

■ 査読付論文

水素エネルギーの環境イノベーション普及要因分析 —SI 機能分析モデルによる定量化—

有元 教世史*

【要旨】

地球温暖化対策として、水素エネルギーの導入は重要な選択肢となっている。本研究では水素エネルギー関連の数値データを基に、KEI モデルを用いて構造方程式モデリング (SEM) を行い、「制度」「供給条件」「需要条件」が企業家の活動に与える影響を分析した。このモデルは MIMIC モデルを基盤とし、企業家の活動を「知識過程の入手」「変換」「投入」の3要素で表現している。相関分析では、「制度」「供給条件」「需要条件」の間に強い相関関係が確認された一方、「制度」や「需要条件」が企業家の活動を決定づける直接要因ではなく、むしろ企業家の活動が、制度や条件に影響を与えることが示唆された。知識創造機関は特許取得に強い影響を与えるが、実証事業が研究開発投資に結びつく度合いは低く、企業家の活動が研究開発投資に強く関与している。さらに、KEI モデルに「消費者の関心・ニーズ・利活用優位性」を新たな潜在変数として追加した結果、モデルの適合度は高い数値を示した。水素エネルギー普及のためには企業家の活動に加え、消費者の関心やニーズ・利活用優位性が重要な要因であると明らかにしている。CO₂ 排出がないクリーンエネルギーとして期待される水素エネルギーの普及には、企業家の活動と消費者意識の両方を重視した戦略が必要とされる。

キーワード：水素 (H₂)、エネルギー革新、SI 機能分析モデル (KEI モデル)

I. 序論

日本におけるエネルギー・イノベーションは、戦後の復興期から高度経済成長期を経て、1973 年の第一次石油危機、1979 年の第二次石油危機により、石炭から石油、石油から天然ガスへと変化してきた。1990 年代後半には地球温暖化や大気汚染などの環境問題が重視されるようになり、CO₂ 排出削減の目標設定から、クリーンなエネルギーへの変革が余儀なくされている。また、2011 年の東日本大震災による福島第一原発事故により、再生可能エネルギーへの変革が重要課題となった。

本論文では、クリーンなエネルギーとして注目されている「水素エネルギー」について、世界各国のエネルギー施策および水素エネルギーへの取り組み状況、日本における水素エネルギーの政府方針、取り組み状況を整理した上で、イノベーションが進展するための諸要因および相互の関係性を定量的に分析することを、SI 機能分析モデル (KEI モデル) によって考察し、日本国内での水素需要分野ごとの普及に向けた課題を分析する。

* 立命館大学大学院政策科学研究科 博士課程後期課程

I. 1 研究背景と研究動機

近年の深刻さを増す気候変動の状況下、国際社会では脱炭素化に向けた取り組みを加速させている。エネルギー資源の無い日本においては、化石燃料の依存から脱却するために、エネルギー効率と安定的に安価に調達することが可能な自然エネルギーへの転換を急ぐ動きが高まっている。化石燃料からの脱却にあたり、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの社会基盤整備が進んでいる。また、電気自動車（EV）化など、再生可能エネルギーを利活用することで、CO₂ 排出削減にも寄与できることになる。一方、産業用では電化できない設備も多く、化石燃料に代わるエネルギー・イノベーションが重要課題となっている。

そのような状況下、政府は 2017 年に世界に先駆けて「水素基本戦略」を策定して、環境エネルギー・イノベーションとして水素利活用において世界をリードしていく方針を発表している。しかし、戦略策定から 7 年経過したが、最大の焦点としていた「家庭用燃料電池（エネファーム）」と「燃料電池自動車（FCV）」は普及目標を大きく下回り、全国各地で計画された水素ステーションの利用率は低迷している¹⁾。

脱炭素社会の実現に必要なグリーン水素の生産面においても、世界各国の開発状況から遅れている状況にあり、かつ利活用においてのコスト面でも、水素の調達・輸送・利用に様々な課題解決が求められている。現状での「水素エネルギー」の状況を把握するとともに、環境エネルギー・イノベーションを普及そして活用するための必要な論点を考察する。

I. 2 世界各国のエネルギー施策および水素エネルギーの取り組み状況

世界各国は地球温暖化対策やエネルギー安全保障の観点から水素エネルギーに注力している。特に、再生可能エネルギー由来の「グリーン水素」の利活用に向けた施策が進められている。米国は「Hydrogen Shot」構想²⁾により、2030 年までにグリーン水素 1,000 万 t の生産を目指し、巨額の財政投資や税額控除を導入して市場形成を加速させている。欧州連合（EU）は再生可能エネルギー由来の水電解装置の導入を進めるとともに、「欧州水素銀行」³⁾ など新たな支援制度を設け、水素製造・利用拡大に注力している。英国は 2030 年までに 10GW の低炭素水素製造能力を確保する目標を掲げ、価格支援や基金を活用したプロジェクト支援を行っている⁴⁾。ドイツは「H2Global」プログラムで水素関連製品の取引を支援し、国内生産能力と国際競争力強化を目指している⁵⁾。フランスは再生可能エネルギーと原子力由来の水素を対象に 90 億ユーロの支援を計画し、技術開発でのリーダーシップ確立を目指している⁶⁾。中国は中長期計画に基づき、水素製造や燃料電池車の普及を推進するとともに地方自治体が積極的な支援を展開しており⁷⁾、豪州は再生可能エネルギーを活用したプロジェクトや原産地証明制度の構築を進め、水素産業のグローバルリーダーを目指している⁸⁾。

多くの国で水素の国家戦略が策定されており、世界中で取り組みが本格化している。電化が困難な長距離輸送および重量物運搬の商用車や、ボイラー・ガスバーナーなど化石燃料使用設備を有している産業部門での水素利用や、水素発電の導入、水素輸入に向けたサ

プライチェーン構築の検討が活発化している。中でも、EU とドイツの水素戦略は、自然エネルギー由来のグリーン水素開発に重点をおいており、脱化石燃料の方向性を明確に打ち出している。また中国は 2022 年に長期水素戦略を公表しており、グリーン水素を中心とした政策を明確にしている。英国の差額契約決済制度など国による金融支援や民間企業の投資を活性化させる政策に注力している。

(出所) 経済産業省、水素基本戦略 (2023 年) より抜粋

I. 3 日本における水素エネルギーの政府方針「水素基本戦略」

日本政府は、2050 年カーボンニュートラルの実現を目指し、水素エネルギーの活用を柱とする「水素基本戦略」を策定した。この戦略は国内外の情勢を踏まえ、官民で共有できるビジョンを明確にしつつ、水素社会の早期実現を表明している。「水素基本戦略」には水素産業の競争力強化を目的とした「水素産業戦略」と、水素の安全利用を推進する「水素保安戦略」より構成されており、エネルギー安全保障、経済効率性、環境対応の観点から具体的な方針が示されている。

まず、安定的な供給確保の観点から、長期的かつ安定的に供給するための需要創出が不可欠であり、2030 年までに 300 万 t/年、2040 年までに 1,200 万 t/年、2050 年には 2,000 万 t/年の導入目標を明示している⁹⁾。これを実現するためには、製造から輸送、貯蔵、利用に至るサプライチェーン全体の効率化とインフラ整備が必要である。特に、輸送インフラとしては液化水素やアンモニアなどを利用した新たなキャリア技術の活用や、港湾設備整備、パイプラインの新設などのインフラ投資が必要となる。

供給コストは、水素利用の拡大を実現するために、2030 年に 30 円/N m³ (約 334 円/kg)、2050 年には 20 円/N m³ (約 222 円/kg) の実現を目指している¹⁰⁾。そのためには技術開発が鍵となり、研究開発や実証事業を推進するとともに、需要喚起によるスケールメリットを図る必要がある。例えば、水素燃料電池車 (水素 FCV) や水素ステーションの普及を支援する政策が検討されている。民間企業の投資拡大を促し、コスト低減と国際競争力強化を両立する方針が示されている。

環境対応の観点では、脱炭素社会への移行が重要な課題であり、水素は天然ガスの改質や、水電解による製造が可能であり、製造プロセスでの CO₂ 排出も考慮した CCUS やカーボンリサイクル技術の導入とあわせたライフサイクルアセスメント (LCA) での環境負荷評価が期待できる。

政府と民間企業の連携が戦略実現の鍵であり、政府は政策方針の明確化や規制緩和を進める一方で、民間企業は技術革新や投資拡大を通じて。水素エネルギーの普及と市場形成、国際競争力の強化が方針として明示されている。

(出所) 経済産業省、水素基本戦略 (2023 年) より抜粋

I. 4 日本国内での水素需要 (分野別) 動向

2023 年現在では、水素を利用した燃料電池自動車 (FCV) や定置用燃料電池 (エネファーム) などの関連製品が商品化済みであるが、燃料電池自動車 (FCV) は全国での水素充填

ステーションの設置は 160 カ所程度であり、利便性面での課題がある。また、定置用燃料電池（エネファーム）は太陽光発電および蓄電池需要が拡大しており、コスト比較において優位性が少ないため普及率は低位推移している。利用される水素はすべてグレー水素であるため、CO₂ 排出削減効果には寄与していない状況にある。

