても各国で行われてきた水素普及プロジェクト等を分析した研究も知られている。例えば Bakker は、2000 年代初頭から複数の大手自動車会社が過度な報道 (数年以内に数万台の FCEV 販売開始、など) を行ったあと、これらが撤回も行われずにトーンダウンされた経緯を公知情報から整理した (Bakker, 2010)。

しかし、これらの研究は hype という現象の整理に注目したものが殆どであり、本研究が目的とするような hype の原因究明やその対策のためのマネジメントまで言及したものはあまり見られない。前節において本研究のフレームワークおよびヒューリスティクスを定義したが、次の 2 つの疑問が残されている。

1. なぜアクターは政府やアカデミアから楽観的な情報を受け入れやすいのか
2. なぜ政府やアカデミアはアクターに楽観的な情報を提供しやすいのか

上記について共同研究者⁷⁶と議論した結果、アクター (産業界) と政府やアカデミアの間に認識ギャップ (recognition gap) が存在し、これが hype の種を継続的に提供することに起因するのではないかと仮説を得るに至った。以下、認識ギャップについて説明する。

⁷³ 日本語としても死後に近いが、語感としては「フィーバー」に近い。

⁷⁴ Borup らは hyperbolic expectations と呼んだ

⁷⁵ 鈴木のリビューに詳しい [鈴木, 2013]

⁷⁶ 東京工業大学イノベーション・マネジメント研究科梶川裕也教授、辻本将晴教授、九州大学稲盛フロンティア研究センター次世代エネルギー研究部門古山通久教授

一般的に、論証⁷⁷(argument)は3つの部分から構成される：

前提(premises, assumptions)、

論理(reasoning, inference, logic)、

結論(conclusion, result)

営利を目的とする産業界は常に結果主義であり、論理より結果に価値があると考え。すなわち、企業にとって結果が確かであれば論理は必ずしも最重要ではない。例えば特許法第二十九条は「産業上利用することができる発明をした者は、次に掲げる発明を除き、その発明について特許を受けることができる。」とされている。また、アメリカの特許法 U.S.C. 101 は「Whoever invents or discovers any new and useful process, machine, manufacture, or composition of matter, or any new and useful improvement thereof, may obtain a patent therefor, subject to the conditions and requirements of this title.」とされている。いずれも結果が「利用可能であること」が特許要件であり、その論理は特許要件ではない。

これに対して、アカデミアは常に論理主義であり、結果より論理に価値があると考え。このため、前提として採用する引用文献の内容には直接的責任を負わない。これは、企業家に比べて限定されたリソースの範囲で、引用文献の内容を完全に確認することは困難なためと一般的に考えることができる。そこで前提については引用文献の書誌事項を明らかにして透明性を担保することで第三者による精査や検証を可能とし、これをもって前提に対する最大限の責任を果たした、とみなす合意がアカデミアで共有されている。結果として、著者は、その本文である論理に対して完全な責任を持つが、前提に対して完全な責任を持ち得ない以上、結論に対して完全な責任を持ち得ない。いわゆる「著者の倫理」である。以上の関係を表 13 に示す。

⁷⁷例えば、“if p then q”という論証は $p \rightarrow q$ と表せる。

表 1 3 産業界とアカデミアの認識ギャップ

Industry (e.g. patents, experimental reports)		
Assumption	Always correct	Examples in patents, reports
Logic	Not always correct	-
Result	Always correct	Patents, Reports
Academia (e.g. academic papers, public reports)		
Assumption	Not always correct	Reference
Logic	Always correct	Peer review
Result	Not always correct	Research ethics

表 1 3 のような違いは、残念ながらアカデミアでも産業界でもあまり知られていない⁷⁸。このため、例えば企業が中長期経営計画等の基礎となる前提を学術文献から求める際に多少の誤解が発生する。たとえば企業がある普及予測文献の結果を前提として採用した場合、企業はこれを確かな予測かと考えるが「著者の倫理」によってそれは常に確かな予測とは言えないのである。こうした傾向は、特に普及予測文献で起こりやすい。本研究ではこれを認識ギャップ(recognition gap)と呼ぶ。

以上は学術文献について述べたが、公的文献も学術文献と大きくは変わらない。ただし、学術文献が査読を受けることでその合理性が審査されるのに対して、多くの公的文献に査読が存在しないことは特記すべきだろう。この結果、「著者の倫理」による公的文献の結論の確かさは学術文献に比べて低いと考えるのが妥当であろう。場合によっては、1つの公的文献が示した多くの結論の中からたった一つが恣意的に抜き出され [秋元, 2014]、これをもとに学術文献や公的文献が発表されるケースもあるだろう。

図 2 4 に認識ギャップと Assumption Lander ling を説明するダイアグラムを示す。ここで左の人物を産業界のアクター、右の人物をアカデミアとする。右の人物は論理を重視するので結論は常に正しいとは限らないという著者の倫理を持つ。これを条件付きの結論として Result* で表す。左の人物はそうしたアカデミアの習慣に不慣れなので無条件の結論である Result として受け取る。このとき、認識のギャップが生まれる。この Result はアカデミアの新しい前提として採用され、新しい Result* と認識のギャップが常にセッ

⁷⁸ 本研究の著者も、産業界とアカデミアの二足の草鞋を履きながら共同研究者と議論することで、最近ようやく明示的な気づきを得た。

トで再生産されることになる。本研究ではこれを Assumption laundering と呼称する。

ここで、Result から Result*を生産するレートが一定であると仮定するなら、重力加速度の式($F=ma$)と同じく Gap は放物線的に増加するはずである。次章でこれを検証する。

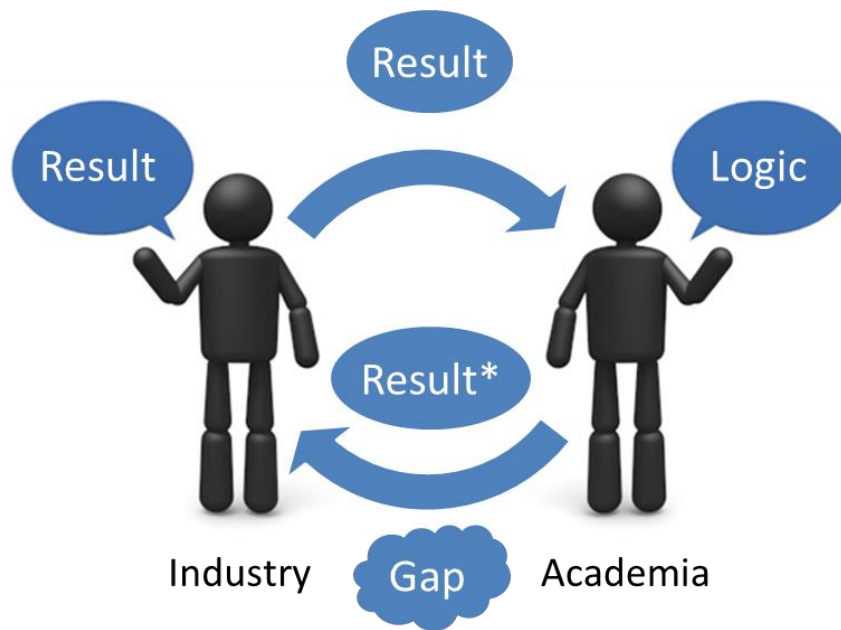


図 2 4 認識ギャップと Assumption laundering

4. Assumptions Study

普及予測文献の中には、2050年にICEVの90%をZEVに置換するにはFCEVの普及はこうなる、HEVの普及速度の50%をFCEVの普及に適用するところなる、など、前提（この例では2050年に90%、FCEVの普及速度はHEVの50%、など）が先行文献から引用される場合が多い。本章では、FCEVおよびHRSの普及予測にかかわる各種文献の中にhypeの種となる認識ギャップが含まれる可能性があるという仮定のもと、普及予測文献が採用する前提をいくつかのカテゴリーに分類し、カテゴリーごとの文献数を追うメタアナリシスを試みた。本研究ではこれをAssumptions Studyと呼称する。

4. 1 方法

表14に、FCEVとHRSの普及予測に関する学術文献および公的文献を抽出するために用いたデータベースおよび検索式を示す。

表 1 4 Assumptions Study のための検索式

Academic Studies
ScienceDirect (Elsevier) ⁷⁹
docsubtype (FLA) and ALL (“fuel cell” and hydrogen and (station or refueling or refueling) and (FCV or FCEV) and (prediction or scenario or projection or estimation or roadmap)) and not ALL (conductivity or microporous)
Public Reports
Engineering Village, NTIS (Elsevier) ⁸⁰
(((((scenario or roadmap or extrapolation or forecast or prediction or projection) WN All fields) and ((hydrogen) WN All fields)) and ((fuel cell) WN All fields))

Assumptions Studyは日産自動車株式会社総合研究所の経済的支援のもと、横須賀（日本）・チェンナイ（インド）・北京（中国）の合計9名の研究者によって2015年の夏におよそ1.5か月をかけて実施された。各文献のカテゴリー分類にあたっては、一文献あたり少なくとも2名による相互確認が行われた。

表15に、カテゴリー分類表、図25に、カテゴリー分類フローチャートをそれぞれ示す。ここで、#0は先行文献のメタアナリシスを行った文献で普及予測を含まないものを

⁷⁹ <http://www.sciencedirect.com/science/search>

⁸⁰ <https://www.elsevier.com/solutions/engineering-village/content#ntis>

示す。このカテゴリーは、検索式の検証のために設けられた。次に、その引用文献を介して各種文献が採用した前提に関して、普及予測年代を特定していないものを#1、普及予測年代を特定したもののうち、未来における別の普及予測を前提とするものを#2、過去における別の普及経緯を前提とするものを#3、とした。例えば、#2にはIPCC AR4やETP2008等の有名な公的文献の記載どおりにFCEVが普及する前提でHRSの効率的配備を研究した文献、#3には日本におけるHEVの実績のとおりにFCEVが普及するという前提でHRSの効率的配備を研究した文献、等が含まれる。#5はノイズであり、自然科学系文献の序章等で検索式にヒットしたものを#5-1、社会科学系文献であって、普及予測に関する前提を採用しているが普及予測は実施していないものを#5-2、普及予測に関する前提は採用しておらず普及予測も実施していないものを#5-3とした。

表 15 カテゴリー分類表

Category	Assumption	Projection
#0	Meta-analysis	No
#1	Yes (not year-specific)	Yes
#2	Yes (year specific; based on the future)	
#3	Yes (year specific; based on the history)	
#5	Noise literature	No
#5-1	Natural science	No (noise)
#5-2	Yes	
#5-3	No	

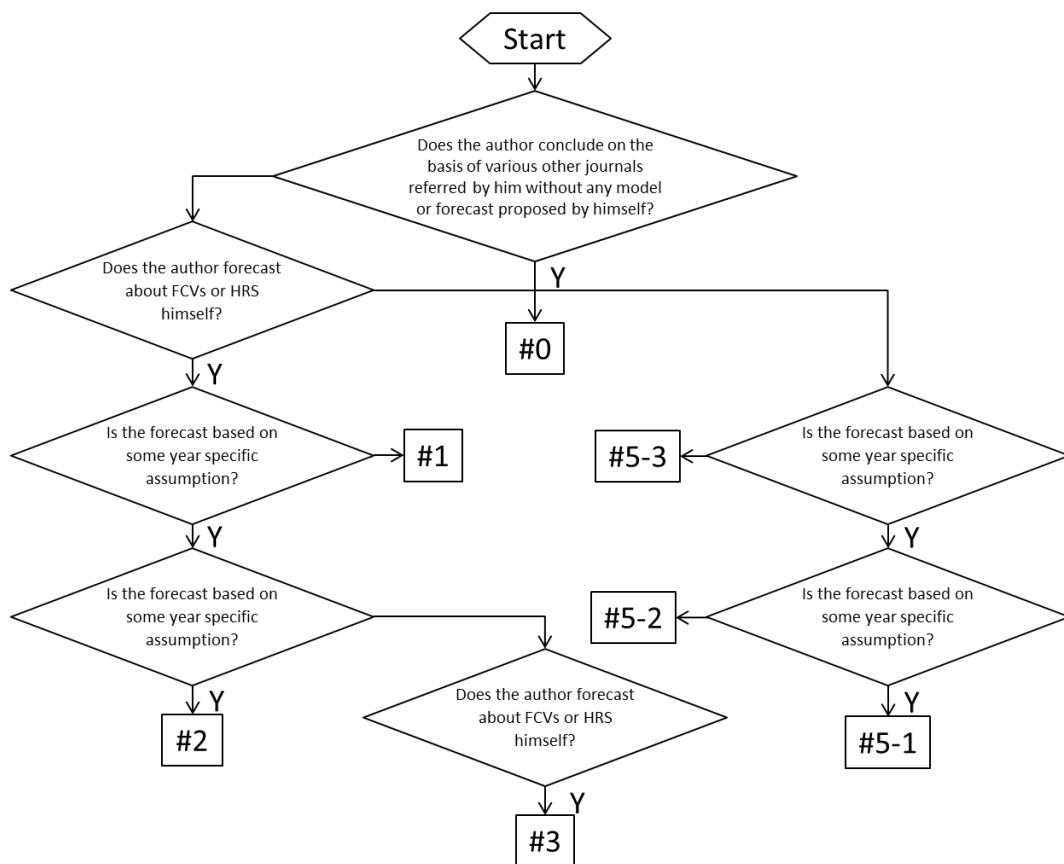


図 2 5 カテゴリー分類フローチャート

4. 2 結果

図 2 6 に、2000 年以降に発行され前記検索式で抽出された全ての学術文献および公的文献の発行数推移を示す。表 1 6 に、学術文献の検索結果詳細を示す。ここで、キーワード検索は予備的なものを含め数回実施されたが、最後の検索は、学術文献 2015 年 7 月 8 日、公的文献 2015 年 10 月 21 日であった。

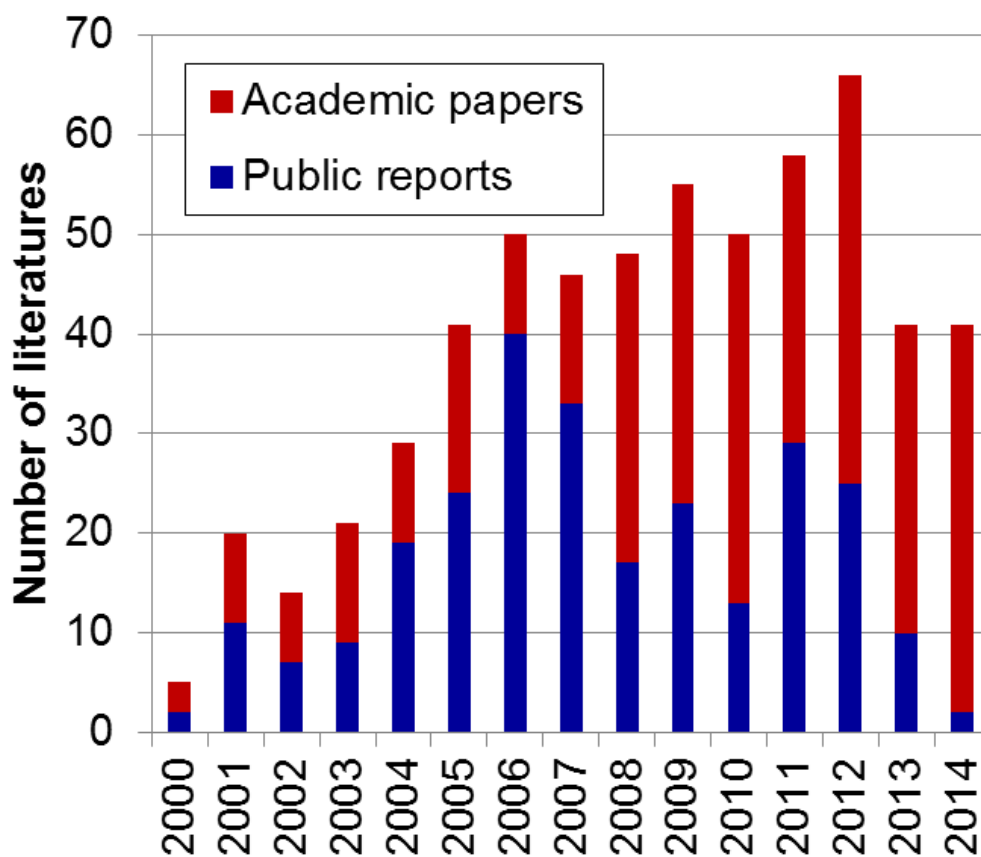
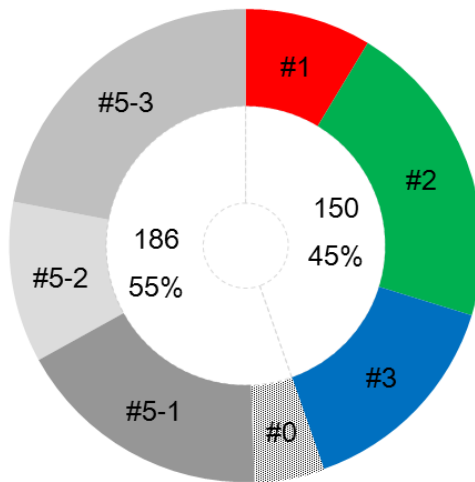


図 26 抽出文献数の発行数推移

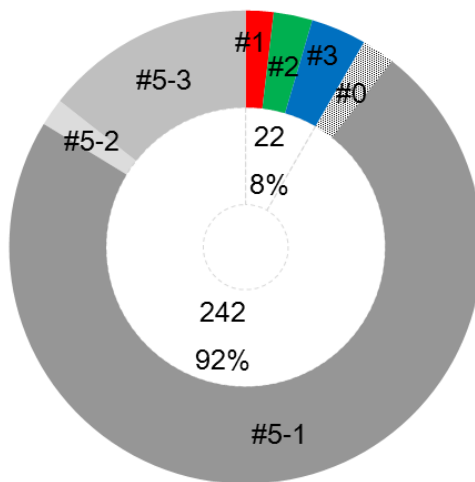
表 16 学術文献の検索結果詳細

AND	fuel cell.	249,871
AND	hydrogen	1,305,414
AND	station or refueling or refueling	743,372
AND	FCV or FCEV	5,365
AND	prediction or scenario or projection or estimation or roadmap or forecast or extrapolation	3,145,602
	Total	344
	Year2000-	336
AND	International Journal of Hydrogen Energy	135
AND	Energy Policy	44
AND	Journal of Power Sources	33

図 27 に、学術文献および公的文献の分類結果を示す。学術文献では150（ノイズ186）件、公的文献では22（ノイズ242）件が#1、#2、#3に該当した。



Academic Papers



Public reports

図 27 学術文献の分類結果

ここで、普及予測の年代を特定した文献を、未来における別の普及予測を前提とした#2、過去における別の普及経緯を前提とした#3に分類したが、これは将来の研究のために予備的に行った分類であり、以降においてはこれらを区別せず、普及予測の年代を特定した文献として一括して取り扱った。また、本研究の目的は統計的分析からマクロな動向を調査

することを目的としたメタアナリシスであり、個別の文献について詳細な議論を行うレビューを目的としない。ここでは、普及予測の年代を特定した文献のうち、いくつか代表的なものを紹介するに留める。

#2と#3の中で採用されている典型的な前提は、既に定められた化石エネルギーを用いるICEVから水素燃料を用いる乗用車（水素ICEVおよびFCEV）への転換を推進するため、に公的政策としていかに支援せねばならないかというものである。Green, Lin, Donは、こうした転換を達成するために必要と考えられる補助金や制度を提案した (Greene, Lin, & Dong, 2013)。

FCEVとHRSの普及予測をより詳細な仮定および仮説を定めたうえで、System Dynamics(Struben & Sterman, 2008)などの洗練された手法を用いて実施されたものもある。Meyer, Winebrakeは、前記手法で実施された普及予測を4つのシナリオに分類した。このうち、S2とS3はFCEV普及が起こる成功例、S1とS4はFCEV普及が起こらない失敗例としている。しかし、S2の前提は、FCEV価格17,000\$(120¥/\$換算204万円)、ランニングコスト0.03\$/mile (120¥/\$換算2.2¥/km)、ワシントンDCを想定した都市に初年度20基のHRS、FCEVは0台からのスタート、S3の前提は、初年度1基のHRSに1,900台のFCEV配備済み、というものである。彼らの前提にはあらゆる乗用車の新商品を世に出すために自動車製造業が負担せねばならない初期投資負担が考慮されていないことは明白だろう。例えば日産自動車は2001年の発表⁸¹で”Nissan and Renault are working together in an intensive five-year joint R&D program to develop FCV technology; 85 billion yen will be invested in this program.”と述べた。85億円を償却するには初年度0台はおろか初年度1,900台でも不十分であり、さらにトヨタMIRAIの販売価格(723.6万円、平成27年度クリーンエネルギー自動車等導入促進対策費補助金202万円適用で521.6万円)より大幅に安い想定価格と日産LEAF並みに安いランニングコストはこうした前提条件の収集において最善の努力がなされたとは考えられないだろう。仮に日産自動車がワシントンDCへのFCEV配備に合意したとしても、204万円という販売価格で85億円を所定期間内に償却するには同時に100程度の都市への配備を条件提示したはずである。こうした背景を踏まえないまま、4シナリオのうち2が成功で2が失敗したとする論文の基本構成は、heuristic 3の作用でhypeを待望している産業界にとって、成功と失敗の確立は五分五分であるとする楽観的な心証を与えるに十分であろうと思われる (Meyer & Winebrake,

⁸¹ Nissan Press Release, Oct23, 2001. <http://www.nissan-global.com/EN/NEWS/2001/_STORY/011023-01.html>.

