

# 博士論文（要約）

エネルギーキャリア導入に向けた  
地産地消シミュレーションに基づく  
地域別エネルギーシステムの計画支援

清水 輝之

# 目次

|   |    |
|---|----|
| 第 1 章 序論                                      | 1  |
| 1.1. エネルギーシステムの抱える課題とエネルギーキャリアの利用             | 1  |
| 1.2. エネルギーキャリア導入の現状                           | 3  |
| 1.3. エネルギーキャリア導入の課題                           | 6  |
| 1.3.1. エネルギーキャリア導入に関する既往の技術経済環境分析             | 6  |
| 1.3.2. 社会経済的な導入障壁                             | 8  |
| 1.4. 本研究で取り組む課題                               | 9  |
| 1.5. 研究目的と本論文の構成                              | 11 |
| 第 2 章 地域別エネルギーキャリア地産地消シミュレーション<br>モデルの構築      | 14 |
| 2.1. エネルギーキャリア地産地消シミュレーションモデルの要件定義            | 14 |
| 2.2. 地域別エネルギーキャリア導入分析の手順                      | 16 |
| 2.3. エネルギーキャリア地産地消モデルの構築                      | 18 |
| 2.3.1. 需給バランス                                 | 18 |
| 2.3.2. エネルギーキャリア製造                            | 20 |
| 2.3.3. エネルギーキャリア輸送                            | 21 |
| 2.3.4. エネルギーキャリア利用                            | 22 |
| 2.4. ケースの設定                                   | 25 |
| 2.4.1. 導入技術とエネルギーパス                           | 25 |
| 2.4.2. 地域区分の定義と地域データ                          | 27 |
| 2.5. 評価結果                                     | 28 |
| 2.5.1. 3つの地域における FGSTR と FCV の導入による LC-GHG 変化 | 29 |
| 2.5.2. 日本における技術導入の LC-GHG                     | 30 |
| 2.6. 評価結果の考察                                  | 35 |
| 2.6.1. エネルギー需要の地域特性                           | 35 |
| 2.6.2. エネルギー源の地域特性                            | 37 |
| 2.7. 地域別エネルギーシステムの計画への適用                      | 39 |
| 2.7.1. 地域に適したシステムオプション検討の必要性                  | 39 |
| 2.7.2. 地域別エネルギーキャリア導入分析の課題                    | 41 |

### 第3章 エネルギーキャリア導入における地域別エネルギーシステムの計画の役割 \_\_\_\_\_ 43

|   |    |
|---|----|
| 3.1. 地域別エネルギーシステムの計画の位置づけ                       | 43 |
| 3.1.1. エネルギーキャリア導入に関連するエネルギーシステム分析<br>研究のレビュー   | 43 |
| 3.1.2. 地域エネルギーシステムの計画と化学プロセス設計との比較              | 53 |
| 3.1.3. 地域エネルギーシステムの計画主体                         | 55 |
| 3.2. 技術導入の社会変化プロセスにおける地域別<br>エネルギーシステムの計画の活用可能性 | 57 |

### 第4章 環境影響評価手法と地域別導入分析の統合 \_\_\_\_\_ 64

|   |    |
|---|----|
| 4.1. エネルギーシステムにおける気候変動以外の課題               | 64 |
| 4.2. 多様な環境影響評価の組み込み                       | 65 |
| 4.2.1. ライフサイクルインパクト評価                     | 65 |
| 4.2.2. 目標とスコープの設定                         | 67 |
| 4.2.3. 地域別エネルギーキャリア地産地消シミュレーション<br>モデルの拡張 | 69 |
| 4.3. 評価結果                                 | 71 |
| 4.3.1. 保護領域ごとのLCAの結果                      | 71 |
| 4.3.2. LIME indexによるLCA結果                 | 77 |
| 4.4. 考察                                   | 81 |
| 4.4.1. 排出場所の変化の影響                         | 81 |
| 4.4.2. 多様な環境影響分析の課題                       | 83 |

### 第5章 社会経済因子と導入効果の突合による       エネルギーキャリア地域適性の分析 \_\_\_\_\_ 85

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 5.1. 分析手法                   | 85  |
| 5.1.1. 地域適性の分析アプローチ         | 85  |
| 5.1.2. カテゴリと指標候補            | 87  |
| 5.1.3. ケーススタディ              | 95  |
| 5.2. 評価結果                   | 99  |
| 5.3. 結果の解釈と応用可能性            | 105 |
| 5.3.1. 地域の優先順位付け            | 105 |
| 5.3.2. 地域別のエネルギーキャリア導入戦略立案  | 106 |
| 5.4. 分析手法の有効性と課題            | 109 |
| 5.4.1. 地域区分                 | 109 |
| 5.4.2. エネルギーキャリア導入の社会経済的導入力 | 109 |
| 5.4.3. エネルギーキャリア導入に向けて      | 111 |

|  |     |
|--|-----|
| 第 6 章 地域エネルギーシステムの計画ワークショップ                  | 113 |
| 6.1. ワークショップの設計                              | 113 |
| 6.1.1. ワークショップの概要                            | 113 |
| 6.1.2. ワークショップの内容と方法                         | 116 |
| 6.2. 結果                                      | 119 |
| 6.2.1. 事前アンケート                               | 119 |
| 6.2.2. ワークショップ                               | 127 |
| 6.3. 計画に基づくエネルギーキャリア導入活動                     | 132 |
| 第 7 章 エネルギーキャリア導入に向けた地域別<br>エネルギーシステムの計画支援   | 139 |
| 7.1. 特定地域でのエネルギーシステムの計画                      | 139 |
| 7.2. 地域別エネルギーシステムの計画に基づくエネルギーキャリア<br>導入メカニズム | 146 |
| 第 8 章 結論と展望                                  | 155 |
| 8.1. 結論                                      | 155 |
| 8.2. 展望                                      | 160 |
| Nomenclature                                 | 163 |
| Abbreviations                                | 166 |
| 参考文献   | 169 |
| 論文業績   | 185 |
| 謝辞   | 186 |
| Appendix                                     |     |
| A. 地域別エネルギーキャリア導入分析のパラメータと地域のデータ             |     |
| B. 多様な環境影響に関する地域別導入分析のパラメータと評価結果             |     |
| C. ワークショップ参加者の経験に関する事前アンケート結果                |     |

# 第1章 序論

---

## 1.1. エネルギーシステムの抱える課題とエネルギー

### キャリアの利用

気候変動の科学的な検証が進み、豪雨や酷暑、干ばつ等の気候変動に関連する問題が徐々に顕在化してきた (IPCC, 2018) ことから、化石燃料から脱却し再生可能エネルギーを主体としたエネルギーシステムへの変革が求められるようになってきている (United Nations, 2015)。太陽光および風力といった再生可能資源は、資源量が豊富であり、化石資源に比べて世界での偏在性が小さく、さらに太陽光発電および風力発電の製造・設置にかかる費用が急激に低下し、電源としての競争力が高まってきており、積極的な投資が進んでいる (IRENA, 2019a)。実際に近年、太陽光発電、風力発電の設備容量は急速に増えてきている (IRENA, 2020)。

太陽光発電や風力発電による再生可能エネルギーの利用が進む一方で、電力システムの柔軟性の課題 (Agora Energiewende, 2018) や電力セクター以外の脱炭素化の課題 (IEA, 2017) といった新たな課題も議論されるようになってきた。電力システムでは電力の需要と供給が常にバランスしている必要があるが、太陽光発電や風力発電のような天候に発電出力が左右される電源の割合が高くなると、需要に合わせた電力供給を行うことが困難になる。そのため、揚水発電や蓄電池等の電力貯蔵を用いた調整や、需要側を供給に合わせて制御するデマンドサイドマネジメント、送電網を強化し広域で連携することによる局所的なインバランスの全体での調整といった方法により供給側だけでなく電力システム全体で柔軟性を確保する必要性が指摘されている (Lund et al., 2015)。また、電力セクターでの CO<sub>2</sub> 排出は全体での CO<sub>2</sub> 排出の約 40% (IEA, 2017) であり、脱炭素化を進めるためには、産業や輸送セクターといった電力セクター以外での CO<sub>2</sub> 排出も削減しなくてはならない。

再生可能エネルギーから水素等のエネルギーキャリアに変換して利用することによって、電力システムの柔軟性の課題および電力セクター以外の脱炭素化の課題双方に対応できる。電力システムの柔軟性を向上させるための方法として、太陽光発電や風力発電といった変動性の再生可能エネルギー電源 (VRE: variable renewable energy) の出力に追従したエネルギーキャリアの製造を行うことで電力需要を制御することやエネルギーキャリアを介することでエネルギー貯蔵の役割を果たすこと、エネルギーキャリアを燃料として需要に合わせた発電を行うことが挙げられる。例えば、VRE の変動に追従して水電解による水素製造を行う検討 (IRENA, 2019b) やさらにその水素から有機ハイドライド製造する実証 (NEDO, 2020a) が行われている。エネルギー貯蔵の面では、様々な個別技術および比較研究がなされており、それぞれ蓄電容量やエネルギー密度、製造コスト等、多面的な特性を有する (Lund, 2015)。エネルギーキャリアを利用して制御可能な発電を行う技術として、水素やメタン、アンモニア等を燃料とした燃料電池やガスタービンが検討されている (NEDO, 2015)。エネルギーキャリアは発電だけでなく、産業セクターにおけるボイラーやコージェネレーションシステムによる熱供給の役割を果たすことができる (Dodds et al., 2015)。それ以外にも、石炭を大量に使用する鉄鋼産業において水素を利用するための検討も進められている (Karakaya et al., 2018)。輸送セクターでは、水素を使った燃料電池自動車も販売され、バス、トラック、電車、船舶等への適用も検討されている (E4tech, 2019)。水素から現在使われている燃料やそれに近い燃料を製造することも検討されている (IRENA, 2019b)。エネルギーキャリアを用いることで、再生可能エネルギーを多様な用途で利用可能になり、電力以外のセクターも連携して全セクターでの脱炭素化をするセクターカップリングを進めることができる。なお、化石燃料や電気エネルギーもエネルギーキャリアの一種として考えられるが、本論文では、再生可能エネルギーを中心的に利用するために新たに必要となるエネルギーキャリアという意味に限定して用いることとする。そのため、主に上述した水素やその派生のメタン、アンモニア、有機ハイドライドといったものをここでのエネルギーキャリアとして扱う。

## 1.2. エネルギーキャリア導入の現状

世界的にエネルギーキャリア導入が徐々に始まりつつあり、欧州 (FCH JU, 2019) やアメリカ (FCHEA, 2019)、中国 (NEDO, 2020b) 等、各国で導入のロードマップ策定や計画が立てられている。日本は現在、世界の中でも多くの社会課題に直面している課題先進国とも言われる状況であり (Komiyama, 2014)、温室効果ガス削減の観点以外にもエネルギーセキュリティや地域活性化等の観点からも分散型のエネルギーシステムへの変化が求められている。エネルギーキャリアとして水素およびその派生のキャリアの活用は、日本政府の水素基本戦略 (再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議, 2017) でも明記されている他、水電解 (NEDO, 2015)、液化水素 (Kawasaki Heavy Industries Ltd., 2020)、有機ハイドライド (Okada et al., 2006) 等関連する要素技術の開発も積極的に行っている。2つの自動車メーカーでの燃料電池自動車 (FCV) の販売 (Honda Motor Co. Ltd., 2016; Toyota Motor Corporation, 2014) に加え、水素ステーションの整備 (FCCJ, 2020)、家庭用燃料電池の販売 (ENE-FARM Partners, 2018) も積極的に行ってきている。

日本では石油等の地下資源が乏しいため、エネルギーセキュリティ向上のために原子力発電を重要な電源と位置づけて関連する技術開発や発電所の建設・運用を進めてきたが、2011年の東日本大震災での原子力発電所の事故以来、原子力発電の拡大を前提としたエネルギーセキュリティ確保は難しい。エネルギーセキュリティ確保のためには、国内の再生可能エネルギーおよび未利用資源の活用が重要である。また、人口減少・少子高齢化に伴い、特に地方での過疎化と経済的衰退の課題が顕在化してきており、地域の資源である分散型エネルギーを活用することが求められている (環境省, 2018)。エネルギーキャリアをグローバルに海外から調達することやローカルに地産地消することが議論されている (NEDO, 2018) が、ここでは分散型の再生可能資源を有効活用し、輸送・貯蔵のロスを削減し、地域経済の発展やエネルギーセキュリティ向上に貢献し得る地産地消でのエネルギーキャリア利用を対象として考える。

日本国内の地域においても多数の地域でエネルギーキャリア導入に関する方針が示されている。参考として、2017年10月時点で調査された都道府県及び政令指定都市で策定されている、水素関連の「計画・ビジョン・構想」について、岩手県の水素利活用構想 (岩手県, 2019a) でまとめられたものを Table 1-1 に示す。提示されている「計画・

ビジョン・構想」には、主として水素等のエネルギーキャリアの利用を進めていくという方針が掲げられており、場合によってはFCVの導入台数の目標等も示されている。これらの「計画・ビジョン・構想」に従い、実際に補助金の提供や勉強会の開催、自治体での公用車としてのFCV導入等が実施されている。国の水素基本戦略等を引用している地域も複数あり、国の方針に沿って導入を進めることを前提として目標を提示しているとも考えられる。水素の製造源や利用先に関して複数示されている場合もあるものの、エネルギーキャリアの製造と利用の量的バランスは明確に示されておらず、導入の結果としてCO<sub>2</sub>削減量等の導入効果も示されていない。つまり、地域として目指すエネルギーシステムにおける設備構成やエネルギーフロー、その結果としての環境影響等が不明確なままに方針が掲げられている。

エネルギーキャリアを導入するためには、その方針や目標値を掲げるだけでは不十分で、地域それぞれの特性に適した地域別のエネルギーシステムの計画が必要である。既存のエネルギーシステムは主に化石燃料を効率的に利用するために構築されてきたシステムであり、エネルギーキャリアの導入というのは、再生可能エネルギーを中心的に利用するためのエネルギーシステムへと変えるということである。ここで、エネルギーシステムというのは、エネルギーの製造、輸送、貯蔵、利用等のプロセスとエネルギーの流れとして捉えることができ、世界全体や国全体のマクロなシステムから、個別の設備や建物のミクロなシステムまで含めた広い概念として考える。エネルギーキャリアを導入する場合のエネルギーシステムの変化として、エネルギー源が変わるため、電解設備やバイオガス製造設備等の新たなエネルギーキャリアの製造設備が必要となり、エネルギーキャリアを貯蔵、輸送、配送するための設備も新たに必要となる。さらに、定置型の燃料電池や燃料電池自動車等のエネルギーの利用側でも新しく設備が必要となる。ここでは、エネルギーキャリア導入の定義を、単独のデバイスや設備を設置・配備することではなく、エネルギーキャリアの製造・輸送・貯蔵・利用といったエネルギーシステム全体でのインフラ構築やデバイスや設備の設置・配備が行われ、ある程度普及した状態になることとする。このようにエネルギーシステム全体を変化させることは容易ではなく、目指すべきエネルギーシステムを明確化して、計画的にエネルギーキャリア導入を進める必要がある。地域によってエネルギー資源やエネルギー需要の量や種類に違いがあるため、目指すべきエネルギーシステムは地域ごとに違うはずである。地域別の条件に応じて地域全体のエネルギーシステムを構成する設備や容量を明確にし、そのエ



エネルギーシステムにおける環境影響等のパフォーマンスを明らかにする地域別エネルギーシステムの計画が必要である。

Table 1-1 List of “plan, vision, and concept” on hydrogen energy presented by prefectures and ordinance-designated cities (adapted from 岩手県 (2019a))

| 団体名  | 名称   | 策定年  |
|------|--|------|
| 北海道  | 北海道水素社会実現戦略ビジョン                              | 2016 |
| 北海道  | 水素サプライチェーン構築ロードマップ                           | 2016 |
| 青森県  | 青森県エネルギー産業振興戦略                               | 2016 |
| 宮城県  | みやぎ水素エネルギー利活用推進ビジョン                          | 2015 |
| 茨城県  | いばらき水素戦略                                     | 2016 |
| 埼玉県  | 埼玉県燃料電池自動車・水素ステーション普及構想                      | 2015 |
| 東京都  | 水素社会の実現に向けた東京戦略会議（平成 26 年度）とりまとめ             | 2015 |
| 東京都  | 環境基本計画 2016（環境全般、一部水素）                       | 2016 |
| 神奈川県 | 神奈川の水素社会実現ロードマップ                             | 2015 |
| 山梨県  | 山梨県燃料電池自動車普及促進計画                             | 2014 |
| 岐阜県  | 岐阜県次世代エネルギービジョン                              | 2016 |
| 静岡県  | 水素ステーション整備方針                                 | 2016 |
| 愛知県  | 愛知県水素ステーション整備・配置計画                           | 2014 |
| 三重県  | 三重県新エネルギービジョン                                | 2016 |
| 滋賀県  | しがエネルギービジョン                                  | 2016 |
| 滋賀県  | 滋賀県次世代自動車普及方針                                | 2016 |
| 京都府  | 京都府燃料電池自動車（FCV）普及・水素 インフラ整備ビジョン～水素社会の実現に向けて～ | 2015 |
| 大阪府  | H2 Osaka ビジョン                                | 2016 |
| 大阪府  | 大阪府内における水素ステーション整備 計画                        | 2015 |
| 兵庫県  | 兵庫県燃料電池自動車普及促進ビジョン                           | 2014 |
| 鳥取県  | 鳥取県水素エネルギー推進ビジョン                             | 2016 |
| 島根県  | 再生可能エネルギー及び省エネルギーの 推進に関する基本計画                | 2015 |
| 徳島県  | 徳島県水素グリッド構想                                  | 2015 |
| 香川県  | 香川県燃料電池自動車普及促進構想                             | 2016 |
| 長崎県  | 長崎県水素戦略                                      | 2015 |
| 熊本県  | 熊本県燃料電池自動車普及促進計画                             | 2014 |
| 大分県  | 大分県新エネルギービジョン                                | 2016 |
| 鹿児島県 | 水素社会を見据えた取組方針                                | 2016 |
| 札幌市  | 札幌市燃料電池自動車普及促進計画                             | 2017 |
| 千葉市  | 千葉市地球温暖化対策実行計画改訂版                            | 2016 |
| 相模原市 | 相模原市水素エネルギー普及ビジョン                            | 2014 |
| 川崎市  | 水素社会の実現に向けた川崎水素戦略                            | 2015 |
| 横浜市  | 横浜市エネルギーアクションプラン                             | 2015 |
| 神戸市  | 水素スマートシティ神戸構想                                | 2015 |
| 広島市  | 広島市地球温暖化対策実行計画                               | 2017 |
| 広島市  | 広島カーボンマイナス 70                                | 2009 |
| 広島市  | 第 2 次広島市環境基本計画                               | 2016 |
| 広島市  | 第 5 次広島市基本計画                                 | 2009 |
| 北九州市 | 北九州ビジョン                                      | 2017 |
| 熊本市  | 熊本市低炭素都市づくり戦略計画                              | 2015 |

## 1.3. エネルギーキャリア導入の課題

### 1.3.1. エネルギーキャリア導入に関する既往の技術経済環境分析

分散型エネルギーシステムでは地域によってそのシステムの条件が異なるため、エネルギーキャリア導入は地域の特性を考慮して慎重に検討されるべきである。これまでにマクロ・ミクロ様々なスケールでエネルギーキャリア導入に関する分析が行われてきた (Agnolucci and McDowall, 2013)。マクロなスケールでの分析としては、国のエネルギーシステム全体のモデルによる技術経済的な分析に基づいてエネルギー構成、技術構成を決定し、エネルギーキャリアの導入量について分析したもの (例えば、IAE, 2019) や FCV の将来の市場規模に関するシナリオ分析を世界 (例えば、Gül et al., 2009) や日本 (例えば、Endo, 2007) で行ったものがある。これらの分析では、国の中の地域の条件は一樣であると仮定して分析が行われている。

ミクロなスケールの分析では、導入する技術システムオプションをモデル化し、特定の場所での気候条件や特定の建物の条件に基づいてシミュレーションを行い評価することでエネルギーキャリア導入の分析が行われている (例えば、Liu, 2013)。ミクロスケールでの分析は、特定の条件下でのエネルギーキャリア導入効果を明らかにすることができるが、別の条件での導入効果や、地域や国での全体としての導入効果との関連が不明確である。

中間的なスケールとして、地域でのエネルギーキャリアの導入分析については、マクロな国のスケールでの研究と比較して不足していることが指摘されている (Blanco and Faaij, 2018)。特定地域での導入分析の事例はあるが (例えば、Loisel et al., 2015)、特定の条件のみの分析であり、地域特性と結び付けられた分析ではないため、地域特性が導入効果に与える影響は明らかではない。FCV の導入に関する分析の一部では、エネルギーキャリアの製造および FCV に水素を供給する水素ステーションの場所を地域特性から分析した事例もあり、場所ごとのエネルギー資源と需要のポテンシャルとその場所間の距離から設備設置の最適化を行っている (De-León Almaraz et al., 2015)。別の事例として、地域別での再生可能エネルギーや CO<sub>2</sub> 排出量からメタンの製造ポテンシャルを分析した研究 (IEEJ, 2018) も行われている。これらの分析では、地域特性として主に資源

や需要のポテンシャルとしての大きさに焦点が当てられており、地域のエネルギー利用形態や既存インフラ等の地域のエネルギーに関する特性が必ずしも考慮されていない。また、対象とするエネルギーシステムの範囲が自動車利用に限定されている場合やエネルギーキャリアの製造だけに限定されている場合も多く、導入するシステムオプションごとの地域特性の影響も明らかではない。

単位製造量あたりのコストや CO<sub>2</sub> 排出量に関する研究も多く行われている (例えば、IEA, 2019; Valente et al., 2017) が、単体量あたりのパフォーマンスは異なる製造方法を比較するのに適するものの、エネルギーの利用側の条件を考慮することができない。エネルギーキャリアの導入においては、単独の設備ではなくエネルギーキャリアの製造、輸送、貯蔵、利用に至るまでのエネルギーシステム全体での設備を設置・運用することで機能を発揮できる。そのため、エネルギーキャリア導入が経済や環境に与える影響は、エネルギーシステム全体でとらえる必要がある。これまでの再生可能エネルギーの導入は既存システムの上に設備を追加するというものであった。例えば太陽光発電であれば、送電線や変電所等の電力システムインフラおよび消費者側での受電設備や電力使用機器といった既存システムを利用することで、発電設備および既存システムへの接続のための設備を導入するだけでその機能を発揮することができていた。新たなエネルギーキャリアを導入する場合、例えば FCV は、既存のインフラを活用することが通常できず、水素ステーションや水素を製造する設備および水素を輸送・貯蔵する設備等も合わせて導入しなければその機能を発揮することはできない。そのため、単独の技術だけを見てその導入を評価することは適切ではなく、システム全体でのエネルギーキャリアの導入効果を分析すべきである。なぜならエネルギーキャリアの製造方法やその種類、輸送経路や利用形態等、システムの各種条件によってエネルギーキャリアの導入効果は異なるためである。もう一つのエネルギーキャリアの導入に関する研究の課題は、多くの研究が経済性に着目しており、環境影響の評価が不十分なことである (Blanco and Faaij, 2018)。水素エネルギーシステムを対象としたライフサイクルアセスメント (LCA) のレビュー論文 (Valente et al., 2017) によると、多くの研究は Cradle/gate-to-gate の範囲、すなわち最終的なエネルギーの利用まで含まない範囲での評価であり、エネルギーシステム全体での環境影響の分析が不足している。自動車の LCA 等において一部 Cradle-to-grave (Well-to-wheel) の範囲、すなわち水素の製造から自動車の走行まで含めた環境影響の分析が行われている (例えば、Bauer et al., 2015) が、特定の地域のエネルギーシ

テムの条件を考慮したものではなく、水素の製造方法や自動車の走行距離等で一定の仮定をおいたシステム分析がされており、地域の資源や自動車の利用パターン等は考慮されていない。FCV を利用する場合、自動車走行時の環境負荷物質の排出が削減され、水素製造場所等での排出が増加するため、エネルギーシステム全体での排出場所の変化が起こる。NOx 排出による大気汚染等は局所的に影響するものであるため、地域におけるエネルギーキャリア導入効果は、グローバルに影響を及ぼす温室効果ガス (GHG) 排出とは異なるはずである。そのため、エネルギーキャリアの導入分析においては、局所的な影響も含めて多様な環境影響を分析すべきである。

### 1.3.2. 社会経済的な導入障壁

エネルギーキャリアの導入にあたっては、新たなインフラの構築が必要なことや設備コストが高いこと等の理由から容易に導入することができない (IRENA, 2019b)。エネルギーキャリアの導入は、エネルギーキャリアの製造、輸送、貯蔵、利用の一連の設備の導入が必要になるだけでなく、それらの原材料のサプライチェーンおよびメンテナンス等のサービス関連事業の変化、税金や規制等の制度の変化、ユーザーの行動変容や文化的変化のように社会システムまで含めて大きな変化を伴う。新しい技術が導入され、普及していくためには、システム全体で見た導入効果が優れているだけでは不十分で、サプライチェーンの構築や政策支援、制度設計、科学的知見の蓄積等の導入されるための環境が整えられていることが必要である (Geels, 2002)。

エネルギーキャリア導入における社会経済的な因子は地域によって異なり、その因子の違いがエネルギーシステムの変化の速度や過程に与える影響についていくつかの研究がなされてきている。地域ではなく二国間での比較研究ではあるが、ドイツとイギリスでの再生可能エネルギー導入に着目した研究では、主に市民社会の強さや産業構造が影響して、ドイツでは新規参入者による小規模な再生可能エネルギー導入が進んだのに対し、イギリスでは政府と強い関係性を持つ既存の強大なアクターが大規模な再生可能エネルギー導入を行ったという分析がなされた (Geels et al., 2016)。別の研究では、アメリカのニューヨーク州内の地域ごとの収入と住宅価格の中央値が電気自動車および PV のアーリーアダプター、すなわち普及の早い段階から導入を行う人の割合に相関があることを指摘した (Araújo et al., 2019)。これらの研究では過去の変化に対して社会経済因

子の影響を結び付けたが、気候条件等の地域特性による導入効果とともに社会経済因子の影響が分析されていない。中国の地域を対象とした研究では 12 の社会経済因子とこれまでのエネルギーの選択に相関があり、それが環境にも影響すると指摘している (Xing et al., 2017)。

地域の社会経済因子によってエネルギーキャリア導入の容易さは異なるため、導入効果だけでなく、そもそも導入しやすい環境であるのかを同時に評価し分析すべきである。たとえエネルギーキャリアの導入効果が高い地域であっても、導入するために投資を行う環境や政策的な支援の環境が整っていない場合、導入自体が困難となる可能性が高い。地域の社会経済因子と導入効果両方の評価に基づいて分析することで、優先的にエネルギーキャリア導入を進める地域の検討や地域の中での導入方法についての検討を支援できる可能性がある。

## 1.4. 本研究で取り組む課題

エネルギーキャリア導入のためには、地域特性に合わせたエネルギーシステムを構築するための地域別エネルギーシステムの計画が必要である。その際、エネルギーキャリア導入は、技術単独でその効果を分析すべきではなく、システム全体としてその導入による効果を分析する必要がある。エネルギーキャリアを導入するシステムの条件に影響する地域特性とエネルギーキャリア導入効果の定量的な関係性を明確にするための分析の必要性が既往の研究から示された。この分析手法を開発し、分析に基づいたエネルギーシステムの計画によりエネルギーキャリア導入を支援するために以下の研究課題に取り組む。

### **研究課題 (i) 地域特性とエネルギーキャリア導入効果の関係性の定量化**

エネルギーキャリアを導入して分散型のエネルギーシステムを構築する場合、導入する地域特性によってその導入効果は異なるはずである。エネルギーキャリア導入においては、エネルギーキャリアの製造から利用までのシステム全体の変化を伴うため、資源ポテンシャルだけでなく、エネルギー利用形態や既存のシステム条件といったエネルギーシステム全体に関わる地域特性と導入効果の関係を明らかにする必要がある。そのた

めに、地域別での評価により地域間比較を行うためのシミュレーションによる評価が必要である。

### **研究課題 (ii) 地域へのエネルギーキャリア導入の多様な環境影響の分析**

これまでのエネルギーキャリア導入に関する分析は主に経済性の分析に焦点が置かれており、環境面での知見が不足している。エネルギーキャリアを導入することで、主要な環境負荷物質の排出場所が変化するため、特に局所的な影響のある大気汚染等への導入の影響は気候変動とは異なるはずであり、局所的な影響も含めた多様な環境影響を分析すべきである。地域特性を考慮したエネルギーシステム全体での環境影響評価を行うために LCA とエネルギーキャリア導入分析を組み合わせることが有効であるが、その方法は確立されていない。LCA に基づく多面的な環境影響評価を組み込んで導入分析を行うことで、エネルギーキャリア導入においてこれまで想定されていなかった問題や新たな価値を検討するべきである。

### **研究課題 (iii) 地域別社会経済因子を考慮した導入分析**

エネルギーキャリア導入はエネルギーシステム全体を変えるものであるため、インフラ構築やコスト面で大きな課題があり、環境面で導入効果の高いシステムであったとしても、必ずしも導入できるわけではない。地域によって市場の状況や政策的な支援状況等、社会経済因子には違いがあり、その違いによりエネルギーキャリア導入のしやすさは異なるはずである。地域別でのエネルギーキャリア導入効果と社会経済因子による導入のしやすさを突合させて定量的に評価する方法が必要である。

### **研究課題 (iv) エネルギーキャリア導入における地域別エネルギーシステムの計画の役割の明確化**

地域特性に応じて適切なエネルギーシステムを計画する際に、誰が何のために行うものなのかが必ずしも明確ではない。地域別エネルギーシステムの計画の、マクロな国スケールでのシステムの計画やマイクロな個別設備のスケールでのシステム設計との役割の違いを明確にし、エネルギーキャリア導入の社会全体でのプロセスにおける活用方法を明らかにする必要がある。

## **研究課題 (v) 地域スケールでのエネルギーシステムの計画スキームの具体化**

エネルギーキャリアの導入においては、設備のシステム設計や設置・配備だけでなく政策支援や資金調達等、多様なアクターにより多様な活動が行われる。地域スケールでのエネルギーシステムの計画を主体的に行うアクターは明確ではなく、計画に基づいて行われる活動も明らかではない。計画スキームを具体化するために、地域スケールでのエネルギーシステムの計画およびそれに基づく多様な導入活動について、アクターの候補とその具体的な活動を明らかにする必要がある。

## **研究課題 (vi) 地域別エネルギーシステムの計画によるエネルギーキャリア導入支援方法の明確化**

地域別エネルギーキャリア導入分析に基づいてシステムを計画した際に、そのまま技術を組み合わせれば導入ができるというわけではなく、社会全体でエネルギーキャリア導入に向けた活動を行う必要がある。目的を理解して地域別エネルギーシステムの計画を行い、効果的なエネルギーキャリア導入につなげるために、地域別エネルギーシステムの計画に基づいてエネルギーキャリア導入を支援する仕組みを明確にする必要がある。

## **1.5. 研究目的と本論文の構成**

本研究では、エネルギーキャリア導入に資する地域別エネルギーシステムの計画方法を提示することを目的とする。そのために、地域別でのエネルギーキャリア導入分析を行うためのシミュレーションモデルを構築し、地域別エネルギーシステムの計画の導入における役割と導入のための各種活動を支援する仕組みを明確化する。

本論文は全 8 章で構成される。Figure 1-1 に本論文の構成を示す。

第 2 章では、研究課題 (i)への取り組みとして、地域別のエネルギーキャリア導入効果を分析するためのエネルギーキャリアの地産地消シミュレーションモデルを構築する。地域別エネルギーシステムの計画自体を議論する前に、計画のための分析から分かることや課題を明らかにすることで、それを用いた計画の役割や活用方法について具体

的に議論できるようにする。日本の地域を対象として、エネルギーキャリアの地産地消シミュレーションによってシステムオプションごとに導入効果を評価し、地域間比較を行うことで、地域特性に応じてエネルギーキャリア導入効果に差異があることを定量的に示す。この分析によって地域特性とエネルギーキャリア導入効果の定量的な関係、およびシステムオプションによる地域特性の影響の違いを明らかにする。

第3章では、研究課題 (iv) に取り組むために、第2章で開発した具体的な分析手法に基づいて、エネルギーキャリア導入において地域別エネルギーシステムの計画の果たす役割を分析する。そのために、エネルギーキャリア導入に関連する既往のエネルギーシステム分析の研究をレビューして、第2章での分析を中間的な地域スケールとした際に、マクロな国スケールや個別設備を導入するマイクロな区画スケールとのシステム計画・設計の違いを明確にする。さらに、化学プロセス設計と地域スケールでのエネルギーシステムの計画の比較から主要な計画・設計問題の違いを明らかにする。続いて、過去のエネルギーシステムの変化を社会全体での変化として捉えた社会学の技術導入プロセスのモデルから、地域別エネルギーシステムの計画の活用可能性を考察する。

第4章では、研究課題 (ii) の多様な環境影響分析を行うために、地産地消シミュレーションモデルを拡張し、LCA との統合を試みる。気候変動以外の局所的な影響を含む環境影響を定量化し、エネルギーキャリア導入におけるグローバルな環境影響と局所的な環境影響での評価結果への違いを明らかにし、地域にとっての気候変動以外の導入の価値と課題について考察する。

第5章では、研究課題 (iii) に挙げた地域別でのエネルギーキャリア導入効果と社会経済因子による導入のしやすさを突合させた定量的評価に基づく分析手法の開発を試みる。地産地消シミュレーションによる導入効果の分析に加えて、地域の社会経済因子による導入のしやすさについて統計情報を用いて評価することで、エネルギーキャリア導入の優先順位付けや地域ごとの戦略立案への利用を考察する。

第6章では、地域スケールでのエネルギーシステムの計画に関わる可能性のあるアクター候補者を集めたワークショップを実施し、地域内外のアクターが協働してエネルギーシステムの計画を行うスキームについて議論することで、研究課題 (v) で示した、地域スケールでのエネルギーシステムの計画およびそれに基づく多様な導入活動について、アクターの候補とその活動を具体化する。



第7章では、研究課題 (vi) に挙げた地域別エネルギーシステムの計画によるエネルギーキャリア導入支援方法を明確化する。前章までに得られた結果から、地域別エネルギーシステムの計画およびそれに基づく導入の各種活動の相互作用を明らかにして、地域別エネルギーシステムの計画によって、多層的にエネルギーキャリア導入を支援できることを示す。計画による導入支援の全体像を仕組みとして示すことで、導入に関わる多様なアクターにとってのシステムの計画および導入の各種活動を行う目的を明確化する。

最後に、第8章で全体での結論と展望を述べる。

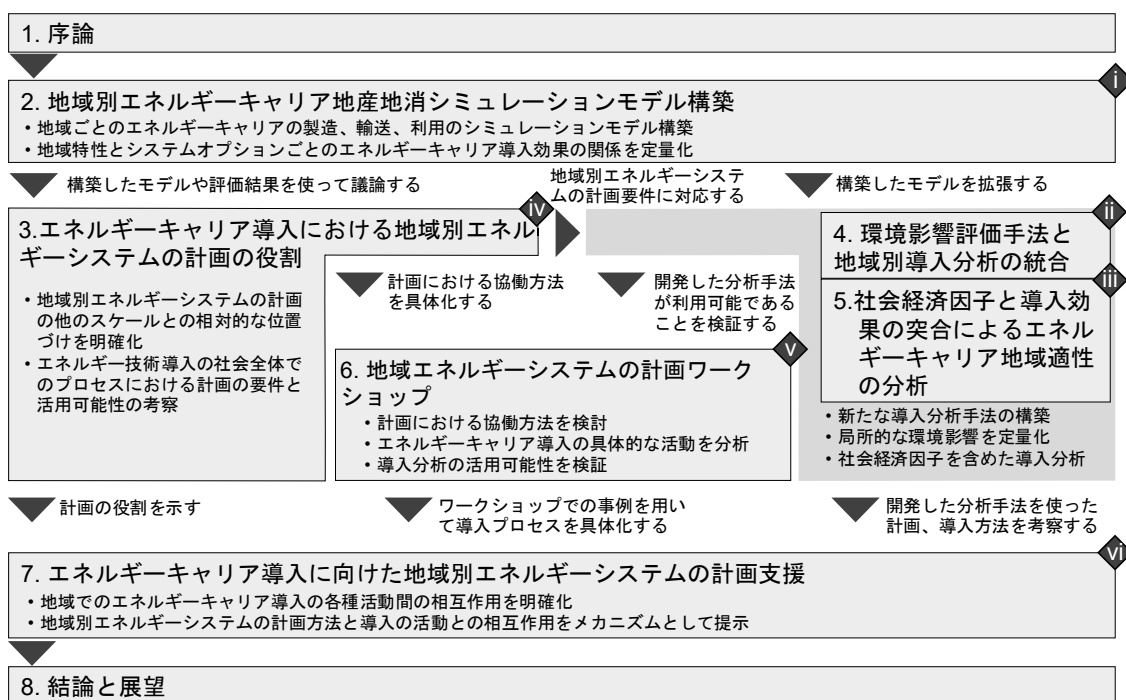


Figure 1-1 Structure of the thesis

## 第2章 地域別エネルギーキャリア地産地消 シミュレーションモデルの構築

---

本章では、地域に適したエネルギーシステムを計画するための地域別エネルギーキャリア導入分析に用いる地産地消シミュレーションモデルを構築する。資源ポテンシャルだけでなく、エネルギー利用形態や既存のシステム条件といったエネルギーシステム全体に関わる地域特性とエネルギーキャリアの導入効果の関係を明らかにするために、地域特性をパラメータとして地域別のエネルギーキャリアの製造、輸送、利用をシミュレーションできるモデルを構築し、地域間での比較を行うことで、導入効果に影響する地域特性およびその影響の大きさを定量化する。また、エネルギーキャリア製造および利用方法の異なる複数のシステムオプションの違いによる地域特性の影響の違いを明らかにする。

### 2.1. エネルギーキャリア地産地消シミュレーションモデル の要件定義

エネルギーキャリア地産地消シミュレーションモデルで対象とするシステムの範囲は、エネルギーシステム全体としての導入効果を分析するために、エネルギーキャリアの製造から利用に至るまでの範囲とする。地域の範囲を定めて、その地域の範囲内でエネルギーキャリアを製造し、利用する地産地消のエネルギーシステムを検討する。地産地消とするのは、再生可能資源は分散型の資源であり、地理的に近い資源の活用はエネルギー輸送における損失が少なく、地域経済やエネルギーセキュリティ、防災等の観点からも有利であるため、地域資源を有効活用することに着目するためである。エネルギーキャリアの利用の仕方として、地域間輸送や国際的な輸出入もあり得るが、ここでは

地産地消を前提とした導入に着目して分析を行う。エネルギーシステムを製造、輸送、利用の3つのパートに分けて考える。エネルギーキャリアの製造では、再生可能エネルギーからの製造以外にも化石資源からの製造もシステムオプションとして検討する。エネルギーキャリアの導入初期においては、天然ガスの水蒸気改質による水素製造のように、確立した技術でかつ比較的安価な技術が活用されることがあるためである。エネルギーキャリアの輸送やそのための変換処理においても設備が必要となり、環境性や経済性にも影響を与えるためこれらのプロセスもモデル化する。エネルギーキャリアの利用では、主要な利用分野である、自動車での利用とコージェネレーションによる電力・熱の利用を対象とする。既存のエネルギーシステムの条件も導入分析における重要な因子であるため、新たに導入される技術が既存システムを代替するという仮定の下でモデルを構築する。

シミュレーションはシステム全体のエネルギーフローを計算し、そのバランスに基づいてシステムを構成する設備の容量・数量を決定する。地域特性として、再生可能エネルギーの資源量、需要量、需要パターンおよび既存システムに関する条件を考慮する。需要パターンというのは、設備の利用率や電力と熱の比率等、需要量だけで表されない需要の特性であり、既存システムに関する条件というのは、既存の電力システムの電源構成や都市ガスインフラの利用可否等である。地域の自然・気候条件は再生可能エネルギーの資源量や需要量、需要パターンに影響し、人口や生活スタイル等の社会的条件は需要量、需要パターン、既存システムに影響する。また、異なる地域区分での評価を行い、地域区分が導入効果に与える影響を明確化できるようにする。評価指標としてはライフサイクル GHG 排出 (LC-GHG) の変化量を用いる。この理由として、エネルギーキャリア導入の主要な目的として気候変動の緩和があり、その目的のための導入効果を分析する必要があるためである。その他の指標に関しては、第4、5章において議論することとする。

## 2.2. 地域別エネルギーキャリア導入分析の手順

モデル構築を含めた地域別エネルギーキャリア導入分析の手順を Figure 2-1 に示す。手順は、準備 (P)、計算 (C)、可視化 (V)、および解釈 (I) の4つのフェーズからなる。

最後の解釈のフェーズでは、技術導入のための意思決定支援について提案する。

準備フェーズは地域特性と技術情報の主に 2 つのパートに分けられ、(P1) 利用可能なデータの取得、(P2) 地域区分の定義、(P3) データ構造化、(P4) 技術情報の取得、(P5) 構成技術の特定、(P6) モデル構築、(P7) パラメータ設定の 7 つのステップで構成される。ステップ (P1) では、人口、地域、再生可能資源、最終エネルギー需要等の地域データを政府の公開している統計や企業の公開している報告書等の入手可能なデータソースから取得する。ステップ (P2) では、この分析における地域の境界を決定するために地域区分を定義する。都道府県や市町村等の行政区分だけでなく、気候区分や機能区分も地域分類方法として採用し得るが、地域区分によってはデータの入手が困難になる可能性がある。ステップ (P3) において、取得した地域データを、定義された地域区分に基づいて変換を行う。必要なデータは必ずしも直接得られるわけではないので、人口等の地域固有の条件との関係から推定する。ステップ (P4) では、カタログ、報告書、特許、学術雑誌等から技術情報を取得する。可能性のある技術オプションを設定し、変換効率やライフサイクルインベントリ等の情報を収集する。ステップ (P5) では、導入技術とエネルギーパスを定義し、エネルギーシステムの構成を特定する。ステップ (P6) では、エネルギーシステムを評価するために、エネルギーキャリア地産地消シミュレーションモデルを構築する。ステップ (P7) では、上述のステップからの情報に基づいて、導入技術とその特性、技術導入量といったシミュレーションにおける入力パラメータを設定する。

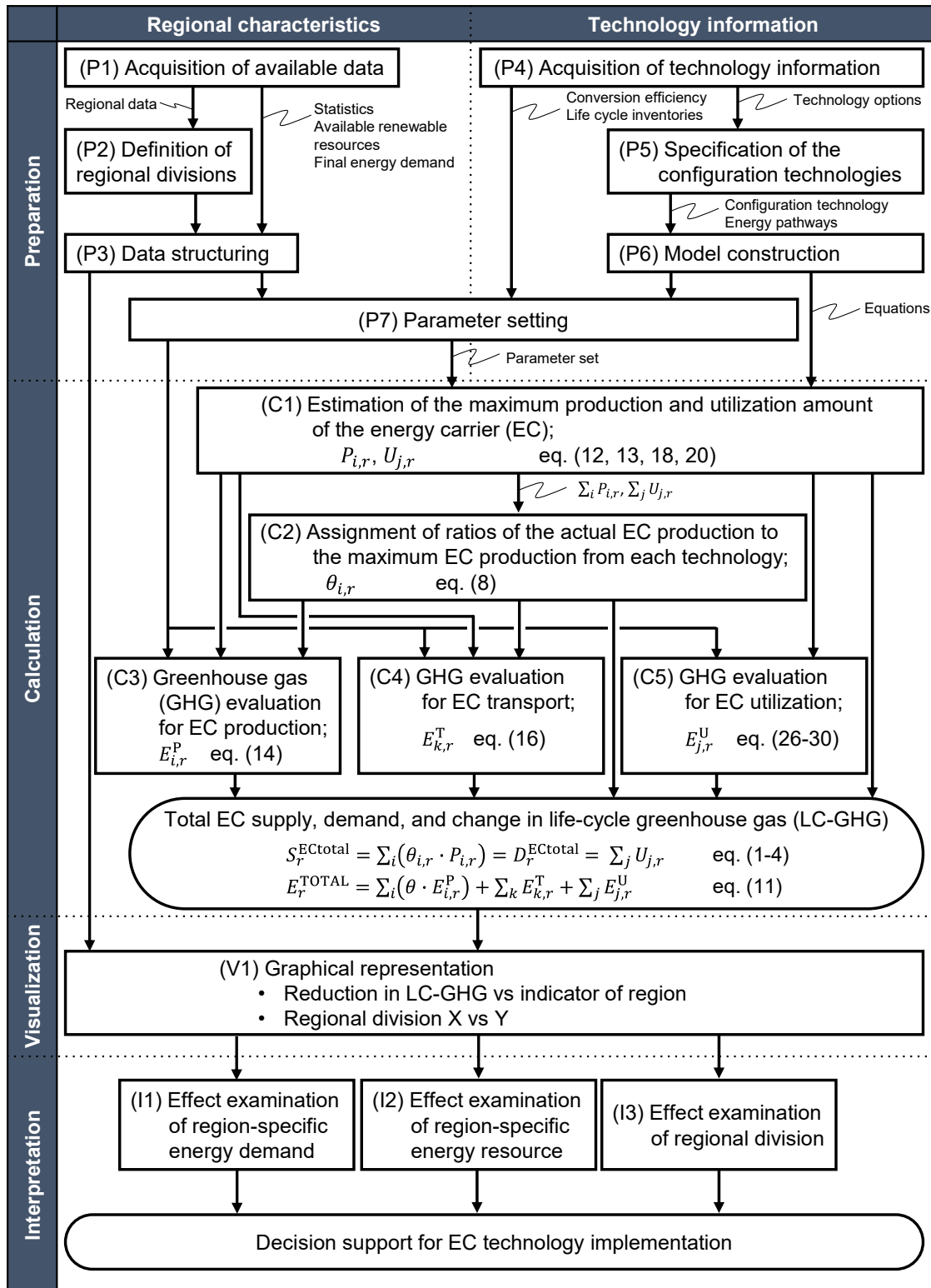


Figure 2-1 Procedure for region-specific analysis of energy carrier (EC) implementation with simulation of local production for local consumption of energy carrier. Adapted from [i].