2030 年までの普及拡大に向けての施策および目標としては、商用車などの輸送部門での利用拡大、大規模水素発電技術等の確立による実証から実用への移行が重点課題となっている。水素供給面においては、海外からの大規模輸入体制を確立すること計画であり、政府と民間企業によって豪州でグリーン水素を製造し、大型輸送船により輸入する実証が開始されている。併せて、国内での太陽光発電の余剰電力を利用した再生可能エネルギー由来の水素製造基盤を確立する計画であり、一部地域で実証設備が稼働している。

2040 年に向けては、発電分野での水素混焼から水素専焼での利用本格化をめざしており、CO₂ 排出削減効果の発揮が期待される。産業用途での利用技術の確立により、製鉄プロセス（水素還元製鉄）での利用確立、および水電解やガス改質による国内での水素製造基盤の確立と拡大が目標となる。政府発表の水素基本戦略（2023 年改訂）では、2040 年の水素導入目標としては 1,200 万 t/ 年を掲げている。

2050 年の到達目標としては、鉄鋼や産業分野の熱利用の全分野において水素が利活用させることで、カーボンニュートラルの実現と、エネルギー政策としての安全保障体制を確立するとしている。導入目標は 2,000 万 t/ 年であり、現状の約 10 倍以上の普及拡大をめざしている。

（出所）経済産業省、水素基本戦略（2023 年）より抜粋

Ⅱ．水素エネルギーの概要

本研究の対象である「水素エネルギー」は、化石エネルギーに代わる新エネルギーとして近年注目されている。製造から利用までの技術開発途上であるが、現在までの技術開発状況および利用技術開発状況について整理する。また、水素エネルギーの特許と発表論文について、2020 年までの状況を調査した。

Ⅱ．1 水素製造

水素は様々なエネルギー源から製造することが可能であるが、製造方法によって製造コストや CO₂ 削減効果等は大きく異なる。現在実用化されている水素製造技術は以下の 3 つである（表 1）。

- ①水電解：水の電気分解により水素を製造（アルカリ水電解と個体高分子形水電解が実用段階）
- ②副生ガス精製：製造プロセスにおいて、発生する副生ガスに含まれる水素を分離
- ③改質精製：都市ガスやバイオガス等に水蒸気や熱、圧力等を加えることにより水素を製造

表 1 水素製造技術

	水電解	副生ガス精製	改質精製
技術概要	水を電気分解	製造で発生する副生物を精製	都市ガス等に加熱、加圧
CO ₂ 排出量	1.78kg/Nm ³	0.89～1.28kg/Nm ³	0.95kg/Nm ³ （都市ガス）
製造コスト	76～136 円/Nm ³	20 円/Nm ³ （苛性ソーダ）	31～58 円/Nm ³ （改質率 70%）
開発度	商用～実証～技術開発段階	商用段階	商用段階
普及課題	コスト低減	CO ₂ 回収が必要	CO ₂ 回収が必要
プレーヤー	神戸製鋼、旭化成、日立造船	トクヤマ、岩谷産業、ENEOS	三菱化工機、東洋エンジ

（出所）環境省「水素サプライチェーンに関する調査・報告（2023 年）」より筆者作成

Ⅱ. 2 水素貯蔵・輸送

水素は都市ガスと比較して体積当たりのエネルギー密度が約 1/4 程度であるため、既存のインフラに対してコスト採算性を確保するためには、水素貯蔵技術（表 2）、輸送距離や輸送量に応じて輸送効率の良い方法を選択する必要がある（表 3 と表 4）。現在、実用段階または実証段階である輸送手段を以下に示す。

- ①圧縮水素：1MPa 以上に圧縮した水素をトレーラやカードル、移動式水素充填車等 により輸送
- ②配管輸送：中低圧または高圧に圧縮した水素をパイプラインにより輸送
- ③液化水素：液化装置により液化した水素を液化水素ローリーや移動式水素充填車により輸送
- ④水素吸蔵合金：水素と反応しやすい金属と反応しにくい金属に水素を吸着させて輸送
- ⑤有機ハイドライド：芳香族化合物と水素を化学反応させた有機ハイドライドにより輸送

表 2 水素貯蔵技術

	圧縮水素	液化水素	MCH	アンモニア	合成メタン	合成燃料	吸蔵合金
輸送効率	1/200	1/800	1/500	1/1300	1/600	液体	質量効率低
毒性	なし	なし	あり	あり	なし	なし	材料依存
ロス	要圧縮	25～35%	35～40%	20%以下	32%	要合成	要加熱
インフラ	新設	新設	既存利用可	既存利用可	既存利用可	既存利用可	新設
実用化課題	実用化済	極低温設備	ロス対策	技術開発	大型化技術	効率化	コスト対策

（出所）環境省「水素サプライチェーンに関する調査・報告（2023 年）」より筆者作成

表 3 水素輸送（配管）技術

	水素ガス	液化水素	合成メタン
技術概要	大量供給可能、設備管理要	専用トレーラ輸送	メタン化装置で水素抽出
導入コスト	小口径：低 大口径：高	二重構造配管：高	既存インフラ活用可：低
インフラ	新設	新設	既存
PJ 実例	山口県周南、北九州市で実証	なし	なし
普及課題	地域クラスター形成	輸送専用車コスト	実用化済

（出所）環境省「水素サプライチェーンに関する調査・報告（2023 年）」より筆者作成

表 4 水素輸送（道路）技術

	圧縮水素	液化水素	MCH・NH ₃ ・合成燃料
種別	GH2 トレーラ、トラック	LH2 ローリー、コンテナ	ケミカルローリー、コンテナ
充填量	トレーラ：1100～3100m ³	ローリー：～23m ³	ケミカルローリー：～30m ³
導入コスト	GH2 トレーラ：～1 億円	LH2 ローリー：～1 億円	ケミカルローリー：数千万円
導入事例	水素 ST への供給	種子島宇宙センター	製油所、ガソリンスタンド

（出所）環境省「水素サプライチェーンに関する調査・報告（2023 年）」より筆者作成

Ⅱ. 3 水素供給

自動車やバス等に水素を供給する場合、ガソリンスタンドと同様にステーションを設立する必要がある。水素ステーションの種類を以下のように整理した（表 5）。

- ①圧縮水素ステーション（オフサイト型）：圧縮水素トレーラ等より輸送した圧縮水素を供給
- ②圧縮水素ステーション（オンサイト型）：ステーション内の水素製造設備で製造した水素を供給
- ③液化水素ステーション：液化水素ローリー等により輸送した水素を供給
- ④移動式水素充填車：ディスペンサー等の水素供給に係る設備を搭載した自動車から水素を供給
- ⑤ガソリンスタンド併設型水素ステーション：ガソリンスタンドと併設

表 5 水素供給技術

	定置式水素ステーション	移動式水素ステーション
概要	乗用車（FCV）への供給	移動可能なトラックに積載
導入コスト	約 3.3 億円/基	2～3 億円/台
普及度	全国 160 ヲ所設置（2030 年 1000 ヲ所目標）	東京都、札幌市、室蘭市などで商用営業
課題	安全性確保、法規制整備	法規制整備、導入コスト
プレーヤー	ENEOS、東京ガス、岩谷、日本エアリキード	ENEOS、豊田通商、岩谷産業、太陽日酸

（出所）環境省「水素サプライチェーンに関する調査・報告（2023 年）」より筆者作成

Ⅱ. 4 水素利用

水素の利用は目的別に、発電・産業・民生・運輸に分類される。近年、様々の研究開発が進んでおり、実証段階を経て実用段階に移行しつつあるが、コスト面と水素調達面において解決すべき課題が多い（表 6 と表 7）。

- ①発電：既存発電設備での混焼率向上や専焼化に向けた燃焼技術の開発が進められている。
- ②産業：工業炉において利用の技術開発が進められている。電化代替が難しい分野に利用期待。
- ③民生：家庭用、業務用の定置燃料電池やボイラが実用化。大型化に向け実証実験が進んでいる。
- ④運輸：FCV、FC フォークリフトは実用化。今後、産業機械・鉄道・船舶・航空機の開発。

表 6 産業用途

	原料用途	熱源利用
技術概要	製鉄プロセスで還元剤に水素を用いる	電化代替できない工業炉やバーナー熱源
開発状況	2030 年までに CO ₂ 排出削減 30% 目標	開発、商品化中
課題	熱補填、反応促進等に関する技術開発	高温域の用途対応、水素物性に対する機器開発
プレーヤー	日本製鉄、JFE スチール、神戸製鋼	東京ガス、東邦ガス、中外炉工

(出所) 環境省「水素サプライチェーンに関する調査・報告 (2023 年)」より筆者作成

表 7 運輸用途

	モビリティ	産業機械	鉄道	船舶	航空機
対象	乗用、トラック	FC、建機、農機	鉄道車両	観光船、運搬船	中小型機
動力源	水素、燃料電池	燃料電池	燃料電池	水素、燃料電池	水素タービン
駆動、航続距離	200~800km	8 時間	140km	(データなし)	2000~3000km
販売・PJ 事例	MIRAI、SORA	トヨタ L&F	HYBARI	NEDO 事業	GI 基金採択
プレーヤー	トヨタ、ホンダ	豊田自動織機	JR 東日本	ヤンマー、岩谷	JAXA、川崎重工

