

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：11301  
研究種目：若手研究  
研究期間：2019～2021  
課題番号：19K20501  
研究課題名（和文）再エネ由来水素の製造・利活用の普及拡大を図るイノベーション：日・独・米の国際比較

研究課題名（英文）Innovation for diffusing renewable hydrogen production and utilisation:  
Comparison of trends in Japan, Germany and the United States

研究代表者  
TRENCHER GREGORY (Trencher, Gregory)  
東北大学・環境科学研究科・准教授

研究者番号：90802108  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、日本、ドイツ、米国（加州）に着目し、水素の生産・利活用拡大の推進に向けた政策と阻害要因を解明するために比較分析を行った。その中で、再生可能エネルギー由来の水素、燃料電池自動車の生産と普及、それを支えるインフラ（水素ステーション）に着目し、包括的に実証的検証を行った。具体的には、水素・自動車の供給、需要、インフラ、制度設計という4つの観点を織り込んだ分析的枠組を展開して、それに沿って聴取調査および文献資料の分析によって、データを収集・分析を進めた。日本、ドイツ、カリフォルニア州の水素市場に関する詳細な事例分析の他、3カ国の共通点・差異点に関する比較分析を行なうことが可能となった。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、公共政策、トランジション研究、交通学、経済学などの分野からの理論を統合的に活用し、独自性の高い形で比較分析を行った。再生可能エネルギー由来の水素の製造および燃料電池自動車の普及拡大を妨げる要因を明らかにし、共通の課題を抽出できた。その結果、日本、ドイツ、カリフォルニア州における市場拡大を推進するに当たって必要とされる打開策を提言し、学術論文投稿、学会発表、業界と一般向けの講演会、公共政策の提言など行なうにより、幅広く社会へ研究成果の発信と活用を行った。なお、学術への貢献としては、次世代自動車技術の社会技術的システムの発展とそれを阻害する諸要因を解明するための分析的枠組を展開できた。

研究成果の概要（英文）：This study conducted a comparison of the policies used to promote the production, diffusion and use of hydrogen in three countries (Japan, United States (California) and Germany) as well as barriers impeding market growth. The study covered the use of renewable hydrogen in transport and the production and diffusion of fuel-cell passenger vehicles. It adopted a mixed methods approach, combining data from interviews and document analysis. The study produced three detailed case studies on the hydrogen market for each country from the perspective of vehicle production, utilization/demand, infrastructure and hydrogen production, and cross-cutting institutional issues. The study found that all market growth in all three countries is slower than expectations due to high costs and a small number of actors in the market. Production of renewable hydrogen in each country is limited and suffering from high costs due to low economies of scale.

研究分野：エネルギー政策

キーワード：水素 燃料電池自動車 政策 再生可能エネルギー 国際比較 日本 ドイツ 米国

## 1. 研究開始当初の背景

脱炭素化に向けたイノベーションを推進する上で、日本を始めとした世界中の国々は水素の普及拡大を積極的に支援しており、今後、水素が交通、工業、発電分野における脱炭素化に大いに資することが期待されている。しかし現時点で水素の大部分が化石燃料から製造されていることを踏まえると、今後、代わりに再生可能エネルギーを活用し、その費用を抑えつつ大規模な供給量を確保することが急務となっている。ところが、仮にこのように再生可能エネルギー由来の水素が大規模かつ低コストで生産できたとしても、それを燃料とする市場を創出することも必要である。そこで、他の分野と比較してその技術開発・普及が進んでいるモビリティ分野、とりわけ乗用車（燃料電池自動車とバス）の市場拡大を更に促すことが、いわゆる「水素社会」の構築を推進する上で、非常に重要だと考えられる。多くの国において交通部門が、大気汚染や気候変動を悪化させる最大の排出源であるため、電気自動車の普及を図りつつ、再生可能エネルギー由来の水素を活用したモビリティシステムを実現すれば、あらゆる環境問題の解消が進むことが期待される。