2009)。

その他の論文として2050年に想定されたCO₂排出量削減目標を達成するためFCEVとICEVのあるべき普及曲線を計算するという論文も多くみられる。Park, Kim, Leeは、2050年にICEVをゼロにするという目標 (Collantes, 2007)を踏まえて作成されたアメリカのナショナルアカデミー報告 (The National Academies, 2004)とその結論が一致したと述べた (Park, Kim, & Lee, 2011)。これは、計算方法に違いがあるとはいえ、いずれもCO₂排出量削減目標からの帰納法的計算であることから当然であろう。しかし、結果を重視し論文の成り立ち(前提)を深く考慮しない産業界が、この学術文献の普及曲線に対して著者が設定したある前提における限定的価値ではなく普遍的価値を持つ本来の意味での「予測」と誤解し中長期投資計画はこの予測を信頼して策定すれば良い、と安易に考える恐れを完全には払拭できないだろう。

論理を重視する学術論文にとって、様々な前提を導入して対象を絞るほど論理を完成させやすいことは言うまでもない。結果として新しい論理構築を行うために、System Dynamicsをはじめ様々な高度な技法の構築が様々な限定された世界を舞台に(場合によっては現実世界との経済的関連付けが失われた仮想世界で)進められている。新しい論理構築はアカデミアの本分であり、これをもって学術文献の価値を一切毀損するものではない。しかし、社会貢献という視点からいうと、産業界はそれぞれの立場でこれらの学術文献からそれぞれの先入観の中で学ぼうとしていることをよく理解し、可能な限り偏見やヒューリスティクスが生じないよう尽力する余地は、まだ必要だろう。

図 28 に2000-2014年に発行された普及予測学術文献のカテゴリー別累積発行数推移を示す。年代特定を行わない#1が定常的に増加しているのに対して年代特定を行った#2,#3が、2006-7年頃から加速的に増加していることが明らかになった。

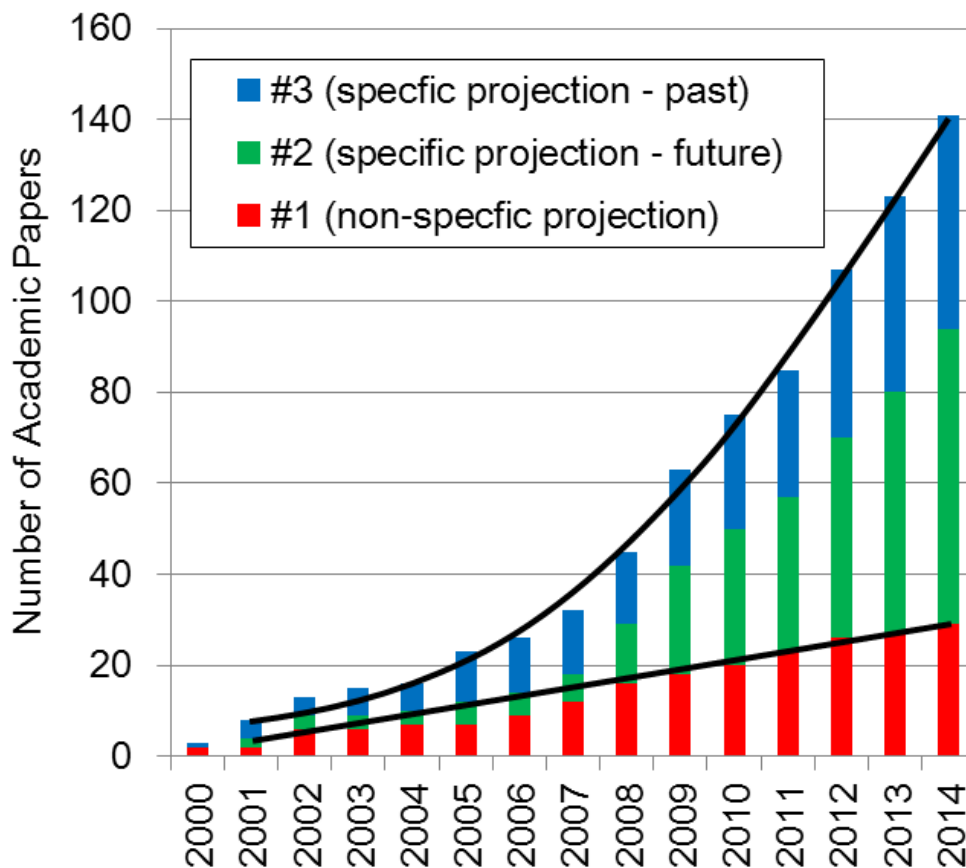


図 2 8 普及予測学術文献のカテゴリー別累積発行数推移

図 2 9 に2000-2014年に発行された普及予測公的文献のカテゴリー別累積発行数推移を示す。公的文献は今回の検索においてヒット数が22件に限られたため学術文献と同列に扱うことはできない。これを承知した上でその傾向を観察すると、年代特定を行わない前提を採用した#1が学術文献と同じく定常的に増加しているのに対して、年代特定を行った前提を採用した#2,#3が、2004-7年にかけて急速に増加し、2008-14年にかけて飽和し始める様子が認められた。文献数の急速な増加が学術文献より数年早く見えることに注目される。

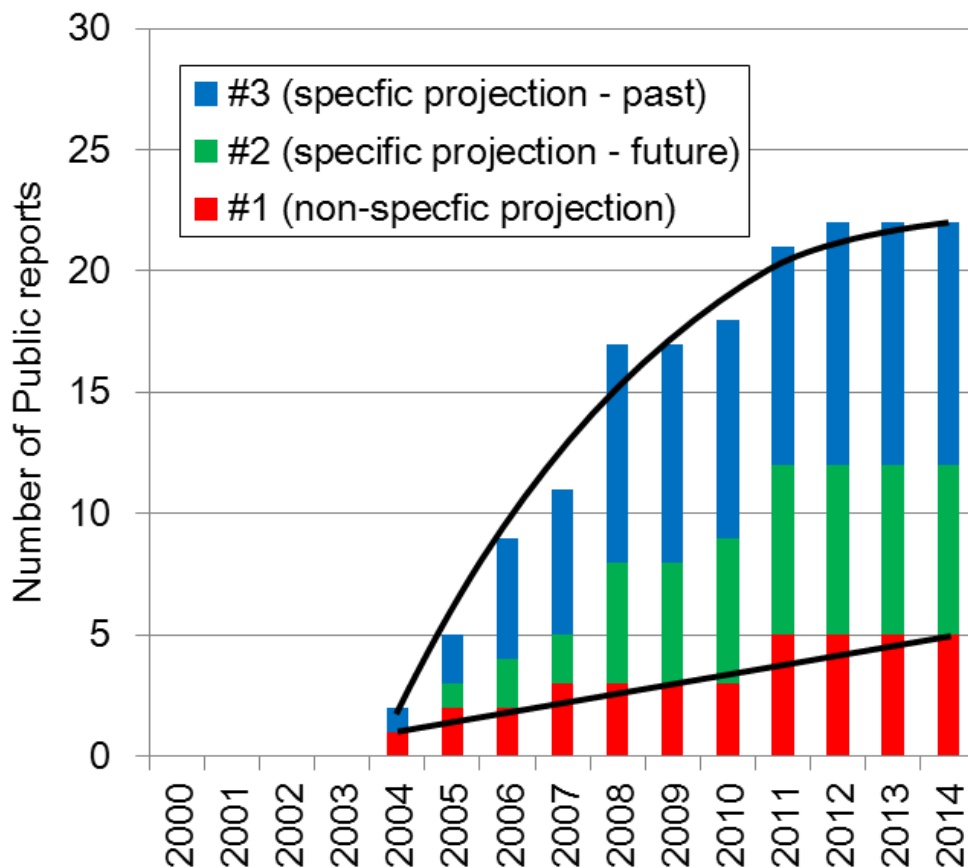


図 29 普及予測公的文献のカテゴリー別累積発行数推移

図 30 に普及予測文献発行数の年間増加率を示す。学術文献は、年間増加率が一定であり、3章で予測したとおり重力による真空中の落下運動のような放物線的加速と同様の挙動を示すことが分かった。一方、公的文献の年間増加率は徐々に減少していることから逆双曲線的加速も言えるが、データ総数が非常に少ないため断言できない。例えば学術文献と同様に初期に放物線的加速を示したあと、何等かの理由で重力を失い飽和に至る過程にあるという解釈も否定されないだろう。

学術文献で見られた「重力」が、著者のどのような意思を反映して一定となるかは不明である⁸²。いずれにせよ現在の検索式ヒット率が学術文献でも45%と低いことを考慮すると、更に前段階でデータ処理に係る合理性を向上させる必要があるとも考えられる。「重力」が示唆する情報の分析については今後の研究課題としたい。

⁸²本来であれば図 26 の母集団の増加を考慮にいれてデータ補正を行った後に図 30 の分析を実施すべきかもしれない。

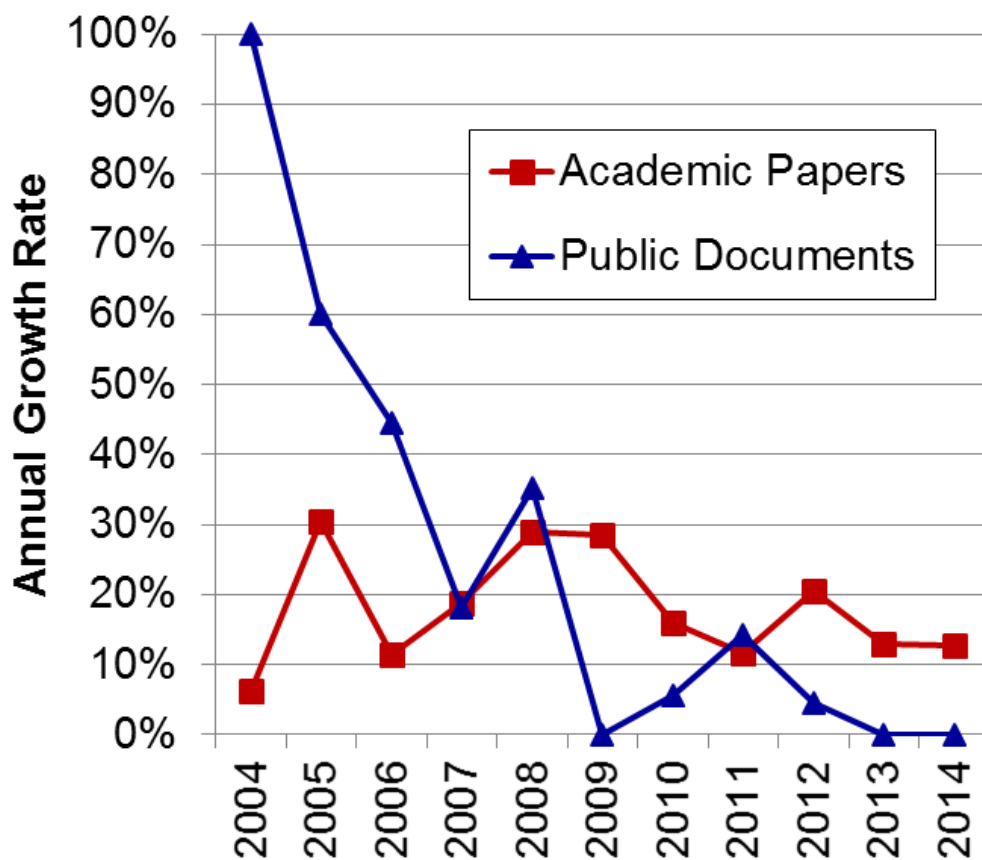


図 30 普及予測文献発行数の年間増加率

善意と同様に公的文献の総数が学術文献の1/7に留まったことから断定的な判断は出来ないが、図 28、図 29の比較から公的文献の急増(2004--7)と学術文献の急増(2006-7)に数年のずれ(公的文献が早い)が見られた。本研究では、何人も意図的に新規市場創出を停滞させる意図は持たないとするが、仮にこのずれが有意であるならば、3章の図 24で予想した認識ギャップの循環が公的文献からスタートしている可能性を示している。このような公的文献として、例えばナショナルアカデミー報告 (The National Academies, 2004)、英政府が発行したスターン報告 (Stern, 2007)、第4次報告(AR4) (IPCC, 2007)などを挙げることもできるが、この仮説を実証するには更なる統計的な分析が必要であることは言うまでもない。なお、前記文献のうちAR4は通常の学術誌と同程度以上の査読が行われている。

これらの結果を踏まえて、以下のように考察した。

4. 3 考察

人口学者が用いるアナロジーによると、「予測」はスライドに記録された映像を離れたスクリーン上に投影するプロジェクションに例えられる（図 3 1）。スライドに記録された映像を離れたスクリーン上に投影する場合、スライドの情報密度とスクリーンまでの距離の関係は、スクリーン上で期待される解像度に応じて光学的に厳密に定められる。

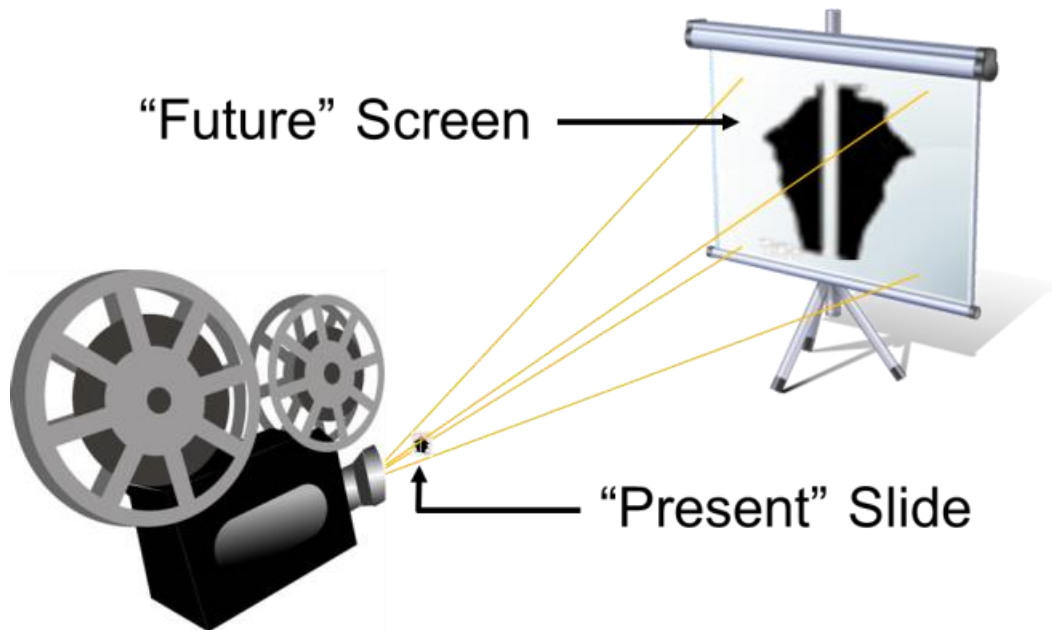


図 3 1 プロジェクションと予測

Source: authors^{83,84}

Original source: Ministry of Health, Labor and Welfare⁸⁵

人口推計についても同様であり、人口動態（出生、死亡、人口移動）の現状と趨勢を実績データの分析によって詳細に把握し、これを将来に向けて投影することで仮定値を得ている [濱, 1980]。人口推計は各種公的施策等の計画策定だけでなく保険会社の保険料率の算定根拠に用いられるため、その信頼性に大きな責任が課されていることは言うまでもない。人口推計は基本的に出生、死亡、人口移動の3種類のパラメータから構成されるため、無数のパラメータが関与する経済推計に比べると難易度が低いといえるだろう。しかし、そ

⁸³ Hasegawa, Koyama, Kajikawa, <http://www.whc2015.com/>

⁸⁴ Hasegawa, <http://in-japan.no/energy2015-day2/>

⁸⁵ <http://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r9852000001hqtl-att/2r9852000001hqxo.pdf> 9p

れでも様々な誤差要因が内包されており、確定した人口推計を行うことは不可能である。このため、人口推計の結果は仮定値一定推計（7推計）、封鎖人口推計（3推計）をあわせて10種の人口指標として公表されている [人口問題研究所資料, 2013]⁸⁶。

ICEVのBusiness Maturity Level (BML)がMDに到達したということは、ICEVに対して一国の人口推計に近い予測が可能になったことを意味している。たとえば、ニューモデルの車種やドア枚数の選定、アフリカにおける7年間のデータから8年後の自家用車普及台数予測を行う作業⁸⁷など、日常的に行われる業務がこれに該当する。一方、FCEVのBMLはBCに到達したばかりであり、ICEVと同じ予測論理は対象外であることを強く留意する必要があるだろう。無論、予測に関する何らかの科学的論理を構築するための仮定としてFCEV普及曲線を仮定することは必要であるが、このような目的においても認識ギャップを踏まえたうえで新たなhypeの種とならないための更なる配慮が必要とされるだろう。

このような事例として、世界の水素イニシアチブ⁸⁸で最も影響力のあるものの一つであるカリフォルニア州政府におけるFCEV普及予測を挙げることができる。図 3 2はCaFCPの“Hydrogen Station Network – Current & Estimated Progress in 2014 Update: Hydrogen Progress, Priorities and Opportunities (HyPPO) Report”、をはじめ、California Air Resources Board (CARB) およびCalifornia Energy Council (CEC)から発行されたFCEV普及予測をまとめたものである。

⁸⁶ <http://www.ipss.go.jp/syoushika/tohkei/newest04/kaisetsu.pdf>

⁸⁷ http://www.meti.go.jp/medi_lib/report/2015fy/000529.pdf

⁸⁸ Appendix 6 水素イニシアチブおよび Appendix 7 2007年公開の公的文献を参照のこと

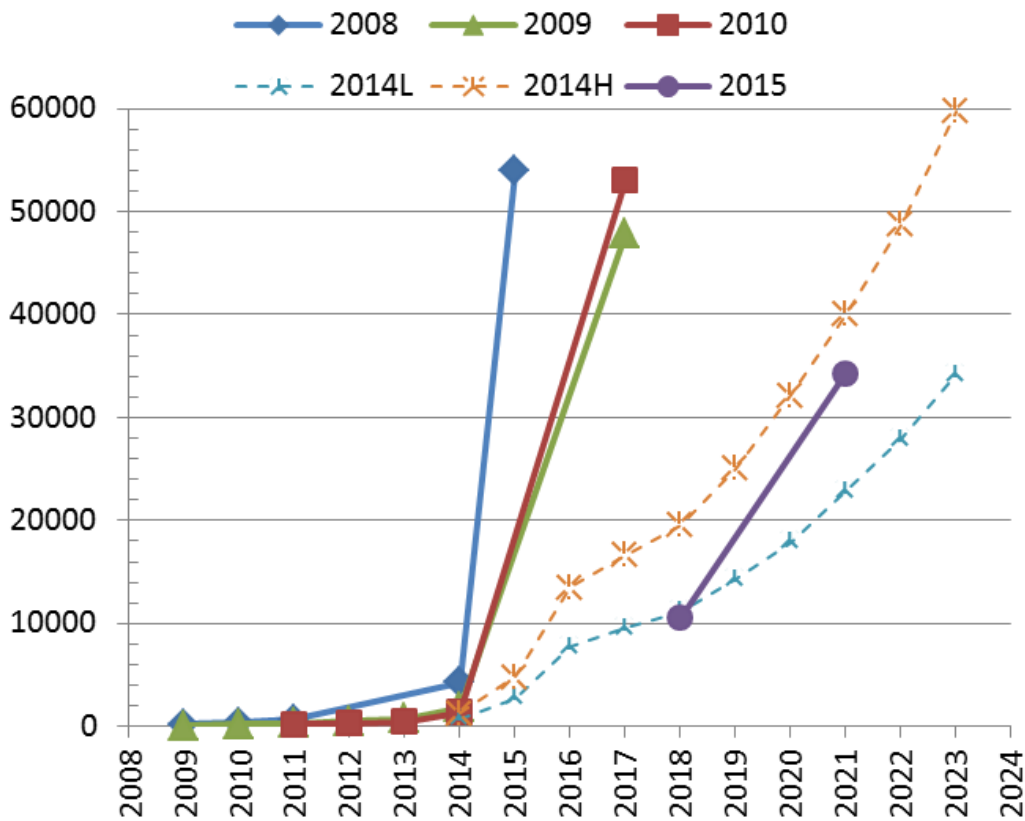


図 3 2 カリフォルニア州における FCEV roll-out survey 結果一覧

(Created by author using CaFCP, CEC, CARB reports)⁸⁹

カリフォルニア州の普及予測はアメリカのみならず世界の産業界・政府・アカデミアが FCEV 普及予測を行うための基本データとなっているが、図 3 2 の曲線は、人口学的もしくは社会科学的な普及予測ではなく、CaFCP と CEC がそれぞれ 9 社および 7 社の自動車会社に対して実施した FCEV 配備台数サーベイの回答を積算して求められたものである。単純な積算であるにもかかわらず、図 3 2 の結果は担当する著者によって報告書の中でしばしば“estimation”、“projection”と呼ばれている。こうした報告書には「著者の倫理」としてサーベイの方法が明示されているが、読み手である産業界もしくはアカデミアと送り手である公的機関との間の認識ギャップは必ずしも強く意識されていない。このため、結果的に無から有が作られるという因果性のジレンマを示す結果となった。

CaFCP 報告書 (CaFCP, 2012) の結論を見ると、因果性のジレンマに対する楽観的な予測を

⁸⁹ (CEC, 2010), (CaFCP, 2010), (CEC, 2011), (CaFCP, 2014), (CARB, 2015)

見ることができる。

“While surveys identify anticipated vehicle sales projections, actual vehicle sales will be based on numerous market-based factors, most notably, customer preferences. If customers believe FCEV technology is mature and fits their needs, and that the station network is sufficient and station performance meets their expectations, then the market is sufficiently enabled to support accelerating FCEV sales will occur. Therefore, the number of stations operating in these early years (2013-2017) will be crucial to building market confidence and growing FCEV sales”, p27

図 3 2 で特に興味深いのは2015年の位置づけである。2015年は2008, 2009, and 2010年のサーベイに回答した自動車会社にとって常に大きな節目であり続けた。その結果、年を追うごとに密な普及曲線が描かれるようになったが、その後2014年が訪れ、それまで考えてきた節目が達成不可能と判断した回答者は一気に普及曲線の勾配を次の節目である2025年に向けて緩和することとした。こうした現象は1997年にDaimlerが、“Daimler will start commercialization in 2003 and will produce 40,000 FCEVs per year.”とアナウンスした時から既に20年近く繰り返されている。

このようなTechnology roadmappingは、燃料電池に限らず様々な分野で必要とされるに従い体系的な研究が進められるようになった。中でもPhaal らのT-Plan (Phaal, Farrukh, & Probert, Technology roadmapping—A planning framework for evolution and revolution, 2004)はその分かりやすさと応用性の高さから産業界においても広く採用されている。しかし、このようなロードマップも一種の予測である以上、同じ産業界の商品であってもゼロからのスタートと既にスタートしたものとの間には慎重な配慮の差が必要であろう。Phaalらは下記のようにmarket ‘pull’ と technology ‘push’ のバランスを取るためにナレッジフローを確立することが要求されると述べているが、これは明らかに既にスタートした商品に対するコメントであり、少なくともプロダクト要因におけるICEVとの差別性の無さからgovernment pull はあってもmarket pullはないFCEVはこれに該当しないであろう。

Healthy technology management requires establishing appropriate knowledge flows between commercial and technological perspectives in the firm, to achieve a balance between market

‘pull’ and technology ‘push’” (p7-8)

Phaalは2003年にワークショップにおいてHEVと並んでFCEVのロードマップ(p29)を示しているが、インフラ要因やプロセス要因には触れずにプロダクト要因だけで2022年までの「ロードマップ」が描かれている様子を見ると、hypeの種を求める需要に一定の供給を果たしたであろうとの思いを禁じ得ない (Phaal, 2003)。これは一種の因果性のジレンマであるが、その背景にはT-Planが果たして来たであろう既にスタートした商品（前記の例でいうとHEV）に対する効果が、market pullどころかmarket creationでつまづきつつあるFCEVにも適用可能との期待があったものと推測される。これも一種のhype（過剰期待）と言えるのではないだろうか。いずれにせよ、T-Planについては「産業生態系」という概念がこうした盲点を解消するひとつの指針になることは間違いないだろう。

アクターが21世紀のICEVとFCEVの相違点を考慮しない限り、hypeの再生産は続き、銀行家の参加は進まない。一方、アクターが共にインフラ依拠型新商品であった20世紀のICEVと21世紀のFCEVの類似性に気づいたとき、あらゆる取り組みは建設的な方向に向かうはずである。このためには、まず顧客創出をhypeに頼らない自律経済的な産業生態系を構築する努力が求められる。この場合、自律経済的であることが最重要であり、必ずしも国家規模や地球規模で構築されねばならない必要はない。このための条件について次章で考察する。

5. FCEV 経済の自律可能性

5. 1 背景と検証の対象

どのような新商品も、企業家と銀行家が連携して小さな経済単位で起業したあと、収益を確認しながら大きく育てることが一般的である。FCEV のインフラ要因でいうと、小さな経済単位とは HRS 商圏あたりの経済を意味している。一方、FCEV はその ZEV としとの性質上、特に政府からは小さな経済単位での起業というより地球規模の問題解決手段として位置付けられた。このため、自動車の平均使用年数を超える償却期間を厭わないという合意のもと、FCEV と HRS に対して多額の先行投資（前者は大手自動車会社、後者はエネルギー会社および政府）が始められ易い環境にあった。

しかし、投資は常に誰かの負債であり、負債が増えることは自律経済化に至るまでの損益分岐点が遠ざかることを意味している。損益分岐点が遠ざかるリスクは一般的には市場の信用⁹⁰で補償されが、監督者である銀行家が参加しない FCEV のようなケースでは再生産され続ける hype が信用不足を埋めているのが現状である。ここまでをボタンの 1 段階目とする。自動車会社で FCEV 開発に従事する人々は 1 段階目のボタンの掛け違いを疑うことなく日常業務に全力を尽くしている。