(出所) 環境省「水素サプライチェーンに関する調査・報告 (2023 年)」より筆者作成

II. 5 水素関連特許および発表論文

2011 年～2020 年の水素関連の特許出願件数全体に占める EU の割合は 28% でトップとなり、日本が 24%、米国が 20% と続いた。ただし、EU のうちドイツが 11%、フランスが 6%、オランダが 3% の順で上位を占め、国別では日本がトップとなった。また、特許出願の同期間の平均成長率も、日本が 6.2% で、欧州の 4.5% を上回った。一方で、米国は同期間の出願件数がむしろ減少した。韓国と中国については、水素関連の出願件数全体に占める割合がそれぞれ 7%、4% にとどまっているが、年間の平均成長率はそれぞれ 12.2%、15.2% と高い伸びがみられる¹¹⁾。

水素バリューチェーンのセグメント別の内訳については、水素製造が水素関連の約半数を占め、残りを貯蔵・輸送とエンドユーザーによる活用が分け合うかたちとなった。また、気候変動に配慮した低排出の革新的な技術に関する件数が、既存技術の改良に関する申請が 2 倍程度となっており、水素製造とエンドユーザーによる活用の両セグメントでその傾向は顕著となっている。特に水素製造では、電気分解の技術革新に関する特許出願が大幅に増えており、2020 年には気候変動に配慮した革新的な技術に関する申請件数が同セグメントの 8 割近くに達した。

エンドユーザーによる活用に関しては、主に日本がこの分野の特許をリードしている。鉄道や海運などの長距離輸送、航空、発電などの分野でも、脱炭素化に向けて水素の活用が注目されている。

III. 先行研究

環境イノベーションは、持続可能な社会を実現するために重要な役割を果たしている。

環境問題の深刻化に伴い、環境に配慮した技術革新や新しいビジネスモデルが求められる中で、イノベーションの創出と活用がどのように環境問題に貢献するかを理解することは、現代社会にとってますます重要になっている。環境イノベーションに関する研究も、従来のイノベーション研究とは異なる視点で進められ、イノベーションの社会的影響や環境への影響をどのように評価するかに移行している。

先行研究では、イノベーション・システム（System of Innovation）の枠組みを用いて、環境問題解決に向けた技術的な変革がどのように促進されるかを分析するものも多くある。特に、1987年にFreemanが提唱したイノベーション・システムの分析は、環境分野にも適用され、要因や、その効果を最大化するかを理解する重要な基盤となっている。FreemanのSI研究は、戦後の日本の急速な経済発展をイノベーションというシステムの観点から分析したものであり、その後、この枠組みを用いて、「セクターごとの活動と相互作用が新技術を創出し、取り込み、そして普及させた」として、国のイノベーション・システム（NSI研究モデル）¹²⁾を提唱した。

Bergek（2008）やHekkert（2007）は、特定の技術や知識に関連するSI機能分析モデルを提唱し、環境技術における問題点を明確にすることを目指した。多くのSI研究は動的な変化を加味していないため、機能概念を導入したTSISモデル（Technology Specific Innovation System）¹³⁾を提唱した。これらの研究は、市場が原因ではなく、システム全体の機能不全が環境イノベーションの進展を阻害している要因であると指摘している。環境イノベーションは、市場メカニズムが必ずしも望ましい結果を生むわけではなく、技術開発が社会的に受け入れられ、普及するための社会システムが必要であると指摘している。環境技術の導入には、政府の政策や規制が重要な役割を果たすことが知られており、民間企業や研究機関、政府機関が連携し、知識の共有やリソースの投入が不可欠である。

更に、Edquist（2005）はSI研究においてシステムの構造と機能を同時に分析することを提案している¹⁴⁾。環境技術の開発に必要なインフラや政策、消費者の関心や意識などの社会・経済的要素がどのように相互作用するかを分析することで、環境イノベーションが単なる技術的な進歩だけでなく、社会全体の構造的な変化に依存していることが理解できる。

環境イノベーションを推進する主体のひとつが企業家であり、その活動がイノベーションの創出と普及に重要な役割を果たしている。Roper（2008）はInnovation Value Chain（IVC）¹⁵⁾を導入し、英国の産業部門における環境イノベーション分析を行っている。IVCモデルは、イノベーション活動の流れを価値創出の過程として捉え、環境技術の開発から商業化に至るまでの全体的なプロセスを明確にする。このモデルを用いることで、環境イノベーションの成功に必要な課題がどこに存在するのか、またどの段階で障害が発生するのかを理解することができる。特に、環境イノベーションの場合、政策的な支援が技術革新を促進する上で重要な要素となる。企業家としては、社会的責任を果たしつつ利益を追求できる新しいビジネスモデルを構築することに重点が置かれる。環境イノベーションを社会全体に普及させるためには、企業家の積極的な役割が不可欠である。

環境イノベーションは、持続可能な社会実現に向けた重要な要素であり、SI研究の枠組みを用いることで、システムの構造と機能、企業の役割、政府等の政策支援など、包括的なアプローチを提案できると考える。

IV. 本研究の目的

本研究では、これらの先行研究を踏まえて、企業家の活動において諸アクタ間の制度による影響や相互作用によって、産業分野や一般消費に関わるエネルギー・イノベーションに、知識の創出・普及・活用に至る過程を明らかにし評価するための SI 機能分析モデルを定量的に考察する。

水素エネルギーの環境イノベーションが普及するためには、政府方針や目標のみならず企業家の活動が重要なアクタとなっている。また、企業家の活動に影響を及ぼしている要因として、知識の展開が不可欠な要因であろう。「企業家の活動と知識展開に着目した SI 機能分析モデル」（三藤、2016）を使って、現状確認できる数値データを抽出し分析を行うことで、企業家の活動および知識過程で種々の要因が影響しているか定量的に分析を行い、モデル以外の要因として「消費者の関心・ニーズ・利活用優位性」など需要家や消費者の関心や意識が、企業家の活動に影響を及ぼす要因としてのアクタ¹⁶⁾である可能性を探求するものである。

IV. 1 KEI モデル（企業家の活動と知識の展開を加味した SI 機能分析モデル）

KEI モデル（図 1）は知識（knowledge）の展開、企業家（entrepreneur）の活動、制度（institution）の導入や変更システムの中核的な要素としている。本モデルは、第一に国や経済圏などの地域を対象とする。第二に、特定の産業部門や技術分野を分析対象とする。第三に、供給側と需要側に関わる市場が未成熟な段階にある形成期の市場を対象とする。

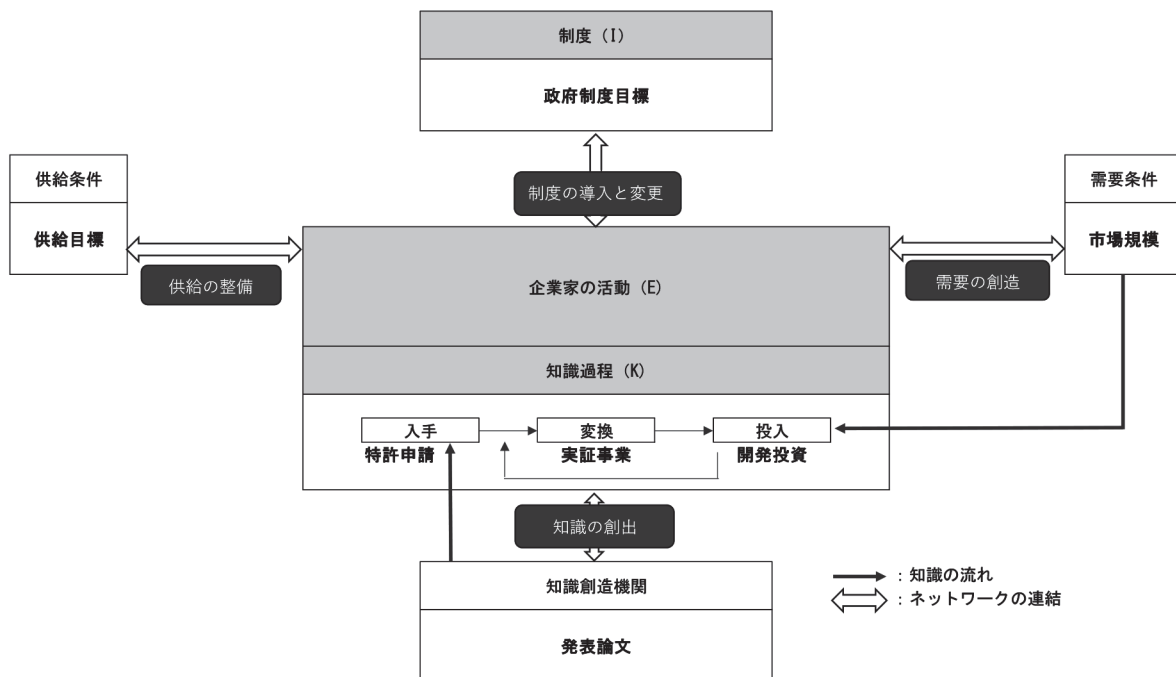


図 1 KEI モデル（企業家の活動と知識の展開を加味した SI 機能分析モデル）
（出所）企業家の活動と知識過程に着目した SI 機能分析モデル（三藤 2016）