計算フェーズは5つのステップから構成され、エネルギーキャリアの供給量および需要量、LC-GHGの削減量の計算結果が出力情報となる。ステップ(C1)では、構築した地産地消モデルおよびパラメータ設定に基づいて、技術および地域ごとにエネルギーキャリア製造能力および利用量をそれぞれ推算する。ステップ(C2)では、地域ごとにエネルギーキャリア製造能力とエネルギーキャリア利用量のバランスに基づいて、エネルギーキャリア製造能力に対する実際のエネルギーキャリア製造量の比率を各技術に割り当てた。ステップ(C3-5)では、技術オプションおよびここまでの推算に基づいて、エネルギーキャリア製造、輸送、利用におけるGHG排出量について従来のエネルギーシステムとの差を計算する。計算フェーズでの出力情報は、各技術のエネルギーキャリアの実際の製造量と利用量、エネルギーキャリアの総供給量、エネルギーのサプライチェーンを通じたLC-GHG排出量の変化等のエネルギーシステムに関するものとなる。

可視化フェーズでは、各地域のLC-GHGの削減について人口、面積、人口密度等の地域の指標に対する関係を可視化する。続く解釈フェーズでは、地域別エネルギー需要(I1)、地域別エネルギー資源(I2)、地域区分(I3)という3つの観点から可視化された結果の解釈を行う。意思決定支援のために、技術導入に大きく影響する地域の要因について検討する。

## 2.3. エネルギーキャリア地産地消モデルの構築

### 2.3.1. 需給バランス

エネルギーシステムにおける年間のエネルギーキャリアの需給およびそれに伴うLC-GHG排出量は、地産地消のバランスを表すモデルの式によって記述される。年間でのエネルギーキャリア需給バランスが一致するという条件の下、エネルギーキャリア技術を新たに導入することでエネルギー需要に対して一定の割合でエネルギーキャリアを利用すると仮定し、そのエネルギーキャリア需要を満たすだけのエネルギーキャリア供給を行うこととした。すなわち、次の式のように表すことができる。

$$S_r^{\text{ECtotal}} = D_r^{\text{ECtotal}} \quad (2-1)$$

ここで、下付  $r$  は地域を表す。全ての技術からの総エネルギーキャリア供給量  $S_r^{\text{ECtotal}}$  は、すべての技術での総エネルギーキャリア需要量  $D_r^{\text{ECtotal}}$  に等しくなる。供給量  $S_r^{\text{ECtotal}}$  と需要量  $D_r^{\text{ECtotal}}$  はそれぞれ次の式で表される。

$$S_r^{\text{ECtotal}} = \sum_{i=1}^m \theta_{i,r} \cdot P_{i,r}^{\text{EC}} \quad (2-2)$$

$$D_r^{\text{ECtotal}} = \sum_{j=1}^n U_{j,r}^{\text{EC}}, \quad (2-3)$$

$$0 \leq \theta_{i,r} \leq 1, \quad (2-4)$$

エネルギーキャリア製造技術  $i$  における年間のエネルギーキャリア製造能力を  $P_{i,r}^{\text{EC}}$  とし、需要量と供給量を一致させるためにエネルギーキャリア製造量を調整する。その調整のために、製造能力  $P_{i,r}^{\text{EC}}$  に対する実際の製造量の比率  $\theta_{i,r}$  を係数とする。また、エネルギーキャリア需要量  $D_r^{\text{ECtotal}}$  は、エネルギーキャリア利用技術  $j$  におけるエネルギーキャリアの利用量  $U_{j,r}^{\text{EC}}$  の合計となる。エネルギーキャリアの製造と利用の技術の数はそれぞれ  $m$  と  $n$  だけあるとすると、エネルギーキャリア製造技術を単位エネルギーキャリア製造あたりの GHG 排出量  $\phi_{i,r}^{\text{production}}$  が小さい順に並べる。

$$i \in \{I: 1, 2, \dots, m\} \quad (2-5)$$

$$j \in \{J: 1, 2, \dots, n\} \quad (2-6)$$

$$\phi_{i,r}^{\text{production}} \leq \phi_{i+1,r}^{\text{production}} \quad (1 \leq i \leq m-1). \quad (2-7)$$

地域  $r$  における各エネルギーキャリア製造技術  $i$  からのエネルギーキャリア製造能力  $P_{i,r}^{\text{EC}}$  に対する実際のエネルギーキャリア製造量の比  $\theta_{i,r}$  は、以下の式によって定義される。

$$\theta_{i,r} = \begin{cases} 1 & (i < q) \\ 0 & (i > q) \\ (D_r^{\text{ECtotal}} - \sum_{i=1}^{q-1} P_{i,r}^{\text{EC}}) / P_{i,r}^{\text{EC}} & (i = q) \end{cases}, \quad (2-8)$$

ここで、 $q$  は以下のいずれかの条件を満たす整数である。

$$\sum_{i=1}^{q-1} P_{i,r}^{EC} \leq D_r^{ECtotal} < \sum_{i=1}^q P_{i,r}^{EC} \quad (2 \leq q \leq m) \quad (2-9)$$

$$P_{1,r}^{EC} > D_r^{ECtotal} \quad (q = 1) \quad (2-10)$$

単位エネルギーキャリア製造あたりの GHG 排出量  $\phi_{i,r}^{production}$  が最も少ない技術 ( $i = 1$ ) から順に、エネルギーキャリア製造能力分だけのエネルギーキャリアを製造する (式(2-8)、 $i < q$  のとき)。技術  $i = 1$  からの製造エネルギーキャリアの総量が総需要量  $D_r^{ECtotal}$  を超えたとき、技術の数は  $q$  となる (式(2-9))。  $q$  番目の製造技術は、エネルギーキャリアの総需要量と総供給量が一致するように、製造能力に対してある程度抑制してエネルギーキャリアを製造する (式(2-8)、 $i = q$  のとき)。単位エネルギーキャリア製造あたりの GHG 排出量がより高い技術は、エネルギーキャリアを全く製造しない、すなわち、実際のエネルギーキャリア製造量がゼロである (式(2-8)、 $i > q$  のとき)。この前提として、考慮されるすべての技術 ( $i = 1, \dots, m$ ) からのエネルギーキャリア製造可能量の合計は総需要量  $D_r^{ECtotal}$  よりも大きくなくてはならない。

エネルギーサプライチェーン全体を通した LC-GHG 排出変化量  $E_r^{total}$  は、エネルギーキャリアの製造、輸送、利用の 3 つの段階で構成され、次の式のように表される。

$$\begin{aligned} E_r^{total} &= E_r^{Ptotal} + E_r^{Ttotal} + E_r^{Utotal} \\ &= \sum_{i=1}^m (\theta_{i,r} \cdot E_{i,r}^P) + \sum_{k=1}^l (E_{k,r}^T) + \sum_{j=1}^n (E_{j,r}^U), \end{aligned} \quad (2-11)$$

ここで、 $E_r^{Ptotal}$ 、 $E_r^{Ttotal}$ 、 $E_r^{Utotal}$  は、それぞれ地域  $r$  でのエネルギーキャリアの製造、輸送、利用における全ての技術の総 GHG 排出変化量、 $E_{i,r}^P$ 、 $E_{k,r}^T$ 、 $E_{j,r}^U$  は、それぞれエネルギーキャリアの製造技術  $i$ 、輸送技術  $k$ 、利用技術  $j$  における GHG 排出変化量を表す。下付き  $k$  および  $l$  は、それぞれエネルギーキャリア輸送の技術種類およびその数を表す。

### 2.3.2. エネルギーキャリア製造

エネルギーキャリア製造能力  $P_{i,r}^{EC}$  は、化石燃料を利用する既存設備、再生可能エネルギーを利用する新規設備、化石燃料利用する新規設備の 3 つの分類のエネルギーキャ



リア製造設備があり、エネルギーキャリア技術の導入の初期段階では、例えば石油精製および鉄鋼生産からの副生水素の利用等、既存設備で製造されるエネルギーキャリアが利用されることを想定する。エネルギーキャリアの利用が十分に普及すると、再生可能エネルギーおよび化石燃料からのエネルギーキャリア製造が、既存設備からのエネルギーキャリア製造の後に開始されることを想定する。それぞれのエネルギーキャリアの製造能力  $P_{i,r}^{EC}$  はエネルギーキャリア製造ポテンシャル  $P_{i,r}^{EC*}$  に導入比率  $\alpha_i$  を乗じることで計算される。

$$P_{i,r}^{EC} = \alpha_i \cdot P_{i,r}^{EC*} \quad (2-12)$$

製造ポテンシャル  $P_{i,r}^{EC*}$  は調査報告書からのデータや入手可能なデータから複合的に推定することを想定する。

エネルギーキャリア製造に起因する GHG 排出量  $E_{i,r}^P$  は、技術  $i$  からのエネルギーキャリア製造量と単位エネルギーキャリア製造あたりの GHG 排出量  $\phi_{i,r}^{\text{production}}$  との積として計算される。

$$E_{i,r}^P = \phi_{i,r}^{\text{production}} \cdot P_{i,r}^{EC} \quad (2-13)$$

### 2.3.3. エネルギーキャリア輸送

製造されたエネルギーキャリアは、需要のある場所で利用するために輸送される。輸送されるエネルギーキャリアの総量は次の式のように製造されたエネルギーキャリアの総量に等しい。

$$\sum_{k=1}^l (\delta_k \cdot T_{k,r}^{EC}) = \sum_{i=1}^m (\theta_{i,r} \cdot P_{i,r}^{EC}), \quad (2-14)$$

ここで、 $\delta_k$  は輸送技術  $k$  を選択するための係数であり、 $T_{k,r}^{EC}$  は輸送技術  $k$  によって輸送されるエネルギーキャリアの量である。全ての輸送技術から 1 つが選択され ( $\delta_k = 1$ )、他の輸送技術は使用されない ( $\delta_k = 0$ )。

エネルギーキャリア輸送から生じる GHG 排出量  $E_{k,r}^T$  は、2 つの項から成る。1 つは輸送距離  $TD$  に比例する項で、もう 1 つは  $TD$  に依存しない項であり、別のエネルギー

一キャリアへの変換やトラックへのエネルギーキャリアの積み降ろし等に関連する排出量である。

$$E_{k,r}^T = \delta_k \cdot (\phi_k^{\text{transportD}} \cdot T_{k,r}^{\text{EC}} \cdot TD + \phi_k^{\text{transportND}} \cdot T_{k,r}^{\text{EC}}), \quad (2-15)$$

ここで、 $\phi_k^{\text{transportD}}$  は輸送距離に依存する項における単位エネルギーキャリア輸送量および単位輸送距離あたりの GHG 排出係数であり、 $\phi_k^{\text{transportND}}$  は輸送距離には依存しない項における単位エネルギーキャリア輸送量あたりの GHG 排出係数である。 $TD$  はモデルの入力パラメータとして設定する。

### 2.3.4. エネルギーキャリア利用

輸送および定置型への用途をエネルギーキャリアの利用技術として想定する。例えば、FCV のようなエネルギーキャリアを利用する自動車 (ECV)、ならびに燃料電池やガスエンジンのようなエネルギーキャリアを利用するコージェネレーションシステム (ECCG) である。利用技術  $j$  の ECV の導入台数を  $N_{j,r}$  とすると、同じ台数分の従来型自動車 (CnV) を置き換えて導入することを想定する。ECV の導入台数  $N_{j,r}$  は、置き換えることができる潜在的な CnV の台数の合計  $N_r^{\text{ECV}*}$  に対する導入率  $\alpha_j$  によって決定される。

$$N_{j,r} = \alpha_j \cdot N_r^{\text{ECV}*}, \quad (2-16)$$

ここで  $\alpha_j$  はモデルの入力パラメータとして設定され、地域間で同じ導入率として設定することで、技術導入効果の地域による違いを分析する。ECV でのエネルギーキャリア利用量  $U_{j,r}^{\text{EC}}$  は、単位走行距離あたりのエネルギーキャリア利用量、つまり燃費  $\psi_j^{\text{EC}}$  および 1 台あたりの年間走行距離  $L_{j,r}$ 、導入される ECV の台数  $N_{j,r}$  によって決まる。

$$U_{j,r}^{\text{EC}} = \psi_j^{\text{EC}} \cdot L_{j,r} \cdot N_{j,r} \quad (2-17)$$

導入される ECCG の数は、ECCG を設置することができる候補地の総数  $N_r^{\text{ECCG}*}$  に対する技術  $j$  の導入率  $\alpha_j$  を設定することによって決定される。

$$N_{j,r} = \alpha_j \cdot N_r^{\text{ECCG}*}, \quad (2-18)$$

ここで $\alpha_j$ はモデルの入力パラメータとして設定される。ECCG の技術  $j$  におけるエネルギーキャリア利用量は、投入されるエネルギーキャリアの発熱量に対する発電効率  $\eta_j^{\text{elec}}$ 、設備利用率  $\beta_{j,r}$ 、ECCG 一台あたりの発電容量  $c_j^{\text{elec}}$ 、ECCG の導入台数  $N_{\text{ECCG},r}$  によって次のように決定される。

$$U_{j,r}^{\text{EC}} = 1/\eta_j^{\text{elec}} \cdot \beta_{j,r} \cdot c_j^{\text{elec}} \cdot N_{j,r}, \quad (2-19)$$

ここで、上付きの elec は電気 (electricity) を意味する。ECCG の設備利用率 $\beta_{j,r}$ は、設備容量に対して 100%の付加率で 1 年間運転を継続した場合の潜在的な発電量に対する実際の年間発電量の比率として定義する。次の式に従って、電力と熱の生成がそれぞれの需要を超えないという制約の下で、各地域で可能な限り高い設備利用率となるようにする。

$$0 \leq \beta_{j,r} \leq 1 \quad (2-20)$$

$$\sum_j P_{j,r}^{\text{elec}} \leq D_r^{\text{elec}} \quad (2-21)$$

$$\sum_j P_{j,r}^{\text{heat}} \leq D_r^{\text{heat}}, \quad (2-22)$$

ここで  $P_{j,r}^{\text{elec}}$  と  $P_{j,r}^{\text{heat}}$  は、それぞれ ECCG 技術  $j$  から発生した電力と熱の量で、 $D_r^{\text{elec}}$  と  $D_r^{\text{heat}}$  はそれぞれ電力と熱の最終エネルギー需要である。ECCG の発電量  $P_{j,r}^{\text{elec}}$  と発熱量  $P_{j,r}^{\text{heat}}$  は次のように決定される。

$$P_{j,r}^{\text{elec}} = \beta_{j,r} \cdot c_j^{\text{elec}} \cdot N_{j,r} \quad (2-23)$$

$$P_{j,r}^{\text{heat}} = \eta_j^{\text{heat}} / \eta_j^{\text{elec}} \cdot P_{j,r}^{\text{elec}} \quad (2-24)$$

ここで  $\eta_j^{\text{heat}}$  は ECCG 技術  $j$  の熱生成の効率であり、発電効率に対する比と発電量から熱の生成量を計算する。

エネルギーキャリア利用技術を導入し、既存技術を代替することによる GHG 排出量への影響は、GHG 排出の増加項  $E_{j,r}^{\text{Uincrease}}$  と減少項  $E_{j,r}^{\text{Udecrease}}$  の差によって評価する。

$$E_{j,r}^U = E_{j,r}^{U\text{increase}} - E_{j,r}^{U\text{decrease}}. \quad (2-25)$$

GHG 排出の増加は、導入されるエネルギーキャリア関連の装置の製造および利用によって引き起こされ、GHG 排出の減少は従来装置の代替に伴う製造および利用の削減に起因する。例えば ECV は、ガソリンを利用する乗用車において CnV を代替するものとして利用される。そのような代替による GHG 排出の増加と減少は、それぞれの自動車の製造段階と利用段階から構成される。

$$E_{j,r}^{U\text{increase}} = \phi_j^{\text{manufacture}} \cdot N_{j,r}/\tau_j + \phi_j^{\text{use}} \cdot \psi_j^{\text{EC}} \cdot L_{j,r} \cdot N_{j,r} \quad (2-26)$$

$$E_{j,r}^{U\text{decrease}} = -(\phi_{\text{CnV}}^{\text{manufacture}} \cdot N_{j,r}/\tau_{\text{CnV}} + \phi_{\text{CnV}}^{\text{use}} \cdot \psi_{\text{CnV}}^{\text{fuel}} \cdot L_{j,r} \cdot N_{j,r}), \quad (2-27)$$

ここで、 $\phi_j^{\text{manufacture}}$  と  $\phi_j^{\text{use}}$  は製造段階と利用段階での GHG 排出係数、 $\psi_j^{\text{EC}}$  は燃費、 $\tau_j$  は ECV の平均寿命である。CnV についても同様に  $\phi_{\text{CnV}}^{\text{manufacture}}$ 、 $\phi_{\text{CnV}}^{\text{use}}$ 、 $\psi_{\text{CnV}}^{\text{fuel}}$ 、および  $\tau_{\text{CnV}}$  を定義しているが、燃費については上付き文字を EC ではなく CnV で使用される燃料として fuel に変更している。

ECCG の場合は、従来の系統電力および熱生成装置 (HG) を代替する。ECCG の GHG 排出量は製造段階と利用段階で構成される。系統電力からの電力供給と HG からの熱供給は ECCG で部分的に代替され、完全に置き換えるものではないと想定し、これらの製造段階の GHG 排出削減は考えず、系統電力と HG の利用段階のみの GHG 排出の削減を考える。

$$E_{j,r}^{U\text{increase}} = \phi_j^{\text{manufacture}} \cdot N_{j,r}/\tau_j + \phi_j^{\text{use}} \cdot 1/\eta_j^{\text{elec}} \cdot \beta_{j,r} \cdot c_j^{\text{elec}} \cdot N_{j,r} \quad (2-28)$$

$$E_{j,r}^{U\text{decrease}} = (\phi_{\text{grid},r}^{\text{use}} \cdot 1/\eta_{\text{grid}}^{\text{elec}} + \phi_{\text{HG},r}^{\text{use}} \cdot 1/\eta_{\text{HG}}^{\text{heat}} \cdot \eta_j^{\text{heat}}/\eta_j^{\text{elec}}) \cdot \beta_{j,r} \cdot c_j^{\text{elec}} \cdot N_{j,r}, \quad (2-29)$$

ここで、 $\phi_{\text{grid},r}^{\text{use}}$  と  $\phi_{\text{HG},r}^{\text{use}}$  は系統電力と HG の利用段階での GHG 排出係数であり、 $\eta_{\text{grid}}^{\text{elec}}$  と  $\eta_{\text{HG}}^{\text{heat}}$  はそれぞれ系統電力と HG における変換または送電にかかる効率である。

## 2.4. ケースの設定

### 2.4.1. 導入技術とエネルギーパス

シミュレーションを用いて地域別でのエネルギーキャリア技術の導入効果の評価が行えることを検証するために、日本におけるケーススタディを行った。Figure 2-2 は、このケーススタディで検討するエネルギーシステム構成としての導入技術およびエネルギーパスを示す。エネルギーキャリアとして水素を取り上げ、様々なエネルギー源から製造されることを考える。製油所からの副生物 (BPR)、都市ガスや液化石油ガス (LPG) のオンサイトでの水蒸気改質 (FGSTR)、再生可能資源および化石資源由来の電力による水の電気分解を対象とした。再生可能資源からの水素製造が十分に利用可能になる前の初期段階では、BPR からの水素がまず利用されることを想定した。自家用普通乗用車としての FCV および家庭用燃料電池コージェネレーションシステム (FCCGh) で水素を利用することで、運輸、給湯、電力における最終エネルギー需要を満たし、既存技術、すなわち、ガソリン使用の内燃エンジン自動車 (ICEV)、給湯器および系統電力を使用する機器が代替される。製油所や集中型発電所で発電した電力を用いた水電解設備の場所は、水素利用技術の場所とは離れていると想定し、製造された水素は、圧縮水素、液化水素、メチルシクロヘキサンの水素キャリアに変換後にタンクローリーで輸送することを想定した。輸送距離  $TD$  は、地域ごとの実際の輸送距離に関係なくモデル内では 100 km で一定であるとした。再生可能エネルギー由来電力での水電解および FGSTR での水素製造はオンサイトでの製造を想定し、 $TD$  は 0 km であるとした。各設備およびプロセスの LC-GHG を考慮した。

Table 2-1 は、ケーススタディで用いる技術および水素キャリアの具体的な名前と、構築したモデルのパラメータとの対応関係を示す。パラメータ値は、取得した地域特性と技術情報に基づいて設定され、これらは Table A-1 に記載した。FCCGh については、より詳細に世帯数と電力・熱需要に関するデータが入手可能であったため、水素需要および水素利用時の GHG 排出量について一戸建ておよび集合住宅別、一世帯あたりの人数別で計算した。GPWE および FGSTR による水素製造の能力に関しては、水素需要に対して十分に大きいものと仮定し、無限大の値をパラメータ値とした。日本では通常、都市ガスまたは LPG のいずれかが家庭用燃料ガスとして使用されており、その割合は地

域によって異なる。このケーススタディでは、都市ガスと LPG の両方を燃料ガスとし、単位水素製造量あたりの GHG 排出係数  $\phi_{i,r}^{\text{production}}$  および従来の給湯器使用に伴う GHG 排出係数  $\phi_{\text{WH},r}^{\text{use}}$  について、地域ごとの使用燃料ガスの割合を考慮して設定した。系統電力の地域別での GHG 排出係数は、電源構成の異なる日本の 10 電力会社からの報告書から個別に取得した。

エネルギーキャリア製造、利用技術の導入率  $\alpha_i, \alpha_j$  および輸送技術の選択に関する係数  $\delta_k$  はエネルギーシステムの条件変更ごとに設定され、他のパラメータは技術情報や地域特性に応じて定数として設定している。以下の結果のセクションで特に指定していない限り、技術導入率および輸送モードの選択に関する係数はゼロに設定した。

Table 2-1 Correspondence of the model parameters to specific technologies and hydrogen carriers assigned for the case study. Adapted from [i].

| Suffix in parameter | Assignment in the case study                                   | Abbreviation |
|---------------------|--|--------------|
| EC                  | Hydrogen   | H2           |
| CnV                 | Internal combustion engine vehicle                             | ICEV         |
| HG                  | Water heater   | WH           |
| fuel                | Gasoline   | gasoline     |
| i                   | Petroleum refinery plant (by-product hydrogen)                 | BPR          |
|                     | Natural gas combined cycle power plant with water electrolysis | NGCCWE       |
|                     | Natural gas thermal power plant with water electrolysis        | NGWE         |
|                     | Oil thermal power plant with water electrolysis                | OILWE        |
|                     | Coal thermal power plant with water electrolysis               | COALWE       |
|                     | Nuclear power plant with water electrolysis                    | NPWE         |
|                     | Grid power with water electrolysis                             | GPWE         |
|                     | Fuel gas steam reforming                                       | FGSTR        |
|                     | Wind turbine power generation with water electrolysis          | WTWE         |
|                     | Photovoltaic generation with water electrolysis                | PVWE         |
|                     | Hydropower generation with water electrolysis                  | HYDWE        |
|                     | Geothermal generation with water electrolysis                  | GEOWE        |
| j                   | Fuel cell vehicle  | FCV          |
|                     | Stationary fuel cell cogeneration for household use            | FCCGh        |
| k                   | Compressed hydrogen  | CPH          |
|                     | Liquefied hydrogen   | LQH          |
|                     | Methylcyclohexane  | MCH          |

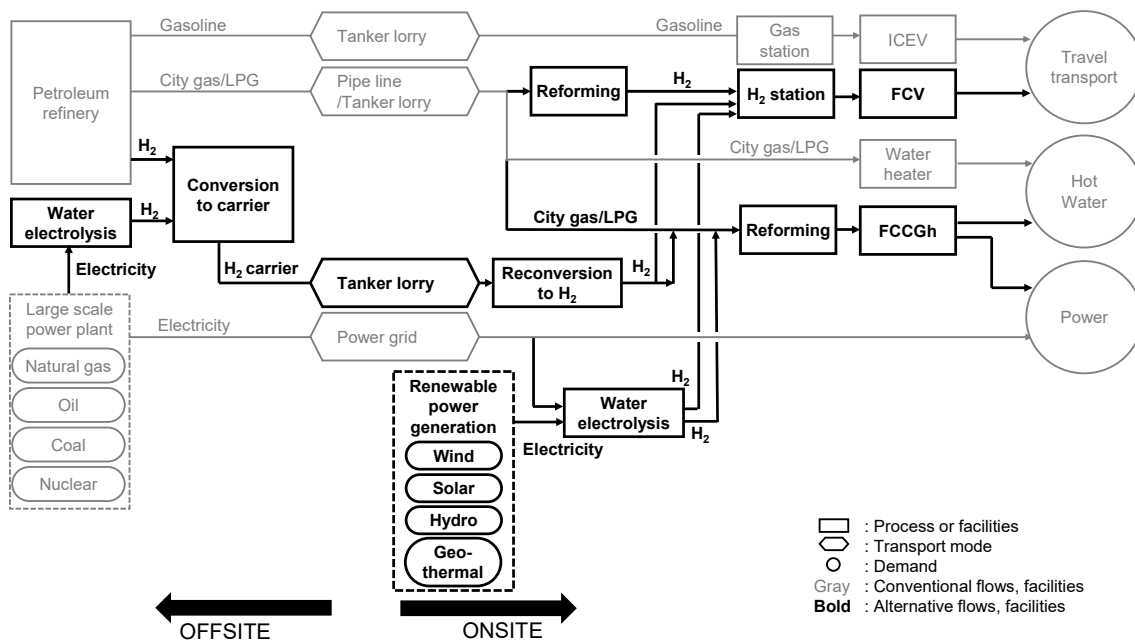


Figure 2-2 Configuration of the technologies and energy pathways considered in the case study. Adapted from [1].

## 2.4.2. 地域区分の定義と地域データ

日本での地域区分を定義するための地域分類方法として都市雇用圏 (UEA) (Kanemoto and Tokuoka, 2002) および都道府県を採用した。これらの地域区分で、有効な地域別分析をするための適切な地域の大きさについて検討する。2015年11月時点で、日本には47の都道府県と1742の市町村が存在していた。都市雇用圏は、金本ら (Kanemoto and Tokuoka, 2002) が提唱したもので、雇用パターンに基づいて複数の市町村から構成される。都市雇用圏は以下のように定義される (CSIS, 2015)。

都市圏は、中心都市と、それと社会的・経済的に密接な関係を有する周辺地域、すなわち郊外、によって形成されています。都市雇用圏は、

- (1) 中心都市をDID人口によって設定し、
- (2) 郊外都市を中心都市への通勤率が10%以上の市町村とし、
- (3) 同一都市圏内に複数の中心都市が存在することを許容する

都市圏設定です。

都市雇用圏の統計について、この定義に基づいて推定した。この定義に基づいて市町村の分類を行った結果として、都市雇用圏および所属する市町村のリストを Table A-2 に示す。都市雇用圏で定義された地域には日本の人口の約 88%が含まれ、いくつかの市町村はどの都市雇用圏にも分類されず、本研究の都市雇用圏における分析の対象外とした。結果として得られた都市雇用圏の数は 247 であり、面積、可住地面積、人口密度の平均値はそれぞれ約 866 km<sup>2</sup>、334 km<sup>2</sup>、916 人/km<sup>2</sup>であった。比較として、都道府県の数 47 であり、面積、可住地面積、人口密度の平均値はそれぞれ約 7,926 km<sup>2</sup>、2,628 km<sup>2</sup>、1,348 人/km<sup>2</sup>である。なお、ここでいう「人口密度」とは、可住地面積あたりの人口であり、可住地面積は林野面積および湖沼面積を除いた土地面積である。東京 UEA と大阪 UEA を除くすべての都市雇用圏は、人口と可住地面積においてそれらの中心都市が所属する都道府県よりも小さい。都市雇用圏の人口密度に関しては、中心都市が所属する都道府県よりも大きいものと小さいものの両方があった。Figure A-1 に都市雇用圏およびその中心都市が所属する都道府県の人口密度の関係を示した。

日本の都道府県および市町村の地域別統計データについて、国や民間の複数の情報源から取得し、都市雇用圏の分類におけるデータを作成するために複数の市町村のデータを統合しつつデータの再構成を行い、Table A-3 にまとめた。

## 2.5. 評価結果

Figure 2-1 で示した計算および可視化フェーズの結果を本節で示し、次節でこれらの結果の解釈を記述する。



## 2.5.1. 3つの地域におけるFGSTRとFCVの導入による

### LC-GHG変化

解析結果の一つとして、FGSTR由来の水素を用いてFCVで1%の自家用ガソリン乗用車を代替することによるLC-GHGの変化を、東京都、福岡県、沖縄県の3県について評価し、Figure 2-3に示した。各都県の大まかな特徴として、人口は東京都が最も多いが、自動車1台あたりの年間走行距離は全都道府県の中で沖縄県が最も長く、福岡県は自動車の台数および1台あたり年間走行距離が全都道府県の中程度である。Figure 2-3において、水素製造、輸送、およびFCV製造時のGHG排出の増加は縦軸の正方向に、代替されるICEV製造およびその利用分でのGHG排出の減少は縦軸の負方向で表されている。LC-GHGの変化は、赤に白抜きひし形形で表され、負の側にプロットされていればFCVの導入によりLC-GHGが削減されていることを意味する。

結果として、福岡県でのLC-GHG削減量が最も大きく、続いて沖縄県で多く削減され、3地域ともLC-GHGが削減されていた。自家用乗用車の総数は、東京都、福岡県、沖縄県の順に多く、FCV製造時のGHG排出の増加量および代替によるICEV製造削減分におけるGHG排出の減少量の順と一致していた。FCVの台数は福岡県よりも東京都の方が多く、水素消費量は福岡県の方が大きかった。これは福岡県の車1台あたりの年間走行距離が長いこと、より多くの燃料が必要となるためである。沖縄県の自動車1台あたりの年間走行距離は他の2つの地域よりも長いこと、導入されるFCVの台数が少ないこと、水素消費量は他の2つの地域ほど大きくはなかった。沖縄県では、自動車1台あたりの年間走行距離が長いこと、1台あたりのFCVによるICEV代替におけるガソリンの削減量が大きく、沖縄県の8倍以上の自動車台数がある東京都よりもLC-GHGの削減が大きくなっている。東京都では、ガソリンを代替することによるGHG排出の減少に対して、FCV製造におけるGHG排出の増加が大きかった。福岡県では、自動車の台数と1台あたりの年間走行距離がバランスよく、LC-GHGの削減量が最も大きかった。

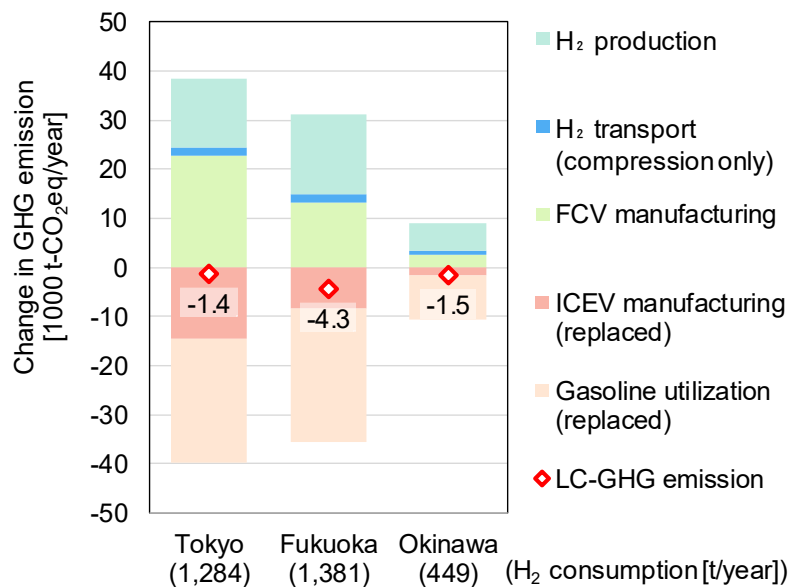


Figure 2-3 Changes in LC-GHG by substituting FCV for ICEV with hydrogen production from FGSTR for Tokyo, Fukuoka, and Okinawa Prefectures; 1% FCV implementation ratio and 100% FGSTR without transport ( $\alpha_{\text{FGSTR}} = 1.0, \alpha_{\text{FCV}} = 0.01, \delta_{\text{CPH}} = 1.0, TD = 0$ ). Adapted from [i].

## 2.5.2. 日本における技術導入の LC-GHG

BPR および FCV を導入したときの LC-GHG を評価した結果を Figure 2-4 に示す。異なる 4 つの FCV 導入率について、都道府県と都市雇用圏の人口密度に対して、面積あたりの LC-GHG の削減量および BPR の水素製造能力に対する実際の製造量の比をプロットした。製油所が存在する 14 都道府県と 13 の都市雇用圏について LC-GHG の削減量をプロットし、製油所の存在しない地域、すなわち  $P_{\text{BPR},r}^{\text{H}_2^*} = 0$  となる地域は除外した。Figure 2-3 での縦軸は GHG 排出の絶対値であったが、Figure 2-4 での縦軸は GHG 排出削減量とした。FCV の導入率の変化によって、同一地域内のプロットは水平方向には動かず、垂直方向にのみ動く。

ICEV を FCV によって代替することで、ほとんどの地域で LC-GHG は削減されるが、神奈川県だけは、LC-GHG が増加しており、GHG 排出削減量のマイナス側にプロット

された。BPRによる水素製造は低炭素技術ではなく、神奈川県での1台あたりの年間走行距離が短いためにこのようなLC-GHGの増加が引き起こされる。ほとんどの都道府県および都市雇用圏において、FCVの導入率が高いほどLC-GHGの削減量も大きかった。FCVの導入率が高くなると、BPRからの水素製造能力は一定であるのに対し水素供給量が増加するために、最大水素製造量に対する実際の水素製造量の比率も高くなった。一部の地域では、その比率は、導入率が高い場合に1.0に達した。これは、BPRが十分な水素製造能力を持っておらず、水素の不足分を補うためにFGSTRを必要としたことを意味する。

千葉県と神奈川県、ならびにこれらの県内の製油所を包含している東京UEAでは、LC-GHGの大幅な削減は見られなかった。この一因として、これらの地域が発達した公共交通システムを有する大都市圏であり、一台あたりの年間走行距離が短いことが挙げられる。これは、FCV製造のLC-GHGへの寄与が大きく、ガソリン代替によるLC-GHG削減効果が小さいということである。和歌山UEAと那覇UEAの中心都市はそれぞれ和歌山県と沖縄県に属しているが (Table A-2 参照)、2つの都市雇用圏におけるFCVの導入は、それぞれ和歌山県と沖縄県よりもLC-GHGの削減量が大きかった。Figure 2-4 (c, d) において、和歌山UEAではBPRからの水素製造能力に対する実際の水素製造量の比が和歌山県よりも低い。これは、既存の製油所という資源は和歌山県と和歌山UEAで共通している一方で、和歌山UEAでの水素需要が和歌山県よりも少ないことによる。このように、都道府県ではなく都市雇用圏を技術導入における地域区分として考えることで良い評価結果が得られる地域もあった。定義された地域の境界によって地域特性が変化するため、異なる地域区分を考慮することで評価結果も異なることが分かった。

太陽光発電電力を用いた水の電気分解 (PVWE) からの水素製造を行った際のFCV導入率ごとの面積あたりLC-GHGの削減量を、都道府県および都市雇用圏の人口密度に対してプロットしたものをFigure 2-5 (a, b) に示す。人口密度とFCV導入率が高いほど、地域ごとの面積あたりのLC-GHGの削減量が高い傾向が見られる。人口密度が高い地域では、面積あたりの自動車の台数が多いためである。人口密度が同程度の地域でも、自動車1台あたりの年間走行距離等の地域特性によってLC-GHG削減量に違いが見られる。

FCV 導入の結果と同様に、都道府県および都市雇用圏における FCCGh に関する結果 (Figure 2-5 (c, d)) からは、人口密度の増加とともに LC-GHG の削減量が大きくなる傾向が見られた。人口密度の高い地域では、住宅数が多く、FCCGh を多く設置できるため、結果的に LC-GHG の削減量が大きくなるためである。人口密度が同程度の地域での LC-GHG の削減量の違いは、住宅の電力需要や給湯需要等の地域特性に起因する。導入率が 1% から 10%、50% に増加すると LC-GHG の削減量も増加しているが、導入率が 50% から 100% に増加するときには、さらなる LC-GHG の削減はほとんどもしくは全く見られなかった。Figure 2-5 (e, f) に示す地域ごとの PVWE からの水素製造能力に対する実際の水素製造量の比からは、大量の FCCGh が導入されると PVWE からの水素供給不足となってしまう、LC-GHG 削減量の低下を招くことが分かった。導入率が 1% または 10% の場合、PVWE からの水素製造能力に対する実際の水素製造量の比率は、ほとんどの地域で 1.0 未満であり、PVWE からの水素供給量が地域の需要を満たすのに不足しないことを意味する。一方、導入率が 50% または 100% の場合、一部の地域では PVWE からの水素製造能力に対する実際の水素製造量の比率が 1.0 であった。つまり、PVWE からの水素供給量が十分でなく、供給量の不足が FGSTR によって補われているということである。水素の供給に FGSTR を使用することで、LC-GHG の削減効果が小さくなる。FCCGh 導入率が低い場合でも PVWE からの水素製造能力に対する実際の水素製造量の比率が高い地域もあれば、導入率が高くても 1.0 以下の地域もあった。このような地域差は、エネルギー資源の量や電力・給湯需要が地域によって異なることに起因する。都市雇用圏と都道府県の面積あたりの LC-GHG 削減の結果を比較すると、人口密度が高い一部の地域において都市雇用圏の方が面積あたりの LC-GHG の削減量が大きい。つまり、年間走行距離が長い等の技術導入に適した条件の地域が都市雇用圏の場合には存在しているということである。

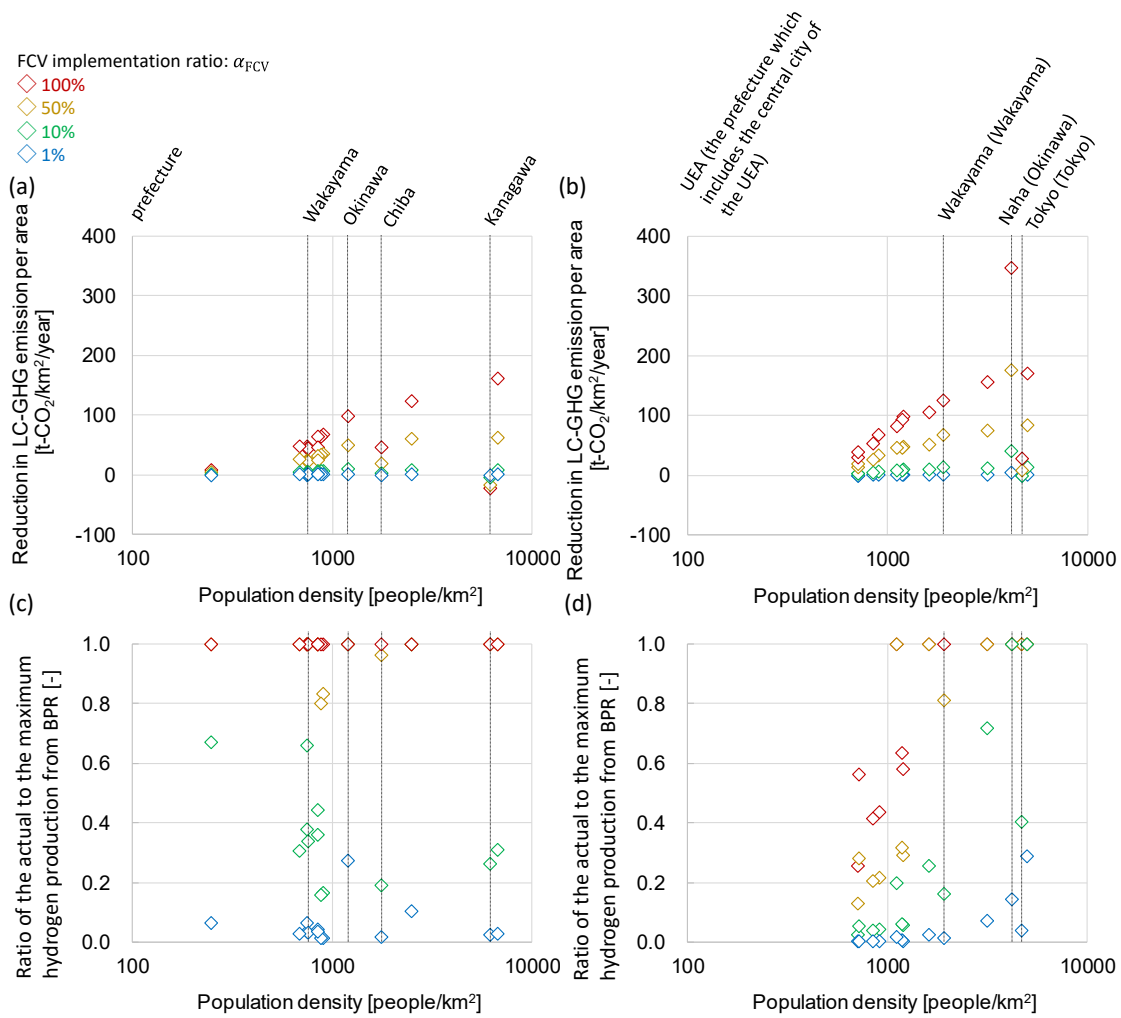


Figure 2-4 Region-specific evaluation of reduction in LC-GHG (a, b) and the ratios of the actual to the maximum hydrogen production from BPR (c, d) for regional division of a prefecture (a, c) and UEA (b, d) with different implementation ratios of FCVs producing hydrogen from existing petroleum refinery plant; 1, 10, 50, 100% as FCV implementation ratio, 100% BPR and 100% FGSTR as backup hydrogen production with 100 km transport of compressed hydrogen ( $\alpha_{\text{BPR}} = 1.0$ ,  $\alpha_{\text{FGSTR}} = 1.0$ ,  $\alpha_{\text{FCV}} = 0.01, 0.1, 0.5, 1.0$ ,  $\delta_{\text{CPH}} = 1.0$ ,  $TD = 100$ ). Adapted from [i].

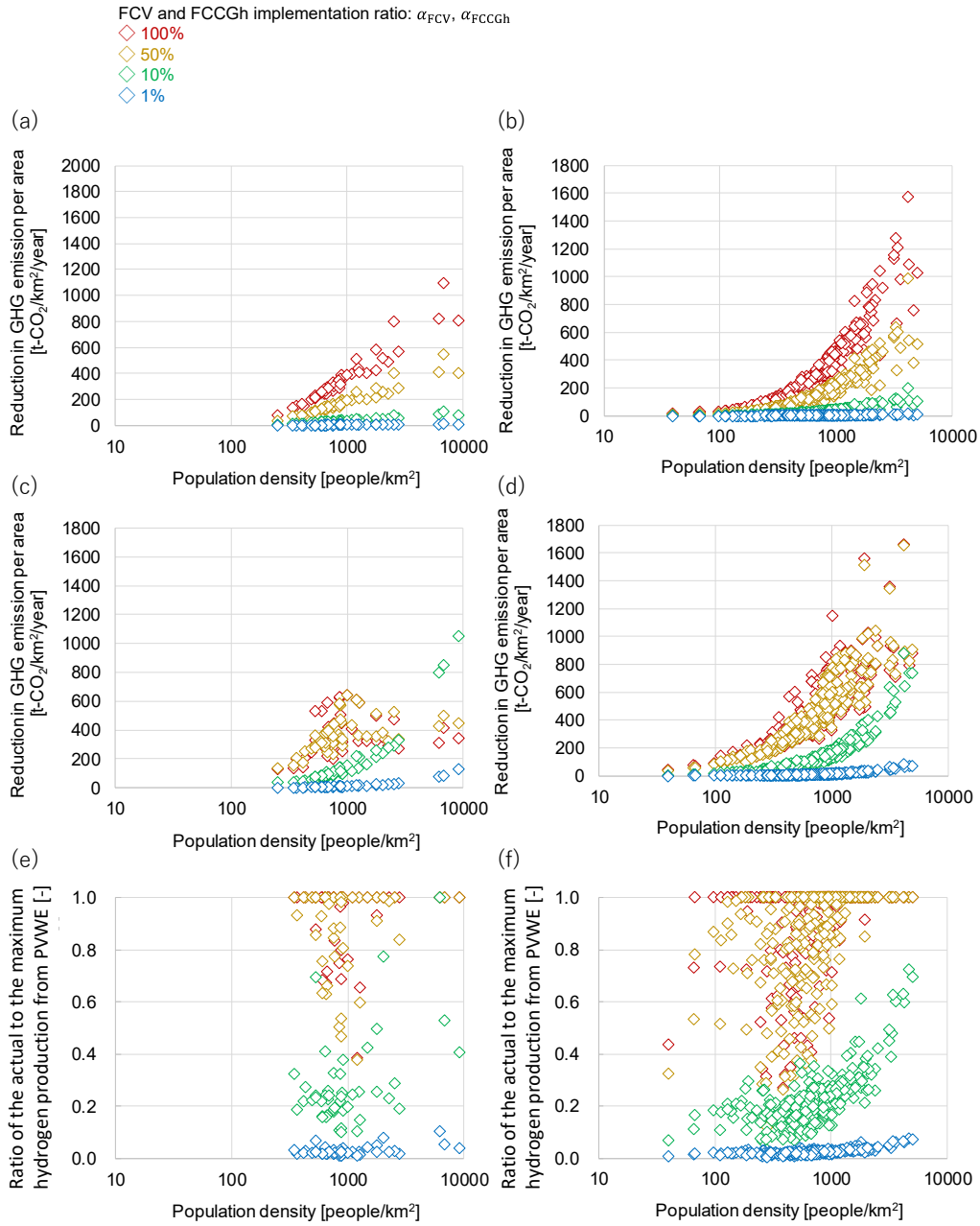


Figure 2-5 Region-specific evaluation of reduction in LC-GHG originating in FCV (a, b) and FCCGh (c, d) implementation with the ratios of the actual to the maximum hydrogen production from PVWE for FCCGh implementation (e, f) for regional division of prefectures (a, c, e) and UEs (b, d, f) with different implementation ratios of FCVs and FCCGh, producing hydrogen from water electrolysis with photovoltaics; 1, 10, 50, and 100% FCV and FCCGh implementation ratios, 100% PVWE and 100% FGSTR as backup hydrogen production without transport ( $\alpha_{PVWE} = 1.0$ ,  $\alpha_{FGSTR} = 1.0$ ,  $\alpha_{FCV} = 0, 0.01, 0.1, 0.5$ , and  $1.0$ ,  $\alpha_{FCCGh} = 0, 0.01, 0.1, 0.5$ , and  $1.0$ ,  $\delta_{CPH} = 1.0$ ,  $TD = 0$ ). Adapted from [i].