こうした中、現在日本、ドイツ、米国（カリフォルニア州）などでは、官民一体となって燃料電池自動車の生産・普及を図る政策と支援制度を導入されている。しかしながら、これらの市場の成長が遅く、乗用車、商業トラック、バスなどの応用分野では、燃料電池自動車ではなく、電気自動車の普及が先に進んでいるため、燃料電池自動車の市場は、当初期待されていたほど伸びていないというのが、これらの3カ国の共通の課題である。そのため、これらの国において水素を燃料とする燃料電池自動車の普及拡大を推進する上で、いかなる政策が導入され、いかなる社会的、技術的、経済的要因が市場成長の妨げとなっているのかを明らかにする必要がある。もしこれらの3カ国に対してこれらの点を解明できれば、先行研究と比較してより普遍的な知識を創出することや、打開策となるより有効な政策立案を提言することが可能となる。それによって、世界中の水素社会を実現する上で大いに寄与できると考えられる。しかしながら、先行研究では、理系の研究が支配的であり、公共政策やイノベーションのプロセス、社会システムなどに焦点を当てた社会科学の分野からの研究、および、燃料電池自動車の普及を目指した戦略に関する国際比較は極めて乏しい。

## 2. 研究の目的

そこで本研究の目的は、日本、ドイツ、カリフォルニア州（以下、対象国）を対象とし、燃料電池自動車および再生可能エネルギー由来水素の生産・利活用拡大の推進に向けた政策と阻害要因を解明するために各国に対して詳細なケーススタディーを行った上で、その共通点を総合的に整理するための国際比較分析を行うこととした。

## 3. 研究の方法

上記の目的を達成するためには、次の流れで理論的、実証的な研究を行ってきた。

1. 先行研究の大規模な調査を行い、燃料電池自動車や電気自動車の普及を妨げる要因を抽出する
2. 実証研究を導くために前の段階で抽出した要因を整理して分析的枠組に取りまとめる
3. 半構造化インタビューおよび関連資料の分析を通じてデータを収集する
4. 上記の枠組に沿って、定性的分析ソフト（MAXQDA）でコード化することによって、上記のデータを分析する
5. その結果を分析することで、対象国の政策、効果、阻害要因を明らかにするために、国ごとのケーススタディーおよび国際比較分析を行なう

## 4. 研究成果

理論レベルの研究では、表1に示した通り、燃料電池自動車や電気自動車の普及を妨げる要因に関する議論を先行研究から抽出・整理した。諸要因は、供給側、インフラ・エネルギー供給、需要側、制度設計の以上、4つのグループに分けて分類化している。対象国の水素・燃料電池自動車の市場形成を実証的に分析するに当たり、同分析的枠組の上述の4つの区分に従ってデータを収集・整理した。基本的には、2019年4月～2021年3月の間におよそ25の組織に対してインタビューを行い、対象国の主要な自動車メーカーや、研究機関、バス会社、政府、自治体、業界団体などから第一次データを取得した。同分析的枠組を活用することで、同様な軸から対象国の市場状況を包括的に分析でき、その結果を3本の論文として発表した（参考文献1-3）。さらには、他の研究者は、他国で水素モビリティの社会技術的システムを評価する際に同分析的枠組を活用している（参考文献4）。