IV. 2 KEI モデルの課題と命題

KEI モデルの特徴は、ある特定の技術分野や産業部門に関わるイノベーションの創出、普及及び活用に至るまでのイノベーションに関わるシステム形成期において、企業家が知識の展開過程と諸制度の間に介在して活動すると同時に、諸アクタ間のネットワークを通じて制度の導入や変更が図られることにより、イノベーションの発展を社会が達成すべき方向を考察するところにある。イノベーションは今や社会の中核をなす存在であり、人類に利便性をもたらす一方、地球規模の環境問題やエネルギー問題、経済格差に起因する貧困問題を引き起こしている。その点においてイノベーションの創出、普及そして活用を社会総体としてシステムの中で内生的に捉えなければならない。現在のイノベーション政策は技術開発に偏っているとともに、政策推進にあたっての供給者側の理論が強く働いているといえる。また、「KEI モデルは形成期の産業および技術分野を対象としているため、市場の不確実性と技術の不確実性に直面しており、有効な情報入手と定量分析が課題である」（三藤 2016）と論述¹⁷⁾している。

本研究にあたって、現段階で入手可能な情報に基づき定量分析をおこなったが、KEI モデルの設定項目と測定指標が、政府方針や制度、供給体制に重点が置かれており、「消費者の関心・ニーズ・利活用優位性」など需要家の関心や意識の観点が欠落している点を指摘する。イノベーション創出は、需要家の要求が第一であり、供給および制度はイノベーション普及段階で必要とされる手段である。KEI モデルにおいて、需要の創造として需要条件に「消費者の関心・ニーズ・利活用優位性」が部分的に含まれていると解釈もできるが、イノベーション創出段階では需要条件として確立していないと考えられる。その観点から、需要の創出や需要条件とは別に「消費者の関心・ニーズ・利活用優位性」など需要家の関心や意識が、企業家の活動にどの様に影響しているのかを設定項目として掲げ、測定指標として影響度を明確にする必要があると考えられる。

V. 研究方法と分析

水素エネルギーの環境イノベーション普及について、KEI モデルでの構造方程式モデリング（SEM）分析を使って、制度および企業家の活動と知識の展開に焦点をあてた定量分析を行うことにより、各測定指標間の相関強度による関連性の強弱と、KEI モデル構造の定量分析および KEI モデルの欠落している測定指標としての「消費者の関心・ニーズ・利活用優位性」など需要家の関心や意識が企業家の活動に影響を与えているかを検証した。

V. 1 測定指標の定量データ

(1) 制度

水素基本戦略において、2050 年までのロードマップが具体的に示されている。水素エネルギーの利活用は環境に適合した環境イノベーションであるが、現状、日本国内では副生水素の発生のみであり、発電・モビリティ・製鉄・産業利用等を賄える製造設備は存在していない。CO₂ 排出削減目標に連動する数値目標として、日本国内での水素ガス数量およ

び水素ガス単価が日本政府より目標値として発表されている。2050 年に向けたロードマップであるため、2030 年・2040 年と 10 年間隔での目標値であるため、中間数値については、前後区間の加重平均数値を用いることとした（表 8）。

表 8 水素関連政府目標

	2020 実績	2021 実績	2022 見込	2025 予測	2030 予測	2035 予測	2040 予測
水素ガス（万 t）	151	150	200	240	300	750	1,200
水素ガス単価（円/Nm ³ ）	150.0	125.0	100.0	70.0	30.0	28.0	25.0

（出所）経済産業省、再生可能エネルギー・水素等閣僚会議、水素基本戦略、2023 年を参考に筆者作成

（2）供給条件

富士経済による調査データを基に、水素製造設備・水素 ST 供給・水素大規模輸送・液化水素輸入の数値を用いて、供給条件としての数値指標（表 9）とする。水素ガス供給においては、パイプライン・輸送設備・供給基地・輸入受入基地などのインフラ整備が不可欠であり、今後の設備投資の方向性において、企業家の活動に影響を及ぼす要因であると考え

表 9 水素供給目標（実績および予測）

【水素ガス市場規模】	2020 実績	2021 実績	2022 見込	2025 予測	2030 予測	2035 予測	2040 予測
水素ガス（百万円）	286,410	386,630	572,970	520,500	539,290	1,590,450	3,151,100
水素製造設備（百万円）	80	400	1,200	9,200	47,400	161,100	344,800
水素 ST 供給（百万 Nm ³ ）	168	176	188	273	936	2,744	7,411
水素大規模輸送（万 t）	22	22	22	22	70	410	1,000
液化水素輸入（百万円）	620	0	60	300	800	3,270	4,500

（出所）富士経済、「2023 年版 水素利用市場の将来展望」を参考に筆者作成

（3）需要条件

富士経済による調査データを基に、車載用高圧容器・燃料電池車両・FCV 台数・FCV トラック台数・水素ステーション・水素発電の実績および予測数値を数値指標（表 10）とする。公共では化石燃料からの水素利活用がメインになると思われる。民間では燃料電池車

表 10 水素市場規模（実績および予測）

【市場規模】	2020 実績	2021 実績	2022 見込	2025 予測	2030 予測	2035 予測	2040 予測
車載用高圧容器（百万円）	1,650	2,130	1,500	11,150	77,000	116,870	152,000
燃料電池車両（百万円）	9,944	13,100	17,680	54,100	326,700	1,027,900	1,641,000
FCV・ストック（台）	5,120	7,120	8,120	26,120	276,120	1,315,820	3,215,820
FCV トラック・ストック（台）	5	15	115	765	1,765	18,765	82,765
水素ステーション（百万円）	11,260	2,330	4,044	15,461	36,922	101,143	175,590
水素発電（百万円）	110	540	1,400	62,600	119,450	512,150	354,870

（出所）富士経済、「2023 年版 水素利用市場の将来展望」を参考に筆者作成

両の普及と今後の水素 FCV および FCV トラックの開発状況が待たれるが、政府方針を基にしたロードマップからの個別推計での数値予測を用いることとする。また燃料電池車両や FCV の開発投入に不可欠な車載用高圧容器の開発目標数値についても、水素エネルギーの普及に不可欠な要因として数値目標を確認している。水素ステーションについては、需要面から推計した市場規模としての数値確認を行っている。今後の企業家の活動における投資対象としての関連があると推測する。

(4) 知識創造機関

日本における水素関連の博士論文発表数（表 11）を、CiNii により検索したところ、2023 年時点で累計 5,796 件の発表論文の掲載を確認した。日本は水素技術研究において世界トップクラスの地位を占めており、特に、水素製造や燃料電池に関する研究分野が活発である。日本政府は水素技術研究を戦略的に支援しており、産学連携での研究開発に早くから注力してきたといえる。また、水素技術は、温室効果ガスの削減に向けたエネルギーとして注目されており、日本が国際的な競争力を発揮するための新たな技術革新の源泉である。

表 11 水素関連発表博士論文数（日本）

	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年
件数推移（件）	118	94	100	92	101	67	19
累計推移（件）	5,323	5,417	5,517	5,609	5,710	5,777	5,796

（出所）CiNii 掲載論文、キーワード「水素」（2023 年データ抽出）を参考に筆者作成

(5) 知識過程

知識過程での水素関連特許件数（表 12）については、2023 年時点で累計 7,278 件を確認した。特に、自動車産業分野を中心に多くの特許が出願されており、水電解装置や製鋼およびエネルギー供給に関する特許出願も近年増加傾向にある。国内の申請主要企業としては、パナソニック、川崎重工、ENEOS など、水素技術の研究開発に積極的な民間企業の申請数が増加傾向にある。

実証事業数については、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の水素関連実証事業を調査したところ、2019 年以降に累計 258 件の実証事業数（表 13）を確認した。実施事業者としては、企業・研究機関・大学・行政・コンサルティングであり、事業者数累計 657 社が参画している。水素製造に関するものから、近年では水素利活用に向けた地域連携によるクラスター形成などの、モデル構築に向けた実証事業も含まれている。

リードユーザーの研究開発投資額（表 14）については、日本の上場企業の内、水素関連銘柄と登録されている 65 社を対象に、研究開発費・設備投資額・開発費・試験研究費を調査した。2017 年以降 2023 年まで、各社累計では投資額は横這い推移であり、民間企業の水素関連に向けた新たな投資拡大の動きは確認できていない。

表 12 特許申請件数

	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年
件数推移（件）	290	322	221	222	219	79	5
累計推移（件）	6,210	6,532	6,753	6,975	7,194	7,273	7,278

（出所）パテント・インテグレーション レポートを参考に筆者作成

表 13 実証事業数（実績）

	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年
実証事業採用件数			5	10	11	8	10
実証事業テーマ数			12	68	85	39	54
テーマ数累計			12	80	165	204	258

（出所）新エネルギー・産業技術総合開発機構 / 公募情報一覧を参考に筆者作成

表 14 リードユーザーの研究開発投資額（百万円）

	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年
研究開発費	3,664	3,867	3,925	5,207	3,815	4,013	4,166
設備投資額	10,523	10,233	10,914	11,909	9,964	10,179	9,526
開発費・試験研究費	430	477	372	443	296	359	320
合計	14,617	14,578	15,211	17,559	14,075	14,552	14,011

（出所）Kabutan「水素関連銘柄（上場企業 65 社）」を参考に筆者作成

V. 2 供給条件・需要条件・制度の相関分析

供給条件、需要条件、制度の各項目の相関分析（表 15）を行ったところ、水素ガス単価（円/N m³）のみ負の相関を示した。供給および需要の拡大による価格低減の関係が確認される。その他項目について相関係数および有意確率を分析したところ、項目間で強い相関関係が確認できるものと相関関係が確認できない項目がある。