## 2.6. 評価結果の考察

### 2.6.1. エネルギー需要の地域特性

ケーススタディの結果から、地域に起因するエネルギー需要の特性が、LC-GHG の削減に関連する重要な要素であることが分かった。FCV の導入では、ICEV を代替する FCV の台数は、地域内の普通乗用車の台数に比例すると仮定し、その台数が地域での導入効果に大きな影響を与えた。また、地域内の自動車 1 台あたりの年間走行距離も重要な要素であった。FCV と同様に、FCCGh についても台数は世帯数に比例すると仮定し、導入された FCCGh の量に応じて LC-GHG の削減量が増大した。地域の一世代あたりの年間電力需要および給湯用の燃料ガスの年間需要も削減効果に強く影響した。

LC-GHG 削減量に対する FCV および FCCGh のパラメータ値の感度を Figure 2-6 に示す。Figure 2-6 (a, c) はそれぞれ、自動車 1 台あたりの走行距離に対しての自動車 1 台あたりの LC-GHG 削減量と走行距離あたりの LC-GHG 削減量の関係を示す。ガソリン利用に伴う直接・間接での GHG 排出削減量が走行距離の増加とともに大きくなるため、自動車 1 台あたりの走行距離が長いほど、赤の実線で示した FCV 1 台あたりの LC-GHG 削減量が増える。別の観点から見ると、自動車 1 台あたりの走行距離が十分に長い場合には、走行距離あたりの LC-GHG 削減への FCV および ICEV の製造時 GHG 排出の増加・削減分の寄与は非常に小さくなり、ガソリン利用時 GHG 排出削減の寄与は大きくなる。沖縄県では、FCV 製造時の GHG 排出増加の絶対値は、ガソリン利用を削減することによる GHG 削減量の絶対値の 3 分の 1 未満であった。東京都での FCV 製造時の LC-GHG への寄与は、福岡県と沖縄県よりも大きかった。FCV で使用される燃料電池スタックと水素タンクの製造におけるエネルギー投入量が大きく、FCV 製造は ICEV 製造よりも多くの GHG を排出する (Evangelisti et al., 2017) ため、FCV の製造に起因する GHG 排出量の増加分は、走行距離に関わらず ICEV の製造に起因する GHG 排出量の削減分よりも大きい。自動車のライフサイクルで短い距離しか運転しない場合は、FCV の製造段階での GHG 排出量の寄与が相対的に大きくなり、ICEV を FCV に置き換えても LC-GHG を大幅に削減することはできない。Figure 2-6 (b, d) は、それぞれ FCCGh の設備利用率に対する FCCGh 1 台あたりの LC-GHG 削減および発電電力量あたりの LC-GHG 削減を示す。FCCGh の製造時の GHG 排出量の LC-GHG への寄与は、Figure 2-6 (a,

c)におけるFCV製造時のGHG排出量の寄与に比べて小さいことが分かった。FCCGh 1台あたりのLC-GHGの削減量は、設備利用率とともに直線的に増加し、設備利用率0.7%で赤の実線で示すLC-GHG削減量が0以上になる。発電量あたりのLC-GHGの削減効果で見ると、設備利用率がおよそ5%を超えたところから0.6 kg-CO<sub>2</sub>eq/kWh付近に漸近する。ケーススタディでは、すべての地域の設備利用率が5%を超えていた。

FCVの導入では、自動車1台あたりの走行距離の長さが重要な地域特性であり、1台あたりの導入効果の観点では1台あたりの走行距離の短い地域は適さない。例えば、東京や大阪等、電車や地下鉄等の大量輸送システムが発達している都市部では、年間の走行距離が比較的短く(国土交通省, 2017)、FCV1台あたりの導入効果は限定的であった。バスやタクシー、トラック等の一般的に走行距離の長い車は、FCVの適用先として自家用乗用車よりも効果的な対象であるといえる。また、FCVとカーシェアリングを組み合わせることで、自動車の台数自体を減らせるだけでなく、自動車1台あたりの年間走行距離が長くなることも期待できるためLC-GHG削減に効果的であるといえる。定置型燃料電池コージェネレーションシステムについても、高い設備利用率を維持することのできる地域でより効果的な導入が可能となる。電力と熱の需要の比がコージェネレーションシステムの発電・熱回収効率と適合することで高い設備利用率とすることができる。このため、家庭への定置型燃料電池の導入が、LC-GHGを削減するための最適な選択肢であるとは限らない。例えば、病院やホテル、その他の商業施設はエネルギー需要が大きく、電力と熱の需要パターンが異なるため、需要家を組み合わせることで燃料電池を効果的に導入できる可能性がある(Shimizu et al., 2015)。家庭であっても集合住宅での熱融通と組み合わせた定置型燃料電池の活用も設備利用率を高くするために考慮すべきである。



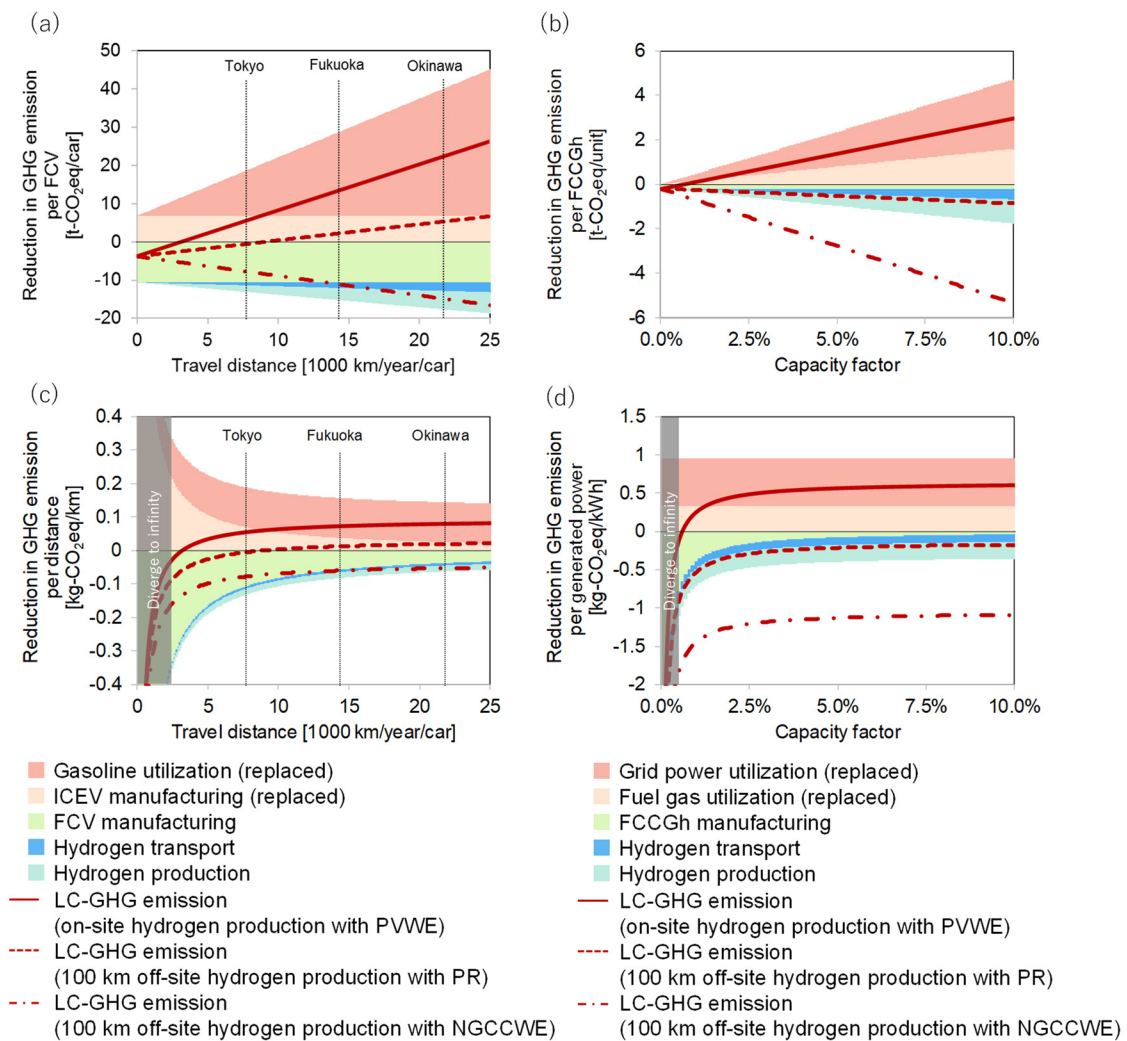


Figure 2-6 Variation in LC-GHG reduction per unit device (a, b) and per utilization amount (c, d) with utilization extent of FCVs (a, c) and FCCGh (b, d). Adapted from [1].

## 2.6.2. エネルギー源の地域特性

3通りの水素エネルギー源と輸送モードによる LC-GHG の違いを、Figure 2-6 (a-d)に3種類の線で示した。実線はオンサイトでの PVWE による水素製造のケース、破線は需要地から 100km 離れた場所での BPR による水素製造のケース、そして一点鎖線は、同じく 100km 離れた場所での天然ガスコンバインドサイクル発電および水電解

(NGCCWE)による水素製造のケースを表す。すべての輸送モードは圧縮水素を用いることとした。FCV、FCCGhの導入双方ともに、走行距離や設備利用率に関わらず、PVWE、BPR、NGCCWEの順にLC-GHGの削減量が小さくなることが示された。Figure 2-6 (a, c)によると、PVWEにより水素製造を製造しFCVを導入する場合、自動車1台あたりの年間走行距離が3200 km/年以上のときLC-GHGを削減できるが、BPRから水素を製造する場合には、LC-GHGを削減するためには自動車1台あたりの年間走行距離が9100 km/年以上でなければならない。さらに、NGCCWEから水素を製造した場合には、年間走行距離によらずLC-GHG排出が増加した。天然ガスコンバインドサイクル発電におけるGHG排出係数は、石油や石炭ベースの他の火力発電よりも低いものにも関わらずである。FCCGhの導入においては、Figure 2-6 (b, d)に示すように、PVWEによって水素を製造した場合のみLC-GHGが削減され、BPR、GCCWEからの水素製造ではどれだけ設備利用率が高くてもLC-GHGが増加してしまうことが示された。

再生可能資源を利用して水素を製造することはLC-GHGの削減に大きく寄与し得るが、その利用可能性は限られている。資源制約を克服するために次の3つのアプローチが考えられる。まず、風力や太陽光等の再生可能エネルギーの土地面積あたりのエネルギー密度はそれほど高くないため、水素をある程度製造するためするには、複数の再生可能エネルギー資源を組み合わせることにより利用できるエネルギー量を増やすことである。地熱発電、水力発電、木質バイオマス、農業廃棄物や都市ごみ等、様々な資源が将来的にエネルギー源となり得る。次に、水素製造における効率向上によって、単位エネルギー資源量あたりの製造可能な水素量を増加させることである。例えば、太陽光発電の効率の技術的改善は、同じ面積の太陽電池からの発電量を増加させる。すなわち、限られた土地面積または地域の建物上に高効率の太陽電池を設置することで、低効率のものよりも多くのエネルギーを得ることができる。水素製造における効率向上は、資源を節約することに加えて、単位水素製造量あたりのGHG排出量の削減につながる。これは化石燃料ベースの水素製造にとっても重要である。最後に、水素利用技術の変換効率の改善によって、同じ性能を得るために使用されるエネルギー量および水素製造時のLC-GHGを減らすことである。FCCGhの技術開発に加えて、システム設計や運用管理も需給のミスマッチによる電力と熱の損失を減らし、全体の効率を高く保つために改善すべきである。

低炭素な水素源を利用するもう一つの方法は、大量の資源を持つ他の地域から水素を持ってくることである。人口密度が高い都市部では水素が不足する傾向にあり、低炭素な水素の需要が大きい一方で、農村部ではエネルギー需要が低く、豊富なエネルギー資源から製造した水素を域外供給できる可能性がある。このような資源の多い地域から需要の大きい地域への水素の輸送は、GHG 排出量を削減し得るが、水素の輸送における GHG 排出の増加への対応も必要となる。海外の資源から水素を製造し国内に持ち込む場合は、東京のような大都市における巨大なエネルギー需要を満たすための現実的な選択肢であるが、資源の枯渇やエネルギーセキュリティ、社会経済的効果等の他国からの資源の利用に起因する問題について慎重に検討しなくてはならない。

## 2.7. 地域別エネルギーシステムの計画への適用

本章では、地域別エネルギーキャリア導入分析を行うための地産地消モデルを構築し、日本での水素エネルギーに関する技術導入のケーススタディを通して地域別エネルギーキャリア導入分析の検証を行った。以下では、地域別エネルギーキャリア導入分析から得られた知見と地域別エネルギーシステムの計画への適用の課題について述べる。

### 2.7.1. 地域に適したシステムオプション検討の必要性

エネルギーキャリア導入効果と地域特性との関係を定量化するモデルを構築することができ、地域別エネルギーキャリア導入分析によって地域ごとの導入効果には差異があることを確認することができた。また、システムオプションによって影響する地域特性は異なることが分かった。評価結果を地域間比較することで、利用可能なエネルギー資源の種類と量、エネルギー需要量とエネルギー利用技術の利用率が評価への影響の大きい地域特性であることが分かった。エネルギー需要量が多い地域ほど、技術導入の影響も大きくなる可能性があるが、エネルギー利用技術の利用率が低いと LC-GHG 削減量が限定的になってしまうことが明らかになった。FCV を導入する場合、自動車台数は重要な要素であるが、大都市では年間走行距離が短い傾向にあるためにそれほど LC-GHG 削減量が大きくないことが分かった。FCCGh を導入する場合、設備の製造、設置に伴う GHG 排出量の影響は大きくないが、設備利用率は LC-GHG 削減量に大きく影響

し、世帯数が多く導入台数の大きい地域の中でも設備利用率によって削減量に違いがあることが明らかになった。また、利用可能なエネルギー資源の種類と量は地域ごとに異なり、地域によってシステムオプションごとの供給可能なエネルギーキャリアの量が異なることが分かった。特に、エネルギーキャリアの導入が進み、その使用量が増えてきた場合に、エネルギー資源に乏しい地域では LC-GHG を効果的に削減できない可能性が示唆された。以上のように、エネルギーキャリアの導入ではエネルギーキャリアの製造から利用に至るまでのシステム全体での地域の条件によってその評価結果が異なることが明らかになった。

地域別エネルギーシステムの計画では、地域とシステムオプションの適合性を分析して計画されるべきである。客観的、定量的に地域のエネルギーキャリア導入効果を分析することで、地域に適したエネルギーシステムを計画できるはずである。地域別エネルギーキャリア導入分析は、特定のシステムオプションについて、地域間での比較を行うことでシステムオプションが特定の地域にとって適しているかを検討することや特定の地域において適したシステムオプションを検討することに利用できる。

地域特性は分析における地域区分の定義によって異なるため、地域区分はエネルギーキャリア導入の評価結果にも強く影響する。都道府県のような行政区分は利用しやすい地域区分であるが、全ての都道府県は部分的に都市部、農村部、工業地帯、山間部等の特性の異なる区域を含んでおり、必ずしも地域別の評価をする上で適切な地域区分であるとは限らない。対照的に、市区町村のような小さな地域区分では、エネルギー資源を多く有する地域と需要が大きい地域が分割され、広域で資源を活用する際の評価に適さない可能性がある。都市雇用圏は、地域システムを提案するのに適切な地域の境界を検討するための地域分類方法として採用した。Figure 2-4 および Figure 2-5 に示すように、都道府県と都市雇用圏の場合で LC-GHG 削減の評価結果は異なっていた。同じ都道府県内であっても、需要の大きさ等が異なるためである。地域を分類するに当たって、通勤者や学生の行き来、工業地帯、気象条件、地理的条件、文化、地方自治体等の様々な点を考慮に入れることができる。そのような社会経済的および自然的条件だけでなく、データの取得可能性およびライフサイクル影響評価等の指標の利用可能性も考慮すべき点である。

地域区分が異なれば地域でのエネルギーシステムの計画に関わるアクターも変わることが想定される。例えば、都市雇用圏は複数の市町村にまたがった圏域であり、市町村間の広域連携が必要となる可能性がある。人口減少を背景に公共設備の共同利用等を目的とした広域連携も行われてきているが、関係するアクターが増えると意思決定が難しくなる可能性もある。複数の地域区分での導入効果を分析しつつ、実際のエネルギーシステムの計画における連携の難しさを勘案しながら適切な地域区分を検討する必要がある。

## 2.7.2. 地域別エネルギーキャリア導入分析の課題

本章で構築した地産地消モデルについて5つの課題を挙げる。1つ目は、需給バランスにおける計算の妥当性の課題である。構築したモデルでは、年間でのエネルギー需給バランスを計算しており、時間、日、月ごとの変動を考慮していない。これらを考慮すると設備利用率の減少とともに、エネルギー需要と供給の時間的および空間的ギャップを埋めるためのエネルギー貯蔵が必要となることが想定される。また、各技術の寿命は利用率や利用頻度に依存しない定数とした。たとえば、FCVの平均寿命は、走行距離に関係なく12.9年に設定した。実際には利用率に応じて使用年数は異なる可能性があるため、評価結果の解釈には注意が必要である。2つ目は、競合技術を見逃していることである。競合技術の開発および普及は現実の導入における問題として検討しなくてはならない。例えば、電気自動車やハイブリッド車はFCVの競合技術となり、電気ヒートポンプは、定置型燃料電池の競合技術となり得る。競合技術も含めた評価を行うことで、比較検討による技術導入の意思決定が可能となる。3つ目は、地域間のエネルギーキャリアの輸送を考慮していないことである。地域内輸送、すなわち、都道府県内または都市雇用圏内での輸送のみが検討されているが、現実的には、地域間輸送も選択肢となり得る。例えば、再生可能エネルギー資源が多い地域からエネルギー需要が大きく十分な資源がない都市圏の地域への輸送が考えられる。地理情報システム (GIS) を活用することで、地域間の距離を考慮したエネルギーシステムをシミュレーションできるようにシミュレーターの拡張も考えられる。4つ目は、LC-GHGの変化のみを評価指標としていることである。LC-GHG評価の結果だけでは地域のエネルギーシステムの計画における意思決定を行うことはできない。経済性や供給安定性、安全リスク等の他の指標も考慮し、多面的にシステムを評価する必要がある。最後に5つ目として、それぞれの地域

に技術を導入するシナリオは考慮されていないことである。技術が導入されたシステムオプションの評価はできるが、そのシステムオプションに至るまでの変化の時間スケールとプロセスは明らかではない。一つの時間断面での評価ではなく、パラメータの経時変化を推定し、技術を導入するための段階的なプロセスを示す必要がある。

上記のモデルの課題と関連して、このモデルの構築を通して明らかとなった地域別エネルギーキャリア導入分析の課題は、データの取得可能性が分析の大きな制約となることである。ケーススタディでは、主に統計データのような公開されているデータを使用して分析を行ったが、必ずしも地域ごとのデータがそろっているわけではない。また、多くの地域のデータは、行政区分に従ってまとめられており、その中でも都道府県単位でしか公開されていないデータも存在する。市区町村や都市雇用圏のように行政区分以外の地域区分を使用する場合、推計しながらデータを構造化する必要がある。再生可能エネルギーのポテンシャルに関する情報は比較的、地域別の情報を得ることができたが、エネルギーの最終消費先における利用形態に関して、乗用車の平均走行距離や電力、熱の需要パターンの情報は詳細な地域ごとの情報がなく、推計が必要であった。また、ケーススタディでは、家庭用の用途での分析を行ったが、産業や業務等の他の部門では細かなセグメントごとに利用形態が異なっており、それぞれのセグメントの地域別データを得るのは難しい。さらに、モデルにおける課題で指摘したようなモデルの精緻化、改善を行うためには、さらに詳細な地域のデータが必要となる。これらの地域別データの整備が必要であるとともに、詳細なデータでの地域導入分析を行うためには、地域別での分析ではなく、地域内での調査やデータを持つ関係者を巻き込んだ分析が必要となる。

## 第3章 エネルギーキャリア導入における地域別 エネルギーシステムの計画の役割

---

第2章では、地域別エネルギーキャリア導入分析を行うための地産地消シミュレーションモデルを構築し、ケーススタディを通して地域特性の違いによってエネルギーキャリアを導入した際の効果に違いが見られることを明らかにした。本章では、これまでに行われてきたエネルギーシステム計画・設計と比較して、地産地消シミュレーションによる地域エネルギーシステムの計画のエネルギーキャリア導入における位置づけを明確化する。さらに、化学プロセス設計と地域別エネルギーシステムの計画を比較して計画・設計問題の主要な違いを明らかにする。最後に、社会学のアプローチによるエネルギーに関連する技術導入における社会変化プロセスを参考に、エネルギーキャリア導入のための社会全体での多様な活動における地産地消シミュレーションに基づく地域別エネルギーシステムの計画の活用可能性を考察し、さらに地域別エネルギーキャリア導入分析に求められる要件を明確化する。

### 3.1. 地域別エネルギーシステムの計画の位置づけ

#### 3.1.1. エネルギーキャリア導入に関連するエネルギーシステム分析 研究のレビュー

第2章で地域別エネルギーキャリア導入分析を行うためのモデルを構築したが、この分析はエネルギーキャリア導入の適切な地域の範囲やエネルギーシステム構成を検討して計画し、導入を行うためのものである。地域別エネルギーキャリア導入分析では、地域区分を決めてシステムオプションを生成し、その条件に基づいて地産地消シミュレ

ーションを行い、LC-GHG の削減量の評価が行われる。この一連のプロセスを地域別エネルギーキャリア導入分析としたとき、地域区分やシステムオプションごとに評価結果を比較検討し、適切なシステムを選定することで地域別エネルギーシステムの計画が作られる。

エネルギーキャリア導入のためには、個別の設備を導入するためのマイクロなスケールでのエネルギーシステムから国全体のマクロなスケールでのエネルギーシステムまで幅広く考えることができる。地域別エネルギーキャリア導入分析に基づく地域別エネルギーシステムの計画がエネルギーキャリア導入において果たす役割を理解するために、これまでに行われてきたエネルギーキャリアに関連するエネルギーシステム分析の研究をレビューし、地域スケールと国あるいは個別のプラント等のスケール（以下、国スケールおよび区画スケールと呼ぶ）での比較を行う。ここで、システム分析とは、シミュレーション等の計算によりシステムのパフォーマンスを評価し、適切なシステムの探索や特定のパラメータの影響を明らかにする等の分析を行うことであり、計画とはそのシステムを導入するために、システム分析の結果に基づいて特定のシステムを選択することとする。

まず、エネルギーキャリアに関連するエネルギーシステム分析の分野の研究動向を理解するために、オンライン学術データベースの Web of Science (Clarivate, 2020) を利用して 2020 年 7 月にキーワード検索を行った。検索キーワードとして、“energy system” AND (analysis OR analyses) AND (“energy carrier” OR hydrogen OR “power to gas” OR “power to liquid” OR “power to heat” OR “power to X”) で検索したところ、件数は 887 件であった。エネルギーキャリアに関しては様々な表現がされており、“energy carrier”以外にも関連するキーワードのいずれかを使っているものを対象とした。さらにキーワードとして“simulation”を AND 条件で追加して検索したところ、196 件であった。Figure 3-1 に年ごとの出版数の推移を示す。特に 2016 年以降に出版数が伸びている傾向が見られ、この分野の関心が高まってきていることが分かる。シミュレーションによる分析を行う研究は、この分野で一定の比率を占めていると言える。



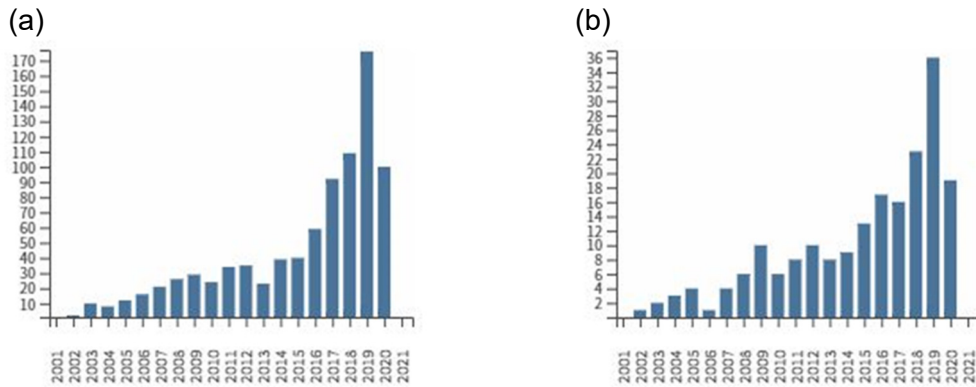


Figure 3-1 Number of published literature associated with energy system analysis and energy carrier based on search results with keywords of (a) "energy system" AND (analysis OR analyses) AND ("energy carrier" OR hydrogen OR "power to gas" OR "power to liquid" OR "power to heat" OR "power to X") and (b) "simulation" AND keywords used in (a) in Web of Science as of July 2020.

エネルギーキャリアに関連するエネルギーシステムの分析に関する文献のうち、国際的機関および日本の代表的研究機関からの報告書や学术论文 31 件について分析内容を Table 3-1 の通りまとめた。ここで、国際、国、地域、区画スケールとは、それぞれ複数の国や世界全体を対象システムとするもの、一つの国を対象システムとするもの、国の中の地域を対象システムとするもの、化学プラントや商業ビル等ある程度の区画範囲を対象システムとするものとし、対象としているシステムの地理的な大きさや発電量や需要量等のエネルギーの規模に応じて分類した。特にスケールの言及がなく、単位エネルギーあたりのコスト等を分析している研究も多くあり、それらの研究もレビューに含めた。スケールごとの分析の違いを理解できるようにレビュー項目を検討した。まず、分析における入力、出力情報として使用データ、評価項目を抽出した。主な使用データを分析することで、第 2 章で課題として挙げた分析におけるデータの利用可能性について、分析のスケールでの違いが見られるかを確認する。次に、分析アプローチとして、システム構成や構成要素の大きさ・容量を決めるシステム設計のアプローチが取られているか、再生可能エネルギーの比率や自給率等、何らかの目標値を制約として解を探索する目標指向型のアプローチが取られているか、エネルギー需要の変化や技術進展等の不確実性の高いパラメータに対して幅を持たせたり、ある想定の下複数のパラメータを

まとめて設定したりするようなシナリオ分析、感度分析といったアプローチが取られているかどうかをまとめた。そして、タイムスコープも項目に加え、分析が短期的・長期的いずれの目的で行われているかを確認した。

国スケールでのエネルギーシステム分析では、基本的に 10 年以上先の長期の分析が行われている。エネルギーシステム全体を俯瞰的に分析し、MARKAL や TIMES 等の国際的に開発の行われているシミュレーターを使って分析が行われ、システム構成や一次エネルギー資源構成の最適化等が行われている。多くは長期視点であり、エネルギーシステムに関係する技術的・社会的な不確実性が大きいため、シナリオ分析として複数のパラメータのパターンによる分析も広く行われている。経済性の指標として電力や水素等に関して均等化エネルギー原価 (LCOE) が多く使われており、他にも環境性として CO<sub>2</sub> の分析等が行われている。また、再生可能エネルギー 100% 等の再生可能エネルギー比率の制約の下、成立し得るシステム構成を検討する分析も行われている。使用データとしては、統計や論文、報告書の他に、電力システムオペレーター等が公開しているデータを活用するものが多い。これらの国スケールの分析の多くは政策立案に使うことを前提としているものが多く、結論として政策提言をしているものも見られる。また、技術開発の方針や目標を定めるために利用することも可能である。現状と大きなギャップがあり、長期的・継続的な対応を必要とするエネルギーキャリア導入のマネジメントにはバックキャストによる方向付けを行うことが重要であることが指摘されており (Eame and McDowall, 2010)、国スケールでの目標を制約とした分析やシナリオ分析のようなアプローチが必要である。

区画スケールのエネルギーシステム分析では、具体的な設備に関する事業性検討やシステム設計が行われるケースが多い。設備構成や機器の容量等の最適化を行うことや設備運用における時系列的变化を分析し、コンセプトをシミュレーション上で実証するような分析も行われる。系統電力と切り離れた Off-grid での制約下で、100%再生可能エネルギーによるシステムの分析もいくつか行われている。区画スケールでのエネルギーシステム分析の主要な目的は、適切なシステムを設計し、そのシステムを実装することである。実装というのは、例えばプラントシステムであれば構成機器を発注し、建設し、運転するということである。評価指標としては、特定のプラント等を建設・運用する事業者にとっての採算性を検討するために、NPV や IRR 等の経済指標が使われる場合も多く、事業者視点の性格が強いと言える。データとして、実際に稼働している発電プラントのデータや局所的な天候

情報を利用していたり、需要データとして、実際の測定データや積み上げ型の推定に基づく詳細なデータを利用したり、技術情報も実際のメーカーからの情報を使っていたりと、国スケールに比べて全体的に詳細度が高く、局所的データも使われる。メーカーや特定のプロジェクトのデータ等公開されていないデータも使われ、データを推計するためのモデルを作ってデータを生成することも行われており、詳細なデータを取得するために手間やコストがかかっていると思われる。分析の使われ方として、事業性評価や設計情報を実装に使うケースはもちろんのこと、技術開発の方向性や目標値を設定するのにも使われる。区画スケールは企業や自治体の事業が行われる規模であるため、学術的な文献となっていなくても、事業探索や投資判断、実装のための事業性検討やシステム設計、建設等が現実には多数行われている。この場合、比較的詳細かつ不確実性の小さいデータに基づいた検討が行われる。例えば、化学プロセス設計においては、建設候補地があり、そこで利用可能な電力や燃料の種類別の利用可否や価格等の条件が決まっており、エネルギー需要はプラントを構成する機器の積み上げから算定される。コージェネレーション設備やボイラー設備等の技術的な情報は、メーカー等それらの供給元のカタログや仕様書等のデータが利用される。ただし、公開されているデータは限定的であり、詳細なデータは各供給元事業者への見積り依頼や問い合わせ、契約の下での情報提供により得られる。費用や秘密保持契約が必要となる場合も多く、そもそも取引関係・信頼関係が無いとデータの授受ができないこともある。

地域スケールの分析は、国スケールおよび区画スケールの分析の中間的な分析であると言える。国スケールの分析と同様に全体としてのシステム構成やシステム運用時の挙動を分析することで、新規のエネルギーシステム導入の影響を評価する。一方で、使われているデータは特定の地域の日射条件や需要の条件等が利用されており、国スケールの分析と比較して具体性、地域の固有性が高いことが分かる。国スケールよりは小さいものの、区画スケールのように単一プロジェクトでの経済性等ではなく、地域全体としてのシステム構成や経済性、環境性等を評価する俯瞰的な視点でもあるため、国スケールの分析と連携させた議論を行うこともできる。第2章で構築した地産地消シミュレーションモデルによる地域別エネルギーキャリア導入分析はこの地域スケールの分析に該当し、地域固有の再生可能エネルギーのポテンシャルデータやエネルギー需要のデータを利用した。特定の地域だけにとどまらず多様な地域での分析を行ったことで、輸送や電力・熱における需要の大きさやパターンといった導入効果に対しての影響の大きい地域特性を特定することができた。

国スケール、地域スケールのエネルギーシステム分析は、政策とリンクさせることが必要である。日本で2018年に閣議決定された第5次エネルギー基本計画（ANRE, 2018）では、省エネルギー、ゼロエミッション電源比率、エネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量、電力コスト、エネルギー自給率に関する定量目標が掲げられた。日本全体としてのエネルギーに関連する基本方針が示されたものの、定量目標を達成するためのエネルギーシステム構成については示されていない。掲げた目標を達成するために必要なシステム、シナリオの定量的な分析を目標とリンクさせることで、目標達成に必要なアクションやその影響を客観的に理解することができ、より良い意思決定につながる（Trutnevyte et al., 2011）。国スケールでのエネルギーシステムの分析はこのような目標とリンクさせるために利用されるべきである。地域スケールでも総合計画等の形式で政策ビジョン・目標が掲げられているが、定量的な目標が示されていないことも多く、大まかな方針だけが書かれている場合が多い。例えば、愛知県の長期計画である「あいちビジョン2020」（愛知県, 2014）では、太陽光発電の普及や小水力発電の推進、バイオマスエネルギー利用の促進、スマートコミュニティでの熱融通や水素エネルギーを活用したまちづくり等の方針が掲げられているが、定量的な数値目標は記載されていない。都道府県や市町村の政策方針についても、地域の条件に基づくエネルギーシステムの分析とリンクさせて戦略的にエネルギーキャリア導入を図るべきである。

Table 3-1 Scales and details in analyses of energy systems using energy carriers

| 番号 | 文献  | スケール | タイムスコープ                  | システム設計 | 目標的制約 | シナリオ分析・感度分析 | 主な評価項目  | 主な使用データ                                |                             |                             |
|----|---|------|--------------------------|--------|-------|-------------|---|--|-----------------------------|-----------------------------|
|    |   |      |                          |        |       |             |   | 資源                                     | 需要                          | 技術、コスト等                     |
| 1  | (Anandarajah et al., 2013)                      | 国際   | 2100 年まで                 | Y      | Y     | Y: 技術・社会条件  | Total discounted energy system cost   | シナリオとして記述                              | シナリオとして記述                   | 論文・報告書等                     |
| 2  | (Bussar et al., 2016)                           | 国際   | 2050 年                   | Y      | Y     | Y: 技術条件     | LCOE  | 太陽光発電、風力発電の実績データ (有料)                  | 関連機関の公開データ                  | 著者推定                        |
| 3  | (Teichmann et al., 2012)                        | 国際   | 将来                       | N      | N     | N           | LCOE  | N/A                                    | N/A                         | 論文・報告書等                     |
| 4  | (Volkart et al., 2018)                          | 国際   | 2060 年まで                 | Y      | N     | Y: 社会条件     | Water depletion, GWP 等の複数環境指標   | シナリオとして記述                              | シナリオとして記述                   | インベントリデータベース、論文等            |
| 5  | (De-León Almaraz et al., 2015)                  | 国    | 2050 年まで                 | Y      | N     | Y: 社会条件     | total daily cost, total global warming potential, total inherent risk index | 論文・報告書等                                | 論文・報告書等                     | 論文・報告書等、GIS の道路ネットワーク情報     |
| 6  | (Guandalini et al., 2017)                       | 国    | 2050 年まで                 | Y      | Y     | Y: 技術・社会条件  | N/A   | 電力システムオペレーターの公開する発電実績データ               | シナリオとして記述                   | 論文・報告書等                     |
| 7  | (Gutiérrez-Martín and Guerrero-Hernández, 2012) | 国    | 2020 年まで                 | Y      | Y     | Y: 社会条件     | Cash flow, NPV 等の複数経済指標   | シナリオとして記述                              | 電力システムオペレーターの公開する需要データ      | 論文・報告書等                     |
| 8  | (Kikuchi et al., 2014)                          | 国    | 2050 年まで                 | Y      | N     | Y: 技術・社会条件  | コスト、GHG、資源消費量   | シナリオとして記述                              | 統計データ、シナリオとして記述             | シナリオとして記述                   |
| 9  | (Mathiesen et al., 2015)                        | 国    | 2050 年                   | Y      | Y     | Y: 技術・社会条件  | N/A   | 調査プロジェクトのデータ                           | 調査プロジェクトのデータ                | 調査プロジェクトのデータ                |
| 10 | (Matsuo et al., 2014)                           | 国    | 2050 年                   | Y      | Y     | Y: 社会条件     | CO <sub>2</sub> 削減率、炭素価格  | 論文・報告書等                                | 論文・報告書等をベースに推計              | 論文・報告書等                     |
| 11 | (Lyseng et al., 2017)                           | 地域-国 | 2050 年                   | Y      | Y     | N           | N/A   | 州で公開されている発電データや公開されているシミュレーターによる発電量推算。 | 電力システムオペレーターの公開需要データ        | 論文・報告書等                     |
| 12 | (Colbertaldo et al., 2019)                      | 地域   | 将来                       | Y      | Y     | N           | 投資コスト   | 電力システムオペレーターの公開する発電実績データ               | 電力システムオペレーターの公開する需要データ      | 論文・報告書等                     |
| 13 | (De-León Almaraz et al., 2014)                  | 地域   | 2050 年まで                 | Y      | N     | Y: 社会条件     | total daily cost, total global warming potential, total inherent risk index | 論文、サイトビジット、専門家へのインタビュー等のデータ            | 論文、サイトビジット、専門家へのインタビュー等のデータ | 論文、サイトビジット、専門家へのインタビュー等のデータ |
| 14 | (König et al., 2018)                            | 地域   | 2015, 2020, 2030, 2040 年 | Y      | N     | Y: 技術・社会条件  | LCOE、社会受容性  | 関連機関の提供する 10 分ごと、20km 四方の気象データから発電量推計  | 統計、州単位での 1 時間ごとの電力需要データから推計 | 論文・報告書等                     |
| 15 | (Loisel et al., 2015)                           | 地域   | 2030 年                   | Y      | N     | Y: 社会条件     | NPV   | 公開されている発電実績データ                         | 需要量推計                       | 公開されている電力市場価格、論文・報告書等       |

Table 3-1 Scales and details in analyses of energy systems using energy carriers (continued)

|    |                                |       |                   |   |   |            |  |                                |                     |   |
|----|--------------------------------|-------|-------------------|---|---|------------|--|--------------------------------|---------------------|---|
| 16 | (Oldenbroek et al., 2017)      | 地域    | 2020, 2050年       | Y | Y | Y: 技術条件    | LCOE   | 統計データから推計                      | 統計データ、論文・報告書等から推計   | 論文・報告書等                                       |
| 17 | (Parra et al., 2017)           | 区画-地域 | Current base      | N | N | Y: 技術・社会条件 | LCOES, IRR 等の複数経済指標、climate change, ozone depletion 等の複数環境指標 | N/A                            | N/A                 | モデルによる推計、実運用されているプラントデータ、インベントリデータベース、論文・報告書等 |
| 18 | (Ghandehariun and Kumar, 2016) | 区画    | 現状ベース             | N | N | Y: 技術条件    | GHG  | 発電所の公開する発電実績データ                | N/A                 | 装置メーカーの LCA 報告書および仕様書等                        |
| 19 | (Gillesen et al., 2017)        | 区画    | 2015, 2030年       | Y | N | N          | LCOE   | 公開されている都市単位で1分ごとの日射量データから発電量推計 | N/A                 | 論文・報告書等                                       |
| 20 | (Kalinci et al., 2015)         | 区画    | 現在                | Y | Y | Y: 社会条件    | LCOE, NPC, cash flows  | 公開されている気象データから発電量推計            | 研究論文                | 研究論文、製造業者から収集したデータ                            |
| 21 | (Lacko et al., 2014)           | 区画    | 現状ベース             | Y | N | N          | ライフサイクルコスト   | 公開されている気象データから発電量推計            | プロジェクトで公開されている需要データ | 論文・報告書等                                       |
| 22 | (Marchenko and Solomin, 2017)  | 区画    | 2025年まで           | Y | Y | N          | 水素貯蔵による回避コスト   | 風速と日射量は著者測定データ                 | 不明                  | 論文・報告書等                                       |
| 23 | (McDonagh et al., 2018)        | 区画    | 2020, 2030, 2040年 | N | N | Y: 技術・社会条件 | LCOE   | N/A                            | N/A                 | 公開されている電力市場価格、論文・報告書等                         |
| 24 | (Rahimi et al., 2014)          | 区画    | (現在)              | Y | Y | N          | Annualized cost of system, NPV, LCOE                         | 不明                             | 論文・報告書等から推算         | 論文・報告書等                                       |
| 25 | (Reuß et al., 2017)            | 区画    | 現状ベース             | N | N | Y: 技術・社会条件 | LCOE、CO <sub>2</sub> 、効率                                     | N/A                            | 論文・報告書等             | 論文・報告書等                                       |
| 26 | (Zhang et al., 2013)           | 区画    | 現状ベース             | Y | N | N          | N/A  | 公開されている発電実績データ                 | モデルによる推計            | 論文・報告書等                                       |
| 27 | (Bauer et al., 2015)           | N/A   | 2050年まで           | N | N | Y: 技術条件    | GWP、Human toxicity potential 等の複数環境指標                        | N/A                            | 論文・報告書等             | インベントリデータベース、論文・報告書等                          |
| 38 | (CRIEPI, 2018)                 | N/A   | 2030年以降           | N | N | Y: 技術条件    | LCOE、LC-CO <sub>2</sub>                                      | 論文・報告書等                        | N/A                 | 論文・報告書等                                       |
| 29 | (Elishav et al., 2017)         | N/A   | 2020年まで           | N | N | Y: 社会条件    | LCOE, LCOES  | N/A                            | N/A                 | 論文・報告書等                                       |
| 30 | (IEA, 2019)                    | N/A   | 2050年まで           | N | N | Y: 技術・社会条件 | LCOE   | 論文・報告書等                        | 論文・報告書等             | 論文・報告書等                                       |
| 31 | (IRENA, 2019b)                 | N/A   | 2050年まで           | N | N | Y: 技術・社会条件 | LCOE   | 論文・報告書等                        | N/A                 | 論文・報告書等                                       |

LCOE: levelized cost of energy, LC-CO<sub>2</sub>: life-cycle CO<sub>2</sub> emission, NPC: net present cost, NPV: net present value, GWP: global warming potential, GHG: greenhouse gas, LCOES: levelized cost of energy storage, IRR: internal rate of return

以上の内容から、地域スケールでのシステム分析による地域別エネルギーシステムの計画の役割を Figure 3-2 のように整理した。地域スケールでの分析は、長期的視点からあるべき姿を描く国スケールのビジョンと、具体的なプラントの建設や機器・設備の販売・購入等を行う区画スケールでの実装をつなぐ役割を果たす。

国スケールでのビジョンやエネルギーシステムの計画は、目標を起点としたバックキャストイングにより国全体としてのエネルギーシステムのあるべき姿を描き、計画的にエネルギーキャリアを導入するために必要である。全国を俯瞰して長期的視点でのエネルギーシステムの計画を作ることができる。しかし、国スケールでのエネルギーシステムの計画では、地域別の条件を考慮せずに全国一律のエネルギーシステムを仮定しており、エネルギーキャリア導入のための具体的な議論、活動を行うには不十分である。第2章での分析から明らかになったように、地域ごとの需要の大きさや自動車の平均走行距離や電力・熱の需要比等の需要パターンの違いによって、地域ごとに導入効果に違いがある他、再生可能資源のポテンシャルと需要の比も異なるため、地域で利用可能な再生可能エネルギーにも地域ごとに違いがある。現状の地域のビジョンでは、国のビジョンをそのまま地域に当てはめている場合やエネルギーキャリア導入の方針を示しているだけでエネルギーシステムとしての計画が示されていない場合が多くある。そして、区画スケールでの導入のための具体的な活動は個別のアクターごとの意思決定が中心になりがちであり、必ずしも国スケールでのビジョンが反映されず、局所的な条件のみを考慮したシステム設計・運用がなされがちである。

地域別エネルギーシステムの計画があることで、国スケールのエネルギーシステムの計画では考慮できていない地域別の条件を考慮して、それぞれの地域に合わせたエネルギーシステムを計画することができ、地域内での具体的な区画スケールのエネルギーシステム設計につなげることが可能となる。国スケールでのエネルギーシステムの分析と区画スケールでのエネルギーシステムの分析では使われているデータの詳細度に違いがあり、国スケールのエネルギーシステムの計画を区画スケールでの導入の活動につなげようとしても、分析の粒度に違いがあるため難しいが、地域別エネルギーシステムの計画は、両者の中間にあるためこれらをつなげられるはずである。例えば全国で100万台のFCVを導入するというのと、ある県で1万台のFCVを導入するというのでは具体性が違い、後者の方がその目標を達成するためのビジネスモデル構築や法令整備といった施策を検討しやすいはずである。このような単純な目標値だけでなく、エネルギーシ

システムの計画として地域での設備導入量やエネルギーフローを示すことでさらに具体的な検討が可能になるはずである。全国や地域のビジョンを区画スケールでの導入の活動に反映させることで、アクターの具体的な活動に結びつけられ、実効性が高まることが期待される。

区画スケールでの設備設計やプラント建設・運用、販売・購入といった活動一つ一つが積み重ねられることで、地域、さらには国スケールでのエネルギーシステムの変化につながっていき、エネルギーキャリアが導入されていく。エネルギーキャリア導入のためにはこのような区画スケールでの個別の実際の活動が不可欠である。実際の活動を通して具体的かつ詳細な条件における機会や課題が分かってくるはずであり、これらを地域別エネルギーシステムの計画、ひいては国スケールのエネルギーシステムの計画やビジョンにも反映させることができるはずである。このように、国スケールでの俯瞰的な視点での計画によりエネルギーシステム全体の方向性を示すことと、区画スケールでの個別の活動を行って、実際に導入を進め、詳細な条件を全体俯瞰の計画にも反映させることの両方を地域別エネルギーシステムの計画によってつなげることができる。このとき、国のビジョン、あるいは国スケールでのエネルギーシステムの計画は地域別エネルギーシステムの計画にとっての制約として機能するというよりは、全体俯瞰的な視点から目標や方向性を示すものであり、地域別エネルギーシステムの計画とともに作り上げていくものとして考えることができる。

既存のエネルギーシステムにおいては、大規模集中型のエネルギー設備（例えば大型石炭火力発電所）の計画・設計は、広域のエネルギーシステムの計画と深く関わっており、事業者も限定的であったため、区画スケールと国スケールの活動が連動しやすかった。しかしながら、分散型のエネルギーシステムにおいては、発電所等のエネルギー設備の規模が小さく、エネルギーキャリアの変換に関連する設備等多様な設備があり、多様なアクターが参画することが想定されるため、区画スケールと国スケールの連携は容易ではなく、地域別エネルギーシステムの計画が必要となる。



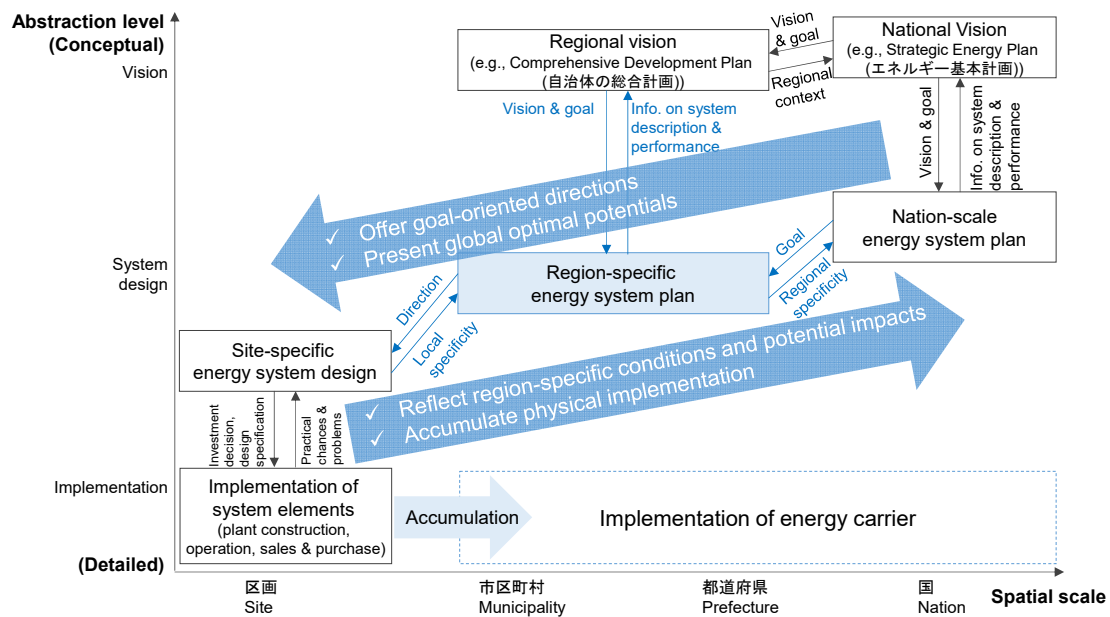


Figure 3-2 Multi-scale activities for energy carrier implementation and roles of region-specific energy system plan to link nation-scale activities and site-scale activities.