何度も同じ過ちを繰り返してきた「小人の肩」に乗っていると考えたとき、自動車の平均使用年数を超える償却期間を厭わないという合意ではなく、一般的な「小さな経済単位で起業したあと、収益を確認しながら少しずつ育てる」という可能性を検証した上で、改めて FCEV の総合戦略を議論すべきではないだろうか⁹¹。図 1 2、図 1 4 で見てきたように、かつての日本の ICEV もポータブル計量器⁹²と 20 台程度の ICEV から構成される小さな経済単位から徐々に成長して現在の姿を作り上げた。また、その際の成長のドライビングフォースは、常に政府の補助金ではなく銀行家にエンドースメント（裏書）された営業利益であった。

ここではまず、前記のような合意の舞台となっている FCEV 乗用車を対象とし、FCEV 経済の自律可能性を検証する。FCEV 商用車については本章の考察で言及する。

⁹⁰ 例えば (von Mises, 1998) p.468

⁹¹ 2010 年頃から燃料電池自動車市場の創出に関わる研究を開始した著者にとって困難な問題であったが、2012 年秋の Symbio FCell とそのビジネスモデルの発見が理想を遂行する契機となった。

⁹² Appendix 2 日本におけるポータブル GRS

5. 2 方法

5. 2. 1 経済単位と検証の手順

本研究の手順を表 17 に示す。

表 17 HRS 商圏経済の自律可能性検証手順（水素供給面）

1. 【登録車数】入手可能な行政単位ごとに、登録車数を調査する
2. 【商圏あたり登録車数】入手可能な行政単位ごとに GRS 数を調査し、商圏あたり登録車数を求める
3. 【新車販売台数・価格】入手可能な行政単位ごとに、新車販売台数と販売価格を調査して新車価格－累積販売台数分布曲線を求める。これが登録車価格－累積登録車数分布曲線と等価であると仮定する
4. 【高価格帯販売台数】商圏あたり登録車数と登録車価格－累積登録車数分布曲線より、FCEV 想定販売価格以上の高価格帯登録車数を求める
5. 【FCEV 潜在需要数】FCEV 選択率を定義し、高価格帯登録者数に掛け合わせることで FCEV 潜在需要数とする
6. 【年間水素需要量】FCEV 潜在需要数に年間水素消費量を掛け合わせることで年間水素需要量を計算する（水素需要面）
7. 【HRS 能力・価格計算】FCEV 潜在需要数にマッチした HRS 水素供給能力と HRS 価格を求める（水素供給面）
8. HRS 水素供給能力と価格の組み合わせが経済的に実現可能か判断する

FCEV 経済の自律可能性を調べる最初のステップとして、1 基の供給ステーションと一群の自動車からなる「商圏」(Primary Market Area = PMA) を定義し、これを経済単位とした。一般に、商圏とはある商業施設が影響を及ぼす地理的な範囲のことをいうが、本研究では供給ステーションを支えるために必要な数の自動車が所在する地理的範囲をいう。たとえば、GRS が 1 基しかない村では村全体が商圏となり、都市間を結ぶ国道沿いの GRS では国道沿いに細長い範囲が商圏となる。本研究では、供給ステーション周辺に所在する固定客だけを経済性計算の対象とする。すなわち、旅行者は含まれない。高速道路や行楽地の GRS では遠距離からの旅行者によってその経営が支えられる場合もあると考えられるが、本研究ではこうしたケースは対象としない。

まず、入手可能な行政単位ごとに登録車数と GRS 数を調査する。これらより商圏あたり登録車数が求められる。次に、入手可能な行政単位ごとに新車販売台数と販売価格を

調査する。これより新車価格—累積販売台数分布曲線が求められる。

次に、新車価格—累積販売台数分布曲線と登録車価格—累積登録車数分布曲線が等価であると仮定する。次に、商圈当たり登録車数と登録車価格—累積登録車数分布曲線より、FCEV 想定販売価格（400 万円および 500 万円）以上の高価格帯登録車数を求める。

次に、同じ価格の FCEV と ICEV が存在したときに顧客が FCEV を選択する比率、すなわち FCEV 選択率を定義し（本研究では 50% および 10%）、高価格帯登録車数に掛け合わせることで FCEV 潜在需要数とする。

次に、FCEV 1 台あたりの年間水素消費量を JHFC の定義と同じ年間 9,500km 走行÷燃費 100km/kg=95kg とし、FCEV 潜在需要数と掛け合わせることで年間水素需要量を計算する—ここまでの水素需要面である。

次に、年間水素需要量に適合した HRS 水素供給能力と HRS 価格を求める。最後に HRS 水素供給能力と HRS 価格の組み合わせが経済的に実現可能かどうか判断することで自律可能性を検証する。

以上の手順は総合的な産業生態系の自律可能性を検証するための必要十分条件ではない。しかし、FCEV 潜在需要数に適合した HRS が経済的に建設できない限り FCEV 経済は自律できないことから必要条件の一つとすることはできる⁹³。

表 17 の手順で各種統計データを使用するにあたって、いくつか注意点が挙げられる。まず、日本の GRS の収益構成はもはやガソリン販売収益がその中心になっておらず、給油の際に付加的に行われる洗車、車検、物品販売等、いわゆる油外収入が中心となる場合も多い。これは日本の ICEV 経済が成熟期に入って GRS の最適化が進み、ICEV も GRS もいわばコモディティー化したためである。こうした収益構造をこれからスタートする FCEV 経済の前提として用いることは必ずしも適切ではないと考え、本研究では水素販売収益を経済性計算の基本とした。各種統計データを使用する際の仮定と補注を表 18、表 19 にまとめた。

ここで、理想的時点では同じ価格の FCEV と ICEV は顧客にとって同じ商品価値を持つはずなので、両者が共存する場合は FCEV と ICEV は同数存在するはずである。この状態を「FCEV 選択率 50%」と定義した。何らかの制約によって FCEV 以外の販売が禁止され

⁹³ HRS が経済的に建設できたとしても、FCEV が経済的に販売できなければ FCEV 経済は自律できない。FCEV が経済的に販売できるための条件は、2. 背景で述べたとおり比較的容易に検証できる。これについては 5. 4. 3 で検証する。

た場合はこの限りではないが、3章で述べたとおり FCEV のプロダクト・イノベーションが Disruptive ではないことから、これは楽観的すぎるだろう。

表 18 GRS 商圏と HRS 商圏における仮定

<p>【GRS商圏】 GRSはGRS商圏内のICEV顧客の燃料購入代金のみで自律的に存続している。 GRS商圏内のICEV数とICEV価格分布は、当該GRSを含むエリア全体の平均と等しい。 新車価格分布は、保有車両価格分布と等しい。</p> <p>【HRS商圏】 HRSはHRS商圏内のFCEV顧客の水素購入代金のみで自律的に存続している。 HRS商圏内のFCEV数とFCEV価格分布は、当該HRSを含むエリア全体の平均と等しい。 新車価格分布は、保有車両価格分布と等しい。</p> <p>【商圏】 理想的時点のHRS商圏とGRS商圏は、面積、車両台数、新車価格分布、保有車両価格分布、その他、経営に伴うあらゆる条件（人口、所得、政治、経済）において互いに等しい。</p>

表 19 用語に関する補注

<p>【理想的時点】 FCEV および HRS の普及によって経営に伴うあらゆる条件が ICEV および GRS と同じになり、ICEV と FCEV が同じ販売価格で同じ商品価値を持つ至った状態</p> <p>【FCEV販売価格】 本研究では 500 万円としたが、一部 400 万円の結果も示した</p> <p>【FCEV選択率】 FCEV と ICEV の販売価格が同じであった場合、顧客が FCEV を選択する比率。理想的時点での FCEV 選択率は定義上 50%である。</p>

以下、研究の方法について個別に補足する。

1. 累積販売台数を用いる理由

一般に、販売価格に対する新車販売価格をそのままプロットすると、グレードやオプションに応じて価格も台数も不均等かつ離散的に分布するためなだらかな曲線は得られない。そこで、最も販売価格の高い新車から安い新車に向けて、次に安い販売価格の新車が現れるたびに販売台数を累積すること不均等かつ離散的な分布は解消しなだらかな曲線が得られるため、統計的な処理が行いやすくなる。これをグラフ上にプロットしたものを新車販売価格－累積販売台数分布曲線という。

2. ASR (Accumulated Sales Ratio)

新車販売台数のうち、ある販売価格以上の新車販売台数が占める比率を ASR と定義した。これをグラフ上にプロットしたものを ASR 曲線といい、新車価格－累積販売台数分布曲線を相対化したものと同義である。この曲線を価格で微分すると新車価格－販売台数分布曲線が得られるが、これは販売価格に対する新車販売価格をそのままプロットしたものを平滑微分したものということも出来る。ただし、新車価格－販売台数分布曲線は直観的に利用できないことから、本研究では微分を用いないこととした⁹⁴。

3. FCEV 潜在需要

表 17 で定義したように、ある商圈においてある販売価格（例えば 500 万円）以上の登録車数の総和に FCEV 選択率を掛けたものを、ある販売価格（例えば 500 万円）の FCEV に対する FCEV 潜在需要と定義した。この場合、この販売価格を大きく超える登録車数も FCEV 潜在需要計算に一定比率で含まれるが、FCEV 想定販売価格以上の高価格帯における価格弾力性は、ICEV 普及価格帯における価格弾力性よりも非常に強く、よって、高価格帯の数は急激に少なくなることから本研究では無視できるとした⁹⁵。

4. FCEV 選択率

FCEV にとって様々な制約が予想される FCEV 普及初期に同じ販売価格の FCEV と ICEV が同じ商品価値を持つ可能性は少ないが、本研究ではまず FCEV 選択率 50% で計算を行い、次に現実的制約の一例として FCEV 選択率 10% で計算を行うこととした。

⁹⁴ 見かけ上、微分幅で販売台数が変化するため。例えば 2,000,000 (円) と 200 (万円) では、微分幅が 1 万倍大きい
ため販売台数も 1 万倍大きくなる。

⁹⁵ 図 2 の統計データから求めた 500 万円の ICEV の価格弾力性は 2.9 (2008 年東京) であり、潜在需要を過剰に見積る
懸念はほとんど無視できる

5. 2. 2 HRS 価格と水素コスト

日本の HRS 価格と水素コストは、水素・燃料電池実証プロジェクト JHFC が 2011 年に発表した第 2 期研究成果報告書 [JHFC, 2011] に詳しい。これによると、普及初期

(2015-2020 年) の FCEV を 5,000 台～155,000 台と想定したとき、70MPa オンサイト圧縮機直接充填 HRS が供給する水素コストは 77.4 円/Nm³ とされている。この HRS 価格は 3.63 億円、水素供給能力は 300Nm³/h であり、償却期間前提は 10 年、この際の FCEV 顧客数前提は 1,340 台とされている。本研究ではこれをフルサイズ HRS と呼称する (表 20)。また、償却期間前提に必要な FCEV 顧客数が充足された状態を HRS 利用率 100% とする。

表 20 にフルサイズ HRS の定義、表 18 にフルサイズ HRS の水素コスト詳細を示す。水素コストの 58.5% は固定費 (減価償却費、修繕費等) が占めており、ガソリンコストと比較して変動費 (都市ガス、電力等) が非常に小さいことが水素コストの特徴である。水素コスト (77.4 円/Nm³、867 円/kg) と、FCEV の水素消費率 100km/kgH₂ ([JHFC, 2011] 表 1.2.2-7) から計算した FCEV ランニングコストは、水素販売に対する利益や課税がない条件で 8.7 円/km であり、ガソリン価格 160 円、燃費 20km/L を想定したときの HEV の燃費 (8.0 円/km = 160 円/Lm = 160 価格と概ね同等であった。

に JHFC 水素コストの詳細、図 33 に水素コスト内訳、図 34 にガソリンコスト内訳をそれぞれ示す。

表 20 フルサイズ HRS の定義

• 水素供給能力	300Nm ³ /h
• 価格	3.63 億円
• FCEV 顧客数	1,340 台 (10 年償却前提)

表 2 1 JHFC 水素コスト

(出典 [JHFC, 2011])

項目	円/Nm3	比率
都市ガス	21.5	27.8%
電力	9.6	12.5%
上水	0.7	0.9%
廃水	0.2	0.3%
触媒・薬品	0.0	0.0%
変動費	32.2	41.5%
減価償却費	23.6	30.5%
修繕費	7.1	9.1%
人件費	6.8	8.8%
土地賃借料	3.6	4.6%
固定資産税	1.8	2.3%
一般管理費（労務費）	1.4	1.8%
保険料	1.0	1.3%
諸経費	0.0	0.0%
固定費	45.3	58.5%
合計	77.4 円/Nm3	
	866.9 円/kg	

表 2 2 JHFC 水素コスト (詳細)

(出典： [JHFC, 2011]を元に著者作成)

水素ステーション形式 70MPa オンサイト 300Nm³/h 圧縮機直接充填(2段) 水素ステーション

水素ステーション規模	300	Nm ³ /h		
水素ステーション運用方式	365	日/年	13	hr/day 運転
水素ステーション建設費	363,000	千円		
年間水素製造量	1,538,475	Nm ³	4,215	[Nm ³ /日]
年間水素製造量	137,364	kg	376	[kg/日]
1営業日の都市ガス消費量	511,000	Nm ³	1,400	[Nm ³ /日]
1営業日の都市ガス消費量	442,015	kg	1,211	[kg/日]
1営業日の電力消費量	1,141,251	kWh	3,127	[kWh/日]
都市ガス単価	50.3	円/kgCH ₄		産業用B契約
都市ガス単価	43.5	円/Nm ³ CH ₄		産業用B契約
水素質量換算	11.2	Nm ³ /kgH ₂		

	単価		年間数量		年間経費		Nm ³ 単価	
変動費								
都市ガス	75	円/kg		441,890		33,141,750	円	21.5 円
電力	13	円/kWh		1,141,251		14,836,263	円	9.6 円
上水	330	円/ton		3,428		1,131,240	円	0.7 円
廃水	220	円/ton		1,714		377,080	円	0.2 円
触媒・薬品						0	円	0.0 円
小計						49,486,333	円	32.2 円
固定費								
人件費	7,000,000	円/人	人員数	1.5	人	10,500,000	円	6.8 円
減価償却費	10	年	建設費	363,000,000	円	36,300,000	円	23.6 円
修繕費	3%		建設費	363,000,000	円	10,890,000	円	7.1 円
保険料	0.77%		簿価前提 55%	199,650,000	円	1,537,305	円	1.0 円
固定資産税	1.40%		簿価前提 55%	199,650,000	円	2,795,100	円	1.8 円
諸経費	0%					0	円	0.0 円
一般管理費(労務費)	20%					2,100,000	円	1.4 円
土地賃借料	550	m ²		10,000	円/m ² 年	5,500,000	円	3.6 円
小計						69,622,405	円	45.3 円
合計								
年間経費合計・水素単価						119,108,738	円	77.4 円
変動費								32.2 円
固定費								45.3 円

※太字は JHFC 所与

水素価格（77円/Nm³、税抜）

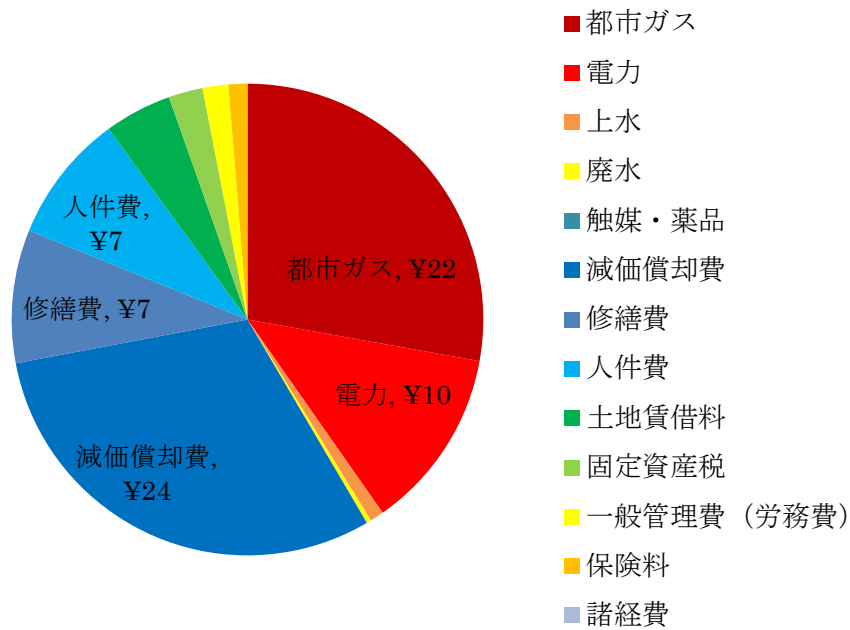


図 3 3 水素コスト内訳

(出典：著者作成)

ガソリン価格（83円/L、税抜）

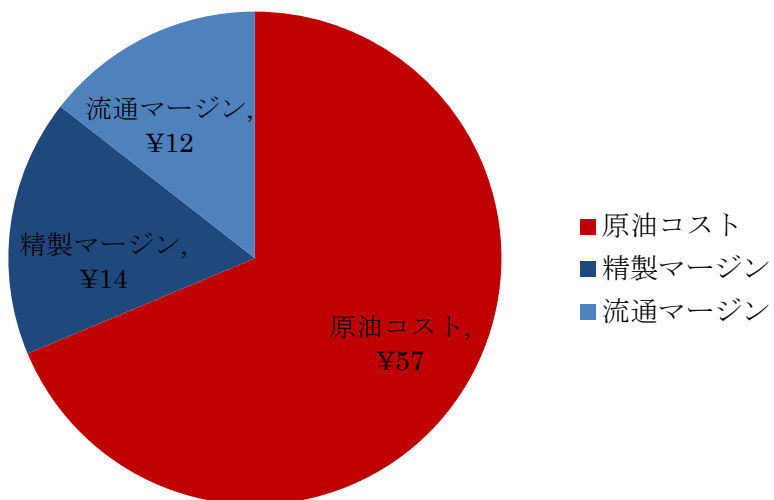


図 3 4 ガソリンコスト内訳

(出典：日本エネルギー経済研究所 2012 年 12 月のデータを元に著者作成)

資源エネルギー庁資料⁹⁶によると、「標準的な供給能力を有する水素ステーションの整備費は、4～5億円程度であり、一般的なガソリンスタンドの整備費が1億円を下回るのと比べると、非常に高額となっている」とされている。日本では2014年4月11日にエネルギー基本計画が閣議決定され、「四大都市圏を中心に2015年以内に100ヶ所程度の水素ステーションの整備をする」⁹⁷という政府目標が掲げられたことを受けて政府補助金を活用したHRS建設が進められており、HRSコスト情報を得ることが可能である。

燃料電池自動車用水素供給設備設置補助事業を管轄する次世代自動車振興センターによると、平成25年度補助事業で16件のHRS建設が採択され⁹⁸、このすべてが300Nm³/h以上の固定式HRS（フルサイズHRS）であった。また、平成26年度補助事業では24件のHRS建設が採択され⁹⁹、このうち300Nm³/h以上の固定式HRSが10件、100Nm³/h以上300Nm³/h未満の移動式HRSが12件、同じく固定式HRSが1件、11設備に水素供給を行う水素集中設備が1件（供給能力不明）であった。これらに対する補助金は、「補助金の申請額は、補助対象経費の2分の1と補助上限額（表23、表24）を比べて低い金額」とされている。

表 23 平成26年度 燃料電池自動車用水素供給設備設置補助事業 補助金上限表

（出典：次世代自動車振興センター）

水素供給設備の規模	水素供給能力（Nm ³ /h）	供給方式	補助上限額（百万円）
中規模	300以上	オンサイト方式	250
		オフサイト方式	190
小規模	100以上300未満	オンサイト方式	160
		オフサイト方式	130

⁹⁶ 資源エネルギー庁「水素社会の実現に向けた取組について」（2015.2.24 更新）燃料電池自動車等の普及促進に係る自治体連携会議（第1回） - 配布資料

http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/nenryodenchi_fukyu/pdf/001_04_01.pdf

⁹⁷ http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2014pdf/whitepaper2014pdf_1_3.pdf

第3章第8節3. “水素社会”の実現に向けた取組の加速

⁹⁸ 次世代自動車振興センター2014.6.6 参照 <http://www.cev-pc.or.jp/hojo/suiso_ketteinaiyou_h25.html>

⁹⁹ 次世代自動車振興センター2015.6.6 参照 <http://www.cev-pc.or.jp/hojo/suiso_ketteinaiyou.html>

表 2 4 平成 26 年度 燃料電池自動車用水素供給設備設置補助事業 補助金上限表

(出典：次世代自動車振興センター)

水素供給設備の規模	水素供給能力 (Nm ³ /h)	供給方式	補助率	補助上限額 (百万円)
中規模	300以上	オンサイト方式 (パッケージを含むもの)	定額	280
		オンサイト方式 (上記に該当しないもの)	1/2	280
		オフサイト方式 (パッケージを含むもの)	定額	220
		オフサイト方式 (上記に該当しないもの)	1/2	220
		移動式	定額	250
小規模	100以上 300未満	オンサイト方式 (パッケージを含むもの)	定額	180
		オンサイト方式 (上記に該当しないもの)	1/2	180
		オフサイト方式 (パッケージを含むもの)	定額	150
		オフサイト方式 (上記に該当しないもの)	1/2	150
		移動式	定額	180
水素集中製造設備 (供給先水素供給設備 1 設備当たり、ただし 1 0 設備を上限とする)			1/2	60
液化水素対応設備			1/2	40
オンサイト方式 : 水素製造装置を敷地内に有する オフサイト方式 : 水素製造装置を敷地内に有さない 移動式 : 充填性能に直接関わる設備を 1 の架台に搭載し移動可能なもの パッケージ : 主要設備を 1 又は 2 の筐体に内包した設備形態のもの 水素集中製造設備: 供給先水素供給設備に、水素を集中的に製造及び供給する 液化水素対応設備: オフサイト方式設備のために液体水素を受け入れ供給する 水素供給能力 : 燃料電池自動車等への平均的な水素充填能力				

平成 26 年に発行された資源エネルギー庁資料¹⁰⁰によると、300Nm³/h の HRS 申請額実績は JHFC 試算よりやや増加して 4.6 億円であった。また、ここでは近い将来の HRS コストにも言及されており、主要機器コスト実績 (圧縮器・蓄圧器・プレクーラ・ディスペンサ) 2.8 億円に対して、欧州では使用材料の変更や量産を見込んだ価格の見直しで 1.3 億円まで低減するとされた。たとえばデンマークの H2 Logic 社は 48 時間で設置可能なパッケージ型 HRS を発表しており、主要機器以外の設置費用等に関しても更なる低減が進

¹⁰⁰ 資源エネルギー庁「燃料電池自動車について」(2014.3.4 更新) 水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ (第 3 回) - 配布資料

むと期待されている¹⁰¹。そこで、本研究では JHFC 試算の 3.63 億円が妥当と考えこれをそのまま用いることとした。

なお、JX 日鉱日石エネルギーの 2014 年 12 月 25 日プレスリリース¹⁰²によると、水素販売価格は 1,000 円/kg であり、ランニングコストは 10 円/km と求められる。同社の HRS（商用水素ステーション 1 号店）は水素供給能力 300Nm³/h のフルサイズ HRS であり、仮にコスト前提が JHFC 報告と同じであった場合、1,000 円－867 円＝133 円が水素販売の粗利益となる。しかし、表 2 1 は HRS 商圏あたり FCEV 台数が目標値である 1,340 台に達した場合の理論値であり、トヨタ MIRAI の 2015 年度販売目標 300 台のみでは HRS 一基当たり 1,340 台に満たないことは明らかである。