制度における政府予算については、水素ガス単価のみ強い負の相関関係が確認できるが、供給条件および需要条件の各項目とは相関関係は確認できない。但し、車載用高圧容器と発電については相関が確認できるが、これは政府予算が車載用高圧容器および発電に政府方針として優先的に配分されている可能性を示唆していると言える。水素ガス（万 t）については、供給条件・需要条件の項目に強い相関が確認できる。特に、水素ステーションに対しては（.996**）となっており、需要創出の為の水素インフラ整備の中心的項目であるといえる。

供給条件としての水素ガス（百万円）は、大規模輸送との強い相関が確認できる。水素供給における海外からの輸入政策が反映している。水素製造設備はすべての項目に強い相関が確認できるが、発電については相関が若干弱い。上述の政府方針での水素輸入政策に関連していると思われる。水素 ST 供給・大規模輸送とも FCV ストックに強い相関が確認できる。液化輸入水素は、燃料電池車両との相関が強く、発電との相関を上回る状況が確

認できる。発電は液化輸入水素だけでなく圧縮水素輸入との関係も確認する必要があると考える。

需要条件での車載用高圧容器は、燃料電池車両との相関が高い。燃料電池車両と水素STは当然ながら強い相関が確認できる。FCVは水素STと強い相関が確認されるが、水素ガス供給条件との相関の方が強い相関が確認できる。

上述より、供給条件・需要条件・政府目標の定量データ分析によると、TSISモデル¹⁸⁾で示されている指標の関連性は、水素利活用モデルでも一定の相関関係が確認できる。但し、新エネルギーの供給面の多様性や、需要面での活用が多岐にわたることから、例えば、民間利活用としてのFCV、FCVトラックなどの指標と、水素発電などの公共利用とでは相関はないといえる。1990年代から2000年頃までのNSI研究モデル¹⁹⁾から更に発展した分析モデルが必要であると言える。

表 15 SPSS による相関分析表

			政府予算	水素ガス (万 t)	水素ガス 単価 (円 /Nm ³)	水素ガス (百万 円)	水素製造 設備 (百 万円)	水素ST 供給 (百 万Nm ³)	大規模輸 送 (万 t)	液化輸入 水素 (百 万円)	車載用高 圧容器 (百万 円)	燃料電池 車両 (百 万円)	FCV・ス トック (台)	FCトラ ック・ス トック (台)	水素ス テーショ ン (百万 円)	発電 (百 万円)
制 度	政府予算	Pearson の相関係数	1	0.588	-.925**	0.48	0.546	0.473	0.462	0.625	.807*	0.636	0.487	0.354	0.612	.803*
		有意確率 (両側)		0.165	0.003	0.276	0.205	0.284	0.297	0.134	0.028	0.125	0.267	0.436	0.144	0.03
	水素ガス (万 t)	Pearson の相関係数	0.588	1	-.717	.989**	.994**	.979**	.985**	.981**	.935**	.995**	.988**	.946**	.996**	.845*
		有意確率 (両側)	0.165		0.070	<.001	<.001	<.001	<.001	<.001	0.002	<.001	<.001	0.001	<.001	0.017
供 給 条 件	水素ガス単価 (円/Nm ³)	Pearson の相関係数	-.925**	-.717	1	-0.653	-0.684	-0.637	-0.618	-0.685	-.854*	-0.736	-0.64	-0.549	-0.72	-.771*
		有意確率 (両側)	0.003	0.070		0.112	0.090	0.124	0.139	0.089	0.014	0.059	0.121	0.202	0.068	0.042
	水素ガス (百万円)	Pearson の相関係数	0.480	.989**	-.653	1	.992**	.991**	.996**	.951**	.885**	.974**	.995**	.977**	.980**	.766*
		有意確率 (両側)	0.276	<.001	0.112		<.001	<.001	<.001	<.001	0.008	<.001	<.001	<.001	<.001	0.045
	水素製造設備 (百万円)	Pearson の相関係数	0.546	.994**	-.684	.992**	1	.994**	.995**	.970**	.925**	.989**	.998**	.970**	.995**	.795*
		有意確率 (両側)	0.205	<.001	0.090	<.001		<.001	<.001	<.001	0.003	<.001	<.001	<.001	<.001	0.033
	水素ST供給 (百万Nm ³)	Pearson の相関係数	0.473	.979**	-.637	.991**	.994**	1	.997**	.942**	.889**	.968**	.998**	.990**	.979**	0.725
		有意確率 (両側)	0.284	<.001	0.124	<.001	<.001		<.001	0.002	0.007	<.001	<.001	<.001	<.001	0.065
	大規模輸送 (万t)	Pearson の相関係数	0.462	.985**	-.618	.996**	.995**	.997**	1	.954**	.884**	.973**	.999**	.986**	.982**	0.750
		有意確率 (両側)	0.297	<.001	0.139	<.001	<.001	<.001		<.001	0.008	<.001	<.001	<.001	<.001	0.052
	液化輸入水素 (百万円)	Pearson の相関係数	0.625	.981**	-.685	.951**	.970**	.942**	.954**	1	.942**	.989**	.958**	.894**	.987**	.897**
		有意確率 (両側)	0.134	<.001	0.089	<.001	<.001	0.002	<.001		0.001	<.001	<.001	0.007	<.001	0.006
需 要 条 件	車載用高圧容器 (百万円)	Pearson の相関係数	.807*	.935**	-.854*	.885**	.925**	.889**	.884**	.942**	1	.961**	.898**	.816*	.950**	.896**
		有意確率 (両側)	0.028	0.002	0.014	0.008	0.003	0.007	0.008	0.001		<.001	0.006	0.025	0.001	0.006
	燃料電池車両 (百万円)	Pearson の相関係数	0.636	.995**	-.736	.974**	.989**	.968**	.973**	.989**	.961**	1	.978**	.924**	.997**	.872*
		有意確率 (両側)	0.125	<.001	0.059	<.001	<.001	<.001	<.001	<.001	<.001		<.001	0.003	<.001	0.01
	FCV・ストック (台)	Pearson の相関係数	0.487	.988**	-.64	.995**	.998**	.998**	.999**	.958**	.898**	.978**	1	.983**	.986**	.759*
		有意確率 (両側)	0.267	<.001	0.121	<.001	<.001	<.001	<.001	<.001	0.006	<.001		<.001	<.001	0.048
	FCトラック・ストック (台)	Pearson の相関係数	0.354	.946**	-.549	.977**	.970**	.990**	.986**	.894**	.816*	.924**	.983**	1	.942**	0.629
		有意確率 (両側)	0.436	0.001	0.202	<.001	<.001	<.001	<.001	0.007	0.025	0.003	<.001		0.001	0.130
	水素ステーション (百万円)	Pearson の相関係数	0.612	.996**	-.720	.980**	.995**	.979**	.982**	.987**	.950**	.997**	.986**	.942**	1	.845*
		有意確率 (両側)	0.144	<.001	0.068	<.001	<.001	<.001	<.001	<.001	0.001	<.001	<.001	0.001		0.017
	発電 (百万円)	Pearson の相関係数	.803*	.845*	-.771*	.766*	.795*	0.725	0.750	.897**	.896**	.872*	.759*	0.629	.845*	1
		有意確率 (両側)	0.030	0.017	0.042	0.045	0.033	0.065	0.052	0.006	0.006	0.010	0.048	0.130	0.017	

※相関関係は1%水準で有意 (両側) です。

※相関関係は5%水準で有意 (両側) です。

サンプル数：制度3、供給条件5、需要条件6の2020年～2022年実績、2025年・2030年・2035年・2040年予測

(出所) 表8～14の数値を基に筆者作成。

V. 3 企業家の活動・知識過程・知識創造の相関分析

KEIモデルで示されている知識創造機関および知識過程における入手・変換・投入の各項目の数値データにもとづき、各指標間の相関分析 (表16)を行った。知識創造機関の数値データとしては、水素関連の公表済み博士論文数を確認した。知識過程での入手は特許申請数、変換についてはNEDOにおける実証事業を確認した上で、参画事業者を、企業・

研究機関・大学・行政・コンサルティングに分類し、相関分析を行っている。投入に関しては、上場企業から水素関連企業とされる 65 社の有価証券報告書より、研究開発投資費を抽出している。

知識創造での博士論文数は、特許と非常に強い相関（.991）が確認された。KEI モデルの企業家の活動と知識過程に着目した SI 機能分析モデル（図 1）の知識の流れが定量的に確認された。知識過程での変換や投入とは相関は確認できない。但し、NEDO の実証事業においては、弱い相関が確認される。

知識過程における入手としての特許については、博士論文との相関に続き実証事業者との相関が確認できる。技術イノベーションにおいて特許を利用した実証事業が行われていると考えられる。その場合企業との相関が、研究機関・大学・行政・コンサルティングより高く、実証事業後の事業化での収益効果を企業のみ視野に入れていると考えられる。実証事業テーマに対しても企業との相関が最も強く、次いで大学、研究機関との相関も確認できる。実証事業者間の相関に於いては、研究機関と大学との相関が高い。また企業と行政との弱い相関も確認できることから、企業家の行政に対する制度変更や助成制度活用などと考えられる。

投入については、水素関連企業の研究開発投資を調査したが、企業財務データでは水素関連のみを抽出することが出来ず、また上場 65 社の数値の数値から相関分析を行ったが、知識過程での各項目との相関は確認できなかった。