### 3.1.2. 地域エネルギーシステムの計画と化学プロセス設計との比較

地域スケールと区画スケールでのエネルギーシステムの計画・設計を比較して、計画・設計問題の主要な違いを明らかにする。区画スケールでのエネルギーシステム設計においては、例えば、電力を水素に変換する水電解プラントの設計があり、実践的に広く利用されている化学プロセス設計（例えば、Biegler et al., 1997）を参考にすることができる。地域エネルギーシステムの計画と化学プロセス設計の比較を Table 3-2 に示す。化学プロセス設計は、化学プラント建設の際の初期的な基本設計として比較を行った。まず、計画・設計のバウンダリに関して、化学プロセス設計では細かくは決めるべき部分はあるものの、用地や原料・製品の条件によって決まるプロセス要求からある程度はつきりした設計のバウンダリが存在する。地域エネルギーシステムの計画では、第2章で考察したように決まったバウンダリがあるわけではなく、適切なバウンダリの設定も重要になる。都道府県や市区町村、都市雇用圏等複数の地域区分について分析しながら適

切なバウンダリを定める必要がある。化学プロセスでは、プラントオーナーが主な意思決定を行うが、地域エネルギーシステムの計画は必ずしも決まった意思決定者はおらず、例えば自治体、エネルギー事業者等がその候補となり得る。これらの候補によるシステムの計画の課題については後述する。何年後を見据えた計画かという時間スコープに関しては、地域エネルギーシステムの計画は比較的長期的視点での計画である。オーナーとして、例えば化学プロセス設計では5年後、地域エネルギーシステムの計画では20年後等があり得る。ただし、この時間スコープは、計画・設計するシステムの規模やフェーズによっても変わるものである。化学プロセス設計の場合、設計されるシステムは、製品を生み出し、さらにはその製品による利益を生み出すものであり、プラント建設プロジェクトの予算や環境・安全規制といったものが主な制約となる。地域エネルギーシステムの計画の場合は、特定のアクターの利益ではなく、むしろ地域あるいは地域外も含めた環境性の改善、便益向上に貢献するものであり、例えば自治体の予算や利用可能な技術等が制約となる。

Table 3-2 Comparison of conventional chemical process design and regional energy system plan

|                                    | 化学プロセス設計<br>Chemical process design  | 地域スケールでのエネルギーシステムの計画<br>Region-scale energy system plan   |
|------------------------------------|--|---|
| 計画・設計バウンダリ<br>Plan/design boundary | 用地の範囲、原料・製品の条件等によって定まるプロセスの範囲<br>Physical land area for construction, process boundary specified based on conditions of feed, products, etc. | 都道府県、市区町村、都市雇用圏等の地域区分。地域区分も計画の問題となる。<br>Regional division, such as prefecture, municipality, and UEA. Specification of regional division can be a part of planning problem. |
| 主要な意思決定者<br>Main decision maker    | プラントオーナー<br>Plant owner  | 決まった意思決定者はいない。自治体、エネルギー事業者等が候補となり得る<br>There is no typical decision maker. Local government and energy supplier are potential candidates.                                   |
| 時間スコープ<br>Time scope               | 比較的短い。例えば5年後<br>Relatively short term; e.g., 5 years after   | 比較的長い。例えば20年後<br>Relatively long term; e.g., 20 years after   |
| システムが生み出すもの<br>System output       | 製品、利益<br>Product and owner's profit  | 地域あるいは地域外も含めた環境性の改善、便益向上<br>Improvement of environment and benefit inside/outside region  |
| 主要な制約<br>Main constraint           | プロジェクト予算、環境・安全規制<br>Project budget, environmental and safety regulations   | 自治体予算、利用可能な技術<br>Local government budget and available technology   |

### 3.1.3. 地域エネルギーシステムの計画主体

地域エネルギーシステムを計画する主体として自治体や既存の大手エネルギー事業者が考えられるが、それぞれの立場から地域エネルギーシステムの計画における役割や課題を考察する。

## 自治体

自治体は、公益に資する事業、政策を行う立場であり、地域のエネルギーシステムの計画においても重要なアクター候補である。一方で、基本的にエネルギーシステムの計画に関するノウハウを持たないという課題を有する。自然エネルギー財団 (2017) によると、既存のエネルギーシステムにおいて自治体はエネルギー政策への関与はほとんどなく、地域エネルギー政策は 2000 年前後から先導的自治体において地球温暖化対策の観点から始まり、多くの自治体ではいまだ関与が小さい。自治体を対象として実施された再生可能エネルギーに関連したアンケート調査 (創発的地域づくり・連携推進センター, 2016) では、再生可能エネルギー関連の取り組みを管轄する部署として、環境部門等で対応しているのが全体の 3 割程度であり、多くの自治体では総務財務部門や市民生活部門、産業部門等であり、特に人口 20 万人以上の大規模自治体ほど環境を専門とする部局体制を取っていることが示された。小規模な自治体ほど非専門的な部署・職員で対応していることが想定される。同アンケート調査では、エネルギー資源量等の基礎データについて、特に小規模自治体で多く把握できておらず、全体としても多くの自治体で把握できていない傾向、さらに、把握している多くの自治体ではコンサルタント会社等に依頼しているということが示された。自治体を対象とした別のアンケート調査 (環境省, 2015) では、地域エネルギー政策の推進上の自治体の役割について、事業主体は民間とし、自治体は規制緩和や用地提供等の側面支援を行うという回答が 5 割以上という結果が示された。自治体はエネルギーシステムの計画について専門的な知識を持たず、その遂行主体ともなりにくい。自治体は公平かつ長期的な観点から地域のエネルギーシステムを計画することができるアクターではあるものの、これらを補完する別のアクターと協働して地域のエネルギーシステムを計画しなくてはならない。

自治体における別の課題として、エネルギーシステムの計画の範囲が自治体の区域に限定されるということが挙げられる。複数市町村にまたがるエネルギーシステムの計画は広域連携が必要となり、一つの市町村で計画することはできない。その場合、上位の行政区分である都道府県が中心となって関係する市町村で協議しながらエネルギーシステムを計画することが想定される。例えば岩手県では、北いわてと呼ばれる県北部にある 12 の市町村で再生可能資源を利用促進することを掲げている (岩手県, 2019b)。

## 既存の大手エネルギー事業者

既存の大手エネルギー事業者は、これまでにエネルギーシステムを計画し、運用してきたため、エネルギーキャリアを用いた新たなエネルギーシステムの計画においても有力なアクター候補となり得る。一方で、エネルギーキャリアの導入は既存のシステムを大きく変えるということであり、既存事業における利益を下げ、さらには多額の投資を行ってきた既存の有形・無形の資産が使われなくなることで保有資産の価値を毀損することにもつながるため、必ずしも積極的な関与が見込めるわけではなく、導入の妨げとなる可能性もある。例えば、既存の電力会社では、大規模集中型の火力発電所、原子力発電所を使った発電事業の面から考えると、分散型の再生可能エネルギーによる発電が増加することは発電のシェアが低下し、既存設備の設備利用率低下につながるため通常は望ましくない。実際に、再生可能エネルギーの導入において既存の電力システムにおける先発企業のビジネスモデルと対立することが指摘されている (Sugimoto, 2020)。既存の石油会社では、EV や FCV の普及によりガソリン需要が縮小することは既存事業の利益を圧縮し、製油所設備という資産価値を毀損することにもつながる。地域でのエネルギーシステムを既存の大手エネルギー事業者が計画する場合、既存事業における資産を最大限活用できるようなシステムとなりかねず、必ずしも地域社会にとって適切なシステムが計画されない可能性がある。さらに、既存システムでは、電力、ガス、石油等、原料や製品の違いによりエネルギー事業者がすみ分けられていたが、エネルギーキャリアを用いたシステムでは、電力・熱・輸送等のセクターを統合したシステムとなるため、これまでの個別の事業者での計画のノウハウだけでは不十分である。

以上のように、自治体も既存の大手エネルギー事業者も必ずしも地域スケールでのエネルギーシステムを計画するのに適しているとは言えない。他のアクター候補にしても同様であり、個別のアクターが計画するのではなく、多様なアクターによる協働が必要である。

## 3.2. 技術導入の社会変化プロセスにおける地域別

### エネルギーシステムの計画の活用可能性

エネルギーキャリアの導入とは、関連する設備を設置するという技術的、エンジニアリング的なプロセスにとどまらず、社会全体が変化するプロセスである。これまでに、

社会学の分野で過去のエネルギーに関連する技術導入における社会全体の変化プロセスを分析する試みが行われてきている。ここでは、エネルギーキャリア導入においても同様の社会全体の変化プロセスがあると仮定し、エネルギーキャリア導入における地域別エネルギーシステムの計画の活用可能性を示し、地域別エネルギーキャリア導入分析の要件を明らかにする。

過去の技術導入のプロセスについて多数の分析がなされてきているが、Geels and Johnson (2018) は、技術導入のプロセスを説明する社会学モデルについて体系的に整理した。この整理に基づいて、技術導入における社会変化のプロセスでの地域別エネルギーシステムの計画の活用可能性を考察する。本節の以下では、技術導入プロセスを説明する社会学モデルについて Geels and Johnson (2018) より翻訳して引用し、引用部は斜体表記とする。

#### **i) 新規技術の採用プロセスに着目したモデル**

##### **モデルの説明：**

技術導入プロセスを新規技術の採用者 (adopter) が拡大するプロセスとして捉え、モデル化する。着目する現象や要因によって異なるモデルが提唱されており、Epidemic model, Rational choice model, Social-psychological framework, Increasing-returns-to-adoption model という代表的な4つのモデルが挙げられている。Epidemic model は、ネットワーク構造を介して、多くの場合対面での接触を通じて、集団全体に情報が広がることに焦点を当てる。Rational choice model は、イノベーションのコストと相対的なパフォーマンスが市場を介した技術普及の重要な推進力であると仮定する。ミクロ経済学的な意思決定手順（費用便益分析等）を使用して、消費者は（固定された）好みと利用可能なリソースに関連してイノベーションを評価し、購入するかどうかを決定する。

Social-psychological framework では、採用者 (adopters) の態度、信念、規範に焦点を当てる。Increasing-returns-to-adoption model は、より多くの人々が採用するにつれて、普及プロセス中に技術の価格／パフォーマンス特性が向上することを提案する。

##### **地域別エネルギーシステムの計画の活用可能性：**

特に Rational choice models においては、採用者が合理的な判断に基づき採用行動を取ることを前提としており、シミュレーションによる定量的な評価結果を提示することで採用のための判断材料として活用できる。採用による地域のシステム全体での影響（例え

ば LC-GHG や雇用創出等) は簡単には理解できず、地域条件を考慮したシミュレーションによる分析が有効である。特に自治体のような公益性を重視する採用者にとっては、システム全体での影響が重要である。また、採用者の収入や職業、教育レベルといった属性によって好みや利用可能なリソースは異なり、採用者の属性の分布は地域により異なるはずであるため、地域別での技術の採用の進み方にも違いが表れるはずであり、このような違いを考慮することで、技術導入しやすい地域が分かるはずである。Social-psychological framework の観点からは、技術の採用において、社会的なプレッシャーといった規範的な要素も重要であることが分かった。例えば、ノルウェーの Mo Industrial Park では、大型車が入り出る産業エリアと住宅地が近接していることから周辺の大気環境を改善することを目的に、電気自動車や燃料電池自動車の採用が検討された (Fedrico et al., 2017)。身近な大気環境の問題は地域内での社会的プレッシャーが大きく採用に結びつきやすい可能性があるため、エネルギーキャリア導入による局所的な大気汚染の改善効果を定量的に示すことができれば、関連する社会的プレッシャーを受けるアクターによる採用が進む可能性がある。Increasing-returns-to-adoption model の観点からは、エネルギーキャリアにおいても導入が進むほど便益が大きくなる要素があるため、初期は導入しやすい地域から導入を進め、エネルギーキャリア技術の採用の便益が大きくなった段階で広く導入していくことが有効であると考えられる。例えば、FCV や水素ステーションの採用においては、初期は FCV も水素ステーションも少ないため採用による便益が小さいが、ある程度普及してくると便益が大きくなっていく。エネルギーキャリアを導入するためには、初期段階で優先的に導入を進める地域を選定することも必要となる。

## ii) システムの構築と拡大プロセスに着目したモデル

### モデルの説明：

物理的なインフラや設備の構築によってシステムが拡大していくプロセスとして技術導入を捉える。統合されたインフラ (電力システム、鉄道ネットワーク、電話システム、インターネット等) に焦点を当て、通常、システムを物理的に構築し、拡大するプロセスとしてシステムの普及を理解する。(中略) まず、大規模な技術システムは、様々な技術 (タービン発電機、変圧器、送電線等) だけでなく、『製造会社、公益事業会社、投資銀行等の組織』も含む異種要素の「シームレスなウェブ」として認識される。システ

ム普及の始まり初期はシステム構築者による献身的な「仕事」に依存するが、システムが「モーメント」を得るにつれて、後半のシステム普及はより自立したものとなる。

#### **地域別エネルギーシステムの計画の活用可能性：**

エネルギーキャリアの導入においても、エネルギーキャリアの製造、輸送の設備が拡大していくことでエネルギーキャリアが導入されていくと考えられる。技術的な設備が拡大していく過程では、その技術部品を製造する会社や投資銀行等の異種要素が結びつく必要がある。そのため、地域別エネルギーシステムの計画があることで、多様なアクターが構築すべきシステムを理解し、協働するための動機づけにつながるものが想定される。この一例として、地域内外の複数のアクターが協働して短期間で大規模に再生可能エネルギーを導入したデンマークの Samsø 島では、地域エネルギーに関するマスタープランが初期に作られ、それが国からの資金獲得につながり、国および目標およびガイドラインを具体的な地域のアクションに置き換え、地域を導くビジョンとして機能し、さらには、地域社会および地域外のアクターのコミュニケーションを援助した (Sperling, 2017)。また、導入初期はシステム構築者の活動に依存し、導入が進むと、導入プロセスそのものが「モーメント」を得て導入が進みやすくなるため、この観点からも初期段階で優先的に導入を進める地域を選定する必要があると言える。

#### **iii) 人や資金、情報等の循環により地域での取り組みが地理的に広がるプロセスに着目したモデル**

##### **モデルの説明：**

技術導入を地理的に導入の取り組みが広がっていくプロセスとして捉える。技術がある場所 (A) で機能する場合、普及とは別の場所 (B) で機能させることを意味する。これには、場所 A と B の間での (知識、設計ルール、人、ファイナンス、事務処理の) 循環と、場所 B での社会技術構成の複製の両方が必要である。例えば、場所 A での成文化、標準化、モデル構築、ハンドブックの作成、ベストプラクティスの策定によって知識が一般化され、専門誌、ニュースレター、ワークショップ、会議等を通して地理的に移動し、場所 B での地域の条件 (都市構造、人口密度、社会経済的パラメータ等) に合わせて調整が行われる。

#### **地域別エネルギーシステムの計画の活用可能性：**



第2章で構築した地域別エネルギーキャリア導入分析は、地域特性と紐づけてエネルギーキャリアの導入効果をモデルの形で一般化できているため、この分析を基にした地域別エネルギーシステムの計画は他の地域への適用もできる。例えば、技術導入によるGHG削減量の地域間での違いが分かることで、システム構成の変更を検討することや補助金適用の可否にも影響するためビジネスモデルの変更を検討することに活用できる。さらに、地域別の社会経済的な因子に基づく導入の進め方についても地域の条件に応じた一般化ができると、地域間での知識共有が容易になるはずである。例えば、オーストリアでのバイオマス地域暖房の事例では、既存事業者である煙突掃除業者や石炭事業者の反発があったことが指摘されている(Geels and Johnson, 2018)。このようなエネルギー資源や需要に関わる条件以外の要素もエネルギーキャリア導入においては重要な地域特性だと考えられる。

#### iv) 新しいシステムが既存の環境に組み込まれながら既存環境そのものも変化していくプロセスに着目したモデル

##### モデルの説明：

技術導入において、導入される社会環境は静的なものではなく、同時に変化していく動的なものだとし、導入される技術、イノベーションが同時に変化する社会環境に組み込まれていくプロセスとして技術導入を捉える。特に重要な社会環境として、文化、規制、ビジネス、ユーザー環境が挙げられている。文化的正当性や社会受容性といったものは、消費者の好み、政策支援、および財源へのアクセスを形作るが、新規技術の場合、文化的正当性がなく社会受容性が低く支持されない場合も多い。規制というのは、安全性、信頼性、および負の副作用に対処するために厳格化されたり補助金等のインセンティブが与えられたりするものである。ビジネス環境では、確固たる戦略、サプライチェーンと流通チェーン、修理施設、技術インフラ等が構築されなくてはならない。また、既存企業に破壊的な影響を与える可能性もある。ユーザー環境への組み込みというのは、ユーザーにとって技術がなじみのない、もしかすると恐ろしいものから、日常生活のルーティンや習慣に組み込まれたなじみのあるものになる必要がある。

##### 地域別エネルギーシステムの計画の活用可能性：

定量的評価に基づいて規制や補助金等の制度設計支援に活用できる。政策における定性的なビジョンは重要な役割を果たすものの、直感的な理解にとどまってしまうため、それを実現するためのシステムの記述およびその定量的な評価を行うことでビジョンを

包括的に理解でき、効果的なビジョン検討を行うことができることが、地域のエネルギーに関する活動団体におけるエネルギー消費者、専門家・学識者、エネルギー産業関係者を対象とした研究でも示唆されている (Trutnevyte et al., 2011)。特に地域の問題と関連付けた定量的評価は政策的な支持を得ることにつながると考えられる。課題として、システムが組み込まれる環境の違いを考慮に入れる必要があることが分かった。既存の環境は地域によって異なるため、技術導入のしやすさも地域によって違いがある。例えば、オーストリアのバイオマス地域暖房の事例では、天然ガス管が通っている地域では、天然ガスの価格競争力およびガス業界からの圧力によりバイオマス地域暖房が導入されにくかったことが述べられている (Geels and Johnson, 2018)。この事例のように既存のビジネスと競合する場合には反対にあい、システムが進みにくい場合がある。文化的、政策的にも地域差はあるため、導入のされ方は異なるはずであり、これらの違いを考慮した地域別分析が必要である。

以上の内容を Table 3-3 にまとめる。第 2 章で構築した地域別エネルギーキャリア導入分析手法によって、地域の条件を考慮した詳細な定量的評価に基づいて、採用における合理的選択の判断材料を提供できることや規制や補助金等の制度設計支援に活用できることが考えられるが、さらなる分析の追加要件も明らかになった。地域での社会的プレッシャーを受けやすく、採用に結びつきやすい、あるいは地域の政策的支持に結びつきやすい、地域の身近な環境問題を定量的に評価することが必要である。Table 3-1 からは、エネルギーシステムの分析において、経済性に関する評価が多く、環境影響では CO<sub>2</sub> や GHG 排出量による評価が多く採用されていることが分かり、それ以外の環境影響に関する評価はあまり多くない。第 4 章で地産地消モデルの拡張を行い、いまだ評価が不十分な気候変動以外の環境影響に関する評価を分析に取り入れる。また、エネルギーキャリア導入の初期段階では、技術を採用する側の観点からもシステムを構築する側の観点からもハードルが高く、後半になるほど導入しやすくなるため、初期段階での優先的に導入を進める地域を絞り込む必要性が明らかになった。この際、システムが組み込まれる環境の違いによって地域での導入のしやすさに違いがあることが示唆され、地域別の社会経済因子を考慮したエネルギーシステムの計画が必要である。この課題について第 5 章で社会経済因子を含めた地域別エネルギーキャリア導入分析を行う。さらに、エネルギーキャリア導入には、技術のサプライチェーン構築や政策や資金提供等を

行う多様なアクターが関わるため、地域別エネルギーシステムの計画を行うことでアクターに方針を示し、導入に対しての動機づけできることが期待される。第6章ではこの検証を行う。第7章では、これらの結果をまとめて地域別エネルギーシステムの計画に基づく導入のメカニズムを示す。

Table 3-3 Model description of system diffusion process and applicability of region-specific energy system plan in diffusion processes from viewpoints of diffusion process models

| 社会学モデルの種類   | モデルの説明  | 地域別エネルギーシステムの計画の活用可能性   |
|---|---|---|
| i) 新規技術の採用プロセスに着目したモデル                                | 技術導入プロセスを新規技術の採用者 (adopter) が拡大するプロセスとして捉え、モデル化する。  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rational choice model における選択の判断材料を提供できる (第2章で対応)</li> <li>- 採用者の属性の地域分布による導入のしやすさを考慮すべき (第5章で対応)</li> <li>- Social-psychological framework の観点から、地域での社会的プレッシャーを受けやすい身近な大気環境の問題を評価すべき (第4章で対応)</li> <li>- Increasing-returns-to-adoption model の観点からは、採用のハードルが高い導入初期に優先的に導入する地域を選定すべき (第5章で対応)</li> </ul> |
| ii) システムの構築と拡大プロセスに着目したモデル                            | 物理的なインフラや設備の構築によってシステムが拡大していくプロセスとして技術導入を捉える。   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 多様なアクターが構築すべきシステムを理解し、協働するための動機づけすることができる (第2章で対応)</li> <li>- 上記を検証すべき (第6章で対応)</li> <li>- システム構築者の活動が特に重要な導入初期では、優先的に導入する地域を選定すべき (第5章で対応)</li> </ul>   |
| iii) 人や資金、情報等の循環により地域での取り組みが地理的に広がるプロセスに着目したモデル       | ある場所で導入された技術が別の場所でも機能するように人や資金、情報等を循環することで、地理的に導入の取り組みが広がっていくプロセスとして技術導入を捉える。   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 地域特性と紐づけてエネルギーキャリアの導入効果をモデルの形で一般化できているため、他の地域への適用もできる (第2章で対応)</li> <li>- 地域別の社会経済的な因子に基づく導入の進め方についても地域の条件に応じた一般化すべき (第5章で対応)</li> </ul>   |
| iv) 新しいシステムが既存の環境に組み込まれながら既存環境そのものも変化していくプロセスに着目したモデル | 技術導入において、導入される社会環境 (文化、規制、ビジネス、ユーザー等) は静的なものではなく、同時に変化していく動的なものだとし、導入される技術、イノベーションが同時に変化する社会環境に組み込まれていくプロセスとして技術導入を捉える。 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 定量的評価に基づいて規制や補助金等の制度設計支援に活用できる (第2章で対応)</li> <li>- 政策的な支持を得るための地域の問題と関連付けた定量的評価をすべき (第4章で対応)</li> <li>- システムが組み込まれる環境の違いを考慮に入れたシステムの計画をすべき (第5章で対応)</li> <li>- 文化的環境として社会受容性を醸成するために定量的評価と共に導入するエネルギーシステムに対する関係者の理解を促進する。</li> </ul>   |

## 第4章 環境影響評価手法と地域別導入分析の統合

---

これまでに行われてきたエネルギーキャリア導入分析では、主に経済性の分析が行われてきていたが、環境面での分析も欠かせず、地域において身近な問題であり政策目標と結び付けられる局所的な環境問題に関する評価も必要である。特に、GHG 排出以外の環境影響の分析は事例が少なく、知見が不足している。本章では、地域別でのエネルギーキャリア導入における気候変動以外の多様な環境影響を分析するために、LCA に基づく多面的な環境影響評価を組み込んだ導入分析を行う。第2章で構築した地域別エネルギーキャリア地産地消モデルを拡張して、LCA における複数のインパクトカテゴリでの分析を行い、エネルギーキャリア導入におけるグローバルな環境影響と局所的な環境影響での評価結果への違いを明らかにする。

### 4.1. エネルギーシステムにおける気候変動以外の課題

エネルギーシステムは気候変動だけではなく、大気汚染や酸性化等多様な環境影響と密接に関連している。例えば、現状のエネルギーシステムにおいて、火力発電所や自動車等では窒素酸化物 (NOx) や硫黄酸化物 (SOx) (Turconi et al., 2013)、非メタン揮発性有機化合物(NMVOC) (環境省, 2017) が排出され、酸性化や大気汚染といった問題の一因となっている。これらは基準値を設けた規制によって排出量がコントロールされており、依然として解決すべき問題である (環境省, 2019)。電気自動車や燃料電池自動車といった新規技術導入において、たとえ GHG 排出量が削減されても他の環境面では悪化する可能性があることも指摘されている (Singh et al., 2014)。第3章では、地域の身近な環境問題は技術の採用において社会的プレッシャーを受けることや政策的な支持を得やすいことが考えられ、この影響を定量化することで導入支援につながりやすいこと

が示唆された。エネルギーキャリアを用いたエネルギーシステムに関してライフサイクルアセスメント (LCA) によって多様な環境影響を定量化する取り組みが行われてきた (Valente et al., 2017)。しかし、単位プロセスにおいて NOx や SOx 等の CO<sub>2</sub> 以外の排出量のデータを得るのは主に二つの理由から困難である。一つは、CO<sub>2</sub> 排出に関するデータはレポートや論文等の多くの文献で参照することが可能なのに対し、それ以外のデータは少ないことである。特に、新たな材料やデバイス、設備の製造プロセスや利用プロセス等は参照可能な文献自体も少なく、CO<sub>2</sub> 排出に関するデータが得られたとしてもその他のデータが得られないこともある。もう一つの理由として燃料の燃焼を伴うプロセス等であれば燃料の炭素含有量からマスバランスに基づいて CO<sub>2</sub> 排出量を推算することができるのに対し、NOx は燃料中に含まれる窒素分から生成 (Fuel NOx) するだけでなく大気中の窒素分から生成 (Thermal NOx) することや脱硝装置、脱硫装置等の処理プロセスを含む場合も多いことから単純なマスバランスで計算することができず推算が容易でないということである。現在、ecoinvent (ecoinvent, 2014) や IDEA (AIST and JEMAI, 2015) のといったライフサイクルインベントリデータベースも整備されてきているが、新規技術・プロセスに関してのインベントリデータは十分ではなく、文献調査や実際のプロセスでの計測等によってデータを得る必要がある。このように、気候変動にとどまらず多様な環境影響を評価することは重要であるものの、インベントリデータの取得が困難であることから評価は進んでいない。

## 4.2. 多様な環境影響評価の組み込み

### 4.2.1. ライフサイクルインパクト評価

第2章で構築した地産地消モデルを拡張し、日本の地域別のエネルギーキャリア導入における多様な環境影響に関連する排出量を計算し、ライフサイクルインパクト評価 (LCIA) を行う。Figure 4-1 に示す手順でライフサイクルインベントリ分析および LCIA を実施する。シミュレーターにおける入力情報は地域パラメータ (region-specific parameter) および設定パラメータ (setting parameter) の二種類とした。これらの入力情報を基にエネルギーバランスをシミュレーションすることで、各プロセスからの排出量、エネルギーフロー、導入あるいは代替される設備の容量が出力される。これらの出

力情報から LCIA を行う。LCIA は、日本で開発されているインパクト評価手法 (LIME2) (Itsubo and Inaba, 2012) を用いて、気候変動、酸性化、都市域大気汚染、光化学オキシダント生成のインパクトカテゴリについて、人間健康、社会資産、一次生産における影響評価および統合化指標 (LIME index) による評価を行った。LCIA の結果は最終的に地域別での棒グラフおよび地図を用いて可視化した。地図上での可視化では、GIS (ArcGIS 10.4 for desktop)を用いて評価結果に応じた地図の塗分けを行った。

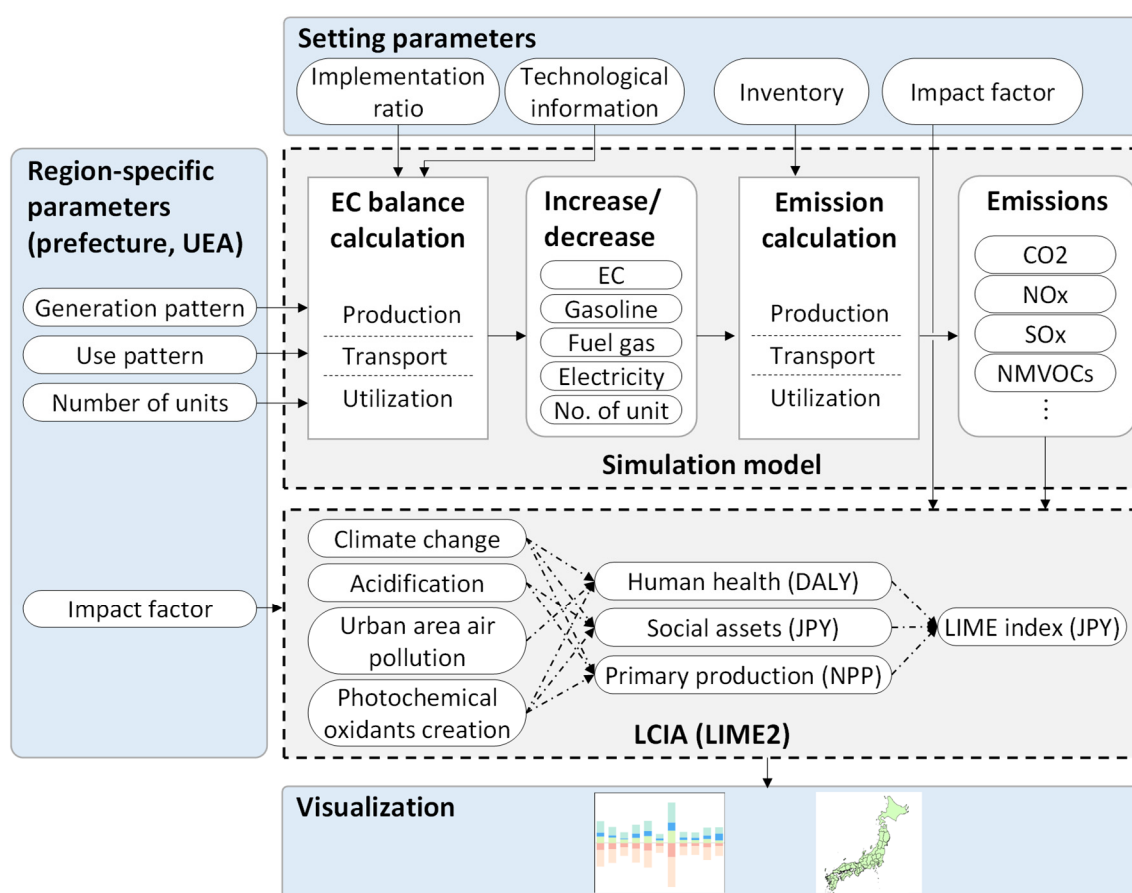


Figure 4-1 Region-specific analysis approach combining region energy model and life cycle assessment (LCA). Adapted from [ii].

Figure 4-1 の左側に示した地域パラメータには、再生可能エネルギーのエネルギーキャリア製造のパターン、車や電気製品等のエネルギー消費機器のエネルギー使用パターン

ン、技術導入数の最大量、系統電力のインベントリが含まれる。これらのデータは、文献から収集および推算した。都市域大気汚染および光化学オキシダント生成は、気候や人口動態等の排出場所の条件によってインパクトが異なるため、これらのインパクト係数も地域パラメータとして扱った。気候変動および酸性化に関しては、インパクト係数を地域に依らない設定パラメータとして扱った。

#### 4.2.2. 目標とスコープの設定

Table 4-1 にケーススタディにおける目標とスコープを示す。エネルギーキャリアとしての水素に関連した技術導入の組み合わせを 4 パターン検討する。4 パターンというのは、水素製造技術の FGSTR および PVWE の 2 パターン、水素使用技術の FCCGh および FCV の 2 パターンの組み合わせである。Figure 4-2 に示す通り、ケーススタディにおける LCA として、エネルギーキャリアおよび設備・機器のライフサイクルを考慮した。エネルギーキャリアのライフサイクルは自動車の LCA (Nordelöf et al., 2014) では well-to-wheel と呼ばれるものに相当するものであり、水素の製造、輸送、使用を含み、設備・機器のライフサイクルは、原材料の処理、機器・設備製造、使用を含む。オンサイトでの水素製造、すなわち輸送しないことを想定し、水素の輸送のステージでは貯蔵するための水素圧縮のエネルギー投入に相当する排出のみを考慮した。オンサイトでの水素製造としたのは、水素製造と使用の場所を設計することがこのケーススタディの主要な目的ではないためである。FCCGh および FCV によって 10%の従来技術を代替することを想定した。ただし、技術予測はスコープ外であるため、技術に関するパラメータは現在の値を使った。地域区分として、日本の都道府県および都市雇用圏を対象とした。

Table 4-1 Settings for life cycle assessment (LCA). Adapted from [iii].

| Items                                | Settings  |
|--------------------------------------|---|
| Life cycle background inventory data | IDEA v2 (AIST and JEMAI, 2015), ecoinvent v3.1 (ecoinvent, 2014).<br>(See also Tables B-1 and B-3 for the cumulative environmental loads of main inventories)   |
| Life cycle foreground inventory data | Implementation amount and fuel consumption in each region are estimated by the simulator  |
| Life cycle boundary                  | Cradle to grave for energy-carrier (EC) life cycle<br>Cradle to gate for equipment life cycle   |
| Assumed time frame                   | The future, when the hydrogen-related technologies have penetrated to 10%, but the current status was used for technological parameter settings   |
| Functional unit                      | One-year use of alternative technologies with 10% replacement for the conventional technologies   |
| Technical information                | Refer to Table B-2  |
| Region-specific characteristics      | 47 prefectures and 247 urban employment areas (UEAs) in Japan<br>(refer to Table A-3 for region-specific parameters for simulation and Table B-3 for region-specific inventory data)  |
| Emission substances                  | CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , HCl, NH <sub>3</sub> , nonmethane volatile organic compounds (NMVOCs)   |
| Life cycle impact factors            | <midpoint><br><ul style="list-style-type: none"> <li>- Climate change</li> <li>- Acidification</li> <li>- Urban area air pollution</li> <li>- Photochemical oxidant creation</li> </ul> <endpoint><br><ul style="list-style-type: none"> <li>- Human health damage</li> <li>- Social asset damage</li> <li>- Primary production damage</li> <li>- LIME index (integrated single index)</li> </ul> Refer to (JLCA, 2018) for details of the LIME2 impact factors.<br>The specific values of the LIME2 impact factors are available in JLCA (2013). |
| Direct applications of LCA results   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Strategy planning to develop a region-specific energy system</li> <li>- Design of the appropriate regional division for technology implementation</li> </ul>   |
| GIS software                         | ArcGIS 10.4   |



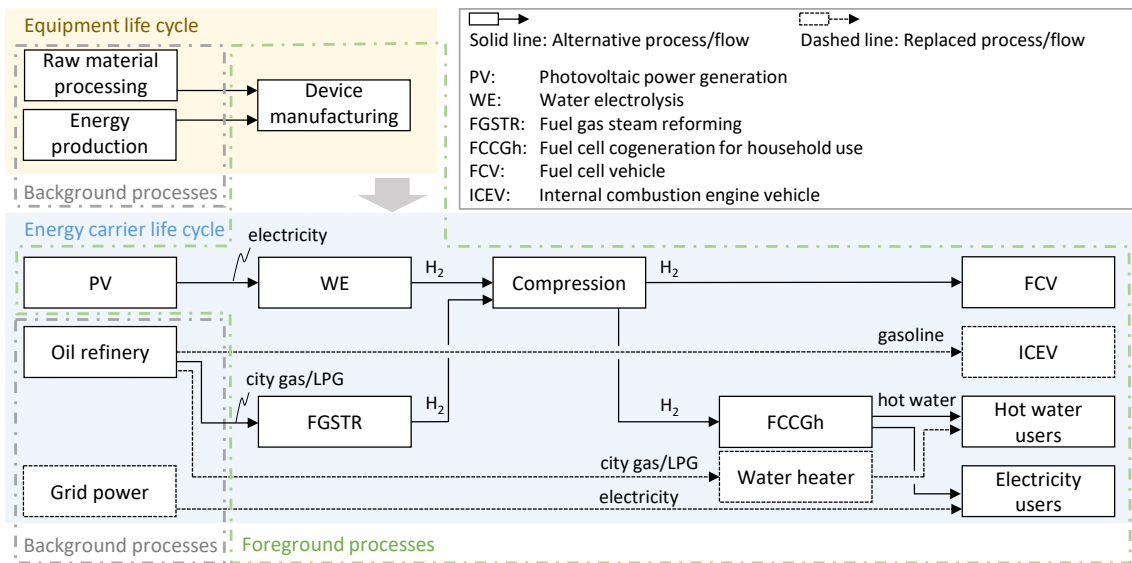


Figure 4-2 Energy system boundary considered in this study. Adapted from [ii].

### 4.2.3. 地域別エネルギーキャリア地産地消シミュレーション モデルの拡張

第2章で構築した地産地消モデルを拡張し、多様な排出物質のインベントリ分析を行う。GHG 排出だけでなく他の排出物質も含めて排出物質ごとの計算ができるように、計算式における排出量および排出係数の文字に排出物質を表す下付きの  $s$  を加えた。例えば、 $E_{i,r}^P$ ,  $\phi_{i,r}^{\text{Production}}$  はそれぞれ  $E_{i,r,s}^P$ ,  $\phi_{i,r,s}^{\text{Production}}$  のように変更した。排出物質として、現在のエネルギーシステムにおいて主要な問題となっている  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NMVOCs}$  を含めた。火力発電所では  $\text{NO}_x$  や  $\text{SO}_x$  が排出され、酸性化や大気汚染を引き起こす。自動車は  $\text{NO}_x$  や  $\text{NMVOCs}$  が排出され、光化学オキシダント生成の原因となる。その他の排出物質の  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{NH}_3$  についても、気候変動や酸性化、大気汚染に関与するために含めた。

モデルを使って計算したインベントリデータからのインパクト評価として、LIME2 (Itsubo and Inaba, 2012) における気候変動、酸性化、大気汚染、光化学オキシダント生成の4つの影響領域を検討し、人間健康、社会資産、一次生産の3つの保護対象における

被害評価を行えるようにした。人間健康、社会資産、一次生産の被害評価はそれぞれ障害調整生命年数 (DALY)、多岐にわたる構成要素が受ける影響の経済指標 (円)、純一次生産量 (NPP) を指標とする。また、外部費用 (円) として被害を単一指標で評価するための LIME index による評価も行えるようにした。LIME index は、各被害に対しての統合化のための係数を社会の選好に基づいて決めたものである (JLCA, 2018)。

LIME2 では、都市域大気汚染および光化学オキシダント生成に関して、運命分析、暴露分析に基づいた排出場所ごとのインパクト係数が用意されている (JLCA, 2013)。すなわち、排出物質の大気中濃度や被害量は、排出場所の気候条件や人口密度等の保護対象の分布の影響を受けるために場所によってインパクト係数が異なるということである。機器の製造、原材料処理の段階における排出は、設備・機器が利用される場所とは必ずしも一致しないため、日本全体の平均的なインパクト係数を用いることとした。

各プロセスにおける物質ごとの排出係数はインベントリデータベースや学術論文、報告書等の文献を基に設定した。原材料処理や燃料・電力製造プロセス等のバックグラウンドプロセスにおける排出も含めた機器・設備製造および燃料使用のインベントリ分析のために、日本で用いられるインベントリデータベース、IDEA v2 (AIST and JEMAI, 2015) を利用した。ただし、PVWE や FCCGh、FCV に関しては、データが無かったため、文献 (Evangelisti et al., 2017; NEEDS, 2008; Zhang et al., 2017) を基にした推算を行った。インベントリデータベースの種類によって、システムバウンダリが異なるため、PV と燃料電池のインベントリとして、製造プロセスでの入出力情報のみ ecoinvent (2014) および NEEDS (2008) のデータを用い、原材料やユーティリティのバックグラウンドプロセスでの排出に関しては IDEA v2 のデータを用いた。

ケーススタディで用いたインベントリデータ、技術情報、地域パラメータの設定について、それぞれ Table B-1~3 にまとめた。

## 4.3. 評価結果

### 4.3.1. 保護領域ごとの LCA の結果

人間健康被害における LCA 結果を Figure 4-3 に示す。北海道、東京都、福岡県、沖縄県の 4 都道県における、FGSTR および FCCGh、PVWE および FCCGh、FGSTR および FCV、PVWE および FCV の 4 つの技術組み合わせについて、ライフサイクルステージおよびインパクトカテゴリ別に評価した。4 つの技術組み合わせにおける全体的な傾向として、正味でのインパクトおよび内訳は地域ごとに異なるパターンが見られた。どの地域、技術組み合わせにおいても気候変動が主要なインパクトカテゴリであった。CO<sub>2</sub> の人間健康被害へのインパクト係数は NO<sub>x</sub> や SO<sub>x</sub>、NMVOCs のインパクト係数よりも 1/1000 から 1/10 程度小さいが、CO<sub>2</sub> の排出量は他の排出よりも 2 桁以上も多いため、GHG 排出に起因するインパクトは他の排出に起因するものよりもずっと大きい。NO<sub>x</sub> や SO<sub>x</sub> は、火力発電所での排ガス処理のように、多くのプロセスで濃度レベルが低くなるように除去されているのに対し、CO<sub>2</sub> は直接排出されがちであることが CO<sub>2</sub> のインパクトが大きくなる一因である。都市域大気汚染は気候変動に次いで人間健康被害への寄与が大きく、地域やライフサイクルステージによって最大 30%程度を占めている。光化学オキシダント生成はほとんど影響が見られない。都市域大気汚染は、製油所における燃料ガスやガソリン製造時、ICEV の走行時、火力発電所での発電時、デバイス製造や原料処理における燃料投入から排出される NO<sub>x</sub> や SO<sub>x</sub> が主な原因である。

Figure 4-3 (a および c) の化石由来の水素を使ったシステムと Figure 4-3 (b および d) の PV 由来の水素を使ったシステムを比べると、FGSTR からの水素製造の方が化石燃料からの CO<sub>2</sub> 排出が大きいため、正味での人間健康被害も大きくなっている。PV や電解装置の製造時の人間健康被害は比較的小さいことが分かる。PVWE による水素製造時の都市域大気汚染は FGSTR による水素製造時のものよりも大きい。これは、PV パネル用のガラス製造やウェハー製造時にシリコンインゴットの切断に使われるシリコンカーバイド製造、金属シリコン製造等の製造プロセスおよび原料処理プロセスにおけるエネルギー投入のための重油燃焼による SO<sub>2</sub> 排出が一因である。PVWE の導入では、水素圧縮に系統電力を使うため、水素製造に対する圧縮の寄与が FGSTR の場合に比べて大きかった。

Figure 4-3 (a および b)の FCCGh 導入効果は、軸のスケールは違っているが、Figure 4-3 (c および d)の FCV 導入と比較して、人間健康被害の観点でより大きな改善効果が見られる。Figure 4-3 (a)に示すように、FGSTR および FCCGh の導入においては、ライフサイクルでの被害の変化量はどの地域でも小さい。FCCGh 導入では、系統電力使用の代替に伴う被害削減が燃料ガス使用の代替に伴う被害削減よりも大きかった。FCV 導入では、主にガソリン使用の代替によって被害が削減されていた。FCCGh 製造による被害の増加量は無視できるほど小さかったが、FCV 製造による被害の増加量は ICEV 製造の代替による被害の削減量よりも大きかった。

Figure 4-3 (d)では、PVWE および FCV の導入によって正味の被害はあまり変化しないことを示している。PVWE および FCV の導入は、再生可能エネルギーを利用しているにも関わらず被害の削減に結びつかない理由として4つの可能性がある。①自動車の利用率が低く、自動車製造時の環境影響への寄与が大きいこと、②低燃費の ICEV を代替することを想定しているため、代替されるガソリン使用量はそれほど大きくないこと、③製造におけるエネルギー投入の大きい燃料電池スタックや水素タンクが必要であるために、FCV 製造時の環境影響は ICEV 製造時の環境影響よりも大きいこと、④水素圧縮はかなりの電力を消費し、それを系統電力からの電力によって賄っていること、である。シミュレーションにおいては、各変数にどの値を用いるかによって LCA 結果は変化する。この点について後段の節で考察する。

Figure 4-3 (b)の PVWE および FCCGh の導入における地域間の違いに着目すると、東京での被害削減量が最も大きく、次いで北海道、福岡、沖縄の順であった。この順番は、Figure 4-3 の都道府県名の横のかっこ内の数字で示した FCCGh の導入量の順と一致しており、被害の削減量は地域の需要の大きさに依存することが示唆される。FCCGh 1 台あたりの被害削減量は、北海道、東京、福岡、沖縄でそれぞれ 0.24, 0.16, 0.19, 0.31 DALY/(yr·10<sup>3</sup> unit)であった。北海道および沖縄における系統電力の GHG 排出係数は、それぞれ日本の 10 電力会社の平均の 1.3 倍、1.5 倍であるため、発電における低炭素化の効果が大きかった。

Figure 4-3 (d)の PVWE および FCV の導入では、棒グラフ全体におけるガソリン使用削減の割合は沖縄が最も大きかった。1 台あたりの年間での平均走行距離は、北海道、東京、福岡、沖縄でそれぞれ 13, 9.3, 16, 27 (10<sup>3</sup> km/yr/car)であり、沖縄は 1 台あたりの

年間での平均走行距離が最も長いこと自動車利用率が最も高いことに起因する。北海道、福岡、東京の順に水素圧縮段階での被害量が大きかった一方で、ガソリン使用の代替に伴う被害削減量の違いは 1%以内であった。水素圧縮時にかなりの量の系統電力を消費するため、系統電力 GHG 排出係数の大きさに依存することが示唆された。

東京では、平均走行距離が最も短いのに、正味の被害変化量は減少しており、他の 3 地域では増加していた。この理由は、東京では系統電力の排出係数が比較的小さく、水素圧縮時の被害量が小さいのに加えて、ガソリン使用量を削減することで都市域大気汚染の被害量が他の地域よりも大きく減少するためである。東京は人口密度が最も高い都道府県であり、多くの人が被害を受けるため、都市域大気汚染による人間健康への被害は他の地域よりも深刻である。このため、SO<sub>x</sub> や NO<sub>x</sub> の都市域大気汚染における特性化係数が他の地域よりも大きくなっていることが、結果に影響したと考えられる。

LCA 結果への影響因子の違いを理解するために、社会資産被害についても分析を行った結果を Figure 4-4 に示す。人間健康被害と社会資産被害の両方で気候変動が主要なインパクトカテゴリであり、酸性化に起因する社会資産被害の割合は小さかったため、社会資産被害の評価結果のパターンは人間健康被害と類似していた。光化学オキシダント生成に起因する被害は全ての技術組み合わせ、地域において無視できるほど小さかった。気候変動および酸性化では地域別のインパクト係数を使用していないため、Figure 4-4 (d)に示すように PVWE および FCV を導入した場合、人間健康被害とは違い、東京での正味の社会資産被害量は増加した。

一次生産被害における LCA 結果について Figure 4-5 に示す。一次生産被害には光化学オキシダント生成および酸性化が影響するため、人間健康被害や社会資産被害とは異なるグラフのパターンが見られた。PVWE によって水素を製造する場合、PV のパネル製造におけるラミネート加工プロセスで NMVOC が排出される (ecoinvent 2014) ため、水素製造時の NMVOC 排出が主に被害増加に寄与していた。系統電力やガソリン使用を代替することによる被害削減量は、給湯のための燃料ガス使用の代替や ICEV 製造の代替による被害削減量よりも大きかった。福岡において、これらの被害削減量が他の地域よりも大きいのは 2 つの要因がある。福岡の自動車台数は東京の半分以上、平均走行距離は約 14,000 (km/yr/car) と東京の 2 倍以上であり、どちらもほどほどに大きいことと、もう一つは、九州地方での NMVOC の被害係数が大きいことである。

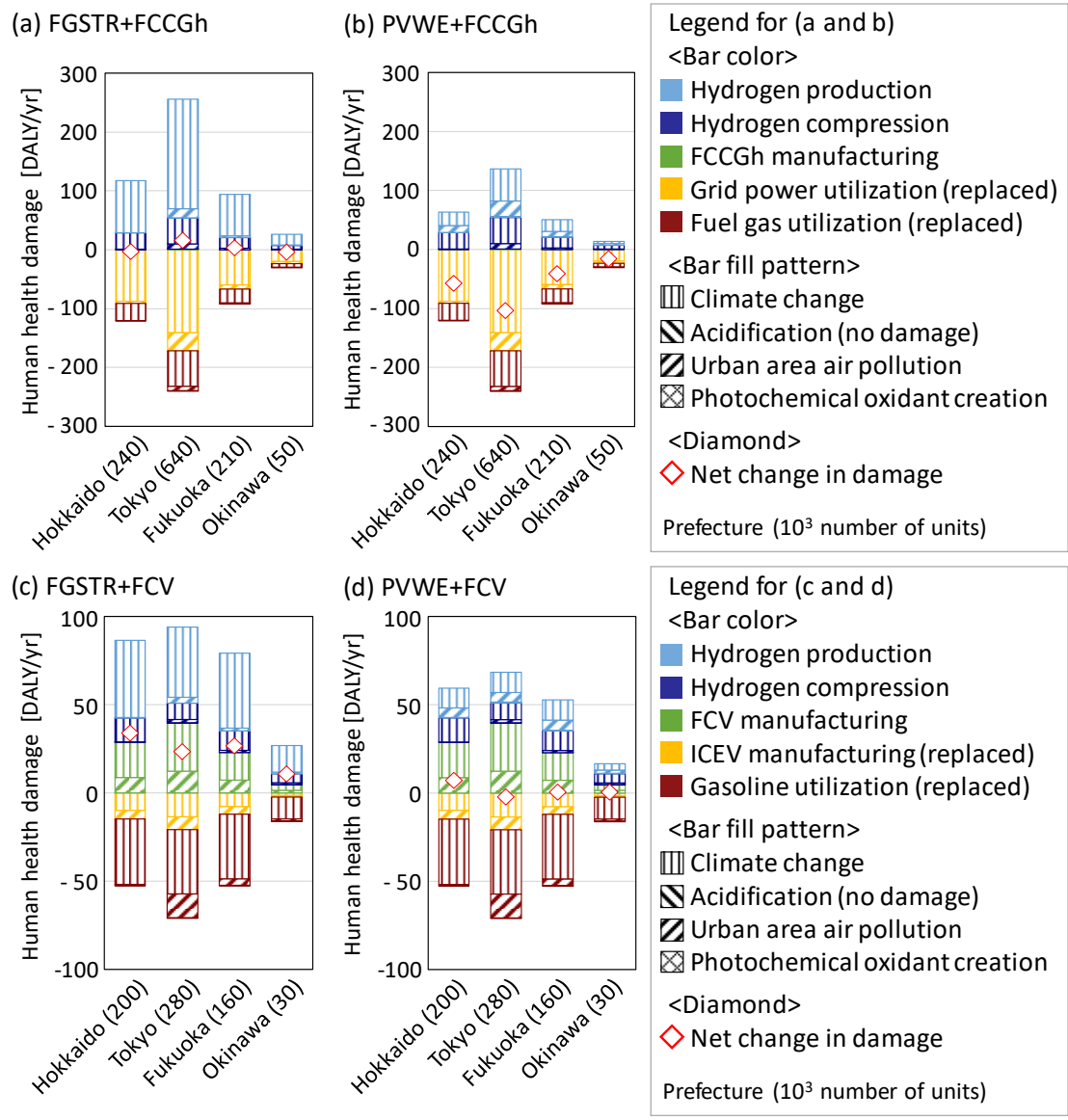


Figure 4-3 LCA results on human health damage for implementation of (a) FGSTR and FCCGh, (b) PVWE and FCCGh, (c) FGSTR and FCV, and (d) PVWE and FCV implemented in Hokkaido, Tokyo, Fukuoka, and Okinawa. Adapted from [ii].