仮に 300 台の MIRAI が 2015 年を通して特定の HRS 周辺に所在し、かつ、政府補助金で HRS 建設費負担が 2.3 億円に半減した場合の水素コストは、表 2 1 より以下のように概算¹⁰³することができる。

数式 2

$$195.2\text{円}/\text{Nm}^3 = ((45.3 - 23.6) + 23.6 \times (2.3\text{億円} / 3.63\text{億円})) \times (1,340\text{台} / 300\text{台}) + 32.2$$

HRS 建設費負担については愛知県¹⁰⁴や東京都¹⁰⁵をはじめとして各地方自治体からも補助金の積み上げが検討されている。愛知県の場合は国費と合わせて 3/4、東京都の場合は 4/5 とされており、これらの効果でより少ない FCEV 数でも HRS 利用率が改善することが期待される。しかしながら、1,340 台に代わる台数目標は愛知県と東京都でそれぞれ 335 台、268 台であり、まだ多いと言わざるを得ないだろう。

日本において GRS 商圏あたり ICEV 台数が 1,340 台に達したのは 1999 年（1,336 台）であった。事業初年度から水素供給能力 300Nm³/h の HRS を建設するのは例えるなら 1946 年に 1999 年の GRS を建設するようなものであり、53 年後の需要拡大を見込んで供給能力を設定したとしても合理性にかけていいだろう。

¹⁰¹ H2 Logic（2013.6.3 更新）2014.5.31 参照

<<http://www.h2logic.com/com/shownews.asp?lang=en&id=424>>、

¹⁰² 「当社商用水素ステーション 1 号店の開所および水素販売価格の決定について」

http://www.noe.jx-group.co.jp/newsrelease/2014/20141225_01_0794529.html

¹⁰³ より正確には修繕費や FCEV 目標数の見直しも必要である

¹⁰⁴ 水素ステーション整備・需要創出活動に対する補助制度を創設 <http://www.pref.aichi.jp/0000082028.html>

¹⁰⁵ 水素社会実現に向けた補助事業開始のお知らせ

<http://www.metro.tokyo.jp/INET/OSHIRASE/2015/03/20p3u900.htm>

次に FCEV 潜在需要に適合した小型 HRS の価格と経済性について検討する。

5. 2. 3 小型 HRS 価格の計算

小型 HRS の価格は公開されていない。そこで、本研究ではフルサイズ HRS の水素供給能力と建設費を起点とする単純比例計算からこれを求めることとした。

ここで、HRS に限らずあらゆる設備の能力と価格が単純比例しないことは明らかであり、一般に規模が小さいほど能力あたりの価格は高騰する（スケールアップ効果）。一方、ある地域で一定の水素消費需要があったとき、規模が小さい HRS ほど多く設置される必要があるため、一基しか発注しないときより低価格になることが期待される（量産効果）。

図 35 に、この関係を示す。

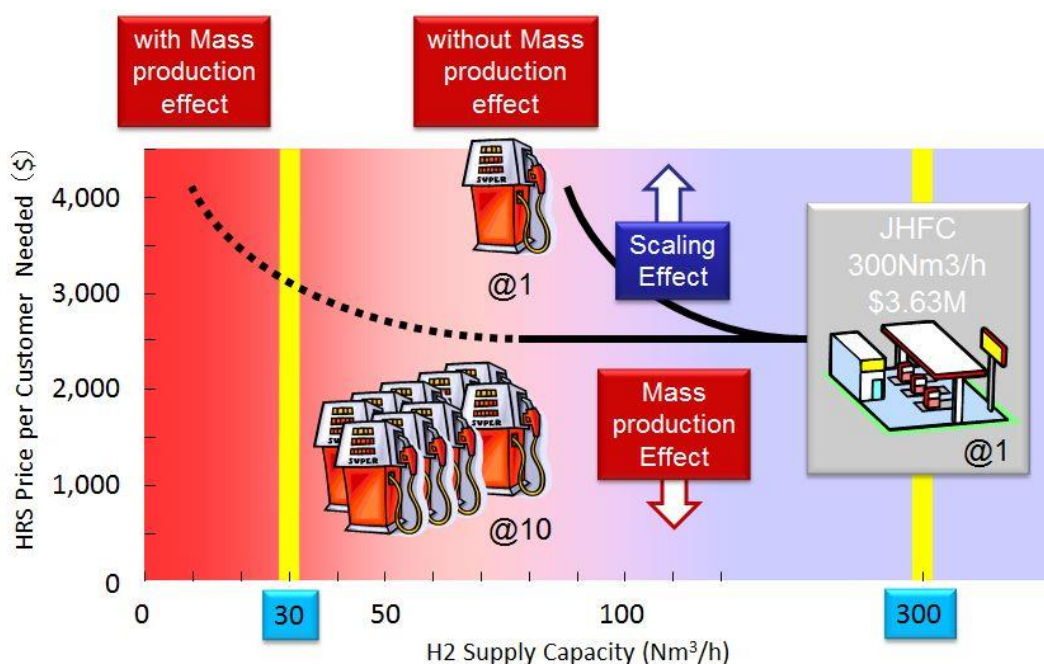


図 35 HRS 価格高騰曲線と単純比例計算範囲 (30-300Nm³/h)

例えばフルサイズ HRS（建設費 3.63 億円、想定顧客数 1,340 人）の場合、顧客あたり HRS 建設費は 27.1 万円である。JHFC 報告によると FCEV の年間水素消費量は 95kg、10 年間で 950kg の水素を購入する。顧客が 10 年間で 27.1 万円を支払うと考えたとき、1Nm³あたりの単価は $27.1 \text{ 万円} \div 950 \text{ kg} = 285 \text{ 円/kg} = 25.4 \text{ 円/Nm}^3$ と求められる。これは減価償却費

の定義そのものである。図 35 で示したような量産効果とスケールリング効果の相殺がどの範囲まで適用されるかは不明であるが、本研究では 30Nm³/h から 300Nm³/h まで単純比例計算が成立すると仮定した。例えば水素供給能力 30Nm³/h の小型 HRS 場合、価格は 3,630 万円と求めることが出来る¹⁰⁶。

5. 4 結果

5. 4. 1 HRS の自律経済性（商圏内需要面）

図 36 に、各都道府県の人口密度に対する GRS 商圏面積および GRS 当たり FCEV 数の分布を示す。ここで、GRS 商圏面積は総面積から林野面積と主要湖沼面積を差し引いた可住地のみを対象としている。2010 年の人口密度は東京および北海道でそれぞれ 9,116 人/km²、204 人/km²、GRS 商圏面積は 1.0 km²/基（可住地 1,443 km²、GRS 1,385 基）、13.4 km²/基（可住地 27,046 km²、GRS 2,003 基）、GRS 当たり ICEV 数は 3,108 台/基、1,753 台/基であった。

東京と北海道の GRS 商圏面積は 13.4 倍異なるが、GRS 当たり ICEV 数は 1.9 倍しか異なる。これは、合理化の進んだ近年の GRS には最小の労務費で収益を上げるための最小規模（GRS 当たり ICEV 数）が存在し、顧客の利便性改善のために超小型 GRS を多数配備して商圏面積を縮小するという手段を採りづらいためと推察される。

¹⁰⁶ 2010 年に実施された日産自動車のヒアリング調査において、複数の HRS 製造会社より、一定の量産台数前提においてこの価格が実現可能であるとの証言を得た

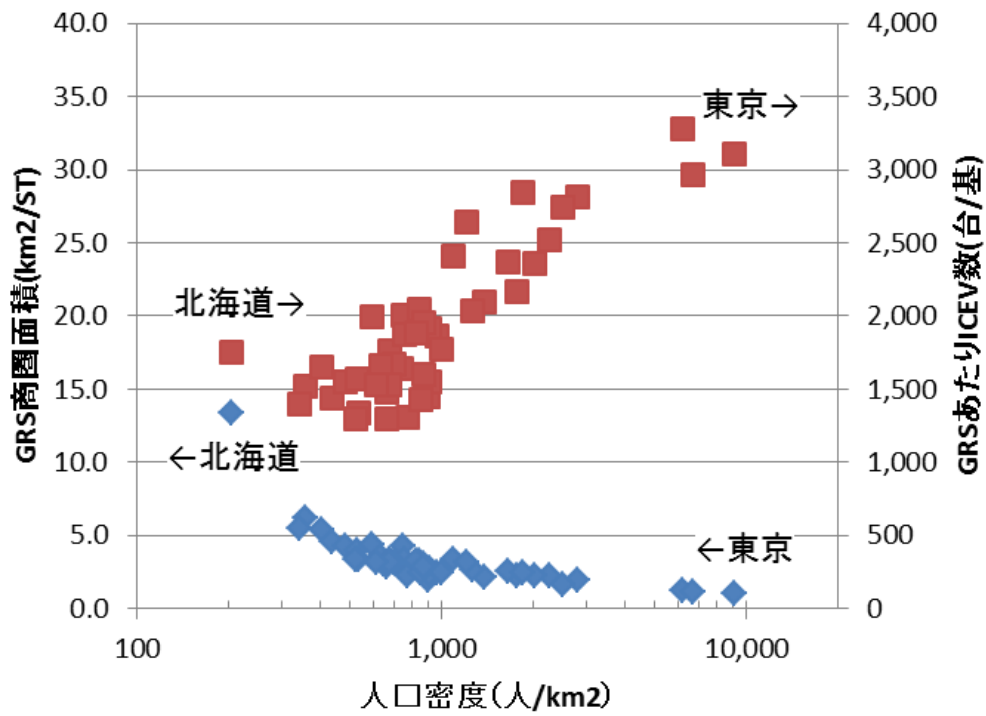


図 3 6 人口密度に対する GRS 商圏面積と GRS 当たり FCEV 数 (台/基)
 (資源エネルギー庁および国土交通省データより著者作成)

図 37 に、日本全体、デンマーク全体、および、日本の 8 都市とコペンハーゲンにおける 2008 年の ICEV 新車販売統計から求めた新車価格－累積販売台数分布曲線を示す。普及初期の FCEV 販売価格は政府補助金を考慮しても 500 万円以上と想定されるが、販売価格 500 万円における日本平均（赤線）の ASR は 2.3%、日本で最も富裕層が多いと思われる東京での ASR は 10.5%であった。コペンハーゲンとデンマーク全体の ASR は東京よりはるかに高いが、これは購買力が高いためではなく車両価格の 180%が課税されるデンマーク特有の自動車登録税の影響と考えられる。日本平均の GRS 当たり平均 ICEV 数、GRS 商圏あたりの ICEV 台数はそれぞれ 2,039 台、47 台、東京はそれぞれ 3,191 台、168 台と求められた。

なお、図 37 を対数表示した図 38 を見ると、デンマーク全体と東京、川崎、横浜、大阪では価格弾力性理論が予想するような直線が ASR の 10-100% にわたって認められた。一方、福岡、堺、北九州および日本全体では約 140 万円で直線の屈折が認められた。これは 2014 年の新車販売台数の 40% を超え、かつ、地方での普及が盛んな軽自動車の影響と予想される。

各都市における GRE 当たり ICEV 数、ASR、および、FCEV 選択率 50% における FCEV 潜在需要と年間潜在需要を表 25 に示す。なお、GRS 当たり ICEV 数については各都市で個別に入手できなかったため本研究では各都道府県における値を使用することとした。年間潜在需要は潜在需要を日本における乗用車平均車両使用年数 11.67 年（軽自動車を除く全国平均、2008 年）で割る事によって計算した。

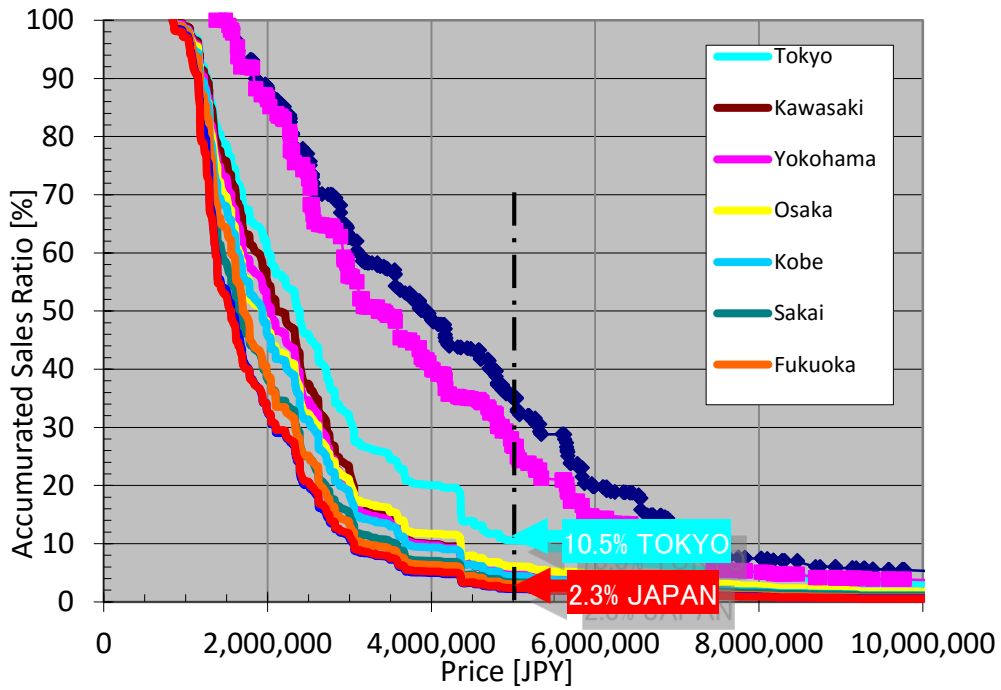


図 3 7 新車価格—累積販売台数分布曲線

(著者、2011 JATO Dynamics、2011 Nissan Motor)

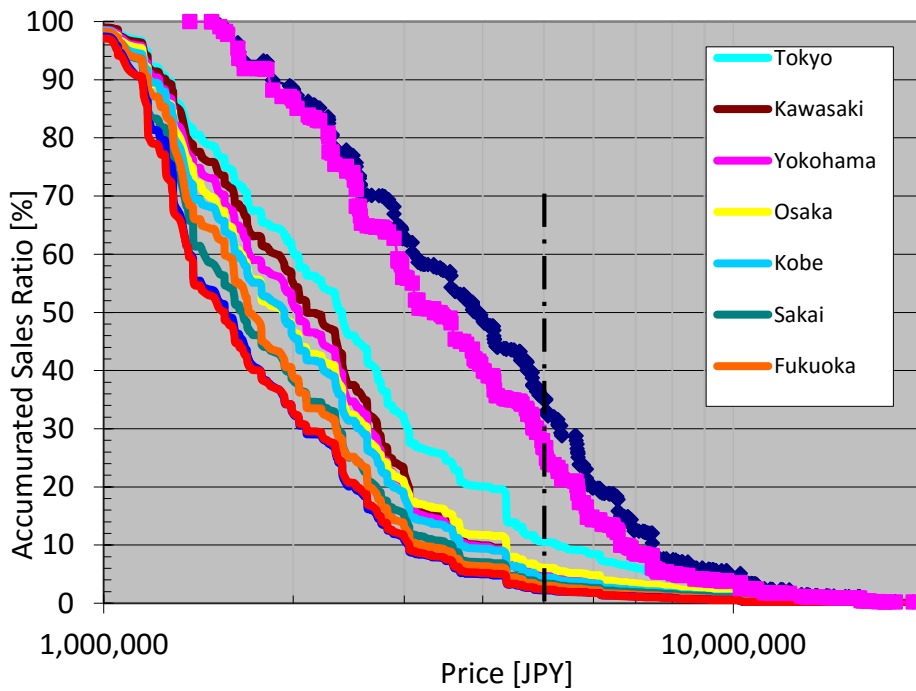


図 3 8 新車価格—累積販売台数分布曲線 (対数スケール)

(著者、2011 JATO Dynamics、2011 Nissan Motor)

表 25 FCEV 選択率 50%での潜在需要計算

(全国石油協会「都道府県別給油所数の推移」他より著者作成)

販売エリア	500 万円以上				400 万円以上		
	GRS 当たり ICEV 数	ASR	FCEV 潜在需要	年間 潜在需要	ASR	潜在需要	年間 潜在需要
	台/基	%	台/基	台/基年	%	台/基	台/基年
コペンハーゲン	-	35.1	560	48	48.1	767	66
デンマーク	-	26.8	428	37	39.9	637	55
東京	3,191	10.5	168	14	20.0	319	27
大阪	3,022	6.1	92	8	11.7	177	15
横浜	3,320	4.6	76	7	9.7	161	14
神戸	2,363	4.4	52	4	9.4	111	10
川崎	3,320	4.4	73	6	6.5	108	9
堺	3,022	3.4	51	4	7.0	106	9
福岡	2,836	3.0	43	4	6.3	89	8
北九州	2,836	2.2	31	3	5.0	71	6
日本	2,039	2.3	23	2	5.2	53	5

東京における 500 万円の FCEV 潜在需要は商圈あたり 168 台/基(=339×50%)、年間潜在需要は平均 14 台/基年(=168/11.67)と求められた。ここで、FCEV 潜在需要を自動車の平均使用年数より前の普及初期と後の成熟期で区別する必要がある。すなわち、平均使用年数に到達して FCEV 潜在需要がすべて顕在化するまでの間、HRS 当たり FCEV 数は常に予定数を充足しない状態が続く。このため普及初期は償却の遅れによって固定費が高騰する。普及初期における 10 年間平均 FCEV 数は数式 3 によって求められる。

数式 3

$$79 = \sum_{i=1}^{10} (168/11.67)i / 10$$

10 年間平均 FCEV 数は 79 台であり¹⁰⁷、成熟期 168 台の半数以下であった。FCEV 選択率 50%という比較的楽観的な条件におおいてもフルサイズ HRS の水素高騰率は 1,003%であり (数式 4)、水素販売価格の 10 倍に及ぶ補助金が必要であることを意味している。

¹⁰⁷ 実際には右のように計算した。78 = (168/11.67)∑_{i=1}¹⁰ i/10

数式 4

$$1,003\% = (1,340/79) \times 56.8\% + 41.5\%$$

5. 4. 2 HRS の自律経済性（商圏内供給面）

以上の潜在需要計算をもとに、これにマッチする HRS 水素供給能力を計算した。① FCEV 選択率 50%、② FCEV 選択率 10%、③ FCEV 選択率 10% + HRS 商圏面積拡大、のそれぞれのケースにおける結果を表 26 に示す。

表 26 HRS 水素供給能力と HRS 価格目標（東京）

		①	②	③
FCEV 選択率		50%	10%	10%
HRS 商圏面積		1.0km ² *	1.0km ² *	4.2km ² **
500 万円以上	FCEV 潜在需要 (台/基)	168	34	140
	HRS 水素供給能力 (Nm ³ /h)	38	8	31
	HRS 価格目標 百万円	45	9	38
400 万円以上	FCEV 潜在需要 (台/基)	319	64	268
	HRS 水素供給能力 (Nm ³ /h)	71	14	60
	HRS 価格目標 百万円	86	17	72
HRS 自律経済性		○	×	○
*東京 GRS 商圏面積(1.0km ² , 2010 年)と同じ				
**北海道 GRS 商圏面積(13.4km ² , 2010 年)からの平均旅行速度補正				

【FCEV 選択率 50%】（表 26 ①）

HRS あたり FCEV 潜在需要は FCEV 選択率 50% の 168 台/基であり、HRS 水素供給能力は 38Nm³/h と求められた。図 35 の定義より 38Nm³/h は比例計算限界内であり、フルサイズ HRS の HRS 充填能力と価格から単純比例計算で求められた HRS 価格は 0.58 億円であった。

しかし、本研究では GRS と HRS がある地域に同数存在し、保険や税金も含めた全ての環境が ICEV と FCEV で対等になった理想的状態を FCEV 選択率 50%と定義している。よって、FCEV 選択率 50%は燃料電池自動車の自律的市場創出を考えるにあたって明らかに適切ではない。一方、乗用車顧客を対象とする限り、FCEV 選択率は潜在顧客の認知メカニズムと決定メカニズムその前提となる広報や潜在顧客にとってのベンチマークなど、広範な社会科学的調査を必要とする。これは本研究の範囲をはるかに超える。

たとえば Rogers はその著書”Diffusion of Innovations” [Rogers, 2007]においてイノベーションの普及が正規分布で進行すると仮定した。このうち、「イノベーション採用者の平均値から 2σ 差し引いたその左側には、社会システムの内最初のイノベーションを採用した $2.5\%^{108}$ の成員が属して」(p228)いるとして、冒険的という際立った特質をもつ Innovator と定義した。しかし、2.5%はイノベーション普及論の概要を説明するための参照値であり、あらゆる新規事業であらゆる環境と無縁に新商品を購入する顧客が 2.5%存在することを保証するものではない。

また、2012 年現在の GRS 数は 36,349 基 (図 3 9)、日本の HRS 建設目標は 100 基である。このため、100 基が完成しても FCEV が長距離運転中に HRS を見出せる可能性は $0.3\%=100/26,349$ しかない。HRS の見つけにくさを FCEV 選択率とする直接的根拠は存在しないが、HRS 数が 36,349 基に到達したときが理想的状態である 50%になることを考えると、何らかの間接的相関を想像することは許容されるであろう。

そこで、本研究では FCEV 選択率は 0.3%から 50%までの範囲に存在すると仮定するに留め、この中から特定の FCEV 選択率を仮置きしたときの自律経済性を検討することで課題抽出を先行することとした。以下の検討では FCEV 選択率 10%で検討を行った。

【FCEV 選択率 10%】(表 2 6 ②)

HRS あたり FCEV 潜在需要は FCEV 選択率 50%の 168 台/基から 34 台/基まで低下し、これに伴って HRS 水素供給能力と HRS 価格目標もそれぞれ 8Nm³/h、0.09 億円に低下した。この水素供給能力は、本研究で定義した単純比例計算の適用下限(30Nm³/h)以下であり、この FCEV 選択率 10%ではスケール効果が強すぎるため HRS 商圏の自律可能性はないと判断された。

¹⁰⁸ 実際の確率は、 $0.5 \cdot P(m-2\sigma \leq X \leq m) = 0.0228$ 、すなわち 2.3%である。Rogers がなぜ 2.5%としたかは不明。

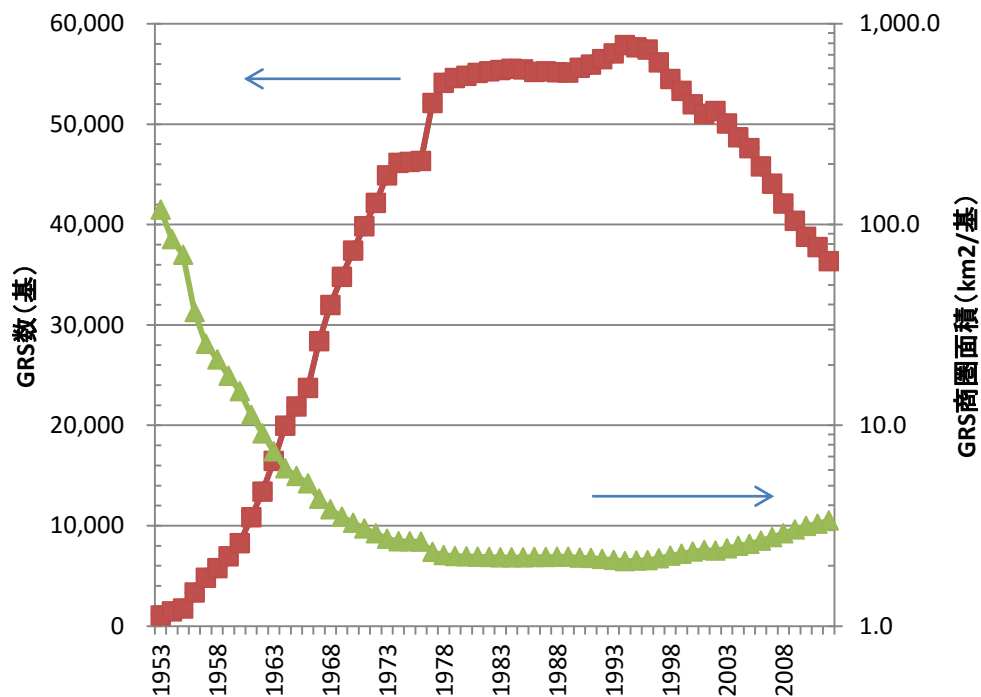


図 3 9 GRS 商圏面積と GRS 数の推移

(石油統計年報、自動車検査登録情報協会資料、平成 21 年度土地所有・利用の概況、より
著者作成)