表 16 SPSS による相関分析表

			博士論文	特許	実証事業 テーマ数	実証事業 者	①企業	②研究機 関	③大学	④行政	⑤コンサ ルティン グ	研究・開 発・投資
知識創造	博士論文	Pearson の相関係数	1	.991**	.764*	.794*	0.754	0.736	0.597	0.587	0.552	-0.142
		有意確率（両側）		<.001	0.046	0.033	0.05	0.059	0.157	0.166	0.199	0.762
知識過程	入手	Pearson の相関係数	1	.991**	.796*	.817*	.771*	0.734	0.638	0.602	0.561	-0.079
		有意確率（両側）		<.001	0.032	0.025	0.043	0.061	0.123	0.153	0.190	0.866
	変換	Pearson の相関係数	1	.764*	.796*	.996**	.934**	.818*	.897**	0.606	0.167	0.168
		有意確率（両側）		0.046	0.032	<.001	0.002	0.025	0.006	0.149	0.720	0.719
		Pearson の相関係数	1	.794*	.817*	.996**	.943**	.822*	.889**	0.634	0.159	0.118
		有意確率（両側）		0.033	0.025	<.001	0.001	0.023	0.007	0.127	0.734	0.801
		Pearson の相関係数	1	0.754	.771*	.934**	.943**	0.642	0.701	.776*	0.142	-0.180
		有意確率（両側）		0.050	0.043	0.002	0.001	0.120	0.079	0.040	0.762	0.699
		Pearson の相関係数	1	0.736	0.734	.818*	.822*	0.642	.836*	0.128	0.081	0.341
		有意確率（両側）		0.059	0.061	0.025	0.023	0.120	0.019	0.784	0.862	0.455
		Pearson の相関係数	1	0.597	0.638	.897**	.889**	0.701	.836*	0.370	0.049	0.536
		有意確率（両側）		0.157	0.123	0.006	0.007	0.079	0.019	0.414	0.917	0.215
		Pearson の相関係数	1	0.587	0.602	0.606	0.634	.776*	0.128	0.370	0.350	-0.406
		有意確率（両側）		0.166	0.153	0.149	0.127	0.04	0.784	0.414	0.441	0.366
		Pearson の相関係数	1	0.552	0.561	0.167	0.159	0.142	0.081	0.049	0.350	-0.049
		有意確率（両側）		0.199	0.19	0.72	0.734	0.762	0.862	0.917	0.441	0.918
	投入	Pearson の相関係数	1	-0.142	-0.079	0.168	0.118	-0.180	0.341	0.536	-0.406	-0.049
		有意確率（両側）		0.762	0.866	0.719	0.801	0.699	0.455	0.215	0.366	0.918

**相関関係は 1%水準で有意（両側）です。

*相関関係は 5%水準で有意（両側）です。

サンプル数：知的創造 1、入手 1、変換 7、投入 1 の 2017 年～2023 年実績値

（出所）表 8～14 の数値を基に筆者作成。

V. 4 KEI モデルをベースとした構造方程式モデリング

供給条件・需要条件・制度の各項目の定量データによる相関分析およびKEIモデルをベースにした企業家の活動・知識過程・知識創造機関の各項目の定量データの相関分析結果を踏まえ、KEIモデルで示されている「SI機能分析モデル」(図1)に、制度は政府の掲げている水素ガス目標(万t)、供給条件は水素製造設備、需要条件は水素ステーションの数値データを用いる。また、知識創造機関の数値データは博士論文、知識過程における入手は特許、変換は実証事業テーマ数、投入は企業65社の研究開発投資額とし、構造方程式モデリングを行った(図2)。絶対適合度指標(GFI)は[0.669]、比較適合度指数(CFI)は[0.394]となっており有効な数値を示していない。

KEIモデルによる構造方程式モデリングにあたっての数値データとしては、制度・供給条件・需要条件は、2020年実績以降の予測数値となっている。一方、知識過程(入手・変換・投入)及び知識創造機関の数値は、2017年～2023年までの実績値となっており、時間軸のずれと実績値と予測値の整合性を考慮する必要があるが、イノベーション過程にある水素エネルギーの諸アクタ間の関連性や相関関係を数値化することが本研究の目的であり、制度・供給条件・需要条件の相関分析と知識創造・知識過程の相関分析で示された相

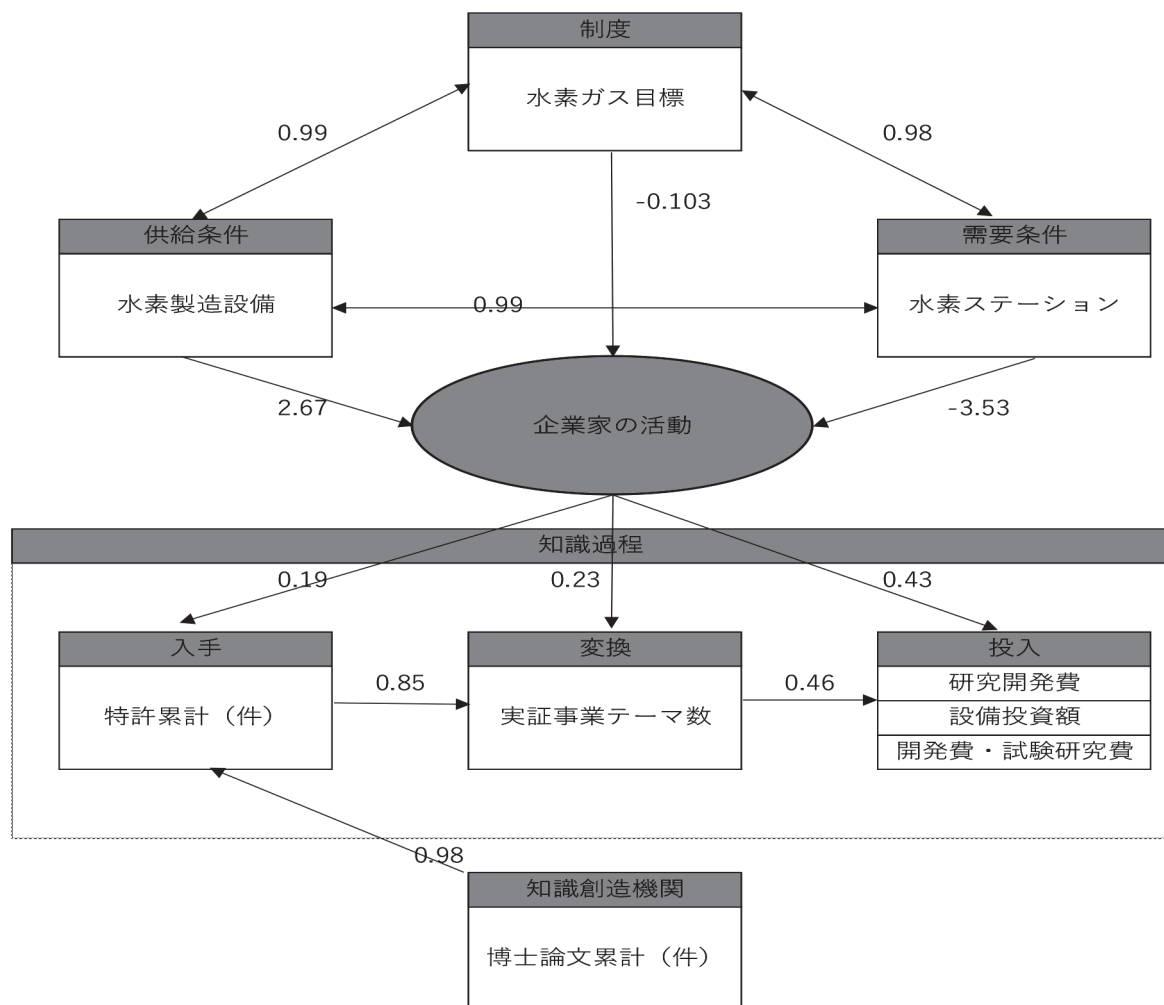


図2 KEIモデルをベースとした構造方程式モデリング

(出所) 企業家の活動と知識過程に着目したSI機能分析モデル(三藤2016)を参考に筆者作成。

関係数の傾向と大きな差異はないと分析できる。

水素エネルギー関連で調査を行った数値データを基に、KEI モデルを使って構造方程式モデリング (SEM) を行った。本モデルは構造方程式モデリングにおける、MIMIC (Multiple Indication Multiple Cause) モデルとなっている。MIMIC モデルの解釈としては、Multiple Cause (多重原因) である「制度・供給条件・需要条件」の観測変数は単方向の矢印として潜在変数である「企業家の活動」に刺さっているが、3 変数の 1 次結合で定まるものでないとされている。潜在変数である「企業家の活動」は「知識過程の入手・変換・投入」の 3 変数から測定されていて、その 3 変数で予測することから「その他という誤差項」が必要とされる。

相関分析では、制度 (水素ガス目標)・供給条件 (水素製造設備)・需要条件 (水素ステーション) の相関係数は強い相関が確認される。しかし、制度 (水素ガス目標)・需要条件 (水素ステーション) の企業家の活動に対する相関は負の相関となっている。制度・需要条件が企業家の活動を決定するものでなく、むしろ企業家の活動が、制度や需要条件に影響をあたえると解釈できる。供給条件 (水素製造設備) は、本来企業家の活動による設備投資により実現するものであり、構造方程式モデリングにおいて、標準化係数ではなく相関係数を求めるべきである。