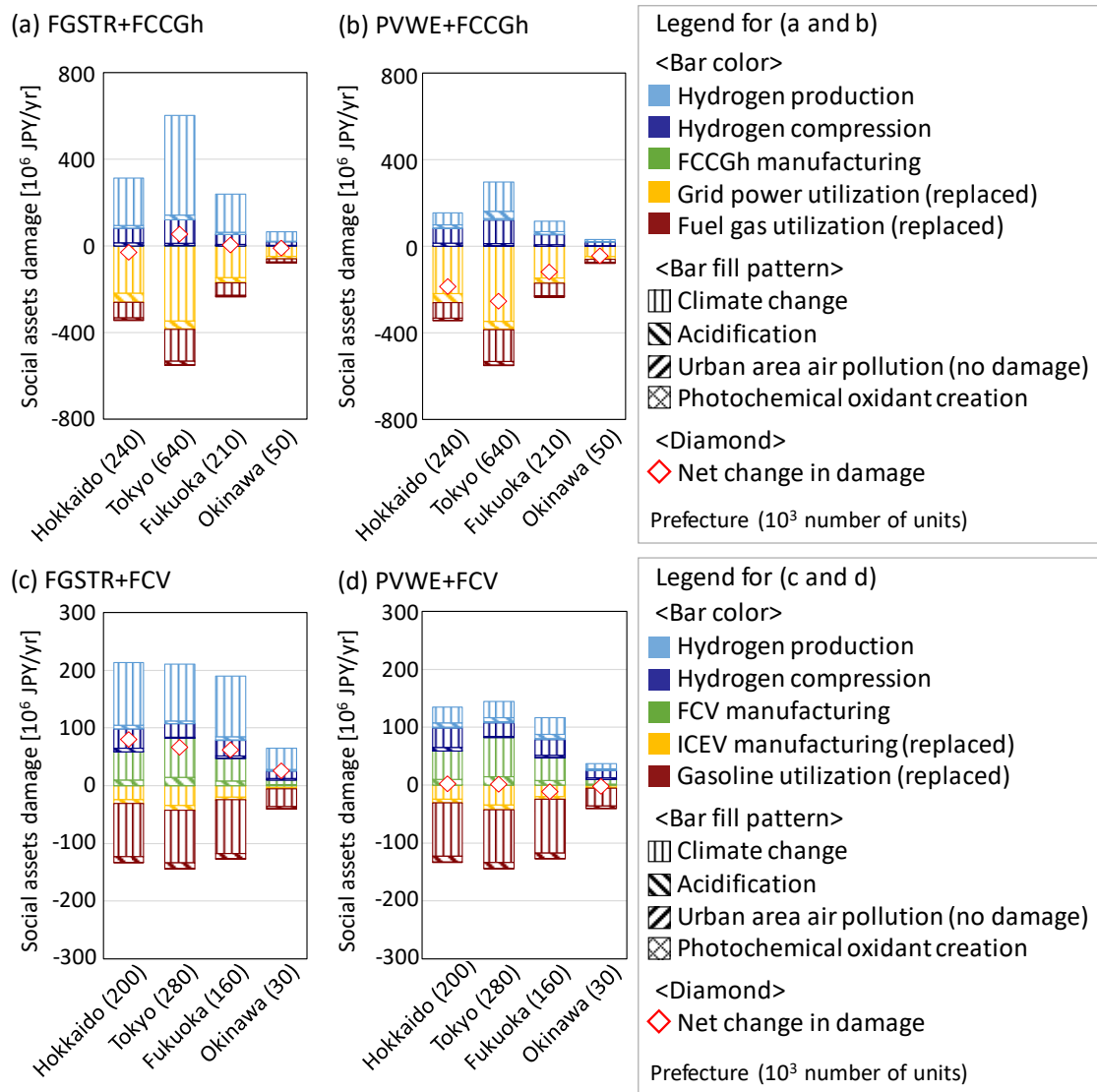


Figure 4-4 LCA results on social assets damage for (a) FGSTR and FCCGh, (b) PVWE and FCCGh, (c) FGSTR and FCV, and (d) PVWE and FCV implemented in Hokkaido, Tokyo, Fukuoka, and Okinawa. Adapted from [ii].

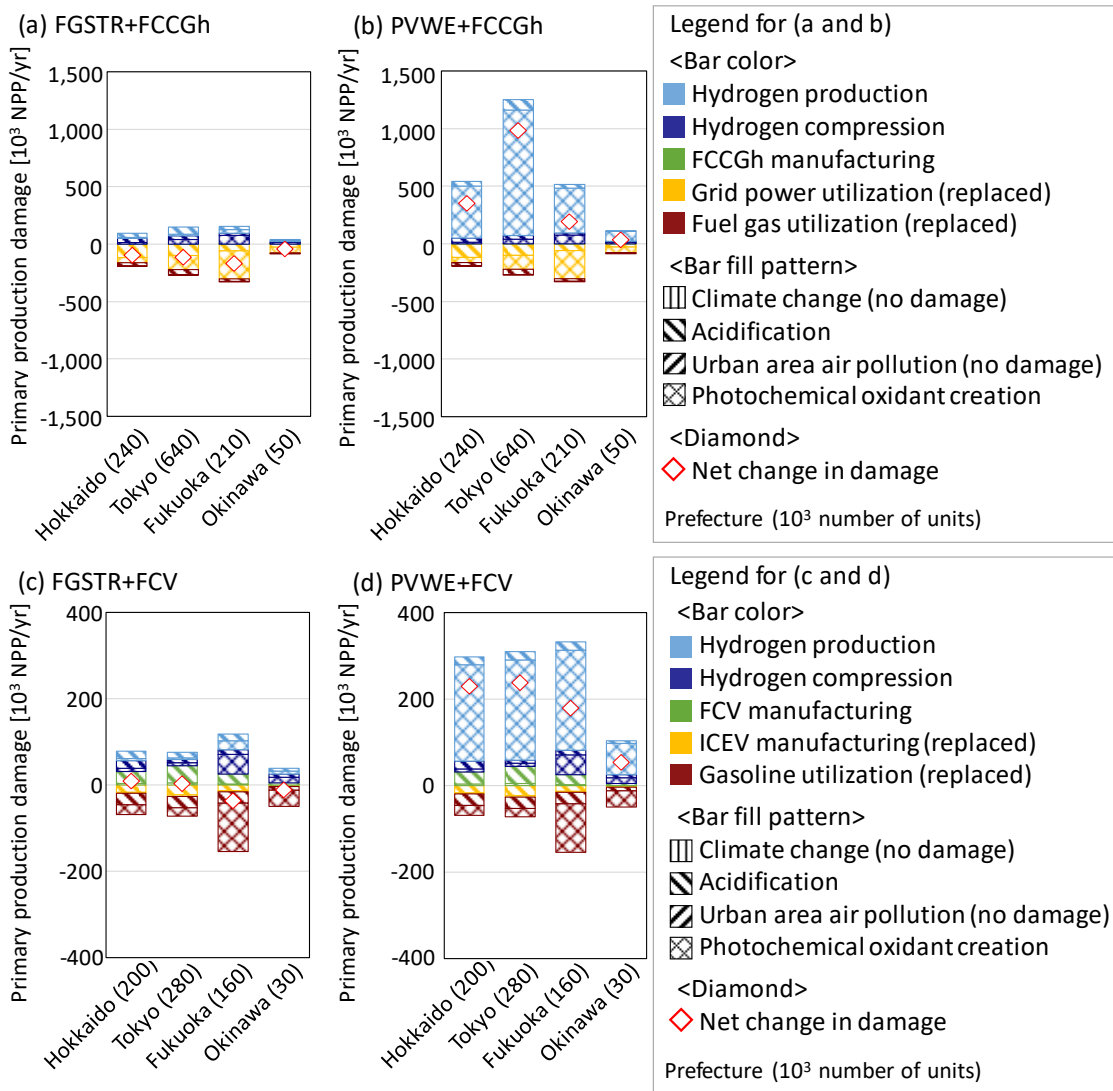


Figure 4-5 LCA results on primary production damage for (a) FGSTR and FCCGh, (b) PVWE and FCCGh, (c) FGSTR and FCV, and (d) PVWE and FCV implemented in Hokkaido, Tokyo, Fukuoka, and Okinawa. Adapted from [ii].



### 4.3.2. LIME index による LCA 結果

FigureB-1 に示す通り、LIME index による LCA 結果は人間健康被害とほとんど同じグラフのパターンであった。つまり、統合化において人間健康への影響が支配的であり、社会資産や一次生産への影響は小さかったということである。

Figure 4-6 に都道府県での LIME index の正味の削減量を示す。全ての都道府県を比較することで、導入効果に強く影響する地域特性を検証した。4つの技術組み合わせにおいて異なる導入影響が見られた。FGSTR による水素製造の場合、Figure 4-6 (a and c) に示す通り、LIME index はほとんどの地域で増加した。FCV および FGSTR の導入の場合、全ての地域で LIME index は増加した。FCCGh および FGSTR を導入する場合、系統電力の GHG 排出係数が比較的高い地域で LIME index が削減されていた。実際に、北海道 (HEPCO, 2017)、北陸 (Hokuriku-EPCO, 2017)、中国 (Chugoku-EPCO, 2018)、四国 (Shikoku-EPCO, 2018)、沖縄 (OEPCO, 2017)における主要な電力会社の電源構成では、石炭および石油火力の割合が 60%以上を占めている。

Figure 4-6 (b)は、それぞれ 5.1 百万, 8.9 百万, 7.4 百万, 13 百万の人口を抱える福岡、大阪、愛知、東京での LIME index の削減が大きいことを示している。これらの地域では、他地域よりもエネルギー需要およびインパクト係数が大きいにより多くの LIME index の削減が見られた。

Figure 4-6 (d)のように PVWE および FCV が導入される場合、LIME index が増加したグレーで色分けされた地域および削減量が小さい赤やオレンジで色分けされた地域では、系統電力の排出係数が高く、水素圧縮時の LIME index の増加分の寄与が大きかった。大都市近郊の都道府県では平均走行距離が長く、系統電力の排出係数も低く、さらに NOx や SOx の都市域大気汚染におけるインパクト係数も小さいために、PVWE および FCV の導入が効果的であることが分かった。

Figure 4-7 に都道府県での一人あたりの LIME index の正味の削減量を示す。一人あたりの削減量であるため、人口規模に依らない導入効果を見ることができる。Figure 4-7 (a and c)で示すように、FGSTR および FCCGh の導入によって半分以上の都道府県で LIME index が増加し、FGSTR および FCV の導入では全ての都道府県で LIME index が増加した。Figure 4-7 (b)では、PVWE および FCCGh の導入によって北海道、北陸、中国、四

国、沖縄という系統電力の排出係数が高い地域で LIME index の削減量が高かった。関東、関西、九州では、比較的温暖な気候のため、給湯需要が小さく、FCCGh の設備利用率が東北の 70%程度であり、LIME index の削減量は小さかった。PVWE および FCV の導入においては、Figure 4-7 (d)に示す通り、東京のように自動車の平均走行距離の短い地域および水素圧縮のための系統電力の排出係数が高い地域での LIME index 削減量が小さかった。都市域大気汚染のインパクト係数の高い関東、中部、関西では、SOx と NOx の削減に伴う LIME index の減少効果が大きかった。

UEA における正味の LIME index 削減量を Figure 4-8 に示す。同じ都道府県内の UEA であっても異なる導入効果が見られた。例えば、Figure 4-8 (b)では、PVWE および FCCGh の導入による LIME index の削減効果は、北海道の中の多くの UEA では小さいが、札幌 UEA は高い削減効果を示した。Sapporo UEA は、北海道の人口の 40%を占めるため、札幌 UEA での大きな削減によって、Figure 4-6 (b)に示すような北海道全体での大きな削減効果ももたらされていることが分かった。UEA の地域特性は都道府県よりも強く表れるものであり、都道府県内での細かな違いを明らかにした。データの地域の詳細度が小さいため、導入技術の利用率等の要素はほとんど結果に反映されていなかった。実際に、Figure B-2 に示す通り、一人あたりの LIME index の正味での削減量は都道府県での場合と同様であった。

人間健康被害、社会資産被害、一次生産被害についても GIS によって地図上に示したものを Figure B-3~14 に示す。異なるエンドポイント間での地域ごとの被害の違いが可視化された。これらの地図から、技術導入によってどのような正負の環境影響が生じるかを理解することができる。

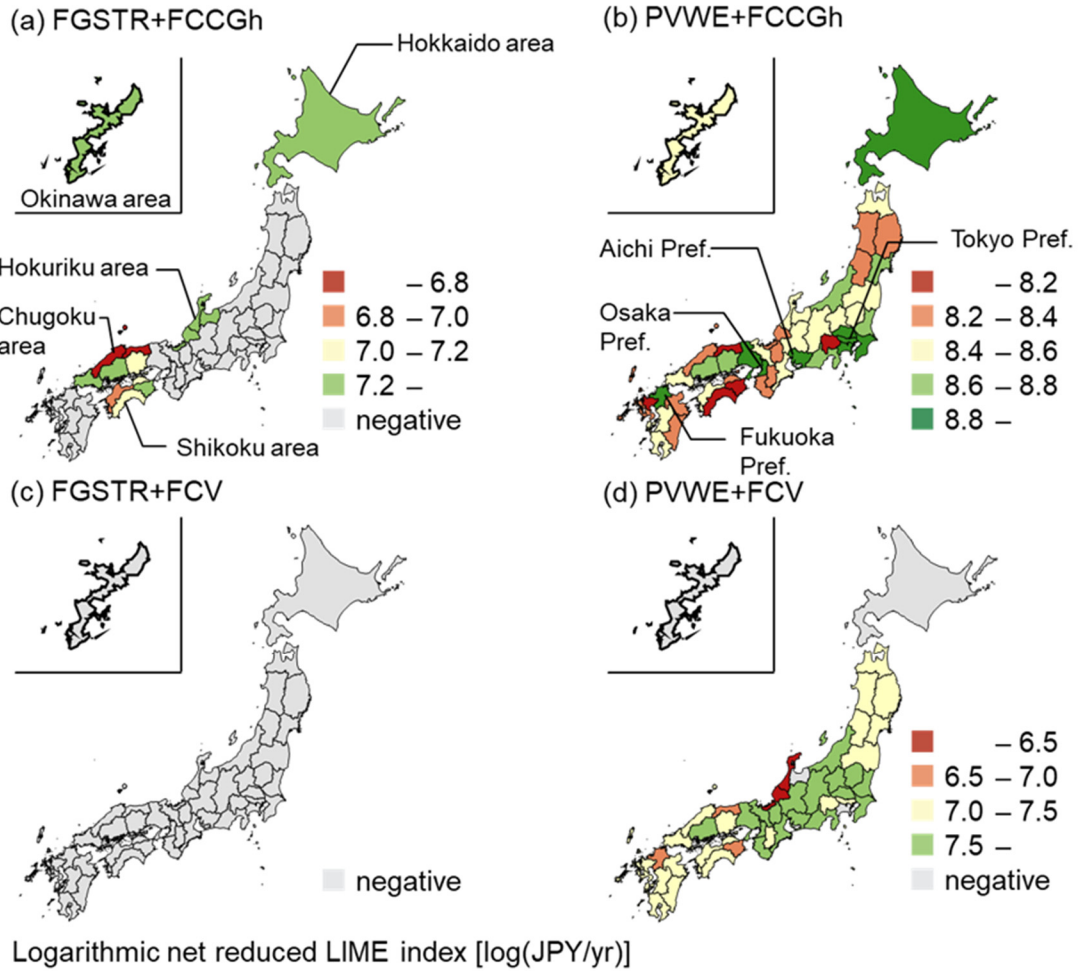


Figure 4-6 Net reduced LIME index represented as logarithmic values for (a) FGSTR and FCCGh, (b) PVWE and FCCGh, (c) FGSTR and FCV, and (d) PVWE and FCV implemented in the prefectures in Japan. Adapted from [ii].

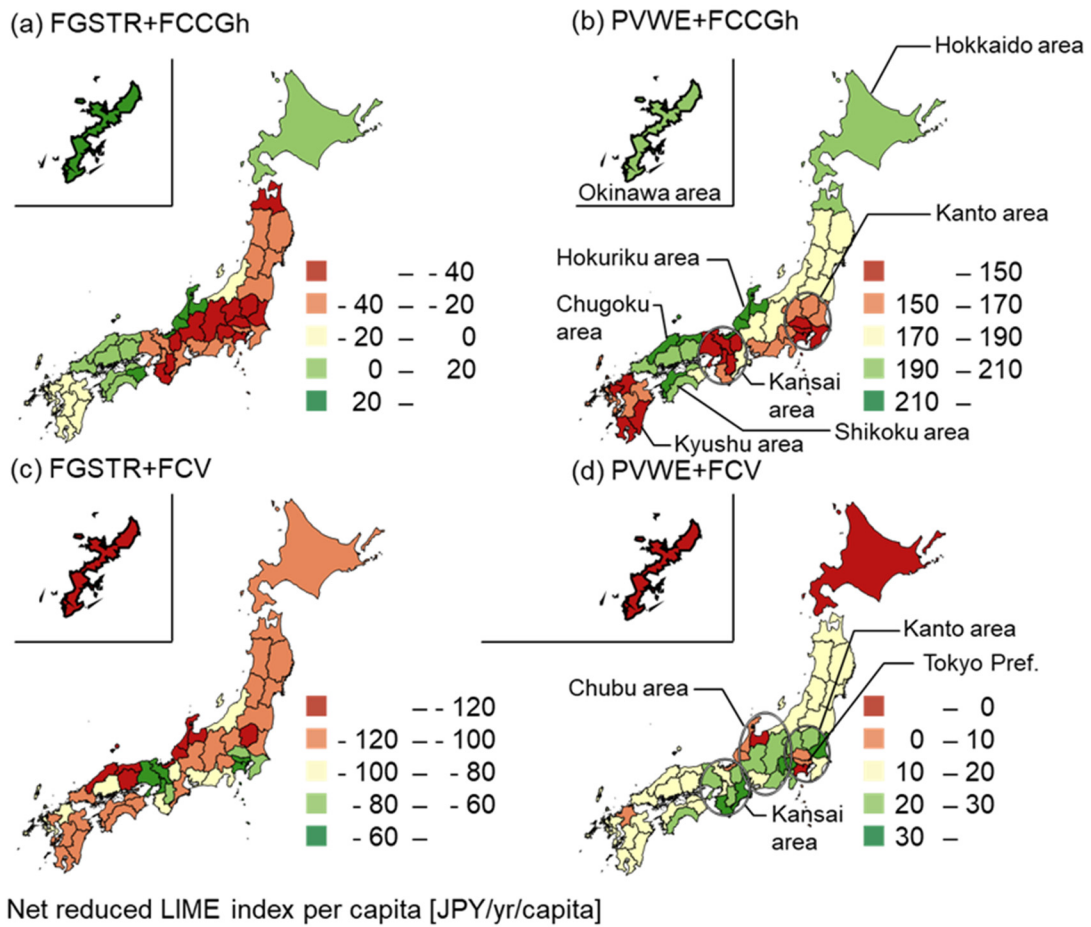


Figure 4-7 Net reduced LIME index per capita for (a) FGSTR and FCCGh, (b) PVWE and FCCGh, (c) FGSTR and FCV, and (d) PVWE and FCV implemented in the prefectures in Japan. Adapted from [ii].

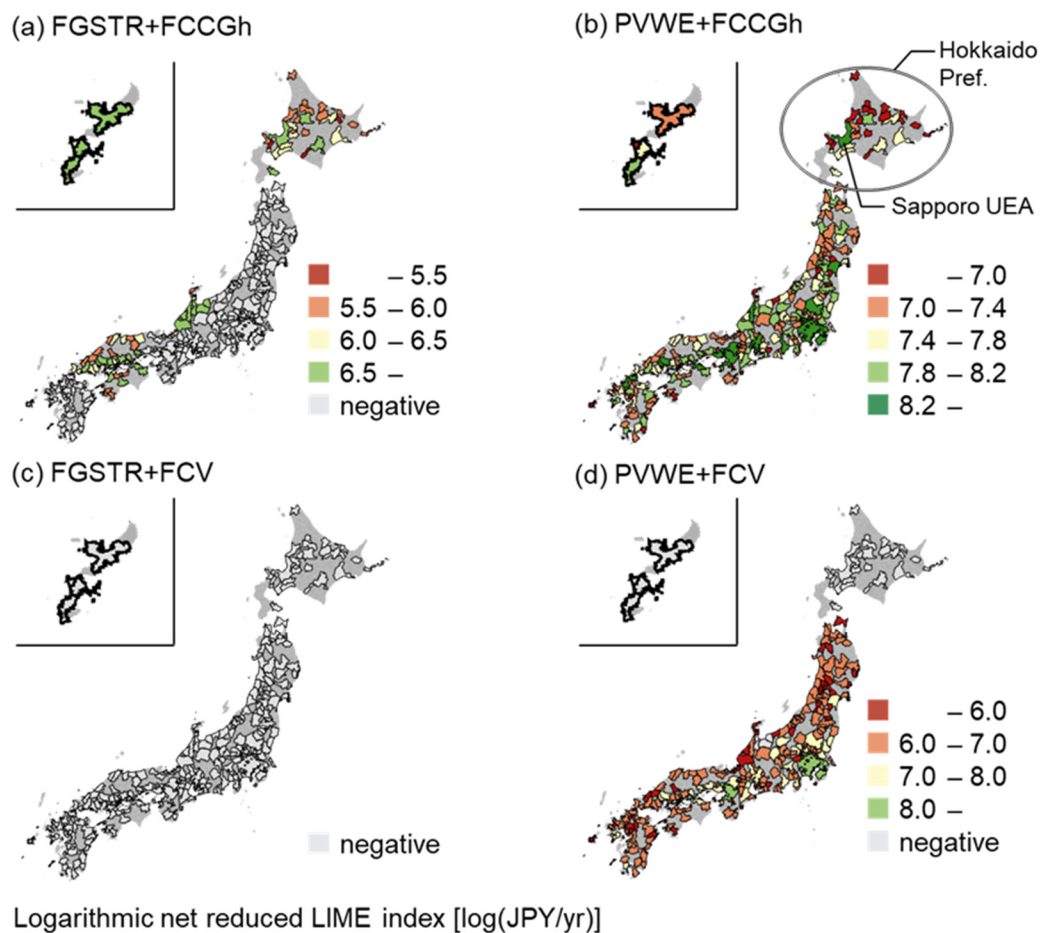


Figure 4-8 Net reduced LIME index represented as logarithmic values for (a) FGSTR and FCCGh, (b) PVWE and FCCGh, (c) FGSTR and FCV, and (d) PVWE and FCV implemented in the UEAs in Japan. Adapted from [ii].

## 4.4. 考察

### 4.4.1. 排出場所の変化の影響

エネルギーキャリア導入によって生じる既存システムからの大きな変化は、エネルギーライフサイクルにおける主な排出源がエネルギーの最終消費の場からデバイスの製造現場や原料製造・処理の現場へと変わることである。特に PVWE と FCV を合わせて導入する場合、ICEV の走行からの線源排出が減少し、PV や電解装置、FCV の製造現

場やそれらの上流の原料処理現場での点源排出が増加する。それゆえ、交通量が多く大気汚染の深刻な都市部では、FCV の導入により気候変動以外の便益を得られやすい。Figure 4-3 (d) の LCA 結果からは、東京において都市域大気汚染に起因する人間健康被害を緩和できることが示唆された。ICEV において内燃エンジンから生じるサーマル NOx や NMVOC の排出は完全に防ぐことはできないため、FCV の走行時の直接排出がほとんどなくなることは FCV 導入の利点となる。

PVWE および FCV を合わせて導入する際のデバイスの製造や原料処理に起因するライフサイクルでの排出およびそのインパクトは、ICEV を用いた従来のシステムよりも大きかった。新規技術は高機能な先端材料を必要とするため、製造に大きなエネルギーを使用することが多い。例えば、PV 用のシリコンの処理では、純度を上げるために多量のエネルギーを消費する (Pellow et al., 2015)。燃料電池スタックや FCV の水素タンクに使われる炭素繊維の製造では、耐炎化処理や炭化・黒鉛化のために高温・大量のエネルギーが必要となる (Evangelisti et al., 2017)。技術が導入される場所での FCCGh や FCV からの直接排出は減るが、デバイス製造や原料処理からの間接排出は増えてしまう。ケーススタディでは、日本国内での PV 製造を想定したが、2015 年時点で中国は PV モジュールおよびセル製造において、世界で 2/3 のシェアを占めている (IEA, 2016)。中国での PV 製造では、石炭火力の多く排出係数の高い系統電力を用いるため、環境負荷が高いことが報告されている (Nian, 2016)。たとえデバイスの使用場所での環境が改善したとしても、製造場所での環境は悪化する可能性もある。

自動車走行時の排出削減による大気汚染の緩和やデバイスの製造場所、あるいはその製造場所への電力の発電所の付近での大気汚染の悪化といった局所的な環境影響の変化は、気候変動影響のようなグローバルな環境影響だけでは分からなかった結果である。このような局所的な影響に対しては、エネルギーキャリア地産地消シミュレーションによる分析が有効であることが分かった。系統電力の排出係数やエネルギー利用パターン、需要の大きさ、インパクト係数等、複合的な地域特性が導入効果に影響するが、シミュレーションを使った定量化によって複雑な影響の結果を理解することができる。地図を使って視覚的に地域間の比較をすることで、地域特性と結び付けた結果の理解もしやすくなった。

多様な環境影響を定量的に分析することは、地域別エネルギーシステムの計画のために重要である。気候変動のようなグローバルな環境問題も重要だが、地域にとっては局所的な環境問題も重要な関心事である。例えば、都市部では自動車の平均走行距離が短く LC-GHG 排出削減の観点では導入効果は他の地域よりも低くなりがちであるが、都市域大気汚染という局所的な環境影響を考慮した場合、導入効果が他の地域よりも優れているという解釈もでき、都市部での導入が促される可能性がある。

GIS を使って導入効果を地図上に表現した結果から、都道府県や UEA といった地域区分が地域特性に強く影響することが示された。一つの都道府県内には、都市部・農村部、資源多い場所・少ない場所、工業地・住宅地が併存しており、これらの内部の地域特性が都道府県という地域区分では均一化されてしまう。同一都道府県内で導入効果の高い UEA は、北海道における札幌 UEA がそうだったように、都道府県内でも人口の多い地域であった。この要因は、人口の多い地域では、エネルギー需要が大きいことである。したがって、適切な地域区分については、地域特性の影響や地域内の意思決定プロセスを考慮した議論がなされるべきである。

#### 4.4.2. 多様な環境影響分析の課題

新規技術のインベントリや技術仕様に関する情報はしばしば不十分であり、不正確な情報や製品ごとのばらつき、将来的な技術発展の影響を確認するために、感度分析を行うのが有効である。PVWE および FCV 導入による被害の変化の感度を見るために、Figure B-15 で東京における LIME index を比較した。Figure B-15(d)の東京をベースケースとし、4つの異なるケースとの比較をおこなった。1つ目のケースでは水素圧縮時の電力の GHG 排出係数を下げた。2つ目のケースでは FCV 製造時の GHG 排出係数を下げた。3つ目のケースでは水素圧縮時の効率を上げた。4つ目のケースでは FCV の燃費を上げた。新たな4つのケースは全てベースケースよりも高い被害削減を示し、これらの組み合わせ次第ではさらに高い被害削減効果が得られる可能性もある。新規技術のインベントリは情報が不足していることや技術成熟度が低いので技術的向上のポテンシャルがおおきいことから不確実性が大きく、FCV 等の技術導入の LCA 結果は注意して解釈しなくてはならない。

多様な環境影響を分析する上でのデータ取得に関する 2 つの課題を特定した。1 つは、CO<sub>2</sub>以外の排出物質に関するインベントリデータが限定的であることである。この研究では、多様な排出についてのインベントリ分析を行うために、IDEA v2 および ecoinvent v3.1 というデータベースを使用した。これらのデータベースにおいても、NO<sub>x</sub> や SO<sub>x</sub>、NMVOC 等は、CO<sub>2</sub>と比較して排出量の測定や推計が困難であるため不確実性が大きいようである。例えば、日本の発電プロセスでのインベントリを ecoinvent v3.1 と IDEA v2 で比較してみると、CO<sub>2</sub>排出量は両データベースではほぼ一致しているのに対し、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、NMVOC の排出量は ecoinvent v3.1 の方が 2-10 倍高かった。燃料の組成および排ガス処理能力についての条件が 2 つのデータベースで異なっていることが一因と考えられる。この研究における分析も、これらのデータベースの不確実性に起因する不確実性を含んでいることに注意しなくてはならない。

もう 1 つの課題は、新規技術のインベントリはインベントリデータベースに収録されていないことである。PV や燃料電池、電解装置のインベントリは IDEA v2 では提供されていない。ecoinvent v3.1 ではこれらの一部のデータが存在しているが、FCV のインベントリは存在しない。これらの技術について、本研究では、2 つのデータベースを組み合わせる事および文献から取得したデータを用いることで推算した。なぜなら Figure 4-3~5 に示したように、これらのデバイスの製造や原料処理の寄与は大きいため、これらの新規技術のインベントリの不確実性の LCA 結果への影響はかなり大きいはずである。新規技術で使われる原料は、傾向として、エネルギー投入量が大きく、高機能・多機能であることが多い。このような取得の難しい新規技術のインベントリを推算する方法論を確立する必要がある。



## 第5章 社会経済因子と導入効果の突合による エネルギーキャリア地域適性の分析

---

本章の内容は雑誌掲載予定でありインターネット公表できません。  
雑誌掲載後にインターネット公表予定です。

## 第6章 地域エネルギーシステムの計画

### ワークショップ

---

本章では、地域やエネルギー関係での実務を経験した多様なバックグラウンドを持つ人々がワークショップという形式で、地域スケールでのエネルギーシステムの計画に必要な仕組み、アクターとその活動を議論する。第3章では、地域スケールでのエネルギーシステムの計画の問題として、計画を行う主体が明確でなく、多様なアクターの協働によりエネルギーシステムの計画を行う必要があることを明らかにした。ここでは、ワークショップでの議論の結果に基づき、多様なアクターの協働によるエネルギーシステムの計画の方法明らかにし、計画に基づく具体的な導入の活動を整理する。その際、第4、5章で開発した分析手法の活用可能性について考察する。

#### 6.1. ワorkshopの設計

##### 6.1.1. ワorkshopの概要

###### 目的

地域スケールでのエネルギーシステムの計画に基づくエネルギーキャリアの導入は多様なアクターが関わる複雑なプロセスとなる。第3章で議論したように地域スケールのエネルギーシステムの計画の主体は必ずしも明確ではなく、導入分析もある程度専門知識が必要であり誰もが行えるわけではない。計画のスキームについて、地域やエネルギーに関連する実務経験者によるワークショップを実施することで実現性のある効果的な方法を検討する。ワークショップという形式を取ったのは、ワークショップ参加者が経験を基に想像し、互いに意見を交わしながらエネルギーシステムの計画のスキーム

を考えることで、比較的实现可能性の高い方法を提示するためである。また、計画に基づいて実際に技術導入を進めることを議論することで、計画に基づく導入の活動を具体化する。

## **実施内容**

事前アンケートとワークショップの2つの調査を実施し、両調査において参加者は同じである。事前アンケートは、2019年8月21日から2019年9月2日までの期間に実施し、参加者の基本情報、経験、地域エネルギー計画についての考えを調査した。Microsoft Word形式の質問票をメールで送付し、メールで回答を集めた。ワークショップは、2019年9月3日に実施した。

## **参加者**

地域計画、あるいは地域に関連した実務、エネルギーシステムの計画に関連した実務・研究の経験のある企業、自治体、大学に所属する人々を著者の知り合い、もしくはその知り合いの紹介によって集め、合計13名が参加した。参加者の基本情報および地域やエネルギーとのこれまでの関わりについて、事前アンケート調査より得られた結果をAppendix Cにまとめる。なお、参加者の個人を特定できる情報を除外するため、各参加者にA1からA13までの参加者番号を振り、所属等はたまかな説明のみとし、同一の所属名を表す場合には同じギリシャ文字を使って表現した。

Table 6-1の参加者の経歴から、現在の所属について企業、自治体、大学という多様性があるだけでなく、過去の業務経験において企業、自治体、大学の2つ以上の経験を持つ参加者や企業・自治体・大学の連携を行う経験を持つ参加者が複数いることが分かった。Appendix Cに示したこれまでの地域やエネルギーとの関わりについて、自治体職員に限らず、地域とは関わりのある参加者が多く、何らかの地域の計画に携わった参加者も複数いた。エネルギーに関しては業務経験として関わっていたのは一部の参加者であったが、多様なエネルギー関連の取組経験がある参加者もいた。

Table 6-1 The attendee list of the Regional Energy Planning Workshop

| 参加者番号<br>(年齢) (*1) | 現在の所属 (*1)  | 経歴  |
|--------------------|---|---|
| A1<br>(30代)        | 自治体、大学、企業等の連携のための活動を行う団体 $\alpha$ に所属。団体 $\alpha$ へは、木材の仕入れ・加工・販売、不動産、建築事業を行う企業 $\beta$ より出向している。 | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 7年間金融業で経営管理、investor relations (IR) 業務、金融商品販売、新店舗出店業務</li> <li>◆ 1年間省庁で経済解析員として経済レポート作成業務</li> <li>◆ 2年間大学院で経営戦略論、creating shared value (CSV) 経営を学び経営学修士を取得</li> <li>◆ 2年間企業<math>\beta</math>で新規事業の企画・戦略業務</li> </ul> |
| A2<br>(30代)        | 建設業の企業 $\gamma$ に所属。  | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 3年間企業<math>\gamma</math>で化学プラント設計のプロジェクト管理</li> <li>◆ 2年半企業<math>\gamma</math>でガスタービン発電所の試運転業務管理</li> </ul>  |
| A3<br>(50代)        | シンクタンク、コンサルティング事業を行う企業 $\delta$ に所属。  | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 約20年間企業<math>\delta</math>で研究員としてサステナビリティに関する政策・技術調査・分析、コンサルティング業務</li> <li>◆ 約10年間企業<math>\delta</math>でマネジメントとして先進的なビジネス開発、海外事業開発、R&amp;D マネジメント</li> </ul>  |
| A4<br>(50代)        | 企業 $\delta$ に所属。  | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 約5年間企業<math>\delta</math>で管理職として産官学ネットワーク研究・組織運営</li> <li>◆ 10年間以上企業<math>\delta</math>で研究職として省庁・自治体からの受託調査研究・政策提言</li> </ul>  |
| A5<br>(50代)        | 企業 $\delta$ に所属。  | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 25年間以上企業<math>\delta</math>で研究職として地域振興に係る自治体の計画策定・事業支援、国の受託調査、民間事業支援</li> </ul>  |
| A6<br>(60代)        | 団体 $\alpha$ に所属。団体 $\alpha$ へは、企業 $\delta$ より出向している。  | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 約30年間企業<math>\delta</math>で研究営業職として中央政府・自治体の道路・港湾等の交通インフラ整備にかかる需要予測、施設等整備計画立案、運営計画立案および事業実施に係るコンサルティング</li> </ul>  |
| A7<br>(40代)        | 団体 $\alpha$ に所属。団体 $\alpha$ へは、自治体（政令指定都市） $\varepsilon$ より出向している。                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 3年間農業関連の組合組織で金融商品営業</li> <li>◆ 7年間自治体<math>\varepsilon</math>で生活保護ケースワーカー、庶務経理</li> <li>◆ 5年間自治体<math>\varepsilon</math>で市議会、常任委員会の議事運営</li> <li>◆ 3年間自治体<math>\varepsilon</math>で副市長秘書</li> </ul>                     |
| A8<br>(30代)        | 自治体 $\varepsilon$ に所属。  | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 3年間自治体<math>\varepsilon</math>で障害者支援業務</li> <li>◆ 7年間自治体<math>\varepsilon</math>で住民税賦課業務</li> <li>◆ 1年未満自治体<math>\varepsilon</math>でスマートシティの推進、エネルギーに関する取組、輸送部門における水素普及に関する業務、EV・PHVの普及促進業務</li> </ul>                 |
| A9<br>(30代)        | 自治体 $\zeta$ （県）に所属。   | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 5年間自治体<math>\zeta</math>（県）に属する自治体<math>\eta</math>（市）で介護保険制度の管理・運営や現場での地域づくり</li> <li>◆ 2年間自治体<math>\eta</math>で大学連携による地域活性化事業や特産品開発・販路開拓の業務</li> <li>◆ 直近では自治体<math>\zeta</math>の東京事務所で観光物産関連業務</li> </ul>           |

Table 6-1 The attendee list of the Regional Energy Planning Workshop (continued)

|              |                      |   |
|--------------|----------------------|---|
| A10<br>(30代) | 大学 $\theta$ (*2)に所属。 | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 3年間書籍の販売・物流業務等を行う企業で販売システムの企画、開発</li> <li>◆ 3年間地域おこし協力隊として自治体 <math>\eta</math> で自治体と大学連携に関する活動および観光事業に関する活動</li> <li>◆ 1年間大学 <math>\theta</math> で研究・研究支援業務として協働自治体との連絡窓口や自治体に関する調査</li> </ul>  |
| A11<br>(30代) | 大学 $\theta$ に所属。     | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 7年間ソフトウェア販売等を行う企業 <math>\iota</math> で技術営業</li> <li>◆ 5年間企業 <math>\iota</math> で IT システム管理</li> <li>◆ 4年間大学 <math>\theta</math> で農林業地域における産業共生の計画支援に関する研究</li> <li>◆ 2年間大学 <math>\theta</math> でバイオマス由来製品および生産システムの環境影響評価に関する研究</li> </ul> |
| A12<br>(20代) | 大学 $\theta$ に所属。     | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 3年間製鉄業の企業で工場のプロセス改善業務</li> <li>◆ 1年間大学 <math>\theta</math> の博士過程でエネルギー関連の研究</li> </ul>   |
| A13<br>(20代) | 大学 $\theta$ に所属。     | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 半年間大学 <math>\theta</math> の博士課程でエネルギー関連の研究</li> </ul>  |

\*1: 情報は全てアンケート当時のものである。

\*2: ワークショップ当時、著者は大学  $\theta$  に所属していた。

## 6.1.2. ワークショップの内容と方法

ワークショップにおいて、多様なアクターが関与して地域スケールでのエネルギーシステムの計画を行い、計画に基づいた導入の活動を行うプロセスを明らかにできるようにワークショップのテーマ、構成、内容を検討した。なお、ワークショップでは、地域スケールのエネルギーシステムの計画と同等の意味で地域エネルギー計画という言葉を使った。ワークショップ設計にあたっては、ワークショップに関する文献 (森, 2015; 山内 et al., 2013)および知見者へのヒアリングを参考にした。

### ワークショップのテーマ

テーマとして「地域エネルギー計画スキームワークショップ」と設定し、ワークショップにおける目的を「地域内外で win-win となるエネルギーシステム計画スキームを創ることで、地域エネルギーシステム実装における地域内外での協働の課題を学ぶ」と設

定した。地域スケールでのエネルギーシステムの計画のスキームとして実現可能性のある計画方法を検討できるようにした。また、地域スケールでのエネルギーシステムの計画は自治体等の単独のアクターでのシステムの計画は困難であり、地域外のアクターも含めた協働が必要となることが想定されるため地域内外での協働を前提として、それを実現する上での課題を見出せるようにした。

## ワークショップの内容

Figure 6-1 にワークショップの主な流れを示す。大きく 4 つのセッションから成り、休憩時間も含めて合計 4 時間のワークショップとした。まず、最初の導入のセッションでは、ワークショップの主旨の説明、ワークショップ参加者の自己紹介、水素エネルギーに関する説明を行った。参加者が具体的にイメージできるようにエネルギーキャリアを水素と限定し、導入が必要となる設備等についての説明を行った。さらに、計画の対象地域として、「白金県ぷらちな市」という架空の地域を設定し、そこでの計画を立案することとした。第 2 セッションでは、ステークホルダーマトリックスの作成を行った。地域エネルギー計画に関わるステークホルダーを特定し、地域の計画と個別の事業の設計や実装、運用という各フェーズでのステークホルダーごとの役割および課題を議論した。第 3 セッションはワークショップの主要なパートであり、計画スキーム図の作成を行った。ステークホルダー間の物質や情報の授受に基づく関係について、矢印を用いて可視化するとともに、協働の仕組みとしての場やプロセスを明確にすることを狙いとした。最後に発表と振り返りでは、各グループでの計画スキーム図について発表を行い、質疑応答も行った。

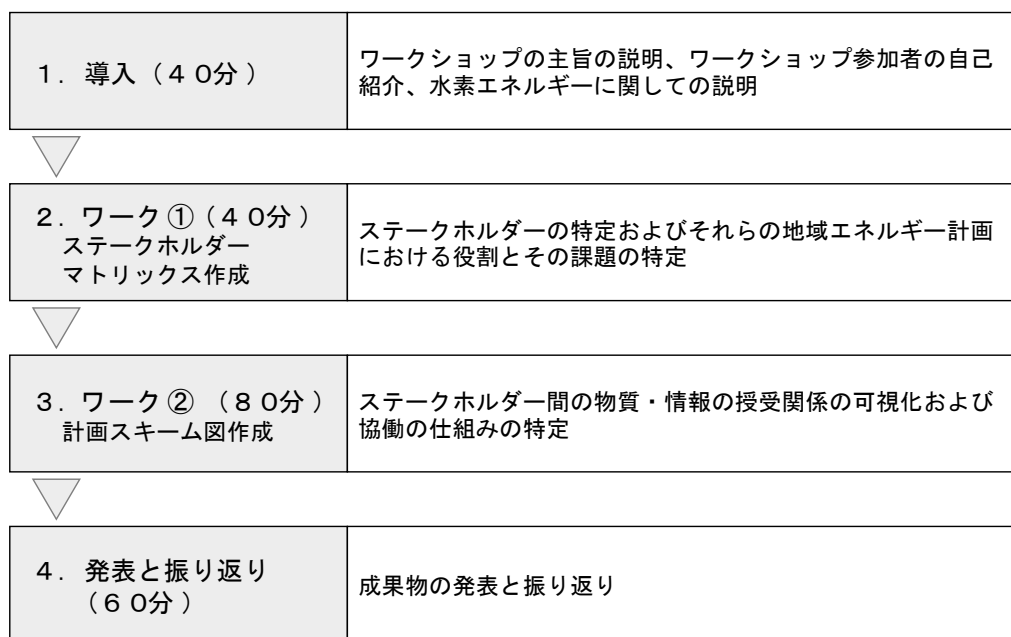


Figure 6-1 The main flow of the workshop

## ワークショップの方法

13名の参加者をA,B,Cの3つのグループに分け、それぞれ4名もしくは5名のグループとした。各グループのメンバー構成は、年齢や経験、所属に偏りがないように配慮し、産学公のそれぞれの経験を持つ参加者が各グループに一人は入るようにした。また、事前アンケート調査からエネルギーに関する知識には個人差があることが示唆されたため、グループ間での知識の偏りが小さくなるように配慮した。各グループのメンバー構成は次の通りである。

A グループ : A3、A7、A10、A13

B グループ : A1、A5、A8、A11

C グループ : A2、A4、A6、A9、A12

ただし、参加者A6は、都合により第3セッションの途中までの参加であり、その後、Cグループは4人でのワークとなった。著者自身は、司会としてのみワークショップに参加し、各グループの議論には加わっていない。各グループには、ワークショップ当時著者と同じ大学θに所属する参加者が加わっているが、第2、第3セッションでのワー

ク中に全員が積極的に発言し議論が大学 $\theta$ 所属の参加者中心にならないように注意を促すとともに、第4セッションでは大学 $\theta$ 所属の参加者以外が発表するように制約を設けた。このような条件下でワークショップでの議論を行うことで、著者や大学 $\theta$ 所属の参加者の意見に偏り過ぎないようにした。

第2セッションのワークでは、模造紙、付箋、ペンを使用した。模造紙にはあらかじめマトリックスの罫線およびフェーズを記入し、ワークシートとして使える状態にしていた。第3セッションのワークでは、ホワイトボードシート、付箋、ペンを使用した。ホワイトボードシートでは、書いたものを容易に消すことが可能であり、ステークホルダー間の関係等を記入したものを修正しやすくすることで、参加者がためらいなく即座に記入できるようにした。

また、ワークショップ全体を通して、記録のためにビデオカメラでの撮影および録音を行った。ただし、録音に関しては雑音やグループ同士の音声重なったことにより、部分的に会話の判別できないところがあった。

## 6.2. 結果

### 6.2.1. 事前アンケート

ワークショップで多様なステークホルダーが協働して地域のエネルギー計画を立案することに関連して、地域エネルギー計画に関する意見、考え方について事前アンケート調査から得られた結果を以下に示す。

まず、質問 (I) の地域エネルギー計画に含まれるべき情報についての回答結果を Table 6-2 に示す。地域エネルギー計画に必要なものとして設問で挙げていた全ての項目について、誰もチェックしない項目はなかった。ただし、「その他」の回答で A2 が指摘している通り、地域エネルギー計画という言葉から想像する段階や境界が回答者によって異なり、それが回答のばらつきに影響を与えた可能性がある。特に多くの回答者が必要と考えていたのは、新規導入設備・デバイスの導入場所、全体での初期費用、全体での運用費、環境影響、災害耐性、スケジュール、といった項目であった。費用に関係する評価だけでなく、環境性や災害耐性、経済波及効果等の多様な評価が必要となる可能



性が示唆された。その他の意見としてステークホルダーごとのタスクが必要との意見があった。計画としては導入システムの評価に加え、それを実装するためのスケジュールや個別のタスクを定めた実行計画が必要とされていると解釈できる。

