

Working Paper Series

IASS WP 2018-J001

政府見通しに基づく水素関連部門の投入係数ベクトルの
作成

早稲田大学社会科学総合学院 鷺津 明由
労働政策研究・研修機構 中野 諭



*School of Social Sciences
Waseda University*

政府見通しに基づく水素関連部門の投入係数ベクトルの作成

鷲津 明由^{*}，中野 諭^{**}

2018年6月⁺

1. はじめに

2014年の「エネルギー基本計画」¹⁾では、水素利用の展開が取り上げられ、同年、経済産業省は「水素・燃料電池戦略ロードマップ」(以下、ロードマップ)²⁾を公表し、水素の製造・貯蔵・輸送システムや、水素発電、水素ステーションや燃料電池自動車(FCV)、家庭用燃料電池の技術開発や普及の目標値を具体的に提示した。ロードマップはその後2016年に改訂されている。また、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)は水素エネルギー白書2014³⁾をまとめ、水素関連技術の開発状況ばかりでなく、水素利用に係わる制度上の課題などについて検討した⁴⁾。さらに、水素関連技術開発の支援事業として、NEDOは2014年度から「水素利用等先導研究開発事業」⁵⁾を実施しているが、そこでは単に開発目標値を掲げて個別技術の革新を目指すばかりでなく、個別技術を全体システムとして円滑に社会に埋め込むための調査研究を実施していることに注目できる。

一方、内閣府では科学技術政策の一環として「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)」⁶⁾を実施し、技術の開発段階から社会実装に至る過程の円滑化を図ろうとしている。このSIPの課題の一つに「エネルギーキャリア」があり、水素関連技術もその対象に含まれている⁷⁾。このように水素関連技術開発は、科学技術振興策、エネルギー政策および関連産業振興策として、幅広い視点から実施されているとみなすことができる。近年、政策の実施効果には厳しい目が向けられるようになってきているだけに、水素関連技術のもたらす社会的影響の分析は、重要性を増すようになってきたと考えられる。

水素関連技術の将来見通しには不確実性も多く、その社会的影響評価分析を行っている先行研究は少ない。本藤ら(2008)⁸⁾は、「実証段階ではあるが、将来有望な技術」として有機ハイドライドを用いた水素の貯蔵・輸送技術のライフサイクル的な検討を、科学技術政策論的視点から行っており、注目することができる。さらに臼井・本藤(2010)⁹⁾では、「(蓄電池技術と水素貯蔵技術という)特徴の異なるエネルギー貯蔵技術」のLC-CO₂の比較という、政策論的課題に取り組んでいる。

そして2014年以降は、エネルギー政策の観点から、再生可能エネルギーを活用した水素

^{*}早稲田大学社会科学総合学術院(e-mail: washizu @waseda.jp)

^{**}労働政策研究・研修機構(e-mail: nakano @jil.go.jp)

利用システムが社会にもたらす効果を評価しようとする研究が活発になっている。たとえば Ehteshamai and Chan(2014)は再生可能エネルギーを貯蔵するいくつかの方法を、設定した基準の下で比較検討しているが、それらのうち水素を利用することが最も望ましいと結論付けて注目されている。Kaldellis et al.(2015)は、島嶼国(ギリシャ)の風力エネルギーの有効活用に水素燃料電池が有効であるとのシミュレーション結果を提示している。嘉藤(2015)は世界の再生可能エネルギーを用いた水素製造コストを試算して、今後必要とされる技術開発について具体的に検討している。Dincer and Acar (2015) は再生可能エネルギー／非再生可能エネルギーを利用した水素製造方法をいくつかの社会的指標面から評価している。藤井ら(2015)は太陽光発電などによる電力を水素に変換するシステム構築に必要な個別技術の開発目標を検討している。また、NEDO 事業の「トータルシステム導入シナリオ調査」では、オーストリアやノルウェーの自然エネルギーに基づく水素を異なる方法で日本に輸送する場合のライフサイクル GHG 排出量を計算して比較している。Amoo and Fagbenle(2014)は、分散するさまざまなエネルギー源を水素に変換して利用するシステム構築が、ナイジェリアのような途上国で進められるべきと論じている。しかし、これらの先行研究では、水素の製造・輸送・貯蔵・利用に至るすべてのプロセスの俯瞰的検討には至っていない。

予想される新たな設備投資が、経済全体にもたらすマクロ的波及効果の分析手法としては、産業連関分析が有効である^{16,17)}。政府が目指す水素利用社会の構築がもたらす経済・環境効果の分析に向けて、本研究では、筆者らが開発した次世代エネルギーシステム分析用産業連関表(Input-output table for analysis of next-generation energy system: IONGES)^{18,19)}の投入係数行列水素関連部門のベクトルを追加し、拡張したので、その方法と結果について報告する。

この分析目的には課題も多い。水素技術のように現実には実現していない新技術を、産業連関表に組み入れることは難しいため、新技術の評価を行う産業連関分析の先行研究は多いとは言えない。発酵工業協会(1985)、菊池・北川(1990)は、1980年代に、それぞれバイオテクノロジーと光技術の2000年代の可能性について分析するための、新技術分析用の拡張産業連関表を作成している。それらによれば、拡張産業連関表の作成プロセスには(1)技術ロードマップに基づく投入係数ベクトルの作成、(2)新技術の普及とそれが対応する旧技術の代替率の推測、(3)新技術の生産規模の設定の3段階がある。(1)は専門家技術集団によってまとめられた技術ロードマップ等を参照して合理的な平均レベルのデータをどのように作成するかがキーポイントである。ただし、技術開発戦略に企業がかかわっている場合には秘匿情報が多いという問題がある。(2)(3)は、新技術がいかに社会に受容されるかという問題であるため、工学的技術情報に限らない広範囲の横断的情報が必要である。幸い、水素に関してはロードマップが公表されているほか、NEDO など公的機関による調査研究の蓄積があり、技術情報が比較的得やすいという利点がある。その一方で、ロードマップにFCVや家庭用燃料電池については普及目標が掲げられているものの、水素の普及と生産

規模の見通し(上記の(2)(3)に関する情報)については、はっきりしていない。したがって本論では、完全な「水素エネルギーシステムの構築の包括的波及効果分析」には不足する情報があるものの、上記の(1)の段階(水素関連部門の投入係数ベクトルの作成)を行い、水素エネルギーシステムの構築がもたらす効果について定量分析の第1段階を目指す。

なお本研究では IONGES を用いるが、再生可能エネルギーを記述した産業関連表の他の例として、横浜国立大学 本藤研究室による再生可能エネルギー部門拡張産業関連表(REFIO)(森泉他(2015))がある。REFIO が、工学的技術情報を重視して詳細な基本分類でまとめられた、再生可能エネルギー部門の投入係数ベクトルの表であるのに対し、IONGES は総務省の産業関連表との概念の整合性を重視して、再生可能エネルギー部門も含めて経済全体の需給バランスを記述した表である(後者の公表部門分類は統合中分類である)。