そこで、FCEV 選択率 10% のままで HRS 商圏の自律可能性が発現する可能性を調べるため、HRS 商圏面積について GRS 商圏面積の統計データから考察することとした。すなわち、ここまでの計算では HRS 商圏は GRS 商圏と同じ面積が仮定されているが、前述のとおり、東京の GRS 商圏面積は 1.0km²/基であり非常に密に配備されることで顧客の利便性を最大化している。普及初期における Innovator が FCEV 顧客となった場合、より遠距離にある供給ステーションを利用することは十分予想されるであろう。

GRS 商圏面積と GRS 数の推移を図 3 9 に示す。日本の GRS 商圏面積は GRS 数の増加に伴って 1960 年から 1980 年にかけて急激に縮小し、2000 年までの停滞期のあと、GRS 数の減少に伴って 2000 年から緩やかに増加している。このうち、1960 年から 1980 年においては、現在より遠方の GRS が利用されながら GRS 数は増加していた。このように、もし遠距離の HRS 利用に躊躇しない FCEV 顧客数が増えれば HRS 商圏面積が拡大したことと同義であり、1 基の HRS を支える FCEV 顧客数が増えることで、本研究で下限とした 30Nm³/h 以上の HRS を導入できる可能性も見えるであろう。一方、平均的な Innovator

が 10km 先の HRS を利用すると仮定することは必ずしも合理的ではない。そこで、国土交通省の統計データの基づき、東京在住の平均的な Innovator は、GRS まで運転する時間が最も長い都道府県の ICEV 顧客と同じ時間を運転することは躊躇しない、という仮定のもとに HRS 商圏を拡大したケースについて自律可能性を検証した。

国土交通省の平成 22 年度交通センサスによると、東京と北海道における昼間 12 時間平均旅行速度（時間帯別交通量による加重平均）はそれぞれ 24.4km/h、44.2km/h とされている。ここで、GRS 商圏外縁部の顧客が GRS まで運転する時間は GRS 商圏面積を円と仮定したときその半径と旅行速度から概算する事が出来、その比は一定の意味を持つ。これを計算したところ北海道は東京の 2.05 倍であった。本研究ではこの時間の自乗を商圏面積拡大率と呼ぶ。この場合、商圏面積拡大率は 4.2 倍であった。東京の FCEV 顧客が現在の 2.05 倍の運転時間を許容した場合に拡大される HRS 商圏面積をもとに再計算を行った結果を表 26 右列に示す。

【FCEV 選択率 10%、HRS 商圏面積拡大】（表 26 ③）

運転時間が 2.05 倍になることによって、東京の HRS 商圏面積は 1.0km² から 4.2km² に拡大し、FCEV 潜在需要は 34 台/基から 140 台/基に改善した。これにマッチした HRS 水素供給能力は 31Nm³/h と求められ、本研究の計算範囲の 30Nm³/h 以上を回復した。また、HRS 価格は 0.38 億円と求められた。10 年間の平均 FCEV 数は 66 台/基

数式 5

$$66 = \sum_{i=1}^{10} (140/11.67)^i / 10$$

と少ないが、フルサイズ HRS ではなく、FCEV 潜在需要に適合した小型 HRS を用いることによって固定費の高騰率は 212%=140/66 に止まった。このため、普及初期の小型 HRS における水素コスト高騰率は 162%であり、フルサイズ HRS における水素コスト高騰率 1,003%より大きく改善された。

数式 6

$$162\% = (140/66) \times 56.8\% + 41.5\%$$

以上の結果、HRS 商圏の水素供給面については以下の条件であれば自律可能性があることが見出された。表 27 に日本で最も可能性の高い東京の例を示す。ここで、表中の () 内は東京での数値を示す。

表 27 HRS 商圏経済の自律条件 (例)

<ol style="list-style-type: none"> 1. 商圏当たり登録車台数が多い (3,191 台/GRS 商圏) 2. FCEV 想定販売価格での ASR が高い (10.5%) 3. FCEV 想定販売価格以上の高価格帯登録車数が多い (335 台/GRS 商圏) 4. FCEV 選択率が高い (10%→本研究での仮置き) <ul style="list-style-type: none"> ● 商圏当たり登録車台数が最も高い東京でもここまででは自律可能性はない 5. 商圏面積拡大率が高い (4.2→運転時間比と運転速度比より算出)

ここで、普及初期における Innovator の行動を考えた場合、商圏面積拡大率は ICEV 統計における最大値であった 4.2 よりも高い数値をとる可能性はあるだろう。一方、FCEV 選択率が 10%である可能性はかなり厳しい。たとえば本研究では FCEV 選択率の下限として HRS 数と GRS 数の比率である $100/36,349=0.3\%$ を採用したが、100 基程度の HRS 数では、人々が他者と同じものを購入しようとする心理的傾向 (Leibenstein, 1950)や、同一製品の購入者の数の大きさによってその製品の便益の大きさが変動する (Rohlf's, 2005)ことによって生じるバンドワゴン効果が十分ではなく、ASR と FCEV 選択率から求められる潜在需要に至らない恐れがある。以上が本研究における限界である。

前述のとおり FCEV 選択率と商圏面積拡大率という更なる社会科学的調査が必要な項目についてはその最大範囲を取り決めるに止め、この範囲の中から特定の数値を仮置きすることで全体の計算スキームを構築するという目的は達成できたものとする。

5. 4. 3 FCEV の自律経済性

以上、HRS 商圏の自律可能性について、水素供給面から供給ステーションの自律可能性という観点から分析を行った結果、表 27 を代表とするいくつかの条件のもとで個別

の HRS 商圏において成立する可能性が見出された。

一方、FCEV 乗用車を個別の HRS 商圏の自律可能性について、FCEV 面はどうだろうか。前述のとおり、日産自動車は 2001 年に FCEV 技術開発に向けた投資額を「5 年間で 850 億円」と発表した¹⁰⁹。これを参考に仮に FCEV 商業化までに必要な全投資額を 1,000 億円として 10 年間で回収するとした場合、販売価格対減価償却費率を 10%と仮定したときに経営が成り立つには、販売価格 500 万円の FCEV で少なくとも年間 20,000 台 (=1,000 億円 / 10 年 / (500 万円×10%)) の FCEV 最低需要を必要とする。

5 章で試算したように、もっとも ASR の高い東京でもその購買力をもって初年度に配備可能な HRS 商圏 (4.2km²) 当たり FCEV 数は 12 台/基年 (=140/11.67) であり、年間 20,000 台規模の最低年間需要を創出するには 1,667 基 (=20,000/12) が必要である。この商圏面積を合計すると 7,001km² となり、可住地面積割合の高い大阪市の面積 (225km²) 31 個分に相当する。

世界の首都面積が、ワシントン DC159km²、オタワ 110km²、パリ 105km²、アムステルダム 207km²、ブリュッセル 161km² 等であることを考えると、首都クラスの 30 の大都市にそれぞれ 50 基 (1650=30*55) 程度の HRS を導入し、各都市で年間 660 台程度の FCEV 販売体制 (ディーラー、メンテナンス、リサイクル、保険等) を整える必要があることを意味する。現在の日本の自動車産業は、販売台数 1 台あたり 1.6 人の雇用で成立している。各都市で 660 台ということは 1,056 人の雇用である。これを 30 都市で同時にスタートはやや難しいだろう。

小型 HRS でこれを整備した場合の総投資額は 634 億円 (=0.38 した,667)、フルサイズ HRS でこれを整備した場合の総投資額は 6,051 億円 (=3.63 した場合の総投である。また、普及初期での水素コスト高騰率はそれぞれ 146%と 1,003%である。

図 35 において、量産効果がスケーリング効果を相殺してフルサイズ HRS 水素供給能力の 1/10 まで単純比例計算が成立するとの仮定を掲げたが、仮にこのときの量産効果が発現する最低台数を年間 100 基¹¹⁰と仮定すると、HRS 製造会社 1 社の損益分岐点は FCEV 台数でいうと最低 1,200 台/年とすることが出来る。これは自動車会社の損益分岐点 20,000

¹⁰⁹ Nissan Press Release, Nissan and Renault are working together in an intensive five-year joint R&D program to develop FCV technology; 85 billion yen will be invested in this program, 23 Oct 2001
<http://www.nissan-global.com/EN/NEWS/2001/_STORY/011023-01.html>

¹¹⁰ 2010 年に実施された日産自動車のヒアリング調査において、複数の HRS 製造会社より、年間 100 基の量産台数前提における販売価格の回答を得た

台/年と比べて低い。自動車会社の初期投資が数千億円であるのに対して、HRS 製造会社のそれは数百億円以下と考えられるため、損益分岐点の差は妥当だろう。損益分岐点 100 基/年の HRS 製造会社 17 社が共同で従事すれば水素供給能力は合計 20,4000 台/年になり、大手自動車会社 1 社の FCEV 損益分岐点である 20,000 台/年を超えて双方とも自律経済化が達成する。しかし、しかし、これはあり得そうにない (表 28)。

表 28 FCEV 乗用車経済の自律経済性

アクター	FCEV 乗用車経済	
	HRS	FCEV
損益分岐点	過剰能力	Vagary
初期投資	100 億円以下	数千億円
損益分岐点	100 基/年	20,000 台/年
小型化下限	12 台/基	
単社損益分岐点 FCEV 換算	1,200 台/年	
FCEV 成立条件	17 社	1 社
総合判断	○	×

以上より、FCEV 乗用車経済をゼロから立ち上げることで本研究の経済的成功の条件 (表 1) を達成することは現実的に難しい、と結論付けられた。

5. 6 考察

表 29 に、本章で実施した検証過程を示す。ここでは「自動車の平均使用年数を超える償却期間を厭わないという合意」がなされている **FCEV 乗用車** に注目し、まずインフラ要因である【水素供給面】から分析をはじめ、ICEV と比較した表 5 の結果からはやや楽観的¹¹¹な FCEV 選択率 10%、かつ、量産効果によるスケーリング則の相殺下限が 30Nm³/、という楽観的な条件な条件で、特定の小型 HRS を導入することにより自律経済性が成立する可能性があることを見出したあと、【水素需要面】の分析に移行し 500 万円の FCEV 乗用車を大手自動車会社が営業利益を伴う販売を開始するために必要な初年度販売台数は何台か、次に、その台数を販売するためには小型 HRS を世界中で何基配備すべきかを計算した。

表 29 自立可能性検証過程

<p>【水素供給面】(表 15)</p> <ol style="list-style-type: none">1. 「小さな経済単位で起業したあと、収益を確認しながら少しずつ育てること」の可能性を検証した上で、改めて FCEV の総合戦略の転換を議論する2. 小さな経済単位として、HRS 一基における潜在顧客数を ICEV 統計から推測する3. 潜在顧客数に応じた HRS 水素供給能力を ICEV 統計から推測する4. HRS 水素供給能力に応じた HRS 価格を量産効果とスケーリング効果を踏まえて推測する <p>【水素需要面】</p> <ol style="list-style-type: none">1. FCEV の損益分岐点台数を公開情報から推測する2. FCEV の損益分岐点台数を販売するために必要な HRS 数を求める3. HRS 数を充足するために必要な HRS 製造事業者数を求める

この検証過程によっていずれも有意義なマネジメント指針を得ることが出来たが、結果的に、【水素供給面】すなわち小型 HRS の自律経済的合理性を達成するために必要な FCEV 換算台数 (1,200 台/年) よりも、【水素需要面】すなわち大手自動車会社が営業利益を伴う販売を開始するための初年度販売台数 (20,000 台/年) が大きすぎることから、

¹¹¹ プロダクト要因がゼロエミッション以外は ICEV とすべて同等であり、価格は高く水素利便性の悪い FCEV を購入する顧客が HRS が建設されたとはいえ、ICEV 購入価格 500 万円以上の富裕層からコンスタントに 10% 発生するであろうか、という懸念。

水素需要面からスタートした方が本章の結論に早く到達できたと言えるだろう。

表 30 FCEV 経済の自律可能性

アクター	乗用車経済		商用車経済	
	HRS	FCEV	HRS	FCEV
特徴	過剰能力	Vagary	最適能力	Captive
初期投資	100 億円以下	数千億円	数億円	数億円
損益分岐点	100 基/年		10 基/年	
小型化下限	12 台/基		10 台/基	
単社損益分岐点 FCEV 換算	1,200 台/年		100 台/年	
総合判断	○	×	◎	◎

フランスにおいて、FCEV 商用車を活用したパッケージビジネスが FCRE-EV と HRS を含むパッケージビジネスでディーゼルトラックに対して対等の TCO を示すとされていることは既に 2 章で紹介したとおりである。ここで、本研究の方法論によって FCEV 乗用車と商用車の市場初期の水素価格から比較する。

計算を簡略化かつ一般化するため、ここでは 300Nm³/h のフルサイズ HRS を想定し、HRS 償却期間 5 年、想定顧客数 2,000 台（HRS 償却期間 10 年での想定顧客数 1,000 台と等価）、ASR10.5%、FCEV 選択率 100%、平均使用年数 11.67 年、HRS 償却期間 5 年とした。5 年間の平均 FCEV 台数は 45 台であり、想定顧客数の 2,000 台より大幅に届かないことから水素価格変動率(H₂ Price Volatility)は 2,866%に達した（図 40）。償却期間 5 年は欧州小型商用車の償却期間と同じである。

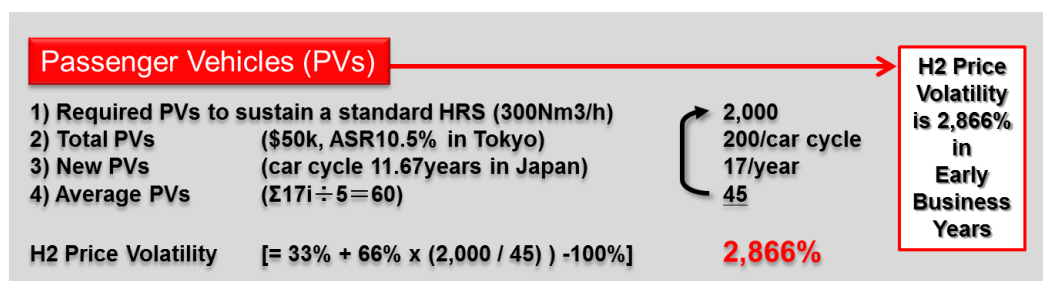


図 40 FCEV 乗用車前提での市場初期の水素価格変動率

一方、FCEV 商用車前提での水素価格変動率(H2 Price Volatility)は 0%である(図 4 1)。これは FCEV 商用車と最適能力 HRS の双方がパッケージ化されており、ガソリンとは逆に理想的状態でも固定費が変動費より大きい(図 3 3、図 3 4)ため顧客数の読み誤りが水素価格の高騰を招くという HRS の弱点が完全に免除されていることに起因する。

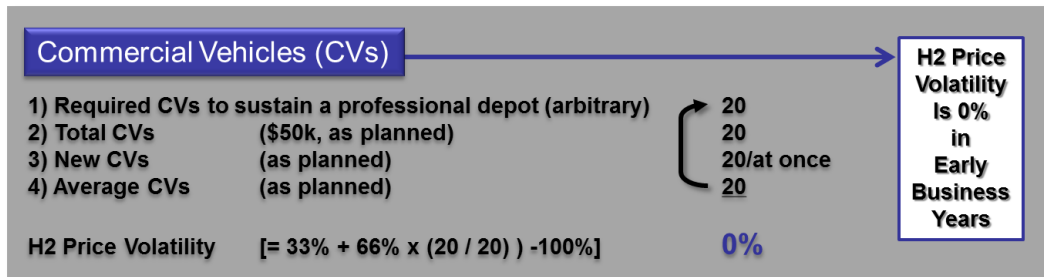


図 4 1 FCEV 商用車前提での市場初期の水素価格変動率

上記が FCEV 乗用車前提であれば、図 4 1 の計算にあたってはわずか 20 台という FCEV 専用の最適能力 HRS が図 3 5 の単純比例計算範囲に入るのかという問題を精査する必要があるが、FCEV 商用車の場合は水素充填待ちの FCEV 乗用車を作らないための余分なディスペンサーや水素貯蔵タンクは不要であり、3 分で水素充填するための高価な大容量高圧コンプレッサーや高価な専用補機（プレクーラー）すら不要である。欧州全域の半導体工場にはロッテルダム河口の化学コンビナートから高圧水素タンクを満載したトレーラーがデリバリーを行っているが、その運行経路周辺に位置する場合はコンプレッサーを全廃して高圧水素タンクの圧力だけで FCRE-EV に水素充填するような破格の水素ステーションも検討されている。まさに、終戦直後に日本自動車産業の高度経済成長の基礎を作ったポータブル計量器と同じ位置付けと言って良いだろう。

6. おわりに

1章と2章で指摘した FCEV 乗用車経済の問題点の本質が、4章および5章の分析によって明らかにすることで、FCEV 商用車の位置付けとその戦略的重要性が浮き彫りにされたことは著者の担当する新構造燃料電池の技術開発および市場開発、さらに、著者の所属する日産自動車株式会社総合研究所の意思決定に大きな影響を及ぼした。本研究から導かれたインフラ依拠型新商品としての FCEV 乗用車および FCEV 商用車の位置付けと、これらの自律経済化を進めるために必要なマネジメントを ICEV と比較するかたちで表 31 と表 32 に示す。

表 31 インフラ依拠型新商品に必要なマネジメント（乗用車）

	ICEV	FCEV
ゼロエミッション	—	優る
車両要因	—	同じ
最大普及率	65%	65%（目標）
初期顧客数予測	可能	不可能
インフラ要因	成立	不成立
マネジメント		アンチハイプとマルチステップビジネスモデルの共有化

表 32 インフラ依拠型新商品に必要なマネジメント（商用車）

	ICEV	FCEV
ゼロエミッション	—	優る
車両要因	—	同じ
最大普及率	35%	35%（目標）
初期顧客数予測	可能	可能
インフラ要因	成立	成立
マネジメント		損益分岐点の精査と銀行家との共有化

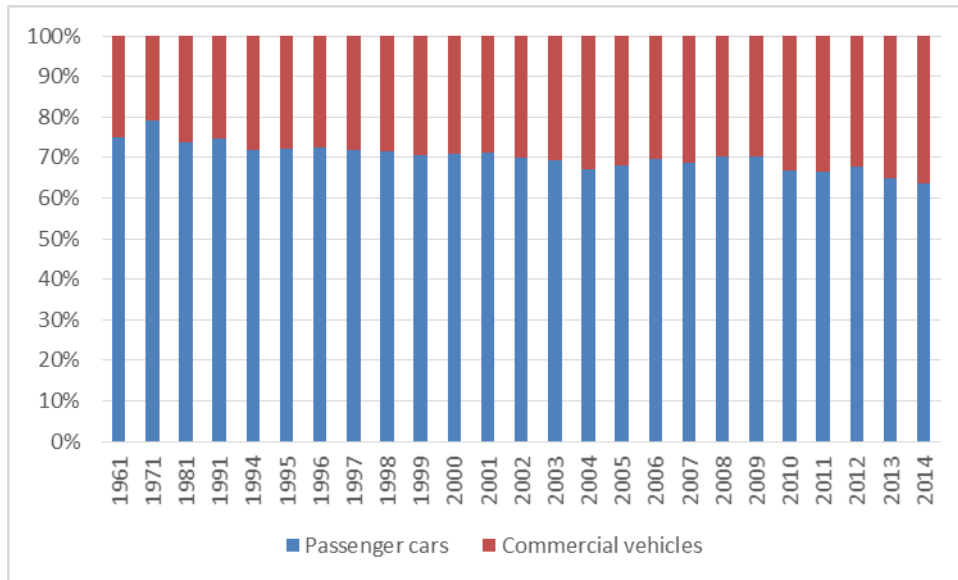


图 4 2 自動車生産台数構成比（世界）

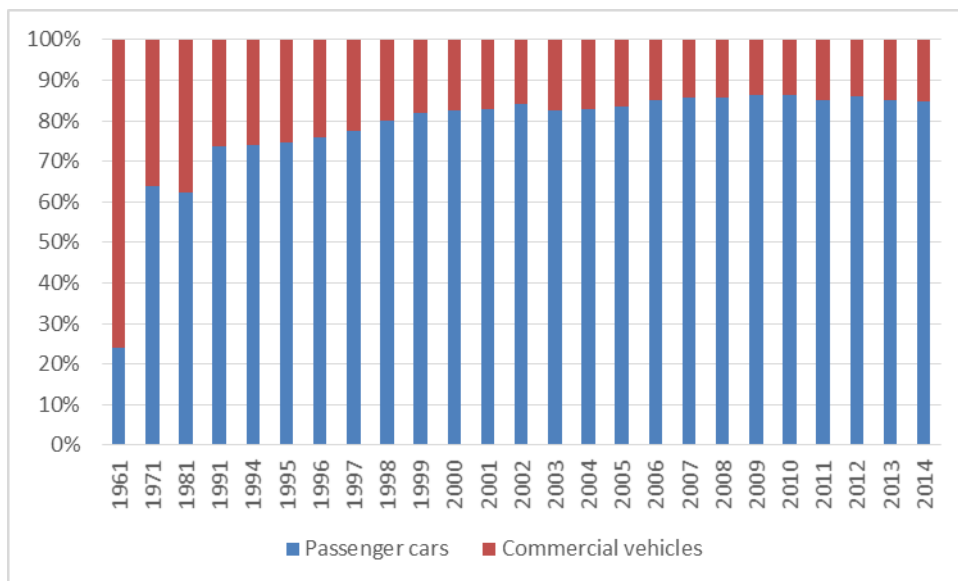


图 4 3 自動車生産台数構成比（日本）

ここで、最大普及率はアメリカ Department of Transport (DOT)の統計資料¹¹²に掲載された世界の自動車生産台数構成比から計算した(図 4 2)。第二次世界大戦後に世界をリードするモータリゼーションを遂げたことから我が国の商用車比率は低いイメージを持ちやすいが、世界に目を向けたときの商用車比率は新興国の人口爆発を反映するように増加傾向にある。新興国だけで商用車比率を見たときは35%を上回るだろう。

かつて、日本で商用車と乗用車が同数生産された1968年当時、当時のGRSオーナーにとって、来客頻度が読みやすくガソリン消費量も多い商用車は理想の顧客だった。一方、乗用車はガソリン消費量も少なく来客頻度に粗密があるため追加の設備投資を必要とする「手間のかかる」顧客だったが、顧客数が伸びて事業の不安定性(Volatility)が解消すれば利益をもたらすことも彼らは予見していたはずである。これは商用車と乗用車の優劣ではなく、社会的背景をふまえた難易を述べている点に改めて留意する必要がある。

