

# 低炭素社会づくりのための 総合戦略とシナリオ

独立行政法人 科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

平成 24 年 7 月 20 日

## エグゼクティブサマリー

我が国は、科学技術を基礎とするグリーンイノベーションによって、人類の共通課題である地球温暖化問題の解決と、我が国の長引く経済閉塞状況の打破の一翼を担うことが期待されている。2011年以降、東日本大震災からの復興とエネルギーの安定的確保・効率的利用が重要課題として顕在化している。科学技術基本計画(2011年8月閣議決定)では、グリーンイノベーションの推進によって、環境・エネルギー技術の革新を促すとともに、世界最先端の低炭素社会の実現を目指すとしている。

独立行政法人 科学技術振興機構(以下、JSTと記す。)低炭素社会戦略センター(以下、LCSと記す。)は、科学技術を基盤に新しい日本の経済・社会の発展に寄与する持続可能で「明るく豊かな低炭素社会」づくりに貢献することを目的としている。この「低炭素社会づくりのための総合戦略とシナリオ」は、これまで2年間の研究・活動を取りまとめたものである。低炭素社会構築のための技術開発戦略、技術普及戦略とこれらを包括する統合モデルシミュレーションによる評価、さらにはこれら成果を現実の社会において実証・普及させていくための取組を紹介する。

第1章「『明るく豊かな低炭素社会』を目指して」では、まず、低炭素社会の構築と併せて考慮すべき私たちが抱える課題を概観するとともに、LCSが明るく豊かな低炭素社会の実現に貢献していくための基本的考え方を記した。低炭素社会の姿を描くことによって、その低炭素社会構築に貢献する技術(低炭素技術)の性能や経済性、環境性を定量的に明確にすべきであると考えている。本報告の第2章では、低炭素技術の性能や経済性、環境性の進展について定量的に検討して得られた定量的技術シナリオなどを示すが、その前提として、第1章ではその定量的技術シナリオを構築するために行った技術の構造化の考え方を記した。

また、我が国はグリーンイノベーションを通じて社会の低炭素化を図ることを科学技術施策の一つの柱としていることから、第1章の最後に、グリーンイノベーションについて理解を深めることを目的として、「経済発展の理論」にみるイノベーションの5分類ープロダクトイノベーション、プロセスイノベーション、マーケットイノベーション、サプライチェーンのイノベーション、組織のイノベーションーを、地球温暖化対策にあてはめてグリーンイノベーションの展望について考察した。

第2章「低炭素社会構築のための技術開発戦略」では、まず、低炭素技術の社会導入・普及にあたっての課題を整理した。多様な低炭素技術のうち、研究開発・技術開発によって社会導入・普及の障壁を解消することが可能であり、性能向上や低コスト化等につながる将来性ある技術を技術開発戦略の検討対象とした。その検討対象となった低炭素技術が、太陽電池、燃料電池、蓄電池である。それら低炭素技術の進展には、技術の原理探索や原子・分子レベルでの制御等から製品化に至るまで垂直的な技術確立が重要である。LCSでは太陽電池等の技術を構成する要素技術に分けて構造化し、技術の性能向上や経済性に関する具体的な目標とそれを達成するための道筋を要素技術も対象として検討することによって、定量的技術シナリオを構築している。太陽電池、燃料電池、蓄電池の定量的技術シナリオに基づいて検討すると、2030年の太陽光発電システムや家庭用燃料電池システム、蓄電池の製造原価はそれぞれ、120円/W(12円/kWh)、360円/W(5円/kWh)、8円/Whst となる結果が得られた(表2.8-1参照)。

なお、定量的技術シナリオを構築するためには、製品として製造する際のコストについても検討する必要がある。LCSでは、製品の製造プロセスの細部を明らかにして製造機器の性能やコスト等に関する「製造機器データベース」を構築している。本章では、「製造機器データベース」とそれを活用するための情報基盤の構築について報告した。

また、LCS では、低炭素技術の環境性について定量的な検討を進めるため、将来の電源構成と  $CO_2$  排出についてケーススタディを行っている。東日本大震災後、原子力発電所に対する依存度が 低下することが見込まれる。原子力への依存度を半減した場合と、原子力への依存度を縮小しそ の代替として LNG や再生可能エネルギーを活用した場合の発電量と  $CO_2$  排出の見込みについても、 低炭素技術の定量的技術シナリオに基づいて検討を開始したところであり、それらを紹介する。

第2章の最後には、低炭素技術の性能や環境性の向上、コストの削減に大きく貢献する材料・ナノテクノロジー研究に対しての期待を記した。低炭素技術の基本原理を製品化まで結び付けていく過程には新しい材料の開発と利用を欠かすことができないことや、新材料の創出には、物性や機能のみを追求するのではなく、コストの肥大化を抑えることが重要であることを指摘した。新材料の研究開発の方向性を低炭素社会構築の観点から明確にするためには、材料研究開発の研究者との連携が必要である。

第3章では「低炭素社会構築のための技術普及戦略」についてまとめている。第2章で述べた研究開発・技術開発によって、グリーンイノベーションの5分類のうちプロダクトイノベーションとプロセスイノベーションの実現を図ることが可能となる。第3章ではその成果を社会に普及させていくための、マーケットイノベーション、サプライチェーンのイノベーション、組織のイノベーションに関する議論を展開した。技術普及を促進する経済制度として、炭素税、排出量取引、固定価格買取制度についてのLOSの基本的考え方を記した。

低炭素技術の普及に関わる経済制度については、低炭素技術を用いた製品を購入し活用する消費者の行動を十分に予測したうえでそれら施策を立案する必要がある。LCSでは消費者の購買行動の予測可能性を高めるための調査・研究を実施した。たとえば、住宅用太陽光発電普及のために取られた施策と普及実績との関連の分析では、価格、設置時の補助金、余剰電力買取価格、潜在発電電力量の4要素が普及率に影響を与えることが分かった。さらに、太陽光発電の普及施策に対する消費者の選好に関するアンケートから、個々人ごとの時間選好率(将来の価値を現在の価値に換算する際に用いる値)を評価し、この値と太陽光発電システムへの選好の関係を明らかにした。これにより、余剰電力買取制度が有効な消費者と、初期費用への補助金が有効な消費者の分類が可能となった。すなわち、消費者の性質に応じた複数の経済制度を用意することにより、効果的に普及を促進できることを定量的に示した。

この検討と同時に、太陽光発電システム普及を例として、消費者がその購入にあたってどのように合理的な、または限定合理的な選択を行うかについてアンケート調査を行った。その結果、消費者の選択行動が限定合理性を持って行われていることが示唆された。消費者の選択行動の把握は、低炭素技術の受容性を評価できるとともに、社会シナリオや戦略を構築するうえでも重要な意味を持つことから、今後も検討課題とする。

この他にも、低炭素技術の適正価格を多角的に評価することの必要性から、東日本大震災後の計画停電対象地域の住民に対しアンケート調査を行った。その結果、停電回避に対する支払意思額は概ね500~900円/kWhであるということが分かった。また、社会の低炭素化に寄与する便益と停電回避の便益の合計が低炭素技術のコスト面での必要条件となることを指摘するとともに、低炭素技術の評価には副次的な便益を考慮することが技術普及戦略を考慮するうえでも欠かせないことを認識した。

第3章の最後に、次世代自動車を例として、エコカー減税等の施策による先進環境対応車の普及を、消費者の選好分析を含めて推定し、併せて温室効果ガスの削減量を検討した。

第4章「低炭素社会構築のための統合モデルシミュレーション」では、第2章の技術開発戦略 と第3章の技術普及戦略を踏まえ、両戦略を組み合わせて「明るく豊かな低炭素社会」の姿を描 き出すことを目的としている。エネルギーや低炭素化に係る施策は日本経済や国民生活に大きな 影響を及ぼす点も見逃してはならない。低炭素技術やその他の低炭素化施策を社会に組み込んでいく際には、それが「豊かな」低炭素社会につながるかについて、社会・経済的な側面からの評価・検証が不可欠である。LCSでは、応用一般均衡モデル、電源構成評価モデル、最終エネルギー需要モデルを組み合わせた統合モデルシミュレーションを用い、低炭素技術その他の低炭素化施策を社会に導入した場合のエネルギー需給、社会全体でのCO2排出量及び国民経済への影響を検証することとしている。また、この過程で抽出された課題は定量的技術シナリオにフィードバックしてシナリオの改善に資する。このフィードバックを繰り返していくことで、より具体的・現実的な低炭素社会のあり方を示していく。

第5章「低炭素社会構築に向けた社会実証実験」では、LCSがこれまで実施してきている停電予防連絡ネットワーク、農林業の活性化を通じた地域社会の低炭素化の取組、植物医科学の研究分野と連携した社会の低炭素化に向けた取組、都市の低炭素化・コンパクトシティの構築に向けた取組を紹介するとともに、東日本大震災からの復旧・復興に向けて低炭素社会構築の概念を盛り込んだ震災復興シナリオの提案を述べた。それぞれの取組の概要とこれまでの進捗状況について記しているが、LCSでは、技術開発に関わる定量的技術シナリオ・戦略と、技術普及に関わる定量的経済・社会シナリオ・戦略が地方自治体などで実際に活用されるためには社会実証実験が不可欠であると認識していることから、今後もこれらの取組を着実に実施していく。そして、その成果をベースにして都市の低炭素化に向けた技術システムの定量的技術シナリオの検討に入る予定である。

第6章「低炭素社会の普及・拡大に向けての取組」では、低炭素社会の普及を国際的に広めるための戦略、国民に向けた低炭素社会づくりに関する理解増進、低炭素社会構築を促進するための社会システム・デザイン手法の適用を記した。低炭素社会構築の国際的な取組を進めるためには、温室効果ガス削減について国際的視野に基づいた国際戦略が不可欠である。これまでの温室効果ガス排出削減に向けた国際動向や途上地域における  $CO_2$  削減の意義を述べるとともに、国際協力によるエネルギー起源  $CO_2$  削減の仕組みやアジア地域での石炭発電効率向上による  $CO_2$  削減ポテンシャルを概観した。国内的に低炭素社会を構築していくためには国民の理解も欠かせない。国民の理解増進を図るためには、子どもたちが低炭素社会づくりの必要性を理解しやすいような学びの機会を提供することが有効である。そこで、低炭素教育という先進的な取組事例を紹介するとともに、理解増進を図るための学びの規準について提案した。

「低炭素社会構築を促進するための社会システム・デザイン手法の適用」では、他国に先駆けて低炭素化が進んでいく日本は、低炭素社会を構築し、それを世界の先例として提示できるよう組み立てることが「低炭素社会戦略」であるとしている。そもそも戦略の定義は「世の中、時代の流れを見極めて、それに沿った自分の強さを最大限に活用して競争相手と差別化し永続性のある優位に立つ」ことである。LCSでは「永続性のある優位」とは、低炭素社会を構築し、改良していく思想、技術、事業、そして、それを支える消費者・生活者の行動と社会構造及び価値観が常に先端的であり、世界に影響を与え続けるという存在であり続けることと解釈している。その考え方の下、「低炭素社会推進システム・デザイン」の具体的な流れを示した。

本報告では付属資料として、低炭素社会づくりのための社会シナリオ研究の基盤となる「日本における太陽光発電の都道府県別発電電力量の推計」、「電源計画モデルの開発手順と解説」、「地域地球温暖化対策事例データベース」、「地域特性による基礎自治体の類型化」について概要を記した。

LCS は、低炭素社会の実現という目標に向かって長い道のりを走り始めたばかりである。本報告が明るく豊かな低炭素社会を構築していくための議論や連携の契機となることを期待している。

## **Executive Summary**

Global warming is a threat to all humankind. In Japan, Green Innovation, based on scientific discoveries and technological development, is expected to play a major role in solving both global warming and prolonged economic stagnation. Since 2011, particular emphasis has been placed on promoting recovery from the Great East Japan Earthquake and ensuring the stable supply and efficient use of energy.

The Science and Technology Basic Plan (decided by the cabinet in August 2011), calls for the promotion of Green Innovation and the development of state-of-the art environmental and energy technologies to transition Japan into a cutting-edge low carbon society that will serve as a model to the international community.

The Center for Low Carbon Society Strategy (LCS) is an independent administrative institution of the Japan Science and Technology Agency (JST). Its objective is to promote the application of science and technology towards the realization of a sustainable, "affluent low carbon society" that is conducive to the economic and social development of the new Japan.

Our research and achievements over the past two years have been compiled into this report "Comprehensive Strategies and Scenarios for the Realization of a Low Carbon Society." It explains the technological development and promotion strategies necessary for making the transition into a low carbon society and presents an integrated simulation model for evaluating these strategies. It also introduces social experiments for verifying and promoting the results.

Chapter 1: "Towards the realization of a dynamic and affluent low carbon society."

This chapter presents an overview of the issues that need to be considered in developing a low carbon society and outlines LCS's basic policies in contributing towards the realization of a dynamic and prosperous low carbon society.

In describing the characteristics of a low carbon society, we believe that it is important to quantitatively define the efficiency, economic and environmental sustainability of low carbon technologies that will contribute to the development of such a society. In Chapter 2, we present quantitative technology scenarios developed as a result of quantitatively analyzing the efficiency and economic and environmental sustainability of low carbon technologies. Before that, in Chapter 1, we explain our approach to structuralizing these technologies, needed to develop quantitative technology scenarios.

Since one of the core pillars of Japan's science and technology policies is to promote Green Innovation and realize a low carbon society, the final section of Chapter 1 is devoted to promoting understanding of what Green Innovation is all about. We looked at the five types of innovation in terms of the Theory of Economic Development–product innovation, process innovation, market innovation, supply chain innovation and organizational innovation – and examined the prospects of Green Innovation for mitigating global warming.

Chapter 2: "Technology Development Strategies for Transitioning to a Low Carbon Society." In this chapter, we begin by clarifying the issues that stand in the way of introducing and promoting low carbon technologies throughout society. From the wide range of technologies available, we selected those that, with further research and development, could potentially overcome such issues, and developed strategies to improve efficiency and lower cost.

The low carbon technologies targeted for our research were solar cells, fuel cells and storage batteries. To promote further development of such technologies, it is necessary to apply a vertical

approach ranging from the pursuit of theory and atomic level control to commercialization.

In developing quantitative technology scenarios, we broke down and structured the technologies involved in the creation of, for instance, solar cells, and came up with specific targets and measures for improving the efficiency and economic sustainability of each component technology as well as the overall technology itself.

According to our quantitative technology scenarios for solar cells, fuel cells and storage batteries, by 2030 production cost should fall to 120 yen/W (12 yen/kWh) for solar generation systems, 360 yen/W (5 yen/kWh) for residential fuel cell systems, and 8 yen/Wh<sub>ST</sub> for storage batteries. (See Table 2.8-1)

In order to develop quantitative technology scenarios, it is also necessary to consider the cost of commercialization. LCS has developed a detailed database of manufacturing costs and efficiency of production equipment. Chapter 2 includes a description of the Production Equipment Database and the information infrastructure necessary to use it.

In order to quantitatively analyze the environmental sustainability of low carbon technologies, we are conducting case studies on possible power generation structures and the resulting  $\rm CO_2$  emissions, taking into account the nation's declining reliance on nuclear power generation in the wake of the Great East Japan Earthquake.

Based on low carbon quantitative technology scenarios, we have also launched a study comparing the possible output and resulting CO<sub>2</sub> emissions of a 50% reduction in the reliance on nuclear power generation to that of a reduction in nuclear power supplemented with LNG and renewable energy sources.

Chapter 2 ends with our expectations of how ongoing research on new materials and nanotechnology will play a major role in improving the efficiency, environmental sustainability and cost performance of low carbon technologies. The development of new materials is essential for the commercial application of the basic principles of low carbon technology. In addition to physical properties and performance, emphasis must also be placed on developing materials to reduce cost. In order to promote research and development into new materials from the perspective of realizing a low carbon society, we need to collaborate with researchers in this field.

Chapter 3: "Strategies for Disseminating Technologies for Realizing a Low Carbon Society." The research and development described in Chapter 2, especially with regard to technology, will help realize two of the five types of Green Innovation—Product innovation and Process Innovation.

Chapter 3 discusses the three other types of green innovation necessary for promoting the results of product and process innovation: Market Innovation, Supply Chain Innovation and Organizational Innovation. We have stated our basic views on the effect that economic policies such as carbon tax, emissions trading, and feed-in tariffs for renewable energy will have on promoting the spread of low carbon technologies.

Economic policies for promoting the spread of low carbon technologies must take into account the possible behavior of consumers in purchasing low carbon technology products. LCS has conducted surveys and research to help improve the predictability of consumer purchasing behavior.

For instance, an analysis of measures implemented to promote residential use of solar power generation systems and the actual increase in installation revealed four factors influencing consumer behavior: installation cost, available installation subsidies, purchasing price of surplus electricity under a feed-in tariff, and the generator system's potential output.

A survey on consumer preferences regarding measures to promote solar power generation also

showed a clear relationship between individual rates of time preference (used to compare the value of consumption today as opposed to future consumption) and interest in installing a solar power generation system.

As a result, it has become possible to divide consumers into two groups. While a feed-in tariff would be effective for one group, installation subsidies would be a more effective way to encourage the second group to install a solar power generation systems. In other words, we were able to provide quantitative proof on the positive effect of having several economic policies to match varied consumer characteristics.

We also conducted a survey on the rationality or bounded rationality of consumers in deciding whether or not to invest in low carbon technologies, citing, as an example, the installation of solar power generation systems.

The results indicated that their decision- making is based on bounded rationality. Further research into their selection behavior will enable better assessment of their acceptability of low carbon technologies and is crucial in developing social scenarios and strategies.

In order to estimate the fair price for low carbon technologies from various perspectives, we also conduced a survey of residents in areas where planned power outages were implemented after the Great East Japan Earthquake.

The results showed that most residents were willing to pay 500 yen to 900 yen/kWh extra to avoid power outages. It also highlighted the importance of educating consumers on how the cost of low carbon technologies should be considered in terms of both the benefits gained by contributing to the realization of a low carbon society and the convenience of avoiding power outages. And it underlined the need to emphasize the secondary benefits of low carbon technologies when developing technology dissemination strategies.

Chapter 3 ends with an estimate of the effect that tax incentives, such as tax breaks on the purchase of next-generation vehicles, would have in helping boost sales of state-of-the-art eco-friendly vehicles and reducing greenhouse gases, taking into account consumer preference analysis.

## Chapter 4: "An Integrated Simulation Model of a Low Carbon Society."

This chapter combines the strategies for developing and disseminating technologies stated in Chapters 2 & 3 to describe a dynamic and affluent and low carbon society. We must not forget that policies regarding energy and the transition towards low carbon will have a major effect on Japan's economy and way of life.

When introducing low carbon technologies and policies, it is essential to evaluate and verify the positive effects of such action in boosting prosperity from both a social and economic perspective. LCS has created an integrated simulation model based on a combination of applied general equilibrium, power supply structure evaluation, and energy end-use demand models to examine how the application of low carbon technologies and policies across society will affect energy supply-demand, total CO<sub>2</sub> emissions, and the national economy. Any further issues that arise from this process are fed back to improve the quantitative technology scenarios. By repeating this feedback process, we aim to present a more concrete and realistic vision of a low carbon society.

## Chapter 5: "Social Experiments for Realizing a Low Carbon Society."

This chapter looks at the various social experiments implemented by the LCS, including the creation of an emergency blackout prevention system; revitalizing rural agriculture and forestry to promote low carbonization in rural societies; using a training system for plant pathologists; and designing low carbon, compact city structures. We have also included a scenario for promoting recovery and reconstruction from the Great East Japan Earthquake that is based on low

carbonization.

This chapter includes a description and status report on each of these experiments.

Further social experimentation is essential if we are to persuade local autonomies to put into practice the various quantitative technology scenarios and strategies for technology development and quantitative economic and social scenarios for technology dissemination that we have developed. Based on the results gleaned from such social experiments, we will start to plan quantitative technology scenarios for the creation of low carbon city technology systems.

## Chapter 6: "Promoting the Spread of Low Carbon Societies."

This chapter describes the strategies for achieving low carbon on a global scale, promoting public understanding and awareness of low carbonization, and designing social systems for promoting low carbonization.

To encourage the worldwide realization of low carbon societies, it is essential to develop a global strategy based on a global perspective on reducing greenhouse gases. The chapter provides background information on the global trend towards reducing greenhouse gas emissions and the significance of reducing  $CO_2$  emissions in developing countries. It also explains the mechanism for reducing energy-derived  $CO_2$  emissions through international cooperation and the potential of reducing  $CO_2$  emissions by improving coal fired generation efficiency in Asia. In order to make the transition towards a low carbon society in Japan, it is essential to promote public understanding.

An effective way of doing this is to provide children with an educational experience that makes it easy for them to understand the importance of making the transition towards a low carbon society. The chapter cites case studies of innovate approaches towards low carbon education as well as proposing educational criteria for furthering understanding.

"Applying social system designs and designing methods for promoting the transition towards a low carbon society." As a global leader in low carbonization, Japan is aiming to set a global precedent in realizing a low carbon society. This in itself constitutes Japan's "low carbon society strategy," since we can define a strategy as "a plan of action based on careful observation of what is happening in reality that makes maximum use of one's strengths to distinguish oneself and gain a lasting advantage over others."

We see a "a lasting advantage" to mean becoming an enduring influence on the world by generating ideas, technologies and businesses necessary to realize and enhance a low carbon society, backed up by pioneering consumer behavior, social structure and values.

Based on this approach, we presented the process involved in designing a system to promote the realization of a low carbon society.

Attached to this report are summaries of projects that provide the basis for our research on social scenarios for realizing a low carbon society. These include: Solar power generation output per administrative division in Japan, Development procedure and explanation of a power supply planning model, Database of case studies on global warming countermeasures, and A classification of local autonomies according to regional characteristics.

LCS has just embarked on the long and winding road towards realizing a low carbon society. We hope that this report will provide a basis for discussion and collaboration, helping the world create a bright and affluent low carbon society.

# 目 次

エグゼクティブサマリー (日本語・英語)

## 目次

はじめに	<u> </u>
第1章	「明るく豊かな低炭素社会」を目指して
1. 1	1 明る N 壹 M は N 条 社 云 」 を 日 相 し C 我が国の課題と 低炭素社会の構築
1. 2	低炭素技術研究開発を進めるための技術の構造化7
1. 3	低炭素社会の実現とグリーンイノベーション11
第2章	低炭素社会構築のための技術開発戦略
2. 1	低炭素社会に貢献する技術·······14
2. 2	低炭素技術の構造化に基づく定量的技術シナリオの構築20
2. 3	要素技術構造化に基づく定量的技術シナリオの構築(1):太陽電池24
2. 4	要素技術構造化に基づく定量的技術シナリオの構築(2):燃料電池30
2. 5	要素技術構造化に基づく定量的技術シナリオの構築(3): 蓄電池35
2. 6	「製造機器データベース」とそれを活用するための情報基盤の構築39
2. 7	電源構成と CO <sub>2</sub> 排出のケーススタディ41
2. 8	定量的技術シナリオを踏まえた今後の研究開発の方向性45
2. 9	社会の低炭素化実現のための材料研究開発のあり方
<i>™</i> 0 <del>±</del>	<b>水出去社人类体の人人の社体並及準順</b>
第3章	低炭素社会構築のための技術普及戦略
3. 1	技術開発と普及促進のシナジーによるグリーンイノベーションの活性化53
3. 2	太陽光発電普及に関する選好調査・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
3. 3	新エネ・省エネ普及に関する限定合理性の考察······61
3.4	停電コストと安心安全のための技術普及······64
3. 5	次世代自動車の普及による温室効果ガスの削減可能性66
第4章	低炭素社会構築のための統合モデルシミュレーション68
第5章	低炭素社会構築に向けた社会実証実験
5. 1	停電予防連絡ネットワークの構築と実証研究78
5. 2	農林業の活性化を通じた地域における低炭素社会の実現89
5.3	低炭素社会の実現に向けた植物医科学の社会実装94
5.4	豊かな低炭素社会のための都市像と地方都市のリデザイン97
5. 5	低炭素社会構築型の震災復興シナリオの提案
第6章	低炭素社会の普及・拡大に向けての取組
6. 1	国際戦略・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・107
6. 2	学校教育から発信する家庭・地域での低炭素社会づくりへの理解増進 110
6. 3	低炭素社会構築促進への「社会システム・デザイン」手法の適用114
付属資料	화 화
資料 1	・ 日本における太陽光発電の都道府県別発電電力量の推計・・・・・・・・・・・118
資料 2	電源計画モデルの開発手順と解説
資料 3	地域地球温暖化対策事例データベース
資料 4	

#### はじめに

地球温暖化の防止は人類共通の課題である。我が国は、温室効果ガスの世界全体の排出量を現状に比して 2050 年までに半減するという目標を国際的に共有することを提案し、日本の長期目標として現状から 60 ~ 80%の削減を掲げ、「グリーンイノベーションに関わる施策を総合的に実施することにより、2020 年までに 50 兆円超の環境関連新規市場、140 万人の環境分野の新規雇用、日本の民間ベースの技術を活かした世界の温室効果ガスの削減を 13 億トン以上」とするとしている。日本は、科学技術を基礎とするグリーンイノベーションによって地球温暖化問題の解決と長期にわたる経済の閉塞状況の打破・成長の進展を図っている。

グリーンイノベーションの取組を進めるなか、2011年3月11日14時46分、三陸沖を震源とする東北地方太平洋沖地震が発生した。この地震と津波に伴う東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故によって国のエネルギー基本計画における原子力依存度の見直しが迫られるに至っている。グリーンイノベーションによる経済成長を目指す日本に、東日本大震災からの復旧・復興とエネルギーの安定確保という大きな課題が加わった。

2011 年8月19日に閣議決定された科学技術基本計画(以下、第4期基本計画と記す。)では、「震災からの復興、再生の実現」と「グリーンイノベーションの推進」等を日本の将来にわたる成長と社会発展の主要な柱と位置付け、特に「グリーンイノベーションの推進」はエネルギー安定確保と気候変動問題の二つの課題に対応するため強力に推進するとしている。日本が強みを持つ環境・エネルギー技術の一層の革新を促すとともに、エネルギー供給源の多様化と分散化、エネルギー利用の革新に向けた社会システムや制度の改革、長期的に安定的なエネルギー需給構造の構築と世界最先端の低炭素社会の実現を目指すとしている。

この第4期基本計画に先立ち文部科学省は、地球温暖化緩和及び気候変動対応のための研究開発の重要性に鑑みて「文部科学省低炭素社会づくり研究開発戦略」を策定した。その中で、「戦略1:戦略的社会シナリオ研究の実施」として、持続的な社会発展を実現しつつ、長期目標を確実に達成するため、産業構造、社会構造、生活様式、技術体系等の相互連関や相乗効果の検討等を行い、低炭素社会実現に向けた社会システムの改革や研究開発の方向性を提示するとした。その具体的な施策として独立行政法人科学技術振興機構(JST)は、「低炭素社会実現のための社会シナリオ研究事業」を平成22年度から開始し、それを推進するに至っている。

この研究事業は、グリーンイノベーションによる低炭素社会の実現に貢献するため、(1)自然科学と人文・社会科学の知見を用いて望ましい姿を描き、その実現に至る道筋を示すシナリオを策定すること、(2)低炭素社会の実現を加速する新技術創出に資する研究開発から成果の普及、社会への実装までを見据えた戦略(総合戦略)や社会システム設計のための取組を検討すること、(3)策定した総合戦略やシナリオが国内外での低炭素社会構築に向けた様々な取組に活用されるよう、広く社会に向けて提言することを目的としている。JST は、この研究事業を実施するため、低炭素社会戦略センター(LCS)を設置した。

LCS は、科学技術を基盤に新しい日本の経済・社会の発展に寄与する持続可能で明るく豊かな低炭素社会づくりに貢献することを目的として、低炭素社会の構築に資する技術(低炭素技術)の定量的技術シナリオや、社会の低炭素化と経済発展の両立を図るための定量的経済・社会シナリオ、そして日本が抱える高齢化や震災復興などの課題も含めて、経済的に発展が可能な低炭素社会システムのデザインを描くための研究・活動を実施している。

日本の太陽電池や蓄電池などの低炭素技術は、先端的で高水準な科学技術としての強みを持っている。低炭素社会の実現には、強みのある低炭素技術をより強いものにしていくと同時に、都市・街づくり、インフラ整備、各種製品・材料製造などの多くの領域で活用させていかなければならない。そのためには環境性、経済性、利便性の高いシステムや製品が導入されることによっ

て、新しい価値が創造されることを示すことが有効である。さらに、日本の強い低炭素技術が世界市場のある一定規模を占めることとなれば、日本はその価格決定権の確保が可能となり、結果 として、低炭素技術の普及拡大に応じて日本の経済成長を促すことも期待できる。

低炭素技術が社会の中へ効果的に導入・普及するためには、技術ごとの性能分析や低コスト化が欠かせない。LCS は、多様な技術の中から真に強みのある低炭素技術を抽出し、その技術を構造化することによって、技術全体の性能向上やコスト低下をもたらすための研究開発課題を明らかにする。この取組を通じてLCS は「強い低炭素技術」のために日本が今後実施すべき研究開発に関する科学技術政策の立案に貢献する。

低炭素技術の社会への導入・普及に当たっては、それらの導入・普及が経済に与える効果や影響、社会の受容性について十分な検討を行うことも必要である。LCS は、日本の経済活動を算定するモデルを開発し、2020年、2030年を目途とした低炭素社会実現の技術と経済制度の必要条件を明らかにする。社会の低炭素化と経済の両立に資する低炭素技術・経済方策・法制度が社会に導入された場合の国内総生産や国民の効用に与える影響を定量的に示し、低炭素技術の効果的な普及を促すための最適な経済・社会シナリオを構築する。さらに、我が国が掲げたグリーンイノベーションの達成目標をより具体的な社会像として示していくため、その社会像の到達に必要となる低炭素技術と社会・経済制度等を統合化して社会実装するための社会実証実験に取り組む。

低炭素社会が普及し拡大していくためには、国際的にも国内的にも低炭素社会構築のメリットについての理解を深めていく必要がある。LCS は、国際協力によるエネルギー起源 CO<sub>2</sub> 削減に向けて我が国が進めていくべき国際戦略について検討を行うとともに、国内的には低炭素社会づくりに向けた理解増進の実践的な活動を進めている。

日本は、冒頭に述べた東日本大震災からの復旧・復興とエネルギーの安定確保の他にも、高齢化への対応という喫緊に解決すべき重要な課題にも直面している。LCS は、これら課題の解決に向けた取組と社会の低炭素化を一体的に推進することが重要であると認識しており、高齢者の活力を引き出し、まちの復興に低炭素社会構築の概念を導入し、低炭素化を自然に成し遂げつつ経済発展していく社会のデザインを設計する。

LCS は、震災復興や高齢化等にも対応した低炭素社会の構築に向けたシナリオ及び戦略を国や地方自治体などの政策決定者に提供していく。

## 第1章 「明るく豊かな低炭素社会」を目指して

#### 1.1 我が国の課題と低炭素社会の構築

#### 1.1.1 はじめに

我が国が掲げた温室効果ガス排出削減の 2050 年長期目標を達成するためには、低炭素技術が 2020 年頃までに社会に導入され、その後広く普及していくことが必要である。しかしながら、日本は、社会の低炭素化のみならず、東日本大震災からの復旧・復興、エネルギーの安定的確保、超高齢社会への対応など様々な課題を抱えている。

私たちは低炭素社会の構築を具体的にどのように進めていけばよいのだろうか。そのためにも、 私たちを取り巻く現状を理解し、そのうえで私たちが取り組むべき課題をここで明確にしておか なければならない。それらの課題を踏まえ、社会の低炭素化を進めるための道筋を考える必要が ある。そして、低炭素技術の社会への導入・普及に向けた取組を新産業・新市場の創出につなげ 経済の活性化を図ることによって、「明るく豊かな低炭素社会」の実現が期待できる。

低炭素社会戦略センター(LCS)の役割は、持続可能な「明るく豊かな低炭素社会」の姿を示し、その姿を実現するために必要となる技術に関する定量的技術シナリオを提示するとともに、低炭素社会構築のための投資が最終的に回収され、経済成長も促すような社会システムなども含めた幅広い社会シナリオを提示することである。ここでは、「明るく豊かな低炭素社会」の実現に貢献するための基本的な考え方を記す。

#### 1.1.2 我が国を取り巻く状況

国内外の気温変化及び温室効果ガス排出の状況、東日本大震災が契機となったエネルギー問題、 高齢社会の現状と将来像を概観し、日本が抱える課題について整理する。

#### (1) 気温変化の長期傾向

日本及び世界の年平均気温を長期的にみると、それぞれ約 1.15 $^{\circ}$ C /100 年と約 0.68 $^{\circ}$ C /100 年 の割合で上昇しており、1990 年代以降、高温となる年が頻出している。この長期的な昇温傾向は南半球に比べて北半球の方が大きい。

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第 4 次評価報告書では、「20 世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇は、人為起源の温室効果ガス濃度増加による可能性が高い」として、温暖化の原因が人為起源の温室効果ガスの増加によるものとした。また、IPCC の排出シナリオ(SRESシナリオ)に基づいた地球温暖化による気候変動の将来予測結果によれば、今後 20 年間は 10 年当たり約  $0.2^{\circ}$ Cの割合で気温が上昇し、2090-2099年の世界年平均気温は、1980-1999年の平均値に比べて  $1.1\sim6.4^{\circ}$ Cの範囲で上昇する。また、産業革命からの累積  $CO_2$ 排出量と大気温度上昇の関係 $^{10}$ を用いて、世界経済が年 2.5%で成長し、実質国内総生産 (GDP) 当たりの  $CO_2$ 排出量 ( $CO_2$ 排出量 /GDP)が現在の日本のものと同じ値で推移するという仮定の下で 2100年の気温上昇幅を試算すると  $2.4^{\circ}$ Cとなる。経済成長を維持・拡大しつつ気温上昇幅を小さくするためには、 $CO_2$ 排出の一層の抑制が不可欠であり、そのためにはグリーンイノベーションが重要な役割を果たすことがこの試算からも理解できる。

## (2) 温室効果ガス排出の現状

日本の温室効果ガス総排出量は、2007 年度まで増加傾向にあったエネルギー起源  $CO_2$  が 2008 年度から 2 期連続して減少しており、2009 年度では 12 億 900 万トン  $(CO_2$  換算)であった。これは、京都議定書の規定による基準年(1990 年度)の総排出量 12 億 6100 万トンを 5210 万トン (4.1%) 下回り、前年度に比べても 7140 万トン (5.6%) の減少となっている。排出量減少の原因としては、2008 年度後半に起こった金融危機がもたらした景気後退に伴う産業部門などのエネルギー需要の減少が続いたことと、原子力発電所の設備利用率の上昇等に伴い電力排出原単位が改善したことなどが挙げられている。しかしながら、エネルギー起源の  $CO_2$  排出量は温室効果ガス総排出量の85%以上を占めていることから、エネルギー起源の  $CO_2$  排出抑制が低炭素社会構築にとって重要である。

#### (3) 東日本大震災からの復旧・復興

東日本大震災の被災自治体は復旧・復興に向けて取り組んでいる。岩手県、宮城県、福島県がそれぞれ取りまとめた復興計画では、太陽光やバイオマスなどの資源を活用した再生可能エネルギーの導入やエネルギー性能の高い設備への積極的な転換などを含めた新たな社会づくりが描かれている。被災自治体の多くは、自然環境に恵まれた地である。その豊かな自然環境を保全しつつも、自然が有する資源やエネルギーを有効に活用し経済的な発展を遂げていくという、持続可能な社会の実現に取り組んでいくことになる。東日本大震災からの復旧・復興は、将来の日本の姿を先行的に実現する取組としてとらえるべきであり、被災自治体や被災者だけでなく、国民や企業も含めて我が国一丸となって推進していくべきものといえる。

## (4) 福島第一原子力発電所事故後のエネルギー問題

2010年6月に閣議決定したエネルギー基本計画では2030年に電力供給の過半を原子力に依存する内容であったが、東日本大震災と福島第一原子力発電所事故等を受けてエネルギー・環境会議はそれを白紙から見直すとしている。したがって、将来に向けたエネルギーシナリオを描くにあたっては、政府からの指針の提示を待たなければならないが、今後のエネルギー問題を検討するうえで、現時点での原子力発電所の状況を概観する。

日本には計54基(計48,960MW)の原子力発電所があるが、東日本大震災により運転を停止した東京電力株式会社福島第一原子力発電所・福島第二原子力発電所や震災後に計画停止に至った中部電力株式会社浜岡原子力発電所、そして定期検査によって全てが停止した。その後、国内全停止から57日ぶりの2012年7月1日、関西電力株式会社は大飯原子力発電所(福井県おおい町)3号機を再起動した(2012年7月5日現在)。

震災によって停止した福島第一及び第二原子力発電所を除き、原子力発電所の稼働可能年数を30~40年、その後廃炉、一方で新規建設も行わないという仮定のもとで2020年時原子力発電設備容量を推定すると約20~35GWとなる。これは震災前の原子力発電による潜在的発電能力の半分程度以下となり、その分の電力エネルギーの確保が求められる。

## (5) 日本における高齢社会の現状と将来

日本では少子高齢化への対応も重要な課題である。平成22年国勢調査では、日本の総人口が1億2806万人であり、65歳以上の高齢者人口は過去最高の2958万人、総人口に対する高齢者人口の割合を示す高齢化率が23.1%に達した。国立社会保障・人口問題研究所によれば、今後、日本は長期の人口減少過程に入り、2046年には1億人を割ると推計されている。その一方で、高齢者人口は増加を続け、2013年には4人に1人、2035年には3人に1人の割合で高齢者になるとされている。高齢者を支える社会の構築が課題となるが、これから作るべき社会は高齢者が生き生きと暮らせる社会である。高齢者一人ひとりが、興味と体力に応じて、社会との関わりを持ちながら暮らしていける社会を形成していかなければならない。

## 1.1.3 低炭素社会への移行の道筋

エネルギー利用効率の指標として、一単位の国内総生産(GDP)を得るのに必要なエネルギー消費量の割合が用いられる。2008年の主要国の実質 GDP 当たりの一次エネルギー消費量及び  $CO_2$ 排出量を見ると、2000年の米ドル価値に換算した実質 GDP100万米ドル当たり、世界の平均エネルギー消費量は石油に換算して約280トン、 $CO_2$ 排出量は約732トンである。これに対し、日本のエネルギー消費量は約97トンで米国の約49%、効率の良い英国と比べても約82%と世界の主要国の中でもエネルギー利用効率が高い。同様に、 $CO_2$ 排出量は231トンで米国の約47%、排出量の少ない仏国と比べても約97%と若干少ない(表1.1-1)。

これは二度のオイルショックを経験した日本が大量にエネルギーを使う技術の性能向上とコスト低減を図り、それらを普及させたことによるといわれている。このことからエネルギー資源に乏しい科学技術創造立国日本が低炭素社会の実現を目指すために取るべき道筋は、エネルギー利用効率を更に向上させ、国内外に普及させることである。

エネルギー利用効率を更に向上させ、低炭素社会を実現するためにどのような技術を重視すべきかについて、小宮山宏らは理論値から予測される技術のエネルギー効率向上の可能性や技術普及によるエネルギー消費量の低減効果、CO<sub>2</sub> 排出量の少なさなどを指標に、省エネルギー、再生

衣	質 GDP 当たりの一次エネルギー消費量及び CO2 排出量 3)
---	-----------------------------------

	世界	米国	英国	独国	仏国	伊国	露国	中国	日本
実質 GDP 当たりエネルギー消費量 (単位:石油換算トン/2000 年価格百万米ドル)	280	198	118	160	176	150	1, 582	711	96. 5
実質 GDP 当たり CO <sub>2</sub> 排出量: (単位:二酸化炭素トン /2000 年価格百万米ドル)	732	490	295	367	238	359	3, 766	2, 418	231

可能エネルギー、鉄などの材料のリサイクルが特に重要であるとしている<sup>2)</sup>。また、2050年を目標にこれらの技術を発展、普及させ、エネルギー効率を3倍、再生可能エネルギー利用を2倍に高め、主要な材料をリサイクルする物質循環システムを構築すれば、低炭素社会実現への道筋が開けるとしている。

## 1.1.4 明るく豊かな低炭素社会とは

日本が抱えている、地球温暖化、大規模災害からの復旧・復興、エネルギーの安定的確保、そして高齢化等の課題は、今後先進国のみならず新興国でも顕在化し取り組まざるを得ない課題である。これら課題の解決に向けて取り組む日本は、世界に先駆けて取り組む「課題先進国」といえる。我が国は、課題を自ら解決していくとともに、課題解決に至った取組を新しいモデルとして世界にも導入していくことを目指すべきである。したがって、課題解決に向けて率先して取り組むことは日本の使命であり、得られた新しいモデルをアジアをはじめとする世界各国に導入することが日本の国際競争力の源泉となる。

日本の強みである科学技術によって地球温暖化への対応とエネルギーの安定確保が両立し、高齢者が生きがいをもって暮らせる活力ある社会こそが、持続的に成長・発展を遂げる日本の一つの姿であり、それが「明るく豊かな低炭素社会」である。

その「明るく豊かな低炭素社会」を構築するに当たっては、エネルギー起源の  $CO_2$  排出量の削減が前提となる。先に述べた我が国の  $CO_2$  排出状況を「ものづくり」、「運輸」、「オフィス」、「家庭」の各部門でみると、日々のくらしに関わる「家庭」、「オフィス」、「運輸」からの排出量合計が全体の 50% を超える。「ものづくり」では排出削減努力が相当程度進んでいるが、日々のくらしに関わる三つの部門では排出削減の余地が見込まれる。また、「ものづくり」においても、省エネルギー技術を効果的に導入することによって一層の排出削減も期待できる。したがって、「日々のくらしで  $CO_2$  排出量の削減、省エネものづくりで先導」することが、低炭素社会づくりに向けた戦略として最も適しているといえる。

LCS では、「日々のくらしでの  $CO_2$  排出量の削減」として、たとえば、住宅やオフィスにおけるエネルギーマネジメントの見える化、新築やリフォーム時の住宅の省エネ化の推進、エコカーへの早期移行や移動手段・物流手段の変更などに、そのポテンシャルがあると考えている。また、バイオマスの利用の促進、農作物の植物被害低減、耕作放棄地や余剰農地における堆肥・緑肥生産などによっても、温室効果ガスの排出量削減に貢献できよう。

## 1.1.5 「明るく豊かな低炭素社会」の実現に貢献するために

我が国は、先端的で多様な裾野の広がりを持つ高水準な科学技術と、大きな経済規模と有力な 産業及び企業を持ち、同時に比較的安定ながらも、2007年には超高齢社会(高齢化率21%以上) という人類史上初の課題に直面している国である。「明るく豊かな低炭素社会」の実現には、こ のような経済・社会を前提としたうえで、持続可能な発展をする社会を設計しなければならない。 低炭素社会の実現に向けた10年、20年という長期の取組に対しては、単なる技術や経済の予 測ではなく、たとえば、2050年を基準に技術の到達目標を設定し、目標に対してどれくらい性能、 コストが改善され、それが社会に普及することによってどれほどの経済効果が生まれ得るか時系 列のシナリオを作成して、比較検討することが有効である。

LCS では、低炭素社会実現に貢献する技術の性能やコスト、CO<sub>2</sub> 排出削減効果などの経時発展予測である「定量的技術シナリオ」や、低炭素社会構築に向けて導入すべき経済制度と社会制度を分析・設計して、日本全体の経済効果や CO<sub>2</sub> 排出削減量を定量化する「定量的経済・社会シナリオ」

を構築している。そして、「定量的技術シナリオ」で試算した技術の性能やコスト等を「定量的経済・社会シナリオ」で用いる一般均衡モデルに導入して、技術導入による経済性の評価を通じて、低炭素社会構築のための「統合シナリオ」としてまとめる。さらに、これらのシナリオから低炭素技術に関する今後の技術開発戦略や社会への技術普及戦略を導き出す。

我が国が直面している課題は国内の地域社会ごとにその現れ方が異なっていることにも留意しなければならない。つまり、それぞれの地域社会の特性に応じた低炭素社会の姿があり得る。これまで国内の様々な地域社会では、抱えている課題や地域特性に応じた低炭素社会づくりの取組が実施されている。多くの取組は国などの補助金や援助に依存しているが、ある時期から自律的展開ができる経済性を有して持続的に成立していくことが望ましい。LCSでは、地域社会での取組が持続的な低炭素社会づくりとなるよう、これらの取組と連携した社会実証実験を行い、定量的技術シナリオ、定量的経済・社会シナリオ、統合シナリオなどを地域社会の実情を踏まえて導入し、地域社会が自律して発展していける低炭素社会システムとして提示していく。社会実証実験を通じて、地域社会の多様な特性や制約条件と合致する「明るく豊かな低炭素社会」を実現するための具体的かつ個別的な戦略を提言する。

国際的にも低炭素化に向けた取組が進められている。一方、日本の製造業では国内に基盤を残しつつもグローバルに活動できる国際競争力強化の課題がある。国際競争力の強化と内需の拡大など、それぞれの産業が抱える課題に対して低炭素化の影響は異なるが、産業構造を低炭素型に導くことによって、世界の低炭素化に資するとともに経済発展を実現していかなければならない。さらに日本は、現在検討が進んでいる二国間クレジットなどの動向を考慮しつつ、途上国をはじめとする海外諸国に日本の低炭素技術を移転することによって、世界的な低炭素社会への移行を率先して推進していくべきである。LCS は、世界の低炭素化に貢献するとともに、我が国の国際競争力強化と経済発展を遂げるための国際戦略を提言していく。

日々のくらしから「明るく豊かな低炭素社会」を構築するには、日々のくらしで CO2 排出量の削減、省エネものづくりで先導することが重要であるが、これは低炭素型の消費構造に導くことにほかならない。そのためには、国民一人ひとりが「明るく豊かな低炭素社会」で暮らすことの価値を見出し低炭素社会の構築に理解を持てるよう、低炭素社会づくりのシナリオや戦略の普及・拡大を通じて、国民の低炭素社会づくりに対する理解増進を図ることも必要である。国民、特に消費者や生活者の低炭素社会づくりに向けた行動が、日常生活の中に自然に組み込まれていき、人々の行動も変わり、最終的には社会全体の価値観の変化に結び付いていく。LCS は、低炭素社会づくりの「良循環」を創造し、それを「駆動するエンジン」として導入すべき必要な仕組みを持った「低炭素社会システム」をデザインし、それを実現するための具体的行動プログラムを描く。

## 【対献】

- 1) H. D. Matthews, N. P. Gillett, P. A. Stott and K. Zickfeld, The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions, nature, Vol. 459, pp. 829-832, 2009.
- 2) 独立行政法人科学技術振興機構低炭素社会戦略センター,シンポジウム「日々のくらしの グリーン・イノベーション」,小宮山宏 基調講演「低炭素社会を実現するには」,2010.4, http://www.jst.go.jp/lcs/result/sympo20100413/program.html
- 3) 財団法人日本エネルギー経済研究所、エネルギー・経済統計要覧 計量分析ユニット編、2011.