前章までに構築した地産地消モデルによる分析は、環境影響および導入のしやすさに関する情報を提供するものであったが、それ以外にもシステム全体としての費用やステークホルダーごとの費用等の経済性の関わる情報やエネルギー供給安定性や災害耐性、地域の経済波及効果等の観点も含めた分析が必要とされることが分かった。また、スケジュールやタスクのように、構想したシステムを実現するために個別のアクターの行動に落とし込むことや時間軸を決めることは、全章までに議論していた地域別エネルギーシステムの計画には含んでいなかったが、計画を実現するためには実行計画として含む必要があることが分かった。

質問 (II) の地域エネルギー計画で考慮すべき項目についての回答結果を Table 6-3 に示す。多くの項目について、過半数の回答者が 4 ないし 5 の評価をつけた。特に 5 の評価が過半数を占め、そう思うという傾向が強かったのが次の 2 つの項目であった：(a) 特定のエネルギー技術・システムありきではなく、様々なエネルギー技術・システムの当該地域での導入影響を分析した上で、導入する技術・システムを決定すべき、(f) 技術・システムの導入影響についての客観的かつ定量的な分析結果があった方が、地域エネルギー計画に参加する上で関係者への説明・説得がしやすい。すなわち、全章までに構築してきた地域別エネルギーキャリア導入分析のように複数のシステムオプションに対して定量的な評価を示すことで、協働による地域エネルギー計画を支援し得ることが示唆された。ただし、参加者 A2 がその他で意見しているように、計画の目的次第では、特定の技術導入を前提とした計画の方が良い可能性もある。項目 (b~e) については、周辺地域との連携に関する質問であり、4 や 5 だけでなく、3 の回答も多くみられた。回答理由までは聞いていないため明確には分からないが、他地域との連携によりエネルギー資源、資金、人材を広域で適切に活用できる可能性がある反面、関わるアクターが増えることにより合意形成が難しくなる等のデメリットがあるために、必ずしも連携すべきとは限らないという理由が考えられる。項目 (g) では、客観的・定量的な導入分析により計画参加へのモチベーションが高まる可能性が示唆されたものの、3 の回答も多く見られた。参加者 A11 がその他で意見しているように、分析結果次第では導入すべきでないと思えることもあるためであると考えられる。項目 (h) では、3 の回答

が多く、1、2の回答も見られた。構築した地産地消モデルにおいては、政府統計データ等のアクセス可能な情報源からのデータを主に利用しているが、情報源がオープンであることは重要ではなく、どのようなデータを用いてどのように分析したのかを示すことが重要であると考えられる。項目 (i, j) の回答結果からは、他地域と比較することで組織や個人のモチベーションが高まると考える人もいることが分かった。必ずしも全員がそのようには考えないが、地域別の導入分析により他地域と比較した結果を提示することで、計画に参加するアクターの動機づけに寄与できる可能性が示唆された。質問 (III) の協働での地域エネルギー計画立案上の課題についての回答結果を Table 6-4 に示す。項目 (a, b) では長期的な計画であることによる課題であるが、4の回答が多かったことから、長期的な計画では、短期的利益を重視するアクターとの合意形成や計画期間内での状況の変化が問題となる可能性が示唆された。ただし、2や3の回答も複数あり、必ずしもこれらが問題となるわけではない可能性も示唆された。項目 (c, d) では、特に5の評価が多く、そう思うという傾向が強かった。多数のアクターが関わる協働においては、リーダーが必要であることが示唆された。項目 (e) では、ビジョンを共有して計画立案を行うことの必要性が示唆された一方で、必ずしもビジョンの共有が計画における課題にはならないことも示唆された。項目 (f) の回答からは、地域全体のメリットだけでは不十分であり、アクターごとのメリットが無ければ計画立案での課題となる可能性が示唆された。自治体に勤める参加者 A7 と A9 は2の回答をしており、アクターの立場によっては、地域全体のメリットがあれば問題とならない可能性もあると考えられる。項目 (g, h) では、計画を行うための分析の難しさと必要性について確認したが、4、5の回答が多いものの3の回答も複数あった。分析が困難であることはある程度課題と認識されており、また地域の適性が不明であることが課題だという認識を持つ参加者も複数いたことから、前章までで検討した分析手法により計画を支援できる可能性が示唆された。一方で、2や3の回答があったことは、回答者にとって分析の難易度が不明であった可能性やこれまで問題として認識されてきていないためである可能性が考えられる。参加者 A11 のその他で指摘した課題について、誰を巻き込むべきか、地理的、時間的範囲を決めるのが難しいという上の2つの課題は、計画そのものを定義することが難しいというものであり、本論文の取り組む課題と一致していると言える。3番目に挙げられている人口を増やすことを目標や前提として考えてしまうという課題については、ビジョンや目標をアクター間で議論し、特に地域外からの客観的な視点を加えることが必要だと考えられる。4、5番目の課題は項目 (a, b) と関連ものである。

質問 (IV) の導入が早く進む地域の参考となる指標についての回答結果を Table 6-5 に示す。まず、社会経済的導入力に関して第 5 章で用いた指標および関連性が深い指標である (a, b, c, d, e) の項目について、回答者によって回答にばらつきが見られた。第 5 章で議論したように、用いた指標はデータの利用可能性の限界から必ずしも適切な指標とは言い切れないものの、一つの指標として適用できる可能性が示唆された。ただし、1 や 2 の回答も複数あることから、多数の納得が得られる指標ではないことが示唆され、より適切な指標が求められるということが明らかになった。(f, g, h) の項目は、人口や電力需要、地域内総生産の大きさといった地域スケールに関連するものであったが、回答にはばらつきがあった。地域スケールは、地域全体としての社会経済的導入力や導入効果の総量に関係することから普及が早く進む可能性も逆に遅くなる可能性もあると考えられる。(i, j, k) の項目は、導入効果と強く関係するものであり、全体的に「そう思う」という 4、5 の評価の傾向が強かった。やはり導入効果は技術・システムの導入において重要であるということが検証できた。

Table 6-2 Questionnaire (I) to the workshop attendees: Regarding regional energy planning

(I) 地域のエネルギー計画にはどんな情報が含まれているべきだと思いますか。該当するものに全て☑を付けてください。

| 参加者番号             | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 | A11 | A12 | A13 |
|-------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| ステークホルダーごとの初期費用   | ☑  | ☑  | ☑  |    |    | ☑  |    | ☑  | ☑  |     | ☑   | ☑   | ☑   |
| ステークホルダーごとの運用費    | ☑  | ☑  | ☑  |    |    | ☑  |    | ☑  | ☑  |     | ☑   | ☑   | ☑   |
| 新規導入設備・デバイスの数量    | ☑  | ☑  |    |    |    | ☑  |    | ☑  |    | ☑   | ☑   | ☑   | ☑   |
| 新規導入設備・デバイスの導入場所  | ☑  | ☑  | ☑  |    | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  | ☑   | ☑   | ☑   | ☑   |
| 全体での初期費用          | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  |    | ☑  | ☑  | ☑  | ☑   | ☑   | ☑   | ☑   |
| 全体での運用費           | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  |    | ☑  | ☑  | ☑  | ☑   | ☑   | ☑   | ☑   |
| どんなステークホルダーが関係するか | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  |    |    | ☑  | ☑  | ☑   | ☑   | ☑   | ☑   |
| 地域のエネルギー自給率       |    | ☑  |    | ☑  |    | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  | ☑   | ☑   | ☑   | ☑   |
| 地域での雇用効果          |    | ☑  |    |    |    | ☑  | ☑  |    |    | ☑   | ☑   | ☑   | ☑   |
| 地域での経済波及効果        |    | ☑  |    | ☑  |    | ☑  |    | ☑  | ☑  | ☑   | ☑   | ☑   | ☑   |
| 環境影響              |    | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  |     | ☑   | ☑   | ☑   |
| エネルギー供給安定性        |    | ☑  | ☑  |    |    | ☑  |    | ☑  | ☑  | ☑   | ☑   | ☑   | ☑   |
| 災害耐性              | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  |     | ☑   | ☑   | ☑   |
| スケジュール            | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  | ☑   | ☑   | ☑   | ☑   |
| その他               |    | ☑  |    |    |    |    |    |    |    |     | ☑   |     |     |

A2 これらの情報は、どのステージにおける“地域のエネルギー計画”を練るのかによって、ステージごとに要否の整理ができると思う。

A11 ステークホルダーごとのタスク

※ その他のコメントについて、内容を要約するために主旨を変えない範囲で一部著者による修正を行った。

Table 6-3 Questionnaire (II) to the workshop attendees: Regarding regional energy planning

(II) 地域のエネルギー計画において何を考慮すべきだと思いますか。  
5段階で選択してください。  
〔「そう思う」を5、「そう思わない」を1とした段階的な評価〕

| 参加者番号  | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 | A11 | A12 | A13 |
|--|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| (a) 特定のエネルギー技術・システムありきではなく、様々なエネルギー技術・システムの当該地域での導入影響を分析した上で、導入する技術・システムを決定すべき | 5  | 4  | 5  | 5  | 5  | 4  | 5  | 4  | 5  | 4   | 5   |     | 5   |
| (b) 地域の外も含めて広域での資源の利用可能性を検討すべき   | 3  | 4  | 5  | 4  | 5  | 4  | 5  | 4  | 5  | 2   | 4   | 4   | 4   |
| (c) 地域の外も含めて広域でのエネルギーの移出可能性を検討すべき  | 3  | 4  | 3  | 4  | 3  | 5  | 5  | 4  | 5  | 4   | 5   | 4   | 4   |
| (d) 近隣地域との資金面での協力を検討すべき  | 3  | 4  | 5  | 5  | 5  | 3  | 5  | 4  | 5  | 2   | 3   | 3   | 4   |
| (e) 近隣地域との人材面での協力を検討すべき  | 3  | 4  | 3  | 4  | 5  | 4  | 5  | 4  | 4  | 4   | 5   | 3   | 4   |
| (f) 技術・システムの導入影響についての客観的かつ定量的な分析結果があった方が、地域エネルギー計画に参加する上で関係者への説明・説得がしやすい       | 5  | 5  | 5  | 4  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5   | 5   | 4   | 4   |
| (g) 技術・システムの導入影響についての客観的かつ定量的な分析結果があった方が、組織・個人としての地域エネルギー計画に参加するためのモチベーションが高まる | 5  | 5  | 4  | 3  | 4  | 4  | 5  | 4  | 3  | 4   | 3   | 4   | 3   |
| (h) 技術・システムの導入影響を分析する上で、政府統計データ等のアクセス可能な情報源からのデータを利用した分析の方が信頼できる               | 3  | 5  | 1  | 3  | 2  | 3  | 4  | 4  | 3  | 5   | 3   | 3   | 3   |
| (i) 他地域と比較して導入効果が高い方が、組織・個人としての当該地域のエネルギー計画に参加するためのモチベーションが高まる                 | 3  | 5  | 4  | 4  | 3  | 3  | 5  | 5  | 4  | 4   | 5   | 4   | 4   |
| (j) 他地域と比較して導入しやすい環境が整っている方が、組織・個人としての当該地域のエネルギー計画に参加するためのモチベーションが高まる          | 3  | 5  | 2  | 3  | 3  | 4  | 5  | 4  | 5  | 4   | 5   | 3   | 5   |

(k) その他

✓

✓

A2 (a)に関して：時間が無限にあれば、全ての選択肢を吟味し、導入技術を決定すべきと思うが、現実時間は限られているため、「時間も限られているから、アジャイル的なやり方として、“特定のエネルギー技術導入ありき”で考えよう」というやり方があっていいと思う。ケースバイケース。また、その他の選択肢にも言えるが、「地域エネルギーシステム設計」の目的によると思う。まずは、“地域エネルギーシステム設計の目的としてどのようなものがあるのかに関するカテゴリズ”を議論したい。

A11 (g)は、分析前に想像していたよりも効果が得られにくい、という結果が出てしまう場合もあり、その場合はモチベーション向上に必ずしもつながらないので3としました。  
(h)は、何に比べて「～の方が」なのかわからず、ひとまず中間の3にしました。

※ その他のコメントについて、内容を要約するために主旨を変えない範囲で一部著者による修正を行った。

Table 6-4 Questionnaire (III) to the workshop attendees: Regarding regional energy planning

(III) 地域内外のステークホルダーが協働して地域の計画を立てる上での課題は何だと思えますか。5段階で記入してください。

| 参加者番号   | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 | A11 | A12 | A13 |
|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| (a) 長期に及ぶ地域計画はリスクが高く、多くのステークホルダーはより短期的な利益を重視する。                   | 5  | 4  | 2  | 5  | 4  | 4  | 3  | 4  | 4  | 4   | 4   | 3   | 5   |
| (b) 長期に及ぶ地域計画を立てても状況がすぐ変わるため、計画通りに進まない。                           | 5  | 4  | 4  | 3  | 2  | 3  | 4  | 3  | 4  | 4   | 4   | 3   | 5   |
| (c) 多数のステークホルダーが協働しようとする、意思決定が遅くなる。                               | 5  | 4  | 5  | 4  | 5  | 4  | 3  | 5  | 4  | 5   | 4   | 4   | 5   |
| (d) 積極的に行動し、協働をけん引するステークホルダーがいない。                                 | 4  | 5  | 5  | 5  | 3  | 5  | 4  | 5  | 2  | 5   | 3   | 4   | 5   |
| (e) ビジョンや目指すべき方向性が共有されておらず、計画立案での意見が対立する。                         | 3  | 3  | 5  | 4  | 4  | 4  | 3  | 4  | 3  | 5   | 4   | 4   | 5   |
| (f) 各ステークホルダーのメリットがはっきりしないと協働のモチベーションが上がらない。                      | 5  | 4  | 4  | 4  | 4  | 3  | 2  | 5  | 2  | 4   | 3   | 4   | 5   |
| (g) エネルギー供給・利用・貯蔵・輸送まで含めたエネルギーの計画における情報収集や評価手法などの技術的な難易度が高い。      | 3  | 4  | 2  | 3  | 3  | 4  | 3  | 5  | 4  | 4   | 5   | 4   | 4   |
| (h) そもそも当該地域が他地域と比べて新たなエネルギーシステムを実装するのに適していない、あるいは適しているかどうか分からない。 | 4  | 4  | 1  | 3  | 3  | 2  | 3  | 4  | 4  | 4   | 3   | 3   | 5   |
| (i) その他   |    | ✓  |    |    |    |    |    |    |    |     | ✓   |     |     |

A2 一番の課題は、問(d)と思う。リーダーがいれば、全てが動き出す。その他は、その後生まれてくる課題、問題、と私個人は考えている。

A11 下記のような点もあるかなと思います。

- ・まず誰を巻き込んだら良いのかわからない
- ・システム計画の地理的、時間的な範囲を決めるのが難しい
- ・人口減がほぼ確実な地域でも人口を増やすことを目標や前提として考えてしまう場合がある
- ・自治体担当者が数年でローテーションするため、継続性が保てない
- ・目の前の定常業務が忙しく未来の計画に使える時間がない

※ その他のコメントについて、内容を要約するために主旨を変えない範囲で一部著者による修正を行った。

Table 6-5 Questionnaire (IV) to the workshop attendees: Regarding regional energy planning

(IV) 全国でどのような地域での技術・システムの導入・普及が早く進むと思いますか。参考となりそうな指標について、5段階で記入してください。

| 参加者番号                            | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 | A11 | A12 | A13 |
|----------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| (a) 自治体の財政力指数が高い                 | 5  | 4  | 3  | 3  | 3  | 3  | 1  | 3  | 5  | 4   | 4   | 4   | 4   |
| (b) 自治体の財政需要額に対する職員数が多い          | 5  | 4  | 1  | 3  | 3  | 3  | 1  | 3  | 5  | 4   | 4   | 4   | 3   |
| (c) 地域産業全体での利益率が高い               | 3  | 4  | 1  | 5  | 3  | 4  | 1  | 4  | 5  | 4   | 2   | 4   | 4   |
| (d) 住民の所得が高い                     | 3  | 4  | 1  | 4  | 3  | 3  | 1  | 4  | 3  | 3   | 2   | 3   | 4   |
| (e) 人口増加率が高い（減少率が低い）             | 3  | 4  | 1  | 4  | 3  | 3  | 1  | 4  | 4  | 3   | 1   | 3   | 4   |
| (f) 人口が多い                        | 1  | 4  | 1  | 3  | 3  | 3  | 1  | 3  | 2  | 4   | 1   | 3   | 4   |
| (g) 電力需要が大きい                     | 5  | 4  | 4  | 3  | 4  | 4  | 1  | 3  | 2  | 4   | 4   | 4   | 4   |
| (h) 地域総生産量（GRP）が大きい              | 3  | 5  | 1  | 4  | 4  | 3  | 1  | 3  | 3  | 3   | 3   | 4   | 4   |
| (i) 再生可能資源ポテンシャルが大きい             | 4  | 4  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 4   | 5   | 3   | 5   |
| (j) CO <sub>2</sub> 削減ポテンシャルが大きい | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 5  | 5  | 5  | 3   | 3   | 3   | 4   |
| (k) 全体で見込まれる運用費が低い               | 5  | 4  | 4  | 5  | 4  | 4  | 5  | 5  | 3  | 4   | 4   | 4   | 4   |
| (l) その他                          |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     | ✓   |     |     |

A2 世の中、物の動きはやはり、“金”と思う。ビジネスチャンスがあるところ。そういう意味では、仮に人口が少ないアフリカ先住民族の村でも、「他社に先駆けて、新技術導入の実験ができる。」という考えのもと技術導入が進むこともあると思う。新聞で、「アフリカで、太陽光発電と蓄電技術導入により送電線なしで、電気利用開始した村が出てきた。技術導入の先駆的検証となる。」や「アフリカでは、先進国に先駆けて、ドローンの商業利用が開始した。薬を病院に届けている。先進国では、そのようなやり方は安全上の問題で実現不可能。後進国にこそビジネスチャンスが広がる。」等の事例もあった。

A11 ・自治体やトップのフットワークが軽い。変化を受け入れられる、促進できる。  
 ・地元企業の力が大きい、または地元貢献をしたいと考えている。

※ その他のコメントについて、内容を要約するために主旨を変えない範囲で一部著者による修正を行った。

## 6.2.2. ワークショップ

地域エネルギー計画スキームワークショップを実施した結果について、ワークショップでの制作物である各グループの計画スキーム図 (Figure 6-2, Figure 6-3, Figure 6-4)およびワークショップ内での議論内容をまとめた。以下、本 6.2.2 項の内容はワークショップ内での議論に基づく内容である。

### A グループ

地域エネルギー計画の始まり方は多様な形があり得るが、グループのメンバーが経験した実際の事例を参考にして、市役所が発案して地域エネルギー計画を立案するスキームを検討した。まず、地域を活性化すべく地域の資源を活用したいという自治体関係者の想いが原動力となって、地域のエネルギー計画を起案する。初期段階では、計画は具体化されていないため、シンクタンクやコンサルティング会社、大学に相談という形で計画を具体化していく。この相談においては、まだ金銭的なやり取りはほとんど発生しない、あるいはできないことが想定されるため、大学のような非営利団体の役割が大きい。具体化されていない段階から相談ができる関係を築いておくことや、包括連携協定のようなものを結んでおくことで、早期に協働して計画立案を進めやすくなる。大学やシンクタンク、コンサルティング会社は、定量的分析によって計画の具体化を進めていく。事業化の前段階として実証実験も行われる。

続いて、主に市、大学、シンクタンク、コンサルティング会社を中心となって地域エネルギー会議を発足する。この会議において、計画を主導して具体化を進めつつ、地元住民への理解を進める役割を担う。地域エネルギー会議からステークホルダー協議会へと計画を主導する主体が移行する。参画するアクターは、地域エネルギー会議が市やコンサルティング会社、大学といった全体を考えるアクターが中心なのに対し、オペレーター、ユーザー、資金の供給者、ハードウェア関係者、学校等の計画を実行するために必要なアクターになっていく。これらのアクターは関連する情報提供を行いながら詳細化を進めていく。地域エネルギー会議においてリーダーを担う主体が重要となるが、具体的にどのアクターが適切かという結論は出ず、リスクを取って事業を行う人物を見出すような仕掛けも必要である。また、この事業におけるデータを大学等に提供すること



で計画に基づく事業における学びを得ることにつながり、計画の更新や他の事例への展開が可能となる。

資金の供給者にも様々な形態があり、県や国等は補助金だけでなく、特区等を指定することで事業を進めやすくなる。私的なものとしては、地銀が融資するもの以外にもクラウドファンディング等の資金調達手段を用いて地域外の応援者からの出資を募るといった手段が可能である。ただし、地域外からの出資においては、PR や宣伝方法が課題となる。オペレーターは計画の中でも重要な役割であるが、どのアクター担うのかは明確でない。特定目的会社として新規に立ち上げた会社や他業界からの参入可能性もある一方、既存の大手電力会社も電力システム運営においてノウハウや地域の情報を提供する等、依然として重要なステークホルダーである。既存の電力会社については、今後どのような動きをしていくのか現状ではスタンスが見えにくい。

地域エネルギー計画は小学校、中学校、高校での教育にも展開できる可能性がある。実際に現場を見に来てもらうことで学ぶことも想定する。シンポジウムを開催する等して発表の場を設けることで、親や近隣住民にも理解を広げることができる。このような教育を受けた学生は、早ければ数年後には社会に出てプレイヤーとして活躍する可能性があることからこのような活動は重要である。計画は一度作ってそれに沿って実装していくものというよりも、一度大きなものを作った後も発展させ続けるものであり、教育を受けた次世代の存在は重要になる。

大学は学会での成果報告を通して他の地域や別の事業へも知識の共有を進めていく。種子島での事例 (著者注 : (Kikuchi et al., 2020)を参照) があるように、大学は地域のニーズを拾い上げて、ビジョンづくり等を行う上で重要な役割を果たすが、大学側としてもそれを学会等の場で発表を行い、地域での活動を学問領域として認知してもらう必要がある。営利企業では、収入が得られる算段が立たないとなかなか入り込めないが、大学では研究成果としてまとめ上げ、研究者個人の評価が上がれば良い部分も大きい。一方、営利企業ができない部分で大学の担う役割は大きい。一方で市はプラチナ構想ネットワーク (著者注 : (プラチナ構想ネットワーク, 2020) を参照) のような他の市町村との連携の場を通して知識の共有を図ることができる。

## **B グループ**

地域エネルギー計画は水素に限らないだろうという考えから、エネルギー計画全体のスキームと水素にフォーカスしたスキームを整理した。中心的な役割を果たすのは共創検討委員会という場であり、自治体や関連する地域内外の企業連合が参画する。いくつかの企業連合がクラスターのように事業を作ることを想定した場合、そのままでは独立して、それぞれの個別最適が行われてしまうため、共創検討委員会の場を通して、各クラスターが緩く連携して個別クラスターでそれぞれ事業を展開しつつ、全体としてのまとまりを考える場を作っておく。個別の事業として成立させつつ、それぞれの事業間でも緊急時にエネルギーの融通を行うような取り決めをしておく。

個別事業として検討すべき項目として、生活支援・地域福祉・防災、環境管理計画、施設の立地検討、土地の提供、引き受け金融機関等が挙げられた。この共創検討委員会では、大学も参加し、システム案の提案や評価を行う。このようなことを行うために、共創検討委員会側からは、事業者や自治体の持つ地域のデータを提供する。全体計画では、新規に実装していく設備と既存の設備とのすり合わせが必要になり、そのすり合わせの場としても共創検討委員会が機能する。

水素にフォーカスしたスキームにおいては、協議会という場を設置し、協議会は国から補助金等の予算申請を行い、自治体はその申請支援や規制緩和要請等による支援を行う。一方で協議会は大学にニーズを伝えつつ大学側はそのニーズに沿った技術開発を行う。水素アグリゲーターという組織ができ、水素のサプライヤー、需要家を束ねて需給のマッチングを行う卸売業者のような役割を果たす。需要家の例としてホテルでのコージェネ設備や燃料電池を用いた列車等の実際に実装されていたり計画されていたりする事例がある。

共創検討委員会でのリーダーについて、最初は自治体を作って、後に関係している主要な事業者が担っていくという形があり得る。自治体が主導する場合には、首長の強い決断が必要となる可能性がある。

## Cグループ

リーダーシップを取ってものごとを進めていくステークホルダーが必要であるため、地域内外から出資を募って設立した地域エネルギー会社を中心となって進めていくス

キームを考えた。地域内から6割程度出資を行うことで、地域がある程度力を持つような仕組みが良い。出資の際に、電力会社も出資することで、この事業に加わってもらい、事業評価をするためのデータを提供する。この際、電力会社はデータを提供するだけで、見返りは出資によるリターンが主なものとなる。大学やコンサルティング会社、シンクタンクといったステークホルダーは、環境影響評価や費用試算といった役割を担う。これらの評価は地域エネルギー会社から外注するような形になる。

さらに「地域のエネルギーを考える会」という地域住民を巻き込む合意形成の場において、反対する住民を含めた合意形成を行う。

人材育成として、小中高生を教育し、地域を良くしたいと考える人を育て、次世代の地域のリーダーを育てる取り組みが必要となる。自分の会社の利益だけを考えるわけではなく、地域を良くしようというマインドを持つような人材が増えてくると、全体として回りやすくなるはずである。

エネルギー供給事業において、料金を安くする仕組みを考える必要もある。除雪費用が既存システムでかなりかかっているのので、水素コジェネの排熱を利用することで、トータルとしての費用を下げられるといった可能性がある。また、役所に儲かる仕組みを考えてもらい、固定資産税を下げることや税制的なメリットを出すことで、地域エネルギー会社が出てくるための仕組みづくりをする必要がある。

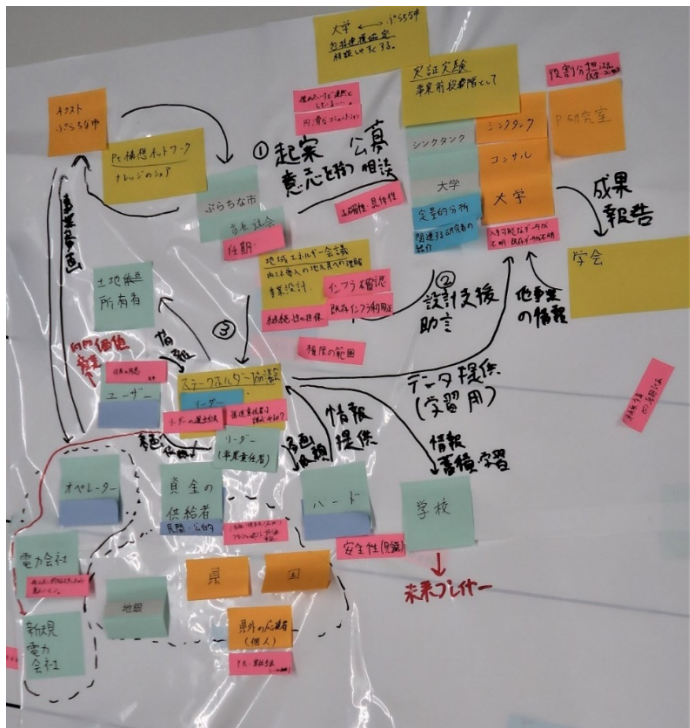


Figure 6-2 Regional energy planning scheme developed by group A

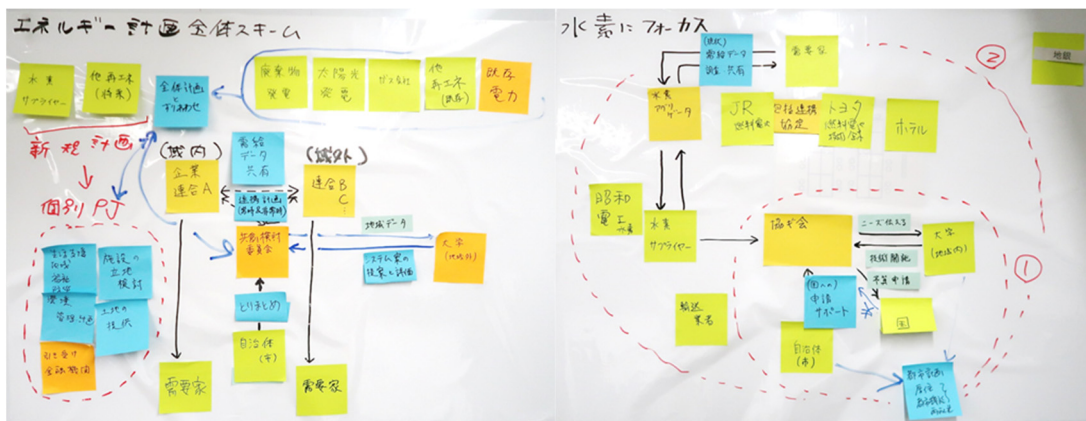


Figure 6-3 Regional energy planning scheme developed by group B

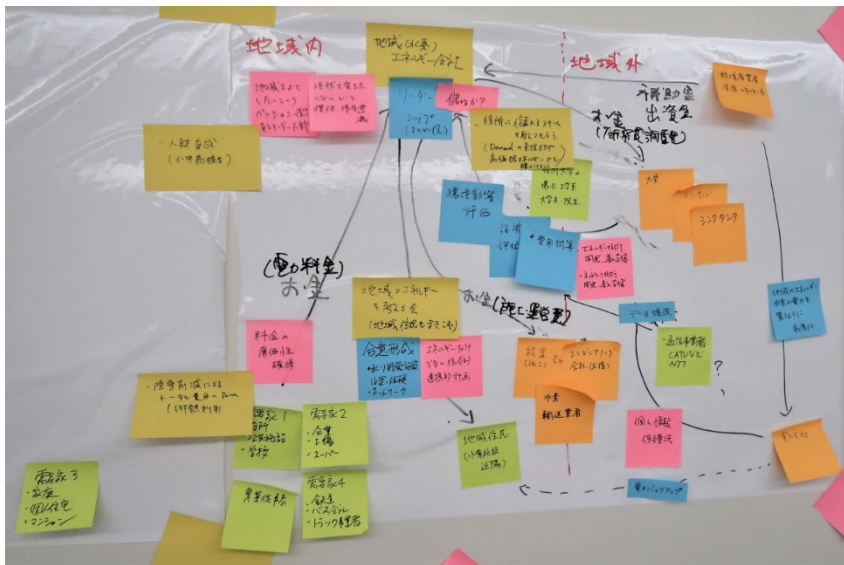


Figure 6-4 Regional energy planning scheme developed by group C

### 6.3. 計画に基づくエネルギーキャリア導入活動

地域スケールのエネルギーシステムを計画する方法について、ワークショップで議論された方法を比較し、効果的な計画方法について考察する。計画のための協働の場と導入分析の2つの観点から各グループの議論を分析する。Aグループでは、協働するための場として、非公式コミュニケーションおよび地域エネルギー会議という会議としての協働の場の設立が検討された。非公式コミュニケーションでは、漠然とした計画のコンセプトを大学やコンサルティング会社、シンクタンク（以下、シンクタンクもまとめてコンサルティング会社として議論する）とコミュニケーションを取りながらある程度具体化する。この際、自治体は公的な立場から地域全体としての便益を考えて計画を主導する役割を果たす。大学やコンサルティング会社では、エネルギーシステムの計画に関する専門的知見を基に計画のコンセプト具体化を支援する役割を果たす。地域エネルギー会議は、計画を個別の事業計画レベルにまで具体化する他、再生可能エネルギー導入の市民への理解を促す場である。ここでも自治体が計画を主導し、大学やコンサルティング会社はその支援を行う役割は同じである。Bグループでは、政令指定都市の自治体εでの事例に基づき検討され、既に事業を行っている事業者間の連携を図るために自治

体が取りまとめて共創検討委員会を設立することが検討された。共創検討委員会では、エネルギー需給のデータを共有し、事業者間での常時・非常時の連携を行うためのシステムを計画する。関わるアクターとして、自治体および各事業者に加えて、大学が地域データを受け取りシステム案の提案と評価を行う役割を果たすということが検討された。エネルギー面での連携以外にも土地の融通等でも連携する可能性について議論があった。Cグループでは、新たに会社を立ち上げて協働する仕組みが検討された。新会社には地域内外のアクターが出資し、電力会社も出資することが検討された。協働に関わるアクターは新会社への出資者であり、具体的なアクターとして電力会社および経済産業省が挙げられていた。その他、大学やコンサルティング会社に費用を払って環境影響評価や経済性評価を行うことが検討された。この新会社はそのまま事業を行うアクターとなることが想定されていた。

各グループでの計画を主導するアクターは、A、Bグループでは自治体であり、Cグループでは新会社であった。分析を担うアクターはどのグループでも大学あるいはコンサルティング会社であった。地域全体の便益を考えてエネルギーシステムを計画するためには、自治体のような公的な立場のアクターが主導する方が進めやすい可能性がある。実際に、過去の技術導入の事例でも自治体の職員や市長がリーダーとなって進めたものがある (Ruppert-Winkel, 2018)。それぞれの計画方法の利点と課題について考察する。Aグループでは、計画のコンセプトが具体的でない状態から協働して具体化していくことができることが利点である。この方法の課題は、自治体の強いリーダーシップが必要なことであり、自治体の影響力が強い自治体の方がこのような方法が適すると考えられる。また、非公式なコミュニケーションでは活動の規模や範囲が限定される恐れがあることも課題として挙げられる。その対策として、具体化にある程度時間を要する場合や調査費用等が発生する場合、コンサルティング会社のような営利企業では難しいため、大学のようなアクターが機能しやすいことや自治体と大学で包括連携協定を結んでおくことで非公式な相談がしやすい環境を整えておくという方法が提示されていた。Bグループで議論されたように、既に進行している個別の事業者が緩く連携するような協働の形態は、既に大きなプロジェクトが複数実施されている自治体εのような地域では現実的に実施可能性が高いことが利点である。地域スケールのエネルギーシステムの計画は個別の事業にも影響するため、計画に関わる個別事業者の意見を無視することはできず、それぞれのの事業が計画における制約となってしまう可能性があるため、緩い連

携として協力できる方法を模索する方法が進めやすいと推察される。ただし、この形態では、現状の制約が強すぎる場合、目指すべきビジョンをうまく反映できなくなる可能性があり、現実とあるべきシステムとの調整が必要である点は注意しなくてはならない。Cグループのように新会社を作る場合は、複数アクターが関与しつつ、1つの組織となるため機動的に活動できる。出資者として必要なアクターを巻き込むことができれば地域のエネルギーキャリア導入を主導するアクターとして強力に導入を推進できる可能性がある。課題としては、事業を行う会社であるため事業性評価がある程度できた段階でないと関係するアクターでの会社設立のための出資の判断ができないことが想定され、新会社設立すること自体がそもそも難しいということである。新電力の会社のように既に複数のアクターが出資して事業を行っている会社がエネルギーキャリア導入のための地域スケールのエネルギーシステムの計画も担うような形であれば、事業性評価にいたらない具体性の低い段階での計画も行える可能性がある。

これらの協働方法で最適なものが一意に定まるというよりは、地域や関わるアクターの条件によって適した方法で協働し、エネルギーシステムを計画すべきである。このワークショップではあり得る協働方法を網羅的には示せていないが、多様な参加者が議論したため、ある程度現実的な協働方法が提示されたはずである。また、どのような条件でどのような協働方法が適しているかの検証もできてはいないが、例えば地域の経済的状况や有力な事業者の存在によって適した協働方法が異なることが想定される。

続いて、エネルギーキャリア導入に関連する各種活動について、ワークショップで議論された具体的な事例を基にその活動の具体化と検証を行う。Table 6-6 に、ワークショップで言及のあった導入における具体的な活動内容をまとめた。第3章の導入プロセスに関する社会学モデルを参考に導入の活動について、政策立案、事業構築・運用、採用行動、受容性醸成・次世代教育、地域間での知識共有の5種類の活動にまとめた。事業構築・運用の活動は、事業構築・運用に関わる多様な活動を包含したものとし、アクターネットワークの形成やビジネスモデル作成や事業運用、資金調達・提供等をまとめたものとした。受容性醸成に関して、次世代教育の重要性がワークショップにおいて明確になったことからその観点も追加し、まとめた。政策立案として明示的に議論されたのは、国や自治体による補助金提供や固定資産税の低減、さらには電力会社が地域由来の電力を買う制度構築で、いずれも事業者の経済的支援を目的としたものであった。計画に基づいた事業構築の活動を支援するための政策立案の必要性が示された。

事業構築・運用では、はっきりと活動として記載はないものの、多様なアクターが連携しネットワーク化しながら事業を作る様子が A グループおよび C グループで作成されたスキーム図から観察される。事業を行うためには、ビジネスモデルを作るだけでなく、設備の設置、施工、環境管理計画、施設の立地検討、土地の提供、資金調達等多様な活動が必要となる。アンケートでは、客観的・定量的な分析結果があった方が、地域エネルギー計画に参加しやすく、そのモチベーションも高まるとの回答が多く得られ、導入分析に基づく地域のエネルギーシステムの計画があることで、アクターネットワーク形成が進みやすい可能性がある。その他の活動として、付加価値産業創出という意見が出された。政策的支援は重要であるものの、関係する事業者も利益が出るビジネスモデルを作り、ニッチな市場を作ることが求められる。水素等のエネルギーキャリア導入においては、現状のシステムではエネルギー供給コストとして高くなってしまったため、そのエネルギーを使った製品の製造費用も高くなってしまふ。それでも成り立つ事業とするためには、ブランド化等により高付加価値な製品を生み出すことが求められる。その他、融雪サービスと組み合わせた事業等の案が出された。

事業運用では、構築したビジネスモデルに従って事業を運用していくが、特に電力供給事業は多くのノウハウが必要であり、そのノウハウを既存の事業者が握っているため、発電事業、エネルギー供給事業に既存事業者を巻き込むことで新規参入の事業者も事業を行いやすくなる。また、実際に運用した事業における学びを導入分析に反映させ、計画の更新や他の取り組みへ展開することも示された。地域のエネルギーシステム計画は一度作って完成させられるものではなく、長期間かけてエネルギーキャリアを導入していく中で計画も少しずつ修正・更新していく。その際、実際に事業を運用したことで明らかになる課題や可能性についてフィードバックすることで計画されたシステムの実現性を高められる。過去のエネルギーシステムの変化から分析した技術導入プロセスの社会学モデルでは、技術導入におけるエネルギーシステムの計画にフォーカスはされていないため、このような計画自体の修正や更新の必要性はワークショップを行ったことで明らかになった。

採用行動として、ホテルや鉄道会社でコージェネレーション設備や燃料電池列車の導入事例があることが紹介されたが、具体的な課題等まで踏み込んだ議論はなされなかった。地域のエネルギーシステムの計画が直接的に採用行動に結びつくというよりも、事業を構築した結果として採用行動が起こるためであると考えられる。



受容性の醸成に関して、A および C グループでは、住民を巻き込むことの重要性が議論されていた。例えば関連施設の見学を行うことで、地域のエネルギーシステムの計画や事業に対する近隣住民の理解を深め、受容性を高めることや住民を議論に加えて合意形成を行う案が出された。また、社会学的な技術導入モデルにおいて示されていない項目として、次世代教育が A および C グループの 2 つのグループで議論された。A グループでは、地域の学生がシンポジウムで発表することで、地域に関心を持ち将来的に地域で活躍する人材となるということが議論された。また、学生が発表することでそれを聴講する親や近隣住民等も関心を高め、受容性が高まる効果も期待される。C グループでは、育成方法の具体案は出されなかったが、個人や個別団体にとっての便益だけでなく、地域全体にとっての便益を考える人材が増えることで、地域にとって便益のある技術導入を進めやすい環境になっていくという議論がなされた。長期的なエネルギーシステムの計画として考えることで、次世代教育の必要性が議論されたと考えられる。

地域間での知識の共有として、学会での報告および自治体間ネットワークでの情報共有という手段が示された。大学のアクターは、学会を通じて他の研究者と情報共有し、自治体間でも自治体連携組織を介して情報共有を行うことで、エネルギーキャリア導入を他の地域にも展開し、全国へと広げていくことが可能となる。エネルギーシステムの計画として体系的に進めることで学会を通しての知識の展開もできるようになる。

Table 6-6 Detailed activities in implementation of energy carrier based on region-scale energy system plan

|  |                              |                          |
|--|------------------------------|--------------------------|
| エネルギーキャリア導入における活動                                | ワークショップで挙げられた活動              | 主要なアクター                  |
| 政策立案   | 補助金提供                        | 国、自治体                    |
|  | 固定資産税の低減                     | 国、自治体                    |
|  | 電力会社が地域由来の電力を買う制度構築          | 国、自治体                    |
| 事業構築・運用<br>(アクターネットワーク形成、ビジネスモデル作成、事業運用、資金調達・提供) | 設備の設置、施工                     | エネルギー供給・輸送事業者、エンジニアリング企業 |
|  | 環境管理計画、施設の立地検討、土地の提供         |                          |
|  | 投融資                          | 銀行、自治体                   |
|  | クラウドファンディングとそのための宣伝活動        | 個人、事業者                   |
|  | 付加価値産業創出                     | エネルギーユーザー                |
|  | 燃料電池排熱を使った融雪サービスを発電事業と組み合わせ  | エネルギー供給事業者               |
|  | 発電事業、エネルギー供給事業への既存の事業者の巻き込み  | 既存発電事業者、新規発電事業者          |
|  | エネルギー供給事業、水素需給のマッチング         | エネルギー供給事業者               |
| 採用行動   | 事業に関するデータ提供                  | 事業者、大学、コンサルティング会社        |
|  | コージェネレーション設備導入               | ホテル                      |
| 受容性醸成・次世代教育                                      | 燃料電池列車導入                     | 鉄道会社                     |
|  | 関連施設の見学                      | 市民                       |
|  | 地域のエネルギーを考える会での地域住民を巻き込んでの会話 | 市民、エネルギー供給事業者            |
|  | シンポジウムでの発表・聴講                | 市民、学校                    |
| 地域間での知識共有  | 次世代の地域のリーダーの育成               | 学校                       |
|  | 学会での報告                       | 大学、学会                    |
|  | 自治体間ネットワークでの情報共有             | 自治体、自治体連携組織              |

以上のように、ワークショップを通して、地域スケールでのエネルギーシステムの計画およびそれに基づいたエネルギーキャリア導入に関する活動を具体化することができた。エネルギーシステムの計画における協働形態は、協議会や新規会社設立等複数の方法があり得、最適な方法があるわけではなく、地域の状況やアクターの関係等によって適切な協働方法を検討する必要がある。

エネルギーシステムの計画に基づくエネルギーキャリア導入の各種活動について具体的な活動の例を示すことができた。多様なアクターがネットワーク化し、設備の設置・施工、環境管理計画、土地の提供、投融資等の多様な活動が連携しながら事業を作る様子が、限られた時間の議論の中でも観察され、エネルギーシステムの計画がネットワーク形成および事業構築に寄与することが明らかになった。ワークショップを行ったことで新たに明らかになったこととして、エネルギーシステムの計画の更新の必要性と次世代教育の重要性が挙げられる。事業の構築や運用における実際のデータや学びを事業計画のための分析にフィードバックすることで、計画に現実的な制約や可能性を反映させて洗練させ、継続的な計画の更新につなげられることが明らかになった。さらに、計画に基づいて導入を実践した経験を次世代の教育に活用することで、エネルギーキャリア導入を継続的に進められることが明らかになった。また、事前アンケートでは、客観的、定量的な分析によってエネルギーシステムの計画に参加することに対して動機づけされ、特に他地域と比較して導入効果が高いような場合に強く動機づけされる可能性が示唆された。これらのワークショップおよび事前アンケートを通して得られた知見を第7章でエネルギーキャリア導入メカニズムとしてまとめる。

## 第7章 エネルギーキャリア導入に向けた 地域別エネルギーシステムの計画支援

---

本章では、前章までに得られた結果を統合し、地域別エネルギーシステムを計画し、エネルギーキャリアの導入における多様な活動を支援することができることを示す。さらに、地域別エネルギーシステムの計画によってエネルギーキャリア導入の社会全体での活動を支援するメカニズムを明らかにする。第3章では、エネルギーキャリア導入における社会全体の変化プロセスにおいて地域別エネルギーシステムの計画によって導入を支援できる可能性を示した。第6章でのワークショップおよびアンケートの結果から、具体的な活動を例に取って地域別エネルギーシステムの計画によるエネルギーキャリア導入支援の可能性を検証する。また、第2章で地産地消モデルを構築し、第4、5章では、地域別の技術導入分析において、LCA と組み合わせた多様な環境影響評価および社会経済的導入力と組み合わせた評価を行い、多面的に技術導入分析を行う手法を開発した。これらの分析を使った地域別エネルギーシステムの計画に基づいて、エネルギーキャリア導入における社会全体での変化に影響するメカニズムを示す。

### 7.1. 特定地域でのエネルギーシステムの計画

特定地域における地域別エネルギーシステムの計画に基づくエネルギーキャリア導入における活動間の相互作用を Table 7-1 の通りまとめた。導入分析 (Analysis)、エネルギーシステムの計画 (Plan)、社会環境の変化 (Social environment change)、個別の区画スケールの導入活動 (Specific site-scale implementation) に活動を分けてを表の左側および上側の項目として並べ、左側は影響する側 (Cause side) の項目、上側は影響される側 (Effect side) の項目を表し、左側の項目が上側の項目に与える影響の種類がそれぞれの項目の交差する場所に記載される。社会環境の変化および個別の区画スケールの導入活

動の項目は、第 6 章で分類した活動と一致したものであり、直接導入に関わる事業構築・運用や採用行動を個別の区画スケールの導入活動とし、政策立案や受容性の醸成、次世代教育、地域間での知識の共有といった導入のための環境構築に関わる活動を社会環境の変化として分けた。これらの他に、地域別エネルギーキャリア導入分析の活動と、これらを活用しての多様なアクターの協働による地域でのエネルギーシステムの計画の活動を加えた。これらの活動間の相互作用について、第 6 章の事前アンケートおよびワークショップ、さらに他の技術導入に関する事例から具体的に記述する。影響の種類として、情報のやり取りがあるものを D と F の二種類に分け、D は方向付けや制約、F は知識やデータに関してのフィードバックとした。情報以外の影響として補助金や人の供給を O として表した。直接的には影響しないものや第 3 章や第 6 章で検証していない範囲のものは I として表した。

導入分析から得られた結果は、エネルギーシステムの計画における重要なインプットとなる。定量的な分析結果に基づいて、エネルギーシステムの計画として適切なシステムオプションを判断することになる。第 6 章のワークショップでも定量的な分析に基づいて協議会等のなかで計画を作る必要性が示された。アンケートでも環境影響を含めた多様な評価に基づく分析の必要性が示唆された。多様な環境影響の評価結果や社会経済的導入力から地域での導入の進めやすさを勘案してシステムオプションの選択が行われる。また、地域での経済波及効果や災害耐性等の異なる指標を評価できるようなモデルの拡張および多基準意思決定の手法も必要となる。場合によっては地域区分を変更すべきという判断もあり、地域エネルギーシステムの計画に関係するアクターにも影響する。例えば、都市雇用圏のように複数の市町村が集まった地域の範囲で計画する方が適切であると判断された場合、市町村間の広域連携が必要となり、複数の自治体がエネルギーシステムの計画の活動に参加することになる。第 6 章のアンケートにおいても特定の地域区分に限定されるべきでなく、広域での連携が必要であるという意見が得られており、適切な地域区分から検討するような協働体制の構築が必要となる。

社会環境の変化および個別の区画スケールの導入活動に対しては、エネルギーシステムの計画が影響するため、導入分析の直接的な影響はあまりないが、地域間での知識共有においては地域別導入分析を活用することができる。ワークショップでは、学会発表や自治体間ネットワークを通じて地域間の知識の共有がなされる案が出された。この際、単に技術導入の事例を共有するのではなく、地域特性やそれに基づく分析と合わせ