知識創造機関 (博士論文) は知識過程における入手 (特許) に強い相関があり、入手 (特許) は実証事業に対しても相関が確認できる。但し、実証事業が知識過程における投入に対しては、相関は強くない。実証事業が必ずしも企業の研究開発投資に繋がっていないと思われる。企業家の活動が、知識過程の入手 (特許)、変換 (実証事業) に対しても、強い相関は確認できない。しかし、投入 (研究開発投資) には影響を与えている。よって、企業家の活動は、知識過程での入手・変換を通じて投入に影響を与えていることが確認される。

V. 5 新 KEI モデル仮説

KEI モデルでは、制度・企業家の活動・知識創造機関に注目したモデルとなっているが、MIMIC モデルとの酷似性を考慮すると、「企業家の活動」に「その他という誤差項」が影響している。企業家は営利集団であり、その活動は営利 (但し、営利とは金銭的なものだけでなく、社会貢献、社会使命なども含まれる) を最大限にする目的で活動する。企業家の活動が目的を達成するためには、需要動向や消費者の関心・ニーズが肝心であり、また永続的に成長するための利活用優位性が必要である。その観点から、「企業家の活動」に影響が強く相関している項目として「消費者の関心・ニーズ・利活用優位性」が不可欠な項目であると考えられる。

MIMIC モデルの解釈を基に、KEI モデルで示されている「制度・供給条件・需要条件」との関係性を切り離し、新たな項目として「消費者の関心・ニーズ・利活用優位性」を潜在変数として分析 (図 3) すると、[企業家の活動 → 入手 : 0.08] [企業家の活動 → 変換 : 0.33] [企業家の活動 → 投入 : 0.91] となった。絶対適合度指標 (GFI) は [1.0]、比較適合度指標は [1.0] となり、絶対適合度指標、比較適合度指標ともに、モデルとして有効な数値となった。

企業家の活動は入手 (特許) が目的でなく成果を発揮するための要素である。実証事業

は事業化に向けた試験であり、企業規模・技術要素の理解・研究機関との関係など、ある特定の条件が揃う必要がある。もっとも相関が高い投入は、設備投資を含めた企業家の活動であり、政府予算や助成金制度とは別に、営利を目的とした企業家の活動を位置付ける。

企業家の活動は、知識創造機関での要素（博士論文）として、知識過程（特許→実証事業→設備投資）を経て、需要条件、供給条件を生み出す。その需要条件と供給条件を確かな成長過程に発展させるために、制度を活用することになる。水素エネルギーの環境イノベーション普及において、企業家の活動が主要要因であることが確認できたが、見逃してはいけないアクタは「消費者の関心・ニーズ・利活用優位性」など需要家の関心や意識である。

水素エネルギーは、CO₂ 排出がないクリーンなエネルギーとして注目されているが、今後の普及拡大のためには、「消費者の関心・ニーズ・利活用利便性」が企業家の活動にとって重要なアクタである。

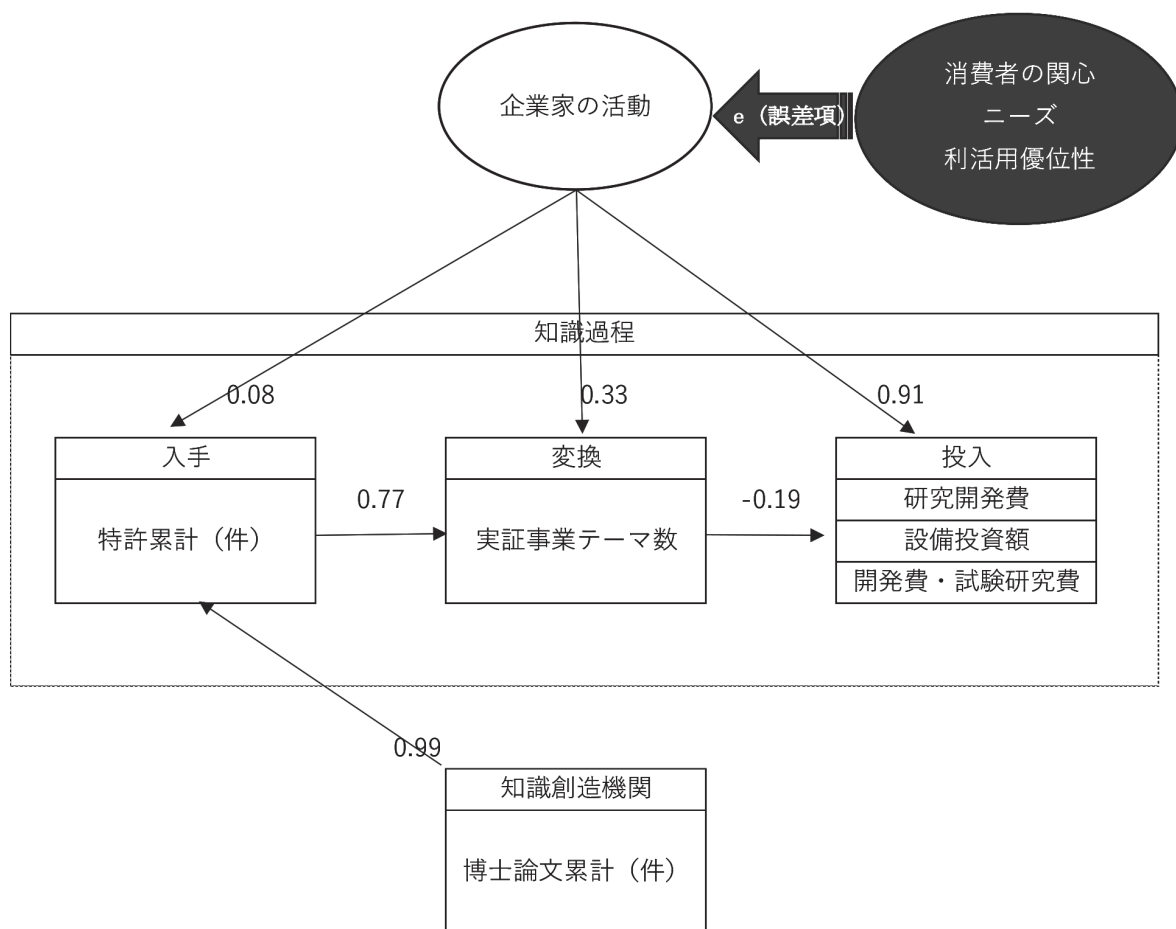


図3 新KEIモデル仮説

出所) 企業家の活動と知識過程に着目したSI機能分析モデル(三藤2016)を参考に筆者作成。

VI. 結論と展望

VI. 1 結論

本研究では、水素エネルギーの環境イノベーション普及要因について、制度下における

政府・企業家や大学・研究機関等のアクタ間の機能により、社会的イノベーションが普及するとされる KEI モデルでの相関分析を行うことで、普及要因の因果関係を分析した。日本におけるエネルギー・イノベーションとしての水素エネルギーの普及要因として、制度や企業家の活動、知識機関での研究開発や実証事業も重要なアクタであることは相関分析で確認できたが、水素エネルギーの利活用にあたっての「消費者の関心・ニーズ・利活用優位性」など需要家の関心や意識が不可欠であると確認される。地球温暖化の懸念がある中、温暖化ガスを排出しないエネルギーへの関心は高い。また、エネルギー資源が無い日本にとって、過去からの推移として、木炭～石炭～石油～天然ガス～再生可能エネルギーへとエネルギー・イノベーションが推移してきたが、安定供給（調達）と利活用におけるコストも重要な要因であると考察される。

本研究では、水素エネルギーに関する数値データを用いて KEI モデルを活用し、構造方程式モデリング（SEM）を実施。「制度」「供給条件」「需要条件」が企業家の活動に与える影響を分析した。その結果、これらの要因は強く相関しているものの、企業家の活動が制度や条件に影響を与える側面が示唆された。また、知識創造機関は特許取得に影響を与えるが、研究開発投資との結び付きは低く、企業家の活動が重要な役割を果たすことが確認された。さらに、「消費者の関心・ニーズ・利活用優位性」を追加すると、モデルの適合度が向上。水素エネルギーの普及には、企業家の活動だけでなく、消費者意識の向上が重要であると結論付けた。

今後、本研究で明らかになった KEI モデルの構造と各測定指標の相関関係の更なる裏付けとして、一般消費者および産業利用としての企業家である民間企業のインタビューが必要になる。産業部門や技術分野を対象とする SI 機能分析モデルは、国や地域が限定されるものでなく、かつ、将来に向けた地球規模での環境問題を視野に入れる課題認識が重要である。水素エネルギーが環境負荷の少ないクリーンなエネルギーとして、一般消費者の認識はもとより産業部門での更なる普及のために、安定供給（調達）、安全性、利活用コストを踏まえた制度、技術開発等のための、今後も新 KEI モデルの構築による「水素エネルギーの環境イノベーション普及要因の分析」が必要である。