## 1.2 低炭素技術研究開発を進めるための技術の構造化

## 1.2.1 はじめに

低炭素社会の構築を進めるためには都市・街づくり、インフラ、各種製品、材料など多くの領域で科学技術の新しい知識を活用しなければならないが、環境性、経済性、利便性が高いシステムや製品の導入による新しい価値創造がないと技術の実用化は難しい。

太陽電池や蓄電池などは社会の低炭素化に寄与すると期待されているが、現状の技術水準では経済性や利便性においてまだ十分なものとはいえない。低炭素社会実現に向けて、これらの低炭素技術の貢献度を高めるためには、研究開発の段階でブレークスルーを生み出し、その成果を製品に反映させる必要がある。なぜならば、低炭素技術の技術水準が高いほど、低炭素社会を構築するための社会経済システム設計の自由度が高くなり得るからである。

また、研究成果を製品に取り入れた際に、全体として性能向上とコスト低減が図れることを、科学技術的な知識基盤に基づき明確に示す必要がある。研究者あるいは科学技術政策立案者が、新しい研究成果やブレークスルーが低炭素技術の社会導入にどの程度のインパクトを与えるかを定量的に把握することで、その成果の重要性を正しく認識することができるようになり、研究開発の方向性を正しく選択することが可能になる。このように、低炭素技術を今後 10 年から 30 年間で大規模実用化につなげていくためには、その開発の早い段階から性能やコストの目標を明確にし、その目標達成のために必要な研究開発や技術開発を行わなければならない。

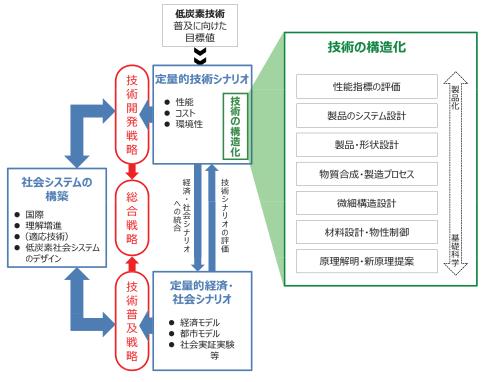
さらに、低炭素技術の研究開発は、太陽電池一つをとってみても国内外の大学から企業まで熾烈な研究開発競争が進められている。オープンイノベーションに対応し、大学や企業の優れた成果を組み合わせ、かつ、短期間に競争力のある製品にまで仕上げる必要がある。このような競争に勝ち残り、製品の優位を保つためには国内外の研究開発動向を俯瞰したうえで、大学や企業の個別の研究開発と、企業における製品化のプロセスを見通した技術シナリオが必要となる。

LCS では、2030年、2050年を目標に主要な低炭素技術について個別の技術の性能とコストを試算した定量的技術シナリオを作成し、これと大学等で行う技術の研究開発をつなげて低炭素技術開発戦略を立案する。

## 1.2.2 技術の構造化とは

企業の太陽電池などの性能やコスト試算などは、消費者が購入する最終製品を想定して行われる。一方、大学等で行う研究開発は、太陽光を電気エネルギーに変換するセルや半導体材料など、太陽電池を構成する個別の要素技術を対象としている。要素技術にブレークスルーが起きたときには、たとえば、太陽光をエネルギーに変換する効率について技術の動作原理や理論に遡って研究する、あるいは、蓄電池の電極と電解層の間をリチウムイオンがどのように移動して電気が蓄えられるかを測定する、などの基礎的な研究を積み重ねることによって技術の成熟が図れる。しかし、このような、要素技術の研究開発の成果を長期にわたって製品の性能向上とコスト低減に切れ目なくつなげ、製品の普及を拡大するための戦略と方法論が必要である。

技術に関わる研究開発や技術開発では、新しい原理の発見、発見された原理やそこに働く機構の解明、原理・機構を活用するための物質材料創成や元素制御に関する研究など基礎的研究から、原材料や部品の製造プロセス、部品に関わる構成部材やデザインの評価、性能指標の抽出、製品化のプロセス技術の開発、さらに低炭素技術の社会導入と経済性等に至るまで、階層的で多様な技術の確立を行うことが必要となる。このような考えに基づき、低炭素技術開発に対して、科学技術的な知見を階層的に整備した知識基盤を、技術の構造化と総称する。LCSでは、低炭素技術を対象とする研究開発をさらに個別の研究要素に分解し、低炭素技術を構成する要素技術に関わる理論や原理、構成元素やナノレベルの構造と機能、製造プロセスなどそれぞれの研究対象のスケールと関連技術との関連性などに着目して、技術の構造化を行っている。技術の構造化は、主に、1.原理解明・新原理提案、2.材料設計・物性制御、3.微細構造設計、4.物質合成・製造プロセス、5.製品・形状設計、6.製品のシステム設計、7.性能指標の評価の階層から構成される(図1.2-1)。技術を構造化すると、たとえば、個別の研究要素で優れた成果が得られると、製品レベルでの性能向上の度合い、コスト低減効果、環境性などを検証することができる。あるいは、あらかじめ低炭素技術にブレークスルーを起こすためには、どのような要素研究分野に研究投資する必要があるかの戦略立案にも利用することができ、社会で普及する際に必要な技術的



<低炭素社会シナリオ研究>

図1.2-1 低炭素社会シナリオ研究における技術の構造化

な課題を抽出し、技術開発にフィードバックすることで、研究開発の推進を図ることが可能になる。また、低炭素技術の現在から未来の時間軸に対して性能、コスト、導入量を定量的に示すことができ、社会への取り込みの速度を定量的に示した、技術シナリオを提示することができる。

低炭素技術の多くは理論値から推定すると、まだ性能もコストも改善される余地が多分に残っている。大学等の研究開発と企業の技術開発、製造を連携させながら長期にわたる技術開発を続け、技術の向上とコスト低減を続けることによって、低炭素技術分野の技術開発に競争力とスピードをもたらし、明るく豊かな低炭素社会の実現に貢献することができる。

#### 1.2.3 技術の構造化の事例

「文部科学省低炭素社会づくり研究開発戦略」(平成21年8月11日文部科学大臣決定)で対象とされる技術分野について、技術シナリオに対応させて構造化した。その内容と構造図は図1.2-2と図1.2-3のとおりである。JSTではLCSの構造化に基づき、先端的低炭素化技術開発事業(ALCA)で研究課題を公募するとともに、事業運営を進めている。

#### (1) 太陽雷池

2030年目標を、発電効率50%以上及びモジュールコストを現状の10分の1とした。この高い目標の実現に向けては、従来型の太陽電池では理論的にも対応が不可能であり、量子ドットやタンデム型などの高い発電効率のポテンシャルを有する新しい太陽電池技術の開発が必須となる。

#### (2) 蓄電デバイス

2030 年目標を、エネルギー密度 500Wh/kg 以上とした。高性能蓄電池の実現のためには、従来のリチウム電池の技術開発に加えて、多価カチオン型、全固体型及び金属空気電池等の新規蓄電池の開発が必要不可欠である。たとえば、電気自動車の本格普及に向けては高エネルギー密度型蓄電システム (700 Wh/kg) が必要と考えられ、エネルギー出力密度、エネルギー密度の向上を図る。

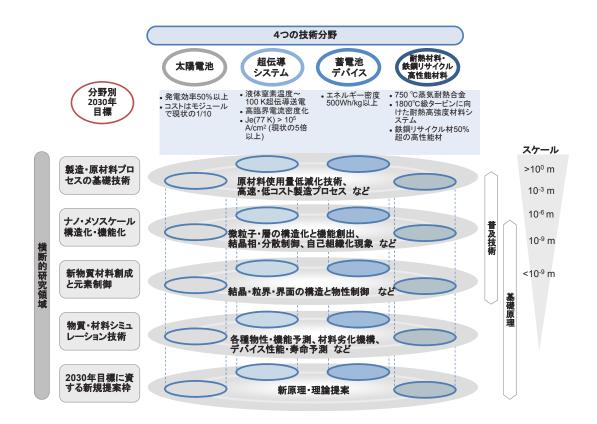


図 1.2-2 ALCA が対象とする低炭素技術の構造化の例

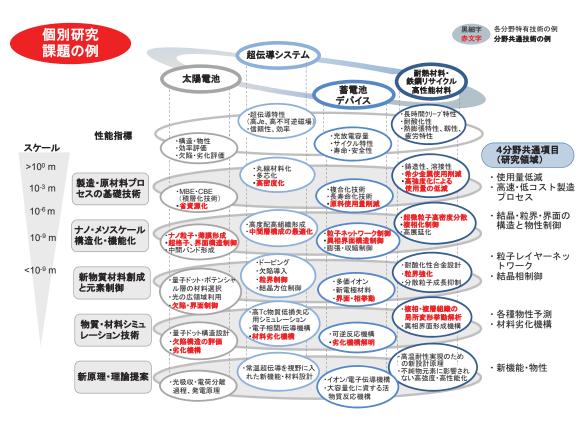


図1.2-3 低炭素技術の構造化に基づく研究課題間の相間マップの例

## (3) 耐熱材料、リサイクル高性能材料

#### ① 耐熱材料

2030 年目標を、750°C級蒸気耐熱合金及び 1800°C級タービンに向けた耐熱高強度材料システムとすることとした。CO₂排出削減の観点から、火力発電技術である先進超々臨界圧火力発電(A-USC)及び石炭ガス化複合発電(IGCC)の持続的な発展には発電温度の高温化技術が必要であり、それらを具現化するためには、新たな耐熱合金材料開発に加え、合金材料の耐熱コーティング技術の進展が必要不可欠で、これら耐熱合金と複合材料の性能向上を図る。

#### ② リサイクル高性能材料

2030 年目標を、リサイクル材を 50%超用いた高強度・高性能材の実現及び高性能材製造における希少金属使用を 50%削減することとした。高強度・高性能金属材料ではバージン材製造の環境負荷と希少金属の使用量増加が課題であり、希少金属資源の枯渇、世界的な資源争奪の激化及び市中の潜在金属スクラップの増加の背景から、リサイクル材・劣質素材を出発原料とした高強度・高性能材の製造技術の確立を図る。課題解決へのアプローチとして、循環合金元素(たとえば鉄鋼リサイクルにおける Cu、Sn 等)や不純物元素を高純化する新たなプロセス開発、あるいは出発原料の合金元素・不純物元素の変動に影響されない新たな材料の高強度化・高性能化技術の開発を図る。

#### (4) 超伝導システム

2030年目標を、液体窒素温度以下、超伝導送電及び高臨界電流密度化 Je (77K) > 10<sup>5</sup>A/cm<sup>2</sup> (現状の5倍以上)とする。低炭素化技術の一環として電力応用に超伝導技術が組み込まれる要件として、高臨界電流密度化技術が極めて重要である。これには、物質科学・材料科学的な基礎研究の展開が必要不可欠であり、その進展に向けて、超伝導物質の化学組成と超伝導層の微細組織の制御及び複合材料化技術の進展を図る。

## 1.3 低炭素社会の実現とグリーンイノベーション

## 1.3.1 はじめに

低炭素社会構築のための戦略を展望するうえで、2010年末に「地球温暖化問題に関する閣僚委員会」から示された基本方針<sup>1)</sup>は重要である(表 1.3-1)。

表 1.3-1 地球温暖化対策の主要施策について(地球温暖化問題に関する閣僚委員会の資料を基に LCS で作成)

(1)	全ての主要国が参加する公平かつ実効性ある枠組みの構築及び意欲的な目標の合意
	を前提に、2020 年における GHG25%削減(1990 年比)を実行する。
2	国内的には、エネルギー基本計画を基に 2030 年にエネルギー起源の CO <sub>2</sub> を 30%程度
2	もしくはそれ以上削減する(1990年比)。
3	国内外の状況変化に応じた柔軟かつ戦略的な政策の再構築と環境・エネルギー技術の
3	強化、グリーンイノベーションを加速する。
	平成 23 年度より地球温暖化対策税を導入する。これは、石油・石炭税に CO2 排出量
4	に応じた税率を上乗せするもので、(最終的には)現行の石油石炭税収を約1.5倍(約
	2,400 億円増税)にする。
(5)	再生可能エネルギーによる発電電力量は、全量買取(買取コストは電気料金に上乗せ)
<u> </u>	を実施すべく、通常国会に関係法案を提出する。
6	キャップ&トレードによる排出量取引に関しては当面慎重に検討する。
(7)	政府は産業、農家、生活者、地域などの主体と連携しつつ、二国間クレジットや国内
	クレジットなどを通じて地球温暖化対策の取組を支援する。
8	森林吸収源対策を含めた諸施策を推進すべく、財源を確保する。

ここでは、主に表 1.3-1の③にある地球温暖化対策において国内外の状況変化に応じた柔軟かつ戦略的な政策の再構築と、エネルギー環境技術の強化、グリーンイノベーションを加速すべきであるという現政権の基本方針について解説した後、グリーンイノベーションに関連して国内で実施すべき社会制度の設計について述べる。

## 1.3.2 イノベーションとグリーンイノベーション

ところで、グリーンイノベーションの意味は、「地球温暖化問題に関する閣僚委員会」の資料には明確に定義されていない。イノベーションを「新結合」という言葉で表し、概念を生み出した経済学者のシュンペーター(オーストリア)の著書『経済発展の理論』  $^{2)}$  に辿れば、イノベーションを5つの類型に分けている(表 1.3-2)。

表 1.3-2 シュンペーターの『経済発展の理論』にみる5つのイノベーション (新結合)

イノベーション類型	イノベーションの内容
プロダクトイノベーション	新しい商品・サービスあるいは新しい品質の商品・サー
	ビスの生産がこれに該当する。
プロセスイノベーション	新しい生産方法の創出がこれに該当する。ただし科学技
Jロピスインペーフョン	術として新規である必要はない。
マーケットイノベーション	当該産業部門における新しい市場の開拓がこれに該当
マークットインペーション	する。
サプライチェーンのイノベ	原料あるいは半製品の新しい供給源の獲得がこれに該
ーション	当する。
知嫌の イノベーション	独占の確立もしくは独占の打破による新しい組織・ビジ
組織のイノベーション 	ネスモデルの実現がこれに該当する。

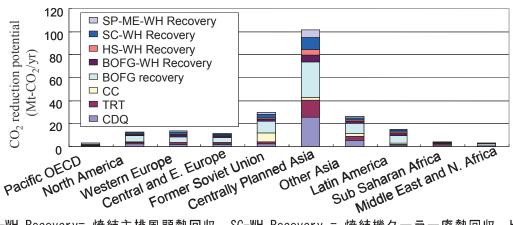
上記5つのイノベーションの類型を地球温暖化対策にあてはめて考えると、表 1.3-3のように各々のイノベーション類型に属する代表的な地球温暖化対策が挙げられる。

表 1.3-3 地球温暖化対策としてのグリーンイノベーション

イノベーション類型	該当するグリーンイノベーションの例と展望
プロダクトイノベーション	太陽電池、省エネ家電、蓄電池等民生用の最終需要製品。これらの開発・普及は対策として大きな可能性がある。
プロセスイノベーション	日本の産業のプロセスにおける効率改善や省エネ技術。 これらは飽和傾向にあり、対策としての可能性は小さい。
マーケットイノベーション	典型例として排出量取引や炭素税などがあり、対策としての可能性は大きいが、経済にも大きな影響を及ぼす可能性がある。
サプライチェーンのイノベー ション	モーダルシフトによる輸送用エネルギーの効率改善や 低炭素化などがこれに該当し、対策としての可能性は大 きい。
組織のイノベーション	電気事業に新たな事業体が参加するスマートグリッド などの新しいビジネスモデルの創成があり、適切な制度 設計により、有効な対策となる可能性がある。

該当するグリーンイノベーションの例と展望について、たとえば、プロダクトイノベーションでは、政府の 2007 年長期エネルギー需給見通しの最大導入ケースにその事例がみられる。事例では家庭部門におけるプロダクトイノベーションが多く、特に省エネ家電、太陽光発電、燃料電池、高効率給湯器、次世代自動車などはいずれも性能、効率、コストの大幅な向上が期待できるものであり、グリーンイノベーションの展望の中核となる可能性がある。プロセスイノベーションでは、主として産業部門の省エネルギー技術の革新がこれに該当する。気候変動に関する政府間パネル (IPCC) では、その設立当初から産業部門等の省エネポテンシャルが評価されてきたが、2011 年現在、あるいは 2020 年頃までを見通したなかで、大きな省エネルギーポテンシャルを持った追加的なプロセスイノベーションは非常に少ない。たとえば、図 1.3-1 は鉄鋼業における代表的な省エネルギー技術による CO2 削減ポテンシャルを表しているが、Pacific OECD に含まれる日本においては、主たる省エネルギー技術の普及率が既に高いため、追加的な CO2 削減ポテンシャルは小さい30。

総じていうならば、今後日本のエネルギー多消費産業、特に製鉄所などの大規模事業所においてはプロセスイノベーションによる CO<sub>2</sub> 削減の余地は小さいといわざるを得ない。



SP-ME-WH Recovery= 焼結主排風顕熱回収, SC-WH Recovery = 焼結機クーラー廃熱回収, HS-WH Recovery =熱風炉顕熱回収, BOFG-WH Recovery= 転炉ガス顕熱回収, BOFG recovery=転炉ガス回収, CC= 連続鋳造、TRT=高炉炉頂圧発電, CDQ= コークス乾式消火設備

図 1.3-1 鉄鋼業における 8 種類の代表的省エネ技術による CO<sub>2</sub> 削減ポテンシャル<sup>3)</sup>

次にマーケットイノベーションの例として京都メカニズムを挙げる。排出量取引などの京都メカニズムは、温室効果ガスの排出枠(排出権)が価格付けされるような制度を設計し、新たなマーケットを創成するという意味で、マーケットイノベーションの一例であるといえる。京都メカニズムそのものについては詳細な説明を省略するが、EU 排出権取引制度(EUETS)など地域における排出量取引や日本における国内クレジット(国内 CDM)の導入にも影響を及ぼした。また、再生可能エネルギーに対する固定価格買取制度も電力市場における制度改革とそれによる普及促進という点から、マーケットイノベーションの一類型とみることができる。サプライチェーンのイノベーションについては、モーダルシフトによる輸送用エネルギーの効率改善や低炭素化などがこれに該当し、対策としての可能性は大きいがここでは省略する。最後の組織のイノベーションについては、スマートグリッドの例を挙げる。スマートグリッドの活性化方策として、たとえば家庭用電力市場の自由化といった規制緩和により、従来の電気事業とは異なる事業体(組織)が当該市場に参入する機会を増加させることが挙げられる。このように規制の緩和等を通じて、新たな組織が新たなビジネスモデルを創成する例は、組織のイノベーションに分類される。スマートグリッドは、グリーンイノベーションの一つとして期待されており、今後関連する新しいビジネスモデルの創成と制度設計(規制緩和)の進展が望まれている。

## 1.3.3 明るく豊かな低炭素社会を構築するためのグリーンイノベーションのあり方

このようにグリーンイノベーションをシュンペーターの概念に基づいて分類してみてきたが、 類型ごとにイノベーションを実現し、豊かな低炭素社会を導くための条件を抽出し、今後に活か す必要がある。我々は、エネルギー環境分野でのグリーンイノベーションを成功に導くためには 複数のイノベーションを適切に組み合わせることが必要である。

たとえば、エネルギー環境分野の研究開発を進めることにより、プロセスイノベーションやプロダクトイノベーションの可能性を広げることができるが、これだけでは十分ではない。開発された技術の社会普及を促すようなマーケットイノベーションや、規制改革等によるビジネスモデルのイノベーションを適切に組み合わせていかなければならない。

#### 【文献】

- 1) 地球温暖化問題に関する閣僚委員会,地球温暖化対策の主要3施策について,2010.12.28, http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004601/012\_s01\_00.pdf
- 2) Joseph A. Schumpeter 著, 塩野谷祐一, 東畑精一訳, 経済発展の理論-企業者利潤・資本・信用・利子および景気の回転に関する研究〈上下巻〉-, 岩波文庫, 1977.
- 3) K. Tanaka, R. Matsuhashi, M. Nishio, H. Kudo, CO<sub>2</sub> Reduction Potential by Energy Efficient Technology in Energy Intensive Industry, J. Inst. Energy Economics, 2006.

## 第2章 低炭素社会構築のための技術開発戦略

## 2.1 低炭素社会に貢献する技術

## 2.1.1 LCS が注目する技術

低炭素社会の実現に向けて、多くの低炭素技術が提案され、エネルギー供給側と需要側の双方での様々な工夫と開発がなされている。エネルギー供給側には、たとえば、再生可能エネルギーの利用や発電効率の向上があり、需要側での工夫は、省エネ・節電や、リサイクルの活用が挙げられる。低炭素社会戦略センター(LCS)は、エネルギー供給側・需要側双方の技術に着目し、研究開発や技術開発の戦略のための「定量的技術シナリオ」研究を進めている。「定量的技術シナリオ」研究を行うにあたり、LCSではまず、低炭素技術の現状について俯瞰的総合的な検討を行った。

低炭素社会の構築に貢献する多種多様な技術(以下、「低炭素技術」という。)は我々の生活の様々なところで用いられている。LCSでは、低炭素技術の研究開発等に着目するだけではなく、その技術が利用される場までを考慮することにより、新しい技術を利用した技術システムあるいはその周辺システムの工夫が創出されるとともに、技術利用によってより大きな社会への影響・波及効果が得られるものと考えている。

たとえば、太陽光発電はクリーンな発電方法として期待が高い。また、電気自動車やプラグインハイブリッド車の電源として用いられている蓄電池は、今後家庭用のバックアップ電源として普及していくことも期待されている。これら太陽光発電などは製造コストの高さが普及の足かせとなっている。低コスト化と高効率化によって、それらの利用が大きく促進されると考えられる。さらに個別需要家で利用されるそれらの技術は、地域規模のエネルギー管理システムの導入と併せて普及することで、より有効に活用できる。このエネルギー管理システムは、地域のエネルギーの利用状況や気象予測、住民の生活スタイルなど幅広い情報を取り入れることで、より拡充され、エネルギーを媒体とした低炭素社会の構築につながっていくであろう。

図2.1-1は、社会における低炭素技術の位置付けを模式化したものである。低炭素技術は、それらを利用するより大きな技術システム(例:家庭用エネルギーマネジメントシステム、高効率発電システム等)、あるいは、より大きな都市、地域といった社会の中で重要な役割を果たす。都市や地域レベルでの低炭素技術の利用は、ひいては社会全体(国、世界)の中でも貢献していることに等しい。それは、技術の普及による直接的な低炭素化としての貢献もあるだろうし、低炭素技術の研究開発等による雇用や新しい社会インフラでの利活用等による経済効果もある。

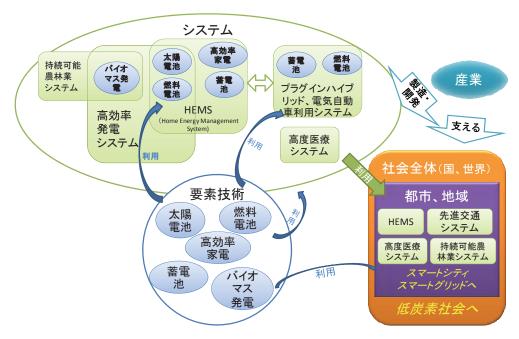


図2.1-1 社会における低炭素技術の位置付け

では、エネルギーの安定利用を確保しつつ低炭素社会の構築を進めるにあたって、どのような低炭素技術に着目すればよいだろうか。低炭素社会構築に貢献が期待される技術について、低炭素化という目的以外に得られる効果と、低炭素技術が大規模利用化や商用ベースに乗せることを考えたときに障壁となっている点について表 2. 1-1にまとめた。なお、これらの効果やバリアの評価は定性的で簡易的に行われたことと、ここではエネルギーの使い方による工夫、つまり、エネルギー管理による省エネルギー方策は省略したことに留意いただきたい。

この表が示すように、それぞれの低炭素技術が社会で広く使われるには障壁が存在する。障壁は、社会的制約(適地確保、社会的受容性、周辺システムの整備、制度制約など)や技術的制約(見込まれる効率が未達成、製造コストが高いなど)といったことが原因となっている。前者の制約は技術的努力では克服が難しいが、後者については、新規材料の新規プロセスの開発などによってバリアの克服が可能であると考えられる。

LCS では、こういった観点から、これら多様な低炭素技術のうち、まずは、研究開発や技術開発に注力することで障壁が解消され、性能向上や低コスト化等に将来性のある技術を当面の研究対象とすることとした。具体的には、太陽電池、燃料電池、蓄電池を取り上げ、それら技術の構造化に基づき具体的定量的な検討を行って定量的技術シナリオを提示した。その手法と検討結果については2.2節以降に詳述する。

表2.1-1 低炭素社会構築への貢献が期待される技術

技術分野			低炭素化以外	社会への導入・普及での障壁
大分類	中分類	小分類	の効果	社会への等人・自及での障室
	太陽光発電	太陽電池など		やや高価格、期待値ほどのエネ ルギー変換効率未達成
	太陽熱発電	集熱プレート など		日本では量的利用可能性低い (適した設置場所少)
	風力発電			立地、供給消費の管理
	水力発電	タービン	治水	大規模新規建設は困難、小規模 はコスト高
	波力発電		量的利用可能 性高	高コスト、制御難
	潮力発電		計画的発電可能	コスト、生態系、日本で該当場 所なし(干満の差8m)
発電	海洋温度差発電	タービン、配管	世界全体では ポテンシャル 高	高コスト、表層と深海の温度差 が大きい場所のみ可
	バイオマス発電			バイオマスの確保、多用途(食糧など)、自然保護との競合
	廃棄物発電		ゴミ減量	
	地熱発電			利用可能場所少
	高温岩体発電	タービン、配管	日本で(地熱に 比べ)量的利用 可能性有	場所の特定難
	マグマ発電		ポテンシャル 高	場所の特定難、実証試験なし
	燃料電池	燃料電池	(水素利用時) クリーン排気	やや高価格、期待値ほどの効率 未達成

		燃料電池	(水素利用時) クリーン排気	やや高価格、期待値ほどの効率 未達成
	燃料電池複合発 電	天然ガス火力		
		石炭火力		
	高効率石炭火力 発電	石炭ガス化複 合発電 (IGCC)		高コスト
	原子力発電	軽水炉、新型炉		社会的受容性
	CO <sub>2</sub> 回収	吸収型、吸着 型、膜分離など		現状では大規模プラント対応 難、高コスト
ccs	CO <sub>2</sub> 貯留	CO <sub>2</sub> 地中貯留		貯留場所の確保、モニタリング 要
	002 KJ E	CO <sub>2</sub> 海洋隔離		海洋生態系への影響評価
	蓄電池	リチウムイオ ン電池	エネルギーの 供給消費不一	大容量化の必要性、安全性、や や高価格
	苗电心 	その他二次電池	致に対応	
	-lv =	高効率水素製 造	クリーン排気	高コスト
エネルギー	水素	水素貯蔵・輸送	グリーン排気 	インフラ整備、管理のコスト
媒体、輸送	雪氷冷熱利用			貯蔵場所
	バイオマス燃料	セルロース系 エタノール	農地林地廃棄 物の有効利用	高コスト、バイオマス確保、需要の確保
		藻類利用		高コスト、藻類生産場所確保
	超伝導送電	超伝導ケーブル		長距離化、高温化
	建物断熱	断熱材改良 (真空、セラミクス膜など)		高コスト、既存建物の改修難
		複層窓、真空断 熱窓	居住環境改善	高コスト、既存建物の改修難
		可動日射制御 システム		高コスト
エネルギー	省エネ空調シス	タスク・アンビ エント空調	局所的な調節 可能により省 エネ	やや高価格
消費   : 民生 	テム	インテリジェ ント空調	局所的(室ご と)調節により 省エネ	やや高価格
	自然エネルギー	自然通風		既存建物の構造変更難、自然に
	利用	自然光利用		よる調節の限界
	ヒートポンプ利 用	高効率ヒート ポンプ (新冷 媒)		高コスト、温水タンク設置場所

_				
	省エネ家電利用	蛍光灯(電球型)	低消費、長寿命	高価格、低温時低照度、水銀使 用
	1   1   1   1   1   1   1   1   1   1	LED 照明	低消費、長寿命	高価格、直流低電圧駆動、熱に 弱い
	ハイブリッド自	高性能エンジン		やや高価格
	動車	車載用蓄電池		廃棄段階への懸念、大容量化に よる取扱時の危険性
	電気自動車	蓄電池	エネルギーの 供給消費不一 致に対応	大容量化の必要性、安全性、やや高価格
		電気供給イン フラ		インフラ未整備
	水素自動車	高効率水素製 造	クリーン排気	高コスト
エネルギー 消費	小糸白勁牛	水素	クリーン排気	インフラ整備、管理のコスト
:交通	燃料電池自動車	燃料電池	(水素利用時) クリーン排気	やや高価格、期待値ほどの効率 未達成
		水素	クリーン排気	インフラ整備、管理のコスト
		ハイブリッド 利用		やや高価格
	高度道路交通シ ステム (ITS)	エコドライブ 情報システム	渋滞緩和	CO <sub>2</sub> 削減と合わせた最適化
		信号制御シス テム	渋滞緩和	00 <sub>2</sub> 削水と ロイノビ /こ取地10
		自動運転シス テム	事故防止	信頼性の向上
エネルギー	高純度リサイク	結晶化技術		高コスト
消費 :産業	ル材の製造	新規リサイク ルシステム		既存供給システムとの摩擦

## 2.1.2 低炭素技術のコスト効果

低炭素技術の効果は、エネルギー面、CO<sub>2</sub> 排出量にとどまるものではない。低炭素技術の普及にあたっては、それが経済に与える影響とその度合いを併せ検討することもまた不可欠である。低炭素技術のやみくもな導入は経済にマイナスの影響をもたらす場合もある。一方で、導入時にコストがかかるという一見マイナスにみえる側面も、技術導入による様々な効果にまで範囲を広げて試算することにより、実際には経済的にもプラスに働く結果を招くことが判明することも多い。

LCS での試算の一例を挙げる。図 2. 1-2 は、年産 1 GW の発電能力を有する太陽光発電(PV)システムの製造から社会での利用までの経済効果を現したものである。 $1,000 \sim 2,000$  億円の PV 生産工場建設投資に対し、200 円 /W で売るとして太陽光発電システムのみで年間 2,000 億円の売上がある。太陽光発電システムの売上だけでなく、さらに設置、運送、コンサルティングなどへ波及効果が見込まれる。需要側においても、製造された太陽光発電システムを家庭用として導入した際、固定価格買取制度を利用すれば 10 年以内で導入にかけた費用を回収できることとなる。さらに、PV 技術の高度化を図るため研究開発基地が新たに設置されれば、設置された地域を中心とする雇用創出や街の経済的発展、加えて PV 技術の周辺技術の開発進展に伴う新産業の拡大も期待できる。また、スマートグリッドへの導入を考えると、たとえば、システム市場や社会市場において、次のような経済的な効果が試算される。

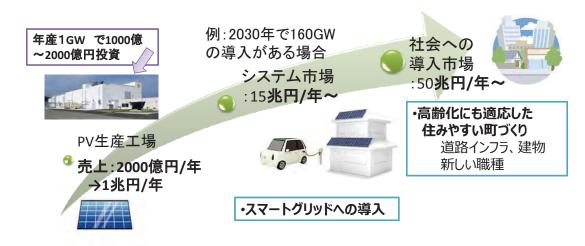


図2.1-2 太陽光発電システムの経済効果の例

- 蓄電池: 160GW の太陽電池を導入し、それを補完するシステムとして蓄電池を導入すると、 10 時間分で8兆円/年(10円/Whの蓄電池利用、2年間で導入)
- ●電気自動車とプラグインハイブリッド自動車:蓄電池のエネルギー密度が向上することで利用量が増加し、それぞれ、50万台/年、300万台/年に販売量増加するとして7兆円/年(電池除く車体200万円/台、電気自動車に20kWh. プラグインハイブリッド自動車に5kWh 搭載)
- ●家のスマートハウス化:スマートハウス仕様により、メータ、各種機器、ソフトウェアの導入で50万円/軒・年かかる。年間新築100万件の半分に導入されるとし1年で0.3兆円

また、高齢化にも適応した住みやすい街づくりに必要な道路インフラ、建物の整備をし、活気ある魅力ある都市にすることで外部からの住民流入・旅行者の訪問などの経済効果により、数十兆円の効果があるだろう。雇用面のみでいえば、PV 生産工場では 1 GW 単位で 1,000 人の直接雇用とその約 10 倍の 1 万人以上の間接雇用の創出が見込める。関連産業への波及効果も含めると 10~30 万人規模の雇用効果が期待できる。

以上に述べた低炭素技術の単体での利用から地域や都市での利用までをも含めた導入・普及効果は、詳細な検討に基づいた定量的な技術シナリオと技術の進展までを考慮した社会・経済シナリオによって把握できるとともに、実現に向けた課題も明らかになる。導入・普及の効果が高いシステム利用のあり方、街づくりへ結び付けていく方法をどのように提案するか、それがグリーンイノベーションへの提案であり、LCSの明るく豊かな低炭素社会構築の本質であると考えており、今後研究活動により明らかにしていく。

#### 2.1.3 低炭素技術の普及に向けて

低炭素技術は、性能とコストが妥当な水準に達していないと世の中に浸透せず、低炭素技術としての真価を発揮できない。低炭素技術の社会への確実な普及を目指すためにはどの程度の性能、どの程度のコストが妥当であるかを定量的に評価し、低炭素技術が入る社会とはどのようなものになるか、具体的なシナリオを示すことが必要である。

そこで、LCS では、「定量的技術シナリオ」についての研究を行っている。技術の構造化による方法論で得られた技術シナリオは、「定量的経済・社会シナリオ」の検討において、技術の進歩を表す重要なインプットとなる。このように定量的技術シナリオを経済・社会システムモデルに統合すること、さらにそこから得られた情報を技術シナリオに還元することで、より技術的根拠に裏打ちされた低炭素社会の姿が見えてくる。そして、単なる技術システムを超えた、地域、都市、世界を視野に入れた大きな社会の中で、低炭素技術を利用した社会像をより具体的に描くことが可能となる(図 2.1-3)。

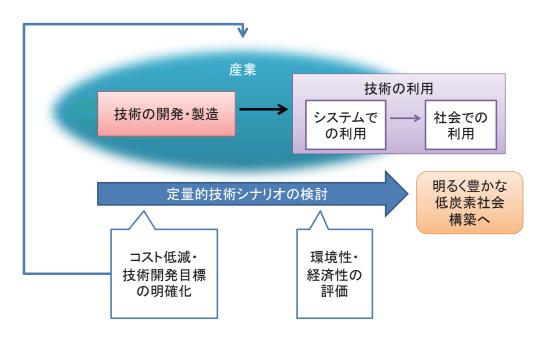


図2.1-3 技術利用の流れの中での定量的技術シナリオの位置付け

## 2.2 低炭素技術の構造化に基づく定量的技術シナリオの構築

## 2.2.1 はじめに

低炭素社会の実現のためには、経済性や環境性の高い技術を組み込んだ社会を設計することが 重要である。そして、社会の低炭素化に寄与する低炭素技術の開発にあたっては、社会全体を理 解しながら、技術の性能などを評価し、必要となる技術の実現の方法とその時期を見通す技術シ ナリオを作成する必要がある。技術シナリオに低炭素技術の進展を定量的に取り込むことによっ て、シナリオ自体の精度や実現可能性を高めることができる。

低炭素技術の進展には、技術の原理探索や原子・分子レベルでの制御等から製品化に至るまで 垂直的な技術確立を行うことが重要である。つまり、技術を構成する個々の要素技術の構造化に 基づいた研究開発及び技術開発が必要となる。

LCSでは、社会の低炭素化に寄与すると期待される太陽電池、燃料電池、蓄電池などのエネルギー関連製品を対象として、それぞれの技術を構成する要素技術を構造化し、それぞれの性能とコストについて具体的な目標とそれを達成するための道筋を検討し、定量的技術シナリオを構築する。

#### 2.2.2 定量的技術シナリオの作成方法

構造化された定量的知識基盤に基づき、コスト、性能などの指標を評価し低炭素技術の発展を経時的に設定した技術シナリオを構築する。図2.2-1に、技術シナリオの位置付けと、技術シナリオを構築するための構造化された基礎情報との関係を示す。LCSが実施している技術の構造化により、具体的な技術課題を抽出し、技術シナリオで用いられる指標と技術課題の関係性を明らかにすることが可能となる。まず、低炭素技術の構造化を行い、低炭素技術の知識を要素技術に分解してそれらを階層的に整理し、製品製造のプロセスを検討する遡上とする。次に、製品製造における様々なプロセスを想定しコスト構造の細部を明らかにする。製造プロセスの評価においては、構造化された要素技術を基に、製造機器を中心とした材料・コスト・プラントの情報を用いて定量的に評価する。ここで、想定したコスト、性能、環境性などの指標の評価を行い、技術シナリオを構築する。

構築された技術シナリオは、経済モデル、都市モデルに反映させ、様々な技術発展や普及に応じた社会影響を明らかにする。また、これらの分析から低炭素技術開発と低炭素社会との関係を明らかにし、必要とされる研究開発課題を特定し、構造化された低炭素技術の知識へとフィードバックする。その結果として、CO<sub>2</sub>の削減効果、経済効果、国民生活へのインパクトなどの評価を通じて、低炭素社会のあり方を定量的シナリオに基づき議論することが可能となる。

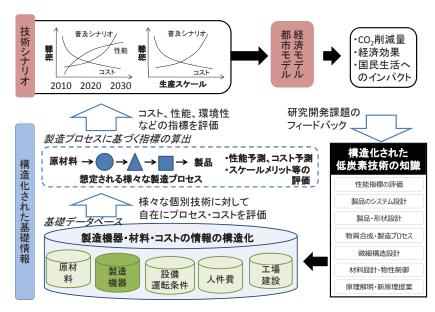


図2.2-1 要素技術の構造化と定量的技術シナリオの位置付け

#### (1) 低炭素技術の構造化

#### ① 要素技術の構造化

構成材料の物性から製品の性能・形状に至る要素技術を整理、構造化を行い、構造化された低炭素技術の知識として蓄積していく。要素技術の構造化の概念図を図2.2-2に示す。物性や新機構などの基礎科学から製品化に至るまでの研究領域を階層的に整理し、要素技術と各要素技術に関わる理論や原理を評価する。1.2節に記した研究課題の公募の際に利用された事例のように、このような構造化された要素技術を評価し、性能向上・コスト低減・環境性改善のための研究開発課題について検証することができる。また、整理された要素技術を基に、製品製造のプロセスを検討し詳細なコスト構造や環境影響評価へと展開していく。



図2.2-2 要素技術の構造化の概念図

## ② 製造プロセスにおける要素技術の整理とコスト構造の評価

太陽電池、燃料電池、蓄電池など、低炭素社会に資する製品を製造するために想定される様々なプロセスを検討し、必要とする製造工程について、製造機器、材料、製品形状、性能などの観点から整理、構造化する。各製造工程においては、性能、コスト、生産規模によるスケールメリット等を検討することにより、コスト構造の細部を明らかにし、性能向上やコスト低下に向けた今後の研究開発・技術開発の具体的な課題を抽出する。

## (2) 定量的技術シナリオの検討のための情報基盤の構築

技術の構造化により得た情報を基に、低炭素技術の社会への確実な普及を促すための目標とすべき性能、コスト、環境性を定量的に評価できる統合的データベースを構築する。

当面、これまで収集した製造機器に関する基礎データを基に、様々な低炭素技術・製品にも適用できるように、拡張性のある製造機器データベース及び機器の仕様の決定と機器コストの算出を効率良く行うための情報基盤を構築する。

## (3)技術の構造化に基づく製造コストと環境性の分析

技術の構造化の結果を踏まえ、太陽電池、燃料電池、蓄電池等についてプロセス設計により具体的に製造プロセスを検討する。性能指標、構成部材とデザイン、製造プロセス、原材料プロセスなどを検討することにより、各製造工程の費目ごとのコスト構成とその製品の製造に関わるCO<sub>2</sub> 排出負荷の分析を行う。

#### ① 製造コスト分析の方法

製造コストは、製造変動費と製造固定費から構成される(表2.2-1)。

製造変動費は、製造量に応じて変動する原材料や電力、燃料、工業用水等に係る費用である。原材料費は、現在の市場価格を採用した。原材料費の市場価格については、たとえば太陽電池プロセスにおけるガラス基板のように、製品の普及に伴う生産量の拡大による市場価格の低減可能性を検討に加えている。

製造固定費は、製造量の増減に関係なく一定に発生する費用であり、設備と人員に分かれる。 設備における費用は工場建設の減価償却費、金利負担費、固定資産税、補修費等を含む。工場建 設費(製造設備と建屋)については、プロセス設計により求めた機器仕様を基に、次の手順で求 めた。機器費及び建屋費を積み上げて算出し、配管、電気、計装等の材料費や各種工事費は機器 費に対する配分比を定めて求め、合わせて工場建設費とした。ただし、工場建設費には土地代は 含まれていない。

人員に関する費用は、製造工場の運転人員を工程ごとの機器数と実績値から推定し、工場は連続稼働を想定し、運転体制を4直3交代制として運転人員数を算出した。なお工場の建設立地は原則として国内を想定した。表2.2-1の備考欄には、製品の製造コスト構成と適用した用役(電力、燃料、工業用水)の単価、設備における年経費率及び1人当たりの人件費を示す。

表 2 . 2-1	製品の製造コス	ト構成
-----------	---------	-----

項目	項目別コスト算出式	備考
製造変動費		
原材料	原単位×単価	
用役 電力	原単位×単価	単価:12円/kWh
燃料	原単位×単価	単価:1.3円/MJ
工業用水	原単位×単価	単価:30 円/m³
製造固定費		
	工場建設費×年経費率/生産量	年経費率:20%
人員	運転人員数×単価/生産量	単価: 400 万円/人年

## ② 環境性(CO<sub>2</sub> 排出負荷)の評価の方法

環境性の評価については、 $CO_2$  排出負荷を対象とする。製品の製造に伴う  $CO_2$  排出負荷の算出法を表 2.2-2に示す。適用した  $CO_2$  排出原単位は、カーボンフットプリント  $Ver3^{-1}$  など公開されているライフサイクルアセスメント(LCA)データベースを用いた。各プロセスで適用した  $CO_2$  排出原単位の共通データを表 2.2-3に示す。

表 2. 2-2 製品製造時における 00。排出負荷の算出法

	算出式	備考
原材料起源	原材料原単位×CO <sub>2</sub> 排出原単位	
用役起源	用役原単位×CO <sub>2</sub> 排出原単位	
設備起源	設備重量×CO2排出原単位 製造設備規模	設備重量: SUS 材とし、機器重量の2倍として算出

表2.2-3 002排出原単位の共通データ

	CO <sub>2</sub> 排出原単位
公共電力	0.479 kg-CO <sub>2</sub> /kWh
ステンレス鋼冷延鋼板 2B	3. 45 kg-CO <sub>2</sub> /kg
生コンクリート	346 kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>

## ③ 製品寿命

電池では、電池寿命がコストの評価に大きく影響する。本検討では、太陽電池では寿命20年、 燃料電池(固体酸化物形燃料電池)では寿命10年、蓄電池(リチウムイオン電池)では寿命10年(充 放電サイクル数3,500回)として計算した。

## 2.2.3 実施内容

太陽電池、燃料電池、蓄電池について、それぞれの技術の構造化に基づいた定量的技術シナリオを2.3節から2.5節に記す。なお、2.6節に個別製造機器の仕様、価格、重量などの製造機器情報のデータベースとそれを活用するための情報基盤を紹介する。

## 【文献】

1) 社団法人産業環境管理協会 CFP 制度試行事業事務局,カーボンフットプリント制度試行事業 用 CO<sub>2</sub> 換算量共通原単位データベース(暫定版)ver. 3,

http://www.cfp-japan.jp/calculate/verify/data.html

## 2.3 要素技術構造化に基づく定量的技術シナリオの構築(1):太陽電池

## 2.3.1 概要:太陽電池の製造コストの削減に向けて

太陽光発電の市場は近年急激な変化を遂げており、世界の年間生産量は 2011 年には 20GW を超えている。一方で、現在の普及は導入補助金や固定価格買取制度等の施策により支えられている。太陽光発電の電力コストを他の電力コストと競争可能な価格にまで削減させるためには、太陽電池モジュール、すなわち太陽電池パネルの製造コストを現在の 100 ~ 150 円 /W から、50 円 /W 以下に大幅に削減する必要がある。

そこでLCSでは、太陽電池のコスト削減に向けた定量的な検討を行うこととした。LCSではまず、プロセス設計により太陽電池の製造プロセスに係る要素技術の構造化を行った。続いて各種太陽電池の発電性能を比較検討し、算出された製造コストとその低減可能性、環境負荷(CO<sub>2</sub>排出量)に基づき技術シナリオを提示した。

太陽電池は光吸収層の材料ではシリコン系、化合物系、有機系などがあり、素子の形態から結晶、微結晶、アモルファスなど、結晶構造も異なる。また、薄膜や積層したタンデム型、球状、量子ドット型、集光型など、その形態も材料も様々である。LCSではまず、現在主流である多結晶シリコン太陽電池を対象として、製造プロセスのコスト構造を明らかにした。また、技術シナリオを構築し、技術進歩・高効率化・量産化によるコスト削減の効果を検証した。多結晶シリコン太陽電池の技術シナリオの試算では、太陽電池パネルの製造コスト 90 円/W以下へのコスト削減の可能性が示された。保護ガラス等の原材料費の割合が高いため、さらなるコスト削減に関して原料費についても考察を行った。次に、シリコン系に加え、化合物系などの近年普及し始めた太陽電池技術に関しても検討し、50 円/Wに向けたコストシナリオを設定し、太陽電池における技術シナリオをまとめた。

#### 2.3.2 多結晶シリコン太陽電池のプロセス設計による太陽光発電技術シナリオの構築

多結晶シリコン太陽電池を対象として、発電部分の構成材料と結晶構造に基づく発電性能、寿命、環境負荷  $(CO_2$  排出量)、製造プロセスについて、太陽電池モジュールの要素技術を検討し評価した結果を示す。

#### (1)技術の構造化に基づく製造コストの算出

多結晶シリコン太陽電池モジュールの製造プロセスを、多結晶シリコンの原料製造工程、ウェハ製造工程、セル製造工程、モジュール製造工程に分けて設計した(図2.3-1)。これらの工程から原料製造のプラントやモジュールの生産プラントを設計し、プラントごとに係るコストの試算を行った。

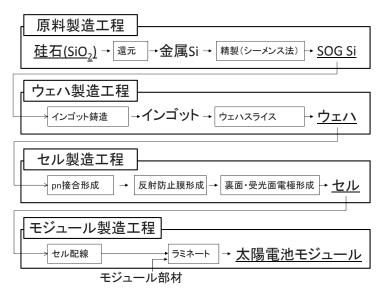


図2.3-1 多結晶シリコン太陽電池モジュールの製造プロセス

原料製造工程は、硅石の採掘からシーメンス法を用いて 6N 以上の純度に精製されたシリコン (SOG-Si; Solar Grade Silicon) を生産する工程までの範囲である。この工程で製造される SOG-Si 製造コストは 3.1 円 /g と試算され、そのうちの 6 割が用役費のうちの電力費であった。

ウェハ製造工程、セル製造工程、モジュール製造工程においてはモジュール年間生産量を1GWとし、表2.3-1に示した設計条件による生産プラントを設計した。試算の結果、太陽電池モジュールの製造コストは現状では144円/Wとなり、費目別で見たその内訳は原材料費が75%、設備費が20%となった。このように原材料費が占める割合が高いため、多結晶シリコンの使用量を削減する技術、保護ガラスなどモジュール部材の軽量化など原材料を削減する技術や、太陽電池の高効率化等により発電量当たりの原材料単価を下げることが望まれる。

プラント規模	1GW/年			
定格出力	180W/枚			
モジュール変換効率	14%			
モジュールサイズ	1. 28m²			
セル枚数	48 枚/モジュール			
ウェハ寸法	156mm × 156mm × 180 μ m			
 インゴット重量	400kg			

表2.3-1 多結晶シリコン太陽電池の生産プラントの設計条件

#### (2) コスト低減の可能性の検討

次に、セル設計、製造プロセス、変換効率に基づく感度解析を行い、技術シナリオの構築を行った。ここでは各要素技術を、スケールアップ効果 (SM: Scale Merit)、変換効率向上 (EI; Efficiency Improvement)、製造技術向上 (TI; Technology Improvement) に分類しそれぞれの効果を比較した (図2.3-2)。各工程での製造技術を Case 1 (2000 年水準)、Case 2 (現在)、Case 3 (近未来:現在導入可能な技術) として設計した。スケールアップ効果では、年間生産規模10MW ~ 100GW のプラントを設計して工場規模の拡大に伴うコスト削減量を算出しており、機器の

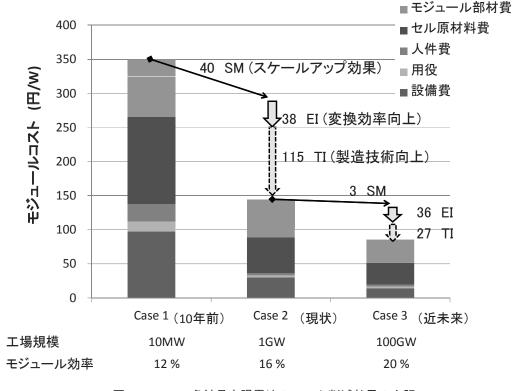


図2.3-2 多結晶太陽電池のコスト削減効果の内訳

大型化、工程の自動化などを加味して検討した。各製造プロセスにおけるスケールアップ効果を検証した結果、年産 1 GW 程度までは工場規模の拡大に伴う製造機器の大型化や量産体制の拡大による製造コスト削減効果が確認された。Case 3 では 90 円 /W 以下へのコスト削減が示されたが、大規模生産によるコスト削減効果は小さい。過去の検証(1993 ~ 95 年)においても、年産 1 GW 程度がスケールアップ効果の上限とされており  $^{11}$ 、製造技術の進歩による試算結果に与える影響は少ない。生産プラントが年産 1 GW を超えた現在では、今後の技術進捗を含めても大幅なコスト削減が難しいことが分かった。

さらなるコスト削減には、原材料費の削減やシステム全体での費用削減、他の太陽電池デザインにおける検討が必要となる。

#### (3) 原材料費の削減やシステム全体での費用低減の検討

多結晶シリコン太陽電池の原材料費の内訳を図2.3-3に示す。SOG-Siに係るコストは原料製造工程から算出しており、その他の材料は市場価格を採用している。原材料費のうち、セル原材料費(SOG-Si、ウェハ製造工程原材料費、セル製造工程原材料費)が半分を占めており、シリコン消費量の削減などが課題となる。また、原材料費の残りの部分はモジュール部材の価格(モジュール製造工程原材料費)が占めるが、主要な部材である保護ガラスの価格が原材料費全体の24%を占めている点も着目に値する。現在の太陽電池用保護ガラスの流通量は世界で200万トン規模であり、4100万トンの強化板ガラスの市場と比べても規模が小さい。しかし、今後年間生産量が10倍以上になると見込まれており、太陽電池モジュールに対応した保護ガラス生産が可能となる。仮にガラス価格が半減した場合、モジュール変換効率10~20%の太陽電池に対し、15~8円/Wのコスト削減となる。

太陽光発電システム全体においては、太陽電池の周辺システム(BOS: Balance of System)の市場価格を用いて比較したところ、BOSに係るコストは太陽光発電システム全体のコストの半分を占めている。BOSのコストには、架台、インバータ、工事費などがあり、これらは太陽電池のパネル枚数と面積に依存することから、太陽電池が高効率化すると相対的に BOS のコストは下がる。しかし、多結晶シリコンは安定した技術である一方で多結晶シリコンの変換効率の上限とされる 30%に近づいており、大幅な変換効率の向上は望み難い。このような量産に伴う原料価格や、モジュール部材や BOS の軽量化などデザインによる評価も今後さらに検討を進めていく。

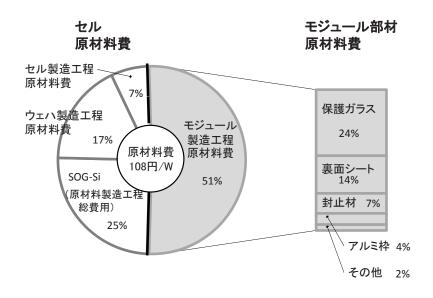


図2.3-3 多結晶シリコン太陽電池の原材料のコスト内訳

#### (4)環境負荷の評価

LCS では、太陽電池製造の原材料と用役消費量、及び製造設備建設に要する鋼材などの使用量からの  $CO_2$  排出量の算出も行っている。多結晶シリコン太陽電池モジュール年産 1~GW のケースでは太陽光発電システムの製造における  $CO_2$  排出量は  $950g-CO_2/W$  であり、原材料(モジュール及び BOS)起因の  $CO_2$  排出量が約 68%を占める(表 2.3-2)。

	$\mathrm{g-CO_2/W}$	
原材料 (モジュール)	460	
原材料 (BOS)	190	
用役	290	
設備	10	
合計	950	

表2.3-2 多結晶シリコン太陽光発電システムの製造における CO。排出量

## 2.3.3 各種太陽電池の評価と技術シナリオ

LCSでは多結晶以外のシリコン系や化合物系についてもプラント設計と各要素技術についての技術シナリオの評価を実施している。

単結晶シリコン、多結晶シリコン、単結晶シリコンにアモルファス製膜を加える系(単結晶+アモルファスシリコン)、化合物系(CIGS 薄膜太陽電池製造プロセス:図2.3-4)において、同面積のモジュールを年間生産1GWとするプラントの設計を行った。シリコン系太陽電池の製造コスト内訳を表2.3-3に示す。単結晶シリコンでは、モジュール変換効率が高効率となるがシリコン製造の歩留りが低く、設備費が高くなるため、多結晶シリコンと比較するとワット単価ではほぼ同等の製造コストとなった。また、単結晶+アモルファスシリコンでは、発電効率は高くなったが、製造コストの低下は期待したほどではなかった。

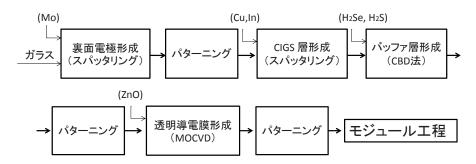


図 2.3-4 CIGS 太陽電池の製造プロセス

表 2 3-3	シリコン系太陽電池のコスト内記	30 比較	(円/W)
1x Z . 3 - 3	ノノコンボ及物甲心のコヘド内間	バ Vノ レレ 半义	(     /     /   /

太陽電池種類 (モジュール変換効率)	多結晶 (14%)	単結晶 (17%)	単結晶+ アモルファス (19%)
セル原材料費	53	52	49
モジュール部材費	55	45	40
用役費	3	6	5
設備費	30	34	33
人件費	3	5	5
合計	144	142	132

多結晶シリコン太陽電池(モジュール変換効率 14%)と CIGS 薄膜太陽電池(モジュール変換効率 13%)のコスト内訳の比較を図 2.3-5 に示す。設備費・人件費の割合は同等である一方、CIGS 薄膜太陽電池では、相対的にモジュール部材のコストが高く、高効率化によるコスト削減が見込まれる。そこで、CIGS 薄膜太陽電池において効率の向上によるコスト削減の検討を行った²)。高効率化による CIGS 薄膜太陽電池のコスト内訳を表 2.3-4 に示す。製膜技術などの向上、さらにタンデム構造による高効率化を達成することにより、モジュール部材のコスト削減なども含めると 50 円 /W の製造コストの達成が視野に入る。これらについて詳細な検討を進めている。

今後、その他の薄膜太陽電池や集光型太陽電池の分析も行い、各種太陽電池のコスト削減のポテンシャルと開発課題を明らかにしていく。また、BOSにおいては市場価格による推算を行っているが、より詳細な検討を進めていく。

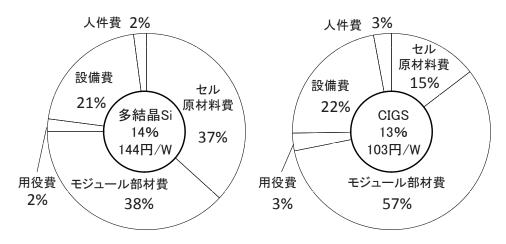


図2.3-5 多結晶シリコン(左)と化合物系(右)のコスト内訳の比較

太陽電池種類	CIGS-1:現在	CIGS-2:高効率	CIGS-T:タンデム
(モジュール変換効率)	(13%)	(18%)	(30%)
セル原材料費	15	11	13
モジュール部材費	59	43	26
用役費	3	3	2
設備費	23	16	12
人件費	3	2	2
合計	103	75	55

表 2.3-4 CIGS 薄膜太陽電池のコストの内訳

# 2.3.4 まとめと展望

シリコン系太陽電池のコスト削減と化合物系太陽電池の高効率化を検討し、2020年、2030年の太陽電池のシステムコスト(モジュールコスト)を175円/W(75円/W)、120円/W(50円/W)としたコストシナリオを設定した(表2.3-5)。今後、太陽電池製造からシステム設置までの各プロセスにおけるコスト構造を詳細にモデル化し、生産量の拡大及び新規プロセス導入効果、デザインの種別の技術を検証していく。また、高効率化や長寿命化における技術なども評価し、統合的なコスト検討を進めていく予定である。

表 2.3-5 コストシナリオ

(円/W)

(単位:円/W)

	2012 年	2020 年	2030 年
モジュール	100	75	50
周辺システム (BOS)	150	100	70
システム全体	250	175	120

# 【文献】

- 1) 山田興一,小宮山宏,太陽光発電工学,日経 BP, 2002.
- 2) K. Yamada, T. Inoue, K. Waki, Future Prospects of Photovoltaic Systems for Mitigating Global Warming, World Engineers' Convention 2011 in Geneva, 2011.