表 1 燃料電池自動車の普及を妨げる要因を整理する分析的枠組

Category	General description	Examples of specific governance challenges	Target	Examined in case study?	Key literature
Supply-side	Measures that influence the production and supply of vehicles	How to force or incentivise the production of ZEVs to ensure a steady supply and diversity of producers and models?	Vehicle makers	Yes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meckling and Nahm (2019)</li> <li>• Pötz et al. (2019)</li> <li>• Rinscheid et al. (2020)</li> <li>• Yarime (2009)</li> <li>• Wesseling et al. (2015)</li> </ul>
		How to spur innovation to increase the technical performance of vehicles (e.g. reduce deterioration of components, increase driving range and safety etc.) and decrease production costs?		No <sup>a</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Farla et al. (2010)</li> <li>• Cano et al. (2018)</li> <li>• Berkeley et al. (2017)</li> <li>• Staffell et al. (2019)</li> <li>• Ball and Weeda (2015)</li> <li>• Ishitani and Baba (2008)</li> </ul>
		How to reduce the environmental impacts of vehicle manufacturing and secure steady and environmentally sustainable supplies of raw materials such as lithium, cobalt and platinum?		No	<ul style="list-style-type: none"> <li>• B. Sovacool et al. (2020)</li> <li>• Biresseoglu et al. (2018)</li> <li>• B. K. Sovacool and Brossmann (2010)</li> <li>• Delloitte (2020)</li> </ul>
Infrastructure	Measures that ensure an adequate, sustainable and safe supply of electricity/hydrogen and ease of access to charging or refuelling stations	How to assure the availability of the required charging/refuelling stations despite low opportunities for profit when vehicle populations are low?	Fuel suppliers	Yes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leibowicz (2018)</li> <li>• McDowall (2016)</li> <li>• Hardman and Steinberger-Wilckens (2014)</li> <li>• Hardman et al. (2017)</li> <li>• Biresseoglu et al. (2018)</li> <li>• Ajanovic and Haas (2019)</li> </ul>
		How to establish or incentivise an uninterrupted, low-cost and environmentally sustainable source of electricity or hydrogen for charging/refuelling?		Yes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leibowicz (2018)</li> <li>• Steinhilber et al. (2013)</li> <li>• Berkeley et al. (2017)</li> <li>• Staffell et al. (2019)</li> <li>• Hardman et al. (2017)</li> </ul>
		How to prevent accidents associated with charging or refuelling stations for vehicles users, operators and neighbouring establishments?		No	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ball and Weeda (2015)</li> <li>• Saritas et al. (2019)</li> <li>• Cano et al. (2018)</li> </ul>
Demand-side	Measures that increase the societal demand for vehicles	How to segment and then target the market (e.g. light/medium/heavy duty, mass-market/fleets etc.) to accelerate vehicle penetration and systematically concentrate private and public resources?	Vehicle users	Yes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hardman et al. (2015)</li> <li>• Morton et al. (2017)</li> <li>• Liao et al. (2017)</li> </ul>
		How to stimulate demand in potential vehicle users despite psychological barriers regarding higher upfront costs, charging/refuelling inconveniences, technical reliability and lack of model diversity?		Yes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hardman et al. (2017)</li> <li>• Cano et al. (2018)</li> <li>• Matthews et al. (2017)</li> <li>• Biresseoglu et al. (2018)</li> </ul>
		How to increase awareness of the benefits of ZEVs for the general public (including both potential users and non-users) and boost social acceptance and familiarity with the respective technologies?		No <sup>b</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yetano Roche et al. (2010)</li> <li>• Egbue and Long (2012)</li> <li>• Berkeley et al. (2017)</li> <li>• Itaoka et al. (2017)</li> </ul>
Category	General description	Examples of specific governance challenges	Target	Examined in case study?	Key literature
Institutional	Cross-cutting measures that facilitate the entire system by removing institutional barriers to collaboration, innovation and cost reduction.	How to coordinate the principal industry, government and academic stakeholders to accelerate knowledge sharing and the alignment of policy, private investments and industry practices (e.g. codes and standards)?	Vehicle makers, fuel suppliers, research institutions and government agencies	Yes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ajanovic and Haas (2020)</li> <li>• Xu and Su (2016)</li> <li>• Yarime (2009)</li> <li>• Pohl and Yarime (2012)</li> <li>• Taeihagh and Lim (2019)</li> </ul>

出典 Trencher (2021) “Accelerating the production and diffusion of fuel cell vehicles: Experiences from California”. *Energy Reports* 6: 2503-2519.