2. 追加した水素関連部門

本研究では分析の対象とする水素利用システムを図 1 のように想定し、関連する水素部門を設定した。この状況はロードマップ 2)における「フェーズ 2」の状況に対応している。すなわち、水素を海外の風力発電などを利用して大規模に製造し、有機ハイドライドによってタンカーで日本に輸送する。国内の港湾施設で、有機ハイドライドから水素を精製し、港湾近くの 100 万 kW の水素発電所に送る。このような大規模な水素利用システムが確立すると、水素が安価になり、燃料電池自動車の普及が進む。2030 年には、FCV80 万台、水素ステーション約 900 か所が実現し、FCV の燃料電池システムの価格が現状の 1/4 になる。すると、家庭用燃料電池の価格も 5 年で投資回収可能な金額となり、530 万台が普及する。ここで、水素価格、FCV、水素ステーション、家庭用燃料電池に関する想定はロードマップ 2)における 2030 年ごろの想定を参照している。一方、海外の積地港湾施設から国内の揚地港湾施設の設備状況については、ロードマップには詳しい記述がないため、NEDO(2010)²⁰⁾における想定を参照した。なお、水素パイプラインの新設は現実的でないと考えられることから、水素は港湾近接の施設で大規模に製造し、水素ステーション(オフサイト施設^{脚注 1)})には専用ポンペによりトレーラー輸送するものとした。水素ステーションに関する想定は JHFC(2011)²¹⁾を参照した。

これらの想定を置いたこと理由として、ロードマップ 2)が経済産業省の水素・燃料電池戦略協議会における産学官の有識者の中立かつ広範な議論に基づいて作成されたものであること、また有機ハイドライドは、NEDO の「国際間水素サプライチェーンの実証事業^{脚注 2)}」でも採用された将来有望な水素輸送方法と考えられることなどがあげられる。

脚注1) その場で水素を製造するのではなく、他箇所製造され、運搬された水素を販売するための施設。

脚注2) NEDO http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100807.html

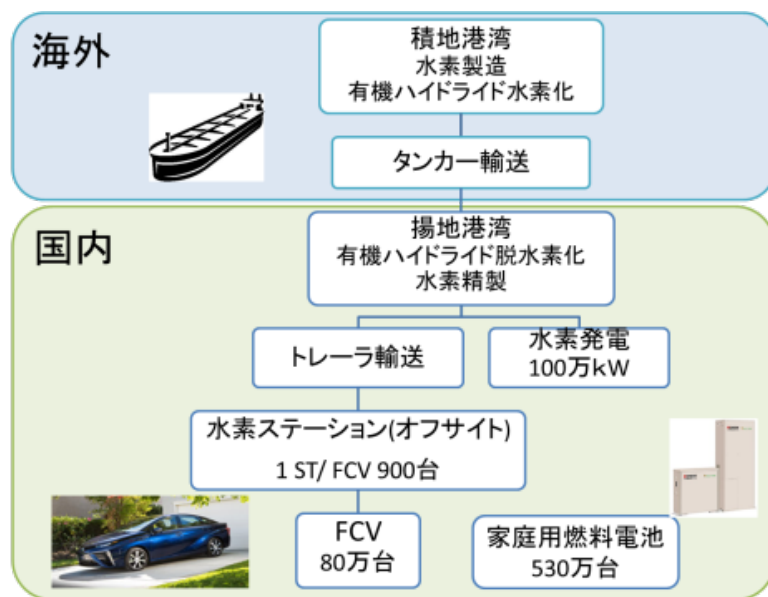


図1 分析の対象とする水素利用システム

図2は IONGES¹⁹⁾の投入係数行列に、水素関連施設の建設および運転の投入係数ベクトルを追加したものイメージである。総務省の産業連関表(図2の塗りつぶしのない部分)に、IONGESでは再生可能エネルギー部門の投入産出関係を追加(薄い塗りつぶし部分)したが、本研究ではさらに水素関連部門の投入構造(斜め線の塗りつぶし部分)を組み込んだ投入係数行列を作成した。

	再生可能エネルギー部門	水素関連部門	その他の部門
再生可能エネルギー部門			
水素関連部門	0	0	0
その他の部門			

図2 水素関連部門を付加した IONGES 投入係数行列の概念図

この投入係数行列から計算されるレオンティエフ逆行列に、任意の水素関連施設の建設または運転の需要(投資)額を示す最終需要ベクトルを与えれば、当該需要から引き起こされる波及効果の分析ができる。図 2 のように、投入係数行列に水素関連部門のアクティビティを埋め込むことによって、任意の水素関連施設の投資または稼働水準に対して、あるいは諸水素関連施設の任意の組み合わせに対して、それぞれがもたらす波及効果の分析を行いやすくなる。こうすることが、外生的に水素関連部門の投入ベクトルに最終需要水準を乗じたものを与えて誘発計算を行うことと異なる点は、水素関連施設の建設または運転の最終需要額そのもの(水素関連施設の建設または運転部門の中間投入財に加え、同部門で発生する粗付加価値額を含む大きさ)が、誘発計算に含まれるという点である。つまり「需要の発生→そのための資材投入」という初期の波及プロセスを、1段階多く記述することになる。ただし、本研究では水素関連部門の行方向のベクトルが記述されていないため 2 つの計算結果の違いは、初期の最終需要額に含まれる水素関連部門の粗付加価値額の大きさだけである。

本研究で付け加えた水素関連部門は、表 1 の表側にある 7 つの設備の施設建設部門と経常運転部門である(ただし FCV と家庭用燃料電池は設備製造部門のみ)。またそれぞれに想定される最終需要規模を表 1 に示した。積地港湾設備、輸送設備、揚地港湾設備、水素発電設備の施設建設と経常運転の最終需要水準は、NEDO(2010)²⁰⁾の想定に基づき、100 万 kW の水素発電設備を稼働させるために必要な需要水準である。また、水素ステーション(運搬含む)、FCV、家庭用燃料電池の最終需要水準はロードマップ²⁾の想定である。

表 1 追加した水素関連部門

水素関連部門	設備の内容	最終需要水準	
		設備投資 億円/1 式	経常運転億 円/1 式・年
積地港湾設備 ¹⁾	アルカリ水電解装置, 海水淡水化施設, 有機ハイドライド水素化装置, コーンルーフ型タンク	2,204	3,477
輸送設備 ¹⁾	ケミカルタンカー	648	126
揚地港湾設備 ¹⁾	コーンルーフ型タンク, 有機ハイドライド脱水素化装置, 水素ガス精製器	1,280	561
水素発電設備 ¹⁾	閉サイクル式純水素酸素燃焼タービン	2,060	—
水素ステーション(運搬含む)	900 台/ST	2,240	507
FCV ²⁾	80 万台×348.8 万円/台	27,888	—
家庭用燃料電池 ²⁾	530 万台×53.3 万円/台	28,267	—