# 2.4 要素技術構造化に基づく定量的技術シナリオの構築(2):燃料電池

# 2.4.1 概要:燃料電池の普及に向けて

2011 年 10 月、家庭用定置型電源として固体酸化物形燃料電池(以下、SOFC と記す。)が日本で発売された。2010 年には既に固体高分子形燃料電池(以下、PEFC と記す。)も家庭用に導入が始まっており、現在、燃料電池は社会への浸透のまさに黎明期にあるといえる。

燃料電池の発電効率は非常に高い。現状の家庭用 SOFC の発電効率は約 45%であり、一般の火力発電所とほぼ同じレベルに達している。また、燃料電池は規模にかかわらず高い効率で発電可能であるという特徴も備えている。燃料電池は分散電源としても火力発電の代替技術としても潜在能力を有することから、低炭素社会の実現のみならず、東日本大震災や原発事故後の電力の安定供給確保に貢献するためにも、普及に向けた対策の提言と行動が必要不可欠である。

LCS では、燃料電池の普及に向けて、燃料電池の発電性能、環境負荷(CO<sub>2</sub> 排出量)、製造コスト及び今後の製造コスト低減の可能性について定量的な評価を行っている。燃料電池は大規模発電、家庭用双方の用途において潜在性を有するが、LCS ではまず発電効率向上の潜在性の高い家庭用燃料電池の SOFC を対象とした。

本節では、家庭用 SOFC システムのセル設計と材料開発の観点から、①材料物性からセル性能に至る技術の構造化を行い、SOFC の発電性能(発電効率、出力密度、寿命)に関する潜在能力について議論した。さらに、②製造設備コスト評価における技術の構造化を実施して製造プロセスのコスト分析を行い、これらから算出される製造コスト、性能、環境負荷に基づいて SOFC の技術シナリオを提示した。これらにより、現状の家庭用 SOFC の発電コストは 74 円 /kWh であるが、発電効率を現状の 45%から 60%に到達させることで発電コストを現在の電力料金(23 円 /kWh)以下の 20 円 /kWh に低減できることが分かった。

## 2.4.2 SOFC の材料物性・セル設計と発電性能の相関

燃料電池の技術シナリオを提示するにあたり、SOFC の技術の構造化に基づく評価を行った。構造化における評価対象は、構成材料、セル設計、発電性能(発電効率、出力密度)、寿命、環境負荷(CO<sub>2</sub> 排出量)及び製造プロセスとし、それらの階層別の分類作業を通じて、構造化に基づく分析を行った。

# (1) 材料物性からセル性能に至る技術の構造化と発電性能の評価

SOFC の発電性能を定量的に記述・予測するうえで、電極、電解質及びインターコネクタ等を構成する材料の物性に基づいたセル構成部材の輸送・反応特性の評価が重要である。格子欠陥構造と粒界・界面構造は、SOFC の各構成部材における輸送現象や反応特性を決定する因子として重要であり、発電性能に大きな影響を与える。一方、セル設計も発電性能に影響を与える主要な因子の一つである。

まずは、①材料物性からセル性能に至る技術の構造化に基づき、燃料電池のセル設計と電極・電解質等の材料物性の両者に対する分析を実施した。家庭用 SOFC システムの基幹であるスタックを評価対象に選び、現状におけるスタックの構成材料の分類及び単セルの数値モデルに基づく発電性能の評価を行ったうえで、単セルの設計(円筒平板型とその発展型であるマイクロチューブ型(図 2.4-1))及び構成部材の物性(電極・電解質材料)の発電性能に対する感度解析を行い、SOFC の潜在的な発電能力について定量的に議論した。以下に主にセル設計がコストと出力密度に及ぼす影響について検討した結果を述べる。

セル構造や発電性能に関する既往報告 $^{1}$  に基づき、基本仕様として円筒平板型単セルから構成される定格 AC 出力 700 Wの家庭用 SOFC スタックを評価対象とした。電極や電解質等の単セル構成部材を表 2.4-1に示す。作動条件は文献 $^{1}$  を参考に設定した(表 2.4-2参照)。マイクロチューブ型単セルについては、単セルの直径を所定の値(直径 2.3 mm 及び 0.8 mm)に設定し、他の条件は円筒平板型と同じとした。また、定量的な発電性能の評価を行うために単セルとスタックの電流 - 電圧曲線及び発電効率についてモデル計算を行った。解析の結果、円筒平板型のスタック重量は約 34 kg であった。セルモジュール、改質器、断熱材、スタックケース等の重量比率の詳細を図 2.4-2に示す。断熱材を含むスタックケースの重量比率が大きく、小型化による材料

重量の低減が効果的であることが示唆される。また、モデル計算から見積もられた発電に対するセル効率 (DC) 及びシステム効率 (AC) は、それぞれ 55% (LHV  $^{\rm A}$ ) 及び 48% (LHV) であった。

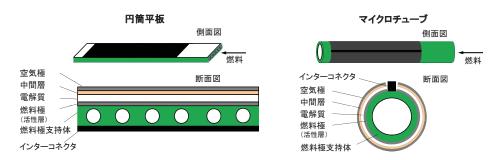


図 2. 4-1 SOFC 単セルの形状

表 2.4-1 SOFC の構成材料

	構成材料
燃料極	Ni-YSZ
電解質	YSZ ( (ZrO <sub>2</sub> ) <sub>0.92</sub> (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>0.08</sub> )
中間層	GDC (Ce <sub>0.8</sub> Gd <sub>0.2</sub> O <sub>1.9</sub> )
空気極	LSCF-GDC (La <sub>0.6</sub> Sr <sub>0.4</sub> Co <sub>0.2</sub> Fe <sub>0.8</sub> O <sub>3</sub> )
インターコネクタ	LCC (La <sub>0.8</sub> Ca <sub>0.2</sub> CrO <sub>3</sub> )
集電材	Steel

表 2. 4-2 SOFC 発電条件

定格 AC 出力(W)	700
DC 出力 (W)	800
平均出力密度(Wcm <sup>-2</sup> )	0. 19
作動温度(°C)	750
燃料利用率(%)	70
スチーム/カーボン比	2. 5

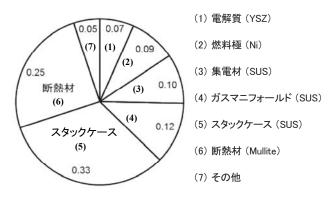


図2.4-2 円筒平板型 SOFC の構成材料の重量比率

## (2) 低コスト化に関するセル設計と材料物性が及ぼす影響評価

SOFC の低コスト化を実現するためには、SOFC スタックの小型化について検証する必要がある。SOFC スタック体積当たりの出力密度の情報は、SOFC の製造コスト低減のよい指標となり得る。その観点から、セル設計と電極・電解質材料物性のそれぞれが出力密度に与える影響について検討を行った。円筒平板型を基準セルとして、マイクロチューブ型単セル(直径 2.3 mm 及び 0.8 mm)について、電極出力密度一定の条件での体積出力密度の評価を行ったところ、それぞれ円筒平板型の同条件での値の約 1.3 倍、1.9 倍となり、セル設計の変更の効果は比較的顕著であることが分かった。一方、材料物性の感度解析の一例として、空気極について検討した。空気極の性能は、電極材料表面の格子欠陥濃度との相関が予想され、その仮説に基づき空気極の交換電流密度を、現在使用されている材料の最大 10 倍に設定した場合、体積出力密度はたかだか 1.2 倍程度であることが分かった。これらの結果から、SOFC の出力密度の向上、すなわちセルの小型化による低コスト化に向けて、材料開発の必要性と共にセル設計の重要性が定量的に示された。

#### 2. 4. 3 技術の構造化に基づく SOFC の技術シナリオ

# (1)技術の構造化に基づく製造コストの算出

上述のセル設計、材料物性の影響評価に加え、製造プロセスの情報を加えることで、SOFC の2020-2030 年の将来を見据えた技術シナリオを描くことができる。ここでは、製造設備コスト評価における技術の構造化の検討結果に基づき SOFC の技術シナリオについて述べる。

現状では家庭用燃料電池システム (700 W) の導入には390万円 /kW のコストがかかる。製造プロセスを図2.4-3に示す。年間の生産規模を10万台、100万台及び1000万台の3ケースを設定し、家庭用700 W 円筒平板型 SOFC スタックの製造コスト分析を行ったところ、それぞれ約64,000円、41,000円、38,000円の値が得られた。図2.4-4と図2.4-5に、それぞれ円筒平板型 SOFC の原材料費の内訳とそのコスト構造(原材料費、用役費、設備費及び人件費:図には年産10万台と100万台の2ケースを掲載)を示す。

これらの結果を踏まえると、生産規模の拡大及び SOFC の出力密度の向上を考慮することで、SOFC のシステムコスト(補機と給湯設備を含む)は、将来の生産規模を年産 100 万台に設定した場合、現状の 10 分の 1 以下に低減することが可能であることが示された(390 万円 /kW  $\rightarrow$  36 万円 /kW)。なお、SOFC のシステムコストは、補機と給湯設備のコストをそれらの構成材料の重量から概算し、将来の補機と給湯設備の合計コストを、700 W のシステムの場合では最大約 20 万円程度まで低減できると仮定して、スタック、補機及び給湯設備の合計額から算出した。図 2.4-4より、材料コストにおける断熱材と電解質の比率が比較的大きく、量産効果による断熱材の材料費の低減や薄膜化技術の進展による電解質の材料費の低減が期待できる。

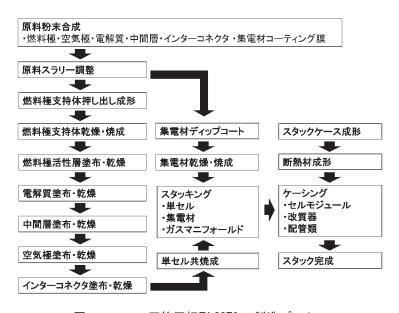
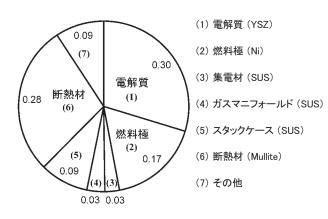


図 2.4-3 円筒平板型 SOFC の製造プロセス



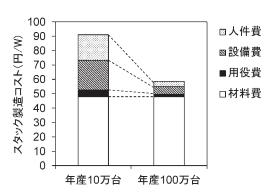


図2.4-4 円筒平板型 SOFC の構成材料のコスト比率

図2.4-5 円筒平板型 SOFC のコスト構造

## (2)環境負荷の評価

製造プロセスにおける  $CO_2$  排出量を見積もったところ、年産 100 万台のケースでは 210 kg $-CO_2/$  スタック (300 g $-CO_2/$ W) の値が得られた。その内訳を表 2.4-3 に示す。一方、現状の家庭用 SOFC システムの発電による年間  $CO_2$  排出量は約 2 トンと見積もられるため、製造時の  $CO_2$  排出量と発電時のそれとを比較すると、後者の寄与が著しく大きい。したがって、この分析結果に基づくと、発電効率の向上による  $CO_2$  排出量の低減の寄与が大きいことが示唆される。

表 2 . 4-3 SOFC スタック製造時の CO<sub>2</sub> 排出量

	_				
	CO <sub>2</sub> 排出量				
	(kg/stack) (g/W)				
原材料	149	213			
用役	57	81			
設備	4	6			
合計	210	300			

#### (3) 定量的技術シナリオの提示

家庭用 SOFC システムの発電効率と発電コストの相関を表 2.4-4に示す。表に示した値は、システム寿命 10 年、年間発電量約 5,000kWh、都市ガスの費用 130 円 /Nm³、構成機器の年経費率 0.1 の前提条件で計算した結果である。なお、発電コストを計算する際、コジェネレーションによる廃熱回収分(現状:発電効率 45%;廃熱回収効率 30%)についても考慮し、回収熱量の 3分の 1 が必要電力量に相当すると仮定して計算を行った(総合効率:現在 75% →将来 85%とした)。表 2.4-4 の結果に示すように、現状の発電効率(45%)での発電コスト(74 円 /kWh)は、生産規模の大幅な拡大によって将来 23 円 /kWh 程度まで低減が可能である。さらに、発電効率を 60%以上まで向上させることで、現在の電力料金(23 円 /kWh)以下の発電コスト(20 円 /kWh 以下)に低減が可能であることが分かる。現在、発電効率 60%の 1 kW 級 SOFC が報告されており 3)、 2030 年の将来ケースにおいて発電効率 60 ~ 70%の量産レベルでの SOFC システムの実現は十分 可能であると判断する。

表2.4-4 発電コストの発電効率依存性

発電効率%	燃料コス	ト(円/kWh)	システムコス	スト(円/kWh)	発電コス	ト(円/kWh)
LHV	現在	将来	現在	将来	現在	将来
45	19	18	55	5. 1	74	23
60	16	15	55	5. 1	71	20
70	15	14	55	5. 1	70	19

<sup>※</sup> 総合効率 (発電効率+廃熱回収効率) は現状 75%、将来 85%の一定条件を仮定した。

## (4) 今後の研究・開発の方向性

このように技術の構造化の検討から、SOFC の普及拡大に向けての定量的かつ現実的な目標設定 (定量的技術シナリオ) が見えてくる。SOFC のコスト低減においては、生産規模のスケールメリットと共に発電効率と出力密度向上の寄与が依然として大きい。今後の技術開発を進めるべき項目としては、高出力・高効率と高耐久性を両立する構成材料 (電極、電解質、インターコネクタ等)の設計と探索、三相界面・異種接合界面の現象理解と体系化、セルデザインと高速製造プロセスの検討が必要であり、これらを踏まえた構造最適化による過電圧の低減と長寿命化 (電極界面の劣化・被毒の経時変化とその抑制等) の進展に向けた研究開発が必要である。

## 2.4.4 まとめと展望

家庭用 SOFC については、生産規模の拡大、セル設計と材料開発による発電効率と出力密度の向上によって、システムコストを現状の 10 分の 1 以下に低減することが十分可能である。2020年と 2030年における家庭用 SOFC の発電効率及び発電コストを示した技術シナリオを表 2.4-5にまとめた。家庭用 SOFC については、今後の着実な研究開発と生産規模の拡大によって、十分に社会導入が可能なコストになり得る。今後は、同様の検討を大型発電用の SOFC コンバインドサイクルについても実施する予定である。また、資源制約に基づく新材料の検討や希土類のリサイクルプロセスについても順次検討を拡張していく予定である。

年	発電効率% LHV	システムコスト (円/W) (円/kWh)		発電コスト (円/kWh)
2012	45	3900	55	74
2020	55	570	8. 2	24
2030	60	360	5. 1	20

表 2. 4-5 SOFC 技術シナリオのまとめ

# 【文献】

- 1) M. Suzuki, et al., Development and field test results of residential SOFC CHP system. ECS Transactions 25, pp. 143-147, 2009.
- 2) T. Iwamoto, Japan patent, P. 2009-87539A, Sept 27, 2007.
- 3) R. Payne, et al., Generating electricity at 60 % electrical efficiency from I-2 kWe SOFC products. ECS Transactions 25, pp. 231-239, 2009.

# 【用語】

A) LHV (Lower Heat Value) 低位発熱量

燃料の燃焼の際に発生する水の状態(液体、気体)によって燃焼熱の値が異なる。液体状態の水の場合、水の潜熱の分だけ高い燃焼熱が得られるので、その場合を高位発熱量(Higher Heat Value: HHV)と呼び、水が気体の状態の場合の燃焼熱を低位発熱量(LHV)と呼ぶ。発電効率を算出する際に、HHVと LHV の選択によってその値が異なる。

# 2.5 要素技術構造化に基づく定量的技術シナリオの構築(3):蓄電池

# 2.5.1 概要:蓄電池の製造コスト削減に向けて

低炭素社会における蓄電池の役割は、主に再生可能エネルギー(太陽光発電、風力発電)及び次世代自動車に電力貯蔵機能を持たせることで、エネルギー利用効率を高めることにある。蓄電池は自動車用鉛蓄電池をはじめ、モバイル機器やハイブリッド車、電気自動車(EV)など用途拡大に伴い、小型・軽量なニッケル水素電池やリチウムイオン電池などが開発・利用されてきた。震災や原発事故後、電力供給の安定化の議論が始まっているが、そのなかでも再生可能エネルギーの普及・拡大に伴い、定置用蓄電池は電力負荷平準化や余剰電力貯蔵の役割として期待されている。

そこで LCS では、現在、最も多く蓄電池として使用され、今後も更なる利用拡大が期待されるリチウムイオン電池を対象としてそのコスト削減に向けた定量的検討を行うこととした。まず、円筒型リチウムイオン電池の製造プロセスの構造化を行い、コスト構造及び環境負荷( $CO_2$  排出量)の計算を行った。続いてコスト低減の可能性を検証し、技術シナリオのうちコストシナリオを提示した。本検討は、製造コスト低減要素とその効果を明らかにし、その結果からコスト低減に向けた研究開発課題を提案することに特徴がある。

これまでの検討の結果、年産 1  $GWh_{ST}$  ( $Wh_{ST}$ : 蓄電池 1 回の充放電容量 (単位: Wh) を示す)の製造コストは 19 円 / $Wh_{ST}$  であり、そのうち原材料費が 7 割を占めていた。また、2020 年の製造コストは現状から生産規模拡大と製造収率改善、電池の高性能化を図ることにより 10 円 / $Wh_{ST}$  まで下げることが可能で、2030 年では電池のさらなる高性能化により 8 円 / $Wh_{ST}$  までコスト低減することが分かった。しかし、蓄電池の普及に向けては格段の製造コスト低減が必要であり、そのためにはより高エネルギー密度で充放電効率に優れた正・負極活物質をはじめとする材料開発、製造プロセス及び装置の高効率化が重要な研究課題となる。

# 2.5.2 構造化手法に基づくリチウムイオン電池の製造コスト

# (1) 製造プロセスの構造化に基づく製造コストの算出

蓄電池コストシナリオ作成に向けて、LCS ではまず電池仕様、生産規模及びプロセスを構造化することにより、リチウムイオン電池の製造コストを求めた。コスト算出の対象とする電池は、現在の主流である正極材にコバルト酸リチウム、負極材に黒鉛を用いた円筒型リチウムイオン電池とし、その電池構成材料は図 2.5-1に示す重量割合で構成され、電池性能はエネルギー密度が 200Wh<sub>ST</sub>/kg(8.6 Wh<sub>ST</sub> /個)であるとした。電池の単一工場生産規模としては、2010 年頃から年産 1 GWh<sub>ST</sub> 超の建設実績がある。そこで、本試算では EV 向けや民生用の更なる市場拡大を想定し、図 2.5-2に示す製造プロセスを用い、単一工場で年産  $10\text{GWh}_{\text{ST}}$  を基準ケースとして、製造コスト及び環境負荷( $CO_2$  排出量)を求めた。なお基準ケースにおける製造収率は、プロセス全体で電極活物質に対し 70%と設定した。

コスト算出の結果、年産10GWh<sub>ST</sub>の円筒型リチウムイオン電池製造コストは図2.5-3の基準ケースに示すように17円/Wh<sub>ST</sub>となり、費目別にみるとその構成は製造変動費のうち原材料費、用役費が77%と4%、製造固定費のうち設備費、人件費が15%と3%であり、原材料費の割合が非常に大きい。原材料費の内訳は図2.5-4(a)に示すように、正極材料、負極材料、セパレータ、電解液がそれぞれ53%、19%、13%、11%を占めており、正極材料の割合が大きい。また、設備費のうち製造機器費の工程別の内訳は図2.5-4(b)に示すように、電池組立・検査工程、負極材製造工程がそれぞれ43%、19%、14%、11%を占めている。

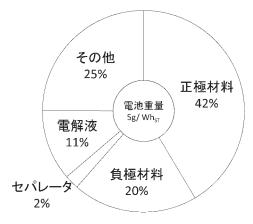


図2.5-1 リチウムイオン電池構成材料の重量割合

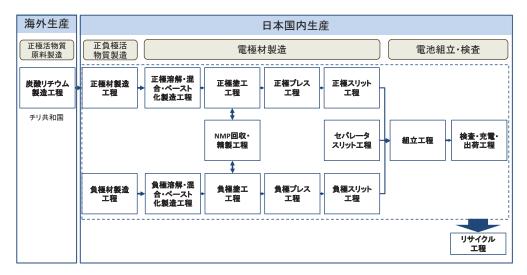


図2.5-2 リチウムイオン電池製造プロセス

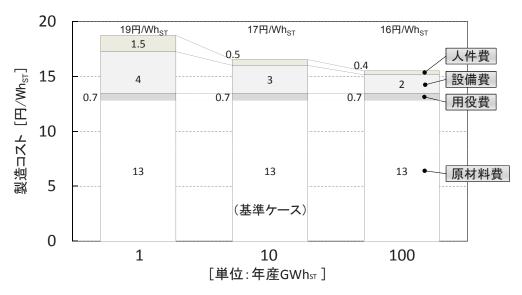


図2.5-3 生産規模によるリチウムイオン電池製造コストの変動

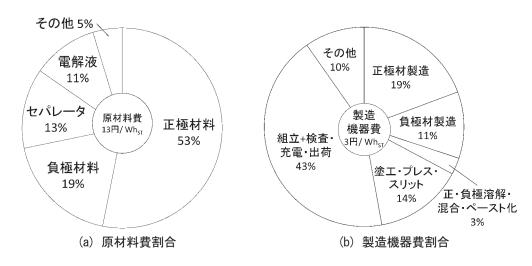


図 2.5-4 年産 10GWh<sub>ST</sub> リチウムイオン電池の原材料費及び製造機器費割合

#### (2) 製造コスト低減の可能性の検討

生産規模、製造収率改善、電池高性能化の効果について検討を行った。生産規模については、基準ケースを中心に年産 1  $GWh_{ST}$  と  $100GWh_{ST}$  の製造コストを算出し、その結果を図 2 . 5 – 3 に示した。各生産規模における製造コストは、年産  $10GWh_{ST}$  の 17 円  $/Wh_{ST}$  に比べ、年産  $1GWh_{ST}$  では 19 円  $/Wh_{ST}$  に、年産  $100GWh_{ST}$  では 16 円  $/Wh_{ST}$  であった。次に、製造収率改善では、電極材製造工程での装置性能向上や操作の改善を見込み 90%まで向上するケースを検討した。さらに電池高性能化では、コバルト系電池からエネルギー密度が 1.3 倍向上する( $200Wh_{ST}/kg$  から  $250Wh_{ST}/kg$ )ニッケル系電池のケースを検討した。以上の製造収率改善及び電池高性能化により、製造コストはそれぞれ 20%の低減となり、その結果 17 円  $/Wh_{ST}$  から 10 円  $/Wh_{ST}$  (図 2 . 5 – 5 , 2020 年ケース)となった。さらに、固溶体系正極材料や 10 円 10 で、エネルギー密度を 1.4 倍向上する(10 の 10 の 10

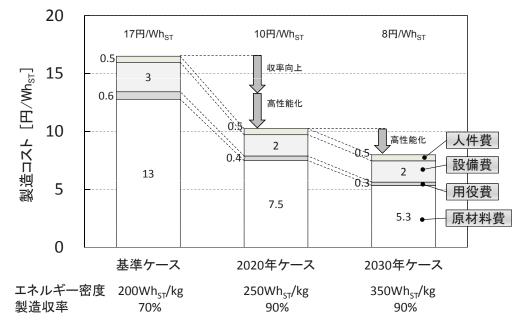


図2.5-5 製造収率向上及びエネルギー高密度化による年産 10GWh<sub>st</sub> リチウムイオン電池製造コストの低減

# (3)環境負荷の評価

次に、蓄電池の環境負荷を検討するため、電池製造に関する原材料と用役消費量、製造設備建設に要する鋼材などの使用量から  $CO_2$  排出量を算出したところ、基準ケースでは  $121g-CO_2/Wh_{ST}$  であった。 $CO_2$  排出量の内訳を表 2. 5-1 に示す。

公 2. 0 1 列口に 6517 6 千座 10 dmis 7 7 7 2 1 7 7 2 电心表 追納 07 002 所口		
CO <sub>2</sub> 排出量 [g-CO <sub>2</sub> /Wh <sub>ST</sub> ]		
原材料	73	
プロセス/用役	36	
設備	12	
合計	121	

表 2.5-1 現在における年産 10GWh<sub>ST</sub> リチウムイオン電池製造時の CO<sub>2</sub> 排出量

# 2.5.3 蓄電池のコストシナリオと技術的課題

リチウムイオン電池の製造コスト算出結果を用いて、蓄電池のコストシナリオを作成した。また、その結果から蓄電池コスト低減の課題について検討を行った。

蓄電池のコストシナリオを表 2.5-2に示す。現状(2012年)の製造コストは、図 2.5-3に示す年産 1  $GWh_{ST}$  である 19 円  $/Wh_{ST}$  と想定した。2020年の製造コストは、基準ケースから製造収率改善と電池高性能化により 10 円  $/Wh_{ST}$  となり、2030年は、さらなる電池高性能化により、製造コストが 8 円  $/Wh_{ST}$  まで低減する(図 2.5-5)。

リチウムイオン電池の製造コスト低減では、図2.5-3に示す基準ケースで77%を占める原材料費をいかに下げられるかが重要である。原材料費低減の方法として、電池エネルギー密度の向上(高性能化)がある。電池の高性能化(200Wh<sub>ST</sub>/kg から250Wh<sub>ST</sub>/kg に向上)により、正極材製造に要する原材料量が20%程度減少するとともに原材料をコバルトからニッケルに代替することで単価も低くなることから、正極材の原材料費割合も53%から36%まで減少する。さらに電池の高性能化は、各製造機器の必要処理量が少なくなり装置サイズも小さくなることから、設備費の低減となる。電池のエネルギー高密度化につながる材料開発は、原材料費の低減だけではなく、製造設備費の低減につながることからも低コスト化に向けて重要な研究課題である。具体的には、ニッケル系正極活物質の充放電効率向上や、より高エネルギー密度で低価格な材料開発、炭素系負極をはじめとする負極活物質の高容量化及び充放電効率向上は重要な材料開発課題となる。設備費は、図2.5-3に示すように生産規模を10倍とした場合、約30%のコスト低減となった。これは最新鋭設備を前提に算出したものである。以上から材料開発、製造プロセス及び装置の高効率化により、さらに大きなコスト低減が期待できる。

更なる原材料費のコスト低減に向けては、今後のリチウムイオン電池普及・利用拡大に伴い、正・ 負極活物質、セパレータ、電解液の生産量拡大による原材料市場価格の低減が期待できる。また、 電池の長寿命化は電池のライフサイクルコスト低減につながる重要な課題である。

#### 2.5.4 まとめと展望

現在と 2020 年、2030 年における蓄電池のコストシナリオを表 2.5-2に示す。リチウムイオン電池の製造コストは、生産規模拡大、製造収率改善や電池高性能化により 2030 年には 8 円/ $Wh_{ST}$  まで低減するが、電力負荷平準化用途等での蓄電池普及に向けては格段の製造コスト低減が必要となる。蓄電池の低コスト化に向けた研究課題としては、より高エネルギー密度で充放電効率に優れた正・負極活物質をはじめとする材料開発、製造プロセス及び装置の高効率化を進める必要がある。今後は、蓄電池システムでの製造コストと環境負荷( $CO_2$  排出量)を求めていくとともに、ライフサイクルコスト低減につながる電池の長寿命化のための研究課題について検討を進めていく予定である。

表2.5-2 蓄電池コストシナリオ

年	コスト [円/Wh <sub>ST</sub> ]
2012	19
2020	10
2030	8

# 2.6 「製造機器データベース」とそれを活用するための情報基盤の構築

## 2.6.1 概要

製品の製造に必要となる製造機器については、その調達費(機器コスト)が設備費の主要部分を占めていることから、製品の製造コストを推定するためには、製造機器の仕様を決定し、機器コストを算出する必要がある。太陽電池、燃料電池、蓄電池の性能や製造コストを推定するため、LCSでは製造時の物質収支と熱収支に基づいた製造プロセスを設計している。この過程では、従来はブラックボックスだった製造プロセスの細部を明らかにするため、個々の製造機器を積み上げて製造プロセスを設計した。その副産物として、これらの製造機器の性能等とコスト等の関係を示す大量のデータが得られた。これらの製造機器はあらゆる製造プロセスにおいて一般的に用いられているために高い汎用性を持ち、様々な低炭素技術の製造プロセスの検討に適用が可能である。

LCSでは、これらの蓄積された製造機器データを基に、製造機器の仕様の決定と機器コストの算出を容易に行うための基盤として、「製造機器データベース」とそれを活用するための情報基盤を構築している。これらによって、様々な低炭素技術の定量的な技術評価を迅速に行うことが可能となる。

# 2.6.2 「製造機器データベース」の構築

「製造機器データベース」は、製造機器の性能(容量、伝熱面積、単位時間当たりの処理量等)と材質(炭素鋼、ステンレススチール等)、形状(複雑さ)の入力に対して、製造機器のコストや重量等を出力するための式または表からなる。現時点で約20種類、総数約1,300基の製造機器の性能、材質に対するコスト、重量等のデータを収集済みであり、現在さらに必要なデータを集めている。これらのデータを基に、表2.6-1に列挙する製造機器のデータベースを作成する。

## 表2.6-1 データベースを作成する製造機器の種類一覧

タンク、ドラム、反応器、塔(吸収塔、蒸留塔)、熱交換器、ポンプ、 ブロワー、圧縮機、撹拌機、濾過機、粉砕機、分級器、集塵機、混合器、 真空設備等

# 2.6.3 情報基盤の構築

LCSでは、「製造機器データベース」を基にした、製造機器の仕様の決定と機器コストの算出を効率良く行うための情報基盤を構築する。この情報基盤では、製造プロセスに必要な製造機器の仕様の決定と機器コストの算出に関する以下の三つの機能を提供する。

# (1) 製造機器の選定を容易にする製造機器セットの提供

情報基盤では、製造機器の選定を容易に行うための「製造機器セット」を提供する。製造機器セットは、製造工程における混合、蒸発、移送等の様々な操作を行うのに用いられる製造機器のセットである。たとえば、混合操作を行うための製造機器セットは、混合を行う混合器と混合する材料を移送するポンプからなる。情報基盤の利用者は個々の製造機器を選定する代わりに、任意の操作について一つの製造機器セットを選択するだけで済むため、従来よりも容易に製造機器を選定することができる。

# (2) 製造機器の仕様を決める手順の自動化

情報基盤では、各製造機器の性能、材質を自動的に決める機能を提供する。製造機器の仕様の 決定にあたっては、設計段階で与えられるプロセスの仕様に加え、多くの経験知を要求されるこ とが多い。情報基盤では、豊富なプロセス設計の経験者の持つ経験知を反映して定めた計算式を 用い、製造機器の仕様を自動的に算出する。

# (3) 製造機器のコスト、重量等を算出する手順の自動化

情報基盤では、「製造機器データベース」を用い、製造機器の性能、材質を基にコスト、重量 等を自動的に算出する。これらの機能により、情報基盤の利用者は、利用する製造機器セットと その仕様(処理量等)を決めるだけで、製造プロセスで使用する全製造機器の性能、材質、コスト、重量等の一覧を得ることができる。図2.6-1に「製造機器データベース」と情報基盤を用いた、製造機器の仕様の決定と製造機器コスト算出手順の流れを示す。

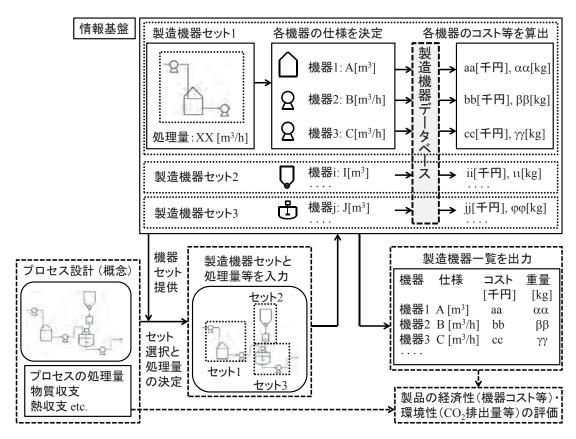


図2.6-1 「製造機器データベース」と情報基盤を用いた製造プロセス評価の流れ

## 2.6.4 特色

「製造機器データベース」と情報基盤を用いることで、製造機器の仕様の決定と機器コストの 算出を容易に行うことができる。特に、製造機器のサイズや処理量を変化させた場合の機器コストの りの算出を容易にするため、製品の生産規模を変化させた場合のスケールアップ効果を見積もる 際に大きな威力を発揮する。

また、「製造機器データベース」は、実験室レベルの小さな製造プロセスで利用される小型のものから、発電所レベルの大規模な製造プロセスで利用される大型のものまでをも網羅しており、あらゆる規模の製造プロセスの設計に活用できる。さらに、「製造機器データベース」で扱う製造機器も、タンク等の機械加工度の低い製造機器から、ポンプ、蒸留塔、熱交換器等の機械加工度の高い製造機器までをも含んでおり、製造機器の複雑さにおいても広い範囲を網羅する。これらの製造機器の多くはあらゆる製造プロセスで一般的に使われており、その高い汎用性を活かして様々な低炭素技術の定量的な技術評価に用いることができる。

なお、「製造機器データベース」や情報基盤で扱う製造機器や製造機器セットは容易に増設できるため、あらゆる製品の製造プロセスに適用するための拡張が可能である。また、各製造機器の性能とコスト等の関係は経年変化等によって変化するが、「製造機器データベース」を更新することでこれらの変化にも容易に対応することができる。

## 2.6.5 今後の展望

「製造機器データベース」とそれを活用するための情報基盤を用いることで、様々な低炭素技術の定量的な技術評価を迅速に行うことが可能となる。今後、できる限り早期にこれらを完成させて低炭素技術の評価に用い、低炭素社会実現のための政策決定の加速に貢献する。

# 2.7 電源構成と CO。排出のケーススタディ

## 2.7.1 はじめに

低炭素社会構築においては、最終需要において  $CO_2$  を排出しない電力の役割は重要である。しかし、石炭・石油・天然ガスといった化石燃料を用いる発電の際には燃焼に伴う  $CO_2$  も発生しており、電力供給システムの低炭素化は低炭素社会実現のための最大のポイントとなっている。そのため、低炭素社会構築のための電力需給シナリオとして、東日本大震災後の原子力依存低減を考慮に入れたシナリオを提示する必要がある。以下では、原子力依存低減によって大きく影響を受けると思われる発電設備容量構成、発電量構成及び  $CO_2$  排出量を指標としたケース分析を行った結果を示した。

# 2.7.2 電力需要

今後の日本のエネルギーシステムに対して、政府によるエネルギー需給見通しなどでは、最終需要における電力の占める割合は大きくなると想定される場合が多かった。しかし、将来に向けて、省エネ意識の高まり、人口、産業構造の変化など、需要減につながる要因もある。また、東日本大震災後の原子力発電の位置付けについては、徐々に依存度を下げるという政策の基本方針は決定しているものの、定量的な供給量と電源の組み合わせについてはいまだに姿が明らかとなっていない。そこで、LCSでは、このような不確実な状況下において、2030年頃を想定した最終電力需要は増加要因と減少要因で相殺されることになり、それほど変わらないと想定した。

## 2.7.3 評価フレームワーク

日本の 2030 年頃を想定し、発電量、 $CO_2$  排出量、コストなどを、積み上げベースで整合的に評価できるフレームワークを作成した。主な入力条件は、各電源の設備容量、発電効率、設備利用率、所内率、送配電損失、 $CO_2$  排出原単位(直接、間接)であり、主な出力は発電量、 $CO_2$  排出量である。なお、発電効率、コストなどのパラメータについては、 $C_1$  3 節から  $C_2$  5 節で述べた技術シナリオと整合性を保つようにしており、長期的にみた火力発電効率の変化についても考慮に加えている。

# 2.7.4 シナリオの概要

検討を行ったシナリオは原子力を維持するケース(以下、「原子力半減ケース」という。)、原子力を縮小し液化天然ガス(LNG)に代替していくケース(以下、「LNG 代替ケース」という。)、及び原子力を縮小し再生可能エネルギーを最大化するケース(以下、「再生可能最大ケース」という。)の3種類である。それぞれのシナリオでの年間電力需要は、現状と比較してそれほど変化しないと想定したので、日本全体で約1,000TWhとほぼ同じになるように設定した。

各シナリオの基本コンセプトは以下のとおりである。

- ・原子力半減ケース:福島事故の影響は考慮するが、リプレース/増設はある程度行われ、電源構成での原子力発電が占める割合は2030年20%程度となるケース
- ・LNG 代替ケース:原子力発電所は寿命 40 年で廃炉とし、減少分を LNG 火力発電で代替するケース
- ・再生可能最大ケース:原子力発電所は寿命 40 年で廃炉とし、再生可能エネルギー(風力、太陽光)が最大限導入され、太陽光発電が大幅に導入されるため、需要側に蓄電池を設置し出力変動を抑制するケース

## 2.7.5 発電設備容量

設備容量評価においてケース間で大きく変動しているのは、原子力、LNG、石炭、太陽光、風力の各発電オプションである。想定をシナリオ別に以下に示すとともに図2.7-1に構成を示す。

#### 原子力

原子力半減ケースでは、2030年に向けて原子力発電所(設備寿命40年と仮定)は徐々に運転を停止していくが、新規設備建設も認め、2030年時点での発電設備容量は29GW程度とした。それに対して、原子力縮小の2ケースでは、新規建設を認めないため設備容量は17GW程度と

なるとした。

#### LNG

原子力半減ケースでは、2030年におけるLNG発電所の設備容量を、既設、新設の合計で74GW程度と仮定した。それに対し、LNG代替ケースでは、LNG火力発電の新設がさらに促進され、合計で89GW程度となるとし、再生可能最大ケースでは、太陽光発電(PV)と風力が大幅導入されるため設備容量を62GW程度とし、設備利用率が多少低下することを仮定した。

#### • 石炭

原子力半減ケース及び LNG 代替ケースでは、2030 年における設備容量を、既設、新設の合計で 31GW 程度と仮定した。それに対し、再生可能最大ケースでは、太陽光と風力が大幅導入されるため設備が新設・更新されないと仮定して、設備容量を 24GW 程度とした。

#### ・太陽光、風力、蓄電システム

原子力半減ケース及び LNG 代替ケースでは、2030 年における太陽光発電及び風力発電の設備容量を、既設、新設の合計で 50GW 程度及び 25GW と仮定し、蓄電池による需要調整は不要と仮定した。それに対し、再生可能最大ケースでは、太陽光が 150GW、風力が 75GW 程度導入されるとした。

再生可能最大ケースにおいては、太陽光発電の大幅導入によって、5月の連休中などの低電力需要時において、昼間に大量の余剰電力が生じる。そのため気象条件が良好な場合、昼間に蓄電し夜間に放電を行うために十分な電池容量を備えることを仮定し、蓄電池容量についても検討を行った結果、最低でも 200GWh 程度の蓄電池容量が必要となると思われる。この場合、2.5節で述べたような kWh 当たり蓄電池コストを1万円とする楽観的想定を採用するとしても、電池寿命を10年程度として、年間 2000億円の潜在的コスト増となる。ただし、必要となる電池容量については、バックアップ必要時間、想定電力需要、電源運用の大幅な変化を考慮する必要があるため、検討は予備的なものである。

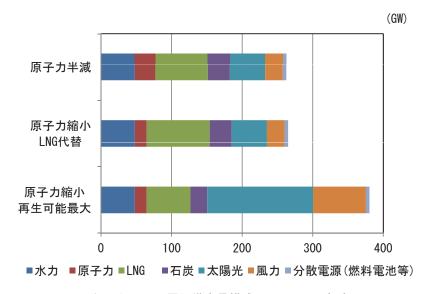


図2.7-1 2030年における発電設備容量構成(LCSによる想定、1GWは百万kW)

# 2.7.6 発電量構成

各シナリオの発電量構成を図2.7-2に示す。太陽光、風力の発電量比率が設備容量比率を大幅に下回るのは、設備稼働率が火力発電や原子力発電より低いためである。なお、評価においては、水力発電の発電量は揚水発電を含め、現状並みとして一定値にしているほか、国際エネルギー機関(IEA)加盟国間での合意「石油火力の新設を認めない」ことに基づき、今後20年を経過した時点では利用できる石油火力発電設備容量はゼロになると仮定している。また、燃料電池などの分散電源のシナリオも各シナリオで共通であり、燃料電池についても、技術シナリオに基づき価格低下が進めば、家庭用電力の数分の1に相当する程度までは導入が進むとしている。

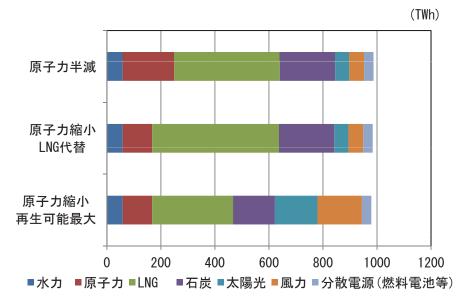


図2.7-2 2030年における発電量構成(LCSによる想定、1 TWh は 10 億 kWh)

# 2.7.7 CO<sub>2</sub>排出量

電源からの  $CO_2$  排出量は、設備運用時における化石燃料燃焼に伴う直接排出と、設備に利用される素材生産などに伴う間接排出に分類される。今回の評価においては両方の要因を含めた。その結果、原子力半減ケース、LNG 代替ケース、再生可能最大ケースの排出量は、それぞれ 3.6 億トン  $CO_2$ 、3.9 億トン  $CO_2$  及び 2.9 億トン  $CO_2$  と試算された(図 2.7-3)。原子力半減ケースと比較して、LNG 代替による  $CO_2$  排出増は 0.3 億トン程度であり、太陽光、風力の大量導入に関する減少は 0.7 億トン  $CO_2$  である。

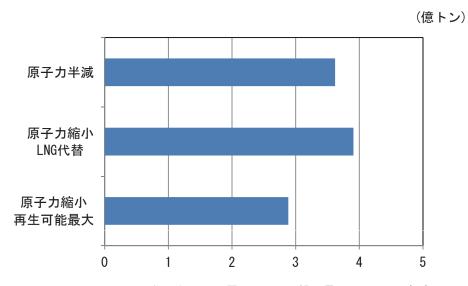


図2.7-3 2030年における発電からのCO<sub>2</sub>排出量(LCSによる想定)

# 2.7.8 今後の課題

今回の報告においては、内閣府国家戦略室エネルギー・環境会議に設置されたコスト等検証委 員会での最新の議論が反映されていないため、発電コストに関する説明は省略した。燃料価格、 設備建設価格などを反映し、容量次第では電力システムコストの大幅増加要因になる可能性がある蓄電池の評価、このコスト増を緩和する太陽光発電や風力発電の発電抑制などを織り込んでシナリオとして示す必要がある。

また、共同火力、特定規模供給事業者、自家発電など、電気事業者以外の評価については記述から除外したが、2030年時点でも一定規模の運用が行われていると思われるため、今後は評価に織り込む必要がある。ただし自家発電は、そのかなりの部分が産業における自家利用であるため、外部供給余力の評価などを経て、最終需要に対する影響を見る必要がある。需要側熱電併給型分散電源における熱需要の扱いも考慮されるべきである。

技術的に  $CO_2$  排出に大きく影響を与える要因として、電気自動車の普及の程度などの電化の進展によるエネルギー部門全体での電力需要、火力発電からの  $CO_2$  回収貯留に加え、石炭ガス化複合発電 (IGCC)、石炭ガス化燃料電池複合発電 (IGFC)、天然ガス燃料電池コンバインドサイクル発電 (NGFC) など高効率火力発電の新設設備に占める比率がある。今後の電力需要に関しては不確実性が大きい。家庭や業務などの民生部門需要は底堅い動きをするのに対し、産業部門需要の動向は産業構造や国際競争力により大きな変動が起こる可能性が高いためである、他の戦略と整合性をとった需要評価は今後の課題である。

今後の検討においては、上記の評価を含め、低炭素社会を実現するための電源システムを、CO<sub>2</sub>排出量、コスト、社会像と併せて示す必要がある。

# 2.8 定量的技術シナリオを踏まえた今後の研究開発の方向性

# 2.8.1 定量的技術シナリオに基づく製造コストの見通し

低炭素技術のうち太陽電池、燃料電池、蓄電池を対象として行った、現在から 2030 年までの経済性(コスト)と環境性(環境負荷)についての定量的な評価とその方法については 2.3 節から 2.5 節で述べたとおりである。これらの定量的評価のうち、低炭素技術を製品化した際の製造原価の計算結果を表 2.8-1に示す。

原価	太陽光発電システム		家庭用燃料電	蓄電池	
年	円/W	円/kWh	円/W	円/kWh	円/Wh <sub>ST</sub>
2012 年	250	25	3, 900	55	19
2020 年	175	18	570	8	10
2030 年	120	12	360	5	8

表 2.8-1 製造原価計算結果

## 2.8.2 大規模実用化にあたっての条件と現状

これらの製品を明るく豊かな低炭素社会の構築に役立つべくシステムに組み込み、実用化に結び付けるためには、以下に示す①~⑤の条件を満たす必要がある。

- ① それぞれの技術がコストシナリオに沿って開発されるか? また、開発に必要な最低な人材、資金が投入され、推進体制が組まれているか?
- ② 市場が拡大していくか?
- ③ スマートグリッド、スマートシティなど価値の高いシステムが設計されるか?
- ④ コスト決定力を持った積極的な産業母体があるか?
- ⑤ 利用者となる市民に低炭素化の価値を理解してもらえる体制はあるか?