実証的な研究レベルでは、最終年度 2021 年中に日本、カリフォルニア州、および中国の比較分析を行い、その成果を発表した（参考文献 5）。表 2 は、その比較分析の主たる結果の可視化を行ったものであり、日本、カリフォルニア州、中国において燃料電池自動車・電気自動車および水素の生産・普及の拡大を図るに当たり、いかなる戦略が官民によって導入されているのかを示している。掲載の諸戦略は、トランジション研究および発展指向型国家( developmental state ) の分野から抽出・定義を行い、市場成長を初期段階( Phase 1 )、加速段階( Phase 2 )に分けて、段階毎に対象国の戦略活用の状況を検証した。その結果、初回段階では、概ねどの国も「知識創出の支援」「ステークホルダーネットワーク構築」「技術開発」「市場創出」「資源調達・配分」に当たる活動に力を入れていることが分かった。一方、既存技術であるガソリン車の生産・利用を抑制するための活動は、中国およびカリフォルニア州が規制を積極的に活用していることに対して、日本は活用していないとの状況が浮き彫りになった。換言すれば、日本は、中国とカリフォルニア州とは異なり、燃料電池自動車の生産と普及を図る上であらゆる戦略を講じているが、ガソリン車の生産・普及を抑える規制面での取り組みを導入していない、とのこととなる。日本で他国に比較して、純粋の電動車（電気自動車、燃料電池自動車）の普及が遅れているのは、まさにこの状況にも起因すると考えられる。

また、この実証的な研究を通じて明らかになったもう一つの動向は、これまでに脱炭素化への移行を妨げると言われてきた大手企業や政府機関が共同して、積極的に次世代自動車のイノベーションと普及を行っている、ということである。つまり、アジア（日本・中国）においても米国（カリフォルニア州）においても、既存の自動車メーカー、政府機関、燃料供給者が連携して、トップダウンの形でモビリティ分野においてエネルギー・技術の転換を図っているのであるが、これは特に欧州を中心に盛んに行われるトランジション研究分野の中で支配的となっている理論とは対象的なイノベーションに対する見方を示す。同論文（参考文献 5）の中では、この議論も展開し、ボトムアップ型イノベーションのあり方を提唱する欧州の研究が伝播する理論に対する問題点と限界を示した上で、「トップダウン型のトランジション」の可能性を理論的にも実証的にも提示した。

表2 水素と燃料電池自動車の普及拡大に向けて用いられた戦略

Comparison of strategy use across cases.

Category	Strategy	Phase 1: Pre-development & exploration			Phase 2: Acceleration		
		China	Japan	California	China	Japan	California
Overarching coordination strategies							
1. Knowledge management	1.1 Knowledge dissemination	●	●	●	●	●	●
2. Actor networks and collaboration	2.2 Inclusive governance	○	○	○	○	○	○
	2.2 State-industry collaboration	●	●	●	●	●	●
	2.3 Industry alliances	●	●	●	●	●	●
3. Guidance and planning	3.1 Planning and commitment	●	●	●	●	●	●
	3.2 Monitoring and disclosure	○	○	○	○	○	○
4. Legitimation and advocacy	4.1 Influencing public views	●	●	●	●	●	●
	4.2 Political lobbying	○	○	○	○	○	○
5. Industry creation and technology production	5.1 Cost alteration	●	●	●	●	●	●
	5.2 Industry nurturing	●	●	●	●	●	●
	5.3 Knowledge production	●	●	○	●	●	○
	5.4 Industry protection	●	○	○	●	○	○
6. Market creation and technology diffusion	6.1 Niche creation and experimentation	●	●	●	●	●	●
	6.2 Demand creation	●	○	○	●	●	●
	6.3 Removing market barriers	○	●	●	●	●	●
	6.4 Sectoral coupling	○	●	●	●	●	●
7. Resource mobilisation and allocation	7.1 Financial support	●	●	●	●	●	●
	7.2 Infrastructure preparation	●	●	●	●	●	●
	7.3 Human resource development	●	●	●	●	●	●
8. Reducing incumbent technology production and use	8.1 Technology control and restriction	●	○	○	●	○	○
	8.2 Support removal	○	○	○	●	○	○
	8.3 Structural reforms	○	○	○	●	○	○
	8.4 Actor changes	○	○	○	●	○	○

○ indicates use of a strategy is 'weak' or 'not observed'. ● indicates use of a strategy is 'strong'. See Section 3.2.