商用車は戦後の社会的背景に適合し易かったからこそ早く立ち上がり、乗用車は社会的背景が未成熟だったからこそ23年かけて商用車を上回った。日本のICEVは1968年以降急速な乗用車シフトが起きたが、FCEVはまだこれからである。これからのFCEV経済を担うHRSオーナーにとって、FCEV商用車はかつてのGRSオーナーのようにFCEVモータリゼーション前の理想の顧客であり続けるだろう。

一方、ここから学ぶもう一つの教訓、FCEV商用車いえどもインフラ依拠型新商品である以上は様々な外的リスクを受けるということである。特に水素価格変動率や車両開発の初期投資が低いというだけで、我々の最終目的である地球規模の問題を解決するにあたってFCEV商用車が最良のソリューションであることを本研究は証明したわけではない。ここから学ぶべきはFCEV乗用車のために一致団結することでもFCEV商用車のために一致団結することでもなく、我々の教科書である図 1 1を眺めながら更に低く更に広くて強い産業生態系を構築するために、4つのタイヤを持たない用途も含めた幅広い可能性を平行して試すことにあるのではないだろうか。

図 4 4に、本研究の成果として著者が日産自動車総合研究所に提案し承認されたマルチステップビジネスモデルを示す。縦軸は新商品の普及もしくは困難度を表しており、横軸はそれに応じて必要とされる努力もしくは年月を表している。

¹¹²

http://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov/bts/files/publications/national_transportation_statistics/html/table_01_23.html_mfd

何か新しいものをつくる時、「易しいもの」と「難しいもの」の二つが必要だと著者は考える。これは哲学ではなく単に目的に向かう道筋を前半と後半に分けただけだが、前半を担うものは（易しいからこそ）前半から始め、後半を担うものは（難しいからこそ）前半から始める、というのはものの道理だろう。図 4 4には燃料電池自動車用途を考えるにあたって避けられないインフラ要因の2本の縦帯が描かれている。

右（ピンク）の縦帯は気まぐれな¹¹³乗用車顧客に水素を供給するための余剰能力 HRS¹¹⁴を表す。図 4 4において、FCEV 乗用車は難しいからこそ階段のトップに位置するが、難しいからこそ早くその準備を始める必要がある。インフラ要因の困難度が高いからこそ2014年にトヨタがFCEV 商用車の一般販売を開始したことは合理的である。

左（グリーン）の縦帯は従属的な¹¹⁵商用車顧客に水素を供給するための最適能力 HRSを示す。FCEV 商用車のオーナーが HRS のオーナーであるという定義上、ここに余剰能力という概念はなく FCEV 商用車が存在する限り減価償却費は常に理論最低値を維持し続ける。インフラ要因の難易度が低いからこそ2014年に Symbio FCell が FCEV 商用車の一般販売を開始したことも合理的である。この2つの縦帯に囲まれた FCEV 商用車という中間ステップこそ、FCEV 乗用車という困難な人口進化を成し遂げるための破壊的イノベーションになるだろう。

一方、地球規模の問題解決のためには、4つのタイヤを必要とせずインフラ要因の制約が少ない無数の用途でも幅広い産業生態系の構築を開始し、商用車から乗用車に至る道のを加速することもまた合理的なはずである。著者は1章において「燃料電池は、近年普及の目覚ましいエネファームをはじめ、テレコムタワー用電源・ビル用電源・建機用電源・フェリーボート・ロードレベリング等、様々な用途開発が進められている。」と述べた。この多くはプロフェッショナルのための燃料電池であり、最適能力 HRS 以上に安価な水素供給でインフラ要因の懸念を低下させる可能性があるだろう。特に、同じ重量で LIB の 5.3 倍（図 4 5）の電気エネルギーを貯蔵できる水素タンクと小型軽量化の進んだ燃料電池スタックの組み合わせは、航空機用途 [長谷川, 2016]やドローン用途¹¹⁶においてより直接的な価値を提供することだろう。

¹¹³ Vagary

¹¹⁴ McKinsey はドイツにおける2010年の HRS 利用率を21%と想定したが、これは余剰能力 4.76 (= 1/0.21)と等価である。

¹¹⁵ Captive

¹¹⁶ 日経テクノロジーonline 燃料電池でドローンを数時間飛行可能に 充電も2分(2015/12/17)

<http://www.nikkei.com/article/DGXMZO95246560X11C15A2000000/>

人間は生まれたときはみな赤ん坊で、スーツを着ているわけでも会社で働いているわけでもない。予防接種をしてベビー服を着て多くの人々に見守られながら健康に育っていく。著者のライフワークである燃料電池技術もまだ赤ん坊である。hype という病気や体に合わないベビー服で健康を損なうことなく、丈夫に育つことを願ってやまない。

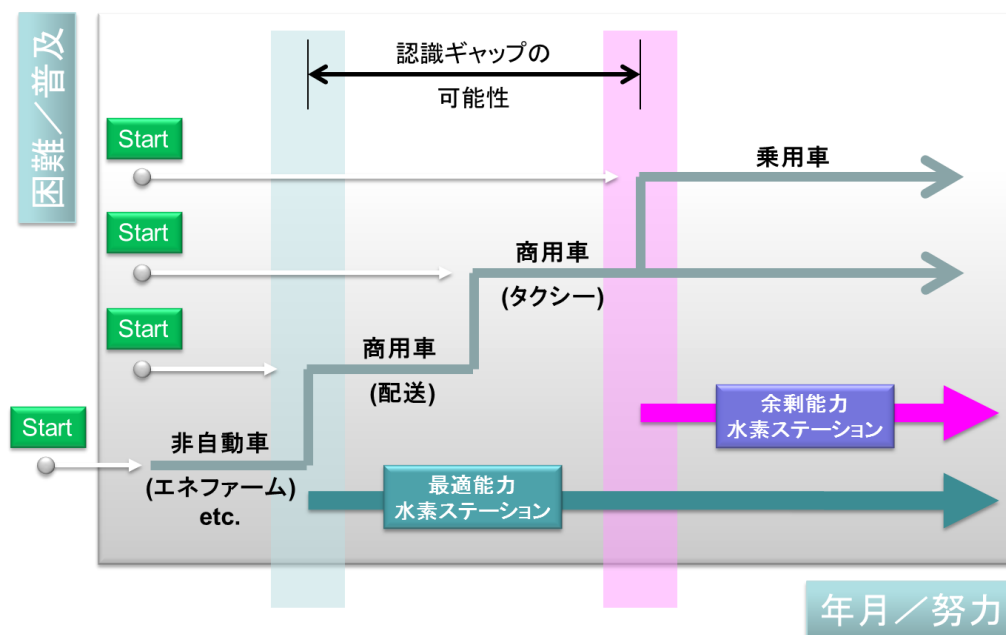


図 4 4 マルチステップビジネスモデル

	Weight Energy Density (Wh/kg)	Energy (Wh)	Weight (kg)
LIB	157	Driving	Laminate Cell
H₂	33,330	Molecule	Molecule
	1,667	Molecule	Molecule + H ₂ Tank*
	833	Driving	Molecule + H ₂ Tank*

図 4 5 リチウムイオン電池と水素タンク内水素の質量あたりエネルギー

謝 辞

本研究の遂行にあたり、五十嵐仁氏（元日産自動車）、鈴木卓馬氏（日産自動車）、Balaji Kalyanarangan 氏（Renault-Nissan Technology and Business Centre India）、辻本将晴准教授、梶川裕矢准教授（東京工業大学）、藤本隆弘教授、新宅純二郎教授（東京大学）、玄場公規教授（法政大学）、石田修一教授（立命館大学）、古山通久教授（九州大学）、Dr. Amgad Elgowainy (Argonne National Laboratory)、Dr. Sjoerd Bakker (Sjoerd Bakker Research and Consultancy)、Prof. Joan Ogden (UC Davis)、Dr. Marcel Weeda (Energy Research Centre of the Netherlands)、Dr. Attlio Pigneri (H2U)はじめ、関係各位に多大なご支援とご助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

Appendix 1 FCEV の歴史的背景

1章で述べたとおり、現在に続く燃料電池の原型は1889年にイギリス人 Sir William Robert Grove, (1811-1896) によって作られたが、自動車用途への本格的検討が始まったのは1990年代であった。1990年に California Air Resources Board (CARB)が Low Emission Vehicle (LEV)法を制定したのはリチウムイオン電池が商業化される前であり、主な関心が向けられたのは鉛電池による BEV であった。一方、Daimler は FCEV の可能性に早くから注目し、高性能燃料電池で注目を集めたベンチャー企業の Ballard Power Systems (カナダ) および Dornier (ドイツ) と共同開発を進めていた。この試みは順調に進捗し、1997年に燃料電池ジョイントベンチャーの DBB Fuel Cell Engines GmbH (後の XCELLSIS) が設立された。同年 Daimler は、「2002年から FCEV の先行販売を開始し2004年には年産40,000台に拡大する」、旨の発表を行い、これが現在に続く FCEV 開発競争の起点となった。

1999年には California Fuel Cell Partnership (CaFCP)が設立され、自動車各社がカリフォルニア州サクラメントに共同の拠点を置いて FCEV のデモンストレーションを進めることが合意された。また、National Renewable Energy Laboratory (NREL)から「2003年迄に米国で10,000台の FCEV 販売を目指す」とするレポートが発表された。

2001年に発生した米国同時多発テロは、中東に依存したエネルギー政策に強い警鐘を鳴らすものであった。ブッシュ政権はテロからわずか2か月後に National Hydrogen Vision Meeting を開催し、水素が米国の重要政策に位置づけられた。2003年12月には Argonne National Laboratory (ANL)から”VISION Model: Description of Model Used to Estimate the Impact of Highway Vehicle Technologies and Fuels on Energy Use and Carbon Emissions to 2050”が発表され、2050年の CO2 削減目標を達成する手段として、水素駆動自動車の重要性が強調された。更に2005年8月には”Energy Policy Act of 2005”が発表され、「2010年までに米国に100,000台の FCEV を走行させる」、という目標が公式に定められた。これを受けて2006年8月に”DOE 2010-2025 Scenario Analysis Meeting”が開催され、Oakridge National Laboratory (ORNL) から提供された3種類の FCEV 普及曲線 (Market Transformation Scenarios)を元に FCEV と HRS の普及に関するシナリオ研究が開始された。

この FCEV 普及曲線は、まず2050年の CO2 削減目標達成に必要な FCEV 普及台数を

計算し、次に初年度と 2050 年を 3 種類のロジスティクス曲線で滑らかに結ぶことで得られたものであり、以降の水素イニシアチブでもしばしば同様の方法が用いられた。この過程において延長予測と計画予測とのギャップ、すなわち各ステークホルダーが担うべき努力目標の開示は含まれておらず、地球温暖化防止にかかわる様々な長期的枠組みによって FCEV 商業化に必要な技術開発と市場開発が強力に推進されるという前提に基づく点で、あくまでテストシナリオという位置づけであった。しかし、アメリカの公的研究機関から提案された最初のシナリオというインパクトは大きく、テストシナリオとしての位置づけが希薄になり世界のシナリオ研究に少なからぬ影響を与える事になった。

hydrogen hype は、その推進力の一つであった CARB の ZEV 規制強化が 2008 年に一旦延期された際に向かったが、2009 年に Daimler の呼びかけで自動車 9 社が参加して行われた 2015 年 FCEV 商業化宣言と、ドイツにおける HRS インフラ構築を目的した水素イニシアチブ H2 Mobility の設立によって、再び活気を呈するようになった。

2010 年には H2 Mobility のコンサルティングを務めた McKinsey & Company によって "A portfolio of power-trains for Europe" 1 を発表され、FCEV 普及曲線のヨーロッパ版が提案された。ここでは欧州全域の HRS ネットワーク構築費用も計算され、その総額は 2,700 億€ に上るとされた。これはかなりの巨額であり、FCEV 普及曲線通りに成長しても投資回収は困難と考えられたため、努力目標として HRS への政府補助金や FCEV に対する免税を含む政策的支援の重要性が強調された。一方、FCEV と HRS の需給バランスの重要性には特に言及されず、非常に低い利用率で推移する HRS の経営支援が政府補助金を必要とする一つの根拠とされた。

Appendix 2 日本におけるポータブル GRS

ICEV 経済の発展の歴史の中で、特筆すべきは日本におけるポータブル GRS の存在である。欧米では大型タンクを導入する効率と安全面との兼ね合いから地下タンクを備える定置式 GRS が当初より主流であったが、国土が狭く人口密度が高い日本では地下タンクの設置場所は限られていた。その結果、必要に応じて小規模ガソリンタンクに4つのタイヤを備え、移動が容易で設置場所の制約を受けないポータブル式ガソリン供給手段¹¹⁷が発達し、手ごろな価格とあいまって日本中に普及した。ポータブル式の利点は地下タンク式では不可能な移動性にあり、欧米の GRS が大型化でガソリンの低コスト化を目指す一方で日本の場合はこれと引き換えに（結果的に）移動性を選択したことになる。これは欧米を上回る急速な人口増加速度にすらマッチし、普及率と普及速度双方の向上に大きく寄与したものと考えられる。

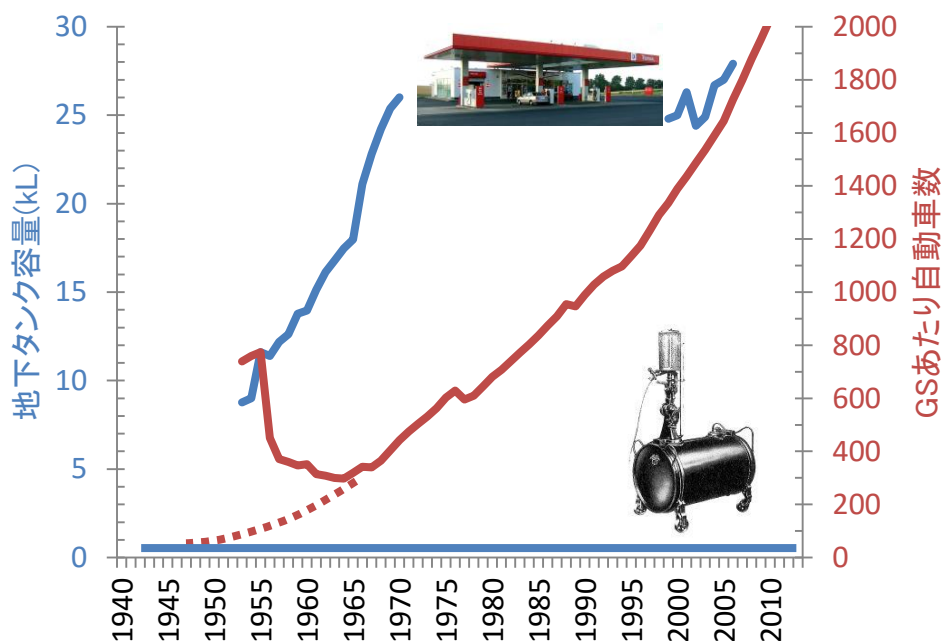


図 4.6 GRS 地下タンク容量と GRS あたり自動車数

(出典：著者作成)

図 4.6 GRS 地下タンク容量と GRS あたり自動車数 図 4.6 に第二次世界大戦後にお

¹¹⁷ 600L の金属製ガソリンタンクに簡易的な車輪と計量機を備えた安価な供給設備で「ポータブル計量器」と呼ばれた。1 基あたり供給可能な ICEV 台数は 20 台程度。当時のメーカーの 1 つである富永製作所では 1953 年までに 50,000 基を販売している。

ける定置式 GRS の地下タンク容量の推移と GRS あたり自動車数を示す。日本における GRS 統計は 1953 年から設置数と地下タンク容量が公開された。1953 年の地下タンク容量は 8800L であり、その後 1970 年にかけて単調に増加したあと現在に至るまで地下タンク容量は増えていない。その間、GRS あたり自動車数は 1970 年から現在に至るまで単調に増え続けているが、これは設備投資を増やすことなく物流を強化することで GRS あたりの自動車数を増して経営効率の改善に努めたのではないかと推測できる。一方、GRS あたりの自動車数は 1953 年から 1963 年頃にかけて明らかな異常性を示している。これは、第二次世界大戦後からいち早く普及して 1965 年当時まで多くの ICEV へのガソリン供給を支えていたと思われるポータブル GRS が計算されないことで現れた異常性ではないかと考えられる。1965 年以降の曲線を 1965 年以前に向けて延長した点線から下と上がそれぞれポータブル GRS と定置式 GRS のガソリン販売量比率ではないかと考えられるが、ポータブル GRS に関わる統計が存在しないため想像の域を出ない。



元売各社向けの㊦（ポータブル）計量機（昭和26年）

図 4 7 昭和 26 年のポータブル式ガソリン計量機

（出典：富永製作所社史「トミナガ 100 年のあゆみ」1987 年）

図 4 7 は、ポータブル GRS 大手であった京都市の富永製作所の社史に掲載された昭和 26 年当時の出荷風景である。写真に見える範囲でも 110 台が出荷を待っている。ポータブル計量機の古い販売情報は富永製作所にも残されていないが、富永製作所ご厚意で入手できた情報を表 3 3 に記す。

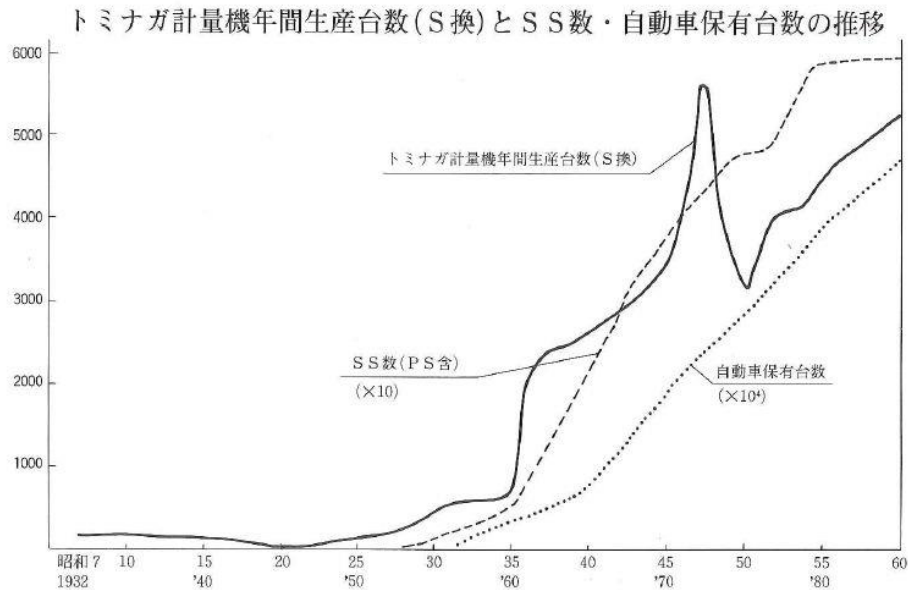


図 4 8 トミナガ計量機年間生産台数 (S 換) と SS 数・自動車保有台数の推移

(出典：富永製作所社史「トミナガ 100 年のあゆみ」1987 年)

表 3 3 ポータブル計量機のあゆみ

(出典：富永製作所)

■大正 12 年頃	¥2,000
■昭和 25 年頃	年間出荷台数 3 ケタ
■昭和 27 年頃	年間 763 台出荷 ¥87,000
■昭和 28 年	年間 955 台出荷 以降昭和 30 年頃にかけて出荷増
■昭和 43 年	現在のポータブルの形にデザイン変更
■昭和 56 年～平成 10 年頃	¥500,000
■以降	¥600,000～¥750,000

図 4 9 に主要国の自動車生産台数 (左) および自動車輸出台数 (右) を示す。日本の自動車生産台数の成長曲線は欧米各国と一線を画す急速な立ち上がりを示しているが、1967 年に西ドイツを抜くまでの急速な普及速度から 1970 年以降の比較的緩やかな普及速度への移行は日本の GRS がポータブル式から定置式に移行する時期と符合しており、遂

には米国を抜いて世界1位¹¹⁸の自動車生産台数を誇るようになった日本 ICEV 経済の発展において一定の貢献を果たしたことは間違いないであろう。一对の自転車タイヤを備えたポータブル GRS (Dispersed Methods) は1900年以降のアメリカでも見られたが1920年前半には姿を消したようである。1910年頃から固定式 (Curb Pumps) の計量器が普及をはじめたがこれも1920年代後半には姿を消し、1930年代中ごろにはドライブイン式 (Drive-in Stations) が主流になり、1940年代中ごろにはサービスステーション式 (Service Stations) に代わって現在に続いている (Melaina, 2007)。一方、富永製作所のポータブル GRS は小さな移動用車輪を備えたまま1980年代まで年間5,000台程度生産しており、日本の狭い道や小型自動車などのニーズに適合しつつも可搬性を維持し続けたが、これは京都の町屋のなかで地下タンクを設置できなかったという事情も大きかったという¹¹⁹。

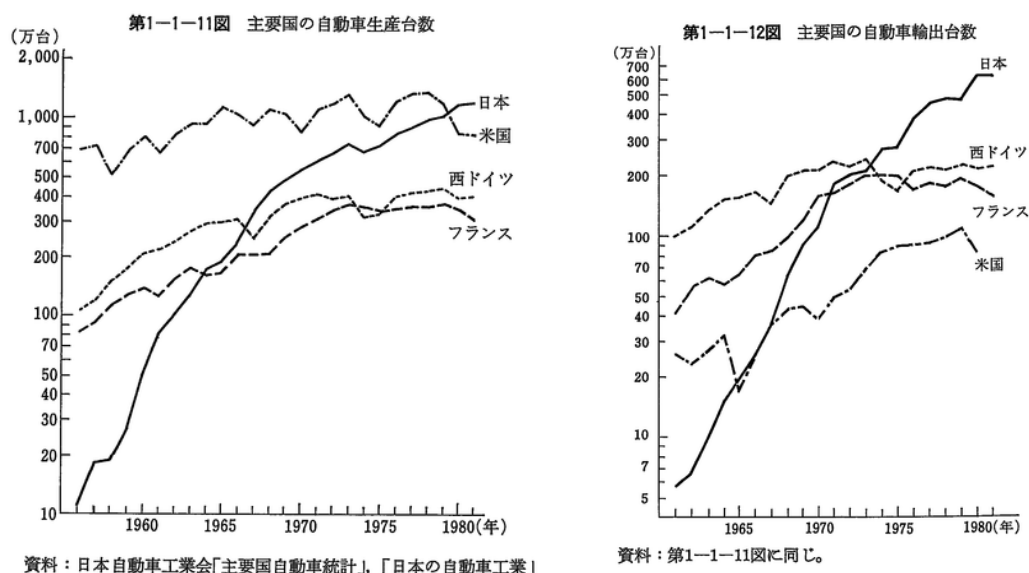


図 4 9 主要国の自動車生産台数 (左) および自動車輸出台数 (右)

(出典：日本自動車工業会「主要国自動車統計」、「日本の自動車工業」)

¹¹⁸ http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/hpaa198201/hpaa198201_2_006.html

¹¹⁹ 富永製作所インタビュー (2015.2.6)

Appendix 3 MIRAI についての考察

2014年12月から一般販売を開始したMIRAIの生産体制は、手作業¹²⁰で年産700台（うち国内向け400台）とされている。2015年1月には、400億円の追加投資で年産2,100台に増産すると発表された。この生産台数の低さに対して一部には生産技術の遅れという見解も見られるが恐らく誤りであろう。前述のとおりFCEVは一種の水素HEV¹²¹であり、多くの電動パワートレインは既に安価になったガソリンHEVの部品が流用されている。またリチウムイオン電池と同じく2次元部品の単純積層体である燃料電池は、投資あたり生産性を高めるために最適の構造といえる。これらよりも製造困難な3次元部品の組み立てで高度な摺合せ技術と生産性を実現したトヨタ自動車が、生産技術の遅れのために手作業による生産体制を選択したとは考えにくい。プリウスとLEAFの初年度国内販売台数はそれぞれ年産13,000台、年産6,000台であったが、これらと同じく、国内におけるHRS普及状況等から年間700台までという需要を読み、製造原価に占める労務費や減価償却費を抑えるために既存の手作業ライン活用による生産体制を選択したと考えられる。公開情報から減価償却費を計算すると償却期間5年で計算したとき1台あたり57万円¹²²であり、通常数万円以下とされる200万円クラスのICEVと比較してやや割高となっている。