たとえば、「②市場が拡大していくか?」の条件に関しては、一般的に低炭素技術の市場拡大は確実であるといえよう。「⑤利用者となる市民に低炭素化の価値を理解してもらえる体制はあるか?」の条件に関しても、東日本大震災後にLED ランプや家庭用蓄電池市場が拡大したり、価格が高いにもかかわらず家庭用燃料電池販売量が震災前に設定されていた計画値を大幅に上回ったりと、安定電源や省電力に対する価値が市民に理解されて市場拡大につながっている例が出てきている。さらに快適な生活につながる低炭素社会像を示していけば、②と⑤の条件を満たしていくことが確実であり、ゆえに経済活動も活発化し、明るい社会像に結び付いていくであろう。

これまでに検討してきた太陽光発電システムなどの3製品の大規模実用化の可能性について、以上の①から⑤までの条件に対する定性的な評価結果を表2.8-2に示す。総じていえば、新しいシステムを作っているさなかであるため、大規模実用化が簡単に進むことにはなっていないということが指摘できる。

低炭素技術の大規模実用化を検討するにあたっては、時間軸を考慮に入れることが重要である。2020年に実用化される技術は現状である程度の目処が立っているものであり、それらの技術開発は着々と進んでいる。だが、それを2030年以降の大規模実用化に結び付けて、さらに新しい技術として完成された姿は見えにくいのも事実である。しかし、これらの製品を使ったシステムに対するニーズは非常に高い。そのため、高効率、低コスト製品開発の道筋が見えれば、市場は急速に拡大することは明らかである。①~⑤の項目を考慮して、それらに相応しい開発体制を整えることが明るく豊かな低炭素社会の構築に重要である。LCSでは、特にJSTの使命に関連の深い条件①を満足な状況にするための提案作成を中心に、今後も技術シナリオを検討し続けていく。

技術シナリオの検討も、太陽光発電システムなどの3製品を対象とした検討だけでは、低炭素社会を構築していくためのエネルギーシナリオの全体像を作ることはできない。そこで2.1節に示した多くの関連技術についても、今後の技術動向を考慮した経済性、環境性の定量的評価を3製品と同様に進める必要がある。それら多くの技術をシステムの中で組み合わせて使い、経済的、環境的に辻褄が合うシナリオを作成しなければならない。

表 2.	8-2	低炭素社会に役立つ技術実用化チェック項目の現状

実用化に結び付け ていくための条件	太陽光発電 システム	家庭用燃料電池 システム	蓄電池 (Li イオン電池)
1	Δ	Δ	Δ
2	0	Δ	0
3	Δ	Δ	Δ
4	Δ	Δ	×
<u></u>	0	Δ	0

表中〇、△、×はそれぞれ「そうである」、「大体そうである」、「そうでない」の意味であり、製品が現在のみならず 2030 年以降も継続して大規模実用化に向かう状況にあるかどうかの観点から定性的に評価した。

#### 2.8.3 今後の大規模実用化に向けて

ここではエネルギーシステム全体ではなく、今回検討した3製品のみを対象とした大規模実用 化に向けての研究開発について、時間軸に沿って考察する。

#### (1) 太陽電池

技術進歩により今後コストが下がることは明らかになった。

現在の太陽光発電の電力コストは、現在の系統電力コストよりも高いが、2020年には現在の家庭での電気代より低くなり、2030年には火力発電コストに匹敵するようになる。このコストには、供給電力安定化のための蓄電池などは入れていない。なぜなら、現在の導入シナリオでは、2030年での太陽光発電割合は全電力の10%以下なので安定電源用蓄電池がなくても問題は生じないためである。現在の最大単一プラントの年生産能力はほぼ1GWに達しており、製造コストの面では規模メリットを受けるに足る水準になっている。

低炭素化を進めるための導入シナリオに従って、2020年までに30~40GWの太陽電池を設置するためには、毎年3GWの太陽電池を設置しなければならない。それを国産で賄う場合、年産1GW以上、これからの建設期間を考えると年産2GWのプラントが必要となる。

現在、太陽電池の発電材料としては Si 系や CIGS 系がある。どの材料系のプラントを選ぶかは 状況で変動するが、今回の検討では後者の系の方がプラント建設費、技術発展によるコスト低減 可能性の両面から、有利であるとの結果となった。

これからの太陽光発電関連産業の拡大は自明のことである。今後この産業に関して日本が国際的に活躍するためには、今回のコストシナリオに基づいた技術開発をさらに促進し、価格決定力のある(シェアの高い)事業にしていくことが重要である。

太陽光発電の電源割合が高くなると電力コストに蓄電池コストも付加されるため、2030 年以降もさらに太陽光発電のコスト低減を進めなければならない。そのためには資源量が豊富な材料で、製造プロセスも簡便な発電効率 40 ~ 50%以上の太陽電池を開発する必要がある。

#### (2) 燃料電池

2. 4節で述べたように、今回検討した固体酸化物形燃料電池(SOFC)を使用した家庭用熱電システム(700W)のコストは、技術開発を続けることと生産規模を現在の100倍(100万台/年)に拡大することにより、2030年には現在の系統電力コストに匹敵できる水準になることが分かった。そのコスト水準になるまで製品を普及させ続けるためには、コスト低減の促進と共に新しい製品、それをシステム化した社会の価値を皆に認めてもらい、それに相応したコストを支払う社会にすることが必要である。2030年に現状の100倍まで拡大できるかどうかは、今回のコスト低減シナリオに準じて関連企業が十分な開発資源投入をするか否かにかかっている。

なお、家庭用システムの開発が進めば、その技術は SOFC を組み込んだ大型高効率火力発電所の開発促進にも役立つ。これらの技術シナリオを明確にするために、さらに今回の定量的評価を進める必要がある。

#### (3) 蓄雷池

蓄電池の大規模用途としては、電力を貯めるための定置型電池システム用と電気自動車用の二つがある。両者共に大幅なコスト低減の必要があるが、後者にはさらにエネルギー密度向上という大きな課題がある。コスト低減については、市場拡大につれて開発費の短期間回収が可能になるので、現在でも現状の数分の1の30円/Wh<sub>ST</sub>、2030年には15円/Wh<sub>ST</sub>以下の価格にすることもできると計算された。さらにコスト低減を図るためには寿命の延長、充放電効率向上も進める必要がある。

以下に用途別蓄電池の経済性について述べる。

## ・太陽光発電との組み合わせ

太陽光発電電力の安定化のために、蓄電池を使う場合のコストを示す。  $1\,\mathrm{kW}$  太陽電池に対して、その最大発電  $10\,\mathrm{bfl}$  分の  $10\,\mathrm{kWh}_\mathrm{ST}$  の蓄電池を付ける。  $2020\,\mathrm{fm}$  年にそれらを原価で購買するとそれぞれ  $20\,\mathrm{Jm}$  、 $13\,\mathrm{Jm}$  の資金が必要となり、太陽電池だけのときの電力コスト  $20\,\mathrm{m}$  /kWh に比べて  $2\,\mathrm{mm}$  60 円 /kWh と高くなり、このままでは使用できない。全システムコスト低減、蓄電池設置量の削減などが必要である。

スマートグリッドなどの中での各種電源構成、電気自動車などとの組み合わせで利便性を高くすれば、低コスト化も進む可能性があり、来期にそれらのシステム設計評価を進める予定である。

## · 深夜電力蓄電

単純に夜間電力の蓄電に使用する場合を計算してみる。現在の深夜電力料金(9円/kWh)は昼間料金より14円/kWh程度安い。2020年での蓄電池の原価は13,000円/kWh<sub>ST</sub>である。この蓄電池の充放電効率を90%とすると、深夜電力を毎日貯め、昼間にその電気を使うと3.3年で資金回収が可能となる。2020年での電源構成によって深夜電力の料金は変わるため、資金回収年も変わるであろうが、これについては来期にエネルギー全システムの中で検討する。

現在の蓄電池販売価格は 100 円 / $Wh_{ST}$  程度と高いが、年間生産規模を 10G $Wh_{ST}$  に拡大すると、蓄電池製造コストは 17 円 / $Wh_{ST}$  となり、購買価格をその 1.3 倍にしても 26 円 / $Wh_{ST}$  である。この蓄電池(充放電効率 90%)を深夜電力利用に使用すると、6.6 年で資金回収ができる。

短期間に性能の高い新型蓄電池の開発ができない現状は、現在と同じような電池が同じ製造プラントで長期間生産され続けることを意味している。今回明らかになったように、生産拡大により製造原価、販売価格を下げれば、経済的にも成立する市場があり、そこに入ることで開発速度を高めるための資金も生まれることになる。生産量の拡大に取り組むことは表 2.8-2の①、④を促進する方向である。

電源コスト低減のための蓄電池の使い方、経済性は電源構成により大きく変わる。今後は電力の経済・環境面での合理性を考えて、家庭、業務、地域、国レベルにおける電力需給システムの中で蓄電池の役割を定量的に明確にする予定である。

# • 電気自動車用

電気自動車とガソリン車の走行燃料費が同一になるための蓄電池価格を表 2.8-3 にある前提条件の下で計算した。

消費動力	100Wh/km	ガソリン車燃費	20 km/L	
電力料金	23 円/kWh	ガソリン価格	140 円/L	
ガソリン車エンジン価格	40 万円	年間走行距離	10, 000 km	
蓄電池積載量	24kWh <sub>st</sub>	電池寿命	5年	

表2.8-3 蓄電池価格を計算するための前提条件

計算の結果、蓄電池の価格が30円/Wh<sub>st</sub>より低ければ、電気自動車の方がガソリン車よりも経済的には有利であることが分かった。この価格を現在の技術で大量生産したときの蓄電池製造原価19円/Wh<sub>st</sub>と比べても、電気自動車の方が低く、現在でも経済的には優れたものになる。

しかし、現在の1充電当たりの走行距離は100km程度と短く、使い勝手が悪いので、ガソリン

車代替用にするためには走行距離を数倍にしなければならない。そのためには蓄電池エネルギー密度の向上、車体の超軽量化などが必要である。今のところ、このような大幅なエネルギー密度の向上のための方法論は明確でない。

市内での短距離走行用などには、経済性、環境性に共に優れているため、電気自動車関連の市場はある程度大きくなるであろう。しかし、年産10GWh<sub>ST</sub>の蓄電池を電気自動車用だけに使用すると40万台/年に相当し、直ちに拡大するには難しい台数である。先に述べたような深夜電力蓄電用途などと組み合わせながら、蓄電池需要を増やしていく必要がある。

以上のように、太陽電池、燃料電池、蓄電池については、それぞれ個別製品として 2020 年以降に自立した市場が立ち上がることが示された。これら3種類の製品以外のものも組み込んだエネルギーシステムの最適な変化状態を明らかにすることが、今後の検討課題になる。そのための技術シナリオ、それに基づいた研究開発の方向性を今後明らかにしていく。

## 2.8.4 研究開発課題

今回の三つの技術についての定量的な評価から明らかになった研究開発課題は、以下のようにまとめられる。

## (1) 太陽電池

Si 系、CIGS 系などの太陽電池の積み上げ方式による製造コスト計算から、2020 年までに太陽 光発電の電力コストは現在の家庭用電力価格と同程度まで下がることは可能であることが分かった。それを既存電力コスト以下にするにはモジュール発電効率を 40%以上にし、製造速度を上げ (例:化合物半導体なら製膜分速度 1  $\mu$ m)、資源量が多く安全な材料を使用するなどの開発が必要である。

集光した太陽光で発電することにより、太陽電池自体のコストを下げることが可能であり、材料資源の問題もなくなる。しかし、現在は集光設備のコストが高く、集光による優位性はない。 これらのほか、太陽電池に関する研究開発課題を以下に示す。

- ① 材料科学の開拓 <最適なバンドギャップを持つ材料の設計と探索> タンデム型 (Ⅲ-V族、I-Ⅲ-Ⅵ₂族などの新材料)、量子ドット型 (マトリックスとドット材料)、有機太陽電池 (アセプター、ドナー、キャリア収集層、バファー材料)
- ② 接合界面科学の確立 〈理論シミュレーション・解析手法の確立〉 接合界面における電荷移動挙動の解明、接合原理の理解、欠陥の解析・制御(放射光などを 用いた先端解析法の確立)
- ③ プロセス工学のアプローチ 新材料の製品化技術開発、高速・低コストの薄膜作製プロセスの開発、太陽電池周辺材料の 最適化(安価高強度ガラス)
- ④ 集光システムの低コスト化 ミラー材料、太陽追尾システム、冷却システム

# (2) 燃料電池 (SOFC)

SOFC も家庭用商品が出されるまでに開発が進んできたが、コストを現状価格の 10 分の 1 (300円/W以下)にする必要がある。製造プロセスの合理化、製造規模の拡大で将来はその水準に近づくことが分かった。しかし、さらにコストを下げ、使いやすいシステムにするために、発電効率向上、電池寿命の延長、運転のしやすさ(短時間での運転開始、停止など)に関した研究開発が必要である。以下に SOFC に関する具体的な研究開発課題を示す。

- ① 機能性材料の開拓 <高出力・高効率と高耐久性を両立する材料の設計と探索> 電極(低温活性、被毒耐性、固相拡散制御、シンタリング抑制)、電解質(高イオン伝導性、中間層、 粒界制御)、インターコネクタ・集電材(低被毒性合金、表面コート技術)
- ② 界面現象の解明と制御 <三相界面・異種接合界面の現象理解とモデル化> 三相界面における電荷移動反応過程の解明、欠陥の制御及び表面反応との相関、界面ネット

ワーク構造の理解と最適化、異種接合界面における相互拡散・固相反応の抑制

③ プロセス工学のアプローチ 〈セルデザインと製造プロセス〉 高速セラミックス成形・焼結技術、異種界面接合技術(コート・焼結技術)、スタッキング・ 集電技術の確立

## (3) 蓄電池

大量生産によりコストは下がることが分かったが、その低下は十分ではない。また電気自動車 用蓄電池として大量に使われるには、エネルギー密度が低い。エネルギー密度向上を進めると、 使用材料量も削減されてコストも下がるという好循環が期待できる。そのための材料探索の目途 が立っていない現状では、下記のような基礎的な研究開発課題を取り上げる必要がある。

- ① 炭素の Li 貯蔵メカニズムの解明と高容量化 リチウムの貯蔵サイト増加、反応過電圧低下、電解質界面生成機構解明など
- ② Si 系負極の高耐久化
- ③ 正極物質の探索 新材料や複合材料の開発、反応メカニズムの解明、電極表面・内部構造、セル構成の耐久性 向上設計
- ④ 低コストプロセスの開発
- ⑤ 新材料電池系の探索

## 2.8.5 グリーンイノベーションに向けた研究開発

今回取り上げた3製品の使用量を拡大し、低炭素社会構築を推進する基になる要素技術開発については、JST 先端的低炭素化技術開発事業(ALCA)を始めとした様々な研究開発事業が実施されている。しかしながら、現在取り組まれている研究テーマの内容を見ると、2020年までに大幅な低コストをもたらす製品の創出、2030年に向けた卓越した新製品に結び付くことを目指した研究開発は多くない。

低炭素社会の構築には低炭素技術の低コスト化は避けられない課題である。低炭素社会の早期 実現を目指して国は、低炭素技術の低コスト化を加速させる研究開発に取り組む必要があること を強調したい。そして、限られた科学技術振興費を効率的かつ効果的に活用するためにも、グ リーンイノベーションに係る研究開発においては、技術シナリオから導出される課題への取組に 研究開発経費が重点的に投入されることが有効であることを提案する。そのためにも技術シナリ オに結び付けた研究資金の投入システムの改善が望まれる。

材料の開発状況を考慮し、その材料を用いた製品製造プロセスを設計し、コストを計算して将来に向けたコストシナリオを示すことは、グリーンイノベーションを進めるための重要な開発課題の明確化につながる。また、コストシナリオで示した時期より先のコスト低減を可能にする技術の種子があるか、それに関する開発が行われているかもコスト計算結果から推測でき、新産業計画作成にも役立つことになる。

# 2.9 社会の低炭素化実現のための材料研究開発のあり方

## 2.9.1 はじめに

地球温暖化の防止と、日本経済の閉塞状況の打破・成長への進展が我が国の課題であるが、様々な要素を組み合わせるイノベーションの創出、なかでも国策として重要視されているのが、科学技術を基礎としたグリーンイノベーションの実現である。それは、低炭素社会構築のための技術の実現と言い換えてもよい。大事なことは、日本学術会議が「物質・材料研究開発に関わる国家戦略確立の必要性について」でも述べているように、低炭素技術の基本原理を製品化まで結び付けていく過程には、新しい材料の開発と利用は欠かすことができないということである。

このことを顕著に現す例が JST 先端的低炭素化技術開発事業 (ALCA) である。ALCA では 1.2 節に述べたように、低炭素技術を研究要素に分解して構造化した結果に基づいて、太陽電池及び太陽エネルギー利用システムなどの技術分野が推進している。平成 22 年度採択課題は全部で 55 課題あり、技術開発の目的は多岐にわたるが、およそ 7 割に相当する 38 課題の研究において、そのターゲットは「物質・材料」である。このように、グリーンイノベーションを実現する技術の多くは材料と不可分の関係にあり、低炭素社会の構築に向けては、材料に関する研究開発と技術開発が大きな鍵を握る。

そこで本節では特に、材料開発の現状と特徴を概観したうえで、社会の低炭素化を実現するために必要な材料開発のあり方について述べることとする。

# 2.9.2 材料研究対象の構造化

従来を凌ぐ性質を有する新しい材料が実験室レベルで開発されてから、社会の中で使われていくまでには、多くの試行錯誤と長い時間を必要とすることが一般的である。使用箇所を見定め、プロセスの工夫などによりコストの問題を克服し、安全性・信頼性・寿命の確保なども含めてすり合わせ作業を進めていくと、新材料が生まれてから社会に定着するまでには、数 10 年もの時間がかかることも珍しくない。

新しい材料の開発では、単純に驚異的な性質を得られればよいというものではなく、プロセスの問題、コストの問題、安全性の問題等、様々な克服すべき点が複雑に連関しており、それら全体を俯瞰するなかから最適な解をみつけることが本質的である。このため全体を容易に把握できるように、材料研究そのものを構造化することが重要である。こうした構造化の試みのなかで一般的によく知られているのは、材料研究においては、研究要素を構造、物性・機能、プロセス、性能の4項目で大きく分類することである。図2.9-1は、各項目を四面体の頂点に配置することで、それらが互いに連関していることを示している。

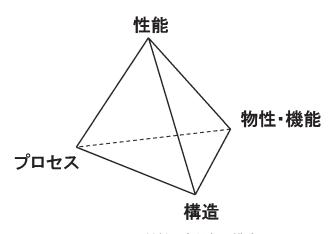


図2.9-1 材料研究対象の構造化

この図をブレークダウンしてみることにする。たとえば、構造について考えてみると、物質は原子の凝集体であるから、構造とは、より具体的にいえば、原子配列と電子構造である。電子構造はさらにブレークダウンされ、電荷の分布の他にスピンの配列状態も研究対象要素である。こ

れらの研究対象要素に対する研究の方向性として、「見る」ことで理解を深める科学的なアプローチと、研究対象要素を「制御する」ことを目指す工学的なアプローチが存在する。構造に対しては、科学的なアプローチとして「観察する」が挙げられる。一方、工学的なアプローチに基づけば、能動的に構造を「予測し」、「設計して」「制御する」ことを目指すことになる。そのためのツールに位置付けられるのが、ナノテクノロジーや理論・モデリング・シミュレーション技術である。こうした考察を「性能」「プロセス」「物性・機能」についても同様に行い整理したのが表2.9-1である。

表2.9-1 材料研究要素のブレークダウン

研究対象要素		科学的なアプローチ	エ営がたマゴロ エ	
大項目	ブレークダウン	科子的なアプローテ	工子的な アプローテ	
性能	・コスト(経済性、省資源性、 環境性能) ・信頼性、寿命、安全性	評価する		
プロセス	・合成、加工 ・集積	見出す	予測する 設計する	
物性・機能	・メカニカル、熱的、電気的、 磁気的、光学的 など	分析・計測する	制御する	
構造	・原子配列 ・電子構造(電荷、スピン)	観察する		

あらためて強調したいのは、図2.9-1が示すように研究対象要素が連関していること、さらに、トレードオフの関係も多く存在することである。たとえば、物性・機能のみを追求した結果、それを実際のものとするプロセスが極端に複雑化したり、コストが肥大化したりする問題が生じるケースなどがこれに当たる。新材料の創出は、こうした連関をどこまで緻密に把握し、最適化できるかにかかっている。

この表を基にして、現在の材料研究の置かれた状況を考えたとき、主張したい点は三つある。 まず一つ目は、ナノテクノロジーが果たす役割についてである。ナノテクノロジーとは、ナノメー トルオーダーという微細な空間を観察・測定・制御する技術の総称である。分かりやすくいえば、 地球の直径を1メートルとみなしたときに1円玉の幅に相当する長さが1ナノメートルであり、 つまり、地球を一望できるところから1円玉を制御するような困難さを伴う最先端の技術である。 ナノテクノロジーは、21世紀に入ってから日本を含む多くの先進国で国家的な戦略の下、研究開 発が推進されてきた。その結果として、物質の構造や物性・機能を科学的に原子レベルで精密に 把握することが可能となった。今後は、構造や物性・機能の把握だけでなく、プロセス開発や性 能評価においてもナノテクノロジーの果たす役割はますます高まっていくと予測される。二つ目 は、性能の観点からの研究の重要性についてである。実際に社会で用いることを前提とする「材料」 において「性能」の評価は不可欠だが、特に基礎的な研究開発の段階で、性能に関する考慮がな されない場合が往々にしてある。このことは、死の谷として認識されている基礎研究成果と製品 の間にある大きなギャップが生ずる一因でもある。低炭素技術において「環境性」の評価が不可 欠だが、その他にも、研究対象要素として表中に挙げた「省資源性」「信頼性」「寿命」「安全性」 などの項目について基礎研究の早い段階から科学的に評価し、さらに、それらの成果を基盤とし て性能の予測・設計・制御まで踏み込むことが、今後必要である。なお、希少元素を使わずに望 みの材料物性・機能を実現することを目指す「元素戦略」は、まさに材料の省資源性能を追求す る研究課題に位置付けられる。

最後に主張したいのは、工学的アプローチに向けた総合的知見及びツールの重要性である。既に述べたように、科学的なアプローチによって得られた知見を基にして、研究対象を能動的に制御するアプローチが工学的アプローチである。面白いことに、4つの研究対象要素の全てについて、「予測し」、「設計して」「制御する」ことが共通する。いうまでもないことだが、構造を制御したいときに、構造に関する知見だけが分かればよいというものではない。物性・機能、プロセス、性能などと連関する科学的知見を総合的に動員することが必要である。そうした総合的な取り扱

いを可能とするツールとして、ナノテクノロジーや理論・モデリング・シミュレーション技術、データベース等があり、これらのツールの拡充は今後の重要な課題である。

## 2.9.3 まとめ

社会の低炭素化に貢献する低炭素技術の実現のために、材料研究に求められることは何か、これまでの主張のまとめも兼ねて考えてみる。

まず必要なのは研究課題の相間マップ(図1.2-3)にもあるように、研究要素を実現するプロジェクトの実施である。これまで基礎研究段階では比較的手薄であったプロセスや性能に注目したプロジェクトの構造化をより積極的に進め、力を注いでいかなければならない。

ただし、材料研究の本質ともいえる研究要素の連関については、こうしたプロジェクト研究の 集積だけではどうしてもカバーしきれないであろう。このため、個別のプロジェクト研究とは別 に、材料研究に関する科学的知見をそれらの連関も含めて統合化する仕組みが必要である。その ための工夫は、従来の施策において「分野融合」「拠点構築」「ネットワーキング」などのキーワー ドで表されてきたが、今後は、特に材料研究対象の連関を蓄積することを念頭に置きつつ施策を 設計し、引き続き強力に推進しなければならない。

特に工学的アプローチが統合化された知見を礎としていることから、工学的研究では、用いられるツールは単独ではなく、あらゆるツールを組み合わせて使えるような環境が重要である。そうしたツール群を自前で揃えること自体が高コストで時間を必要とするため、上述の拠点構築やネットワーキングなどの施策と絡めながら、中長期的にツール群とそれらを使いこなす専門家集団を拡充する施策も必要である。このことは、理論・モデリング・シミュレーション技術についても同様である。

たとえば、米国では国策として、エネルギー省では5つのナノテクノロジー研究所が稼働しており、最先端装置、大型装置、さらにはスーパーコンピューターの共用が推進されている。他にも、全米科学財団による拠点構築やネットワーキングの推進が、戦略的に進められている。さらに米国に限らず、協働のパートナーをグローバルに集い、材料・ナノテクノロジーの研究開発を推進する大規模拠点がベルギー、フランス、中国等にも出現している。これに対して日本では、こうした取組が遅れていることが指摘されており<sup>1)</sup>、これまで以上に強力に推進していくことが望まれる。

以上、プロジェクト研究と並行して、「連関も含め統合化された科学的知見」及びそれを礎とした「工学的研究のためのツール群」が、特に材料研究を推進するにあたり重要であることを述べてきた。第4期科学技術基本計画において、材料・ナノテクノロジー研究は「基盤技術」に位置付けられているとおり、これらの知見やツール群は様々な技術の基盤となるものである。このことは、LCS の目指す低炭素社会における低炭素技術にとっても例外ではなく、たとえば、低炭素技術の性能や環境性の向上、コストの削減などを考えるうえで、材料・ナノテクノロジー研究は大きな貢献を果たすことが期待される。したがって、材料開発の関係者と密接にコミュニケーションをとることは、LCS と LCS の目指す低炭素社会にとって有益であろう。同時に、材料開発者にとっても、LCS とのコミュニケーションを通じて社会のあり方を踏まえることが、高いインパクトの研究を行う一助となるはずである。

# 【文献】

1)独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター, 戦略プロポーザル 09SP07「ナノテクノロジー」グランドデザイン~グローバル課題解決の鍵となる技術領域~, 2010.3.

# 第3章 低炭素社会構築のための技術普及戦略

# 3.1 技術開発と普及促進のシナジーによるグリーンイノベーションの活性化

## 3.1.1 概要

グリーンイノベーションについても、シュンペーターのイノベーションの概念に基づいて、プロダクトイノベーション、プロセスイノベーション、マーケットイノベーション、サプライチェーンのイノベーション、そして組織のイノベーションの5つに分類できるのは第1章で述べたとおりである。グリーンイノベーションを成功に導くためには、これら複数のイノベーションを適切に組み合わせることが必要である。

LCSの研究をこの5分類にカテゴライズするなら、第2章で述べた技術開発戦略とこれに基づく研究開発・技術開発によってプロセスイノベーションとプロダクトイノベーションの実現を図ることまでが可能となる。その一方、プロセスイノベーションとプロダクトイノベーションの成果を社会に普及させていくためには、マーケットイノベーション、サプライチェーンのイノベーション、そして組織のイノベーションについても検討を行い、これら適切に組み合わせていくことが重要である。

ここでは、そのような技術普及を促進する経済制度として、炭素税、排出量取引、固定価格買取制度を取り上げ、これらについて説明すると共に、技術開発と技術普及のシナジーによるグリーンイノベーションの活性化について述べる。

## 3.1.2 技術普及を促進する経済制度について

技術普及を促進する経済制度には数多くの種類があるが、紙面の関係で、ここでは炭素税、排出量取引、固定価格買取制度について説明する。

## (1) 炭素税

炭素税のもととなる環境税という考え方を初めて提案したのは、経済学者のピグーであるといわれている¹)。このピグーの考え方をごく簡単に説明すると以下のようになる。今、ある企業が生産活動を行い、ある環境排出物を出していたとしよう。この環境排出物は、たとえば酸性雨の原因となり、建築物や農作物に損害を与えるものとする。排出物 1 トン当たりの被害額が 1 万円であったとしよう。このとき、この物質の排出に対し 1 トン当たり 1 万円の環境税を課すのが社会全体にとって最適である、というのがピグーの考え方であり、これをピグー税と呼ぶ。ピグー税が課される場合、企業は環境排出物の 1 トン当たり削減コストが 1 万円以下ならば削減を実行し、1 万円より高くつくならば削減を行わずに税を支払うであろう。削減が行われない場合、環境税の税金を全額補償に用いれば、被害補償は可能である。企業の排出削減費用と環境排出物による被害額の和を社会全体の総費用と考えると、この税により総費用が最小化されるというのがピグーの考え方である。

ただし、温室効果ガスの増加とそれによる気候変動という複雑な地球環境問題を考えた場合、上記のようなピグー税の適用は困難である。それは、CO<sub>2</sub> 1トン当たりの被害額の算定に大きな不確実性が伴うからである。実際には、気候変動に関する被害額の推定もあるが、残念ながらその精度は高いとはいえない。気候システムは大規模で複雑な系であり、長期的な気候変動を正確に予測し、そこから社会全体の経済活動への影響をくまなく拾い上げ、精度良く推定するのは困難である。

その意味で、気候変動の緩和に炭素税を用いる場合の基本的概念は、むしろボーモル・オーツ税の方であろう。ボーモル・オーツ税は、ピグ一税のように1トン当たりの被害額をもって税率とするのではなく、最終的に、所定の目標値まで排出量を抑えるような税率を設定しようというものである。その意味で、ボーモル・オーツ税は被害額を含む社会全体の総費用を最小化するような効果は望めないが、各企業に税率に等しい同じ削減費用の対策を講じさせ、被害額を含まない、削減費用の総和を最小化するには都合が良い。一方、ボーモル・オーツ税には、目的の排出量に至るまでに、複数回税率を変更しなければならず、そうした実験的な税率の変更は社会の混乱を招くため、現実の施策としては難しいという問題点がある。

このような炭素税への理解を深めるため、以下のような戦略を考えてみよう。すなわち、炭素税を最初軽く、徐々に重く課すようにし、それとともに所得税を軽くする。これにより、エネルギー

を節約し、効率の良いエネルギーシステムを構築するとともに雇用を増加させるインセンティブをつくることができる。このように炭素税を導入するとともに、所得税など他の税制と併せて改革することにより、CO2の排出削減と雇用問題の双方の改善、すなわち「二重の配当」を獲得する戦略が考えられた。欧州各国は、この「二重の配当」の獲得を念頭において相次いで炭素税を導入してきた。

世界で初めて炭素税を導入したのはフィンランドで、1990年1月のことである。その後、オランダ、スウェーデン、ノルウェー、デンマークで導入された。1999年以降は、ドイツ、イタリア、英国において炭素税または気候変動税が導入されてきた。

欧州諸国で導入されている炭素税の導入の契機になったのは、税制の根本的な構造改革である。特に炭素税の導入に積極的な北欧諸国は高福祉国家として有名であり、これは同時に重い税負担を意味している。この重い税負担とは、すなわち所得税、法人税が高いこと、及び付加価値税が高いことである。まず、所得税、法人税が高いことは、個人にとっては労働意欲の減退、法人にとっては企業の国外への流出を意味し、直接税を軽減して間接税へ税収をシフトしていく必要ができていた。しかし、一方で付加価値税も非常に高い水準に達しており、こうした事情から、新しい財源としての炭素税がクローズアップされたわけである。

この炭素税の導入にあたって最も憂慮されたのは、炭素税の導入によって国際競争力が損なわれ、その国の経済が大きなダメージを受けることであった。このため炭素税の税率を低く抑えるか、税率を高くする場合には、様々な例外規定を設けて、産業の国際競争力を損なわないような工夫が行われた。たとえば、鉄鋼業の場合は、その用いる石炭は原料と考え、炭素税の適用範囲外としたことが挙げられる。

炭素税導入の最大の問題点は、炭素漏洩(カーボンリーケージ)の問題であろう。たとえば、日本が  $CO_2$  排出量を削減するために、高い炭素税を課すが、他の国がこれと歩調を合わせないとしよう。この場合、 $CO_2$  排出量の大きい産業は国外に流出し、炭素税が課されていない地域で(場合によっては)環境技術レベルの低い地域に工場の新設が行われるかもしれない。この場合、日本国内の産業が衰退するだけでなく、世界全体としての  $CO_2$  排出量が増加してしまう場合さえ起こり得る。こうした状況においては、日本が京都議定書を遵守できたとしても、世界の  $CO_2$  削減には寄与するどころかマイナスになってしまう。これを炭素漏洩(カーボンリーケージ)の問題と呼んでいる。

換言すると、世界各国が歩調を合わせて炭素税を導入していくならば、地球環境の改善に必要な技術進歩のインセンティブとなり得るわけである(世界共通炭素税の考え方は現在でも、経済学者の間では議論されているが、国家の主権に関わる問題でもあり、実現は難しいと考えられている)。

この点で、上述した国以外にも、1999年以降、ドイツ、イタリア、英国において炭素税または気候変動税が導入されており、少なくとも欧州内部においては、多くの国が歩調を合わせて炭素税を導入しつつあると考えられる。その意味で、後述する温室効果ガス排出量取引に関する動きとも併せて炭素税に関する EU の動向を今後も見極めることが重要である。

# (2) 排出量取引

 $CO_2$  排出量を削減する経済的インセンティブを生み出すものとして、排出量取引のような制度を利用する方法もある。排出量取引とは、環境排出物の排出量の上限を何らかの方法で決定し、その上限を超える排出を望む企業については、上限を下回っている企業から「余分に排出する権利」を購入しなければならない、という制度である。たとえば、米国で進んでいる排出量取引は、 $SO_2$ 、 $NO_\chi$  などが主であり、 $SO_2$  については、1995 年から 1999 年を排出量規制の第一約束期間として取引を行っている。他方、 $NO_\chi$  に関しては 1999 年から 2002 年が第一約束期間として取引が開始された。 $SO_2$ 、 $NO_\chi$  の遵守期間初期の価格は各々 1 トン当たり 160 ~ 170 ドル、4000 ドル近辺であった。

排出量取引には大別して、キャップ&トレードとベースライン&クレジットという二つの形式がある。ここでは、温室効果ガスに関する排出量取引を例にとり、この二つの形式について説明する。温室効果ガス (GHG) に関する排出量取引とは、各事業者または主体の GHG 排出量の上限を何らかの方法で決定し、その上限を超える排出を望む者については、上限を下回っている者から「余分に排出する権利」を購入しなければならない、というものである。ここで決定される排

出量の上限のことを「キャップ」と呼び、このような制度を「キャップ&トレード」による排出量取引という。これに対し、GHG 排出量を削減する何らかの事業を行い、その事業実施による排出量の削減分を金銭的価値のある「クレジット」として取引する制度もある。この場合、当該事業がなかった場合に排出されていたであろう GHG 排出量を「ベースライン」と呼び、そのベースラインと事業実施後の GHG 排出量との差をクレジットとするので、「ベースライン&クレジット」による排出量取引という。京都議定書で定められた排出量取引関連制度には、共同実施(JI)・クリーン開発メカニズム(CDM)・排出量取引(ET)の三種類があるが、共同実施(JI)とクリーン開発メカニズム(CDM)は「ベースライン&クレジット」型であり、排出量取引(ET)は「キャップ&トレード」型である。

京都議定書で規定された上記の制度以外で最も代表的な GHG の排出量取引としては、欧州連合域内排出量取引制度(EUETS)が挙げられる。欧州委員会は、2001 年 10 月 23 日に  $CO_2$  排出量取引を EU 全域に義務付ける内容の草案を発表した。この草案によると、期間を二期に分け、実際に取引ができるようになる 2005-2007 年を第一期とし、第二期を京都議定書の第一遵守期間に則り 2008-2012 年としており、2013 年以降を第三期としている。EU の取引プログラムは、当初  $CO_2$  のみを対象にしたものであったが、欧州委員会は、今後温室効果ガス排出量のモニタリングの問題が解決されれば、他の温室効果ガスについても網羅するとしている。排出権取引に参加する業種は、20MW 以上のエネルギーを消費する電力及び熱供給、鉄鋼、建設、石油精製、紙・パルプ、 
案業(セメント・ガラス・セラミックス製造業など)のエネルギー多消費産業に限定している。

伝統的な経済学の理論では、「キャップ&トレード」・「ベースライン&クレジット」のいずれ の排出量取引制度でも最終的には同じ結果になるとされている。それは以下の理由による。たと えば、削減される GHG 排出量1トン当たりの価値が 2,000 円であるとすれば、いずれの制度でも 削減単価が2,000円以下の対策は導入され、2,000円を超える対策は導入されないはずである。 そして、削減単価に差がなく、同じ削減単価までの対策が導入されるということは、社会全体に おいて最小費用で GHG を削減できている状態である。このことを経済学では排出量取引市場が効 率的であるという(工学的な意味での効率とは意味が異なる点に注意を要する)。しかし、現実 の世界では「キャップ&トレード」・「ベースライン&クレジット」の二つの排出量取引制度は異 なる結果を招く。その理由は大きく分けて二つある。一つには、GHG 削減対策に関する情報が社 会全体に十分いきわたっていないことである。たとえば、「キャップ&トレード」による排出量 取引では、一般に取引価格の情報は公開されるが、取引のもととなる GHG 削減事業や削減技術に ついて取引所で公開されることは少ない。取引の価格情報だけが分かっても、どのような技術、 対策、事業によって、その取引価格以下での GHG 削減が可能なのか、一般には知られていない。 したがって、「キャップ&トレード」による排出量取引制度では、その取引価格以下の削減対策 がくまなく導入されるとは限らないわけである。一方、「ベースライン&クレジット」による CDM や後述する国内クレジットでは、どのような対策によって GHG が削減されたのかといった情報が 一般に公開されている。したがって、後続する者はその情報を基に同様の事業を展開するため、 GHG 削減対策が進みやすい。ただし、「ベースライン&クレジット」では、取引されるクレジット 価格が公開されない場合もあり、このことは後続する者にとって事業リスクになってしまう場合 もある。

「キャップ&トレード」と「ベースライン&クレジット」が現実の世界で異なる帰結を生むもう一つの理由は、取引価格の変動の大きさである。排出量取引の経済学的な効率性の前提は、上述したように、市場全体でただ一つの取引価格が決定され、その取引価格が、市場が包含する社会の GHG 削減の限界費用に等しくなることである。市場全体でただ一つの取引価格を実現するには、EUETS のような取引市場を創設し、取引所取引によって価格を決定するのが一般的である。しかし、図3. 1-1 の EUETS における取引価格の推移を見ると、現実の取引価格は変動が激しく、限界費用に落ち着いて均衡する様子はない $^2$ )。

「キャップ&トレード」による価格は、市場参加者の取引によって決定されるため、市場を左右する出来事や市場参加者の期待の相互作用などによって複雑に激しく変動する傾向がある。このように取引価格の変動が大きい場合、GHG の削減事業を行ってクレジット収益を得ようとする事業者には当然リスクが大きくなる。クレジット価格の変動が大きければ大きいほど、GHG 削減事業への投資が減退することは、ブラック・ショールズ式などに表されるオプション理論を生んだ近年の経済学の理論的帰結でもある。一方、「ベースライン&クレジット」型の CDM においても、



図3.1-1 EUETS における EUA 及び sCER の価格推移2)

事業者が取得したクレジットを転売するセカンダリー市場の価格(図3.1-1の sCER がこれに相当する)は EUETS の価格に強く相関するといわれる。しかし、後述する国内クレジットなどでは、クレジット価格は事業者と共同実施者による相対取引で決定される。このような取引形態では、不特定多数の参加者がある取引所取引と比較して各々の取引の価格変動が小さくなる傾向があり、これにより削減策への投資意欲の減退を抑えることがある程度可能である。ただし、相対取引で価格を決定し、価格変動の抑制のための制度を設ければ設けるほど、削減量1トン当たりの価格が、限界費用からかい離してしまう恐れが高まる。

経済学的な効率性を追求して「キャップ&トレード」による取引所における排出量取引を行えば、価格変動によって削減策への投資意欲が減退し、価格変動を抑制するために「ベースライン&クレジット」型として相対取引を主とすれば、今度は経済的な効率性が低下する可能性が出てくる。このように「キャップ&トレード」、「ベースライン&クレジット」には、それぞれ長所・欠点があり、万能ではない。また、「キャップ&トレード」は上記のような問題の他にも制度設計上の難点がある。それは、原則として各企業や事業所ごとに排出枠を与える必要があることである。この各企業・事業所への排出枠の配分は、システム全体の排出総費用には影響しないが、各企業・事業所の負担の公平性には大きく影響する。そのために、公平で、産業界全体が受け入れ可能な排出枠を考案することは大変困難な作業となるのである。

現在、EUでは EUETS に代表されるように「キャップ&トレード」による排出量取引が主流である。これは様々な問題がありながらも、最終的には、キャップ&トレードによる排出量取引の経済学的な効率性の実現に重きが置かれているためであろうと推察される。一方、我が国では、国内クレジットなど「ベースライン&クレジット」による排出量取引が主流である。これは GHG 削減技術や事業への投資を真摯に実施することを目的としているからであろうと推測される。また、日本の場合は「キャップ&トレード」の排出枠(キャップ)の割り当てが、産業界の反対などで極めて困難であることも一因であろう。なお、日本においては、第1章で述べたように、地球温暖化対策に関する閣僚委員会による「地球温暖化対策の主要施策について(2010.12.28)」という文書の中で、キャップ&トレードによる排出量取引について「慎重に検討する」と記述されており、事実上凍結されているのが現状である。

## (3) 再生可能エネルギーと固定価格買取制度

固定価格買取制度は、主に再生可能エネルギーによって生み出された電気を、電気事業者などが固定価格で買い取ることにより、再生可能エネルギー技術の導入促進を図るものである。2011年8月の第177回通常国会において、「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」、いわゆる再生可能エネルギーの固定価格買取制度が成立した。これにより、

2012年7月1日からは再生可能エネルギー源を用いて発電された電気は、一定の期間・価格で電気事業者に買い取られることとなった。

現在、住宅の屋根置き型の太陽光発電(PV)については、既に余剰分の電気の固定価格買取制度が施行されている。上記の特別措置法では、住宅用の太陽光発電は現行の余剰買取方式で進め、非住宅用の太陽光発電とその他の風力発電、地熱発電、小水力発電などについては、全量買取方式を前提にしている。今後、経済産業大臣によって買い取りの期間や価格が決定される。

再生可能エネルギー技術への投資を事業として考えるならば、初期投資と毎年のキャッシュフローがあり、毎年のキャッシュフローの中心は生産される電気の売上ということになる。この「生産される電気」の販売単価が将来のある時点まで固定価格となるのであれば、事業リスクが小さくなるのは自明である。また、設定される固定価格が高ければ高いほど、事業としての収益性も当然高くなる。したがって、固定価格が高いほど当該技術の需要が高まり、生産量も高くなると推定される。これにより、当該技術は量産効果によって更に初期コストを低減することができる。このような循環構造を図3.1-2に示す。

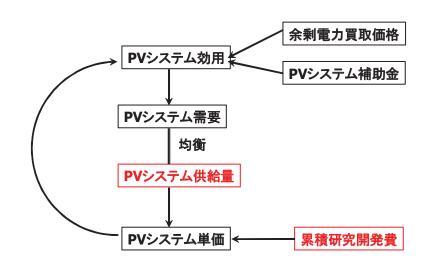
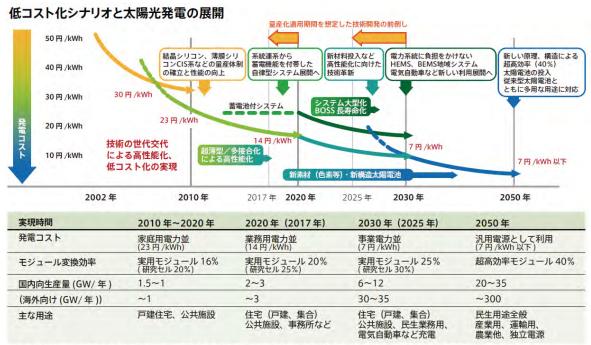


図3.1-2 太陽光発電 (PV; Photovoltaics) の需給における循環構造

PV の余剰電気の固定価格買取制度における余剰電気買取価格や PV システム購入時の初期コストを低減させる補助金は、PV 購入のインセンティブとなり、その需要を増加させる。これによって PV の供給量が増加すると量産効果により、PV の単価が低減することになり、さらに需要を増加させる効果を持つ。他方、図3.1-2の右下に示した累積研究開発費も重要である。PV に関する研究開発の対象は、従来型である結晶シリコン太陽電池や薄膜シリコン太陽電池などと、色素増感型や量子ドット型などの革新的技術による太陽電池に大別することができる。このうち、従来型の太陽電池への研究開発は、主として太陽電池の光電変換効率の向上やセルの大面積化を目指してきた。変換効率の向上やセルの大面積化は、直接ないし間接に太陽光発電モジュールとしてのコスト低下に貢献する。また、PV に関する研究開発の推進はプロダクトイノベーションを推進し、固定価格買取制度はマーケットイノベーションを推進するものとみることができる。両者は図3.1-2のように密接に関係しつつ、全体としてグリーンイノベーションの活性化に貢献することになる。

ただし、ここで注意すべき点が二つある。一点は、PVの研究開発に関することである。図3.1-3は日本政府によるPV単価低減と普及のロードマップの目標を示したものであり<sup>3)</sup>、PVの発電単価が、研究開発と普及促進により、最終的に既存の火力発電と同等の発電単価まで低減する様子が描かれている。ここで、PVの発電単価が最終的な目標に到達するまでに、PVそのものが異なる技術に世代交代している点に注意を要する。たとえば、14円/kWh程度までは結晶シリコン、薄膜シリコン CIGS 系などの量産化と性能向上で価格低下し、その後は超薄型/多接合型による高性能化でPVが普及し、さらに既存火力発電並みの7円/kWhを実現するには新素材・新構造PVが普及するとしている。ここで、固定価格買取制度は既存のPVの量産化による価格低減には貢



(出典:独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構発行「太陽光発電ロードマップ (PV2030 +)」概要版;図2改変)

図3.1-3 PV 単価低減と普及のロードマップ<sup>3)</sup>

献するが、新技術への世代交代を必ずしも促進しないと考えられる。したがって、このロードマップにあるような PV の世代交代と普及を実現するには、既存の PV の固定価格買取制度による普及促進をいつまでも続けることが望ましいとは限らない。

二点目は、固定価格買取制度と電気料金に関するものである。この制度により、電気事業が再生可能エネルギーによる電気を買い取る際の追加コストは、電気料金に上乗せされ、原則としてその他の全ての需要家の負担となる(電気を大量に消費する特定の業種については、当該負担が免除される場合もある)。したがって、買い取られる電気の単価が高くなるほど、電気料金への上乗せ分も大きくなり、国民負担が大きくなってしまう。したがって、固定価格買取制度については、再生可能エネルギーの導入促進によるメリットと上述した国民負担によるデメリットを定量的に比較することにより、全体の意思決定に活かすことが重要である。

総じて、固定価格買取制度と技術開発のシナジーは、グリーンイノベーションを活性化させる有望な施策の一つといえよう。しかし、このシナジーを成功に導くためには、量産効果による価格低下、技術開発による世代交代の進展、電気料金の設定と国民負担の度合いを常に観測しつつ、買取料金の設定を行う巧妙かつ定量的な制度設計が必要である。

3.2節以降では、新技術の普及促進のための消費者選好等に関する分析をさらに進める。

#### 【文献】

- 1) 石見徹, 低炭素社会のための経済的施策, エネルギー資源学会低炭素社会研究会講演, 2010.
- 2) 国際協力銀行環境ビジネス支援室, 排出権市場動向レポート 2010, http://www.joi.or.jp/carbon/report/pdf/201007\_01.pdf (2011.9.10 時点閲覧可).
- 3) 岡田至崇、量子ドット太陽電池、工業調査会、2010.

# 3.2 太陽光発電普及に関する選好調査

## 3.2.1 概要

低炭素技術の開発は目覚ましいが、当初は価格などの経済性に劣るため、世の中に普及するかどうかは、普及を促す補助金などの政策に依存することが多い。たとえば、住宅用太陽光発電は1990年代から普及が始まった有望な低炭素技術の一つである。その導入時の価格が高いことが普及の妨げとなっていることから、国は、1994年から2005年にかけて住宅用太陽光発電設備導入時に数万円/kWの補助金を交付する制度を実施した。この制度は2005年度にいったん終了したが、住宅用太陽発電のさらなる普及を進める必要が生じたことから、2008年度に7万円/kW相当を給付する新たな制度を再開した。そして、2009年11月からは、太陽光発電の余剰電力を買い取る制度(太陽光発電の余剰電力買取制度)が開始されるに至っている。このように、太陽光発電の普及に関わる施策はいわば試行錯誤的になされており、消費者の行動を十分に予測して立案された普及施策を行ってきたとはいい難い。

LCSでは、消費者の購買行動の予測可能性を高めるために、二つのアプローチを行った。一つ目は、過去の普及施策とその結果である普及実績との関係の分析である。これにより、平均的な消費者が実際にどのような選択を行ってきたかを把握することができる。二つ目は、個人へのアンケート調査などに基づいて、仮想的な状況での消費者の選択行動やその個人間のばらつきを分析するアプローチである。このアプローチでは個々の消費者の所得階層や環境意識等の個人の特性ごとの傾向を把握できる。これらのアプローチを実施することにより、消費者の購買行動を知ることが可能となり、費用対効果の大きい補助金施策の実施、さらには低炭素技術の効果的な普及促進が可能となる。

本節では、住宅用太陽光発電に対する消費者の選択行動を上述の二つの観点から分析した結果を示す。

# 3.2.2 過去の普及施策の分析

LCS ではまず、2000 年代の住宅用太陽光発電の普及施策と普及実績を統計的に分析した。この結果、価格、設置時の補助金、電力買取価格、潜在発電電力量(日射量には地域差があるため、同じ性能の太陽光発電を設置しても発電量は異なる)の4要素が普及率に影響を与えることが分かった。

普及施策と普及実績の関係から予測することにより、電力買取価格を現在の 42 P/kWh からたとえば 50 P/kWh に上げると、 1 年当たりの普及率を現在の 1.37% から 1.43% まで増やすことができ、初期費用の補助金をたとえば現在の 4.8 万P/kWh から 7 万P/kWh に上げると、同普及率を 1.69% まで増やすことができる、といった施策効果の柔軟なシミュレーションも可能となった。

# 3.2.3 太陽光発電の普及施策に対する消費者の選好に関するアンケート調査

太陽光発電の普及のための施策には、大きく分けて2通りの方法がある。設置のための初期費用への補助金と、設置した住宅用太陽光発電で発電した電力の固定価格買取制度である。LCSではインターネット調査によって戸建て住宅居住者1,000人に太陽光発電に関するアンケート調査を行い、太陽光発電の普及施策に対する個人の選好と施策の有効性との関係について検討を行った10。

アンケート調査内容は、環境意識の調査、時間選好率の調査、太陽光発電に関する選択実験からなる。環境意識調査では、環境知識を問う設問と普段の環境に配慮した行動意識について質問を行った。次に時間選好率であるが、これは将来価値を現在価値に引き戻す際に消費者が暗黙のうちに想定する割引率をいう。時間選好率の調査については、回答者に「現在 100 万円を受け取る権利がある」という仮定を与えたうえで、「100 万円に代わっていくら受け取れるのであれば、受け取り時期を将来に延期しても構わないか」という質問を、異なる延期期間について 1 人当たり計 6 問実施した。また、太陽光発電に関する選好調査では、総額は同じであるが初期費用、発電電力の買取価格、保証期間が異なる太陽光発電の選択肢の組から、回答者にとって最も望ましい選択肢を問うことを数問繰り返した。これらの結果を、回答者の個人属性に照らし傾向を分析した。

このアンケート調査によって、現在の価値を強く重視する割引性向を持つ人ほど、発電電力の

買取価格を高くすることに対する選好が小さく、初期費用への補助金への選好が大きいことが示唆された。具体的には時間割引率についての設問で、回答者を現在の価値を強く重視する割引性向を持つグループ(双曲割引)とそうでないグループ(指数割引)に分類し、各グループについて、固定買取価格を 1 円 /kWh だけ増加させた場合の利益の増加(年間 3,000kWh 発電すると 3,000 円相当)の 30 年にわたる現在価値を計算した(図 3.2-1)。その結果、双曲割引グループが 30 年後の年間利益増加の評価額を半減程度まで低くみているのに対し、指数割引グループは将来の価値を高く見積もり続けていることを示した。このように、太陽光発電については初期費用への補助金と電力の買取価格の二種類の導入インセンティブが考えられるが、消費者によってどちらの導入インセンティブを好むかは異なり、それは時間選好率と相関を持つことが示唆された。この結果は、消費者の低炭素技術の購入に対する選好の違いの存在を明らかにした一つの例といえる。

したがって、太陽光発電のような、消費者向け低炭素技術の普及施策としては、将来の価値を割引率の小さい消費者向けの固定価格買取制度、逆に割引率の大きい消費者向けの設備購入時の補助金、という選択可能な2本立ての制度を用意することが、より大きな普及拡大につながる可能性が示唆される。

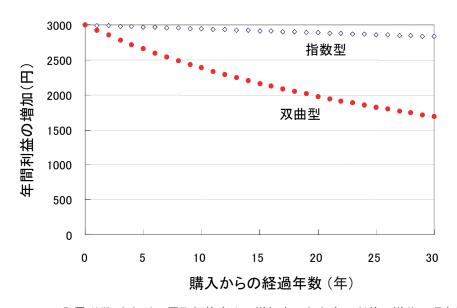


図3.2-1 発電 1kWh 当たりの買取価格を1円増加させたときの利益の増分の現在価値

## 3.2.4 今後の展望

近年、行動経済学の分野において、個人の時間選好率は、禁煙、飲酒、ギャンブル等の嗜癖行動との関連において研究が進んでいる。一方、低炭素技術の導入行動や各種の環境配慮行動が、個人の時間選好率とどのような関係があるのかについては、本節の内容を端緒として LCS が今後検討を進めていくべき重要な課題である。

# 【文献】

1) 外崎龍之介, 松橋隆治, 吉田好邦, 「選好分析を用いた国内住宅用太陽光発電システムの普及に関する研究」, 第 28 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文要旨集, p. 36, 2012. 1. 30.