て知識を共有することで地域の条件に応じた知識の一般化ができ、他の地域への展開を促進することができる。第5章で分析したように社会経済的な導入力と技術導入効果を合わせて分析し、地域を分類することで、類似の地域への展開を円滑に行う効果が期待できる。

多様なアクターの協働によるエネルギーシステムの計画の導入分析への影響は、主に分析における制約条件である。エネルギーシステムの計画のための協働体制構築によって参加アクターが決まると、それ自体が導入するシステムオプションの制約となってしまう可能性がある。例えば、ワークショップでは、既存の電力会社も出資して新規に地域エネルギー会社を設立するスキームが検討されたが、この場合、火力発電の廃止等の既存の電力会社の保有する資産を下げるシステムオプションは検討対象から外れる可能性がある。一方で、既存の電力会社等はエネルギーに関連するデータを多く保有しているため、それらを利用して詳細な分析ができるようになる可能性もある。システムオプションの比較・選択の活動における検討結果を基にして分析内容の見直しやモデルの修正等が行われ、分析とアクター間での解釈を繰り返しながら地域のエネルギーシステムが計画される。

エネルギーシステムの計画は社会環境の変化および個別の区画スケールの導入活動の両方に影響を及ぼす。政策立案として、ワークショップでは補助金提供や減税、電力購入に関する規制の案が検討されたが、こうした政策案がエネルギーシステムの計画と合致しているかを確認し、正当化、あるいは反対するのにエネルギーシステムの計画を利用できる。エネルギーシステムの計画を根拠として、一貫性のある政策立案が可能となり、関連する事業者にとってもリスクを見通しやすくなる。エネルギーシステムの計画は受容性醸成・次世代教育においても重要な役割を果たす。ワークショップでは、住民との対話を行う場を設けることやシンポジウムで発表する案が挙げられていたが、そこでの説明材料や発表の題材としてエネルギーシステムの計画を利用することができる。エネルギーシステムの計画があることで地域全体としてどのような変化が期待されるのかについての理解を促すことができる。地域間での知識共有においても計画的に技術導入を進めることそのものの実践と課題を共有することで他の地域にも同様のアプローチで展開できるようになる。事業構築・運用の活動として、ワークショップでは多数のアクターがネットワークを形成し、連携しながら多様な活動を行い、事業を構築していくことが示された。アンケートでは、客観的・定量的な導入分析によって、関係者

への説明・説得ができることや組織・個人としてのモチベーションが高まること、さらに他地域と比較して導入効果が高い方がその効果が強まることが示唆された。地域別の導入分析に基づくエネルギーシステムの計画によって、アクターネットワークを形成しやすくなり、事業構築・運用を円滑に進められると期待される。また、事業構築におけるビジネスモデルの作成や設備の設置・施工、事業運用等の多様な活動は、エネルギーシステムの計画と一致しているべきである。地域別エネルギーシステム計画があることで、事業者は地域にとって必要な事業を理解でき、事業方針にも反映させることができる。また、エネルギーシステムの計画に関わるアクターが個別の事業にも関与する可能性がある。ワークショップでも、地域エネルギー会社を新たに設立し、エネルギーシステムの計画および事業の両方を担うということが議論された。

社会環境の変化および個別の区画スケールの導入活動は、エネルギーシステムの計画に対してフィードバックとして現実の導入における課題や制約、可能性等に関する情報を提供する。ワークショップでも実際に運用した事業における情報や学びを導入分析に反映させ、計画に実状を反映させることや計画の更新、他の取り組みへ展開することが議論された。事業の運用時だけでなく、政策立案、事業構築、採用行動、受容性醸成においても現実の情報を反映させることで、エネルギーシステムの計画の実現性を高められる。第2、4、5章で行った地域別エネルギーキャリア導入分析では、地域全体でのエネルギーシステムを分析することができるが、地域内の詳細な資源や需要の場所は考慮できておらず、計画するシステムを実現するために必要な設備の場所や容量までは特定できない。このような粒度の高い分析を行うためには、地域内の詳細なデータが必要となり、実際の事業運用のデータや技術の詳細なデータが必要となるため、個別の区画スケールの導入活動からのフィードバックとしてのデータを使ってエネルギーシステムの計画を具体化していくことができる。導入の早い段階で粒度の高い分析に基づく計画を行うためには、エネルギーシステムの計画での協働において、地域内の詳細なデータを持つアクターを巻き込み、それを反映した分析を行う必要がある。例えば、プラントエンジニアリング会社は化学プラント等のシステムを設計し、現実には建設して運用できるようにするが、詳細設計での各機器メーカーの出してくる仕様の情報や建設現場での既設配管の位置情報等を得て、場合によってはシステム全体の変更を行う。同様に地域スケールのエネルギーシステムの計画でも個別の機器情報やコスト情報等を持つエンジニアリング会社が計画の活動に参加することで、計画段階から技術導入時の視点を

取り入れられる。また、地域別エネルギーキャリア導入の分析手法は確立できてはおらず、意思決定支援における課題や社会経済的導入力の適切な指標、適切な地域区分についての検証に利用することもできる。地域間での知識共有によって他地域の事例を学ぶことによって、考慮しきれていない地域特性や地域分類と実際の導入形態を比較し検証することもできる。また受容性醸成として、第6章のワークショップでは、合意形成の場に市民を巻き込んでエネルギーシステムの計画に携わってもらい、多様な視点を取り入れることが議論されていた。

政策立案、次世代教育、事業構築・運用の活動はエネルギーシステムの計画において、情報以外のインプットも与える可能性がある。政策立案においては、エネルギーシステムの計画に関連した事業の支援だけでなく、エネルギーシステムの計画立案そのものを支援することもあり得る。デンマークの Samsø 島の事例では、地域を支援する国のプロジェクトにおいて、地域のマスタープランを作ることを義務付けた。このように、国の政策としてエネルギーシステムの計画を促すことは有効であると考えられる。また、第6章のワークショップでは次世代教育として地域のエネルギー等に関して教育を受けた人が数年後に地域のエネルギーシステムの計画を担う立場になって、有力なアクターとして計画および導入を主導することで、地域での導入の活動が持続的になるという意見も示された。個別の区画スケールの導入活動では、事業構築における主なアクターは、計画時にも協働に関わるアクターとなり得る。ワークショップでも既に実施されている事業の事業者が中心となって連携する協働枠組の案が検討されていた。このアクターは実際の現場を理解していることやデータを保有していることから、情報のフィードバックにおいて重要な役割を果たす一方で、エネルギーシステムの計画における制約ともなり得る。

社会環境の変化は個別の区画スケールの導入活動にも影響を与えるため、エネルギーシステムの計画は、直接エネルギーキャリア導入の個別の区画スケールの導入活動を支援するだけでなく、社会環境の変化を通じて間接的にも導入支援につながる。政策立案はエネルギーシステムの計画によって定量的なエビデンスを得て方向付けられ、結果として種々の導入活動に影響する。補助金制度が作られることで実現可能となるビジネスモデルが生まれることや、国や自治体が資金の出し手となり、新たなプロジェクトを組成することもある。また、次世代教育によって次世代のリーダーを育成することで、事業を主体的に行うアクターや積極的に採用行動を行うアクターの登場に貢献できる可



能性がある。第6章のワークショップにおいてこのような次世代教育の重要性が議論された。逆に事業構築・運用の活動や採用行動では、政策への要求、補助金申請、事業を行うための資金調達等が行われ、事業として運用されるようになり、事業の内容によってアクターごとの採用行動に影響する。運用している施設見学をすることで受容性醸成につながるといった意見もワークショップで示された。

地域間での知識共有として、エネルギーシステムの計画、社会環境の変化、個別の区画スケールの導入活動全てがフィードバックとして知識共有に利用できる可能性がある。その際、地域別エネルギーキャリア導入分析による地域の分類と結び付けて一般化して地域での導入に関する知見・ノウハウを一般化することで効率よく知識の共有ができるはずである。ワークショップで議論されたような自治体連携組織を介して、実際に行った政策支援やその効果を他地域に共有することも重要である。逆に、多地域での事例を参考にして政策立案、事業構築、資金調達・提供、事業運用に活かすこともできる。

Table 7-1 Relationships among activities in regional energy planning and implementation

|                  |                                    | Effect side  |  |                           |  |  |   |                  |     |
|------------------|------------------------------------|--|--|---------------------------|--|--|---|------------------|-----|
|                  |                                    | Analysis   | Plan   | Social environment change |  |  | Specific site-scale implementation            |                  |     |
|                  |                                    | Region-specific analysis of energy carrier implementation<br>地域別エネルギーキャリア導入分析      | Energy system planning in multiple-actor collaboration<br>多様なアクターの協働によるエネルギーシステム計画 | Policy making<br>政策立案     | Social acceptance fostering/next-generation education<br>受容性醸成・次世代教育 | Knowledge sharing among regions<br>地域間での知識共有 | Business structuring and operation<br>事業構築・運用 | Adoption<br>採用行動 |     |
| Cause side       | Analysis                           | Region-specific analysis of energy carrier implementation<br>地域別エネルギーキャリア導入分析      |  | D                         | I  | I  | D   | I                | I   |
|                  | Plan                               | Energy system planning in multiple-actor collaboration<br>多様なアクターの協働によるエネルギーシステム計画 | D  |                           | D  | D  | F   | D/O              | D   |
|                  | Social environment change          | Policy making<br>政策立案  | I  | F/O                       |  | I  | F   | D/O              | D/O |
|                  |                                    | Social acceptance fostering/next-generation education<br>受容性醸成・次世代教育               | I  | F/O                       | I  |  | F   | D/O              | D/O |
|                  |                                    | Knowledge sharing among regions<br>地域間での知識共有                                       | D  | D                         | D  | D  |   | D                | D   |
|                  | Specific site-scale implementation | Business structuring and operation<br>事業構築・運用                                      | I  | F/O                       | F  | D  | F   |                  |     |
| Adoption<br>採用行動 |                                    | I  | F  | F                         | D  | F  |   |                  |     |

D: direction and constraint, F: feedback of knowledge and data, O: other input (e.g., money and human resource), I: indirect or non-validated effect

## 7.2. 地域別エネルギーシステムの計画に基づくエネルギー

### キャリア導入メカニズム

ここまでの内容を整理し、地域別エネルギーシステムの計画に基づいたエネルギーキャリア導入のメカニズムを Figure 7-1 に示した。これまでに述べてきた通り、エネルギーキャリア導入というのは、単に個別の設備を設置・配備するというものではなく、新規技術の普及やインフラ構築を伴うエネルギーシステム全体を大きく変えるものであり、多様な活動が相互に連携しながら導入される。これらの相互作用を図的にメカニズムとして示した。計画および導入に関わる活動を四角ブロックで表し、特に本論文で中心的に取り扱った活動については塗りつぶした四角ブロックに白抜き文字で表した。本論文の主要な問題である地域別導入分析およびエネルギーシステムの計画 (Region-specific analysis and energy system planning for implementation) に関する活動の部分は背景を薄く塗りつぶして範囲を明確化した。この中の活動として、地域別エネルギーキャリア導入分析のためのモデルの変更とシミュレーション (Model modification and simulation for region-specific analysis of energy carrier implementation)、LCA と組み合わせた地域別エネルギーキャリア導入分析 (Region-specific analysis of energy carrier implementation combining with LCA)、社会経済的導入力と組み合わせた地域別エネルギーキャリア導入分析 (Region-specific analysis of energy carrier implementation combining with socioeconomic driving force)、多様なアクターの協働による学び、議論、創造、意思決定等を含めたエネルギーシステムの計画 (Energy system planning in multiple-actor collaboration including learning, discussion, creation, and decision) がある。また、各種活動および関連を表す矢印の説明において、関連の深い章を角括弧 [ ] で表した。

多様なアクターの協働によるエネルギーシステムの計画に関する活動は、エネルギーシステムの計画そのものを立案するだけでなく、地域のビジョンを定め分析に対する要求を提示することや検討するシステムオプションや地域区分についても提示するものである。一度計画を作って終わるのではなく、実際に社会環境の変化の活動として政策立案や醸成等、区画スケールでの個別の活動として設備の構築や事業として運用等を行い、現実的な条件や問題に関してのフィードバックを行うことで、計画を常に更新し、目標に向かって現実性のあるエネルギーシステムの計画を作ると同時にエネルギーキ

キャリア導入を進めていく。第6章での議論のように、その地域の状況や関わるアクターによって様々な計画の方法があり得る。まずは少数のアクターが集まってある程度のコンセプトを固めて他のアクターを巻き込んでいくことや、既に事業を行っているアクターが中心となって計画を作るということも考えられる。参加するアクターによって計画における制約条件が付いてしまうこともあれば、アクターの持つ情報、データを活用して分析に活用することもできる。また、政策としてガイドラインを示すことや計画のための助成金を提供する等、地域に適したエネルギーシステムの計画自体を支援することも有効である。計画の活動としては、分析した計画案を並べて選択するような意思決定だけでなく、参加するアクター自身が学び、議論し、創造するような多様な活動が必要となり、会議のような形だけでなくセミナーやワークショップ、体験活動等の多様な形態が考えられる（例えば、種子島での事例 (Kikuchi et al., 2020) が参考にできる)。この計画の具体的な進め方については本論文の範囲外であり、さらに実践と分析が必要である。

エネルギーキャリア導入分析では、第2章で構築したモデルをベースとして、モデルの変更とシミュレーションおよびLCAや社会経済的導入力と組み合わせた地域別分析を行う。検討するシステムオプションや地域区分によってはモデルを変更していくことが必要となる。また地域や技術に関するデータの更新や新たにデータが利用可能となることによって、それを反映させる必要が出てくる。分析するためのパラメータ設定を行ってシミュレーションを実行する。第4章で行ったLCAとの組み合わせによる多様な環境影響の分析を実施することで、気候変動だけにとどまらない環境影響を理解することができ、ライフサイクル全体での主な排出場所がエネルギー利用の場所から設備・材料製造の場所に変化するという気づきが得られ、例えば、FCVの導入について、局所的な大気汚染を改善するために積極的に進めるようなエネルギーシステムの計画とすることもあり得る。また、第5章で行った社会経済的導入力と組み合わせた地域別導入分析を行うことで、導入効果だけでなく導入のしやすさといった観点から地域を評価することができ、エネルギーシステムの計画に参加するアクターを検討することや強い社会経済的導入力を示す業界のアクターの力をうまく活用できるようなエネルギーシステムを考えるとといった導入戦略立案に使うことができるはずである。

地域別導入分析とエネルギーシステムの計画はエネルギーキャリア導入全体の活動とも相互に関連しながらエネルギーキャリアが導入されていく。それぞれの活動につい

て、現状の課題と地域別エネルギーシステムの計画があることでどのように支援し得るのかについて以下に記述する。

## **国スケールのエネルギーシステムの計画**

### 現状の課題：

国スケールのエネルギーシステムの計画は、地域特性が反映されておらず、どの地域も一様に扱われており、具体性が不足している。それゆえに個別の設備導入と結び付けることも難しく、優先的に導入を進める地域も絞り込めない。

### 地域別エネルギーシステムの計画による支援：

第3章におけるエネルギーキャリア導入に関連するエネルギーシステム分析研究のレビューにおいて明らかにした通り、地域別エネルギーシステムの計画は、国スケールのエネルギーシステムの計画に対して、地域特性を反映させ、地域ごとに異なるエネルギーシステムを具体化する役割を担う。国スケールのエネルギーシステム計画は地域別エネルギーシステムの計画における制約条件としてはたらくというよりも、全体俯瞰的な視点から目標を示すものであり、地域別エネルギーシステムの計画で地域特性を考慮しながらその実現性や目標達成のための具体策を検討し、国スケールのエネルギーシステムの計画とともに発展させていくものとして捉えることができる。また、第3章の技術導入プロセスの社会学モデルにおいて、i) 新規技術の採用プロセスに着目したモデルおよび ii) システムの構築と拡大プロセスに着目したモデルで示された通り、エネルギーキャリア導入の地域適性の分析から地域を優先順位付けすることで、導入初期のシステム構築の労力が大きいときに限られた資源を優先する地域に集中的に投資することができる。

### 具体的アクターと支援の例：

国が燃料電池自動車の導入目標を掲げる際に、地域特性に合わせて地域ごとの導入目標内訳や資源利用可能性の観点からの実現可能性を理解できる。また、エネルギーキャリア導入の適性の高い地域で優先的に導入できるような具体的な補助金提供の条件を決めることができるようになる。

## **事業構築・運用、採用行動**

### 現状の課題：

事業構築・運用においては、個別の事業の経済性の観点が重視されており、地域全体の便益を評価する方法が整備されていない。また、採用者は個別の製品やサービスについての価格や便益の情報は定量的に理解できるが、地域全体としての影響を理解しにくい。

#### 地域別エネルギーシステムの計画による支援：

地域全体の便益を定量的に示すことができ、事業構築におけるサプライチェーンや資金提供を行う関係者が事業を実施するための動機付けにつながる。第3章の技術導入プロセスの社会学モデルにおいて、ii) システムの構築と拡大プロセスに着目したモデルで示された通り、エネルギーキャリア導入のためには、エネルギーキャリア供給を行う事業者だけでなく、ファイナンス面での支援をする銀行等のアクターや事業のサプライチェーン、メンテナンスに関わるアクターを巻き込む必要があり、第6章では定量的、客観的な評価を示すことでその動機付けにつながる可能性が示唆された。また、第3章の技術導入プロセスの社会学モデルにおいて、i) 新規技術の採用プロセスに着目したモデルで示された通り、採用行動において採用者が合理的選択を行うために、定量性のある計画を示すことは重要である。特に地域の身近な環境影響を定量的に示すことは、その地域のアクターにとっての採用の重要な観点となる。

#### 具体的アクターと支援の例：

自治体は、地域別エネルギーシステムの計画によって地域での都市域大気汚染の改善効果を定量的に理解することで、その費用便益から燃料電池バスの導入について意思決定に役立てることができる。また、エネルギーキャリアの供給事業者は、エネルギーキャリアの供給による地域での便益という社会的観点からの意義を理解することで、長期的に事業を行う意思決定に役立てることができる。

### **地域間での知識共有**

#### 現状の課題：

地域特性と構築すべきエネルギーシステムの関係が明確化されていないため、地域間での知見をうまく利用できず、試行錯誤的なエネルギーキャリア導入が進められ、結果として多くの時間や資源投入を必要とってしまう可能性がある。

#### 地域別エネルギーシステムの計画による支援：

第3章の技術導入プロセスの社会学モデルにおいて、iii) 人や資金、情報等の循環により地域での取り組みが地理的に広がるプロセスに着目したモデルで示された通り、一つの地域で得られた知見を他の地域にも適用し、広げていく取組が必要である。その際、本論文で構築したモデルを用いて、地域特性に応じた導入効果や社会経済的導入力の観点からエネルギーキャリア導入について地域を分類することで、分類に応じた導入の知見蓄積および共有が可能となり、効果的かつ早くエネルギーキャリア導入を進めることができる。

#### 具体的アクターと支援の例：

家庭用の燃料電池コージェネレーション設備の供給事業者は、ある地域で高い効果が得られたときに、地域別エネルギーシステム計画によって、エネルギーシステム全体の観点から同様の高い効果を得られる地域を理解し、ターゲットとする地域を絞り込むことができる。

### **社会環境の変化**

#### 現状の課題：

目指すエネルギーシステムが不明確であり、エネルギーキャリア導入のために必要な政策が不明である。また、定量的な地域全体の便益が不明であるためエネルギーキャリア導入のための個別の活動を支援すべきかどうか分からない。

#### 地域別エネルギーシステムの計画による支援：

第3章の技術導入プロセスの社会学モデルにおいて、iv) 新しいシステムが既存の環境に組み込まれながら既存環境そのものも変化していくプロセスに着目したモデルで示された通り、定量的なエネルギーシステム計画を政策立案や社会受容性醸成に役立てられる。地域全体の便益を定量的に示すことができ、エネルギーキャリア導入のための活動を支援するための政策を定量的根拠に基づいて立案することができる。定量的かつ客観的な根拠に基づくことで、政策立案者に依らない一貫性のある政策立案につながり、結果として、エネルギーキャリア導入に関わる事業者が長期的な事業リスクを見通しやすくなる。また、目指すエネルギーシステムとその導入効果が明確になっていることで、エネルギーキャリア導入に対する社会受容性の醸成や第6章のワークショップで協調された次世代教育にもつなげやすくなり、結果的にエネルギーキャリア導入のための個別の事業や採用行動を支援することにつながる。特に地域の身近な環境影響を定量的に

示すことは、その地域のアクターにとっての支援する判断における重要な観点となる。社会環境を変化させることで、結果的に個別の事業構築や採用行動がしやすくなる。また、エネルギーキャリア導入は個別の事業構築・運用や採用行動が積み重ねられることで、インフラ・設備が構築されると同時に事業におけるサプライチェーンやメンテナンス体制、金融機関と事業者との連携といった事業環境が構築されていき、エネルギーユーザーが関連する製品やサービスを理解し、生活習慣や業務プロセスに組み込まれるといったユーザー環境も構築されていく。こうした個別の活動が積み重ねられることでも社会環境が変化し、導入が進みやすくなる効果もある。

#### 具体的アクターと支援の例：

自治体は、地域別エネルギーシステムの計画を根拠にそれを実現するための補助金制度構築や土地提供を実施することができる。

地域住民は、地域で目指すエネルギーシステムの計画およびその便益を理解することで、エネルギーキャリア導入に関わる事業を応援するためにクラウドファンディングでの資金提供に協力する。



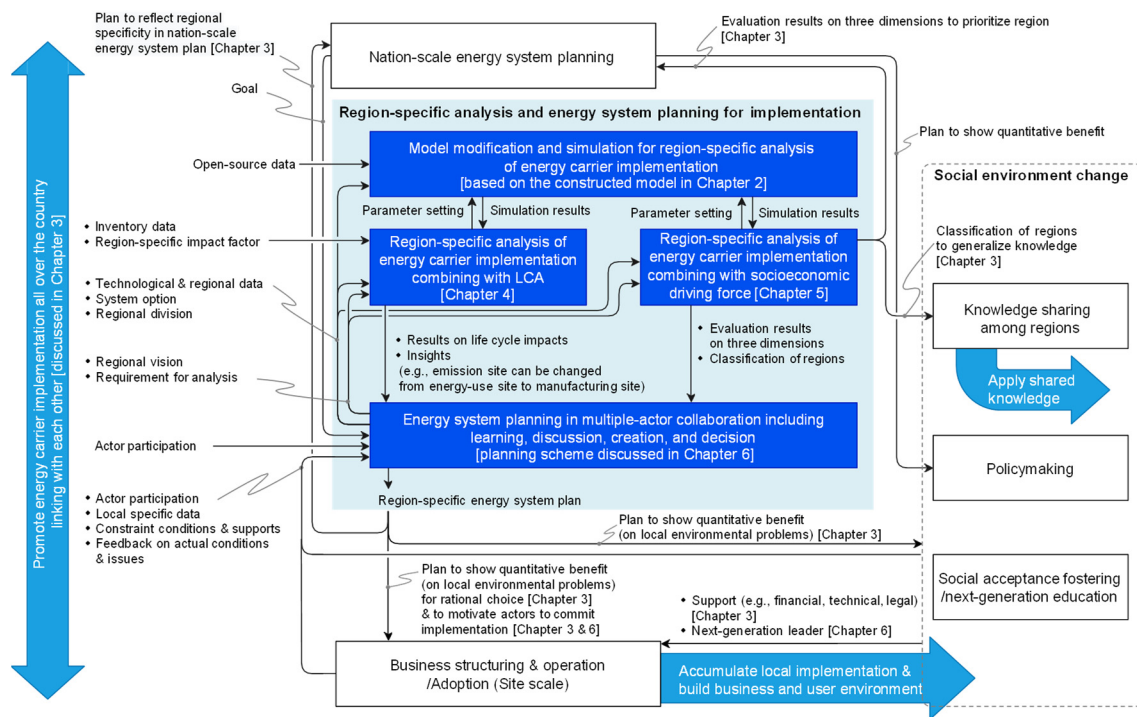


Figure 7-1 Schematic mechanism of energy carrier implementation based on region-specific energy system planning.

具体的な地域の事例に当てはめて地域別エネルギーキャリア導入分析によって地域別エネルギーシステムの計画を支援し、エネルギーキャリア導入に寄与できることを検証する。具体的な地域として福岡県北九州市を考える。北九州市では、製鉄所からの副生水素をパイプラインで輸送し、市街地で世界に先駆けて水素利用を行った北九州水素タウンプロジェクトが実施され、市内に2か所の水素ステーションが整備されている（北九州市, 2020）。福岡県では「福岡水素エネルギー戦略会議」という産学官連携組織が2004年に設立され、北九州市も参画して研究開発や社会実証、産業育成等に取り組んでいる（福岡水素エネルギー戦略会議, 2020）。

北九州市のウェブページでは、2020年現在、「北九州市の水素に関する取組み」というページの中で「北九州市における水素社会の実現に向けた方向性」という資料が示されている（北九州市, 2020）が、地域全体のエネルギーシステムの計画というよりは、個別具体的な案件の取組状況と今後の方向性が示されており、定量的な数値目標は示され

ていない。また、2017年に改定した北九州市環境基本計画という資料(北九州市,2017)では、環境政策の目標が記載されているが、CO<sub>2</sub>排出の削減目標として2030年に2005年度比で30%削減、2050年に2005年度比で50%削減およびアジア地域で150%削減という定量目標がある他には、定性的に広範な環境・エネルギー政策が主に記載されている。

こうした目標に対して、地域別エネルギーキャリア導入分析を行うことで、目標を実現するための具体的なエネルギーシステムを示すことや、目標の修正を検討することができるようになるはずである。第5章での分析において北九州市UEAは、太陽光発電および水電解で水素を製造し、家庭での燃料電池利用としてFCCGhによって水素を利用した場合、1台あたり162 kg-CO<sub>2</sub>eq/year/unitのGHG排出削減、全世帯の10%に導入した場合、88千ton-CO<sub>2</sub>eq/yearのGHG排出削減につながるという結果になっている。北九州市全体での家庭部門でのCO<sub>2</sub>排出量は2017年度時点で1,112千ton-CO<sub>2</sub>eq/yearであった(北九州市,2019)ことから、家庭部門でのCO<sub>2</sub>排出の8%程度(全体では0.5%程度)の削減となることが分析から分かる。他の地域と比較すると単位導入量あたりのGHG排出削減量は低い。この結果から、十分に効果が期待できると考えて家庭への燃料電池コージェネレーションを導入する計画にすることもあり得るし、比較的温暖な地域のためコージェネレーションは向かないと考え、太陽光発電とヒートポンプ利用によって排出削減をするエネルギーシステムの計画とした方が良いという判断もできるかもしれない。また、産業部門でのGHG排出削減がより重要と考え、産業部門でのエネルギーシステムを詳細化した計画を考えることもあり得る。こうした定量的な評価を行うことで、掲げた目標に対しての具体的なエネルギーシステムを議論することができるようになり、エネルギーシステムの計画を作る支援ができるはずである。

地域としてのエネルギーシステムの計画があることで、そもそも家庭用の燃料電池コージェネレーションを普及させるべきなのか、一定の稼働率確保のためにマンション全体での共有等のシステム変更が必要なのか、普及させるべきだとした場合に計画として設定した容量に対して現状の導入量が十分なのか不足しているのか、全体としてのGHG排出削減を達成するために他に必要な技術導入は何か、これらの導入を進めるための具体策として何をしなくてはいけないのか、といった導入のためのロードマップ策定や具体的なアクションプランにもつながるはずである。そうすれば、自治体は客観的な分析に基づいて政策的な支援を行いやすくなり、事業者も地域として進む方向性がある

る程度見えることで事業のリスクを見極めやすくなり、結果的に事業を行いやすくなると考えられる。

多様な立場のアクターがそれぞれエネルギーキャリア導入に関連する活動を行う際に、地域別エネルギーシステムの計画として目指すエネルギーシステムが明確になっていなければ、多様な活動は連携して動くことができず、効率的に導入を進めることができない。エネルギーキャリア導入は時間のかかるプロセスであり、すぐに地域全体としての導入効果は表れず、見えにくいため、導入分析に基づいた計画によって目指すべきエネルギーシステムを明示、共有し、その結果としてもたらされる導入効果を明らかにすることで、多様な立場のアクターが導入の意義を理解し、動機づけされ、連携しながら導入することにつながるはずである。すなわち、地域別エネルギーシステムの計画によって、国スケールから区画スケールまでの導入の活動を連携できるようになり、個別の導入活動のために効果的に社会環境を変化させることができるようになる。

## 第8章 結論と展望

---

### 8.1. 結論

持続可能なエネルギーシステムへと変えるために、地域特性に合わせたエネルギーキャリア導入によるエネルギーシステムを計画する地域別エネルギーシステムの計画の手法を開発し、導入の多様な活動を支援する方法を明らかにした。以下に各章で達成したことと本論文全体として達成したことを述べる。

第2章では、地域特性を考慮して LC-GHG の観点から適切なシステムを分析するための地産地消シミュレーションのモデルを構築した。地域ごとのエネルギー資源や利用形態、既存のエネルギーシステムの条件を考慮して、地域内でのエネルギーキャリアの製造、輸送、利用をシミュレーションし、エネルギーキャリア導入効果として LC-GHG の変化量を評価できるようにした。ケーススタディを通して、地域内のエネルギーフローおよび設備の構成、容量、LC-GHG 変化量を定量化することができ、地域の資源量や需要量、需要パターンの違いにより評価結果に違いが表れることが明らかになった。システムオプションによってライフサイクルステージごとの GHG 排出の構成には違いがあり、影響の大きい地域特性は異なることが分かった。特に地域全体での需要の大きさとエネルギーキャリア利用技術の利用率に影響するエネルギー需要パターンの地域による違いは評価結果に大きな影響を与える因子であることが分かった。また、地域によってエネルギー資源量と需要量は異なり、再生可能エネルギーからエネルギーキャリアを製造する場合、エネルギーキャリア利用技術の既存技術に対しての導入率が 50%程度でもエネルギー資源の不足する地域と 100%でも余剰のある地域があり、より広域的な地域での電力やエネルギーキャリアの融通が必要となることが分かった。地域区分として都市雇用圏を採用することで、地域特性がより際立ち、都道府県とは導入効果が異なることや、地域によってエネルギー資源量と需要量のバランスが異なるために再生可能エネルギーからの水素製造の限界に地域差があることが定量的に明らかになった。これ

らのケーススタディを通じた結果から、構築したモデルによって地域と技術システムオプションの組み合わせを定量的に評価することで、地域に適したシステムオプションおよびシステムオプションに適した地域を分析できることが明らかになった。課題として、モデルの精緻化、拡張が必要なことに加え、データの取得可能性が問題となることが分かった。

第3章では、エネルギーキャリア導入における地域別エネルギーシステムの計画の役割を明確化した。第2章で開発した分析手法を基に、それを使った地域別エネルギーシステムの計画が指すものを明確化した。その上で、エネルギーキャリアに関連するエネルギーシステム分析研究のレビューを行い、スケールの違いによって分析目的や使用されるデータに違いがあることが明らかになった。国スケールでは、10年以上先の長期的なエネルギーシステム全体でのシステム構成や一次エネルギー資源構成の最適化およびシナリオ分析といったことが行われ、特に気候変動対応のために必要なシステム構成や炭素税等の条件の分析が行われ、政策立案に利用されている。区画スケールでのエネルギーシステムの分析は、事業性検討およびシステム構成要素の仕様決定のために用いられる。中間的な地域のスケールでのエネルギーシステムの計画は、国スケールの計画で考慮されていない地域性や具体性を反映させることができ、区画スケールでのエネルギーシステム設計に対して、地域全体としての導入効果や目標との比較・対策検討を行うことで、エネルギーキャリア導入を方向付けることができ、結果としてこれらの異なるスケールを結び付ける役割を担うことを明確にした。また、従来の化学プロセス設計との比較から、地域スケールでのエネルギーシステムの計画では、地域全体としての便益向上が目的となることや主要な意思決定者がおらず複数のアクターが協働する必要があることを明らかにした。過去の技術導入の分析から作られた技術導入の社会全体のプロセスの社会学モデルから、地域別エネルギーシステムの計画によってエネルギーキャリア導入を支援できること明らかにし、さらに地域別エネルギーシステムの計画に求められる要件を明らかにした。

第4章では、気候変動以外の環境影響、特に、地域のアクターにとって重要な関心事である局所的な影響を及ぼす指標についても評価するために、第2章で構築した地産地消モデルを拡張し、LCAと統合した分析手法を開発した。気候変動以外の多様な環境影響について、地産地消シミュレーションとインパクト評価手法(LIME2)とを組み合わせることで、影響領域ごとのインパクトを定量化するとともに、統合的なインパクト

評価を行うことができた。ケーススタディを通して、局所的な影響のある都市域大気汚染や光化学オキシダント生成は、排出場所によらず影響する気候変動とは違った影響の傾向を示すことを明らかにした。FCVは線源NOx排出削減に効果的であり、特にその影響の大きい人口密度が高い都市部でその削減効果の恩恵が大きいという、気候変動への影響という観点からだけでは示されない価値を定量的に明らかにすることができた。さらに、設備・デバイスの製造地における局所的な環境影響悪化の可能性も示され、個別の対応が必要となることを明らかにした。また、評価結果には地域別のインパクト係数や代替される既存の系統電力の排出係数、気候や都市条件の違いによるエネルギー利用形態の違い等が評価結果に複合的に影響していることが分かった。

第5章では、社会経済因子と導入効果を合わせて地域適性を分析する手法を開発した。そのための指標を文献ベースで整理し、地域に差異が表れることを明らかにし、優先順位づけや地域別の戦略立案に活用し得ることを示した。エネルギーキャリア導入効果に加えて、社会経済的導入力として地域ごとの導入のしやすさを定量化して分析する手法を開発した。そのために、地域スケール、単位導入効果、社会経済的導入力という3つの基準に対して、評価を行うための分類、指標を特定した。ケーススタディを通して、実際に地域を3つの基準に対応する指標で評価することができ、単位導入効果としての単位LC-GHG削減量が同等の地域であっても社会経済的導入力および地域スケールにおいて差異があることが明らかになった。この分析を行うことで、国や大企業等の全国で活動するアクターがエネルギーキャリアを優先的に導入する地域を選定する支援につながる。また、特定の地域で主に活動するアクターがエネルギーキャリア導入のために自治体や特定の産業のアクターと連携する等の戦略を立案する支援にもつながる。そして、3つの基準から地域を分類することで、その分類に応じた知識やノウハウの蓄積、共有が容易になる。新たなエネルギーキャリア導入分析手法として提案し、エネルギーキャリア導入のための活動の支援に活用し得ることが分かった。

第6章では、ワークショップを通して地域でのエネルギーシステムの計画を行うための協働の具体的な方法を検討した。そして、エネルギーシステムの計画によるエネルギーキャリア導入におけるアクターとその活動を具体化した。地域やエネルギーに関わる多様なバックグラウンドを持つワークショップ参加者を対象として、事前アンケートを行い、地域別エネルギーキャリア導入分析によってアクターがエネルギーシステムの計画に参加する動機付けにつながることや地域の優先順位付けを行える一方で、経済性や

災害耐性等の評価指標も求められることやより適切な社会経済的導入力の指標を特定する必要があることが明らかになった。ワークショップでは、3つのグループで地域スケールでのエネルギーシステムの計画スキームを議論した。エネルギーシステムの計画における協働形態には協議会や新規会社設立等、複数の方法があり得るが、最適な方法があるわけではなく地域の状況やアクターの関係等によって適切な協働方法を検討する必要があり、ワークショップを通してある程度現実的な協働方法を示すことができた。また、計画に基づくエネルギーキャリア導入の各種活動について、エネルギーシステムの計画がアクターネットワーク形成および事業構築に寄与することや実際の事業構築や運用におけるデータ、学びの導入分析へのフィードバックによりエネルギーシステムの計画の洗練・更新につながることで、次世代教育として地域での活動の担い手を育成しエネルギーキャリア導入の活動を持続的に支える必要があることが明らかになった。

第7章では、地域別エネルギーシステムの計画に基づくエネルギーキャリア導入における主要な活動とそれらの相互作用を明らかにし、国スケールおよび区画スケールでの活動も含めた全体としてのエネルギーキャリア導入のメカニズムを明確化した。第3章で整理した技術導入プロセスの社会学モデルと第6章で議論した地域スケールでのエネルギーシステムの計画に基づくエネルギーキャリア導入の活動の具体例から、地域内でのエネルギーキャリア導入分析およびそれに基づくエネルギーシステムの計画、社会環境の変化、個別の区画スケールの導入活動との間の相互作用を整理した。地域スケールでのエネルギーシステムの計画は事業構築や採用行動といった個別の区画スケールでの導入活動に直接影響するだけでなく、政策立案や受容性醸成・次世代教育のような社会環境の変化を通じて間接的にも影響することが明らかになった。また個別の区画スケールの導入活動や社会環境の変化の活動を通して得られたデータや知見を導入分析にフィードバックすることで、導入分析の精度を実状に基づいて向上させるだけでなく、地域内の詳細な情報に基づき分析の粒度を高めることができる。このようなフィードバックをうまく機能させることで計画されたシステムの具体化と継続的な更新につながることが分かった。さらに、特定地域にとどまらず国全体を含めたマルチスケールでのエネルギーキャリア導入に関連する活動において、地域別エネルギーシステムの計画を活用しての導入メカニズムを明確化し、第2章で構築した地産地消モデルを応用して第4、5章で行った多様な環境影響や社会経済的導入力を組み合わせた導入分析

を行って地域別のエネルギーシステムを計画し、それがエネルギーキャリア導入に関連する多様な活動と相互作用することを示した。具体例を用いて、活動内容と地域別エネルギーシステムの計画の活用方法を具体化し、エネルギーシステム全体の変化を伴うエネルギーキャリア導入においては、多様な立場アクターによる活動によって導入が進められ、地域別エネルギーシステムの計画によってそれらの活動を連携して進めることができるようになることを明らかにした。

結論として、本研究によって地域別エネルギーキャリア導入分析に基づくエネルギーシステムの計画の方法を明らかにし、エネルギーキャリア導入のための社会全体の活動において計画を活用するメカニズムを提示することができ、導入のための多様な活動について導入の全体像を理解して進めることができるようになった。これまでのエネルギーキャリア導入の動きにおける課題として、個別のアクターによる短期的視点での事業性や便益に基づいた個別の設備の導入や採用行動が行われ、地域全体での長期的な便益を考慮する視点に欠けていたことや、あるいは国全体としてのエネルギーシステムを考えた長期的視点の分析においては、全国を一様に見なしており具体的なシステム構成やそのパフォーマンスについて十分に検討できていなかった。本研究では、地域特性に合わせたエネルギーシステムを計画するための地域別エネルギーキャリア導入分析を行うことで、国スケールでのエネルギーシステムの計画よりも具体的なエネルギーシステムの計画とすることができ、個別の導入の活動についてエネルギーシステムの計画における位置づけを理解できるようにし、国スケールと区画スケールのそれぞれの導入の活動を連携させることができるようになった。地域別エネルギーキャリア導入分析によって、自動車の平均走行距離や家庭での電力・熱需要といったエネルギー需要パターン、既存の系統電力の排出係数等の地域特性の違いによって導入効果に地域差があることが明らかになり、こうした地域の違いを考慮したエネルギーシステムの計画を作ることによってエネルギーキャリア導入における目標を実現するのに寄与できる。

また、地域別エネルギーシステムの計画に基づくエネルギーキャリア導入のメカニズムを示すことによって、エネルギーキャリアの社会全体での導入プロセスにおける個別の活動の位置づけを理解するのを支援できる。エネルギーキャリア導入というのは、単に個別の設備を設置・配備するだけでなく、エネルギーシステム全体が変化し、かつ政策や制度、事業環境、技術のユーザー環境も変化する複雑なプロセスであるため、個別のアクターが個々に導入するのではなく、エネルギーシステムの計画を示し、連携して



導入を進めるべきである。地域別エネルギーシステムの計画に基づく社会全体での導入プロセスをメカニズムとして示すことで、地域別エネルギーシステムの計画は、システムを構成する設備を詳細化して要求を明確化していく目的だけでなく、社会環境を変えることにより、社会全体としてエネルギーキャリア導入を方向付けていく役割を担うことを明確にした。このような全体像を各アクターが理解することで、エネルギーキャリア導入に関わるそれぞれの多様な活動の意義を理解し、強く動機づけられることや目的に沿って効果的な活動を実施することが期待される。

## 8.2. 展望

今後、実際に地域別エネルギーシステムの計画を行い、エネルギーキャリアを導入していくことで、本研究で提案した地域別エネルギーシステムの計画手法およびそれに基づく導入メカニズムが機能することを検証していくことが必要である。そのためには、複数のアクターが地域のエネルギーシステムを変える必要性を強く認識し、地域でのビジョンや目標を定め、地域別エネルギーシステムの計画により具体的なシステムイメージへと変えていくべきである。その際、第7章で示した通り、地域別エネルギーシステムの計画を一度行って終わるのではなく、個別の設備導入や社会環境を変えるための政策立案等の具体的な導入活動を実践しながら継続的に計画を更新することで、実現可能な計画となるはずである。実践的な地域別エネルギーシステムの計画とするためには、さらに以下の項目の開発が望まれる。

- 指標の拡充

環境影響以外にも経済性分析やエネルギーセキュリティの観点等での分析が必要である。これまでにエネルギーシステムの分析で検討されてきている指標であれば、データがあれば分析可能なはずである。データの取得可能性に関しては本論文で議論したように必ずしも必要なデータを全て取得することはできず、ある程度の推計や時間と費用をかけての調査、あるいはエネルギーシステムの計画に関与するアクターから情報を入手することが考えられる。つまり、地域別導入分析は全ての指標を網羅できるわけではなく、データの入手可能性から地域別分析を行うものと、特定地域のみ分析を行うものが必要になる。また、社会経済的

導入力に関する指標は検証が十分にできておらず、有効な指標の探索・開発が必要となる。実際に導入を進めながら適切な指標についての検証を実施していくことで今後の導入に役立てられるはずである。

- 意思決定手法の組み込み

上述の通り複数の指標での評価が必要となるが、評価指標間のトレードオフを理解した上での意思決定が必要となる。多基準意思決定等の手法の活用が必要となるであろう。もう一つの意思決定上の課題は将来の不確実性が高いことである。不確実性に対しては感度分析が良く用いられるが、必ずしも高い不確実性に対応できるわけではない。地域スケールでのエネルギーシステムの計画は長期的視点であり、エネルギーキャリアに関連する技術はまだ発展途中であることから、新規技術の登場や技術的發展の他、シェアリングエコノミーやデジタル技術の発展等の社会的な変化によるエネルギー利用形態の不確実性が高い。長期的な不確実性を予測することは困難であることから、モデルに基づく分析手法ではなく、多様なステークホルダーの意見を基に物語を作る探索的シナリオ分析等の手法 (Heiden et al., 1998) やモデルとの組み合わせによる手法 (McDowall, 2014) も注目すべき取り組みである。

- シナリオの提示

将来のある時点での計画に至るまでの道筋を示したシナリオを作ることが求められる。地域別エネルギーシステムの計画は長期的にエネルギーキャリアを導入するための計画であり、計画されたシステムの構成要素が一度にすぐに導入されるわけではなく、個別の区画スケールの導入活動を通して徐々にシステムが変化していく。導入の初期段階では、化石資源由来のエネルギーキャリアを利用し、段階的に CCS の利用や再生可能エネルギーを利用したエネルギーキャリアへと変わっていくことが想定される。その一連のプロセスを含めてエネルギーシステムの計画に含めることで、具体的な手順やスケジュールを含めた計画が可能になる。また、計画として目指すシステムの GHG 排出量を示すことも重要だが、シナリオ全体を通しての GHG 排出量を示すことで地域での累積での GHG 排出量を想定することができる。このようなシナリオ全体を通じた評価も加えたシナリオ分析が必要である。

- エネルギーシステム以外の地域計画との統合

本研究では、エネルギーシステムにフォーカスして地域別エネルギーシステムの計画手法を検討したが、エネルギーシステムは、福祉や交通、住環境、産業等、多様な地域の側面とも関連しており、エネルギーシステムだけを独立に考えることはできない。これらの多様な側面を統合的に計画する手法は確立されていないが、異なる分野の相互作用に着目した研究もされ始めており (Geels, 2018)、今後の発展が期待される。