1)最終需要水準の想定は 100 万 kW の水素発電所を 1 年間稼働させるための水準であり、NEDO(2010)²⁰⁾による。ただし、海水淡水化施設にかかる需要額を、公表されている国内事例^{22,23)}の平均値を参照して追加した。

2)普及台数と価格の想定はロードマップ²⁾による。

3.水素関連部門の投入係数ベクトルの作成手順

本章では、水素関連施設の建設および運転の投入係数ベクトルの作成方法について説明する。以下で作成した投入係数ベクトルは、早稲田大学 スマート社会技術融合研究機構 次世代科学技術経済分析研究所ウェブページ^{脚注 3)}において公開予定である。また、各水素関連部門における主な内訳と、産業連関表との対応関係を付表に示す。

3.1 積地港湾設備，輸送，揚地港湾設備施設建設部門

表 1 の海外の積地，輸送および国内の揚地港湾設備施設建設部門の投入係数ベクトルを次のように作成した。

- 1)表 1 の設備投資総額を、「プライスコストインデックス PCI」²⁵⁾の構成比で各費目に分割
- 2)各費目を関連する産業連関部門(IO 部門)に対応させる。(現場経費，一般管理費は，対応する建設 IO 部門における関連項目の構成比で，複数の IO 部門に割り当てる。)
- 3)2)を建設費総額が 1 となるように係数化することで，投入係数ベクトルを推計

ここで、「プライスコストインデックス PCI」²⁵⁾とは，日本機械輸出組合が作成した，一般的な化学プラントを建設する際に目安となる費目構成比である。それによれば，一般的な化学プラントでは，建設費全体のうち 27.2%がメインとなる機械設備費用であり，残りが汎用的な計測機器の費用や配管工事費用，土木や建設費用などである。

有機ハイドライド(脱)水素化設備について，27.2%のメインとなる機械設備費用の IO 部門への分割方法については補足説明が必要である。有機ハイドライド(脱)水素化設備は現在開発中の技術であるため，資材構成についての開示情報を得ることができなかった。一方，NEDO(2010)²⁰⁾によれば，これら設備には，既存のシクロヘキサン製造プロセス(図 3)と類似するプロセスが想定されるということである。そこで，本研究では図 3 のプロセスに記載の各部品に対して，経済産業省「生産動態統計」で捕捉される平均単価を当てはめ，(脱)水素化プロセス全体の金額的資材構成比を推計した。これには，有機ハイドライド(脱)水素化設備が普及した段階では，それを構成する各部品も現在の汎用部品と同等の価格に落ち着くであろうとの前提に基づく。情報の少ない未来技術の普及予測評価にあたって，このような前提を置くことの妥当性の検討は今後の課題である。

輸送設備と発電設備の施設建設投入係数ベクトルには，それぞれ，IONGES の「船舶・同修理」と LNG コンバインドサイクル発電施設建設^{脚注 4)}の投入係数ベクトルを対応させた。

脚注3) <http://www.f.waseda.jp/washizu/>

脚注4) LNG コンバインドサイクル発電施設の建設費のコストシェアには，池田他²⁴⁾の天然ガス火力発電施設のコストシェアをもととし，タービンのシェアを 2 倍に調整したものを使用している。

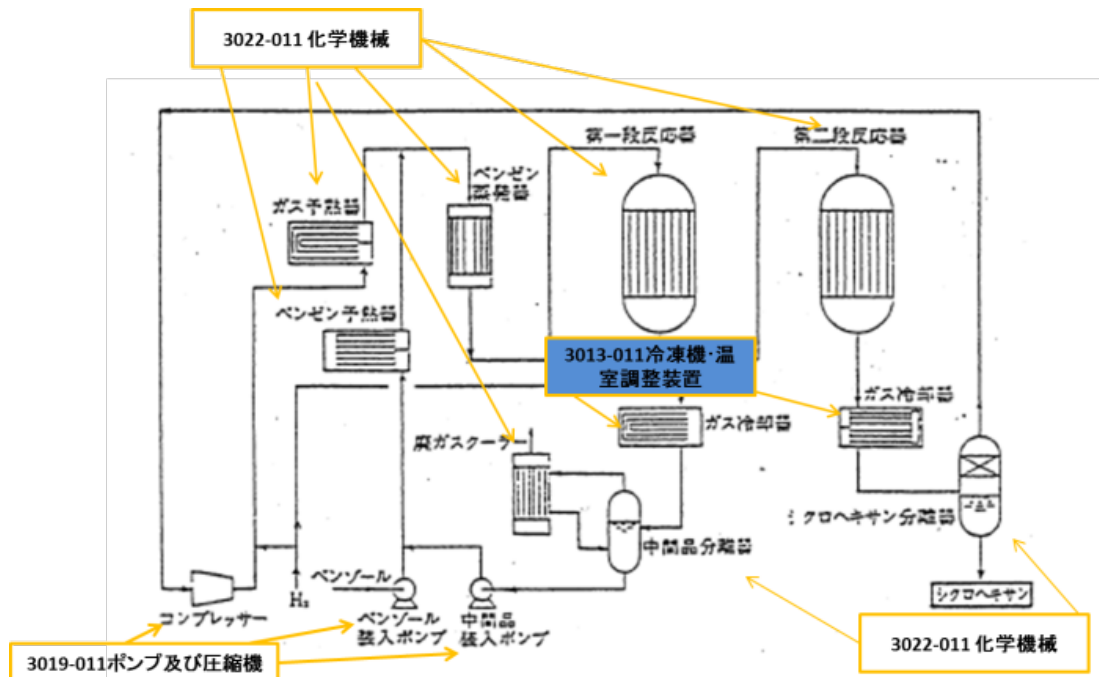


図3 シクロヘキサン製造プロセス

3.2 積地港湾設備，輸送，揚地港湾設備経常運転部門

海外積地，輸送および国内揚地港湾設備経常運転部門の投入係数ベクトルの作成方法について説明する．これらの設備を運転するために必要な電力，重油，補充用トルエン，触媒の投入金額が，NEDO(2010)²²⁾の「有機ハイドライドのエネルギーマテリアルフロー」に示されている．また，固定資産税，保険費用，一般管理費，修繕費，人件費が，建設費増額にしてそれぞれ一定比率でかかると想定されている．これらの費用の合計が，表1の積地，輸送，揚地設備における経常運転の欄に示されている．