# 3.3 新エネ・省エネ普及に関する限定合理性の考察

## 3.3.1 概要

経済学では人は完全に合理的であり、現在から将来にわたる効用(満足度)を最も高くするように行動を計画することで、人は本来後悔することがないことを前提として理論が組み立てられている。しかし消費者は必ずしもいつも合理的であるとは限らない。美味しいものを食べ過ぎたうえにダイエットに失敗したり、嫌いな勉強を後回しにして後悔したりすることは多くの人にみられる。よって消費者の選択行動を分析するときには、人は完全には合理的でなく、すなわち限定合理性を持った存在であることを前提にして考える必要がある。

低炭素技術の購入に関する意思決定プロセスにおいても、人はしばしば限定合理的に振る舞う。 限定合理性は、たとえば将来的には、設置した太陽光発電システムにより発電された電力を固定 価格買取制度で売却できる金額により初期設置費用を賄える場合であっても、設置はしないとい う選択をする行動などとして表れ得る。

LCSでは、新エネ・省エネ普及に関する限定合理性の考察を行っている。本節では、消費者が太陽光発電システム普及を例として、その購入にあたってどのように合理的な、または限定合理的な選択を行うかについて考察した。低炭素技術の購入時の消費者行動に関する知見を深めていくことで、効果的な太陽光発電システムをはじめとした新エネ・省エネの普及策を提言することが可能となる。

# 3.3.2 太陽光発電システム設置における支払い方式に関する消費者の選好調査

LCS では 2011 年 4 月下旬に、一戸建てに居住、かつ太陽光発電システム設置の意向がある 1,030 人に対してインターネット調査を実施し、太陽光発電システム設置時の支払い方式に関する選好を調査した $^{10}$ 。

回答者には3kWの太陽光発電システムを想定してもらい、太陽光発電システム購入の初期費用の3通りの支払いプランに「購入しない」という選択肢を加えた4種類の選択肢から最も望ましいものを回答してもらった。支払いプラン1は一括払い、支払いプラン2は発電した電力の売却益相当分で返済していく方式、支払いプラン3は定額の分割払いとした。

太陽光発電の耐用年数を 20 年、金利をゼロとした場合(ケース 1)の支払プランを図3.3-1に示す。この他に表3.3-1に示すように、耐用年数は 20 年であるが金利が3%である場合(ケース2)、金利はゼロであるが耐用年数が 30 年である場合(ケース3)、耐用年数が 30 年でかつ金利が3%である場合(ケース4)の計4通り設定した。定額分割払いのプラン3での支払期間は、ケース1とケース3で7年半、ケース2とケース4で9年である。ケース2においては、金利が付いた分、支払いプラン2(電気代そのまま)の支払総額は240万円となり、支払いプラ

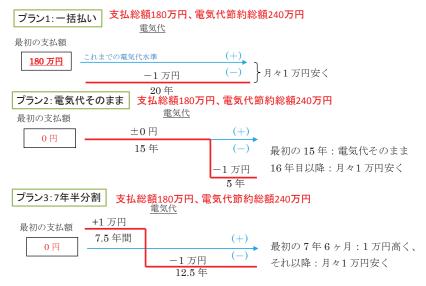


図3.3-1 太陽光発電購入における支払プラン(ケース1の例)

表3.3-1 太陽光発電のケース設定

	耐用年数	金利
ケース 1	20 年	なし
ケース 2	20 年	3 %
ケース3	30 年	なし
ケース 4	30 年	3 %

ン3 (9年払い)の支払総額は204万円となる。ケース3、ケース4では期間が30年のため電気代節約総額が360万円である。

それぞれについて最も望ましい選択肢を回答してもらった結果を図3.3-2に示す。

消費者が経済学の基本的な考えに従うのであれば、将来の売却益から支払額を差し引いた消費者の利得を時間割引率で割り引いた、正味の収支が最も大きい方式を消費者は選択するはずである。これは、割引率や割引関数にもよるが、将来の支払期間が最も長い「電気代そのまま」と支払期間が最も短い「一括払い」は、最も選好されるか、最も嫌われるかのどちらかであるはずである。しかしアンケートの結果によると金利がゼロで、どの選択肢も支払総額は変わらないケース1とケース3について、「電気代そのまま」が最も選好され、次に「一括払い」が選好されている。また、金利があるケース2とケース4については、「一括払い」「電気代そのまま」「9年払い」の順で選好された。これは、割引率や割引関数の形状だけでは説明することができず、消費者は単純な割引だけではない選好を持っていることが示唆される。

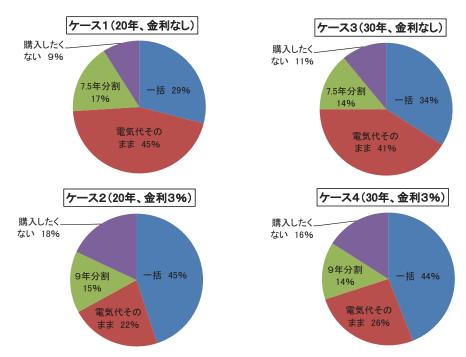


図3.3-2 支払プランに対する選択結果

この結果は、個人の行動の限定合理性によって説明できる。これは現状を基準として起こった変化に伴う利得と損失のうち、損失をより重視するという損失回避性が、個人の行動には観察されるというものである。つまり、太陽光発電によって得られる売電収入と、初期費用の支払(一括、分割を問わず)は、同額であっても支払の方を嫌う傾向があり、それゆえ「電気代そのまま」プランが多く選択されているといえる。一方で、資金に余裕がある層を中心に、購入時点の損失を受容して一括払いを好む消費者も一定の割合で存在するものと考えられる。このように個人の選択行動は、割引率で現在価値換算した利得によって選択の意思決定がなされるとは限らず、上述した限定合理性を考慮した選択行動の分析が必要であることが示唆される。

## 3.3.3 今後の展望

新エネ・省エネ普及に関する限定合理性について、太陽光発電システム設置における支払い方式に関する消費者の選好調査を例に考察した。このような限定合理性を持った選択行動が、本節の調査の結果で存在することが示唆されたが、今後は、現実の選択行動実績に基づく分析や、表明選好の調査をさらに実施して再現性を確認するなどにより、これを実証することが必要になる。消費者の選択行動の把握は低炭素技術の受容性を評価するうえで必要な事象なだけでなく、低炭素社会シナリオや戦略を構築するうえでも重要な意味を持つため、引き続きLCSにおいて検討を続けることが必要である。

# 【文献】

1) 高瀬香絵, 松橋隆治, 吉田好邦, 「アンケート調査に基づく経済性向上以外の効果的住宅用 太陽光普及政策の検討」, 第 28 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文 要旨集, 2012. 1. 30.

# 3.4 停電コストと安心安全のための技術普及

#### 3.4.1 概要

東日本大震災とその後に行われた計画停電は、「電力は常に安定的に供給されるもの」という 認識を覆し、電力の安定供給の問題を浮き彫りにした。それ以降、「自家発電設備としての」太 陽光発電や「電力貯蔵設備としての」蓄電池が注目を浴びている。これらは低炭素技術であると 同時に、人々の安心安全を確保するために必要な技術であり、その観点に立てば、これらのコス ト評価も重要といえる。

このような背景を踏まえ、LCS では 2011 年 8 月に計画停電の対象地域の住民 1,052 人に対するアンケート調査を実施し、停電回避に対する支払意思額は概ね  $500 \sim 900$  円 /kWh であるという結果を得た $^{1)}$ 。また、停電を回避するという目的で設置される蓄電池の適正価格を定量的に評価することができた。

このような調査を進めることにより、低炭素技術の適正価格を多角的に評価することが可能と なる。

#### 3.4.2 調査内容とその結果

アンケートはインターネット調査により2011年8月に計画停電の対象地域に居住するアンケートモニター1,052人に対し実施した。この調査では、24時間前までに時間帯の予告のある2時間の計画停電を仮定し、停電を回避するためならば、いくらまで支払ってもよいかという支払意思額を尋ねた。

停電が起こると仮定した時間、気温の条件とアンケートの結果を表3.4-1に示す。

	外気温	支払意思額 中央値;単位:円/2時間	停電回避電力量当たりの 支払意思額 中央値;単位:円/kWh
夏の平日 14~16 時	30°C	700	824
	35°C	725	853
夏の平日 18~20 時	27°C	675	630
	32°C	800	747
冬の平日 17~19 時	_	700	546

表3.4-1 計画停電の回避に対する支払意思額

全サンプルの中央値でみると、2時間の停電回避に対する支払意思額は700 ~ 800 円程度であるという結果が得られた。これを停電する2時間における電力使用量当たりの支払意思額に換算すれば、概ね500 ~ 900 円 /kWh となる。

このように推計された kWh 当たりの停電回避の支払意思額は、最も小さく見積もっても 500 円/kWh 以上であり、家庭向けの電力の購入価格 25 円/kWh 程度と比べて、極めて大きな値である。追加的に購入する電力よりも、既に使用している電力の方が高い価値を持つことは直感的にも整合するが、損失をより重視するという損失回避性を示しているとも解釈できよう。

# 3.4.3 停電リスクを回避する目的で設置する蓄電池の適正価格の算出

アンケート調査で得られた kWh 当たりの支払意思額を用いると、停電リスクを回避する目的で 導入される機器の適正価格を試算することができる。LCS では具体的に、停電の回避のために蓄 電池を導入する場合についての費用と便益について、簡単な試算を行った。

まず、1kWの蓄電池を設置することで停電が回避できる世帯を想定し、蓄電池の耐用年数を10年、1年当たり6時間(2時間/回×3回)の停電が起こるとすると、10年間合計で60kWhの電力の供給が停電時に確保できることになる。消費者の支払意思額が500円/kWhならば、住民は都合3万円を停電回避という便益に見合った費用であると認識していることとなる。つまり3万円が、蓄電池を停電リスクを回避するという目的で設置する場合の適正価格であるとみなせる。

一方、現状では蓄電池の価格はバッテリー本体でも 10 ~ 20 万円 /kWh 程度、インバータなどの蓄電池の使用に不可欠な周辺機器を含むシステム価格では 100 万円 /kWh 近い機器もある。量産が進めば価格は大幅に低下すると考えられるが、現状では蓄電池を停電回避の目的で購入するには、価格が高すぎると判断せざるを得ない。震災以後、蓄電池を購入した層が少数であるが存在することを説明する結果とはいえる。

実際には蓄電池は停電時のバックアップ以外にも、再生可能エネルギーの安定的な導入の助けとなる機器として、有望視されている低炭素技術の一つでもある。したがって低炭素化に寄与する便益と、停電回避の便益の合計が蓄電池の費用を上回ることが、蓄電池が世の中に普及するためのコスト面での必要条件であると考えられる。低炭素技術を評価するとき、このような副次的な便益を考慮することが普及戦略を考慮するうえでも欠かせない手続きである。

### 3.4.4 今後の展望

東日本大震災による原発事故に伴う電力供給力の不足は、短期的には低炭素社会の実現よりも 切迫した、極めて重要な問題であることは間違いない。しかしながら、両者は独立して捉えられ るべき問題ではなく、本節で述べた蓄電池の役割のように、両立するものである。蓄電池以外にも、 燃料電池による分散型発電、太陽光発電は同様な意味を有する技術であり、今後はこのような技 術の評価も検討することが必要である。

#### 【文献】

1)金テイ、松橋隆治、吉田好邦、「家庭部門における停電回避に対する支払意思額の評価」、第28回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文要旨集、2012.1.31.

# 3.5 次世代自動車の普及による温室効果ガスの削減可能性

#### 3.5.1 概要

3.2節から3.4節において、太陽光発電や停電回避サービスの購入についてのアンケート調査によって、仮想的な状況に関する選択行動を尋ねることにより、消費者の選好を推定した(これを表明選好分析と呼ぶ)。また、3.2節の一部で過去の普及施策とその結果である普及実績との関係を分析したように、過去に実際に行った選択行動の結果に基づいて消費者の選好を推定する(これを顕示選好分析と呼ぶ)こともできる。表明選好分析では、現実にはない環境施策や仮想的なサービスに対する消費行動を直接予測することが可能である。一方、顕示選好分析は選択実績に基づいた分析であるために、仮想的な状況に対する予測可能な範囲はそれに比べて小さいが、一般に予測の信頼性は高くなる。本節では顕示選好分析の事例として、乗用車の購入の選択データに基づいて、消費者の乗用車の選択のモデル化を行う。モデルに基づいてエコカー減税・エコカー補助金政策による、次世代型自動車を含む先進環境対応車の普及量を推定し、併せて温室効果ガスの削減量を検討した。

### 3.5.2 車種選好モデルの構築と普及施策の効果の検証

使用したデータは(財)自動車検査登録情報協会が提供する地域別型式別自動車保有車両数のデータと、2009年に新車販売された普通・小型四輪乗用車の全型式の諸元データである。国内で販売されている全ての型式別の車両の諸元データを用いて、各型式の販売台数が、価格や燃費などの車両の特性とどのように関係しているかを分析した<sup>1)</sup>。その結果、型式別の販売台数を、各型式の前年販売台数、新車種であるかを示すダミー変数、室内容積、燃料費などの年間経費、そしてエコカー補助金額の5つの変数で説明する式を作成した。

この関係式を用いると、たとえばエコカー補助金の額を変更したときの販売台数の予測が可能となる。そこで 2009 年に施行されたエコカー減税・エコカー補助金政策がなかった場合の各型式の販売台数を推計し、同政策ありの場合の販売台数と比較することにより、同政策の効果を検証した。その結果、販売された自動車の走行に由来する  $CO_2$  排出量は、エコカー減税・エコカー補助金政策によって、同政策を仮に実施しなかった場合と比較して、年間約4%減少したと推定された。これは同政策によって燃費の良い車種が多く普及することによる。図3.5-1に先進環境対応車(次世代自動車ならびに環境性能に特に優れた従来車)の普及効果を示したが、小型車を中心に同政策による普及効果が顕著であることが示唆される。

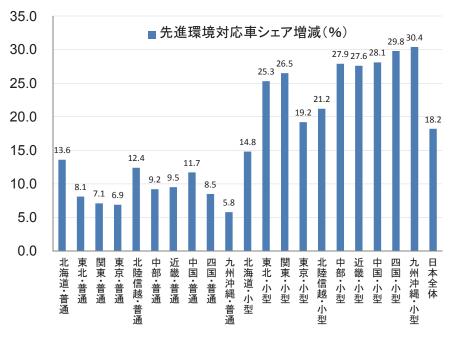


図3.5-1 エコカー減税・補助金による先進環境対応車のシェアの増加率の推定

では、エコカー補助金政策よりも  $CO_2$  排出削減効果が大きい施策とはどのようなものであるだろうか。LCS では、燃費効率に比例して自動車税額が増減する制度を想定し、その効果を推計した。想定した制度では、排気量帯別に税額が決められている現行の自動車税を、燃費効率に比例して税額が決まるように修正する。仮にハイブリッド車では税を概ね免除し、現在販売されている型式の燃費効率の最も悪い型式の税額を現在の 3 倍の約 20 万円 / 年とする制度を想定して試算すると、エコカー減税・エコカー補助金制度の約 2 倍の  $CO_2$  排出削減が期待できることが示された。このように消費者の購買行動に基づいたモデルを用いることにより、実際の政策の効果を検証するだけでなく、仮想的な政策の効果を予測することも可能である。

### 3.5.3 今後の展望

現実の選択行動の結果に基づく顕示選好分析は、予測精度の高い推計が可能である。一方で電気自動車などの今後普及する技術の評価には、顕示選好分析と、アンケート調査による次世代自動車への選好調査等による表明選好分析を組み合わせた検討がより望ましい。LCSでは今後はこのような観点から、次世代自動車の普及による低炭素化のポテンシャルを検討していくことが必要である。

#### 【文献】

1) 菅沼貴之, 松橋隆治, 吉田好邦, 工藤祐揮, 「車種選好モデルを用いた次世代自動車普及のための減税・補助金施策の評価」, 第 27 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス 講演論文要旨集, p. 100, 2011. 1. 26.

# 第4章 低炭素社会構築のための統合モデルシミュレーション

#### 4.1 概要

エネルギーは現代社会のあらゆる活動を支えており、その安定供給の確保は豊かな低炭素社会の議論においても欠かすことのできない論点の一つである。一方、エネルギー政策の根幹は長期的なエネルギーの供給安定性、経済性、そして環境性の向上であり、この「環境性」の中の最重要項目に $O_2$ など温室効果ガスの低減が掲げられるようになっているなど、低炭素社会の実現とエネルギー政策は相互に非常に密接な関係にある。

エネルギーに関する国の政策の基本的な方向性は、2010年に閣議決定されたエネルギー基本計画に記されているとおりである。この計画は2030年までのエネルギーの需給を詳細に検討し作成されたものであり、エネルギーの供給安定性、経済性の向上とCO<sub>2</sub>排出量の削減技術の中心には原子力発電が位置付けられている。計画によると、2007年7月の新潟県中越沖地震などの影響もあって2008年時点で60%前後と低迷していた既設原子力の平均稼働率を2030年までに90%まで向上させ、さらに原子力発電所を14基新設することとなっている。

しかしながら、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災によって、エネルギーを巡る情勢は大きく変化した。日本は、東北地方を中心とした地域が壊滅的な被害を被っただけでなく、この地震と津波により、東京電力株式会社の福島第一原子力発電所の電源が非常用を含め、一時ストップし、危機的な状況に陥ったためである。福島第一原発の事故については 2012 年 1 月現在、野田総理の「冷温停止」宣言はあったものの、事故の完全な収束、廃炉、除染、被害地域及び住民に対する損害賠償などの問題解決は、まだその緒に就いたばかりである。これは日本の原子力発電史上最大の事故であり、今後の原子力に関する計画、さらにはエネルギー基本計画そのものも根底から見直さなければならないであろう。

一方で、エネルギー施策や低炭素化施策は日本経済や国民の生活に大きな影響を及ぼす。そこでこれらの施策を策定する際には、経済面での評価を十分に行い、低炭素化と経済成長が両立するように設計することが重要である。

LCSでは、以上の点を踏まえ、今後、あるいは何らかのエネルギー施策、低炭素化施策を行った場合の、エネルギー需給、CO<sub>2</sub>排出と国民経済への影響について定量的に評価を行ってきた。

分析にあたっては、応用一般均衡モデル、電源構成評価モデル、最終エネルギー需要モデルを 組み合わせた統合シナリオを用いた。また、原子力については「原発拡大ケース」、「原発現状維 持ケース」、「原発縮小ケース」の三つのケースを想定したうえで、温室効果ガスの削減を全く行 わない「基準ケース」と比較することとした。

この結果、原子力発電の規模が縮小した場合には、これが拡大した場合と比較して、2030年の CO<sub>2</sub> 排出量は大幅に増加し、多様な省エネ・新エネ技術の普及も、現状では原子力の縮小による CO<sub>2</sub> 増加分を全て帳消しにするほどの効果は未だないと分かった。一方で、家電製品や自動車など最終消費部門での省エネルギーの推進は、家計の効用を向上させる効果が高く、この点については原発の拡大、縮小を問わないことも分かった。

統合シナリオにより、第2章と第3章の結果を踏まえた低炭素社会の姿を描くとともに、その実現のための課題を抽出することができる。また、課題が克服された場合に随時統合シナリオに反映させていくことで、豊かな低炭素社会のあり方を具体的・現実的に指し示すことが可能となる。 以下、2030年に至るエネルギーシナリオについて述べる。

#### 4.2 エネルギーと低炭素化のシナリオ分析手法

LCS では、図4-1に示すようなフレームワークで、現在から 2030 年に至るエネルギーシナリオを策定した<sup>1)</sup>。まずは、このフレームワークを構成する三つのモデルについて解説する。

# (1) 応用一般均衡モデル

本章で紹介する応用一般均衡モデルは、市岡の分析<sup>2)</sup>を基に開発したモデルである。このモデルは経済理論に則って開発されたもので、エネルギーや低炭素化に関する施策の日本経済や国民生活への影響を、詳細かつ定量的に評価することができる。具体的には、家計が効用を最大化し、企業が収益を最大化するという条件の下で、全ての財・サービスと生産要素の需給が均衡する状態を定量的に示すモデルである。

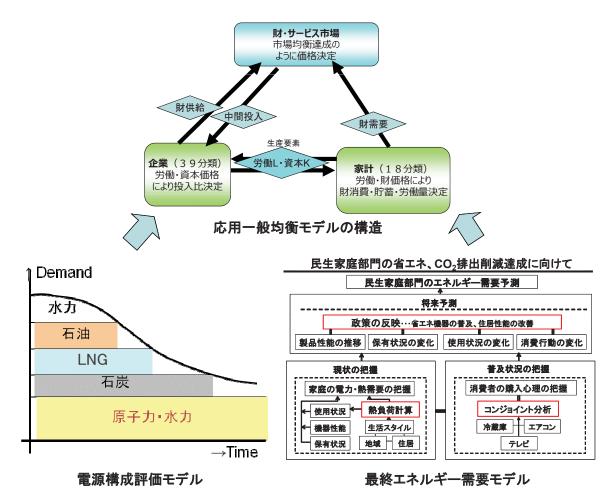


図 4-1 エネルギーシナリオ開発のためのフレームワーク

家計部門は図4-2の左に示した19種類の財と将来の消費に備える貯蓄を、自らの効用(満足度)を最大化するように決定する。また、家計部門は年収によって年間200万円未満の階層から1500万円以上の階層まで、全18階層に分類している。この分類はエネルギー政策や低炭素化施策の国民生活への影響を評価するうえで、二つの意味で重要である。一つ目は、所得階層によって、低炭素化に関する行動に違いがみられるためである。家庭における効率改善や再生可能エネルギーの浸透、すなわち、省エネルギー家電製品や太陽光発電システムは、一般に高価であるため、年収の高い階層の方が、低い階層よりも、こうした製品を購入する余裕がある。したがって、年収は、温室効果ガス削減のための省エネ機器などの導入に異なる影響をもたらす。二つ目は、LCSはエネルギーや低炭素化に関する施策は、特に低所得者に対し悪影響をもたらさぬよう慎重に設計すべきと考えているためである。本モデルが異なる所得階層への影響を定量的に求められることは、施策の設計のうえで重要な情報を与える。

一方、企業部門では収益を最大化するように労働と資本の投入を決定する。それと同時に決定される中間需要の財(原材料)は、図4-2の右に示す産業連関表のとおり39部門に分類されている。

モデルの流れを概説する。一例として、家庭部門において省エネ機器や新エネ製品を導入する場合について本モデルを用いて計算すると、産業部門における電気機械、精密機械、自動車製造業などの生産額が増加するが、エネルギー効率改善のために家庭部門における電気、ガソリンなどのエネルギーの消費量が減少する。そして、この家庭部門の最終需要の変化に端を発する複雑な波及効果が生じる。政府は自らの最終需要と公共投資などの財源として、炭素税を含む様々な税を課すことも計算に入れることで、最終的には、図4-3のように全ての財と生産要素の需要と供給が一致する均衡点を算出することができる。



図4-2 応用一般均衡モデルー部門ー

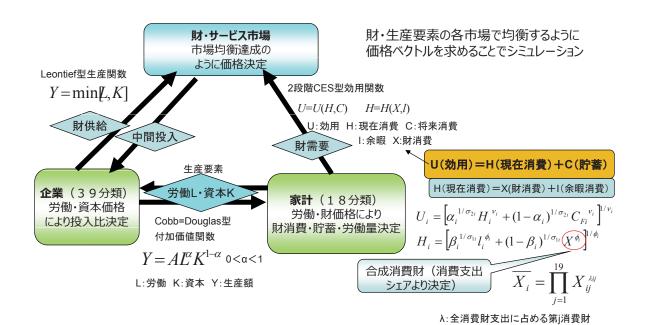


図4-3 応用一般均衡モデルの構造

### (2) 電源構成評価モデル

LCS が用いる電源構成評価モデルは、国立環境研究所の芦名らの研究による多地域最適電源計画モデルを基に構築したものである<sup>3)</sup>。この電源構成評価モデルは、以下のような前提条件の下で総発電コストが最小となる電源構成を評価するためのモデルである。

・発電の種類は、水力・原子力・揚水式水力・石炭火力・石炭ガス化複合・天然ガス火力・天

然ガス複合・石油火力・バイオマス火力の9種類に、太陽光及び風力を加えた11種類である。これらの発電技術のコストデータについては、国家戦略室の「コスト等検証委員会」において評価された値を用いている4)。ただし、太陽光発電については、別途LCSにおいて評価された値を用いる。この点については、後述する。

- ・発電と需要は電力会社の管轄区別に全国 10 か所の地域に分類(同じ都市内の送電も送電口スを考慮)しており、各地域を結ぶ連係線の送電容量も考慮している。
- ・電力需要の設定については、後述するように、1年間の各々の日を季節ごとの違いを考慮し 7パターンに分類している。
- ・2010年から5年おきに2035年までの5つの期間について解析を行い、この間のコストの割引現在価値の総和が最小となる解を求める。
- ・図4-4のように、供給予備力制約、電力需給制約、燃料消費量制約、各種設備容量制約、設備利用率制約、負荷追従率制約など約29万の制約条件の下で、5年×5期間=25年間のコストの割引現在価値の総和が最小となるように、約11万の変数を線形計画法<sup>A)</sup>により決定する。

電源計画モデルにおける電力需要は以下のとおりである。一年を①最大3日電力需要、②夏季平日、③夏季休日、④中間期平日、⑤中間期休日、⑥冬季平日、⑦冬季休日、の7期間に分け、各期間の電力需要の日変化を各地域の実データに基づいて表し、各地域・各期間・各時間帯の電力需要を満たすように制約式を作り、期間中の総発電コストを最小化するような電源構成を求める。

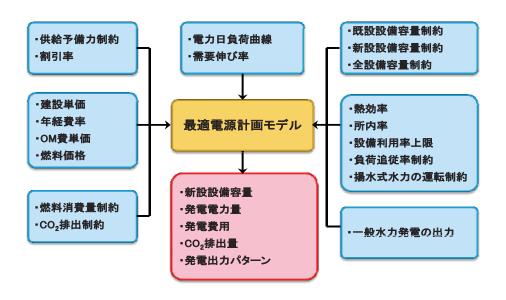


図4-4 最適電源計画モデルの構成

### (3) 最終エネルギー需要評価モデル

最終エネルギー需要評価モデルでは、以下の要領で家庭部門の最終エネルギー需要を評価する。 なお、家庭以外の業務部門、運輸部門、産業部門については、応用一般均衡モデルの中で内生的 にエネルギー需要が決定される。

- ① 18 階層の各所得ごとに家計等消費構造統計などのデータに基づき、各階層の家計の標準となる電気・ガス・灯油・ガソリンなどのエネルギー需要を設定する。このエネルギー需要は後述する各技術の普及率によって変化するものである。
- ② 住宅の断熱性能の 2030 年時点での普及率を設定し、これに基づき各階層の家庭の冷暖房需要を評価できるモデル構造とする。

- ③ 太陽光発電・エコキュート・燃料電池等新技術の2030年時点での普及率を設定し、これに基づき、階層ごとの家庭の冷暖房・温水・電気・ガス・灯油需要を評価できるモデル構造とする。
- ④ 家電製品の中で消費電力の大きいエアコン・テレビ・冷蔵庫につき、トップランナー制度<sup>B)</sup> の継続による 2030 年時点での性能を推定し、これに基づく各階層の家庭の電力需要を評価できるモデル構造とする。
- ⑤ 自動車のトップランナー制度の継続と次世代自動車の普及による 2030 年時点での性能を推定 し、これに基づき、各階層の家庭のガソリン需要を評価できるモデル構造とする。
- ⑥ 上記の全ての最終需要製品の普及を総合して、2030年時点での階層ごとの家庭の冷暖房・温水需要を評価し、電気・ガス・灯油需要を設定する。
- ⑦ なお、ここで設定された最終エネルギー需要は、標準状態での値であり、一般均衡モデルの 収束により、所得の初期均衡からの変化に伴い、増減が起こり得る点に注意を要する。

#### (4) モデル計算上の設定条件

次に、(1)のモデルを用いた分析を行うにあたって設定した条件について説明する。

LCSでは、原子力の拡大、縮小に関しては以下の三つのケースを想定し、各々のケースについて温室効果ガス削減量と国民生活への影響を、温室効果ガスの削減を行わない基準ケースとも比較のうえ評価した。

#### ・基準ケース (GHG 無削減ケース)

温室効果ガスの削減を全く行わない基準ケースである。国内総生産(GDP)成長率は2005年から2020年までは1.3%/年、2020年から2030年までは0.5%/年と仮定する。

### ・原発拡大ケース

GDP 成長率は基準ケースと同じであり、太陽光発電は 2030 年に 5300 万 kW に増加すると仮定している。福島第一原発の6基は停止するが、その他の原子力の新規建設はエネルギー基本計画に従うものとし、既設原子力の稼働率を 90%とする。

### 原発維持ケース

GDP 成長率は基準ケースと同じであり、太陽光発電は 2030 年に 5300 万 kW に増加すると仮定している。福島第一原発の6基は停止するが、その他の原子力発電については、40 年の耐用年数経過後に廃炉した容量だけの新規建設を認めることにより、原子力発電全体としての現状の規模を維持するものとし、その稼働率を 90%とする。

#### ・原発縮小ケース

GDP 成長率は基準ケースと同じであり、太陽光発電は 2030 年に 5300 万 kW に増加すると仮定している。2030 年において、福島第一、第二原発は稼働せず、その他の既設の原発も運転開始から 40 年経った時点で廃炉とする。さらに原子力発電のこれ以降の新規建設が不可能になったと想定する。これによる電力供給不足分は主として火力発電の増加で対応する。

原子力政策以外では、下記のような省エネルギー及び燃料転換の施策を応用一般均衡モデルに 盛り込んだ。これらの施策は基準ケースを除く全てのケースに共通とした。

- ① 次世代省エネ住宅(H11年基準)は、建築研究所の推定を基にして 2030 年に存在する住宅の 約 48% (2030 年)まで増加すると仮定した。
- ② 次世代自動車はストックの5割(2030年)まで増加すると仮定した。
- ③ 家電製品、自動車のトップランナー制度を継続するものとした。
- ④ 石油化学工業を除く産業部門において 2005 年の重油等石油製品燃料利用の 80%が天然ガスに 転換するものとした。
- ⑤ モーダルシフト推進:物流の詳細な分析を基に輸送部門の CO<sub>2</sub> 排出量を最大 44%削減できる ものとした<sup>5)</sup>。

この中で、①・②・③は家計に直接影響を与える「日々のくらしにおける省エネルギー」に当たるものである。豊かな低炭素社会を実現するうえで重要な項目であるため、後の分析では、①・②・③が入ったものを「最終消費の効率改善あり」、①・②・③が入らないものを「最終消費の効率改善なし」として、その影響をみている。なお、④・⑤については、基準ケースを除く全て

のケースに導入している。

原子力発電の運用年数と残存容量について図 4-5 に、上記の各ケースの発電量の比率を図 4-6 に示す。

また、太陽光発電については、第2章で記した定量的技術シナリオに基づき、価格低下していくものと想定した(表4-1)。

一方、低炭素化政策が家計の効用に与える影響を評価し、家計の効用を向上させる効果が高い のは、家電製品や自動車など最終消費部門での省エネルギーの推進であることを示した。この点

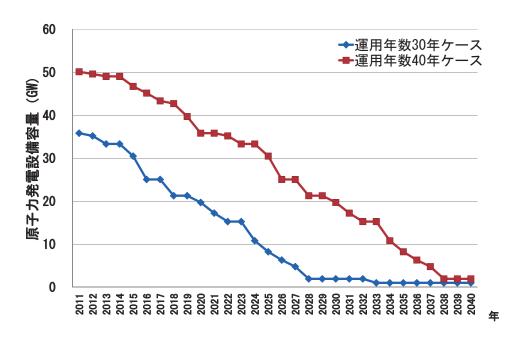


図4-5 原子力の運転年数と残存設備容量

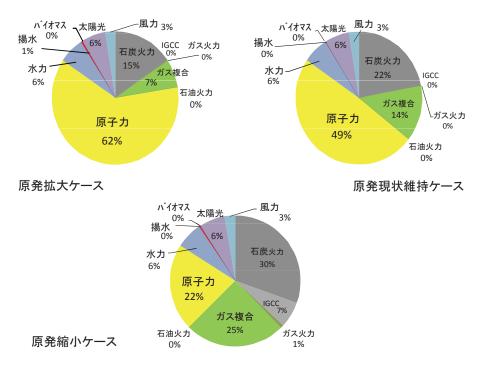


図4-6 各シナリオの2030年の発電量構成の比率(最終需要の省エネあり)

は、原子力の拡大、縮小にかかわらず成立する。したがって、豊かな低炭素社会を実現するためには、「日々のくらしにおける効率改善」を大幅に進展させることが重要である。

表 4-1 太陽電池に関するコスト低下(LCSの評価結果)

(円/W)

	2012 年	2015 年	2020 年	2030 年
プラントサイズ	1 GW/年	1 GW/年	1 GW/年	1 GW/年
モジュール	100	100	75	50
BOS	150	150	100	70
システム全体	250	250	175	120

#### (5) 2030 年におけるエネルギー需給、00。排出量と国民経済への影響評価

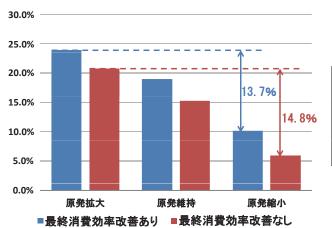
このフレームワークを利用して、各ケースの 2030 年におけるエネルギー起源  $CO_2$  排出量の削減率を評価した結果を図 4-7 に示す。

これより、福島第一原発事故で新規建設の延期や中止が起こることによる CO<sub>2</sub> 排出量への影響は、非常に大きいことが分かる。すなわち、原発拡大ケースと原発縮小ケースでは、1990 年比のエネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出量の差が 13.7 ~ 14.8%ある。

次に、基準ケースと比較した場合の、各ケースの家計一世帯当たりの厚生額の増減を評価した結果を図4-8に示す。厚生額の増減は、国民の効用の変化から算定したもので、基準ケースと同じ物価レベルに調整した結果の数値である。これは、各ケースによってエネルギーなどの価格が変化しているため、単に可処分所得を比較するだけでは、家計の実質的な効用の増減を表せないからである。要するに、ここでの厚生額の増減とは、財の価格を基準ケースに揃えた場合の可処分所得の増減額を表していると考えてよい。

家計の厚生額への影響をみると、原発を拡大するケースと原発を縮小するケースとの差はあるものの、原発の拡大、維持、縮小にかかわらず、最終需要の省エネルギーを進めれば、一切の温室効果ガス排出削減を行わない基準ケースよりは、国民全体の厚生額は5兆円以上高くなる。一方、最終需要の省エネルギーを進めないケースでは、基準ケースよりもむしろ厚生が低下している。この主たる原因は地球温暖化対策税の導入である。

国家戦略室の「コスト等検証委員会」では EU の排出量取引価格などを参考に 2010 年以降の炭素価格を想定し、各種発電技術のコストを評価している。この炭素価格は 2030 年において 3,430



原発拡大ケースと 原発縮小ケースで は、1990年比のエ ネルギー起源CO2 排出量の差が13.7 ~14.8 % である。

各ケースのエネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出量の削減率

図 4-7 応用一般均衡モデルを用いたシミュレーション結果 1 (2030 年)

円 /t- $CO_2$  となっている。本報告では、この評価に基づき、地球温暖化対策税を設定している。この地球温暖化対策税は、電源構成の決定において  $CO_2$  排出の少ない電源への移行を促進するだけでなく、エネルギー価格の上昇を通じて、家計の厚生を低下させる。最終需要の省エネルギーを進めないケースでは、原発拡大、維持、縮小にかかわらず、家計の厚生がマイナスになっているが、これは地球温暖化対策税の影響が大きいと考えられる。したがって、こうした税を導入し、その税率を長期的に引き上げていく場合には、家計の厚生低下を抑制するような緩和措置の導入を検討する必要がある。

また、2030年において、原発を拡大するケースと縮小するケースの家計の厚生額を、低所得者から高所得者までの所得階層ごとにみた結果を図4-9に示す。これより、最終消費の効率(4.

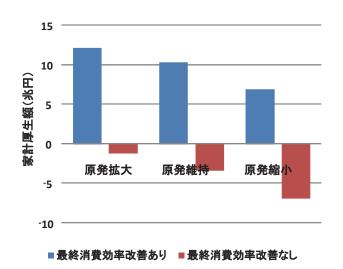


図4-8 応用一般均衡モデルを用いたシミュレーション結果2 (2030年)

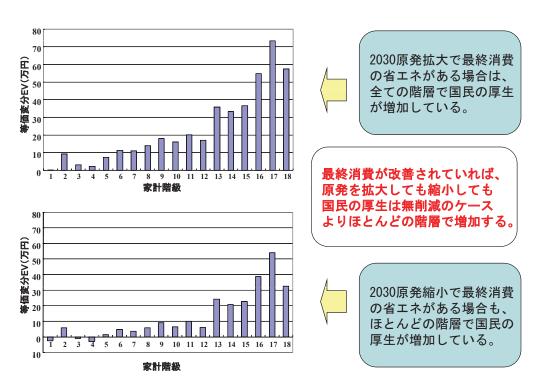


図4-9 応用一般均衡モデルを用いたシミュレーション結果3

2(4)で①②③に示した項目)が改善されていれば、原発を拡大しても縮小しても、国民の厚生は、 大部分の所得階層で無削減のケースより増大することが分かる。すなわち、省エネルギーの推進 が豊かな低炭素社会の構築にとって重要である。

図4-10には、これまで述べてきた各シナリオの実質 GDP の評価結果を示した。これを見ると、最終消費部門の効率改善がない場合の方が、効率改善がある場合よりも2兆円程度 GDP が高くなっている。この結果は、効率改善のための製品を供給することにより生産額が増加する電気機械部門や輸送用機械部門と、効率改善によってむしろ生産額が減少するエネルギー関連部門を総合した影響を示している。ただし、この差は GDP 全体の 0.3%程度である。

これらの結果より、原子力拡大ケースは、CO<sub>2</sub>削減量の点では他のケースより優れていることが分かる。しかし、福島第一原発事故を受けて、国民の原子力発電に対する信頼が崩れてしまっている現状では、安心・安全への懸念が大きくなっている。原子力縮小ケースは、経済性の点で、原子力拡大ケースには若干劣るものの大きな差はない。しかし、CO<sub>2</sub>排出量の削減率が低下し、エネルギーの安定供給という点でも不安が残るシナリオである。

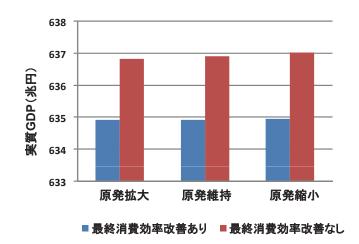


図4-10 応用一般均衡モデルを用いたシミュレーション結果4

### 4.3 おわりに

本節では豊かな低炭素社会を実現するための、日本の中長期のエネルギーシナリオについて検討した。具体的なエネルギーシナリオを描くため、日本の応用一般均衡モデルを利用し、電源構成モデル、最終エネルギー需要モデルと組み合わせて、東日本大震災による原子力発電の拡大あるいは縮小などの影響を考慮した比較分析を行った。また、このモデルの中で多様な省エネ技術の普及に関する評価を行った。その結果、原子力発電の規模が縮小した場合には、これが拡大した場合と比較して、2030 年の 602 排出量が大幅に増加することを定量的に示した。多様な省エネ技術の普及も、現在のところ、原子力の縮小による 602 増加分を全て帳消しにするほどの効果はない。ただし、第4章で示したシナリオについては、以下の点に注意を要する。ここでの分析は、中立的視点から、将来のシナリオについて、その 602 排出量、実質 GDP、家計の厚生額等を評価したものであり、原子力の拡大、維持、縮小のいずれかのシナリオを最適と評価しているのではない。また、602 排出量、実質 GDP、家計の厚生額等の指標は、国民生活や国家全体への影響を評価するうえでは部分的なものにすぎず、これだけでは国家全体としての意思決定を行うに不十分である。現在、総合資源エネルギー調査会基本問題委員会や中央環境審議会地球環境部会等でも同様の審議が進んでいるが、最終的にはモデルのアウトプットなどではなく、国家全体を多面的に考慮する視点から意思決定がなされるものと考えられる。

一方、低炭素化政策が家計の効用に与える影響を評価し、家計の効用を向上させる効果が高いのは、家電製品や自動車など最終消費部門での省エネルギーの推進であることを示した。この点は、原子力の拡大、縮小にかかわらず成立する。したがって、豊かな低炭素社会を実現するためには、「日々のくらしにおける効率改善」を大幅に進展させることが重要である。これを実現す

るには、技術面と制度面での大幅なイノベーションが必要である。これには、省エネルギー技術の更なる革新、太陽光発電をはじめとする再生可能エネルギーの効率改善とコスト低下、及びこれらを普及促進させるための社会システムの変革が含まれる。

#### 4.4 今後の課題と展望

本章では、第2章の技術開発戦略と第3章の技術普及戦略を踏まえ、両戦略を組み合わせて「明るく豊かな低炭素社会」の姿を描き出すことを目的としてきた。現在のところ、第2章及び第3章では、低炭素社会の実現にとって重要な技術についての今後の展望が得られているものの、技術開発と普及の戦略を理想的に組み合わせるには至っていない。したがって、本章の「統合シナリオ」も「豊かな低炭素社会」を完全には表現できていない。

そこで、今後は技術開発戦略と技術普及戦略の理想的な融合の在り方を検討し、その結果を「統合シナリオ」に反映させ、真に「豊かな低炭素社会」の姿を示すことが最重要課題である。

#### 【文献】

- 1) R. Matsuhashi, K. Takase, K. Yamada and Y. Yoshida, Prospective on Policies and Measures for Realizing a Secure, Economical and Low-carbon Energy System, -Taking the Effects of the Great East Japan Earthquake into Consideration-, Low Carbon Economy, Vol. 2, No. 4, pp. 193-199, 2011,
  - http://www.scirp.org/journal/lce/
- 2) 市岡修, 応用一般均衡分析, 有斐閣, 1991.
- 3) 芦名秀一, 藤野純一, 多地域最適電源計画モデルを用いたわが国電力部門における CO<sub>2</sub> 削減シナリオの検討, エネルギー・資源 29-1, pp. 461-464, 2007.
- 4) 国家戦略室, コスト等検証委員会報告書, 2011.12.19, http://www.npu.go.jp/policy/policy09/archive02.html
- 5) 服部公裕, 吉田好邦, 松橋隆治, 地域間物流に伴う  $CO_2$  排出量の削減ポテンシャル, エネルギー・資源, 31 巻, 1 号, p. 43, 2010.

# 【用語】

### A)線形計画法

一次不等式で表された制限条件の中で、目的関数の値を最大または最小にする解を求める数学的技法。

B)トップランナー制度

省エネルギーの推進に関する法律で定められた制度であり、電気製品や自動車の省エネルギー化を図るためのものである。市場に出ている同じ製品の中で、最も優れている製品の省エネ性能(トップランナー)を基準にして、対象企業の該当製品の性能の平均値が、所定の年度においてその基準以上を達成することを目指す。

# 第5章 低炭素社会構築に向けた社会実証実験

### 5.1 停電予防連絡ネットワークの構築と実証研究

#### 5.1.1 停電予防連絡ネットワークの構築までの背景

2011 年3月に起きた東日本大震災において、東京電力と東北電力管内の発電施設の被害は甚大なものであり、震災直後は電力需給が逼迫し計画停電を行うなど過去に経験したことがない事態となった。計画停電は産業・経済、国民生活を停滞させ、一部地域にのみ過大な「我慢」を強いた。電力需要が高まる時期に、どのように節電を行い、計画停電なしに乗り切るのかは、電力不足の地域全体に課せられた重要な課題である(BOX 1)。

低炭素化には、燃料転換、再生可能エネルギー利用、省エネ(エネルギー管理)、炭素隔離がある。その中で、省エネは、コストが低く行えるものとして広く認識されている。特に、電力需給が逼迫する時間帯においては、電力供給量の調整が容易な LNG や石油火力による発電量が増加するため、この時間帯の節電を促すことは低炭素化にもつながる。

電力の消費者は、大きく分けて、産業、業務、家庭の三部門に分けられる。2011 年夏季には、産業部門と業務部門については、消費電力が大きい契約電力 500kW 以上契約者を対象に電気事業法第 27 条に基づく電力使用制限が実施され、7月1日から9月9日まで 2010 年夏の最大消費電力から 15%低い値で使用が制限された。これらの部門では、営業時間、操業時間の短縮・シフト、輪番休日、夏期休暇のシフト、夏季長期休暇、照明の削減、空調利用の緩和、ブラインドなど遮光遮熱、執務室の集約、LED 灯への転換、ガス空調器の利用、BEMS (ビルエネルギーマネジメントシステム) の導入など多様な対策を実施した。節電は、実際のところ電気代の節約となり、経費削減が可能になったというメリットもあったが、一方、産業によっては生産活動を鈍化させ、経済活動に少なからず悪い影響もあったことは否めない。低炭素社会戦略センター (LCS) では、明るく豊かな低炭素社会の構築を進めており、経済活動の停滞を伴った低炭素社会は LCS の目指すところではない。

一方、家庭部門は法規制などのアプローチが最も難しい部門であり、政府の家庭部門への施策も節電目標を示すにとどまった。そこで LCS では、各家庭が経済活動を維持したまま、無理のない範囲で節約することにより社会全体のエネルギー使用量を削減するシステムを構築することは、低炭素社会戦略の点からも肝要であると考え、自治体と協働し、家庭部門における節電促進を目的とした「停電予防連絡ネットワーク」の構築を開始した。

LCS の知見と自治体の行動力が結び付くことで、家庭部門に直接働きかけ、低炭素社会への変革の一助とすることが可能となった。

#### 5.1.2 停電予防連絡ネットワークとは

LCS が構築した停電予防連絡ネットワークは、電力不足時に、地域の緊急ネットワーク連絡網を使用して節電を呼び掛け、それにより節電の効果を上げることを目的にしたシステムである(図5.1-1)。電力の需要が増加し、供給最大レベルまで近づいたとき、地域の緊急連絡ネットワークに節電の必要性の依頼が連絡される。電力需給の逼迫をその深刻度に応じて三つのレベルに分け、各レベルについて家庭でできる節電メニューを連絡することで、節電を促す。LCS では、プラチナ構想ネットワークと協力し、東京電力管内の55の自治体に停電予防連絡ネットワークに加入してもらい、停電予防に向けた枠組みを構築した。BOX 2 に参加自治体の一覧を示した。

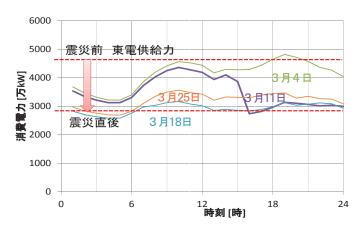
#### (1) 停電予防連絡ネットワークの特徴

一般家庭に節電を呼びかけることを目的としたサービスは、LCSによる取組以外に、東京電力(でんき予報)や政府(節電.go.jp)においても実施された。これらの機関とは合意のうえ、整合性

を持った取組として LOS による停電予防連絡ネットワークを実施した。

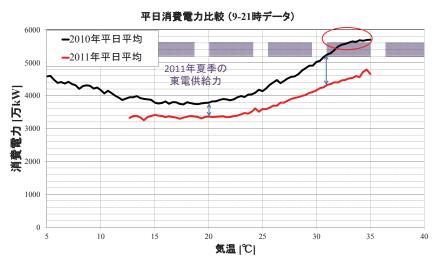
### BOX 1 東北地方太平洋沖地震による電力需給の変化

東北地方太平洋沖地震は、電力需給に大きな影響を与えた。図 A は東京電力管内消費電力量の一日の変動について、2011 年 3 月の金曜日のみ比較したものである。また、震災の直前、直後の東電供給力の変化を赤破線で示した。消費電力、供給力ともに震災直後、急激に減少したことが分かる。3 月 14 日から 28 日まで実施した輪番停電により、消費量が抑制された。また、図 B に 2010 年と 2011 年の東京電力管内の平日の消費電力と気温との相関の違いを表した。2010 年夏季で 2011 年の供給力(5620 万 kW)を超えた日数は 20 日間あったが、実際には社会の節電効果により、2011 年に供給力を超過することはなかった。同じ気温で比べると400 ~ 1000 万 kW 程度、2011 年は 2010 年の値よりも少なかった。



東京電力データから LCS が作成

図 A 2011 年 3 月の金曜日のみの東京電力管内消費電力量の変化と震災前後の東電供給力の変化



東京電力、気象庁データから LCS が作成

図 B 2010 年と 2011 年の東京電力管内の平日の消費電力と気温との相関(紫の破線で示す範囲は 2011 年夏季の東電供給力)

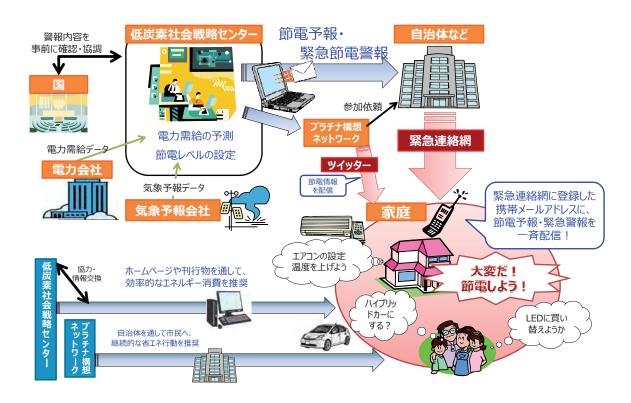


図5.1-1 停電予防連絡ネットワークの仕組み

LCSによる停電予防連絡ネットワークの特徴として以下3点が挙げられる。

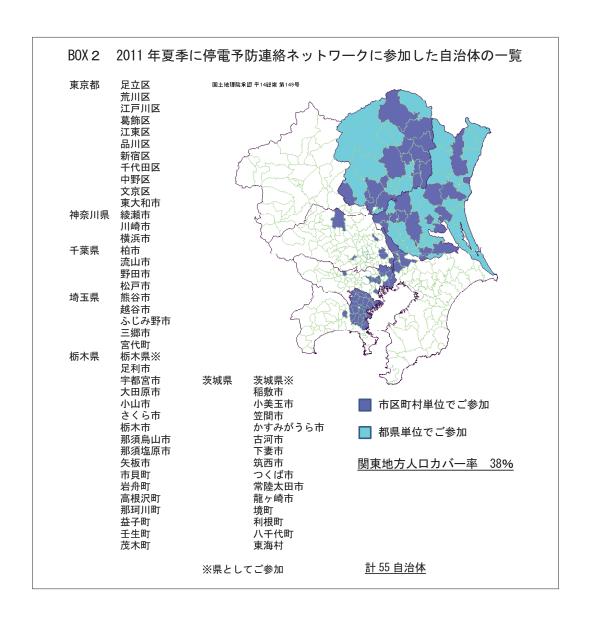
#### ① 節電対象時間の指定

東日本大震災後から継続的に続いた電力不足により、昼夜を問わず節電を心がけてきた家庭が多い。しかしながら大規模停電の予防という観点では、電力使用率が高い時間帯に、集中的な節電を促すことが重要となる。LCSでは、独自に開発した電力消費量予測モデル((3)にて後述)に基づき、2~3時間に区切った節電の呼び掛けを行った。1日の中でもメリハリのある節電行動を促すことで、"節電疲れ"を軽減しつつ大規模停電を予防するシステムは、他では見られない。② 具体的な節電メニューの配信