VI. 2 本研究の限界と今後の課題

研究方法として、現状確認することが可能な測定指標として「水素基本戦略」を基にできるだけ客観的な数値を抽出したが、2023 年以降については予測値であり、今後の経済環境や技術開発動向等により変化すると思われる。先行研究である SI 機能分析モデルは前提条件として、国や経済圏などの地域を限定しているが、国際情勢や安全保障等の問題で、供給・需要条件も大きな変化が発生する可能性を内在している。また、KEI モデルは企業家の活動・知識過程・知識創造機関の包括的なモデルであり、かつ、企業家の活動に注目しているため、消費者の要因について分析が欠落しているともいえる。イノベーション普及要因の分析にあたって、「消費者の関心・ニーズ・利活用優位性」など需要家の関心や意識を加味したモデルの改良が必要である。今後の課題として「消費者の関心・ニーズ・利活用優位性」など需要家の関心や意識の調査および定量データの抽出を、アンケート調査および企業への聞き取り調査により行うこととしたい。

2000 年代初頭以降、世界のエネルギー政策は大きく変化してきた。特に 2015 年のパリ協定成立後、脱炭素社会への転換が加速し、ロシアのウクライナ侵略によるエネルギー危機も加速させた。この変化は欧米先進国だけでなく、中国やインド、中東諸国、南米なども巻き込んでおり、オーストラリアも変化を始めている。日本は 2011 年の福島第一原子力発電所事故を経験し、海外からの化石燃料依存から抜け出す必要があったが、政策は古いエネルギー供給体制に固執してきた。これに対し、同じ先進工業国のドイツや英国は自然エネルギーの割合を急速に増やしてきた。日本の自然エネルギー産業は国際的に劣位に立っており、政府内には化石燃料や原子力に固執する勢力がある。水素ビジネスも成長の可能性を失う可能性があり、国際的な信頼を得るためには GHG 排出基準の整備や国産グリーン水素の供給が必要である。戦略と政策の転換には時間が限られているが、日本が世界のグリーン水素ビジネスで重要な役割を果たすことを期待する。

[注]

- 1) 富士経済、水素利用市場の将来展望、2023 年、49-53 頁参照。
- 2) 米国政府、Department of Energy「Hydrogen Shot」。
- 3) 「グリーンディール産業計画（2023 年 2 月）」、European Commission「A Green Deal Industrial Plan for Net-Zero Age」。
- 4) 再生可能エネルギー・水素等閣僚会議、水素基本戦略、2023 年、8 ページ。
- 5) 再生可能エネルギー・水素等閣僚会議、水素基本戦略、2023 年、8 ページ。
- 6) 再生可能エネルギー・水素等閣僚会議、水素基本戦略、2023 年、9 ページ。
- 7) 再生可能エネルギー・水素等閣僚会議、水素基本戦略、2023 年、9 ページ。
- 8) 再生可能エネルギー・水素等閣僚会議、水素基本戦略、2023 年、10 ～ 11 ページ。
- 9) 再生可能エネルギー・水素等閣僚会議、水素基本戦略、2023 年、11 ページ。
- 10) 再生可能エネルギー・水素等閣僚会議、水素基本戦略、2023 年、11 ～ 12 ページ。
- 11) 特許庁、令和 4 年度特許出願技術動向調査報告書、2023 年。
- 12) 三藤利雄（2016）、イノベーションのシステムに関わる機能分析モデルの展開－技術の創出、普及及び活用の観点から－、立命館ビジネスジャーナル（Vol.10）、2016 年、4 ページ。
- 13) 三藤利雄（2016）、イノベーションのシステムに関わる機能分析モデルの展開－技術の創出、普及及び活用の観点から－、立命館ビジネスジャーナル（Vol.10）、2016 年、10 ページ。
- 14) 三藤利雄（2016）、イノベーションのシステムに関わる機能分析モデルの展開－技術の創出、普及及び活用の観点から－、立命館ビジネスジャーナル（Vol.10）、2016 年、5 ページ。
- 15) 三藤利雄（2016）、イノベーションのシステムに関わる機能分析モデルの展開－技術の創出、普及及び活用の観点から－、立命館ビジネスジャーナル（Vol.10）、2016 年、16 ページ。
- 16) アクタ（actor）は「システム内外で影響を与える主体的要因」。プレイヤー（Player）は「人として結果を体験する主体」と補足する。
- 17) 三藤利雄（2016）、イノベーションのシステムに関わる機能分析モデルの展開－技術の

創出，普及及び活用の観点から－、立命館ビジネスジャーナル（Vol.10）、2016 年、28 ページ。

- 18) Hekkert et al. (2007) 「SI に機能概念を導入したイノベーション・システム（TSIS）モデル」を論文として発表。
- 19) Lundvall (1992)、Nelson (1993)、Edquist (1997) および Nelson & Rosenberg (1993) による研究発表。

[参考文献]

- 安孫子誠男（2000）、イノベーション・システム論の現在－ひとつのサーベイ－、「千葉大学経済研究第 14 巻第 4 号」、713—751 頁
- 石川康（2019）、日本企業の投資効率性と株主価値、「京都大学（学位申請論文）」、2019 年
- 稲垣有弥、小笠原有香、高橋佑太郎、武安光太郎、立川雄也、他（2022）、水素関連プロジェクトの今後の取組みに関する提言、2050 年カーボンニュートラルに向けた若手有識者研究会
- 宇野誠二（2016）、クラスター研究における新たな分析 フレームワークに関する考察－クラスターとイノベーションの関係を中心として－、「大阪市立大学経営学会」、2016 年、313—330 頁
- 小山堅（2023）、激動の国際エネルギー情勢と日本の課題、北海道エナジートーク 21、2023 年
- 佐々木一成（2023）、水素エネルギーの現状・課題と将来展望、財務省ランチミーティング講演、2023 年
- 新宅純二郎、二又俊文、吉岡徹、許経明、瀬川晶子（2017）：ヨーロッパのイノベーション、「赤門マネジメントレビュー（第 16 巻 1 号）」、2017 年、35—59 頁
Innovation Activities in Europe、Junjiro Shintaku, Toshifumi Futamata, Tohru Yoshioka-Kobayashi, Jing-Ming Shiu, Akiko Segawa
- 庄司真理子（2014）、革新的な知識・技術に起因するイノベーション・システムの動的変化に関する分析、「一般社団法人研究・イノベーション学会（Vol29 No4）」、2014 年、281—295 頁
- 田島恵美（2023）、迷惑施設立地と NIMBY 論、「大正大学公共政策学会年報（N0.3）」、2023 年
- 長明洋介、南石晃明（2020）、イノベーションを創出する産業クラスター形成に関する一考察、「九州大学大学院農学研究院学芸雑誌」、2020 年、63—71 頁
A Study on the Industrial Cluster for the Innovation、Yosuke Chomi and Teruaki Nanseki
- 松平好人（2021）、自治体の中小企業イノベーション促進政策の効果に関する仮説構築－大阪トップランナー育成事業を実例として－、「関西ベンチャー学会第 13 号」、34—43 頁
- 三原巧（2020）、地域住民の水素ステーションに対する受容態度の規定要因、「東京工業大学（甲第 11046 号）」、2020 年

- 三藤利雄（2016）、イノベーションのシステムに関わる機能分析モデルの展開－技術の創出，普及及び活用の観点から－、「立命館ビジネスジャーナル（Vol.10）」、2016 年
A development of functional analysis model in the system of innovation: From the viewpoint of generation, diffusion and utilization of technology、Mitsufuji, Toshio
- 山下誠二（2016）、低炭素社会に向けた水素エネルギーチェーン構築に関する研究、「京都大学学術情報レポジトリ」、2016 年
- 横山実紀（2022）、NIMBY 問題における段階的合意形成過程の検討－決定プロセスの公正さに関する実証研究、「北海道大学博士（人間科学）甲第 15059 号」、2022 年
- *Freeman, C. (1995). "The 'National System of Innovation' in historical perspective". Cambridge Journal of Economics: 5–24.*
- 経済産業省（2023）、再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議、「水素基本戦略」
- 環境省（2023）、水素サプライチェーンに関する調査・報告
- 特許庁（2023）、令和 4 年度特許出願技術動向調査報告書

Analysis of Environmental Innovation Diffusion Factors of Hydrogen Energy: Quantification by SI Functional Analysis Model

Noriyoshi Arimoto

Abstract:

As a countermeasure against global warming, introduction of hydrogen energy is an important option. In this study, we conducted structural equation modeling (SEM) using the KEI model based on numerical data related to hydrogen energy, and analyzed the effects of “system,” “supply condition,” and “demand condition” on entrepreneurs’ activities. The model is based on the MIMIC model and expresses entrepreneurs’ activities with three elements. In the correlation analysis, a strong correlation was confirmed between “system,” “supply condition,” and “demand condition,” but it was suggested that “system” and “demand condition” were not direct factors determining entrepreneurs’ activities, but rather that entrepreneurs’ activities influenced the system and conditions. Knowledge creation organizations have a strong influence on patent acquisition, but demonstration projects are less likely to lead to R & D investment, and entrepreneurs’ activities are strongly related to R & D investment. Furthermore, as a result of adding “consumers’ interest, needs, and advantage in utilization” to the KEI model as a latent variable, the goodness of fit of the model was high. In addition to entrepreneurs’ activities, consumers’ interest, needs, and advantage in utilization are important factors for the diffusion of hydrogen energy. The diffusion of hydrogen energy, which is expected to be a clean energy with no CO₂ emissions, requires strategies that emphasize both entrepreneurs’ activities and consumers’ awareness.

Keywords: hydrogen (H₂), energy innovation, innovation system