海外積地での水素の製造について，NEDO(2010)²⁰⁾では，電源を特定せず電力の必要量だけが評価されている．この電力を，2005組込表を用いるときには事業用電力からの，2030年想定表を用いるときには洋上風力発電からの投入として，投入係数ベクトルを作成した．

各費用項目を対応するIO部門に対応づけ，費用合計を1とするように係数化して，経常運転時の投入係数ベクトルを作成した．なお，一般管理費は，対応するIO部門における関連項目の構成比で，複数のIO部門に割り当てた．

3.3 水素ステーション施設建設部門と経常運転部門

本研究では，事業者へのヒアリングに基づいて，2030年までに普及が見込まれる水素ステーションを「300Nm³/hの差圧式オフサイト施設」と仮定して，その施設建設と運転部門の投入係数ベクトルを作成した．

まず施設建設部門についてであるが、ロードマップ²⁾によれば、現在の水素ステーション(固定式オフサイト・300Nm³/h)の整備費の実績は3.9億円であるが、これを2020年ごろまでに半減させる、との目標が示されている。そこで、3.9億円の半額の1.95億円を水素ステーション1か所当たりの建設費総額と想定することとし、ロードマップ²⁾記載の資材構成比(同書 p.39 図表 27)に従って、個別の資材投入額に分割した。これを、全施設建設費用を1とするように係数化して、水素ステーション建設時の投入係数ベクトルを作成した。

水素ステーションの経常運転に係る、投入係数ベクトル作成手順は、次のとおりである。

- 1) ロードマップの想定に従い、300Nm³/hの水素ステーションの稼働率を70%、営業日数を11.5か月/年とし、計算される水素供給量に、ヒアリングによって得た70Mpaのオフサイト施設における電力消費原単位の実績値(4kW/kg-H₂)を乗ずることで、水素ステーション一か所当たりの電力消費量を計算した。これに産業連関表の事業用電力の生産者価格を乗じて、電力の投入金額とした。
- 2) JHFC²¹⁾によって報告されている、70Mpaのオンサイト施設の情報(JHFC²¹⁾にはオフサイト施設の費用の報告がないから、人件費、減価償却費、修繕費、保険料、固定資産税、一般管理費の金額を得、さらにロードマップの「2020年ごろまでに運営費半減」の目標に基づいてそれを2分の1にした金額を、本研究における水素ステーション一か所を運転するのに必要なその他の費用とする。

1)と2)の費用を積み上げ、各費用項目をIO部門に対応づけたうえ、全体を1とするように係数化して、水素ステーション運転時の投入係数ベクトルを作成した。ここでも、一般管理費は、対応するIO部門における関連項目の構成比で、複数のIO部門に割り当てた。

本研究ではオフサイト施設を想定しているので、揚地港湾から水素ステーションに水素を運搬するための費用を考える必要がある。これについては、JHFC²¹⁾が、広域の水素ステーション(64か所)に水素を運搬する場合の費用をシミュレートしているので、その想定に従って費用を算出した。それによれば、16台のトラクタが96台のトレーラーを引いて、1日4回、1回あたり100kmを走行し、軽油の燃費は2km/Lと想定されている。そこで、トラクタ16台とトレーラー96台にかかる総費用の1/64を、水素ステーション1か所当たりの車両の設備費用とした。また、車両費用の一定額としてJHFC²¹⁾に記載されている燃料費以外の諸経費(車両減価償却費、車両修繕費、保険料、固定資産税、諸経費、人件費)と燃料費を積み上げ、各項目を関連するIO部門に対応づけたうえ、全体を1とするように係数化して、水素運搬に係る投入係数ベクトルを作成した。なお、諸経費と人件費は、IOの道路貨物輸送部門における関連項目の構成比で、複数のIO部門に割り当てた。

3.4 燃料電池自動車(FCV)製造部門

FCV 製造の投入係数ベクトルを、次のように作成した。

- 1) FCV の現在の価格は 723.6 万円^{脚注 5)}(トヨタ自動車の燃料電池自動車 MIRAI の価格)であるが、ロードマップ²⁾によれば、そのうち 500 万円が燃料電池スタックのコストである。そして、ロードマップ²⁾では、燃料電池スタックのコストを 2025 年ごろまでに現在の 4 分の 1(125 万円)にするとの目標が置かれているので、その時点の FCV の販売価格を 348.6 万円と想定した。
- 2) 図 4 では、FCV の基本的な仕組みをハイブリッド車(HV)との対比で示している。FCV は、HV のエンジンと燃料タンクを燃料電池スタックと水素タンクに置き換えた構造であると考えられる。したがって、FCV の現在の価格 723.6 万円から、燃料電池スタック 500 万円と水素タンク 1.1 万円^{脚注 6)}を除いた金額 222.5 万円が、エンジンと燃料タンクを除く HV の生産に必要な財・サービスの投入金額と同等であると考えられる。IONGES¹⁹⁾には HV の投入係数ベクトルがすでに作成されているので、同投入係数ベクトルのエンジンと燃料タンクを除く係数値を用いて、222.5 万円を個々の IO 部門分類に振り分けた。

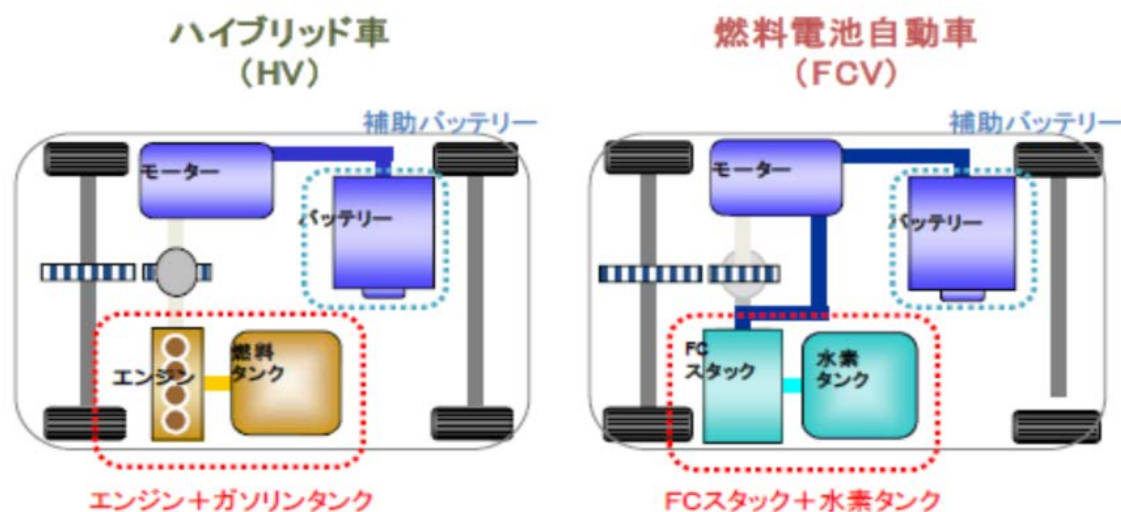


図 4 HV と FCV の基本構造(ロードマップ 2)