家庭における節電対策に関しては、多数の機関が発表している。LCSでは、電力需給の逼迫レベルに応じて各種節電対策を分類し、各レベルにおいて特に節電効果が高いと予想される対策5個前後を、①で述べた節電対象時間と併せて配信した。このように、需給逼迫レベルに応じて節電対策を選択・配信するシステムは、他では見られない。なお、節電対策の選択に関しては、第3章に記載した実証研究に基づき今後も検討を行う予定である。

#### ③ 地域のネットワークを活かしたシステム

停電予防連絡ネットワークは、自治体が保有している既存の緊急連絡網を活用して、節電を呼び掛けるシステムである。情報を受信する家庭にとっては、自らが所属する自治体からの情報となるため、配信元に対して不信感を抱くことはないと考えられる。また、情報を配信する自治体にとっても、既存の連絡網を有効に活用して地域住民へ有用な情報を発信できる点が、長所として挙げられる。さらには、参加自治体内で省エネ・節電を一体的に取り組む環境の熟成も期待される。



### (2) 停電予防連絡ネットワークの仕組み

停電予防連絡ネットワークでは、電力需給バランスの逼迫度を3段階設定した。電力使用率が、電力供給量の90%未満の場合を「レベル1」、90  $\sim$  97%未満の場合を「レベル2」、97%以上の場合を「レベル3」と区分した。

「レベル1」は停電予防のための緊急行動をとる必要はないレベルであるため、停電予防連絡ネットワークによる情報発信は行わない。ただし、「レベル1」で推奨される節電行動はLCSのホームページにて常時公開した。

「レベル2」「レベル3」に至ると予測された場合には、停電予防連絡ネットワークを通じて、 前日もしくは当日に情報発信を行った。前日に発信する情報を「節電予報」とし、当日に発信す る情報を「緊急節電警報」とした。

節電予報は、翌日の家庭における節電行動計画を事前に練ることを主目的としている。緊急節電警報は、大停電のみならず、計画停電を回避することを主目的としている。計画停電を回避するためには、計画停電開始の遅くとも2時間前までに電力消費が減る兆しが必要であるため、その約4時間前に配信することにした。情報発信のタイミングと、発信する可能性のある逼迫レベルの関係を図5.1-2に示す。

#### 電力需給の逼迫度

	$\rightarrow$	
	レベル2	レベル3
	(電力使用率90%~97% 未満の場合)	(電力使用率97%以上 の場合)
節電予報 (前日16時半〜18時頃までに自治体担当者 (緊急連絡網管理者)へ配信)	0	0
緊急節電警報 (当日、東京電力の情報に基づき、電力使用率 97%超過が予測される時間帯の約4時間前に、 自治体担当者(緊急連絡網管理者)へ配信。 朝10時の段階で、既に4時間を切っている場合 は、朝10時に配信する。)		0

図5.1-2 情報発信のタイミングと逼迫レベルの関係

#### (3) 停電予防連絡ネットワークの構築

停電予防連絡ネットワークを構築するにあたり、①電力消費量予測モデルの開発、②逼迫レベルに応じた節電メニューの設定、の2点を行った。

#### ① 電力消費量予測モデルの開発

停電予防連絡ネットワークの運用においては、信頼性の高い消費電力の予測が不可欠である。消費電力の予測については、東京電力の発表する「でんき予報」においても発表されているが、停電予防連絡ネットワークを構想した時点では、東京電力から詳細な消費電力の予測が発表されることは確定していなかった。また、「でんき予報」による消費電力の翌日の予測は 17 時 30 分以降に発表されるため、自治体の就業時間を超えており、その日のうちに自治体のネットワークを通して市民へ節電情報を伝えることが困難であった。よって、LCS では独自に消費電力予測モデルを構築し、自治体の対応が十分に可能な 16 時過ぎに翌日の予測を行うこととした。

LCS で開発した消費電力予測モデルは、気象条件 (気温、湿度、最高気温等)、曜日等のパラメータを基に、東京電力管内の消費電力を 1 時間単位で予測する。2011 年の消費電力の振る舞いは東日本大震災の影響により 2010 年以前とは大きく異なっており、2011 年のデータのみを用いてモデルを構築する必要がある。特に 2011 年の夏の初期においては、気温の高いときのデータが極めて少ない。本モデルでは、用いるパラメータを少なくし、またこれらのパラメータと消費電力の間の関係式には単純な一次式を採用している。これらの特徴によって、本モデルではデータ数が少ない場合に消費電力と各パラメータ間との関係式がうまく求まらない、過剰適合と呼ばれる現象の起きる可能性を軽減しているため、データ数が少ない場合でも十分な精度で消費電力を予測することができる。

2011年7~9月の停電予防連絡ネットワーク運用期間中の平日の昼(9~21時)の時間帯において、消費電力予測モデルによる消費電力予測値の実測値に対する標準誤差は85万kWであった。また、7~9月の全ての平日のうち76%で、消費電力ピーク時における予測値と実測値が100万kW以内で一致した。これらは「でんき予報」において発表された予測の精度とほぼ同等で

あり、このモデルが十分な精度を持っていることが分かった。

以上のように、十分な精度を持つ消費電力予測モデルを構築することにより、停電予防連絡ネットワークにおいて信頼性の高い消費電力予報を流すことが可能となった。

# ② 逼迫レベルに応じた節電メニューの設定

LCSでは、政府(節電.go.jp)や(財)省エネルギーセンターなど多数の機関が発表している 節電メニューを調査し、逼迫レベルに応じて以下のように分類した。

# レベル 1

### ・買い替えによる節電行動

エアコン	古いエアコンを買い替えましょう
照明	白熱電球から LED 電球やインバータ式蛍光灯に買い替えましょう
テレビ	古いブラウン管テレビを、液晶テレビ等の低消費電力テレビに買い替
	えましょう
冷蔵庫	古い冷蔵庫を買い替えましょう
窓部分	遮熱カーテンに変え、二重窓を取り付けましょう

# ・暮らしの中の節電行動

エマコン・・空戸地	冬場:設定温度を低めにしましょう
エアコン・暖房機器(こたつ、電気カーペット等)	夏場:設定温度を高めにしましょう
	エアコン利用時に循環のために扇風機をつけましょう
	エアコンやファンヒーターのフィルターを定期的に掃除しましょう
テレビ・パソコン	使用しない時は、電源を切るかシステムスタンバイ状態にしましょう
調理家電	電気ポットや炊飯器の保温機能を使わないようにしましょう
冷蔵庫	温度設定を標準または弱に変更しましょう
	壁から適切な距離を空けて設置しなおしましょう
	開け閉めの回数を減らしましょう
温水洗浄便座	保温便座のフタを閉めるように心がけましょう
家電全般	待機電力をなるべく切るようにしましょう
窓部分	夏場:西日の強い時間は、遮光カーテンを閉めましょう

### レベル 2

比較的大きな電力消費家電について、不要不急の場合の使用を控えるとともに、使用時間をずらせる家電についてはピーク時間帯を避けて使用する等の節電行動。

エアコン・暖房機 器(こたつ、電気	冬場:設定温度を低めにしましょう
お (こたり、电気 カーペット等)	夏場:設定温度を高めにしましょう
照明	使用する部屋以外の照明を消しましょう
テレビ・パソコン	省電力モードにしましょう
その他家電	使用の際は省エネを心がけ、炊飯器等の調理家電や洗濯乾燥機、加
	湿器、食洗機、掃除機等の使用をなるべく控えましょう

#### レベル3

レベル2より厳しい次のような節電行動。身体・生命・財産等に影響を及ぼさない範囲で、不要不急の電気機器の使用を控える等の行動。

エアコン・暖房機 器 (こたつ、電気 カーペット等)	冬場:設定温度を低めにしましょう
	夏場:設定温度を高めにしましょう
	冬場:暖房する部屋をできるだけ減らしましょう
	夏場:冷房する部屋をできるだけ減らしましょう
照明	部屋の照明を消しましょう
テレビ・パソコン	使用を控えましょう/消しましょう
	使用の際は省エネを心がけ、炊飯器等の調理家電の使用を控えまし
その他家電	ょう/使用の際は省エネを心がけ、炊飯器等の調理家電や洗濯乾燥
	機、加湿器、食洗機、掃除機等は使用しないようにしましょう

### 5.1.3 家庭におけるより効果的な節電行動の検討のための実証試験の実施概要

LCS では、停電予防連絡ネットワークの効果を検証し、家庭におけるよりよい節電行動を促すために、荒川区、足立区、柏市、川崎市、流山市の協力の下、アンケート調査及び電気使用量の計測による実証試験を行った(合計 326 世帯の家庭でアンケート調査、うち 119 世帯では省エネナビ設置)。実証試験により、停電予防連絡ネットワークによる節電の促進とともに、各家庭の節電のための行動の効果を定量的に把握することで、ピーク時の節電戦略に今後活用することができる。

実証試験は停電予防連絡ネットワークの運用期間に合わせて、夏季が7~9月、冬季が12~3月までの実施で、実証試験の協力家庭は協力自治体を通じて募集を行った。夏季実証試験期間終了後に、協力自治体を通じてアンケート調査の実施及び省エネナビデータの回収を行い、家庭で日常的に行っている家電種別の節電行動と予報・警報を受け取った際に取った節電行動とその効果についての検証を行った(図5.1-3)。

実証試験の結果を集計し分析することにより、システムによる節電効果の評価のみならず、分析結果をフィードバックすることで、より節電効果の高いシステムへの改善を行うことができる。

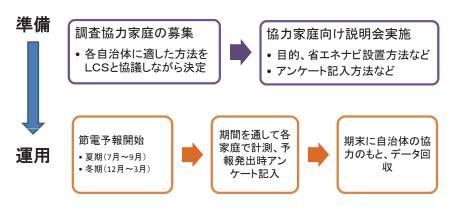


図5.1-3 停電予防連絡ネットワーク運用のための実証研究の準備・運用の流れ

#### (1) 日頃からの省エネ行動に関するアンケート調査

各家庭で日常的に行われている節電について、どの家電製品を対象にどのような行動が取られているのかを把握することにより、日常的に取り組みやすい節電行動及び既に行われている可能

性の高い節電行動の把握ができる。需給逼迫時の節電メニューを、より行動が取りやすく、かつ、 節電効果の高いものへと改善に活用することができる。

### (2) 予報時省エネ行動実施に関するアンケート調査

節電予報及び緊急節電警報を受けたときに、各家庭において具体的にどの家電製品で電源を切るや省エネモードに設定したかなどの「節電行動」を報告していただく。これにより、節電予報等により実際にどのような行動を取ったかを把握できるとともに、需給逼迫時にはどの家電製品でどのような節電行動を呼び掛ければよいのか具体策を練ることができる。

#### (3) 省エネナビ設置による電気使用量の実測調査

実証試験協力家庭(全326世帯)のうち119戸の家庭には、電力消費量が記録されるメータ(省エネナビ)を取り付けて計測を行う。これにより、アンケート結果から把握された節電行動と比較することで、実測でどの程度の節電効果が得られたのかが明らかになり、実効性のある節電行動や、行動と結果のかい離などが検証できる。

### 5.1.4 停電予防連絡ネットワークの効果の検証

2011年の夏季において、電力消費量予測モデルでレベル2に達すると予測されたのは7月15日と8月18日の2日、レベル3は0日であった。

前日である7月14日と8月17日の両日、LCSでは「節電予報(レベル2)」メールを送出した。その後、各家庭では節電予報を受けてどのように節電の行動がなされたのか、そして実際にはどの程度の節電になったかを分析した。

ただし、7月15日の予報について14日に発出した節電予報については、システム稼働から間もなくであり、自治体の連絡体制が整っていなかったため、有効なデータが少なかったことから、ここでは8月18日について報告する。

#### (1) 8月18日の電力需給状況と「節電予報(レベル2)」メールの配信について

お盆休み明けの 8 月 18 日は、その年の最高気温(東京:  $36.1^{\circ}$ C)を記録している。LCS では前日 17 日 16 時時点で、翌日 13 ~ 16 時の電力需要量が約 5000 万 kW になると予測し、この需要量が電力供給力 5550 万 kW に対して 90%に相当することから、「節電予報(レベル 2)」メールを自治体に配信した。その結果、「節電予報(レベル 2)」メールは、東京電力管内の停電予防連絡ネットワークに参加している自治体住民の約 12 万 2 千世帯に配信された(図 5 . 1-4)。

#### (2)「節電予報(レベル2)」を受けて実施した節電行動について

実証試験参加の4自治体(荒川区、足立区、川崎市、柏市)に対して行ったアンケート調査の結果、 節電予報を受けて行った節電行動としては、「今、その時間に使わなくて済む家電に対して電源 を切る」という傾向がみられた。また、「節電予報(レベル2)」メールに記載した節電対策を参 考にした様子も観察された(図5.1-5)。

#### (3)「節電予報(レベル2)」メール配信による節電効果について

実際にはどの程度の節電効果が出たのか、省エネナビのデータに基づいて分析した。その結果、省エネナビ設置家庭の約 69%において 8 月 18 日の節電対象時間(13 ~ 16 時)に、その前後 2 時間(11 ~ 13 時、16 ~ 18 時)と比較して、電力消費量が減少したことが分かった。また、同じような気象条件(最高気温 32°C以上、最低気温 25°C以上の平日、ただしお盆期間を除く)の日と比べたところ(図 5 . 1 - 6)、前日に LCS 予報があった日では、節電対象時間で前後 2 時間

ずつと比較し、節電に結び付いたことが結果から導かれた(図 5.1-6では、正の値が、節電対象時間に消費電力が前後 2 時間よりも低かったことを示す。前日 LCS 予報があった日は、他の日に比べ値が大きく、より消費電力が少ない)。

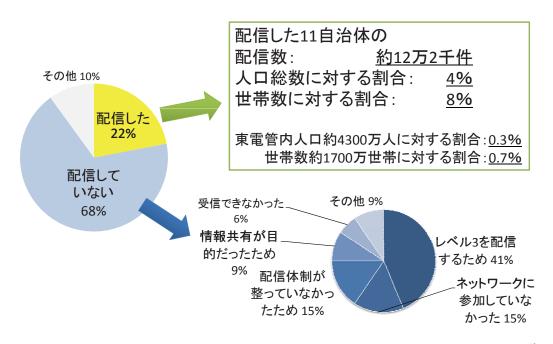
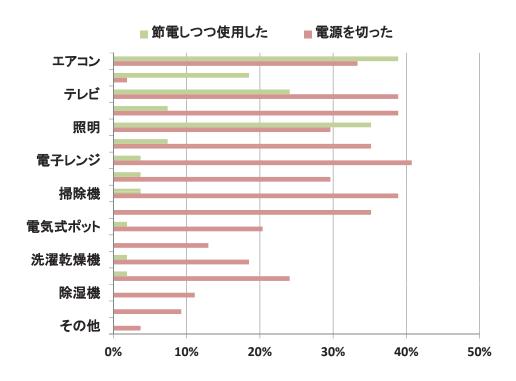


図5.1-4 LCS が8月17日に発出した「節電予報(レベル2)」の自治体からの配信状況<sup>1)</sup>



節電行動された方(54名)が実施した対策の家電別割合%

図5.1-5 8月17日の「節電予報 (レベル)」受信時の節電行動<sup>1)</sup>

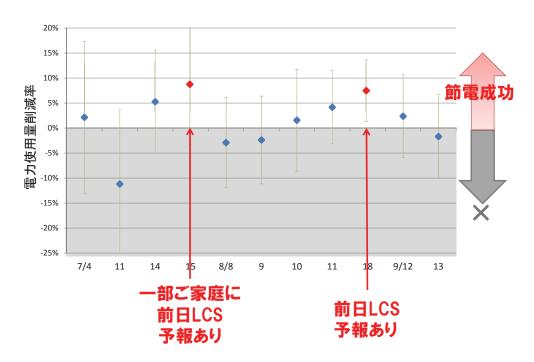


図 5. 1-6 省エネナビ設置家庭の予報発出時前後 2 時間と比較したときに削減していた電力使用量の割合(最高気温 32℃以上、最低気温 25℃以上の平日、ただしお盆期間を除く) 1)

#### 5.1.5 まとめ

本取組は、東日本大震災に起因する電力需給の逼迫を機として開始したものである。本取組の狙いである「経済活動を停滞させないような家庭部門での節電促進」は、LCSの目指す明るく豊かな低炭素社会づくりにおいても重要なテーマである。今回の結果から、低炭素社会づくりに向けた知見が得られた。広く提示するだけの情報でなく手元に届くような情報発信をすることで、家庭はより節電を行うという結果からは、行動を起こす側に対する積極的な情報発信システム、ひいては低炭素社会づくりに向けた教育が重要であることが示唆される。

また、低炭素型の街づくりには地域の視点が欠かせない。地域の特色を活かして自治体の協力を得て進めることが重要であり、今回住民の目線に近い自治体と協働した点は、今後の低炭素社会づくりに向けた住民参加型プロジェクトの推進において布石の一つとなったといえる。実証試験を通じて得られた、家庭の電力消費量のデータとアンケートによる節電行動の結果は、家庭のエネルギー消費に関する分析を可能とし、高効率家電への買い替えによる、省エネ型ライフスタイルの提言につながるものである。

中長期的には、スマートグリッドやスマートハウスなどエネルギーマネジメントが進むことでタイムリーな節電を促すことが可能になるだろう。たとえば、現在、時間帯別電気料金が導入されていない日本では、電力需給逼迫時の電気料金による節電のインセンティブは期待できない。価格メカニズムを利用した課金システムが整備されることで経済的方策も考えられるようになる。こういったシステムの実現には各種情報技術の開発と浸透が期待される。

#### 5.1.6 今後の予定

2011 年夏季の実証試験結果について、より詳細に分析・検討し、予報が住民の節電行動の促進にどのように影響したか、予報をどのように改良すればよいかを明らかにする。また、個別センサーによる計測結果を基にした代表的な家電の省エネ性能の評価、及び産業・家庭・業務部門での節電効果の定量的な把握に努める。

停電予防連絡ネットワークの運用については、冬季、2011 年 12 月から 2012 年 3 月末まで実施している。その結果についてはデータが揃い始める 2012 年 4 月以降に分析を開始する。また、図 5 . 1-7 と図 5 . 1-8 に示すように、夏季に参加した 55 自治体にアンケート調査を実施したところ、有効回答が 50 自治体から得られ、半数以上がネットワークの有用性を認め、今後も利用したいと回答している。今後(2012 年夏季、冬季)のネットワーク自体の広範囲の自治体を対象にした運用については、このような自治体の希望、電力需給の状況や社会からの要請などを勘案し、LCS 内で協議のうえ実施するかどうかをも含めて決定する。

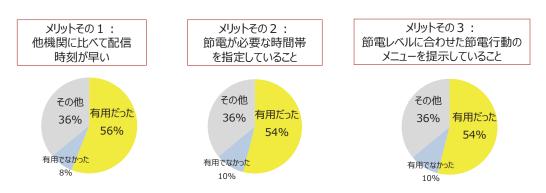


図5.1-7 LCS の節電・予報警報の3つのメリットについて1)

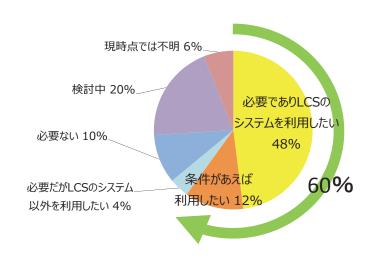


図 5. 1-8 今後の LCS の節電予報・警報の必要性について<sup>1)</sup>

#### 【文献】

1)独立行政法人科学技術振興機構低炭素社会戦略センター,シンポジウム「『まち』で取り組む節電・省エネ対策で低炭素社会へ」,2011.11.18.

### 5.2 農林業の活性化を通じた地域における低炭素社会の実現

### 5.2.1 農山村地域を対象とした明るく豊かな低炭素社会シナリオの提案

LCSでは、高齢者を含めた誰もが活躍する場のある明るく豊かな低炭素社会を実現するための 先行研究として、高齢化の進行が特に顕著に表れている農山村地域を対象とした低炭素社会シナ リオを提案する。

我が国は既に WHO (世界保健機構) が定義する「超高齢社会」に突入しており、2010 年時点で 65 歳以上人口の割合は 23%、2026 年には 30%に達することが試算されている¹)。これに対して、農業就業者数の高齢者比率は 2010 年時点で既に 61.6%に達していることから²)、農山村地域では急速に高齢化が進行している状況にあるといえる。特に、生産年齢人口の都市部への流出が農山村地域の高齢化に拍車をかけていることから³)、内閣府地域活性化統合本部会合や農林水産省農山漁村活性化推進本部等をはじめとする各省庁では、農林業及び地域経済の活性化や雇用の創出に向けた取組を行っている。

LCSでは、生産年齢人口は勿論、高齢者を含めた誰もが活躍する場があり、二酸化炭素の排出を抑えつつも豊かに暮らすことができる地域社会全体のあり方を、定量的検討と実証実験に裏付けられた明確なシナリオとして提示することとした。特に農林業は、長年の知識や経験を保有している高齢者が活躍できる場の一つであり、かつ、再生可能エネルギー資源であるバイオマスが豊富に賦存する場である。

LCSでは、まず日本の森林には潜在的にはエネルギー自給に足るバイオマスを継続的に利用することが可能であることを確認した。そのうえで環境モデル都市、環境未来都市、森林総合産業特区などにより木質バイオマス利用に関する取組を先行的に推進している北海道下川町を対象とした、LCSによる低炭素社会シナリオのための社会実証実験を開始し、現状の問題点と今後の方向性について検討を行っているところである。

### 5.2.2 農林業の活性化により期待されるバイオマスエネルギー供給量の拡大

### (1) バイオマスエネルギーの潜在的供給可能量

我が国では国土の約  $66\%^4$ )を森林が占めており、バイオマスの中でも特に木質バイオマスが豊富に賦存している。LCS で試算した結果、2010 年時点で約 44, 180 PJ(ペタジュール:ジュールは熱量を表す単位で、1ペタジュールは 10 の 15 乗ジュール)に相当する木質バイオマスが国土に蓄積されていると見積もられた $^{11}$ 。これは日本の一次エネルギー国内供給量 $^{5}$  の約 2 倍に相当するが、林業衰退に伴い、一般的に伐採可能となる樹齢を迎えた森林の多くが放置されている状況にある。

LCS では、持続可能な林業を行う場合には、上述の木質バイオマス総量のうち毎年約 740PJ に相当する木質バイオマスが伐採可能であると算出した $^{\pm 2}$ )。また、このうち、約 40% を占めている林地残材や間伐材などが、現状ではエネルギー資源として活用できる可能性が高いと考えている。

この場合の潜在的な木質バイオマスエネルギー量(約296 PJ)と農畜産業廃棄物や食品加工残渣、下水汚泥などの廃棄物系バイオマスエネルギー利用可能量(2000 年時点で年間約634 PJ) た合計すると、バイオマスエネルギー供給可能量は年間約930 PJに達する。これは、民生部門(家庭と業務部門の合計)における最終エネルギー消費量 $^{51}$ の約24%に相当する。また、毎年伐採できる木質バイオマスのうち、住宅用の建材や合板などの用途に用いられる木材も全てリサイクルするシステムが構築された場合のバイオマスエネルギー供給可能量は、民生部門における最終エネルギー消費量の約36%に相当する。仮に、技術革新によるエネルギー効率の向上や、省エネ型ライフスタイルへの移行によって、将来民生部門の最終エネルギー消費量がおよそ5分の1に低減された場合、バイオマスエネルギーでほぼ100%自給できる可能性を有する(図5.2-1)。

#### (2) バイオマス活用にあたっての現状の問題点

豊富に賦存するバイオマスを現実的に利用可能な状態にするためには、現在の森林利用率が 40%<sup>8)</sup> ともいわれている林業を活性化させて国土の森林資源を有効に活用し、廃棄物系バイオマスのリサイクルシステムを確立することが必要である。

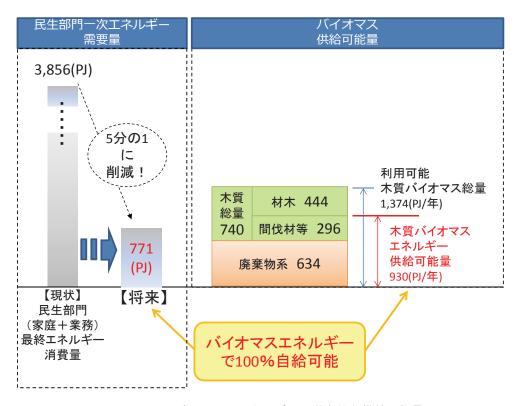


図5.2-1 バイオマスエネルギーの潜在的な供給可能量

我が国における林業の現状を例にとると、2009 年における木材生産額は約 1861 億円 $^{9)}$ であったのに対して、林野庁における 2009 年度の木材生産関連予算(2009 年度)は合計約 3925 億円と推測されることから $^{123}$ 、農林業の活性化による経済的な自立は我が国において特に重要な課題であるといえる。

バイオマスからのエネルギー・燃料生産という観点からみれば、農林業に伴い排出されるバイオマスを安価に調達し、現在の主要なエネルギー源である安価な化石燃料に代替可能なシステムを構築することが求められている。バイオマスを安価に調達する手段としては、従来のようにエネルギー変換設備やバイオマス輸送に対して補助金制度や税制優遇措置を導入する方法と、農林業の経済性を改善して木材生産コストを削減することによって副次的に発生するバイオマス価格を低減させる方法が考えられる。農林業の経済性の改善は主力製品である木材・農産物の価格競争力向上にも貢献し、農林業を主軸とする地域の活性化に結び付く可能性を有する。

そこで LCS では具体的な事例として、木質バイオマス利用に関する事業を推進している北海道下川町を対象に、林業の活性化による安価なバイオマスの調達可能性について検討した。

### 5.2.3 北海道下川町における社会実証実験

# (1) 北海道下川町の取組と現状の問題点

下川町は、約58千haの森林面積を持つ林業を基幹産業とする町である。下川町においては豊富な木質バイオマス資源を活用するための取組の一環として、木材チップ燃料製造施設や熱供給を行うための木質バイオマスチップボイラーが公共施設を中心に導入されており、木材チップ638トン(平成22年)の燃料供給実績がある。

しかし、これらは国からの補助金を契機に開始された事業であり、経済的に自立したものではなく、木質バイオマスの一部の利用が始まったばかりである。一般に薄く広く分布する木質バイオマス資源のみを事業対象とすると収集運搬コストが非常に高く、経済性が低いために持続可能ではない。

#### (2) LCS の試算と取組

以上を踏まえ、LCSでは、コスト削減による経済的に自立したプロセスを設計するために、林

業及び林産業、木質バイオマス利用のシステム全体を対象に工程ごとに必要資源量及び機材、コストを定量的に把握し検討するシステムフロー分析を行う予定である。図5.2-2に示すシステムフロー分析を通じて、国有林も含めた林業対象面積の拡大や林業機械の効率改善により木材流通量を増やすことで林業を活性化し、これに伴い増加する木質バイオマスの利用を促進することで、林業及び林産業の経済的な自立を基盤とした低炭素社会像を提示する。

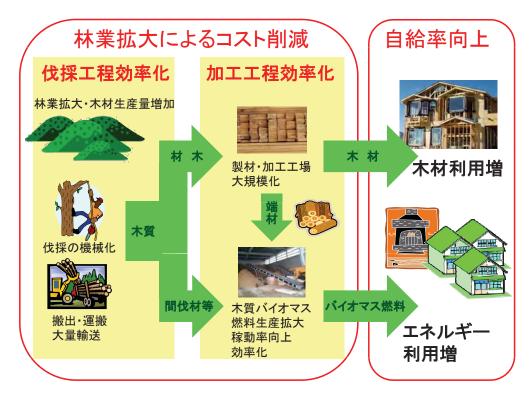


図5.2-2 システムフロー分析を用いた林業拡大によるコスト削減の検討

LCS で試算した結果、林業対象面積の拡大によって下川町の木材チップ燃料製造施設での最大生産可能量である年間約5万 t にまで生産量を拡大した場合、現在の木材チップ燃料価格 17,800 円/トンに対して、約9,000 円/トン程度に生産価格を抑えることができると推測された。この価格は、同じ熱量をA重油から得る場合にかかる費用の約3分の1であるが $^{12}$ 4、海外での木材チップ燃料価格が約5,000円/トン $^{10}$ 0であることから、更なる生産コスト削減に加えて木質バイオマス収集から最終需要地までの輸送・管理コストの削減を検討する必要がある。

今後 LCS では、下川町において先行実施されている事業や地域の現状をより詳細に調査し、各工程における定量的なデータを積み上げることで、林業の機械化や効率的な木材搬出方法などの採用による、更なるコスト削減の可能性を検討していく。

5.2.4 高齢者を含めた誰もが活躍する場のある、農林業の活性化を基軸とした低炭素社会像 LCS では、農林業の活性化によってバイオマス燃料の安価な調達や雇用の拡大を促すだけではなく、農山村地域において長年の知識や経験を有している高齢者が活躍できる低炭素社会シナリオの提案を行う。LCS が具体的に提案する農林業活性化を基軸とした低炭素社会像を図5.2-3に示す。

図5.2-3に示した低炭素社会像では、林業の活性化によって木材資源を有効に活用する多様な地域産業が創出される社会において、若者の雇用拡大だけではなく、長年の知識や経験を持つ高齢者の能力を活かした様々な取組を提案した。具体的には、林業の活性化によって安価に調達できる林地残材や間伐材の収集方法を高度な専門知識に基づいて高齢者が新たに提案するための仕組みや、拡大する木材産業における高齢者雇用の拡大などを挙げた。またLCSでは、低炭素社会の構築においては、高齢者にもやさしい暮らしを含めた提案を行う。木質バイオマスを活用し

た暖房・給湯用エネルギーの供給等による日々のくらしや地域産業活動の低炭素化、放置された森林から管理の行き届いた豊かな自然資源への魅力向上に伴う観光価値の向上、エコツーリズムや農業体験の企画に伴う都市交流人口の拡大による豊かな生活、そして高齢者が安心して暮らせる医療・福祉の充実化などの提案により、高齢者を含めた誰もが活躍する場のある農林業の活性化を基軸とした低炭素社会に向けたシナリオを検討する。

LCSでは今後、北海道下川町など具体的な地域における検討を通して、農林業活性化及び明るく豊かな低炭素社会の実現に向けた成功要素を抽出し、日本における他の地域での実現可能性について検討を行う。既にLCSでは、日本における全市町村別の地域地球温暖化対策事例データベース(付属資料3参照)を構築しており、地域特性が反映された本データベースを他地域への展開に活用する予定である。



図5.2-3 農林業の活性化を基軸とする明るく豊かな低炭素社会像

#### 【注記】

- 注1) 森林の総蓄積量 4,418 百万 m<sup>3 4)</sup> に木材発熱量(気乾状態で含水率 20%程度の木材発熱量 = 10GJ/m<sup>3</sup>) <sup>11)</sup> を乗じて算出した。
- 注 2 )森林の年間総成長量 74 百万  $m^{3.4.9}$  に木材発熱量(気乾状態で含水率 20%程度の木材発熱量 =  $10 \text{GJ/m}^3$ )  $^{11.9}$  を乗じて算出した。
- 注3) 平成21 年度森林・林業白書 <sup>12)</sup> に記載されている予算のうち、「森林整備事業の推進」、「森 林計画」、「森林の整備・保全」、「林業・木材産業等振興対策」、「森林整備・林業等振興対策」 に対する予算の合計値とした。

注4) 木質バイオマス燃料 1 トンと同じ熱量(含水率50%程度の=12GJ) を A 重油から得るためには、A 重油が約307 リットル必要である。A 重油 1 リットル当たりの価格は76.2 円~82.1 円であるため、木質バイオマス燃料1トンと同じ熱量を得るためには、約2万3千円~2万5千円の費用がかかると試算した。

### 【文献】

- 1) 国立社会保障・人口問題研究所、日本の将来推計人口(平成24年1月推計),2012.
- 2) 農林水産省, 2010 年世界農林業センサス, 2011.
- 3)農林水産省,平成21年度食料・農業・農村白書,2010.
- 4) 林野庁, 森林·林業統計要覧 2011, 2012.
- 5)(財)日本エネルギー経済研究所, EDMC エネルギー・経済統計要覧(2011 年版), 2011.
- 6) 吉田茂二郎ら、平成11年度~13年度科学研究費補助金研究成果報告書、九大農学部、2002.
- 7) 経済産業省, バイオマスエネルギー開発・利用戦略の検討状況, 新エネルギー部会第 10 回 配布資料, 2002.
- 8) OECD Environmental Data compendium (2004年12月現在データ).
- 9) 農林水産省, 平成21年生産林業所得統計報告書, 2011.
- 10) 熊崎実, 木質エネルギービジネスの展望, (社) 全国林業改良普及協会, p. 73, 2011.
- 11) 熊崎実, 木質バイオマス発電への期待, (社) 全国林業改良普及協会, p. 74, 2000.
- 12) 林野庁, 平成 21 年度森林·林業白書, 2010.

# 5.3 低炭素社会の実現に向けた植物医科学の社会実装

# 5.3.1 植物医科学<sup>A)</sup>による低炭素社会の実現に向けて

持続可能で「明るく豊かな低炭素社会」の実現に向けて、農業分野の果たすべき役割は大きい。そもそも農業は、CO<sub>2</sub>を吸収・固定する能力を持つ植物を扱う産業である。また、作物の生産過程で投入される各種資材(肥料、農薬、燃料等)は、その製造時に温室効果ガスの排出を伴うことから、農業生産現場においてこれら資材の投入量を抑制することにより、社会の低炭素化に貢献することができる。

農業分野における低炭素化実現に大きな鍵を握るのは、植物病<sup>B)</sup> の抑止である。世界中で生産可能な食糧の約3分の1が、毎年、作物の植物病によって失われている。植物病の抑止は、農業の生産性向上、ひいては世界的な人口急増により懸念される食糧問題の解消に大きく貢献することはいうまでもないが、そのメリットはそれだけにとどまらない。農業生産現場においては、結果的に植物病により失われる作物に対しても、その生産過程で上述の各種資材(肥料、農薬、燃料等)が投入される。植物病による食糧生産の口スを減ずることは、これらの資材の無駄を省くこと、言い換えれば単位生産量当たりの投入資材量を減ずることにつながるため、資材の製造に伴い発生する温室効果ガスの削減の形で社会の低炭素化にも寄与する。

また、我が国において休耕地が増え続け、その総面積(2010年時点で約39.6万 ha)が埼玉県の面積を上回った現状に鑑みれば、休耕地の適正な植物管理を通じて、温室効果ガスを土壌中に固定し、低炭素化の実現を目指す取組も必要になる。すなわち、休耕地を放置して「荒れ地」にするのではなく、温室効果ガスを効果的に吸収・固定する植物を栽培することにより、温室効果ガスの排出を抑制するアプローチである。ここでも、休耕地の適正な植物管理を図るうえで、植物病の抑止が非常に重要となる。

LCSでは、植物病の抑止に向けた応用研究を推進するための植物医科学の臨床技術を活用することにより、農業分野における低炭素化を進めることが可能であると考えている。

以上の観点を踏まえ、LCS は東京大学と連携し、二つの取組を実施している。一つ目は、植物医科学に基づく低炭素化による効果の検証である。二つ目は、植物医科学に基づく低炭素化を社会に実装するための制度設計及び人材育成を目的とした、植物病院<sup>C)</sup>・植物医師<sup>D)</sup> 制度の導入に向けた取組である。

# 5.3.2 植物医科学に基づく低炭素化による効果の検証

植物医科学に基づく低炭素化には、主に二つのアプローチが考えられる。一つは植物病の抑止による単位生産量当たりのエネルギー効率向上(投入資材量の削減)であり、もう一つは休耕地・余剰農地の適正な植物管理を通じた温室効果ガスの土壌中への固定である。これらのアプローチが低炭素化に果たす効果に関する試算結果を以下に述べる。

前者のアプローチについては、まず、国内のエネルギー及び農業関連統計に関する調査を行い、農業部門から排出される温室効果ガスの総量を試算した。その量は  $CO_2$  換算でおよそ年間 2500 万トンにのぼることが判明した。そこで、仮に植物医科学の適用によって植物病が半減すると見積もった場合、国内  $CO_2$  排出量の  $O_3$  30%相当の削減(1990 年比)が見込まれた。

次に、後者のアプローチ(休耕地における温室効果ガスの土壌中への固定)に関する試算について述べる。試算の結果、栽培する植物の性質により幅があるが、国内  $CO_2$  排出量の  $0.39 \sim 1.82\%$  (1990 年比) 相当を土壌中に固定可能であることが得られた。

# 5.3.3 植物病院・植物医師制度の確立

植物医科学に基づく低炭素化の実現を図るためには、植物医科学の研究成果を社会に役立てるための「社会実装」が必要になる。植物医科学の社会実装の推進役となるのが、植物病の抑止を担う「植物病院」及び「植物医師」である。

農作物に関わる植物病の抑止については、農林水産省の各植物防疫所や農業試験場等の公的機関が重要な役割を果たしている。他方で、植物病は農家所有の農地だけでなく、庭木、家庭菜園、市民農園、街路樹など様々な場所で発生する。とりわけ、団塊の世代の退職に伴って家庭菜園や市民農園で植物の栽培を楽しむ人が増えると予想されるなかで、これらの場所における植物病の抑止はますます重要な課題となる。現状では、一般市民が栽培を楽しむ家庭菜園や市民農園では、

植物病の抑止に係る十分な取組がなされないまま多くの植物病が発生し、近隣の農業生産現場に影響が及んでいる。

こうした問題を踏まえ、植物防疫所等の機能を補い、植物病の蔓延防止体制を更に強化するために、植物病院・植物医師制度の確立が急がれる。2004年に国家資格である技術士に「農業部門・植物保護」が追加され、この合格者が事実上の植物医師として活躍を始めている。今後は、技術士の更なる育成に加え、植物病の発生現場に近い草の根レベルで活躍する人材の育成も求められる。すなわち、一般市民の中から、「植物病に関する知識を持ち、地域社会において植物病の抑止等に向けた積極的な活動を行う」人材を育成することが重要である。

このような市民版植物医師の育成に向けて、東京大学植物医科学研究室では、2011 年から千葉県柏市において「コミュニティ植物医師訓練プログラム」を実施している。20歳代から80歳代までの1,000名を超える柏市民に対して、講義・実習・成果発表からなるプログラムを実施し、そのうえで日本植物医科学協会による「コミュニティ植物医師認定試験」を行った。この試験には約700人が合格し、合格者は10~15人からなる「班」に所属しつつ、他の班員と協力しながら家庭菜園、市民農園、公園などにおいて植物病の診断・治療・予防・防除を行っている。「班」は合計で約70あり、柏市の各地域に配置されているため、市内全域において機動的に植物病を抑止し、農業生産現場への蔓延を防止することができる態勢が整いつつある。

「コミュニティ植物医師」育成により期待される効果は、地域社会に密着した機動的な植物病の抑止による農業生産現場への植物病蔓延の防止と、そのことを通じた農業生産性向上及び単位生産量当たりのエネルギー効率向上である。また、休耕地の有効利用をはじめとする緑地環境の維持保全も期待される。これらはいずれも、「5.3.1 植物医科学による低炭素社会の実現に向けて」で述べたように、農業分野における低炭素化の実現に大きく貢献するものである。加えて、「コミュニティ植物医師」の活動は、農業生産者と消費者の相互理解の促進、都市美観の維持向上、地域社会の活性化など様々な価値実現にも寄与するものと期待される。

### 5.3.4 課題と今後の展開

植物医科学に基づく低炭素技術の検証に関する取組については、今後、試算結果の検証・精緻化のために、関連する内外の研究事例に関する調査を進める必要がある。また、試算結果の示唆する「農業の低炭素化」の実現に向けて、2011 年度から千葉県柏市の休耕地において実証実験を開始したところである。初年度は主に植物病の適正管理に基づく栽培管理ノウハウを蓄積したが、今後は実証実験を本格化させ、農業生産現場に普及させることができる手法・技術の確立を目指す。加えて、休耕地の一部を、宿根性植物を植えた庭園(ペレニアルガーデン)とし、温室効果ガスを効果的に吸収・固定する植物の見極めや、その適正な栽培管理手法(植物病の抑止に係る手法を含む)の検証を行うことを通じて、低炭素化に資する休耕地利用のモデルを確立することを目指す。ペレニアルガーデンの管理は、「コミュニティ植物医師」を中心とする地元住民が行っている。また、植物医科学に基づく低炭素化の経済的効果については、太陽光パネルの設置やバイオエタノールの生産などの取組に比べて初期投資額が少ないことや、一時的なインフラ整備に頼らない恒常的な雇用創出効果、農地保全による食料安全保障上の効果、農地の多面的機能の確保等の効果等も見込まれる。これらの経済的効果については、現在、それらを試算するための研究手法の開発にも新たに着手したところであり、今後さらなる検討を行う予定である。

植物病院・植物医師制度の確立とその前提となる人材育成に関しては、「コミュニティ植物医師」の実践的な技術の向上を図り、植物の種類ごとに、その栽培方法や植物病抑止手法に通じた「専門家」を育成するための追加プログラムを実施する。また、「コミュニティ植物医師」の活動を支援するため、情報通信技術(ICT)を活用し、フィールドからアクセス可能な植物病データベースを整備するとともに、地域の植物病情報を共有・相談することができるネットワークの構築を進める計画である。この仕組みを導入することにより、植物病の発生状況をいち早く把握し、市内全域で機動的な抑止を行うことが可能になる。

これらに加え、東京大学植物病院®以外の本格的な植物病院を設置することが必要である。草の根レベルでの活動が盛んになるほど、植物病診断に対するニーズが掘り起こされていくことになると予想されることから、最新の診断機器を備え、高度な知識を持つスタッフを抱える本格的な植物病院を早急に設置することが求められる。各所に設置される植物病院は、東京大学植物病院®や公的機関と緊密に連携しながら、全国各地で機動的な植物病抑止を通じ低炭素社会の実現

### に貢献することになる。

以上の取組を通じ、引き続き、我が国が農業部門においても世界に先駆けて、持続可能で明るく豊かな低炭素社会の実現に貢献する。

### 【用語】

#### A)植物医科学

植物病に関連する諸学問(植物病理学、応用昆虫学、農薬学、雑草学、土壌栄養学、分子生物学など)を統合し、植物病の診断・治療・防除・予防を行う臨床分野を重視した総合学問分野。

### B)植物病

植物に生じる、微生物病、害虫による障害(害虫病)、生理障害、雑草による生育障害の総称。

### C)植物病院

植物医科学に基づき臨床への応用を展開する場。植物病の診断・治療・防除・予防に加えて、 先端的治療・予防技術や診断機器の開発、植物医師やその指導者を養成するための教育を行 う。

### D) 植物医師

植物医科学に関する専門的な知識・技術を持ち、植物の病気を診断・治療・防除・予防する者。

### 5.4 豊かな低炭素社会のための都市像と地方都市のリデザイン

### 5.4.1 はじめにーコンパクトシティへの定着と課題ー

コンパクトシティとは、高度成長期を通じて郊外に拡散してきた都市のあり方を改め、都市の 諸機能を集約することで、環境や人に負荷をかけず、公共投資の無駄を省くことを可能にすると いう都市設計の考え方である。

低炭素社会、超高齢社会という二大課題に適した都市像として、コンパクトシティは有望な選択肢の一つと考えられ、ほぼ同義の「集約的都市構造」という言葉が、2008年7月に閣議決定された「国土形成計画(全国計画)」の中に「今後目指していくべき都市構造の基本」と位置付けられるまでに至っている。

しかし、コンパクトシティの議論には、「地方都市には難しいのではないか」「周辺地域、農村を切り捨てることにならないか」といった、いくつかの疑問がつきまとう<sup>1)2)</sup>。

そこで LCS では、「5.4.2 低炭素の視点から見た都市の姿」で都市の現状を分析し、「5.4.3 地方都市のリデザインの実践的な取組を通じて」で実践事例を個別に検証した。これらの結果から見えてきた、コンパクトシティの実現にあたっての課題と方向性を「5.4.4 低炭素社会構築に向けた地方都市のリデザインの課題と方向性」に示す。

この結果、都市の性質を十分に把握したうえで、現在既に機能している地域内循環型の社会シ

ステムを現在や将来に見合った形にリデザインし、中心部と郊外のそれぞれの強みとなる機能を強化し、都市における中心部と郊外の連携を進めていくことで、持続可能な都市構造を維持していくための活力を備えた地方都市圏の形成は十分に可能であることが示された(図5.4-1)。

また、実践例を通じて学ぶことができた課題と今後の方向性については、地方都市におけるコンパクトシティの実現と低炭素化の取組の一助となるはずである。

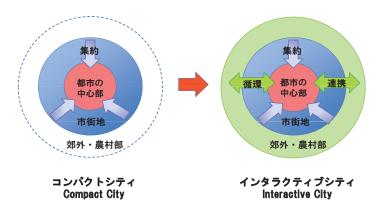


図5.4-1 持続可能な都市構造のイメージ

### 5.4.2 低炭素の視点から見た都市の姿

低炭素化のための都市のリデザインを進めるためには、現在の我が国の都市が、低炭素化の視点から見てどのような姿をしているのかを把握しておく必要がある。本来、都市は、規模、特性、成り立ちなどにより実に多様である。LGSでは以下のように都市は3類型、都市の特性を把握するための指標は6つに絞って検討した。すなわち、地方中核都市(人口30万人以上)、地方中小都市(人口5~10万人)、大都市地域の連担都市(郊外接続型の鉄道沿線)の3つの類型をベンチマークとして提示する(図5.4-2)。現実の都市は、これら3類型との比較のなかで、相対的な位置を確認することができると考えるからである。

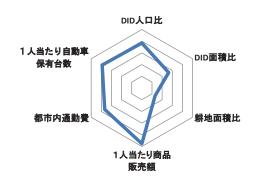
地方中核都市は、政令指定都市を除く全国の人口 30 万人以上の都市の平均像である。地方中小都市は、全国の人口 5 万~ 10 万人の都市の平均像であり、自治体数全体の 34%を占める。

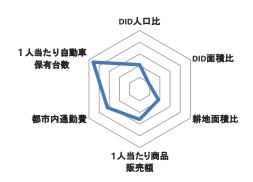
都市の特徴を示すパラメータもまた多岐にわたるが、LCSでは特に都市の低炭素化と密接な関係のある6つのパラメータ、すなわちコンパクト化の指標(人口集中地区(DID<sup>A)</sup>)内の人口比・面積比)、産業活動の指標(耕地面積比、商品販売額)、交通関係の指標(都市内通勤費、自動車保有台数)である。

LCSでは、以上の類型と指標を用いて4つの都市について検討を行った。大都市地域の連担都市は、つくばエクスプレス(TX)の沿線都市を比較例として取り上げた。東京都内は除き、千葉・埼玉エリアと茨城エリアに分割している。グラフの見方としては、右上の二つが突出していればコンパクト化が進んでおり、左下の商品販売額、都市内通勤費が突出していれば都市内での活動の完結性が高いという傾向が把握できる。

# 地方中核都市(平均40.7万人)

# 地方中小都市(平均6.8万人)





# 大都市地域の連担都市

TX千葉·埼玉(平均73.7万人)

TX茨城(平均29.4万人)



図5.4-2 地方都市の3つの類型

4つのグラフを見ると、地方中核都市は、コンパクト化が相当程度進んでおり、活動の都市内での完結性が高い。一方で、地方中小都市は、ごく限られたエリアに都市集約が見られるが、自動車依存が高く、都市外での活動も多い。大都市郊外では、千葉・埼玉エリアは地方中核都市よりも更にコンパクト化程度が高いが、都市の完結性は相対的に低く、公共交通機関を活用して他都市との連携が行われている。一方、茨城エリアでは、大都市圏であっても地方中小都市と同じく、自動車依存度が高く、コンパクト性・完結性は低い。なお、耕地面積比の大きさが目立っている。いずれの都市も都市内に一定程度の耕地面積を抱えている。

このように、低炭素化の視点から見て都市は多様であり、コンパクトシティへの転換の容易さの程度にも大きな違いがあることが分かる。中心性を持つ都市は既にコンパクトであり、小さな都市は全体としてコンパクトから大きく離れている。低炭素化を進めるにあたっての前提となる都市構造が大きく異なることに留意すべきである。

一方で、都市間で類似性や傾向が見出せる側面もまた存在する。たとえば大都市の郊外とつながる鉄道沿線では、都心との距離により、地方中核都市や地方中小都市との類似性を持つ。大都市の鉄道沿線の連担都市における低炭素化の経験を、地方における中核都市と中小都市との連携に活かすことができる可能性を示唆している。

こうした相対的な検討のなかで、忘れてはならないのが、絶対数の把握である。コンパクト化が進んでいても、地方中核都市の人口の23%(1都市当たり8万人程度に相当)、地方中小都市の人口の60%が郊外に住む。これらの中に、高度成長期につくられた郊外型の新住宅地、ニュータウンがある。これらのエリアは一斉に高齢化を迎えている。都市の縮退を図るなかで、郊外住宅地の再自然化を進める考え方もあるが、相当数の郊外居住者を念頭に置くとき、容易なことではない。

# 5.4.3 地方都市のリデザインの実践的な取組を通じて

#### (1) 概説

都市のリデザインは、必ずしもハードな都市施設をデザインし直すことではない。社会が人口減少期に入るなか、無駄な投資をしないという意味での拡散志向からの転換は逆らい難い時代の趨勢である。しかし、ハードな施設を再び都市の中心部につくり直すことをすぐに意味するものでもない。5.4.2でみたように、我が国の都市は既にコンパクトであるということもできる。むしろ大切なのは、コンパクトであることを支えてきた地域内循環型の社会システムを、現在や将来に見合った形にリデザインしていくことである。こうしたリデザインを進めなければ、かつてコンパクトであった都市の形骸化した姿がさらされることになる。ここでは、都市を支える社会システムを掘り起こし、現代の環境に見合った形に再生することを目指した「地方都市のリデザイン」の実践的な取組を中心に紹介する。

#### (2) 熊本県荒尾市の「徒歩圏マーケット」

熊本県荒尾市は、福岡県との県境に接する人口約6万人の地方中小都市である<sup>3)</sup>。2004年から、地域の農産物の活用を中心に市民の起業で雇用創造を行う取組を、「まちなか研究室『青研』」を拠点として推進している(写真1)。

そもそも「青研」は、商店街店主、主婦、失業者などが意見を交わし、ワイン、焼酎、酢、海苔などの多様な商品を次々に生み出していったことで注目された。だが、ここでは、地域の農家の協力を得て、空き店舗の活用により設置した「青研」で野菜などの生鮮食品を販売し、大きな成果を納めたことに注目したい。「青研」は、日商 10 万円ほどの売り上げを確保し、同様の店舗を市内に増やしていくことになる。彼らは、中心市街地に、高齢者を中心とした半径 300 m 程度のマーケットがあることを発見し、「徒歩圏マーケット」と呼んだ。地方中小都市における従来からの都市機能の集約を支える社会システムを現代的に甦らせた例である。