出典 Trencher, G., Truong, N. et al. (2021) "Top-down sustainability transitions in action: How do incumbent actors drive electric mobility diffusion in China, Japan, and California?". *Energy Research and Social Science* 79: 102184

参考文献

1. Trencher (2021) "Accelerating the production and diffusion of fuel cell vehicles: Experiences from California". *Energy Reports* 6: 2503-2519.
2. Trencher, G. Edianto, A. (2021) "Drivers and Barriers to the Adoption of Fuel Cell Passenger Vehicles and Buses in Germany". *Energies*, 14(4): 833.
3. Trencher, G., Taihagh, A., Yarime, M. (2020) "Overcoming Barriers to Developing and Diffusing Fuel-Cell Vehicles: Governance and Experiences in Japan." *Energy Policy*. 142.
4. Greene, David L., Joan M. Ogden, and Zhenhong Lin. 2020. 'Challenges in the designing, planning and deployment of hydrogen refueling infrastructure for fuel cell electric vehicles', *eTransportation*, 6: 100086.
5. Trencher, G., Truong, N. et al. (2021) "Top-down sustainability transitions in action: How do incumbent actors drive electric mobility diffusion in China, Japan, and California?". *Energy Research and Social Science* 79: 102184

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Trencher G., Truong, N., Temocin, P., Duygan, M.	4. 巻 79
2. 論文標題 Top-down sustainability transitions in action: How do incumbent actors drive electric mobility diffusion in China, Japan, and California?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energy Research & Social Science	6. 最初と最後の頁 102184 ~ 102184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.erss.2021.102184	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Trencher G., Edianto, A.	4. 巻 14
2. 論文標題 Drivers and Barriers to the Adoption of Fuel Cell Passenger Vehicles and Buses in Germany	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 833 ~ 833
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/en14040833	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Trencher, G.	4. 巻 6
2. 論文標題 Strategies to accelerate the production and diffusion of fuel cell electric vehicles: Experiences from California	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Energy Reports	6. 最初と最後の頁 2503 ~ 2519
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.egyr.2020.09.008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Trencher G., Taeihagh, A., Yarime, M.	4. 巻 142
2. 論文標題 Overcoming barriers to developing and diffusing fuel-cell vehicles: Governance strategies and experiences in Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Energy Policy	6. 最初と最後の頁 111533 ~ 111533
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.enpol.2020.111533	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 トレンチャー・グレゴリー
2. 発表標題 燃料電池自動車の生産・普及の拡大加速に向けて日本、カリフォルニア州における戦略の比較分析
3. 学会等名 東京大学未来ビジョン研究センター エネルギーセミナー（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Trencher, G.
2. 発表標題 Accelerating Production and Diffusion of Fuel Cell Vehicles: Experiences from California
3. 学会等名 International Sustainability Transitions Conference 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Trencher, G.
2. 発表標題 Overcoming Barriers to Producing & Diffusing FCVs: Governance Strategies and Experiences in Japan
3. 学会等名 International Energy Politics Module: Novosibirsk State University（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Trencher, G.
2. 発表標題 Overcoming Barriers to Producing & Diffusing FCVs: Governance Strategies and Experiences in Japan
3. 学会等名 9th International Workshop in Advances in Cleaner Production（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 TRENCHER Gregory
2. 発表標題 Accelerating diffusion of fuel-cell vehicles in Japan: Governance insights for fuel-cell and electric vehicles and sustainability transitions
3. 学会等名 International Sustainability Transitions Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 TRENCHER Gregory
2. 発表標題 Accelerating uptake of fuel-cell vehicles in Japan: Insights for sustainability transitions and electric vehicles
3. 学会等名 2nd International Conference on Energy Research and Social Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------