脚注5)トヨタ自動車 Web サイト(<http://toyota.jp/mirai/>)

脚注6)富士経済「水素燃料関連市場の将来展望 2015 年版」

表 2 2030 年の FCV と燃料電池のコスト構造

部品名	FCV		家庭用燃料電池		(参考)現在の家庭用燃料電池	
	(千円)	構成比	(千円)	構成比	(千円)	構成比
セパレータ	288	8%	5	1%		
電解質膜	125	4%	7	1%		
触媒	575	16%	11	2%		
ガス拡散層	63	2%	5	1%		
ガスケット等	63	2%	3	1%		
その他機械部品	138	4%	11	2%		
スタック計	1,250	36%	42	8%	147	11%
水素タンク	11	0.3%				
その他自動車部品	1,804	52%				
一般管理費等	421	12%				
燃料処理器			42	8%	147	11%
補機類			47	9%	196	14%
外装			65	12%	98	7%
制御装置			51	10%	98	7%
貯湯槽			126	24%	294	21%
内作費(組立て費)			160	30%	420	30%
2030 年想定価格	3,486	100%	533	100%	1,400	100%

3) ロードマップ²⁾に記載の燃料電池スタック普及段階におけるコスト構成比に従い、125 万円の燃料電池スタックを IO 部門分類に分割した(表 2 の 2 列と 3 列を参照)。

4) 水素タンク 1.1 万円は炭素繊維を用いた強化プラスチック製品として、対応する IO 部門に対応付けた。

2)~4)を総合して、FCV の将来販売価格 348.6 万円を個々の IO 部門分類に分割し、全体を 1 とするように係数化して、FCV 製造時の投入係数ベクトルを作成した。

3.5 家庭用燃料電池製造部門

表 2 の 6 列と 7 列は、ロードマップ²⁾に記載されている、現在の家庭用燃料電池(PEFC 型)140 万円のコスト構造である。ロードマップ²⁾によると 2019 年までにスタック 20%、燃料処理機 20%、補機 30%、制御システム 5%、貯湯槽 25%のコスト削減を目指すとしているので、2019 年頃の家庭用燃料電池のコスト構造は表 2 の 5 列の塗りつぶし部分のようになるかと予測された。本研究では、この 2019 年に関する想定を、将来時点における家庭用燃料電池のコスト構造と考える。そのうえで、家庭用燃料電池製造の投入係数ベクトルを次のように作成した。

1) 家庭用燃料電池の価格について、ロードマップ²⁾では、2020 年に 7、8 年で投資回収可能な金額(80 万円)を、2030 年に 5 年で投資回収可能な金額を目指すとしているので、2030 年の価格を 53.3 万円と設定した。

2) メーカーへのヒアリングによれば、家庭用燃料電池価格の 7 割が部品代、3 割が内作費(組み立て費用)ということであったので、53.3 万円の 7 割に当たる 37.3 万円を表 2 の 2019 年の比率で各部品に分割した(表 2 の 4 列の塗りつぶし部分を参照)。

また、そのうちの燃料電池スタックを、ヒアリングによって得た比率(表 2 の 5 列のスタックに関する内訳を参照)で各部品に分割した。FCV の燃料電池のセパレータはチタン製であるのに対し、家庭用燃料電池のセパレータは炭素製である。なお、内作費は、IO のその他の電気機械部門の構成比で、複数の IO 部門に割り当てた。

燃料電池, FCV では製造業の投入比率が 7 割を超える。積地港湾設備運転(水素生成のためのアクティビティ)の 96%, 揚地港湾設備運転(有機ハイドライドを脱水素化し水素を精製するアクティビティ)の 56%は電力である。従って水素をどのような電力を用いて精製するかがキーポイントになる。水素ステーション運用においては資本費の負担(資本減耗引当)が重い。

3.水素関連部門の投入係数ベクトルの作成結果

図 5 に産業連関部門を 13 の産業部門と 2 つの水素関連部門の計 15 部門に集計して、投入係数の推計結果を示す。

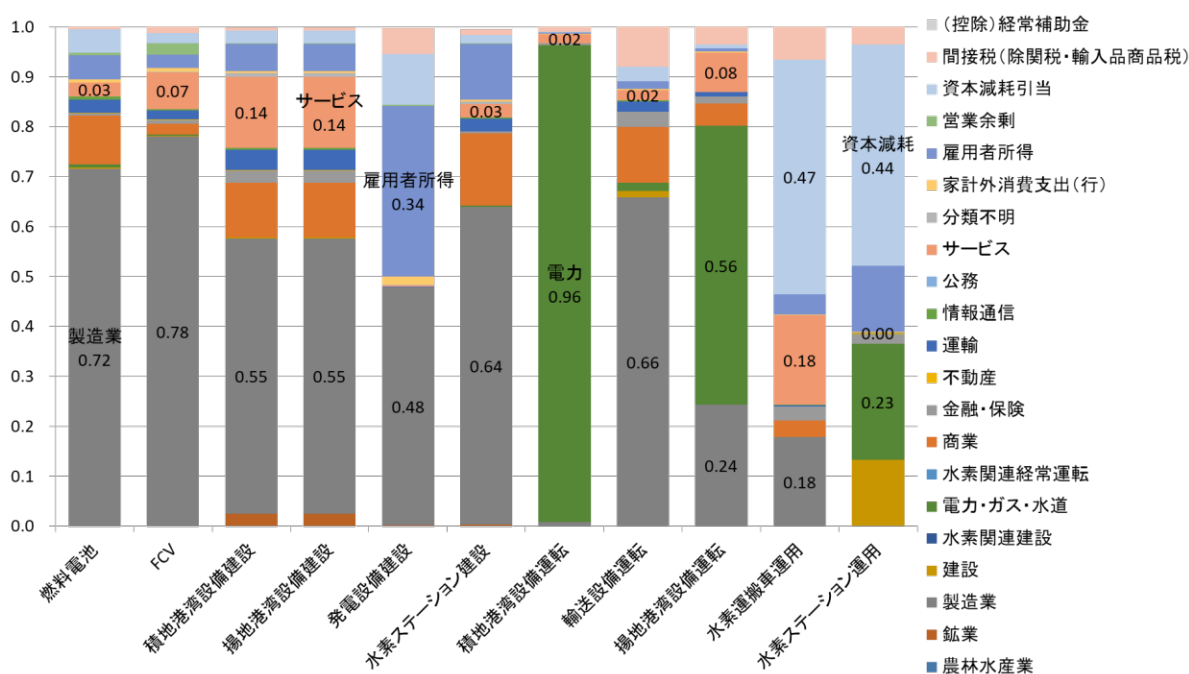


図 5 投入係数の推定結果(2030)