写真 1 社会システムの掘り起こしで大きな成果を納めた「青研」

# (3) 愛知県豊川市の「まち DEN ラボ」

愛知県豊川市は人口約 18 万人の中規模都市である<sup>4)</sup>。企業城下町として栄え、公共施設が集中する諏訪地区と、豊川稲荷の門前町として栄えた豊川地区の二つの地区を中核とする。いずれの地区も集客力が低下し低迷期を迎えるなか、諏訪地区は 1989 年にオープンした再開発商業施設を核に活力を取り戻したが、近年の小売業低迷の例にもれ

ず、再び困難に面している。

そこで、諏訪地区の活性化のために、2010年から市民参加型の「まちなか交流拠点『まち DEN ラボ』」を設置した。ラボでは、諏訪地区を豊川市全体の核として位置付けた都市マスタープランをベースに、諏訪地区の商業機能と郊外の農業や工業による付加価値生産機能とを結び付け、全市的な活性化を目指している。活動開始から日が浅いが、ラボでの野菜販売は荒尾の例と同様に好評を得ており、市内の飲料メーカーと共同で開発したお茶のペットボトル販売などの実績を上げている(写真2)。ペットボトルの納入額の一部がメーカーからラボのまちづくり資金に還元されていることが特徴的である。



写真2 収益の一部をまちづくり 資金に還元する「まちDENラボ」

### (4) 三重県四日市市の観光戦略と定期市の活用

三重県四日市市は人口約30万人の地方中核都市である。戦後、石油コンビナートを主体とする工業都市として発展し、深刻な公害問題に直面したが、環境改善の努力が実を結んでいる。最近では、コンビナートの夜景が評判となり観光振興に力を入れ始め、2011年には、四日市市観光戦略<sup>5)</sup>を取りまとめた。観光戦略では、工場都市として発展する一方で、野菜やお茶の栽培などの農業が盛んであり、陶器やうちわの生産などの伝統工芸も維持されていることから、これらの

地域資源を市民や観光客にアピールするための拠点を中心市街地に設けることを提案している。

また、市名の由来となった定期市が現在も市内各所で維持されていることに着目し、定期市の存続を支援しつつ、観光資源として活用することを提案している。定期市は、市内の農林水産物の生産者と出店する商業者との連携が古くから維持されている社会システムである(写真3)。大規模な流通システムと結び付いた小売業が一般的となるなかで、貴重な仕組みといえる。しかし、出店者が高齢化しながらも固定化され、新規参入が進まない現状があり、今後のシステムの維持が懸念される。食の安全や地産地消への意識の高まりや観光資源としての活用を契機に、新規参入を促進する新たなシステムへの転換が望まれる。古くからコンパクト化が進んでいる地域中核都市における社会システムの再生の例として注目される。



写真3 地元農産物等を求めて にぎわう四日市市の定期市

### 5.4.4 低炭素社会構築に向けた地方都市のリデザインの課題と方向性

#### (1) 低炭素型コミュニティの拠点形成と運営主体の確立

5.4.3では、持続可能な都市構造を支える社会システムを現代の環境に見合った形に再生する地方都市のリデザインの実践例を見た。ここでは、これらの実践例を通じて学ぶことができた課題と今後の方向性について記し、地方都市における低炭素化の取組の一助となることを期する。コンパクトシティへの志向の下、都市機能が集約化される都市の中心部が機能するためには、中心部と郊外・農村部をつなぐ拠点の形成とその自律的な運営体制の確立が不可欠である。

地域コミュニティが高齢化するも、拠点の担い手として期待されるのは高齢者自身である。その高齢者の活動を支えるためには、産直の農林水産資源や加工品の販売による、経営基盤の確立や、都心居住しつつも、郊外の農業生産に積極的に参加できるよう交通手段の整備などを進め、CO<sub>2</sub> 吸収源対策の効果もある地域の緑を増やす高齢者の活動を地域経営の核に据えていく「グリーンマネジメント」ともいうべき体制の整備が望まれる(図 5.4-3)。

さらに、地域拠点の運営体制の安定化のためには、経営資源の多角化が必要である。多様な経験を持つ高齢者の人材派遣、見守り・買物支援等の生活支援サービスの提供の他、スマートコミュニティの形成が進む将来は、コミュニティ単位でのエネルギーの発電・蓄電・売電などのマネジメント機能を担っていくことも考えられる。こうした観点での実証的な取組が期待される。

なお、紹介した実践例は、既成市街地のものであったが、ニュータウン再生にあたっても同様の考え方を適用することが可能である。

### (2) 中心部と郊外の各々の機能強化とサポートの充実

都市における中心部と郊外の連携を進めていくためには、中心部と郊外のそれぞれの強みとなる機能を強化していく必要がある。中心部の強みは、消費者ニーズへの敏感な対応力である。郊外・農村部の強みは、付加価値の創造力である。両者が結び付いて初めて、持続可能な都市構造を維持していくための活力が生まれる。しかし、個々の地方都市において、的確に消費者ニーズに反応するための情報の受発信や双方向的なコミュニケーションを維持していくこと、また、生産者が消費者ニーズに応えられる品質管理能力や技術力を獲得することは難しい。これらを的確に支える柔軟性を持った情報産業や大学・研究機関によるサポートを、地域が容易に享受できるようにすることが望まれる。

### (3) ダイナミズムを生み出す広域的な連携の構築

さらに、各都市が個性を発揮しつつ、役割分担の下で連携する地方都市圏の形成が望まれる。 広域観光や農商工連携などの取組は現実性が高い。この際、大都市の鉄道沿線での都市間連携の 取組を地方都市の都市間連携に応用していくことも検討に値する。たとえば、つくばエクスプレ ス沿線における秋葉原、柏の葉、つくば等の諸都市の連携により、各都市が情報発信、研究開発 などのそれぞれの強みを活かして産業創出や技術開発を進めていることが参考になる<sup>6)</sup>。大都市 で効率的に蓄積された知識や人材などの資源を、地方都市が比較的少ない負担で活用できるよう にすることも、明るく豊かな低炭素社会の構造にとって効果的である(図5.4-4)。

### 低炭素型の経済社会活動の創出



図5.4-3 高齢者を主体とした都市の中心部と郊外を結ぶグリーンマネジメントの展開

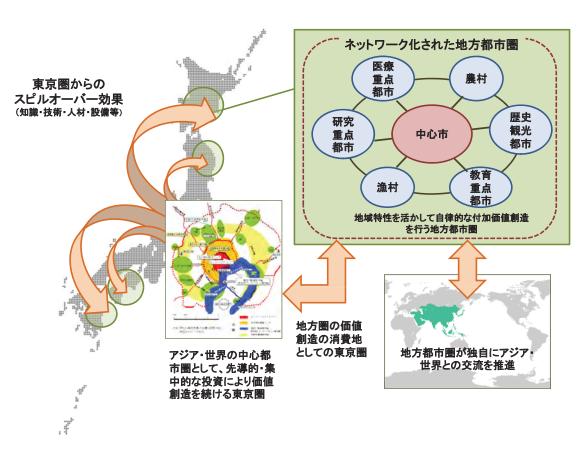


図5.4-4 低炭素社会に向けた国土全体としての広域連携

### 【文献】

- 1) 鈴木浩, 日本版コンパクトシティ, 学陽書房, pp. 183-188, 196-203, 2007.
- 2) 海道清信, コンパクトシティ, 学芸出版社, p. 178, 2001.
- 3) 服部敦, こだわりをつなぐと地域が元気になる・熊本荒尾編・三重四日市編, meeting business, No. 20, 2007.
- 4) 服部敦, 岡本肇, 地方都市における中心と郊外を結ぶ拠点の形成に関する考察-豊川市諏訪地区における「まち DEN ラボ」の実践例を通じて一, 日本都市計画学会中部支部研究発表会論文・報告集, 2011.
- 5) 四日市市観光戦略会議,四日市市観光戦略,2011.
- 6) 前田英寿, アーバンデザインセンターに関する経験的考察-柏の葉アーバンデザインセンターの3年-, 日本建築学会計画系論文集75(655), pp. 2203-2212, 2010.

### 【用語】

### A) DID

国勢調査で用いる概念で、人口集中地区 (Densely Inhabited District) のこと。具体的には、国勢調査の調査区を単位として、人口密度 4,000 人  $/km^2$  以上で 5,000 人以上連なって人が住んでいる区域を指す。

#### 5.5 低炭素社会構築型の震災復興シナリオの提案

### 5.5.1 低炭素社会構築型の震災復興シナリオの提案と実現に向けた研究計画

東北地方太平洋沖地震と津波によって、東北地方は特に太平洋沿岸部を中心に甚大な被害を受 けた。岩手、宮城、福島などの各県では、震災からの復旧期間後の本格復興に向けた計画が検討 されている。LCS では、東北地方が希望する震災復興プランを考慮しつつ、明るく豊かな低炭素 社会の姿を震災からの復興の取組のなかに盛り込んでいただけるよう、被災地域の人々との意見 交換やLCSで実施している取組の各種成果を活用して、実現可能な低炭素社会構築型の震災復興 シナリオの提案を行う。

震災復興シナリオの提案と実現に向けた研究計画の概要を図5.5-1に示す。まず、東北地方 の各自治体や団体が検討している震災復興プランについてヒアリングや意見交換を通して把握す る。次に、地域の人々が望む復興プランの実現可能性を検討するために、GIS(地理情報システム) や各種統計データを用いて、東北3県(岩手県、宮城県、福島県)における環境・資源の情報、 人材の情報、そして産業・暮らしの情報を収集する。震災による津波被害や放射能汚染状況につ いても、聞き取り調査及び放射線測定器を用いた実地調査などを実施して把握する。

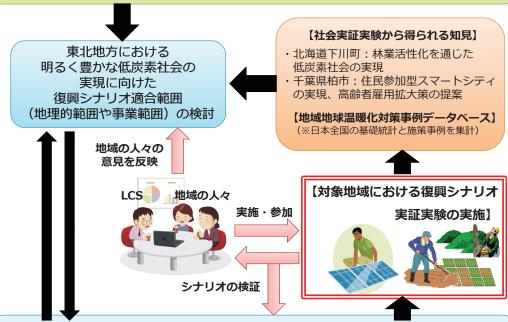
### 東北地方が希望している復興プラン



#### 【東北地方固有のデータの収集・分析】

- ・環境・資源の情報(気象、地形、再生可能エネルギー分布 etc.)
- ・人材の情報(年齢分布、第一次・二次・三次産業就業者数、将来人口予測 etc.) ・産業・暮らしの情報(工場・住宅分布、熱電需要分布、住宅性能、高齢者の暮らし etc.)
- ・震災被害の情報(津波被害、道路交通網被害、放射能汚染被害状況 etc.)





### 【 実現可能 かつ 明るく豊かな低炭素社会構築型の震災復興シナリオの検討 】

▶物・人・お金の流れのシミュレーション

- ・施設配置・物流最適化モデル、経済モデルの活用
- ・高齢者を含む雇用拡大の検討
- ・経済的に持続可能な低炭素型事業の設計
- ▶シナリオ実現に向けた制度設計
  - 特区制度の活用
- ▶低炭素化技術開発・普及手法の提案

図5.5-1 低炭素社会構築型震災復興支援シナリオの提案と実現に向けた研究概要

収集した情報は、地域の人々が望む復興プランや実施地域の希望に配慮しつつ、物質循環や事業経済性などの観点からみて実施が望ましい地域や事業範囲の検討に用いる。具体的には、LCSが各地で実施している社会実証実験を通して得られた知見や、LCSが構築している地域地球温暖化対策事例データベース(付属資料3)を活用することにより、東北地方の地域特性に照らし合わせて復興シナリオ適合範囲(地理的な復興プラン実施範囲や、復興プランにおける事業対象範囲など)を検討する。

低炭素社会構築型の復興支援シナリオの具体的な検討においては、第4章で述べた統合シナリオ検討手法を活用する。必要な施設配置・物流の最適化モデルを構築し、物の流れのシミュレーションを行う。また、経済的に持続可能な低炭素事業の設計や、事業の経済波及効果を推計するための経済モデルを構築し、物の流れとお金の流れを合わせたシミュレーションも実施する。さらに、得られた結果に基づき、事業の経済性の改善に効果的な技術開発・普及シナリオの提案、特区制度を活用した制度設計、さらに高齢者を含む雇用の拡大に効果的な事業の検討などを行う。具体的なシナリオ検討において、復興シナリオ適合範囲の変更が必要な場合には、再度地域の人々の意見を反映しつつ適合範囲の検討を行う。

以上のように、LCS が提案する震災復興シナリオは、地域の人々との意見交換やLCS で実施している取組の各種成果を駆使して提案するものである。最終的には、提案したシナリオを実際に現地で実現し、社会実証実験として、そのシナリオ導入効果を検証する。さらに、シナリオの策定や実証実験によって得られた知見を地域地球温暖化対策事例データベースへフィードバックすることで、今後の日本各地で展開される低炭素化に向けての活動に活用する。

#### 5.5.2 東北地方におけるバイオマス資源の活用による復興シナリオの検討

東北3県が提案している震災復興計画では、どの県においても農林業の活性化や地域エネルギー自給率の向上を目的としたバイオマス資源の活用を挙げている $^{1)}$   $^{2)}$   $^{3)}$ 。そこで、東北3県における潜在的なバイオマスエネルギー量を試算した結果、年間約193 PJ(ペタジュール:10の15乗ジュール)と見積もられた(図5.5-2)。これは、東北3県の民生部門(家庭と業務部門)最終エネルギー消費量(2009年推計値で合計約365 PJ) $^{4)}$ の約53%に相当する。この数値は、5.2節で挙げた日本全体のバイオマスによる割合(約24~36%)よりも大幅に高い数値である。仮に技術革新によるエネルギー効率の向上や省エネ型ライフスタイルへの移行によって、将来民生部門の最終エネルギー消費量がおよそ2分の1に低減された場合、バイオマスによる民生部門エネルギー自給率100%を東北3県において達成できる可能性は高い。

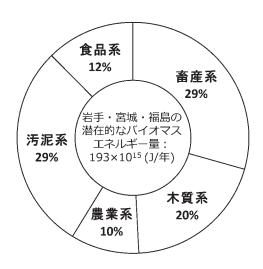


図5.5-2 東北3県における潜在的なバイオマスエネルギー量とその内訳注1)

低炭素社会の構築に向けて、5.2節で述べた農林業の活性化によって潜在的なバイオマスエネルギーを活用する復興シナリオを描く場合、対象とするバイオマスは畜産系・木質系・農業系バイオマスとなる。バイオマスは、市町村レベルやそれ以下の地域単位でみても発生量分布に大

きな偏りがある。そこで、市町村別にこれら3種類のバイオマスが持つ潜在的なエネルギー量を調査した結果、年間合計約113 PJと見積もられた(図5.5-3)。なお、本数値は震災前の農林業統計情報に基づき推算されているため、震災後の変化は考慮していない。図5.5-1に示したように、放射能汚染による利用可能量の変化も含めて今後精査する必要があることに留意されたい。

具体例として、北海道下川町の実証実験において検討している木質バイオマスに関して市町村別にみると、図5.5-3に示した木質系バイオマスエネルギー賦存量が多い市町村は、上位から宮城県石巻市(約4.1TJ/年)、福島県いわき市(約3.5TJ/年)、岩手県宮古市(約3.3TJ/年)となっている。しかしながら、木質バイオマスの種類別の内訳をみると、この賦存量は製材所廃材による木質バイオマス供給量が大きく影響していた。現状では森林で発生する林地残材や間伐材はほとんど利用されていないため、林業が行われている地域と図5.5-3に示す賦存量分布は一致していない。今後、森林分布や林道の有無などを把握することによって、下川町の実証実験において提案している林業活性化シナリオの適用可能地を検討する予定である。市町村別に賦存量を把握したが、GIS を用いて市町村界を超えて面的に、林業活性化シナリオの適用可能範囲を検討し、図5.5-1に示した研究の概要に沿って様々な震災復興シナリオの提案・実現に向けた研究を行う予定である。

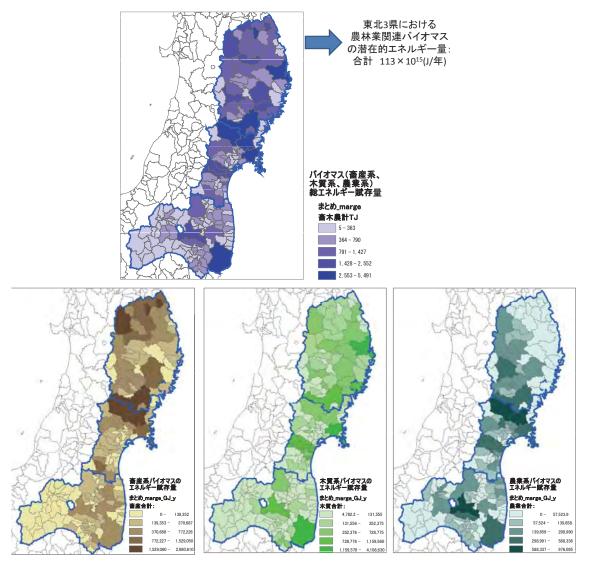


図5.5-3 東北3県におけるバイオマス(畜産系・木質系・農業系)の潜在的なエネルギー量分布とその内訳

### 【注記】

注1) 文献<sup>5)</sup> に基づき算出した。畜産系(乳牛・肉牛・豚・採卵鶏・ブロイラーの糞尿)、木質系(林地残材、製材所廃材、果樹剪定枝、公園剪定枝、建築解体廃材、新・増築廃材)、農業系(稲わら、もみ殻、麦わら)、食品系(生活系厨芥類、事業系厨芥類、動物性残渣)を対象とした。

### 【文献】

- 1) 岩手県, 岩手県東日本大震災津波復興計画, 2011.
- 2) 宮城県, 宮城県震災復興計画, 2011.
- 3)福島県,福島県復興計画(第1次),2011.
- 4) 経済産業省資源エネルギー庁, 都道府県別エネルギー消費統計, http://www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/regional-energy/index.htm (2012.1.16 時点閲覧可).
- 5)独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構,バイオマス賦存量・有効利用可能量の 推計。
  - http://app1. infoc. nedo. go. jp/biomass/index. html (2012. 1. 16 時点閲覧可).

### 第6章 低炭素社会の普及・拡大に向けての取組

### 6.1 国際戦略

#### 6.1.1 はじめに

低炭素社会への移行は、日本だけでなく、成長著しい途上国にとっても省エネルギーを通じた エネルギーコスト削減などの点において、持続可能な発展に対して長期的メリットをもたらす。 また、当然ながら気候変動影響の緩和につながるので、地球全体への便益も期待できる。これら の視点を先進国と途上国の間の共通認識とし、世界協調行動に対するポジションを共有すべきで ある。

日本では人口や経済成長の伸び率が低く、総人口に至っては近年減少に転じており、結果として温室効果ガスの排出の伸びは世界平均より低くなっている。しかし、経済成長の著しいBRICS諸国などの新興国では、温室効果ガス排出の大幅な伸びが報告されている。気候変動問題に対処するための温室効果ガス発生量の削減は、世界的課題となっているため、世界全体で取り組んでいく必要があり、低炭素社会戦略センター(LCS)においても日本以外の地域における温室効果ガス排出削減の可能性の検討を行っている。

#### 6.1.2 国際気候政治と削減枠組

低炭素社会に向けた  $CO_2$  排出抑制の政治的要請は、科学的知見を反映し、気候変動影響を許容できる範囲に抑制するという 1990 年代の国連気候変動枠組条約 (UNFCCC) への国際合意から始まった。 2012 年は、1992 年にブラジルで「国連環境開発会議(地球サミット)」が開催されてから 20年の節目の年にあたり、6月に地球サミット開催地であったリオデジャネイロで「国連持続可能な開発会議(リオ+20)」が開催される。

国際交渉を経て、1997年に京都で開催された UNFCCC 第3回締約国会議(COP3)で採択された京都議定書は、短期の温室効果ガス削減目標を先進国に対して義務付けるものである。議定書は2005年に発効したが、最大の $CO_2$ 排出国であるアメリカは議定書に批准せず、最近世界第2の排出国になった中国は議定書の削減枠組に参加していないことから、実効性に欠けた仕組みとなっている。そのためもあり、2011年12月に開催された南アフリカ共和国ダーバンにおけるUNFCCC第17回締約国会議(COP17)では、合意成果を2020年から発効させることを意図した、将来枠組に関する特別作業部会の設置を決定した。

また、世界の平均温度の上昇幅を産業革命時から2°C以内に抑制するという長期目標を達成するため、今世紀中葉までに世界の温室効果ガス排出を現状から半減することも主要国首脳会議などで認識が共有されている。

このように、温室効果ガスの大幅削減は政治的に要請され、削減達成のためには国際的視野に基づく戦略が不可欠になっている。

京都議定書は、先進地域の国・地域に対して、基準年に対する温室効果ガスの削減を求めている。対象となる温室効果ガスは、 $CO_2$ 、亜酸化窒素、メタン、代替フロンである。基準年は、 $CO_2$ については 1990 年であり、代替フロンについては 1990 年または 1995 年を選択できる。削減対象となる年は 2008 年から 2012 年 (第一約束期間と呼ばれる) であり、今年はその最終年にあたる。現在、新たな枠組みに向けた議論が行われているが、先進国の削減は形を変えることはあっても、引き続き政治的に要請される可能性が高い。

### 6.1.3 途上地域における CO<sub>2</sub> 削減の意義

今後、先進地域と途上地域のバランスにおいて、人口、経済規模、温室効果ガス排出における途上地域のシェアは確実に高まることが予想されている。その意味で、世界レベルでの温室効果ガス大幅削減の最大のポイントとなるのは、現在の途上地域のエネルギー需給システムの将来設計にある。そのエネルギー需給システム構築において、地域の実情に合わせ、エネルギー利用効率のよいシステムを構築すれば、対策を行わなかった場合と比較して、結果的に世界全体での $CO_2$ の排出を少なくすることが可能である。

途上地域については、経済成長と効率的なエネルギーシステムの両立及び近代的なエネルギー アクセスの確保が課題である。特に中国やインド等の新興国においては、電力などのエネルギー 供給増加や鉄・セメントなどの大量素材生産のニーズが、経済成長に伴い爆発的に拡大中である。 このことは、新規設備における高効率技術導入のチャンスが訪れていることを意味する。また、国際エネルギー機関 (IEA) により発行された「2011 年度版世界エネルギー見通し (World Energy Outlook 2011)」 (以下、WE02011 と記す。) によると、途上地域においては、電気にアクセスできない人口は13億人に達する。これらの地域におけるエネルギーアクセスの確保は当然である。

### 6.1.4 国際協力によるエネルギー起源 CO<sub>2</sub> 削減の仕組み

先進地域と途上地域が国際協力して  $CO_2$  削減に取り組む方法がいくつか提案されている。京都議定書では、先進地域の温室効果ガス削減の算定において、途上地域の削減事業で生じた削減分排出量を、温室効果ガス排出量の削減分の一部に充当することができる制度が設けられている。これをクリーン開発メカニズム(Clean Development Mechanism, CDM)と呼んでいる。しかし、CDM については、事業審査に要する時間、小規模プロジェクト優先など、制度としての使いにくさも指摘されてきた。そのため、国連が関与しない方式も提案されている。その一つが、日本政府によって提案された「二国間クレジット」である。この制度では、二国間の約束によって削減量を自主的に算定するので手続きが簡素化され、効果の大きい大規模プロジェクトを含めることができる。

このような削減への取組は、電力などの供給側、産業、家庭、業務、運輸などの需要側の両者で可能である。

### 6. 1.5 アジア地域における石炭発電起源 $CO_2$ と発電効率向上による削減ポテンシャル

石炭発電における  $CO_2$  削減効果について考察する。WEO2O11 によると、 $CO_2$  年におけるアジア途上地域内  $CO_2$  排出量は  $CO_2$  が石炭発電起源の排出である。そこで、 $CO_2$  が石炭発電起源の排出である。そこで、 $CO_2$  が石炭発電起源の排出である。そこで、 $CO_2$  が石炭発電起源の排出である。そこで、 $CO_2$  が石炭発電量と  $CO_2$  排出量の推移をまとめ、 $CO_2$  申点での発電実績から発電効率が 1 %向上した場合の  $CO_2$  削減効果を試算した。

アジア途上地域における 1990 年及び 2009 年の石炭発電量の推移を図 6.1-1 に示す。約 20 年の間に、年間発電量は地域計で 7291Wh から 38521Wh と 5.3 倍になった。特に中国は、同期間における高度経済成長を反映して、4711Wh から 29411Wh と 6.2 倍に成長している。また、同地域における石炭起源  $CO_2$  排出量は、図 6.1-2 に示すように 9.0 億トン  $CO_2$  から 43.5 億トン  $CO_2$  と 4.8 倍の伸びを示した。 $CO_2$  排出量の伸びが発電量の伸びを下回ったのは、域内平均での発電効率が 27.4%から 30.1%と向上したためである。

2009 年における石炭発電所の発電効率は中国30.8%、インド26.1%、その他地域33.3%である。仮にそれぞれの発電効率が1%向上した場合の排出削減効果は、中国1.0億トンCO<sub>2</sub>、インド0.3億トンCO<sub>2</sub>、その他地域0.1億トンCO<sub>2</sub>であり、合計で1.4億トンCO<sub>2</sub>になる(図

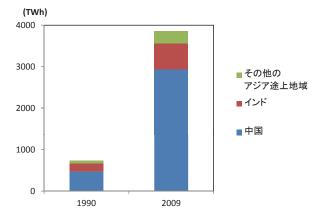


図 6.1-1 アジア途上地域における石炭発電量の推移 (WE02011, 1TWh=10 億 kWh)

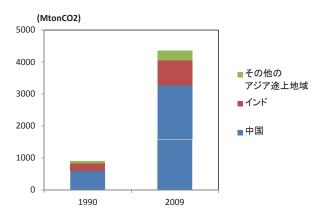


図 6.1-2 アジア途上地域における石炭発電起源  $CO_2$  排出量の推移 (WE02011, 1MtonCO<sub>2</sub>= 百万トン  $CO_2$ )

6.1-3)。この量は、日本の 2009 年エネルギー起源  $CO_2$  排出量 10.9 億トン  $CO_2$  の 12.9%に相当し、アジア地域に限定してみても、適切な方法で石炭発電技術の移転がなされれば、 $CO_2$  削減効果は極めて大きいものであることが分かる。

#### 6.1.6 今後の課題

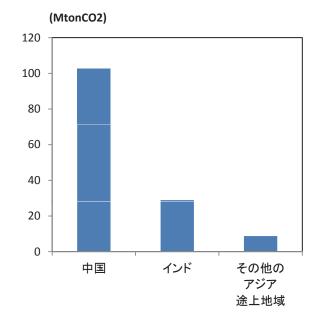


図 6.1-3 2009 年において発電効率が 1%向上したと仮定した場合の  $CO_2$  削減量 (LCS 推定 1Mton $CO_2$ = 百万トン  $CO_2$ )

技術移転による高効率発電の導入可能性を評価するためには、想定設備費、電気料金などのデータを基にした事業性評価も必須であり、LCSにおいて関連調査研究を実施する必要がある。

### 【文献】

1) International Energy Agency, World Energy Outlook 2011, 2011.

### 6.2 学校教育から発信する家庭・地域での低炭素社会づくりへの理解増進

#### 6.2.1 はじめに

LCSでは、低炭素社会の構築に資するシナリオや戦略に関する研究を実施している。しかし、現実の社会において低炭素社会を構築していくためには、日々のくらしの主体である国民の理解が不可欠である。

国民の理解増進を図るためには、低炭素社会づくりの必要性を子どもたちが理解しやすい学びの機会を提供することは有効である。たとえば、学校の取組のなかでも、今日の我が国の資源エネルギー状況を踏まえて、化石燃料に過度に依存することなく、再生可能エネルギーの有効活用、省エネルギー生活への転換、分散型エネルギーの利用などの理解を深める活動が展開され始めている。

社会の低炭素化に向けた理解を増進するためには、社会、理科、技術、家庭科等の各科目の学習や教科横断的な学習を活用することが有効である。そのためには各科目の学習目標のなかに無理なく低炭素化の理解を深めることも含めた指導方法及び教材の開発が必要である。その具体的な方法としては、ESD(持続可能な開発のための教育) A)として先進的に進められている実践事例から、低炭素化への理解増進につながる教育実践事例を抽出し体系化して価値付けをすることを通じて、低炭素化の理解増進の取組における目標の立て方や理解増進のための学びの内容を開発することなどが挙げられる。

東日本を襲った未曾有の震災、特に津波に伴う原子力発電所の事故により、国民の多くは防災 教育とエネルギー教育の必要性を感じるとともに、改めてその意義と役割を意識するに至った。 子どもたちを対象とするエネルギー環境教育においては、子どもたちの科学技術リテラシーを高 めるとともに、省エネルギーや省資源に結び付く諸活動を行い、生涯にわたって課題意識を醸成 するとともに、その解決に向けて判断し行動できる能力を養う低炭素教育が求められることと なった。

### 6.2.2 低炭素社会づくり理解増進としての実践と課題

子どもたちが社会の低炭素化に向けた理解を増進する学びの機会として、学校の教科科目と連携した学習機会があると考えている。LCSではその学習機会を低炭素教育と呼ぶこととしており、「子どもたちから家庭の低炭素化」を図ることとしている。科学技術の知識を活用して生活の視点から社会の諸課題を解決することを、学校教育の場で具体化することを目標とする。

子どもたちには、日常生活での小さな成功体験を積み重ねることで、自己を肯定的に受け入れ、将来の夢を持てるようにする。このことは学習指導要領の改定趣旨である「生きる力」を培うことにもつながる。このように、低炭素教育で目指す子どもの姿とは、我慢することや豊かさを損なうことなく、生活水準を向上させながら、夢と希望を持って明るく楽しく生きる姿である。

低炭素教育が学校での教科科目と連携して行われる場合、以下のような目標を掲げて推進する 具体的な指導の展開が課題となる。

- ① 日本の先進的な科学技術による、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの活用や発電の高効率化、送電ロスの削減、スマートグリッドの推進、蓄電池の改良など省エネと新しいエネルギーの概念と活用について考えることができる。
- ② 家屋の断熱性を高めるグリーンカーテン、窓が多く庇の長い日本型の家屋、打ち水、よしずなどの日本の伝統的な低炭素社会の知恵に学ぶ節電・節水等による電力消費量の削減による電力危機の回避について取り組む態度を育てる。
- ③ 石油や石炭・LNG などの化石燃料に過度に依存することなく、再生可能エネルギーの有効活用、 省エネルギー生活への転換、分散型エネルギーの利用、地方の自立を促す社会の実現を目指 すためにできることを考える。

#### 6.2.3 先進的に実践されている低炭素教育

#### (1) 小学校

身近な生活を振り返り、省エネルギーと省資源の意味や意義を問い、関心を高め、その活動に参加し、低炭素社会実現のための基礎的な知識や実践力を身に付けることや、気候変動に対応するために、再生可能エネルギーの開発と省資源に必要な科学リテラシーや気候変動への理解をさ

せることを狙いとする。小学校社会の「電気の確保」(3、4学年)の単元では、電力需要の増加に対して、主に火力、原子力、水力の発電所から送り出される電気で安定供給が図られている現状について学び、火力発電所や原子力発電所では環境にこれまでは配慮していて、安全性の確保にも努めていたことなどを学び、低炭素社会を実現するために電気エネルギーの持続可能な開発について考えるようにする。

小学校理科の「電気の利用」(6学年)の単元では、エネルギー資源の有効利用という観点から電気の効率的な利用に関心を向けるようにする。たとえば、手回し発電機や蓄電器を用いて発光ダイオードと豆電球の点灯時間を比較し、発光ダイオードが豆電球より長く点灯することから、今日の電力危機における家庭の照明機器選択のヒントを得るようにする。

小学校家庭科の「住まいの工夫」(5、6学年)の単元では、年間を通して快適な生活を送るための暑さ・寒さへの対処法や、それらと通風・換気との関わり、適切な採光の必要性などについて考える。こうして、自然を活かして住むことの大切さを理解し、より快適に住むために工夫できるようにする。そして、生活スタイルを変えて、低炭素社会の実現を図ることを学ぶようにする。

### (2) 中学校

中学校社会科の「資源・エネルギーと産業」では、子どもたちが、日本の安全保障の観点から資源・エネルギーの安定確保の重要性を認識し、日本が直面するエネルギー・環境問題への理解を深め、持続可能な社会構築のために何をすべきかを、自ら考えられるようにする。環境汚染や自然破壊が地域や国家の問題であるとともに、地球規模の問題となっていることや資源・エネルギーが不足してきていることから、一層の省資源・エネルギー及びリサイクルなどの必要性、さらに、新しい資源・エネルギーの開発やその利用の必要性を学ぶようにする。

中学校理科では、環境への理解とその保全、科学技術の利用について考察し、持続可能な社会実現の重要性を認識することを狙いとしている。科学技術の発展が人間生活を豊かで便利にしてきたこと、エネルギー問題や環境問題などを解決するためにも科学技術が重要であること、科学技術の発展と人間生活とが密接な関わりを持っていること、などの認識を深めさせる。

技術家庭・技術分野では、持続可能な社会の構築やものづくりを支える能力の育成を重視している。学習指導要領では、「科学技術の発展は、情報化の進展や生活環境の向上をもたらす一方、自然環境の破壊や資源・エネルギーの浪費などの問題を生じさせている実情もある」と改定された。しかし、自然環境の保全には科学技術の進展が貢献していることにも気付かせ、自らの生活を改善するためには必要な情報・技術を取捨選択するよう指導することとされている。これは、今日の科学技術弊害論を払拭するためにも極めて大切なことである。突き詰めれば、低炭素社会を実現する教育の力も、科学技術教育の充実によるところが大きいということができる。「技術が環境問題の原因と解決に深く関わっていること」や「技術の進展が資源やエネルギーの有効利用と自然環境の保全に貢献していること」について、具体的な活動を通じて学ぶようにする。

中学校1年の単元「生活や産業の中で利用される技術~環境を守る科学技術の開発~」では、 以下2点の目標に向けた授業の実践がある。

- ① 有限な化石燃料の利用を減らして、再生可能エネルギーを利用した豊かな生活の実現を目指す。
- ② 発電所や運輸、家庭などが進める温室効果ガス排出量削減のための技術の開発の現状を知る。 授業の中では、太陽光発電、風力発電、地熱発電などを取り入れている諸外国と日本の現状について比較し、次に、火力、原子力、水力及び再生可能エネルギーを利用した発電所の長所と短所について、グループで話し合い、表にまとめる。

展開としては、最近の電気自動車やハイブリッドカーの走行性能や価格などの急速な進展について調べる。また、国産のリチウムイオン電池で駆動する軽自動車が、補助金付きではあるが200万円を切る価格で販売されたこと(従来は2倍以上の価格だった)、車重の多くを占めていたバッテリーの改良等により軽量化を図ったこと、電力不足による計画停電時などの非常時に対応したAC100Vを供給できる電源端子を装備していること、などについて生徒が気付くようする。

さらに、ハイブリッドカーや水素を燃料とした燃料電池車の普及、そして再生可能エネルギーの開発には、日本の科学技術が大きな役割を果たし、低炭素社会の実現に向けて寄与していることを考えさせる。

### 6.2.4 低炭素社会実現の理解増進を図るための学びの規準

低炭素教育で目指す未来に生きる子どもの姿は、暑さや寒さを我慢したり楽しいことができなくなったり行きたいところに行けなくなったりするなど、国民としての厚生の基準を下げたりすることなく現状の生活を更に向上させながら夢と希望を持って明るく楽しく生きことができる姿である。小学校及び中学校における教科等の指導で、低炭素社会の実現の理解を図るための指導内容を社会科、理科、生活科(小学1、2学年)、家庭科(中学校においては技術・家庭)及びこれらの教科を中核とした総合的な学習の時間<sup>B)</sup>における学びの項目及び低炭素教育としての学びの規準は、表6.2-1のようになる。

表 6.2-1 小中学校の各教科及び総合的な学習の時間における低炭素教育の学びの規準試案

	小学校		中学校				
	1, 2年	3, 4年	5年	6年	1年	2年	3年
社会		・身近な地域 〈健康な生活や 良好な自然環境〉 ・飲用水、電気、 ガスの確保処理 ・災害、 ・災害、 ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・	・環境の保全と 自然を実事を (変) では (変) でな (変) で。	・国家社会の発展に入した人の中の日本の投票 (本のな環境、国際協力)	・地域間の結び( ・地域の自然災) ・国際社会におい 〈高度経済成長 ・国民の生活とご	ーと産業 消費、野付き 書に応じた防災対等 ける我が国の役割 、対学技術〉 政府 源・エネルギー〉 の形成	
理科		・光の性質(3年) 〈太陽光発電〉 ・電気の働き (3年) ・電気の働き (4年) ・身の回りの生物 と環境の関わ り(3保全〉 ・太陽と地面の様 子(3年) 〈太陽熱利用〉	・電流の働き 〈電力消費〉 ・天気の変化 〈気候変動〉	・電気の利用 〈発電、発熱〉 ・燃焼の仕組み 〈パイオマ ス、の排出⇒ ・生物気・連環 〈空物を環 、 食種環 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	・光と音 〈太陽光発電〉 ・物質の姿 〈化学変化 ・状態面と地電、 ・火地熱発 ・火地熱発 ・水地が炎〉	・電流 〈「電力、省工 不電力、磁 ・電子 ・電子 ・化気地球 ・化気地球 ・サタ報温 ・サータ ・サータ ・サータ ・サータ ・サータ ・サータ ・サータ ・サータ	・ 大小
家庭 技術・家庭			・近隣の人々との・食育・季節の変化に合まい・身近な生活とま・環境に負荷をか	合わせた快適な住 環境	・生活や産業のなかで利用されている技術 ・エネルギー変換に関する技術、評価、活用、制作 ・生物の生育環境 ・家庭生活と地域のつながり ・地域の食文化 ・住居の機能と住まい方 ・環境に配慮した消費生活の工夫		
生活	・家支と地共活家 を族と地域で ・安支と地域で ・地域で ・地域交流						
総合的な学習 の時間(教科 横断的展開例 >		下水道分野によ る低炭素教育 ・下水処理場の働き ・再生可能エネルギー ・自然界の水循環・自然界の炭素循環・地球温暖化防止	ESD (持続可能な開発のための教育) で進める低炭素教育 ・国際機関、各国政府、NGO、企業等あらゆる主体間で連携を図る ・環境、エネルギー、福祉、平和、開発、ジェンダー、子どもの人権教育、国際理解教育、貧困撲滅、紛争防止教育など		放射線・原子力発電で進める低炭素教育 ・プレートの変化と地震による災害 ・地震発生による放射能汚染 ・放射線による外部被ばくと内部被ばく ・原子力発電の仕組みと我が国の電力供給 ・再生可能エネルギーによる発電		

各学年でいずれかの教科もしくは総合的な学習の時間において、社会の低炭素化につながる学びの機会を提供することにより、子どもたちの低炭素社会実現のための理解を増進することになると考えられる。

小学校において社会科の電気(電力)の確保の授業では、低炭素社会での電気エネルギー施策について児童の理解を深めるとともに家庭において児童が発信者となり家族の理解を増進することができるようになる。理科の電気の利用(6学年)の授業は、今日の電力危機における家庭の照明機器の選択のためのヒントを得て児童の理解を深めるとともに、家庭において児童が発信者となり家族の理解を増進することができるようになる。さらに、理科における小学校最後のまとめとしての「人と自然(6学年)」の授業では、人間を含めた生物が生きていくためには、水や空気、食べ物、太陽のエネルギーなどが必要なことを理解し自然を愛する心情を育てることとなり、自然環境と人間との共生の手立てを考えながら低炭素社会の実現を目指す自然観を持たせることができるようになる。家庭科では、より快適な住まい方に関心を持って工夫できるようにすることについて児童の理解を深めるとともに、家庭において児童が発信者となり家族の生活スタイルの変化を図ることができるようになる。

中学校においては社会科では一層の省資源、省エネルギー及びリサイクルなどの必要性が求められていること、及び新しい資源・エネルギーの開発やその利用が必要であることについて理解する。また、理科では科学技術の発展が人間生活を豊かで便利にしてきた一面と、エネルギー問題や環境問題などの様々な問題を解決するためにも科学技術が重要であること、科学技術の発展と人間生活とが密接に関わりを持っていることの認識を深める。さらに、技術・家庭では技術が環境問題の原因と解決に深く関わっていること、技術の進展が資源やエネルギーの有効利用、自然環境の保全に貢献していることについて具体的な活動を通じて教科の目標を達成することにより、地域や家庭における低炭素社会実現のため理解を波及していくことが期待できる。

### 【用語】

A) ESD (Education for Sustainable Development)

これまでは別々に検討されていた日本の伝統的な文化・自然遺産と環境問題等、地域コミュニティレベルを含めた国内的な課題と国際的な課題のそれぞれを結び付けて、持続可能な未来の構築と現実的な社会転換に必要な価値観・実践力の育成を狙いとしている。

豊かな自然と命のつながりを感じたり、地域に根ざした伝統文化や人々と触れたりしながら、 人と自然、人と人との共存や多様な生き方を学ぶという狙いは低炭素社会の求める在るべき 子どもの姿でもある。

### B)総合的な学習の時間

平成 10 年度の学習指導要領の改定によって設けられた「時間」である。小学校 3 学年から高等学校まで、当初は週当たり 3 時間相当の年間の授業時数であったが、平成 20 年度の改定でほぼ週当たり 2 時間となった。目標は、「横断的・総合的な学習や探究的な学習を通して、自ら課題を見つけ、自ら学び、自ら考え、主体的に判断し、よりよく問題を解決する資質や能力を育成するとともに、学び方やものの考え方を身に付け、問題の解決や探究活動に主体的、創造的、協同的に取り組む態度を育て、自己の生き方を考えることができるようにする」 $^{1)}$  とされている。また、総合的な学習の時間での横断的・総合的な課題として環境が例示されている $^{2)}$   $^{4)}$  。LCS では、総合的な学習の時間において低炭素教育の学びの機会を提供できるものと考えている。

#### 【汝献】

- 1) 文部科学省, 小学校学習指導要領, 2008.
- 2) 文部科学省、小学校学習指導要領解説 総合的な学習の時間編、2008.
- 3) 文部科学省,中学校学習指導要領,2008.
- 4) 文部科学省、中学校学習指導要領解説 総合的な学習の時間編、2008.

### 6.3 低炭素社会構築促進への「社会システム・デザイン」手法の適用

### 6.3.1 はじめに

私たちは比較的最近まで技術進歩は大枠として社会の福祉向上につながると考え、そのマイナス面にはあまり関心を払わないできた。しかし、資源浪費型の人間活動が飛躍的に増大し、自然環境の自己調節機能の範囲を超え始め、自然環境の不可逆な変化を起こしていると考えるのが大枠として正しいと世界中が認識し、それに対処する行動を始めている。「低炭素社会」の実現はその行動の主要なテーマである。

現在の化石資源の多様化は石油の採掘コストとの見合いで形成されており、最近の石油の価格高騰からこれまでの天然ガスに加えて、シェール・ガス、シェール・オイル、そして、オイルサンドからの油分抽出や石炭液化なども、石油に対抗できるコストという面から現実味を帯びてきている。すなわち、化石資源はそう簡単に枯渇しない。しかし、たとえ、そのような状況下でも、化石資源の浪費とそれが作り出す炭酸ガスは望ましいものではないとの認識が世界人類共通の価値観になってきている。このように世界は技術中心のロジックから社会の価値観との関係で技術進歩を捉える時代に変わろうとしているのであり、ある意味で明確なパラダイム転換が起ころうとしている。

また、国際化の時代は国内と海外と分けて考えることができたが、グローバリゼーションの時代においては国内と海外は分けられなくなっている。グローバリゼーションの本質は地域の相互連鎖である。「日本が海外に染み出し、海外が日本に染み込んでくる」のが日常生活の実感になってくる。加えて、別の形での相互連鎖も進行中である。それは産業や学問などの分野間の相互連鎖である。医療、情報、金融、エネルギーなど先端分野のそれぞれの最適化を図れば全体最適につながるということはありえず、それらの分野間の相互連鎖によるフィードバックを含んだダイナミック・システムとして捉えないといけなくなってきている。

このような地域間、及び分野間の相互連鎖ももう一つのパラダイム転換である。このような二つのパラダイム転換の時代にはアプローチの革新が必要である。すなわち、地域、分野横断型のダイナミック・システムとして課題設定し、社会の価値観を組み込んだ技術開発と活用を目指した課題解決を成し遂げるアプローチが求められている。

### 6.3.2 「社会システム・デザイン」というアプローチ

「社会システム・デザイン」はこのような新たなパラダイムのニーズに応えるためのアプローチである。すなわち、技術のロジックと社会の価値観の両方を勘案し、また、分野間の相互連鎖を取り込むため、分野横断的システムを組み立てることを目指している。また、時間軸に関係ない処理が中心のスタティック・システムとは異なり、過去の結果がシステムの中に取り込まれていくという形で、時間軸を考慮したダイナミック・システムのデザインのアプローチを工夫している。それは「悪循環」、「良循環」という発想の中に組み込まれている。

「社会システム・デザイン」は専門家、素人に関係なく誰でも理解でき、参加できるステップ に基づいたアプローチで構成されている。すなわち、

- ① 現在、存在する「悪循環」の定義
- ② 新しい「良循環」の創造
- ③「良循環」を「駆動するエンジンとしてのサブシステム」の抽出
- ④「サブシステム」をより細かい「サブサブシステム」群へ分解
- ⑤「サブサブシステム」から具体的な行動ステップの構築
- がそのデザインの主要なステップである。

ここでの「社会システム」の定義は社会学者のいう「社会全体がシステムである」という発想ではなく、社会の部分であり、デザイン可能な「消費者・生活者への価値創造と提供の仕組み」と定義する。この定義では供給者側の発想ではないかという批判があり得る。しかし、自動車や家電製品のような伝統的なものづくりとは異なり、「社会システム」のデザイン・プロセスに消費者・生活者が参加していくことは可能である。それぞれのステップに生活者感覚で関っていくことは現実的なアプローチである。また、多くの供給者側の専門家もこのプロセスは初めての経験であり、両者が関わることのできるこのプロセスを通じて新しい社会の価値を醸成していくことも可能である。これまで存在しなかった全く新しいアプローチである。

また、「社会システム・デザイン」のもう一つの特徴は、産業振興的発想から脱却し、消費者・生活者、及びそれらの人々で構成する社会の意識向上が産業や企業が提供するもの、サービスに対する選別眼を高め、本当に価値のある選択をするように展開していくことを前提としていることである。すなわち、消費者・生活者が何に価値を感じているかという観点から社会に醸成される価値観を考慮に入れ、それを反映するアプローチである。現在、「低炭素社会の構築」は先進諸国の消費者・生活者の間での共通の価値観になりつつある。

このような価値観に沿った、今必要な「社会システム」とはこの構築プロセスを着実なものにする「低炭素化推進システム」である。「低炭素化推進システム」とは、社会の低炭素化のための技術開発が進み、実用化され、消費者が積極的に受け入れることで普及が促進され、その効果が個々人の生活の中で効果が見えてくることで幅広く普及し、技術及びそれが提供する商品・サービスのコストが下がり、日常生活の中に自然に組み込まれていき、人々の行動も変わり、最終的には社会全体の価値観の変化に結び付いていく社会の仕組みである。

### 6.3.3 低炭素社会と社会システム・デザイン

ところで、「低炭素社会」という、自己の行動を規制するような方向への変化はこれまでの社会の流れと大きく異なる。消費者・生活者は生活の利便性をこれまで追求してきたのであり、自分の行動を制約されるような社会の流れを受け入れてきたことはない。確かに、戦後の経済発展は消費者の欲望とわがままに応える形で展開してきた。しかし、ここ 20 年の消費の低迷はそのような傾向に限界が来たともいえる。それは欲望の限界に達したということではなく、新しい欲望へ転換していると考えるべきであろう。わがままで自己中心的な生活の追求から、自己規律のある生活という質を求める欲望に変わろうとしているともいえる。実際に、いわゆる3・11(東日本大震災)の後に起こった意味ある節電、意味ない節電のすべてを含めて、電力の浪費を止めようとする節約行動はその一つの表れということができよう。

このような資源浪費型の消費から節度のある消費への自己規制という時代精神の発現に対して、タイミングよく的確な行動を起こさないと、「社会システム・デザイン」で定義するところの「悪循環」が巡ってしまうことになりかねない。起こり得る「悪循環」として考えられるのは次のようなものである。

すなわち、低炭素化を推進するのに必要な技術開発予算や資金がばらまき型で、個々の研究課題への資源投入が不十分でクリティカル・マスに達しないため、成果がなかなか出ない。市場に投入される低炭素化製品の価格面での政府の助成資金も十分でないため、初期需要が伸びず、生産規模が速いスピードで拡大しない。その結果、単価が高いままであり、普及が進まない。当然、デバイスやシステムの供給者はこの事業において十分な利益を上げることができないため将来の技術開発投資を進めることができない。したがって、投資のクリティカル・マスに達しないから成果が相変わらず出ない、という悪循環である。

基本的にはこの分野の製品はハイテクであってもコモディティであり、伝統的な穀物や汎用石油化学製品と同様に20~30%の市場シェアを取ったものが寡占を達成し、利益を出すという構造である。また、そのレベルに達するにはかなりの持続的投資が必要であるが、成果に結び付く見通しが立たないと事業者は事業の先行きに悲観的になり、積極的に投資をしなくなる。その結果、市場に安価で改良されたデバイスやシステムが提供されない状況が続くことになる。あるいは外国製が席巻することになるかもしれない。

消費者にとって低炭素化は社会の価値として分かるが、日常生活において毎日追求することをしなくてもとりわけ生活に大きな影響があるわけではない。まして、高いお金を出してコスト・ベネフィットの悪い消費をしようとは思わない。努力をしても気候に対する影響は30年後からしか見えないということを知ってしまうと、今、主義主張のために無理をすることもないということになってしまう。そして、いったん盛り上がった機運も段々と風化してしまう。

#### 6.3.4 低炭素社会戦略としての低炭素社会推進システム・デザイン

「低炭素社会推進システム」は、このような「悪循環」が出来上がってしまうことを避け、他に先駆けて低炭素化が進んでいく日本社会を構築し、それを世界の先例として提示できるように組み立てる。それが「低炭素社会戦略」の意味であり、戦略的に事を進める必要がある。改めて戦略の定義とは「世の中、時代の流れを見極めて、それに沿った自分の強さを最大限に活用して

競争相手と差別化し永続性のある優位に立つ」ということである。

「低炭素社会戦略」が国家戦略であるならば競争相手は諸外国である。その場合、「永続性のある優位」とは低炭素社会を構築し、改良していく思想、技術、事業、そして、それを支える消費者・生活者の行動と社会構造及び価値観が常に先端的であり、世界に影響を与え続けるという存在であり続けることと解釈すべきである。