ここで、MIRAIのプロダクト・イノベーションを確認する。図50に示すとおり、FCEVの自動車としての一般性能はICEVと同等であり、プロダクト・イノベーションが他のイノベーションへ波及するような根拠は見出せない。よって、プロダクト・イノベーションは「破壊的」(Disruptive)ではなく「持続的」(Sustaining)と考えられる。FCEVの一般性能に代わる波及の根拠としてゼロエミッションに注目が集まることは理解できるが、車両部門のゼロエミッションは国家や地球規模の地球温暖化を100年単位で考えたときに初めて具現化する顧客価値であり、普及初期における顧客創出を促す価値になり得ると考えることは難しい。

次にプロセス・イノベーションを確認する。現時点において、2章で例示したような3次元部品から2次元部品への転換を強調するようなプレスリリース等を行われていな

¹²⁰かつて高級スポーツカーLexus LFA（販売価格3,750万円、世界限定2年間・500台）を生産した工房を再活用して計13人で生産されている。生産能力は日産3台。<http://response.jp/article/2015/02/24/245058.html>

¹²¹ 内燃機関とパワートレイン¹²¹のかわりに燃料電池と電動パワートレインを搭載したと考えると理解しやすい。

¹²² 400億円 ÷ {(2,100台-700台) × 5年} = 57.1万円

い。ただし、ロール搬送を基本とする燃料電池部品の製法特許は多数確認できる。これらはいずれ部品からモジュール、ユニットの製法特許に拡大するであろう。

走行性能 Driving performance

車両 Vehicle	走行距離 Cruising range	約650 km*2 (JC08モード走行パターンによるトヨタ測定値) 約700 km*2 (JC08モード走行パターンによるトヨタ測定値) Approx. 650 km *2 (JC08 mode test cycle, Toyota measurements) Approx. 700 km *2 (JC08 mode test cycle, Toyota measurements)
	最高速度 Maximum speed	175 km/h 175 km/h
FCスタック Fuel cell stack	体積出力密度 Volume power density	3.1 kW/L (世界トップレベル*3) 3.1 kW/L (world top level *3)
	最高出力 Maximum output	114 kW (155 PS) 114 kW (155 PS)
高圧水素タンク High-pressure hydrogen tank	本数 Number of tanks	2本 2
	公称使用圧力 Nominal working pressure	70 MPa (約700気圧) 70 MPa (approx. 700 bar)
	タンク貯蔵性能*4 Tank storage density *4	5.7 wt% (世界トップレベル*3) 5.7 wt% (world top level *3)
モーター Motor	最高出力 Maximum output	113 kW (154 PS) 113 kW (154 PS)
	最大トルク Maximum torque	335 N・m (34.2 kgf・m) 335 N-m (34.2 kgf-m)

*1 約650 kmは、SAE規格 (J2601) の標準条件 (外気温 20℃、高圧水素タンク内の圧力 10 MPaからの充填) に基づいた水素充填圧 70 MPa ステーションでの充填作業におけるトヨタ測定値。約700 kmは、同条件下で2016年度公路上に運用開始が予定される新規特の水素ステーションで充填した場合のトヨタ測定値。走行距離は、使用環境 (気象、渋滞等) や運転方法 (急発進、エアコン使用等) に応じて大きく異なる。

*2 2014年11月現在トヨタ調べ *3 タンクの重量に対する水素貯蔵量 (重量) の割合

*4 As measured by Toyota when refueling at a hydrogen station supplying hydrogen at a pressure of 70 MPa under SAE J2601 standards (ambient temperature: 20°C, hydrogen tank pressure when fueled: 10 MPa). Differing amounts of hydrogen will be supplied to the tank if refueling is carried out at hydrogen stations with differing specifications, and the cruising range will therefore also differ accordingly. It is estimated that a cruising range of approximately 700 km can be achieved when fueled at new standard hydrogen stations scheduled to begin operation after FY2016. Possible cruising range may vary largely due to usage conditions (weather, traffic congestion, etc.) and driving methods (quick starts, air conditioning, etc.).

*5 As of November 2014, Toyota data *6 Hydrogen storage mass per tank weight

図 50 MIRAI 車両概要¹²³

¹²³ <http://newsroom.toyota.co.jp/jp/download/4224903>

Appendix 4 創造的破壊についての考察

Schumpeter は、図 22 や図 23 のようなイノベーションの不均衡について何も言及していない。Schumpeter が目指したものは、一般均衡理論から企業者利潤や利子率や資本形成にかかわる動学的経済理論の構築であり、彼の理論を補完するアイテムとしてイノベーションという概念を導入したものの、それを深掘りするより理論構築を優先したのではないかと考えられる。このため、Schumpeter の比喻は a.郵便馬車→鉄道にとどまっていた。例えば b.郵便馬車→ICEV や c.ICEV→ZEV と a.と一緒に比べたとき、b.¹²⁴が、a.¹²⁵や c.¹²⁶に比べて圧倒的で進化していることは明らかであろう。よって、これらをすべて Disruptive と呼ぶことに本研究は合意しない。

同様に、Disruptive に関する Christensen の定義も本研究の狙いから考えると広すぎるようである。Christensen は「破壊的技術は、当初は主流から離れた小規模な市場でしか使われないが、いずれ主流市場で確立された製品に対抗する性能を身につける点が、「破壊的」と呼ぶゆえんである」¹²⁷とし、8 inch ドライブ→5.25 inch ドライブへの変遷を破壊的イノベーションの例として挙げた。彼はまた、ディスク・ドライブアーキテクチャの変更を含まない改善(例:フェライト・ヘッド→薄膜ヘッド→MR ヘッド)を「持続的技術」と呼び、ディスク・ドライブアーキテクチャの変更を含む「少なくとも短期的には製品の性能を引き下げる技術」を「破壊的技術」と呼んだ。

これらに対して、本研究では他のイノベーションに波及してその必要性を「免除」させるほどのイノベーションを破壊的 (Disruptive) と定義する。Christensen と本研究は破壊に対する視座が違っただけであるが (Christensen の視点は、短期的な性能低下を考慮した技術マネジメント、本研究の視点は他のイノベーションへの波及の有無)、結果的に破壊的 (Disruptive) と持続的 (Sustaining) の分類が異なる場合がある。

例えば 8 inch ドライブ→5.25 inch ドライブを例にとったとき、本研究では技術イノベーション以外にイノベーションの免除をもたらさない場合は「破壊的」とはみなさない。例えば、8 inch→5.25 inch はミニコン市場からデスクトップ市場という顧客創出を支援した点で本研究の定義における「破壊的」に近いが、5.25 inch ドライブによってのみデスク

¹²⁴ (ICEV の運行速度は郵便馬車の 10 倍)

¹²⁵ (鉄道の運行速度は郵便馬車より優れるが、利便性に劣るため郵便馬車を代替できない)

¹²⁶ (ICEV と FCEV の運行速度は変わらない)

¹²⁷ 「イノベーションのジレンマ」序文

トップ市場がつくられたとは考えられないし、他のイノベーションを停滞させるほどの波及効果も見られないため、本研究では「破壊的」とはみなされない。

本研究において、破壊的イノベーションは以下のような作用を持つと考えられる。

1. 破壊的イノベーションがプロダクト・イノベーションに発生した場合、破壊的商品の価値を背景に需要創出期待が増加しこの意図がサプライチェーンに波及して部品生産を促す。
2. 破壊的イノベーションがプロセス・イノベーションに発生した場合、これを背景に製造原価（製造固定費）が低減し、この意図がサプライチェーンに波及して部品生産を促す。これらによって、新商品のコストパフォーマンスが旧商品より優位に向上し、顧客創出は特段のイノベーションを必要とすることなく自発的に進む。日本の ICEV 経済における 1950-1960 年がこれに該当するであろう。

Appendix 5 電動駆動機関のプロセス・イノベーションと量産価格

ここでは、BEV と FCEV を ZEV としてではなく電動駆動機関自動車ととらえ、プロセス・イノベーションに関する内燃機関自動車との比較を試みる。

例えば、2010 年 12 月に日産自動車から発売された BEV 乗用車 LEAF の販売価格は当初税込 376 万円 (X) であった。その後、2012 年 11 月のマイナーチェンジで税込 334 万円の廉価グレード S が登場し、企業努力や政府補助金の減額タイミングにあわせて 2013 年 4 月に 306 万円、2014 年 3 月に 287 万円、2015 年 3 月に 273 万円と、三度にわたって値下げされた。この間、2010 年から 2014 年の LEAF の年間平均販売台数は 3.9 万台 (=15.6 万台/4 年) であった。

ここで、1908 年に T 型フォードが登場せず 21 世紀に至るまで BEV が唯一の自動車という仮の世界を考えたとき、万一 2010 年から ICEV を生産販売しようと考えても高度な摺合せ技術を必要とするエンジン工場と幅広い裾野産業を必要とする部品工場への初期投資を、年産 3.9 万台の新規モデル 1 車種で吸収することは不可能に近いであろう。

一方、BEV はこれを可能にした。その理由を特定することは難しいが、おそらく ICEV に対する顕著な比較優位を持たないプロダクト・イノベーションよりも、3 次元部品（内燃機関）から 2 次元部品（リチウムイオン電池・燃料電池）への転換に端を発するプロセス・イノベーションの貢献が大きかったのではないだろうか。むろん、長年かけてボディ、シャシ、ソフトウェア等の車両共通部分で ICEV が構築した恩恵を BEV が受けたことは明らかであるが、これを差し引いても電動機関の実用化を ICEV の内燃機関よりも低い損益分岐点で実現した技術イノベーションは高く評価されるべきであろう¹²⁸。

特に、ZEV のプロセス・イノベーションは破壊的イノベーションの可能性を見出すことができるのではないだろうか。すなわち、リチウムイオン電池と燃料電池は数種類の 2 次元部品の単純積層で構成されている。内燃機関が 1,000 を超える高精度 3 次元部品の摺合せで構成されることを考えたとき、リチウムイオン電池や燃料電池を構成する 2 次元部品は生産性に大きな変革をもたらすはずである¹²⁹。

これまで、内燃機関における技術イノベーションの主題は合理的な製品アーキテクチ

¹²⁸ ZEV における今後の技術イノベーションおよび価格目標・価格予測の詳細は MIT や DOE の研究に詳しい。DOE は年産 50 万台、MIT は年産台数未定義で 2035 年前提とのみ記されているが、いずれも本格量産が始まった際には HEV に近いところまで価格低下するものと予想されている。

¹²⁹ Takuya Hasegawa, EU Delegation Workshop for Aerospace Industries

ャの構築であった¹³⁰。すなわち、機能と部品が「多対多」の関係にある自動車産業では、高度な擦り合わせを高い次元で成立させる取り決めにその特徴と価値があり、質の高い労働力を手にした日本企業がこれを精緻化させることで躍進を遂げた。近年では擦り合わせコストの低減を目指して機能ごとに分割を進めるモジュール型アーキテクチャや、これを社会的に共有されたオープンなインターフェースでつなぐオープン・アーキテクチャ議論が展開されるようになり、さらなる効率化に向けて技術イノベーションが進化しつつある。しかしこうした進化も3次元部品を前提としたものであり、2次元部品への転換¹³¹はこうした進化を根底から覆す可能性がある。少なくとも、藤本らのアーキテクチャ理論によって自動車産業の特徴とされたインテグレート型から、コンピューター産業に代表されるモジュラー型への転換を一気に促す可能性がある。こうした世界では、ロボットすら生産能力が低いとみなされ、同じ予算でより多くの搬送ロールが導入されるかもしれない。また、スポット溶接ではなく構造接着剤の連続施工が中心になるかもしれない。部品の2次元化にとまらぬ製品アーキテクチャの転換は、リチウムイオン電池や燃料電池にとどまらず、様々な電動機関部品で発現する可能性があるだろう。

¹³⁰ Henderson and Clark (1990)、藤本(2003)はじめ多くの研究者によって詳細かつ広範囲に分析されている。

¹³¹ [長谷川, 2016]

Appendix 6 水素イニシアチブ

水素イニシアチブとは、水素および燃料電池技術を用いて地球温暖化対策や新規雇用創出を進めることを目的とした産官学連携組織を指す場合の一般名称であり、国連の JPHE、日本の FCCJ、欧州の H2 Mobility、アメリカの DOE および CARB といった大規模なものからロンドン、アバディーン、マサチューセッツ州、福岡県、大阪府などの地方自治体が運営するものまで、さまざまな組織が現在も活発に活動している。例えば経済開発協力機構 OECD 参加の HIA (Hydrogen Implementing Agreement) の歴史は古く、その発端は 1970 年代のオイルショックにさかのぼる。これは日本の FCCJ でも同じであり、1970 年代のサンシャイン計画から様々な変遷を経て現在に至っている。水素イニシアチブの歴史的経緯については Appendix 1 FCEV の歴史的背景を参照されたい。

水素イニシアチブでは、産官学各界を代表するメンバーが参加して活動が行われている。主な水素イニシアチブを表 3 4 に、参加メンバーの特徴を表 3 5 にまとめた。参加メンバーについては、政府は日本の経済産業省（もしくは環境省）に相当する省庁が管掌することが多い。産業界は大手の自動車会社やエネルギー会社大企業がメンバーとなっている。監督者もしくは判断者としての銀行家の姿は見られず、先に見える営利を必ずしも目的としない政府が銀行家に代わって資金提供者の役割を担うことが多い。また、大学からは自然科学系のメンバーが多く、社会科学系のメンバーが殆ど見られないことも特徴的である。

表 3 4 Number of Commercial HRSS

(出典：著者作成¹³²)

Nation/Region	H2 Initiative	2014 Actual	2017 Target	2020 Target
Japan	FCCJ	3	100(2015)	140
USA	CaFCP	9	68(2016)	100↑
Germany	H2 Mobility	15	140	223
UK	UK H2M	7	48	72
France	H2M France	2	-	-
Norway	SHHP	6	-	-
Korea		12	43(2015)	168

¹³² 各種資料から作成。例えば <http://www.hess.jp/Search/data/37-03-063.pdf>、https://www.jimin.jp/policy/policy_topics/pdf/pdf146_1.pdf、http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/nenryodenchi_fukyu/pdf/001_04_01.pdf、<http://www.meti.go.jp/press/2014/06/20140624004/20140624004.html>

表 3 5 水素イニシアチブのメンバーとその特徴

(出典：著者作成¹³³)

	参加	備考
政府	有	経済産業省管掌（日本の場合）
企業	有	自動車会社、エネルギー会社
大学	有	自然科学系
顧客	無	—
銀行家	無	—

例えば、我が国の水素イニシアチブである燃料電池実用化推進協議会(FCCJ)が 2010 年に発表した「FCV と水素ステーションの普及に向けたシナリオ」によると、2015 年から一般ユーザーへの FCEV 乗用車の普及が始まり、2025 年に FCEV 乗用車および HRS がビジネスとして成立し、2025 年に FCEV 乗用車 200 万台の普及を目指す、とされている³⁾。しかし、ICEV 乗用車でさえ年産 200 万台に達したのは商業化再開から 20 年後(1967 年)であったことを考えると、FCEV 乗用車が半分の期間で達成するとは考えにくい。こうした傾向はドイツの H2Mobility を含めて各国の水素イニシアチブでも見ることができる。このような楽観的シナリオが生まれる理由のひとつに社会科学系の人材や銀行家が含まれないメンバー構成も想定されないだろうか。

各国水素イニシアチブが楽観的シナリオを策定する根拠として、よく引用されるものの一つがハイブリッド自動車(HEV)の普及を FCEV 乗用車普及のベンチマークとした先行研究である (Park, Kim, & Lee, 2011) (Collantes, 2007)。これらはあくまで学術論文として結果というより新しい論理を世に問うために出版されたものであり、AR4 と同じく何かを推奨するものではないと思われる。しかし、これが何かを推奨しているととらえる誤解は AR4 と同じく後を絶たない。

日本市場における HEV の普及を例にとると、当初高価だった販売価格のハンディを克服して商業化開始から 4 年後には年産 20,000 台に達したが、HEV は ICEV との価格差も

¹³³ 著者は日産自動車総合研究所所属として以下の水素イニシアチブにメンバーとして参加しヒアリングを行った：FCCJ（日本）、H2 Mobility（ドイツ）、UK H2 Mobility（イギリス）、H2Mobility France（フランス）、おおさか FCV 推進協議会（大阪府）

少なく走行燃費についても明確な優位性があった¹³⁴。さらに新しいインフラを構築する必要もなかった。学术论文の著者は HEV 経済と ICEV 経済にかかわる相違点の数々をすべて網羅する義務はなく、学术论文の主旨に合わせてその前提と検討範囲は取捨選択されているはずである。

しかし、銀行家や社会学者が不在の水素イニシアチブ内で、「著名学術誌に掲載されたこのアイデアは、HEV 経済と ICEV 経済のすべてにかかわる相違点の数々がすべて網羅された FCEV 乗用車普及指針である」、という拙速な誤解が共有化されることで楽観的観測が生まれるであろうことは想像に難くない。それでは、他にどのような種類の先行研究が楽観的観測のタネを提供したのであろうか。また、これらを定量化し対策を考えるにはどうすればよいであろうか。

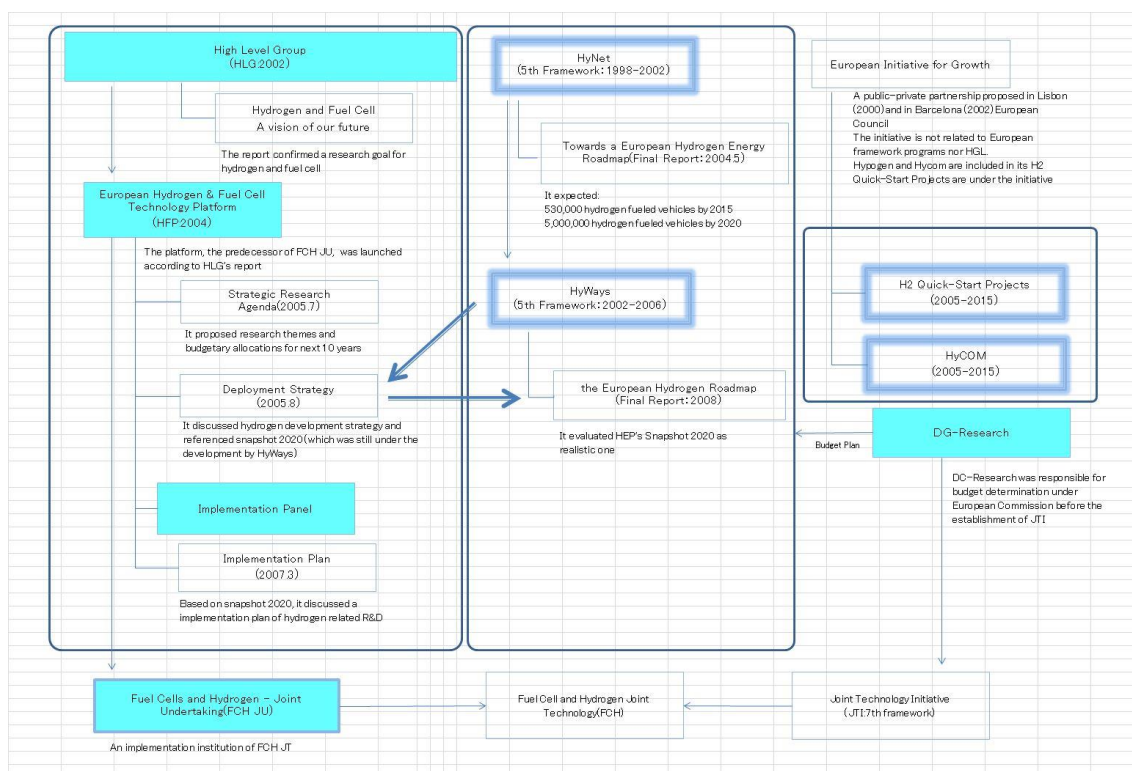


図 51 欧州政府の水素イニシアチブ推移

(出典：富士経済、著者)

¹³⁴ FCEV の場合は、ICEV との価格差が大きく走行燃費についても明確な優位性がない。なお、5章で述べるように、フルサイズ HRS で償却が進まない現状では水素コストは 1,003%に高騰する。政府補助金がない場合、走行燃費は ICEV の 1/10 となる。

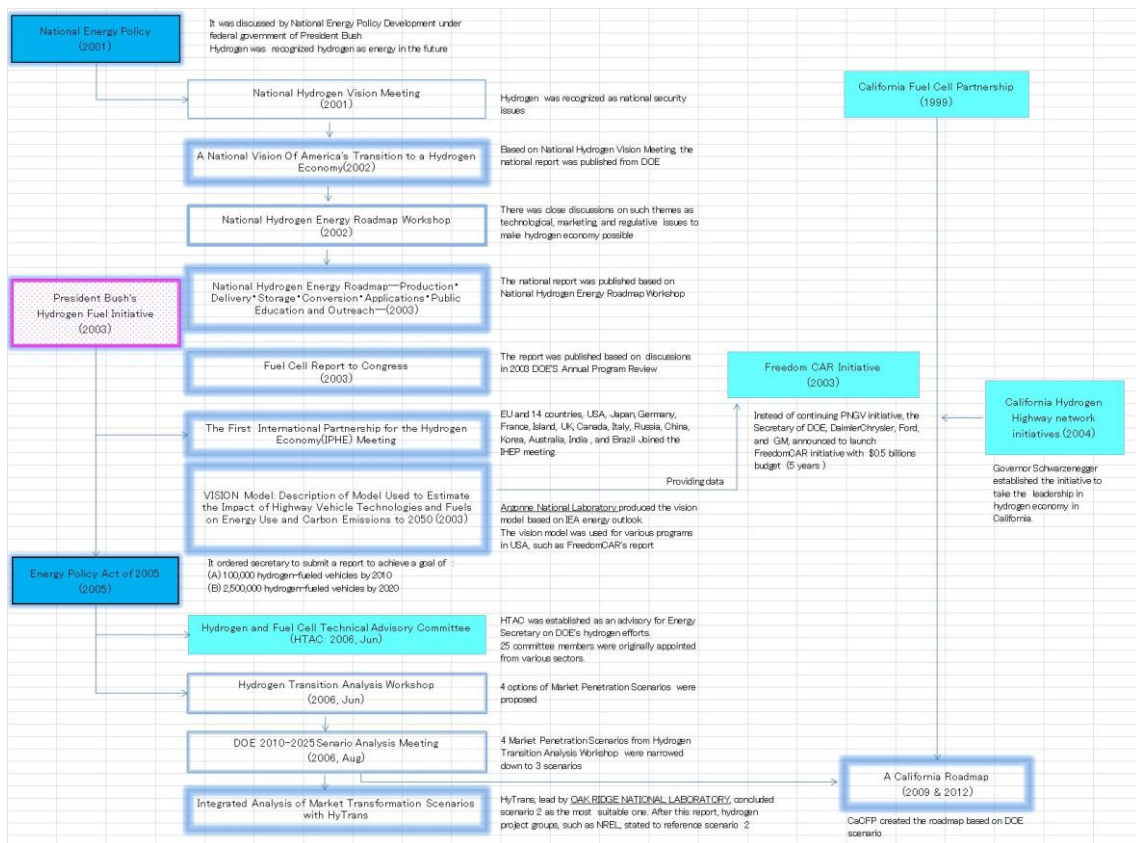


図 5 2 アメリカにおける水素イニシアチブ推移

(出典：富士経済、著者)