4.おわりに

4.1 波及効果を推計する際の留意点

最後に、本研究の投入係数ベクトルを用いて推計された波及効果に含まれるだろう不確実性の問題について言及する。その第 1 は、技術の予測値に対する意図しない誤差によってもたらされる不確実性である。本下ら(2008)²⁶⁾は、LCA 分析結果に含まれる不確実性を、分析に用いたパラメータの統計的分散に基づいて評価するという方法を提案している。本研究では、政府見通しにおける想定値に基づいて、投入係数ベクトルを作成しているが、各想定値に対する何らかの分散値が与えられれば、その分析結果について同様の考察が可能である。また、本藤ら(2001)²⁷⁾は、産業連関表を用いて計算した CO₂ 排出量原単位の誤

差が、主要投入物の原単位誤差に大きく影響されることを示しているが、波及先の分布を考察することによって、ある部門の予測誤差が、全体結果にどの程度の誤差をもたらすかなどの感度分析を行うことは可能である。そのために、政府見通しの想定値に対して設定すべき分散の大きさや、主要投入財に想定されているコストの予測誤差について、情報収集を行ったうえで感度分析を実施することが重要である。

第 2 の不確実性は、本研究では想定されていないような革新的なイノベーションがもたらす効果についてである。たとえばロードマップ²⁾では、水素価格を 30 JPY/Nm³($\approx 334.08\text{JPY}/\text{kg}\cdot\text{H}_2$)と想定しているが、これが実現するためにはさらなるイノベーションが不可欠と考えられる。国内の水素価格を 30 JPY/Nm³とする場合、積地～揚地港湾設備で生産される水素の単価は少なくともこの金額を下回ることが必要である。表 1 で与えられた積地～揚地港湾設備運転の金額を見ると、そのためには、これらの想定額を 1/3 以下に抑える必要がありそうである。それには、積地、揚地での電力供給方法(図 5 によればこれらの部門の電力の投入係数が極めて大きかった)をはじめ、設備運転に係る抜本的なイノベーションが必要であろうが、その具体像について確度のある情報は得られていない。今後のイノベーションに対しても、ある程度の確度を持った情報が得られ次第、引き続きデータを更新していかなければならない。

4.2 今後の課題：水素の需要構造分析に向けて

本論では、水素関連設備の波及効果分析を行うための投入係数ベクトルの作成方法について詳説した。このデータに基づく効果分析を行った後、さらに残された今後の課題として、水素関連設備の運用段階における効果分析を詳しく行うことがあげられる。そのためにはまず、水素発電、FCV、家庭用燃料電池という水素利用段階の設備機器運転に関する投入係数ベクトルを作成し、それらによる化石エネルギー代替効果や CO₂削減効果について詳しい分析を行う必要がある。その際、特定の地域に遍在して使うことが難しいとされている再生可能エネルギー(廃棄物等に由来するメタン発酵バイオガスなど)の利用など、小規模で地域密着型の水素の利用システムについて検討することも必要であろう。あるいは、出力抑制を実施しなければならない太陽光・風力の変動電源の有効な貯蔵手段として水素が選択され、それが(FCV を含む)燃料電池で利用されれば、社会全体の CO₂削減に大きな効果があると考えられるので、水素エネルギーシステムを系統システムと連携させて考えることも必要である。宍戸(2010)²⁸⁾第 5 章 3 節では新技術の定着がもたらす効果についての産業関連分析手法について検討されているが、それによれば、技術の定着効果の分析には、「その技術のアウトカムがどのようなインパクトをもたらすか」についての慎重な検討が肝要とされている。本研究では、水素関連技術部門そのものの構築がもたらす効果(水素関連部門の投入(縦)ベクトルがもたらす効果)に着目したが、今後は、この技術が定着し各産業での水素利用の定着がもたらす効果(水素関連部門の需要(横)ベクトルがもたらす効果、水素によって代替される従来エネルギーの需要(横)ベクトルの変化の効果も含む)について

分析を行い、水素技術のアウトカムのインパクト効果を総合的に検討する必要がある。上述した本研究の今後の研究の方向性は、水素技術のアウトカムのインパクト効果の総合的検討という課題に対するものである。

謝辞

本研究は、平成 28～30 年度科学研究費補助金(挑戦的萌芽研究)(課題番号 16K12663)の助成の下で実施した。また、文献調査については早稲田大学特定課題研究助成費(課題番号 2018K-318)、および、環境省・(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(2-1707)の助成を得た。

参考文献

- 1) Strategic Energy Plan, 2014: エネルギー基本計画, http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf (Last access 2016.05.21)
- 2) Ministry Trade, Economy and Industry (METI), 2016: 経済産業省, 水素・燃料電池戦略協議会, 水素・燃料電池戦略ロードマップ(改訂版), 1-69, 2016 <http://www.meti.go.jp/press/2015/03/20160322009/20160322009-c.pdf> (Last access 2016.05.21)
- 3) New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO):水素エネルギー白書, 1-194, 2014, http://www.nedo.go.jp/library/suiso_ne_hakusyo.html (Last access 2016.05.21)
- 4) Harada, M., J. JPN. Inst. Energy, 94(1), 2-6, 2015: 原田亮, 日エネ誌, 94(1), 2-6, 2015
- 5) New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO):「水素利用等先導研究開発事業」基本計画, 2014, <http://www.nedo.go.jp/content/100561275.pdf> (Last access 2016.05.22)
- 6) Cabinet Office, Government of Japan (CAO) : Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program (SIP)戦略的イノベーション創造プログラム, 科学技術イノベーション創造推進費に関する基本方針, <http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/index.html> (Last access 2016.05.22)
- 7) Sakata, K., J. JPN. Inst. Energy, 94(11), 1243-1250, 2015: 坂田興, 日エネ誌, 94(11), 1243-1250, 2015
- 8) Hondo, H.; Moriizumi, Y.; Usui, T., J. JPN. Inst. Energy, 87, 753-762, 2008: 本藤祐樹, 森泉由恵, 臼井達朗, 日エネ誌, 87, 753-762, 2008
- 9) Usui, T.; Hondo, H., J. JPN. Inst. Energy, 89, 551-561, 2010: 臼井達朗, 本藤祐樹, 日