この戦略を推進するためには新たなアプローチが必要である。先の「悪循環」で見たように、現在のような縦割りの部分最適とばらまき型予算、リスク回避型企業行動では達成できないことは明らかである。「やるべき」、「やらなければならない」からやってみると、これまでより一層可能性が見えてきて、誰もがもっとやりたくなるという展開が必要である。それが「社会システム・デザイン」でいう第二のステップである「良循環」の創造の意味である。関係者のばらばらな行動を結び付け、段々良くなっていくことが実感でき、一層みんなが連携をして行動するような方向にもっていかないといけない。

そのための「良循環」とはどんなものだろうか。 $CO_2$  排出量において「日々のくらし」の部分は産業界の努力に比べるとこれから努力を傾注するべき分野であり、放置すると炭酸ガス放出量は拡大する傾向にある。この現象に着目した「良循環」の形成が重要だ。そのためには、消費者・生活者が義務感からではなく、多少の追加的対価を払い、ある程度行動を規制する生活の自己規律が自分の精神面、物質面、健康面のすべてにおいてプラスに効いてくるような「良循環」を形成する必要がある。

たとえば、日本はがん検診を含めて定期健康診断を受けている比率が諸外国に比べて極めて少ないが、これは費用面より自己規律の問題であり、その改善は健康面での改善に直接的につながり、当然、物質面、精神面での効果も大きいことは明らかである。

「良循環」の創造は「悪循環」の裏返しではなく、新たな発想が必要な行為であり、これがデザインの中核である。したがって、デザインの本質である繰り返し作業を通じて優れた「良循環」をみつける努力を続けていくことが必要である。ここではその最初となる「良循環」のたたき台を提示する。

それは初期段階において主婦の間のピア・プレッシャー(仲間外れにならないよう、また、バカにされないようにみんなと同じ行動をするように自然と働く圧力)を活用して新しい消費行動を広げていく発想である。たとえば、活動的主婦を消費者活動グループ、商店会などの団体から募って、新たなグループを形成する。そこに、省エネ、低炭素化などの情報を提供していき、それを口コミで自分のコミュニティ・グループに伝播させて、一般の主婦層を「低炭素化」に関する抽象的な関心を具体的な行動に巻き込んでいき、賢い「低炭素化生活」のための太陽光発電であれ、蓄電池であれ、あるいは省エネ家電であれ新しい生活投資を誘発させ始める。

その広がりを見て企業は低炭素化のための消費行動の定着を確認し、現在の赤字を越えてコモディティ・ビジネスに不可欠な将来の圧倒的シェア獲得のための設備投資を進めることで、ボリューム拡大によるコスト・ダウンが進み始め、より手が届きやすい価格と具体的な生活スタイルが見えてくる。一方、主婦は「低炭素化生活」が先端的生活であるとの確信を持ち、自分のコミュニティ・グループにより積極的に自分の生活を見せることで、一層、主婦層に広がっていくという「良循環」が考えられるであろう。

この「良循環」を巡らせるためには「駆動エンジンとしてのサブシステム」がいくつか必要である。それは

- ① 活動的主婦層のための活動支援システム
- ② リースなどの優遇ファイナンス・システム
- ③ 主婦の活動成果顕彰システム

などが考えられる。すなわち、倹約志向の強い主婦の中から核になる活動的主婦を見つけていろいろなインセンティブを提供し、自分の生活を変えていくことを仲間に宣伝することで「低炭素生活」のスタイルを定着させることと、顕彰することで、ある種の競争をすることによって達成感に結び付け、注目を浴びることでモーチベーションを維持しようということを目指した「良循環」である。

当然、消費者・生活者側の努力だけでは成果の規模は限られている。ソーラー・セルや定置用蓄電池も供給側の大型需要がないと事業は立ち上がらない。しかし、あれかこれかではなく、供給側の大型需要の確保と消費者・生活者側の小口需要の拡大との両方が併存することがコスト面

### の「良循環」を形成するために必要である。

供給側の大口需要が製品の製造固定費を担うことで、消費者・生活者には変動費だけを回収する形でかなり安価な価格設定(マージナルコスト・プライシング)をすることが可能であり、それによって普及を促進するなどの施策が考えられる。その場合、政府が税制面で優遇するなどの支援が必要である。

以上、ここに述べたのは「低炭素社会推進システム・デザイン」の具体的な流れを第一回目の作業として示した。デザインは繰り返し作業の連続であるから、実施に移せるレベルのデザイン完成のためには今後の継続が必要である。

### 付属資料

### 資料1 日本における太陽光発電の都道府県別発電電力量の推計

我が国においては、地球温暖化対策やエネルギー安全保障の観点から再生可能エネルギーの導入推進が図られている。また、2011年3月の東日本大震災及び福島第一原発事故による災害対策、電力不足により、再生可能エネルギーのニーズが高まっている。しかし、再生可能エネルギーは地域偏在性があり、エネルギーの出力変動が大きい点が課題となっている。再生可能エネルギーの中でも地熱発電や水力発電は年間を通じて比較的出力変動が小さく、設備利用率が高いエネルギーである。一方、太陽光発電や風力発電は、季節や時間によって出力変動が大きく、設備利用率が小さいエネルギーである。今後、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの導入量が増加するにあたり、日本の電源構成や電力系統に与える影響やその対策を検討していく必要がある。そのため、これらの再生可能エネルギーの各地域における導入量及び発電特性を把握する必要がある。

### 1. 目的

LCS では、再生可能エネルギーの中でも昼夜や天気によって発電電力の変動が大きい太陽光発電を対象として、2020年、2030年における国の導入目標値から、都道府県別の導入量を推計するとともに、各都道府県の日射量データを基に、時間別発電電力量の試算を行い、季節時間別の発電電力量の変動量を把握することを目的とする。

#### 2. 推計方法

太陽光発電の導入状況として、各種統計データや既往調査から、都道府県別の導入状況及び導入可能量を把握する。次に2020年、2030年における導入想定値から都道府県別の導入割合を算出する。最後にこの算出結果及び都道府県別の日射量データから、月別時間別発電電力量を算出する。

### 3. 太陽光発電の導入状況

日本全体における太陽光発電の導入量は、2010 年時点で 361.8 万 kW となっている  $^{1)}$ 。その内 訳は、一般社団法人太陽光発電協会(JPEA)の太陽電池国内出荷量データ  $^{2)}$  によると(図 1)、2009 年時点で 87%が住宅用となっており、現在日本に導入されている多くの太陽光発電が住宅用であることが分かる。住宅用太陽光発電の都道府県別導入量を各種統計データ  $^{3)}$   $^{4)}$  から試算すると(図 2)、戸建住宅数に対する導入率(2008 年)は全国平均で 1.9%であるのに対し、九州地域が 3 ~ 4%の導入率となっており、西高東低の傾向が出ている。一方、導入された設備容量の総量でみると、第 1 位が愛知県(10.1 万 kW)、第 2 位が福岡県(9.7 万 kW)、第 3 位が兵庫県(8.9 万 kW)と推計され、戸建住宅数が多く平均的な導入率となっている都市圏での導入量が大きいことが分かる。

今後は、住宅の新規着工数の停滞やメガソーラーなどの大規模事業の導入が進むことが予想されるため、将来的には非住宅用の比率が大きくなってくると想定される。

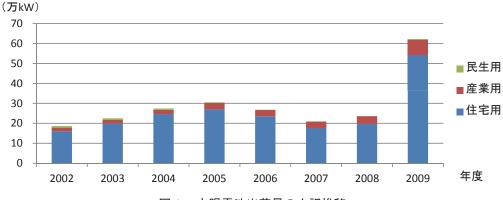


図1 太陽電池出荷量の内訳推移

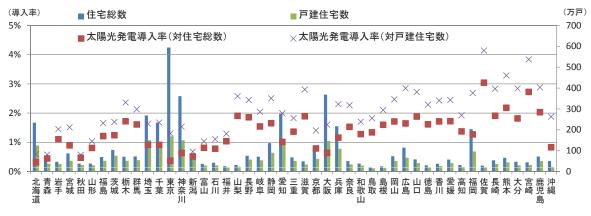


図2 都道府県別住宅数と住宅用太陽光発電の導入率

#### 4. 太陽光発電の導入量推計

日本における太陽光発電の導入可能量(ポテンシャル)の推計は、国等でこれまで多くの調査が行われているが、LCSでは、環境省<sup>5)</sup>及び太陽光発電協会(JPEA)<sup>6)</sup>の試算結果を基に、2020年、2030年における都道府県別の太陽光発電導入量を推計した。

#### (1) 太陽光発電の導入目標値

日本の太陽光発電の導入目標としては、「低炭素社会づくり行動計画」<sup>7)</sup>を受けて、「長期エネルギー需給見通し」<sup>8)</sup>で、最大導入ケースとして 2020 年で 2800 万 kW、2030 年に 5300 万 kW が導入されると想定している。そこで、この国の目標値が達成された場合における都道府県別の住宅用及び非住宅用の導入量を算出する。

### (2) 太陽光発電の導入量推計の算出方法

都道府県別の住宅用、非住宅用太陽光発電導入量推計の算出方法を以下に示す。

- ① 基準年(2009年)における住宅用及び非住宅用太陽光発電の導入量の算出 2008年、2009年における日本の導入実績値(2008年:214.4万kW、2009年:262.7万kW)及 び太陽電池出荷量推移データ内訳<sup>2)</sup>を基に、2008年、2009年の住宅用及び非住宅用太陽光発 電の導入量(単年度及び累積)を算出する。
- ② 基準年から各目標導入量に対して、住宅用及び非住宅用太陽光発電の導入推移を推計 各目標年の導入量に対して、2009 年を基準とし、住宅用及び非住宅用太陽光発電の年間導入 量を JPEA による「国内導入量見通し」<sup>6)</sup> の試算値を基に設定する。
- ③ 都道府県別の住宅用及び非住宅用太陽光発電の導入量の算出 住宅用太陽光発電については、戸建住宅数との相関が高い(相関係数 0.83:2008 年データ<sup>3)</sup>) ため、日本全体に対する各都道府県の導入比率は同様のまま推移すると仮定して算出する。 非住宅用太陽光発電については、環境省調査報告書<sup>5)</sup>を基に、各都道府県における「公共系 建築物」、「発電所・工場・物流施設」、「低・未利用地」、「耕作放棄地」に対する導入可能量 の合計値の比率から按分して算出する。

#### (3) 太陽光発電の導入量の推計

都道府県別の住宅用、非住宅用太陽光発電導入量推計を算出した結果、日本全体における住宅 用太陽光発電と非住宅用太陽光発電の導入割合はそれぞれ、2020年時点で68%(住宅用)、32% (非住宅用)、2030年時点で53%(住宅用)、47%(非住宅用)と推計された(図3)。また、都 道府県別の導入比率は、第1位が鹿児島県(4.51%)、第2位が愛知県(4.50%)、第3位が福岡 県(3.86%)となった(図4)。鹿児島県は非住宅用(特に耕作放棄地)、愛知県及び福岡県は住 宅用のポテンシャルが高いことが理由と考えられる。

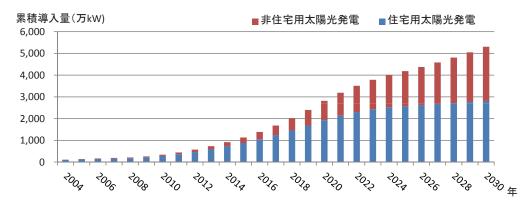


図3 日本の太陽光発電の導入量推移推計結果

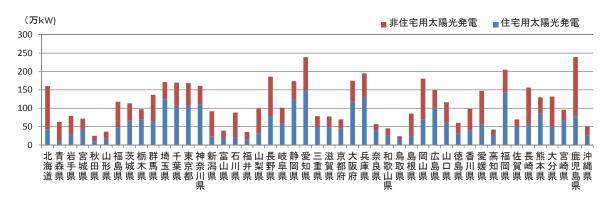


図4 都道府県別太陽光発電の導入量推移推計結果(2030年時点)

### 5. 太陽光発電の発電電力量の算出

各都道府県(県庁所在地)の日射量データを基に kW 当たりの月別時間別発電電力量を求め、2020 年及び 2030 年における都道府県別の総発電電力量及び月別時間別発電電力量を算出する。

#### (1)発電電力量の推計方法

都道府県別の日射量データを整理し、kW 当たりの月別時間別発電電力量の算出方法を以下に示す。

#### ① 日射量データの整理

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の日射量データ<sup>9)</sup>から、各都道府県(県 庁所在地)の日射量データとして、方位:真南、傾斜角:30度における1年間の時間別日射 量データを抽出し、各月における最大、平均、最小の時間別日射量を整理する。

### ② 発電電力量の算出

発電電力量は、以下の JIS C 8907-2005 を基に算出する。

発電電力量(kWh) =基本設計係数(0.7562) ×温度補正係数(Kpt) /標準試験条件における日射強度(1kW/m²) ×太陽光パネル定格出力(1kW) ×傾斜面日射量(kWh/m²)

\* Kpt : 1 -  $(Tav + \angle T - 25) / 100$ 

ただし、Tav:各都道府県の月別平均気温、△T:加重平均太陽パネル温度上昇(18.4°C)

### ③ 発電電力量の補正

本試算で用いた日射量データは、方位:真南、傾斜角:30度と好条件のデータとなっているが、 実際には必ずしも方角や傾斜角がこのような好条件で太陽光パネルが設置されているとは限 らない。そのため、②の方法で算出した各都道府県における kW 当たりの発電電力量と実際の発電電力量  $^{10}$  を比較し、補正値(0.928)を求めた。発電電力量の算出にあたっては、②の計算式のこの補正値を乗じることとする。

#### (2) 太陽光発電の総発電電力量の算出

先の推計方法に基づき、2020年、2030年における日本及び各都道府県別の月別時間別発電電力量を算出した。その結果、各目標年における日本の太陽光発電による総発電電力量はそれぞれ、280億 kWh/年(2020年)、526億 kWh/年(2030年)となり、全電源による発電電力量合計<sup>8)</sup>の最大導入ケースに対して占める割合は、2.7%(2020年)、5.5%(2030年)と推計される。また、各月におけるピーク時(12時)において、最大発電出力と平均発電出力とを比較(最大発電出力/平均発電出力)すると、いずれの月も1.5前後である。一方、最小発電出力と平均発電出力と平均発電出力とを比較(最小発電出力/平均発電出力)すると、夏季は約0.2、冬季は約0.1となり、日によって極端に出力が落ちることが分かる。そのため、太陽光発電の導入量の増加とともに、電力系統及び電源構成等に与える影響が大きくなることが分かる(図5、図6、図7)。

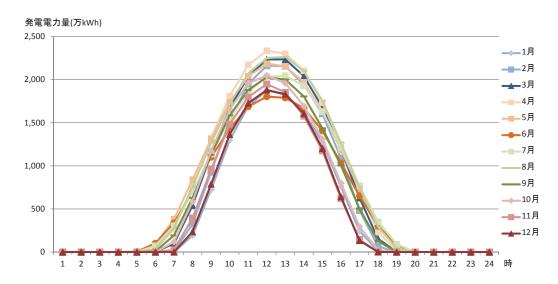


図5 2030年、536W導入時における日本全体の月別時間別平均発電電力量(平均値)

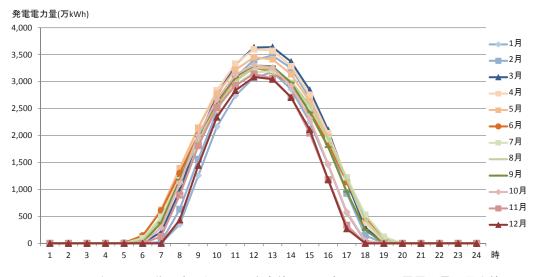


図 6 2030 年、53GW 導入時における日本全体の月別時間別平均発電電力量(最大値)

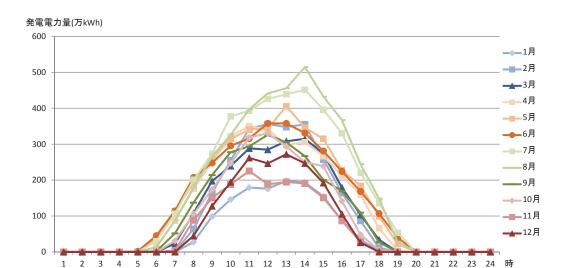


図7 2030 年、53GW 導入時における日本全体の月別時間別平均発電電力量(最小値)

#### 6. 今後の課題

本研究では、太陽光発電について、国の目標とする導入量が達成された場合の住宅用及び非住宅用太陽光発電の導入量推移及び日本全体における発電電力量(年間、月別時間別)の推計を行った。その結果、太陽光発電が日本全体の電力供給量に占める割合や発電電力の変動量を把握することができた。また、各都道府県における導入量の推計及び月別時間別の発電電力量の推計を行った。その結果、地域別(都道府県別、電力管内別等)の導入量や発電電力量の変動量を把握することができ、地域別に電力系統に与える影響や電源構成の検討に活用できると考えられる。今後は、各推計の精緻化や本推計結果を用いて、地域別の導入要因分析、普及戦略を検討していくこととする。

#### 【文献】

- 1) International Energy Agency (IEA), TRENDS IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS (Report IEA-PVPS T1-20:2011),
  - http://www.iea-pvps.org/index.php?id=32 (2012.1.17 時点閲覧可).
- 2) 一般社団法人太陽光発電協会, 日本における太陽電池出荷量の推移, http://www.jpea.gr.jp/pdf/qlg2010.pdf (2011.4.21 時点閲覧可).
- 3) 総務省統計局, 平成 20 年住宅・土地統計調査, http://www.stat.go.jp/data/jyutaku/2008/index.htm (2011.4.21 時点閲覧可).
- 4) 財団法人新エネルギー財団, 住宅用太陽光発電導入促進事業に係る年度別・都道府県別太陽 光発電システム導入状況(設備容量)(1997 — 2005 年度),
  - http://www.solar.nef.or.jp/josei/zissi.htm (2011.4.21 時点閲覧可).
- 5) 環境省, 平成 22 年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査, 2011.
- 6) 一般社団法人太陽光発電協会, JPEA PV Outlook 2030, http://www.jpea.gr.jp/pdf/t101207.pdf (2011.6.1 時点閲覧可).
- 7)環境省,低炭素社会づくり行動計画,2008, http://www.env.go.jp/press/file\_view.php?serial=11912&hou\_id=10025 (2011.4.21 時点閲覧可).
- 8)経済産業省,長期エネルギー需給見通し(再計算),2009, http://www.meti.go.jp/report/data/g90902aj.html (2011.4.21 時点閲覧可).
- 9)独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、標準気象・日射データ (METPV-3),

http://www.nedo.go.jp/library/shiryou\_application.html (2011.6.1 時点閲覧可).

10) 財団法人新エネルギー財団, 都道府県別 kW あたりの年間発生電力量と年間売電電力量(10年間)(1995年4月~2005年3月),

http://www.solar.nef.or.jp/josei/h18-07.pdf(2011.4.21 時点閲覧可).

### 資料2 電源計画モデルの開発手順と解説

電力は、国のライフラインとして、また産業基盤として不可欠の存在である。同時に、電力は他の燃料とは異なり貯蔵が困難、あるいは高コストであること、需要が季節や時間帯で大きく変動すること、電源設備は計画から稼働まで比較的長期を要することから、需要に応じた設備計画が必要となる。温暖化対策を講じるうえでは、どのように効率的に低炭素排出の電源の割合を高めていくかは重要な戦略課題である。

2011年3月の福島第一原子力発電所事故は、この電源計画問題にいくつかの新たな問題を投げかけた。第1は、原子力発電所の停止による供給の絶対量の低下への対応、第2はコスト効率性とともに供給の頑健性の必要性、そして第3に、再生可能エネルギー導入拡大の施策の可能性と課題である。これらは、定量的な評価が不可欠な課題である。そのため、古くから電源計画モデルが構築され、活用されてきた。

なお、この第3の課題は、従来型の電源技術の一オプションとしてトップダウン的に考慮するだけでなく、スマートグリッドのような地域での詳細な需給システムのあり方からボトムアップ的に検討する必要があるため、これまでの電源計画問題とは異なる新しいアプローチが求められることを指摘しておきたい。

本資料では、電源計画を定量的に検討・評価するための基本ツールとしてのモデル開発の手順と構築の概説を行う。モデルの開発目標を、将来の電源計画を定量評価するための多期間モデルとすること、地域間電力融通を明示的に扱うため多地域連系モデルとすることに置く。

以下、各種データ、ソースの利用を認められた国立環境研究所の芦名秀一氏と藤野純一氏に敬意を表するため、変数やデータ配列名はこれにならっている<sup>1)</sup>。しかしプログラムソースの開発や25期データの構築はLCSのオリジナルであること、したがって本モデルに何らかの誤りやバグが含まれていた場合、それらはすべてLCSの責任であることを付記する。

### 1. 基本的モデルの考え方と構築

多くの電源計画モデルは1日24時間、年365日変動する電力需要に対して、最もコストが安くなるような電源構成を求める問題として定式化される。1年365日8,760時間を対象とするとデータが多すぎるので、1年を①夏平日、②夏休日、③冬平日、④冬休日、⑤中間期平日、⑥中間期休日、⑦ピーク日、と7代表日に集約することもよく行われる。

基本的な電源計画モデルは、電力需要を所与とするとき、A. 各時点で需要を満たすよう発電が行われること、B. 設備は需要の最大値を満たせるだけ建設されていること、C. 対象期間の固定費(主に資本設備の償却に必要な年経費と管理運営費)と可変費(主に燃料費)の総和の最小化、の3ブロックから構成される。この基本的な電源計画モデルの拡張により、D. 各発電技術の運転特性制約(運転稼働率の上下限制約、時点間の出力調整の制約、地域間の送電制約、運転パターンによる費用の変化など)、E. 送電ネットワークの構造、などを表現することができ、次第にモデルも複雑・大規模化する。

まず期の定義を最初に行う。需要パターンは時々刻々と変化することや太陽電池を含める際の日射量変化を考慮すると、1年8,760時間でもなお不足で分単位のモデル構築が本来は望ましい。しかし細分化された時間軸に対する需要データは一部の家庭用データなど限られた範囲でしか存在せず、また日による変動も大きい。推計データへの依存度が上がるとモデルの不確実性が増大してしまう。このため、電源計画など長期かつ比較的マクロな評価を目的とする場合、ある程度時間・空間の解像度を下げ集計した方がむしろ頑健な結果を与えることになる。そのため通常は季節、平日と休日に区分し、これにピーク3日間平均値を加える簡易化がしばしば用いられてきた。芦名・藤野モデルでは上記の7代表日でモデル構築を行っているが、ここでは電気事業者間の融通を扱う際の地域間の季節差から、12か月を平日(W)・休日(H)に分け、さらに電力ピーク3日平均を加える25期モデルとする。ただし日間変動は24時間モデルとする。これを添字d(d= JanW,JanH,FebW,FebH,MarW,MarH,AprW,AprH,MayW,MayH,JunW,JunH,JulW,JulH,AugW,AugH,SepW,SepH,OctW,OctH,NovW,NovH,DecW,DecH,Peak3)とh(h=1…24)とする。この各期、各時間帯の電力需要を所与のデータとして、e\_DMD(h,d)とする。ここでは、沖縄電力を除く9電力会社に関する年間の発電実績データと2010年の発電電力量を基に上記25期の電力日間負荷の推計を行った。

まず、A. 各時点で需要を満たすよう発電が行われること、B. 設備は需要の最大値を満たせるだけ建設されていること、に関する制約式を示す。発電施設の種類をgで表す。簡単のため、石炭火力、ガス火力、石油火力、原子力、水力のみとする。すなわち、g =coal, gas, oil, nucr, hydro である。それぞれの設備容量をG(g)、各時間帯での発電電力量をG(g)、内、d)とすると、発電電力量について以下のバランス式が得られる。この第2式が需給バランス式であり、必要なら、送配電効率を導入してもよい。

$$O(g, h, d) \le C(g) \tag{1}$$

$$\sum_{g} O(g, h, d) = e_DMD(h, d)$$
 (2)

C. 対象期間の固定費(主に資本設備の償却に必要な年経費と管理運営費)と可変費(主に燃料費)総和の最小化、それぞれの発電設備の固定費(利子率と償却年数に基づく kW 当たりの年間費用)を Fix\_Cost(g)、可変費(kWh 当たりの燃料費)を Var\_Cost(g)とすると、年間の費用合計の最小化は

min. 
$$T_Cost = \sum_g Fix_Cost(g) \times c(g) + \sum_g \sum_h \sum_d Var_Cost(g) \times O(g, h, d)$$
 (3)

で表される。このモデルは3本の制約式しか含まないが、これを基本として様々な拡張が可能である。

### 2. 一次エネルギーからのフローと揚水発電の扱い

CO2 排出量評価や化石燃料の価格変動、発電技術の効率向上などを扱うには、一次エネルギーから電力への変換効率を明示する必要がある<sup>注1)</sup>。たとえば、同じ石炭火力でも技術により効率、固定費とも異なるので一次エネルギーと発電技術の間にはフロー行列を導入する必要がある。そこで一次エネルギーを f、発電技術を k に拡張する。なお太陽光発電 (PV) の扱いは本論の「3.太陽電池の取り扱い」で述べる。一次エネルギー i から発電技術 k への投入フローが図 1 のようであった場合を考える。バイオマスは石炭と混焼可能とする。

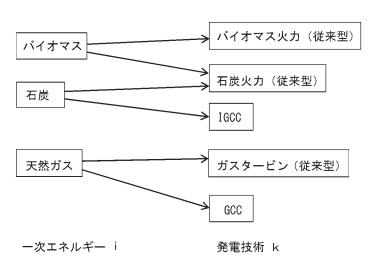


図1 一次エネルギーと発電技術間のエネルギーフロー

一次エネルギー需要を E\_Prm(i, h, d)、発電設備 k の発電量を 0(k, h, d)、発電効率を G\_eff(k) とする。一次エネルギー i の k への投入を Prm\_G(i, k, h, d) とする。また一次エネルギーと発電設備 k の間のフローの可能性を表 FG(i, k) にしておくと、表 1 のようになるので、

表 1 一次エネルギーと発電技術の対応フロー

	バイオマス火力	石炭火力	IGCC	ガスタービン	GCC
バイオマス	1	1	0	0	0
石炭	0	1	1	0	0
天然ガス	0	0	1	1	1

$$O(k, h, d) = G_{eff}(k) \times \sum_{i} Prm_{e}G(i, k, h, d) \times FG(i, k)$$
(4)

$$E_{Prm}(i, h, d) = \sum_{k} Prm_{G}(i, k, h, d)$$
(5)

と定式化できる。ただし、FG(i, k)=0 の場合、Prm\_G(i, k, h, d)=0 と固定しておく。

揚水発電(PumpHdr)を扱うには、貯蔵されたエネルギー量と汲み上げエネルギー量、発電のエネルギー量の間のフローとストックの関係式が必要である。汲み上げにより貯蔵に使うエネルギーを PumpUp (h, d)、累積で貯蔵されたエネルギーを StoreHdr (h, d) とする。放水エネルギー量は、ここでは一次エネルギー供給と同等の PrmEng ("PumpHdr", h, d) で扱える。放水量は貯蔵量以下であり、揚水発電所からの発電電力量 0 ("PumpHdr", h, d) はこの放水量に効率を乗じたものとなる。すなわち、

 $StoreHdr(h + 1, d) \le StoreHdr(h, d) + PumpUp(h, d)$ 

$$-PrmEng("PumpHdr", h + 1, d)$$
 (6)

$$O("PumpHdr", h, d) = PrmEng("PumpHdr", h, d) \times G_{eff}("PumpHdr")$$
 (7)

の関係式が基本となる。ここに、貯蔵量の上限、汲み上げのエネルギーと放水時のエネルギーの変換効率を導入することで定式化が可能となる。いうまでもなく、電力バランス式(2)の右辺には、汲み上げのための電力量 PumpUp (h, d) が加算される。

#### 3. 太陽電池の取り扱い

太陽電池からの電力供給は外生的に扱われ、電力需要からこの供給を除いた値に対して上記の電源計画を適用することが多い。ここでは、将来太陽電池価格が低下した場合の導入量を計算可能とするための定式化の例を以下に示す。太陽電池は、一度設置すれば「運転」という概念がなく、日射量に応じた発電を行う。そのため、(1) 式とは異なる扱いを必要とする。

まず、太陽電池の最大導入可能設置面積を PV\_Area としておく。単位面積当たりの季節時間帯別発電電力量を Solar (h,d) としておくと、設置面積導入率 U\_PV  $(0 \le U_PV \le 1)$  を用いて電力供給  $(PV)^n$ ,  $(PV)^n$ 

$$O("PV", h, d) = PV\_Area \times U\_PV \times Solar(h, d)$$
(8)

となる。固定費は、面積当たりの太陽電池価格に PV\_Area × U\_PV を乗じたものとして与えられる。

### 4. 多地域化と多期間化及び電力融通他

式(8) までのモデルを基本として、多地域化、多期間化、電力融通を導入することは容易である。 各変数に地域を表す添字 r と動学的拡張のための期間の添字 t を付加すれば拡張ができる。

まず地域間の連携は電力融通となるので、地域 r と地域 R 間の融通量を Trans(r,R,h,d) とすると電力需給バランス式(2) は次のようになる。

$$\sum_{g} O(r, g, h, d) + \sum_{R} Trans(R, r, h, d)$$

$$= e_DMD(r, h, d) + Pump(r, h, d) + \sum_{R} Trans(r, R, h, d) \times TrEff(R, r)$$
(9)

ここで、電力融通の際の効率を TrEff(R, r) で導入した。評価関数は、可変費と固定費の和を地域で合計したものとなる。これを最小化することで、地域間の電力融通と設備制約、運転制約を考慮したうえで需要を満たす、対象地域全体の費用合計を最小化する設備と運転を求めることができる。

多期間化は期間 t と t+1 間の新規導入設備と廃止設備を与えるものである。上記のほか、原子力発電所の日間出力変化に関する制約、会計上の資産と物理的な設備容量の分離などが加わっているが、これらについての説明は略する。

### 5. 電源計画モデルの応用シミュレーション例

式(9) までのモデルにより、LCSでの取組にどのように応用できるかの一例を示す。ここでは、データの制約のため沖縄電力を除く9電力会社の費用合計を最小化し、電力融通を含む各電力会社の最適な設備導入と運転を導く。ここでは、特に太陽電池の導入可能性に着目したシミュレーションを行った。太陽電池は現在、広く関心が寄せられているところであるが、高価である。そこで固定価格買取制度の導入により設置を促進しようとしているが、その後の費用負担の発生がなお論点となっている。

ここでは、固定価格買取制度とは異なる視点から評価シミュレーションを行った。まず、現状の太陽電池の価格を 64 万円 / kW と設定した場合、本電源計画モデルでは導入はなされなかった。そこで、この価格を下げるシナリオを設定する。このシナリオ価格に対して、電源計画モデルで最適な導入量と電源計画を求める。次いで、このときの最適導入量に(現状の PV 市場価格 – シナリオ PV 価格)を乗じた値を必要補助金額と考え、これを全発電電力量で割ることで、PV 導入負担費用の kWh 当たりの上乗せを求める。シナリオ PV 価格を下げるほど導入量は増大するが、必要な補助金が増加することになる。太陽電池の価格を下げた場合の太陽電池の導入量は、気象条件、電力需要パターンなどに依存するため、kWh 当たりの上乗せ価格も地域によって変化することになる。

シナリオ PV 価格を 80,000 円 /kW まで下げた場合の、補助金上乗せを含めた発電コスト結果の一例を図2に示す。ここでは、導入速度に制約を与えなかったため導入は第2期になされ、その後一定を保つ。この補助金をその後 10 年間電力価格に上乗せするとした場合、各地の平均電力価格は以下のようになる。凡例中の地域の右側の数値は、設定した太陽電池導入可能最大面積(建物屋根面積、工業団地空き面積、公共用地空き面積など)に対する導入率である。今回のシミュレーションでは、太陽電池は四国、北陸に導入がなされず、関西地域には潜在可能面積のすべてに導入がなされる結果となった。このように、太陽電池の価格に地域差がないものと仮定しても、最適な導入量には地域差が大きい結果となった。発電費用の上乗せが最大を示したのは中国電力であった。

### 6.終わりに

本資料では、電源計画モデル構築の基本的な定式化と手順を述べるとともに、電源計画モデルの応用として PV 導入がどのように電源計画とコストに影響するかの試算例を示した。いうまでもなく、このシミュレーションは PV の導入速度や現実的な導入量、価格を反映したものではなく試算の域にとどまる。しかし電源計画モデルにより PV 導入にも地域差が大きいこと、PV 導入による電源構成の変化などが一貫した体系のもとで評価できる点は意義が大きいと考えられ、今後のシミュレーションへの利活用の可能性が示せたといえる。

## 発電コスト 円 /kWh 太陽電池販売価格 8万円 /kW ケース

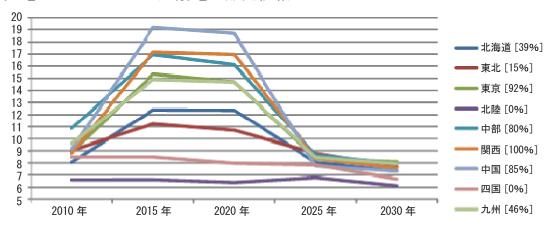


図2 太陽電池導入補助 (太陽電池販売価格 80,000 円 /kW) による上乗せを含む電力価格

### 【文献】

1) 芦名秀一, 藤野純一, 多地域最適電源計画モデルを用いたわが国電力部門における CO<sub>2</sub> 削減シナリオの検討, エネルギー・資源, Vol. 29, No. 1, pp. 1-7, 2008.

### 【注記】

注1)原子力発電は、IEA やエネルギーバランス表では効率 0.333 とされている。

### 資料3 地域地球温暖化対策事例データベース

世界的な低炭素社会実現に向けた気運の高まりを受けて、日本全国の自治体で様々な事業が行われており、国のいろいろな制度がこれを支援している。これら地域の事業や、国の制度に対しては、多額の資金を必要とすることから、事業の効果を「評価」することが重要となる。しかし現状では、制度や事業が個々の省庁及び自治体で独立して行われているため、事業に関する情報が分散していることから事業効果を比較することが困難であり、また評価指標なども整備されていないことから十分に取組が評価されているとはいえない。このため低炭素社会実現に向けて重点的に取り組むべき事業などを客観的に選定することができず、具体的な低炭素社会像を描き難く実現性の高い低炭素社会シナリオを作成する際の課題ともなっている。

このような状況のなか、地球温暖化対策に意欲的に取り組む先進地域である「環境モデル都市」として 13 市区町(表 1)が選定された。これら「環境モデル都市」の取組を評価し、有効と評価された取組をその他全国の市区町村へ拡大していくことが望まれる。したがって、LCS では、「環境モデル都市」を中心に国の助成制度を受けている地域の地球温暖化対策を取りまとめ、地域特性及び助成制度ごとに検索が可能で事業を比較することができる「地域地球温暖化対策事例データベース」の構築を行っている。

地域地球温暖化対策事例データベースの作成により、これまで分散していた地域事業に関する 情報が集約することで個々の事業の比較が行えるとともに、地域特性などの実情を考慮したうえ

での各事業の効果を定量的に評価することが可能となる。これら事業評価結果を統合することで地域の低炭素社会像を定量位にモデル化することができ、地域単位であ事業評価や地域特性に適した事業の組み合わせの最適化などの検討が行え、LCSが作成を進める低炭素社会シナリオの基盤とが成を進める低炭素社会シナリオの基盤と地域へ展開する際においても、地域特性などを考慮したうえで事業の他地域への適になる。

表 1 環境モデル都市 13 都市

北九州市(福岡県)	豊田市(愛知県)
京都市 (京都府)	下川町 (北海道)
堺市 (大阪府)	水俣市(熊本県)
横浜市(神奈川県)	宮古島市(沖縄県)
飯田市(長野県)	梼原町 (高知県)
帯広市(北海道)	千代田区 (東京都)
富山市(富山県)	_

### 1. 地域地球温暖化対策事例データベースの概要

地域地球温暖化対策事例データベースへの格納対象となる事業は、国や自治体などから何らかの助成を受けている事業としている。まずは環境モデル都市13市区町から始め、地球温暖化対策に関連する助成制度を受けている全国の市区町村へと拡大する予定である。データベースには事業概要と事業期間、施策分類、事業費、事業名、助成機関、補助金額、取組の効果(主にCO<sub>2</sub>削減量)の情報を格納する(図1参照)。

また、地球温暖化対策は人口規模や地理特性などの地域特性により有効な取組が異なることから、データベースにおいては単に各地域の取組が閲覧できるだけではなく、地域特性別にも取組を検索できる機能が要求される。地域特性別の検索には人口や産業、地理特性などが検索項目となることから、国などが公開している地域統計データも併せて格納する。これらの情報を基に各市区町村を地域特性別に分類することで地域特性別に取組の検索が可能となる。

さらに、低炭素社会実現に向けた取組は多岐に及ぶことから、たとえば交通施策と農業施策を 比較して効果を評価することは困難である。よって本データベースは、事業内容を分野別に分類 することで事業を分野別に抽出することができるよう整備する。

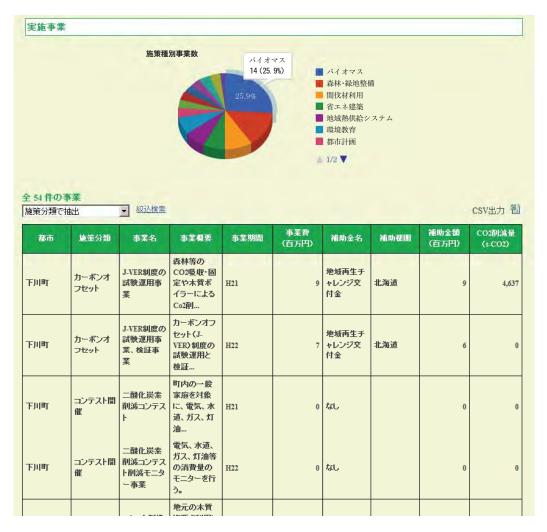


図1 地域地球温暖化対策事例データベース検索結果例

### 2. 地域地球温暖化対策事例データベースの現状と今後の課題

現在までのところデータベースには、環境モデル都市13都市の温室効果ガスの削減目標とその達成に向けた取組方針及び具体化する予定の取組内容を示したアクションプランに記載のある全1,348件の取組を格納しており、その他の事業に関しても先行的に138の助成事業を対象に事例の収集を行っている。今後は国の助成制度の情報を幅広く全国の市区町村に対象を拡大して事例収集を行う予定である。

事業を分類するために求められる地域特性情報としては、現在までのところ総人口や人口密度、土地面積、産業分類別就業者数、地域 CO<sub>2</sub> 排出特性(資料 4 参照)などの統計データを用い各規模でカテゴリー化しデータベースに格納している。たとえば市区町村の人口規模別(大都市30万人以上、中規模都市10万人以上、小規模都市10万人以下)に事業を検索することができる(図 2 参照)。今後はより多角的に事業を検索できるように、人口集中地区人口や年齢区分別人口、利用区分別の土地面積、産業分類別の事業所数などの統計データを用いて検索システムの拡張を行う予定である。

低炭素社会に関連した事業は様々な規模及び内容のものが混在しており、複数の小規模事業からなる大規模事業の存在や、事業内容により事業成果もそれぞれ異なるなど、単純に事業効果を比較することは困難である。今後の課題としては、全国の基礎自治体が取り組む低炭素社会に関連する広範囲な事業情報をデータベース化し、事業比較や評価を円滑に行えるように、事業規模や内容により客観的に類型化する仕組みや評価指標を整備する必要がある。

また、事業効果については現在のところ 00,削減量のみとしているが、明るく豊かな低炭素社

会の実現を目指すにあたっては、経済効果や少子高齢化対策への貢献度合いなども重要であり、これらの効果も把握し評価できることが望ましい。 $CO_2$  削減量以外の効果に関しては、地域統計データにて格納される人口や経済などの統計データの活用が考えられ、これらの経年変化を追跡できるように時系列で統計情報を格納するなど、データウェアハウス $^{A_2}$  化も視野に入れて事業効果を多様な視点から分析評価するための機能を付加する必要がある。どのような地域統計データを活用することで、どの事業効果を把握し評価できるかに関しては、北海道下川町や東日本大震災の被災地を対象に進めている地域研究のケーススタディの成果を検討し全国の事例に展開していく予定である。

最後に、これらデータベースはウェブデータベースを前提とした開発を進めており、セキュリティや情報の二次利用の面からの調整が必要となるものの、将来的にインターネットを通じた情報公開にも対応が可能である。

#### 都市 o哈尔滨 都市を選択 北朝鮮 那覇 Cotte 地図データ-利用規約 ☑ すべて ☑ 大都市 ☑ 北九州市 ☑ 京都市 ☑ 横浜市 ☑ 堺市 地域特性 市区町村、都道府県の ☑ 地方中心都市 🗹 飯田市 ☑ 帯広市 ☑ 豊田市 ☑ 富山市 地域特性で絞り込み 市息古宮 ☑ ☑ 小規模都市 ☑ 下川町 ☑ 水俣市 ☑ 檮原町 ☑ 特別区 ☑ 千代田区 削減分野 削減対象分野で絞込み ▼ 削減分野対象で 施策 ▼ すべて 施策のタイプで 絞り込み 検索

### 環境モデル都市データベース

図2 地域地球温暖化対策事例データベースの検索インターフェース

#### 【用語】

### A) データウェアハウス

データベースと異なりデータの削除及び更新を行わず、時系列で蓄積された大量のデータを 統計解析手法などにより各項目間の関連性を分析するためのシステム

### 資料4 地域特性による基礎自治体の類型化

低炭素社会に向けた取組は世界的に広まっており、日本では環境モデル都市をはじめとする基礎自治体で様々な取組が行われている。その中でも地球温暖化対策に意欲的に取り組む先進地域である環境モデル都市の取組を評価し、有効と評価された取組情報を他の基礎自治体のまちづくりに活かしていくことが望まれる。そのためには、取組を進めている基礎自治体の地域特性を明らかにしたうえで、成功事例の情報をどの地域に提供するかを特定する必要がある。

LCS では、先進地域での成功事例の他地域展開や導入削減ポテンシャル推定を目的とし、地域基礎情報の収集、さらに CO<sub>2</sub> 排出状況を基礎自治体単位で分析を行った。その結果、地域特性の抽出及び基礎自治体の類型化を実施するための「地域基礎情報」及び「温室効果ガス排出量情報」に関するデータベースを構築した。また、先進地域での成功事例の他地域展開における指標の一つとして、1人当たりの部門別年間 CO<sub>2</sub> 排出量に着目した基礎自治体の類型化ができた。今後、地域特性情報の拡張を進めるとともに、低炭素社会に関する事業情報と組み合わせた類型化を行うことで、成功事例の他地域への展開可能性について検討を行っていく。

#### 1. 地域統計データベースの作成

低炭素社会に関する事業情報を他地域に展開するためには、基礎自治体単位での地域環境・経済等の基礎情報から地域特性を把握するとともに(表 1)、温室効果ガスの排出量データベースを作成する必要がある(表 2)。表 3 に示すように収集した情報は、データ取得基準が明確で、かつ同一基準で取得・算定されたデータを活用している。今回、収集する地域情報は、 $CO_2$  削減施策などで基準年として利用されることの多い 2005 年を対象とし、調査データがない項目については 2005 年に最も近い年のデータを活用した。

表 ]	地域基礎情報	報のテー	タ項日

部門	代表的データ項目
地理	総土地面積、可住地面積、耕地面積、林野面積 等
気象	都市別冷暖房度日、年平均気温、日射量等
人口	人口総数、一般世帯数、人口集中地域人口等
行政	財政力指数、歳入決算総額、ごみ総排出量等
産業	第1次・第2次・第3次産業就業者数、事業所数 等
運輸	自動車総保有台数(車種別)
民生家庭	居住世帯あり住宅数、1 住宅当たり延べ床面積
民生業務	大型・小売店数、小学・中学・高等学校数 等

表2 基礎自治体における温室効果ガス排出量データ項目1)

対象ガス	排出部門 ※				
二酸化炭素	製造業、農業、廃棄物焼却、家庭、業務、運輸				
メタン	運輸、家畜、稲作、廃棄物埋立、廃水処理				
一酸化二窒素	運輸、家畜、農用地の土壌、廃水処理、廃棄物焼却				
フロン類	冷媒のみ				

※ 計上していない項目【CO<sub>2</sub>】エネルギー転換、産業、運輸(鉄道など)、林業、工業プロセス【CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、HFCS】上掲以外のもの

表3 地域基礎情報データ(表1)の出典一例

データ項目	出 典			
総土地面積、可住地 面積、耕地面積、林 野面積	農林水産省「2005 年農林業センサス」 http://www.maff.go.jp/j/tokei/census/afc/2010/report05_archives.html			
都市別冷暖房度日	家庭用エネルギーハンドブック 2009 (株)住環境計画研究所 編・発行 / 省エネルギーセンター			
年平均気温、 日射量	気象庁 気象統計情報 http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php			
人口総数、 一般世帯数	平成 17 年国勢調査 http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2005/index.htm			
人口集中地域人口、 財政力指数	総務省 統計局 「統計でみる市区町村のすがた 2009」 http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001021807&cycode=0			
歳入決算総額	総務省自治財政局「市町村別決算状況調」 http://www.soumu.go.jp/iken/jokyo_chousa_shiryo.html#01			
ゴミ総排出量、第1 次・第2次・第3次 産業就業者数、事業 所数	総務省 統計局 「統計でみる市区町村のすがた 2009」 http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001021807&cycode=0			
自動車総保有台数 (車種別)	民力 2009 (1989-2009) 朝日新聞出版編 (DVD-ROM)			
居住世帯あり住宅 数、1住宅当たり延 ベ床面積	総務省 統計局 「統計でみる市区町村のすがた 2009」 http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001021807&cycode=0			
大型・小売店数、小 学・中学・高等学校 数	総務省 統計局 「統計でみる市区町村のすがた 2009」 http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001021807&cycode=0			

### 2. 基礎自治体別 CO<sub>2</sub> 排出データの推計及び検証

LCS では、低炭素社会に向けた取組の中でも今後ますます温室効果ガス排出量の伸びが大きいと推測され、省エネルギー化が遅れている日々のくらしに着目している。様々な取組は、基礎自治体単位で行われていることが多く、産業、業務、家庭、交通などの部門間での  $CO_2$  排出特性については分かっていない。また、基礎自治体を横並びに評価するためには、温室効果ガス排出量で比較すると地域規模等の違いがあるため、直接的な比較が難しい。そこで、NPO 法人環境自治体会議環境政策研究所が算定した市町村別温室効果ガス排出量の推計データ  $^{1)}$  を用い、各基礎自治体の昼間人口を基準とする 1 人当たりの部門別年間  $CO_2$  排出量について 2005 年を対象に算出し、分析を行った。

基礎自治体別  $CO_2$  排出データとしては中口  $^{2)}$  が 2000 年、2003 年の温室効果ガス排出データの 算定を行っている。そこで、この基礎自治体別温室効果ガス排出データとエネルギー消費の伸び 率を組み合わせることで、2005 年の排出量の推計を行った。本推計値を、温室効果ガスインベントリオフィス(GIO)が報告している日本の温室効果ガス排出量データと比較した結果、部門別の大小関係に一部差がみられるものの、 $CO_2$  排出総量では GIO の報告値の約 7 割以上を推計できていることが確認された。

### 3. CO。排出特性に着目した基礎自治体の類型化

温暖化対策や都市の類型化の取組に関しては、これまでに中口<sup>2)</sup> が温暖化対策施策のアンケート調査を基に類型化し、公共事業系一社会制度系、人工系一自然系、新技術系一在来技術系に分類できると報告している。一方、奥岡・白川<sup>3)</sup> は、中口の分類で地域特性として産業構造や資源量が考慮されていないことから、自然・社会・産業の基礎データからの都市の類型化を提唱して

いる。

LCSでは、温暖化対策や自然・社会・産業の基礎データからの類型化とは異なり、低炭素社会に向けた取組と関連付けるため基礎自治体の CO<sub>2</sub> 排出特性に着目した類型化を行った(表 4 )。表 4 の横軸は、基礎自治体 1 人当たりの部門別(工業、業務、運輸、家庭、廃棄物、農業)年間 CO<sub>2</sub> 排出量を対象とする、主成分分析及びクラスター分析による CO<sub>2</sub> 排出特性による分類である。また表 4 の縦軸は、環境モデル都市で用いられている都市規模による分類と、第 4 次全国総合開発計画の人口による区分を組み合わせ、定義した分類を示している。本分類の結果、家庭部門からの CO<sub>2</sub> 排出量が多い小規模地方都市数が、全基礎自治体の約 4 割を占めていることが分かった。またこれに次いで、同じ小規模都市で業務、家庭、工業、農業の各部門から一様に CO<sub>2</sub> が排出される基礎自治体が多いことが分かった。本分類は、先進地域での成功事例の他地域展開を行う際に、CO<sub>2</sub> 排出形態が類似する基礎自治体と関連付けるためのデータとして活用される。

表 4 CO<sub>2</sub> 排出及び規模を考慮した基礎自治体分類(単位: 2005 年における基礎自治体数)

	業務中心	家庭中心	工業都市	農業共存	バランス都市
大都市	9 (京都市)	_	2 (堺市)		14 (横浜市、 北九州市)
地方中心都市	83	19 (帯広市)	18	_	106 (飯田市、豊田市)
小規模都市	272	745 (北海道下川町、 高知県檮原町)	100	63	389 (水俣市、 宮古島市)
特別区	6 (千代田区)	_	_	_	17

#### 4. まとめと展望

LCS では、地域特性を定量的に把握・分析するため、共通基準で取りまとめた基礎自治体の地域情報(地理、気候、行政、産業、人口、運輸、及び温室効果ガス排出量等)のデータベースを作成した。また、先進地域での成功事例の他地域展開における指標の1つとして、1人当たりの部門別 $00_2$ 排出量に基づく基礎自治体の類型化ができた。今後は、低炭素社会に関する事業情報と組み合わせた基礎自治体の地域特性による類型化を行っていくことで、成功事例の他地域への展開可能性の検討を行っていく。

### 【文献】

- 1) 環境自治体会議環境政策研究所,「市町村別温室効果ガス排出量推計データ(2000年、2003年)」, 2006.
  - http://www.colgei.org/C02/index.html (2000 年、2003 年推計).
- 2) 中口毅博,「自治体における温暖化防止対策の特性とその推進力に関する分析」, 環境科学会誌, 17巻3号, pp. 217-223, 2004.
- 3) 奥岡桂次郎、白川博章,「地域特性に適した温暖化対策のあり方に関する研究」, 環境経済・政策学会 2009 年大会, 2009.

# 「低炭素社会づくりのための総合戦略とシナリオ」

平成24年7月20日

独立行政法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

〒 102-8666 東京都千代田区四番町 5-3 サイエンスプラザ 4 階電 話 03-6272-9270 ファックス 03-6272-9273 http://www.jst.go.jp/lcs/©2012 JST/LCS

許可無く複写/複製することを禁じます。 引用を行う際は、必ず出典を記述願います。