Appendix 7 2007 年公開の公的文献

2007 年頃に公開された文献のうち、hype の形成に影響が強いと予想される文献 2 点の概要を示す。

1) ORNL 報告 (Green, Leiby, & Bowman, 2007)

2005 年にブッシュ政権下のアメリカ議会が水素経済への移行をサポートするため Section 811 of the Energy Policy Act (EPACT) of 2005 (Public Law No:109-058)を制定したことを受け、2006 年 1 月 25 日にエネルギー省が DOE and Freedom CAR & Fuel Partnership Hydrogen Delivery and On-Board Storage Analysis Workshop と称するワークショップを開催した。このとき、DOE の依頼でオークリッジ国立研究所 (ORNL) が提案した 3 つの vehicle penetration scenario をまとめた資料が ORNL 報告である。

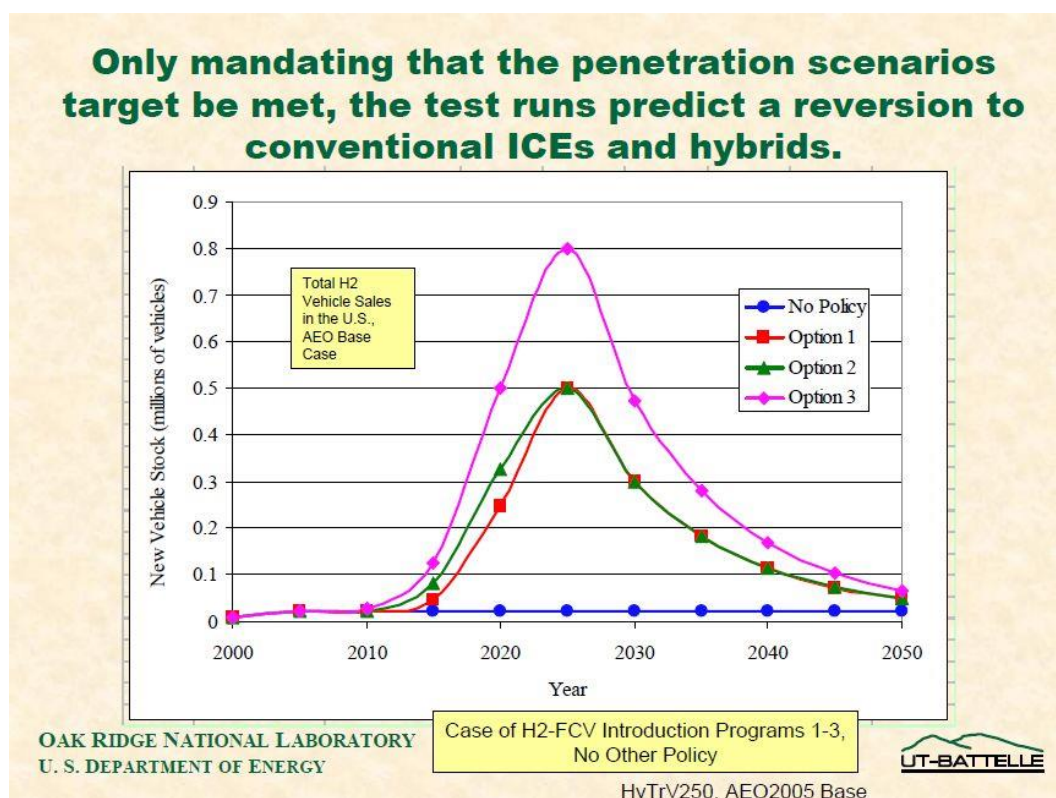


図 5 3 ORNL 報告における政策の位置づけ

((Green, Leiby, Tworek, & Bowman, 2006), 31 ページより引用)

Scenario 1 – Production of *thousands* of vehicles per year by 2015 and *hundreds of thousands* per year by 2019. This option is expected to lead to a market penetration of 2.0 million fuel cell vehicles (FCV) by 2025.

Scenario 2 – Production of *thousands of FCVs* by 2013 and *hundreds of thousands* by 2018. This option is expected to lead to a market penetration of 5.0 million FCVs by 2025.

Scenario 3 – Production of *thousands of FCVs* by 2013, *hundreds of thousands* by 2018, and *millions* by 2021 such that market penetration is 10 million by 2025.

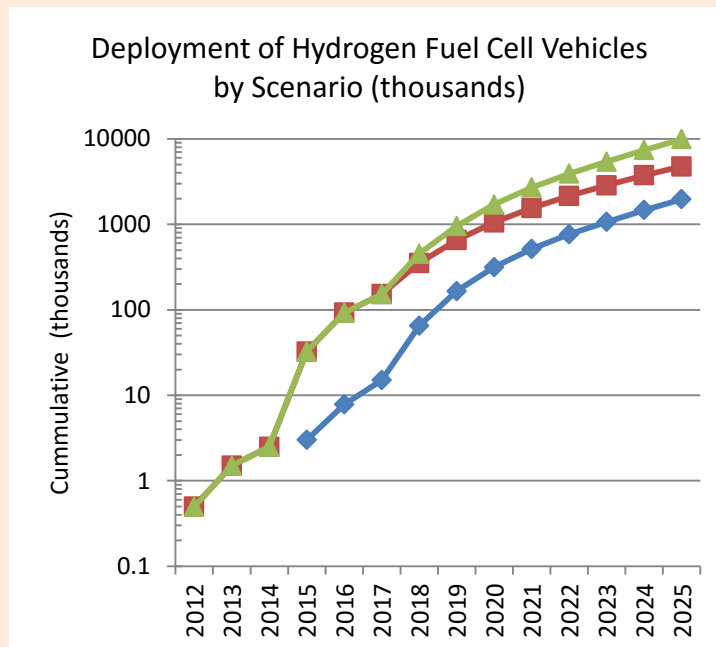


図 5 4 ORNL 報告における 3 種類の FCEV 普及シナリオ

((Green, Leiby, & Bowman, 2007)より 著者作成)

EPACT が求める” alternative scenarios for deployment of millions of hydrogen fueled vehicles and supporting infrastructure”に答えるため、図 5 4 の 3 種類のシナリオが提案された。いずれも 2013 年～2015 年の短期目標と 2025 年の長期目標からなるが、シナリオ 1 が求める「2015 年に数千台」は 2015 年 5 月現在においてほぼ不可能であり、シナリオ 2 と 3 が求める「2013 年に数千台生産」は実現されなかった。

ORNL 報告は、政策の支援なしに FCEV が配備されることはないと仮定し、3つのシナリオで必要とされる政策コストを以下のように between \$1 and \$6 billion と試算した。

The scenario analysis evaluated the cost of alternative government policies to support a successful transition to hydrogen fuel cell vehicles. The costs for the three policy cases analyzed were estimated to range from \$10 to \$45 billion cumulatively over the 2012-2025 timeframe (14 years), with peak annual costs of between \$1 and \$6 billion.

ORNL 報告に掲げられた between \$1 and \$6 billion という政策コストの対象には 2025 年に 50 万台から 250 万台の FCEV 販売が含まれる。なお、ORNL 報告はその内容がいずれかのシナリオの選択を推奨したものではないことを記しているが（下記）、図 53 のような強いメッセージのもとではやや力不足の感がある。

Although there was no consensus on a particular vehicle penetration rate, it was agreed that this set of scenarios is inclusive of industry expectations and could provide a basis to interpolate or extrapolate the results to other cases. The purpose of the DOE study was not to select any one scenario but to assess the costs and impacts of achieving each. x, (Green, Leiby, & Bowman, 2007)

2) Stern 報告¹³⁵ (Stern, 2007)

Stern 報告は、2006 年 10 月 30 日に世界銀行のチーフエコノミストであった経済学者ニコラス・スターン卿(Sir Nicholas Stern) によって英国財務省のために作成された地球温暖化（気候変動）に関する報告書であり、2007 年 1 月に Cambridge University Press から書籍として刊行された。

Stern 報告では、IPCC-AR4 と同様の地球温暖化研究に加えて、CO₂ 排出抑制がなされず地球温暖化が放置された際に発生する年間コスト（大規模災害対策費等）が開示された。また、この年間コストが世界の GDP の 5-20% に及ぶ一方、CO₂ 濃度を現在の 430ppm から 500-550ppm 迄に抑制するために必要な年間コストは世界の GDP の 1%程度¹³⁶であり、地球温暖化対策が政策コスト的に有利であるとの見解が示された。

¹³⁵

http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20100407011151/http://www.hm-treasury.gov.uk/d/Summary_of_Conclusions.pdf

環境省による Executive Summary 和訳

http://www-iam.nies.go.jp/aim/publications/review/2006_stern/stern_review_summary_jpn.pdf

¹³⁶ 日本の場合、年間 5 兆円程度に相当する

Using the results from formal economic models, the Review estimates that if we don't act, the overall costs and risks of climate change will be equivalent to losing at least 5% of global GDP each year, now and forever. If a wider range of risks and impacts is taken into account, the estimates of damage could rise to 20% of GDP or more.

This is a major challenge, but sustained long-term action can achieve it at costs that are low in comparison to the risks of inaction. Central estimates of the annual costs of achieving stabilization between 500 and 550ppm CO₂e are around 1% of global GDP, if we start to take strong action now.

Stern 報告について、国立環境研究所が査読スタイルのレビュー¹³⁷を行い、「経済学の学問としての限界を熟知する Stern が、綿密なレビューに基づき、敢えてそのような積極的な評価を行った点は、大いに評価しなければならない」、という言葉で結んでいる。

ORNL 報告や Stern 報告のような政策コストの計算は、人口学のような3つのパラメータではなく社会・経済・技術・金融にまたがる無数のパラメータと大胆な前提が必要であり、(人口推計に準ずる精度を持つに至った) ICEV 普及予測のような精度は持ち得ない。

この困難な課題に対して様々な前提を導入することで目的を達成しようとするのはアカデミアとして当然の作業であるが、アメリカ政府やイギリス政府を発行元とするこれらの報告において (ORNL 報告のような注意書きがあったとはいえ)、場合によってはスライドの解像度 (前提) よりもスクリーンの映像 (結果) に価値があるという誤解を招いたと考えることも可能である。政策コストまで踏み込んだ研究としては、Stern 報告の後に発表された国際エネルギー機関 IEA の ETP2008 (International Energy Agency, 2008) および ETP2010 (International Energy Agency, 2010) を挙げることが出来るが、IPCC の AR4 や AR5 も含めて、これらが経済的側面まで踏み込んで最適であると特定されたシナリオの推奨でないというメッセージは、どこまで社会に届いたであろうか。

¹³⁷ http://www-iam.nies.go.jp/aim/publications/review/2006_stern/stern_comment_jpn_ver8.pdf

引用文献

- Bakker, S. (2010). The car industry and the blow-out of the hydrogen hype. *Energy Policy*, *38*, 6540-6544.
- Bandivadekar, A., Bodek, K., Cheah, L., Evans, C., Tiffany, G., Heywood, J., . . . Weiss, M. (2008). *On the Road in 2035: Reducing Transportation's Petroleum Consumption and GHG Emissions*. Massachusetts Institute of Technology, Laboratory for Energy and the Environment.
- Borup, M., Brown, N., Konrad, K., & van Lente, H. (2006). The Sociology of Expectations in Science and Technology. *Technology Analysis & Strategic Management*, *18*(3/4), 285-298.
- CaFCP. (2010, 4). *Hydrogen Fuel Cell Vehicle and Station Deployment Plan: A Strategy for Meeting the Challenge Ahead*. Retrieved 11 29, 2015, from <http://www.cafcp.org/sites/files/FINALProgressReport.pdf>
- CaFCP. (2012, 6). *A California Road Map: The Commercialization of Hydrogen Fuel Cell Vehicles*. Retrieved 11 29, 2015, from [http://cafcp.org/sites/files/A%20California%20Road%20Map%20June%202012%20\(CaFCP%20technical%20version\)_1.pdf](http://cafcp.org/sites/files/A%20California%20Road%20Map%20June%202012%20(CaFCP%20technical%20version)_1.pdf)
- CaFCP. (2014, 7). *A California Road Map 2014 Update*. Retrieved 11 29, 2015, from <http://cafcp.org/sites/files/Roadmap-Progress-Report2014-FINAL.pdf>
- CARB. (2015, 7). *2015 Annual Evaluation of Fuel Cell Electric Vehicle Deployment and Hydrogen Fuel Station Network Development*. Retrieved 11 29, 2015, from http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/ab8/ab8_report_2015.pdf
- Carlsson, B., & Stankiewicz, R. (1991). On the Nature, Function and Composition of Technological Systems. *Journal of Evolutionary Economics*, *1*, 93-118.
- CEC. (2010, 1). *2010-2011 Investment Plan for the Alternative and Renewable Fuel and Vehicle Technology Program*. Retrieved 11 29, 2015, from <http://www.energy.ca.gov/2010publications/CEC-600-2010-001/CEC-600-2010-001-SD.PDF>

- CEC. (2011, 9). *2011-2012 Investment Plan for the Alternative and Renewable Fuel and Vehicle Technology Program*. Retrieved 11 29, 2015, from <http://www.energy.ca.gov/2011publications/CEC-600-2011-006/CEC-600-2011-006-CMF.pdf>
- ChristensenMClayton. (2001). イノベーションのジレンマ. (伊豆原弓, 訳) 翔泳社.
- Collantes, G. (2007). Incorporating stakeholders' perspectives into models of new technology diffusion: The case of fuel-cell vehicles. *Technological Forecasting & Social Change*, 74, 267-280.
- Geels, F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. *Research Policy*, 31, 1257-1274.
- Green, D., Leiby, P., & Bowman, D. (2007, June). *Integrated Analysis of Market Transformation Scenarios with HyTrans*. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY. Oak Ridge, Tennessee: OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY.
- Green, D., Leiby, P., Tworek, E., & Bowman, D. (2006). *Using HyTrans to Study H2 Transition Scenarios*. Washington, DC: OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY.
- Greene, D. L., Lin, Z., & Dong, J. (2013). Analyzing the sensitivity of hydrogen vehicle sales to consumers' preferences. *International Journal of Hydrogen Energy*, 15857-15867.
- International Energy Agency. (2008). *Energy Technology Perspectives 2008*. OECD.
- International Energy Agency. (2010). *Energy Technology Perspectives 2010*. OECD.
- IPCC. (2007). *the Fourth Assessment Report*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2014). *the Fifth Assessment Report*.
- Jacobsson, S., Sanden, B., & Bangens, L. (2004). Transforming the energy system - The evolution of the German technological system for solar cells. *Technol. Anal. Straeg. Manag.*, 16(1), 3-30.

- JHFC. (2011). 燃料電池システム等実証研究（第2期 JHFC[プロジェクト] 報告書. 石油産業活性化センター・日本自動車研究所・エンジニアリング振興協会・日本ガス協会.
- Kahneman Daniel. (2012). ファスト&スロー（上）（第 電子書籍版 版). 早川書房.
- Leibenstein, H. (1950). Bandwagon, Snob, and Veblen Effects in the Theory of Consumers' Demand. *The Quarterly Journal of Economics*, 64(2), 183-207.
- Liu, X., & White, S. (2001). Comparing innovation systems: a framework and application to China's transitional context. *Research Policy*, 30, 1091-1114.
- Melaina, M. W. (2007). Turn of the century refueling: A review of innovations in early gasoline refueling methods and analogies for hydrogen. *Energy Policy*, 35, 4919-4934.
- Meyer, P. E., & Winebrake, J. J. (2009). Modeling technology diffusion of complementary goods: The case of hydrogen vehicles and refueling infrastructure. *Technovation*, 77-91.
- Moore, J. F. (1993). Predators and Prey: A New Ecology of Competition. *Harvard Business Review*, 71(3), 75-86.
- Park, S.-Y., Kim, J.-W., & Lee, D.-H. (2011). Development of a market penetration forecasting model for Hydrogen Fuel Cell Vehicles considering infrastructure and cost reduction effects. *Energy Policy*, 39, 3307-3315.
- Phaal, R. (2003, 10 9). *Fast-start technology roadmapping*. Retrieved 12 23, 2015, from <https://wiki.auckland.ac.nz/download/attachments/11963044/Cambridge+Phaal+TRM+fast+start+presentation.pdf>
- Phaal, R., Farrukh, C. J., & Probert, D. R. (2004). Technology roadmapping—A planning framework for evolution and revolution. *Technological Forecasting and Social Change*, 71, 5-26.
- Rogers M. Everett. (2007). Diffusion of Innovation (第 5 版). (三藤利雄, 訳) 翔泳社.
- Rohlf, J. (2005). *Bandwagon Effects in High-Technology Industries*. (勉. 佐々木, Trans.) MIT Press.

- Schumpeter, J. A. (1934). *The Theory of Economic Development*. New Brunswick (USA) and London (UK): Transaction Publishers.
- Stern, N. (2007). *The Economics of Climate Change — The Stern Review*. UK: Cambridge University Press.
- Suurs, R., Hekkert, M., Kieboom, S., & Smits, R. (2010). Understanding the Formative Stage of Technological Innovation System Development: The Case of Natural Gas as an Automotive Fuel. *Nergy Policy*, 38(1), 419-431.
- The National Academies. (2004). The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs. *The National Academies Press*, 29.
- van Lente, H. (1993). *Promising Technology: The dynamics of expectations in technological developmennts*. PhD Thesis, University of Twente.
- von Mises, L. (1998). *HUMAN ACTION A Treatise on Economics*. Auburn, Alabama: Ludwig von Mises Institute.
- シュムペーター. (1977). 経済発展の理論 上 (第 1 版). 岩波書店.
- 秋元圭吾. (2014). IPCC 第 5 次評価報告書における緩和の排出経路と各種対策・政策の評価. *環境情報科学*, 43(3).
- 人口問題研究所資料. (2013). 日本の将来推計人口—平成 24 年 1 月推計の解説および参考推計 (条件付推計) —. 国立社会保障・人口問題研究所.
- 長谷川卓也. (2016). 燃料電池自動車の課題と展望. *エネルギー・資源*, 37(1).
- 鈴木和歌奈. (2013). 希望／期待から見る科学技術. *研究技術計画*, 28(2), 163.
- 濱英彦. (1980). 地域人口予測の性格と推計方法. *人口問題研究*, 155, 21.

図表目次

表 1	経済的成功に対する視点	26
表 2	石油消費量の推移	29
表 3	ITEM 6.SELECTED CONSOLIDATED FINANCIAL DATA	33
表 4	燃料電池自動車用水素供給設備設置補助事業 (補助上限額表)	36
表 5	ICEV と ZEV の比較 (1)	43
表 6	ICEV と ZEV の比較 (2)	43

表 7	ICEV と ZEV の経済的成功	45
表 8	Technological Innovation System with 7 system functions	48
表 9	新結合の遂行にかかわる五つの場合	49
表 10	自動車産業のインフラ依拠型新商品に特化したイノベーション・フレームワーク	49
表 11	ICEVs in 1915-2015	57
表 12	FCEVs in 2015-2025	57
表 13	産業界とアカデミアの認識ギャップ	60
表 14	Assumptions Study のための検索式	62
表 15	カテゴリー分類表	63
表 16	学術文献の検索結果詳細	65
表 17	HRS 商圏経済の自律可能性検証手順 (水素供給面)	78
表 18	GRS 商圏と HRS 商圏における仮定	80
表 19	用語に関する補注	80
表 20	フルサイズ HRS の定義	82
表 21	JHFC 水素コスト	83
表 22	JHFC 水素コスト (詳細)	84
表 23	平成 26 年度 燃料電池自動車用水素供給設備設置補助事業 補助金上限表	86
表 24	平成 26 年度 燃料電池自動車用水素供給設備設置補助事業 補助金上限表	87
表 25	FCEV 選択率 50% での潜在需要計算	94
表 26	HRS 水素供給能力と HRS 価格目標 (東京)	95
表 27	HRS 商圏経済の自律条件 (例)	99
表 28	FCEV 乗用車経済の自律経済性	101
表 29	自立可能性検証過程	102
表 30	FCEV 経済の自律可能性	103
表 31	インフラ依拠型新商品に必要なマネジメント (乗用車)	105
表 32	インフラ依拠型新商品に必要なマネジメント (商用車)	105

表 3 3	ポータブル計量機のあゆみ	115
表 3 4	Number of Commercial HRSs	123
表 3 5	水素イニシアチブのメンバーとその特徴	124
図 1	ボタンの掛け違い	8
図 2	世界の大気汚染状況(2015年12月14日13:00)	10
図 3	大気中の二酸化炭素濃度推移	12
図 4	バラードパワーシステムズ株価推移	16
図 5	プロダクトライフサイクル	18
図 6	1880年代のイギリスにおける帆船と蒸気船の普及	19
図 7	1990年代のアメリカにおける馬(Equine)と ICEV の普及 ²²	19
図 8	1980年代のニュージーランドにおける AFV(CNGV, LPGV)の普及	20
図 9	天然ガス車の年間導入台数	21
図 10	2つのベルカーブ	22
図 11	自動車関連産業就業者と運転免許所有者	23
図 12	日本の自動車生産台数推移(台/年)	28
図 13	ポータブル式計量機	28
図 14	日本の GRS 数(青)および年間増加数(赤)	30
図 15	日本市場における日産 LEAF の月間販売台数および累積販売台数	31
図 16	世界における主要 BEV の年間販売台数推移	32
図 17	世界における HEV および ZEV の年間販売台数推移	35
図 18	需要と供給の概念図(現状)	38
図 19	A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis	39
図 20	需要と供給の概念図(対策案)	40
図 21	量産時車両価格	44
図 22	ICEV における Innovation Category の推移	50
図 23	FCEV における Innovation Category の推移	52
図 24	認識ギャップと Assumption laundering	61
図 25	カテゴリー分類フローチャート	64

図 2 6	抽出文献数の発行数推移	65
図 2 7	学術文献の分類結果	66
図 2 8	普及予測学術文献のカテゴリー別累積発行数推移	69
図 2 9	普及予測公的文献のカテゴリー別累積発行数推移	70
図 3 0	普及予測文献発行数の年間増加率	71
図 3 1	プロジェクションと予測	72
図 3 2	カリフォルニア州における FCEV roll-out survey 結果一覧	74
図 3 3	水素コスト内訳	85
図 3 4	ガソリンコスト内訳	85
図 3 5	HRS 価格高騰曲線と単純比例計算範囲 (30-300Nm ³ /h)	89
図 3 6	人口密度に対する GRS 商圈面積と GRS 当たり FCEV 数 (台/基)	91
図 3 7	新車価格－累積販売台数分布曲線	93
図 3 8	新車価格－累積販売台数分布曲線 (対数スケール)	93
図 3 9	GRS 商圈面積と GRS 数の推移	97
図 4 0	FCEV 乗用車前提での市場初期の水素価格変動率	103
図 4 1	FCEV 商用車前提での市場初期の水素価格変動率	104
図 4 2	自動車生産台数構成比 (世界)	106
図 4 3	自動車生産台数構成比 (日本)	106
図 4 4	マルチステップビジネスモデル	109
図 4 5	リチウムイオン電池と水素タンク内水素の質量あたりエネルギー	109
図 4 6	GRS 地下タンク容量と GRS あたり自動車数	113
図 4 7	昭和 26 年のポータブル式ガソリン計量機	114
図 4 8	トミナガ計量機年間生産台数 (S 換) と SS 数・自動車保有台数の推移	115
図 4 9	主要国の自動車生産台数 (左) および自動車輸出台数 (右)	116
図 5 0	MIRAI 車両概要	118
図 5 1	欧州政府の水素イニシアチブ推移	125
図 5 2	アメリカにおける水素イニシアチブ推移	126
図 5 3	ORNL 報告における政策の位置づけ	127
図 5 4	ORNL 報告における 3 種類の FCEV 普及シナリオ	128