# Nomenclature

---

|                              |  |                              |
|------------------------------|--|------------------------------|
| $c_j^{\text{elec}}$          | エネルギーキャリア使用技術 $j$ の ECCG 一台あたりの発電容量            | (J/year·unit of ECCG)        |
| $D_r^{\text{ECtotal}}$       | 地域 $r$ における全ての技術での総エネルギーキャリア需要量                | (J/year)                     |
| $D_r^{\text{elec}}$          | 地域 $r$ における電力需要量                               | (J/year)                     |
| $D_r^{\text{heat}}$          | 地域 $r$ における熱需要量                                | (J/year)                     |
| $E_{i,r}^{\text{P}}$         | 地域 $r$ におけるエネルギーキャリア製造技術 $i$ の GHG 排出量         | (kg-CO <sub>2</sub> eq/year) |
| $E_{j,r}^{\text{U}}$         | 地域 $r$ におけるエネルギーキャリア使用技術 $j$ の GHG 排出量         | (kg-CO <sub>2</sub> eq/year) |
| $E_{j,r}^{\text{Uincrease}}$ | 地域 $r$ におけるエネルギーキャリア使用技術 $j$ の GHG 排出の増加項      | (kg-CO <sub>2</sub> eq/year) |
| $E_{j,r}^{\text{Udecrease}}$ | 地域 $r$ におけるエネルギーキャリア使用技術 $j$ の GHG 排出の減少項      | (kg-CO <sub>2</sub> eq/year) |
| $E_{k,r}^{\text{T}}$         | 地域 $r$ におけるエネルギーキャリア輸送技術 $k$ の GHG 排出量         | (kg-CO <sub>2</sub> eq/year) |
| $E_r^{\text{Ptotal}}$        | 地域 $r$ におけるエネルギーキャリアの製造による総 GHG 排出量            | (kg-CO <sub>2</sub> eq/year) |
| $E_r^{\text{total}}$         | 地域 $r$ におけるエネルギーキャリアのサプライチェーン全体を通じた LC-GHG 排出量 | (kg-CO <sub>2</sub> eq/year) |
| $E_r^{\text{Ttotal}}$        | 地域 $r$ におけるエネルギーキャリアの輸送による総 GHG 排出量            | (kg-CO <sub>2</sub> eq/year) |
| $E_r^{\text{Utotal}}$        | 地域 $r$ におけるエネルギーキャリアの使用による総 GHG 排出量            | (kg-CO <sub>2</sub> eq/year) |
| $L_{j,r}$                    | 地域 $r$ におけるエネルギーキャリア使用技術 $j$ の 1 台あたりの年間走行距離   | (km/year/car)                |

|                         |   |          |
|-------------------------|---|----------|
| $N_{j,r}$               | 地域 $r$ におけるエネルギーキャリア使用技術 $j$ の導入台数  | (-)      |
| $N_r^{\text{ECCG}*}$    | 地域 $r$ における ECCG を設置することができる候補地の総数  | (-)      |
| $N_r^{\text{ECV}*}$     | 地域 $r$ における ECV によって置き換えることができる潜在的な CnV の台数                                   | (-)      |
| $N_r^{\text{FCV}*}$     | total number of the vehicles that can be replaced by EC vehicle in region $r$ | (-)      |
| $P_{i,r}^{\text{EC}}$   | 地域 $r$ におけるエネルギーキャリア製造技術 $i$ のエネルギーキャリア製造能力                                   | (J/year) |
| $P_{i,r}^{\text{EC}*}$  | 地域 $r$ におけるエネルギーキャリア製造技術 $i$ のエネルギーキャリア製造ポテンシャル                               | (J/year) |
| $P_{j,r}^{\text{elec}}$ | 地域 $r$ におけるエネルギーキャリア使用技術 $j$ の発電量   | (J/year) |
| $P_{j,r}^{\text{heat}}$ | 地域 $r$ におけるエネルギーキャリア使用技術 $j$ の熱発生量  | (J/year) |
| $S_r^{\text{ECtotal}}$  | 地域 $r$ における全ての技術からの総エネルギーキャリア供給量  | (J/year) |
| $T_{k,r}^{\text{EC}}$   | 地域 $r$ におけるエネルギーキャリア輸送技術 $k$ によって輸送されるエネルギーキャリアの量                             | (J/year) |
| $TD$                    | エネルギーキャリア輸送距離   | (km)     |
| $U_{j,r}^{\text{EC}}$   | 地域 $r$ におけるエネルギーキャリア使用技術 $j$ のエネルギーキャリア使用量                                    | (J/year) |
| $\alpha_i$              | エネルギーキャリア製造技術 $i$ の導入率  | (-)      |
| $\alpha_j$              | エネルギーキャリア使用技術 $j$ の導入率  | (-)      |
| $\beta_{j,r}$           | 地域 $r$ におけるエネルギーキャリア使用技術 $j$ の年間設備利用率   | (-)      |
| $\delta_k$              | エネルギーキャリア輸送技術 $k$ を選択するための係数  | (-)      |
| $\eta_j^{\text{elec}}$  | エネルギーキャリア使用技術 $j$ の発電効率   | (-)      |

|  |   |   |
|--|---|---|
| $\eta_j^{\text{heat}}$                   | エネルギーキャリア使用技術 $j$ の熱生成効率  | (-)                                     |
| $\eta_{\text{grid}}^{\text{elec}}$       | 系統電力の送電効率   | (-)                                     |
| $\eta_{\text{HG}}^{\text{heat}}$         | 熱生成装置の熱生成効率   | (-)                                     |
| $\theta_{i,r}$                           | 地域 $r$ におけるエネルギーキャリア製造技術 $i$ の製造能力に対する実際の製造量の比率                       | (-)                                     |
| $\tau_j$                                 | エネルギーキャリア使用技術 $j$ の平均寿命   | (year)                                  |
| $\tau_{\text{CnV}}$                      | CnV の平均寿命   | (year)                                  |
| $\phi_{i,r}^{\text{production}}$         | 地域 $r$ におけるエネルギーキャリア製造技術 $i$ の単位エネルギーキャリア製造あたりの GHG 排出係数              | (kg-CO <sub>2</sub> eq/J)               |
| $\phi_j^{\text{manufacture}}$            | エネルギーキャリア製造技術 $j$ の製造段階での GHG 排出係数                                    | (kg-CO <sub>2</sub> eq/functional unit) |
| $\phi_{\text{CnV}}^{\text{manufacture}}$ | CnV の製造段階での GHG 排出係数  | (kg-CO <sub>2</sub> eq/functional unit) |
| $\phi_j^{\text{use}}$                    | エネルギーキャリア製造技術 $j$ の使用段階での GHG 排出係数                                    | (kg-CO <sub>2</sub> eq/J)               |
| $\phi_{\text{CnV}}^{\text{use}}$         | CnV の使用段階での GHG 排出係数  | (kg-CO <sub>2</sub> eq/J)               |
| $\phi_{\text{grid},r}^{\text{use}}$      | 系統電力の使用段階での GHG 排出係数  | (kg-CO <sub>2</sub> eq/J)               |
| $\phi_{\text{HG},r}^{\text{use}}$        | HG の使用段階での GHG 排出係数   | (kg-CO <sub>2</sub> eq/J)               |
| $\phi_k^{\text{transportD}}$             | エネルギーキャリア輸送技術 $k$ の輸送距離に依存する項における単位エネルギーキャリア輸送量および単位輸送距離あたりの GHG 排出係数 | (kg-CO <sub>2</sub> eq/J·km)            |
| $\phi_k^{\text{transportND}}$            | エネルギーキャリア輸送技術 $k$ の輸送距離には依存しない項における単位エネルギーキャリア輸送量あたりの GHG 排出係数        | (kg-CO <sub>2</sub> eq/J)               |
| $\psi_j^{\text{EC}}$                     | エネルギーキャリア使用技術 $j$ の単位走行距離あたりのエネルギーキャリア使用量                             | (J/km)                                  |
| $\psi_{\text{CnV}}^{\text{fuel}}$        | CnV の単位走行距離あたりの燃料使用量  | (J/km)                                  |

# Abbreviations

---

|   |                              |
|---|------------------------------|
| BPR (byproduct from petroleum refinery)                   | 製油所からの副生物                    |
| CnV (conventional vehicle)                                | 従来型自動車                       |
| COALWE (coal thermal power plant with water electrolysis) | 石炭火力発電電力を用いた水電解              |
| CPH (compressed hydrogen)                                 | 圧縮水素                         |
| ECCG (energy-carrier-using cogeneration system)           | エネルギーキャリアを使用するコージェネレーションシステム |
| ECV (energy-carrier vehicle)                              | エネルギーキャリアを使用する自動車            |
| EV (electric vehicle)                                     | 電気自動車                        |
| FCCGh (fuel cell cogeneration system for household use)   | 家庭用燃料電池コージェネレーションシステム        |
| FCV (fuel cell vehicle)                                   | 燃料電池自動車                      |
| FGSTR (fuel gas steam reforming)                          | 燃料ガスの水蒸気改質                   |
| GEOWE (geothermal generation with water electrolysis)     | 地熱発電電力を用いた水電解                |
| GHG (greenhouse gas)                                      | 温室効果ガス                       |
| GIS (geographic information system)                       | 地理情報システム                     |
| GPWE (grid power with water electrolysis)                 | 系統電力を用いた水電解                  |
| HG (heat generator)                                       | 熱生成装置                        |

|  |                                 |
|--|---------------------------------|
| HYDWE (hydropower generation with water electrolysis)                            | 水力発電電力を用いた水電解                   |
| ICEV (internal combustion engine vehicle)  | 内燃エンジン自動車                       |
| IRR (internal rate of return)  | 内部利益率                           |
| LCA (life cycle assessment)  | ライフサイクルアセスメント                   |
| LC-GHG (life-cycle greenhouse gas emission)                                      | ライフサイクル温室効果ガス排出                 |
| LCIA (life cycle impact assessment)  | ライフサイクルインパクト評価                  |
| LCOE (levelized cost of energy)  | 均等化エネルギー原価                      |
| LIME2 (life cycle impact assessment method based on endpoint modeling for Japan) | 日本版被害算定型影響評価手法                  |
| LPG (liquefied petroleum gas)  | 液化石油ガス                          |
| LQH (liquefied hydrogen)   | 液化水素                            |
| MARKAL (Market Allocation Model)   | 国スケールでのエネルギーシステムのシミュレーションを行うモデル |
| MCH (methylcyclohexane)  | メチルシクロヘキサン                      |
| NGCCWE (natural gas combined cycle power plant with water electrolysis)          | 天然ガスコンバインドサイクル発電電力を用いた水電解       |
| NGWE (natural gas thermal power plant with water electrolysis)                   | 天然ガス火力発電電力を用いた水電解               |
| NMVOC (nonmethane volatile organic compound)                                     | 非メタン揮発性有機化合物                    |
| NPV (Net present value)  | 正味現在価値                          |
| NPWE (nuclear power plant with water electrolysis)                               | 原子力発電電力を用いた水電解                  |



|  |                 |
|--|-----------------|
| OILWE (oil thermal power plant with water electrolysis)      | 石油火力発電電力を用いた水電解 |
| PV (photovoltaic generation)                                 | 太陽光発電           |
| PVWE (solar photovoltaic generation with water electrolysis) | 太陽光発電電力を用いた水電解  |
| RS (regional scale)  | 地域スケール          |
| SDF (socioeconomic driving force)                            | 社会経済的導入力        |
| UEA (urban employment area)                                  | 都市雇用圏           |
| UIE (unit implementation effect)                             | 単位導入効果          |
| VRE (variable renewable energy)                              | 変動性の再生可能エネルギー電源 |
| WH (water heater)  | 給湯器             |
| WTWE (wind turbine power generation with water electrolysis) | 風力発電電力を用いた水電解   |

## 参考文献

---

- Agnolucci, P., McDowall, W., 2013. Designing future hydrogen infrastructure: Insights from analysis at different spatial scales. *Int. J. Hydrogen Energy* 38, 5181–5191. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.042>
- Agora Energiewende, 2018. A word on- flexibility.
- AIRIA (Automobile Inspection and Registration Information Association), 2016. A trend of car ownership in Japan. <https://www.airia.or.jp/publish/file/r5c6pv000000budm-att/r5c6pv000000bue1.pdf> (accessed 8.15.17).
- AIST (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology), JEMAI (Japan Environmental Management Association for Industry), 2015. LCI database IDEA version 2. <http://www.idea-lca.jp/index.html> (accessed 7.23.18).
- Ali, S., Taweekun, J., Techato, K., Waewsak, J., Gyawali, S., 2019. GIS based site suitability assessment for wind and solar farms in Songkhla, Thailand. *Renew. Energy* 132, 1360–1372. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.035>
- Anandarajah, G., McDowall, W., Ekins, P., 2013. Decarbonising road transport with hydrogen and electricity: Long term global technology learning scenarios. *Int. J. Hydrogen Energy* 38, 3419–3432. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.110>
- ANRE (Agency for Natural Resources and Energy, Japan), 2018. Strategic energy plan.
- ANRE (Agency for Natural Resources and Energy, Japan), 2016. The Fukushima plan for a new energy society. [https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving\\_and\\_new/fukushima\\_vision/](https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/fukushima_vision/) (accessed 2.28.19).
- Araújo, K., Boucher, J.L., Aphale, O., 2019. A clean energy assessment of early adopters in electric vehicle and solar photovoltaic technology: Geospatial, political and socio-demographic trends in New York. *J. Clean. Prod.* 216, 99–116. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.208>

- Bauer, C., Hofer, J., Althaus, H., Del Duce, A., Simons, A., 2015. The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework. *Appl. Energy* 157, 871–883.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.019>
- Bhandari, R., Trudewind, C.A., Zapp, P., 2014. Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis - A review. *J. Clean. Prod.* 85, 151–163.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.048>
- Biegler, L.T., Grossmann, I.E., Westerberg, A.W., 1997. *Systematic Methods of Chemical Process Design*.
- Blanco, H., Faaij, A., 2018. A review at the role of storage in energy systems with a focus on Power to Gas and long-term storage. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 81, 1049–1086.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.062>
- Brewer, J., Ames, D.P., Solan, D., Lee, R., Carlisle, J., 2015. Using GIS analytics and social preference data to evaluate utility-scale solar power site suitability. *Renew. Energy* 81, 825–836. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.017>
- Bussar, C., Stöcker, P., Cai, Z., Moraes Jr., L., Magnor, D., Wiernes, P., van Bracht, N., Moser, A., Sauer, D.U., 2016. Large-scale integration of renewable energies and impact on storage demand in a European renewable power system of 2050 — Sensitivity study. *J. Energy Storage* 6, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.est.2016.02.004>
- Charabi, Y., Gastli, A., 2011. PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation. *Renew. Energy* 36, 2554–2561.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.10.037>
- Chubu-EPCO (Chubu Electric Power Company), 2014. Past records of coefficient of CO2 emission. <http://www.chuden.co.jp/> (accessed 8.15.17).
- Chugoku-EPCO (Chugoku Electric Power Company), 2018. Fact book 2018.
- Chugoku-EPCO (Chugoku Electric Power Company), 2014. Past records of coefficient of CO2 emission. <http://www.energia.co.jp/> (accessed 8.15.17).
- CLAIR (Council of Local Authorities for International Relations), GRIPS (Institute for Comparative Studies in Local Governance National Graduate Institute for Policy Studies), 2011. Statistics on local governance (Japanese/English).
- Clarivate, 2020. Web of Science. <https://clarivate.com/webofsciencegroup/>

- Colbertaldo, P., Agustin, S.B., Campanari, S., Brouwer, J., 2019. Impact of hydrogen energy storage on California electric power system: Towards 100% renewable electricity. *Int. J. Hydrogen Energy* 44, 9558–9576. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.062>
- CRIEPI (Central Research Institute of Electric Power Industry), 2018. 水素サプライチェーンの経済性とCO<sub>2</sub>排出量の比較 – 詳細評価に必要な水素サプライチェーンの抽出 –.
- CRIEPI (Central Research Institute of Electric Power Industry Japan), 2016. Comprehensive assessment of life cycle CO<sub>2</sub> emissions from power generation technologies in Japan.
- CSIS (Center for Spatial Information Science the University of Tokyo, Japan), 2015 Urban employment area. [http://www.csis.u-tokyo.ac.jp/UEA/index\\_e.htm](http://www.csis.u-tokyo.ac.jp/UEA/index_e.htm) (accessed 9.20.20).
- De-León Almaraz, S., Azzaro-Pantel, C., Montastruc, L., Boix, M., 2015. Deployment of a hydrogen supply chain by multi-objective/multi-period optimisation at regional and national scales. *Chem. Eng. Res. Des.* 104, 11–31. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.07.005>
- De-León Almaraz, S., Azzaro-Pantel, C., Montastruc, L., Domenech, S., 2014. Hydrogen supply chain optimization for deployment scenarios in the Midi-Pyrenees region, France. *Int. J. Hydrogen Energy* 39, 11831–11845. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.05.165>
- Díaz, P., van Vliet, O., 2018. Drivers and risks for renewable energy developments in mountain regions: A case of a pilot photovoltaic project in the Swiss Alps. *Energy. Sustain. Soc.* 8. <https://doi.org/10.1186/s13705-018-0168-x>
- Dodds, P.E., Staffell, I., Hawkes, A.D., Li, F., Grünewald, P., McDowall, W., Ekins, P., 2015. Hydrogen and fuel cell technologies for heating: A review. *Int. J. Hydrogen Energy* 40, 2065–2083. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.059>
- E4tech, 2019. The Fuel Cell Industry Review 2019.
- Eame, M., McDowall, W., 2010. Sustainability, foresight and contested futures: Exploring visions and pathways in the transition to a hydrogen economy. *Technol. Anal. Strateg. Manag.* 22, 671–692. <https://doi.org/10.1080/09537325.2010.497255>
- ecoinvent, 2014. ecoinvent life cycle inventory database v3.1. <https://www.ecoinvent.org/>

- Elishav, O., Lewin, D.R., Shter, G.E., Grader, G.S., 2017. The nitrogen economy: Economic feasibility analysis of nitrogen-based fuels as energy carriers. *Appl. Energy* 185, 183–188. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.088>
- Endo, E., 2007. Market penetration analysis of fuel cell vehicles in Japan by using the energy system model MARKAL. *Int. J. Hydrogen Energy* 32, 1347–1354. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.10.015>.
- ENE-FARM Partners, 2018. Outlook for diffusion of ENE-FARM.
- Essletzbichler, J., 2012. Renewable Energy Technology and Path Creation: A Multi-scalar Approach to Energy Transition in the UK. *Eur. Plan. Stud.* 20, 791–816. <https://doi.org/10.1080/09654313.2012.667926>
- Evangelisti, S., Tagliaferri, C., Brett, D.J.L., Lettieri, P., 2017. Life cycle assessment of a polymer electrolyte membrane fuel cell system for passenger vehicles. *J. Clean. Prod.* 142, 4339–4355. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.159>
- FCCJ (Fuel cell commercialization conference of Japan), 2020. Commercial hydrogen fueling station. <http://fccj.jp/hystation/> (accessed 9.20.20).
- FCH JU (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking), 2019. Hydrogen Roadmap Europe.
- FCHEA (Fuel Cell and Hydrogen Energy Association), 2019. Road map to a US hydrogen economy.
- Fedrico, Z., Møller-Holst, S., Ødegård, A., 2017. The 7th World Hydrogen Technology Convention 2017, in: *Batteries and Hydrogen for Heavy Transport Applications in an Industrial Park*.
- Gao, L., Winfield, Z.C., 2012. Life cycle assessment of environmental and economic impacts of advanced vehicles. *Energies* 5, 605–620. <https://doi.org/10.3390/en5030605>
- Gardiner, M.R., Burke, A., 2004. Comparison of hydrogen storage technologies: a focus on energy required for hydrogen input. University of California, Davis, CA 94539.
- Geels, F.W., 2018. Low-carbon transition via system reconfiguration? A socio-technical whole system analysis of passenger mobility in Great Britain (1990–2016). *Energy Res. Soc. Sci.* 46, 86–102. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.07.008>

- Geels, F.W., 2002. Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: A multi-level perspective and a case-study. *Res. Policy* 31, 1257–1274.  
[https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00062-8)
- Geels, F.W., Johnson, V., 2018. Towards a modular and temporal understanding of system diffusion: Adoption models and socio-technical theories applied to Austrian biomass district-heating (1979–2013). *Energy Res. Soc. Sci.* 38, 138–153.  
<https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.02.010>.
- Geels, F.W., Kern, F., Fuchs, G., Hinderer, N., Kungl, G., Mylan, J., Neukirch, M., Wassermann, S., 2016. The enactment of socio-technical transition pathways: A reformulated typology and a comparative multi-level analysis of the German and UK low-carbon electricity transitions (1990-2014). *Res. Policy* 45, 896–913.  
<https://doi.org/10.1016/j.respol.2016.01.015>
- Ghandehariun, S., Kumar, A., 2016. Life cycle assessment of wind-based hydrogen production in Western Canada. *Int. J. Hydrogen Energy* 41, 9696–9704.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.077>
- Gillessen, B., Heinrichs, H.U., Stenzel, P., Linssen, J., 2017. Hybridization strategies of power-to-gas systems and battery storage using renewable energy. *Int. J. Hydrogen Energy* 42, 13554–13567. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.163>
- Guandalini, G., Robinius, M., Grube, T., Campanari, S., Stolten, D., 2017. Long-term power-to-gas potential from wind and solar power: A country analysis for Italy. *Int. J. Hydrogen Energy* 42, 13389–13406. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.081>
- Gül, T., Kypreos, S., Turton, H., Barreto, L., 2009. An energy-economic scenario analysis of alternative fuels for personal transport using the Global Multi-regional MARKAL model (GMM). *Energy* 34, 1423–1437. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.010>
- Gutiérrez-Martín, F., Guerrero-Hernández, I., 2012. Balancing the grid loads by large scale integration of hydrogen technologies : The case of the Spanish power system 37.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.09.116>
- Heiden, K. van der, 1998. シナリオ・プランニング—戦略的思考と意思決定. 株式会社グロービス 監訳, 西村行功 訳, ダイヤモンド社.
- HEPCO (Hokkaido Electric Power Company), 2017. Annual Report 2017.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- HEPCO (Hokkaido Electric Power Company), 2014. Past records of coefficient of CO2 emission. <http://www.hepco.co.jp/> (accessed 8.15.17).
- Hokuriku-EPCO (Hokuriku Electric Power Company), 2017. Annual report 2017.
- Hokuriku-EPCO (Hokuriku Electric Power Company), 2014. Past records of coefficient of CO2 emission. <http://www.rikuden.co.jp/> (accessed 8.15.17).
- Honda Motor Co. Ltd., 2016. news release on 10th March, 2016. <http://world.honda.com/news/2016/4160310eng.html> (accessed 8.15.17).
- Hondo, H., Moriizumi, Y., Usui, T., 2008. Life cycle environmental analysis of hydrogen storage technology using organic hydride: energy requirement and CO2 emission. J. Japan Inst. Energy 87, 753–762.
- IAE (The Institute of Applied Energy), 2019. CO2 フリー水素普及シナリオ研究成果報告書.
- IEA (International Energy Agency), 2019. The Future of Hydrogen.
- IEA (International Energy Agency), 2017. Energy technology perspectives.
- IEA (International Energy Agency), 2016. Trends 2016 in photovoltaic applications.
- IEEJ (The Institute of Energy Economics Japan), 2018. カーボンニュートラルメタンの将来ポテンシャル.
- IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change), 2018. Special report on the impacts of global warming of 1.5°C.
- IRENA (International Renewable Energy Agency), 2020. Statistics Time Series. <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series> (accessed 2.9.20).
- IRENA (International Renewable Energy Agency), 2019a. Renewable Power Generation Costs in 2018.
- IRENA (International Renewable Energy Agency), 2019b. Hydrogen: A renewable energy perspective.
- Itsubo, N., Inaba, A., 2012. LIME 2 - Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling - Summary, JLCA Newsletter of Life-Cycle Assessment Society of Japan.

- JHFC (Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project), 2011. Page on Kitakyushu Hydrogen Station.  
<http://www.jari.or.jp/portals/0/jhfc/e/station/cooperative/kitakyushu.html> (accessed 9.20.20)
- JLCA (Life Cycle Assessment Society of Japan), 2018. JLCA Newsletter. <http://lca-forum.org/english/> (accessed 7.23.18).
- JLCA (Life Cycle Assessment Society of Japan), 2013. Impact factor list of LIME2.  
<http://lca-forum.org/database/impact/> (accessed 7.23.18).
- JX 日鉱日石リサーチ株式会社, 2013. 製油所からの水素供給能力評価 (調査) . 一般財団法人 石油エネルギー技術センター (JPEC), 平成 25 年度技術開発・調査事業成果発表会要旨集
- Kajikawa, Y., Mori, J., Sakata, I., 2012. Identifying and bridging networks in regional clusters. *Technol. Forecast. Soc. Change* 79, 252–262.  
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2011.04.009>
- Kalinci, Y., Hepbasli, A., Dincer, I., 2015. Techno-economic analysis of a stand-alone hybrid renewable energy system with hydrogen production and storage options. *Int. J. Hydrogen Energy* 40, 7652–7664. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.10.147>
- Kanemoto, Y., Tokuoka, K., 2002. Proposal for the Standards of Metropolitan Areas of Japan. *J. Appl. Reg. Sci.* 7, 1–15.
- Karakaya, E., Nuur, C., Assbring, L., 2018. Potential transitions in the iron and steel industry in Sweden: Towards a hydrogen-based future? *J. Clean. Prod.* 195, 651–663.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.142>
- Kawasaki Heavy Industries Ltd., 2020. Kawasaki Hydrogen Road.  
<http://www.khi.co.jp/hydrogen/> (accessed 8.15.17).
- KEPCO (Kansai Electric Power Company), 2014. Past records of coefficient of CO2 emission. <http://www.kepcoco.jp/> (accessed 8.15.17).
- Kikuchi, Y., Kimura, S., Okamoto, Y., Koyama, M., 2014. A scenario analysis of future energy systems based on an energy flow model represented as functionals of technology options. *Appl. Energy* 132, 586–601.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.005>



- Kikuchi, Y., Nakai, M., Kanematsu, Y., Oosawa, K., Okubo, T., Oshita, Y., Fukushima, Y., 2020. Application of technology assessments to co-learning for regional transformation: a case study of biomass energy systems in Tanegashima. *Sustain. Sci.* <https://doi.org/10.1007/s11625-020-00801-1>
- Komiyama, H., 2014. *Beyond the Limits to Growth: New Ideas for Sustainability from Japan*. Springer.
- König, S., Bchini, Q., McKenna, R., Köppel, W., Bachseitz, M., Entress, J., Ryba, M., Michaelis, J., Roser, A., Schakib-Ekbatan, K., 2018. Analysing the regional potential and social acceptance of power-to-gas in the context of decentralized co-generation in Baden-Württemberg. *J. Energy Storage* 16, 93–107. <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.12.011>
- Koyama, M., Kimura, S., Kikuchi, Y., Nakagaki, T., Itaoka, K., 2014. Present status and points of discussion for future energy systems in Japan from the aspects of technology options. *J. Chem. Eng. Japan* 47, 499–513. <https://doi.org/10.1252/jcej.13we345>
- Kyushu-EPCO (Kyushu Electric Power Company), 2014. Past records of coefficient of CO2 emission. <http://www.kyuden.co.jp/> (accessed 8.15.17).
- Lacko, R., Drobnič, B., Sekavčnik, M., Mori, M., 2014. Hydrogen energy system with renewables for isolated households: The optimal system design, numerical analysis and experimental evaluation. *Energy Build.* 80, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.009>
- Liu, P., Georgiadis, M.C., Pistikopoulos, E.N., 2013. An energy systems engineering approach for the design and operation of microgrids in residential applications. *Chem. Eng. Res. Des.* 91, 2054–2069. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.08.016>
- Loisel, R., Baranger, L., Chemouri, N., Spinu, S., Pardo, S., 2015. Economic evaluation of hybrid off-shore wind power and hydrogen storage system. *Int. J. Hydrogen Energy* 40, 6727–6739. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.03.117>
- Lund, P.D., Lindgren, J., Mikkola, J., Salpakari, J., 2015. Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 45, 785–807. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.057>
- Lutz, L.M., Lang, D.J., von Wehrden, H., 2017. Facilitating regional energy transition strategies: Toward a typology of regions. *Sustain.* 9, 1–17. <https://doi.org/10.3390/su9091560>

- Lyseng, B., Niet, T., English, J., Keller, V., Palmer-Wilson, K., Robertson, B., Rowe, A., Wild, P., 2017. System-level power-to-gas energy storage for high penetrations of variable renewables. *Int. J. Hydrogen Energy* 43, 1966–1979.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.162>
- Marchenko, O. V, Solomin, S. V, 2017. Modeling of hydrogen and electrical energy storages in wind/PV energy system on the Lake Baikal coast. *Int. J. Hydrogen Energy* 42, 9361–9370. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.076>
- Mathiesen, B. V., Lund, H., Connolly, D., Wenzel, H., Ostergaard, P.A., Möller, B., Nielsen, S., Ridjan, I., KarnOe, P., Sperling, K., Hvelplund, F.K., 2015. Smart Energy Systems for coherent 100% renewable energy and transport solutions. *Appl. Energy* 145, 139–154. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.075>
- Matsuo, Y., Kawakami, Y., Shibata, Y., Yanagisawa, A., Suehiro, S., 2014. 統合型エネルギー経済モデルによる 2050 年までの日本の長期エネルギー需給見通しと 輸入水素導入シナリオの分析. *J. Japan Soc. Energy Resour.* 35.
- McDonagh, S., O’Shea, R., Wall, D.M., Deane, J.P., Murphy, J.D., 2018. Modelling of a power-to-gas system to predict the levelised cost of energy of an advanced renewable gaseous transport fuel. *Appl. Energy* 215, 444–456.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.019>
- McDowall, W., 2016. Are scenarios of hydrogen vehicle adoption optimistic? A comparison with historical analogies. *Environ. Innov. Soc. Transitions* 20, 48–61.  
<https://doi.org/10.1016/j.eist.2015.10.004>
- McDowall, W., 2014. Exploring possible transition pathways for hydrogen energy: A hybrid approach using socio-technical scenarios and energy system modelling. *Futures* 63, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2014.07.004>
- McDowall, W., Eames, M., 2006. Forecasts, scenarios, visions, backcasts and roadmaps to the hydrogen economy: A review of the hydrogen futures literature. *Energy Policy.*  
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.12.006>
- METI (Ministry of Economy, Trade, and Industry, J.), 2014. Census of Manufacture.
- MIC (Ministry of Internal Affairs and Communications, Japan), 2017. Basic financial needs by prefecture.

MIC (Ministry of Internal Affairs and Communications, Japan), 2015a. Account survey of cities, FY2015 (Shichosonbetsu kessan jokyo shirabe).

MIC (Ministry of Internal Affairs and Communications Japan), 2015b. Survey for controlling personnel numbers of local public bodies.

MIC (Ministry of Internal Affairs and Communications, Japan), 2013a. Sales and diffusion rate of gas produced by city gas utilities, by prefecture FY2011.

MIC (Ministry of Internal Affairs and Communications, Japan), 2013b. Housing and land survey.

MIC (Ministry of Internal Affairs and Communications, Japan), 2014-2016 Survey on population, demographics, and number of families based on resident registration.

MOE (Ministry of Environment, Japan), 2020. 2050 Zero Carbon Cities in Japan. [http://www.env.go.jp/en/earth/cc/2050\\_zero\\_carbon\\_cities\\_in\\_japan.html](http://www.env.go.jp/en/earth/cc/2050_zero_carbon_cities_in_japan.html) (accessed 7.26.20).

MOE (Ministry of Environment, Japan), 2013. Study of basic zoning information concerning renewable energies (FY2012).

MRI (株式会社三菱総合研究所), 2013. 平成 24 年度エネルギー消費状況調査 (民生部門エネルギー消費実態調査) 報告書

NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization), 2020a. News release on demonstration project for a hydrogen energy supply chain. [https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101322.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101322.html) (accessed 9.12.20).

NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization), 2020b. 中国の水素・燃料電池産業の動向.

NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization), 2018. Total System Introduction Scenario Research, Leading Technology Research and Development Project on Hydrogen Utilization (FY2016-FY2017) Final Report.

NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization), 2015. 水素エネルギー白書.

NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization), 2015. 平成 27 年度成果報告会. <https://www.nedo.go.jp/content/100759810.pdf>.

- NEEDS (New Energy Externalities Developments for Sustainability), 2008. Final report on technical data, costs and life cycle inventories of fuel cells.
- Negro, S.O., Alkemade, F., Hekkert, M.P., 2012. Why does renewable energy diffuse so slowly? A review of innovation system problems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 3836–3846. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.043>
- Nian, V., 2016. Impacts of changing design considerations on the life cycle carbon emissions of solar photovoltaic systems. *Appl. Energy* 183, 1471–1487. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.176>
- Nordelöf, A., Messagie, M., Tillman, A.M., Ljunggren Söderman, M., Van Mierlo, J., 2014. Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles—what can we learn from life cycle assessment? *Int. J. Life Cycle Assess.* 19, 1866–1890. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0788-0>
- OEPCO (Okinawa Electric Power Company), 2017. Annual report 2017.
- OEPCO (Okinawa Electric Power Company), 2014. Past records of coefficient of CO<sub>2</sub> emission. <http://www.okiden.co.jp/> (accessed 8.15.17).
- Ogawa, M., Kaneko, T., Matsuda, S., 2016. Pure Hydrogen Fuel Cell Systems Based on Technologies for ENE-FARM Residential Fuel Cell Systems.
- Okada, Y., Sasaki, E., Watanabe, E., Hyodo, S., Nishijima, H., 2006. Development of dehydrogenation catalyst for hydrogen generation in organic chemical hydride method 31, 1348–1356. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.11.014>
- Oldenbroek, V., Verhoef, L.A., van Wijk, A.J.M., 2017. Fuel cell electric vehicle as a power plant: Fully renewable integrated transport and energy system design and analysis for smart city areas. *Int. J. Hydrogen Energy* 42, 8166–8196. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.155>
- PAJ (Petroleum Association of Japan), 2015. Oil statistics. <http://www.paj.gr.jp/english/statis/index.html> (accessed 3.1.15).
- Parra, D., Zhang, X., Bauer, C., Patel, M.K., 2017. An integrated techno-economic and life cycle environmental assessment of power-to-gas systems. *Appl. Energy* 193, 440–454. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.063>
- Pehnt, M., 2001. Life-cycle assessment of fuel cell stacks. *Int. J. Hydrogen Energy* 26, 91–101. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(00\)00053-7](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(00)00053-7)

- Pellow, M.A., Emmott, C.J.M., Barnhart, C.J., Benson, S.M., 2015. Hydrogen or batteries for grid storage? A net energy analysis. *Energy Environ. Sci.* 8, 1938–1952. <https://doi.org/10.1039/C4EE04041D>
- Penna, C.C.R., Geels, F.W., 2012. Multi-dimensional struggles in the greening of industry: A dialectic issue lifecycle model and case study. *Technol. Forecast. Soc. Change* 79, 999–1020. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2011.09.006>
- Perpiña Castillo, C., Batista e Silva, F., Lavalle, C., 2016. An assessment of the regional potential for solar power generation in EU-28. *Energy Policy* 88, 86–99. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.10.004>
- Rahimi, S., Meratizaman, M., Monadzadeh, S., Amidpour, M., 2014. Techno-economic analysis of wind turbine e PEM ( polymer electrolyte membrane ) fuel cell hybrid system in standalone area. *Energy* 67, 381–396. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.072>
- Reuß, M., Grube, T., Robinius, M., Preuster, P., Wasserscheid, P., Stolten, D., 2017. Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model. *Appl. Energy* 200, 290–302. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.050>
- Ruppert-Winkel, C., 2018. Leaders, networks and the social context: A relational leadership approach to regional renewable energy self-sufficiency. *J. Clean. Prod.* 193, 811–832. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.001>
- Shikoku-EPCO (Shikoku Electric Power Company), 2018. FY2017 financial results outline.
- Shikoku-EPCO (Shikoku Electric Power Company), 2014. Past records of coefficient of CO2 emission. <http://www.yonden.co.jp/> (accessed 8.15.17).
- Shimizu, T., Kikuchi, Y., Sugiyama, H., Hirao, M., 2015. Design method for a local energy cooperative network using distributed energy technologies. *Appl. Energy* 154, 781–793. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.032>
- Singh, B., Guest, G., Bright, R.M., Strømman, A.H., 2014. Life cycle assessment of electric and fuel cell vehicle transport based on forest biomass. *J. Ind. Ecol.* 18, 176–186. <https://doi.org/10.1111/jiec.12098>

- Sperling, K., 2017. How does a pioneer community energy project succeed in practice? The case of the Samsø Renewable Energy Island. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 71, 884–897. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.116>
- Sugimoto, K., 2020. Barrier of renewable energy development and transmission unbundling : A literature review. Discussion paper No. 7, Renewable Energy Economics Course.
- Teichmann, D., Arlt, W., Wasserscheid, P., 2012. Liquid Organic Hydrogen Carriers as an efficient vector for the transport and storage of renewable energy. *Int. J. Hydrogen Energy* 37, 18118–18132. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.08.066>
- TEPCO (Tokyo Electric Power Company), 2014. Past records of coefficient of CO2 emission. <http://www.tepco.co.jp/index-j.html> (accessed 8.15.17).
- Toei Transportation, 2018. Conclusion of agreement with Koto Ward for fuel cell buses to supply power during disasters. [https://www.kotsu.metro.tokyo.jp/eng/news/2018/20180417\\_8005.html](https://www.kotsu.metro.tokyo.jp/eng/news/2018/20180417_8005.html) (accessed 7.26.20).
- Tohoku-EPCO (Tohoku Electric Power Company), 2014. Past records of coefficient of CO2 emission. <http://www.tohoku-epco.co.jp/> (accessed 8.15.17).
- Tokyo Gas Co. Ltd, 2018. Specifications of ENE-FARM. <http://home.tokyo-gas.co.jp/living/enefarm/specific/index.html> (accessed 8.15.17).
- Tokyo Metropolitan Government, 2018. Subsidies for implementation of hydrogen energy. <https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/climate/hydrogen/fcvst.html> (accessed 7.26.20).
- Toyota Motor Corporation, 2018. Performance of Mirai. <https://toyota.jp/mirai/performance/>
- Toyota Motor Corporation, 2014. news release on 18th November, 2014. <http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/4198334/> (accessed 8.15.17b).
- Trutnevyte, E., Stauffacher, M., Scholz, R.W., 2011. Supporting energy initiatives in small communities by linking visions with energy scenarios and multi-criteria assessment. *Energy Policy* 39, 7884–7895. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.038>

- Tsunoka, S., Uchiyama, Y., Okajima, K., Murata, K., 2011. Analysis of Environmental Burdens on By-Product Hydrogen in Oil Refinery using a Matrix Method. *J. Japan Soc. Energy Resour.* 33, 23–31.
- Turconi, R., Boldrin, A., Astrup, T., 2013. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 28, 555–565. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.013>
- United Nations, 2015. The Paris Agreement.  
[http://unfccc.int/paris\\_agreement/items/9485.php](http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php) (accessed 8.22.20).
- Usui, T., Hondo, H., 2010. Life cycle CO<sub>2</sub> emission analysis of hydrogen storage and battery for wind power generation. *J. Japan Inst. Energy* 89, 551–561.
- Valente, A., Iribarren, D., Dufour, J., 2017. Life cycle assessment of hydrogen energy systems: a review of methodological choices. *Int. J. Life Cycle Assess.* 22, 346–363. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1156-z>
- Van Der Schoor, T., Scholtens, B., 2015. Power to the people: Local community initiatives and the transition to sustainable energy. *Renew. Sustain. Energy Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.089>
- Volkart, K., Mutel, C.L., Panos, E., 2018. Integrating life cycle assessment and energy system modelling: Methodology and application to the world energy scenarios. *Sustain. Prod. Consum.* 16, 121–133. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.07.001>
- Watson, J.J.W., Hudson, M.D., 2015. Regional Scale wind farm and solar farm suitability assessment using GIS-assisted multi-criteria evaluation. *Landsc. Urban Plan.* 138, 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.001>
- Xing, R., Hanaoka, T., Kanamori, Y., Masui, T., 2017. Greenhouse Gas and Air Pollutant Emissions of China's Residential Sector: The Importance of Considering Energy Transition. *Sustainability* 9, 614–630. <https://doi.org/10.3390/su9040614>
- Zhang, F., Thanapalan, K., Procter, A., Carr, S., Maddy, J., Centre, H., Park, B.E., Sa, P.T., Kingdom, U., 2013. Power management control for off-grid solar hydrogen production and utilisation system. *Int. J. Hydrogen Energy* 38, 4334–4341. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.175>

- Zhang, X., Bauer, C., Mutel, C.L., Volkart, K., 2017. Life cycle assessment of power-to-gas: Approaches, system variations and their environmental implications. Appl. Energy 190, 326–338. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.098>
- プラチナ構想ネットワーク, 2020 <http://www.platinum-network.jp/> (accessed 9.20.20).
- 一般社団法人 創発的地域づくり・連携推進センター, 2016. 第3回 再生可能エネルギー・省エネルギー導入に関する自治体意向調査 集計結果.
- 一般社団法人 日本自動車工業会, 2018. 車と環境.  
[http://www.jama.or.jp/eco/earth/earth\\_02\\_g01.html](http://www.jama.or.jp/eco/earth/earth_02_g01.html)
- 愛知県, 2014. あいちビジョン 2020.
- 岩手県, 2019a. 岩手県水素利活用構想.
- 岩手県, 2019b. いわて県民計画 (2019-2028).
- 兼松祐一郎, 2018. 農林業地域における産業共生の計画支援.
- 株式会社富士経済, 2017. 2017年版 水素燃料関連市場の将来展望.
- 環境省, 2019. 平成29年度 大気汚染状況について.  
<https://www.env.go.jp/press/106609.html> (accessed 3.29.20).
- 環境省, 2018. 地域循環共生圏. <https://www.env.go.jp/seisaku/list/kyoseiken.html>
- 環境省, 2017. 光化学オキシダント調査検討会 報告書.
- 環境省, 2015. 地方自治体の地域エネルギー政策推進に向けた 取組み状況について (報告).
- 北九州市, 2020. 北九州市の水素に関する取組み.  
<https://www.city.kitakyushu.lg.jp/kankyoku/28900005.html> (accessed 12.20.20).
- 北九州市, 2019. 北九州市域内の温室効果ガス排出量.  
[https://www.city.kitakyushu.lg.jp/kankyoku/file\\_0366.html](https://www.city.kitakyushu.lg.jp/kankyoku/file_0366.html) (accessed 12.20.20).
- 北九州市, 2017. 北九州市環境基本計画.  
[https://www.city.kitakyushu.lg.jp/kurashi/menu01\\_0455.html](https://www.city.kitakyushu.lg.jp/kurashi/menu01_0455.html) (accessed 12.20.20).
- 公益財団法人 自然エネルギー財団, 2017. 地域エネルギー政策に関する提言 - 自然エネルギーを地域から拡大するために -.
- 国土交通省 2016. 自動車燃料消費調査 (2015年度).



再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議, 2017. 水素基本戦略.

財団法人 日本自動車研究所, 2011. 総合効率と GHG 排出の分析 報告書

東洋経済新報社, 2014. 地域経済総覧 2015 年版

福岡水素エネルギー戦略会議, 2020. <http://www.f-suiso.jp/> (accessed 12.20.20).

森玲奈, 2015. ワークショップデザインにおける熟達と実践者の育成. ひつじ書房.

山内祐平, 森玲奈, 安斎勇樹, 2013. ワークショップデザイン論—創ることで学ぶ.  
慶応義塾大学出版会.

## 論文業績

---

自身を著者に含む投稿論文のうち、この博士論文に内容の一部が含まれるものを以下に記す（自身は太字下線で表示）。

- [i] **Shimizu, T.**, Tsukushi, Y., Hasegawa, K., Ihara, M., Okubo, T., Kikuchi, Y., A region-specific analysis of technology implementation of hydrogen energy in Japan. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 19434–19451 (2019)
- [ii] **Shimizu, T.**, Hasegawa, K., Ihara, M., Kikuchi, Y., A region-specific environmental analysis of technology implementation of hydrogen energy in Japan based on life cycle assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 24, 217–233 (2020)
- [iii] **Shimizu, T.**, Kikuchi, Y., Regional suitability for energy carriers in Japan considering socioeconomic conditions and environmental performance, submitted to *Sustainable Production and Consumption*.

博士論文に含まない投稿論文業績を以下に記す（自身は太字下線で表示）。

- [iv] Yoko, A., Fukushima, Y., Shimizu, T., Kikuchi, Y., **Shimizu, Teruyuki**, Guzman-Urbina, A., Ouchi, K., Hirai, H., Seong, G., Tomai, T., Adschiri, T., Process Assessments for Low-Temperature Methane Reforming Using Oxygen Carrier Metal Oxide Nanoparticles. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 142, 107531 (2019)
- [v] **Shimizu, T.**, Kikuchi, Y., Sugiyama, H., Hirao, M., Design method for a local energy cooperative network using distributed energy technologies. *Applied Energy*, 154, 781–793 (2015)
- [vi] Tada, S., **Shimizu, T.**, Kameyama, H., Haneda, T., Kikuchi, R., Ni/CeO<sub>2</sub> catalysts with high CO<sub>2</sub> methanation activity and high CH<sub>4</sub> selectivity at low temperatures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 5527–5531 (2012)

## 謝辞

---

研究活動や本論文の執筆にあたり多くの方にご指導、ご支援いただきました。関係する全ての方々にこの場を借りて感謝の意を表します。

本論文の主査を務めていただきました、東京大学未来ビジョン研究センター／総括プロジェクト機構「プラチナ社会」総括寄付講座／大学院工学系研究科化学システム工学専攻の菊池康紀准教授には、論文執筆においてお休みの日にも多くのディスカッションの時間を割いていただきました。修士研究の頃からご指導いただき、修士を修了して就職した後も、投稿論文の執筆でご指導いただきました。また、再び大学での研究に導いてくださり、「プラチナ社会」総括寄付講座としてのイベントや地域でのワークショップ等、多様な勉強、体験の機会を与えてくださいました。深く感謝申し上げます。

本学位論文審査の副査を務めていただきました、東京工業大学環境・社会理工学院融合理工学系の大友順一郎教授、物質理工学院応用化学系の松本秀行准教授、東京大学大学院工学系研究科化学システム工学専攻の平尾雅彦教授、脇原徹教授、菊地隆司准教授には、様々な視点から多くの重要なご指摘・ご助言をいただきましたこと、深謝いたします。特に平尾教授には、修士研究でご指導いただき、研究の面白さや難しさを教えていただきました。また、菊地准教授には学士研究でのご指導いただき、触媒のミクロな世界からその応用としてのエネルギーシステムのマクロな世界まで幅広くものごとを捉えるきっかけを作ってくださいました。

東京工業大学物質理工学院応用化学系の伊原学教授には、研究員として研究する機会を与えていただきました。伊原研究室での研究活動では、スタッフの方々にたくさんのご支援をいただきました。長谷川馨助教や学生の皆様とは研究内容について多くの実のあるディスカッションをさせていただきました。伊原研究室は明るい雰囲気、楽しく探求心を持って研究に向き合うことを学ばせていただきました。伊原教授と伊原研究室の皆様には大変感謝しております。

本研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)「水素利用等技術開発事業/トータルシステム導入シナリオ調査」の支援により実施しました。この調査プロジェクトに関わった東京工業大学グローバル水素エネルギー研究ユニット、産業技術総合研究所、エネルギー総合工学研究所の皆様には多くのご支援とご知見をいただきました。深く御礼申し上げます。また、基盤研究(B) (26285080)、基盤研究(A) (15H01750)、若手研究(A) (16H06126)、環境省環境研究総合推進費 (2-1910) より、資金面での支援を受けて実施しました。国際学会 LCIC2018 への参加においては、東電記念財団 国際技術交流援助による資金の支援を受けました。

東京大学「プラチナ社会」総括寄付講座のメンバーおよび関係各位には、研究活動を行う上で多くのご支援をいただきました。心より感謝いたします。寄付企業の株式会社地球快適化インスティテュート、三井不動産株式会社、信越化学工業株式会社、オリックス株式会社、積水ハウス株式会社、東日本旅客鉄道株式会社のご支援により研究活動を進めることができました。講座代表の大久保達也教授には、講座運営と研究活動の両面でご支援いただきました。兼松祐一郎特任助教には、論文博士の先輩として何度も相談に乗っていただき、研究面でも多くのご助言をいただきました。下野僚子特任助教には、コーヒー片手の雑談によくお付き合いいただき、公私共に大変お世話になりました。五十嵐悠氏とは鹿児島県の種子島や山形県の置賜地域、岩手県の北いわて地域、紫波町等多くの場所にご一緒させていただき、多くのことを学ばせていただいたとともに、地域への熱意に刺激を受けました。研究スタッフ、秘書、学生の皆様のおかげで楽しく充実した研究生活を送ることができました。誠にありがとうございました。

実際の地域での課題や取組を理解するためのワークショップや意見交換会において、一般社団法人置賜自給圏推進機構ならびに岩手県、北いわての自治体職員の方々には大変お世話になりました。また、プラチナ構想ネットワークの方々には、両地域での取組および複数のイベントでお世話になりました。この場を借りて感謝申し上げます。

大久保・脇原研究室修了生の筑紫洋平氏は、本研究の土台となるモデルの基礎を構築してくださいました。ヒアリングや投稿論文執筆にもご協力いただき、大変感謝しております。

産業技術総合研究所の田原聖隆氏には、ライフサイクルインベントリデータベースのIDEA に関してのヒアリングのご協力をいただきました。深謝申し上げます。

帝京大学森玲奈准教授には本論文の第 6 章におけるワークショップの設計について貴重なご助言をいただきました。唐突なお願いにも関わらず快く引き受けてくださいましたことに深く御礼申し上げます。

ワークショップにご協力いただいた皆様のおかげで、本研究において重要な知見を得ることができました。皆様に心より謝意を表します。参加者のご氏名、ご所属等の個人情報記載は控えさせていただきますこと、ご了承のほどお願い申し上げます。

千代田化工建設株式会社の旧・現所属部署の上司・同僚の皆様、水素関係の皆様、人事の皆様、友人の皆様には、仕事の調整や休職・復職にかかる手続き、研究上の助言、復職の相談等多くのご支援・応援をいただきました。深く感謝申し上げます。

最後に、常に私を支えてくれた家族に感謝いたします。両親にはこれまでの人生で多くの部分を支えられてきました。義父母には遠く慣れない日本に長期間滞在してもらい、娘の世話と家事を引き受けて生活を支えてくれました。娘には研究のためになかなか遊ぶ時間が取れず寂しい思いもさせてしまいました。娘の笑顔が何よりも活力を与えてくれました。そして妻の子正には、たくさんの苦勞をかけました。元気な娘を出産してたくさんの愛情を注ぎ、多方面で支えてくれたことに心より感謝します。

2021 年 1 月

清水 輝之