- エネ誌, 89, 551-561, 2010
- 10) Ehteshami, S.M.M.; Chan, S.H., *Energy Policy*, 73, 10-109, 2014
 - 11) Kaldellis, J.K.; Kavadias, K.; Zafirakis, D., *International Journal of Sustainable Energy*, 34(3-4), 188-201, 2015
 - 12) Dincer, I.; Acar, C, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 11094-11111, 2015
 - 13) Amoo, L.M.; Fagbenle, R.L., *International Journal of Sustainable Energy*, 33(4), 742-765, 2014
 - 14) Kato, T., *J. JPN. Inst. Energy*, 94(1), 7-18, 2015: 嘉藤徹, *日エネ誌*, 94(1), 7-18, 2015
 - 15) Fujii, K.; Sugiyama, M.; Nakamura, A., *J. JPN. Inst. Energy*, 94(1), 27-34, 2015: 藤井克司, 杉山正和, 中村振一郎, *日エネ誌*, 94(1), 27-34, 2015
 - 16) Leontief W., *Input-Output Economics*, Oxford University Press, New York, 1986
 - 17) Nakano, S.; Murano, A.; Washizu, A., *Jpn. Inst. Energy*, 94(6), 522-531, 2015
 - 18) Nakano, S.; Arai, S.; Washizu, A., *Environmental Economics and Policy Studies*, 2016, DOI: 10.1007/s10018-016-0158-1, <http://link.springer.com/article/10.1007/s10018-016-0158-1>
 - 19) Institute for Economic Analysis of Next-Generation Science and Technology website: 次世代科学技術経済分析研究所 ホームページ: 次世代エネルギーシステム分析用産業連関表(Input-output table for analysis of next-generation energy system: IONGES), <http://www.f.waseda.jp/washizu/table.html> (Last access 2016.5.22)
 - 20) New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), 2010: 平成 21 年度エコイノベーション推進事業, 海外再生可能エネルギーの大陸間輸送技術の調査, 1-115, 2010, http://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201107/20110000001030.html, (Last access 2016.05.21)
 - 21) Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project (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, 1-429, http://www.jari.or.jp/portals/0/jhfc/data/report/pdf/tuuki_phase2_01.pdf, (Last access 2016.05.21)
 - 22) Umi no Nakamichi Nata Seawater Desalination Center website: 海の中道奈多海水淡水化センターの事業費 <http://apcs.city.fukuoka.lg.jp/news/pdf/Seawater%20Desalination%20Plant%20in%20The%20Fukuoka%20District%20JP.pdf> (Last access 2016.05.21)
 - 23) Okinawa Seawater Desalination Center website: 沖縄海水淡水化施設の事業費 <http://www.eb.pref.okinawa.jp/sisetu/suigen/kaisui/> (Last access 2016.05.21)
 - 24) 池田明由・菅 幹雄・篠崎美貴・早見 均・藤原浩一・吉岡完治 (1996) 「環境分析用産業連関表」 KEO Monograph Series No.7, 慶應義塾大学産業研究所

- 25) Japan Machinery Center for Trade and Investment (JMC),2012: 日本機械輸出組合
「2012年プラントコストインデックス/ロケーションファクター(PCI/LF)報告書」
- 26) Motoshita,M.; Itsubo, N.; Inaba, A., Journal of Life Cycle Assessment, Japan, 4(3),
260-268, 2008: 本下晶晴, 伊坪徳宏, 稲葉敦, 日本 LCA 学会誌, 24, 4(3), 260-268, 2008
- 27) Hondo, H.; Sakai, S.; Tanno, S., Journal of Japan Society of Energy and Resources,
22(4), 322-328, 2001: 本藤祐樹, 酒井信介, 丹野史郎, エネルギー資源, 22(4), 322-328,
2001
- 28) 宍戸駿太郎監修, 環太平洋産業連関分析学会編, 産業連関分析ハンドブック, 東洋経済
新報社, 2010

附表

附表1 積地港湾設備建設

	IOコード	IO部門	億円/1式
アルカリ水電解装置	3022011	化学機械	411.06
海水淡水化施設	3022011	化学機械	38.75
有機ハイドライド水素化設備	3019011	ポンプおよび圧縮機	0.79
	3022011	化学機械	120.03
	3013011	冷凍機・温室調整装置	12.46
コーンルーフ型タンク	3022011	化学機械	16.32
	3231011	電気計測器	167.48
	2622011	普通鋼鋼管	236.00
	3031099	その他の一般機械器具品	26.13
工事費	建設IO土木で分割		718.52
エンジニアリング費	8519099	その他对事業所サービス	154.26
プロジェクト運営費	8519100	その他对事業所サービス	59.50
現場経費	建設IO「港湾・漁港」の現場経費項目で分割		24.24
保険料	6212021	損害保険	19.83
一般管理費	建設IO「港湾・漁港」の本社関連項目で分割		198.33
積地港湾設備建設計			2,203.71

NEDO(2010)²⁰⁾における「有機ハイドライドのエネルギーマテリアルフロー」に記載の総事業費をプラントコストインデックス²⁵⁾を用いて費目に按分。
 ただし海水淡水化施設の総事業費は国内事例^{22,23)}より推計。
 有機ハイドライド水素化設備の内訳については本文参照。

附表2 積地港湾設備運転

	IOコード	IO部門	億円/1式/年
触媒 (Ni系) 消費量	2079091	触媒	8.73
トルエン補充分	2031022	純トルエン	20.06
電力	5111001	事業用電力	3,324.62
固定資産税	9404000	間接税	30.85
保険費用	6212021	損害保険	13.22
一般管理費	203202環式中間物ベクトルの本社関連項目の構成比で分割		22.04
修繕費	4121011	建設補修	57.61
人件費	203202環式中間物ベクトルの雇用者報酬項目の構成比で分割		6.61
積地港湾設備運転計			3,477.14

NEDO(2010)²⁰⁾における「有機ハイドライドのエネルギーマテリアルフロー」の運転費用に基づく。

附表3 輸送船建設

	IOコード	IO部門	億円/1式
ケミカルタンカー	3611011	鋼船	648

NEDO(2010)²⁰⁾における「有機ハイドライドのエネルギーマテリアルフロー」に基づく。

付表 4 輸送船運転

	IOコード	IO部門	億円/1式/年
電力	5111001	事業用電力	2.13
BC重油	2111016	B重油・C重油	89.73
固定資産税	9404000	間接税	9.07
保険費用	6212021	損害保険	3.89
一般管理費	714101外洋輸送バクトルの本社関連項目の構成比で分割		6.48
修繕費	3611101	船舶修理	14.90
人件費	714101外洋輸送バクトルの雇用者報酬項目の構成比で分割		1.94
輸送船運転計			126.21

NEDO(2010)²⁰における「有機ハイドライドのエネルギーマテリアルフロー」に基づく。

付表 5 揚地水素製造設備建設

	IOコード	IO部門	億円/1式
コーンルーフ型タンク	3022011	化学機械	43.52
有機ハイドライド脱水素化設備	3019011	ポンプおよび圧縮機	1.63
	3022011	化学機械	248.64
	3013011	冷凍機・温室調整装置	25.81
TSA (水素ガス精製器)	3022011	化学機械	28.56
	3231011	電気計測器	97.28
	2622011	普通鋼鋼管	137.08
	3031099	その他の一般機械器具	15.18
工事費	建設IO土木で分割		417.34
エンジニアリング費	8519099	その他对事業所サービス	89.60
プロジェクト運営費	8519100	その他对事業所サービス	34.56
現場経費	建設IO「港湾・漁港」の現場経費項目で分割		14.08
保険料	6212021	損害保険	11.52
一般管理費	建設IO「港湾・漁港」の本社関連項目で分割		115.20
揚地水素製造設備建設計			1,280.00

NEDO(2010)²⁰における「有機ハイドライドのエネルギーマテリアルフロー」に記載の総事業費をプラントコストインデックス²⁵を用いて費目に按分。

有機ハイドライド脱水素化設備の内訳については本文参照。

付表 6 揚地水素製造設備運転

	IOコード	IO部門	億円/1式/年
触媒(白金系)消費量	2079091	触媒	0.07
A重油	2111015	A重油	166.05
電力	5111001	事業用電力	311.49
固定資産税	9404000	間接税	17.92
保険費用	6212021	損害保険	7.68
一般管理費	203202環式中間物バクトルの本社関連項目の構成比で分割		12.80
修繕費	4121011	建設補修	41.19
人件費	203202環式中間物バクトルの雇用者報酬項目の構成比で分割		3.84
揚地水素製造設備運転計			561.04

NEDO(2010)²⁰における「有機ハイドライドのエネルギーマテリアルフロー」に基づく。

付表7 水素発電所設備建設

	IOとの対応	億円/1式
閉サイクル式純水素酸素燃焼タービン	LNG火力CCの設備構成比で分割	2,060.00

NEDO(2010)²⁰⁾における「有機ハイドライドのエネルギーマテリアルフロー」に基づく。

付表8 水素ステーション1か所当たり設備建設

(水素供給能力300Nm³/h差圧オフサイト式施設)

	IOコード	IO部門名	百万円/ST
圧縮機	3019011	ポンプ及び圧縮機	60
蓄圧器	3022011	化学機械	25
プレクーラー	3013011	冷凍機・同温湿装置	15
ディスペンサー	3019099	その他の一般産業機械	20
バルブ	3031099	その他の一般機械器具	5.3
センサ	3421099	その他の電子部品	0.4
その他機器	3211031	開閉制御装置及び配電盤	9.3
機器工事費	411202	非住宅建築(非木造)ベクトルの構成比で分割	25
土木工事費	413209	その他の土木建設ベクトルの構成比で分割	35
ステーション設備建設計			195

ロードマップ²⁾に基づく。

付表9 水素ステーション1か所当たり設備運転

(水素供給能力300Nm³/h 差圧オフサイト式施設)

	IOコード	IO部門名	万円/年/ST
電力	5111001	事業用電力	1,023
人件費	611201	小売の雇用者報酬項目構成比で分割	525
減価償却費	9402000	資本減耗引当	1,950
修繕費	4121011	建設補修	585
保険料	6212021	損害保険	83
固定資産税	9404000	間接税	150
一般管理費	6112011	小売の本社関連項目構成比で分割	105
ステーション設備運転計			4,421

電力消費は、ヒアリングに基づくオフサイト70Mpa施設の実績値。

その他の費用はJHFC²¹⁾における70Mpaオンサイト施設に対する想定値。

付表10 水素ステーション1か所当たり水素運搬車両費用

	IOコード	IO部門名	千円/ST
トラック	3521011	トラック・バス・その他	2,750
トレーラー	3541011	自動車車体	54,330
運搬車両費用計			57,080

JHFC²¹⁾における大規模運搬を仮定した場合の費用に基づく。

付表12 水素ステーション1か所当たり水素運搬費用

	IOコード	IO部門名	千円/年/ST
車両減価償却費	9402000	資本減耗引当	5,983
車両修繕費	8514101	自動車修理	2,283
保険料	6212021	損害保険	342
固定資産税	9404000	間接税	799
諸経費	7122011	道路貨物輸送の本社関連項目構成比で分割	571
人件費	7122011	道路貨物輸送の雇用者報酬項目構成比で分割	109
トラクタ燃料	2111014	軽油	2,738
水素運搬費用計			12,825

JHFC²⁾における大規模運搬を仮定した場合の費用に基づく。

付表13 FCV1台当たり製造

	IOコード	IO部門名	円/台
HVからエンジンとガソリント ンクを除いたインプット*			1,804,053
FCV用スタック			
その他機械部品	3211031	開閉制御装置・び配電盤	137,500
セパレータ	2899099	その他の金属製品	287,500
電解質膜	2211012	プラスチック板・管棒	125,000
触媒	2079091	触媒	575,000
ガス拡散層	2599031	炭素・黒鉛製品	62,500
ガスケット等構成部品	2599031	炭素・黒鉛製品	62,500
水素タンク（車載用高圧容器 ×2本）	2899021	金属製容器及び製缶板金製品	11,000
一般管理費とVAの追加額			420,947
FCV製造計			3,486,000

*「HVからエンジンとガソリントタンクを除いたインプット」の内訳については本文参照。

FCV用スタックの内訳はロードマップ²⁾に基づく。またスタック価格は同資料における2030年の想定。

付表14 家庭用燃料電池1台当たり製造

部品名	IOコード	IO部門名	円/台
家庭用燃料電池用スタック			
その他機械部品（制御系）	3211031	開閉制御装置・配電盤	10,500
セパレータ（炭素）	2599031	炭素・黒鉛製品	5,040
電解質膜(高分子)	2211012	プラスチック板・管・棒	7,140
触媒	2079091	触媒	10,500
ガス拡散層	2599031	炭素・黒鉛製品	5,460
ガasket等構成部品	2599031	炭素・黒鉛製品	3,360
燃料処理器	2899021	金属製容器及び製缶板金製品	42,000
補機類	3019099	その他の一般産業機械及び装置	46,667
外装	2899021	金属製容器及び製缶板金製品	65,333
制御	3211031	開閉制御装置及び配電盤	51,333
貯湯槽	2899021	金属製容器及び製缶板金製品	126,000
内作費（組み立て費）	324109	その他の電気機械器具ベクトルの構成比で分割	160,000
家庭用燃料電池製造計			533,333

コストの総額および内訳はロードマップ²⁾における2030年の想定に基づく。ただし、スタックの内訳はFCV用スタックの内訳を、材質の違いを考慮してヒアリングに基づき補正して算出。内作費の比率はヒアリングに基づく。